

令和3年度宇宙産業プログラムに関する事業評価検討会(第1回)

資料7-5

「石油資源を遠隔探知するためのハイパースペクトルセンサの研究開発事業費」プロジェクト評価用資料(中間評価)

2022年1月14日

経済産業省製造産業局宇宙産業室

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

B 石油資源を遠隔探知するためのハイパースペクトルセンサの研究開発事業

上位施策名	エネルギー基本計画（2021年10月22日閣議決定） 宇宙基本計画（2020年6月30日閣議決定）										
担当課室	製造産業局宇宙産業室										
目的	<p>HISUI は、既存のセンサに比べ、スペクトル分解能が格段に高く、より高い精度で宇宙空間から地表の物質の識別が可能なハイパースペクトルセンサである。既存の資源探査用センサ ASTER（バンド数 14）に比べバンド数が 185 と多く、例えば資源探査に必要な鉱物の識別能力では、10 種類程度から 30 種類程度の特定が可能となる。本事業では、目標性能を達成した HISUI ハイパースペクトルセンサを国際宇宙ステーション（ISS）に搭載し、地球陸域を観測しデータを蓄積とともに、取得されるデータを用いて利用実証を行い、宇宙用ハイパースペクトルセンサの有用性を検証するなどの宇宙実証を行うことを目的とする。</p> <p>さらに、今後蓄積されるデータをより多くの国内ユーザ等が利活用し、エネルギー資源や重要資源鉱物のサプライチェーンの安定供給の確保のみならず、地球温暖化対策への貢献など地球規模の環境問題への貢献の他、多分野での効率的・効果的なデータ利活用の実現を目指す。</p>										
類型	複数課題プログラム / 研究開発課題（プロジェクト）/ 研究資金制度										
実施時期	2007年度～2023年度（17年間）		会計区分	一般会計 / エネルギー対策会計							
評価時期	事前評価：2006年度、中間評価：2008年度、2011年度、2015年度、2018年度、2021年度、終了時評価：2024年度予定										
実施形態	国 → （一財）宇宙システム開発利用推進機構（委託）										
プロジェクトリーダー	岩崎 晃 東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授										
執行額 (百万円)	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	総執行額	総予算額				
	1,149	1,149	875	843	721	17,548	17,780				

1. 国内外の類似・競合する研究開発等の状況

ハイパースペクトルセンサ HISUI の開発が始まった背景としては、2006 年（平成 18 年）3 月の総合科学技術会議による「分野別推進戦略」にて特記された先進的なりモートセンシング技術の一つであるハイパースペクトルセンサ技術には大きな進展が期待される旨が明記されたことのほか、エネルギー・鉱物資源の安定供給を図るため、そして、エネルギー安全保障を含む我が国の総合的な安全保障や国民の安全・安心の観点から、逼迫しているエネルギー資源の効率的探査および地球規模での環境問題等に対応可能な高い波長分解能を有するハイパースペクトルセンサへのニーズの高まり、さらには、海外でのハイパースペクトル衛星開発計画（例、ドイツの EnMAP やカナダの HERO プロジェクト等）の立ち上がりなどがあった。そして、我が国の宇宙開発利用が、それまでの研究開発・技術開発を重視した「宇宙開発」の時代から、「宇宙の利用・産業化」を通じた国民生活の質の向上、総合的な安全保障の確保、経済の活性化、産業競争力の向上を目指す時代への転換期を迎えていた 2007 年（平成 19 年）、ハイパースペクトルセンサ HISUI の開発が始まった。

当時、世界のハイパースペクトル衛星は、米国 NASA の E0-1/Hyperion（2000 年打上）と ESA の PROBA/CHRIS（2001 年打上）の 2 機のみであった。Hyperion は研究目的のセンサで、データ品質において商業利用までには向かない仕様であり、CHRIS は観測波長域が VNIR のみであるためエネルギー・鉱物資源のユーザにとっては不十分なものであった。

その後、米国の OrbView-4、カナダの HERO、ドイツの EnMAP、イタリアの PRISMA、南アの MSMISat、米 JPL の HyspIRI、インドの HySI、中国の HJ-1A、米空軍の ARTEMIS、米海軍研究所の HICO、韓国の COMS、フランスの HYPXIM 等、数多くのプロジェクトが計画・開始されるなど、多くの国でハイパースペクトルセンサ開発に対して前向きに取り組む動きが活発化した。さらに、近年の衛星の小型化の動きに合わせてハイパースペクトル衛星も小型化あるいはコンステレーション化の計画・打上げ・運用がベンチャー企業においても始まりつつある。

2021 年 10 月 22 日に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では、「世界的に関心が高まっている気候変動問題など国内外の動向を踏まえながらエネルギー政策を進めていくことが時代の要請であり、カーボンニュートラルに向けた対応が世界的な潮流である」と強調しているものの、我が国のエネルギー・資源の安定供給はこれまでと同様にその重要性は謳われており、

- ・カーボンニュートラルへの道筋に関わらず、必要なエネルギー・資源を安定的に確保し続けることが国家の責務である。
- ・石油などの海外権益獲得や国内資源開発を通じた安定供給確保は、国民生活及び経済活動の観点から重要であり、引き続き確実に達成する必要がある。
- ・鉱物資源は、カーボンニュートラルに向けて需要の増加が見込まれる再生可能エネルギー関連機器や電動車等（特に、蓄電池、モーター、半導体など）の製造には、銅やレアメタル等の鉱物資源の安定的な供給確保が欠かせない。

と言及している。

現在、運用中および計画中の宇宙用ハイパースペクトルセンサには、実験用から商用まで様々なハイパースペクトルセンサがあるが、HISUI の主目的であるエネルギー資源、鉱物資源探査を達成するためには、2.0–2.5 μm の波長帯のデータ取得は必須であり、かつノイズの少ない品質の良いデータ

(S/N 比の大きいもの) に着目してそれぞれのセンサを比較すると、HISUI が 300@2100nm と最もノイズの少ない品質の良いデータの取得が可能である。

なお、商用目的のハイパースペクトル衛星は、開発・打上げコストを低減させ、開発期間を短縮するために衛星を小型化する傾向であり、結果、冷却装置の不要なセンサ (VNIR の帯域を対象とするセンサ) による運用とせざるを得ない状況であり、エネルギー資源・鉱物資源探査には必ずしも適さない。

2. 研究開発の内容

HISUI (Hyperspectral Image SUite) ハイパースペクトルセンサは、資源探査用衛星センサであるASTER（1999年打上げ。現在も設計寿命5年を超えて22年以上運用中）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程度しかできなかつたが、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賦存地域のより詳細な特定や埋蔵量のより詳細な推定のみならず、カーボンニュートラルに向け、モータ用磁石や車載用電池の効率化・軽量化等に必要となる重要鉱物資源等の安定的なサプライチェーン確保等にも貢献できる。HISUIを開発し宇宙実証を行って、我が国へのエネルギー資源・金属資源の安定供給や地球温暖化に伴う様々な環境問題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。

（1）研究開発の全体構成

研究開発項目とその実施者を表2-1に示す。

表2-1 研究開発項目と実施者

研究開発項目	実施者
① ハイパースペクトルセンサの開発	日本電気(株)
② 曝露ペイロードの開発	(a) 曝露ペイロードバス部の開発 (b) 船内データ保存システムの開発
	(株) IHI エアロスペース、明星電気(株)
③ 宇宙実証支援システムの開発	(a) HISUI 管制系システムの開発 (b) 地上データ処理システムの開発
	宇宙技術開発(株) 富士通(株)、日本電気(株)、三菱スペースソフトウェア(株)
④ ハイパースペクトルセンサの実証	(a) 画像データ校正手法の開発 (b) 観測計画策定手法の開発
	(国研)産業技術総合研究所、東京大学 (国研)産業技術総合研究所、酪農学園大学
	(c) データ利用実証 (株)地球科学総合研究所、JX金属探査(株)、アジア航測(株)、国際航業(株)

HISUIは、国際宇宙ステーション(ISS)の「きぼう」船外実験プラットフォームに取り付けられる曝露ペイロードシステム(ハイパースペクトルセンサと曝露ペイロードバス部)と「きぼう」日本実験棟(JEM)内に置かれる船内データ保存システムおよび宇宙実証システム(地上データシステムと

地上データ処理ソフトウェア)、さらに、センサ校正・観測計画策定システムから構成される。また、宇宙実証のとしてデータ利用実証も実施する。

これらの HISUI システムの構成と研究開発項目を対応付け、その主な役割を表 2-2 に示すとともに全体構成を図 2-1 に示す。

表 2-2 HISUI システムの構成と主な役割

HISUI システムの構成	主な役割
①曝露ペイロードシステム	ハイパースペクトルセンサと曝露ペイロードバス部から構成
②ハイパースペクトルセンサ	可視近赤外領域と短波長赤外領域の観測を行う地球観測センサ
③曝露ペイロードバス部	ハイパースペクトルセンサの作動に必要な資源と観測環境の提供。 観測データとその処理に必要なテレメトリを、HISUI 船内データ保存システムに伝送
④船内データ保存システム	曝露ペイロードシステムから伝送される観測データとその必要なテレメトリをハードディスクに保管。それらを地上に伝送
⑤宇宙実証支援システム	
⑥HISUI 管制系システム	JAXA ISS 運用管制系を経由して曝露ペイロードシステムと接続し、観測計画の送信、一部の観測データやテレメトリの受信
⑦地上データ処理システム	HDD 輸送またはダウンリンクした観測データやテレメトリの受配信、プロダクトの作成・保存管理等の実施
⑧ハイパースペクトルセンサの実証	
⑨センサ校正・観測計画策定システム	観測画像データの分析評価機能によるセンサの精度検証・校正の実施。観測計画作成・観測実績管理
⑩データ利用実証	上記一連のシステムから得られた観測データを用いて、エネルギー資源・鉱物資源分野のほか、地球温暖化対策に貢献する地球規模の環境分野等の実証研究を行い、その有用性の評価の実施

