宇宙産業プログラムに関する
施策・事業評価報告書

平成２８年　３月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成２４年１２月６日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成２６年４月改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

また、第２５回産業構造審議会評価小委員会（平成２１年１月）において、新たな評価類型として「技術に関する施策評価」が審議・了承された。技術に関する施策評価は、当該技術分野全体の方向性等を勘案しつつ、当該施策の下に位置付けられる技術に関する事業のまとまりを俯瞰する形で、各事業の相互関係等に着目し、個々の事業に係る評価結果を踏まえて行うこととしている。

経済産業省において実施している技術に関する施策「宇宙産業プログラム」は、国家の宇宙開発を支える基盤である宇宙産業について、我が国の持つ先端民生技術の強みを最大限活用し、重要基盤技術の研究開発を実施することで国際競争力を強化の強化を図るものである。本施策は、これを実現するため、以下の技術に関する事業から構成されている。

Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２０年度から平成２６年度）（終了時評価）
Ｂ．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（プロジェクト）
（平成２２年度から平成２８年度）（中間評価）
Ｃ．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２４年度から平成２６年度）（終了時評価）
Ｄ．可搬統合型小型地上システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２１年度から平成２６年度）（終了時評価）
Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／　次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）
（昭和６２年度から平成２７年度）（中間評価）
Ｆ．石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）
（昭和５８年度から平成２８年度）（中間評価）
Ｇ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）
（平成１９年度から平成３３年度）（中間評価）
Ｈ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）
（平成２０年度から平成３３年度）（中間評価）
Ｉ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（ＳＥＲＶＩＳプロジェクト）（プロジェクト）
（平成１１年度から平成２９年度）（中間評価）
Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発（プロジェクト）
（平成２１年度から平成２６年度）（終了時評価）
Ｋ．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト）
（平成２６年度から平成３０年度）（中間評価）
Ｌ．空中発射システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２１年度から平成２６年度）（終了時評価）

今回の評価は、技術に関する施策「宇宙産業プログラム」、及びこの構成要素である技術のうち、Ａ～Ｌに関する事業評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価検討会（座長：建石　隆太郎　国立大学法人千葉大学　環境リモートセンシング研究センター長　教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ（小林　直人　早稲田大学研究戦略センター副所長　教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成２８年　３月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ

委　員　名　簿

座　　長	小林　直人	早稲田大学研究戦略センター副所長・教授
	大島　まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	太田　健一郎	横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センター長 ・特任教授
	亀井　信一	株式会社三菱総合研究所政策・経済研究センター長
	高橋　真木子	金沢工業大学工学研究科教授
	津川　若子	東京農工大学大学院工学研究院准教授
	西尾　好司	株式会社富士通総研経済研究所主任研究員
	森　　俊介	東京理科大学理工学部経営工学科教授

（敬称略、座長除き五十音順）

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価検討会

委　員　名　簿

座　　長	建石　隆太郎	国立大学法人千葉大学 環境リモートセンシング研究センター長　教授
	澤谷　邦男	国立大学法人東北大学　イノベーション戦略推進本部 レジリエント社会構築イノベーションセンター副センター長
	中山　裕則	学校法人日本大学　文理学部地球システム学科　教授
	橋本　英一	元国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 研究開発本部　宇宙実証研究共同センター長
	三宅　弘晃	学校法人五島育英会　東京都市大学 工学部機械システム工学科　准教授

（敬称略、座長除き五十音順）

事務局：経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課宇宙産業室

宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価に係る省内関係者

１．技術に関する施策

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹
（平成２０年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　長濱　裕二

２．技術に関する事業

A.　小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）

【事後評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

【中間評価時】
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）

B.　超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（プロジェクト）

【事後評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）

産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

C.　小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発（プロジェクト）

【事後評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

D.　可搬統合型小型地上システムの研究開発（プロジェクト）

【事後評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

E.　極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹
（平成２０年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　長濱　裕二
（平成１８年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価調査課長　柴尾　浩朗

F.　石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）

産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹
（平成２０年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　長濱　裕二
（平成１９年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価調査課長　本橋　克広
（平成１６年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　波多野　淳彦（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価調査課長　陣山　繁紀

G.　ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　　飯田　陽一（事業担当課長）

H.　次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹
（平成２０年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　長濱　裕二

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）

I.　宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVISプロジェクト）（プロジェクト）

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
機械情報産業局　航空機武器宇宙産業課長　柴生田　敦夫（事業担当課長）

J.　太陽光発電無線送受電技術の研究開発（プロジェクト）

【事後評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

【中間評価時】
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）

K.　太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト）

【中間評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）

L.　空中発射システムの研究開発（プロジェクト）

【事後評価時】
（今回）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　恒藤　晃（事業担当課長）
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）
産業技術環境局　研究開発課　技術評価室長　岩松　潤

【中間評価時】
（平成２３年度）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　岡野　克弥（事業担当課長）
産業技術環境局　技術評価室長　岡本　繁樹

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）
製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　飯田　陽一（事業担当課長）

宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価

審 議 経 過

〇第１回評価検討会（平成２７年１２月１６日）
・評価の方法等について
・技術に関する施策・事業の概要について
・評価の進め方について

〇第２回評価検討会（平成２７年２月１２日）
・評価報告書(案)について

〇産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ（平成２８年３月２３日）
・評価報告書(案)について

目　　次

はじめに
産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発･評価小委員会評価ワーキンググループ　委員名簿
宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価検討会　委員名簿
宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価に係る省内関係者
宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価　審議経過

ページ
技術に関する施策・事業評価報告書概要 …… i

第１章　評価の実施方法
１．評価目的 …… 1
２．評価者 …… 3
３．評価対象 …… 3
４．評価方法 …… 4
５．プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準 …… 5

第２章　技術に関する施策の概要
１．施策の目的・政策的位置付け …… 8
２．施策の構造及び目的実現の見通し …… 12

第３章　技術に関する事業の実施状況
Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け ……Ａ－２
２．研究開発等の目標 ……Ａ－４
３．成果、目標の達成度 ……Ａ－９
４．事業化、波及効果について ……Ａ－57
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ……Ａ－59

Ｂ．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け ……Ｂ－２
２．研究開発等の目標 ……Ｂ－４
３．成果、目標の達成度 ……Ｂ－６
４．事業化、波及効果について ……Ｂ－18
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ……Ｂ－23

Ｃ．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け ……Ｃ－３
２．研究開発等の目標 ……Ｃ－７
３．成果、目標の達成度 ……Ｃ－12
４．事業化、波及効果について ……Ｃ－37
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ……Ｃ－41

Ｄ．可搬統合型小型地上システムの研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け ……Ｄ－５
２．研究開発等の目標 ……Ｄ－７
３．成果、目標の達成度 ……Ｄ－11
４．事業化、波及効果について ……Ｄ－30
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ……Ｄ－32

Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム／次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｅ－２
２．研究開発等の目標　……Ｅ－５
３．成果、目標の達成度　……Ｅ－10
４．事業化、波及効果について　……Ｅ－14
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｅ－16

Ｆ．石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｆ－２
２．研究開発等の目標　……Ｆ－５
３．成果、目標の達成度　……Ｆ－12
４．事業化、波及効果について　……Ｆ－68
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｆ－72

Ｇ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｇ－２
２．研究開発等の目標　……Ｇ－５
３．成果、目標の達成度　……Ｇ－11
４．事業化、波及効果について　……Ｇ－33
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｇ－39

Ｈ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｈ－２
２．研究開発等の目標　……Ｈ－５
３．成果、目標の達成度　……Ｈ－10
４．事業化、波及効果について　……Ｈ－46
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｈ－54

Ｉ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVISプロジェクト）（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｉ－２
２．研究開発等の目標　……Ｉ－４
３．成果、目標の達成度　……Ｉ－８
４．事業化、波及効果について　……Ｉ－37
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｉ－41

Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｊ－２
２．研究開発等の目標　……Ｊ－５
３．成果、目標の達成度　……Ｊ－11
４．事業化、波及効果について　……Ｊ－75
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｊ－80

Ｋ．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｋ－３
２．研究開発等の目標　……Ｋ－５
３．成果、目標の達成度　……Ｋ－11
４．事業化、波及効果について　……Ｋ－26
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｋ－33

Ｌ．空中発射システムの研究開発（プロジェクト）
１．事業の目的・政策的位置付け　……Ｌ－２
２．研究開発等の目標　……Ｌ－４
３．成果、目標の達成度　……Ｌ－８
４．事業化、波及効果について　……Ｌ－68
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等　……Ｌ－73

第４章　技術に関する施策評価
１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性　…… 22
２．施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性　…… 24
３．総合評価　…… 26

第５章　技術に関する事業評価
Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）総合評価　… 31
Ｂ．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（プロジェクト）
総合評価　…… 35
Ｃ．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発
（プロジェクト）総合評価　…… 39
Ｄ．可搬統合型小型地上システムの研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 44
Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム
／次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 47
Ｆ．石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 50
Ｇ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 53
Ｈ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）総合評価　… 56
Ｉ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVISプロジェクト）
（プロジェクト）総合評価　…… 59
Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 62
Ｋ．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 65
Ｌ．空中発射システムの研究開発（プロジェクト）総合評価　…… 68

第６章　今後の研究開発の方向等に関する提言　…… 72

第７章　評価ワーキンググループのコメント及びコメントに対する対処方針…… 78

参考資料
参考資料１　今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針
参考資料２　経済産業省技術評価指針
参考資料３　経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準
参考資料４　宇宙産業プログラムに関する施策・事業評価報告書（抜粋）
参考資料５　太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業事前評価報告書

技術に関する施策・事業評価報告書概要

技術に関する施策

技術に関する施策名	宇宙産業プログラム
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

技術に関する施策の目的・概要

安心・安全で豊かな社会の実現や安全保障の強化の観点で、宇宙空間の利用が果たす役割がますます大きくなる中、我が国にとって、自前で宇宙活動できる能力を保持することが重要である。また、宇宙産業の世界の市場規模は今後も拡大すると予想され、また広い裾野産業を有するなど波及効果も大きく、将来の重要な成長分野として期待されるところである。しかしながら、国内民間企業が調達する実用衛星の多くが米国製であるなど、我が国の宇宙産業の国際競争力は依然厳しい状況にあり、その産業基盤を強化していくことが求められている。

こうしたことを踏まえ、政府としては、宇宙基本法に基づいて策定した宇宙基本計画に基づき、関係府省が分担・協力して宇宙産業基盤の強化に向けた取組を進めることとしている。

経済産業省の宇宙関連技術開発施策（宇宙産業プログラム）は、こうした政府全体の取組の一環として、特に以下の２つを目的に技術開発プロジェクトを推進するものである。

①国際競争力のある人工衛星やロケットの実現に資する技術の開発

②エネルギー政策の推進に資する宇宙関連技術の開発

技術に関する事業一覧

Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発

Ｂ．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発

Ｃ．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発

Ｄ．可搬統合型小型地上システムの研究開発

Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発

Ｆ．石油資源遠隔探知技術の研究開発

Ｇ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発

Ｈ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発

Ｉ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業＜ＳＥＲＶＩＳプロジェクト＞

Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発

Ｋ．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発

Ｌ．空中発射システムの研究開発

技術に関する施策評価の概要

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

世界の宇宙産業が全体的に拡大傾向にある中、この流れをつかんで我が国の宇宙産業が成長し関連市場を創出していくには、国の関与による産業基盤強化や市場の創出が必要である。

このような観点から、国際競争力のある高性能かつ低コストな人工衛星等の開発や、将来のエネルギーの確保に資する高機能な衛星センサ及びその利用技術の開発、宇宙太陽光発電技術の開発等を、宇宙基本法及び宇宙基本計画に基づき関係府省と役割分担・連携を図りつつ経済産業省が推進することは極めて重要であり、本施策の目的及び政策的位置づけは妥当である。

宇宙産業の国際競争激化の傾向に対応するため、機器とサービスのパッケージ提供で日本の優位性を目指すという方針や、民生技術も利用して高機能・高付加価値かつ低価格を目指すという方針は、これからの市場ターゲットである新興国のニーズを見据えた適切なものであり、妥当である。

経済産業省のプロジェクトと他省庁のプロジェクトの関係の考え方が必ずしも明確ではないように見受けられる。よりわかりやすく明確に役割分担の考え方を示すことが望ましい。また、本施策によって実現を目指す将来の宇宙産業の規模の目標や時期についての記載がある方が望ましい。

２．施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性

本施策において、国際競争力を向上させるための衛星・センサの低コスト化、小型化、高機能化を目指したハードの開発と、運用・利用のためのソフト（利用技術）の開発がバランスよく実施されており、プロジェクト等は適切に配置されている。

国際競争力のある小型衛星の開発（ＡＳＮＡＲＯプロジェクト）、資源探査等に資する観測センサの開発（ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲ及びＨＩＳＵＩプロジェクト）、宇宙実証（ＳＥＲＶＩＳプロジェクト）、宇宙太陽光発電、空中発射システムの各プロジェクトとも、濃淡はあるが現時点において得られた成果は概ね妥当である。

現状、どちらかといえば宇宙機器等の開発に重点が置かれており、今後は、より広い分野を対象としたニーズの掘り起こしや新たな利用方法の開発など、人工衛星から得られたデータの利用を振興する取組を強化することが望ましい。

いくつかの事業において、計画、体制、費用対効果、技術や社会の変化に対する対応などについて、明確化が十分でない点があるように思える。また、技術目標の設定根拠が明確でない箇所もあった。

施策全体の目標達成に向け、どのような事業を実施するかについては、開発するシステムが市場開拓の条件に合う性能と使い易さを持っているかなど世界の趨勢等を考慮しつつ、調整しながら推進することが重要。例えば、ＳＥＲＶＩＳプロジェクトの３号機は、当初の目的設定は理解できるが、現時点では再検討を要する。

３．総合評価

国全体の大きな宇宙政策に則り、日本の宇宙産業の発展に必要な施策が適切に実施されていると判断できる。

特に、小型衛星（ＡＳＮＡＲＯプロジェクト）、観測センサ（ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲ及びＨＩＳＵＩプロジェクト）で所期の成果を上げたことは、将来につながる技術であり評価できる。これらの施策は継続的に実施する必要があり、今後も同様の予算措置をすべきである。

本施策の推進に当たっては、世界の宇宙産業の動向を見据え、海外の技術との比較などを通じて真に国際競争力のある技術であるかを評価し、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばしていけるよう、事業の過不足について常に検討を加えることが必要である。具体的には、近年の情勢変化を踏まえ、ＳＥＲＶＩＳ－３号機及び、空中発射システムの意義については、再検討を要すると考えられる。

なお、衛星リモートセンシング分野における海外市場獲得には資源探査だけでなく農業、防災などさまざまな分野におけるサービスをパッケージで提供していくことが有効であり、今後は、幅広い分野におけるリモートセンシングデータ利用の拡大につながる取組が重要と考えられる。

加えて、衛星リモートセンシングから取得したデータの適切な取扱いについて、我が国としてのルールを確立することが必要である。

今後の研究開発の方向等に関する提言

世界の宇宙産業の拡大傾向に対し、日本の宇宙産業は必ずしも同期しているとはいえない。この理由は、技術力をベースとした宇宙産業の成長が必ずしも十分ではなく、またニーズの開拓も不十分であることによると考えられる。これらの点を克服するため、国が適切な技術開発施策を推進することは極めて重要である。

しかし、諸外国、特に米国などの先行する宇宙産業と直接競争することは短期的に少なからず困難を伴うことが考えられる。そのため、日本でこれまで培なわれ国際的にも高い評価を受けた宇宙産業関連の技術を継承しつつ、それらをより発展させる施策が適切と考えられる。特に、既存技術を改良･発展させて、コスト削減、高機能化、利用の多目化を図ることや、高信頼性、高安定性の実現していくことなどは、日本が得意とするところであり、海外の技術との比較をしながら、この方向での技術開発を発展的かつ積極的に推進することが望ましい。

また、新興国（ＡＳＥＡＮ、中央アジア、中南米、アフリカなど）におけるニーズの開拓と展開は、国際協力という観点からも極めて重要と考える。

このような観点から、国際競争力のある高性能かつ低コストな人工衛星等の開発や、将来のエネルギーの確保に資する高機能な衛星センサ及びその利用技術の開発、宇宙太陽光発電技術の開発等を、宇宙基本法及び宇宙基本計画に基づき経済産業省が実施することは極めて重要であり、本施策を引き続き着実に推進すべきである。

施策の推進に当たっては、世界の宇宙産業の動向を見据え、海外の技術との比較などを通じて真に国際競争力のある技術であるかを評価し、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばしていけるよう、事業の過不足について常に検討を加えることが必要である。

具体的には、近年の情勢変化を踏まえ、ＳＥＲＶＩＳ－３号機及び、空中発射システムの意義

については、再検討を要すると考えられる。

なお、衛星リモートセンシング分野における海外市場獲得には資源探査だけでなく農業、防災などさまざまな分野におけるサービスをパッケージで提供していくことが有効であり、今後は、幅広い分野におけるリモートセンシングデータ利用の拡大につながる取組を進めることが重要と考えられる。

将来的な技術開発の方向性としては、地上に配置したセンサ等から人工衛星を活用して情報を収集するシステムの実現に資する技術の研究開発などが考えられる。さらに長期的には、宇宙空間を物質生産・加工の場として活用するための技術開発も一案である。

技術に関する事業

技術に関する事業名	Ａ　小型化等による先進的宇宙システムの研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国宇宙産業の国際競争力強化のため、高性能な小型衛星を短期間に低コストで実現するための新たな衛星システム開発アーキテクチャ（設計思想）を確立するとともに、これら設計思想や中小企業等の優れた民生技術を導入し、大型衛星に劣らない機能を維持しつつ、低コスト、短納期を実現する高性能小型衛星の開発技術を獲得するための研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２０年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	JSS、NEC
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
－	669,526	－	10,008,483	9,684,255

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

国際競争力の強化のため、我が国の強みである民生部品及び民生技術等を適用した高機能、低コスト、短納期な、小型化等による先進的宇宙システムの開発技術を確立することを目的として、設定された各項目について所定の成果を上げた。

個別要素技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
総合システム	地上・宇宙総合システムとしての開発を行う。	総合システムとしての達成目標設定および宇宙機、地上系への要求の明確化を実施する。	宇宙機側と地上システムである「可搬統合型小型地上システムの研究開発」担当（パスコ）とで、合同調整会議および細部技術検討を行う分科会により「総合システム開発仕様書」を平成23年3月に制定した。以降、同会議・分科会にて情報共有・検	達成

			討を行いつつ、本仕様書を基として衛星−地上適合性試験を実施した。	
新しい仕組み	先進的宇宙システムのアーキテクチャを構築する。	コンソーシアム活動により、今後の小型衛星への適用を考慮した新しい仕組みを構築する。	宇宙機関との連携、宇宙関連企業の技術を集結しただけでなく、中小企業や新規参入企業もコンソーシアムとして加えることにより、先進的宇宙システム設計、製造、試験の「仕組みづくり」の検討を行った。	達成
高性能光学センサ	地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度500km、パンクロマチック）を目標とする可視光地球観測センサを開発する。	地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度500km、パンクロマチック）を目標とする可視光地球観測センを開発する。	最終目標である地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック）のセンサとそれに光を集光することのできる光学反射望遠鏡を、設計の段階から開発し、個別試験で性能を確認した。また衛星バスとの組み合わせ試験、システム試験を実施した。	達成
小型衛バス	バス質量 300kg 程度以下の小型地球観測衛星を開発する。	バス質量 300kg 程度以下の小型地球観測衛星を開発する。	JAXA との共同研究により、軌道維持／修正のための推進系に燃料を充填した状況で 300kg 以下の重量（燃料なしで、設計値 250kg）となる小型衛星バスを製造し、性能確認試験、ミッション系搭載機器との組み合わせ試験、システム試験を実施した。	達成

短納期の仕組み	再製造の場合に、2 年間で製造・試験実施を可能とする。	2 年間で製造試験を実現する仕組みを構築する。	新しい宇宙システム対応の標準ネットワーク方式であるスペースワイヤを採用することで、ミッション機器の変更に対してはソフトウエアの変更で対処が可能になり、従来はミッション要求に応じて設計変更を行っていたバス機器のリピート生産が可能になり、設計変更により必要となる費用やリードタイムが圧縮でき、2 年以内の開発が可能であるという目処が立った。また、スペースワイヤ試験センターを整備した。	達成
自動自律運用	人間の判断無しで 1 週間以上のバスの自動自律運用を実現する。	自動機能、自律機能を効率的に活用し、観測計画と、バス運用のコマンドをアップロード可能な仕組みを構築する。	自動機能、自律機能を活用して、観測計画とバス運用のコマンドをアップロード可能な衛星側の仕組みを構築し、1 週間以上の自動自律運用の目処が立った。	達成
宇宙実証	軌道上実証を実現する。	運用準備・打上準備を開始する。	・国内外の打ち上げロケットを検討し、ロシア ISC コスモトラス社のドニエプルを選定した。 ・衛星－ロケット インタフェース調整、衛星の射場への輸送、射場での打上げ準備作業を経て、平成 26 年 11 月 6 日（日本時間）に衛星を打上げ、軌道上運	達成

			用を開始した。 ・「総合システム開発仕様書」を基にして、機能・性能について軌道上実証を行った。	

(2) 目標及び計画の変更の有無

打上の延期等により、計画の変更を行った。

＜共通指標＞

論文数
27

総合評価概要

新興国における導入が期待されるコストパフォーマンスの良い衛星システムを構築することは我が国の宇宙産業の国際競争力強化に非常に有用であり、小型、軽量、低コスト、短納期かつ高性能な人工衛星を開発するという事業目的は極めて妥当。こうした開発は民間での達成は難しく、国の事業としての必要性は高い。衛星システムの具体的な開発目標も、打上機会、開発期間、ペイロード質量などを踏まえ５００ｋｇ級を選択したことなど、適切に設定されている。

事業の成果としては、小型衛星バスを構築するとともに、地上分解能０．５m未満の高性能光学センサを開発し、地球観測衛星「ＡＳＮＡＲＯ－１」を完成させ、軌道上で所期の目標を達成しており、高く評価できる。さらに、運用システムの自律運用の導入により運用コストを低減するという野心的な取組も達成している。

開発に際しては、民生機器・部品の採用に現実的な設計方針で望んでおり、性能目標についても柔軟に難度の高い方へ変更し、それを達成しているなど、適切に事業が遂行されている。

今後は、軌道上実証の状況を分かり易く定期的に公表するなどにより成果を示すことで、ビジネス展開につなげていくことが重要。また、得られた成果が十分な国際競争力のあるものになっているか自己評価を行うことや、ユーザー等の声も踏まえた実証運用とフィードバックを行い改良すべき点を検討することにより、今後１０年、２０年を目指した性能設定のあり方など、将来への課題を示すことが望ましい。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/セ

ンサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

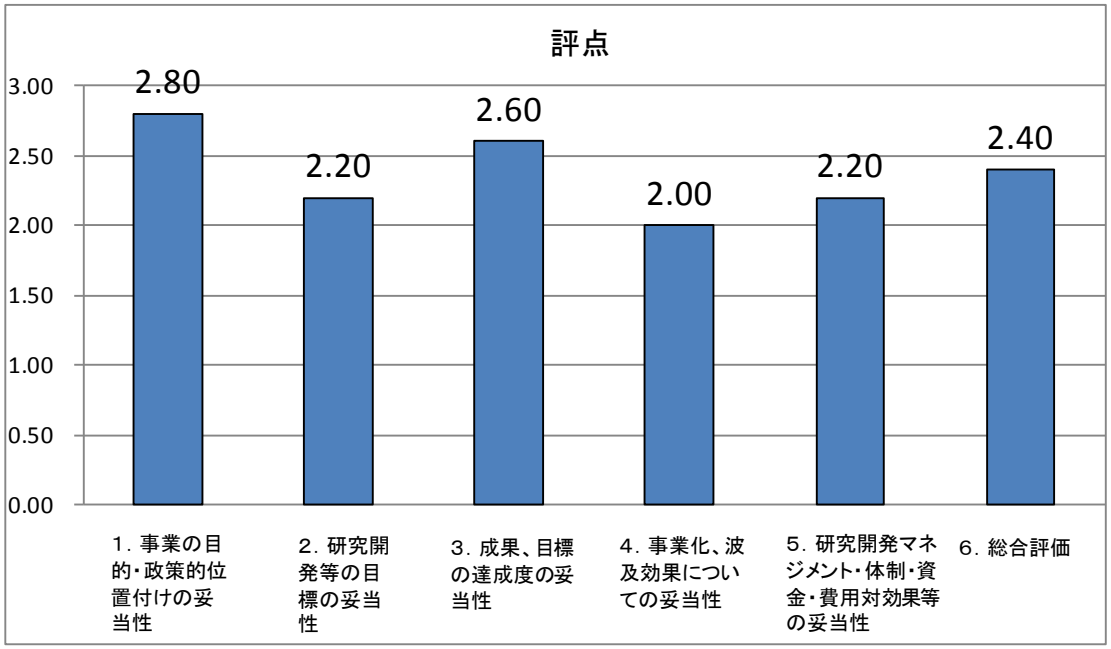
などが想定される。

評点結果

評点法による評点結果

（A. 小型化等による先進的宇宙システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的･政策的位置付けの妥当性	2.80	2	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	2	2	2	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.00	1	2	3	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6. 総合評価	2.40	2	2	2	3	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	B．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国宇宙産業の国際競争力強化のため、「A. 小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」の成果を活用し、高分解能なXバンド合成開口レーダ衛星を開発することを目的として、①国際競争力ある高分解能レーダセンサの開発、②高電力・高出力のレーダに対応する小型衛星バスの開発（ASNAROバスの後継）、③高分解能レーダセンサに搭載する高出力増幅器の開発、④宇宙実証等の研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２２年度	平成２８年度	平成２７年度	平成２９年度	NEC
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額（H25FY 分は繰越のため未確定）
5,850,000	3,820,000	－	13,110,170	12,593,752

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

我が国の宇宙産業の国際競争力を強化するため、高分解能なXバンド合成開口レーダを搭載する、小型で低コストな高性能地球観測衛星（レーダ衛星）の開発を目的とし、平成28年度からの宇宙実証に向け、低コスト、短納期、高性能を実現する小型レーダ衛星の設計を完了した。

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
超高分解能センサ	分解能1ｍ未満を目標とする我が国初のＸバンドの合成開口レーダの設計を完了する。	分解能 1m 未満の合成開口レーダの設計を完了した	達成
小型衛星バス	バス質量 350kg 程度以下の高電力対応の小型地球観測衛星の設計を完了する。	推進系に燃料を充填した状況で 350kg 以下の質量となる大電力仕様の小型衛星バスの設計を完了した。バス機器については現在製造中のフェーズにある。	達成
パルス	SAR センサに搭載する高出力増	小型衛星搭載用の高出力増幅器の設	達成

TWTA	幅器の設計を完了する。	計が完了した。	
短納期の仕組み	衛星システムの全製造試験期間(2 年)のうち前半に相当する、「バス機器の製造着手から機器試験完了まで」、1 年間で実現する。	【未達成:理由】 他国からの部品調達の手続きが長期化したため、製造着手が予定より遅延し現時点で製造中機器がある。 ※機器製造および試験完了予定(2016 年 2 月) 但し、新しい宇宙システム対応の標準ネットワーク方式を採用することで、変更に対してはソフトウエアの変更で対処が可能になったためバス機器のリピート生産が可能になり、設計変更により必要であった費用やリードタイムが圧縮でき、それによりバス機器の製造着手から機器試験完了まで、1 年間で実現する、という仕組みは確立した。	未達成
国内ロケットへの適合	イプシロンロケットへの適合性確認を完了する。	打上げ機に関して、2017 年打上げ対応可能なロケットとしてイプシロンロケットの適合性確認が完了した。これにより打上げ機としてイプシロンロケットを選定した。	達成
宇宙実証	運用準備を開始する。	運用準備を開始した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

衛星システムの部品調達遅延に伴い、計画（事業期間）の変更を行った。

＜共通指標＞

論文数
3

総合評価概要

小型、低コスト、かつ高性能な合成開口レーダ衛星の開発は我が国宇宙産業の国際競争力強化に極めて重要であり、事業の目的・政策的位置付けは妥当である。

開発目標として、光学衛星「ＡＳＮＡＲＯ－１」の成果を活かすよう、ＡＳＮＡＲＯ－１のバスに適合した設計としてバスの共通化を図り、低価格化と５００ｋｇ級衛星のシリーズ化を目指している点など、適切に設定されている。

研究開発の進捗は、合成開口レーダの心部とも言えるパルスＴＷＴＡを設計し、小型、省電力で

分解能１m未満という高性能の小型Ｘバンド合成開口レーダを設計・開発が完了しているなど、部品調達の遅れによる継続中のものを除けば個別事項は概ね達成されており、順調な進捗状況であると言える。

今後、実施される予定の宇宙実証においては、衛星開発者目線とならないよう、ユーザーとデータ利用方法を想定して行うようにすべきである。さらに、これまで研究開発を実施したＬバンドＳＡＲ（ＰＡＬＳＡＲ）との観測特徴の比較や、ＡＳＮＡＲＯ－１衛星との協調観測についても検討すべきである。

また、研究開発終了後に海外展開を実現していくには、システム全体でのコスト等も重要であり、事業Ｃ「小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発」と合わせた検討や、運用技術者育成の検討も必要と考えられる。

開発・製造の短縮化については、バス機器製造から試験完了までの期間について１年という数値が達成できるのか検証し、未達の場合には今後の課題を抽出することが求められる。

今回開発するＴＷＴＡは単体の輸出も可能な競争力のあるものと考えられ、従来のものと比較しどの程度小型・省力化が達成できたかを数値で示すことが望ましい。

<u>今後の研究開発の方向等に関する提言</u>

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

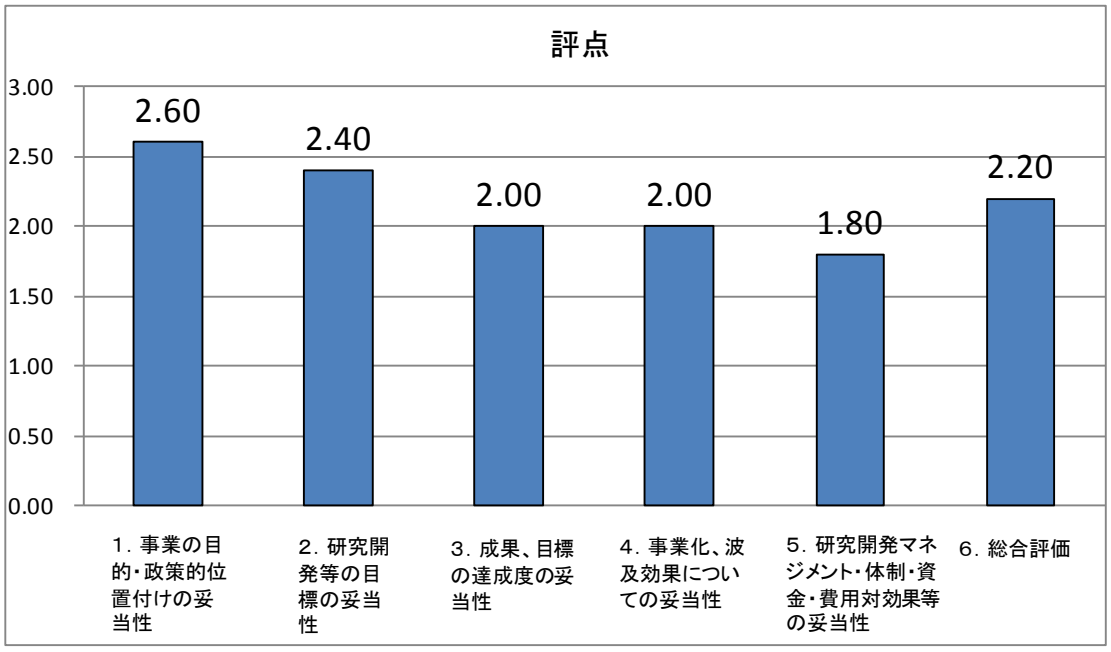
などが想定される。

評点結果

評点法による評点結果

（B. 超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.40	2	2	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.00	2	2	1	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.00	2	2	2	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	1.80	1	2	2	2	2
6. 総合評価	2.20	2	2	2	2	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	C．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国が保有する衛星システムにおけるコンステレーション衛星運用をコアとして、将来、日本製衛星システムを保有する各国のシステムとも連携を可能とする統合運用システムの研究開発を行うとともに、地球観測衛星から得られる大量の衛星画像に対して、利用者が必要とする地物の自動判読を高速に実施し、利用者に判読結果を最適な形で提供するためのシステムの研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２４年度	平成２６年度	－	平成２７年度	JAXA、パスコ
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
3,000,000	－	－	3,000,000	2,932,086

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

①複数衛星運用のための統合運用システム

複数の衛星が必要に応じて有機的に連携し、参加した全てのリソースを最大限活用し運用可能な衛星コンステレーションシステムに求められる機能･性能要求を分析し、システム仕様を確定した。その上で、当該システム仕様に基づき、統合運用システムを開発し、システム全体としての機能・性能確認及び運用性確認を実施した。

個別要素技術	目標･指標	成果	達成度
1.自律自動複数衛星管制システムの開発	(1)複数衛星管制マネージメント（管制、軌道）機能の開発	･ASNARO-1 衛星管制システムを利用することにより衛星管制機能の統合運用システムへの組み込みを検証した。 ･複数衛星の軌道管理を実施するための軌道管理サブシステムを開発した。	達成
	(2)複数衛星リソースマネージメント（撮像計画、予約）機能の開発	･衛星のリソースを管理し、適切な撮像計画を立案するためのコレクション計画立案サブシステムを開発した。 ･各衛星の運用を立案するためのミッ	達成

		ション運用計画立案サブシステムを開発した。	
	(3)地上局マネージメント(複数局管理)機能の開発	複数の地上局のリソースを管理し、利用計画を作成する地上局運用管理サブシステムを開発した。	達成
	(4)高度なセキュリティ機能の開発	・統合運用システム内部セキュリティを確保するためにインタフェースする相手方に応じたインタフェース用ゲートウェイサブシステムを開発した。 ・システム内のネットワークを公開系と非公開系に区分し、系間にファイヤーウォールを設置し、内部セキュリティを確保した。	達成
	(5)高信頼性システムの開発	主要な機器や部品については、単一故障点を排除した高可用性とし、障害時の継続稼働を行うためのフォールトトレランス構成等を採用することで計画停止、自然災害等による停止を除き、99.9%の稼働率を達成するシステムを開発した。	達成
2. ニアリアルタイム・オンデマンドシステムの開発	(1)複数同時画像処理機能の開発	様々な観測データを画像処理するための画像処理サブシステムを開発した。	達成
	(2)複数衛星データアーカイブ(分散、集中、同期)機能の開発	・各衛星の観測データを保存・管理するためのデータ保存・検索ブシステムを開発した。 ・撮像した観測データ、処理された画像データを注文受付、配布管理するための受付・配布管理サブシステムを開発した。	達成
	(3)ターミナル方式、クラウド方式によるオペレーション機能の開発	プライベートクラウド方式のシステム基盤を採用し、計算機リソースを効率的に使用するため、各プロセスを全体的に管理する全体運用管理サブシステムを開発した。	達成

②画像自動判読システム

高分解能光学衛星画像及び高分解能合成開口レーダー衛星画像から、対応衛星画像で目視認識可能な地物や土地被覆を判読するシステムを開発した。判読精度は、地物のサイズによってバラつきが

あるが、判読精度の向上が可能なシステムとなっている。また、最も利用が見込まれる建造物の判読については、面積ベースで 80%以上と十分実用に足る判読精度が得られている。加えて、目視判読が難しいとされる合成開口レーダー画像についても、光学画像との比較で単体では判読精度は劣るものの、光学画像と組み合わせることにより、精度の向上が期待できることも確認された。

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1)システムロジック部の開発 ①学習／判読ロジックの確立	画像から、コンピュータが地物の判読のための知識を自ら獲得（学習）し、未知の画像から地物の種類や位置を特定（判読）するためのロジックを確立する。 対象とする画像は、光学画像、合成開口レーダー画像及びその複合とし、画像中で視認できる様々な地物の判読に対応する汎用性の高いロジックを目指す。	機械学習の一つであるディープラーニング手法をベースとして、画像中で視認できる地物や被覆に対する汎用的な判読ロジックを確立した。また、精度評価を行い、十分に実用に足る精度を有することを確認した（建造物で 80%以上）。	達成
②判読処理の高速化	光学画像、合成開口レーダー画像、光学／合成開口レーダー統合のそれぞれの判読処理が、3 分以内に完了できるよう判読処理の高速化を行う。	複数の処理ノード、マルチコア CPU、GPGPU を活用した並列分散処理を判読処理に適用することにより、3 分以内の判読処理完了を実現した。	達成
(2)システムフレーム部の開発 ①ユーザインターフェイスシステムの開発	ウェブを介して、ワンストップで利用者へ判読サービス（画像の入手から判読レポートの提供）を提供するための機能を開発する。 開発にあたっては、利便性やシステムへのアクセスのし易さ等を考慮する。 【性能目標】 画面応答速度：1 秒以内	ウェブを介して判読サービスを利用者に提供するためのユーザインターフェイスシステムを設計、製造し、試験を行った。ワンストップでサービスを提供するため、衛星プラットフォームや ASNARO 地上システム等の外部システムとの連携機能を具備した。加えて、利便性やシステムへのアクセスのし易さの向上のため、ウェブ GIS 上で判読結果表示の対応およびタブレット端末への対応を実施した。 【性能】 画面遷移：0.6 秒	達成
②アーカイブ管理システムの開発	判読処理によって判読された大量の地物の情報を、分散データベースにて、高速に取り扱う機能を開発する。 【性能目標】	判読結果が格納されるデータベースの制御及び管理を担う、アーカイブ管理システムを設計、製造し、試験を行った。 高速なデータアクセスを実現するた	達成

	100 万件のデータから 10 件のデータの検索及び抽出：1 秒以内	め、データベースの分散化を行った。 設計にあたっては、分散データベースに求められる要件（速度、可用性等）を整理し、プロトタイピングを行うことで、データベース管理システムの選定を行った。 【性能】 100 万件のデータから 10 件のデータの検索及び抽出：0.0137 秒	
③画像判読システムの開発	判読処理を行うための複数の計算機（処理ノード）に効率よく要求（ジョブ）を割り当て、短時間で判読処理を完了させるジョブスケジューリング機能を開発する。 【性能目標】 処理ノードへのジョブ割当：2 秒以内 判読処理完了：3 分以内	処理ノードの管理および判読学習処理の実行と制御及び管理を担う、画像判読システムを設計、製造し、試験を行った。 複数の判読処理ノードの監視、判読要求の分散発行、進捗モニタリング等を行うための、ジョブスケジューラー機能と、システムロジック部の研究結果による仕様変更のインパクトを最小限にするための汎用処理フレームワークを具備した。 【性能】 処理ノードへのジョブ割当：1.0 秒 判読処理完了：113 秒/40 秒/140 秒（光学/SAR/統合）	達成
④ナレッジ管理システムの開発	コンピュータが画像判読を実行する際のナレッジ（識別器）や、そのナレッジを生成するための学習用/評価用データを管理する機能を開発する。本機能は、システムの運用者が利用する機能であるため、運用性や、サービスの継続性を考慮して開発を行う。	コンピュータが画像判読を実行する際のナレッジ（識別器）の管理を担う、ナレッジ管理システムを設計、製造し、試験を行った。継続的かつ効率的な識別器の精度の向上を実現するため、判読結果からのフィードバック機能を具備した。	達成
⑤計算機環境の構築	画像自動判読システムを動作させるための計算機環境の設計・構築を行う。 設計にあたっては、本システムを構成する各システムの処理特性や処理性能、運用性を十分考慮	システムロジック部およびシステムフレーム部の研究成果や設計を踏まえ、機械装置のサーバー、ネットワーク等の要件整理、計算機環境の設計および機器選定・調達を行い、構築を行った。 処理特性に応じて、システムによって	達成

	する。	ネットワーク規格やストレージを使い分けることにより、効率的かつ合理的な設計を行った。また、計算機の集約・仮想化や自動デプロイ機能の具備を行い、運用性の向上と、ランニングコストの低減を図った。	
⑶ナレッジデータベースの構築	衛星画像から、システムロジック部の開発等に利用する学習用／評価用データの整備を行う。	大量の学習用／評価用データを整備する必要があるため、効率性を考慮した整備ツールを作成した。当該ツールを活用し、衛星画像や航空写真から、学習用／評価用データを約 45 万セット整備した。	達成

⑵ 目標及び計画の変更の有無

ＡＳＮＡＲＯ－１の打上延期により、計画（事業期間）の変更を行った。

＜共通指標＞

特に無し。

総合評価概要

（複数衛星統合運用のための統合運用システム）

１台のシステムで複数の異なる人工衛星の運用が出来ることは、大幅なコストダウンを可能にすることに加え、既存の衛星も取り込んだ低コストでのコンステレーション化も可能にするものであり、ＡＳＥＡＮ各国への寄与や災害監視などの地球観測に資するものである。

統合運用システムを開発するための要素技術に関する全ての項目について目標を達成していることは評価できる。また、統合衛星運用により開発費・運用経費を削減できる見通しを得ており優れている。

一方で、優位性を示す数値データがほとんど示されておらず、国際競争力を判断することが困難であり、事業化・波及効果がやや不透明である。

本開発の成果の普及には、そのニーズは様々な分野に及ぶ可能性があり、ユーザーに有効な使い方をアピールするなどの取組が必要と考えられる。

（画像自動判読システム）

大量の衛星データから必要な情報をコンピュータに抽出（自動判読）させる手法は、人工衛星の高度化・機数増が進む中で今後ますます必要となると考えられ、有用な研究開発である。

本事業で画像自動判読システムの枠組みとその要素システムを構築し、操作感の向上も含め実用に耐えうる処理能力を有したシステムを構築したことは評価できる。

本事業の成果の優位性をアピールする観点からも、自動判読の処理時間についてはこれまでのも

のとの比較をすることが望ましい。

今後、本事業の成果の普及にあたっては、分野ごとのニーズに応じた改良や、衛星毎のセンサの仕様の差異に応じた対応等が必要になると考えられる。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

などが想定される。

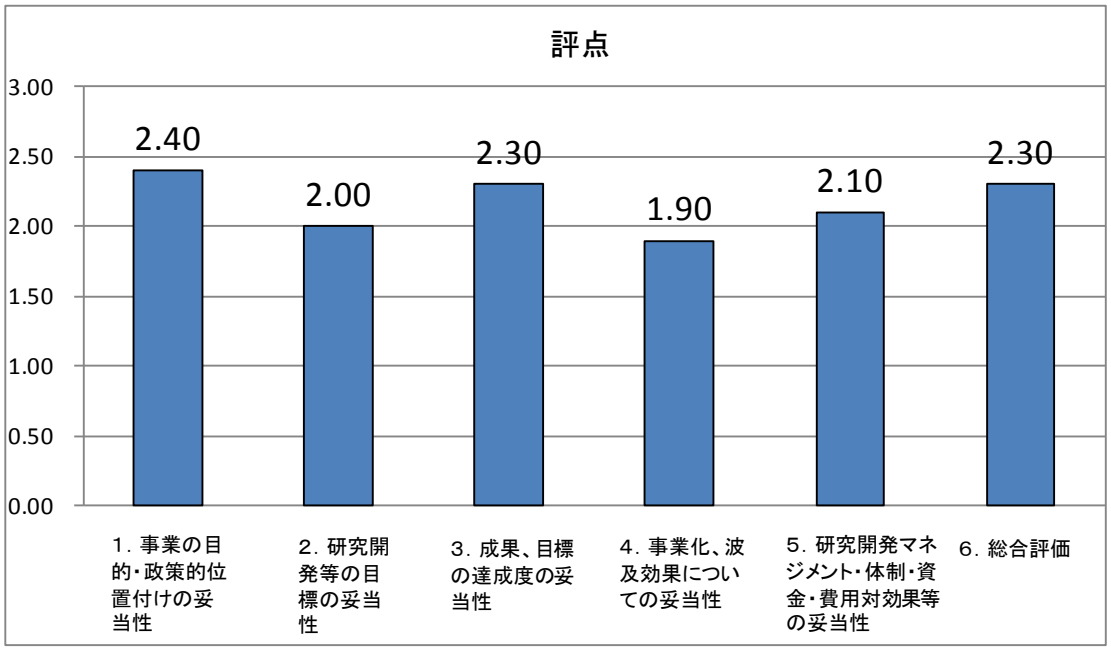
社会から求められる目的特化型のサービスは､多種多様であることからオーダーメードにならざるを得ないが、開発期間を例えば１年間とできれば大きなメリットとなる。今後、こうしたことも見据えることが重要である。

評点結果

評点法による評点結果

（C. 小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	3	2	3	2	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.00	2	1	3	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.30	3	2	3	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.90	2	1	3	1	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.10	3	2	2	2	3
6. 総合評価	2.30	3	2	3	2	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｄ．可搬統合型小型地上システムの研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国宇宙産業の国際市場への参入及び宇宙利用の拡大を図るため、「Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」によるＡＳＮＡＲＯ－１衛星の開発に合わせ、衛星の追跡管制やデータ受信処理システムの小型化、低コスト化、高性能化、運用の省力化を実現する、効率的かつ利便性の高い可搬統合型地上システムについての研究開発を実施するとともに、高性能小型衛星を活用した技術実証を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２１年度	平成２６年度	平成２７年度	平成２７年度	パスコ
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
－	297,474	－	4,476,867	4,089,071

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

衛星の追跡管制やデータ受信処理といった地上システムについて、効率的、かつ、利便性の高い利用者重視の地上システムの実現を目指し、地上システムの小型化、低コスト化、高機能化、運用の省力化を実現した

個別要素技術	目標･指標	成果	達成度
(1)可搬統合局 ①車両総重量の軽量化	車両総重量を 20t 以下とする。	車検における車両総重量の測定結果が 19.4t であることを確認。	達成
②アンテナ搭載型車両	アウトリガの安定度に関する性能要件はアンテナ設置要件を適用し以下の設定とする。 【性能要件】 設置面傾斜: 水平面から±5°	設置面傾斜: 水平面から±5° 初期姿勢: 水平面から±0.1° 運用時安定度: 初期姿勢から±0.04°	達成

	初期姿勢: 　水平面から±0.5° 運用時安定度: 初期姿勢から±0.1°	（風速 25m/s 環境下の最大変位）	
③ 可搬局セットアップ（アンテナ組立）の高速化	アンテナ組立の 3 工程（アウトリガの設置、Feed の取り付け、アンテナパネルの取り付け）を 2 名で 2 時間以内に実施する。	2 名で 2 時間以内（1 時間 55 分）に設置を完了した。	達成
（2）画像統合運用 ①統合運用の検討	災害発生時における統合運用手法を確立し、可搬統合局及び統合運用の実施フローから可搬統合局の運用時間や情報提供までの時間を整理しモデルケースにおいて情報提供時間の有効性を検証する。	可搬統合局に具備する変化抽出手法、地物抽出手法、DEM の生成手法、災害シミュレーション手法を開発した。省力化と時間短縮を行い実用に耐え得るシステムを開発した。	達成
②主題図作成の自動化	主題図作成の自動化を実現し、統合運用人員の省力化を実現する。	主題図作成における一連の手順を自動化することで省力化を図った。 また、自動処理に対する設定作業を画像注文時に一括して行う仕組みとすることで、可視時間内の運用負荷を削減している。	達成
③主題図様式のテンプレート化	主題図の表現方法を明確化し、テンプレートとして柔軟に利用するための表示設定やレイアウトを確立する。また主題図の表現に必要な情報を選定する。	分析結果の実データと、それを表現するための表示設定ファイル、レイアウトを管理するテンプレートファイルを個別に管理する仕組みを実装することで、利用者の要望に応じた主題図や、対象とする災害に応じた表示方法での主題図提供を可能とした。	達成
④DSM 差分抽出の精度検証	DSM 差分抽出アルゴリズムの確立と、大規模災害における被害状況の把握に、広域にわたる高さの変化情報が有効かを検証する。	アルゴリズムを確立し、その精度検証において建物倒壊の被害状況把握を想定し、建物面積に着目した検証を行った。200 ㎡以上の面積を持つ建物に関して 83.3%の抽出率を示し、単純差分での変化抽出と比較しても良好な検出が行えることが分かった。	達成

(3)画像高速処理 ①L0 処理の高速化	ストリーム方式での中間ファイルの最適なファイル分割サイズ検討、復号処理アルゴリズムの確立と高速化手法による処理の高速化を実現する。 【性能目標】 L0 処理:42 秒	【性能実績】 L0 処理:26 秒 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
②L1 処理の高速化	画像 I/O について異なる媒体での性能比較・検討を行うことにより処理の高速化を実現する。 【性能目標】 L1 処理:70 秒	【性能実績】 L1 処理:53 秒 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
③高次処理の高速化	高次処理アルゴリズムの開発、最適な装置構成により処理の高速化を実現する。 【性能目標】 パンシャープン生成:60 秒 オルソ生成:90 秒 DSM 生成:180 秒	【性能実績】 パンシャープン生成:28 秒 オルソ生成:20 秒 DMS 生成:155 秒 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
④大容量データ I/F の高速化	最適化ソリューションの確立、局間伝送シミュレーション実施、最適な装置構成により処理の高速化を実現する。 【性能目標】 伝送効率:75%	【性能実績】 伝送効率:97% 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
(4)先進的地上システム ①撮像予約提供システムの開発	利用者の利便性に考慮した Web 注文システムの構築を目標とする。 【性能目標】 検索速度:4 秒以内 ※アーカイブ検索の前提 登録母数:1,500 万件 適合件数:500 件 同時アクセス数:10	直観的なインターフェイスの検討を実施した。 大量データ表示のレスポンスを考慮した設計とし伝送遅延も考慮した描画方式を実現した。 アーカイブ検索の速度に対する大量データの表示性能目標を達成した。 【性能実績】 アーカイブ検索速度:2.4 秒	達成

②アーカイブ システムの開発	OGC/ISO 準拠のメタデータ設計、高速な空間検索を行うための検索モジュールの最適化を目標とする。 【性能目標】 1500 万件から 500 件のデータ抽出:1 秒以内	最適な OGC/ISO 準拠のメタデータ設計を実施した。 高速な空間検索を行うための検索モジュールの最適化を実施した。 【性能実績】 1500 万件から 500 件のデータ抽出: 0.488 秒	達成
③撮像計画管理 システムの開発	撮像計画立案処理の高速化と、撮像機会の向上を目的としたアルゴリズムの確立を目標とする。 【性能目標】 計画立案時間(衛星運用計画管理と合計):15 分以内	撮像計画時間で性能目標を達成した。 【性能実績】 計画立案時間:9 分 13 秒 注文の締め切り時間を衛星が飛来する直前(AOS-30 分前)まで許容できるようになった。	達成
④衛星運用計画管理 システムの開発	運用計画立案処理の高速化を目標とする。 【性能目標】 計画立案時間(撮像計画管理と合計):15 分以内	運用計画立案処理時間で性能目標を達成した。 【性能実績】 計画立案時間:4 分 2 秒 注文の締め切り時間を衛星が飛来する直前(AOS-30 分前)まで許容できるようになった。	達成
⑤衛星管制システム の開発	運用の省力化・衛星運用自動化の検討を行い運用省力化画面の作成を目標とする。 【性能目標】 ノミナル時 1 可視運用中の運用者操作:0 件	ノミナル時の運用者操作は 0 件となり性能目標を達成できた。よって、運用の省力化を実現できた。	達成
⑥軌道制御 システムの開発	軌道決定運用の自動化、手順の簡略化、軌道決定精度向上、最速軌道決定実施タイミングと処理時間の短縮を目標とする。 【性能目標】 GPS 軌道決定精度: 3m(3σ) 最速軌道決定処理: 20 分	高い軌道決定精度であり、かつ高速に軌道決定処理を実施することができたため、衛星運用を安定的に行うための重要な要素が整ったことを確認した。 【性能実績】 GPS 軌道決定精度: 3m(3σ) 最速軌道決定算出時間: 11 分	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

ＡＳＮＡＲＯ－１の打上延期により、計画（事業期間）の変更を行った。

＜共通指標＞

論文数
5

総合評価概要

小型の可搬統合型地上システム・画像統合運用システムを構築できたことは、固定の地上システムが不要となることになり、通信インフラのない新興国への輸出において有効であるなど、国際競争力強化の観点から非常に重要であり、所期の目標を達成できたことは評価できる。

なお、本事業の成果を活用した今後の国際展開は新興国が中心になると考えられるが、人工衛星と会わせたパッケージとしてどのように新興国に働きかけていくかを具体化するとともに、使い勝手の向上、メンテナンスコストの低下、各国の状況に対応した改良などが必要になると考えられる。

また、日本のように通信インフラの確立した地域では災害時等の利用が想定されるが、普段のメンテナンスコストが必要になるなど、課題もある。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

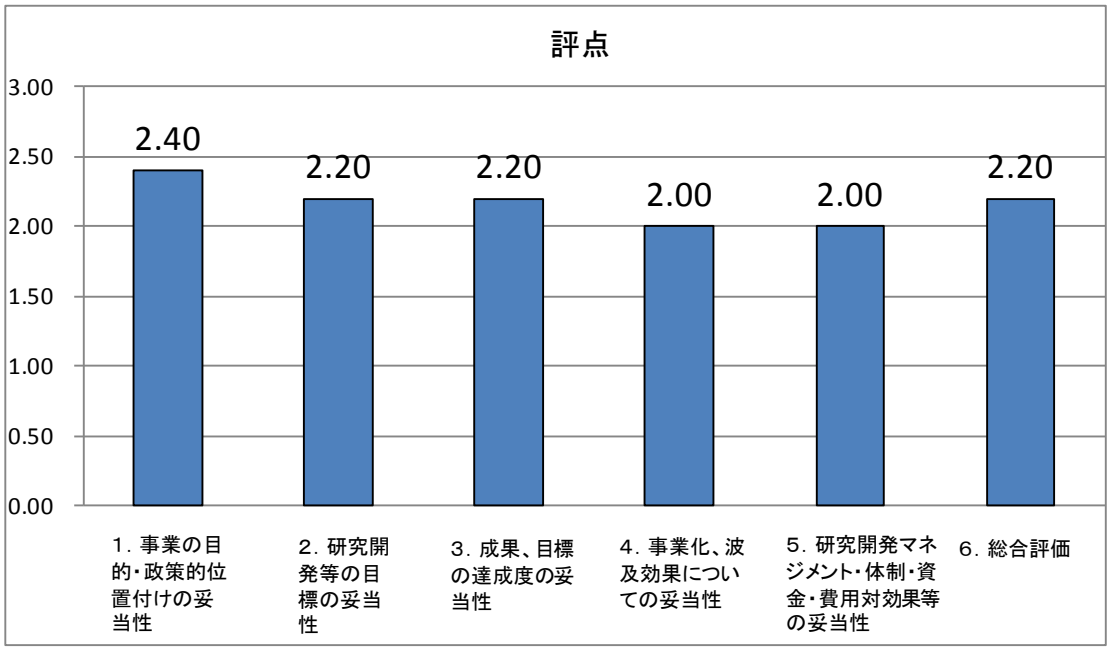
などが想定される。

評点結果

評点法による評点結果

（D. 可搬統合型小型地上システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	2	3	3	1	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	2	2	3	1	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	2	2	3	1	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.00	2	2	3	0	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	2	2	2	1	3
6. 総合評価	2.20	2	2	3	1	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（石油・天然ガス・石炭の安定供給確保）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

石油資源の安定供給に向けた資源探査のため、地球資源衛星１号（ＪＥＲＳ－１）の成果を活かし、光学センサである極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ＡＳＴＥＲ）及びレーダセンサである次世代合成開口レーダ（ＰＡＬＳＡＲ）を開発し、その校正・精度評価を実施することによってデータの健全性を維持するとともに、センサの安定運用を図るための研究開発を行う。

なお、ＡＳＴＥＲセンサは平成１２年度のミッション運用開始以降、現在も運用を続けており、ＰＡＬＳＡＲは平成２３年度に運用を終了している。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
昭和６２年度	平成２７年度	平成２７年度	平成２８年度	JSS
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
80,000	68,000	69,943	30,985,700	29,444,358

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

ＡＳＴＥＲの軌道上運用について、平成２３年度～平成２６年度は、定常運用及びそれに続く後期運用の中で短波長赤外放射計（ＳＷＩＲ）を除く機器の正常な運用を維持し、利用者への画像供給も継続でき、目標を達成できた。

個別要素技術	目標・指標（中間時点）	成果	達成度
ASTER軌道上運用 ・定常運用 （5年間） ・後期運用 （5年以上）	①テレメトリデータによる機器の正常動作確認 （オンラインTLMモニタリング：毎日）	各機器の温度、電流、電圧等のテレメトリデータが正常な動作範囲内に維持されており、長期にわたる機器の安定動作が確保されていることを確認した。	ASTER定常運用のミッションサクセスを達成 後期運用はVNIRとTIRについてエクストラサクセスを達成
	②画像データによる性能評価 （画像評価データの取得：年2回）	機器評価のための観測画像データを取得し、ポインティング機能の正常動作確認及びジオメトリック性能としての地表分解能が開発仕様を満足していることを確認した。	
	③定期校正データによる機上校正・検証 （機上校正データの取得：49日毎） （16日回帰軌道の3回帰毎に実施）	各放射計の定期校正データを取得し、機上校正機能の正常確認及びラジオメトリック性能としての分光特性の経年変化を評価した。 経年変化による感度低下については、感度補正の校正係数を算出し、観測データに反映することにより高品質の画像生成を維持することができた。	
	④データトレンドよる機器の長期的健全性確認 （アーカイブTLMデータトレンド：毎月）	機器のポインティング動作の累積回数管理及び温度、電流、電圧の特性値管理によるトレンド評価を継続して行い、長期運用による機器の劣化や変動傾向がなく健全性が維持されていることを確認した。	

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し。

＜共通指標＞

論文数
145

※論文数には、講演数やその他の発表も含む。

総合評価概要

ＡＳＴＥＲについて１５年間運用を継続しているというのは驚異的な成果であり、長期にわたって正常な運用を続けてきたことは高く評価できる。この間、ＡＳＴＥＲデータの継続的・安定的な利用と蓄積を可能にすることにより、石油資源の探査等において多くの成果をあげてきたと言え

る。

今後は、衛星リモートセンシングデータに対するニーズの拡大や海外の競合するリモートセンシング衛星の状況を踏まえて、アーカイブデータも含め、他分野での活用などより広いユーザーに活用してもらう方策を検討すべきである。

さらに、本システムで蓄積したデータの評価等を踏まえ、次世代のセンサ開発に是非つなげていただきたい。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

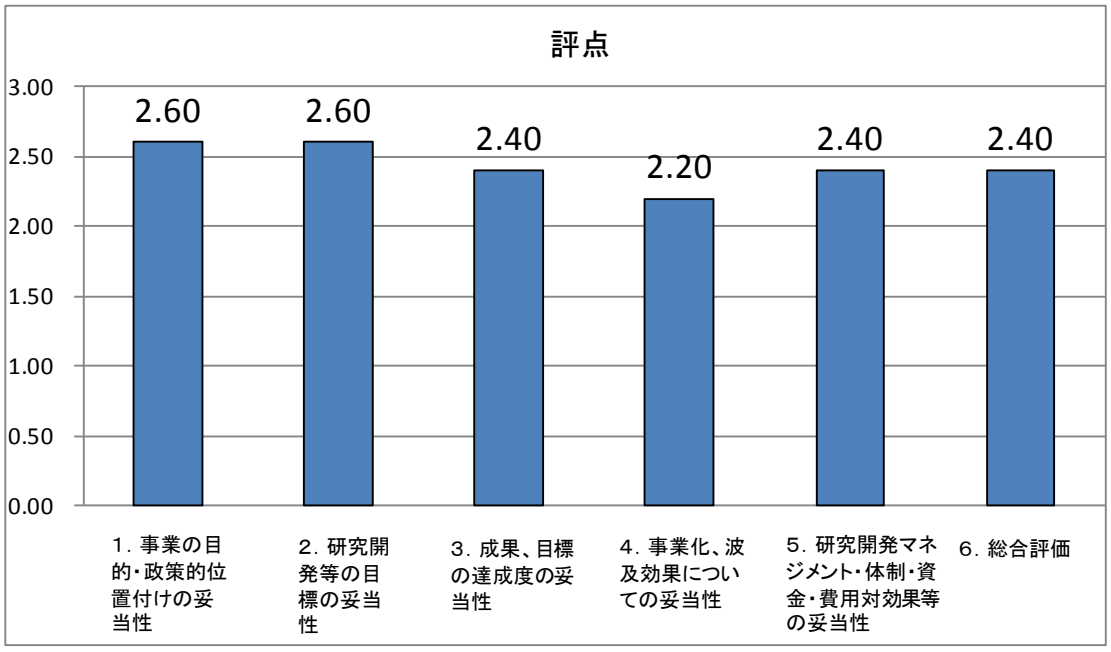
などが想定される。

評点結果

評点法による評点結果

（E. 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	2	2	2	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	2	2	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.40	2	2	2	3	3
6. 総合評価	2.40	2	2	2	3	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｆ．石油資源遠隔探知技術の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（石油・天然ガス・石炭の安定供給確保）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

石油資源の安定供給に向けた資源探査のため、「Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発」において開発されたＡＳＴＥＲ（光学センサ）及びＰＡＬＳＡＲ（レーダセンサ）より取得されたデータの品質管理及び地上システムの運用を行うとともに、これらのデータを活用し、石油資源探査を効率的かつ精度よく実施するための利用技術開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成５６年度	平成２８年度	平成２７年度	平成２９年度	JSS、産総研
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
870,000	739,500	638,289	71,521,545	67,815,898

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

ASTERおよびPALSARデータによる、石油ガス鉱床の地表・貯留構造の状況に応じた利用技術、非在来型資源・生産管理監視等への利用技術等について、合計57件の利用技術および事例を開発し、資源ユーザの要望するほぼ全てのケースを網羅した。また資源・地球環境・防災等の課題に必要な情報を抽出する解析アルゴリズムを合計66件開発し、利用に必要な解析手法をほぼ網羅した。

ASTER及びPALSARとも、地上システムの運用によって、ユーザの要求に対応した観測計画の作成、観測データの全量入手・保存、標準・高次プロダクトの生産・配付数の目標を満足した。また運用期間中に実施した校正検証結果から、定められた精度を維持したことが確認された。

個別要素技術	目標・指標（中間時点）	成果	達成度
①石油ガス資源探査等への利用手法の確立	目標: ASTER及びPALSARデータによる、石油ガス鉱床のトラップ別と地表状況に応じた衛星データ利用技術、及び近年注目をあびている非在来型資源への利用や生産管理監視技術等を確立す	ASTERおよびPALSARデータによる、石油ガス鉱床の地表・貯留構造の状況に応じた利用技術、非在来型資源・生産管理監視等への利用技術等について、合計57件の事例を開発し、資源ユーザの要望するほぼ全てのケースを網羅した。また資源・地球環境・防災等	達成

	る。 指標: 各項目の利用手法を確立した事例件数とする。	の課題に必要な情報を抽出する解析アルゴリズムを合計 66 件開発した。	
②地上データシステム運用・品質管理	目標・指標:以下の項目の実現する。 (ア)観測計画の作成 (イ)観測データの全量入手・保存 (ウ)標準・高次処理プロダクトの生産 (エ)ASTER及びPALSARそれぞれ5万シーン以上の配付 (オ)衛星データの目標精度の維持	(ア)ユーザ要望を取りまとめた観測計画を滞りなく作成した。 (イ)ASTER・PALSAR の観測データを全量入手し保存した。 (ウ)ASTER・PALSAR の全量を標準処理し、オンデマンドで高次処理プロダクトをユーザに提供した。 (エ)標準・高次処理プロダクトを累計で２６万シーン配付した。ASTER GDEM(Ver2)を配付した。 (オ)幾何精度 50m以内、放射量精度可視近赤外±2%、熱赤外±1度の精度を維持した。	達成
③次世代アーカイブシステムおよび広域マップの整備	目標:ユーザに対してより利用し易い衛星データを継続的に提供するため、大量データを扱うことが可能な次世代アーカイブシステムを構築するとともに、次世代プロダクトとなる広域マップを整備する。 指標:ASTER 及び PALSAR のアーカイブ実績、高速再処理アルゴリズム開発、標準化対応等の実現度合い、整備した広域マップの種類とその完成度とする。	ペタバイト級のデータアーカイブシステムを導入し、ASTER・PALSAR データの高速処理が可能なアーカイブシステムを実現した。提供システム関しては、OGC 標準 2 種について最新版に対応した。 ASTER GDEM ver.3・オイルスリック DB・時系列 DEM/オルソデータ、全球モザイクオルソ画像、全球放射率データを整備した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し

＜共通指標＞

論文数
41

総合評価概要

石油ガス田の開発や鉱区取得につながった例など、ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲデータを石油ガス資源の探査等に利用して成果をあげている点は高く評価できる。

また、ＡＳＴＥＲ　ＧＤＥＭの整備、オイルスリックデータベースなど、ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲの長期観測データから様々なプロダクトを作成し利用者に配布しており、関連分野の産業活動及び科学研究に大きく貢献している。

なお、ＡＳＴＥＲは引き続き多くの分野での活用が期待され、今後も運用を継続すべきであるが、その運営についてはより省力化、効率的運営を検討すべきである。

米国のＬＡＮＤＳＡＴでは２００８年よりデータの無償配布が開始されるなど、海外衛星においてはデータの配布ポリシーが近年変更になっている。ＡＳＴＥＲ等で取得したデータについても、より広い分野での活用が期待され、今後はその配布を無償化するなど、ユーザーの拡大に向けた見直しを行う必要がある。

また、現在開発中のハイパースペクトルセンサの観測データの処理についての研究開発は、本事業の成果や反省を十分に踏まえて推進するべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

などが想定される。

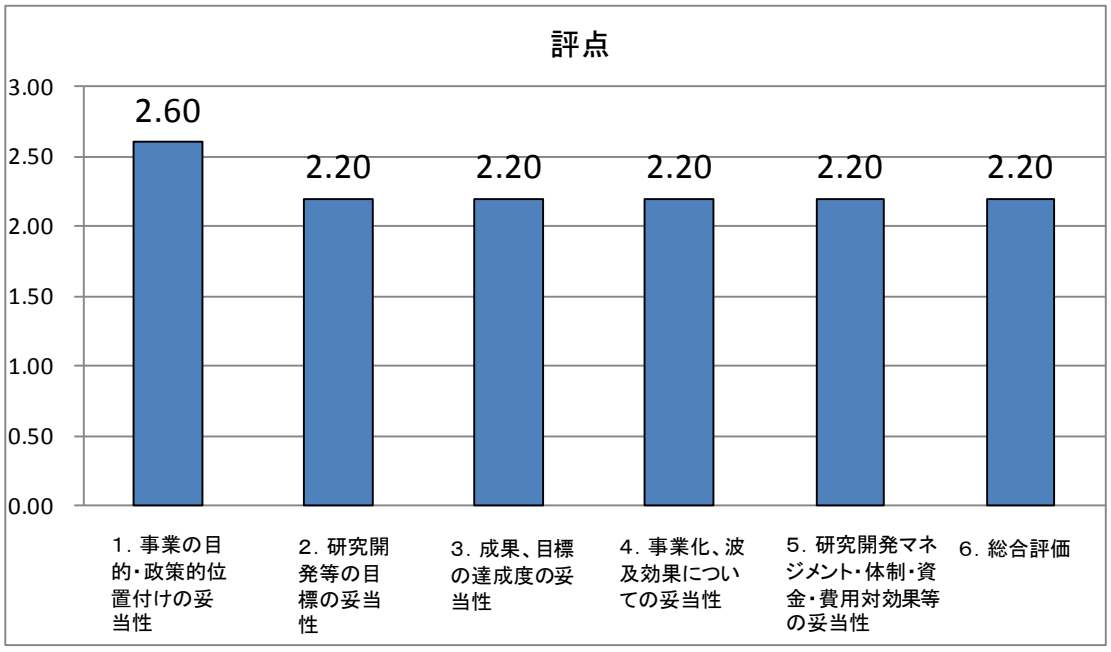
欧米による衛星観測データの無料公開の動向も踏まえ、ＡＳＴＥＲデータが広く利用されて社会に還元されるよう、利用研究の分野を拡大するとともに、ＡＳＴＥＲデータを無料公開する方針に転換することを提案する。

評点結果

評点法による評点結果

（F. 石油資源遠隔探知技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	2	2	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6. 総合評価	2.20	2	2	2	2	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｇ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（石油・天然ガス・石炭の安定供給確保）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

石油資源の安定供給に向けた資源探査のため、資源探査用センサであるＡＳＴＥＲの後継機として、物質の解析に有用なスペクトル分解能を飛躍的に向上させたＨＩＳＵＩ（Hyperspectral Imager Suite：高性能のハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサの両センサを合わせたセンサの名称）を開発し、より高精度なデータを得ることを可能とするとともに、石油埋蔵の有望地域を早期に発見するための研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１９年度	平成３３年度	平成２７年度	平成３４年度	JSS、NEC
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
1,800,000	1,530,000	668,571	12,018,571	11,876,902

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサについて、構成するコンポーネント及びセンサシステムの詳細設計を行い、詳細設計審査会（ＣＤＲ）において、最終目標性能を達成可能であることを確認した。

また、両センサを構成するコンポーネントのフライトモデルを製作し、軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性、電磁適合性等を含む試験により、宇宙用としての品質を確認したことに加え、当該コンポーネントを用い、両センサのフライトモデルの組立を開始した。

個別要素技術	目標･指標(中間時点)	成果	達成度
システム設計	詳細設計結果として、最終目標性能仕様を達成する。	詳細設計結果について、コンポーネント詳細設計審査(CDR-1)及びセンサシステム詳細設計審査(CDR-2)を行い、最終目標性能が達成が可能であることを確認した。最終目標性能の各項目に対する達成度は表３－２－Ｇ－２および表３－２－Ｇ－3に示す。	達成
フライトモデル	フライトモデル用コンポーネント	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペ	達成

	の製作及び試験を行う。 フライトモデルの組立てを開始する。	クトルセンサを構成するコンポーネントについて、熱機械環境を含む性能を試験し、宇宙用としての品質を確認した。 上記のコンポーネントを用い、ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサのプロトフライトモデルの組立てを開始した。	
宇宙実証 支援システム	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサ用機器実証部及び地上データシステムの設計・製造を行う。	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサの宇宙実証に必要な機器実証部及び地上データシステムの設計・製造を実施した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

ＨＩＳＵＩの搭載を想定していたＡＬＯＳ－３の開発計画が中止となったことにより、計画（宇宙実証機会の模索・検討）の変更を行った。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
49	2

※論文数には、その他外部発表を含む。

総合評価概要

資源探査や環境観測をはじめとする様々な分野で高スペクトル解像度観測への期待は高く、本事業の目的・政策的位置づけは妥当。

これまでの研究開発により、ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサを設計が完了し、プロトフライトモデルの組立が開始されており、宇宙実証への実現に向け、着実に進展している。

現在予定されている国際宇宙ステーションへの搭載を着実に推進し、早期に宇宙実証を行うことが望まれる。その際、観測データの大容量化が想定されるため、データ処理、分析手法について検討する必要があると考えられる。

なお、本開発センサの性能について、要求スペックの記述はされているが、性能向上による具体例がもっと分かりやすい形で提示されることが望まれる。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

などが想定される。

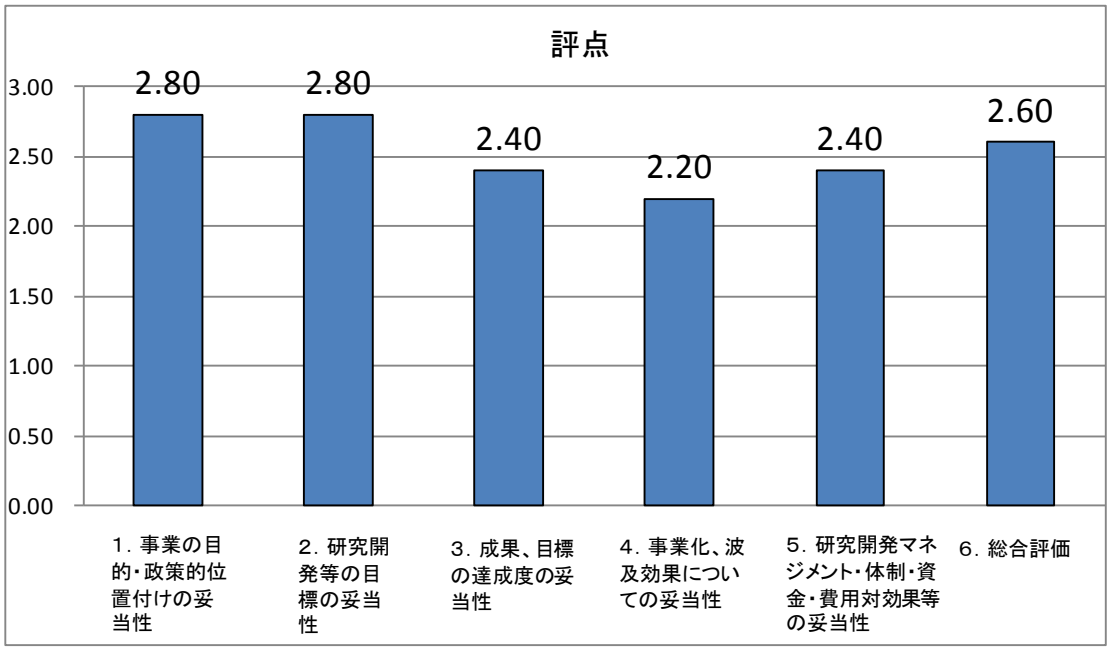
資源開発以外の多様な分野でのハイパースペクトルデータの解析技術を確立させるためには、サンプルデータ提供による多数公募型の共同研究方式により、日本の技術を広く結集させることが効果的である。

評点結果

評点法による評点結果

（G. ハイパースペクトルセンサ等の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	2	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.80	2	3	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	2	2	2	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	1	3	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.40	2	2	3	2	3
6. 総合評価	2.60	2	2	3	3	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	H 次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

ＡＳＴＥＲの後継機であるＨＩＳＵＩのセンサデータを有効に活用し、農業分野、森林分野、環境分野においても、食糧供給の円滑化、国土保全・管理、地球規模の環境問題の解決等に活用するため､高精度なハイパースペクトルデータにより石油有望地域の抽出や金属資源鉱物等のより詳細な特定を可能とする等、様々な分野での解析技術を確立するとともに、高品質なデータの継続提供を可能とするためのセンサの校正・データ処理・運用計画の最適化等からなる地上データ処理システムを構築するための研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１８年度	平成３３年度	平成２７年度	平成３４年度	JSS、産総研、JOGMEC
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
530,000	449,280	407,537	3,484,359	3,393,305

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

エネルギー・資源、農業、環境、防災の各分野における実利用化のための解析技術の手法開発と、HISUI シミュレーションデータを使った実証により手法の有効性の確認・検討を行うとともに、スペクトルライブラリの整備を開始した。また、ハイパースペクトルデータ利用者に高品質・高精度で実用可能なプロダクトを継続して提供できるようにするため、センサ校正・データ処理・運用計画策定等からなる地上システムに必要な技術の開発を行った。いずれも研究開発スケジュールに沿った進捗であり、各中間目標を達成した。

個別要素技術	目標･指標(中間時点)	成果	達成度
1．実利用化のための解析技術 (1)実利用化のための解析技術に共通する	HISUI シミュレータを開発すること、およびスペクトルデータベースに格納する細かな波長分解能の鉱物スペクトルライブラリを作成する。	航空機ハイパースペクトルデータから HISUI シミュレーションデータを作成するための HISUI シミュレータを開発し、各分野の研究開発で事前実証に使用した。また、ハイパースペクトルデータのライブラリとして整備すべき 125 鉱	達成

基盤技術		物、168 標本のスペクトルを整備した。	
(2)個別分野における利用技術	エネルギー・資源分野では、海域でのオイルスリック判定や植生地域でも利用可能な探鉱手法の開発のほか、農業、環境、防災等の分野も含め手法を 5 事例以上開発する。	エネルギー・資源分野では、オイルスリックの解析手法、熱水性鉱床の鉱物同定手法、植生地域でも有効な酸化鉄型銅金鉱床の抽出、農業、環境、防災分野で、ユーザが利活用できる具体的な解析手法の研究開発／打上前の事前実証を行い、事例数として 9 事例を実施した。	達成
2. センサ校正・データ処理技術 (1)校正・データ処理技術	HISUI の仕様に対し既存校正技術の適用評価、必要に応じた改良技術を開発し、校正検証計画および校正システムの開発に着手する。 また、幾何補正・波長補正・放射量補正、さらに、大気補正に必要な画像補正処理手法を開発し、アルゴリズム基準書の作成に着手する。	打上前校正・代替校正・相互校正および月校正のそれぞれの既存技術評価を行い、改良技術の開発を行った。また、校正アーカイブシステムの開発および校正パラメータテーブル管理手順の策定に着手した。 幾何・放射量補正を行うためのアルゴリズム開発およびその基準書、ソフトウェア開発および試験を行った。大気補正については、太陽高度・大気状態の変動に強い反射率推定法開発、雲検知アルゴリズムの開発等を行った。	達成
3. 地上システム（運用計画システムを含む）	地上システム（全体システム）の概念設計を行う。 長期運用計画シミュレーションツールを開発する。 短期観測計画の作成アルゴリズムを開発する。	地上システム（全体システム）の概念設計を行った。 長期運用計画を最適化に必要な計画策定システムを構築し、様々な条件のもとで長期観測シミュレーションを実施した。 短期観測計画作成アルゴリズムを開発した。	達成
4. 金属資源探査技術の研究開発 (1)次世代衛星データ解析技術開発	鉱床に伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータを集積し、鉱物分類を高精度化するための解析技術を開発すること。	鉱床に伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータを測定し、解析に利用可能なデータベースとして取りまとめた（512 試料 1,038 スペクトル）。ハイパースペクトルデータ・スペクトルメータデータ等を用いて詳細な鉱物識別を行うとともに鉱物の化学組成、風化プロセスなどに対する解析技術を開発した。	達成

(2)金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発	鉱床タイプに応じた衛星データ等による解析技術を開発すること。また、ハイパースペクトルデータ解析評価用システムを開発すること。	鉱床探査対象となる主要な15鉱床タイプに関する解析技術を開発し、その成果を解析手順書等として取りまとめた。また、解析評価用システムとして携帯型スペクトルメータ及びSQUID磁場偏差計の実機を開発した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し

＜共通指標＞

論文数	特許等件数（出願を含む）
110	2

※論文数には、その他外部発表を含む。

総合評価概要

高頻度観測、高スペクトル観測が必要とされる資源、環境、災害などの分野において、ハイパースペクトルセンサＨＩＳＵＩへの期待は高いと考えられ、その利用に必要となるライブラリデータの整備、校正・データ処理技術や利用手法の開発を行う本事業の目的・政策的意義は妥当。

研究開発の体制は妥当であり、ハイパースペクトルデータの利用が期待されるさまざまな分野の手法開発も順調に進んでいる。特に金属資源探査において岩石鉱物のスペクトルデータを整備し、解析技術を開発したことは評価できる。

我が国は、ハイパースペクトルセンサのハード開発及び利用技術のノウハウの面で国際的に優位に立てるポテンシャルを持っていることから、早期に宇宙実証を行うことが重要である。なお、宇宙実証の実施にあたっては、ＡＳＴＥＲ、ＰＡＬＳＡＲなどの経験や反省を適切に活用すべきである。

また、プロダクトの配布方法等の検討を含め、将来の利用拡大に向けた取組を引き続き推進していくべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

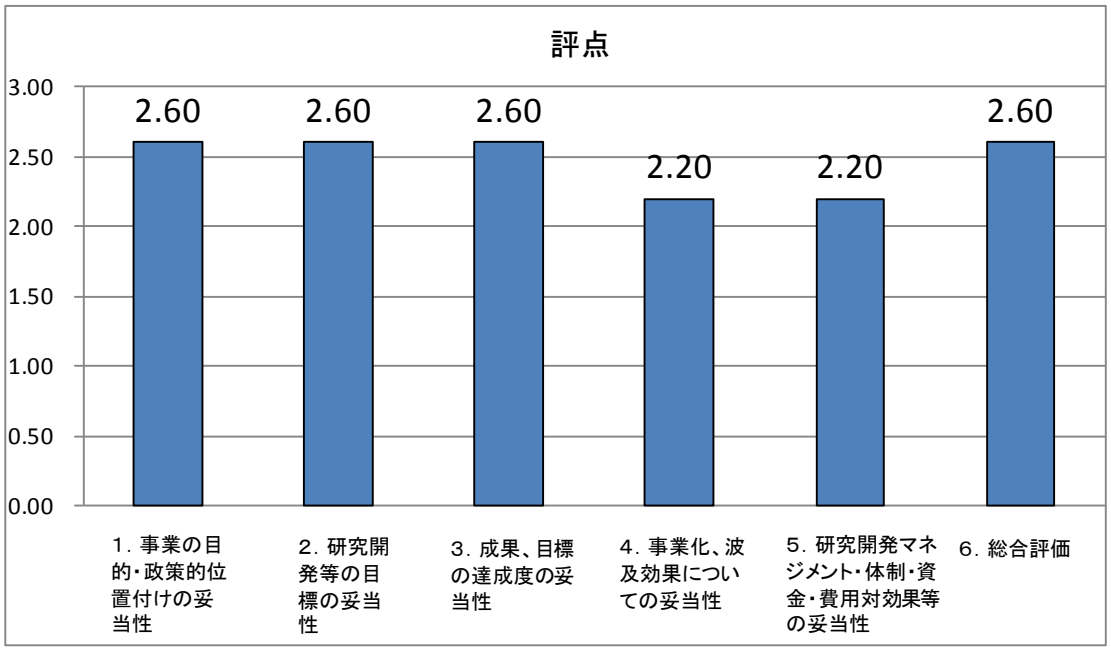
などが想定される。

<u>評点結果</u>

評点法による評点結果

（H. 次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的･政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	1	3	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	3	2	2
6. 総合評価	2.60	2	2	3	3	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ⅰ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発＜SERVIS プロジェクト＞
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国宇宙産業の成長や国際衛星市場への参入を進めるため、我が国企業が得意とする安価かつ高機能な民生部品・民生技術の衛星への転用を進め、信頼性を確保しつつ衛星の低コスト化、高機能化等を図ることを目的として、民生部品（ＣＰＵ、メモリ等）・民生技術を活用するための地上模擬試験・宇宙実証実験を行い、その結果を受けて知的基盤を整備すること等によって、衛星・コンポーネントの低コスト化、高機能化、短納期化を実現するための研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１１年度	平成２９年度	平成２７年度	平成３０年度	JSS、NEC
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
150,000	126,937	153,715	29,093,405	28,734,822

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

実証衛星 2 号機は平成 22 年 6 月 2 日に打ち上げられ、平成 23 年 6 月 3 日に宇宙実証試験を終了した。これまでの地上模擬試験の結果、及び 2 回の宇宙実証試験の結果を反映し、第二次の民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築した。

また、実証衛星 3 号機等による宇宙実証試験に向けて、新たに最新の民生部品・民生技術の地上模擬試験を実施し、これらを適用した実験装置等を開発している。更に衛星システムの統合化も検討した。

個別要素技術	目標･指標	成果	達成度
①民生部品･民生技術の極限環境適用技術	衛星製造等に転用可能性を有する民生部品･民生技術に対し宇宙等極限環境を模擬した地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品･民生技術データベースを構築する。ここにデータベースへの累積登録品種数は	地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品･民生技術データベースを構築した。ここにデータベースへの累積登録品種数は 236 品種となった。またデータベース活用状況を調査し利用促進を検討した。	達成

	200 品種以上とする。またデータベース活用状況をフォローする。		
	民生部品・民生技術データベース及びそれに基づき選定した民生部品・民生技術の実証衛星 1 号機及び 2 号機の宇宙実証試験のデータ等に基づき、第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと適用設計ガイドラインを構築する。ここに実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 30 品種以上とする。またガイドライン類活用状況をフォローする。	第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと適用設計ガイドラインを構築した。ここに実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 74 品種となった。またガイドライン類の活用状況を調査し利用促進を検討した。	達成
	最新の民生部品・民生技術を適用した実験装置等の開発を行い、実証衛星 3 号機のシステム統合化検討を行う。	実験装置等の開発を行い、実証衛星 3 号機のシステム統合化方針を明確化した。	達成
②極限環境で使用する機器等の開発支援技術	実証衛星開発への適用結果に基づき、極限環境で使用する機器等の設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価する。	設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価し、有意な効果を確認した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数（出願を含む）
30	17

※論文数には、その他外部発表も含む。

総合評価概要

民生技術を活用し、人工衛星等で使用できる安価かつ高機能の部品やコンポーネントを増やしていくことは、我が国宇宙産業の国際競争力強化に極めて重要であり、本事業の意義は大きい。

本事業において進めてきた、民生部品のデータベース化及び選定評価ガイドライン、適用設計ガイドラインの作成は、衛星機器の設計・製作に寄与し、評価できる。

部品については、地上模擬試験の有効性が明らかになってきていること、民生部品についてはライフサイクルが短くなっていることなどを踏まえ、宇宙実証の必要性は低下していると考えられる。また、１００～２００ｋｇ級衛星による宇宙実証は、ＪＡＸＡの革新的小型衛星技術実証プログラムで実現されつつあり、３号機の開発は必要性がなくなったと考えられる。

今後は、民生技術を活用したコンポーネントの開発及び部品の地上模擬試験に注力するとともに、ＪＡＸＡが行う革新的小型衛星技術実証プログラムとの連携を図り、効率的に事業を実施していくべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

□複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、

□資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、

□小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、

□資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発

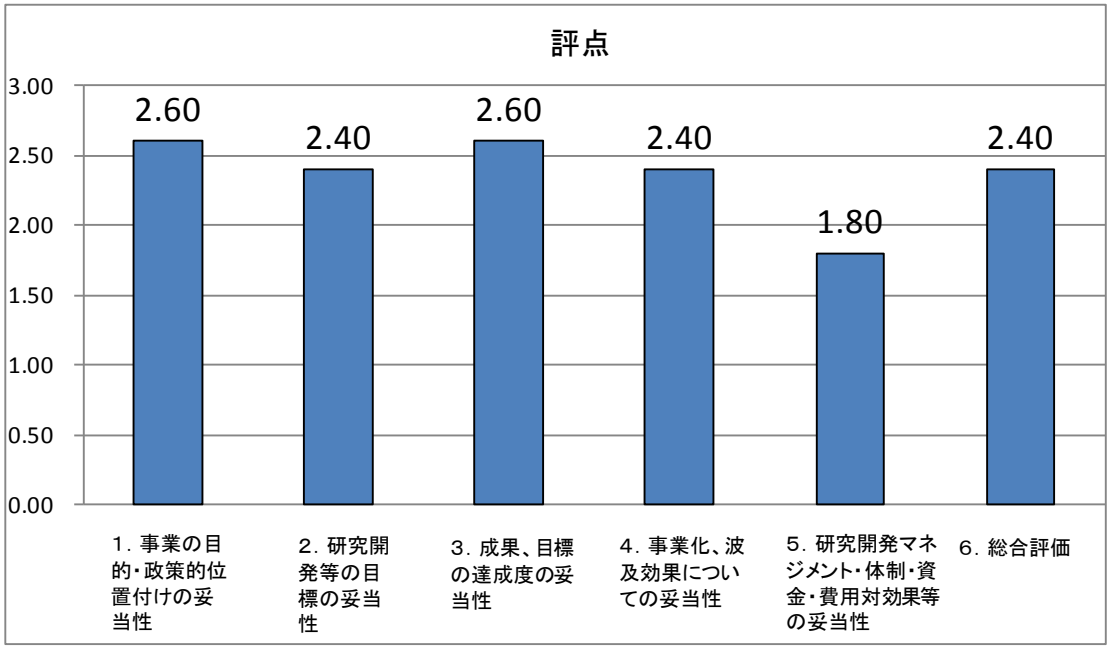
などが想定される。

評点結果

評点法による評点結果

（I. 宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業＜SERVISプロジェクト＞）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	3	3	3	1	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.40	3	3	3	1	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	3	3	3	1	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.40	3	3	3	1	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	1.80	2	2	2	1	2
6. 総合評価	2.40	3	3	3	1	2



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（エネルギー源の多様化・エネルギーの高度利用）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

エネルギー源の多様化に資するため、将発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能な宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ：Space Solar Power System）の実現に向けて、その中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指し、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２１年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	JSS、三菱重工、三菱総研
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
1,149,616	-	-	1,657,661	1,638,114

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

将来の宇宙太陽光発電システムの中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えたマイクロ波送受電技術の研究開発を行い、最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行った。

個別要素技術	目標･指標	成果	達成度
総合システム	無線送受電技術の確立に向け、送電系･ビーム方向制御系･受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。	マイクロ波電力伝送試験モデルを試作した。本試験モデルを用いて、マイクロ波電力伝送試験を実施した。5.8GHz帯でフェーズドアレーアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。	達成

送電部	将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。	薄型・高効率のフェーズドアレイアンテナからなる送電モジュールを開発した。 送電部は 4 枚の送電モジュール(アンテナ数 1216 素子)を組み合せ、約 1.8kW の電力を送電可能である。	達成
受電部	伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ(レクテナ)を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子(ダイオード)を開発する。	市販のショットキーバリアダイオードを使用し、36 個の受電モジュール(アンテナ数 2304 素子)で構成する、大規模で高効率動作する受電部を開発した。これと並行して、窒化ガリウム(GaN)を使用した高効率整流素子(ダイオード)を試作評価した。	達成
送電制御技術	精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術に取組み、実現性や有効性を明らかにする。	両手法の伝送効率の低下量や不要波の発生レベルについて解析・試験を行い、将来のSSPSへ適用可能である見通しを得た。	達成
試験候補地調査	国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。	国内における屋内・外のマイクロ波電力伝送試験候補地調査を行い、要件に適合する試験地を選定した。また、試験実施に係わる課題を抽出し、対処法を考えた。	達成
関連技術動向調査	本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。	国内外のSSPS研究開発動向を調査し、本研究開発との関連などについてまとめた。また、「マイクロ波の植物への影響」に関する研究動向について整理した。	達成
無線送受電スピンオフ技術	成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム(送電出力 10kW 程度、送電距離 500m 程度)を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。	2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。また、電力事業者の観点から、航空障害灯等の電力インフラへの適用可能性を検討した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

試験環境整備の遅延により、計画（一部の事業期間）の変更を行った。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
41	1

※論文数には、講演数やその他の発表も含む。

総合評価概要

レトロディレクティブ方式を用いたビーム制御は、宇宙太陽光発電の実現に向けて有効な技術であることは従来から指摘されていたが、これを間接的ではあるが実証した点は評価できる。送電部を半導体で構成する技術や高効率受電部の開発など、所期の目標を達成している点も評価できる。

産業応用を目指した２．４５ＧＨｚ帯での電力伝送実験により各種検証データを取得できたことは、今後の大電力無線伝送への可能性を示したものであると言える。

本事業内で進められた要素技術開発のうちＧａＮ素子の開発について、５．８ＧＨｚ帯で７０%を超える電力付加効率を達成できことは評価できる。今後、送信部については、ＳＳＰＳの実用化に要求される性能の実現に向け、さらなる薄型化・軽量化・大電力化が必要。

また、本実証実験における最終効率は２０%弱であり、実用化に向けたロードマップを描き、システム全体としての効率を高めていくことが今後の課題である。その際、宇宙太陽光発電システムの実現にはさらなる年月が必要となるため、研究開発を継続するためにも各種技術をスピンオフしていくことが重要である。

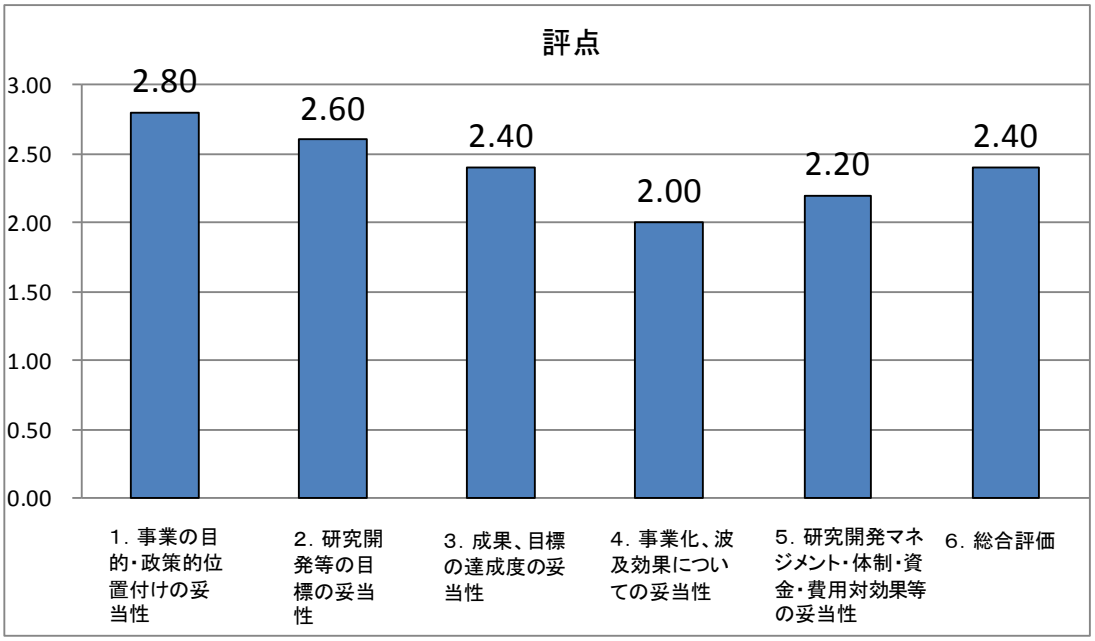
将来的には、安全性を担保するデータの取得も含め、広く理解を得るための積極的な広報をしていくことも考えてほしい。

評点結果

評点法による評点結果

（J．太陽光発電無線送受電技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	3	3	3	2	3
2．研究開発等の目標の妥当性	2.60	2	3	3	2	3
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.40	2	2	3	2	3
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.00	1	2	3	1	3
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6．総合評価	2.40	2	2	3	2	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｋ．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（エネルギー源の多様化・エネルギーの高度利用）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

エネルギー源の多様化に資するため、将発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能な宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ：Space Solar Power System）の実現に向けて、「Ｊ．太陽光無線送受電技術の研究開発」の成果を踏まえ、マイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化及び最先端の半導体技術による大幅な薄型・軽量化を図るための研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２６年度	平成３０年度	平成２７年度	平成３１年度	JSS
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
－	－	250,000	250,000	247,405

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

本研究開発で扱う技術仕様の設定と作業計画の設定を行った。また、これらに基づき、具体的な設計検討作業、解析作業、調査作業を開始し、個別要素技術についても検討を開始した。

個別要素技術	目標･指標(中間評価時点)	成果	達成度
送電系高効率化	高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。	高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針を明確にした。	達成
受電系高効率化	受電部高効率化に寄与する項目を抽出する。	受電部高効率化に寄与する項目を抽出し、研究開発目標を設定した。	達成
薄型･軽量化	送電部の大幅な薄型化を実現するために必要となる HySIC 技術の実現の見通しを得る。	整流デバイスの特性評価冶具の作製と評価を行い、整合回路の誘電体基板による電力合成器の試作を行い、有効性を確認した。 上記により HySIC 実現の見通しを得た。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し

＜共通指標＞

論文数
10

※論文数には、その他外部発表も含む。

総合評価概要

高出力増幅器（ＨＰＡ）を試作、世界最高水準を達成したほか、整流デバイスや電力合成器など周辺機器の基本設計を完了したことで、今後の技術開発に期待が持てる。また、無線送受電技術は地上産業への波及効果も期待できる。

一方で、これまでの研究開発で実現できた水準と将来の商用ＳＳＰＳに要求される効率及び送電部の厚さ、重量にはまだ大きな開きがある。現時点での達成した限界値を踏まえ、中途段階、例えば 5～6 年に実現を目指す数値目標も示して研究開発を進めるべきと考えられる。

なお、他分野での応用も将来の宇宙太陽光システムの開発に資する知見の拡大に寄与すると考えられることから、本事業で開発中の無線送受電技術については、産業応用に向けた理解の増進等の取組を進めるべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ）の技術開発については、地上の電力伝送だけに終わることがないよう、その実現に向けて、打ち上げコストも含めた検討を深めていくべきである。

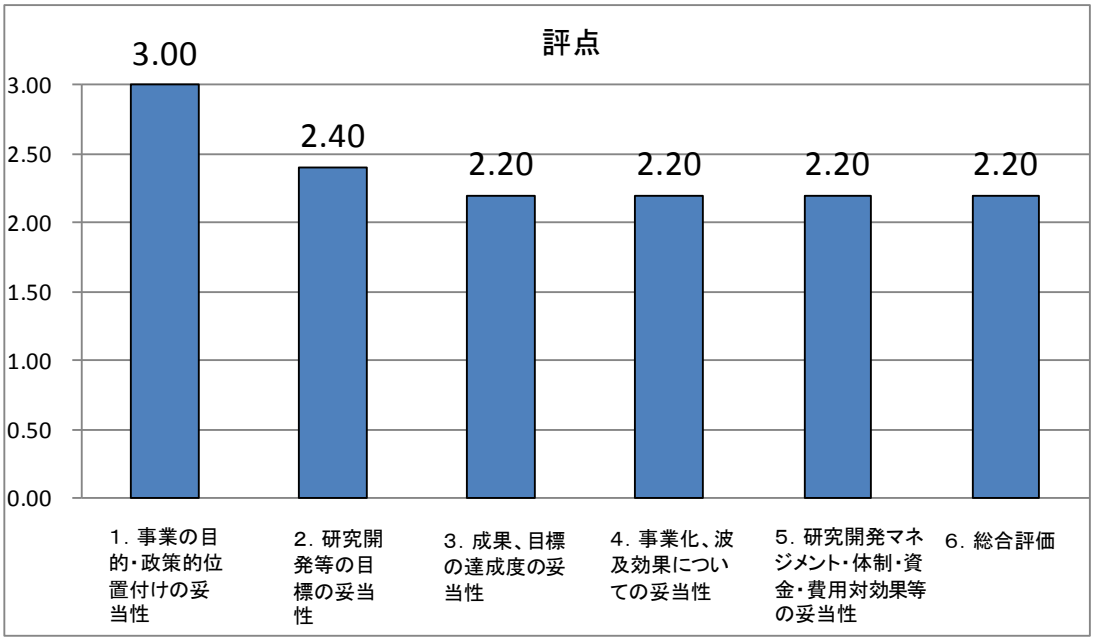
ＳＳＰＳの実現に向けて、送受電関連だけでなく、それを支える高電圧や絶縁などの基盤技術、電波伝送経路にあたる空間における環境との相互作用、生体への影響なども含めて研究開発を進め、社会として進めていける土壌を育てていく必要がある。

評点結果

評点法による評点結果

（K. 太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.00	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.40	1	3	3	2	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	1	2	3	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	1	2	3	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6. 総合評価	2.20	1	2	3	2	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｌ．空中発射システムの研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

小型衛星の打上げビジネスに係る国際市場を獲得するため、従来より低コスト、高効率かつ機動的に小型衛星を打上げることができる空中発射システムの実現に向けて、運用に不可欠な航空機からのロケット分離に係わる技術、将来の事業化を見据えた低コスト化に係る基盤技術の研究開発を行うとともに、民間打ち上げ事業展開に必要な法規制等に係る調査研究等の研究開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２１年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	JSS
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
149,152	324,901	－	841,367	838,492

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

将来の小型衛星需要動向を調査し、空中発射システムの構想検討を行うとともに、空中発射方式による打ち上げメリットを有効に引き出し、地上インフラを最小限にした上で、低コスト化を実現できる運用管制方式の構想を策定した。

空中発射システムは、プラットフォーム投下方式とし、投下システムの設計、投下シーケンスの検討等を行い、米国の専門企業による安全審査及び国内の詳細設計審査により、設計の妥当性を確認した。

打上げ運用管制は、インマルサットを利用した静止衛星経由の管制を行うこととして、インマルサットが開発中の小型衛星搭載用の通信端末 SB-SAT（SwiftBroadband for Satellite）をロケット用に改修することとして技術課題の抽出を行い、課題解決の対応策を明らかにするとともに、運用手順を策定した。

個別要素技術	目標･指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
１．空中発射システム運用構想	空中発射による衛星打ち上げ及び運用の構想検討を行い、技術的	空中発射による衛星打ち上げ及び運用の構想検討を行い、技術的	打上能力 150kg(高度 500km 極軌道)の空中発射システムとして、	達成

	成立性があり、将来の打ち上げ事業展開に資する低コストな空中発射システム運用構想を策定する。	成立性があり、将来の打ち上げ事業展開に資する低コストな空中発射システム運用構想を策定する。	輸送機を使用した投下方式、自律飛行、衛星経由の飛行管制方式など、将来の衛星打ち上げ市場参入を目指した、整合性のある空中発射システム運用構想を策定し、開発課題を明らかにすることができた。	
2. ロケット搭載/分離技術	空中発射システムに不可欠な、航空機にロケットを搭載する技術、高々度飛行中の航空機からロケットを安全に分離する技術、分離されたロケットの正常な飛行が可能なロケット点火のための姿勢安定に係わる技術を確認する。 また、投下技術の実証に必要な投下システムの設計、投下シーケンス及び投下試験計画について安全審査を含む詳細設計審査を終了させる。	空中発射システムに不可欠な、航空機にロケットを搭載する技術、高々度飛行中の航空機からロケットを安全に分離する技術、分離されたロケットの正常な飛行が可能なロケット点火のための姿勢安定化技術について、成立性を確認する。	将来の民間による商業打ち上げ市場参入を図るために、輸送機を使用したPDS方式を選定した。本方式に基づいた、打上能力解析において、150kg 以上の打上能力が達成できることを確認した。 また、技術の実証を行う、ダミーロケットを使用した高空落下試験の試験場所及び航空機に関して複数の候補の洗い出しができた。	達成
3. 運用管制技術	空中発射システムのメリットを最大限に引き出すとともに、将来の打ち上げ事業展開に不可欠な低コスト運用技術として、ロケットの自律飛行技術と商用衛星を利用した飛行管制技術課題を抽出し、対処方法を明らかにす	空中発射システムのメリットを最大限に引き出すとともに、将来の打ち上げ事業展開に不可欠な低コスト運用技術として、ロケットの自律飛行技術と商用衛星を利用した飛行管制技術の成立性を確認する。	自律飛行のためのGPS/INS を適用に関して、技術課題を明らかにすることができた。 また、衛星経由の通信システムとして、インマルサット社が開発中の低軌道周回衛星用の端末をベースにロケット用通信端末を検討す	達成

	る。		ることでインマルサット社と協力関係が構築でき、技術課題を明らかにすることができた。	
4．法規制調査	空中発射システムの実現に係わる、現行の国内法規制等の制約を整理する。 また、諸外国における民間打ち上げ事業展開に係わる法規制の洗い出しを行う。	空中発射システムの実現に係わる、現行の国内法規制等の制約を整理する。また、諸外国における民間打ち上げ事業展開に係わる法規制の洗い出しを行う。	空中発射システムの運用を航空法での対応で実施する場合の課題を明らかにすることができた。 また、民間打ち上げライセンスに係わる米国の状況等を明らかにすることができた。	達成
5．小型搭載電子機器技術	ロケット搭載電子機器の小型、軽量、低コストに必要な技術を明らかにする。	ー	アビオニクスの小型軽量化として、搭載電子機器の統廃合、機体ハーネス質量の軽量化のため機器間にシリアル通信の適用、電力制御装置の小型軽量化方策を示した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し

＜共通指標＞

論文数
11

※論文数には、その他外部発表も含む。

総合評価概要

空中発射システムは、衛星打ち上げの低コスト化、高効率化、打ち上げの自由度向上に資するものであり、システムを実現するための要素技術や法規制、海外動向調査などに関して調査・検討を行い課題の抽出をできたことは評価できる。

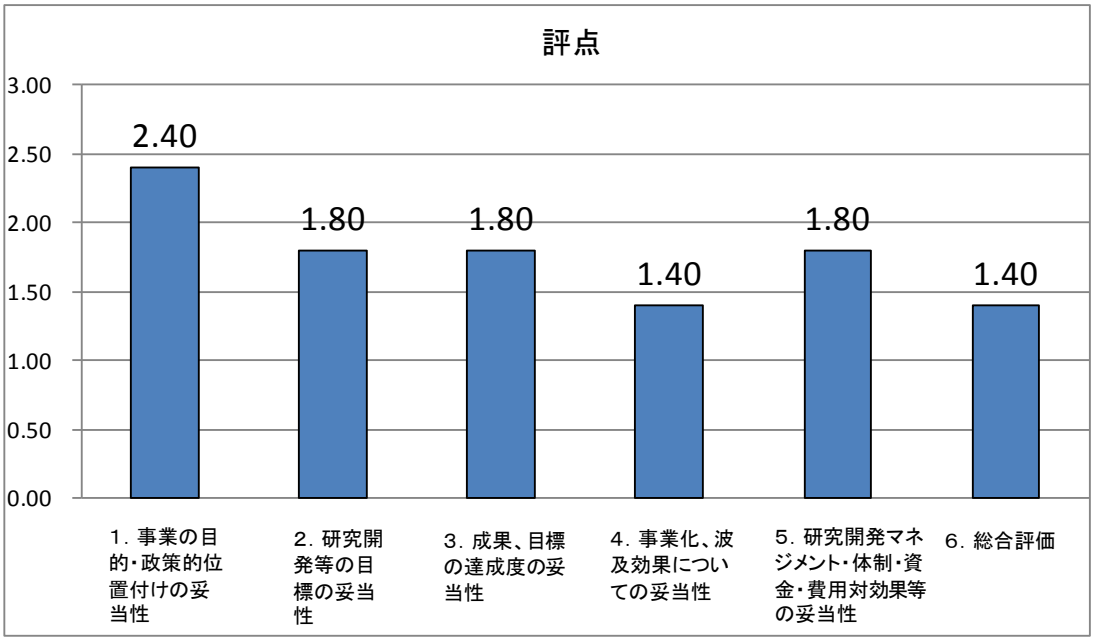
ただし、本事業では打ち上げの実証には至っておらず、本事業の核であるパラシュートの投下・展開・姿勢の確立までを実証に含めるべきであったと考える。試作試験など解決すべき事項はまだ多く残っている。また、機体の保守コストや駐機料など全体的なコストを比較し、ビジネスとして成立するかも検討すべきであった。

評点結果

評点法による評点結果

（L. 空中発射システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	3	3	3	0	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	1.80	2	3	2	1	1
3. 成果、目標の達成度の妥当性	1.80	2	2	2	0	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.40	2	2	2	0	1
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	1.80	2	2	2	1	2
6. 総合評価	1.40	2	2	2	0	1



第１章　評価の実施方法

第１章　評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」（平成２６年４月改定、以下「評価指針」という。）に基づき、実施した。

１．評価の目的

以下の（１）～（４）を目的として評価を実施した。

⑴ より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

⑵ より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上など、研究開発を効果的・効率的に推進すること。

⑶ 国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む技術に関する施策・事業の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

⑷ 資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を技術に関する施策・事業の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。また、研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等通じて次の段階に連続してつなげることなどにより、研究開発成果の国民・社会への還元の効率化・迅速化に資すること。

また、評価の実施に当たっては、以下の①～④を基本理念として実施した。

① 透明性の確保

推進課、主管課及び研究開発機関においては、積極的に成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

② 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部

評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

③ 継続性の確保

技術に関する施策・事業においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけではなく、評価とそれを反映した技術に関する施策・事業の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

④ 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な技術に関する施策・事業が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、技術に関する施策・事業の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけることのない費用対効果の高い評価を行うこと。

２．評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、技術に関する施策、技術に関する事業（プロジェクト等）の目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある５名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課宇宙産業室が担当した。

３．評価対象

技術に関する施策「宇宙産業プログラム」

技術に関する事業

Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２０年度から平成２６年度）

Ｂ．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（プロジェクト）
（平成２２年度から平成２８年度）

Ｃ．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発
（プロジェクト）（平成２４年度から平成２６年度）

Ｄ．可搬統合型小型地上システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２１年度から平成２６年度）
Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）
（昭和６２年度から平成２７年度）
Ｆ．石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）
（昭和５８年度から平成２８年度）
Ｇ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）
（平成１９年度から平成３３年度）
Ｈ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）
（平成２０年度から平成３３年度）
Ｉ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（ＳＡＲＶＩＳプロジェクト）
（プロジェクト）（平成１１年度から平成２９年度）
Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発（プロジェクト）
（平成２１年度から平成２６年度）
Ｋ．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト）
（平成２６年度から平成３０年度）
Ｌ．空中発射システムの研究開発（プロジェクト）
（平成２１年度から平成２６年度）

を評価対象として、研究開発実施者（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構、国立研究開発法人産業技術総合研究所、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、日本電気株式会社、株式会社パスコ、三菱重工業株式会社、株式会社三菱総合研究所）から提出された資料をもとに、技術に関する事業（プロジェクト）の評価を行うとともに、それらの事業評価の結果を踏まえて、各事業を俯瞰する形で各事業の相互関係等に着目し、技術に関する施策の評価を実施した。

４．評価方法

第１回評価検討会においては、担当課、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答が行われた。

第２回評価検討会においては、それらを踏まえて、第２５回産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成２１年１月）において審議・了承された「技術に関する施策評価」の評価項目（施策の目的・政策的位置付け、施策の構造及び目的実現の見通し、総合評価）、「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」に従い評価を実施し、今後の研究開発の方向等に関する提言をいただいた。技術に関する事業評価については、加えて３段階評点法による評価を行い、評価報告書（案）を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

５．評価項目

【技術に関する施策】

〇施策の目的・政策的位置付けの妥当性

・施策の目的の妥当性

・施策の政策的位置付けの妥当性

・国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

〇施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

・現時点において得られた成果は妥当性

・施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

〇総合評価

【技術に関する事業】

〇事業の目的・政策的位置付けの妥当性

・事業の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

・国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。

〇研究開発等の目標の妥当性

・研究開発等の目標は適切かつ妥当か。

〇成果、目標の達成度の妥当性

・成果は妥当か。

・目標の達成度は妥当か。

〇事業化、波及効果についての妥当性

・事業化については妥当か。

・波及効果は妥当か。

〇研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

・研究開発計画は適切かつ妥当か。

・研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

・資金配分は妥当か。

・費用対効果は妥当か。

・変化への対応は妥当か。

〇総合評価

第２章　技術に関する施策の概要

１．施策の目的・政策的位置付け

１－１　施策の目的

宇宙は国家の安全、経済、科学を担う戦略的分野であり、各国とも安全保障、国威発揚、技術開発のために国が主導して自国産業を育てている。また、宇宙の利用サービスは大幅に拡大しており、宇宙産業の裾野はますます広がっているほか、新興国を中心に衛星の需要も拡大しており、宇宙産業は今後も市場規模の拡大が見込まれる成長分野である。

経済産業省における宇宙産業プログラムの目的は、「国家の宇宙開発を支える基盤である宇宙産業について、我が国の持つ先端民生技術の強みを最大限活用し、重要基盤技術の研究開発を実施することで国際競争力の強化を図る」ものである。

平成２０年５月、これまでの宇宙開発利用の役割を科学技術中心から、国民の安全・安心、安全保障、産業振興等へ拡大すること等を目的に宇宙基本法（平成２０年法律第４３号）が成立した（同年８月施行）。

同法第４条では、

> 宇宙開発利用は、宇宙開発利用の積極的かつ計画的な推進、宇宙開発利用に関する研究開発の円滑な企業化等により、我が国の宇宙産業その他の産業の技術力及び国際競争力の強化をもたらし、もって我が国産業の振興に資するよう行われなければならない。

とされており、宇宙産業プログラムの目的は、宇宙基本法の目指すべき方向に沿ったものである。

宇宙基本法では、６つの基本理念として、宇宙の平和的利用、国民生活の向上等、産業の振興、人類社会の発展、国際協力等、環境への配慮が定められるとともに、１１の基本的施策として、国民生活の向上等に資する人工衛星の利用、国際社会の平和及び安全の確保並びに我が国の安全保障、人工衛星等の自律的な打上げ等、民間事業者による宇宙開発利用の促進、信頼性の維持及び向上、先端的な宇宙開発利用等の推進、国際協力の推進等、環境の保全、人材の確保等、教育及び学習の振興等、宇宙開発利用に関する情報の管理が定められた。

また、同法に基づき、宇宙政策を総合的・計画的に推進するための宇宙基本計画が平成２１年６月に策定され、同計画の中で、日本の宇宙政策を「研究開発主導から高い技術の上に立った利用ニーズ主導に転換」することが明示的に謳われた。

その後、我が国宇宙産業を取り巻く環境が大きく変化したことを踏まえ、平成２７年１月に本計画が改訂され、宇宙開発利用の推進に関して以下の目標が

掲げられた。
「宇宙を活用した地球規模課題の解決と安全・安心で豊かな社会の実現」
「関連する新産業の創出」
「宇宙産業関連基盤の維持・強化」
「価値を実現する科学技術基盤の維持・強化」

本プログラムでは、宇宙基本法で示された６つの基本理念と１１の基本的施策、そして宇宙基本計画で示された４つの目標に沿って、別紙１のロジックツリーのとおり施策における課題技術を体系的に整理し、施策実現に向けて取り組んでいる。

なお、宇宙基本計画では、宇宙開発利用で実現を目指す社会的ニーズとして次のものが挙げられている。

・公共の安全の確保（災害時の情報把握、気象予報等）
・国土保全・管理（地図作成、国土変化の把握等）
・安全保障
・食料供給の円滑化（衛星画像による作柄の把握等）
・資源・エネルギー供給の円滑化（資源探査等）
・地球規模の環境問題の解決
（地球上の温室効果ガスの分布の把握、宇宙太陽光発電等）
・豊かな国民生活の質の向上（正確な位置情報の提供等）
・世界をリードする科学的成果の創出等
・持続的な産業の発展と雇用の創出（宇宙産業の競争力強化等）

経済産業省においては、人工衛星の軽量・低コスト化、より精密なリモートセンシング技術の開発等の施策を実施することで、国際競争力の強化、宇宙利用の拡大を図っており、このような現在の施策の方向性は、上記のニーズを満足するものである。

１－２　政策的位置付け

前述した宇宙基本法及び宇宙基本計画の他、次のような基本計画等に位置付けられている。

〇第４期科学技術基本計画（平成２３年８月１９日閣議決定）
国家存立の基盤を保持するため、国の安全保障や安全な国民生活の実現等につながる宇宙輸送や衛星開発及び利用に関する技術の研究開発を推進すること。また、グリーンイノベーションを推進するための再生可能エネルギー技術の研

究開発として、宇宙太陽光発電など新たなブレイクスルーとなり得る革新的技術の獲得を目指すこと。我が国の産業競争力強化のため、我が国の強みを生かした新たな産業基盤の創出に向けて、統合的システムの構築や、保守、運用までも含めた一体的なサービスの提供に向けた研究開発を、実証実験や国際標準化と合わせて推進するとともに、これらの海外展開を促進する旨、記載されている。

〇日本再興戦略（平成２６年６月２４日閣議決定）
　宇宙利用の拡大に資するべく、衛星の開発等に関する優先順位や民間企業からの関連利益の還元方策の在り方等を含め、官民それぞれの役割分担の下、効率的かつ効果的な衛星などの宇宙インフラの開発、整備、運用等に係る中長期のビジョンを検討する。

〇エネルギー基本計画（平成２６年４月１１日閣議決定）
　人工衛星等の宇宙情報インフラやエネルギー関連施設・機器の状況を把握するセンサー等を用いたシステムを通じて、災害の予兆や災害発生後の国土・施設の状況を迅速に把握することができる情報システムを積極的に活用していくことで、供給サイドの更なる強靱化を図る。
　宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ）の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。

〇地理空間情報活用推進基本計画（平成２４年３月２７日閣議決定）
　実用準天頂衛星システムの海外展開を推進するため、産業界と連携を図りながら、国際標準化等の環境整備を進めつつ、実用準天頂衛星システムの測位信号の監視局の設置・運用、人材育成、アジア太平洋地域に共通する人口密集、交通渋滞、地震や津波などの自然災害等の課題に対応する実用準天頂衛星システムを用いた各種アプリケーション等に関する国際協力を総合的に進める。

　海外では、重要な実績を持つ欧米に加えて、近年急速に技術力をつけてきた中国や韓国等も途上国を中心とする宇宙新興国の市場へ進出を進めており、国際競争力はさらに激しくなると見込まれている。我が国としても、今後は宇宙新興国の市場に重点を置き、特に、今後宇宙新興国を中心として需要の拡大が見込まれる地球観測衛星について、機器とサービスのパッケージを提供する形で市場参入を進めていくことが重要となっており、我が国の施策もこれらの動向に沿ったものである。

１－３　国の関与の必要性

宇宙は国家として戦略的な開発利用を行う必要があること及び特殊な環境に置かれていることから、次のとおり法律等において国の積極的な関与が求められている。

〇宇宙基本法（平成２０年５月制定）
第８条（国の責務）

国は、第二条から前条までに定める宇宙開発利用に関する基本理念にのっとり、宇宙開発利用に関する総合的な施策を策定し、及び実施する責任を有する。

第１６条（民間事業者による宇宙開発利用の促進）

国は、宇宙開発利用において民間が果たす役割の重要性にかんがみ、民間における宇宙開発利用に関する事業活動（研究開発を含む。）を促進し、我が国の宇宙産業その他の産業の技術力及び国際競争力の強化を図るため、自ら宇宙開発利用に係る事業を行うに際しては、民間事業者の能力を活用し、物品及び役務の調達を計画的に行うよう配慮するとともに、打上げ射場（ロケットの打上げを行う施設をいう。）、試験研究設備その他の設備及び施設等の整備、宇宙開発利用に関する研究開発の成果の民間事業者への移転の促進、民間における宇宙開発利用に関する研究開発の成果の企業化の促進、宇宙開発利用に関する事業への民間事業者による投資を容易にするための税制上及び金融上の措置その他の必要な施策を講ずるものとする。

経済産業省においては、将来の民間企業による国際市場への展開（商用段階）を視野に入れつつ、必要な取組を行っている。（例：小型化等による先進的宇宙システムの研究開発）

また、経済産業省が宇宙産業の施策を推進するにあたっては、必要に応じて、文部科学省、ＪＡＸＡ等との関係省庁・機関との情報、意見交換等を通じた連携を行っている。例えば、太陽光発電無線送受電技術の研究開発においては、経済産業省及び独立行政法人宇宙航空研究開発機構（ＪＡＸＡ）におけるこれまでの宇宙太陽光発電に関する調査研究や研究開発の成果を活かし、経済産業省はマイクロ波ビームを所定の方向に正確かつ効率的に送電制御する技術の研究開発を、ＪＡＸＡはパイロット信号の到来方向にマイクロ波ビームを指向制御する技術の研究開発を実施するなど、双方が役割分担のうえ連携協力して実施している。

資源探査分野においては、ＪＡＸＡと共同で開発したＰＡＬＳＡＲセンサについて、その運用を連携して実施するとともに、観測計画については、関係省庁・機関も含めた会議を開催し、検討を行った。

また、ハイパースペクトルセンサ等の研究開発においては、国際宇宙ステーションへの搭載を予定しており、インターフェース調整等の検討を重ねながら、開発を進めている。

２．施策の構造及び目的実現の見通し

２－１　得られた成果

これまで経済産業省において実施された主な成果は、次のようなものが挙げられる。

〇小型化等による先進的宇宙システムの研究開発

高性能な小型衛星を短期間に低コストで実現するため、大型衛星に劣らない機能を維持しつつ、低コスト、短納期を実現する高性能小型衛星の開発技術を獲得することを目的としており、先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立、標準的小型衛星バスの開発、搭載ミッション機器の開発を行い、平成２６年１１月に本事業において開発した「ＡＳＮＡＲＯ－１」衛星の打上に成功し、宇宙実証を実施している。

〇超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発

我が国の宇宙産業の国際競争力を強化するため、高分解能なＸバンド合成開口レーダを搭載する、小型で低コストな高性能地球観測衛星（レーダ衛星）の開発を目的とし、平成２８年度からの宇宙実証に向け、低コスト、短納期、高性能を実現する小型レーダ衛星の設計を完了した。

〇小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発

（１）複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

我が国が保有する衛星システムにおけるコンステレーション衛星運用をコアとして、将来、日本製衛星システムを保有する各国のシステムとも連携を可能とする統合運用システムの研究開発を行い、複数の衛星が必要に応じて有機的に連携し、参加した全てのリソースを最大限活用し運用可能な衛星コンステレーションシステムに求められる機能・性能要求を分析し、システム仕様を確定した。

（２）画像自動判読システムの研究開発

衛星コンステレーションから得られる大量の衛星画像に対して、利用者が必要とする地物の自動判読を高速に実施し、利用者に判読結果を最適な形で提供するためのシステムを開発することを目的とし、高速で高精度の判読が可能な画像自動判読システムの開発を行うとともに、判読ロジックの開発に必要なデータベースの構築を行った。

〇可搬統合型小型地上システムの研究開発

「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」における高性能小型衛星の開発に合わせ、衛星の追跡管制やデータ受信処理システムの小型化、低コスト化、高性能化、運用の省力化を実現する効率かつ利便性の高い地上システムについて研究開発を実施するとともに、高性能小型衛星を活用した技術実証を行うもので、可搬統合局の開発、画像統合運用システム及び画像高速処理システムの開発、先進的地上システムの開発を行い、統合的な機能を有した可搬統合局の開発及び効率的活利便性の高い地上システムを実現するとともに、高速かつ利便性の高い画像処理システムを開発した。

〇極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発

極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ＡＳＴＥＲ）については、昭和６２（１９８７）年度の調査研究から平成１１（１９９９）年度の設計、製造・試験までの１３年間に亘る機器開発期間を経て軌道上に打上げ後、平成１２（２０００）年度のミッション運用開始から平成２７（２０１５）年の継続運用に至る通算２９年間の長期事業であり、今年で１６年目となるＡＳＴＥＲミッション運用も所期の目標を達成し十分な実績と成果を得た。

打上げ以降、ＡＳＴＥＲセンサによるターゲット観測数は約２７５万シーンを達成しており、遠隔探知のデータ利用に供する高次プロダクトをユーザに提供した。

データ利用の具体的な成果としては、資源探査・有望値抽出の実利用によるリビア、インドネシア等の日本企業石油鉱区獲得やＡＳＴＥＲデータの一般ユーザへの利用拡大、及び全球の標高データセット（ＡＳＴＥＲ　ＧＤＥＭ）を作成した。

〇石油資源遠隔探知技術の研究開発

ASTER および PALSAR データによる、石油ガス鉱床の地表・貯留構造の状況に応じた利用技術、非在来型資源・生産管理監視等への利用技術等について、合計57件の利用技術および事例を開発し、資源ユーザの要望するほぼ全てのケースを網羅した。また資源・地球環境・防災等の課題に必要な情報を抽出する解析アルゴリズムを合計66件開発し、利用に必要な解析手法をほぼ網羅した。

ASTER 及び PALSAR とも、地上システムの運用によって、ユーザの要求に対応した観測計画の作成、観測データの全量入手・保存、標準・高次プロダクトの生産・配付数の目標を満足した。また運用期間中に実施した校正検証結果から、定められた精度を維持したことが確認された。

さらに次世代アーカイブシステムに ASTER 全量と PALSAR の一部のデータの保存が完了し、次世代プロダクトとして全球DEMをはじめとした広域をカバーしたマップの

作成を完了した。

〇ハイパースペクトルセンサ等の研究開発
　ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサについて、平成２３年度から平成２６年度にかけて、構成するコンポーネント及びセンサシステムの詳細設計を行い、詳細設計審査会（CDR）において、最終目標性能を達成可能であることを確認した。
　また、平成２３年度から平成２６年度にかけて、両センサを構成するコンポーネントのフライトモデルを製作し、軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性、電磁適合性等を含む試験により、宇宙用としての品質を確認した。
　さらに上記コンポーネントを用い、両センサのフライトモデルの組立を開始した。

〇次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発
　エネルギー・資源分野、農業分野、環境分野、森林分野等における実利用化のための解析技術の手法開発と、HISUI シミュレーションデータによる実証により手法の有効性の確認・検討を行うとともに、スペクトルライブラリの整備を開始した。また、ハイパースペクトルデータ利用者に高品質・高精度で実用可能なプロダクトを継続して提供可能とするため、センサ校正・データ処理・運用計画策定等からなる地上システムに必要な技術の開発を行った。

〇宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業＜ＳＥＲＶＩＳプロジェクト＞
　実証衛星 2 号機は平成 22 年 6 月 2 日に打ち上げられ、平成 23 年 6 月 3 日に宇宙実証試験を終了した。これまでの地上模擬試験の結果、及び上記 2 回の宇宙実証試験の結果を反映し、第二次の民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築した。また、実証衛星 3 号機等による宇宙実証試験に向けて、新たに最新の民生部品・民生技術の地上模擬試験を実施し、これらを適用した実験装置等を開発している。更に衛星システムの統合化も検討した。

〇太陽光発電無線送受電技術の研究開発
　将来の宇宙太陽光発電システムの中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えたマイクロ波送受電技術の研究開発を行った。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行い、また、当該技術の地上での応用を図った。

〇太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発
　将来の新エネルギーとしての宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ：Space Solar

Power System）の実現に向け、その中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術に係る研究開発を行うことで、当該技術の高度化を図るため、宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成、マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発、マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査を行った。

〇空中発射システムの研究開発

従来のロケットによる打上げシステムと比較し、低コスト、高効率かつ機動的に小型衛星を打上げることができる先進的打上げシステムを確立することにより、海外衛星打上げ市場における優位性を獲得し、小型衛星の打上げビジネスに係る国際市場の獲得を目指すもので、空中発射システムの運用構想の策定、ロケット搭載・分離システムに係る技術の確認及び投下技術の実証に必要な安全審査並びに詳細設計審査の実施、運用完成技術における技術課題の抽出及び対処方法の検討を行った。

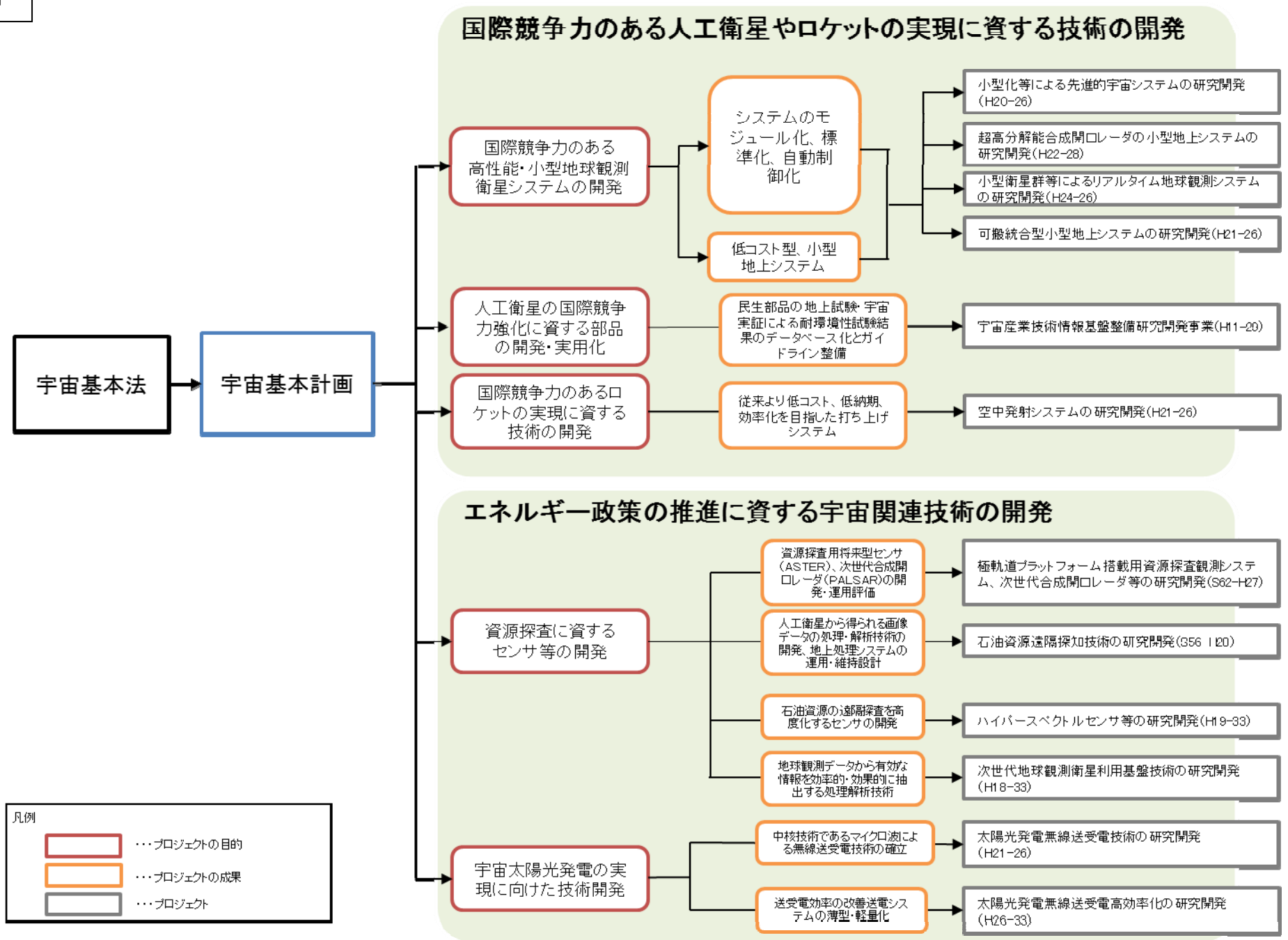
このように国際競争力強化のため、各分野においてこれまでも様々な成果を挙げてきたところであるが、今後もこれまで同様に成果を得られるよう事業を実施していく。

２－２　施策の構造

経済産業省のプロジェクトについては、衛星やロケットといった宇宙機器の開発、衛星に搭載され資源探査や災害対応等に用いられる地球観測センサ及びその利用技術の開発、さらには将来のエネルギー確保の手段として期待される宇宙太陽光発電に関する技術開発など、様々な事業を実施している。これらの事業は、民間においてリスクが高く手を出すのが難しい実証機の開発や機器・部品等の宇宙実証を中心としたものであり、他の事業の成果を活用しながら切れ目なく実施しているところである。

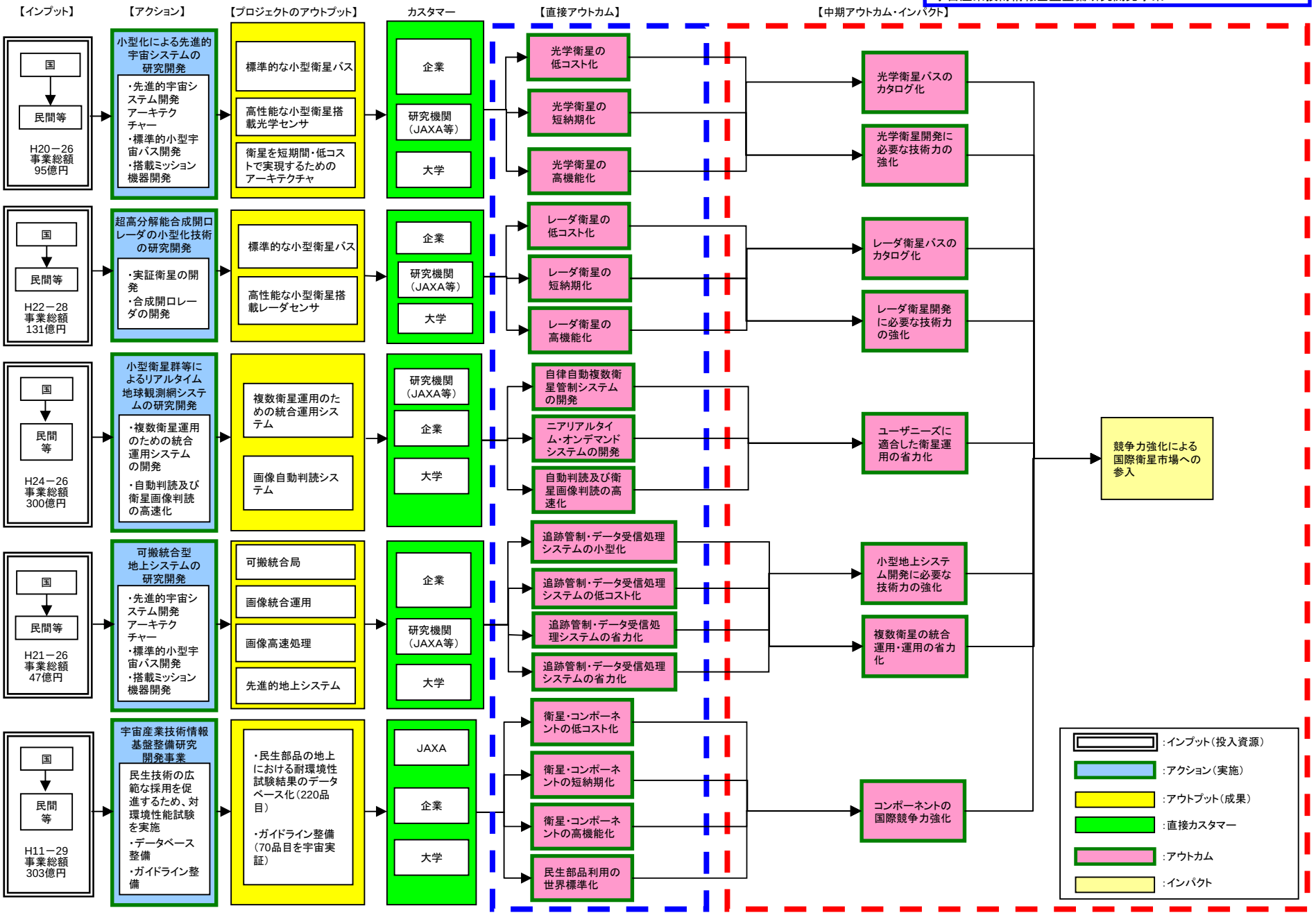
施策の構造については、別紙１のロジックツリー及び別紙２のロジックモデルを参照されたい。

別紙１

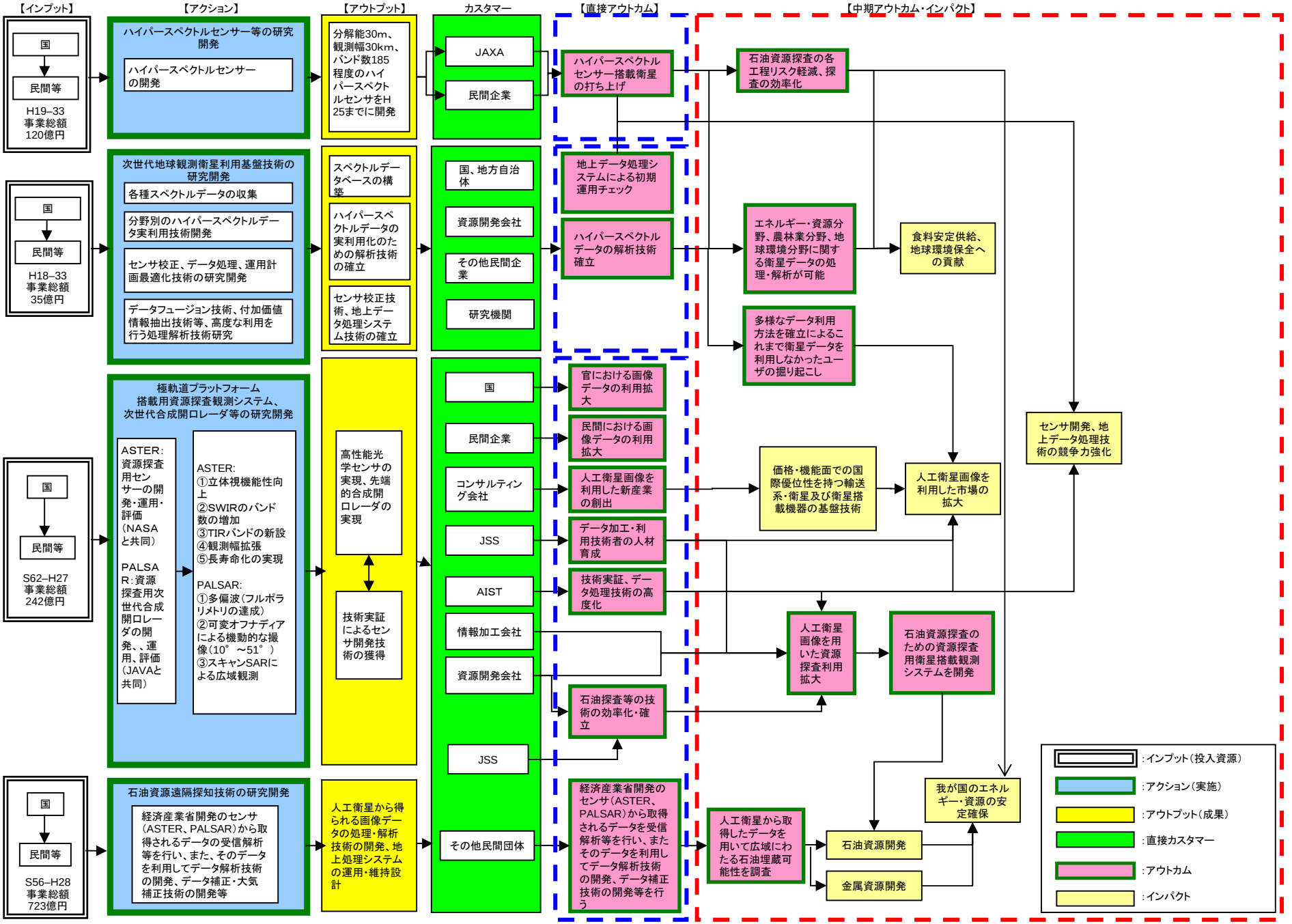

国際競争力のある人工衛星やロケットの実現に資する技術の開発
宇宙基本法
宇宙基本計画
国際競争力のある高性能・小型地球観測衛星システムの開発
システムのモジュール化、標準化、自動制御化
低コスト型、小型地上システム
小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（H20-26）
超高分解能合成開口レーダの小型地上システムの研究開発（H22-28）
小型衛星群等によるリアルタイム地球観測システムの研究開発（H24-26）
可搬統合型小型地上システムの研究開発（H21-26）
人工衛星の国際競争力強化に資する部品の開発・実用化
民生部品の地上試験・宇宙実証による耐環境性試験結果のデータベース化とガイドライン整備
宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（H11-20）
国際競争力のあるロケットの実現に資する技術の開発
従来より低コスト、低納期、効率化を目指した打ち上げシステム
空中発射システムの研究開発（H21-26）
エネルギー政策の推進に資する宇宙関連技術の開発
資源探査に資するセンサ等の開発
資源探査用将来型センサ（ASTER）、次世代合成開口レーダ（PALSAR）の開発・運用評価
極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発（S62-H27）
人工衛星から得られる画像データの処理・解析技術の開発、地上処理システムの運用・維持設計
石油資源遠隔探知技術の研究開発（S56 I20）
石油資源の遠隔探査を高度化するセンサの開発
ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（H19-33）
地球観測データから有効な情報を効率的・効果的に抽出する処理解析技術
次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（H18-33）
宇宙太陽光発電の実現に向けた技術開発
中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立
太陽光発電無線送受電技術の研究開発（H21-26）
送受電効率の改善送電システムの薄型・軽量化
太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（H26-33）
凡例
・・・プロジェクトの目的
・・・プロジェクトの成果
・・・プロジェクト

別紙２

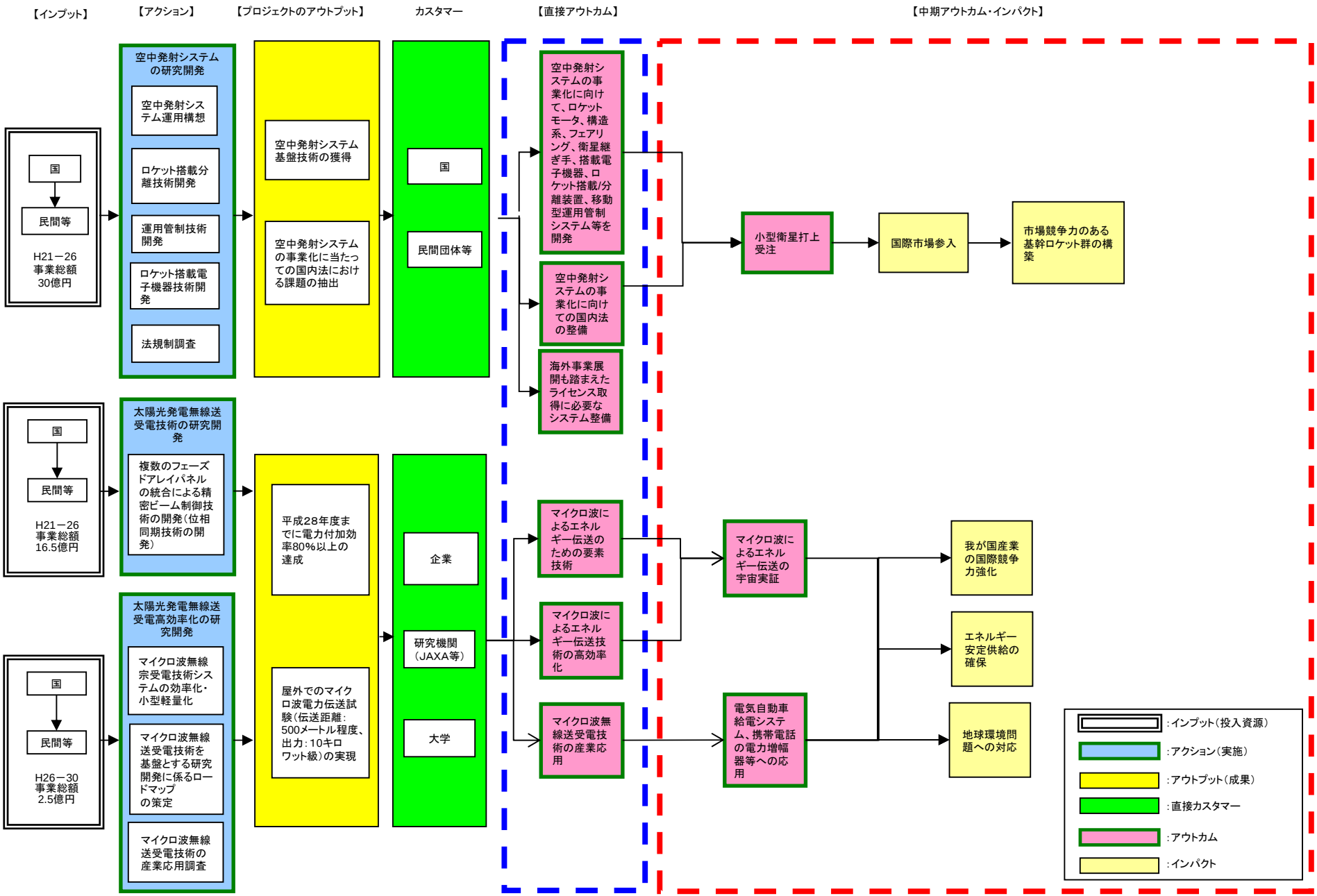
小型化による先進的宇宙システムの研究開発
超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発
小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発
可搬統合型小型地上システムの研究開発
宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業



極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発／石油資源遠隔探知技術の研究開発／ハイパースペクトルセンサ等の研究開発／次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発



空中発射システムの研究開発
太陽光発電無線送受電技術の研究開発
太陽光無線送受電高効率化の研究開発



第３章　技術に関する事業の実施状況
（平成２３～２６年度）

Ａ　小型化等による先進的宇宙システムの研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構
日本電気株式会社

Ａ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ａ－１－１　事業の目的

我が国宇宙産業は、宇宙機器産業から利用サービス、ユーザー産業群まで含めると、総額7兆円を超える一大産業となっているが、これまでの我が国宇宙システムの商業受注実績はごくわずかであり、国際競争力は十分でない。また、衛星等の部品やコンポーネントについては、我が国企業も技術的ポテンシャルを有するものの、宇宙実証の機会が少ないことから、国際競争力のある分野はごく限定的である。

我が国宇宙産業の国際競争力が十分でない原因は、従来の衛星の設計思想が大型で新規開発を追及するあまり、商業需要に応えるために最も重要な実績作りや低コスト化・短納期化を疎かにしてきた結果、性能とコストが見合わないことである。これを克服するには、世界の潮流である衛星の小型化により、大型衛星に性能が劣らないで、低コスト化・短納期化を実現することが重要となる。

本事業は、高性能な小型衛星を短期間に低コストで実現するための新たな衛星システム開発アーキテクチャ（設計思想）を確立するとともに、これら設計思想や中小企業等の優れた民生技術を導入し、大型衛星に劣らない機能を維持しつつ、低コスト、短納期を実現する高性能小型衛星の開発技術を獲得することを目的としており、これが達成されれば、我が国宇宙産業の国際競争力が強化され、国際衛星市場への参入（国際産業協力、ODA案件形成）、政府衛星の計画的かつ効率的な開発・調達（科学衛星等への活用、先端民生部品・技術の実証機会の提供）、新たな衛星システム運用への展開（複数機運用による広域観測や高頻度観測等）等の実現が期待される。

Ａ－１－２　政策的位置付け

関連する閣議決定等における位置づけを以下に示す。

〇宇宙基本計画（平成 21 年 6 月宇宙開発戦略本部決定）第 3 章　1 (1) A ②より抜粋

アジア地域の高頻度・高分解能での観測を目指して、光学、レーダセンサについて高分解能の性能を低コストで実現する戦略的な小型衛星（ASNARO（仮称））について、民間とのパートナーシップも想定した人工衛星の研究開発を進め、まず光学センサを搭載した小型光学実証機を打ち上げ、技術実証を推進する

〇日 ASEAN 首脳会合議長声明（平成 23 年 11 月 18 日）抜粋

The ASEAN leaders appreciated the progress of establishment of the ″Disaster Management Network for the ASEAN Region″, which Japan had proposed on the occasion of the ASEAN-Japan Foreign Ministers’ Meeting in July 2011.

ASEAN and Japan leaders, reaffirmed our determination to continue exploring effective use of science and technology such as satellite system as well as jointly developing the regional network for disaster preparedness and disaster relief with AHA Centre in the hub through the ″Disaster Management Network for the ASEAN Region.″

〇宇宙基本計画（平成 25 年 1 月宇宙開発戦略本部決定） 3-1 B (4) ②より抜粋

具体的には、我が国衛星技術の強みをいかした「ASEAN防災ネットワーク構築構想」に賛同するアジア各国と共同でリモートセンシング衛星のコンステレーションを整備し、我が国のみならずアジア全体でのリモートセンシング衛星の利用拡大を図る。本コンステレーションの整備に当たっては、現在開発中のASNARO1、2等も含める方

向で検討する。

〇新宇宙基本計画（平成 27 年 1 月宇宙開発戦略本部決定）4（2）①ⅱ）より抜粋

現在開発中の災害予防・対応、地球環境観測や資源探査のための取組を着実に進める。今後、上記以外の新たなリモートセンシング衛星の開発及びセンサ技術の高度化に当たっては、我が国の技術的優位や、学術・ユーザーコミュニティからの要望、国際協力、外交戦略上の位置づけ等の観点を踏まえ、地球規模課題の解決や国民生活の向上への貢献など、出口が明確なものについて優先的に進める。

この他にも、平成 22 年 6 月 1 日にとりまとめられた産業構造ビジョン、新成長戦略（平成 22 年 6 月 18 日閣議決定）、宇宙分野における重点施策（平成 22 年 5 月 25 日宇宙開発戦略本部決定）等においても同様の記載があり、我が国の小型化技術を活用した小型衛星により高頻度な観測を可能とする地球観測衛星網を整備・運用することが重要であり、ベトナムをはじめとした ASEAN 防災ネットワークを構築しリアルタイムの衛星画像提供市場の創出を目指す。

Ａ－１－３　国の関与の必要性

宇宙システムは、一般的に極限環境下で極めて高い信頼性が求められ、その研究開発や宇宙実証には多額の費用を要すること、また、我が国宇宙産業は欧米と比べ官需依存度が高いこと等から、リスクが高く、かつ、直接利益に結びつかない衛星の研究開発や宇宙実証を民間企業のみで実施することは困難であることから、我が国が有する民生技術の強みを最大限活用するとともに、政府による衛星・ロケット等の計画的な開発・調達を通じて、我が国宇宙産業の国際競争力の強化に必要なこれら研究開発や宇宙実証の機会を提供することが必要不可欠である。特に、衛星の小型化、低コスト化、短納期化を実現するための新たな設計思想を確立するためには、実際にその設計思想に基づき、衛星の試作機を開発・試験し、軌道上実証を行うことが必要不可欠であるため、政府による研究開発事業の実施が必要となる。

Ａ－２　研究開発目標

Ａ－２－１　研究開発目標

本プロジェクトは、国際競争力の強化のため、我が国の強みである民生部品及び民生技術等を適用した高機能、低コスト、短納期な、小型化等による先進的宇宙システムの開発技術を確立することを目的とする。

世界市場へ我が国の産業界による高機能、低コスト、短納期小型衛星の早期展開の実現を目指して、我が国の宇宙関係機関、企業、大学等の技術を集結し、小型化等による高機能、低コスト、短納期に資する先進的宇宙システムのアーキテクチャを構築するとともに、小型衛星の技術開発を通して、すぐに作れてすぐ使える即応型宇宙システム技術の構築を行う。これらの成果は、我が国の産業界に公開し共有することにより、宇宙産業の活性化、裾野の拡大、国際競争力強化を図る。

衛星バスは、広範なミッションへの対応の他、機能の増設、性能向上等が可能な拡張性を持たせる。また、搭載ミッションは、地上分解能（GSD：Ground Sampling Distance 光学センサの一画素の大きさ）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック＜広帯域スペクトラムによる高分解能白黒画像＞）を目標とする可視光地球観測センサの開発を行う。これにより、諸外国の最先端技術に比肩する、バス質量 300kg 程度以下の小型地球観測衛星の開発技術を獲得する。

平成 20 年度から平成 22 年度までは独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（当時。現在、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO という）の委託を受け「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」（衛星名としては以下、ASNARO：＜Advanced Satellite with New System ARchitecture for Observation＞ という）として、日本電気株式会社（以下、NEC という）と財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構（当時。現在、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構。以下、「機構」という）にて研究開発を行なった。平成 23 年度より経済産業省に全面的に移管し、経済産業省が別途委託する「可搬統合型小型地上システムの研究開発」の委託事業者である株式会社パスコ（以下、「パスコ」という）と連携・協力し小型衛星でも最新の市場の需要にこたえることのできる衛星システムを目指し、地上・宇宙総合システムの開発を行った。

Ａ－２－２　全体の目標設定

表 A-2-2-1　全体の目標

項目	目標・指標	設定理由・根拠等
総合システム	地上・宇宙総合システムとしての開発を行う。	METI 事業として地上系（可搬統合型小型地上システムの研究開発）との整合をはかり、付加価値の高い地上・宇宙総合システムを実現する必要がある。
新しい仕組み	先進的宇宙システムのアーキテクチャを構築する。	従来からの宇宙産業だけではなく、中小企業や新規参入企業を含めた業界全体を活性化することで国際競争力を強化する必要がある。
短納期の仕組み	再製造の場合に 2 年間で製造・試験実施を可能とする。	2 年間で製造試験ができることで国際競争力強化可能を確保できる。
自動自律運用	人間の判断無しで 1 週間以上のバスの自動自律運用を実現する。	省力化による運用費用削減が可能になる。
小型衛星バス	バス質量 300kg 程度以下の小型地球観測衛星を開発する。	小型衛星バスとして各種ミッション機器に対応しやすい規模（適切な電力と姿勢制御可能）として 300kg のバス質量を設定した。
高性能光学センサ	地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック）を目標とする可視光地球観測センサを開発する。	諸外国の中型大型の先進光学観測衛星に比肩する性能をもつことで、国際競争力を確保する必要がある。
宇宙実証	軌道上実証を実現する。	軌道上実証により実績と信頼性評価が得られ、競争力が強化される。

Ａ－２－３　個別要素技術の目標設定

表 A-2-3-1　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
（1）先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立		
ネットワーク導入	・オープンアーキテクチャの採用により、衛星バスのプロトコル、サブシステム、機器間等のインタフェースの標準化を推進する。 ・スペースワイヤ（SpW）試験センタを実現する。	インタフェースの標準化・機器接続の共通化を促進することで、機器の低コスト化・高信頼性化、試験期間の短縮、新規企業参入の容易化が実現できる。
熱構造電気ｲﾝﾀﾌｪｰｽ基準の設定	搭載機器インタフェース仕様を衛星システム/衛星機器メーカ固有のものでなく標準化する。	宇宙分野への国内中小企業や新規参入企業の機器の参入障壁を減らし、宇宙産業の規模の拡大が実現できる。
民生部品採用基準の設定	使用される軌道での宇宙環境、運用年数を考慮した評価を実施出来るようにスクリーニング試験項目や試験条件等の基準を策定する。	宇宙環境を事前に印加することにより、宇宙での活用可否を評価する。
民生機器採用方針設定	民生部品や技術を使用している機器について、スクリーニング試験や耐放射線性の試験方法の方針を設定する。	最先端技術を宇宙で活用することで、低価格、高機能化を実現することが可能になる。
民生品利用における信頼性/信頼度の考え方	小型衛星に適用可能な信頼性保証手法を確立する。	従来の衛星開発で実施された信頼性保証手法では民生品を使う小型衛星では直接適用できないため、対応が有効である。
試験検証の考え方	開発着手 2 年で組み立て試験が完了する仕組みとしての試験検証を確立する。	低コスト・短工期の衛星バス製造を実現するためには、従来とは異なる考え方が必要である。
自動自律化による運用の省力化	衛星運用システム全体から見た自動化・自律化能力の向上を実現する。	省力化・効率化を実現し、コストダウンを図るためには自動化・自律化が有効である。
ﾈｯﾄﾜｰｸによるどこでも運用	場所に依存しない運用形態の構想検討を行う。	地理的に分散した人員が、ネットワークを利用して衛星情報にアクセスしてミッションを運用することで、柔軟な衛星運用が可能になる。
（2）標準的小型衛星バスの開発		

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
①衛星システム及び衛星バスの開発	質量 300kg 以下の小型衛星バスの低コスト・短期開発を実現する。	JAXA との共同研究にて効率的な開発を実施する。
ア、衛星システム及び衛星バス設計	衛星システム（システム性能、機器配置、全体コンフィギュレーション、質量配分、電力配分等）およびバス設計（構成、ネットワーク構成、熱/構造設計等）を実施する。	質量 300kg の小型衛星バスおよびシステムの設計を具体化する必要がある。
イ、衛星バス製造・試験	衛星バスの構成要素（コンポーネント、バス構造部/電気部）の製造および試験を実施する。全機器の製造試験を実施する。	設計した衛星バスを製造し、試験を実施する必要がある。
ウ、衛星システム総合試験	システム総合試験の実施を打ち上げ前に実施する。	軌道上評価前に地上で可能な限りの事前評価することは有効である。
エ、衛星ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽの整備	衛星運用時に適用する衛星データベースを構築する。	テレメトリデータを意味のある工学値に変換するためには不可欠である。
②システム解析	宇宙実証の解析により事後確認を実施する。	システム解析を行い設計、試験結果の妥当性を検証する。
③運用性向上	撮像性能、運用性に優れた機能・方式を実現する。	ハードウエアの追加なしに、運用性を向上させることは、衛星の競争力強化のために有効である。
(3)搭載ミッション機器の開発		
①光学センサ設計	高度 500km から分解能（GSD）0.5m未満を実現する光学センサを実現し実証する。	衛星の国際競争力強化のためには、海外の大型衛星に比肩する性能を目標にする必要がある。
②光学センサ用LSI設計・試作・実装	光学センサ系 SOI（Silicon On Insulater）製造プロセスを使用した光学センサ用 LSI を実装する。	宇宙環境における信頼性確保のために有効である。
③直接伝送系設計	800Mbps の高速画像伝送を可能にする直接伝送系を実現する。実用化のための符号化も実装する。	実用衛星として国際競争力を持たせるためには、高速データ伝送と符号化が必要である。
④ミッション制御部設計	ミッション制御部を実現する。	地上からの指令により適切なミッション運用を実現するために有効な開発が必要である。
⑤ミッショ	各ミッション機器を製造し搭載	設計したミッション機器を製造し、試

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
ン機器製造・試験	品の製造・試験を実施する。	験を実施する必要がある。
⑥ミッション総合試験実施	ミッションを組み合わせた総合試験を実施する。	全体のシステム試験の前にミッションの総合試験は必要である。
(4)宇宙実証		
①打ち上げ機候補洗い出し	各種ロケットとの適合・不適合を明確化する。	事前に入手可能な公開資料あるいは、ロケットサービスプロバイダ情報から対応可能な環境条件を把握する。
②打ち上げ機選定	打ち上げ機とのインタフェース調整および打ち上げを実施する。	期間・費用・環境条件等に整合する最適打ち上げ機を選定する必要がある。
③宇宙実証	総合システムの軌道上実証を行う。	衛星の宇宙実証および衛星と地上を組みわせた総合システムの軌道上実証が必要である。

Ａ－３　成果、目標の達成度

Ａ－３－１　成果

Ａ－３－１－１　全体成果

地上・宇宙総合システムの開発および実現に関しては、宇宙機側である「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」担当（機構、NEC）と地上システムである「可搬統合型小型地上システムの研究開発」担当（パスコ）とで、合同調整会議および細部技術検討を行う分科会により「総合システム開発仕様書」を平成 23 年 3 月に制定した。以降、同会議・分科会にて情報共有・検討を行いつつ、本仕様書を基として衛星−地上適合性試験および軌道上実証を実施した。

先進的宇宙システムのアーキテクチャの構築に関しては、宇宙機関との連携、宇宙関連企業の技術を集結しただけでなく、中小企業や新規参入企業もコンソーシアムとして加えることにより、先進的宇宙システム設計、製造、試験の「仕組みづくり」の検討を行った。また「スペースワイヤ（SpW）試験センタ」を整備した。

高分解能可視光地球観測センサについては、最終目標である地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック）のセンサとそれに光を集光することのできる光学反射望遠鏡（SiC（シリコンカーバイド）による主反射鏡とガラス反射鏡の組み合わせ）を設計の段階から開発し、個別試験で性能を確認した。また衛星バスとの組み合わせ試験、システム試験を実施した。軌道上実証を行い、目標性能の達成を確認した。

バス質量 300kg 以下の小型地球観測衛星の開発に関しては、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（当時。現在、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構。以下、JAXA という）との共同研究により、軌道維持/修正のための推進系に燃料を充填した状況で 300kg 以下の重量（燃料なしで、設計値 250kg）となる小型衛星バスを製造し、性能確認試験、ミッション系搭載機器との組み合わせ試験、システム試験を実施した。

再製造の場合に 2 年間で製造試験を実施するという課題に関しては、新しい宇宙システム対応の標準ネットワーク方式であるスペースワイヤ（以下、SpW と略す）を採用することで、ミッション機器の変更に対してはソフトウエアの変更で対処が可能になり、従来はミッション要求に応じて設計変更を行なっていたバス機器のリピート生産が可能になり、設計変更により必要であった費用やリードタイムが圧縮でき、2 年以内の開発が可能であるという目処が立った。

人間の判断なしで 1 週間以上のバスの自動自律運用を可能にするという課題に対しては、自動機能、自律機能を活用し、観測計画とバス運用のコマンドをアップロード可能な衛星側の仕組みを構築した。

軌道上実証の実現に関しては、打ち上げロケットとしてロシア ISC コスモトラス社のドニエプルを選定し、衛星−ロケット　インタフェース調整、衛星の射場への輸送、射場での打上げ準備作業を経て平成 26 年 11 月 6 日（日本時間）に衛星を打ち上げ、軌道上運用を開始し、機能・性能の実証を開始した。

Ａ－３－１－２　個別要素技術成果

（1）先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立

①ネットワーク導入

ア、「SpW 導入方針」の作成

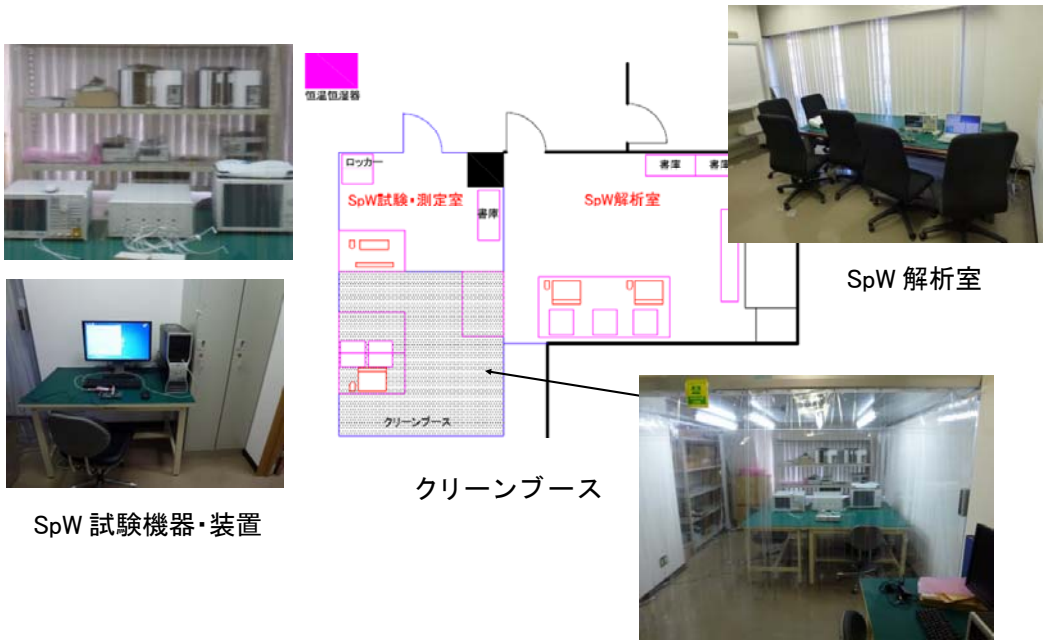
スペースワイヤ（SpW）は ECSS（The European Cooperation for Space Standardization：宇宙標準を目指す欧州共同組織）により国際標準として規格化が進められている衛星用ネットワークとして有望なプロトコルである。

従来、衛星でのデータインタフェース仕様は衛星プロジェクト毎に異なる固有仕様であったため、機器設計の共通化などの障害となっていた。本ネットワーク導入方針を作成する事で、SpW 基準の導入及び普及を促進し、機器開発の共通化を図ることで再利用性を高め、機器の低コスト化・高信頼性化、衛星開発の短納期化ひいては新規企業の参入の容易化を目指している。

本ネットワーク導入方針は、国際スペースワイヤ標準化委員会（スペースワイヤ ワーキンググループ）及び日本スペースワイヤ ユーザ会で検討されている標準化案、設計基準案などに基き、更に産業化の観点から提言や実装例などを加味したものになっている。

イ、 SpW 試験センタの開設と利用

SpW 技術の宇宙産業界への普及、低価格での新規企業・中小企業等への SpW 技術支援・試験環境の提供および SpW のノウハウの蓄積と共有等を目的として SpW 試験センタをシマフジ電機（株）敷地内に開設した。SpW の試験に関連する豊富な試験装置と各種参考資料を揃えており、SpW 関連技術の開発で想定される様々な試験を効率良く実施できる環境を提供した。現在まで、このセンタを利用した実績は、民間 7 件、宇宙機関 1 件となっている。



SpW 試験機器・装置　　クリーンブース　　SpW 解析室

図 A-3-1-2-1　SpW 試験センタ

ウ、 SpW 導入方針の適用実績と普及

上記 SpW 導入方針を適用し、ASNARO で搭載された GPS 受信機（GPSR）を適用事例として SpW 試験センタにおいて接続確認試験を実施した。得られた様々な知見を共有するとともに、中小企業等への SpW 普及における課題を抽出し、これらの課題（共通試験装置等）に対する対策案の検討を実施した。

また、ASNARO 以外の衛星で SpW が採用される事例があり、ASNARO で開発された SpW インタフェース機器が他衛星にも幅広く採用され始めている。ただし、それら機器のラインアップは衛星システム・メーカの製品に限られており、新規参入を促進している状況には至っていない。

②熱構造電気インタフェース基準の設定

ア、「インタフェース設計ガイドライン」の作成

搭載機器の開発仕様は、搭載する衛星や打ち上げるロケットに応じてインタフェースに関する仕様が異なるケースが多く、機器の共通化設計の障害となっている。また宇宙環境特有のインタフェースや熱・構造数学モデルなど特殊な要求が多く、たとえ潜在的に設計能力を有する民生機器メーカであっても、宇宙ビジネスに参入するのは極めて困難な状況にある。

そこで「ASNARO 衛星適用に限定されない幅広なインタフェース基準の検討」をテーマに、熱・構造・電気の各インタフェース設計を中心に、低コスト・短納期の衛星開発技術の実現のための、より簡素化された「インタフェース設計ガイドライン」を作成した。その内容は以下のものである。

・機械インタフェース基準
・電気インタフェース基準
・熱インタフェース基準
・耐環境設計基準
・電磁適合性（EMC）設計基準

本ガイドラインにより、

・衛星／コンポーネント間のインタフェース調整
・衛星毎に変更していたコンポーネント設計変更の低減
・試験項目の統一化・簡素化による試験作業コストの低減
・各種試験（機器試験、サブシステム試験、システム試験）検証方針・検証内容の統一

が期待できる。

③民生部品採用基準設定

ア、「民生部品採用基準」の作成

新規参入企業が採用したい民生部品を選択する際の指針の設定を念頭に、「民生部本採用基準」を作成した。これは SERVIS1 号機、同 2 号機により実証され

た『SERVIS 民生部品・民生技術選定評価ガイドライン』を参考として、新規参入者にも理解し易く使い易い形にしている所および具体的な例を記載している所が特徴である。その内容は以下のものである。

・部品選定の考え方
・使用環境の対策・耐性の考え方
・リスク解析の方法と評価方法
・スクリーニングの実施と必要性の考え方
・地上試験、種類、方法等
・初めての人にわかる部品選定の流れ
・民生技術・機器採用方針との関連
・信頼性・信頼度の考え方との関連
・付録として、
① 宇宙機器で用いられる用語
② 民生部品選定作業およびリスク評価の実施例
③ 東北大学における放射線試験の手順、注意事項等
④ アウトガス測定の手順、注意事項等

これは、リスク評価の結果に基いて試験の緩和が可能になっており、費用対効果の高いものになっている。

イ、タングステンシート（日本タングステン株式会社、東邦金属株式会社、凸版印刷株式会社の 3 社の製品）の放射線遮蔽測定とアウトガス測定

東北大学で放射線減衰特性試験を実施した結果、各社のタングステンシートは比重が異なるものの比重が大きいほどエネルギー減衰量は大きくなり、鉛と同程度の比重をもつタングステンシートは鉛と同等な減衰特性を持つことが確認できた。したがって、タングステンシートは宇宙での民生部品の放射線遮蔽に有効と考えられる（タングステンシートは、粉末化したタングステンを有機材料と合成することで、加工性に優れ、毒性のない放射線遮断部材として商品化されている。純粋なタングステン金属は高価であり、硬く加工も容易ではない）。

④民生機器採用方針設定

ア、「民生機器採用方針」の作成

民生部品を衛星搭載機器に採用する基準は他にも国内外で作成されているが、民生機器を衛星搭載機器に採用するためのものは見当たらない。本方針は国内外で初めてのものである。これも SERVIS1 号機、同 2 号機により実証された『第一次民生部品・民生技術適用設計ガイドライン』を参考としている。その内容は以下のものである。;

・民生機器の選定
- 民生機器利用のリスク
- 民生機器利用のメリット
- 民生機器採用フロー

- リスク解析（リスク対応の考え方）
- 必要情報（メーカから入手するのが望ましい情報の種類）

・要求事項
- 耐環境性（宇宙環境への配慮）
- 使用部品、使用禁止部品
- 設計（あるいはリスク解析）

・品質保証
- 評価試験（テアダウン、放射線耐性試験、HALT）
- 認定試験
- スクリーニング試験（機器レベルエージング条件）
- 受入試験

・調達における留意事項、部品選定の考え方

リスク評価結果により対策の度合いを決めるという方針で、民生機器を使える可能性を広げている。また HALT を試行した経験を付録に添付した結果、初めて HALT を行うメーカにとって使い易い方針となった。なお、「民生機器採用方針」は当初の目的を達成してはいるものの、現段階では方針であり、基準ほどの要求、解説になっていない。機器あるいはボードレベルの基準は早期に必要になると考えられるため、SERVIS 等での適用の実績を作りつつ、基準化に向けた検討が必要と考えられる。

イ、HALT の試行

民生機器を宇宙用に搭載可能か否かを判断(スクリーニング)するのに HALT 試験(Highly Accelerated Life Test:高加速寿命試験)が使えないかを検討し試行した。

民生部品を使用した 4 種類の宇宙用機器（渦電流制限回路基盤、Ku-バンド QPSK 送信機、小型イオン推進システム搭載用マイクロ波電源、TCXO）に対して HALT を試行した結果、HALT は以下の点に有効であることがわかった。

・設計の弱点を検出し、設計を強化すること
・設計情報が開示されない民生部品の設計を見極めること

ただしこれまで宇宙機に対して実施してきた各種環境試験を HALT のみで代替できるかの解は得られていない。HALT を実施するだけではなく他の試験も実施するのでなければ、コスト低減、開発期間短縮は期待できない。更に、既に HALT が要求されている産業界での実績等の調査を実施し、試験検証方法を見極める必要がある。

⑤民生品利用における信頼性/信頼度の考え方

ア、HALT による信頼度算出方法の検討

米国の Ops A La Carte 社が、HALT/HASS(HASS:Highly Accelerated Stress Screen 高加速ストレススクリーニング)の試験結果から信頼度を算出する、“AFR Estimator(年間故障率推測手法)”を発表した。HALT で検出される故障限界条件

が実使用条件より高いほど年間故障率(AFR: Annualized Failure Rate 年間故障率)が低くなると考えられている。

この HALT/HASS の試験結果から信頼度を算出する方法を検討した。従来の部品故障率計算基準ツールである MIL-HDBK-217F、FIDES に代わるものとして HALT による 4 供試体の試行結果から信頼度算出を行い、MIL-HDBK-217F 算出値との比較を行った。

供試体数が 4 台と少ないものの、「試験条件」や「判定基準（温度や振動の稼働限界値の定義)」により信頼度の数値が大きく異なることが分かった。したがって、宇宙機へ適用する場合には横並びで判定できるよう、「試験条件」及び「稼働限界の判定基準」を統一する必要がある。

HALT を通じた知見として、機器の稼働限界と実際の仕様値との差（マージン）を把握して衛星に搭載すれば安心して使うことが出来る。マージンがどのくらいあれば良いか定量的に示すのは難しいが、民生部品を使う場合、この考え方が従来の部品積み上げによる信頼度算出よりは現実的と考えられる。

イ、「信頼性／信頼度の考え方」の作成

民生部品及び民生機器を採用する際の「信頼性／信頼度の考え方」を検討し、文書化した。これも SERVIS1 号機、同 2 号機により実証された『第一次民生部品・民生技術適用設計ガイドライン』を参考としている。その特徴は以下の通りである。;

・衛星搭載機器製作分野に新規参加する者が分かり易い内容とした。
・小型衛星での信頼度要求は、民生部品の採用や民生機器の採用を排除する方向に働いてしまうことを危惧し、要求事項としないことを基本とした。
・新たな信頼度算出方法を示した。
・低コスト化を考慮しつつ信頼性確保に必要な最低限の項目を盛り込んだ。

その内容は以下のものである。;

・信頼性保証技術
  - 信頼度予測
  - FMEA
  - 部品ストレス解析
  - トレンド解析
・試験要求
・付録　信頼度算出方法・ツール（HALT Calculator、MIL-HDBK-217F、FIDES）

一般に信頼度予測は部品の故障率の積み上げによって行われるが、民生機器においては機器メーカから部品リストを含む設計情報の詳細が入手できない場合が多く、部品故障率の積み上げはおろか故障率の算出さえできない可能性が高い。従来、部品の故障率算出には MIL-HDBK-217 を利用するのが一般的であるが、この文書は 1995 年 2 月以降改訂されておらず、最新の部品情報が反映され

ていない。このため、最新技術の民生部品の故障率を算出できなかったり、現状の実力にそぐわない品質ファクタ（πQ）で極端に故障率を高くしてしまうなどの問題がある。このような理由から、小型衛星では信頼度の算出は絶対条件とはしないことにした。

⑥試験検証の考え方

ア、「試験検証の基本方針及びテーラリングの指針」の作成

低コスト・短納期の衛星バス製造を可能にする新しいシステムアーキテクチャの考え方による衛星開発技術の実現のため、機器単体試験からシステム試験までの試験検証について、開発が2年で完了する仕組みとしての試験検証の考え方を整理した。具体的には、

・機器試験、設計情報のベースラインとその根拠

・試験、設計条件の省略に関する指針

について明らかにした。

従来の中型衛星や機器・サブシステム・システム試験項目をレビューし、重複試験項目の洗い出し、設計検証とワークマンシップ確認の識別およびそれらの削減可能性について検討した。まず前提条件を明確にするため、設計検証とワークマンシップ検証について、表 A-3-1-2-1 の通り定義した。

表 A-3-1-2-1　試験検証の考え方

	試験検証目的	試験対象	試験の基本要求	備考
①	設計の検証	新規設計部分	原則として、設計要求条件の全てを試験検証（物理的に試験不能なものは除く）	認定試験
②	ワークマンシップの検証	既開発品の繰り返し生産部分	設計通り製造されたか（ワークマンシップ）のスクリーニング試験	受入試験

また機器レベルの試験で高コスト試験と考えられる項目を洗い出した結果、EMC 試験の RE(Radiated Emission)および衝撃試験をリストアップした。これらの試験の簡素化・削減について検討した。

新規開発品ではない既開発機器での試験削減の検討として、設計検証ではなくワークマンシップ確認のみでどこまで簡易化可能か、という点についても検討を行った。

以上の検討の結果を踏まえて、「試験検証の考え方」を作成した。

なお中小企業の参入を促進する上では、宇宙環境耐性検証設備の確保が課題となるため、九州工業大学に設置された宇宙環境技術研究センタを訪問し、関連試験設備リストの作成も実施した。

イ、試験検証に関する用語の説明および補足説明資料の作成

衛星搭載機器の設計製造経験の無い中小企業、新規参入企業にとっては、試験基準書を読み解くこと自体に高いハードル存在する。コンソーシアム参加メンバーの中での議論を通じて、用語の解説や補足説明資料の存在が非常に有益であることが判明したため、主として衛星メーカおよびコンポーネントメーカを中心とするメンバーで分担して解説資料を作成した。作成に当たっては、宇宙でのモノづくりにあまり経験のないメンバーの疑問に答える形で、最も基本的かつ重要と思われる用語を選択し、改めてわかりやすく定義した。

ウ、コンポーネント試験方針の整理

コンポーネント試験を実施するに当たっては、機器の流用度合いに応じて試験項目が変わるが、これまでなかなか統一的に説明した資料がなかった。以下の通り用語を説明したうえで、これらの考え方についても整理を行った。

- リピート品：既存機器を完全流用（設計／製造／試験／使用方法等が完全に同一）できる。
- 流用品：基本的に既存機器の設計を踏襲するが、マイナーチェンジ等により若干の H/W または S/W の変更（改修・改善）を伴う。
- 新規開発品：H/W および S/W の既存流用ができず、EM 相当（試作を含む）の開発が必要である。

以下の表 A-3-1-2-2 に整理したコンポーネント試験方針の抜粋を示す。

表 A-3-1-2-2 コンポーネント試験方針

	フライトモデル形態		リピート品	流用品	
			ALL	1台目	2台目以降
			FM品：AT試験	PFM品：PFT試験	FM品：AT試験
1	機械環境試験	（基準書 6.2 項）			
1.1	振動試験				
		モーダルサーベイ	× 適用しない。	× 適用しない。	× 適用しない。
		正弦波振動	× 適用しない。	△ 必要に応じて実施。	× 適用しない。
		ランダム振動	○ ワークマンシップ確認のため、ATレベルで 3 軸実施。	○ PFTレベルで 3 軸実施。	○ ワークマンシップ確認のため、ATレベルで 3 軸実施。
1.2	衝撃試験		× 適用しない。	△ 必要に応じて実施。	× 適用しない。
1.3	音響試験		× 適用しない。	× コンポーネントレベルでは原則として適用しない。	× コンポーネントレベルでは原則として適用しない。
2	熱環境試験	（基準書 6.2 項）			
2.1	熱平衡試験		× 適用しない。	△ 必要に応じて実施。	△ 必要に応じて実施。

このようにモデル形態と試験適用の考え方を整理して、様々な状況に適合した試験の種類と適用すべき項目・レベル等を選定することが比較的容易となった。

⑦自動自律化による運用の省力化

ア、自動自律化（運用省力化）の対象の明確化

調査・検討を始めるに当たり、まず調査・検討対象を考察した。衛星運用システム全体（宇宙・地上）の機能ブロック図を、観測衛星を例として図 A-3-1-2-2 に示す。エンドユーザからミッション要求（例：「ここを観測したい」）が出てから、観測結果（プロダクツ）がエンドユーザに届くまでの一連の工程を示している。この図の各工程、A 運用計画立案の自動化、B コマンド作成・送信の自動化、C 状態監視（テ

レメモニタ)の自動化、D 自律化(上記 A-C の工程の自動化)、E 観測データ処理の自動化　を自動化自律化の調査・検討対象とした。

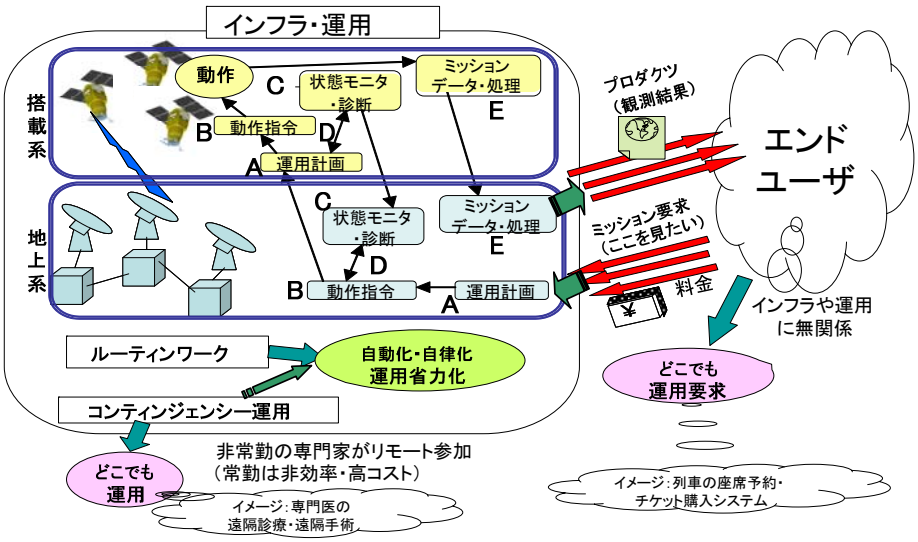


図 A-3-1-2-2　衛星運用の機能ブロック図と自動化自律化対象

イ、現状の衛星運用システムの自動自律化の度合いに関する調査

　国内外の代表的な衛星運用システムについて、ア、で抽出した各処理ブロックの自動化・自律化の度合いに関する調査結果をまとめた。凡例を図 A-3-1-2-3 に示す。

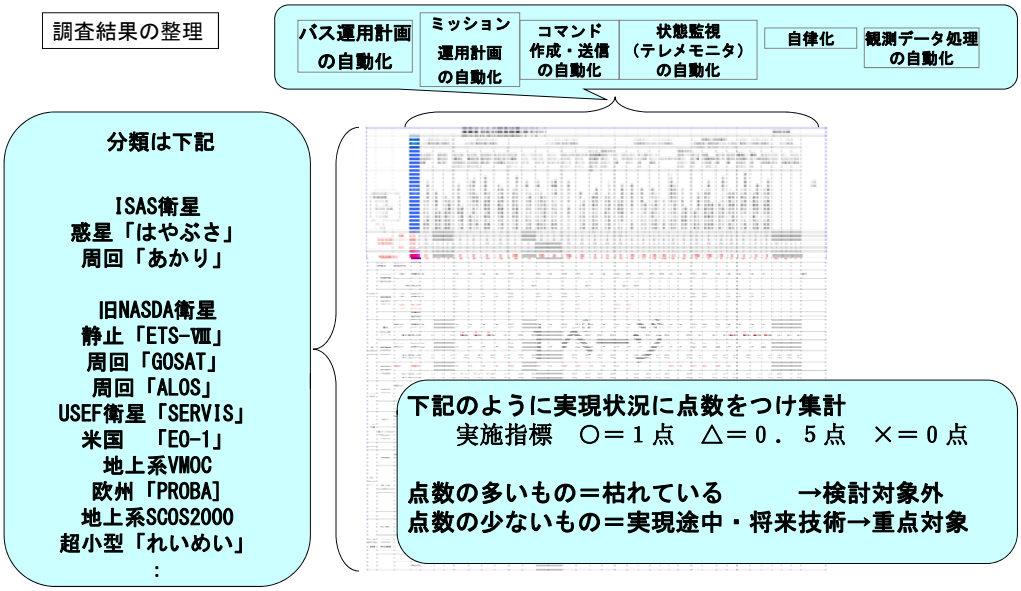


図 A-3-1-2-3　自動自律化の度合いに関する調査結果(凡例)

ウ、自動自律化の方向性に関する検討結果

イ、の調査結果をベースに、現時点での衛星運用システムが将来、どの処理ブロックに対してどのようなレベルの自動自律化機能が組み込まれていくべきかについて検討を行った。表 A-3-1-2-3 に近未来の目標と理想的な目標について自動自律化のレベルの検討結果を示す。また図 A-3-1-2-4 に最も自動自律化が進んだ場合の定常運用処理フローを示す。

表 A-3-1-2-3 自動自律化の目標：近未来の目標と理想的な目標

	ミッション運用計画	バス運用計画	コマンド作成・送信	状態監視(ﾃﾚﾒ・ﾓﾆﾀ)
近未来	地上作成された自動ミッションコマンドを受け、限定的な範囲でのミッション運用の組み替え、ミッション運用を遂行する。	ほぼ8割の運用を自動化自律化で遂行するが、残り2割は地上での計画立案によりコマンドをアップリンクし運用する。	バス運用については2割、ミッション運用についてはほぼ100%地上でのコマンド作成となる。	緊急不具合対応が自律化。地上でのテレメトリモニタによる正常確認が基本。
理想	地上からのミッション運用要求（ex.撮像要求）を受付し、衛星内で計画立案、ミッション運用を遂行する。	異常時を除き、全自動化自律化でバス運用計画を衛星内で立案、実行する。	異常時を除き衛星内で処理されるため、地上でのコマンド作成はない。	異常時のみ異常のステータス、異常内容がダウンリンクされる。正常時は衛星内で自律。

	自律化 （状態監視→計画立案→コマンド作成）	観測データ処理	ユーザ受付	データ配信
近未来	衛星の生き死に関わる部分を自律化。その他は地上への異常通知により地上にて対応。	観測生データをL0処理したものをダウンリンク。	観測要求時刻、要求場所を受付後、衛星状況との調整を地上系で処理し、観測計画を立てる。	衛星から観測データを受信後、観測要求に対応したデータを地上で処理して配信。
理想	衛星異常に対し、衛星内で監視し、不具合発生時は衛星内でリカバリ計画作成、実行。	人間が見てわかるレベル（L1）まで、衛星内で処理しダウンリンク。	観測要求時刻、要求場所のみを受け付け、観測計画処理。	観測要求に対応した観測データを衛星から受信し自動配信。

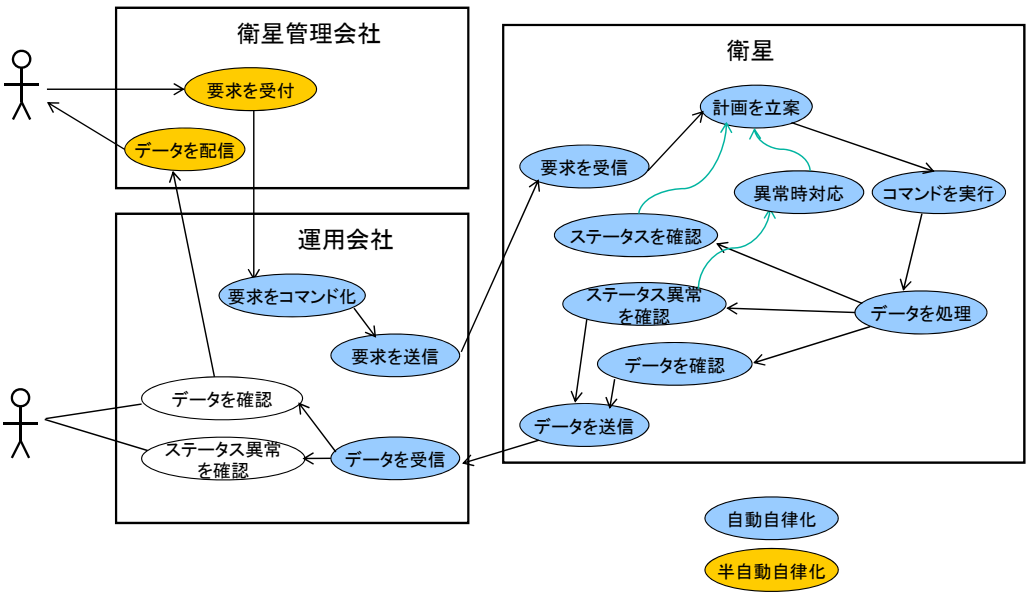


図 A-3-1-2-4 最も自動自律化が進んだ場合の運用処理フロー（定常運用段階）

⑧ネットワークによるどこでも運用

運用要求レベルやサービスを分類し、「どこでも運用」に必要となる技術的要素を抽出整理した。

ア、概念の整理

どこでも運用とは、「地理的に分散した人員が」、「ネットワークを利用」して、ミッションコントロールすることを指すことである、として以下の 2 通りに大別した。

常時は自動運用を前提とするが、異常をトリガーとして、地理的に分散した人員が衛星を運用することを「どこでも運用」とする。

次に、地理的に分散したユーザがいつでもミッション要求を出すことができ、必要な場合は地理的に分散した関係者間で調整し、衛星運用に反映できることを「どこでも運用要求」とする。また、ユーザは結果を迅速に入手できることも含まれる。

イ、 サービスと対象者による分類

調査結果を整理し、要件の大項目（サービス）を8項に分類することができた。また、サービス対象者を識別して、この対象者毎に「どこでも運用」が必要な理由をまとめた。

ウ、実現レベルの考え方

対象者（利用ユーザ）に共通的なサービスと各対象者に固有なサービスを識別した。共通的なサービスの提供および事例においてすでに実現されているものを早期に実現すべきレベルに設定した。

エ、実現のために必要な技術要素

調査した事例等を参考に、識別したサービス毎に実現に必要な技術要素を整理した。技術的には、ネットワークを使用して遠隔地からリモートでコンピュータに登録されている機能（OS、アプリケーション）を利用することが可能である。しかし現時点ではネットワークのセキュリティ確保、システム全体のセキュリティポリシー、運用セキュリティポリシー、リスク対応等々の観点から、これら技術を全面的に適用した「どこでも運用」事例はないと思われ、現状では利用者が利用可能な機能を限定的に提供する事例が多い。

オ、要求と要件

エンドユーザからのヒアリングをベースに、どこでも運用の要求シーンを設定し、「要求」を具体化し、個々の要求に対応した形でシステムに必要な要件（システム要件）やシステム化する上での課題などを整理した。

カ、どこでも運用イメージ

「どこでも運用」と「どこでも運用要求」とに区分して検討を進め、それぞれの考え方について整理を行なった。このようなサービスを享受するユーザの特性によっても期待されるサービスの内容が異なったものとなってくるため、ユーザ分析と利用シーンの検討・整理は具体的なサービスの検討において重要となる。

キ、運用想定と実現課題

これまでの検討を踏まえ、「どこでも運用」と「どこでも運用要求」の運用想定と実現課題について整理した。

⑨自動自律化・どこでも運用を適用した近未来の総合宇宙システムの検討

上記自動自律化およびどこでも運用の検討結果を踏まえ、5 年程度先の近未来を念頭においた地球観測衛星向け総合宇宙システムの検討を行った。すなわち、現在保有しているあるいは近未来に獲得が予想される技術要素をベースに、理想的な総合宇宙システム（宇宙セグメント、地上セグメント）とりわけ光学衛星画像による地球全球データ取得・アーカイブ型システムのシステム構成、機能・性能について検討した。

ア、従来の宇宙システムの課題の抽出とその対処策・効果

まず従来の運用システムの課題を抽出し、自動自律化およびどこでも運用の検討結果を反映した対処策を検討した。表 A-3-1-2-4に検討結果を示す。

イ、総合宇宙システムの構成

図 A-3-1-2-5 に総合宇宙システムの構成を示す。諸元は以下の通りである。

・衛星機数：

データ利用の観測頻度要求とのバランスから8 日で全球を取得できる可能性のある 8 機体制を想定する。

・地球局処理データ量：

1 日に地上システムで取り扱う画像シーン数は約 5 万シーン以上、100TB 以上の受信データ処理性能が必要である。

・ネットワーク管制：

複数衛星運用に対応した多数の地上局を統合的に制御・管制する。完全無人化運用を可能とするリモート監視・リモート制御の機能を有し、無人の局設備と運用センタ設備を統合的に運用可能とする。通常時は、運用計画ベースで各地上局の制御を行ない、監視運用以外は自動化対応とする。

・地上伝送ネットワーク：

各地上局のミニデータセンタの処理データ量(20TB/日以上)に応じた伝送能力が必要（常時約 0.5Gbps 以上）である。ローカルデータセンタあたり 2 拠点のミニデータセンタからの受信データの処理・伝送を行う場合に必要なデータ伝送容量は、約 1.0Gbps 以上となる。

・L0 データ処理：

ミッションデータを各地上局設備のミニデータセンタ、各地域のローカルデータセンタ側でL0 処理・アーカイブし、実績情報を中央データセンタの処理管制に通知し、観測運用計画へ反映する。処理管制を含めた分散型でのシステム構築が必要である。

・アーカイブ：

蓄積対象はL0 データ。データの「地産地消」の概念に従い、ローカルデータセンタで蓄積する。バックアップを考慮してミニデータセンタでも蓄積する。

・利用システム：

新規観測要求は基本的には受け付けないことを想定（ユーザからの画像要求受付はアーカイブについてのみ）する。ユーザインタフェースは中央データセンタで一括集中管理。データ配信はユーザ要求に対応した L0 データが保管されているローカルデータセンタからユーザに対して直接行う。

表 A-3-1-2-4　従来の運用システムの課題と対処策・効果

LN	対象および課題内容（リスク）	対処	効果
1	**衛星毎に計画系・運用管制系を有していた**ために全体的に運用要員を多く必要とした。	衛星バスに対する**運用仕様・要求を統一**し、かつ**ミッション機器の特殊要求を排除**し、各システムを統合化する。	管制系・計画系運用要員の削減 管制システム(H/W・S/W)の削減 運用スペースの削減
2	**地上NW系に他機関の設備仕様に合わせた機能を作り込む**か、人手により作業を行っていた。	**できるだけ他機関を使用しない**ことが望ましい。	地上NW系運用要員の削減
3	**地上局緊急連絡対応**のため、地上NW系に要員が必要であった。	地上局の不具合発生時には**自律的に対処策を実行**し、衛星管制系に通知する。	地上NW系運用要員の削減
4	**長期の軌道予測**の実施	衛星バスの**軌道制御範囲を小さくする**ことで長期予測を排除する。また、**軌道制御は自動的に実施**する。	軌道力学系運用要員の削減
5	**リアルタイム運用を有人で実施**していた。	**無人化を決断**する。 ただし、不具合発生時の処理手順を確立すること。	運用要員の削減
6	ミッションの緊急要求を受付けによる**再計画要員の配置で対応**していた。	**自動的に再立案を実施**。 ただし、緊急要求受諾におけるリスクルールの定義と、ユーザへの事前告知。	計画系運用要員の削減

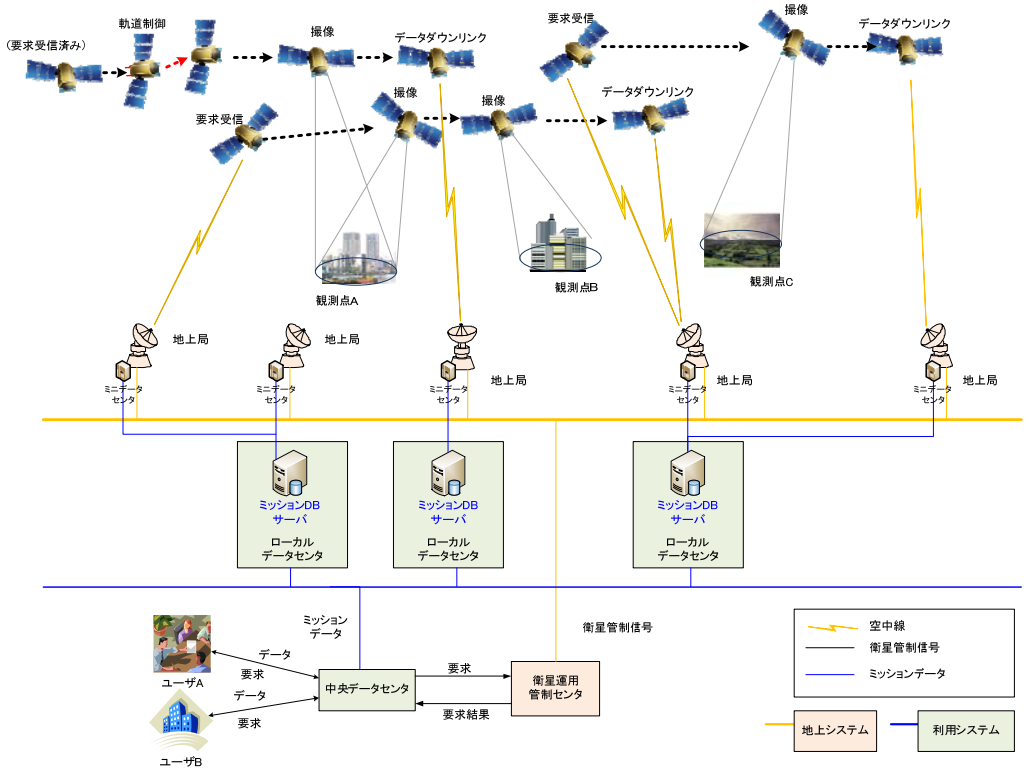


図 A-3-1-2-5　総合宇宙システムの構成

イ、運用イメージ

a. 衛星システムバスの運用イメージ

・正常時は衛星システム側で自律運用し、テレメトリのダウンリンクは基本的に行わず、衛星システム内部で正常・異常の判定を自動的に行う。衛星異常時は、衛星システム内でリカバリ（FDIR）を実施し、地上へ異常状況及びリカバリ対応をダウンリンクして報告する。衛星システム内でリカバリ不可能な場合は撮像運用を中止し、地上へ異常状況の報告をダウンリンクして地上の支援を仰ぐ。したがって、地上側でのバス運用は、基本的に異常時への対応のみとなり、運用コストの大幅な低減が可能となる。

・データのダウンリンクは、衛星の軌道決定結果および地上側からの地上局アベイラビリティ情報から、地上局の可視情報を算出し、HK データ及びミッションの送信機 ON/OFF を含むデータ・ダウンリンク計画を立案、自律実行する。

・衛星上で軌道決定し、衛星の可視予測のため軌道決定値をダウンリンクして衛星／地上間で軌道決定値を共有する。

・衛星上で軌道制御計画の自動立案及び自律化を実行する。立案結果は、地上にダウンリンクし共有する。デブリ回避についても、地上からのデブリ情報を受け、衛星上でデブリ回避を計画し実行する。

b. ミッションシステムの運用イメージ

・衛星上で決定された軌道決定値をベースとして自衛星の撮像計画を立案し実行する。その際、地上から中・長期間の撮像エリア／撮像時期期限／優先順位の指示および自衛星のバス運用計画のうちミッション運用の制限となる計画を入手してミッション計画立案の前提とする。

・撮像計画を元に、画像のダウンリンク計画、画像データ蓄積計画を自動生成し、自律実行する。

c. 地上システムの運用イメージ

・衛星および地上システムの自律・自動運用をベースとした少人数・省力化運用を実現し、衛星の運用コストを大幅に低減して観測画像の提供に関わるコストを大きく下げることを目指す。

・運用コストの低い衛星を数多く打ち上げ、複数衛星・複数設備の相互補完によりコストパフォーマンスの向上を図り、低コストでサービスレベルを維持する運用とする。

・観測データは、観測地域周辺の地上局にダウンリンクすることを原則とし、L0 データ処理・提供も含めて、地産地消型での対応を原則とすることで、ユーザサービスレベルの向上と地上データ伝送に関わるネットワーク利用コストの低減を図る。

d. 利用システムの運用イメージ

・データ要求受付・データ配信は基本的に自動化を行い、人的リソースの介入を可能な限り小さくする。

・L0 データから高次プロダクトまでは全自動で処理を行う。ユーザ要求によっては全自動での処理が不可能なプロダクトは、個別にサービスメニューを用意してローカルデータセンタにおいて別途有償でオペレータが処理を行う。

e. アーカイブ・データの運用

・受信管制局にミニデータセンタを併設する。ミニデータセンタは極力無人化する。撮像対象地近隣でのデータ利用頻度が高いと想定し、大陸単位程度にローカルデータセンタを配置する。ローカルデータセンタは、利便性がよい都会近辺に設置する。中央データセンタを設置して全世界の画像データ・カタログ情報を集約する。

・L0 データを永久保存の対象とする。L0 データは、ミニデータセンタ及びローカルデータセンタに保存する。

・L1 処理、及び高次処理はローカルデータセンタで実施する。作成した L1 データ及び高次データは、再配布に備えて一定期間保管する。

（2）標準的小型衛星バスの開発

①衛星システム及び衛星バスの開発

ア、衛星システムおよびバス設計

衛星システム及びバスの設計を実施した。衛星システム諸元を表 A-3-1-2-5 に、システム構成図（バス系）およびシステム構成図（ミッション系）を各々、図 A-3-1-2-6、図 A-3-1-2-C-7 を示す。

表 A-3-1-2-5　衛星システム諸元

ミッション - 光学センサ - データ記憶量 - データ伝送	 パンクロ／マルチ一体型 分解能： 0.5m 未満 （パンクロ，高度 504km、直下） 観測幅： 10km 120GB 以上 X バンド 16 相 QAM， 約 800Mbps
撮像範囲 アジリティ	直下±45deg の円錐領域内 90deg／90 秒 （平均 1deg／秒）
打上 軌道	2014 年度　国産，海外主要ロケットに適合 太陽同期準回帰軌道（高度 504km） 軌道傾斜角：97.4° 降交点通過太陽地方時刻：11 時
地上局	国内商用地上設備および可搬局、海外局
運用期間	3 年以上（目標 5 年）
質量	・バス　250 kg （推薬除く） ・ミッション　200 kg（最大搭載可能質量） ・推薬　45 kg（最大搭載可能質量） ＜TOTAL＞　495 kg
電力	発生電力：　1300 W （3 年後） ミッション供給電力： 400 W

パンクロ：Panchromatic （全色感応性：高分解能広帯域白黒画像取得）

マルチ：Multi-spectrum（多数スペクトラム：狭帯域スペクトラムの複数周波数画像取得）

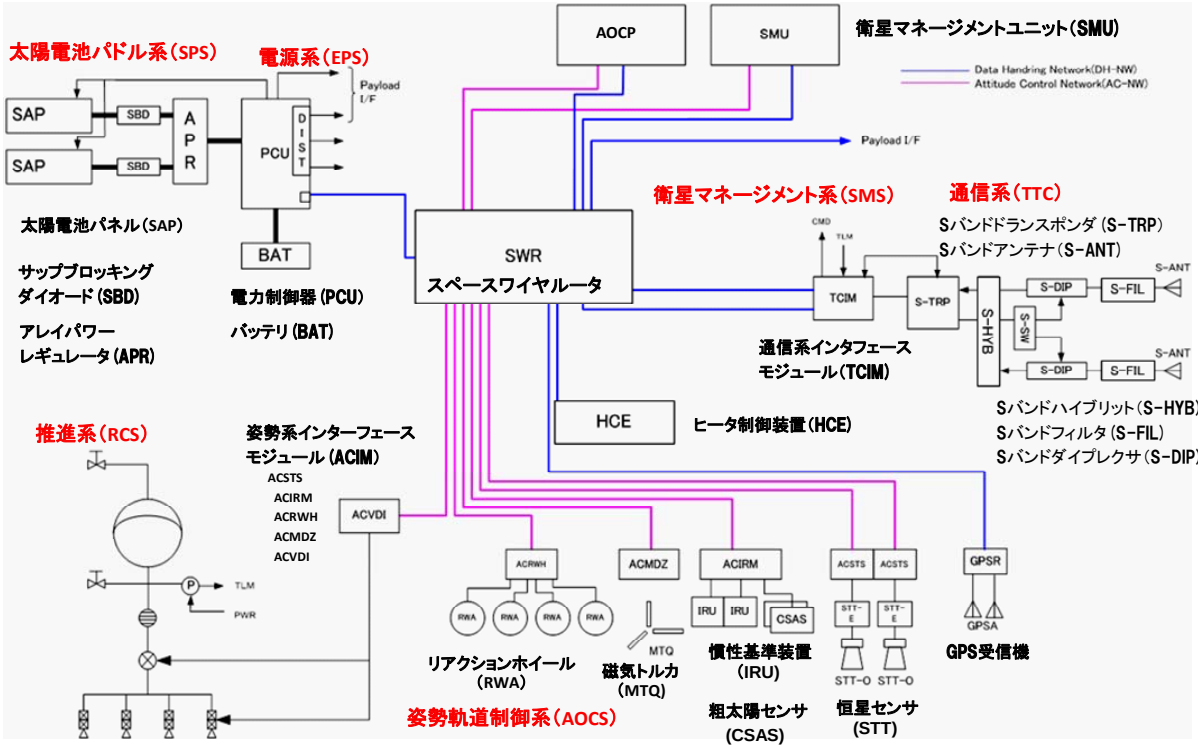


図 A-3-1-2-6　システム構成図(バス系)

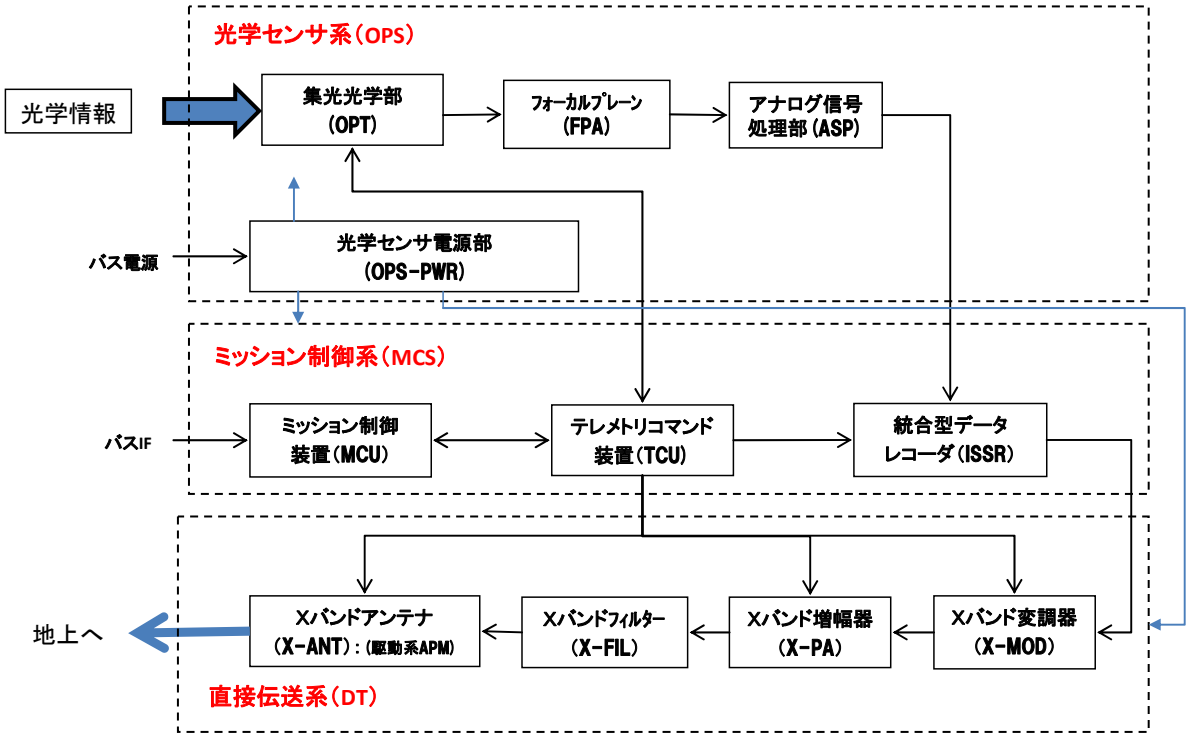


図 A-3-1-2-7　システム構成図(ミッション系)

衛星コンフィギュレーション（打上時）を図 A-3-1-2-8 に、衛星コンフィギュレーション（軌道上）を図 A-3-1-2-9 に示す。

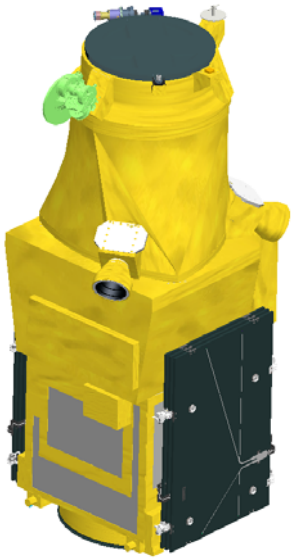


図 A-3-1-2-8 衛星コンフィギュレーション（打上時）

図 A-3-1-2-9 衛星コンフィギュレーション（軌道上）

衛星機器配置を図 A-3-1-2-10 に示す。

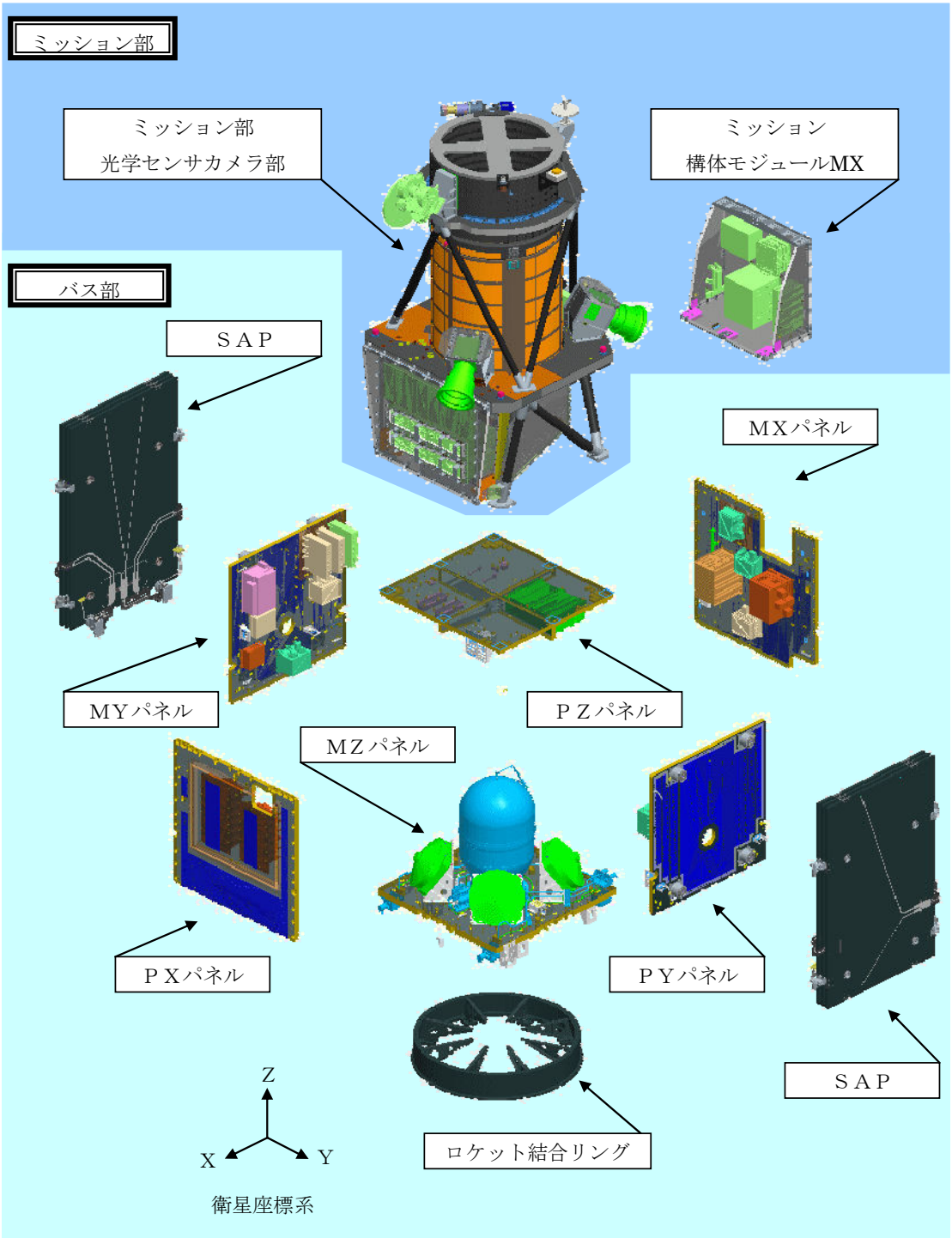


図 A-3-1-2-10　衛星機器配置

衛星の運用性の概念図を図 A-3-1-2-11 に示す。

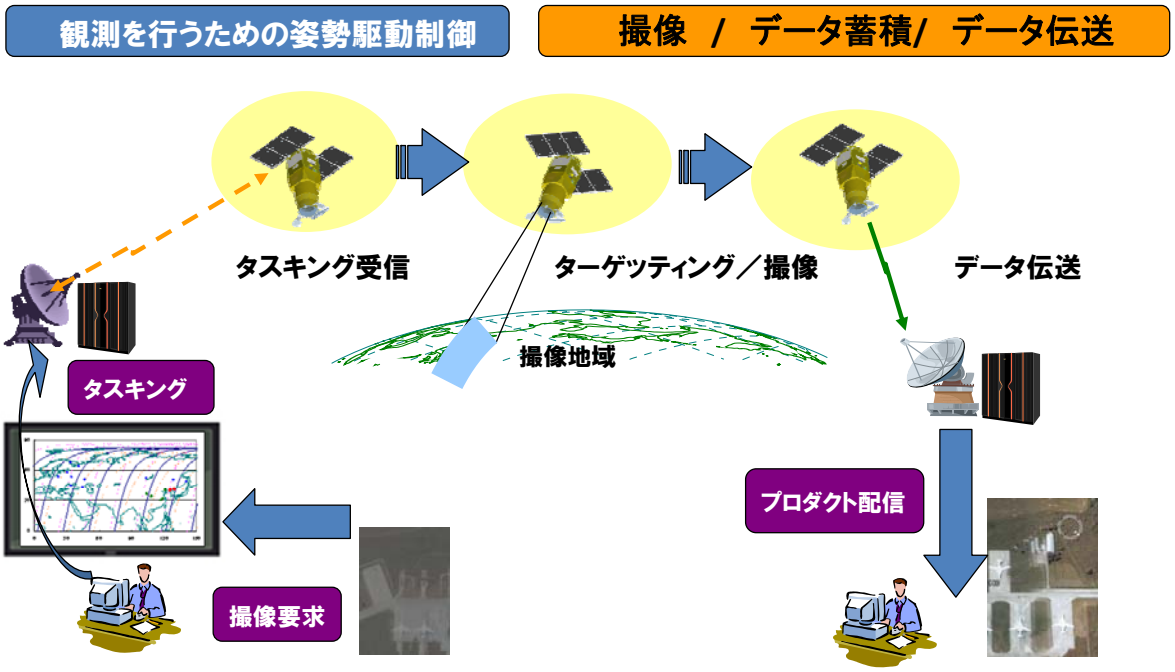


図 A-3-1-2-11　衛星運用概念図

ミッション運用は、観測計画に応じたミッション系の自動コマンドをアップロードすることで、姿勢駆動制御、撮像、データ蓄積、データ伝送のすべての運用を自動で行うことが可能である。基本的観測方式を図 A-3-1-2-12 に示す。

バス系については、ミッションとは別に自動コマンドとしてアップロードすることが可能な設計としており、例えば 1 週間分の計画をアップロードすれば、バスについてはその間、人が介在しない運用が可能になる。

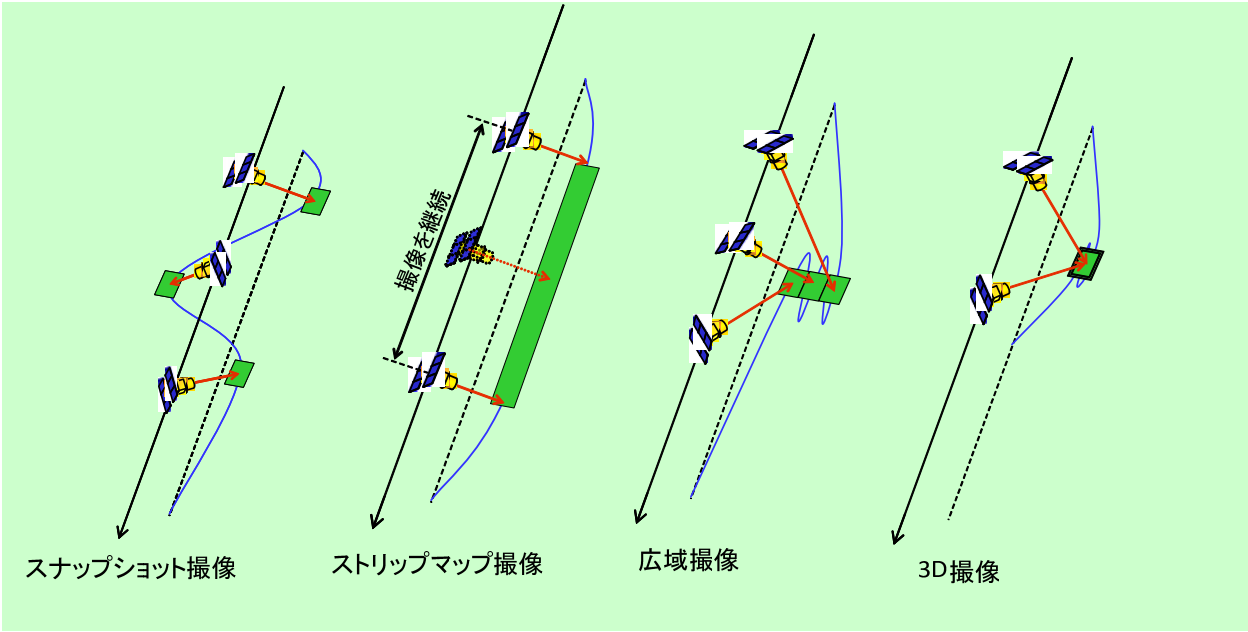


図 A-3-1-2-12　基本的観測方式

衛星で採用したスペースワイヤ ネットワーク構成を図 A-3-1-2-13 に示す。

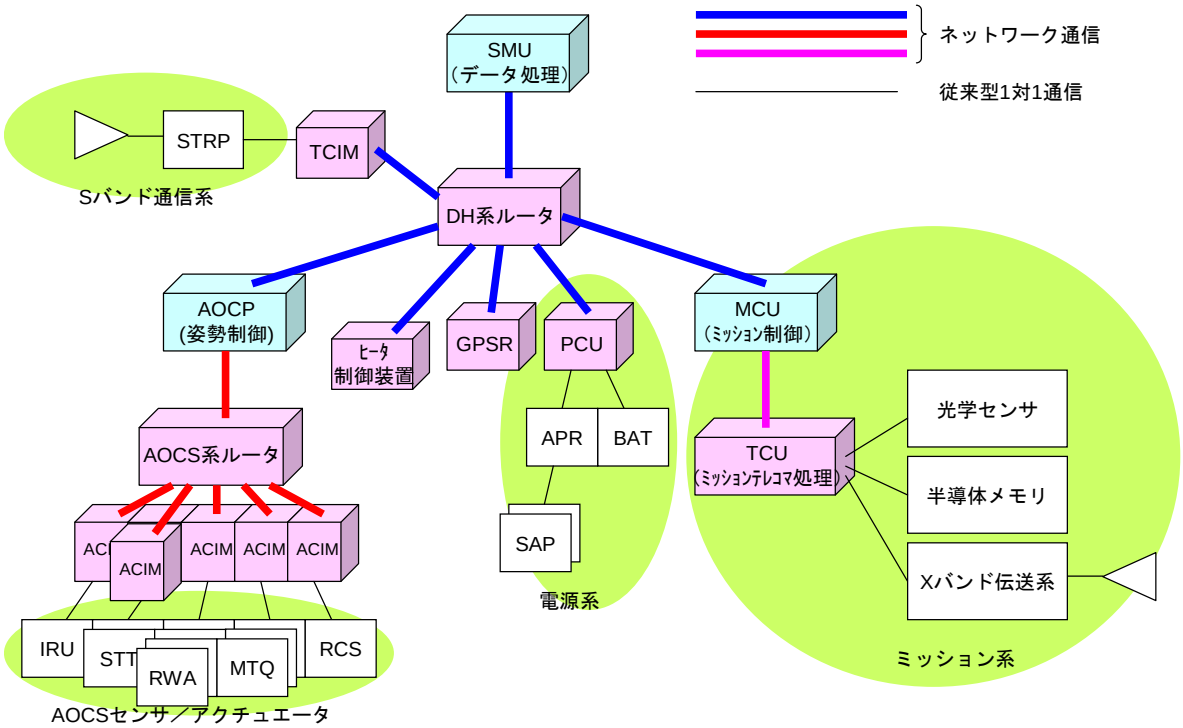


図 A-3-1-2-13 スペースワイヤ ネットワーク構成

この標準ネットワーク方式を採用することにより、ハードウエアはリピート生産が可能となり、ミッションによる変更は搭載ソフトウエアをカスタマイズすることで対応できる。したがって、従来はミッション要求によって設計を見直していた衛星バスの設計変更が最小限に抑えられ、コスト・リードタイムが削減される。その結果、表 A-3-1-2-6 に示すように、リカレント・フェーズとして 2 年以内の開発が可能と想定される。

表 A-3-1-2-6 標準バス リカレント・フェーズの開発スケジュール

	1 年目	2 年目
ミッション要求検討 部品調達 機器製造・試験 機器調達 ソフトウエア開発 システム製造・ 試験		

衛星の質量配分を表 A-3-1-2-7 に示す。最大搭載推薬量を考慮しても 300kg 以下のバスが実現可能である。

表 A-3-1-2-7 衛星質量配分

バス質量(推薬を除く)	250kg
推薬(最大)	45kg
バス質量(推薬最大)	295kg
ミッション質量(最大)	200kg
衛星質量(推薬最大)	495kg

衛星の電力配分は表 A-3-1-2-8 の通りであり、バッテリーに対する充電電力を考慮しても十分なパドル発生電力がある。なお、観測中はパドルのセル面が太陽を指向していないため、バッテリー放電を伴う。

表 A-3-1-2-8 衛星電力配分

	観測時	非観測時
衛星負荷電力	800W	600W
ミッション	400W	200W
バス	400W	400W
バッテリー充電電力	ー	600W 以下
太陽電池パドル発生電力	ー	1300W 以上

イ、衛星バス製造・試験

a. 構造モデル試験

JAXA との共同研究契約に基づき、構造モデル(MTM)を用いた機械環境試験を行った。試験項目を以下に示す。また MTM の外観形状を図 A-3-1-2-14 に示す。

・正弦波振動試験
・音響試験
・静荷重試験

試験結果により下記のことが確認された。

① バス構体は打上げ時の荷重に対し十分な強度を有している。
② バス構体はイプシロンロケットの剛性要求を満足する(打ち上げ環境条件はその時点で開発中の国産イプシロンロケットを前提に検討し、選定された DNEPR ロケットの環境条件での問題の有無は ISC Kosmotras 社との事前調整段階で検討・確認を行った)。
③ 衛星全機固有振動数は解析予測とよく一致しており、構造数学モデルは必要な精度を有している。

④ 搭載機器の環境条件を設定するための技術情報を取得することができた。
⑤ 構造モデル試験結果に基づき搭載機器機械環境条件を設定した。
⑥ ミッション、太陽電池パネル（SAP）、推進系（RCS）、MAGE（Mechanical Aerospace Ground Equipment：機械系航空宇宙(支援)地上機器）との機械インタフェースは問題なかった。

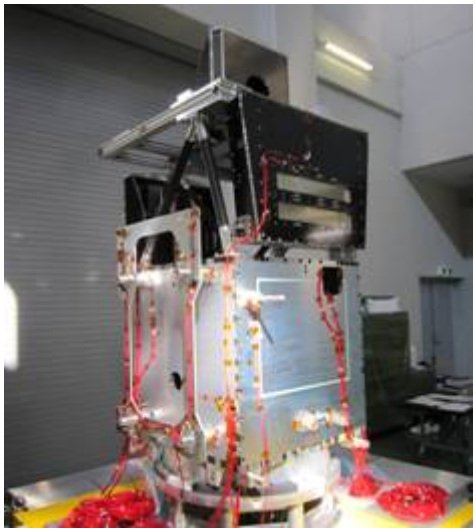


図 A-3-1-2-14 MTM 外観形状

b. 熱モデル試験

JAXA との共同研究契約に基づき、熱モデル（TTM）を用いた熱平衡試験を行った。試験結果より、熱解析温度予測と実際に計測された搭載機器の温度は 5℃以内でほぼ一致していることを確認した。この結果より、熱数学モデルに基づく熱解析結果が妥当であり、ASNARO に搭載される機器が軌道上で所定の温度範囲内に制御可能であることが検証された。TTM の外観形状を図 A-3-1-2-15 に示す。

図 A-3-1-2-15 TTM 外観形状

c.バス構造部製造・試験

実際に軌道上に打ち上げられる推進系、太陽電池パドル、バス構体フライトモデル（FM）を組み合わせたバス構造部を製造した。バス構造部に搭載されている推進系及び太陽電池パドルはプロトフライト試験を行い、フライト品質を有していることが確認された。バス構造部の外観形状を図 A-3-1-2-16 に示す。

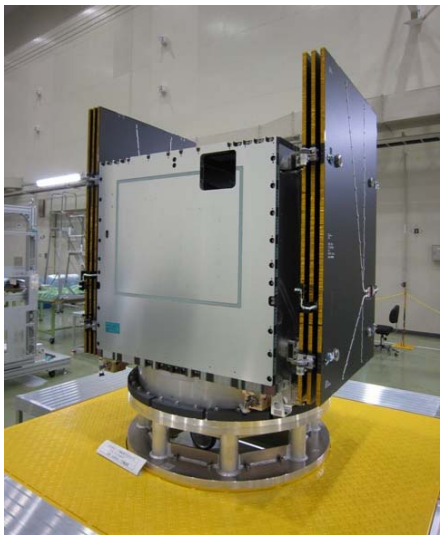


図 A-3-1-2-16　バス構造部外観形状

d.バス電気部製造・試験

実際に軌道上に打ち上げられるバス系電気コンポーネントフライトモデルを組み合わせたバス電気部を製造した。電気コンポーネント（一部は試作モデルや同等の機能を有する模擬装置）を電気的に接続し、搭載計算機に組み込まれたフライトソフトウェアを用いて新規設計であるスペースワイヤネットワークを中心に下記の電気的インタフェースの確認を実施し、正常に動作することを確認した。バス電気部の外観形状を図 A-3-1-2-17 に示す。

・通信インタフェースモジュール（TCIM）/スペースワイアルータ（SWR）/衛星マネージメントユニット（SMU）/GPS 受信機（GPSR）スペースワイヤインタフェース確認（SMS サブシステム試験として実施）
・電源系（EPS）電源制御機能・性能確認（EPS サブシステム試験として実施）
・姿勢制御系（AOCP）/姿勢制御系インタフェースモジュール（ACIM） スペースワイヤインタフェース確認（AOCS サブシステム試験として実施）
・TCIM/S バンドトランスポンダ（STRP）テレメトリ／コマンド信号インタフェース確認
・TCIM パルスコマンドインタフェース確認
・電力制御器（PCU）スペースワイヤインタフェース確認
・ヒータ制御装置（HCE）スペースワイヤインタフェース確認

図 A-3-1-2-17　バス電気部外観形状

ウ、システム総合評価

上記の通りMTMによる機械的検証結果、TTMによる熱的検証結果、MTM／バス構造部／バス電気部によるインテグレーション性確認結果、バス電気部による電気的検証結果および各機器・サブシステム試験結果、設計・解析結果により要求されたシステム総合性能を満足していることを確認した。

エ、衛星データベースの整備

宇宙実証の為に必要となる衛星データベースの整備を行い、バス電気部のシステム噛み合わせ試験においてシステム試験装置に整備したデータベースを組み込み、実機を使った評価を行った。

②システム解析

設計、試験結果の妥当性を検証するためのシステム解析作業を実施した。

ア、軌道解析

軌道解析を実施した結果、下記の軌道で運用することを設計の前提とした。

・軌道：太陽同期準回帰軌道
・高度： ノミナル 504km（赤道上）
・軌道傾斜角：97.4°
・離心率：0.00125
・降交点通過太陽地方時刻：11 時

イ、推薬量解析

海外商用ロケットによる（その時点で計画されていた）2012 年 12 月打上を前提とした推薬量解析を行った結果、45kg の推薬搭載でワーストケース（大気密度がワースト予測値を使用）で 3 年以上、ノミナルケース（大気密度がノミナル予測値を使用）で 5 年以上の軌道保持が可能であることが確認された。

ウ、構造解析

・剛性解析

国内のイプシロンロケット、H-IIA、海外商用ロケットそれぞれのロケットの剛性要求を満足していることを確認した。

・打上時強度解析

全ての MS（安全余裕：Margin of Safety）が正であることを確認した。

・機械環境条件解析

衛星の構造設計に関しては、イプシロンロケットによる打上げを前提に、他のロケット（H-IIA、海外商用ロケット）への適合性を考慮し、搭載機器の機械環境条件を設定した。

エ、熱解析

機器配置、ヒータ設計、放熱面積設計の結果に基づき熱解析を実施し、全ての機器で許容温度に対して十分な温度マージンが確保できていることを確認した。

オ、通信解析

テレメトリ・コマンドの送受信を行う S バンド回線と観測した画像データを伝送する X バンド回線の回線解析を行い、マージンをもって成立していることを確認した。

カ、電力解析

・発生電力解析

軌道上環境条件に基づき、太陽電池パドルの発生電力解析を実施し、打ち上げ 3 年後（EOL：End of life)の発生電力が要求値 1300W 以上であることを確認した。

・バッテリー充放電解析

ロケット打ち上げ時のバッテリー充放電解析、軌道上周回時のバッテリー充放電解析を行い、共に 3 年以上のバッテリー寿命を確保する最大放電深度以下であることを確認した。

キ、指向解析

・撮像指向誤差解析

ASNARO は衛星全体の姿勢を変更（マヌーバ）し、撮像地点に ASNARO の光学センサの光軸を指向させ、地上の画像を取得する運用となる。撮像姿勢中の姿勢安定度解析・指向誤差解析を行い、要求を満足していることを確認した。

・アンテナ指向誤差解析

ASNARO は画像データを地上に伝送する際に、2 軸ジンバル機構をもった X バンドアンテナで地上局を追尾する。アンテナ追尾中の指向誤差解析を行い、要求を満足していることを確認した。

ク、アジリティ解析

ASNARO の質量特性解析、姿勢制御設計結果に基づき ASNARO のマヌーバ速度（アジリティ性能）の算出を行った。その結果条件によっては日本上空の 1 パスで最大 11 箇所の県庁所在地の画像が取得できることが確認できた（図 A-3-1-2-18 参照）。

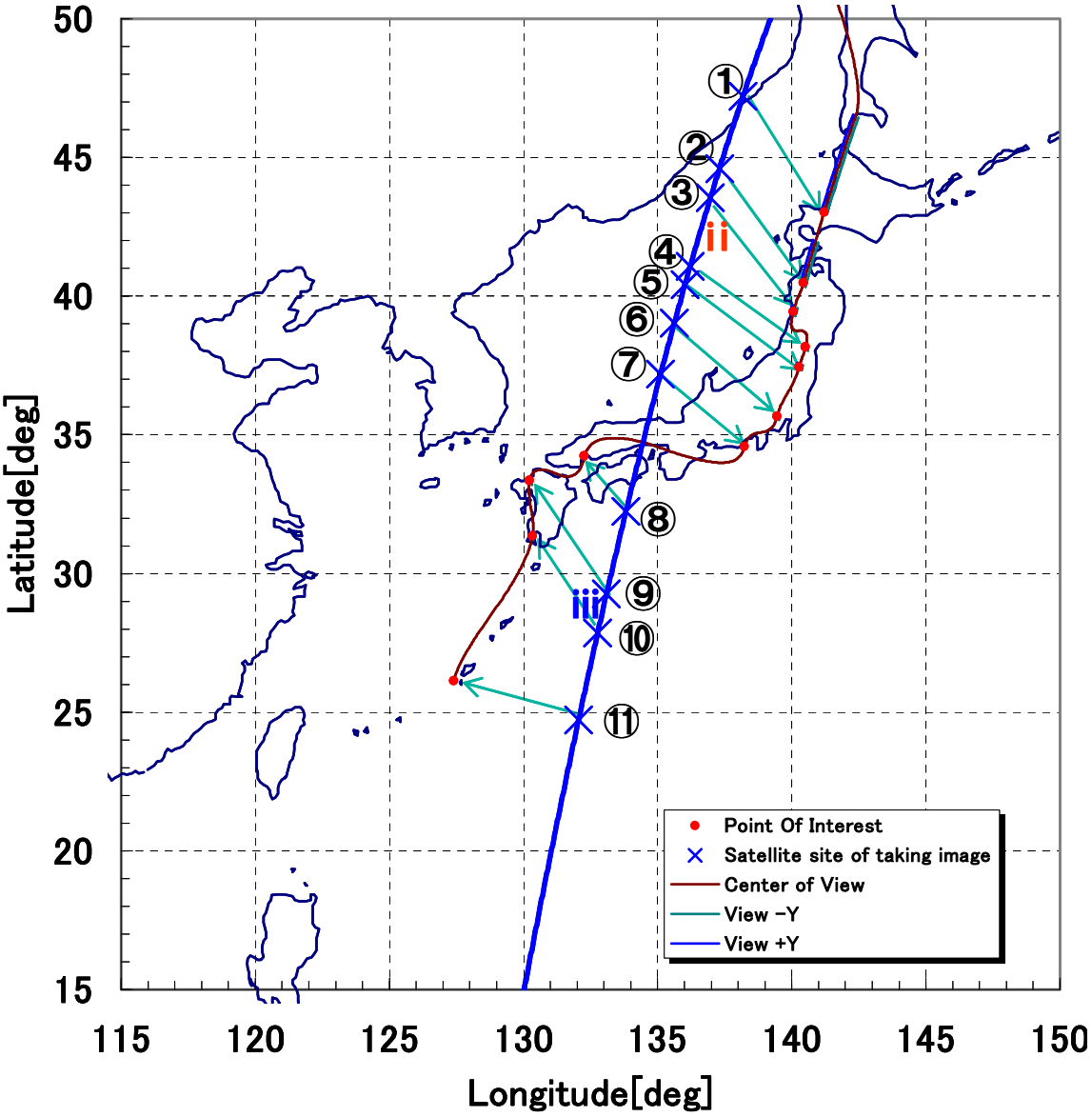


図 A-3-1-2-18　ASNARO アジリティ解析結果

ケ、ロケットインタフェース解析

イプシロンロケット、DNEPR、ROCKOT など国内外ロケットに対する下記のインタフェース解析を行った。

・機械環境適合性解析
・フェアリング収納性解析
・初期投入軌道解析
・初期運用地上局可視解析
・初期 SOE（Sequence Of Events：時刻とイベントの対応表）解析

③運用性向上

特に、撮像性能および運用性に優れた機能・方式については、ソフトウエアを試作し、有効性の評価を実施した。

ア、スキューショット機能

スキューショット機能を用いた観測方式を図 A-3-1-2-19 に示す。

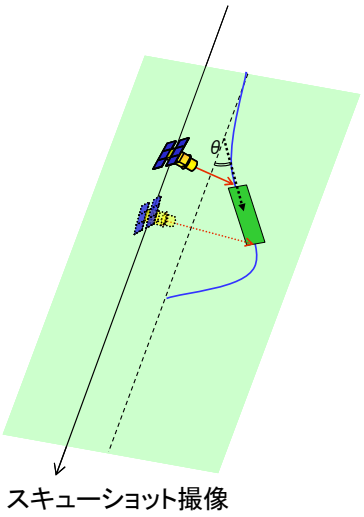


図 A-3-1-2-19　スキューショット撮像方式

図 A-3-1-2-12 の基本的観測方式に示されている他の観測方式はすべて衛星の軌道と平行に観測を行う方式である。しかしながら、河川の氾濫や津波被害など、広いエリアを 1 回のパスで撮像する場合、図 A-3-1-2-12 の広域撮像方式よりも河川の流れや海岸線に沿って撮像した方が効率的な場合が多い（図 A-3-1-2-20 参照）。スキューショット撮像は撮像中に姿勢駆動制御を行い、軌道に対して一定のスキュー角度 θ 方向に撮像を行う方式である。

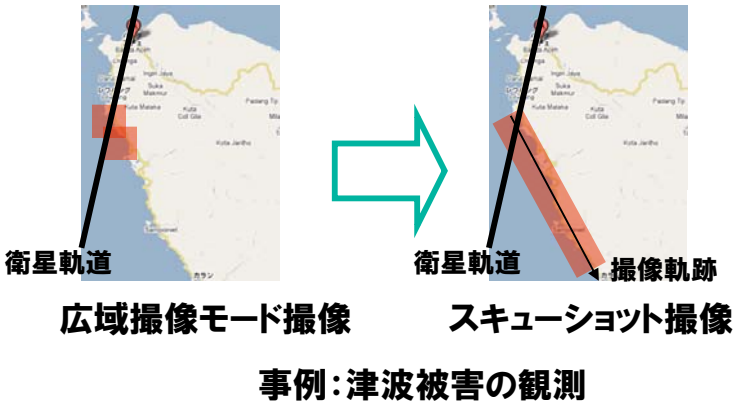


図 A-3-1-2-20　スキューショット撮像方式利用例

イ、ラインレート可変機能

ASNARO では TDI 撮像（Time Delayed Integration（時間遅延積分方式））を行うために、CCD 上での撮像画像の流れと観測点の直距離（スラントレンジ）からラインレートを計算する機能を持っている。1シーンの撮像において、スラントレンジは一定でなく、以下の理由により変動する。

a. 慣性固定のまま（スナップショットで）楕円状の地表面をスキャンするため。（図 A-3-1-2-21 参照）
b. スキューショット撮像などで衛星がレートを持つため（図 A-3-1-2-22 参照）
c. 衛星軌道に離心率があるため。
d. 撮像中に地表面の標高が変わるため（図 A-3-1-2-23 参照）

ASNARO にラインレート可変機能を持たせることにより、上記原因による短期安定度の劣化を抑制することができ、撮像性能の向上につながる。特に日本のような標高差の激しい地形では、標高差を加味したラインレート可変機能が効果的である。

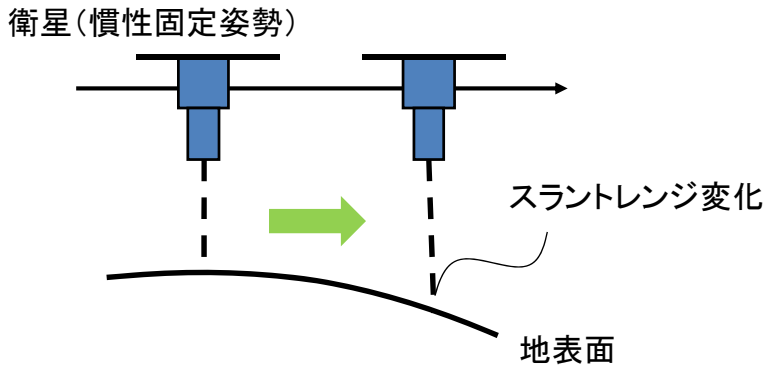


図 A-3-1-2-21　楕円体上地表面によるスラントレンジ変化

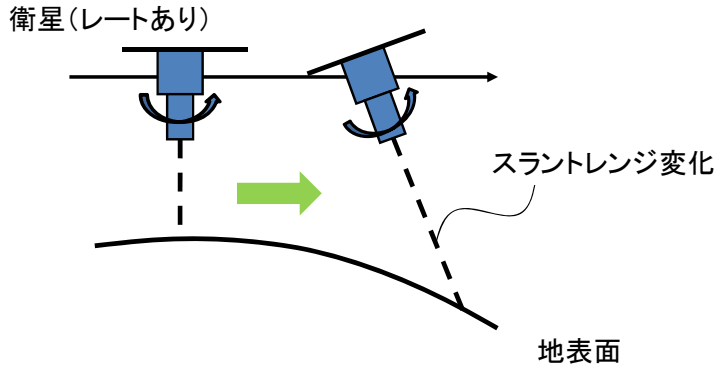


図 A-3-1-2-22　衛星レートによるスラントレンジ変化

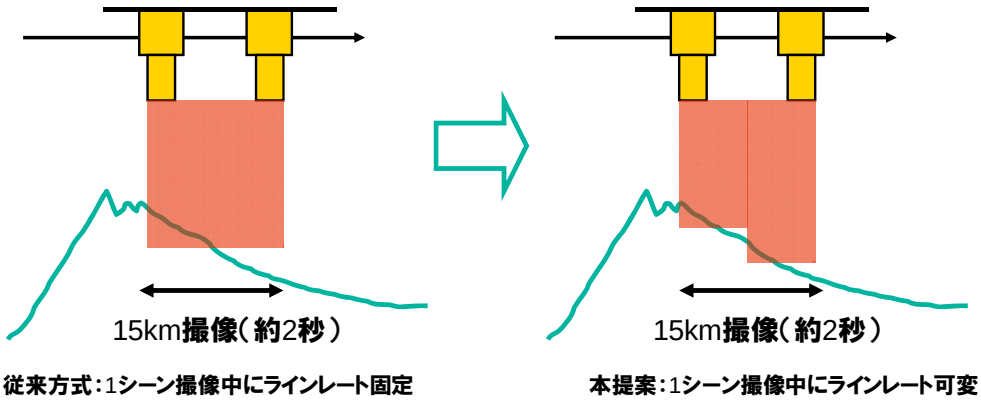


図 A-3-1-2-23　標高差変動によるスラントレンジ変化

ASNARO では運用性向上の施策としてラインレートを撮像中に 1 秒周期で可変する機能を追加した。詳細解析の結果以下の点が確認された。

・1 秒周期のラインレート更新機能により、撮像短期安定度で制限される撮像時間が4秒から 10 秒以上に拡大。
・国内の地形であれば、1 秒のラインレートの更新周期で十分な撮像短期安定度が獲得できる。

ウ、恒星による光学センサアライメント方式

撮像された画像の画素位置決定精度は、姿勢決定誤差・軌道位置決定誤差に加えて衛星本体と光学センサ間のアライメント誤差が影響する。その中でもアライメント誤差の影響は大きいが、画像の中に地表基準点（GCP）を含む場合には、これを頼りに補正を行うことができる。

しかし、画像の中に常に GCP を期待することはできないので、上記アライメント誤差を事前に校正する必要がある。この校正方法として、図 A-3-1-2-24 のように、宇宙空間に存在する恒星により正確にアライメント校正を行う機能を追加した。

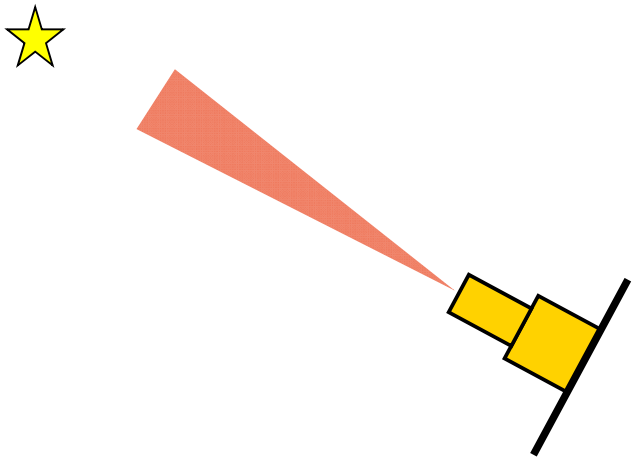


図 A-3-1-2-24　恒星撮像

詳細解析およびシミュレーションの結果、以下の点が確認された。

・ASNARO の CCD 感度では、8 等級までの恒星が検出可能。これにより、オンボード上で銀河面を指向すれば、各 CCD で 3～10 個程度の恒星が撮像可能。
・恒星撮像への姿勢マヌーバで姿勢短期安定度が許容の範囲内にある。

エ、光学センサ撮像トラッキング方式

図 A-3-1-2-25 に高 S/N 撮像（光学センサ撮像トラッキング方式）の概略を示す。高 S/N 撮像では、衛星に進行方向とは逆方向のレートを与えることにより、光学センサが観測点を凝視する時間を長くする。その結果、CCD への入射光量が増加し、高緯度地域や冬季のような暗い観測点であっても撮像ができる。

詳細解析結果から以下の点が確認された。

・従来のスナップショット撮像の 30 倍の高 S/N 撮像が可能。
・1～30 倍の範囲の高 S/N 撮像であれば、10 秒の撮像が可能。

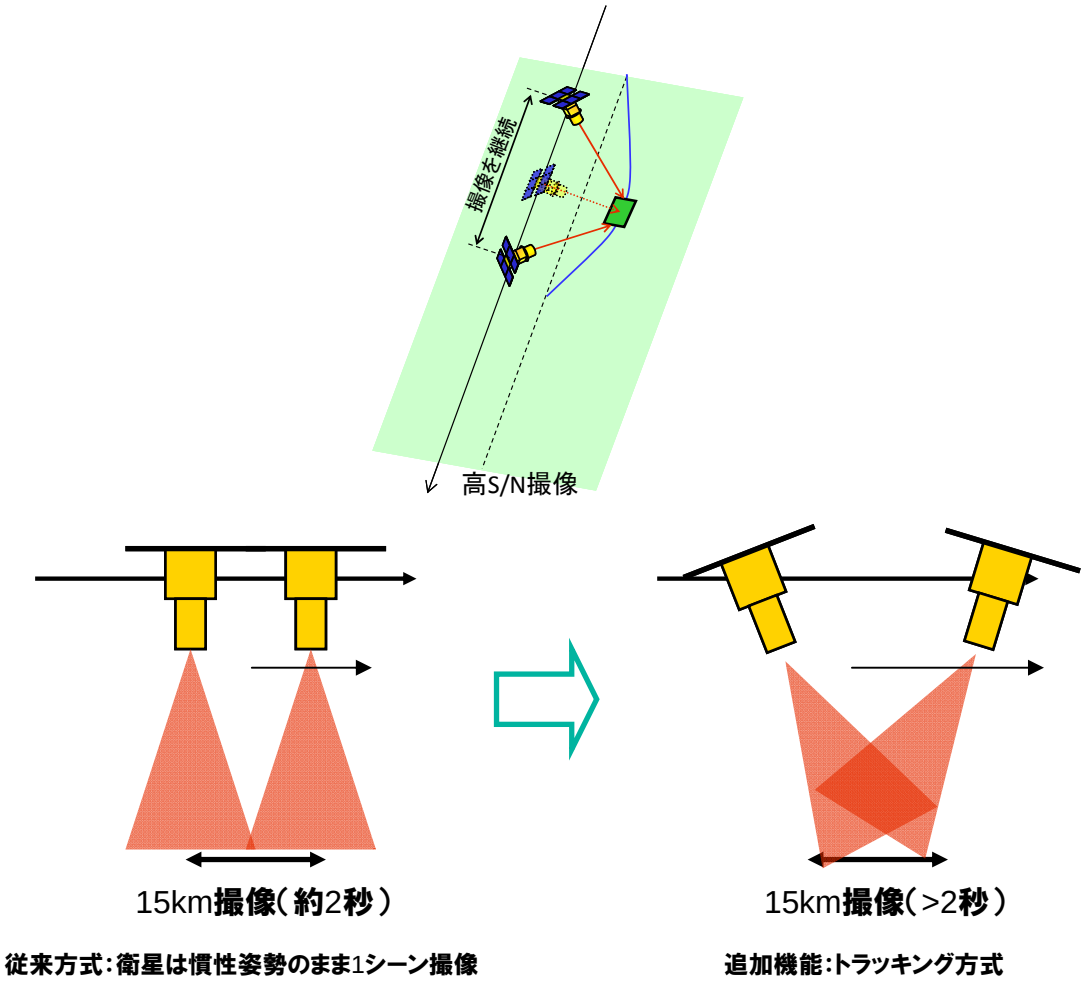


図 A-3-1-2-25　高 S/N 撮像方式

(3)搭載ミッション機器の開発

①光学センサ設計

光学センサ諸元を表 A-3-1-2-9 に、光学センサの構成品を表 A-3-1-2-10 に、光学センサ形状図を図 A-3-1-2-26 に示す。設計結果として、光学センサはすべての機能・性能要求を満足することを確認した。