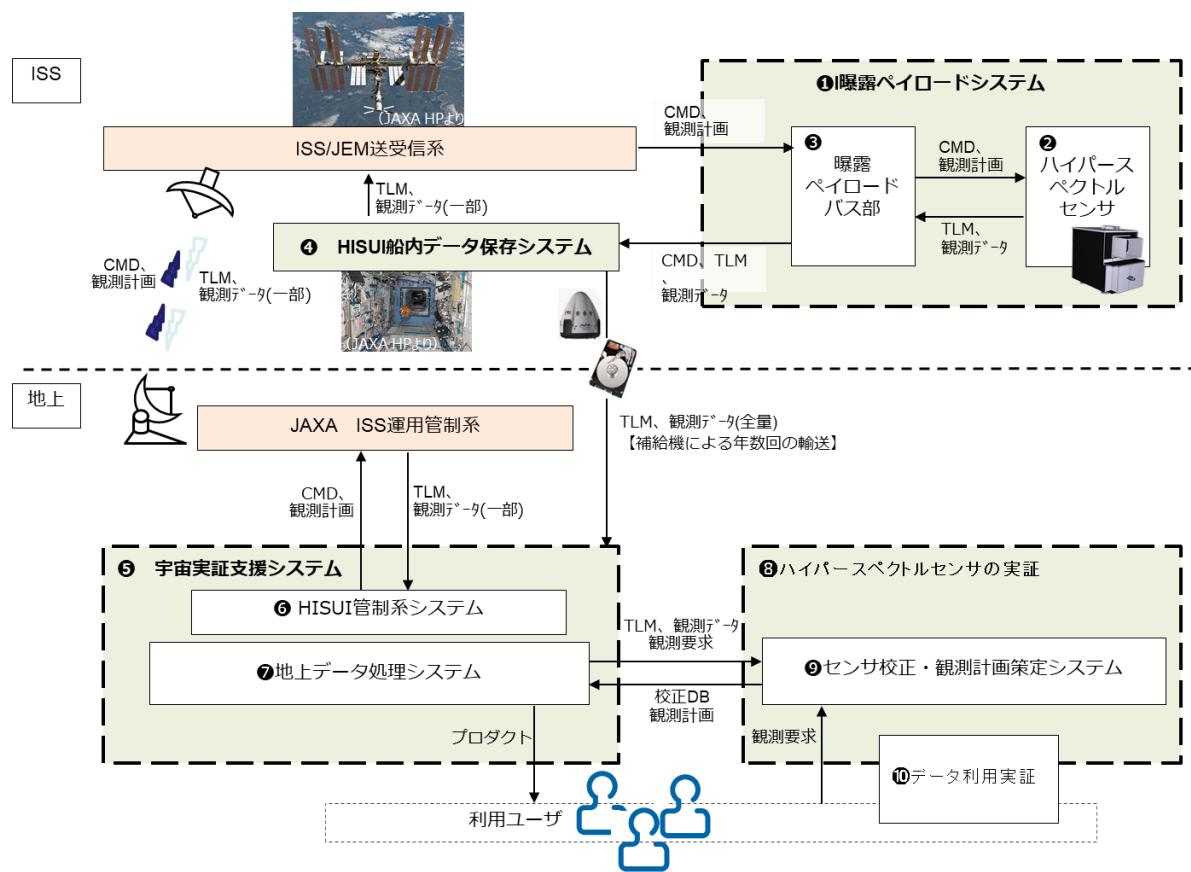


図 2-1 HISUI 全体構成

ハイパースペクトルセンサの目標性能を表 2-3 に示す。

表2-3 ハイパースペクトルセンサの目標性能

HS	項目	達成目標
1	空間分解能	20m × 30m
2	観測幅	20km (空間分解能の 1000 倍)
3	バンド数	185 (VNIR 58、SWIR 127)
4	観測波長域	0.4~2.5 μm
5	波長分解能 (バンド幅)	10nm (VNIR) 12.5nm (SWIR)
6	S/N 比	370@620nm 270@2100nm (前提 : アルベド 30% · 太陽天頂角 24.5 度)
7	MTF	0.2
8	量子化ビット数	12bit
9	オンボード圧縮・処理	有 (可逆のデータ圧縮を有する)

注1) 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

注2) 宇宙実証時の軌道高度 : 410km程度

上記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、および、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。さらに、プロジェクト開始時、航空機搭載ハイパースペクトルセンサや衛星搭載ハイパースペクトルセンサ Hyperion などのデータを実際に使用しているユーザから高 SN データが必須であるとの要望に基づき、世界的にも最高水準にある以下の SN が可能となるべく、下記の SN をを目指した。

●HISUI でを目指す世界的な最高水準 (SN 値)

VNIR (可視近赤外) 450 以上@620nm

SWIR (短波長赤外) 300 以上@2100nm

(2) 各研究開発項目の実施内容

① ハイパースペクトルセンサの開発

ハイパースペクトルセンサは、2007～2014 年度に、構成するコンポーネント及びセンサシステムの設計を行い、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ている。また、2011～2014 年度に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。2015～2016 年度は、センサのフライトモデルの組立・インテグレーションおよび試験を行った。

また、2015 年度より ISS に搭載して宇宙実証するための機能強化・上位システムとのインタフェース調整・安全審査、およびハイパースペクトルセンサの健全性確認試験を行い、2018 年度には設計確認会において目標性能の適合性が達成可能であり健全性が保たれていることを確認したうえで、曝露ペイロードへ組み込まれた。

さらに 2019 年度に曝露ペイロードでの環境試験に供された後に 2019 年 12 月に打ち上げられ、ISS に搭載された。

ハイパースペクトルセンサの外観、内部構造図を図 2-①-1、図 2-①-2 に示す。

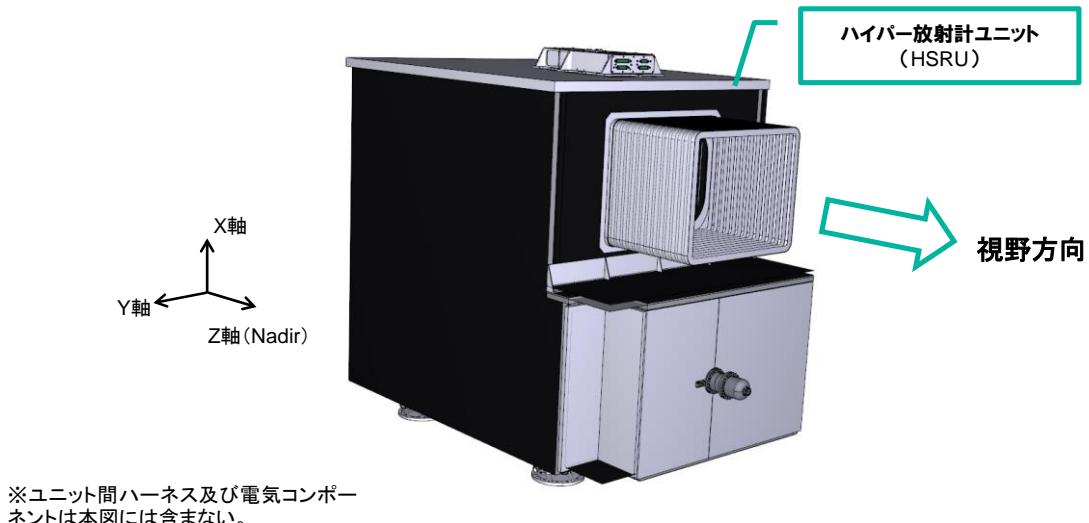


図 2-①-1 ハイパースペクトルセンサ外観図

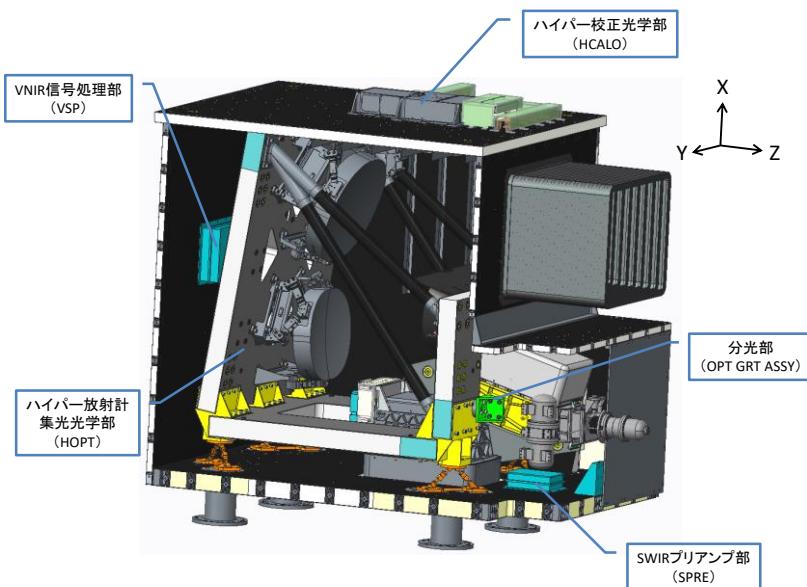


図 2-①-2 ハイパースペクトルセンサ放射計ユニット(HSRU) 内部構造図

ア. ISS 搭載に向けての設計

ハイパースペクトルセンサの ISS 搭載については、開発中の同センサを極力生かして曝露ペイロードバス部に搭載する事でコスト低減・開発スケジュールへの影響回避を図る方針とした。

(A) センサ目標性能の適合性検討

ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサの詳細設計を実施し、ISS 搭載により遭遇する熱、機械、電気、放射線や EMC 等の各環境条件に対する ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサの「宇宙実証時の達成目標値」に対する実現性、適合性の評価結果を行い、全ての項目に対して適合していることをセンサ部設計確認会（2018 年 9 月）で確認した。

表 2-①-1 に、基本計画で示されている目標性能に対する適合性一覧を示す。

表 2-①-1 基本計画で示されている目標性能に対する適合性

No.	項目	達成目標	適合性
①	空間分解能	20m × 30m	適合 20m(CT) × 30m(AT)
②	観測幅	20km	適合
③	バンド数	185	適合 VNIR: 57, SWIR: 128
④	観測波長域	0.4~2.5 μm	適合 VNIR: 0.4~0.97 μm SWIR: 0.9~2.5 μm
⑤	波長分解能 (サンプリング)	10nm (VNIR) 12.5nm (SWIR)	適合
⑥	S/N 比	370 @620nm 270 @2100nm	適合
⑦	MTF	0.2	適合
⑧	量子化ビット数	12bit	適合
⑨	オンボード圧縮・処理	有	適合

(B) 安全設計

ハイパースペクトルセンサを ISS に搭載するために、ISS 側から要求される安全に関する課題を抽出し、その対策を立案・実施した。NASA/JAXA による安全審査は 3 段階（フェーズ 0/1、フェーズ 2、フェーズ 3）があり、2017 年度に終了しているフェーズ 0/1 に続いて、2018 年度には以下の審査を受け、合格した。

- ・ JAXA Phase II 安全審査 (SFCB: Structure Fracture Control Board 含む)
- ・ NASA Phase II 安全審査 (HISUI-Exp φ II)

イ. ISS 搭載のための機能強化

ハイパースペクトルセンサを ISS に搭載するための機能強化として以下の作業を行った。

- ・ ISS 搭載時の熱環境に適合させるための「サーモスタッフ」貼り付け
- ・ ISS 搭載時の原子状酸素による MLI の表面劣化を防ぐ「β クロス」を留めるためのベルクロテープ縫い付け
- ・ 冷凍機のガス置換作業
- ・ ハイパースペクトルセンサの健全性確認試験を実施し、その結果を 2018 年 9 月の設計確認会で報告し、健全性が保たれていることを確認した。
- ・ ハイパースペクトルセンサと曝露ペイロードバス部との組立試験の際にシリアライザ IC が故障したため、交換および交換後のワークマンシップ確認試験により正常動作を確認した。また、交換後の曝露ペイロードバス部との再組立試験（2019 年 1 月）においても正常に動作することを確認した。

ウ. 軌道上性能解析

(A) センサの健全性評価

(i) 初期機能確認

2019/12/6 の打上げ後、2019/12/13 に実施した冷凍機クールダウン結果は、クールダウン完了後の温度も非常に安定していることから、冷凍機は良好な状態で動作していることが確認できた。

2019/12/16 に実施したハイパースペクトルセンサ各機器の起動／停止動作確認において、各機器のオン時の電圧および電流値は地上試験と同等の値を示しており、良好な状態であることが確認できた。

また各部の温度についても、光学系が 23°C～26°C の性能維持温度範囲、その他機器についても許容温度内に十分入っており、良好に温度制御されていることが確認できた。

2019/12/24 に実施した観測においては、以下に示す観測対象にて、計 3 回の観測シーケンスを実行した。

1回目の観測：日本

2回目の観測：夜間の海（暗時データ取得）

3回目の観測：豪州北部

該当の観測シーケンスにおいて取得したテレメトリデータによる確認・評価の結果、軌道上におけるハイパースペクトルセンサの健全性及び観測シーケンスにおける動作に問題のないことが確認できた。

(ii) 初期チェックアウト

2020 年 1 月に発生したトラブル（詳細は②カ (B) 項に示す）のため中断した初期チェックアウトは、半年のトラブルシュートの後、2020 年 9 月にチェックアウトが再開された。

チェックアウトとして、以下に示す観測対象にて計 6 回の観測シーケンスが実行された。

1回目の観測（2020/9/4）：通常観測（暗時データの取得）

2回目の観測（2020/9/4）：通常観測 日中

3回目の観測（2020/9/11）：内部光源校正 Lamp A

4回目の観測（2020/9/11）：内部光源校正 Lamp B

5回目の観測（2020/9/23）：高波長分解能

6回目の観測（2020/9/23）：地球校正

該当の観測シーケンスにおいても、(i) 項と同様に、軌道上におけるハイパースペクトルセンサの健全性及び観測シーケンスにおける動作に問題のないことが確認できた。

(B) センサの軌道上性能評価

2020年9月以降、取得できた内部光源校正および地表観測のデータを用いて、HISUI 軌道上性能評価を実施した。目標性能に対する評価結果のサマリを表 2-①-2 に示す。引き続き評価中の項目を除き、全ての項目で目標性能を達成したことを確認した。

内部光源校正のデータを用いた評価は④及び⑤、地表観測のデータを用いた評価は①、②および⑨である。③及び⑧は観測対象を限らず画像データの確認にて評価した。

評価中の⑥および⑦については、2021年度以降に引き続き評価を実施する。

以下の(i)および(ii)項にて、①②④⑤についての評価内容を示す。

表 2-①-2 目標性能に対する適合性の評価結果

No.	項目	達成目標	評価結果
①	空間分解能	20m × 30m	達成 VNIR : 20.5m(CT) × 29.1m(AT) SWIR : 20.0m(CT) × 29.7m(AT)
②	観測幅	20km	達成 VNIR : 21.0km SWIR : 20.0km
③	バンド数	185	達成 VNIR: 57, SWIR: 128
④	観測波長域	0.4~2.5 μm	達成 VNIR: 0.361~0.999 μm SWIR: 0.883~2.47 μm
⑤	波長分解能 (サンプリング)	10nm (VNIR) 12.5nm (SWIR)	達成 VNIR : 10.02nm SWIR : 12.42nm
⑥	S/N 比	370 @620nm 270 @2100nm	良好 (引き続き評価中)
⑦	MTF	0.2	良好 (引き続き評価中)
⑧	量子化ビット数	12bit	達成
⑨	オンボード圧縮・処理	有	達成

(i) 内部光源校正データを使用した評価

ハイパースペクトルセンサの内部に搭載したハロゲンランプを光源として取得したデータを使用し、観測波長域および波長分解能を評価した。

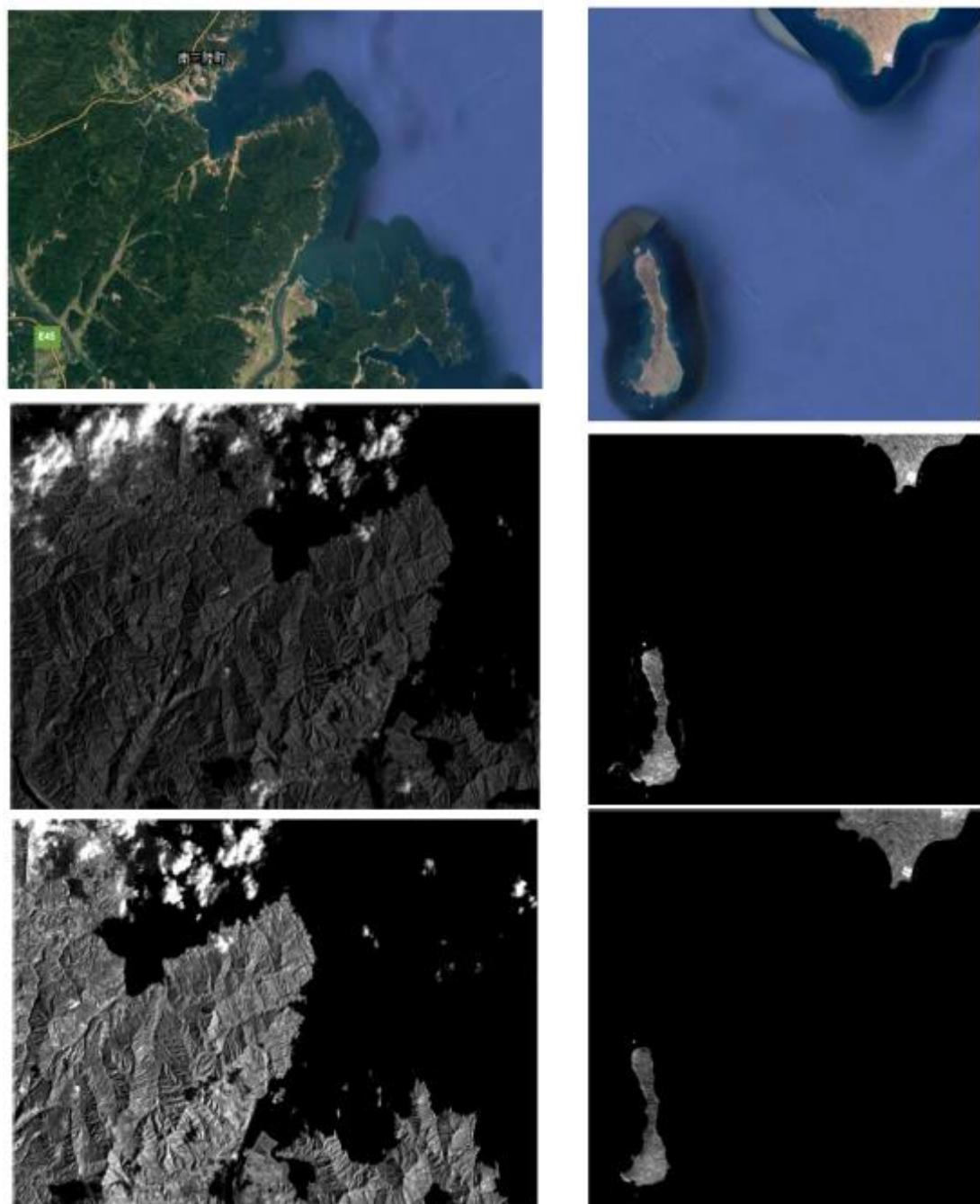
軌道上では VNIR、SWIR とも規格内で安定して推移していることが確認できた。また、異なるランプ A、ランプ B で観測波長域および波長分解能いずれも同等の観測結果が得られることが確認され、ランプが冗長系として使用可能であることを確認できた。

(ii) 地表観測のデータを用いた評価

通常観測(2021/1/29 (日本の南三陸町付近)、2021/2/7 (米国カリフォルニアのナティヴィダ一島付近))で取得したデータを用いて、空間分解能 (表 2-①-2 の①) および観測幅 (表 2-①-2 の②) の評価を実施した。

評価に使用した画像を図 2-①-3 に示す。

それぞれ進行方向(AT 方向)、進行方向に直角の方向(CT 方向)に、地図上で場所を特定しやすい陸のエッジ部分を含む 5 点を抽出し、評価を行った。それぞれ 5 点の平均値をとり、最終的な評価結果は東北とカリフォルニアの平均値とした。



左：南三陸町付近の画像（上段：地図、中段：VNIR、下段：SWIR）

右：ナティヴィダ一島付近の画像（上段：地図、中段：VNIR、下段：SWIR）

図 2-①-3 ジオメトリック評価に使用した画像

評価結果を表 2-①-3 および表 2-①-4 に示す。VNIR、SWIR 共に仕様値 に対して妥当な結果であると判断した。なお仕様値との差分については、今回、L0 データを使用し、地図上の距離を目視で読み取っていることが理由に挙げられる。幾何補正された L1 データであれば、より正確に地図と比較することができ、より仕様値に近い結果が得られると考えられる。

表 2-①-3 空間分解能の評価結果

	VNIR	SWIR
仕様値	20m(クロストラック) / 31m(アロングトラック) @高度 400km 程度	
評価結果	AT : 29. 1m CT : 20. 5m	AT : 29. 7m CT : 20. 0m

表 2-①-4 観測幅の評価結果

	VNIR	SWIR
仕様値	20km @高度 400km 程度	
評価結果	21. 0km	20. 0km

② 曝露ペイロードの開発

ハイパースペクトルセンサはISSの日本の宇宙ステーション取付型実験モジュール(JEM: Japanese Experiment Module)の曝露部のEFU#8に設置して宇宙実証を行う(図2-②-1)。そのため、同センサを制御・運用するための装置である曝露ペイロードの開発を2015年度より開始した。

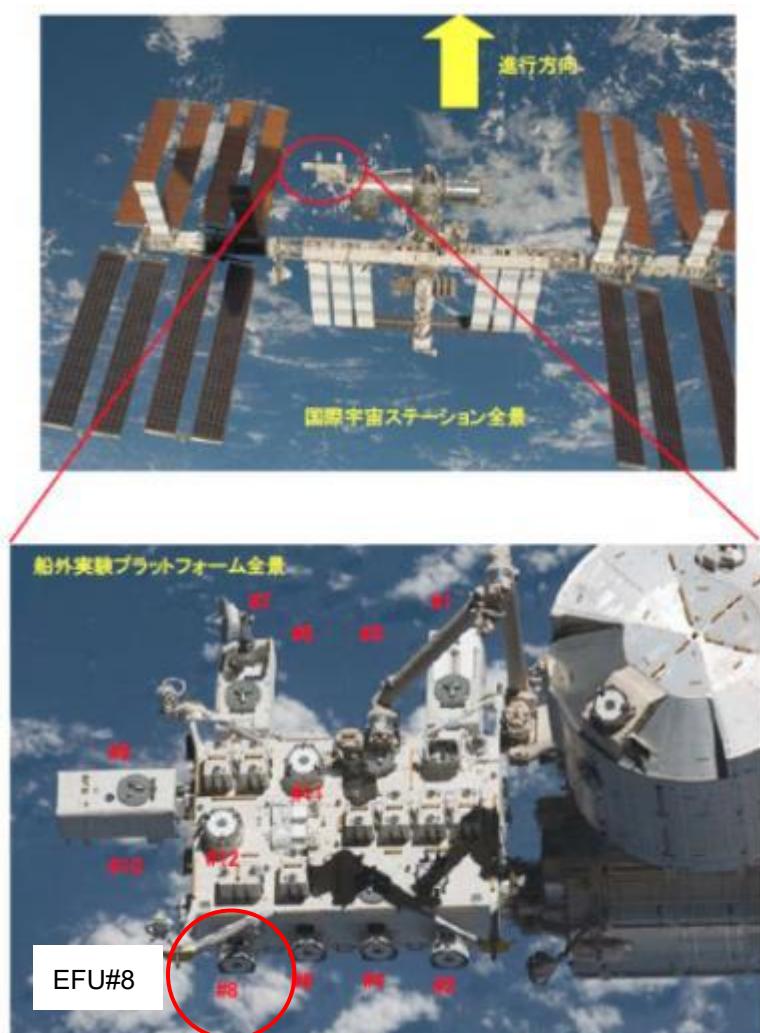


図2-②-1 国際宇宙ステーション(ISS)とJEM曝露部

曝露ペイロードは、JEM曝露部に設置し観測データを取得する曝露ペイロードシステム(曝露ペイロードバス部+ハイパースペクトルセンサ)とJEM与圧室内に設置し、取得データを格納ないしは地上にダウンリンクする船内データ保存システムからなる。曝露ペイロードの構成ツリーを図2-②-2に示す。