光学センサの機能を以下に示す。

- 可視近赤外域をパンクロ:1 バンド/マルチ:6 バンドで観測することにより高分解能かつ高画質な地表の画像データを同時に取得する。
- 上記バンドによる観測のため、パンクロ・マルチ一体型の反射型光学系方式による集光機能を有する。
- 高画質画像を取得するため、パンクロ、マルチともに TDI 型 CCD によるプッシュブルーム(Pushbroom)方式により地上を撮像する機能を有する。
- 軌道上で予測される焦点位置ズレ量をモニタするための焦点位置モニタ用 CCD を有する。また軌道上で予測される焦点位置ズレを補正するための焦点調整機構を有する。
- 軌道上で予測される熱環境に対し、要求性能を維持するための温度制御機能を有する。
- 光学センサの状況をモニタするため、テレメトリ信号及び各部の動作指示のためのコマンド信号の送受をミッション制御部と行う機能を有する。
- 光学センサは、開口カバーを有し、観測時以外は開口カバーを閉じることにより光学センサ内部の温度を安定化する機能を有する。開口カバーの開閉は、ミッション制御部内の開口カバー駆動部による。
- 軌道上でマルチバンドの感度をモニタするために、内部光源による校正機能を有する。

表 A-3-1-2-9 光学センサ諸元

項　目	設計結果	備　考
軌道高度	504km	
軌道	太陽同期準回帰軌道、円軌道	
センサの種類	高分解能パンクロ・マルチセンサ	
マルチセンサバンド数	6バンド	可視及び近赤外
空間分解能(GSD)	パンクロ:0.5m 未満 マルチ:　2m 以下	直下
観測幅	パンクロ:10km 以上 マルチ:　10km 以上	
検出器種類	パンクロ:TDI 型 CCD マルチ:TDI 型 CCD	

TDI: Time Delayed Integration(時間遅延積分方式)

CCD:Charge coupled devices(電荷結合デバイス)

表 A-3-1-2-10 光学センサ構成品目

名称		略称	台数	担当
光学センサ		OPS	1	
	集光光学部	OPT	1	機構
	フォーカルプレーンアッセンブリ	FPA	1	NEC
	パンクロアナログ信号処理部	PA-ASP	1	NEC
	マルチアナログ信号処理部	MU-ASP	1	NEC
	光学センサ電源部	OPS-PWR	1	NEC
	内部校正光源投光部	CAL-O	1	NEC
	光学部後方カバーアッセンブリ	OPS-CVR	1	NEC
	光学センサ内熱計装	OPS-TINT	1	NEC
	光学センサ内電気計装ハーネス	OPS-EINT	1	NEC

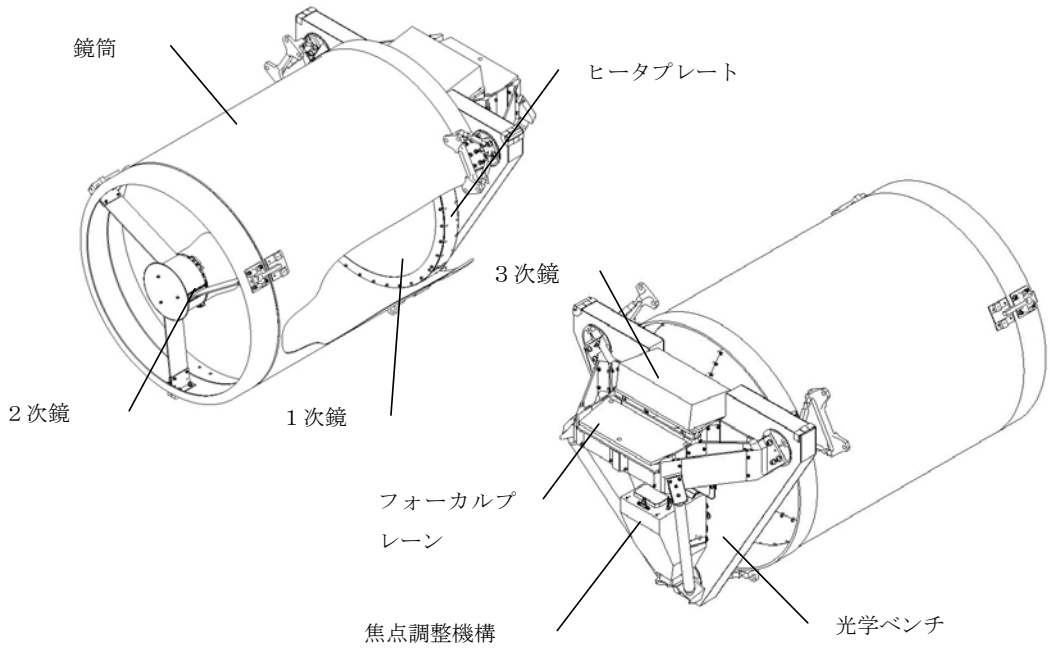


図 A-3-1-2-26 光学センサ形状図(光学部及び FPA のみ記載)

② 光学センサ用 LSI 設計・試作・実装

光学センサ高信頼性化検討結果として、光学センサに搭載するアナログ ASIC の SOI (silicon on insulator)化開発を行い、下記の試験を実施して光学センサに実装した。

・ ロット保証試験

光学センサ向けフライト用アナログ ASIC に対するロット保証試験を行い、宇宙用途に適合する信頼性品質保証を有する製品であることを確認、完了した。

・ 重粒子照射試験
アナログ ASIC に対し、軌道上想定される放射線環境を模擬した放射線試験を実施し、本デバイスの耐放射線耐性を評価、把握し、宇宙搭載機器に使用可能な耐放射線性を有していることを確認、完了した。

③ 直接伝送系(DT)設計

直接伝送系諸元を表 A-3-1-2-11 に、直接伝送系の構成品を表 A-3-1-2-12 に示す。設計結果として、DT はすべての機能・性能要求を満足することを確認した。

DT の機能を以下に示す。

・ 可視域内にある任意の位置にある地上局にアンテナを指向し、統合型データレコーダ(ISSR)から入力される観測データを直接伝送できること。
・ コマンドにより 416Mbps/QPSK と 832Mbps/16QAM に切替できること

表 A-3-1-2-11 直接伝送系諸元

項目	要求性能
1 搬送波特性	
1.1 搬送波周波数	8180MHz
1.2 占有帯域幅	300MHz 以下
2 変調特性	
2.1 変調方式	QPSK / 16QAM 切替
2.2 伝送レート	832Mbps (16QAM 時) / 416Mbps (QPSK 時)切替 (リードソロモン符号化後)
3 アンテナ特性	
3.1 偏波	RHCP
3.2 ビーム指向範囲	Z 軸±90°

QPSK:Quadrature PSK [phase shift keying] 四状態[直交]位相偏移符号化
16QAM:16Quadrature amplitude modulation 16 直角位相振幅変調, 直交振幅変調
RHCP: right-handed circularly polarized wave 右旋円偏波

表 A-3-1-2-12 直接伝送系構成品

構成品目	略号	数量	備考
X バンド変調器	X-MOD	1	
X バンド送信機	X-PA	1	
X バンドフィルタ	X-FIL	1	
X バンドアンテナ	X-ANT	1	

④ ミッション制御系(MCS)設計

ミッション制御系諸元を表 A-3-1-2-13 に、ミッション制御系の構成品目を表 A-3-1-2-14 に示す。設計結果として、MCS はすべての機能・性能要求を満足することを確認した。

MCS の機能を以下に示す。

・ バスから配信されるコマンドデータを解析する機能を有すること。また、ミッションテ

レメトリ生成機能で生成した必須 HK をスペースワイヤ経由で送信する機能を有する。

- バスからのコマンド及びミッション自動化機能によるコマンドを、MCS 内、OPS 及び DT に配信する機能を有する。
- ミッション部のテレメトリを収集し、バスに送出するための必須 HK（ハウスキーピング：衛星状態管理モニタ）及び ISSR にて記録するためのミッションテレメトリを生成する機能を有する。
- 地上から送信された運用タスク(一連のコマンドシーケンス)に従って、サブシステム/機器を動作させる機能を有する。
- 地上から送信するコマンド数の削減を図るため、サブシステムの動作モードを変化させるための一連のコマンドシーケンスをタイムライン、ないしマクロコマンド(グループコマンド)として内部メモリに保持する機能を有する。
- 地上からの撮像要求及び GPS データを基に、撮像パラメータ(姿勢要求/ラインレート等)を決定する機能を有する。
- X バンドアンテナの指向制御を行い、アンテナのモータを駆動する機能を有する。
- 開口カバーの制御を行い、開口カバーのモータを駆動する機能を有する。
- OPS からの撮像データ及びテレメトリ、温度、GPS データ、姿勢センサデータ等を記録する機能を有する。
- 記録した撮像データ及び低速データを再生する機能を有する。
- ミッションコマンドデータの復号、再生データの符号化を行う機能を有する。
- 焦点調整機構の制御を行い、焦点調整用モータを駆動する機能を有する。
- バスから受信した時刻データを、OPS に対して配信する。また同様にバスから受信した時刻基準信号を、OPS 及び DT に対して配信する機能を有する。

表 A-3-1-2-13 ミッション制御系諸元

No.	項目	主要性能	備考
1	観測データ記録チャンネル数	パンクロマッチックセンサ(Pa): 8 チャンネル マルチスペクトルセンサ(Mu): 4 チャンネル Pa 焦点調整用 ： 2 チャンネル	
2	観測データ容量	120 Gbytes(EOL)	1Gbytes $=1024^3$ bytes
3	DT 出力系データレート	16QAM 時 ： 832.56Mbps QPSK 時 ： 416.28Mbps	1Mbps $=10^6$ bps

表 A-3-1-2-14 ミッション制御系構成品

構成品目	略号	数量	備考
ミッション制御装置	MCU	1	
ミッションテレコマ装置	TCU	1	
統合型データレコーダー	ISSR	1	
ミッションコントロール フライトアプリケーションソフトウェア ※1	MCFS	1	

※1:ソフトウエアは MCU に実装される。

⑤ ミッション機器製造・試験

ア、光学センサ

集光光学部及び各構成機器の製造を行った。また集光光学部のインテグレーション後の試験を行い、分解能と S/N に影響する MTF 特性(Modulation Transfer Function:空間周波数特性)及び効率を含む性能が要求を満足していることを確認した。図 A-3-1-2-27 に集光光学部の完成写真を示す。

また、PA-ASP、MU-ASP(ASP: アナログ信号処理部)、焦点調整機構(CAL-O)、光学センサ電源部(OPS-PWR)についてはミッション電気部との噛み合わせ試験を実施し、下記の電気インタフェースが正常であることを確認した。

- ISSR との画像データインタフェース
- TCU とのテレメトリ/コマンドインタフェース
- TCU との駆動信号インタフェース

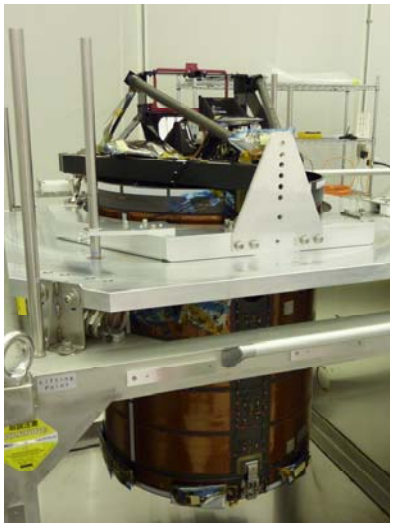


図 A-3-1-2-27 集光光学部

イ、ミッション構造部

実際に軌道上に打ち上げられるミッション構体フライトモデル(FM)を組み合わせたミッション構造部を製造した。ミッション構造部の外観形状を図 A-3-1-2-28 に示す。

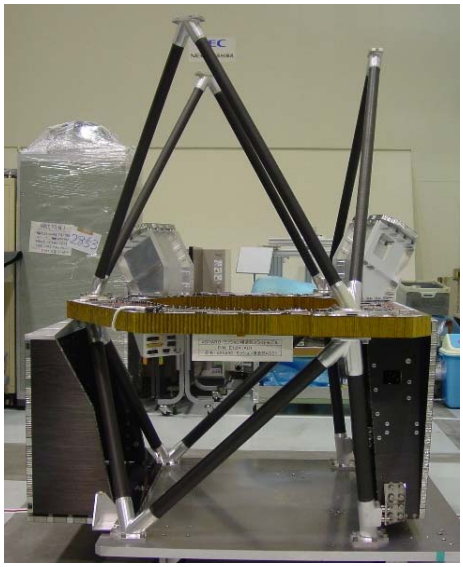


図 A-3-1-2-28　ミッション構造部

ウ、ミッション電気部

実際に軌道上に打ち上げられるミッション系電気コンポーネントフライトモデルを組み合わせたミッション電気部を製造した。電気コンポーネント（一部は試作モデルや同等の機能を有する模擬装置）を電気的に接続し、下記の電気インタフェースの確認、サブシステムの機能性能試を行った。ミッション電気部の外観形状を図 A-3-1-2-29 に示す。

- DT 機能・性能確認（DT サブシステム試験として実施）
- TCU-ISSR 間インタフェース確認（MCS サブシステム試験として実施）
- X-MOD/X-PA と TCU 間のテレメトリ・コマンドインタフェース確認
- X-ANT と TCU 間の駆動信号インタフェース確認
- カバー駆動機構と TCU 間の駆動信号インタフェース確認
- ISSR と X-MOD 間の画像データ信号インタフェース、ローカル信号インタフェース確認

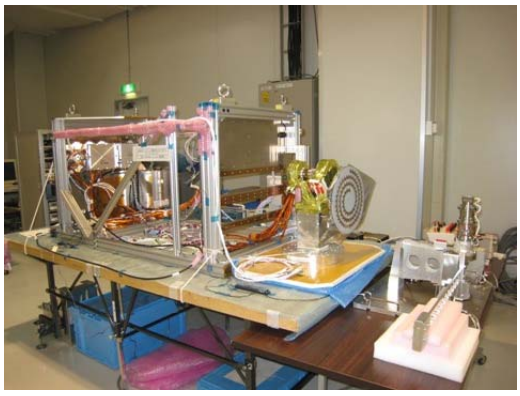


図 A-3-1-2-29　ミッション電気部

⑥ ミッション総合試験

上記の通りOPSによる光学性能検証結果、ミッション構造部／ミッション電気部によるインテグレーション性確認結果、ミッション電気部による電気的検証結果、及び各機器・サブシステム試験結果、設計・解析結果により要求されたミッション総合性能を満足していることを確認した。

(4)宇宙実証

① 打ち上げ機候補洗い出し

以下のロケットについて、調査・インタフェース設計・解析を行った。

・ 国産ロケット
イプシロンロケット（開発中）、H-IIA

・ 海外ロケット
DNEPR、ROCKOT、Kosmos 3M、Falcon-1e

② 打ち上げ機選定

ア、打上げ機選定

a. 打上げ機選定

打上能力と性能、打上げスケジュール適合性、打上げ実績および実用性の観点から、打上げ機をDNEPRとROCKOTに絞り、担当会社に提案要請を行い、提案書を検討した結果、DNEPRを選定した。この結論に基き、DNEPRの打ち上げを担当するISC Kosmotras 社（以下ISCKという）と契約調整を行い、DNEPRロケットをASNARO打上ロケットとして正式に選定した。

b. 射場調査・インタフェース調整

ISCK と契約後、ISCK が管理する射場である Yasny 基地（ロシア、オレンブルグ州）の調査、ISCK の副契約者でありロケットの製造請負のユジノエ社（ウクライナ、ユジノエ設計オフィス）を含めて、インタフェース調整会議、技術調整および各種インタフェース試験（PAF 分離衝撃試験、PAF 適合性試験、Space Head Module（SHM）フィットチェック立会い）を行った。

c. 輸送検討・実施

日本から射場であるロシア Yasny 基地までの輸送経路と手段および実績は以下の通りである。この経路で日本からロシアに輸送する輸出品リストを作成し、国内の輸出申請並びにロシア側の通関に必要な情報を ISCK に提出している。

（ｉ）国内輸送（衛星保管場所：JAXA筑波宇宙センター → 成田空港）
輸送手段：トラック

（ii）成田空港 →(通関地：Ulyanovsk 空港)→ Orsk 空港
輸送手段：貨物輸送機（チャータ便が第一候補）
実績：平成 26 年 8 月 20 日昼過ぎ 成田空港発
平成 26 年 8 月 20 日夜 Ulyanovsk 空港着
平成 26 年 8 月 21 日 17:00 頃 Orsk 空港着

（iii）Orsk 空港 → Yasny 基地
輸送手段：トラック（ISCK 社手配）

実績:平成 26 年 8 月 21 日夜　Orsk 空港発
平成 26 年 8 月 22 日未明　Yasny 基地着

イ、軌道上実証準備

a. 運用準備

運用準備として下記の作業を実施した。

・ 打上／初期運用計画の立案、運用リハーサル計画の立案
・ 運用データベースの整備
・ 運用マニュアル、運用手順書の整備

b. 海外ネットワーク選定・インタフェース調整

打上／初期運用時に衛星との通信に必要な海外ネットワークをノルウェーの Kongsberg Satellite Services 社（以下KSATという）に選定し、インタフェース調整会議を実施した（平成24年7月、平成26年8月、平成26年9月）。

c. 打上げ準備

（ｉ）ASNARO LRR（Launch Readiness Review）

平成 26 年 9 月 25 日に Yasni 射場にて ASNARO LRR（Launch Readiness Review）を実施し、必要な準備がなされアクションアイテムがクローズしていることを確認した。

（ii）ASNARO 運用準備完了確認会（ORR: Operation Readiness Review）

平成 26 年 10 月 24 日に NEC にて ASNARO 運用準備完了確認会（ORR: Operation Readiness Review）を実施し、以下の運用の観点から打上げおよび初期運用フェーズへの移行が妥当である事を確認した。

・試験完了状況
初期運用で使用する衛星管制センタ、データセンタ、ネットワーク運用センター及び各地上局間を接続し、試験を実施し完了した。

・運用設備、地上局準備状況
運用設備、地上局予約状況、地上局準備状況、射場とのインタフェース等準備状況に関し問題無い事を確認した。

・公的手続きの状況
宇宙物体登録、無線局免許に関し問題無い事を確認した。

・運用手順準備状況
運用手順準備状況に関し問題無い事を確認した。

・運用計画設定状況
運用計画設定状況に関し問題無い事を確認した。

・体制整備、訓練・リハーサル完了状況
体制整備、訓練・リハーサル完了状況に関し問題無い事を確認した。

d. 打上・初期運用

ASNARO は、平成 26 年 11 月 6 日 16 時 35 分（日本標準時）にヤスニ射場からドニエプル・ロケットにより打ち上げられ、所定の軌道に投入された。その後、各機器の動作状況を確認しながら順次衛星の搭載機器を稼働させ、11 月 6 日の真夜中辺りで衛星が

最終的に稼働状態に入ったことを確認し、打上・クリティカルフェーズを終了した。その後、9.5 日間のチェックアウト・フェーズ、約 3 ヶ月の校正運用フェーズで衛星バス、ミッション機器の機能･性能の基本的な動作確認を軌道上で行った。この軌道上運用を通して、衛星システム開発仕様書に定められた機能、性能の軌道上検証を実施した。

③ 宇宙実証

ア、実証結果

平成 27 年 2 月 17 日の技術委員会において、ASNARO の軌道上試験および運用結果に基づく解析検証結果が開発仕様（地上・宇宙総合システム、標準小型衛星バス、搭載ミッションについての仕様）に適合していることを確認した。

・打上・クリティカルフェーズの結果

ASNARO は平成 26 年 11 月 6 日 16:35(日本標準時)にロシア・ヤスニ射場からドニエプルロケットにより打ち上げられた後、11 月 7 日 0:00(日本標準時)の沖縄局からのコマンドによるロンチロック解除まで正常に実施され、打上・クリティカルフェーズを問題なく完了した。

・チェックアウト・フェーズの結果

すべてのチェックアウト運用（L+0 日～L+9 日）を問題なく完了した。

・校正運用フェーズの結果

予定された校正運用（L+10 日～L+90 日）を問題なく完了した。但し、遅延している一部の機能確認及び精度向上を継続して実施する。

イ、衛星画像のサンプル

図 A-3-1-2-30～図 A-3-1-2-33 に、ASNARO の画像サンプルを示す。

図 A-3-1-2-30　京都駅

図 A-3-1-2-31　西之島

図 A-3-1-2-32　スカイツリー

図 A-3-1-2-33　NEC 府中事業場

Ａ－３－１－３　特許出願状況等

表 A-3-1-3-1　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	「先進的宇宙システム ASNARO の開発」@NEC 技報 Vol.64 No.1（2011 年 3 月）	H23.3
	特集　宇宙民営化元年 @日経エレクトロニクス	H25.1
投稿	「ASNAROプロジェクト　小型衛星開発で日本の強みを活かし海外展開めざす」＜インタビュー記事＞@向学新聞	H23.3
	Japan Delays ASNARO-1, Switches to Russian Rocket @Space News	H23.6
発表	「ASNARO」のパネル展示@国際航空宇宙展（JA2008）	H20.10
	「ASNARO GPSR における SpaceWire の適用事例」@ SpaceWire ユーザ会	H21.12
	「地球観測衛星の小型化・高機能化のイノベーション」@経済研究所 BBL セミナー	H22.2
	ASNARO 紹介@　NHK「サイエンスアイ」	H20.10
	ASNARO 紹介@テレビ東京「ワールドビジネスサテライト」	H22.3
	ASNARO 紹介@BS-i「榊原・嶌のグローバルナビ」	H22.8
	ASNARO 紹介@経済産業ジャーナル（METI Journal）	H22.11
	ASNARO 紹介@経済産業ジャーナル（METI Journal）	H22.12
	小型低価格の人工衛星新興国に売り込み @NHK おはよう日本	H26.1
論文・発表	System Outline of the Advanced Satellite with New System ARchitecture for Observation (ASNARO)@27th International Symposium on Space Technology and Science	H21.7
	Introduction and the Outline Of the ASNARO Project (Advanced Satellite with New System ARchitecture for Observation) @ 27th International Symposium on Space Technology and Science	H21.7
	System outline of small Standard bus and ASNARO spacecraft@23nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites (AIAA:The American Institute of Aeronautics and Astronautics, USU: Utah State University)	H21.8
	ASNARO 衛星のシステム概要@第 53 回宇宙科学技術連合講演会	H21.9
	先進的宇宙システムコンソーシアムでの衛星開発運用活性化活動の概要@第 53 回宇宙科学技術連合講演会	H21.9
	先進的宇宙システムコンソーシアムでのインタフェース標準の検討@第 53 回宇宙科学技術連合講演会	H21.9
	先進的宇宙システムコンソーシアムでの民生部品・機器採用	H21.9

	基準・信頼性の検討@第 53 回宇宙科学技術連合講演会	
	先進的宇宙システムコンソーシアムでの自動自律運用・どこでも運用の検討@第 53 回宇宙科学技術連合講演会	H21.9
	「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」成果活用による産業化への取組み@第 53 回宇宙科学技術連合講演会	H21.9
	Study of criteria of commercial parts and equipment in the advanced space system consortium@ The 22nd Microelectronics Workshop	H21.9
	Project Outline of the Advanced Satellite with New system ARchitecture for Observation (ASNARO) @60th International Astronautical Congress	H21.10
	Project Outline of the Advanced Satellite with New system ARchitecture for Observation (ASNARO) @22nd Micro-electronics Workshop	H21.10
	The Outline and the Application of Advanced Satellite with New System ARchitecture for Observation (ASNARO) @3rd IAA Africa Regional Conference (IAA: The International Academy of Astronautics)	H21.11
	衛星搭載用高速デジタル変調器の開発@電子情報通信学会ソサイエティ大会	H22.9
	ASNARO プロジェクト概要@宇宙科学研究所　小型科学衛星シンポジウム	H23.3
	Outline and Progress of ASNARO Satellite System @8th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation	H23.4
	Outline and Progress of ASNARO Satellite System @3rd International Conference 2011 (Dnepropetrovsk)	H23.4
	Current Status and Problems for HALT Beginner in Space Applications @2011 Workshop on Accelerated Stress Testing & Reliability (San Francisco)	H23.9
	ASNARO 衛星開発概要と今後（小型化等による先進的宇宙システムの研究開発@第 2 回小型科学衛星シンポジウム	H24.3
	Outline and Progress of ASNARO @Small Satellite Systems and Services – The 4S Symposium	H24.6
	ASNARO 衛星及び標準小型衛星システム(NEXTAR)における Space Wire 技術　@第 56 回宇宙科学技術連合講演会	H24.11
	Space Wire 試験センタの活用事例　@第 56 回宇宙科学技術連合講演会	H24.11
	Space Wire 技術を用いた ASNARO 衛星及び標準小型衛星システム　@第 56 回宇宙科学技術連合講演会	H24.11
	ASNARO1 & 2 プロジェクトの概要　@第 3 回小型科学衛星シンポジウム	H25.3
	小型衛星バスシステム「NEXTAR」の試験標準化による品質	H25.11

	向上 @平成 25 年度宇宙航空品質保証シンポジウム	
表彰	「高強度反応焼結 SiC のミラーの開発」(社)日本セラミックス協会より第 63 回日本セラミックス協会賞技術賞	H21.8
	8th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation において最優秀ポスタープレゼンテーション(Poster Award)を受賞	H23.4

Ａ－３－２　目標の達成度

表 A-3-2-1. 目標に対する成果・達成度の一覧表： 全体

項目	目標・指標	成果	達成度
総合システム	地上・宇宙総合システムとしての開発を行う。	宇宙機側と地上系「可搬統合型小型地上システムの研究開発」担当（パスコ）とで、合同調整会議および細部技術検討を行う分科会により「総合システム開発仕様書」を平成 23 年 3 月に制定した。以降、同会議・分科会にて情報共有・検討を行いつつ、本仕様書を基として衛星−地上適合性試験を実施した。	達成
新しい仕組み	先進的宇宙システムのアーキテクチャを構築する。	・宇宙機関との連携、宇宙関連企業の技術を集結しただけでなく、中小企業や新規参入企業もコンソーシアムとして加えることにより、先進的宇宙システム設計、製造、試験の「仕組みづくり」の検討を行った。	達成
短納期の仕組み	再製造の場合に、2 年間で製造・試験実施を可能にする。	・新しい宇宙システム対応の標準ネットワーク方式であるスペースワイヤを採用することで、ミッション機器の変更に対してはソフトウエアの変更で対処が可能になり、従来はミッション要求に応じて設計変更を行なっていたバス機器のリピート生産が可能になり、設計変更により必要であった費用やリードタイムが圧縮でき、2 年以内の開発が可能であるという目処が立った。またスペースワイヤ試験センタを整備した。	達成
自動自律運用	人間の判断無しで 1 週間以上のバスの自動自律運用を実現する。	・自動機能、自律機能を活用し、観測計画とバス運用のコマンドをアップロード可能な衛星側の仕組みを構築し、1 週間以上の自動自律運用の目処が立った。	達成
小型衛星バス	バス質量 300kg 程度以下の小型地球観測衛星を開発する。	JAXA との共同研究により、軌道維持/修正のための推進系に燃料を充填した状況で 300kg 以下の重量（燃料なしで、設計値 250kg）となる小型衛星バスを製造し、性能確認試験、ミッション系搭載機器との組み合わせ試験、システム試験を実施した。	達成
高性能光学センサ	地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック）を目標とする可視光地球観測センサ	最終目標である地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック）のセンサとそれに光を集光することのできる光学反射望遠鏡を設計の段階から開発し、個別試験で性能を確認した。また衛星バスとの	達成

項目	目標・指標	成果	達成度
	を開発する。	組み合わせ試験、システム試験を実施した。	
宇宙実証	軌道上実証を実現する。	・国内外の打ち上げロケットを検討し、ロシアISC コスモトラス社のドニエプルを選定した。 ・衛星 － ロケット インタフェース調整、衛星の射場への輸送、射場での打上げ準備作業を経て平成 26 年 11 月 6 日（日本時間）に衛星を打ち上げ、軌道上運用を開始した。 ・「総合システム開発仕様書」を基にして、機能・性能について軌道上実証を行った。	達成

表 A-3-2-2. 目標に対する成果・達成度の一覧表： 要素技術

要素技術	目標・指標	成果	達成度
（1）先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立			
ネットワーク導入	・オープンアーキテクチャの採用により、衛星バスのプロトコル、サブシステム、機器間等のインタフェースの標準化を推進する。 ・スペースワイヤ（SpW）試験センタを実現する。	・スペースワイヤを活用して衛星を構築した。 ・スペースワイヤ(SpW)試験センタを整備した。	達成
熱構造電気インタフェース基準の設定	搭載機器インタフェース仕様を衛星システム/衛星機器メーカ固有のものでなく標準化する。	小型衛星の内部搭載機器に関する簡素化したインタフェース基準を作成した。	達成
民生部品採用基準の設定	使用される軌道での宇宙環境、運用年数を考慮した評価を実施出来るようにスクリーニング試験項目や試験条件等の基準を策定する。	・SERVIS プロジェクトの資産を活用しつつ、搭載予定の民生部品評価に適用する基準を作成した。 ・先進的な宇宙システムに使用する民生部品について、シングルイベント耐性評価を実施した。	達成
民生機器採用方針設定	民生部品や技術を使用している機器について、スクリーニング試験や耐放射線性の試験方法の方針を設定する。	民生機器採用基準の策定と、リスク評価・管理方法を方針に盛り込んだ。	達成
民生品利用における	小型衛星に適用可能な信頼性保証手法を確立	民生品利用機器の信頼性を検討する新しい信頼性/信頼度の考え	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
信頼性/信頼度の考え方	する。	方を検討した。	
試験検証の考え方	開発着手 2 年で組立試験が完了する仕組みとしての試験検証を確立する。	従来の考え方を見直し、簡略化された試験検証の考え方を検討した。	達成
自動自律化による運用の省力化	衛星運用システム全体から見た自動化・自律化能力の向上を実現する。	現状の自動化・自律化技術を元に今後の方向を検討した。	達成
ネットワークによるどこでも運用	場所に依存しない運用形態の構想検討を行う。	現状の衛星運用、他業種の技術状況を調査して、場所に依存しない運用形態の構想検討を行った。	達成
(2)標準的小型衛星バスの開発			
①衛星システム及び衛星バスの開発	質量 300kg 以下の小型衛星バスの低コスト・短期開発を実現する。	質量 300kg 以下の小型衛星バスの設計、製造および試験を実施した(燃料なしで、設計値 250kg)。	達成
ア、衛星システム及び衛星バス設計	衛星システム(システム性能、機器配置、全体コンフィギュレーション、質量配分、電力配分等)およびバス設計(構成、ネットワーク構成、熱/構造設計等)を実施する。	衛星システム(システム性能、機器配置、全体コンフィギュレーション、質量配分、電力配分等)およびバス設計(構成、ネットワーク構成、熱/構造設計等)を実施した。	達成
イ、衛星バス製造・試験	衛星バスの構成要素(コンポネント、バス構造部/電気部)の製造および試験を実施する。全機器の製造・試験を実施する。	衛星バスの構成要素(コンポネント、バス構造部/電気部)の製造および試験(構造モデル試験/熱モデル試験、構造部/電気部試験)を実施した。	達成
ウ、衛星システム総合試験	システム総合試験の実施を打上げ前に実施する。	搭載フライトモデル、開発モデルおとびシステム性能解析による評価を行って、最終的にシステム総合試験を実施した。	達成
エ、衛星ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽの整備	衛星運用時に適用する衛星データベースを構築する。	衛星データベースの整備を行った。	達成
②システム解析	宇宙実証の解析により、事後確認を実施する。	宇宙機システム解析を実施し、軌道上での特性予想を行い、設計条件、設計解析を行った。宇宙実証による解析を実施した。	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
③運用性向上	撮像性能、運用性に優れた機能・方式を実現する。	撮像性能、運用性に優れた機能・方式についてソフトウェアを試作して評価を行い、最終的に実装した。	達成
(3)搭載ミッション機器の開発			
①光学センサ設計	高度 500km から分解能（GSD）0.5m未満を実現する光学センサを実現し実証する。	高度 500km から分解能（GSD）0.5m 未満を実現する光学部の集光光学部/電子部機械部等の設計、製造、試験を行った。	達成
②光学センサ用 LSI 設計・試作・実装	光学センサ系 SOI(Silicon On Insulater)製造プロセスを使用した光学センサ用 LSI を実装する。	光学センサ系 SOI 製造プロセスを使用した光学センサ用 LSI を試作、評価し、実装した。	達成
③直接伝送系設計	800Mbps の高速画像伝送を可能にする直接伝送系を実現する。実用化のための符号化も実装する。	800Mbps の高速画像伝送を可能にする直接伝送系の設計および符号化設計を行い、その製造、試験を実施した。	達成
④ミッション制御部設計	ミッション制御部を実現する。	ミッション制御系の設計、製造、試験を行った。	達成
⑤ミッション機器製造・試験	各ミッション機器を製造し、搭載品の製造・試験を実施する。	ミッション機器構成要素（コンポーネント、ミッション構造部/電機部の）製造、試験を実施した。	達成
⑥ミッション総合試験実施	ミッションを組み合わせた総合試験を実施する。	総合試験および解析を行い、ミッション性能を評価した。	達成
(4)宇宙実証			
①打上げ機候補洗い出し	各種ロケットとの適合・不適合を明確化する。	国内外のロケットとのインタフェース解析を実施した。	達成
②打上げ機選定	打上げ機とのインタフェース調整および打ち上げを実施する。	・ロシア ISC コスモトラス社のドニエプル・ロケットを選定した。 ・衛星−ロケット インタフェース調整、射場準備作業を行い、平成 26 年 11 月 6 日（日本時間）に打上げた。	達成
③宇宙実証	総合システムの軌道上実証を行う	・「総合システム開発仕様書」を基にして、機能・性能について軌道上実証を行った。	達成

Ａ－４　事業化、波及効果について

Ａ－４－１　事業化の見通し

（1）成果の利用例

①ASNARO衛星による地球観測データの取得と利用

METI は政府機関からの地球観測データ取得の要望を受けて、ASNARO 衛星を利用して地球観測データを取得・配付を実施している。

②地球観測データ利用事業への事業拡大

NECは今回開発した技術を用いて小型標準バス「NEXTAR」という名称で製品化し、小型衛星製造事業および同衛星による観測画像のデータ利用事業を推進している。パスコは「可搬統合型小型地上システムの研究開発」の成果と連携を取り、衛星運用事業およびデータ販売事業について事業化を推進している。

③小型観測衛星による海外新興国への事業拡大

データ利用志向の中～上級レベルの新興国ユーザを主なターゲットとした、小型地球観測衛星システム販売事業を推進する。政府間協力と連携したアプローチとNEXTARバスベースの500kg級高性能小型衛星による多様な観測ミッションラインアップにより、海外拡販活動を行う。なお、機構/NECは現在までに東南アジア、アフリカ諸国、南米諸国など10カ国以上の新興国に対するアプローチを既に実施中である。

（2）事業化に至る期間

①小型観測衛星による海外新興国への事業拡大

現在、海外新興国からの初号機受注を目標として複数の商談を継続中である。

②地球観測データ利用事業への事業拡大

平成28年度にリモートセンシング法制定を前提として、事業化を計画する。

（3）問題点の分析と明確な解決方策

世界の小型衛星市場は、衛星製造国の強い支援の下、欧州製シェアほぼ 100%という状況が続いており、新規参入の大きな障壁となっている。新興国の国家プロジェクトに対して新規に衛星を売り込む場合、価格が低くても過去に欧州メーカが販売した衛星と同等の性能では、国家予算を投入して新たに衛星を購入することはありえない。新規参入を実現するためには「同じ価格以下で現在保有する衛星より大幅な性能向上が望まれる」ことが条件であり、今回の研究開発で実現した標準化、高性能化技術を用いた小型衛星バス／ミッションは高い優位性を持つと考えられる。

我が国においては、リモートセンシングデータ・ポリシーが未だ確立していないため、民間業者による衛星画像データの販売は著しく制限を受けている。一刻も早くリモートセンシング法を制定して、その取り扱い基準を明確し、事業化の可能性を高めるべきである。

Ａ－４－２　波及効果

今回の事業で開発した小型標準バス「NEXTAR」は高い汎用性をもち、ASNAROのミッションである高分解能光学観測だけではなく、他のセンサ（レーダセンサ、ハイパースペクトラムセンサ等）による観測に対しても容易に対応が可能である。複数のセンサのラインアップを充実させ、さまざまなミッションで小型衛星コンステレーションを実現する

ことにより、地球観測データ利用事業に対して更なる事業の拡大が期待できる。
　また本事業成果の1つでもある先進的な宇宙システム開発アーキテクチャを活用し、NEXTARバスの拡張版としてASNAROよりも大型のセンサの搭載や、冗長化によるバスの長寿命化の実現、あるいは民生品を採用したNEXTARバスよりも安価で小型のバスの実現が可能である。ミッションだけではなく、バスのラインアップを充実させることにより、海外新興国に対してさらなる事業の拡大が期待できる。

Ａ－５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ａ－５－１　研究開発計画

表 A-5-1-1. 研究開発計画

実施項目／年度	H.20	H.21	H.22	H.23	H24	H.25	H26
要素技術							
（1）先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立							
（2）標準的小型衛星バスの開発							
①衛星システム及び衛星バスの開発							
ア、衛星システム及び衛星バス設計、 イ、製造試験							
ウ、衛星システム総合試験							
エ、衛星データベースの整備							
②システム解析							
③運用性向上							
(3)搭載ミッション機器の開発							
①光学センサ設計							
②光学センサ用 LSI 設計・試作・実装							
③直接伝送系設計							
④ミッション制御部設計							
⑤ミッション機器製造・試験（製造設計含む）							
⑥ミッション総合試験実施							
(4)宇宙実証							
①打ち上げ機候補洗い出し							
②打ち上げ機選定							
③宇宙実証							

Ａ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、機構および NEC が NEDO/経済産業省からの委託を受けて実施した。また、共同実施先として国立大学法人東北大学、JAXA が参加した。

また、研究開発の実施に当たっては研究開発内容の評価を適切に実施するため、国内有識者からなる委員会を機構内に設け、事業計画、実施結果等の審議を実施する技術委員会（先進的宇宙システム技術委員会）を設置した。

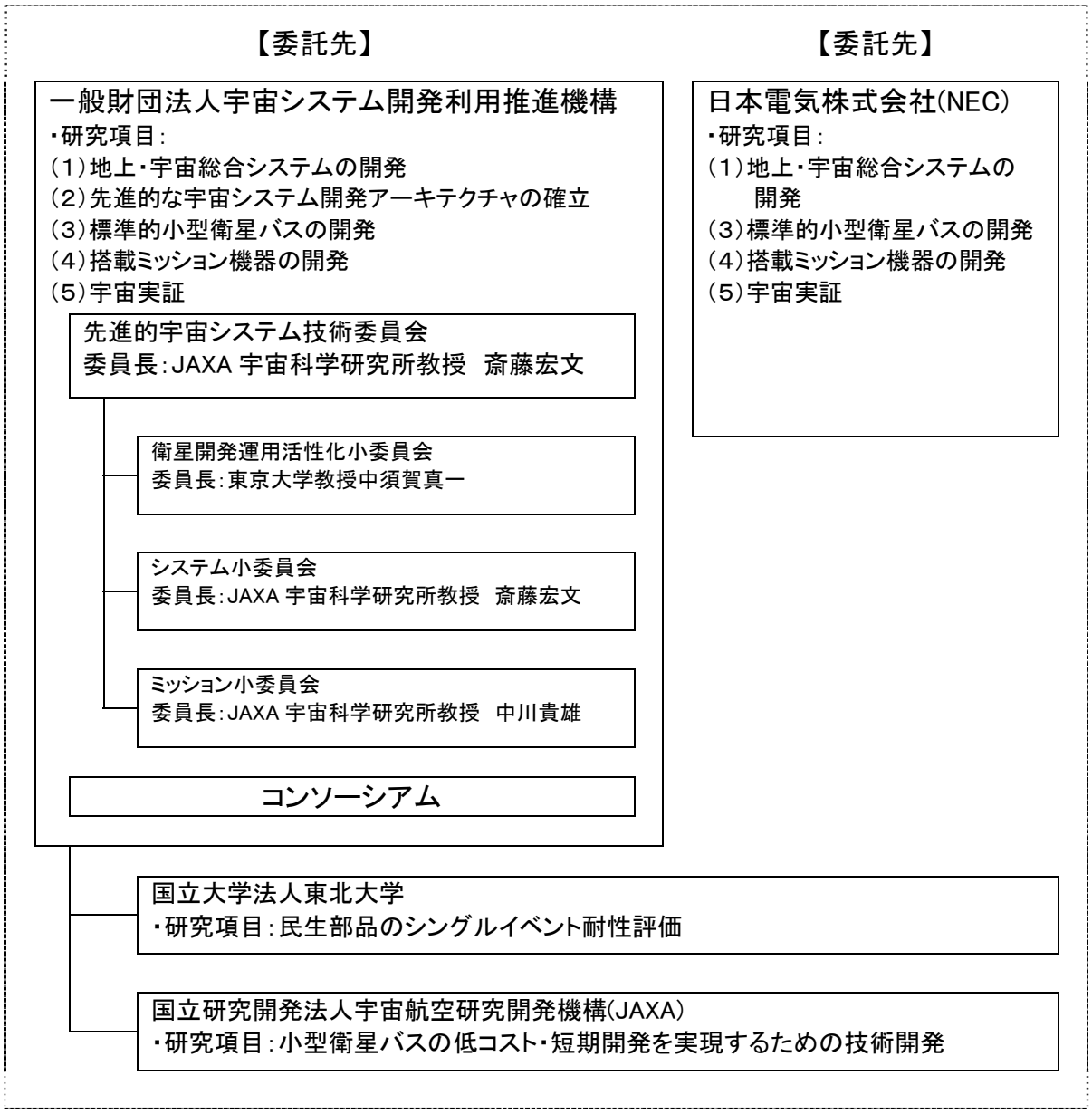


図 A-5-2-1. 研究開発実施体制

Ａ－５－３　資金配分

（1）資金配分

平成20年度から平成26年度までの資金配分実績（平成20～22年度はNEDO経由、平成 23～26 年度は経済産業省より）は以下の通りである。

表 A-5-3-1. 各年度資金配分　　（単位：百万円）

年度	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	合計
機構	540	661	1,000	451	199	32	20	2,903
NEC	30	568	576	2,892	910	1,013	649	6,638
国立大学法人　東北大学	4	4	4	0	2	0	0	14
JAXA	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	574	1,233	1,580	3,343	1,111	1,045	669	9,555

（2）作業分担

①平成 20 年から平成 22 年度まで

ア、一般財団法人　宇宙システム開発利用推進機構（機構）

・先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立

・標準的小型衛星バスの開発：衛星システム及び衛星バスの開発

・搭載ミッション機器の開発：

ミッション制御部、直接伝送系及び光学センサ系(ミラー加工及び組立)、

ミッション総合試験

イ、日本電気株式会社（NEC）

・標準的小型衛星バスの開発：システム解析、運用性向上

・搭載ミッション機器の開発

光学センサ系(ミラー加工及び組立除く)

ウ、国立大学法人　東北大学

・先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立の内、民生部品のシングルイベント評性評価

エ、国立研究開発法人　宇宙航空研究開発機構（JAXA）

・衛星システムおよび衛星バスの開発の内、小型衛星バスの低コスト・短期開発を実現するための技術開発についての共同研究実施

②.平成 23 年度から平成 26 年度まで

ア、一般財団法人　宇宙システム開発利用推進機構（機構）

・先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立

・地上・宇宙総合システムの開発

設計、製造、評価試験に関する管理監督業務（総合システム仕様書とりまとめ）

・標準的小型衛星バスの開発

設計、製造、評価試験に関する管理監督業務

・搭載ミッション機器の開発

設計、製造、評価試験に関する管理監督業務

・軌道上実証

軌道上実証準備、実証および評価に関する管理監督業務

イ、日本電気株式会社（NEC）

・地上・宇宙総合シスエムの開発

機構との合意のもと、設計、製造、評価試験の実施

・標準的小型衛星バスの開発

機構との合意のもと、設計、製造、評価試験の実施

・搭載ミッション機器の開発

機構との合意のもと、設計、製造、評価試験の実施

・軌道上実証

機構との合意のもと、軌道上実証準備、輸送、射場作業、データ取得、評価、撤収作業等の実施

ウ、国立大学法人　東北大学

・先進的な宇宙システム開発アーキテクチャの確立の内、民生部品のシングルイベント耐性評価

エ、国立研究開発法人　宇宙航空研究開発機構（JAXA）

・衛星システムおよび衛星バスの開発の内、小型衛星バスの低コスト・短期開発を実現するための技術開発についての共同研究実施

Ａ－５－４　費用対効果

ASNARO 衛星及び「可搬統合型小型地上システムの研究開発」の成果を活用して海外新興国へ小型観測衛星システム（衛星及び地上システム）を販売することで、１つのプロジェクト当たり衛星製造、地上設備構築、打上、初期運用サービス総額で 100 億円以上の売り上げが見込まれる。

このシステムを複数の海外振興国に販売し、さらにこの売上に加えてデータ利用事業を拡大することで、投入された資源量以上の成果及び波及効果が得られることが期待される。現在、複数の海外新興国へ小型観測衛星システム（衛星及び地上システム）の販売に関し営業活動を継続中である。

Ａ－５－５　変化への対応

現在小型衛星を新興国向けに販売している英国 SSTL 社、韓国 Satrec Initiative（SI）社の衛星の分解能は 1m～数 m のレンジであるが、近年 1m を切る観測衛星の開発を進めている。ASNARO はその 2 社が開発中のセンサよりも高い分解能を持ったセンサをすでに実現しており、商品価値としては十分高いと予測している。しかしながら、性能では劣るものの、価格面では非常に競争力があり、NEC としては ASNARO の成果をベースに複数衛星の製造・販売を前提とした量産体制を整え、更なる低価格化・短納期化の準備を進めている。

Ｂ　超高分解能合成開口レーダの
小型化技術の研究開発

日本電気株式会社

Ｂ－１　施策の目的・政策的位置付け

Ｂ－１－１　施策の目的

〇将来の成長が期待される我が国の宇宙産業の国際競争力を強化するために、軌道上検証済みの高性能小型衛星（光学衛星）に続き、民間企業等が行う高分解能な Xバンド合成開口レーダの小型化、低コスト化を実現する高性能小型衛星（レーダ衛星）の研究開発を助成する。

〇小型の光学衛星と合成開口レーダ衛星を組み合わせることにより高頻度の地球観測システムを構築することが可能となる。またレーダ衛星は、光学衛星では撮像できない夜間・悪天候においても撮像が可能であるため、光学衛星と一対のシステムとして需要がある。

〇本事業を通じて、民間企業等に衛星の実証機会を提供することにより、光学衛星、レーダ衛星、地上局をひとつの衛星システムとして国際市場へ参入することが可能となる。これらの衛星システムについては、すでに複数の国から調達に関する要請照会が来ている。

〇また、宇宙基本計画等においても着実な実施が求められている。

Ｂ－１－２　政策的位置付け

〇高性能小型衛星（レーダ衛星）の研究開発

・小型の光学衛星と合成開口レーダ衛星を組み合わせることにより、高頻度の地球観測が実現できるシステムを構築することが可能

・衛星搭載用として我が国初のXバンド合成開口レーダ

・低コストで世界最先端クラスの分解能

〇我が国宇宙産業の国際競争力の強化

国際衛星市場への参入（アジア・中東等）

・国際産業協力、ODA 案件形成

政府衛星の計画的・効率的な開発・調達

・科学衛星等への活用

・先端民生技術・部品の実証機会の提供

新たな衛星システム運用への展開

・複数機運用による広域観測や高頻度観測

Ｂ－１－３　国の関与の必要性

宇宙システムは、一般的に極限環境下で極めて高い信頼性が求められ、その研究開発や宇宙実証には多額の費用を要すること、また、我が国宇宙産業は欧米と比べ官需依存度が高いこと等から、リスクが高く、かつ、直接利益に結びつかない衛星の研究開発や宇宙実証を民間企業のみで実施することは困難であることから、我が国が有する民生技術の強みを最大限活用するとともに、政府による衛星・ロケット等の計画的な開発・調達を通じて、我が国宇宙産業の国際競争力の強化に必要なこれら研究開発や宇宙実証の機会を提供することが必要不可欠である。特に、衛星の小型化、低コスト化、短納期化を実現するための新たな設計思想を確立するためには、実際にその設計思想に基づき、衛星の試作機を開発・試験し、軌道上実証を行うことが必要不可欠であるため、政府による研究開発事業の実施が必要となる。

Ｂ－２　研究開発目標

Ｂ－２－１　研究開発目標

本プロジェクトは、国際競争力の強化のため、我が国の強みである民生部品及び民生技術等を適用した高機能、低コスト、短納期な、小型化等による先進的宇宙システムの開発技術を確立することを目的とした ASNARO：＜Advanced Satellite with New System ARchitecture for Observation＞）で宇宙実証された衛星バスの後継機を用いる。また、搭載ミッションは、分解能 1m 以下（軌道高度 505km、スポットライト）を目標とする超分解能合成開口レーダ（SAR センサ）の開発を行う。これにより、諸外国の最先端技術に比肩する、バス質量 350kg 程度以下の小型地球観測衛星の開発技術を獲得する。

平成２３年度から補助事業を受け「超高分解合成開口レーダの小型化技術の研究開発」（衛星名としては以下 ASNARO-2：＜Advanced Satellite with New System ARchitecture for Observation 2＞）として、日本電気株式会社（以下 NEC）と三菱電機株式会社（以下 MELCO）にて研究開発を行う。

Ｂ－２－２　目標設定

以下、表 B-2-2-1 に全体の目標を記載する。

表 B-2-2-1. 全体の目標

項目	目標・指標（中間評価時点）	目標・指標（事後評価時点）	設定理由・根拠等
超高分解能レーダセンサ（SAR）	分解能1m未満を目標とする我が国初のＸバンドの合成開口レーダの設計を完了する。	分解能1m未満を目標とする我が国初のＸバンドの合成開口レーダを開発する。	諸外国の中型大型のXバンドの合成開口レーダ衛星に比肩する性能をもつことで、国際競争力を確保する必要がある。
小型衛星バス	バス質量 350kg 程度以下の高電力対応の小型地球観測衛星の設計を完了する。	バス質量 350kg 程度以下の高電力対応の小型地球観測衛星を開発する。	高電力小型衛星バスとして SAR ミッション機器に対応しやすい規模（適切な電力と姿勢制御可能）として 350kg のバス質量を設定した。
パルスTWTA	SAR センサに搭載する高出力増幅器の設計を完了する。	SAR センサに搭載する高出力増幅器を開発する。	消費電力を削減する目的として小型衛星搭載用の高出力増幅器の開発する必要がある
短納期の仕組み	衛星システムの全製造試験期間（2 年）のうち前半に相当する、「バス機器の製造着手から機器試験完了まで」、1 年間で実現する。	2 年間で製造試験を実現する仕組みを構築する。 【製造試験期間＝機器製造着手～衛星システム試験完了迄】	製造試験期間を2年間に短縮することで、国際競争力を確保する。
国内ロケットへの適合	イプシロンロケットへの適合性確認を完了する。	我が国の打上げロケットを活用し、宇宙産業の国際競争力を強化する。	小型衛星の打上げ手段として確保する。
宇宙実証	運用準備を開始する。	軌道上実証を実現する。	平成 28年度の軌道上実証に向けて運用準備を開始する。

Ｂ－３　成果、目標の達成度

Ｂ－３－１　成果

Ｂ－３－１－１　全体成果、個別要素技術成果

（1）超高分解能レーダセンサ

超高分解能レーダセンサについては、分解能 1m 未満（軌道高度 505km、スポットライトモード）の X バンド合成開口レーダの設計が完了した。

（表 B-3-1-1-1　設計結果サマリ）

ア）ミッション運用は、観測計画に応じたミッション系の自動コマンドをアップロードすることで、姿勢駆動制御、撮像、データ蓄積、データ伝送のすべての運用を自動で行うことが可能である。観測モードは、図 B-3-1-1 に示す。

バス系については、ミッションとは別に自動コマンドとしてアップロードすることが可能な設計としており、たとえば 1 週間分の計画をアップロードすれば、バスについてはその期間人の介在する運用は不要となる。

表 B-3-1-1-1　設計結果サマリ

項　目	設計結果	備　考
センサの種類	合成開口レーダ（SARセンサ）	
分解能	スポットライト：1m以下　＊ ストリップマップ：2m以下 スキャンSAR：16m以下	＊観測時間は、ﾓｰﾄﾞ1が4.4sec、ﾓｰﾄﾞ2が10sec
観測幅	スポットライト：10km以上 ストリップマップ：12km以上 スキャンSAR：50km以上	
撮像範囲	オフナディア角 15-45deg	
偏波機能	HH or VV	２偏波（選択可能）
データ圧縮	1/2、1/4、非圧縮	
量子化ビットレート	8bit	

イ）観測モード

①スポットライトモード：高い解像度を利用して都市化状況の把握、安全保障関連用途（船舶の安全航行等）の利用を想定

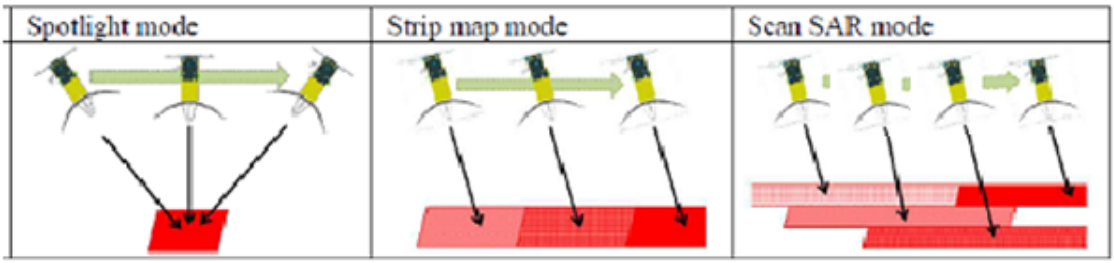
※ スポットライトモード 1（観測時間 4.4sec）とスポットライトモード 2（同 10sec）があり、スポットライトモード 2 の方が暗いターゲットまで観測できる。

②ストリップマップモード、スキャンSARモード

：広域を観測する用途として自然災害監視（火山活動土砂崩れ）、資源探査（森林・鉱山）、温暖化（氷河）監視など、対象物の経年変化の観測を想定

画像の需要としては高解像度画像（スポットライトモード観測）が多い。
SAR 観測時には衛星本体に搭載しているアンテナを観測対象に向けるために衛星本体を姿勢制御 （ボディポインティング）をすることを特徴としている

図 B-3-1-1-1　観測モード



以下、表 B-3-1-1-2 に「衛星質量と分解能の相関関係」を示す。ASNARO の光学衛星と同様のグラフ上に SAR 衛星のグラフをプロットした。

SAR センサに関しては、小型衛星への搭載例が少ないため顕著な高分解能トレンドは見えてこないが、今後の技術進歩によって一定の傾向を示すと考えられる。

その中で ASNARO-2 のポジションとしては軽量高分解能という相関関係においては、国内外の他の衛星(ALOS シリーズ、TerraSAR-X、COSMO SkyMed)に比肩する性能を有している。

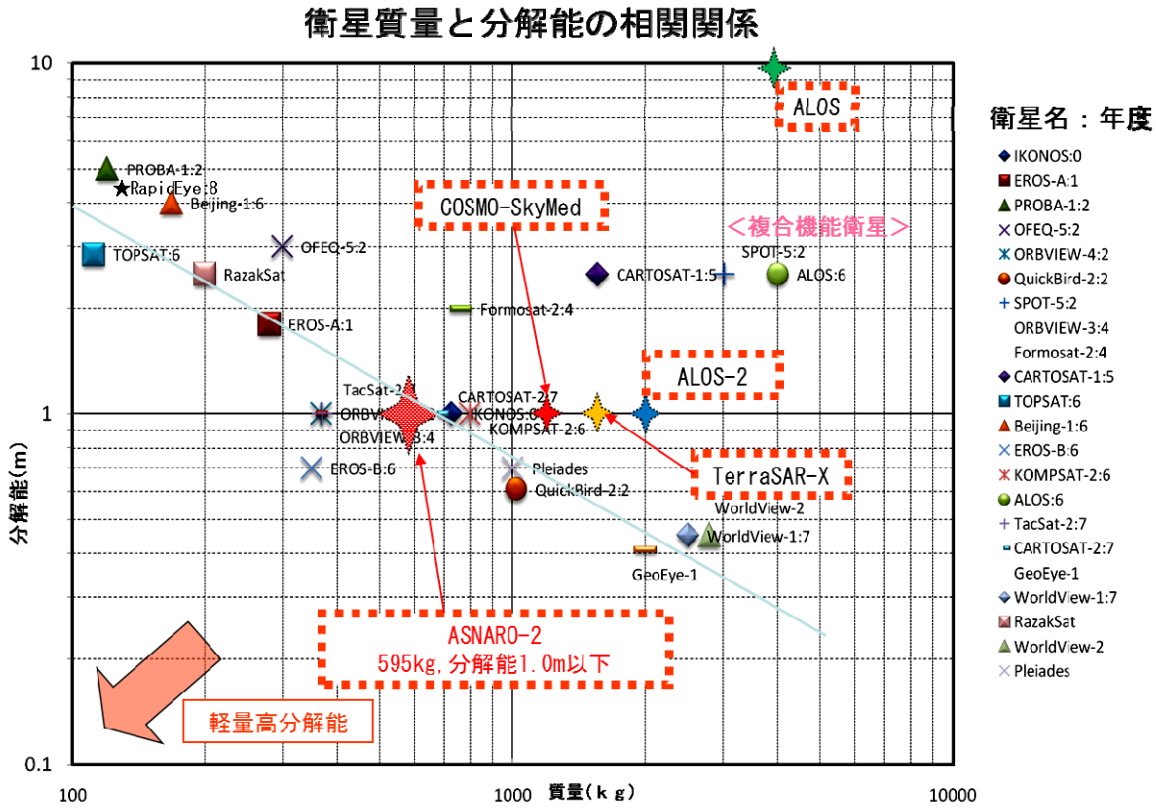


図 B-3-1-1-2 衛星質量と分解能の相関関係

ウ）搭載ミッション機器の開発

①超分解能合成開口レーダ（SAR センサ）

(1)衛星バスに搭載された状態で、打上げ時の加速度、振動、音響、衝撃環境に耐え、打上げ機のフェアリング内に収納される形態を維持する。

(2)軌道上で SAR アンテナを展開し、鏡面の形状を維持する。

(3)衛星バス側から電力の供給を受け、軌道上から地表に向けて電波を放射し、地表からの反射波を受信し、ローデータを取得する。

(4)取得した SAR ローデータと、衛星バスシステムから供給されるアンシラリデータを所定のフォーマットに編集し、衛星バスに出力する。

(5)衛星バスからコマンドを受信し、観測する電波の偏波面を水平か垂直に切り替える。

(6)衛星バスからコマンドを受信し、SAR ミッションの機器の動作を制御し、衛星バスの姿勢制御と連動して、以下の４つの観測モードを実行する。

A） スポットライトモード 1

B） スポットライトモード 2

C） ストリップマップモード

D） スキャン SAR モード

(7)SAR ミッション内の機器の動作状態をモニタし、その情報を所定のフォーマットのテレメトリ信号に編集して衛星バスに出力する。

(8)SAR ミッションの構成機器の温度を許容範囲内に維持するために、機器が発生する熱を宇宙空間に排熱し、機器の温度を計測し、また、衛星バス側から供給される電力に応じて保温用ヒータを発熱させる。

(9)SAR ミッション内部の動作状態をモニタし、異常状態が検出された場合、衛星システム側に異常信号を出力する。（衛星バス側は、異常信号を受けて SAR センサシステムをサバイバルモードに移行させるコマンドを送出するものとする。）

エ）SAR の観測性能サマリを表 B-3-1-1-2 に示す。

表 B-3-1-1-2　　SAR の観測性能サマリ

観測モード		スポットライトモード1	スポットライトモード2	ストリップマップモード	スキャンSARモード
周波数		9.65±0.12GHz			
偏波		HHまたはVVの切替			
オフナディア角		15～45度			
空間分解能※1	Rg	1.0m未満	1.0m未満	2.0m 未満	16.0m 未満
	Az	1.0m未満	1.0m未満	2.0m 未満	16.0m 未満
観測幅※1		Rg × Az	Rg × Az	Rg × Az	Rg × Az
		10km×10km	10km×10km	12km×800kmより長い	50km×800kmより長い
データレート		1.38Gbps 以下			
量子化ビット数		8bit			
データ圧縮		1/2, 1/4, 非圧縮 から選択			
NESZ※1		−14.0dBより低い	−15.5dBより低い	−17.0dBより低い	−25.0dBより低い
S/A※1		20dBより高い			
RF Duty		12%以下			
1シーン観測時間※1		4.4s	10.0s	−	−
観測運用Duty		最大2分/1周回			
アンテナ方式		開口面アンテナ（電気長ノミナル：約4m × 約1.5m）			

※1：赤道上対地高度 505km, オフナディア角 35° 付近の画像中心の値とする

・NESZ（Noise Equivalent Sigma Zero：雑音等価後方散乱係数）：
SAR センサの S/N(Signal to Noise ratio：信号対雑音比) を規定する性能でどこまで小さい後方散乱係数のターゲット（暗いターゲット）を撮像できるかを示す指標
（NESZ が小さいほど高性能）

・S/A：
ターゲットが実際の位置とは異なる位置に虚像として画像化されるレベルを示す指標
（S/A が大きいほど高性能）

・オフナディア角：（次頁参照）
衛星鉛直直下方向と衛星のレーダ照射方向のなす角度

【参考】合成開口レーダ（SAR）衛星とは

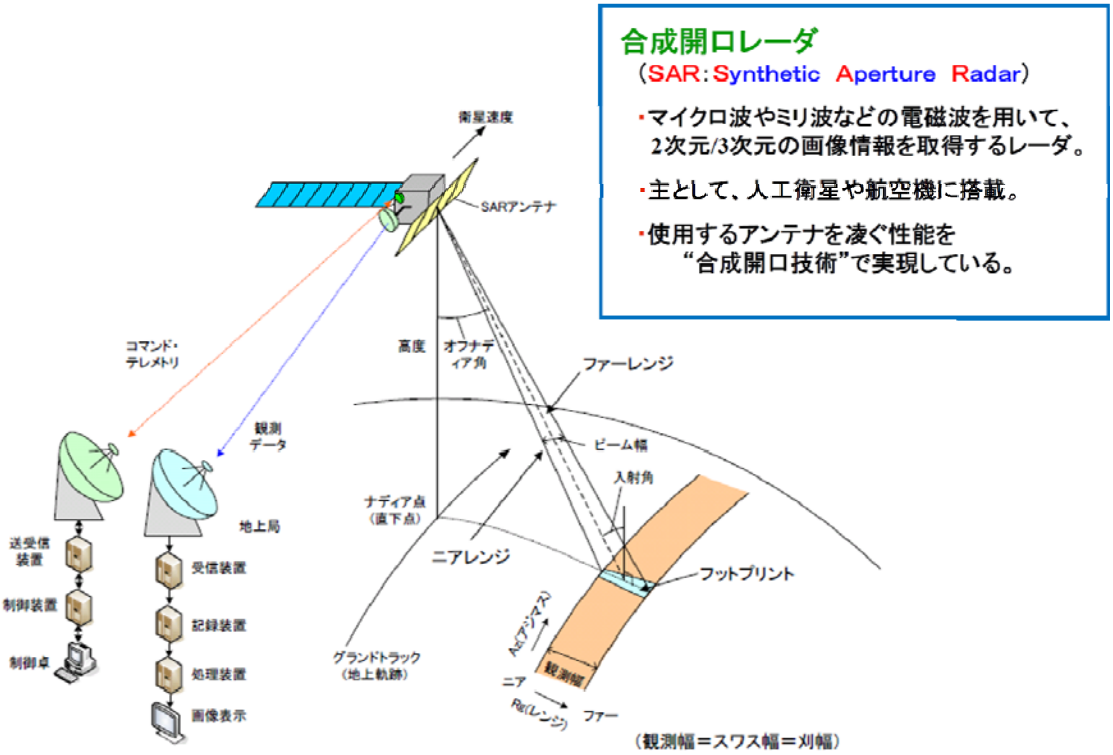


図 B-3-1-1-3 合成開口レーダ（SAR）衛星とは

(2)大電力用小型衛星バスの開発

バス質量350kg以下の高電力用小型地球観測衛星の開発に関しては、ASNAROで開発した小型衛星バスの後継機として、軌道維持/修正のための推進系に燃料を充填した状況で350kg以下の重量となる小型衛星バスを製造中である。

① 衛星システム諸元（衛星システムおよびバス設計）

ASNARO-2 は ASNARO のバス と同じコンポーネント、ネットワーク構成、運用性を備え、ミッションとしては全天候観測が可能なレーダ衛星（バス）として設計を完了した。衛星システム諸元を表 B-3-1-1-3 に示す。

表 B-3-1-1-3　衛星システム諸元

打上 軌道	2017 年（予定） 国内ロケットに適合 太陽同期準回帰軌道（高度 505km） 軌道傾斜角：97.4° 降交点通過太陽地方時刻：6 時
地上局	国内商用地上設備および可搬局、海外局
運用期間	5 年
質量	・バス　　305 kg（推薬除く） ・ミッション　　245 kg（最大搭載可能質量） ・推薬　　45 kg（最大搭載可能質量） ＜TOTAL＞　　595 kg
電力	発生電力：　　1300 W（5 年後） ミッション供給電力：　1550 W(BAT 供給)

② システム構成

システム構成図を図 B-3-1-1-4 に示す。

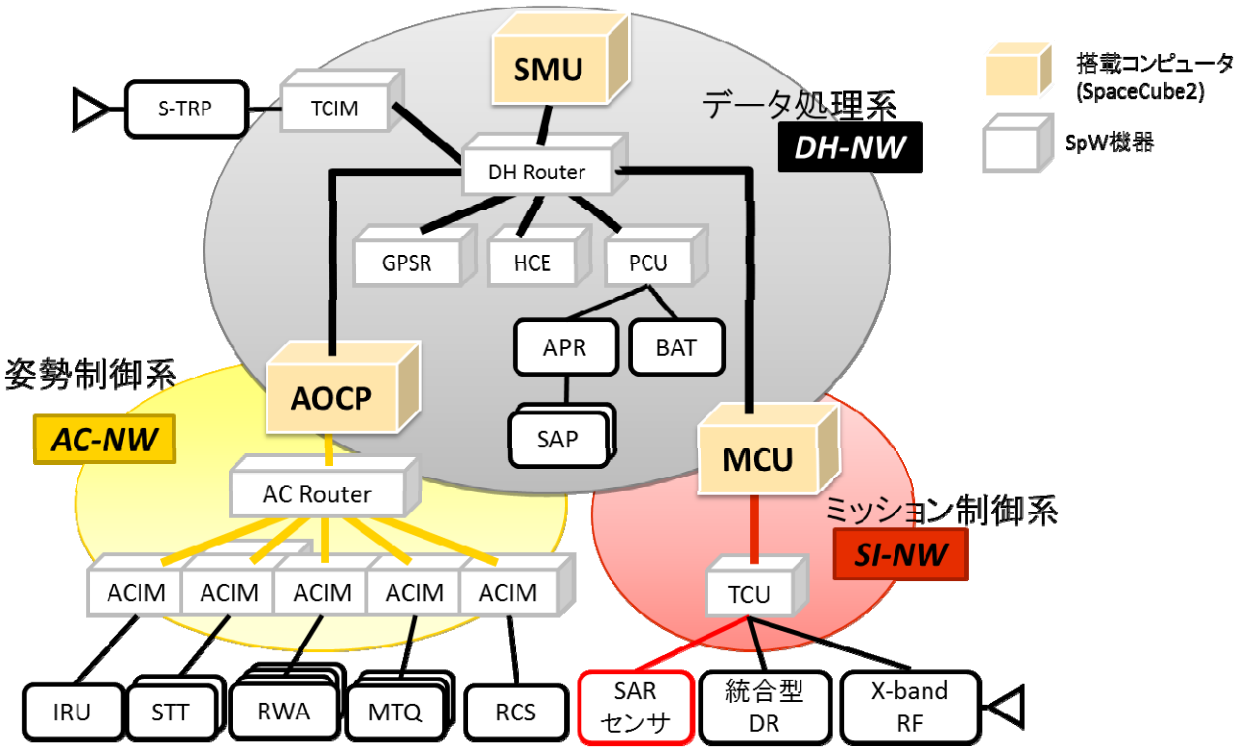


図 B-3-1-1-4 システム構成図

② 質量配分

衛星の質量配分を表 B-3-1-1-4 に示す。

表 B-3-1-1-4 衛星質量配分

バス質量(推薬を除く)	305.0kg
推薬(最大)	45kg
バス質量(推薬最大)	350kg
ミッション質量(最大)	245kg
衛星質量(推薬最大)	595kg

③ 電力配分

衛星の電力配分は表 B-3-1-1-5 の通りであり、バッテリに対する充電電力を考慮しても十分なパドル発生電力がある。なお、観測中はパドルのセル面が太陽を指向していないため、バッテリ放電を伴う。

表 B-3-1-1-5 衛星電力配分

	観測時	非観測時
衛星負荷電力	2000W	700W
ミッション	1550W	300W
バス	450W	400W
バッテリ充電電力	ー	600W 以下
太陽電池パドル発生電力	ー	1300W 以上

（3） パルス型高出力増幅器 （パルス TWTA)の開発

小型 SAR 衛星の電源制約の都合上より効率的な電波送信の仕組みが必要となる。つまり超高分解能レーダセンサの実現のためには SAR ミッションの省電力化をおこなう必要がある。

今回の中間報告では最小の消費電力で、大きな高周波エネルギーを放射するためのパルス TWTA（Traveling Wave Tube Amplifier:進行波管増幅器）の設計が完了した。（図 B-3-1-1-5）

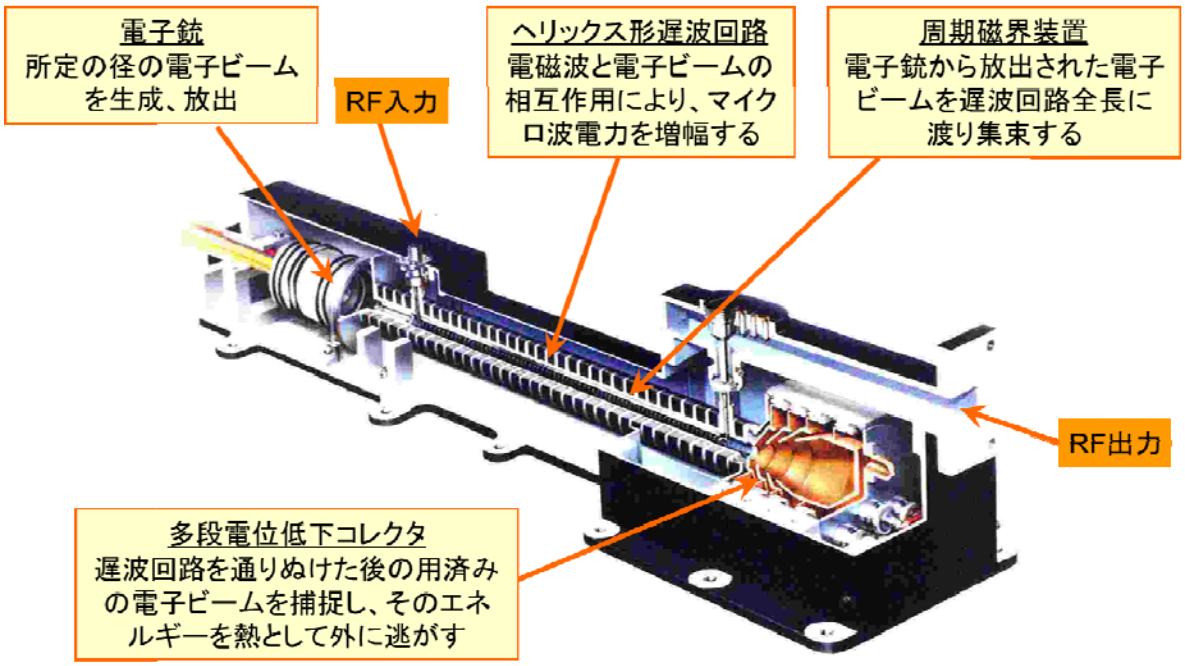


図 B-3-1-1-5 TWTA の基幹部分となる進行波間増幅器 TWT 概略図

TWTA は SAR ミッションのマルチポートアンプ部(MPA)に搭載され、以下の機能を果たすものとする。

① 入力される送信 RF 信号に対し、TWTA にて規定の電力まで増幅する。
② 入力されるグリッド on/off 信号に合わせて、TWTA 機器の送信可・不可を切り替える。
③TWTA の状態をモニタし、システム制御部(SC)に対して出力する。
④放電を停止する。
⑤出力端子の短絡、開放により送信波が全反射しても故障しない。
⑥受信した on/off のディスクリート信号に対応して、各機器の on/off 動作を行う。
⑦機器の温度状態を測定し、出力する。（温度モニタ機能）
⑧機器の on/off 状態を測定し、出力する（ステータスモニタ機能）

（4） 短納期の仕組み

製造試験期間を2年間に短縮することで、国際競争力を確保する。
中間評価時点では衛星システムの全製造試験期間（2 年）のうち前半に相当する、「バス機器の製造着手から機器試験完了まで」、1 年間で実現することを目標としている。

新しい宇宙システム対応の標準ネットワーク方式を採用することで、変更に対してはソフトウエアの変更で対処が可能になったためバス機器のリピート生産が可能になり、設計変更により必要であった費用やリードタイムが圧縮でき、それによりバス機器の製造着手から機器試験完了まで、1 年間で実現する、という仕組みは確立した。
但し、本報告時点では以下の理由により達成度としては「未達成」としている。

【未達成理由】

他国からの部品調達の手続きが長期化したため、製造着手が予定より遅延し現時点で製造中機器がある。 ＃機器試験完了予定（2016.2 月）

（5） 国内ロケットへの適合

① 打ち上げ機候補洗い出し

以下のロケットについて、調査・インタフェース設計・解析を行った。

- 国産ロケット
  イプシロンロケット、H-IIA
- 海外ロケット
  DNEPR　ROCKOT

② 打ち上げ機選定

その後以下の観点で打上機をイプシロンロケットに選定した。

・打上能力と性能
・打上げスケジュール適合性
・実用性

（6） 宇宙実証

平成 28年度の軌道上実証に向けて運用準備を開始した。

Ｂ－３－１－２　特許出願状況等

表 B-3-1-2-1　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文 発表	ASNARO-2 衛星の概要と全体計画 第 57 回宇宙科学技術連合講演会	2013/10
論文 発表	ASNARO-2　搭載用 X　バンド SAR　ミッションシステムの開発 第 57 回宇宙科学技術連合講演会	2013/10
論文 発表	衛星の標準バスのつくりかた―小型衛星「NEXTAR」の事例を中心に　情報処理学会誌	2015/7

Ｂ－３－２　目標の達成度

以下、表 B-3-2-1 に目標の達成度を記載する。

表 B-3-2-1. 目標に対する成果・達成度の一覧表（中間評価時点）

項目	目標・指標（中間評価時点）	成果	達成度
超高分解能センサ	分解能1m未満を目標とする我が国初のＸバンドの合成開口レーダの設計を完了する。	分解能 1m 未満の合成開口レーダの設計を完了した	達成
小型衛星バス	バス質量350kg程度以下の高電力対応の小型地球観測衛星の設計を完了する。	推進系に燃料を充填した状況で 350kg 以下の質量となる大電力仕様の小型衛星バスの設計を完了した。バス機器については現在製造中のフェーズにある。	達成
パルス TWTA	SAR センサに搭載する高出力増幅器の設計を完了する。	小型衛星搭載用の高出力増幅器の設計が完了した。	達成
短納期の仕組み	衛星システムの全製造試験期間（2 年）のうち前半に相当する、「バス機器の製造着手から機器試験完了まで」、1 年間で実現する。	【未達成：理由】他国からの部品調達の手続きが長期化したため、製造着手が予定より遅延し現時点で製造中機器がある。 #機器製造および試験完了予定(2018 年 2 月) 但し、新しい宇宙システム対応の衛星ネットワーク方式を採用することで、変更に対してはソフトウエアの改修で対応が可能になったためバス機器のリピート生産が可能になり、設計変更により必要であった費用やリードタイムが圧縮でき、それによりバス機器の製造着手から機器試験完了まで、1 年間で実現する、という仕組みは確立した。	未達成
国内ロケットへの適合	イプシロンロケットへの適合性確認を完了する。	打上げ機に関して、2017 年打上げ対応可能なロケットとしてイプシロンロケットの適合性確認が完了した。これにより打上げ機としてイプシロンロケットを選定した。	達成
宇宙実証	運用準備を開始する。	運用準備を開始した。	達成

Ｂ－４　事業成果、波及効果について

Ｂ－４－１　事業成果

小型標準バス「NEXTAR」をベースに SAR 観測衛星の設計を完了した。これにより既に開発済みの光学観測衛星と組み合わせた複数種類のセンサのラインアップが実現する。さまざまなミッションで小型衛星コンステレーションを実現することにより、多様なユーザニーズに応えた更なる地球観測データ利用事業の拡大が期待できる。今後、先進的な宇宙システム開発アーキテクチャを活用し、NEXTAR バスの拡張版として大型のセンサの搭載や、冗長化によるバスの長寿命化の実現、あるいは民生品を採用した NEXTAR バスよりも安価で小型のバスの実現が可能である。ミッションだけではなく、バスのラインアップを充実させることにより、海外新興国に対してさらなる事業の拡大が期待できる。（図 B-4-1-1）

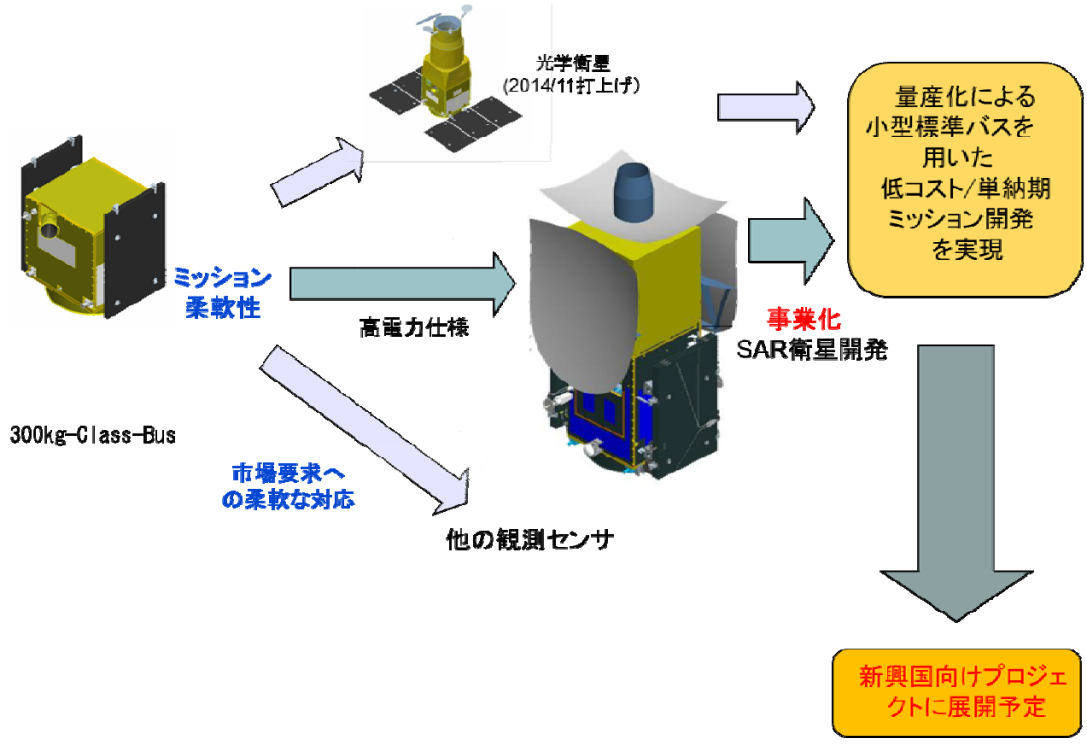


図 B-4-1-1 小型標準バスをベースとした事業成果

Ｂ－４－２　波及効果

① ASNARO-2 開発において小型標準バスに搭載されている機器の国産化率 80%以上を達成（機器数ベース）
⇒ 中小企業を活用（※）することで日本の産業活性化に貢献
※ アンテナ駆動モータ、衛星パネル生産を中小企業に委託

② 衛星システム海外拡販に向けて、海外訪問活動を実施。【次頁】

③ この売上に加えてデータ利用事業を拡大することで、投入された資源量以上の成果及び波及効果が得られることが期待される。【次頁】

Ｂ－４－２－１　波及効果詳細

（1）新興国向け海外展開

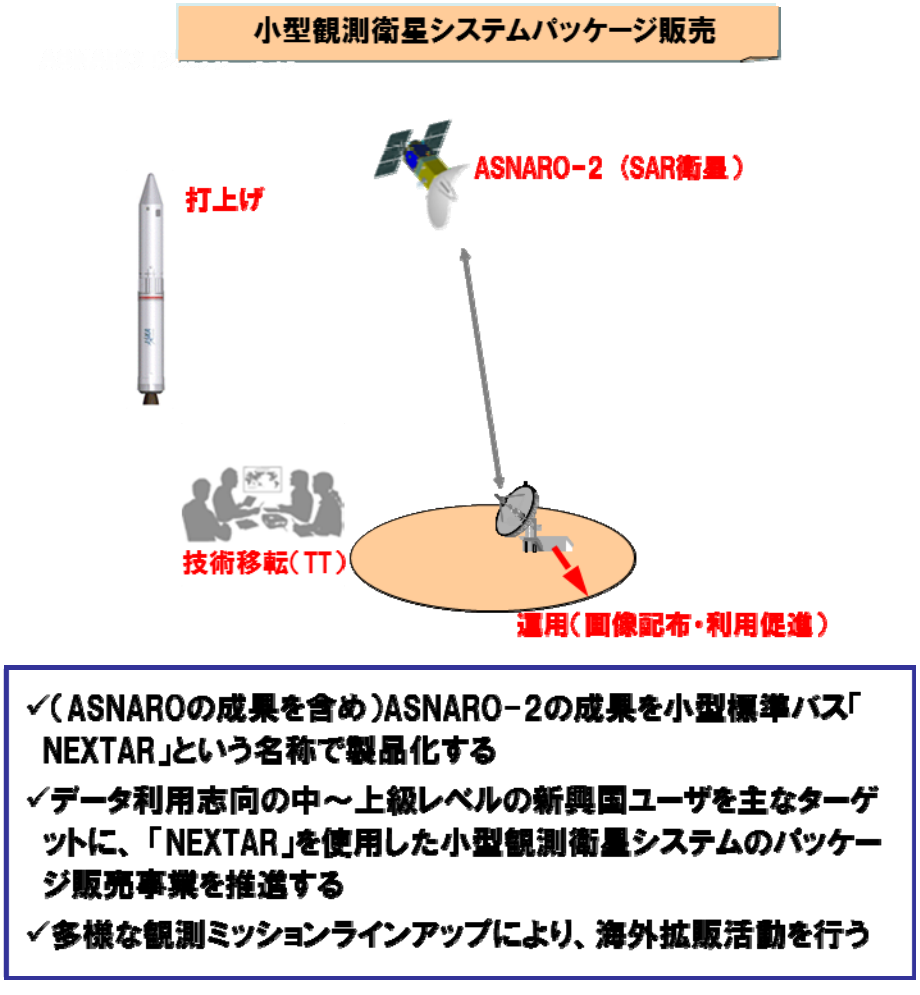
衛星システム海外拡販に向けて、海外訪問活動を実施している。

⇒新興国向けプロジェクトによる衛星製造、地上設備構築、打上、初期運用サービス提供を「システムパッケージ販売」として展開する。

（2）　地球観測データ利用事業への事業拡大

(ア) 小型 SAR による地球観測衛星システムパッケージ（図 4-2-A-2）

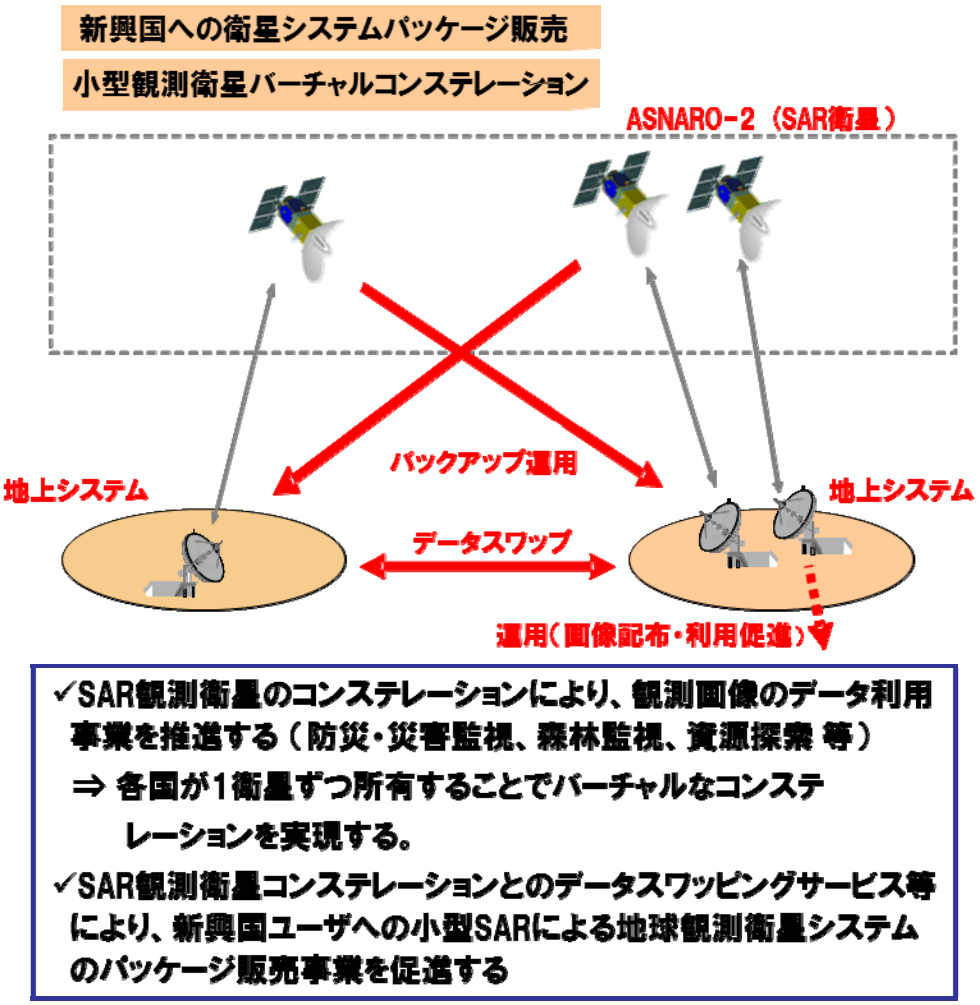
NECは今回開発した技術を用いて、新たに小型標準バス「NEXTAR」によるSAR観測衛星を製品化する。このSAR衛星を用いたデータ利用事業として、国内および新興国を中心とした海外市場における観測画像のデータ販売・利用事業を推進する。



図B-4-2-2　地球観測データ利用事業への事業拡大（例）

（イ）SAR 観測衛星コンステレーション（図 B-4-2-3）

データ利用志向の中～上級レベルの新興国ユーザを主なターゲットとした、小型SARによる地球観測衛星システムパッケージ販売を推進する。NEXTARバスベースの500kg級高性能小型衛星による多様な観測ミッションラインアップにより、海外拡販活動を行う。なお、NECは現在までに東南アジア、アフリカ諸国、南米諸国など10カ国以上の新興国に対するアプローチを既に実施中である。



図B-4-2-3 小型観測衛星による海外新興国への事業拡大（例）

（3）事業化に至る期間

①小型観測衛星による海外新興国への事業拡大

現在政府間の調整が進められている「新興国向けプロジェクト」を通じ、2015年度中に小型SAR衛星の初号機受注を目標とする。

② 地球観測データ利用事業への事業拡大

ASNARO-2衛星の画像校正運用が終了する予定の2017年度より、画像販売事業の立上げを目指す。

（4）問題点の分析と明確な解決方策

世界の小型衛星市場は、ドイツ、フランス、韓国などの政府による強力な支援を背景とした事業者が優位にあり、新規参入の大きな障壁となっている。新興国の国家プロジェクトに対して新規に衛星を売り込む場合、価格が低くても過去に先行国が販売した衛星と同等の性能では、国家予算を投入して新たに衛星を購入することはありえない。新規参入を実現するためには「同じ価格以下で現在保有する衛星より大幅な性能向上が望まれる」ことが条件であり、今回の研究開発で実現した標準化、高性能化技術を用いた小型衛星バス／ミッションは高い優位性を持つと考えられる。このように、上記に示した事業拡大のためには ASNARO-2 の成果達成が前提となる。そのためにはASNARO-2 衛星を 2017 年に打上げ、軌道上での性能評価完了が重要である。引き続きスケジュール面・性能面両方においてプロジェクト管理を行う。

ASNARO-2 は小型衛星でありながら 1m～数 m レンジの分解能を備え、諸外国の中型大型 X バンド合成開口レーダ衛星に比肩する性能を有しており、十分に高い商品価値を提供する衛星となり得る。また、小型衛星標準バスを活用することにより、短期間での製造・試験を実現する衛星量産体制の整備を進めることで、低価格化、短納期化を実現し、さらなる国際競争力の強化を図る。

Ｂ－５. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｂ－５－１　研究開発計画

以下、表 B-5-1-1 に研究開発計画を示す。

表 B-5-1-1. 研究開発計画

実施項目／年度	H.23	H.24	H.25	H.26	H.27	H.28
要素技術						
（1）超高分解能レーダセンサの開発						
（2）小型衛星バスの開発						
（3）パルスTWTAの開発						
（4）短納期の仕組み						
（5）国内ロケットへの適合						
（6）宇宙実証						

Ｂ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

以下、図 B-5-2-1 に研究開発実施体制を示す。

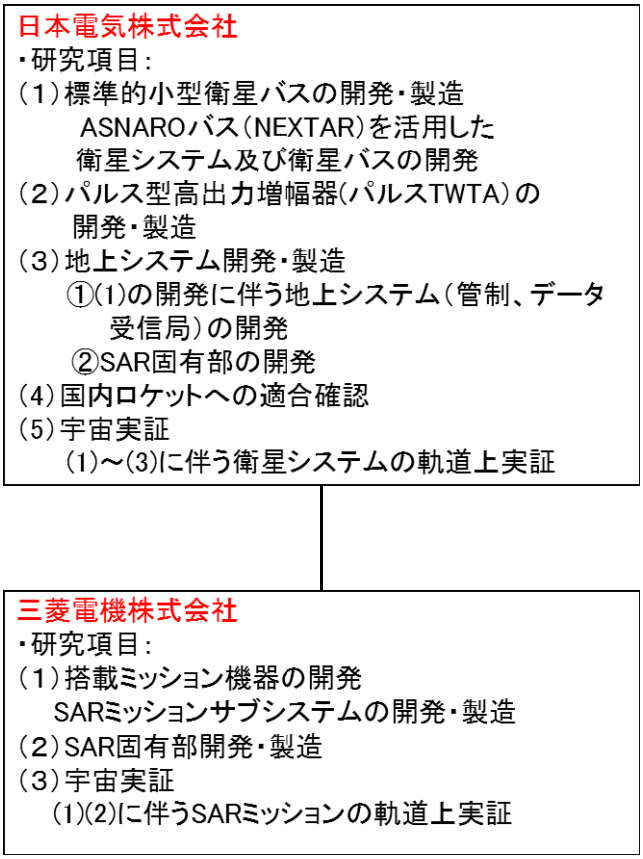


図 B-5-2-1. 研究開発実施体制

Ｂ－５－３　資金配分

（1）資金配分

平成 23 年度から平成 28 年度までの資金配分（実績及び予定）は以下、表 B-5-3-1 に示すとおり。

表 B-5-3-1. 各年度資金配分　　（単位：億円）

年度　平成	23	24	25	26	27	28	合計
超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発							
日本電気株式会社	0.7	22.4	42	3.2	0.5	2.7	71.5
三菱電機株式会社		9.4	16.5	23	3.5		52.4
独立行政法人宇宙航空研究開発機構				12	1	27.3	40.3
合計	0.7	31.8	58.5	38.2	5	30.0	164.2

（2）作業分担 （図 B-5-2-1. 研究開発実施体制 による）

①日本電気株式会社（NEC）

・標準的小型衛星バス（高電力 SAR 用）の開発

・搭載ミッション機器の開発

- パルス型高出力増幅器（パルス TWTA）

・地上システムの開発

- 管制、データ受信局
- SAR 固有部

・宇宙実証

②三菱電機株式会社

・SAR ミッションサブシステムの開発

・SAR 固有部の開発

・宇宙実証

Ｂ－５－４ 費用対効果

１つのプロジェクト当たり衛星製造、地上設備構築、打上、初期運用サービス総額１００億円以上の売り上げが期待される。この売上に加えてデータ利用事業を拡大することで、投入された資源量以上の成果及び波及効果が得られることが期待される。ASNARO 及び ASNARO-2 の成果をベースに複数衛星の製造・販売を前提とした量産体制を整え、更なる低価格化・短納期化を実現する。

Ｂ－５－５ 変化への対応

ASNARO-2 は小型衛星でありながら 1m～数ｍ レンジのレーダ分解能を備え、諸外国の中型大型 X バンド合成開口レーダ衛星に比肩する性能を有しており、十分に高い商品価値を提供する衛星となり得る。また、小型衛星標準バスを活用することにより、短期間での製造・試験を実現する衛星量産体制の整備を進めることで、低価格化、短納期化を実現し、さらなる国際競争力の強化を図る。

Ｃ　小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

株式会社パスコ

用語集の例

用語	用語説明
ALOS-2	平成 26 年 5 月 24 日に打ち上げられた JAXA が開発した地球観測衛星
CCSDS	1982 年に各国の宇宙機関により設立された宇宙データシステムの国際規格を検討／推奨する委員会
SLE	CCSDS が定める衛星－地上システム間や地上システム間のインタフェースプロトコル
UNIFORM-1	平成 26 年 5 月 24 日に打ち上げられた和歌山大学が開発した超小型衛星
衛星データ利用促進プラットフォーム	衛星データを容易にワンストップで統合的に検索・閲覧するためのシステムであり、内閣府が開発したシステムである。現在、本システムの運用を(株)パスコが担当している。
ほどよし１号機	平成 26 年 11 月 6 日に打ち上げられた東京大学が開発した超小型衛星

Ｃ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｃ－１－１　事業目的

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

衛星画像は自然災害をはじめ、広域に渡る災害の被災状況を把握するのに役立ち、先の東日本大震災においても多くの衛星画像が利用された。特に被災前の画像との比較や、刻一刻と変化する被災地の状況を継続的にかつ広域的に観測することが可能である衛星は、救助活動やその後の復興において欠くことのできないツールである。

防災以外にも農業における収量予測や資源探査、環境監視など衛星画像は広範囲な分野において利用されているが、各国が保有する衛星は独自の衛星軌道を周回し、独自の撮像計画に基づき運用が行われており、必ずしも効率的な連携がなされているわけではない。また衛星システムも各国独自のものに最適化されているため、連携する場合であっても最終的なアウトプットである衛星画像ベースでのデータ共有などとなる。

本研究開発では、我が国が保有する衛星システムにおけるコンステレーション衛星運用をコアとして、将来、日本製衛星システムを保有する各国のシステムとも連携を可能とする統合運用システムの研究開発を行う。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

昨今、地球観測衛星は高性能化とダウンサイジング（小型化）が進み、世界的にはコンステレーションとして運用されるケースが当たり前になってきている。観測衛星でコンステレーションを組む最大のメリットは、撮像機会が増加（時間分解能の向上）することであるが、同時に管理すべき大量の画像（ビッグデータ）が発生することは自明である。そして、これらのビッグデータから如何にして利用者が求める情報を抽出・加工して提供するかということは、大きな課題である。

例えば、地図作成用途で衛星画像を利用する場合、ステレオペアで撮像された画像を用いて立体視を行い、オペレータが 3D 空間上で、フィーチャ（道路や建物等）の判読を実施する。また、IMINT（IMage INTelligence）用途においては、関心フィーチャーに対するオペレータによるマニュアル判読が、現在も主流となっている。これらのフィーチャー判読は、人間の目視判読によるものであるが、人間の脳の複雑かつ高度な働きで、情報を空間として正確に把握し、また必要に応じて適宜補完を行うため、より的確な判断が行えることが特徴であり、それが最大のメリットである。しかしその一方、オペレータによる判読は、一般的に多くの教育と経験（ナレッジ）が必要であり、また判読する量に関しても限界がある。

衛星画像の利用用途は多岐に渡るが、上記で述べた判読を必要とするものが

大きな市場を占めているのが現状である。よって、コンステレーションシステムの価値を最大化し、それらの本来の目的を実現させるためには、画像判読の自動化は必要不可欠と言える。また、大量の画像を自動かつニアリアルタイムでプロダクト生成する仕組みは、「可搬統合型小型地上システムの研究開発」等により既に実現されており、画像判読の高速な自動処理が実現することにより、撮影から利用者への情報提供までのリードタイムは最小化される。これにより、連携するコンステレーションシステムの価値は飛躍的に高まり、衛星ビジネスにおける新たなサービスの創造も期待できる。

以上の背景から、本事業においては、コンステレーションから得られる大量の衛星画像に対して、利用者が必要とする地物の自動判読を高速に実施し、利用者に判読結果を最適な形で提供するためのシステムを開発すること目的としている。

Ｃ－１－２　政策的位置付け

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

ベトナム、タイをはじめ ASEAN 各国には、防災や農業管理等を目的とした衛星保有の機運が高まっており、現実に多くの国から我が国の衛星技術を活用した衛星システム構築の支援要請を受けている。これらの要請を各国単位で対応するのではなく、要請を束ねることで各国が拠出する経費以上のメリットを享受できるシステムとして、戦略的提案を ASEAN 諸国に提示することが重要である。各国の衛星をネットワーク化することにより、「高い撮像頻度」と「迅速な情報提供」を可能とするシステムを構築することが可能となり、ASEAN 諸国のニーズだけでなく、我が国のユーザにも役立つシステムとすることが可能となる。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

新成長戦略（平成 22 年 6 月 18 日、閣議決定）において、宇宙産業振興のため、小型衛星の開発や、衛星データ利用促進プラットフォームの構築、リアルタイム地球観測網の構築、最先端宇宙科学・技術による競争力の確保等の宇宙開発利用の推進が工程表に盛り込まれている。

また、産業構造ビジョン 2010（平成 22 年 6 月 3 日、産業構造審議会産業競争力部会報告書）の中で、海外市場獲得に向けた我が国企業の競争力強化 のため、防災、資源管理、環境監視、国土管理などの多様な宇宙システムの利用に係るアプリケーションの開発・実証を進めるとともに、防災等の分野でアジアとの国際協力も念頭に置いた 10 機程度の地球観測衛星を複数連携運用するシステムを構築し、衛星利用サービスの多様化を進めるとしている。加えて、社会・市場ニーズへの対応による宇宙システムの利用拡大のため、衛星データを利用したアプリケーション開発を促進し、地球環境変動の把握、農水産業の収穫管

理、エネルギー資源探査、防災・国土管理等における利用を拡大するとしている。

宇宙分野においては、「宇宙基本法」（平成 20 年 5 月 28 日）において、国は、宇宙開発利用に関する施策を総合的かつ計画的に推進すること、観測に関する情報システム等の整備の推進その他の必要な施策を講ずることとされた。

また、宇宙基本法を受けて策定された「宇宙基本計画」（平成 21 年 6 月 2 日宇宙開発戦略本部決定）においては、宇宙開発利用に関し政府が総合的かつ計画的に実施すべき施策として、アジア等に貢献する陸域・海域観測衛星システムの構築を推進するとしている。その中で、公共の安全の確保の分野においては、「アジア地域における災害時の情報把握」というニーズに対して、被災地域の広域での把握と、被害状況の把握のため人工衛星等の整備・活用（光学及びレーダ衛星で 4～8 機）や分析方法の高度化等を行うことを目標としている。

Ｃ－１－３　国の関与の必要性

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

経済産業省では、我が国の宇宙開発利用の競争力強化の一環から、「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」、「可搬統合型小型地上システムの研究開発」、並びに「超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発」等を実施してきた。

こうした取り組みの成果を踏まえ、ベトナム政府との間で円借款による小型合成開口レーダ衛星２機の調達並びに宇宙センター設立について合意した。

今後、小型衛星の需要が拡大するにつれ、我が国の衛星システムの競争力強化のため、我が国及び日本製衛星システムを含む各国の複数の衛星システムを有機的に連携し、高い撮像頻度を確保するための、我が国独自の「衛星コンステレーションシステム」の開発が必要である。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

2011 年 7 月の日 ASEAN 外相会合、同年 11 月の日 ASEAN 首脳会合で我が国から提案した「ASEAN 防災ネットワーク構想」では、日本と ASEAN 各国との間で地球観測衛星の観測頻度を向上させるための連携運用を提案している。ASEAN 防災ネットワークの構築は、観測頻度を飛躍的に向上させることから、自然災害の発災後速やかに撮像することが可能となるが、衛星画像から必要な情報を必要な形態で抽出、加工する処理する作業は、現在、人間の手で行っているため災害現場に迅速に情報を提供することの妨げになる。このため、衛星画像から自動的に情報を抽出する「衛星画像自動判読システム」の開発が求められている。

衛星画像から情報を自動的に抽出する技術は、世界に類を見ない技術であり、

今後 ASEAN 防災ネットワーク構想を一端とするリアルタイム地球観測網を構築し、当該市場において我が国企業がシェアを獲得するためには必須の技術である。しかし、衛星運用システムとの密接な連携が必要であり、また開発リスクが高いため民間での実施は困難である。加えて、顧客は各国政府も含まれ、それらは二国間協力により実施される事業であることから、国の事業として実施する。

Ｃ－２　研究開発目標

Ｃ－２－１　研究開発目標

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

我が国が保有する衛星システムにおけるコンステレーション衛星運用をコアとして、将来、日本製衛星システムを保有する各国のシステムとも連携を可能とする統合運用システムの研究開発を行う。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

地球観測衛星（光学、SAR）から得られるデータ量は、開発/打ち上げコスト低下による衛星数増加や、撮像能力/センサ能力の向上により、加速度的に増加している。一方、それらのデータを解析し、情報抽出する方法は、いまだ人間によるものが主流となっており、大量のデータを生かし切れていない。

衛星群から得られる大量のデータから、コンピュータにより高速かつ高精度に情報抽出させることにより、衛星システムの価値の向上と新たなサービスの創造が期待できる。以上の背景から、本研究開発においては、地球観測衛星から得られる大量の衛星画像に対して、利用者が必要とする地物の自動判読を高速に実施し、利用者に判読結果を最適な形で提供するためのシステム（以下、画像自動判読システム）を開発する。

画像自動判読システムは、国内外の利用者に対し、衛星利用促進プラットフォームや、統合運用システム、衛星画像プロバイダーと連携を行い、判読サービスを提供する。画像自動判読システムの位置付けを図 C-2-2-1-1 に示す。

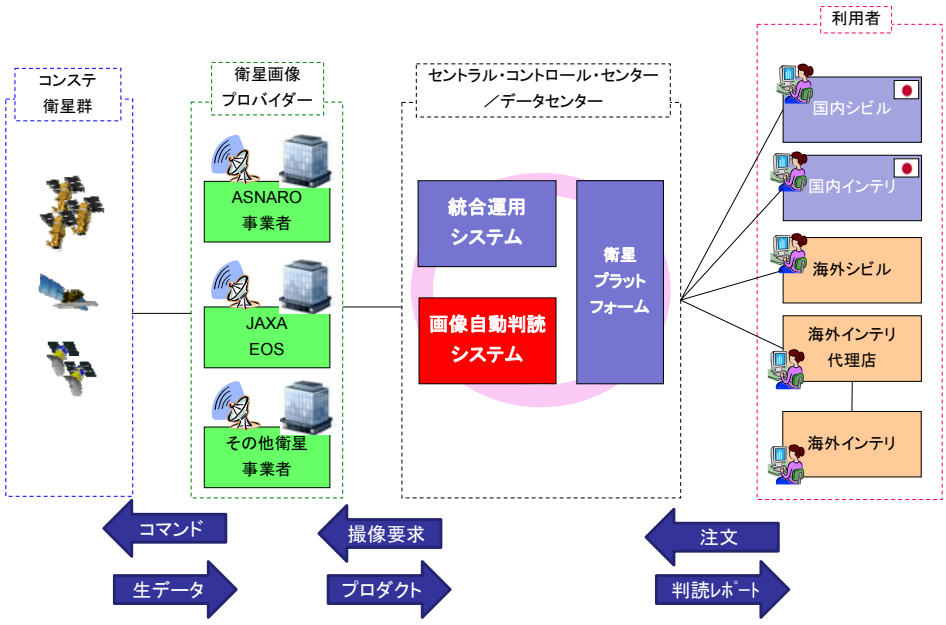


図 C-2-2-1-1 画像自動判読システムの位置付け

Ｃ－２－２　全体の目標設定

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

表 C-1-2-2-1. 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
それぞれが独立した衛星システムとして運用されている地球観測衛星群を、あるトリガーとなる事象を契機に、複数の衛星が必要に応じて有機的に連携し、参加した全てのリソースを最大限活用し運用可能な衛星コンステレーションシステムの研究開発を行う。	我が国の衛星システムの利便性を高めるためには、様々な機関で開発、運用されている衛星をあるトリガーとなる事象を契機に連携させ、迅速かつ高い頻度での撮像を実現し、衛星画像利用者に対する要求受付、データ提供等のサービス向上を図ることが必要である。 また、JAXA や他機関の地上局を統合運用システムに接続することにより、災害時の運用性及び迅速性を向上させる必要もある。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

表 C-2-2-2-1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
地球観測衛星から得られる大量の衛星画像に対して、利用者が必要とする地物の自動判読を高速に実施し、利用者に判読結果を最適な形で提供するためのシステムを開発する。	地球観測衛星（光学、SAR）から得られるデータ量は、開発/打ち上げコスト低下による衛星数増加や、撮像能力/センサ能力の向上により、加速度的に増加している。 一方、それらのデータを解析し、情報抽出する方法は、いまだ人間によるものが主流となっており、大量のデータを生かし切れていない。 衛星群から得られる大量のデータから、コンピュータにより高速かつ高精度に情報抽出させることにより、衛星システムの価値の向上と新たなサービスの創造が期待できる。

Ｃ－２－３　個別要素技術の目標設定

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

表 C-1-2-3-1. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
(1)自律自動複数衛星管制システムの開発	a.複数衛星管制マネージメント（管制、軌道）機能の開発	複数衛星の管制運用、軌道管理運用を実施するための機能を開発し、検証する必要がある。
	b.複数衛星リソースマネージメント（撮像計画、予約）機能の開発	複数衛星のリソースを管理し、各衛星の撮像計画を立案するための機能を開発し、検証する必要がある。
	c.地上局マネージメント（複数局管理）機能の開発	複数の地上局のリソースを管理し、各地上局の利用計画を立案するための機能を開発し、検証する必要がある。
	d.高度なセキュリティ機能の開発	複数衛星の運用、データを保全するため高度なセキュリティを有したシステムの設計が必要である。
	e.高信頼性システムの開発	複数衛星の運用及びデータ提供サービスを継続的に実施するため運用停止のないシステムの設計が必要である。
(2)ニアリアルタイム・オンデマンドシステムの開発	a.複数同時画像処理機能の開発	複数衛星で取得した観測データを同時に並行処理するための機能を開発し、検証する必要がある。
	b.複数衛星データアーカイブ（分散、集中、同期）機能の開発	複数衛星で取得した観測データを保存・管理し、適切に検索できる機能を開発し、検証する必要がある。
	c.ターミナル方式、クラウド方式によるオペレーション機能の開発	システムを構成する計算機リソースを様々な機能で効率的に利用し、共通的な端末から柔軟に様々な運用を実施するための機能を開発し、検証する必要がある。

Ⅱ. 画像自動判読システムの研究開発

表 C-2-3-1 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
(1)システムロジック部の開発		
① 学習／判読ロジックの確立	画像から、コンピュータが地物の判読のための知識を自ら獲得（学習）し、未知の画像から地物の種類や位置を特定（判読）するためのロジックを確立する。 対象とする画像は、光学画像、合成開口レーダー画像及びその複合とし、画像中で視認できる様々な地物の判読に対応する汎用性の高いロジックを目指す。	衛星画像から地物の位置や種類を特定する確立された技術はなく、従来は人間の手作業にて実施されている。 大量に得られる衛星画像から、効率よく情報を抽出するためには、人間の作業をコンピュータに代替させる必要がある。また、利用者の幅広いニーズに対応するためには、衛星画像で視認できる様々な地物に対応した汎用性の高いロジックが必要である。
② 判読処理の高速化	光学画像、合成開口レーダー画像、光学／合成開口レーダー統合のそれぞれの判読処理が、3分以内に完了できるよう判読処理の高速化を行う。	サービスの価値の向上のためには、画像の入手から、短時間で判読結果（レポート）を利用者に提供する必要があり、判読処理の高速化は必要不可欠である。
(2)システムフレーム部の開発		
① ユーザインターフェイスシステムの開発	ウェブを介して、ワンストップで利用者へ判読サービス（画像の入手から判読レポートの提供）を提供するための機能を開発する。 開発にあたっては、利便性やシステムへのアクセスのし易さ等を考慮する。 【性能目標】 画面応答速度：1秒以内	幅広く判読サービスを提供するためには、ウェブへの対応は必要である。また、衛星画像の入手から判読レポートの提供までをワンストップで提供することにより、システムの価値の向上が期待できる。加えて、利便性を考慮すると、サービス画面の応答速度は短時間であることが望ましい。
② アーカイブ管理システムの開発	判読処理によって判読された大量の地物の情報を、分散データベースにて、高速に取り扱う機能を開発する。 【性能目標】 100万件のデータから10件のデータの検索及び抽出：1秒以内	判読結果のウェブ上への表示や、リアルタイムでのレポート作成機能の提供のためには、判読された大量のデータへのアクセスが必要となる。しかし、一般的なデータベースでは長い時間を要するため、利便性を考慮し、データベースの分散化等によるデータアクセスの高速化が必要である。
③ 画像判読システムの開発	判読処理を行うための複数の計算機（処理ノード）に効率よく要求（ジョブ）を割り当て、短時間で判読処理を完了させるジョブスケジューリング機能を開発する。 【性能目標】 処理ノードへのジョブ割当：2秒以内 判読処理完了：3分以内	単位時間当たりの判読処理量を最大化し、かつ判読処理自体も短時間で完了させるためには、複数の計算機を効率よく運用する必要がある。そのためには、計算機と要求を管理するためのジョブスケジューリング機能が必要である。

④ ナレッジ管理システムの開発	コンピュータが画像判読を実行する際のナレッジ（識別器）や、そのナレッジを生成するための学習用/評価用データを管理する機能を開発する。本機能は、システムの運用者が利用する機能であるため、運用性や、サービスの継続性を考慮して開発を行う。	識別器の生成には、大量の学習用データ/評価用データが必要である。また、複数の地物の判読に対応するためには、複数のナレッジ（識別器）が必要である。 判読サービスを継続的に提供するためには、これらの情報をより簡便に管理でき、サービスの拡張にも対応できることが望ましい。
⑤ 計算機環境の構築	画像自動判読システムを動作させるための計算機環境の設計・構築を行う。 設計にあたっては、本システムを構成する各システムの処理特性や処理性能、運用性を十分考慮する。	各種性能要求を満たしつつ、計算機リソースを効率的に利用するためには、合理的な設計に基づいた計算機環境が必要である。また、判読サービスを継続的に提供するためには、計算機の管理に関わるコストの最小化が必要である。
⑶ナレッジデータベースの構築	衛星画像から、システムロジック部の開発等に利用する学習用／評価用データの整備を行う。	短期間で効果的、効率的に研究開発を行うためには、大量の学習用データ／判読用データを整備する必要がある。

Ｃ－３　成果、目標の達成度

Ｃ－３－１　成果

Ｃ－３－１－１　全体成果

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

複数の衛星が必要に応じて有機的に連携し、参加した全てのリソースを最大限活用し運用可能な衛星コンステレーションシステムに求められる機能・性能要求を分析し、システム仕様を確定した。

要求分析・仕様設定に当たっては、統合運用システムを利用して実施する事業計画を民間事業者が検討し、この事業計画を分析して開発するシステムの仕様を決定した。

システム仕様に基づき、統合運用システムを開発し、システム全体としての機能・性能確認及び運用性確認を実施した。

統合運用システムの全体構成図を図 C-1-3-1-1 に示す。

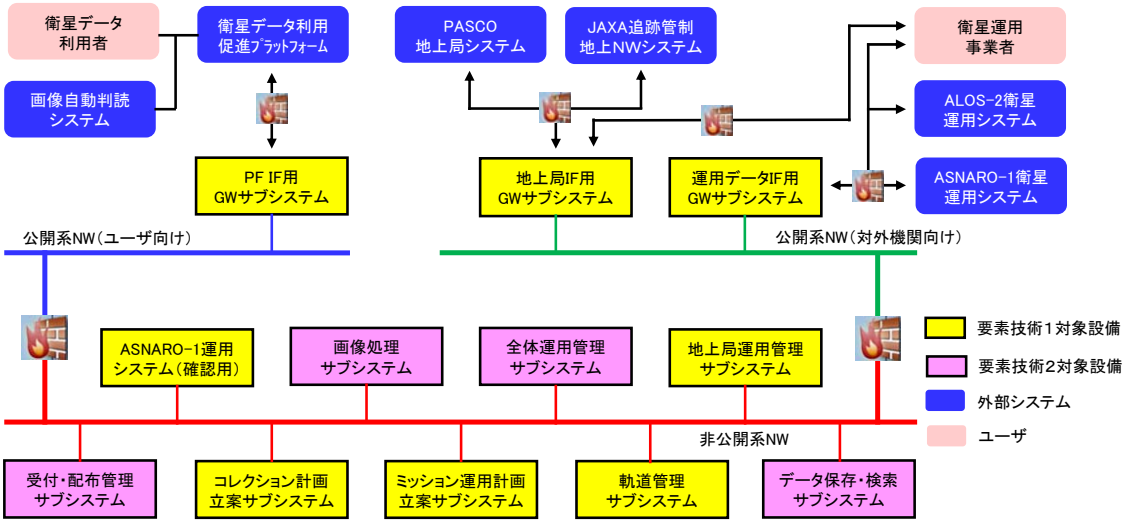


図 C-1-3-1-1　統合運用システム全体構成図

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

高分解能光学衛星画像及び高分解能合成開口レーダー衛星画像から、対応衛星画像で目視認識可能な地物や土地被覆を判読するシステムを開発した。判読精度は、地物のサイズによってバラつきがあるが、判読精度の向上が可能なシステムとなっている。また、最も利用が見込まれる建造物の判読については、面積ベースで 80%以上と十分実用に足る判読精度が得られている。加えて、目視判読が難しいとされる合成開口レーダー画像についても、光学画像との比較で単体では判読精度は劣るものの、光学画像と組み合わせることにより、精度の向上が期待できることも確認された。

判読速度については、GPGPU(General-purpose computing on graphics processing units)やマルチコア CPU、複数処理ノードにおける並列分散処理を行うことにより、1 判読区画（1km 四方）おける、光学 300 クラス、SAR100 クラス、統合 300 クラスの判読完了がそれぞれ 3 分以内を実現した。

システムの開発にあたっては、利用者や市場のニーズ等を踏まえ、機能、性能に関わる要件定義を実施した。これら要件を満たすべく、システムのコアとなる判読ロジックの研究開発（システムロジック部の開発）と、システムの枠組みとなるフレームの開発（システムフレーム部の開発）を並行して実施した。また、システムロジック部の開発に必要な、学習用／評価用データの整備のため、ナレッジデータベースの構築を行った。

画像自動判読システムの全体像およびサービスフローを、図 C-2-3-1-1-1、図 C-2-3-1-1-2 に示す。

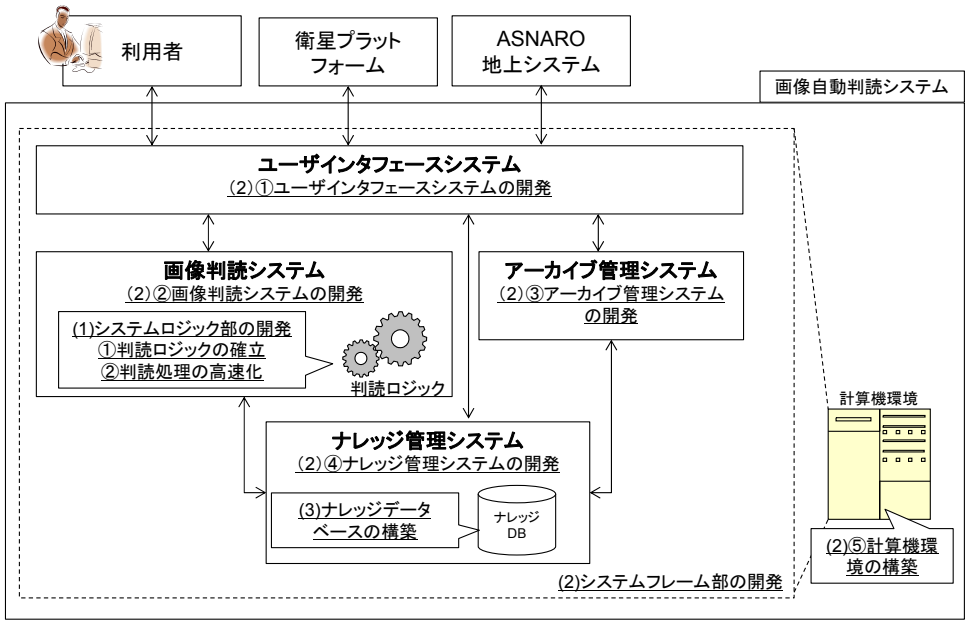


図 C-2-3-1-1-1 画像自動判読システムの全体像と要素技術

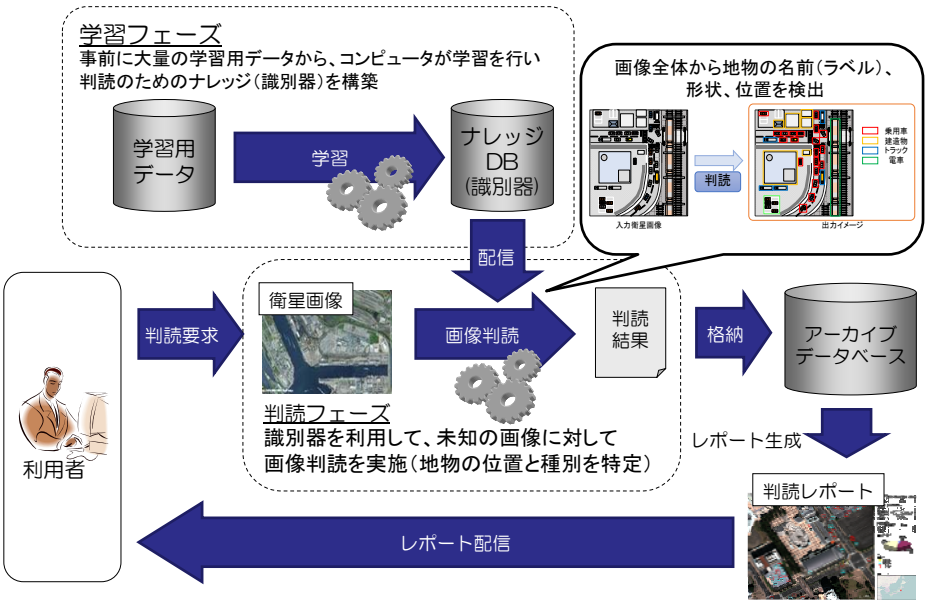


図 C-2-3-1-1-2 画像自動判読システムのサービスフロー

Ｃ－３－１－２　個別要素技術成果

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

（１）自律自動複数衛星管制システムの開発

わが国の所有する高分解能地球観測衛星システム（本研究開発期間内に運用中或いは将来の計画衛星を含む）のコンステレーション運用、また、ASEAN 等の海外において日本製衛星システム等を導入する国々の衛星を含めた統合運用を行うため以下の機能を有する衛星管理システムの開発し、機能・性能の実証を実施した。

a.　複数衛星管制マネージメント（管制、軌道）

① 衛星管制機能（ミッション計画立案）では大型衛星、小型衛星、超小型衛星を問わず最大 50 機まで、軌道管理機能については同最大 30 衛星まで対応可能な拡張性を有する。

② ASNARO-1、ALOS-2 に加え、ほどよし 1 号機、UNIFORM-1 の軌道情報を入手し、軌道管理を実施する機能を具備した。

③ ASNARO-2 及びベトナム衛星の衛星管制機能、軌道管理機能については、将来的に統合運用システムに組み込むことを想定し、容易に機能付加できるよう拡張性を持たせた。ただし、今後打上げ予定の衛星に対する管制機能の拡張性の確認用として、簡易的な衛星管制機能として機能確認用 ASNARO-1 運用システムを整備した。

④ ASNARO-1 の衛星管制機能については、ASNARO-1 運用システムの機能

限定版である機能確認用ASNARO-1運用システムを整備することとした。管制系のインタフェースについては、国際標準である宇宙データシステム諮問委員会（CCSDS）の Space Link Extension（SLE）を採用し、その内容をインタフェース条件書の衛星運用事業者間インタフェース編にまとめることで、将来の衛星運用事業者の追加に対応できるようにした。

b. 複数衛星リソースマネージメント（撮像計画、予約）

① 本研究開発の対象衛星である ASNARO-1、ALOS-2、ほどよし 1 号、UNIFORM-1 の軌道情報をもとに撮像機会の検索機能を具備した。国内、海外、大型、小型、超小型を問わず、最大 50 衛星（同時に使用出来るのは軌道情報を保持できる最大 30 衛星）まで対応可能な拡張性を有する。

② ASNARO-1 運用システムに対してはオンラインで撮像要求及び処理要求をインタフェースする機能を具備した。ALOS-2 運用システム、ほどよし 1 号機運用システム及び UNIFORM-1 運用システムに対しては運用者が介在することで撮像要求、処理要求をインタフェースする機能を具備した。

③ ASNARO-1の撮像計画立案機能については既存のASNARO-1地上システムの開発及び運用を行う(株)パスコと調整を行い、統合運用システムでコレクション計画立案、ミッション計画立案を行い、オンラインでインタフェースを行う機能を具備した。

④ ASNARO-2 及びベトナム衛星の撮像計画立案機能については、将来的に統合運用システムに組み込むことを想定し、容易に機能付加できるよう衛星情報を共通パラメータとして保持する機能を具備した。

c. 地上局マネージメント（複数局管理）

① 衛星運用事業者からの要求により地上局利用機会検索を実施したうえで、地上局の利用要求をオンラインインタフェースで入力することにより、利用計画を立案し、その結果を地上局運用事業者に出力する機能を具備した。

② JAXA が所有する地上局の監視・制御機能については、軽微な改修で実施が可能な局状態データの取り込みを行うこととした。

③ ASNARO-1 にて使用するパスコ地上局ネットワークの監視・制御機能については、自動運用が基本でパス運用中に中央からの監視制御は行わなっておらず、また、外部システムと接続する場合、一部情報を秘匿するための機能を新たに追加する必要が有るため、計画ベー

スの運用を行うこととした。

④　地上局は最大 50 局まで対応可能な拡張性を持たせた。

d.　高度なセキュリティ

JAXA の地上システムと同様にネットワークを外部のシステムと接続する公開系とシステム内部の各装置を接続する非公開系に区分し、更に公開系ネットワークは、不特定多数の衛星データ利用者を対象としたネットワークと衛星運用事業者を対象としたネットワークに区分した。

公開系ネットワークと非公開系ネットワークの間にはファイヤーウォールを設置し、外部から統合運用システム内部へのアクセスを監視・遮断することで、外部からの侵入によるシステム破壊や不正利用から防護する機能を具備した。

図 C-1-3-1-2 に統合運用システムのネットワーク概略図を示す。

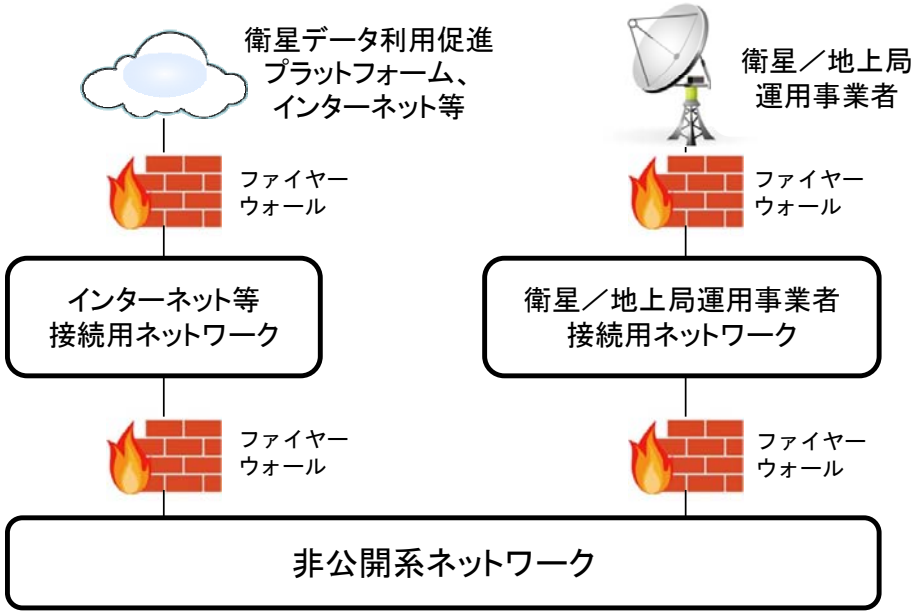


図 C-1-3-1-2　統合運用システムのネットワーク概略図

e.　高信頼性

主要な機器や部品については単一障害点を排除した高可用性とし、障害時の継続稼働を行うためのフォールトトレランス構成や障害からの自動復旧構成を採用することで、計画停止、自然災害等による停止を除き、99.9%の稼働率を実現した。

（２）ニアリアルタイム・オンデマンドシステムの開発

複数衛星を利用したコンステレーションシステムにより得られた大量のデータを最大限に活用するためには、エンドユーザが容易に利活用できる

仕組みを作り出す必要があり、様々なユーザが容易に利用できるシステムとするため、以下の機能を有するコントロールシステムを開発し、機能・性能の実証を実施した。

a. 国内外のネットワーク環境による複数同時画像処理

将来的に統合運用システムに画像処理機能を取り込むことを想定し、容易に機能付加できるよう拡張性を持たせた。この拡張性を確認するために機能確認用 ASNARO-1 運用システムを整備し、レベル 1 処理機能を具備した。また、同機能確認用システムとのインタフェース条件書を定めることで、将来的に ASNARO-2 等の画像処理機能を取り込むことになった場合に参照できるようにした。

b. 複数衛星データアーカイブ（分散、集中、同期）

① 統合運用システムで扱う ASNARO-1、ALOS-2、ほどよし 1 号機及び UNIFORM-1 の画像データを保存管理する機能を具備した。
② 保存対象としたデータのカタログ情報を管理する機能を具備した。
③ 将来的に ASNARO-2 等の衛星を容易に組み込むめるよう衛星情報のパラメータ化を行うと共にストレージ容量を容易に増加できるよう増設、拡張可能な装置を選定した。

c. ターミナル方式、クラウド方式によるオペレーション

本システムは計算機コストを低減するとともに拡張性・サービス継続性・保守性を担保するために仮想化ソフトウエアによる仮想サーバを構築した、いわゆるプライベートクラウド方式のシステム基盤を採用し、システムを構築した。また、端末による運用を柔軟に行えるよう、運用端末から各サブシステムが構築されたサーバにログインするターミナルサービス方式によりオペレーションを行う機能を具備した。

Ⅱ. 画像自動判読システムの研究開発

（１）システムロジック部の開発

「システムロジック部の開発」においては、当該システムの開発において、技術的課題を有するロジック部に研究テーマを設定し、基礎的な研究からプロトタイプ製造による検証等を実施した。最終的には、システムフレーム部の開発で製造したパーツとシステムロジック部の開発で製造したパーツを結合し、画像自動判読システムとしてのシステム化を行った。

開発手法としては、イテレーション開発手法を採用し、短い期間でプロトタイピングおよび評価を反復的に繰り返し、機能具備および性能向上を図った。

要素技術毎の成果を、以下に記載する。

① 学習／判読ロジックの確立

（ア）ベースとなるアルゴリズムの選定

本システムのコアとなる判読ロジックは、光学画像と合成開口レーダー（SAR）画像を対象に 300 種類以上(SAR は 100 種類以上)の地物の判読に対応するような、高い汎用性を有したアルゴリズムを選定する必要があった。従来の判読手法においては、個別の地物に対して、個々に特徴抽出と識別を設計する必要があったため、高い汎用性が要求される本システムには適さないと判断した。そこで、本システムにおいては、機械学習アルゴリズムの１つであるディープラーニング（深層学習）手法を採用した。ディープラーニングは、ニューラルネットワークを用いた手法であり、人間の脳を模した構造をもつニューラルネットワークを多層に重ねた構造を有することで、より抽象的な特徴の抽出が可能となっている。従来手法とディープラーニングの特徴の比較を図 C-2-3-1-2-1 に示す。

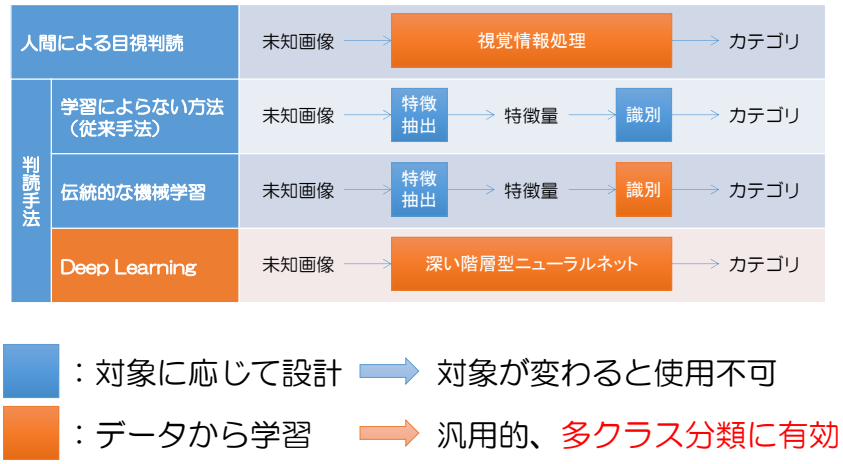


図 C-2-3-1-2-1 ディープラーニングの特徴

（イ）地物判読手法の開発

ディープラーニングをベースに地物の判読手法を開発した。対象とする画像は、光学画像、SAR 画像、光学画像と SAR 画像の統合の 3 種類に設定した。ディープラーニングを利用した画像判読手法は、自然画像に対してはいくつかの実績があったが、衛星画像の判読の場合、より細かい情報（例えば車の場合、数ピクセル四方）に対し、地物の種類と位置を識別する必要があった。そこで、本研究では、画素毎に地物のクラスを判定する手法を開発した。これにより、従来のディープラーニングの手法で課題となった、位置の特定精度が非常に低いという欠点を補い、かつ正確に地物の種類を推定することが可能となった。

なお、判読精度の向上や手法の優位性の確認のため、学習用データの機械的な増

幅、色調のヒストグラム正規化によるデータ均一化、マルチスケールによる学習、学習用データセットの動的な優先度付与、コンテキスト情報を用いたラベル修正、外部情報を利用したラベル修正、超パラメータの自動チューニング手法、他手法との精度比較等の研究も併せて実施した。

（ウ）地物判読手法の評価

地物判読手法の評価のため、代表的な地物（建物、道路、乗用車）に対し開発した手法を適用して精度の検証を行った（図 C-2-3-1-2-2、図 C-2-3-1-2-3）。結果としては、光学画像については、移動体（乗用車）を除き、70%以上と高い精度を得ることが出来た。SAR 画像については、建造物（建物）で 50.6%、線形地物（道路）で 53.8%と光学画像に比べる低い結果となったが、光学/SAR を統合させることにより、光学単体での判読精度を向上させる効果も一部で確認できた(文中の精度は全て Precision Break Even Point の数値を示す)。

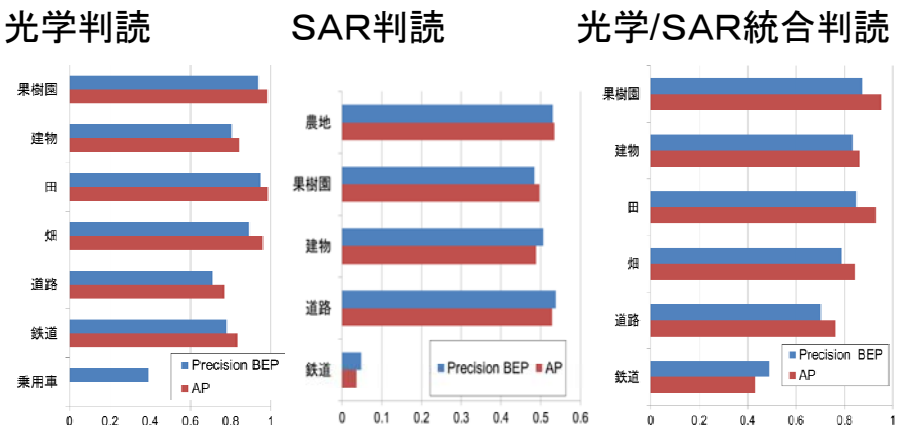


図 C-2-3-1-2-2 地物判読手法の評価結果

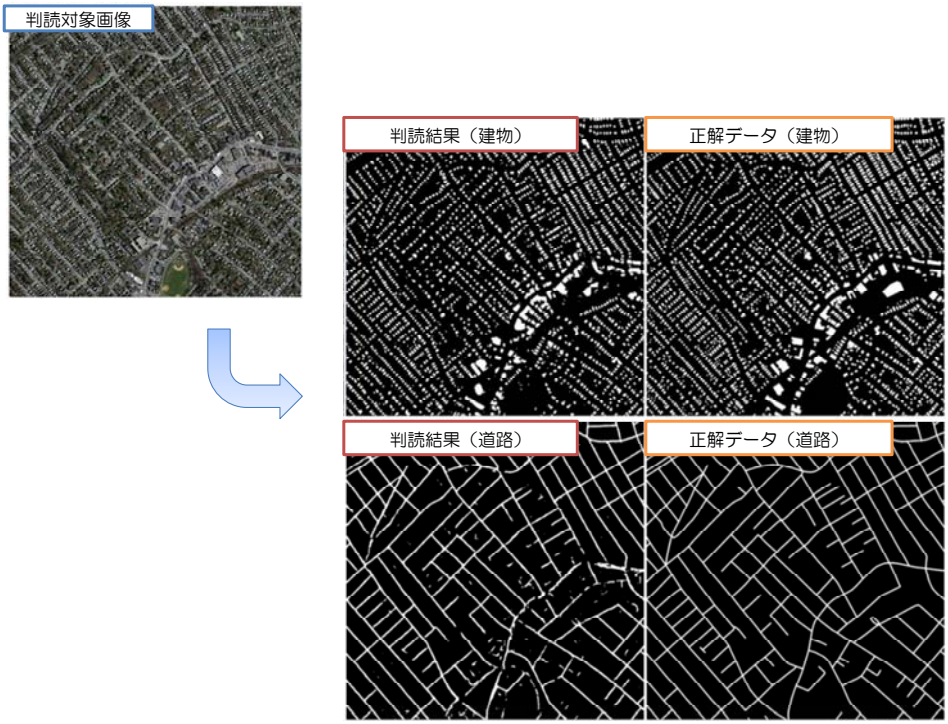


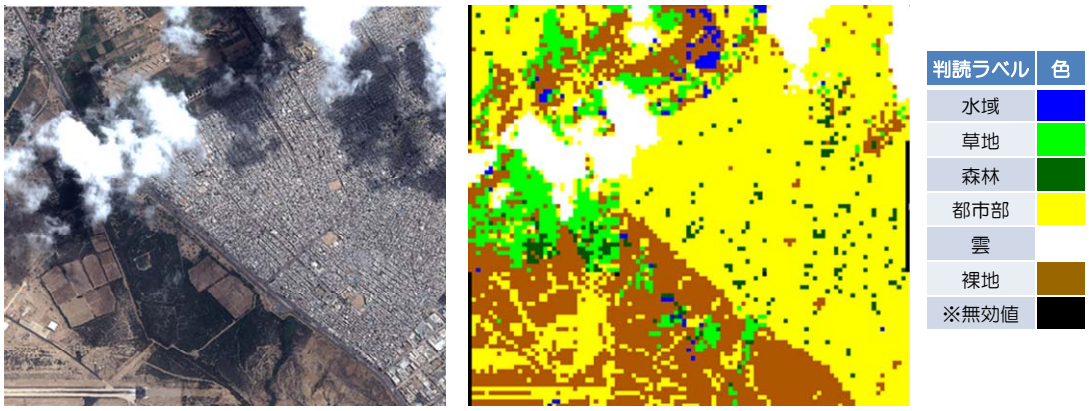
図 C-2-3-1-2-3 地物判読処理結果例

（エ）被覆判読手法の開発

ディープラーニングをベースに、被覆の判読手法を開発した。対象とする入力は、光学画像と SAR 画像の 2 種類に設定した。なお、SAR 画像については、単偏波と多偏波にそれぞれ対応する手法を開発した。また、判読精度の向上や手法の優位性の確認のため、地物判読と同様の項目の研究を併せて実施した。

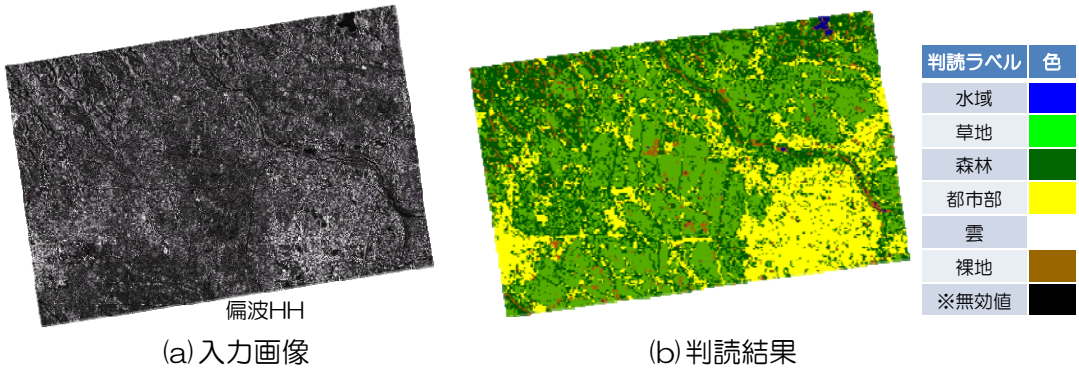
（オ）被覆判読手法の評価

被覆判読手法の評価のため、代表的な地物に対し開発した手法を適用して精度の検証を行った。結果としては、光学判読で平均 97.2%、SAR 判読で単偏波、多偏波それぞれ平均 73.8%、平均 80.4%の成果を得ることが出来た（図 C-2-3-1-2-4、図 C-2-3-1-2-5、図 C-2-3-1-2-6）。



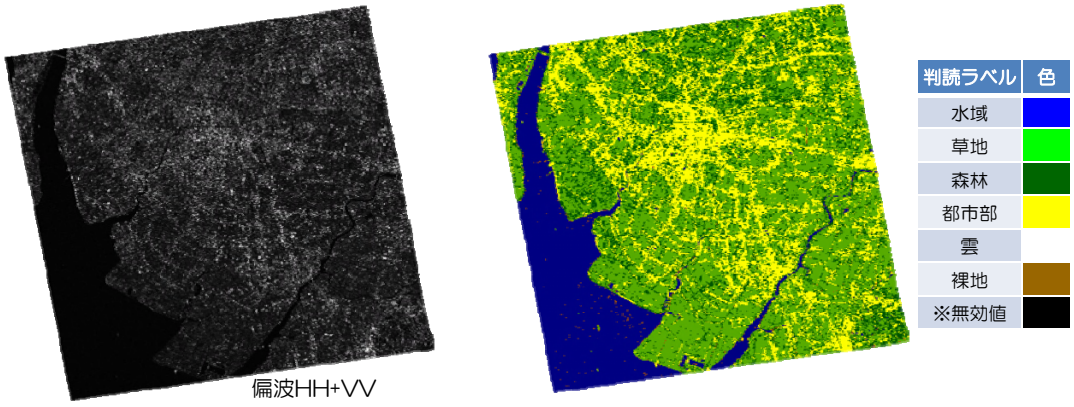
(a)入力画像　　(b)判読結果

図 C-2-3-1-2-4 地物判読処理結果例(光学)



(a)入力画像　　(b)判読結果

図 C-2-3-1-2-5 被覆判読処理結果例（SAR、単偏波）



(a)入力画像　　(b)判読結果

図 C-2-3-1-2-6 被覆判読処理結果例（SAR、多偏波）

② 判読処理の高速化

判読処理の高速化のため、判読処理プログラムに対し、複数処理ノードに処理を分散させる分散処理と GPGPU やマルチコア CPU を利用したマルチスレッドによる単一処理ノード内の並列処理を適用した。結果、光学、SAR、光学／SAR 統合の何れのケース

においても、事前に設定した 3 分以内の処理完了の目標を達成した。各ケースの結果については、表 C-2-3-1-2-1 に示す。

表 C-2-3-1-2-1 各判読処理の処理時間

	光学判読	SAR 判読	統合判読
クラス数	300	100	300
処理速度	1 分 53 秒	46 秒	2 分 20 秒

（２）システムフレーム部の開発

「システムフレーム部の開発」は、本研究開発事業におけるシステム開発部分を担い、ウォーターフォール開発手法をベースにシステム開発を実施した。なお、ロジック部のパートである研究開発は難易度が高く、開発期間直前まで研究を継続する必要があったため、システムフレーム部はロジック部の影響を考慮した開発を進めるべく、開発期間をバージョン 1.0、バージョン 1.1 の 2 つに分けて、手戻りや無駄を無くす開発プロセス、スケジュールとした。各バージョンの定義を以下に示す。

・バージョン 1.0

ロジック部の研究結果の影響を受けにくい、システム間のインターフェイスモジュール、研究開発を必要としないモジュールの開発、製造、プレ結合試験を範囲とする。

・バージョン 1.1

ロジック部の研究結果を随時反映させたモジュールの開発、製造、単体試験、結合試験、及びロジック部の研究開発したモジュールを取り込んだ総合試験、運用試験を範囲とする。

画像判読システムの全体構成図と開発スケジュールを図 C-2-3-1-2-7、図 C-2-3-1-2-8 に示す。

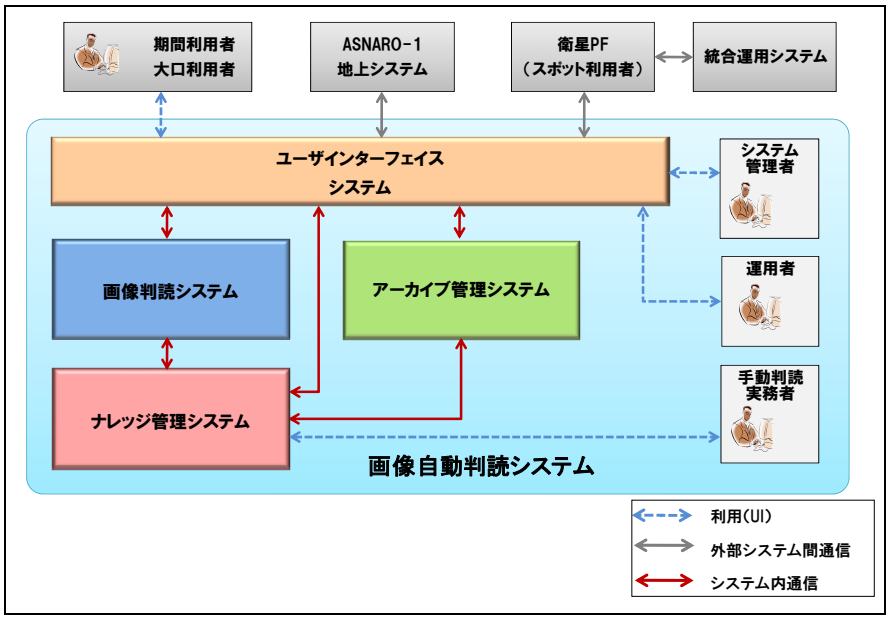


図 C-2-3-1-2-7 画像自動判読システム全体構成図

バージョン	開発フェーズ	2013年度											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
V1.0	①要求分析	■	■										
	②概念設計			■	■								
	③基本設計					■	■						
	④詳細設計							■	■	■			
	⑤製造・動作確認										■	■	■
	⑥プレ結合試験												■
V1.1	②～⑤設計/製造												■
	⑦単体試験												■
	⑧結合試験												
	⑨総合試験												
	⑩運用試験												

バージョン	開発フェーズ	2014年度											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
V1.0	①要求分析												
	②概念設計												
	③基本設計												
	④詳細設計												
	⑤製造・動作確認												
	⑥プレ結合試験												
V1.1	②～⑤設計/製造	■	■	■									
	⑦単体試験	■	■	■									
	⑧結合試験				■	■	■						
	⑨総合試験							■	■	■	■		
	⑩運用試験										■	■	■

図 C-2-3-1-2-8 開発スケジュール

① ユーザインターフェイスシステムの開発

利用者や外部システムとのインターフェイスを担う、ユーザインターフェイスシステムを設計、製造し、試験を行った。ユーザインターフェイスが具備する機能を以下に示す。

（i）外部システム、又は利用者（期間利用者、大口利用者、運用者、システム管理者）とのインターフェイスを担い、判読注文に係わる以下要求の管理、及びコンテンツ（判読結果アーカイブ、判読レポート、画像アーカイブ）に対するアクセス権の制御や、取得・提供に係わる制御を行う。

- アーカイブ画像検索及び画像データ取得・格納
- 判読要求及びそれに伴うプロダクト処理要求（判読画像）
- 判読レポート作成要求
- フィードバック
- 処理進捗確認（障害に対する再処理要求、フラグ／ステータス手動更新など）

（ii）ユーザ情報に関する以下の管理やログイン認証を行う。

- 期間利用者、大口利用者、運用者、システム管理者、手動判読実務者の登録・変更・削除・検索
- 上記利用者の権限管理、グループ管理、契約情報管理
- 上記利用者のログイン認証（履歴）

（iii）システム共通として利用するリソースや情報に関する以下の管理を行う。

- 利用者トップ画面に表示するインフォメーション（システムメンテナンス通知、障害状況通知など）の登録・変更・削除・検索
- 処理ノードの状態表示、及びメンテナンスモードへの切替要求

ユーザインターフェイスシステムの開発においては、利用者のユーザビリティの向上と、システムへのアクセサビリティの向上を重要視した。具体的な措置を以下に示す。

ア．ウェブ GIS 上での判読結果表示

利用者のユーザビリティ向上を目的に、ウェブ GIS 上で、判読結果をリアルタイムで表示、解析するための機能を実装した(図 C-2-3-1-2-9)。

判読結果のリアルタイム表示については、処理結果や背景画像等のコンテンツのデータサイズが大きく、ブラウザへの表示速度は、利用者の回線環境に依存してしまうという課題を有していた。そこで、コンテンツの伝送を非同期通信とすることにより、操作感の向上とレスポンスの維持を図った。結果、回線環境への依存度が低下し、高いレスポンスが実現した。なお、当該機能に関わるレスポンス性能については、1 秒以内の画面遷移の目標に対し、0.6 秒と目標を達成している。

また、判読結果のリアルタイム解析については、後述する分散データベースから高速でデータ検索抽出を行い、リアルタイムで判読地物の数量、面積、割合等を算出し、レポート化する機能と 2 時期差分解析を行う機能を具備した。

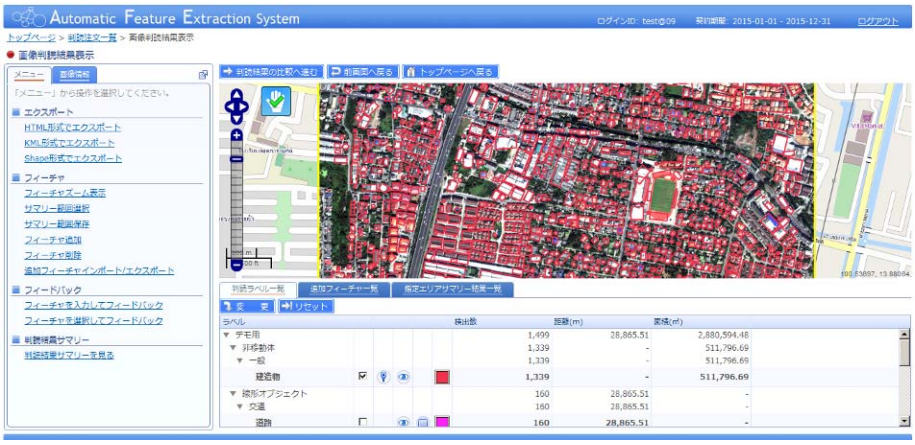


図 C-2-3-1-2-9 ウェブ GIS 画面

イ． タブレットへの対応

システムへのアクセサビリティ向上を目的として、タブレットデバイスから判読注文や判読結果の確認ができる機能を実装した。PC 上での表示内容をタブレットに表示させると、操作性やレスポンスの劣化が確認されたため、タブレット専用に最適化された画面を作成した(図 C-2-3-1-2-10 左)。また、判読結果の表示においては、Google Earth 上で結果を表示できる連携機能を具備した(図 C-2-3-1-2-10 右)。これにより、他システムで解析した情報とのデータ連携が容易になった。

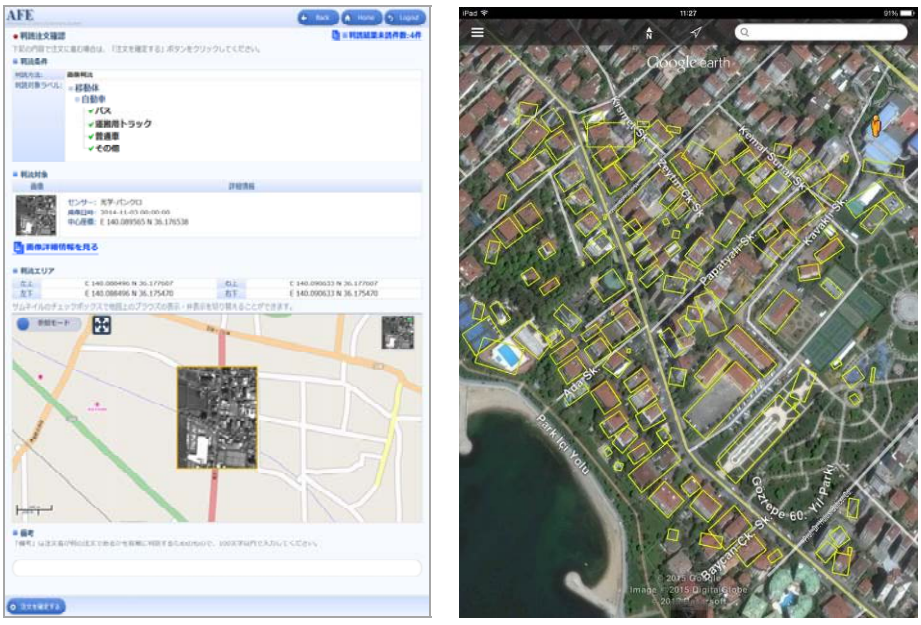


図 C-2-3-1-2-10 タブレット画面例（左図)、
Google Earth との連携画面（右図）

ウ. 外部システム連携

衛星プラットフォーム及び ASNARO 地上システムとの連携機能を実装し、実システムを用いて試験を行った。これにより、新規撮像注文から判読注文および判読結果の提供まで、ワンストップでサービス提供する仕組みを確立した。なお、外部との連携のプロトコルは、今後の連携先の追加を見据え、OGC※で標準化されたプロトコル（CSW、OSEO、SPS 等※）を採用した。本システムと外部システムとの連携概念図を、図 C-2-3-1-2-11 に示す。

※
OGC: Open Geospatial Consortium
CSW: Catalog Service for the Web
OSEO: Ordering Services Framework for Earth Observation Products
SPS: Sensor Planning Service

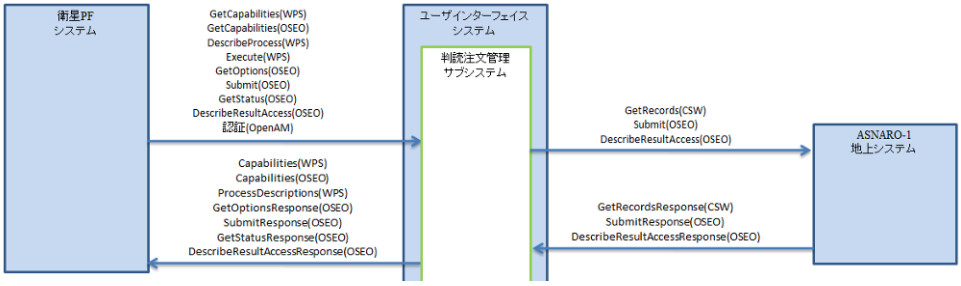


図 C-2-3-1-2-11 ユーザインタフェースシステムにおける外部システム連携

② アーカイブ管理システム

判読結果に係わる情報のアーカイブデータベースへの登録、変更、検索および取得・提供に係わる制御を担うアーカイブ管理システムを設計、開発した。

アーカイブ管理システムは、大量の判読結果を短時間で登録・検索・抽出を行う必要があったため、データベースの分散化を行った。

データベースの設計にあたっては、まず運用性やユーザビリティ等を考慮し、登録・検索・抽出に関わる速度要件とデータの可用性要件を設定した。そして、これら要件を満たすデータベースを選定するため、複数種類のデータベースでプロトタイピングを行い性能等の評価を行った。なお、一般的なデータベースシステムでは今回の高い要件を達成することが難しいと判断したため、分散データベースを前提に、評価対象データベースを選定した。

プロトタイプを利用した評価の結果、最も高いパフォーマンスを記録した、オープンソースの分散データベース管理システムである Cassandra と、同じくオープンソース全文検索システムの Solr の組み合わせを採用した。全文検索システムを利用しているのは、

本システムが、リアルタイムで結果を表示する関係上、検索・抽出速度が非常に重要であり、かつ地理空間的な検索クエリに対応する必要があるためである。分散データベースの構成概念図を、図 3-14 に示す。なお、最終的な構成においては、約 15,000 件のデータの登録が 1 秒以内に完了し、100 万件のデータから 10 件のデータの検索及び抽出が 0.0137 秒で完了する性能となっている。

構築した分散データーベース環境の構成図を図 C-2-3-1-2-12 に示す。

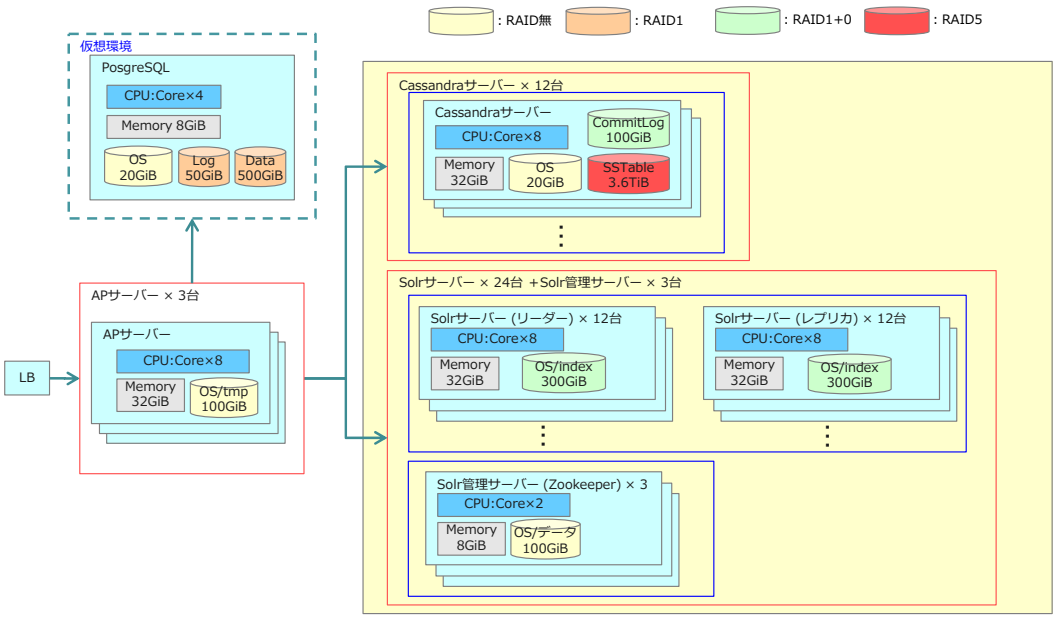


図 C-2-3-1-2-12 分散データベース構成図

③ 画像判読システムの開発

判読処理ノードの管理および判読学習処理の実行と制御・管理を担う、画像判読システムを設計、製造し、試験を行った。

画像判読システムは、ユーザインターフェイスシステム、ナレッジ管理システムからの判読要求、学習要求、性能評価要求、チップ画像作成要求を受け付けて判読学習およびチップ画像作成ジョブの処理計画を作成し、複数の計算機（以下、処理ノード）の中から処理計画に従い判読学習およびチップ画像作成ジョブを実行させるシステムである。処理性能は、計測値で 113 秒/40 秒/140 秒（光学/SAR/統合）となっており、300 クラス以上の地物の判読を同時に実施できる性能となっている（システムロジック部の開発における判読処理の高速化に準ずる）。

画像自動判読システムは、ニアリアルタイムで判読処理及び判読結果提供を行う理由から、複数の判読処理ノードにて、並列で処理を行う必要がある。本理由から、画像判読システム内に、複数の処理ノードに対し、効率的に判読学習処理要求を発行するためのジョブスケジューラー機能を実装した。実装にあたっては、高い可用性、高速なレスポンス、クラウドへの対応等を考慮した。ジョブスケジューラーの主な機能を以下に示

す。また、運用画面の一例を図 C-2-3-1-2-13 に示す。

処理ノードの監視

処理ノードの配下への追加、削除を行う。処理ノードのメンテナンス時においては、一時的に削除を行うことで、全体システムへの影響を最小化することが可能である。

処理ノードへのジョブ割当

受信した判読学習処理要求から処理計画（ジョブ）を作成し、要求の優先度に基づき、配下の処理ノードに対してジョブを割り当てる。本機能は、高速レスポンスを考慮した設計を行うことで、受信から 1 秒以内でのジョブ割当が可能となっている。

処理ノードの進捗管理

処理ノードで実行されるジョブの進捗をモニタリングし、要求の送信元システムに対して報告を行う。また、処理中において、エラーが発生した場合、管理画面上に表示すると共に、要求の送信元システムに報告を行う。

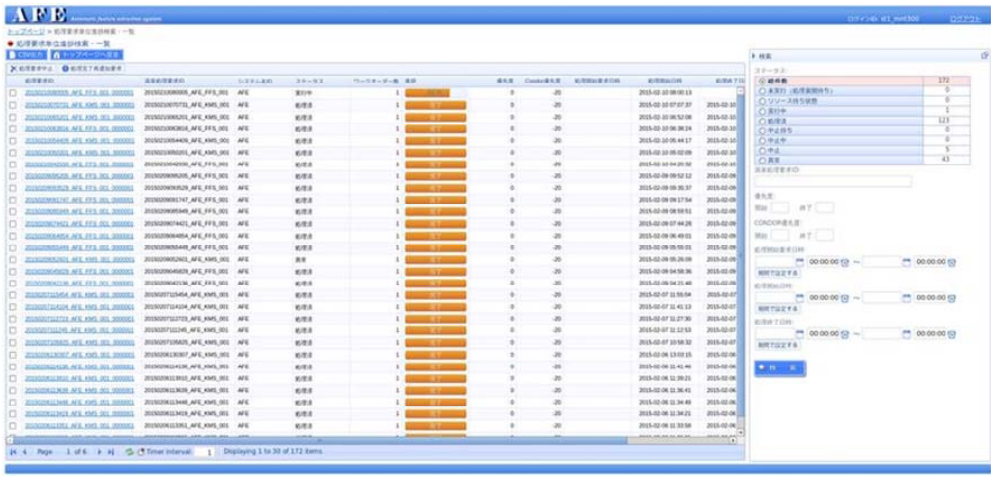


図 C-2-3-1-2-13 ジョブスケジュール機能画面

加えて、システムロジック部の研究結果による仕様変更のインパクトを最小限にするため、汎用処理フレームワークを実装した。当該フレームワークの特徴を以下に示す。

Filters&Pipes アーキテクチャーパターンの採用

POSA（Pattern Oriented Software Architecture）のアーキテクチャーパターンの一つである Filters&Pipes アーキテクチャーパターンを適用することで処理

ステップごとに処理ロジックをカプセル化した。そのため、処理の組み合わせを変えることにより、機能が類似した一連のシステムを作成可能となり、処理の差し替えを容易にしている。Filters&Pipes アーキテクチャーパターンの概念図を図 C-2-3-1-2-14 に示す。

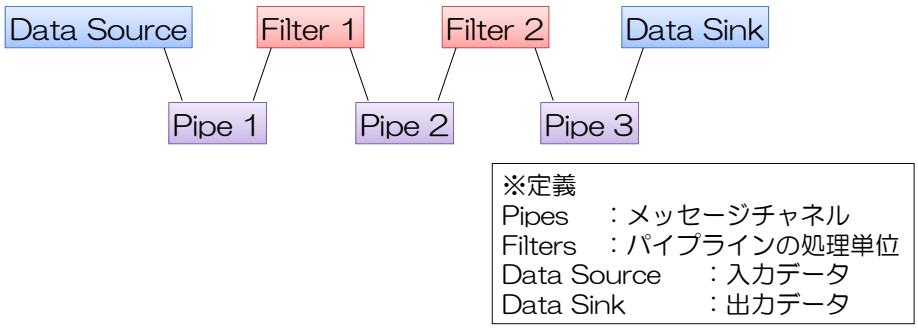


図 C-2-3-1-2-14 Filters&Pipes アーキテクチャーパターンの概念図

データアクセサの採用

モジュールからデータを直接アクセスせずに、必要なデータをアクセスする仲介役（データアクセサ）を設けることで、データ仕様の変更に対するインパクトを最小限にした。データアクセサの概念図を図 C-2-3-1-2-15 に示す。

図 C-2-3-1-2-15 データアクセサの概念図

④ ナレッジ管理システムの開発

コンピュータが画像判読を実行する際のナレッジ（識別器）を格納したナレッジデータベースの管理を担う、ナレッジ管理システムを設計、開発した。

識別器は、画像判読システムが判読処理を行う際に使用される。画像判読の精度を向上させるために画像判読によって生成された判読結果を手動判読実務者により評価、修正を受け、識別器としてナレッジデータベースへ登録、更新する。

ナレッジ管理システムの機能は、画像判読の結果を受けて識別器の登録、更新を行い、識別器の判読性能を向上させるナレッジ制御機能、手動判読実務者による判読結果、および識別器の選定、評価、修正を行うナレッジ管理機能、学習データを作成する学習データ作成機能に分かれる。

また、継続的かつ効率的な識別器の精度の向上を実現するため、判読結果からのフィードバック機能を具備した。これは、利用者から、

⑤ 計算機環境の構築

計算機環境の設計のため、ロジック部およびフレーム部の研究成果や設計を踏まえ、機械装置のサーバー、ネットワーク等の要件の整理をした。本要件に基づき、計算機環境の設計および機器選定・調達を行い、構築を行った。構築に際して考慮した要素を以下に示す。

（ア）仮想 OS サーバーの集約

仮想 OS を稼働させるサーバーは必要リソース＋1 台の構成として冗長化を担保するとともに異なるネットワークのサーバーを配置しても稼働可能なよう構成した。

（イ）ブレードサーバーの採用

ブレードサーバーを採用することで、設置スペースの省スペース化を図り、ラック数を抑えることとした。

その結果、耐震施工工事に係る費用の抑制、電気使用量の抑制を図った。また、各機能のサーバーを同一エンクロージャーに収容して管理性の向上を図った。

（ウ）ストレージの分割

ストレージは、高速にアクセスが可能な高速ファイルサーバーと大容量のファイルサーバーの 2 種類を配置して、用途に応じて使い分ける仕様とした。

高速ファイルサーバーに搭載を検討した I/O アクセラレータは PCIe 直接接続型のストレージであるため、従来ストレージと比較し高速にデータ転送が可能であるが、ファイルサーバーに必要と試算している容量をサーバーに搭載した場合、高額な費用が必要となる。そのため、各種データの速度要求から高速アクセスが必要なデータのみを I/O アクセラレータを使用したサーバーに保存するものとした。その他のデータは、大容量のストレージが必要となるため従来のハードディスクドライブを採用したファイルサーバーを大容量ファイルサーバーとして構成することとした。

（エ）ネットワークの集約

ネットワークの要求では、より高速な通信が必要な「画像処理サーバー間の通信」と「その他の業務用通信」、「OS 管理用通信」、「HW 管理用通信」に分類を行いそれぞれに必要な通信規格を定めた。

OS 管理用通信では、1G Base-T の通信規格を採用しても用途上の支障はないと検討したが、「その他の業務用通信」と同じネットワークを利用して、VLAN を利用することで論理的に通信を分けることでセキュリティを担保しつつネットワーク機器の台数を減らし、コストを削減することとした。各用途区分の採択通信規格を表 C-2-3-1-2-2 に示す。

表 C-2-3-1-2-2 各用途区分の採択通信規格

用途	通信規格
画像処理サーバー間の通信	Infiniband
その他の業務用通信	10G Base-T
OS 管理用通信	10G Base-T
HW 管理用通信	1G Base-T

（オ）デプロイツールの採用

画像処理サーバー、NoSQL サーバーでは、物理サーバーでかつ、同様設定のサーバーを複数台使用する構成となっているため、運用性の向上のため、OS のデプロイツールを採用することとした。このツールにより構築に係る作業工数を大幅に削減し構築工期の短縮、構築コストの抑制が可能となる。また、同一種類のサーバーを複数台構築した場合、人的な作業ミスによって設定差分による不具合が発生する危険があるが、OS イメージをコピーしていく方式であるため、設定の差分は最小限に排除可能となる。

また、構築した計算機環境の外観を、図 C-2-3-1-2-16 に示す。

図 C-2-3-1-2-16 計算機環境外観

（３）ナレッジデータベースの構築

システムロジック部の研究開発に必要となる研究用データ（学習用データおよび評価用データ）を、効率的に整備するため、2 段階のフェーズに分けて作業を実施した。第一フェーズの「トライアル実施」においては、汎用 GIS ツールを用いて整備作業を試行し、効率的に実施できる運用方法の確立や整備ツール（図 C-2-3-1-2-17）の作成

を行った。続く第二フェーズの「ライン生産」においては、「トライアル実施」で開発したツールを利用して、大人数にて集中的・効率的に学習用データの整備を進めた。

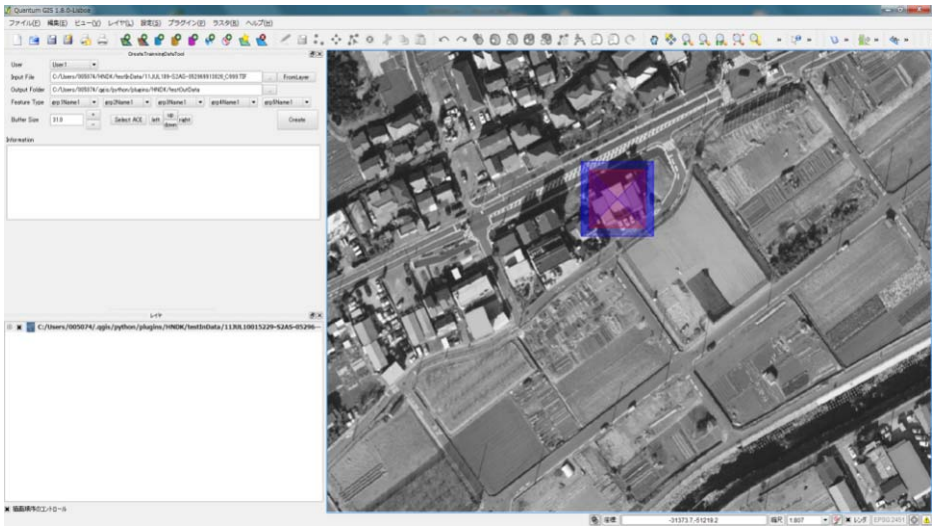


図 C-2-3-1-2-17 整備ツール画面

整備対象のクラスとして、光学/統合 300 クラス、SAR100 クラスのリストアップを行い、各クラスに対して整備作業を進めた。ただし、実空間上においてクラスごとの存在頻度はばらつきがあるため、全てのクラスにおいて一律に研究用データを整備することはせず、光学/統合 300 クラス、SAR100 クラスをグルーピング（移動体、線形地物、建造物、被覆系地物）し、各グループを代表するようなクラスを優先的に整備した。これにより、システムロジック部の検証の早期開始が可能となった。最終的には、光学、SAR 合わせて 45 万チップ画像セットを整備した。

Ｃ－３－１－３　特許出願状況等

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

本研究開発における特許出願及び論文等の投稿・発表はない。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

本研究開発における特許出願及び論文等の投稿・発表はない。

Ｃ－３－２　目標の達成度

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

表 C-1-3-2-1. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1)自律自動複数衛星管制システムの開発	a.複数衛星管制マネージメント（管制、軌道）機能の開発	ASNARO-1 衛星管制システムを利用することにより衛星管制機能の統合運用システムへの組み込みを検証した。 複数衛星の軌道管理を実施するための軌道管理サブシステムを開発した。	達成
	b.複数衛星リソースマネージメント（撮像計画、予約）機能の開発	衛星のリソースを管理し、適切な撮像計画を立案するためのコレクション計画立案サブシステムを開発した。 各衛星の運用を立案するためのミッション運用計画立案サブシステムを開発した。	達成
	c.地上局マネージメント（複数局管理）機能の開発	複数の地上局のリソースを管理し、利用計画を作成する地上局運用管理サブシステムを開発した。	達成
	d.高度なセキュリティ機能の開発	統合運用システム内部セキュリティを確保するためにインタフェースする相手方に応じたインタフェース用ゲートウェイサブシステムを開発した。 システム内のネットワークを公開系と非公開系に区分し、系間にファイヤーウォールを設置し、内部セキュリティを確保した。	達成
	e.高信頼性システムの開発	主要な機器や部品については、単一故障点を排除した高	達成

		可用性とし、障害時の継続稼働を行うためのフォールトトレランス構成等を採用することで計画停止、自然災害等による停止を除き、99.9%の稼働率を達成するシステムを開発した。	
(2)ニアリアルタイム・オンデマンドシステムの開発	a.複数同時画像処理機能の開発	様々な観測データを画像処理するための画像処理サブシステムを開発した。	達成
	b.複数衛星データアーカイブ（分散、集中、同期）機能の開発	各衛星の観測データを保存・管理するためのデータ保存・検索ブシステムを開発した。 撮像した観測データ、処理された画像データを注文受付、配布管理するための受付・配布管理サブシステムを開発した。	達成
	c.ターミナル方式、クラウド方式によるオペレーション機能の開発	プライベートクラウド方式のシステム基盤を採用し、計算機リソースを効率的に使用するため、各プロセスを全体的に管理する全体運用管理サブシステムを開発した。	達成

Ⅱ. 画像自動判読システムの研究開発

表 C-2-3-2-1 目標に対する成果・達成度の一覧表

目標・指標	成果	達成度
地球観測衛星から得られる大量の衛星画像に対して、利用者が必要とする地物の自動判読を高速に実施し、利用者に判読結果を最適な形で提供するためのシステムを開発する。	高分解能光学衛星画像及び高分解能合成開口レーダー衛星画像から、対応衛星画像で目視認識可能な地物や土地被覆を判読するシステムを開発した。処理速度は 3 分以内を実現し、判読可能な地物/被覆は 300 クラス以上を実現している。また、ウェブ GIS への結果表示やタブレット対応等により、ユーザビリティの向上を実現している。	達成

表 C-2-3-2-2 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1)システムロジック部の開発			
① 学習／判読ロジックの確立	画像から、コンピュータが地物の判読のための知識を自ら獲得（学習）し、未知の画像から地物の種類や位置を特定（判読）するためのロジックを確立する。 対象とする画像は、光学画像、合成開口レーダー画像及びその複合とし、画像中で視認できる様々な地物の判読に対応する汎用性の高いロジックを目指す。	機械学習の一つであるディープラーニング手法をベースとして、画像中で視認できる地物や被覆に対する汎用的な判読ロジックを確立した。また、精度評価を行い、十分に実用に足る精度を有することを確認した（建造物で 80%以上）。	達成
② 判読処理の高速化	光学画像、合成開口レーダー画像、光学／合成開口レーダー統合のそれぞれの判読処理が、3 分以内に完了できるよう判読処理の高速化を行う。	複数の処理ノード、マルチコア CPU、GPGPU を活用した並列分散処理を判読処理に適用することにより、3 分以内の判読処理完了を実現した。	達成
(2)システムフレーム部の開発			
① ユーザインターフェイスシステムの開発	ウェブを介して、ワンストップで利用者へ判読サービス（画像の入手から判読レポートの提供）を提供するための機能を開発する。開発にあたっては、利便性やシステムへのアクセスのし易さ等を考慮する。 【性能目標】 画面応答速度：1 秒以内	ウェブを介して判読サービスを利用者に提供するためのユーザインターフェイスシステムを設計、製造し、試験を行った。ワンストップでサービスを提供するため、衛星プラットフォームや ASNARO 地上システム等の外部システムとの連携機能を具備した。加えて、利便性やシステムへのアクセスのし易さの向上のため、ウェブ GIS 上で判読結果表示の対応およびタブレット端末への対応を実施した。 【性能】 画面遷移：0.6 秒	達成
② アーカイブ管理システムの開発	判読処理によって判読された大量の地物の情報を、分散データベースにて、高速に取り扱う機能を開発する。 【性能目標】 100 万件のデータから 10 件のデータの検索及び抽出：1 秒以内	判読結果が格納されるデータベースの制御及び管理を担う、アーカイブ管理システムを設計、製造し、試験を行った。 高速なデータアクセスを実現するため、データベースの分散化を行った。設計にあたっては、分散データベースに求められる要件（速度、可用性等）を整理し、プロトタイピングを行うことで、データベース管理システムの選定を行った。	達成

		【性能】 100万件のデータから10件のデータの検索及び抽出：0.0137秒	
③ 画像判読システムの開発	判読処理を行うための複数の計算機（処理ノード）に効率よく要求（ジョブ）を割り当て、短時間で判読処理を完了させるジョブスケジューリング機能を開発する。 【性能目標】 処理ノードへのジョブ割当：2秒以内 判読処理完了：3分以内	処理ノードの管理および判読学習処理の実行と制御及び管理を担う、画像判読システムを設計、製造し、試験を行った。 複数の判読処理ノードの監視、判読要求の分散発行、進捗モニタリング等を行うための、ジョブスケジューラー機能と、システムロジック部の研究結果による仕様変更のインパクトを最小限にするための汎用処理フレームワークを具備した。 【性能】 処理ノードへのジョブ割当：1.0秒 判読処理完了：113秒/40秒/140秒（光学/SAR/統合）	達成
④ ナレッジ管理システムの開発	コンピュータが画像判読を実行する際のナレッジ（識別器）や、そのナレッジを生成するための学習用/評価用データを管理する機能を開発する。本機能は、システムの運用者が利用する機能であるため、運用性や、サービスの継続性を考慮して開発を行う。	コンピュータが画像判読を実行する際のナレッジ（識別器）の管理を担う、ナレッジ管理システムを設計、製造し、試験を行った。継続的かつ効率的な識別器の精度の向上を実現するため、判読結果からのフィードバック機能を具備した。	達成
⑤ 計算機環境の構築	画像自動判読システムを動作させるための計算機環境の設計・構築を行う。設計にあたっては、本システムを構成する各システムの処理特性や処理性能、運用性を十分考慮する。	システムロジック部およびシステムフレーム部の研究成果や設計を踏まえ、機械装置のサーバー、ネットワーク等の要件整理、計算機環境の設計および機器選定・調達を行い、構築を行った。処理特性に応じて、システムによってネットワーク規格やストレージを使い分けることにより、効率的かつ合理的な設計を行った。また、計算機の集約・仮想化や自動デプロイ機能の具備を行い、運用性の向上と、ランニングコストの低減を図った。	達成
(3)ナレッジデータベースの構築	衛星画像から、システムロジック部の開発等に利用する学習用／評価用データの整備を行う。	大量の学習用／評価用データを整備する必要があるため、効率性を考慮した整備ツールを作成した。当該ツールを活用し、衛星画像や航空写真から、学習用／評価用データを約45万セット整備した。	達成

Ｃ－４　事業化、波及効果について

Ｃ－４－１　事業化の見通し

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

統合運用システムにおいては、今後、民間事業者に払い下げられ、別途、研究開発された衛星データ利用促進プラットフォームや画像自動判読システムのみならず、民間事業者が有する提供システム等と連携することにより事業化される見通しである。

衛星画像データの提供サービス、衛星運用サービス等に係るビジネスモデルおける統合運用システムの位置づけを図 C-1-4-1-1 に示す。

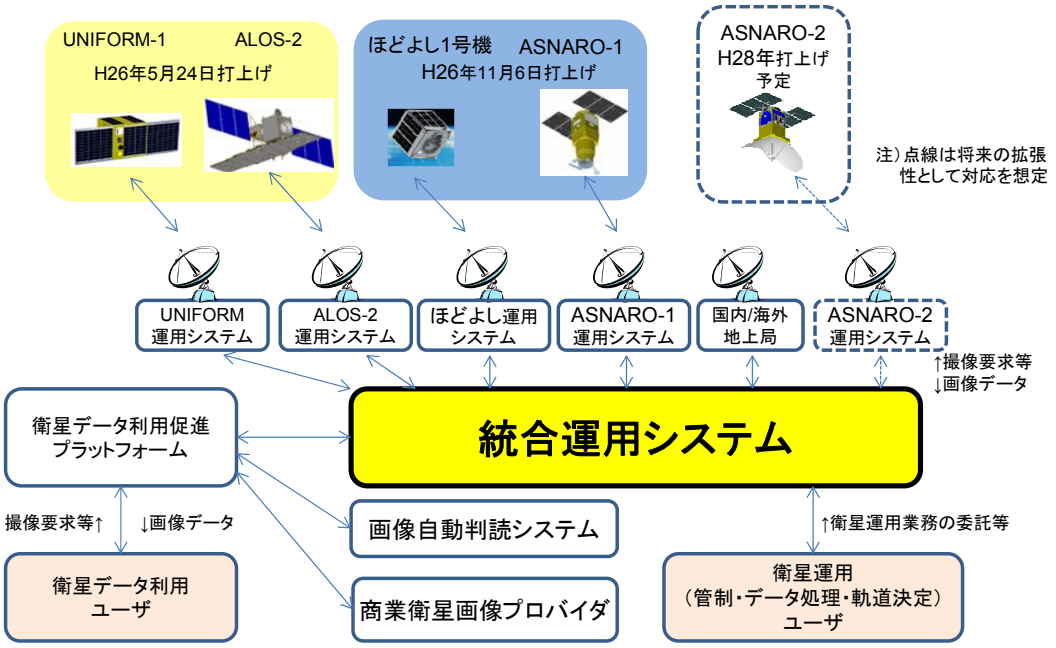


図 C-1-4-1-1　統合運用システムの位置づけ

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

（１）成果の利用例

画像自動判読システムの成果は、今後、民間事業者に払い下げられ、当該民間事業者により事業化がなされる予定となっている。

ビジネスモデルとしては、国内外の民間企業や政府/自治体に対し、インターネット（窓口に衛星プラットフォームを利用）や専用線を介した判読サービスを提供することを想定している。

初期のサービスとしては、衛星画像からの地物の抽出をメインとしたもの（地物抽出サービス）であるが、成果の高度化を行うことにより、利用者の目的に特化したサービス（目的特化型サービス）を順次展開していく。

最終的には、地上で起こりうる様々な事象や情勢（経済活動等）を、衛星画像等を中心とするビックデータ情報解析により可視化を行い、リアルタイム情報として利用者に提供するサービス（情勢解析レポートサービス）の実現を目指す。

サービスの価値としては、高速、高精度、広範囲な画像判読の提供とし、それを実現するために、継続的な学習による精度の維持や、高速にデータを提供するためのシステム基盤の維持を行う。加えて、源泉画像の提供元として、衛星運用事業者と連携を行い、ワンストップでのサービス提供を目指す。収支としては、判読サービス利用料として、スポットや月額利用等、利用者の利用形態に合わせてメニューの設定を行う。

表 C-2-4-1-1 目的特化型サービスの例

適用分野		適用例
農業		作付け状況確認、生育管理、収穫の状況確認・予測、耕作放棄地、転作、災害査定、土地変化、植生分野、疫病管理、休耕地調査、農地海岸域調査
林業		樹種、バイオマス、不法伐採・造林未済地、病虫害（樹木の枯損）、森林管理
鉱業		鉱場モニタリング、生産量推定、採掘地選定
漁業		魚場モニタリング、海洋生簀モニタリング、漁獲量推定、密漁監視、漁獲量調整
保険		農業保険料率算定
物流		物流推定（空路、海路、鉄道運輸）、最適航路ナビゲーション
エネルギー		発電量推定（太陽光、風力、水力等）、太陽光パネル普及モニタリング
金融		先物取引、経済活性度推定
マーケティング		販売促進ターゲット分析、プロモーション評価、新規出店候補地分析、市場占有状況分析、市場ポテンシャル分析
施設管理	港湾	堤防（防波堤、防潮堤）、港湾施設
	道路	道路築造状況（拡幅、延長含む）、道路周辺地の状況
	ダム	ダムサイト（敵地選定、ダム管理）、土砂発生量（堆砂量の推定等）、水量･水位（ダム管理）
都市 国土管理	都市	家屋移動（移動、滅失、移転、増改築等）、固定資産税予測、土地利用、ヒートアイランド、都市緑地
	環境	不法投棄モニタリング、廃棄場管理、陸域汚染評価、河川汚染評価
	地図	地形図作成・更新、主題図作成・更新（都市計画図、土地利用、植生、河川、水系、農地、森林管理図）
	海洋	船舶監視、海域汚染評価、サンゴ礁（白化減少）モニタリング、マングローブ監視、旱魃域監視、領海監視（不正海洋プラント等）

適用分野	適用例
災害支援・防災	洪水、地震、津波、火山活動、火災（山火事）、風水害・高潮、各種事故（航空機、鉄道、船舶座礁等）、道路防災、被害把握（時間経過により必要な情報精度が変化することが特徴）

（２）事業化に至る期間

民間事業者へ払い下げ後、1 年以内に事業化を行う計画である。

（３）問題点の分析と明確な解決方策

判読のための学習に関わるコストの低減は、事業化を行うに当たって大きな課題と言える。本研究開発においては、代表的な地物の学習用データセットを研究開発として必要な数量だけ整備したが、事業化においては、判読精度を向上させるために、継続的に学習用データセットを増やす必要がある。その整備コストは事業化の中で最大のウエイトを占め、その低減は、事業を継続するうえで必要不可欠である。本課題に対し、画像自動判読システムは、利用者からのフィードバック機能を具備させた。当該機能を利用することにより、誤判定された結果を利用者から効率的に収集し、自動で学習にフィードバックすることが可能となっている。なお、誤判定を報告した利用者へのインセンティブの付与のスキーム等については、事業化を進める中で検討をするものとする。

Ｃ－４－２　波及効果

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

１衛星プロジェクトにおける地上システム開発費、運用経費を用いた場合のコスト削減効果の一例を以下に示す。

＜システム開発費＞

１衛星の地上システムを新規に開発した場合、約 15 億円程度の開発費が見込まれる（統合運用システムの開発費をベースとし、地上局の新規建設を除く）。統合運用システムに参画することにより、軌道管理やデータ保存、要求受付・配布等、共通システムを利用することにより、衛星個別で開発すべき機能が不要となり、1 衛星あたり 2～3 割程度のコスト削減が期待できる。

＜運用経費＞

１衛星の運用経費は年間数億円程度が見込まれるが、以下の理由により 2～3 割程度のコスト削減が期待できる。

- 本システムに参画する地上局システムが利用可能
- 地上システムを構成する計算機を複数衛星ユーザで共有可能

- 複数衛星同時運用による運用者数の削減

統合運用システムを利用することにより、上記に示したコスト削減効果が期待できることから、超小型衛星を研究開発している大学等では地上局等のインフラ整備を気にせず衛星開発が可能となり、定常的な衛星運用に人員を確保できない衛星利用機関等にとっては、衛星運用を自ら実施せずとも統合運用システムに任せることによって衛星の観測データのみを入手可能となる。

また、衛星データの利用ユーザにとっては、様々な宇宙機関が運用している衛星の観測データを一括して利用可能となる等、今後、様々なユーザ、大学、衛星利用機関等の宇宙利用に係る波及効果が期待できる。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

（１）成果の高度化に関する波及効果の事例

本研究開発で確立した技術は、画像中から微細な情報を抽出する技術であり、高度化することにより、高分解能衛星画像だけでなく、様々な画像に適用が可能なものと言える。例えば、航空写真やヘリテレ画像、UAV/ドローンから取得された画像等分解能が高い画像から、気象衛星等の分解能が低い画像まで、幅広く適用できる。また、リモートセンシング画像以外においても、監視カメラ画像（光学、近赤外、熱赤外）や医療画像、製造ラインの検査カメラ画像等にも活用が期待できる。

（２）当初想定していなかった波及効果の事例

画像自動判読システムは、人間が衛星画像を判読する際の暗黙知を、コンピュータが学習することをスタートに研究開発を行ったが、研究開発を進める中で、コンピュータが学習した結果から新たな判読指針を得ることが出来る可能性が見えてきた。例えば、合成開口レーダー画像（SAR 画像）は観測方法の特殊性から、人間でも判読することが難しいと言える。しかし、大量の画像をコンピュータが学習することにより、人間が見ても判読を迷うような画像を正しく判読しているケースも見受けられた。このようなコンピュータだからこそ発見できた対象物の特徴を、人間による判読にフィードバックすることが可能となれば、本研究成果の応用範囲は更に広がるものと期待される。

Ｃ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｃ－５－１　研究開発計画

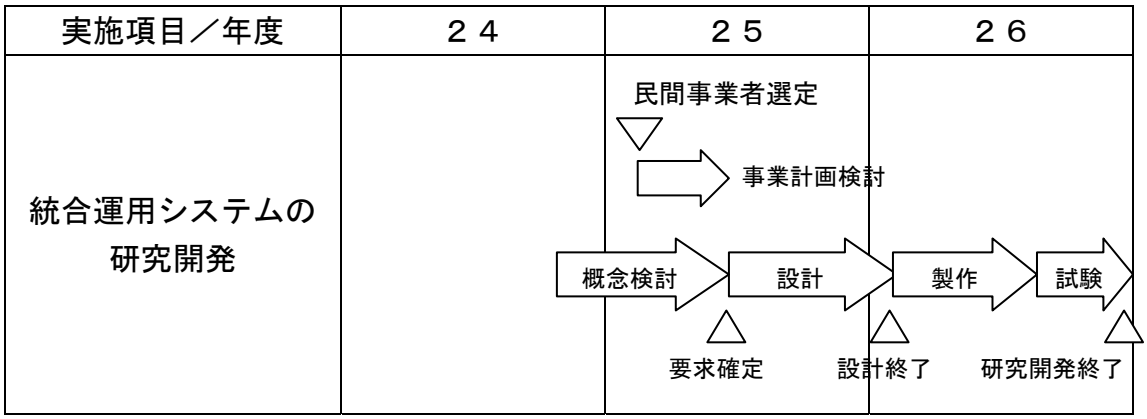
Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

本研究開発は、民間事業者を選定して事業計画及びシステム仕様を検討し、システムの研究開発を行う企業を選定した。

システムの研究開発にあたっては、ウォーターフォール型の開発モデルを採用し、要求確定時、設計終了時、研究開発終了時に社内有識者による審査および技術検討委員会の提言を受けながら、研究開発を進めた。

表 C-1-5-1-1 に本研究開発のスケジュールを示す。

表 C-1-5-1-1. 研究開発計画



△：技術検討委員会

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

本研究開発を実施するにあたっては、実施内容をシステムロジック部とシステムフレーム部に分割し、それぞれ異なる手法で開発を進めた。

システムロジック部の開発は、判読のコアロジックの確立や高速化がメインであり、研究要素が多いため、反復的にプロトタイピングと評価を実施するイテレーション開発手法を適用した。これにより、研究の進捗を確認しながら、短いスパンで研究の方向修正を行うことが可能となり、最終的な目標達成へ貢献した。一方、システムフレーム部の開発は、大規模開発であることと、事業化を見据えてソフトウェアの品質を重視することから、ウォーターフォール開発手法を適用した。また、要件定義から、設計、製造、試験等の各工程や品質管理、工程管理は、国際標準規格を参考に実施することにより、確実な目標の達成と品質の確保を実現した。

表 C-2-5-1-1 に本研究開発のスケジュールを示す。

表 C-2-5-1-1. 研究開発計画

実施項目／年度	２４	２５	２６
(1)システムロジック部の開発			
判読ロジックの確立		計画 → プロトタイピング及び評価を反復	
判読処理の高速化		計画 → プロトタイピング及び評価を反復	
(2)システムフレーム部の開発			
ﾕｰｻﾞｲﾝﾀｰﾌｪｲｽｼｽﾃﾑの開発		設計／製造／試験	
アーカイブ管理システムの開発		設計／製造／試験	
画像判読システムの開発		設計／製造／試験	
ナレッジ管理システムの開発		設計／製造／試験	
計算機環境の構築		設計／調達／構築	
(3)ﾅﾚｯｼﾞﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽの構築		トライアル実施	ライン生産

Ｃ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、宇宙航空研究開発機構が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として(株)パスコ、TIS(株)、富士通(株)、新日鉄住金ソリューションズ(株)、ALOS-2 運用・観測データ一般配布共同企業体、日本電気(株)、宇宙技術開発(株)、ラック(株)、ニシム電子工業(株)、(株)アペックス和光、(株)清和設備設計が参加した。

また、東京大学（ほどよし１号機運用システムの開発者)、和歌山大学（UNIFORM-1 運用システムの開発者)、(株)パスコ（衛星データ利用促進プラットフォーム[注)] 開発業者）の支援を受けた。

なお、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトチームとして統合運用システム研究開発室（室長：内藤一郎）（当時）を宇宙航空研究開発機構内に設置するとともに、本研究開発の内容ついて提言を受けるため宇宙開発利用に関わる地上系、運用系の学識経験者、専門家等からなる７名の有識者による技術検討委員会を設置した。

図 C-1-5-2-1 に本研究開発の実施体制図を示す。

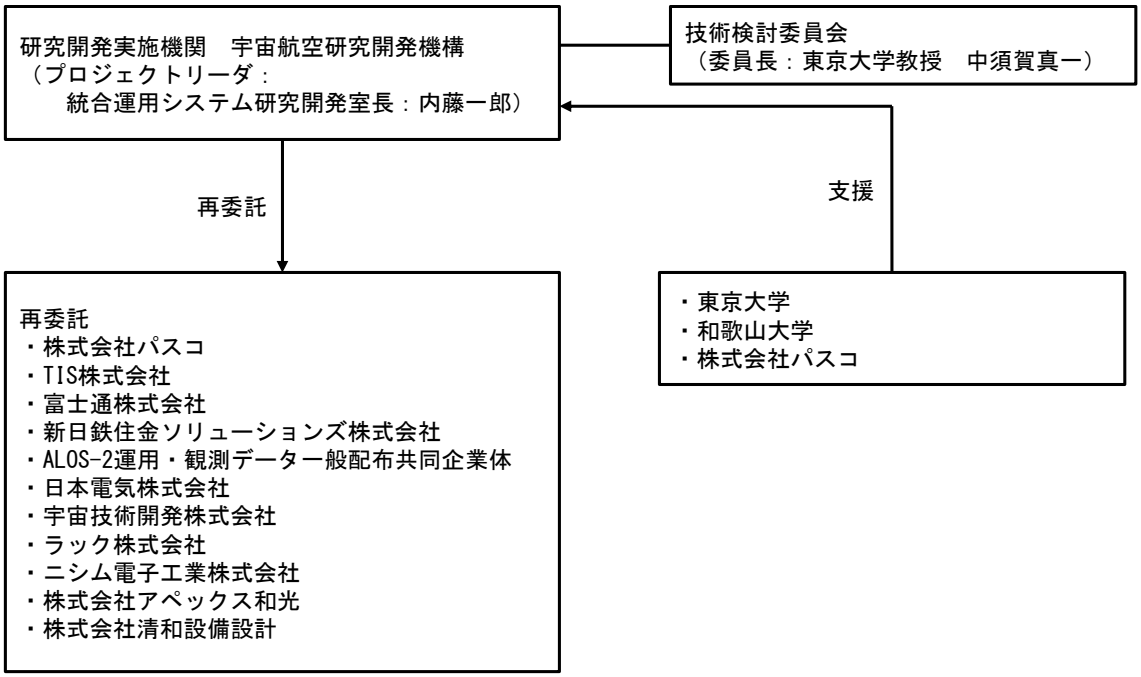


図 C-1-5-2-1. 研究開発実施体制

Ⅱ. 画像自動判読システムの研究開発

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、株式会社パスコが経済産業省からの委託を受けて実施した。

また、研究開発の実施に当たっては、事業計画、実施結果等の評価を適切に実施するため、衛星画像の利活用、画像判読の研究開発、人工知能の研究開発、光学/SAR 衛星のセンサ開発、コンピュータアーキテクチャの研究開発等に関わる学識経験者、専門家等からなる 8 名の有識者による技術評価委員会を設置した。

図 C-2-5-2-1 に本研究開発の実施体制図を示す。

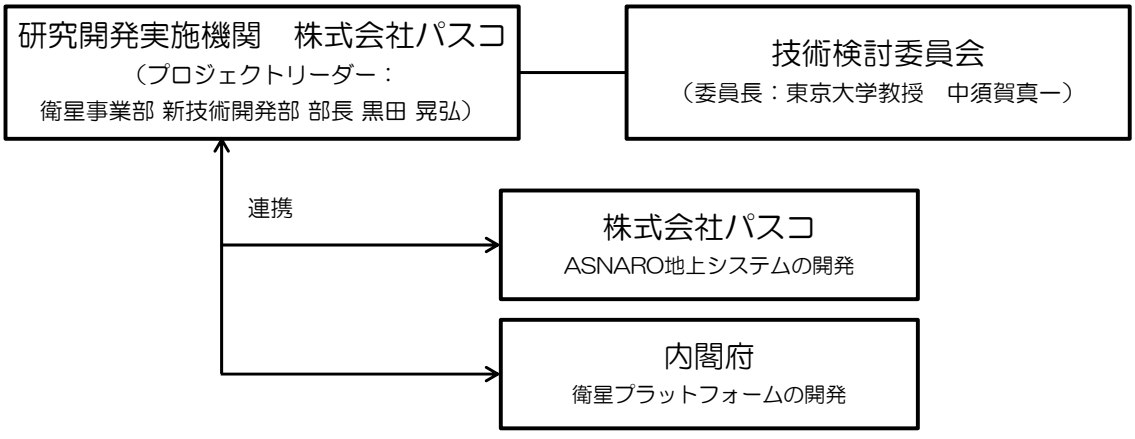


図 C-2-5-2-1 研究開発実施体制

Ｃ－５－３　資金配分

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

表 C-1-5-3-1. 資金度配分　（単位：百万円）

年度　平成	２４	２５	２６	合計
統合運用システムの研究開発	1,430	0	0	1,430
合計	1,430	0	0	1,430

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

表 C-2-5-3-1 資金度配分　（単位：百万円）

年度　平成	２４	２５	２６	合計
画像自動判読システムの開発	1,570	0	0	1,570
合計	1,570	0	0	1,570

Ｃ－５－４　費用対効果

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

本研究開発によって、複数衛星の運用を統合し、様々なユーザへのサービスを一元化可能なシステムの検証が実施できた。

今後、多数の衛星運用事業者が本システムに参画し、利用することによって以下の示す効果が期待できる。

a. 複数衛星に対する撮像機会検索サービス（既存サービス）の利用によりセンサ種別を問わず利用可能な衛星の同時検索が可能となり、迅速な情報収集に寄与できる。
b. 災害状況に応じた迅速かつ適切な撮像要求決定に際し、新たに撮像機会検索サービスと連動するタスキング機能を設け運用者作業をシステム的に支援することで、従来以上の迅速性、撮像の適時性が期待できる。
c. 利用者は衛星データ利用促進プラットフォームを介して統合運用システムのジオインフォメーション提供サービスを活用することによりワンストップで複数衛星からの情報を取得可能であり、災害対応時における現地の作業負荷低減が可能となる。
d. 統合運用システムでアーカイブデータを取り扱うことで、統合運用システムでの付加価値サービス追加、ならびに利用者に対する利便性向上（新規撮像に加えてアーカイブ要求も含めたワンストップでの提供）が可能

となる。

e. 民間地上局を利用した直接ダウンリンクサービスの高度化により、最小コストでのサイトダイバーシティの実現、また情報提供の迅速化が可能となる。

加えて以下の考慮により、本システム利用ユーザ以外の衛星運用事業者の効率的な災害時対応の支援が可能となり、システムのさらなる価値向上が期待できる。

f. 撮像済みエリアを一元的に管理・公開する仕組みの整備により、統合運用システム利用ユーザ以外の衛星運用事業者による効率的な撮像のサポートが可能となる。

g. 通常時において統合運用システムとインタフェースを持たない大学衛星等が、発災時において自ら収集したデータを統合運用システム経由で利用者へ提供する仕組みを整備することで、提供情報量の拡大が期待できる。

Ⅱ. 画像自動判読システムの研究開発

本研究開発の成果を活用することで、衛星インフォメーションプロダクト分野において、年間48億円以上※の受注機会が発生すると期待される。また、衛星インフォメーションプロダクト分野の市場規模は、今後5年で倍増することが予測されており、受注機会は更に拡大する見込みである。

また、既存業務（図化やマーケティング解析等）のコンピュータへの置き換えへのベンチマークにおいては、最大99.6%のコスト削減が実現できることが確認された。このように、コンピュータが人間の処理の代替することで、大量のデータからの情報抽出を現実的な時間とコストで実現することが可能となり、新たな市場の創造が期待される。

※衛星インフォメーションプロダクト分野の市場は1200億円（2015年、Northern Sky Research 調査）と言われており、当該分野から本システムに置き換え可能な規模は4%と算定している（パスコにおける過去3か年の実績）。本システムの潜在的な価値は、現段階で48億円以上と算定（単年度）される。

Ｃ－５－５　変化への対応

Ⅰ．複数衛星運用のための統合運用システムの研究開発

様々な変化に対応すべく以下の設計を採用することで将来の拡張への備えとしている。

a. 統合対象とする衛星及び地上局について、パラメータにより追加・削除を可能な設計とした。
b. 1つのサブシステム（全体運用管理サブシステム）でシステム監視・制御を一元的に実施することとし、将来の運用変更への対応を容易（改修を最小）とする設計とした。
c. 外部システム（衛星データ利用促進プラットフォーム、衛星運用事業者、地上局運用事業者）とのインタフェースにおいて、ゲートウェイの役割を担うサブシステム（プラットフォームインタフェース用ゲートウェイサブシステム、運用データインタフェース用ゲートウェイサブシステム、地上局インタフェース用ゲートウェイサブシステム）を置くことで、外部システム連携への対応を容易（改修を最小）とする設計とした。
d. システムを構成するサーバ類について仮想化技術を採用し、将来の処理追加や能力向上へ柔軟に対応できる設計とした。

Ⅱ．画像自動判読システムの研究開発

本研究開発で利用したディープラーニング手法は、2012 年に自然画像を対象とした画像認識コンペティションで圧勝をしてから、様々な分野で加速度的な広がりを見せている。実際、Google 社や Apple 社等大手 IT 企業を中心にディープラーニング手法を利用したアプリケーションの開発が積極的に行われ、画像判読の分野においては、自然画像を対象に判読（認識や分類）のアプリケーションやサービスの事例が出始めている。一方、自然画像に比べ、衛星画像の判読は難易度が高く、まだ適用事例は限定的である。このような背景の中、本研究開発の成果は、より難易度の高い衛星画像の判読を実現したことから、十分な技術優位性とビジネス化への可能性を有していると言える。しかし、衛星画像に対しても、今後ディープラーニングを用いた研究開発や適用事例が世界的に広がることは十分予期される。今後、技術優位性を維持しつつ、早期に事業化を進めるため、本研究開発では以下の措置を講じている。

✓ 衛星プラットフォーム等の外部システムとの連携

衛星プラットフォームや衛星運用事業者と連携することにより、データの入手から、加工、提供までの一連のバリューチェーンを確立した。これは早期に事業化を実現するうえで、他者に比べ大きなアドバンテージとなり得る。

✓ スケールアウト可能なシステム構成

本研究開発で開発した画像自動判読システムは、仮想化技術と分散技術を取り入れており、サービスの規模に応じて、柔軟にスケールアウト可能なシステム構成となっている。また、構成されるサブシステム間のインターフェイスは疎結合となっており、必要に応じて機能の組み合わせを変更し、異なる形態でサービスを提供できるような構成となっている。これらにより、利用者の様々なニーズに柔軟に対応することが可能である。

✓ 研究開発のためのフレームワークの構築

ディープラーニングの研究開発を効率的に行うためには、十分な計算機環境が必要である。また、短いスパンでトライアンドエラーを繰り返すことにより成果が向上していくため、開発のための使いやすいフレームワークも必要である。本研究開発においては、計算機環境及びフレームワーク共に、整備を行っており、今後の継続的な研究実施においても、十分な環境が整っていると言える。

✓ 研究開発のためのデータセットの整備

ディープラーニングの研究開発においては、品質が高い研究用データセットの有無が、その効率に大きく影響を及ぼす。本研究開発において、必要なデータセットを十分に整備できたため、今後の研究開発においてもアドバンテージを有していると言える。

Ｄ　可搬統合型小型地上システム
の研究開発

株式会社パスコ

用語	用語説明
アーキテクチャ	ハードウェア、OS、ネットワーク、アプリケーションソフトなどの基本設計や設計思想。
アウトリガ	可搬統合局のアウトリガとは、車体横に張り出して接地させることで車体を安定させる装置をいう。
ウォーターフォール・モデル	システムの開発手順を示すモデル。設計、開発、テスト等の作業工程を順番に実施し前工程に戻らないように進める方式。
衛星ライフ	衛星の打上げから実際に機能停止の状態に陥るまでの期間を指す。
オールインワン	可搬統合局1台で衛星とのコミュニケーション（UL/DL）から、受信データの基本的な処理及び高次処理までの機能を具備していること。
オルソ	「正しい、ひずみの無い」という意味。GISにおいては「ひずみを修整」のことを「オルソ」と呼ぶ。
画像I/O性能	画像処理全般に関する入出力処理の性能のこと。
画像分析機能	ある目的に沿って、画像上の情報を分析する機能のこと。ここでは、DSM差分抽出、マルチ画像分析、メッシュ解析を指す。
幾何補正処理	地図や画像などの空間位置の誤差を除き、基準点を用いて正確な地理座標を与えること。
軌道決定	様々な観測データから、衛星のある時刻における位置と速度を求めること。
局間伝送シミュレーション	遅延装置を用いた疑似環境と東京―北海道間をインターネット回線で接続した実環境において、伝送を実施すること。このシミュレーションよって、帯域、遅延時間、パケットロス及びRAMディスクの使用量を測定する。
光学補正処理	周辺光量の落ち込みと色収差による画像ムラを補正すること。
高次処理	パンシャープン処理、オルソ処理、DSM処理の総称のこと。
小型化等による先進的宇宙システムの研究開発	低コスト、短期の開発期間を実現する高性能小型衛星を開発することを目的とし、経済産業省（当初は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が平成20年度から実施する研究開発事業。
コマンド	地上から衛星に指令を与えるために送られるデータ。
コンステレーション	複数の人工衛星で協調した動作を行いシステムの目的をはたすこと。
コンピュータアーキテクチャ	コンピュータ（主にハードウェア）の基本設計や設計思想などの基本設計概念をいう。
最適化ソリューション	伝送する拠点間の帯域を十分に活用することを目指した、ネットワーク伝送を最適化による解決法のこと。WANの高速化やトラフィックの平滑を含む。
主題図	利用目的に応じてある特定の主題を表現した地図のこと。 例えば、人口などの統計データや経済、自然などの様々な事象をテーマ（主題）として、それを地図上で色分けや円グラフなどを使って表現したもののこと。
情報統合機能	多様なデータを集約し、統合的に分析できるように管理する機能のこと。
ステレオペア画像	イメージマッチングに使用する二枚のステレオ画像のこと。

ストリーム方式	通信回線で送受信される画像等のデータをリアル-タイムで再生する技術方式をいう。
総合システム開発仕様書	衛星と地上システムを総合システムとして運用するために、衛星、地上システムの各々に機能・性能を規程した仕様書。
地物抽出手法	シーン中に存在する地物（河、山、植物、橋、鉄道、建築物などの総称）を抽出する手法のこと。
中間ファイル	処理系で、あるファイルを作成する途中に作られるテンポラリファイルのこと。
テレメトリ	衛星から地上に送られる衛星内部の状態を表すデータ。
ナショナルアーカイブ	リモートセンシングデータの組織的整備を指す。
ノミナル	標準的、定常的の意。
パンクロマティック	ほぼ可視光線のすべてに感光するセンサによって撮像、生成されるグレースケールで表示されるシングルバンドのこと。
パンシャープン	パンクロマティック（モノクロ）とマルチスペクトル（カラー）の合成処理をいう。
被雲率	衛星画像データ中の雲に覆われている領域の割合のこと。
ピクセルスペーシング	画像を構成する隣りあう 2 つのピクセルの中心間の距離。
復号処理	暗号化されたデータ列を、平常のデータ列に復元する処理のこと。
プロトタイピング	設計を様々な観点から検証するため、不完全だが実動するモデル（プロトタイプ）を早期に製作する手法および過程をいう。
変化抽出手法	複数のデータを比較し、変化した領域を抽出する手法のこと。
マルチバンド	スペクトルを複数に分けて撮像が行われたバンドのこと。
ミッション運用	衛星がミッションを遂行するにあたって必要な機器を運用すること。
メタデータ	あるデータが付随して持つそのデータ自身についての付加データを指す。
リファレンスデータ	パンシャープン処理における出力補正処理で、補正の参考に使用するデータのこと。
AOS	Acquisition of Signal の略語。 衛星が可視範囲に入り上空に見え始めること。LOS（Loss of Signal）：衛星が上空から見えなくなること。
CCD	Charge-Coupled Device の略語。 隣り合った素子の間の電荷的な結合を利用して、次々と電荷の状態が送り出されることにより信号がやりとりされる素子のこと。
CSW	Catalog Services for the Web の略語。 地理空間データ、サービス、および関連リソースを記述する情報（メタデータ）のコレクションを検索、取得、および更新する機能を提供する。 カタログは、特定の情報モデルまたは規格に準拠するメタデータを登録するために使用する。
DB	Database の略語。データベース。
DEM	Digital Elevation Model の略語。 地表面の地形情報をデジタル化した数値標高モデルのこと。
DSM	建物等を含む全ての地表面の情報をデジタル化した数値表層モデルのこと。
ebRIM	国際標準団体 OASIS によって定義された E ビジネスなど多様な分野におけるデータ交換に必要な情報モデル。

EOP	Earth Observation Profile の略語。 地理空間情報メタデータ標準として EOP は衛星データに特化して設計されている。
GIS	Geographic Information System の略語。 位置や空間に関する様々な情報を、コンピュータを用いて重ね合わせ、情報の分析・解析を行い、情報を視覚的に表示する地理情報システム。
GPS 軌道決定処理	GPS（Global Positioning System）を使って、精密な人工衛星の軌道決定を実施すること。
H/W	Hard Ware の略語。ハードウェア。
H/W アーキテクチャ	ハードウェア機器の基本構成や設計思想のこと。
HK 運用	人工衛星としての基本機能に必要な機器を運用すること。
ISO	International Organization for Standardization の略語。 工業分野（電気分野を除く）の国際的な標準である国際規格を策定するための非政府組織。
ISO19115/ISO19118	19115 は地理空間情報及びサービスを記述するために必要なデータの論理的構造を表す規格、19118 は空間データの符号化に関する規格をいう。
JMP	国土地理院と民間企業との共同研究により作成した地理情報標準（JSGI）の中から特に情報の発見、評価、入手に必要なメタデータ要素を集めて標準化された日本版のメタデータサブセット。
L0 処理	衛星からダウンリンクした前処理データに復号処理・パケット分離処理を施すこと。
L1 処理	L0 データから切り出し、ライン生成された生データにラジオメトリック補正と幾何学的補正を施すこと。
OGC	Open Geospatial Consortium の略語。 地理空間に関する情報の標準化などを推進している非営利団体である。
RPC	有理多項式係数（Rational Polynomial Coefficient）の略で、衛星画像と地上の幾何学関係を関連付ける変換係数のこと。
SOM	satellite operations manual の略語。 衛星操作のためのマニュアル。
UL/DL	UPLINK/DOWNLINK の略語。 アップリンクとは衛星を利用する際に地上局から衛星に向けて送信される通信経路のこと。反対方向の通信はダウンリンクと呼ばれる。

Ｄ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｄ－１－１　事業目的

我が国の宇宙産業は、宇宙機器産業から利用サービス、ユーザー産業群まで含めると、総額７兆円を超える規模の一大産業に成長している。我が国の宇宙開発は、これまで研究開発が中心であったことから、開発される宇宙システム（衛星、衛星の追跡管制やデータ受信処理を行う地上システム、ロケット等）も政府系研究開発機関が自ら保有し運用することを前提としている。そのため、性能や価格等の面において国際市場から大きくかけ離れたものとなっており、我が国の宇宙システムを民間企業が保有するインセンティブが働かず、国際市場への参入障壁にもなっている。特に、地球観測分野では、これまで我が国衛星メーカの海外受注実績はなく、また、国内のリモートセンシング産業でも自ら地球観測衛星を保有する商業オペレータは存在しないのが現状である。

こうした状況の中、宇宙システムは、大規模な観測とサービス提供を効率的かつ地球規模で行うことができることから、世界的に利用が拡大してきており、近年は先進国のみならず新興国においても、宇宙システムの保有及び利用が拡大傾向にある。

このため、経済産業省は、我が国宇宙産業の国際競争力を強化し国際市場への参入を図るため、今後、科学、地球観測、安全保障等の分野で活用が進む小型衛星に焦点を当て、大型衛星に劣らない機能を維持しつつ、低コスト、短期の開発期間を実現する高性能小型衛星を開発するため、別途「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」を実施している。

本事業は、この高性能小型衛星の開発に合わせ、衛星の追跡管制やデータ受信処理システムの小型化、低コスト化、高性能化、運用の省力化を実現する効率かつ利便性の高い地上システムについて研究開発を実施するとともに、高性能小型衛星を活用した技術実証を行うことにより、我が国宇宙産業の国際市場への参入及び宇宙利用の拡大を図ることを目的とする。

Ｄ－１－２　政策的位置付け

平成２１年６月に宇宙開発戦略本部において決定された「宇宙基本計画」において、我が国宇宙機器産業の国際競争力強化の推進策として、衛星の運用を円滑に行うための「可搬型データ受信システムやデータの統合・高速処理システムの整備を進める。」とされており、この政策に準じた研究開発である。

Ｄ－１－３　国の関与の必要性

我が国宇宙産業は欧米と比べ官需依存度が高いため、直接利益に結びつかない地上システムの研究開発や軌道上実証を民間企業のみで実施することはリスクが高く、かつ、困難である。そのため、我が国宇宙産業の国際競争力の強化

には、これら研究開発や軌道上実証の機会を国が民間企業へ提供することが必要不可欠である。特に、衛星の追跡管制やデータ受信処理システムの小型化、低コスト化、高性能化、運用の省力化を実現するためには、新たな設計思想に基づく地上システムの開発・試験、軌道上実証が必要不可欠となるため、国による研究開発事業の実施が必要となる。

Ｄ－２　研究開発目標

Ｄ－２－１　研究開発目標

本事業は、「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」において経済産業省が開発中の高性能小型衛星（光学実証機）の開発に合わせ、衛星の追跡管制やデータ受信処理システムの小型化、低コスト化、高性能化、運用の省力化を実現する効率的かつ利便性の高い地上システムの研究開発を実施することである。

具体的には以下の４つの項目についての研究開発を実施するとともに、技術検証を行うことを目標とする。

（１）可搬統合局の開発
（２）画像統合運用システムの開発
（３）画像高速処理システムの開発
（４）先進的地上システムの開発

Ｄ－２－２　全体の目標設定

表 D-2-2-1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
（１）可搬統合局の開発 単独で衛星データが送受信可能となるように車両に搭載可能なアンテナ、衛星へのコマンドが直接送信可能となるように衛星管制機能、撮像計画機能、コマンド送信機能を有する可搬統合局の開発・検証を実施する。	主に災害等の有事での利用を想定した場合、固定化された地上局では、電力・通信網遮断等による衛星データの受信及びデータ配布の制約リスクを回避するため。
（２）画像統合運用システムの開発 衛星から取得したデータと過去に撮像した同一地点のアーカイブデータを活用した画像データの統合運用を可能とするシステムの開発・検証を実施する。	災害現場に必要な情報抽出（複数時期のデータを利用した変化抽出や地物抽出など）や、GIS（地理情報システム）機能の活用による画像データの統合的な利用を可能とし、利用者にとって利便性の高いサービスを提供するため。
（３）画像高速処理システムの開発 衛星から取得したデータの L0 処理、L1 処理、高次処理、大容量データ I/F に対する高速処理技術の開発・検証を実施する。	迅速なプロダクト提供は利用者にとっての利便性が高いため。
（４）先進的地上システムの開発 運用要員の低減とユーザー本位なシステムの実現をめざし、地上システムの小型化、低コスト化、高機能化、運用の省力化を実現するためのシステムを開発・検証を実施する。	効率的かつ利便性の高い利用者重視の地上システムを実現することで、利用者にとって利便性の高いサービスを提供するため。

Ｄ－２－３　個別要素技術の目標設定

表 D-2-3-1 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
（１）可搬統合局の開発		
①車両総重量の軽量化	車両総重量を 20t 以下とする。	可搬統合局が機動的に出動するためには一般道を制限なく走行する必要がある。そのためには車両制限令（道路法）による「特殊車両通行許可」申請が不要な重量制限（20t）を満たす必要があるため。
②アンテナ搭載型車両	アウトリガの安定度に関する性能要件はアンテナ設置要件を適用し以下の設定とする。 【性能要件】 設置面傾斜： 水平面から±5° 初期姿勢： 水平面から±0.5° 運用時安定度： 初期姿勢から±0.1°	アンテナ製造メーカから、アンテナを車両に搭載し衛星運用を行うための設置要件が提示されている。
③可搬局セットアップ（アンテナ組立）の高速化	アンテナ組立の 3 工程（アウトリガの設置、Feed の取り付け、アンテナパネルの取り付け）を 2 名で 2 時間以内に実施する。	発災時における可搬局の運用タイムラインを現地到着後 2 時間で組立と想定している。 可搬局の運用者の想定は 3 名でありトラックの定員乗車人数から規定した。1 名はアプリケーションの立ち上げ等の作業を担当、2 名でアンテナ組立作業をする必要がある。
（２）画像統合運用システムの開発		
① 統合運用フローの作成	災害発生時における統合運用手法を確立し、可搬統合局及び統合運用の実施フローから可搬統合局の運用時間や情報提供までの時間を整理しモデルケースにおいて情報提供時間の有効性を検証する。	自然災害の被害状況等、時々刻々と変化する様々な事象の把握のためには、衛星から得られるデータとその他のデータを統合的に処理し迅速に提供することが必須となる。
②主題図作成の自動化	主題図作成の自動化を実現し、統合運用人員の省力化を実現する。	可搬統合局の運用人員 3 名にて統合運用を実施するためには、機能の自動化による省力化が必須となる。
③主題図様式のテンプレート化	主題図の表現方法を明確化し、テンプレートとして柔軟に利用するための表示設定やレイアウトを確立する。また主題図の表現に必要な情報を選定する。	同一の情報であっても、利用者の求める表示形式が異なることから、どのような表示形式の要望にも柔軟に対応できるように分析結果と表示様式を分離し、様式をテンプレート化することが必須である。

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
④DSM 差分抽出の精度検証	DSM 差分抽出アルゴリズムの確立と、大規模災害における被害状況の把握に、広域にわたる高さの変化情報が有効かを検証する。	大規模災害において、広域にわたる高さの変化情報は被害状況を把握するために有効であり、必須の機能となる。
（３）画像高速処理システムの開発		
① L0 処理の高速化	ストリーム方式での中間ファイルの最適なファイル分割サイズ検討、復号処理アルゴリズムの確立と高速化手法による処理の高速化を実現する。 【性能目標】 L0 処理：42 秒	利用者への迅速なプロダクト提供のためにはプロダクト生成の高速化が必要なため。 以下の検討を実施し実現を見込める目標設定である。 ・ストリーム処理方式による処理時間短縮 ・中間ファイル分割サイズの最適化 ・復号処理の高速化
②L1 処理の高速化	画像 I/O について異なる媒体での性能比較・検討を行うことにより処理の高速化を実現する。 【性能目標】 L1 処理：70 秒	利用者への迅速なプロダクト提供のためにはプロダクト生成の高速化が必要なため。 以下の検討を実施し実現を見込める目標設定である。 ・CCD 単位の処理並列化による処理時間短縮 ・画像 I/O 性能の改善 ・処理時間の測定と分析/改善
③高次処理の高速化	高次処理アルゴリズムの開発、最適な装置構成により処理の高速化を実現する。 【性能目標】 パンシャープン生成：60 秒 オルソ生成：90 秒 DSM 生成：180 秒	利用者への迅速なプロダクト提供のためにはプロダクト生成の高速化が必要なため。 以下の検討を実施し実現を見込める目標設定である。 ・最適アーキテクチャの導出 ・高次処理における各種アルゴリズム ・高次処理における H/W アーキテクチャ
④大容量データ I/F の高速化	最適化ソリューションの確立、局間伝送シミュレーション実施、最適な装置構成により処理の高速化を実現する。 【性能目標】 伝送効率：75%	利用者への迅速なプロダクト提供のためには大容量データ伝送の高速化が必要なため。 以下の検討を実施し実現を見込める目標設定である。 ・最適アーキテクチャの導出 ・データ局間伝送の最適化
（４）先進的地上システムの開発		
①撮像予約提供システムの開発	利用者の利便性に考慮した Web 注文システムの構築を目標とする。 【性能目標】	利用者拡大のため、誰もが平易に操作できる Web 検索、注文システムを構築する必要がある。利便性を考慮するため、アーカイブ検索の速度向

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
	検索速度：4 秒以内 ※アーカイブ検索の前提 登録母数：1,500 万件 適合件数：500 件 同時アクセス数：10	上、複雑な処理パラメーターの簡易な設定方法を検討する必要がある。
②アーカイブシステムの　開発	OGC/ISO 準拠のメタデータ設計、高速な空間検索を行うための検索モジュールの最適化を目標とする。ナショナルアーカイブを視野に入れた国際標準に準拠した DB 設計を行う 【性能目標】 1500 万件から 500 件のデータ抽出：1 秒以内	利用者拡大のため、ナショナルアーカイブシステムとの連携が必須であるため。 利用者の利便性を考慮し最適な DB 選定や設計、チューニングを実施し、アーカイブ検索の高速化が必須である。
③撮像計画管理システムの開発	撮像計画立案処理の高速化と、撮像機会の向上を目的としたアルゴリズムの確立を目標とする 【性能目標】 計画立案（衛星運用計画管理との合算）時間：15 分以内	利用者の利便性を考慮し、撮像機会を増やすためのアルゴリズムが必要である。また注文の締め切り時間を衛星が飛来する直前（AOS-30 分前）まで許容するため、計画立案処理は 15 分で完了させる必要があり高速化が必須である。
④衛星運用計画管理システムの開発	運用計画立案処理の高速化を目標とする。 【性能目標】 計画立案（撮像計画管理との合算）時間：15 分以内	利用者の利便性を考慮し、注文の締め切り時間を衛星が飛来する直前（AOS-30 分前）まで許容するため、計画立案処理は 15 分で完了させる必要があり高速化が必須である。
⑤衛星管制システムの開発	運用の省力化・衛星運用自動化の検討を行い運用省力化画面の作成を目標とする。 【性能目標】 ノミナル時 1 可視運用中の運用者操作：0 件	従来システムでは、ノミナル時に 3 名で実施していた運用作業を、運用者 1 名の目視確認のみで運用可能となるようにする。
⑥軌道制御システムの開発	軌道決定運用の自動化、手順の簡略化、軌道決定精度向上、最速軌道決定実施タイミングと処理時間の短縮を目標とする。 【性能目標】 GPS 軌道決定精度： 3m（3σ） 最速軌道決定処理： 20 分	軌道決定の精度は安定的な衛星運用を行うための重大な要素である。

Ｄ－３　成果、目標の達成度

Ｄ－３－１　成果

Ｄ－３－１－１　全体成果

地上・宇宙総合システムの開発及び実現に関して、本研究開発と宇宙機側である「小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」とで合同の調整会議及び細部の技術検討を行う分科会により「総合システム開発仕様書」を平成 23 年 3 月に制定した。本仕様書を基にして可搬統合局及びデータセンター（先進的地上システム）の方向性を定めることができた。概要を図 D-3-1-1-1 に示す。

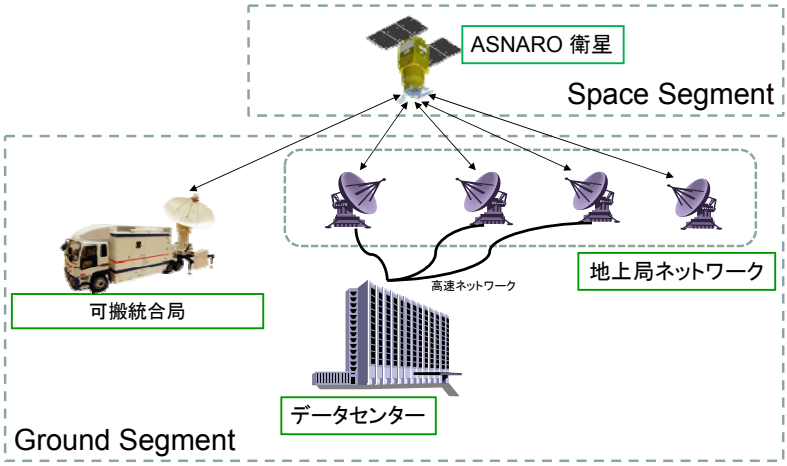


図 D-3-1-1-1 総合システム全体概要

可搬統合局については、衛星とのコミュニケーション（UL/DL）はもとより、受信データの基本的な処理及び高次処理までの統合的な機能を有したオールインワンのシステムを開発することができた。

データセンター（先進的地上システム）は、効率的かつ利便性の高い利用者重視の地上システムを実現した。先進的地上システムの構成を図 D-3-1-1-2 に示す。

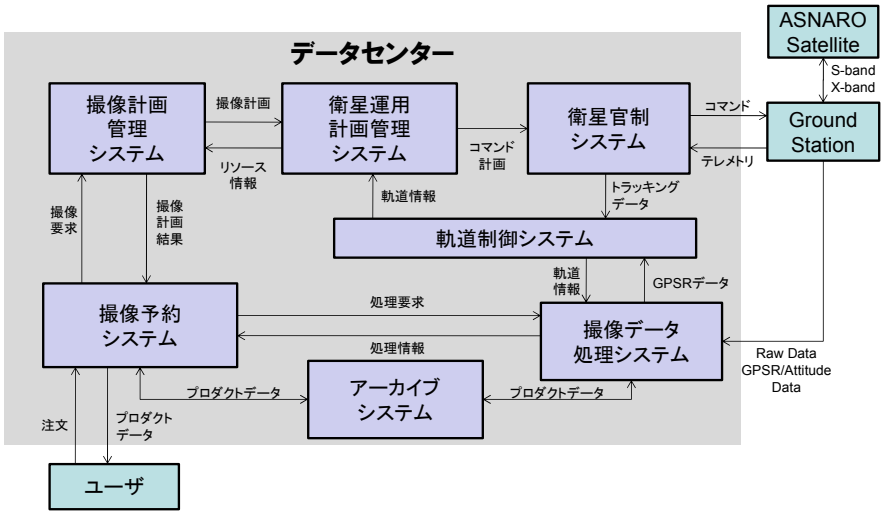


図 D-3-1-1-2 先進的地上システムの構成

画像統合運用については、可搬統合局に具備する変化抽出手法、地物抽出手法、DEM の生成手法、災害シミュレーション手法を開発した。省力化と時間短縮を行い実用に耐え得るシステムを開発した。

高速画像処理については、ハードウェアによる高速化及びソフトウェアによる高速化を実現し利用者にとって利便性の高いサービスを実現した。光学補正処理の高速処理アルゴリズム、幾何補正処理の高速処理アルゴリズム、復号処理の高速処理アルゴリズムを開発した。

Ｄ－３－１－２　個別要素技術成果

（１）可搬統合局の開発

以下の図 D-3-1-2-1 に可搬統合局の性能の仕様と実績を示す。

図 D-3-1-2-1 可搬統合局の仕様と実績

可搬統合局に関しては大きく三つの課題があり、それぞれの課題についての達成状況を以下に示す。

①　車両総重量の軽量化

可搬統合局は車両制限令（道路法）による「特殊車両通行許可」の申請を必要とせず、発災時には機動的に一般道を走行することができるように道路法に定められている重量制限（20t）を満たす必要がある。そのため、必要な機能

を損なうことなく車両総重量が 20t 以下となるように車両の軽量化、搭載機器の最適化、アンテナの軽量化を行った。車両の車検時の計測では 19.4t であったため、有事の場合でも機動性を損なうことなく出動できることを確認した。

② アンテナ搭載型車両

衛星からの画像データを受信するためには、高いアンテナ指向精度が求められる。一方、車体は土台としては不安定であり、衛星を正確に追尾するためにはアンテナを水平かつ安定した状態で設置することが必要である。加えて、アンテナ組立作業時等の危険回避のために様々な措置が必要となる。

本研究開発では、接地面傾斜±5°の場所への設置、初期姿勢を水平面から±0.1°以内で設置できるように開発した。また、風速 25m/s 時のアウトリガの安定性を確認し、風速 25m/s 環境下での初期姿勢からの変位が 0.04°であり、衛星の追尾が可能な性能であることを確認した。

③ アンテナの展開

有事利用における可搬統合局の運用想定は 3 名である。現地に到着後は 1 名がアプリケーション立ち上げの準備を行うため、残りの 2 名でアンテナの組み立て作業行う。

可搬統合局は 2 名で組み立て、設置作業ができるようにアンテナ設計している。可搬統合局の組み立て試験では、2 名で制限時間（2 時間）以内に組み立てを完了でき、有事の初動対応が迅速に実施できることを確認した。

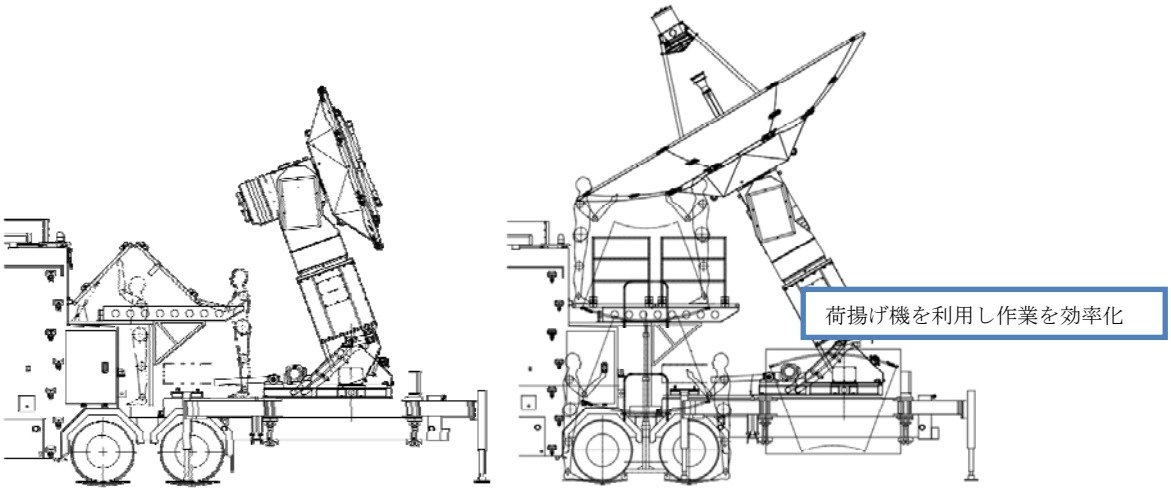


図 D-3-1-2-2 アンテナの組み立て

（２）画像統合運用システムの開発

画像統合運用については、可搬統合局に具備する変化抽出手法、地物抽出

手法、DSM の生成手法、災害シミュレーション手法を開発した。省力化と時間短縮を行い実用に耐え得るシステムを開発した。

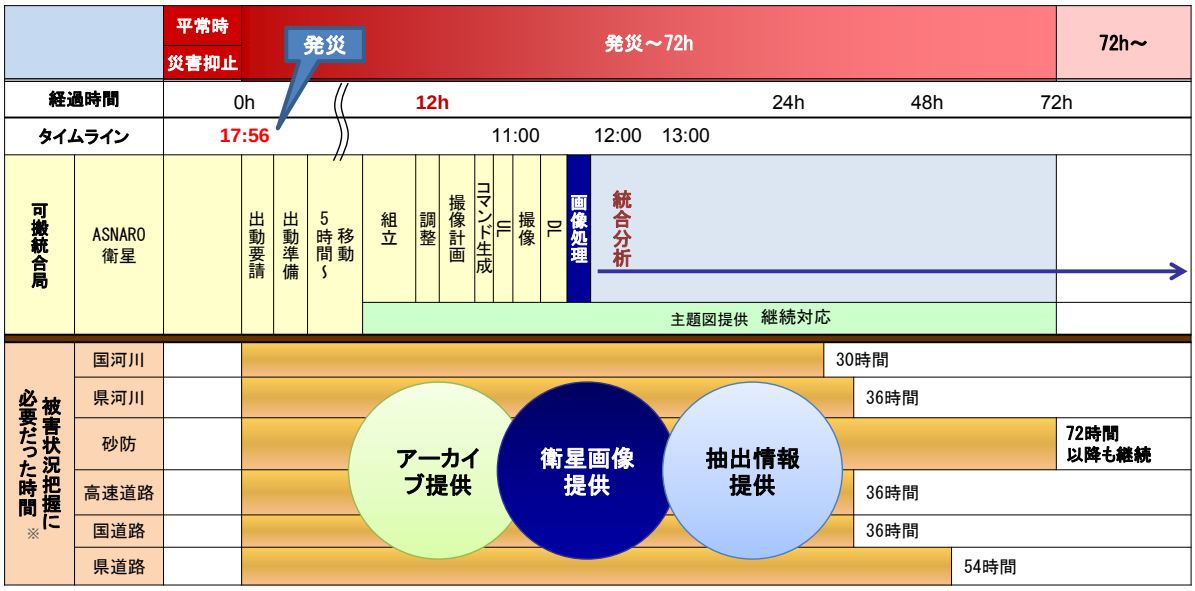
① 統合運用の検討

国内外・平時/有事における可搬統合局の運用局面を整理し、統合運用の有効性を検討した。可搬統合局の画像分析機能、情報統合機能を最大限発揮する局面である「国内における有事」、特に自然災害発生時についてのモデルケースを設定し、統合運用の有効性を確認した。

自然災害発生時においては、「新潟県中越地震」を対象とし、大規模地震の発生時における可搬統合局、及び統合運用の実施フローを整理した。可搬統合局の運用時間に加え、統合運用による情報提供の時間を時間軸でグラフ化し、モデルケースにおける実際の状況把握における所要時間と比較を行うことで、統合運用における情報提供時間の有効性を確認した。具体的には可搬統合局の到着後、間もなくアーカイブデータ提供を開始できることを確認した。

表 D-3-1-2-1 想定する可搬統合局の運用局面

	平時	有事
国内	・教育、トレーニング ・バックアップ ・地球局機能 ・データセンター機能	・災害時における活用
国外	・地球局機能、データセンター機能、統合分析機能を備えたオールインワンシステムとしての活用	・災害時における活用 ・安全保障における活用



※ 減災総プロ 第7回委員会 研究報告書 資料3-1

図 D-3-1-2-3 被害状況把握までの時間と主題図提供可能時間の比較

② 主題図作成の自動化

画像データ統合運用システムで作成する主題図は、ASNARO 衛星画像と、可搬統合局に搭載されたリファレンスデータの統合により、災害情報の抽出を行い、作成される。

災害情報の抽出アルゴリズムに関しては、対象とする災害、現象、対象物を抽出するために利用するデータの種類や画像処理技術が異なるため、それぞれの抽出対象に対してモジュール化し実装する必要がある。一方で、主題図を作成する全体のフローはどのような抽出アルゴリズムを用いる場合においても、概ね一定の手順で行われる。このことから、主題図作成における一連の手順を自動化することで省力化を行った。

また、自動処理に対する設定作業を画像注文時に一括して行う仕組みとすることで、可視時間内の運用負荷を削減している（図 D-3-1-2-4）。

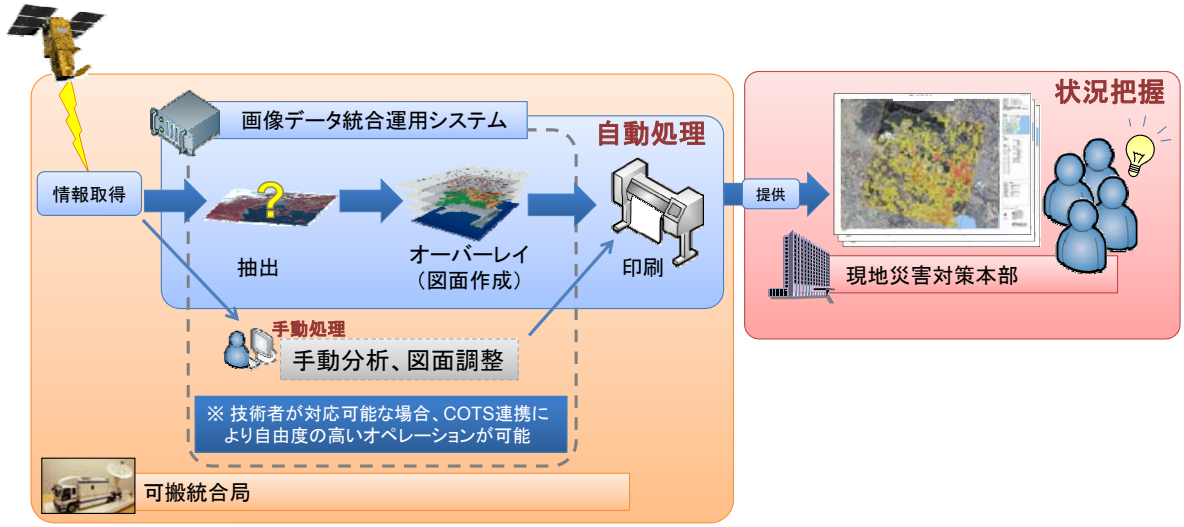


図 D-3-1-2-4 主題図作成の流れ

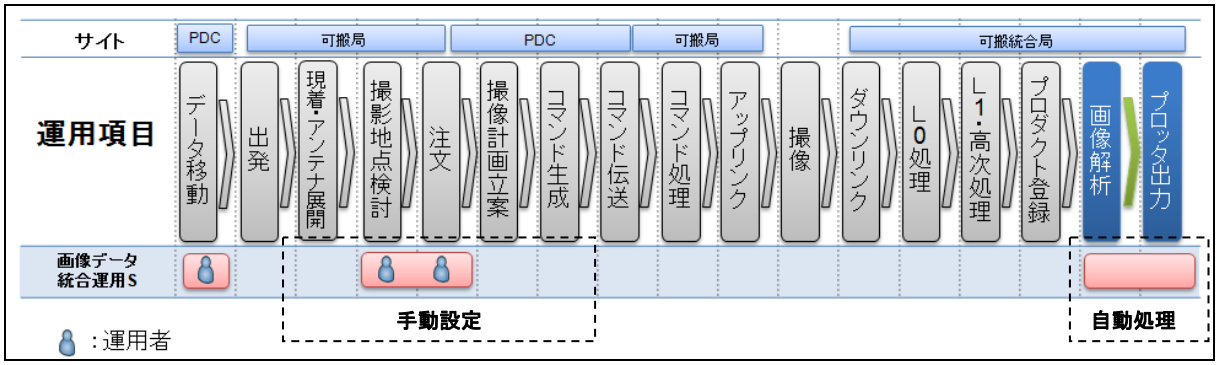


図 D-3-1-2-5 画像データ統合運用システム 運用タイミング

③ 主題図様式のテンプレート化

画像データ統合運用システムは、アウトプットとなる主題図において、分析結果の実データと、データを表現するための表示設定ファイル、主題図のレイアウトを管理するテンプレートファイルを個別に管理する仕組みを実装することで、利用者ニーズや対象とする災害に応じた表示方法での主題図提供を可能とした。

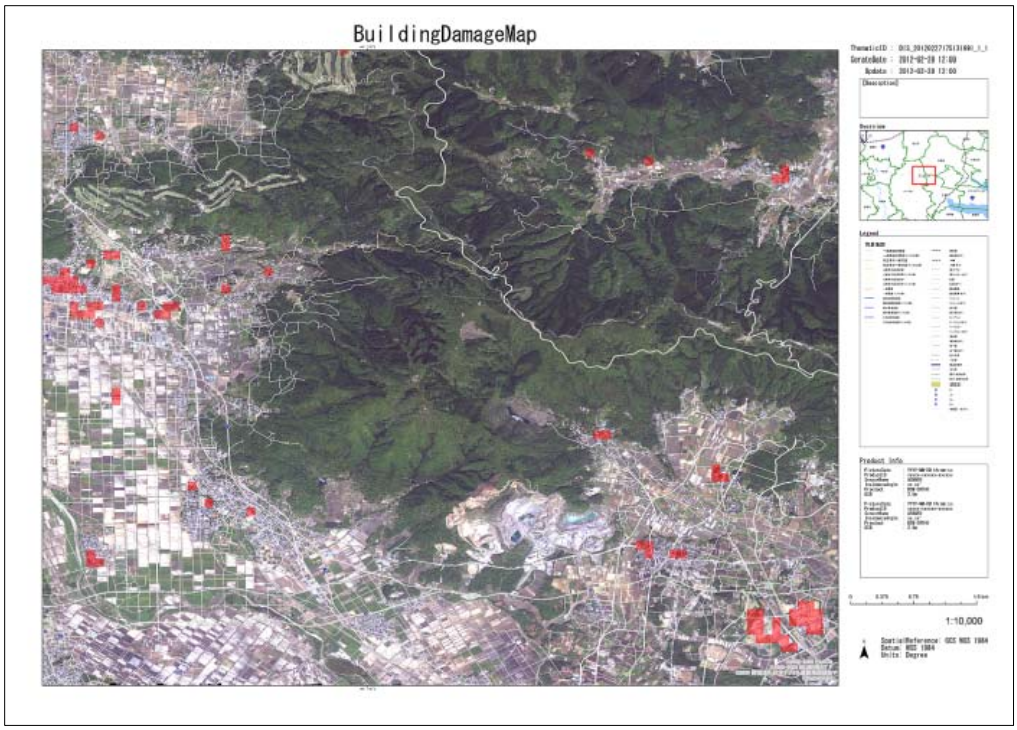


図 D-3-1-2-6 主題図テンプレートの一例（建物倒壊状況）

④ DSM 差分抽出の精度検証

2 時期の画像から高さに関する変化を抽出するため、DSM 差分抽出プログラムのプロトタイピングでアルゴリズムの精度検証（図 D-3-1-2-7）を実施した後、システム仕様に反映した。

アルゴリズムの精度検証においては、建物倒壊の被害状況把握を想定し、把握可能な建物面積に着目した検証を行った。検証においては、ASNARO 衛星を模擬した 50cm 分解能の衛星画像を利用した。検証の結果、200 ㎡以上の面積を持つ建物に関して 83.3%の抽出率を示し、単純差分での変化抽出と比較しても良好な検出が行えることが分かった（図 D-3-1-2-7、表 D-3-1-2-2）。このことにより、ASNARO 衛星画像より作成した DSM の利用においては、大規模な施設に着目し、被害の概況把握を行う場合において有効であると結論づけられた。

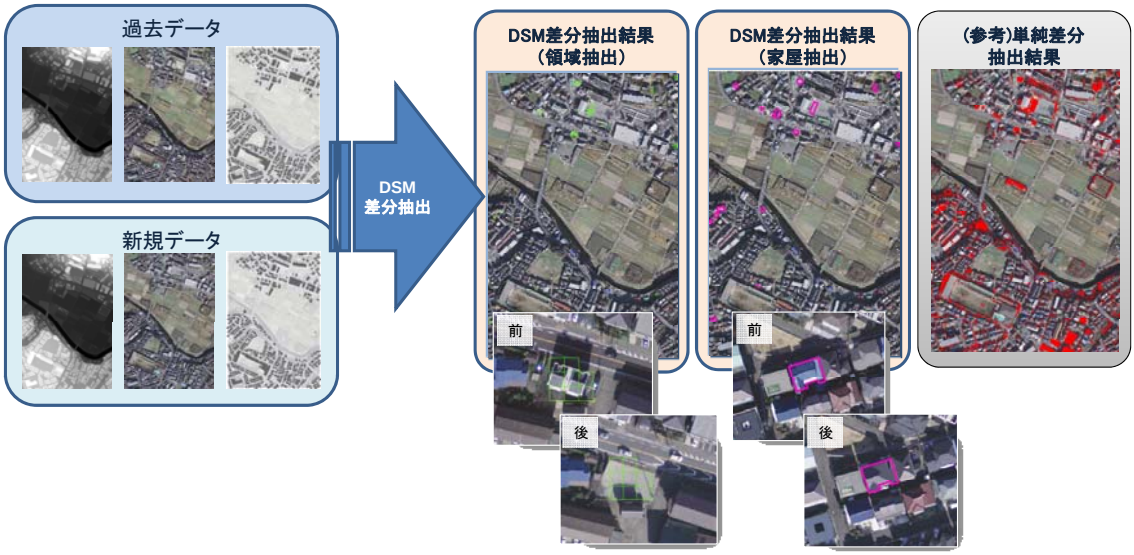


図 D-3-1-2-7 DSM 差分抽出の結果

表 D-3-1-2-2 家屋面積別の抽出率

建物面積	異動家屋（戸数）	抽出家屋（戸数）	抽出率（%）
100 ㎡未満	20	5	25.0
100 ㎡以上 200 未満	8	4	50.0
200 ㎡以上	6	5	83.3

（３）画像高速処理システム開発

画像高速処理を実現する撮像データ処理システムの概要を図 D-3-1-2-8 に示す。

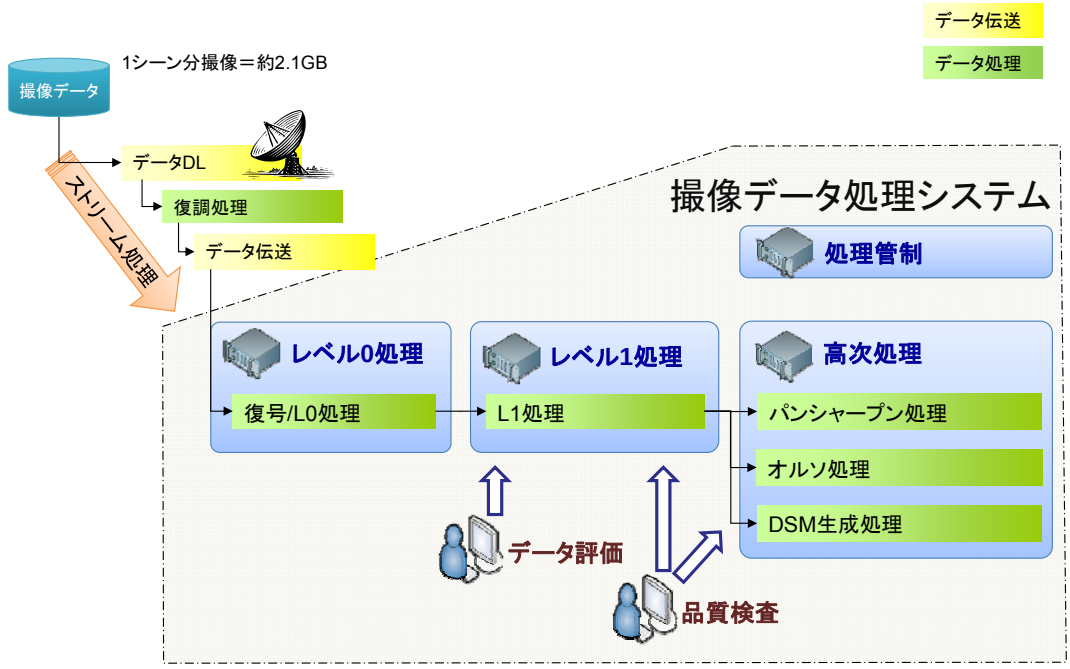


図 D-3-1-2-8 撮像データ処理システムの概要

各要素技術の目標と実績を表 D-3-1-2-3 に示す。すべての目標設定値をクリアすることができた。なお、従来手法からの処理と比べ、3～6 倍の処理速度の向上が確認できた。DSM 生成処理は既存システムとの比較を実施し飛躍的な性能向上を実現した。