曝露ペイロード

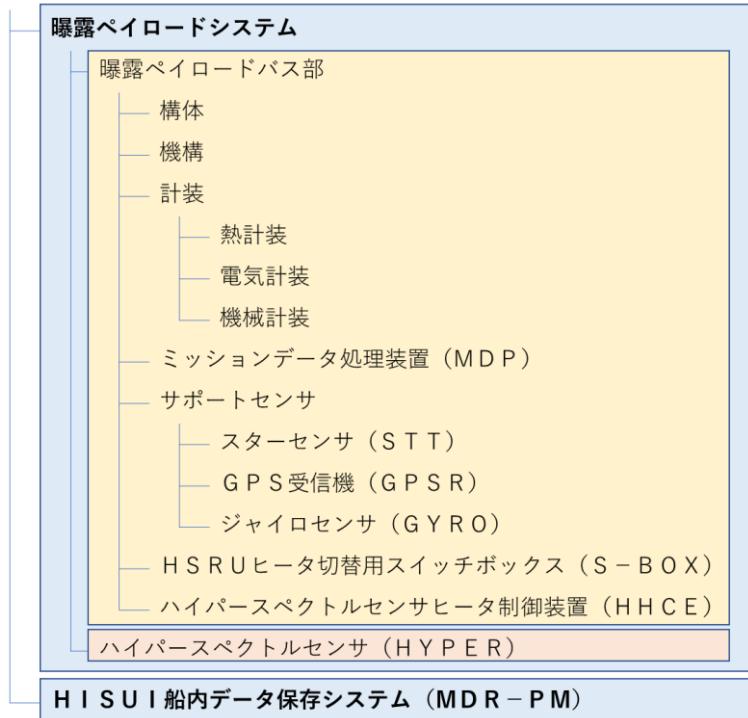


図 2-②-2 曝露ペイロード 構成ツリー

曝露ペイロードシステムは JEM 曝露部に設置され、観測計画にしたがって観測データを取得し、軌道・姿勢情報や各種装置作動情報とともに船内データ保存システムに送信する。曝露ペイロードシステムの外観図を図 2-②-3 に示す。

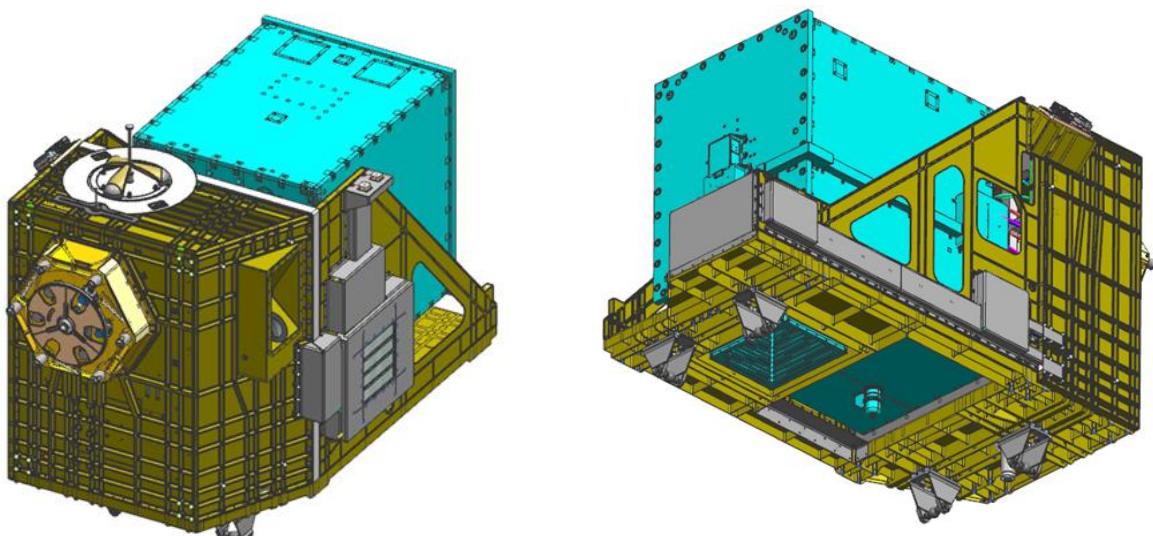
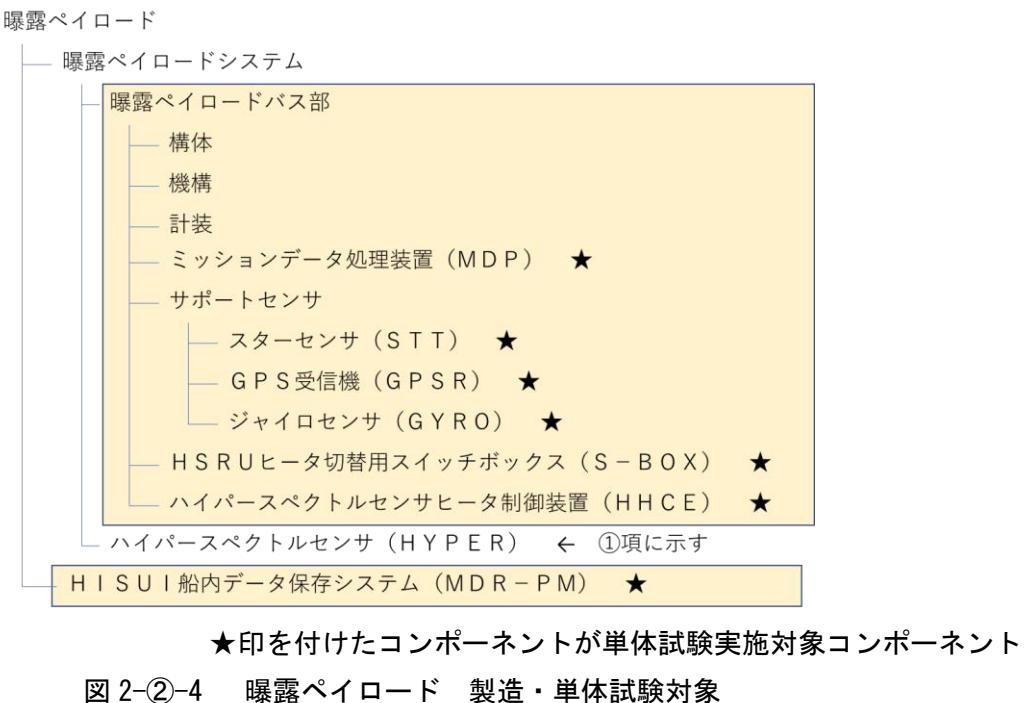


図 2-②-3 曝露ペイロードシステム外観図

船内データ保存システムは JEM 与圧室内に設置され、曝露ペイロードシステムから送信されてきた観測データ、軌道・姿勢情報および各種装置作動情報を交換可能なストレージデバイス(HDD)に記録すると共に、一部の観測データおよび軌道・姿勢情報および各種装置作動情報を地上にダウンリンクする。また、地上からに指示により指定された観測データを地上にダウンリンクする。

ア. 曝露ペイロードバス部および船内データ保存システムの製造・単体試験

曝露ペイロードを構成する下図の黄色ハッチング部のコンポーネントの製造および単体試験を行った。



単体試験を行ったコンポーネントのプロトフライトモデルは、要求された事項を満足し、フライトに供しうる品質を有していることが確認された。

イ. インテグレーション、試験

(A) システム組立

曝露ペイロードシステムの組立として、ハイパースペクトルセンサの搭載およびバス部の組立を実施した。

- ・ MLI フィットチェック形態組立（2018 年 9 月～11 月）
- ・ ベーキング形態組立（2018 年 10 月～12 月）
- ・ ベーキングの実施（2018 年 12 月）
- ・ システム組立（2019 年 4 月）

(B) システム試験

ペイロードシステムおよび船内データ保存システムについて、以下の試験を実施した。
試験の結果を認定試験後審査インプットパッケージにまとめ、認定試験後審査（PQR）を実施した。
この結果、製造、検査及び試験を行ったプロトフライトモデルは仕様書の要求事項を満足しフライトに供し得る品質を有していることが確認された。

- ・機能試験 (2019年4~5月)
- ・音響試験 (2019年6月)
- ・電磁適合性(EMC)試験 (2019年6月)
- ・アクセス性試験／FCIT試験 (2019年8月)
- ・熱真空試験 (2019年7月)
- ・最終性能試験 (2019年8月)
- ・SUIFT試験 (2019年8月)
- ・End To End 試験 (2019年9月)

(注)

FCIT試験: Flight Crew Interface Test の略。JAXA/NASA が実施するクルー作業の試験。

SUIFT試験: SDGF to UMBILICAL I/F FITCHECK TOOL の略。ISS のロボットアーム(SDGF: Standard Dexterous Grasp Fixture)と HISUI のフィットチェックツールの適合性を確認する試験。

ウ. ISS、JEM および輸送機とのインターフェース調整

(A) JEMとのインターフェース検討

JEM曝露実験ペイロードに対する標準的なインターフェース仕様の詳細については、以下のJAXA文書に要求事項が規定されている。

- ・NASDA-ESPC-2563 「JEMペイロードアコモデーションハンドブック Vol.3
曝露部／ペイロード標準インターフェース管理仕様書」
- ・NASDA-ESPC-2564 「JEMペイロードアコモデーションハンドブック Vol.4
JEMマニピュレータ／ペイロード標準インターフェース管理仕様書」
- ・NASDA-ESPC-2567 「JEMペイロードアコモデーションハンドブック Vol.7
通信プロトコル・管制サービス標準インターフェース管理仕様書」

2015～2016年度の基本設計検討において、曝露ペイロードシステムは、搭載するハイパースペクトルセンサの形状・質量により、上記文書に示される標準要求に対して一部の項目は適合しないことが識別された。

標準要求に適合しない項目については、別途「JEM全体システム／ISS搭載型ハイパースペクトルセンサI/F管理仕様書(JX-ESPC-101469)」を作成し、非適合事項の要求緩和についてJAXAと調整を行い、仕様書に反映し制定された。制定されたインターフェース管理仕様書をベースライン文書として、詳細設計審査会(2017年度7月、9月)を実施し、要求項目を満足することを確認した。

また 2018～2019 年度には、制定されたインターフェース管理仕様書に対して最新の設計情報をもとに JAXA と調整を行い、改訂された A 改訂インターフェース管理仕様書をベースライン文書としてインターフェース確認会を実施し、要求項目を満足することを確認した。一部の要求を満足できない部分については、デビエーションを申請し、JAXA の承認を受けた。

(B) 輸送機(Dragon)とのインターフェース検討

曝露ペイロードシステムの ISS/JEM への輸送および廃棄には、SpaceX 社の Dragon 輸送機を使用する（図 2-②-5）。



図 2-②-5 SpaceX Dragon 輸送機

Dragon 輸送機のインターフェースに関する要求は、SpaceX 社文書の Dragon Interface Definition Document (IDD) に規定されている。詳細設計フェーズではこの IDD 要求事項を満足するように設計を行ったが、最終フェーズのインターフェース管理文書として、SpaceX 社より、Dragon/HISUI Launch ICD (Interface Control Document) が提示された。

インターフェースは熱放射、電磁適合性 (EMC/EMI) 、清浄度、構造、電気接合等である。

上記インターフェース要求文書の要求項目に対する検証を行いそのエビデンスについて整理し、SpaceX へ提出し、承認を受けた。（一部の要求を満足できない部分についても、SpaceX との調整の結果問題なしとして承認を受けた。）

また将来の廃棄段階でのインターフェース管理文章も提示され、必要情報を整理し、SpaceX へ提出し、すべて承認を受けた。（溶融解析で必要な構成品の材質情報も提示した。）

(C) SPDM とのインターフェース検討

曝露ペイロードシステムは、Dragon 輸送機から JEM 曝露部に移設するために、機械的把持用のインターフェースとして、H-fixture/MTC Target、電力受給用のインターフェースとしてアンビリカル・コネクタを有する。これらの SPDM とのインターフェースに関する要求は、JAXA の SSP (Space Station Program) 文書に規定されており、開発仕様書の適用文書となっている。

上記 SSP 文書の要求項目に対する検証を行いそのエビデンスについて整理し、NASA へ提出し、すべて承認を受けた。

エ. 安全審査への対応

ハイパースペクトルセンサを ISS に搭載するためには、ISS/JEM の要求する安全要求に適合しなければならない。そのため、NASA/JAXA が行う安全審査に合格する必要がある。安全審査は開発工程に準じてフェーズ 0/1（基本設計終了近辺）、フェーズ 2（詳細設計終了近辺）、フェーズ 3（システム試験終了近辺）の 3 段階で行う。

ハイパースペクトルセンサの安全審査対応には、ハイパースペクトルセンサの ISS 搭載時に要求される安全に関する課題を抽出し、その対策を立案・実施する必要があり、そのためにはハイパースペクトルセンサのハードウェアの設計・解析の内容、構成する部品・材料に関する知見が必須となる。また、ISS の安全審査の要求事項や審査方法および対応の実務実績に基づく知見が必要である。

表 2-②-1 に、実施した安全審査のスケジュールを示す。フェーズ 3 までのすべての審査を、打上げ 4 ヶ月前の 2019/8 月までに完了した。

表 2-②-1 安全審査実施スケジュール

審査対象	FY H29 (2017)	FY H30 (2018)	FY H31 (2019)
曝露ペイロード システム	▼JAXAφ0/1 SRP NASA φ0/1 SRP▼	▼JAXAφ2 SRP NASA φ2 SRP▼ Ground φ0/1/2 SRP▼	▼JAXAφ3 SRP Ground φ3 SRP▼ ▼NASAφ3 SRP
船内データ保存 システム	▼JAXAφ0/1/2 SRP	▼JAXAφ3 SRP	

オ. 輸送および射場作業

(A) 輸送作業

曝露ペイロードシステムと船内データ保存システムは、2019 年 9 月 20 日に輸送され、2019 年 9 月 24 日に NASA ジョンソン宇宙センター到着した。

(B) 射場作業

日本から輸送したすべての曝露ペイロードシステム関連貨物は、NASA ケネディ宇宙センター(KSC) 宇宙ステーション処理施設から、NASA 借用器材とともに SpaceX 社のインテグレーション施設に移動させてインテグレーション作業を行った。

射場作業は、2019 年 10 月 24 日～12 月 6 日の日程で、機材の受け入れ、SpaceX 社施設への移送/開梱、HISUI 単独作業、輸送機(Dragon)への搭載作業 (Space-X 社との共同作業)、ノンフライトアイテムの取り外しに立ち合い、機材返送を実施した。

HISUI を搭載した Dragon の打上げは、ケープカナベラル空軍基地内からロケット Falcon 9 により 2019 年 12 月 5 日 (木) 12:29 (現地時間) に行われた

力. 軌道上運用

(A) 初期機能・動作確認

2019年12月6日（日本時間）に打上げられた後、2019年12月10日に船内データ保存システムをJEM与圧部内に設置し、初回起動後の機器のステータスおよび基本動作の確認を行い、機器が健全であることを確認した。

また12月12日に曝露ペイロードシステムを輸送機(Dragon)のトランクからJEM曝露部に移設し、12月17日までの間に、起動後の機器のステータスと基本動作の確認を行い、機器が健全であることを確認した。

実施したタスクを以下に示す。また、図2-②-6にJEM曝露部に移設された曝露ペイロードシステムを示す。

実施日 (JST)	実施内容
2019/12/10	<ul style="list-style-type: none">船内データ保存システムの設置船内データ保存システムの起動・チェックアウト
2019/12/12	<ul style="list-style-type: none">曝露ペイロードシステムのJEM曝露部移設曝露ペイロードシステムの起動・チェックアウト
2019/12/13	<ul style="list-style-type: none">冷凍機制御部(CCE)の起動および冷凍機クールダウン実施MDP フラッシュメモリ初期化実施
2019/12/16	<ul style="list-style-type: none">ハイパースペクトルセンサ各機器(HELU、SASP、VSP、HCALE)の起動／停止確認STT/GPSR 非周期テレメトリの取得(その1)
2019/12/17	<ul style="list-style-type: none">STT/GPSR 非周期テレメトリの取得(その2)マクロコマンド書換確認実施



図2-②-6 JEM曝露部に移設されたHISUI

2019/12/23 からは、定常運用に向けてマニュアルでのマクロ実行によるハイパースペクトルセンサ（HYPER）観測機能の確認を行い、観測データが取得できることを確認した。
実施したタスクを以下に示す

実施日（JST）	実施内容
2019/12/23	MDP フラッシュメモリ初期化 MDP 時刻同期
2019/12/24	ハイパースペクトルセンサ観測実行
2019/12/25～26	観測データ転送

なお、この期間のハイパースペクトルセンサのチェックアウト結果については①ウ（A）項に示した。

（B）チェックアウト～準定常運用

2020 年 1 月に船内データ保存システム（MDR-PM）の不調により、曝露ペイロード（HISUI）と ISS 本体間の通信が途絶した。2019 年度はその復帰を試みたが復旧できず、原因は MDR-PM の CPU 系の故障と推定した。

2020 年度、MDR-PM の機能を代替するために、JAXA 殿より借用した軌道上のラップトップ PC を使用したシステムを構築した。（（ii）項参照）

輸送機 HTV による上記代替システム構築用の追加器材の打ち上げ（2020 年 5 月）を経て 2020 年 7 月中旬に MDR-PM 代替機能を構築し、起動した。

一方、2019 年度末から曝露ペイロードシステムの通信機器（MDP）の不調により通信が途絶えていたが、2020 年 8 月末にパワーサイクル（上位電源のオフによる強制遮断／オン）を行うことで復活した。

2020 年 1 月から中断していた初期チェックアウトを 8 か月遅れの 9 月から再開し、9 月 4 日にはオーストラリアの初画像を取得した。（図 2-②-7 に示す）

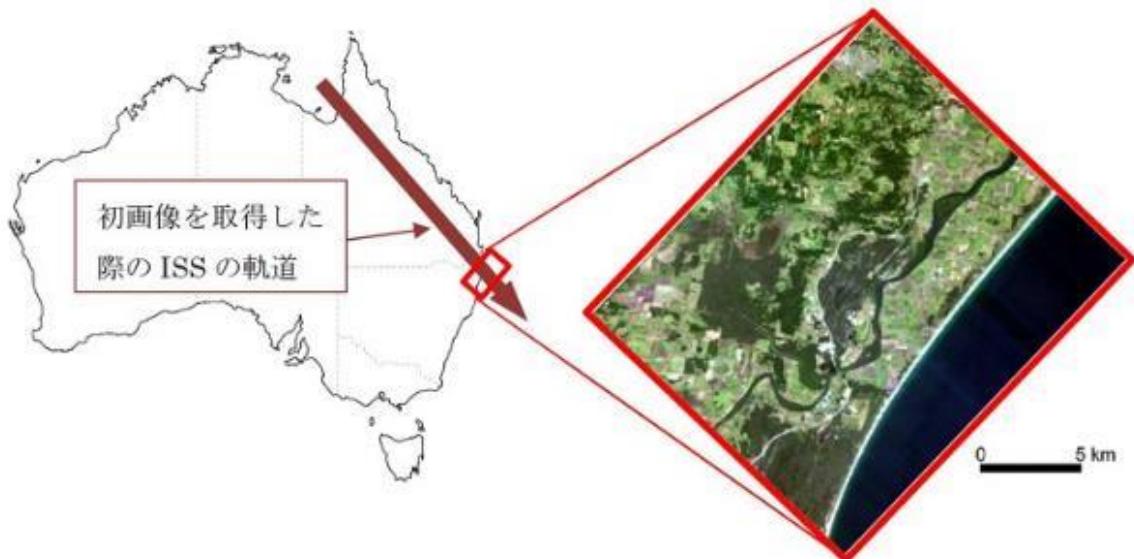


図 2-②-7 HISUI 初画像

10月にはハイパースペクトルセンサのオンボード補正のための補正係数を更新する運用を行った。また、10月からはスケジュールファイルによる連続的な地表面観測、定期的な校正運用を実施している。以降、表 2-②-2 に示すように複数の不具合が発生したが、いずれも復帰している。

表 2-②-2 2019 年度～2020 年度 HISUI 軌道上運用実績

2019 年度	12 月	打上げ・設置 初期チェックアウト開始・機能確認実施
	1 月	MDR-PM 不調による通信途絶発生
	3 月	MDP 不調による通信途絶発生
	5 月	MDR-PM 代替機能構築のための追加資材打ち上げ (HTV による)
2020 年度	7 月中旬	JAXA 殿 PC 借用／MDR-PM 代替機能構築
	8 月末	MDP 通信途絶の復帰
	9 月	初期チェックアウト再開 初画像取得／プレスリリース
	10 月	オンボード補正テーブル更新
	11 月	通信途絶再発／復帰 観測データ転送不可事象発生／復帰
	12 月	MDP 突発的再起動発生／復帰 第 1 回技術員会（初期運用評価報告）
	1 月	観測データ転送不可事象再発／復帰
	2 月	通信途絶再発／復帰
	3 月	第 2 回技術員会（前期定常運用報告）

(i) 健全性評価

曝露ペイロード、MDR-PM の健全性評価結果を以下に示す。

- ・初期チェックアウト及び不具合処理によって、定常運用に向けた各機器の基本的な機能と性能の確認を行うことができた。機器の温度維持も正常である。
- ・通信系の機能については、不具合再発の可能性が否定できない状態にある。
安定稼働に向けた原因究明と対策検討を継続する必要がある。

サポートセンサの健全性評価結果を以下に示す。

- ・STT、GPSR については、妥当な出力が得られる時間が短いなど、期待した性能が得られていない。データ利用方法、改善策の検討が必要である。
- ・GYRO については残念ながら故障により使用不可となった。

ハイパースペクトルセンサの健全性評価結果については①ウ (A) 項に示した。

(ii) MDR-PM 代替機能構築

不調となった船内データ保存システム (MDR-PM) の主要な機能を、JAXA 殿より借用するラップトップ PC で代用するためのシステムを構築した。

船内データ保存システム (MDR-PM) は、曝露ペイロードシステムから伝送される観測データを保管及び地上へ伝送するためのデータ保管・処理装置で、以下の主要機能で構成されている。

- ・データ処理端末
- ・メディア交換機
- ・データストレージ (ハードディスク (HDD))

上記データ処理端末の機能代替用に改修した MDR-PM ソフトウェアをラップトップ PC 上に搭載し、主要機能を実現させた。

データストレージ (HDD) は、当初は MDR-PM に 6 台を内蔵交換する方式であったものを、ラップトップ PC の USB ポートに 4 台接続し交換する方式とした。

通信用のメディア交換機は、MDR-PM 内蔵用のものを継続利用することとした。

③ 宇宙実証支援システムの開発

(a) HISUI 管制系システムの開発

HISUI 管制系システムは、筑波宇宙センターにある JAXA/ISS 運用管制系システム、及び HISUI 専用設備であるテレメトリ/コマンド処理装置と、J-spacesystems 拠点にある中速系データ受信・表示システムにて構成される。(図 2-③-1 参照)

テレメトリ/コマンド処理装置は、HISUI 宇宙機へのコマンド送信機能(低速通信系)を有するとともに、HISUI 宇宙機からのテレメトリデータを受信して表示する機能を有する。中速系データ受信・表示システムは、中速通信系で伝送されるテレメトリデータの受信・表示と、観測データの受信を行い、地上データ処理システムにそれらのデータを転送する。