表 D-3-1-2-3 要素技術の実績

No.	要素技術	従来	目標	実績
1	L0 処理の高速化	125sec	42sec	26sec
2	L1 処理の高速化	200sec	70sec	53sec
3	高次処理（パンシャープン処理）の高速化	340sec	60sec	28sec
4	高次処理（オルソ処理）の高速化	130sec	90sec	20sec
5	高次処理（DSM 生成処理）の高速化	3h41m55sec	180sec	155sec
6	大容量データ I/F の高速化	伝送効率 70%	伝送効率 75%	伝送効率 97%

① L0 処理の高速化

ストリーム処理の最適化、中間ファイル分割サイズの最適化、復号処理の高速化の検討を実施することにより処理の高速化を実現した。L0 処理の概念図を図 D-3-1-2-9 に示す。

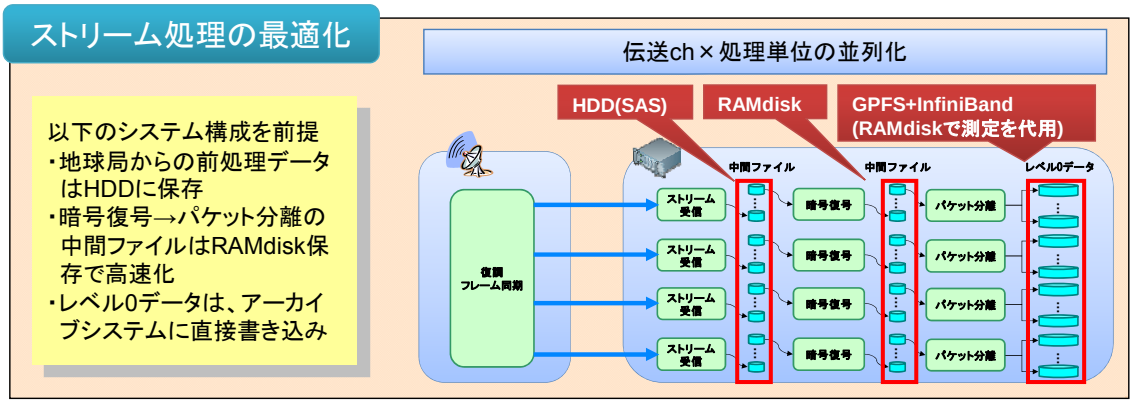


図 D-3-1-2-9 L0 処理の概念図

② L1 処理の高速化

CCD 単位の処理並列化、画像 I/O 性能の改善、処理時間の測定と分析による改善の検討を実施することにより、処理の高速化を実現した。L1 処理の概念図を図 D-3-1-2-10 に示す。

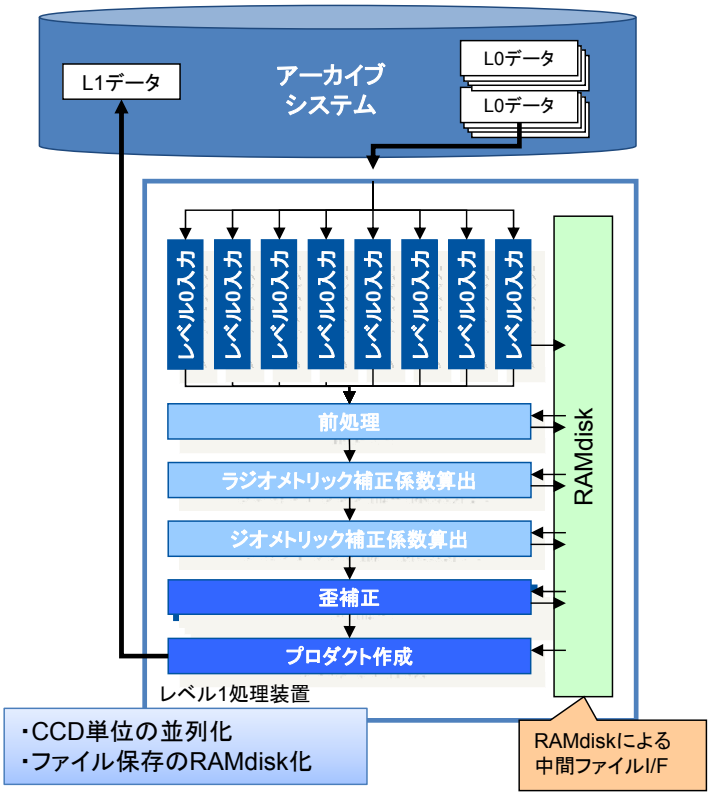


図 D-3-1-2-10 L1 処理の概念図

③ 高次処理の高速化

（ア）パンシャープン

パンシャープンは、高解像度パンクロマティック画像と低解像度マルチバンド画像とを融合させ、高解像度を持つマルチバンド画像として、パンシャープン画像を生成する。パンシャープンのアルリゴズムの検証と改善、H/W アーキテクチャの検証と改善により、処理の高速化を実現した。パンシャープン処理のフローを図 D-3-1-2-11 に示す。

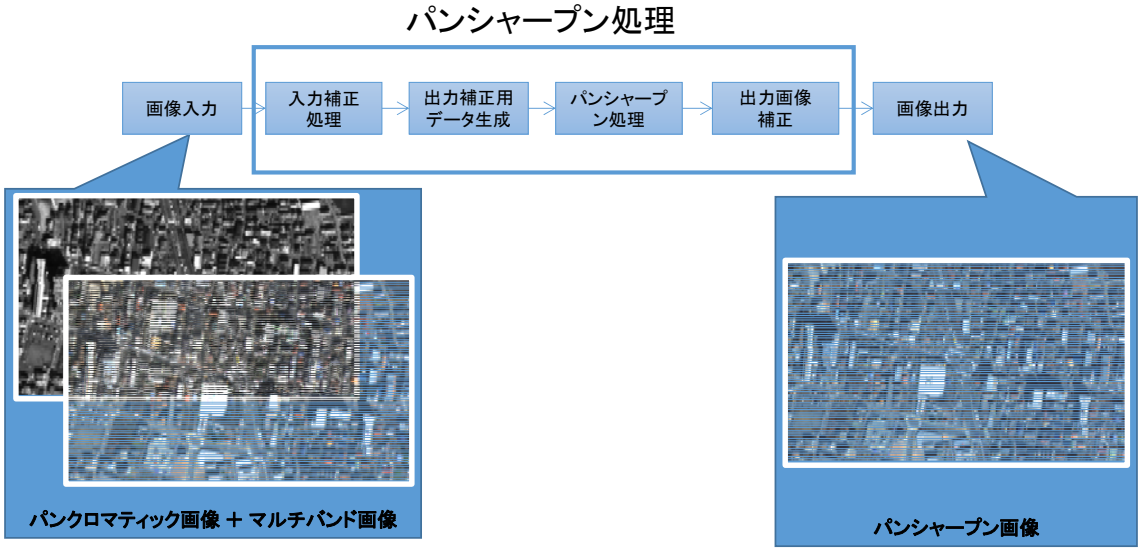


図 D-3-1-2-11 パンシャープン処理のフロー

（イ）オルソ

オルソは、標高値データ（DEM）を使用し、正射投影することにより、像の歪みを補正したオルソ画像を生成する。オルソのアルリゴズムの検証と改善、H/W アーキテクチャの検証と改善により、処理の高速化を実現した。オルソ処理のフローを図 D-3-1-2-12 に示す。

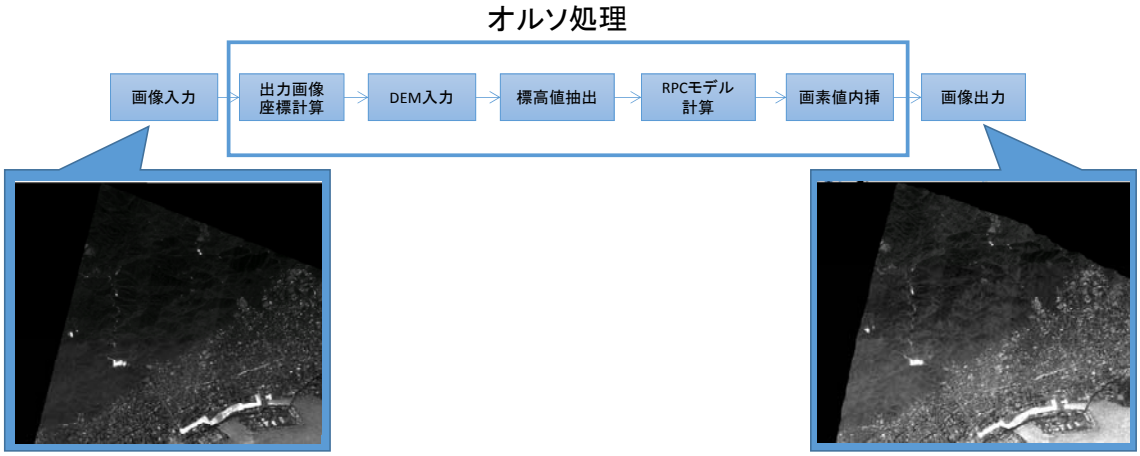


図 D-3-1-2-12 オルソ処理のフロー

（ウ）DSM 生成

DSM 生成は、2 枚の同一地点画像（ステレオペア画像）を入力し、RPC（有理多項式係数）を用いて標高値を算出することにより、DSM（数値表層モデル）を生成する。DSM 生成のアルリゴズムの検証と改善、H/W アーキテクチャの検証と改善により、処理の高速化を実現した。DSM 生成処理のフローを図 D-3-1-2-13 に示す。

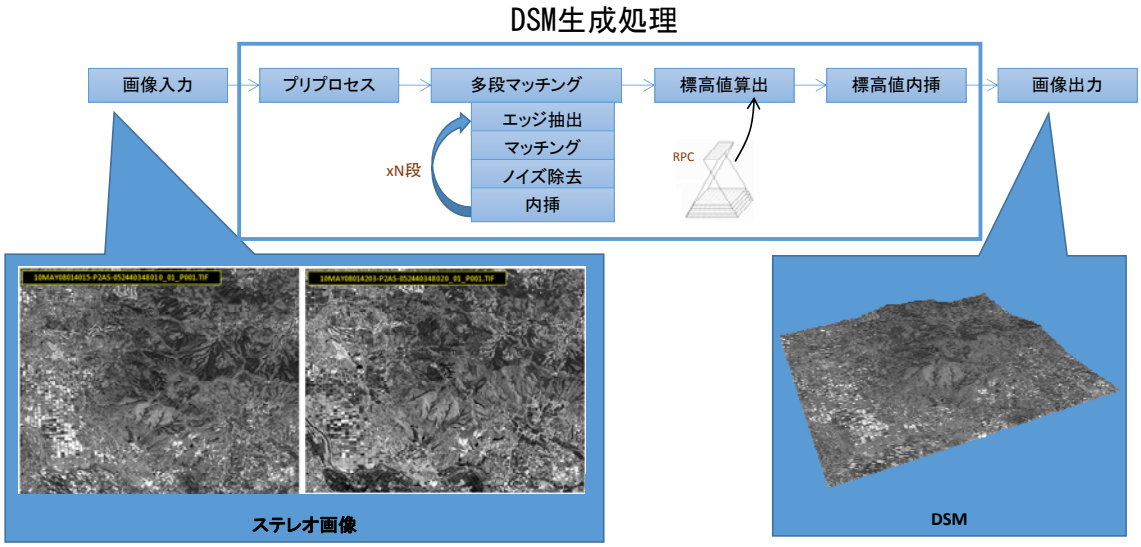


図 D-3-1-2-13 DSM 生成処理のフロー

④ 大容量データ I/F の高速化

最適アーキテクチャの導出検討、データ局間伝送の最適化の検討を実施し、高速ファイル伝送ツールの適用により、局間伝送の高速化を実現した。検討結果を図 D-3-1-2-14 に示す。

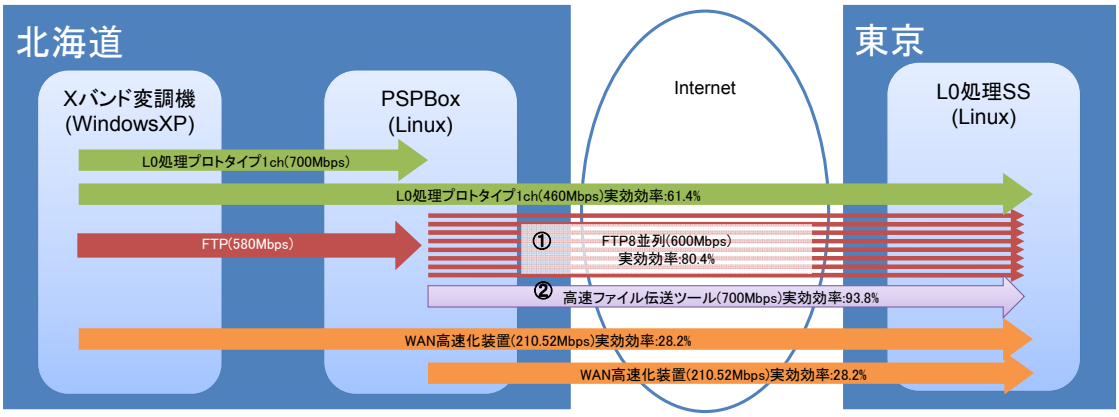


図 D-3-1-2-14 大容量データ I/F の検討結果

（４）先進的地上システムの開発

先進的地上システムは以下の表 D-3-1-2-4 の７システムで構成される。

表 D-3-1-2-4 先進的地上システム

システム	機能概要
撮像予約提供システム	ユーザーの撮像要求をまとめ、撮像計画管理システムに送り、要求結果の推移情報をユーザーへ通知する。また撮像要求から撮像データの処理計画を立案し、撮像データ処理システムへ出力し処理状況をユーザーへ通知する。
アーカイブシステム	撮像データ処理システムが処理した全画像データを保存、管理する。
撮像計画管理システム	撮像予約提供システムから受け取った各ユーザーからの撮像要求を集計し、衛星運用計画管理システムが行うリソースチェック結果から撮像計画立案、管理を行う。
衛星運用計画管理システム	軌道制御システムで生成したマヌーバ計画、軌道パラメーター等を使用して衛星の軌道維持制御計画、また太陽位置情報、日照日陰情報を使用して衛星の太陽電池パドル、バッテリーの維持管理計画、更には可視情報を使用して各地球局の運用計画等を立案、衛星テレメトリデータを基に管理運用を実施する。また撮像計画管理システムから受け取る撮像要求に衛星が対応可能かのリソースチェックを行う。
撮像データ処理システム	衛星が撮像したデータを、撮像予約提供システムの処理計画に従って撮像データの光学的幾何学的歪補正処理を行い、処理済データをアーカイブシステムへ送る。
衛星管制システム	地球局で受信・復調されたテレメトリデータを取り込み、衛星の動作状況を監視できるよう様々な処理を行い、衛星運用者へ情報を提供する。また衛星運用計画管理システムで立案された衛星バス運用計画及び撮像計画から、衛星が解読できるコマンドデータに翻訳してアンテナシステムへ出力する。
軌道制御システム	衛星から送信される GPSR（GPS 受信機）データを入力し、衛星の軌道を高精度に決定し、衛星を規定の軌道に維持する為の軌道管理を行う。また軌道決定データを用いて衛星運用上必要となる地球局の AOS/LOS 時間やマヌーバ計画、各種イベント情報、衛星と太陽の位置関連情報、月の位置情報を算出、各システムへ出力する。

① 撮像予約提供システムの開発

（ア）平易に操作できる Web 検索／注文システム

衛星画像を地物判読や解析といった用途で利用するユーザーや、背景図のような用途で利用するユーザーなど、さまざまな利用目的を持ったユーザーが混在する。「ユーザー本意なサービス」を提供するために、各々のユーザーに配慮した設計・開発を行った。

A) ユーザーの習熟度への考慮

習熟度に合わせた条件指定ができるような設計とした。

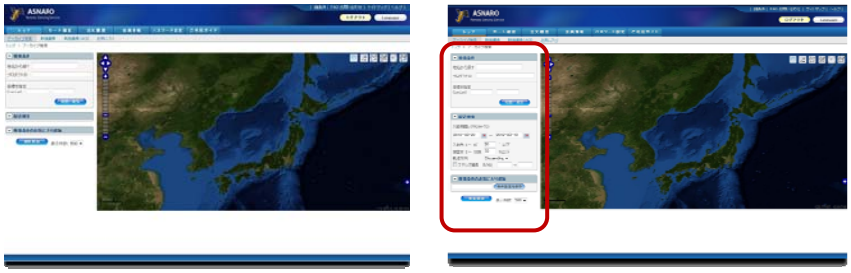


図 D-3-1-2-15 習熟度に応じた画面表示（例）

B) ユーザーの使用環境への配慮

低解像度のモニター使用時でもシステム使用に困難を来さない設計とした。

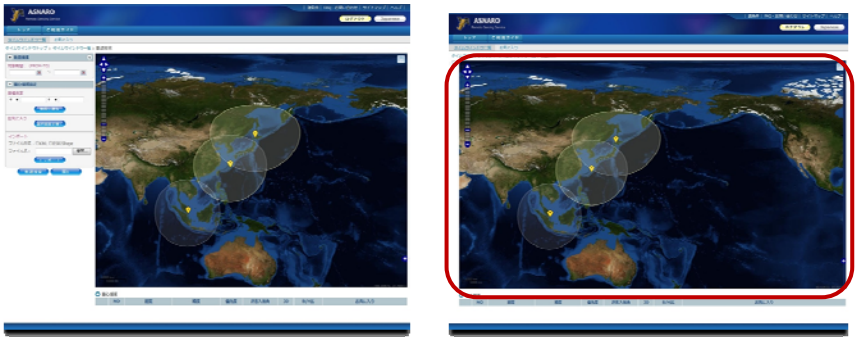


図 D-3-1-2-16 使用環境に応じた画面表示（例）

C) ユーザーの視認性への考慮

一覧と地図が連動する設計とし、地図をクリックするとリストも選択される。

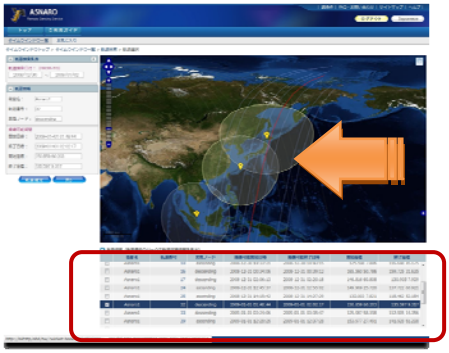


図 D-3-1-2-17 視認性に配慮した画面表示（例）

② アーカイブシステムの開発

（ア）OGC 国際標準を利用した分散検索

ナショナルアーカイブと連携することで、他の衛星データと一括分散検索できるためユーザーの利便性が向上する。

ASNARO メタデータを国際標準形式の EOP に対応させ、メタデータ検索の標準方式である CSW で提供することで、他の衛星データと一括分散検索できることを実証した。国内外の地理空間情報メタデータ標準としては ISO 19115/19118 や JMP も存在するが、EOP は衛星データに特化して設計されており、ebRIM を通じた拡張性を保持しているため、今後の情勢の変化にもより柔軟に適応できる。

③ 撮像計画管理システムの開発

（ア）自動化対象の処理

定常時の運用においては管理者によるオペレーションを必要としない。撮像予約提供システムから受け付けた撮像要求を基に撮像計画が立案され、その計画を衛星運用計画管理システムのコマンド生成処理に引き渡す一連の処理を自動で実施する。自動化による運用者の省力化を実現した。

（イ）気象予報データの利用について

光学衛星は天候の影響を撮像計画立案の際、気象予報データを利用して撮像要求地点の被雲率を算出する。被雲率が許容値（ユーザーが注文時に指定）を超えた撮像地点は、撮像計画立案の計画対象外とする。撮像できる可能性が低い地点を計画段階で外し、その分の衛星リソースを他の撮像に割り当てることで、効率的な撮像計画立案を実現した。

④ 衛星運用計画管理システムの開発

（ア）計画立案処理の自動化実現

計画立案作業フローを確立し、HK 運用及びミッション運用の計画立案処理の自動化を実現した。

⑤ 撮像データ処理システムの開発

前述（３）画像高速処理システム開発を参照

⑥ 衛星管制システムの開発

（ア）ノミナル運用時の運用性

衛星の運用状況をサマリ表示できる画面を使用することで、ノミナル時の運用者操作が 0 件となり、自動化による運用者の省力化を実現した。

（イ）運用者復旧操作支援の改善

衛星異常時のテレメトリをリスト表示し必要な情報に素早くアクセスできるようにし、指定テレメトリの詳細（SOM）表示を可能としたことで、効率的に後続の復旧作業が実施できることを確認した。

⑦ 軌道制御システムの開発

（ア）性能

GPS 軌道決定処理により、決定精度が 3m（3σ）以下を実現した。軌道決定処理時間についても、目標値 20 分をクリア（11 分）した。

（イ）自動運用

定常運用における軌道制御システムの運用は、自動で実施することを基本とする。自動運用では軌道制御システムのメイン処理が常時動いており、トリガーとなる処理開始時刻及び、追跡データ発行通知を指定回数受信したタイミングで各処理を開始するように実現した。ただし、異常が発生した場合には、運用者に異常を知らせる。異常時には異常時対応画面を立ち上げ、手動操作にて処理実行の指示を行えるように実現した。

Ｄ－３－１－３　特許出願状況等

表 D-3-1-3-1 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文 発表	ASNARO 用可搬統合型小型地上システムにおける可搬統合局の開発 (社)日本リモートセンシング学会　平成 22 年度秋季学術講演会	H22.11
論文 発表	ASNARO 用可搬統合型小型地上システムにおける高速画像処理システムの開発 (社)日本リモートセンシング学会　平成 22 年度秋季学術講演会	H22.11
論文 発表	ASNARO 用可搬統合型小型地上システムにおける先進的地上システムの開発 (社)日本リモートセンシング学会　平成 22 年度秋季学術講演会	H22.11
論文 発表	Advanced EO system for the Japanese Small Satellite ASNARO SmallSatConference 2011	H23.8
論文 発表	民間企業のサテライトサービスビジネスの課題と対策 第 56 回宇宙科学技術連合講演会	H24.11

Ｄ－３－２　目標の達成度

表 D-3-2-1 目標に対する成果・達成度の一覧表

目標・指標	成果	達成度
単独で衛星データが受信可能となるように車両に搭載可能なアンテナ、小型で高カバレッジな受信システム、衛星へのコマンドが直接送信可能となるように衛星管制機能、撮像計画機能、コマンド送信機能を有する可搬統合局の開発・検証を実施する。	衛星とのコミュニケーション（UL/DL）はもとより、受信データの基本的な処理及び高次処理までの統合的な機能を有したオールインワンのシステム（可搬統合局）を開発した。	達成
衛星から取得したデータと過去に撮像した同一地点のアーカイブデータを活用した画像データの統合運用を可能とするシステムの開発・検証を実施する	可搬統合局に具備する変化抽出手法、地物抽出手法、DEM の生成手法、災害シミュレーション手法を開発した。省力化と時間短縮を行い実用に耐え得るシステムを開発した。	達成
衛星から取得したデータの L0 処理、L1 処理、高次処理、大容量データ I/F に対する高速処理技術の開発・検証を実施する。	ハードウェア及びソフトウェアによる高速化を実現し利用者にとって利便性の高いサービスを実現した。 以下のアルゴリズムを開発した。 ・光学補正処理の高速処理 ・幾何補正処理の高速処理 ・復号処理の高速処理	達成
運用要員の低減とユーザー本位なシステムの実現をめざし、地上システムの小型化、低コスト化、高機能化、運用の省力化を実現するためのシステムを開発・検証を実施する。	小型化、低コスト化、高機能化、運用の省力化を実現する先進的地上システムを開発した。	達成

表 D-3-2-2 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
（１）可搬統合局の開発			
①車両総重量の 軽量化	車両総重量を 20t 以下とする。	車検における車両総重量の測定結果が 19.4t であることを確認。	達成
②アンテナ搭載型 車両	アウトリガの安定度に関する性能要件はアンテナ設置要件を適用し以下の設定とする。 【性能要件】 設置面傾斜： 水平面から±5° 初期姿勢： 水平面から±0.5°	設置面傾斜： 水平面から±5° 初期姿勢： 水平面から±0.1° 運用時安定度： 初期姿勢から±0.04°	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
	運用時安定度： 初期姿勢から±0.1°		
③ 可搬局セットアップ（アンテナ組立）の高速化	アンテナ組立の3工程（アウトリガの設置、Feedの取り付け、アンテナパネルの取り付け）を2名で2時間以内に実施する。	2名で2時間以内(1時間55分）に設置を完了した。	達成
（2）画像統合運用システムの開発			
①統合運用の検討	災害発生時における統合運用手法を確立し、可搬統合局及び統合運用の実施フローから可搬統合局の運用時間や情報提供までの時間を整理しモデルケースにおいて情報提供時間の有効性を検証する。	可搬統合局に具備する変化抽出手法、地物抽出手法、DEMの生成手法、災害シミュレーション手法を開発した。省力化と時間短縮を行い実用に耐え得るシステムを開発した。	達成
②主題図作成の自動化	主題図作成の自動化を実現し、統合運用人員の省力化を実現する。	主題図作成における一連の手順を自動化することで省力化を図った。 また、自動処理に対する設定作業を画像注文時に一括して行う仕組みとすることで、可視時間内の運用負荷を削減している。	達成
③主題図様式のテンプレート化	主題図の表現方法を明確化し、テンプレートとして柔軟に利用するための表示設定やレイアウトを確立する。また主題図の表現に必要な情報を選定する。	分析結果の実データと、それを表現するための表示設定ファイル、レイアウトを管理するテンプレートファイルを個別に管理する仕組みを実装することで、利用者の要望に応じた主題図や、対象とする災害に応じた表示方法での主題図提供を可能とした。	達成
④DSM差分抽出の精度検証	DSM差分抽出アルゴリズムの確立と、大規模災害における被害状況の把握に、広域にわたる高さの変化情報が有効かを検証する。	アルゴリズムを確立し、その精度検証において建物倒壊の被害状況把握を想定し、建物面積に着目した検証を行った。200㎡以上の面積を持つ建物に関して83.3%の抽出率を示し、単純差分での変化抽出と比較しても良好な検出が行えることが分かった。	達成
（3）画像高速処理システムの開発			

要素技術	目標・指標	成果	達成度
①L0 処理の高速化	ストリーム方式での中間ファイルの最適なファイル分割サイズ検討、復号処理アルゴリズムの確立と高速化手法による処理の高速化を実現する。 【性能目標】 L0 処理：42 秒	【性能実績】 L0 処理：26 秒 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
②L1 処理の高速化	画像 I/O について異なる媒体での性能比較・検討を行うことにより処理の高速化を実現する。 【性能目標】 L1 処理：70 秒	【性能実績】 L1 処理：53 秒 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
③高次処理の高速化	高次処理アルゴリズムの開発、最適な装置構成により処理の高速化を実現する。 【性能目標】 パンシャープン生成：60 秒 オルソ生成：90 秒 DSM 生成：180 秒	【性能実績】 パンシャープン生成：28 秒 オルソ生成：20 秒 DMS 生成：155 秒 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
④大容量データ I/F の高速化	最適化ソリューションの確立、局間伝送シミュレーション実施、最適な装置構成により処理の高速化を実現する。 【性能目標】 伝送効率：75%	【性能実績】 伝送効率：97% 迅速なプロダクト提供に寄与できる性能目標を達成した。	達成
（４）先進的地上システムの開発			
①撮像予約提供システムの開発	利用者の利便性に考慮した Web 注文システムの構築を目標とする。 【性能目標】 検索速度：4 秒以内 ※アーカイブ検索の前提 登録母数：1,500 万件 適合件数：500 件 同時アクセス数：10	直観的なインターフェイスの検討を実施した。 大量データ表示のレスポンスを考慮した設計とし伝送遅延も考慮した描画方式を実現した。 アーカイブ検索の速度に対する大量データの表示性能目標を達成した。 【性能実績】 アーカイブ検索速度：2.4 秒	達成
②アーカイブシステムの開発	OGC/ISO 準拠のメタデータ設計、高速な空間検索を行うための検索モジュールの最適化を目標とする。ナショナルアーカイブを視野に入れた国際標準に準拠した	最適な OGC/ISO 準拠のメタデータ設計を実施した。 高速な空間検索を行うための検索モジュールの最適化を実施した。 【性能目標】	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
	DB 設計を行う 【性能目標】 1500 万件から 500 件のデータ抽出：1 秒以内	1500 万件から 500 件のデータ抽出：0.488 秒	
③撮像計画管理システムの開発	撮像計画立案処理の高速化と、撮像機会の向上を目的としたアルゴリズムの確立を目標とする 【性能目標】 計画立案（衛星運用計画管理との合算）時間：15 分以内	撮像計画時間で性能目標を達成した。 計画立案時間：9 分 13 秒 注文の締め切り時間を衛星が飛来する直前（AOS-30 分前）まで許容できるようになった。	達成
④衛星運用計画管理システムの開発	運用計画立案処理の高速化を目標とする。 【性能目標】 計画立案（撮像計画管理との合算）時間：15 分以内	運用計画立案処理時間で性能目標を達成した。 計画立案時間：4 分 2 秒 注文の締め切り時間を衛星が飛来する直前（AOS-30 分前）まで許容できるようになった。	達成
⑤衛星管制システムの開発	運用の省力化・衛星運用自動化の検討を行い運用省力化画面の作成を目標とする。 【性能目標】 ノミナル時 1 可視運用中の運用者操作：0 件	ノミナル時の運用者操作は 0 件となり性能目標を達成できた。よって、運用の省力化を実現できた。	達成
⑥軌道制御システムの開発	軌道決定運用の自動化、手順の簡略化、軌道決定精度向上、最速軌道決定実施タイミングと処理時間の短縮を目標とする。 【性能目標】 GPS 軌道決定精度： 3m（3σ） 最速軌道決定処理： 20 分	高い軌道決定精度であり、かつ高速に軌道決定処理を実施することができたため、衛星運用を安定的に行うための重要な要素が整ったことを確認した。 【性能実績】 GPS 軌道決定精度： 3m（3σ） 最速軌道決定算出時間： 11 分	達成

Ｄ－４　事業化、波及効果について

Ｄ－４－１　事業化の見通し

（１）成果の利用例

「可搬統合型小型地上システムの研究開発」は、次の通り成果利用を想定している。

ASNARO 衛星シリーズでは、本研究開発成果を利用して地上システムを横展開する予定である。また ASNARO-1（光学）衛星打上後、校正検証を実施した上で、必要な手続きを経て民間事業者がこれを利用して、世界マーケットを対象として衛星画像販売、付加価値プロダクト販売、他のコンテンツやシステムと融合したアプリケーション及びサービス展開を行うこと想定している。併せて本研究開発成果を活用し、主に新興国を対象として衛星システムとしての宇宙インフラパッケージ輸出を想定している。

（２）事業化に至る期間

現状の見通しでは、ASNARO-1（光学）衛星の民間事業者への必要な手続き後、速やかに事業化への展開を実施する予定である。手続き後は 1 年以内に実施可能である。

また、宇宙インフラパッケージ輸出においては、顧客（相手国）の要請を受けて速やかに着手することが可能である。

（３）問題点の分析と明確な解決方策

本研究開発成果の主戦場は、世界を対象としていることから各国の状況がそれぞれ異なる。ASNARO-1（光学）の研究開発成果の利用にあたっては、各国の事情を踏まえた対応が必要である。例えば、衛星画像販売においては分解能や撮像場所、提供相手等を精査し販売を行う必要がある。また宇宙インフラパッケージ輸出においては、システムで利用する部品や機能・性能等について関係国や機関との調整を踏まえ、慎重に検討する必要がある。

Ｄ－４－２　波及効果

（１）成果の高度化に関する波及効果の事例

ASNARO-1（光学）の研究開発成果は、各国の顧客が抱える課題を解決する手段として利用可能である。例えば、森林管理、農地管理、災害監視及び国土管理等における基盤情報整備や定点モニタリング等を実施することにより、現状把握、計画策定、変化抽出、監視を行うことができる。世界では、前述のようなニーズを持っている国が多数あることから、本研究開発成果への期待度は高い。

（２）当初想定していなかった波及効果の事例

本研究開発成果の 1 つである先進的地上システムは、システム単体でも機能するものの、この他の統合運用システム、画像自動判読システム及び内閣府宇宙戦略室において開発された衛星データ利用促進プラットフォーム等を組み合わせて利用することにより、より多様な課題を解決する手段として利用することが可能である。また可搬統合局は、トラックの荷台に衛星管制、軌道制御、運用計画及びデータ処理、アンテナシステム等をオールインワンで搭載したシステム構成となっており、新規に宇宙利用を図ろうとする場合やバックアップ、様々なシチュエーションの現場対応等に活用することが可能である。

Ｄ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｄ－５－１　研究開発計画

本研究開発は当初、平成 21 年度から 4 か年で実施する計画であった。システム開発の全般においては大規模システム開発であることや、事業計画に年度単位の工程計画が定義されていたことから、ウォーターフォール・モデルによるシステム開発を実施した。年度毎に研究成果を確定し翌年度の工程に引き継ぐことで工期遅延もなく事業を継続することができた。個々の研究開発においては、研究要素を絞りプロトタイピングと評価を反復的に実施するイテレーション開発手法を適用した。これにより研究の進捗を確認しながら短いスパンで研究内容の方向修正を行うことができ、最終的な目標の達成に貢献した。

なお、衛星の打上げ日程が当初予定の平成 24 年 12 月から複数回の日程変更を経た後、最終的に平成 26 年 11 月へと約 2 年間延期となった。そのため、打上げ前準備の最終の試験作業は複数年度にわたり実施することとなった。

表 D-5-1-1 に本研究開発のスケジュールを示す。

表 D-5-1-1 研究開発計画

実施項目／年度	H21	H22	H23	H24	H25	H26
工程計画	概念設計	基本/詳細設計 プロトタイプ開発	製造・試験	試験・実証 ※打上げが複数回延期されたことにより複数年度で実施		
（１）可搬統合局の開発						
車両総重量の軽量化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
アンテナ搭載型車両	⇨	⇨	⇨	→	→	→
展開設置の高速化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
（２）画像統合運用システムの開発						
統合運用の検討	⇨	⇨	⇨	→	→	→
主題図作成の自動化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
主題図様式のテンプレート化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
DSM 差分抽出の精度検証	⇨	⇨	⇨	→	→	→
（３）画像高速処理システムの開発						
L0 処理の高速化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
L1 処理の高速化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
高次処理の高速化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
大容量データ I/F の高速化	⇨	⇨	⇨	→	→	→
（４）先進的地上システムの開発						
撮像予約提供システムの開発	⇨	⇨	⇨	→	→	→

実施項目／年度	H21	H22	H23	H24	H25	H26
アーカイブシステムの開発	⇨	⇨	⇨	→	→	→
撮像計画管理システムの開発	⇨	⇨	⇨	→	→	→
衛星運用計画管理システムの開発	⇨	⇨	⇨	→	→	→
衛星管制システムの開発	⇨	⇨	⇨	→	→	→
軌道制御システムの開発	⇨	⇨	⇨	→	→	→
（５）データ標準化の検討						
OGC 国際標準を利用した分散検索			⇨			
メタデータ集積による統合検索			⇨			
（６）総合システム開発仕様の達成						
総合システム開発仕様の準拠				→	→	→

Ｄ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、株式会社パスコが経済産業省からの委託を受けて実施した。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発内容への技術的な助言や実施結果等への適切な評価をいただくため、衛星分野、衛星画像の利活用、コンピュータアーキテクチャに関わる学識経験者、専門家等、7 名の国内有識者による技術委員会を設置した。

図 D-5-2-1 に本研究開発（可搬統合型小型地上システムの研究開発）の実施体制を示す。

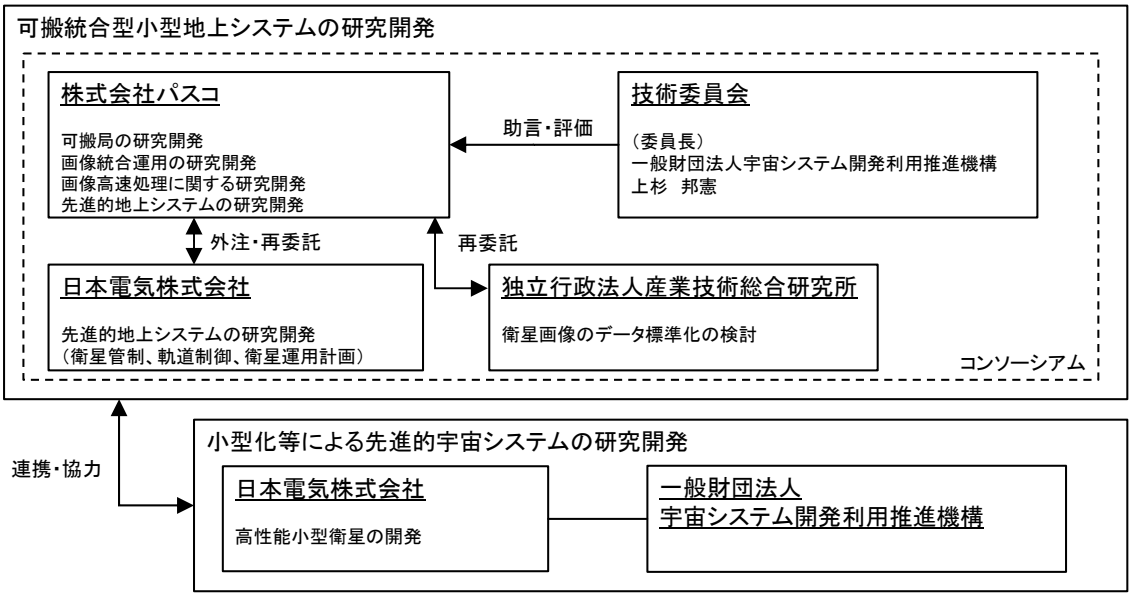


図 D-5-2-1 研究開発実施体制

技術委員会 委員一覧（敬称略、委員長を除き五十音順）

氏名	職位	所属
上杉 邦憲	委員長	一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構　技術顧問 （元独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部　名誉教授）
齋藤 宏文	委員	独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部　教授
柴崎 亮介	委員	東京大学空間情報科学研究センター　センター長
関口 智嗣	委員	独立行政法人産業技術総合研究所グリッド研究センターセンター長
山本 善一	委員	独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部　教授
横塚 英世	委員	東海大学情報デザイン工学部　専任准教授
六川 修一	委員	東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻　教授

Ｄ－５－３　資金配分

表 D-5-3-1 資金度配分　（単位：百万円）

年度　平成	21	22	23	24	25	26	合計
概念設計	269						269
基本設計・詳細設計 プロトタイプ評価		909					909
製造・試験 データ標準化検討			2,000				2,000
試験・校正運用				1,247		292	1,539
合計	269	909	2,000	1,247		292	4,717

Ｄ－５－４　費用対効果

費用対効果は、以下の通り想定している。

■本研究開発成果を活用した画像販売等の事業

年間当たり35億円以上の売上（40シーン/日×365日×平均単価250,000円）が見込めることから、衛星ライフを5年とした場合、総額180億円以上の総売上が期待される。

よって、初期投資に対するB/C（182.5億円/47.2億円）=3.9以上となる。

■本研究開発成果を活用した宇宙インフラパッケージ輸出事業

ASNARO-1（光学）をベースとした宇宙インフラパッケージ輸出を行う場合、衛星、地上システム、アンテナシステム、輸送（epsilon利用）、教育までの一式で130億円程度（衛星ライフにおけるメンテナンスは除く）と想定している。現在の新興国の要望から想定すれば、ASNARO-1（光学）の潜在マーケットは3基以上が期待される。

よって、初期投資に対するB/C（390億円/47.2億円）=8.3以上となる。

■可搬統合局を活用した宇宙インフラパッケージ輸出事業

可搬統合局をベースとしたインフラパッケージ輸出を行う場合、対象がASNARO-1（光学）衛星であろうが、他の衛星利用であろうが一式あたり12億円を見込んでいる（国際競争力ある価格）。現在の顧客の要望から想定すれば5台以上が期待される。

よって、初期投資に対するB/C（60億円/47.2億円）=1.3以上となる。

■総合

これらを総合するとASNRO-1（光学）をベースとした費用対効果B/C（632.5億円/47.2億円）=13.4以上となる。

Ｄ－５－５　変化への対応

近年の宇宙開発利用は、かつてない勢いで技術開発が進むと共に新規参入も増加してきており、競争が激しくなってきている。このような変化に対応するためには、本研究開発着手時に整理した基本コンセプトの通り、安価、高性能、短納期であることは勿論のこと、わが国らしい手厚いサポート体制により対応していくことが肝要である。これにより先行する欧米の他、新規参入を図ってきている中国、韓国、インドなどにも十分に競争力ある位置にあると考えている。

また、本研究開発で得たアーキテクチャをベースとして早期に複数衛星によるコンステレーションを構築（輸出した相手国システムも組み合わせて）することはもとより、次世代システムの開発を行う必要がある。これにより、世界での高い競争力を維持できるものと考えている。

Ｅ　極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム／次世代合成開口レーダ等の研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

Ｅ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｅ－１－１　事業目的

石油等の資源に恵まれない我が国において、その安定供給の確保を図ることは、国民の安全・安心な生活の実現及び産業インフラの確保の観点から、国家基盤として必須の重要課題である。

衛星を活用したリモートセンシング（遠隔探知）技術には

（1）一度に広範囲の地域の分析が可能

（2）立入りが困難な地域の分析及び開発の有望性に関する評価が可能、等の利点がある。

欧米等の先進諸国においても地球観測のためのグローバルなプロジェクトが進行しており、メジャーにおいても、鉱区取得・権益確保のためには、衛星画像データを用いて地質構造分析を行い、大きな判断材料としている。

我が国においては、地球資源衛星１号（JERS－１）が初の資源探査用衛星としてOPS（光学センサ）及びSAR（レーダセンサ）を搭載し運用（1992 年～1998 年）されていたが、その開発成果を活かし、高性能化・高機能化を図った後継機の開発が望まれていた。

このような状況の中、本事業においては、光学センサである極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ASTER）及びレーダセンサである次世代合成開口レーダ（PALSAR）を開発し、打上げ後は、その校正・精度評価を実施することによってデータの健全性を維持するとともに、センサの安定した運用を図ることを目的としている。なお、ASTER センサは平成１２年度のミッション運用開始以降、現在も運用を続けており、PALSAR は平成２３年度に運用を終了している。

「極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ASTER）」
（Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer）
・光学センサ（以下の3つのセンサを搭載）
　可視近赤外放射計（VNIR：Visible and Near Infrared Radiometer）
　短波長赤外放射計（SWIR：Short Wave Infrared Radiometer）
　熱赤外放射計（TIR：Thermal Infrared Radiometer）
・平成 11 年 12 月 18 日打上げ（現在も運用中）
・米国 NASA の衛星 Terra に搭載

「次世代合成開口レーダ（PALSAR）」
＜正式名称は、フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ＞
（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）
・レーダセンサ（L バンド合成開口レーダ）

・平成 18 年 1 月 24 日打上げ（平成 23 年 5 月 12 日運用終了）
・JAXA の衛星だいち（ALOS：AdvancedLand Observation Satellite）に搭載。
・電子機器部を開発
（アンテナ構造系については、科学技術庁／宇宙開発事業団（当時）が開発）

Ｅ－１－２　政策的位置付け

（1）事業の科学的・技術的意義

世界の堆積盆地を対象に、石油を貯める地質構造と岩石分布の情報を入手して、石油資源の探査から操業までを安全に効率的かつ精度よく行うためには、衛星データの利用が有益であり、それに適合した高信頼・長寿命な衛星搭載用観測センサの開発が必須になる。

（2）社会的・経済的意義

衛星搭載用センサを開発することにより、世界に対して我が国の工業技術の高さを示す機会になる。また、人工衛星から得られる観測データを用いたリモートセンシング（遠隔探知）技術の高度化は、効率的な石油資源探査を可能とし、その経済的意義は高い。加えて、近年、資源保有国へのリモートセンシングに関する技術移転は、資源外交において重要な交渉材料となっている。

また、リモートセンシング技術は、資源探査以外の分野にも応用の可能性があり、本事業において開発されたセンサによって取得されたデータの解析技術向上により、さらなる波及効果が見込まれる。

（3）国民や社会のニーズ

エネルギー需要は年々増大しており、石油資源の消費もそれにともなって増加している。このまま進めば石油資源の枯渇も懸念されており、国として新たな石油資源の探査開発と、安定確保を図る施策が必須となる。

また、今後の石油資源探査は地理的に不利なところが中心となるため、探査地域の基礎情報（広域地質・地質構造に関する情報）の把握、現地調査計画の策定、試掘位置の決定、補給ルートの把握等について、衛星データはその威力を発揮する。

Ｅ－１－３　国の関与の必要性

我が国のエネルギー政策上必要不可欠である、石油資源の安定供給の確保のためには、上述のとおり、衛星データの利用が効果的である。しかしながら、探査・開発から操業までの期間は長期間を要し、一企業が衛星の開発・運用、取得されたデータの解析等を実施することは、非常にリスクが高い。

したがって、世界的に激化している資源開発競争の中にあっては、国が率先して、

リモートセンシング技術の高度化を推し進め、石油資源開発に資する基盤技術を確立することが重要である。

Ｅ－２　研究開発目標

Ｅ－２－１　研究開発目標

・資源探査用観測センサの開発

・軌道上運用の継続

Ｅ－２－２　全体の目標設定

表 E-2-2-1　全体の目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
資源探査用観測センサの開発		
ASTER		
センサの製作	達成（評価済み）	NASA との国際協力プロジェクトとしてセンサの提供と NASA 支援
衛星インテグレーション	達成（評価済み）	
打上げ	NASA（成功）	
初期軌道チェックアウト	達成（評価済み）	
軌道上運用の継続		
ASTER		
定常運用（5 年間）	達成（評価済み）	ミッション要求
後期運用（5 年以上）	同左	エクストラミッション

（注）定常運用の５年間は、打上げ後の初期チェックアウトを含む期間である。
　　後期運用の５年以上は、定常運用の５年間を含む期間である。

Ｅ－２－３　個別要素技術の目標設定

ASTER の後期運用期間において、機器が正常に動作していることを確認し、ユーザへ各種校正を行ったデータを供給すること。

図 E-2-3-1 にASTERを搭載している Terra 衛星及びASTERの構成を示す。

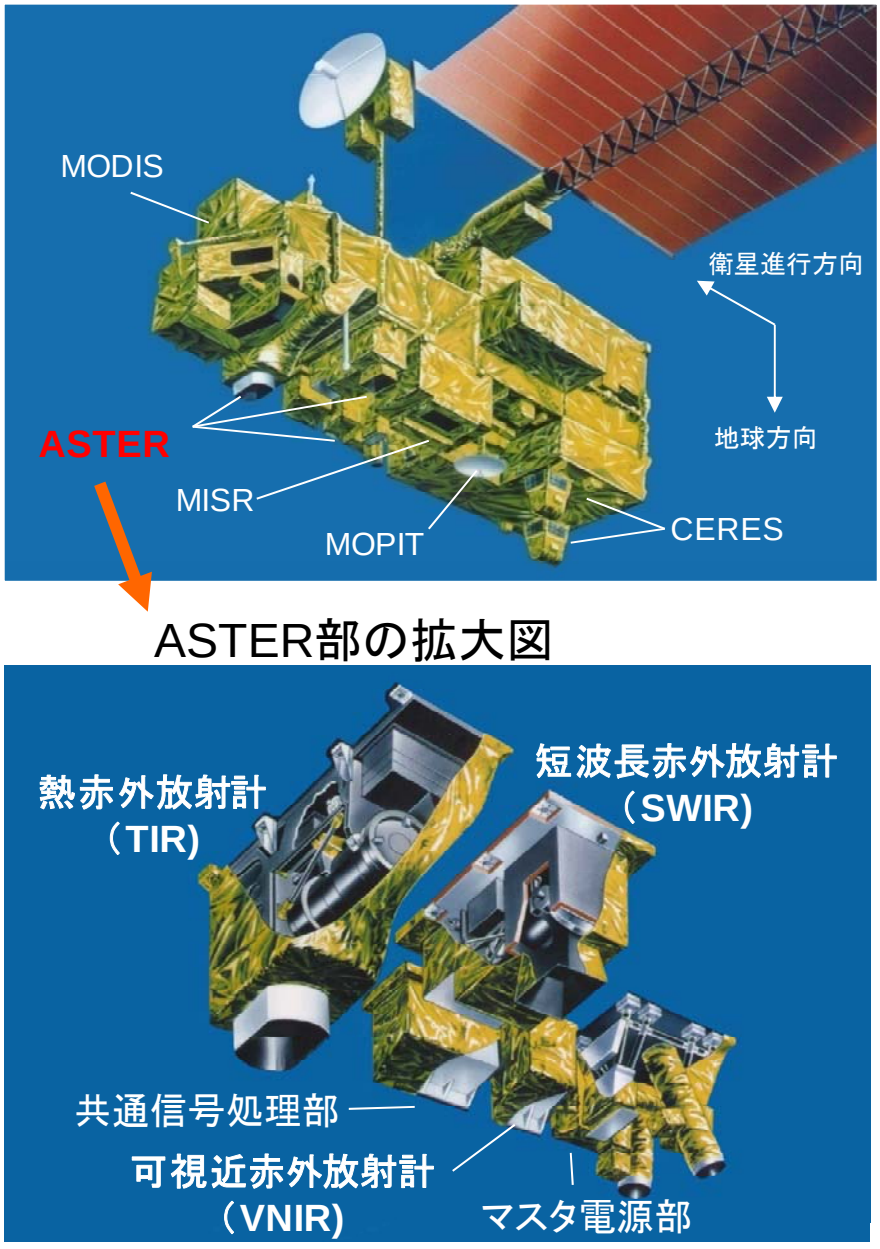


図 E-2-3-1　Terra 衛星とASTERの構成図

表 E-2-3-1 に評価項目、評価指標を示す。

①テレメトリデータの評価

機器の温度、電流等のテレメトリデータが正常な値の中に入っていることを確認するとともに、打ち上げ以降の時間経過に伴う変化を評価することで、機器が正常に動作していることを確認する。

②画像データの評価

あらかじめ設定した場所を定期的に撮像した画像データを解析することで、機器の性能が開発目標仕様を満足していることを確認する。

③校正データの評価

VNIR、SWIR、TIR の各放射計毎に機上校正システムを用いた感度、オフセット値に関する校正データを定期的に取得し、経年変化の評価、その変化分の画像データへの反映のための RCC (Radiometric Calibration Coefficient) テーブルを作成する。

・データ取得：1回/49日

・RCC テーブル作成：特性変化に応じて適時

④データトレンドの評価

寿命管理品目、特性値管理品目の動作時間について、状況を管理する。

表 E-2-3-1 ASTER運用目標

項番	運用・評価項目	評価方法(注)	評価概要	評価指標
1.	システム/CSP/MPS			
1．1	動作確認	①	通信インタフェースの確認	正常動作の確認
1．2	温度テレメトリ	①	温度テレメトリが正常値であることの確認	正常値の確認
1．3	電圧値	①	電圧テレメトリが正常値であることの確認	正常値の確認
1．4	電流値	①	電流テレメトリが正常値であることの確認	正常値の確認
1．5	寿命管理、特性値管理	④	各サブシステムの寿命管理品目、特性値管理品目の値が適切であることの確認	設定範囲内の確認
2.	VNIR			
2．1	MTF(空間周波数特性)	②	直線状のターゲットで評価	仕様達成の確認
2．2	過渡応答	②	輝度変化の大きな対象で評価	仕様達成の確認
2．3	ダイナミックレンジ	②	一様な輝度の対象で評価	仕様達成の確認
2．4	バンド間レジストレーション	②	同一場所を観測したときの差異を評価	仕様達成の確認
2．5	ポインティング角度精度	①	エンコーダ出力の精度を確認	正常値の確認
2．6	温度制御特性	①	温度テレメトリが正常値であることの確認	正常値の確認
2．7	光学校正データ	③	校正データの算出、評価	校正値の更新
2．8	暗時校正データ	③	オフセットデータの算出、評価	校正値の更新
2．9	電気的校正データ	③	校正レベル、ゲインが正常であることの確認	校正値の更新
2．10	走査幅	②	既知の対象で走査幅を評価	仕様達成の確認
2．11	立体視角	②	同一時点撮像の時間差から立体視角を確認	仕様達成の確認
3.	SWIR			
3．1	MTF(空間周波数特性)	②	直線状のターゲットで評価	仕様達成の確認
3．2	ダイナミックレンジ	②	一様な輝度の対象で評価	仕様達成の確認
3．3	画素間感度偏差	②	一様な輝度の対象で評価	仕様達成の確認
3．4	ポインティング角度精度	①	設定角度と駆動後の角度の差分を評価	正常値の確認
3．5	過渡応答	②	輝度変化の大きな対象で評価	正常値の確認
3．6	冷却性能	①	検出器温度テレメトリが正常であることの確認	正常値の確認
3．7	温度制御	①	温度テレメトリが正常値であることの確認	正常値の確認
3．8	オフセット	③	オフセットレベルの算出、評価	オフセット値の更新
3．9	校正機能	③	校正データの算出、評価	校正値の更新
4.	TIR			
4．1	感度偏差	②	一様な輝度の対象で評価	仕様達成の確認
4．2	光学校正	③	校正データの算出、評価	校正値の更新

項番	運用・評価項目	評価方法（注）	評価概要	評価指標
4．3	暗時校正	③	オフセットレベルの算出、評価	校正値の更新
4．4	電気校正	③	校正データの算出、評価	校正値の更新
4．5	経年変化評価	①	温度テレメトリが正常値であることの確認	正常値の確認
4．6	検出器温度	①	検出器温度テレメトリが正常であることの確認	正常値の確認
4．7	チョッパ温度	①	チョッパ温度テレメトリが正常であることの確認	正常値の確認
4．8	黒体温度	①	黒体温度テレメトリが正常であることの確認	正常値の確認
4．9	画像信号出力	②	出力データの確認	仕様達成の確認
4．10	ポインティング角度精度	①	設定角度と駆動後の角度の差分を評価	正常値の確認

（注）評価方法

① テレメトリデータの評価、② 画像データの評価、③ 校正データの評価、④ データトレンドの確認

Ｅ－３　成果、目標の達成度

Ｅ－３－１　成果

Ｅ－３－１－１　全体成果

極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ASTER）については、昭和62（1987）年度の調査研究から平成11（1999）年度の設計、製造・試験までの13年間に亘る機器開発期間を経て軌道上に打上げ後、平成12（2000）年度のミッション運用開始から平成27（2015）年の継続運用に至る通算29年間の長期事業であり、今年で16年目となるASTERミッション運用も所期の目標を達成し十分な実績と成果を得ている。

打上げ以降、ASTERセンサによるターゲット観測数は約275万シーンを達成しており、遠隔探知のデータ利用に供する高次プロダクトをユーザに提供している。
データ利用の具体的な成果としては、資源探査・有望値抽出の実利用によるリビア、インドネシア等の日本企業石油鉱区獲得やASTERデータの一般ユーザへの利用拡大、及び全球の標高データセット（ASTER GDEM）の作成による世界貢献等を実現している。

また、運用開始以来、ASTERの論文数は合計49件（内英文33件）、講演数は合計33件、その他発表数は合計63件である。

Ｅ－３－１－２　個別要素技術成果

ASTERの成果

ASTERは、地表からの太陽反射光や熱放射に対する観測可能な波長帯が、可視近赤外域、短波長赤外域、熱赤外域と広く、合計14の波長帯に細かく分けて観測することができ、岩石や鉱物の探査や地質構造の識別に優れた機能を有する高性能の光学センサシステムである。

ASTERは、NASAの EOS 計画の第1号衛星であるTerra衛星に搭載されて平成11（1999）年12月に打上げられた。軌道上での初期チェックアウトを経て、平成16（2004）年12月に設計寿命5年の定常運用期間を経過し、平成21（2009）年12月には軌道上寿命10年を達成し、さらに現在でも後期運用を継続している。

VNIRは、可視から近赤外域の観測波長（0．52μm～0．86μm）を、光学レンズを透過して、バンド1、2、3N、3BのSi－CCD（Silicon-Charge Coupled Device）検出器により画像データを取得する望遠鏡ポインティング方式のプッシュブルーム型光学センサである。また、VNIRは直下視用と後方視用の2つの望遠境で構成されており、直下視望遠鏡のバンド3Nと後方視望遠鏡のバンド3Bとの画像を組合せての立体視機能を有している。

SWIRは、短波長赤外域の観測波長（1．60μm～2．43μm）を、光学ミラーで反射して、バンド4、5、6、7、8、9のIR－CCD（Infrared- Charge Coupled Device）検出器により、画像データを取得するミラーポインティング方式のプッシュブルーム型光学センサである。

TIRは、熱赤外域の観測波長（8．125μm～11．65μm）を、機械的走査ミラーで反射して、バンド10、11、12、13、14の熱赤外検出器により、画像データを取得する走査ミラーポインティング方式のウィスクブルーム型光学センサである。

画像評価では、SWIRは平成20（2008）年5月以降検出器の温度上昇により画素出力が飽和し、画像取得ができなくなったが、VNIRとTIRについてはラジオメトリック性能としての分光特性及びジオメトリック性能としての幾何学的特性を評価し、正常な画像データが取得できていることを定期的に確認している。ラジオメトリック性能については、経年変化によるVNIRとTIRの感度低下を考慮し、必要に応じて感度補正の校正を行っている。ジオメトリック性能については、識別可能な地表分解能（VNIR 15m、TIR 90m）が安定して確保されており、経年変化によるMTF（Modulation Transfer Function）の劣化等のないことを検証している。

健全性評価では、SWIRを含めてVNIRとTIRのテレメトリデータによる機器の正常動作確認、ポインティング動作の累積回数管理、並びに温度・電流・電圧の特性値管理によるトレンド評価を継続して行っている。この中で、ASTERのポインティング回数は、設計寿命5年の有効寿命を既に超えており、信頼性工学で定義されるバスタブ曲線の摩耗故障期にあるとのリスク評価に基づき、異常/故障時の対策として、ASTERの継続運用に係わる緊急対応マニュアルを整備している。

E－3－1－3　特許出願状況等

（1）研究項目別成果状況

ASTERの研究項目別論文数、講演数、その他は発表数及び特許出願数を以下に示す。

	ASTER
論文数	49（内英文33）
講演数	33
他発表数	63
特許出願数	0

（2）年度別成果状況

ASTERの年度別論文数、講演数及び特許出願数を以下に示す。

平成	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	計
論文		6	6	5	6	2	1	2			1	2		3	1	3	1		1			1	3	2	3	49
講演	4	2		2	1	3	3			1		1	3		3	1			1		2	1	2	2	1	33
他発表		4	4	3	4	9	6	11	8	4	3	1	2	2						1				1		63
特許																										0

注：ASTERは軌道上で運用するため修理ができず、既存技術を用いた高信頼性設計のため、特許出願はない。

Ｅ－３－２　目標の達成度

ASTER後期運用の目標の達成度

今回の評価の対象期間とした平成23（2011）年度から平成26（2014）年度は後期運用段階であるが、ミッション期間の目標指針を達成した場合と同様に、国内会議であるIOT（Instrument Operation Team）会議、日米合同会議であるAST/ACT（ASTER Science Team/ASTER Calibration Team）会議とNASA／ASTERインタフェース会議として国内外の運用調整をしながらASTER機器運用を進めた。これらを踏えた目標達成度はASTERセンサ委員会で審議され、確認された。目標の評価結果を表3．2－1に示す。SWIRは、平成11（1999）年12月の衛星打上げから設計寿命5年を達成し、累積寿命8．5年を経過した平成20（2008）年5月以降、検出器の温度上昇により観測データの取得ができなくなった。詳細は後の節で記述する。

表 E-3-2-1　平成23年度～平成26年度ASTER運用目標評価結果

項番	運用・評価項目	評価方法(注1)	評価指標	運用の評価結果
1.	システム/CSP/MPS			
1．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
1．2	温度テレメトリ	①	正常値の確認	目標達成
1．3	電圧値	①	正常値の確認	目標達成
1．4	電流値	①	正常値の確認	目標達成
1．5	寿命管理、特性値管理	④	設定範囲内の確認	目標達成
2.	VNIR			
2．1	MTF（空間周波数特性）	②	仕様満足の確認	目標達成
2．2	過渡応答	②	仕様満足の確認	目標達成(注2)
2．3	ダイナミックレンジ	②	仕様満足の確認	目標達成
2．4	バンド間レジストレーション	②	仕様満足の確認	目標達成
2．5	ポインティング角度精度	①	正常値の確認	目標達成
2．6	温度制御特性	①	正常値の確認	目標達成
2．7	光学校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
2．8	暗時校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
2．9	電気的校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
2．10	走査幅	②	仕様満足の確認	目標達成
2．11	立体視角	②	仕様満足の確認	目標達成
3.	SWIR			
3．1	MTF（空間周波数特性）	②	仕様満足の確認	(注3)
3．2	ダイナミックレンジ	②	仕様満足の確認	(注3)
3．3	画素間感度偏差	②	仕様満足の確認	(注3)

項番	運用・評価項目	評価方法(注1)	評価指標	運用の評価結果
3．4	ポインティング角度精度	①	正常値の確認	目標達成
3．5	過渡応答	②	正常値の確認	(注3)
3．6	冷却性能	①	正常値の確認	(注3)
3．7	温度制御	①	正常値の確認	(注3)
3．8	オフセット	③	仕様範囲内に校正	(注3)
3．9	校正機能	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．	TIR			
4．1	感度偏差	②	仕様満足の確認	目標達成(注2)
4．2	光学校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．3	暗時校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．4	電気校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．5	経年変化評価	①	正常値の確認	目標達成
4．6	検出器温度	①	正常値の確認	目標達成
4．7	チョッパ温度	①	正常値の確認	目標達成
4．8	黒体温度	①	正常値の確認	目標達成
4．9	画像信号出力	②	仕様満足の確認	目標達成
4．10	ポインティング角度精度	①	正常値の確認	目標達成

（注1）　評価方法

①テレメトリデータの評価、②画像データの評価、③校正データの評価、④データトレンドの評価

（注2） VNIRとTIRは、打上げ後10年間以上の軌道上運用でセンサの検出感度が徐々に低下している傾向にあるが、機上校正を行い、画像品質処理に必要な感度補正を行っている。

（注3） SWIR は平成 20(2008)年 5 月以降、検出器の温度上昇により観測画像の取得ができなくなったため、当該項目の目標は未達となった。本不具合はトラブルシューティングにおいて回復不能との処置により、平成 21 年度以降は適用外とする。

Ｅ－４　事業化、波及効果について

Ｅ－４－１　事業化の見通し

ASTERの利用技術は、石油資源開発分野で有用な情報・技術として実利用に供されている。特に、探査・開発対象地域を選択的に観測できるため、比較的低コストで必要とされる場所の広域地質情報や、ロジスティックス情報、並びに環境に関する経年変化情報が得られ、鉱区取得の意思決定支援や開発・生産に伴う環境監視に活用されている。具体的には、予備調査段階における対象鉱区（鉱区権取得予定地域）の適切な評価、概査段階における有望地域の絞り込みによる地震探鉱位置の決定と合理的な測線配置計画、さらに精査では試掘位置の決定に利用され、各工程におけるリスク軽減に貢献している。また、商用生産に係わるロジスティックス調査（機材・人員等の運搬ルート、施設配置計画の決定に係わるもの）等にわたる広汎な工程にも利用されている。

すなわちリモートセンシング事業で地球観測データの利用促進を図るには、

①観測（ミッション）要求の最適化、

②観測データの継続提供が重要である。

ASTERは、利用者の意向を反映して、石油資源開発に必要なデータを収集できるよう観測機器を最適化するとともに、長期運用を行うことにより観測データの継続提供に寄与している。

Ｅ－４－２　波及効果

（１）石油資源開発分野における波及効果

ASTERの研究開発で得られた技術は次に続く観測センサの研究開発に活用することができる。ASTER センサに搭載された各種観測機器の観測波長域は後発の地球観測衛星にも採用されており、これら衛星から得られたデータは、継続して地球資源開発分野で活用されている。

（2） その他の波及効果

ASTERで取得された観測データは事業目的に加えて次に示す分野で利用されており、また利用が期待されている。

1）気候変動・温暖化観測

地球温暖化対策として植林活動によって炭素吸収源を増大させること、あるいは熱帯雨林等の森林伐採を減少させることによって吸収源を持続させることが、地球温暖化対策として温暖化ガスの排出削減と同様の効果を有するので、森林のバイオマス計測は重要な分野である。

ASTERのマルチスペクトルデータは、植生の分布状況やその変化、地表温度分布などの把握から地表面と大気との相互作用、雲のタイプ分けや大気中のエアロゾルの特性などの把握に有効である。

2）水循環・海象観測

TIRセンサの搭載により海水の測温が可能となり、水資源への観測に有効に働いている。

3）地図作成

ASTERは立体視機能を有しており、地表分解能15mの地形図作成能力がある。さらにASTERでは高次処理データとして正射画像（オルソ画像）も作成しており、地形図・土地被覆図作成データだけでなく地理情報システムのベースレーヤとして利用可能である。

4）資源分布モニタリング

金属鉱物資源分野では、本研究開発事業の成果である地質区分・地質構造解析等に直接応用できる分野である。特にASTERの高性能スペクトルデータは、金属資源の開発においても活用されている。

5）環境モニタリング

①環境モニタリング分野においては、ASTERによる沿岸域環境モニタリング技術は、水質汚染や海水温度の監視等に有用である。また、環境汚染の防止を目的とした船舶事故あるいは不法投棄による海上流出油の検出、不法廃棄物（特に金属製廃棄物）に対するモニタ等への応用にASTERの観測データが使用できる。

②ASTERと地質マッピングとの組み合わせによって、地殻表層の状態把握が可能となり、大規模な地殻変動の予測も可能にすると考えられる。また、赤外スペクトルにおいて硫化ガスのモニタリングができるため、火山ガスの大気中への放出の評価とその影響把握が可能であり、火山噴火のモニタリングへの活用が可能である。

Ｅ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｅ－５－１　研究開発計画

評価年度における本研究開発事業の目的は、ASTERにおいては後期運用での健全性を評価して、適切にセンサの運用を行うことである。それらの目標を達成するため、計画を立て、実行している。
なお、全体の計画を、図 E-5-1-1 にて示す。

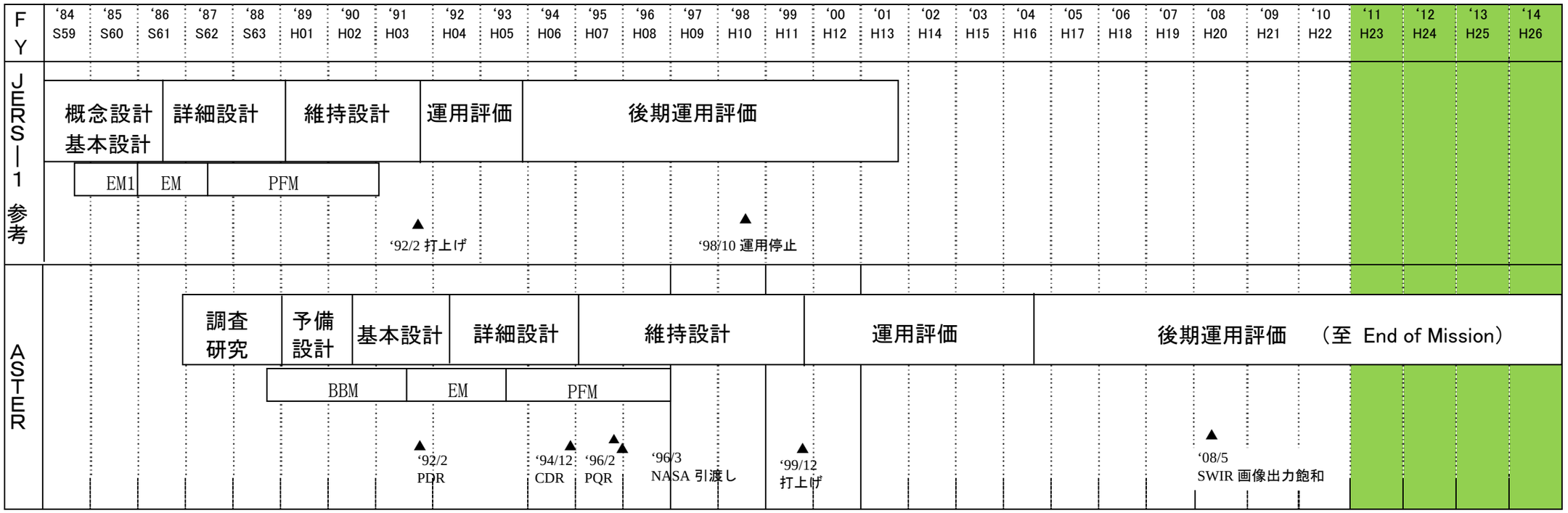


図 E-5-1-1　ＡＳＴＥＲ開発スケジュール

用語説明

- BBM (Breadboard Model)：試作試験用モデル
- EM(Engineering Model)：開発モデル
- PFM (Prot-Flight Model)：プロトフライトモデ
- PDR (Preliminary Design Review)
- CDR(Critical Design Review)
- PQR (Post-Qualification test Review)

Ｅ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

ASTERの実施体制

（1）ASTER後期運用に当たっては、ASTER開発を担った旧JAROSから引き継いだJ－spacesystemsが担当し、各種センサデータの評価を実施している。現在も定期的に米国 NASA との会議を開催し、衛星側との調整を図っている。また、ユーザからのデータ取得要望に基づく最適な観測計画の立案及びセンサ運用、観測生データから標準処理データの作成作業も旧ERSDACからJ－spacesystemsが引き継いで分担している。

図 E-5-2-1 にASTERに関して経済産業省が統括する事業体制図を示す（太枠着色部分が、本事業で実施した範囲である。）。

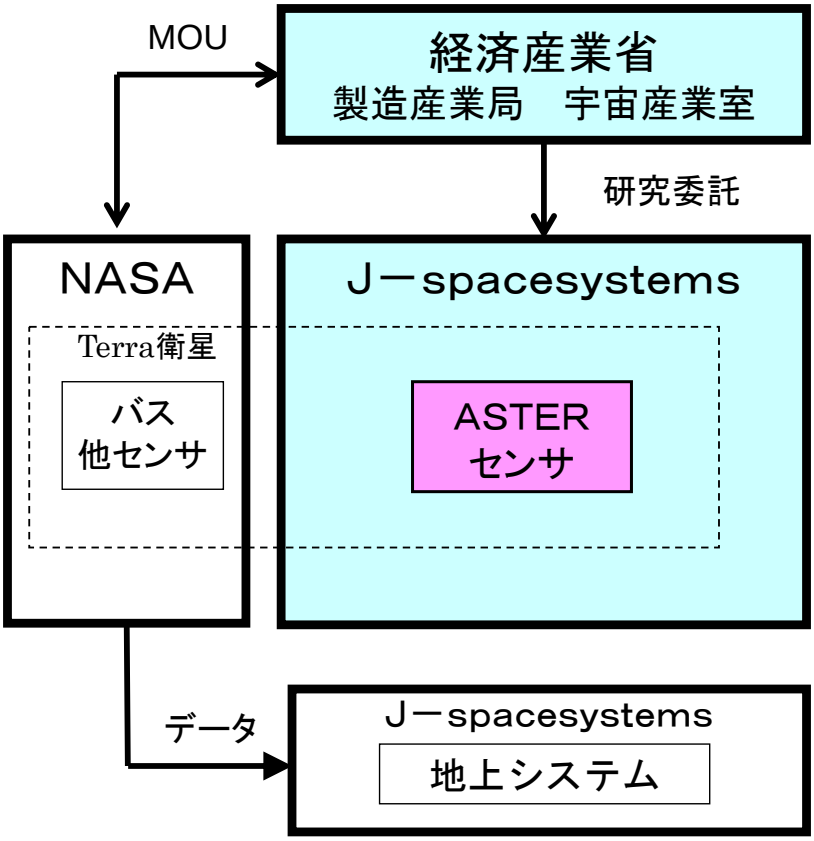


図 E-5-2-1　事業体制図

（2）プロジェクトマネージャの選任等、全体を統括する環境整備

・プロジェクトマネージャ等の選任

ASTERの研究開発事業の全体統括はJ－spacesystemsの専務理事が担当し、技術開発本部長／ミッション開発部長のもとにASTERインストルメントプロジェクトマネージャを設置してASTERセンサのプロジェクト管理を行う。

図 E-5-2-2 に、ASTERインストルメントのプロジェクトマネージャ関連図を示す。

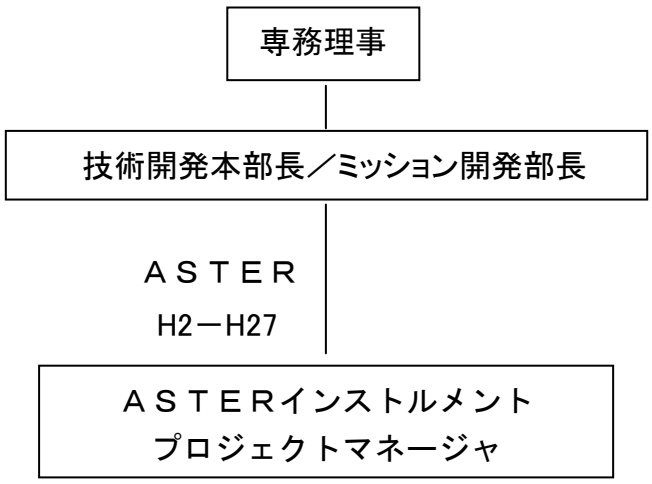


図 E-5-2-2　プロジェクトマネージャ関連図

（3）意思決定、進捗状況、計画見直し等の検討

本研究開発は、研究内容の確認・検討・修正の後に確定された実施計画によって遂行する。

研究実施に際しては、研究の進捗状況に応じて、プロジェクトに設置された委員会（※）の指導のもとに進捗状況の確認・見直し・修正を行い、その実施した結果を成果報告書として年度毎にまとめ、成果を評価・検討し、次年度以降の研究計画へ反映している。

（※）設置した委員会

ASTERセンサ委員会
- ・機上校正WG
- ・クーラWG

（4）目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携

ASTERの運用段階においては、日本の関連研究者、米国 NASA の研究者からなるサイエンスチームを構成し、地上システムのインタフェース調整や、利用ユーザの立場からの観測データの画像検証、年次変化の校正作業などを毎年継続的に実施している。

（5）成果の普及と関与の体制

Ｊ－spacesystemsにはASTER運用に携わる地上データシステム（GDS）プロジェクトとそのデータを利用するサイエンスプロジェクトが設置されている。ASTERインストルメントプロジェクトはASTERの成果物の受け取り手であるASTER GDSプロジェクト及びASTER サイエンスプロジェクトとの相互間でトリニティ体制のチームASTERとして密接な情報交換を行っている。

また、研究開発を行っていく上で不可欠である関連情報の収集等については、基礎的な技術動向調査として本事業開始から継続して実施し、国内外の関連学会へ参加し、成果の発表と情報収集に努めている。さらに、海外の最先端技術を把握する目的で、主な宇宙関連機関の技術動向調査を行っている。

Ｅ－５－３　資金配分

（1）資金の各要素技術への内部配分について

1） ASTERの資金配分

後期運用段階における平成23（2011）年度から平成26（2014）年度のASTERの資金配分（支出額）を表 E-5-3-1 に示す。

表 E-5-3-1 ASTER資金配分 （単位：百万円）

研究開発項目(注)	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	合計
ASTER運用評価の全体取りまとめ	11．0	19．1	19．9	22．0	72．0
SYS運用評価	6．3	10．5	11．2	11．9	39．9
VNIR運用評価	7．0	13．6	10．5	10．8	41．9
SWIR運用評価	5．9	15．2	12．1	10．4	43．6
TIR運用評価	8．4	16．3	10．1	10．8	45．6
MPS運用評価	2．4	5．3	4．2	4．1	16．0

（注）

・ASTER 運用評価の全体取りまとめ：ASTER 機器全体の運用評価に関する全体取りまとめ及びNASA、GDS、サイエンスチームとのインタフェース調整等

・SYS 運用評価：ASTER の各放射計の組合せによるシステム運用評価及び健全性の確認等
・VNIR 運用評価：VNIR テレメトリの監視と健全に運用するための対応、VNIR 校正係数の定期取得とデータ整理等
・SWIR 運用評価：SWIR テレメトリの監視と健全に運用するためのサブシステムとしての解析・評価、SWIR 検出器の温度上昇に対するトラブルシューティングと原因究明のための要因分析等
・TIR 運用評価：TIR テレメトリの監視と健全に運用するためのサブシステムとしての解析・評価、TIR 校正係数と機器評価のために画像データの定期取得とデータ整理等
・MPS 運用評価：電源部に関するテレメトリデータの評価と電源を健全に運用するための解析評価

Ｅ－５－４　費用対効果

資源探査観測システムの活用に関し、使用する衛星データについての性能的および経済的な比較検討を行った。平成25年以前は ASTER のように、可視近赤外、短波長赤外及び熱赤外データやステレオデータをすべて備えたセンサは国内外に存在しなかったが、平成２６年から熱赤外(TIR)データ以外は米国 DigitalGlobe 社の WorldView-3 によって代替が可能となった。表 E-5-4-1 に代替可能な衛星データとの仕様比較を示す。

表 E-5-4-1　代替可能な衛星データとの仕様比較

センサ名称	主な仕様			
	空間分解能	観測幅	スペクトル帯域	立体視
ASTER	VNIR:15m、 SWIR:30m、 TIR:90m	60km	VNIR,SWIR,TIR	同一軌道立体視
WorldView-3	VNIR: 1.24m、 SWIR: 3.70m	13.1km （直下）	VNIR,SWIR	ポインティング立体視

しかしながら経済的な面を考えると、空間分解能や 1 シーンの大きさが大きく異なるため、その比較は難しいものの、仮に面積単位の販売価格を単純に比較した場合、WorldView-3 は未定ながら ASTER の数百倍～数千倍であることが想定され、既存の ASTER に比べてデータの入手に掛る費用は桁違いとなる。広域探査のような、高分解能のデータや新規のデータを使用する必要性がなければ、ASTERを利用する方が経済的に優れている。

その他、有人および無人航空機等を利用した観測データによる代替は可能であるが、実際には他国の領空内を自由に飛行しデータを取得することは困難なため代替手段とはなりえない。従って、ASTERは資源探査に関する有効な費用対効果が得られているものと考える。

Ｅ－５－５　変化への対応

（1）社会経済情勢等周辺の状況変化への対応

石油を供給する油田地域の状況変化とともに油田の周辺地域の環境を含めて地域保全なども義務づけられるようになった。このような社会情勢変化に対して衛星データ利用においても対応の変化が必要になった。つまり、衛星データを利用するチームは、ASTER運用開始後に「地表面被覆変化モニタリング技術開発」、「沿岸域の濁度観測技術開発」等を進めてきた。また、海域のオイルスリック抽出技術もタンカー等からの油漏れ汚染観測に応用可能である。

世界の地球観測衛星に搭載されているセンサの内、ASTERと同等の中分解能センサとしては米国のランドサット、仏国のスポットがある。これらのセンサは継続的に運用されてきたが、現在ではランドサット5号は運用停止であり、ランドサット7号は不具合により制限つきで運用されている。後継機のランドサット8は平成25（2013）年2月に打上げられ、ASTER搭載のTerra衛星と同一軌道の衛星コンステレーションによる運用観測を行っている。

（2）ASTER運用に影響を与える情勢変化と対応

1） VNIR/TIRの感度低下

長期運用における ASTER 観測画像のラジオメトリック性能を維持するために、太陽反射光の放射輝度に対するセンサの検出感度との対応づけを行い、センサの入出力特性を定量的に把握していくことが必要である。そのため軌道上において定期校正を行い、VNIRはハロゲンランプを用いた光学校正を、TIRは標準黒体を用いた温度校正を実施している。

光学センサとしてのASTERは、打上げ後から15年を越えての長期運用において、ラジオメトリック感度の経年変化が進行している。

・VNIRでは、打上げ時からのバンド1の感度が約31%低下しており、同様にバンド2は約24%、バンド3は約19%低下している。

・TIRでは、打上げ時からのバンド12の感度が約50%低下しており、同様に他の4つのバンドも約18%～33%低下している。

・SWIRは、軌道上7．5年間において、6つのバンドの感度は約2%の低下であったが、平成20（2008）年5月以降、検出器の温度上昇により画素出力が飽和し、画像取得ができなくなった。

VNIRとTIRについては、センサの感度トレンドの変動に合わせて、観測データの画像処理に必要な感度補正の校正値を適時更新していくことにより、継続的に利用価値の高い品質の画像を生成している。

これらの状況において、ASTERの感度低下として、VNIRとTIRについてのFTA（Fault Tree Analysis）による要因抽出の網羅性と複合要因の関連性を分析し、原因究明の検討を行った。VNIRとTIRの機上校正の感度低下に関するFTAを図

E-5-5-1 と図 E-5-5-2 に示す。

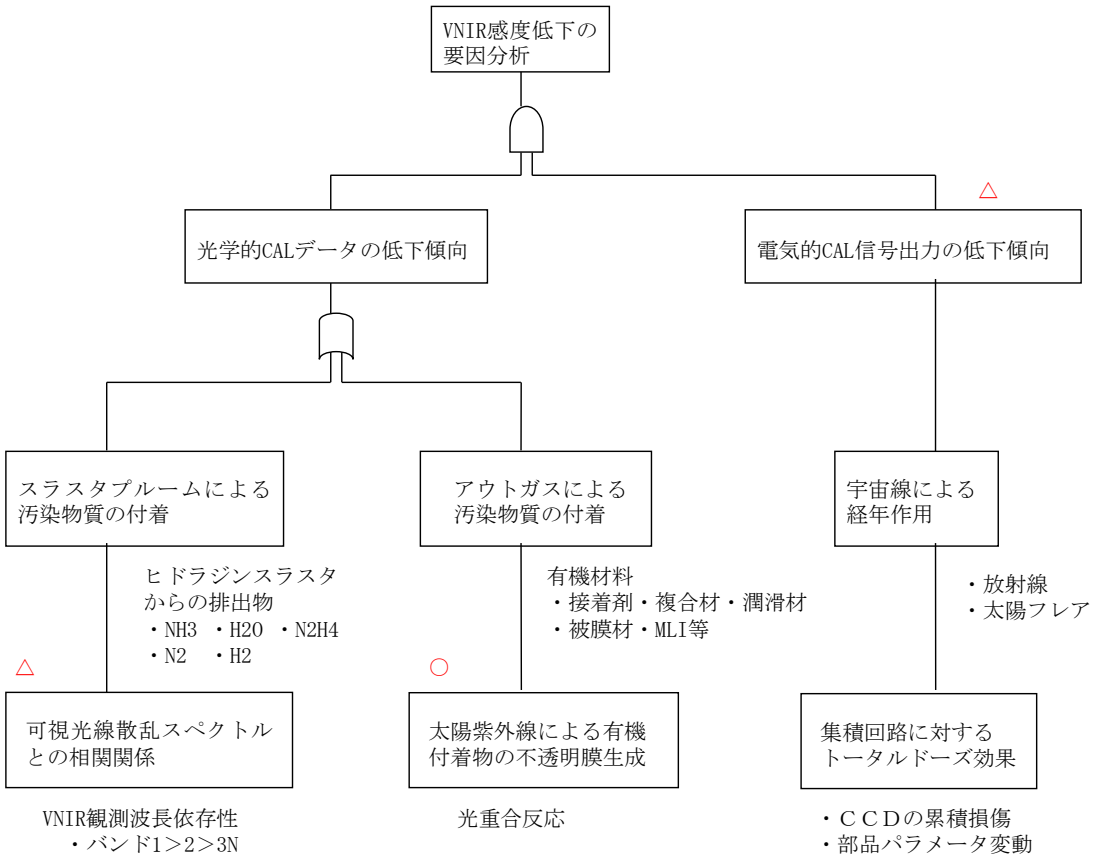


図 E-5-5-1　VNIRの機上校正の感度低下に関するFTA

VNIR の感度低下は、観測画像と機器の健全性評価から、以下に示す3つの複合要因が考えられる。【要因－2】が主要因と考えられるため、推定原因の評価と検証を行った。

【要因－1】スラスタプルームによる排出物（NH3、H2O、H2H4、N2、H2）の付着あるいは蒸発・散乱による低温部への再付着によって、光学レンズ系に長期的な物理的吸着を積み重ねることにより、透過性能が低下したものと推定される。特に、VNIR の観測波長特性と光散乱スペクトルとの相関関係に、感度低下のバンド依存性（バンド 1＞2＞3N）が見られることから、スラスタプルームによる排出物が感度低下の原因として寄与している可能性がある。
軌道上検証の結果、主要因である可能性は小さいことを確認した。

【要因－2】アウトガスとして光学面に付着した有機物が、UV との光重合反応による

化学的吸着によって、光学レンズ系が長期的に暗色化することにより透過性能が低下したものと推定される。すなわち VNIR の透過性能低下には、シリコーン等からのアウトガス付着と太陽光に含まれる真空紫外線との相乗効果が寄与している可能性が大きい。
このことから、シリコーンアウトガスに対する真空紫外線による特性変化についての影響評価を行い、経時的変化の可能性があることを確認した。

【要因－3】画像信号経路の電気的性能評価を行う画像校正信号の出力レベルに低下傾向が全バンドに共通して見られることから、宇宙放射線による長期的な電気回路のデバイスや電子部品に対するトータルドーズの影響が考えられる。

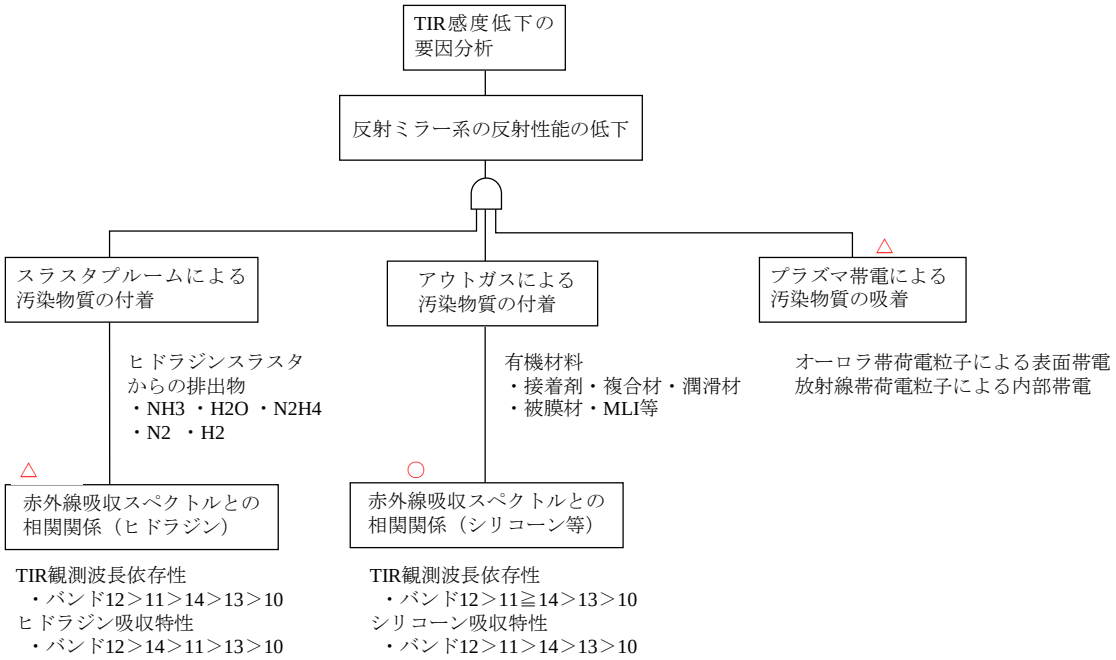


図 E-5-5-2　TIRの機上校正の感度低下に関するFTA

TIR の感度低下は、観測画像と機器の健全性評価から、以下に示す要因分析により【要因－2】が主要因と考えられるため、推定原因の評価と検証を行った。

【要因－1】スラスタプルームによる排出物（NH3、H2O、H2H4、N2、H2）の付着あるいは蒸発・散乱による低温部への再付着によって、反射ミラー系に長期的な物理的吸着を積み重ねることにより、反射性能が低下したもの

と推定される。特に TIR の観測波長特性とヒドラジンの赤外吸収スペクトルとの相関関係に、感度低下のバンド依存性（バンド 12＞14＞11＞13＞10）との一致が見られることから、ヒドラジンが感度低下の原因として寄与している可能性がある。
軌道上検証の結果、主要因である可能性は小さいことを確認した。

【要因－2】真空環境下において有機材料であるシリコーンのアウトガスとして放出されたシロキサンが、反射ミラー系を汚染し、経年変化により反射性能が低下したものと考えられる。TIR の観測波長特性とシロキサンの赤外吸収スペクトルとに相関関係があることから、シリコーンによるアウトガスが感度低下の原因として寄与している可能性がある。また、TIR の反射性能低下は、シリコーンのアウトガスであるシロキサンが真空紫外線による化学的吸着の特性変化を生じ、吸収スペクトルの変化をもたらした可能性が大きい。
このことから VNIR と同様に、シリコーンアウトガスに対する真空紫外線による特性変化についての影響評価を行い、経時的変化の可能性があることを確認した。

【要因－3】プラズマ帯電による汚染物質の吸着による影響は、TIR の感度低下に対するバンド依存性との相関関係が認められていない。
主要因となる可能性は小さい

2） SWIRの温度上昇

SWIRは、平成11（1999）年12月の衛星打ち上げから設計寿命5年を達成し、累積寿命8．5年を経過した平成20（2008）年5月以降、検出器の温度上昇により観測画像の取得ができなくなった。SWIRの温度上昇現象の経緯を、以下に示す。

平成11（1999）年12月の Terra 衛星打上げ以降SWIR温度が漸増し、温度低下策として Terra CPHTS（Capillary Pumped Heat Transport System）コールドプレートの設定温度変更を計3回実施し、コールドプレートの温度は下限状態となっている。また、平成16（2004）年9月にSWIRの温度ジャンプが発生し、スターリングサイクル方式のSWIRクーラはフルストローク状態となり、検出器温度を77K で安定化することが困難になった。その後SWIRの再起動を何度か行い、SWIR各部温度の漸増は止まったが検出器温度は87K 位まで上昇した。

この対策として、SWIRクーラの運用条件変更を試行し、最終的に77K、6mm から83K、6mm に変更した。これにより平成21（2009）年1月のSWIR再起動以降、検出器温度は上昇したものの現在131K 付近で安定状態にある。

ASTERセンサ委員会クーラ WG の活動を通して、SWIR検出器の温度上昇による画像取得不具合に関する原因究明の検討を行い、現象発生以降に実施したSWIR

の再起動対策による確認結果を含めて、推定原因の要因抽出と分析を実施した。
SWIR検出器の温度上昇に関する FTA を図 E-5-5-3 に示す。

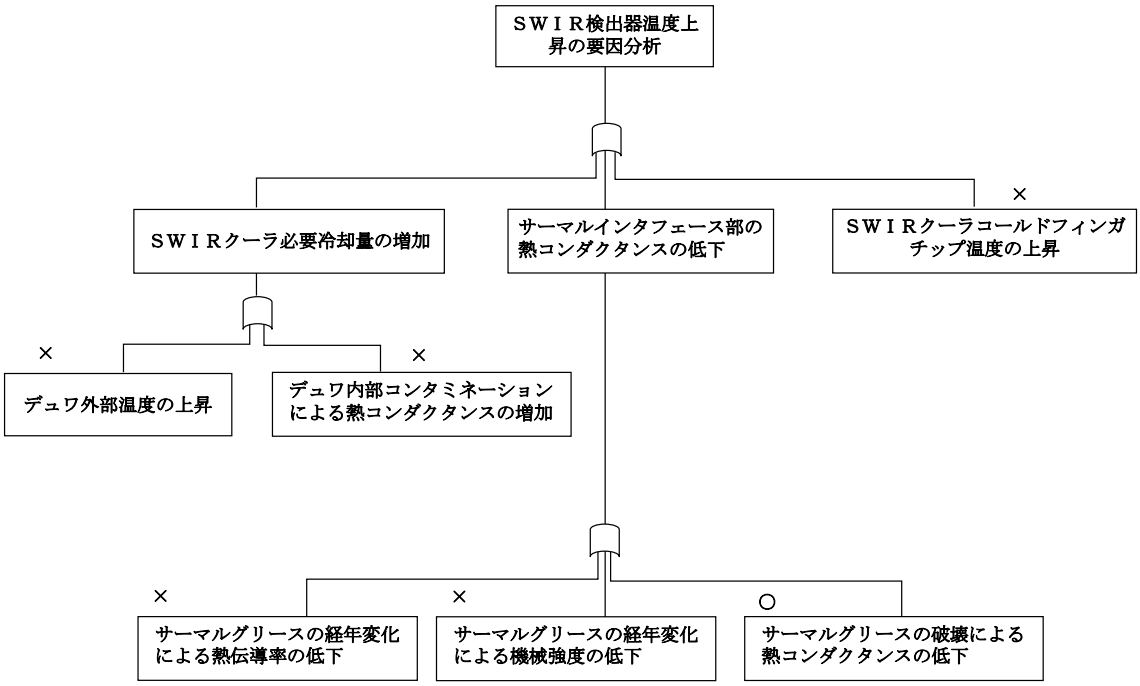


図 E-5-5-3　SWIR検出器の温度上昇に関する FTA

SWIRの温度上昇は、観測画像と機器の健全性評価から、以下に示す要因分析により【要因－2】が主要因と考えられるため、推定原因の評価と検証を行った。

【要因－1】検出器温度上昇の外部要因として、デュワ外部温度の上昇やデュワ内部のコンタミネーションによる輻射熱侵入量の増加が考えられるが、機部各部の温度は安定しており、デュワ温度は健全に維持されていることを確認した。

【要因－2】検出器温度の必要冷却量の熱伝達経路であるサーマルインタフェース部の熱結合が低下している可能性がある。そのため、検出器とクーラのコールドフィンガ間を熱結合しているサーマルグリースについて、経年変化による熱伝導率の低下、経年変化による機械的強度の低下及び剥離破壊による熱コンダクタンスの低下に関する要因特定の評価試験を行った。
サーマルグリースの低温評価試験の結果、シリコーンコンパウンドのサーマルグリースは極低温下の固化過程において、クールダウン等の繰返し熱応力により、低温破壊が伸展することを確認した。

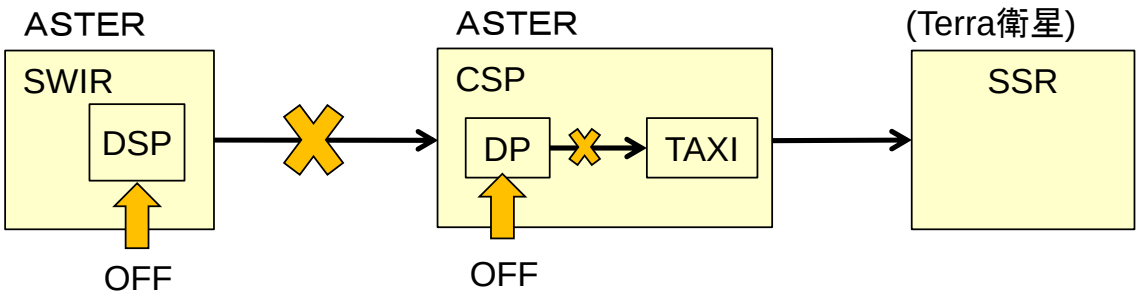
しかるに、現状での検出器温度は131Kで安定した状態にあり、サーマルグリースが全ては剥離しているのではなく、クーラからの熱結合を一部維持していると考えられる。

【要因－3】スターリングクーラのコールドフィンガの温度が上昇するケースについては、クーラのコンプレッサ及びディスプレーサが正常に動作していることをTLMデータトレンドにより確認しているため、該当しない。

3）SWIR機上データの配信停止処理

ASTERミッション運用に関するASTERサイエンスチームからの要求を受けて、画像データが無効となっているSWIR機上データの配信停止処理を実行した。
具体的には、ASTER SWIRと共通信号処理部のデータ処理回路をOFFして、ASTERのフルモード観測を行ってもSWIRのデータがTerra衛星のSSR(Solid State Recorder)に出力されないようにした。

これにより、ASTERデータのSSR容量をVNIRデータとTIRデータに、＋25%有効利用することが可能となった。



（3）今後の変化の予測とリスク対策

Terra衛星は、平成26（2014）年12月に打上げ後の軌道上運用15周年を迎えた。
衛星バスの健全性については、NiH_2 バッテリの一部に不具合が発生しているが、負荷放電による発熱で温度低下を防ぐ運用対策を行っており、問題はない。
また、ASTERセンサはTerra衛星と同様に平成26（2014）年12月で軌道上運用15年になるが、SWIRを除くASTER機器は正常に動作している。

これらの状況を踏まえて、今後のASTER運用において予測される情勢変化とリスク対策を以下に示す。

1） ASTERコンティンジェンシー・プラン

ASTERセンサの継続運用に係わるリスク対策として、コンティンジェンシー発生時におけるASTER不具合処理フローについてNASAとの調整を行った。

ASTERの軌道上不具合については、想定不具合と想定外不具合に分けて対応する。

ASTERの想定不具合としては、

① TIR CPHTSのフラクチュエーションによるTIRのシャットオフ

② Terra衛星バッテリのパワーダウンによるVNIRとTIRのスイッチング運用

③ TIRまたはVNIRのセンサ不具合によるVNIRまたはTIRの単独運用

が考えられる。

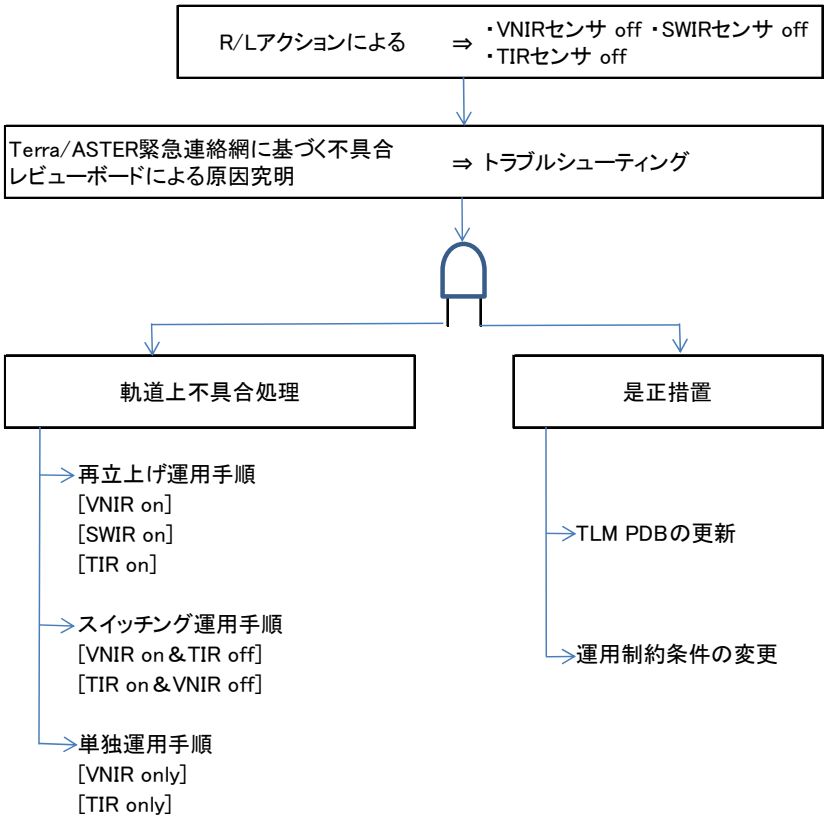
典型的な不具合処理フローとしては、TLMのRed Limitアクションによる ASTER機器のOFFが生じた場合、ASTER IOTのアノマリ・レビューボードを開催して、関係者によるトラブルシューティングを検討する。同時に並行してNASA FOTとASTER IOT間での連絡と調整を行い、アノマリの調査と解析及びリカバリプランを提示する。

以下に、コンティンジェンシー発生時におけるASTER不具合処理フローを示す。

ASTERセンサ不具合処理フロー

1. ASTERセンサの現状 ： ASTERセンサは正常に動作しており、SWIRを除いた観測を実施している

2. ASTERセンサの想定不具合 ：〔CASE-1〕TIRフラクチュエーションによるTIRシャット・オフ
〔CASE-2〕衛星バッテリの電力低下による縮退運用
〔CASE-3〕TIR/VNIR寿命故障によるVNIR/TIR単独運用



2） Terra衛星／ASTERルナーCAL計画の相互調整

NASAからオファーのあったTerra衛星のEnd of Misionにおけるスペシャルアクティビティとして、ASTERルナーCALを計画している。

ASTERルナーCALは、オンボードCAL，バイキャリアスCALに対する第3のCAL手法として、次のような成果を得ることができる。

〔平成15(2003)年時のルナーCAL画像〕

① ラジオメトリック感度の高輝度観測と月面反射モデルの高精度化

② VNIR の感度低下に対するオンボード CAL とバイキャリアス CAL との比較・検証

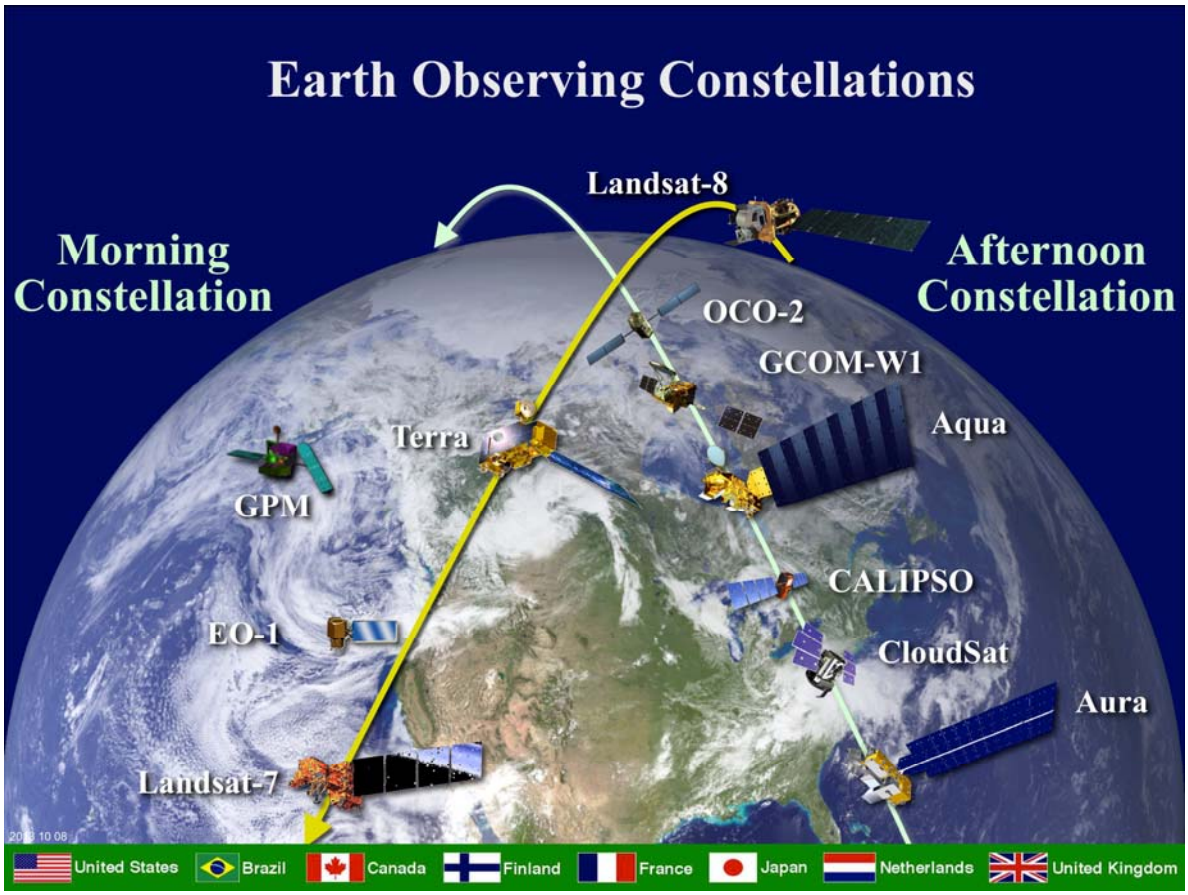
③ TIR のダイナミックレンジの広がりにより可能となった TIR の月画像取得による評価
（温度-放射率分離評価の可能性を含む）

ASTER ルナーCAL は平成15（2003）年に一度実施されており、同様の条件で実施するための計画や手順はマイナーな変更で対応可能である。

2回目のルナーCAL のベストタイミングとして、平成28（2016）年～平成29（2017）年頃の実行計画を NASA 側に提案している。

3） Terra 衛星／ASTER End of Mission Planの相互調整

ASTERを搭載しているTerra衛星は、NASAの地球観測コンステレーションに参加している。衛星コンステレーションは、複数の衛星を同一軌道上に配置することによって、同一のターゲット観測を可能とするバーチャルなプラットフォームを形成している。

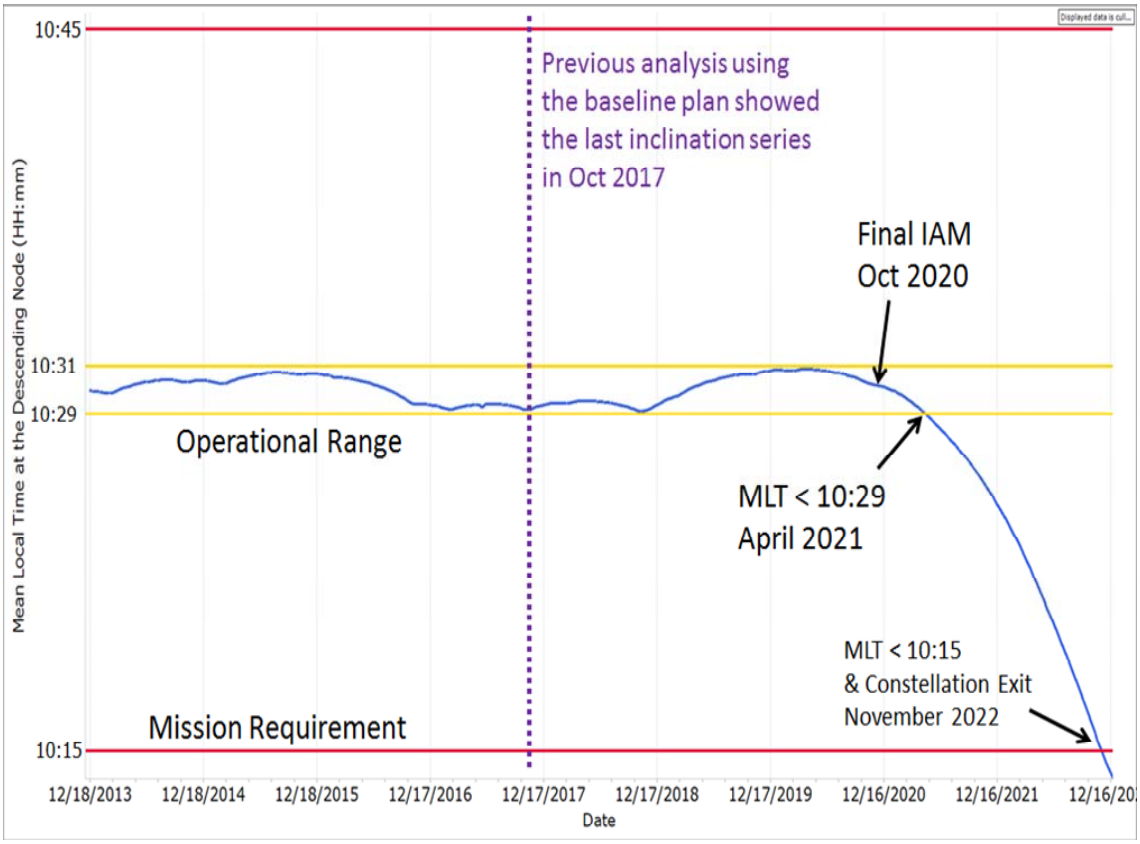


（NASA提供）

Terra 衛星は、平成 32（2020）年頃まで太陽同期準回帰軌道を維持した後、End of Missionの第1段階として降交点通過地方時（Mean Local Time）を10:30±1 分から 10:30－15 分への軌道ドリフトに移行する。
その後、End of Missionの第2段階として約1−2年経過後に軌道低下を行い、モーニング・コンステレーションから離脱する予定である。
NASAのEnd of Mission Planに対するASTER観測運用への影響について検討した。
第1段階のMLTドリフト・フェーズと第2段階の軌道低下によるコンステレーション離脱フェーズについての詳細を、以下に示す。

① MLT ドリフト・フェーズ(降交点通過地方時、10:30 → 10:15)

太陽同期軌道におけるTerra衛星のMLT要求は、降交点通過地方時 10:30 AM ± 15 分である。



（NASA による解析）

MLTドリフトについては、10:30±15分の要求範囲であり、ASTERの観測運用に、支障はない

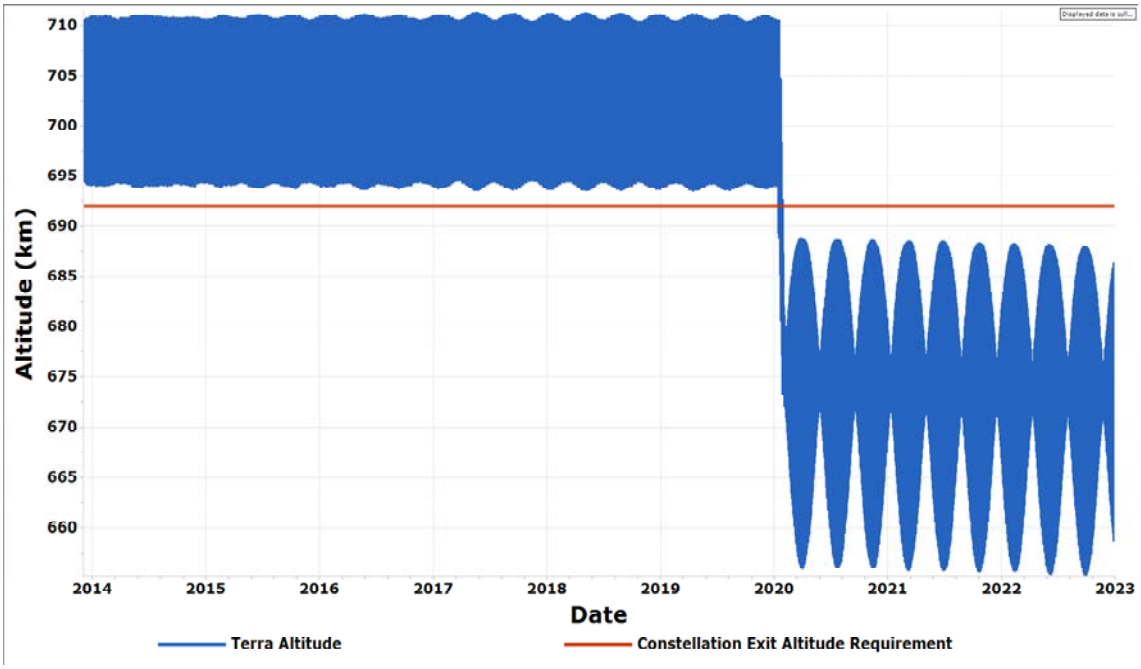
②コンステレーション離脱フェーズ

軌道低下後の衛星高度

・アポジー高度:711km → 688km（△23km）

・ペリジー高度:695km → 656km（△38km）

モーニング・コンステレーション離脱後のアポジー高度は、692km以下にすることが要求されている。



（NASA による解析）

Terra衛星の軌道低下後の平均高度（705km → 675km）における ASTER 検討結果を、以下に示す。

〔VNIR〕
- 重点変動 : N/A
- 空間分解能 : 15m → 14.4m
- 観測幅 : 60 km → 57.6 km
- 立体視角(B/H) : 0.6 → 0.5965

〔TIR〕
- 重点変動 : N/A
- 空間分解能 : 90m → 86m
- 観測幅 : 60 km → 57.6 km
- 軌道低下前にスラスタ噴射によるコンタミネーションを避けるために TIR ミラーを CAL 位置(収納状態)にする。

第2段階の軌道低下によるコンステレーション離脱フェーズについては、軌道高度の低下が小さいため、ASTER観測性能に大きな変化はない。

Ｆ　石油資源遠隔探知技術の研究開発

一般財団法人宇宙システム開発推進機構

国立研究開発法人産業技術総合研究所

Ｆ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｆ－１－１　事業の目的

石油等の資源に恵まれない我が国において、その安定供給の確保を図ることは、国民の安全・安心な生活の実現及び産業インフラの確保の観点から、国家基盤として必須の重要課題である。

衛星を活用したリモートセンシング（遠隔探知）技術には、（1）産油国との調整を経ずに、開発の有望性に関する評価が可能、（2）一度に広範囲の地域の分析が可能、（3）立入りが困難な地域の分析が可能、等の利点がある。

欧米等の先進諸国においても地球観測のための大規模プロジェクトが競うように進行しており、メジャーにおいても、鉱区取得・権益確保のためには、衛星画像データを用いて地質構造分析を行い、大きな判断材料としている。

我が国においては、地球資源衛星１号（JERS－１）が初の資源探査用衛星としてOPS（光学センサ）及びSAR（レーダセンサ）を搭載し運用（1992 年～1998 年）されていたが、その開発成果を活かし、高性能化・高機能化を図った後継機の開発が望まれていた。

このような状況の中、本事業においては、「E. 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発」において開発されたASTER（光学センサ）及びPALSAR（レーダセンサ）より取得されたデータの品質管理及び地上システムの運用を行うとともに、これらのデータを活用し、石油資源探査を効率的かつ精度よく実施するための利用技術開発を実施する。

「極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ASTER）」
（Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer）
・光学センサ（以下の3つのセンサを搭載）
　可視近赤外放射計（VNIR：Visible and Near Infrared Radiometer）
　短波長赤外放射計（SWIR：Short Wave Infrared Radiometer）
　熱赤外放射計（TIR：Thermal Infrared Radiometer）
・平成 11 年 12 月 18 日打上げ（現在も運用中）
・米国NASAの衛星 Terra に搭載

「次世代合成開口レーダ（PALSAR）」
＜正式名称は、フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ＞
（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）
・レーダセンサ（L バンド合成開口レーダ）
・平成 18 年 1 月 24 日打上げ（平成 23 年 5 月 12 日運用終了）
・JAXA の衛星だいち（ALOS：Advanced Land Observation Satellite）に搭載。
・電子機器部を開発

（アンテナ構造系については、科学技術庁／宇宙開発事業団（当時）が開発）

Ｆ－１－２　政策的位置づけ

（1）事業の科学的・技術的意義

世界の堆積盆地を対象に、石油を貯める地質構造と岩石分布の情報を入手して、石油資源の探査から操業までを安全に効率的かつ精度よく行うためには、衛星データの利用が有益であり、それに適合した高信頼・長寿命な衛星搭載用観測センサの開発が必須になる。

（2）社会的・経済的意義

衛星搭載用センサを開発することにより、世界に対して我が国の工業技術の高さを示す機会になる。また、人工衛星から得られる観測データを用いたリモートセンシング（遠隔探知）技術の高度化は、効率的な石油資源探査を可能とし、その経済的意義は高い。加えて、近年、資源保有国へのリモートセンシングに関する技術移転は、資源外交において重要な交渉材料となっている。

なお、宇宙基本法（平成 20 年法律第 43 号）及び宇宙基本計画（平成 21 年 6 月 2 日宇宙開発戦略本部決定）においては、資源・エネルギー供給の円滑化を含む宇宙開発利用の推進が謳われている。また、リモートセンシング技術は、資源探査以外の分野にも応用の可能性があり、本事業において開発されたセンサによって取得されたデータの解析技術向上により、さらなる波及効果が見込まれる。

（3）国民や社会のニーズ

エネルギー需要は年々増大しており、石油資源の消費もそれにともなって増加している。このまま進めば石油資源の枯渇も懸念されており、国として新たな石油資源の探査開発と、安定確保を図る施策が必須となる。

エネルギー基本計画（平成 22 年 6 月）においては、2030 年までに、我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率を 40%以上まで引き上げることを目標としており、本事業の成果を活用し、石油資源開発を効率的に進めていく必要がある。

また、今後の石油資源探査は地理的に不利なところが中心となるため、探査地域の基礎情報（広域地質・地質構造に関する情報）の把握、現地調査計画の策定、試掘位置の決定、補給ルートの把握等について、衛星データはその威力を発揮する。

Ｆ－１－３　国の関与の必要性

我が国のエネルギー政策上必要不可欠である、石油資源の安定供給の確保のためには、上述のとおり、衛星データの利用が効果的である。しかしながら、探査・開発から操業までの期間は長期間を要し、一企業が衛星の開発・運用、取得されたデータ

の解析等を実施することは、非常にリスクが高い。

　したがって、世界的に激化している資源開発競争の中にあっては、国が率先して、リモートセンシング技術の高度化を推し進め、石油資源開発に資する基盤技術を確立することが重要である。

Ｆ－２　研究開発目標

Ｆ－２－１　研究開発目標

本事業の目標は、石油ガス開発企業等が衛星データを実際の資源探鉱活動に活用することができるように、人工衛星から取得される画像データを用いて、石油ガス資源探鉱の効率化、権益確保のための事前情報取得など、石油ガス資源の安定供給確保に貢献できる衛星データ利用技術開発を行うことである。また、そのために必要となる、品質が保証された衛星画像データをユーザに対して安定的に提供を行うため、経済産業省が開発した ASTER 及び PALSAR の地上データシステムの安定的な運用、並びに同観測データの品質管理を行うことである。

Ｆ－２－２　全体の目標設定

本事業の最終目標は、衛星データを石油ガス開発企業等の探鉱活動等に活用することである。そのために、石油ガス鉱床のタイプや地表状況に応じた、衛星データ利用技術と解析アルゴリズムを開発し、資源有望地を対象とした検証により、利用手法を確立するとともに、ユーザに対して品質の保証された衛星データ及び標準処理・高次処理プロダクトをタイムリーに提供することが全体の目標となる。さらには将来に向けて、より効率的なシステムの構築と衛星データから抽出される情報を利用しやすい形式での整備等により衛星データの資源利用を増進していくことも必要と考えられるため、これも一つの目標としている。

これらの達成度を評価する指標としては、まずは利用研究事例数や解析アルゴリズムの実用化件数であり、さらに衛星データの高品質・高精度(幾何精度、放射量精度など)の維持、効率的な観測計画の作成、データ処理・保存・配付の安定的運用等の目標数値となる。

全体の目標を整理したものを表 F-2-2-1 に示す。なお、これらの項目については、外部委員会(ASTER では日米 ASTER サイエンスチーム会議を含む)においても技術的検討を実施している。

表 F-2-2-1. 全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
目標: 経済産業省が開発した衛星搭載型地球観測センサによる、石油ガス鉱床タイプや地表状況等に応じた資源探査利用手法を確立し、石油ガス開発企業等の探鉱活動に活用されること。 ユーザに対して品質の保証された衛星データ及び付加価値プロダクトをタイムリーに提供すること。 指標: 研究事例数、広域地質・資源情報マップ完成度、及び解析アルゴリズム実用件数とする。定められた精度の維持・確保や、地上システム運用の数値目標を指標とする。	目標: ASTER 及び PALSAR データによる、石油ガス鉱床タイプや地表状況等に応じた資源探査利用手法を確立し、石油ガス開発企業等の探鉱活動に活用されること。 ユーザに対して品質の保証された ASTER 及び PALSAR データ及び付加価値プロダクトをタイムリーに提供すること。 指標: 資源分野のタイプ別事例、地質・資源情報マップの精度向上、完了地域数・コンテンツ数、及び解析アルゴリズム件数、および定められた精度の維持・確保や、地上システム運用の数値目標を指標とする。	経済産業省が開発した衛星搭載型地球観測センサは、資源探査への利用を目的として設計・開発されており、国内資源企業による実利用推進により、石油ガス資源の安定供給確保に貢献することが最終目標である。国内資源開発企業のニーズが高い利用手法を網羅した開発を進めるとともに、ニーズの変化に柔軟に対応する必要がある。さらに、より利用しやすい形式で広域の地質・資源情報整備を行うことが利用機会の増進に役立つ。 同時に衛星データ利用ユーザに対して十分な品質・精度を有するデータを遅滞なく、かつ長期継続的に提供することも必須な事項となる。

Ｆ－２－３　個別要素技術の目標設定

（1） 利用技術開発

上記全体目標を達成するために、個別要素技術として利用技術開発では、3つの個別要素技術を設定した。

① 石油ガス資源探査等への利用手法の確立

石油ガス鉱床のタイプ・地表状況に応じた衛星データ利用技術を確立する。また、新たなニーズへの柔軟な対応を行うとともに、これまでに開発してきた ASTER 及び PALSAR データによる研究事例を整理する。

石油・天然ガス鉱床は、図 F-2-3-1 に示す石油ガスを地中に貯める構造で分類される。また衛星データは地表の被覆状況により適用するデータの種類やその解析手法が異なることから、これらの各種条件を網羅した利用手法を確立することを最終目標とする。そのために、表 F-2-3-1 に示すユーザ要望と衛星データ利用可能性を表にしてとりまとめ、各項目の達成に必要な研究事例数（対象地域）の目標を設定した。

また、石油ガス探鉱の対象や衛星データから得られる情報の利用対象は昨今大きく変化してきていることもあり、近年注目をあびている非在来型資源[1]を対象とする研究等を含めた新たな目標設定を追加した(表 F-2-3-2)。

各項目の利用手法確立において必要と考えられる研究事例数は、例えば半乾燥／露岩地域では衛星データ活用効果は期待できるが、現段階では探鉱ポテンシャルが低い、または鉱区獲得機会が少ない(例えば外国に鉱区を開放していない)等を考慮して設定した。ニーズの高い項目については、利用する衛星データの種類、融合処理方法等の適用を行い、手法の汎用性や頑健性を得るために複数地域の事例により技術を確立する。

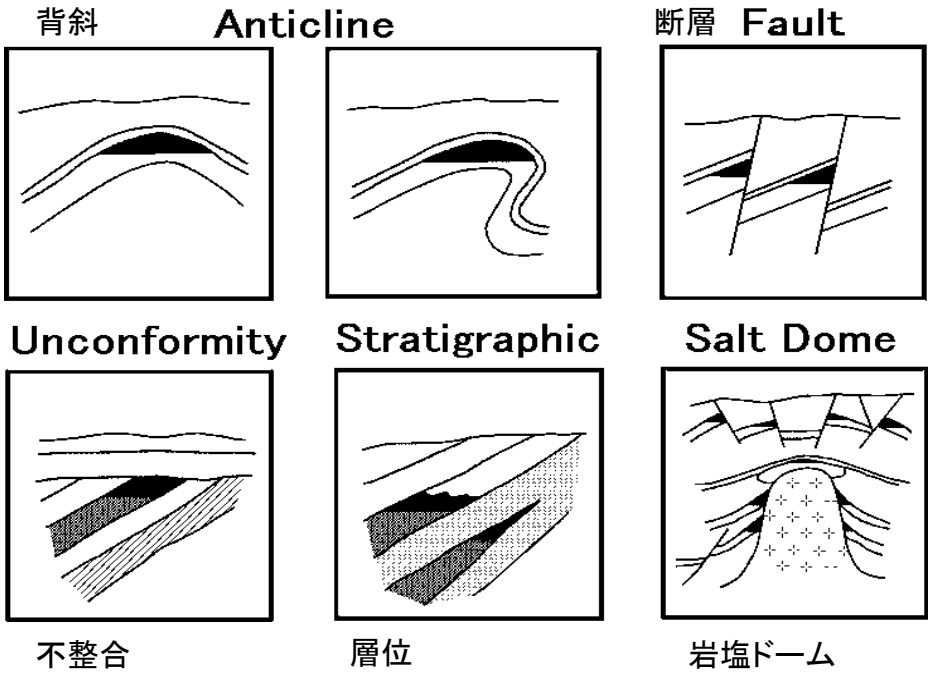


図 F-2-3-1 石油ガス貯留構造の模式図

[1] 非在来型資源:シュールガス、オイルサンド、コールベッドメタン(CBM)など、通常の油ガス田以外から開発される石油・天然ガスのことを指す。

表 F-2-3-1 トラップ構造と地表状況に関する資源ユーザ要望と衛星データ利用可能性及び研究事例目標数

貯留構造(トラップ)		植生(湿潤)	半植生(半乾燥)	露岩(乾燥)
背斜トラップ	利用者要望	大(特にアジア)	小(地域狭)	大(世界・広域)
	利用可能性	中	大	大
	研究事例目標	5地域以上	2地域以上	10地域以上
断層トラップ(背斜ー断層の組合せ含む)	利用者要望	中	小	中
	利用可能性	中	大	中
	研究事例目標	3地域以上	1地域以上	5地域以上
その他(層位、不整合、礁トラップ等)	利用者要望	中	小	中
	利用可能性	中	大	大
	研究事例目標	3地域以上	1地域以上	1地域以上

表 F-2-3-2 資源ニーズを踏まえた新たな目標

テーマ／技術		
非在来型資源 CBM/オイルサンド/シュールガス	利用者要望	CBM:大／オイルサンド:中／シェールガス:大
	研究事例目標	2地域以上
大規模油ガス田生産量監視技術	利用者要望	大
	研究事例目標	5地域以上
開発時の環境監視技術	利用者要望	大
	研究事例目標	1地域以上

中間評価対象期間では、上記目標のうち国内資源開発企業ニーズを反映して、利用手法の事例研究として、背斜トラップ／植生、断層トラップ／植生、背斜トラップ／露岩、及び断層トラップ／露岩の各タイプの事例研究を1地域以上実施し、利用手法の検証を行うこと、さらに新たなニーズへの対応として、非在来型資源への利用研究については異なる資源を2地域以上、大規模油田生産監視技術の開発については地表状況の異なる5地域以上、開発時の環境監視技術を1地域以上行い、衛星データの利用可能性を確認することを目標とする。なお、これらの利用研究の成果が、企業の資源探鉱においてどの程度利用されているかについてはヒアリング調査等を実施し、利用状況を確認するとともに、これまでに本事業で開発してきた ASTER 及び PALSAR データによる研究事例を整理する。また合わせて、資源分野を含む様々な分野における衛星データ利用促進のため、衛星の利用効果の高い分野における情報抽出技術を確立することを目標とする。

②ASTER・PALSAR 地上システム運用および衛星データ品質管理

地上システム運用においては、ユーザの観測要求を取りまとめた観測計画を作成すること、観測された原データの全量の入手・保存すること、標準処理・高次処理のプロダクトを生産してユーザへタイムリーに提供すること、十分な配付数を達成することを目標とする。また衛星運用中、衛星データ（ASTER 及び PALSAR）の校正・検証・補正処理技術の開発を行うとともに、放射率精度や幾何精度が定められた範囲にあることを確認し、品質が保証されたデータを生産・配付することを最終目標とする。

中間評価期間では、以下を目標・指標とする。

（ア）ASTER の運用期間中は、最適化された観測計画を日単位で作成し、NASAへ提出する。PALSAR の運用期間中は長期計画に対して観測成功実績を勘案して適宜見直すとともに、週単位の観測計画を JAXA へ提出すること。

（イ）観測された原データは全量入手・保存すること。

（ウ）標準・高次処理プロダクトの生産については、ユーザ要求にもとづきオンデマンド処理し、タイムリーにユーザへ提供すること。

（エ）標準・高次処理プロダクトの配付は ASTER 及び PALSAR とも累計5万シーン以上とする。

（オ）ASTER について幾何精度 50m以内、放射量精度可視近赤外±2%、熱赤外±1度の精度を維持する。

なお、これらの結果については、別途、外部委員会（日米 ASTER サイエンスチーム会議を含む）においても検討がなされる。

③次世代アーカイブシステムおよび広域マップの研究

衛星データの長期的かつ継続的なユーザへの提供は重要な課題である。そこで次世代のアーカイブシステムとして、衛星の運用停止後の効率的なデータアーカイブシステムを開発することを最終目標とし、中間評価時においては、クラスタシステムを用いた ASTER・PALSAR データのデータのオンデマンド処理の実現、特に ASTER についてはデータ取得から公開までの処理時間の短縮化、および全量アーカイブの完成、さらに2種類以上のOGC標準に対応したシステム開発を目標とする。

また、よりユーザの使いやすいプロダクトを開発し、提供していくことも重要な課題である。そこで次世代のプロダクトとして、衛星データから得られる地質・資源情報を、より利用しやすい形式に加工・整備した広域な地質・資源情報マップやその統合利用システムを開発する。

中間評価期間では、以下を目標・指標とする。

（ア）ASTER および PALSAR データのアーカイブシステムとして、1.0 PB 以上のストレージを保有し、ASTER 全量データのアーカイブを実現する。併せて長期アーカイブのための冗長性を担保したテープアーカイブも各 1 セット以上、構築する。

（イ）ASTER 処理においては観測計画作成後 39.5 時間以内に標準および高次処理行

うシステムを構築する。
（ウ）データ提供システムとして、2 種類以上の最新の OGC 標準に対応したシステムの構築を行う。
（エ）全球の数値標高データとして過去に開発した全球 DEM（ASTER GDEM）の高精度版（Ver.3）を整備する。
（オ）世界の主だった海上の油徴オイルスリック[2]のスクリーニングを行い、オイルスリック DB として整備及び油徴抽出の精度の向上を図る。
（カ）グローバル衛星画像データセット(時系列 DEM・オルソ画像モザイクオルソ)、および時系列 DEM・オルソ画像を用いた広域分校放射率マップを開発する。

以上の個別目標・指標について整理したものを表 F-2-3-3 に示す。

表 F-2-3-3. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
①石油ガス探査利用手法確立および解析アルゴリズムの確立	目標: 石油ガス鉱床の貯留構造別と地表状況に応じた衛星データ利用技術、及び近年注目をあびている非在来型資源への利用や生産管理監視技術等を確立する。 指標: 各項目の利用手法を確立した事例件数とする。	目標: ASTER 及び PALSAR データによる、石油ガス鉱床の貯留構造別と地表状況に応じた衛星データ利用技術、及び近年注目をあびている非在来型資源への利用や生産管理監視技術等を確立する。 指標: 各項目の利用手法を確立した事例件数とする。	国内資源企業における、衛星データの実利用推進により、石油ガス資源の安定供給確保に貢献するために、任意の利用ケースに対応した手法を確立することが必要である。また、衛星データ利用促進のため、衛星データの利用効果が高いと考えられる資源・地球環境・防災等に係る衛星データ解析アルゴリズムの開発が必要である。
②ASTER 及び PALSAR 地上システム運用および衛星データ品質管理	目標: ユーザに対して品質の保証された衛星データ及び付加価値プロダクトをタイムリーに提供すること。 指標: 観測計画、衛星データプ	目標・指標：以下の項目の実現とする。 （ア）観測計画の作成 （イ）観測データの全量入手・保存 （ウ）標準・高次処理プロダクトの生産	地上データシステムにより、事業目的に最適化した観測計画を作成し、観測データを全量入手・保存し、ユーザへタイムリーに品質管理された標準・高次処理プロダクトの

[2] 油徴オイルスリック：天然原油由来の油膜によって海面上に広がる平滑面

	ロダクトの生産数・保存数・配付数等の実績および目標精度の達成度とする。	(エ)ASTER 及び PALSAR それぞれ５万シーン以上の配付 (オ)衛星データの目標精度の維持	生産・配付することが、衛星データの実利用を推進するための基本条件である。
③次世代アーカイブシステムおよび広域・グローバル地質・資源情報マップ整備	目標: 地上システム運用終了後も、衛星データを継続的にユーザに提供できる次世代アーカイブシステム構築すること。 指標: ASTER 及び PALSAR のアーカイブ実績、高速再処理アルゴリズム開発、標準化対応等の実現度合いとする。	目標:ユーザに対してより利用し易い衛星データを継続的に提供するため、大量データを扱うことが可能な次世代アーカイブシステムを構築するとともに、次世代プロダクトとなる広域マップを整備する。 指標:ASTER 及び PALSAR のアーカイブ実績、高速再処理アルゴリズム開発、標準化対応等の実現度合い、整備した広域マップの種類とその完成度とする。	将来への対応として、地上システム運用終了後も衛星データを大量かつ継続的にユーザに提供するための、大容量のアーカイブシステム、迅速に再処理が可能な高速処理アルゴリズムの開発等が必要となる。また、従来よりも利用しやすい形式で広域の地質・資源情報整備を行い、リモートセンシングの専門家でないユーザへの利用を推進する必要がある。

Ｆ－３　成果、目標の達成度

Ｆ－３－１　成果

Ｆ－３－１－１　全体成果

ASTER および PALSAR データによる、石油ガス鉱床の地表・貯留構造の状況に応じた利用技術、非在来型資源・生産管理監視等への利用技術等について、合計57件の利用技術および事例を開発し、資源ユーザの要望するほぼ全てのケースを網羅した。また資源・地球環境・防災等の課題に必要な情報を抽出する解析アルゴリズムを合計66件開発し、利用に必要な解析手法をほぼ網羅した。

ASTER 及び PALSAR とも、地上システムの運用によって、ユーザの要求に対応した観測計画の作成、観測データの全量入手・保存、標準・高次プロダクトの生産・配付数の目標を満足した。また運用期間中に実施した校正検証結果から、定められた精度を維持したことが確認された。

さらに次世代アーカイブシステムに ASTER 全量と PALSAR の一部のデータの保存が完了し、次世代プロダクトとして全球DEMをはじめとした広域をカバーしたマップの作成を完了した。

なお、これらの成果については、表 F-5-2-1～4 に示す委員会において確認されている。

以上から、中間評価時における全体目標を達成していると判断できる。

Ｆ－３－１－２　個別要素技術成果

①石油ガス資源探査等への利用手法の確立

（ア）石油ガス資源探査への利用手法

平成 26 年度までに実施した ASTER 及び PALSAR による石油ガス資源探査への利用研究対象地を表 F-3-1-2-1 に示す。いずれも資源ユーザの要望を反映した貯留構造、地表状況において研究を実施し、得られた成果は実際の資源探査への情報として活用されている。

これらの成果は、表 F-3-1-1-1 に示した項目のうち、背斜／植生、断層／植生、背斜／露岩及び断層／露岩の各タイプの利用手法については、資源地域における検証がなされほぼ確立されたと判断できる。

表 F-3-1-2-1　ASTER 及び PALSAR による石油ガス資源探査利用研究

貯留構造（トラップ）		植生（湿潤）	半植生（半乾燥）	露岩（乾燥）
背斜トラップ	利用者要望	大（特にアジア）	小（地域狭）	大（世界・広域）
	研究実施	インドネシア等の 9 地域（タイ）	アルゼンチン等の 2 地域（-）	中国等の 8 地域（イラク 3 地域）
断層トラップ（背斜－断層の組合せ含む）	利用者要望	中	小	中
	研究実施	メキシコ等の 7 地域（アンゴラ、コンゴ、ウンガンダ）	-	アルゼンチン等の 10 地域（-）
その他（層位、不整合、礁トラップ等）	利用者要望	中	小	中
	研究実施	カンボジア等の 6 地域（-）	-	リビア等の 2 地域（ケニア）

注）「研究実施」欄のカッコ内は最新（平成 23 年～平成 26 年）に実施した地域

ASTER 及び PALSAR による新たな対象の実施結果について表 F-3-1-2-2 に示す。

非在来型資源については、これまでに実施したオイルサンドの開発及びコールベッドメタンの開発に加え、シェールガスの開発に伴う情報取得方法についても衛星データ利用の可能性・効果が確認された。

大規模油田生産監視技術の開発については、平成 23 年度 5 月に PALSAR、同年 11 月に ERS-2、平成 24 年 4 月に ENVISAT と主要な合成開口レーダ（SAR）衛星の運用が停止しため、大規模油田の継続監視は難しくなったが、既存データの解析より地表状況等の異なるタイプの油ガス田おいても有効な技術であることが確認できた。

また、開発に伴う環境監視技術等の利用手法についても、石油探鉱のフロンティアである北極圏を対象とした利用技術開発を行い、中空間分解能の衛星データの利用方法に関する知見が得られた。

表 F-3-1-2-2　ASTER 及び PALSAR による新たな対象の実施

テーマ／技術		
非在来型資源 CBM/オイルサンド/シュールガス	利用者要望	CBM：大／オイルサンド：中／シュールガス：大
	研究実施地	CBM:インドネシア等の 3 地域 （オーストラリア 2 地域） オイルサンド：カナダ 1 地域 （-） シェールガス：米国等の2地域 （米国、カナダ）
大規模油ガス田生産量監視技術	利用者要望	大
	研究実施地	イラク等の 6 地域 （サウジアラビア、クウェート、アルジェリア、 ベネズエラ、西シベリア）
開発時の環境監視技術	利用者要望	大
	研究実施地	北極圏1地域 （同地域）

注）「研究実施」欄のカッコ内は最新（平成 26 年迄）に実施した地域

資源開発企業の具体的な利用状況を把握するために、開発した手法を利用して、実際の石油探鉱・開発に貢献できた事例をヒアリングにより調査した。国内の石油ガス資源開発企業が主な探鉱対象としている東南アジア、アフリカ、中東での利用が進められている。

新たなニーズへの対応として、非在来型資源、大規模油田の生産量監視技術の開発、開発時の環境監視技術を実施した。非在来型資源については、コールベッドメタン（CBM）[3]、オイルサンド[4]、シェールガス[5]資源における利用手法の研究と、大規模油田の生産量監視技術の開発を行った。大規模油田の生産量監視技術の開発については、中東の大油田に加え地表状況等の異なる西シベリア、ベネズエラ等の油ガス地域においてもその有効性を確かめた。開発時の環境監視技術については、北極圏において海氷監視技術の開発の研究を行った。

以上の成果を含め、これまでに開発してきた研究事例を整理した。合計事例は 57 地域に達し、ASTER および PALSAR を利用した石油ガス鉱床の貯留構造と地表状況に応じた衛星データ利用技術、及び近年注目をあびている非在来型資源への利用や生産管理監視技術等を十分に確立したと考えられる。これらのうち特に有効な研究事例については、今後の石油資源開発に携わるリモートセンシング技術者の手引書として使えるように整理も行った。

[3] コールベッドメタン：石炭層に含まれる炭層ガスのことで主にメタンガスからなる
[4] オイルサンド：きわめて粘性の高い鉱物油分を含む砂岩のこと。母岩が頁岩の場合はオイルシェールと呼ぶ
[5] シェールガス：頁岩（シェール）層に含まれる天然ガス

表 F-3-1-2-3 研究開発事例の一覧

No.	対象地域	対象	内容	トラップ	植生	地表
1	アルゼンチン・ネウケン盆地	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	疎	植生
2	ミヤンマー・中央盆地	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	疎	植生
3	ミヤンマー・カウラ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
4	タイ東北部	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
5	ロシア・東シベリア	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
6	フィリピン・ネグロス	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
7	ロシア・サハリン	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
8	インドネシア・西ジャワ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
9	インドネシア・カンゲアン	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
10	インドネシア・パプア州北部	在来	PALSAR、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
11	タイ・コラート高原	在来	PALSAR、地質・構造判読・解析	背斜	密	植生
12	中国・民和	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	疎	露岩
13	パキスタン・スレマン	在来	ASTER、地質・構造判読・解析、ハイパースペクトル解析	背斜	無	露岩
14	イラク・キルクーク	在来	ASTER、スペクトル解析	背斜	無	露岩
15	イラク・南部湿原	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	無	露岩
16	リビア・シレナイカ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	無	露岩
17	イラク・ザクロス	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	疎	露岩
18	イラク・北部	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	背斜	無	露岩
19	イラク・産油油地帯	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析、GIS データベース化	背斜	疎	露岩
20	メキシコ・ベラクルス	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	密	植生
21	ブラジル・ウアツマ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	密	植生
22	フィリピン・南東ルソン・ミンドロ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	密	植生
23	パプアニューギニア・パプア褶曲帯	在来	ASTER、数値地形解析	断層	密	植生

24	インドネシア・マドゥラ～カンゲアン	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	密	植生
25	インドネシア・ブトン	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	密	植生
26	アンゴラ・コンゴ	在来	ASTER GDEM、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	密	植生
27	アルゼンチン・パタゴニア	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	疎	露岩
28	リビア・ムルズク	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
29	中国・トルファン	在来	多偏波 SAR、 解析	断層	無	露岩
30	アルジェリア・Ilizi	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
31	シリア・中央部	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
32	リビア・シルテ盆地1	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
33	エジプト・スエズ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
34	チュニジア・Pelagian	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
35	リビア・ガダメス盆地	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
36	イエメン・ジサカマール堆積盆	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	断層	無	露岩
37	カンボジア・トレンサップ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	その他	密	植生
38	インドネシア・東ジャワ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	その他	密	植生
39	インドネシア・東スンダ	在来	ASTER、地質・構造判読・解析	その他	密	植生
40	インドネシア・北スマトラ	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	その他	密	植生
41	ガボン・東部	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	その他	密	植生
42	ウガンダ・リフト分堆積盆	在来	ASTER GDEM、PALSAR、地質・構造判読・解析、GIS データベース化	その他	密	植生
43	リビア・シルテ盆地2	在来	ASTER、PALSAR、地質・構造判読・解析	その他	無	露岩
44	ケニア・リフト分堆積盆	在来	ASTER GDEM、PALSAR、GIS データベース化	その他	無	露岩
45	ロシア・西シベリア	油田監視	PALSAR 差分干渉、大規模油ガス田生産量監視	背斜	疎	植生
46	ベネズエラ・油田地帯	油田監視	PALSAR 差分干渉、大規模油ガス田生産量監視	背斜	密	植生
47	イラク・キルクーク油田	油田監視	PALSAR 差分干渉、大規模油ガス田生産量監視	背斜	無	露岩

48	サウジアラビア・ガワール油田	油田監視	PALSAR 差分干渉、大規模油ガス田生産量監視	背斜	無	露岩
49	クウェート・ブルガン油田	油田監視	PALSAR 差分干渉、大規模油ガス田生産量監視	背斜	無	露岩
50	アルジェリア・ハシメサウド油田	油田監視	PALSAR 差分干渉、大規模油ガス田生産量監視	背斜	無	露岩
51	カナダ・Hangingstone	非在来	PALSAR 差分干渉	−	密	植生
52	インドネシア・カリマンタン	非在来	CBM 開発好適地抽出	−	密	植生
53	米国・Uinta 盆地	非在来	シェールガス開発好適地抽出	−	中～疎	植生
54	オーストラリア・ボーエン盆地	非在来	CBM 開発好適地抽出	−	中～疎	植生
55	カナダ・ブリティッシュコロンビア	非在来	シェールガス開発好適地抽出	−	密	植生
56	オーストラリア・スラット盆地	非在来	CBM 開発好適地抽出	−	中～疎	植生
57	北極圏	開発環境	ASTER、 PALSAR、 海氷モニタリング	−	無	海氷

これらの研究成果のうち、特に中間評価対象期間に実施した研究事例を 4 地域、以下に紹介する。

(i) ウンガンダ国境アフリカ大湖沼地域における研究事例

近年新たな石油・天然ガスが発見され、今後の本邦石油ガス開発企業等の参入も見込まれている東アフリカを対象とした衛星画像データの利用研究を行った。ウガンダとコンゴ民主共和国の国境にあるアフリカ大湖沼地域は降水量が多く植生が密であり、これまで衛星画像で、特に光学センサで良好な画像データが揃わず，解析が難しい地域であった。このような地域での ASTER 及び PALSAR データの利用法、有効性を検証した。図 F-3-1-2-1 に、対象地域の位置、PALSAR スタッキング処理モザイク画像、ASTER GDEM を利用した地形解析から作成した水系図や地形分類図をそれぞれ示す。これらの画像解析の結果を踏まえた地質および地形情報の抽出および地質構造解析を実施し、同地域における新規探鉱有望地域の抽出を試みた。ウガンダ領内の第四系分布域に発達する NE-SW 系リニアメントは、伏在するプロスペクトの伸長方向とも良く一致する(図 F-3-1-2-2)。

研究成果として、良好な衛星画像を揃えることが難しい地域において、ASTER GDEM のように長期間の衛星運用によって整備された標高データや大量に蓄積された PALSAR データが有効に活用できることが分かった。特に、衛星データから作成された標高データの詳細な地形解析から石油探鉱において有益な情報を得られることが確認された。

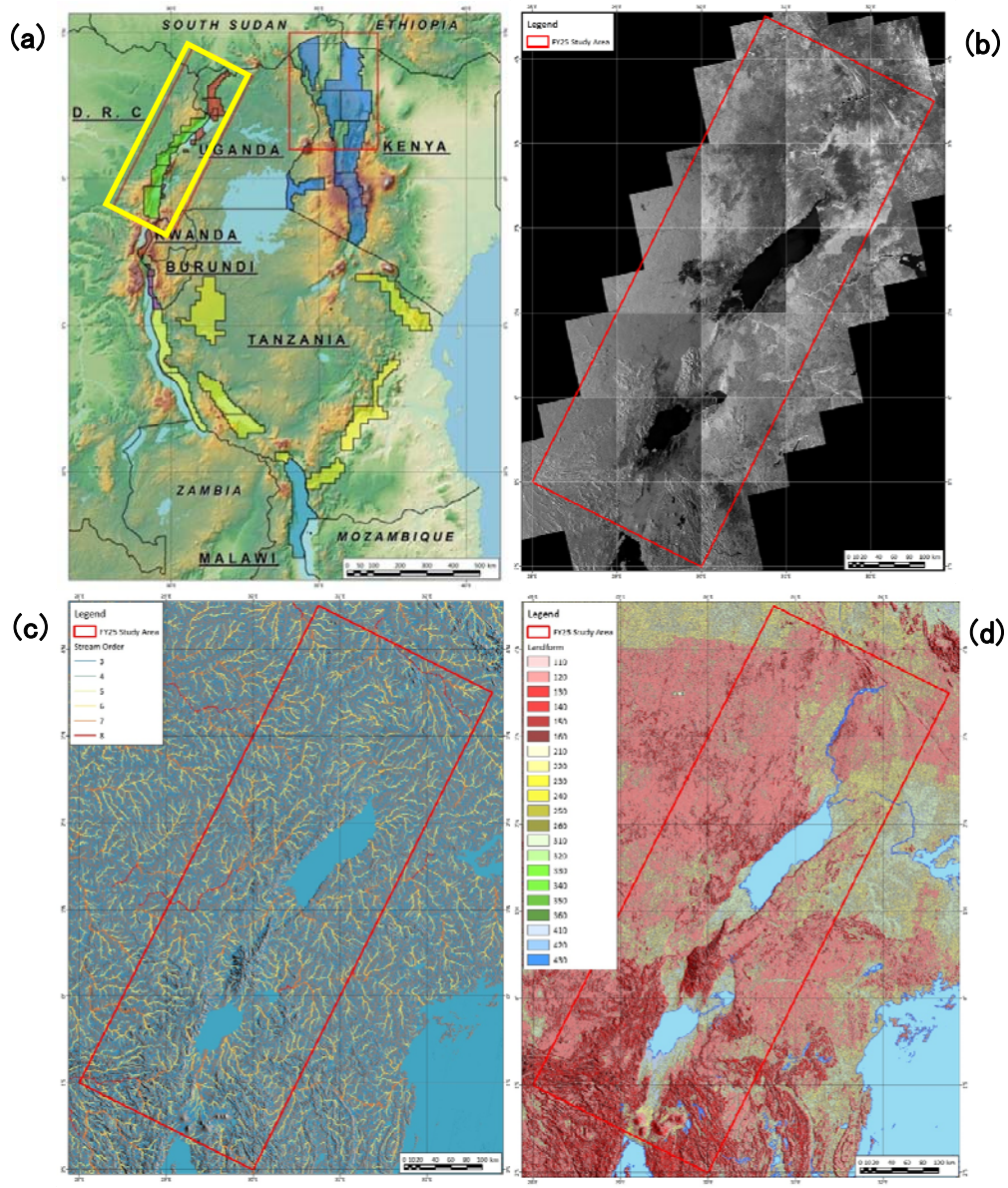


図 F-3-1-2-1　ウガンダ国境のアフリカ大湖沼地域で解析事例、(a)対象位置図（黄色枠）、(b)PALSAR スッタキング処理モザイク画像、(c)擬似水系抽出結果、(d)地形分類図のモザイク画像

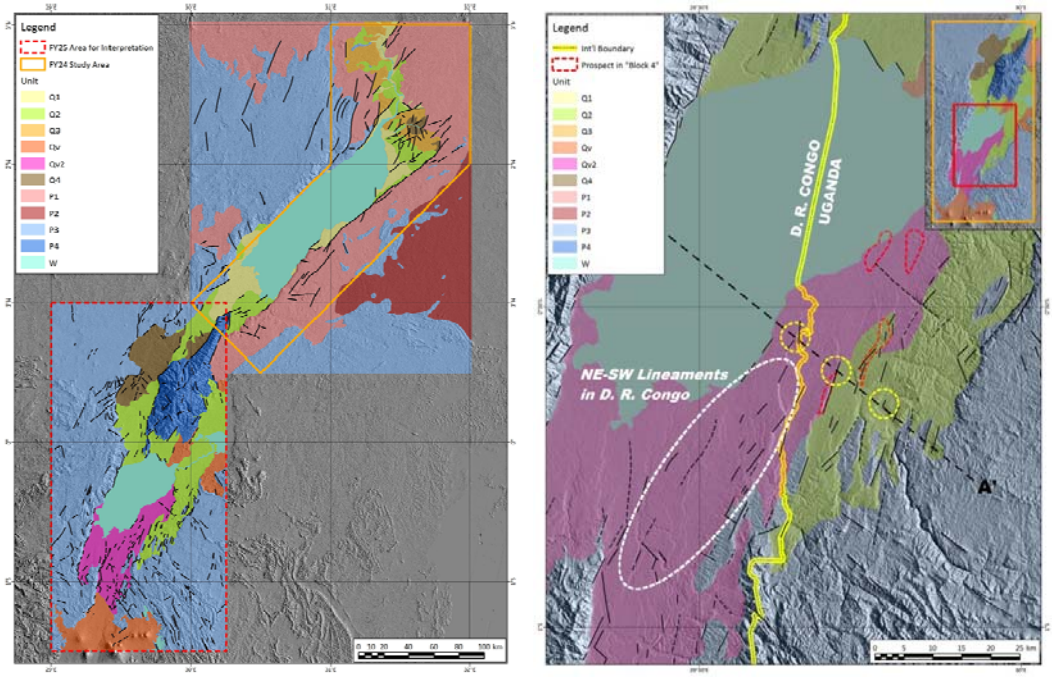


図 F-3-1-2-2　左図：エドワード湖周辺における衛星画像判読結果、右図：プロスペクト（赤色の破線ので囲まれた領域）比較

(ii) 米国におけるシェールガスを対象とした研究事例

非在来型資源の一つであるシェールガスの開発における衛星データの利用法を検討した。図 F-3-1-2-3 に示すように対象地域はシェールガス・オイル含む地層が数多く分布している米国のユタ州東部とした。非在来型資源の開発においては、在来型と異なり油ガスの存在は既知であり、生産性の向上に繋がる開発好適地（スウィートスポット）を見つけることが重要となる。対象地域の ASTER SWIR および TIR 画像から作成したシリカ鉱物、炭酸塩岩、粘土鉱物の 3 種類の鉱物の含有量の指標を示す画像を基に現地で試料の分析を行った所、衛星画像解析によって推定された鉱物組成と、鉱物分析結果には概ね相関があることが認められた（図 F-3-1-2-4、図 F-3-1-2-5）。また、岩石物性試験の結果、シリカ含有量が増すことにより岩石はより「砕けやすい（brittle）」、粘土含有量、炭酸塩含有量が増すことにより「しなやか（ductile）」であることが示された。画像解析によって、対象地域では中央部、西部でシリカ含有量が高く、南西部で粘土含有量が、南西部・東部で炭酸塩含有量が高くなる傾向が認められ、中～西部に「砕けやすい（brittle）」頁岩が分布する可能性が分かった。

研究成果として、シェールガス開発において開発好適地の絞り込みの条件の一つであるシェール層のフラクチャリング[6]に適した「砕けやすい（brittle）」物性の推定に ASTER の鉱物識能力が適用できることが分かった。今後、ますます盛んになるだろう

[6]岩石を粉砕し、地層に亀裂（フラクチャー）を生じさせることで、石油や天然ガスなどの流路を確保し、収率を増加させる手法のこと

と考えられるシェールガスの開発において、衛星データの鉱物識別・同定能力が利用できることが確認できた。

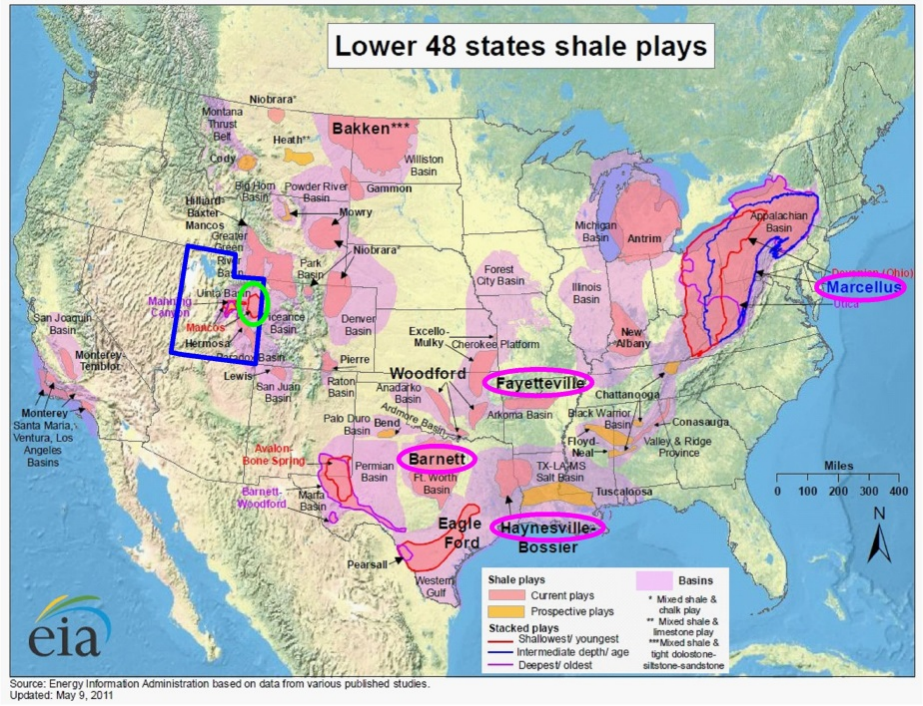


図 F-3-1-2-3　米国におけるシェールガス・オイル開発有望地の分布と研究対象地域の位置（緑色の楕円）

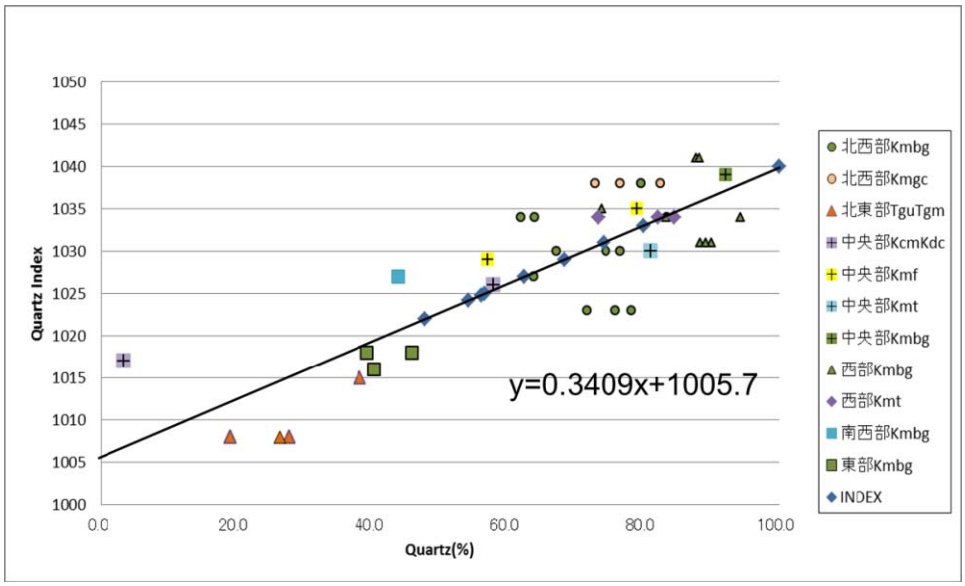


図 F-3-1-2-4　鉱物含有量と鉱物インデックス値の相関の例（Quartz Index）

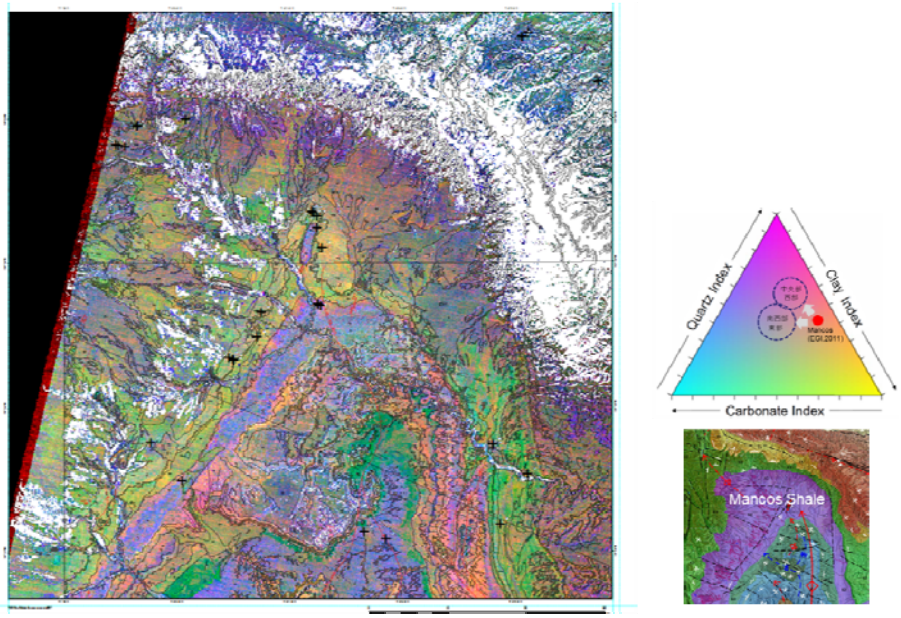


図 F-3-1-2-5　Mancos 頁岩分布域の鉱物分布特性（三色ダイアグラム表示）

(iii) オーストラリアにおけるコールベッドメタンを対象とした研究事例

非在来型資源の一つであるコールベッドメタン開発における衛星データの鉱物識別能力の適用性を検証した。コールベッドメタン開発については、他の２地域で研究を既に行った実績があるが、主に地質構造から開発好適地を絞り込む方法であった。対象地域のオーストラリアのスラット盆地では、コールベッドメタンの開発が盛んに行われ、かつコールベッドメタン開発ターゲットとなっている地層が地表に露出しており、衛星画像解析の検証に適した場所である。スラット盆地おいては、Walloon 亜層群から良質のコールベッドメタンが生産され、開発好適地となっていることが知られている。今回、開発好適地となっている地層にカオリナイトが富むことに着目し、ASTER のカオリナイト指標画像を作成し、Walloon 亜層群と他の層を区分した（図 F-3-1-2-6）。推定された Walloon 亜層群の地表の分布範囲を、広域地質断面および現在の主なコールベッドメタン開発域と併せて考察し、スラット盆地におけるコールベッドメタンの開発好適地を絞り込むことができた。（図 F-3-1-2-7）。

研究成果として、特定の鉱物に富む地層を ASTER で識別し、その分布から開発好適地を絞り込むことができた。コールベッドメタンの開発好適地条件によっては、在来型資源の開発で培った衛星データによる鉱物識別・同定能力が適用できることが分かった。衛星データによる鉱物識別・同定能力は、今後のコールベッドメタン開発における好適敵地の絞り込み方法の一つになり得ることが確認できた。

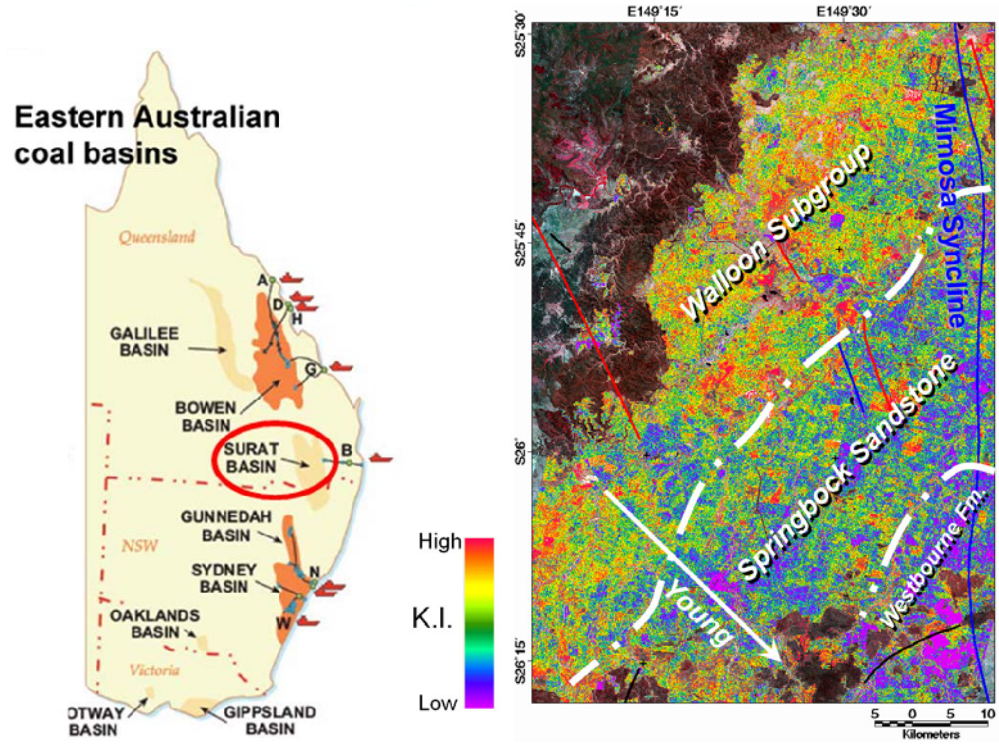


図 F-3-1-2-6　対象位置図（左図）と中西部の Terra ASTER カオリナイトインデックス画像とユニット境界（右図）

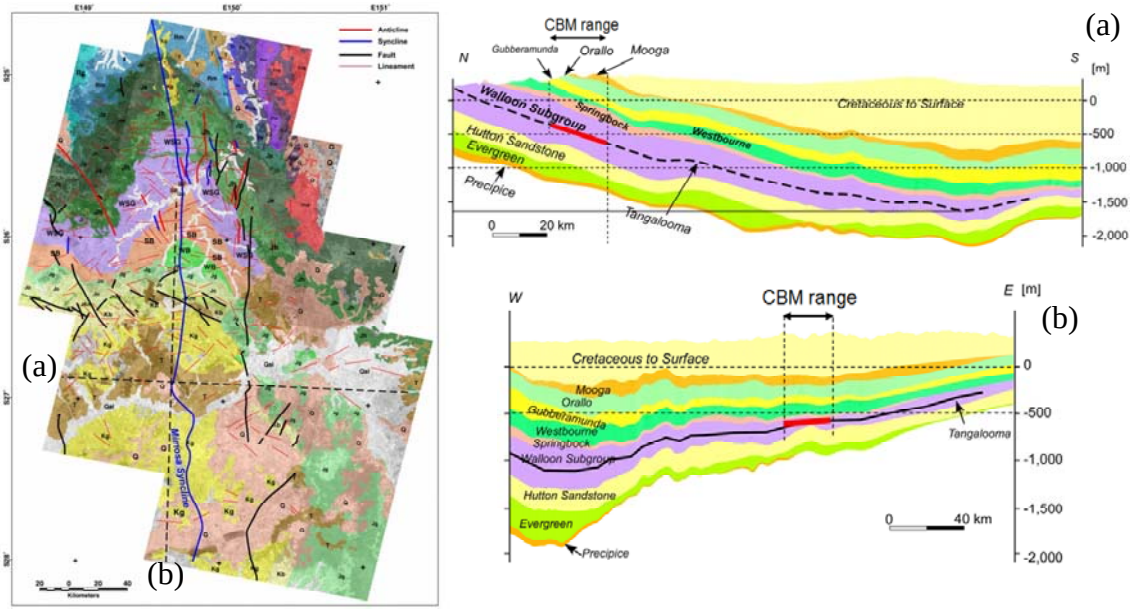
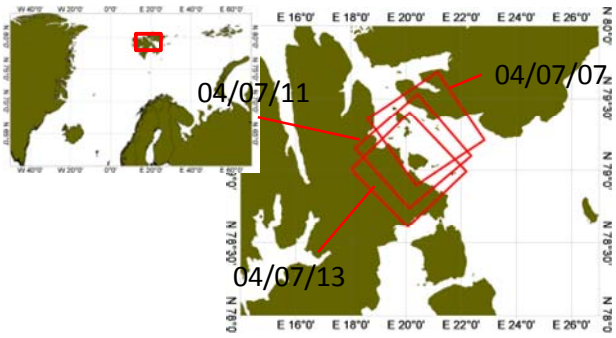


図 F-3-1-2-7　Terra ASTER カオリナイト指標を用いて Injune Creek 層群を細分した地質解析図と断面線（a)と（b）の地質断面図.

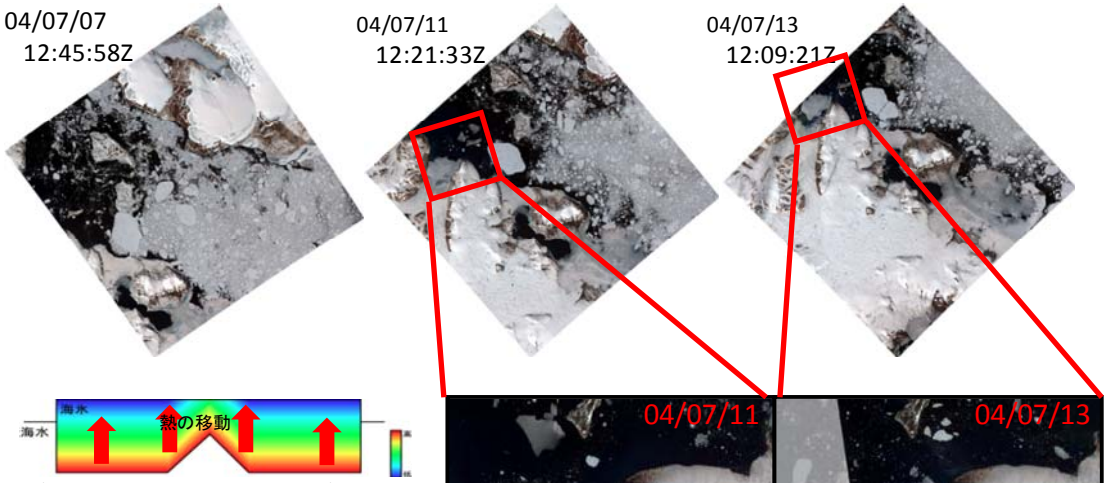
(iv) 北極圏にける海氷モニタリングを対象とした研究事例

開発時の環境監視技術の開発をテーマとして、北極圏における海氷モニタリングを対象とした。米国地質調査所によれば、北極圏は世界の未発見資源量の天然ガスでは 30%、石油でも 13%と多くの未発見資源量が残っていると期待され、今後の石油ガス資源探査の進展が注目される地域の一つとなっている。衛星データは、石油ガス開発段階の海氷モニタリングに貢献できると期待される。石油ガス開発においては、開発計画を立案する上で海氷が存在・消滅する時期を正確に予測することが重要である。しかしながら、自然条件が厳しく、海氷の状態・挙動を継続的にモニタリングすることは難しく、衛星によってその課題を解決できるのではと期待されている。北極圏の衛星による観測は，気象衛星に代表されるように高頻度であるが，低空間分解能の衛星センサによるモニタリングが主流である。低空間分解能衛星センサでは、詳細な海氷の状態・挙動まで把握できず、破砕・衝突によって起こる海氷の消滅メカニズム等が未だ良く分かっていない。そのため、ASTER や PALSAR などの中空間分解能の光学センサや合成開口レーダを利用した海氷の情報を抽出する手法の開発が望まれている。図 F-3-1-2-8 に示すように ASTER 及び PALSAR の時系列データを用いた海氷の変化抽出や海氷表面の温度分布情報を用いた構造的弱線の推定等を試みた。

研究成果として、未だ課題を多く残すが、ASTER 及び PALSAR において得られた中空間分解の画像データからこれまでない情報を得ることができる可能性を得た。但し、中空間分解能画像データでだけでは，観測の頻度や範囲に難点があるため、観測頻度の高い低空間分解能衛星データと併用しながら、興味有る海域をモニタリングする方法が良いとの知見を得ることができた。

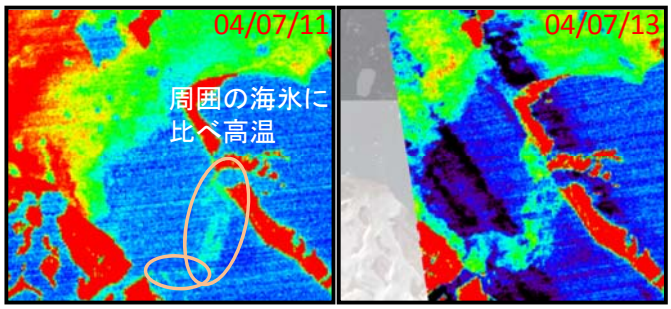


- スバールバル諸島のシーン
- 2004年7月に数日間隔で撮像されたデータが3シーン
- 海氷の縮小・分裂過程を追跡可能



- 海氷厚さの違いにより海氷下の海水からの熱の伝わり方が異なる
- 海水温が高ければ海氷の薄い部分はより高温となる
- 左画像(スバールバル諸島のデータ)で，7月11日の温度プロダクトで周囲より高温となっている部分が2日後に割れている
- しかし，割れる前に温度の変化があるデータはこのデータのみ
- 筋状の温度変化があるが割れないケースは見つかっていない

ASTER VNIR疑似カラー 合成画像 バンド1(B), 2(G), & 3(R)



ASTER TIR 地表面温度画像

図 F-3-1-2-8　ASTER による海氷の時系列モノタリングと海氷表面の温度分布情報を用いた構造的弱線の推定

（イ） 解析アルゴリズム開発

石油ガス資源探査以外の金属資源探査・地球環境・防災等へも応用可能な解析アルゴリズム開発事例を表 F-3-1-2-5 に示す。解析事例は合計で 66 件となり、ASTER 及び PALSAR データによる、衛星データから資源探査に必要な情報を抽出する解析アルゴリズム、及び衛星の利用効果の高い分野における解析アルゴリズムを開発し実用化したと考えられる。表 F-3-1-2-6 に資源、環境、防災における分野の解析アルゴリズム開発事例を紹介する。

表 F-3-1-2-5　ASTER・PALSAR の解析アルゴリズム開発一覧

No.	分野	対象センサ	研究名	研究内容
1	環境	PALSAR	ポラリメトリック SAR インタフェロメトリによるターゲット分類手法に関する検討	従来のポラリメトリック SAR による分類（人工構造物、森林、耕地、裸地等）よりもさらに細かく、高精度にターゲットの分類を行う手法を確立する。
2	環境	ASTER	ASTER データを用いた水質モニタリング技術の研究開発	湖沼の継続的な水質モニタリングにおいて ASTER データを効果的に活用するための手法を確立する。
3	環境	ASTER	衛星データを利用したプラスチック検知技術の実用化への研究開発	ASTER データを用いたプラスチック検知技術を実用化するために、他の廃棄物と混合している場合の抽出手法の開発、海岸での漂着箇所の抽出や山中/河川敷の不法投棄箇所抽出技術の開発を行う。
4	環境	ASTER	熱赤外域 ASTER データを利用した植生マッピング手法の研究	ASTER データ可視域～近赤外域のデータに加え、熱赤外域データをも利用した植生マッピング手法の開発を行う。
5	環境	ASTER	ASTER データによるサンゴ白化現象の監視と検出技術の研究開発	ASTER データ（2B05）を使用したサンゴ白化域の抽出手法の開発を行う。
6	環境	PALSAR	SAR 後方散乱補正による山地林のバイオマス推定	熱帯雨林地域における山地林の後方散乱補正手法を用いた森林バイオマス推定手法の確立を目的とする。
7	環境	ASTER	ASTER による SO_2 ガス濃度解析技術及び高温物質温度解析技術の研究	ASTER TIR データを用いた大気中の高濃度 SO_2 ガス濃度および ASTER SWIR データを用いた地表高温物質の温度（100℃以上)を推定・マッピングするための技術の検討・検証・ツール化する。
8	環境	ASTER	ASTER 画像を用いた時系列高分解能画像データ作成モデルの開発	ASTER の熱赤外域と NOAA（AVHRR)に適用し温度変化を広域かつ時系列に把握するモニタリング手法を検討する。また、都市域および都市周辺域での緑地評価を行うための実利用・産業化を検討する。

9	環境	ASTER, PALSAR	吸収源活動モニタリングのための衛星センサ観測戦略に対する研究開発	京都議定書において規定される植林活動を主対象とし今後産業界等にる吸収源プロジェクトの実施が想定される地域に対し、ASTER および PALSAR により重点的かつ効率的に観測すべき地域の選定を行うアルゴリズムを開発する。
10	環境	PALSAR	PALSAR データによるバイオマスマッピング手法の研究	京都議定書に定められた森林吸収源による炭素固定量を算出する基礎データであるバイオマスを計測するために、PALSAR で取得されるポラリメトリックデータを利用して複層林のバイオマスを計測する手法を研究開発する。
11	環境	ASTER	ASTER データによる金属資源開発に伴う重金属汚染モニタリング手法の技術開発	定常的な観測が可能な ASTER データを用いて鉱山から流出した酸性水による重金属汚染モニタリング手法の開発を行う。
12	環境	ASTER	実利用に即した緑地モニタリング技術の研究開発	ASTER データを用いた緑被率推定アルゴリズムを開発し、緑地分布図、緑被率マップ等主題図を作成し、地方自治体での「緑の基本計画」等の緑地管理を目的とした総合的な緑地モニタリング技術を構築する。
13	環境	ASTER	ASTER データを用いた森林の CO_2 吸収・固定量把握のための基礎パラメータに関する研究開発	衛星データを用いた森林計測のためのパラメータ算出手法の山地や丘陵地等の広域の森林計測への適応を行い、CO_2 吸収・固定量把握事業に応用可能な技術の開発を行う。
14	環境	ASTER	里山放置地域の竹林化の実態および特性把握に関する研究開発	里山の状況を把握・管理するために、ASTER データ（VNIR/SWIR/DEM）を用いた里山の竹林化の面的な分布状況、経年的な変化傾向、および竹林化の特性の把握手法を開発する。
15	環境	ASTER	ASTER データを用いた沿岸環境モニタリング手法の実用化に向けた研究開発	ASTER データを用いた水温情報の作成方法と表示形態について検討するとともに、水温情報の実用化と沿岸環境モニタリングにおいて ASTER データを効率的に活用するための手法を提案する。
16	環境	ASTER	ASTER データを用いたヒートアイランド現象の解析シミュレーションモデルの研究開発	現在用いられている 100m～数 100m 分解能のヒートアイランド対策効果解析用シミュレーションモデルへ ASTER データを取り組み、より高精度なヒートアイランド軽減対策に応用するための技術を開発する。
17	環境	ASTER	ASTER VNIR および SWIR データを利用したマングローブマッピング	ASTER データの VNIR および SWIR の特徴を用いたマングローブ樹種区分図作成手法を開発する。
18	環境	ASTER	デブリ被覆氷河における氷河湖形成位置の予測手法に関する研究	ASTER/DEM データを用いて氷河地形の特微量を抽出し、氷河湖形成場所および決壊の可能性のある氷河の抽出手法を開発し、実利用を念頭においたハザードマップ作成手法に関し検討する。
19	環境	ASTER	水資源探査へのリモートセンシングデータの適用性評価	従来から行われてきた地下水資源探査・開発をより効率良く行う為の実利用可能な ASTER データを中心とした衛星データの利用法とその解析

				手法の開発を行う。
20	環境	ASTER	ASTER データを用いた植林 CDM・モニタリングにおける植生変化解析に関する研究開発	植林 CDM（クリーン開発メカニズム）の地域選定などに用いる為に、ASTER データおよびその他の既存衛星データ等を組み合わせて土地被覆変化に関する情報の抽出を行う手法および将来の土地被覆変化の予測を行う手法を開発する。
21	環境	ASTER	ASTER データの沙漠交錯帯への適用に関する研究	オアシスと沙漠の中間に存在する沙漠交錯帯に分布する植生の種類・密度を把握する技術の開発を行うと共に、オアシス管理に関する政策立案や意思決定のための支援情報の効率的な蓄積・管理手法を検討する。
22	環境	ASTER	ASTER データによる植生被覆地域における油土壌汚染箇所抽出手法の研究開発	植生に覆われた地域での油による土壌汚染個所を把握するために油土壌汚染と植生の関係を衛星データで明らかにする手法の開発を行う。
23	環境	ASTER, ﾊｲﾊﾟｰｽﾍﾟｸﾄﾙｾﾝｻ	マルチスペクトル、ハイパースペクトルおよびレーザースキャナーによる森林計測	ASTERデータによる樹種区分を基準データとし、CASI データを用いた樹種区分を行い森林計測にための樹種区分手法の開発を行う。レーザースキャナーデータを用いた樹高計測および現地調査結果とも併せバイオマスの算出を行う。
24	環境	ASTER	吸収源 CDM プロジェクトの設計・実施における ASTER データ利用技術開発	吸収源 CDM プロジェクト申請に必要なプロジェクト設計書作成を目的とし、ASTER データ等のリモートセンシングデータの適用範囲の検討および処理・解析技術の開発を行う。
25	環境	ASTER	ASTER データを用いた自動地図作成手法の研究開発	ASTER データを用いた、地図に必要な道路網等の線型情報、等高線や土地被覆・土地利用情報を抽出し、それらを組み合わせた実用性のある地図の作成手法を研究開発する。
26	環境	ASTER	中空間分解能衛星データを用いた植林 CDM・モニタリングにおける植生変化解析手法の開発	過年度「ASTER データを用いた植林 CDM・モニタリングにおける植生変化解析に関する研究開発」において開発された植林モニタリングおよび植生状況の将来予測手法の精度向上を図る。
27	環境	ASTER	乾燥地帯を対象とした水資源調査手法の開発	積雪の範囲、融雪水の流路とその季節毎の変動および地形の起伏状況などを衛星リモートセンシングによって抽出・図化することにより、オアシス管理のための政策や対策事業へ利用可能なデータセットの試作を行う。
28	環境	ASTER, ﾊｲﾊﾟｰｽﾍﾟｸﾄﾙｾﾝｻ	植林地域における植生環境情報の抽出技術の開発	植林事業、森林保全において必要とされる植生情報の抽出技術の開発を、植林地を対象にした同期観測により取得された ASTER データと HyMap データおよび現地計測データを用いて行う。
29	環境	PALSAR	衛星搭載型合成開口レーダデータを用いた波浪情報抽出アルゴリズムの開発	波浪予測の高精度・広範囲予測化を行うために、PALSAR 実利用を前提とした、JERS-1/SAR（L バンド）を用いた波浪情報抽出技術の開発を行う。

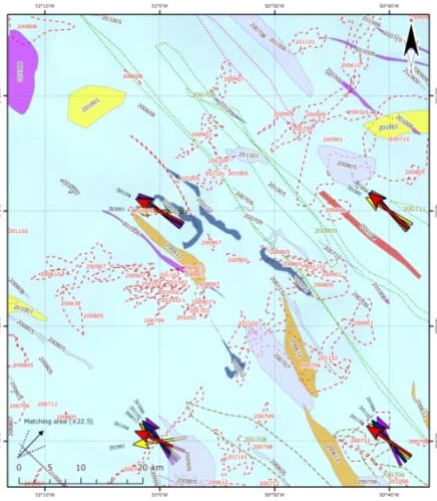
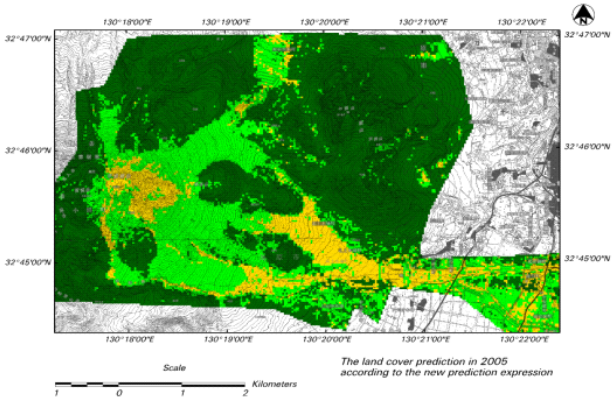
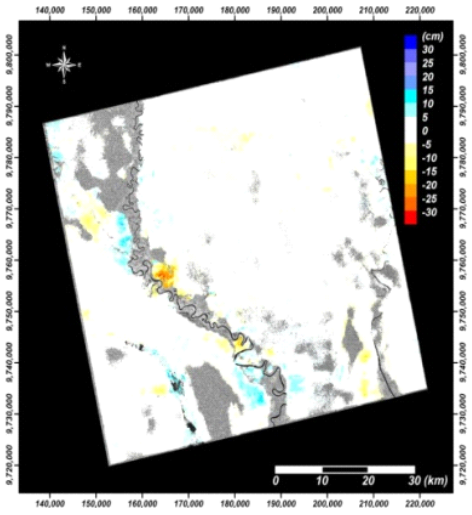
30	環境	ASTER	ASTER 昼夜 TIR 画像による地質情報抽出の検討	夜間 TIR データの精密幾何補正ツールの開発を行い、幾何補正処理の効率化をはかる。また，精密に幾何補正された昼夜 TIR データを用いて得られる鉱床探鉱に有用な地質情報抽出のための手法開発を行う。
31	環境	ASTER	ASTER データを用いた北方林の CO_2 吸収機能評価に関する研究開発	ASTER データを用いた北方林の CO_2 吸収機能評価手法を開発する。
32	環境	PALSAR	PALSAR データによる波高推定アルゴリズムの開発および適用性評価	PALSAR データを用いた波高推定アルゴリズムを開発することを目的とする。この成果により、波浪予測システムの予測精度向上・コスト削減が可能となり、沿岸防災や船舶運行コストの削減へと繋がることが期待される。
33	環境	PALSAR	PALSAR および PRISM による山地林の森林バイオマス推定手法の開発	PALSAR および JERS-1/SAR の SAR データと ALOS/PRISM を用いて山地起伏による高精度後方散乱補正手法の開発により山地林のバイオマス量推定手法の高精度化を目的とする。
34	環境	PALSAR	PALSAR データを用いた地表物識別分類手法の研究開発	PALSAR のフルポラリメトリデータの偏波シグネチャに含まれる地表物の散乱特徴量を利用し，油田開発に伴う環境保全のための植生被覆分類を中心とした地表物の識別手法を開発することを目的とする。
35	環境	PALSAR	PALSAR による熱帯域山地林のバイオマス量推定手法の開発	温暖湿潤～熱帯湿潤地域において，PRISM DEM が利用できない地域でも，SRTM DEM あるいは ASTER GDEM を用いて PALSAR の地形補正を効果的に行い，広域的で汎用的な山地林のバイオマス量推定手法を開発するる。
36	資源	ﾊｲﾊﾟｰｽﾍﾟｸﾄﾙｾﾝｻ	ハイパースペクトルイメージングデータの資源解析への基礎技術の研究	数年後の衛星からのハイパースペクトルデータの利用を見据え、航空機搭載型ハイパースペクトルイメージングセンサーによるデータを使用し、大気補正法など資源解析への利用のための基礎技術研究を行う。
37	資源	PALSAR	マルチパラメータ SAR データによる地表物の識別と分類手法の研究	PALSAR で取得されるポラリメトリデータを有効活用するために、ポラリメトリック・シグネチャに含まれる特徴量を利用して、石油地質のための土地被覆の分類および地表物の識別を行う手法を開発する。
38	資源	ﾊｲﾊﾟｰｽﾍﾟｸﾄﾙｾﾝｻ	ハイパースペクトルデータによる高精度鉱物識別の研究	各種の金属鉱床地帯を対象として、高スペクトル・高地表分解能のハイパースペクトルデータの金属資源探査への適用性評価・特に高精度な鉱物識別について研究する。
39	資源	ASTER	ASTER データによりメタン濃度分布を推定する方法の研究	ASTER データのスペクトル解析を行い、油ガス田に伴い地表付近の土壌中に滲出したメタンを抽出する技術を開発し従来の地表地化学探査に替わりうる技術の開発を行い石油資源探鉱に資することを目的とする。
40	資源	ASTER	超苦鉄質岩を利用した大気 CO_2 の地下貯留サイトの評価に関する研究開発	CO_2 の超苦鉄質岩に伴う炭酸塩への吸着を念頭に置いた ASTER データを用いた適地抽出技術の開発を行う。

41	資源	ASTER, ﾊｲﾊﾟｰｽﾍﾟｸﾄﾙｾﾝｻ	HyMap および ASTER データを利用した鉱物マッピング技術の開発	後退変質を受けた高変成相の岩石分布域で HyMap と ASTER を相補的に用い、鉱物マッピングを効率良く行う為の手法の開発を行う。
42	資源	ASTER	乾燥域における ASTER データによる高感度鉱物同定手法の開発	ASTER センサの持つ性能を最大限に生かした、探鉱制度および効率の向上等実利用を目的とした乾燥域における高感度鉱物同定手法の開発を行う。
43	資源	ASTER	ASTER DEM による構造の3次元解析手法の開発	ASTER プロダクツの DEM の地形特徴に基づいた補正手法の開発、および地形特徴を利用したリニアメントを制度良く自動抽出し、断裂系の三次元的な解析を行う手法を開発する。
44	資源	PALSAR	石油資源胚胎地域における多偏波 SAR データを用いた地質情報抽出技術の研究	過年度 JERS-1 データ等の成果をもとに石油資源胚胎地域における地質情報抽出に適した多偏波 SAR データ利用方法とその地質情報抽出能力の検証と PALSAR の多偏波 SAR データによるより高精度な地質情報抽出技術の開発を行う。
45	資源	ASTER	TIR データによる鉱床探査地域選別手法の研究	過年度「乾燥域における ASTER データによる高感度鉱物同定手法の開発」にて開発した鉱物同定手法に加え、TIR を用いた鉱床形成に伴う珪化岩体や変質体中のシリカ含有量変化を抽出する手法の開発を行う。
46	資源	ASTER	ASTER データを用いた斜面防災支援技術の研究開発	道路、パイプラインや施設等の建設計画時のルート選定や適地選定や崩壊危機斜面への対策工事の実施などを支援する目的で、潜在的な崩壊危険斜面の抽出手法を開発する。
47	資源	ASTER, PALSAR	ASTER・PALSAR データによる地質解析情報のフュージョン（融合）技術の研究	ペルー中部における石灰岩分布域を対象に, ASTER および PALSAR データを効果的に組み合わせた地質解析を実施することにより, 変質鉱物抽出手法の研究開発を目的とする。
48	資源	ASTER	インドネシアにおける石油代替エネルギーの潜在性評価に関する研究開発	インドネシアを対象国とし、バイオ燃料資源の安定供給のため、ナンヨウアブラギリの栽培候補地の選定技術開発および評価を行う。
49	資源	PALSAR	ALOS PALSAR インタフェロメトリを用いたシベリアガス田地域の地殻変動モニタリング	シベリア北部のガス田地域の地盤変動モニタリングにおける PALSAR データの有効性を検証する。
50	資源	PALSAR	熱帯雨林地域の石油開発に係わる PALSAR 差分干渉技術の適用	植生被覆地域における処理結果の向上を目的として, 熱帯雨林地域に位置する生産中の油ガス田周辺を対象とする PALSAR データの差分干渉処理解析を実施する。
51	資源	PALSAR	スリナム～ブラジル北部沖合におけるスリック抽出とオイルスリック判別手法の検討	スリナム～ブラジル北部沖合海域を対象に, PaGOSS を用いたオイルスリック解析を主体とする石油探鉱ポテンシャル評価を行う。昨年度までに抽出したスリックから自然滲出に伴うオイルスリックを効率的に判別する手法について検討する。

52	データ処理	PALSAR	差分干渉 SAR を利用した局所的地表変動の監視に関する研究	差分干渉 SARによる変動検出を実用化させるためには、位置のみならず局所的地表変動の範囲や進行状況を精度よく把握する必要がある。変動が確認されている地域を対象として精度向上のための応用技術開発を行う。
53	データ処理	PALSAR	SAR 後方散乱補正処理手法の開発	山地における SAR 後方散乱補正手法を開発し、当手法による実用ソフトウエアを開発する。
54	データ処理	PALSAR	差分干渉における大気遅延補正手法の検討	国土地理院が全国に設置している電子基準点等を利用し、差分干渉の誤差となる大気遅延を補正し、精度よい差分干渉の結果を得る。
55	データ処理	PALSAR	差分干渉 SAR を用いた地盤沈下地域の高精度モニタリング	既存の差分干渉手法の問題点を洗い出し、それを元に定量的な判断を処理に反映させるような新たな DinSAR アルゴリズムの開発を行う。
56	データ処理	PALSAR	マルチバンドポラリメトリック SAR インタフェロメトリ応用手法の研究	SIR-C のマルチバンド SAR データ(L バンドおよび C バンド)を用い、ポラリメトリック SAR インタフェロメトリの応用手段の開発と検証を行う。
57	データ処理	PALSAR	PALSAR 干渉処理を用いた高緯度地域における DEM 作成技術の研究開発	高緯度地域(北緯 60 度以北)の ASTER GDEM を補完するため、PALSAR 干渉処理による DEM 作成技術を開発し、標高および空間分解能の精度を評価する。
58	データ処理	PALSAR	SAR における多偏波・多周波数解析利用技術の研究	L バンド SAR と X バンド SAR をそれぞれ個別に解析した結果と多偏波・多周波(融合解析)した結果を比較し，融合性解析の有効性を検証する。
59	防災	PALSAR	差分干渉 SAR の高精度処理技術の開発	既存の SAR による差分干渉技術の問題点を洗い出し、それに伴って差分干渉アルゴリズムの開発を行い、最終的に高精度の地盤沈下モニタリングに適用する。
60	防災	ASTER	フィリピン(東南アジア島弧変動帯)におけるリモートセンシングによる資源・環境情報抽出技術の研究	東南アジア島弧変動帯の典型であるフィリピン諸島を対象地域として、ASTER データを使用し地熱探査のための応用技術の開発及び火山域の熱分布のモニタリング・防災への応用技術の開発を行う。
61	防災	PALSAR	差分干渉 SAR を用いた地盤沈下地域の高精度モニタリング	既存の差分干渉法の問題点を洗い出し、それを元に定量的判断を処理に反映する新たな差分干渉のアルゴリズムの開発を行う。また、現在地盤沈下が進行している地域に対して適応し面的な変動の高精度な抽出が可能か評価する。
62	防災	ASTER	ASTER データを用いた内水氾濫対策事業のための土地条件データ整備に関する検討	内水氾濫対策を立案するための土地条件の広域調査手段を検討する。浸透/不浸透域の区分、時系列変化等の土地被覆条件および内水氾濫時の水の溜まりやすさの評価のための地形条件の抽出方法等を開発・検討する。

63	防災	ASTER	ASTER 画像データを用いる洪水予測システムの研究開発	洪水予測システムの構築に対し必要となる入力情報を ASTER データから抽出する手法の研究開発を行う。その結果抽出された情報を用いた洪水モデルを開発し抽出手法および抽出情報の有効性を評価する。
64	防災	ASTER	ASTER データを用いた地滑り・斜面崩壊危険箇所推定手法の開発	ASTER データより抽出した地滑り・斜面崩壊に関連する情報データとした詳細解析対応地域を絞り込むための「決定木」を用いた地滑り、斜面崩壊に対応可能な危険箇所推定手法の開発を行う。
65	防災	ASTER	極低平地における環境影響評価手法の開発	極低平地における開発等に資するために、衛星データを用いた主として洪水等の自然災害による流域環境に与える影響評価手法の開発を行う。
66	防災	PALSAR	インドネシア・中部カリマンタン州における干渉 DEM 作成および地表面変位計測	PALSAR データを用いた干渉処理により，稜線・谷線の位置精度が高い DEM を作成する。 PALSAR および TerraSAR-X データを用いた差分干渉解析により，中部カリマンタンの州都 Palangkaraya 周辺の地表面変位計測を行う。

表 F-3-1-2-6　開発した解析アルゴリズム事例

分野	研究名	事例
資源	スリナム～ブラジル北部沖合におけるスリック抽出とオイルスリック判別手法の検討	 形状で判別したオイルスリック分布図 （破線:除外されたオイルスリック）
環境	中空間分解能衛星データを用いた植林CDM・モニタリングにおける植生変化解析手法の開発	 ASTERのミクセル分解による高精度 植生被覆分類手法を用いた土地被覆予想図
防災	インドネシア・中部カリマンタン州における干渉DEM作成および地表面変位計測	 PALSARで作成した高精度DEMから 得られた地盤沈下の変動量推定図

②ASTER 及び PALSAR 地上システム運用の成果

（ア） ASTER 地上システム運用成果

(i) 観測計画作成

ASTER は資源ユーザ、サイエンスユーザ、及び一般ユーザからの観測要求を最適化して、日単位の観測計画を作成し、NASA へ送信した。ここでは、長期的な観点からのセンサ機能（ポインティング回数等のリソース残量）、様々な観測要求の達成度、全球の観測状況（時期、地域、雲量等）を総合的に考慮しており、年一回開催される日米 ASTER チームによるミッション運用（長期観測計画）協議において観測計画と実績を評価し、次期一年間の長期観測計画に反映している。現段階でほぼ全球陸域の観測実績があり、サイエンスユーザから運用に対して高い評価を得ている。直近 4 年間においては、観測回数の少ない極域や被雲率の高い熱帯雨林地域や、あるいは、ごく一部の未観測地域に対しては、優先した観測計画を立案している。また、ASTER GDEM Ver.3 作成のための観測計画を策定し、新規データを取得して、ASTER GDEM Ver.2 のデータ欠損域の補完を行った。

(ii) 観測データの入手・保存

ASTER の観測データは全量入手し、その原データは次世代アーカイブシステムに保存した。打ち上げ以降、平成 26 年度(2014 年度)末までの総観測数は約 275 万シーンであり、平成 23 年度（2011 年度）から 26 年度の観測数は約 77 万シーン、1 日あたりの観測シーンは約 530 シーンが実績である。

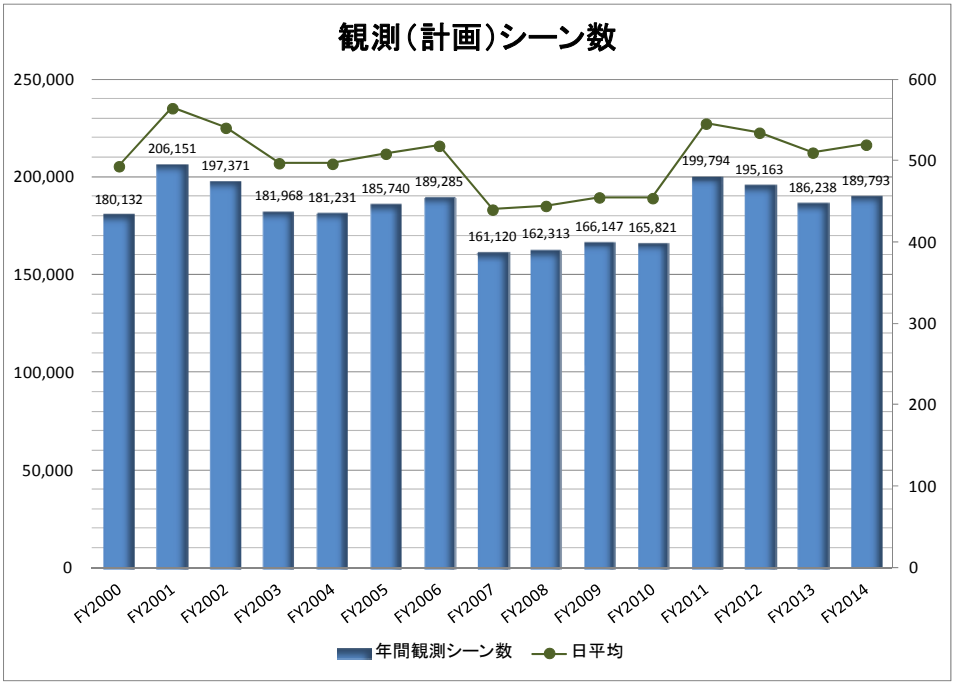


図 F-3-1-2-9 ASTER 年間観測シーン数の推移

(iii) 標準処理・高次処理実績

標準処理・高次処理のプロダクト生産については、基本となるL1A処理は観測データの全量の処理がされている。L1A以降の高次処理については、オンデマンド方式でユーザ要求受付後速やかに処理を行い、ユーザへのタイムリーな提供が実現している。平成23年度(2011年度)～26年度(2014年度)の4カ年の累積L1A処理シーン数は約76万シーン、1日の平均処理数は約520シーンである。

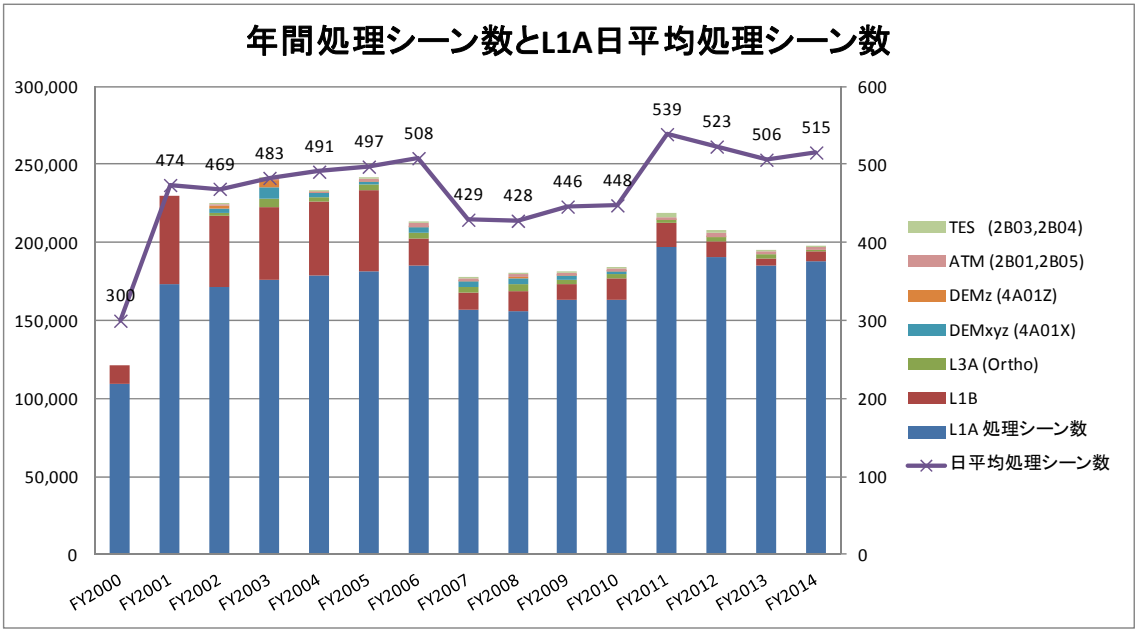


図 F-3-1-2-10 ASTER 年間処理シーン数の推移

(iv) 一般観測要求(GPR)の実績

ASTERでは、一般ユーザからの観測要求を観測全体リソースの10%以下の範囲内で受け付けている。これは、ユーザからの観測要求受け入れ後3カ月間、被雲率 20%以下のデータ取得ができるまで観測を繰り返すもので、直近の4ヵ年の観測成功率は、平均して 40%前後を維持している。一般観測要求はユーザ自身が、観測可能な時季を理解しながら要求を出すことができるため、特定の時期・場所の観測が必要なユーザへの利便性を図っている。

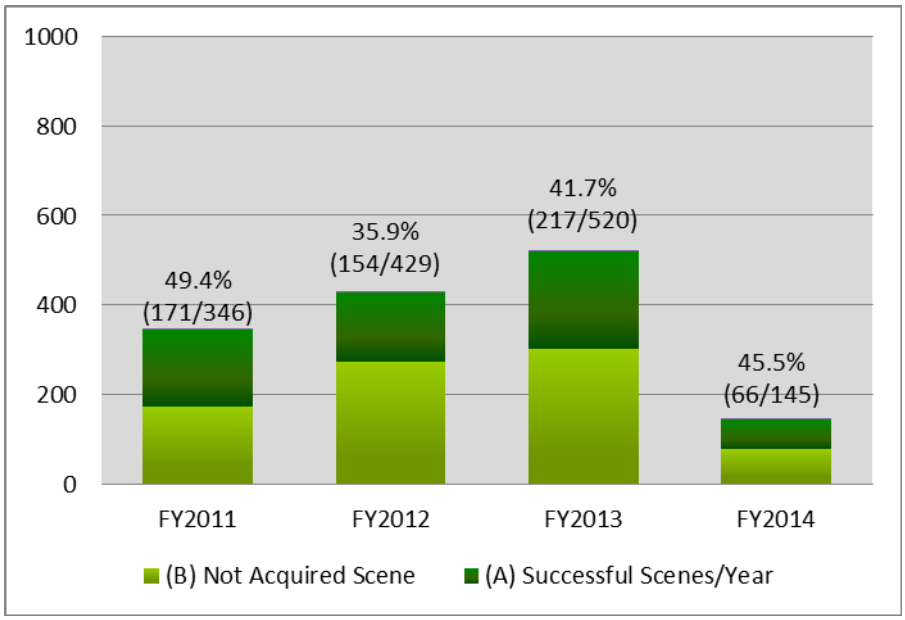


図 F-3-1-2-11　過去 5 カ年の一般観測要求による観測結果
（要求シーン数：棒グラフ全体、観測成功シーン数：棒グラフ上部）

(v) 配付実績

ASTER 地上システムからデータ配付（無償：サイエンスユーザ配付及び有償：一般ユーザ配付）を行っている。ユーザへの配付シーン数目標を 5 万シーンとし、平成 26 年度（2014 年度）末時点で、運用開始から累計約 28 万シーン、平成 23 年度からの 4 年間で累計約 6.9 万シーンを配付しており、目標を達成した。

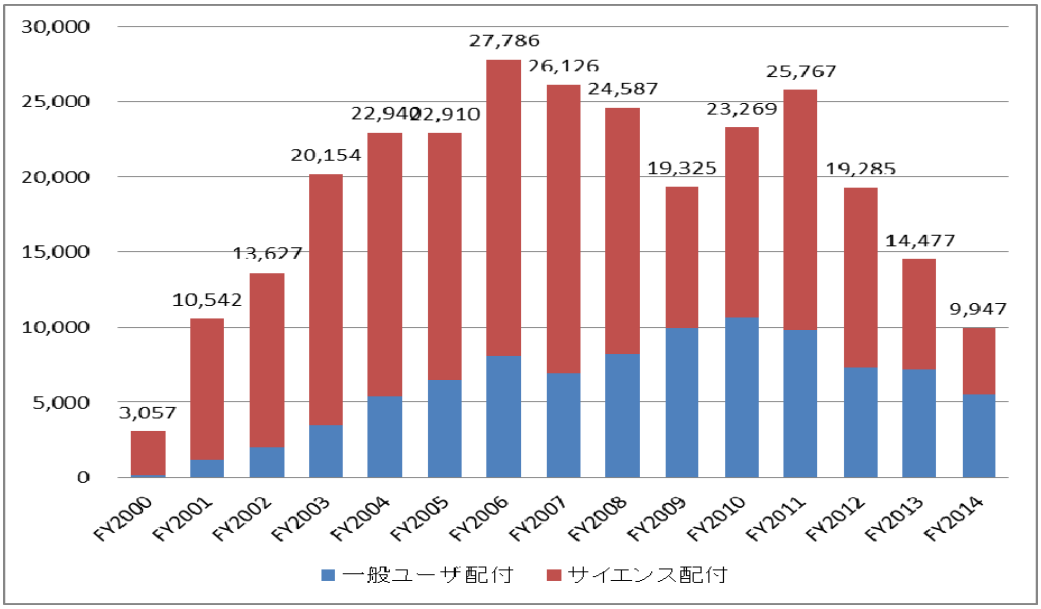


図 F-3-1-2-12　ASTER 配付数（有償配付と無償配付）

なお、有償配付のうち、資源ユーザと非資源ユーザへの配付状況を図 F-3-1-2-13 に示す。

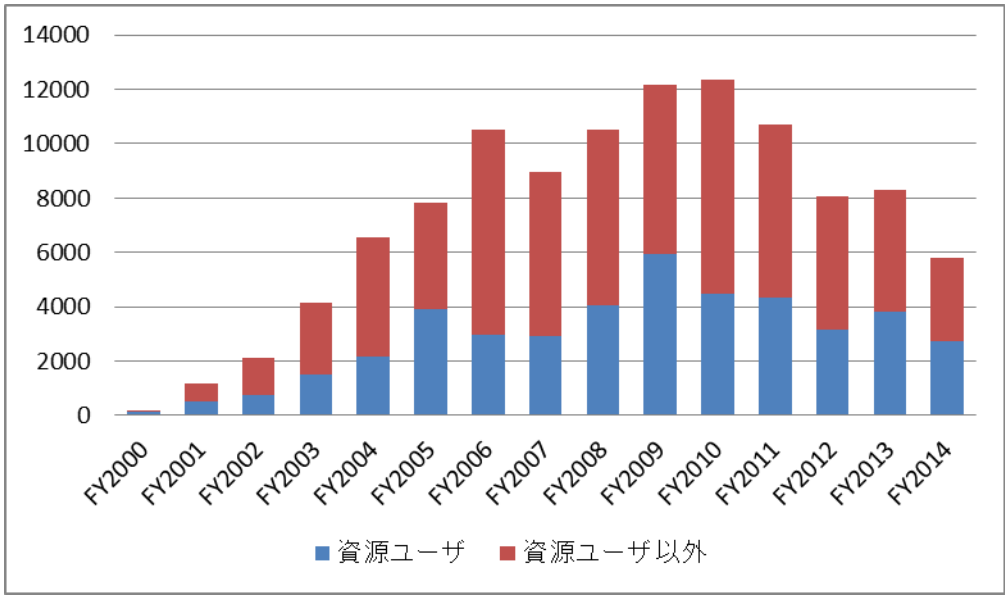


図 F-3-1-2-13　資源ユーザと非資源ユーザへの有償配付数（年間総計）

また、有償配付を受けたユーザの所属カテゴリ毎の配付シーン数を図 F-3-1-2-14 に示す。分類中、「地質・資源」および「国・自治体・特殊法人」のうち資源系組織への配付数を合算したものが、上記資源ユーザへの配付数となる。

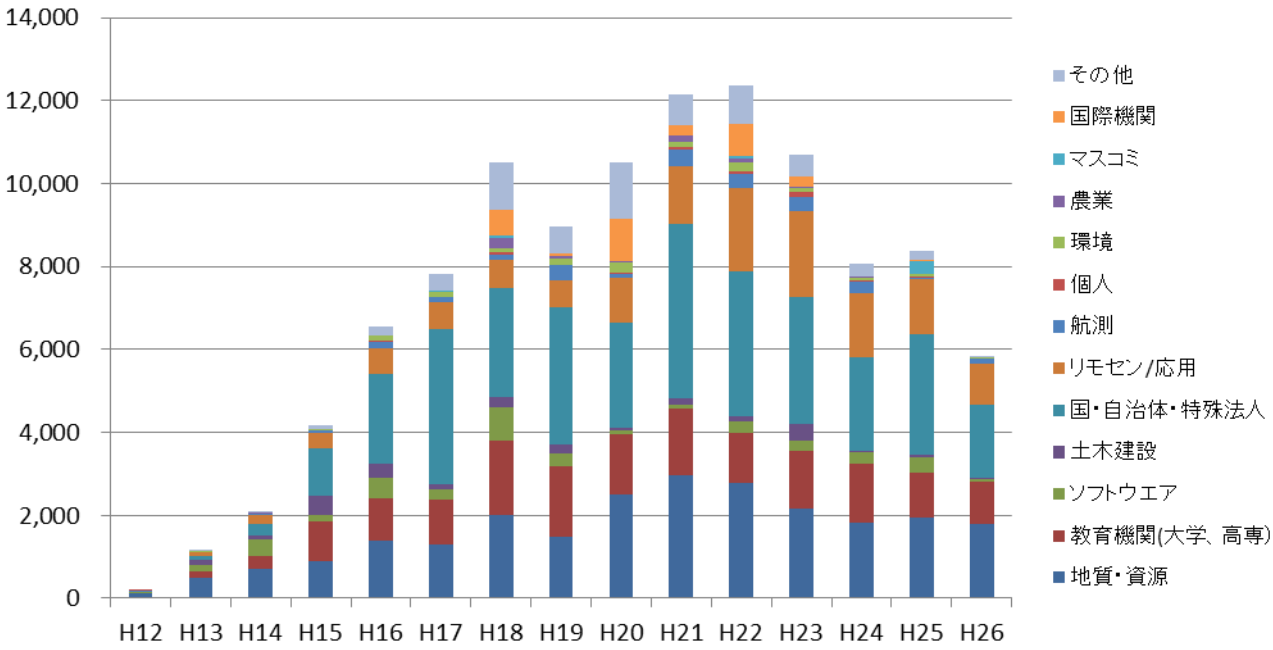


図 F-3-1-2-14　登録ユーザの所属分野で分類した配付数

(vi) ASTER GDEM 配付実績

ASTER GDEM の平成 23 年度(2011 年度)～26 年度(2014 年度)の累積配付数は約 1,044 万タイル(タイルは 1° x 1° (赤道付近で 110 Km x 110Km)のエリアに 30m x 30m グリッドで標高値を定義したデータファイル)を配付した。ダウンロードしたユーザ数は、総計約 18 万ユーザであり、その利用分野(GEO/GEOSS[7]の 9 分野で分類)の内、資源関係は全体の約 14%である。全体的には、災害、環境、水関係がトップ3の利用分野である。

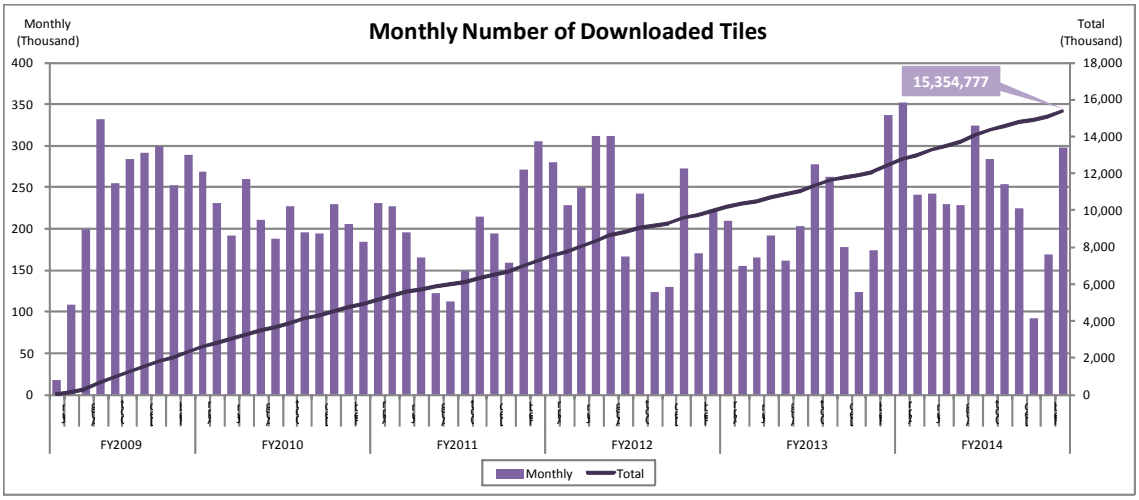


図 F-3-1-2-15 ASTER GDEM の毎月のダウンロードタイル数

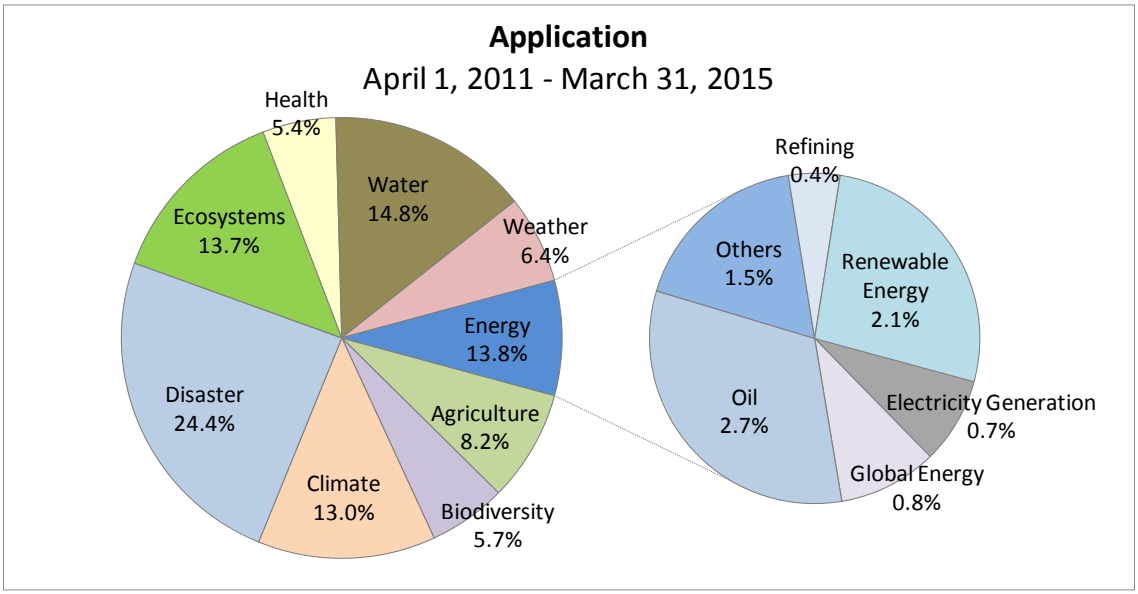


図 F-3-1-2-16 利用分野(GEO/GEOSS の 9 分野)

[7] GEOSS:衛星データ及び地上観測データを統合した地球規模のシステム

（イ） PALSAR 地上システム運用

PALSAR は平成18年1月の打ち上げ後順調に観測を続け、定常運用期間の 5 年を無事に終了し、その後も観測を続けたが、平成 23 年 4 月 21 日に衛星の電源障害が発生し、5 月 12 日に運用停止となった。地上データシステムはハードウェアを含むシステムの更新・改良を適宜実施し、ユーザの利便性の向上や利用要求に答えるため、検索・注文機能の改良やプロダクトの拡充を行った。

(i) 観測計画作成

PALSAR は当初作成した基本観測計画の達成度を考慮し、適宜見直しを行った結果、84%以上の観測を達成している。短期計画は資源ユーザ、利用研究等からの要求を取りまとめ、1 週間に1回 JAXA への提出を実施した。

なお、PALSAR の観測計画は JAXA 及びデータ利用機関と共同で策定しており、多くの観測要求は共通観測として取り扱われてきた。経済産業省が特定した観測対象域は図 F-3-1-2-17 に示すとおりである。平成 23 年の全球の観測状況は図 F-3-1-2-18 の PALSAR カバレッジマップに示すように、陸域堆積盆、海域堆積盆を含む経済産業省の観測対象の何れでもほぼ 100%のデータが取得されており、利用技術研究において活用されている。

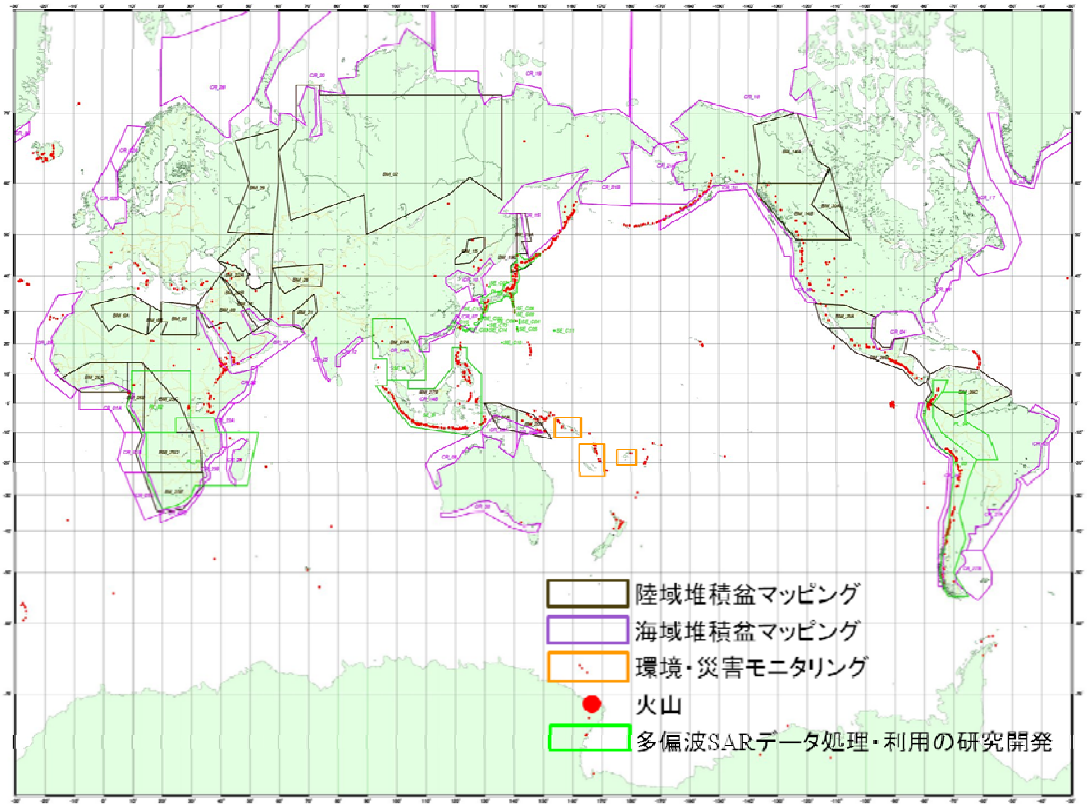


図 F-3-1-2-17 PALSAR 観測計画対象地域（堆積盆等）

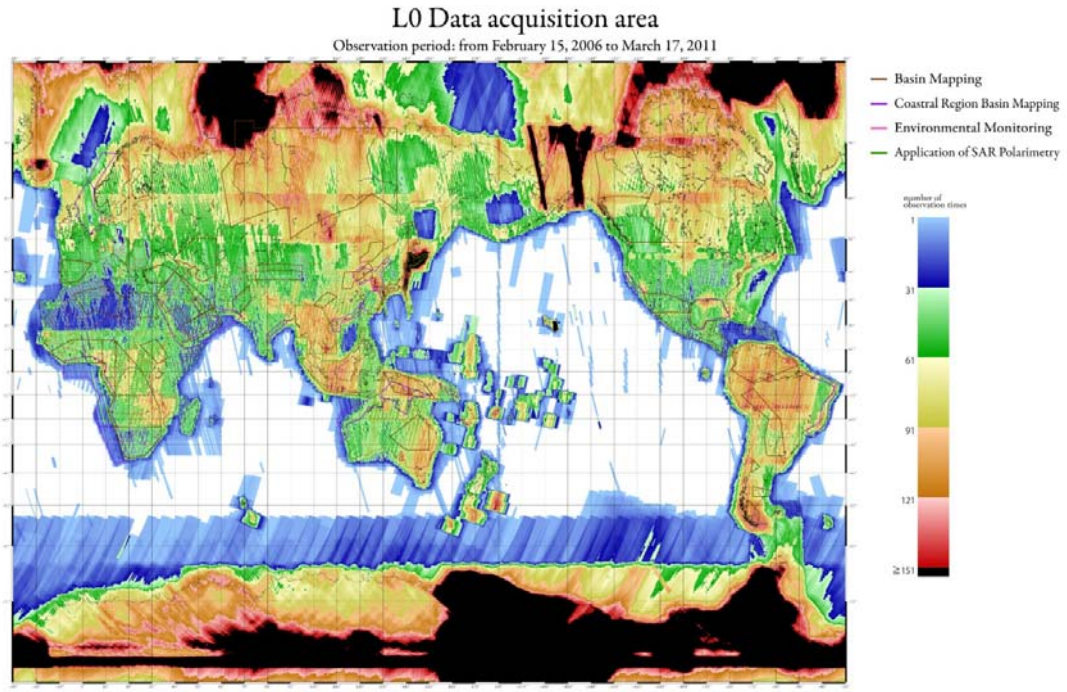


図 F-3-1-2-18　PALSAR 全球観測状況（平成 23 年観測終了まで）
（青→黄→赤→黒　の順で観測頻度が高くなる）

(ii)　観測データの入手・保存

図 F-3-1-2-19 に ALOS 打ち上げからの年度別 PALSAR 観測数の推移を示す。打ち上げ当初は観測データの一部入手としていたが、平成 20 年度から観測データの全量を保存した。平成 26 年度末時点で JAXA が ALOS の海外受信ノードから未入手のデータを除く観測データ約 302 万シーンの入手・保存を完了した。

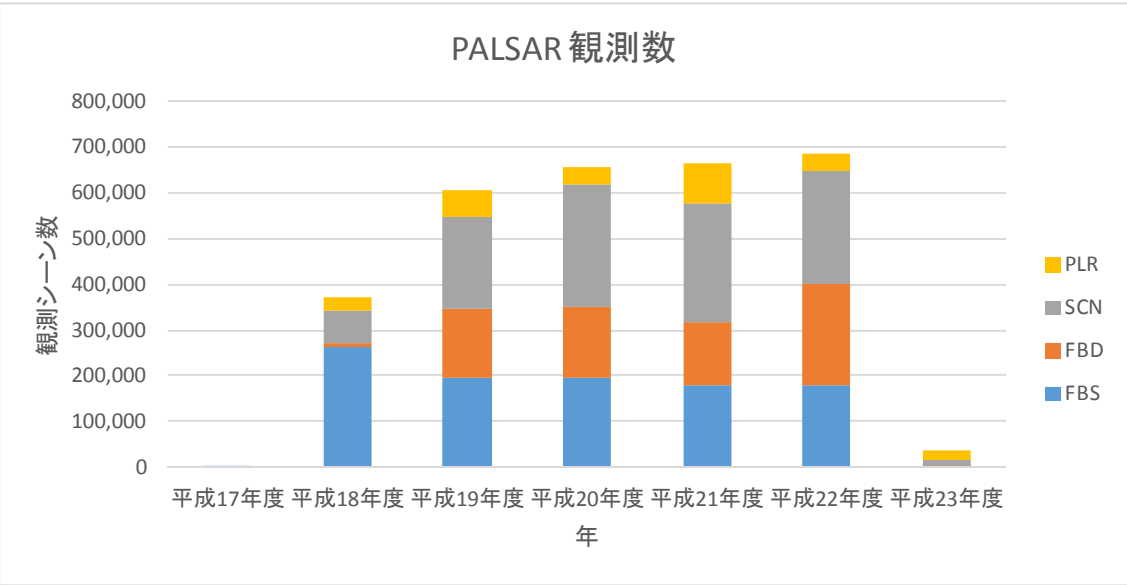


図 F-3-1-2-19　年度別 PALSAR 観測数の推移

（平成 23 年 4 月 21 日(UTC)電源障害により ALOS 運用停止。以降観測なし）

(iii) 標準処理・高次処理実績

PALSAR の全量について標準処理として L1.0 処理を行い、検索に必要なブラウズ等の作成を実施した。さらに、高次処理として、干渉処理に必要な L1.1、画像判読用の L1.5、ScanSAR プロダクト L4.1、偏波プロダクト L4.2 については、ユーザ要求にもとづきオンデマンド方式で処理した L1.1、L1.5、L4.1 及び L4.2 の累計の生産数は約 83 万シーンである。このうち、高次処理プロダクトの L1.1、L1.5、L4.1 及び L4.2 について、平成 23 年～平成 26 年度の日平均処理数は約 225 シーンである。

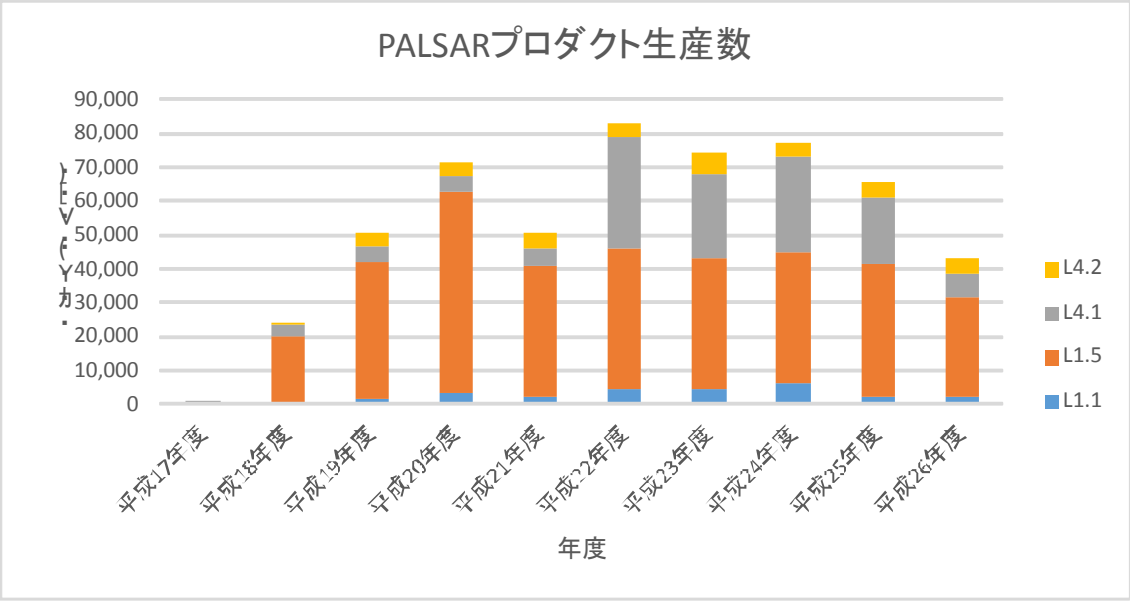


図 F-3-1-2-20 年度別 PALSAR プロダクト（L1.1、L1.5、L4.1、L4.2）生産・保存シーン数の推移

(iv) 配付実績

ユーザへの配付シーン数目標を 5 万シーンとし、平成 26 年度（2014 年度）末時点で、運用開始から累計約 26 万シーン、平成 23 年度からの 4 年間で累計約 16 万シーンを配付しており、目標を達成した。平成 22 年度から平成 25 年度までの間、金属鉱物資源探査用支援システムにおける PALSAR 全球シームレスモザイク画像作成のため、配付数の大幅増がみられた。平成 23 年 5 月の ALOS 運用終了に伴い、外部ユーザへの配付は平成 26 年 11 月を以って終了した。

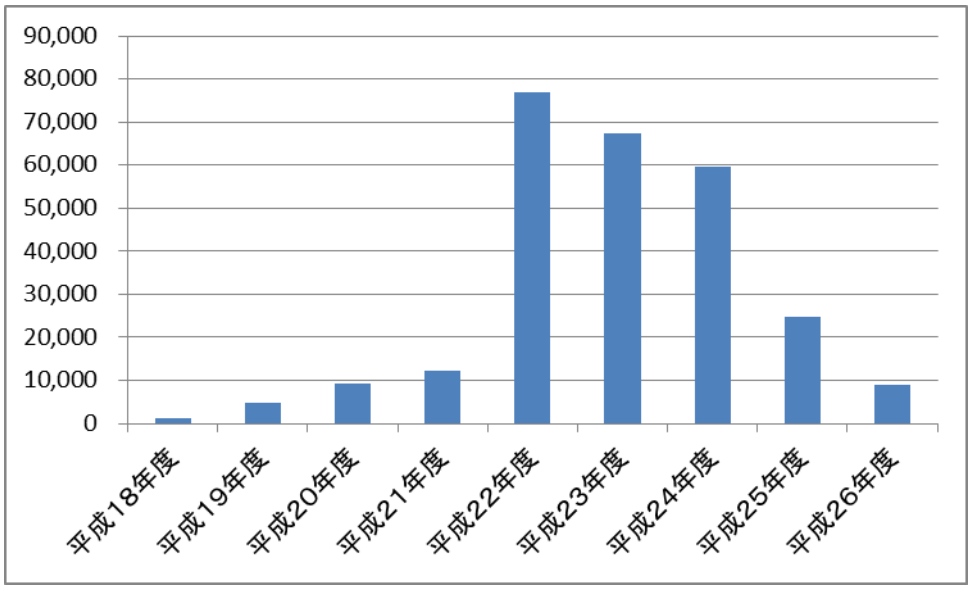


図 F-3-1-2-21　年度別 PALSAR プロダクト配付数の推移

（ウ） ASTER 品質管理

ASTER 品質管理にかかる幾何精度検証、機上校正、代替・相互校正、および処理アルゴリズム・パラメータの更新を実施した。

(i) 幾何補正精度検証

ASTER 幾何補正の精度検証として、ASTER 単シーンの DEM データおよびオルソ画像データの二種類のデータによる定期検証作業を実施し、評価した。シーン DEM による検証は、新規に観測された ASTER 単シーンより作成した DEM について、国内の検証地域について、既存の高精度 DEM（国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ標高）との比較による DEM 精度評価を実施した。オルソ画像データによる検証は、国内（筑波、富士山、木曽駒ケ岳、佐賀，雲仙、阿蘇）および海外（米国およびオーストラリア）の GCP(Ground Control Point)整備地域を対象として、GCP との画像マッチングによる精度評価を実施した。

これらの結果、幾何 DB バージョン 3.01 が適用されて以降は、水平方向および高さ方向の精度は正常の範囲内（水平方向の誤差±50m 以内、高さ方向の誤差±30m 以内）にあり、問題のないことを確認した。

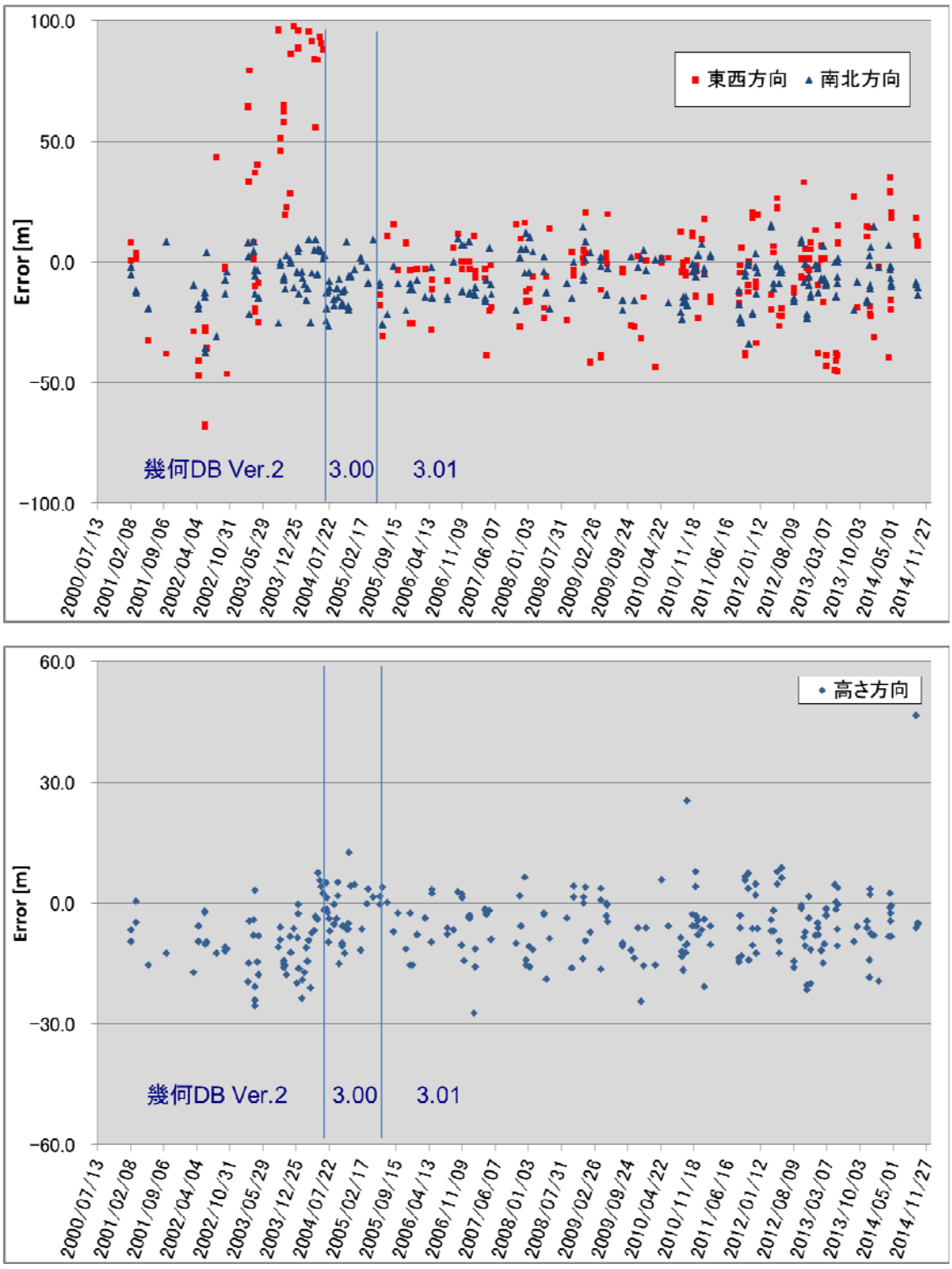


図 F-3-1-2-22　シーン DEM およびオルソ画像データの位置誤差検証結果
（上：水平方向精度、下：高さ方向精度）

(ii) 機上校正

ASTER に搭載された機上標準放射源を用いて定期的に校正を実施、その VNIR

及び TIR センサに感度劣化が観測された。当初は 3 ヶ月に一度の係数変更を計画していたが、変更の遅れが無視出来なくなり、モデルを用いた近似式を導入した。その結果、可視近赤 2%以内、熱赤外±1 度以内の精度を維持している。

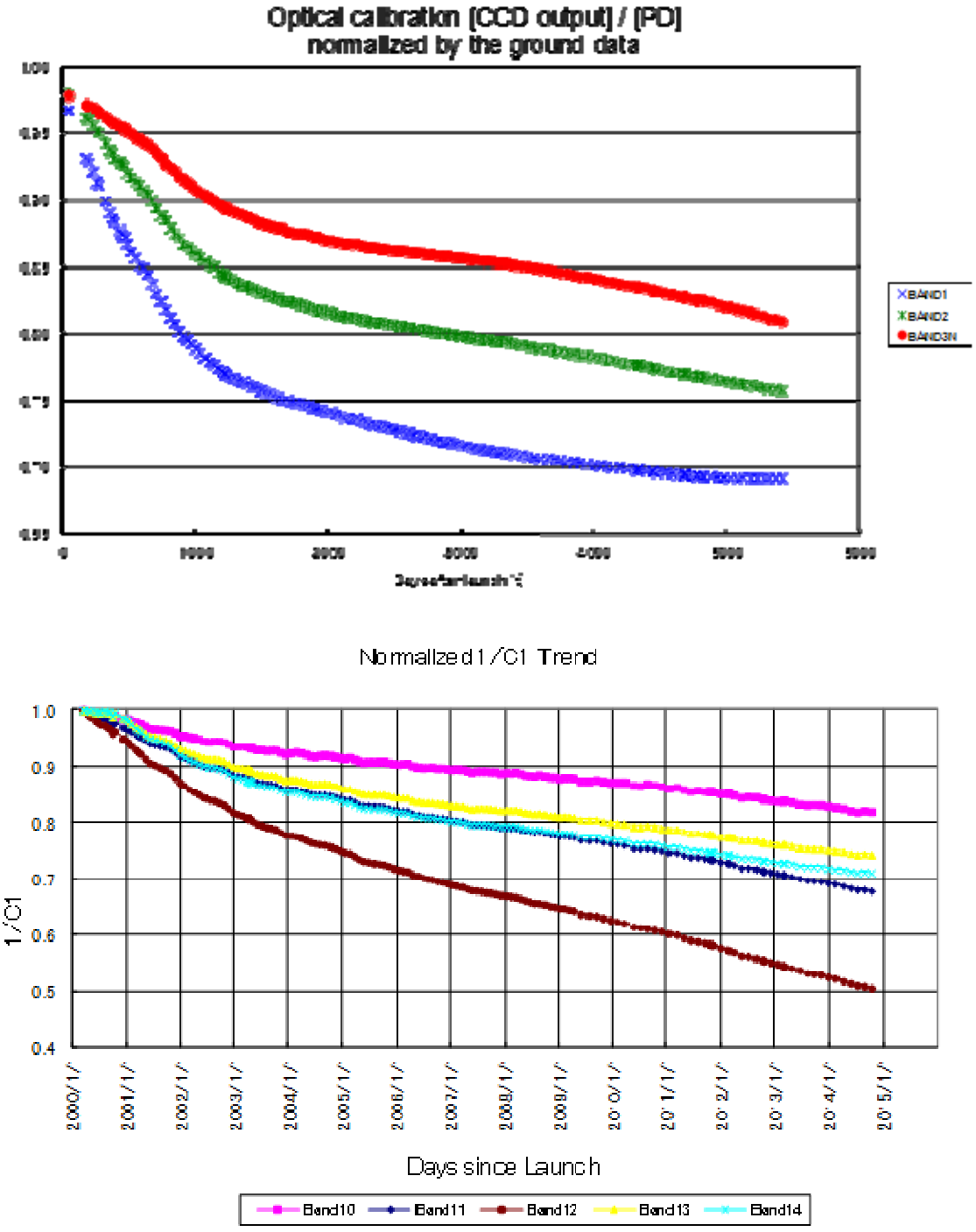
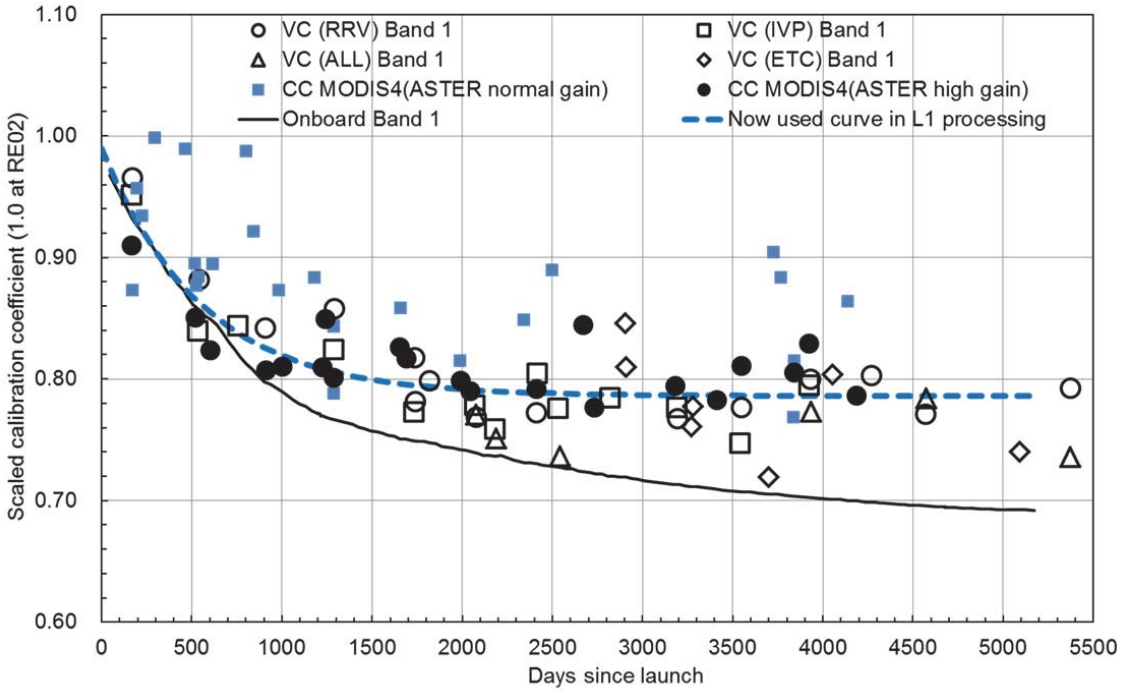


図 F-3-1-2-23 VNIR（上図） および TIR（下図）の機上校正係数の変化
（打ち上げ前地上試験との比）

(iii) 代替・相互校正

ASTER 可視近赤外(VNIR)および短波長赤外(SWIR)センサについては、1999年の打上以降、ほぼ年 1～2 回の頻度で、代替校正のためのフィールド実験を、砂漠地域の乾燥湖上で実施した。本実験により取得した地表面と大気の測定値を入力パラメータとした放射伝達計算から校正係数を算出し、オンボード校正機器による結果との比較などからその経年変化について調べ、ASTER データの検証を行った。また、ASTER と同様に Terra 衛星に搭載されている MODIS(The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)データを用いた相互校正を試み、代替校正実験の結果との整合性の確認も行った。

図 F-3-1-2-24 は代替校正と相互校正の結果を示したものである。ASTER VNIR の放射量補正は機上校正の結果(図中の黒実線)に基づいて行われてきたが、代替校正等との差異が大きくなったため、Band1,2 については代替校正等の結果に基づいた補正(図中の青点線)に置き換えることとなった。



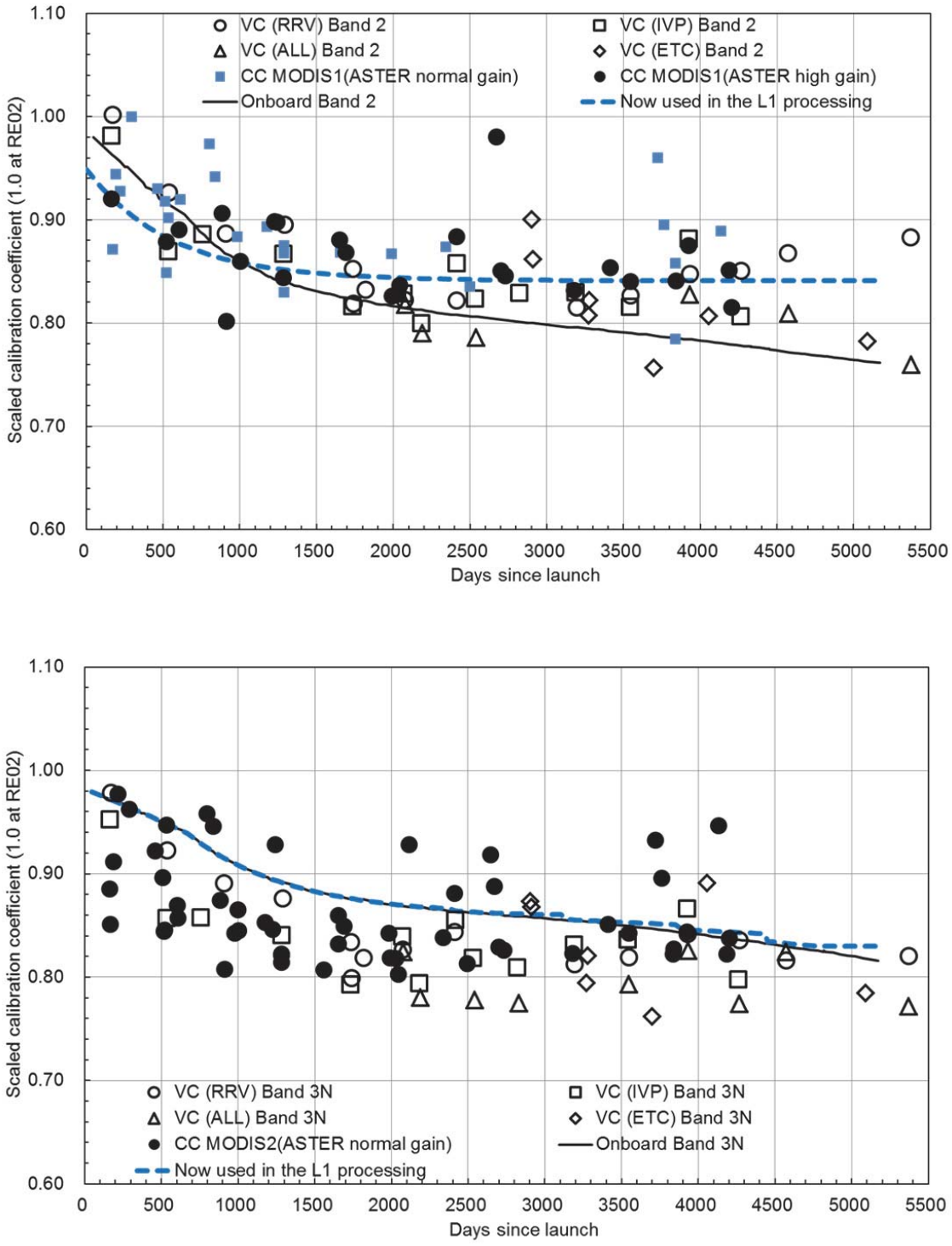


図 F-3-1-2-24　ASTER/VNIR 代替校正結果
上から順にバンド 1、バンド 2、バンド 3N
（黒実線：機上校正結果、青点線：代替校正結果）

ASTER 熱赤外（TIR）センサを対象とした代替校正は、米国の乾燥湖、および、霞ヶ浦（水域）において、年に数階～１０数回程度のペースで実施した。

図 F-3-1-2-25 は、各バンドにおける機上校正による輝度温度と代替校正による輝度温度の比較結果である。両者の差は、水域サイト（248 データ）では概ね±1 度以内、陸域サイト（65 データ）では概ね±1.5 度以内である。これらの結果から、ASTER/TIR の機上校正は、打ち上げ以来、検証温度レンジ（-10～＋45℃）において、仕様で示された校正精度を維持し続けていると推察することができる。