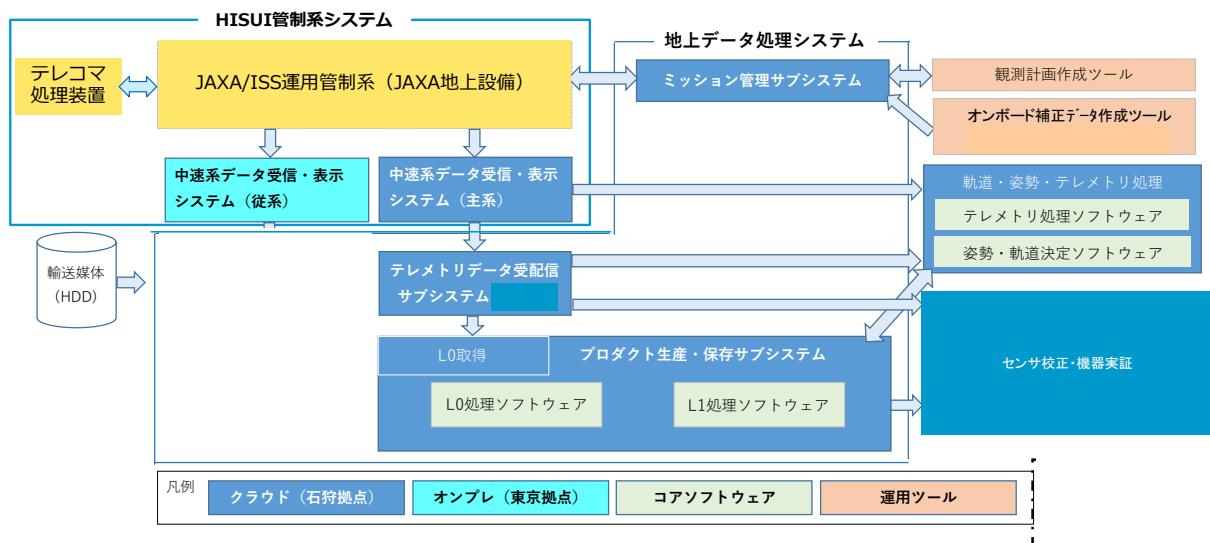


図 2-③-1 宇宙実証支援システム構成図

テレメトリ/コマンド処理装置及び中速系データ受信・表示システムについては、2019 年度に開発及び他設備間の接続試験を完了した。

また、同年度に JAXA のつくば宇宙センターに HISUI 宇宙機 (HISUI-Exp、MDR-PM) を持ち込み、ISS 運用管制系システム、テレメトリ/コマンド処理装置と接続して低速系・中速系 End-to-End 伝送試験を行い、宇宙機と地上設備間のインターフェースが正常にできることを確認して同試験を完了しました。(表 2-③-1 参照)

表 2-③-1 HISUI 管制系システムにおける HISUI 専用設備の開発、関連試験の実施状況

項目名	概要	実施状況	評価結果
テレメトリ/コマンド処理装置の開発	コマンド送信、テレメトリ受信表示	開発完了	達成
中速系データ受信・表示システムの開発	テレメトリデータ及び観測データ受信、保存	開発完了	達成
HISUI 地上設備 組合せ試験	JAXA JEM 運用管制システムと J-spacesystems 地上データ処理システム間の接続試験	試験完了	達成
HISUI 低速系・中速系 End-to-End 伝送試験	低速系コマンド・中速系テレメトリ確認 中速系ファイル転送確認 中速系コマンド確認 運用模擬試験	試験完了	達成

(b) 地上データ処理システムの開発（改修）

地上システムの大きな部分を占める地上データ処理システム(GDS)は、2017 年度までに、衛星搭載センサ用のシステムから、ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサ用に改修設計作業を実施して来た。2018 年度以降は、ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサ用のみを改修（製造）を進め、従来の衛星搭載センサ用のシステムは維持しないため、特に断りのない限り、地上データ処理システムは ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサ用を指すものとする。

2018～2020 年度にかけては、地上データ処理システムの改修作業、及び、GDS インタフェース試験・運用性試験を実施した。なお改修にあたり、衛星搭載版の地上データ処理システムの機能ごとに構成されているサブシステムを見直し、一部サブシステムの機能をソフトウェアや運用ツールで代替することで、ダウンサイズした。システム構成図を図 2-③-1 に、各サブシステムの機能概要を表 2-③-2 に示す。

表 2-③-2 地上データ処理システムの各サブシステム

No.	サブシステム	機能概要	開発状況
1	プロダクト生産・保存サブシステム	テレメトリ受配信サブシステムが生成した L0 データセットから、プロダクト生産を行い、プロダクトの保存・管理を行う。また、利用者のプロダクト注文に応じたプロダクトの生産を行う。	改修完了

No.	サブシステム	機能概要	開発状況
2	テレメトリ受配信 サブシステム	JAXA 地上システムから中速系データ受信・表示システムを経由して受信した観測データやテレメトリについて、後段のサブシステムでデータが円滑に処理できるよう、前処理として L0 データセットを作成し、プロダクト生産・保存サブシステムに配信する。	開発完了
3	ミッション管理 サブシステム	つくば拠点の HISUI 運用者からのメール送信データを受信・管理し、東京拠点の HISUI 運用者が作成した観測計画データをメール送信する。	開発完了

一方で、2020 年 10 月から、HISUI 管制系システム～地上データ処理システム間、地上データ処理システム～各種運用ソフトウェア／ツール間の GDS インタフェース試験・運用性試験の準備を行い、2021 年 2～3 月に試験を実施し、地上データ処理システムの ISS 搭載を前提としたインターフェース部分のデータの授受、及び、運用性を確認した。

④ ハイパースペクトルセンサの実証

(a) 画像データ校正手法の開発

HISUI の画像データを、生データからユーザが取り扱うことができるプロダクトへと処理するため、波長・放射量および幾何に関して校正するための情報を整備し、それを地上処理ソフトウェアに実装していく。これらの校正情報については、初期チェックアウト後に軌道上のデータを取得し、そのデータの解析によって整備する。

ア. 波長・放射量の校正

波長・放射量の校正のため、内部光源校正（地上試験および軌道上試験）により取得したデータを解析した。その解析の結果、地上試験から軌道上試験への変化はないと考えられ、地上試験の結果を初期のラジオメトリックデータベース（生データを放射量補正するためのデータベース）として整備する方針とした。

感度についての結果を図 2-④-1 に示す。赤いラインが平均で、ほとんどゼロとなっているが、VNIR の BPF1 で 12%、BPF2 で 5%、BPF3 で 3%、SWIR の BPF3 で 5%、BPF4 で 4% 程度大きくなっている。これらの差は測定した光源の輝度の増加によるものであり、地上試験から軌道上試験への変化はないと考えられる。

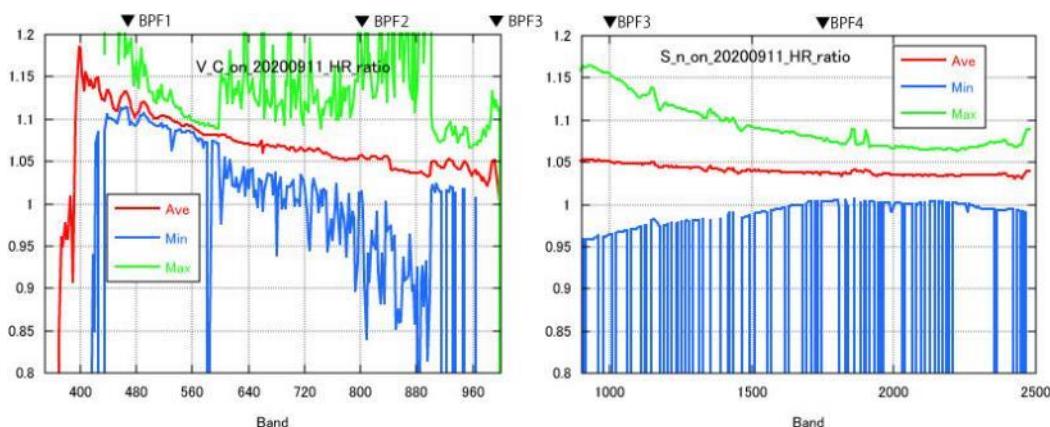


図 2-④-1 感度変化の解析結果

暗時輝度についての結果を図 2-④-2 に示す。VNIR では 0 で問題なく、SWIR では 0.1 程度のオフセットがみられるが問題となるレベルではない。また、オフセットの原因とみられる、SWIR 検出器、分光器には温度差がみられなかった。

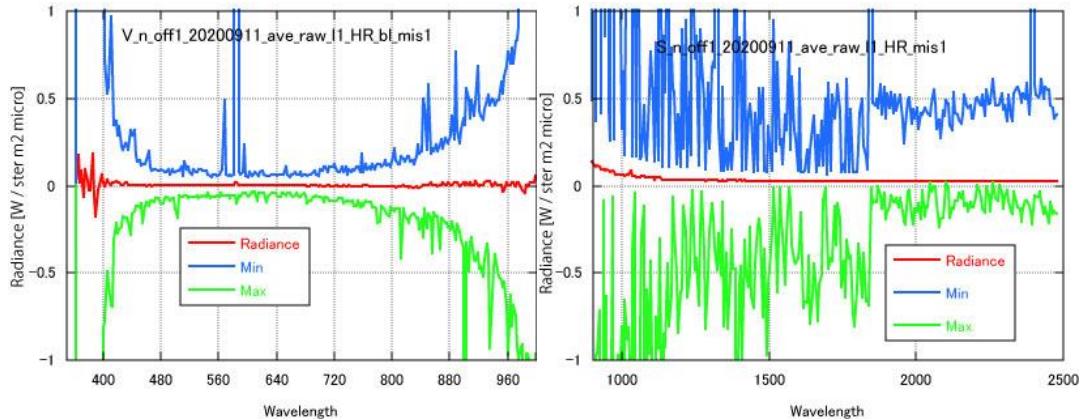


図 2-④-2 暗時輝度の解析結果

波長ずれの結果について表 2-④-1 に示す。地上試験（20190711）から軌道上試験（20200911）への変化はほとんどなかった。しかし、地上試験から波長ずれが検出されているため、内容を検証して実装することが今後必要となる。

表 2-④-1 波長ずれの解析結果

取得日時	ずれ(nm)		センサ 方向	環境
	VNIR	SWIR		
20160925	-0.4	-2.3	横向き	大気中
20161015	0.2	-0.5	横向き	真空
20180829	2.7	5.3	下向き	大気中
20190711	2.9	5.5	下向き	真空
20200911	2.3	5.5	—	宇宙

イ. 幾何の校正

HISUIにおいては、センサの視線方向を決定する上で必要な補助センサのうち、ジャイロセンサが故障、スターセンサが ISS の構造物の影響で視線がさえぎられる時間帯があること、GPSR センサがマルチパスの影響で受信できない時間帯があることから、ISS から提供される位置・速度および角度情報を組み合わせることで、センサの視線方向を決定することとし、そのためのアルゴリズムを開発した（図 2-④-3）。

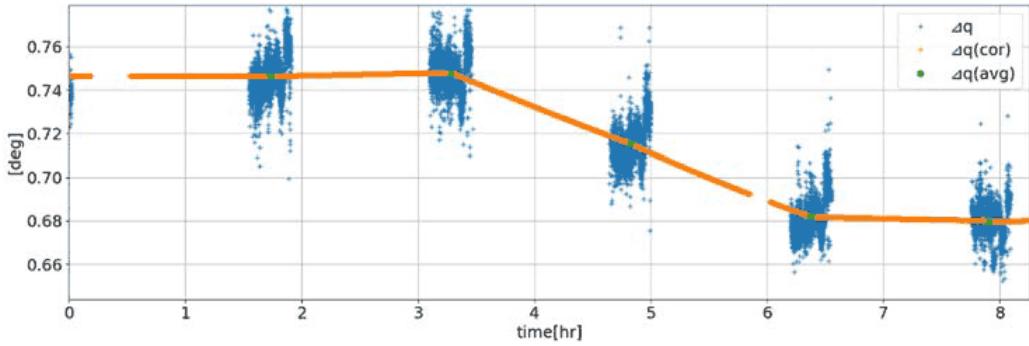


図 2-④-3 HISUI の視線方向の決定
STT データと ISS 補助データとの差異(水色)と補正量(橙色)