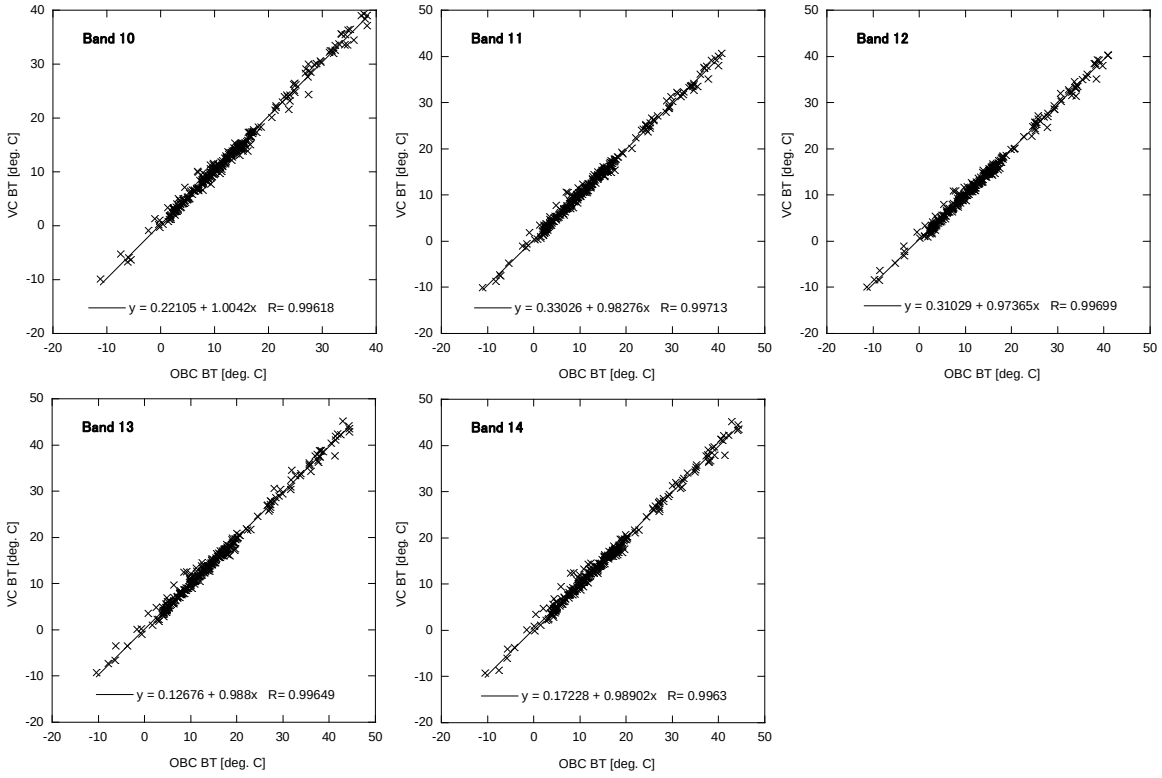


図 F-3-1-2-25：各バンドにおける機上校正による輝度温度と代替校正による輝度温度の比較（日米チームによる計 313 データを使用）

(iv) ASTER 処理アルゴリズムの改良・パラメータの更新

放射量補正アルゴリズム・パラメータについては、2005 年 7 月にラジオメトリックデータベースをバージョン 3 に更新した。このバージョンでは、機上校正の傾向から感度変化を予測し、その予測式より観測時点の感度とオフセットを算出する方式で計算される。このバージョンアップにより、更新頻度や誤差が大きく縮小された。

放射量補正バージョン 3 の更新履歴について表 F-3-1-2-7 に示す。

表 F-3-1-2-7　ラジオメトリックデータベースの更新履歴
（バージョン 3）

	更新日	ラジオメトリック DB を更新したセンサ		
		VNIR	SWIR	TIR
Ver.3.00	1999/12/18	更新	更新	更新
Ver.3.01	2000/10/18			更新
Ver.3.02	2001/10/21	更新		
Ver.3.03	2006/07/08	更新	更新	更新
Ver.3.04	2007/01/29		更新	
Ver.3.05	2007/05/06		更新	
Ver.3.06	2007/06/16			更新
Ver.3.07	2007/09/22		更新	
Ver.3.08	2008/07/06	更新		更新
Ver.3.09	2008/07/18		更新	
Ver.3.10	2009/09/27			更新
Ver.3.11	2010/07/10	更新		更新
Ver.3.12	2012/02/23	更新		更新
Ver.3.13	2013/03/04	更新		更新
Ver.3.14	2014/04/25			更新

さらに、(ア)(iii)で記載した通り、VNIR の Band1,2 において、機上校正と代替校正等との乖離が徐々に拡大していることを受けて、2013 年に代替校正を基準とした新たな校正方針が提言され、この提言に基づき 2014 年にバージョン 4 としてリリースした。現在は全てのデータに対し後述のレベル 1A+ツールによる放射量補正により、バージョン 4 で処理されたデータとなっている。

幾何補正アルゴリズム・パラメータについては、ジオメトリックデータベースの更新履歴を表 F-3-1-2-8 に示す。位置情報はレベル 1A 処理の際に、本データベースおよび観測時の衛星の位置・姿勢等の情報に基づき、観測位置情報として計算・出力される。

表 F-3-1-2-8　ジオメトリックデータベース更新状況

バージョン	実装時期	内容
1.00	2000 年	初期バージョン
1.01,1.02	2000 年	バンド間位置ずれ、TIR スキャン間ずれの修正
2.00	2001 年	座標系、軌道傾斜角等の変更
3.00	2004 年	地球自転角の修正
3.01	2005 年	章動補正の実装
3.02	2011 年	夜間 TIR のポインティング依存誤差の修正
3.03	2015 年	Band3B のピクセルずれの修正

なお、既に生産・アーカイブされているレベル 1A については、古いバージョンのラジオメトックデータベース・ジオメトリックデータベースで処理されたものとなっており、それに伴って幾何・放射量精度が悪い状態にある。

この状況を克服するため、レベル 1A のうち、放射量補正係数・幾何補正係数（位置情報）のテーブル部分のみ修正するツールを開発した。これをレベル 1A+ツールと呼んでいる。そしてユーザに提供されるプロダクトは全てこのレベル 1A+ツールにより修正されたものとなる。

③次世代アーカイブシステムおよび広域マップの整備

次世代アーカイブシステムとして、ペタバイト級のデータアーカイブシステムを導入し、ASTER・PALSAR データの高速処理が可能なアーカイブシステムを実現した。提供システム関しては、OGC 標準 2 種について最新版に対応した。

広域マップについては、ASTER GDEM ver.3・オイルスリック DB・時系列 DEM/オルソデータ、全球モザイクオルソ画像、全球放射率データを整備した。

（ア）次世代アーカイブシステムの研究

衛星データの長期的なアーカイブ、データ処理・提供の継続を効率的に実施するために、次世代アーカイブシステムを開発する。その開発要素は以下の 3 種に大別される。まず、大容量クラスタシステムを用いたオンデマンド処理、高速処理を実現するための環境の構築、次にデータの長期アーカイブを想定した堅牢なデータの保存、さらに、利活用促進のための国際標準に準拠したウェブ配信システムの構築である。

(i) クラスタシステム概要

ASTER は、現時点において約 270 万シーンを超えたデータが蓄積され 280TB 以上のデータが蓄積されている。PALSAR はペタバイトクラスのデータ量を保有している。従来，こうした膨大な衛星データを処理・保存するために大容量テープライブラリシステムに基づく地上データ処理システムが用いられてきた。しかし、テープベースのシス

テムでは原データへの高速アクセスを行うことができないため、例えば幾何補正アルゴリズムが改訂され全データを再処理する場合に、数年という多大な時間が必要となり、実際上不可能となる。そのため次世代のアーカイブシステムとしては、大容量データを容易に扱うことができ、かつ高速なデータ処理が可能となる最新の情報技術を適用した新たな処理システムの構築が必要である。

本研究では、ネットワーク上の計算資源を有機的に統合して利用することができるグリッド/クラウド技術を採用し、従来よりも格段に低コストで高速な衛星画像データ処理が可能なアーカイブシステムを構築した。現在、ストレージシステムの容量は 1.0 PB を超えており、これに ASTER 全過去データのアーカイブが完了し、新規観測データについては毎日自動的にアーカイブシステム内に転送が実施されるようになっている。

新 ASTER 処理システムの構築による処理の高速化

ASTER の毎日の受信データの処理は VM: Virtual Machine での処理体制に移行した。当初は 4 ノード 32core で処理していた。処理の冗長性の観点から、定常処理は新規の処理用サーバ 1 台上で行う体制を新たに構築した。新処理サーバは 8 スロットで L0、L1A 処理を行い、管理用データベースである Postgresql DB やジョブ管理スケジューラもこのサーバ上で動かせるようCPU は 12core、メモリは 64GB のものを用意した。HDD は 12TB 搭載している。L0、L1 は共に 1 日 10GB から 20GB 程度増加していくのでそれぞれ 2TB まで溜まった時点でテープにアーカイブしてサーバ上からは削除していく。L3 も L0、L1 とほぼ同じペースで増加していき、こちらは NFS で処理サーバ同様に新規の WMS サーバにアーカイブされる。WMS サーバは ASTER 用に 219TB のストレージを保持しており既存の 15 年分の 115T に加え約 14 年間分の L3 データを追加で保持することが可能である。図 F-3-1-2-26 に ASTER データ転送の流れを示す。

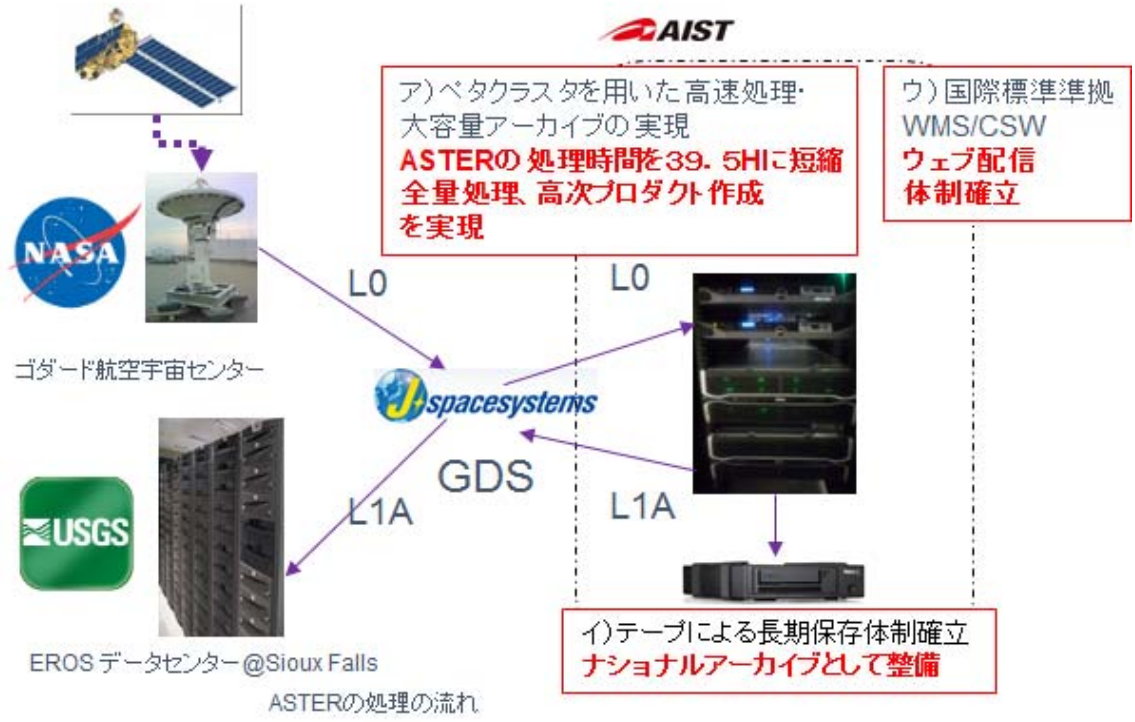


図 F-3-1-2-26　ASTER データ転送の流れ

ASTER データは NASA で受信され、その後国際回線を通じて日本側に転送され J-spacesystems の FTP サーバに置かれる。新体制では AIST 側から J-spacesystems の FTP サーバにファイルを取りに行くこととした。ASTER 受信データは 8 時間単位で 1 日 3 回取得し、観測スケジュールは 1 日 1 回取得される。観測スケジュールを取得してから 39.5 時間後にそのスケジュール内の L1 を作成するのに必要な L0 が揃うので処理が開始される。1 日に約 50 件分の L0 が送られてくる(図 F-3-1-2-27)。

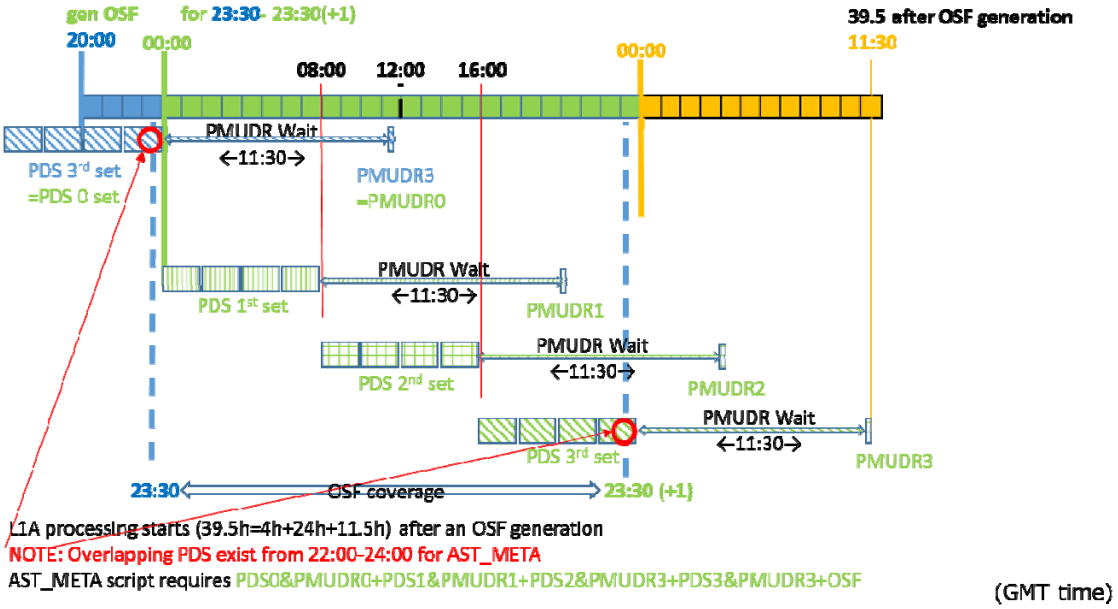


図 F-3-1-2-27　ASTER データ処理のタイミング

L0 から L1 に分割する処理は内包するシーン数にもよるがおおむね 20 分から 60 分かかり L1A から L3A を作成する処理はおおむね 7 分で終了する。これらの処理が 7 時間程度で完了するようになっている。処理システムの基本構造はこれまでに開発したものを踏襲している為、これまでと同様に VM で処理することも可能である。これにより、処理の冗長化を実現した。ASTER L1 生成シーン数の照合として、平成 25 年度から J-spacesystems と AIST にある L1 シーンの比較を行いアーカイブの整合性を完全なものにするための体制を確立した。

(ii) 全量データセットの作成

次世代アーカイブシステムの構築に係る研究開発では、従来のテープドライブを用いた地上データ処理システムはデータに高速アクセスできないという欠点があること、さらにハードディスクドライブの市場が大きくなり、媒体単価も下がったことからハードディスク、あるいはクラウドによるデータのアーカイブを検討してきた。一方で、アーカイブするデータ量は日々増加するとともに、ディスクの電気代、あるいはクラウドの維持経費もそれに伴い増加する傾向にある。衛星データには日々オンデマンドで処理し解析に用いるデータ以外にも源泉データといったアクセス頻度は低く、しかしながらデータとしての価値が高いものが多数存在する。

テープは正確には「ランダムアクセスは得意ではない」ものの、シーケンシャルなアクセスは HDD を凌駕するスピードがあることから、たとえば L0 データ、あるいは PALSAR の L1 コンプリートリストのようなオンデマンド処理、再処理を必要としないデータのアーカイブにはテープドライブを利用することも可能となった。特にテープシス

テムのうち、LTO は第 6 世代まで進化し、いっそう安定した媒体となったことから、従来のペタクラスタ上でのデータアーカイブに加えて、あらたに LTO6 を用いたテープアーカイブを実現した。これにより、ペタクラスタ上には全データを保持しつつ電源をシャットダウン可能とし、今後のランニングコストを削減することに成功するとともに、異なるデバイスによるデータの冗長管理を実現することで、貴重な衛星データの長期アーカイブに向けた体制を実現した。

ASTER の全 L0、L1 は LTO テープへのアーカイブを行った。今後も L0、L1 はデータが 2TB に達し次第テープにアーカイブしていく。テープドライブは SAS 接続のものと USB3.0 接続の 2 台を購入していてテープには圧縮データなら 2TB、非圧縮データなら 6TB が記録可能である。L0 は冗長化し 2 本 1 セットとして 2015/2/6 現在で 48 セット、L1 は 1 本 1 セットで 39 セットアーカイブ済である。また、同様にペタクラスタにアーカイブされていた JERS1 のデータも 2 本 1 セットで 32 セット、ASTER プロダクトの一つである ASTER 時系列データセット(ATOM)を 1 本 1 セットで 56 セットアーカイブしている。

PALSAR アーカイブ構築(コンプリートデータセットの作成)としては、J-spacesystems は JAXA より受領した PALSAR レベル 0 データの品質確認及びデータ処理を行い、一定の基準を満たす PALSAR レベル 0 データのダウンリンクセグメント ID リスト(以下、コンプリートリストという)を作成した。AIST では、J-spacesystems からこれら PALSAR レベル 0 データをインターネット回線経由で取得し、転送された L0 データの全 L1 処理を完了した。AIST での L0 の検証は L1 の生成をもって判断し、最終的に J-spacesystems 側で L1 を生成できた L0 と同数の 74139 セグメントを確認し、コンプリートリストとした。

(iii) 国際標準への準拠

国際標準 Web Mapping Service(WMS)の配信サービスを新 WMS サーバに移植した。この WMS サーバは CPU 40core、メモリ 90GB で 10Gbps のネットワークを持っている。また外部ストレージ 2 台と繋がっていてそれぞれ 110TB、219TB ずつデータを保持することができる。現在では 219TB のストレージに ASTER L3A のデータが置いてある。HDD のサイズが小さい為にデータは tar に纏めて bzip2 圧縮したもののみで tar を展開したファイルは置いていない。また WMS で使用する TIFF 画像も deflate 圧縮をかけて容量を削減している。

AIST CSW の最新の実装である CSW3 は従来の CSW2 と比較して格段に検索速度が向上した。そこで、システムを更新するタイミングで CSW3 に移行することにした。CSW3 は opensearch をサポートしている。全文検索エンジンが Lucine から Apache Solr に変更され検索速度が向上した。また必要とするサーバの能力が従来は 4 台のサーバが必要だったものが CSW3 では AIST ASGC クラスタのメモリ 128GB、CPU 20core の large VM を用いることで 1 台に収まるようになった。現在 ASTER が 260 万

件、JERS OPS 20 万件、SAR 41 万件、合計 320 万件のカタログが登録されている。ASTER のエントリは日々追加されている。

（イ）広域マップの整備

(i) 全球の数値標高データ（ASTER GDEM）の整備

ASTER GDEM の整備については、バージョン1を平成 21 年 6 月にリリース後、平成 23 年に精度改善したバージョン 2 をリリースした。その後さらに欠損地域の低減を目的として、バージョン 2 開発以降に観測した ASTER データ（約 50 万シーン）を追加して再作成しバージョン 3 が完成した。バージョン 3 では図 F-3-1-2-28 に示すように特に高緯度地域の欠損部が大幅に低減されている。バージョン 3 は平成 27 年中にリリース予定である。

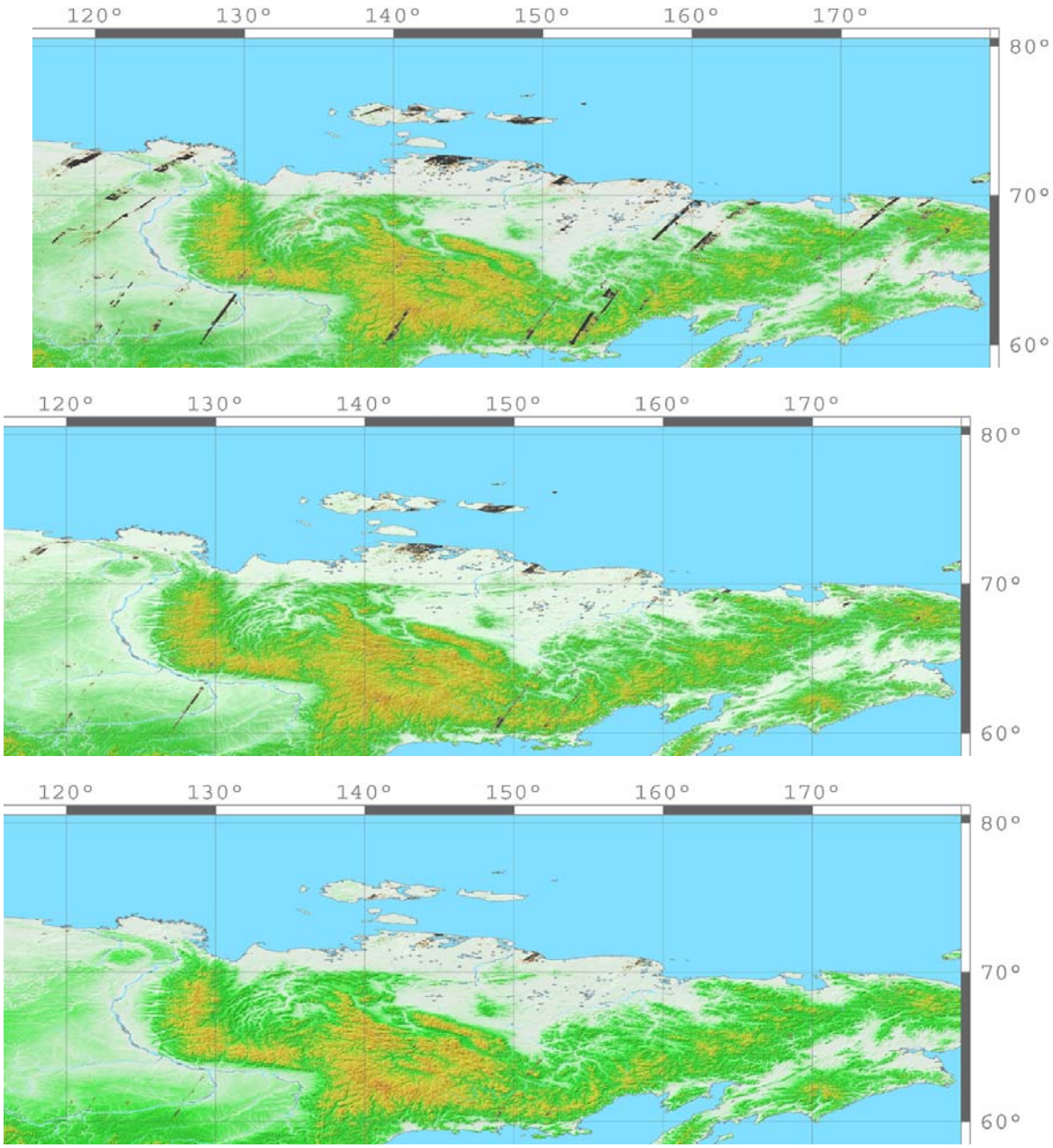


図 F-3-1-2-28　高緯度地域における欠損部の低減（黒い部分が欠損部）
（上：Ver.1 /中：Ver.2 /下：Ver.3）

(ii) オイルスリックデータベース

世界的に陸域での石油ガス資源探査はし尽くされ感が有り、本邦の石油開発企業等の探鉱の興味の対象は海域に移っている。また、課題であった大水深での石油ガス開発も技術の進歩により克服しようとしている。海域における石油ガス探査の需要は、ますます増大している。海域における石油探鉱に衛星データを利用する方法のひとつに油徴オイルスリック解析は重要な情報源として利用されている。この研究では、膨大な PALSAR データから油徴オイルスリック解析に適したデータ選定作業支援

システムを開発し、同システムを用いて油徴オイルスリック解析のデータベースを整備する。平成 23 年度 5 月に PALSAR の運用が停止に伴い、新たなデータから油徴抽出（スクリーニング）は終了となった。そのため、これまでに取得された PALSAR データ全量によるオイルスリック解析を行ないながら、油徴抽出の精度の向上を図った。整備した対象海域は、表 F-3-1-2-9 に示すように我が国の石油ガス開発企業等の参入が見込まれる有望な海域である。図 F-3-1-2-29 は、これまでにあまり石油ガス探鉱が進んでいない東アフリカ沖の大水深で抽出されたオイルスリックの例である。また、油徴オイルスリック解析のデータベースの整備のために、油徴抽出の精度の向上を目的とした作業支援システムへ機能追加を行い、解釈支援機能や PALSAR だけでなく PALSAR-2 等の他の衛星データの取り込み機能等を追加した。

表 F-3-1-2-9　PALSAR データの全量によるオイルスリック解析

対象海域	研究内容
スリナム～ ブラジル沖	データ選定作業支援システム利用、オイルスリックの効率的判別手法
東アフリカ沖	データ選定作業支援システム利用、ケニア、タンザニア、モザンビーク沖のオイルスリックマッピングと探鉱ポテンシャル評価
アンゴラ・ コンゴ沿岸	データ選定作業支援システム利用、ガボン堆積盆地海上油徴の抽出、陸域の解析

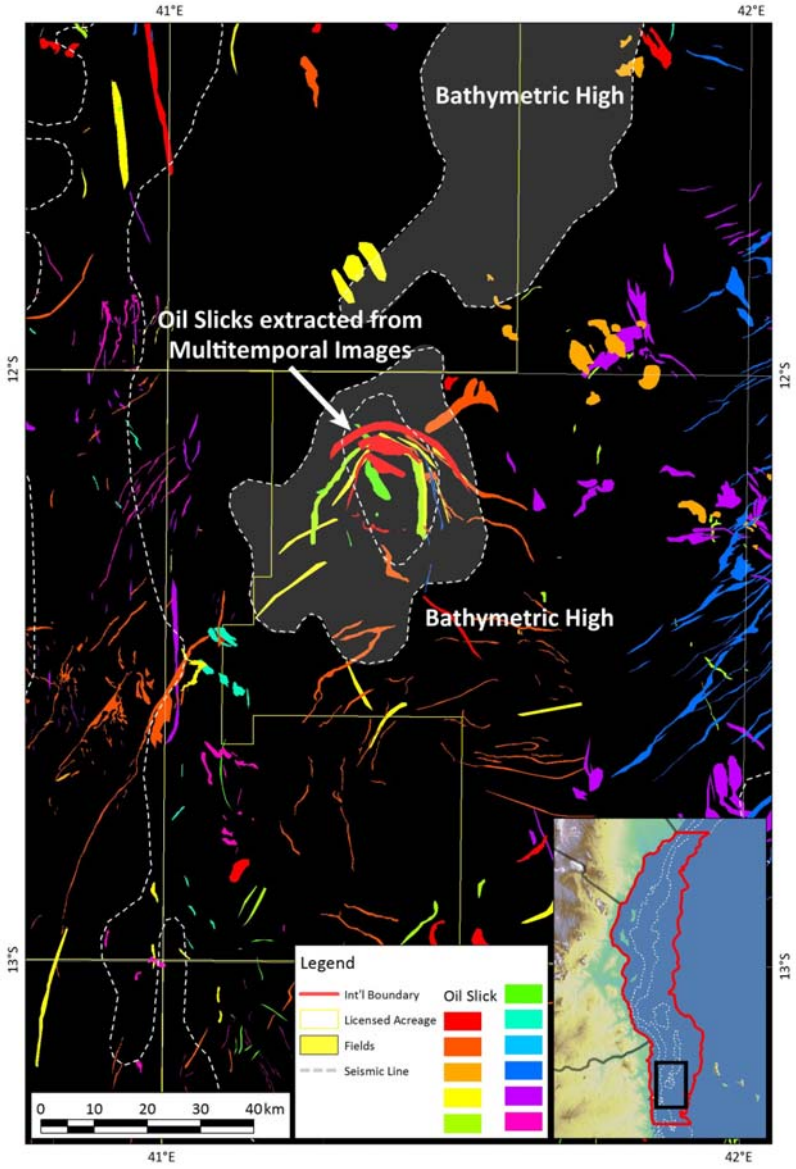


図 F-3-1-2-29　海底地形の高まり周辺におけるオイルスリック抽出結果（モザンビーク沖）

(iii) 時系列および全球モザイクオルソ画像

時系列 DEM・オルソ画像は、フルモードで観測された ASTER 画像を ASTER DEM を使ってオルソ化し、緯度 1 度×経度 1 度の範囲でモザイクした、観測日毎のオルソ画像の集合である。このオルソ画像には VNIR、SWIR および TIR 画像が含まれる。時系列 DEM･オルソ画像は海岸浸食、違法伐採、土地利用変化、砂漠化、湖沼の面積変化など、様々な利用が考えられる。時系列 DEM･オルソ画像の例を図 F-3-1-2-30 に示す。

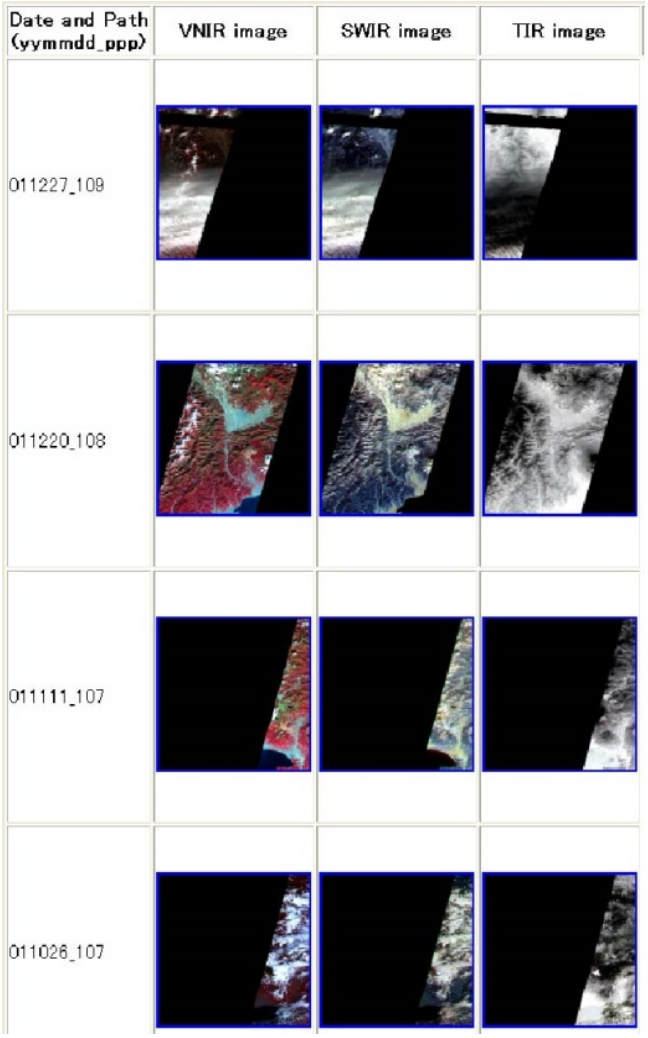


図 F-3-1-2-30　時系列オルソ画像の例

モザイクオルソ画像は、時系列オルソ画像の VNIR を見かけ反射率に変換し、同一地点で観測された雲の無い見かけ反射率の平均をその地点のピクセル値とした。

このため、季節によって反射率が大きく変化する地域では平均的な反射率を示す。例えば、モザイクオルソ画像のフォールスカラー表示で、夏は植生で覆われ、冬は降雪のある山岳地帯がピンク色に見えることがある。観測回数が少ない地域では ASTER の軌道方向にそった縞が見えることがある。モザイクオルソ画像作成の際、時系列画像相互の位置ずれは、添付された情報を基に、補正される。モザイクオルソ画像も、時系列オルソ画像と同様に、緯度 1 度×経度 1 度の単位で作成されるが、隣同士とスムースにつながり、広域のシームレスオルソ画像として利用可能である。図 F-3-1-2-31 にモザイクオルソ画像の例を図 F-3-1-2-32 にこれまでに作成したグローバル衛星画像データセットの範囲を示す。

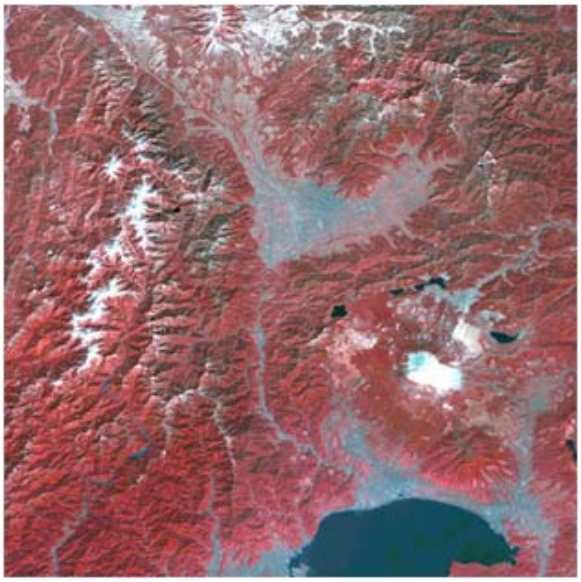


図 F-3-1-2-31　富士山を含む地域のモザイクオルソ画像

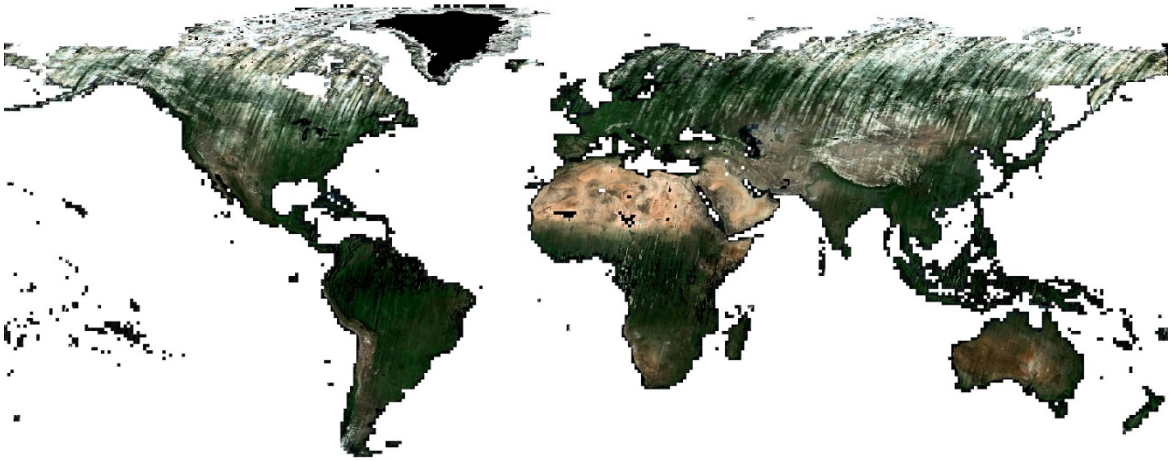


図 F-3-1-2-32　グローバル衛星画像データセットの範囲

(iv) 全球分光放射率マップ

図 F-3-1-2-33 は全球の広域放射率マップ（RGB＝B14、12、10）であり、上段が 1～12 月の全データを使用したもの、中段が 5～10 月（北・南半球の各夏・冬）のデータのみを使用したもの、下段が 11～4 月（北・南半球の各冬・夏）のデータのみを使用したものである。観測月を絞ることにより、放射率の季節変動の影響を抑えた結果が得られるものの、欠損域が増加するため、対象地域の大きさや用途に応じてスタックするデータを選択すべきである。なお、図中で赤く発色している箇所はケイ酸塩鉱物が豊富であることを示しており、特にサハラ砂漠において顕著に赤く発色していることが

分かる。図 F-3-1-2-34 は、サハラ～アラビア付近の拡大図（上段：1～12 月、中段：5～10 月、下段：11～4 月）であり、ケイ酸塩鉱物の含有量が多い岩石・土壌が多様に分布していることが分かる。図 F-3-1-2-35 は、図 F-3-1-2-33 を生成する際の各点のスタック数を表した画像である（上段：1～12 月、中段：5～10 月、下段：11～4 月）。日本、米国西部、東欧、西アジア（イラン、アフガニスタン付近）、チリ、アフリカ南部、オーストラリア南東部などでスタック数が大きい一方、シベリア北部やアフリカ・アジアの赤道付近などでスタック数が小さくなっているのが分かる。これらの違いは、観測計画による観測回数の違いや、晴天率の違いによる。

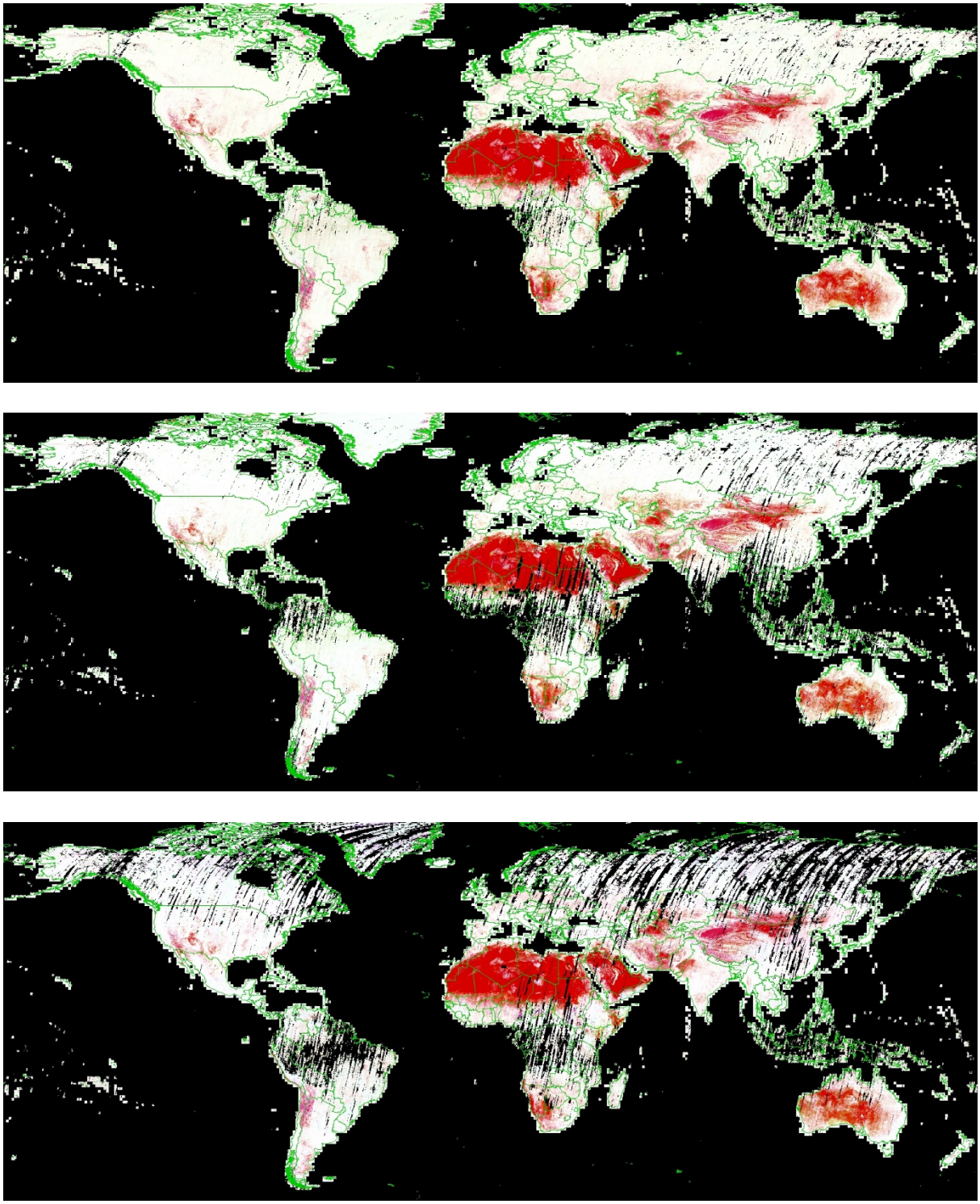


図 F-3-1-2-33　ASTER 広域放射率マップ（RGB＝Band 14,12,10）
上段：　1～12 月（全データ）、中段：5～10 月、下段：11～4 月

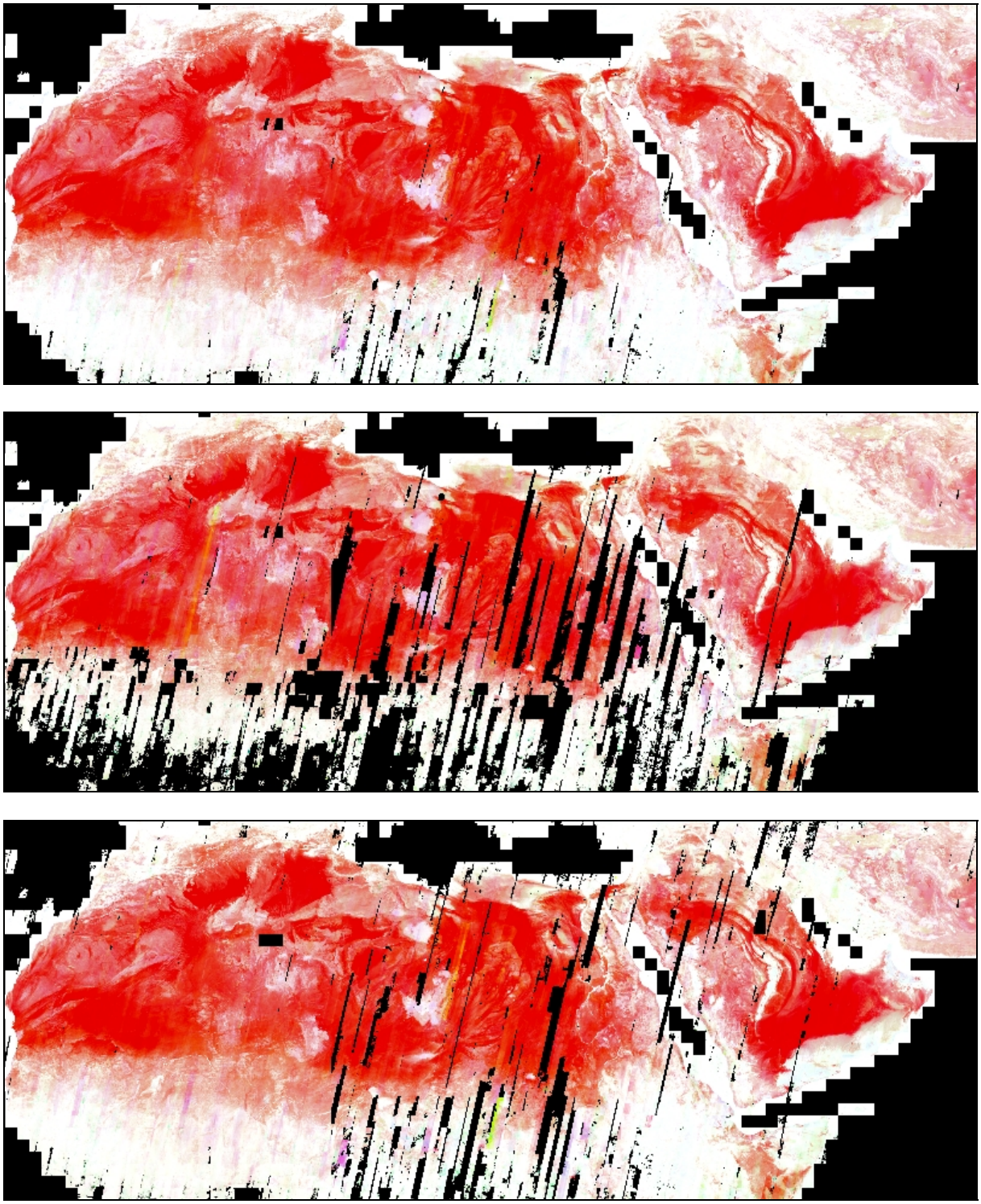


図 F-3-1-2-34　サハラ～アラビア半島周辺の拡大図（RGB＝Band 14,12,10）
上段：　1～12 月（全データ）、中段：5～10 月、下段：11～4 月

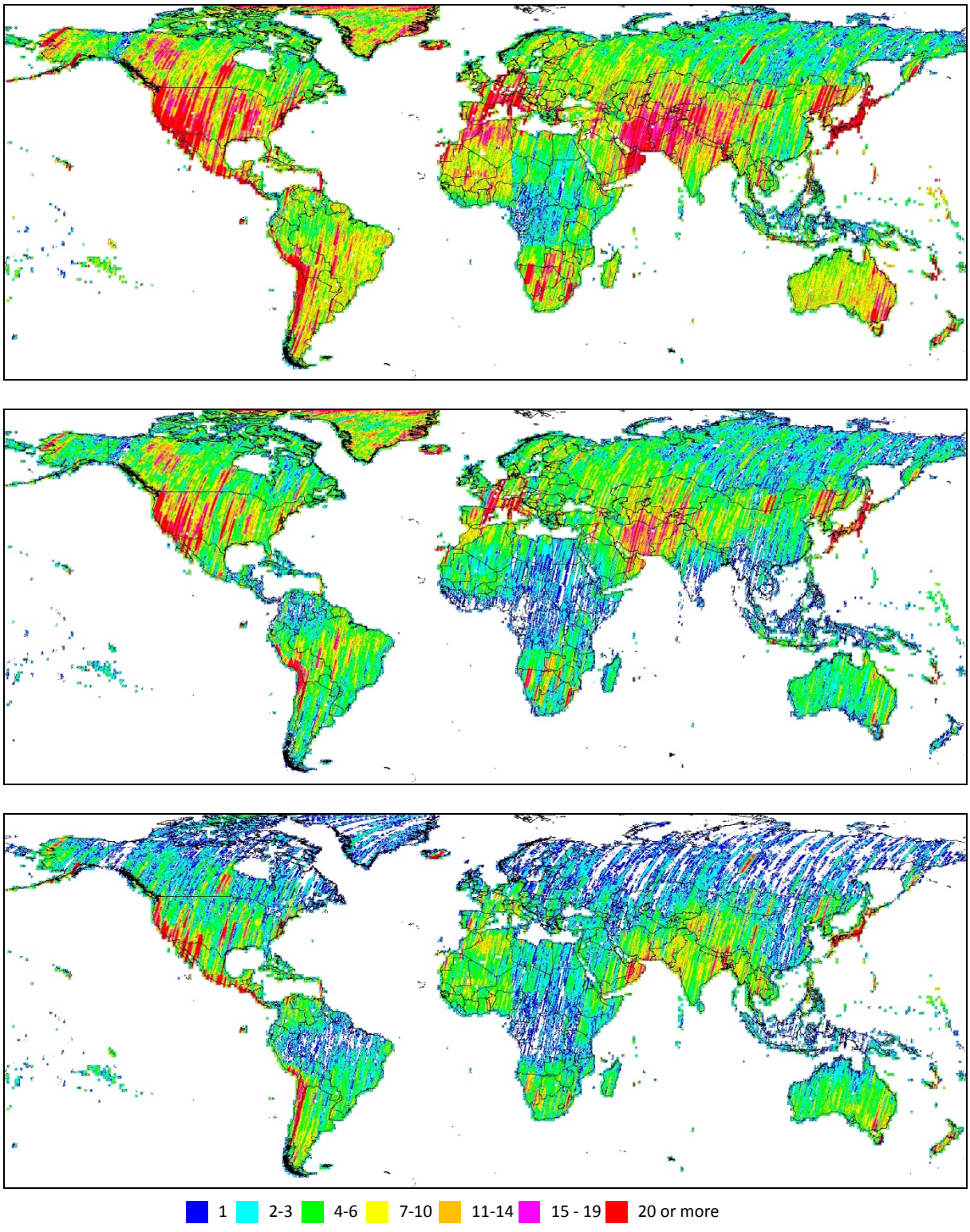


図 F-3-1-2-35　ASTER 広域放射率マップのスタック数（2014/2/6 現在）
上段：　1～12 月（全データ）、中段：5～10 月、下段：11～4 月

Ｆ－３－１－３　特許出願状況等

表 F-3-1-3-1　特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
	41*		0				

＊論文、発表において、要素技術をまたがるものが多いため、要素技術別の件数の計上は困難であり、一括した件数となっている。

表 F-3-1-3-2 （1）論文、投稿、発表、特許リスト（論文）

	題目・メディア等	時期
論文	Cross Calibration of Formosat-2 Remote Sensing Instrument (RSI) with Terra Advanced Spaceborne Thermal－Bmission and Reflection Radiometer (ASTER)	H24.10
論文	Development of a New Ground Truth Database for Global Urban Area Mapping from a Gazetteer	H23.6
論文	グローバル ASTER 時系列 DEM・オルソ画像の提供	H23.11
論文	ASTER TIME SERIES DEM AND ORTHO-RECTIFIED IMAGE DATASET	H23.11
	次世代 GEO Grid ホワイトペーパー1．0	H24.5
論文	Advanced Spaceborne Thermal－Bmission and Reflection Radiometer (ASTER)－Bnhanced Vegetation Index (EVI) Products from Global－Barth Observation (GEO) Grid: An Assessment Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) for Synergistic Applications	H24.8
論文	Cross Calibration of Formosat-2 Remote Sensing Instrument (RSI) with Terra Advanced Spaceborne Thermal－Bmission and Reflection Radiometer (ASTER)	H24.11
論文	米国ネバダ州 Railroad Valley を対象とした ASTER 放射率プロダクトの相対精度検証	H24.5
論文	Relative Accuracy Assessment of－BRSDAC ASTER Surface－Bmissivity Products at Railroad Valley, Nevada	H24.7
論文	An Automated Method for Global Urban Area Mapping by Integrating ASTER Satellite Images and GIS Data	H23.11
論文	DATA ACQUISITION STRATEGIES FOR ASTER GLOBAL DEM GENERATION	H24.8
論文	Statistical and in-situ validations of the ASTER spectral－Bmissivity product at Railroad Valley, Nevada, USA	H26.4
論文	全球 ASTER 時系列 DEM・オルソ画像データセット	H25.11

表 F-3-1-3-3　(2)論文、投稿、発表、特許リスト(発表)

	題目・メディア等	時期
発表	Huge Satellite Data Processing for Assessment of Offshore Wind ーBnergy Resources	H23.3
発表	OpenID 認証に対応した Tsukuba-GAMA バージョン 1.2 公開	H23.6
発表	Long-term cross-calibration of the Terra ASTER and MODIS over the CEOS calibration sites	H23.8
発表	AIST 2011 field work report for the vicarious calibration of ASTER/VNIR	H23.12
発表	Evaluation of ASTER gain/offset by long-term Terra ASTER/MODIS cross-calibration over the CEOS calibration sites	H23. 12
発表	Analysis of Relationship between Surface Temperature and Shade in an Urban Area by ASTER and PRISM Data	
発表	ASTER データを用いた都市域の日陰・日向地表温度の推定	H23.11
発表	Crowd-Sourcing Approach of Building Ground Truth Database for Global Urban Area Mapping	H23.10
発表	グローバル ASTER 時系列 DEM・オルソ画像の提供	H23.11
発表	ASTER TIME SERIES DEM AND ORTHO-RECTIFIED IMAGE DATASET	H23.11
発表	ASTER TIME SERIES DEM AND ORTHO-RECTIFIED IMAGE DATASET	H23.11
発表	ASTER VNIR/SWIR データを用いた相対反射率推定	H23.11
発表	国際標準規格を用いた ASTER 高温領域検出システムの開発	H24.5
発表	Update on Development of Hot Spot Detection System using GeoRSS	H24.6
発表	Field Campaign for the Vicarious Calibration of ASTER/VNIR 2012	H24.12
発表	Radiometric ーBvaluation of long-term Terra ASTER/MODIS cross-calibration	H24.12
発表	Crowd-Sourcing GIS for Global Urban Area Mapping	H24.11
発表	Automated Construction of Coverage Catalogues of ASTER Satellite Image for Urban Areas of the World	H24.8
発表	DATA ACQUISITION STRATEGIES FOR ASTER GLOBAL DEM GENERATION	H24.8
発表	Data Acquisition Strategies for ASTER Global DEM Generation	H24.6
発表	Effects of position navigation for AIST DEM, some ーBxample	H24.6

発表	Nighttime TIR geolocation－Bvaluation using volcanic hotspots	H24.12
発表	代替校正および ASTER/MODIS 相互校正の併用による ASTER VNIR バンドの放射量評	H25.10
発表	Field Campaign report (Summer and Winter, 2013)	H26.3
発表	Validation of ASTER－Bmissivity product Comparing with Ground and Laboratory data	H25.5
発表	nterpretation of Terra/MODIS Mid and Thermal Infrared Data over an－Bxperimentally Burned Building	H25.6
発表	熱赤外リモートセンシング代替校正に用いる分光放射計の経年劣化補正	H25.11
発表	全球 ASTER 時系列 DEM・オルソ画像データセット	H25.11

Ｆ－３－２　目標の達成度

表 F-3-2-1. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
①石油ガス資源探査等への利用手法の確立	目標: ASTER 及び PALSAR データによる、石油ガス鉱床のトラップ別と地表状況に応じた衛星データ利用技術、及び近年注目をあびている非在来型資源への利用や生産管理監視技術等を確立する。 指標: 各項目の利用手法を確立した事例件数とする。	ASTER および PALSAR データによる、石油ガス鉱床の地表・貯留構造の状況に応じた利用技術、非在来型資源・生産管理監視等への利用技術等について、合計 57 件の事例を開発し、資源ユーザの要望するほぼ全てのケースを網羅した。また資源・地球環境・防災等の課題に必要な情報を抽出する解析アルゴリズムを合計 66 件開発した。	達成
②地上データシステム運用・品質管理	目標・指標:以下の項目の実現とする。 (ア)観測計画の作成 (イ)観測データの全量入手・保存 (ウ)標準・高次処理プロダクトの生産 (エ)ASTER 及び PALSAR それぞれ5万シーン以上の配付 (オ)衛星データの目標精度の維持	(ア)ユーザ要望を取りまとめた観測計画を滞りなく作成した。 (イ)ASTER・PALSAR の観測データを全量入手し保存した。 (ウ)ASTER・PALSAR の全量を標準処理し、オンデマンドで高次処理プロダクトをユーザに提供した。 (エ)標準・高次処理プロダクトを累計で26万シーン配付した。ASTER GDEM(Ver2)を配付した。 (オ)幾何精度 50m以内、放射量精度可視近赤外±2%、熱赤外±1度の精度を維持した。	達成
③次世代アーカイブシステムおよび広域マップの整備	目標:ユーザに対してより利用し易い衛星データを継続的に提供するため、大量データを扱うことが可能な次世代アーカイブシステムを構築するとともに、次世代プロダクトとなる広域マップを整備する。 指標:ASTER 及び PALSAR のアーカイブ実績、高速再処理アルゴリズム開発、標準化対応等の実現度合い、整備した広域マップの種類とその完成度とする。	ペタバイト級のデータアーカイブシステムを導入し、ASTER・PALSAR データの高速処理が可能なアーカイブシステムを実現した。提供システム関しては、OGC 標準 2 種について最新版に対応した。 ASTER GDEM ver.3・オイルスリック DB・時系列 DEM/オルソデータ、全球モザイクオルソ画像、全球放射率データを整備した。	達成

Ｆ－４　事業化、波及効果について

Ｆ－４－１　事業化の見通し

（1） 成果の利用主体

石油ガス探査利用手法の成果利用主体は、資源エネルギー戦略を立案する公的機関および国内資源企業や商社である。しかしながら近年は、石油資源開発業界では、石油の探鉱・開発に必要な作業はアウトソーシングされ、それを専門に実施する石油サービス会社が作業を請け負う傾向にある。そのため今後は、石油資源開発企業よりも石油サービス会社での事業化が期待される。

広域地質・資源情報マップ整備のうち、石油ガス資源用に特化したオイルスリックデータベース等は、上記と同様の公的機関および石油サービス会社が利用主体である。一方、汎用的な情報である ASTER GDEM や地質情報データベースについては、様々な分野における基礎情報であることから科学的利用から商用利用まで幅広いユーザが利用主体である。

PALSAR データの衛星データ品質管理・地上システム運用は平成 24 年度をもって終了したが, ASTER については、品質が保証されたデータを長期に亘り安定的に提供しており、広く一般にも利用が進められるところである。例えば、ASTER の有償配付実績をみると、公的機関や資源ユーザ以外に、衛星データ加工分野や農業への利用が進められるとともに、JICA 等の国際支援の分野などで広く利用されている。地理情報が充分整備されていないアジア、アフリカの国々においては未だ中空間分解能衛星データの需要は大きい。

解析アルゴリズムの成果については、民間の事業化が見込まれるものとしては、森林バイオマス量推定技術が有望であり、地球温暖化に関する排出権クレジットにおけるベースラインの基本データとして活用できるため、京都議定書以降の枠組みの議論において、戦略上の重要なツールになりうると考えられる。

（2）事業化にいたる期間

石油資源探査・開発への衛星データ及びその利用技術の実成果並びに費用対効果の観点からは、鉱区入札前の検討材料としての利用、探鉱作業の費用対効果向上、非在来型資源開発適地絞り込み、開発環境の監視における事業化が見込まれているが、資源開発は探査から開発まで十年以上、さらに運用期間が数十年という非常に長期的な事業でもあるため、事業化に至るまでの期間は非常に長期となる。さらには、資源開発企業は他の様々な分野へ技術の展開を図ることには消極的である。

一般的にはこのような状況にあるものの、オイルスリック解析などでは既に事業化に至っているケースもある。主な事業化状況について表 F-4-1-1 に示す。

表 F-4-1-1　利用技術開発における資源探鉱・開発利用状況

対象地域	探鉱における利用段階	探鉱案件への貢献						開発案件の評価
		鉱区取得	探鉱作業	油田発見	開発支援	鉱区参入検討	入札回避	
リビア	②					○		
インドネシア	①②③	○	○	○＊）	○	○		
カナダ	④							○
イエメン	①					○		
ガボン	①					○		
イラク	②③	○	○	○	○			

①：鉱区参入の機会を窺うためのスクリーニング段階

②：鉱区参入の機会が訪れ、鉱区評価の段階

③：鉱区を取得し探鉱の初期（計画）段階

④：開発案件への参入について、効率的な開発計画を検討する段階

＊）Pagerunga 北沖（PUO）油田の発見に貢献し、同油田は開発が完了し現在生産中である。

最新の石油資源探査・開発への貢献事例として、イラクで行った利用技術開発の例を図 F-4-1-2 に示す。未開発の巨大油田開発有望地でありながら、現地調査のできないイラクの鉱区入札に備え、平成 13 年、平成 17 年、平成 22 年～平成 25 年度と ASTER、PALSAR データを使用して広域かつ詳細な地質解析を行った。鉱区を含む広域における地質構造の推定および最新の地表状況把握が生産設備配置等の開発計画に貢献し、ガラフ油田は平成 25 年 9 月生産開始に至った。

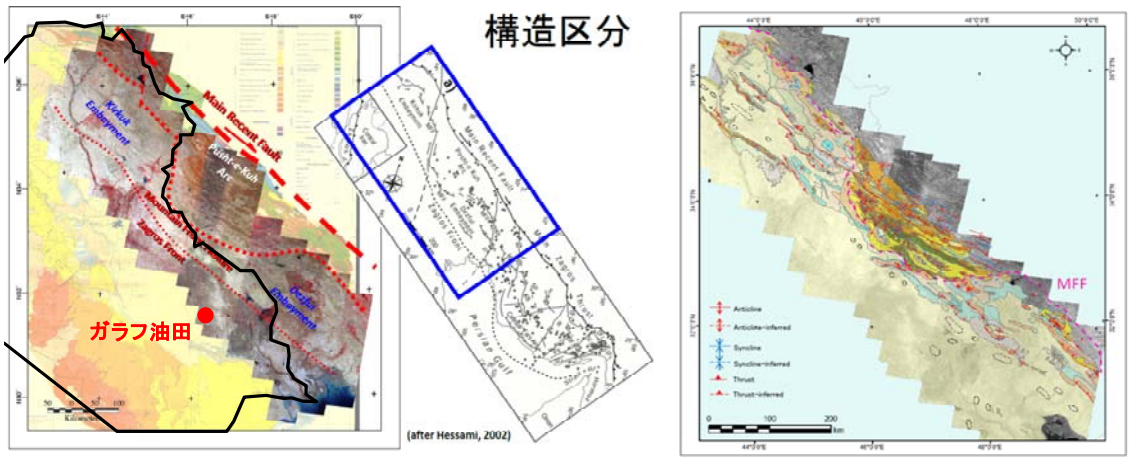


図 F-4-1-2　石油資源探査・開発に貢献したイラクの地質詳細解析

一方、汎用的な情報である ASTER GDEM や地質情報データベースについては、資源エネルギー庁の事業「希少金属資源開発推進基盤整備事業（探査基盤技術高度

化支援事業）」において構築された資源探査支援システム「GRIAS」の中に組み込まれて、国内の資源会社や商社における利用が進んでいる。

解析アルゴリズム開発により開発された鉱物抽出アルゴリズムは、チリ・カセロネス銅鉱山を始め多くの金属鉱山の開発に繋がった。

以上の通り、事業化に至るまでの期間は非常に長期であるものの、既に事業化が進みつつあると判断できる。

（3）問題点の分析、明確な解決方策等

PALSAR の後継である ALOS-2/PALSAR-2 の販売価格が PALSAR よりも高額に設定されたことが事業化促進への阻害要因となっている。特に、米国や欧州においては衛星データを無償化が進んでいるおり、同等の性能を持つ国産衛星データを利用した事業化は厳しい状況にある。海域における石油探査（オイルスリックの抽出）や SAR 差分干渉技術による世界の陸上主力油田の生産状況の監視においては、すでに SAR データの利用において事業化が進みつつあるので、今後の地球観測衛星の運用において事業化を考慮するとなれば、データの価格を低下させることが重要と考える。

一方、利用価値の高い高空間分解衛星については、海外企業が独占し優位に運用している状況である。日本においても衛星データの利用技術を高めるのはもちろんのことであるが、新規または高精度データを提供できる地球観測衛星を持ち運用も含めてその利用技術を優位に展開できるようにすることも重要である。

Ｆ－４－２　波及効果

（1） 成果の高度化等に関する波及効果事例

全球の数値標高データ ASTER GDEM は GEOSS（全地球観測システム）への貢献のスキームの下に， NASA/LPDAAC とともに世界のユーザに対して無償で配付を行っており、高い評価を得ている。これは、地球観測における国際的な我が国のステータス提示に貢献しているものの代表例であり、これからも様々な分野での利用が期待される。

また、利用技術開発の成果報告書、オイルスリックデータベースの一部は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構が実施している海外地質構造調査等で既に活用されており、我が国の資源外交へ貢献が期待できる。

また、PALSAR の L バンドでの油徴オイルスリック解析の実用性が確認され、石油資源開発の有望海域におけるデータ取得が JAXA の地球観測衛星 ALOS-2/PALSAR-2 の観測計画に組み込まれた。PALSAR-2 によるオイルスリック抽出技術の高度化が期待される。

また、資源国との関係強化のために、共同研究として技術移転を含む研究を行っており、例えばガス資源が豊富に存在する西シベリアにおいて、地盤変動監視の研

究を、ロシア最大のガス企業と進めることができた。（平成 25 年度で終了）

また、ASTER データの解析アルゴリズムの技術移転として、ボツワナ・地質リモートセンシング事業が発足し、資源外交への大きな貢献となっている。

また、地球温暖化削減に関する京都議定書以降の枠組みへの対応として、PALSAR を利用して培った森林モニタリング及びバイオマス推定は PALSAR の後継機の PALSAR-2 に引き継がれ炭素クレジット取引等の際に有利なものとなることが期待される。

（2） 当初予想していなかった波及効果の事例

ASTER の長期にわたる衛星データ品質管理・地上システム運用において、数々のノウハウを得た。また、それらに連帯した大学等の教育機関においては、多くの人材が育っている。これらのノウハウと人材は、今後日本国内の地球観測衛星の宇宙システム、さらには日本から宇宙システムの輸出においても活用されて行くものと期待される。

PALSAR の地上データシステムの運用において JAXA と協力関係を築いたことが、ALOS/PRISM および ALOS-2/PALSAR-2 の販売促進に繋がった。今後、特に資源分野での有効利用が期待される。

Ｆ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｆ－５－１　研究開発計画

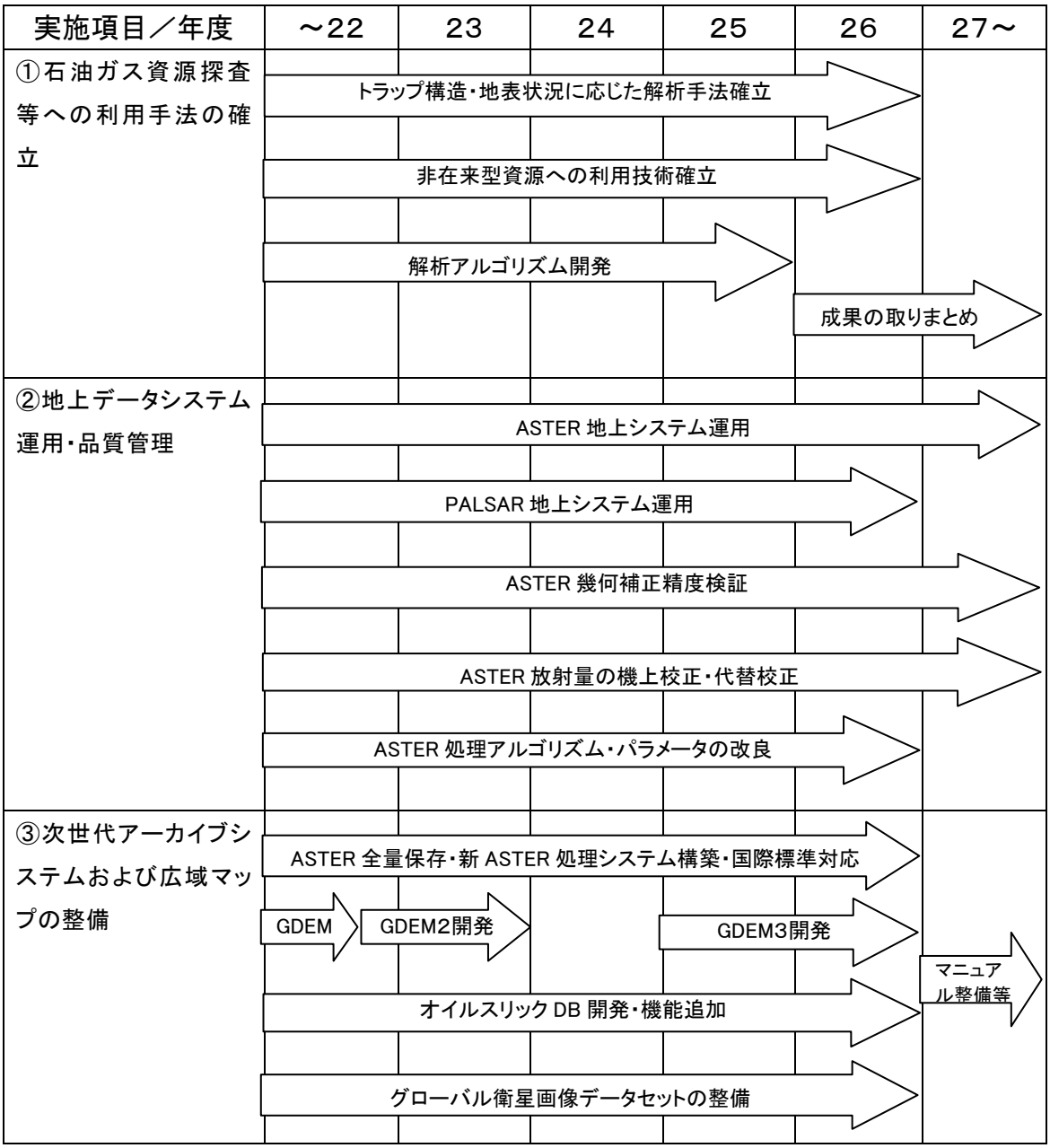
（1） 事業計画

資源探査への利用方法の確立では、ニーズと衛星データの特性を考慮したマトリックスを設定し、国内資源利用者の関心が高い課題・地域を優先的に実施した。また、広域資源地質情報整備では、海外の宇宙関連機関の動向などから研究課題を絞り込み、世界最高レベルの精度や、他に開示されていない情報に特化して研究を進めた。また多くの事例の蓄積を受けて、研究開発の成果のとりまとめを開始した。

ASTER は当初設計の3倍以上の運用を継続しており、地上システムの設備更新や次世代システム研究について、予算規模を考慮しながらシステムの機能が中断・停止しないように努めている。PALSAR は平成１８年１月の打ち上げ後、運用停止となった平成２３年５月１２日まで順調にデータを取得しつづけた。地上データシステムはハードウェアを含むシステムの更新・改良を適宜実施し、ユーザの利便性の向上や利用要求に答えるため、検索・注文機能の改良やプロダクトの拡充を行った。

以上のように、研究実施中にPALSARの運用停止のイベントが生じたが、中間評価期間内の事業全体としては、特に計画の変更無く、順調に研究が進められた。

表 F-5-1-1　研究開発計画



Ｆ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

（1） 研究体制

本事業は、経済産業省からの直接委託事業として、(一財)宇宙システム開発利用推進機構（以下、J-spacesystems）と（独）産業技術総合研究所（以下 AIST）が共同で実施している。前者は石油資源への利用に直接つながる実用研究と地上システム運用を担当し、その研究の一部は資源開発企業を中心とする民間企業に外注している。後者は先端的研究や次世代アーカイブ等を担当し、その研究の一部を大学等に再委託して実施している。中間時点での実施体制を図 F-5-2-1 に示す。

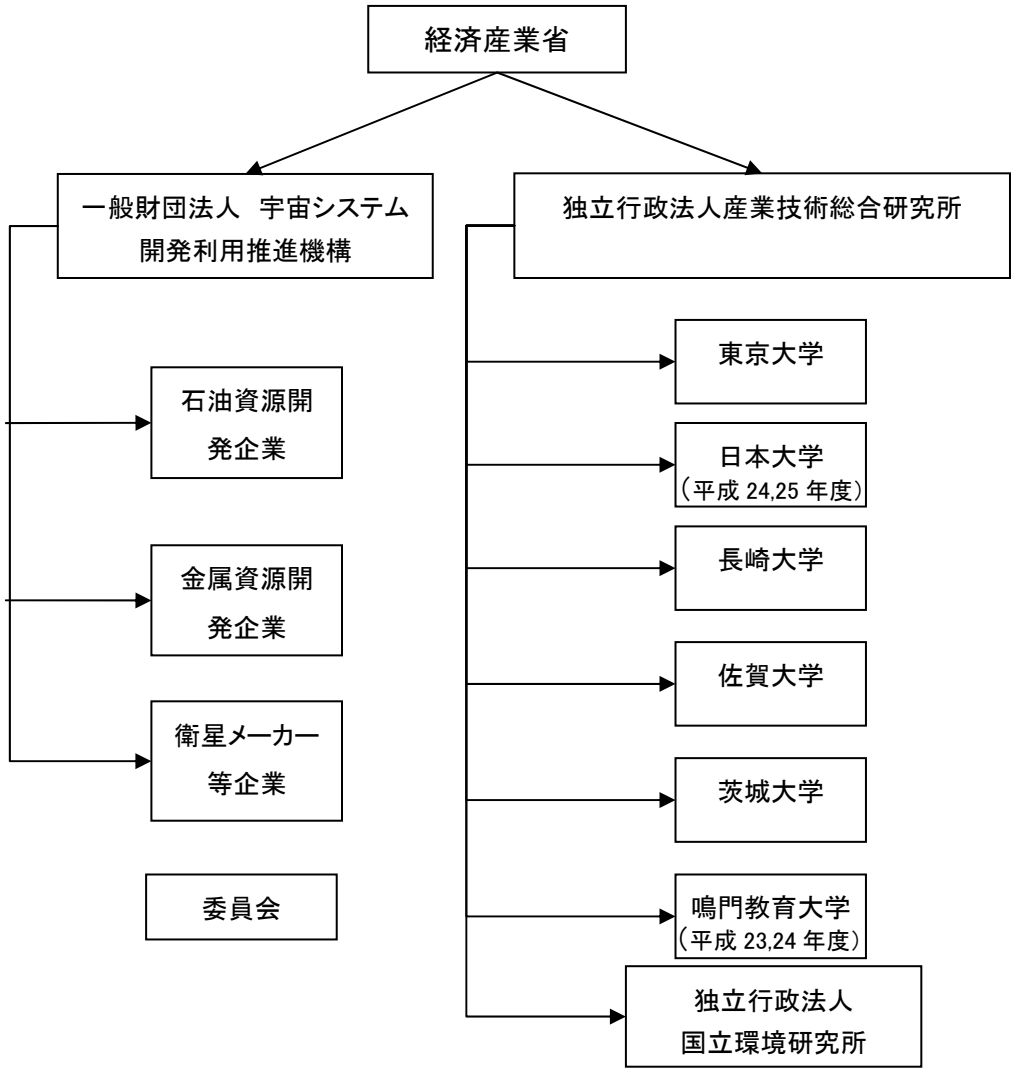


図 F-5-2-1　研究実施体制図（平成26年度時点）

目標の評価や技術の指導に下記に示す委員会を設置した。

表 F-5-2-1 ASTER 委員会名簿

氏 名	所　　属 （平成27年7月末現在）
山口　靖(委員長)	名古屋大学大学院環境学研究科 地球環境科学専攻 教授
新井 康平	佐賀大学大学院工学系研究科 知能情報システム学専攻 特任教授
岩崎　晃	東京大学大学院工学系研究科 先端学際工学専攻 教授
小野　晃	産業技術総合研究所 特別顧問
松永 恒雄	国立環境研究所 環境計測研究センター 環境情報解析研究室 室長
森山 雅雄	長崎大学 大学院 工学研究科 准教授
六川 修一	東京大学大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻 教授
渡辺　宏	元 国立環境研究所

表 F-5-2-2 日米 ASTER サイエンスチーム名簿

日本側		米国側	
氏 名	所　属	氏 名	所　属
山口 靖	名古屋大学	Michael Abrams	JPL/NASA
岩男 弘毅	産業技術総合研究所	Stuart Biggar	Univ. Arizona
岩崎 晃	東京大学	Nina Cole	JPL/NASA
浦井 稔	産業技術総合研究所	Robert Crippen	JPL/NASA
土田 聡	産業技術総合研究所	Leon Maldonado	JPL/NASA
外岡 秀行	茨城大学	Bjorn－Bng	JPL/NASA
中村 良介	産業技術総合研究所	Dave Pieri	JPL/NASA
松永 恒雄	国立環境研究所	Gary Geller	JPL/NASA
新井 康平	佐賀大学	Alan Gillespie	Univ. Washington
山本 浩万	産業技術総合研究所	Mike Ramsey	U. Pittsburgh
六川 修一	東京大学	Simon Hook	JPL/NASA
藤定 廣幸	センサ情報研究所	Jeff Kargel	Arizona State Univ.
森山 雅雄	長崎大学	Lila Prashad	Univ. Arizona
鹿志村 修	J-spacesystems	Chris Doescher	USGS
立川 哲史	J-spacesystems	Dave Meyer	USGS
加藤 雅胤	J-spacesystems	Howard Tan	JPL/NASA
藤田 勝	J-spacesystems	Elsa Abbott	JPL/NASA
薦田 麻子	J-spacesystems		

表 F-5-2-3 データ利用委員会名簿

氏 名	所　　属　（平成27年7月末現在）
六川 修一(委員長)	東京大学大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻 教授
粟屋 善雄	岐阜大学 流域圏科学研究センター 流域情報研究部門 教授
石塚 直樹	農業環境技術研究所 生態系計測研究領域 主任研究員
大村 誠	高知県立大学 文化学部 文化学科 地学・地理学 教授
斎藤 元也	東京工業大学 イノベーション研究推進体付加価値リモートセンシング 特任教授
土井 浩一郎	国立極地研究所 研究教育系地圏研究グループ 准教授
中村 英克	石油天然ガス・金属鉱物資源機構 資源探査部 探査技術開発課 課長
並川 貴俊	石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油開発技術本部 技術部 探査技術課(併)探査部 海外探査課 担当調査役
松岡 俊文	深田地質研究所 理事
松永 恒雄	国立環境研究所 環境計測研究センター 環境情報解析研究室 室長
山口 靖	名古屋大学大学院環境学研究科 地球環境科学専攻 教授
山口 芳雄	新潟大学 工学部 情報工学科 教授

表 F-5-2-4 期間中に開催された委員会一覧

年度	ASTER データ利用委員会(平成23以前)・ASTER委員会(平成24以降)*	データ利用委員会	PALSAR データ利用委員会
平成23	第 1 回 平成 23 年 6 月 6 日～9 日(39th ASTER Science Team Meeting) 第 2 回 平成 23 年 11 月 16 日		第 1 回 平成 23 年 10 月 20 日 第 2 回 平成 24 年 2 月 17 日
平成24	第 1 回 平成 24 年 6 月 11 日～14 日(41st ASTER Science Team Meeting) 第 2 回 平成 24 年 11 月 30 日	第 1 回 平成 24 年 10 月 29 日 第 2 回 平成 25 年 2 月 20 日	
平成25	第 1 回 平成 25 年 6 月 10 日～12 日(43rd ASTER Science Team Meeting) 第 2 回 平成 26 年 3 月 10 日～12 日(44th ASTER Science Team Meeting)	第 1 回 平成 25 年 11 月 29 日 第 2 回 平成 26 年 2 月 28 日	
平成26	第 1 回 平成 26 年 12 月 8 日～10 日(45th ASTER Science Team Meeting)	第 1 回 平成 26 年 10 月 27 日 第 2 回 平成 27 年 1 月 13 日	

*日米 ASTER サイエンスチーム会議含む

（2） プロジェクトリーダー

広範囲にわたる研究開発を効率的に運営・推進するために、本事業では、J-spacesystems では利用技術本部長津宏治（元日本リモートセンシング学会会長）を、また AIST では地質分野担当の研究コーディネータ佃栄吉をそれぞれプロジェクトリーダーとして、相互の連携体制を明確にするとともに、各研究項目を担当するテーマリーダ、個々のテーマの取りまとめを担当するサブテーマリーダによる開発分担体制の下、本事業の運営を行っている。

（3） 実施者間の連携

表 F-5-2-5 のとおり研究開発課題別に最適な研究開発実施体制を組んで業務を遂行した。

表 F-5-2-5 研究開発課題別の研究開発実施体制

	研究開発課題	主担当（担当ユニット）	連携・協力機関（民間企業・独法・大学等）
利用技術開発	石油ガス探査における利用手法確立	J-spacesystems（利用技術本部）	資源関連企業
	地質・資源情報整備	J-spacesystems（利用技術本部） AIST（地質情報研究部門）	資源関連企業 茨城大学 長崎大学
	解析アルゴリズム開発	J-spacesystems（利用技術本部） AIST（地質情報研究部門、情報技術研究部門）	国立環境研究所 東京大学 日本大学 佐賀大学 茨城大学 鳴門教育大学
衛星データ品質管理・地上システム運用	衛星データ品質管理	J-spacesystems（利用技術本部） AIST（地質情報研究部門、情報技術研究部門）	NASA、JAXA
	ASTER 地上システム運用・PALSAR 地上システム運用	J-spacesystems（利用技術本部）	NASA、JAXA、民間企業の複数社
	次世代アーカイブ研究	AIST（情報技術研究部門）	

（4） 成果普及体制

本事業では、成果の利用主体である民間企業を直接事業に参加させることにより、その事業成果は技術的障害がなくそのまま民間企業が利用することが可能となり、確実に普及が促進される。また合わせて本事業の成果は、年度ごとに成果報告書にまとめており、その成果報告書は広く民間企業や大学・研究機関に配付されており、多方面に広く普及していることが期待できる。AIST では、研究開発を行う上で不可欠な関連情報の収集等については、継続的に実施するとともに、国内外の関連学会へ参加し、成果の発表と情報交換に積極的に行っている。

①報告会・ワークショップ等

J-spacesystems では、毎年7月頃に事業成果報告会を開催しており、ここでは一般公開により事業の成果について報告し、広く成果の普及に努めている。また、AIST においても、各研究部門の成果報告会において、本業務を紹介している。さらに、JICA による海外研修生や資源関連業務で来日している技術者への業務紹介も積極的に実施している。

②広報活動および災害状況公表

ASTER 及び PALSAR の研究事例やデータ入手方法等の広報活動を国内外の関係学術会議を中心に実施している。具体的には成果の紹介を行うとともに、企業展示を利用してデータ普及に努めた。また、大規模災害等の発生直後には、緊急観測を実施し、被害状況が撮影された画像をホームページに公開している。

F－5－3 資金配分

本事業は昭和56年度から平成27年度まで継続して実施している委託研究事業である。今回の中間評価の対象となる平成23年度から26年度までの事業費推移を表 F-5-3-1 に示す。

表 F-5-3-1. 資金度配分（単位：百万円）

年度　平成	２３	２４	２５	２６	合計
	1,148	867	735	634	3,383

利用技術開発については、資源分野はユーザニーズを把握することにより、効果の高い研究に重点を置いて実施した。また衛星データ品質管理及び地上システム運用については、共同作業者である NASA 及び JAXA との協力・分担による業務の絞り込み、あるいは地上システム運用では日々の観測計画の作成を半自動化してオペレーションに係る作業を簡素化するなどの節約に努めた。

このように、研究開発の進捗状況や前回の中間評価の指摘を十分に勘案し、資金

の過不足がないように適切な資金配分を行い、最大の成果を得ることができるよう予算の運用管理を行った。

Ｆ－５－４　費用対効果

石油資源分野では、探鉱から生産に至るまでの段階は、「探鉱段階」と「開発・生産段階」に大きく分けられる。探鉱段階はさらに、「事前に予備的な調査を行う段階」、「予備（事前）調査結果を基に鉱区取得を行う段階」、「地質学的探査・物理探査を行う段階」、「試掘井を掘る段階」、そして「評価井を掘る段階」の 5 つに大別される。一方、開発・生産段階は、探鉱段階に行われた評価の結果、開発・生産に移行するという判断がなされた後に移行する段階であり、「生産のための設備を建設する段階」と「生産井を掘る段階」の 2 つに大別される。

各段階では、衛星データの利用方法も異なり、また利用量も異なる。さらに、当然ながら衛星データ以外のデータも利用され、そちらのデータが主となる段階も存在する。一般に、探鉱初期段階ほど案件数が多く、また衛星データの利用量は多い。一方、開発・生産段階になると案件数が減少し、利用量はさらに減少する。しかし、衛星データの利用はこの案件数の削減、開発経費－探鉱リスクの削減に最も貢献している。油・ガス田の発見に至るまでには、多数のそれぞれに適切な調査がなされ、それらの貢献が油・ガス田の発見への功績が大きいと評価される場合が多い。

油・ガス田権益の取得手段には、探鉱段階から参入する「探鉱」と、すでに油やガスが発見され、ある程度埋蔵量が確認されている鉱区へ参入する、いわゆる「埋蔵量買収」の大きく 2 とおりがあり、「埋蔵量買収」は探鉱リスクがない分だけ取得価格が高くなっている。つまり、「探鉱」から参入できればリスク分だけ利益が期待できる。

以上を勘案すると定性的には、費用対効果は十分に大きいと考えられる。

費用対効果を定量化は困難であるが、ここでは国内の石油ガス探査企業へのヒアリングを基に表 F-5-4-1 に示すモデル値を設定し試算をした。

表 F-5-4-1 石油資源分野のモデル値

大項目	小項目	モデル値
年間案件数		オペレータ案件の探鉱フェーズが 5 年間で 5 件程度 ≒1 件／年
案件規模	探鉱段階	40 億円／件 事前調査:1 億円 試掘井:10 億円 評価井:29 億円
	開発・生産段階	500 億円×年数
衛星データ利用率	オペレータ案件	陸上、海上合わせて 90%の利用
	ノンオペレータ案件	ノンオペレータ案件では、予備（事前）調査をオペレータ候補企業が実施することが多いため、衛星データの利用は限定的
貢献率	経費節減	陸上: ● 地上踏査で代替の場合はコスト 10 倍 ● ボーリングは 10 億円/本
	収入増	鉱区取得、生産・開発案件化につながっているが定量的情報は得られず。
	機会損失防止	広域調査やリスク地域の調査においては代替手段はなく、また、詳細な地質図の入手が困難な国も多いため、効果は大きいが、定量的情報は得られず。

経費節減効果を図 F-5-4-1 に示した代替法により試算すると、1件当たり8億円となる。

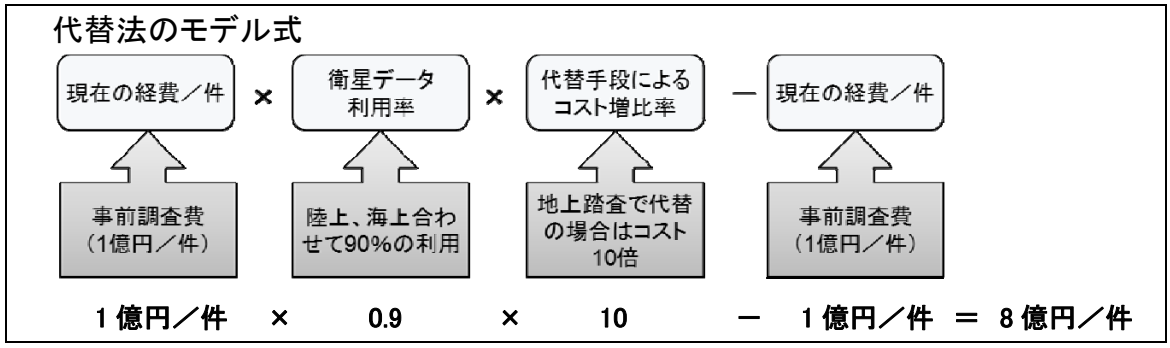


図 F-5-4-1 代替法による経費節減効果の試算結果

また、経費節減効果を図 F-5-4-2 に示した削減貢献度の設定による試算では、1件当たり 9 億円となる。

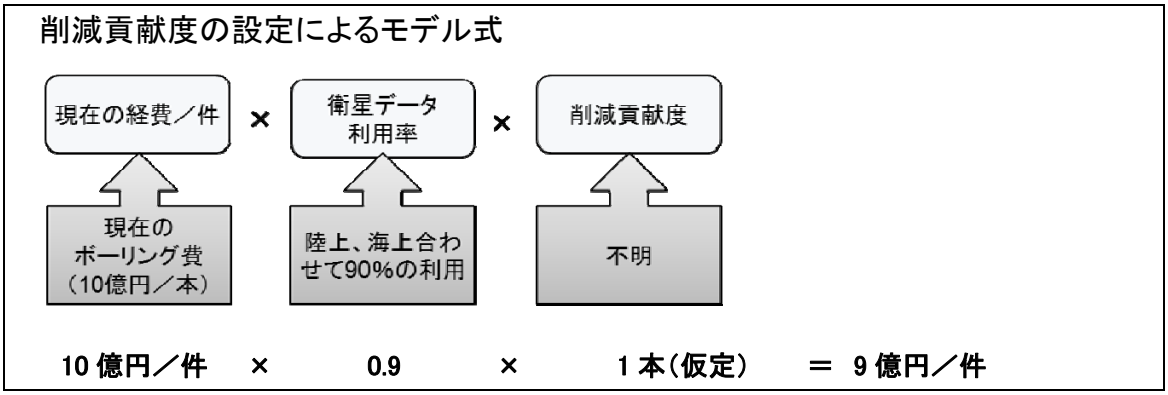


図 F-5-4-2 削減貢献度の設定による経費節減効果の試算結果

この試算結果が妥当な数値であると結論付けることは難しいが、過去の事例と比較しほぼ同じ桁に収まっていることを考えると、石油資源分野での衛星データによる費用節減効果は数億円程度とみなすことができると考えられる、以上から充分な費用対効果が得られているものと考える。

Ｆ－５－５　変化への対応

（1） 技術動向・社会情勢・市場ニーズ等の変化への対応

本研究開発においては、下記に示すようにさまざまな状況変化に対応してきている。

① 石油資源分野等ニーズ変化への対応

「シェール革命」と呼ばれるシェール層からの石油や天然ガス（シェールガス）の抽出は世界のエネルギー事情を大きく変え、石油資源開発の対象は在来型資源から非在来型資源へ移行しつつある。それに対応して、シェールガス等の開発好適地抽出技術の開発テーマを増やした。

我が国の石油ガス開発企業の石油ガス資源探査の対象は陸域から海域特に大水深に移ってきているため、石油ガス開発の参入の可能性が高い海域で重点的にオイルスリックのデータベースの整備とオイルスリック抽出精度の向上を図った。

石油ガス探査段階に加えて石油ガス開発・生産段階で衛星データを利用する需要が増加しているため、大規模油ガス田の生産状況監視のツールとなることが期待される差分干渉 SAR 技術の研究を数多くこなし、その監視技術の確立に努めた。

地球温暖化の影響とも言われる近年の海氷の減少傾向による開発にかかる自然条件の緩和期待や探鉱開発技術の発達等で、北極圏は残された石油・天然ガスの最後のフロンティアとして石油ガス開発が期待されている。それに対応すべく衛星データの利用した開発時の環境監視技術の開発を試みた。

陸域における石油ガス探査は熟成段階にある地域が多く、今後新たな油ガス田を発見することは年々難しくなっている。既存油ガス田周辺の探鉱・開発の見直しも重要なテーマとなって来ている。今後の国内の石油ガス探査企業等の探鉱・開発に役

立つように、これまで蓄積された研究成果の画像解析データや付帯資料を WebGIS[8] で閲覧・利用できるように整理し始めた。

②他分野における変化への対応

４－２－B波及効果の節において記載しているとおり、金属資源分野については、特にレアメタル・レアアース資源の確保が重要となっている。このような状況に対応するため、資源エネルギー庁の主導で、ASTER・PALSAR データ、そして本事業で開発されたデータ利用技術の成果が集約されている、資源探査支援システム「GRIAS」の開発・運用が進められている。

③ 相互運用性向上のための標準化技術への対応

IT 技術の進展により、インターネットを通じて様々な空間情報をやりとりすることが可能になってきている。しかも、異なる国や機関から提出される様々なフォーマットのデータを標準化し、情報相互運用性の高い情報配信が求められている。そのため、地質図など様々な地質情報をこれらのプロトコルを経由して、インターネット上で利用できるように標準化する技術の研究を進めている。

（2） 代替的手段との比較

石油資源遠隔探知技術の研究開発の遂行に際し、使用する衛星データについての性能的および経済的な比較検討を行った。平成25年以前は ASTER のように、可視近赤外、短波長赤外及び熱赤外データやステレオデータをすべて備えたセンサは国内外に存在しなかったが、平成２６年から熱赤外(TIR)データ以外は米国 DigitalGlobe 社の WorldView-3 によって代替が可能となった。PALSAR についても、平成25年以前は森林における透過能力の高い L バンドをもつ PALSAR の性能と同程度のものは国内外に存在しないため、衛星を利用した代替手段はなかったが、 平成２６年からその後継機である ALOS-2/PALSAR-2 により代替が可能となった。表 F-5-5-1 に代替可能な衛星データとの仕様比較を示す。

[8]地理情報システムをインターネットを使って操作できるようにしたシステムで、広く地図等を使った情報の公開とその情報を使ったユーザのニーズにあわせた情報の加工を行うのに便利である。

表 F-5-5-1　代替可能な衛星データとの仕様比較

センサ名称	主な仕様			
	空間分解能	観測幅	スペクトル帯域	立体視
ASTER	VNIR:15m、 SWIR:30m、 TIR:90m	60km	VNIR,SWIR,TIR	同一軌道立体視
WorldView-3	VNIR: 1.24m、 SWIR: 3.70m	13.1km （直下）	VNIR,SWIR	ポインティング立体視

センサ名称	主な仕様			
	空間分解能	観測幅	波長	偏波
PALSAR	10 m	70km	L バンド	全偏波
PALSAR-2	3～10m	50～70km	L バンド	全偏波

しかしながら経済的な面を考えると、空間分解能や 1 シーンの大きさが大きく異なるため、その比較は難しいものの、仮に面積単位の販売価格を単純に比較した場合、WorldView-3 は未定ながら ASTER の数百倍～数千倍であることが想定され、PALSAR-2 も PALSAR の 4 倍であり、既存の ASTER 及び PALSAR に比べてデータの入手に掛る費用は大幅な増加となる。広域探査のような、高分解能のデータや新規のデータを使用する必要性がなければ、ASTER 及び PALSAR を利用する方が経済的に優れている。

その他、有人および無人航空機等を利用した観測データによる代替は可能であるが、実際には他国の領空内を自由に飛行しデータを取得することは困難なため代替手段とはなりえない。

Ｇ　ハイパースペクトルセンサ等の
研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

日本電気株式会社

Ｇ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｇ－１－１　事業目的

我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率は約 20%に過ぎない。エネルギー基本計画（平成 22 年 6 月）では、これを 2030 年までに 40%以上まで引き上げることを目標としており、国内外において石油資源開発を効率的に進める必要がある。

また、平成 22 年度においては、我が国の資源確保に大きな影響を与える出来事が起こっている。メキシコ湾の大規模な海底油田事故は海底油田開発のリスクの大きさを再認識させ、中東アフリカ地域における民主化運動は今でもなお産油国及びその周辺が政情的に不安定であることを示している。さらに、東日本大震災による福島第一原発の事故により、準国産エネルギーとも言われた原発の今後の見通しが不透明である。エネルギーセキュリティの観点からは、今後も我が国の自主開発比率を高め、万が一の際に対処できる備えが必要である。

欧米のメジャーと呼ばれる大手石油会社は、衛星画像データを用いて地質構造解析を行い、鉱区選定の大きな判断材料としている。メジャーが、年間に鉱区に投資する額が 1 社当たり 150 億ドルから 200 億ドル程度なのに比べ、日本は、石油開発の中核的企業でさえ、年間数百億円程度である。原油の高騰が続いている中、メジャーは鉱区取得の取組を促進しており、従来の衛星画像データにより判別できる有望地域は少なくなりつつある。よって、日本資本の石油開発会社がメジャーに先んじて有望な鉱区を獲得するためには地質について、より詳細に解析することが可能な高性能センサの開発が不可欠である。

上記背景を踏まえ、本事業では宇宙から地球表面を観測する高性能センサである HISUI（Hyperspectral Imager Suite：高性能のハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサの両センサを合わせたセンサの名称。）を開発している。HISUI の内のセンサの一つであるハイパースペクトルセンサは、世界各国で開発が実施されているところであるが、本事業では世界初の衛星搭載用実用ハイパースペクトルセンサの開発を目指している。全世界に先駆けて衛星搭載用実用ハイパースペクトルセンサを実現することにより、石油埋蔵の有望地域を早期に発見し、自主開発比率を高め、我が国への石油資源の安定供給に資することを本事業の目的とする。

Ｇ－１－２　政策的位置付け

ハイパースペクトルセンサ等の研究開発の政策的位置付けとしては、以下のものが挙げられる。

①「新成長戦略」（平成２２年６月１８日、閣議決定）
②「産業構造ビジョン２０１０」（平成２２年６月３日、産業構造審議会産業競争力部会

報告書）
③「宇宙基本計画」（平成21年6月2日、宇宙開発戦略本部決定）
④「宇宙分野における重点施策について」（平成22年5月25日、宇宙開発戦略本部決定）
⑤「科学技術基本政策策定の基本方針(案)」（平成22年6月16日、総合科学技術会議基本政策専門調査会）
⑥「エネルギー基本計画」（平成22年6月18日閣議決定）

これらの政策の中では、資源・エネルギー供給の円滑化、食糧供給の円滑化、国土保全・管理、地球規模の環境問題の解決等が目的として記載されている。また、エネルギー基本計画（平成22年6月）では、我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率（約20%）を2030年までに40%以上まで引き上げることを目標としており、国内外において石油資源開発を効率的に進める必要がある。衛星を活用したリモートセンシング（遠隔探知）技術には、①産油国と調整を経ずに、開発の有望性に関する評価が可能、②一度に広範囲の地域の分析が可能、③立入りが困難な地域の分析が可能、等の利点がある。

上記各政策が有する課題を解決するために、高波長分解能を有する高性能ハイパースペクトルセンサの開発は非常に重要な位置付けとなっている。

また、技術戦略マップ２０１０（宇宙分野）においても「資源探査・開発や農林水産業などの行政での利用、国土管理や災害監視等の公共的利用など、国民・社会への貢献を主眼とする地球観測衛星分野に対しては、従来の技術開発中心から利用ニーズ主導により、衛星開発を継続的に進める必要があり、現在、陸域観測技術衛星「だいち（ＡＬＯＳ）」の後継機や次世代の地球観測センサであるハイパースペクトルセンサの開発が行われている。」と明示されている。

Ｇ－１－３　国の関与の必要性

ハイパースペクトルセンサの開発は、国際的に見て極めて高度な技術が要求されるために未だ実験・研究段階であり、商業段階にはないものの、その衛星搭載用実用ハイパースペクトルセンサの開発要望は世界的に拡大している。具体的には、ハイパースペクトルセンサから得られるデータは従来のリモートセンシング市場における重要な購買層である資源探査会社、インテリジェンス機関、航空測量会社、地図作成会社等による活用だけでなく、環境観測・災害監視・森林観測・食糧分野等の産業利用が大幅に拡大することが期待されている。その一方で、衛星に搭載するセンサ及びそのデータの利用技術・処理技術の開発には大規模な初期投資が必要なため、民間による自主的な取組を期待することは難しい。

鉱物資源分野においては、資源価格高騰等により、資源国は豊富な資金を有

し、資金面のみからのパートナーは必ずしも求めていない状況の下、我が国リモートセンシング技術は、資源国から高く評価されるとともに、一部の資源メジャーとの関係構築に発展している。鉱物資源の供給に関しては制約やリスクが大きく、市場メカニズムのみによって安定供給確保を図ることが困難である中で、国が技術開発等に積極的に支援することが必要不可欠である。

Ｇ－２　研究開発目標

Ｇ－２－１　研究開発目標

HISUI は、資源探査用衛星センサである ASTER（1999 年打上げ。既に設計寿命 5 年を超えて運用中）の後継機として開発を行い、物質の解析に有用なスペクトル分解能を飛躍的に向上させ、より高精度なデータを得ることを可能とする。ASTER センサでは鉱物の分類が 10 程度しかできなかったが、本センサにより 30 程度まで特定することができる。このデータを解析することによって石油埋蔵地域のより詳細な特定を行うことができるため、今後の石油資源の安定的な確保に非常に有用である。HISUI を開発し、我が国への石油資源の安定供給のための高度リモートセンシング技術の向上及び利用の拡大を図ることを本研究開発の目標とする。

Ｇ－２－２　全体の目標設定

（１）目標・指標の設定

本プロジェクトの達成目標の設定に当たっては、ユーザの意見を反映するため資源、農業、環境などの分野の専門家へのアンケート、聞き取り調査及び航空機ハイパースペクトルデータによる再シミュレーション評価を実施し、そのデータをもとに、ミッション要求審査委員会において審議し、以下に述べる目標を最終的に設定した。

主要な項目の開発目標は表 G-2-2-1 に示すとおりである。

表 G-2-2-1　全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
ハイパースペクトルセンサ 空間分解能　30m 以下 観測幅　30km バンド数　185 以上 S/N 比　VNIR 450 以上 SWIR 300 以上 マルチスペクトルセンサ 空間分解能　5m 以下 観測幅　90km バンド数　4 S/N 比　200 以上	詳細設計結果として左記の仕様を達成する。	ハイパースペクトルセンサ 航空機ハイパー、Hyperion 等のデータを実際に使用しているユーザから高 S/N データが必須との意見があり、 VNIR（可視近赤外）：450 以上 SWIR（短波長赤外）：300 以上 の目標を設定した。 この値は世界最高レベルである。 マルチスペクトルセンサ ASTER のユーザの性能向上要求を反映した。 高空間分解能：15m→5m 高頻度観測(広観測幅)： 60km→90km バンド数：3→4　青バンド追加 ・青バンド追加により沿岸域の観測に有利 ・トゥルーカラーが可能。 S/N 比：160→200 ASTER 相当以上

注）Hyperion：米国の実験的ハイパーセンサ(2000 年打上)

さらに詳細な項目については以下の表 G-2-2-2 および表 G-2-2-3 に示す目標を設定し、各項目をフライトモデルにおいて確認することを最終開発目標とした。

表G-2-2-2　ハイパースペクトルセンサ（ＨＳ）の最終開発目標

HS	項目	達成目標
1	空間分解能	30m 以下
2	観測幅	30km 程度 （空間分解能の 1000 倍）
3	バンド数	185 程度
4	観測波長域	0.4～2.5μm
5	波長分解能（ﾊﾞﾝﾄﾞ幅）	平均 10nm 以下（VNIR） 平均 12.5nm 以下（SWIR）
6	最大入射輝度	アルベド　70%
7	S/N 比	仕様値 450 以上@620nm 仕様値 300 以上@2100nm （前提：アルベド 30%・太陽天頂角 24.5 度）
8	暗時雑音	S/N 比規定レベルの Signal の 1/350 以下
9	迷光	S/N 比規定レベルの Signal の 1/100 以下
10	MTF	0.2 以上
11	ラジオメトリック分解能	量子化ビット数 10bit 以上
12	波長精度	VNIR：誤差　バンド幅の 2%以下 SWIR：誤差　バンド幅の 5%以下
13	バンド間相対感度精度	誤差：2%以下
14	オンボード圧縮・処理能力	有 （可逆のデータ圧縮を有する）
15	ポインティング機能	有 （マルチスペクトルセンサの観測範囲内でのハイパースペクトルセンサの独立ポインティング機能を有する）

※波長校正時には上記の1/2のバンド幅にて校正を行うこととする。

注）VNIR：可視近赤外、SWIR：短波長赤外、アルベド：地表反射率

太陽天頂角：太陽方向と地表点の天頂のなす角

MTF:　：振幅伝達関数=光学解像度の品質指標

ラジオメトリック分解能：（地球からの）放射エネルギー分解能。ここでは、デジタル信号に変換した時の分解能をいう。

表G-2-2-3　マルチスペクトルセンサ（ＭＳ）の最終開発目標

MS	項目	達成目標
１	空間分解能	5m 以下
２	観測幅	90km 程度 （空間分解能の 18000 倍）
３	バンド数	4
４	観測波長域	0.45～0.89μm
５	最大入射輝度	70%
６	S/N 比	仕様値 200 以上 @全ての観測帯 （前提：アルベド 70%・太陽天頂角 24.5 度）
７	暗時雑音	S/N 比規定レベルでの 1/400 以下
８	迷光	S/N 比規定レベルの Signal の 1/100 以下
９	MTF	0.3 以上
10	ラジオメトリック 分解能	量子化ビット数 8bit 以上
11	バンド間相対感度 精度	誤差：2%以下
12	オンボード圧縮・ 処理能力	有 （可逆のデータ圧縮を有する）
13	ポインティング機能	有 （衛星ポインティングも対象）

※ラジオメトリック分解能については、ゲイン切り替え、データ処理上の工夫等により実質的に 12bit以上の分解能を実現する。

（前提条件）

・設計寿命 5 年以上。目標寿命 7 年。

・衛星実証時の軌道高度： 625.7km。

（２）　目標設定理由

目標設定に当たっては、ユーザの要求に合致していること、世界最高レベルの性能を有していることを前提に検討を行った。

ハイパースペクトルセンサに関しては、航空機ハイパー、Hyperion などのデータを実際に使用しているユーザから高 SN データが必須との要望があり、世界的にも最高水準にある以下の SN が可能な目標とした。

VNIR（可視近赤外）　450 以上

SWIR（短波長赤外）　300 以上

マルチスペクトルセンサに関しては、ASTER のユーザのデータの継続性がありさらなる性能向上をとの要求を反映した。

高空間分解能　　15m→5m

高頻度観測(広観測幅)　60km→90km

バンド数　　3→4　青バンド追加

（沿岸域の観測に有利であり、またトゥルーカラー*）が可能）

*)　青バンドを追加することにより、赤、緑、青の３バンドを使用して自然色に

近いカラー画像の提供が可能になる。

S/N 比　ASTER 相当以上　160→200

バンドの波長域に関しては国際間でデータの共通利用を考慮し、Landsat を基準にして設定したが、バンド４に関しては、技術委員会での議論の結果、酸素(0.76μm)および水蒸気(0.90μm)の吸収帯を外すため、観測波長帯：0.76-0.90μm を 0.78-0.89μm に変更することとなった。

注）Landsat：米国の地球観測衛星

Ｇ－２－３　個別要素技術の目標設定

表 G-2-3-1　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・ 根拠等
システム設計	表２－２－Ｇ－１ および 表２－２－Ｇ－２ 表２－２－Ｇ－３ と同様	詳細設計結果として左記の仕様を達成する。	表２－２－Ｇ－１と同様
フライトモデル	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサのフライトモデルを設計・製作し、地上検証試験によりセンサ性能目標値の実現性を確認する。 宇宙実証時、軌道上での運用に必要な各種耐環境性、電磁適合性についても併せて検証する。	フライトモデル用コンポーネントの製作及び試験を行う。 フライトモデルの組立てを開始する。	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサを構成するコンポーネントについて、熱機械環境を含む性能を試験し、宇宙用としての品質を確認する。
宇宙実証 支援システム	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサの宇宙実証を行うため、宇宙実証支援システムを打上げ前までに整備する。	宇宙実証支援システムとして、センサ性能を評価する解析システム（機器実証部）及び地上データシステムの設計・製造を行う。	宇宙実証支援システムにおいて、宇宙実証に必要な機能を打上げ前までに確認する。

Ｇ－３　成果、目標の達成度

Ｇ－３－１　成果

Ｇ－３－１－１　全体成果

ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサについて、平成２３年度から平成２６年度にかけて、構成するコンポーネント及びセンサシステムの詳細設計を行い、詳細設計審査会（CDR）において、最終目標性能を達成可能であることを確認した。

また、平成２３年度から平成２６年度にかけて、両センサを構成するコンポーネントのフライトモデルを製作し、軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性、電磁適合性等を含む試験により、宇宙用としての品質を確認した。

さらに上記コンポーネントを用い、両センサのフライトモデルの組立を開始した。

詳細設計により得られたハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサの外観を図 G-3-1-1-1 および図 G-3-1-1-2 に示す。

図 G-3-1-1-1　ハイパースペクトルセンサの外観

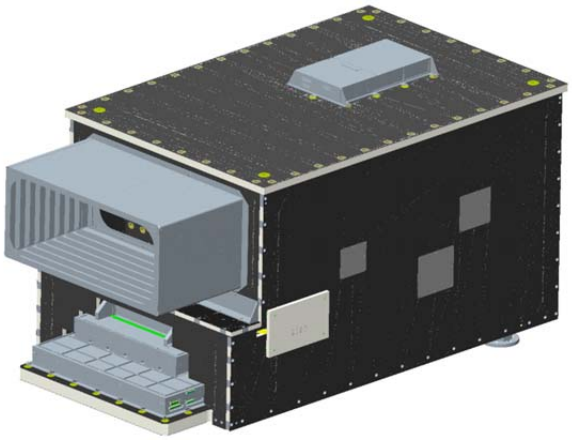


図 G-3-1-1-2　マルチスペクトルセンサの外観

宇宙実証支援システムについて、平成２４年度から平成２６年度にかけて、構成する機器実証部（センサ性能を評価する解析システム）及び地上データシステムの設計を実施し、設計審査会において、宇宙実証に必要な機能が設計されていることを確認した。また、平成２６年度において、設計結果に基づき両システムの製造を実施した。

Ｇ－３－１－２　個別要素技術成果

（１）システム設計

ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサについて、構成するコンポーネント及びセンサシステムの詳細設計を行い、コンポーネント詳細設計審査会（CDR-1、平成２５年３月)、マルチセンサシステム詳細設計審査会（CDR-2､平成２６年７月)及びハイパーセンサシステム詳細設計審査会(CDR-2、平成２６年１１月）を通じて詳細設計結果の審査を行い、最終目標性能を達成可能であることを確認した。

（２）フライトモデル用コンポーネント

以下のフライトモデル用コンポーネントを製作し､軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性、電磁適合性等を含む試験により、宇宙用としての品質を確認した。

- ハイパースペクトルセンサ用コンポーネント
  - ◆ 集光光学部
  - ◆ 可視近赤外分光部
  - ◆ 短波長赤外分光部
  - ◆ 可視近赤外検出器部
  - ◆ 短波長赤外検出器部
  - ◆ 冷凍機部
  - ◆ 校正光学部
  - ◆ 可視近赤外信号処理部
  - ◆ 短波長赤外アナログ信号処理部
  - ◆ 冷凍機制御部
  - ◆ 校正電気部
  - ◆ 熱制御部
  - ◆ 電気回路ユニット

- マルチスペクトルセンサ用コンポーネント
  - ◆ 集光光学部
  - ◆ 検出器部

- ◆ 校正光学部
- ◆ 信号処理部
- ◆ 校正電気部
- ◆ 熱制御部
- ◆ 電気回路ユニット

以下、各コンポーネントの外観写真を示す。

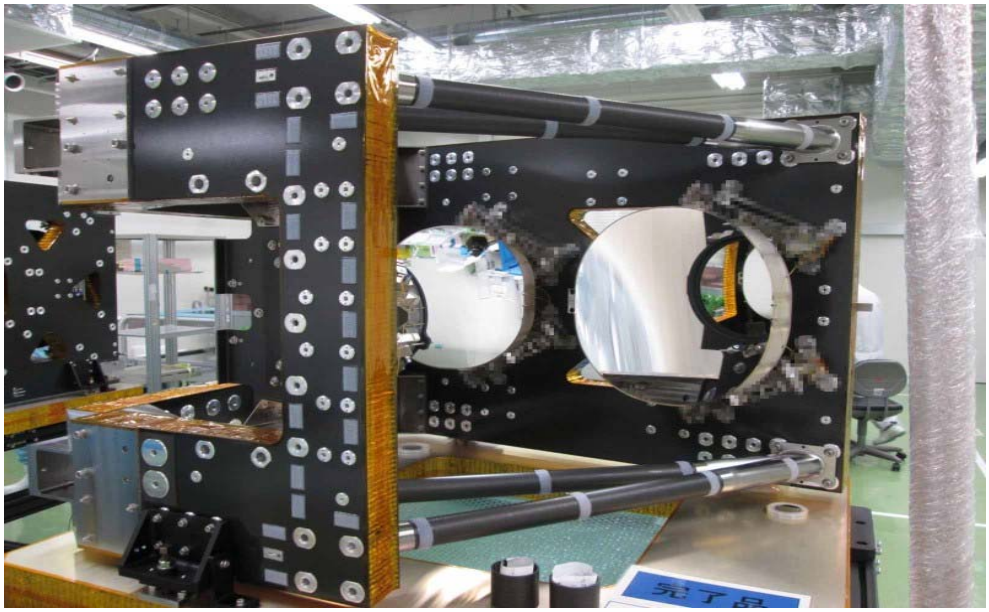


図 G-3-1-2-1　ハイパー集光光学部

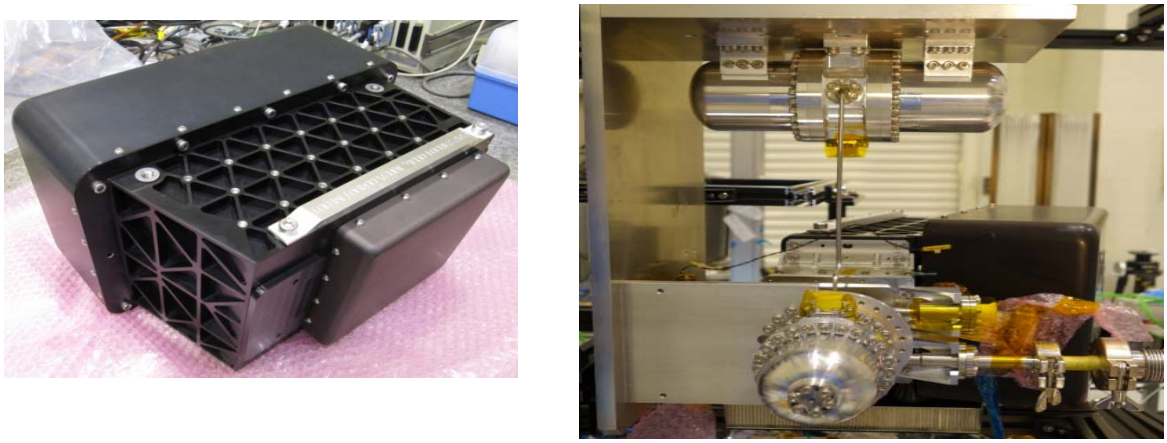


図 G-3-1-2-2　ハイパー可視近赤外分光部（左）
ハイパー短波長赤外分光部及び冷凍機部（右）

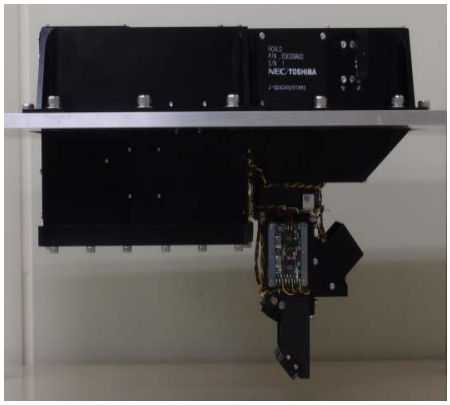


図 G-3-1-2-3　ハイパー校正光学部（左）及び校正電気部（右）

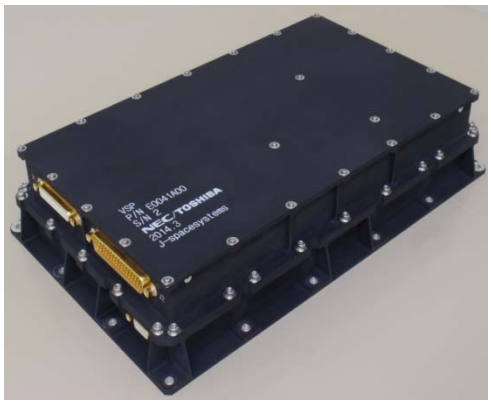
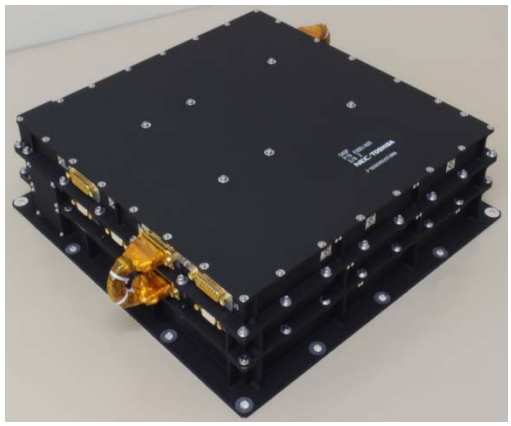



図 G-3-1-2-4　ハイパー可視近赤外信号処理部（左）
ハイパー短波長信号処理部（右）

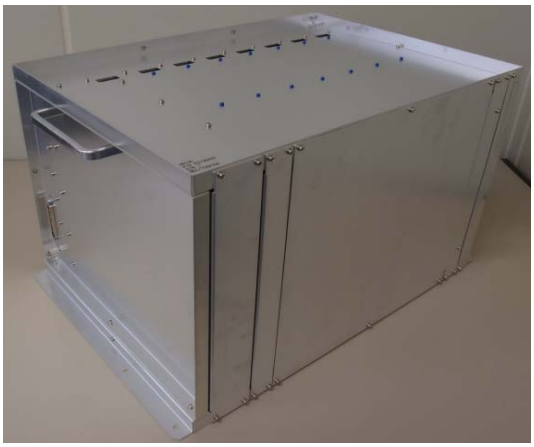


図 G-3-1-2-5　ハイパー電気回路ユニット（左）及び熱制御部（右）

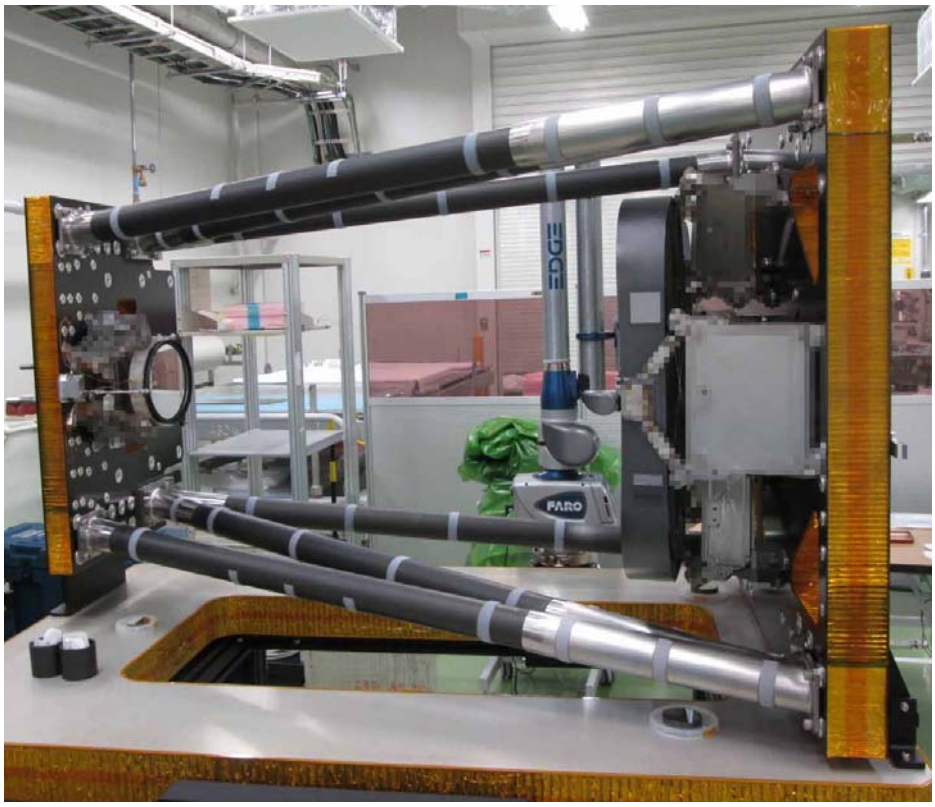


図 G-3-1-2-6　マルチ集光光学部

図 G-3-1-2-7　マルチ校正光学部（左）及び校正電気部（右）

図 G-3-1-2-8　マルチ検出部（左）及びマルチ信号処理部（右）

図 G-3-1-2-9　マルチ電気回路ユニット（左）及び熱制御部（右）

（３）フライトモデル

（２）項のコンポーネントを用い、両センサのフライトモデルの組立を開始した。

図 G-3-1-2-10 にハイパースペクトルセンサの内部透視図を、図 G-3-1-2-11 に組立作業中の外観写真を、図 G-3-1-2-12 にマルチスペクトルセンサの内部透視図を、図 G-3-1-2-13 に組立作業中の外観写真を示す。

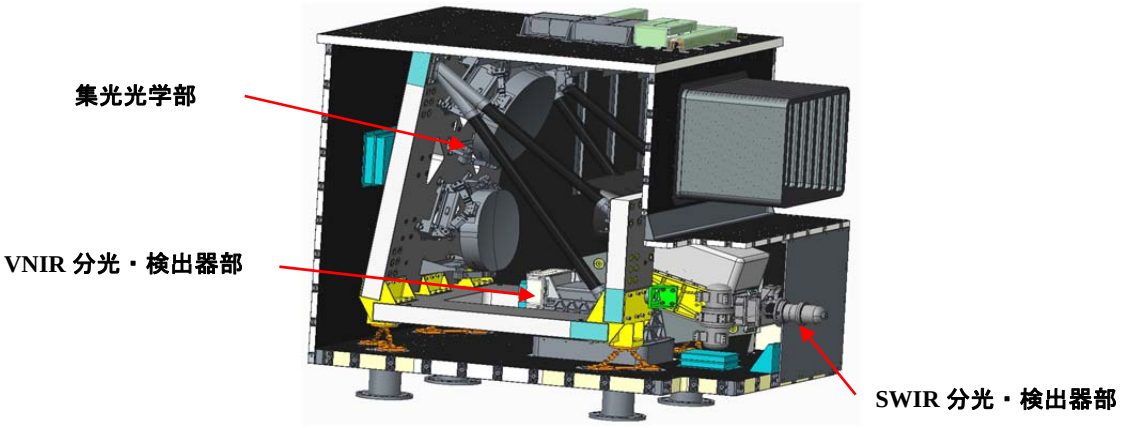


図 G-3-1-2-10　ハイパースペクトルセンサの内部透視図

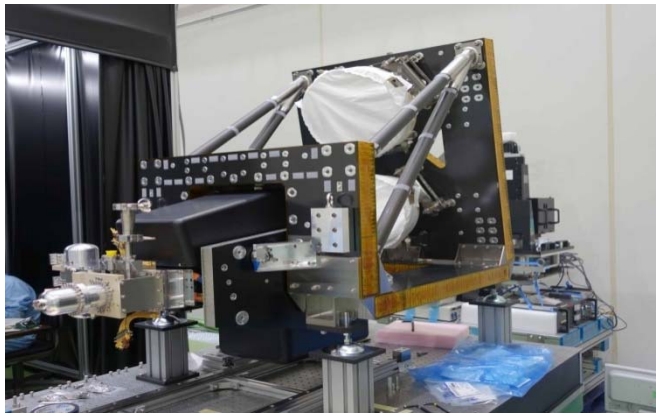


図 G-3-1-2-11　ハイパースペクトルセンサの組立作業

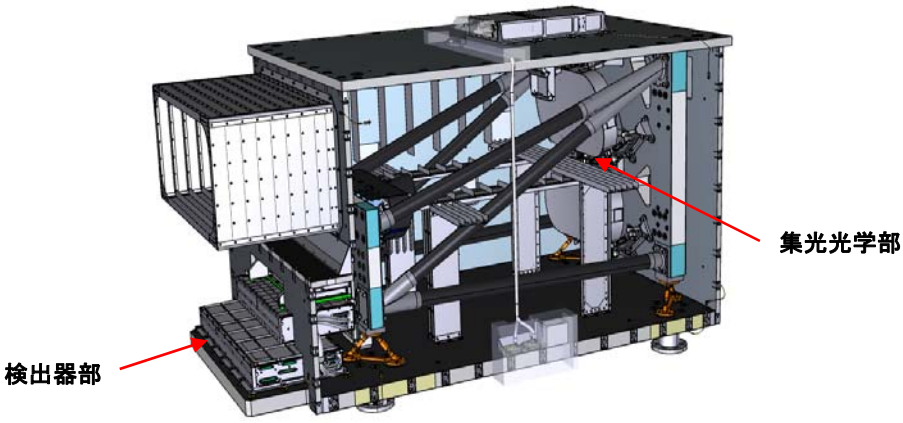


図 G-3-1-2-12　マルチスペクトルセンサの内部透視図

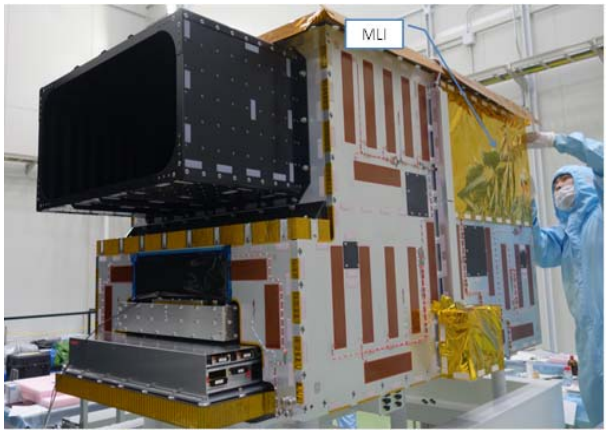


図 G-3-1-2-13　マルチスペクトルセンサの組立作業

（４）宇宙実証支援システム

宇宙実証支援システムはセンサ性能を評価する解析システム（機器実証部）と地上データシステムで構成される。以下に両システムの開発成果を示す。

機器実証部は、センサの健全性を確認する機能（機器モニタ機能）と、観測データの品質を検証する機能（機器実証機能）を有するシステムとして、設計、製造を実施した。

基本設計審査会（PDR、平成２６年３月）、詳細設計審査会（CDR、平成２６年９月）を通じて設計結果の審査を行い、最終目標を達成可能であることを確認した。

以下に、設計に基づき製造した機器実証部の画面例を示す。

機器モニタ機能の実装結果として、センサテレメトリデータ表示画面を図 G-3-1-2-14 に示す。衛星から受信したセンサテレメトリデータを表示し、値が正常な範囲内にあることを確認する。

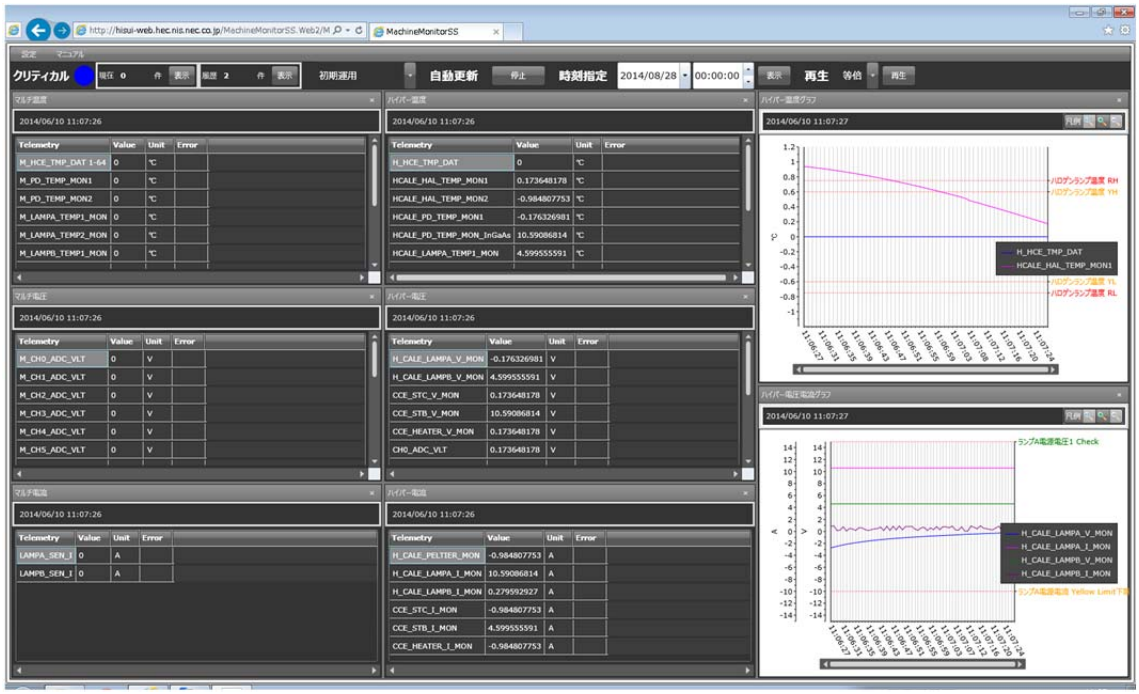


図 G-3-1-2-14　センサテレメトリデータ表示画面

機器実証機能の実装結果として、観測データ検証用画面を図 G-3-1-2-15 に示す。観測データのイメージ、スペクトル、メタ情報等を表示し、品質を定期的に検証する。

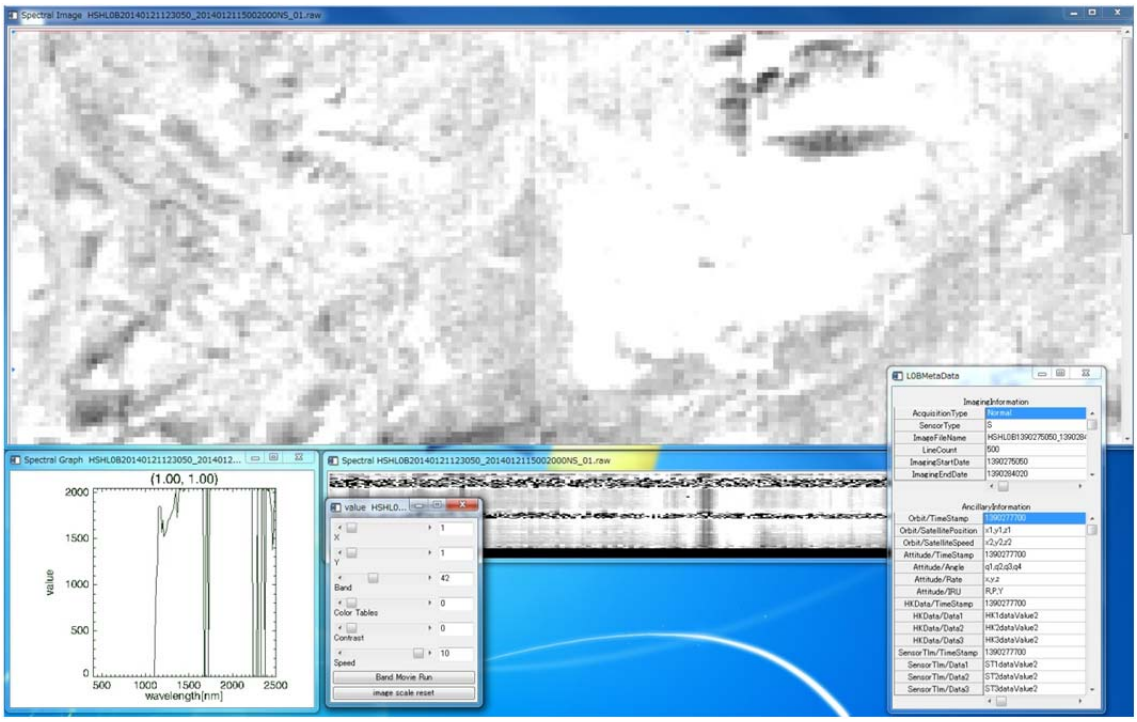


図 G-3-1-2-15　観測データ検証用画面

地上データシステムは、ユーザから HISUI の観測要求を受け付け、観測計画を立案する機能と、観測したデータに幾何補正、放射補正等を施し画像データを生産・保存する機能、ユーザからの画像検索・注文・配付を行う機能、等を有する総合地上データシステムとして、設計、製造を実施した。

図 G-3-1-2-16 に地上データシステム(HISUI GDS)の位置付けを、また表 G-3-1-2-1 に地上データシステムで取り扱うデータを示す。

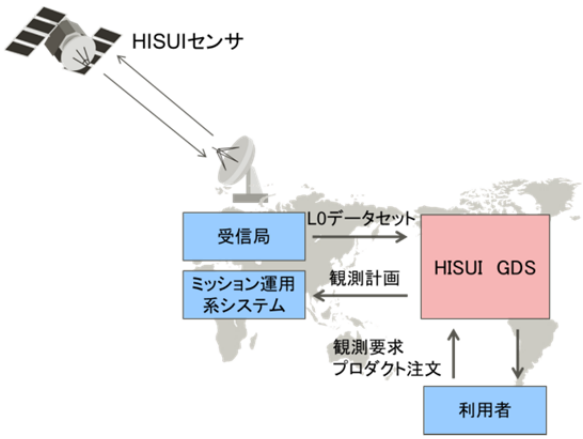


図 G-3-1-2-16　地上データシステム（HISUI GDS）の位置付け

表 G-3-1-2-1　地上データシステムで取り扱うデータ

レベル	解説	備考
L0 データ	未処理データ	
L0B データ	処理に必要な全ての情報を包括したデータ	保管
L1A プロダクト	L0B に対して、シーンカットしたデータ（各種補正のための情報が付属する）	一般公開
L1R プロダクト	L1A に対して、放射量補正し、大気上端のラジアンスに変換したデータ（幾何投影によるリサンプリングを実施していない）	一般公開
L1G プロダクト	L1R に対して、幾何補正（投影）・オルソ補正（投影）したデータ（望遠鏡間、視差、キーストーンの幾何補正を含む）	一般公開

基本設計審査会（PDR、平成２５年１２月）、詳細設計審査会（CDR、平成２６年３月）を通じて設計結果の審査を行い、最終目標を達成可能であることを確認した。

以下に、設計に基づき製造した地上データシステムの画面例を示す。

観測計画作成機能の実装結果として、観測要求登録・参照画面を図 G-3-1-2-17 に、観測計画参照画面を図 G-3-1-2-18 に示す。

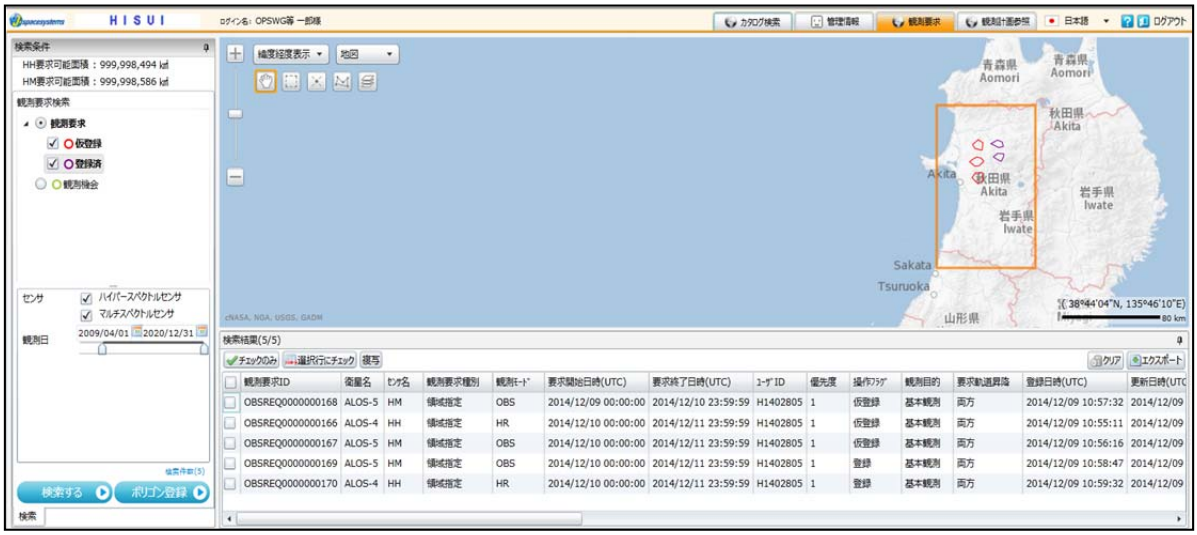


図 G-3-1-2-17　観測要求登録・参照画面

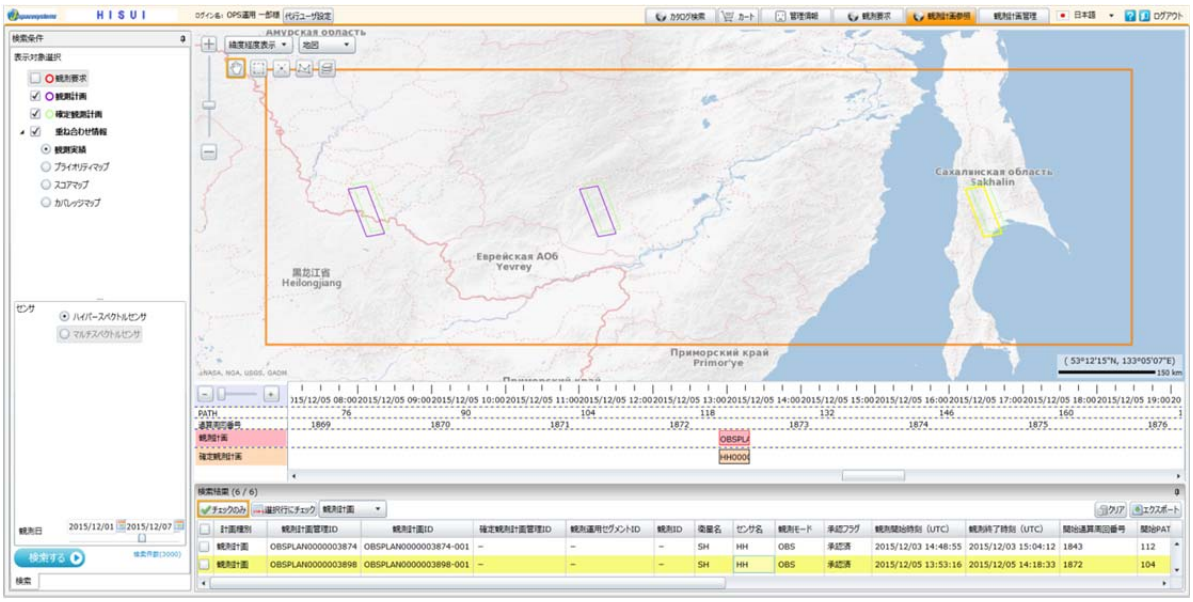


図 G-3-1-2-18　観測計画参照画面

プロダクト生産・保存機能の実装結果として、プロダクト注文管理画面を図 G-3-1-2-19 に、プロダクト生産管理画面を図 G-3-1-2-20 に、プロダクト品質確認画面を図 G-3-1-2-21 に示す。

図 G-3-1-2-19　プロダクト注文管理画面

図 G-3-1-2-20　プロダクト生産管理画面

図 G-3-1-2-21　プロダクト品質確認画面

ユーザインタフェース機能の実装結果として、プロダクト（カタログ）検索画面を図 G-3-1-2-22 に、プロダクト注文状況確認画面を図 G-3-1-2-23 に、オンラインダウンロード画面を図 G-3-1-2-24 に、ユーザ情報管理画面を図 G-3-1-2-25 に示す。

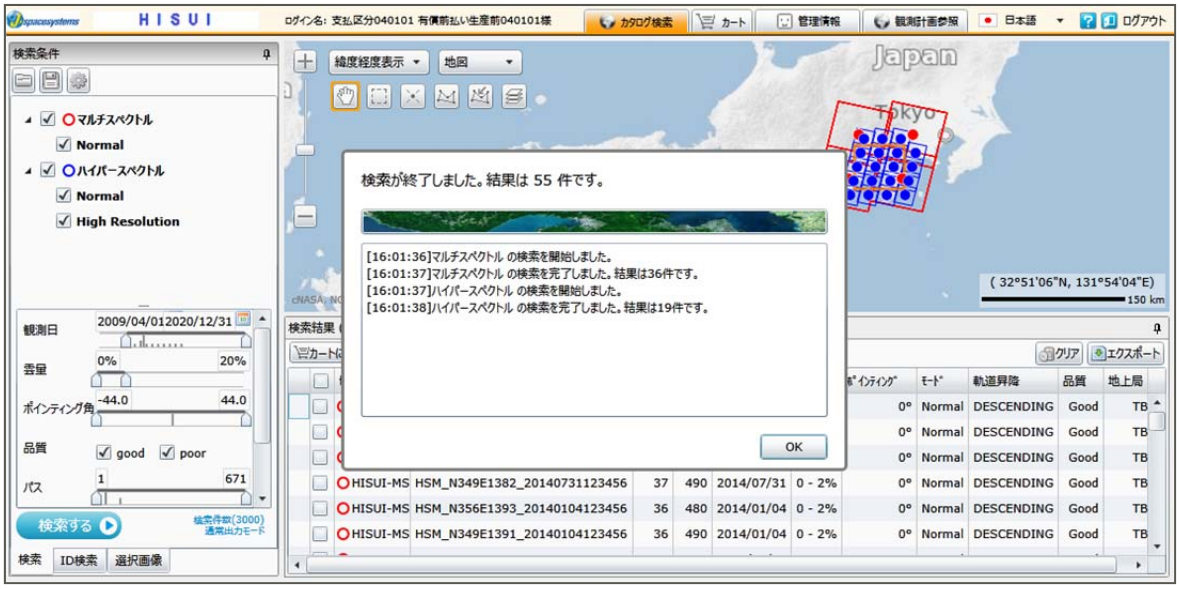


図 G-3-1-2-22　プロダクト（カタログ）検索画面

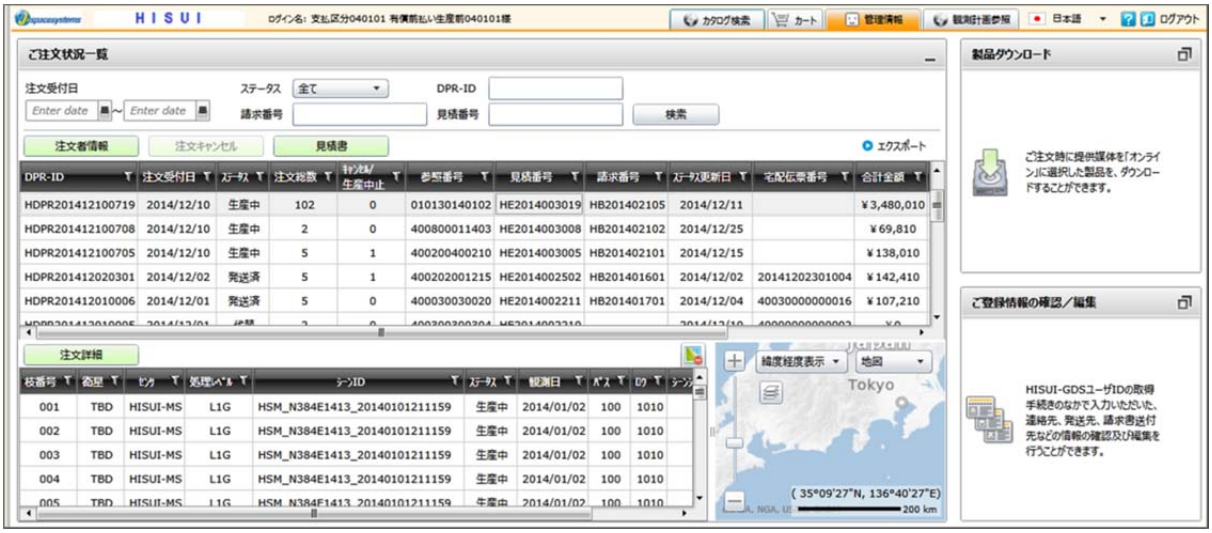


図 G-3-1-2-23　プロダクト注文状況確認画面

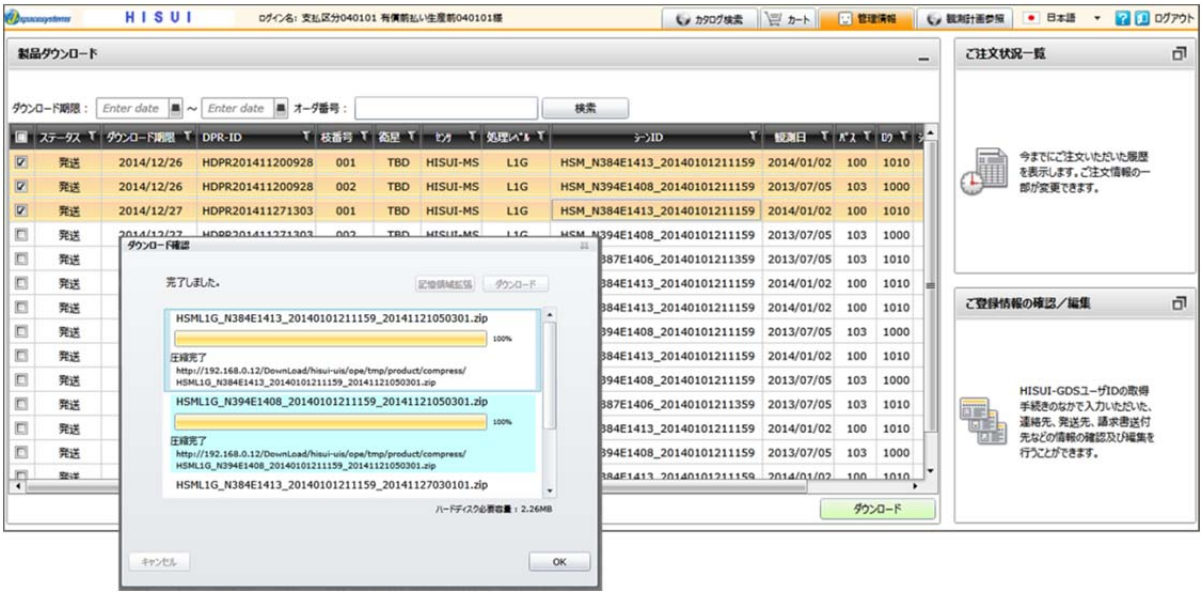


図 G-3-1-2-24　オンラインダウンロード画面

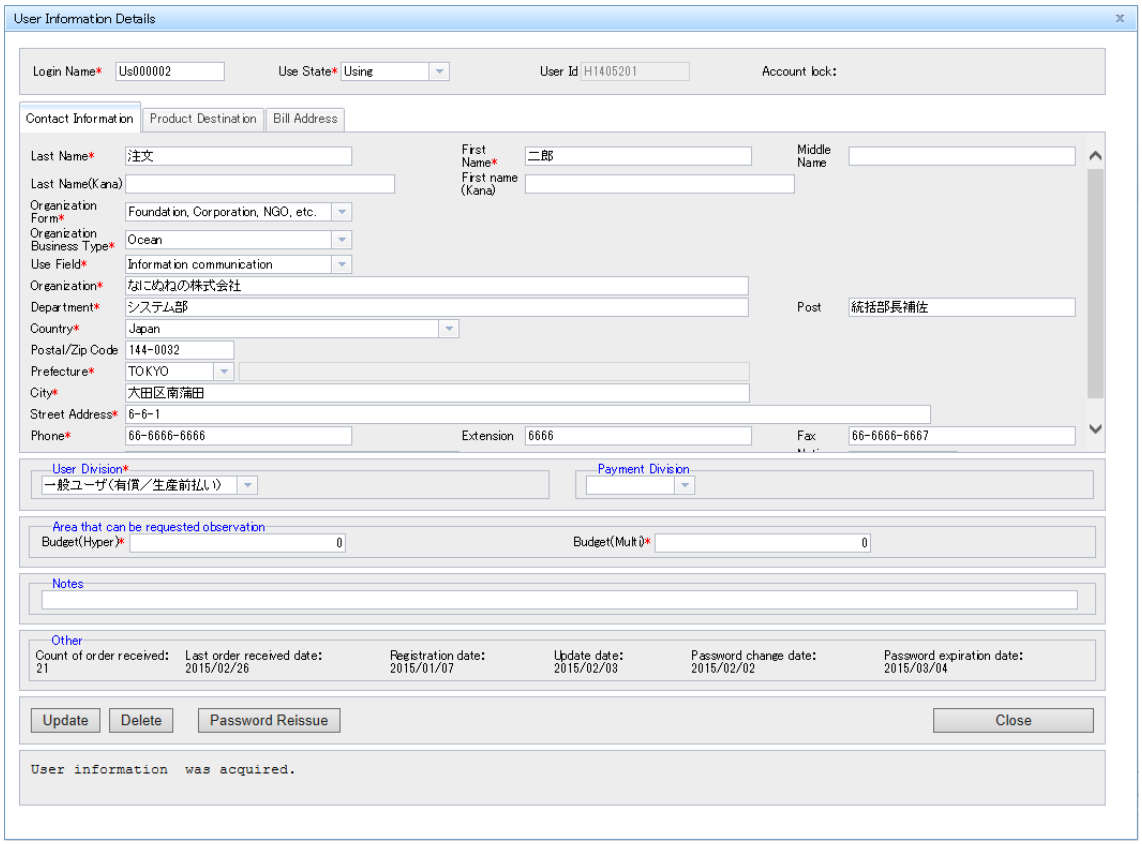


図 G-3-1-2-25　ユーザ情報管理画面

Ｇ－３－１－３　特許出願状況等

表 G-3-1-3-1　論文、投稿、発表、特許リスト

区分 / 年度	特許出願		論文	その他外部発表（プレス発表等）
	国内	外国		
～H22FY	1	1	15	6
H23FY			4	1
H24FY			7	2
H25FY			4	1
H26FY			3	1

論文・発表リスト

番号	学会・研究会・WS等名称	発　表　題　目	開　催　日時
1	IEEE IGARSS2011(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI) -JAPANESE HYPER-MULTI SPECTRAL RADIOMETER-	2011年7月25日
2	SPIE Remote Sensing	Retrieval of spectral response functions for the hyper-spectral sensor of HISUI (Hyper-spectral Imager SUIte) by means of onboard calibration sources	2011年9月20日
3	SPIE Remote Sensing	Short term operation planning for Japanese future hyperspectral and multispectral senor: HISUI	2011年9月21日
4	SPIE Remote Sensing	Simulation of operation of future Japanese spaceborne hyperspectral imager: HISUI	2011年9月20日
5	IEEE IGARSS2012(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	CURRENT STATUS OF HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)	2012年7月22日
6	IEEE IGARSS2012(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	Results of Evaluation Model of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)	2012年7月22日
7	IEEE IGARSS2012(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	USAGE OF CLOUD CLIMATE DATA IN OPERATION MISSON PLAN SIMULATION FOR JAPANESE FUTURE HYPERSPECTRAL AND MULTISPECTRAL SENOR: HISUI	2012年7月22日

8	SPIE Remote Sensing 2012	Effect of temperature on onboard calibration reference material for spectral response function retrieval of the hyperspectral sensor of HISUI -SWIR spectral case-	2012年9月24日
9	ICSO2012 (International Coference on Space Optics)	TMA Optics for HSS and MSS Imagers	2012年10月9日
10	SPIE Asia-Pacific Remote Sensing	Observation planning strategy of a Japanese spaceborne sensor: Hyperspectral Imager Suite (HISUI),	2012年10月29日
11	SPIE Asia-Pacific Remote Sensing	The instrument development status of hyper-spectral imager suite (HISUI),	2012年10月29日
12	IEEE IGARSS2013(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	CURRENT STATUS OF HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)	2013/7/21-26
13	IEEE IGARSS2013(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	THE FLIGHT MODEL DESIGNED AND PERFORMANCES OF HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)	2013/7/21-26
14	IEEE IGARSS2013(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	OBSERVATION PLANNING AND ITS COVERAGE SIMULATION OF A JAPANESE SPACEBORNE SENSOR:HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)	2013/7/21-26
15	IEEE IGARSS2013(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	USABILITY OF LUNAR REFLECTANCE MODEL BASED ON SELENE/SP FOR PLANNED HISUI RADIOMETRIC CALIBRATION	2013/7/21-26
16	IEEE IGARSS2014(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	CURRENT STATUS OF HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)	2014年7月15日
17	IEEE IGARSS2014(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	INSTRUMENT DEVELOPMENT STATUS AND PERFORMANCES OF HYPERSPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI) -ONBOARD DATA CORRECTION	2014年7月15日
18	IEEE IGARSS2014(International Geoscience & Remote Sensing Symposium)	EFFECTIVE OBSERVATION PLANNING AND ITS SIMULATION OF A JAPANESE SPACEBORNE SENSOR:HISUI	2014年7月15日

特許リスト

	題目	時期
特許	特願２００９－１５０８１１ 撮像装置、撮像方法及び撮像回路	2009.6.25 出願
特許	ＰＣＴ／ＪＰ２０１０／０００４０３４　（同上の国際特許）	2010.6.17 出願

Ｇ－３－２　目標の達成度

本プロジェクトの中間目標に対する達成度を表 G-3-2-1 に示す。

中間目標のうち、最終目標性能に対する実現の見通しについては表 G-3-2-2 に示すように全ての項目に関して達成見込みが得られているため、本プロジェクトの中間目標は達成したと判断する。

表 G-3-2-1　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
システム設計	詳細設計結果として、最終目標性能仕様を達成する。	詳細設計結果について、コンポーネント詳細設計審査（CDR-1)及びセンサシステム詳細設計審査(CDR-2)を行い、最終目標性能が達成が可能であることを確認した。最終目標性能の各項目に対する達成度は表３－２－Ｇ－２および表３－２－Ｇ－３に示す。	達成
フライトモデル	フライトモデル用コンポーネントの製作及び試験を行う。 フライトモデルの組立てを開始する。	ハイパースペクトルセンサ、　マルチスペクトルセンサを構成するコンポーネントについて、熱機械環境を含む性能を試験し、宇宙用としての品質を確認した。 上記のコンポーネントを用い、 ハイパースペクトルセンサ、　マルチスペクトルセンサのプロトフライトモデルの組立てを開始した。	達成
宇宙実証支援システム	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサ用機器実証部及び地上データシステムの設計･製造を行う。	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサの宇宙実証に必要な機器実証部及び地上データシステムの設計・製造を実施した。	達成

表 G-3-2-2 最終目標に対する達成の見通し（ハイパースペクトルセンサ）

項目	最終目標	達成の見通し	達成度
空間分解能	30m 以下	30m 以下	達成
観測幅	30km 程度	30km 程度	達成
バンド数	185 程度	185	達成
観測波長域	04～2.5μm	04～2.5μm	達成
波長分解能（バンド幅）	平均 10nm 以下(VNIR) 平均 12.5nm 以下（SWIR）	波長サンプリング間隔 VNIR： 10nm 以下 SWIR：12.5nm 以下	達成
最大入射輝度	アルベド 70%	アルベド 100%でも飽和しない	達成
S/N 比	仕様値 450 以上@620nm 仕様値 300 以上@2100nm （アルベド 30%、太陽天頂角 24.5 度）	450 以上@620nm 300 以上@2100nm	達成
暗時雑音	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/350 以下	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/350 以下	達成
迷光	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/100 以下	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/100 以下	達成
MTF	0.2 以上	0.2 以上	達成
ラジオメトリック分解能	量子化ビット数 10bit 以上	12bit	達成
波長精度	VNIR：誤差 バンド幅の 2%以下 SWIR：誤差 バンド幅の 5%以下	VNIR：誤差 バンド幅の 2%以下 SWIR：誤差 バンド幅の 5%以下	達成
バンド間相対感度精度	誤差 2%以下	誤差 2%以下	達成
オンボード圧縮処理	有 （可逆データ圧縮）	有 （可逆データ圧縮）	達成
ポインティング機能	有	有 （衛星ポインティングによる）	達成

表 G-3-2-3　最終目標に対する達成の見通し（マルチスペクトルセンサ）

項目	最終目標	達成の見通し	達成度
空間分解能	5m 以下	5m 以下	達成
観測幅	90km 程度 （空間分解能の 18000 倍）	90km 程度	達成
バンド数	4	4	達成
観測波長域	0.45～0.89μm	0.45～0.89μm	達成
最大入射輝度	アルベド 70%	アルベド 100%でも 飽和しない	達成
S/N 比	仕様値 200 以上（ノミナル 215 以上）@全ての観測帯 （前提：アルベド 70%、太陽天頂角 24.5 度）	200 以上 （ノミナル 215 以上） @全ての観測帯	達成
暗時雑音	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/400 以下	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/400 以下	達成
迷光	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/100 以下	S/N 比輝度レベルのシグナルの 1/100 以下	達成
MTF	0.3 以上	0.3 以上	達成
ラジオメトリック分解能	量子化ビット数 8bit 以上	12bit	達成
バンド間相対感度精度	誤差 2%以下	誤差 2%以下	達成
オンボード圧縮処理	有 （可逆データ圧縮）	有 （可逆データ圧縮）	達成
ポインティング機能	有 （衛星ポインティングも対象）	有 （衛星ポインティングによる）	達成

表 G-3-2-4　最終目標に対する達成の見通し（宇宙実証支援システム）

項目	最終目標	達成の見通し	達成度
＜機器実証部＞ 機器モニタ機能	ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサテレメトリ・軌道姿勢データ等のモニタ及び統計処理機能を実装する。	ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサテレメトリ・軌道姿勢データ等のモニタ及び統計処理機能を実装した。	達成
＜機器実証部＞ 機器実証機能	ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサの精度等の検証を行うための機能を実装する。	ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサの精度等の検証を行うための機能を実装した。	達成
＜地上データシステム＞ 観測計画作成機能	観測要求を取りまとめ、気象データおよび観測実績を考慮することにより、効率的な観測計画を作成する機能を実装する。	観測要求を取りまとめ、気象データおよび観測実績を考慮することにより、効率的な観測計画を作成する機能を実装した。	達成
＜地上データシステム＞ プロダクト生産・保存機能	観測データに幾何補正、放射補正等を施した画像データを生産・保存する機能を実装する。	観測データに幾何補正、放射補正等を施した画像データを生産・保存する機能を実装した。	達成
＜地上データシステム＞ ユーザインタフェース機能	プロダクト検索、注文、配付機能を実装する。加えて、ユーザの観測要求受け付け、課金機能を実装する。	プロダクト検索、注文、配付機能を実装した。加えて、ユーザの観測要求受け付け、課金機能を実装した。	達成

Ｇ－４　事業化、波及効果について

Ｇ－４－１　事業化の見通し

現在開発を実施しているハイパースペクトルセンサを利用した事業として、①センサそのものまたは、このセンサを搭載した衛星システム（地上局含む）を販売する事業、②　衛星から得られる観測データや付加価値をつけた情報を販売する事業、の２種類を考えている。現時点では、特にデータ販売に関しては、各種の条件が明確になっていないところもあり、事業化に関しては概略の市場規模や効果の予測と、この開発センサを用いたデータ販売事業を行う上で検討を要する条件を明確化し、事業化の構想を検討した。

実用化と事業化の定義については以下の様に考えている。

実用化：ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサは、衛星への搭載を想定し、平成３０年度以降の打上を想定している。この衛星での軌道上実証をもって、両センサの実用化を確認することとする。

事業化：実用化の確認を受けて、事業化を進めるが、その内容は、①センサそのもの、あるいはセンサを搭載した衛星システムを販売するセンサ販売事業と、②センサから得られる観測データや付加価値を付けた情報を販売するデータ販売事業、の２種類となる。

（１）実用化について

衛星への搭載に向けて、衛星との汎用的インタフェースを前提にセンサ開発を進めている。平成２１～２３年度に PDR(基本設計審査)を実施し、平成２４年度にコンポーネント CDR(詳細設計審査)、２６年度にはセンサシステム CDR(詳細設計審査)を実施した。平成２８年度に目標性能を満足するフライトモデルを完成する予定である。衛星打ち上げは平成３０年度以降を想定しており、軌道上実証により、実用化を確認する予定である。

（２）センサ販売の事業化について

近年、海外では低価格の衛星やセンサを複数組み合わせたコンステレーションによる複数衛星による地球観測のニーズが出てきている。現状開発中のハイパースペクトルセンサ自身やその発展型も含め事業展開を考えている。

事業の形態としては、以下のケースが考えられる。

日本におけるプログラムの立ち上げ

海外への展開

①事業化の構想

(a) 日本におけるプログラムの立ち上げ

ハイパースペクトルセンサ販売を国内で実現するのは、データの利用官庁が継続的にデータ取得するプログラムを立ち上げる場合の可能性が高く、公的なデータ利用にも非常に有効であり、今後データ利用の要求を訴求していくことを計画している。データの継続的な利用を実現するためには、現在開発しているハイパースペクトルセンサが打上げられ、その寿命が尽きる頃に打上げられることが有効である。従って、現在のハイパースペクトルセンサの打上が 2018 年頃になるとすると次期の打上げは 2023 年ごろとなる。この場合には、更に高性能化等の改善が必要になる可能性が高いと想定しており、新たな開発要素を必要とする新製品開発とすると、2018～19 年頃から、次世代のセンサ開発としてのプログラム立ち上げが必要となるため、開発事業のターゲットとしてその実現に向けて提案活動等を推進していく予定である。

現在ハイパースペクトルセンサを活用してデータ利用の事業化を検討しているグループ等が将来的に独自のセンサや衛星を保有する可能性はある。また、データ利用を広く国内外のユーザに呼びかけることにより、データ利用への機運が高まってくる場合には、民間としても衛星のニーズに応えるべく、官民の連携を含めた民間主体の衛星が実現する可能性はある。この方向でも事業の拡大に努力し、センサや衛星の販売事業につなげていくことを考えている。

(b) 海外プログラムへの販売

最近の新興国における衛星保有や開発をターゲットとした開発の受注に関しては可能性が十分にあると考えている。

現在複数国での衛星やセンサ保有を目指した開発の可能性があり、今後これらの可能性を追うと共に、日本政府の資金や国家間の協力によって、海外プログラムが実現する可能性もある。

今後の官民の連携による海外売込みが進む場合には、海外へのセンサ販売や技術提供、更には地上システムを含む衛星システム全体の提供の可能性も十分あると考えている。

（３）　データ販売における事業化について

① 事業化における課題と対策

本センサの搭載衛星の運用は基本的には衛星側が主体に行うことが想定されるため、このような条件での地上系の分担を含めた想定を行って、事業化の検討をする必要がある。図 G-4-1-1 に衛星を含む地上システムの構成を示しているが、官と民間の役割分担がどのようになるかによって、地上局の保有や、運用の権利、データの展開等の方法が変わる。センサの運用やデー

タのアーカイブでの事業も視野に入れると以下のような課題が発生するため、取得されたデータの利用販売に関する民間事業の拡大も事業展開の範囲に加えて、活動を進めていく必要がある。

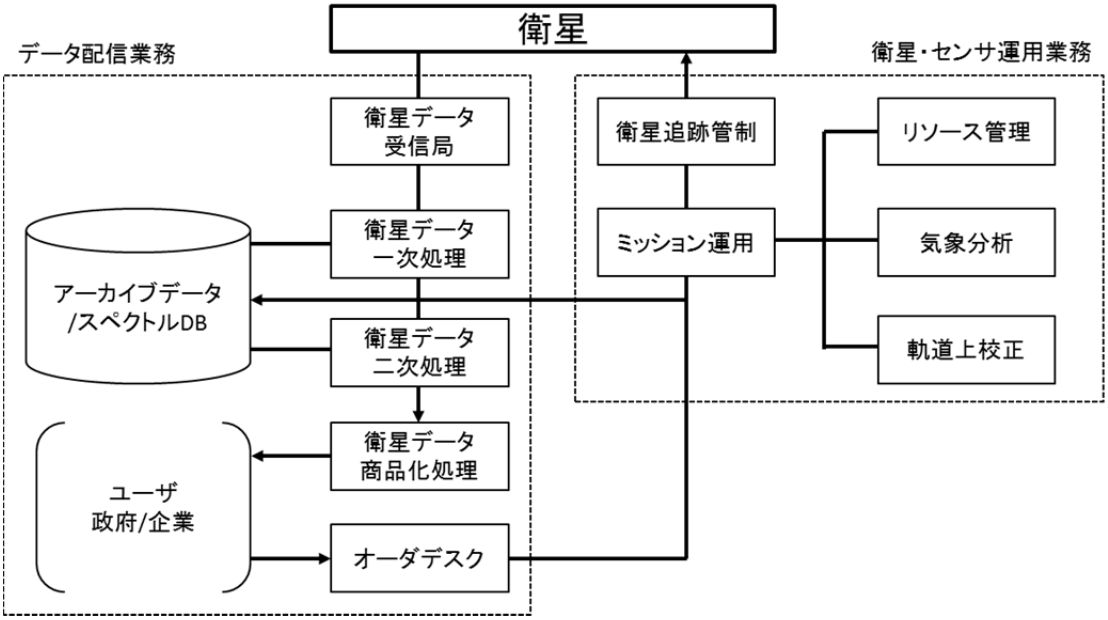


図 G-4-1-1　ハイパースペクトルセンサ関連の地上システム構成例

- データアーカイブの分担をどうするか
- データ配信の権利をどうするか
- センサのメンテナンス、校正データへの保証はどうするか
- 以上を踏まえた場合の地上局の構成と整備分担をどうするか
- データ販売の価格設定や販売ルートをどうするか

等の課題がある。

これらに関しては、今後関係者との調整を積極的に進めて課題の解決を図り、事業化を進めていくように考えている。

② 事業化の構想

ハイパースペクトルセンサ（マルチスペクトルセンサも含む）は、沢山の波長を有していることから、高付加価値情報を広い分野に提供出来る可能性を有している。この為、現在開発中のセンサによる情報の活用を広く官民に促し、データ販売及び利用事業の発展を目指すことで、市場の掘り起こしに務める。そのため、市場調査やデータ販売、各種データ利用に関する国内外のユーザや連携先等の獲得や条件調整を実施する。

また、ハイパースペクトルセンサのデータ販売の事業展開を図るため、データ利用の拡販を行うために、国内のユーザによる業界（コンソーシアム等）の実現を目指した活動を展開していく。これらの組織やデータ利用ビジネスを目

指す企業等との連携を図り、データ配信から付加価値情報の展開までを事業の対象の最大範囲として、各種専門企業との連携を図りながら、需要の拡大に努めていく。

一方、本事業化にあたっては、①項に示すような課題があるが、これらの関係者との調整は今後開発と並行して積極的に進めていくことで解決を図っていく。

③　将来的な事業化の見通し

ハイパースペクトルセンサの詳細なスペクトル情報による利用には大きな期待がもたれており、今後ハイパースペクトルデータの利用に関するアルゴリズムの開発に伴い、データ利用の拡大が期待される。潜在市場は大きく、データの継続が実現すれば、国際的な事業として発展する可能性がある。国際的な事業協力も含めた事業を目指して推進する。

現在開発中のセンサのデータによる利用の普及をベースにして、その後のデータ利用事業の拡大を図っていく。このため、データ利用ユーザを含めた業界（コンソーシアム等）を実現し、更なる拡大、展開を目指し、官民の利用ユーザへのつながりのスキーム構築を強化する。さらに、衛星からの取得データの配信から、付加価値データの展開までを視野に入れて、専門企業等との連携を図りながら需要の拡大に努める。

Ｇ－４－２　波及効果

ハイパースペクトルセンサデータには非常に多くの情報が含まれており、その潜在価値は非常に高いと言える。特に多数のスペクトルを有することから、土壌の質を見極めるために非常に有効であること、植生の種類や生育状態を見極めるためにも大きな効果を発揮できることが期待される。更に、水質等の汚染の状況の識別や陸域での土地利用の詳細な識別にも能力を発揮できる。このような、特徴から、食料、海洋資源、鉱物資源やエネルギー探査、環境監視等での情報提供による波及効果は計り知れなくなる。

更に、センサの特徴から、分解能等の向上が図られることによって、安全保障分野での利用にも大きな期待がかかっている。このように、数値的な換算が出来ない部分もあるが、データの情報化による波及効果の大きさは計り知れない。

この観点で、ハイパースペクトルセンサのデータ販売は将来の事業化としては大いに期待が持てる分野である。

本センサ開発、センサ販売、データ販売事業の継続による事業の安定化、拡大により以下の波及効果を期待出来る。

（１）研究体制への波及効果(人材育成、研究開発継続)

① 分光センサ技術者、画像データ処理技術者の育成、維持拡大が可能。衛星搭載センサ開発者の確保。

② 分光技術、素子技術、分光測定技術、画像分析技術等の継続開発による技術、ノウハウ蓄積が可能。

（２）技術的波及効果

① 分光、校正技術が蓄積される。

② データ利用業者は、分光センサデータ利用に際してデータベースが必須であり、ハイパープロジェクトによる大量の分光データ取得はこのデータベース蓄積に大きく貢献する。

（３）経済的波及効果、社会的効果

☆　資源探査能力の向上

化石燃料資源の大半を輸入に依存する我が国においてその安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。本プロジェクトで開発するハイパースペクトルセンサの取得データから得られる地表面情報は資源の有無、分布などに関し従来の ASTER などのセンサのデータより精度の高い情報を提供できるため新しい油田や鉱床の発見、鉱床探査の効率化が可能となるなどによる、資源の安定供給の確保、資源国への開発支援に多大な効果が期待できる。

仮に新規油田の発見・開発 が実現した場合、数兆円～数十兆円の効果が期待される。

☆　その他（環境監視・農林業等）

多数のスペクトルを有することから、土壌の質を見極め、植生の種類や生育状態を見極めるためにも大きな効果を発揮できる。更に、水質等の汚染状況の識別や陸域での土地利用の詳細な識別にも能力を発揮。このような特徴から、以下が期待できる。

① 農産物の育成管理へ貢献が期待できる。国内農業生産額（耕種）が６．３兆円（平成１８年度）であるが、この 0.1%が改善されれば、６０億円の効果が期待される。

② 海洋資源、鉱物資源やエネルギー探査、森林、河川等の環境監視等での情報提供による波及効果は計り知れなくなる。更に、分解能等の向上を図ることで、安全保障分野での利用にも大きな期待が出来る。

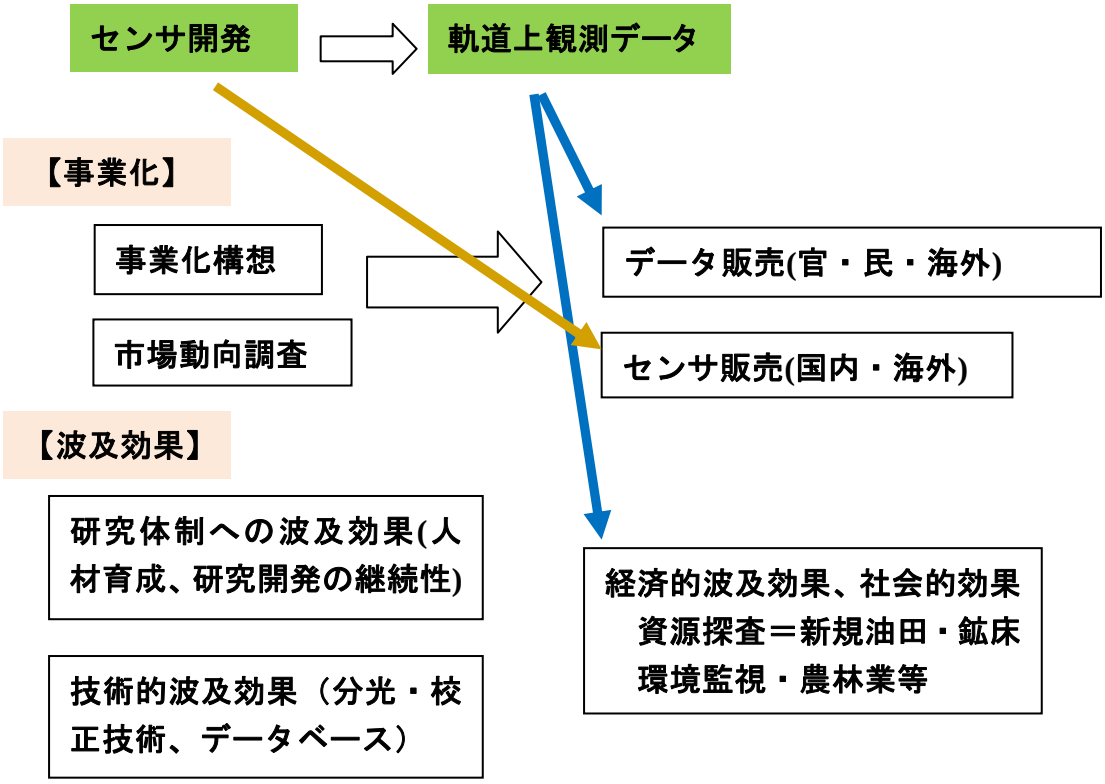


図 G-4-2-1　事業化・波及効果のフロー

Ｇ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｇ－５－１　研究開発計画

Ｇ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

（１）　事業計画(研究開発)の内容

本研究開発では、平成 28 年度までに環境観測・災害監視・資源探査・農林水産など、多様な用途への活用を可能とする広い観測幅と高い波長分解能を有する高性能な衛星搭載型ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサの技術の開発を行う。

センサ開発は概念設計、基本設計、詳細設計、維持設計のフェーズで実施し、搭載モデル（フライトモデル）を開発し、実運用に供するが、技術的課題である要素技術の解決を目的とした要素技術開発及び目標仕様の実現性確認、搭載に耐える設計であることを確認する評価モデルを設計・製作・試験し確実な開発が可能なように計画している。

各項目の内容は以下のとおりである。

① センサシステムの設計

高性能な衛星搭載型ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサの基本計画の実現を目的とした概念設計、基本設計、詳細設計、維持設計を行い、フライトモデルの開発仕様書の作成、維持を行う。「②センサシステムの要素技術開発」及び「③評価モデルによる検証」は基本設計、詳細設計に反映される。

② センサシステムの要素技術開発

技術開発が必要な要素技術に関し、早期に性能実現の可能性を確認するため、以下の項目の要素技術開発を行う。

- 高 S/N 比を実現する分光検出系技術
- 高精度校正系技術
- 高速データ処理系、データ伝送系技術

③ 評価モデルによる検証

ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサの設計の確認を行うことを目的として、評価モデルによる検証を行う。

評価モデルとしては以下の２種類を開発する。

- 「熱構造モデル」: 熱構造的な性能を確認するものとし、軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性について試験により確認する。
- 「機能評価モデル」: 電気的な性能を評価するものとし、分光検出系、信号処理部、校正系、伝送系の性能確認を行う。さらに、校正精度評価方法及び観測自動化技術の開発を行う。

④ フライトモデルの開発

「①センサシステムの設計」に基づきハイパースペクトルセンサ、マルチス

ペクトルセンサのフライトモデルを設計･製作し、地上検証試験によりセンサ性能目標値の実現性を確認する。衛星軌道上での運用に必要な各種耐環境性、電磁適合性についても併せて検証する。

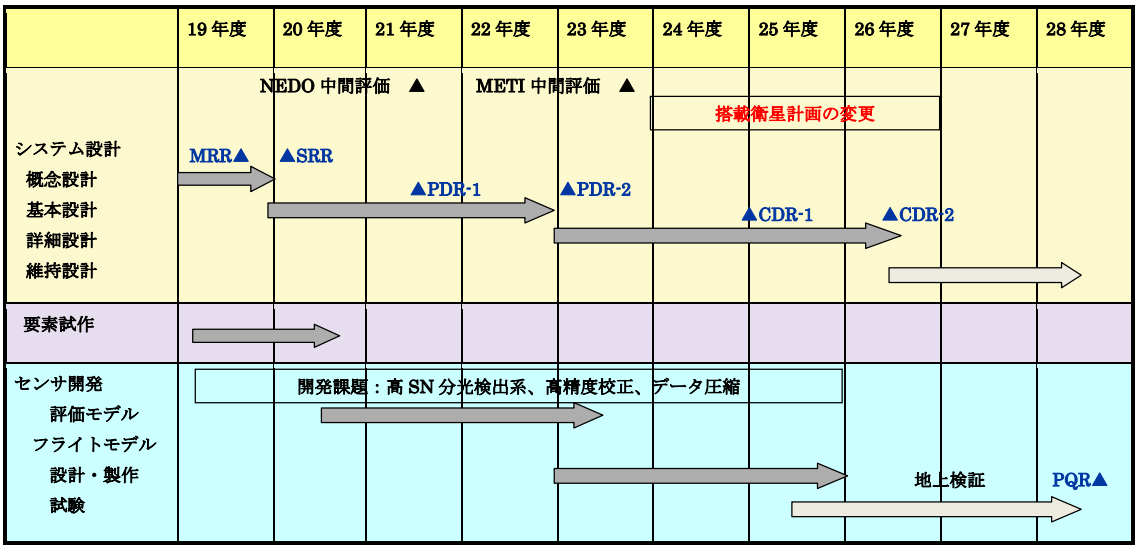
⑤　宇宙実証支援

「④フライトモデルの開発」で開発、確認試験を実施したセンサについて、円滑な軌道上実証実験に向け、搭載・インテグレーション支援作業を行う。

宇宙実証に必要な宇宙実証支援システムとして、衛星データの観測計画作成、データの保存･処理･配付を行う地上データシステム（レベルゼロ処理部を含む）及びセンサの健全性の確認を行う機器実証部の開発を実施する。

（２）　全体スケジュール

本プロジェクトの全体スケジュールを図 G-5-2-1 示す。



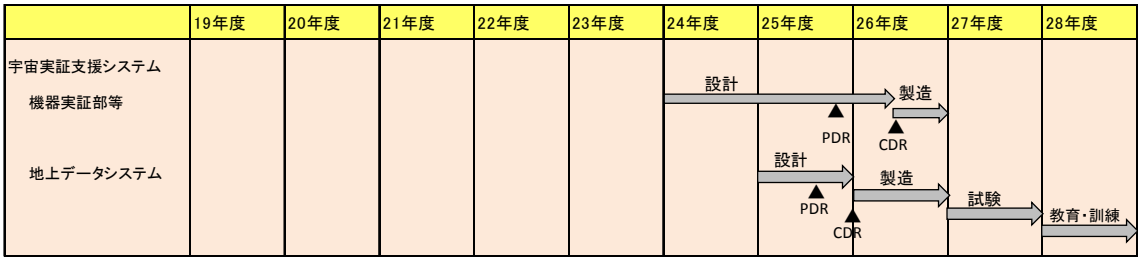


図 G-5-2-1　全体スケジュール

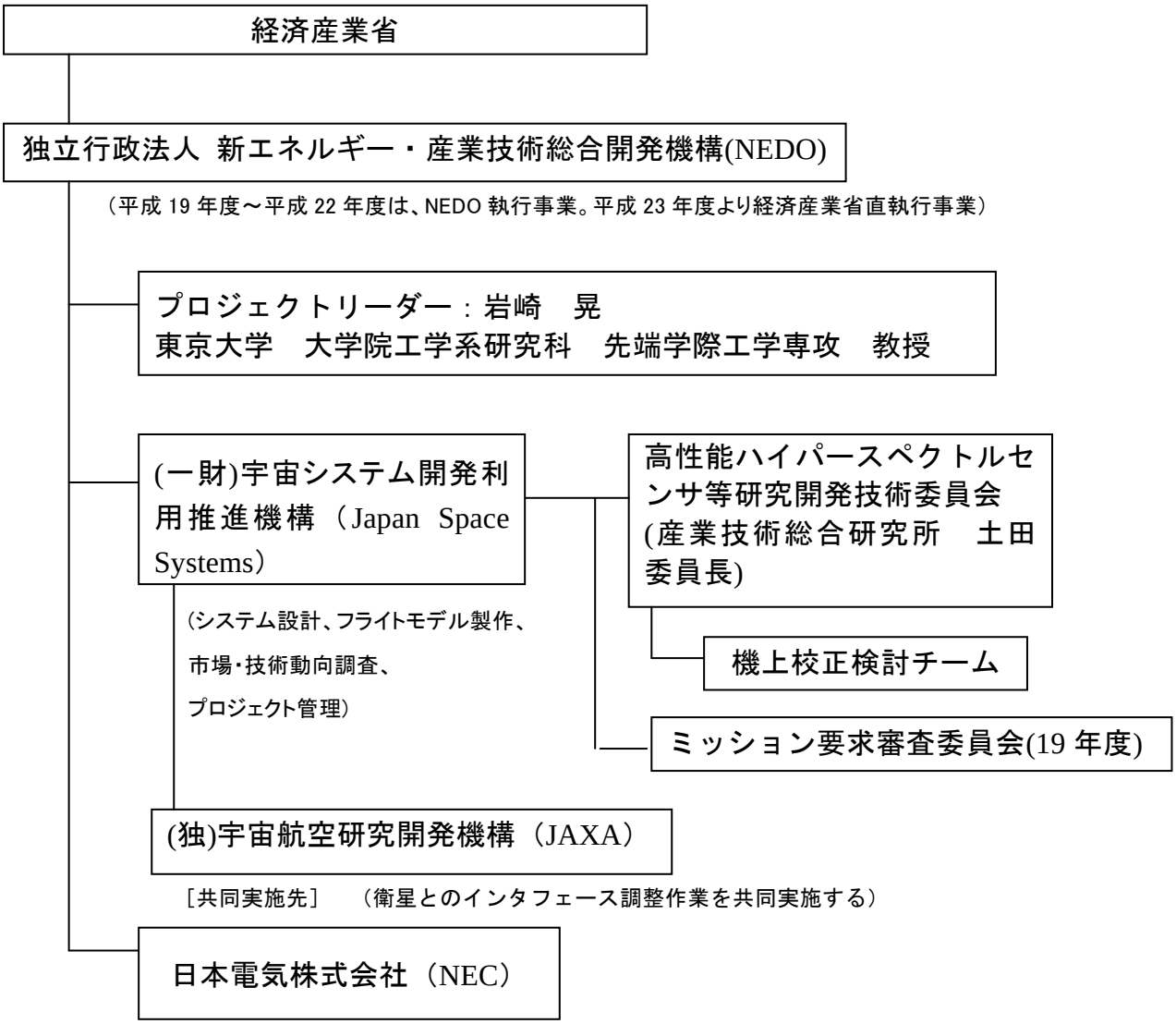
注）MRR：ミッション要求審査、SRR：システム要求審査、PDR：基本設計審査、CDR：詳細設計審査、PQR：品質確認試験後審査

（１）実施体制

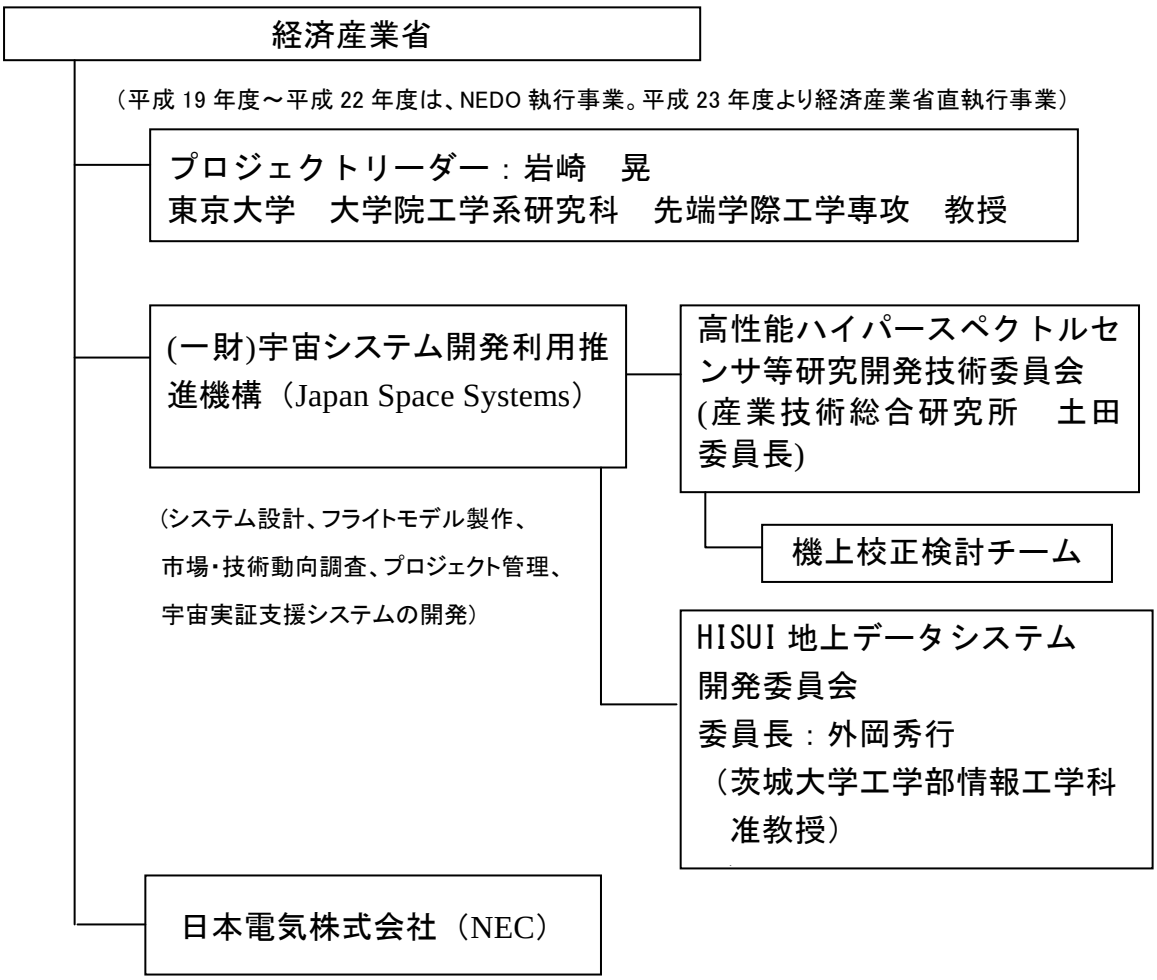
一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（Japan Space Systems）及び

日本電気株式会社（NEC）は、本事業を以下に示す体制により実施している。

【研究開発開始時の実施体制】



【平成２６年度の実施体制】



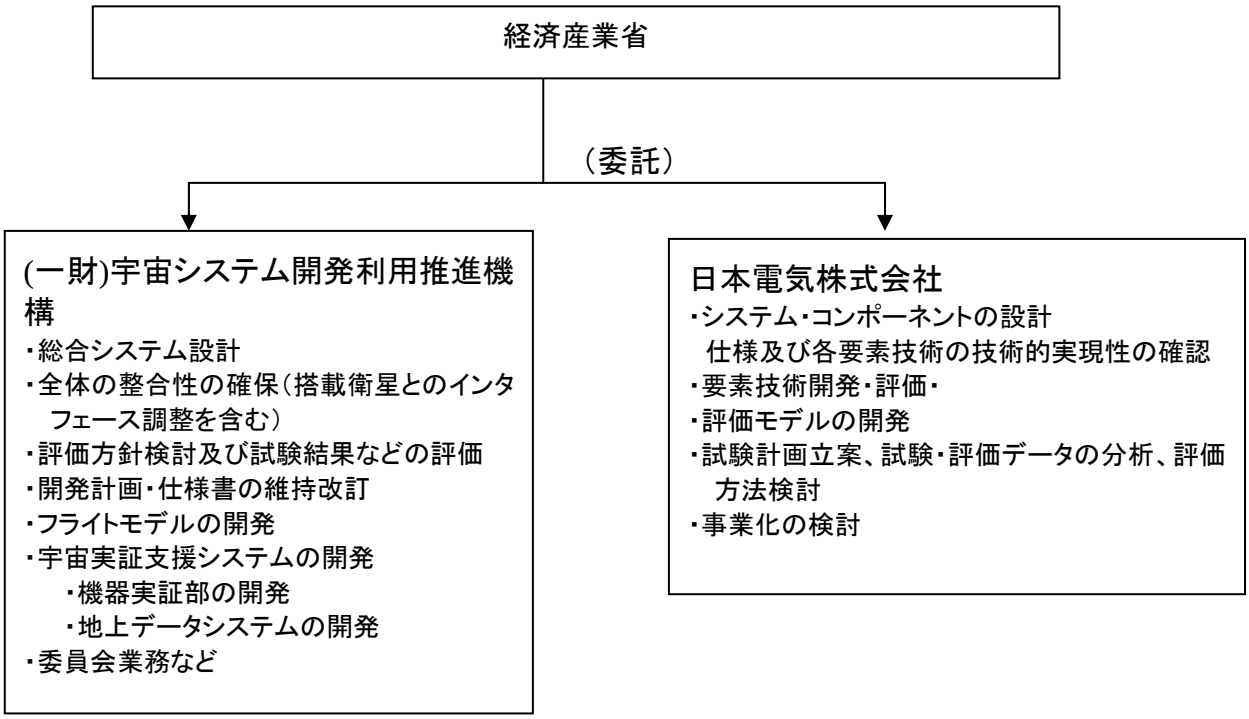
（２）　研究の運営管理

①　事業実施における運営方針・方法

ハイパースペクトルデータの情報抽出に必要なハイパースペクトルデータの解析技術開発、スペクトルデータベースの開発を行う「次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発」事業と協力し、お互いの委員会に相互参画するなどによりセンサ開発、利用研究双方の情報交換を密に行っている。

また、METI（平成 19 年度～平成 22 年度は NEDO)、Japan Space Systems、NEC の間で定例の進捗会議において進捗確認を行うことで、日程管理、課題の解決が適切に行うことができるようにしている。

以下に本事業での役割分担を示す。



② 技術委員会の組織・役割

本事業の実施に当たっては、Japan Space Systemsを事務局として国内有識者からなる委員会を設け、事業計画、開発・検討結果の審議などを実施し、開発内容の妥当性、設計品質などの確保に努めている。

委員会に関しては以下の構成で実施している。

高性能ハイパースペクトルセンサ等研究開発技術委員会

高性能ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサの設計状況の確認、開発仕様書の内容確認、製造・試験フェーズでの取得データの確認を行う。

機上校正検討チーム

機上校正の方式検討、取得データ、試験要求などの検討。

技術委員会委員名簿

	氏　　名	所　　属	
PL	岩崎　晃	東京大学大学院工学系研究科　教授	Ｈ２０～２１ 委員長
委員長	土田　聡	産業総合技術研究所　情報技術研究部門 地球観測グリッド研究グループ長	Ｈ２２～ 委員長
委員	山口　靖	名古屋大学大学院環境学研究科　教授	
委員	新井　康平	佐賀大学 理工学部　教授	
委員	佐鳥　新	北海道工業大学　創生工学部　　教授	
委員	山田　善郎	産業技術総合研究所　計測標準研究部門 放射温度標準研究室　主任研究員	Ｈ２４～ 機上校正検討チームリーダ
委員	清水　祐公子	産業技術総合研究所　計測標準研究部門 放射温度標準研究室	Ｈ２２～
委員	中村　良介	産業技術総合研究所　情報技術研究部門	Ｈ２２～
委員	松永　恒雄	国立環境研究所　環境計測研究センター 環境情報解析研究室　室長	
委員	大沢　右二	宇宙航空研究開発機構　宇宙利用ミッション本部　ALOS２プロジェクトマネージャ（上席開発員）	
委員	春山　純一	宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系	

委員	大竹　真紀子	宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系	
委員	川田　正國	元日本大学　非常勤講師	冷凍・機械 技術

HISUI 地上データシステム開発委員会

氏　　名	所　　属	
外岡秀行	国立大学法人茨城大学工学部情報工学科　准教授	本委員会 委員長
尾西恭亮	国立大学法人秋田大学国際資源学部　助教	
松岡昌志	国立大学法人東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻　准教授	

Ｇ－５－３　資金配分

資金配分（実績）は、図 G-5-2-1 に示した全体スケジュールに基づき、事業計画（研究開発計画）の各項目に配分し、各々の進捗に従い、事業を適切に推進している。

表 G-5-3-1　資金度配分　（単位：百万円）

年度	２３	２４	２５	２６	合計
フライトモデル	2,170	1,634	835	220	4,859
宇宙実証支援システム		166	695	430	1,291
合計	2,170	1,800	1,530	650	6,150

Ｇ－５－４　費用対効果

（１）　事業化の計画

Ｇ－４－１項にて、種々の形態でのセンサ販売に関する事業化の可能性を概観したが、今後これらの実現に向けて各方面への提案活動や、連携を働きかけていくことが必須となる。特に、国内の官のプログラムでの計画、データ利用事業の立ち上げによるセンサへの需要、官民連携による海外への売り込み等について、現在開発中のセンサによる拡販活動を今後更に活発化して事業化の可能性を高めていくことが重要である。現在開発中のセンサのデータが各種ユーザに展開された後、その後継機の実現や更に高性能化したセンサへのニーズが出てくることが期待される。

センサ及び関連システムでの事業規模を非常に概略で以下に推定する。

これまでの官のプロジェクトの場合には、性能の向上を図ることを目的に、開発要素を多く要する開発であったため、開発費用は比較的大規模になる。宇宙基本計画実現により、データ利用重視の方針が打ち出されており、繰り返しの観測継続が求められる場合には、現在開発中のセンサを継続して製造することとなる。また、民間や海外への販売を想定する場合には、小型衛星に搭載して地上システムまで含めた全体システムの提供を想定することになる。

現在開発中のハイパースペクトルセンサ打上後の５年間程度で、データ利用が進むと国内外で衛星や地上系の継続に期待がかかると考えられる。この期間にハイパー関連のプログラムが国内外需要によって 2～3 システム立ち上がるとすると、数 100 億円程度の事業規模となると推定される。

（２）事業化の規模

ハイパースペクトルセンサから得られる情報の種類及び量は従来のマルチスペクトルセンサの場合よりもはるかに広く多くの利用への潜在的な可能性があることを考慮して、現状での世界的なデータ利用のビジネス規模から、本センサによる観測データ利用が始まった場合の市場の規模や波及効果の規模の推定を行った。

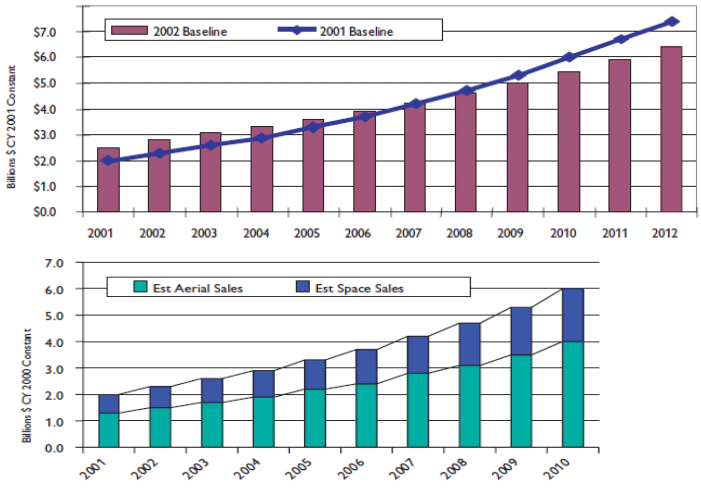


図 G-5-4-1 観測データ利用の事業規模に関する情報

図 G-5-4-1 は 2004 年度の ASPRS(American Society of Photogrammetry and Remote Sensing)のデータであり、2012 年度の航測・衛星のデータ利用事業規模で、約 44 億＄(04-12 計)となり、うち衛星リモセン市場は約 15 億＄である。ハイパーの登場によって、更に市場の拡大が進むと全世界の衛星リモセン市場は 2012 年度以降、過去５年間と同様の伸び率として、センサ運用５年間とするとその間の約 72 億＄（6700 億円）にまで拡大するものと期待される。当然のことながら、これはハイパーだけのデータではないが、データとして最も多くの情報を含むデータであることから、ハイパースペクトルセンサでの市場は非常に期待できる可能性がある。一方、日本でのデータ利用事業に関しては、衛星データ全体で現状約 100 億円程度の規模の事業になっている。今後ハイパースペクトルセンサの打上に伴い、データ利用の分野が増えることが期待されることから、国内における市場規模も、海外と同様に大幅に伸びてくることが期待される。

Ｇ－５－５　変化への対応

（１）搭載衛星計画の変更

ＨＩＳＵＩセンサは、開発の検討着手時から文部科学省が研究開発を計画していた「ＡＬＯＳ－３（だいち３）」に搭載することを想定していた。しかし、平成２３年８月の「宇宙開発利用の戦略的推進のための施策の重点化及び効率化の方針」において、以下のような指摘があり、「ＡＬＯＳ－３」の開発計画は中止となった。

だいち３（文部科学省（ＪＡＸＡ）、分解能８０ｃｍ、観測幅５０ｋｍ）は（中略）緊急性等との観点で他のプロジェクトより優先度が低いため、宇宙政策全体の中で他の優先度の高いプロジェクトを実施した上で宇宙予算上可能であれば実施することとすべきである。

搭載衛星(JAXA)の中止に伴い、新たなセンサの宇宙実証機会の模索とともに、搭載機会拡大のために典型的な衛星インタフェースをベースに開発を継続して進め、汎用的なインタフェース化の検討を実施した。

上記の計画変更のため、開発完了を平成２８年度まで延長することとなった。

（２）中間評価（平成２３年度）の反映

（指摘事項の要点）

将来的な事業化に向けて、

① 海外の技術開発及び事業化情報の収集、ベンチマーキング

② 「次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発」と連携して、利用ユーザとのコネクション生成

③ 将来のセンサ販売のためのコストダウン検討

以上の点について留意しての検討を望む。

（対応）

①②③の指摘に対し、「次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発」事業と連携して調査・検討を進め、ロードマップを作成している。（次ページ）

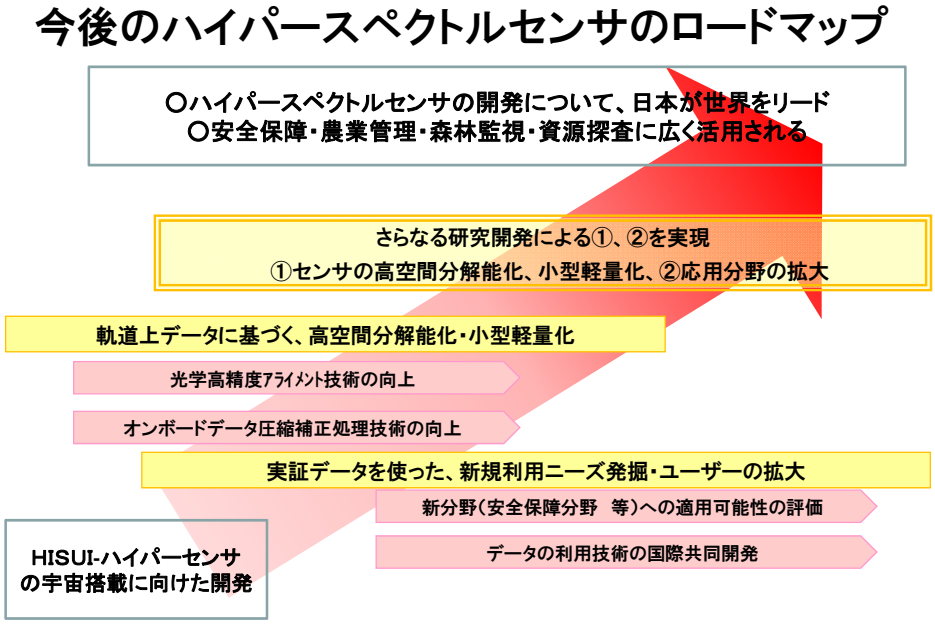


図 G-5-5-1　今後のハイパースペクトルセンサのロードマップ

Ｈ　次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構
国立研究開発法人産業技術総合研究所
独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

Ｈ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｈ－１－１　事業目的

我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率は約 20%に過ぎない。エネルギー基本計画（平成 22 年 6 月）では、これを 2030 年までに 40%以上まで引き上げることを目標としており、国内外において石油資源開発を効率的に進める必要がある。

また、平成 22 年度においては、我が国の資源確保に大きな影響を与える出来事が起こっている。メキシコ湾の大規模な海底油田事故は海底油田開発のリスクの大きさを再認識させ、中東アフリカ地域における民主化運動は今でもなお産油国及びその周辺が政情的に不安定であることを示している。さらに、東日本大震災による福島第一原発の事故により、準国産エネルギーとも言われた原発の今後の見通しが不透明である。エネルギーセキュリティの観点からは、今後も我が国の自主開発比率を高め、万が一の際に対処できる備えが必要である。

欧米のメジャーと呼ばれる大手石油会社は、衛星画像データを用いて地質構造解析を行い、鉱区選定の大きな判断材料としている。メジャーが、年間に鉱区に投資する額が 1 社当たり 150 億ドルから 200 億ドル程度なのに比べ、日本は、石油開発の中核的企業でさえ、年間数百億円程度である。原油の高騰が続いている中、メジャーは鉱区取得の取組を促進しており、従来の衛星画像データにより判別できる有望地域は少なくなりつつある。よって、日本資本の石油開発会社がメジャーに先んじて有望な鉱区を獲得するためには地質について、より詳細に解析することが可能な高性能センサの開発とセンサデータの利用技術・処理技術の開発が不可欠である。

全世界に先駆けてHISUIのセンサデータの利用技術・処理技術を確立することにより、石油埋蔵の有望地域を早期に発見し、自主開発比率を高め、我が国への石油資源の安定供給に資することが本事業の目的の一つである。

金属資源に関しても偏在性、有限性等から供給者数が限られ、非鉄メジャーによる寡占化・独占化が進みやすい特性を有しており、経済安全保障の観点及び供給構造の安定性の確保を図るため、探鉱能力を左右する探査技術の高度化・効率化を進める必要がある。

上記背景を踏まえ、本事業では宇宙から地球表面を観測する高性能センサであるHISUI（Hyperspectral Imager Suite：高性能のハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサの両センサを合わせたセンサの名称。）のセンサデータ利用技術・処理技術を開発している。HISUI の内のセンサの一つであるハイパースペクトルセンサは、世界各国で開発が実施されているところであるが、世界初の衛星搭載用実用ハイパースペクトルセンサの開発を実現した場合、そのセンサデータの利用技術・処理技術も全世界に先駆けて開発する必要がある。

また、HISUIによって得られるデータは、波長分解能が非常に高精度なものであるため資源探査分野に限らず他の利用分野でもその利用価値は高くなっている。例え

ば、農業分野では、食料の安定供給という観点から農作物の最適収穫時期を推定したり、森林分野では、植生を把握するという観点から樹種の分類をしたり、環境分野では、環境保全という観点から、天然資源物の保全状況を監視するという利用手法が考えられている。

本事業では、HISUIのセンサデータの利用技術・処理技術を確立することにより、農業分野、森林分野、環境分野においても、センサデータを有効に活用し、食糧供給の円滑化、国土保全・管理、地球規模の環境問題の解決等に資することを目的とする。

Ｈ－１－２　政策的位置付け

次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発の政策的位置付けとしては、以下のものが挙げられる。

①「新成長戦略」（平成22年6月18日、閣議決定）
②「産業構造ビジョン2010」（平成22年6月3日、産業構造審議会産業競争力部会報告書）
③「宇宙基本計画」（平成21年6月2日、宇宙開発戦略本部決定）
④「宇宙分野における重点施策について」（平成22年5月25日、宇宙開発戦略本部決定）
⑤「科学技術基本政策策定の基本方針(案)」（平成22年6月16日、総合科学技術会議基本政策専門調査会）
⑥「エネルギー基本計画」（平成22年6月18日閣議決定）

これらの政策の中では、資源・エネルギー供給の円滑化、食糧供給の円滑化、国土保全・管理、地球規模の環境問題の解決等が目的として記載されている。また、エネルギー基本計画（平成22年6月）では、我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率（約20%）を2030年までに40%以上まで引き上げることを目標としており、国内外において石油資源開発を効率的に進める必要がある。衛星を活用したリモートセンシング（遠隔探知）技術には、①産油国と調整を経ずに、開発の有望性に関する評価が可能、②一度に広範囲の地域の分析が可能、③立入りが困難な地域の分析が可能、等の利点がある。

上記各政策が有する課題を解決するために、HISUIのセンサデータの利用技術・処理技術の開発は非常に重要な位置付けとなっている。

また、技術戦略マップ２０１０（宇宙分野）においても「資源探査・開発や農林水産業などの行政での利用、国土管理や災害監視等の公共的利用など、国民・社会への貢献を主眼とする地球観測衛星分野に対しては、従来の技術開発中心から利用ニーズ主導により、衛星開発を継続的に進める必要があり、現在、

陸域観測技術衛星「だいち（ＡＬＯＳ）」の後継機や次世代の地球観測センサであるハイパースペクトルセンサの開発が行われている。」と明示されており、ハイパースペクトルセンサのデータの利用技術・処理技術の開発は非常に重要である。

Ｈ－１－３　国の関与の必要性

ハイパースペクトルセンサから得られるデータの処理技術は、国際的に見て極めて高度な技術が要求されるために未だ研究段階であり、商業段階にはないものの、そのデータへの要望は世界的に拡大している。具体的には、従来のリモートセンシング市場における重要な購買層である資源探査会社、インテリジェンス機関、航空測量会社、地図作成会社等による活用だけでなく、環境観測・災害監視・森林観測・食糧分野等の産業利用が大幅に拡大することが期待されている。その一方で、衛星に搭載するセンサ及びそのデータの利用技術・処理技術の開発には大規模な初期投資が必要なため、民間による自主的な取組を期待することは難しい。

鉱物資源分野においては、資源価格高騰等により、資源国は豊富な資金を有し、資金面のみからのパートナーは必ずしも求めていない状況の下、我が国リモートセンシング技術は、資源国から高く評価されるとともに、一部の資源メジャーとの関係構築に発展している。鉱物資源の供給に関しては制約やリスクが大きく、市場メカニズムのみによって安定供給確保を図ることが困難である中で、国が技術開発等に積極的に支援することが必要不可欠である。

Ｈ－２　研究開発目標

Ｈ－２－１　研究開発目標

産業界の活動に不可欠なエネルギー・資源の安定供給等に対処するため、詳細な地表構成物の物性の把握が可能となり、探鉱活動をより効率的に行うための判断に資するデータを取得する最新技術の光学センサであるハイパースペクトルセンサを利活用する要望が急速に高まってきている。現在、経済産業省が開発中のHISUI（Hyperspectral Imager Suite：高性能のハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサの両センサを合わせたセンサの名称。）は、我が国のエネルギー・資源のみならず食糧の安定供給等に資する情報を得ることができるものと期待されている。しかしこれまで実用的な衛星搭載型ハイパースペクトルセンサがなかったため、十分と言えるだけの利用実績がまだ積み上げられていないのが実情である。そこで、データ利用者のニーズに応えるべく、これまでの利用者・研究者の意見を反映したデータ利用基盤技術を開発するとともに、高精度・高品質でユーザにとって実用可能なプロダクトの提供を可能とする地上システムに必要な技術を開発し、運用後の速やかなハイパースペクトルデータ等の利用拡大を通じて「宇宙利用の拡大」に貢献することが本研究開発の目標である。

Ｈ－２－２　全体の目標設定

エネルギー・資源を始め、農業、環境、防災等の分野で、HISUI データの利用促進を図るためには、ハイパースペクトルセンサで取得されるデータの実利用化のための解析技術を開発し、運用開始までにその検証・評価を行いかつ運用後は実証することが必要である。また、HISUI データを高品質・高精度で提供するために不可欠なセンサ校正技術、ユーザにとって実用可能なプロダクトとするための各種補正を施すデータ処理技術、HISUI を最大限効率的に運用するために運用計画の最適化が可能な地上システムに必要な技術等を開発することが必要である。さらに、金属資源に関しては昨今各種金属・レアメタル（レアアース等）の供給問題が生じており、金属資源の安定供給に資するために金属資源分野におけるハイパースペクトルセンサデータの利用技術及び総合解析技術を開発することが必要である。

これらを踏まえて、全体目標を表 H-2-2-1 のように設定した。

表 H-2-2-1　全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
１．実利用化のための解析技術		
HISUI データを用いて、実利用化のための解析技術を確立する。	地上計測および航空機ハイパースペクトルデータまたはHISUI シミュレーションデータを用いてハイパースペクトルデータの実利用化のための解析手法を開発する。	従来の衛星データでは得られなかった情報抽出が可能なハイパースペクトルデータを用いた、エネルギー・資源等の分野でユーザニーズに基づく実利用化のための解析技術を開発し、HISUI 運用開始までに検証・評価を行うことが必要である。
２．センサ校正・データ処理技術		
高品質・高精度でユーザの実用に資するHISUI データのプロダクトを提供可能とするために必要となるセンサ校正・データ処理・運用計画最適化等、地上システムの技術を開発する。	地上システムの概念設計を行うとともに、センサ校正・データ処理、短期観測計画作成アルゴリズム等の研究開発を進め、運用時に必要な各種計画書作成、地上システム構築等に必要な仕様・設計に反映させる。また、長期運用計画策定システムを開発する。	HISUI は新しい技術のセンサであるため、高品質・高精度かつユーザが実用可能なプロダクトを継続的に提供するためにはセンサ校正、データ処理の技術開発が必要である。また、ユーザからの観測要求を満たすために最適運用計画策定システムが必要である。
３．金属資源探査技術の研究開発		
HISUI データを金属資源探査技術に利用するために、鉱物分類を高精度化し、金属鉱床タイプに応じた解析探査技術を開発すること。	HISUI データを金属資源探査技術に利用するために、鉱物分類を高精度化し、金属鉱床タイプに応じた解析探査技術を開発すること。	ハイパースペクトルセンサにより得られるデータから、金属資源探査に有用な情報を効果的・効率的に抽出するためのハイパースペクトルデータ解析技術を開発し、金属資源探査分野における我が国の競争力確保を図ることが必要である。

Ｈ－２－３　個別要素技術の目標設定

前項の全体目標を達成するため、以下のような項目について、表 H-2-3-1 に示す個別要素技術の目標を設定した。

表 H-2-3-1　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標（事後評価時点）	目標・指標（中間評価時点）	設定理由・根拠等
１．実利用化のための解析技術			
１）実利用化のための解析技術に共通する基盤技術	個別分野の開発手法を HISUI 運用開始前に実証することと、HISUI で観測されるデータから物質を特定するために利用するスペクトルデータベースを構築する。	HISUI シミュレータを開発すること、およびスペクトルデータベースに格納する細かな波長分解能の鉱物スペクトルライブラリを作成する。	個別分野の開発手法を HISUI 運用開始前に実証するために、HISUI シミュレーションデータを作成するシミュレータの開発が必要である。また、運用後の HISUI ハイパースペクトルデータから物質を特定するためには、鉱物等のスペクトルライブラリを整備しておく必要がある。
２）個別分野における利用技術	エネルギー・資源分野を始め、農業、環境、防災等の幅広い分野でユーザが利活用できる解析手法を確立する。	エネルギー資源分野では、海域でのオイルスリック判定や植生地域でも利用可能な探鉱手法の開発のほか、農業、環境、防災等の分野も含め手法を5事例以上開発する。	エネルギー・資源、農業、環境、防災等の分野でユーザによる具体的な実利用のニーズに応える手法開発が必要である。 具体的には、資源分野のニーズとして、既存の陸域露岩地域の探鉱から、植生地域での探鉱やオイルスリック抽出への利用可能範囲の拡大、農業分野のニーズとして、国内農作物から海外農作物（小麦等）のモニタリングなど対象域の拡大、環境分野のニーズとして、農地塩害化の早期対応のために低塩分濃度土壌分布を把握や熱帯泥

			炭湿地林での温室効果ガスの排出量や炭素蓄積量を把握、防災分野のニーズとして、植生を含んだ土砂災害の脆弱性の評価。
２．センサ校正・データ処理技術			
１）校正・データ処理技術	HISUI の仕様に適した校正技術を開発し、その成果を運用開始前後に適用する。 また、ユーザにとって実用可能なプロダクト作成に必要なデータ処理技術を開発する。	HISUI の仕様に対し既存校正技術の適用評価、必要に応じた改良技術を開発し、校正検証計画および校正システムの開発に着手する。 また、幾何補正・波長補正・放射量補正、さらに、大気補正に必要な画像補正処理手法を開発し、アルゴリズム基準書の作成に着手する。	HISUI の各種プロダクトの品質を保証・高精度化させるためには、センサの校正技術を確立する必要があり、そのため、HISUI 打上前および打上後校正の信頼性向上のための校正技術を開発する必要がある。 また、HISUI のデータが有効に活用されるためには、放射量・幾何的歪みの除去や大気の影響の除去を行い、ユーザにとって扱いやすいデータ（プロダクト）に処理することが必要である。
２）地上システム（運用計画システムを含む）	地上システム（全体システム）の概念設計を実施する。 長期運用計画策定システムを開発し、長期運用計画を策定する。 短期観測計画の最適可能な	地上システム（全体システム）の概念設計を行う。 長期運用計画シミュレーションツールを開発する。 短期観測計画の作成アルゴリズムを開発	最適化された観測計画に基づき取得されたデータを処理し、高品質なプロダクトとしてタイムリーにユーザへ提供するため、地上システム（全体システム）に求められる機能の検討・整理を行う必要がある。 また、HISUI はデータ量が膨大であるため、運用はデータダウンリンク量に制約される一方、ハイパースペクトルセンサの観測幅は

	アルゴリズムを開発し、最適なパラメータを設定する。	する。	30㎞であるため、その戦略的価値を最大限に生かすためには限られたリソースの中で、効率的にセンサを運用する必要がある。
３．金属資源探査技術の研究開発			
１）次世代衛星データ解析技術開発	鉱床に伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータを集積し、鉱物分類を高精度化するための解析技術を開発すること。	鉱床に伴う岩石･鉱物の反射スペクトルデータを集積し、鉱物分類を高精度化するための解析技術を開発すること。	ハイパースペクトルセンサにより得られるデータから、資源探査に有用な情報を効果的・効率的に抽出するためのハイパースペクトルデータ解析技術の開発を行い、金属資源探査分野における我が国の競争力確保を図る。
２）金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発	鉱床タイプに応じた衛星データ等による解析技術を開発すること。また、ハイパースペクトルデータ解析評価用システムを開発すること。	鉱床タイプに応じた衛星データ等による解析技術を開発すること。また、ハイパースペクトルデータ解析評価用システムを開発すること。	金属鉱床では、ベースメタルやレアメタルを産する鉱床タイプごとに固有の岩石・鉱物の産状を示すため、鉱床タイプに応じた解析技術を明らかにすることが必要である。また、ハイパースペクトルデータの高度利用のため、データ解析をサポートする解析評価用システムが必要となる。

Ｈ－３　成果、目標の達成度

Ｈ－３－１　成果

Ｈ－３－１－１　全体成果

エネルギー・資源、農業、環境、防災の各分野における実利用化のための解析技術の手法開発と、HISUI シミュレーションデータを使った実証により手法の有効性の確認・検討を行うとともに、スペクトルライブラリの整備を開始した。また、ハイパースペクトルデータ利用者に高品質・高精度で実用可能なプロダクトを継続して提供できるようにするため、センサ校正・データ処理・運用計画策定等からなる地上システムに必要な技術の開発を行った。いずれも研究開発スケジュールに沿った進捗であり、各中間目標を達成した。

Ｈ－３－１－２　個別要素技術成果

実利用化のための解析技術およびセンサ校正・データ処理技術について、平成 23～26 年度に実施した研究開発テーマの成果を要素技術ごとに示す。

（１）実利用化のための解析技術

【背景】

個別分野における利用技術開発のためには、HISUI 運用前に開発した手法を実証する必要がある。そこで、航空機搭載型ハイパースペクトルデータから HISUI シミュレーションデータを作成する HSUI シミュレータを開発した。

また、地球観測のために得られた HISUI ハイパースペクトルデータから物質を識別する際には、様々な物質毎のスペクトルデータを参照するため、その参照されるスペクトルデータは HISUI データの波長分解能より細かく精度の良いデータであることが望ましい。そこで、ハイパースペクトルデータを用いて鉱物識別を行うと思われる鉱物種を検討・整理し、選定された鉱物のスペクトルライブラリを整備した。

以上をまとめると、平成 23～26 年度では実利用化のための解析技術に共通する基盤技術として、

・HISUI シミュレータの開発
・鉱物スペクトルライブラリの整備

を行った。

【成果】

HISUI シミュレータの開発では、以下の成果を得た。

- HISUI ハイパースペクトルセンサの空間特性、波長特性、輝度特性を再現す

ることが可能な HISUI シミュレータを開発した（図 H-3-1-2-1）。

- 大気補正アルゴリズムである MODTRAN を HISUI シミュレータに組み込むことで、様々な大気条件や入射光量の違いを再現したデータを作成した。
- 既存の航空機ハイパースペクトルセンサの反射率データから HISUI シミュレーションデータを作成し、個別分野における利用技術の研究開発の実証試験に使用した。

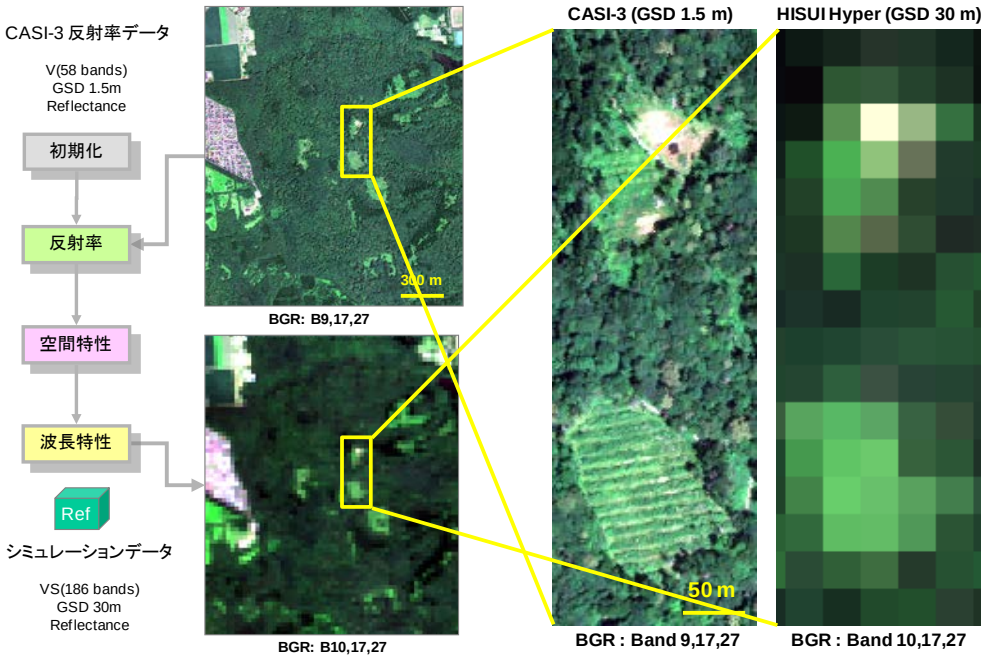


図 H-3-1-2-1　航空機搭載のハイパースペクトルデータから HISUI シミュレータにより作成した HISUI シミュレーションデータの例

また、鉱物スペクトルライブラリの整備では、以下の成果を得た。

- ハイパースペクトルデータのライブラリとして整備すべき 125 鉱物、168 標本（1 鉱物が複数の標本からなる場合があるため）のスペクトルデータを整備した。
- 測定に用いたセンサの波長分解能は、0.4μm～1.2μm の波長帯 で 3nm、1.2～2.5μm では 1～5nm であり、HISUI の波長分解能（それぞれ、10nm と 12.5nm）より細かなスペクトルデータを収集・整備した。
- スペクトルライブラリは、鉱物名、スペクトルデータ、X 線回折（XRD） チャート、蛍光 X 線分析装置（XRF）の分析値などの必要な情報を全て網羅したエクセルファイルとして作成し（表 H-3-1-2-1）、それぞれの情報はハイパーテキストのリンク先から確認できるようにした（図 H-3-1-2-2、図 H-3-1-2-3）。

表 H-3-1-2-1　エクセルファイルで作成したスペクトルライブラリ

鉱物名		標本番号	反射スペクトル (FS Pro, FT-NIR)			合成反射スペクトル および連続体除去			USGSスペクトル		XRD 分析結果	XRF等 分析結果	FT-NIR 生データ
和名	英名		塊状	粉砕	その他	塊状	粉砕	その他	生	連続体除去			
アンナイト	Annite	N14161	–	○	–	–	○	–	○	○	○	○	○
アノーサイト	Anorthite	N14178	–	○	–	–	○	–	○	○	○	–	○
直閃石	Anthophyllite	N14165	–	○	–	–	○	–	○	○	○	–	○
アンチゴライト	Antigorite	N14167	–	○	–	–	○	–	○	○	○	○	○
		N14192	–	○	–	–	○	–	○	○	○	–	○

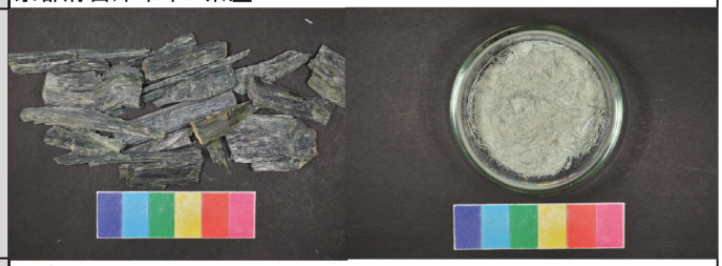
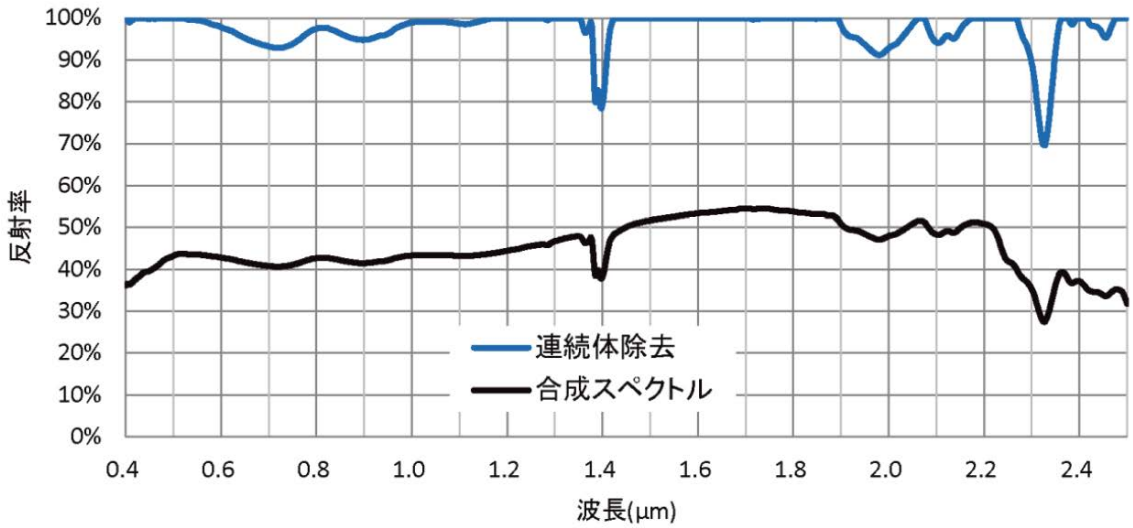
鉱物名		アンチゴライト(Antigorite)
組成式		$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
結晶系		単斜晶系
類		フィロ珪酸塩鉱物
族または系列等		蛇紋石族
測定標本	出所	株式会社ニチカ
	標本番号	N14167
	産地	京都府宮津市中ノ茶屋
	写真	
	備考	写真：カラーチャートは長さ4cm。
測定時の標本状態	Field Spec Pro	粉砕
	FT-NIR	粉砕
分析項目		XRD, XRF
USGS標本番号		nmnh17958,nmnh96917

図 H-3-1-2-2　標本番号のリンク先として表示される鉱物の基本情報（アンチゴライトの例）



（２）図 H-3-1-2-3　反射スペクトルのリンク先として表示される鉱物のスペ

クトルデータ（アンチゴライトの例）個別分野における利用技術

ハイパースペクトルデータに対して、エネルギー・資源、農業、環境、防災等の分野でユーザからのニーズが高かった以下の 9 事例について、解析手法の研究開発／打上前の事前実証を行った。

1. 海域の石油資源探査のための研究開発

海域の鉱区評価に有効とされるオイルスリックの情報をマイクロ波とは異なる視点で捉え、より確実性の高い石油滲出点を推定したいというユーザニーズがあった。

そこで、オイルスリック上の位置によるスペクトル特徴の違いから、石油滲出点の位置を推定可能な手法を開発した。

2. 熱水性鉱床探査のための高精度岩石・鉱物識別技術の研究開発

熱水性鉱床に付随する変質帯および鉱物種を衛星から直接識別したいというユーザニーズがあった。

そこで、岩石・鉱物の反射スペクトルの吸収位置と深さに注目した鉱物同定法（改良型 POSAM アルゴリズム）をもとに、熱水性鉱床探査のための高精度岩石・鉱物識別技術を開発した。

3. 酸化鉄型銅金鉱床に伴う変質帯抽出および探鉱のための研究開発

酸化鉄型銅金鉱床（酸化鉄型鉱物を主とし、硫化銅鉱物のほかコバルトやウラン、レアアースなどのレアメタルを伴う鉱床）の有望地抽出を植生が存在するような場所でも行いたいというユーザニーズがあった。

そこで、植生とミクスチャになったスペクトルから植生の影響を取り除いたスペクトルを再現する手法を開発し、酸化鉄型銅金鉱床の有望地を抽出する技術を開発した。

4. インドネシア共和国における水稲に関する研究開発

インドネシアにおいて、低コストかつ効率的に農地管理を行うため、水稲の生育段階と収量を推定したいというユーザニーズがあった。

これに対して、現地調査データが取得できる場合では、1 時期に取得したハイパースペクトルデータのみから、生育段階（9 段階）を約 80%の精度で分類できることを示した。さらに、収量については現地の統計データと 15%未満の差で予測できることを示した。

5. オーストラリアにおける小麦の生育モニタリングおよび収量・品質推定手法

の研究開発

食糧安全保障の観点から、日本が多くの小麦を輸入しているオーストラリアで小麦の収量、品質、作付状況、生育状況を推定したいというユーザニーズがあった。

そこで、ハイパースペクトルセンサによる１回の観測のみから小麦の収量、品質、生育状況、作付状況を推定する手法を開発した。

6. 不法栽培作物監視に関する研究開発

世界各国で重大な社会懸案事項となっている不法作物（ケシ）栽培地抽出のため、1 時期の画像データから効率的にケシと他の作物を分類したいというユーザニーズがあった。

そこで、同じ地域に栽培されている作物の中からケシを抽出する手法を開発した。

7. 半乾燥域から乾燥域における土壌塩分濃度マッピング手法の研究開発

塩害の土地の再生計画や劣化を食い止めるため、塩害化の初期段階を検出したいというユーザニーズがあった。

そこで、様々な土壌タイプで従来のマルチスペクトルセンサよりも低い塩分濃度を推定できる手法を開発した。

8. 熱帯泥炭地での森林バイマス分布と火災跡地植生タイプ分類手法の開発

インドネシアの熱帯泥炭湿地林において、REDD+や JCM/BOCM の MRV 方法論策定に必要な情報を精度よく抽出したいというユーザニーズがあった。

そのため、熱帯泥炭湿地林の森林タイプ分類とバイオマス量の推定手法を開発し、その有用性を実証した。また、火災跡地の植生分類の手法を開発した。

9. 土砂災害（表層崩壊）の脆弱性評価のための研究開発

植生と関連付けた土砂災害の発生可能性や防災機能の評価を行いたいというユーザニーズがあった。

そこで、ハイパースペクトルデータで得られた植生情報を、従来の地形、地質情報をもとにした危険度評価マップに追加することで、“より危険な地域”を抽出できることを示すとともに、植生情報を基にして崩壊跡地候補地を抽出できることを示した。

上記 9 事例の中から 5 事例について、以下に詳細を示す。

（ア）海域の石油資源探査のための研究開発

- オイルスリック上で400nm～950nmの放射輝度が最大となる範囲を教師とし、Spectral Angle Mapper（SAM）法を適用したところ、石油滲出点からの距離と SAM のスペクトル角の変化に関連性があることが分かった（図 H-3-1-2-4)。
- 滲出点近傍ではスペクトル角は相対的に大きいが、滲出点から離れるにつれて急激にスペクトル角は減少し、オイルスリック内での最小値に達した後、徐々に増加に転じることが明らかになった（図 H-3-1-2-4)。
- 波長が 2,337nm から 2,377nm の 5 バンドを正規化した輝度値の両端の反射強度を結ぶ直線より下の面積は、滲出点から離れるにつれて減少する傾向が認められた（図 H-3-1-2-5 の a と b)。

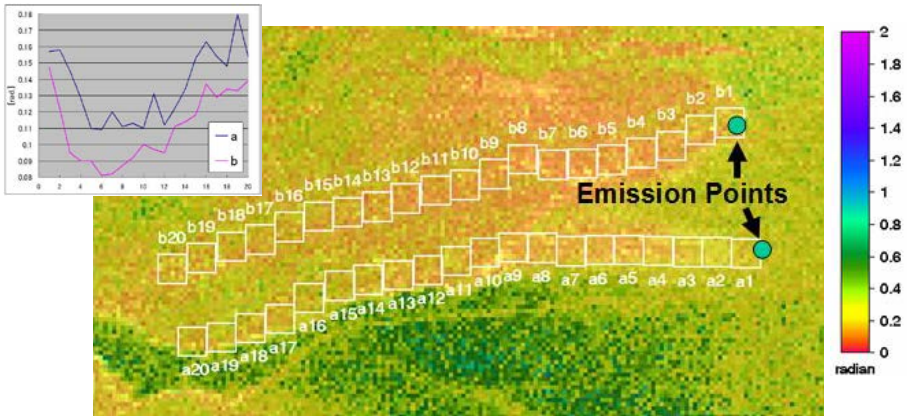


図 H-3-1-2-4　400nm～950nm のスペクトル角と滲出点からの距離の関係。左上のグラフは、横軸が算出点からの距離、縦軸がスペクトル角を表しており、a と b の折れ線は、それぞれ図の a1 から a20、b1 から b20 のスペクトル角を結んだものである。

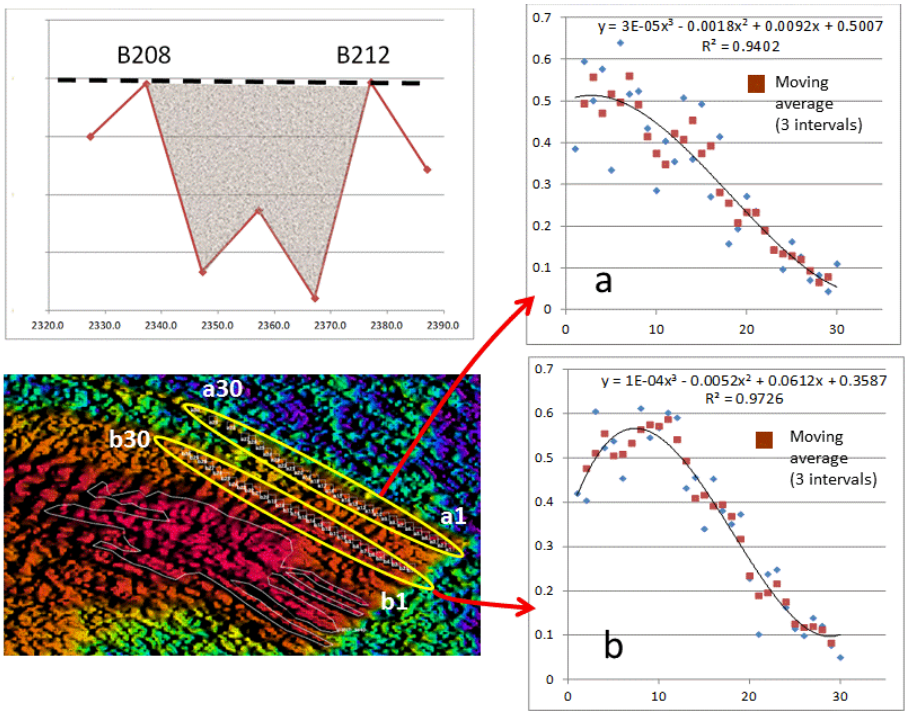


図 H-3-1-2-5　滲出点からの距離と 2,337nm（B208）から 2,377nm（B212）の 5 バンドのスペクトルパターンの変化の関係。左上図は、5 バンドを正規化した輝度値の両端の反射強度を結ぶ直線より下の面積を表し、右上 a は左下図の a1～a30 について、右下 b は左下図の b1～b30 についての面積変化を表す。

（イ）酸化鉄型銅金鉱床に伴う変質帯抽出および探鉱のための研究開発

- 植生指標（NDVI）とセルロース吸収指数（CAI）を用いた補正により、NDVI が 0.6 までは良い土壌スペクトルの復元が可能であった（図 H-3-1-2-6）。
- 鉱物抽出手法として、吸収のピーク位置に重みを置いたアルゴリズムを開発した。
- 酸化鉄型銅金鉱床に関連する変質鉱物の抽出を試みた結果，角閃石、緑泥石、白雲母等の変質鉱物の量比の抽出が可能となり（図 H-3-1-2-7）、その結果、既存の地質図や地表踏査を実施せずとも、ハイパースペクトルデータと物理探査データを組み合わせることで有望地を抽出できる可能性があることが分かった（図 H-3-1-2-8）。

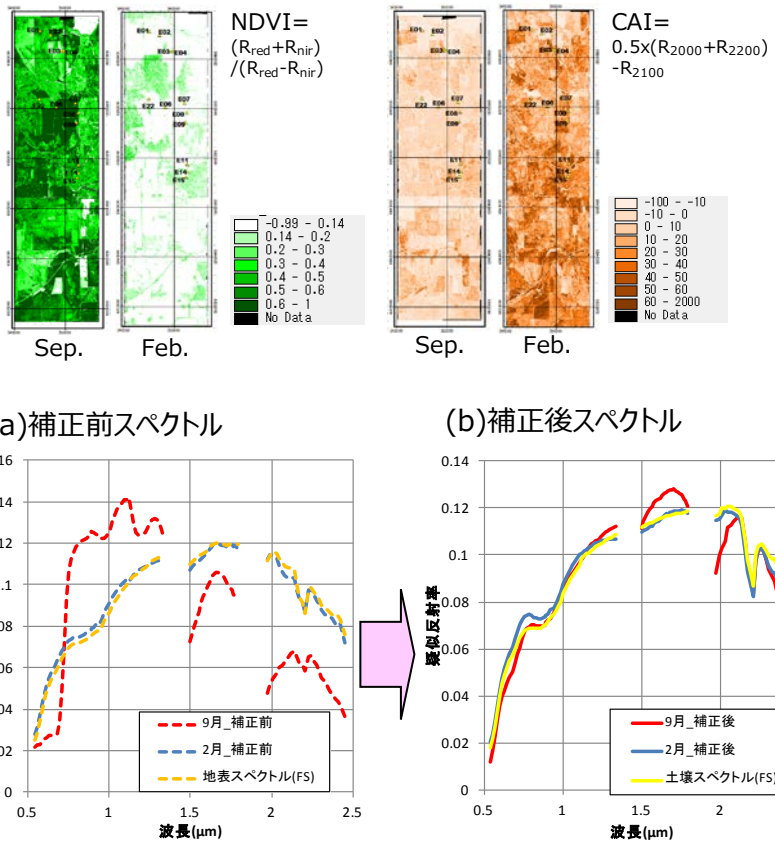


図 H-3-1-2-6　植生の影響を補正する前(a)と補正後(b)のスペクトル形状の比較。左上図と右上図は、それぞれ 9 月と 2 月の植生指数と 9 月と 2 月のセルロース吸収指数を表す。

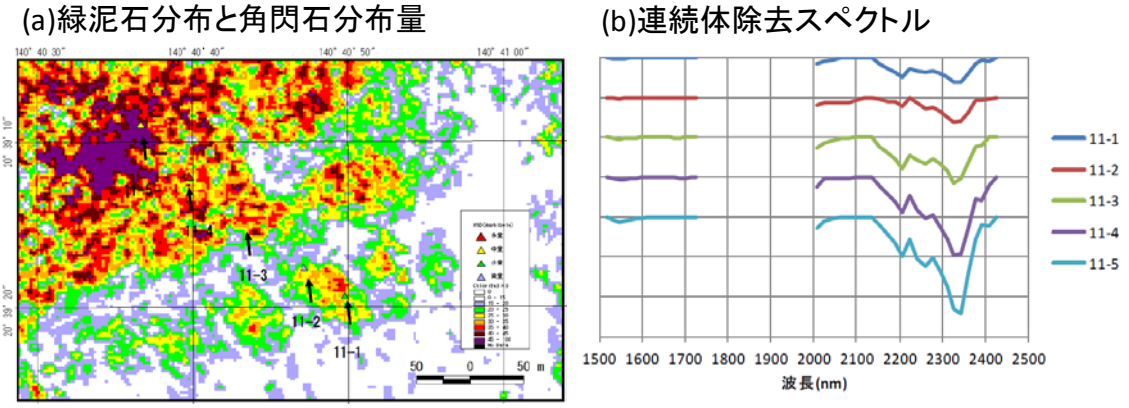


図 H-3-1-2-7　緑泥石分布推定図（左図）と現地測定のスペクトル（右図）。左図の黒矢印で示した箇所の連続体除去スペクトルを右図に示している（試料採取地点 11-1～11-5）。

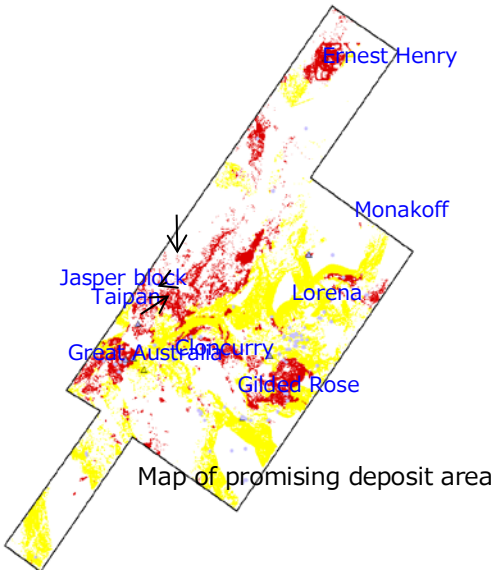


図 H-3-1-2-8　本手法を適用して作成した酸化鉄型銅金鉱床の有望地抽出図

（ウ）オーストラリアにおける小麦の生育モニタリングおよび収量・品質推定手法の研究開発

- ハイパースペクトルデータを用いることで、子実重や子実窒素含有率だけでなく、灰分や穂水分の推定も可能な手法を開発した（図 H-3-1-2-9）。
- また、小麦が栽培されている圃場を特定するための作付分類手法を開発した（全体精度 78.2%）。
- 開発した手法を利用して広域分布推定図を作成した（図 H-3-1-2-10）。
- ユーザからは、広域観測が可能な低解像度衛星から得られる情報を高精度化するための補完的な情報としてのハイパースペクトルデータへの期待が高いことを確認した。

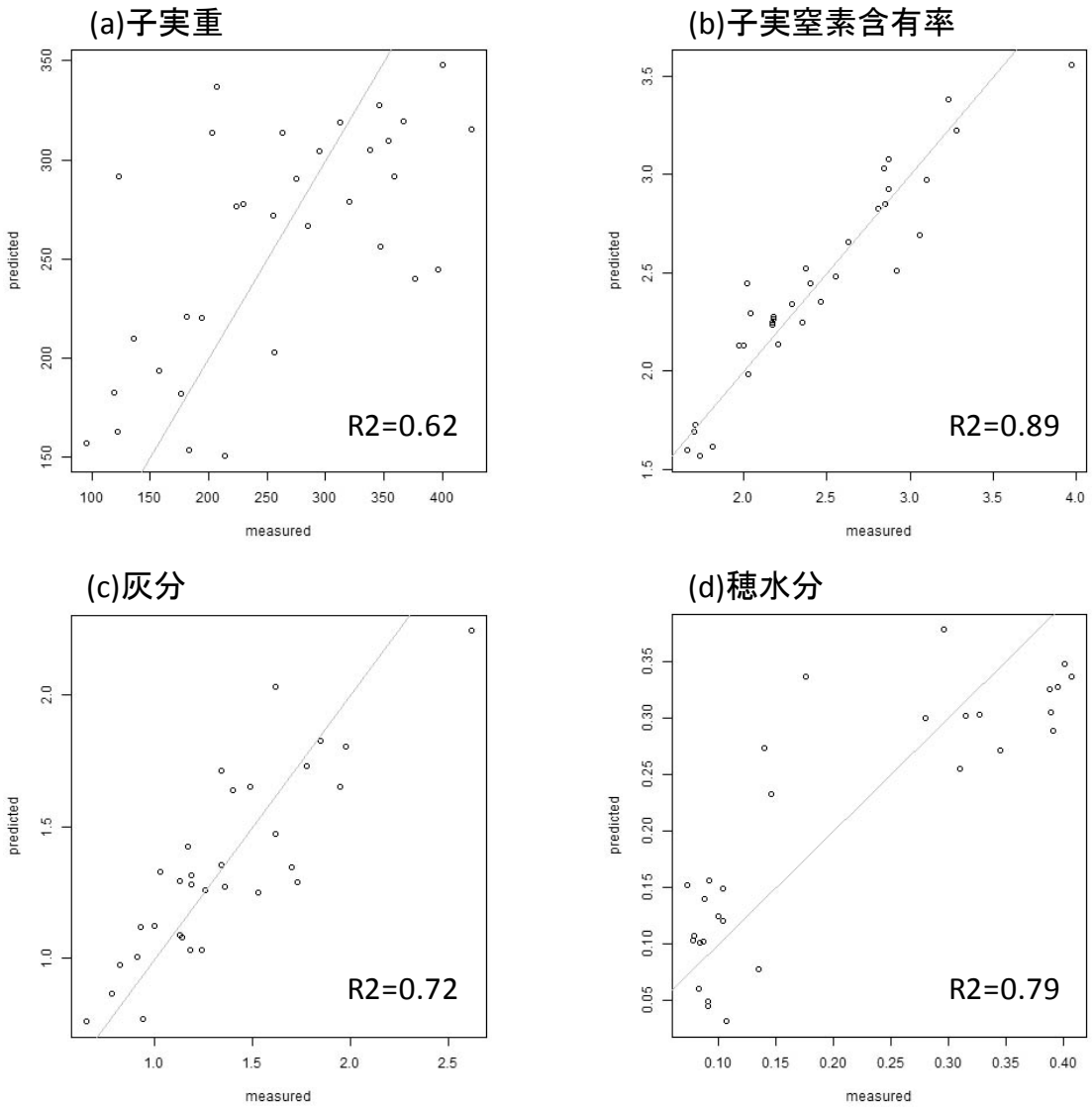


図 H-3-1-2-9　ハイパースペクトルデータによる、(a)子実重、(b)子実窒素含有率、(c)灰分、(d)穂水分の推定値と現地調査による測定値との比較。

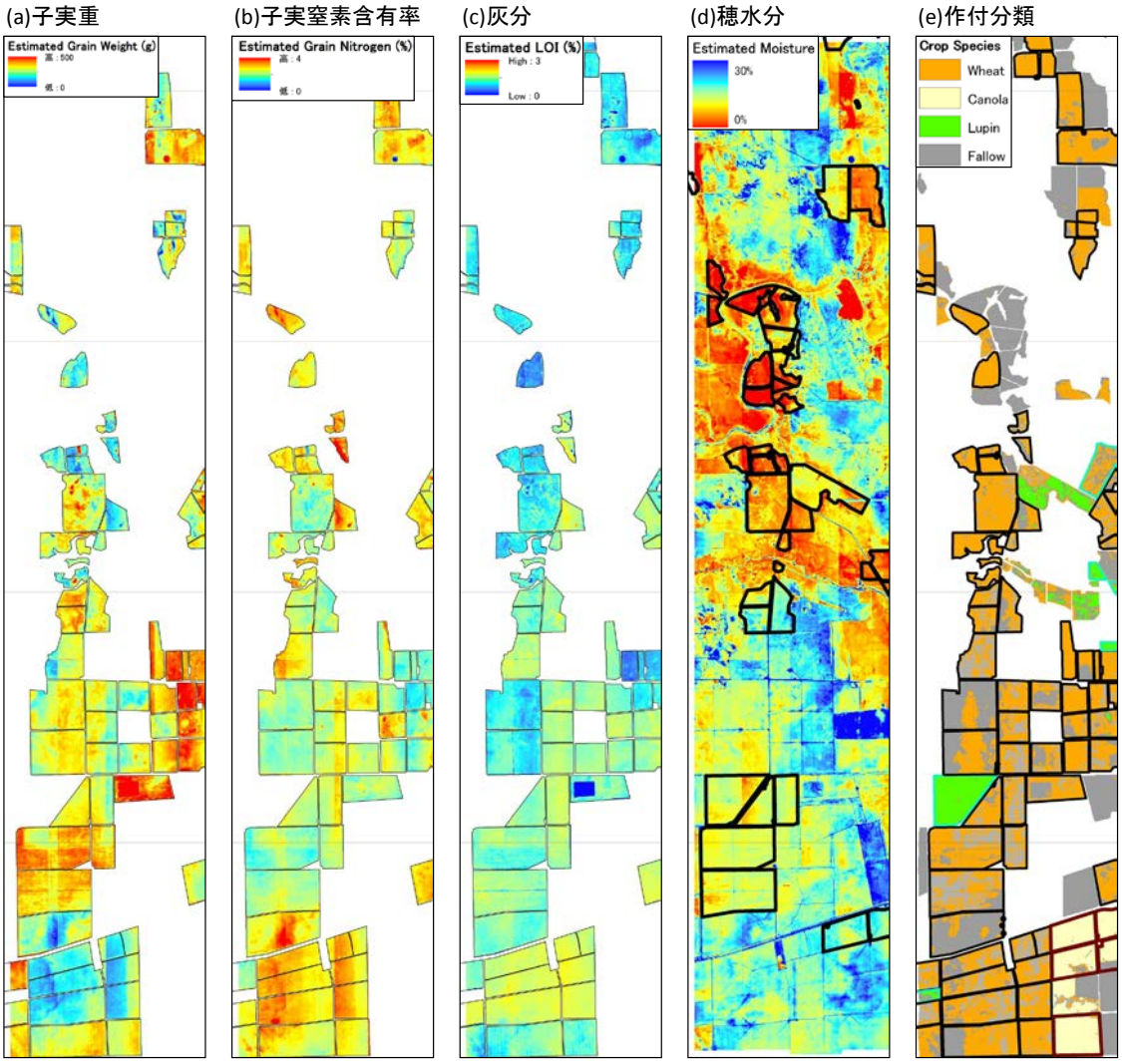


図 H-3-1-2-10　ハイパースペクトルデータによる、(a)子実重、(b)子実窒素含有率、(c)灰分、(d)穂水分、(e)作付分類の広域分布推定図。

（エ）半乾燥域から乾燥域における土壌塩分濃度マッピング手法の研究開発

- 従来のマルチスペクトルセンサでは不可能だった、塩類集積の初期段階である 500mS/m 以下の低い土壌塩分濃度で、スペクトルとの関係式を導くことができた（図 H-3-1-2-11）。
- 携行型分光放射計 FieldSpec のデータを用いた解析の結果、15 種類の異なる土壌タイプにおいて、同一推定式により土壌塩分濃度が推定可能である事を示した。
- 航空機搭載型ハイパースペクトルセンサである HyMAP の解析結果でも、同じシーン中に異なる土壌タイプで塩類集積地域を抽出できる事を示した。