また加えて、地表面位置の誤差を測定する機能を実装した。地表面位置の誤差を測定する方法としては、Landsat によって撮像された GLS のデータを参照画像とした、面積相関を用いたテンプレートマッチングによって実施した。そして早速この機能を利用して時刻の誤差を評価した（図 2-④-4）。

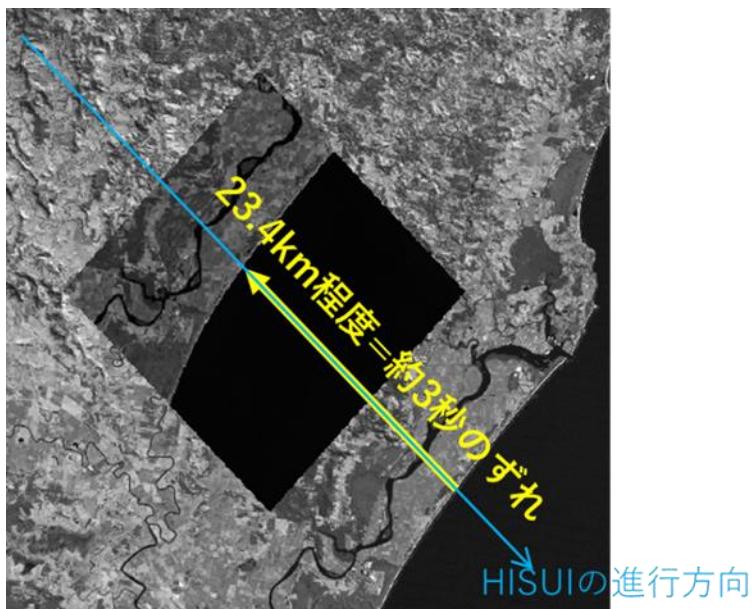


図 2-④-4 時刻の誤差の検討結果

今後、このような時刻の誤差に加えて姿勢情報の誤差についても合わせて評価し、地上処理においてその誤差に対応していくことが必要となる。

(b) 観測計画策定手法の開発

観測計画は 1 日単位で作成し、観測スケジュール作成・送信運用に従って HISUI へと送信される。定常運用が開始されてから、予め不具合対応等により観測が実施されない日を除いて、観測計画の作成を実施した。

ア. 長期観測計画の策定

HISUI の長期観測計画は、観測要求をベースに、観測時間制限や太陽高度条件など多くの制約条件に基づいて策定される。その策定の際には長期観測シミュレーションを実施して観測結果を推定している。観測要求の種別と優先度について表 2-④-2 に示す。

表 2-④-2 HISUI 観測要求の種別

観測要求種別	説明	観測要求の例
重要観測	運用上必要な観測。HISUI の運用において絶対に必要となる特別な観測の要求であり、運用試験のための観測や内部光源校正等の特殊な観測などが該当する。	運用試験、内部光源校正
実証観測(P)	プロジェクト上必要な観測。HISUI プロジェクトを遂行する上で必要な観測で、代替校正、HISUI プロジェクト(METI)の利用実証、大災害観測、日本観測が該当する。	代替校正、METI 利用実証、大災害観測、日本観測
実証観測(C)	協定機関との共同研究による利用実証に必要な観測。研究公募などが該当する。	研究公募
優先地域観測	世界の資源探査対象地域等の優先する地域を対象とし、雲無し・高太陽高度条件でカバーする観測。	石油堆積盆地域、金属資源要求地域
全陸域観測	全陸域および浅海地域(ISS 軌道範囲)を対象とし、雲無し・高太陽高度条件でカバーする観測。	

また、観測要求（優先地域観測および実証観測）について仮想して、長期観測シミュレーションを実施した。その結果の観測地域、および優先地域観測・実証観測の観測結果（達成度）について、それぞれ図 2-④-5・図 2-④-6 に示す。

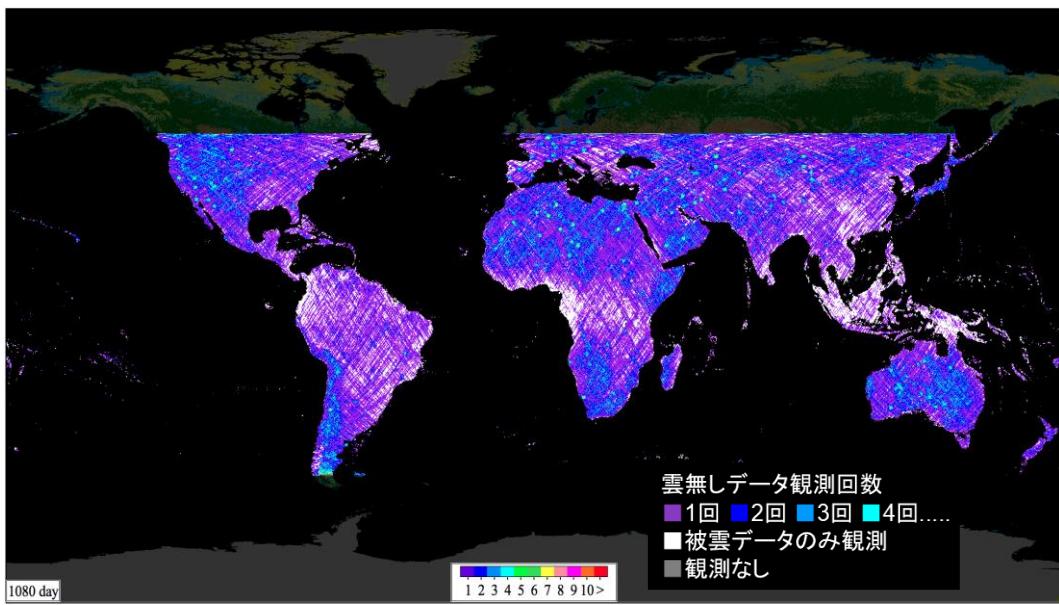


図 2-④-5 長期観測シミュレーション結果の観測地域（3年間）

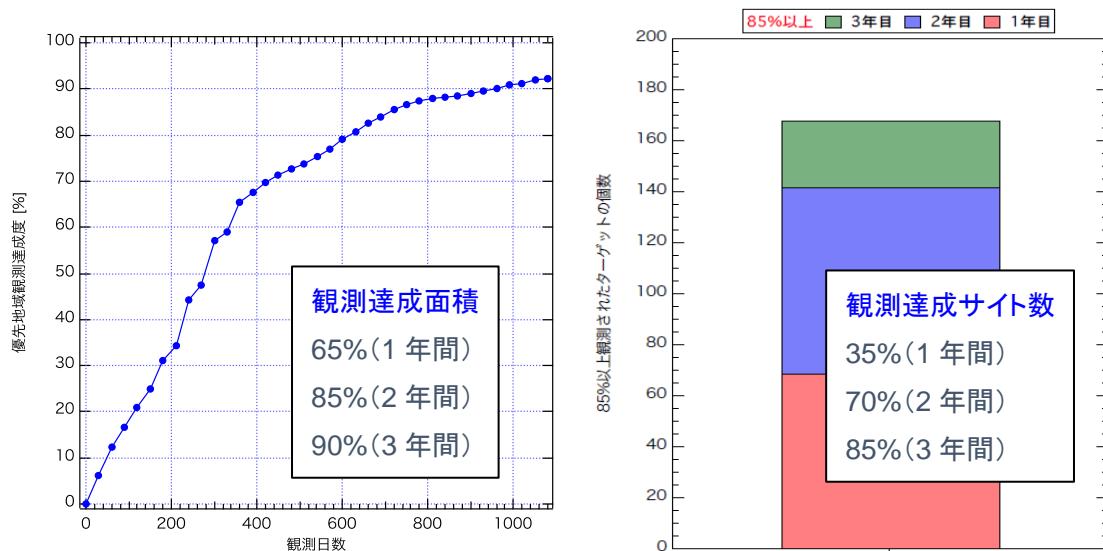


図 2-④-6 優先地域観測(左)・実証観測(右)の観測結果（達成度）

(A) 長期観測計画の更新

新たに JOGMEC より金属鉱物資源の有望地域の情報について提出を受けた。これに合わせて優先観測地域の対象地域の追加を実施した。具体的には、JOGMEC よりリクエストされた地域を、既存の優先地域観測である石油堆積盆地域に追加した。その結果、優先地域観測の面積が過剰に広大となり、他の観測要求への悪影響が大きいことが明らかとなった。そのため、資源探査には有効ではない領域、すなわち森林域および水域を除外して、最終的な優先地域観測の対象地域と設定した（図 2-④-7）。

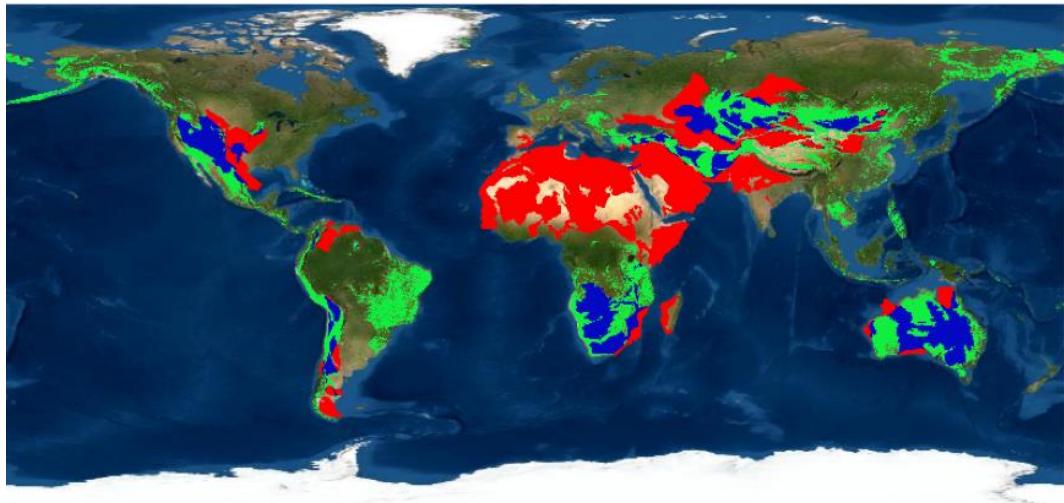


図 2-④-7 観測領域を追加した優先地域観測マップ
赤：石油堆積盆地域 緑：追加地域 青：重複地域

また、HISUI 研究公募からの、観測要求の提出に合わせて、観測計画作成パラメータの一つである、実証観測の対象地点について、定常的な更新を実施した。

以上の長期観測計画を更新にあたって、長期観測シミュレーションを実行した。観測地域については変化しているが（図 2-④-8）、達成度のパーセンテージについてはほとんど変化がないことを確認した。

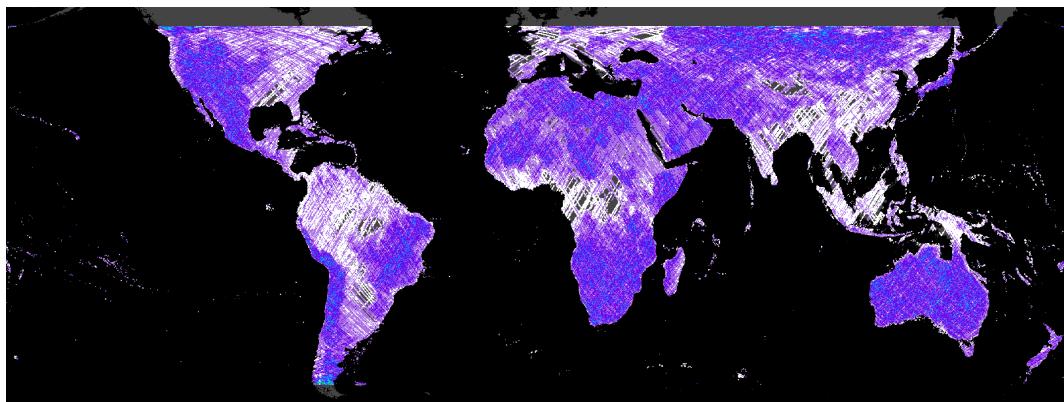


図 2-④-8 観測要求更新後の長期観測シミュレーション結果

（B） 観測計画作成に関する参照情報の整備

観測計画を作成する上で、被雲を避けるために、全球の晴天率マップを整備した。具体的には、2010 年～2019 年の 10 年間の Terra および Aqua 衛星搭載の MODIS データ、MOD35/MYD35 を用いて実運用向けの雲被覆統計の整備を行った。