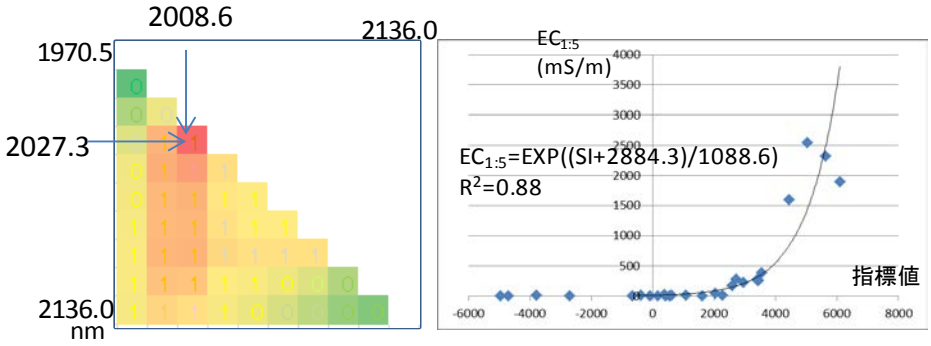


図 H-3-1-2-11　土壌塩分濃度と関係の高い波長の組合せの探索（左図）、およびこれら波長の組合せを使って作成した土壌塩分濃度推定式と推定結果。

（オ）熱帯泥炭地での森林バイマス分布と火災跡地植生タイプ分類手法の開発

- インドネシア政府の泥炭湿地林区分に対応した一次林、二次林の分類では、平成 22 年度までに実施した HyMAP による分類結果とおおむね一致していることを確認した（図 H-3-1-2-12 の a)。
- バイオマス推定では、決定係数 0.82、推定誤差 50t/ha という高い精度で推定可能であることを示した（図 H-3-1-2-12 の b)。なお、将来 REDD+活動等の実施が想定される民間事業者からは、本研究の森林タイプ分類は極めて有効であり、バイオマス推定精度は 50t/ha の誤差であれば十分活用可能であるという評価を得た。
- Fieldspec および HyMAP を用いて、最大 6 区分の火災跡地植生タイプを推定する手法を開発し、全体精度 0.93 という高い精度を得た。また、マップ化を行った（図 H-3-1-2-13)。

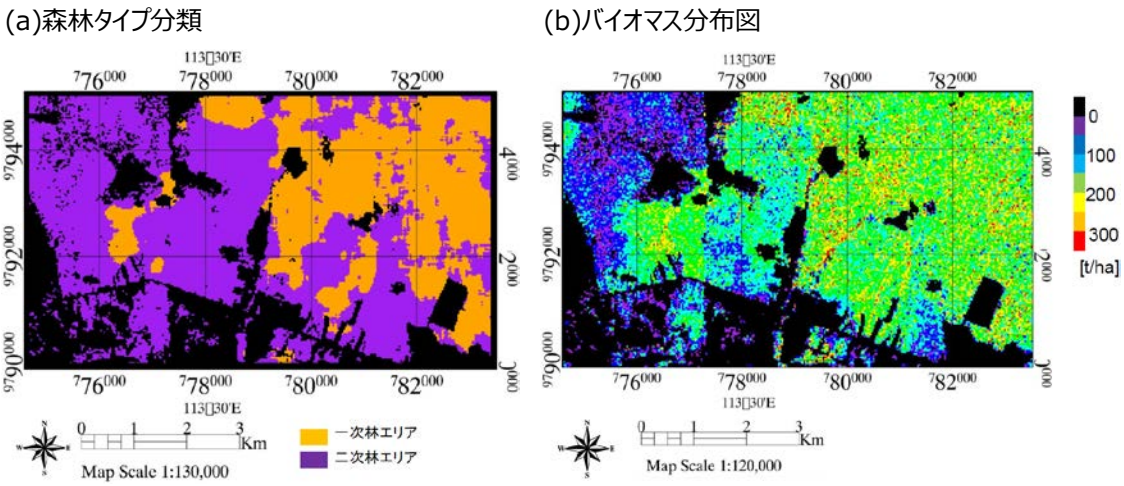


図 H-3-1-2-12　(a)一次林と二次林の森林タイプ分類。(b)バイオマス分布の推定図

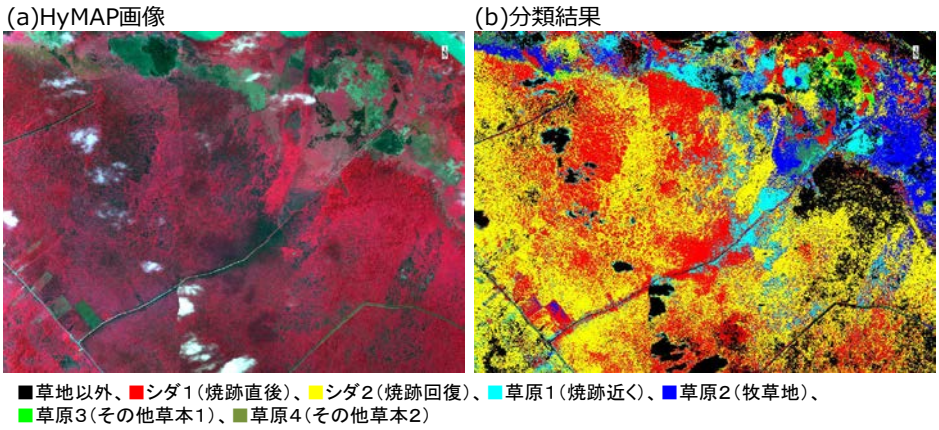


図 H-3-1-2-13　分布が限定的な草本を含めた詳細な火災跡地の植生タイプ分類結果　(a)HyMAP 画像、(b)分類図

（３）センサ校正およびデータ処理技術

HISUI の各種プロダクトの品質を保証・高精度化させるためには、その校正技術を世界に先駆けて確立する必要があり、そのため、HISUI の打上前および打上後校正の信頼性向上のための「校正技術」を開発する必要がある。また、HISUI に対して実効的な校正を行うためには、その「校正計画」を綿密に作成する必要があり、さらに、校正にかかる意思決定を速やかに HISUI 運用に反映できる体制を整備することを目的に「校正システム」の開発を進める。

また、これら校正技術・計画・システムをベースに、放射量・幾何的歪みの除去や大気の影響の除去等を行い、ユーザにとって扱いやすい「データ処理」をすることが重要となる。HISUI によって取得される生データから、幾何補正および放射量補正を施すことによって生成されるプロダクトを L1、および、L1 プロダクトから大気補正を施すことによって生成されるプロダクトを L2 と呼び、そのアルゴリズム（および基準書）・ソフトウェアの作成・開発を進め、さらに必要に応じ、これらをシステム化する。

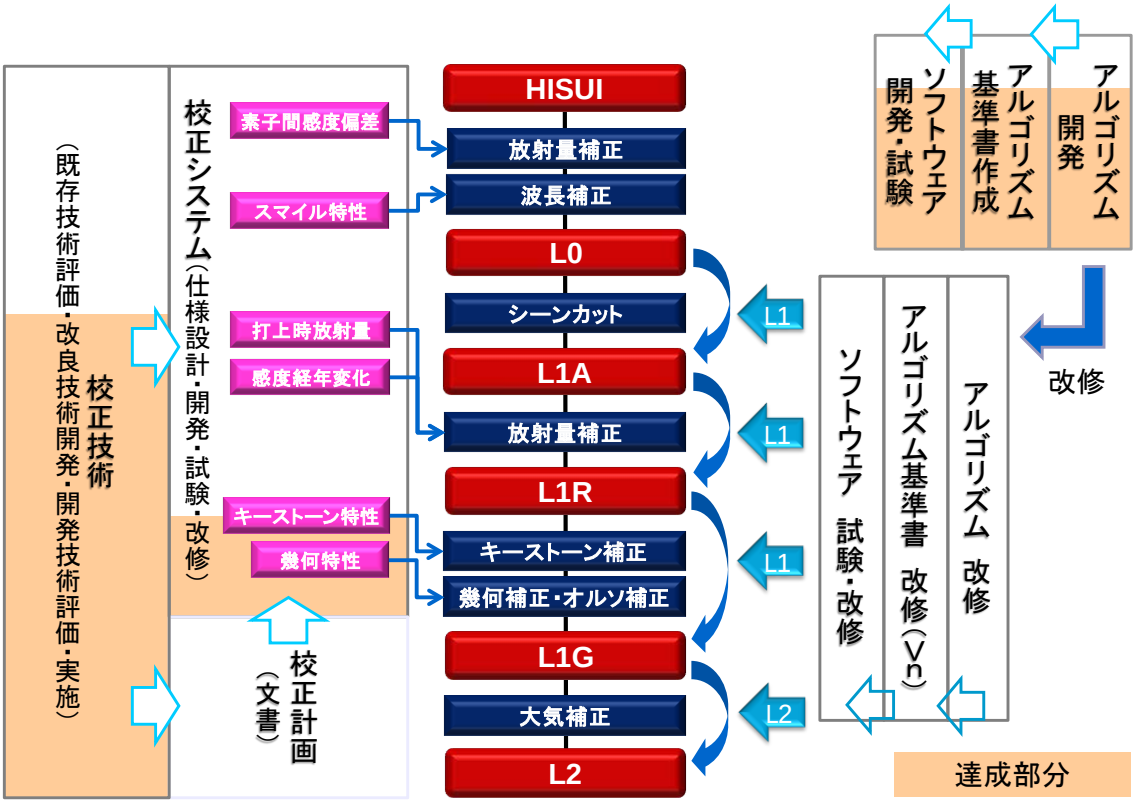


図 H-3-1-2-14　校正とデータ処理

（ア）校正技術

- 打上前校正・代替校正・相互校正および月校正のそれぞれの既存技術評価を行い、以下の改良技術の開発に当たった。
  - 打上前校正については、相対分光応答度評価技術および絶対感度打上前校正・評価技術の開発を行った。
  - 代替校正については、南半球新規校正サイトの検討、水蒸気吸収帯での標準反射板の精度見積り、標準反射板の品質維持・高精度化に向けた技術開発を行った。
  - 相互校正については、HISUI 運用時に計画されている他のハイパースペクトルセンサ(EnMAP、PRISMA、HyspIRI および NIST traceable な CLARREO、NPL traceable な TRUTHS など）の仕様・運用計画等の調査・検討を行った。また、マルチスペクトルセンサ等とハイパースペクトルセンサとの相互校正にかかる改良手法を開発した。
  - 月校正については、現在標準となっている月照度モデル ROLO についての調査、その上で、日本が独自に整備をすすめる月面輝度データ（SELENE/SP データ）の利用可能性を検討、運用コストを抑えつつ高精度の放射量校正を実現できることを明確にした。

（イ）校正システム

- 以下の校正アーカイブシステムの開発および校正パラメータテーブル管理手順の策定に着手した。
  - 校正アーカイブシステムは、従前の衛星搭載センサ運用上の教訓に基づき、校正に用いた源泉データを確実に保守し、校正検証作業を行うツール・データ群を合わせ持つものを目指すものである。その仕様設計、特に、HISUI 標準プロダクトを作成する地上データシステム（GDS）およびセンサ機器モニタリングを行う機器実証部とのインターフェース、および、その処理手順について検討を進めた。
  - 校正パラメータテーブル管理手順の策定については、衛星センサ上でも輝度補正処理を行う HISUI の特性に最適化したラジオメトリック DB の作成を進めた。

（ウ）データ処理

- L1 作成処理のため、以下のアルゴリズム開発（およびその基準書作成）、ソフトウェア開発（および試験）を行った。
  - センサにおける幾何・波長歪補正ならびにセンサ視差補正の手法を開発した。
  - 評価モデルの特性に基づき、システム開発情報を作成した。
  - スマイル、キーストーン特性のデータベース化および補正方法の検討、その検証を行った。
  - オルソ化に必要な数値標高モデル（DEM）の評価し、オルソ化手法の比較を行った。
  - 素子間感度偏差・非線形性につき、モーメンタムマッチングなどの手法を用いて低減できることを示した。
  - 以上をもとに、アルゴリズム基準書の情報を収集した。
  - L1 処理ソフトウェアの開発、模擬入力データを用いた動作試験を行い、要求速度、精度を満たしていることを確認した。
- 大気補正済みプロダクト L2 の作成処理のための以下のアルゴリズム開発を行った。
  - 太陽高度、大気状態の変動にロバストな反射率推定法の開発を行った。
  - 打ち上げ後のチューニングが容易な HISUI 雲検知アルゴリズムを開発した。
  - エアロソル量推定手法の暗画素法を陸域向けに開発、標高まで考慮する手法を開発した。

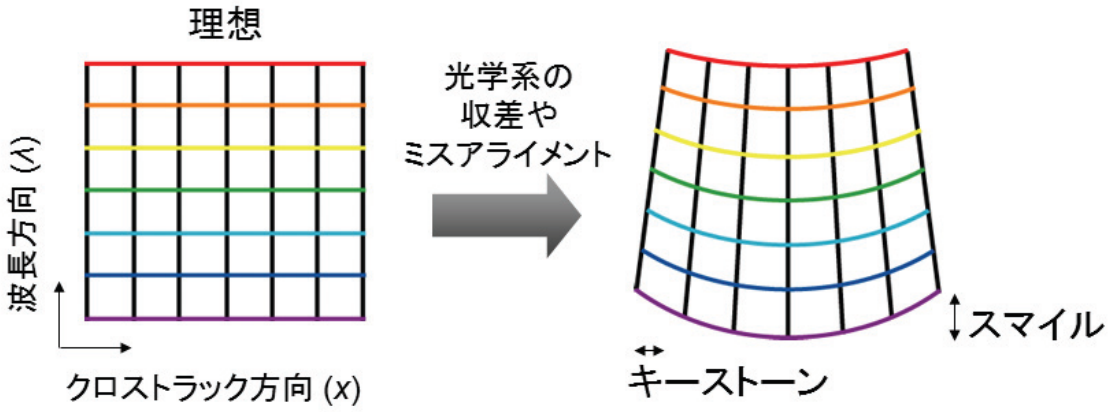


図 H-3-1-2-15　センサ光学特性：キーストーンとスマイル

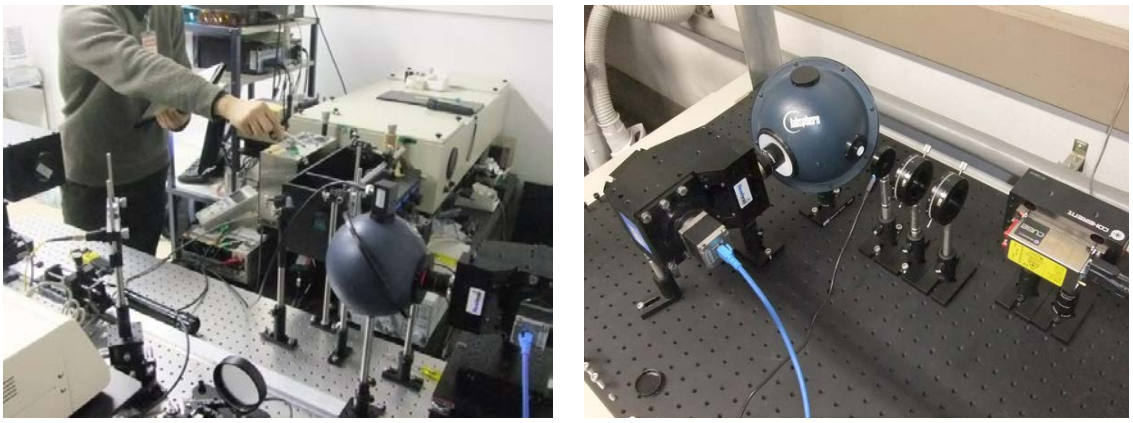


図 H-3-1-2-16　センサ光学特性の実験設備概観
左：ＳＣ利用　右：レーザ利用

（４）地上システム（運用計画システムを含む）

ハイパースペクトル及びマルチスペクトルセンサの運用では最適化された観測計画により取得されたデータを処理し、高品質なプロダクトとしてタイムリーにユーザへ提供することが求められる。当該運用を実現するため、センサ校正・観測計画・データ処理・保存・配付の各システムから構成される地上システム（全体システム）に求められる機能の検討・整理を行った。

地上システムの機能要求項目の検討・整理においては、ASTER および PALSAR 地上データシステムの開発・運用の経験から蓄積された知見を基に、ユーザの利便性を考慮した地上システムに求められる機能を洗い出し、内容を整理した。また、国際標準に準拠した対外インターフェース、クラウドサービスの利用によるコスト効率向上等、これまで検討を行った要素技術を考慮して地上システムの概念設計書を作成した。

ハイパースペクトルセンサ等には多様な分野のユーザからデータ要求があるため、観測機会を最大限有効に活用して成果を着実に上げるためには、ユーザからの要望に基づいて立案された長期的な機器運用計画及び観測計画が求められる。またハイパースペクトルセンサによって得られるデータは膨大であり、得られる情報も多種多様であるため、そのデータ処理も長期的視点から立案された計画に基づいて効率的に行う必要がある。

このような状況を踏まえて、運用計画システムとしては、長期的な機器運用計画及び観測計画を策定するとともに、これらの計画に基づき、短期の観測計画を自動的に作成するアルゴリズム（短期観測計画アルゴリズム）を開発することを目的として、以下の成果を達成した。

（ア）HISUI 長期運用計画シミュレーションツールの開発およびシミュレーションの実施

平成 22 年度までに開発した長期観測シミュレーションツールの基礎部分に対して、ユーザニーズに基づく観測対象地域や観測条件、およびセンサの技術的な制約条件を組み込み、観測状況が高い精度で再現できるようにした。

具体的には、以下の機能を追加した。

- シミュレーション結果を解りやすく表示するため、未観測地域の表示、球体表示、観測達成回数や試み回数の表示機能を追加した。
- シミュレーションを高精度化するため、被雲実績予測機能を追加した。
- ユーザニーズに基づく観測対象地域の設定を可能とするため、優先観測対象地域（石油堆積盆）、夜間火山観測対象地域、主要都市・自然保護地域、氷河観測地域、国毎などの観測対象地域設定機能を追加した。
- ユーザニーズに基づく観測条件の設定を可能とするため、サングリント（水面による太陽光の鏡面反射）の回避機能の設定、季節条件の追加、被雲回避モデル等の観測条件設定機能の追加を行った。
- センサおよび搭載衛星等による技術的な制約条件の設定を可能とするため、ポインティング 5 方向の設定、観測マージンの設定、観測機器稼働時間の制約の設定、オンボードレコーダ容量およびダウンリンク基地局の設定等、衛星制約条件設定機能を追加した。

これら機能を追加した長期運用計画シミュレーションツールを用いて、観測シミュレーションを行った出力例を図 H-3-1-2-17、図 H-3-1-2-18 示す。

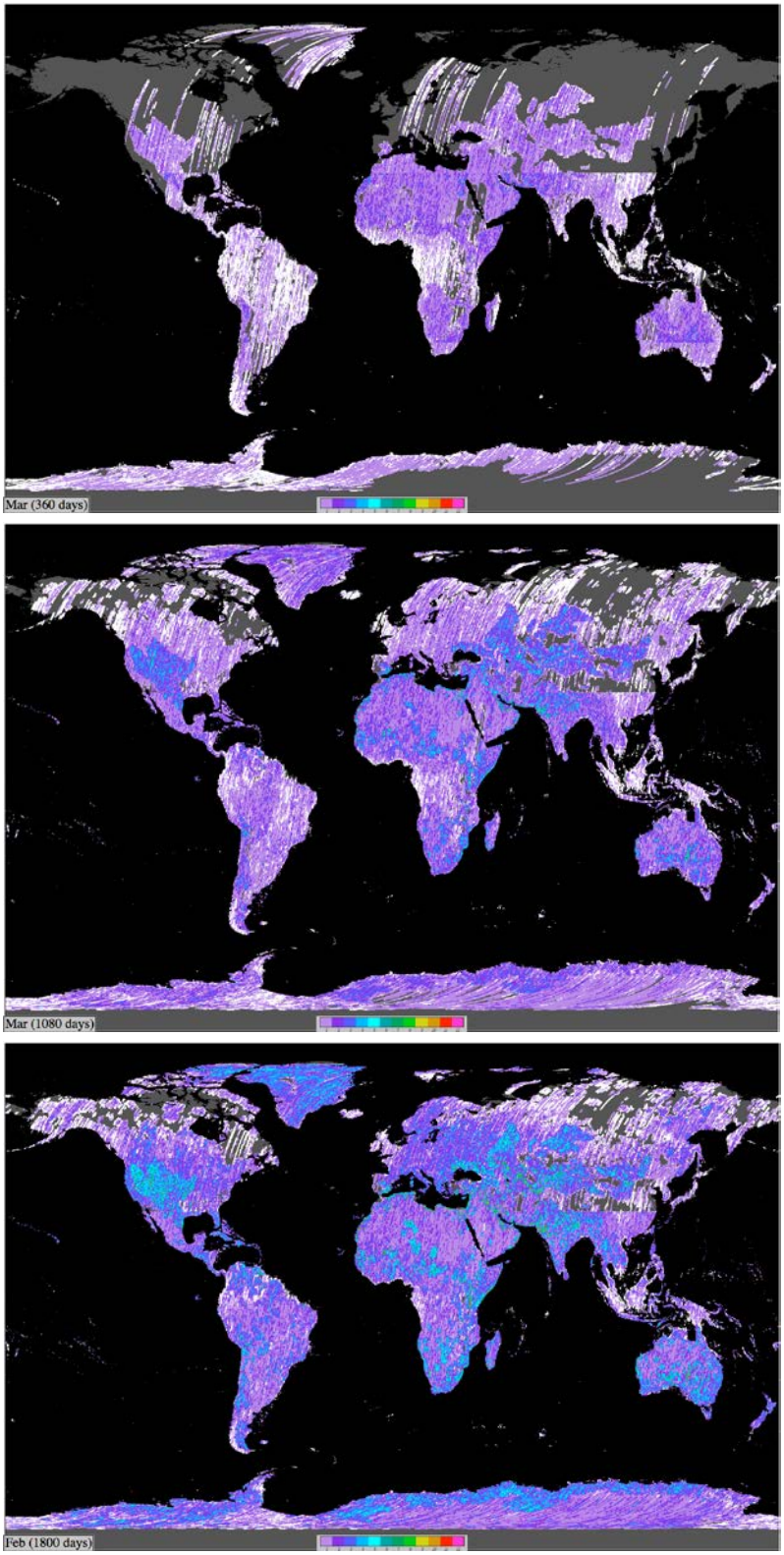


図 H-3-1-2-17　長期観測シミュレーション結果の一例
（上：1 年目　中：3 年目　下：5 年目）
（石油堆積盆・火山・都市・自然保護・氷河を観測要求に設定した例）

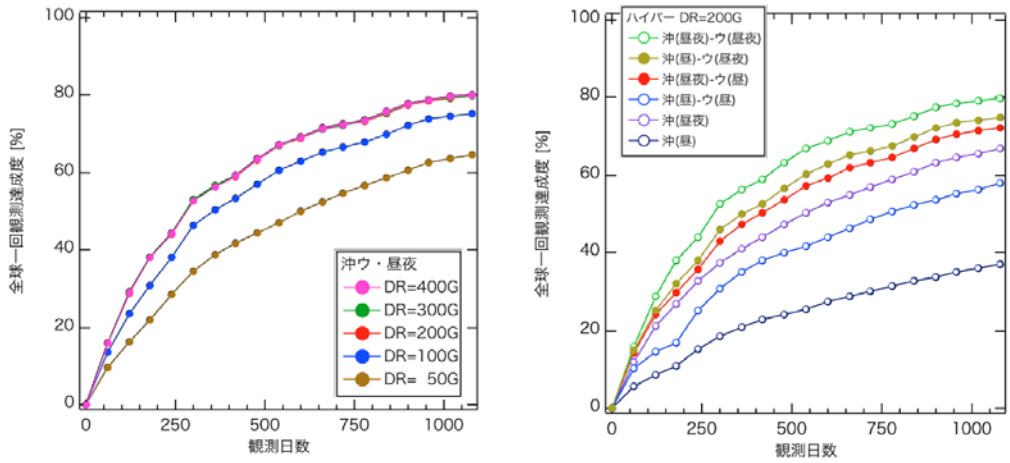


図 H-3-1-2-18　オンボードレコーダ容量およびダウンリンク基地局による全陸域一回観測の達成度
（左：オンボードレコーダ容量　右：ダウンリンク基地局）

（イ）短期観測計画作成アルゴリズムの開発

HISUI の運用では、詳細な個別観測要求、観測実績、軌道予測情報データ、センサの状態、観測日の雲予測等を入力情報として、一日～数日分の具体的な観測対象位置/時刻を規定した観測計画（短期観測計画/観測スケジュール）を作成する必要がある（図 H-3-1-2-19）。

そこで、平成 23～26 年度には、以下の(a)、(b)の項目を実施した。

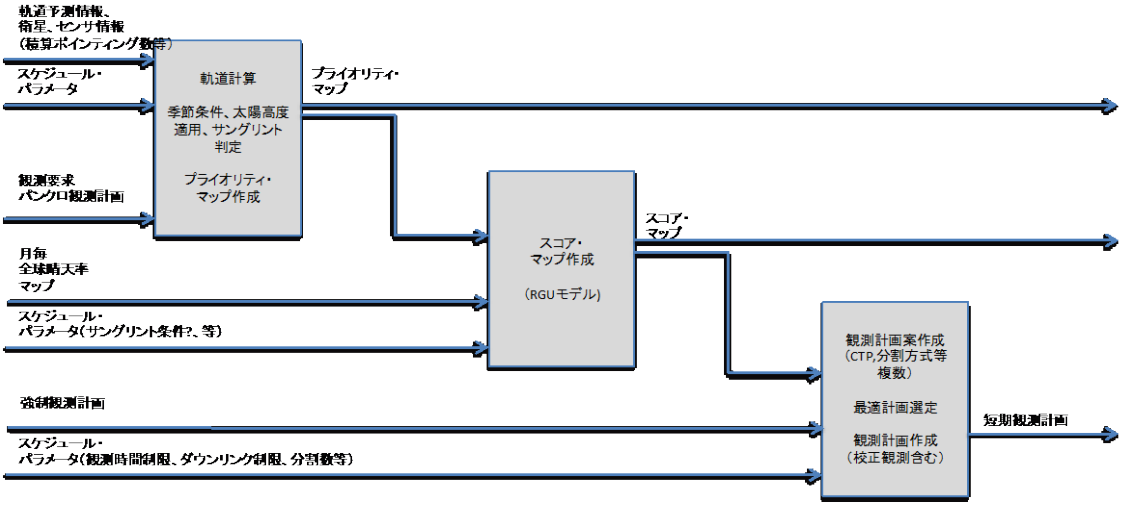
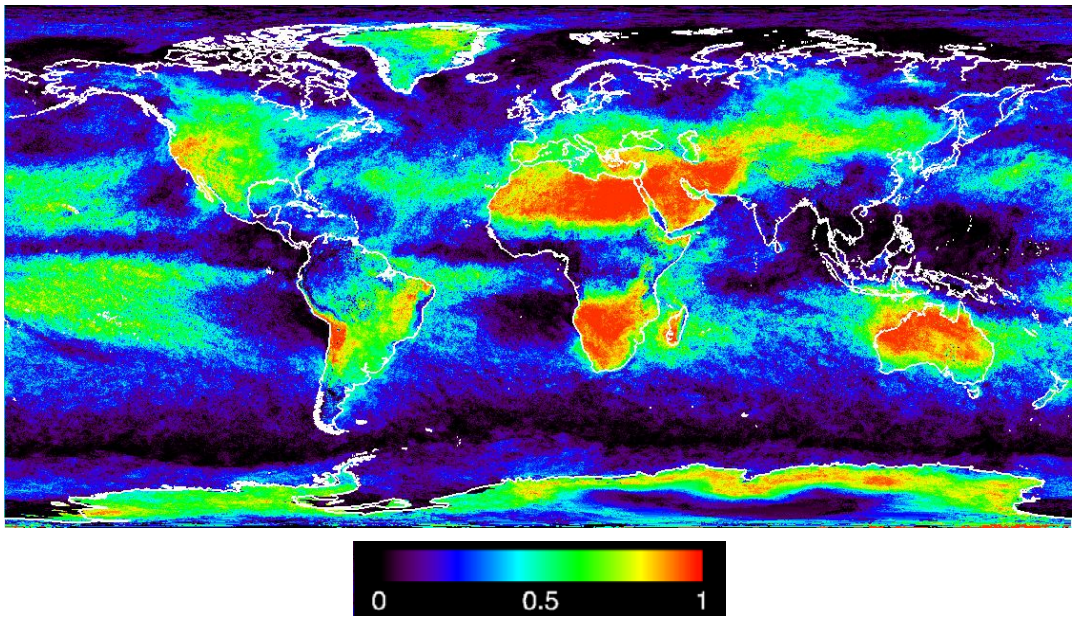


図 H-3-1-2-19　HISUI 短期観測計画作成の流れ

(a)「全球月毎晴天率マップ」の整備

短期観測計画の作成に必要なデータ「全球月毎晴天率マップ」を、2008～2013年に観測されたTerra/MODISデータから作成された、NASAが配布する雲マスクプロダクトMOD35から、雲のあり・なしの情報のみを抽出して「全球月毎晴天率マップ」を全球30秒(約1km)メッシュの空間分解能で計算した（図H-3-1-2-20)。



図H-3-1-2-20　全球月毎晴天率マップ（例：7月）

(b) 短期観測作成アルゴリズムの開発

複数のアルゴリズムを併用して、より良い観測計画を立案する短期観測作成アルゴリズムを開発した。また、本アルゴリズムを実行する上で、必要な情報（観測要求とその進捗状況・メッシュ毎の観測実績情報・作成した短期観測計画・パラメータ等）を格納したデータベースが、また運用に際しては短期観測計画や観測要求の情報表示等のオペレーション支援機能を有するシステムが必要であることを明示した。

今後は今回開発した本アルゴリズムの有効性の検証および最適なパラメータの設定のために、最終的に設定された長期運用計画をベースに検証作業を実施する。

（５）金属資源探査技術の研究開発

（ア）次世代衛星データ解析技術開発

【研究概要】

地球観測衛星センサ及び今後実用化が期待されるハイパースペクトルセンサ等により得られる地球観測データから、鉱物分類を高精度化するためのデータ解析技術の研究及び開発を実施した。具体的には、金属鉱床や同探査プロジェクトで対象となる岩石・鉱物の反射スペクトルデータを測定・集積し、ベースメタルやレアメタルを産する鉱床タイプに伴われる岩石・鉱物の反射スペクトルの特徴を明らかにするとともに、ハイパースペクトルデータやスペクトルメータデータ等を用いて、鉱物の詳細な産状、鉱物の化学組成、鉱物の風化プロセス等を明らかにした。

【成果】

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構が海外の金属資源探査プロジェクトで採取した岩石・鉱物試料及び、国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質標本館の鉱石・鉱物を対象にスペクトル測定、化学分析等を実施してベースメタルやレアメタルを産する鉱床タイプに伴われる岩石・鉱物のスペクトルデータ収集を行い、解析に利用可能なデータベースとして取りまとめた（512 試料 1,038 スペクトル）。

ハイパースペクトルデータや上記のスペクトルメータデータ等を用いて、北米、南米、豪州、アフリカ等の各種鉱床地帯等を対象に詳細な鉱物識別を行うとともに、鉱物の化学組成、風化プロセスなどに対する解析技術を開発した。例えば、南米のスカルン鉱床周辺において、航空機ハイパースペクトルデータを用い、イライト(絹雲母)の鉱物組成の詳細解析から、鉱床生成に関与したと推測される熱水活動の中心域(高温域<水色>：Al-イライト、低温域<青色>：Fe-Mg-イライト)が推測可能となった（図 H-3-1-2-21）。本成果は、今後、金属鉱床探査のターゲット絞り込み、つまり、探査技術の高度化･効率化に貢献すると期待される。

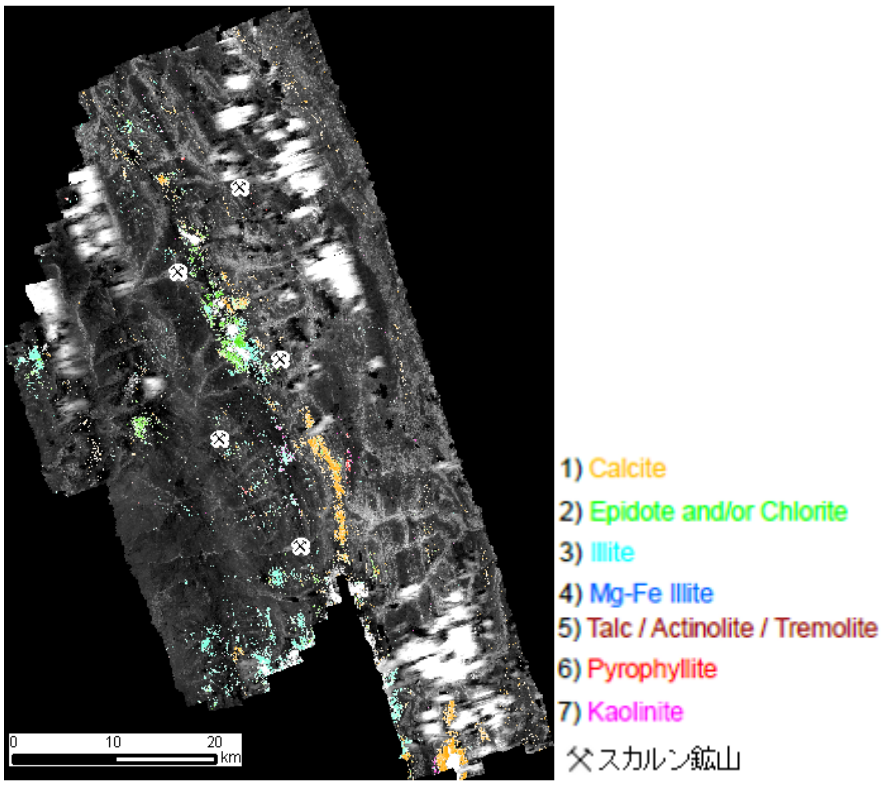


図 H-3-1-2-21　南米スカルン鉱床を対象とした HyMap データ解析結果

（イ）金属鉱床タイプに応じた総合解析技術の開発

【研究概要】

金属鉱床では、ベースメタルやレアメタルを産する鉱床タイプごとに固有の岩石・鉱物等の産状を示すため、鉱床タイプに応じて地形、地質、化学分析、物理探査等の多種データを活用した解析技術開発を実施した。さらに、ハイパースペクトルデータの高度利用のため、データ解析をサポートする解析評価用システムの開発を行った。

【成果】

鉱床探査対象となる主要な１５の鉱床タイプ（レアアース鉱床、浅熱水性鉱床、ニッケル白金鉱床、IOCG 鉱床、高硫化型銅金鉱床、リチウム鉱床、VMS 鉱床、PGE 鉱床、タングステン鉱床、アンチモン鉱床、鉱脈型鉱床、斑岩銅鉱床、重レアアース鉱床、スカルン鉱床、漂砂鉱床）に関する解析探査技術開発を行い、その成果を解析手順書等として取りまとめた。また、解析評価用システムとして探鉱現場で有効活用できる機能を備えた携帯型スペクトルメータ（図 H-3-1-2-22）及び SQUID 磁場偏差計の実機を完成した。

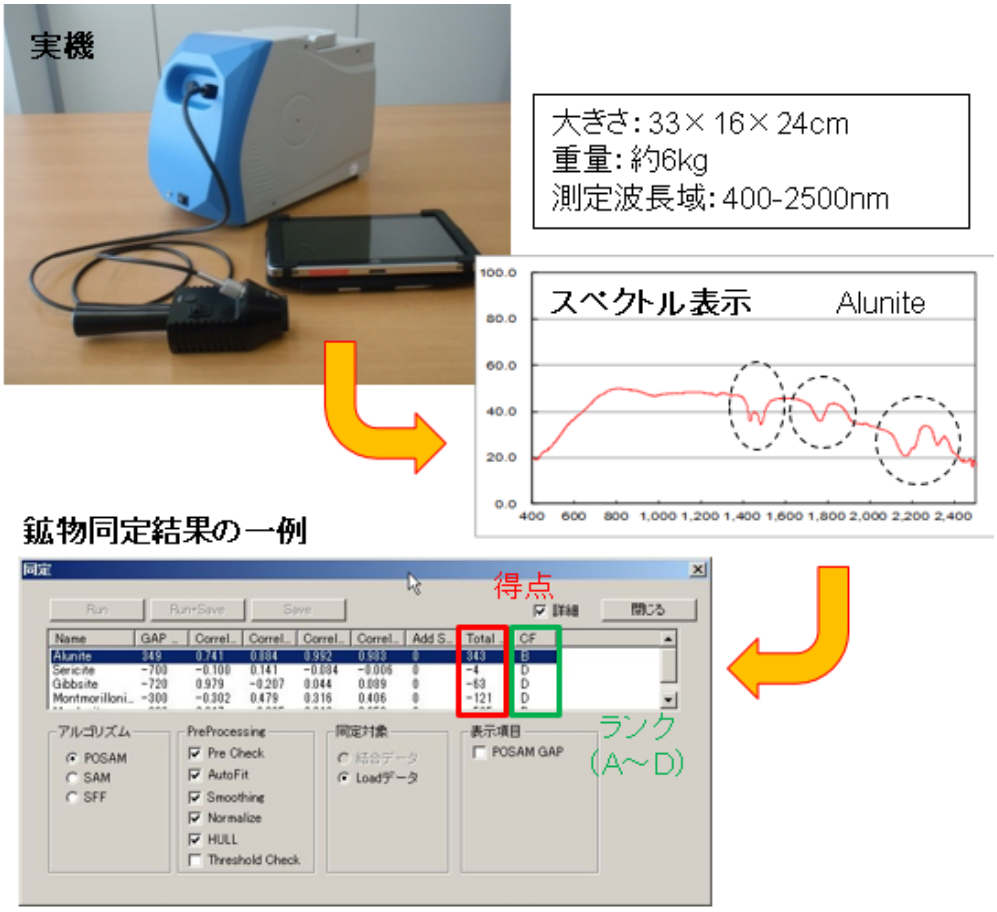


図 H-3-1-2-22　携帯型スペクトルメータ実機の概要

Ｈ－３－１－３　特許出願状況等

当プロジェクトでは表 H-3-1-3-1 に示すように、平成 23～26 年度は表 H-3-1-3-2、表 H-3-1-3-3 に示すように、関連学会誌への論文投稿、関連学会への投稿や発表等、多数行っている。

表 H-3-1-3-1　特許・論文等件数

要素技術 （実用化技術研究細分要素）	論文、投稿、発表数	特許等件数 （出願を含む）	特許権の実施件数
実利用化のための解析技術	52		
センサ校正・データ処理技術	31		
金属資源探査技術の研究開発	27	2	

表 H-3-1-3-2　（１）論文、投稿、発表、特許リスト(実利用化技術)

	題目・メディア等	時期
投稿 発表	34th ISRSE 「Retrieval of Soil Erosion Relevant Parameters in the Western Australian Wheat Belt from the VNIR-SWIR and TIR Spectral Signatures」	H23.4
投稿 発表	34th ISRSE 「The Effect of Spectral Unmixing of Hyperspectral Imagery for Mapping of Soil Properties」	H23.4
投稿 発表	34th ISRSE 「Operation Plan Study for Japanese Future Hyperspectal Mission: HISUI」	H23.4
投稿 発表	EARSeL 2011 「Mapping of Surface Soil Parameters in the Western-Australian Wheat Belt Region from Hyperspectral Imagery」	H23.4
投稿 発表	（社）日本写真測量学会平成 23 年度年次学術講演会「登熟後期のハイパースペクトルデータによるオーストラリア小麦の生育モニタリング」	H23.5
投稿 発表	（社）日本写真測量学会平成 23 年度年次学術講演会「航空機搭載ハイパースペクトルデータによる連続体除去法を用いた樹種分類」	H23.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 50 回（平成 23 年度春季）学術講演会 「ハイパースペクトルデータ利用のためのスペクトルデータベースの改良」	H23.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 50 回（平成 23 年度春季）学術講演会 「山形県酒田市における航空機搭載ハイパースペクトルセンサ AISA を用いた植生指数・NDSI および PLS による水稲収量・タンパク質含有率評価」	H23.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 50 回（平成 23 年度春季）学術講演会 「ハイパースペクトルデータを用いたサンゴの白化及び回復状況の把握手法の開発」	H23.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 50 回（平成 23 年度春季）学術講演会 「スパース判別分析を用いたハイパースペクトル画像からの樹種選定」	H23.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 50 回（平成 23 年度春季）学術講演会 「インドネシア水稲地域におけるハイパースペクトル画像からのスパース判別分析による生育段階分類」	H23.5
投稿	（社）日本リモートセンシング学会 第 50 回（平成 23 年度春	H23.5

発表	季）学術講演会　「LASSO 回帰を用いたハイパースペクトル画像からの森林管理情報の抽出」	
投稿 発表	ACRS 2011　「Development of Hyperspectral Data Utilization Technology for Growth Stage Lassificationof Paddy Field in West Java, Indonesia」	H23.10
投稿 発表	（社）日本写真測量学会 平成 23 年度秋季学術講演会「出穂期のハイパースペクトルデータによるオーストラリア小麦の生育モニタリング」	H23.10
投稿 発表	ReSESS 2011 「Hyperspectral Space-borne Development and its Data Application」	H23.11
投稿 発表	ISRS 2011　「Monitoring Method of Coral Reef Bleaching for HISUI, Hyperspectral Imager Suite」	H23.11
発表	第 3 回 ALOS-2/3 ワークショップ：ＨＩＳＵＩデータの利用技術研究と長期観測計画について	H23.11
論文	写真測量とリモートセンシング誌　「波長較正による航空機ハイパースペクトラルイメージャのアーティファクト低減」	H24.1
発表	AFCU 2012 : Hyperspectral Sensor Application	H24.2
投稿 発表	5th Digital Soil Mapping Conference「 Mapping surface soil mineralogy using hyperspectral and ASTER imagery: An example from Mullewa, Western Australia 」	H24.4
投稿 発表	（社）日本写真測量学会平成 24 年度年次学術講演会「航空機ハイパースペクトルデータを用いた Lasso 回帰による水稲生育状況の推定」	H24.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 52 回（平成 24 年度春季）学術講演会「航空機ハイパースペクトルデータを用いた Random Forest 回帰による水稲収量とタンパク含有率の推定および赤池情報量基準によるバンド数選択」	H24.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 52 回（平成 24 年度春季）学術講演会「航空機ハイパースペクトルデータによる針葉樹林の植林年数と間伐状況把握の試み」	H24.5
発表	G 空間 Expo 2012 HISUI プロジェクト概要、HISUI 利用研究事例のポスター紹介	H24.6
投稿 発表	ISRS VIII/6「 Evaluation of wheat growth monitoring methods based on hyperspectral data in Western Australia」	H24.8
発表	International Symposium on ” Wild Fire and Carbon Management in Peat-Forest in Indonesia”　「Development of a monitoring method for peat forest using Hyperspectral	H24.9

	data」	
投稿発表	SPIE Earth Resources and Environmental Remote Sensing 2012「Detection of Coral Bleaching on Sekisei Lagoon Using Multispectral Sensor Data」	H24.11
論文	写真測量とリモートセンシング誌「 航空機ハイパースペクトルデータを用いた水稲の生育・収量・タンパク含有率推定手法の開発 」	H24.11
論文	日本リモートセンシング学会誌 Vol.32, No.5「スパース正則化を用いたハイパースペクトルデータの解析：インドネシア水田地帯における水稲生育状況診断および収量予測への適用」	H24.11
論文	日本リモートセンシング学会誌 Vol.32, No.5「衛星搭載型ハイパースペクトルセンサのデータ利用を想定した鉱物同定と定量化への試み」	H24.11
論文	日本リモートセンシング学会誌 Vol.32, No.5「石油探鉱におけるハイパースペクトるデータへの期待」	H24.11
論文	日本リモートセンシング学会誌 Vol.32, No.5「植生地域混合スペクトルにおける単位ベクトル化と NDVI 関数を用いた植生影響低減手法の提案」	H24.11
投稿発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 53 回（平成 24 年度秋季）学術講演会「ハイパースペクトルデータを利用したサンゴの白化・回復状況の把握」	H24.11
発表	日本サンゴ礁学会第 15 回大会「多時期の衛星画像を用いたサンゴの白化抽出」	H24.11
投稿発表	The 33th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2012)「 Herbage biomass and quality status assessment in a mixed sown pasture from airborne based hyperspectral imaging 」	H24.11
投稿発表	The 33th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2012)「 Experimental validation for robustness of growth stage classification model of paddy in Indonesia by using multi-year hyperspectral data 」	H24.11
発表	第 4 回 ALOS-3 ワークショップ「HISUI 開発の現状とデータの利用可能性」	H24.12
論文	東北大学大学院農学研究科付属複合生態フィールド教育研究センター報告「フィールドセンター北山地区針葉樹林地における航空機ハイパースペクトルリモートセンシングによる森林	H24.12

	管理の可能性の検討」	
投稿 発表	（社）海洋調査協会報「はかる　サンゴ礁をはかる」	H25.4
投稿 発表	（社）日本写真測量学会 平成 25 年度年次学術講演会「航空機ハイパースペクトルデータを用いたカーネル SAM 法による樹種分類」	H25.5
投稿 発表	International Symposium on Remote Sensing 2013「 Specific wavelength region for estimating soil salinity in arid and semiarid area 」	H25.5
投稿 発表	International Symposium on Remote Sensing 2013 「 Development of peatland monitoring method using hyperspectral data 」	H25.5
投稿 発表	International Symposium on Remote Sensing 2013「 Wetland vegetation mapping by object-based image analysis using hyperspectral data 」	H25.5
投稿 発表	IGARSS 2013「 Estimating soil salinity using hyperspectral data in the western Australia wheat belt 」	H25.7
投稿 発表	IGARSS 2013「 Application of hyperspectral data for assessing peatland forest condition with spectral and texture classification 」	H25.7
投稿 発表	The 34th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2013) 「 Application of hyperspectral data for estimating leaf water potential and peatland ground water level in Indonesia 」	H25.10
投稿 発表	第 10 回地盤工学会関東支部発表会「Exploring of field hyperspectral bands of rice leaves suffering from soil salinity in the northeastern Thailand」	H25.10
発表	G 空間 Expo2013　HISUI プロジェクト概要、HISUI 利用研究事例のポスター紹介	H25.11
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 55 回（平成 26 年度秋季）「衛星ハイパースペクトルシミュレーションデータを用いた渡良瀬遊水地における群落分類」	H25.11
投稿 発表	（社）日本写真測量学会 平成 26 年度年次学術講演会「ハイパースペクトルデータを用いた Lasso 回帰による牧草地生産性評価」	H26.5
投稿 発表	The 35st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2014) 「 Improvement of Estimation Method for Gramineous Crop	H26.10

	Productivity Using Normalization of Hyperspectral Data 」	
発表	G 空間 Expo2014　HISUI プロジェクト概要	H26.11
投稿 発表	（社）日本写真測量学会 平成 26 年度秋季学術講演会「HISUI シミュレーションデータによる農業・環境分野を対象とした実利用化技術の事前実証」	H26.11

表 H-3-1-3-3　（２）論文、投稿、発表、特許リスト(センサ校正・データ処理技術)

	題目・メディア等	時期
発表	34th International Symposium on Remote Sensing of Environment「Operation Plan Study for Japanese Future Hyperspectral Mission: HISUI」	H23.4
発表	第 50 回日本リモートセンシング学会学術講演会「正規化法をもちいたハイパースペクトラルデータからの相対反射率の推定」	H23.5
発表	日本写真測量学会平成 23 年度学術講演会「ディジタルカメラの感度、分光応答の推定」	H23.6
論文 発表	IGARSS 2011「THE LONG-TERM VICARIOUS AND CROSS CALIBRATION PLAN FOR HYPER-SPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)」	H23.7
論文 発表	IGARSS 2011「Coupled non-negative matrix factorization (CNMF) for hyperspectral and multispectral data fusion: application to pasture classification」	H23.7
論文 発表	IGARSS 2011「Registration techniques for multimodal images and its application」	H23.7
発表	IGARSS 2011「Image sharpening using hyperspectral and multispectral data」	H23.7
論文 発表	IGARSS 2011「Hyperspectral imager suite (HISUI) Japanese hyper-multispectral radiometer」	H23.7
発表	2011 HyspIRI Science Workshop「Current status of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H23.8
発表	2011 HyspIRI Science Workshop「THE LONG-TERM CAL/VAL PLAN FOR HYPER-SPECTRAL IMAGER SUITE (HISUI)」	H23.8
発表	2011 HyspIRI Science Workshop「Current status of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H23.8
発表	2011 HyspIRI Science Workshop「Operation planning for Japanese future hyperspectral and multispectral senor:	H23.8

	HISUI」	
発表	SPIE Optics+Photonics 2011「High-temperature fixed points for pre-launch calibration of earth observing sensors」	H23.8
論文 発表	SPIE Remote Sensing (Prague)「Simulation of Operation of Future Japanese Spaceborne Hyperspectral Imager: HISUI」	H23.9
発表	SPIE Remote Sensing (Prague)「Short term operation planning for Japanese future hyperspectral and multispectral senor: HISUI」	H23.9
発表	9th International Temperature Symposium「Large-Aperture High-temperature Fixed-Point Cells for Calibration of Earth-Observing Sensors」	H24.3
論文 発表	9th International Temperature Symposium「Uncertainty Due to Non-linearity in Radiation Thermometers Calibration by Multiple Fixed Points」	H24.3
発表	HyspIRI Symposium「Application of MODIS Cloud Data for Observation Planning of an Spaceborne Sensor: Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H24.5
論文 発表	IGARSS 2012「Generalized bilinear model based nonlinear unmixing using semi-nonnegative matrix factorization」	H24.7
論文 発表	IGARSS 2012「Similarity measure for spatial-spectral registration in hyperspectral era」	H24.7
論文 発表	IGARSS 2012「Fine image matching for narrow baseline stereovision」	H24.7
論文 発表	IGARSS 2012「Results of evaluation model of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H24.7
論文 発表	IGARSS 2012「USAGE OF CLOUD CLIMATE DATA IN OPERATION MISSION PLAN SIMULATION FOR JAPANESE FUTURE HYPERSPECTRAL AND MULTISPECTRAL SENOR: HISUI」	H24.7
発表	IGARSS 2012「Current Status of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H24.7
発表	SICE Annual Conference 2012「Uncertainty of Non-linearity in Radiation Thermometers Calibrated by Interpolation among Multiple Fixed Points」	H24.8
発表	IMEKO World Congress「New Setup for the Absolute Spectral Responsivity of Radiation Thermometers with a Supercontinuum Source」	H24.9
発表	SPIE Europe Remote Sensing 2012	H24.9

	「Supercontinuum-source-based System for Pre-launch Calibration of the Hyperspectral Sensor」	
発表	2012 HyspIRI Science Workshop「Current Status of Hyperspectral Imager Suite (HISUI) Project」	H24.10
論文 発表	SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2012「Parallel evaluation for detector devices of the hyperspectral imager with a supercontinuum source」	H24.10
論文 発表	SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2012「Observation Planning Strategy of a Japanese Spaceborne Sensor: Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H24.10
発表	第52回日本リモートセンシング学会学術講演「 VNIR/SWIRを用いた簡易雲検知手法の開発」	H24.11
論文	日本リモートセンシング学会誌「HISUIの概要と将来展望」	H24.11
発表	American Geophysical Union Fall meeting「Planned HISUI radiometric calibration using the lunar reflectance model from SELENE Spectral Profiler data」	H24.12
発表	CEOS IVOS 25th Meeting「Status of ASTER/HISUI radiometric calibration - Vicarious calibration and cross - calibration-」	H25.3
発表	LPSC「Development of A New Lunar Radiometric Calibration Model based on SELENE/SP for Japanese Future Hyper Spectral Mission HISUI」	H25.3
発表	日本地球惑星科学連合2013年大会「ハイパースペクトルリモートセンシングによる月スピネル全球捜索」	H25.5
発表	The International Symposium on Remote Sensing 2013 「Overview of Hyperspectral Imager Suite (HISUI) project」	H25.5
発表	SPIE Europe Remote Sensing 2013 「Supercontinuum-source-based Facility for Evaluation of Hyperspectral Imagers」	H25.9
論文 発表	IGARSS 2013「STUDY ON VICARIOUS CALIBRATION AND CROSS CALIBRATION FOR HISUI HYPERSPECTRAL AND MULTISPECTRAL IMAGER」	H25.7
論文 発表	IGARSS 2013「Usability of LUNAR Reflectance Model Based on SELENE/SP for Planned HISUI Radiometric Calibration」	H25.7
論文 発表	IGARSS 2013「Comparison of a New Lunar Radiometric Model Based on SELENE/SP with Satellite Observing Lunar Images」	H25.7
論文	IGARSS 2013「Hyperspectral and multispectral data fusion	H25.7

発表	mission on hyperspectral imager suite (HISUI)」	
論文発表	IGARSS 2013「Data product of hyperspectral imager suite (HISUI)」	H25.7
論文発表	IGARSS 2013「Enhancement of hyperspectral unmixing using continuum removal」	H25.7
論文発表	IGARSS 2013「Observation Planning Strategy and its Simulation of a Japanese Spaceborne Sensor: Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H25.7
発表	IGARSS 2013「 Current Status of Hyperspectral Imager Ssuite (HISUI)」	H25.7
発表	日本惑星科学会 2013 年秋季大会「観測衛星による連続分光データを使った月面上の Ca に富む輝石の全球捜索」	H25.10
発表	2013 HyspIRI Science Workshop「Observation Coverage Simulation and Its Improvement for A Japanese Spaceborne Sensor: Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H25.10
発表	TEMPMEKO 2013「EVALUATION OF HYPERSPECTRAL IMAGERS WITH A SUPERCONTINUUM SOURCE」	H25.10
論文発表	TEMPMEKO 2013「Supercontinuum-source-based Facility for Absolute Calibration of Radiation Thermometers」	H25.10
発表	日本リモートセンシング学会第 55 回学術講演会「ハイパースペクトルデータと LiDAR データを融合した樹種分類手法の提案」	H25.11
発表	日本リモートセンシング学会第 55 回学術講演会「HISUI の大気補正手法の検討」	H25.11
論文発表	WHISPERS「Hyperspectral tree species classification with an aid of LiDAR data」	H26.6
論文発表	NEWRAD 2014「Comparison of WC-C peritectic fixed point cells between VNIIOFI, NIM and NMIJ」	H26.6
論文発表	IGARSS 2014「HISUI vicarious calibration and CAL/VAL activities」	H26.7
論文発表	IGARSS 2014「Airborne unmixing-based hyperspectral super-resolution using RGB imagery」	H26.7
論文発表	IGARSS 2014「Effective observation planning and its simulation of a Japanese spaceborne sensor: Hyperspectral imager suite (HISUI)」	H26.7
発表	IGARSS 2014「Current Status of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H26.7

論文 発表	SPIE Remote Sensing 2014「Observation planning algorithm of a Japanese spaceborne sensor: Hyperspectral Imager Suite (HISUI)」	H26.9
発表	日本リモートセンシング学会第57回学術講演会「標高を考慮した暗画素法によるエアロソル量推定」	H26.11
発表	第58回宇宙科学技術連合講演会「中分解能地球観測衛星データの活用事例と高精度化」	H26.11
発表	第62回応用物理学会春季学術講演会「スーパーコンティニュアム光を用いた絶対放射温度計の分光感度校正」	H27.3

表H-3-1-3-4　（３）論文、投稿、発表、特許リスト(金属資源探査技術の研究開発)

	題目・メディア等	時期
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第50回（平成23年度春季）学術講演会　「ハイパースペクトルカメラを用いたレアアース鉱物マッピング」	H23.5
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第50回（平成23年度春季）学術講演会　「ASTERデータを用いたナミビア共和国南部の地質マッピング」	H23.5
投稿 発表	資源地質学会　2011年度年会学術講演会　「ベトナム北部地域でのレアアース探査におけるリモートセンシング技術の活用」	H23.6
投稿 発表	資源地質学会　2011年度年会学術講演会　「航空機ハイパースペクトルデータによる入来カオリン鉱床の変質鉱物解析」	H23.6
投稿 発表	IGARSS 2011　「Mineral Index Maps of the Southern Namibia Using Hymap and ASTER data」	H23.7
投稿 発表	第24回国際超電導シンポジウム(ISS2011)「HTS planar Gradiometer Consisting of SQUID with Multi-turn Input Coil and Large Pickup Coil Made of GdBCO Coated Conductor」	H23.10
投稿 発表	第24回国際超電導シンポジウム(ISS2011)「Fabrication of SQUID chip for large planar gradiometer using HTS coated-conductor」	H23.10
発表	10th SEGJ International Symposium　「Mapping Rare Earth Minerals with Near-Ingrared Reflectance Spectra」	H23.11
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第51回（平成23年度秋季）学術講演会　「HyMapデータを用いたナミビア共和国南部	H23.11

	の地質マッピング」	
発表	第 32 回 SRL 研究報告会「 Y 系線材を用いた大型グラジオメータの開発」	H23.11
発表	低温工学・超電導学会　超電導応用研究会／材料研究会「地下資源探査用 SQUID-TEM 磁力計の開発」	H24.2
発表	応用物理学関係連合講演会「高温超電導テープ線材を用いた大型グラジオメータの試作(2)」	H24.3
論文	International Journal of Remote Sensing 「Mineral mapping of southern Namibia by application of continuum-removal MSAM method to the HyMap data」	H24.4
投稿 発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 52 回（平成 24 年度春季）学術講演会「ハイパースペクトルカメラによるレアアース鉱物マッピング手法の開発」	H24.5
投稿 発表	資源地質学会第 62 回年会学術講演会　「ペグマタイト鉱床における反射スペクトルデータを用いた希土類鉱物の識別」	H24.6
投稿 発表	IGARSS 2012 「Mapping of Pegmatite in Tantalite Valley Region in Southern Namibia Using ASTER and HyMap Data」	H24.7
投稿 発表	34th IGC Australia 2012 「Lithologic Mapping by ASTER and Hymap data in central-western Namibia」	H24.8
投稿 発表	第 25 回国際超電導シンポジウム（ISS2012）「A highly-balanced electrical gradiomter using a flux locked loop circuit with fine-tunable feedback resistor」	H24.12
論文	Physica C　Volume 484 「 HTS planar gradiometer consisting of SQUID with multi-turn input coil and large pickup coil made of GdBCO coated conductor」	H25.1
発表	第 60 回応用物理学会春期学術講演会「位相特性を微調整可能な電気差分グラジオメータ用 FLL 回路」	H25.3
投稿 発表	International Symposium on Remote Sensing 2013 「 Mineralogical mapping of Nevada using airborne hyperspectral data: applying the composite MSAM」	H25.5
特許 （出願）	出願番号：特願 2013-119513「磁場偏差測定器及び磁場偏差測定方法」	H25.5
発表	第 61 回応用物理学会春期学術講演会「2-SQUID 回転方式の高温超電導磁場偏差計の開発」	H26.3
特許 （取得）	特許番号：特許第 5537312 号「資源探査用磁気センサ」	H26.5
発表	第 75 回応用物理学会秋期学術講演会「アクティブシールド付	H26.9

	き 2-SQUID 同軸型グラジオメータの試作」	
発表	第 27 回国際超電導シンポジウム（ISS2014）「Two-SQUID axial gradiometer using active magnetic shield」	H26.11
投稿発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 55 回（平成 26 年度秋季）「ハイパースペクトルデータを用いたネバダ州キュプライト地域の地質マッピング；線形アンミキシング解析と k-means クラスタリング解析の統合」	H26.11
投稿発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 55 回（平成 26 年度秋季）「ASTER データのバンド比演算による鉄酸化鉱物の抽出」	H26.11
投稿発表	（社）日本リモートセンシング学会 第 55 回（平成 26 年度秋季）「ハイパースペクトルデータの一次微分処理を利用した変質鉱物の識別」＊H26 年度リモートセンシング学会　優秀論文発表賞受賞	H26.11

Ｈ－３－２　目標の達成度

表 H-3-2-1　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
１．実利用化のための解析技術			
１）実利用化のための解析技術に共通する基盤技術	HISUI シミュレータを開発すること、およびスペクトルデータベースに格納する細かな波長分解能の鉱物スペクトルライブラリを作成する。	航空機ハイパースペクトルデータから HISUI シミュレーションデータを作成するための HISUI シミュレータを開発し、各分野の研究開発で事前実証に使用した。また、ハイパースペクトルデータのライブラリとして整備すべき 125 鉱物、168 標本のスペクトルを整備した。	達成
２）個別分野における利用技術	エネルギー資源分野では、海域でのオイルスリック判定や植生地域でも利用可能な探鉱手法の開発のほか、農業、環境、防災等の分野も含	エネルギー・資源分野では、オイルスリックの解析手法、熱水性鉱床の鉱物同定手法、植生地域でも有効な酸化鉄型銅金鉱	達成

	め手法を 5 事例以上開発する。	床の抽出、農業、環境、防災の分野では、ユーザが利活用できる具体的な解析手法の研究開発／打上前の事前実証を行い、事例数として 9 事例を実施した。	
２．センサ校正・データ処理技術			
１）校正・データ処理技術	HISUI の仕様に対し既存校正技術の適用評価を行い、必要に応じて、その改良技術を開発し、これに伴い、校正検証計画および校正システムの開発に着手する。 また、幾何補正・波長補正・放射量補正、さらに、大気補正に必要な画像補正処理手法を開発し、アルゴリズム基準書の作成に着手する。	打上前校正・代替校正・相互校正および月校正のそれぞれの既存技術評価を行い、改良技術の開発を行った。また、校正アーカイブシステムの開発および校正パラメータテーブル管理手順の策定に着手した。 幾何・放射量補正を行うためのアルゴリズム開発およびその基準書、ソフトウェア開発および試験を行った。大気補正については、太陽高度・大気状態の変動に強い反射率推定法開発、雲検知アルゴリズムの開発等を行った。	達成
３）地上システム （運用計画システムを含む）	地上システム（全体システム）の概念設計を行う。 長期運用計画の最適化に必要な長期運用計画シミュレーションツールを完成し、長期観測シミュレーションを実施し、様々な条件による長期観測状況への影響を把握する。	地上システム（全体システム）の概念設計を行った。 長期運用計画の最適化に必要な計画策定システムを構築し、様々な条件のもとで長期観測シミュレーションを実施している。	達成

	短期観測計画の作成アルゴリズムを開発する	短期観測計画作成アルゴリズムを開発した。	
３．金属資源探査技術の研究開発			
１）次世代衛星データ解析技術開発	鉱床に伴う岩石･鉱物の反射スペクトルデータを集積し、鉱物分類を高精度化するための解析技術を開発すること。	鉱床に伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータを測定し、解析に利用可能なデータベースとして取りまとめた（512 試料 1,038 スペクトル）。ハイパースペクトルデータ・スペクトルメータデータ等を用いて詳細な鉱物識別を行うとともに鉱物の化学組成、風化プロセス等に対する解析技術を開発した。	達成
２）金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発	鉱床タイプに応じた衛星データ等による解析技術を開発すること。また、ハイパースペクトルデータ解析評価用システムを開発すること。	鉱床探査対象となる主要な 15 鉱床タイプに関する解析技術を開発し、その成果を解析手順書等として取りまとめた。また、解析評価用システムとして携帯型スペクトルメータ及び SQUID 磁場偏差計の実機を開発した。	達成

Ｈ－４　事業化、波及効果について

Ｈ－４－１　事業化の見通し

現在開発している実利用化のための解析技術やセンサ校正・データ処理技術を利用する事業として、衛星から得られる観測データや付加価値を付けた情報を販売する事業が考えられる。ただし、データ販売に関しては、各種条件が明確になっていないこともあり、観測データや付加価値情報の販売を行う上で検討を要する条件について、主要ユーザとして想定するエネルギー・資源分野での ASTER データの配布状況をもとに整理した。

①想定データ配付数

石油資源探査を目的として、1999 年 12 月の打上から 15 年以上運用している ASTER データは、1 日あたり約 530 シーンで 15 年間の総観測数は約 275 万シーンである。このうち、15 年間で累計約 28 万シーンのデータをユーザに配付しており、その大多数はエネルギー・資源分野であることが分かる（図 H-4-1-1）。

HISUI センサの搭載衛星や１日に可能な観測シーン数などハード的な制約条件や運用面からの制約条件、データ配布条件等は決まってはいないものの、ハイパースペクトルデータへのユーザニーズから想定すると、少なくとも ASTER と同等以上のデータ配付数（年間平均約 18,000 シーン）が見込めるものと考える。

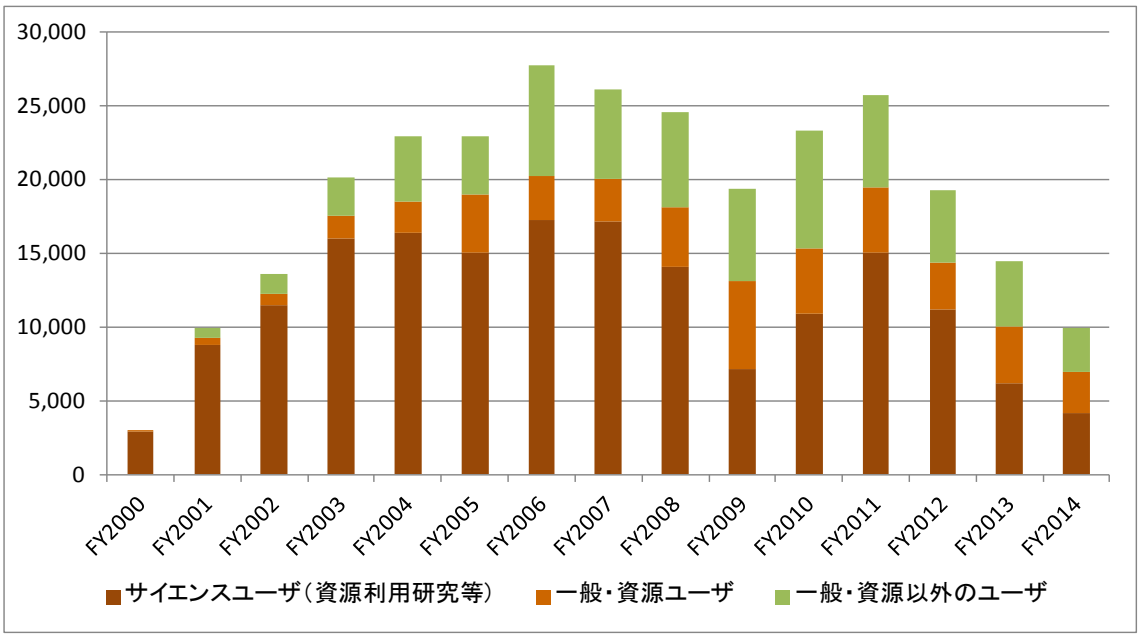


図 H-4-1-1　ASTER データ配付数（資源ユーザ（有償・無償）と資源ユーザ以外）

① エネルギー・資源分野ユーザのハイパースペクトルデータの利用

エネルギー・資源分野のユーザが ASTER データを使っている第一の理由は、2.0～2.4μｍの波長帯域に5バンドを有しており、鉱物の分類が可能となった点である。それがHISUIハイパースペクトルデータでは同様の波長帯で20バンド以上を有するため、より詳細なスペクトル解析が可能となり、鉱物分類数がさらに増えることが期待されている。

例として、エネルギー・資源分野のASTERユーザである（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に、石油分野と金属資源分野のそれぞれについて聞き取り調査を行った結果を示す。

【石油分野】

ハイパースペクトルデータの利用は、陸域探査においては、一つの対象地域で少なくとも数百 km 四方の広範囲における粘土鉱物や炭酸塩鉱物の識別（油田／ガス田／どちらでもない、の違いを判断したい。根源岩／貯留岩／帽岩の良し悪しを推定したい。など）と、それらの分布傾向を把握することが主目的である一方、海域探査においては海面に流出しているオイルスリックの有無と、それが滲出油起源かどうか（廃油等の人工油起源かどうか）を判定することに利用したい意向がある。なお、陸域での画像データによる解析対象候補地域は、未だ危険な国で面積が広いことから航空機より衛星による観測が有利であるとのことである。

【金属資源分野】

ハイパースペクトルデータは、ASTERデータより高精度で従来識別が困難な変質鉱物等も同定が可能であることを期待しており、金属資源探査案件のポテンシャル評価等の概査段階（通常約300km四方の広域調査）での利用を想定している。例えば、レアアース等の識別にはハイパースペクトルデータが必要であり、資源探査において有効であると考えられる。また、今後の探鉱余地の一候補地域として、標高が高く地表踏査の困難な山岳国境付近等が挙げられ、飛行許可等が必要となる航空機観測より衛星観測のほうが物理的にも経済的にも有利になる可能性が期待される。

③付加価値情報提供事業化の構想

日本は、小麦の需要量の約 9 割近くをオーストラリアから輸入しており、食糧安全保障の観点からオーストラリアの小麦の収量、品質、作付状況、生育状況等を推定したいという声がユーザにはある。国内政府機関、商社、オーストラリアの農業コンサルタント、集荷業者等にヒアリングを行った結果、ハイパ

ースペクトルデータからこれら生育状況を解析する技術が確立することにより、図 H-4-1-3 に示すような小麦に関する付加価値情報を提供する事業構想を描くことができた。

この情報提供事業は、低分解能多頻度衛星（MODIS 等）をベースに利用し HISUI のハイパースペクトルデータを小麦生育状況推定の調整のために活用する政府機関向けの広域モニタリングサービスとハイパースペクトルデータを特定関心農地を中心に観測取得して活用する特定ユーザ向けモニタリングサービスの二つから構成される。このようなニーズは、オーストラリアのみならず世界の主要小麦生産国（アメリカ、カナダ、中国、ロシア）でも同様であると想定され、開発した手法はこれらの国々へも利用可能なモデルである。

以上のように、「衛星から得られる観測データや付加価値を付けた情報を販売する事業」を実現するためには、どのようなデータを、どのような付加価値情報まで、どのように配付するか、データアーカイブはどうするか、等の想定される課題を整理し、関係者と調整して積極的に解決を図ることが必要である。

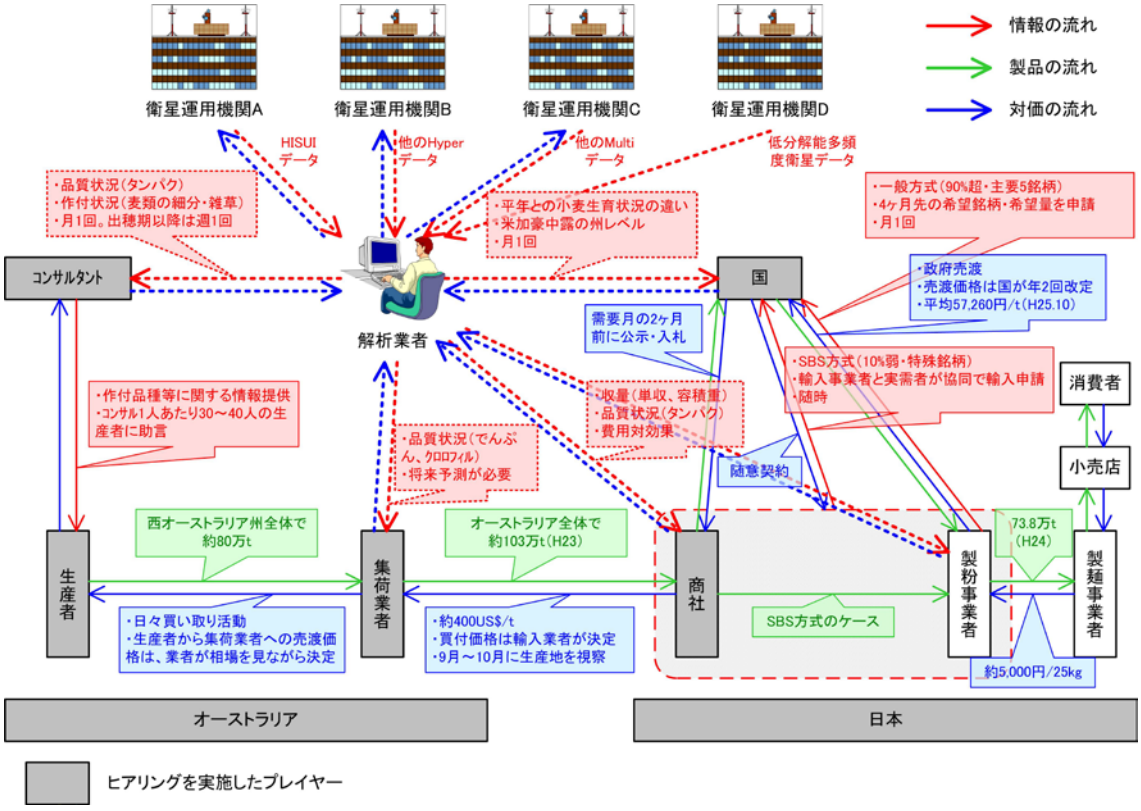


図 H-4-1-3　オーストラリア小麦に関する情報提供事業化の構想

Ｈ－４－２　波及効果

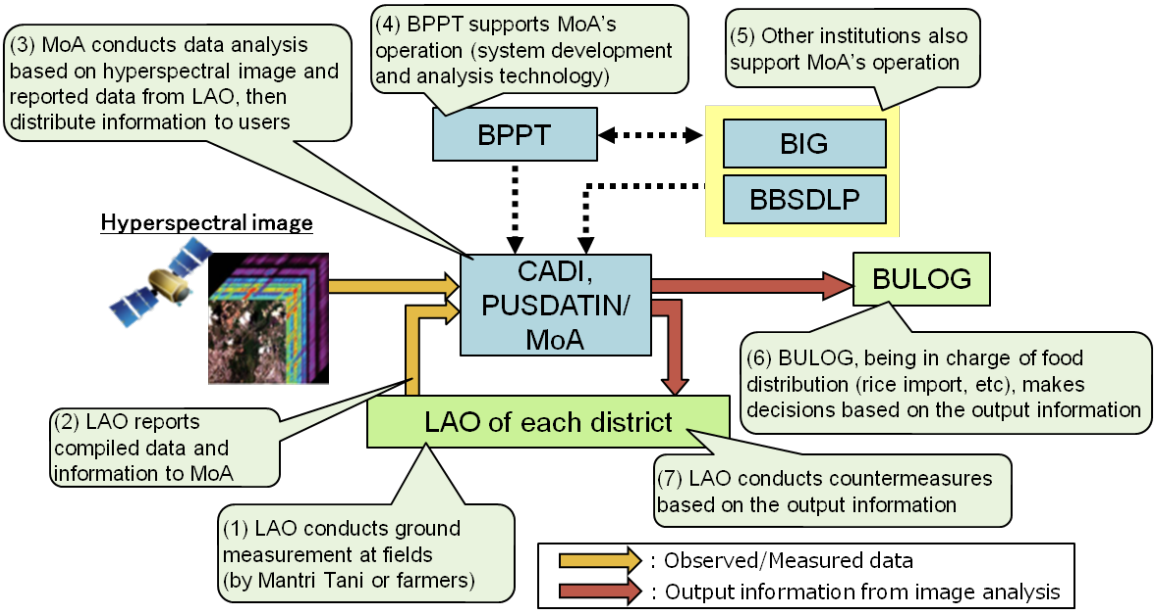
ハイパースペクトルデータにより、根源岩層が過去に受けた最高温度を示す鉱物（イライト、モンモリロナイト、及びそれらの混合物）を見分けることができるようになると、その地域に油田が期待できるか、ガス田しかないのか、あるいはどちらも期待できないかが推定できるようになる。さらに、地下で石油の上昇・拡散を止める帽岩の緻密さに影響を与える硬石膏の存在割合の確認や石油を貯めるための貯留層の隙間の多さに影響を与えるドロマイトとカルサイトの識別などにより、ハイパースペクトルデータによる石油探鉱の成功確率が高まることが期待できる。このように石油探鉱における波及効果は非常に大きい。

また、Ｈ－４－１事業化の見通しでは、オーストラリア小麦に関する情報提供事業化の構想を示したが、それ以外にも水稲やケシのモニタリング情報提供により、インドネシア行政での水稲収量予測情報提供、不法栽培作物監視業務の効率化の可能性など、さまざまな分野への波及効果が期待できる。

本研究開発で実施しているテーマ以外に、営農管理、森林管理、環境管理等で有用な情報が解析・抽出でき、その波及効果は計り知れない。さらに、センサ性能が向上し、地上分解能等の向上が図られると、安全保障分野で利用が格段に増えると見込まれている、波及効果は一層大きくなる。

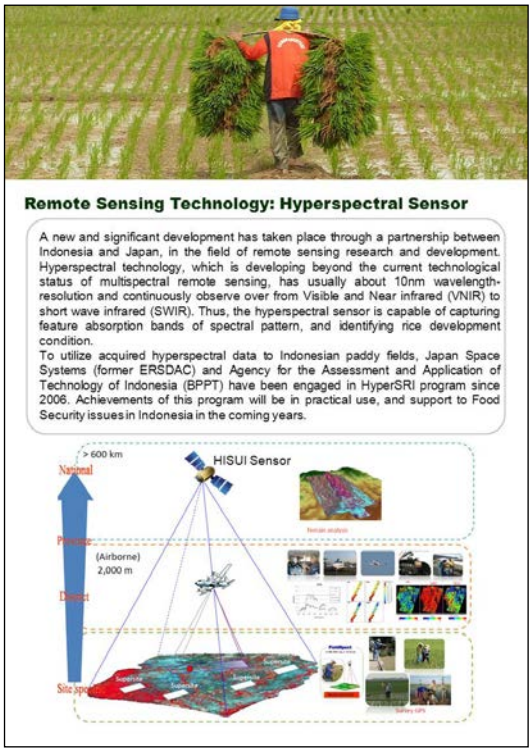
【情報提供の例】

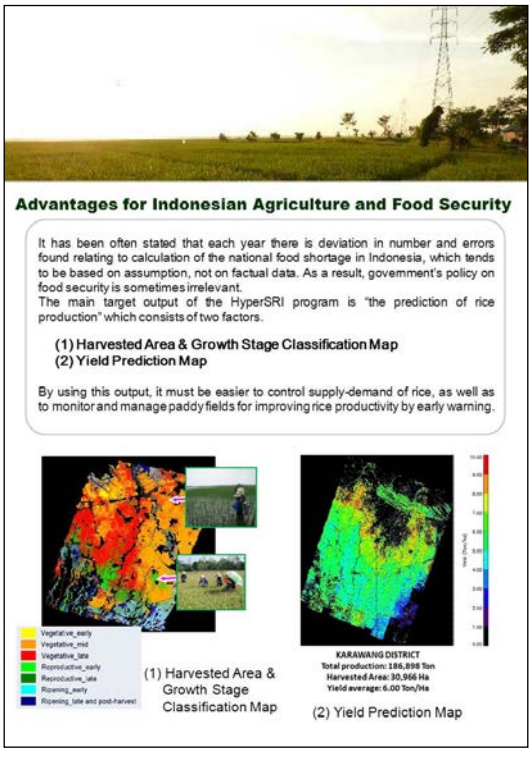
共同研究先であるインドネシアでは、ハイパースペクトルデータによる水稲の収量予測情報等が得られるようになれば、複数の行政・研究機関とともに、図 H-4-2-1 のように水稲収量予測情報提供サービスが可能になると考えられる。本研究開発の成果を対外的に周知するため、これまでに図 H-4-2-2 のようなパンフレットを作成した。(配付対象機関は、情報提供サービスに関与するインドネシア中央及び地方政府関係者や国際機関、ドナー機関および農業・リモートセンシング関連研究者)。



BPPT：技術評価応用庁、MoA：農業省、BIG：地理情報庁、CADI：農業データ情報センター、BBSDLP：農地研究開発センター、BULOG：物流関連局、PUSDATIN：データ情報センター、LAO：地方の農地・農作物監視員

図 H-4-2-1　インドネシア行政でのハイパースペクトルデータによる水稲収量予測情報提供サービス構想





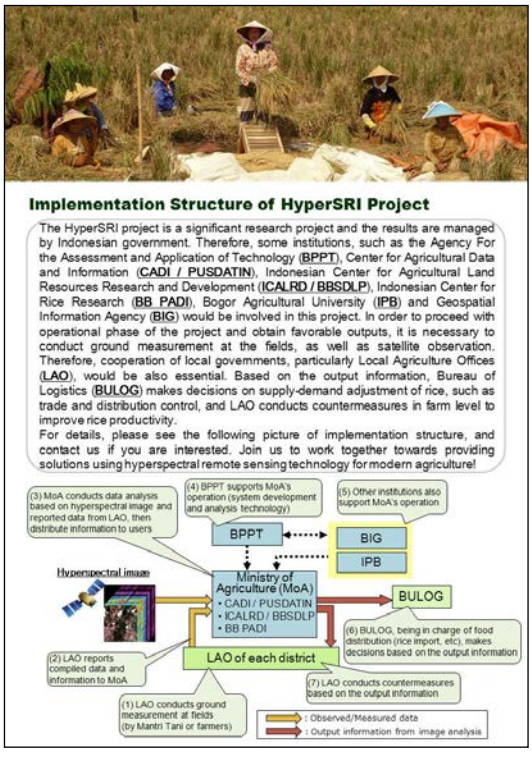


図 H-4-2-2　共同研究開発成果の紹介パンフレット

ケシは、各国政府機関のほか UNDOC（国際連合薬物犯罪事務所）で不法栽培作物の監視が行われている。例えば、高解像度マルチスペクトルセンサでケシ圃場の候補地を抽出し、1 回のハイパースペクトルデータによる観測データからケシ圃場を確定するという利用方法が可能になる。ハイパースペクトルデータと高解像度マルチスペクトルセンサを組み合わせることで、図 H-4-2-3 に示すような監視業務の効率化が図れるという波及効果が期待できる。

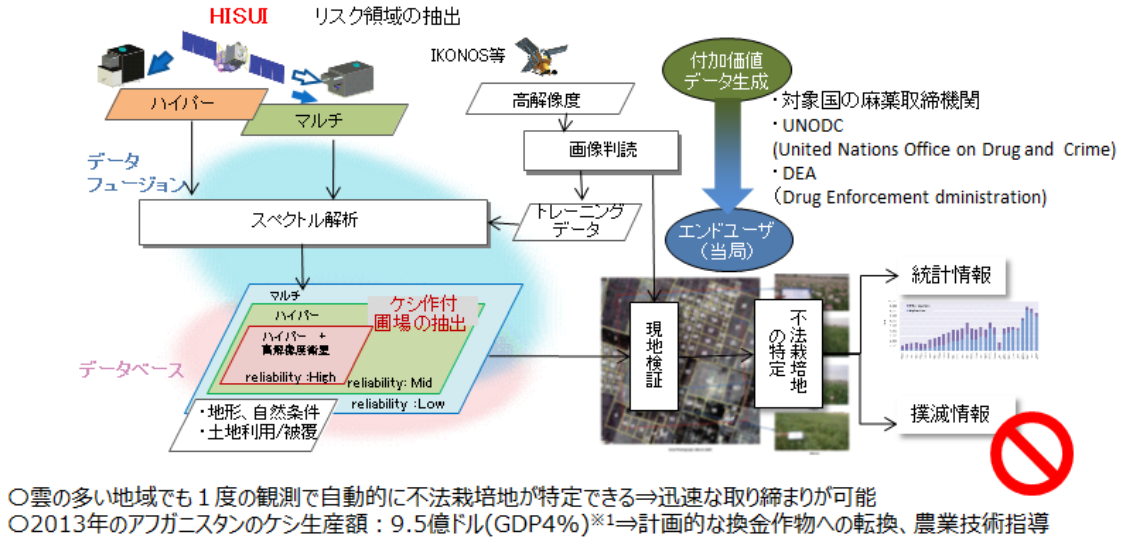


図 H-4-2-3　不法栽培作物監視業務の効率化構想

これらをとりまとめ波及効果について H-4-2-5 に示す。

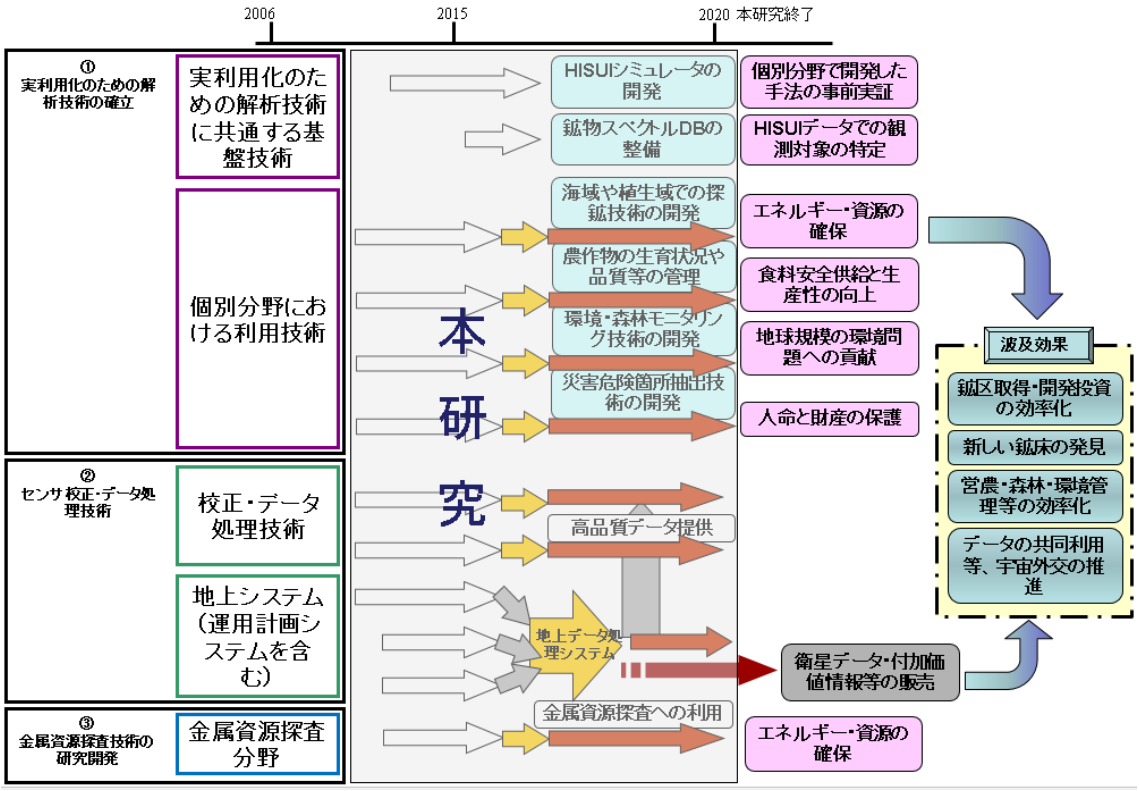


図 H-4-2-4　本研究の波及効果の模式図

ハイパースペクトルデータの有用性は各国でも認知されており、観測されるハイパースペクトルデータの共同利用による地球観測等の協力やすそ野の広い国際宇宙協力を推進することでソフトパワーを発揮し、国際社会における我が国のリーダーシップ及び外交力の一層の強化につなげることも考えられる。実際、ドイツ DLR やイタリア ASI からはハイパースペクトルセンサの運用時における協業の可能性についての打診を受けていることから、個別分野の利用技術の波及効果とは別に、我が国と諸外国との宇宙外交の推進や、データの共同利用等という我が国の政策への波及効果も考えられる。

Ｈ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｈ－５－１　研究開発計画

本研究開発で実利用化を目指して開発している技術は、図 H-5-1-1 に示すようにエネルギー・資源の確保、食糧安定供給、地球規模の環境監視に資するものである。

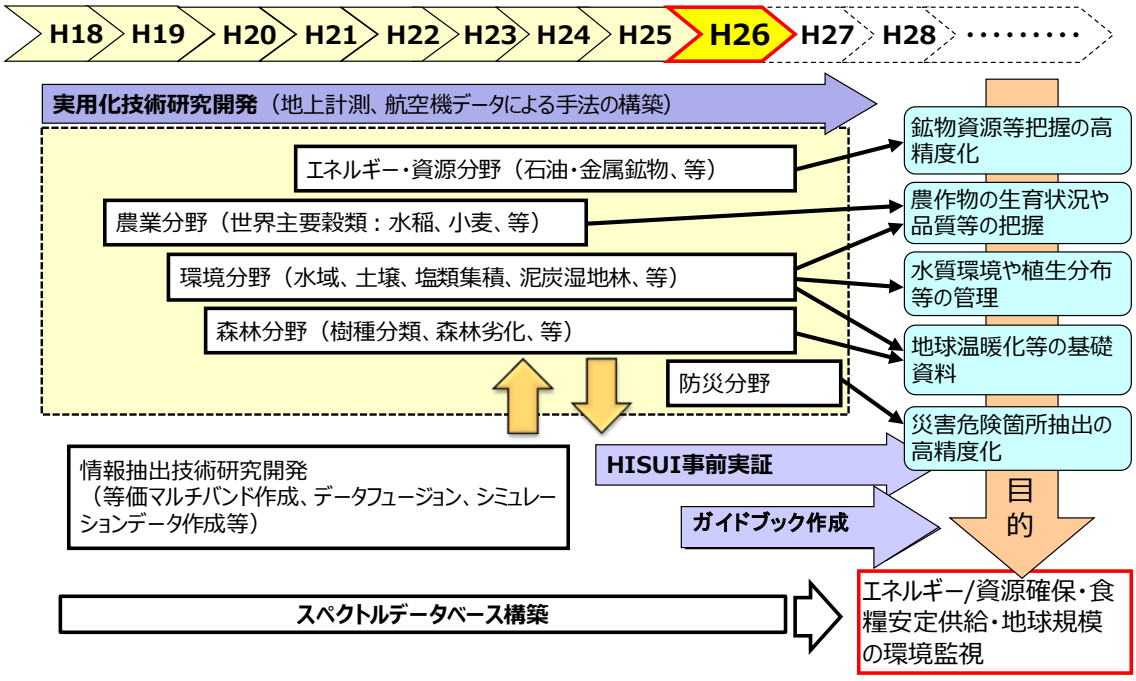


図 H-5-1-1　実利用化のための解析技術の目標

ハイパースペクトルデータの有用性が見込める分野でユーザニーズの高いテーマを選定し、手法開発、事前実証、実証の３つのフェーズに分けて研究開発を実施する。それぞれのフェーズの意味は、次のとおりである。

手法開発　：携行型や航空搭載型のハイパースペクトルセンサを使用し、目標達成に向けた手法の開発を行う。
事前実証　：HISUI 運用前に、HISUI シミュレーションデータを使って手法開発の成果を実証する。
実証　　：HISUI 運用後に、実際の HISUI データを使って開発した手法の成果を実証する。

これら各研究フェーズの関係を模式的に表した実利用化のための解析技術の研究開発の流れを図 H-5-1-2 に示す。

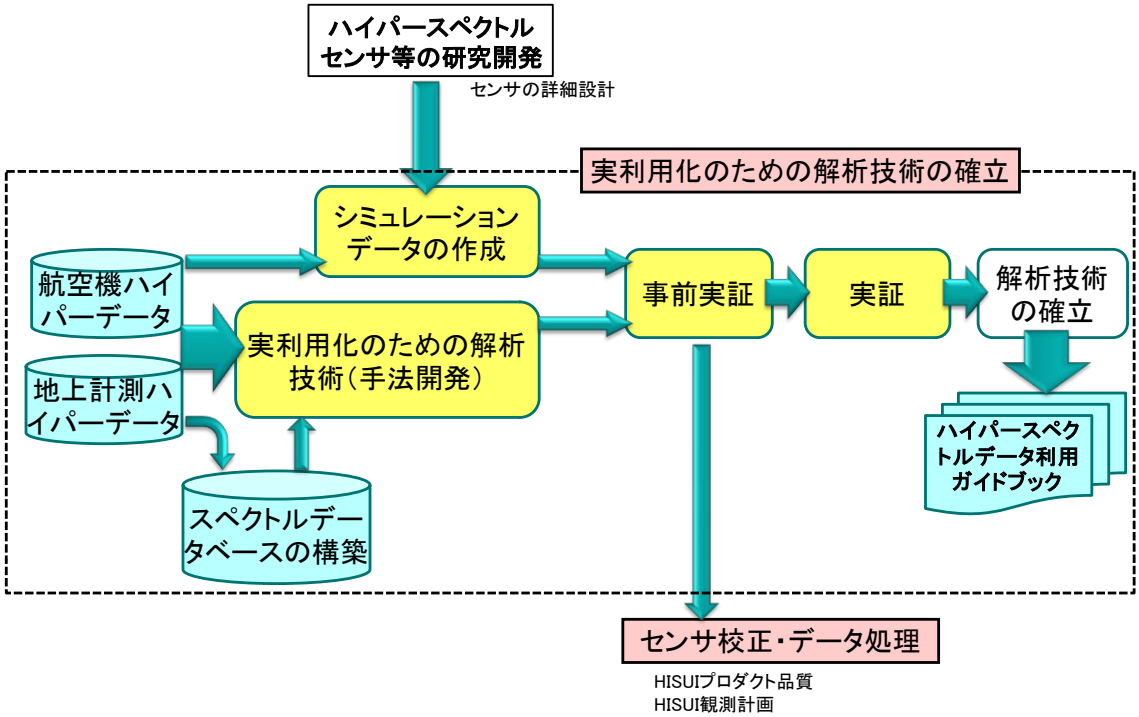


図 H-5-1-2　実利用化のための解析技術の研究開発の流れ

また、研究開発のテーマを研究フェーズごとに色分けし、年度別に図 H-5-1-3 に示す。具体的には、平成 23 年度から平成 26 年度の期間に、航空機搭載センサで取得したハイパースペクトルデータから、HISUI で取得されるデータと同等のデータを作成できる HISUI シミュレータを開発した。そして、エネルギー・資源、農業、環境、防災等の分野で、手法開発が完了したテーマについて事前実証を行った。また、成果をまとめたガイドブックと総括資料の作成を開始した。さらに、スペクトルデータ整備方針に従ってスペクトルデータの作成と登録を行った。

以上のように、計画通りの行程で進んでおり、今後も研究開発を進捗させることが適当と考えられる。

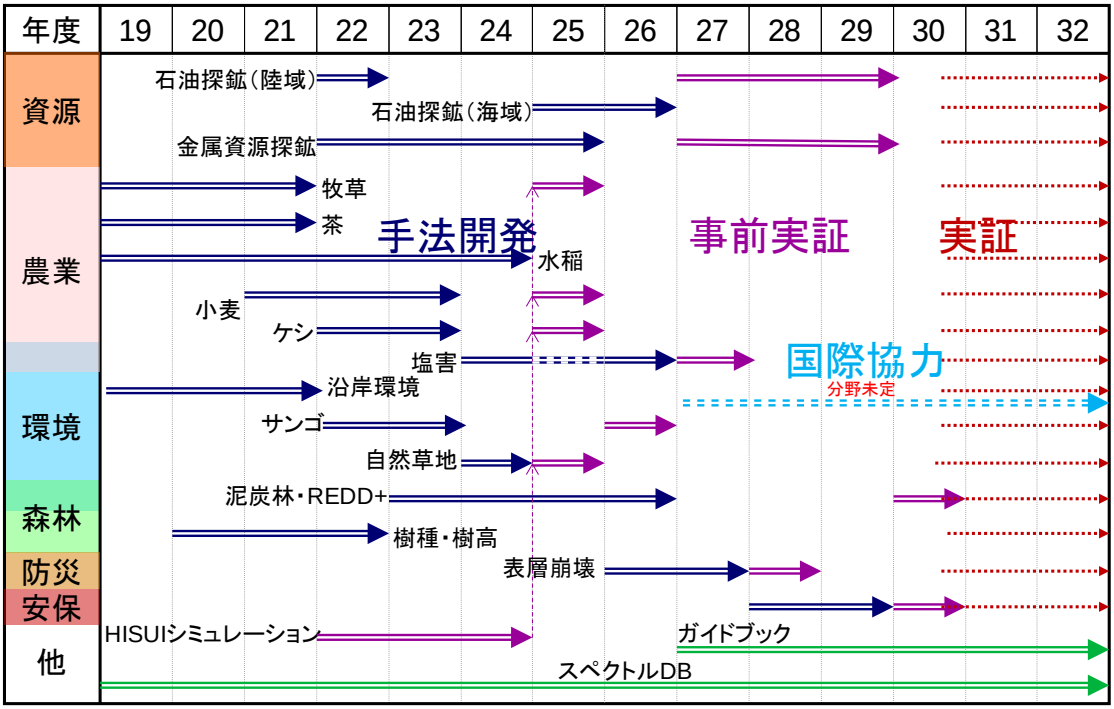


図 H-5-1-3　実利用化のための解析技術に係る研究開発計画

センサ校正・データ処理技術では、平成 23 年度から平成 26 年度の期間に、アルゴリズムの開発、ソフトウェアの開発、地上システムの概念設計を行い、計画どおりの工程で進んでいる。今後も研究開発を進捗させることが適当と考えられる（図 H-5-1-4）。

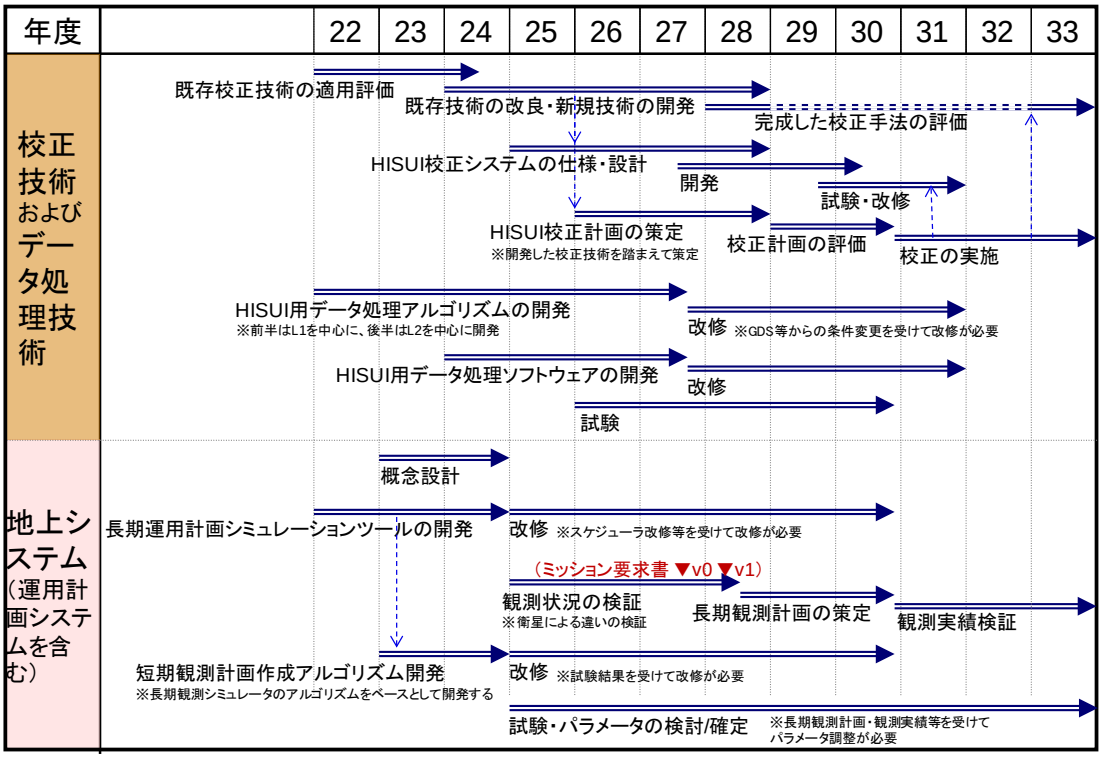


図 H-5-1-4　センサ校正・データ処理技術に係る研究開発計画

「金属資源探査技術の研究開発」では、平成２３～２６年度は金属鉱床タイプに応じた解析技術開発を行い、計画どおりの事業を完了した（図 H-5-1-5）。

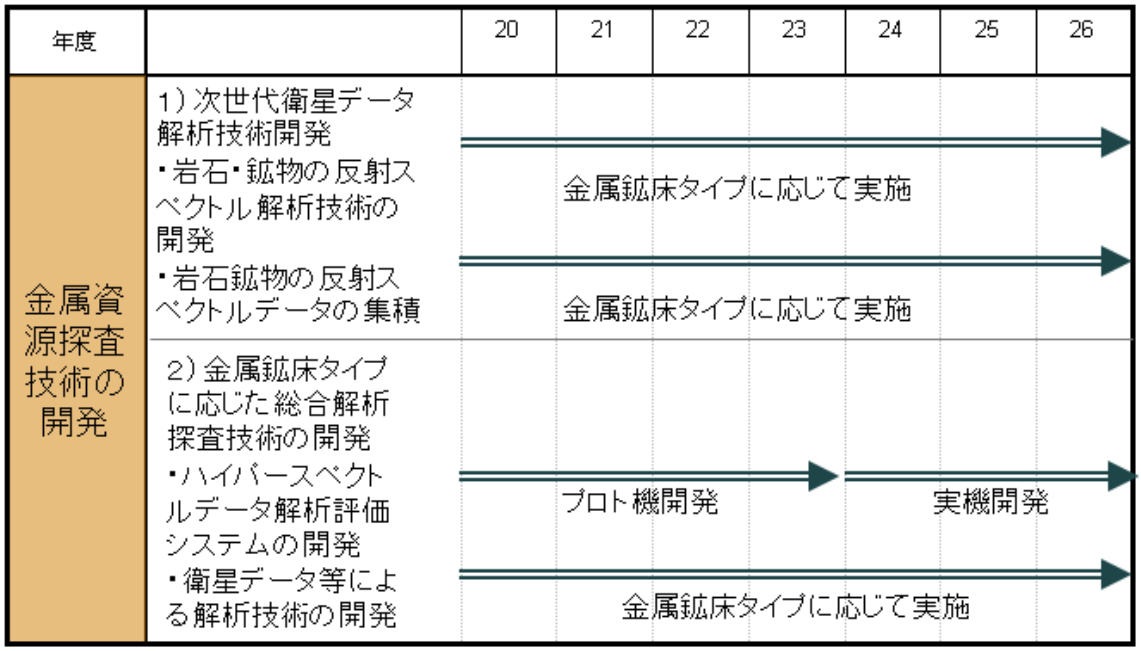


図 H-5-1-5　金属資源探査技術の研究開発計画

Ｈ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

Ｈ－５－２－１　研究開発の実施体制

以下に平成 26 年度末時点での実施体制を図 H-5-2-1-1 及び図 H-5-2-1-2 として示す。

本事業のうち、実利用化のための解析技術は、（一財）宇宙システム開発利用推進機構が実施する。センサ校正・データ処理技術は、地上システム（運用計画システムを含む）を（一財）宇宙システム開発利用推進機構が実施し、校正・データ処理技術を（独法）産業技術総合研究所が実施する体制である。

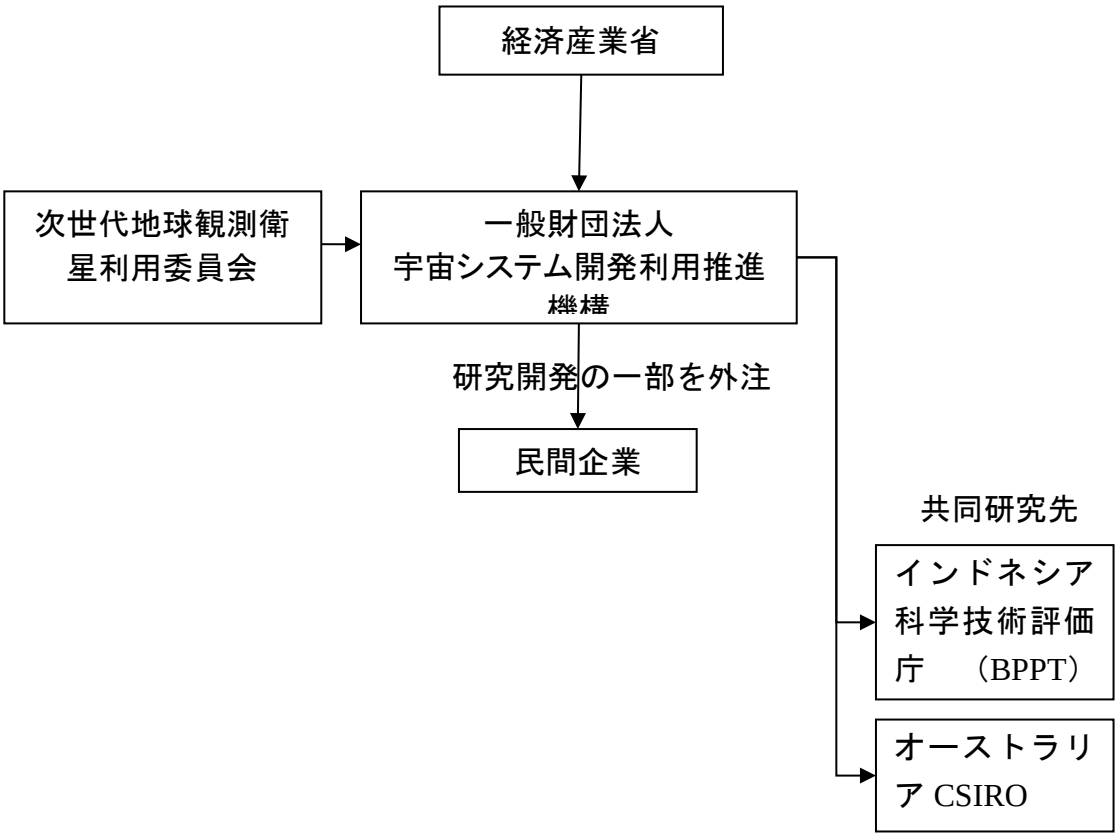


図 H-5-2-1-1　実施体制図（実利用化のための解析技術の確立）

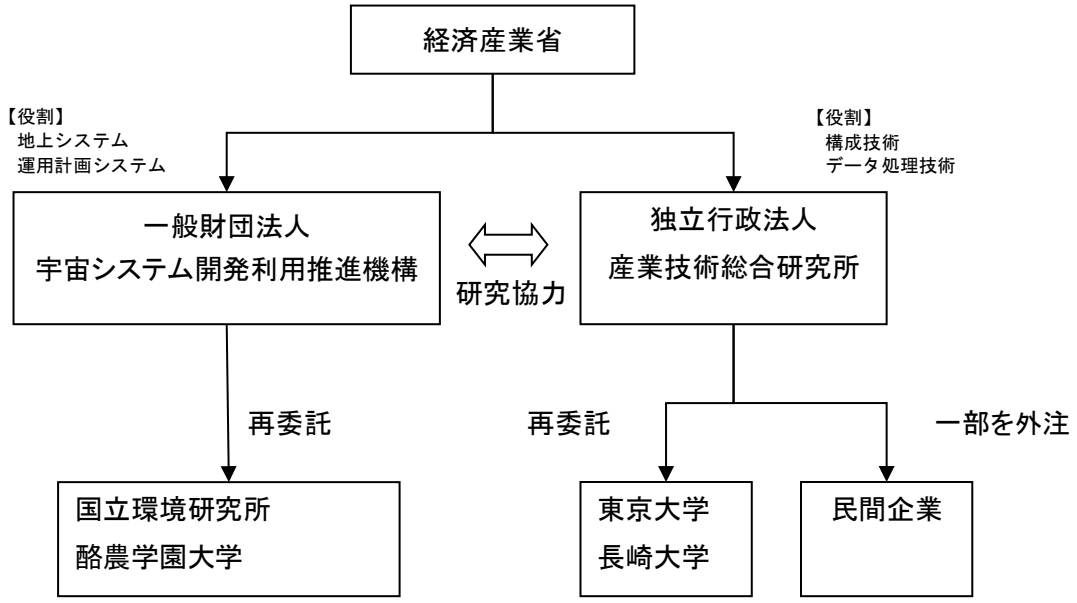


図 H-5-2-1-2　実施体制図（センサ校正・データ処理技術）

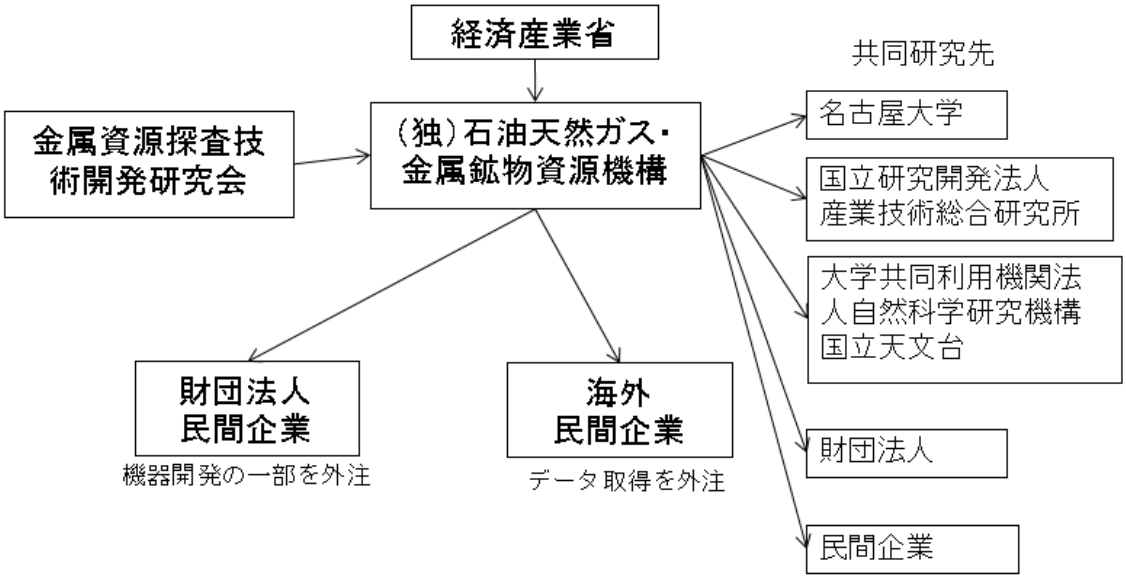


図 H-5-2-1-3　実施体制図（金属資源探査技術の研究開発）

Ｈ－５－２－２　研究の運営管理

図 H-5-2-1-1 および図 H-5-2-1-2 に示したように、本研究開発は、実利用化のための解析技術とセンサ校正・データ処理技術に分かれている。しかし、開発される解析技術をユーザが利用するに当たって、HISUI のデータが仕様どおり

に高品質なプロダクトとして継続提供されることや限られた観測時間の中でユーザニーズに出来る限り応じる観測計画が立案可能な運用が要求される。したがって、本研究開発の実施機関である（一財）宇宙システム開発利用推進機構と（独法）産業技術総合研究所とは相互に研究協力を行うとともに、HISUI センサの開発を行う「ハイパースペクトルセンサ等の研究開発」事業とも協力し、お互いの委員会に相互参画するなどして、センサ開発、利用研究、センサ校正・データ処理技術研究の間で情報交換を密に行っている。

本研究開発の目標は開発する解析技術が様々な利用者に活用されることであるが、前述したように、特にハイパースペクトルデータはこれまでほとんど実利用化が行われていない状況を考慮し、先駆的技術の実利用化研究の推進にあたり、計画の妥当性、技術的妥当性等を客観的に助言・指導する「次世代地球観測衛星利用委員会」を平成 18 年度に設置し、研究テーマに対応した有識者を随時委嘱している。委員は、主としてエネルギー・資源、農業、環境分野におけるハイパースペクトルデータに関する学識経験者と将来ハイパースペクトルデータを利活用することが期待される企業の専門家に委嘱している。

以下に、「次世代地球観測衛星利用委員会」の委員を示す。

【次世代地球観測衛星利用委員】（肩書きは、平成 27 年 3 月末現在）

【委員長】

六川　修一　　東京大学大学院 工学系研究科 技術経営戦略学専攻 教授

【副委員長】

松永　恒雄　　国立環境研究所　環境計測研究センター　環境情報解析研究室　室長

【委　員】

粟屋　善雄	岐阜大学 流域圏科学研究センター 流域情報研究部門　教授
石山　　隆	千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 研究員
岩崎　　晃	東京大学大学院　工学系研究科 先端学際工学専攻 教授
斎藤　元也	東京工業大学 イノベーション研究推進体 付加価値リモートセンシング　特任教授
高田　雅之	法政大学　人間環境部　人間環境学科　教授
竹花　康夫	石油資源開発株式会社　技術企画部　部長
土田　　聡	産業技術総合研究所 地質調査情報センター　次長
外岡　秀行	茨城大学 工学部情報工学科 准教授
中村　英克	石油天然ガス･金属鉱物資源機構 資源探査部 探査技術開発課課長　（併）探査第１課　担当調査役
中山　憲幸	日本電気株式会社　品質推進本部　環境推進部　エキスパート
平井　浩二	JX 日鉱日石金属株式会社　金属事業本部　資源開発部　技師
矢崎　慎介	兼松株式会社　鉄鋼・素材・プラント部門 エネルギー部　直売課ｋ

図 H-5-2-1-3 に示すように、金属資源探査技術の研究開発については、開発計画、開発内容及び開発結果に関する技術的な助言を得るために、外部専門家から構成される研究会を設置し事業を進めている。当該研究会委員の構成を以下に示す。

【金属資源探査技術開発研究委員】

浦井　稔	産業技術総合研究所 地質情報研究部門 情報地質研究グループ 上級主任研究員
古宇田 亮一	産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 招聘研究員
三箇 智二	JX 日鉱日石探開株式会社 取締役 券 探査事業部副事業部長
武田 祐啓	住鉱資源開発株式会社 資源環境調査部 担当課長
加藤 雅胤	一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構 利用技術本部 技術参与
押上 祥子	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室 研究員
山口 靖	名古屋大学大学院 環境学研究科 教授

Ｈ－５－３　　資金配分

今回の中間評価の対象となる期間である平成２３年度から平成２６年度の資金とその配分（いずれも実績）を表 H-5-3-1 に示す。

本研究開発を遂行するにあたり、ハイパースペクトルデータが必要になるが、入手可能な衛星搭載型センサによるデータは米国の Hyperion しか存在しないため、研究開発に遅滞が生じないよう航空機搭載型のセンサにて新規撮影するための資金も配分し、より実用性のある研究に集中している。

研究開発の進捗状況を十分に勘案し、資金の過不足がないように適切な資金配分を行い、最大の成果を得ることができるよう予算の運用管理を行っている。

表 H-5-3-1　資金配分（平成２３～２６年度）

（単位：百万円）

研究項目／年度	23 年度	24 年度	25 年度	26 年度	4 年間合計
実用化技術研究	281	171	135	127	714
センサ校正・データ処理技術	143	215	222	199	779
金属資源探査技術の研究開発	140	100	85	82	407
各年度の合計	564	486	442	408	1,900

（注）各年度の合計、４年間の合計は、四捨五入の関係で必ずしも一致していない。

Ｈ－５－４　費用対効果

Ｈ－４－１項にて、事業化の見通しについて示したが、データ配付条件等については決まっていないものの、仮にASTERと同様に　1シーン1万円とした場合、一般ユーザへのデータ配付金額は年間約7千万円となり、5年間で3億5千万円となる。これにさらに付加価値情報提供サービスによる金額が加算されることになる。

石油・天然ガスが探鉱段階から生産段階に至るまでに、陸上や海上、大水深海等の条件により期間は異なるが、探鉱には３～５年、開発には６～１０年の期間を要する。特に探鉱は、商業的に採取可能な規模の石油・天然ガスを発見できない場合、数十億円から数百億円という投下資金が全く回収できないという極めてリスクの高い事業である。そのため、いかにコストを引き下げ、効率的かつ採算性の良い方法を採用するかという技術開発の問題が重要であり、ハイパースペクトルデータを使用することにより、一定のコスト引き下げが期待される。

一方、金属資源探査の初期段階においては、対象範囲10万km^2程度から有望地を10km^2程度の範囲まで絞り込み、さらにボーリング調査を行うまでに10億円以下の探鉱費用が必要となり、深部の鉱床評価までにはさらに40億円以下の投資が必要となる。このため、最も初期段階における有望地絞り込みの精度は、その後の探鉱・投資の進退に大きな影響を与えることから、ハイパースペクトルデータから高い確度で有望地を絞り込む効果が期待される。

また、オーストラリアでは農耕地の塩害化対策に1km^2あたり50～500万円をかけている例もあることがヒアリング結果で分かっている。塩害が進むほど対策費用は嵩むことから、農家では低濃度の塩分分布を把握したいというニーズがある。ハイパースペクトルデータから土壌の低濃度塩分濃度マップが作成できるようになれば有償販売が見込まれ、仮にこのマップを1万円/km^2の価格で販売する場合には、耕作地面積が40万km^2以上もあるオースラリア全域で約40億円の事業規模になると推定される。

以上示したように、ハイパースペクトルデータが各事業の売上増・経費削減に対してどの程度の貢献度しているかを数値で表すのは難しいが、対象となる鉱区が開発生産に到る場合には、石油、金属資源ともに費用対効果は非常に大きくなる。

Ｈ－５－５　変化への対応

（１）搭載衛星計画の変更

「ハイパースペクトルセンサ等の研究開発」事業の評価用資料にも記載してあるが、HISUI センサは、開発の検討着手時から文部科学省が研究開発を計画していた「ALOS-3（だいち 3)」に搭載することを想定していた。しかし、平成 23 年 8 月の「宇宙開発利用の戦略的推進のための施策の重点化及び効率化の方針」において、以下のような指摘があり、「ALOS-3」の開発計画は中止となった。

だいち３（文部科学省（JAXA)、分解能 80cm、観測幅 50km）は（中略）緊急性等との観点で他のプロジェクトより優先度が低いため、宇宙政策全体の中で他の優先度の高いプロジェクトを実施した上で宇宙予算上可能であれば実施することとすべきである。

搭載衛星（JAXA）の中止に伴い、新たなセンサの宇宙実証機会の模索とともに、ハイパースペクトルデータの共同利用や共同研究の機会についても模索をし、搭載機会拡大のための典型的な衛星を想定して観測されるデータの仕様・性能等を鑑み、開発した手法の汎用化の検討を実施している。

上記の計画変更のため、開発完了を平成 32 年度まで延長することとなった。

（２）中間評価（平成 23 年度）の反映

（指摘事項の要点）

・解析技術が実用化にどうつながるか、ユーザにどう活用できるかが課題
・解析事例を増やすことで、ユーザに魅力的で、とりつきやすいシステムとなるよう今後の進展に期待
・データ販売および利用に関して、より定量的な試算が必要。

（対応）

「Ｈ－４－１事業化の見通し」で示したように、ユーザや関係者へのヒアリングを行い、ニーズや事業の実情を確認しつつ将来の事業化の見通しを具体的に検討している。

また、ユーザに分かりやすくデータ利用が魅力的となるよう、技術開発の成果をとりまとめ、ハイパースペクトルデータの利用促進に寄与するべくハイパースペクトルデータの利用事例を掲載したガイドブックを作成している。（図 H-5-5-1）

また、「ハイパースペクトルセンサ等の研究開発」事業と連携して調査・検討を進め、図 H-5-5-2 のようにロードマップを作成している。

(a)ガイドブック（案）

(b)総括資料骨子（案）

1. **概要** → 総括資料の概要

2. **HyperProjectについて** → HyperProjectの全体像を説明。実施内容については次章で詳細説明。
   - 2-1. 目的 → HyperProjectの目的。HISUIの紹介。
   - 2-2. 全体計画 → 事業の実施計画・スケジュールについて説明
   - 2-3. 実施内容 → 実施内容の説明。次章の要約版をイメージ
     - ユーザー要求の調査・整理
       - ユーザー要求調査
       - 技術動向調査
       - 次世代センサ要求調査
     - ハイパースペクトルデータの利用研究
       - 実利用化技術研究
       - 情報抽出技術研究
     - スペクトルデータベース構築

3. **実施内容の紹介** → 具体的な紹介
   - 3-1. ユーザ要求の調査・整理 → ユーザーニーズを調査し、取り組むテーマを選定した経緯を記載
   - 3-2. ハイパースペクトルデータの利用研究 → 分野ごとの研究内容について記載
     - ハイパースペクトルデータの補正手法 → 主に航空機データを用いた補正手法について紹介
     - ハイパースペクトルデータの解析手法 → 複数の研究で用いられた主要な解析手法の紹介
     - 資源
     - 環境
     - 農業
       → 現地調査方法、複数の手法を用いた比較・検証も含めて記載
   - 3-3. スペクトルデータベースについて → 開発過程、利用方法、収納データなどについて記載
   - 3-4. HISUI打ち上げに向けた取り組み → HISUI打ち上げ後の実利用性を検証するための研究紹介。
     - シミュレーションデータの作成
     - 等価マルチバンドの作成

4. **データの入手方法** →ハイパースペクトルデータの入手方法について記載。
5. **用語集** → 分野ごとに専門的な言葉が多数見られるため説明は必要と考える。

図 H-5-5-1　ガイドブック（案）の表紙と目次（案）

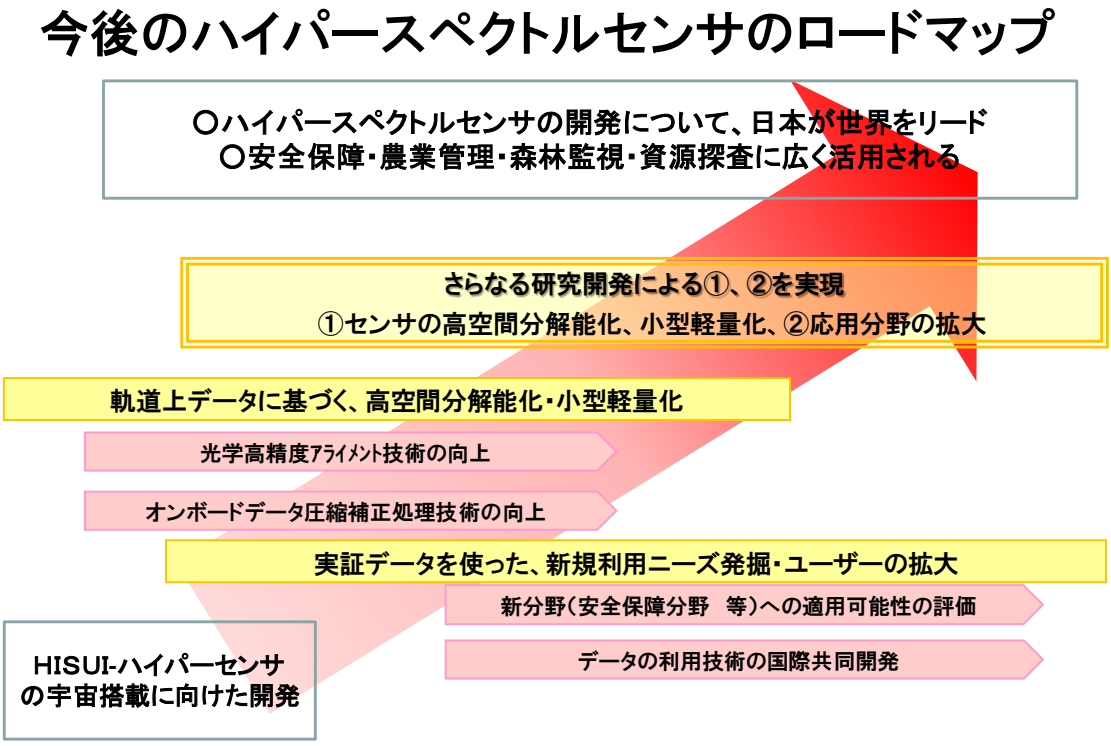


図 H-5-5-2　今後のハイパースペクトルセンサのロードマップ

Ⅰ 宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVIS）

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

日本電気株式会社

Ⅰ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ⅰ－１－１　事業の目的

我が国の宇宙関連企業は、衛星等のコンポーネントについては技術力を有するものの、宇宙実証の機会が少ないため、国際競争力のある分野はごく限定的である。さらに、我が国衛星市場の頭打ちに伴い、近年、国内の宇宙用部品メーカの市場からの撤退が進んでおり、部品調達に支障を来している。

他方、我が国の衛星に従来用いられてきた MIL 規格（米国国防総省が制定した米軍物資調達規格「Military Standard」の略。）部品は、信頼性が高い反面、高価、低機能、納期が長いことに加え、国内の生産量が少ない。また、MIL 部品の輸入時には、米国での輸出規制（ITAR）手続きの影響により、納入遅延や仕様変更等が発生し、衛星開発に悪影響を与えることが少なくない。

このような状況の中、我が国宇宙産業の成長や国際衛星市場への参入を進める方法の一つとして、我が国企業が得意とする安価かつ高機能な民生部品・民生技術の衛星への転用を進め、信頼性を確保しつつ衛星の低コスト化、高機能化等を図ることが必要となる。

本事業を通じて、民生部品（CPU、メモリ等）・民生技術を活用する知的基盤を整備すること等により、衛星・コンポーネントの低コスト化、高機能化、短納期化を実現し、我が国宇宙産業の国際競争力を強化する。

Ⅰ－１－２　政策的位置づけ

まず、新成長戦略（平成22年6月18日、閣議決定）において、宇宙産業振興のため、小型衛星の開発や、最先端宇宙科学・技術による競争力の確保が工程表に盛り込まれている。

また、産業構造ビジョン2010（平成22年6月3日、産業構造審議会産業競争力部会報告書）の中で、海外市場獲得に向けた我が国企業の競争力強化のため、国際市場、特に宇宙新興国のニーズ（低コスト・短納期・高性能・高信頼）を踏まえた世界最先端の小型衛星を中心として、新技術の実証手段として期待できる超小型衛星を含めた宇宙システム全体の開発を加速することとされている。

次に、技術戦略マップ2010では、今後5～10年程度は、各分野で必要となる基盤的な技術の蓄積を確実に実施し、宇宙実証機会の確保を重点的に取り組み、宇宙関連産業の競争力と自律性を強化し、さらにその後の宇宙産業の振興に寄与することとされており、国際競争力の獲得に必要な宇宙実証の機会を確保することで、新たな機器の信頼性確保を強化できると述べられている。

さらに、第4期科学技術基本計画（平成23年8月19日閣議決定）では、我が国の産業競争力強化のため、我が国の強みを生かした新たな産業基盤の創出に向けて、統合的システムの構築や、保守、運用までも含めた一体的なサービスの提供に向けた研究開発を、実証実験や国際標準化と合わせて推進するとともに、

これらの海外展開を促進する旨、記載されている。

宇宙分野においては、改訂された新たな「宇宙基本計画」（平成２７年１月９日、宇宙開発戦略本部決定）において、我が国の宇宙活動の自立性の確保に中核的役割を担う宇宙産業基盤を維持・強化するため、産業界の投資の「予見可能性」を高め、また、人工衛星等を利用した新たな国内需要の拡大に努め、さらに我が国の宇宙産業の国際競争力を強化するとされている。この目標達成に向けた具体的アプローチとして、我が国の宇宙産業の基幹的部品の安定供給、新規参入の促進、民間需要の新規開拓、国外受注の獲得等に官民一体となって取り組むこととされている。さらに、具体的取組として宇宙システムの基幹的部品等の安定供給に向けた環境整備を行うこととされている。

なお、「宇宙基本計画　工程表」（平成２７年１月９日、宇宙開発戦略本部決定）は上記本文とともに宇宙基本計画を構成し、毎年、政策項目ごとの進捗状況を宇宙政策委員会において検証し、宇宙開発戦略本部において改訂される。

Ⅰ－１－３　国の関与の必要性

宇宙システムは、特殊環境下で極めて高い信頼性が求められ、研究開発や技術実証には多額の費用が必要となるため、世界各国ともに国が責任を持って進めている。特に、宇宙空間において不具合の発生するリスクが MIL 部品と比べて高い民生部品・民生技術の宇宙実証は、民間企業のみで実施することが困難である。

このため、国が宇宙実証等の機会を提供し、民生部品・民生技術の衛星転用に必要な知的インフラ（データベース／ガイドライン）を整備する必要がある。また、本事業を通じて整備する知的基盤は、我が国産業界に公開し、整備の受益者が特定企業に限られないため、個別企業による事業実施は現実的でなく、国による事業実施が必要となる。

Ⅰ－２　研究開発目標

Ⅰ－２－１　研究開発目標

我が国が得意とする民生部品・民生技術を、衛星製造等の低コスト化、短納期化、高機能化に活用するため、これらを選定し地上模擬試験及び宇宙実証試験を行う。その結果を受けて、衛星製造等に適用するための知的基盤となる「民生部品・民生技術データベース」、「民生部品・民生技術選定評価ガイドライン」及び「民生部品・民生技術適用設計ガイドライン」を構築し整備する。また、機器等の開発の効率化を図るため開発支援技術を開発し適用する。

Ⅰ－２－２　全体の目標設定

本研究開発の全体の目標は次の通りである。

「宇宙実証の結果を踏まえ、平成 29 年度*)までに民生部品・民生技術を衛星に転用するための知的基盤を整備することにより、我が国における衛星製造等の低コスト化等を図る。」

その内容を具体的に説明すると次のようになる。

地上模擬試験においては、民生部品・民生技術が宇宙空間で曝される複合環境下での挙動と地上の常温・常圧下で限られた放射線源を使う加速試験結果とを比較・検討してその相関を求めることにより、衛星製造等に適用するための評価試験条件・方法を確立する。また民生部品・民生技術を宇宙で使用するためにどのようにスクリーニング試験及び品質確認試験を行えば効率的に信頼性の評価・確認ができるかも検討する。これらをデータベース、ガイドライン類にまとめる。

これらの地上模擬試験に加え、将来の低コスト化周回衛星バスを構成するバス機器に民生部品・民生技術を適用して実証衛星に搭載して宇宙実証試験を行う。これにより、民生部品・民生技術の評価と同時に低コスト・高機能な先端バス機器の評価も可能となり、我が国の宇宙産業界の国際競争力強化に貢献するものである。

平成 11 年より開始した地上模擬試験の結果、及び平成 15 年 10 月 30 日に打ち上げて約 2 年間の軌道上運用を行った実証衛星１号機の実証試験結果を受けて、第一次の民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築した。

次に、それ以降の地上模擬試験の結果、及び平成 22 年 6 月 2 日に打ち上げ約 1 年間の軌道上運用を行った実証衛星 2 号機の宇宙実証試験結果を反映して、第二次の民生部品・民生技術データベース及びガイドライン類を平成 23 年度までに構築を完了した。

また、平成 22 年度より新たに実証衛星 3 号機等の開発を開始した。この中で最新の民生部品・民生技術に対する地上模擬試験を実施しており、今後これらを搭載した機器等の宇宙実証試験を実施し評価することにより、これまで構築した民生部品・民

生技術データベース及びガイドライン類を改訂しまとめる。並行してこれらの活用状況をフォローする。

これらを受けて、本研究開発の今回の目標・指標と全体の目標設定を表 I-2-2-1 に示す。

表 I-2-2-1 全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
宇宙実証の結果を踏まえ、平成 29 年度*)までに民生部品・民生技術を衛星に転用するための知的基盤を整備することにより、我が国における衛星製造等の低コスト化等を図る。	平成 23 年度までに第二次の民生部品・民生技術データベース及びガイドライン類の知的基盤の構築を完了し、活用状況をフォローする。	衛星製造等の低コスト化、短納期化、高機能化等を実現するため、宇宙環境で実績のない民生部品・民生技術を適用するための知的基盤を構築する必要がある。

注＊）事業見直しにより、終了は平成29年度に変更された。

<u>I－２－３ 個別要素技術の目標設定</u>

本研究開発は①及び②の研究開発項目から成る。

①民生部品・民生技術の極限環境適用技術

②極限環境で使用する機器等の開発支援技術

①についての目標は次の通りである。

「民生部品･民生技術データベース及び実証衛星 1 号機･2 号機･3 号機等による宇宙実証データ等に基づき、最終の民生部品･民生技術選定評価ガイドラインと民生部品･民生技術適用設計ガイドラインを策定するとともに最終の民生部品・民生技術データベースを構築する。ここにデータベースへの累積登録品種数は 230 品種以上とし、実証衛星 3 号機等により宇宙実証する民生部品・民生技術適用数は 3 品種以上とする。」

これに対して今回の目標・指標は、民生部品･民生技術データベース及び実証衛星 1 号機及び 2 号機による宇宙実証データ等に基づき、第二次の民生部品･民生技術選定評価ガイドラインと民生部品･民生技術適用設計ガイドラインを構築する。ここにデータベースへの累積登録品種数は 200 品種以上とする。また実証衛星 2 号機の宇宙実証試験に適用する民生部品・民生技術を 30 品種以上とする。そしてこれらの活用状況をフォローする。更に、最新の民生部品・民生技術を適用した実験装置等を開発し、実証衛星 3 号機のシステム統合化を検討する。

②についての目標は次の通りである。

「実証衛星開発への適用結果に基づき、極限環境で使用する機器等の設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価する。」

これに対して今回の目標・指標は、開発支援技術を実証衛星 1 号機及び 2 号機の機器等の開発に適用してきた結果として、設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化の効果を確認し定量化する。

各々について、個別の目標設定を表 I-2-3-1 に示す。

表 I-2-3-1 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
①民生部品・民生技術の極限環境適用技術	衛星製造等に転用可能性を有する民生部品・民生技術に対し宇宙等極限環境を模擬した地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品・民生技術データベースを構築する。ここにデータベースへの累積登録品種数は 230 品種以上とする。	データベースへの累積登録品種数は 200 品種以上とする。またデータベース活用状況をフォローする。	衛星機器の低コスト化、高機能化、小型・軽量への寄与の可能性を有する品種数の調査結果等により設定した。
	民生部品・民生技術データベース及びそれに基づき選定した民生部品・民生技術の宇宙実証試験（実証衛星 1 号機・2 号機・3 号機等）のデータ等に基づき、最終の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築する。ここに実証衛星 3 号機等で宇宙実証する民生部品・民生技術適用数は 3 品種以上とする。	第二次のガイドライン類を構築する。実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 30 品種以上とする。またガイドライン類の活用状況をフォローする。	実証衛星 1 号機用実験装置への民生部品・民生技術の適用を決定する時の、地上模擬試験結果から得られた予測により品種数を設定した。
		最新の民生部品・民生技術を適用した実験装置等の開発を行い、実証衛星 3 号機のシステム統合化検討を行う。	最新の民生部品・民生技術の宇宙実証試験を行うために必要な作業である。
②極限環境で使用する機器等の開発支援技術	実証衛星開発への適用結果に基づき、極限環境で使用する機器等の設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価する。	実証衛星 1 号機及び 2 号機の開発に適用しその効果を定量化する。	本技術により衛星機器等の開発の効率化が可能となる。

I－３　成果、目標の達成度

I－３－１　成果

I－３－１－１　全体成果

平成 15 年 10 月 30 日に打ち上げた実証衛星 1 号機は平成 17 年 11 月 1 日に宇宙実証試験を終了した。また、実証衛星 2 号機は平成 22 年 6 月 2 日に打ち上げられ、平成 23 年 6 月 3 日に宇宙実証試験を終了した。これまでの地上模擬試験の結果、及び上記 2 回の宇宙実証試験の結果を反映し、第二次の民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築した。

また、実証衛星 3 号機等による宇宙実証試験に向けて、新たに最新の民生部品・民生技術の地上模擬試験を実施し、これらを適用した実験装置等を開発している。更に衛星システムの統合化も検討した。

以上の結果、今回の目標を達成した。

今後、新たに開発している実験装置等に対して宇宙実証試験を行い、これらの結果を反映して民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを最終化する。

本研究開発全体の流れを I-3-1-1-1 に示す。

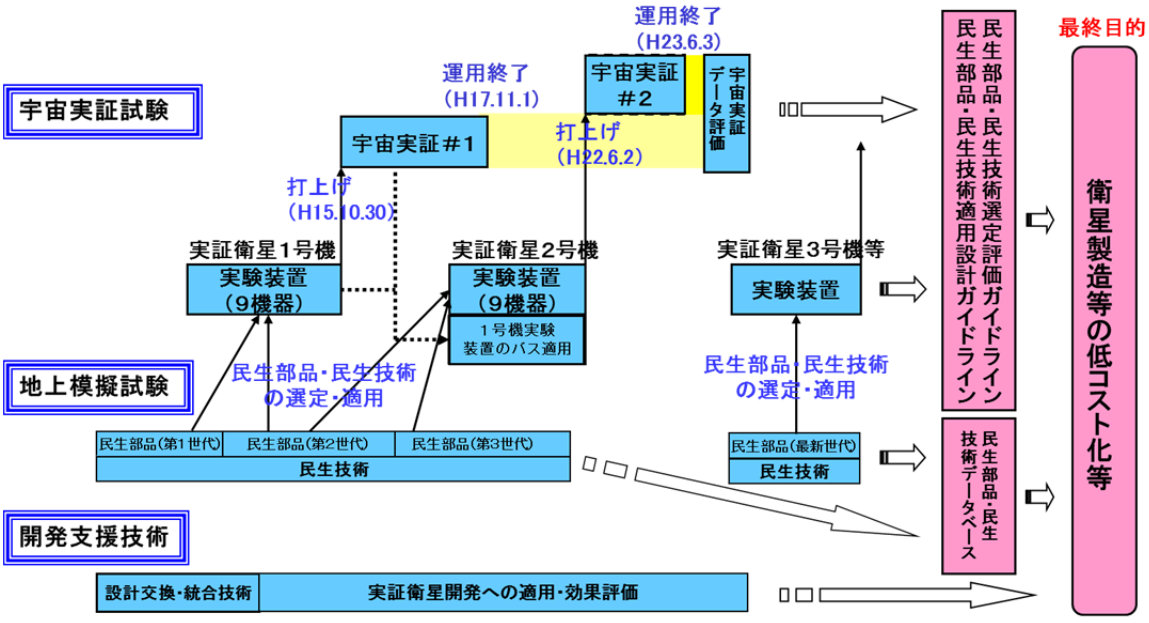


図 I-3-1-1-1　研究開発の流れ

Ⅰ－３－１－２　個別要素技術成果

①民生部品・民生技術の極限環境適用技術

（1）地上模擬試験

a） 民生部品・民生技術の選定

地上模擬試験に供する民生部品は工業機器、自動車、IT 関連機器、IT 家電等の用途のため、安定した製造プロセスで大量に製造された半導体部品を主とした民生部品及び民生技術を対象とし、特に以下の視点で選定した。

・衛星用機器の小型、軽量、高機能及び低コスト化に貢献する民生部品
・実証衛星の実験装置に搭載する民生部品
・放射線耐性予測方法の評価検討に役立つ民生部品
・民生部品を使用する際に必要となる民生技術
・低コスト化に貢献する民生技術

選定の手続きとしては、基本的にプロジェクト参画の衛星開発関連参画企業から提案されたものの中から SERVIS 技術委員会の審議を経て採択した。

b） 民生部品の地上模擬試験の試験項目と試験条件

民生部品の地上模擬試験の試験項目は大別するとスクリーニング試験、放射線試験及び品質確認試験である。

スクリーニング試験は初期故障を除去するために実施するもので、全数実施し不良が発生したロットは除外した。その後、環境耐性を調べる放射線試験であるトータルドーズ試験及びシングルイベント試験、更に機械環境・温度環境に対する耐性確認試験である品質確認試験を実施した。なお、民生部品は地上で使用するため、一般に放射線試験を実施することはない。従って宇宙環境での耐性を確認するためには放射線試験が必須である。一方、品質確認試験は、既に部品メーカで実施しそのデータを取得したものもあり、これらの試験データは部品メーカから提供頂き試験を省略することも許容した。

これらの地上模擬試験で採用した試験項目・試験条件等を、ガイドライン類の付属文書として「民生部品評価試験条件書」としてまとめた。

c） 民生部品の試験結果

これまでに地上模擬試験が終了した 221 品種について、年度毎の評価品種数を表 I-3-1-2-1 に示す。この中で平成 18 年度までに実施した民生部品については、軌道高度 1000km、5 年ミッションの中低高度地球周回衛星（LEO）において、搭載民生部品までのアルミ遮蔽圧が 5mm の場合は約60%の民生部品が使用可能であることが明らかとなった。また、平成 24 年以降に選定し試験を行った民生部品については、軌道高度 1200km、4 年ミッションの LEO ではほとんどの民生部品が使用可能であることが判明した。

表 I-3-1-2-1　民生部品の地上模擬試験の実績

品種	H11年	H12年	H13年	H14年	H15年	H16年	H17年	H18年	H24年	H25年	H26年	合計
CPU	5	3	4	1	0	0	0	0	1	0	1	15
DSP	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
SRAM	4	12	6	1	1	1	1	1	0	0	0	27
SOI-SRAM	3	1	4	0	2	0	0	0	0	0	0	10
DRAM	1	10	1	1	3	1	1	0	0	0	0	18
PROM	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
EEPROM	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4
フラッシュメモリ	0	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0	5
ゲートアレイ	3	0	7	1	2	0	0	0	0	0	0	13
デジタルIC	3	0	19	5	0	0	0	0	0	0	0	27
デジタルIC(SOI)	2	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	8
アナログIC	6	10	21	4	1	0	0	2	5	4	1	54
光部品	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
SOI	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
その他	5	5	11	1	1	0	2	0	1	3	0	29
合計	37	50	81	14	13	2	4	3	8	7	2	221

d） 民生技術の試験結果

これまでに表 I-3-1-2-2 に示す 15 品種の民生技術について地上模擬試験を実施した。これらの民生技術は、ほとんどが技術単独では評価できないため、民生技術を搭載した実験装置レベルでの試験を実施した。試験項目は機能・性能試験に加え、環境試験（機械、温度等）を行い、いずれも問題のないことを確認した。

表 I-3-1-2-2 民生技術の地上模擬試験の実績

No.	民生技術	搭載実験装置	実証衛星No.	備　考
1	超塑性加工タンク	ベーン式推薬タンク（VTS）	1	
2	グリース潤滑	次世代パドル駆動機構（APDM）	1	
3	表面部品実装技術	無調整化TTCトランスポンダ（ATTC）	1	
4	MCM化技術	オンボードコンピュータ（OBC）	1	MCM: Multi Chip Module
5	表面実装技術	スターセンサ統合型衛星制御装置（SIS）	1	
6	リチウムイオンバッテリセル	リチウムイオンバッテリシステム(LIB)	1	Co系電池
7	PHIC実装技術	リチウムイオンバッテリシステム(LIB)	1	PHIC: Power Hybrid IC
8	リチウムイオン電池	リチウムイオン電池実験装置（LIBA）	2	Mn系電池
9	MCM実装技術	高性能データ圧縮装置（HPDC）	2	
10	SOI技術	高性能データ圧縮装置（HPDC）	2	SOI: Silicon on Insulator
11	GPS受信機	先進測位実験装置（APE）	2	
12	実装技術	先進測位実験装置（APE）	2	
13	実装技術	先進衛星構体実験装置（ASM）	2	
14	磁気軸受	磁気軸受ホイール実験装置（MBW）	2	
15	MEMS製造技術	RF-MEMS実験装置（MEMS）	2	

e） 地上模擬試験のまとめ

以上により、これまでに民生部品 221 品種、及び民生技術 15 種、計 236 品種の地上模擬試験を完了し、今回の評価の目標である 200 品種を達成した。民生部品は入れ替わりのサイクルが早く初期のデータは陳腐化して行くことから、平成 24 年度以降の 15 品種の試験は、今後の宇宙実証試験を目指して最新の民生部品を対象として実施したものである。

これらの地上模擬試験結果は、もう1つの研究開発項目である「開発支援システム」のデータベース作成機能を用いて、最初（第一次）の民生部品・民生技術データベースとして登録した。この中で、公開用として第一次のデータベースを平成 19 年に旧（財）無人宇宙実験システム研究開発機構（USEF）のホームページに掲載した。その後、実証衛星 2 号機による宇宙実証結果を受けて必要箇所を見直して平成 24 年に改訂し第二次の民生部品・民生技術データベースとして(一財)宇宙システム開発利用推進機構（J-spacesystems）のホームページに掲載した。

公開用データベースでは、民生部品・民生技術の製造メーカ名は記載せず型式は型式 ID で置き換えることで、製造メーカへの配慮を行っている。また、試験結果のサマリのみを掲載している。一方、非公開用データベースとして試験結果一式を掲載したものについては、活用を要望する組織・個人が J-spacesystems に対して利用申請書を提出し J-spacesystems による審査を行い、情報管理や目的外利用等に問題なしと判断した場合は個別に提供する形で活用されている。

（2）宇宙実証試験

a) 実験装置

a-1) 実証衛星 1 号機及び 2 号機搭載実験装置

実証衛星に搭載され宇宙実証される実験装置は、国内の宇宙関連企業に公募し、次の観点から SERVIS 技術委員会において審議され、選定を行った。本選定は複数回に亘って行われた。

- ・将来の低コスト化衛星バスを構成するバス機器で、民生部品・民生技術の宇宙実証試験が適切にできる機器であると共に、民生部品・民生技術により抜本的な低コスト化、短納期化、高機能化等が図れる機器であること。
- ・宇宙実証試験が必要なものであると共に、組み込んだ民生部品・民生技術の挙動がモニタできること。
- ・開発担当各社の戦略機器として機器単体でも世界市場での販売が可能なものであること。

その結果として選定・開発され、実証衛星 1 号機に搭載・宇宙実証された実験装置一覧を表 I-3-1-2-3 に示す。また、実証衛星 2 号機の実験装置一覧を表 I-3-1-2-4 に示す。いずれの衛星にも9装置が搭載されることとなった。なお、実証衛星 1、2 号機ともに、民生部品を単体として試験するための装置として部品単体試験装置(CPT)（後述）を搭載しており、これもカウントすると 10 機器となる。

実証衛星 1 号機では約 2 年間の軌道上運用により宇宙実証を行った。また実証衛星 2 号機では約 1 年間の軌道上運用により宇宙実証を行った。1、2 号機ともに全ての実験装置が致命的な不具合もなく、計画した宇宙実証試験を完了し、所期の目的を達成した。

表 I-3-1-2-3 実証衛星 1 号機で宇宙実証された実験装置

No.	名　　称	略称
1	ベーン式推薬タンクシステム	VTS
2	統合航法センサシステム	INU
3	統合電力制御装置	PCDS
4	次世代パドル駆動機構	APDM
5	無調整化 TTC トランスポンダ	ATTC
6	オンボードコンピュータ	OBC
7	スターセンサ統合型衛星制御装置	SIS
8	リチウムイオンバッテリシステム	LIB
9	光ファイバジャイロ慣性基準装置	FOIRU

表 I-3-1-2-4 実証衛星 2 号機で宇宙実証された実験装置

No.	名　　称	略称
1	リチウムイオン電池実験装置	LIBA
2	高ｱｼｭｱﾗﾝｽﾃﾞｰﾀﾏﾈｰｼﾞﾒﾝﾄ装置	ADMS
3	自律フォールトトレラント計算機	CRAFT
4	リモートターミナル実験装置	PPRTU
5	高性能データ圧縮装置	HPDC
6	先進測位実験装置	APE
7	先進衛星構体実験装置	ASM
8	磁気軸受ホイール実験装置	MBW
9	RF-MEMS 実験装置	MEMS

次に、実験装置に搭載され宇宙実証された民生部品及び民生技術を、実証衛星 1 号機について表 I-3-1-2-5 に、また実証衛星 2 号機について表 I-3-1-2-6 に示す。これらの表では民生部品の品種名を示すが、民生技術名は前述の I-3-1-2-2 に示し、ここでは数のみとした。18 の実験装置で評価される民生部品は合計 86 品種、また民生技術は合計 15 種となった。

これらの民生部品や民生技術も、これらが組み込まれた実験装置と同様、ほぼ計画通りに動作し、1 号機は 2 年間の宇宙実証を、また 2 号機は 1 年間の実証を完了した。宇宙実証結果は地上模擬試験結果との比較・検討により地上での予測の妥当性評価を行い、特に 2 号機の結果は民生部品・民生技術選定評価ガイドライン、及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインに順次反映している。

表 I-3-1-2-5 実証衛星 1 号機の実験装置に搭載・
評価された民生部品・民生技術

略称	民生部品	民生技術	搭載民生部品品種
VTS	1	1	ボイドセンサ
INU	1	0	RFチップ
PCDS	1	0	16bit CPU
APDM	0	1	－
ATTC	11	1	16b D/A C, 12b A/D C, Receiver IF, LN AMP, LN AMP/MIXER, TRASMIT/RECEIVE SWITCH, UPC, MODULATOR, TRANCEIVER, PA DRIVER AMP, POWER AMP
OBC	6	1	CPU, SDRAM, FPGA, Dig_IC×2, SRAM
SIS	4	1	CPU, EEPROM, CCD, SDRAM
LIB	0	2	－
FOIRU	5	0	受光、光源、導波路、ファイバ、FOG
合計	29	7	

表 I-3-1-2-6 実証衛星 2 号機の実験装置に搭載・
評価されている民生部品・民生技術

略称	民生部品	民生技術	搭載民生部品品種
LIBA	7	1	CPU、マルチプレクサ、フォトカプラ、リレードライバ、MOS-FET、OPAMP、ホールセンサ
ADMS	17	0	CPU、FLASH MEMORY、SRAM、FPGA、FET、Digital IC×6種、Analog IC×4種、Transistor×2種
CRAFT	4	0	64bit MPU(P-QFP)、64bit MPU(BGA)、SRAM、SDRAM
PPRTU	9	0	IEEE-1394 I/F LS、PLL LSI、LVDS Line Driver、LVDS Line Receiver、PCI I/F デバイス、デュアルポートSRAM、高速FIFO、EDAC、バッファIC
HPDC	7	2	LVD Line Driver、LVDS Line Receiver、LVDS Line Driver/Receiver、Line Receiver、16bit Level Shifting Tranceiver、SDRAM、Image Comp Chip
APE	4	2	OPAMP、FIFO、FPGA、SDRAM
ASM	7	1	CPU、FPGA、DRV×2、OPAMP、EEPROM、SDRAM
MBW	1	1	パワーMOSFET
MEMS	1	1	RF-MEMSスイッチ
合計	57	8	

機器実験装置に加え、高機能で最先端の半導体メモリ部品を中心に、部品単体としての挙動を詳細に計測するために部品単体試験装置(CPT)を開発し、実証衛星 1 号機及び 2 号機に搭載した。本装置に搭載する民生部品は最先端の 2 世代の SRAM、DRAM 等とした。これにより 2 機の実証衛星により、3 世代の半導体メモリ部品の宇宙実証を実施し、世代の違いが放射線耐性にどのように影響するかも調査した。CPT に搭載した民生部品を表 I-3-1-2-7 に示す。

表 I-3-1-2-7 部品単体試験装置に搭載・評価された民生部品

品種	実証衛星 1 号機	実証衛星 2 号機
SRAM	1Mbit, 4Mbit	4Mbit, 8Mbit
DRAM	128Mbit, 256Mbit	256Mbit, 512Mbit
SOI SRAM	256kbit (0.35μm)	128kbit (0.18μm)
フラッシュメモリ	NOR 型 32Mbit	NOR 型 128Mbit
FPGA	SRAM 型, EEPROM 型	SRAM 型, EEPROM 型
品種数	11	9

部品単体試験装置では、2 機の実証衛星により計 20 品種の民生部品が評価され、地上模擬試験結果との比較・検討により地上での予測の妥当性評価を行うと共に、民生部品の放射線耐性予測の検討にも反映された。

以上により、実証衛星 2 号機に搭載された実験装置と部品単体試験装置により民生部品は計 66 品種、民生技術は計 8 種が実証されている。即ち、今回の評価の目標である「実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術の適用数 30 品種以上」に対して、合計 74 品種となり、充分に目標を達成した。

なお、実証衛星 1 号機に搭載された実験装置と部品単体試験装置により民生部品は計 40 品種、民生技術は計 7 種が実証された。合計で 47 品種となり、1 号機においても 30 品種以上の目標を達成している。

a-2) 実証衛星 3 号機等搭載実験装置

平成 22 年度より開発を開始した、実証衛星 3 号機等に搭載して宇宙実証すべき民生部品・民生技術を適用した実験装置等は以下の通りである。

ア. トランスポンダ（STRX）
イ. 電力制御器（PCU）
ウ. グリーンプロペラント推進系（GPRCS）
エ. 半導体増幅器（SSPA）
オ. 環境計測装置（SPM）

これらについて、以下個別に説明する。

ア. トランスポンダ（STRX）

今回の STRX は、これまで小型衛星で実績のあるものをベースに機能追加を行い、実験機器でありながら、バス機器としても使用できることを目指した。追加するのはレンジング（測距）機能であり、この部分の追加回路を要素試作し試験を行うことにより、設定した仕様を満足できる見通しを得た。本装置の開発に当っては、地上模擬試験を行い評価した民生部品を適用する。

但し、本装置は全体として衛星バス機能に合わせた仕様とする必要があることから、実証衛星 3 号機の開発計画が明確になるまで、STRX のフライト品の開発は実施しないこととした。

イ. 電力制御器（PCU）

今回の PCU は実証衛星 1 号機の実験装置である統合電力制御装置（PCDS）で実証し実用化した制御方式（PPT 方式）を採用するとともに、安価な Ni-MH バッテリを使用する計画であった。しかし、市場動向から本 PCU はリチウムイオンバッテリ（LIB）の使用を前提とすることに変更した。それに伴い、PCU の充電機能及びバッ

テリ温度制御機能を要素試作し、試験を行うことにより LIB を使用した場合の制御ができる見通しを得た。本装置の開発に当っては、地上模擬試験を行い評価した民生部品を適用する。

但し、本装置は全体として衛星バス機能に合わせた仕様とする必要があることから、実証衛星 3 号機の開発計画が明確になるまで、PCU のフライト品の開発は実施しないこととした。

ウ. グリーンプロペラント推進系（GPRCS）

ロケット、衛星及び探査機などの宇宙機の軌道や姿勢を制御するためのスラスタには“高性能化(消費推薬量低減)”、“作業性／取扱性向上(推薬低毒化)”、“低コスト化”が望まれている。そのため、現行の有毒な推薬を使用する推進系に替って“グリーンプロプラント”と呼ばれる低毒性推薬を使用する推進系が次世代推進系として着目されている。

これまで開発されてきたグリーンプロペラントを大別すると、HAN (Hydroxyl Ammonium Nitrate)をベースとした HAN 系推薬、ADN (Ammonium DiNitramide)系推薬、HNF (Hydrazinium NitroFormate)系推薬、過酸化水素がある。HAN は使用済み核燃料の再処理剤として使用されている民生材料である。HAN 系推薬の中で、HAN に AN (Ammonium Nitrate)、水、メタノールを添加した推薬(SHP)は、低凝固点、高密度、高比推力であり、宇宙機適用の際にシステムメリットが大きい。本装置はグリーンプロペラントとして SHP を採用することとした。SHP を使用する場合、推薬を従来のヒドラジン（ITAR 規制対象品）を置き換えることになり、この観点でも意義が大きい。

平成 23 年度に SHP を利用した GPRCS の開発を開始した。本研究開発は宇宙航空研究開発機構(JAXA)との共同研究で実施している。要求性能及び中間評価時点までの達成状況は表 I-3-1-2-8 の通りである。

表 I-3-1-2-8 要求性能及び達成状況

項目		仕様	達成状況	備考
スラスタ	推力	1N	○	・仕様設定根拠は地球周回の小型衛星に適用可能なレベル ・本試験実績では、約0.9Nまで確認済み
	比推力	≧210s	△	・仕様設定根拠は現行ヒドラジン一液スラスタと同等以上 ・本試験では、約0.9Nで約200sの比推力達成 ・比較的増速量の小さい数100kgの小型衛星では、比推力の影響は少ない ・密度比推力が大きいため、(比推力が若干低くても)衛星のコンパクト化が可能
	連続噴射時間	各部が平衡温度になるまで	△	・本試験実績は0.6N級で約60s、0.9N級で約40s
	累積噴射時間	≧3,000s	○	・仕様設定根拠は地球周回の小型衛星に適用可能なレベル ・本試験実績で約 5,000s 達成
	総推力	≧3,000Ns	○	・本試験実績で約3,450Ns達成
	最小 ON タイム(*)	≦100ms	○	・本試験実績で、100msで着火することを確認 (インパルスビット@1パルス目=約0.01Ns)
	触媒層初期温度	≦200℃	○	・仕様設定根拠は、一般的なヒドラジン一液式スラスタと同一レベル ・本試験実績で、全試験ケースにおいて、触媒層初期温度=200℃で試験実施
	累積パルス数	≧20,000	△	・本試験実績で、累積パルス数　約10,000を達成 ・累積パルス数／累積噴射時間の比では海外他社ヒドラジン1Nスラスタと同等
	搭載数	4 基	―	
質量		≦13 kg	―	・ドライ質量
電力		≦80W	―	

＊:インパルスビットが発生する最小 ON 時間

表 I-3-1-2-8 の通り、要求性能をほぼ達成しており、今後認定試験として、機械環境試験及び環境試験前後の機能試験を実施し、本事業で開発したスラスタがフライト品質を有することを確認する。

供試体の写真を図 I-3-1-2-1 に示す。

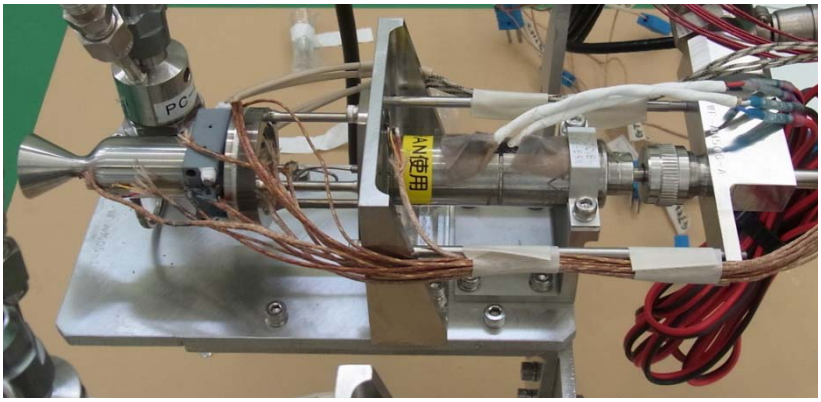


図 I-3-1-2-1　供試体写真

エ. 半導体増幅器（SSPA）

現在、衛星搭載の通信用増幅器は進行波管増幅器（TWTA）が主流である。一方半導体増幅器（SSPA）は出力が小さいため低周波では徐々に採用されつつあるが、高周波領域では既存デバイスでは SSPA に適用することは不可能であった。しかし、今回窒化ガリウム(GaN)を採用し新たにデバイスを開発することで、現在 TWTA しか無い Ku 帯及び Ka 帯増幅器を SSPA に置き換えることが可能である。

通信ミッションには 100W クラス以上の出力が必要であるが、今回はバス通信系（TTC）を対象とし、Ku 帯で 40W、Ka 帯で 10W の SSPA を開発することで世界市場への参入が見込めると判断した。これまでに、Ku 帯、Ka 帯ともに GaN を使用してモノリシックマイクロ波 IC（MMIC）を開発できる見通しを得ている。この MMIC には民生部品及び民生技術が適用されている。

オ. 環境計測装置（SPM）

衛星に搭載する民生部品、民生技術の宇宙実証評価には、軌道上での放射線モニタが必須である。実証衛星 1、2 号機ではバス機器として粒子エネルギースペクトロメ―タだけでなく、ドーズモニタ及びアップセットモニタも搭載し、詳細な評価を行った。

開発中の粒子エネルギースペクトロメ―タ（SPM）は、搭載実績のノウハウを活かし、現行の国内・国外の放射線計測器に対抗し得る性能（観測エネルギー範囲、粒子弁別機能、低電力、軽量等）を有しながら、小型で低価格な搭載機器をコンセプトに開発を進めてきた。

SPM の概念図を図 I-3-1-2-2 に、外観図を図 I-3-1-2-3 に、主要諸元を表 I-3-1-2-9 に示す。SPM は、S1とS2の2枚のシリコン(Si)検出器を用いて、その間に減速材を挿入する単純なセンサ構成より、広範囲なエネルギー粒子の計測を可能とする装置である。この SPM には4種の民生部品が適用されている。

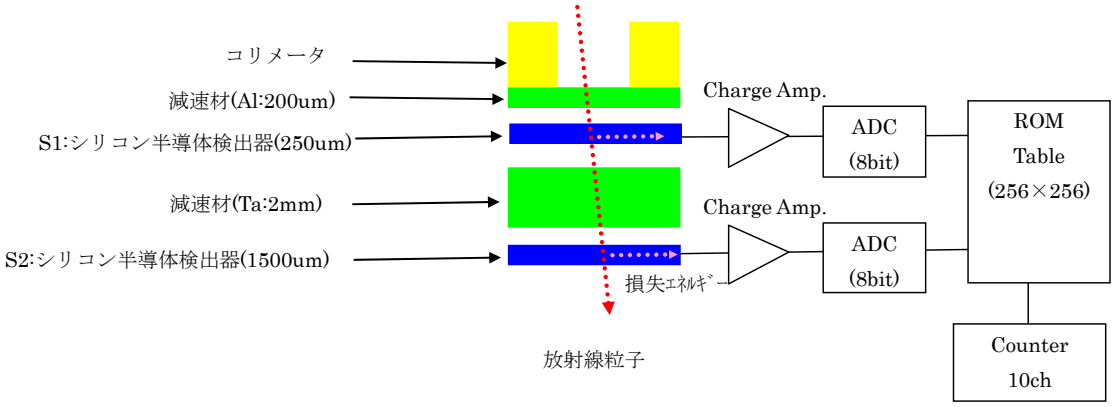


図 I-3-1-2-2　SPM 概念図

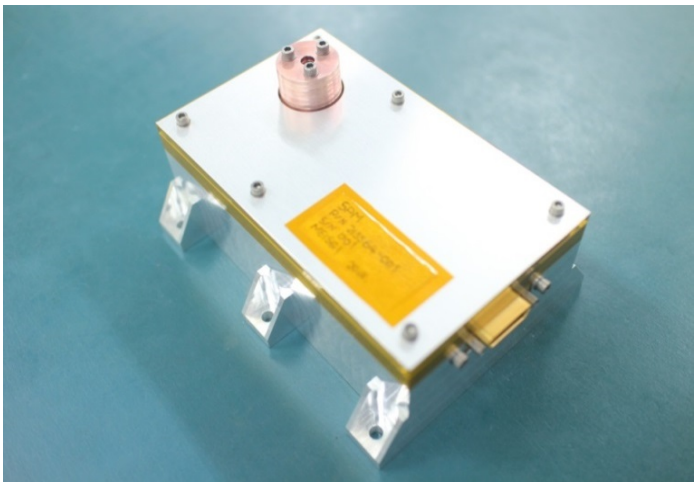


図 I-3-1-2-3　SPM 外観図

表 I-3-1-2-9　SPM 主要諸元

計測粒子種 ／ エネルギー範囲	電子：2 チャンネル　（0.21MeV～1.3MeV） 陽子：6 チャンネル（5.5MeV～300MeV） 重イオン：2 チャンネル　（7.12MeV/n～）
視野	±21.8 度（衛星軌道により設定）
寸法	102×132×46(mm)　公差±1% （コリメータ、コネクタ等突起物含まず）
質量	0.9kg　以下
消費電力	1.1 W　以下

b) 実証衛星

b-1) 実証衛星 1 号機

実証衛星 1 号機は、研究開発の効率的推進の観点から、先に開発された次世代型無人宇宙実験システム（USERS）の資産を最大限活用することにした。バス部は USERS 宇宙機サービスモジュール（SEM）をそのまま使い、また USERS 宇宙機リエントリモジュール(REM)の代わりに実験装置を搭載するペイロードユニット(PLU)を取り付けることとした。運用軌道は宇宙実証を行うために必要な放射線環境と、将来の低コスト化周回バス・搭載機器が飛翔すると考えられる範囲を考慮して高度 1000km の太陽同期軌道（SSO）とした。

実証衛星 1 号機はロシアのプレセツク射場からロコットにより打上げられ、ほぼ計画通りの軌道に投入された。その後は宇宙航空研究開発機構（JAXA）のグラウンドネットワーク局（GN 局）を使用して USEF 運用管制センター（USOC）（b-2) 実証衛星 2 号機の説明参照）により約 2 年の軌道上運用を行い、計画された全ての宇宙実証試験を完了した。なお、停波の前に国際機関間スペースデブリ調整会議(IADC)のガイドラインを遵守し、スペースデブリの発生を抑える処置を可能な範囲で実施した。

衛星の概要を表 I-3-1-2-10 に示す。

表 I-3-1-2-10 実証衛星 1 号機の概要

打上げ日	平成 15 年 10 月 30 日
打上げロケット	ロコット（ROCKOT）
運用軌道	高度 1000 km、軌道傾斜角 99.5deg 太陽同期軌道（SSO）
運用期間	2 年
衛星重量	840kg
外形寸法	2.5m(H) x 10.2m(L)
発生電力	1300W 以上（太陽指向時、EOL）
衛星制御系	ISC による統合化制御
姿勢制御系	3 軸制御
電源系	50V フローティングバス NiH_2 バッテリ
データハンドリング系	CCSDS 準拠パケット方式
通信系	テレメトリ：USB (2kbps), HSB (256kbps) コマンド：4000bps
推進系	1 液式（ヒドラジン） 1N スラスタ 12 本
運用管制設備	USEF 運用管制センター(USOC)
追跡管制局	JAXA グラウンドネットワーク（GN）局
ペイロードへのリソース	重量：300 kg 以上、電力：500 W 以上 データレート：2400 bps 以上

b-2) 実証衛星 2 号機

実証衛星 2 号機は、1 号機搭載の機器実験装置を出来る限りバス機器に採用する方針とした。宇宙実証結果を受けて検討した結果、表 I-3-1-2-3 に示す以下の装置をバス化することとした。

・無調整化 TTC トランスポンダ（ATTC）
・リチウムイオンバッテリシステム（LIB）
・スターセンサ統合型衛星制御装置（SIS）

また、実証衛星 2 号機は運用期間が 1 年であり 1 号機の 2 年より短いため、1 号機と等価な累積放射線量を与えることを考慮して高度 1200km の SSO とした。また、運用期間の短縮に合わせて搭載する推薬量を少なくした結果、衛星の質量も 1 号機より小さくなった。実証衛星 2 号機の概要を表 I-3-1-2-11 に示す。

表 I-3-1-2-11 実証衛星 2 号機の概要

打上げ日	平成 22 年 6 月 2 日
打上げロケット	ロコット（ROCKOT）
運用軌道	高度 1200 km、軌道傾斜角 100.4deg 太陽同期軌道（SSO）
運用期間	1 年
衛星重量	740kg
外形寸法	2.5m(H) x 10.2m(L)
発生電力	1300W 以上（太陽指向時、EOL）
衛星制御系	ISC による統合化制御
姿勢制御系	3 軸制御
電源系	50V フローティングバス リチウムイオンバッテリ
データハンドリング系	CCSDS 準拠パケット方式
通信系	テレメトリ：USB (2kbps), HSB (256kbps) コマンド：4000bps
推進系	1 液式（ヒドラジン） 1N スラスタ 12 本
運用管制設備	USEF 運用管制センター(USOC)
追跡管制局	JAXA グラウンドネットワーク（GN）局
ペイロードへのリソース	重量：300 kg 以上、電力：500 W 以上 データレート：2400 bps 以上

実証衛星 2 号機の打上げ機も、1 号機と同様ロコット（ROCKOT）による打上げ提案を行ったドイツのユーロコット（Eurockot）社と打上げサービス契約を締結することとなった。ロケット側の事情により打上げが遅延したため、実証衛星 2 号機はシステム PFT 後に衛星を適切な環境下に保管し、打上げ時期確定後に最終点検と出荷前審査（PSR）を行い、ロシアのプレセツク射場に輸送した。射場における衛星の外観を図

I-3-1-2-4 に示す。射場整備作業の終了後、衛星は平成 22 年 6 月 2 日 01 時 59 分 11 秒(UTC(協定世界時))に打上げられた。その様子を図 I-3-1-2-5 に示す。

図 I-3-1-2-4　実証衛星 2 号機の外観

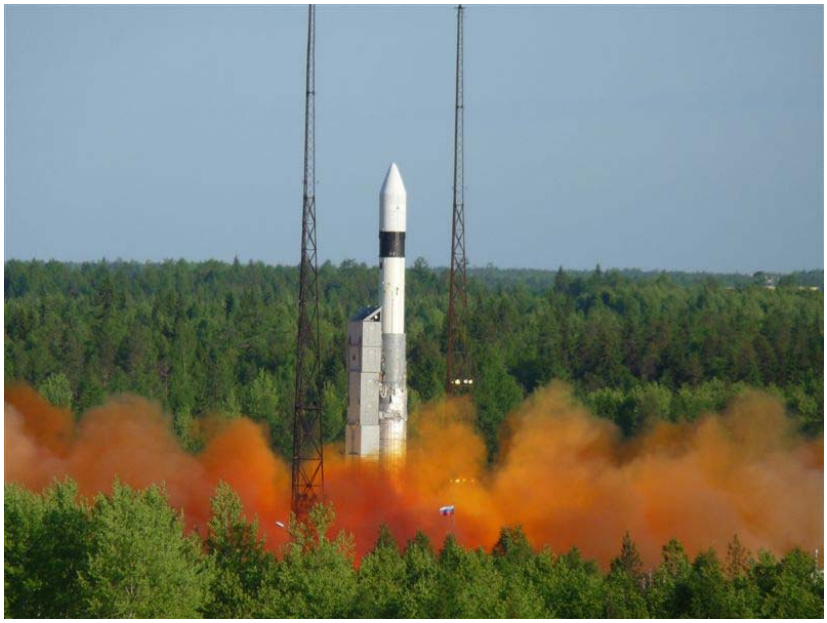


図 I-3-1-2-5　実証衛星 2 号機の打上げ

実証衛星 2 号機は殆ど計画通りの軌道に投入された。その後 SIS をベースとした

統合型衛星制御装置の恒星センサ（STT）により初期捕捉を問題なく完了した。ATTCをバスに転用した通信系、LIBをバスバッテリとして使用した電源系も正常に動作することが確認できた。初期チェックアウト後、約 1 年間の軌道上運用を行い、計画された全ての宇宙実証試験を完了した。軌道上運用の終了に際し、1 号機と同様、残推薬の消費、バッテリの放電、不要機器の電源オフ等により、国際機関間スペースデブリ調整会議(IADC)のガイドラインを遵守し、制約の範囲で最大限にスペースデブリの発生を抑える処置を行った後平成 23 年 6 月 3 日に停波し、実証衛星 2 号機の運用を完了した。

実証衛星 1、2 号機の運用にはUSEF 運用管制センター（USOC）を使用した。USOC開発の基本方針は設備の低コスト化と運用の省力化におかれている。設備の低コスト化では、既存の技術資産を充分活用することに加え、PC ベースでのシステム構成とし、最小限の装置冗長と相互代用可能な装置間での機能冗長を採用し、更に追跡管制には宇宙航空研究開発機構（JAXA）のグラウンドネットワーク局(GN 局)を活用した。また、運用の省力化では、1 名の指揮者（FD: Flight Director）と 2 名のオペレータでの定常運用作業ができるシステムを構築している。なお、実証衛星 2 号機用のUSOC においては、1 号機からの経年に伴うハードウェア、オペレーションシステム等の換装、及び通信環境の高速化に対応して改修を行った。

運用管制システムの構成を図 I-3-1-2-6 に示す。

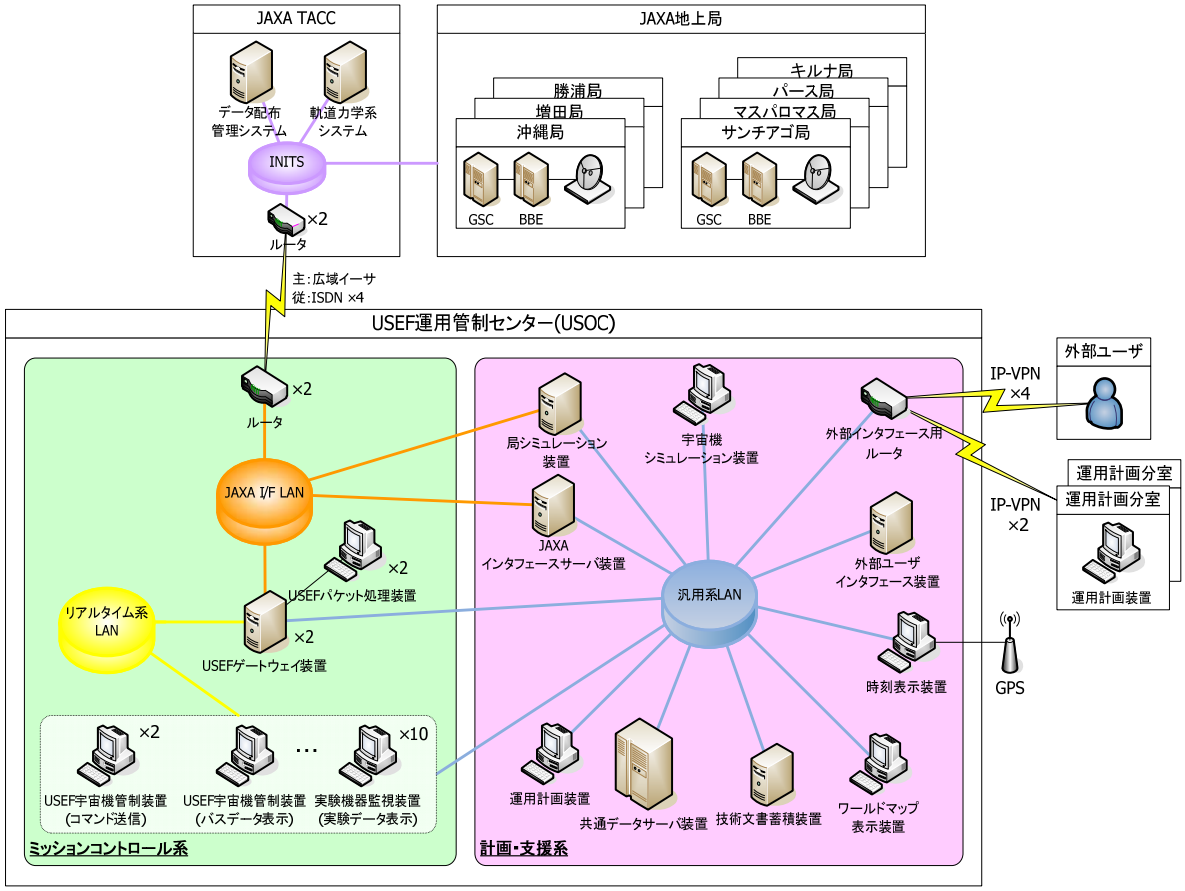


図 I-3-1-2-6　実証衛星 1、2 号機の運用管制システム

b-3) 実証衛星 3 号機

低コストでかつ短期間で宇宙実証試験を実施するために、平成 22 年度より 100kg 級の実証衛星 3 号機の検討を開始した。実証衛星 3 号機の概要を表 I-3-1-2-12 に示す。

表 I-3-1-2-12 実証衛星 3 号機の概要

項 目	諸 元
ミッション	光学センサ（TBD）
民生部品の適用	最新の民生部品を採用 -機器の小型化、高機能化 -輸出入管理（ITAR規制等）の影響回避
実験装置等	トランスポンダ（STRX） 電力制御器（PCU） グリーンプロペラント推進系（GPRCS） 半導体増幅器（SSPA） 環境計測装置
適合ロケット	H-IIA サブペイロード，イプシロン，ASAP-5， Falcon 等の主要ロケットに適合
軌道	低高度周回軌道（高度 500～700km）
地上局	追跡管制・データ受信局 （国内）
設計寿命	1 年以上 （SERVIS-3 ミッション要求） 5 年以上 （標準バスとしての設計目標）
質量	打上質量： 170kg （内、推薬 4kg） ペイロード搭載能力： 最大 80kg
電力	発生電力： 370 W （1 年後） ペイロード供給電力： 最大 80W

実証衛星 3 号機においては、特に小型衛星バスの競争力強化を図るために、バスの拡張性と操作性の向上とペイロードへのリソース増大を目指して、システム統合化の検討を行った。これを図 I-3-1-2-7 に示す。

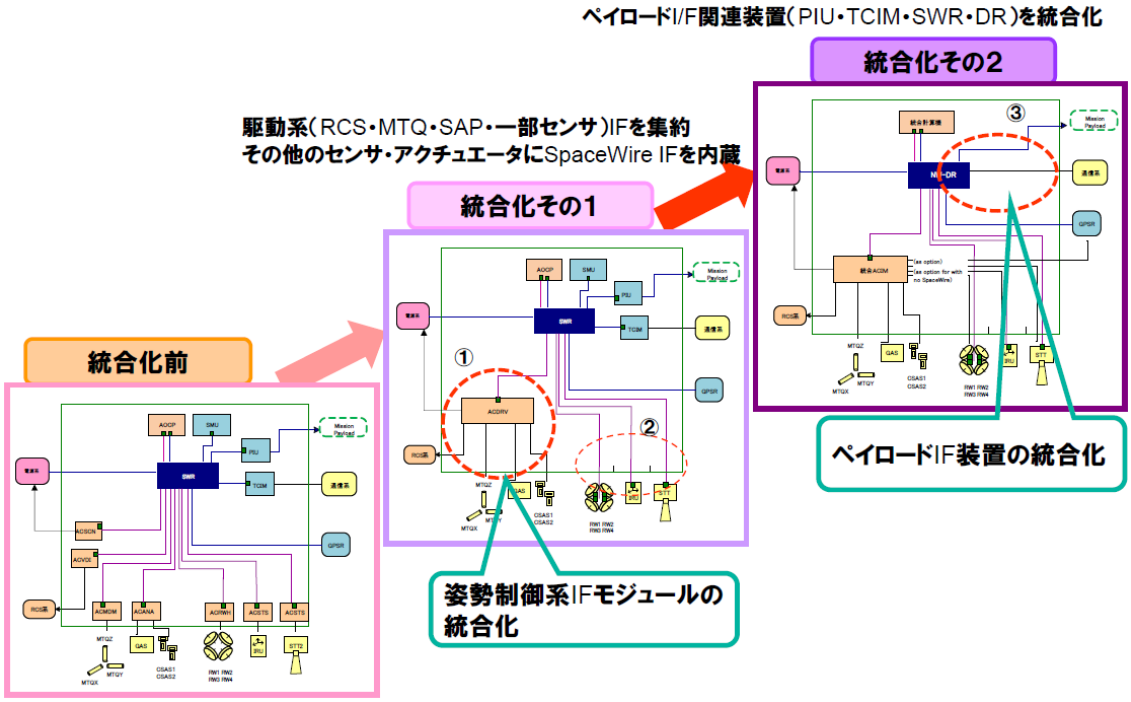


図 I-3-1-2-7　システム統合化の流れ

システム統合化の検討は下記のア、イを対象として実施した。

ア. 姿勢制御系インタフェース統合化

i) 姿勢制御系インタフェースモジュールの統合化

磁気トルカ(MTQ)駆動インタフェース、推進系(RCS)駆動インタフェース、アナログインタフェース、及び太陽電池パドル駆動インタフェースの各モジュールを統合した回路(ACDRV; Attitude Control DRiVer)を開発することにより、機器数を約1／4、質量を約2／3、電力を約1／4、搭載面積を1／2と、大幅にリソースを削減できることを確認した。

ii) 姿勢制御系機器へのスペースワイヤ(SpW)インタフェース回路内蔵化

姿勢制御系機器であるリアクションホイール(RW)、慣性基準装置(IRU)、及び恒星センサ(STT)に、各々SpW インタフェース回路を内蔵するための要素試作を行い、実現の方策を確認した。実現すれば該当インタフェースモジュールの削減が可能となる。

イ. ペイロードインタフェース統合化

ペイロードインタフェース技術及び標準試験装置技術の世界市場を調査し、その結果統合化ペイロードインタフェース装置(NW-DR; NetWork Data Recorder)に対する開発項目を識別した。

また、NW-DR によりペイロードインタフェースユニット（PIU）、通信インタフェースモジュール(TCIM)、スペースワイヤルータ(SWR)、データレコーダ(DR)等を統合化し、大幅な小型軽量省電力化が実現可能であることを確認した。

（3）ガイドライン策定

a) 民生部品・民生技術選定評価ガイドライン

本研究開発における知的基盤の構築の一環をなす民生部品・民生技術選定評価ガイドラインは、民生部品・民生技術を宇宙等極限環境下で使用に耐えうるか否かを評価するための試験項目及び試験条件、使用に当たっての配慮事項、注意事項等をまとめたものである。

本ガイドラインは、民生部品・民生技術の地上模擬試験結果と宇宙実証試験結果を分析し、耐環境性を評価する地上試験として最適で、かつ必要最小限な試験項目と試験条件を導き出すものである。また、民生部品を宇宙機器として使用する場合に必要となる信頼度計算に用いる部品単体の信頼度に対する考え方を整理したものである。本ガイドラインは、宇宙用機器開発企業が有効且つ短時間で、また宇宙実証することなく民生部品・民生技術の選定評価を行うことを可能とすることを目的とした。

本ガイドラインは、宇宙実証試験等の進捗とともに内容の充実を図り、今回の中間評価時点では実証衛星 2 号機の軌道上実証試験結果の比較検討結果まで反映した第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインを構築し、目標を達成できた。その目次を表 I-3-1-2-13 に示す。

表 I-3-1-2-13　民生部品・民生技術選定評価ガイドラインの目次

1. 総則
2. 適用文書・関連文書
3. 基本方針
4. 民生部品選定基準
  4.1 民生部品の定義
  4.2 環境条件
  4.3 部品選定基準
5. 評価試験
  5.1 スクリーニング項目／試験条件設定
  5.2 品質確認試験項目／試験条件設定
  5.3 放射線耐性試験
    5.3.1 トータルドーズ試験方法
    5.3.2 シングルイベント耐性
    5.3.3 その他の放射線耐性特性
6. 信頼性保証
7. 採用に当たっての留意点・制約事項
8. 宇宙実証結果との比較方法
9. 宇宙実証結果から得られた放射線試験に対する留意事項

b) 民生部品・民生技術適用設計ガイドライン

本研究開発における知的基盤の構築の一環をなす民生部品・民生技術適用設計ガイドラインは、民生部品・民生技術を宇宙等極限環境で使用される機器設計に有効に適用するための配慮事項、注意事項等をまとめたものである。

本ガイドラインは、本研究開発終了後に各企業において民生部品・民生技術を採用した宇宙用機器を設計する際の手引きとなるもので、実験装置の開発、宇宙実証試験、地上模擬試験等で得られた民生部品・民生技術を宇宙機器に適用するための設計的ノウハウをまとめた。本ガイドラインに従って機器設計を実施すれば、見落としなく適切に宇宙用機器の設計ができることを狙いとしている。なお、付録として実証衛星 1、2 号機に搭載した機器実験装置毎に、民生部品・民生技術の適用事例としてまとめた。

本ガイドラインは、宇宙実証試験等の進捗とともに内容の充実を図っており、今回の中間評価時点では実証衛星 2 号機までの宇宙実証試験結果の比較検討結果を反映した第二次の民生部品･民生技術適用設計ガイドラインを構築し、目標を達成できた。その目次を表 I-3-1-2-14 に示す。

表 I-3-1-2-14　民生部品・民生技術適用設計ガイドラインの目次

1. 目的
2. 適用・関連文書等
3. 定義
4. 設計基準
4.1 全般
4.2 機器総合設計
4.3 電気設計
4.4 機構設計
4.5 熱設計
4.6 EMC設計
4.7 耐放射線設計
4.8 インタフェース設計
4.9 信頼性設計
4.10 安全性設計
4.11 実装設計
4.12 部品・材料選定基準
付録：適用設計例

②極限環境で使用する機器等の開発支援技術

本研究開発項目は、実証衛星の開発に参画する関係者間のタイムリーで齟齬のない情報伝達、インタフェース設計情報交換及び機器・衛星等の3次元CADモデルを使った3次元設計、仮想環境を用いた解析を効果的かつ効率的に行なうためのシステムを構築するものである。本システムは設計情報交換システム及び設計情報統合システムから成る。これを図 I-3-1-2-8 に示す。

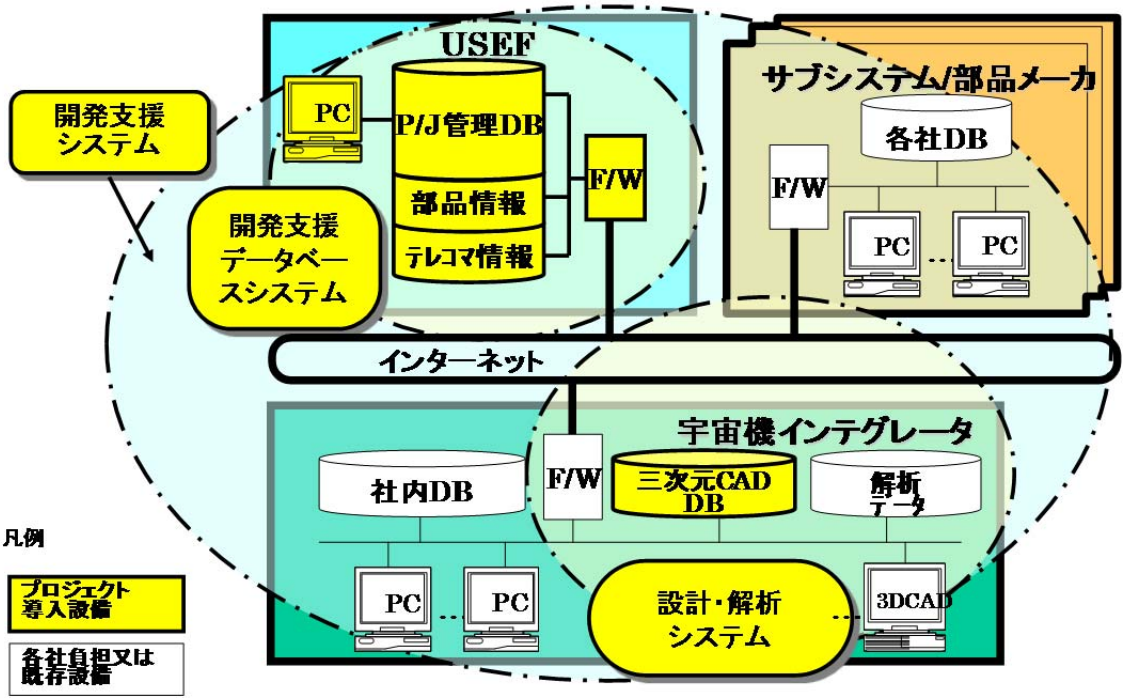


図 I-3-1-2-8　開発支援システムの構成

この開発支援技術は平成 12 年までに構築を完了し、研究開発項目①民生部品・民生技術の極限環境適用技術の研究開発に適用した。

（1）設計情報交換技術

実証衛星及び実験装置の開発業務並びに、プロジェクト管理業務を支援するためのシステムであり、衛星及び機器の開発仕様情報とプロジェクト管理情報をデータベースとし、ネットワークを介してそれらの情報の登録・保管・検索・提供を行った。

（2）設計情報統合技術

実証衛星を構成するシステム、サブシステム、実験装置の設計業務を担当各社間で効率的且つ正確に行うためのシステムであり、衛星の設計情報をデータベースとし、ネットワークを介して、それらの情報の登録、保管、検索、提供を行った。

（1）、（2）により実証衛星 1 号機及び 2 号機の開発において、設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化が図れた。これらの効果を実証衛星等の全体開発費用に対する改善時間を費用に換算して定量的に評価した結果、有意な効果を確認し中間目標を達成した。

なお、本研究開発に着手してから現在まで十余年が経過しており、その間に衛星の開発環境とりわけネットワーク環境は長足の進歩を遂げている。その中にあって本

研究開発で開発されたシステムの枠組みや技術は既に実用・標準となっており、当初の目標方向が正しいものであったことを裏付けている。

Ⅰ－３－１－３　特許出願状況等

表 I-3-1-3-1 に特許出願状況を示す。また、表 I-3-1-3-2 に学会発表・論文等の状況を示す。

なお、学会発表・論文等の状況については、前回の中間評価以降（平成 23 年 4 月以降）を対象とし、平成 27 年 3 月までを示している。

表 I-3-1-3-1　特許出願状況

機器名	特許名称	出願国	出願日	出願番号	状態・登録番号	登録日
LIB	バッテリ蓄電装置	日本	20001215	2000-350378	登録済み	
SIS	恒星センサ	日本	20020202	2001-027041	3733293	2005.10.21
SIS	人工衛星の姿勢決定装置	日本	20020227	2001-052803	3871891	2006.10.27
VTS	液体用タンク	日本	20010518	P2001-149482		
SIS	恒星センサ	日本	20020205	2002-028318		
LIB	バッテリ蓄電装置	米国	20020416	6373224	登録済み	
LIB	蓄電装置	日本	20020510	2002-135988		
LIB	バッテリセル用セルシャント回路	米国	20020514	6388424	登録済み	
LIB	バッテリ充電器	米国	20020604	6400124		
LIB	バッテリセル用セルシャント回路	日本	20020628	2002-186191	3828354	2006.7.14
LIB	バッテリ充電器	日本	20020628	2002-186192		
LIB	低軌道人工衛星用リチウムイオンバッテリ装置	日本	20020628	2002-186196	3767378	2006.2.10
SIS	恒星センサ	日本	20020619	2002-177985	3804579	2006.5.15
LIB	バッテリーモジュール	日本	20040513	2004-139934	3888283	2006.12.08
LIB	バッテリ装置	日本	20050113	2005-012958	4291629	2009.4.10
PPRTU	IEEE1394インタフェース回路	日本	20141104	2014-224049		
CRAFT	ﾃﾚﾒﾄﾘﾃﾞｰﾀ監視修復装置及び監視修復方法	日本	20141225	2014-262167		

［注］ LIB：リチウムイオンバッテリシステム
SIS：スターセンサ統合型衛星制御装置
VTS：ベーン式推薬タンクシステム
PPRTU：リモートターミナル実験装置
CRAFT：自律フォールトトレラント計算機

表 I-3-1-3-2 学会発表・論文等の状況 （1／2）

No.	年月日	論文名	発表先	著者（組織）	口頭	論文
1	平成23年6月7日	The Summary of the SERVIS Project	28th International Symposium on Space Technology and Science (28th ISTS)	USEF	○	○
2	平成23年6月7日	Spacecraft Attitude and Body Rate Estimation with Four Star Sensor Heads: Concepts and On-Orbit Results	28th International Symposium on Space Technology and Science (28th ISTS)	MELCO, USEF	○	○
3	平成23年10月4日	The SERVIS Project	62nd International Astronautical Congress	USEF	○	○
4	平成23年12月1日	SERVISプロジェクト概要	第55回宇科連	USEF	○	○
5	平成23年12月1日	SERVIS運用管制システムと軌道上運用	第55回宇科連	USEF	○	○
6	平成23年12月1日	SERVIS宇宙機システム評価と低コスト化バス構築に向けて	第55回宇科連	MELCO, USEF	○	○
7	平成23年12月1日	SERVIS-2環境計測装置(EMSS)による宇宙環境計測結果	第55回宇科連	MPC, USEF	○	○
8	平成23年12月1日	リチウムイオン電池実験装置(LIBA)の宇宙実証結果	第55回宇科連	IA, USEF	○	○
9	平成23年12月1日	高ｱｼｭｱﾗﾝｽﾃﾞｰﾀﾏﾈｰｼﾞﾒﾝﾄ装置(ADMS)の宇宙実証結果	第55回宇科連	IA, USEF	○	○
10	平成23年12月1日	自律フォールトトレラント計算機(CRAFT)の宇宙実証結果	第55回宇科連	NTSpace, USEF	○	○
11	平成23年12月1日	リモートターミナル実験装置（PPRTU)の宇宙実証結果	第55回宇科連	NTSpace, USEF	○	○
12	平成23年12月1日	高性能データ圧縮装置(HPDC)の宇宙実証結果	第55回宇科連	MHI, USEF	○	○
13	平成23年12月1日	先進測位実験装置(APE)の宇宙実証結果	第55回宇科連	MELCO, USEF	○	○
14	平成23年12月1日	先進衛星構体実験装置(ASM)の宇宙実証結果	第55回宇科連	MELCO, USEF	○	○
15	平成23年12月1日	RF-MEMS 実験装置(MEMS)の宇宙実証結果	第55回宇科連	MELCO, USEF	○	○
16	平成23年12月1日	磁気軸受ホイール実験装置(MBW)の宇宙実証結果	第55回宇科連	MPC, USEF	○	○
17	平成23年12月1日	SERVIS衛星における運用概要	第55回宇科連	USEF	○	○
18	平成23年11月30日	実利用向け100kg級標準バスの開発	第55回宇科連	NEC, USEF	○	○
19	平成23年12月16日	衛星用複合材料の研究開発 (ASM)	第27回複合材料研究センター発表会	MELCO	○	
20	平成24年2月3-8日	Spacecraft Attitude and Body Rate Estimation with Multi-Head Star Sensor: Concept, Design and On-	35th Annual AAS Guidance & Control Conference	MELCO, USEF	○（ポスター）	○

表 I-3-1-3-2 学会発表・論文等の状況 （2／2）

No.	年月日	論文名	発表先	著者（組織）	口頭	論文
21	平成24年4月12日	GPS信号受信強度を用いた衛星の姿勢推定手法に関する研究	日本航空宇宙学会第43期年会講演会	東大	○	○
22	平成24年10月4日	The Study on Satellite Attitude Determination Method Using GPS Signal Strength	63rd International Astronautical Congress	東大	○	○
23	平成24年10月4日	Development of Operational 100kg-class Standard Spacecraft Bus	63rd International Astronautical Congress	NEC, J-spacesystems	○	○
24	平成24年11月20日	SERVISプロジェクトにおける民生部品・技術の宇宙適用	第56回宇科連	J-spacesystems	○	○
25	平成24年11月20日	SERVIS-3 SpW I/F内蔵化の要素試作試験結果	第56回宇科連	MPC, J-spacesystems	○	○
26	平成24年11月22日	国際競争力を有する実利用向け100kg級標準バスの検討	第56回宇科連	NEC, J-spacesystems	○	○
27	平成25年9月25日	Development of Green Propellant Reaction Control System (GPRCS) for SERVIS-3 Project	64th International Astronautical Congress	MHI, JAXA, J-spacesystems	○	○
28	平成25年10月9日	次世代高性能低毒性推進系の開発状況	第57回宇科連	JAXA, MHI, J-spacesystems	○	○
29	平成26年10月3日	Integrated and Standardized System Architecture for Small Standard Satellite Bus	65th International Astronautical Congress	NEC, J-spacesystems	○	○
30	平成26年11月12日	小型衛星システムアーキテクチャの統合化と標準化の検討	第58回宇科連	NEC, J-spacesystems	○	○

Ⅰ－３－２　目標の達成度

表 I-3-2-1 に、各々の目標に対する成果・達成度を示す。今回の中間評価ではいずれの項目も目標を達成し、事業終了時の目標を達成できる見通しを得た。

表 I-3-2-1　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 （中間評価時点）	成果 （中間評価時点）	達成度
①民生部品・民生技術の極限環境適用技術	衛星製造等に転用可能性を有する民生部品・民生技術に対し宇宙等極限環境を模擬した地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品・民生技術データベースを構築する。ここにデータベースへの累積登録品種数は200品種以上とする。またデータベース活用状況をフォローする。	地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品・民生技術データベースを構築した。ここにデータベースへの累積登録品種数は 236 品種となった。またデータベース活用状況を調査し利用促進を検討した。	達成
	民生部品・民生技術データベース及びそれに基づき選定した民生部品・民生技術の実証衛星 1 号機及び 2 号機の宇宙実証試験のデータ等に基づき、第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと適用設計ガイドラインを構築する。ここに実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 30 品種以上とする。またガイドライン類活用状況をフォローする。	第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと適用設計ガイドラインを構築した。ここに実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 74 品種となった。またガイドライン類の活用状況を調査し利用促進を検討した。	達成
	最新の民生部品・民生技術を適用した実験装置等の開発を行い、実証衛星 3 号機のシステム統合化検討を行う。	実験装置等の開発を行い、実証衛星 3 号機のシステム統合化方針を明確化した。	達成
②極限環境で使用する機器等の開発支援技術	実証衛星開発への適用結果に基づき、極限環境で使用する機器等の設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価する。	設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価し、有意な効果を確認した。	達成

Ⅰ－４　事業化、波及効果について

Ⅰ－４－１　事業化の見通し

（1）知的基盤の活用

本研究開発の開始以来、これまでに 236 品種の民生部品・民生技術を試験し、極限環境における機能についてのデータを「民生部品・民生技術データベース」として蓄積した。また、これらの部品、技術を使用した衛星搭載機器を実証衛星 1 号機で9機器、更に 2 号機でも9機器を開発して宇宙実証に供してきた。これらの成果を踏まえて民生部品・民生技術を衛星製造等に適用するための「民生部品・民生技術選定評価ガイドライン」ならびに「民生部品・民生技術適用設計ガイドライン」は第二次案まで構築できた。

これらの知的基盤はいずれも我が国としては初めての成果である。これは我が国宇宙産業界で早くから期待されていたものであり、民生部品・民生技術を宇宙に積極的に利用して行くために必須のものである。更に、本知的基盤の確立により、衛星および搭載機器の低コスト化、短納期化、高機能化、小型軽量化が進み、我が国の宇宙産業界の国際競争力強化にも大いに役立つものである。

民生部品・民生技術選定評価ガイドライン、民生部品・民生技術適用設計ガイドラインは宇宙システム開発利用推進機構機構（J-spacesystems）ホームページに配布申請要領を公開しており、申請を受けて機構内で可否を審査した上で配布を実施している。第一次の公開以降これまでに計41件配布され利用されている。配布状況を図 I-4-1-1 に示す。

これによると、既存の宇宙関連企業のみならず、新規参入企業にも活用されており、本ガイドライン類が宇宙産業の裾野を広げることに貢献していることを示す。これらの活用状況を適宜調査し、利用促進の努力を継続している。

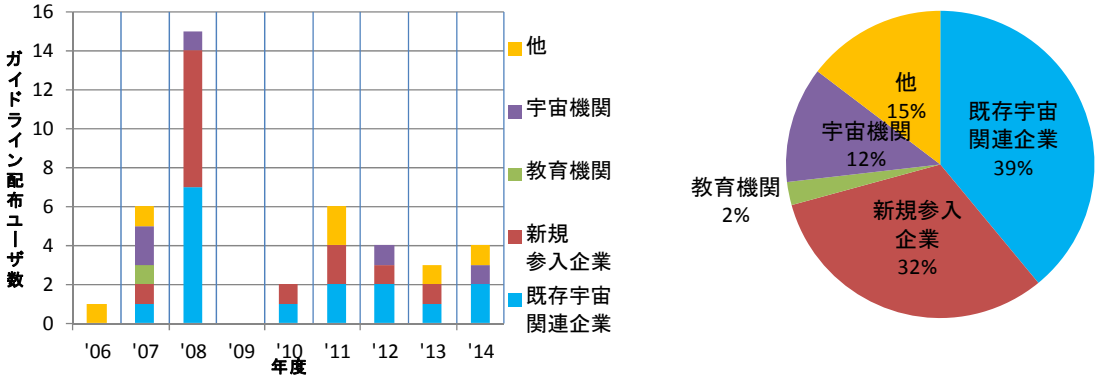


図 I-4-1-1　ガイドライン類配布数の年度推移と配布先区分

民生部品、民生技術データベースも、ガイドライン類と同様 J-spacesystems ホームページに配布申請要領を公開しており、申請があった時点に機構内で可否を審査した上で配布を実施している。これまでに19件配布され利用されている。配布状況を

図 I-4-1-2 に示す。データベースも既存の宇宙関連企業のみならず新規参入企業に活用されており、宇宙産業の裾野を広げることに貢献している。これらの活用状況を適宜調査し、利用促進の努力を継続している。

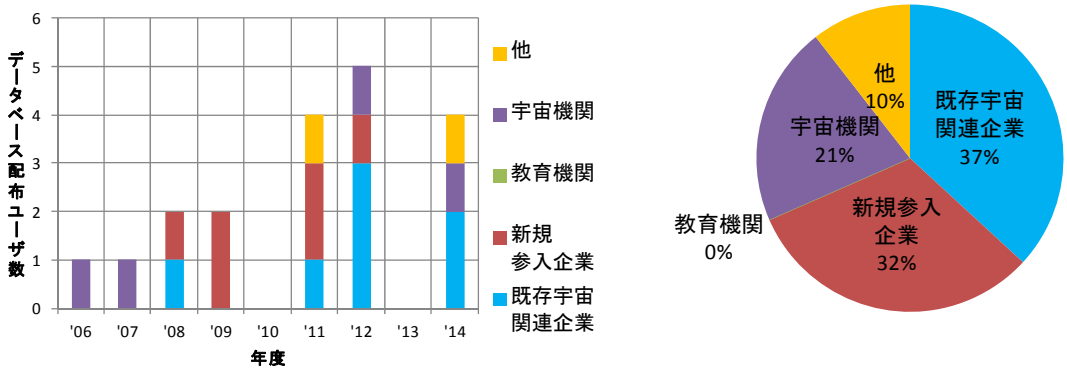


図 I-4-1-2　データベース配布数の年度推移と配布先区分

以下にこれらの活用の具体例を示す。

・九州工業大学：小型衛星用部品の試験技術開発、小型衛星開発
・JAXA（複数組織）：衛星への民生部品適用、JAXA 内委員会での参考等
・MHI（複数組織）：新型基幹ロケット開発での民生部品適用等
・AES：小型衛星設計における部品選定
・キヤノン電子：小型衛星の民生部品使用による低コスト化推進

(2)実証衛星に搭載された機器実験装置の売り込み

実証衛星 1、2 号機に搭載する実験装置を選定する際の判断基準の1つとして、開発担当企業の戦略機器として単独でも販売可能な機器とし、計 18 機器を選定した。

現在、2機の実証衛星による軌道上実績をベースに、開発担当各企業により海外の衛星メーカ等に販売活動を展開している。以下にその例を示す。

・リチウムイオンバッテリ（LIB）：　世界でのシェアの約40%を確保
・次世代パドル駆動機構（APDM）：　JAXA 科学衛星に採用
・統合電力制御装置（PCDS）：　ASNARO 等の電源系に採用済
・オンボードコンピュータ（OBC）：　科学衛星搭載機器の OBC として事業化
・リモートターミナル実験装置（PPRTU）：　スペースワイヤの前身の方式を確立

(3)低コスト衛星バス構築と売り込み

本研究開発により、衛星バスの低コスト化を実現する方策が得られた。

本研究開発においては、まず実証衛星1号機のバス部に、先行する次世代型無人宇宙実験システム（USERS）のサービスモジュール（SEM）を適用した。そして低コストで高機能な実験装置を搭載して宇宙実証を行い、その成果を反映して 2 号機のバス

機器として採用した。次に、実証衛星 2 号機に搭載した実験装置を将来の衛星バスに適用して行くことにより更にコストが低減できる。これらの民生部品・民生技術を適用した低コスト化に加え、本研究開発において開発した開発支援システムの適用等により、実証衛星の製造費、資材費、管理費も低減できた。

これらの成果により、実証衛星 1 号機及び 2 号機と同規模（500～1500kg）の将来衛星バスのリカリングコストは半減できる見通しが得られた。以上により、衛星バスの世界市場での売り込みも期待できる。

（4）国際標準化

リチウムイオンバッテリ（LIB）は国際標準（ISO）化作業を進めており、平成 22 年度に日本が ISO に提案し新規プロジェクト化されたものである。現在、ISO/TC20/SC14 のワーキンググループ(WG)1 において日本がリードして国際審議を継続している。

本標準では宇宙用 LIB について性能、安全、及びロジスティクスを規定し、機器産業が活性化できることを目指している。また、この標準化によって我が国のメーカが世界市場において競争力が強化できることを図る。

（5）開発支援技術

本研究開発にて開発した開発支援技術は、我が国の主要な宇宙関連企業間において、インタフェース部分の共通化を図り、3 次元 CAD ソフトもデファクトスタンダードとなりつつあるソフトに統一し、インターネットを使用した電子的情報交換システムを確立した。この開発支援システムを実証衛星等の開発に適用することにより、効率的な開発が行えることが確認できた。

本システムは、他の衛星機器開発への適用が見込まれ、我が国の宇宙産業界の国際競争力強化につながることが期待できる。

<u>I－4－2　波及効果</u>

放射線耐性を持つ民生部品・民生技術のデータベースおよびそれを選定・利用するためのガイドラインは、宇宙関連機器への適用にとどまらず石油掘削装置、原子力関連設備等への波及効果が期待できるため、これら我が国関連企業等へのデータベース等の提示も行っている。

当初想定していなかった波及効果として、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災とその後の大津波により福島第一原子力発電所が被災したことへの対応がある。人が近づけない放射線量の中で、発電所内で稼働するロボットを製作する際の民生部品選定において、本研究開発で構築した民生部品・民生技術データベース、ガイドライン等を適用できるか検討を行った。

その結果、現状設計のロボット等に対してはデータベースが比較的古くなっている

ことからそのまま使用できる部品は少ないが、本研究開発で作成した放射線耐性予測関係式により目安を得ることは可能である。また、再設計を行う場合は、民生部品・民生技術選定評価ガイドラインによる部品の選定、また民生部品評価試験条件書による試験条件の設定を行うことができる。更に、民生部品・民生技術適用設計ガイドラインにより回路設計等を行うことが可能である。

Ⅰ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ⅰ－５－１　研究開発計画

研究開発計画開始の平成 11 年度から平成 26 年度までの計画と実績を図 I-5-1-1 に示す。

①民生部品・民生技術の極限環境適用技術の研究開発項目の構成は次の通り。

（1）地上模擬試験

（2）宇宙実証試験

a)実験装置（各々の実証衛星に搭載）

b)実証衛星（1 号機、2 号機、3 号機）

（3）ガイドライン策定

・民生部品・民生技術データベース

・民生部品・民生技術選定評価ガイドライン

・民生部品・民生技術適用設計ガイドライン

図 I-5-1-1 に示されるように、（1）地上模擬試験と（3）ガイドライン策定は平成 11 年度より開始した。データベースは地上模擬試験の結果を順次反映して蓄積してきた。また、（2）宇宙実証試験での成果を反映してガイドラインを構築してきた。平成 19 年に第一次のデータベース、ガイドラインを構築後、平成 24 年に第二次のデータベース、ガイドラインを構築している。

（2）宇宙実証試験は大きく a)実証衛星と b)実験装置から成る。実証衛星 1、2 号機搭載の実験装置は、各々の実証衛星に搭載し宇宙実証することから並行して開発されたことが図に示される。実証衛星 1 号機はほぼ当初計画通りに打上げられ実証試験が行われたが、2 号機の打上げ機が変更されたことで遅延し、更にロケット側の都合で打上げが延期となったことから、計画されていた実証時期が当初計画から遅れることとなった。しかし、宇宙実証自体は順調に進められ、所期の成果は得られた。実証衛星 3 号機はシステム統合化を中心に設計が進められ、実験装置は独立に開発が進められている。

②極限環境で使用する機器等の開発支援技術は図 I-5-1-1 の最後の段に示されるが、平成 11 年度より開発支援システムとして開発され、計画通り平成 12 年度に完了した。その後は①の開発・運用に継続して適用された。

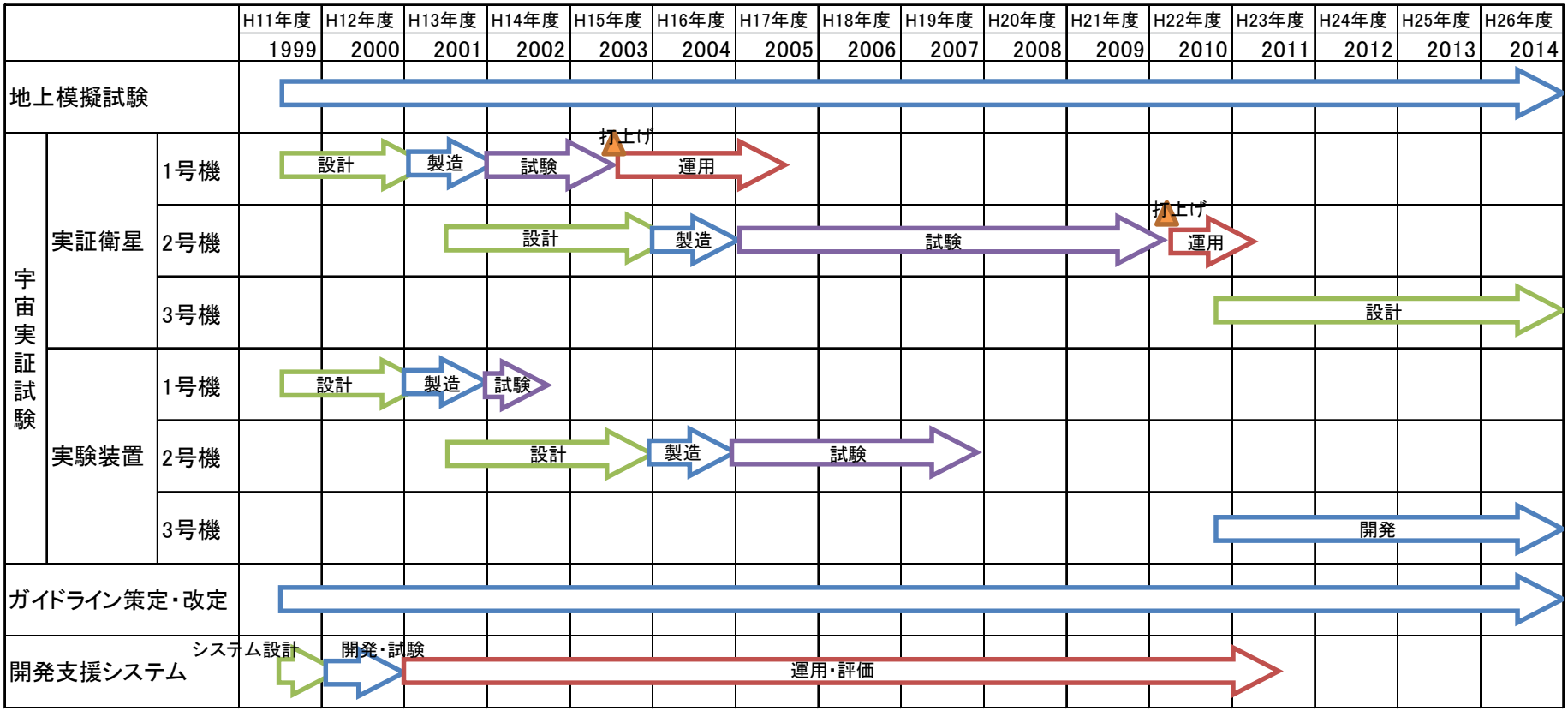


図 I-5-1-1　研究開発計画

Ⅰ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は NEDO が基本計画を策定して平成 11 年度に公募を行い、選定審査手続きを経て委託先として旧（財）無人宇宙実験システム研究開発機構（USEF）が選定された。NEDO は USEF の協力を得て本研究開発の運営管理を行ない、USEF は本研究開発の研究主体として目標に向かって我が国宇宙産業界を束ね、リードする形で研究開発の推進にあたった。その際、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、早稲田大学理工学総合研究センター、及び九州大学大学院総合理工学研究院と共同実施することにより、研究開発の効率的推進を図った。

実証衛星 3 号機等の開発は、新たに平成 22 年度に NEDO により公募が行われ、選定審査手続きを経て USEF 及び日本電気（株）（NEC）が共同実施者として選定され研究開発を開始した。なお、USEF は平成 24 年 3 月 30 日より(財)宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)に統合され、更に平成 25 年 4 月 1 日より一般財団法人に移行した。本研究開発においても J-spacesystems が運営管理を行い事業を推進した。その際、宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、及び九州工業大学先端機能システム工学研究系と共同実施することにより、研究開発の効率的推進を図った。

本研究開発の全体の実施体制を図 I-5-2-1a（実証衛星 1 号機及び 2 号機の開発等）及び図 I-5-2-1b（実証衛星 3 号機等の開発）に示す。

委託先である J-spacesystems の実施体制を図 I-5-2-2 に、また NEC の実施体制を図 I-5-2-3 に示す。更に、J-spacesystems の共同実施先の実施体制を図 I-5-2-4a（実証衛星 1 号機及び 2 号機の開発等）及び図 I-5-2-4b（実証衛星 3 号機等の開発）に示す。

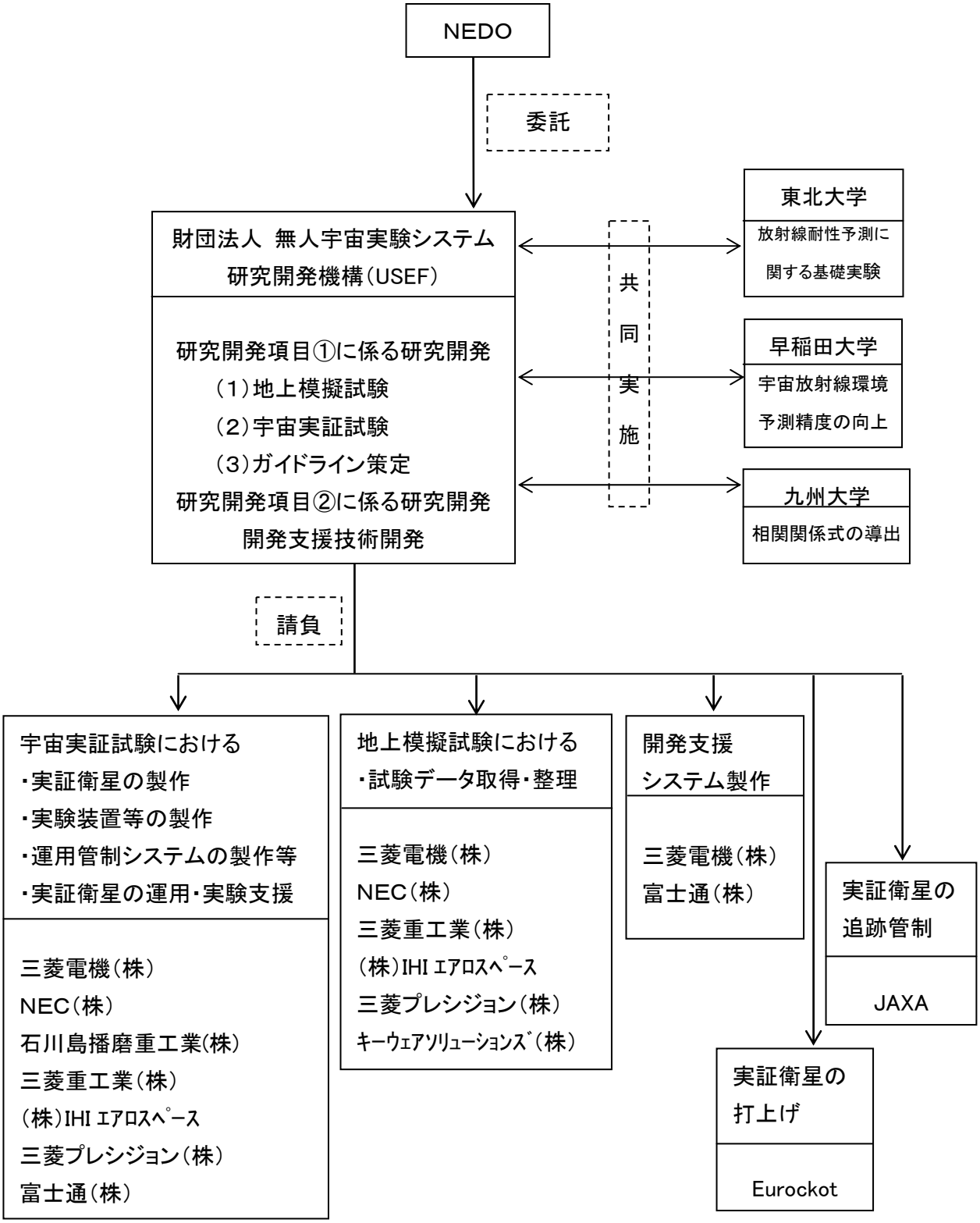


図 I-5-2-1a 本研究開発の実施体制 (実証衛星 1 号機及び 2 号機の開発等)

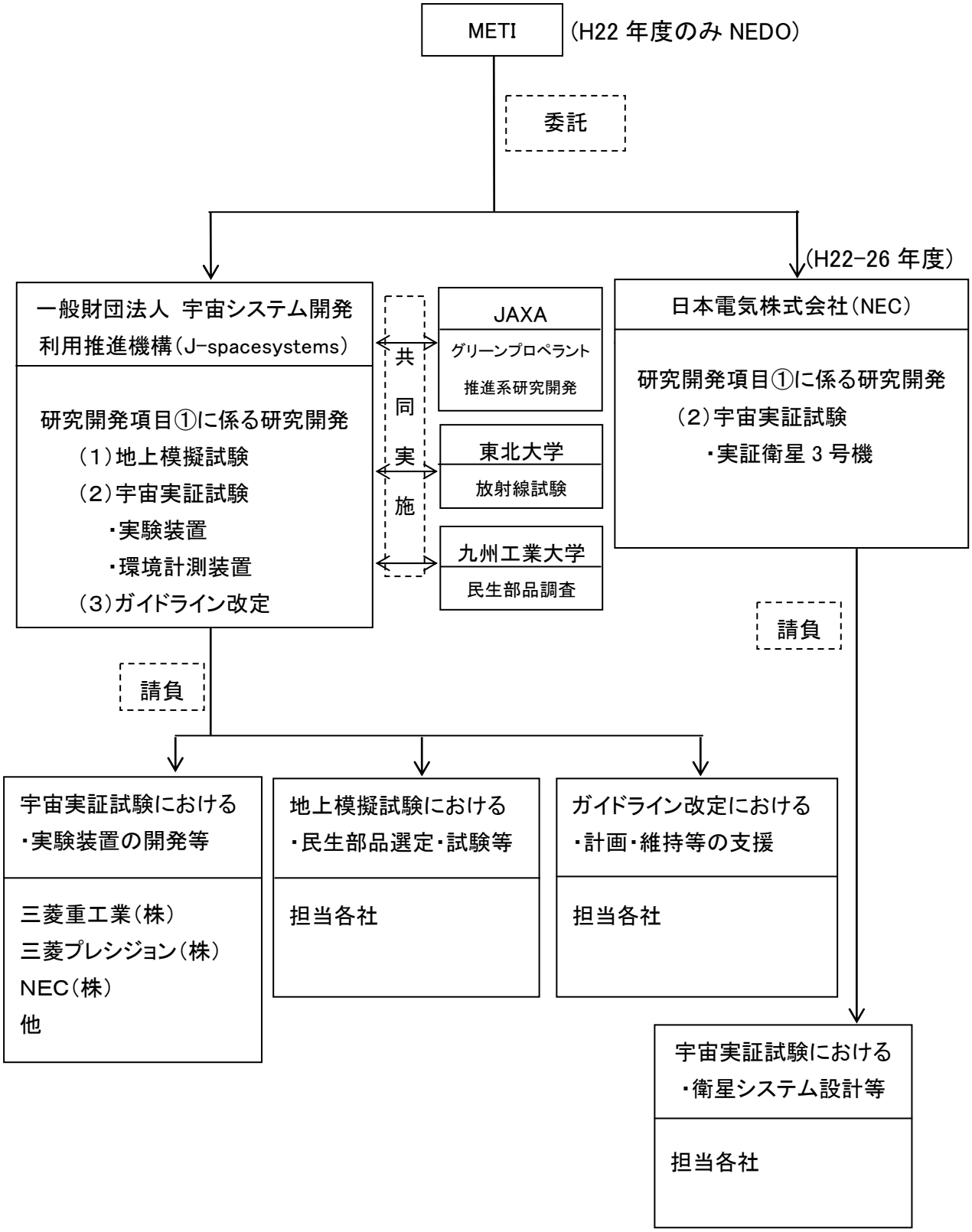


図 I-5-2-1b 本研究開発の実施体制 (実証衛星 3 号機等の開発)

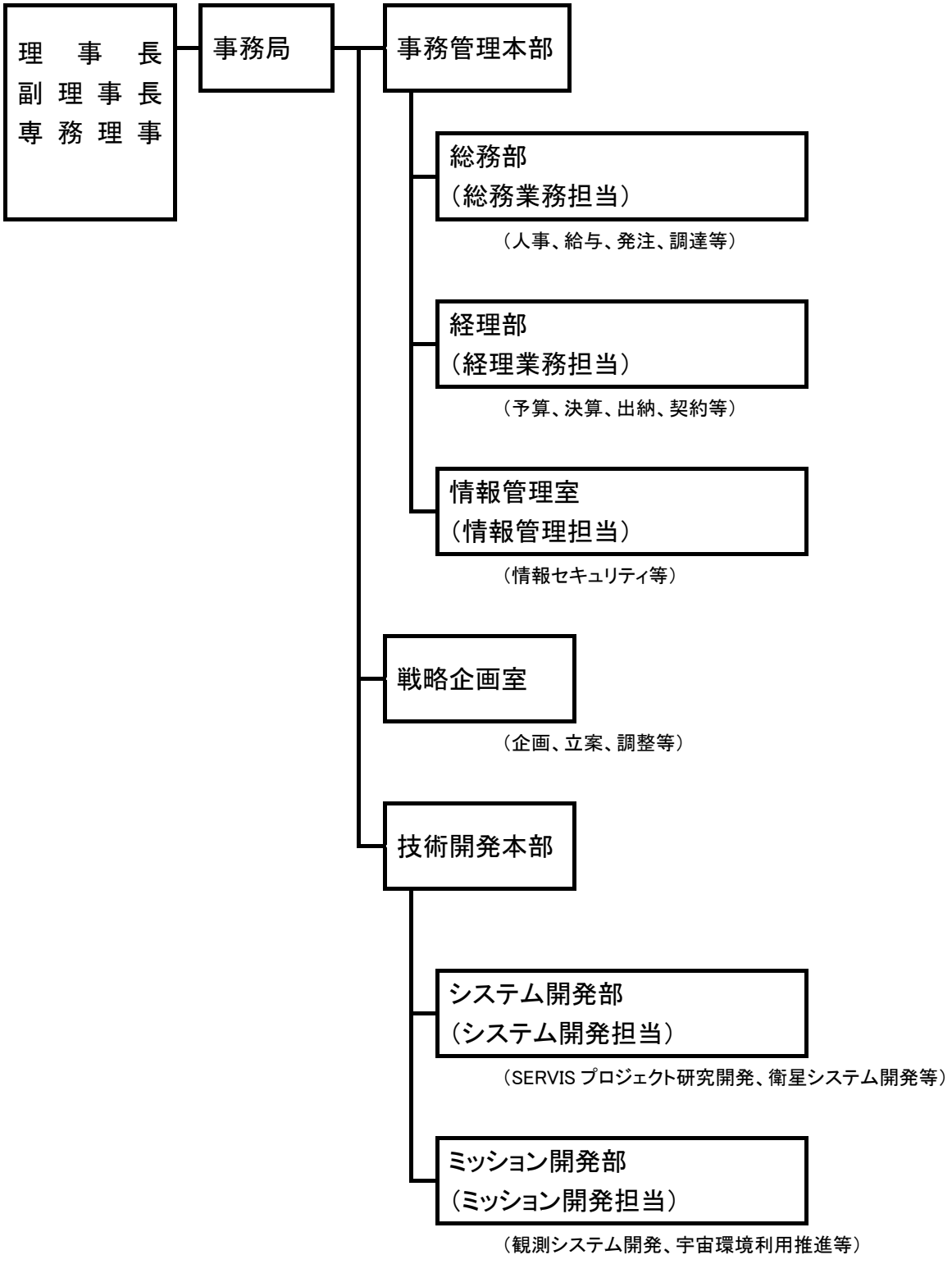


図 I-5-2-2　J-spacesystems 実施体制

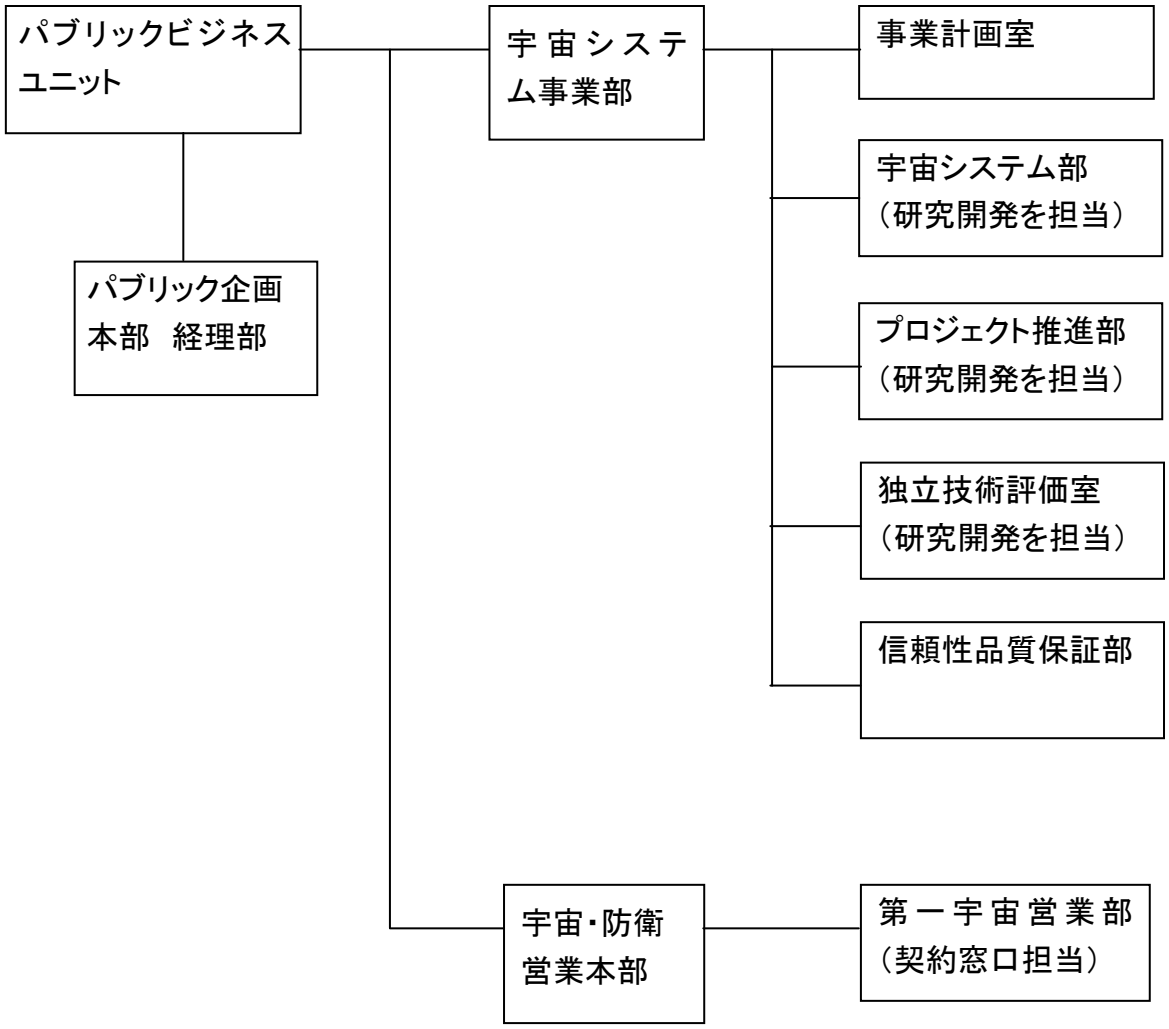
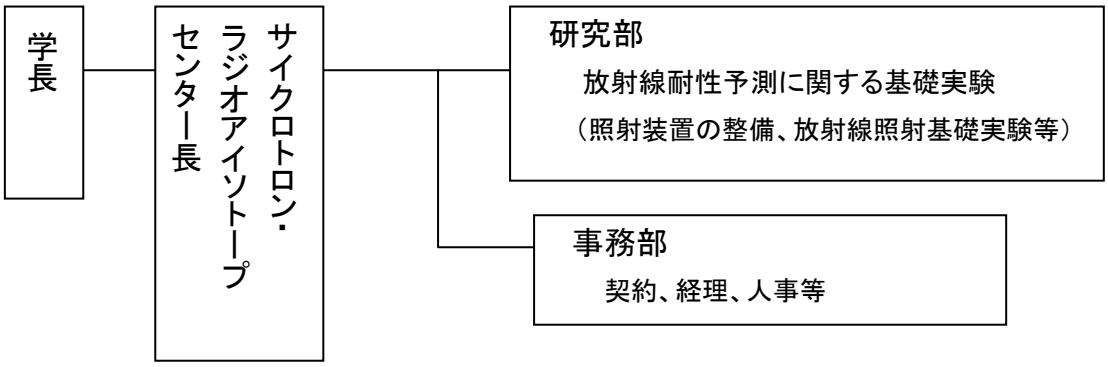
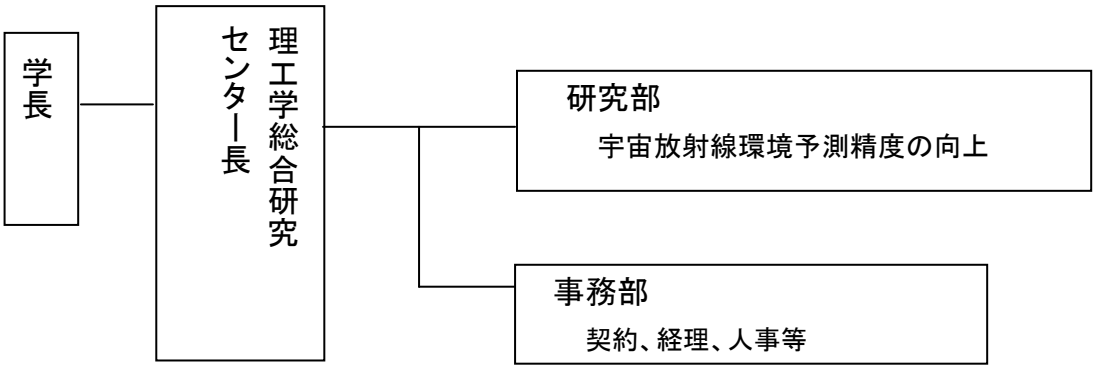


図 I-5-2-3　NEC 実施体制

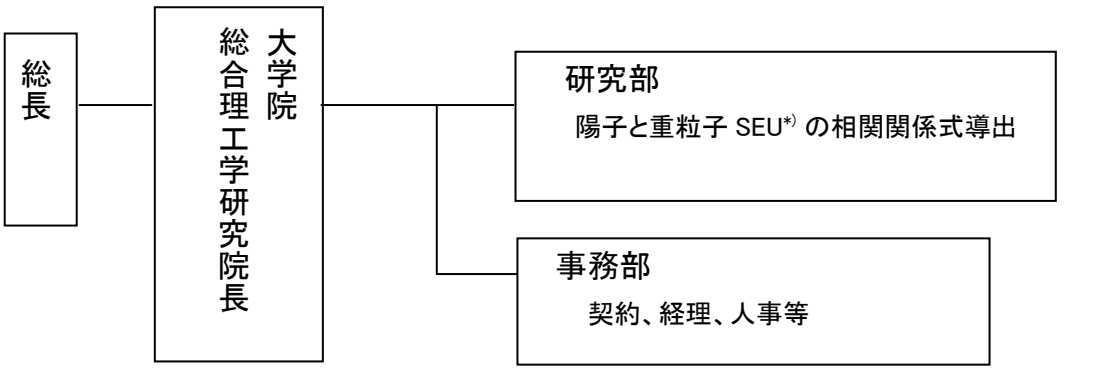
東北大学



早稲田大学



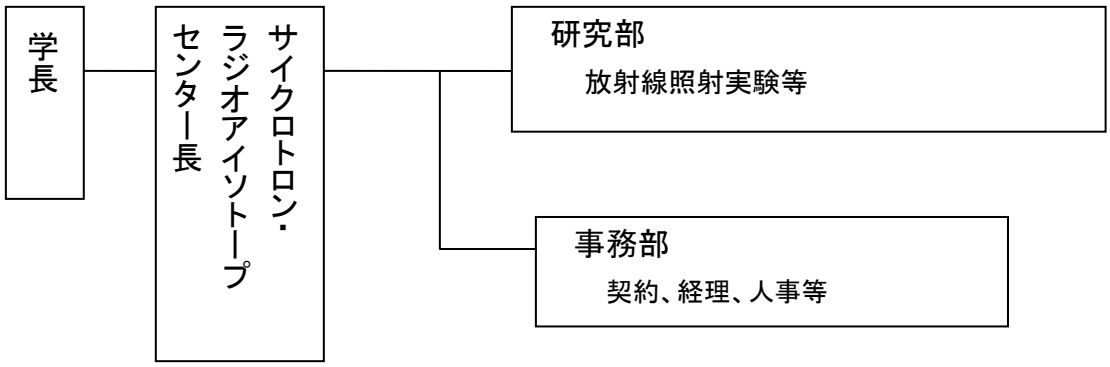
九州大学



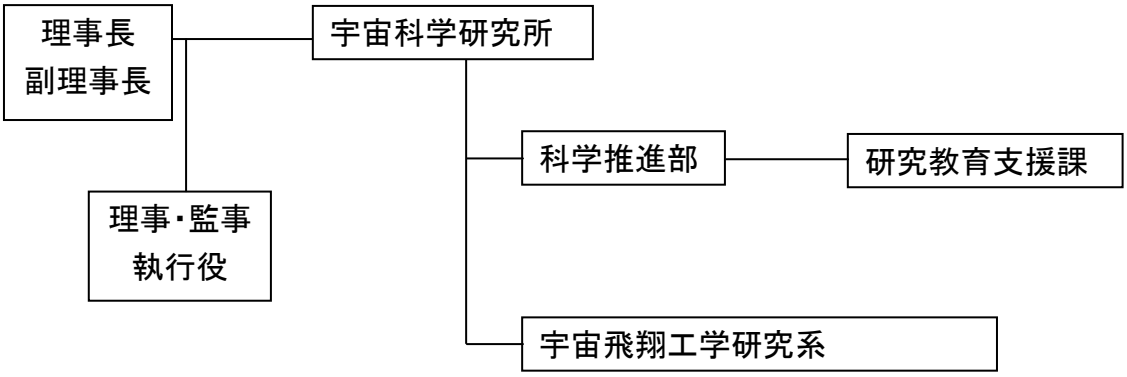
［注］ *) SEU：Single Event Upset

図 I-5-2-4a 共同実施先の実施体制(実証衛星 1 号機及び 2 号機の開発等)

東北大学



JAXA



九州工業大学

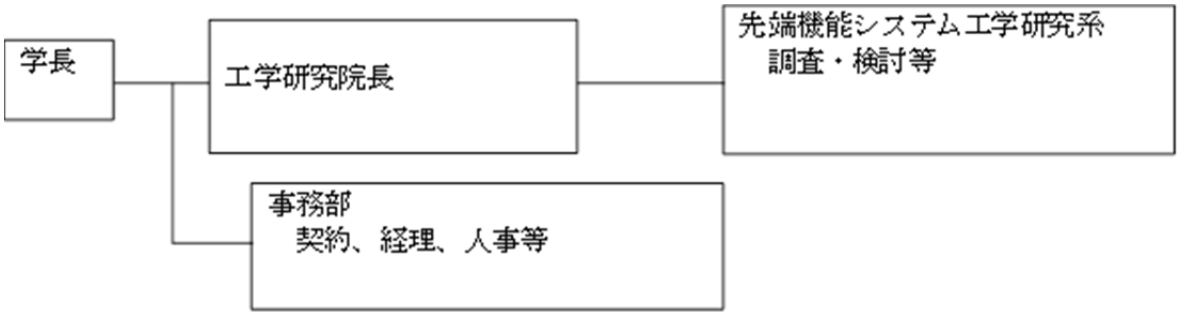


図 I-5-2-4b 共同実施先の実施体制（実証衛星 3 号機等の開発）

J-spacesystems における研究開発を確実に推進するために、外部有識者からなる SERVIS 技術委員会を組織し、定期的にまた必要時に技術的助言を受けて研究開発に反映している。本技術委員会には、専門的事項を審議するために、宇宙機システム小委員会、実験機器小委員会、運用システム小委員会、民生部品・技術小委員会、開発支援システム小委員会の5小委員会を設けた。なお、システムの開発が完了した平成 12 年度で開発支援システム小委員会は廃止し、現在は4小委員会となっている。

技術委員会の組織を図 I-5-2-5 に示す。

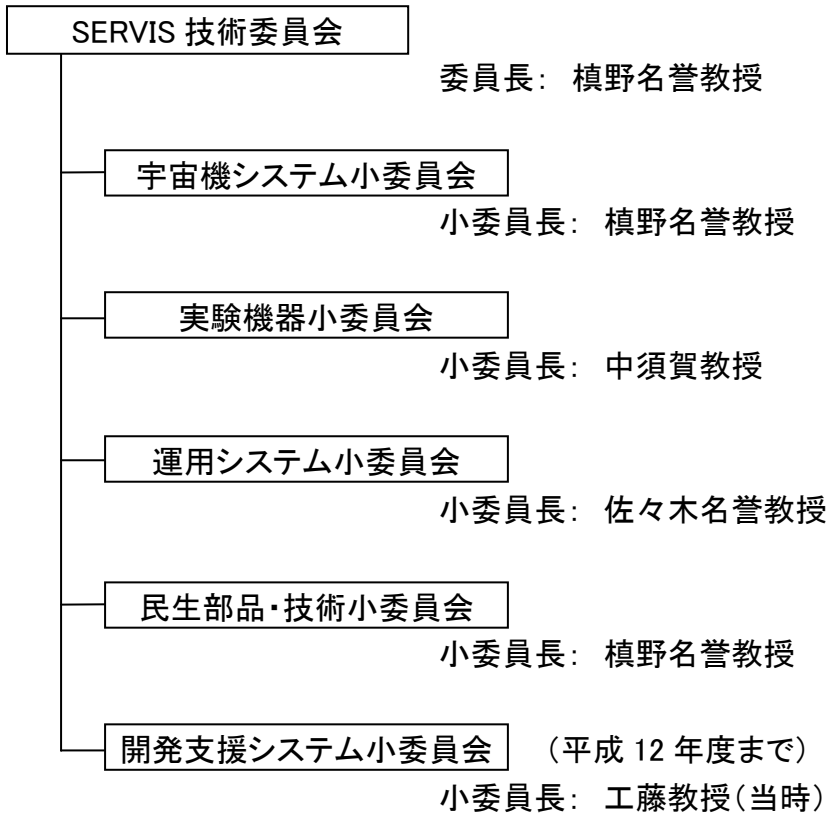


図 I-5-2-5 SERVIS 技術委員会の組織構成

Ⅰ－５－３　資金配分

本研究開発全体の資金配分を、平成 23 年度から平成 27 年度まで表 I-5-3-1 に示す。この表では、J-spacesystems 及び NEC 分を合計した確定予算を示す。

表 I-5-3-1　全体の資金配分

（単位：百万円）

年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
確定予算	188	140	117	126

次に、①民生部品・民生技術の極限環境適用技術、及び②極限環境で使用する機器等の開発支援技術の各研究開発項目の内訳の実績を表 I-5-3-2 に示す。①は大きく地上模擬試験、宇宙実証試験、ガイドライン策定に分かれるため、この３項目についての資金配分を示す。②は開発支援技術の 1 項目であり、平成 22 年度までに完了しているため0となる。

表 I-5-3-2　各研究開発項目の資金配分

（単位：百万円）

	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
①地上模擬試験	2	27	24	11
①宇宙実証試験	184	111	91	113
①ガイドライン策定	2	2	2	2
②開発支援技術	0	0	0	0
総　額	188	140	117	126

Ⅰ－５－４　費用対効果

（１）知的基盤による効果

本研究開発で構築された民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン、民生部品・民生技術適用設計ガイドラインは我が国で初めて構築された知的基盤であり、本研究開発に参画した企業等では継続して活用されている。更に、平成 19 年に公開されて以降、これから宇宙に参画しようとしているベンチャー企業や大学等においても大いに役立っている。これらの定量的効果は明確化できないが、我が国の宇宙産業の底上げと裾野拡大に貢献している。

（２）実験装置をベースとした先端的バス機器の販売

実証衛星 1 号機で宇宙実証された実験装置の 1 つである LIB（リチウムイオンバッテリ）は開発企業により世界市場での販売がなされており、販売以来継続的に約 40%のシェアを獲得している。売り上げは年間数十億円のレベルである。

1 号機の成果を受けたその他の先端的バス機器、また実証衛星 2 号機で実証された実験装置の販売も努力を継続しているが、国内衛星への搭載が中心であり海外への展開は容易ではない。

（３）衛星バスの低コスト化

実証衛星 1、2 号機の衛星バスについては、本研究開発の成果として低コスト化の見込みが得られている。今回の実証衛星と同程度の規模（500～1500kg クラス）の衛星バスの場合、将来のリカリング販売においては現状の半額程度とできる見込みである。

また、実証衛星 3 号機に関してはシステム統合化検討の結果、100kg 級衛星バスについてペイロード搭載比率向上とペイロードインタフェースの簡素化等によって拡張性と操作性に優れたバスを構築可能であり、その結果として衛星バスの低コスト化が期待できる。

Ⅰ－５－５　変化への対応

（１）世界市場変化への対応

本研究開発を開始した平成 11 年時点では、宇宙機器産業の観点では欧米と日本しか念頭になく、日本企業が欧米に勝ることを中心として考えていた。即ち、欧米企業の製品に対して低コスト化、短納期化、高機能化を図ればこれを凌駕できることを想定していた。

しかし、最近は中国、インド、韓国等の台頭、更に欧米企業の新興国市場への進出を受けて国際競争は激しさを増しており、これに勝ち抜くためには、日々進歩する最新の民生部品・民生技術を適用することが重要となっている。

このため、平成 22 年度から実証衛星 3 号機等の開発に着手することにより、日々

進歩する最新の民生部品・民生技術の地上模擬試験及び宇宙実証試験を継続し、データベース、ガイドライン等の最新化を図って行く。また、最新の民生部品・民生技術を適用した先進的な実験装置を開発し、海外展開を図る。更に実証衛星についても我が国が現在保持していない量産化を志向する 100kg 級小型衛星バスを開発し、新興国への輸出も含めて世界市場での競争力の確保を目指すこととした。

（2）過去の中間評価への対応

平成 22 年度に中間評価を実施した。結論としては中間目標を達成したことが確認された。そのときの提言を以下に示す。

1)民生技術・部品の宇宙実証（SERVIS 衛星）によるデータベースを活用して国際標準化する方法を探せないか。往々にして日本は国際的な戦略に劣るので、日本の優れた材料や部品で国際的な戦略を立てるのが望ましい。その意味で、次世代構造部材創成・加工技術も戦略的な技術となり得る。

2)空中発射システムを使って 50kg 級を3機同時打上げとし、毎年2、3回打上げることを国によるアンカーテナンシーとして確保することで、事業化を促進するとともに、宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業等で、ベンチャー衛星メーカーによる 50kg 級の衛星を年6～9機作る。これに載せて技術実証すべき中小企業による開発機器を載せて軌道上実証させるなど、ロケットメーカ、ベンチャー衛星メーカー、新規参入の中小企業とすべてを関連付けて成果に結び付けていくことも必要であると考える。特にベンチャーや中小企業の製品は、大手に比べて低コストで実証ができる。

1）については、本事業の中ではないが本事業での民生部品に対する放射線試験に関する成果を反映し、平成 26 年度から「民生部品の宇宙放射線試験に関する国際標準化委員会」を設け、この委員会で放射線試験をベースにした国際標準化の検討を開始した。これが実現できれば、日本にとって有利なものとなる。また、これとは別にリチウムイオンバッテリ（LIB）は ISO において審議を継続しており、標準化による競争力強化が期待できる。

2)については、新規参入のベンチャー企業が本事業で構築したデータベースやガイドライン類を活用することにより衛星、機器の開発においては力を付けてきており、実現に近づきつつある。ただ、空中発射システムは実現が厳しい見込みであることから衛星の打ち上げは別の手段で実現する必要がある。

なお、本事業で構築している知的基盤によって宇宙産業の裾野を広げる等により、今後とも普及啓発を図って行く所存である。

Ｊ 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

三菱重工業株式会社

株式会社三菱総合研究所

Ｊ－１　施策の目的・政策的位置付け

Ｊ－１－１　事業目的

太陽光発電は、CO2 の排出が少ないクリーンエネルギーであり、かつ、資源制約が少ない国産エネルギーであること、または、石油依存低減に資する石油代替エネルギーとしてその導入が進められてきたところであるが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題等への対応の観点から、より一層その導入拡大を図ることが重要となっている。さらに、世界全体の温室効果ガスの排出を 2050 年までに半減するといった低炭素社会を実現するためには、地上におけるこれら再生可能エネルギーの導入拡大に加え、長期的に抜本的な対策を講じることが必要である。

こうした状況の中、宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）は、発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能であることから、将来の新エネルギーシステムとしてその実現が期待されているところであるが、実用化に至るまでには長期の研究開発と段階的な技術実証を要する。

本事業では、将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術を確立することにより、宇宙太陽光発電システムの実現並びにエネルギー源の多様化に資することを目的とした。

Ｊ－１－２　政策的位置付け

経済産業省では、宇宙太陽光発電システムを実現するため、平成21年度から無線送受電技術の研究開発に取り組んでいる。

平成21年6月決定の宇宙基本計画には「地政学的な影響を受けず、安定的でクリーンなエネルギーを利用可能な宇宙における太陽光発電システムに関して、実現に必要な技術の研究開発を進め、地上における再生可能エネルギー開発の進捗とも比較しつつ、１０年程度を目途に実用化に向けた見通しをつけることを目標」とし、そのため「関係機関が連携し、総合的な観点からシステム検討を実施する。並行して、エネルギー伝送技術について地上技術実証を進める。」と位置づけている。

その後、宇宙基本計画は2度改訂されているが、いずれも、宇宙太陽光発電システムの研究を推進することが位置づけられている。

また、エネルギー基本計画（平成22年、平成26年）においても、宇宙太陽光発電システムは将来の革新的なエネルギーとして、中長期的な技術開発を行うことが位置づけられている。

宇宙分野の技術ロードマップ（エネルギー利用分野）を図 J-1-2-1 に示す。

関連する閣議決定等における関係分の記述を以下に示す。

〇宇宙基本計画（平成 27 年 1 月宇宙開発戦略本部決定）抜粋

エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組や、太陽活動等の観測並びにそれに起因する宇宙環境変動が我が国の人工衛星等に及ぼす影響及びその対処方策等に関する研究を推進する。

〇エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）抜粋

宇宙太陽光発電システム(SSPS)の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。

〇環境エネルギー技術革新計画（平成 25 年 9 月総合科学技術会議決定）抜粋

将来的な課題への対応や長期的な可能性として検討すべき技術として、核融合、宇宙太陽光発電や窒素循環の適正化等についても、長期的観点から取り組む。

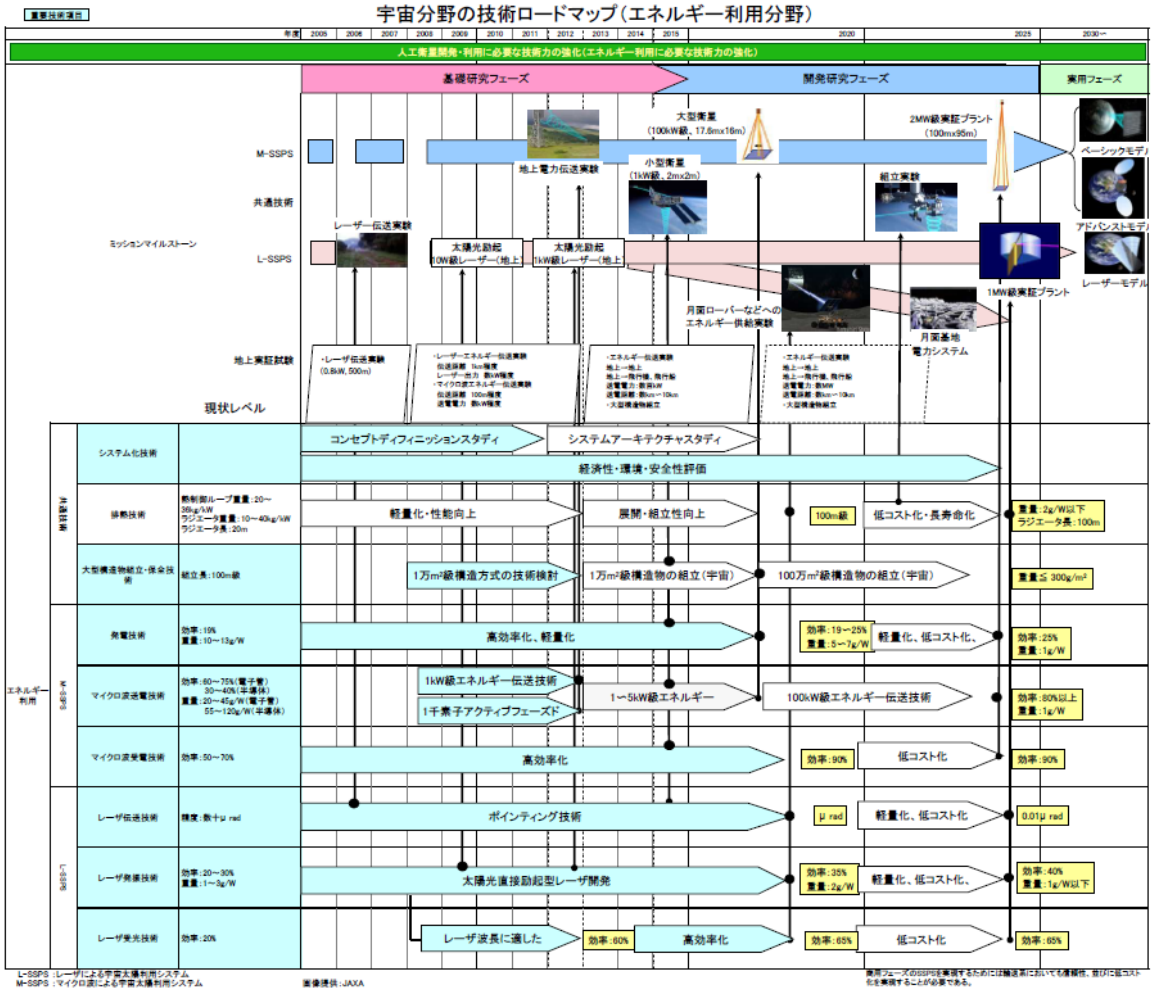


図 J-1-2-1　宇宙分野の技術ロードマップ（エネルギー利用分野）

Ｊ－１－３　国の関与の必要性

宇宙太陽光発電システムの実現には、先端的な半導体技術から高信頼性が求められる宇宙技術に至るまで、多岐にわたる専門技術と長期の取組が必要であり、民間企業だけで研究開発や技術実証を行うことは困難であることから、我が国の英知を集結して、政府が主導的に研究開発や技術実証を進めていくことが必要不可欠である。また、宇宙太陽光発電システムは、将来の新エネルギーシステムとなる可能性を有していることから、エネルギー政策を所管する経済産業省が我が国の宇宙機関である（当時）独立行政法人宇宙航空研究開発機構（以下、JAXAという。）などと連携・協力し、研究開発や技術実証を進める必要がある。

Ｊ－２　研究開発目標

Ｊ－２－１　研究開発目標

太陽光発電は石油代替エネルギーとして導入が進められてきているが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題への対応等の観点から、更なる導入拡大が重要となっている。さらに、世界規模の低炭素社会を実現のための抜本的な対策の一つとして、昼夜や天候に左右されることなく発電が可能な SSPS の実現が期待されている。

SSPS の実現にあたっては、宇宙発電・送電部の薄型軽量化技術、高効率な発電・送電・受電技術、効率と安全な運用を実現するエネルギー伝送ビーム制御技術、大型構造物を宇宙空間に輸送し組み立て運用・維持する技術などが技術課題として挙げられる。

本研究開発は、将来の新エネルギーとしての SSPS の実現に向け、その中核的技術であるマイクロ波による送電部の高効率及び薄型軽量技術を含む無線送受電技術を確立することを目標として、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を実施する。その他の大型構造物を宇宙空間に輸送し組み立て運用・維持する技術などについては、主に JAXA が取り組んでいる。

長距離間を無線でエネルギー伝送する媒体としてマイクロ波とレーザーが存在する。マイクロ波はレーザーに比べて、大気の影響を受けず（全天候型）、ビーム方向制御に電子方向制御が可能であり、エネルギー密度が比較的低く安全な運用が可能であることから、本研究開発ではマイクロ波による無線送受電技術に取り組んでいる。

また、マイクロ波による無線送受電技術は、長距離間のエネルギー安定供給が期待されることから、地上での応用の可能性が高い技術でもある。宇宙用途での小型化、薄型化の要求を緩和し、ハードウェア構成には成熟度の高い技術を活用したスピンオフ技術実証を実施した。

本研究開発の実施体制はＪ－５－２項で述べるとおりであるが、その区分はおよそ表 J-2-1-1 のとおりである。

表 J-2-1-1　太陽光発電無線送受電技術研究開発

実施内容	実施担当
マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発* ・全体システムの研究開発、トータルシステムによる試験実証の実施 ・送電系システムに関する要素技術研究と試験モデル送電部の開発 ・受電系システムに関する要素技術研究と試験モデル受電部の開発 ・無線送受電スピンオフ技術の研究開発	一般財団法人 宇宙システム 開発利用推進 機構 (J-spacesystems)
電送制御技術に関する研究開発 ・位置・角度補正法及び並列化法に関する研究開発	三菱重工業 株式会社(MHI)

無線送受電技術研究開発支援業務 ・マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査 ・宇宙太陽光発電関連研究に関する調査	株式会社 三菱総合研究所 （MRI）

*ビーム方向制御部に関する事項は JAXA が連携/協力して実施

また、図 J-2-1-1 は本研究開発の主体となっている一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（以下、機構という。）が提案する、将来実用化 SSPS の構想図である。

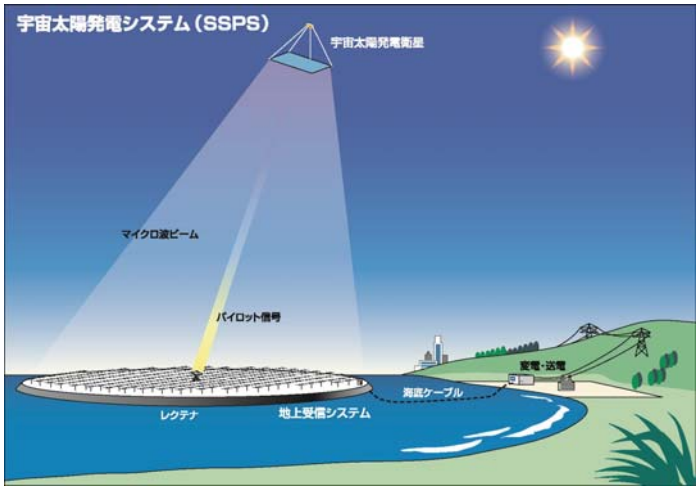
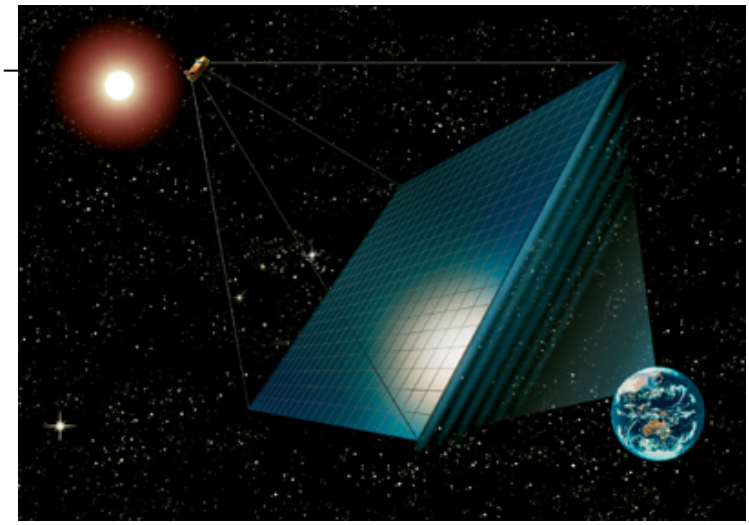


図 J-2-1-



J－２－２　全体の目標設定

本研究開発の全体の目標を表 J-2-2-1 に示す。

将来の宇宙太陽光発電システムの中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えたマイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。また、当該技術の地上での応用を図る。

表 J-2-2-1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
総合システム: 無線送受電技術の確立に向け、送電系・ﾋﾞｰﾑ方向制御系・受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。	将来 SSPS 用マイクロ波電力伝送技術を念頭に、地上実証課題や技術実現性を考慮して課題を抽出して研究開発を行う。また取り組むべき技術に取り残しが出ないよう、各系を組み合わせたシステム全体としての送電実験を計画する。なお、技術成果を高める為、送電部、受電部、ビーム方向制御部は、それぞれ専門性の高い部署で担当させる。
送電部: 将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。	商用 SSPS の送電部は宇宙に設置された大量のアンテナパネルを組み合わせた巨大なシステムとなるので、小型化・薄型化・高効率化が求められる。また、通信用フェーズドアレイの域から脱するためにも送電出力電力はキロワット級とする。
受電部: 伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ（レクテナ）を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子（ダイオード）を開発する。	伝送されるマイクロ波エネルギーを測定するだけではなく、利用可能な電力に変換して高効率でとり出す技術が求められる。また高効率化実現のための整流素子ダイオードの技術開発が必要である。

表 J-2-2-1 全体の目標（続き）

目標・指標	設定理由・根拠等
ビーム方向制御部【参考】: 将来の宇宙利用を念頭に、高精度のビーム制御方式として、ソフトウェアレトロディレクティブ方式（振幅モノパルス方式）の研究開発に取り組む。試験モデルでは受電電力が最大となるよう、送電部からのマイクロ波の位相を制御する素子電界ベクトル回転法（REV法）を採用する。	注）ビーム方向制御部の研究開発は、JAXA が実施する。
送電制御技術: 精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法（PAC法）及び並列化法による送電制御技術に取組み、実現性や有効性を明らかにする。	超遠距離送電を行う将来のSSPSを見据えた精密なビーム制御技術が求められる。複数の技術から選択できる余地を確保しておく必要がある。 JAXAの方法（REV法）とは異なる手法についても並行して検討する。
試験候補地調査: 国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。	試験作業を円滑に遂行するための周辺作業の実施が本研究開発の成否に大きく寄与する。
関連技術調査: 本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。	本研究開発に関連する技術情報や動向を広く収集し、必要に応じて本研究開発計画に反映する。
無線送受電スピンオフ技術: 成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム（送電出力 10kW 程度、送電距離 500m 程度）を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。	マイクロ波無線送電は他方式と比べ長距離間の送受電が可能であり、低コスト化システムを試作することで産業応用に大きく寄与する。また、電力事業者による適用可能性検討は実施意義が大きい。

本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次のコンセプトを取り上げた。

●技術的に新しい一歩（世界で初めて）
●軌道上実証実験に技術的につながる試作

マイクロ波による電力伝送についての技術検討は数十年前からなされているが、過去に行われた実験などを見ても、マグネトロンやクライストロンをマイクロ波発生源としてパラボラアンテナを使って送電しているのが多い。技術的なブレークスルーを通して技術の確立に努めている。

1） マイクロ波ビーム方向を任意に制御可能な半導体増幅器を使用したフェーズドアレイアンテナ。キロワット級電力伝送技術で、かつ受電方向からの信号に基づく精密方向制御を組み込んだ電力送電は世界初。
2）半導体増幅器自体にも、窒化ガリウムを基板にしてF級増幅回路技術を採用した、電力付加効率で世界最高水準の素子を適用した送電用サブアレイアンテナ。
3）システムの小型化を指向して送電周波数に 5.8GHz を適用し、かつ回路構成を工夫した薄型送電用サブアレイアンテナ。従来実績の約 1/10 程度の画期的な薄さ。
4）窒化ガリウムを採用し RF-DC 変換効率80%以上を目標とした素子（ダイオード）の試作評価。世界最高水準の効率。

また、将来の宇宙利用を念頭に置きつつも、直近の技術応用としての可能性を探るため、宇宙用途での小型化・薄型化の要求を緩和し、ハードウェア構成には成熟度の高い技術を活用してコストの低減を図った無線送受電実証システムを試作する。

Ｊ－２－３ 個別要素技術の目標設定

前項の目標を達成する上で必要な個別要素技術の達成目標を表 J-2-3-1 に示す。

表 J-2-3-1 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
高効率薄型送電部の開発	(1)送電効率 主アンプ等にGaN素子を利用したF級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上、及び送電部としての効率は 30%以上の送電システムを実現する。	研究室レベルの State-of-the-Art 技術を、効率を落とすことなく適用する。
	(2)薄型軽量化 送電モジュールは薄型化および高効率化に適したアクティブ集積アンテナ(AIA)で構成し、その厚みは 40mm 以下とする。	厚みを追求した研究事例は無く、既存概念での想定厚さ(実力値)は 300～400mm と考えられることから、1桁小さな目標値を設定して取り組む。
高効率受電用整流ダイオードの開発	(1) 高効率受電整流素子 任意の電力レベルのマイクロ波を整流するダイオードの設計手法及び製作技術を取得するとともに、電力伝送試験時相当の電力束密度に適した高効率整流ダイオードを試作する。半導体にはGaN等を利用し、RF-DC 変換効率は 80%を目標とする。	現時点でレクテナに適した GaN を使用したダイオードはないことから、システムの要求に応じた受電電力設定に対応でき、かつ世界最高水準の効率の整流ダイオードを設計製作できる技術を培う。
位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術	(1) 送電制御技術 実用システムの送電制御技術として PAC 法及び並列化法が有効であることを見極め、実現のための基本技術を確立する。有効性の目安としては、伝送効率低下量 1%以下、不要波発生ﾚﾍﾞﾙ 0.3W/㎡以下を目標とする。	有効性目標設定根拠は以下の通りである。 ・経済性を考慮して、伝送効率のノミナル値から 1%レベルを許容低下量とした。 ・航空機の EMC 基準(0.3W/m^2)とした。

Ｊ－３　成果、目標の達成度

Ｊ－３－１　成果

Ｊ－３－１－１　全体成果

本研究開発は平成２１年９月に開始し、平成２７年３月まで実施した。

なお、実施にあたっては、専門学識経験者による技術委員会を組織し、技術内容を中心に評価と助言を頂き、反映した。

具体的な成果については、以降、以下の順で述べる。

（１）マイクロ波電力伝送試験モデル
- ①マイクロ波無線送受電システムの概要
- ②送電部
- ③受電部
- ④各部間のインタフェース

（２）マイクロ波電力伝送試験
- ①試験概要
- ②屋内試験
- ③屋外試験
- ④実用化実証試験

（３）無線送受電技術研究開発支援業務
- ①マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査
- ②宇宙太陽光発電関連研究に関する調査
- ③その他関連技術に関する調査

（４）無線送受電スピンオフ技術の研究開発
- ①スピンオフ技術実証システムの試作評価
- ②電力インフラへの適用可能性の検討

（1）マイクロ波電力伝送試験モデル

実用レベルでのマイクロ波による宇宙太陽光発電システムでは、静止軌道上の送電設備から地上の受電設備に向けて、数多くのマイクロ波を合成し，ビームを形成して高精度で指向制御する技術が必要となる。これらは今後、軌道上実証を行う際にも必要不可欠な技術である。本研究開発では将来の発展性をも考慮して以下の技術を組み合わせた地上実証を行った。表 J-3-1-1-1 にマイクロ波電力伝送試験モデルの特徴を示す。

表 J-3-1-1-1　マイクロ波電力伝送試験モデルの特徴

項目	将来の発展性・利点
フェーズドアレイアンテナを使用	従来のパラボラアンテナに比べ，将来の宇宙での大型アンテナ構築につながる技術
電力伝送周波数に5.8GHzを使用	従来の 2.45GHz に比べてシステムの小型化が可能となり，将来の宇宙への輸送に有利
半導体増幅器を使用	従来のマグネトロン(電子管)方式に比べて薄型化に有利。また低電圧での動作も宇宙での使用に向く
ソフトウェアレトロディレクティブ方式を使用	送受電の周波数が任意に選択可能であり，パイロット信号に変調波や鍵機能を付与することも可能

①マイクロ波無線送受電システムの概要

本研究開発では、マイクロ波電力伝送試験モデル（以下、試験モデルという。）を試作し、それを使用して電力伝送試験を行う。試験モデルは送電部、受電部、ビーム方向制御部から構成され、これらを組み合わせた状態で、屋外での電力伝送試験が実施できるものとする。ビーム方向制御部は、将来の宇宙利用を念頭に、高精度のビーム制御方式として、ソフトウェアレトロディレクティブ方式（振幅モノパルス方式）を、また、受電電力が最大となるよう、受電部でのマイクロ波受電強度測定結果をもとに、送電部からのマイクロ波の位相を制御する素子電界ベクトル回転法（REV法）を採用した。

- 送電部は軽量薄型のマイクロ波フェーズドアレイアンテナで構成され、電気エネルギーを高効率でマイクロ波に変換する。
- 受電部は、複数のモジュールで構成され、空間を伝播してきたマイクロ波を安定的かつ効率的に電気エネルギーに変換する。
- ビーム方向制御部は、マイクロ波が送電部から受電部に向けて精度よく送られるよう、ソフトウェアレトロディレクティブ機能、REV 機能などで実現するマイクロ波ビーム制御を行う。（なお、このビーム方向制御部の研究開発は JAXA が実施した。）

試験モデルの概念を図 J-3-1-1-1 に示す。

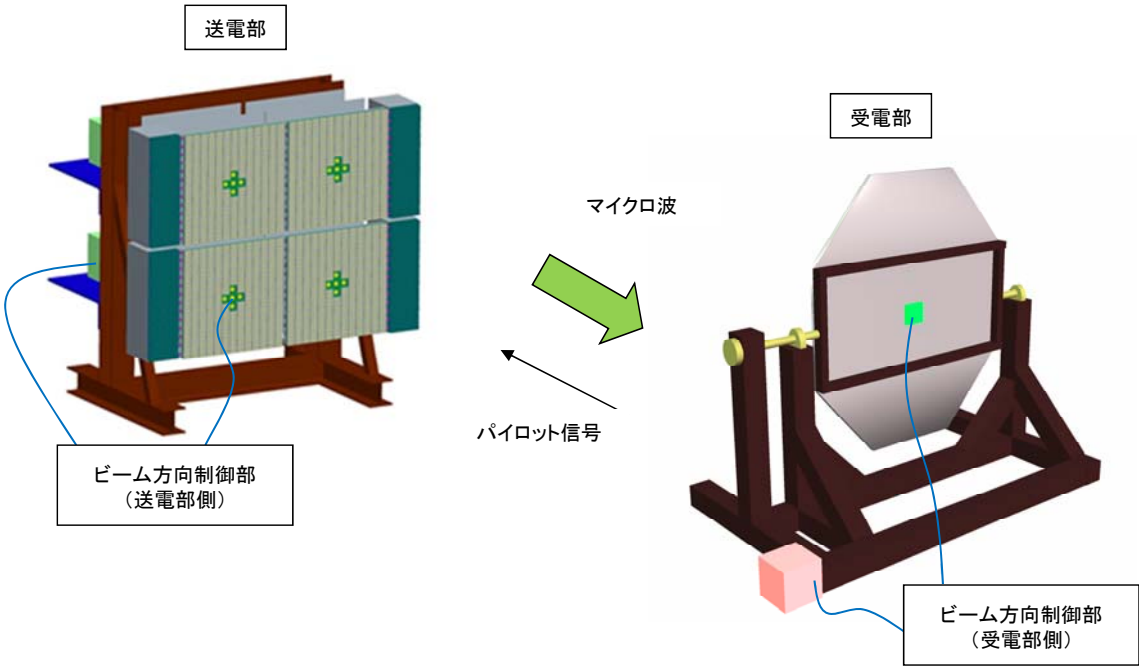


図 J-3-1-1-1 マイクロ波電力伝送試験モデル概念図

試験モデルのシステム構成ツリーを図 J-3-1-1-2 に示す。

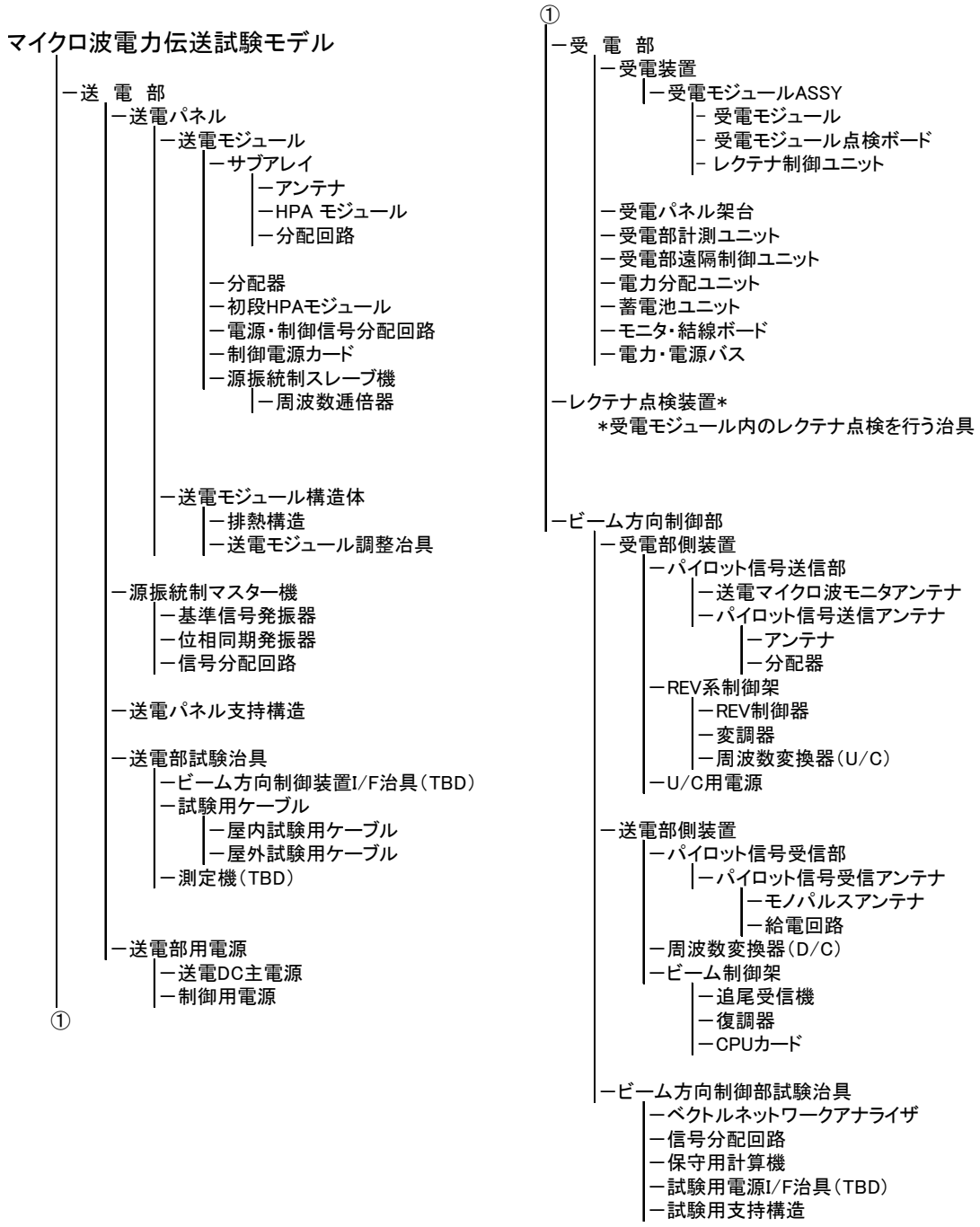


図 J-3-1-1-2 システム構成ツリー

また、マイクロ波電力伝送試験モデルのシステムブロック図を図 J-3-1-1-3 に示す。

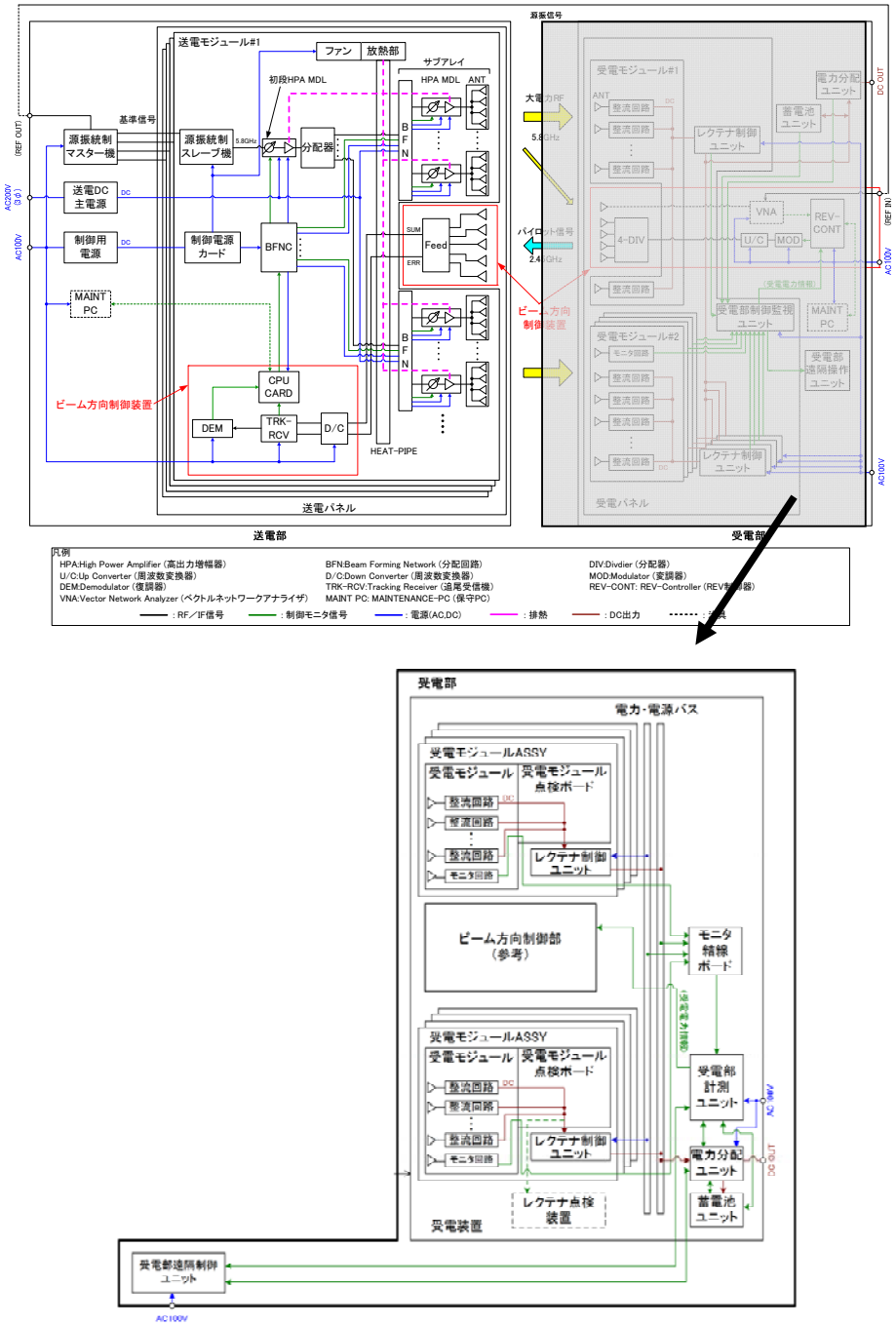


図 J-3-1-1-3　マイクロ波電力伝送試験モデル　システムブロック図

②送電部

送電部は、将来の軌道上実証への応用も考慮し、小型・軽量・高効率化が望める半導体を使用したフェーズドアレイアンテナを使用し、複数の送電モジュールでアレイアンテナを構成し、マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとした。マイクロ波送出方向は、ビーム方向制御部からの位相制御信号を受けて定めるものとし、さらに、受電部側での受電電力を最大にするためのマイクロ波移相器を持ち、ビーム方向制御部からの位相制御信号を受けて位相を変化させる機能を持たせた。

送電部の主要諸元を表 J-3-1-1-2 に示す。

表 J-3-1-1-2 送電部主要諸元

項 目	主要諸元
使用周波数	5.8GHz±75MHz（円偏波）
システム構成	4 モジュール構成
モジュールサイズ	約 0.6m×0.6m
ビーム拡がり角	全システムで約3度のビーム形成(-3dB ビーム幅)
モジュール重量	19kg 以下
モジュール間の接続方法	手動で±10 度(縦方向のみ)可動な接続方法
モジュール支持方法	4枚の送電モジュールを支持し自立可能な枠構造とする。 （晴天時における屋外でのマイクロ波電力伝送試験を想定した設計とする）
送電出力	400W 以上／モジュール 1,600W 以上／システム（4モジュール） 別途、低出力モードを持つこと
アンテナ素子間隔	0.65 波長±0.02 波長(λ)(33.6mm±1mm) λ は中心周波数に対応
マイクロ波増幅器効率	60%以上
移相器	5bit (MMIC 移相器)
運用時間	1 分間以上（送電出力 400W/モジュールの高出力モードにおいて）
送電部総合効率	30%以上
基準信号の配信	有線配信
アンテナ素子数	300 素子以上／モジュール。中心部にビーム方向制御部用にアンテナ 20 素子分の設置スペースを確保する。
マイクロ波増幅器個数	76 個以上／モジュールとして、1増幅器で4素子アンテナに給電する
サブアレイ厚さ	サブアレイ厚さ： 40mm 以下
排熱構造	送電部とは別構造の排熱構造を設置し、熱対策とする。

送電部の外観図を図 J-3-1-1-4 に、外観(前面)を図 J-3-1-1-5 に示す。

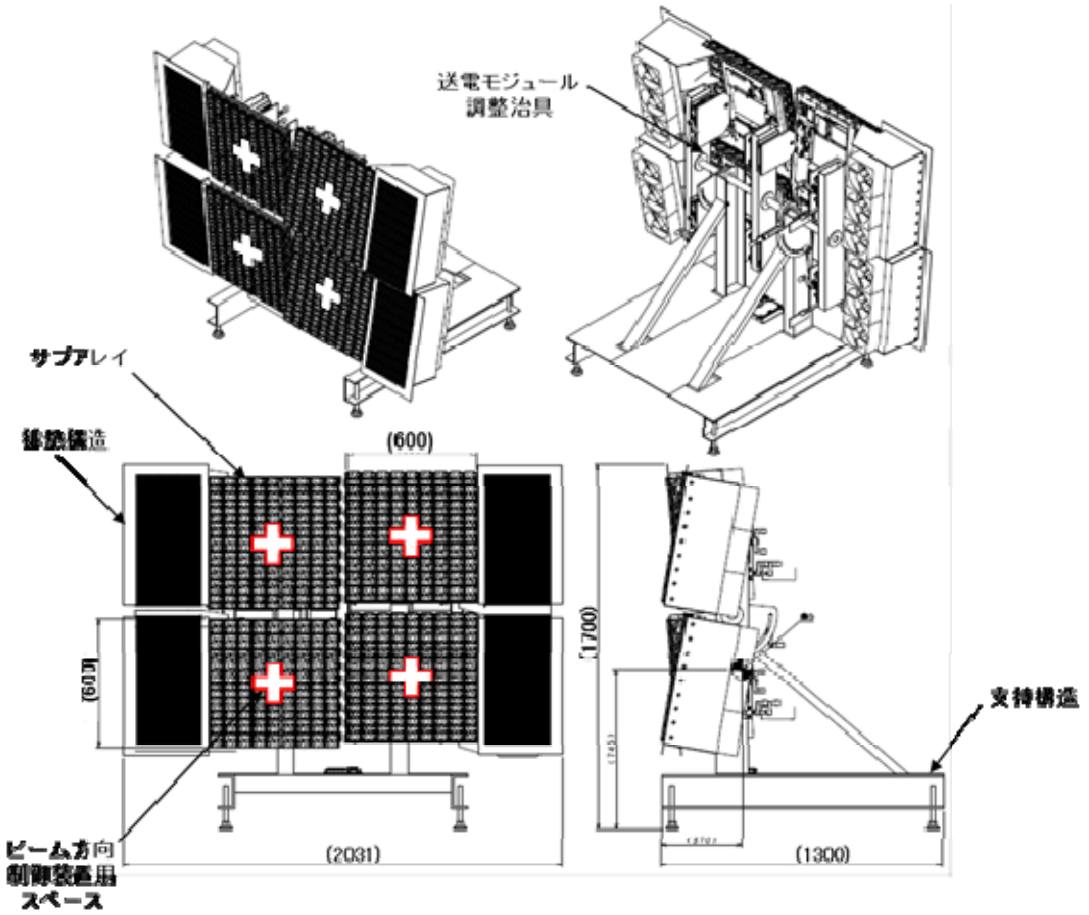


図 J-3-1-1-4 送電部 外観図

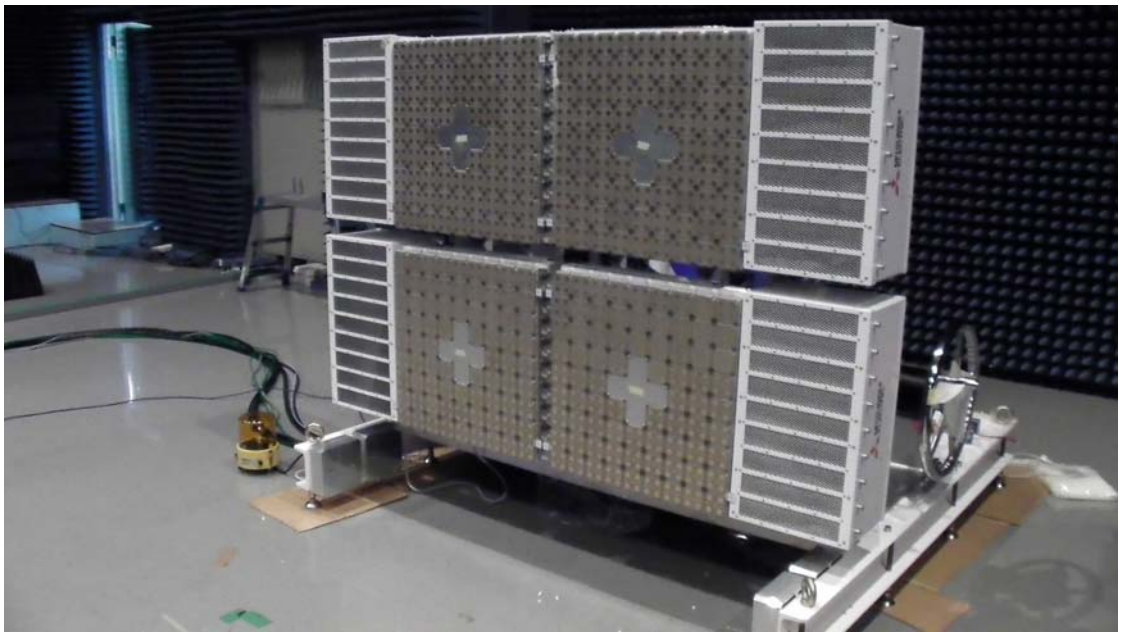


図 J-3-1-1-5 送電部 外観(前面)

表 J-3-1-1-3 に送電部に要求されている主な仕様に対する検査結果を示す。全ての試験項目について仕様値を満足し、受電部やビーム方向制御部との組合せ試験の前に、送電部がシステム要求を満足することを確認した。

送電部検査結果サマリを表 J-3-1-1-3 に示す。

表 J-3-1-1-3 送電部検査結果のサマリ

項目	仕様値	試験結果
使用周波数	・屋内試験： 5.8GHz（右旋円偏波） 周波数偏差±5ppm 以内 ・屋外試験： 5.8GHz（右旋円偏波）	5.8GHz(右旋円偏波)、周波数偏差+0.1ppm 以下
モジュールサイズ	約 0.6m×0.6m	0.599m×0.600m
サブアレイ部質量	19kg 以下	16.1kg
サブアレイ部厚さ	40mm 以下	25mm(突起部を含めると 33mm)
送電出力	・高出力モード： 400W 以上／送電モジュール 1.6kW 以上／4 送電モジュール ・低出力モード(最大出力の約 5%)を持つこと	・高出力モード 最大値：460.7W 最小値：423.3W 平均値：449.8W (約 1.8kW/4 送電モジュール) ・低出力モード：高出力モードの約 5%
増幅器効率	60%以上(最終段増幅器の電力付加効率)	平均 60.3%
送電部総合効率	30%以上	35.1%
運用時間	60 分以上(最大出力時)	60 分以上

③受電部

受電部は、マイクロ波の効率的な電気エネルギーへの変換を考慮し、ショットキーバリアダイオードを使用した受電パネル（レクテナアレイ）とした。レクテナアレイは、複数の受電モジュールから構成され、試験等における取扱いが容易なものとした。

受電部の主要諸元を表 J-3-1-1-4 に、外観（正面）を図 3-1-1-I-6 に示す。

また、受電部の艤装・組立図を図 J-3-1-1-7 に示す。（レクテナ点検装置は治具のため除く。）

表 J-3-1-1-4　受電部主要諸元

項目	主要諸元
受電パネルサイズ	受電パネル：約2.6m × 2.3m（突起物を除く） （晴天時における屋外マイクロ波電力伝送試験を想定した設計）
受電パネル枚数	1枚(受電パネルは、36個の受電モジュールで構成)
受電パネル支持方法	受電パネルを支持し自立可能な架台を有する。 （角度調整機能、可搬機能）
ダイオード	ショットキーバリアダイオード
RF-DC 変換効率	・50%以上（アンテナ～レクテナ制御ユニット出力）
電磁再放射抑制	受電パネルで発生する2次～4次高調波再放射を抑制する入力フィルタを有する。
自動点検計測機能	故障したレクテナを含む受電モジュールの特定、故障レクテナの特定を行う。

図 J-3-1-1-6　受電部外観（正面）

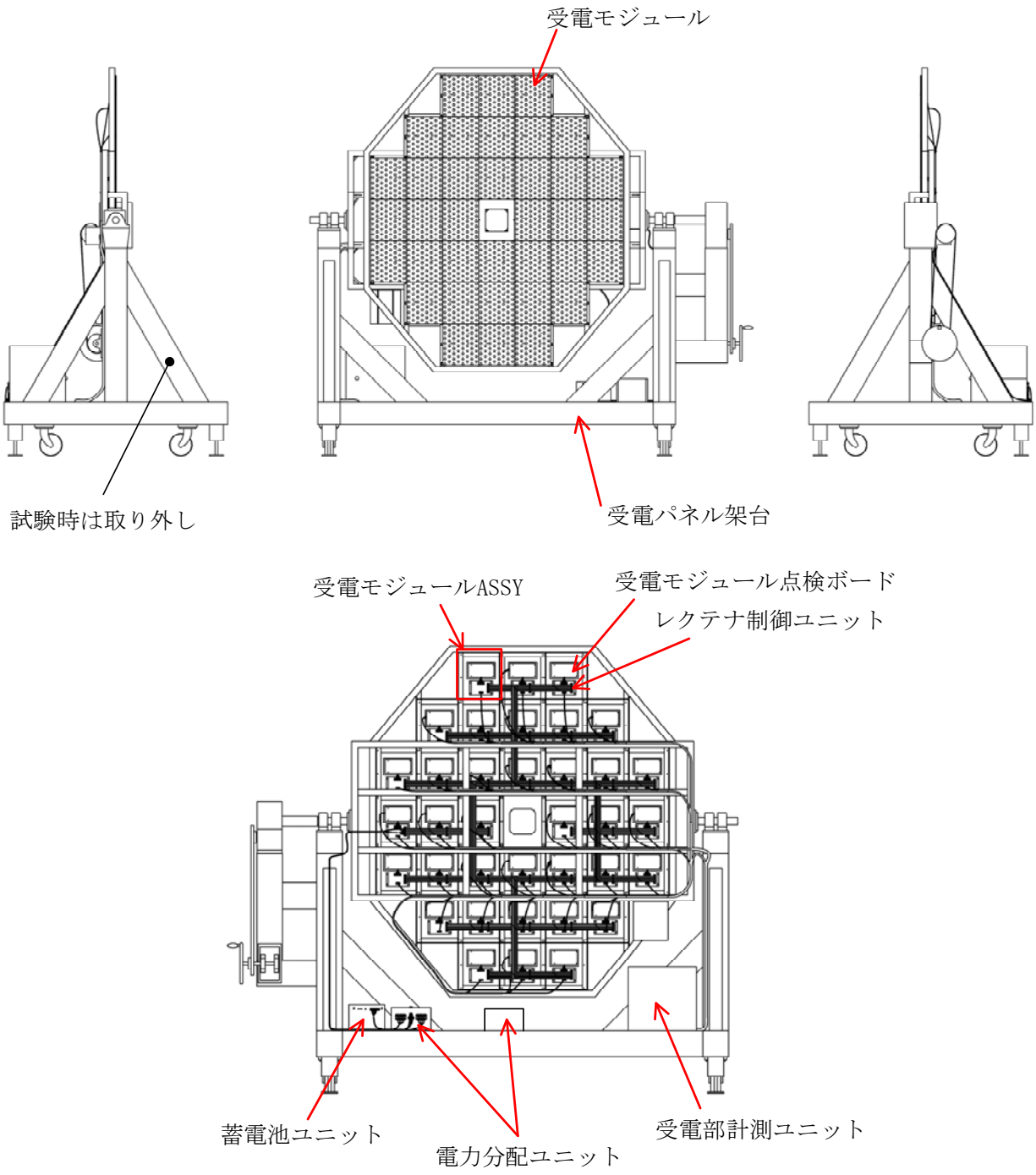


図 J-3-1-1-7　受電部　艤装・組立図

表 J-3-1-1-5 に受電部に要求されている主な仕様に対する検査結果を示す。全ての試験項目について仕様値を満足し、送電部やビーム方向制御部との組合せ試験の前に、受電部がシステム要求を満足することを確認した。

表 J-3-1-1-5 受電部検査結果のサマリ

項目	仕様値	試験結果
周波数	中心周波数 5.8GHz	5.8GHz においてリターンロスは全て -20dB 以下。 受電モジュールにて DC 出力が得られることを確認。
受電パネルサイズ	約 2.6m×2.36m	2603mm×2259mm
受電パネル枚数	１枚（受電パネルは 36 枚の受電モジュールで構成）	36 枚の受電モジュールで構成される受電パネル１枚
受電パネル支持方法	受電パネルを支持し自立可能な画題を有する（角度調整機能、可搬機能）	角度調整範囲：±30° 以上 車輪／レベルアジャスタ：あり
ダイオード	ショットキーバリアダイオードを使用	左記の通り
RF-DC 変換効率	50%以上（アンテナ～レクテナ制御ユニット出力）	59%～62% （受電モジュール ASSY 1 系統ごとの効率）
電磁再放射抑制	受電パネルで発生する 2 次～4 次高調波再放射を抑制する入力フィルタを有する。	入力フィルタ挿入損失測定結果。 ・2 次高調波：41dB ・3 次高調波：45dB ・4 次高調波：41dB
自動点検計測機能	故障したレクテナを含む受電モジュールの特定、故障レクテナの特定を行う。	受電部遠隔制御ユニットの画面に異常検出が表示されることを確認。レクテナ点検装置によってレクテナ整流回路の I-V 特性を取得できることを確認。

参考として、ビーム方向制御部の主要諸元を表 J-3-1-1-6 に示す。

表 J-3-1-1-6 ビーム方向制御部主要諸元（参考：JAXA 担当）

項　目	主要諸元
レトロディレクティブ方式	ソフトウェアレトロ方式に属する振幅モノパルス方式を使用。 ビーム方向制御方式としては、素子電界ベクトル回転法（REV法）を使用する。
ビーム制御精度	伝送距離 10m以上で角度精度 0.5 度 rms を目標とする。 (rms：二乗平均平方根)

④各部間のインタフェース

マイクロ波電力伝送試験モデルの送電部、受電部、ビーム方向制御部間のインタフェース仕様についての検討を実施した。主な内容は表 J-3-1-1-7 のとおりである。

これらのインタフェースの定義や技術仕様を詳細化し、インタフェース管理仕様書（ICD）としてまとめた。

表 J-3-1-1-7　各部間のインタフェース概要

インタフェース	内　容
送電部～受電部	主にマイクロ波の周波数、偏波、受電パネル部での電力束密度分布及びビームパターンである。
送電部～ ビーム方向制御部	パイロット信号受信アンテナの送電モジュールへの物理的な取り付けに関するインタフェースの他、アンテナアレイ位相制御信号の受け渡しなどがある。
受電部～ ビーム方向制御部	パイロット信号送信アンテナの受電パネルへの物理的な取り付けに関するインタフェースの他、マイクロ波受電強度レベル情報の受け渡しなどがある。

（2）マイクロ波電力伝送試験

①試験概要

マイクロ波電力伝送システムの機能性能を総合的に検証するために、送電部、受電部、ビーム方向制御部を組み合わせ、屋内試験および屋外試験を実施した。なお、屋外試験に続いて、JAXA と連携協力のもと、実用化実証試験を JAXA 主体にて実施した。

屋内試験は、電波暗室内に設置した屋内試験設備を用いた。伝送距離 10m以上において、ビーム方向制御精度 0.5 度（rms）以下の達成を目標として、送電マイクロ波のビーム方向制御精度を確認した。

屋外試験は、電波法等の法的制約準拠の下、4 枚の送電モジュールを協調動作させ、地面反射等の影響を回避しつつ、伝送距離 50m程度の間で、受電部にて計画された電力相当を受電することにより、無線電力伝送システムとしての性能確認を実施した。

実用化実証試験は、屋外試験に続いて、無線伝送した電力により、アマチュア無線局の運用を行う実用化実証を行った。本試験項目は、JAXA が取り纏め、J-spacesystems が支援した。

なお、屋外試験地は、マイクロ波電力伝送試験候補地の要件に基づき、選定された候補地から、次の試験場所を選択した。

・三菱電機株式会社 通信機製作所 試験場（兵庫県）

表 J-3-1-1-8 に、試験に係る設定条件、および試験候補地に望まれる要件を示す。

表 J-3-1-1-8 マイクロ波電力伝送試験候補地の要件

（要件欄の●は、候補地選定に係わる項目を示す。）

要件	項 目	設定条件
	送電部大きさ	1.2m×1.2m（0.6m×0.6m モジュール 4 枚）
	送電部重量	1,000kg
	受電部大きさ	受電パネル 2.5m×2.5m
	受電部重量	1,500kg
	送電部出力電力	1,600W 以上（400W/モジュール×4）
	送電距離	50m 程度
	中心部電力密度	電力束密度 330W/m^2=33mW/cm^2（最大値@50m）
	受電部取出し電力	350W 程度
	マイクロ波周波数	5.8GHz±75MHz、（右旋円偏波）
	パイロット信号周波数	2.45GHz

表 J-3-1-1-8 マイクロ波電力伝送試験候補地の要件（続き）

（要件欄の●は、候補地選定に係わる項目を示す。）

要件	項　目	設定条件
	デモンストレーション	・視覚的にアピールする負荷 ・エネルギー伝送が理解できる負荷 の 2 種類を想定する。
	技術データ取得	ビームパターン等
	運用時間	定常状態で 10 分間（暖気時間 TBD）
●	試験時　天候	晴天または曇り時（雨天等の悪天候除く）
●	試験時　風速	平均風速 3.0m/sec 以下（注 1）
●	試験時　温度	3～20℃（約 2 時間の試験中の温度変動±3℃以内）(*1)
●	試験時　湿度	10～90%RH
●	電波環境	周辺に電波ノイズ源が少ないこと。 電波を利用する設備が少ないこと。
●	試験コンフィギュレーション	送電部と受電部は斜めに配置。(*2)
●	安全性等	試験実施の規準を設ける（雨天や強風時は避ける）。 また、必要に応じ器材の防護用テントなど設ける。 マイクロ波の取扱いに関しては法令を遵守する(電波管理法、電波防護指針など)。
	試験場設備等	
●	試験エリア面積	送電距離として 50m 以上を確保できること。 また、マイクロは防護指針に基づき十分な安全区域を確保できること。
●	電源	周波数 50/60Hz　(*3)
	AC 単相 100V	送電部：80A 程度、受電部：20A 程度
	AC 三相 200V （デルタ結線）	送電部：30A 程度、受電部：ー
	接地	A 種（第一種）
●	上下水道	水冷設備は不要。
●	装置格納場所	雨露をしのげる場所で保管。　(*4) 温度環境　−10～20℃、湿環境度　5～95%RH（結露なきこと）
	その他	
●	宿泊施設	試験場の近くに宿泊施設があり、交通の便が良いこと。
●	インターネット環境	インターネットのインフラが利用できることが望ましい。
●	公共対策	近隣住民の理解が得られること。

(*1)温度や風速の条件が、機器の性能に大きく影響する。装置を防護用テント等で囲う場合は、条件が緩和される。

(*2)上方に向けての送電の場合、航空機への影響等、電波法上の課題の有無要検討。

(*3)大電力を扱うので十分な電源設備や設置の設備が備わっていることが重要である。

(*4)悪天候時を考えた場合、雨露を凌げるシェルター等に退避する必要があり、十分なスペースとプレハブやシェルターなどの設備が備わっている場所であることが望ましい。

②屋内試験

屋内試験は、伝送距離 10m 以上において、ビーム方向制御精度 0.5 度（rms）以下の達成確認を目標として、送電マイクロ波のビーム方向制御精度確認試験を実施するものであり、天候や周囲環境（地形・構造物など）に左右されない安定した電波環境下（電波暗室内）で試験を実施した。

・期間：平成 26 年 12 月～平成 27 年 2 月

・場所：京都大学生存圏研究所　高度マイクロ波エネルギー伝送実験棟（A-METLAB）（京都府）

図 J-3-1-1-8 に屋内試験（機器レイアウト）を、図 J-3-1-1-9 に伝送距離 10m の試験実施状況を示す。

マイクロ波を受ける側に設置している機器は受電部ではなく、マイクロ波送電ビームの方向制御精度を計測するための X-Y スキャナーである。電波暗室の高対電力電波吸収体の方向に送電するような機器レイアウトとしている。

本研究開発の目標である「伝送距離 10m 以上において 0.5°（rms)以下」のビーム制御精度については、伝送距離 10.06m において 0.15°（rms）が得られ、目標を達成することを確認した。なお、ビーム幅は 2.3°（平均値）であった。

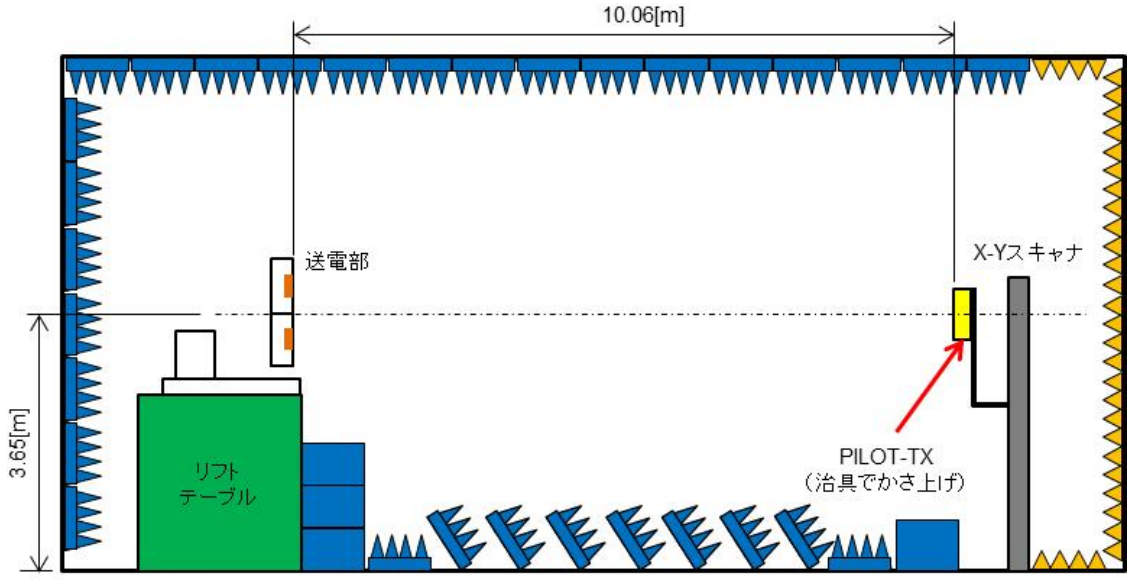


図 J-3-1-1-8　屋内試験（機器レイアウト）

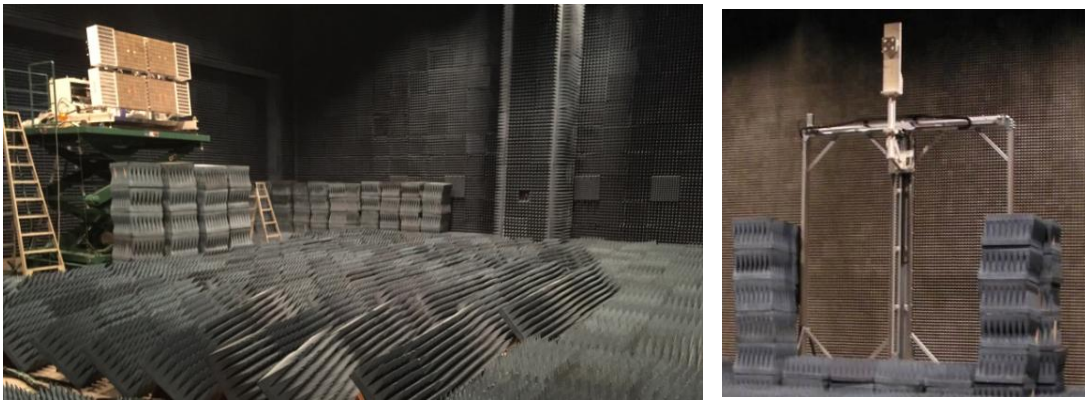


図 J-3-1-1-9　屋内試験状況（伝送距離：10m）

③屋外試験

複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、マイクロ波ビームを受電部に向けて指向制御する精密ビーム制御技術を実証するために、屋外においても電力伝送試験を実施し、ビーム制御による電力伝送を確認し評価した。

・期間:平成 27 年 2 月～平成 27 年 3 月

・場所:・ 三菱電機株式会社 通信機製作所 試験場(兵庫県)

図 J-3-1-1-10 に試験場のレイアウトを、図 J-3-1-1-11 に屋外試験のコンフィギュレーションをそれぞれ示す。本試験場は、送電部が設置される送電エリア、受電部が設置される受電エリア、各機器を操作するオペレータエリアからなり、地面反射等の影響を低減する目的で送電部は盛り土の上に設置されている。図 J-3-1-1-12 に屋外試験風景を示す。ビーム指向制御のためのパイロット信号(2.45GHz)送信時に、地面反射等の周囲環境の影響が低減できるよう電波吸収体を配置した。図 J-3-1-1-13 に送電部設置状況を、図 J-3-1-1-14 に受電部設置状況を示す。

マイクロ波電力伝送距離は水平距離 53.8m、垂直距離 2.9m であり、送受間距離は 53.88m であった。送電部から約 1.8kW を出力し、受電部から約 340W 平均の利用可能電力の取出しを確認した。

5.8GHz 帯での屋外無線送電試験は世界で初めての取組であり、フェーズドアレーアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。

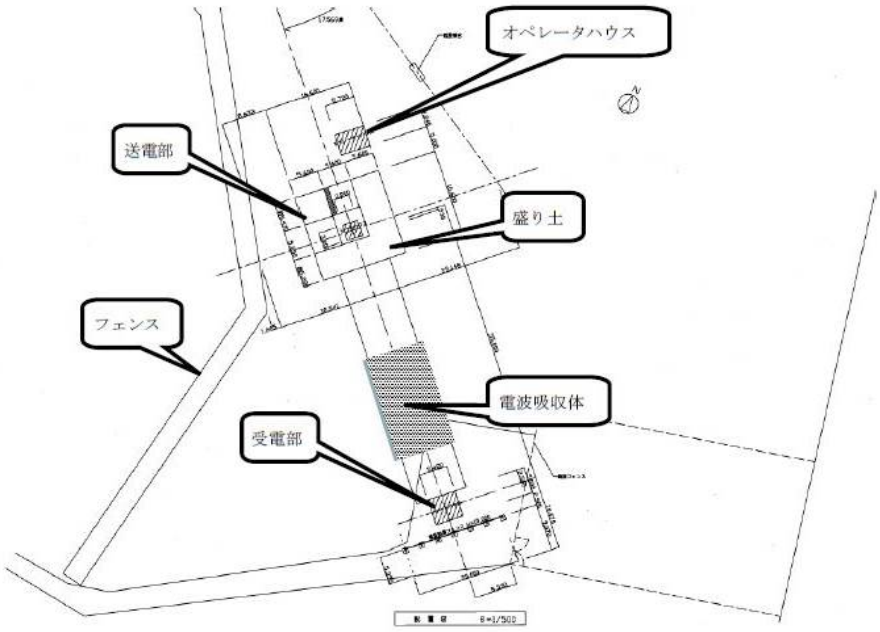


図 J-3-1-1-10　屋外試験場レイアウト

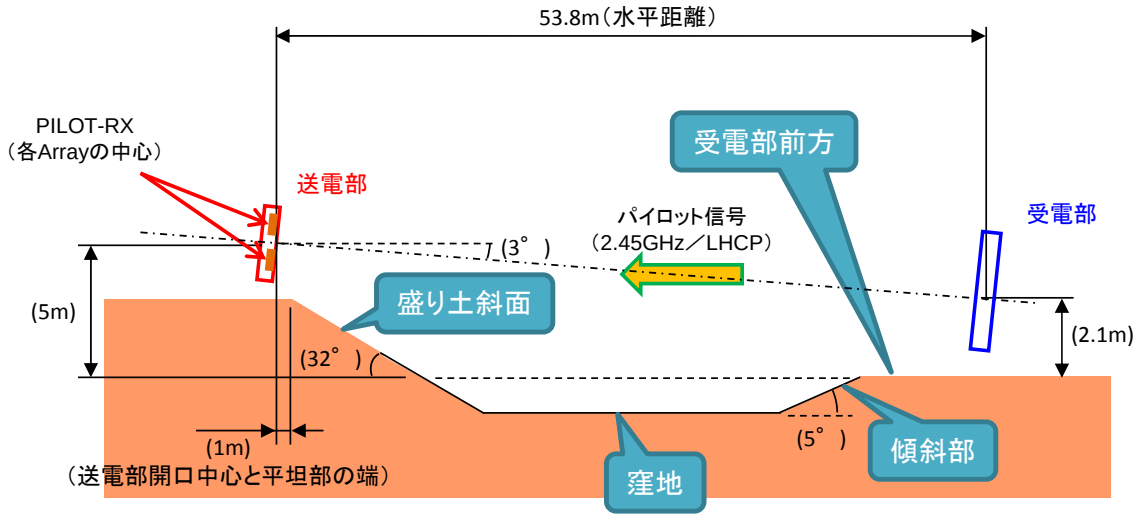


図 J-3-1-1-11　屋外試験コンフィギュレーション

図 J-3-1-1-12　屋外試験風景

図 J-3-1-1-13 送電部設置状況

図 J-3-1-1-14 受電部設置状況

④実用化実証試験

マイクロ波電力伝送試験モデルを用いて、連携協力を行なっている JAXA の主体により実用化実証を行なった。これは、受電部出力電力を実証機器（アマチュア無線機）に供給して、アマチュア無線家よる交信を可能にしたものである。送電部から受電部にマイクロ波無線電力伝送を実施し、実用化実証中、受電部の蓄電池ユニットに充電するとともに、実証機器への電力供給が行われていることを確認した。

図 J-3-1-1-15 に JAXA 研究開発部広報サービスからの引用を示す。

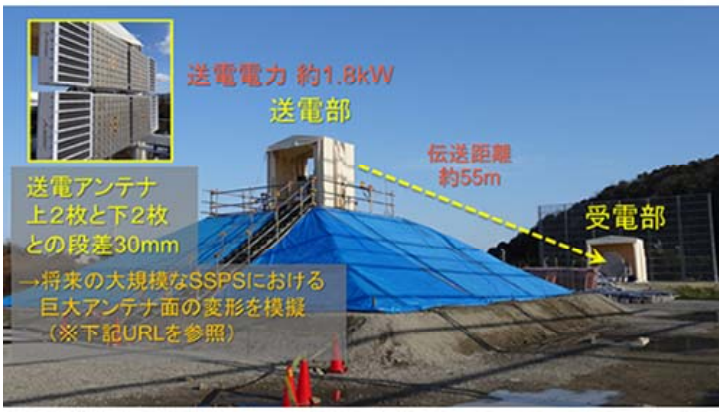


図 J-3-1-1-15　マイクロ波無線電力伝送地上試験／実用化実証（デモンストレーション）
（JAXA 研究開発部広報サービスからの引用）
（出典：http://www.ard.jaxa.jp/publication/event/2014/150301.html）

（3）無線送受電技術研究開発支援業務

無線送受電技術研究開発支援業務は平成21年9月に開始され、平成24年度末まで実施された事業内容と成果である。

初年度(平成21年度)には、本研究開発で扱う技術仕様の設定と作業計画の設定を行った。また、これらに基づき、具体的な設計検討作業、解析作業、調査作業を開始した。平成22年度から平成23年度は主にマイクロ波送電試験候補地の調査を実施し、候補地の絞り込みを実施した。平成23年度からは主に宇宙太陽光発電関連研究に関する調査を実施し、地上技術の SSPS への応用、効果的なデモンストレーションの検討および SSPS 関連技術の応用について検討を行った。

無線送受電技術研究開発の支援的な業務として以下の2つの調査を行った。

- マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査

  主要成果）候補地を調査し、JAXA 種子島宇宙センターと三菱電機赤穂工場を試験候補地として選定した。

- 宇宙太陽光発電関連研究に関する調査

  主要成果）国内外の関連技術動向を調査した。海外では、米国及び中国にマイクロ波 SSPS に関する動きがあり、動向を注目する必要がある。

①マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査

マイクロ波電力伝送試験を安全かつ効率的に実施するため、国内における屋内及び屋外試験候補地について情報収集や現地調査を行い、適切な試験候補地を提案するとともに、マイクロ波電力伝送試験の実現に必要な各種関係法令等に基づく手続き、安全対策、試験候補地が所在する自治体及び周辺地域住民の理解・協力を得るための方策等の課題抽出を行い、その対応方法を検討することを目的とした。

国内の試験候補地について調査を行い表 J-3-1-1-7 の試験候補地の要件に照らして評価し種子島宇宙センターと三菱電機赤穂工場がを選定した。なお、試験実施時期は現時点で未確定のため、1 か所に試験場所を限定するより、複数の候補を残しておき、試験実施時期確定時に、それらの候補から選定することとした。

候補場所の調査結果を表 J-3-1-1-9、表 J-3-1-1-10 に示す。

表 J-3-1-1-9 調査結果概要(種子島宇宙センター)

項 目	調査結果
試験エリア面積	・50m 以上の試験距離確保可能　注)センター内候補地は他にもあり (候補地 A:縦約 40m×横約 130m(約 5200 ㎡)) (候補地 B:縦約 30m×横約 130m(約 3900 ㎡)) ・ただし、縦幅が狭いため土地制約を受ける可能性 ・その他、打上げ期間中は警戒区域内のため利用不可
電源	隣接する建屋等から供給可能
上下水道	隣接する建屋等から供給可能
装置格納場所	隣接する建屋への格納が可能
温度環境	年間を通じて温度環境を満足する。(最低 10℃～28℃程度)
電波環境	周辺環境に影響を及ぼすものは特になし
宿泊施設	・種子島宇宙センター周辺(南種子町)の宿泊施設利用可能 ・センター最寄りの南種子町までは車で約 30 分の移動距離 ・センター内にはゲストハウスが設置(食堂利用可能) ・センター最寄りの南種子町の食堂等も利用可能
インターネット環境	JAXA から借用
公共対策	・両試験候補地の前方は公共の海岸となっており、サーフィン等の利用客への対応として立ち入り禁止区域設定等の対策を行う必要がある ・試験候補地後方の広場も一般に開放されており、影響評価や電波の伝送方向の調整等を実施する必要がある
フォークリフト、クレーン	JAXA 等から借用
候補地概要 (候補地 A:南側、 候補地 B:北側)	 (Google 地図)

表 J-3-1-1-10 調査結果概要(三菱電機赤穂工場)

項 目	調査結果
試験エリア面積	50m 以上の試験距離確保可能 (縦約 120m×横約 100m(約 12000 ㎡))
電源	供給可能(最大 500kVA)
上下水道	供給可能(隣接する建屋にトイレ設備等あり)
装置格納場所	三菱電機赤穂工場内倉庫や近隣業者の仮設テント借用を想定
温度環境	年間を通じて温度環境を満たす。(平均気温 5℃～27℃)
電波環境	・北側約 3.5km の高速道路(赤穂 IC)ETC への影響考慮が必要 ・北方向の航空機の航行への考慮が必要 ・東側には黒崎播磨株式会社の赤穂工場が隣接、東側対岸 2km には関西電力の赤穂発電所(南赤穂変電所)が立地 ・隣接する第 3 試験場の試験との日程調整も必要 ・電波遮蔽用フェンスの反射の可能性も考慮する必要 ・斜め設置の場合静止衛星(放送衛星)方向の確認も必要
宿泊施設	JR 播州赤穂駅周辺(1 駅 5 分)、赤穂御崎温泉、姫路駅等の宿泊施設が利用可能
インターネット環境	三菱電機赤穂工場のインターネット環境利用を想定
公共対策	・チラシ等による市役所、近隣住民への連絡が必要 ・その他、試験場近辺の家屋(北東方向約 150m)の居住状況の確認が必要
フォークリフト、クレーン	近隣の業者から借用可能
候補地概要	 (Yahoo 地図)

②宇宙太陽光発電関連研究に関する調査

有意義かつ効果的に本研究開発を進めるにあたり、本研究開発以外の関連研究の実施状況について把握することを目的として国内外の調査を行った。調査の結果、技術的な情報交換や体制やスケジュールの見直し等を必要に応じて実施することも考えてゆく。

a) 国内の研究動向

国内では、本研究開発の他には大学での要素技術を主眼にした研究開発以外に目立った活動はない。国内の研究動向の状況を表 J-3-1-1-11 にまとめる。

表 J-3-1-1-11 SSPS関連の国内研究動向

分野		調査結果の概要
システム関連	全般状況	国内では、本研究開発の他には大学での要素技術を主眼にした研究開発以外に目立った活動はない。ただしレーザーについてはJAXA が太陽光直接励起型レーザーの研究開発を行っている。
	軽量システム	三菱重工業が商用 SSPS で課題とされる輸送単価を現状程度に抑える代わりに SSPS の衛星重量を大幅に軽減することで、全体的に低コストで実現させる案を発表している。これは商用 SSPS の仕様に踏み込んだ、これまでとは異なる発想に基づくものである。
	屋内試験設備	京都大学では、生存圏研究所(京都府・宇治キャンパス)に平成22年度に高度マイクロ波エネルギー伝送実験装置(具体的には電力規模対応電波暗室及びマイクロ波ビーム計測解析処理設備他)並びに関連送受電設備を導入した。これらの設備は、本研究開発にとっても利用価値の高い試験設備である。
送電技術	半導体	GaN などの高効率半導体及びそれを用いた F 級増幅器などが新しい動きである。これらが地上の通信網に利用されれば、その波及効果として SSPS 実現に応用可能と思われる。

b) 海外の研究動向

海外では、米国及び中国にSSPSに関する動きがあり、今後の動向を注目してゆく必要がある。海外の研究動向の状況を表 J-3-1-1-12 にまとめる。

表 J-3-1-1-12 SSPS関連の海外研究動向

国名	関連機関	調査結果の概要
米国	NASA	米国での SSPS 研究は、NASA を中心に 1970 年代の終わりから断続的に行われてきた。最新の情報によれば、NASA が SSPS に興味を持ち始めており、2011 年 NIAC (NASA Innovative Advanced Concepts)の研究テーマの一つに選定され、小規模ながら研究開発に予算を割り振った。初年度は机上検討であるが、その後は技術実証試験や軌道上デモンストレーションも視野に入れていると言われている。今後の動向に注目する必要が有る。
	民間企業	Boeing 社、Lockheed Martin 社、Raytheon 社といった大企業での活動は見られない。2009 年に、電力会社 Pacific Gas & Electric (PG&E)と SSPS による電力を供給する買電契約(PPA)を結んだ中小企業の Solaren 社は、ロサンゼルス空港近くに施設を所有しているが、詳細は不明である。
欧州	ESA	SSPSは、総合研究プログラム(GSP、2003 年 1 月)の中で、2 年間 3 フェーズのプログラムとして採用され、第 1 フェーズの地上プラントと SSPS との比較等の研究が行われたが、それ以来目立った活動は見られない。
	民間企業	SSPS 研究を行っている EADS 社では、1.5μ 帯の赤外線レーザーを用いる方がマイクロ波より効率が良いとしている。EADS Astrium は 2020 年までに 20-25kW のレーザーを使ったネットワークが運用可能と考えている。また5年以内には国際宇宙ステーションを利用したレーザー方式による 10-20kW の軌道上実証を行うことも検討している。マイクロ波方式に関する検討は報告されていない。

表 J-3-1-1-12 SSPS関連の海外研究動向(続き)

中国	全般	近年、中国において、SSPSおよび関連の研究開発における活動は数多く存在する。その中には、重点的な国内SSPS研究開発の取り組みや、特別な国際的アウトリーチ活動が含まれる。欧州企業「Space Energy Group (SEG)」が関係するものが多いが、日本におけるこれまでの研究成果等についても調査を進めている。今後は中国の動向を意識した研究開発の加速や、技術情報の保護も考えていく必要があるかもしれない。
	CAST	●中国における SSPS 研究開発の中心は、中国空間技術研究院(China Academy of Space Technology: CAST)と言われている。CAST は、SSPS の最初のフィージビリティ・スタディや概念設計を行い、Ministry of Industry and Information Technology (MIIT)から研究開発のための資金が与えられている。CAST では、SSPS開発について以下の4つの重要課題を選定している。 (1) 地球対軌道輸送、(2) 宇宙空間における組み立ておよび構築(モジュラーシステム要素を使用)、(3) 高効率な太陽エネルギー変換、(4) 無線電力伝送 このうち(1)の宇宙への輸送の問題のみ解決する必要がありその他は対応可能と報告している。 ●CAST では最初の SSPS の商業化を達成するための 5 つのステップを提示している。第一に、CAST は Chinese Reference System の設計を 2010 年の間に完了する。その後、2020 年までに、軌道上構築および WPT 技術の産業レベル試験を終わらせる。第三に、2025 年までに、低軌道での最初の 100kW SPS の実証を完了する。2035 年までに、100 MW SPS の試験機で電力供給を実証する。最後に、2050 年までに、静止軌道(GEO)システム上で、最初の商用 SSPS を運用する。
	国際活動	2010 年春、四川省成都において開催された、四川国際クリーンエネルギーサミット(SICES 2010)では、米国、欧州および中国から多数参加し、中国、欧州、米国およびその他から一流の専門家を集め、中国のハイテク由来のクリーンエネルギープロジェクトの戦略的選択について議論された。特に SSPS を含む先端技術の商業化による、クリーンおよび持続可能なエネルギー開発のパラダイムチェンジ・アプローチが議論された。

c) SSPS 関連技術の応用

SSPS 関連技術の応用として調査した。その結果マイクロ波電力伝送技術の地上応用に関する期待は高く、まずは数 m 程度の送電距離が要求される B to B 機器でのセンシングデバイス向け送電やエネルギー・ハーベストとしての利用で、市場が立ち上がると予想されている。更に、電動バスや電気自動車向けの応用が期待されている。無線電力伝送技術が製品化されれば利便性の高さから一気に搭載が進む可能性もあると予測されている。その結果国内で100億円規模、全世界で 2 兆円規模の市場に成長するという予測も出されている。

d) 効果的なデモンストレーション

効果的なデモンストレーションを実施するために、過去に行われたSPRITZの公開（平成12年）、レーザー伝送実験施設の公開（平成16年）、ハワイ電力伝送実験（平成 20 年）を調査した。その結果、デモンストレーションの内容をメディアに取り上げられるためには、わかりやすい説明資料を準備するだけでなく、放映時間、入稿時間等を考慮したスケジュールを設定することが重要である。

また、SSPS に関する知名度を上げるためには一過的なデモンストレーションだけでなく、恒常的なイベント化する事が重要である。その一例として日本全国学生室内飛行ロボットコンテストへのアプローチを提案した。

③その他関連技術に関する調査

その他の関連技術として「植物へのマイクロ波の影響」を調査し、データを取得した。

人体への電磁波の健康影響については、総務省の電波防護指針のように安全基準が設定されているが、動植物については現在のところ基準が定められていない。SSPS、あるいは無線送受電技術の普及においては、受電部（レクテナ）近傍の動植物への影響をあらかじめ調査しておくことは有意義である。特に、植生は食物環境の基礎であり、動物のように自由に移動できないことから、影響度を定量的に調べることが出来る。

屋内実験設備（図 J-3-1-1-16）は、マイクロ波周波数は 5.8GHz を主とし、照射対象としては短時間で成長の様子を観察できるカイワレダイコン（双子葉植物）等を使用した。また屋内実験では、土壌温度変化の影響を除くため、土の代わりに水で栽培し、水温一定に保っている。これらの手法により、マイクロ波の植物に及ぼす影響について調査を行った。調査結果を表 J-3-1-1-13 に示す。

図 J-3-1-1-16　屋内実験設備および植物育成容器

表 J-3-1-1-13　植物へのマイクロ波の影響調査　実施状況

対　象	実施状況（マイクロ波周波数は 5.8GHz）
双子葉植物	・双子葉植物に影響が現れる電力密度について、段階的に照射実験を繰り返した。その結果、マイクロ波照射による温度上昇により成長促進が見られた（屋内実験） ・次世代への影響を調べるために、双子葉植物に連続したマイクロ波を照射し、種子を採取し、その種子を育てたが、異常は見られなかった。屋内実験と同様温度上昇による成長促進が見られた（屋外実験）
単子葉植物	・双子葉植物に見られる育成容器の包み込み現象を避けるため単子葉植物についてマイクロ波照射実験を行った。その結果、マイクロ波照射がある一定値以上の場合生育が良くなる傾向が見られた（屋内実験）

（4）無線送受電スピンオフ技術の研究開発

非接触給電技術としてのマイクロ波送電は、マイクロ波を制御することにより電磁誘導等の他の方式と比べて長距離間の送受電が可能となることから、様々な利用の場での活用が期待されている。

①スピンオフ技術実証システムの試作評価

短期間に事業化／製品化が期待される無線送受電スピンオフの実証システムを試作し、実証実験を実施した。

本研究開発では以下の2つの技術を導入して低コスト化を目指した。スキャッタードシステム方式（間引き方式）は送電装置の数を減らすことが可能となる技術であり、送電装置の低コスト化に寄与する。次に焦点化アンテナ方式は受電装置の数を減らすことが可能となる技術であり、受電装置の低コスト化に寄与する。

設計にあたっては下記を目標とした。

・周波数　　2.45GHz
・送電出力　10kW 程度
・送電距離　500m（最大）
・構成　　スキャッタードシステム方式

また、試作にあたっては下記を採用した。

a. 送電ユニット試作
・位相制御マグネトロン
・位相同期システム

b. ビーム制御ユニット試作
・レトロディレクティブ ／クローズドループ 併用方式

c. 計測ユニット試作

計測ユニットは送電するマイクロ波の電界強度を送電距離にあわせて計測できる。

主要なシステム仕様は、以下の通りである。

図 J-3-1-1-17 実証システム 基本形状
図 J-3-1-1-18 実証システム 基本構成
表 J-3-1-1-14 実証システム 主要諸元

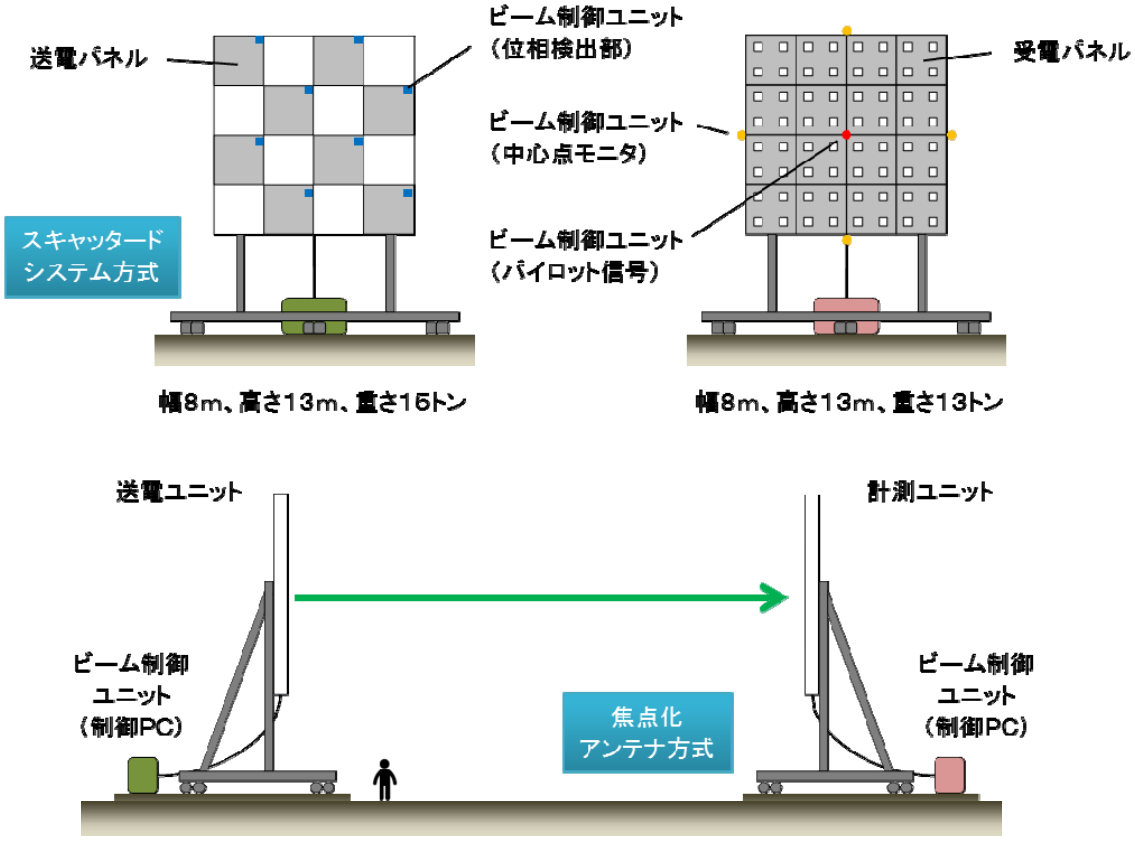


図 J-3-1-1-17　実証システム　基本形状

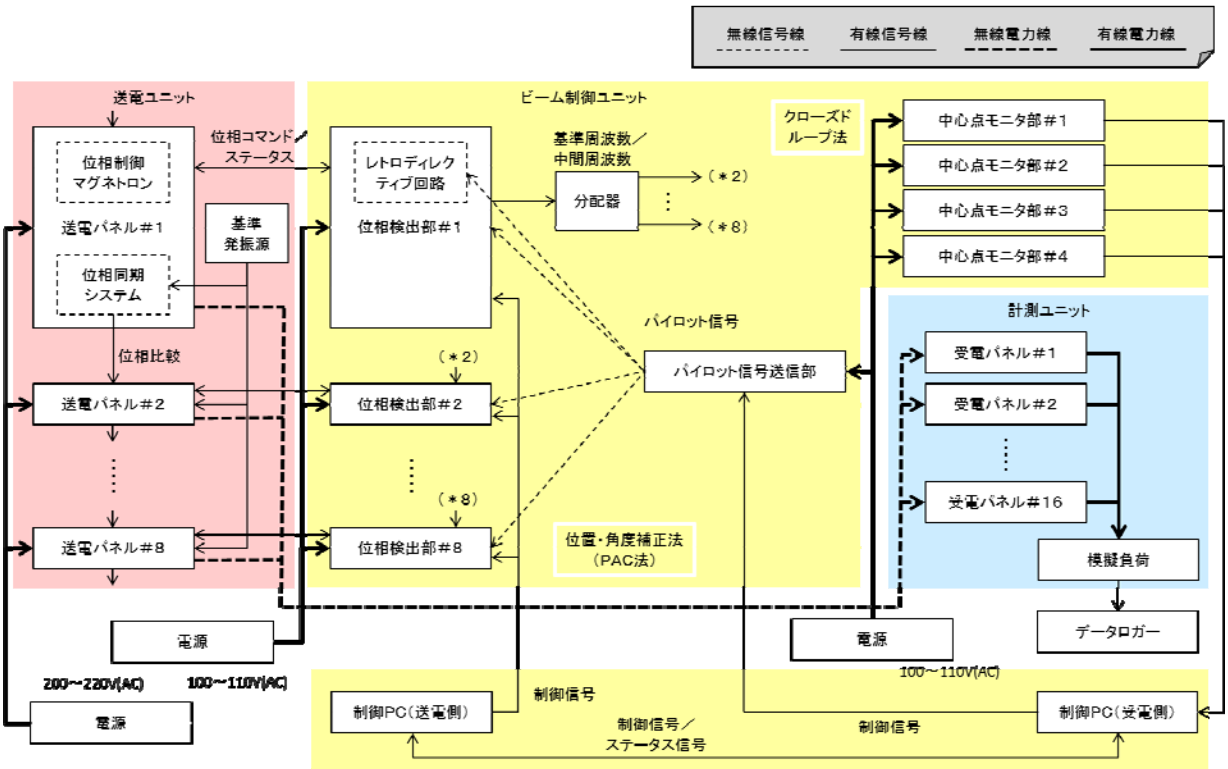


図 J-3-1-1-18　実証システム　基本構成

表 J-3-1-1-14　実証システム　主要諸元

項目	性能		備考
	値	単位	
送電ユニット			
・送電パネルのサイズ	2	m	
・マグネトロン発振周波数	2.45	GHz	
・位相制御回路効率	80	%以上	
・アンテナ効率	85	%以上	
・位相制御マグネトロン位相制御精度	17	° 以下	3σ値
・位相同期システム位相制御精度	17	° 以下	3σ値
ビーム制御ユニット			
・位置・角度補正法位相制御精度	17	° 以下	3σ値
・ビーム方向制御精度	0.1	° 以下	3σ値
計測ユニット			
・受電パネル数	16	枚	
・受電パネルのサイズ	2	m	
・アンテナ効率	80	%以上	
・整流回路効率	80	%以上	
・受電面積に対するレクテナ面積	11	%以上	
・送受電効率	12	%以上	

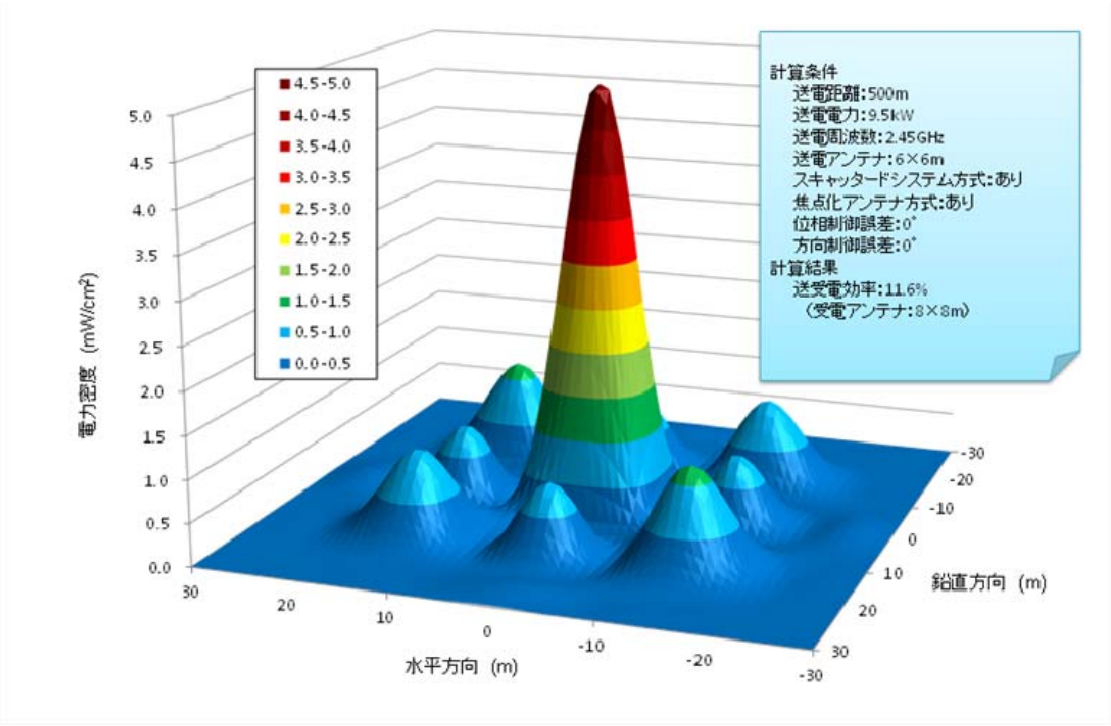


図 J-3-1-1-19　実証システム　主要諸元(付図)

実証システムを用いて無線送受電スピンオフシステムの有効性を確認するための試験を実施した。試験結果は以下の通りである。本試験結果から、無線送受電技術のスピンオフ技術は、短期間での事業化／製品化可能であることが、実証できたものと考えられる。

・実証システムを用いて、送電距離500m、送電出力約10kWの無線送受電試験を実施した。
・PAC法による位相角度制御は、目標の±17° 以下の精度を達成した。
・ビーム方向制御精度は、レトロディレクティブ法／クローズドループ法併用方式により、目標の±0．1° 以下の精度を達成した。

送電ユニット　　計測ユニット

図 J-3-1-1-20　実証システム試験　試験風景

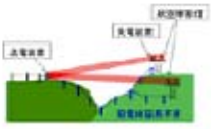
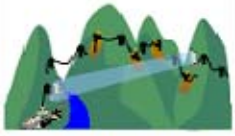
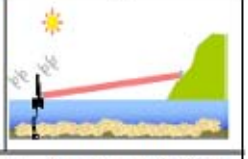
2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。（受電約 32W）

②電力インフラへの適用可能性の検討

マイクロ波無線送受電技術について、電気事業者の観点から電力インフラへの適用可能性について検討した。

様々な適用可能性が考えられる中、無線送受電技術の特徴を活かせる活用用途として、航空障害灯、応急送電、離島送電、洋上風力発電を選定し、その各々に対して、現行の設備・運用実態や課題を踏まえた無線送受電の適用可能性について検討した。表 J-3-1-1-15 に無線送受電技術の適用用途を示す。

表 J-3-1-1-15 無線送受電技術の適用用途

	航空障害灯	応急送電	離島送電	洋上風力発電
設備・運用実態と課題	・航空障害灯の消費電力は 1 基あたり僅か 1kW 未満 ・郡部鉄塔の場合、配電線延長等、航空障害灯供給工事に多額の費用が発生 ・代替手法もあるが、低出力のため供給対象が限定される	・台風・豪雨・地震・津波・雪害など自然災害による電力設備被害が甚大化 ・様々な被災状況に対応するため、電力設備の応急復旧のほかに出来るだけ多くの応急送電技術の確立が必要	・①本土と離島を海底ｹｰﾌﾞﾙで連系する方式と、②離島の内燃力発電所から供給する方式が存在 ・運用上②→①への切替が望ましいが、長距離、小規模離島の場合、採算が合わない	・欧州では数百 MW、陸上から 100km 以内の洋上風力が増加 ・再ｴﾈへの関心の高まりや固定価格買取制度の適用対象となったため日本も今後普及の見込み
送電電力	1kW 未満	数百 kW	5MW～40MW	数百 MW
送電距離	500m 程度	―	30km～150km	100km 以内
難易度	低	中	大	大
無線送受電適用のイメージ				
無線送受電技術適用時の課題	・安全性に問題がないこと、代替手法と同等若しくはそれ以上のコストメリットと供給信頼度が得られること			
	・風荷重増加に伴う鉄塔補強の軽減のための、鉄塔搭載設備のｺﾝﾊﾟｸﾄ化 ・鉄塔の揺れによる指向性への悪影響防止	・無線送受電設備の搬送性の向上	―	―

上記4つの適用対象のうち、必要とされる送電電力と送電距離が「小電力、近距離」になるほど難易度が低く、逆に「大電力、長距離」になるほど難易度は高くなる。今回、最も難易度が低い「航空障害灯」への適用可能性について検討した。

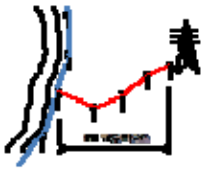
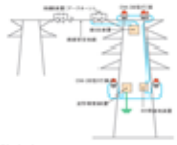
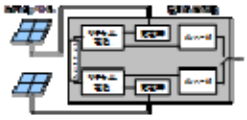
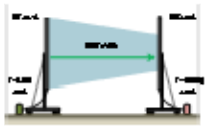
表 J-3-1-1-16 に、航空障害灯の電源供給方式の得失比較を示す。

航空障害灯の電源は、配電線から供給するのが一般的であるが、鉄塔は一般的に僻地に建設されるため、以下の課題が見受けられる。

・周辺に既設配電線がなく、長亘長の配電線新設が必要となるケースが多い。

・山間部等地理的条件が悪く、配電線建設コストが割高となる。
・設備巡視や電線に接近する樹木伐採等、設備の保守・運用に労力を費やす。

表 J-3-1-1-16 航空障害灯の電源供給方式の得失比較

	配電線供給	静電誘導方式	太陽光+蓄電池方式	無線送受電
システム構成		 (出典)ガンコーシャ HP		
建設費用	22.5百万円 (鉄塔1基あたりの航空障害灯供給平均工事費)	- (要求仕様の設定や現地の設置状況等に大きく影響するものと思われ、敢えて未記入)	29百万円 PV　：2.5百万円 蓄電池　：4.5百万円 制御装置　：12百万円 設置工事費：10百万円	80百万円 送電部　：40百万円 受電部　：30百万円 設置費用：10百万円 ※無線送受電装置の設置風景や施工方法次第では、本装置を加味した強度計算や鉄塔の補強費用が新たに発生
供給信頼度	台風等による配電線事故の影響を受ける	鉄塔建設直接(未充電時)や送電停止時の電源供給が課題	連続不日照日数への考慮が必要	鉄塔設置の場合は、鉄塔の揺れによる指向性への影響が懸念

航空障害灯の電源供給方式として、配電線供給の他に、静電誘導方式や「太陽光＋蓄電池」方式が存在する。配電線供給以外の 2 方式は、配電線事故の影響を受けないというメリットを有する一方で、静電誘導方式は、送電線電圧を課電しないと発電電力が得られない他、発電電力が一般的に小さいとの課題を有し、また、「太陽光＋蓄電池」方式は、発電電力が天候に左右されるため、供給信頼度の担保が難しいとの課題がある。

2.4GHz 帯のマイクロ波無線送受電技術を航空障害灯の電源供給に適用する場合、鉄塔の揺れに伴う指向性の悪化・供給信頼度低下、代替手法と比べて割高な建設費用、風荷重増加に伴う鉄塔補強の軽減のための鉄塔搭載設備のコンパクト化などの課題が見えた。それらへの対策の一案として、マイクロ波の周波数帯を高めること(例:24GHz 帯)により、鉄塔搭載装置の大きさ縮小(8m×8m から直径 3m へ)、正面の受風面積縮小(64m^{2}から 7m^{2}へ)、重量軽減(数百 kg から 50kg へ)が考えられるなど、具体策も抽出できたことから、電力インフラへの適用可能性が見えた。

Ｊ－３－１－２　個別要素技術成果

マイクロ波エネルギー送受電技術の確立に向け、高効率・軽量薄型・高精度を実現するための個別要素技術の要素技術開発を行った。いずれの目標も、世界的に類のないもの、あるいは最高水準の効率を目指した。

具体的な成果については、以降、以下の順で述べる。

（1）高効率薄型送電部の開発
①送電効率
1）サブアレイアンテナ
2）垂直給電回路
3）電力増幅器（HPA）
②薄型軽量化
1）給電部（BFN）
2）実装
（2）高効率受電用整流ダイオードの開発
①高効率受電用整流ダイオードの必要性
②高効率受電用整流ダイオードの検討
1）基礎試験
2）GaN ショットキーバリアダイオードの整流回路への適用検討
（3）位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術開発
①開発の課題、各方式の概要
②開発目標
③開発内容
1）実現性の検討
2）有効性の検討
④今後の課題・実施予定事項

（1）高効率薄型送電部の開発

将来のＳＳＰＳでは宇宙に設置される送電部にとって、高効率や薄型化のための技術確立は必須である。本研究開発では各々に対して具体的な数値目標を設定し、さらにそれを実現する技術要素を小項目に分類して取り組み、目標を達成した。

送電効率最終目標

・GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上

・送電部としての効率は 30%以上

薄型軽量化最終目標

・アクティブ集積アンテナで構成して送電モジュールは厚み 40mm 以下

①送電効率

以下、送電部の効率向上に関与する要素に関わる検討結果を示す。

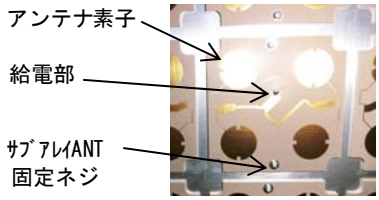
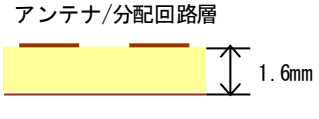
1）サブアレイアンテナ

HPA モジュールからの出力電力を効率良く空間に放射させる必要があるため、アンテナ素子部には高放射効率特性が求められる。また、本サブアレイは 1 つの HPA モジュール出力に対して4つのアンテナ素子に分配給電を行うことから、低損失の分配回路部が必要となる。

サブアレイ薄型化のためには、アンテナ素子層と分配回路層を同じ層上に構成する 2 層基板構成が望ましい。これにより、サブアレイ ANT 基板厚を 1.6mm まで薄型化することができた。さらに、多層積層基板を用いる必要がないため PTFE 系の低損失基材を用いることができ、放射効率の改善も可能となる。

高放射効率及び薄型化の両立を目的とした4素子サブアレイの設計を行い、部分試作で性能確認を行い、損失は-0.27dB を得た。表 J-3-1-2-1 に本サブアレイアンテナ2層基板モデルを示す。

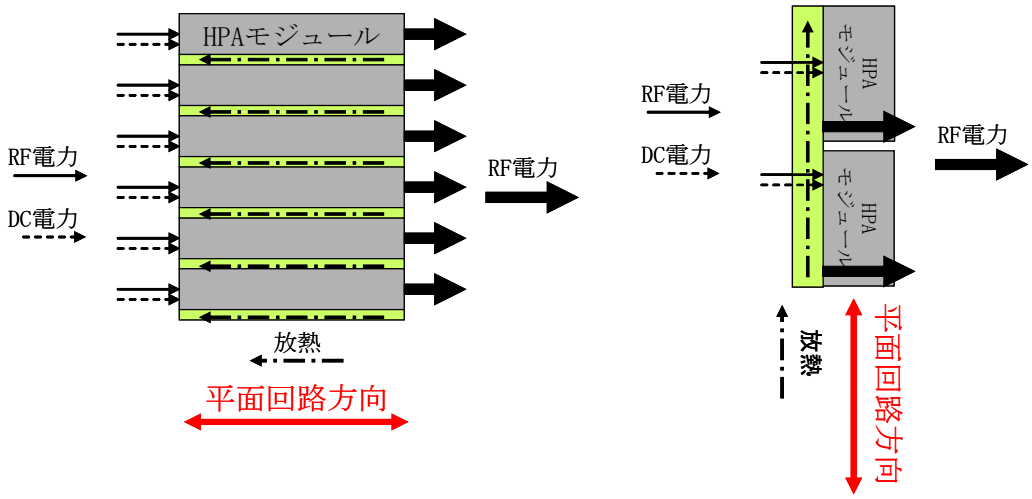
表 J-3-1-2-1　サブアレイアンテナ　2層基板モデル

	2層基板モデル
外観図	
層構成	
厚さ	1.6mm
放射効率（設計値）	-0.27dB

2）垂直給電回路

送電部で採用する薄型 HPA モジュール構造は、図 J-3-1-2-1 に示すように、従来の一般的な構想では薄型化には限界があることから、HPA モジュール内部の平面回路方向と RF 電力の給電方向が垂直の関係を持つような構造を採用した。アンテナ基板と接続する HPA モジュールの出力部を垂直給電回路と呼ぶ。

図 J-3-1-2-1 に示した構造以外に薄型 HPA モジュール構造として放熱板をアンテナと HPA モジュールで挟み込む HPA･アンテナ背面合わせ構造がある。この構造では、HPA モジュールの取り外しが困難になるといった問題とともに、HPA モジュールの出力部からアンテナまでの経路が長くなることから電力損失が増加する欠点があるため、採用しない。



HPAモジュール従来構造　　薄型HPAモジュール構造

図 J-3-1-2-1　従来モジュール構造と薄型 HPA モジュール構造の差異概念

垂直変換回路については、HPA モジュールの薄型化という観点から将来性がある、カバー同軸方式を採用した。カバー同軸方式とは、HPA モジュールのカバーに導体芯線を誘電体で円筒状に覆った端子を挿入し、カバーと一体で同軸線路を形成する方式である。導体芯線は両端ともアンテナ基板や HPA モジュール内の基板とはんだ付けで接続する。

HPA モジュール内部の平面回路方向と、垂直な関係になる RF 電力給電方向を結びつける低損失（設計目標値−0.2dB、解析値−0.1dB）な垂直給電回路を HPA モジュールの設計に適用した。

3）電力増幅器（HPA）

GaN 半導体素子単体用の評価系を構築し、素子レベルでの電力付加効率を検証した。さらに、性能実証用モデル HPA を開発し、最適条件で電力付加効率 70%程度が可能であることを確認し、その結果、送電モジュールに使用する HPA で電力付加効率 60%以上の成果を得た。

HPA モジュール用に GaN 素子を新たに開発し、高効率化のために F 級増幅回路を採用するなどして出力および効率の最適化を図った。また、入出力整合回路基板も HPA モジュール用に最適設計を行い、GaN 素子と入出力整合基板をメタルパッケージに収納し、部品レベルの HPA 開発を行った（HPA パッケージ）。

図 J-3-1-2-2 に HPA の回路構成を示す。C 帯ではトランジスタの寄生成分が高調波整合に大きな影響を及ぼす。そこで、高調波ロードプル測定により素子最大効率を与える負荷インピーダンスを入力側、出力側ともに 3 倍波まで求め、実測で得られた最適負荷インピーダンスに基づいて回路設計を行った。

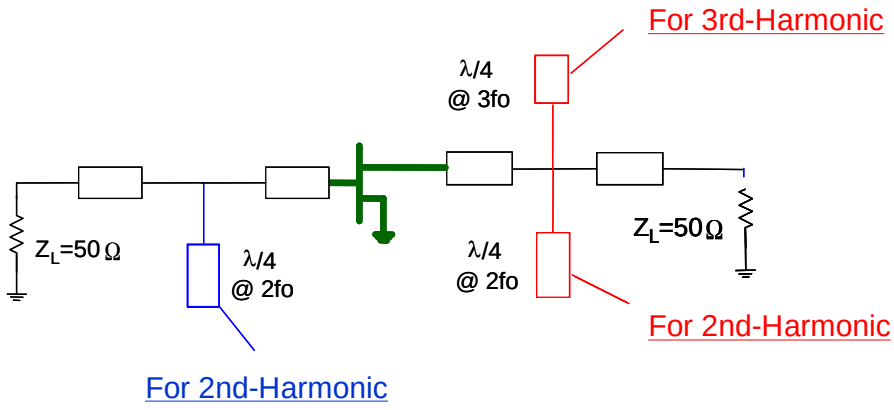


図 3-1-2-I-2 HPA パッケージの回路構成

高調波ロードプル測定の結果、素子効率は出力側では 2 倍波、3 倍波双方の反射位相に依存するのに対して入力側では 2 倍波の反射位相にのみ依存することが分かったため、入力側には 2 倍波の反射回路のみ、出力側には 2 倍波、3 倍波双方の反射回路を取り付けている。高調波反射回路は 1/4 波長のオープンスタブで構成し、反射係数を大きくするために GaN HEMT 直近に配置し、反射回路から GaN HEMT までの電気長を調整することで反射位相を調整している。

図 J-3-1-2-3 に HPA の外形と内部の様子を示す。パッケージの外寸は 21mm×12.9mm（高さは 4.3mm）、整合回路の実効寸法は 6.4mm×8mm である。

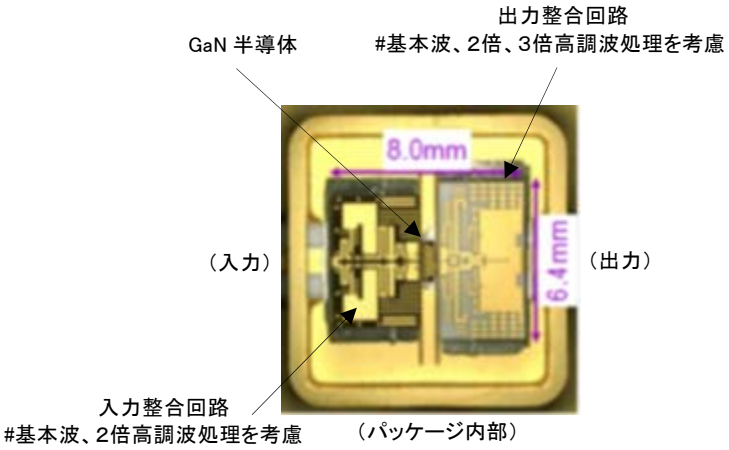


図 J-3-1-2-3　性能実証モデル HPA

図 J-3-1-2-4 に HPA 評価結果を示す。HPA パッケージ単体の電力付加効率(PAE)の仕様 60%以上に対して、70.5%の良好な結果が得られた。

また、高調波についても-60dBC 以下の良好な結果が得られた（図 J-3-1-2-5）。

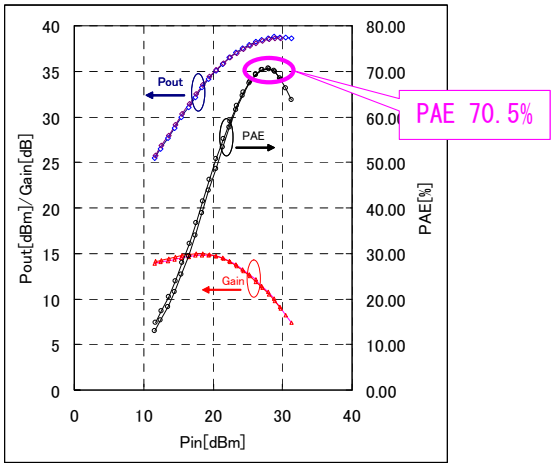


図 J-3-1-2-4　HPA 評価結果

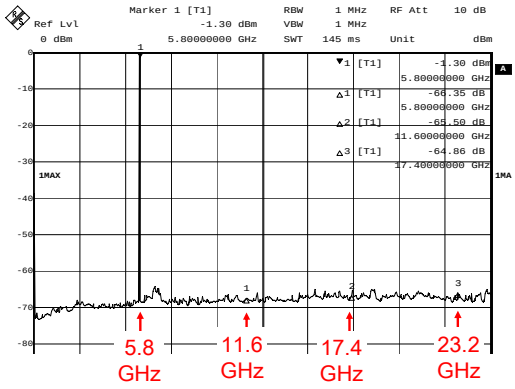


図 J-3-1-2-5　HPA の高調波/スプリアス特性の評価結果

試作した最終段増幅器の電力負荷特性が電力付加効率(PAE)最大 70%を達成した。また素子の特性および製作時のばらつき等を考慮しても PAE 平均 60%以上を達成した。

②薄型軽量化

将来、宇宙用としての送電部には、高度の薄型軽量化が求められることから、既存の概念にとらわれず、大幅な成果が期待できる方式を模索した。本件に関与する要素に関わる検討結果を示す。

1）給電部（BFN: Beam Forming Network）

給電部は、送電モジュール(76 サブアレイ)において、サブアレイ内の各 HPA モジュールへのマイクロ波電力および電源・制御信号を供給するための回路である。

給電部は、図 J-3-1-2-6 に示すように、送電モジュールごとに 4 セットの 19 分配器で構成され、それぞれ 2 層トリプレート線路構成を用いた。トリプレート線路では、基板厚が薄くなるにつれて、線路幅が細くなる。サブアレイの薄型化を図るため、想定される基板作製誤差を与えた場合の各ポートの透過振幅バランスから基板厚を選定した。また、図 J-3-1-2-7 に、19 サブアレイの外観を示す。

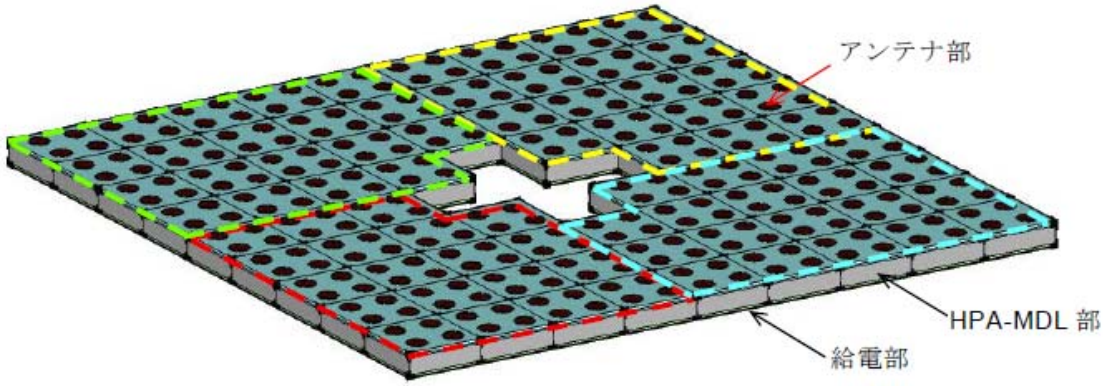
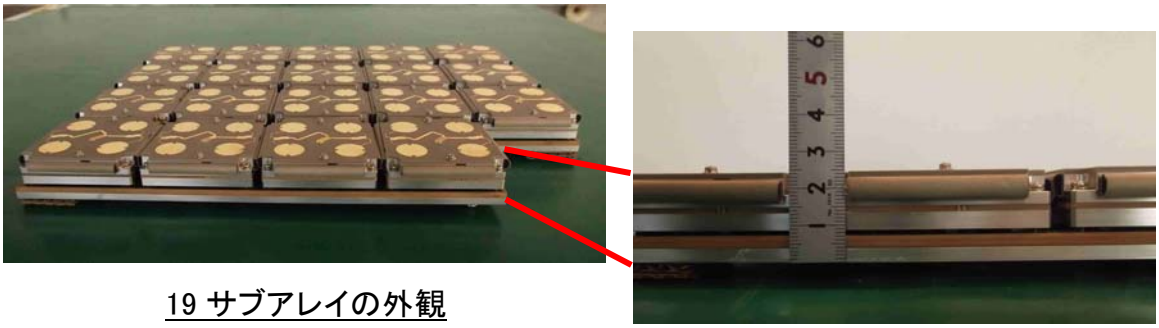


図 J-3-1-2-6　送電モジュール(76 サブアレイ)構成

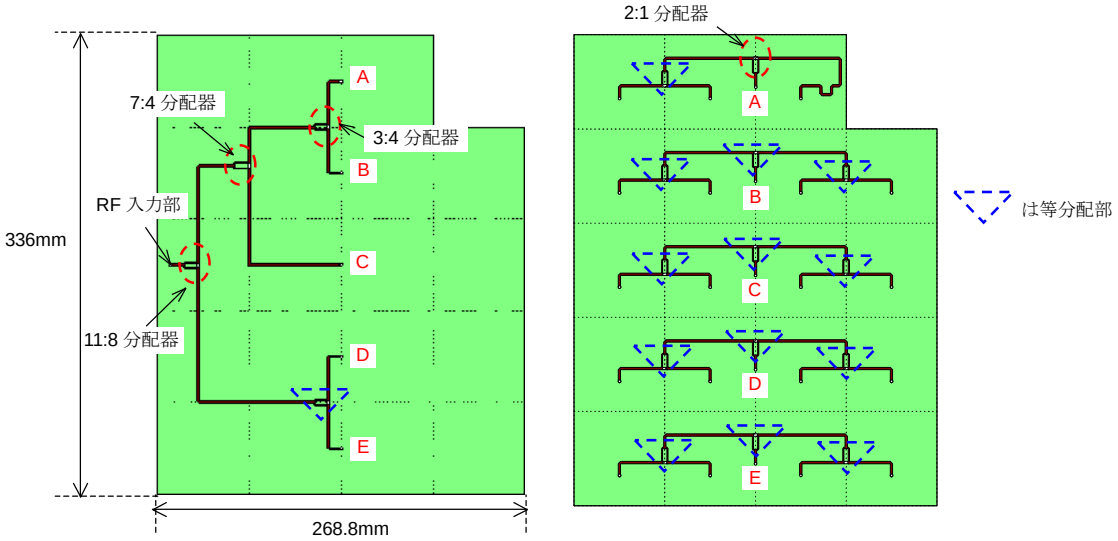


19 サブアレイの外観　　サブアレイの厚み

図 J-3-1-2-7　19 サブアレイの外観

19 分配部を構成する線路レイアウトは図 J-3-1-2-8 のようになり、1 層目で 1 入力を 5 分配し、2 層目で 5 入力を 19 分配する回路構成とした。配線に際し、それぞれの出力で等振幅、等位相特性が得られるよう配線してある。回路としては複数種類の不等分配回路、および等分配回路から成り、それぞれウィルキンソン型分配回路を用い

ることで、端子間のアイソレーションを確保してある。



（a） 1 層目パターンレイアウト　（b） 2 層目パターンレイアウト

図 J-3-1-2-8　給電部構成図

給電部は薄型化を実現するため、RF 部と制御部を同一基板内での配線とし、RF/制御部を含めた薄型化を図った。図 J-3-1-2-9 にサブアレイ番号と給電部番号を示す。

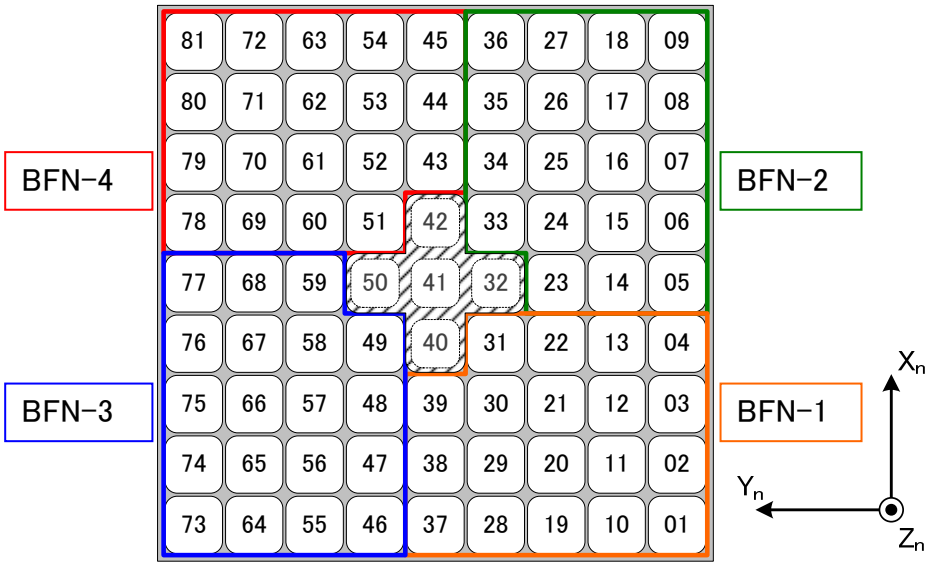


図 3-1-2-I-9　サブアレイ番号と給電部番号

HPA モジュールの前段に位置している給電部は、薄型化を重視した設計を行い、部分試作で設計の妥当性を確認した。この結果、サブアレイ厚さは仕様 40mm に対して、突起部を除き 25mm を達成した。

2）実装

HPA モジュールの実装では、既述の垂直給電構造で HPA モジュールの薄型化を図るとともに各デバイスの性能を安定して実現させるための小型アイソレーション構造を考慮した。

- デバイス間のアイソレーションを確保できるよう導体のシールド構造となる壁を設ける構造とする。
- 空間の高さや幅に不要な共振が発生しない構造とする。構造が複雑な箇所や部品寸法の関係で空間が広くなる箇所については、シールドチューブ等を用いて高周波の回り込みを抑制する。

図 J-3-1-2-10 に HPA モジュールの HPA 出力部のアイソレーション構造を示す。HPA 出力部は全体のカバーとは別に小型カバーで覆う複雑な構造であり、HPA モジュールの性能に大きく影響を与える部位であるため、HPA 出力部に着目して検討を進めた。

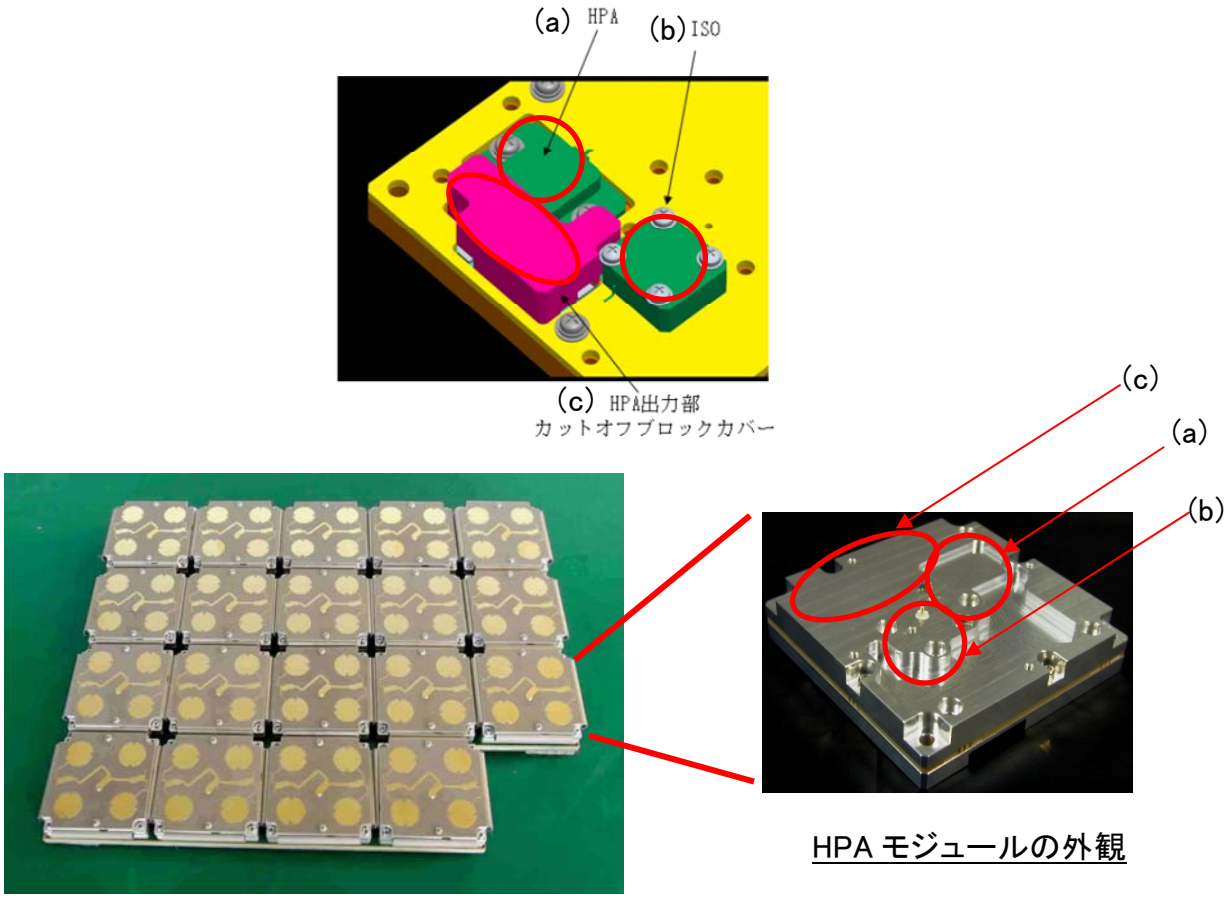


図 J-3-1-2-10　HPA 出力部アイソレーション構造

システムから入力された RF 信号を 5 ビット移相器で位相を制御し、DA（ドライバーアンプ）と HPA（ハイパワーアンプ）で増幅してアンテナに出力する構成となっている。

HPA モジュールの主な機能を以下に示す。 また、HPA モジュールのブロック図を図 J-3-1-2-11 に示す。

ア. RF 電力増幅機能

HPA モジュールに入力された信号を規定の出力レベルまで増幅する機能

イ. 位相制御機能

HPA モジュールに入力された信号に応じて透過位相をデジタル位相制御する機能(5 ビット移相器)

ウ. ON/OFF 機能

外部制御信号により上記ア.の機能を ON/OFF する機能

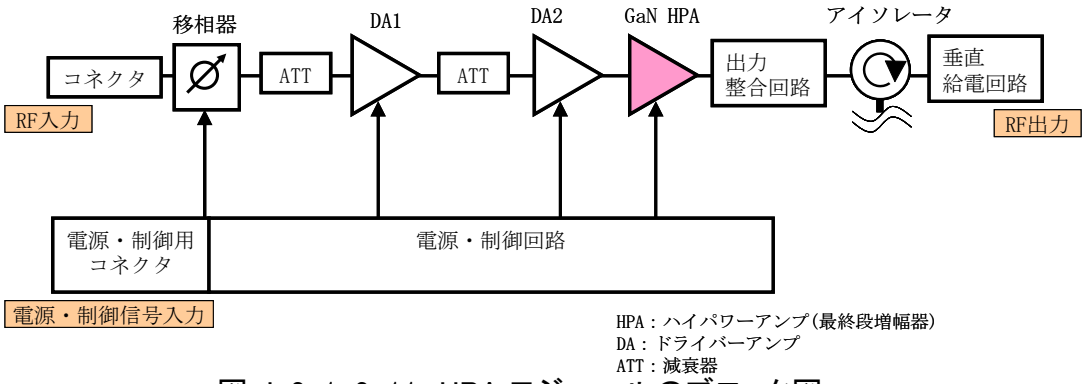


図 J-3-1-2-11 HPA モジュールのブロック図

HPA モジュールの薄型化を図り、かつ各デバイスの性能を安定させるための小型アイソレーション構造を設定した。

（2）高効率受電用整流ダイオードの開発

マイクロ波を直流電力として取り出すための整流回路の基本回路は図 J-3-1-2-13 のとおりであり、中でも効率を左右する主要構成品は整流ダイオードである。多数の整流ダイオードを使用するマイクロ波電力伝送試験モデル用の受電部では、コスト効率の観点からSi半導体等を利用した市販のダイオードを使用する計画で進めたが、それとは独立して高効率の整流ダイオードの開発に取り組んだ。

本研究開発を始める前の知見として、レクテナアレイを定格電圧近くで使用すると、素子単体のときとは異なり、変換効率の劣化や、場合によっては破壊されるといった現象が見られた。そこで、将来の実用 SSPS で必要な高い目標につなげるため、より高効率が期待できるGaN半導体等を利用したマイクロ波受電用整流ダイオードを試作した。このダイオード単体の RF-DC 変換効率は80%以上を目標とした。

①高効率受電用整流ダイオードの必要性

レクテナ素子は高い動作電圧で高い変換効率が得られるため、通常は整流ダイオードの耐電圧の定格近くで使用される。レクテナアレイでは、高い変換効率を達成するために、レクテナ素子を高い電圧で動作させ、極力電流を減らし、変換回路で損失を低減することが要求される。

この要求に適合する整流方式として、図 J-3-1-2-12 に示す単一の伝送線路上、整流ダイオードと入出力フィルタで構成される自己バイアス整流方式を採用する。

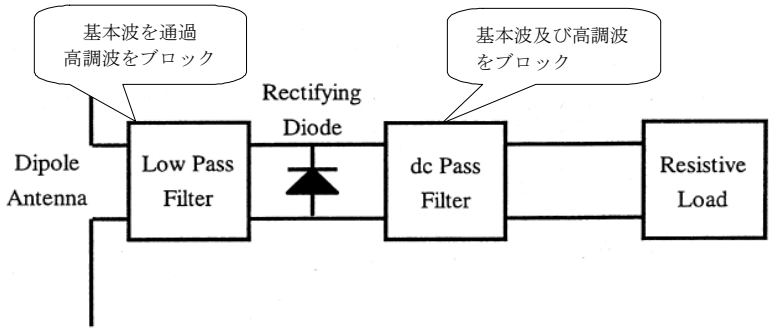
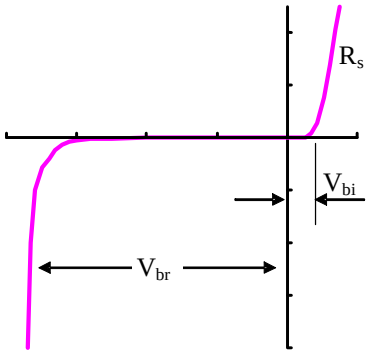


図 J-3-1-2-12　自己バイアス整流方式レクテナ素子

この時、自己バイアス整流方式の能力を最大限に発揮するために、高効率受電用整流ダイオードには、基本的には、高い逆耐電圧(Vbr)、低いオン抵抗(Rs)、低い立上り電圧(Vbi)等が要求される（図 J-3-1-2-13）。



Rs　:オン抵抗
Vbi　:立上り電圧
Vbr　:逆耐電圧

図 J-3-1-2-13　整流ダイオードのパラメータ

このような要求に対して、耐圧や高温特性に優れた特性を有する窒化ガリウム(GaN)が、これまでのシリコンやガリウム砒素に代わり、物性面、プロセスの成熟度から見て有望な材料と考えられている[1]。

ここで、受電電力の大小により整流ダイオードの特性パラメータに対する要求は相反したものとなるが、それらを同時に満足する GaN 系ショットキーダイオードの例を図 J-3-1-2-14 に示す。

ここでは、アノード電極が電極①と電極②の二重電極を構成し、AlGaN／GaN ヘテロ接合の負のしきい値電圧の絶対値を、アノード電極①の逆方向耐圧より小さく選ぶ。それにより、アノード電極①による逆方向漏れ電流がカソード電極に到達することが抑制され、低いオン抵抗 Rs と高い逆方向電圧 Vbr の実現を目指す。

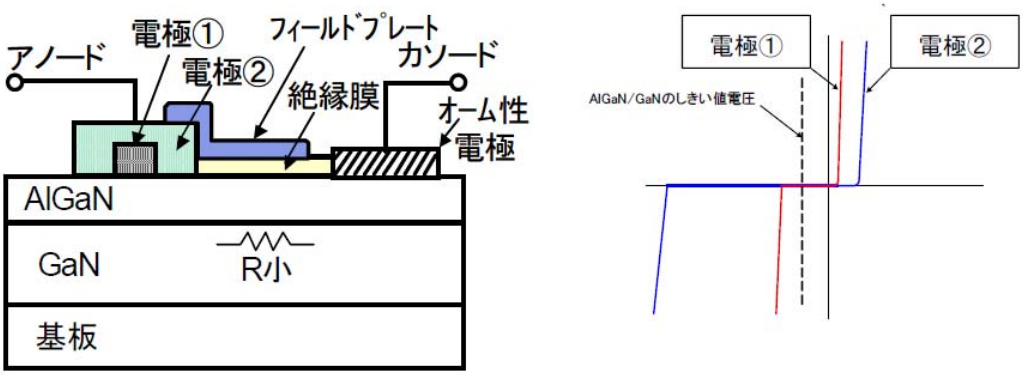


図 J-3-1-2-14　高効率整流ダイオードの例[2]

[1] 「レクテナ用整流ダイオードに関する調査」、平成17年度、JAXA

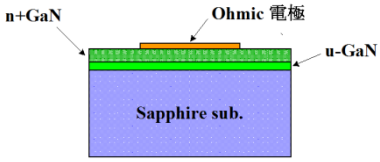
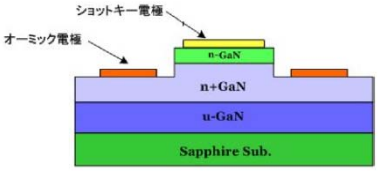
[2] 「ショットキーダイオード」；特許出願番号：2007-003952、公開番号：2008-172035

②高効率受電用整流ダイオードの検討

1）基礎試験

レクテナ整流回路の RF-DC 変換効率を改善するためには、そこに用いるショットキーバリアダイオードの特性として、低抵抗（2[Ω]程度）、低容量（1[pF]程度）、低立上り電圧（0.5[V]程度）、高耐圧（40[V]程度）が要求される。これらを実現させるための各要素の基礎試験を実施した。試験結果概要を表 J-3-1-2-2 に示す。

表 J-3-1-2-2 基礎試験結果概要

試験	項目	内容	結果
1	低抵抗化のための基礎試験	【評価内容】 TLM によるコンタクト抵抗（Rc）の評価 【評価構造】  	熱処理を施すことによって 1[Ω]以下程度の低減効果が認められた
2	低 Vbi 化のための基礎試験	【評価構造】 I-V 特性取得による立上り電圧（Vbi） 【評価構造】  	試験 1 のショットキー電極では Vbi と Vbr の関係からバランスの良い値に設定できる可能性があるが、条件出しが難しい。 一方、試験 2 では概ね特性が安定。

2）GaN ショットキーバリアダイオードの整流回路への適用検討

ショットキーバリアダイオードの構造は大きく分けて「縦型構造」と「横型構造」がある。図 J-3-1-2-15 に構造の概要を示す。これらの構造の GaN ショットキーバリアダイオードのレクテナ整流回路への適用について検討した。

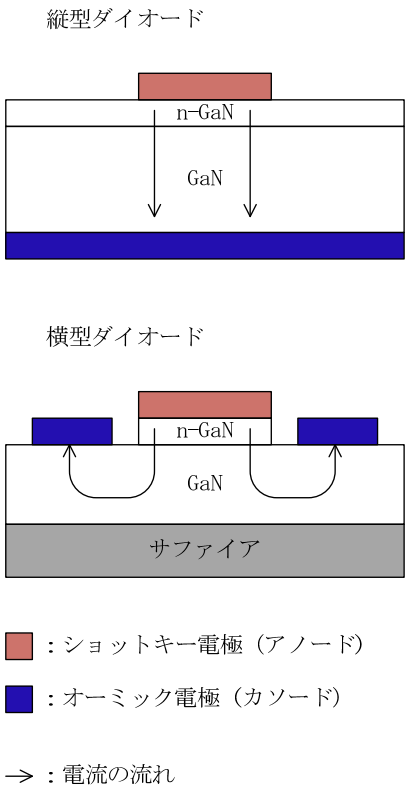


図 J-3-1-2-15　ダイオード構造概要

a. 性能向上ダイオードの試作と評価

縦型電極構造の基本形ダイオードを試作して、変換効率 71.4%（5.8GHz、入力電力 1W）を実測した。この値は、5..8GHz 帯における GaN 半導体を用いたレクテナ整流回路では世界最高水準である。

b. 更なる性能向上に向けて

目標効率（80%）を実現するためのダイオードパラメータは、パラメータごとに実現できることを、試作を通して確認した。表 J-3-1-2-3 にダイオードパラメータ（目標値）を示す。

表 J-3-1-2-3　ダイオードパラメータの目標値

No.	項目	目標値
1	立上り電圧 Vbi	0.5[V]以下
2	逆耐電圧 Vbr	40[V]以上
3	等価直列抵抗 Rs	2[Ω]以下
4	接合容量 Cjo	1[pF]以下

それらのパラメータを、ダイオードとして実現することで目標効率達成の見込みが

得られた。これを実現するためには主に以下の研究開発が必要となる。

－立上り電圧が低いショットキー電極材料の選定と特性把握および特性安定化の研究。

－損失要因となる抵抗を低減するために、低抵抗 GaN 層の厚みを薄くする製造技術の開発

以上から、GaN 半導体を用いたレクテナ整流回路の RF-DC 変換効率 80[%]を実現するために必要な課題と改善策を抽出することができた。

（3）位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術の開発

① 開発の課題、各方式の概要

宇宙太陽光発電システムでは、数百～千万枚の送電パネルから送電されるマイクロ波の位相を同期させる技術が必要である。

本研究開発では、2つの送電制御技術の実現性及び有効性の評価・検討を行って技術の確立を行い、将来の宇宙太陽光発電システムの実現に資することを目的とする。

位置・角度補正法（PAC法）とは、地上からのパイロット信号を利用して、各送電パネル部の位置ズレを推定し、ズレている分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正しておく方法である。（図 J-3-1-2-16）

並列化法とは、送電パネル部毎に送電電波の周波数変調を行ない、受電側で基準となる周波数との重ね合わせをすると、位相の誤差分だけ変調周波数に出力が発生する原理を利用して、送電パネル部毎の位相の誤差を検知し、検知した誤差分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正しておく方法である。（図 J-3-1-2-17）

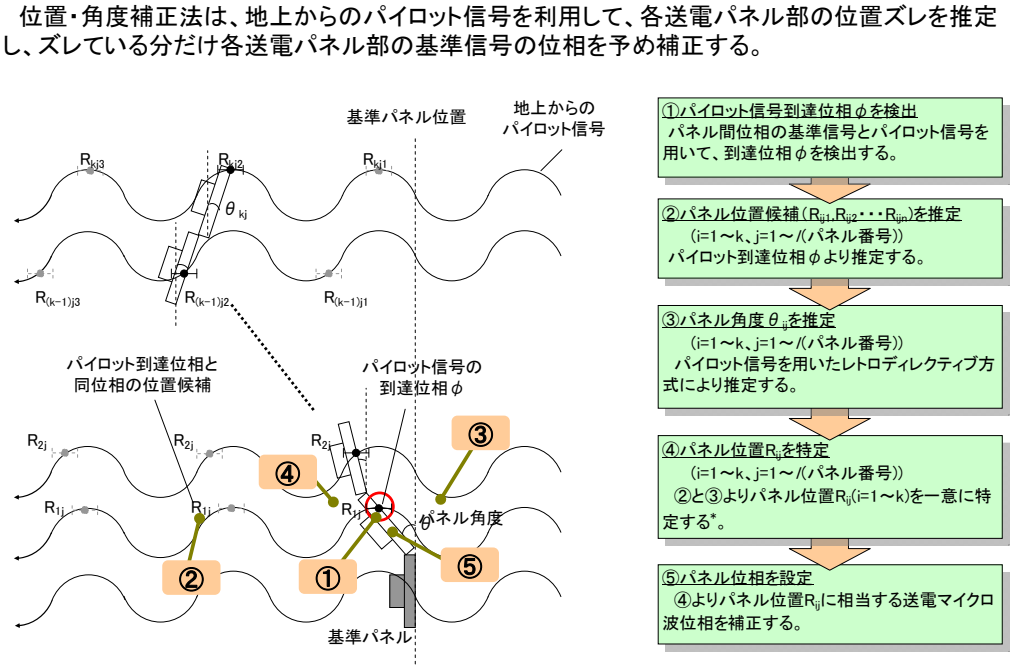


図 J-3-1-2-16　位置・角度補正法（PAC法）

並列化法は、送電パネル部毎に送電電波の周波数変調を行ない、受電側で基準となる周波数との重ね合わせをすると、位相の誤差分だけ変調周波数に出力が発生する原理を利用して、送電パネル部毎の位相の誤差を検知し、検知した誤差分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正する。

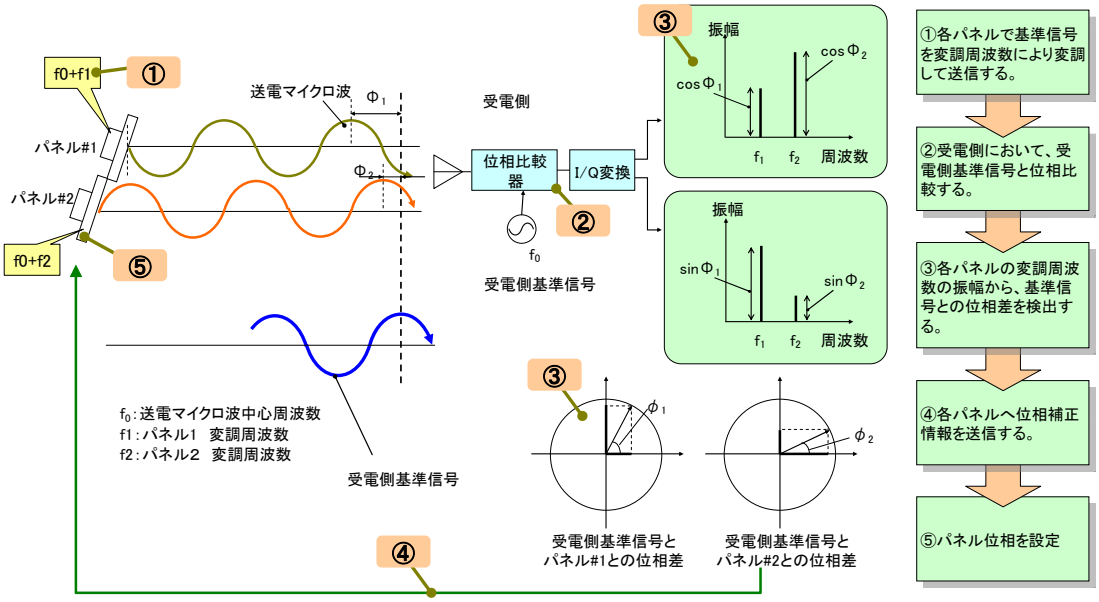


図 J-3-1-2-17 並列化法

②開発目標

“位置・角度補正法(PAC法)”及び“並列化法”の実現性及び有効性を評価するための目標値を以下に示す。

(a) 送電制御性能の実現性

【目標値】送電制御性能(精度) :±12° 以下

送電制御性能(処理速度) :400 秒以下/サイクル

(b) 実用システムに適用した場合の有効性

【目標値】無線電力伝送効率の低下量 :1%以下

不要波の発生レベル :0.3W/m^2 以下

③開発内容

1) 実現性の検討

PAC法及び並列化法の各々について基本原理の整理、送電制御性能向上の対策の具体化を行い、これらから、基本仕様として、機能ブロック図及び処理ロジックを設定した。機能ブロック図については、基本原理を実現するための電気回路として具体的な RF 機器の主要特性をまとめ、機器の校正までブレークダウンした。また、処理ロジックについては、送電制御を行う 1 サイクルの処理ロジックとして、処理に要する

時間の大きい送電パネルごとにソフトウェアや詳細通信処理ロジックを設定した。

上記の基本仕様に基づき、PAC法及び並列化法の送電制御性能として、処理速度及び精度について解析による評価を実施した。処理速度の解析では、通信処理ロジックに基づき、各通信ステップに必要な処理時間を既存品ベースで見積り、積み上げ計算した。精度の解析では、各構成機器の精度誤差を既存品ベースで見積り、高周波回路シミュレータ(Microwave Office)で各精度誤差が送電制御精度に与える影響を求めた。解析結果を踏まえて、PAC法及び並列化法の送電制御性能のキーとなる要素を試作し試験評価(要素試作試験:図 J-3-1-2-18)を行った。更に、要素試作試験の結果を踏まえて、PAC法及び並列化法の送電制御性能をタートルで評価できる原理モデルを試作し試験評価(原理モデル試作試験:図 J-3-1-2-19)を行った。

解析、要素試作試験、原理モデル試作試験の結果を表 J-3-1-2-4 に示す。位相精度については、理想的な解析評価に対して、実際に機器の製作を行った原理ﾓﾃﾞﾙでは各種誤差の影響により、PAC 法で目標値を若干オーバするものの、並列化法で目標値を満足する結果となった。処理速度については、理想的な解析評価に対して、通信のプロトコル等の製作を行った原理ﾓﾃﾞﾙでは通信の待ち時間などの影響で、並列化法で目標値を若干オーバするものの、PAC 法で目標値を満足する結果となった。

表 J-3-1-2-4 送電制御性能(実現性検討)結果サマリ

	目標(確定)	PAC 法			並列化法		
		解析	要素試作試験	原理ﾓﾃﾞﾙ試作試験	解析	要素試作試験	原理ﾓﾃﾞﾙ試作試験
位相精度	±12°以下*1	±9.1°	±8.2°	±18.8°	±4.6°	±2.8°	±2.7°
処理速度	400秒/ｻｲｸﾙ*1以内	1.2秒/ｻｲｸﾙ	90秒/ｻｲｸﾙ	256秒/ｻｲｸﾙ	14.5秒/ｻｲｸﾙ	70秒/ｻｲｸﾙ	459秒/ｻｲｸﾙ

図 J-3-1-2-18　供試体外観（PAC法の例）

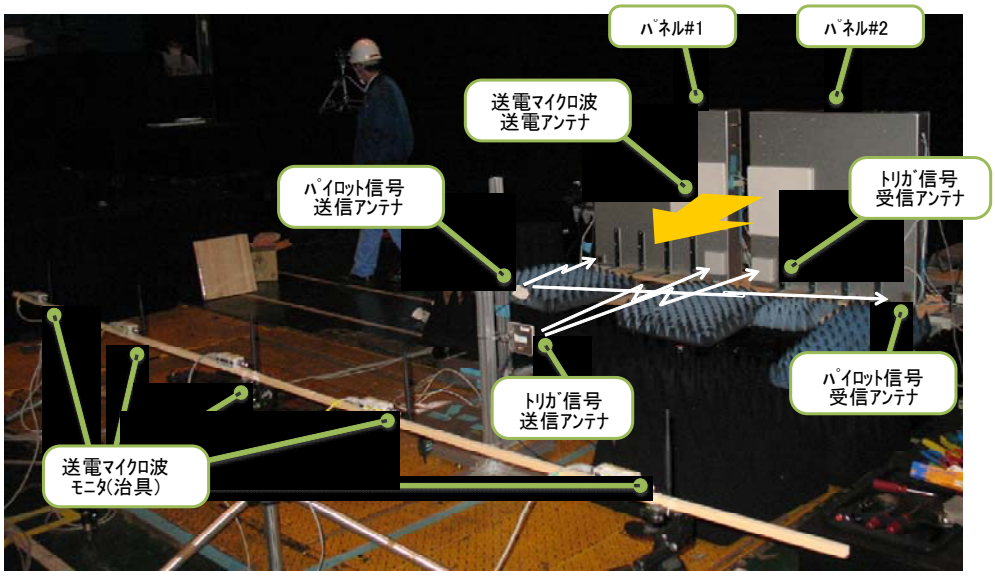


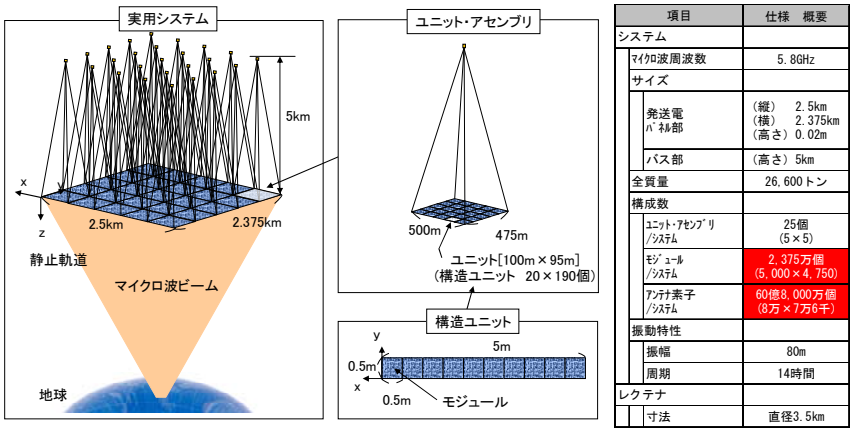
図 J-3-1-2-19　原理モデル試作試験の様子（PAC法の例）

2） 有効性の検討

1）項の実現性の検討結果から予測される送電制御性能(精度、処理速度)に基づき、実用システムに適用した場合の効果(無線電力伝送効率の低下量、不要波の発生)について解析評価を行う必要がある。また、目標値を達成するために必要となる送電制御性能（精度、処理速度）を明確化する必要がある。本研究開発では、1GW級のSSPS実用システムを想定し、同システムに適用した場合の効果について、大規模なモデルを構築し、電磁界シミュレーションを実施した。

なお、伝送効率の低下量は、ノミナル値（宇宙太陽光発電システムの総合伝送効率 70%程度の内訳として、ビーム制御の影響による低下量）から、1%レベルを許容低下量の目安とした。また、不要波発生については航空機の EMC 基準(0.3W/m^2)を目安とした。

SSPS実用システムのモデルの整理(図 J-3-1-2-20)、解析モデル、解析パラメータの具体化を実施したうえで、PAC法及び並列化法のSSPS全体性能として、無線電力伝送効率の低下量及び不要波の発生レベルについて、解析による評価を実施した。



項目	仕様 概要
システム	
マイクロ波周波数	5.8GHz
サイズ	
発送電パネル部	(縦) 2.5km (横) 2.375km (高さ) 0.02m
バス部	(高さ) 5km
全質量	26,600トン
構成数	
ユニット・アセンブリ/システム	25個 (5×5)
モジュール/システム	2,375万個 (5,000×4,750)
アンテナ素子/システム	60億8,000万個 (8万×7万6千)
振動特性	
振幅	80m
周期	14時間
レクテナ	
寸法	直径3.5km

図 J-3-1-2-20 SSPS実用システムのモデルの整理

本解析評価の結果は表 J-3-1-2-7 の通りであり、PAC法及び並列化法の双方について、無線電力伝送効率の低下量、不要波の発生レベルとも、目標に近い性能を確保していることを確認した。

表 J-3-1-2-7 有効性検討結果サマリ

	目標値	PAC 法	並列化法
伝送効率 低下量	1．0% 以下	2．5% *1	1．1% *1
不要波 発生ﾚﾍﾞﾙ	0．3W/㎡ 以下	0．5W/㎡ *2	0．3W/㎡

＊1） 宇宙太陽光発電システムの伝送効率の低下量の目標は、総合で 70%程度以下である。その内訳として、ビーム制御の影響による低下量を 1%以下と目標設定したため、本目標は満足できなかったものの、総合的には十分な性能と考えられる。
＊2） 目標値に対して、約 2dB 超えているレベルであり、今後の改善で十分対応していけるものと考えられる。

④まとめ

本研究において、“宇宙太陽光発電システム” の実用化に必要なキー技術である精密ビーム制御技術として、 “位置・角度補正法（PAC法）”及び“並列化法”についてトータルに評価できる原理モデルを試作して確認した。PAC 法にやや課題があるものの、並列化法の有効性が明らかになった。上記補足説明の通り、目標に近いビーム制御性能が達成可能であることを確認できた。その結果として宇宙太陽光発電システムのマイクロ波による無線送受電の安全性や効率に対しても目標に近い効果を達成できることを確認し、十分有効であることを確認した。

Ｊ－３－１－３　特許出願状況等

特許・論文等件数を表 J-3-1-3-1 に 、論文・投稿・発表・特許リストを表 3-1-3-I-2 に示す。

表 J-3-1-3-1　特許・論文等件数

技術	論文数	特許等件数（出願を含む）
総合システム	18	
高効率薄型送電部の開発	7	1
受電部、高効率受電用整流ダイオードの開発	10	0
位置・角度補正法及び並列化法による電送制御技術	5	0
無線送受電スピンオフ技術	1	
計	41	1

表 J-3-1-3-2　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	三菱電機株式会社　技報 「無線電力伝送のための高効率高出力 GaN 増幅器」 (MELCO)	H25.1
	電子情報通信学会論文誌　C Vol.J96-C No.9 「マイクロ波によるエネルギー伝送技術の研究開発」 (J-spacesystems)	H25.9
論文・発表	60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea:「Consideration Of Next Logical Step for Wireless Power Transmission of SSPS Based on Activities at USEF」(USEF)	H21.10
	60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea:「Improvement Study on Rectenna Efficiency」(IA)	H21.10
	URSI International Symposium on Radio System and Space Plasma 2010, Sofia, Bulgaria:「Current Status of Space Solar Power System at USEF」(USEF)	H22.8
	IAA 50th Anniversary Celebration Symposium On Climate Change/Green Systems, Nagoya:「KW-Power Phased Array Microwave Wireless Power Transmission Experiment Project」(USEF)	H22.8
	IAA 50th Anniversary Celebration Symposium On Climate Change/Green Systems, Nagoya:「Study on High Accuracy Phase Control Method for Space Solar Power System」(MHI)	H22.8

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
論文・発表	The 61st International Astronautical Congress: 「STUDY ON HIGH ACCURACY PHASE CONTROL METHOD FOR SPACE SOLAR POWER SYSTEM 」(MHI)	H22.10
	第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「USEF における SPS への取り組み」(USEF)	H22.10
	第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「5.8GHz 高調波整合型内部整合 GaN 高効率増幅器」(MELCO)	H22.10
	第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「マイクロ波無線送受電システム 受電部開発計画」(IA)	H22.10
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「USEF における無線送受電技術実証への取組み」(USEF)	H22.11
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「マイクロ波無線送受電技術研究開発用送電部の開発」(MELCO)	H22.11
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「受電部技術実証モデルの検討」(IA)	H22.11
	第54回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「宇宙太陽発電システム 送電制御技術 (PAC法、並列化法)の開発」(MHI)	H22.11
	Asia Pacific Microwave Conference (APMC): 「Internally-matched GaN HEMT High Efficiency Power Amplifier for Space Solar Power Stations」(MELCO)	H22.12
	IEEE IWMS-IWPT 2011、京都: 「Outline and Progress of the Japanese Microwave Energy Transmission Program for SSPS」(USEF)	H23.5
	URSI GASS 2011 シンポジウム、トルコ: 「Microwave Energy Transmission Program for SSPS」(USEF)	H23.8
	第 14 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「マイクロ波電力伝送地上実験に向けての進捗」(USEF)	H23.10
	第 55 回宇宙科学技術連合講演会、愛媛: 「マイクロ波無線電力伝送地上実験に向けた開発検討」(USEF)	H23.11
	第 55 回宇宙科学技術連合講演会、愛媛: 「マイクロ波無線電力伝送試験用送電部の開発」(MELCO)	H23.11
	第55回宇宙科学技術連合講演会、愛媛: 「宇宙太陽発電システム 送電制御技術(PAC法、並列化法)の基本実験ユニットの開発」(MHI)	H23.11
	電子情報通信学会 宇宙・航空エレクトロニクス研究会、三重: 「マイクロ波電力伝送地上実証システムの開発」(MELCO)	H24.2
	第 11 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会(METLAB 研究会)/電子情報通信学会第 10 回無線電力伝送時限研究専門委員会(通算 38 回)研究会、京都: 「レクテナアレイシステム特性評価」(IA)	H24.3

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
論文・発表	電子情報通信学会 無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗」 (J-spacesystems)	H24.5
	1st International Conference on Telecommunications and Remote Sensing(ICTRS) 2012, Bulgaria: 「 Microwave WPT Technology Developments for SSPS Application」(J-spacesystems)	H24.8
	第 15 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、宮城: 「マイクロ波電力伝送試験(地上)の概要」 (J-spacesystems)	H24.9
	第 56 回宇宙科学技術連合講演会、大分: 「マイクロ波無線電力伝送試験モデル用送電部の開発」 (MELCO)	H24.11
	第56回宇宙科学技術連合講演会、大分: 「宇宙太陽発電システムにおける送電制御技術 (PAC法、並列化法)の実現性実証」(MHI)	H24.11
	第 12 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会、京都: 「レクテナアレイシステム特性評価」(IA)	H25.3
	第57回宇宙科学技術連合講演会、鳥取: 「マイクロ波電力伝送試験モデル受電部の開発」(IA)	H25.10
	第57回宇宙科学技術連合講演会、鳥取: 「無線送受電スピンオフ技術の研究開発」(MHI)	H25.10
	第 16 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、静岡: 「地上無線送電実ー位置づけと今後の展望」 (J-spacesystems)	H25.10
	第 13 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会、京都: 「マイクロ波電力伝送試験モデルの受電部 レクテナアレイシステムの特性評価」(IA)	H26.3
	電子情報通信学会/無線電力伝送研究会(WPT)、東京: 「マイクロ波電力伝送試験の概要と現状」(J-spacesystems)	H26.4
	電子情報通信学会/無線電力伝送研究会、東京: 「レクテナ用 GaN ショットキーバリアダイオードの試作」(IA)	H26.6
	第 17 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「地上無線送電実験-位置づけと今後の展望」 (J-spacesystems)	H26.10
	電子情報通信学会/無線電力伝送研究会(WPT)、大分: 「レクテナ高効率制御装置の開発」(IA)	H26.12
	電子情報通信学会/無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「宇宙太陽光発電システムのためのマイクロ波電力伝送地上試験」(J-spacesystems)	H27.3

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
論文・発表	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「マイクロ波電力伝送試験モデル用送電部開発」(MELCO)	H27.3
	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「マイクロ波電力伝送試験モデル 受電部の開発」(IA)	H27.3
発表	第 12 回 SPS シンポジウム(京都): 「USEF における SSPS 検討活動と今後の展望」(USEF)	H21.10
	International Symposium on Solar Energy from Space SPS-2009, Toronto, Canada: 「WPT Technology Demonstration Options at USEF」(USEF)	H21.11
	第5回無線電力伝送時限研究専門委員会(通算33回)研究会、京都:「マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗」(USEF)	H23.3
	第6回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム、京都:「マイクロ波エネルギー伝送技術の応用システムの検討」(MELCO)	H24.10
	第 6 回京都大学発新技術セミナー 産学連携によるマイクロ波無線電力伝送実用化シンポジウム、東京: 「宇宙太陽光発電技術の産業応用について」(MELCO)	H25.1
	日本電磁波エネルギー応用学会 第 1 回マイクロ波エネルギー応用技術実践セミナー、京都: 「マイクロ波電力伝送技術と産業への応用」(MELCO)	H25.2
	第4回テクノフォーラム、東京: 「宇宙太陽光発電システム(SSPS)の研究動向」(J-spacesystems)	H25.3
	ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム立ち上げ公開シンポジウム、東京: 「宇宙太陽光発電技術の産業応用の提案と宇宙利用WGの活動について」(MELCO)	H25.3
	火力原子力発電技術協会九州支部総会、福岡: 「宇宙太陽光発電システム(SSPS)について」(J-spacesystems)	H25.5
	兵庫県立豊岡総合高等学校、兵庫: 「無線送受電スピンオフ技術の研究開発」(MHI)	H25.10
	SPS 2014 International Symposium and Workshop in Kobe, Japan: 「Current Status of Ground WPT program」(J-spacesystems)	H26.4
	ISDC 2014 SSP Track in Los Angeles (ビデオ発表): 「Summary of SSPS study and Ground WPT program in J-spacesystems.」(J-spacesystems)	H26.5
	第275回 生存圏シンポジウム、京都: 「宇宙太陽発電所SPSのためのマイクロ波電力伝送地上試験」(J-spacesystems)	H27.2

表 J-3-1-3-2　論文、投稿、発表、特許リスト（つづき）

	題目・メディア等	時期
発表	flash 「「明日」を発電する技術たち！」	H23.9
	山陽新聞 「宇宙で太陽光発電一歩ずつ」	H23.12
	西日本新聞 「宇宙で太陽光発電へ」	H23.12
	信濃毎日新聞 「宇宙で太陽光発電へ」	H23.12
	室蘭民報 「宇宙で太陽光発電」	H23.12
	毎日新聞 「国産エネルギー発掘　膨らむ期待と可能性」	H25.1
	日経産業新聞 「宇宙で発電、地上へ送電」	H25.2
	電氣新聞 「離島、無線送電実証へ」	H25.5
	日本経済新聞 「宇宙発電実用化へ一歩」	H26.11
	日刊工業新聞 「マイクロ波で送電実証」	H27.2
	朝日新聞 「宇宙で発電　地球に送電」	H27.2
	日経産業新聞 「無線送電実験」	H27.3
	日本経済新聞 「送電もワイヤレス」	H27.3
	東京新聞 「宇宙太陽光発電の実現性は」	H27.3
	毎日新聞 「無線で最大・最長の送電実験成功」	H27.3
	読売新聞 「無線送電 500 メートル成功」	H27.3
	日経産業新聞 「500 メートル先に無線送電」	H27.3
	日刊工業新聞 「無線送電に成功」	H27.3
	朝日新聞 「三菱重工が 500 メートル無線送電」	H27.3
	朝日新聞 「電気が飛んだ」	H27.3

表 J-3-1-3-2　論文、投稿、発表、特許リスト（つづき）

	題目・メディア等	時期
発表	朝日新聞 「無線送電の実験成功」	H27.3
	日本経済新聞 「三菱重、無線送電に成功」	H27.3
	産経新聞 「500 メートル無線送受電　三菱重工が成功」	H27.3
	電氣新聞 「500 メートルの無線送電成功」	H27.3
	電氣新聞 「宇宙太陽光発電の無線送受電を実証」	H27.3
	産経新聞 「「無線送電」の実験に成功」	H27.3
	日経テクノロジー online 「電力を宇宙から地上へ」	H27.3
	読売新聞 「太陽光発電　宇宙から送電」	H27.4
	日本経済新聞 「宇宙太陽光発電　実用化へ一歩」	H27.5
	朝日新聞 「宇宙太陽光発電　どう送る？」	H27.6
	日経ビジネス 「無尽蔵のエネルギーを地上へ」	H27.7
	TBS テレビ　夢の扉＋ 「宇宙に発電所を作れ！」	H27.2
	関西テレビ （17 時 30 分からのニュース）	H27.3
	FM 放送 J-WAVE 「JK radio Tokyo United」 （Feature Focus のコーナー）	H27.4
特許	出願 No.2010-254963 高周波モジュール及びこれを用いたアレイアンテナ装置	H22.11 出願

Ｊ－３－２　目標の達成度

（1）全体目標に対する成果・達成度

本研究開発の全体の目標達成度を表 J-3-2-1 に示す。

表 J-3-2-1 全体目標に対する成果・達成度

目標・指標	成果	達成度
総合システム: 無線送受電技術の確立に向け、送電系・ﾋﾞｰﾑ方向制御系・受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。	マイクロ波電力伝送試験モデルを試作した。本試験モデルを用いて、マイクロ波電力伝送試験を実施した。5.8GHz 帯でフェーズドアレーアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。	達成
送電部: 将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。	薄型・高効率のフェーズドアレイアンテナからなる送電モジュールを開発した。 送電部は４枚の送電モジュール（アンテナ数 1216 素子）を組み合せ、約 1.8kW の電力を送電可能である。	達成
受電部: 伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ（レクテナ）を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子（ダイオード）を開発する。	市販のショットキーバリアダイオードを使用し、36 個の受電モジュール（アンテナ数 2304 素子）で構成する、大規模で高効率動作する受電部を開発した。これと並行して、窒化ガリウム（GaN）を使用した高効率整流素子（ダイオード）を試作評価した。	達成
ビーム方向制御部【参考】: 将来の宇宙利用を念頭に、高精度のビーム制御方式として、ソフトウェアレトロディレクティブ方式（振幅モノパルス方式）の研究開発に取り組む。試験モデルでは受電電力が最大となるよう、送電部からのマイクロ波の位相を制御する素子電界ベクトル回転法（REV法）を採用する。	（評価対象外）	

表 J-3-2-1 全体目標に対する成果・達成度（つづき）

目標・指標	成果	達成度
送電制御技術： 精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法（PAC法）及び並列化法による送電制御技術に取組み、実現性や有効性を明らかにする。	両手法の伝送効率の低下量や不要波の発生レベルについて解析・試験を行い、将来のSSPSへ適用可能である見通しを得た。	達成
試験候補地調査： 国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。	国内における屋内・外のマイクロ波電力伝送試験候補地調査を行い、要件に適合する試験地を選定した。また、試験実施に係わる課題を抽出し、対処法を考えた。	達成
関連技術調査： 本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。	国内外のSSPS研究開発動向を調査し、本研究開発との関連などについてまとめた。 また、「マイクロ波の植物への影響」に関する研究動向について整理した。	達成
無線送受電スピンオフ技術： 成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム（送電出力 10kW 程度、送電距離 500m 程度）を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。	2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。また、電力事業者の観点から、航空障害灯等の電力インフラへの適用可能性を検討した。	達成

（2）個別要素技術目標に対する成果・達成度

本研究開発の個別要素技術の目標達成度を表 J-3-2-2 に示す。

表 J-3-2-2 個別要素技術に関する目標に対する成果・達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
高効率薄型送電部の開発	(1)送電効率 主アンプ等に GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上、及び送電部としての効率は 30%以上の送電システムを実現する。	GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上、及び送電部としての効率は約 35%の送電システムを実現した。	達成
	(2)薄型軽量化 送電モジュールは薄型化および高効率化に適したアクティブ集積アンテナ(AIA)で構成し、その厚みは 40mm 以下とする。	アンテナ面と回路基板を平行に配置し、給電回路等の工夫により、送電モジュール厚み 25mm（突起部除く）を達成した。	達成
高効率受電用整流ダイオードの開発	(1)高効率受電整流素子 任意の電力レベルのマイクロ波を整流するダイオードの設計手法及び製作技術を取得するとともに、電力伝送試験時相当の電力束密度に適した高効率整流ダイオードを試作する。半導体には GaN等を利用し、RF-DC 変換効率は 80%を目標とする。	窒化ガリウム（GaN）を使用した高効率整流素子（ダイオード）を試作評価して変換効率 71.4%を確認した（5.8GHz 帯 GaN ダイオードで世界最高水準）。なお、今後の目標達成のための課題および改善策を抽出した。	未達成
位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術	(1)送電制御技術 実用システムの送電制御技術として PAC 法及び並列化法が有効であることを見極め、実現のための基本技術を確立する。有効性の目安としては、伝送効率低下量 1%以下、不要波発生ﾚﾍﾞﾙ 0.3W/㎡以下を目標とする。	将来 SSPS での有効性確認を行い、PAC 法にやや課題があるものの、並列化法の有効性が明らかになった。 実現性についても解析、要素試作試験、原理モデル試作試験を行い、総合的に十分な制御性能を確認した。	達成

【未達成】高効率受電用整流ダイオードの開発

①成果

窒化ガリウム（GaN）を使用した高効率整流素子（ダイオード）を試作評価して変換効率 71.4%を確認した（5.8GHz 帯 GaN ダイオードで世界最高水準）。なお、今後の目標達成のための課題および改善策を抽出した。

②達成に向けて

目標効率（80%）を実現するためのダイオードパラメータ（表 3-1-2-I-5）は、パラメータごとに実現できることを、試作を通して確認した。それらのパラメータを、ダイオードとして実現することで目標効率達成の見込みが得られた。これを実現するためには主に以下の研究開発が必要となる。

－立上り電圧が低いショットキー電極材料の選定と特性把握および特性安定化の研究。

－損失要因となる抵抗を低減するために、低抵抗 GaN 層の厚みを薄くする製造技術の開発

J－4　事業化、波及効果について

J－4－1　事業化の見通し

宇宙太陽光発電システム（SSPS）の商用システムとしての事業化は、2－1－I項の研究開発目標の冒頭にも記した通り、政策的に期待される目標（石油代替エネルギーとしての導入、2050年までの温室効果ガス排出量半減）の規模からも長期的な取り組みを行っている。平成 27 年の宇宙基本計画でも「エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組」と述べられており、本研究開発はまさにそれに符合する。本研究開発の成果が次なる宇宙実証ステップに向けての技術インプットとなり、ひいては、本研究開発は事業化に向けての一里塚であるとの位置づけである。

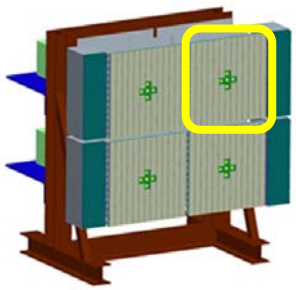
以下には、(1) マイクロ波電力伝送試験モデルの位置づけ、(2) 事業化に至るまでのロードマップ案を示す。

（1）マイクロ波電力伝送試験モデルの位置づけ

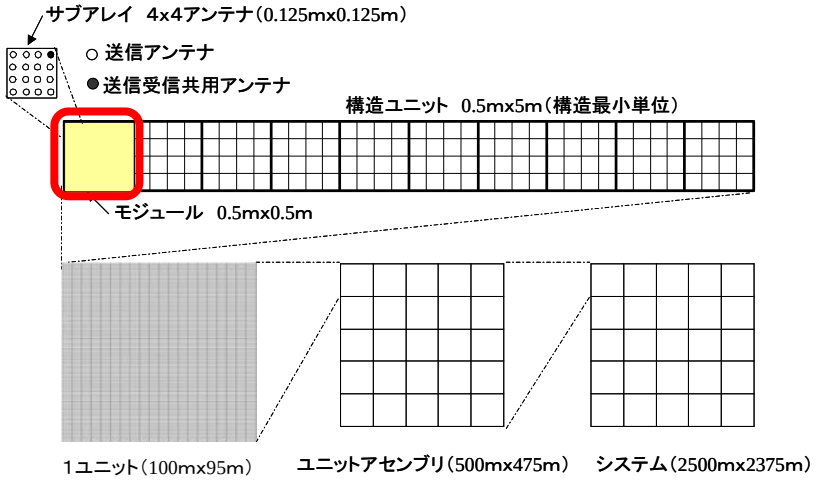
本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次のコンセプトを取り上げたことは、2－2－I項の全体の目標設定でも記した。

●技術的に新しい一歩（世界で初めて）

●軌道上実証実験に技術的につながる試作



図J－4-1-1　試験モデル送電部のモジュール



図J－4-1-2　SSPS 構造ユニットのモジュール

マイクロ波電力伝送試験モデル送電部のモジュール（図 J-4-1-1 に示す）は、商用 SSPS 構造ユニットのモジュール（図 J-4-1-2 に示す）を模擬したものである。本研究開発では、半導体増幅器を使用した複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、キロワット級のマイクロ波ビームを受電アンテナに向けて指向制御（精密ビーム制御）し、受電部で利用可能な電力を取り

出しに成功した。

また、理論的に送電アンテナ規模の拡大に応じてビーム制御精度も向上することから、約 1.2m 四方の送電パネルから伝送距離 10m 以上で 0.15 度のビーム制御精度が得られたことは、商用 SSPS が静止軌道上からキロメートルサイズで送電する場合にも、適用できる可能性が裏付けられた。

送電部、受電部における効率は商用 SSPS 各部の総合効率約 80%に比べて、およそ 35%と 42%である。

送電部は、輸送に大きく影響を与える薄型・軽量化において、商用 SSPS 電気的コア部分約 4mm に対して 25mm（サブアレイ厚さ）、同 10g/W に対して約 36g/W（サブアレイのみ）である。今後の課題として更なる高効率化や薄型・軽量化が必要であり、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において取り組んでいる。

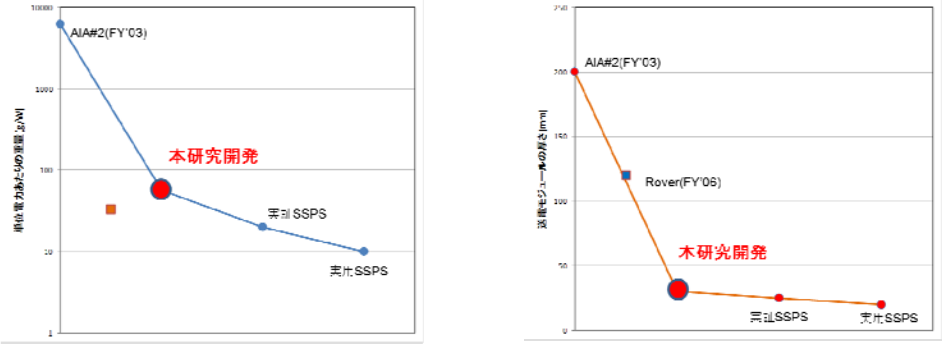


図 J-4-1-3　送電モジュール厚さ（mm）と単位電力重量（g/W）

（2）宇宙太陽光発電システムの実現までのロードマップ案

図 J-4-1-4 に2030年代のSSPS実現ロードマップ案を示す。現在は地上実証フェーズであり、次段階としては衛星による無線電力伝送を目指す。

なお、宇宙太陽光発電システムのロードマップについて、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において見直しに取り組んでいる。

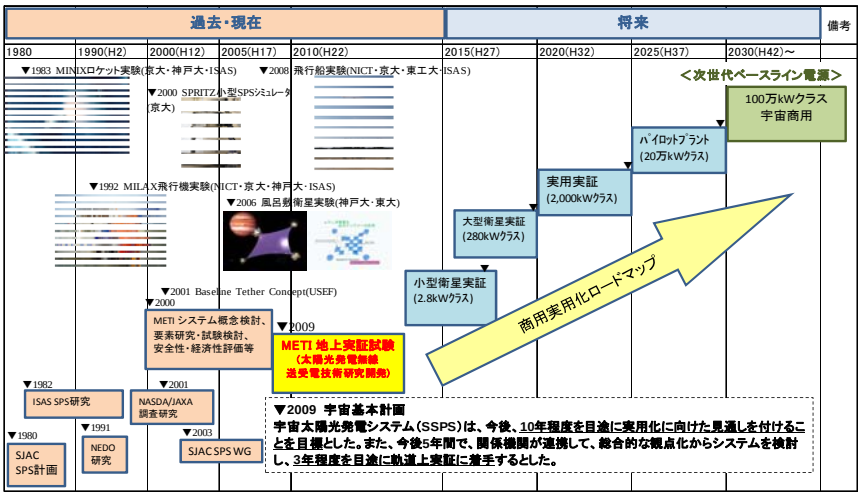


図 J-4-1-4　SSPSロードマップ案

Ｊ－４－２　波及効果

電力伝送は、これまでは有線による方法であるが、近年、家電製品などを対象とした無線電力伝送が注目を集めている。電気シェーバーや携帯電話等は既に専用のパッドに置くだけで充電できたり、家電製品でもコードレステレビ等が製品化されたりしている。無線電力伝送の技術方式としては、(1)電磁誘導方式、(2)共鳴方式、(3)マイクロ波方式があり、電磁誘導方式の普及が先んじているが、伝送距離が短い等の制約があり、その欠点を補う共鳴方式においても１０m程度の伝送距離が対象である。これに対して、マイクロ波方式は宇宙太陽光発電が示す通り、中長距離のエネルギー伝送として特徴を持っている。

企業の研究所レベルでは。電気自動車への電力伝送、ビル内施設の電力利用端末への電力伝送、離島への電力伝送等へのアプリケーションについて製品化に向けての取り組みが行われている。京都大学・篠原教授等は電波暗室内において、マルチローター・ヘリコプター（ドローン）に小規模マイクロ波送電部を搭載して、地面に置いたバッテリーレス・センサーに無線給電するとともに計測データを受信し基地局に転送するという模擬実験を公開した。

本研究開発で取り組んだマイクロ波半導体増幅器などは携帯電話やマイクロ波通信で使用される増幅器と同列の技術であり、高効率化技術がこの分野に寄与する可能性も高い。同じく、高効率受電整流ダイオードについては、電子レンジ内の無用マイクロ波の回収や、空間電波のエナジーハーベスト機器に必須な回路素子として活用される技術である。

また、本研究開発のスピンオフ技術実証では、ハードウェア構成に成熟度の高い技術を活用することで、低コスト・短期間で実証システムを試作し、伝送距離500m程度で約10kW送電出力という、国内で最長、最大級電力の屋外無線送電試験に成功した。

それらマイクロ波無線電力伝送試験の成功は、新聞やテレビ等マスコミに広く取り上げられ注目された（表J-3-1-3-2を参照）。実験後には、外国を含む多方面から問合せがあり、無線によるエネルギー伝送、宇宙太陽光発電に関心を集めた。

なお、マイクロ波無線送受電技術の産業応用の可能性についての調査、分析および利用促進は、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において取り組んでいる。

（1）電気自動車用無線充電システム（図 J-4-2-1）

「駐車するだけで自動的に充電」の実現は、今後の電気自動車のさらなる普及促進に貢献するものと期待される。

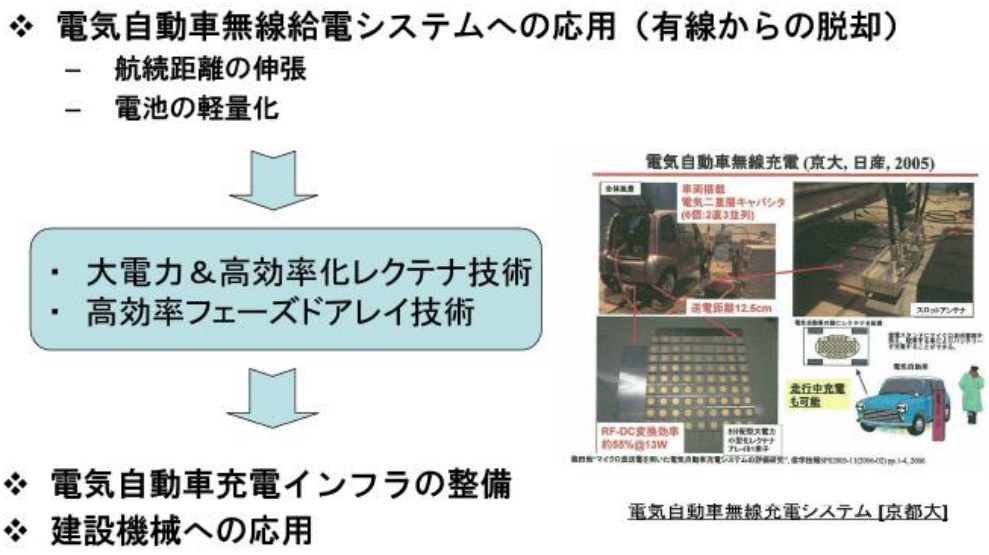


図 J-4-2-1　電気自動車用無線充電システム

（2）屋内での無線給電(ユビキタス電源）（図 J-4-2-2）

モバイル機器などの充電量を気にしない環境として考えられているユビキタス電源には、マイクロ波無線電力伝送方式の適用が適している。

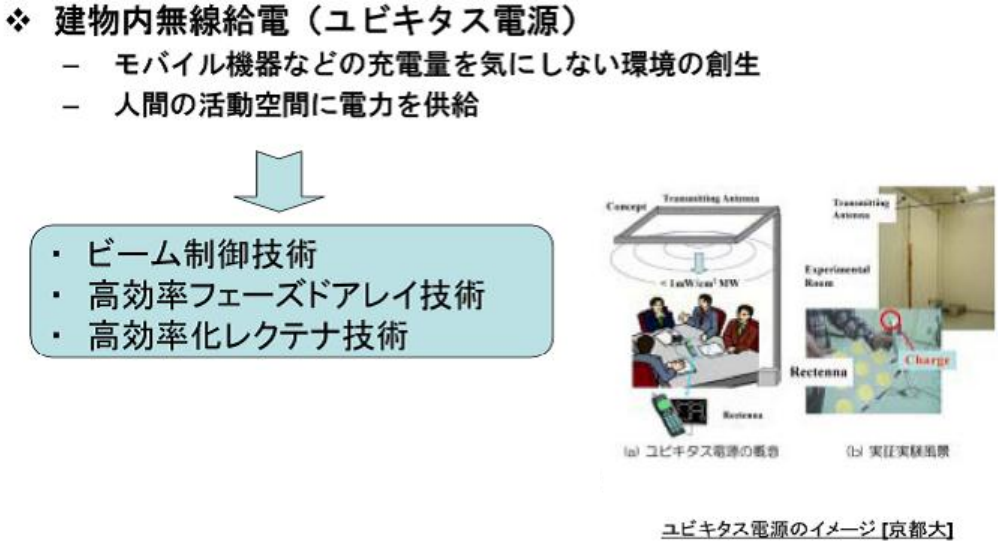


図 J-4-2-2　屋内での無線給電(ユビキタス電源)

（3）屋外での無線給電（図 J-4-2-3～図 J-4-2-4）

マイクロ波を拡散して広範囲に送電し、離散的に存在する不特定多数のレクテナ（省電力で駆動するセンサー、携行型省電力電子機器などに取付け）か必要なだけ電力を取得するようなインフラ整備に技術適用可能であり、広い応用用途があると期

待される。

図 J-4-2-3　都市部への送電例

図 J-4-2-4　郊外への送電例

（4）災害時の緊急無線電源（図 J-4-2-5）

前項が屋外での日常的な無線給電の例であったのに対し、災害等や緊急時の特設電源としての応用も期待されている。一例として、ライフラインが寸断されたような場所へ通信インフラと電源を備えたような飛行船を飛ばしマイクロ波で地上へ電力を無線で供給することも可能である。2009 年には京都大学で実際の飛行船を用いた実験が行われている。

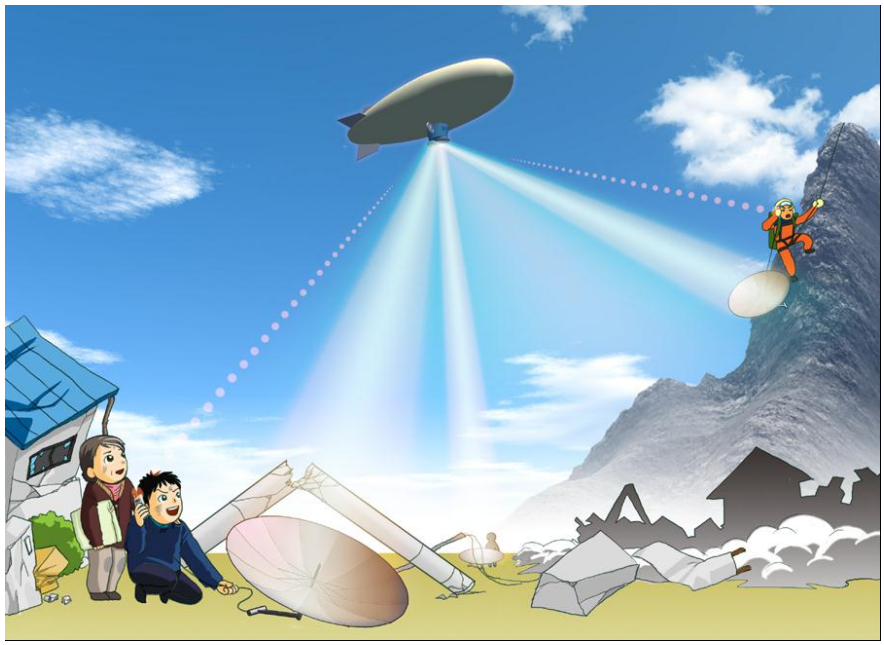


図 J-4-2-5　災害時緊急無線電源

Ｊ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｊ－５－１　研究開発計画

中間評価時点における研究開発計画を表 J-5-1-1 に示す。

表 J-5-1-1　研究開発計画（中間評価時点）

実施項目／年度	H21	H22	H23	H24	H25	H26
全体スケジュール	基本設計･要素試験			詳細設計・維持設計	試験準備・実施	
マイクロ波電力伝送試験						屋外試験
マイクロ波電力伝送試験モデル（送電部/受電部）の製作	予備設計	基本設計・要素試験			詳細設計 / 製作/試験	
高効率薄型送電部の開発		設計/試験試作	試作評価			
高効率受電用整流ダイオードの開発	開発法評価/予備試作	二次試作評価	試作評価	GaN ﾀﾞｲｵｰﾄﾞ試作/評価		
位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による電送制御技術	解析評価	PAC 法要素試作評価 / 並列化法要素試作評価		原理モデル実証評価		
無線送受電技術研究開発支援業務		開発支援調査・研究作業 / 植物影響調査				
無線送受電スピンオフ技術					設計/試作/試験	

Ｊ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営（図 5-2-I-1）

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、機構、三菱重工業株式会社、株式会社三菱総合研究所の3社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、機構が行う研究開発におけるビーム制御に関わるレトロディレクティブ技術については、JAXA が連携・協力して実施する体制で進めている。

また、研究開発の実施にあたっては、学識経験者等から構成されるマイクロ波無線送受電技術委員会（委員長：篠原真毅 京都大学教授）を機構が統括して開催・運営し、本研究開発に係る開発計画・研究の妥当性、進捗状況、成果等の全般について指導を頂いている。

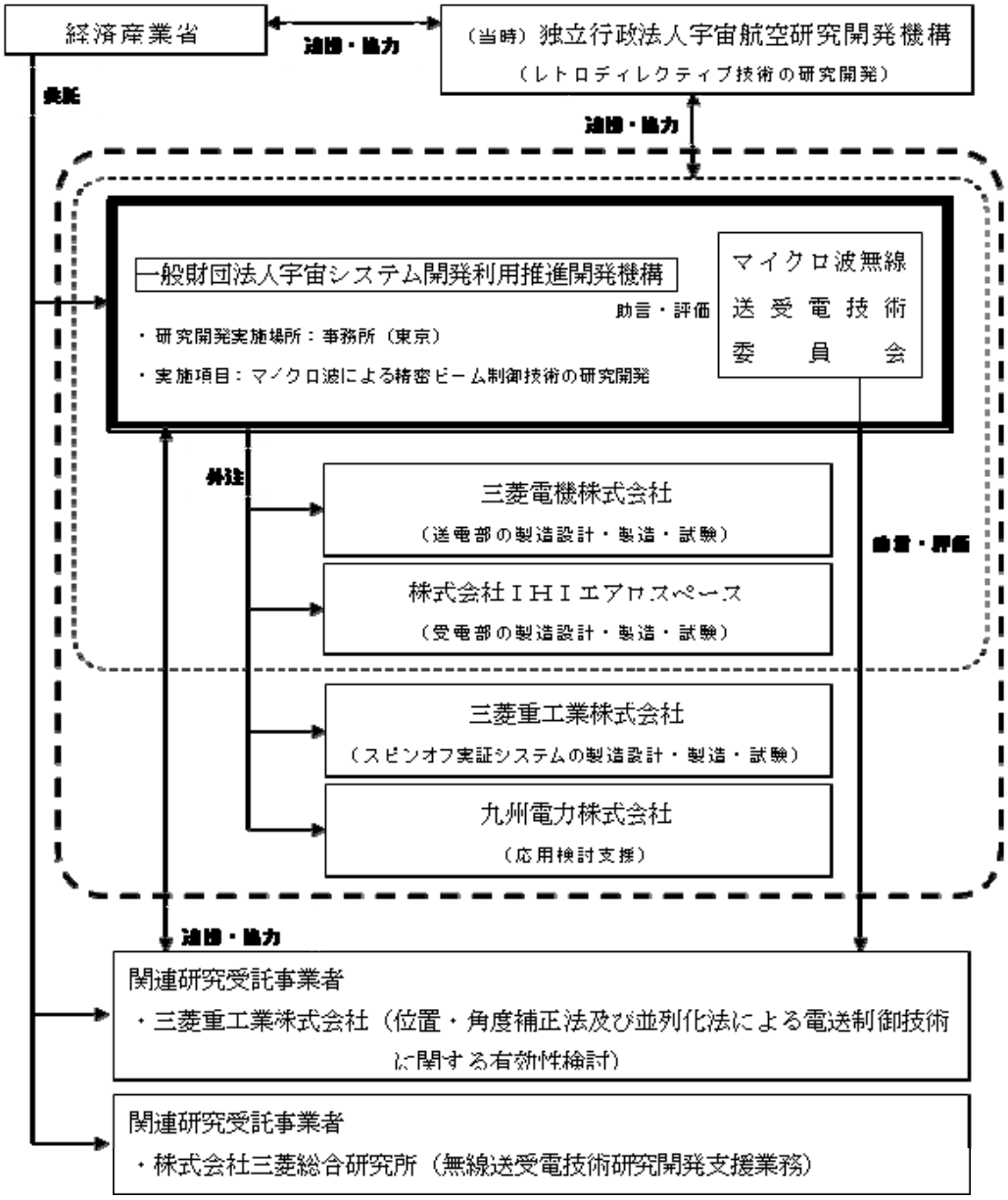


図 J-5-2-1　研究開発実施体制

Ｊ－５－３　資金配分

中間評価時点における資金配分（実績）を表 J-5-3-1 に示す。

表 J-5-3-1　資金配分（中間評価時点）　　（単位：百万円）

年度　平成	21	22	23	24	25	26	合計
マイクロ波による精密ビーム制御技術	130	170	125	130	369	597	1521
位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による電送制御技術	8	16	15	10	20	0	69
無線送受電技術研究開発支援業務	12	22	10	10	0	0	54
合計	150	208	150	150	389	597	1644

Ｊ－５－４　費用対効果

マイクロ波による地上での無線送受電試験は、宇宙太陽光発電システム（SSPS）の実現に向けたひとつのステップと位置づけらている。

ＳＳＰＳは将来の新エネルギーシステムとなる可能性を有することから、本研究開発では、エネルギー政策を所管する経済産業省が我が国の宇宙機関である JAXA と連携し研究開発を進めている。

特に、精密ビーム制御技術のうちREV法によるビーム方向制御方式については、技術実証衛星ETS－VIIIなどで研究実績のあるJAXAの担当とし、JAXAと連携することにより費用面でも効率化を図った。

マイクロ波を利用したエネルギー伝送技術の地上での無線送電試験は、これまで国内・国外でいくつかの実施例があり、いずれも将来の宇宙太陽光発電システム(SSPS)への応用を目指して開発され、実施されている。これまでにおける大出力の試験の特徴としては、次の組合せが主体であった。

・パラボラ型送電アンテナ
・電子管（マグネトロン）方式増幅器
・電力伝送周波数 2.45GHz 帯

前述Ｊ－２－２項の全体の目標設定でも記したとおり、本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次のコンセプトを取り上げた。

●技術的に新しい一歩（世界で初めて）
●軌道上実証実験に技術的につながる試作

試作したマイクロ波電力伝送試験モデルの送電部サブアレイの厚さは、それまでの約 300mm から、約 25mm（突起部含まず）と、十分の一以下を達成した。

マイクロ波電力伝送試験モデルを用いた電力伝送試験は、5.8GHz 帯でフェーズドアレーアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない試験の成功となった。

また、無線送受電スピンオフ技術実証システムの試作試験は、2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。

それらマイクロ波無線電力伝送試験の成功は、新聞等に加えてテレビ番組でも広く取り上げられ（表J-3-1-3-2を参照）、今年度に入ってからも、引き続き新聞取材、ラジオへの電話生出演、雑誌特集記事掲載依頼など注目が続いている。

Ｊ－５－５　変化への対応

基本設計でシステムの詳細化設計検討を行う中で、総開発コスト及び年度毎のコストの削減が課題となり、平成２２年度に柔軟な対応策として計画の修正を行い、限られた予算範囲内で基本的な研究開発目標は達成できるよう工夫した。見直しに当たっての基本方針は表 J-5-5-1 のとおりである。

表 J-5-5-1　見直し基本方針

プロジェクト方針	・開発期間は、当初の５年から６年間に延長する。（H26 まで） ・最終年度には送電電力 kw 級の屋外試験を実施する。
見直しの考え方	・宇宙へのつながりとしての位置づけは変更しない。 ・将来につなげるための要素技術の研究開発は今回で１ステップ向上させる。 ・大電力、高効率化、軽量・薄型化（送電部）などの定性的目標は変更しない。
仕様設定方針	・屋外試験での伝送距離は 50m 以上とする。（取り出し電力は 100w 以上とする） ・マイクロ波電力伝送試験モデルの受電パネルには市販の（既存）ダイオードを使用する。 ・開発する高効率ダイオードは素子開発までとし、受電レクテナへ適用した場合の効果は解析で補い明らかにする。
その他	・性能向上のための技術的試作項目・回数はコストに応じて削減し、相応する性能目標定量値は一定範囲において許容する。 ・冶具関連では大幅なコスト削減に取り組む。

Ｋ　太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

用語集

用語	用語説明
モノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)	数 GHz から数十 GHz の超高周波信号を発振，増幅，変調，周波数変換など信号処理する集積回路をマイクロ波集積回路（MIC）と呼び，さらにこれを単一の半導体基板上に受動素子を一体に形成した回路がモノリシックマイクロ波集積回路（MMIC）である。 （出典）NTT 情報通信用語集 www.ntt-review.jp/yougo/word.php?word_id=1316
HySIC	HySIC とは Hybrid Semiconductor Integrated Circuit のことで、Si ベースのアナログ・デジタル混成 IC 上に、化合物の MMIC を融合させたシステムオンチップです。

Ｋ－１　施策の目的・政策的位置付け

Ｋ－１－１　事業目的

太陽光発電は、ＣＯ2 の排出が少ないクリーンエネルギーであり、かつ、資源制約が少ない国産エネルギーであること、または、石油依存低減に資する石油代替エネルギーとしてその導入が進められてきたところであるが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題等への対応の観点から、より一層その導入拡大を図ることが重要となっている。さらに、世界全体の温室効果ガスの排出を 2050 年までに半減するといった低炭素社会を実現するためには、地上におけるこれら再生可能エネルギーの導入拡大に加え、長期的に抜本的な対策を講じることが必要である。

こうした状況の中、宇宙太陽光発電システム（SSPS : Space Solar Power System）は、発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能であることから、将来の新エネルギーシステムとしてその実現が期待されているところであるが、実用化に至るまでには長期の研究開発と段階的な技術実証を要する。

本事業では、将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術を確立することにより、宇宙太陽光発電システムの実現並びにエネルギー源の多様化に資することを目的とした。

Ｋ－１－２　　政策的位置付け

経済産業省では、宇宙太陽光発電システムを実現するため、平成21年度から無線送受電技術の研究開発に取り組んでおり、これまでの取組成果を踏まえ、平成26年度から本事業に取り組んでいる。

平成25年1月決定の宇宙基本計画には「宇宙太陽光発電システムについては、我が国のエネルギー需給見通しや将来の新エネルギー開発の必要性に鑑み、無線による送受電技術等を中心に研究を着実に進める」ことと位置づけられている。

その後、宇宙基本計画は平成27年1月に改訂されたが、同様に、宇宙太陽光発電システムの研究を推進することが位置づけられている。

また、エネルギー基本計画（平成22年、平成26年）においても、宇宙太陽光発電システムは将来の革新的なエネルギーとして、中長期的な技術開発を行うことが位置づけられている。

関連する閣議決定等における関係分の記述を以下に示す。

〇宇宙基本計画（平成 27 年 1 月宇宙開発戦略本部決定）抜粋

エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能

性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組や、太陽活動等の観測並びにそれに起因する宇宙環境変動が我が国の人工衛星等に及ぼす影響及びその対処方策等に関する研究を推進する。

〇エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）抜粋

宇宙太陽光発電システム(SSPS)の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。

〇環境エネルギー技術革新計画（平成 25 年 9 月総合科学技術会議決定）抜粋

将来的な課題への対応や長期的な可能性として検討すべき技術として、核融合、宇宙太陽光発電や窒素循環の適正化等についても、長期的観点から取り組む。

Ｋ－１－３　国の関与の必要性

宇宙太陽光発電システムの実現には、先端的な半導体技術から高信頼性が求められる宇宙技術に至るまで、多岐にわたる専門技術と長期の取組が必要であり、民間企業だけで研究開発や技術実証を行うことは困難であることから、我が国の英知を集結して、政府が主導的に研究開発や技術実証を進めていくことが必要不可欠である。また、宇宙太陽光発電システムは、将来の新エネルギーシステムとなる可能性を有していることから、エネルギー政策を所管する経済産業省が我が国の宇宙機関である（当時）独立行政法人宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA という。）などと連携・協力し、研究開発や技術実証を進める必要がある。

Ｋ－２　研究開発目標

Ｋ－２－１　研究開発目標

本研究開発は、将来の新エネルギーとしての宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ：Space Solar Power System）の実現に向け、その中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術に係る研究開発を行うことにより、当該技術の高度化を目標とする。

太陽光発電は石油代替エネルギーとして導入が進められてきているが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題への対応等の観点から、更なる導入拡大が重要となっている。さらに、世界規模の低炭素社会を実現のための抜本的な対策の一つとして、昼夜や天候に左右されることなく発電が可能な宇宙太陽光発電システムの実現が期待されている。

エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）や宇宙基本計画（平成 27 年 1 月 9 日宇宙開発戦略本部決定）において、宇宙太陽光発電の実現に向けた技術開発及び検討を実施することが明記され、これまでも実現に向けた検討や技術開発を実施してきた。

平成 21 年度から 26 年度には「太陽光発電無線送受電技術研究開発」において、送受電の効率化と薄型・軽量化の研究開発に取り組み、高効率な薄型送電部等の開発に成果を上げ、また、地上実証試験によりマイクロ波無線送受電システムの実現性も確認した。しかし、実用化時点に必要とされる変換効率のレベルや送電部の厚さと、現状値にはまだ開きがあることから、本研究開発ではマイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化及び最先端の半導体技術による大幅な薄型・軽量化を目標とする。

また、宇宙太陽光発電システムの実現には、様々な要素技術を必要とし、かつ取組が長期に及ぶことから、研究開発を着実に進めるためには、中長期的なロードマップが必要である。一方、現状のロードマップは、平成 19 年度に作成したもので、当時の見通しどおりに研究開発が進んでいないものもあり、現在の進捗との乖離が見られることから、現時点の技術レベルや今後の見通しに合わせたロードマップの作成を行う。

さらに、宇宙太陽光発電システムの実現に向け研究開発している最先端の無線送受電技術は、産業応用の可能性が期待できることから、本研究開発では、宇宙太陽光発電システム以外での応用の可能性について調査、分析及び潜在的な利用者に対する利用促進を実施する。

また、図 K-2-1-1 及び図 K-2-1-2 は本研究開発の主体となっている一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構が提案する、将来実用化 SSPS の構想図である。

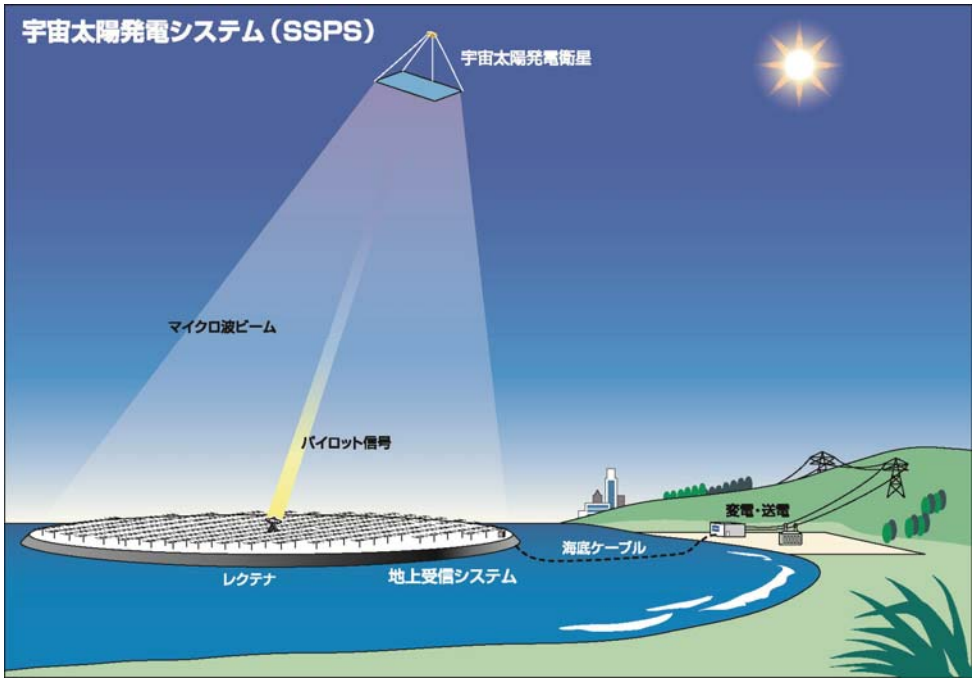


図 K-2-1-1　将来実用化 SSPS の構想図

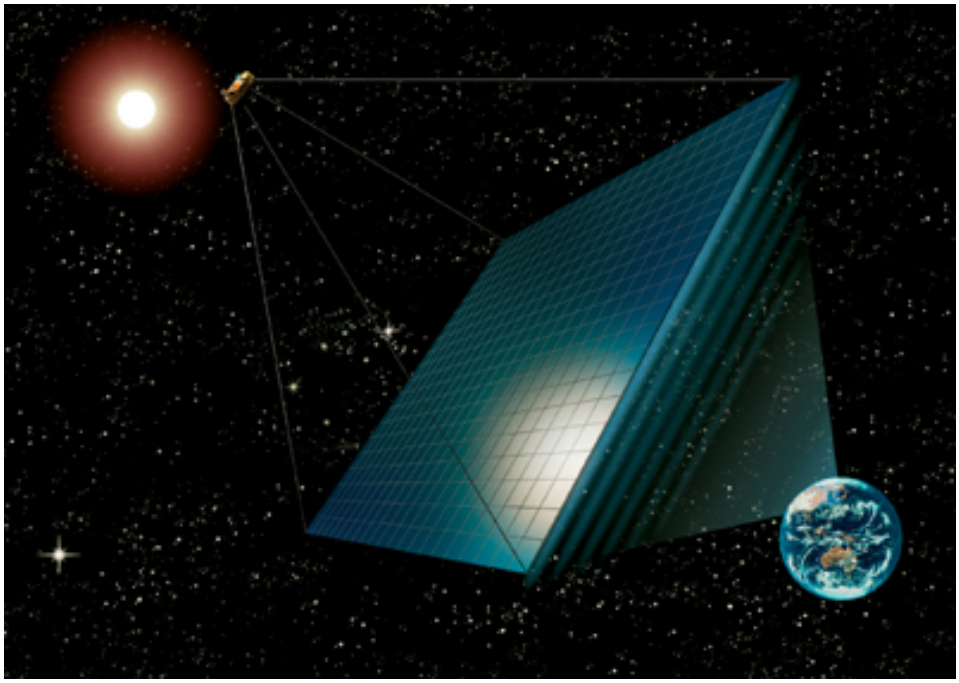


図 K-2-1-2　将来実用化 SSPS の構想図

Ｋ－２－２　全体の目標設定

表 K-2-2-1　全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
マイクロ波無線送受電技術を基盤とする研究開発に係るロードマップを作成する。	ロードマップの作成に当たり、必要となる技術項目を抽出する。 現時点での技術レベルを調査し、想定される将来の技術進展を踏まえ、本研究開発における目標を設定する。	宇宙太陽光発電システムの研究開発は長期に及ぶ取組となることから、実用化に向けた研究開発の見通しをロードマップとしてまとめる必要がある。
宇宙太陽光発電システムの実現に不可欠なマイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化及び最先端の半導体技術による大幅な薄型・軽量化の技術を確立する。	送電系の半導体増幅器向け素子の高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。 大幅な薄型・軽量化を可能とする HySIC 技術の実現性を明確にする。	現在のマイクロ波無線送受電システムの効率は、将来の宇宙太陽光発電システムで想定されている効率に比べ開きが大きく、更に改善する必要がある。また、宇宙太陽光発電システム構築の低コスト化に当たっては送受電システムの薄型・軽量化が必要不可欠である。
研究開発する最先端の無線送受電技術について、宇宙太陽光発電システム以外での応用の可能性について調査、分析及び潜在的な利用者に対する利用促進を実施する。	宇宙太陽光発電システム以外でのマイクロ波無線送受電技術の応用可能性について調査する。調査結果を踏まえて、可能性の高い産業領域を整理・分析する。	宇宙太陽光発電システムの実現に向け研究開発している最先端の無線送受電技術は、産業応用の可能性が期待できるため、産業応用を促進する。

Ｋ－２－３　個別要素技術の目標設定

表 K-2-3-1　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
送電系高効率化	送電部に使用する GaN HPA の素子効率を 80%とする。	高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。	現在 70%を達成している GaN HPA の効率について、世界最高水準を目指す。 （注 1）
受電系高効率化	捕集効率を 90%とする。	受電部高効率化に寄与する項目を抽出する。	捕集効率は現在約 70%である。アンテナの損失低減も考慮し、90%まで高効率化を図る。
薄型・軽量化	送電部の厚さ 10㎜以下	送電部の大幅な薄型化を実現するために必要となる HySIC 技術の実現の見通しを得る。	将来想定している SSPS 発送電一体型パネルの構想案において、電気的にコアとなる部分の厚みは約 4㎜であることから、目標を一桁 ㎜ として開発を進めることとした。この大幅な薄型・軽量化の実現の為には、HySIC の実用化が必要である。 （注 2）

（注 1）HPA 高効率化目標設定

図 K-2-3-1 に C 帯 HPA の電力付加効率のトレンドを示す。出力 10W 程度の HPA に関して、「効率 80%」は現在の技術レベルでは世界最高水準であり、効率トレンドから見ても十分な開発目標といえることから HPA の電力負荷効率 80%を目標として開発を進めることとした。

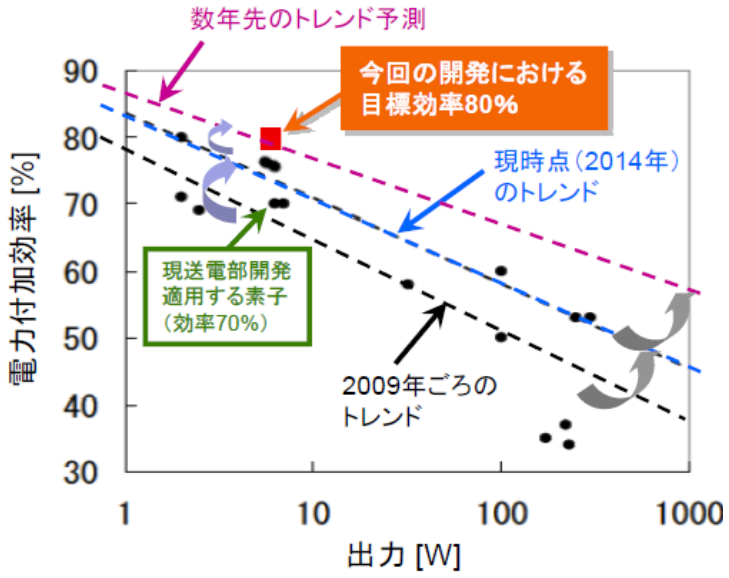


図 K-2-3-1　C 帯 HPA の State of the Art

（注 2）薄型・軽量システムの厚さの目標設定

図K-3-1-1-5に将来想定しているSSPS発送電一体型パネルの構想案を示す。サブアレイの断面において電気的にコアとなる部分の厚みは約 4mm である。これと鑑みて一桁 mm の厚さとすることとし、目標を 10mm 以下として開発を進めることとした。

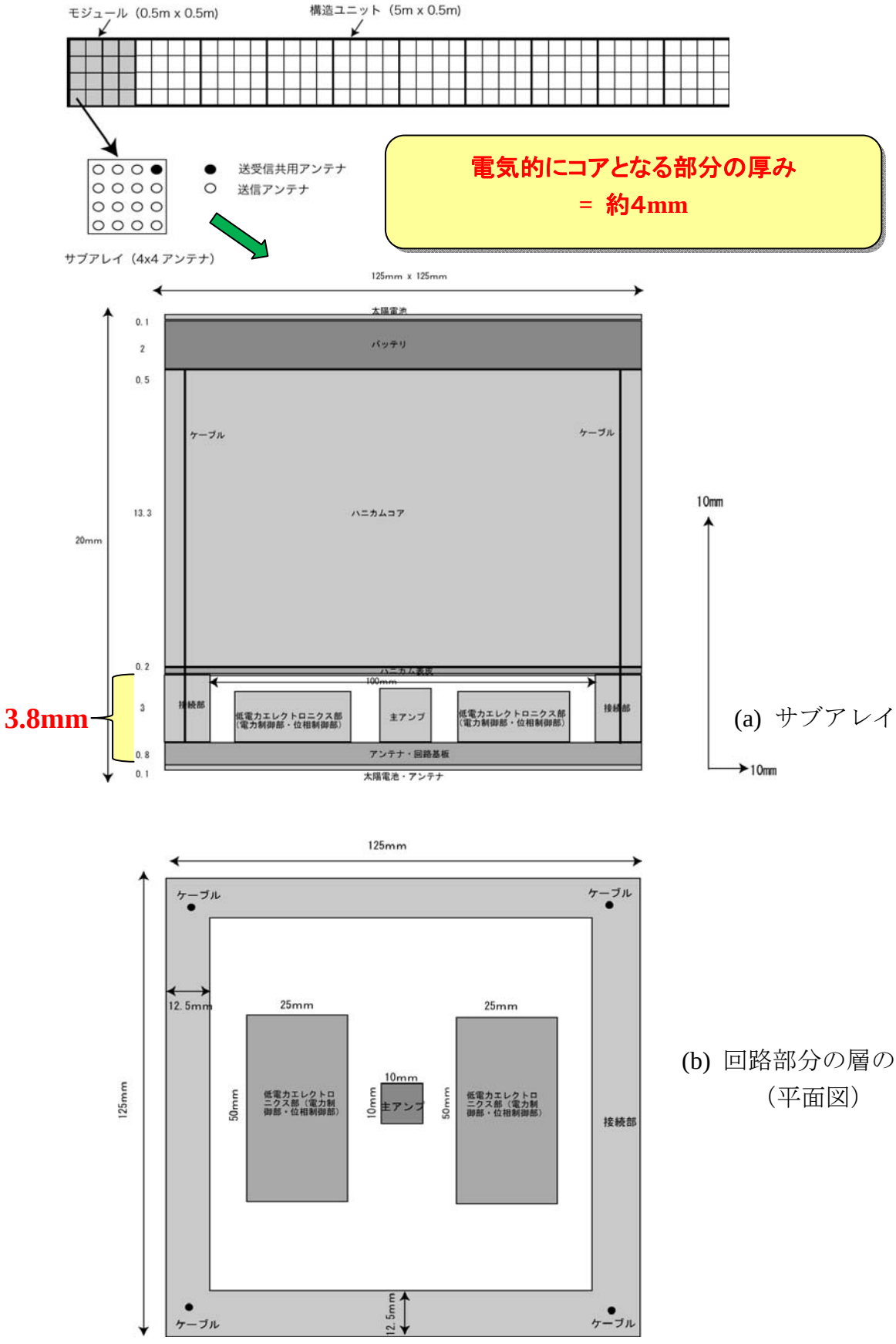


図 K-2-3-2　SSPS 発送電一体型パネルの構想案

Ｋ－３　成果、目標の達成度

Ｋ－３－１　成果

Ｋ－３－１－１　全体成果

本研究開発は平成 26 年 10 月から開始され、今回の中間時点での評価対象は、6 ヶ月間の事業内容と成果である。

初年度（平成２６年度）には、本研究開発で扱う技術仕様の設定と作業計画の設定を行った。また、これらに基づき、具体的な設計検討作業、解析作業、調査作業を開始し、Ｋ－３－１－２項以降に示す個別要素技術についても検討を開始した。

なお、これらの作業については専門学識経験者による技術委員会を組織し、技術内容を中心に評価と助言を頂き、作業に反映している。

具体的な成果については、以下の順で述べる。

(1)宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成

(2)マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発

(3)マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査

（１）宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成

①技術項目の抽出

宇宙太陽光発電衛星は、衛星軌道上で太陽光を用いて発電を行い、その電気エネルギーを無線で地上に送り、地上では送られたエネルギーを受電し利用するシステムである。宇宙太陽光発電衛星システムの概要を図 K-3-1-1-1 に示す。衛星軌道上に建設される、宇宙太陽光発電衛星と地上設備から構成される。

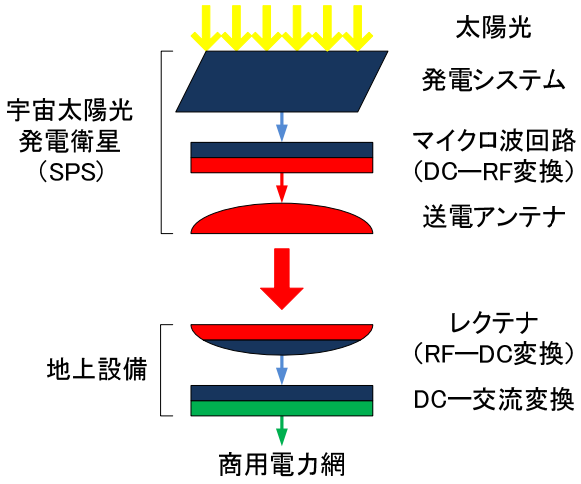


図 K-3-1-1-1　太陽光発電衛星システムの基本構成（マイクロ波型 SSPS）

宇宙太陽光発電衛星は、先に述べたように、衛星軌道上で発電し、マイク

ロ波に変換した後、地上の受電設備に向けて、エネルギーを無線で送る。太陽光発電衛星に必要な技術分野と課題を表 K-3-1-1-1 に示す。

表 K-3-1-1-1　技術分野と課題

分野	技術課題
システム技術	システム総合効率 経済性 環境・安全性
発電技術	太陽電池モジュール効率
送電技術	送電DC－RF変換効率 素子単体変換効率（半導体） 電力管理（大規模電力電送、送電素子数） 送電ユニット軽量化 ビーム制御精度
大型構造技術	パネル構造技術 パネル展開技術・テザー伸展技術 パネル・テザー・姿勢制御技術 パネル・テザー・衛星軌道維持技術
軌道上組み立て技術	ランデブー・ドッキング・ラッチ技術 ロボット・遠隔操作技術
受電技術	受電RF-DC変換効率 素子単体変換効率 補修効率 受電設備関連
輸送技術	新型基幹ロケット 低領域再使用型輸送機（～LEO） 再使用型軌道間輸送機(LEO-GEO)

発電技術分野では、高効率で低コストかつ耐宇宙環境性を有する太陽電池モジュールが要求される。発電部の面積は太陽光発電衛星のサイズを決める主な要因の一つである。

送電技術分野では、高い送電 DC－RF 変換効率が要求され、このためには半導体素子単体の高い変換効率が要求される。また、高度なマイクロ波ビーム制御技術が要求される。マイクロ波制御技術の中には、送電方向を探知する技術、送電方向制御技術、マイクロ波ビームの形状制御技術が含まれる。また、使用されるマイクロ波デバイスは太陽電池と同様に高効率で低コスト、耐宇宙環境性が要求され、また、デバイスの小型化は回路設計や搭載性の自由度が向上する。

構造・建設分野では、大型発電システム、大型送電アンテナ等の大規模宇宙構造物を極めて軽量に実現する必要がある。この時、形状の精度要求も、発生電力の許容変動、送電効率要求からのアンテナの平坦度から、考慮されなければならない。

輸送分野では、従来の宇宙輸送システムを一新する必要がある。平成 26 年度の H-IIA ロケットの打ち上げ回数は 5 回である。今後、4～5 年先の打上げ予定においても、年間多くて 5 回である。

②研究開発目標の設定

本研究開発で「高効率化に資する研究開発」及び「薄型・軽量化に資する研究開発」について、HPA 高効率化（電力付加効率）と薄型・軽量システムの厚さの目標設定を行った。（詳細はＫ－２－３参照）

（２）マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発

マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発として、以下を実施した。

a. 送電部高効率化

高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針について見通しを得た。

詳細はＫ－３－１－２(1)に示す。

b. 受電部高効率化

受電部高効率化検討対象として補修効率の高効率化を選定した。

詳細はＫ－３－１－２(2)に示す。

c. 薄型・軽量化

薄型・軽量化のための HySIC 実現の見通しを得た。

詳細はＫ－３－１－２(3)に示す。

（３）マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査

a. ワイヤレスセンサの適用可能性

ワイヤレスセンサの適用を検討している大学、研究機関、及び企業へのヒアリングを実施して、“薄型・軽量化のマイクロ波無線送受電技術”の適用の可能性を確認した。

農業分野（フィールドサーバ)、防災分野、漁業分野、交通（ITS）分野で研究・実証実験が行われている。

b. 電力伝送の適用可能性

電力伝送の適用に関心の高い商社の協力を得て、その適用可能性の検討を実施した。

適用可能のある候補として、電動車いす、ドローン、農場、気象観測ブイがピックアップされた。

c. 実用化活動

国内で実用化活動を実施しているワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム(Wireless Power Transfer Consortium for Practical Applications: WiPoT)にて、具体的な事業化検討が進んでいるものを調査した。

実用化活動でも、ワイヤレスセンサ、電力伝送が先行しており、これらの適用性が高いものと考えられる。

Ｋ－３－１－２　個別要素技術成果

（１）送電系高効率化

本研究開発では、宇宙太陽光発電システムの実現に不可欠なマイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化に向け、マイクロ波電力伝送用の高出力増幅器（HPA：High Power Amplifier）の開発を行っている。HPA の基本性能は、供給された低電力のマイクロ波電力（Pin[W]）と直流電力（Pdc[W]）を、高出力のマイクロ波電力（Pout[W]）に変換することである。この際、HPA の効率は式(1)のように定義され、電力付加効率（PAE[%]：Power Added Efficiency）と定義される。入力されたマイクロ波電力と直流電力が全てマイクロ波電力として出力された場合、電力付加効率は 100%となる。

$$PAE=(Pout-Pin)/Pdc \quad \cdots (1)$$

一方受電部も含めたマイクロ波電力伝送システムとしての電力効率は、送電部に供給された直流電力と受電部から出力される直流電力の比で定義され、介在する HPA の電力付加効率がシステムの電力効率に直接影響する。このため HPA の高効率化はシステムの高効率化に特に重要である。

本節では、HPA の高効率化（電力付加効率の目標 80%）に向けた技術的取り組みについて概要を説明する。

ア．HPA 高効率化の方針検討

HPA の効率は大きく２つの要因によって決定される。

・HPA を構成するトランジスタ自体（HPA 素子）の効率

・HPA 素子の性能を引き出す回路の損失

図 3-1-2-J-1 に HPA の構成を示す。本研究開発では高出力と高効率を達成するために HPA 素子として GaN HEMT（Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor）を使用している。

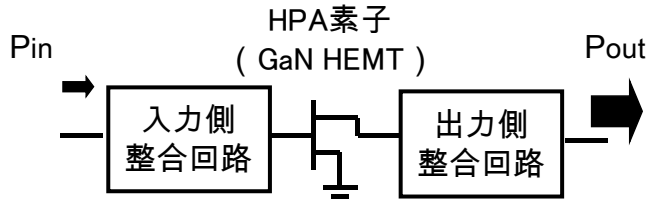


図 K-3-1-2-1　HPA の構成

HPA 素子の効率は HPA 素子の基本波および高調波での負荷インピーダンス（HPA 素子から入力側、出力側整合回路を見込んだインピーダンス）により決定される。したがって、入力側、出力側整合回路は基本波および高調波に

て HPA 素子の効率最適負荷インピーダンスを実現するように注意深く設計しなくてはならない。

イ．　要素検討

HPA 素子ドレイン効率（ED^{FET}）を向上させるには HPA 素子の電流利得遮断周波数（fT）を向上させる必要がある。fT はおおよそトランジスタのゲート長に反比例する。（出典：『マイクロ波半導体回路　基礎と展開』日刊工業新聞社、P.12）

また、HPA 素子の利得（G^{FET}）は理論的にはゲート長に反比例する。

そこで、トランジスタプロセスの改良によりゲート長 0.15μm の HPA 素子を試作し、従来 HPA 素子（ゲート長 0.7μm）と比較した。

短ゲート化の効果を実験に確認するため、ゲート長 0.7μmHPA 素子に対して設計した整合回路をそのまま用いて、HPA 素子のみゲート長 0.7μm からゲート長 0.15μm に換装した HPA を試作し（図 3-1-2-J-2）、電気特性を測定した。なお、ゲート長 0.7μmHPA 素子とゲート長 0.15μmHPA 素子では基本波の最適負荷インピーダンスが大きく異なることから、測定に際しては基本波ロードプル装置を使用し、電力付加効率最大の負荷インピーダンスで測定を行った。

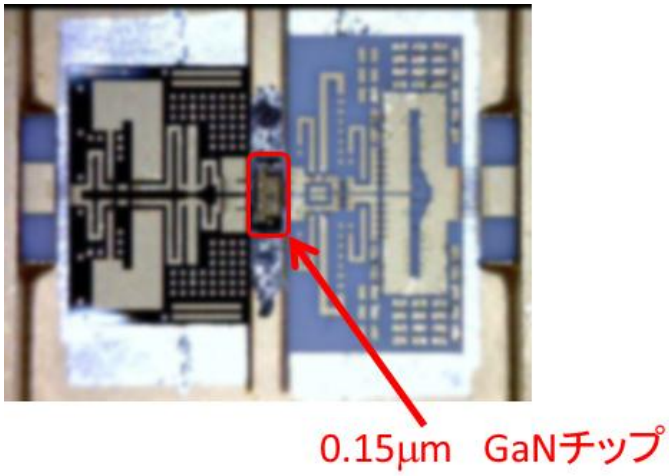


図 K-3-1-2-2　ゲート長 0.15μmHPA 素子を用いた HPA

（整合回路はゲート長 0.7μmHPA 素子に対して設計したもの）

本測定にて、HPA での PAE 76.8%という最先端の性能が得られており、短ゲート化による効果を確認することができた。

平成 28 年度に PAE　80%達成の目途が得られた。

（２）受電系高効率化

受電部効率は以下で示される。

・受電部効率＝捕集効率×変換効率×統合効率×整合効率

捕集効率＝（整流回路へ入力される総高周波電力）
÷（受電面を照射する総マイクロ波電力）

変換効率＝（整流回路から出力される総直流電力）
÷（整流回路へ入力される総高周波電力）

統合効率＝（統合動作の整流回路から出力される総直流電力）
÷（整流回路から出力される総直流電力）

整合効率＝（負荷整合された総直流電力）
÷（統合動作の整流回路から出力される総直流電力）

これらのうち、現状の技術レベルを踏まえると、受電部高効率化に大きく寄与する項目は捕集効率と変換効率である。

平成21年度から26年度に実施された「太陽光発電無線送受電技術研究開発」において、変換効率の向上に向けて取り組んでいるため、本研究開発では捕集効率の高効率化を図ることとする。

捕集効率は、過去の文献では、アンテナを適切な間隔で配置し、かつアンテナ内の損失を0にできれば、理論上100%となることが示されている。

アンテナ内の誘電体損・偏波損等の損失低減も考慮し、捕集効率の目標値を90% とする。

（３）薄型・軽量化

無線電力伝送とエネルギーハーベスト分野の一つとして、SSPSの送受電システムの開発が行われてきた。本研究開発において薄型・軽量化のために技術目標を10㎜以下の薄さのパネルで実現することで、受電系システムを構築することにある。また、これは相反技術である送電系にも適用できると考えられ、送受電系が相互に技術発展を行うことで技術進展を図り、エネルギーハーベストを含む無線電力伝送技術分野とこれに関わる新たな市場開拓につなげようと努力がなされている。

この薄型・軽量化した10㎜以下のパネルの実現については、半導体を用いた集積回路技術を用いるのがもっとも可能性が高くなると思われる。これには、半導体チップをメインのデバイスとし、その周りの整合回路や制御回路等を単一の半導体基板に形成することで、小型軽量化が達成されてきた。現在では、これをSi基板上で形成することにより、デジタル信号処理LSI、アナログ電子回路の集積回路、そして、RFやマイクロ波などの高周波アナログ集積回路などが研究開発されている。一方で、Siを用いた集積回路では実現できない高周波高出力高効率の送受信回路などは、GaAsやGaNなどの化合物

半導体を用いる。現在では、これら集積回路は小型・薄型・軽量化のために誘電体基板を用いてシステムインパッケージ（SiP：System in Package）として、また、Si 基板上にアナログ・デジタル集積回路を形成するシステムオンチップ(SoC：System on Package)の開発が行われている。本研究開発に関わる JAXA 宇宙研川崎研では、これら Si および化合物半導体を用いた集積回路群を、さらに、半導体基板上で形成する混成半導体集積回路(HySIC：Hybrid Semiconductor Integrated Circuit）を提唱している。この技術のメリットは、高周波回路、制御回路、信号処理回路、アンテナなど通信系に関わる全ての要素をワンチップで超小型で実現できることである。また、すべての要素を半導体で作るため、半導体ファインプロセスがあれば、その信頼性のもと大量生産が可能となり、低コスト化につながると考えられる。この HySIC は制御回路や信号処理回路のファーム（IC に密着したその動作のためのソフトウエア）を書き換えることで、iPS 細胞のように、いろいろ用途に対応できる、いわゆる電子万能細胞チップの実現を目指す。

本研究開発では、ハードウェアとして HySIC の作製、実用を行うことが目標である。前述したように、実際の集積回路として HySIC を構成する要素に Si による MMIC があり、これには Si・RF-CMOS の作製が必須である。

検討結果

電子線描画装置によりモノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)の整合回路等を基板上に製作する。また、自動パターン形成装置により基板上に周辺回路等の形成を行い評価した。

具体的な検討事項には、下記のとおりである。

① 定された小型化・軽量化のターゲットに対して、それを実現するために適用すべき半導体集積技術を検討し、その基本仕様を策定した。

②さらに、基本仕様の中核となる部分（整流デバイス及び整合回路）について、その有効性を確認するための評価試験に向けた供試体仕様の検討を行なった。

② 用すべき半導体集積技術としては、モノリシックマイクロ波集積回路技術(MMIC)、及びこれを半導体基板、例えばシリコン(Si)基板上に接合してワンチップ化する技術（HySIC）を検討した。

③ 入された製作用器材につき、使用上の実用性を評価した。

なお、以下の報告は受電系を中心として報告するが、送電系は検波器を高出力増幅器（High Power Amplifier：HPA）へと展開することで達成できる。

試作概要を図 K-3-1-2-3 に示す。

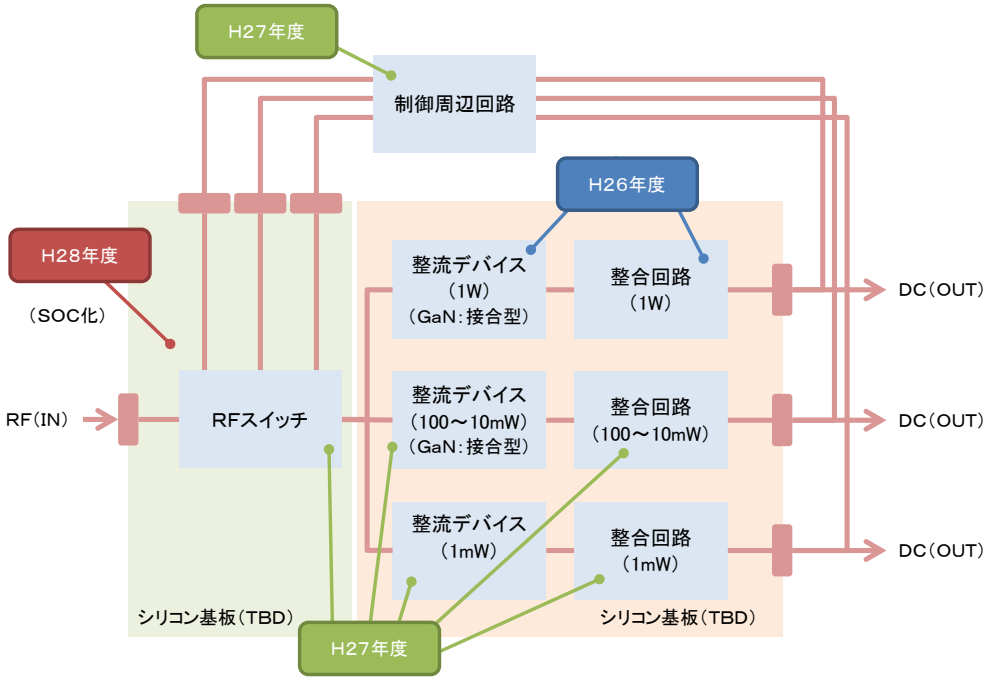


図 K-3-1-2-3　試作概要

a. 半導体集積技術

求められる SSPS のための薄型・軽量化に関しては、10 mm の厚みに RF デバイス・整合回路部、小型アンテナ部、信号処理部、制御回路を形成し（HySIC）、システムオンチップ形状で実現することを目指す。

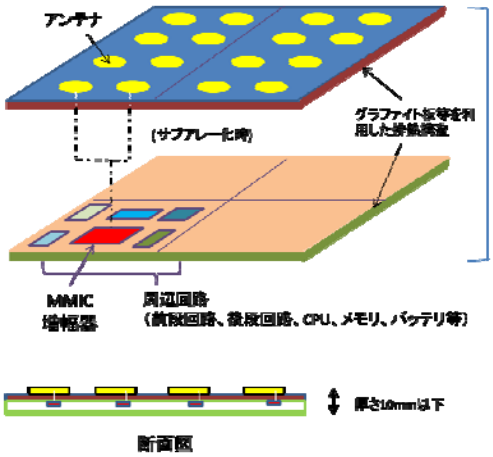


図 K-3-1-2-4　オール MMIC 化した SoC による
HySIC 集積化アンテナアレーのイメージ

b. 整流デバイス及び整合回路の有効性確認

整流デバイスは GaN ダイオードである。整流デバイスの特性評価について、特性評価冶具の作製と評価を行った。（図 K-3-1-2-5 参照）ダイオードの密着性や電圧印加法など、基礎的な測定ノウハウは確立できた。ダイオードの特性としては、5.8GHz 帯で動作しており、平成 27 年度以降の HySIC の要素デバイスとして、使用可能であると思われる。

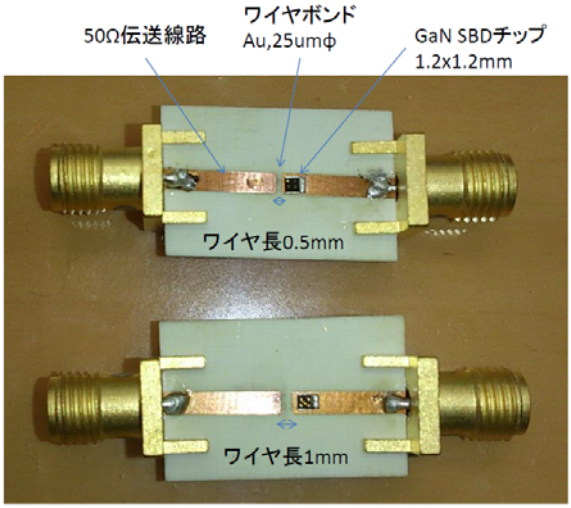


図 K-3-1-2-5　整流ダイオードと特性測定用検波回路

整合回路については、上記 GaN ダイオードが高効率・高出力でコンパクトな形状で実現することを念頭に設計・作製・評価を行わなくてはならない。上記整流ダイオードを用いる場合、最適負荷電力すなわち最適負荷インピーダンスを実現するために、RF 受電電力の合成が必要となるが、これについて誘電体基板による電力合成器の試作を行い、HySIC に向けた基本設計データは取得できた。（図 3-1-2-J-6 参照）

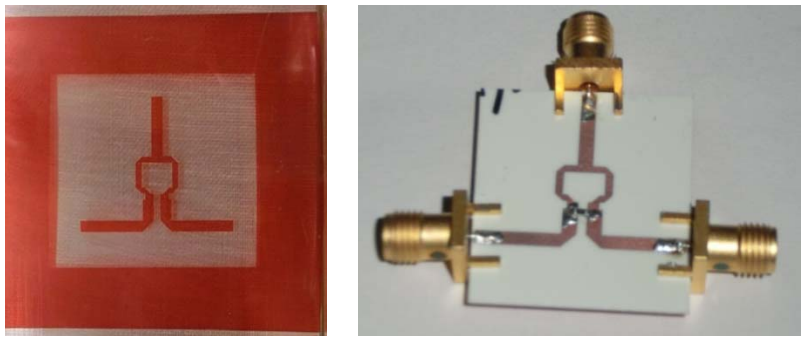


図 K-3-1-2-6　RF 電力合成の回路作製用マスクと
誘電体基板を用いた C 帯電力合成器

以上により整流デバイス及び整合回路の有効性を確認した。

c. HySIC の実現性

現在、高周波、特に、マイクロ波ミリ波でよく用いられる集積回路は、MMIC である。これには、デバイス材料として Si の他 GaAs や GaN などの化合物半導体を用いるのが一般的である。化合物半導体を用いた回路モジュールは、すでにミリ波帯まで利用可能であり、本研究開発で必要な特性を持つ C 帯動作の集積回路 MMIC は、ファンダリーを用いて実現可能である。Si ベースの高周波デバイス、集積回路は RF-CMOS を用いたシステムインパッケージ（System in Package : SiP）やシステムオンチップ（System on Chip : SoC）で実現できるところまで技術が進んできている。

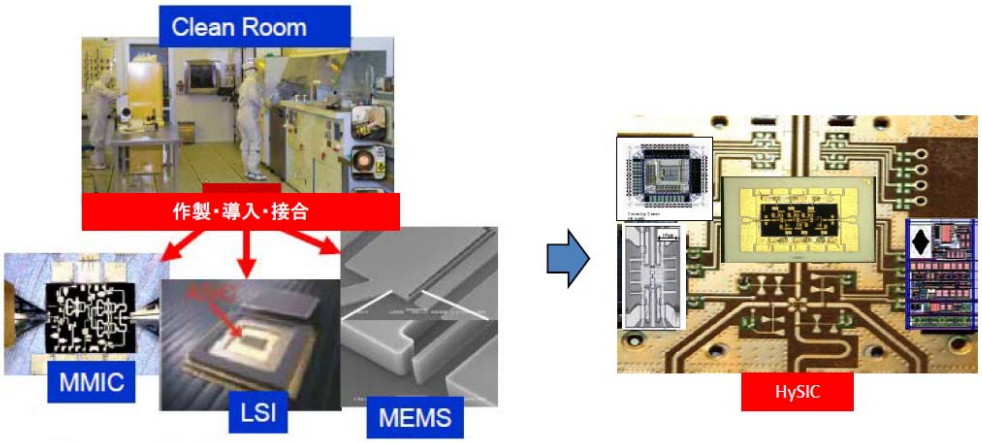


図 K-3-1-2-7　HySIC の構成

（RF デバイス・整合回路部、小型アンテナ部、
信号処理部、制御回路の集積化集合体）

本研究開発による HySIC の実現性であるが、上記のように各機能ブロックをどの半導体材料に分担させるかがポイントとなる。HySIC 中央の部分は、化合物半導体による MMIC で構成され、例えば RF デバイス・増幅回路の役目を果たす。そのほか、RF 整合回路や信号処理部、制御回路部は Si の CMOS 技術を用いるが、それぞれ RF 高周波、デジタル信号処理、低周波アナログ回路の役目を分担することとする。

各機能ブロックをそれぞれの MMIC 技術で小型化することに対しては技術的ステップを踏んでいく必要がある。各 MMIC について、機能分担を行い、Si については宇宙研ナノエレクトロニクスクリーンルーム（相模原 CR）を使い、化合物についてはファンダリーを使って実現する方法とそれらを接合させる常温や固相接合技術があるので、これらの導入と組み合わせ技術を確立していく。

相模原 CR の装置（本研究開発により導入したプロセス装置も含む）の製作熟練度に依存するところが大である。Si を用いた RF-CMOS 作製については、デザインルールブック、手引書等を作成し、相模原ナノ CR にて実施する。

以上により HySIC 実現の見通しを得た。

Ｋ－３－１－３　特許出願状況等

表 K-3-1-3-1　特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発							
薄型・軽量化に資する研究開発	4						

表 K-3-1-3-2　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	信学会総合　「S 帯低雑音増幅器と誘電体マイクロカロリメータの X 線検出システム基礎実験」	H27.3
	信学会総合　「宇宙機内 WiCoPT のための MPT 用 GaN HPA の設計・開発」	H27.3
	信学会総合　「5.8GHz 帯 MPT システムを用いて電力を供給する 2.4GHz 帯ワイヤレスセンサネットワークシステムの基礎検討」	H27.3
	応用物理学会　「エナジーハーベスト用ショットキーダイオードの検討その１」	H27.3
発表	第 2 回ナノエレクトロニクスワークショップ　「ナノ RF 技術の展望」	H27.3
	第 2 回ナノエレクトロニクスワークショップ　「MOSFET 作製を目指した熱拡散プロセスについて」	H27.3
	第 2 回ナノエレクトロニクスワークショップ　」宇宙ナノエレクトロニクスクリーンルームでの MOSFET 作製に向けて」	H27.3
	第 2 回ナノエレクトロニクスワークショップ　「電源も無線化したワイヤレスセンサネットワークシステムの再使用ロケット実機内での実証実験」	H27.3
	第 2 回ナノエレクトロニクスワークショップ　「地上局搭載のためのアップリンク用 20W 級 GaN HPA の設計・試作」	H27.3
	第 58 回 宇宙科学技術連合講演会　「太陽光発電無線送受電技術開発の状況」	H26.11

Ｋ－３－２　目標の達成度

Ｋ－３－２－１　全体の目標の達成度

表 K-3-2-1-1　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 （中間評価時点）	成果 （中間評価時点）	達成度
宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成	ロードマップの作成に当たり、必要となる技術項目を抽出する。 現時点での技術レベルを調査し、想定される将来の技術進展を踏まえ、本研究開発における研究開発の目標を設定する。	本研究開発後のステップに必要となる技術項目を抽出した。 本研究開発における研究開発の目標を設定した。	達成
マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発	送電系の半導体増幅器向け素子の高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。 大幅な薄型･軽量化を可能とする HySIC 技術の実現性を明確にする。	高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針を明確にした。 薄型・軽量化のための HySIC 実現性を明確にした。	達成
マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査	宇宙太陽光発電システム以外でのマイクロ波無線送受電技術の応用可能性について調査する。 調査結果を踏まえて、可能性の高い産業領域を整理･分析する。	宇宙太陽光発電システム以外でのマイクロ波無線送受電技術の応用可能性について調査した。 調査結果を踏まえて、可能性の高い産業領域を整理・分析した。	達成

Ｋ－３－２－２　個別要素技術の目標の達成度

表 K-3-2-2-1　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 （中間評価時点）	成果 （中間評価時点）	達成度
送電系高効率化	高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。	高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針を明確にした。	達成
受電系高効率化	受電部高効率化に寄与する項目を抽出する。	受電部高効率化に寄与する項目を抽出し、研究開発目標を設定した。	達成
薄型・軽量化	送電部の大幅な薄型化を実現するために必要となる HySIC 技術の実現の見通しを得る。	整流デバイスの特性評価冶具の作製と評価を行い、整合回路の誘電体基板による電力合成器の試作を行い、有効性を確認した。 上記により HySIC 実現の見通しを得た。	達成

Ｋ－４　事業化、波及効果について

Ｋ－４－１　事業化の見通し

宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ）の商用システムとしての事業化は、政策的に期待される目標（石油代替エネルギーとしての導入、２０５０年までの温室効果ガス排出量半減)の規模からも長期的な取り組みを行っている。平成２７年の宇宙基本計画でも、４．我が国の宇宙政策に関する具体的アプローチ（2）具体的取組 ②個別プロジェクトを支える産業基盤・科学技術基盤の強化策 iii）将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組において、「エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組」と述べており、本研究開発はまさにそれに符合する。本研究開発の成果が次なる宇宙実証ステップに向けての技術インプットとなり、ひいては、本研究開発は事業化に向けての一里塚であるとの位置づけである。

本研究開発は、表 K-3-1-1-1 に示した太陽光発電衛星に必要な技術分野のうち送受電（高効率化）及び輸送（薄型・軽量化）にかかる技術に貢献することを目的に実施されている。

開発される HPA によれば送電のエネルギー効率が大幅に向上するため、送電の際に発生する熱量が減少し、排熱の為に必要となる構造等を大幅に削減することができる。

開発される HySIC によれば、送電システムが一段と薄型・軽量化され、将来ＳＳＰＳの商用化で想定する打ち上げ質量に近づけることができる。

Ｋ－４－２　波及効果

Ｋ－４－２－１　マイクロ波無線送受電技術の波及効果

K-3-1-1(3)マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査から､以下の分野で波及効果が期待できる。

（１）ワイヤレスセンサ

本研究開発を活用することにより送受電装置が薄型・軽量化、高効率化すると、電源部設置に必要な容積の低減、架台の簡略化による設置コストの低減がなされ、よりワイヤレスセンサの活用が広がることが期待できる。

バッテリレスとすることにより更に電源部を小型・軽量とすることができる。

a. 農業分野（フィールドサーバ）

i）農場モニタリング

ア. 計測項目

温度、湿度、日射量、CO2 濃度、降水量、風速、外注カウント、土壌水分等

イ. 実用ステータス

政府機関、民間企業がフィールドサーバ（センサネットワーク）の実証実験中

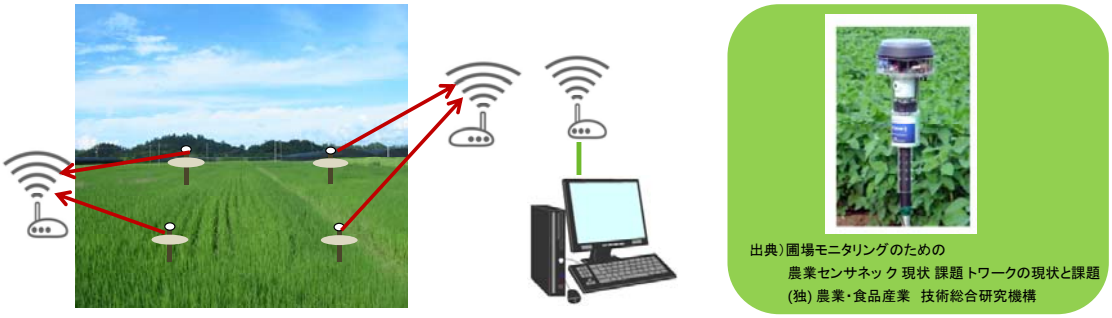


図 K-4-2-1　ワイヤレスセンサ　研究例（農業分野）

b. 防災分野

i）土砂災害監視システム

ア. 計測項目

雨量、伸縮、傾斜

イ. 実用ステータス

民間企業が土砂災害監視システム（センサネットワーク）の実証実験中

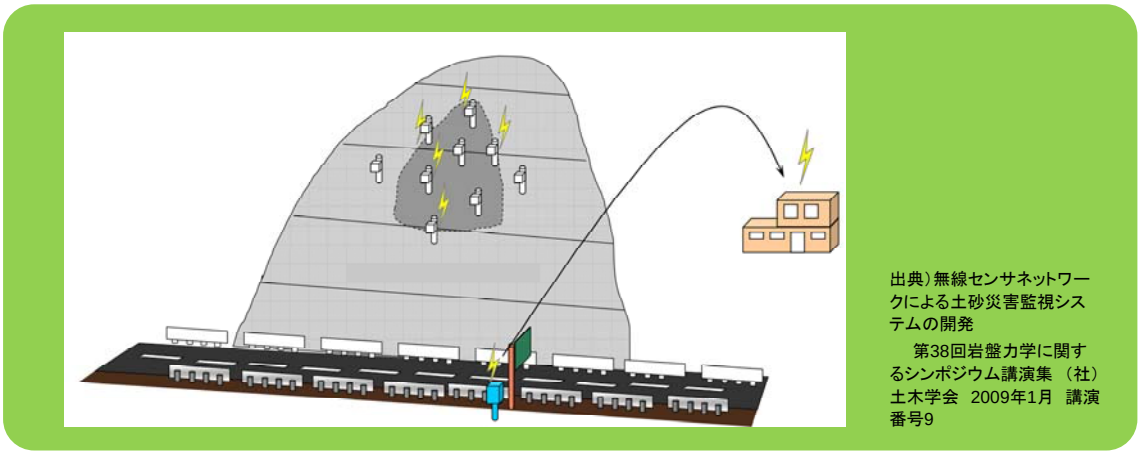


図 4-2-J-2　ワイヤレスセンサ　研究例（土砂災害監視システム）

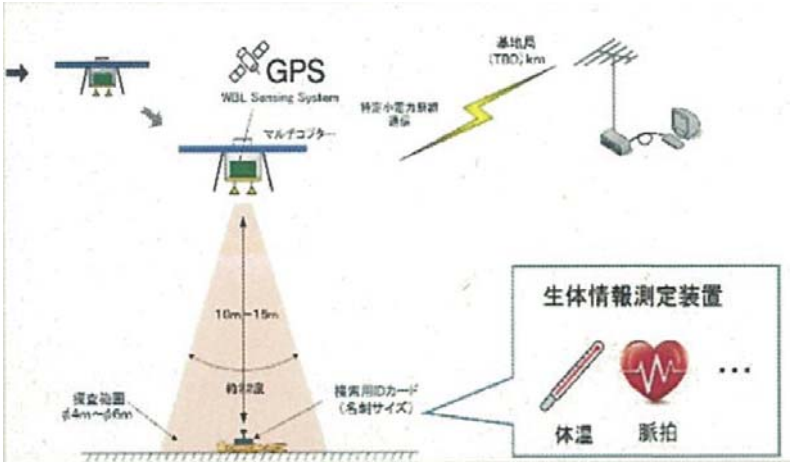
ii）遭難者探索システム

ア．計測項目

体温、脈拍、遭難者識別 ID 等

イ．実用ステータス

産学連携にてマルチコプターによる実証実験中。



出典：福島県商工労働部医療関連産業集積推進室

図 K-4-2-3　ワイヤレスセンサ　研究例（遭難者探索システム）

c．漁業分野

i）養殖／水産資源管理システム

ア．計測項目

水温、潮流

イ．実用ステータス

大学機関が養殖／水産資源管理システム（センサネットワーク）の実証実験中（民間も参入可能）

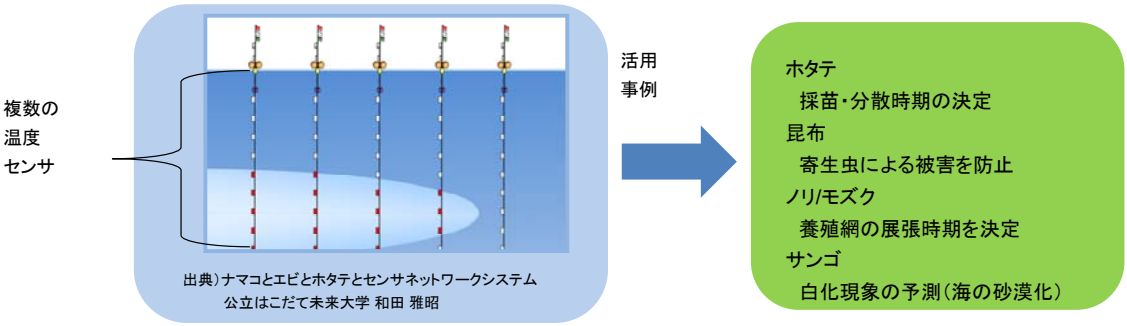


図 K-4-2-4　ワイヤレスセンサ　研究例（漁業分野）

d. 交通（ITS）分野

i）交通情報システムの構築

ア. 計測項目

車両、車両間の距離等

イ. 実用ステータス

政府機関、民間企業、大学機関が交通情報システム（センサネットワーク）の実証実験中

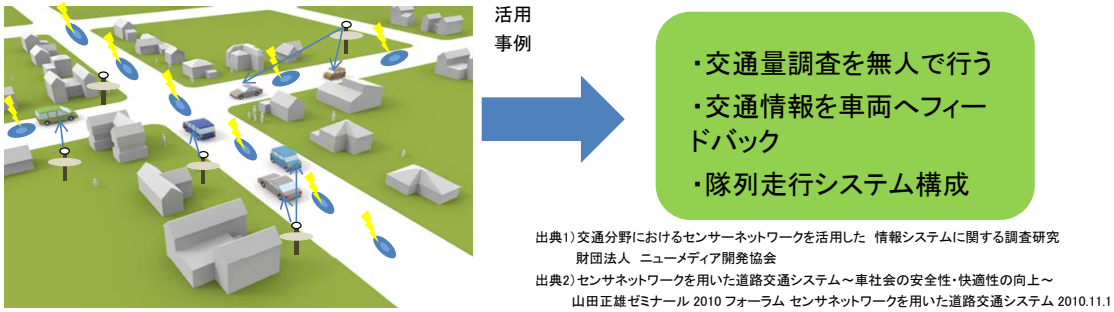


図 K-4-2-5　ワイヤレスセンサ　研究例（交通（ITS）分野）

（２）電力伝送

受電装置に HySIC を利用することにより、受電装置の小型軽量化が出来、搭載制約・持ち運び時の不便さが緩和される。

a. 電動車両向け無線充電システム

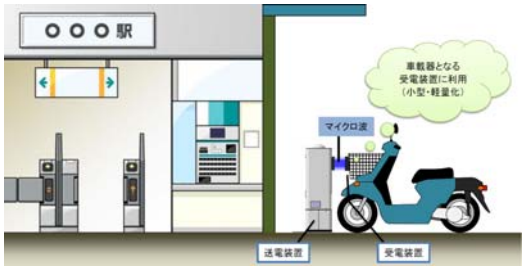
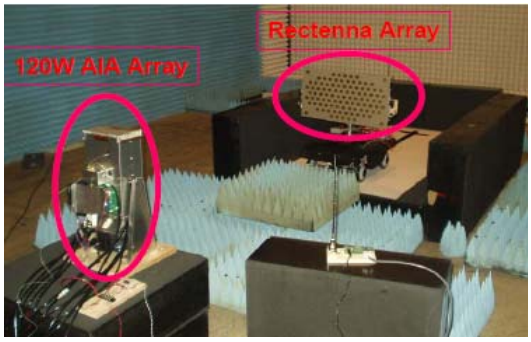


図 K-4-2-6　電力伝送　研究例（電動車両向け無線充電システム）

b. ローバへの無線給電



（出典：作業用ロボットへのマイクロ波送電および通信技術の開発に関するフィージビリティスタディ報告書　平成 19 年 3 月　財団法人機械システム振興協会）

図 K-4-2-7　電力伝送　研究例（ローバへの無線給電）

c. ユビキタス電源による無線電力空間

（出典：信学技報 SPS2003-18, 2004 京都大学生存圏研究所）

図 K-4-2-8　電力伝送　研究例（無線電力空間）

Ｋ－４－２－２　高効率化に資する研究開発の波及効果

高効率化に資する研究開発で開発したCバンド増幅デバイスの主な関連利用用途として、以下に示す継続市場がある。本研究開発の成果は、以下のように関連分野に大きな効用をもたらす見込みである。

（１） 衛星通信用機器

衛星搭載機器の例として通信衛星用トランスポンダがある。本研究開発のHPA と同種（GaN）の C バンド高効率増幅素子の宇宙機器への適用が現在、進められている。従来の GaAs 素子 SSPA（半導体増幅器）より、高出力化・高効率化を図り、市場拡大を目指している。

新たな半導体増幅器による小型・軽量化、高効率化、高出力化により、従来と同等の性能を小型・軽量・低消費電力で実現出来る。

図 K-4-2-2-1 衛星搭載用 GaN C-band SSPA
（提供：三菱電機株式会社）

（２） 地上のレーダ、中継器等

レーダ市場でアクティブフェーズドアレイ方式化を促進し、電子走査やビーム制御の多様化などの高機能化を実現する。また、高効率化、高出力化により、従来の管球デバイスを置換え、搭載機器の信頼性向上・維持コスト低減に寄与する。

各種レーダ(気象レーダ)、地上無線通信機器(マイクロ波中継器)、衛星通信用機器(VSAT 端末)等の適用例を図 K-4-2-2-2 に示す。

各種レーダの例
（気象レーダ）

地上無線通信機器の例
（マイクロ波中継）

衛星通信用機器の例
（VSAT 端末）

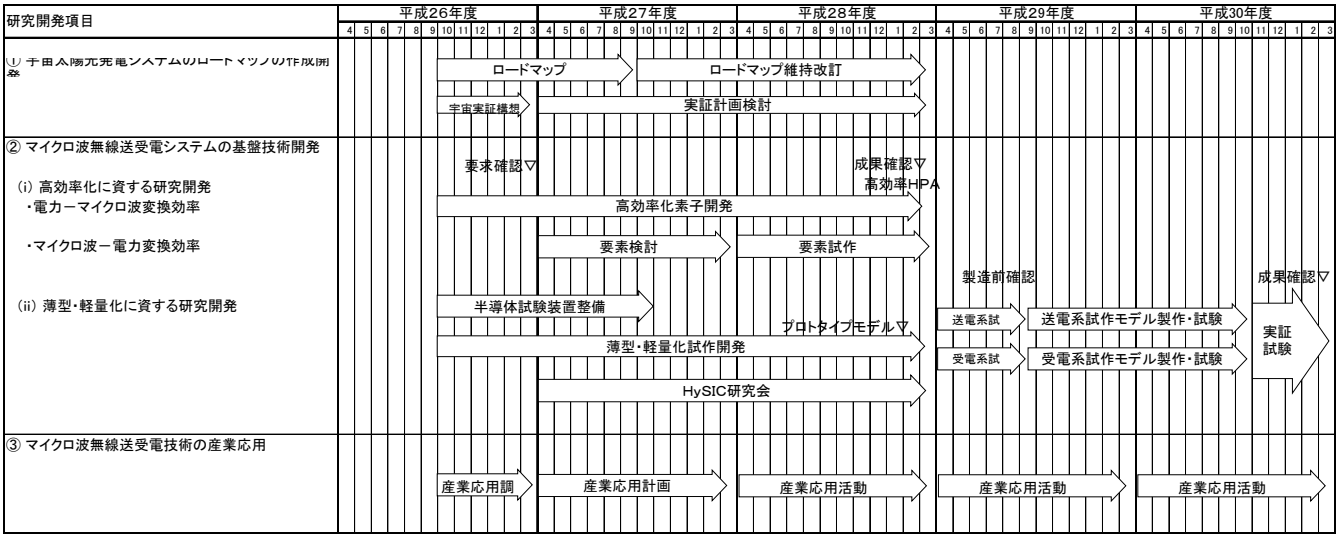
図 K-4-2-2-2　C バンド増幅デバイスの主な適用例

Ｋ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｋ－５－１　研究開発計画

中間評価時点における研究開発計画を表 K-5-1-1 に示す。

表 K-5-1-1　研究開発計画



Ｋ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が参加した。（図 K-5-3-1 参照）

また、研究開発の実施に当たっては、助言・評価のため、表 K-5-3-1 からなる無線送受電高効率化技術委員会委員会を設置した。

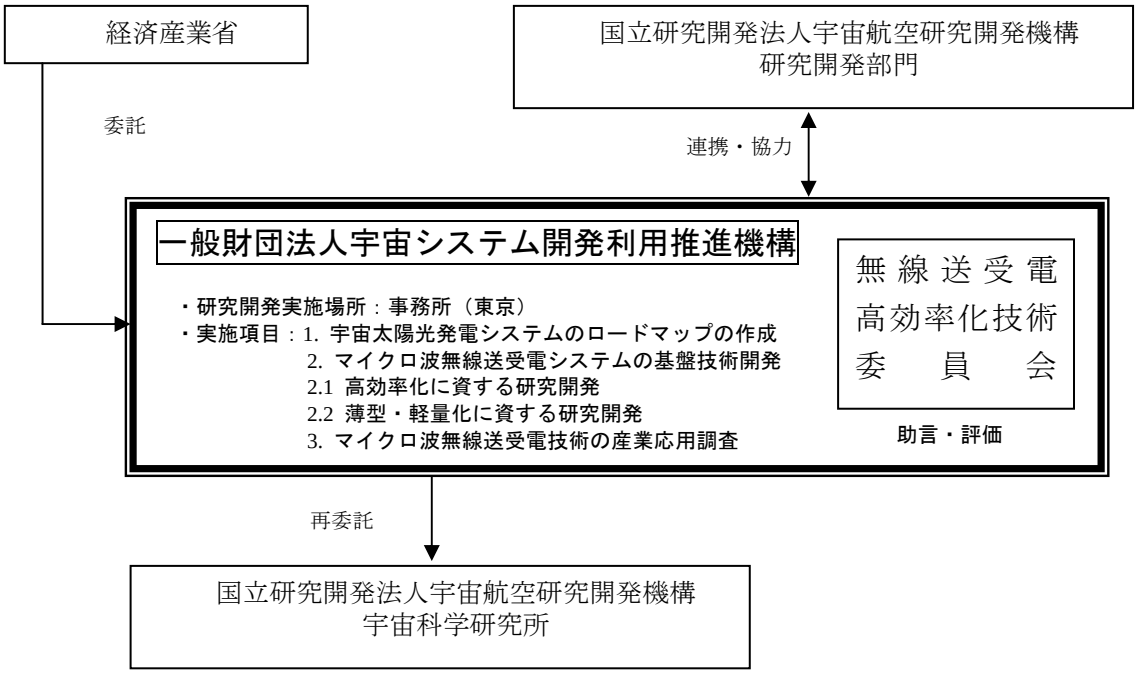


図 K-5-3-1　研究開発実施体制

表 K-5-3-1　無線送受電高効率化技術委員会委員会 名簿

氏 名	所　　属
川原 圭博	国立大学法人東京大学大学院情報理工学系研究科　准教授
佐々木　進	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 名誉教授
篠原　真毅	国立大学法人京都大学生存圏研究所　教授
末松 憲治	国立大学法人東北大学電気通信研究所　ブロードバンド工学研究部門　先端ワイヤレス通信技術研究室　先端ワイヤレス通信技術研究分野　教授
藤島　実	国立大学法人広島大学大学院先端物質科学研究科半導体集積科学専攻 教授
藤野　義之	学校法人東洋大学理工学部電気電子情報工学科 教授
星　裕	九州電力株式会社技術本部総合研究所副所長
本城　和彦	国立大学法人電気通信大学情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 教授

Ｋ－５－３　資金配分

中間評価時点における資金配分（実績）を表 K-5-3-1 に示す。

表 K-5-3-1　資金度配分　　（単位：百万円）

年度　平成	２６	合計
宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成	12	12
マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発	ー	ー
高効率化に資する研究開発	76	76
薄型・軽量化に資する研究開発	160	160
マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査	2	2
合計	250	250

Ｋ－５－４　費用対効果

本研究開発においては、マイクロ波無線送電の送受電効率の改善及び送受電システムの薄型・軽量化に向けた研究開発を実施するとともに、マイクロ波無線送電による宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の実現に向けた研究開発の中長期ロードマップの作成等を行う。

中長期ロードマップの作成等については、SSPS 研究機関である、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）と連携・協力を行い、効果的、効率的に実施している。また、この分野で世界をリードする京都大学をはじめとする大学、SSPS の想定ユーザも含め、協力して実施している。

マイクロ波無線送電の送受電効率の改善及び送受電システムの薄型・軽量化については、特に最新技術である HySIC の制作を行うため、新たな装置の導入が必要であるが、必要最小限の設備により試作・評価するなど効率化を図っている。

本研究開発では、ＳＳＰＳ用や民生用通信機に適応可能な次世代集積回路技術としてシリコンと化合物半導体の良さを複合した混成半導体集積回路（ＨｙＳＩＣ：Hybrid Semiconductor Integrated Circuit）を採用した。この技術を用いることにより、ＳＳＰＳの送電部を 20mm 以下で実現することが期待できるとともに、最先端の微細加工技術ではなく、ニッチ的な高密度実装技術を用いることで比較的開発コストが抑えられる。

世界的に見ても、このような視点でＳＳＰＳの無線電力伝送や高性能コンパクト通信機をコンパクトな混成集積回路で実現する技術開発には手が付けられておらず、これが早期に実現できれば、日本の電子立国の優位性が得られる。

薄型・軽量化のシステムオンチップを実現するために、材料、回路技術、接合技術など多くの先端技術を取り入れた本研究開発は、高度な最先端の集積回路技術の混合体であるため、リスクもかなり大きい。これに対しては、異種半導体接合技術をもってチャレンジすることを、世界で初めて取り組んでいる。

本研究開発は、その波及効果は非常に大きく、少なくともＳＳＰＳのスピンオフとして、宇宙機や航空機、自動車などの通信、センサ、エネルギー伝送分野への広範囲な応用が期待できる取り組みである。

Ｋ－５－５　変化への対応

現状において特に社会情勢等の変化はない。

Ｌ　空中発射システムの研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

Ｌ－１　事業の目的・政策的位置付け

Ｌ－１－１　事業目的

現在、日本の基幹ロケットとしてはH-IIA、イプシロンロケットが存在しているが、H-IIAは大型衛星を、イプシロンロケットは500kg級の衛星を打ち上げるロケットであり、現在の日本には今後の市場活性化が想定される超小型周回衛星打上げに対応する小型ロケット開発計画が存在していないのが実情である。H-IIAは打上げの信頼性こそ比較的高いと言えるものの、コストとしては８５～１００億程度かかっており、中型小型衛星を単独で打ち上げる場合は、外国のロケット等に依存せざるを得ないのが現状である。小型/超小型衛星をピギーバック等により H-IIA で打上げることも考えられるが、打上げは主衛星の打上時期や軌道によって左右されることとなり、数年単位で打上げが遅れることも想定される。また、近年、超小型周回衛星群によるサービス展開計画が進んでおり、今後小型/超小型衛星の打上げは飛躍的に伸びていくことが想定される。一方で、宇宙新興国においては、災害対策の一環として、地球観測衛星等の打上げ需要が拡大しており、今後ますます小型地球観測衛星等の打上げビジネスが活発化していくことが予想される。

上記のような背景を踏まえ、空中発射システムの研究開発では、従来より低コスト、高効率かつ機動的に小型衛星を打上げることができる先進的打上げシステムを確立することにより、海外衛星打上げ市場における優位性を獲得し、小型衛星の打上げビジネスに係る国際市場の獲得を目指す。

Ｌ－１－２　政策的位置付け

空中発射システムの研究開発の政策的位置付けとしては、以下のものが挙げられる。

① 新成長戦略（平成２２年６月１８日、閣議決定）
　Ⅴ　科学・技術・情報通信立国戦略　5.フロンティアの創出
② 産業構造ビジョン２０１０（平成２２年６月３日、産業構造審議会産業競争力部会報告書）
　Ⅲ.　今後の戦略分野　5.先端分野　③宇宙
③ 宇宙基本計画
　（平成２１年６月２日、宇宙開発戦略本部決定）
　第 3 章　宇宙開発利用に関し政府が総合的かつ計画的に実施すべき施策　2 各分野における具体的施策の推進　(5)　戦略的産業としての宇宙産業育成の推進
　（平成２７年１月９日、宇宙開発戦略本部決定）
　4.　我が国の宇宙政策に関する具体的アプローチ　(2)具体的取組

④ 宇宙分野における重点施策について」（平成２２年５月２５日、宇宙開発戦略本部決定）
⑤ 「科学技術に関する基本政策について」答申（平成２２年１２月２４日、総合科学技術会議）
2. 重要課題達成のための施策の推進 (4)国家存立の基盤の保持

これらの政策の中では、小型衛星の海外市場獲得、小型衛星の打上需要増加に伴う打上げ手段の確保等が目的として記載されており、低コスト、高効率かつ自由度の高い打上げ手段である空中発射システムの確立は、非常に重要な位置付けとなっている。

また、技術戦略マップ２０１０（宇宙分野）においても、「我が国の自立的な打ち上げ手段を今後も維持・発展し、更なる信頼性の向上を図るべき「ロケット・輸送系分野」においては、基幹ロケット群の確立と多様なミッションへの対応を掲げ、大型ロケット H-IIA/B シリーズ、軌道間輸送機 HTV 等の着実な打上げ及び次期小型固体ロケットの開発を進めるとともに、今後市場拡大が見込まれる小型衛星を高い自由度・即応性の下に、効率よく打ち上げることを可能とする空中発射システムの基盤技術開発を進める。」と明示されている。

Ｌ－１－３　国の関与の必要性

宇宙システムは、一般的に極限環境下で極めて高い信頼性が求められ、その研究開発や宇宙実証には多額の費用を要すること、また、我が国宇宙産業は欧米と比べ官需依存度が高いこと等から、リスクが高く、かつ、直接利益に結びつかない衛星の研究開発や宇宙実証を民間企業のみで実施することは困難であることから、我が国が有する民生技術の強みを最大限活用するとともに、政府による衛星・ロケット等の計画的な開発・調達を通じて、我が国宇宙産業の国際競争力の強化に必要なこれら研究開発や宇宙実証の機会を提供することが必要不可欠である。ロケットに代表される宇宙開発は、長期にわたる開発投資などそのリスクの大きさから、国が主導して開発が行われてきた分野である。世界の宇宙産業をリードする諸外国においても、国によるロケット開発を経て、その成果を商業転用するという実態を踏まえ、我が国において国際市場で競争力のある宇宙産業を育成する観点から、小型衛星の低コスト打上げに適した空中発射システムの基盤技術の研究開発に国が関与することは極めて重要である。

L－２　研究開発目標

L－２－１　研究開発目標

2000 年以降、欧米を中心として低コスト小型高性能衛星（Nano、Micro、Mini）や基盤技術の開発が本格的に開始され、これまでの教育や技術実証のための小型衛星から、災害監視、安全保障、ミッション実証、ベンチャ企業によるアイデア実証等の実用衛星と利用拡大が進んでいる。2010 年代に入り更なる小型高性能化を目指し、Cubesat を利用した技術開発が進められ、その成果は Skybox Imaging の Skysat や Planet Labs の DOVE で実証され、また Google や Facebook が超小型周回衛星によるサービス展開を計画している。しかし、小型衛星の打ち上げは、大型、中型ロケットのピギーバックや相乗り打ち上げに頼らざるを得ないことから、ミッション達成の大きな制約となっている。小型衛星の利用促進を図るために、機動的で低コストな打ち上げ機会の実現が求められており、諸外国においては小型衛星の開発と並行して小型ロケットの研究、開発が進められている。

我が国のロケット計画には、開発中も含めて H-IIA、H-IIB、Epsilon、H-3 ロケットしかなく、Nano、Micro、Mini の小型衛星打ち上げには十分に応えられるものではないことから、将来の超小型衛星の利用促進に寄与する低コスト小型ロケットの実現が求められている。我が国特有の射場制約として、年間打ち上げ回数の制約や高傾斜角への打上時の飛行経路の制約があることから、特定の射場が不要で高々度からロケット点火を行う空中発射システムは、機動性、打ち上げ効率、コスト等の観点から小型衛星打上げには非常に有効な手段となる。

上記背景を踏まえ、将来の小型衛星の需要増大、普及促進に寄与する、空中発射システムの構築及び運用に不可欠な、航空機からのロケット分離に係わる技術や、将来の事業化を見据えた低コスト化に係わる基盤技術の研究開発を行うとともに、民間打ち上げ事業展開に必要な法規制等に係わる調査を行うことを本研究開発の目的とする。

L－２－２　全体の目標設定

航空機を利用して衛星を打ち上げる空中発射システムは、我が国には実績のない打ち上げシステムであることから、空中発射システムの運用構想を策定し、新規技術、低コスト化技術等の検討を行い、システムの成立性の確認を行う。また、将来の空中発射システムによる民間打ち上げ事業化に向けて、航空法等の現行法や整備中の宇宙活動法等の法制面の調査を行い、諸課題の整理を行う。

本研究開発における基本方針を以下に示す。

- 既存の航空機と固体ロケット技術をベースとして、研究開発を進める。
- 研究開発に要する期間及び経費の低減を目指して、海外企業等との連携も

考慮する。ただし、開発成果は我が国独自に使用できるものとする。

- 空中発射システムの打上能力は、適用可能な航空機の搭載条件と将来の小型衛星の需要予測を考慮し決定する。
- 空中発射システムの開発や運用に適用する技術やインフラは、将来の民間事業に利用可能なものとする。

全体の目標を表 L-2-2-1 に示す。

表 L-2-2-1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
航空機を利用して小型衛星を打ち上げる空中発射システムの運用構想を策定し、技術課題の抽出、解決策の検討等を実施し、空中発射システムの技術課題を抽出し、対応策を明らかにする。 また、空中発射システムによる民間打ち上げ事業展開に必要な、法制面の課題を整理する。	空中発射システムは小型衛星の機動的な低コスト打ち上げシステムとして期待されているが、我が国では実績のない打上システムであることから、適用する新規技術及び低コスト運用技術に係わる、技術課題の抽出、解決策の検討を行い、システムの成立性を確認する必要がある。 また、世界的に官製宇宙から商業宇宙への移行が進む中、我が国においても国際宇宙法、国内法に準拠した民間宇宙活動の促進に係わる法規制の制定が必要である。

Ｌ－２－３ 個別要素技術の目標設定

空中発射システムの構築に係わる諸課題への対応として、表 L-2-3-1 に示す要素技術に識別し、個別に目標設定を行った。

表 L-2-3-1 （1／2） 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
1. 空中発射システム 運用構想	空中発射による衛星打ち上げ及び運用の構想検討を行い、技術的成立性があり、将来の打ち上げ事業展開に資する低コストな空中発射システム運用構想を策定する。	将来、需要が見込まれる小型衛星の打ち上げが可能な打ち上げシステムとする。 我が国には空中発射システムの開発実績がないことから、空中発射システムの運用に必要な構成システムを明らかにし、その技術的課題を抽出する。
2. ロケット搭載／分離技術	空中発射システムに不可欠な、航空機にロケットを搭載する技術、高々度飛行中の航空機からロケットを安全に分離する技術、分離されたロケットの正常な飛行が可能なロケット点火のための姿勢確保に係わる技術を確認する。 また、投下技術の実証に必要な投下システムの設計、投下シーケンス及び投下試験計画について安全審査を含む詳細設計審査を終了させる。	飛行中の航空機からのロケット投下は、通常の物量投下の制約を遙かに超えた投下高度、大型重量物となることから、ロケットを搭載した航空機の飛行、ロケットの投下、ロケットの点火等から航空機及び乗員の安全が確保できる投下システムの設計、投下手順が求められる。 また、分離されたロケットの点火時の姿勢が衛星打ち上げの成否や分離した航空機の安全確保に繋がることから、分離後のロケットの姿勢を確保する必要がある。
3. 運用管制技術	空中発射システムのメリットを最大限に引き出すとともに、将来の打ち上げ事業展開に不可欠な低コスト運用のため、地球局に依存しない運用管制として、ロケットの自律飛行と商用衛星を利用した飛行管制技術の検討を行い、技術課題を抽出し、対処方法を明らかにする。	空中発射のメリットは、打ち上げ効率の向上のみならず、打ち上げ場所の自由度が高いことにある。そのために、現在は地上の地球局から連続して飛翔体を追跡する打上げ管制を行っているが、地球局を必要とせず、自由に打上げ場所、飛行経路を設定できる管制方式が必要である。

表 L-2-3-1 （2／2） 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
4. 法規制等調査	空中発射システムの実現に係わる、現行の国内法規制等の制約を整理する。 また、諸外国における民間打ち上げ事業展開に係わる法規制の洗い出しを行う。	宇宙活動の展開には、宇宙空間とその利用に関する国際法規則（宇宙法）の順守が必要であるが、我が国は宇宙法の批准国で有るにもかかわらず、国内法の整備が遅れており、民間宇宙活動の制約となっている。
5. 小型搭載電子機器技術	ロケット搭載電子機器の小型、軽量、低コストに必要な方策を明らかにする。	我が国のロケット開発が、短期間でのシステム開発と開発経費の削減に力点が置かれていたことから、諸外国と比較し電子機器の小型/軽量化等の基盤技術において、大きく後れを取っている。特に小型ロケットにおいては、打上能力に大きな影響を与えることから、早急な対応が必要である。

Ｌ－３　成果、目標の達成度

Ｌ－３－１　成果

Ｌ－３－１－１　全体成果

将来の小型衛星需要動向を調査し、空中発射システムの構想検討を行った。航空機を利用した打ち上げ方式である空中発射システムは、航空機への搭載にあたり質量や形状の制約等を受けることから、打上能力は適用する航空機や搭載方式の影響を受ける。また、開発する技術は、適用する航空機の機種等の影響が少なく汎用性を確保することが重要である。また、空中発射方式による打ち上げメリットを有効に引き出すとともに、地上インフラを最小限にし、低コスト化を実現できる運用管制方式の構想検討を行った。

空中発射システムは C-130 を利用したプラットフォーム投下方式とし、投下システムの設計、投下シーケンスの検討等を行い、米国の専門企業による安全審査及び国内の詳細設計審査により、設計の妥当性を確認した。

打上げ運用管制は、インマルサットを利用した静止衛星経由の管制を行うこととして、インマルサットが開発中の小型衛星搭載用の通信端末 SB-SAT（SwiftBroadband for Satellite）をロケット用に改修することとして技術課題の抽出を行い、課題解決の対応策を明らかにするとともに、運用手順の策定を行った。

法規制調査は、主に米国の打上げ制度、打上げ許可申請の調査を行った。また、国内の航空法に基づき、空中発射システム実施に当たっての適合性の整理を行った。

小型搭載電子機器については、従来の小型ロケットシステムをベースラインとし、シリアルデータバスの採用、電子機器の構成、機能を検討し各構成に対する再配分を行い、機器の統合及び削減の見通しを得た。

図 L-3-1-1-1 にこれまでの成果に基づく、空中発射システムの将来運用構想（案）を示す。

ロケットは物料投下に使用される標準のプラットフォームに固定され、C-130 輸送機のカーゴ内に搭載される。高度約 7km を飛行中の輸送機の後部ドアが開き、プラットフォームに固定されたロケットは抽出傘により輸送機から投下される。投下後に、主傘が引き出され振り子運動をしながら緩降下する。振り子運動の減衰後、プラットフォームからロケットが切り離されロケット点火が行われる。

飛行中のロケットは、搭載された GPS（Global Positioning System）受信機及び INS（Inertial Navigation System）により位置、姿勢情報等から飛行経路を計算し、自身の飛行状況を判断する。同時にロケットの位置、姿勢等の情報は、商用通信衛星（Inmarsat）を介して地上へ送信される。正常な飛行の確保が困難と判断された場合は、ロケット及び地上の双方において飛行中断などの必要な措置を講じる。

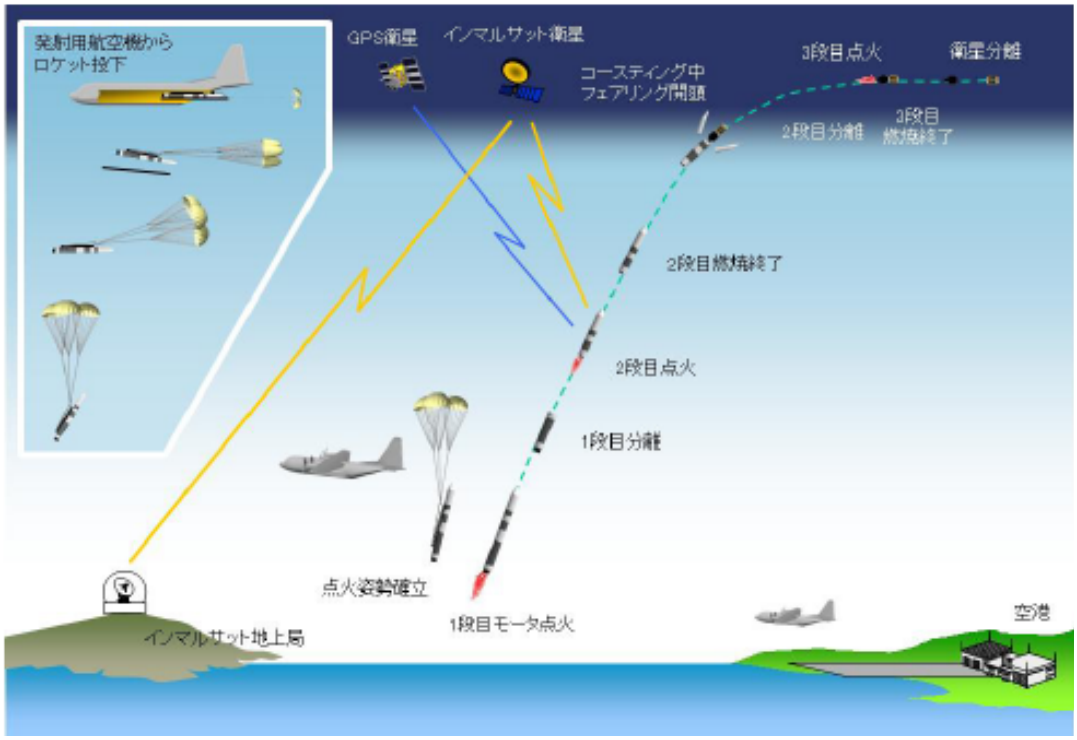


図 L-3-1-1-1　空中発射システム運用構想（案）

L－３－１－２　個別要素技術成果

（1）空中発射システム運用構想

小型衛星の市場調査、ロケット分離方式のトレードオフを行い、将来の民間打ち上げ事業展開に有効な空中発射システムとして、輸送機の胴体内にロケットを搭載し、高々度からロケットを投下して 150kg の衛星を高度約 500km の極軌道に打ち上げるシステム構想を策定した。

① 打上能力

小型衛星の高性能、高機能化が進み、現在では CubeSat の実用衛星や軍事衛星への利用のための開発も進められており、Pico、Nano、Micro、Mini 衛星の利用は今後、急速に拡大することが予想される。また、小型、高機能、低コスト小型衛星の出現により、新規市場の創成が期待されている。

小型衛星の需要予測について、FAA（Federal Aviation Administration）の「2010 Commercial Space Transportation Forecasts」と 2010 年 5、6 月にポルトガルで開催された 4S（Small Satellites Systems and Services）シンポジウムにおいて、Euroconsult と CNES が共著で発表したものに、小型衛星の実績と今後の予測に関する情報が記載されている。

Euroconsult と CNES の報告等に基づき、単独打ち上げ機会の確保が困難でかつ、需要の見込まれる **150kg 衛星を、高度約 500km の極軌道に打ち上げる空中**

発射システムの検討を行った。

2013 年から、Planet Labs の DOVE 光学衛星（5.2kg、解像度 3～6m）や Skybox Imaging の光学衛星 Skysat（80kg、解像度サブメータ）等が打ち上げられ軌道実証され、また Google や FaceBook が超小型周回衛星によるサービス事業展開を発表するなど、今後の超小型衛星によるサービスが加速されるものと予測される。

（a） 2010 Commercial Space Transportation Forecasts

FAA では、周回衛星機数と打ち上げ実績と今後 10 年間（2010～2019）の打ち上げ予測（図 L-3-1-2-1、表 L-3-1-2-1）を行い、今後 10 年間では平均 26 機（打ち上げ機会 12 回）が打ち上げられるとしている。このうち、直近の 2009 年から 2012 年の 4 年間では、106 機の衛星打ち上げが予測（表 L-3-1-2-2）され、200kg 以下の衛星は 25 機と全体の 1/4 程度になると予測している。

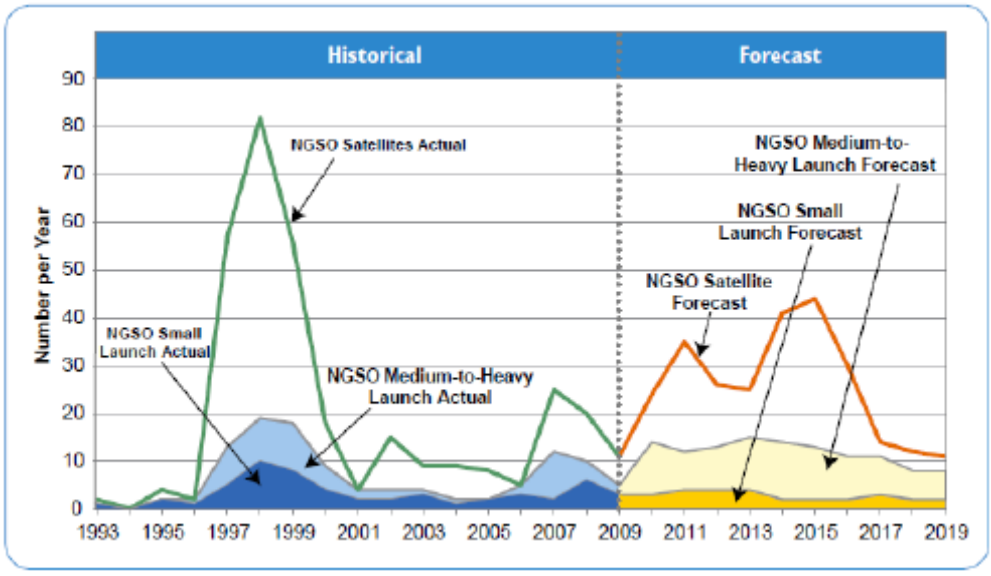


図 L-3-1-2-1 非静止衛星の打ち上げ実績と予測（FAA）

表 L-3-1-2-1　2010 年～2019 年の非静止衛星の打ち上げ予測（FAA）

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	TOTAL	Avg
SATELLITES												
International Science/Other	11	7	7	8	6	7	6	7	8	7	74	7.4
Commercial Remote Sensing	1	0	2	1	2	6	2	3	0	0	17	1.7
Little LEO Telecom	3	6	6	3	0	0	0	0	0	0	18	1.8
Big LEO Telecom	6	18	0	0	27	27	18	0	0	0	96	9.6
Broadband Telecom	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	16	1.6
Orbital Facility Assembly & Services	3	4	3	5	6	4	4	4	4	4	41	4.1
Total Satellites	24	35	26	25	41	44	30	14	12	11	262	26.2
LAUNCH DEMAND												
Medium-to-Heavy Vehicles	11	8	9	11	13	12	11	8	6	6	95	9.5
Small Vehicles	3	4	4	4	2	2	2	3	2	2	28	2.8
Total Launches	14	12	13	15	15	14	13	11	8	8	123	12.3

表 L-3-1-2-2　非静止衛星の衛星質量別の打ち上げ予測（FAA）

Note: Table includes only satellites with known mass. Therefore the total number of satellites examined in a year differs from the forecast.

	2009	2010	2011	2012	Total	Percent of Total
< 200 kg (< 441 lbm)	8	8	6	3	25	24%
200-600 kg (441-1,323 lbm)	1	2	3	1	7	7%
601-1,200 kg (1,324-2,646 lbm)	10	19	10	10	49	46%
> 1,200 kg (> 2,646 lbm)	6	4	6	9	25	24%
Total	25	33	25	23	106	100%

（b） Euroconsult と CNES の予測

2010 年の 4S シンポジウムにおける両者共著の報告（LESSONS FROM THE PAST FOR THE FUTURE OF THE SMALLSAT MARKET）では、Orbcomm、Gonets 及び Globalstar のコンステレーションを除き、500kg 以下の小型衛星は 1999-2009 年にかけて 255 機が打ち上げられ、2010～2013 年の 4 年間で 100 機のバックログがあるとしている。そのトータル 355 機の内訳（図 L-3-1-2-2）は、欧州の政府衛星が 16%、その他の政府衛星 61%、学術目的の衛星 13%及び商用衛星 10%となっている。また 355 機のミッションは、技術実証 32%、地球観測 28%、科学 21%、通信 14%及びその他 4 パーセントとなっている。（図 L-3-1-2-3）

また、355 機の衛星質量別では、10kg から 150kg の衛星が全体の 57%を占めると予測されている。（図 L-3-1-2-4）

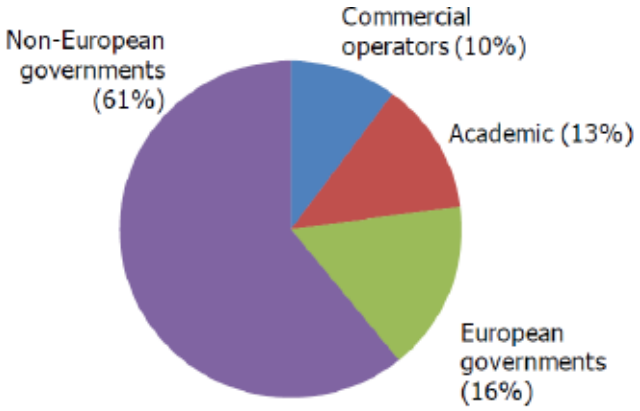


図 L-3-1-2-2　355 機の衛星分類（Euroconsult/CNES）

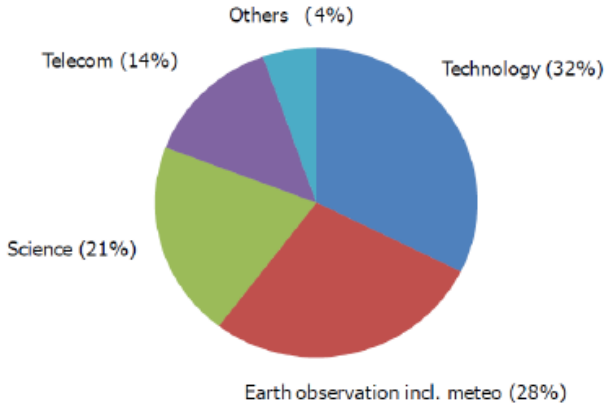


図 L-3-1-2-3　355 機の衛星ミッション分類（Euroconsult/CNES）

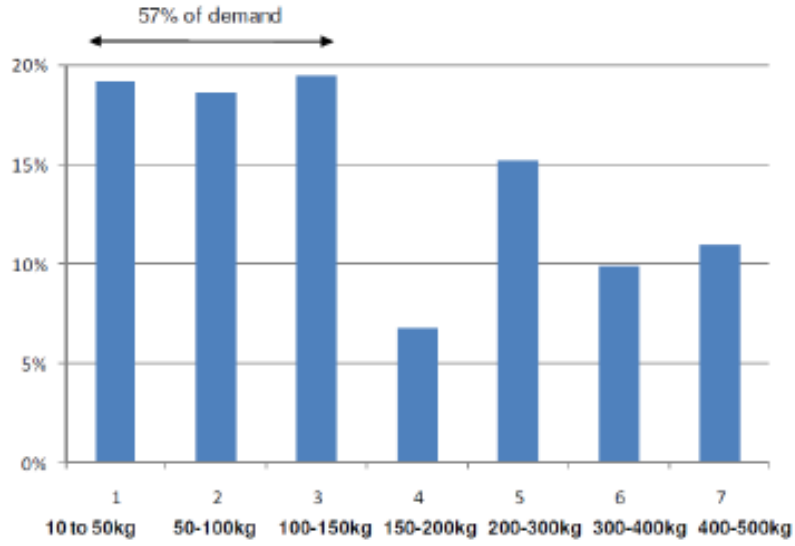


図 L-3-1-2-4　355 機の質量分類（Euroconsult/CNES）

② ロケット搭載方式

空中発射システムにおける航空機へのロケット搭載方式としては、亜音速機の機体下部若しくは上部に搭載する*亜音速水平発射方式*、超音速機等の機体下部若しくは上部に搭載する*ズームフライト方式*及び輸送機の胴体内部に搭載し飛行中に後部ドアを開放して投下する*空中投下方式*の 3 方式が考えられる。

3 方式の内、速度及び上昇高度から超音速ズームフライト方式の打ち上げ効率が最も高いが、超音速機の利用性、ロケット搭載のための機体改造及び搭載質量に大きな制約を受ける。亜音速水平発射方式については、次ぎに打ち上げ効率の高い方式であるが、機体改造が必要なことから、特定の機体の占有（若しくは所有）が必要となる。空中投下方式は、打ち上げ効率は 3 方式の中で一番劣るが、ロケット搭載や分離のための特別な機体改造が不要であることから、航空機の所有若しくは占有の必要がなく航空機の利用性が高く、搭載質量の制約も少ない。図 L-3-1-2-5 に 150kg 衛星を高度約 500km の極軌道へ投入するためのロケット点火条件、ロケット質量の関係を示す。3 方式のトレードオフの結果を、表 L-3-1-2-3 に示す。

以上から、**ロケット搭載方式として輸送機のカーゴにロケットを搭載する空中投下方式を選定**した。

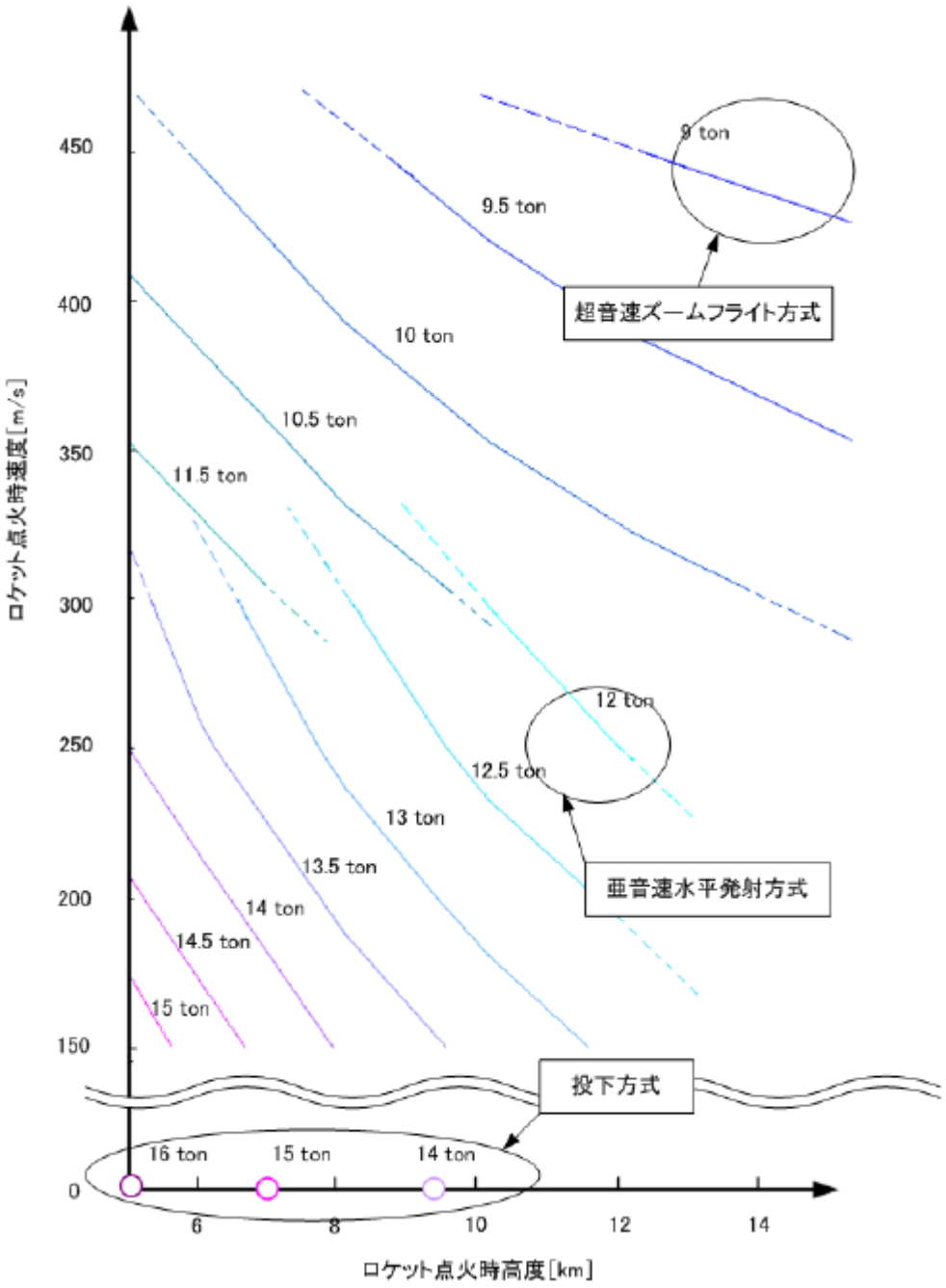


図 L-3-1-2-5　ロケット点火条件とロケット質量
（打ち上げ極軌道、高度 500km、衛星 150kg）

表 L-3-1-2-3　空中発射方式のトレードオフ

空中発射方式	水平発射方式	ズームフライト方式	空中投下方式
付　図			
航空機改修	ロケットを航空機の外部に搭載するための機体改修が必要		物料投下に使用される方式で、機体改修は最小
飛行性能への影響	航空機の機体外部にロケットを搭載することから、飛行性能の検証が必要 航空機の機種、ロケット形状毎に個別の検証が必要		カーゴ内への搭載のため、飛行性能の検証不要
150kg 衛星打上ロケット極軌道 500km	12ton クラス	9ton クラス 通常の戦闘機の下部では搭載不可 機体上部への搭載が必要	15ton クラス
その他の開発リスク	外部搭載のため、飛行中に気象の影響有り ロケットに主翼が必要	外部搭載のため、飛行中に気象の影響有り 上部への搭載は、緊急脱出、空中給油などの機能を阻害	投下後の点火姿勢の確立 投棄物が発生するケース有り
総合評価	△ 航空機の改修が必要で、使用する航空機が限定される	△ 航空機の改修が必要で、使用する航空機が限定される	○ 航空機の改修がほとんど不要 航空機の機種やロケット形状等の変更に柔軟

（a） 水平発射方式

水平発射方式の空中発射システムは、航空機下部（若しくは上部）のロケット搭載/分離機構によりロケットを搭載し、高々度からロケットを分離する方式（図 L-3-1-2-6）であり、ロケット分離に伴う投棄物はほとんどない。ロケットは、航空機からの分離時の初速と高度及び分離直後からの翼等による姿

勢制御が可能なことから、打上能力の向上が期待できる。しかし、ロケット搭載/分離のための航空機改造が不可欠であり、改造後の耐空証明、型式毎の適合性試験は必要となり、専用の航空機(若しくは所有)を確保しなければならない。本方式の実施/検討例を表 L-3-1-2-4 に示す。

本方式の適用例としては、1990 年から商用打ち上げを開始した、米国 Orbital Sciences 社の Pegasus ロケットがある。Pegasus の開発時と商用運用初期は航空機として、NASA の NB-52 を使用していたが、1994 年以降は NASA の超音速実験機 X-43A の実験を除いて、自社所有の L1011 を使用している。Pegasus は小型ロケット専用の低コスト打ち上げ機として商用運用を開始したが、ICBM 転用ロケットや、中国、インドの低コストロケットの台頭によりコスト優位性が低減している。Orbital Sciences 社では、Pegasus のコスト低減には限界があるとして、新たな空中発射システムの検討を開始している。

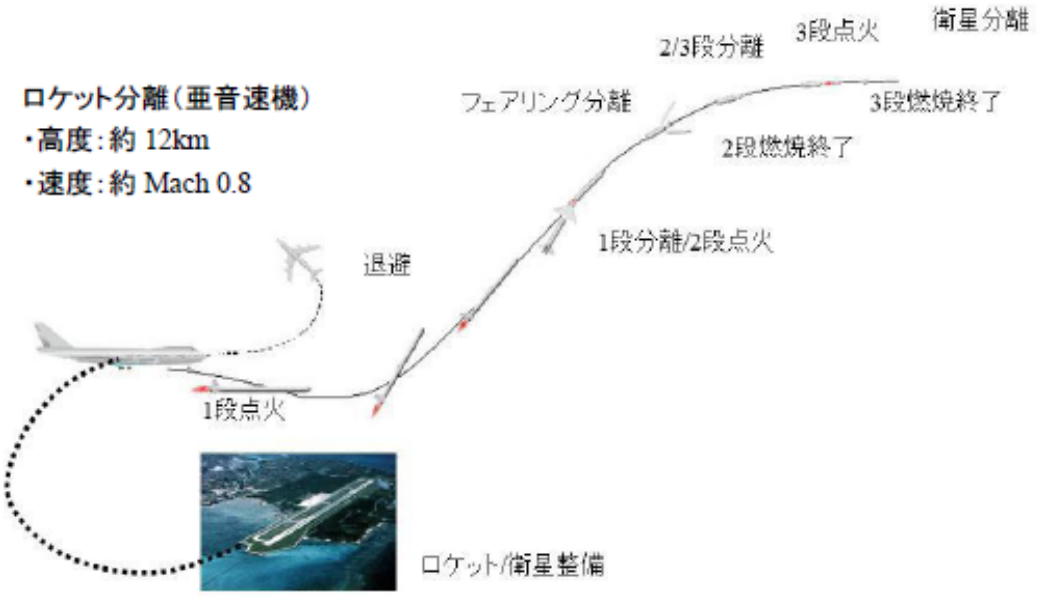


図 L-3-1-2-6　亜音速水平発射方式

表 L-3-1-2-4 水平発射方式の実施/検討例

実施状況	実施例	実施例	開発中	検討
名称	Pegasus XL	Enterprise 滑空飛行試験機	LauncherOne	horizontal launch system
実施国／機関	米国 Orbital Sciences Corporation	米国 NASA	米国 Virgin Galactic	米国 NASA/DARPA
概略図	 出典：Orbital Sciences Corporation HP	 出典：AIAA-2005-0621	 出典：Virgin Galactic HP	 出典：NASA
搭載方法	胴体懸架	背負い	懸架	背負い
発射用航空機	L1011 OSC 所有機体	Boeing747	新規開発 WhiteKnightTwo	Boeing747
ロケット重量	23ton	70ton		
全長 直径	全長 17.6m 直径 1.27m	全長 37.2m 直径 17.2m (翼幅)		
分離高度 分離速度	高度 12km 速度 Mach 0.8	高度 6～8km 速度-	高度 15km	
打上げ能力	LEO 450kg		LEO 225kg	LEO～8000kg

（b） ズームフライト方式

亜音速水平発射方式と同様に超音速機の下部（若しくは上部）のロケット搭載/分離機構によりロケットを搭載するが、発射用航空機は超音速加速後に運動エネルギを位置エネルギに変換しつつ上昇運動を行い、ロケットの打上能力が最大となる高度，速度，姿勢にてロケットの分離を行なう。（図 L-3-1-2-7）したがって、ロケットの全備質量に対する打上能力は，3つの方式のうち最大となる。しかし、亜音速水平発射方式と同じく、航空機側の改修が必要なことや搭載するロケット形状、質量の制約が大きい。超音速機では機体下部にロケットを搭載するのが一般的であるが、より大型のロケット搭載を可能とするために、超音速機を無人化して機体上部に搭載（緊急時のキャノピからの乗員脱出ができなくなる。）する検討も行われている。

超音速機を使用した空中発射システムについては、米国をはじめとして、ロシア、ウクライナ、イスラエル等で検討が進められている。

本方式の実施/検討例を表 L-3-1-2-5 に示す。

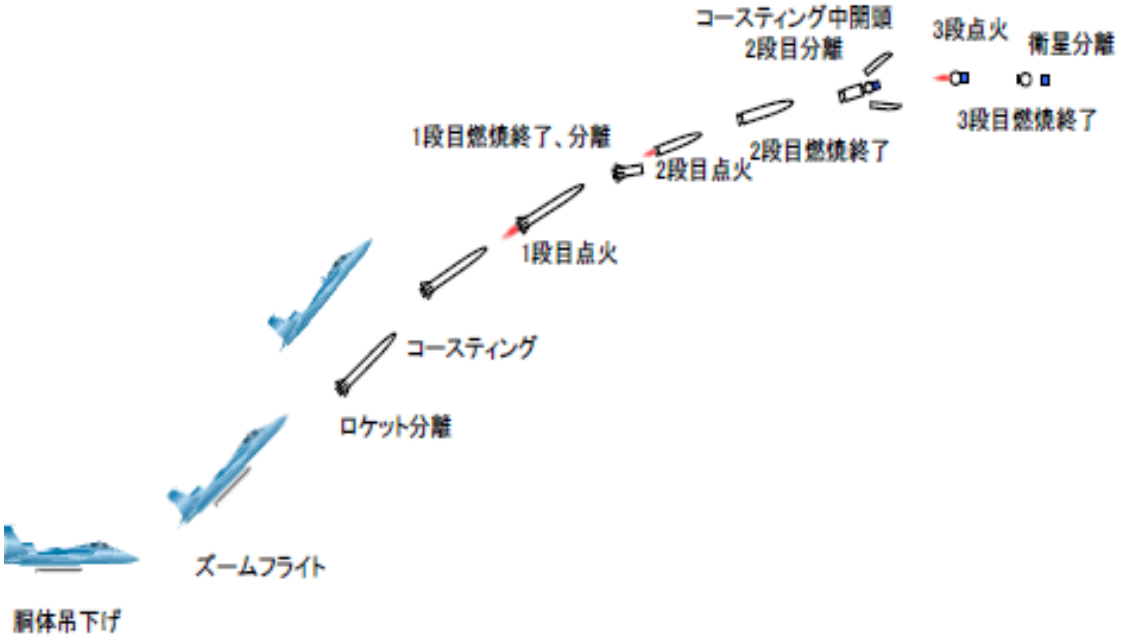


図 L-3-1-2-7　ズームフライト方式

表 L-3-1-2-5 超音速ズームフライト方式の実施/検討例

実施／検討例	実施例	開発中	開発中	検討例
名称	ASM-135 ASAT	GOLauncher 2	ALASA	DRLV
実施国／機関等	米国 Air Force	米国 Generation Orbit Service	米国 The Boeing Company	イスラエル テクニオン工科大学
概略図	 出典：USAF	 出典： Generation Orbit Service	 出典： Boeing	 出典： AIAA-RS6-2008-5003
搭載方法	懸架	懸架	背負い	懸架
発射用航空機	F-15A	Gulfstream business j	F-15E	F-15I
ロケット重量	1.2ton			3.1ton
ロケット外形	全長：5.5m 直径：0.5m	全長：7.8m 直径：0.8m	全長：7.2m	全長：6m 直径：1.25m （star48V）
分離速度 分離高度	高度：11.6km 速度：Mach 0.934（遷音速）		高度：12km	高度：14.3km 速度：472m/s （Mach 1.6）
打上げ能力		LEO 45kg	LEO 45kg	LEO 75kg

（c） 空中投下方式

空中投下方式は、輸送機のカーゴにロケットを搭載し高々度飛行中に後部ドアを開放し、ロケットを放出する方式（図 L-3-1-2-8）で、救援物資の物料投下等で実施されている方式である。空中投下方式は、他の 2 方式と比較し、ロケット投下時の高度、速度の点では劣るものの、輸送機内部へのロケット搭載であることから、飛行中に航空機との空力干渉を受けないこと、飛行中に所用の温度環境にロケットを維持できること、ロケット搭載のための機体改修の必要性がほとんどないことから、専用の航空機が不要となり選択肢が増える。輸送機は主に軍事利用を目的とした航空機であるが、米国の C-130、

C-17、ロシアの An-124、An-225 等の民間転用が行われている機種もある。ただし、高々度での後部ドアの開閉が必要なことから、乗員への配慮が必要となる。空中投下方式の実施/検討例を、表 L-3-1-2-6 に示す。

空中投下方式については、米国、ロシアで開発が行われている。特に米国においては、有人カプセルやフライバックブースタの回収実験など、航空機を利用した多くの実験が行われている。

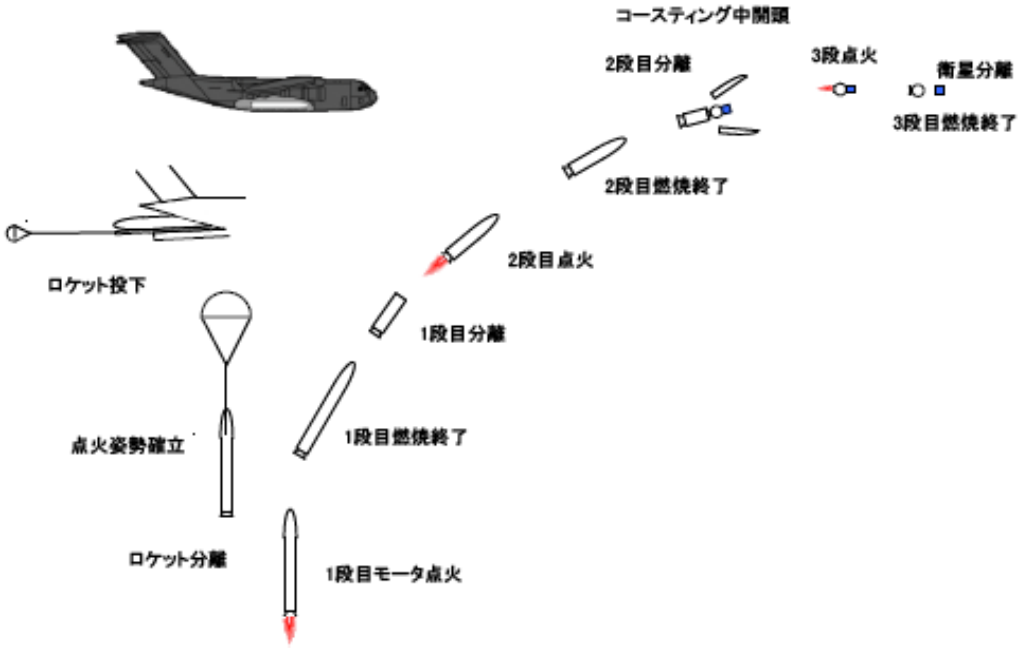


図 L-3-1-2-8 空中投下方式

表 L-3-1-2-6 空中投下方式の実施/検討例

実施／検討例	実施例	実施例（投下のみ）	開発中	検討例
名称	ミニットマン	QuickReach	Polyot	HORVS
実施国／機関	米国 DOD	米国 AirLaunch LLC	ロシア Air Launch Aerospace	仏国 CNES
概略図	出典： AIAA-2005-0621	出典： AIAA-2007-6146	出典： Air Launch Aerospace	出典： AIAA-RS7-2009-1005
搭載方法	胴体内	胴体内	胴体内	胴体内
発射用航空機	C-5A	C-17	An-124	A400M
ロケット質量	39ton（架台含む）	32ton	102ton	24ton
ロケット外形	全長 18m 直径 1.67m	全長 20m 直径 2.2m	全長：32.5m 直径：3.2m	全長 - 直径 -
分離高度 分離速度	高度 6km —	高度 10km 速度 Mach 0.6	高度 10km 速度 Mach 0.6	高度 6～10km 速度 Mach0.45～0.6
打上げ能力	———	450kg	3～4ton	500kg

（2）ロケット搭載/分離技術

投下方式には、輸送機の荷室に設置したローラ上を滑走させてロケットを投下する Gravity Air Launch（GAL）方式、荷室内のサイロから高圧ガスでロケットを射出する射出方式、物量投下に使用するプラットフォームにロケットを搭載してプラットフォーム毎投下する Platform Delivery System（PDS）方式がある。本研究開発では、機体の改造が不要であることと、ロケットのサイジングの自由度が高い PDS 方式を-選定し、標準プラットフォームとしては最大の Type V(PartNo. 11—1-2780-7 長さ 32ft)と C-130 輸送機を適用する。

航空機からのロケット投下は米国の国際武器取引規則（ITAR : International Traffic in Arms Regulations）に抵触することから、投下に係わる米国の専門企業を参加させ、米国国務省の ITAR 許可を受けて実施した。詳細検討は、米国企業か

ら提供されるロケットの航空機への搭載及び投下に係わる航空機及び乗員の安全要求に基づき投下システムの設計、投下手順等の検討を行い、検討結果について米国企業の安全審査を受け、結果に問題ないことが確認された。

① 投下方式

本研究開発における空中発射システムにおけるロケット搭載方式として空中投下方式を選定したが、ロケットの搭載/分離としては、AirLaunch LLC 社が QuickReach で実施した Gravity Air Launch（GAL）方式、物料投下で適用されている方式でプラットフォームに投下物を搭載し、プラットフォームと一緒に投下する Platform Delivery System（PDS）方式及びロシアの Air Launch Aerospace LLC 社が開発を進めている Air Launch Polyot の射出方式がある。表 L-3-1-2-7 に、各方式の概要を示す。

GAL 方式は、投下時に輸送機後部ドアとロケットの干渉の確認が機種毎に必要となり、射出方式は投下時の干渉の他にロケット射出のための特別な装置が必要となる。PDS 方式では、適用する輸送機と標準プラットフォームの組み合わせにより搭載物の質量、重心位置及び高さが制限されており、この制約内での使用においてはあらゆる機種に適用が可能であることから、**標準プラットフォームを使用した PDS 方式を選定**した。

表 L-3-1-2-7 投下方式

投下方式	GAL 方式	射出方式	PDS 方式
特　徴	輸送機の胴体内にロケット設置された投下器材を搭載し、輸送機の機首を上げることによりロケットは自重で投下機材上のローラ上を滑り投下される。	サイロ方式のミサイル発射と類似の技術であり、ロケットが搭載された円筒（サイロ）を輸送機内に設置し、ガス圧によりロケットを放出する。	物料投下に使用されるプラットフォーム上に投下物を固定し、プラットフォームごと航空機から抽出傘により投下する。
イメージ	米国 QuickReach の例 	ロシア Polyot の例 	物料投下の例 プラットフォーム 後部ドアからの投下
績/検討例	米国：QuickReach ロケット　質量 32ton 全長/径　20×2.2m 航空機　C-17 分離　高度 10km、速度 Ma0.6	ロシア：Polyot ロケット　質量 100ton 全長/径　32×3.2m 航空機　An-124 分離　高度 10km、速度　Ma0.6	米国：ミニットマン ロケット　質量 32ton 全長/径　18×1.67m 適用航空機　C-5A 分離　高度 6km
評　価	△ C-17 での実績しかなく、他の機種ではロケット投下時の機体との干渉や飛行性能への影響確認が必要	△ 投下時の機体との干渉や飛行性能の影響確認が必要 別途、射出装置が必要	○ 標準プラットフォームの運用制約（質量、重心、形状）遵守により、多種の機体適用が可能

（a） GAL 方式

航空機には Storage and Launch Canister（SLC）と呼ばれる投下器材を搭載し、航空機の機首を上げることで、ロケットは自重によりSLC上に多数設置されたローラ上を機体後方へ移動していく。投下されたロケットは抽出時に回転運動を起こすことから、点火までに回転運動を制御する必要がある。GAL方式で開発を進めていたAirLaunch LLCの投下試験では、ロケットの回転運動を制御するために小型パラシュート（安定傘）を 1 つ使用していることから、小型パラシュートが投棄物となる。（図 L-3-1-2-9）

米国 AirLaunch LLC 社の QuickReach（図 L-3-1-2-10）は、SpaceX 社の Falcon ロケット等と同様に国防高等研究計画局（DARPA：Defense Advanced Research Projects Agency）の FALCON（Force Application and Launch from Continental United States）計画の一つとして開発を進め、C-17 を使用した高空落下試験までは実施したが、液体酸素とプロパンを使用したエンジン開発に失敗し、開発を中止した。

図 L-3-1-2-9 ロケットの抽出

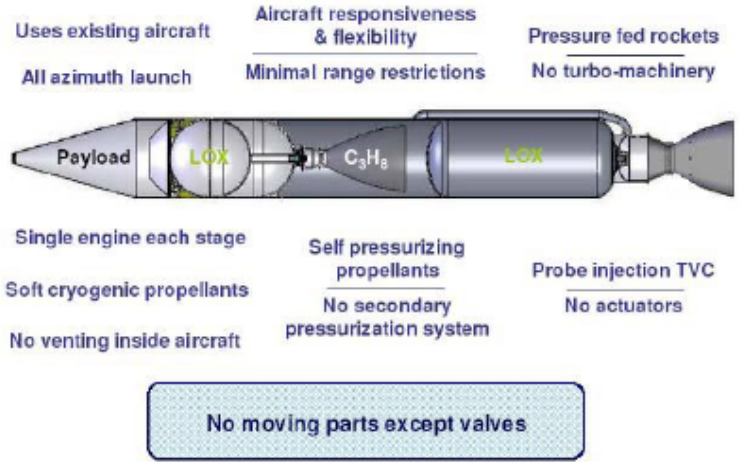


図 L-3-1-2-10 QuickReach のロケット概要

（b） 射出方式

ロケットが搭載された円筒（サイロ）を輸送機内に設置、輸送機の機首を上げるとともに、ガス圧によりロケットを放出する。サイロは、ミサイル打ち上げの転用技術であり、発射システムを地下式サイロとすることにより、待機中や発射準備中のミサイルにおける脆弱性の向上を図った。本技術は、主に米国と旧ソ連（ロシア）に限られる。商用衛星打ち上げロケットである、Rockot、Dnepr はサイロから打ち上げられている。

本システムを採用しているシステムとして、ロシア・ウクライナの Air Launch Aerospace Corp.の Polyot がある。Polyot の運用図を図 L-3-1-2-11 に、輸送機内へのロケット搭載図を図 L-3-1-2-12 に示す。輸送機は投下前にダイブし機首を上げるとともに、ロケット後部（輸送機前部）からのガス圧により、輸送機後部のドアからロケットを射出する。（図 L-3-1-2-13）本方式はロケット投下のためのパラシュート等の投棄物のない方式である。Polyot は全長 32.5m、質量 100ton の 3 段式液体ロケットで An124 輸送機を使用した巨大なシステムである。

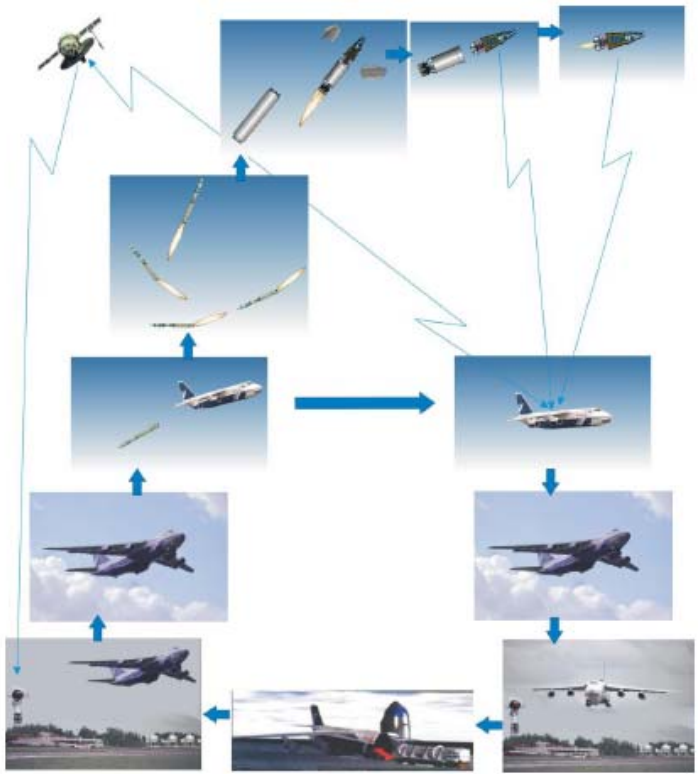


図 L-3-1-2-11　Polyot 運用構想図

図 L-3-1-2-12　An124 内へのサイロ及びロケット搭載

図 L-3-1-2-13　Polyot のロケット射出

（c） PDS 方式

ロケットは、プラットフォームに固定して輸送機内に搭載し、プラットフォームに取り付けられた抽出傘により、後部ドアから投下される。投下後、ロケットに取り付けられたメインシュートが開傘し、同時にプラットフォーム及び抽出傘は投棄される。ロケットは投下後に振り子運動を行うことから、ロケットの点火までに姿勢安定を図る必要がある。（図 L-3-1-2-14）プラットフォームには標準タイプのものもあり、搭載条件（エンベロープ、質量、重心位置、高さ）が規定されており、これらの制約の範囲内においての使用は、輸送機と投下物の適合性が確認されていることから、機体、機種の特定は必要なく、汎用性が高い。本研究開発では、最も大型の標準プラットフォームである Type V を適用する。

Type V プラットフォーム

全長／幅　　：　9.6m／2.74m
質量　　：　1.4ton
投下物高さ　　：　輸送機毎に設定
投下質量　　：　19ton（プラットフォームを含む）

PDS 方式は、通常の物料投下方法として米軍、自衛隊等で採用されている方式で、救難物資の投下や米軍のミニットマン、NASA の有人カプセルの投下実験など、これまでに多種多様な投下実験等が実施されている。Type V は、米国では C-130E/H/L、C-17、C-5 において運用されている。現在開発中で民間転用も検討されている C-2 の Type V 適用が可能になれば、国産機による空中発射システムの実現にもつながる。

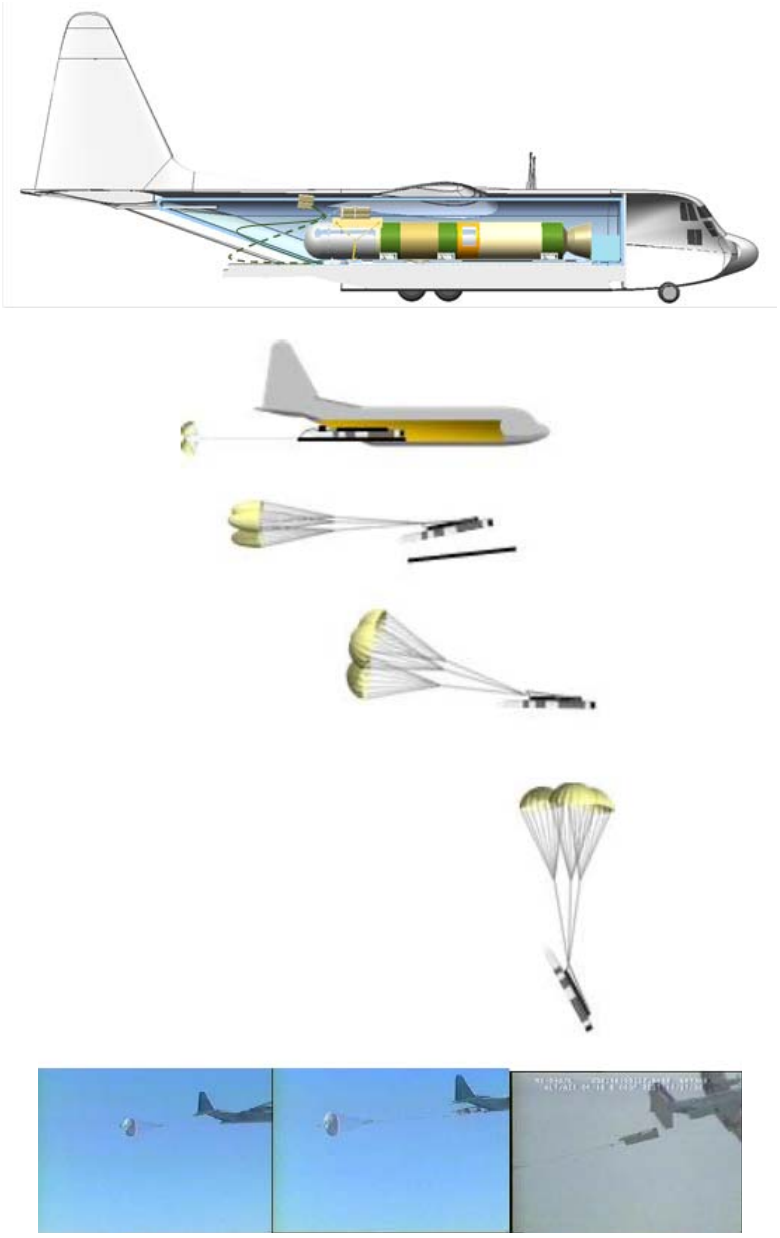


図 L-3-1-2-14　投下概要

② ロケット構想

質量 150kg の衛星を高度 500km の極軌道に打ち上げることを目標として、Type V プラットフォームに搭載可能な固体ロケットの構想検討を行った。検討は、目標打上能力を達成できる最小の輸送機である、C-130 を適用して実施した。C-130 適用時の投下物質量（Type V 質量を含む）及び寸法の制約を表 L-3-1-2-8 に示す。

上記条件を考慮しロケットのサイジングを行った。

ロケットサイジングの結果を、表 L-3-1-2-9 に示す。

表 L-3-1-2-8 C-130 搭載時の質量・寸法の制限

	制　　限	備　　考
質量	投下用器材を含め 19ton 以下	Type V プラットフォーム搭載重量制限
全高	重心位置と投下物の高さ	重心位置で許容高さがきまる。

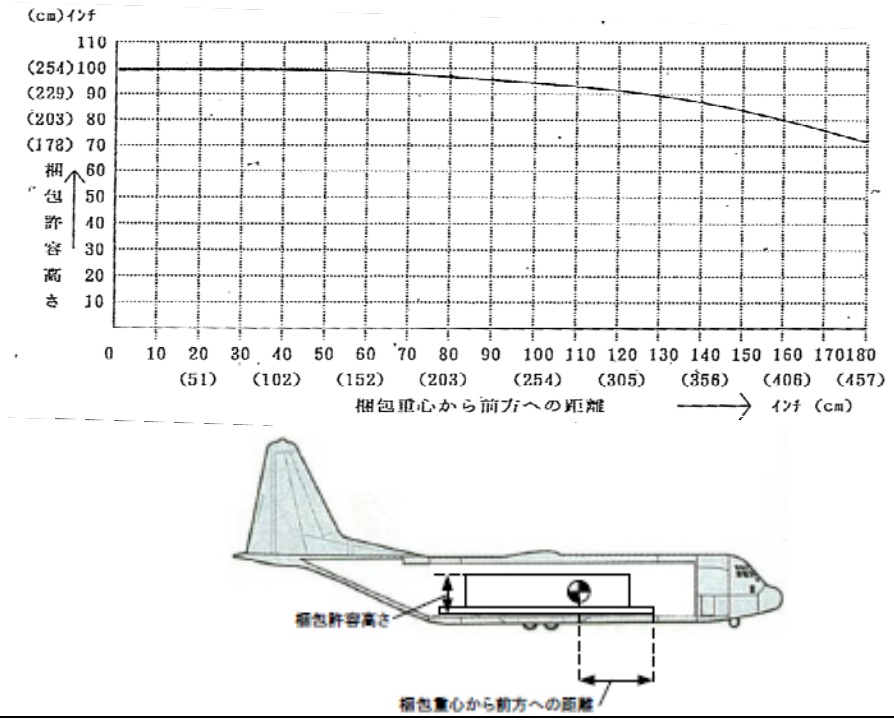
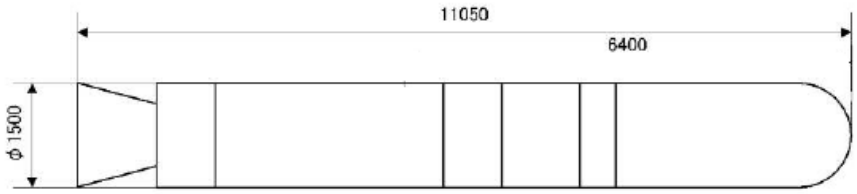


表 L-3-1-2-9 ロケット構想検討結果

項　　目		質量（kg）
3rd Stage		1,190
	イナート	180
	推進薬	1010
フェアリング		150
2nd Stage		2890
	イナート	350
	推進薬	2540
1st Stage		10,770
	イナート	1020
	推進薬	9750
トータル		15,000



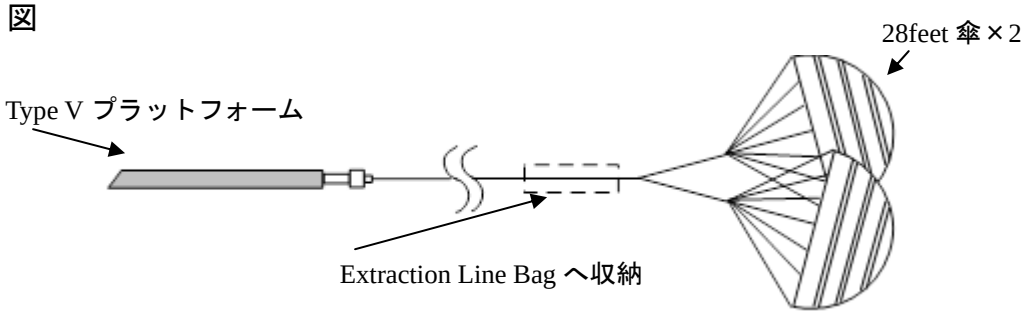
③ 抽出及びメインパラシュートシステム

PDS 方式では投下物の重量等により、発射用航空機からの抽出に使用する抽出傘の種類及び数が指定されており、Type V で最大質量を搭載した場合の抽出機材のまとめを、表 L-3-1-2-10 に示す。

また、輸送機から投下されたロケットの降下速度を減衰させるためのメインシュートの検討を行った。一般に PDS 方式で利用されている落下速度減速用のメインシュート（100feet 平面傘）、あるいは、その一部を改修したものを利用することを前提とした。約 19ton の投下物に対するメインシュートの数量による終端降下速度の概算を行った。結果は図 L-3-1-2-15 に示すように、メインシュートの数量による影響は少ないことから、質量等を考慮しメインシュートの数量を 3 個と設定した。

表 L-3-1-2-10　輸送機からの抽出システム

抽出器材	主な役割
28feet リングスロット傘×2	抽出傘（プラットフォームの抽出）
抽出力変換連結器	抽出傘/プラットフォーム分離機構
付　図	



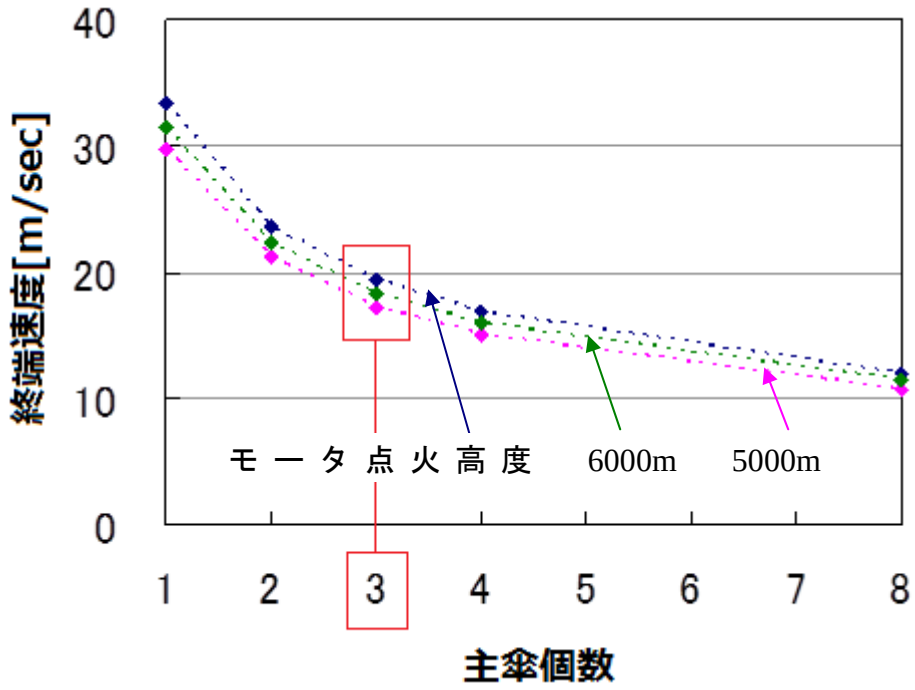


図 L-3-1-2-15　メインシュート（主傘）数量と終端速度

④　落下時のロケットの挙動

メインシュート開傘からのロケットの挙動について、検討を行った。ロケットは輸送機から投下後振り子運動を起こすことから、ロケットを点火するまでに姿勢の安定が求められる。検討は、投下高度とロケットの重心位置の運動の関係について

実施した。

投下高度（抽出時）7000m を速度約 250km/h で航行中の輸送機から抽出され、3 個の 100ft メインシュート開傘後のロケットの運動について検討を行った結果、投下から約 20sec でロケットの運動はほぼ安定する。（図 L-3-1-2-15）

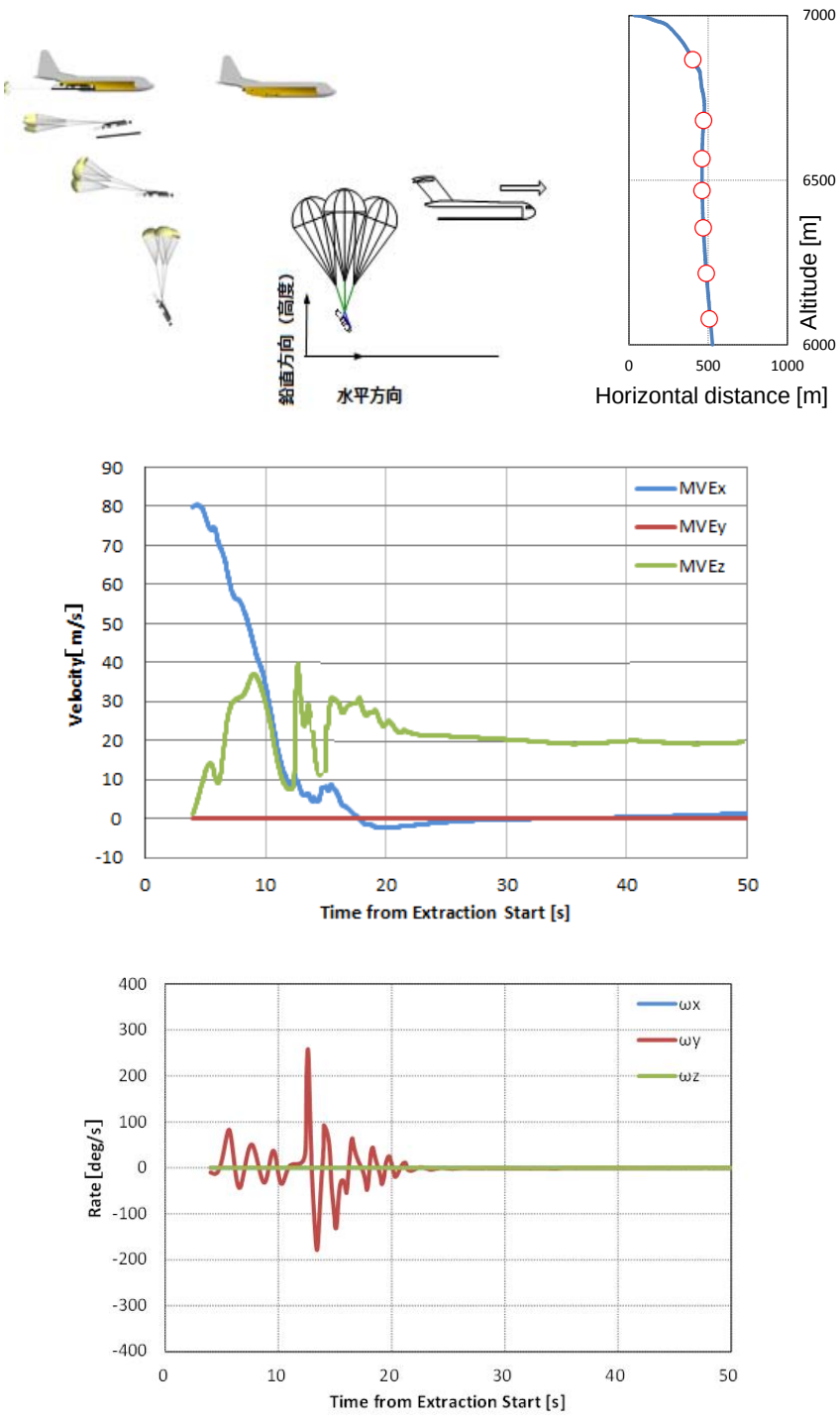


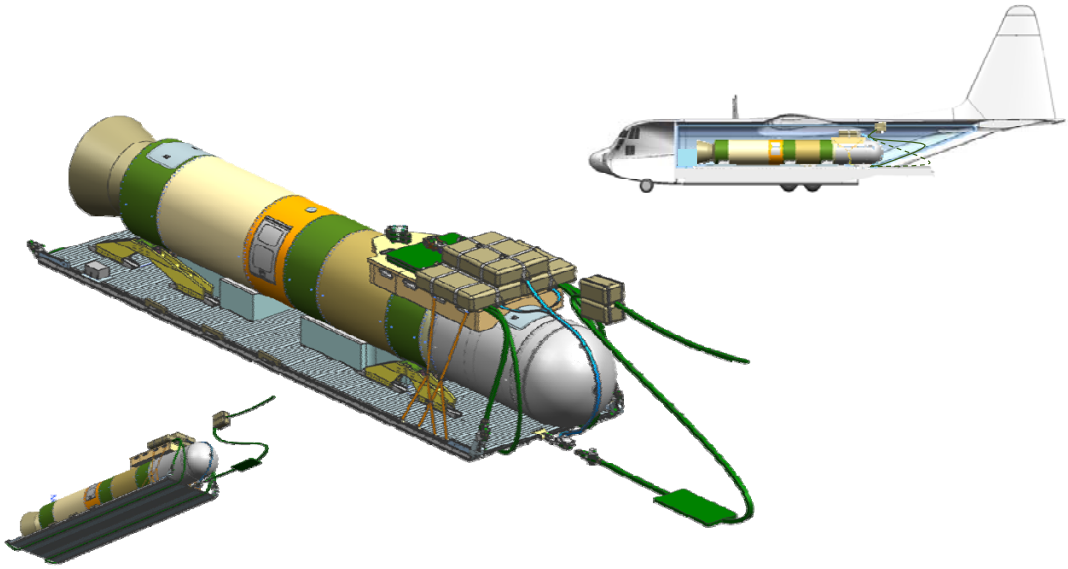
図 L-3-1-2-16　投下高度と落下運動

⑤ 投下システム設計結果

（a） 投下システム設計結果

極軌道へ 150kg の衛星を打上げを要求として、投下システム及び投下シーケンスの検討を行った。

投下システムの設計結果を図 L-3-1-2-17 に、構成品ツリーを図 L-3-1-2-18 に示す。



No.	項　　目	質量(kg)	備　　考
1	衛星＋マージン	350	
2	ロケットシステム	15,000	3 段式固体ロケット 直径：φ1.5m、全長：L11m
3	投下システム		
	プラットフォーム （32 ft Type V）	1,400	幅　：108inch 全長：L32ft
	ロケット支持台 分離機構	1,000	
	主傘 抽出傘	430	100ft 傘×3 個 28ft 傘×2 個
	PPF	100	
	その他構成品	520	
	重心調整ウエイト	200	
全投下物質量		19,000	全幅：2.7m、全長：L18.7m、全高：2.6m

図 L-3-1-2-17　投下システム設計結果

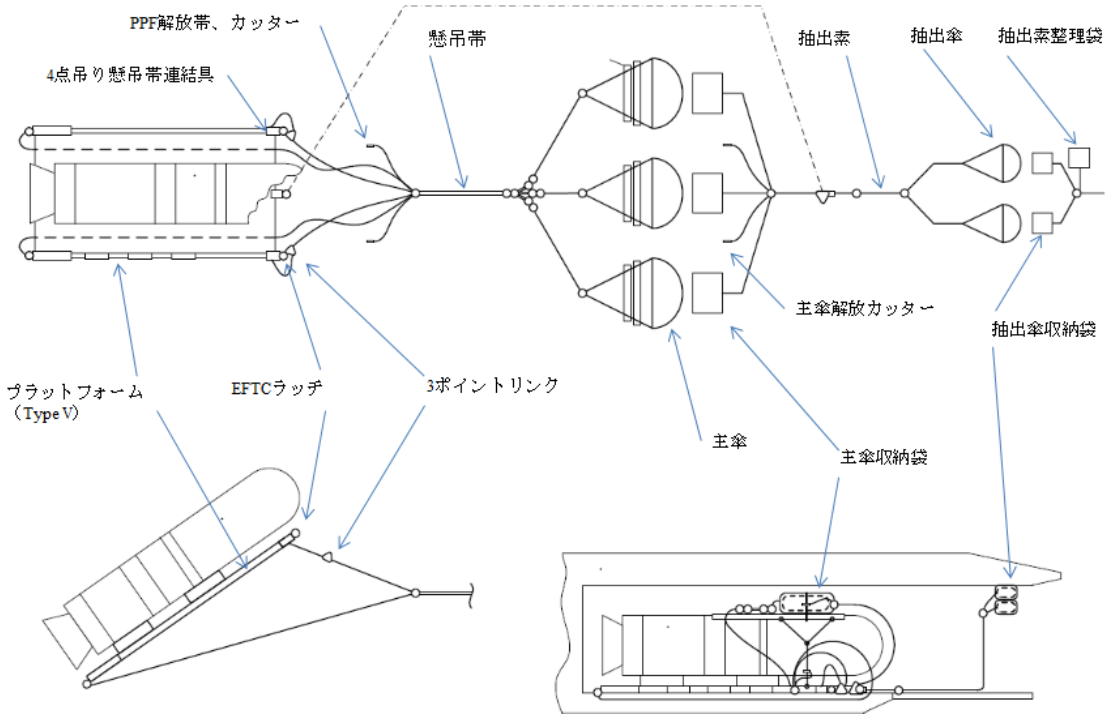


図 L-3-1-2-18　投下システム構成品ツリー

（b） 打上げ能力

ロケットの点火高度をパラメータとした打上げ能力を図 L-3-1-2-19 に、打上げ高度とペイロード質量の関係を図 L-3-1-2-20 に示す。

打上げ条件

・C-130 からの投下高度：7,000m

・ロケット点火高度　　：5,000～7,000,

・発射上下角　　：50～80deg.

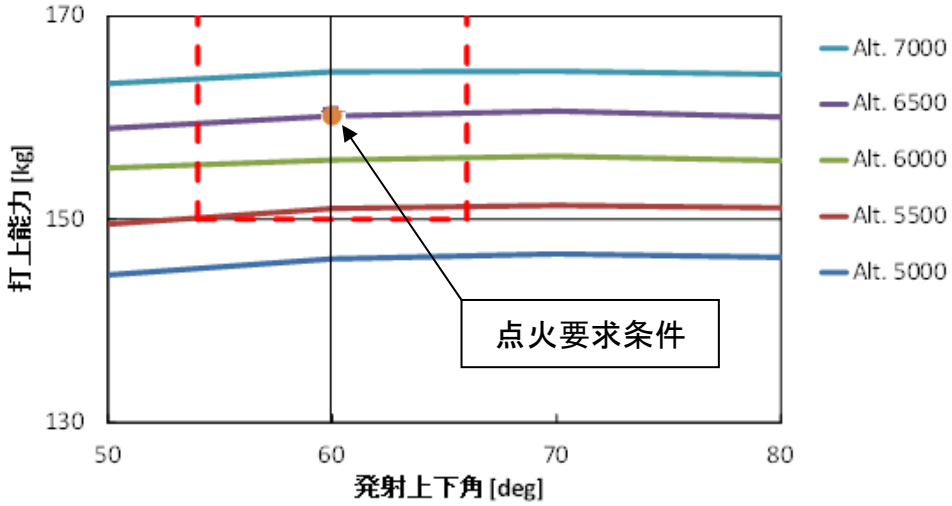
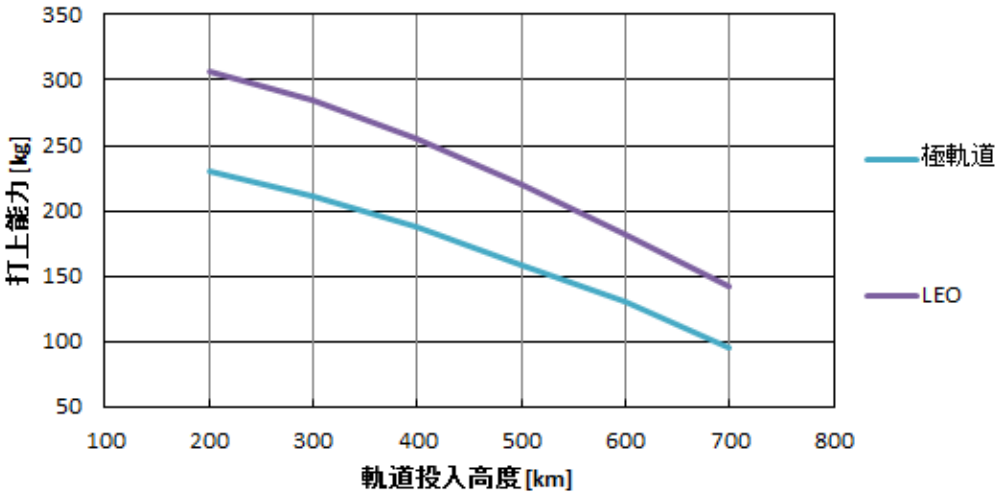


図 L-3-1-2-19　打上げ能力



C-13 からのロケット投下条件

3 段式固体ロケット：15ton、飛行高度：7,000m、飛行速度：マッハ 0.6

ロケット点火条件

ロケット点火高度：6.4 km、発射上下角：60deg.

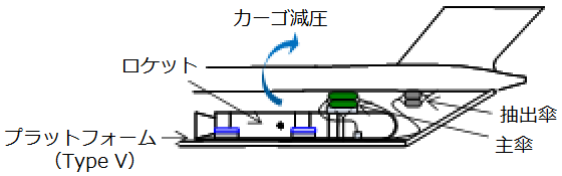
図 L-3-1-2-20　軌道高度と打上げ能力

（c） 投下シーケンス

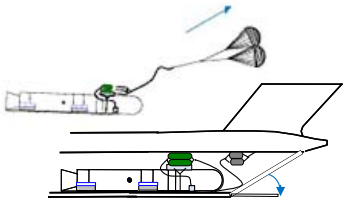
C-130 での投下作業開始からロケット点火までのイベントを表 L-3-1-2-11 に、シーケンス概要図を図 L-3-1-2-21 に示す。

表 L-3-1-2-11　シーケンスオブイベント

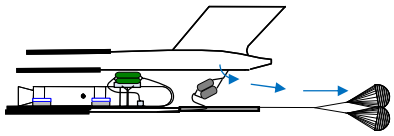
No.	イベント	時刻（sec）
1	カーゴ減圧開始	
2	カーゴ後部ドア開放	
3	抽出傘放出	X+0
4	Type V 固定解除	X+1
5	Type V 抽出完了	X+3
6	主傘放出	X+4
7	PPF 解放	
8	主傘開傘	
9	ロケット姿勢変更	X+14
10	ロケット分離	X+32
11	ロケット点火	X+33



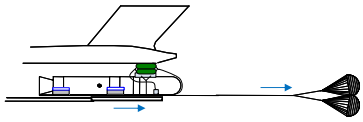
(1)カーゴ減圧開始



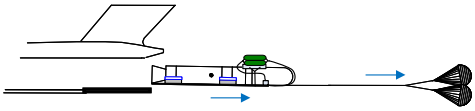
(2)後部ドア開放



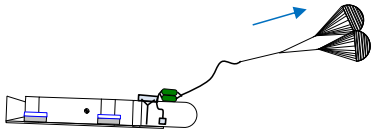
(3)　抽出傘放出



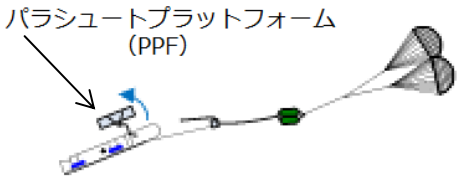
(4)Type V 固体解除



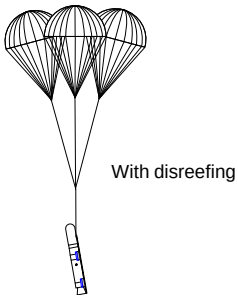
(5)Type V 抽出完了



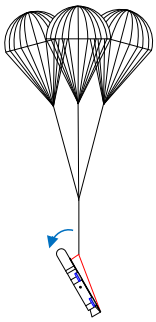
(6)主傘放出



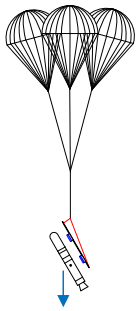
(7)PPF 解放



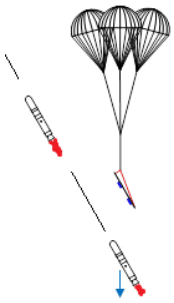
(8)主傘開傘



(9)ロケット姿勢変更



(10)ロケット分離



(11)ロケット点火

図 L-3-1-2-21　投下シーケンス概要図

⑥ 投下実証試験計画

投下システム及び投下シーケンスの実証を行うための試験計画の策定を行った。試験は、米陸軍が運用するアリゾナ州 YTC(Yuma Test Center)での実施を前提として、空中発射ロケットの寸法及び慣性諸元を模擬したダミーロケットをC-130に搭載し、高度約7,000mから投下するもので、供試体設計、計測システム、試験場における供試体の組立、発射用航空機への搭載手順の検討を行った。

試験は日本と米国の合同チームで実施する。実施体制を図 L-3-1-2-22 に示す。

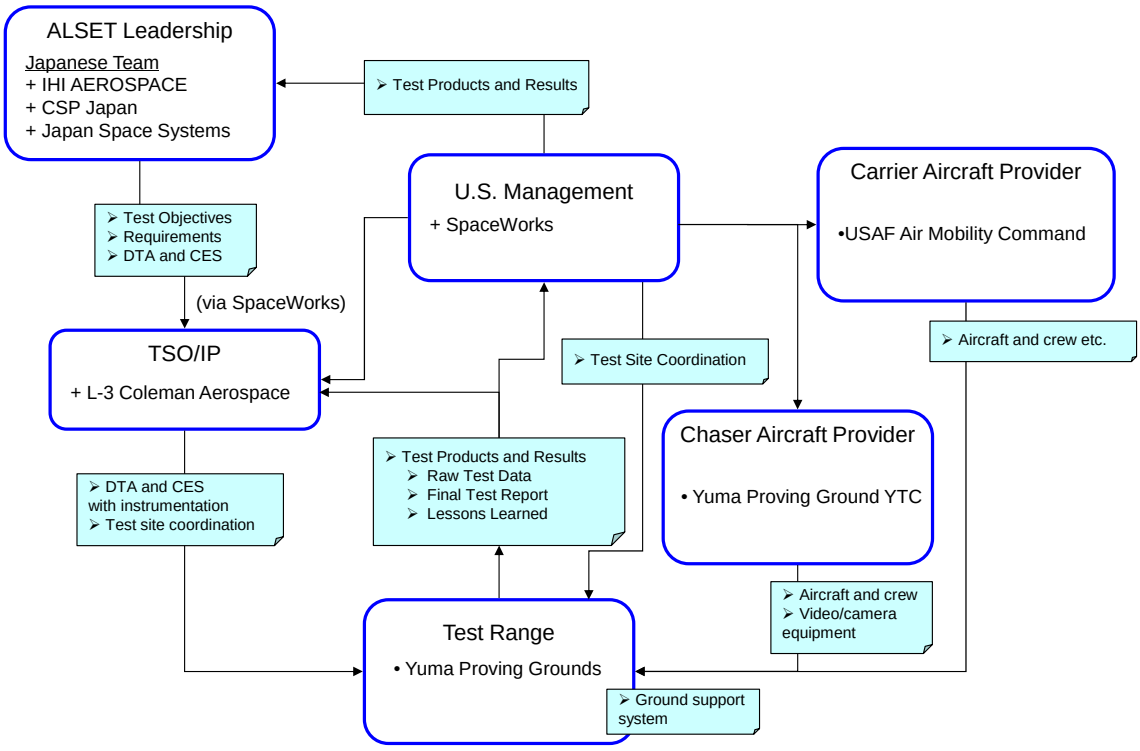


図 L-3-1-2-22 投下試験実施体制図

⑦ 設計結果の評価

投下システム、投下シーケンス、実証試験計画等について、設計審査会を開催し問題ないことが確認された。このうち、航空機へのロケット搭載、航行、高空投下等の安全に係わる事項については、米国企業を審査員とする安全審査会を開催し、投下システムの組立手順、C-130 荷室内の機器配置、火工品安全対策、構造解析、抽出解析、実証試験計画等の報告を行い、安全性に問題のないことを確認した。

（3）運用管制技術

将来の事業化に資する空中発射システムの運用を考慮し、以下の方針を策定した。本研究開発は、下記の基本方針に基づき運用技術の検討を行った。

将来システムの基本方針

・ ロケットの点検の自動化

アビオニクス、姿勢制御装置等はメーカ工場で可能な限りシステムレベルで十分な検証を行う。現地搬入後は自動化を推進し、点検時間の短縮を図るとともにヒューマンエラーを排除する。現地搬入後の自動化を推進するために以下の方向で検討を行った。

- コンポーネント単位で自己診断機能を充実
- 点検データ処理（規格値との照合、トレンド評価）の自動化
- 工場と現地のロケット点検器材/設備の共有

・ ロケット自律飛行安全形態

自律飛行安全機能を有しかつ地上からの飛行安全回線を有する形態を目標とし、将来の自律飛行安全につなげる。

- ロケット搭載機器による自律飛行及び非常時の推力中断
- 地上からのロケットの監視
- 地上からの推力中断コマンド送信

・ 自動化による省力化

ロケットの組立～発射のフェーズにおいては、以下により省力化を目指す。

- 飛行中のロケット診断の自動化

  ロケット飛行中の監視及び飛行安全監視の省力化を図りヒューマンエラーを排除するため、自己診断機能等を使用することにより異常検出の自動化を検討する。
- ロケット発射シーケンスの自動化

  ロケットの発射工程の省力化を図り、ヒューマンエラーを排除するため、発射シーケンスの自動化を検討する。

空中発射システムのメリットの一つである打上場所の自在性では、地球局に依存しないシステムが必要であることから、ロケットに GPS 受信機と慣性航法装置（INS Inertial Navigation System）を搭載した複合航法システムとし、自律飛行を可能とする。ロケットの飛行状態については、インマルサット衛星を経由して地上へ送信する。

① ロケット組立整備

空港等における組立/整備構想の検討フローを図 L-3-1-2-23 に示す。空中発射システムの基本方針より、射場での運用には「即応性・利便性を持った運用」に大きく関係することから、「最終組立/整備期間の短縮」や「コストの削減」および「運用の柔軟性」を向上させる方法について、工場内作業の充実を図り、空港内作業の簡素化を行うとともに、自己診断機能の追加により省力化、期間短縮の実現を図った。

具体的には、嚙み合わせ等これまで射場で行ってきた作業を工場出荷前に終わらせることにより、射場での作業期間を短縮することや自己診断機能を付加することにより点検項目を削減すること等を行う。

また図 L-3-1-2-24 に従来の地上発射型のロケットと比較した組立・整備フローを示す。組立・嚙み合わせ試験までは工場出荷時までに終了させることにより射場での組立・分解作業を減らし、射場での組立・整備期間の短縮が可能となる。

図 L-3-1-2-25 に、上記の組立/整備構想を反映した組立/整備作業構想を示す。ロケットは工場において嚙み合わせ試験を行い、各段のステージを組み立てた状態で出荷する。そして空港等にて火工品を艤装し、ロケットの点検を行う。同時に衛星は可搬式クリーンルーム等で継ぎ手に結合し、各種点検が終了した段階でフェアリングに格納する。そしてフェアリングと最終組立/最終点検を行う。搭載機器は自己診断機能の充実を図り、点検作業の省力化を行う。最終点検が終了したロケットは発射用の航空機に搭載され、射点に移動し打上げが行われる流れである。

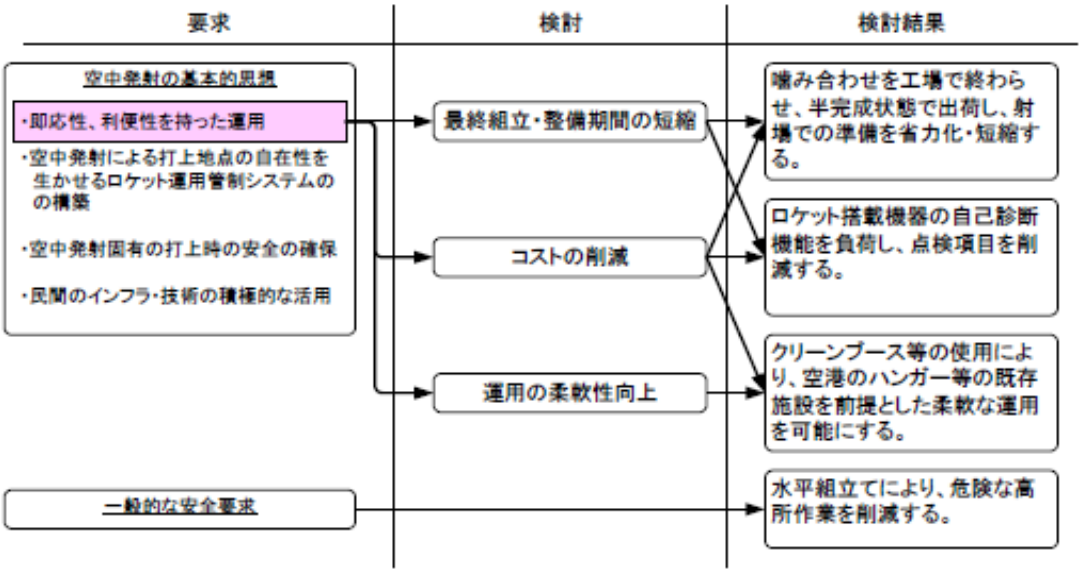


図 L-3-1-2-23 ロケット組立/整備構想の検討フロー

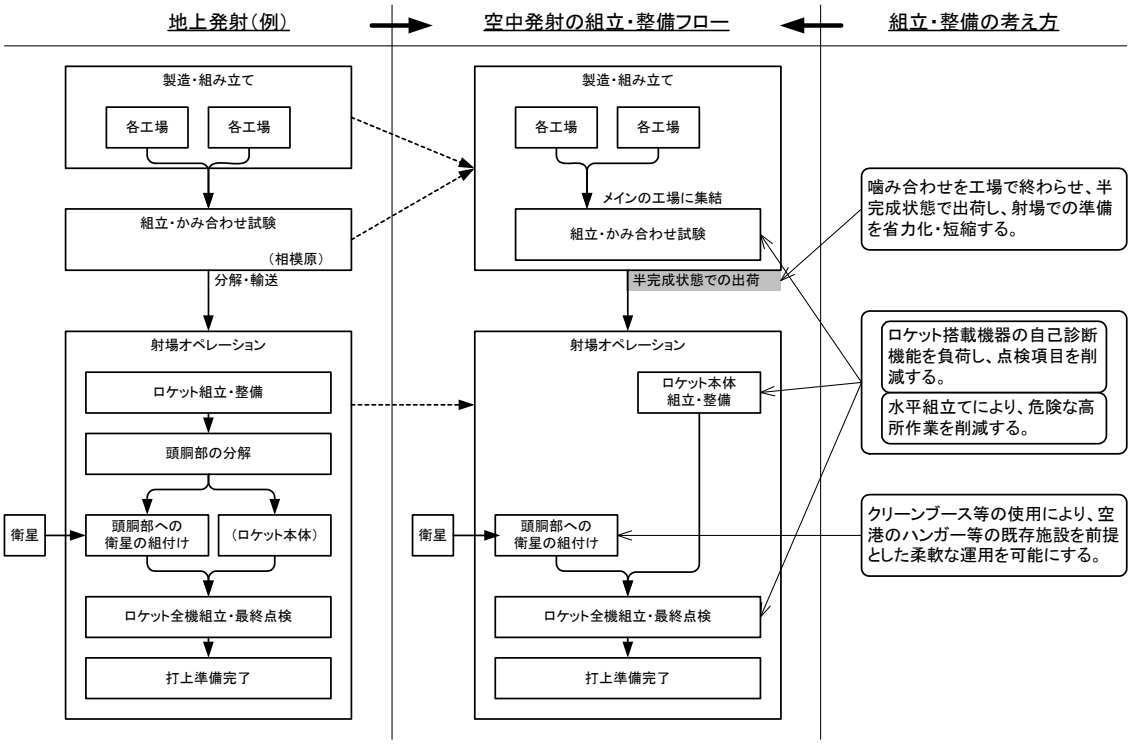


図 L-3-1-2-24　射場運用フローの検討

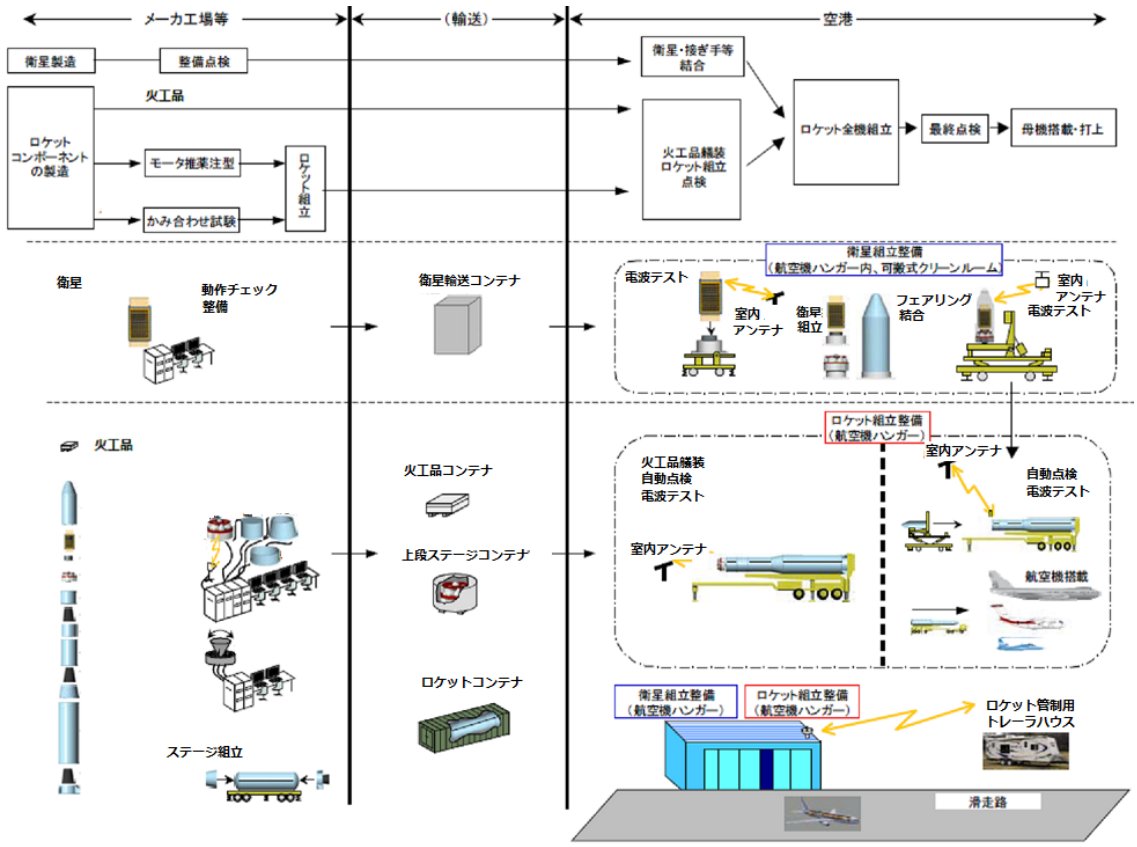


図 L-3-1-2-24　組立/整備作業構想

② GPS/INS 複合航法

ロケットの位置・速度の測定システムとして、軽量・小型・低コストの GPS/INS 複合航法システムを検討した。検討に当たっては、JAXA の飛行安全要求及び飛行安全システム要求をベースに、空中発射システムとしての基本構想、要求条件案を策定し、GPS/INS 複合航法システムの検討を行った。システムの主要課題として、①複合航法システムの初期アライメント、②航法データ（位置、速度）及び姿勢角データの計測精度、③GPS 衛星の捕捉と GPS 測位精度、④GPS 受信機のロケット飛翔環境への対応、の 4 点が想定される。システムの動作原理を図 L-3-1-2-26 に示す。GPS 受信機を除く、慣性航法装置に複合航法ソフトウェアを内蔵する複合航法装置として、GPS/INS インターフェイス、複合航法システムの初期アライメント、航法データ（位置、速度）及び姿勢角データ精度の検討を実施し、主要緒元として表 L-3-1-2-12 を策定した。

GPS アンテナ系は、独立した 3 個のアンテナをフェアリングの内側近傍に配置（図 L-3-1-2-27）し、その上部に電波透過窓を設ける。GPS アンテナとしては、昨年度提案したクロスダイポールアンテナに代わって、GPS 受信機用として開発され実用化されている低利得・高角度アンテナ（図 L-3-1-2-28）を採用する。当該アンテナの放射パターン（図 L-3-1-2-29）である。150° の角度範囲で 0dBi 以上の利得が期待される。

GPS 衛星の補足解析では、打上方位角に関係なく常時 8 基以上の観測が可能であり、幾何学的精度低下率（GDOP：Geometrical Dilution of Precision）は 2 以下と良好である。

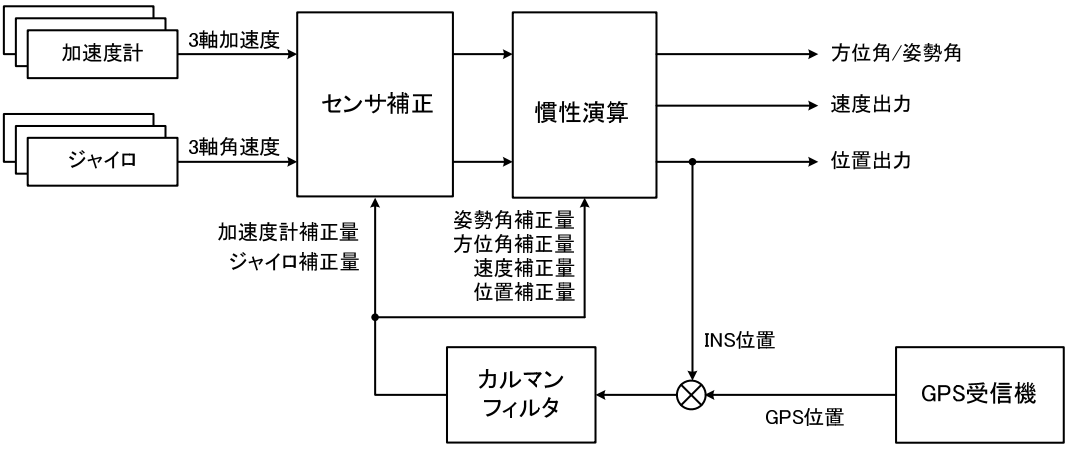


図 L-3-1-2-26 GPS/INS 複合航法システムの動作原理

表 L-3-1-2-12　GPS/INS 複合航法装置の主要諸元

No	項　目		仕様値	備　考
1	加速度計	検出範囲	±196m/s^2	20G
2		バイアス	0.098m/s^2 rms	10mG
3		SF誤差	1%FS rms	
4	ジャイロ	検出範囲	±30° /s	
5		バイアス	200° /h rms	GPS/INS修正後
6		SF誤差	0.5%FS rms	
7	消費電力		10W 以下	
8	質量		1.5kg 以下	
9	データ更新レート		50Hz	
10	温度範囲		-40～+71℃	

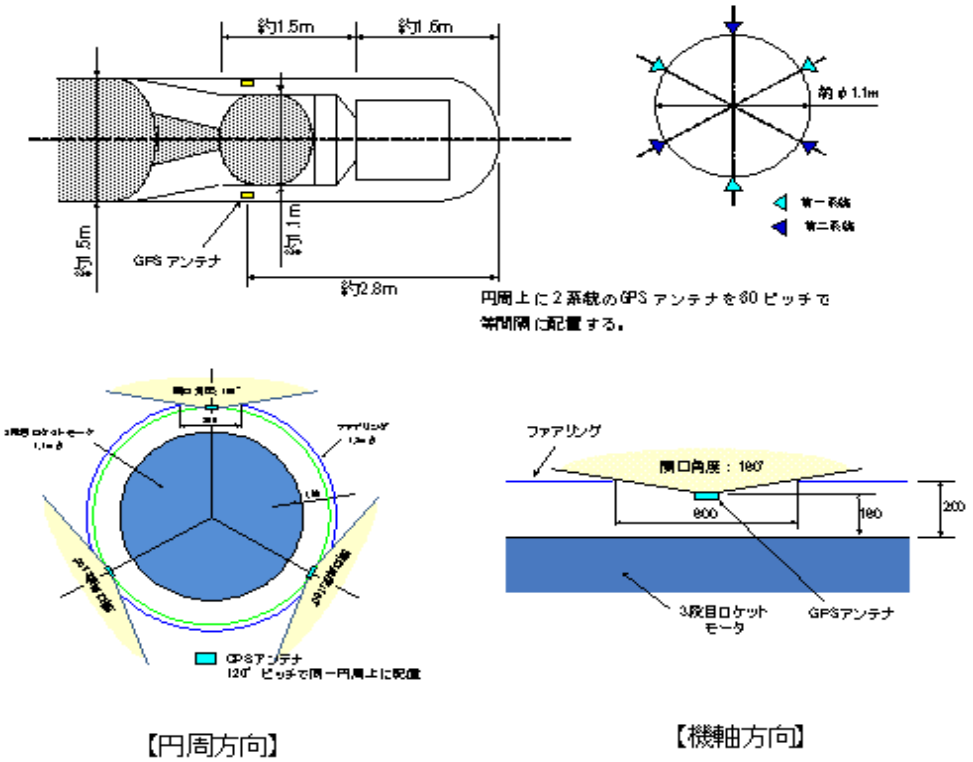
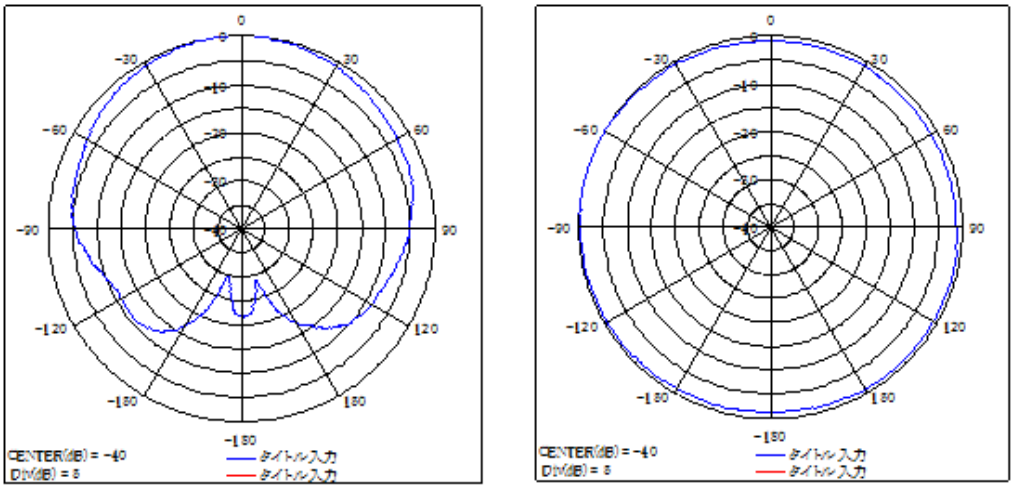


図 L-3-1-2-27　アンテナ配置

図 L-3-1-2-28　低利得・高角度 GPS アンテナ



天頂方向（90deg.）指向性　　水平方向（0deg.）指向性

図 L-3-1-2-29　低利得・高角度アンテナの放射パターン

③　衛星経由の打上げ管制

空中発射システムのメリットは、高々度からの打ち上げであることから打ち上げ効率が高いこと、特定の射場を必要とせずに任意の場所からの打ち上げが可能なことにある。しかし現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の種子島宇宙センタ及び内之浦宇宙空間観測所から衛星の打ち上げが行われているが、飛行中のロケットには連続した飛行状況の確認が求められている。このために、ロケットの飛行経路下には追跡のための地球局が設置されているが、地球局の利用を前提とすると、空中発射システムのメリットである、任意の場所からの打ち上げができなくなる。そのために、地球局に依存しない安全、確実で、かつ低コストな打上げ管制として、衛星を経由してロケットと地上間の通信を行う。飛行管制のバックアップ及び現在の打ち上げ基準である、継続した飛行状況の監視と地上からの飛行中断機能を確保する手段として、ロケットの飛行情報を衛星経由で地上に送信し、飛行中断などのコマンドを衛星経由で送る技術を検討する。ロケットと地上間の通信手段として、通信衛星を適用する。

（a） 通信衛星

宇宙のデータ中継衛星としては、米国の TDRS や日本の DRTS があるが、将来の事業化への適用を考慮し、実験衛星や民間利用できない衛星ではなく、商用の通信衛星を利用することとした。商用通信衛星のうち、日本国内で通信免許を有すること、所要の通信量が確保できること、アンテナビーム制御の制約が比較的緩やかであることから、**インマルサット衛星を選定した。**（表 L-3-1-2-13）

表 L-3-1-2-13 空中発射システム用通信衛星候補

衛星名	軌道	通信容量	通信範囲	評 価	備 考
TDRS	GEO	1920kbps	太平洋東域	△	米国中心、他国向けチャンネル割り当て開始
インマルサット（BGAN）	GEO	IP：492kbps ｽﾄﾘｰﾐﾝｸﾞ：256kbps	太平洋全域	○	
JSAT	GEO	UP：2Mbps Down：10Mbps	太平洋特定域	△	Ku ﾊﾞﾝﾄﾞ使用、アンテナビーム制御精度厳しい
インテルサット	GEO	UP：64kbps Down：64kbps	太平洋全域	△	移動体通信能力が低
オーブコム	LEO	UP：2.4kbps Down：4.8kbps	太平洋全域	×	通信量が少
イリジューム	LEO	UP：2.4kbps Down：2.4kbps	太平洋全域	×	通信量が少、次世代は 10Mbps に増加予定
グローバルスター	LEO	9.6kbps	太平洋全域	×	通信量が少
スラーヤ	GEO	IP：444kbps ｽﾄﾘｰﾐﾝｸﾞ：256kbps	太平洋全域	×	日本国内では未許可

（b） インマルサット衛星

インマルサットI-4 衛星は静止軌道上に 3 機打ち上がっており、南極、北極を除くほぼ地球全域をカバー（図 L-3-1-2-30）している。太平洋をカバーする衛星は、ハワイにある地上局と通信を行い、地上回線により日本へ送信される。3 機の衛星管制は英国ロンドンにあるインマルサット社（本社）の管制センタで行われている。現在インマルサットは、陸上、海上、航空サービスを提供（表 L-3-1-2-14）しているが、新たに低周回軌道の衛星と通信を行う端末（SB-SAT：Swift Broadband Satellite）を開発中で、2012 年にフライトモデルの製作を予定していることから、**ロケット用通信端末として、SB-SAT の改修**を行うこととする。

SB-SAT による通信システム構想を、図 L-3-1-2-31 に示す。

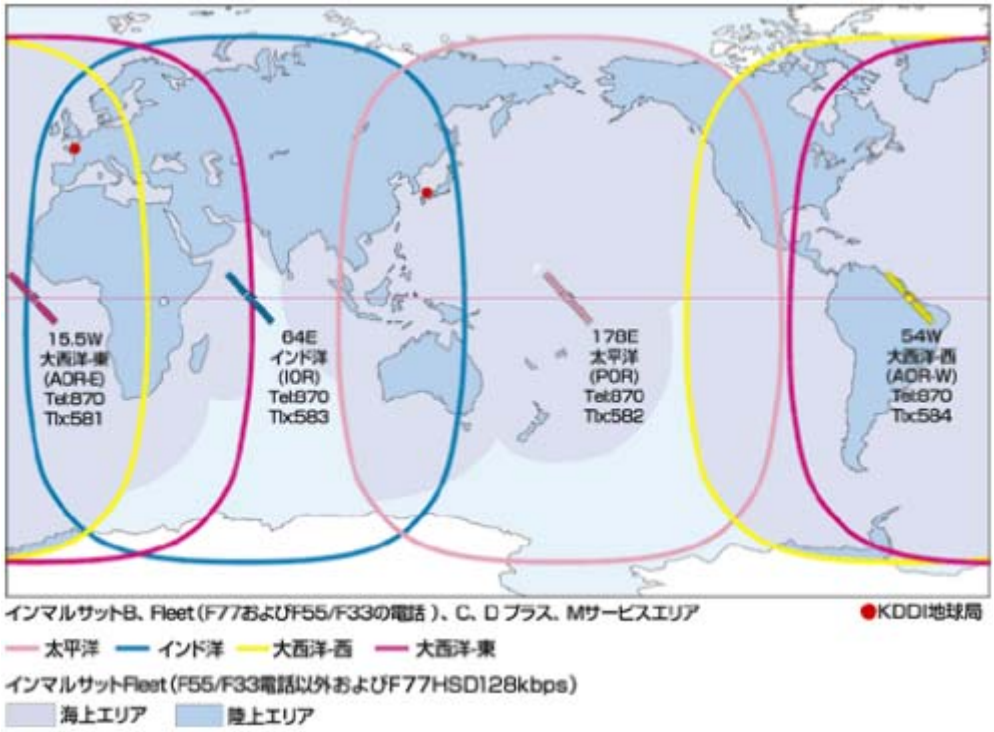


図 L-3-1-2-30 インマルサットのサービスエリア

表 L-3-1-2-14 インマルサット通信サービス

区分	サービス名称
陸上通信	BGAN： Broadband Global Area Network
海上通信	FB： Fleet Broadband
航空機通信	SB： Swift Broadband
LEO 衛星通信	SB-SAT ： Swift Broadband Satellite

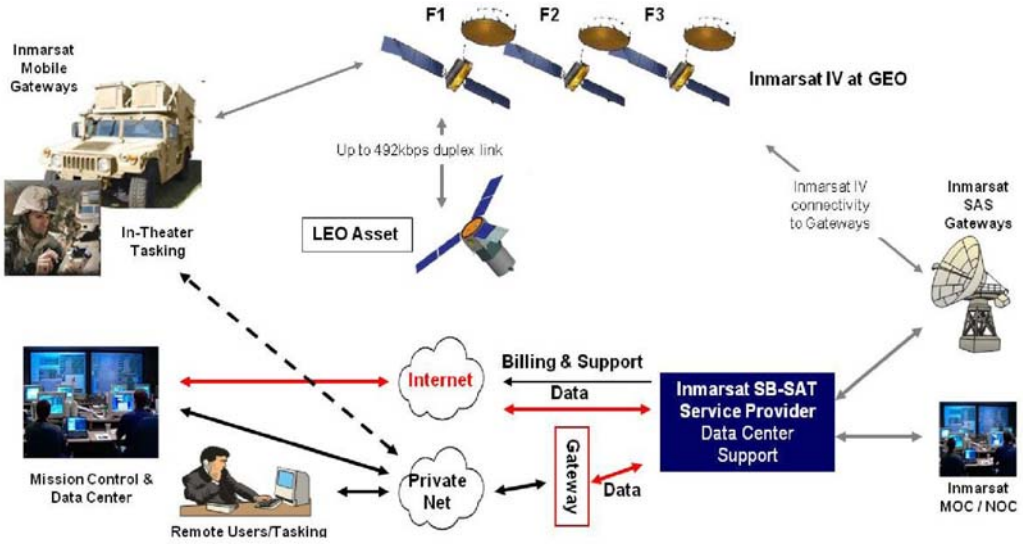


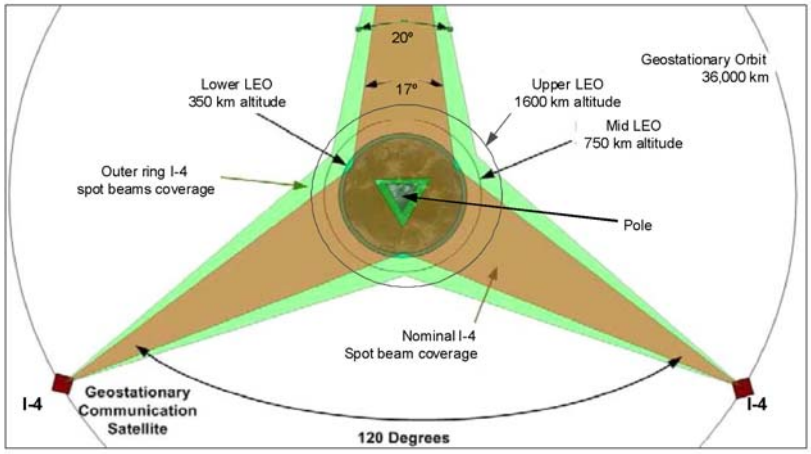
図 L-3-1-2-31　SB-SAT 通信システム構想

（c） ロケット用通信端末

インマルサット衛星との通信端末として、SB-SAT をベースに検討を行う。

SB-SAT は、米国国防高等研究計画局（DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency）と欧州宇宙機関（ESA : European Space Agency）が開発資金を拠出し、開発を進めており、主に、LEO（軌道高度 : 300～1600km）衛星との通信を計画している。SB-SAT のビームカバー率とカバーエリアを表 L-3-1-2-15 に示す。

表 L-3-1-2-15　SB-SAT ビームカバー率

高度	ビーム	軌道傾斜角			
		30 度	45 度	60 度	90 度
300km	Nom	100%	100%	96%	87%
	Outer	100%	100%	100%	100%
700km	Nom	95%	91%	77%	57%
	Outer	100%	99%	93%	71%
カバーエリア高度方向					

SB-SAT の仕様を、表 L-3-1-2-16 に示す。また、LEO 衛星のドップラ効果を考慮し、周波数変化に対応できるように設計されている。（表 L-3-1-2-17）

SB-SAT は衛星搭載用として開発されているが、ロケット通信系への適用に当たっては、ロケットの燃焼による加速度及び加加速度（ジャーク）に対する対応が必要となる。想定される加速度、ジャークの環境を、図 L-3-1-2-30 に示す。この環境に対応させるための技術課題と、ロケット用通信端末に求められる仕様案を表 L-3-1-2-18、表 L-3-1-2-19 に示す。

また、本通信端末を使用したロケット通信系の技術課題と、対応策の検討を行った。結果を表 L-3-1-2-20 に示す。

表 L-3-1-2-16　SB-SAT 仕様

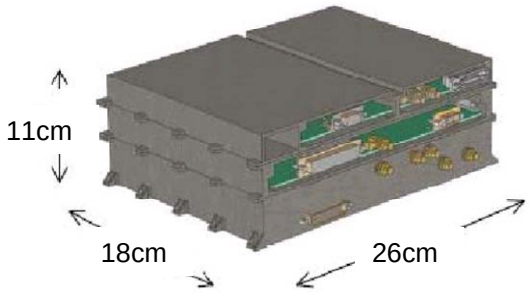
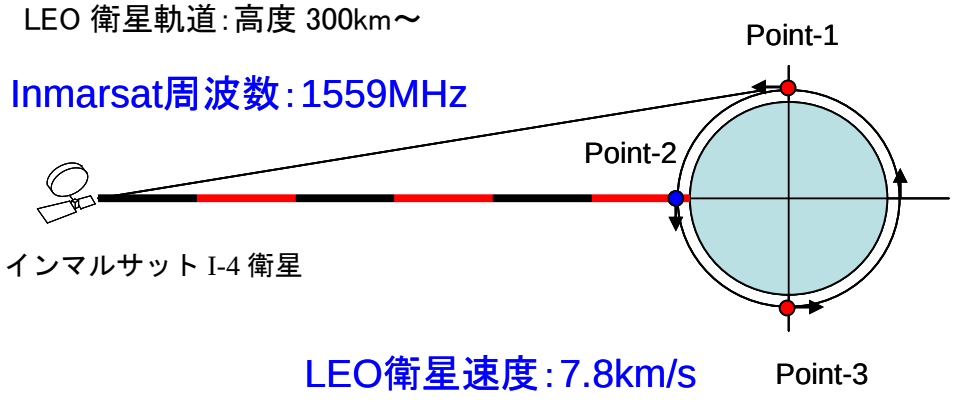
項目	通信端末仕様		
チャンネル	Single Channel w/GPS		
通信レート アンテナゲイン 14dbi 前提	100kbps～475kbps		
	ケース	RTN	FWD
	Nom 中心	475kbps	464kbps
	Nom 端	332kbps	300kbps
大きさ	11cmx18cmx26cm		
重量	4kg 以下		
作動環境	-25 度 C～＋60 度 C		
消費電力	40W		
オプション	アンテナ・ジンバルコントロール		
外　　観			

表 L-3-1-2-17　SB-SAT のドップラ効果

位　　置	ドップラ効果量
Point-1 、 Point-3	周波数変化：　±41kHz
Point-2	周波数変化率：　48Hz/s
	

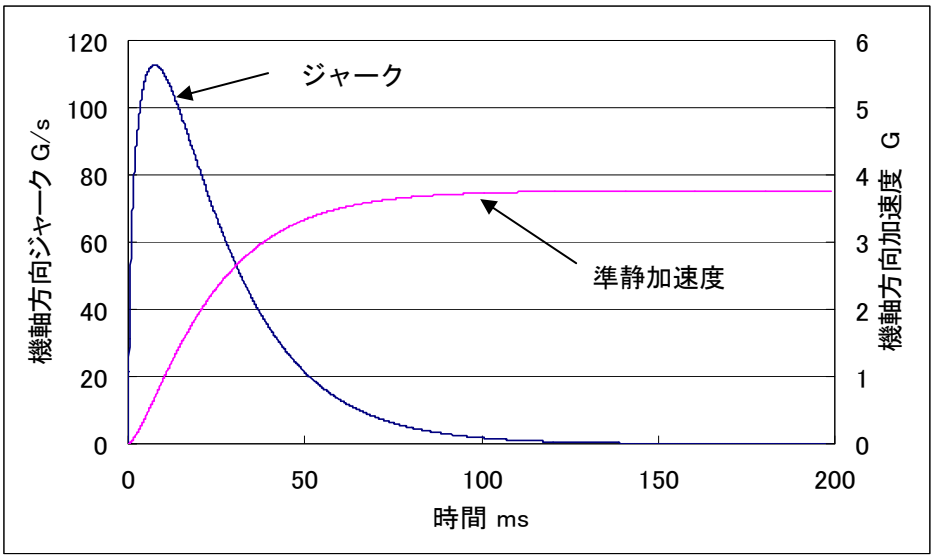


図 L-3-1-2-32 ロケット飛翔環境

表 L-3-1-2-18 ロケット用通信端末の技術課題

課　題	ロケット	対応検討	LEO 衛星
ロケット飛翔速度（0km/s～7.8km/s）によるドップラシフト	±41kHz 以下	SB-SAT 通信端末で対応可能。	周波数変化 :±41kHz 周波数変化率 :48Hz/s
準静的加速度（3G～10G）によるドップラシフトの変化	520Hz/s (@10G)	ドップラシフトの変化量は、SB-SAT 仕様値より大きい。しかし、SB-SAT ソフトウエア処理のパラメータ変更により対応可能と考えられる。	
ロケットモータ点火時のジャーク(100G/s 以上)により発生するドップラシフトの変化量	2600Hz/s (@100G/s)	ブラックアウト（通信遮断）が発生する可能性があるが、その場合は通信再開時間を極短時間にする。	

表 L-3-1-2-19 ロケット用通信端末仕様案

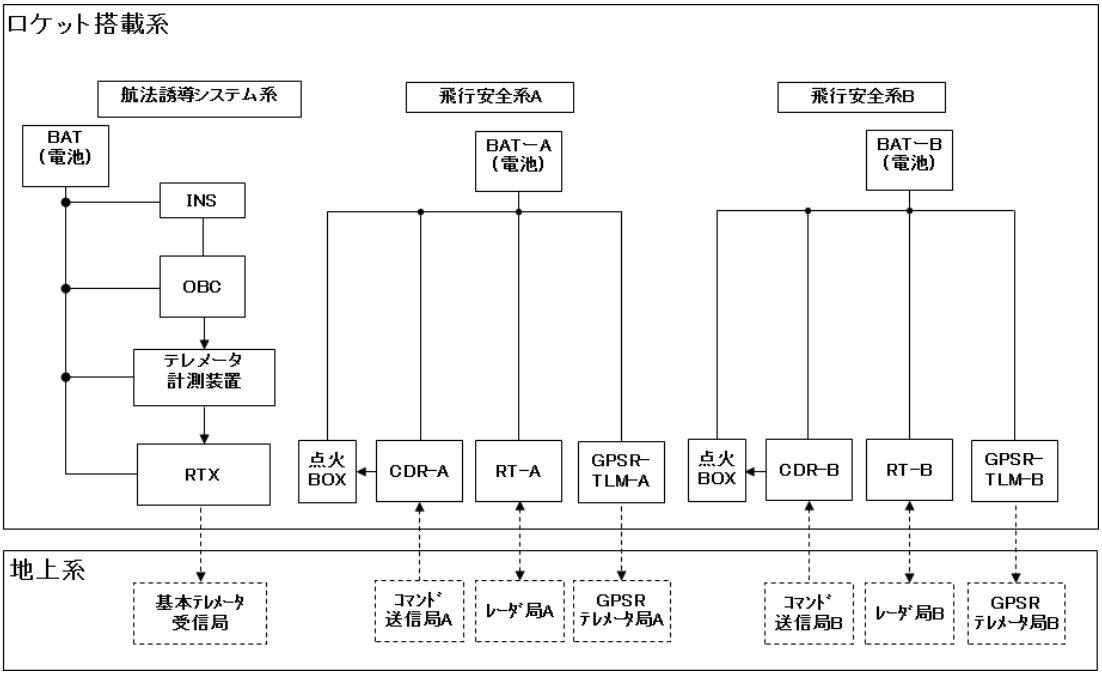
項　目	通信端末仕様
チャンネル	Single Channel w/GPS
通信レート	294kbps
大きさ	11cm × 18cm × 26cm
重量	4kg 以下
作動環境	-25 度 C～＋60 度 C
消費電力	40W
ロケット環境対応	・速度対応（0km/s～8km/s） ・加速度対応（0G～10G） ・ジャーク対応（100G/s 以上） ・通信遮断の無いこと （通信遮断発生の場合は短時間での通信再開が可能なこと）

表 L-3-1-2-20 ロケット通信系の技術課題

No	課 題	対 処(案)	備 考
1	テレメータ データ量	必要最小限のデータ内容の確定	・ 必要通信データ量の確保は可能
2	小型、軽量、低消費電力通信機	小型、軽量、低消費電のロケット搭載通信機開発	・ SB-SAT 性能諸元はロケット搭載可能 ・ SB-SAT 通信端末をベースに ALSET 通信端末を開発する
3	ドップラ シフト補償	・ ドップラシフト補償機能付きロケット搭載通信機開発 SB-SAT の復調器に周波数変動フィードバックループを追加	・ 復調器はジャーク時を含む全ロケット飛行く環境
4	高ジャーク下における通信確保	復調器に周波数変動フィードバックループを追加	・ジャークにより復調器の周波数ロックが外れても、高ジャーク終了後、通信回復時間は約 80msec～160msec 間であり、高ジャーク間隔が 4 フレーム(320msec)以内であれば通信遮断期間 500msec 以下となる。実際のジャーク間隔は、2フレーム(1mse160)以内。
5	Narrow Band 間の境界域におけるハンドオーバの頻繁な発生	・ 処置不要	・ Narrow Band ハンドオーバは、移動体の位置、飛行情報に基づき、インマルサット側で自動切り替え
6	ロケット/地上間の通信遅れ	・ 簡易実験による通信遅れ時間 1sec 以下を計測 ・ 詳細計測によりデータを蓄積	・ 破壊限界線の設定に反映
7	ロケット搭載アンテナ	・ ロケットの頭頂部及び側方にパッチアンテナを設置	・ ロケットの姿勢異常時においてもほぼ通信可能
8	航空機搭載時からロケット点火までの通信確保	・ 通信遮断時間が 5sec 以上の場合は、近距離用通信機を導入	・ 通信回線遮蔽解除後、通信回復時間は約 80msec～160msec

（d） 指令破壊

現行の打ち上げ安全基準や米国連邦航空局（FAA : Federal Aviation Administration）の安全基準等では、地上設備の使用を前提としたものであり、基準に基づき、ロケットの飛行安全システムが構成（図 L-3-1-2-33）されている。本空中発射システムではシステム簡素化と将来の低コスト化の可能性を考慮し、従来からのロケット誘導航法システムに付加する飛行安全システムの構成（図 L-3-1-2-34）を策定した。



[注記]INS：慣性基準、OBC:誘導ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ、RTX：送受信機、CDR：ｺﾏﾝﾄﾞ受信機、RT：ﾚｰﾀﾞﾄﾗﾝｽﾎﾟﾝﾀﾞ、BAT:ﾊﾞｯﾃﾘ電源、GPSR：GPS 受信機

図 L-3-1-2-34 現状の飛行安全システム構成

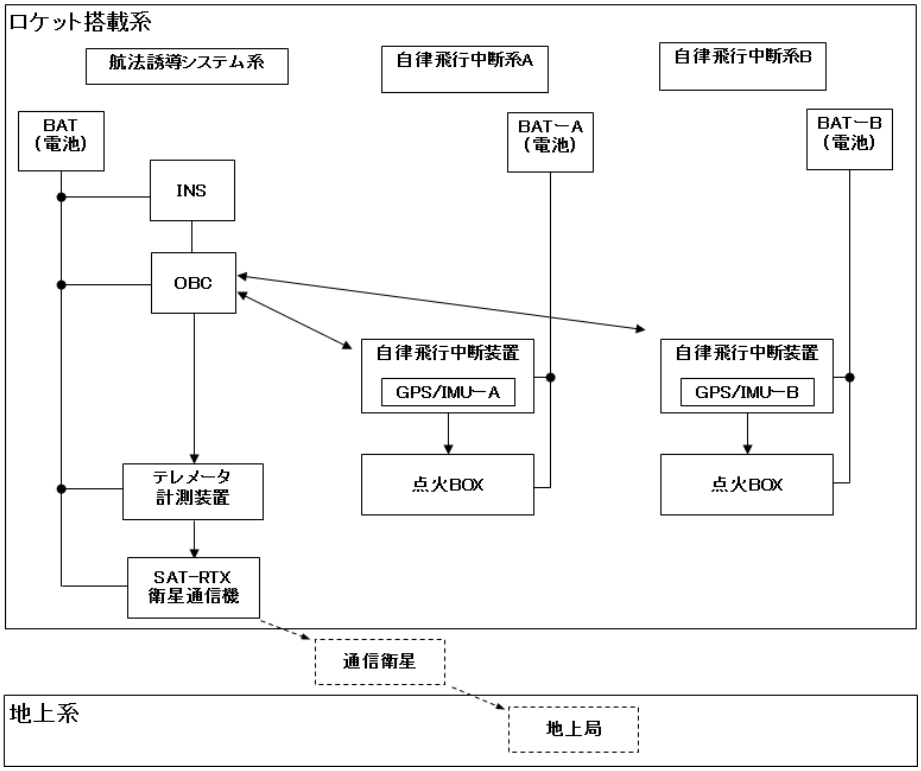


図 L-3-1-2-34　空中発射システムの飛行安全システム構成の構想案

④ 運用管制

図 L-3-1-2-34 に示す空中発射システムの全体運用構想に基づき、指令管制、飛行管制、投下管制の構想検討を行った。各管制の機能配分を表 L-3-1-2-21 に示す。

各管制の責任範囲として、指令管制は運用全体、飛行管制はロケット投下～発射工程終了宣言まで、投下管制は発射工程宣言～ロケット点火までとする。ロケット投下～ロケット点火までの間は、飛行管制と投下管制を重複させ、ロケット投下～ロケット点火の間に何らかの異常事態が発生した場合に、投下管制がロケット点火を中止出来るようにした。

ロケットと運用管制センタ間は、ロケットが発射用航空機から投下されてから絶え間なく通信できることを原則として検討した。ロケット～運用管制センタの間でメインとなる通信系は、ロケット搭載インマルサット通信系であり、ロケットが発射用航空機内にある時にハットアンテナ等を使用して通信を確立しておく。しかし、発射用航空機からロケットを投下する際にアンテナのブラックアウト期間が生ずるため、ブラックアウト期間の発射用航空機～ロケット間の通信を補うための発射用航空機～ロケット間で近距離無線を使用し、発射用航空機から発射用航空機搭載インマルサット通信系を使用して運用管制センタに接続する。

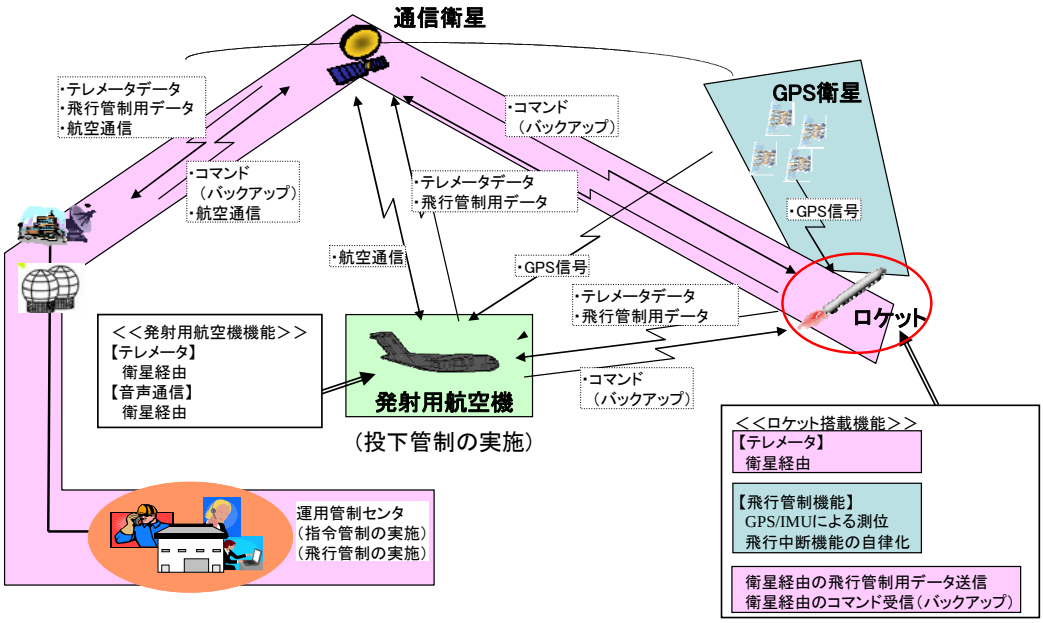


図 L-3-1-2-34　空中発射システムの全体運用構想

表 L-3-1-2-21　各管制の機能配分

機能要素	機能配分
指令管制 (運用管制 センタ)	・発射工程宣言 　発射工程開始を宣言し、各系に準備を指示する。 ・航空機の状態監視 　航空管制側からの情報や航空機無線からの直接伝達情報によって、航空機の飛行状況の監視を行う。異常が発生した場合は直ちに指令管制指揮者(LC)へ報告する義務を有する。報告は、指令管制員が行う。 ・その他の状態監視 　地上安全(離陸前のみ)、気象(離陸前のみ)に関しての情報監視を行う。異常が発生した場合は直ちに LC へ報告する義務を有する。報告は、指令管制員が行う。 ・発射用航空機の飛行計画承認 　指令管制にて投下場所、時刻を航空機に指示する。それに対する飛行計画を承認する。 ・航空機の離陸許可 　各系からの監視状況を集約の上、航空機の離陸を許可する。 ・最終投下（打上げ）判断及び指示 　各系からの監視状況を集約の上、最終的なロケット投下の判断を実施し、各系への指示を行う。判断の実施はミッション責任者が行い、ミッション責任者の指示のもと、あるいは代行執行承認のもとで LC が各系への指示を行う。 ・運行監視 　航空機の飛行状態監視及びロケットの飛しょう安全監視を行う。 　また、飛行管制からの情報に基づき、ロケットの指令破壊要否判断(コマンド判断)を行い、ロケットの飛しょうに異常が発生した場合には、飛行管制にコマンド送信を指示する。 ・発射工程終了宣言 飛行管制からの衛星軌道投入確認報告を受け、発射工程終了を宣言する。

飛行管制 (運用管制センタ)	・ロケットの状態監視 　地上支援設備（GSE：Ground Support Equipment）を起動し、ロケットからのテレメータ情報によって、ロケットの状態監視を行い、ロケットの健全性を判断する。異常が発生した場合は直ちに LC へ報告する義務を有する。報告は飛行管制員が行う。 ・ロケットの飛行安全監視 　ロケットからのレンジングデータによって、飛行安全監視を行い、飛行安全を判断する。異常が発生した場合は直ちに LC へ報告する義務を有する。報告は飛行管制員が行う。また、指令管制の指示によって、コマンド送信を行う。 ・衛星の軌道投入確認 衛星が軌道に投入されたことを確認し、LC へ報告する。
投下管制 (発射用航空機)	・発射用航空機の飛行計画作成 　指令管制にて指示された投下場所、時刻に基づき、飛行計画を作成する。 ・ロケット状態監視 　空中投下支援装置（ASE：Airborne Support Equipment）を起動し、ロケットの点検・初期化・設定を行う。ロケットが点火するまでの間における、ロケットのテレメータデータの監視を行い、ロケットの健全性を判断する。監視機能は専用装置（ASE）によって行われる。 ・ロケット状態監視データの中継 　ロケット点火までの間のテレメータデータの中継を行う。中継機能は専用装置（ASE）によって行われる。 ・航空機飛行状態の報告 　航空機の飛行状態を指令管制へ報告する義務を有する。報告は、投下管制が行う（機長又は機長の代行執行承認のもと）。 ・ロケット投下の実施 　カウントダウンを開始し、投下を実行する。投下の実行は機上の航空機クルーが行う。航空機にとって致命的となり得る異常が発生しない限り、指示によらないロケット投下･投棄は許容されない。LC からの投下指示後、ロケット点火までの間のシーケンス停止判断権限は投下管制に移行する。最終投下(打上げ)判断を行い、投下後、シーケンス停止要否を判断(コマンド判断(緊急停止))し、異常が発生した場合は、緊急停止を行う。 　発射用航空機飛行中の異常に関する判断権限は、下記の通りとする。なお、投下後、発射用航空機は射点からの離脱を行う。 ・　投下機構作動前：機長又はオペレータ（代行執行） ・　投下機構作動後：機長又はロードマスター（代行執行） ・ロケットのオペレーション 　LC からの指示に基づき、ロケットへの自動/手動制御を行う。制御の実行は発射用航空機に搭乗したオペレータが行う。オペレータはロケットの状態監視を実行するが、独自の判断によるオフノミナルの制御を行ってはならない。 ・ペイロードのオペレーション LC からの指示に基づき、ペイロードへのオペレーションを行う。実行は発射用航空機に搭乗したオペレータが行う。オペレータは独自の判断によるオフノミナルの制御を行ってはならない。発射用航空機の一般的な運行に係わる責任と義務は投下管制が有し、投下管制が実施する。
ロケット	・ロケットの点検・初期化・設定 　投下管制からの操作でロケットの点検・初期化・設定が行われる。 ・安全機能 発射用航空機搭乗員の安全を確保するため、ロケットが発射用航空機から離れるまで破壊機能、その他の火工品点火機能に対するインヒビット機能を有する。なお、ロケット機能の暴走による安全機能の喪失を防止するため、投下までのカウントダウンシーケンスは発射用航空機側から実施する。投下後、点火までのカウントダウンシーケンスはロケット本体で実施する。

（４） 法規制調査

宇宙空間利用の国際規則として、国連宇宙空間平和利用委員会（COPUOS：United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space）が作成した宇宙 5 条約と呼ばれる宇宙法がある。主要各国は、条約の批准に伴い国内法の整備を行っているが、我が国においては 2008 年に宇宙基本法が制定に伴い、宇宙開発戦略本部において宇宙活動に関する法制検討が開始され、2010 年 3 月に「宇宙活動に関する法制検討WG報告書＜中間取りまとめ＞」が公表されたが、民間宇宙活動の促進、ルールの必要性を記載するものの、具体的な方策には触れられていない。

本研究開発では、将来の空中発射システムによる民間打ち上げ事業展開を目指して、空中発射システムに必須の航空法等の現行法の弊害に係わる調査を行うとともに、海外の民間打ち上げに係わる法令等について調査を行った。

① 航空法

従来の地上打ち上げに対して、空中発射システムの運用に当たっては新たに航空法に抵触することから、空中発射システムの民間運用に係わる航空法の制約について調査を行った。調査結果の概要を、表 L-3-1-2-22 に示す。また、航空機の耐空証明取得に係わる空中発射システムへ与える制約について、航空運送事業の中型/大型航空機用に適用されるＴ類として調査を行った。今後、さらに空中発射システムの具体化が進むに当たって詳細な検討が必要となるが、現時点での結果を表 L-3-1-2-23 に示す。

今後制定される、宇宙活動法との整合性を考慮する必要がある。

※なお、2015 年になってから、宇宙活動法の検討が進んでおり、ロケットの打上事業者に対する許可の仕組みが検討されているが、空中発射については、宇宙活動法とは別に、航空機の安全確保を行うことが必要と整理されている。（平成 27 年 6 月 宇宙活動法に関する基本的考え方）

表 L-3-1-2-22 空中発射システム運用における航空法上の主要な制約

項 目	条 項	内 容	備 考
航空機の取扱	第二条第 1 項 第 2 項	人が乗って航空の用に供する飛行機、回転翼航空機、滑空機及び飛行船等	航空機は、ロケットの輸送か、衛星打ち上げ機の第 1 段かとの解釈はあるが、通常の航空機として取り扱う
事業形態	第二条第 18 項 第 21 項	・ 航空運送事業:他人の需要に応じ有償で旅客、貨物を運送 ・ 航空機使用事業;上記の運送以外の行為	衛星打ち上げを目的とした、ロケットの投下業務で単なる輸送ではないが、航空輸送事業として取り扱う
耐空証明の取得	第十条第 3 項 第十一条	・ 航空の用に供する場合には耐空証明取得が必要 ・ 改造を行わなくても用途や運用限界が変わるので、再度耐空証明取得が必要	ロケット搭載の有無により、類別して耐空証明を取得する ロケット搭載なしの場合は T 類、ロケット搭載時は X 類とする
機長の役割	第七十三条の四	・ 航空機内の安全 ・ 地上又は水上の人又は物件への危難の防止	打ち上げ責任者と機長の安全業務との権限を明確にする
ロケット(危険物)搭載	第八十六条	・ 爆発性等の物件の航空機による輸送に禁止 ・ 航空機以外の輸送手段が不可能、不適合の場合で国土交通大臣の承認を受け手輸送	ロケットは禁止物件に該当する 投下を目的としたものであり、通常の輸送には必ずしも該当しない
ロケット(物品)投下	第八十九条	航空機からの物件投下の禁止 ただし、地上又は水上の安全が確保でき、国土交通大臣に届け出ができた場合は可能	過去には、ビラの投下と農薬散布の実績有り ノータム/水路通報を発信する
事業実施	第百条 第百五条、 第百二十三条 第百三十三条	国土交通大臣の許可が必要	これまでにない、新たな事業形態となる

表 L-3-1-2-23 耐空証明審査要項に係わる空中発射システムの制約

項目	システムへの影響	検討事項	備　　考
飛行（第 2 章） 操縦性及び運動性（2-4）、及びトリム（2-5）	臨界発動機停止状態における飛行性能確保のために、臨界発動機停止時のミッション中止（ロケット投下中止）を運用制限に加える必要あり	投下作業中の発動機停止を耐空性審査対象とすると、追加証明の量が大幅に増加する	極めて稀であることや、投下形態を飛行性能上で十分余裕のある状態にして追加証明を回避できないか、若しくは打ち上げを中止する
強度（第 3 章） 非常着陸状態（3-8）	非常着陸（胴体着陸）時の搭乗者の保護から、搭載しているロケットの固定強度を確保する必要がある	非常着陸のような厳しい条件下での、ロケットのような重量物／危険物の安全な支持方法の実現性に関しては十分な検討が必要である	航空機へのロケット搭載部の強度向上（機体改修）またはロケット投棄する

② 米国における商業打ち上げライセンス

米国では、商用打ち上げ事業と関連施設の許可および規制について、米国運輸省（DOT：Department of Transportation）が Commercial Space Launch Act を 1984 年 10 月に制定している。これ以前は、武器輸出管理法及び国際武器取引規則（ITAR：International Trafic in Arms Regulations）を適用していた。1999 年 6 月には、連邦航空局（FAA：Federal Aviation Administration）が Commercial Space Transportation Licensing Regulation を制定し、商業打ち上げ等に係わる規制、振興、ライセンスの発行等を行っている。

米国における、民間打ち上げ事業展開に必要な技術や制約を把握するために、FAA のライセンス取得の手順や審査内容に係わる調査を開始した。

FAA は、1984 年に運輸省・運輸長官室において、商業宇宙輸送室（Office of Commercial Space Transportation：OCST）として設置され、1995 年 11 月に FAA へ移設され、軌道ロケットおよび弾道飛行ロケットの商業打上げ活動に係わる下記の管理等を実施している。

- 米国の国際責任の遵守を確証し、公共の健康と安全、財産の安全、国家安全保障および外交政策利益を保護するために、商業宇宙輸送産業を規制
- 民間セクターによる商業宇宙打上げ・再突入活動の奨励、促進、振興

・ 連邦法、条約、規則、政策、計画および手続きに適切な変更を勧告
・ 米国の宇宙輸送インフラの強化・拡大を促進

打ち上げライセンスは、米国市民、合衆国および州法に基づき組織された、または存在する団体及び米国企業および米国が管理的利益を有する外国企業に対して交付される。その手順を図 L-3-1-2-35 に、審査対象項目を表３－１－２－L-24 に示す。

米国では、1990 年より Orbital Sciences Corp.の Pegasus ロケットが空中発射システムによる商業打ち上げ行っているが、空中発射システムによる商業打ち上げに係わる特別な規制等はないことから、FAA の審査手順に従いライセンスが付与されている。

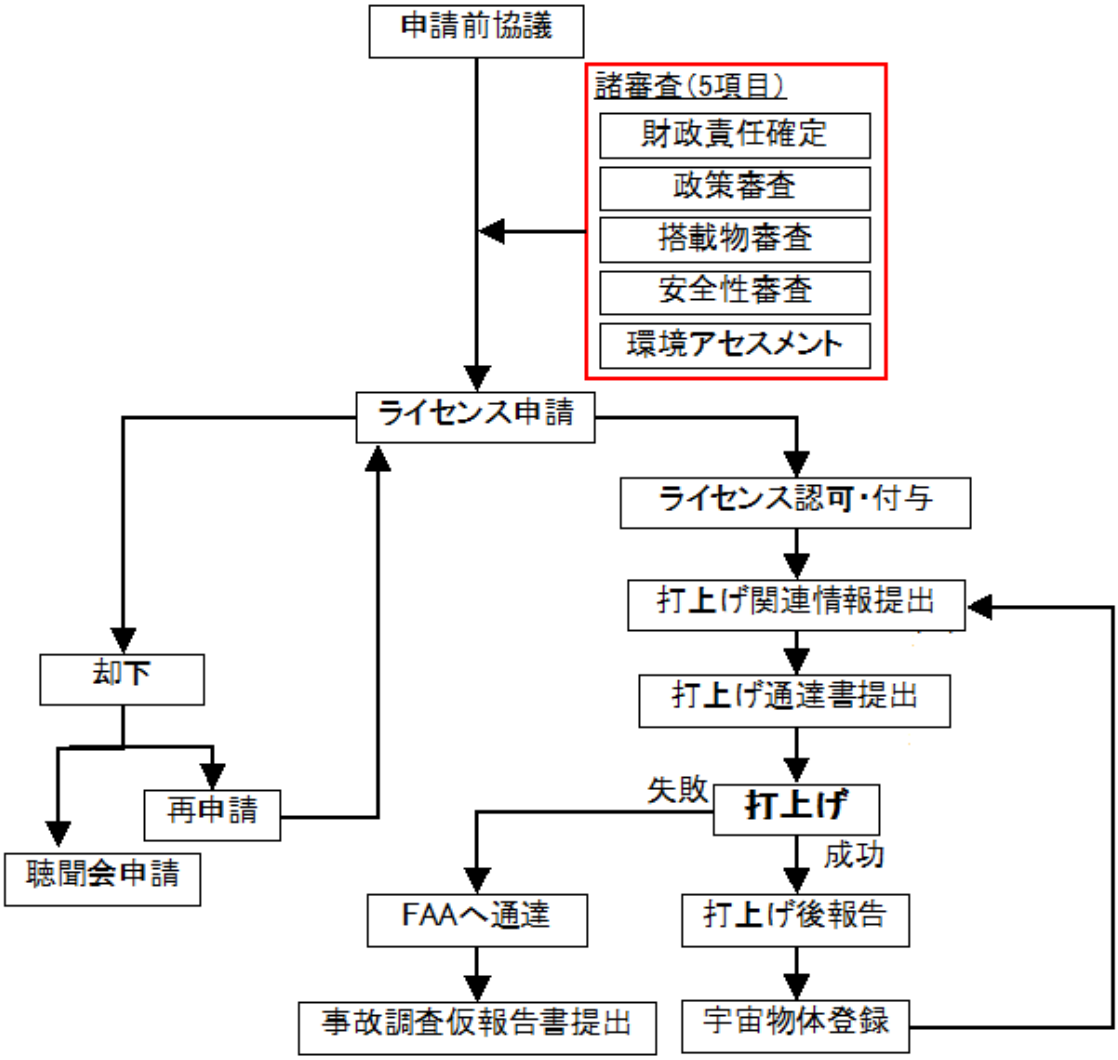


図 L-3-1-2-35　商業打ち上げライセンス発行の手順

表 L-3-1-2-24 商業打ち上げライセンス審査内容

審査項目	内容
財政責任 Determination of financial responsibility	申請者は予想最大損失額の算出に「必要な情報」を提出し、FAA 側は予想最大損失額を算定する。予想最大損失は“申請者”もしくは“ライセンス譲渡を受ける予定者”に通知される。ライセンス取得者が財政責任要件に従わない場合は、ライセンスの差し止めや一時停止を招くこともあり、民事制裁の対象にもなる。
政策審査 Policy Review	技術移転や国家安全保障の観点から審査が行われる。FAA は、国防省、国務省、商務省や、その他の政府機関との協議をもとに、審査を行う。政策審査はライセンス申請者のみが申請できる。
搭載物審査 Payload Review	搭載物の打上げが国家安全保障上問題とならないか FAA は国防省と協議する。 米国政府所有もしくは運用されているペイロードおよび商務省下の NOAA と連邦通信委員会の規制対象のペイロードは審査対象外となる。
安全性審査 Safety Review	審査は連邦射場とそれ以外の射場に区分されて行われる。連邦射場からの打ち上げは、射場の安全基準に従い審査される。連邦射場以外の射場から打上げる場合は、連邦射場の基準に合わせて審査される。
環境審査 Environmental Review	打ち上げによる環境の影響を審査として、大気質、気候変動やオゾン層破壊、水質、水資源、騒音、危険物質や廃棄物について行われる。射場等で新たに地上設備の建設が伴う場合は、生物、沿岸資源等の項目が追加される。 審査時に年間の打上げ回数、過去の打ち上げ活動の累積影響も評価される。

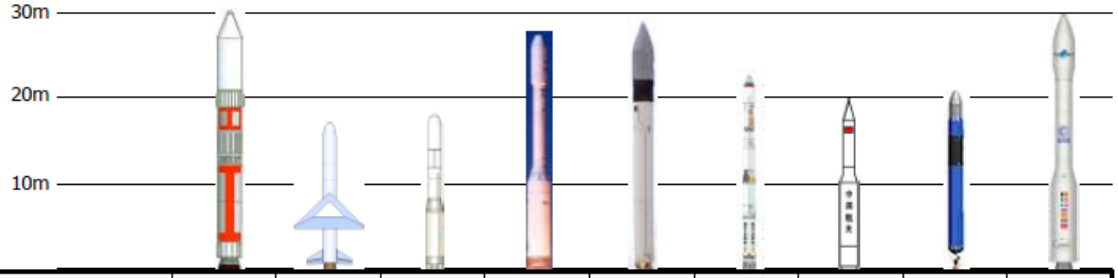
（5） 小型搭載電子機器の検討

我が国のロケット技術と諸外国の先端的な小型ロケットに適用されている技術を比較すると、ロケットエンジン技術等は諸外国と比肩するものの、表 L-3-1-2-25 示すように、ペイロード比率（衛星質量/ロケット全備質量）において諸外国に遅れをと

っている。これは、我が国のロケット開発が短期間でのシステム開発と開発経費の削減に力点が置かれていたこと、ロケットの開発機会が少ない（H-IIA、M-V ロケットの開発から 20 年以上が経過）こと等から、基盤技術の開発が不十分となり、設計基準、搭載機器、材料等の世代交代が遅れていることに起因するものである。表 L-3-1-2-26 は低軌道への打上能力 400kg を有する Pegasus XL の搭載電子機器を日本の現有の搭載機器に置き換えた場合の質量比較である。結果は、機器質量は 2.5 倍となり打上能力は 100kg 減の 300kg となる。

表 L-3-1-2-25　ペイロード比率の比較

■ 日本の小型ロケットシステムはM-Vで性能上、当時の世界レベルに達した。
軌道投入精度、運用性、コストの点でビハインドしている。

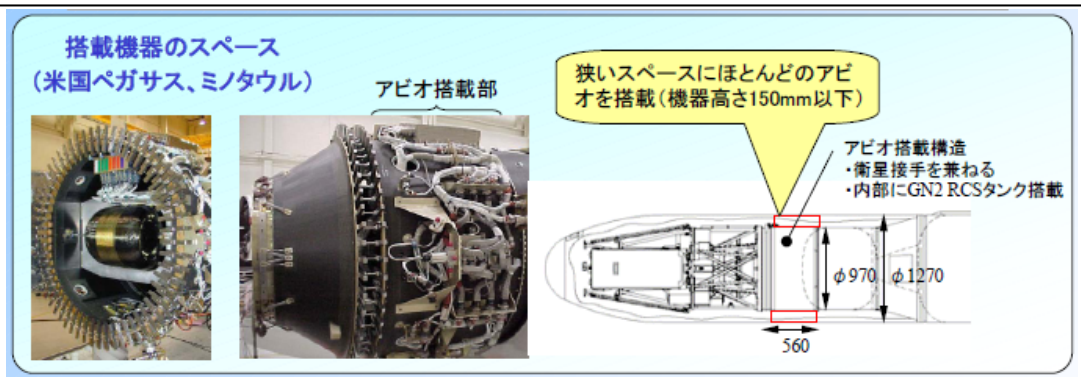


名称	M-V	Pegasus	Minotaur	Taurus	Rocot	START1	開拓者	Falcon 1	Vega
国	日	米	米	米	露	露	中	米	欧
ステージ	固体3段	固体3段 (+ PBS)	固体4段 (+ PBS)	固体4段 (+ PBS)	液体3段	固体4段 + 固PBS	固体4段	液体2段	固体3段 + PBS
射点	陸）固定	空中	陸）固定	陸）固定	陸）固定	陸）機動	陸）機動	陸）固定	陸）固定
コスト M$	60	15～25	17～20	25～47	12～15	10	?	7.9	27～40※
全備 ton	138	23	36	73	107	47	20	27	134
成功率	6/7	30/36	7/7	6/7	11/12	6/6	0/2	0/2	開発中
LEO打上能力 ton	1.9	0.44	0.55	1.3	2.0	0.6	0.3?	0.42	2.2
ﾍﾟｲﾛｰﾄﾞ比	1.4 %	1.9 %	1.5 %	1.8 %	1.8 %	1.3 %	1.5 %?	1.6 %	1.6 %

注）　$1 = 120円換算

※　推定コスト。政策的プライスは20M$

表 L-3-1-2-26　搭載電子機器の質量比較



	米国 Pegasus	Pegasus の機器を日本の現有機器に置換
全段	100	250
3 段	60	160
2 段	20	45
1 段	20	45
打上能力	400kg	300kg（100kg 減）

注 1：Pegasus 機器の全段質量を 100 として表示
2：打上能力感度
1 段=4.5%
2 段=20%
3 段=100%

既存のロケットシステムのアビオニクス構成をベースラインとして、ロケット搭載電子機器の小型、軽量化検討を行った。結果を図 L-3-1-2-36 に示す。

・バスは、シリアルバスとして、ハーネスの質量低減およびシステムを簡素化

・機器は、 機器の統合および機能の見直しによる機器数の削減

Ppower Sequence Distribution Box の小型化、搭載計算機/管制計測装置の統合、指令破壊受信機/早期分離破壊イネーブル制御ボックスの統合、駆動装置のパルス電圧振幅波形制御（PAM）方式への変更による電池数の削減　等

・計測計は、小型シグナルコンディショナ回路により計測系個別の通信ライン形成し簡素化

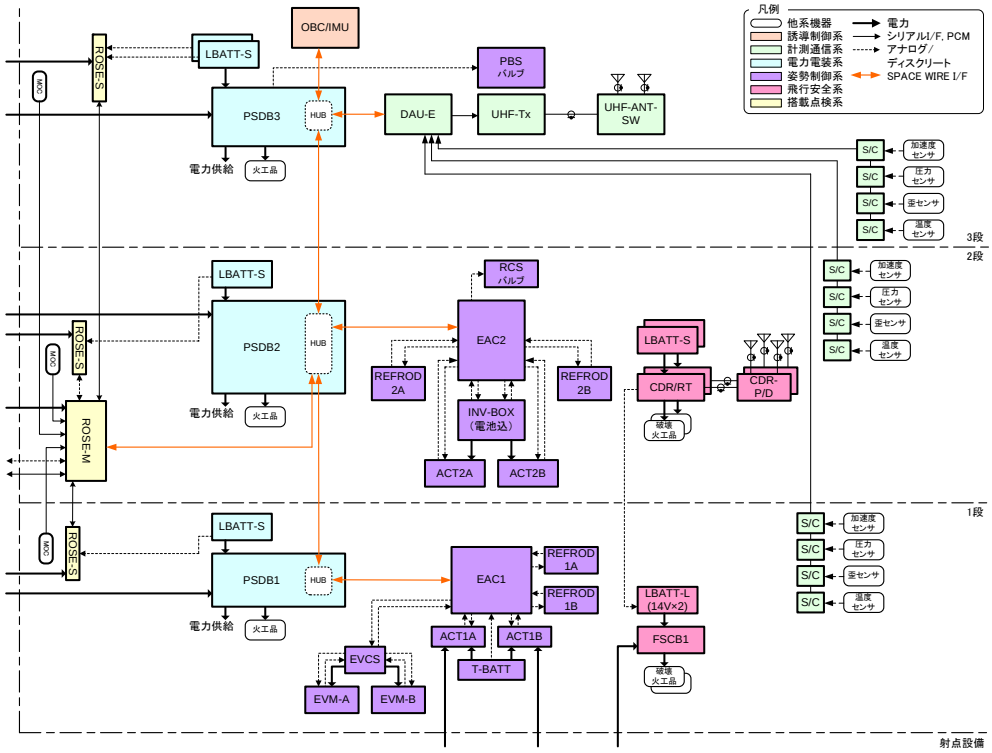


図 L-3-1-2-36　小型アビオニクス構成

Ｌ－３－１－３　特許出願状況等

成果の発表状況を表 L-3-1-3-に示す。

表 L-3-1-3-1　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
発表	27th International Symposium on Space Technology and Science 「Air Launch System for Small Satellites」	H21.7
	平成 21 年度宇宙輸送シンポジウム 「空中発射の研究開発（ALSET）について」	H22.1
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会 「小型衛星打ち上げ用空中発射システムについて」	H22.11
	28th International Symposium on Space Technology and Science 「Air Launch System Enabling Technology」	H23.6
	25th Annual Conference on Small Satellites 「ALSET - Air Launch System Enabling Technology R&D program」	H23.8
	22nd AIAA Aerodynamic Decelerator Systems (ADS) Conference 「Japanese Air Launch System Concept and Test Plan」	H25.3
	29th International Symposium on Space Technology and Science 「Japanese Air Launch System Concept Design」	H25.6
	2013 年度アストロダイナミクスシンポジウム 空中発射システム概要と飛行解析によるシーケンス検討結果	H25.7
	27th Annual Conference on Small Satellites 「ALSET - Japanese Air Launch System Concept and Test Plan」	H25.8
	第 57 回宇宙科学技術連合講演会 「空中発射打上追跡管制ｼｽﾃﾑの技術検討」	H25.10
	30th International Symposium on Space Technology and Science 「Air Launch System Enabling Technology (ALSET) Program Overview」	H27.7

Ｌ－３－２　目標の達成度

将来の小型衛星市場で需要増大が見込まれる 150kg 以下の衛星打上げ能力を有し、運用コストの低減を図った空中発射システムの構想を策定できた。表 L-3-2-1 に目標の達成状況を示す。

表 L-3-2-1　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
1．空中発射システム運用構想	空中発射による衛星打ち上げ及び運用の構想検討を行い、技術的成立性があり、将来の打ち上げ事業展開に資する低コストな空中発射システム運用構想を策定する。	打上能力 150kg（高度 500km 極軌道）の空中発射システムとして、輸送機を使用した投下方式、自律飛行、衛星経由の飛行管制方式など、将来の衛星打ち上げ市場参入を目指した、整合性のある空中発射システム運用構想を策定し、開発課題を明らかにすることができた。	達成
2．ロケット搭載/分離技術	空中発射システムに不可欠な、航空機にロケットを搭載する技術、高々度飛行中の航空機からロケットを安全に分離する技術、分離されたロケットの正常な飛行が可能なロケット点火のための姿勢安定に係わる技術を確認する。 また、投下技術の実証に必要な投下システムの設計、投下シーケンス及び投下試験計画について安全審査を含む詳細設計審査を終了させる。	将来の民間による商業打ち上げ市場参入を図るために、C-130 輸送機を使用した PDS 方式を選定した。本方式に基づいた、打上能力解析において、150kg 以上の打上能力が達成できることを確認した。 また、技術の実証を行う、ダミーロケットを使用した高空落下試験の試験計画を策定した。 本項目の検討に当たっては、米国の国際武器取引規則（ITAR : International Traffic in Arms Regulations）に基づき。米国国務省の許可を受け、必要な情報の提供受けるとともに、投下システムの安全審査を受け問題ないことが確認された。 本成果により、直ちに実施サイズの投下試験が実施できる状況にある。	達成
3．運用管制技術	空中発射システムのメリットを最大限に引き出すとともに、将来の打	自律飛行のための GPS/INS 複合航法システムについて、技術課題を抽出し対応策を明ら	達成

	ち上げ事業展開に不可欠な低コスト運用技術として、ロケットの自律飛行技術と商用衛星を利用した飛行管制技術課題を抽出し、対処方法を明らかにする。	かにすることができた。 　また、ロケットの状態監視及び指令破壊信号の創出を可能とする衛星経由の通信システムとして、インマルサット社が開発中の低軌道周回衛星用の通信端末をロケット用に改修することとして検討を行い、改修に係わる技術課題を抽出し対応策を明らかにすることができた。	
4. 法規制調査	空中発射システムの実現に係わる、現行の国内法規制等の制約を整理する。 　また、諸外国における民間打ち上げ事業展開に係わる法規制の洗い出しを行う。	空中発射システムの運用を航空法での対応で実施する場合の課題を明らかにすることができた。 　また、民間打ち上げライセンスに係わる米国の状況等を明らかにすることができた。	達成
5. 小型搭載電子機器技術	ロケット搭載電子機器の小型、軽量、低コストに必要な技術を明らかにする。	アビオニクスの小型軽量化として、搭載電子機器の統廃合、機体ハーネス質量の軽量化のため機器間にシリアル通信の適用、電力制御装置の小型軽量化方策を示した。	達成

Ｌ－４　事業化、波及効果について

Ｌ－４－１　事業化の見通し

本研究開発において、我が国に全く知見のない航空機からのロケット投下技術の研究開発を行い、米国の専門企業を含めた詳細設計審査を受け、問題のないことが確認された。今後、本詳細設計結果に基づき高空投下実証試験を行うことにより、空中発射システムに必要なすべての技術を我が国は取得することになる。これにより、空中発射システムの開発に当たっては、すべて実証された技術でシステム開発を進めることが可能となり、空中発射システムの技術的課題はすべてクリアできる。また本研究開発は、将来の小型衛星打上げサービスの事業化に資する運用性の向上及びコスト低減に向けた方策として、ロケットの自律飛行及び商用衛星を使用した打上げ管制技術の技術課題を抽出し、対応策を示すことができた。

以上の成果により、空中発射による小型衛星打上げサービスに必要な多くの技術の対応策は明らかになっており、空中発射システムの実現への大きな課題としては、システムの実証が残されている。

(1)市場競争力

今後の衛星市場として、Nano、Micro、Mini 衛星の需要増及び新規市場の創成が予測されている。空中発射システムについては、米国の Pegasus ロケットが運用を行っているが、運用開始から 20 年以上を経過し、価格競争力が極端に低下している。これに変わる低コスト小型ロケットがないことから、世界の小型衛星は相乗り打ち上げに頼らざるを得ず、商用衛星の打ち上げ手段としては制約が非常に大きい。我が国は、1970 年に文部省宇宙科学研究所（当時）が、国産技術による固体ロケットを使用して衛星（おおすみ）打ち上げに成功して以降、固体ロケットによる数多くの周回衛星、探査機等を打ち上げ、世界的に高い評価を受けている。この技術により低コスト小型打ち上げ機を市場展開することにより、高い競争力を確保できる。

(2)事業化のために必要な今後の開発内容

① 投下システムの実証試験

投下システムについては、本研究開発において投下システムの設計、投下シーケンス、ダミーロケットによる実施相当の試験計画を作成し、米国の安全審査及び国内の設計審査を完了している。

本研究開発では投下システムの設計、投下シーケンス策定の他、米国のC-130を利用した米国のユマ試験場に於ける投下試験計画を策定している。この成果を利用した投下試験の実施により、空中発射システムの核となる投下システムに係わる技術の実証を行う。

② 搭載電子機の小型、軽量、低コスト化

本研究開発の成果に基づき、民生部品及び民生技術を中心とした機器の開発及び搭載電子機器システムの開発に速やかに着手できる状況にある。搭載電子機器の小型、軽量、低コスト化は、空中発射のみならず観測ロケット、衛星打上げロケットや無人機等にも利用可能な汎用性の高い技術である。

③ 次世代運用技術開発

ロケットの自律飛行、衛星を利用した打上げ運用技術については、本研究開発において技術的課題を抽出し、対応策の目処を得ていることから、速やかに開発へ移行することが可能である。本技術は、上記②と同様に空中発射のみならず観測ロケット、衛星打上げロケットや無人機等にも利用可能な汎用性の高い技術である。

④ 空中発射システムの開発

本研究開発及び上記の①、②、③の技術開発を得て、本格的な空中発射システムの開発を行う。必要となる新規の個別技術については、ほぼ終了しており、ここでは、ロケットシステムの開発を行い、空中発射システムの実証試験を行う。

⑤ 事業化判断

本研究開発成果を活用した事業化の検討は、上記の①～④の進捗状況及び成果を確認しつつ進める。技術開発に加えて事業化の判断には、小型衛星の需要動向、国内外の航空機メーカや類似開発及び運用を行う企業との協力関係（技術情報の開示、共同開発、共同事業等）構築が不可欠である。需要等の調査、海外等の協力については本研究開発においても実施しており、今回の調査結果や需要見通し等を踏まえ、事業化の判断を行う必要がある。

（3）事業に至る期間

本成果を利用した衛星打上げ事業に当たっては、投下システムの実証実験、コスト低減と運用性向上に係わる搭載電子機器開発、ロケットシステム開発、運用技術の開発及びこれらの成果を踏まえた空中発射システムの試験打上げが必要であり、このために約 6 年の期間を要する。

（4）事業化に係わる問題点

民間宇宙活動に関し、内閣府宇宙開発戦略本部において宇宙活動法の策定が進められているが、平成 22 年 3 月に「宇宙活動に関する法制検討WG報告書＜中間とりまとめ＞」が公開されて以降、具体的な進展が認められなかったが、平成 27 年度に

入り活動法の制定に向けた検討が進められることとなった。宇宙基本法では、民間事業者による宇宙開発利用促進を重要な目的として掲げ、宇宙諸条約上の義務の履行を確実にするために、宇宙活動法を整備することになっている。これまでも民間による宇宙利用は行われているものの、打ち上げ事業に関しては H-IIA ロケットが民間に移管されたものの、打ち上げ行為は JAXA に委託し JAXA の責任において実施することによって、国際法の遵守を図っている。民間宇宙開発利用促進には、早期の宇宙活動法の制定が必要である。

※なお、2015 年になってから、宇宙活動法の検討が進んでおり、ロケットの打上事業者に対する許可の仕組みが検討されているが、空中発射については、宇宙活動法とは別に、航空機の安全確保を行うことが必要と整理されている。（平成 27 年 6 月 宇宙活動法に関する基本的考え方）

Ｌ－４－２　波及効果

本研究開発は、今後の宇宙活動の機動的かつ、低コストでの推進を目的としたものであり、その技術は宇宙開発に留まらず、超高速飛翔体等への適用が期待できる。これらの技術の利用により、今後の技術開発の期間短縮、コスト低減や運用経費の低コスト化に大きく寄与する。

本研究開発における空中発射システムのロケット搭載/分離技術、運用管制技術、低コスト電子機器技術をベースに空中発射システムの大型化、小型化への展開（図 L-4-2-1）が容易になるとともに、ロケットシステムの小型、高機能、低コスト化及び運用のコスト低減に寄与し、地上発射システム、海上発射システム等の輸送系全体のシステム技術となる。

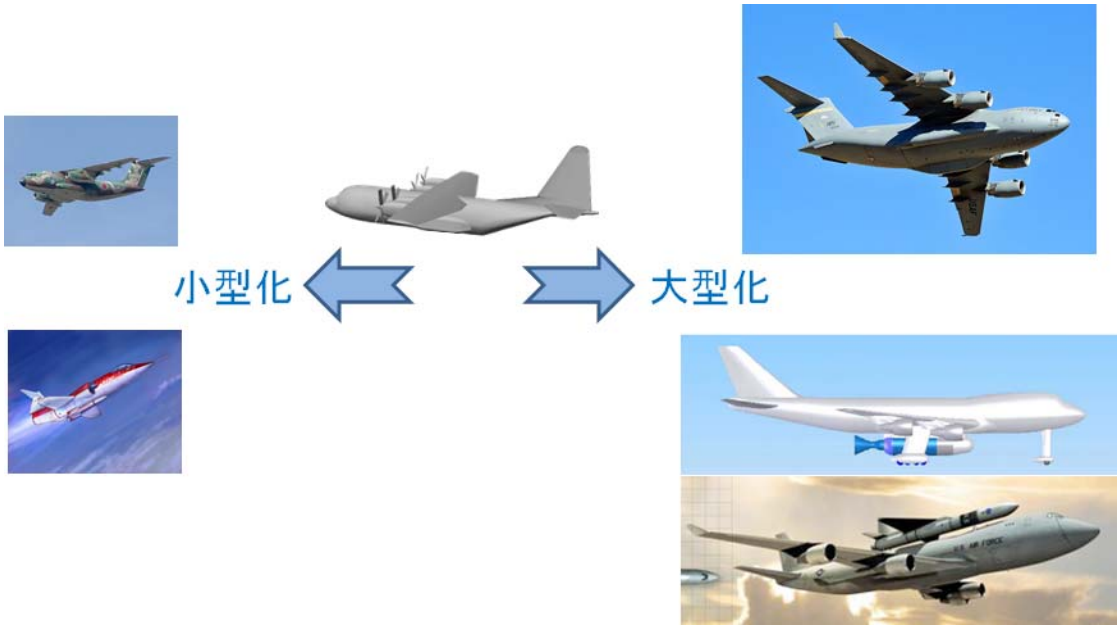


図 L-4-2-1　空中発射システムのラインアップ

（1）ロケット投下/分離技術

本技術は、空中発射システムの中核となる技術であり、今後の輸送機を利用した空中発射システムの基盤技術となる。Type V または Type V より小さなプラットフォームの適用により、さらに小型の空中発射システムへの技術転用が可能となる。

また、本技術を利用したフライバックブースタ（再利用型ロケットの技術）、カプセル回収（無人、有人）、再突入機等の技術開発において有効な手段となる。

例として、NASA のオリオン計画におけるアレスロケット1段目(SRB)の回収のシステムと、有人宇宙船の回収実験を図 L-4-2-2、図 L-4-2-3 に示す。また、再突入機の回収実験を図 L-4-2-4 に示す。

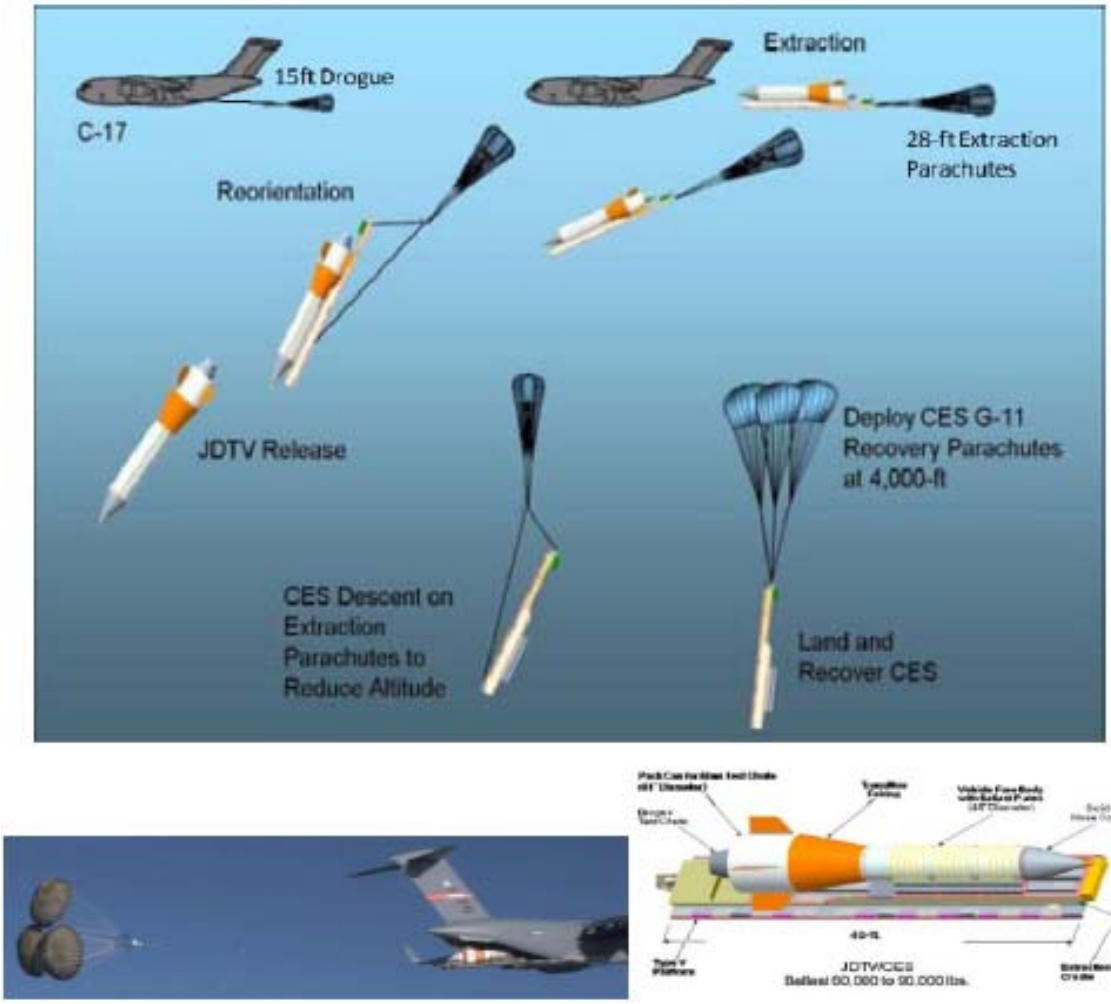


図 L-4-2-2　ARES ロケット 1 段目の回収実験

図 L-4-2-3　ARES 有人カプセルの回収実験

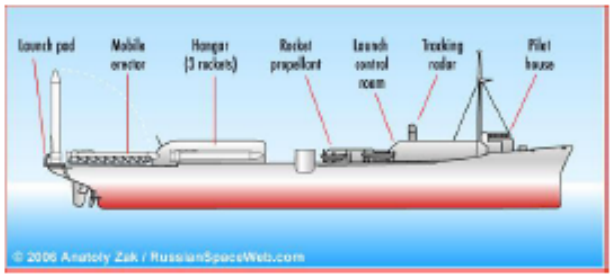
図 L-4-2-4　再突入機の回収実験

（2）運用管制技術

運用管制技術は、これまでの地上局に依存した飛行管制から、飛翔体の自律飛行と商用衛星を利用した管制技術を開発する。この技術は、空中発射システムに限定されることなく、観測ロケット、地上打ち上げロケット及び海上打ち上げロケットにも有効な技術である。（図 L-4-2-5）また、従来の航空機と異なる超音速機の管制や無人機の管制にも利用可能な技術である。（図 L-4-2-6）

S-520

Falcon 9



Sea Launch

図 L-4-2-5　観測及び衛星打上げロケット

グローバルホーク

プレデタ

図 L-4-2-6　無人機

Ｌ－５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

Ｌ－５－１　研究開発計画

開発最終年度に、各要素技術の評価を実施する。ロケット搭載/分離は、投下システムの設計、投下シーケンス及び航空機を使用したダミーロケットの高空投下試験計画を策定し、米国企業を含む専門家による審査により研究開発の妥当性を確認する。運用管制技術については、技術課題を抽出し、対応策を解析等により明らかにし国内の専門家による審査を受け対応策のの妥当性を確認する。これにより、空中発射システム構想の技術的成立性を確認する。

法規制調査の結果については、我が国の「宇宙活動法」の制定に係わる関係者へ適宜提供する。

表 L-5-1-1 に研究開発計画を示す。

表 L-5-1-1 研究開発計画

実施項目／年度	２１	２２	２３	２４	２５	２６
1.　技術動向等調査						
2.　空中発射システム運用構想検討						
3.　ロケット搭載分離技術開発						
4.　運用管制技術検討						
5.　法規制等調査						
6.　小型搭載電子機器の検討						

Ｌ－５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構が経済産業省からの委託を受けて実施している。

また、研究開発の実施に当たっては、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構内に、国内の有識者からなる委員会を設置し、開発計画、解析等の結果について審議し、助言を受けて進めている。

図 L-5-2-1 に研究開発実施体制を示す。

平成 21～平成 24 年度研究開発実施体制

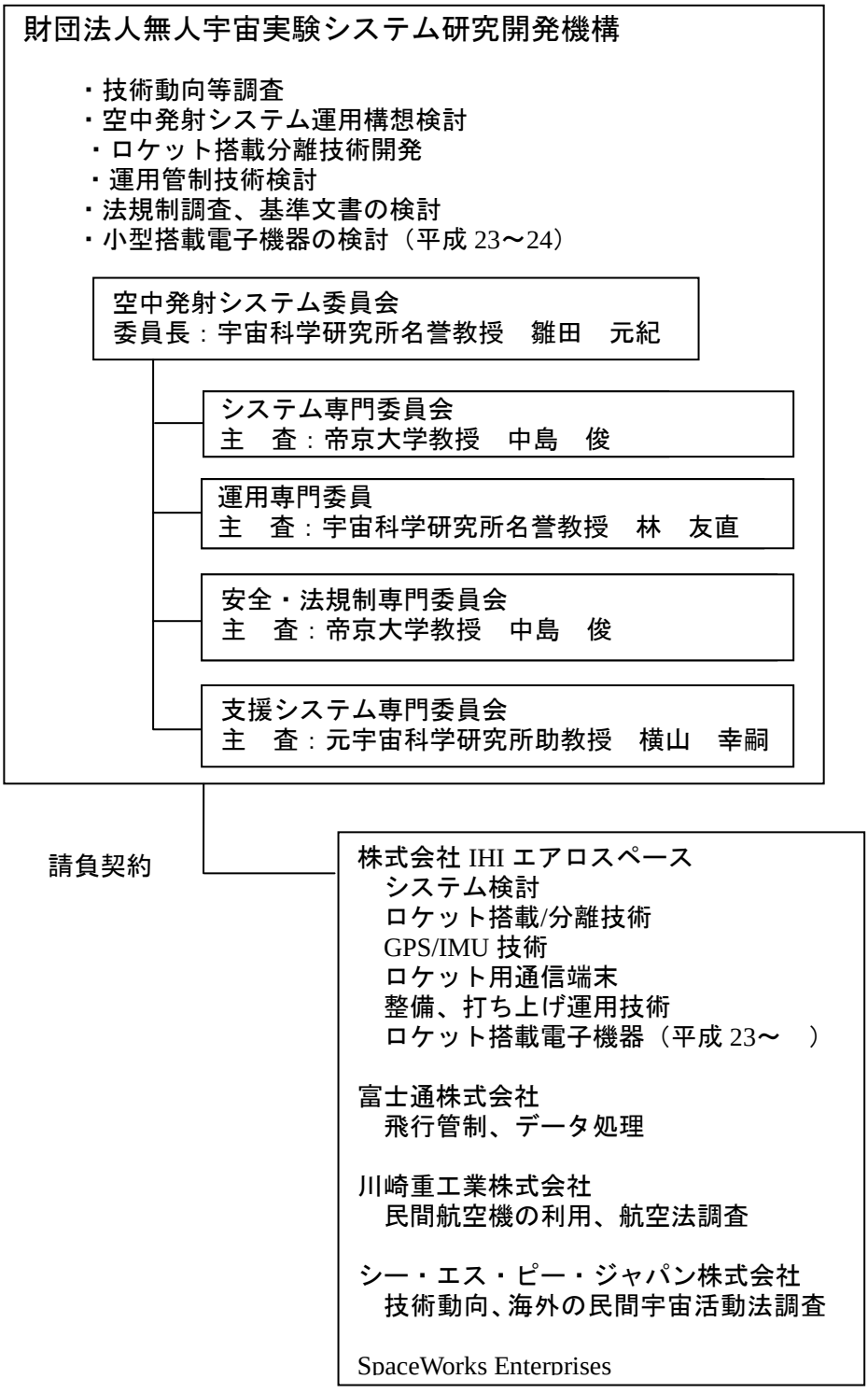


図 L-5-2-1 （1／2） 度研究開発実施体制（平成 21～平成 24 年）

平成 25～26 年度研究開発実施体制

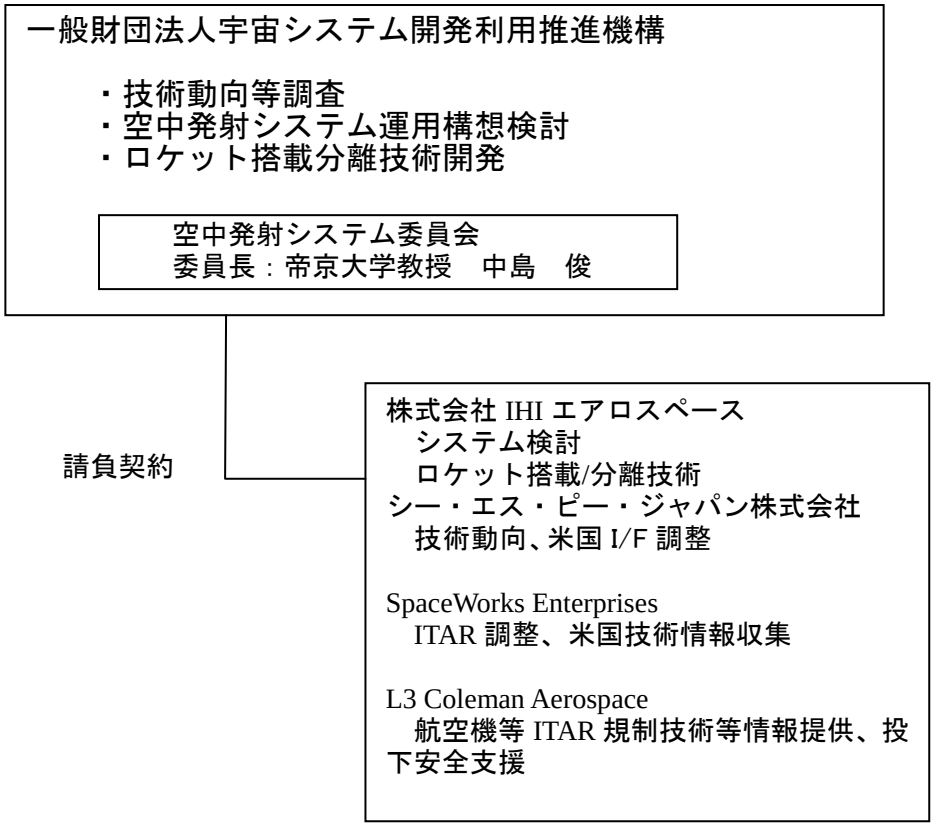


図 L-5-2-1　（２／２）　研究開発実施体制（平成 25～平成 26 年度）

Ｌ－５－３　資金配分

平成２１、２２年度の各要素技術への資金配分（実績）を表 L-5-3-1 に示す。

表 L-5-3-1　資金度配分　　（単位：百万円）

年度　平成	２１	２２	２３	２４	２５	２６	合計
1.　技術動向等調査	7	10	9	9	3	4	42
2.　運用構想検討	4	4	22	18	2	1	51
3.　ロケット搭載分離技術開発	16	50	62	74	120	195	517
4.　運用管制技術検討	32	69	39	32			172
5.　法規制等調査	8	17	11	10			46
6.　小型搭載電子機器の検討			7	6			13
合　　計	67	150	150	149	125	200	841

Ｌ－５－４　費用対効果

（1）ロケット搭載/分離技術

空中発射システムにおける輸送機からのロケット投下は、通常の物量投下の制限（投下高度、重量、容積）を越えたもので、投下システムの設計等に係わる技術情報は一般公開されていない。これらの技術情報を独自に取得するには、膨大な経費と時間を要する。

米国では、空中発射システムに係わる航空機情報は大型ミサイル技術の一つとして国際武器取引規則（ITAR：International Traffic in Arms Regulations）で管理されている。本研究開発では、米国の輸送機を使用することとして米国の専門企業と連携し、米国からの必要な情報の開示について国務省に申請を行い許可された。

これにより、投下システムの設計等に必要な技術要求を入手できたとともに、投下システムの設計、投下シーケンス等について、米国専門企業の安全審査を受けることができ、短期間でかつ、効率的な経費の運用が可能となった。

本技術を利用した本格的な空中発射システムの開発及び事業化に移行する場合の、米国企業との協力関係について事前調整を実施した。

（2）ロケット打上げ運用技術

ロケットに搭載する自律飛行システム、商用通信衛星との通信端末に係わる技術課題の抽出と解決方法の見通しを得ることができた。通信衛星としてインマルサット衛星が有効であることから、インマルサット社と調整を行った結果、現在インマルサット社が開発を進めている、低高度周回衛星に搭載し静止のインマルサット衛星と通信する端末をベースとして、ロケット用通信端末の検討を行ない、技術課題の抽出とその解決策の見通しを得ることができた。

これにより、衛星経由の打上管制にかかわるロケット搭載通信端末開発に必要なの技術情報を短期で経済的に取得することができた。

本技術は将来のロケット打上管制の主流になるものであり、世界に先駆け本格的な研究を行うことができた。ロケット搭載通信端末はインマルサットとの協力により、将来の商品化が可能なものである。

米国でも、2013 年に GPS 衛星や衛星経由の打上管制が地球局の大幅な削減や省力化に寄与するとして、開発に着手することを発表している。

空中発射は、小型衛星の機動的な低コスト打上システムとして期待されるが、我が国では実績のない打上システムであり、これについて、必要最小限の費用で、打上から運用に関わる各種技術の研究開発を行い、実現までの見通しを明らかにすることができた。

Ｌ－５－５　変化への対応

空中発射システムの打上能力は、将来の小型衛星市場の状況を見つつ進めることとし、将来需要予測の調査を行った。調査の結果、1999～2013 年の 500kg 以下の衛星打ち上げ実績及びバックログ 355 機から、150kg 以下の衛星が全体の半数以上を占めていることが判明した。150kg クラスの衛星はピギーバック打ち上げの対象ではなく、相乗り衛星にもなりにくい質量でもある。2000 年代は、米国では Operationally Responsive Space と銘打って、300kg クラスの衛星の高機能化、低コスト化を進め所要の成果を収め、2010 年代に入り更なる小型、高機能衛星の開発に着手し、Planet Labs の 5.2kg の Dove 衛星や SkyBox Imaging の 80kg の SkySat 衛星が実証されている。Planet Labs は 150 基の超小型衛星群によるサービス計画を、SkyBox Imaging は 24 基の超小型衛星群によるサービス事業の計画を発表するなど、超小型衛星群による周回衛星事業が確実に進展しており、これに伴い超小型衛星の打上げ手段の実現が望まれている。

上記動向を踏まえて、本研究開発で実施する空中発射システムの研究開発は、打上能力 150kg を目標とした。

また、将来の空中発射システムの大型化及び小型化への発展性も考慮し、空中発射システムの方式として、輸送機を使用した投下方式を選定した。

第４章　技術に関する施策評価

第４章　技術に関する施策評価

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

世界の宇宙産業が全体的に拡大傾向にある中、この流れをつかんで我が国の宇宙産業が成長し関連市場を創出していくには、国の関与による産業基盤強化や市場の創出が必要である。

このような観点から、国際競争力のある高性能かつ低コストな人工衛星等の開発や、将来のエネルギーの確保に資する高機能な衛星センサ及びその利用技術の開発、宇宙太陽光発電技術の開発等を、宇宙基本法及び宇宙基本計画に基づき関係府省と役割分担・連携を図りつつ経済産業省が推進することは極めて重要であり、本施策の目的及び政策的位置づけは妥当である。

宇宙産業の国際競争激化の傾向に対応するため、機器とサービスのパッケージ提供で日本の優位性を目指すという方針や、民生技術も利用して高機能・高付加価値かつ低価格を目指すという方針は、これからの市場ターゲットである新興国のニーズを見据えた適切なものであり、妥当である。

一方、経済産業省のプロジェクトと他省庁のプロジェクトの関係の考え方が必ずしも明確ではないように見受けられる。よりわかりやすく明確に役割分担の考え方を示すことが望ましい。また、本施策によって実現を目指す将来の宇宙産業の規模の目標や時期についての記載がある方が望ましい。

【肯定的意見】

- 経産省の立場から国際競争力のある人工衛星やロケットの実現を目指している点は評価できる。また、エネルギー政策の推進も経産省の立場からは的を射ている。
- 宇宙産業の国際競争激化の傾向に対応するため機器とサービスのパッケージ提供で日本の優位性を目指す方針は妥当であり、その方針を強く進めるべきである。
- 世界の宇宙産業は全体的には拡大傾向が明らかであるが、日本の宇宙産業はこれに必ずしも同期していない。これは宇宙産業の成長が必ずしも十分でなく、市場開拓もやや弱い点が考えられ、国の関与による産業基盤強化や市場の創出が必要である。このような点から、法整備や計画に基づき、国際競争力を見据えた低コスト、小型化、高機能化などによる人工衛星センサの開発およびその利用技術の開発は極めて重要で、本事業の目的および政策的位置づけは妥当と考えられる。また、国としての施策は、国内の宇宙産業育成と市場創出が必ずしも十分でないことから、関係省庁との連携をとりながら実施することが必要である。
- ５００ｋｇ級ＡＳＮＡＲＯプロジェクト、ＨＩＳＵＩプロジェクトなど、社会的ニーズに適合すると共に、国際競争力の実現を目標とした施策であり評価できる。
- ビジネス展開への前段としての開発であり、国の関与が必要である。

- 現状非常に低い我が国の宇宙産業の国際競争力を向上させるため、衛星システムやセンサなどのハードと、運用・利用のためのソフトと、両輪が揃った適切な事業設定がなされており、国際的に見てもこれからの市場ターゲットである新興国のニーズを見据えた施策になっている。
- また、高性能・高価格でなく民生技術を利用した衛星部品の開発なども含めて高機能・低価格・高付加価値と今後１０年を見据えた、政策に則った施策が講じられていると判断できる。
- 衛星システムの開発とセールスにはオールジャパンとして開発リソースを集中させていく必要があり、その点でも産学官の連携が取れている。

【問題点・改善すべき点】

- 経産省のプロジェクトと他省庁のプロジェクトの関係の考え方が必ずしも明確ではないように感じられる。経産省が担当するテーマと他の省庁や期間が担当するテーマの明確な線引きは難しいと思うが、ある程度の線引きがあった方がやりやすいのではないのか。
- 施策、宇宙産業プログラムの目的は宇宙基本法、宇宙基本計画を踏まえ、明確に記述されている。ただ、時期に関する具体的な記述は見当たらなかった。
- 開発する衛星による観測データを用いた利用システムまで含めたパッケージ輸出を目指している方向性は正しいと言える。ただ、観測データの利用分野は多岐に亘るため、データ利用手法の提供にはオールジャパンの技術を結集する枠組が望まれる。
- 施策の事業化において、計画、体制、費用対効果、技術や社会の変化に対する対応などでやや明確でない点があるように思える。より広い機関や民間企業を対象としたニーズの掘り起こしや個別ノウハウの取り込みの可能性の検討も必要と思われた。
- 宇宙機等の開発に偏重し、本来の利用者（観測機器の国内ユーザー機関）の活動が乏しい。観測データそのものもビジネスにはなるが、有効的な利用の仕方がビジネスとなり、結果として宇宙機等の普及に寄与する。
- 経産省として、現状の規模をどの程度（金額的規模）まで拡大したいのか、明示することが可能であれば、していただいた方が理解しやすい。

２．施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

本施策において、国際競争力を向上させるための衛星・センサの低コスト化、小型化、高機能化を目指したハードの開発と、運用・利用のためのソフト（利用技術）の開発がバランスよく実施されており、プロジェクト等は適切に配置されている。

国際競争力のある小型衛星の開発（ＡＳＮＡＲＯプロジェクト）、資源探査等に資する観測センサの開発（ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲ及びＨＩＳＵＩプロジェクト）、宇宙実証（ＳＥＲＶＩＳプロジェクト）、宇宙太陽光発電、空中発射システムの各プロジェクトとも、濃淡はあるが現時点において得られた成果は概ね妥当である。

一方、現状は、どちらかといえば宇宙機器等の開発に重点が置かれており、今後は、より広い分野を対象としたニーズの掘り起こしや新たな利用方法の開発など、人工衛星から得られたデータの利用を振興する取組を強化することが望ましい。

また、いくつかの事業において、計画、体制、費用対効果、技術や社会の変化に対する対応などについて、明確化が十分でない点があるように思える。また、技術目標の設定根拠が明確でない箇所もあった。

施策全体の目標達成に向け、どのような事業を実施するかについては、開発するシステムが市場開拓の条件に合う性能と使い易さを持っているかなど世界の趨勢等を考慮しつつ、調整しながら推進することが重要。例えば、ＳＥＲＶＩＳプロジェクトの３号機は、当初の目的設定は理解できるが、現時点では再検討を要する。

【肯定的意見】

- 予算の額は文科省に比べてはるかに少ないが、幅広い研究開発のテーマを扱っており、目標の達成度も良好である。
- 技術に関する事業は適切に配置されており、妥当と考える。すなわち、（１）不確定性はあるものの長期的な開発としての太陽光発電などの事業、（２）数年程度の短期間で事業化を目指す小型、低コスト化の人工衛星およびその利用システムなどの開発、そして（３）継続的な運用により資源探査を含む多目的に利用されるＡＳＴＥＲ、ＰＡＬＳＡＲ関係の事業、のタイプの異なる事業がバランスよく実施されている。
- 施策の構造は、国際競争力ある人工衛星等の技術開発として、高い必要性を有する高性能・小型衛星システム開発、関連部品開発・実用化が配置され適切である。成果については、要素技術ごとに具体的に示されていて、ほぼ達成されている。事業の予算配分については、詳細部分までは読み取りにくいが、ほぼ妥当であると思われる。また、目的実現の見通しについては、個々に示してあり、妥当と思われた。
- 小型衛星（ＡＳＮＡＲＯプロジェクト）、観測センサ（ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲ及びＨＩＳＵＩプロジェクト）、宇宙実証（ＳＥＲＶＩＳプロジェクト）、宇宙太陽光発電、空中発射システムの各プロジェクトに濃淡はあるが現時点において得られた成果は概ね妥当である。

- プロジェクト等は適切に配置されている。予算は比較的潤沢である。
- 事業の設定とその位置づけに関しては、必要十分は手当がなされていると判断できる。また、技術目標については必要な範囲での設定がなされていると思われる。

【問題点・改善すべき点】

- プロジェクトの過不足についてコメントするのは難しいが、議論する必要はあると思う。
- 衛星、センサなどのハードウェアの開発はその実証が事業に含まれているが、観測データの利用システムの開発はその実証が現在の事業には含まれていない。現在はまだ部分的な開発の段階と考えられるが、次期は開発したシステムが市場開拓の条件に合う性能と使い易さを持っているかの実証が必要である。
- 施策全体の達成と事業（要素技術）の配置の関係について、今後、世界の趨勢を考慮しつつ、調整しながら推進することが重要と考えられた。
- 可搬統合型小型地上システム、空中発射システムについては、事業の成果を今後どのように活かしていくかを検討することが必要。また、ＳＥＲＶＩＳプロジェクトの３号機は、当初の目的設定は理解できるが、現時点では再検討を要する。
- 個々の事業において、技術目標の設定根拠が明確でない箇所もあるため、設定根拠を明確にしていく指導が必要と思われる。
- 国際競争力を高めていくためには、個々の事業を束ねて、衛星製造・打上げ・運用・データ利用をワンパッケージで行っていく事がキーポイントとなると考える。その横断的な展開を誰がどのように行っていくのかを明確に示す事が必要になると考える。

３．総合評価

国全体の大きな宇宙政策に則り、日本の宇宙産業の発展に必要な施策が適切に実施されていると判断できる。

特に、小型衛星（ＡＳＮＡＲＯプロジェクト）、観測センサ（ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲ及びＨＩＳＵＩプロジェクト）で所期の成果を上げたことは、将来につながる技術であり評価できる。これらの施策は継続的に実施する必要があり、今後も同様の予算措置をすべきである。

一方、本施策の推進に当たっては、世界の宇宙産業の動向を見据え、海外の技術との比較などを通じて真に国際競争力のある技術であるかを評価し、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばしていけるよう、事業の過不足について常に検討を加えることが必要である。

具体的には、近年の情勢変化を踏まえ、ＳＥＲＶＩＳ－３号機及び、空中発射システムの意義については、再検討を要すると考えられる。

なお、衛星リモートセンシング分野における海外市場獲得には資源探査だけでなく農業、防災などさまざまな分野におけるサービスをパッケージで提供していくことが有効であり、今後は、幅広い分野におけるリモートセンシングデータ利用の拡大につながる取組が重要と考えられる。

加えて、衛星リモートセンシングから取得したデータの適切な取扱いについて、我が国としてのルールを確立することが必要である。

【肯定的意見】

- 幅広い範囲のプロジェクトを推進しており、成果を上げている。
- 世界の宇宙産業の拡大傾向に比して、日本の宇宙産業はこれに必ずしも同期していないことから、産業基盤強化や市場創出のための国による施策は必要であり、これに対応する国際競争力を見据えた低コスト、小型化、高機能化による人工衛星（センサ）およびその利用技術の開発、エネルギー政策推進のための宇宙関連技術の開発に関する施策は非常に重要であり、事業内容は妥当と考えた。
- 特に、小型衛星（ＡＳＮＡＲＯプロジェクト）、観測センサ（ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲ及びＨＩＳＵＩプロジェクト）で所期の成果を上げたことは、将来につながる技術であり評価できる。
- 政策に則り、日本の宇宙産業の発展に必要な施策が実施されていると判断できる。これらの施策は継続的に実施する事が必要であると考えるので、これらの施策に対して、経済産業省において今後も同様の予算措置をすべきである。

【問題点・改善すべき点】

- 予算を効率良く使っていくために、過不足について今後も議論していく必要がある。また、海外の技術との比較を通じて、真に国際競争力のある技術となっているのか

を評価する必要がある。

- リモートセンシングのデータポリシーの確立がリモートセンシング産業の国際進出には必要である。まず、日本のデータポリシーを確立する必要がある。将来、海外の複数国と日本製衛星システムの統合運用を目指す場合、これらの国のデータポリシーも関係が出てくる。このため新興国のデータポリシー策定にも日本が支援すべきである。
- リモートセンシングと資源探査
  資源探査のためにはリモートセンシングは不可欠である。一方、リモートセンシング側から見ると、資源探査以外に農業、防災など多くの利用が可能である。このリモートセンシングの汎用性が連携を必要とする。日本がパッケージ輸出により宇宙産業の強化を図る場合、利用技術の提供においては連携によりオールジャパン体制をとることが日本として効率的であり、また英知を結集できる。
- 今後、世界の宇宙産業の動向を見据えながら、その変化に柔軟に対応しながら、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばすような施策も必要と思われた。
- ＳＥＲＶＩＳ－３号機及び、空中発射システムの意義は、再検討を要する。
- 宇宙太陽光発電は、長期に及ぶ研究開発となることから、各種技術をスピンオフすることで理解を得る必要がある。
- 各事業間の連携強化が今後求められてくると考える。今回の評価においては個々の所行・要素においては、明確であり、順調に実施されていると判断できるが、事業間連携についても明確にしていいただきたい。

第５章　技術に関する事業評価

評点法による評点結果について

宇宙産業プログラムに関する事業評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は各事業の総合評価に併記した通りである。

１．趣　旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成１１年度に評価を行った研究開発事業（３９プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第９回評価部会（平成１２年５月１２日開催）において、評価手法としての評点法について、

⑴数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

⑵個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、

との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

⑴評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

⑵プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき、点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。

２．評価方法

- 各項目ごとに４段階（Ａ(優)、Ｂ(良)、Ｃ(可)、Ｄ(不可)〈ａ，ｂ，ｃ，ｄも同様〉）で評価する。
- ４段階はそれぞれ、Ａ(ａ)＝３点、Ｂ(ｂ)＝２点、Ｃ(ｃ)＝１点、Ｄ(ｄ)＝０点に該当する。
- 評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に〇を付ける。
- 大項目（Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ）及び小項目（ａ，ｂ，ｃ，ｄ）は、それぞれ別に評点を付ける。
- 総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

第５章　技術に関する事業評価

Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

新興国における導入が期待されるコストパフォーマンスの良い衛星システムを構築することは我が国の宇宙産業の国際競争力強化に非常に有用であり、小型、軽量、低コスト、短納期かつ高性能な人工衛星を開発するという事業目的は極めて妥当。こうした開発は民間での達成は難しく、国の事業としての必要性は高い。衛星システムの具体的な開発目標も、打上機会、開発期間、ペイロード質量などを踏まえ５００ｋｇ級を選択したことなど、適切に設定されている。

事業の成果としては、小型衛星バスを構築するとともに、地上分解能０．５ｍ未満の高性能光学センサを開発し、地球観測衛星「ＡＳＮＡＲＯ－１」を完成させ、軌道上で所期の目標を達成しており、高く評価できる。さらに、運用システムの自律運用の導入により運用コストを低減するという野心的な取組も達成している。

開発に際しては、民生機器・部品の採用に現実的な設計方針で望んでおり、性能目標についても柔軟に難度の高い方へ変更し、それを達成しているなど、適切に事業が遂行されている。

今後は、軌道上実証の状況を分かり易く定期的に公表するなどにより成果を示すことで、ビジネス展開につなげていくことが重要。また、得られた成果が十分な国際競争力のあるものになっているか自己評価を行うことや、ユーザー等の声も踏まえた実証運用とフィードバックを行い改良すべき点を検討することにより、今後１０年、２０年を目指した性能設定のあり方など、将来への課題を示すことが望ましい。

【肯定的意見】

- 所期の目標の全ての項目で目標を達成しており、評価できる。また、事業化と波及効果の見通しもある程度得られている点も評価できる。
- 自動自律かつどこでも運用の特徴を持つ光学衛星８機８日で全球を観測する目標は日本の宇宙技術を世界に示す意味で妥当である。
- 欧州製に比し高い性能の小型衛星を実現したことは高く評価できる。
- 国際市場参入を想定した国際競争力強化を目指し、小型化、軽量化、低コスト、短期開発による高性能衛星開発は、宇宙基本計画に照らしても重要であり、民間だけでの達成も難しく、国の事業としても必要性が高いと考える。このため事業目的は極めて妥当で、政策的位置づけも極めて明確である。目標は事業内容を反映し具体的に設定してあり適切で、その成果･目標の達成度は個別要素技術ごとに具体的に示してあり妥当である。また事業化・波及効果も小型衛星開発とその海外展開について柔軟な対応に基づき示され妥当である。

- 開発期間が８～１０年と長期化し、打ち上げ機会も少ない「大型衛星システム」、また、ペイロード質量が少ない「５０ｋｇ級超小型衛星」ではタイムリーな実用に供さないことから、「５００ｋｇ級小型衛星」は妥当な選択である。
- 開発に際して民生機器・部品の採用に現実的な設計方針で臨むなど、評価できる。
- スペースワイヤを採用した小型衛星バスを構築すると共に、地上分解能０．５ｍ未満の高性能光学センサを開発し、地球観測衛星「ＡＳＮＡＲＯ－１」を完成させ、軌道上で所期の目的を達成したことは、大いに評価できる。
- 新興国に対して、簡便に導入できるコストパフォーマンスの良い衛星システムを構築することは、宇宙産業に対する我が国の国際競争力の確保に非常に有用である。国として本事業を積極的に推進して行くべきであり、その意味で本事業実施に対する施策はとても適切であると考える。
- 衛星システム全体としての性能目標の設定やその実行、達成に対しては適切であり、５００ｋｇ以下という小型衛星システムを構築が完了し、市場へ普及させて行く段階まで達成できたことも、相互的に本事業が適切に遂行されたと判断できる。さらに性能目標の設定についても、設計時から改善し柔軟に設定目標を難度の高いほうへ変更し、それを達成していることも適切に事業が遂行されている証明といえよう。
- 運用システムに自律運用を導入するなど人的コストなどのトータルの運用コスト低下につながる野心的な試みも達成しており、評価できる。
- 事業化の観点からも、新興国が本衛星システムを導入した際に、我が国の小型衛星群とコンステレーション運用を提供することにより、単機運用では得られない高観測頻度や多角的な解析を提供できるなど、先行する競合国に対してのアドバンテージとなりえる、先端的かつ意欲的な取り組みであると評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- 所期の目標を達成した点は評価できるが、得られた成果が現時点で十分な国際競争力のあるものになっているのかについての自己評価を加えることにより、今後に残された課題を示すことが望ましい。
- 事業化については「期待」が「実現」となることが今後の課題である。
- 今後、もし可能なら、より広いユーザーの利用による評価とそのフィードバックを実施し、改良点や改善点を検討することも必要と考えられた。
- 海外展開、国際市場参入には、打ち上げコスト面からの検討も必要と考えられ、事業化と合わせた検討も必要であろう。
- 高性能光学センサの開発に関して、バンドが可視・近赤外と示されているが、国際市場を想定したときは他センサとの波長帯の比較検討、さらにはステレオ視機能についての検討を深めることも必要と考えられる。
- 概ね成功と言えるが、活動の成果が見えない。特に、衛星開発運用活性化活動の具

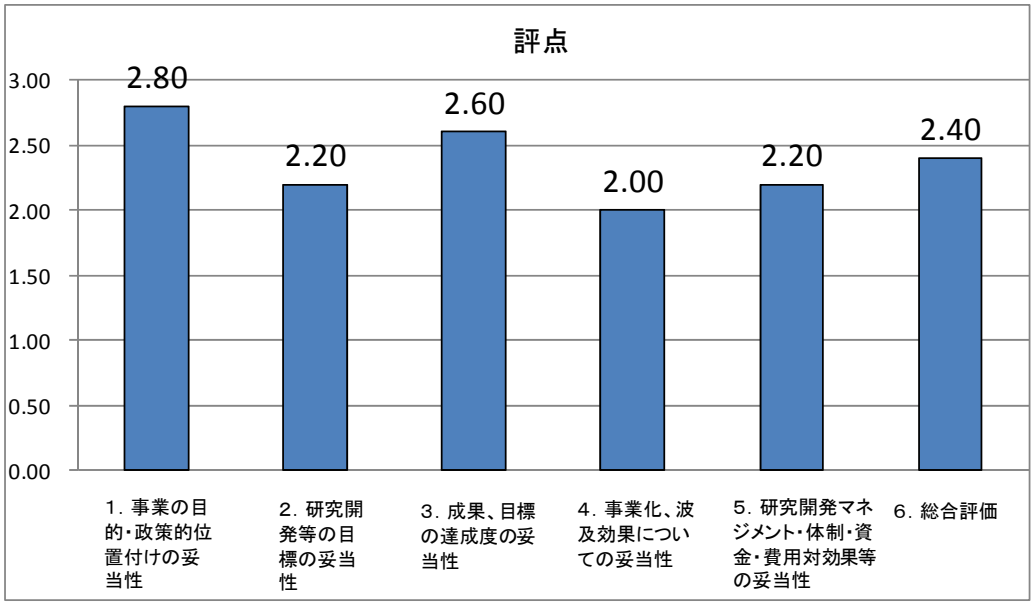
体的内容、次号機への反映事項もあるはずである。

- 軌道上実証として、２０１４年１１月の打ち上げ後の活動内容も見えない。バス機器、ミッション機器などの実績を分かり易く定期的に公表し、ユーザー（国内外の宇宙機購入機関）へ成果を示す事で、ビジネス展開につながる。
- ＡＳＮＡＲＯ－２（ＳＡＲ衛星）との協調運用の可能性があるので、電源等寿命に関わる部分には特に注意した運用を望む。ＡＳＮＡＲＯ－１（光学衛星）の寿命延長が見込めない場合には、ＡＳＮＡＲＯ－２との仮想協調運用を想定したデータ取得を望む。いずれにしてもユーザー（ミッション利用機関等）からの要求が必須である。
- 平成２０年から本事業を実施していることに鑑み、重量・サイズ・光学機器の各仕様の設定については妥当なのかもしれない。しかしながら、本システムの競争力を担保するためには、今後１０年、２０年を目指した性能設定をすることも必要なるのではと考える。

評点法による評点結果

（A. 小型化等による先進的宇宙システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	2	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	2	2	2	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.00	1	2	3	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6. 総合評価	2.40	2	2	2	3	3



Ｂ．超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

小型、低コスト、かつ高性能な合成開口レーダ衛星の開発は我が国宇宙産業の国際競争力強化に極めて重要であり、事業の目的・政策的位置付けは妥当である。

開発目標として、光学衛星「ＡＳＮＡＲＯ－１」の成果を活かすよう、ＡＳＮＡＲＯ－１のバスに適合した設計としてバスの共通化を図り、低価格化と５００ｋｇ級衛星のシリーズ化を目指している点など、適切に設定されている。

研究開発の進捗は、合成開口レーダの心臓部とも言えるパルスＴＷＴＡを設計し、小型、省電力で分解能１ｍ未満という高性能の小型Ｘバンド合成開口レーダの設計・開発が完了しているなど、部品調達の遅れによる継続中のものを除けば個別事項は概ね達成されており、順調な進捗状況であると言える。

今後、実施される予定の宇宙実証においては、衛星開発者目線とならないよう、ユーザーとデータ利用方法を想定して行うようにすべきである。さらに、これまで研究開発を実施したＬバンドＳＡＲ（ＰＡＬＳＡＲ）との観測特徴の比較や、ＡＳＮＡＲＯ－１衛星との協調観測についても検討すべきである。

また、研究開発終了後に海外展開を実現していくには、システム全体でのコスト等も重要であり、事業Ｃ「小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発」と合わせた検討や、運用技術者育成の検討も必要と考えられる。

開発・製造の短縮化については、バス機器製造から試験完了までの期間について１年という数値が達成できるのか検証し、未達の場合には今後の課題を抽出することが求められる。

今回開発するＴＷＴＡは単体の輸出も可能な競争力のあるものと考えられ、従来のものと比較しどの程度小型・省電力化が達成できたかを数値で示すことが望ましい。

【肯定的意見】

- 小型標準バスにＸバンドレーダを搭載したＡＳＮＡＲＯ－２を開発し、宇宙実証に向けた運用準備に入っており、所期の目標をほぼ達成している点は評価できる。また、パルスＴＷＴＡの設計も終了しており、順調な進捗状況であると言える。
- 国際競争力を確保するために衛星システムの製造試験期間を２年間に短縮する方針、およびミッション柔軟性を持たせた小型標準バスＮＥＸＴＡＲの方針は妥当である。段階的に順調に進んでいることが認められる。
- 各国が１ずつ持ったバーチャルコンステレーションの構想とそれに向けた海外への事業拡大の試みは妥当である。この計画を可能にしたバス／ミッション機器のこれまでの開発は評価できる。
- 合成開口レーダの小型化、開発低コスト化は、国際市場への参入を想定するならば極めて重要であり、小型光学衛星を組み合わせた高頻度観測システム構築への期待も高く、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。また、目標は開発、

設計、試験、ロケットへの適合性などの個別事項が設定されており、極めて適切である。個別事項の成果･目標の達成度は、部品調達の遅れによる現時点で事業継続中のものを除けば、概ね達成されており、衛星システムのパッケージ販売の事業化や地球観測データ利用事業拡大への波及効果が期待できる。さらに、ＡＳＮＡＲＯ－１の成果などを適用した研究開発マネジメント･体制などは、適切と考えられる。

- パルスＴＷＴＡを設計すると共に、分解能１ｍ未満を小型Ｘバンド合成開口レーダとして設計したことは、ＳＡＲの利用価値を高めるもので評価できる。目標も概ね世界的技術レベルで妥当である。
- ＡＳＮＡＲＯ－１（光学衛星）とバスを共通化したことは、５００ｋｇ衛星のシリーズ化に有益である。
- イプシロンロケットで早期に打ち上げる計画は、光学衛星との協調運用の可能性もあり、推進するべきである。
- 我が国の宇宙産業の国際競争力を確保する為にも、合成開口レーダの小型・省電力化が必須である。この観点から、これまでに開発をしてきた光学衛星のＡＳＮＡＲＯ－１と共通のバスを使用できる仕様の設計が完了したことは評価が出来る。
- 合成開口レーダを使用する際の心臓部といっても良い、パルスＴＷＴＡの小型化・省電力化に向けた開発設計が完了したことは、とても評価できる。ＡＳＮＡＲＯ－２に適合した設計となっていると思われるが、今後の衛星の電力リソースの増大を考えると、搭載機器の型化・省電力化は必須であり、ＴＷＴＡだけでも勝負可能な製品となるのではないだろうか。
- 短納期の仕組みについて、今回は部品調達の点で未達となっているが、即応が可能と判断できるバス機器製造着手から機器試験完了まで 1 年で実現できる仕組みを構築できることは、競合国に対するアドバンテージとなると考えられる。

【問題点・改善すべき点】

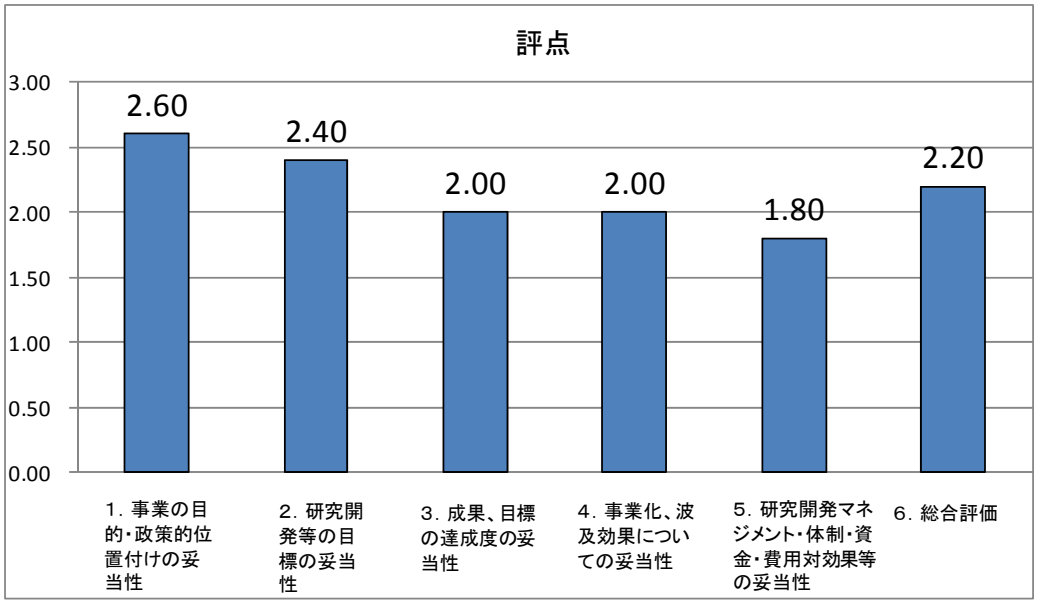
- プロジェクトが終了する平成２８年度の最後に打上予定となっており、宇宙実証の成果は平成２９年度以降になる計画となっているが、平成２８年度中に宇宙実証の基本的な成果が得られることが望ましい。
- 海外展開、国際市場参入には、事業Ａのように、打ち上げコスト面からの検討も必要と考えられ、事業Ｃと合わせた検討も必要と思われる。
- 新興国を想定した衛星システムパッケージ販売においては、運用技術者育成の検討必要性も考えられる。
- これまで継続して研究開発を続けてきたＰＡＬＳＡＲ（Ｌバンド）の技術ノウハウを想定し、これとＸバンドＳＡＲの観測特徴についての検討も考えられた。
- ユーザー（ミッション利用機関等）をある程度確定すべきである。運用が衛星開発者目線となり、ハードの健全性など単調となる。

- ユーザーによるデータ利用方法も、ビジネス（衛星売り込み）に寄与する。また、運用にモチベーションが保てる。
- 軌道上のＡＳＮＡＲＯ－１（光学センサ）を丁寧に運用し（寿命を延ばし)、協調観測が望まれる。
- ＴＷＴＡの開発について、従来器と比較しどの程度小型・省電力化が達成できたかを数値で示すべきである。
- 短納期の仕組みで未達となった、他国からの部品調達に関しても、そのリスクを考慮した短納期の仕組みが求められてくると考える為、その当たりの考慮も今後頂きたい。
- 本当に１年でバス機器製造から試験完了までを完了できるのか、そのあたりの仕組みだけでなく、実効的に１年という数値が達成できるのかも検証をして行くことが求められると考える。

評点法による評点結果

（B. 超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.40	2	2	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.00	2	2	1	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.00	2	2	2	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	1.80	1	2	2	2	2
6. 総合評価	2.20	2	2	2	2	3



Ｃ．小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

（複数衛星統合運用のための統合運用システム）

１台のシステムで複数の異なる人工衛星の運用が出来ることは、大幅なコストダウンを可能にすることに加え、既存の衛星も取り込んだ低コストでのコンステレーション化も可能にするものであり、ＡＳＥＡＮ各国への寄与や災害監視などの地球観測に資するものである。

統合運用システムを開発するための要素技術に関する全ての項目について目標を達成していることは評価できる。また、統合衛星運用により開発費・運用経費を削減できる見通しを得ており優れている。

一方で、優位性を示す数値データがほとんど示されておらず、国際競争力を判断することが困難であり、事業化・波及効果がやや不透明である。

本開発の成果の普及には、そのニーズは様々な分野に及ぶ可能性があり、ユーザーに有効な使い方をアピールするなどの取組が必要と考えられる。

（画像自動判読システム）

大量の衛星データから必要な情報をコンピュータに抽出（自動判読）させる手法は、人工衛星の高度化・機数増が進む中で今後ますます必要となると考えられ、有用な研究開発である。

本事業で画像自動判読システムの枠組みとその要素システムを構築し、操作感の向上も含め実用に耐えうる処理能力を有したシステムを構築したことは評価できる。

本事業の成果の優位性をアピールする観点からも、処理全体の時間の短縮や自動判読の正確性の向上について、これまでのものとの比較をすることが望ましい。

今後、本事業の成果の普及にあたっては、分野ごとのニーズに応じた改良や、衛星毎のセンサの仕様の差異に応じた対応等が必要になると考えられる。

（複数衛星統合運用のための統合運用システム）

【肯定的意見】

- 統合運用システムを開発するための要素技術に関する全ての項目について目標を達成していることは評価できる。また、統合衛星運用により開発費・運用経費を削減できる見通しを得ており優れている。
- 最大３０衛星、最大５０地上局の拡張性は妥当である。
- 我が国がノウハウを有する衛星システムによるコンステレーション衛星運用と、関連衛星システムの統合運用システム開発は、特にＡＳＥＡＮ各国への寄与という点において、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。また、統合運営システムとその要素技術に対しては、目標設定がされており、目標の妥当性は極めて適切である。これに対する成果･目標の達成度は、項目ごとに具体的に達成されて

おり、さらに、システムのコスト面の検討もされ、統合運用システム利用のビジネス展開が期待される。

- 災害監視などの地球観測は、数機の大型衛星のみならず、複数の小型衛星で実施することも有効といえる。これら複数衛星の統合運用技術を確立したことは、評価できる。特に、５００ｋｇ級衛星を海外に売り込む際、運用も含めた有効システムになり得る。
- 各衛星の地上系システムを統合し、１台のシステムで複数機の運用が出来ることは、衛星個々にシステムを準備する必要がない為、大幅なコストダウンが期待できる。また、既存の衛星も当該システムに取り込むことが出来れば、低コストでのコンステレーション化も可能である意欲的な取り組みであるといえる。
- 既に、技術試験衛星や小型衛星、超小型衛星などの多種の衛星との接続試験も実施しており、近い将来での実現性が確実に見える。

【問題点・改善すべき点】

- 運用システムの研究開発という内容からやむを得ないかも知れないが、成果の優位性を示す数値データ（グラフなど）がほとんど示されていないので、国際競争力を判断することが困難であり、事業化・波及効果がやや不透明である。
- ＡＳＥＡＮ各国における本衛星システム構築の支援あるいはビジネス展開には、運用技術者育成の検討の必要性も考えられる。
- ニーズはさまざまな分野に及ぶ可能性があり、ニーズ毎の個別の適用についての検討も必要と考えられた。
- ユーザー（ミッション利用機関等）にとって、複数衛星が活用できる有効な使い方をアピールできるはずである。まずは、国内ユーザーを増やす必要がある。
- 一時的な試験運用にとどまらず、定常的な活動にすることが望まれる。
- 各国の衛星をネットワーク化し、高い撮像頻度と迅速な情報提供を提案しているが、いかにこの統合運用システムに参加してもらうか、その戦略を今後どのように立てて実施して行くかが鍵となると思われる。

（画像自動判読システム）

【肯定的意見】

- 光学画像とＳＡＲ画像から地物や土地被覆を自動的に判読するシステムを開発するための全ての要素技術の目標を数値目標も含め達成しており、評価できる。
- 具体的な地物や被覆の判読結果の例やｍＡＰ値も示されており、光学とＳＡＲの画像の特徴を示す貴重なデータとなっている。
- 地物抽出サービスの第一段階として画像自動判読システムを開発しようとした目標設定は妥当である。

- 本事業で画像自動判読システムの枠組みとその要素システムを構築したことは評価できる。
- ユーザーインターフェースにおける操作感の向上などの成果は評価できる。
- 宇宙基本計画に基づく、衛星利用のアプリケーション開発、多様化推進、利用に伴う分析方法の高度化は、ユーザーサイドから極めて重要であり、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。また、地球観測衛星からの高分解能画像データや合成開口レーダ画像データにおける対象物識別、土地被覆判別のシステム開発の要素技術に対して目標設定がされており、目標の妥当性は極めて適切である。また、これに対する成果・目標の達成度は具体的に示され、事業化のロードマップや情勢分析なども示され、事業化の明瞭な見通しがある。
- 大量な衛星データから必要な情報をコンピュータに抽出（判読）させる手法は、衛星が高度化・複数化することで、今後ますます必要となり、有効な研究である。
- 画像の自動判別の精度を高めていくことは、ユーザーサイドの負荷を軽減し、利用に専念が出来る為、有用な研究であると思わる。
- 処理時間がかなり短くなっており、即応的な実用に耐えうる処理能力を有したシステムの構築ができたことは、評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- 判読結果の精度は改善の余地があると判断されるので、これをさらに向上させるための方策を提言してほしい。
- 事業化における判読サービスではユーザー要求が異なるため、個別のユーザー要求に対応しやすい画像自動判読システムの改良が必要であろう。
- 光学／ＳＡＲの統合利用の考え方は、雲域あるいは夜間災害の緊急時などに対する利用を考えるべきである。建物、道路は時間単位では変化しないため日中の光学観測で情報が集められるのに対して、乗用車は夜間のＳＡＲ観測で判読が可能である。
- 土地被覆判読において光学で６クラスで９７％、多偏波ＳＡＲで雲を除く５クラスで８０％の精度は通常より高い。これは水域、草地、森林、都市部、裸地が明瞭に区別できる対象地域で分類した結果と考えられる。
- 「問題点の分析」で書かれているように、学習データの蓄積が判読の鍵となる。特に対象とするセンサのタイプが追加されるとそのセンサのための学習データが必要となる。
- ニーズの多様化への対応として、分野ごとのアプリケーションのさらなる改良･高度化も今後の検討事項として指摘できる。
- 判読速度は計算機の能力向上で必然的に高まるので、正確さに重点を置く必要がある。今回の成果は、ユーザーを満足させるレベルなのだろうか。
- 衛星毎にセンサの仕様が異なり、判読に影響があると考えられる。その傾向を明確

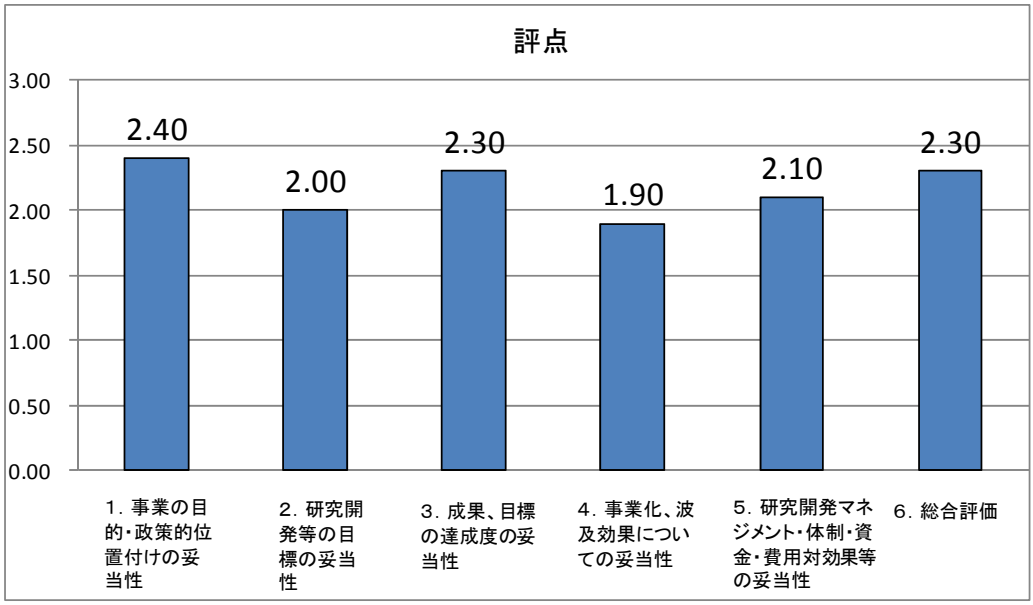
にしておくことが必要である。

- 光学とＳＡＲでは得意とする領域が異なる為、目的に合わせて使い分けるべきである。また、光学／ＳＡＲ統合判断の結果は、ｍＡＰ値が光学単体より低下をする為、あえて統合判読をすることは必要がないのではないかと考える。
- 処理時間は早ければ早い方が良いのだが、過去との比較があってこそ、本事業のアドバンテージを示せると考えられる。目標設定の根拠にもなるので、これまでの実績との比較をされることが望ましい。
- 個別運用ではなく、衛星・地上システムなどとワンパッケージでセールスすることで、新興国への衛星システム導入のセールスポイントになる為、それらとの協力もご検討いただきたい。

評点法による評点結果

（C. 小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	3	2	3	2	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.00	2	1	3	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.30	3	2	3	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.90	2	1	3	1	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.10	3	2	2	2	3
6. 総合評価	2.30	3	2	3	2	3



D．**可搬統合型小型地上システムの研究開発（プロジェクト）**

（総合評価）

画像高速処理システムの開発と先進地上システムの開発は、画像の高速処理や撮像計画策定の自動化を可能とすること等により、リモートセンシング衛星の運用の飛躍的な省力化・低コスト化を実現するものであり、国際競争力強化の観点から非常に重要。その成果は ASNARO-1 衛星の実証運用に活用されるなど、所期の目標を達成できたことは評価できる。

小型の可搬統合型地上システム・画像統合運用システムの開発については、通信インフラが不十分な地域での活用や災害時等のバックアップとしての活用が想定されるが、普段のメンテナンスコストが必要になるなど課題も多く、事業化・波及効果が見込めないのではないかという意見もあった。

【肯定的意見】

- 多くの要素技術項目の目標を全て達成し、小型地上システムを開発しており、評価できる。また、費用対効果の具体的な数値も明確に示されており、優れている。
- 本事業は宇宙インフラのパッケージ輸出における一構成要素であり、国の事業として妥当である。
- 撮像注文を衛星飛来直前まで可能にしたシステム開発は評価できる。
- 宇宙基本計画の宇宙機器産業の国際協力強化の観点において、衛星追跡管制、データ受信高速処理の地上トータルシステムの小型化、低コスト化、高性能化、運用省力化は、ユーザーサイドにおいて、あるいは国際競争力の点から非常に重要となり、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。研究開発の目標は、要素技術ごとに具体的かつ定量的に設定されていて、極めて適切である。これに対する成果・目標の達成度は数値的に詳しく示され、目標を大きく上回っていた。また、事業化の事例や費用対効果の検討結果が示され、事業化の明瞭な見通しが考えられる。
- 通信インフラのない地域（特に海外）向けとして有効である。
- 小型の可搬統合型地上システム・画像統合運用システムを構築できたことは、固定の地上システムを構築しなくてもよく、すぐにユーザーが利用できる環境を整えることが出来るため、我が国の小型衛星システムを、インフラを含めてワンパッケージで納入出来る為、新興国に対する輸出を促進する為の必要不可欠な補完システムとなる。

【問題点・改善すべき点】

- 国際市場においては新興国が中心となると考えられるが、その場合、各国の(社会、地理的)状況などに対応した改良の可能性の検討も必要と考えられる。
- メンテナンスのコストや運用技術者育成についての検討も考えられる。
- 日本のように通信インフラの確立した地域での目的には適していない。大災害時に

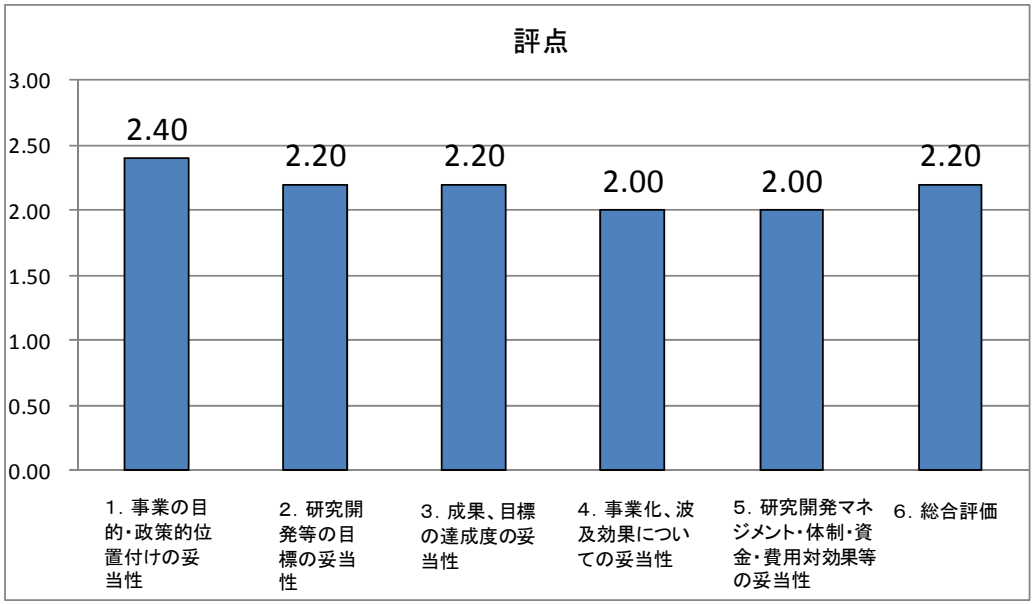
利用価値がありそうだが、エンジンなどは普段のメンテナンスが必要である。海外においても基本的にはサブ局扱いとなる可能性が高い。

- ＡＳＮＡＲＯ－１などの日常的な運用に使用されないのは、課題があるからと推測する。それらを明らかにして、より使い易いシステムにしてほしい。
- ＡＳＮＡＲＯシリーズとのインフラパッケージとするとあるが、今後どのようにセールスを展開していくか、そのビジョンを示すことが必要である。

評点法による評点結果

（D. 可搬統合型小型地上システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	2	3	3	1	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	2	2	3	1	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	2	2	3	1	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.00	2	2	3	0	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	2	2	2	1	3
6. 総合評価	2.20	2	2	3	1	3



Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

ＡＳＴＥＲについて１５年間運用を継続しているというのは驚異的な成果であり、長期にわたって正常な運用を続けてきたことは高く評価できる。この間、ＡＳＴＥＲデータの継続的・安定的な利用と蓄積を可能にすることにより、石油資源の探査等において多くの成果をあげてきたと言える。

今後は、衛星リモートセンシングデータに対するニーズの拡大や海外の競合するリモートセンシング衛星の状況を踏まえて、アーカイブデータも含め、他分野での活用など、より広いユーザーに活用してもらう方策を検討すべきである。

さらに、本システムで蓄積したデータの評価等を踏まえ、次世代のセンサ開発に是非つなげていただきたい。

【肯定的意見】

- ＡＳＴＥＲの軌道上運用について、その動作と性能の確認や校正などを行い、正常な運用を続けてきたことは評価できる。
- センサ開発に成功したＡＳＴＥＲの継続運用として必要な事業である。
- 金属資源の開発に利用されるなどＡＳＴＥＲデータの有効性は確認されている。
- ＡＳＴＥＲおよびＰＡＬＳＡＲは運用を継続中であり、これまで多くの情報、成果を出し、それらは蓄積されてきており、データの継続、比較利用の観点から重要で、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。目標は、データの継続した安定利用と蓄積にあり、要素技術が具体的に設定されていて、極めて適切である。これに対する成果・目標の達成度は要素技術ごとに示され、妥当な成果と目標達成がなされている。また、事業化･波及効果は資源遠隔探知技術の開発に資する情報を提供しており妥当と考えられる。
- ＡＳＴＥＲの後期運用の継続は、長期間トレンドデータ取得の貴重な機会であり評価する。
- 資源・エネルギーの円滑供給のための、石油関連資源の探査のために必要不可欠な観測システムであり、我が国の資源開発に重要な役割を果たしている。また、定常運用５年と後期運用５年に加え、さらに後期運用を継続しており、１５年間運用を継続しているというエクストラサクセスまで達成し、驚異的な成果である。
- 別の評価案件（Ｆ：石油資源遠隔探知技術の研究開発）ではあるが、本観測システムの情報により実際の油田開発や鉱区開発につながっており、システムの意義や成果を最大限に評価できる。
- 本システムで蓄積したデータを是非次世代システムの開発につなげて頂きたい。

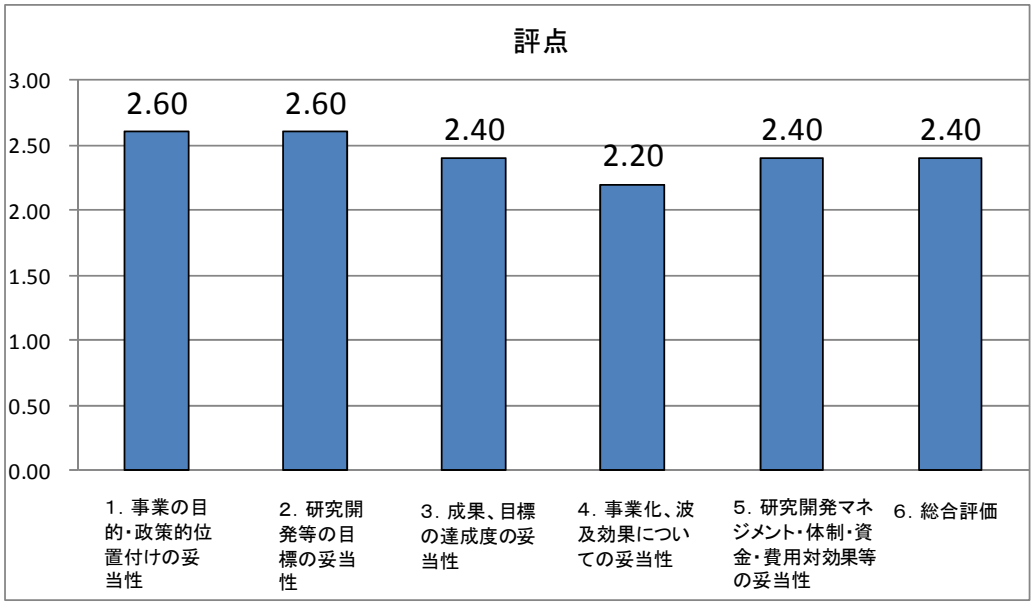
【問題点・改善すべき点】

- 国際的な競争力の観点からの自己評価を示し、今後のプロジェクトの推進に反映するべきである。
- アーカイブデータも含めさらなるユーザー開拓の検討の必要性。
- データの将来の新規センサ開発へ反映。
- １５年間の成果を俯瞰した取得データを評価し、これから新規開発する機器への反映事項等を提言できると良い。
- ＡＳＴＥＲは設計寿命年度を大幅に超えて後期運用をしており、ＰＡＬＳＡＲも既に運用を終了しており、次世代のレーダを含む観測システムの構築が望まれる。

評点法による評点結果

（E. 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム、次世代合成開口レーダ等の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	2	2	2	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	2	2	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.40	2	2	2	3	3
6. 総合評価	2.40	2	2	2	3	3



Ｆ．**石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）**

（総合評価）

石油ガス田の開発や鉱区取得につながった例など、ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲデータを石油ガス資源の探査等に利用して成果をあげている点は高く評価できる。

また、ＡＳＴＥＲ　ＧＤＥＭの整備、オイルスリックデータベースなど、ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲの長期観測データから様々なプロダクトを作成し利用者に配布しており、関連分野の産業活動及び科学研究に大きく貢献している。

なお、ＡＳＴＥＲは引き続き多くの分野での活用が期待され、今後も運用を継続すべきであるが、その運営についてはより省力化、効率的運営を検討すべきである。

米国のＬＡＮＤＳＡＴでは２００８年よりデータの無償配布が開始されるなど、海外衛星においてはデータの配布ポリシーが近年変更になっている。ＡＳＴＥＲ等で取得したデータについても、より広い分野での活用が期待され、今後はその配布を無償化するなど、ユーザーの拡大に向けた見直しを行う必要がある。

また、現在開発中のハイパースペクトルセンサの観測データの処理についての研究開発は、本事業の経験を十分に踏まえて推進するべきである。

【肯定的意見】

- ＡＳＴＥＲ／ＰＡＬＳＡＲデータを石油ガス資源の探査に利用して成果をあげている点は高く評価できる。
- 平成２３年度の評価報告書では、「国民に対する説明は『宇宙産業プログラムに関する施策・事業』のすべてにおいて必須である。特に、資源探査における衛星データ利用は、本施策・事業の中でも重要な部分であるため、その費用対効果の定量的説明は困難であるといえども、何らかの方法で国民にその意義を理解してもらう説明の工夫が必要であろう。」と述べている。これに対して「Ｆ－５－４　費用対効果」で、すべてを定量的に説明することが難しい中、モデル値、経費削減効果の試験結果などで定量的に説明していることは高く評価できる。
- 様々な全球プロダクトを作成、公開しており、科学研究および専門業務に対する貢献は極めて高い。例えば、ＰＡＬＳＡＲ全球シームレスモザイク画像、ＡＳＴＥＲ ＧＤＥＭの整備、オイルスリックデータベース、ＡＳＴＥＲ緯度経度１度オルソ画像、全球分光放射率マップなどである。
- 宇宙基本計画の宇宙開発利用の推進において、石油ガスなどの資源･エネルギーの円滑な供給のために、ＡＳＴＥＲやＰＡＬＳＡＲデータの継続的利用技術開発および地上システムの安定運用などは重要で、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は高い。目標は利用手法やアーカイブシステムなどを中心に要素技術が設定されていて適切である。これに対する成果・目標の達成度は、要素技術ごとに具体的に多くが示され、妥当な成果と目標達成がなされている。また、事業化･波及効果は事例やデータで示されて妥当と考えられる。

- ＡＳＴＥＲ、ＰＡＬＳＡＲの長期間観測データを利用者に、各種形態で配布可能にしたことは評価できる。
- 鉱物・石油に対する画像の解析結果を基に開発を開始・中止を判断できるデータを提供できる校正システムを構築し、また、実地でその解析結果を検証できるシステムを開発し、事業者がそれらを基に事業を実施し油ガス田の開発や鉱区取得、あるいは計画策定につながったことは非常に有益な成果である。事業者開発の実施の是非を判断できる合理的な結果を示せることは、事業者のリスースの確保・効率的執行とリスク低減の観点から、非常に有用である。今後も是非進めていただきたい。

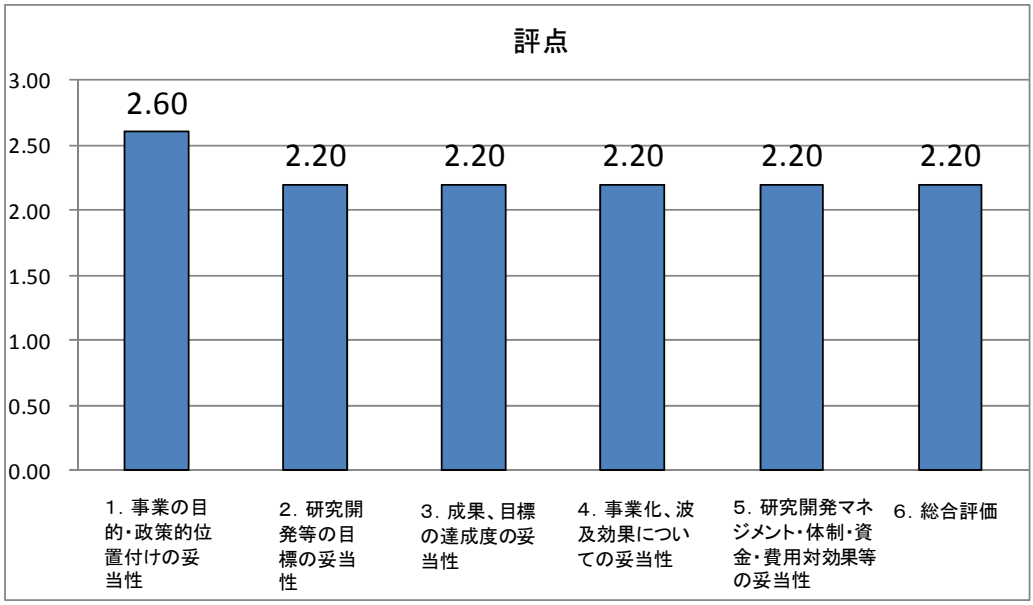
【問題点・改善すべき点】

- データの配布数が減っており、競合する無料のデータも出ているとのことなので、最近の国内外の動向を調査し、今後の運用に反映させる必要がある。
- 利用(ユーザー)のより多分野への拡大の試みは続けるべきと考えられる。
- 今後の継続運営についてはより省力化、効率的運営の検討も必要と思われる。
- 後継センサとなるＨＩＳＵＩ（ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサ）の観測データ処理に関して提言すべき。
- 米国のＬＡＮＤＳＡＴも２００８年よりデータの無償配布が開始されるなど、海外衛星によるデータの配布ポリシーが近年変更になってきている。
- 日本が管理しているデータの配布方法を再考する時期に差し掛かっていると思われる。例えば後期運用に移行した衛星、あるいは後継機の運用開始に伴って、これまでの衛星が取得したデータ（例えばＡＳＴＥＲ）などの配布を無償化するなどの施策が望まれる。
- 開発の成功だけを示されていたが、開発を中止する材料になることも非常に重要な情報である。成功例だけでなく、本データを利用しての開発中止例も合わせて示すべきで、双方が揃ってこそ、本事業の高い有用性がアピールできるものと考える。

評点法による評点結果

（F. 石油資源遠隔探知技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	2	2	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6. 総合評価	2.20	2	2	2	2	3



G．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

資源探査や環境観測をはじめとする様々な分野で高スペクトル解像度観測への期待は高く、本事業の目的・政策的位置づけは妥当である。

これまでの研究開発により、ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサの設計が完了し、プロトフライトモデルの組立が開始されており、宇宙実証への実現に向け、着実に進展している。

現在予定されている国際宇宙ステーションへの搭載を着実に推進し、早期に宇宙実証を行うことが望まれる。その際、観測データの大容量化が想定されるため、データ処理、分析手法について検討する必要があると考えられる。

なお、本開発センサの性能について、要求スペックの記述はされているが、性能向上による具体例がもっと分かりやすい形で提示されることが望まれる。

【肯定的意見】

- システムの目標性能達成の可能性の確認、プロトフライトモデル組立の開始、宇宙実証のための機器実証部の設計・製造について目標を達成しており、評価できる。
- ハイパースペクトルセンサ開発の技術的目標設定および達成度は問題がない。
- 資源探査や環境観測をはじめ災害監視などの分野において、高頻度観測、高スペクトル観測への期待は高く、今後、センサの技術確立に対する期待という点において、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。システム設計やプロとフライトモデルなどの要素技術に対して具体的に目標設定がされており、目標の妥当性は極めて適切である。これに対する成果･目標の達成度は、具体的に詳しく示されており、国内外のプログラムの提案および販売、事業化見通し、市場規模検討、波及効果の検討なども示され、さらに、研究開発計画マネジメントなども詳しく示されており、今後の展開が期待される。
- ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサを設計製造、プロトフライトモデルの組立を開始したことは、宇宙実証への実現に向け、評価できる。
- ＡＳＴＥＲの後継というべきセンサの開発であり、必要不可欠な研究開発である。性能設定も既ユーザーの意見を取り入れており、必要な手当てがなされた研究開発となっている。ＡＳＴＥＲも長期の後期運用に入っており、本センサの実用化が喫緊の課題であると認識している。
- 資源探査のみならず本センサが環境観測、災害監視等の社会保障に資することは、明確であり、国の事業として実施することが妥当であり、このまま実用化に向けてこのまま進めて頂きたい。

【問題点・改善すべき点】

- 現時点では具体的な実験データはほとんど示されていないので、今後の成果に期待

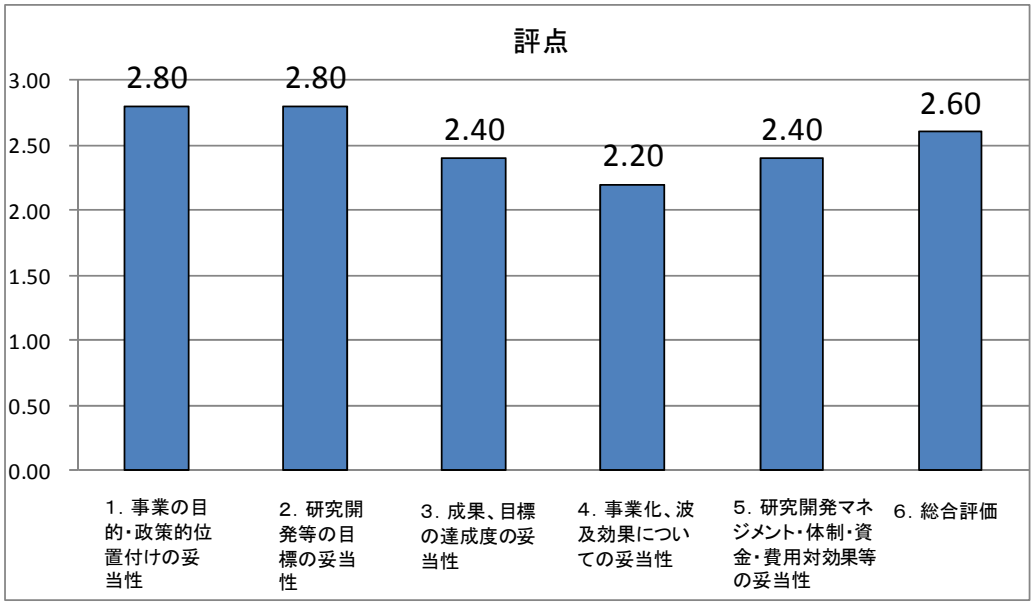
せざるを得ない。

- ハイパースペクトルセンサを事業化するには、日本の衛星打ち上げの継続性の確保および海外市場開拓のための国が主導する環境整備などの条件が必要である。前者が困難である現状では、後者の海外市場開拓に官民一体となり取り組むべきである。もちろん、継続的な技術的優位性の維持は必要である。
- 将来の複数衛星へのセンサ搭載の可能性の検討。
- 観測データの大容量化が想定されるため、そのデータ処理、分析手法などの検討の必要性が考えられる。
- 宇宙ステーション（日本実験棟（きぼう）の船外実験プラットフォーム）へ搭載するための周辺機器（インターフェース機器）の製作を促進する。（両センサの仕様、船外プラットフォームの仕様は確定しており、インターフェース機器に新規開発要素はない）
- ＡＬＯＳ３の計画中止に伴い、ＩＳＳでの実証を計画されているようであるが、これが担保されているか不明確である。既にＩＳＳ搭載が決定しているのであればよいが、ＪＡＸＡの実施している革新的衛星技術実証プログラムなどを使い、早急に実証されることが望まれる。
- 本開発センサの性能について、要求スペックの記述はされているが、性能向上による具体例がもっと分かりやすい形で提示されることが望まれる。このようなものは性能が高ければ高いほど良いのは理解できるが、具体的に本要求スペックを達成すると、例えばＡＳＴＥＲと比較して何がどのように分かるようになるのかを具体的に示して行くことが望まれると考える。

評点法による評点結果

（G. ハイパースペクトルセンサ等の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	2	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.80	2	3	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	2	2	2	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	1	3	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.40	2	2	3	2	3
6. 総合評価	2.60	2	2	3	3	3



H．**次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）**

（総合評価）

高頻度観測、高スペクトル観測が必要とされる資源、環境、災害などの分野において、ハイパースペクトルセンサＨＩＳＵＩへの期待は高いと考えられ、その利用に必要となるライブラリデータの整備、校正・データ処理技術や利用手法の開発を行う本事業の目的・政策的意義は妥当である。

研究開発の体制は妥当であり、ハイパースペクトルデータの利用が期待されるさまざまな分野の手法開発も順調に進んでいる。特に金属資源探査において岩石鉱物のスペクトルデータを整備し、解析技術を開発したことは評価できる。

我が国は、ハイパースペクトルセンサのハード開発及び利用技術のノウハウの面で国際的に優位に立てるポテンシャルを持っていることから、早期に宇宙実証を行うことが重要である。なお、宇宙実証の実施にあたっては、ＡＳＴＥＲ、ＰＡＬＳＡＲなどの経験を適切に活用すべきである。

また、プロダクトの配布方法等の検討を含め、将来の利用拡大に向けた取組を引き続き推進していくべきである。

【肯定的意見】

- ＨＩＳＵＩ運用前の準備として、ＨＩＳＵＩシミュレータ、鉱物スペクトルライブラリの作成、エネルギー資源、農業、環境等の利用技術の開発、校正、データ処理技術の開発、地上システムの設計などの要素技術の目標を挙げ、そのいずれにおいても目標を達成していることは評価できる。また、事業化についても見通しを得ている。
- 研究開発の体制は妥当であり、ハイパースペクトルデータの利用可能な様々な分野の手法開発も順調に進んでいるとみられる。特に金属資源探査において岩石鉱物のスペクトルデータを整備し、解析技術を開発したことは評価できる。
- 高頻度観測、高スペクトル観測が必要とされる資源、環境、災害に関する応用分野において、ハイパースペクトルセンサＨＩＳＵＩへの期待は高いと考えられ、利用技術開発という観点において、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は極めて高い。解析基盤、分野毎、校正・データ処理、地上システムなどの要素技術に対して具体的に目標設定がされており、目標の妥当性は極めて適切である。これに対する成果は、具体的に詳しく示されており、事例による事業化の構想、見通しおよび波及効果についての検討なども示され、さらに、研究開発計画とそのマネジメント体制なども詳しく示されており、それらは極めて適切で妥当である。
- ハイパースペクトルセンサ及びマルチスペクトルセンサの宇宙実証を前提としてデータ活用のあらゆる準備をしていることは、評価できる。
- 既に設計寿命を超えて運用中のＡＳＴＥＲの後継機のＨＩＳＵＩにより得られるデータの運用システムを構築する物であり、特に鉱物探査・石油探査等に適応する

など開発リソースの効率的運用が可能となり、非常に重要である。

- 鉱物・石油に対する画像の解析結果を基に開発を開始・中止を判断できるデータを提供できる校正システムを構築し、また、実地でその解析結果を検証できるシステムを開発し、事業者がそれらを基に判断可能な事例が示せたことは、今後の開発事業者の事業展開の効率化を考えた際に非常に有用な結果が得られたものと判断できる。

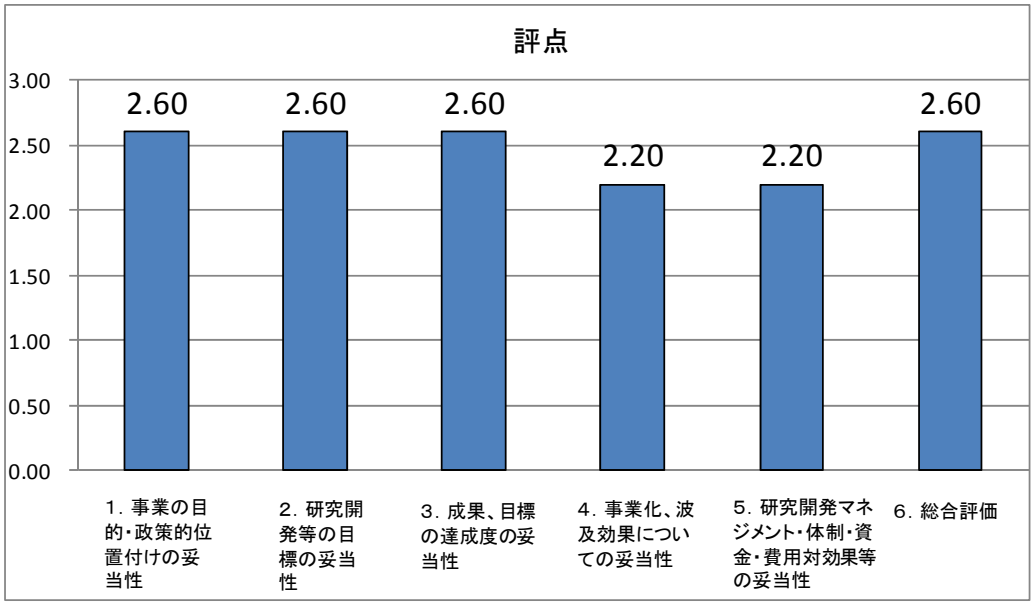
【問題点・改善すべき点】

- まだ実証試験のデータは出てきていないので、今後の成果に期待せざるを得ない。
- 日本はハイパースペクトルセンサのハードの開発および利用技術のノウハウの面で国際的に優位に立てるポテンシャルを持っている。これを活かすには日本がハイパースペクトルセンサ搭載衛星を打ち上げることが望ましい。しかし、それができない場合には、海外にセンサと利用技術を合わせて販売する必要がある。このためには国際的な優位性を当面１０年程度は維持する必要がある。
- ユーザー拡大の方策。
- プロダクトの配布･販売とその価格などの検討。
- 比較的詳細なのは、ＡＳＴＥＲ、ＰＡＬＳＡＲなどの経験に基づくと思われる。「石油資源遠隔探知技術の研究開発」も含め一本化した方が、活動しやすいのではないか。
- ＡＬＯＳ－３の計画中止に伴う、実証機会を模索していくことが最優先課題である。ＪＡＸＡの実施している革新的衛星技術実証プログラムなどを使い、早い段階で実証をする機会を得ることを希望する。

評点法による評点結果

（H. 次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	2	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	2	2	3	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	2	1	3	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	3	2	2
6. 総合評価	2.60	2	2	3	3	3



Ⅰ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業＜ＳＥＲＶＩＳプロジェクト＞（プロジェクト）

（総合評価）

民生技術を活用し、人工衛星等で使用できる安価かつ高機能の部品やコンポーネントを増やしていくことは、我が国宇宙産業の国際競争力強化に極めて重要であり、本事業の意義は大きい。

本事業において進めてきた、民生部品のデータベース化及び選定評価ガイドライン、適用設計ガイドラインの作成は、衛星機器の設計・製作に寄与し、評価できる。

部品については、地上模擬試験の有効性が明らかになってきていること、民生部品についてはライフサイクルが短くなっていることなどを踏まえ、宇宙実証の必要性は低下していると考えられる。また、１００～２００ｋｇ級衛星による宇宙実証は、ＪＡＸＡの革新的小型衛星技術実証プログラムで実現されつつあり、3号機の開発は必要性がなくなったと考えられる。

今後は、民生技術を活用したコンポーネントの開発及び部品の地上模擬試験に注力するとともに、ＪＡＸＡが行う革新的小型衛星技術実証プログラムとの連携を図り、効率的に事業を実施していくべきである。

【肯定的意見】

- 衛星搭載の可能性がある民生部品について、宇宙を模擬した地上実験、ＳＥＲＶＩＳ－１、ＳＥＲＶＩＳ－２を用いた実証試験を行っており、目標を全て達成している点は評価できる。
- 民生部品を用いた衛星搭載用コンポーネントの開発を行っている点も評価できる。
- 事業化についても成果を上げている。
- 民生部品・技術の選定評価・適用設計のガイドラインの作成、公開、民生部品のデータベース作成、および民生部品の海外への売り込み、国際標準化などの成果は高く評価できる。
- 宇宙基本計画などの背景のもと、宇宙等の環境での使用機器の安価で高機能の民生部品および技術の短納期化を実現して実証することで国際市場参入を促進することは、国の成長戦略の観点からも重要で、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は高い。目標は要素技術ごとに定量的かつ明確に示されており適切である。これに対する成果・目標の達成度も、要素技術ごとに多くが具体的、数値的に示され、妥当な成果と目標達成がなされている。また、事業化･波及効果は事例をあげながら活用、売り込み、標準化などについて示されており妥当と考えられる。
- 民生部品のデータベース化及び選定評価ガイドライン、適用設計ガイドラインの作成は衛星機器の設計・製作に寄与し、評価できる。
- 今後認定品には頼れないので、民生部品の衛星製造への転用を促進し、認定品を基本的に用いる衛星開発では、このような各部品の実証情報を整備していくことは非

常に重要である。

- 実証衛星も打ち上げており、現在３号機が計画・設計されている段階であり、実証機会を確保していくことは非常に重要である。

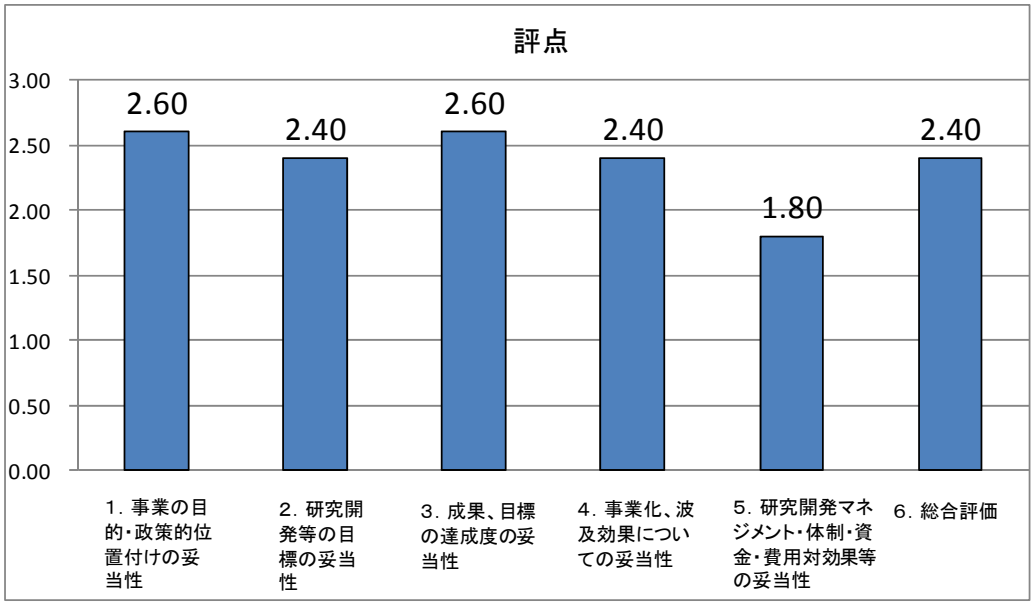
【問題点・改善すべき点】

- 国際市場における民生部品の更新のサイクルのスピードは速いと考えられ、その流れとの関係も考慮しながら進めることも必要と思われた。
- 今後、低コストの先進的バス機器の売込みにもより力を注ぐことが望ましいと思われた。
- **地上の放射線試験やこれまでの宇宙実証の経験から、部品の放射線影響は一定の精度で放射線の影響を推定することができるため、**放射線の影響を宇宙で確認する意義はない。地上の方が、長寿命を考慮した加速試験を含め、各種条件で確認でき安価であると共に、タイムリーに部品が調達できる。
- ＳＥＲＶＩＳ－１、２当時は民生品を使用することに懸念があり、宇宙実証に意義あると考えられていたことも事実であるが、「地上模擬試験」の有効性が確認できたはず。
- ３号機は必要ない。１００～２００ｋｇ級衛星は、他機関で実現できつつあり、新規開発する必然性がない。
- 部品のライフサイクルは昨今短くなってきているため、どこまで実証機会を提供し、実施していくのかを検証していく必要がある。
- 実施されている地上試験の必要性と軌道上実証とその必要性をもう少し明確に示していくことも、広く理解を得ていくためには必要かと思われる。
- 今後の展開として、革新的小型衛星実証プログラムなどへの展開も含めてご提案をいただきたい。

評点法による評点結果

（I. 宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業＜SERVISプロジェクト＞）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	3	3	3	1	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.40	3	3	3	1	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	3	3	3	1	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.40	3	3	3	1	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	1.80	2	2	2	1	2
6. 総合評価	2.40	3	3	3	1	2



Ｊ．太陽光発電無線送受電技術の研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

レトロディレクティブ方式を用いたビーム制御は、宇宙太陽光発電の実現に向けて有効な技術であることは従来から指摘されていたが、これを間接的ではあるが実証した点は評価できる。送電部を半導体で構成する技術や高効率受電部の開発など、所期の目標を達成している点も評価できる。

産業応用を目指した２．４５ＧＨｚ帯での電力伝送実験により各種検証データを取得できたことは、今後の大電力無線伝送への可能性を示したものであると言える。

本事業内で進められた要素技術開発のうちＧａＮ素子の開発について、５．８ＧＨｚ帯で７０％を超える電力付加効率を達成できことは評価できる。今後、送信部については、ＳＳＰＳの実用化に要求される性能の実現に向け、さらなる薄型化・軽量化・大電力化が必要である。

また、本実証実験における最終効率は２０％弱であり、実用化に向けたロードマップを描き、システム全体としての効率を高めていくことが今後の課題である。その際、宇宙太陽光発電システムの実現にはさらなる年月が必要となるため、研究開発を継続するためにも各種技術をスピンオフしていくことが重要である。

将来的には、安全性を担保するデータの取得も含め、広く理解を得るための積極的な広報をしていくことも考えてほしい。

【肯定的意見】

- レトロディレクティブ方式を用いたビーム制御はＳＳＰＳに不可欠であることは従来から指摘されていたが、これを間接的ではあるが実証した点は評価できる。
- 送電部を半導体で構成する技術、高効率受電部の開発などにより所期の目標を達成している点も評価できる。
- 設定した技術目標を達成しており評価できる。
- 宇宙基本計画やエネルギー基本計画などに基づき、石油代替エネルギーとしての宇宙太陽光発電システムは必要であり、事業の目的･政策的位置付けの妥当性は高い。目標はシステム全体の達成のための要素技術ごとに具体的に示されており適切である。これに対する成果・目標の達成度も、設定した要素技術ごとに具体的かつ数値的に詳しく示され、妥当な成果と目標達成がなされている。また、事業化･波及効果はシステムの事業化や技術波及などについて示されており妥当と考えられる。
- 産業応用を目指した２．４５ＧＨｚ帯での電力伝送（出力１０ｋＷ、距離約５００ｍ）実験で、各種検証データを取得できたことは、将来の大電力無線伝送への可能性を示した。
- 本技術の確立は将来の安定電源の確保のために、非常に重要であり、評価者も無線送電技術への期待は非常に高い。
- 本事業内で進められた、各要素技術における高効率化において、送電に関する半導

体増幅器のＧａＮ素子の開発では、５．８ＧＨｚ帯で７０％を超える電力付加効率を達成できことは評価できる。

- 本事業により、ｋW送電と受電実験に成功したことは、今後技術開発の橋頭堡となる成果であったと考える。この実験では最終的に２０％弱の効率であったが、周辺技術も含めて高効率化に向けた技術開発が行われており、今後の展開に期待が出来、今後も無線送受電技術の開発に対して引き続き支援を行って行く必要がある。

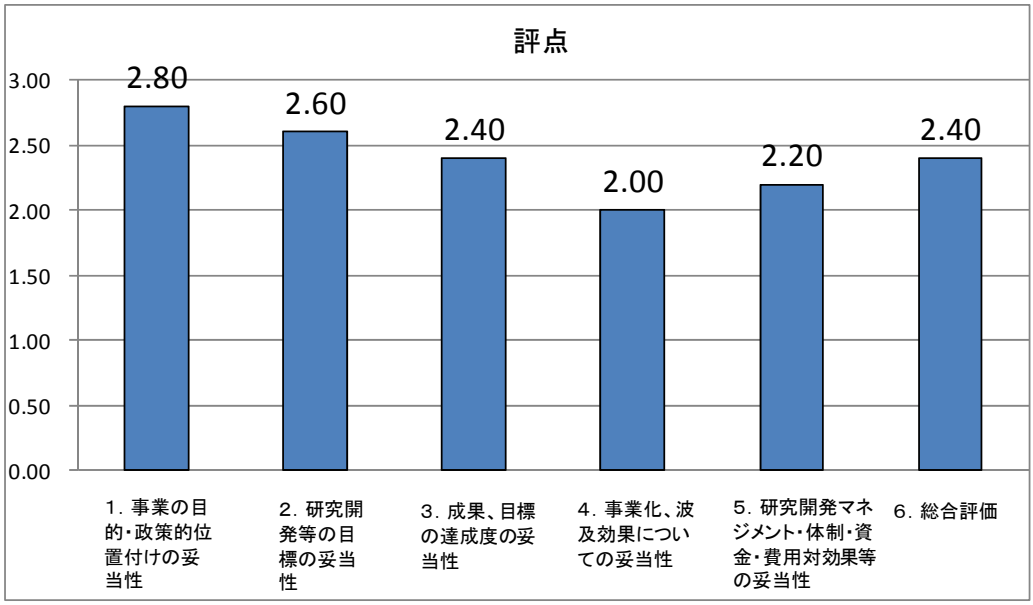
【問題点・改善すべき点】

- 送電部と受電部の高効率化やビーム制御を達成しているが、全体の性能は１．８ｋW送信に対して３４０W受信であり、約１９％となっている。この値が限界なのか、改善の余地があるのかについて言及してほしい。
- 商用ＳＳＰＳに要求される送信部の性能は達成されていないので、さらなる薄型化・軽量化・大電力化が求められている。
- 国際的にも同様の研究開発が進みつつあることが想定されるため、それらと比較し、本事業の特徴を明確にすることが望ましいと思われる。
- 宇宙太陽光発電システムの実現にはさらなる年月が費やされると思われる。研究開発を継続していくためにも、各種技術をスピンオフしていくことが大事である。
- ５．８ＧＨｚ帯を利用した１．８ｋWの送電により、利用可能電力として３４０W が取得できたとの結果から、最終効率は２０％弱ということになる。最終的に利用可能な電力としてもっとあげる為、効率を向上させていかないと実用化にはたどり着けない。その当たりの方策(ロードマップ)をどのように描いているのかを示して頂くことが今後の課題となる。
- 本事業内で進められた、各要素技術における高効率化において、受電部に対する８０％の目標はかなり野心的な設定であったと認識しているが、達成できなかった原因を検証し、明らかにして頂くことが必要と考える。
- さらに、ＧＨｚ帯の周波数の電磁波は、空気(水分)で吸収される分が多いと考えられる。その点に関しては局所的な熱的平衡状態を崩す為、局所的な環境変動や生態への直接的影響などもとも考慮に入れるべきとの指摘もある。この点にも十分配慮し、安全性を担保する十分なデータの取得なども、ＳＳＰＳは宇宙基本計画の中でも推進事業として挙げられているため、広く理解を得られるように努めて行く事も、本事業の推進には欠かせないものであると考えられる。基礎技術の周辺技術の一環として評価し、積極的に広報していくことも考えて頂きたい。

評点法による評点結果

（J．太陽光発電無線送受電技術の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	3	3	3	2	3
2．研究開発等の目標の妥当性	2.60	2	3	3	2	3
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.40	2	2	3	2	3
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.00	1	2	3	1	3
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6．総合評価	2.40	2	2	3	2	3



K．太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

高出力増幅器（ＨＰＡ）を試作、世界最高水準を達成したほか、整流デバイスや電力合成器など周辺機器の基本設計を完了したことで、今後の技術開発に期待が持てる。また、無線送受電技術は地上産業への波及効果も期待できる。

一方で、これまでの研究開発で実現できた水準と将来の商用ＳＳＰＳに要求される効率及び送電部の厚さ、重量にはまだ大きな開きがある。現時点での達成した限界値を踏まえ、中途段階、例えば５～６年の間に実現を目指す数値目標も示して研究開発を進めるべきと考えられる。

なお、他分野での応用も将来の宇宙太陽光システムの開発に資する知見の拡大に寄与すると考えられることから、本事業で開発中の無線送受電技術については、産業応用に向けた理解の増進等の取組を進めるべきである。

【肯定的意見】

- 目標としている研究開発の個別項目の目標は達成していると思われる。
- 設定した技術目標を達成しており評価できる。
- 宇宙基本計画やエネルギー基本計画などに基づき、宇宙太陽光発電システムにおける高効率化、大幅薄型･軽量化されたマイクロ波無線送受電技術の必要性は高く、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は高い。目標はマイクロ波無線送受電システム全体の達成のための要素技術ごとに示されており適切である。これに対する成果・目標の達成度も、設定した要素技術ごとに具体的に示され、妥当な成果と目標達成がなされている。また、事業化･波及効果は事例による技術波及などについて示されており妥当と考えられる。
- ＨＰＡ（高出力増幅器）素子を試作し、送信系高効率化への目処を得ると共に、整流デバイスと電力合成器の薄型・軽量化の試作もでき、次段階へ期待が持てる。
- 無線送受電技術は、地上産業への波及効果も期待できる。
- 本技術の確立は将来の安定電源の確保のために、非常に重要であり、評価者も無線送電技術への期待は非常に高い。よって、本事業により、無線送受電技術の効率化のための技術開発の推進を図ることは必須であるため、本事業を高く評価している。
- ＨＰＡ素子でＰＡＥ７６．８%という性能が、世界最高水準での結果であると高く評価できる。システムを構成する整流デバイスや電力合成機などの周辺機器関連の基本設計をも完了できたことも、中間評価として評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- 現在の無線送受電システムの効率及び送電部の厚さ、重量と将来の商用ＳＳＰＳに要求されている効率及び送電部の厚さ・重量のギャップを埋めることが目標の１つであるが、現状ではこの目標を十分には達成しない。これを達成するか、または達

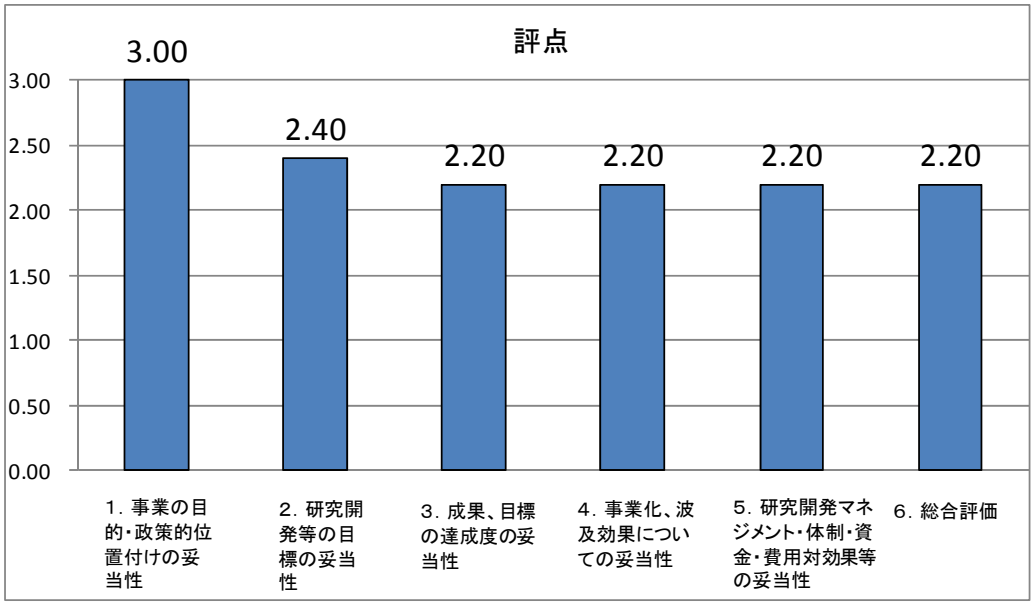
成できない場合にはその利用並びに達成できる限界値を示してほしい。また、各項目の数値目標を示してほしい。

- 国際的に同種の研究開発の進捗が想定されるため、高効率化、薄型･軽量化の特徴を考慮しながら進めるべきと思われる。
- マイクロ波送電において、人体、通信システム、その他への影響を引続き検討しながら進めるべきと思われる。
- 産業応用化を促進することで、地上ユーザー（電力関係機関）技術者の理解を得る。多くのユーザーにさらされることで、宇宙適用時の知見を得るのに役立つ。
- ロードマップの整備は、本事業の前に実施をしておくものであり、これを評価項目に上げることは少々妥当性にかけるのではないかと思われる。
- 波及効果の例示に電力送電が挙げられているが、ワイヤレス給電のことであると思われる。実際にワイヤレス給電は、欧州ではＥＶやＰＨＶ（あるいはＰＨＥＶ）などの車輌への実用へ向けて既に規格制定段階にある。そこでは、周波数帯がＧＨｚ帯よりも低いものを利用し効率も８０％を越えてきている。本太陽光発電による無線送受電とシステムそのものが異なっているため、そのあたりの情報を斟酌して波及効果の例に挙げているのか疑問が残る。

評点法による評点結果

（K. 太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.00	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.40	1	3	3	2	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	1	2	3	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.20	1	2	3	2	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	2	2	2	2	3
6. 総合評価	2.20	1	2	3	2	3



Ｌ．空中発射システムの研究開発（プロジェクト）

（総合評価）

空中発射システムは、衛星打ち上げの低コスト化、高効率化、打ち上げの自由度向上に資するものであり、システムを実現するための要素技術や法規制、海外動向などに関して調査・検討を行い課題の抽出をできたことは評価できる。

ただし、本事業では打ち上げの実証には至っておらず、本事業の核であるパラシュートの投下・展開・姿勢の確立までを実証に含めるべきであったと考える。試作試験など解決すべき事項はまだ多く残っている。また、機体の保守コストや駐機料など全体的なコストを比較し、ビジネスとして成立するかも検討すべきであった。

【肯定的意見】

- 空中発射システムを実現するための要素技術に関して詳細な調査・確認が行われており、それぞれの項目で目標を達成している。
- 技術面および法律面での検討、海外動向調査を十分に実施しており、日本が空中発射システムに対して取るべき道筋を明らかにしている点で評価できる。
- 国の方針、規制などによる事業化の遅れは想定されるものの、本委託事業における事業化の検討内容は妥当である。
- 小型衛星打上げニーズの高まりとともにその手段の低コスト化、高効率化、打上げの自由度向上は重要であり、事業の目的・政策的位置付けの妥当性は高い。目標はシステムの構想、運用、管制、法規制など達成のための要素技術ごとに示されており適切である。これに対する成果・目標の達成度も、設定した要素技術ごとに具体的に示され、妥当な成果と目標達成がなされている。また、事業化･波及効果はそれぞれ具体的に示されており妥当と考えられる。
- 課題の抽出はできた。
- 日本の地理的条件を克服し、任意の場所で発射できる本事業の意義は高く評価できる。
- 射場などの固定施設を持たないため、その保守コストがかからないことや、周辺環境(漁業権保証など)への配慮などのハードルが、現状より格段に下がるため、民間の市場参入の障壁を下げることには一定の評価ができる。

【問題点・改善すべき点】

- 研究開発の内容から見てやむを得ないが、打上の実証には至っていない。
- 事業化について、具体性がやや少ないように感じたが、さらなる低コスト化や実証試験が必要と考えられた。
- 本事業について、他の打上げシステムの開発などの進捗状況を考慮しつつ、コスト面などによるさらに比較検討も必要と思われた。
- 日本の超小型衛星（５０ｋｇ級衛星）打ち上げ手段として、①Ｈ－ⅡＡの副ペイロ

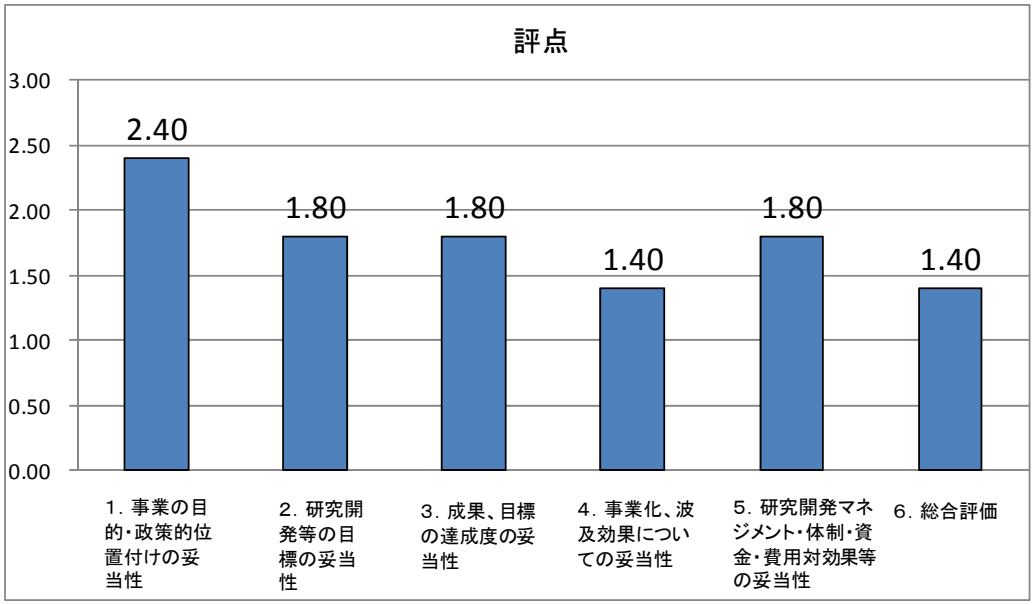
ード（相乗り）、②イプシロンロケットの複数衛星搭載、③宇宙ステーション日本実験棟（きぼう）エアロックからの放出が、既に存在する。
例えば、③の有償打上は、質量（約５０ｋｇ）から概算すると約１億円である。
超小型衛星の打ち上げが盛んになってはいるが教育や実験以上の役割、すなわち実用衛星がほとんどないのが現状である。目標とした太陽同期（高度５００ｋｍ）１５０ｋｇ級は、実用衛星への可能性を秘めているが、②と競合する。
教育や実験を超小型衛星で実施する大学等は、経済的余裕はなくビジネス対象にはならない。

- 課題は抽出したものの、試作試験したりして解決すべき事項が多々あり、実現には程遠い。
- 射場などのコストがかからないまでも、まず専用機の手当てや、機体の保守コストや駐機料などのコストもあり、評価者としては具体的なコストの比較が示されるべきであると考える。
- 目標の設定時に、本事業の核であるパラシュートの投下・展開・姿勢の確立までを実証することまで含めるべきであったと考える。

評点法による評点結果

（L. 空中発射システムの研究開発）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	3	3	3	0	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	1.80	2	3	2	1	1
3. 成果、目標の達成度の妥当性	1.80	2	2	2	0	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.40	2	2	2	0	1
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	1.80	2	2	2	1	2
6. 総合評価	1.40	2	2	2	0	1



第６章　今後の研究開発の方向等に関する提言

第６章　今後の研究開発の方向等に関する提言

【技術に関する施策】

（宇宙産業プログラム）

世界の宇宙産業の拡大傾向に対し、日本の宇宙産業は必ずしも同期しているとはいえない。この理由は、技術力をベースとした宇宙産業の成長が必ずしも十分ではなく、またニーズの開拓も不十分であることによると考えられる。これらの点を克服するため、国が適切な技術開発施策を推進することは極めて重要である。

しかし、諸外国、特に米国などの先行する宇宙産業と直接競争することは短期的に少なからず困難を伴うことが考えられる。そのため、日本でこれまで培われ国際的にも高い評価を受けた宇宙産業関連の技術を継承しつつ、それらをより発展させる施策が適切と考えられる。特に、既存技術を改良・発展させて、コスト削減、高機能化、利用の多目化を図ることや、高信頼性、高安定性の実現していくことなどは、日本が得意とするところであり、海外の技術との比較をしながら、この方向での技術開発を発展的かつ積極的に推進することが望ましい。

また、新興国（ＡＳＥＡＮ、中央アジア、中南米、アフリカなど）におけるニーズの開拓と展開は、国際協力という観点からも極めて重要と考える。

このような観点から、国際競争力のある高性能かつ低コストな人工衛星等の開発や、将来のエネルギーの確保に資する高機能な衛星センサ及びその利用技術の開発、宇宙太陽光発電技術の開発等を、宇宙基本法及び宇宙基本計画に基づき経済産業省が実施することは極めて重要であり、本施策を引き続き着実に推進すべきである。

施策の推進に当たっては、世界の宇宙産業の動向を見据え、海外の技術との比較などを通じて真に国際競争力のある技術であるかを評価し、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばしていけるよう、事業の過不足について常に検討を加えることが必要である。

具体的には、近年の情勢変化を踏まえ、ＳＥＲＶＩＳ－３号機及び、空中発射システムの意義については、再検討を要すると考えられる。

なお、衛星リモートセンシング分野における海外市場獲得には資源探査だけでなく農業、防災などさまざまな分野におけるサービスをパッケージで提供していくことが有効であり、今後は、幅広い分野におけるリモートセンシングデータ利用の拡大に向け、日本全体の英知を結集する仕組みを導入するなどの工夫が重要と考えられる。

将来的な技術開発の方向性としては、地上に配置したセンサ等から人工衛星を活用して情報を収集するシステムの実現に資する技術の研究開発などが考えられる。さらに長期的には、宇宙空間を物質生産・加工の場として活用するための技術開発も一案である。

【各委員の提言】

- 国際競争力のある宇宙産業のための技術を育成することは容易ではないが、これを推進する必要があるので、海外の技術との比較をしながらプロジェクトを進めてほしい。
- リモートセンシングに関する二つの研究を提言する。
  (1)進行形のＡＳＮＡＲＯタイプの光学および SAR センサおよびハイパースペクトルセンサによるリモートセンシングで何に利用できるかの実証研究を、日本全体のリモートセンシング研究者にサンプルデータを公開する形で実施し、その成果を利用実例としてまとめる。
  (2)資源探査、エネルギー供給のためにどのような衛星リモートセンシング、宇宙技術が必要か、それらの衛星リモートセンシング、宇宙技術の内どの部分で日本の宇宙産業が国際的に優位に立つことが得策か、を検討する調査研究を行う。
  上記(1)は開発するセンサの多様な可能性をオールジャパンで検討し、その利用実例をパッケージ輸出に使う考え方である。逆に上記(2)は経産省が担当する資源開発、エネルギー供給の分野をどのような宇宙産業と結合させれば日本として得策かを走りながら常に検討する考え方である。
- 世界の宇宙産業の拡大傾向に対し、日本の宇宙産業は必ずしも同期しているとはいえない。この理由は、宇宙産業の成長が必ずしも十分ではなく、またニーズの開拓も不十分であることによると考えられる。これらの点について、国の施策を設定することは極めて重要である。しかし、諸外国、特に米国などの先行する宇宙産業と直接競争することは短期的に少なからず困難を伴うことが考えられる。そのため、日本でこれまで培なわれ国際的にも高い評価を受けた宇宙産業関連の技術(ＪＥＲＳ－１／ＳＡＲ、ＰＡＬＳＡＲ、ＡＳＴＥＲに関連した技術など)を継承しつつ、それらをより発展させる施策が適切と考えられる。特に、既存技術を改良･発展させて、コスト削減、高機能化、利用の多目化を図る能力、高信頼性、高安定性の実現などは、日本が得意とするところであり、この技術開発を発展的かつ積極的に推進することが望ましい。また、本事業でも多く示されている新興国（ASEAN、中央アジア、中南米、アフリカなど）でのニーズの開拓と展開は国際協力という観点からも極めて重要と考える。
- 日本として実施した方がよい技術として、①情報のアップロード、②物質のダウンロードを提案したい。
  ①情報のアップロードは、地上の機器（センサ等）から宇宙機へのデータ通信である。(ただし、インターネット環境が整った地域では必須ではない)
  地上の機器情報を衛星が収集する。
  衛星からの観測のみではなく、地上での観測データも収集する。
  ②物質のダウンロードは、軌道上から地球へ物質（宇宙で製作したものなど）を多

量に日常的に再突入させる。宇宙空間の産業化（工場が宇宙）

- 技術に関する施策に関しては、適正に投資がなされていると思われる。

【技術に関する事業】

（A～H　全事業（プロジェクト））

これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。

具体的には、例えば、

- 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、
- 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、
- 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、
- 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発

などが想定される。

【各委員の提言】

- これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理、解析技術の進展を目指すような技術の継続開発あるいは新たな開発に関する事業の検討が必要と思われる。またこれらの技術の輸出が期待される国々に即した適用技術の開発についても考えられる。

  それらは例えば、複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の継続的開発、資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、資源保有国を対象とした衛星データの高精度解析手法の開発などが想定される。
- ＡＳＮＡＲＯプロジェクト及び観測センサの進化に向けて、各機器に未だ小型・軽量化の余地があるため、民生部品・機器を宇宙適用化する技術を駆使するなどし、本格的な「小型高機能衛星」を実現するべき。

（C　小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発（プロジェクト））

社会から求められる目的特化型のサービスは、多種多様であることからオーダーメードにならざるを得ないが、開発期間を例えば１年間とできれば大きなメリットとなる。今後、こうしたことも見据えることが重要である。

【各委員の提言】

- 今後開発する予定の目的特化型のサービスこそが社会のニーズがあるが、その種類は多様であるためオーダーメードにならざるを得ない。この場合、開発期間を例えば１年間とできれば大きなメリットである。これを可能にするシステム構築をしておくことが必要である。

（F　石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト））

欧米による衛星観測データの無料公開の動向も踏まえ、ＡＳＴＥＲデータが広く利用されて社会に還元されるよう、利用研究の分野を拡大するとともに、ＡＳＴＥＲデータを無料公開する方針に転換することを提案する。

【各委員の提言】

- ＡＳＴＥＲデータを無料公開する方針に転換することを提案する。衛星データは広く利用されて初めて社会に還元される。欧米による衛星観測データの無料公開の動向もこの考え方に依るものである。

（H　ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト））

資源開発以外の多様な分野でのハイパースペクトルデータの解析技術を確立させるためには、サンプルデータ提供による多数公募型の共同研究方式により、日本の技術を広く結集させることが効果的である。

【各委員の提言】

- ハイパースペクトルデータの資源開発以外の多様な分野への解析技術確立に関しては、サンプルデータ提供による多数公募型の方式で日本の技術を広く結集させることが効果的である。

（K　太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（プロジェクト））

宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ）の技術開発については、地上の電力伝送だけに終わることがないよう、その実現に向けて、打ち上げコストも含めた検討を深めていくべきである。

ＳＳＰＳの実現に向けて、送受電関連だけでなく、それを支える高電圧や絶縁などの基盤技術、電波伝送経路にあたる空間における環境との相互作用、生体への影響なども含めて研究開発を進め、社会として進めていける土壌を育てていく必要がある。

【各委員の提言】

- ＳＳＰＳに関する事業は発電衛星の打ち上げコストも含めた検討が必要であるので、議論を深めてほしい。ＳＳＰＳの技術開発が地上やオフィスの電力伝送や電気自動車の充電の技術に化けて終わることがないようにしてほしい。
- 送電関連だけでなくそれを支える高電圧や絶縁などの基盤技術、宇宙・地球などの電波伝送経路にあたる空間の環境との相互作用、生体への影響なども含めて研究開発を進めていき、社会として進めていける土壌を育てていく必要がある。

第７章　評価ワーキンググループのコメント及びコメントに対する対処方針

第７章　評価ワーキンググループのコメント及び コメントに対する対処方針

「宇宙産業プログラム」に関する施策・事業評価に係る評価ワーキンググループのコメント及びコメントに対する推進課の対処方針は、以下のとおり。

（施策評価）

宇宙産業プログラム

（事業化、波及効果についての妥当性） 本プログラムに属するプロジェクトはそれぞれ高い評価を得ており、本成果の有効な活用を進めることが重要である。一方、宇宙産業の将来展望を勘案し、産業競争力を強化する経済産業省の役割の観点から、次のステップを真摯に検討する必要がある。 今後、必要に応じて、宇宙産業プログラムの強化を図り、システム開発だけではなく、サービス提供を含めた宇宙システム・機器の利用の拡大を促進していくことが重要である。
（対処方針） これまでに行ってきた研究開発を引き続き継続するとともに、本成果を踏まえ、宇宙産業の産業競争力を強化し、宇宙システム・機器の利用拡大を促進するための施策を実施していく。

（事業評価）

Ａ　小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（終了時評価）

（事業化、波及効果についての妥当性） 事業の達成度は高く、非常に高く評価できる。今後、更に、海外のユーザーをターゲットとした開拓方法について検討されたい。
（対処方針） 本事業の成果を活用し、我が国企業が海外向けの販売を念頭においた人工衛星を開発し、売り込みを進めているところ。 経済産業省としては、関係府省とも連携し、人材育成協力の提案など政府ベースでの働きかけを行い、民間企業による売り込みをサポートしていく。 また、光学衛星とレーダ衛星のパッケージでの売り込みが有効であることを踏まえ、低コストなレーダ衛星技術開発プロジェクト（ASNARO-2）を着実に推進する。

Ｂ　超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発（中間評価）

（成果、目標の達成度の妥当性） 　部品調達面で日程遅延が生じているが、全体としては目標に向けて着実に研究開発は進展しているので、引き続き研究開発に注力されたい。
（対処方針） 海外でも類似の技術の開発が進めている国もあり、海外に先駆けた市場投入を支援できるよう、迅速な研究開発の推進が重要と認識。予定通りのスケジュールで開発／宇宙実証を実施する。

Ｃ　小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発（終了時評価）

（事業化、波及効果についての妥当性） 　複数衛星用の統合運用システム及び画像自動判読システムは、民間での活用が期待できる新しいシステムであり、引き続き実用化に向けて取り組んでもらいたい。
（対処方針） 　民間企業における実用化に向けた取組が進んでおり、事業環境の整備などその動きを支援していく。

Ｄ　可搬統合型小型地上システムの研究開発（終了時評価）

（事業化、波及効果についての妥当性） 　事業目標は的確であり、今後の運用について、維持運用費用等も含めて詳細に検討されたい。
（対処方針） 　民間企業における実用化に向けた取組が進んでおり、事業環境の整備などその動きを支援していく。

Ｅ　極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／
次世代合成開口　レーダ等の研究開発（中間評価）

（事業化、波及効果についての妥当性）

極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システム（ASTER）及び次世代合成開口レーダ（PALSAR）の研究開発は中間段階の目標を達成している。今後、関連衛星の運用及び利用の方法を積極的に開拓することにより、利用価値の更なる向上を図られたい。

（対処方針）

ASTERについては、2000年の運用が開始されてから15年以上にわたり主に石油資源探査の観点から利用研究等を実施し、多くの成果を上げてきた。他方で、地理空間情報や地質情報などを活用する多様なビジネスや、防災対策、環境対策等の推進において、ASTERデータには大きな活用可能性があると考えられ、こうした分野においては引き続き利用研究の実施が求められている。

こうした状況変化を踏まえ、平成28年度から、産業技術総合研究所が中心となってASTERセンサを運用することとし、知的基盤としてASTERデータの整備・無償提供を開始するとともに、ASTERを用いた地質研究を実施する。

Ｆ　石油資源遠隔探知技術の研究開発（中間評価）

（事業化、波及効果についての妥当性）

本事業で得られた情報及び知的財産のオープン・クローズ戦略を明確化し、産業界で有効にビジネスに繋がるように環境整備を図ってもらいたい。

（対処方針）

ASTERについては、2000年の運用が開始されてから15年以上にわたり主に石油資源探査の観点から利用研究等を実施し、多くの成果を上げてきた。他方で、地理空間情報や地質情報などを活用する多様なビジネスや、防災対策、環境対策等の推進において、ASTERデータには大きな活用可能性があると考えられ、こうした分野においては引き続き利用研究の実施が求められている。

こうした状況変化を踏まえ、平成28年度から、産業技術総合研究所が中心となってASTERセンサを運用することとし、知的基盤としてASTERデータの整備・無償提供を開始するとともに、ASTERを用いた地質研究を実施する。

また、ASNAROについては、活用が期待される分野の有識者を含む委員会を開催し、その意見を踏まえ、ビジネスでの活用をにらんだ実証を引き続き実施する。

G　ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（中間評価）

（事業化、波及効果についての妥当性） 　本事業の意義及び計画どおりの進捗は高く評価できる。今後、事業化及び経済的かつ国際的波及効果の発揮に向けて、引き続き研究開発に注力されたい。
（対処方針） 　平成30年度から本センサを国際宇宙ステーションに搭載して宇宙実証を行うための研究開発を継続するとともに、データ利用に関する研究公募等を実施し、海外の研究機関も含めて取得データを提供することで、事業化及び経済的かつ国際的波及効果の発揮に向けた取組を進める。

H　次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（中間評価）

（事業化、波及効果についての妥当性） 　これまでの研究開発は高く評価できる。今後は技術の高度化を図り、事業化及び経済波及効果の発揮に向けて研究開発を継続されたい。
（対処方針） 　これまでに開発したデータ利用技術の高度化を進め、平成30年度から本センサを国際宇宙ステーションに搭載して宇宙実証を行うとともに、データ利用に関する研究公募等を実施し、海外の研究機関も含めて取得データを提供することで、事業化及び経済的かつ国際的波及効果の発揮に向けた取組を進める。

I　宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVISプロジェクト）】（中間評価）

（事業化、波及効果についての妥当性） 　JAXAと連携して研究開発を進めることは妥当である。今後、我が国の特性や強みを踏まえ、地上試験、ガイドライン作成等を行い、事業目標を達成されたい。
（対処方針） 　今後もＪＡＸＡ等関係機関と連携しながら、我が国が強みを有する優れた民生部品・民生技術の利用拡大に向け、部品・コンポーネントの開発や、地上試験・ガイドライン作成等を進めていく。

J　太陽光発電無線送受電技術の研究開発（終了時評価）

（研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性）

継続事業では、ニーズの確認や、安全性を含めて広く社会から理解を得るための積極的な広報等を実施していただきたい。

（対処方針）

宇宙太陽光発電の中核的な技術である無線送受電技術について、応用が機体される分野の把握務めるとともに、その技術がどのようなものであるか、安全性も含めて、広く社会の理解を得られるよう、各種シンポジウムや展示会、ホームページ等を活用して情報発信を行っていく。

K　太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発（中間評価）

（研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性）

本分野のロードマップを策定し、複数の里程標を設けてもらいたい。各段階で成果を出していくことが重要であり、これを視野に入れて研究開発を継続されたい。

（対処方針）

宇宙太陽光発電は長期の取組となることから、今後の研究開発のためロードマップを検討しており、平成 28 年度中にロードマップを策定することとしている。この中で、実現に至る過程で複数のマイルストーンを設け、その段階ごとに必要な技術レベルを定めることを検討しており、今後はこのロードマップに基づいて研究開発を着実に進めていく。

L　空中発射システムの研究開発（終了時評価）

（事業化、波及効果についての妥当性）

目標に向けて一定の成果を上げている。この成果を有効に活用しながら今後の施策を検討されたい。

（対処方針）

空中発射システムに関する本事業の成果を、今後の施策検討に活用していく。

参考資料１

「宇宙産業プログラム」施策評価

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対　処　方　針
○　世界の宇宙産業の拡大傾向に対し、日本の宇宙産業は必ずしも同期しているとはいえない。この理由は、技術力をベースとした宇宙産業の成長が必ずしも十分ではなく、またニーズの開拓も不十分であることによると考えられる。これらの点を克服するため、国が適切な技術開発施策を推進することは極めて重要である。 　しかし、諸外国、特に米国などの先行する宇宙産業と直接競争することは短期的に少なからず困難を伴うことが考えられる。そのため、日本でこれまで培われ国際的にも高い評価を受けた宇宙産業関連の技術を継承しつつ、それらをより発展させる施策が適切と考えられる。特に、既存技術を改良・発展させて、コスト削減、高機能化、利用の多目化を図ることや、高信頼性、高安定性の実現していくことなどは、日本が得意とするところであり、海外の技術との比較をしながら、この方向での技術開発を発展的かつ積極的に推進することが望ましい。	○　今後の研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい。
○　また、新興国（ＡＳＥＡＮ、中央アジア、中南米、アフリカなど）におけるニーズの開拓と展開は、国際協力という観点からも極めて重要と考える。 　このような観点から、国際競争力のある高性能かつ低コストな人工衛星等の開発や、将来のエネルギーの確保に資する高機能な衛星センサ及びその利用技術の開発、宇宙太陽光発電技術の開発等を、宇宙基本法及び宇宙基本計画に基づき経済産業省	○　施策の推進に当たっては、世界の宇宙産業の動向を見据え、海外の技術との比較などを通じて真に国際競争力のある技術であるかを評価し、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばしていけるよう、検討を行いながら取り組んで参りたい。 　なお、ＳＥＲＶＩＳ実証衛星３号機については、ＪＡＸＡの革新的衛星技術実証プログラムと連携することで、取りやめることとしている。空中発射システムの今後の研究開発については、そ

が実施することは極めて重要であり、本施策を引き続き着実に推進すべきである。 　施策の推進に当たっては、世界の宇宙産業の動向を見据え、海外の技術との比較などを通じて真に国際競争力のある技術であるかを評価し、日本の得意とする技術力を重点的に伸ばしていけるよう、事業の過不足について常に検討を加えることが必要である。 　具体的には、近年の情勢変化を踏まえ、ＳＥＲＶＩＳ－３号機及び、空中発射システムの意義については、再検討を要すると考えられる。	の意義をよく検証してまいりたい。
○　なお、衛星リモートセンシング分野における海外市場獲得には資源探査だけでなく農業、防災などさまざまな分野におけるサービスをパッケージで提供していくことが有効であり、今後は、幅広い分野におけるリモートセンシングデータ利用の拡大に向け、日本全体の英知を結集する仕組みを導入するなどの工夫が重要と考えられる。	○　衛星リモートセンシングにおいては、ＨＩＳＵＩプロジェクト等において、データ利用拡大に向けた取組を実施しているところであるが、効果的な取組について検討・実施してまいりたい。
○　将来的な技術開発の方向性としては、地上に配置したセンサ等から人工衛星を活用して情報を収集するシステムの実現に資する技術の研究開発などが考えられる。さらに長期的には、宇宙空間を物質生産・加工の場として活用するための技術開発も一案である。	○　今後の技術開発の検討においては、ご指摘の視点も踏まえて、検討してまいりたい。

「A. 小型化等による先進的宇宙システムの研究開発」プロジェクト評価（終了）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（A～H事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい。 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。

「B. 超高分解能合成開口レーダの小型化技術の研究開発」プロジェクト評価（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい。 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。

「C. 小型衛星群等によるリアルタイム地球観測網システムの研究開発」プロジェクト評価（終了）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい。 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。
○　社会から求められる目的特化型のサービスは、多種多様であることからオーダーメードにならざるを得ないが、開発期間を例えば１年間とできれば大きなメリットとなる。今後、こうしたことも見据えることが重要である。	○　今後の同種の研究開発の実施に当たっては、ご指摘の踏まえて取り組んでまいりたい。

「D. 可搬統合型小型地上システムの研究開発」プロジェクト評価（終了）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。

「E. 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口 レーダ等の研究開発」プロジェクト評価（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○ これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○ 今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。

「F. 石油資源遠隔探知技術の研究開発」プロジェクト評価（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。
○　欧米による衛星観測データの無料公開の動向も踏まえ、ＡＳＴＥＲデータが広く利用されて社会に還元されるよう、利用研究の分野を拡大するとともに、ＡＳＴＥＲデータを無料公開する方針に転換することを提案する。	○　ご指摘の通り、ＡＳＴＥＲ・ＰＡＬＳＡＲデータの利用を促し社会に還元するとともに、利用研究の分野拡大を図るため、ＡＳＴＥＲデータの取扱いについて見直しを行ってまいりたい。

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。
○　資源開発以外の多様な分野でのハイパースペクトルデータの解析技術を確立させるためには、サンプルデータ提供による多数公募型の共同研究方式により、日本の技術を広く結集させることが効果的である。	○　ご指摘の点については、「Ｉ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発」で実施しているハイパースペクトルセンサ・データの利用技術開発において、より多くの研究テーマに取り組める方式を検討してまいりたい。なお、平成２８年度においては、公募型の共同研究を行うべく、関係者と検討を進めている。

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○　これまで日本の宇宙関連産業が蓄積してきた人工衛星/センサの開発、運用、解析の技術を継承しながら発展させるという点から、人工衛星の高分解能化や高頻度観測、その高精度かつ高速な運用・処理・解析に資する技術の開発についての検討が必要と考えられる。また、輸出が期待される国々のニーズに即した技術の開発についても検討することが重要と考えられる。 具体的には、例えば、 ● 複数衛星/センサによる高頻度観測が可能となるような小型化かつ低コストの高機能衛星/センサ技術の開発（本格的な「小型高機能衛星」の実現）、 ● 資源探査に有効な高空間分解能・高スペクトルの光学センサの発展的な開発、 ● 小規模機関や民間などでも十分に利用可能な簡易衛星データ受信･処理･解析の一貫システムの開発、 ● 多様な地域に対応できる衛星データの高精度解析手法の開発 などが想定される。（Ａ～Ｈ事業共通）	○　今後のリモートセンシング衛星に関わる研究開発に当たっては、これまでに培われた技術を承継・活用し、また、その技術を発展させるものとなるよう、検討を行いながら、取り組んでまいりたい 輸出が期待される国々・ユーザーのニーズに即した研究開発についても、検討してまいりたい。

「K 太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」プロジェクト評価（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	対 処 方 針
○ 宇宙太陽光発電システム（ＳＳＰＳ）の技術開発については、地上の電力伝送だけに終わることがないよう、その実現に向けて、打ち上げコストも含めた検討を深めていくべきである。	○ 宇宙太陽光発電システムの研究開発は、長期に及ぶ取組となることから来年度に中長期の研究開発のロードマップを策定予定であり、その際、打上コストの視点も含めて検討してまいりたい。
○ ＳＳＰＳの実現に向けて、送受電関連だけでなく、それを支える高電圧や絶縁などの基盤技術、電波伝送経路にあたる空間における環境との相互作用、生体への影響なども含めて研究開発を進め、社会として進めていける土壌を育てていく必要がある。	○ ご指摘の~~視~~点は重要な課題と認識しており、マイクロ波による動植物や大気、電子機器への影響について、過去にも検討を行ったところ。高電圧への対応技術や周囲の環境への影響等の検討は、今後の送受電技術の研究開発の進捗に応じて、適切な時期の実施を検討してまいりたい。

参考資料２

経済産業省技術評価指針

平成２６年４月

目次 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

経済産業省技術評価指針の位置付け ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

Ⅰ．評価の基本的考え方 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
１．評価目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
２．評価の基本理念 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
３．指針の適用範囲 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
４．評価の類型・階層構造及びリンケージ ・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
５．評価方法等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
６．評価結果の取扱い等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
７．評価システムの不断の見直し ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
８．評価体制の充実 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
９．評価者（外部有識者）データベースの整備 ・・・・・・・・・・・・・・ 9
10．評価における留意事項 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０

Ⅱ．評価の類型と実施方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２

１．研究開発プログラムの評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２
１－１．複数の研究開発課題によって構成されるプログラムの評価・・・１２
(1) 事前評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２
(2) 中間評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２
(3) 終了時評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
１－２．競争的資金制度等の研究資金制度プログラムの評価・・・・・・１４
(1) 事前評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
(2) 中間評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
(3) 終了時評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５

２．研究開発課題（プロジェクト）の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・１６
(1) 事前評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１６
(2) 中間評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１６
(3) 終了時評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１７

３．追跡調査・追跡評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
３－１．追跡調査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
３－２．追跡評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８

経済産業省技術評価指針の位置付け

経済産業省技術評価指針（以下、「本指針」という。）は、経済産業省が、経済産業省における研究開発プログラム及び研究開発課題（以下、「研究開発プログラム・課題」という。）の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたものである。

本指針は、「産業技術力強化法」（平成１２年法律第４４号）第１０条の規定、「科学技術基本計画」（平成２３年８月閣議決定）、「研究開発システムの改革の推進等による研究開発能力の強化及び研究開発等の効率的推進等に関する法律」（平成２０年法律第６３号）第３４条の規定及び「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成２４年１２月内閣総理大臣決定）（以下、「大綱的指針」という。）に沿った適切な評価を遂行するための方針を示す。

同時に、「行政機関が行う政策の評価に関する法律」（平成１３年法律第８６号）（以下、「政策評価法」という。）に基づく「経済産業省政策評価基本計画」（以下、「政策評価基本計画」という。）に沿った、経済産業省政策評価のうち研究開発に関する部分の実施要領としての性格を持つ。したがって、研究開発プログラム・課題についての評価の結果は、政策評価基本計画に基づき実施される事前評価及び事後評価に適切に反映・活用を図る。

技術評価は、政策評価法上要請される評価を含め政策評価の一環としての位置付けを有することから、本指針は、研究開発プログラム・課題の成果や実績等を厳正に評価し、それを後の研究開発プログラム・課題の企画立案等に反映させる政策サイクルの一環としての評価の在り方について定めるものである。

ただし、研究開発プログラム・課題に係る評価は、研究開発の内容や性格、実施体制等の態様に応じた評価方法に拠るべきであるとともに、評価の厳正さと効率性を両立するためには、評価をとりまく様々な状況に応じた臨機応変な評価手順を設定する必要がある。さらに、評価手法は日進月歩であり、今後よりよい評価手法が提案されることも十分考えられる。したがって、本指針では共通的なルール及び配慮事項を取り上げることとし、より詳細な実施のプロトコルは評価マニュアルの作成等により記述することで、機動的な実施を図ることとする。

当省研究開発機関が自ら実施する評価をその機関の自己改革の契機とするような自律的なシステムの構築に努め、研究開発を実施する当省研究開発機関が、大綱的指針及び本指針に沿って、研究開発評価の実施に関する事項について、明確なルールを定め、研究開発評価の実施及び評価結果の活用が適切かつ責任を持って行うよう、所管官庁としての責務を果たすものとする。

◎本指針における用語については、次に定めるところによる。

・研究開発プログラム：　「上位施策の目標達成に向けて複数の研究開発課題を含む各手段を組み立てた計画や手順に基づく取組」及び「上位施策目標との関連性を明確にし、検証可能な目標を設定した研究資金制度」をいう。

（注１）「政策評価の実施に関するガイドライン」（平成１７年１２月１６日政策評価各府省連絡会議了承。以下「政評ガイドライン」という。）においては、各行政機関が所掌する政策を、「政策（狭義）」、「施策」及び「事務事業」の三階層に区分整理するところであり、その定義は次のとおり。

・政策（狭義）：　特定の行政課題に対応するための基本的な方針の実現を目的とする行政活動の大きなまとまり。

・施策：　上記の「基本的な方針」に基づく具体的な方針の実現を目的とする行政活動のまとまりであり、「政策（狭義）」を実現するための具体的な方策や対策ととらえられるもの。

・事務事業：　上記の「具体的な方策や対策」を具現化するための個々の行政手段としての事務及び事業であり、行政活動の基礎的な単位となるもの。

（注２）第４期科学技術基本計画においては、研究開発の政策体系は、「政策」、「施策」、「プログラム・制度」及び「研究開発課題」の四階層に区分整理するところである。政評ガイドラインとの関係では、当該「プログラム・制度」及び「研究開発課題」は、ともに政評ガイドラインにおける「事務事業」に該当するものと整理されているところである。

・研究開発課題（プロジェクト）：　具体的に研究開発を行う個別の実施単位であり、当省が定めた明確な目的や目標に沿って実施されるものをいう。

なお、大綱的指針においては、競争的資金制度等の「研究資金制度」における個々の採択課題も「研究開発課題」と称呼されているところであるが、本指針においては、混同を避けるため、当該各採択課題は「研究課題」と称呼するものとする。

・研究資金制度：　資金を配分する主体が研究課題を募り、提案された中から採択した研究課題に研究開発資金を配分する制度をいう。競争的資金制度は、これに含まれる。

なお、「上位施策目標との関連性を明確にし、検証可能な目標を設定した研究資金制度（以下、「研究資金制度プログラム」という）」については、大綱的指針における整理に従い、本指針においても「研究開発プログラム」の一つとして取り扱うものとする。

・競争的資金制度：　資金を配分する主体が、広く一般の研究者（研究開発に従事している者又はそれらの者から構成されるグループをいう。）、企業等又は特定の研究者、企業等を対象に、特定の研究開発領域を定め、又は特定の研究開発領域を定めずに研究課題を募り、研究者、企業等か

ら提案された研究課題の中から、当該課題が属する分野の専門家（当該分野での研究開発に従事した経験を有する者をいう。）を含む複数の者による、研究開発の着想の独創性、研究開発成果の先導性、研究開発手法の斬新性その他の科学的・技術評価又は経済的・社会的評価に基づき研究課題を採択し、当該研究課題の研究開発を実施する研究者等又は研究者等が属する組織若しくは企業等に研究開発資金を配分する制度をいう。

・当省研究開発機関：　国からの出資、補助等の交付を受けて研究開発を実施し、又は研究開発の運営管理を行う機関のうち、当省所管の独立行政法人をいう。

・政策評価書：　本指針において用いる「政策評価書」とは経済産業省政策評価実施要領を踏まえた評価書をいう。

・政策サイクル：　政策の企画立案・実施・評価・改善（plan-do-check-action）の循環過程をいう。

・評価システム：　評価目的、評価時期、評価対象、評価方法等、評価に係るあらゆる概念、要素を包含した制度、体制の全体をいう。

・推進課：　研究開発プログラム・課題を推進する課室（研究開発担当課室）をいう。

・主管課：　研究開発プログラム・課題の企画立案を主管する課室及び予算等の要求事項を主管する課室をいう。

・査定課：　予算等の査定を行う課室（大臣官房会計課、資源エネルギー庁総合政策課等）をいう。

・有識者：　評価対象となる研究開発プログラム・課題について知見を有する者及び研究開発成果の経済的・社会的意義につき評価できる者（マスコミ、ユーザ、人文・社会科学者、投資家等）をいう。

・外部評価者：　経済産業省に属さない外部の有識者であって、評価対象となる研究開発プログラム・課題の推進に携わっていない者をいう。

・外部評価：　外部評価者による評価をいい、評価コメントのとりまとめ方法としてパネルレビュー（評価者からなる委員会を設置（インターネット等を利用した電子会議を含む。）して評価を行う形態）による場合とメールレビュー（評価者に対して郵便・ＦＡＸ・電子メール等の手段を利用して情報を提供し、評価を行う形態）による場合とがある。

・評価事務局：　研究開発プログラム・課題の評価の事務局となる部署をいい、評価者の行う評価

の取りまとめ責任を負う。

・評価者：　評価の責任主体をいい、パネルレビューによる場合には外部評価者からなる委員会が責任主体となり、メールレビューによる場合には、各外部評価者がそれぞれ責任主体となる。また、評価の結果を踏まえて、資源配分の停止や変更、研究開発プログラム・課題の内容の変更に責任を有するのは研究開発プログラム・課題の推進課及び主管課である。

・終了時評価：　事業終了時に行う評価であり、事業が終了する前の適切な時期に行う終了前評価と事業の終了直後に行う事後評価がある。

・アウトプット指標：　成果の現象的又は形式的側面であり、主として定量的に評価できる、活動した結果の水準を測る指標をいう。

・アウトカム指標：　成果の本質的又は内容的側面であり、活動の意図した結果として、定量的又は定性的に評価できる、目標の達成度を測る指標をいう。

Ⅰ．評価の基本的考え方

１．評価目的

(1) より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

(2) より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上を促すことにより、研究開発を効果的・効率的に推進すること。

(3) 国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む研究開発プログラム・課題の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

(4) 資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を研究開発プログラム・課題の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。

また、評価の結果に基づく適切な資源配分等を通じて、研究開発を次の段階に連続してつなげることなどにより、その成果の利用、活用に至るまでの一体的、総合的な取組を推進し、研究開発成果の国民・社会への還元の効率化・迅速化に資すること。

２．評価の基本理念

評価の実施に当たっては、以下の考え方を基本理念とする。

(1) 透明性の確保

推進課、主管課及び当省研究開発機関は、積極的に研究開発成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

(2) 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者による外部評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

(3) 継続性の確保

研究開発プログラム・課題においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけではなく、評価とそれを反映した研究開発プログラム・課題の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の研究開発プログラム・課題の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

(4) 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な研究開発プログラム・課題が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、研究開発プログラム・課題の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけることのない費用対効果の高い評価を行うこと。

３．指針の適用範囲

(1) 本指針においては、多面的・階層的な評価を行う観点から、経済産業省における研究開発プログラム・課題を基本的な評価対象とする。

(2) 国費（当省予算）の支出を受けて研究開発プログラム・課題を実施する当省研究開発機関、民間企業、大学・公設試験研究機関等について、当該研究開発プログラム・課題の評価の際に、これら機関における当該研究開発プログラム・課題に係る研究開発実施体制・運営面等に関し、国費の効果的・効率的執行を確保する観点から、必要な範囲で評価を行う。

(3) 上記(1)及び(2)の規定にかかわらず、当省研究開発機関が運営費交付金により自ら実施し、又は運営管理する研究開発プログラム・課題については、独立行政法人通則法（平成１１年法律第１０３号）及び大綱的指針に基づいて実施されるものであることから、原則として本指針による評価の対象としない。その他、公的第三者機関において技術的事項も含めて事業内容の評価検討等がなされることとなった研究開発プログラム・課題についても、原則として本指針による評価の対象としない。

(4) 評価の種類としては、この他に当省研究開発機関における研究者等の業績の評価が存在するが、これは当該機関の長が評価のためのルールを整備した上で、責任を持って実施することが基本であり、本指針による評価の対象としない。

４．評価の類型・階層構造及びリンケージ

(1) 実施時期による類型

評価はその実施時期により、事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価に類型化される。

(2) 評価の階層構造及び施策階層における評価

経済産業省における技術評価は、「研究開発プログラム」階層又は「研究開発課題」階層における評価を基本とするが、政策効果をあげるために特に必要があると認められるときには、「施策」階層において、関連する複数の研究開発プログラム・課題が有機的に連携をとって体系的に政策効果をあげているかを評価することとする。当該「施策（階層における）評価」は、それを構成する研究開発プログラム又は研究開発課題における評価結果を活用し、研究開発プログラムの評価に準じて実施するものとする。

(3) 実施時期による評価のリンケージ

中間評価、終了時評価は、研究開発プログラム・課題の達成状況や社会経済情勢の変化を判断し、計画の見直しや後継事業への展開等の是非を判断するものである。また、事前評価での予想が実際にどのような結果となったか、予算措置は妥当であったか等を確認することにより、事前評価の方法を検証し得るものである。したがって、中間評価、終了時評価の結果をその後の産業技術政策・戦略の企画立案や、より効果的な事前評価の評価手法の確立に反映させるよう努めるものとする。

５．評価方法等

厳正な評価を行うためには、評価方法、評価項目等に客観性を持たせることが必要であることから、本指針をはじめ評価実施に係る諸規程等を整備の上、公開するものとする。

技術評価室は本指針を踏まえ、評価マニュアル等を策定するとともに、円滑な評価の実施のための指導及び評価システムの維持管理を行う。

(1) 事業原簿

研究開発プログラム・課題の基本実施計画書、政策評価書等をもって事業原簿とする。推進課又は主管課は、事業原簿を作成・改定した場合は、速やかにその写しを技術評価室へ提出する。

(2) 評価項目・評価基準

評価の類型及び研究開発プログラム・課題の態様に応じて標準的な評価項目・評価基準を技術評価室が別に定めることとする。

(3) 評価手法

評価の類型に応じて適切な評価手法を用いるものとする。

(4) 評価の簡略化

評価の実施に当たっては、評価コストや被評価者側の過重な負担を回避するため、研究開発プログラムの評価においては、合理的と考えられる場合には、研究開発課題の評価を省略又は簡略化することができるものとする。また、評価対象となる事業に係る予算額が比較的少額である場合には、評価項目を限定する等の簡略化を行うことができるものとする。

なお、省略及び簡略化の標準的な方法については技術評価室が別に定める。

６．評価結果の取扱い等

(1) 評価結果の取扱い

評価事務局は、評価終了後速やかに評価書の写しを技術評価室に提出する。技術評価室は全ての評価結果について、これまでに実施された関連調査及び評価の結果、評価の実施状況等を踏まえつつ意見をまとめ、査定課及び政策評価広報課に報告する。

主管課、推進課は、評価結果を踏まえ、必要に応じ、研究開発プログラム・課題の運営見直し・改善等を図るものとする。

(2) 予算査定との関係

査定課は、技術評価室から事前評価、中間評価及び終了前評価の評価書の提出を受けた場合は、技術評価室の意見を踏まえつつ研究開発プログラム・課題の査定等を行う。

(3) 評価結果等の公開の在り方

評価結果及びこれに基づいて講ずる又は講じた措置については、機密の保持が必要な場合を除き、個人情報や企業秘密の保護、知的財産権の取得等に配慮しつつ、一般に公開することとする。

なお、事前評価については、政策立案過程の透明化を図る観点から、評価事務局は予算が経済産業省の案として確定した後に、公開するものとする。

７．評価システムの不断の見直し

いかなる評価システムにおいても、評価は評価者の主観的判断によってなされるものであり、その限りにおいては、完璧な客観性、公平性を求めることは困難である。したがって、評価作業が終了するごとにその評価方法を点検し、より精度の高いものとしていく努力が必要である。また、本指針については、こうした一連の作業を踏まえ、原則として毎年度見直しの要否を検討する。

８．評価体制の充実

評価体制の充実を図るため、研究者を評価者として活用するなどにより、評価業務に携わる人材を育成・確保するとともに、評価の実施やそれに必要な調査・分析、評価体制の整備等に要する予算を確保する。

９．評価者（外部有識者）データベースの整備

技術評価室は、国内外の適切な評価者を選任できるようにするため、及び個々の評価において普遍性・信頼性の高い評価を実現するため、研究開発プログラム・課題に係る外部有識者（評価者）データベースを整備する。

１０．評価における留意事項

(1) 評価者と被評価者との対等性

① 評価者と被評価者との関係

評価作業を効果的に機能させるためには、評価者と被評価者の双方が積極的にその知見と情報を提供し合うという協調的関係と、評価者もその評価能力を評価されるという意味で、評価者と被評価者とが相互に相手を評価するという緊張関係とを構築し、この中で、討論を行い、評価を確定していく必要がある。この際、評価者は、不十分な成果等を被評価者が自ら進んで提示しない事実があるかどうかを見極める能力が要求される。一方、被評価者は、評価対象の研究開発プログラム・課題の位置付けを明確に認識するとともに、評価結果を正確に理解し、確実にその後の研究開発プログラム・課題の創設、運営等に反映させていくものとする。

② 評価者に係る留意事項

研究開発成果を、イノベーションを通じて国民・社会に迅速に還元していく観点から、産業界の専門家等を積極的に評価者に選任する。

③ 被評価者に係る留意事項

被評価者は、評価を事業の質をより高めるものとして積極的に捉え、評価は評価者と被評価者の双方の共同作業であるとの認識の下、真摯な対応を図ることが必要である。

(2) 評価の不確実性

評価時点では見通し得なかった技術、社会情勢の変化が将来的に発生し得るという点で評価作業は常に不確実性を伴うものである。したがって、評価者は評価の精度の向上には、必然的に限界があることを認識した上で、評価時点で最良と考えられる評価手法をとるよう努めることが必要である。かかる観点からは、厳正さを追求するあまりネガティブな面のみを過度に減点法で評価を行うこととなると、将来大きな発展をもたらす技術を阻害するおそれがある点にも留意する必要がある。また、成果に係る評価において、目標の達成度合いを評価の判定基準にすることが原則であるが、併せて、副次的成果等、次につながる成果を幅広い視野からとらえる。

(3) その他の留意事項

① 評価人材としての研究者の活用

研究者には、研究開発の発展を図る上で専門的見地からの評価が重要な役割を果たすものであることから、評価者としての評価への積極的参加が求められる。一方、特定の研究者に評価実施の依頼が集中する場合には、評価への参加が大きな負担となり、また、評価者となる幅広い人材の養成確保にもつながらないことから、海外の研究者や若手研究者も評価者として積極的に参加させることなどにより評価者確保の対象について裾野の拡大を図るよう努める。

② 所期の成果を上げられなかった研究開発

研究開発は必ずしも成功するとは限らず、また、失敗から貴重な教訓が得られることもある。したがって、失敗した場合には、まずその原因を究明し、今後の研究開発にこれを活かすことが重要であり、成果を上げられなかったことをもって短絡的に従事した研究者や組織、機関を否定的に評価すべきものではない。また、評価が野心的な研究開発の実施の阻害要因とならないよう留意しなければならない。

③ アウトプット指標及びアウトカム指標の活用等

評価の客観性を確保する観点から、アウトプット指標やアウトカム指標による評価手法を用いるよう努める。ただし、論文の被引用度数、特許の申請状況等による成果の定量的評価は一定の客観性を有するが、研究開発プログラム・課題においては研究分野や内容により、その意味は大きく異なり得るものであり、必ずしも研究開発成果の価値を一義的に表すものではない。したがって、これらを参考資料として有効に活用しつつも、偏重しないよう留意すべきである。

④ 評価結果の制度間での相互活用

研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等を通じて次の段階の研究開発に連続してつなげるなどの観点から、関係府省、研究開発機関及び制度を越えて相互活用するよう努める。

⑤ 自己点検の活用

評価への被評価者等の主体的な取組を促進し、また、評価の効率的な実施を推進するため、推進課及び主管課は、自ら研究開発プログラム・課題の計画段階において具体的かつ明確な目標とその達成状況の判定基準等を明示し、研究開発プログラム・課題の開始後には目標の達成状況、今後の発展見込み等の自己点検を行い、評価者はその内容の確認などを行うことにより評価を行う。

⑥ 評価の国際的な水準の向上

研究開発の国際化への対応に伴い、評価者として海外の専門家を参加させる、評価項目に国際的なベンチマーク等を積極的に取り入れるなど評価に関して、実施体制や実施方法などの全般にわたり、評価が国際的にも高い水準で実施されるよう取り組む。

Ⅱ．評価の類型と実施方法

１．研究開発プログラムの評価

１－１．複数の研究開発課題によって構成される研究開発プログラム（以下「複数課題プログラム」）の評価

(1)事前評価

① 評価者
　外部評価者
② 被評価者
　推進課及び主管課
③ 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
　外部評価を行う。
⑤ 評価項目・評価基準
　技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
⑥ 実施時期
　「複数課題プログラム」の創設時（プログラム構成要素として最初に実施する「研究開発課題（プロジェクト)」の初年度予算要求時）に、当該プログラム全体に係る「事前評価」を実施する。
　これに加え、既に実施中の複数課題プログラムにおいて、新たな「研究開発課題」を実施する前（初年度予算要求時）に、当該研究開発課題に係る「事前評価」を実施するものとする。

(2)中間評価

① 評価者
　外部評価者
② 被評価者
　推進課及び主管課
③ 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
　外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

複数課題プログラムを構成する各「研究開発課題」が終了する各年度中に、当該プログラム全体に係る中間評価を実施する。（ただし、当該研究開発課題の終了をもって複数課題プログラム全体が終了する場合にあっては、当該プログラム全体の終了時評価（終了前評価又は事後評価）を行うものとし、前記中間評価は実施しない。）

なお、複数課題プログラムを構成する一の「研究開発課題」の実施期間が５年以上である場合にあっては、必要に応じ、上記中間評価の実施に加え、当該研究開発課題事業の開始から３年程度ごとを目安として、当該プログラム全体に係る中間評価を行うものとする。

(3) 終了時評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

複数課題プログラム全体の終了時に実施する。

ただし、当該プログラムの成果を切れ目なく次の研究開発プログラム等につなげていく場合には、当該プログラムが終了する前の適切な時期に終了時評価（終了前評価）を行うこととし、その他の場合には、当該プログラムの終了直後に終了時評価（事後評価）を行うものとする。

１－２．競争的資金制度等の研究資金制度プログラムの評価

(1)事前評価

① 評価者
　外部評価者
② 被評価者
　推進課及び主管課
③ 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
　外部評価を行う。
⑤ 評価項目・評価基準
　技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
⑥ 実施時期
　新規の研究資金制度プログラムの創設時（初年度予算要求時）に行う。

(2)中間評価

① 評価者
　外部評価者
② 被評価者
　推進課及び主管課
③ 評価事務局
　推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。
④ 評価手法
　外部評価を行う。
⑤ 評価項目・評価基準
　技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。
⑥ 実施時期
　実施期間が５年以上の研究資金制度プログラム又は実施期間の定めのない研究資金制度プログラムについて、３年程度ごとに行う。

(3)終了時評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

研究資金制度プログラムの終了時に実施する。

ただし、当該研究資金制度プログラムの成果を切れ目なく次の研究資金制度プログラム等につなげていく場合には、当該研究資金制度プログラムが終了する前の適切な時期に終了時評価（終了前評価）を行うこととし、その他の場合には、当該研究資金制度プログラム終了直後に終了時評価（事後評価）を行うものとする。

２．研究開発課題（プロジェクト）の評価

(1)事前評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥実施時期

新規の研究開発課題（プロジェクト）の創設時（初年度予算要求時）に行う。

(2)中間評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

実施期間が５年以上の研究開発課題（プロジェクト）又は実施期間の定めのない研究開発課題（プロジェクト）について、３年程度ごとに行う。

(3)終了時評価

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

研究開発課題（プロジェクト）の終了時に実施する。

ただし、当該研究開発課題（プロジェクト）の成果を切れ目なく次の研究開発課題（プロジェクト）等につなげていく場合には、当該研究開発課題（プロジェクト）が終了する前の適切な時期に終了時評価（終了前評価）を行うこととし、その他の場合には、当該研究開発課題（プロジェクト）終了直後に終了時評価（事後評価）を行うものとする。

３．追跡調査・追跡評価

３－１．追跡調査

終了した研究開発プログラム・課題を対象として、終了後数年間にわたり、その研究開発活動や研究開発成果が産業、社会に及ぼした効果等について調査を行う。

３－２．追跡評価

終了して数年経った国費（当省予算）投入額の大きな研究開発プログラム・課題を対象として、その研究開発活動や研究開発成果が産業、社会に及ぼした効果等について外部評価を行う。

(1) 評価者

外部評価者

(2) 被評価者

評価対象となる研究開発プログラム・課題に携わった推進課及び主管課

(3) 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

(4) 評価手続・評価手法

過去の事業原簿等の文献データ、関連部署・機関及びその他関係者等からの聞き取り調査等による情報を基にパネルレビュー又は第３者機関への委託による外部評価を行う。

(5) 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

(6) 実施時期

研究開発プログラム・課題終了後、成果の産業社会への波及が見極められる時点とする。

参考資料３

経済産業省技術評価指針に基づく
標準的評価項目・評価基準

平成２５年４月

経済産業省産業技術環境局

技術評価室

目　次

ページ

はじめに ····· 1

Ⅰ．技術に関する施策評価 ····· 3

Ⅱ．技術に関する事業 ····· 6

Ⅱ－１　プロジェクト評価 ····· 6

Ⅱ－２　研究開発制度評価 ····· 9

Ⅱ－３　競争的資金による研究課題に関する評価 ····· 13

Ⅲ．追跡評価 ····· 16

はじめに

研究開発評価に当たっては、公正性、信頼性さらには実効性の観点から、その対象となる研究開発の特性や評価の目的等に応じて、適切な評価項目・評価基準を設定して実施することが必要である。

本標準的評価項目・評価基準は、経済産業省における技術に関する施策及び技術に関する事業の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたガイドラインである経済産業省技術評価指針に基づき、評価方法、評価項目等に一貫性を持たせるために、標準的なものとして、技術評価室が定めるものである。

なお、本標準的評価項目・評価基準は、あくまで原則的なものであり、必ずしも全てそのとおりとしなければならないものではなく、適切な評価の実施のために評価対象によって、適宜、変更することを妨げるものではない。

Ⅰ．施策評価

【事前評価】

１．目的

・施策の目的は特定されていて、簡潔に明示されているか。
・当該施策の導入により、現状をどのように改善し、どのような状況を実現しようとしているのか。

２．必要性

・国（行政）が関与する必要があるか。

（注１）　背景として、どのような問題が当該施策の対象領域等に存在するのか。
また、その問題の所在や程度を数値、データや文献により具体的に把握しているか。

（注２）　行政関与の必要性や妥当性について、その根拠を客観的に明らかにする。
具体的には、妥当性を有することを説明する場合、これらニーズや上位目的に照らした妥当性を可能な限り客観的に明らかにする。また、「市場の失敗」と関連付けて行政の関与の必要性を説明する場合には、「行政関与の基準」の「行政関与の可否に関する基準」により、必要性を明らかにする。

（注３）　行政目的が国民や社会のニーズ又はより上位の行政目的に照らして妥当性を有していること、民間活動のみでは改善できない問題であって、かつ、行政が関与することにより改善できるものが存在することを明らかにする。

３．施策の概要

・施策全体としての概要を適切に記述しているか。
・当該施策を構成する事業を網羅し、個々の事業について記載しているか。

（注）施策の概要の記載において、施策の中間・事後評価時期を記載する。

４．目標、指標及び達成時期

（１）目標

・具体的にいつまでにいかなる事業をどの程度実施し、どの水準から事業を開始し、どの水準の成果を達成するのか。目的と照らして、明確かつ妥当な目標を設定しているか。
・政策の特性などから合理性がある場合には、定性的な目標であっても良いが、その場合、目的として示された方向の上で目指す水準（例えば、研究開発成果による新規市場の創設効果など）が把握できるものとなっているか。

（注）　目標は、資金提供やサービス提供の量といった施策の実施の直接的な結果（アウトプット）だけでなく、施策の目的を具現化した効果（アウトカム：実施の結果、当該施策を直接に利用した者以外にも生ずる効果等）についても設定する。

（２）指標及び目標達成時期

・適切な指標を設定しているか。毎年のモニタリングとして測定可能なものとなっているか。
・当該指標により当該目標の達成度が測定可能なものとなっているか。

・目標達成時期は明確かつ妥当であるか。

（注）＜共通指標＞
・論文数及びそれら論文の被引用度数
・特許等取得した知的所有権数、それらの実施状況
・特に、製品化に際しての実施権供与数、取得実施権料
・国際標準形成への寄与

５．中間・事後評価の時期及び方法

・事前評価書に、中間・事後評価の時期を設定しているか。
・目標達成や運用の状況を、いつ、どのようにして計測し、また、検証するかを明らかにしているか。
・事前評価段階で、評価方法を定めているか。

（注１）施策の中間評価は、技術評価指針に基づき、４年以上の事業期間である施策について、実施する。
なお、技術評価指針における「中間評価」は、政策評価法上においては「事後評価」のカテゴリーに整理される。
（注２）事業の実施状況モニタリングは、過度のコストを伴う等非現実的な実施が前提とならないように配慮し、各指標値を得る情報源及び入手頻度等は明確にする。

６．有識者、ユーザー等の各種意見

・当該施策の企画・立案過程において参照した外部の意見や要請等を施策全体及び個別事業毎に具体的に記述しているか。

７．有効性、効率性等の評価

（１）手段の適正性
・目的や目標を達成するために採り得る政策手段にはどのようなものがあるか。その中で、提案している施策が最も優れていると考える根拠は何か。
・採ろうとする政策手段が目的や目標の達成に役立つ根拠及び程度を明らかにしているか。

（２）効果とコストとの関係に関する分析（効率性）
・要求予算規模、想定減税規模、機会費用その他の当該政策手段に伴い発生するコストを明確にしているか。
・各選択肢についての社会的便益と社会的費用の比較（費用便益分析、費用効果分析、（社会的便益が同等な場合は）コスト分析等）を行っているか。定量的な評価が困難な場合は、少なくとも、各々の想定される結果の長所・短所の定性的な比較に基づいて行っているか。

（３）適切な受益者負担
・政策の目的に照らして、政策の効果の受益や費用の負担が公平に分配されるか。

【中間・事後評価】

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）施策の目的の妥当性

・施策の目的が波及効果、時期、主体等を含め、具体化されているか。

・技術的課題は整理され、目的に至る具体的目標は立てられているか。

・社会的ニーズに適合し、出口（事業化）を見据えた内容になっているか。

（２）施策の政策的位置付けの妥当性

・施策の政策的位置意義（上位の政策との関連付け、類似施策との関係等）は高いか。

・国際的施策動向に適合しているか。

（３）国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

・国として取り組む必要のある施策であり、当省の関与が必要とされる施策か。

・必要に応じ、省庁間連携は組まれているか。

２．施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

（１）現時点において得られた成果は妥当か。

（２）施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

・配置された技術に関する事業は、技術に関する施策の目的を実現させるために必要か。

・配置された技術に関する事業に過不足はないか。

・配置された技術に関する事業の予算配分は妥当か。

・配置された技術に関する事業のスケジュールは妥当か。

３．総合評価

Ⅱ．技術に関する事業評価

Ⅱ－１　プロジェクト評価

【事前評価】

１．事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）事業の必要性はあるか（どのような社会的課題等があるのか）。
（２）アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期は適切に設定されているか。
（３）アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度は優れているものか。
（４）アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期は適切に設定されているか。

２．アウトカムに至るまでの戦略について

（１）アウトカムに至るまでの戦略に関して、以下の点について適切に計画されているか。
・アウトカムに至るまでのスケジュール
・知財管理の取扱
・実証や国際標準化
・性能や安全性基準の策定
・規制緩和等を含む実用化に向けた取組

（２）成果のユーザーの段階的イメージ・仮説は妥当なものか。
・技術開発成果の直接的受け手は誰か
・社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か

３．次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（１）次年度以降に技術開発を実施する緊急性は合理的なものか。

４．国が実施する必要性について

（１）科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性を有している事業か。
・我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か

・他の研究分野等への高い波及効果を含むものか

５．当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（１）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性は適切か
・当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業として何があるか
・上記の関連性のある事業と重複がなく、また、適切に連携等が取れているか

【中間・事後評価】

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
・事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
・社会的・経済的意義（実用性等）
（２）国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
・国民や社会のニーズに合っているか。
・官民の役割分担は適切か。

２．研究開発等の目標の妥当性

（１）研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．成果、目標の達成度の妥当性

（１）成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。
（２）目標の達成度は妥当か。
・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．事業化、波及効果についての妥当性

（１）事業化については妥当か。

・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

＊知的基盤・標準整備等の研究開発の場合、以下の評価項目・評価基準による。

４．標準化等のシナリオ、波及効果の妥当性

（１）標準化等のシナリオは妥当か。

・ＪＩＳ化や我が国主導の国際規格化等に向けた対応は図られているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）研究開発計画は適切かつ妥当か。

・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。

・採択スケジュール等は妥当であったか。

・選別過程は適切であったか。

・採択された実施者は妥当であったか。

（２）研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。

・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。

・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。

・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発で、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

・資金の過不足はなかったか。

・資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。
・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。
（５）変化への対応は妥当か。
・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
・代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

Ⅱ－２　研究開発制度評価

※複数の制度の制度構造評価を実施する場合、参考に示す評価項目・評価基準に留意する。

【事前評価】

１．事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）事業の必要性はあるか（どのような社会的課題等があるのか）。
（２）アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期は適切に設定されているか。
（３）アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度は優れているものか。
（４）アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期は適切に設定されているか。

２．アウトカムに至るまでの戦略について

（１）アウトカムに至るまでの戦略に関して、以下の点について適切に計画されているか。
・アウトカムに至るまでのスケジュール
・知財管理の取扱
・実証や国際標準化
・性能や安全性基準の策定
・規制緩和等を含む実用化に向けた取組

（２）成果のユーザーの段階的イメージ・仮説は妥当なものか。

・技術開発成果の直接的受け手は誰か
・社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か

３．次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（１）次年度以降に技術開発を実施する緊急性は合理的なものか。

４．国が実施する必要性について

（１）科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性を有している事業か。
・我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か
・他の研究分野等への高い波及効果を含むものか

５．当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（１）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性は適切か
・当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業として何があるか
・上記の関連性のある事業と重複がなく、また、適切に連携等が取れているか

【中間・事後評価】

１．制度の目的及び政策的位置付けの妥当性
（１）国の制度として妥当であるか、国の関与が必要とされる制度か。
（２）制度の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
（３）他の制度との関連において、重複等はないか。

２．制度の目標の妥当性
（１）目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．制度の成果、目標の達成度の妥当性
（１）制度としての成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの

作製等があったか。

（２）制度としての目標の達成度は妥当か。

・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．制度採択案件に係る事業化、波及効果等その他成果についての妥当性

（１）成果については妥当か。

・当該制度の目的に合致する成果は得られているか。

・事業化が目標の場合、事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．制度のマネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）制度のスキームは適切かつ妥当か。

・目標達成のための妥当なスキームとなっているか、いたか。

（２）制度の体制・運営は適切かつ妥当か。

・制度の運営体制・組織は効率的となっているか、いたか。

・制度の目標に照らして、個々のテーマの採択プロセス（採択者、採択評価項目・基準、採択審査結果の通知等）及び事業の進捗管理（モニタリングの実施、制度関係者間の調整等）は妥当であるか、あったか。

・制度を利用する対象者はその目標に照らして妥当か。

・個々の制度運用の結果が制度全体の運営の改善にフィードバックされる仕組みとなっているか、いたか。

・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

・資金の過不足はなかったか。

・資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。

・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。

・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

（５）変化への対応は妥当か。

・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか。

・代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

（参考）制度構造評価

＜複数制度の俯瞰的評価＞

１．複数制度のバランス、相対的位置の妥当性

・他の制度との重複により効率が低くなっていないか。結果的に類似し重複や非効率が目立つ制度となってはいないか。

・産業技術戦略や内外情勢変化に即した制度の配置、構成となっているか。

・目標のレベル、国が関与すべき程度、実用化時期の想定等に関して、複数制度の相対的位置、複数制度間の政策目的に照らした整合性は妥当か。

・利用者から見て、制度間の相違（趣旨、対象者、要件等）が分かりにくいものとなっていないか。一方、複数の制度間で申請書類の様式が必要以上に異なり、利用者側に不用な負担をしいることとなっていないか。

＜個別制度の方向性項目＞

２．俯瞰的にみた個別制度の方向性

・内外情勢変化、他の制度との相対関係、個別制度評価の結果等を踏まえ、個別制度の継続、統廃合、新設の必要性はどうか。国の関与の度合いはどうか。

・統廃合を行う必要はなくても、運用面における連携、協調の必要性はどうか。

Ⅱ－３　競争的資金による研究課題に関する評価

＜ア．主として技術シーズの創造を目的とする競争的資金制度の場合＞

【事前評価】

１．目標・計画

・制度の目的（公募の目的）に照らして、研究開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標の実現性、計画の妥当性はどうか。

２．科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）

・最新の研究開発動向・水準からみて新規性はあるか。
・研究開発内容について独創性はあるか。
・飛躍的に技術レベルを高めるような技術的ブレークスルーポイントがあるか。

３．実施体制

・研究開発代表者に十分な研究開発管理能力があるか。既に、相当程度の研究開発実績を有しているか。
・研究開発内容に適した研究開発実施場所が選定されているか。
・研究開発を行う上で、十分な研究開発人員（研究開発分担者）及び設備等を有しているか、また、研究開発を推進するために効果的な実施体制となっているか。

４．実用化の見通し

・研究開発の成果が実用化に結びつく可能性があるか。
・実用化された場合に、産業・社会への波及効果は認められるか。
・研究開発代表者又は研究開発チームに属する研究開発分担者が、当該研究開発の基礎となる特許を有しているか、又は出願中であるか。
・国内外で関連の特許が押さえられていないか。

５．想定される選択肢内の比較

・事業の提案に当たり、選択肢の吟味を行っているのか。提案する手段が最も優れていると考える根拠は何か。

【中間・事後評価】

１．目標・計画

・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
・成果は目標値をクリアしているか。

２．要素技術から見た成果の意義

・科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）が認められるか。

３．実施体制

・研究開発管理能力、研究開発実施場所、研究設備等実施体制は適切であったか。
・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施す

ることが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

４．実用化の見通し

・成果に関する特許の出願予定はあるか。
・実用化に向けた具体的な計画があるか。

＜イ．主として研究開発成果を早期に実用化することを目的とする競争的資金の場合＞

【事前評価】

１．必要性

・制度の目的に照らして、国の支援が必要な事業であるか。
・当該事業に対する社会的なニーズが具体的かつ明確となっており、ニーズを満たすために相当程度有効な事業であるか。

２．目標・計画

・制度の目的（公募の目的）に照らして、技術開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標や計画は実現性が高い妥当なものとなっているか。
・実用化（事業化）に向けた具体的な計画を有し、実用化（事業化）の可能性が高いものとなっているか。

３．新規性、先進性、技術レベル

・革新的な新製品の開発に取り組むものであるか。
・既存製品の延長ではあるが経済性の格段の向上や新機能の付加が認められるなど、新規性・先進性を有しているか。
・技術開発の難易度が既存の技術水準に比して高い事業であるか。

４．実施体制

・事業を的確に遂行するために必要な開発体制及び能力を有しているか。既に、関連する研究開発等の事業経験があるか。

５．実用化（事業化）の見通し

・当該研究開発の基礎となる研究開発成果が確実なものとなっているか。
・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。

・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

【中間・事後評価】

１．必要性

・社会的なニーズを満たすために相当程度有効な事業であったか。国の支援が必要な事業であったか。

２．目標・計画

・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
・成果は目標値をクリアしているか

３．要素技術から見た成果の意義

・新規性、先進性が認められるか。

４．実施体制

・開発体制及び能力は適切であったか。
・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

５．実用化（事業化）の見通し

・成果に関する特許出願、国際標準の提案の予定はあるか。
・実用化に向けたスケジュールや体制は明確になっているか。
・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。
・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

Ⅲ．追跡評価

Ⅰ．波及効果に関する評価

Ⅰ－１．技術波及効果

（１）実用化への進展度合

・プロジェクトの直接的および間接的な成果は、製品やサービスへの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるか。特許取得やその利用状況、市場環境の変化、競合技術の台頭等を踏まえて評価する。

①プロジェクト終了後に実用化した製品やサービスは数多くあったか。

②プロジェクトの成果から今後実用化が期待される製品やサービスはあるか。

③多額の実施料収入を生み出す等、インパクトのある技術が得られたか。

④外国での特許取得が行われたか。

⑤基本特許を生み出したか。

（２）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

・プロジェクトの成果により直接的に生み出された技術は、関連技術分野に技術面でのインパクトを与えたか。派生技術には、プロジェクト実施当時に想定されていたもの、想定されていなかったものを含めてどのようなものがあり、それらはどのように利用されているかを踏まえて評価する。

①数多くの派生技術を生み出したか。

②派生技術は多くの種類の技術分野にわたっているか。（当該技術分野、他の各種技術分野）

③直接的に生み出された技術又は派生技術を利用した研究主体は数多くあるか。

④直接的に生み出された技術又は派生技術を利用する研究主体は産業界や学会に広がりを持っているか。（参加企業、大学等、不参加の同業種の企業、その他の産業等）

⑤参加企業等が自ら実施する研究開発の促進効果や期間短縮効果はあったか。

（３）国際競争力への影響

・直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力はどのように強化されたか。

①我が国における当該分野の技術レベルは向上したか。

②外国と技術的な取引が行われ、それが利益を生み出しているか。

③プロジェクトの技術分野に関連した外国での特許取得は積極的になされているか。

④国際標準の決定に対し、プロジェクトはメリットをもたらしたか。

⑤国際標準等の協議において、我が国がリーダーシップをとれるようになったか。

⑥外国企業との主導的な技術提携は行われたか。

⑦プロジェクトが外国の技術政策に影響を与え、その結果技術交流が促進され

たり、当該分野で我が国がイニシアチブをとれるようになったか。

Ⅰ－２．研究開発力向上効果

（１）知的ストックの蓄積度合

・特許や、研究者のノウハウ・センス・知識等の研究成果を生み出す源となる知的ストックはどのような役割を果たしたか。それらはプロジェクト終了後も継承され、次の研究の芽になる等、今後も影響を持ち得ることができるか。

①当該分野における研究開発は続いているか。

②プロジェクト終了後にも、プロジェクトに参加した研究者が派生技術の研究を行っているか。

③プロジェクトの終了時から現在までの間に、知的ストックが将来的に注目すべき新たな成果（画期的な新製品・新サービス等）を生み出す可能性は高まっているか。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

・プロジェクトは、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか。あるいは、実施企業の技術戦略に影響を与えたか。

①企業を超える研究開発のインフラとして、学会、フォーラム、研究者間交流等の公式・非公式の研究交流基盤は整備され、活用されているか。

②企業間の共同研究の推進等、協力関係、良好な競争的関係が構築されたか。

③顧客やビジネスパートナーとの関係の変化が、経済性を向上させたか。

④技術の管理組織を再編成する契機となったか。

⑤研究開発部門の再構成等、社内の組織改編は積極的に行われたか。

⑥研究開発の予算規模が増減する契機となったか。

⑦プロパテント等の特許戦略に対する意識が高くなったか。

⑧知的ストックは、企業の技術戦略にどのような影響を与えたか。

（３）人材への影響

・プロジェクトは研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したか。

①国内外において第一人者と評価される研究者が生まれたか。

②論文発表、博士号取得は活発に行われたか。

③プロジェクト従事者の企業内での評価は高まったか。

④研究者の能力向上に結び付くような研究者間の人的交流が行われたか。

⑤関連分野の研究者増員が行われたか。

⑥国内外から高く評価される研究機関となったか。

Ⅰ－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

・新しい市場を創造したか。また、その市場の拡大に寄与したか。

（２） 経済的インパクト

・生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響は大きかったか。
①直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、製品の売り上げと利益は増加したか。
②直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、雇用促進は積極的に図られたか。

（３）産業構造転換・活性化の促進

・プロジェクトが産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加等）にどのような役割を果たしたか。
①プロジェクトが、各関連産業における市場の拡大や雇用の増加等に寄与したか。
②プロジェクトが新たな産業の勃興や、既存市場への新規参入、あるいは既存市場からの撤退等をもたらしたか。また、それらが市場全体における雇用に影響したか。
③プロジェクトが生産業務の改善や更新に結びついたことにより生産性・経済性は向上したか。

Ｉ－４．国民生活・社会レベルの向上効果

・プロジェクトによって新たな製品・サービスが実用化されたこと、プロジェクトの成果の応用による生産性の向上や顕著なコストダウン、デファクトを含めた規格化を促進したこと等の事例がある場合、それらは、例えば下記に挙げる項目にそれぞれどのような影響をもたらしたか。

（１）エネルギー問題への影響

・エネルギー問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（２）環境問題への影響

・環境問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（３）情報化社会の推進

・情報化社会の推進に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（４）安全、安心、生活の質

・国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。
①国民生活の利便性を向上させた事例が存在するか。
②国民生活の安全性の向上に寄与したか。
③プロジェクトの成果は、身障者や高齢者の多様な生活を可能にしたか。また、個の自立を支援するものであるか。

Ｉ－５．政策へのフィードバック効果

（１）その後の事業への影響

・プロジェクトの成果や波及効果、改善提案、反省点等がその後の研究開発プロ

ジェクトのテーマ設定や体制構築へ反映されたか。

（２）産業戦略等への影響

・プロジェクトの直接的・間接的な成果が実用化したり、関連の研究開発基盤ができたこと等による、その後の産業戦略等への影響があったか。

Ⅱ．現在の視点からのプロジェクトの評価

Ⅱ－１．国家プロジェクトとしての妥当性

・国のプロジェクトとしてどのような効果があったか。Ⅰに示した各効果を総合的に評価する。

・現在（追跡評価時点）から見て、国が関与する必要性があったか。また、関与の方法や程度は妥当であったか

①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合。

②環境問題への先進的対応等、民間企業には市場原理に基づく研究開発実施インセンティブが期待できない場合。

③標準の策定、データベース整備等のうち社会的性格が強いもの（知的基盤）の形成に資する研究開発の場合。

④国の関与による異分野連携、産学官連携等の実現によって、研究開発活動に新たな付加価値をもたらすことが見込まれる場合。

⑤その他国が主体的役割を果たすべき特段の理由がある場合。

Ⅱ－２．目標設定

・当時の技術動向、市場動向、社会環境、政策目的等から見て、目標設定の方向性とそのレベルは妥当であったか。

Ⅱ－３．プロジェクト実施方法

・プロジェクトの計画策定、スキーム（予算制度）、実施体制、運営方法等の実施方法が現在の視点から見て妥当であったか。

Ⅱ－４．Ⅱ－１～Ⅱ－３の評価結果を踏まえ、プロジェクト終了時の事後評価の妥当性

・事後評価で行われた評価結果は、追跡評価の時点から見て妥当であるか。

（現在の事後評価項目の例示）

目的・意義の妥当性、目標の妥当性、計画内容の妥当性、国のプロジェクトであることの妥当性、研究開発体制・運営の妥当性、研究開発成果の計画と比較した達成度、実用化の見通し（成果普及、広報体制、波及効果）、総合評価、今後の提言

・今後の最終評価において改善すべき評価方法、考慮すべき要因等を提案。

Ⅱ－５．プロジェクト終了後のフォローアップ方法

・プロジェクトの成果の実用化や普及に対して、プロジェクト終了後のフォローアップ体制が適切であったか。後継の国のプロジェクトを立ち上げる必要は無かったか。
・不適切な場合の改善点、より効果を発揮するための方策の提案。

参考資料４

宇宙産業プログラムに関する
施策・事業評価報告書

平成２４年３月

産業構造審議会産業技術分科会

評　価　小　委　員　会

技術に関する施策・事業評価報告書概要

技術に関する施策

技術に関する施策名	宇宙産業プログラム
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

技術に関する施策の目的・概要

宇宙は国家の安全、経済、科学を担う戦略的分野であり、各国とも安全保障、国威発揚、技術開発のために国が主導して自国産業を育てている。また、宇宙の利用サービスは大幅に拡大しており、宇宙産業の裾野はますます広がっているほか、新興国を中心に衛星の需要も拡大しており、宇宙産業は今後も市場規模の拡大が見込まれる成長分野である。

経済産業省における宇宙産業プログラムの目的は、「国家の宇宙開発を支える基盤である宇宙産業について、我が国の持つ先端民生技術の強みを最大限活用し、重要基盤技術の研究開発を実施することで国際競争力の強化を図る」ものである。

技術に関する事業一覧

Ａ．小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（プロジェクト）
Ｂ．空中発射システムの研究開発（プロジェクト）
Ｃ．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（プロジェクト）
Ｄ．石油資源遠隔探知技術の研究開発（プロジェクト）
Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／
次世代合成開口レーダ等の研究開発（プロジェクト）
Ｆ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発（プロジェクト）
Ｇ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発（プロジェクト）
Ｈ．太陽光発電無線送受電技術研究開発（プロジェクト）
Ｉ．次世代衛星基盤技術開発プログラム（準天頂衛星システム基盤プロジェクト）
（プロジェクト）
Ｊ．次世代構造部材創製・加工技術開発事業（次世代衛星基盤技術開発）（プロジェクト）

技術に関する施策評価の概要

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

宇宙は開発するものから利用するものへと認識が変わってきており、宇宙の利用が産業として成り立つことが重要である。この観点から、宇宙産業プログラムを構成するプロジェクトは、先端民生技術を最大限活用して人工衛星の基盤技術を確立させ、国際競争力の強化を図るものであり、国の施策として妥当である。また、個別の目標も明確に位置付けられており、継続すべき事

業は継続していることも評価できる。開発した地球観測衛星の価値を高めるためには、経済産業省が管轄するエネルギー・資源分野のみではなく、その他多くの分野への利用を促進することが必要であるが、その点は本施策に反映されており評価できる。

なお、宇宙システムは軌道上システムと宇宙輸送システム及び地上システムから成るが、本プログラムは人工衛星に重点を置いており、宇宙輸送システム及び地上システムの施策がやや少ない。それらは常に表裏一体のものであることを認識すべきである。

事業化については、初期の段階でビジネスの専門家等を交えて設定し、必ず最初に特許・標準（デファクト、デジュール）等の目標も設定し、知財・標準化戦略を合わせて行うことが望まれる。目標が遠大であるテーマほど、プログラムの全体像を俯瞰的に見ることができず、個別具体的なプロジェクトの並列化が起こってしまっている。

宇宙産業は総合産業であり、必然的にほぼ全ての府省庁が絡む産業と言えるが、その連携が見えていないことは問題である。産業支援として取りまとめ役は経済産業省が妥当であるが、ユーザとしての要求／提案、円滑な実施のための支援、得られる成果の教育への波及などは他府省庁との協力なしには効果的な施策とはならないと考える。

地球観測衛星によって得られたデータを実利用に結びつけるには、データの価格（データポリシー）及び使いやすさ、ユーザ業界における衛星観測データ利用促進のための環境整備など利用分野ごとに異なる様々な問題を解決する必要があるため、実利用の推進を施策として拡充してもらいたい。経済産業省のみならず環境省、農林水産省も取り組むべき課題（エネルギー・資源、地球環境、食糧などの社会的ニーズに基づく課題）を持っており、他省と協力しつつ、エンドユーザーの立場から衛星データの実用化を進めていく必要がある。また、宇宙分野では、政府調達は必須であり、今後、さらに行政向けのリモートセンシングの活用などを振興してほしい。

２．施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性

本施策は、技術の開発段階によって、各事業の成果の質と量は異なるが各事業の重要性は明確になっており、現時点で得られた成果は概ね良好である。また、フライトセグメントから打ち上げに至るまで広くカバーした活動になっていること、日本企業の強みと弱みのプロジェクトがあることから、バランスがとれていると言える。総じて妥当な予算が配分されており、成果が得られている。

小型化等による先進的宇宙システムの研究開発は民生技術・部品を活用して、いかに事業化できるかにかかっており、それは SERVIS 衛星に代表される宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業の成果に基づくものであり、両者はまさに補完的な意義を有する。また、地球観測センサに関しては、ASTER、PALSAR から後継機としてのハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサへつながり、準天頂衛星を例とした次世代衛星基盤技術では熱制御、次世代イオンエンジン、測位用擬似時計技術を柱とするシステム基盤プロジェクトと構造部材創成・加工技術開発事業に分けられ、両者を合わせて次世代衛星基盤技術を構成するようになっていて妥当である。

なお、宇宙産業は多様な技術が高度に統合された産業であるため、個々の事業を支援するのみではなく、異なる事業者が実施している事業を有機的につなげる必要がある。また、事業を進めるにあたっては、開発する技術、時間的観点からの優位性を事業の競合相手と比較することが必

須である。さらに、事業化は、自国だけでなく、競合となる他国の状況にも大きく影響を受けるため、資金を前倒し投入して事業化を早めたり、世界のトレンドに合わせて事業を変更していく等、柔軟性が必要である。
本施策には、データベース整備などのソフト面のプロジェクトも含まれているが、技術開発はハードウェアを中心とした技術・製品の開発が多く、ソフトウェア技術にあまり焦点が当たっていない。世界的には、今後はソフトウェア技術とシステム技術がイノベーションの中心となると捉えられているため、当該技術により力を入れていくべきである。
本施策の目的は「技術の研究開発」である。衛星による地球観測の場合、長期にわたる施策は「衛星の打ち上げ・運用」の段階に入っており、「必要な技術の開発」と性格が異なるため、別の枠組みとして事業を実施するもしくは、評価の仕方を変えることも検討に値する。

３．総合評価

宇宙産業プログラムを構成するプロジェクトは、先端民生技術を最大限活用して人工衛星の基盤技術を確立させ、国際競争力の強化を図るものであり、国の施策として妥当である。宇宙開発の事業化を進める上で重要な活動となっている。
宇宙基本法、宇宙基本計画、地理空間情報活用推進基本計画及び第 4 期科学技術基本計画等の上位政策との関連が明らかであり、政策的位置づけがはっきりしており、ロジックモデルにしたがって実施機関の役割も設定されている。どの事業も公共性を有し、一企業で実施するには金額が大きすぎるので、国として取り組む施策である。政府調達が重要である宇宙開発において、海外への売り上げを増やすためにカタログ化・パッケージ化して行く方向性は良い。その中で日本の技術が際立っていけるような、官民一体となったビジネスデザインを進める上で、現在の官民連携体制をさらに強化してほしい。
各事業は概ね適切な目標を設定できており、それを実現するためのスケジュール及びコストも適切に管理されており、事業の結果も良好に得られている。
今後の主な課題として、1)宇宙機器産業の拡大、2)事業の積極的な海外展開、3)事業間の連携、4)国民への説明責任の強化、の 4 項目がある。
1)本宇宙産業プログラムで取り上げられている研究開発の事業化のような官民協働による衛星需要の掘り起こしによる宇宙機器産業の拡大が必要である。日本の宇宙産業市場の大部分は、宇宙利用サービスを利用した事業によるユーザ産業群であるためである。また、その場合、モノを作ること、技術を開発することだけでなく、それらに付随する方法論、開発環境及び知財・標準化による国際戦略も考慮して実施することが望ましい。
2)今後、海外への売り込みにあたって、コストで勝負する技術と、性能・品質で勝負する技術との差別化を進め、それぞれに整合する開発計画を立てて行く必要がある。
3)現段階では、事業間の連携が実現されていない、各事業の競合他者との比較が弱い、省庁間の連携がないといった問題がある。今後は、それらの点を視野に入れた政策立案を進めてほしい。
4)国民に対する説明は「宇宙産業プログラムに関する施策・事業」のすべてにおいて必須である。特に、資源探査における衛星データ利用は、本施策・事業の中でも重要な部分であるため、その費用対効果の定量的説明は困難であるといえども、何らかの方法で国民にその意義を理解し

てもらう説明の工夫が必要であろう。

今後の研究開発の方向等に関する提言

宇宙の利用を産業として成立させるためには、民生技術・部品を使用することで、宇宙機器産業への企業の参入を促し、一方で利用実例の紹介などによってユーザー産業群の裾野を広げ、宇宙産業全体を拡大させることが重要であり、さらに規制適正化や補助制度などの政策面からの市場規模拡大の努力が望ましい。

その中で、新興国をターゲットとして地球観測分野で、衛星開発からデータ利用手法のサポート等まですべてをパッケージとして、売り込める技術開発は妥当であり、今後も鋭意進めていただきたい。特に、地上受信システムやデータ利用手法のサポート等は今後も継続的な市場を確保できるという点で重要である。

各プロジェクトの主目的は技術開発であり、事業化推進のための問題の整理とその解決は主目的ではないため事業化計画が具体性に欠ける。そこで、実利用推進（事業化推進）の道筋の明確化を主目的とした別枠のプロジェクトを立ち上げることは検討に値する。

経済産業省の担うべき範囲と責任の明確化が不十分だと思われる中、経済産業省がリモートセンシングに集中している点は、政策判断として高く評価できる。今後もリモートセンシングに関する技術力強化を柱にプログラムを進めるべきである。なお、国の限られた予算・人員の中で最大の成果を上げるためには、他にもっと良い施策・事業があるのではないかとの視点を厳しくもつことが重要である。

プロジェクトH（太陽光発電無線送受電技術の研究開発）に相当する将来のエネルギー確保の技術は極めて重要であるため、先進国の技術開発動向を注視しつつ、日本の優位性を発揮できる部分に対して継続的な技術開発の投資をしていただきたい。

技術開発においては、得られた知見の再利用や他産業への波及効果も考慮して、先端の開発方法論をきちんと適用する施策が必要である。なお、計画されたすべてのプロジェクトの目標達成率は非常に高いため、今後はもっとチャレンジングなテーマ設定が望まれる。

技術に関する事業

技術に関する事業名	Ａ　小型化等による先進的宇宙システムの研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

高性能な小型衛星を短期間に低コストで実現するための新たな衛星システム開発アーキテクチャ（設計思想）を確立するとともに、これら設計思想や中小企業等の優れた民生技術を導入し、大型衛星に劣らない機能を維持しつつ、低コスト、短納期を実現する高性能小型衛星の開発技術を獲得することを目的としており、これが達成されれば、我が国宇宙産業の国際競争力が強化され、国際衛星市場への参入（国際産業協力、ＯＤＡ案件形成）、政府衛星の計画的かつ効率的な開発・調達（科学衛星等への活用、先端民生部品・技術の実証機会の提供）、新たな衛星システム運用への展開（複数機運用による広域観測や高頻度観測等）等の実現が期待される。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２０年度	平成２４年度	平成２３年度	平成２６年度	USEF、NEC
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
604,629	1,300,000	1,395,371	3,300,000	3,516,165

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

国際競争力の強化のため、我が国の強みである民生部品及び民生技術等を適用した高機能、低コスト、短納期な、小型化等による先進的宇宙システムの開発技術を確立することを目的として、設定された各項目について所定の成果を上げた。

個別要素技	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
総合システム		総合システムとしての達成目標設定および宇宙機、地上系への要求の明確化を実施する。	宇宙機側と地上システムである「可搬統合型小型地上システムの研究開発」担当（パスコ）とで、合同調整会議および細部技術検討を行う分科会により「総合シ	達成

			ステム開発仕様書」を平成23年3月に制定した。	
新しい仕組み		コンソーシアム活動により、今後の小型衛星への適用を考慮した新しい仕組みを構築する。	宇宙機関との連携、宇宙関連企業の技術を集結しただけでなく、中小企業や新規参入企業もコンソーシアムとして加えることにより、先進的宇宙システム設計、製造、試験の「仕組みづくり」の検討を行った。	達成
高性能光学センサ		地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度500km、パンクロマチック）を目標とする可視光地球観測センを開発する。	設計の段階から最終目標である地上分解能（GSD）0.5m 未満（軌道高度 500km、パンクロマチック）のセンサとそれに光を就航することのできる光学反射望遠鏡を開発し、個別試験で性能評価が出来る段階まで完成した。	達成
小型衛バス		バス質量 300kg 程度以下の小型地球観測衛星を開発する。	JAXA との共同研究により、推進系に燃料を充填した状況で 300kg 以下の重量となる小型衛星バスを製造し、熱機械的特性の設計検証、電気的性能の確認等を実施した。	達成
短納期の仕組み		2 年間で製造試験を実現する仕組みを構築する。	新しい宇宙システム対応の標準ネットワーク方式を採用することで、変更に対してはソフトウエアの変更で対処が可能になったためバス機器のリピート生産が	達成

			可能になり、設計変更により必要であった費用やリードタイムが圧縮でき、それにより2年以内の開発が可能であるという目処立った。	
自動自律運用		自動機能、自律機能を効率的に活用し、観測計画と、バス運用のコマンドをアップロード可能な仕組みを構築する。	自動機能、自律機能を活用し、観測計画とバス運用のコマンドをアップロード可能な衛星側の仕組みを構築した。	達成
宇宙実証		運用準備・打上準備を開始する。	打ち上げ機に関して、候補会社に対して提案要請を出し、最終的に2012年12月の打ち上げに対応可能な打上サース提供会社を選定した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し

＜共通指標＞

論文数
16

総合評価概要

欧米より高機能・低価格で国際競争力を持った小型衛星観測システムを目指す本プロジェクトの推進は妥当である。顧客のニーズ対応への取り組みがなされており、今後の国際市場での販売拡大に期待したい。国が本事業のような開発を進めることは大変重要である。

小型衛星における撮影分解能としては世界的にみて高い性能を有しており、技術としての価値が極めて高い。また、地上システムも含めた衛星運用の自動自律化、ネットワークによるどこでも運用の取り組みは先端的・意欲的な取り組みであり評価できる。他方、衛星の小型化による機器の信頼性への懸念を払拭するためには、民生技術・部品の活用がキーであり、そのためには、SERVIS プロジェクトによる民生部品の宇宙実証の結果を最大限生かすべきである。また、編隊飛行(コンステレーション)によって各衛星システムが補完的に働く機能を持たせることも必要である。

なお、現時点では競合他者との時間的な競争状況を捉えるとより良いと考えるが、どの企業においても技術は

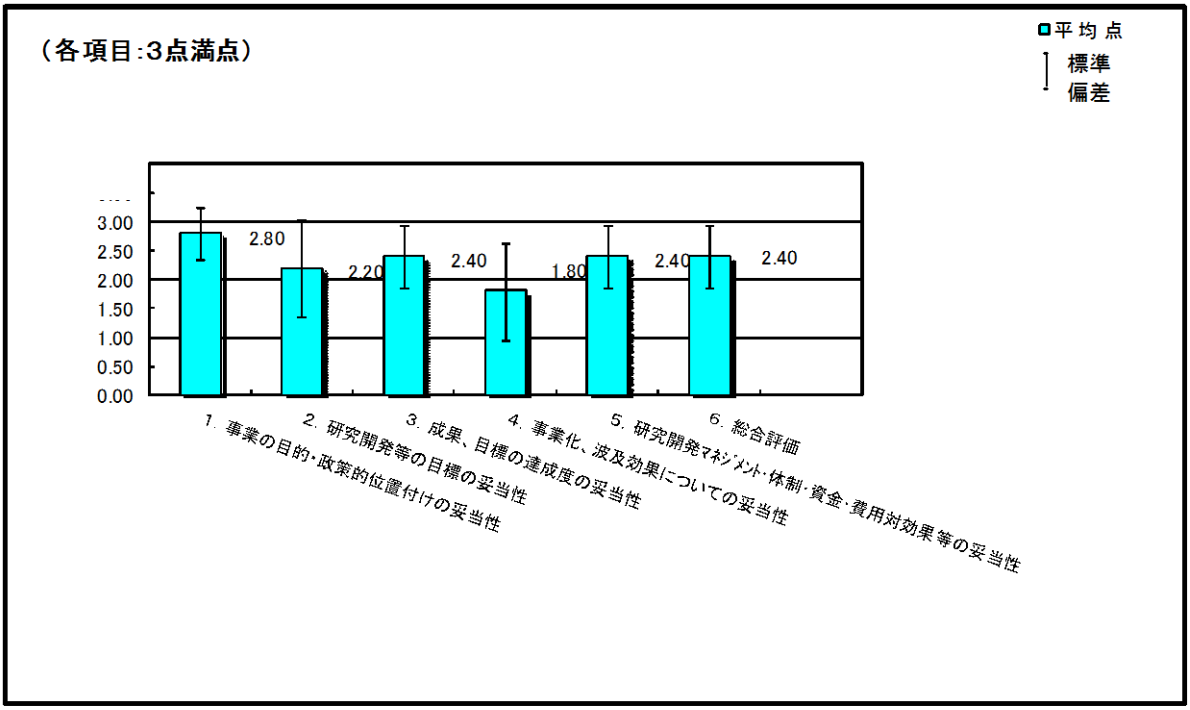
日々進化しているため、その時々において他者に対して優位を示していくことが重要であり、衛星の売り方を考えたパッケージ提供、衛星開発を考えるべきである。知財・国際標準化戦略も強化してゆくべきである。

評点結果

評点法による評点結果

A　小型化等による先進的宇宙システムの研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	0.45
2．研究開発等の目標の妥当性	2.20	0.84
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.40	0.55
4．事業化、波及効果についての妥当性	1.80	0.84
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.40	0.55
6．総合評価	2.40	0.55



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｂ．空中発射システムの研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

現在、日本の基幹ロケットとしては H-IIA が存在しているが、H-IIA は大型衛星等を打上げるための大型ロケットであり、現在の日本には中型、小型ロケットが存在していないのが実情である。そして、H-IIA は打上げの信頼性こそ比較的高いと言えるものの、コストとしては85～100億円程度かかっており、中型小型衛星を単独で打ち上げる場合は、外国のロケット等に依存せざるを得ないのが現状である。ピギーバック等によりH-IIA で打上げることも考えられるが、打上げは主衛星の打上時期や軌道によって左右されることとなり、数年単位で打上げが遅れることも想定される。また、近年、民生部品等の宇宙転用に伴い、衛星のサイズも小型化が進んでおり、今後小型衛星の打上げは飛躍的に伸びていくことが想定される。一方で、宇宙新興国においては、災害対策の一環として、地球観測衛星等の打上げ需要が拡大しており、今後ますます小型地球観測衛星等の打上げビジネスが活発化していくことが予想される。

上記のような背景を踏まえ、空中発射システムの研究開発では、従来より低コスト、高効率かつ機動的に小型衛星を打上げることができる先進的打上げシステムを確立することにより、海外衛星打上げ市場における優位性を獲得し、小型衛星の打上げビジネスに係る国際市場の獲得を目指す。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２１年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	USEF
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
－	67,445	150,000	217,445	217,329

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

将来の小型衛星需要動向を調査し、空中発射システムの構想検討を行った。また、ロケット搭載/分離技術の開発においては、適用する航空機の機種等の影響が少なく汎用性を確保することが可能な搭載方式、分離方式を採用した。さらに、空中発射方式による打ち上げメリットを有効に引き出すとともに、地上インフラを最小限にし、低コスト化を実現できる運用管制方式の構想検討を行った。空中発射システムの運用を航空法での対応で実施する場合の課題を明らかにすることができた。

個別要素技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
1．空中発射システム運用構想	空中発射による衛星打ち上げ及び運用の構想検討を行い、技術的成立性があり、将来の打ち上げ事業展開に資する低コストな空中発射システム運用構想を策定する。	小型衛星需要動向を基に、打上能力の設定を行い、ベースとなる空中発射システム運用構想案を策定する。	打上能力 150kg（高度 500km 極軌道）の空中発射システムとして、輸送機を使用した投下方式、自律飛行、衛星経由の飛行管制方式など、将来の衛星打ち上げ市場参入を目指した、整合性のある空中発射システム運用構想を策定し、開発課題を明らかにすることができた。	達成
2．ロケット搭載/分離技術	空中発射システムに不可欠な、航空機にロケットを搭載する技術、高々度飛行中の航空機からロケットを安全に分離する技術、分離されたロケットの正常な飛行が可能なロケット点火のための姿勢安定化技術について、成立性を確認する。	空中発射方式を決定する。ロケット搭載/分離技術を確認するためにダミーロケットを使用した高空落下試験の候補となる航空機及び試験場の洗い出しを行う。	将来の民間による商業打ち上げ市場参入を図るために、輸送機を使用した PDS 方式を選定した。本方式に基づいた、打上能力解析において、150kg 以上の打上能力が達成できることを確認した。 また、技術の実証を行う、ダミーロケットを使用した高空落下試験の試験場所及び航空機に関して複数の候補の洗い出しができた。	達成
3．運用管制技	空中発射システムのメリットを最大限に引き出すとともに、将来の打ち上げ事業展開に不可欠な低コスト運用技術として、ロケットの自律飛行技術と商用	地球局に依存しないロケットの追跡管制方式の構想検討を行い、システム構成案を策定するとともに、技術課題の洗い出しを行う。	自律飛行のための GPS/INS を適用に関して、技術課題を明らかにすることができた。 また、衛星経由の通信システムとして、インマルサット社が開発中の	達成

	衛星を利用した飛行管制技術の成立性を確認する。		低軌道周回衛星用の端末をベースにロケット用通信端末を検討することでインマルサット社と協力関係が構築でき、技術課題を明らかにすることができた。	
4. 法規制調査	空中発射システムの実現に係わる、現行の国内法規制等の制約を整理する。また、諸外国における民間打ち上げ事業展開に係わる法規制の洗い出しを行う。	空中発射システム実現の中核となる、航空機の利用に係わる課題を抽出する。 米国における民間打ち上げ事業に係わる法規制等の整理を行う。	空中発射システムの運用を航空法での対応で実施する場合の課題を明らかにすることができた。 また、民間打ち上げライセンスに係わる米国の状況等を明らかにすることができた。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し。

＜共通指標＞

論文数
3

総合評価概要

今後の必要な衛星打ち上げ、その国際状況を把握した上で日本が衛星打ち上げにおいて先進的な技術を確保することを目指している点で妥当である。また、世界の調査、技術開発から法制度の適用検討まで多くの活動を行っており、費用に対するアウトプットとして評価される。技術開発は、予算の集中投入によって加速できるが、法規制等の適正化には時間が掛かるので、今後も持続的に進めてほしい。早期の実験実施によって、事業化の有用性を判断すべきである。

なお、小型衛星打ち上げ手段として、空中発射が最善の方法であるかは自明ではない。小型衛星国際市場を獲得するためには、本開発が実用化を目論む 2020 年頃の予測価格と比較し、より低コスト化につながる包括的な活動に取り組むべきである。

選定した方式(空中投下、PDS(Platform Delivery System)方式)は、既に米国で例があるものの、投下後の姿勢、点火のタイミング等、実用化にいたるまでに多くの検討課題がある。現時点では具体的な実証は行われておらず、さらに検討した上で、十分な実証試験等が必要である。

今後の研究開発の方向等に関する提言

空中発射システムは、日本が得意とする改良技術開発であり、今後、技術開発と共に、実機規模に近い試験実施も含めて制度整備が滞り無く進むことに期待する。

空中発射システムの研究開発では、実現に向けた戦略的なロードマップなどの検討も考慮する必要がある。

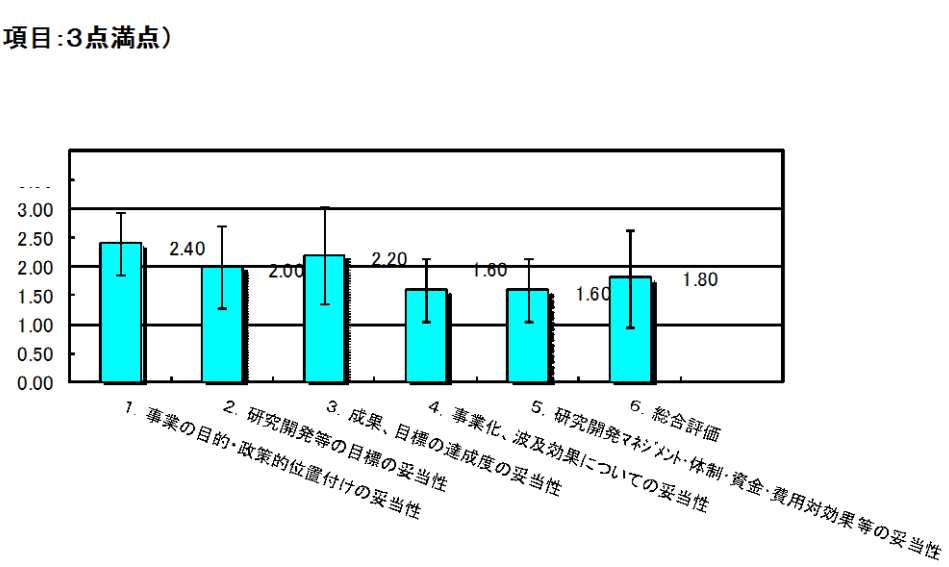
評点結果

評点法による評点結果

B　空中発射システムの研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	0.55
2．研究開発等の目標の妥当性	2.00	0.71
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.20	0.84
4．事業化、波及効果についての妥当性	1.60	0.55
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	1.60	0.55
6．総合評価	1.80	0.84

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	C．宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国企業は、衛星等のコンポーネントについては技術力を有するものの、宇宙実証の機会が少ないため、国際競争力のある分野はごく限定的である。さらに、我が国衛星市場の頭打ちに伴い、近年、国内の宇宙機器部品メーカの市場からの撤退が進んでおり、部品調達に支障をきたしている。他方、我が国の衛星に従来用いられてきた MIL 規格（アメリカ国防総省が制定した米軍物資調達規格「Military Standard」の略。）部品は、信頼性が高い反面、高価、低機能、納期が長いことに加え、国内の生産量が少ない。また、MIL 部品の輸入時には、輸出規制（ITAR）手続きの影響により、納入遅延や仕様変更等が発生し、衛星開発に悪影響を与えることが少なくない。このような状況の中、我が国宇宙産業の成長や国際衛星市場への参入を進める方法の一つとして、我が国企業が得意とする安価かつ高機能な民生部品・民生技術の衛星への転用を進め、信頼性を確保しつつ衛星の低コスト化、高機能化等を図ることが必要となる。

このため、我が国が得意とする安価で高機能な民生部品・民生技術を選定して地上模擬試験及び宇宙実証試験を実施する。その結果、これらを宇宙等の極限環境に適用するための民生部品・民生技術のデータベース、選定評価及び適用設計ガイドライン等の知的基盤を構築する。

本事業を通じて、民生部品（CPU、メモリ等）・民生技術を活用する知的基盤を整備すること等により、衛星・コンポーネントの低コスト化、高機能化、短納期化を実現し、我が国宇宙産業の国際競争力を強化する。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１１年度	平成２７年度	平成１６年度	平成２３年度	USEF、NEC
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
490,000	900,000	400,000	28,462,420	28,134,349

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

平成 15 年 10 月 30 日に打ち上げた実証衛星 1 号機は軌道上運用を継続し、平成 17 年 10 月 31 日に軌道上運用を終了し 11 月 1 日に停波して宇宙実証試験を終了した。また、実証衛星 2 号機は平成 22 年 6 月 2 日に打ち上げられ、平成 23 年 6 月に軌道上運用を終了し宇宙実証試験を完了する見込みである。

これまでの地上模擬試験の結果、及び上記 2 回の宇宙実証試験の結果を反映し、第二次の民生部品・民生技術データベース、民生部品・民生技術選定評価ガイドライン及び民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを策定する見込みであり、今回の目標を達成できる見通しを得た。

個別要素技術	目標・指標 （中間評価時点）	成果 （中間評価時点）	達成度
①民生部品・民生技術の極限環境適用技術	衛星製造等に転用可能性を有する民生部品・民生技術に対し宇宙等極限環境を模擬した地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品・民生技術データベースを構築する見通しを得る。ここにデータベースへの累積登録品種数は 200 品種以上とする。	地上模擬試験を実施し、その試験結果から民生部品・民生技術データベースを構築できる見込みである。ここにデータベースへの累積登録品種数は 219 品種となった。	達成
	民生部品・民生技術データベース及びそれに基づき選定した民生部品・民生技術の実証衛星 1 号機及び 2 号機の宇宙実証試験のデータ等に基づき、第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築する見通しを得る。ここに実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 30 品種以上とする。	第二次の民生部品・民生技術選定評価ガイドラインと民生部品・民生技術適用設計ガイドラインを構築できる見込みである。ここに実証衛星 2 号機への民生部品・民生技術適用数は 74 品種となった。	達成
②極限環境で使用する機器等の開発支援技術	実証衛星開発への適用結果に基づき、極限環境で使用する機器等の設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価する見通しを得る。	設計の省力化、情報管理の迅速化、製造・試験期間の短縮化に関する効果を定量的に評価し、有意な効果を確認の見込みである。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
86	15

総合評価概要

実証衛星 SERVIS 1 号及び 2 号による実証によって着実に成果を上げていることは評価できる。民生部品・民生技術のデータベース及びガイドラインを合わせて作成したことは利用者の利便性向上の意味で高く評価でき、衛星の低コスト化、高機能化、小型軽量化、短納期化が進み、国際競争力の強化につながるものである。本事業の継続発展において、開発に貢献した日本企業に有利な標準化が進むことを期待する。SERVIS 3 号機によって、さらに多くの民生技術・部品のデータベース化ができることは喜ばしい。

なお、本事業において作成したデータベース及びガイドラインの活用状況に関する調査により力をいれるべきと考える。ユーザー側からの要望も少なからずあるはずであり、それを上手く取り入れる体制があれば、より良いデータベース構築ができると考える。また、目標を個数(件数)とすることは、データベースの初期段階では有用であるが、今後はデータベースの利用率に係わる指標を目標設定すべきである。民生品の入れ替わりサイクルはとても早いため、より高頻度での実証機会も必要となる。

今後の研究開発の方向等に関する提言

民生技術・部品の宇宙実証（SERVIS 衛星）によるデータベースを活用して国際標準化する方法を探せないか。日本は国際的な戦略に劣るので、日本の優れた材料や部品で国際的な戦略を立てるのが望ましい。

民生技術・部品は、入れ替わりサイクルが早いため、宇宙実証を継続的に実施する必要がある。

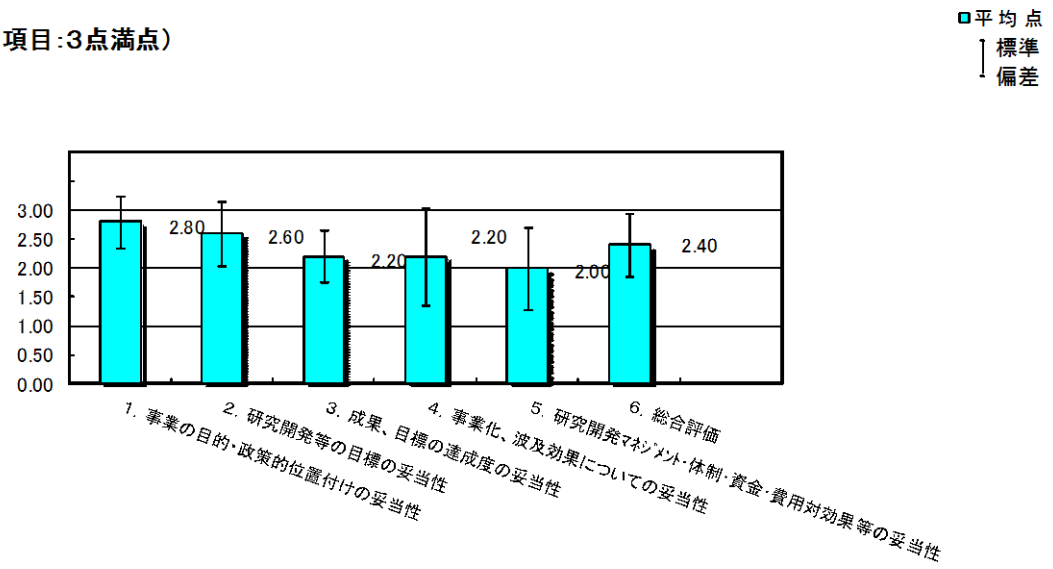
評点結果

評点法による評点結果

C　宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	0.45
2．研究開発等の目標の妥当性	2.60	0.55
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.20	0.45
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.20	0.84
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	0.71
6．総合評価	2.40	0.55

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	D．石油資源遠隔探知技術の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（石油・天然ガス・石炭の安定供給確保）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

石油等の資源に恵まれない我が国において、その安定供給の確保を図ることは、国民の安全・安心な生活の実現及び産業インフラの確保の観点から、国家基盤として必須の重要課題である。

衛星を活用したリモートセンシング（遠隔探知）技術には、①産油国との調整を経ずに、開発の有望性に関する評価が可能、②一度に広範囲の地域の分析が可能、③立入りが困難な地域の分析が可能、等の利点がある。

本事業においては、「E.極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発/次世代合成開口レーダ等の研究開発」において開発されたASTER（光学センサ）及びPALSAR（レーダセンサ）より取得されたデータを用いて、以下の業務を実施する。

（１）利用技術開発

人工衛星から取得される画像データを用いて、石油ガス資源探鉱の効率化、権益確保のための事前情報取得など、石油ガス資源の安定供給確保に貢献できる衛星データ利用技術開発を行う。

（２）衛星データ品質管理・地上システム運用

ASTER及びPALSARデータの品質管理と同地上システムの運用を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
昭和５６年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	AIST、ERSDAC
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
1,600,000	1,476,690	1,188,499	68,123,756	64,432,684

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

概ね計画通り順調に進んでいる。前回評価で指摘のあったPALSARの打ち上げ遅れに起因する未達成の部分については、その後の運用において、当初の目標を大幅に上回る観測数、処理数、配付数を達成した。なお、PALSARについては、本評価の対象期間以後ではあるものの、平成23年5月にその運用を停止したため、今後、PALSAR に係る業務に関しては、目標の再設定等を行う必要がある。

個別要素技術	目標・指標（中間時点）	成果	達成度
①石油ガス探査利用手法確立	石油ガス鉱床タイプや地表状況等に応じた資源探査利用手法の確立、及び資源ニーズの変化に対応した利用手法を確立すること。各項目の利用手法確立に必要な事例件数の実施を指標とする。	背斜/植生、背斜/露岩、断層/植生、断層/露岩の利用手法がほぼ確立された。また、非在来型資源及び大規模油田生産量監視については衛星データ利用可能性が確認された。	達成
②広域地質・資源情報マップ整備	衛星から得られる情報を利用しやすい形式に加工し、3つのマップを整備する。 (ア)ASTER GDEM の高精度化(ver.2)の整備 (イ)オイルスリックデータベース構築のスクリーニング完了 (ウ)地質情報データベースとして、時系列衛星データセット整備、堆積岩区分システム開発、東アジア数値地質図整備、及びその統合利用システムの開発を行う。	以下の各項目が開発・実現された。 (ア)ASTER GDEM の空間分解能の向上、欠損域の低減を行い、ver.2 を完成させた。 (イ)22海域について、オイルスリックの概査が完了した。 (ウ) 地質情報データベースとして、以下が完了した。 ・東アジア・アフリカ地域時系列衛星データセット整備 ・堆積岩区分プロトタイプシステム開発 ・500 万分の1アジア数値地質図作成及び国際標準形式の配信準備 ・地質情報統合利用システムの基本部位開発	達成
③解析アルゴリズム開発	衛星データ利用を促進するために、実用化をめざした解析アルゴリズムを開発する。 (ア)土壌水分推定アルゴリズム開発 (イ)PALSAR 再生処理技術開発 (ウ)干渉 SAR 技術実用化 (エ) 居住地マッピング整備 (オ)PALSAR DEM 処理高度化 (カ)森林バイオマス抽出技術開発	以下の各項目が開発・実現された。 (ア)土壌水分推定アルゴリズム開発に必要な現地データ取得が完了。 (イ)SAR 再生処理の高速化、種々の機能追加が完了。 (ウ)干渉 SAR 技術実用化では GPS を併用した高精度化を確認。 (エ)居住地マッピングでは、PALSAR 併用により都市域と非都市域の分類精度を向上。 (オ)PALSAR DEM 作成処理では、スタック処理により高精度化が図られた。 (カ)森林バイオマス抽出技術が完成	達成

		され、特許申請を行った。	
④衛星データ品質管理	ASTER 及び PALSAR の校正検証により品質管理を行い、所定の精度を確保すること。	期間中の衛星データ品質が定められた精度内に収まっていることを確認した。	達成
⑤ ASTER 及び PALSAR 地上システム運用	定常運用を行い、目標とした観測データの全量入手・保存、標準・高次プロダクトの生産、配付数を達成する。	期間中の観測データの全量入手・保存、標準・高次データのユーザへのタイムリーな提供、配付数等の数値目標は ASTER、PALSAR とも達成された。	達成
⑥次世代アーカイブシステム研究	ASTER および PALSAR データのアーカイブシステムとして、1.0 PB 以上のストレージを保有し、ASTER 全量データおよび PALSAR の一部データのアーカイブを実現する。 アーカイブデータは新たに 2 種類以上の最新の高度化アルゴリズムを追加し、1 日 2 万シーン以上の標準および高次処理行う。 データ提供システムとして, 2 種類以上の OGC 標準に対応したシステムの構築を行う。	ASTER 全量および PALSAR の一部データのアーカイブを完了。 ASTER の高度化アルゴリズムは 4 種類以上更新され、1 日 2 万シーンを超える処理が可能となっている。 OGC 標準への対応として、ブラウズ画像には WMS サービスを、カタログデータには CSW を採用している。 ストレージ容量、高度化アルゴリズムの数、1 日の処理シーン数および国際標準への対応の全てにおいて目標を達成している。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

前回評価時から、実施する業務内容の変更等があったため、一部の目標の変更を行った。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
70	1

総合評価概要

経済産業省が開発を行った ASTER センサ及び PALSAR センサによる地球観測データの有効活用が図られている。特に本事業の目的でもある衛星センサによって取得される画像データを用いて石油資源の遠隔探知を行う技術は、資源・エネルギー供給の円滑化を図るものとして意義が大きく、多くの成果を挙げている。なお、ASTER GDEM(ASTER Global Digital Elevation Model:ASTER 全球三次元地形データ) ver.2 は、精度の高い標高データを世界に対して提供した特筆に値する優れた成果であり、地質情報データベース等とともに、幅広いユーザーが利用できるようになっていることは大きな価値がある。

また、本研究開発では、衛星データを継続的に利用していくために、地上システムの運用及びセンサの劣化に関する品質管理が着実に行われていることも評価できる。

今後は、次世代アーカイブシステム研究について、ASTER、PALSAR データだけに限定せず、国の基盤衛星データ、基盤地理空間データ(DEM、土地被覆データ)の管理システムとして、発展させていくことなども必要である。

なお、本事業に関しては、上述のとおりその意義は理解できるが、明確な成果を国民に対して定量的に説明できる必要がある。利用分野であるので、事業化についてはもう少し注力する必要があるとともに、評価指標については、何をもって手法の確立とするかなど、明確な指標設定が望まれる。加えて、長期的な観点で進める事業であることはそのとおりであるが、長期にわたる事業であるならばフェーズに分けて重点化するなどの取組も必要ではないかと考えられる。

また、取得できたデータの分析を国独自でも進める仕組みの構築やデータを閲覧できるユーザーの条件検討など、今後、取り組むべき課題も考えられるところである。

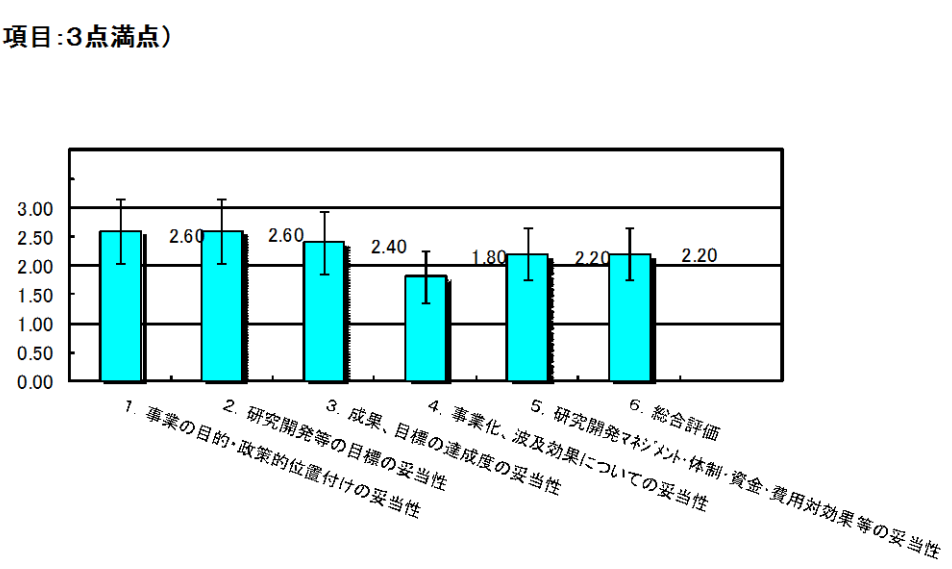
評点結果

評点法による評点結果

D　石油資源遠隔探知技術の研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	0.55
2．研究開発等の目標の妥当性	2.60	0.55
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.40	0.55
4．事業化、波及効果についての妥当性	1.80	0.45
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	0.45
6．総合評価	2.20	0.45

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｅ．極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発 ／次世代合成開口レーダ等の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（石油・天然ガス・石炭の安定供給確保）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

石油等の資源に恵まれない我が国において、その安定供給の確保を図ることは、国民の安全・安心な生活の実現及び産業インフラの確保の観点から、国家基盤として必須の重要課題である。

衛星を活用したリモートセンシング（遠隔探知）技術には、①産油国との調整を経ずに、開発の有望性に関する評価が可能、②一度に広範囲の地域の分析が可能、③立入りが困難な地域の分析が可能、等の利点がある。

本事業においては、1992 年～1998 年に運用された我が国初の資源探査用衛星である地球資源衛星１号（JERS-1）の後継機として、ASTER（光学センサ）及び PALSAR（レーダセンサ）を開発し、打上げ後は、その校正・精度評価を実施することによってデータの健全性を維持するとともに、センサの安定した運用を図る。なお、取得された画像データの利用については、「D.石油資源遠隔探知技術の研究開発」について実施している。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
昭和６２年度	平成２９年度	平成２３年度	平成３０年度	JAROS
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
117,000	100,000	100,000	30,667,757	29,147,410

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

・ASTER

短波長赤外放射計（SWIR）の一部分の運用目標を除いて達成しており、利用者への画像供給も継続でき、目標を達成できた。（SWIR は平成 20 年 5 月以降、検出器の温度上昇により観測画像が取得できなくなった。）

・PALSAR

定常運用及びそれに続く後期運用の中で機器の正常な運用を維持し、発生した異常事象についても、適切な対処等により、利用者への画像供給も継続でき、目標を達成できた。なお、評価対象期間外ではあるが、平成 23 年 5 月に ALOS 衛星本体が電力異常により運用を終了したことに伴い、PALSAR の運用も終了した。

ASTERの評価指標と評価結果

項番	運用・評価項目	評価方法(注1)	評価指標	運用の評価結果
1.	システム/CSP/MPS			
1．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
1．2	温度テレメトリ	①	正常値の確認	目標達成
1．3	電圧値	①	正常値の確認	目標達成
1．4	電流値	①	正常値の確認	目標達成
1．5	寿命管理、特性値管理	④	設定範囲内の確認	目標達成
2.	VNIR			
2．1	MTF（空間周波数特性）	②	仕様満足の確認	目標達成
2．2	過応答	②	仕様満足の確認	目標達成(注2)
2．3	ダイナミックレンジ	②	仕様満足の確認	目標達成
2．4	バンド間レジストレーション	②	仕様満足の確認	目標達成
2．5	ポインティング角度精度	①	正常値の確認	目標達成
2．6	温度制御特性	①	正常値の確認	目標達成
2．7	光学校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
2．8	暗時校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
2．9	電気的校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
2．10	走査幅	②	仕様満足の確認	目標達成
2．11	立体視角	②	仕様満足の確認	目標達成
3.	SWIR			
3．1	MTF（空間周波数特性）	②	仕様満足の確認	(注3)
3．2	ダイナミックレンジ	②	仕様満足の確認	(注3)
3．3	画素間感度偏差	②	仕様満足の確認	(注3)
3．4	ポインティング角度精度	①	正常値の確認	目標達成
3．5	過渡応答	②	正値の確認	(注3)
3．6	冷却性能	①	正常値の確認	(注3)
3．7	温度制御	①	正常値の確	(注3)
3．8	オフセット	③	仕様範囲内に校正	(注3)
3．9	校正機能	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4.	TIR			
4．1	感度偏差	②	仕様満足の確認	目標達成(注2)
4．2	光学校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．3	暗時校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．4	電気校正	③	仕様範囲内に校正	目標達成
4．5	経年変化評価	①	正常値の確認	目標達成
4．6	検出器温度	①	正常値の確認	目標達成

4．7	チョッパ温度	①	正常値の確認	目標達
4．8	黒体温度	①	正常値の確認	目標達成
4．9	画像信号出力	②	仕様満足の確認	目標達成
4．10	ポインティング角度精度	①	正常値の確認	目標達成

（注1） 評価方法

①テレメトリデータの評価、②画像データの評価、③校正データの評価、④データトレンドの評価

（注2） VNIRとTIRは、打上げ後の軌道上運用10年間でセンサの検出感度が低下している傾向にあるが、機上校正を行い、画像処理に必要な感度補正を行っている。

（注3） SWIR は平成 20（2008）年 5 月以降、検出器の温度上昇により観測画像の取得ができなくなったため、当該項目の目標は未達となった。本不具合はトラブルシューティングにおいて回復不能との処置により、平成 21 年度以降は適用外とする。

PALSARの評価指標と評価結果

項番	運用・評価項目	評価方法(注1)	評価指標	平成20～23年度の評価結果
1.	電子機器部			
1．1	校正モード時の動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
1．2	REV モード時の動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
1．3	観測モード時の動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
1．4	データトレンドの確認	④	変動値の確認	目標達成
2.	送受信モジュール			
2．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
2．2	温度モニタ	①	正常値の確認	目標達成
2．3	送信出力	③	正常値の確認	目標達成(注2)
2．4	水平偏波移相量	③	正常値の確認	目標達成
2．5	垂直偏波移相量	③	正常値の確認	目標達成
3.	信号発生部			
3．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
3．2	温度モニタ	①	正常値の確認	目標達成
3．3	チャープ変調	③	正常値の確認	目標達成
4.	送信部			
4．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
4．2	温度モニタ	①	正常値の確認	目標達成
4．3	送信出力	③	正常値の確認	目標達成
4．4	パルス幅	③	正常値の確認	目標達成
4．5	校正信号出力	③	正常値の確認	目標達成
5.	受信部			
5．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成

5．2	温度モニタ	①	正常値の確認	目標達成
5．3	受信系利得	②	正常値の確認	目標達成
5．4	ノイズレベル	③	正常値の確認	目標達成
5．5	アッテネータ設定パラメータ	①	正常値の確認	目標達成
6．	データ処理部			
6．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成(注3)
6．2	ダイナミックレンジ	②	正常動作の確認	目標達成
7．	システム制御部			
7．1	動作確認	①	正常動作の確認	目標達成
7．2	各機器の設定パラメータ	③	設定値の確認	目標達成
8．	送受信モジュール　電源			
8．1	動作確認	②	正常動作の確認	目標達成
8．2	温度モニタ	③	正常値の確認	目標達成
9．	制御分配器			
9．1	動作確認	②	正常動作の確認	目標達成
9．2	温度モニタ	①	正常値の確認	目標達成
10．	RF分配器			
10．1	動作確認	②	正常動作の確認	目標達成
11．	電力分配器			
11．1	動作確認	②	正常動作の確認	目標達成
12．	REVアンテナ			
12．1	動作確認	③	正常動作の確認	目標達成

（注1）評価方法

①テレメトリデータの評価、②画像データの評価、③校正データの評価、④データトレンドの評価

（注2）送受信モジュール80台中の1台に送信出力低下が発生した。PALSARの観測上、支障がないと判断される不具合台数であり、達成度は「目標達成」とした。

（注3）データ処理部に同期コード異常が発生し、観測データを画像化できないものが発生したが、大半は同期コードの復元により画像化できた。どうしてもできないものは発生数が運用上許容できる範囲内とJAXA側で判断され欠損として処理された。したがって達成度は「目標達成」とした。

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
141	1

※論文数には、講演数やその他の発表も含む。

総合評価概要

光学センサである ASTER と合成開口レーダセンサである PALSAR は、それぞれの長所を活かし、高機能・高性能な地球観測センサとして十分に効力を発揮している。特に、PALSAR が搭載された ALOS の活躍は一般社会においても災害監視等で認知度は高く、宇宙利活用の重要性を一般社会に広めるという大きな役割を果たしている。

また、両センサとも予定通りの運用を達成し、多くの成果を上げているが、本研究開発では運用評価も実施することで、その技術が次世代の観測センサ開発に引き継がれていることも高く評価できる。

なお、目標設定としては、運用面のみではなく、意義のあるデータが取得できたかどうかに着目した設定もなされるべきではなかったかと考える。また、20 年以上にわたる長期間の研究開発であり、世界的に見た時間的な制約／競争という視点が弱くなっていないか懸念が感じられる。

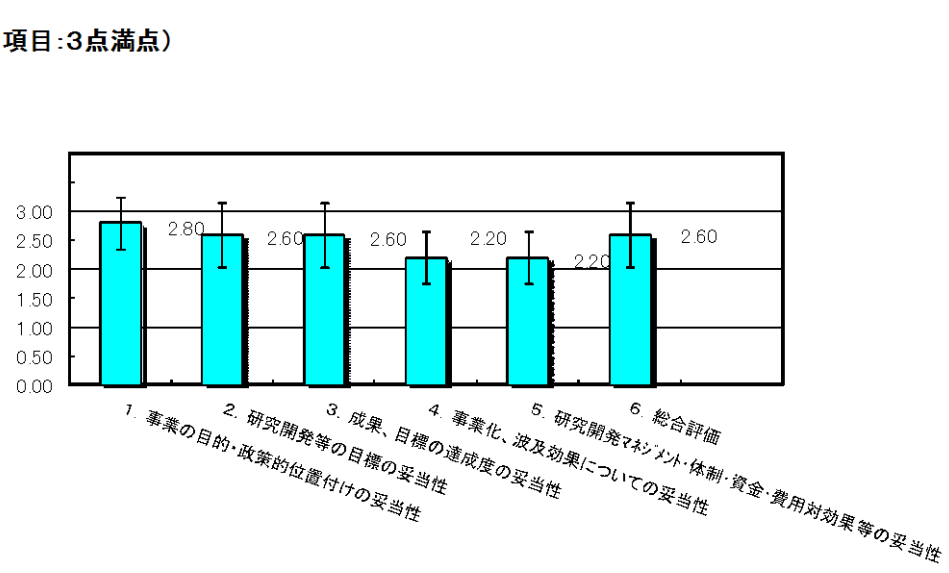
評点結果

評点法による評点結果

E　極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発／次世代合成開口レーダ等の研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	0.45
2．研究開発等の目標の妥当性	2.60	0.55
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.60	0.55
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.20	0.45
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.20	0.45
6．総合評価	2.60	0.55

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｆ．ハイパースペクトルセンサ等の研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（石油・天然ガス・石炭の安定供給確保）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率は約 20%に過ぎない。エネルギー基本計画（平成 22 年 6 月）では、これを 2030 年までに 40%以上まで引き上げることを目標としており、国内外において石油資源開発を効率的に進める必要がある。

上記背景を踏まえ、本事業では宇宙から地球表面を観測する高性能センサである HISUI（Hyperspectral Imager Suite：高性能のハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサの両センサを合わせたセンサの名称。）を開発している。HISUI の内のセンサの一つであるハイパースペクトルセンサは、世界各国で開発が実施されているところであるが、本事業では世界初の衛星搭載用実用ハイパースペクトルセンサの開発を目指している。全世界に先駆けて衛星搭載用実用ハイパースペクトルセンサを実現することにより、石油埋蔵の有望地域を早期に発見し、自主開発比率を高め、我が国への石油資源の安定供給に資することを本事業の目的とする。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１９年度	平成２５年度	平成２３年度	平成２６年度	JAROS 、NEC
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
1,000,000	2,500,000	2,000,000	5,850,000	5,758,465

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

ハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサについて、平成19年度から平成20年度にかけて、分光・検出系、高速信号処理系、校正系などについて、要素試作試験を行った結果、最終目標性能項目について定量的な予測を行い、実現の見通しを得ることができた。

また、平成19年度から平成23年度にかけて、両センサの分光系、検出部、信号処理部、校正部、伝送系を含めた評価モデルを開発し、軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性、電磁適合性等について試験により確認を行った。

さらにポインティング機能およびデータ圧縮機能についても、評価モデルにより最終目標性能の達成の見通しを得た。

個別要素技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
システム設計・仕様設計	<u>ハイパースペクトルセンサ</u> 空間分解能　30m 以下 観測幅　30km バンド数　185 以上 S/N 比　VNIR 450 以上 SWIR 300 以上 <u>マルチスペクトルセンサ</u> 空間分解能　5m 以下 観測幅　90km バンド数　4 S/N 比　200 以上	評価モデルによる試験などにより、最終目標性能について、達成の見通しを得る。	基本設計・詳細設計を行うことにより、最終目標性能について実現の見通しを得た。	達成
要素試作試験	以下の項目の要素技術開発を行う。 ・高 S/N 比を実現する分光検出系の開発により、S/N 比、MTF などの性能達成の見通しを得る。 ・高精度校正方式の開発により、ハイパースペクトルセンサの波長精度達成の見通しを得る。 ・高速データ処理系、データ伝送系の開発により、大容量データ伝送の技術的達成見通しを得る。	左記に同じ	左記の要素技術開発を行うことにより、各性能の達成の見通しを得た。	達成
評価モデル	評価モデルにより下記事項を確認する。 ・軌道上環境での熱環境や機械環境に対する耐性について試験により確認する。 ・分光検出系、信号処理部、校正系、伝送系の電気的な性能確認を行う。	左記に同じ	評価モデルの設計・製作・試験を行い下記事項を確認した。 ・耐熱・機械環境性、電磁適合性を確認した。 ・分光検出系、信号処理部、校正系、伝送系の電気的性能について評価モデル性能試	達成

	・ポインティング機能およびデータ圧縮機能について、達成の見通しを得る。		験により最終目標性能の確認を行った。 ・ポインティング機能、データ圧縮機能の確認を行い、最終目標性能の達成の見通しを得た。	
フライトモデル	ハイパースペクトルセンサ、マルチスペクトルセンサのフライトモデルを設計・製作し、地上検証試験によりセンサ性能目標値の実現性を確認する。 衛星軌道上での運用に必要な各種耐環境性、電磁適合性についても併せて検証する。	長納期の部品について調達を行う。	長納期の部品として下記の部品について、調達を行った。 ・ハイパースペクトルセンサ SWIR 用検出器 ・マルチスペクトルセンサ用検出器 ・ハイパースペクトルセンサ用集光光学部ミラー	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数	特許等件数（出願を含む）
15	2

総合評価概要

リモートセンシングの重要性及び活用頻度は増え続けており、そのための先端的かつ有用性の高いセンサ開発への投資は重要である。早期開発によって、次世代のリモセンにおいて日本のセンサ及び衛星の地位を高めていくことは重要である。また、ハイパースペクトルセンサは可視光から短波長赤外線をカバーする400－2500 nmの波長に185以上のバンドを持ち、より高精度なデータを得る事が可能である。したがって、地表の石油資源探査に有効な手段となり得るので、研究開発の意義は大きい。さらに、ユーザーニーズのあった高S/N比に対応したことや、利用ユーザーである各種機関と「G. 次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発」を通じて連携し、技術開発のためのセンサとならないようにしていることは評価される。「ユーザーによるコンソーシアム等を作り、データ利用ビジネス業界との連携を図り」事業化の構想を練る方向性は正しい。

なお、実際の成果の例示が望ましい。例えば、前回評価指摘事項に対し、12 種の樹種を 70%以上の精度で分類可能という回答があったが、それ以上の成果はあるのか、また、石油資源探査等には効果はないのか、等。

また、将来的な事業化に向けて、海外のハイパースペクトルセンサの技術開発及び事業化情報の収集を期待

する。事業化という点で考えたときに、商用としてどのようなデータがどのようなユーザーに売れるのかを明確にした上で、その実現に向けて、海外の同様のセンサとベンチマーキングを実施し、今回開発するセンサの特徴を出すことが望ましい。したがって、早期に商用利用ユーザーとの密接なコネクションを作り、センサ仕様への反映を目指すべきである。

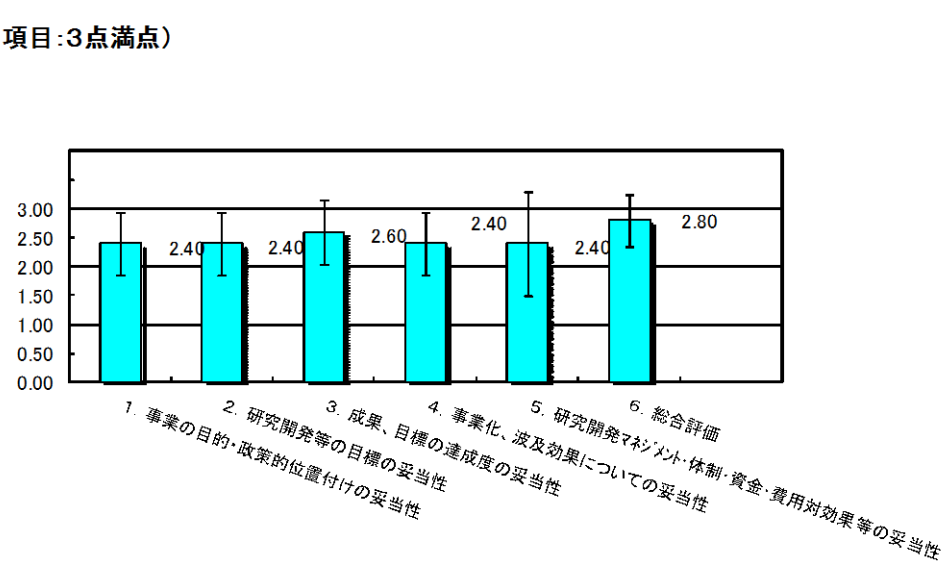
評点結果

評点法による評点結果

Ｆ　ハイパースペクトルセンサ等の研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	0.55
２．研究開発等の目標の妥当性	2.40	0.55
３．成果、目標の達成度の妥当性	2.60	0.55
４．事業化、波及効果についての妥当性	2.40	0.55
５．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.40	0.89
６．総合評価	2.80	0.45

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｇ．次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備、ものづくり産業振興）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

我が国の石油及び天然ガスを合わせた自主開発比率は約 20%に過ぎない。エネルギー基本計画（平成 22 年 6 月）では、これを 2030 年までに 40%以上まで引き上げることを目標としており、国内外において石油資源開発を効率的に進める必要がある。

金属資源に関しては偏在性、有限性等から供給者数が限られ、非鉄メジャーによる寡占化・独占化が進みやすい特性を有しており、経済安全保障の観点及び供給構造の安定性の確保を図るため、探鉱能力を左右する探査技術の高度化・効率化を進める必要がある。

上記背景を踏まえ、本事業では宇宙から地球表面を観測する高性能センサである HISUI（Hyperspectral Imager Suite：高性能のハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサの両センサを合わせたセンサの名称。）のセンサデータ利用技術・処理技術を開発している。当該センサデータ利用技術・処理技術により、我が国の石油資源探査や金属資源探査を効率的に進めることを本事業の目的とする。

また、ＨＩＳＵＩによって得られるデータは、波長分解能が非常に高精度なものであるため資源探査分野に限らず他の利用分野でもその利用価値は高くなっている。例えば、農業分野では、食料の安定供給という観点から農作物の最適収穫時期を推定したり、森林分野では、植生を把握するという観点から樹種の分類をしたり、環境分野では、環境保全という観点から、天然資源物の保全状況を監視するという利用手法が考えられている。

したがって、本事業では、ＨＩＳＵＩのセンサデータの利用技術・処理技術を確立することにより、農業分野、森林分野、環境分野においても、センサデータを有効に活用し、食糧供給の円滑化、国土保全・管理、地球規模の環境問題の解決等に資することも目的とする。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１８年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	ERSDAC、AIST、JOGMEC
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
342,774	495,774	400,000	1,532,292	1,520,626

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

ハイパーセンサデータを利用した研究として、ハイパースペクトルデータ利用が有効である手法を開発するとともに、エネルギー・資源分野、農業分野、環境分野等の様々な分野における実利用化について確認・検討を行った。また、更に、ハイパースペクトルデータ利用者が高品質なデータを活用できるようにするため、データの校正・データ処理・運用計画策定等からなる HISUI 地上データ処理システムの構築等の問題点の洗い出しを行った。金属資源探査技術の研究開発では、各種鉱床タイプを対象としてスペクトルデータに関する検討を行い、ハイパースペクトルデータの高度利用のための解析評価用システム開発を行った。

個別要素技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
1. 実利用化のための解析技術 1)エネルギー・資源分野	1. 実利用化のための解析技術 1)エネルギー資源分野 これまでマルチスペクトルセンサでは抽出が困難であった鉱物の識別などを含め、抽出総数が2倍以上可能な解析手法を確立すること。	1. 実利用化のための解析技術の確立 1)エネルギー・資源分野 熱水性鉱床の探鉱に有用と考えられる鉱物を10種以上抽出可能な手法を開発すること。	1)エネルギー・資源分野 熱水性鉱床探鉱に有用な14種の鉱物抽出アルゴリズムを開発した。	達成
2)農業分野	2)農業分野 農作物の収量や品質推定等がマルチスペクトルデータによるものより精度の良いまたは効率的となる解析手法を確立すること。	2)農業分野 水稲の生育段階を5分類以上分類可能な技術を開発すること。	2)農業分野 茶葉、水稲、小麦の精度の良い生育段階分類技術を開発した。特にインドネシアの水稲では7段階分類が可能な技術を開発した。	達成
3)環境分野	3)環境分野 陸域または水域環境項目の推定等がマルチスペクトルデータによるものより精度の良いまたは効率的となる解析手法を確立すること。	3)環境分野 マルチスペクトルデータでは困難なサンゴの白化回復状況を把握するために、生サンゴと底質が分類可能な技術を開発すること。	3)環境分野 サンゴの白化からの回復状況把握のための底質分類手法を構築した。	達成
4)森林分野	4)森林分野	4)森林分野	4)森林分野	達成

	樹種分類など森林管理に必要な情報等がマルチスペクトルデータによるものより精度の良いまたは効率的となる解析手法を確立すること。	マルチスペクトルでは困難な広葉樹の種レベルの分類を含む10以上の樹種分類可能な技術を開発すること。	新たな手法を開発し、12種の樹木について70%以上の精度で分類することができた。	
2. センサ校正・データ処理技術 1)校正技術	2. センサ校正・データ処理技術 1)校正技術 ハイパスペクトルセンサ(特に HISUI)の仕様に適した校正技術を開発する。打上前校正としての放射量、波長、幾何補正にかかる校正技術を開発、打上時までに、これらの成果を HISUI センサに適用する。また、打上後校正としてのオンボード校正機器による校正、地表ターゲットを用いた代替校正、他衛星との相互校正、さらには月をターゲットとした月校正等の技術を開発、HISUI 打上後、速やかに、これらの成果を適切に組み合わせて適用できるようにする	2. センサ校正・データ処理技術 1)校正技術 ハイパースペクトルセンサとしての新たな技術課題を調査し、品質保証に影響が予測される項目の校正技術の開発に着手すること。	1)校正技術 センサの仕様から生じる新たな技術課題を調査し、次の課題について検討に着手した。分光画像の波長方向への歪の特性／代替校正手法の検討／月校正手法の検討	達成
2)データ処理技術	2)データ処理技術 レベル1・レベル2について処理アルゴリズムを確定する。 レベル1はバンド間レ	2)データ処理技術 幾何補正のために必要な分光画像の歪を補正処理する手法を開発すること。	2)データ処理技術 分光画像の空間方向の歪の処理技術は完了した。必要な補助データ、ユーザ要求精度	達成

	ジストレーション 0.1 ピクセル以下、地上位置精度1ピクセル以下を目指した処理技術を実現するアルゴリズムを開発するとともに、同記述書を完成させる。 レベル2については、処理アルゴリズムの定常運用への可否の確定を行い、実装可能な場合は同記述書を完成させる。		評価の調査を実施し、問題点の洗い出しをした。	
3）地上処理システム	3）地上処理システム 国際標準に対応したカタログサービスおよびデータ配信サービス機能を備え、商用クラウド上で動作する HISUI データ地上処理系を開発する。	3）地上処理システム 国際標準化のシステム検討のため、マルチセンサの模擬データを1万件以上作成すること。	3）地上処理システム カタログサービスの国際標準化を検討した。実験用に ASTER メタデータを 160 万件以上変換し、HISUIのマルチデータは標準化可能であることが確認できた。	達成
4）運用計画システム	4）運用計画システム 1）HISUI の長期運用計画を様々な種類のユーザニーズや技術的な制約について最適化した形で示すことが出来るシステムを開発する。 2）HISUI の短期運用計画を、長期運用計画や最新の観測実績、様々な技術的な制約について最適化した形で示すことが出来るシステムを開発する。	4）運用計画システム 長期運用計画の最適化に必要な計画策定ソフトウェアの試作すること。	4）運用計画システム 運用計画を最適化するためのシステムの要求分析、運用ソフトの試作し、観測達成率が得られるようになった。	達成

3．金属資源探査技術の研究開発 1）次世代衛星データ解析技術開発（変質帯・鉱物分類の高精度化）	3．金属資源探査技術の研究開発 1）次世代衛星データ解析技術開発 鉱床に伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータを集積し、鉱物分類を高精度化するための解析技術を開発すること。	3．金属資源探査技術の研究開発 1）次世代衛星データ解析技術開発 各種鉱床タイプに伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータを測定し、鉱物分類を高精度化するための解析技術開発を行うこと。	1）次世代衛星データ解析技術開発 鉱床に伴う岩石・鉱物の反射スペクトルデータ測定を実施した。ハイパースペクトルデータ・スペクトルメータデータ等を用いて詳細な鉱物識別を行うとともに鉱物の化学組成、風化プロセス等についても検討した。	達成
2）金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発	2）金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発 鉱床タイプに応じた衛星データ等による解析技術を開発すること。また、ハイパースペクトルデータ解析評価用システムを開発すること。	2）金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発 複数の鉱床タイプを対象として衛星データ等による解析技術開発を行うこと。また、ハイパースペクトルデータ解析評価用システムプロト機を開発すること。	2）金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術の開発 5つの鉱床タイプ（レアアース鉱床、斑岩銅鉱床、ニッケル白金鉱床、酸化鉄型銅金鉱床、高硫化型銅金鉱床）に関する解析探査技術開発を行い、解析手法等を示した。また、携帯型スペクトルメータのプロト機を完成した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数
10

総合評価概要

ASTERの後継機であるHISUIはハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサから構成されるが、高精度・高品質なデータを継続的に得るために必要なセンサの校正、データ処理、運用計画から成る地上データ処

理システム構築ができれば、その意義は大きい。センサとしての潜在的利用価値が高い点や実用化のための解析技術において、4分野の開発目標がそれぞれ具体的であり、それらが達成されていることは評価できる。また、ハイパースペクトルセンサデータは、いろいろな用途に利用できる可能性を持っており、潜在的なユーザーを多く持っている。このようなセンサ技術において、日本が優位に立つことは大変重要であり、積極的に進めるべき研究開発である。

なお、各種の解析技術の目標は達成されているので、実際にそれが実用化にどうつながるか、すなわち、ユーザーにどう活用できるかが課題となる。データ処理システムは国際標準に則っただけで売れるわけではなく、利用者にとってのメリット（処理時間が世界最短など）があって初めて売れるものである。他のシステムとのベンチマーキングをし、システムの特徴を明確にすることが望まれる。小型衛星の海外展開に際しても、市場が本センサをどの程度必要としているかを調査した上での試算があるべきと考える。

解析事例を増やすことで、ユーザーにとって魅力的で、とりつきやすいシステムとなるよう今後の進展に期待する。また、センサデータの商用利用を積極的に進める必要があり、データ販売及び利用に関して、より定量的な試算が必要。なお、衛星データを農業・環境・森林分野で実利用推進するためには別のプロジェクトが必要である。

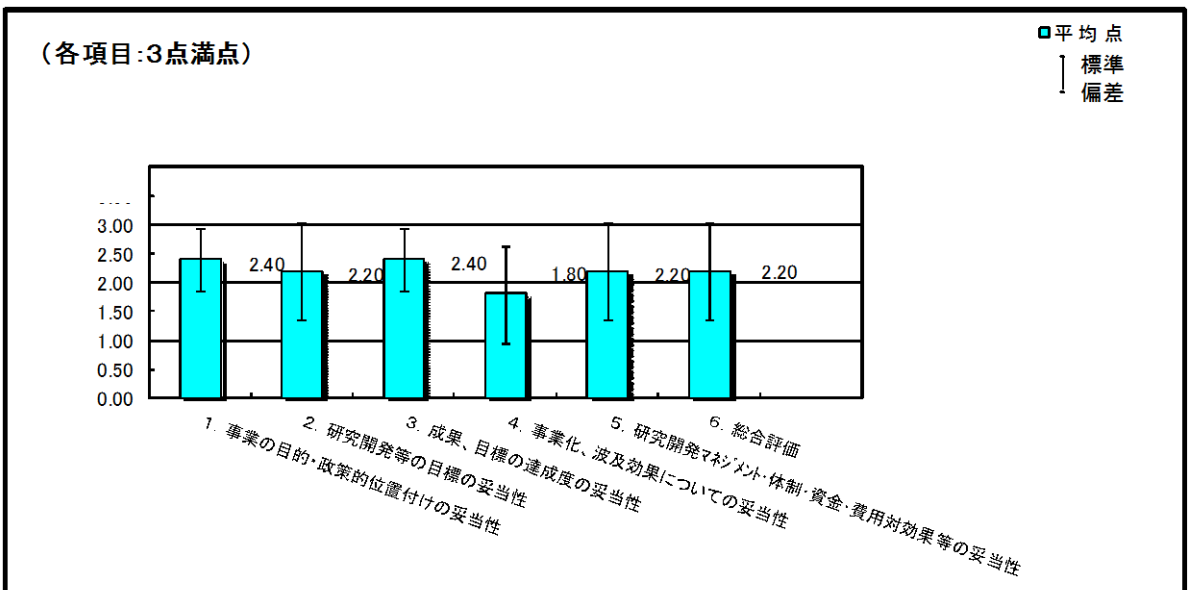
評点結果

評点法による評点結果

G　次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	0.55
2．研究開発等の目標の妥当性	2.20	0.84
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.40	0.55
4．事業化、波及効果についての妥当性	1.80	0.84
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	0.84
6．総合評価	2.20	0.84

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	H 太陽光発電無線送受電技術研究開発
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（エネルギー源の多様化・エネルギーの高度利用）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

宇宙太陽光発電システムは、発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能であることから、将来の新エネルギーシステムとしてその実現が期待されているところであるが、実用化に至るまでに長期的な開発努力と技術の段階的実証を要することから、本事業では、将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術について、安全性や効率性の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を実施し当該技術を確立することにより、宇宙太陽光発電システムの実現並びにエネルギー源の多様化に資することを目的とする。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２１年度	平成２６年度	平成２３年度	平成２７年度	USEF、三菱重工、三菱総研
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
-	149,542	208,064	357,606	357,069

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

将来の新エネルギーとしての宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の実現に向け、その中核的技術であるマイクロ波による無線送受電技術を確立することを目的として、設定された各項目について所定の成果を上げた。

個別要技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
高効率薄型送電部の開発		(1)送電効率 研究レベルの高効率Ｆ級増幅器の効率を低下させることなくメタルパッケージ化し、回路定数等を調整することにより、増幅器単体効率 60%以上、送電部	メタルパッケージ化後の増幅器単体効率は、パッケージ化前とほぼ同等の 70%程度を実現した。試験モデルの送電装置には数百個の増幅器が必要となるが、製造量産精度を考	達成

		効率 30%以上の達成についての見通しを得る。	慮しても左記目標値を達成できる見通しを得た。	
高効率薄型送電部の開発		(2)薄型軽量化 通常の基板構造概念にとらわれない方式を検討し、実現に必要な構成部品の実現性に目途を付けて送電モジュール厚み 40mm 以下の達成についての見通しを得る。	アンテナ面と回路基板を平行に配置し、給電回路等の工夫により、送電モジュール厚み 40mm 達成についての見通しを得た。	達成
高効率受電用整流ダイオードの開発		GaN半導体等を利用した高効率整流ダイオードの設計手法を検討し、予備的な試作を行うことで RF-DC 変換効率 80%の達成についての見通しを得る。	GaN半導体等を利用した複数の構造パターンを持つ整流ダイオードを試作し、製造技術と高効率化に必要なパラメータの抽出並びに目標値の設定を行った。今後さらに検討を進めることにより、RF-DC 変換効率 80%を達成できる見通しを得た。	達成
位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術		解析により有効性の確認を行う。また、各方式について研究し、解析及び要素試作試験による確認を進め、実現性の見通しを得る。	将来 SSPS での有効性確認を行い、伝送効率の低下量:0.4%(目標値 1%以下)、不要波の発生レベル: 0.1W/m^2（目標値 0.3W/m^2 以下）の結果を得た。 また実現性についても解析及び要素試作試験を行い、定量的な見通しを得た。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無し。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
9	1

総合評価概要

宇宙太陽光発電システム(SSPS)は、エネルギー問題、環境問題を解消する将来システムとして有望であり、技術的課題が多く長期的な視野が必要であることから国の研究開発として取り組むべきものである。

本事業では無線送受電技術の開発を行っているが、30%以上の送電効率と送受電モジュール厚さ 40 ㎜以下の達成見込みを得ていることは評価できる。

なお、SSPS の構築に向けては無線送受電技術だけでなく、打上げコストや軌道遷移コスト等、その他にも解決すべき課題が多い。全体システムの完成までを考えるとすれば、それぞれの課題を着実に解決すべきである。

またすぐには実現できない長期的な研究であるからこそ、常にどのような前提に基づき、どのようなシステムを想定し、どのようなメリットがあるのかを示すとともに、多くの人に理解してもらう活動をあわせて行うべきである。

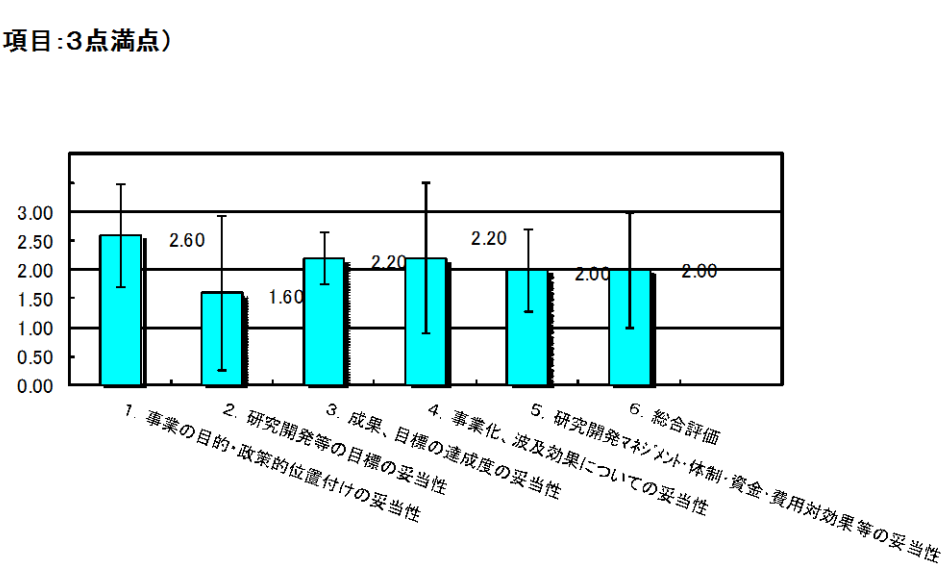
評点結果

評点法による評点結果

H　太陽光発電無線送受電技術研究開発

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	0.89
2．研究開発等の目標の妥当性	1.60	1.34
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.20	0.45
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.20	1.30
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	0.71
6．総合評価	2.00	1.00

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ⅰ．次世代衛星基盤技術開発プログラム（準天頂衛星システム基盤プロジェクト）
上位施策名	経済成長（技術革新の促進・環境整備）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

次世代衛星に要求されるミッションの大型化・高度化に伴う搭載機器の高密度実装、及び発熱量の増大に伴う発熱密度の増加、推進薬の増大等に対応するために必要不可欠な以下の技術開発を行う。

（１）衛星構体の高排熱型熱制御技術

3 次元結合ヒートパイプ網技術の開発及びそれを使った３次元排熱制御技術の開発を行う。

（２）次世代イオンエンジン技術

小推力による緻密な姿勢・軌道保持制御が可能になるとともに、大型衛星の姿勢・軌道修正に適合しつつ衛星重量の低減と目標衛星寿命の確保が期待できる推力 200mN クラスの次世代イオンエンジンの開発を行う。

（３）測位用擬似時計

衛星の水晶発振器を地上局の原子時計に同期させて時刻管理を行う技術の開発を行う。

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１５年度	平成２３年度	平成２０年度	平成２３年度	USEF、JAXA
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額 （H22FY は繰越のため未確定）
660,000	600,000	400,599	5,557,278	5,085,556

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

開発要素となった３項目とも、当初の目標を達成した。なお、「衛星構体の高排熱型熱制御技術」「測位用擬似時計技術」において得られた成果は、準天頂衛星初号機「みちびき」に搭載され、平成 22 年 9 月 11 日に種子島宇宙センターから打ち上げられた。

（1）衛星構体の高排熱型熱制御技術　事後評価時点

目標項目	成果	達成度
≪主目的≫ 3 次元ヒートパイプネットワーク構成技術を開発し、準天頂衛星の排熱能力目標 5kW 以上の実現性を地上試験で実証する。	(1)第 1 期の成果に基づき、全排熱面有効利用技術システム構成要素仕様ならびに全排熱面有効利用技術の設計仕様を作成し、その妥当性を確認した。 (2)第 1 期の成果に基づき、3 次元ヒートパイプネットワーク認定および検証モデルの試験結果を反映した次世代高排熱型衛星構体各部の熱解析モデルを構築した。 (3)上記で構築した熱解析モデルを用いて、軌道上熱解析を実施し、3 次元ヒートパイプネットワークシステムの熱制御性能の妥当性を確認・評価した。 (4)3 次元ヒートパイプネットワークおよび構成技術の認定および検証モデルの設計・製作を行ない、衛星に搭載できる機能・性能を有していることを地上検証試験で評価・確認した。なお、検証モデルは評価の目的により、下記の 2 種類のモデルを製作した。 (a)フライト品質確認用検証モデル (b)熱制御性能確認用検証モデル (5)高熱輸送ヒートパイプおよび高熱伝達ジョイント認定モデルによる試験の結果に基づき、検証モデルの設計・製作及び試験を実施した。その結果に基づき、検証モデルを製作し両者の組合せによる適合性を確認した。 (6)認定および検証モデルによる地上試験結果に基づき、地上検証試験技術の要求仕様の制定と検証計画とその詳細手順を制定した。 (7)3 次元ヒートパイプネットワークの熱解析モデル化および設計手法の体系化を実施した。 (8)製作した 3 次元ヒートパイプネットワーク検証モデルにより、本研究開発目標である排熱能力 5kW 以上を地上試験にて実証した。	達成
≪制約条件≫ 太陽光が照射されるパネル温度は 50～60℃、太陽光の入射が無いパネルは、35～45℃の範囲に保持されること。及びヒートパイプについては単位質量当りの熱輸送能力が 0.38Wm^2/g 以上であること。		

（2）次世代イオンエンジン技術　事後評価時点

目標値	成果	達成度
電源入力 5kW 以下にて、スラスタ性能目標値として、推力 250mN 以上、比推力 1,500 秒以上の実現性 及び 寿命 3,000 時間以上の実現性を地上検証試験で実証する。	1．寿命試験終了時の推力測定で下記性能を確認した。 ・スラスタ消費電力：4.65kW（PPU 入力 5kW 相当） ・推力：253.5mN ・比推力：1,697 秒 2．寿命試験において、推力 250mN 相当の動作点で 3,006 時間のスラスタ噴射を実施し、3,000 時間以上の寿命を確認した。	達成

（3）測位用擬似時計技術　事後評価時点

目標値	成果	達成度
擬似時計システム構成機器を使った地上評価試験及び静止衛星を用いたアルゴリズム実証試験により、擬似時計時刻に関して準天頂衛星システム時刻への同期精度 10ns 以上実現性の見込みを得ていることを確認する。	(1)実際の準天頂衛星で送信される L1, L2, L5 帯の測位信号を使った擬似時計アルゴリズムを開発し、2 ns 以下で同期できる見通しが計算機シミュレーションと地上評価試験で得られた。 (2) 静止衛星（JCSAT-1B）を用いた実験で、10 ns 以内 の同期実験結果が得られている。ただし、用いている装置は擬似時計実証用に準備した装置である。仰角の低い Intelsat-4 を用いた実験でも 2 ns 以内の同期誤差で同期実験結果が得られた。	達成
100,000 秒以上における長期安定性 1×10^{-13} 以上の確保及び擬似時計システム構成の実現性の見込みを得ていることを確認する。	(1) 地上評価試験で、停波の有無にかかわらず、10 万秒で 1.4×10E-14 程度の安定度が得られた。	達成
準天頂測位衛星を用いた実証実験を実施する	準天頂衛星に擬似時計制御ソフトウェアを搭載し、平成 22 年 12 月から、軌道上技術実証実験を実施した。同期精度 0.3 ns、10 万秒で 4.43 ×10E-15 の安定度が得られた。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし。

＜共通指標＞

論文数	特許等件数 （出願を含む）
48	1

※論文数には、講演数やその他の発表も含む。

総合評価概要

既に社会インフラと化した測位システムを自国でまかなうことは、必須の課題であり、GPS の補完的役割を果たす準天頂衛星の開発は重要である。また、準天頂衛星への活用のみならず、国際競争において優位性を保つための次世代衛星技術の開発としての本プロジェクトの意義は大きい。要素技術それぞれにおいても目標が達成されており、その成果の準天頂衛星へ搭載、あるいは、今後開発予定の衛星への搭載の動きが進んでいることは評価できる。

なお、次世代衛星基盤技術として、なぜ、この 3 つ(衛星構体の高排熱型熱制御技術、次世代イオンエンジン技術、測位用擬似時計技術)の技術開発が選ばれたのかを明示しておく必要があったと感じられる。イオンエンジンについては、本プロジェクトの目標は達成しているが、実際には、運用期間終了後も故障するまで使用されることを考えると、もう少し長い設定が必要であったのではないかと考えられる。また、今後の衛星販売ビジネスにおける体系的な戦略なども描けるとよいと思われる。

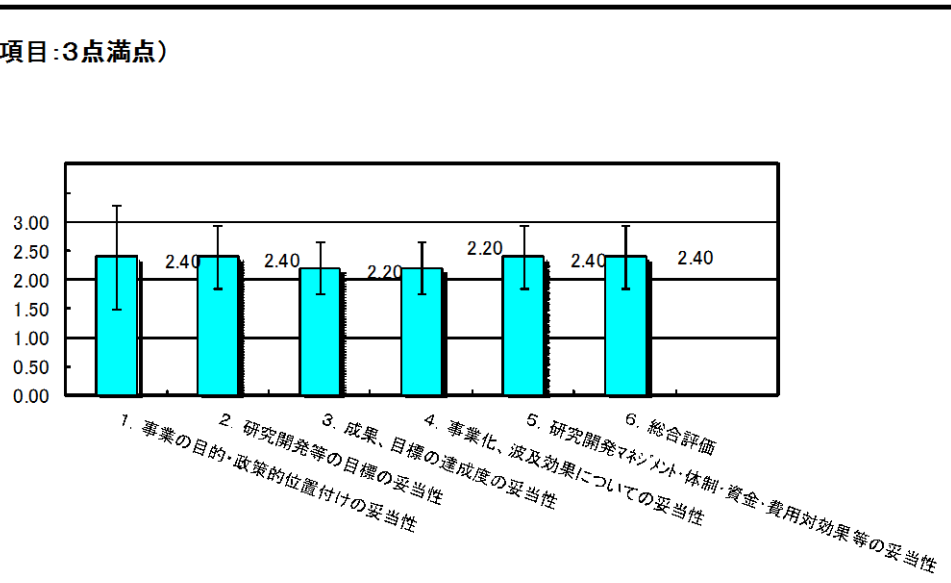
評点結果

評点法による評点結果

Ⅰ　次世代衛星基盤技術開発プログラム
（準天頂衛星システム基盤プロジェクト）

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	0.89
2．研究開発等の目標の妥当性	2.40	0.55
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.20	0.45
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.20	0.45
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.40	0.55
6．総合評価	2.40	0.55

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｊ．次世代構造部材創製・加工技術開発事業（次世代衛星基盤技術開発）
上位施策名	資源エネルギー・環境政策（省エネルギーの推進）
担当課	製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

事業の目的・概要

準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術として産業競争力強化にも直結する衛星の高度化、長寿命化等に関する技術及び我が国の次世代を担う衛星に不可欠な基盤技術として「異種材料を含む大型構造体用複合材料製造設計技術」の開発を行う。以下は、開発要素である。

①熱特性及び製造プロセスを含めた複合材料製造設計技術

②複合材料を用いた精密大型構造体の一体成形技術の開発

③異種材料間の接合面を有する複雑構造体の成型技術の開発

④宇宙空間における技術実証試験の実施

予算額等（委託）　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成１５年度	平成２２年度	平成２０年度	平成２３年度	USEF、JAXA
H19FY 予算額	H20FY 予算額	H21FY 予算額	総予算額	総執行額
617,000	600,000	255,000	3,873,991	3,795,600

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

開発要素となった３項目とも、当初の目標を達成した。なお、得られた成果は、準天頂衛星初号機「みちびき」に搭載され、平成 22 年 9 月 11 日に種子島宇宙センターから打ち上げられた。

事後評価時点の目標に対する達成度

目標値	成果	達成度
(1)熱特性及び製造プロセスを含めた複合材料製造設計技術		
CFRP 構造体の使条件および製造条件（材料の種類、温度条件等）による熱特性、成形歪の解析シミュレーションツルを開発すること。	解析ツールを開発し、解析を実施した。従来方式の設計ツールでは評価することのできなかった金型影響、硬化収縮影響、製造法影響を評価することが可能となった。	達成
(2)複合材料を用いた精密大型構造体の一体成形技術の開発		
精密大型構造体の主構造となる一体成形CFRPシリンダ（約3m長×1m径）	精密な複雑形状を有する CFRP シリンダ(直径1.3m×高さ3.8m)の設計・製造技術を開発した。ま	

	技術を開発する。	た、開発モデル・認定モデル・検証モデルの製作・検査・試験（打上げ環境を考慮した静荷重試験と音響試験）および準天頂衛星での軌道上実証を実施して、開発した技術が妥当であることを確認した。検証モデルの写真を図 3-2-J -1 に示す。	達成
(3)異種材料間の接合面を有する複雑構造体の成形技術の開発			
	異なる材料による接合部分を有するパネル構造体(約2m 立方)において、使用温度範囲-30℃～+70℃において熱歪みによる破壊を生じないこと及びパネルの少なくとも一方向の線熱膨張率が 5ppm／℃以下であること。	衛星への実機搭載を想定した仕様設定を行ったパネル構造体(2.3m × 2.4m)において線熱膨張率 4.95ppm/℃を達成した。 -40℃～+80℃の熱サイクル試験においても熱歪みによる破壊は生じていないことを確認した。検証モデルの写真を図 3-2-J-2 に示す。	達成
(4)衛星構体の軽量化			
	衛星構体について打上げ環境・軌道上環境に適合し且つ衛星構体重量削減目標 10%以上の実現性を地上検証により実証する。	上記(2)項に示すように、開発したシリンダが打上げ環境・軌道上環境に適合することを地上検証および準天頂衛星での軌道上実証により確認した。 また、上記(1)～(3)項の成果を全て活用することにより、次世代衛星において 10.5%の重量削減が可能であることを確認した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし。

＜共通指標＞

論文数
6

※論文数には、講演数やその他の発表も含む。

総合評価概要

I. の研究開発と表裏一体をなすものであり、ともに準天頂衛星を例に、次世代衛星基盤技術開発の確立を目指すものとして意義が大きい。本技術開発は、衛星全体の軽量化に対するインパクトの高い研究であり、数値目標も達成している上、開発中の商用衛星への適用など、研究開発から事業化までがリンクしている点が評価できる。

なお、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics:炭素繊維強化プラスチック)に関する研究は、大学や研究機関においても多く実施されており、これら組織との協力体制を図るとともに、世界を視野に入れた競合他者との比較等、本技術の立ち位置を明確にすることも望まれる。日本の得意分野である複合材料技術を生かして、積極的に国際標準化を推進する等の戦略的視点をもつのが望ましい。

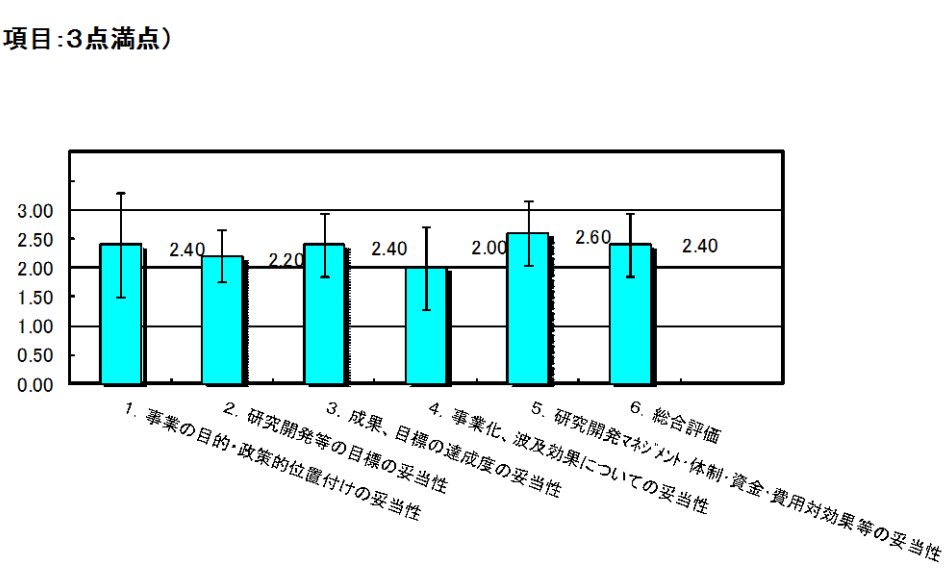
評点結果

評点法による評点結果

Ｊ　次世代構造部材創製・加工技術開発事業
（次世代衛星基盤技術開発）

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	0.89
２．研究開発等の目標の妥当性	2.20	0.45
３．成果、目標の達成度の妥当性	2.40	0.55
４．事業化、波及効果についての妥当性	2.00	0.71
５．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.60	0.55
６．総合評価	2.40	0.55

（各項目:3点満点）



参考資料５

太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業
事前評価報告書

平成２５年８月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ＷＧ

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針（平成２４年１２月６日内閣総理大臣決定）」等に沿った適切な評価を実施すべく、「経済産業省技術評価指針（平成２１年３月３１日改正）」を定め、産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ＷＧ（座長：渡部俊也　東京大学教授）の場において、経済産業省が実施する研究開発プロジェクト等の技術評価を実施しているところである。

今般、経済産業省から、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業」を新たに創設することに関し、当該技術分野の省外専門家の評価コメント等を取り纏めた「事前評価報告書（案）」の付議提出があったので、当ＷＧにおいてこれを審議し、内容了承することとしたところである。

本書は、上記評価結果及びその経緯等を取り纏めたものである。

平成２５年８月
産業構造審議会産業技術環境分科会
研究開発・評価小委員会評価ＷＧ

産業構造審議会　産業技術環境分科会
研究開発・評価小委員会　評価ＷＧ
委　員　名　簿

座長	渡部　俊也	東京大学政策ビジョンセンター　教授
	大島　まり	東京大学大学院情報学科　教授 東京大学生産技術研究所　教授
	太田　健一郎	横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センター センター長・特任教授
	菊池　純一	青山学院大学法学部長・大学院法学研究科長・教授
	小林　直人	早稲田大学研究戦略センター　副所長・教授
	鈴木　　潤	政策研究大学院大学　教授
	森　　俊介	東京理科大学理工学研究科長・教授
	吉本　陽子	三菱ＵＦＪリサーチ＆コンサルティング株式会社 経済・社会政策部経済・産業調査グループ　主席研究員

（委員敬称略、五十音順）

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業の事前評価に当たり意見をいただいた外部有識者

工藤　勲	北海道大学　名誉教授
竹ヶ原　春貴	首都大学東京大学院　教授
秦　重義	一般社団法人日本航空宇宙工業会　常務理事

（敬称略、五十音順）

事務局：製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室

太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業の評価に係る省内関係者

【事前評価時】

製造産業局　航空機武器宇宙産業課　宇宙産業室長　武藤　寿彦

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　飯村　亜紀子

太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業事前評価
審 議 経 過

〇新規研究開発事業の創設の妥当性に対する意見の収集（平成２５年５月）

〇産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ＷＧ（平成２５年８月２１日）
・事前評価報告書(案)について

目　　次

はじめに
評価ＷＧ　委員名簿
御意見をいただいた外部有識者　名簿
事前評価に係る省内関係者
審議経過

第１章　技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要
　１．技術に関する施策の概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
　２．新規研究開発事業の概要について　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
　３．新規研究開発事業の創設の妥当性等について　・・・・・・・・・・・・・・・・・３

第２章　評価コメント　・・６

参考資料　太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発事業の概要（PR資料）

第1章　技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要

1．技術に関する施策の概要

宇宙は国家の安全、経済、科学を担う戦略的分野であり、各国とも安全保障、国威発揚、技術開発のために国が主導して自国産業を育てている。また、宇宙の利用サービスは大幅に拡大しており、宇宙産業の裾野はますます広がっているほか、新興国を中心に衛星の需要も拡大しており、**宇宙産業は今後も市場規模の拡大が見込まれる成長分野**である。

本年1月には、新たな「宇宙基本計画」が策定された。ここでは**「宇宙利用の拡大」**と**「自律性の確保」**を基本的な方針とし、これを支える宇宙産業基盤の維持・強化、産業振興に取り組むことの必要性を確認した。

そこで、経済産業省では、「宇宙産業プログラム」として、**「国家の宇宙開発を支える基盤である宇宙産業について、我が国の持つ先端民生技術の強みを最大限活用し、重要基盤技術の研究開発を実施することで国際競争力の強化を図り、宇宙利用を拡大する」**ことを目的に研究開発事業を実施している。

本事業では、将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の中核的技術であるマイクロ波による無線送受電技術を確立する。

2．新規研究開発事業の概要について

（1）開発する技術のサイエンス、テクノロジーの概要

将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システム（SSPS:Space Solar Power System）の中核的技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立に向け、発電コストの低減に必要不可欠な送受電効率の改善を目指した研究開発を行う。具体的には、送電部の半導体増幅器、および受電部のレクテナ整流回路についてより高効率の素子を用いた要素技術の開発を行う。

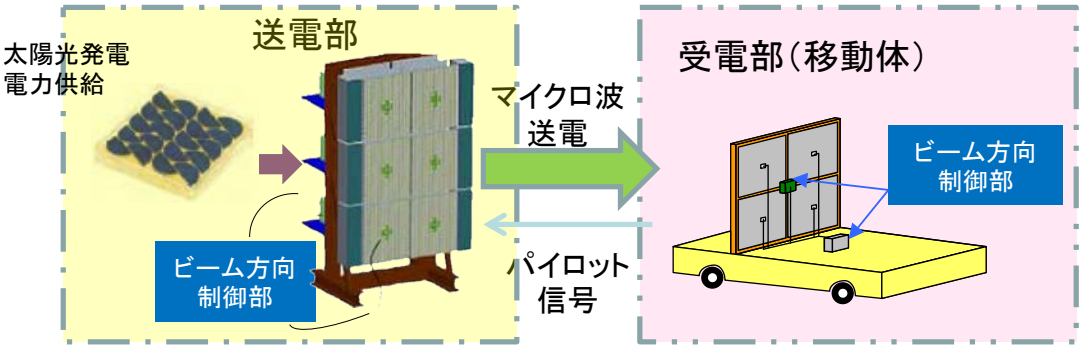
また、無線送受電の安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術について、従来に比較して高効率・大電力・長距離でのビーム制御検証を行う。

①送受電効率の改善

本事業では、SSPS の中核的技術として応用可能なマイクロ波による無線送受電技術について送受電効率の改善を目指す。

SSPS の送電部は、宇宙に設置された大量のアンテナパネルを組み合わせた巨大なシステム（フェーズドアレイアンテナ）となるので、構成要素には小型化・薄型化・高効率化が求められる。フェーズドアレイアンテナによりマイクロ波の位相同期を図りつつ、ギガワット級のエネルギーを送電可能なものとする。フェーズドアレイは多数の送電モジュールから構成される。送電モジュールはさらにサブモジュールに細分化され、サブモジュールの変換効率は主に半導体増幅器(HPA)の効率に依存する。半導体増幅器の効率改善によって、熱対策が軽減され、太陽光発電衛星の大きさ・質量を小さくすることが可能となる。これにより、輸送費やひいては全体の発電コストの低減に資するものである。よって、半導体増幅器の効率改善は必要不可欠なものである。

システム構成イメージ



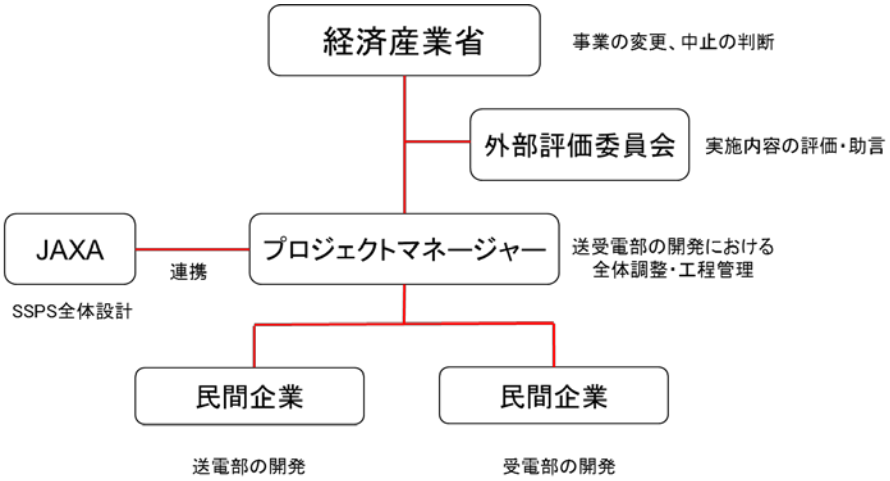
一方、地上の受電部としては、マイクロ波を DC 電力に変換するレクテナ素子(ダイオードを含む整流回路)の効率の改善が、SSPS の発電コスト低減の観点から同様に必要である。

②送受電の安全性確保等

受電部に関する電磁環境 (EMC)問題としては、一般的には受電部アンテナ面からのスプリアス放射が考えられ、不要波の放射は周辺の電子機器等に影響のないレベルに抑える必要があることから、フィルター等により対策が練られている。本事業では、フィルターでは対処できない受電アンテナからの基本波を含むマイクロ波再放射を抑制する技術について検討する。また、受電部側から発信されるパイロット信号の到来角度を計測し、その角度方向にマイクロ波ビームを精密に指向制御する精密ビーム制御技術を活用する。

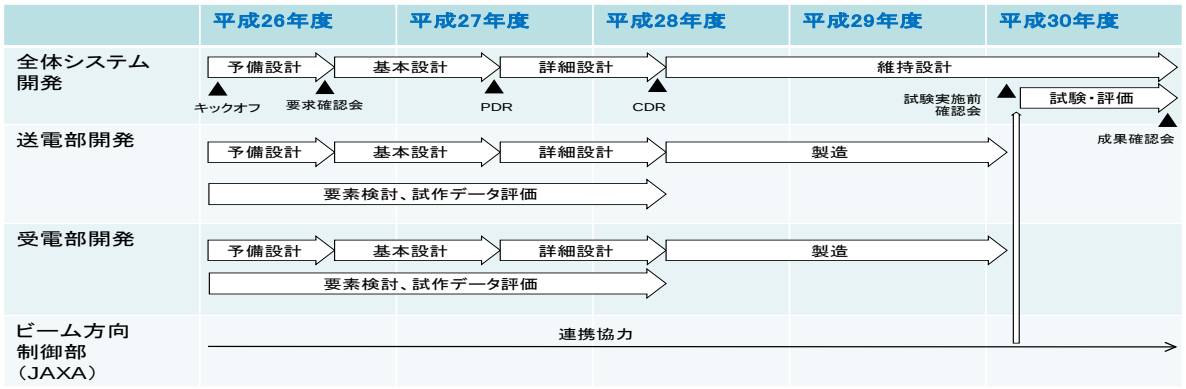
(2)実施体制図

本事業における実施体制図を以下に示す。



（3）実施スケジュール

平成26年度(2014)～平成30年度(2018)



3.　新規研究開発事業の創設の妥当性について

（1）事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

①事業の必要性

太陽光発電は石油代替エネルギーとして導入が進められてきているが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題への対応等の観点から、更なる導入拡大が重要となっている。さらに、世界規模の低炭素社会を実現するための抜本的な対策の一つとして、他の再生可能エネルギーとは異なり、昼夜や天候に左右されることなく 24 時間安定的に発電が可能な SSPS の実現が期待されている。

実用化に至るまでには長期の研究開発と段階的な技術実証が必要であるため、エネルギー基本計画（平成 22 年 6 月閣議決定）、環境エネルギー技術革新計画（平成 20 年 5 月総合科学技術会議決定）等においても長期的視野に立ち必要な取組や検討を進めるとされている。

また、平成25年1月に宇宙開発戦略本部が決定した「宇宙基本計画」では、今後5年間の開発利用計画として、宇宙太陽光発電については、「我が国のエネルギー需給見通しや将来の新エネルギー開発の必要性に鑑み、無線による送受電技術等を中心に研究を着実に進める。」とされており、経済産業省では、マイクロ波による宇宙太陽光発電の中核的技術である無線送受電技術（エネルギー伝送技術）の確立に向け、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術について研究開発を実施してきた。

新たな宇宙基本計画で掲げた、SSPS の実現に向けた3つの課題（技術、安全性、経済性）のうち、技術課題のひとつとして「高効率で安全な発電・送電・受電技術等」がある。本事業では、マイクロ波による送受電効率の改善、および再放射抑制技術の習得等を目指すものである。

②アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期

太陽光発電は石油代替エネルギーとして導入が進められてきているが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題への対応等の観点から、更なる導入拡大が重要となっている。さ

らに、世界規模の低炭素社会を実現するための抜本的な対策の一つとして、他の再生可能エネルギーとは異なり、昼夜や天候に左右されることなく 24 時間安定的に発電が可能な SSPS の実現が期待されている。

かかる状況の下、本事業に加え宇宙実証試験等を実施することにより、2030年代には商用システムとして事業化を行うことを目標とする。

本事業の研究開発の定量的目標としては以下のとおり。

(a) 送電部： 2018年度末までに、単体での DC-RF 変換効率（電力付加効率）80%（目標）のマイクロ波増幅器(HPA)の開発を行う。（現状効率70%程度）

(b) 受電部： 2018年度末までに、単体での RF-DC 変換効率（整流効率）80%（目標）の整流回路の開発を行う。（現状効率70%程度）

(c) ビーム方向制御： 2018年度末までに、伝送距離100m程度のビーム方向制御を確認する。

(d) 受電部からのマイクロ波再放射： 2018年度末までに、マイクロ波再放射の抑制技術を習得する。

③アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度

SSPS の中核的技術として応用可能なマイクロ波無線送受電技術に係る研究開発は、レーダー技術や通信技術などの民生分野への波及効果も期待される。

また、SSPS が実用化された日には、天候に左右されず夜間でも発電可能な発電システムにより大幅な $CO2$ 削減効果が得られる。仮に我が国の火力発電所の $1/2$ が SSPS に置き換わった場合、約1億トンの $CO2$ 削減効果が得られると試算される。

④アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期

本事業で行う地上実証送受電実験を踏まえ、小型衛星を利用した宇宙実証実験を実施、2030年には商用システムとして事業化を行うことを目標とする。SSPS実現に向けてのロードマップを別紙1に示す。

（2）アウトカムに至るまでの戦略について

①アウトカムに至るまでの戦略（アウトカムに至るまでのスケジュール、知財管理の取扱、実証や国際標準化、性能や安全性基準の策定、規制緩和等を含む実用化に向けた取組）

SSPS実現に向けてのロードマップを別紙1に示す。2020年までに地上で行う送受電実験の結果を踏まえ、小型衛星を利用した宇宙実証実験を実施し、宇宙太陽光発電の商業化を促進する。マイクロ波による健康、大気・電離層、航空機、電子機器等への影響について調査を実施し、性能や安全性基準について関係省庁と検討を行う。

また、本事業で得られたマイクロ波送電の技術は、地上でも応用が可能である。技術波及・応用の可能性を別紙2に示す。

なお、本事業では、平成25年度終了予定の「太陽光発電無線送受電技術の研究開発」の成果を活かし、（独）宇宙航空研究開発機構と協力して実施することを想定している。

②成果とユーザーの段階的イメージ・仮説（技術開発成果の直接的受け手、社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤー）

有効かつ効率的な実施体制とするために、これまで実施したSSPSの研究開発事業の成果を活かし、無線電力伝送技術に関する知見や研究実績のある企業の参加により研究開発に取り組む体制を想定。その中で学術的知見をもつ大学やユーザである電力関係者等からな

る技術委員会を設置し、助言・評価をいただくことを想定。
　また、我が国全体の宇宙開発利用を技術で支える中核的な機関である（独）宇宙航空研究開発機構とも協力・連携を行い事業を実施することを想定している。

（3）次年度以降に技術開発を実施する緊急性について
①次年度以降に技術開発を実施する緊急性
　世界全体の温室効果ガスの排出を 2050 年までに半減するといった低炭素社会を実現するためには、地上における再生可能エネルギーの導入拡大に加え、さらに抜本的な対策が必要である。SSPS は将来の新エネルギーシステムの一つとしてその実現が期待されているところであるが、実用化に至るまでには長期の研究開発と段階的な技術実証が必要であるため、継続的に事業を進める必要がある。

（4）国が実施する必要性について
①科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性（我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野であることについて、他の研究分野等への高い波及効果を含むものであることについて）
　SSPS は、研究開発リスクが伴う、研究投資額が巨額である等、民間が開発に着手しにくい技術課題があり、実現には先端的な半導体技術から高信頼性が求められる宇宙技術に至るまで、多岐にわたる専門技術と長期の取組が必要である。そのため、我が国の英知を集結して、政府が主導的に研究開発や技術実証を進めていくことが必要不可欠である。また、開発に当たっては、エネルギー政策を所管する経済産業省が我が国の宇宙機関である独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）などと連携・協力し、研究開発や技術実証を進める必要がある。

（5）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について
①当該事業のアウトカムと関連性のある省外の事業との関係性（当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業、上記の関連性のある事業との重複がなく、適切に連携等が取れていることについて）
　本事業は「太陽光発電無線送受電技術の研究開発」（平成21年度～平成25年度）の開発成果を活用する。また、JAXAではビーム制御に関わるレトロディレクティブ技術の研究開発を実施しており、その成果を本事業でも活用する。

第２章　評価コメント

新規研究開発事業の創設の妥当性に対するコメント
（１）事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）①事業の必要性
　低炭素社会を実現するための抜本的な対策の一つとして 24 時間安定的に発電が可能な SSPS の実現は必要である。実現に向けては、技術的な実証を踏まえつつ着実に実現性を検証する必要があり、要素技術の検証を先行させることは妥当である。
　なお、宇宙基本計画（平成２５年１月）では「宇宙空間での実証に関し、その費用対効果を含めて実施に向けて検討すること」が要求されており、宇宙実証の必要性を本効率化の研究開発と合わせて実施すべきである。衛星間の無線送電は既に行われており、SSPS の実用化に向けたパイロット実験を行う場合にはこれ以上のスケールのものが求められるが容易ではない。また、国家的事業として取り組むには産官学の連携が重要である。よって、大学が技術委員会の委員とは別に、計画に直接参加できる枠組みを模索する必要がある。

〇肯定的意見
（A 氏）改訂された「宇宙基本計画」では、無線による送受電技術を中心に研究開発することを求めていて、本件はこれに従いマイクロ波による送受電効率の改善、再放射抑制技術の習得に取り組むことを提案している。地上において各所にメガソーラー発電所が建設され始めていて、その電力は有線により送電網に接続されるが、SSPS の場合には高効率な無線送受電技術の獲得が鍵となる。
（B 氏）世界規模の低炭素社会を実現するための抜本的な対策の一つとして、24 時間安定的に発電が可能な SSPS の実現は必要である。
（C 氏）SSPS は将来のエネルギー供給に革新をもたらす技術であり、実用化に至ればその社会へ及ぼす影響は計り知れない。その一方、実現に向けての課題は多く、技術的な実証を踏まえつつ着実に実現性を検証する必要があり、本事業計画に示された要素技術の検証を先行させることは妥当である。

〇問題点・改善すべき点
（A 氏）宇宙基本計画の見直しでは、「宇宙空間での実証に関し、その費用対効果を含めて実施に向けて検討すること」を要求していて、今後 5 年以内にその必要性を明確にしておかなければならない。実証の必要性は本効率化の研究開発と合わせて実施すべきである。そもそも SSPS については 1990 年代から通商産業省においてフィージビリティが検討されてきているが、宇宙実証には至っていない。原理が簡単で多くの衛星が太陽電池で発電し、通信放送衛星では軌道上から通信手段として無線で電力を送っている。具体的には ISS では 120kW を発電し、大型の通信衛星では 10kW レベルの送信を実現している。このことから、宇宙発電の原理を実証する必要はなく、宇宙発電を実用化する為のパイロット実験を計画する場合には、これ以上のスケールのものが要求され簡単にはできないのが難点である。基本計画の要求に説得力のある回答を用意することは容易ではないと考える。
（C 氏）国家的事業として取り組むに当たっては産官学の連携が重要であるが、特に大学の参加に関しては技術委員会の評価委員とは別に計画に直接参加できる枠組みを模索する必要があると思料する。

（１）②アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期

原子力発電が不安定な状態の今、従来の太陽光発電の稼働率の低さを克服する SSPS の早期実現に期待。送電効率の向上は輸送系への負担軽減、排熱装置の小型化へつながり重要である。また、開発の目標が定量的に設定されており、開発に必要な時間や現在の我が国の経済状態等を考慮しても本事業計画は妥当である。

なお、SSPS の実現の成否は大型構造物を如何に安価に効率よく構築するかが鍵であり、次のフェーズではそのための基本実験を行うべきである。設計の段階では個々の目標値の達成度のみならずコストを含む将来システムとしての実現性に関する評価も考慮すべきである。

〇肯定的意見

（A 氏）温室効果ガス削減の旗手であった原子力発電が不安定な状態の今、SSPS の早期実現が期待されている。今後メガソーラー発電所が普及するにつれ、その欠点である稼働率の低さが SSPS の有利性を際立たせるようになると思われる。送電効率の向上は、輸送系への負担の軽減、排熱装置の小型化へつながり、重要と考える。

（B 氏）研究開発の定量的目標が具体的に設定されている。

（C 氏）SSPS の実現可能性を探求するためには個々の要素技術の検証が不可欠であり、主要な課題である電力伝送技術の地上における実証は重要である。開発に必要な時間等を考慮しても本事業計画は妥当である。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）SSPS が実用となる時期のアウトカムを議論すべきと考えるが、SPSS はあまりに巨大であることから、具体的な指標等について議論できない。実現までには多くの課題を解決していかなければならないと考えるが、提案の高効率無線送受電は現在の経済状態を考えれば最適な設定であろうと思う。私自身は上述のように発送電の原理を小規模のスケールで宇宙実証する必要はないことから、SSPS 実現の成否は大型構造物を如何に安価に効率よく構築するかにかかっていると考えている。次のフェーズではそのための基本実験も実施していただきたいものである。

（C 氏）事業計画開始段階の判断であるが、基本設計や詳細設計の評価については個々の目標値の達成度のみならずコストを含む将来システムとしての実現性に関する評価も重要である。設計段階から評価項目として考慮することを望む。

（１）③アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度

世界に先駆けて我が国が SSPS の実現性を検証することができれば世界のエネルギー供給の革新への大きな進展となる。さらに SSPS そのものが実現すれば原子力・火力発電の依存度を低減できる。本研究開発はレーダー技術や通信技術などの民生分野の波及効果も期待され、大きな経済効果が期待される。現状、SSPS に具体的な取り組みがあるのは日本だけであり、先行して成果を得ることができれば国際競争力の向上に貢献する。

なお、火力発電の 1/2 を SSPS に置き換わった場合を想定しているが、現状のロードマップ（2020 年に２MW 級）を見る限り、非現実的である。また、国際競争力について具体的に言及すべき。我が国経済への影響等については本事業の最終段階にて評価すべき事項であるが、中途段階においても将来、計画遂行に関する費用対効果を検討しておく必要がある。

〇肯定的意見

（A 氏）今や、SSPS に具体的な取り組みがあるのは日本だけであり、小規模であるにしろこうした継続した研究開発は他国の追従を許さないものとなる。

（B 氏）本研究開発は、レーダー技術や通信技術などの民生分野への波及効果も期待され、日本経済にも大きな効果がある。

（C 氏）世界に先駆けて我が国が SSPS の実現性を検証することができれば世界のエネルギー供給の革新への大きな進展となる。さらに SSPS そのものが実現すれば原子力・火力等による電力供給への依存度を低減することが可能となり、多くの経済効果が期待できる。一方、全体システムとしての実現性及び費用対効果については多くの課題があり、本事業はこれらの課題解明に重要な要素技術の検証を行うもので、この分野で先行して成果を得ることができれば国際競争力の向上に貢献する。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）火力の 1/2 を SSPS（１機 100 万 KW）に置き換わった場合を想定しているが、ロードマップを見る限り、2020 年に 2MW 級ではこの仮定は非現実的である。

（B 氏）国際競争力に関し、具体的に言及すべきと考える。

（C 氏）我が国経済への影響等については本事業の最終段階にて評価すべき事項であるが、中途段階においても将来計画の遂行に関する費用対効果等を検討しておく必要がある。

（１）④アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期

アウトカムに至るまでに達成すべきも目標については、ロードマップにおいて、詳細な検討がなされており、地上実証から小型衛星実証、大型衛星実証を経てユニット配備を行うというロードマップは間違っていない。予備設計、基本設計、詳細設計の各段階において評価時期が設定されており、設計目標も数値目標として明示されており目標設定は適切である。

なお、今回示されたロードマップは従来のものより遅れており、これ以上遅れないようにすべきである。送電部と受電部の開発はそれぞれ平行して実施しつつも相互の情報共有は不可欠であり、製造段階においても何等かの連接試験等が必要である。

〇肯定的意見

（A 氏）地上実証→小型衛星実証→大型衛星実証→ユニット配備の道筋は間違っていない。

（B 氏）ロードマップにおいて、詳細な検討がなされている。

（C 氏）予備設計、基本設計、詳細設計の各段階において評価時期が設定されており、設計目標も数値目標として明示されており目標設定は適切である。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）別紙 1 に示されているロードマップは、従来のものに比べて若干の遅れがあり、これ以上遅れないようにしていただきたい。

（C 氏）送電部と受電部の開発は平行して実施しつつも相互の情報共有は不可欠であり、計画細部ではあるが製造段階においても何等かの連接試験等が必要である。

（２）アウトカムに至るまでの戦略について

（２）①アウトカムに至るまでの戦略

マイクロ波送電技術はさまざまな分野での応用が期待されるが、特に電気自動車の応用に期待。ロードマップとして具体的戦略及び技術波及・応用の可能性が示されており、技術的難易度を考慮しても全体スケジュールは妥当である。また、知的財産管理に関しては、成果は原則として委託先に帰属するものであり、知財の取り扱いは適切である。

なお、今回示されたロードマップは従来のものより遅れており、これ以上遅れないようにすべきである。また、計画実施段階での考慮事項であるが、知財管理としての成果の帰属に関しては明確化が必要となる。

〇肯定的意見

（A 氏）マイクロ波送電技術は別紙 2 に示されるような応用が期待される。電気自動車への応用は特に期待したい。

（B 氏）ロードマップ１，２において、具体的戦略および技術波及・応用の可能性が示されている。

（C 氏）本事業は要素技術の開発・実証が目的であるため全体システムの検証としては初期段階にあり、国際標準化、性能、安全性基準等は将来の課題として留意するものと理解している。知的財産管理に関しては成果の帰属は原則として委託先と理解しており、知財の取扱いは適切である。また技術的難易度を考慮しても全体スケジュールは妥当である。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）別紙1に示されているロードマップは、従来のものに比べて若干の遅れがあり、これ以上遅れないようにしていただきたい。

（C 氏）計画実施段階での考慮事項であるが、知財管理としての成果の帰属に関しては明確化が必要である。

（２）②成果とユーザーの段階的イメージ・仮説

過去、大学、研究所、企業が SSPS の研究開発に参画しており、これらの人的資源を引き続き活用することが重要である。本事業の対象となる無線電力伝送技術は SSPS の実現性の検証にとって重要な鍵となるものであり、今後の計画遂行の可否の判断に大きく影響する。将来のエネルギー確保は国家の役割であり、本事業は公共の利益に資するものであり、計画は妥当である。

なお、SSPS は、低炭素社会を実現するための抜本的な対策の一つとして考えられていることから、今後は電力会社をさらに巻き込んだ技術開発を進めていくべきである。また、キープレーヤーは想定されているが、その相互の関係、役割分担を明確にすべきである。

〇肯定的意見

（A 氏）別紙 1 によると、過去、大学、研究所、企業が研究開発に参画していて、これらの人的資源を引き続き活用することが重要である。

（B 氏）キープレーヤーは想定されているが、その相互の関係、役割分担を明確にされたい。

（C 氏）本事業の対象となる無線電力伝送技術は SSPS の実現性の検証にとって重要な鍵となるものであり、本事業の成果は今後の計画遂行の可否の判断に大きく影響する。

将来のエネルギー確保は国家の役割であり、本事業は公共の利益に資するものであり、計画は妥当である。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）現在、原子力発電所の多くが止まっている状態で電力会社は苦慮している。従来より電力会社(電事連)は温室効果ガス対策として唯一原発を考えていたことから、SPSS を軽視し続けてきた。SPSS のプレイヤーは電力会社のはずであり、今後は彼らを巻き込んで技術開発を進めていただきたい。

（B 氏）キープレーヤーは想定されているが、その相互の関係、役割分担を明確にされたい。

（３）次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（３）①次年度以降に技術開発を実施する緊急性

我が国の将来のエネルギー確保は昨今、重要な課題となっており SSPS の技術的実現性についても早急に検証を進め、着実に研究開発を積み上げる必要がある。特に SSPS はシステムが巨大となることから早期に要素技術の実証を進め実現性の可否を検討する必要があり、次年度からの着手は妥当である。

なお、2050 年までに SSPS が CO2 排出量を半減するための新エネルギーの一つとなるには現状のスケジュールでは心もとない。2030 年代の商用実用化を目標としているが、重要なことは段階的な実証と評価であり、2030 年代の実用化がすべての目標であるかのような表現は抑制すべきである。

〇肯定的意見

（A 氏）継続は力であることを認める。過去 20 年にわたり継続してきた METI の研究開発は今後も続けるべきである。

（B 氏）着実な研究開発を積み上げる必要性があり、そのために緊急性がある。

（C 氏）我が国の将来のエネルギー確保は昨今、重要な課題となっており SSPS の技術的実現性についても早急に検証を進める必要がある。特に SSPS はシステムが巨大となることから早期に要素技術の実証を進め実現性の可否を検討する必要があり、次年度からの着手は妥当である。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）「2050 年までに CO2 排出量を半減するために SSPS が新エネルギーの一つとしてその実現が期待される」を真に受け止めようとするならば、別紙１のスケジュールでは心もとない。

（C 氏）2030 年代の商用実用化は目標であるが、重要なことは段階的な実証と評価であり、2030 年代の実用化が全ての目標であるかのような表現は抑制することが適切である。

（４）国が実施する必要性について

（４）①科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性

SSPS の開発費は巨額であり、民間による取り組みは極めて難しい。また、国が約束した温室効果削減のためにも、国が主体的に取り組むのは当然である。そのため、国が先導的役割を果たすことが必要である。無線送受電技術は、電気自動車の無線給電や建物内のユビキタス電源等への活用が期待できることから、一般社会への無線送電の理解が深まることが期待できる。さらに、本事業の対象となるアクティブ・フェイズドアレー・レーダ

（APR）技術は我が国では防衛用途として世界のトップレベルの実績がある分野である。無線電力伝送技術は宇宙空間あるいは地上間でも有効な技術であり、波及効果が期待できる。
なお、SSPS は超大型な宇宙構造物であり、運用中に制御を失えば、その被害は予測の域を超えたものとなる。研究開発のみでなく、運用の際にも国の責任は大きい。また、高出力の電波ビームを長距離で収束させる技術は難易度が高く、個々の開発品の評価とともに宇宙への運搬手段、維持経費等を含む全体システムの実現性の検証が不可欠であることから、事業計画実施段階においても評価項目に含めるべきである。事業の実施にあたっては、諸外国における開発状況を注視し、差別化することが重要である。

〇肯定的意見

（A 氏）開発費は巨額であり、民間のみによる取組は極めて難しい。温室効果ガス削減は国の約束であり、国が主体的に取り組むのは当然である。他国が何もしない状況下では世界に勝てる技術分野と判断できる。別紙 2 の波及効果が期待でき、特にユビキタス電源、電子機器への直接給電が浸透すれば、市民の無線送電に対する恐怖感を払しょくできる状況がやがて来ると考える。

（B 氏）All Japan として、その先導役として国が先導的役割を果たすことが必要である。

（C 氏）本事業の対象となるアクティブ・フェイズドアレー・レーダ（APR）技術は我が国では防衛用途として世界のトップレベルの実績がある分野である。無線電力伝送技術は宇宙空間あるいは地上間でも有効な技術であり、波及効果が期待できる。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）SSPS は超大型な宇宙構造物であり、運用中に制御を失えば、その被害は予測の域を超えたものとなる。研究開発のみでなく、運用の際にも国の責任は大きい。

（B 氏）諸外国における研究開発状況に関し、言及し・差別化することが、重要と考える。

（C 氏）高出力の電波ビームを長距離で収束させる技術は難易度が高く、個々の開発品の評価とともに宇宙への運搬手段、維持経費等を含む全体システムの実現性の検証が不可欠である。事業計画実施段階に於ける各評価ではこれらの点も評価項目に含めることを要望する。

（５）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（５）①当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性
電力伝送技術を対象とした研究は大学の実験室レベルでは実施されているが、長距離大電力を前提としておらず、省内外においても類似の計画は見当たらない。また、既に SSPS に関する研究を実施している JAXA とは協力・連携体制を作り、本事業に組み込まれることから関係他機関とも適切に連携している。
なお、今後は、エネルギー政策や研究開発マネジメントを考慮して、資源エネルギー庁や産総研等との連携を図るべきである。さらに、類似の研究に取り組む意欲のある大学があれば計画への参加を奨励し産官学の連携を深めることが望まれる。

〇肯定的意見

（A 氏）JAXA との連携は適切に行われていると評価する。

（B 氏）国および法人の長期的、継続的事業が重要である。

（C 氏）電力伝送技術を対象とした研究は大学の実験室レベルでは実施されているが、長距離大電力を前提としておらず、省内外においても類似の計画は見当たらない。既に SSPS に関する研究を実施している JAXA とは協力・連携体制を作り、本事業に組み込まれることから関係他機関とも適切に連携している。

〇問題点・改善すべき点

（A 氏）宇宙産業室が獅子奮迅の働きをしていることは認めるが、多勢に無勢である。省内においては資源エネルギー庁をもっと巻き込むこと、シンクタンクとして AIST を働かせることを考えなくてはいけない。

（C 氏）類似の研究に取り組む意欲のある大学があれば計画への参加を奨励し産官学の連携を深めることが望まれる。

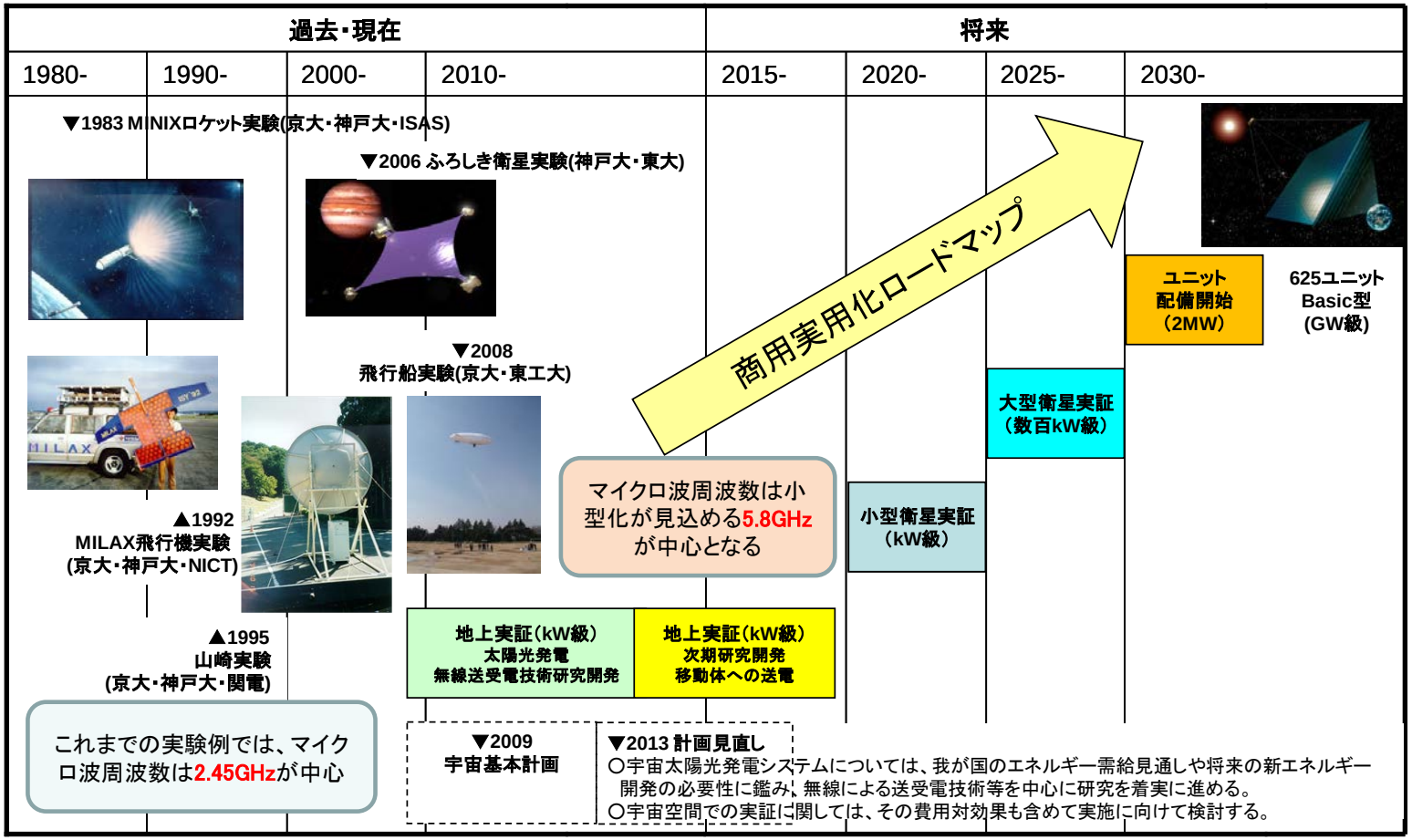
第３章　評価ワーキンググループのコメント及びコメントに対する対処方針

本研究開発事業に対する評価小委員会のコメント及びコメントに対する推進課の対処方針は、以下のとおり。

【太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発】

（アウトカムに至るまでの戦略について） ① 安全性に対する考慮について ・　マイクロ波による送電の実用においては、人体や通信、その他のシステムへの影響を与える可能性も考えられることから、マイクロ波の利用を安全にコントロールするという視点をしっかり入れ、安全性の確立について一段深めて考慮しておくべき。 ② 無線送受電技術の転用について ・　ＳＳＰＳについては、宇宙構造物としての建造、安全な利用、管理について課題が多いものと思われるが、無線送受電技術については、他の民生用途への応用も考えられることから、多用途転用・応用の意義をしっかり確認すべき。
対処方針 ① 地上の受電部の内部には人が入れないように管理を行い、その外のエリアでは、人体の安全性に問題はないと考えられている基準値以下になるように設計する。再放射による通信、その他のシステムへの影響を防ぐために、本事業において、マイクロ波の再放射抑制技術の研究開発を実施する。 今後、更に実証が進んでいくにあたり、安全性を確保する方策についても検討していきたい。 ② 無線送受電技術の多用途応用については、平成２４年度補正予算事業において、九州電力等が離島向け無線送電システムの実現に向けた実証試験を実施中である。また、本技術は航空標識塔や災害現場への電力供給、洋上風力発電からの送電、電気自動車や建設機械の給電等にも応用できると考えられており、今後、設備の開発の進展に伴い、更なる応用に向けた参加者の拡大等を検討していきたい。

別紙1（参考）　宇宙太陽光発電システム(SSPS)に向けてのロードマップ

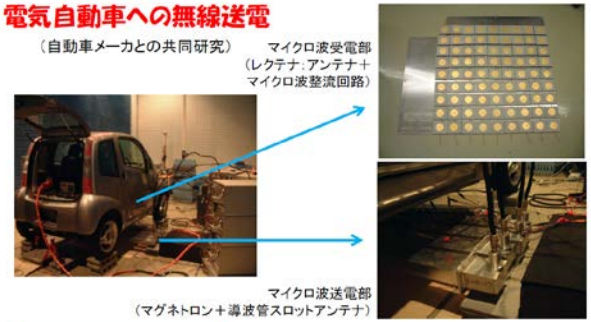


別紙2（参考）　技術波及・応用の可能性　出典：三菱電機株式会社、京都大学

（電気自動車無線給電応用）

電気自動車への無線送電

（自動車メーカとの共同研究）



走行中充電も可能

・電波放射方式特有の利点

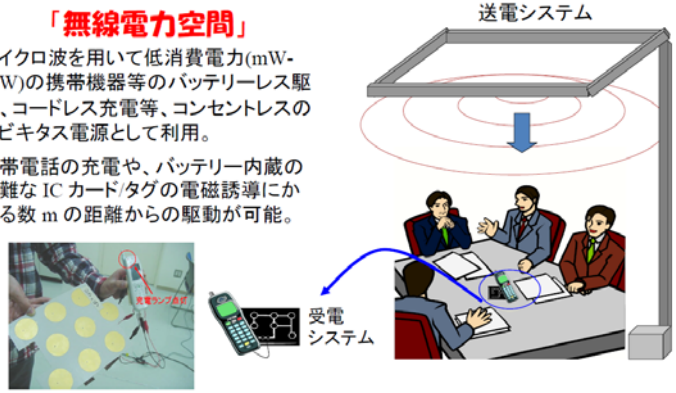
・高速道路渋滞中の送電など

（建物内ユビキタス電源応用）

「無線電力空間」

マイクロ波を用いて低消費電力(mW-μW)の携帯機器等のバッテリーレス駆動、コードレス充電等、コンセントレスのユビキタス電源として利用。

携帯電話の充電や、バッテリー内蔵の困難なICカード/タグの電磁誘導にかわる数mの距離からの駆動が可能。



SSPSからのマイクロ波を拡散させ、離散的に存在する不特定多数のレクテナ（省電力で駆動するセンサー、携行型省電力電子機器などに取付け）により必要なだけ電力を取得することができる。

（都市部で）　（郊外で）　（災害緊急時に）

太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発

平成26年度概算要求額　２．５億円（新規）

製造産業局
航空機武器宇宙産業課宇宙産業室
０３－３５０１－０９７３

事業の内容

事業の概要・目的

○将来の新エネルギーシステムとなる宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の中核的技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立に向けた研究開発を行います。

○具体的には、無線送受電実用化に必要不可欠な送受電効率の改善、ETC等への電波干渉を防ぐための再放射の抑制、ならびに宇宙太陽光発電システム構築の低コスト化に必要不可欠な送電システムの小型・軽量化に取り組みます。

○また、これら研究成果を活用し、今後の宇宙実証や産業応用に必要な、移動体に対するマイクロ波電力送電試験を実施します。

○宇宙太陽光発電の研究については、新たな宇宙基本計画（2013年1月宇宙開発戦略本部決定）において、着実な実施が求められているところであり、低炭素社会の実現に向けた野心的なプロジェクトです。

条件（対象者、対象行為、補助率等）

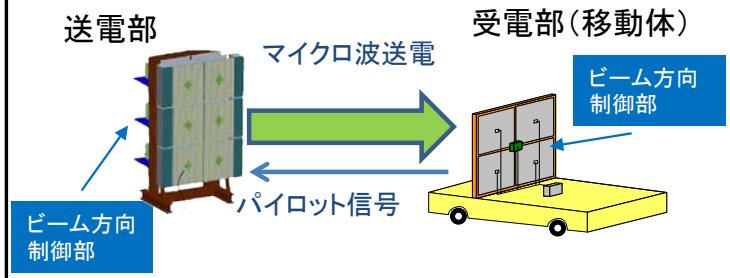
国 → 委託 → 民間企業等

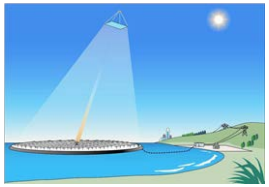
※本事業は、（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）と連携・協力して進めます。

事業イメージ

○高効率送電部・受電部開発（経産省）
送電部の半導体増幅器、および受電部のレクテナ整流回路について高効率の素子を用いた要素技術の開発、送電部の小型・軽量化、受電部の再放射抑制

○移動体への無線送受電試験の実施（経産省）



○ビーム方向制御技術（JAXA）
レトロディレクティブ法により、マイクロ波ビームを指向させるビーム方向制御を実施

○宇宙太陽光発電システムの実現によるエネルギー源の多様化、石油代替エネルギーの導入促進