イ. 短期観測計画の運用

短期観測計画は長期観測計画に基づき 1 日単位で作成される。その 1 日単位の短期観測計画を作成するツール（観測計画作成ツール）を開発した。

そして、このツールにより、定常運用が開始されてから、予め不具合対応等により観測が実施されない日を除いて、短期観測計画の作成を実施した。

なお、運用上は「短期」を省略して単に「観測計画」と定義しているので、以降の記載においても同様に単に観測計画と表記する。

(A) 観測計画の構成

観測計画は、スケジュールファイル・ダウンリンクリストファイル・サマリファイルの3種類によって構成される。

スケジュールファイルは、HISUIが実行するコマンドマクロと、その実行タイミングを記述したファイルで、HISUIはスケジュールファイルの記述にしたがって運用される（表2-④-3）。

表2-④-3 スケジュールファイル

スケジュールファイルの記載内容 [時刻(GPS),マクロ名,パラメータ1,2,3,4]	実行マクロの内容
**** Synchronize to GPS time ****	
1287861896,TIMESYNC.mcr,ISS,,,	MDPの時計を同期
**** Normal observation 24 (4.6minutes) ****	
1287861930,SV_SET_1_COMM.mcr,,, 0000000000,SV_SET_2_NOM_OBS.mcr,023,0,0,A	センサON 観測パラメータ設定
1287862235,SV_OBS_START.mcr,,,	観測開始
1287862510,SV_OBS_STOP.mcr,,,	観測停止
0000000000,SV_OFF.mcr,,,	センサOFF
**** Transfer HYPER data to MDR-PM ****	
1287862531,TRANS.mcr,2455,,, 1287864986,TRANS-END.mcr,,,	蓄積データ転送開始 蓄積データ転送停止
**** Initialize Flash Memory ****	
1287865015,CLEAR_FLASH.mcr,BADCHK_DISABLE,,,	蓄積データ消去
**** Load next schedule file ****	
1287881465,SCHEDULE_START.mcr,20201028.scl,,, EN	翌日の.sclを読み出す 終了

ダウンリンクリストファイルにより、与圧部のHDDに蓄積されたHISUI画像データから、所定の観測時刻のファイルを抽出して地上へダウンリンクされる（表2-④-4）。

表2-④-4 ダウンリンクリストファイル

ダウンリンクリストファイルの記載内容 [時刻(GPS),時刻(GPS),秒]	船内HDDから、抽出・地上へダウンリンクする観測時刻の範囲
1287799620,1287799658,39	1287799620～1287799658の39秒間
1287805440,1287805445,6	1287805440～1287805445の6秒間
1287827677,1287827681,5	1287827677～1287827681の5秒間
EN	終了

サマリファイルには、1日および1周回毎の合計観測時間、特別な観測やイベントの実行の有無、予測軌道およびスケジュールファイルにおける観測地点の地理的な位置の情報を記述している（図2-④-9）。

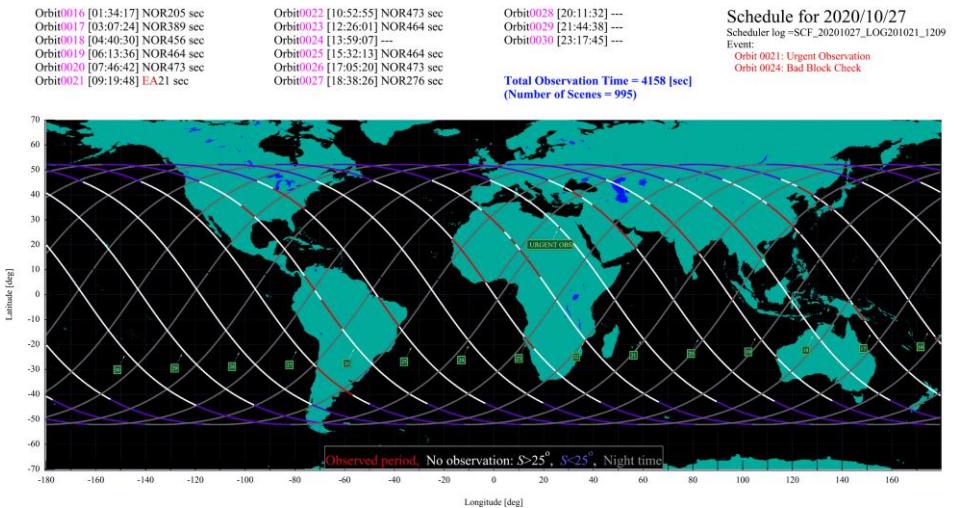


図 2-④-9 サマリファイル

(B) 観測計画の作成結果

定常運用を開始した 2020 年 10 月 27 日から、2021 年 3 月 14 日までの観測計画作成結果を、観測計画された観測シーン数によって示す（図 2-④-10）。

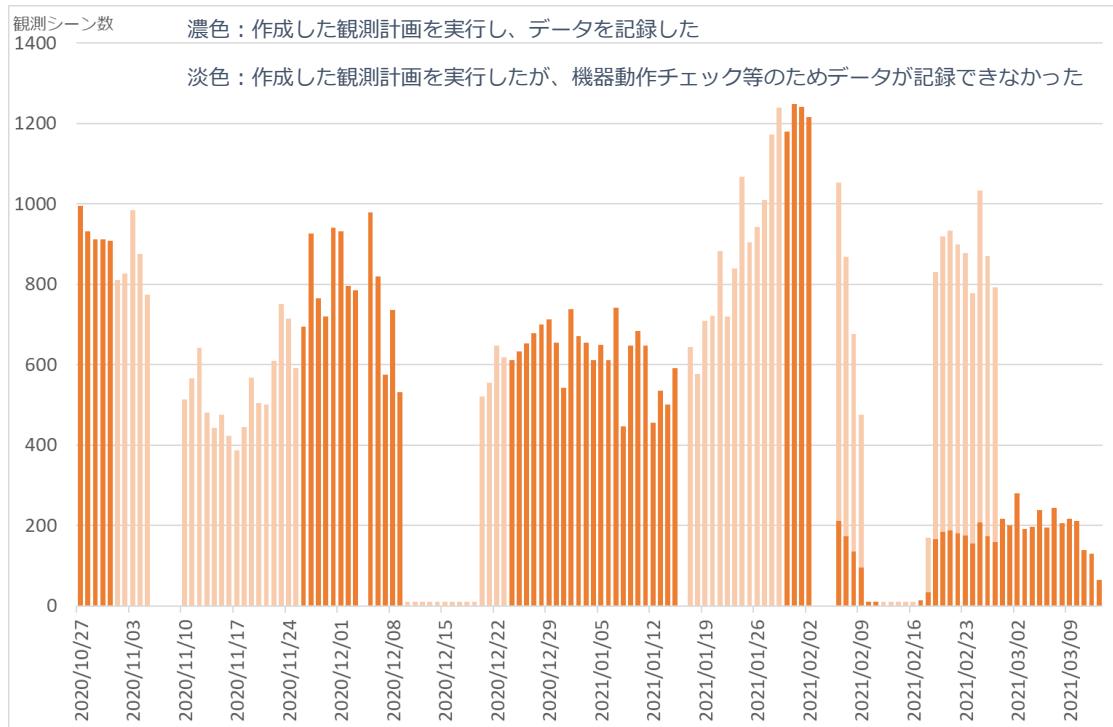


図 2-④-10 観測計画作成結果

1 日の観測計画には、数 400～1200 シーン程度の観測が含まれていた。

通常の運用では、HISUI はスケジュールファイルにより観測を実行しているが、イレギュラーなケースとして以下が挙げられる。

- HDD 交換等による非定常運用の実施が計画されているため、観測計画を作成していないケース（例：2021/2/3～5）。
- 太陽β角の状況が悪く HISUI が昼間の地表面を観測できないため、観測が無い観測計画が作成そして実行されるケース（例：2021/2/10～16）。
- 軌道上の不具合およびその対応により、作成した観測計画が実行されなかったケース（例：2020/11/1～25）。
- 転送速度が一時的に低下したケース（例：2021/2/4～3/19）。本ケースにおいては観測計画パラメータの一時的な変更で対応している。

(C) 観測計画作成に関するパラメータの整備

打ち上げ後の性能評価により反映する必要があるパラメータとして、MDP から MDR-PM へのデータ転送速度が挙げられる。

そこで、2020/12/1, 12/25, 2021/1/1 に実施された MDP から MDR-PM へのデータ転送に際し、テレメトリデータから転送速度を計算した。

その結果、想定した転送速度（解凍時サイズ換算）である 65Mbps に対して、実際の転送速度は、約 64.2～94.4 Mbps の範囲であった。したがい、安全側を考慮して 64Mbps にパラメータを設定した。

(c) データの利用実証

定常運用が開始される事前に、初期チェックアウト後に取得した生データ (LOB データ) を使って、予備的にデータの品質を確認した。

具体的には、金属資源で重要な鉱物の分布について、HISUI 生データから解析し、既存の航空機ハイパスペクトルセンサ HyMAP から解析した結果と比較・評価した（図 2-④-11・図 2-④-12）。

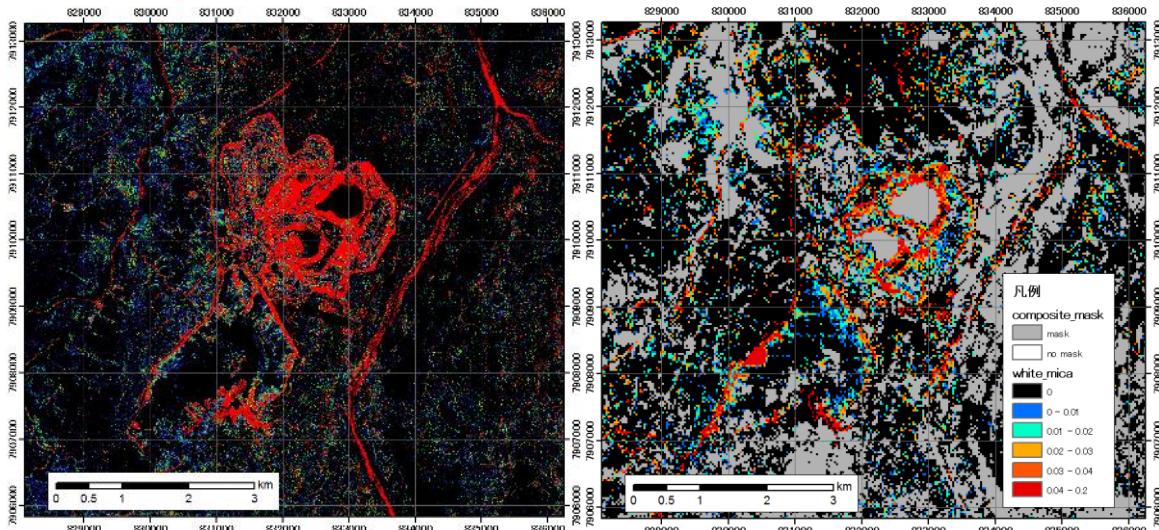


図 2-④-11 白雲母量の分布

左 : HyMAP 右 : HISUI

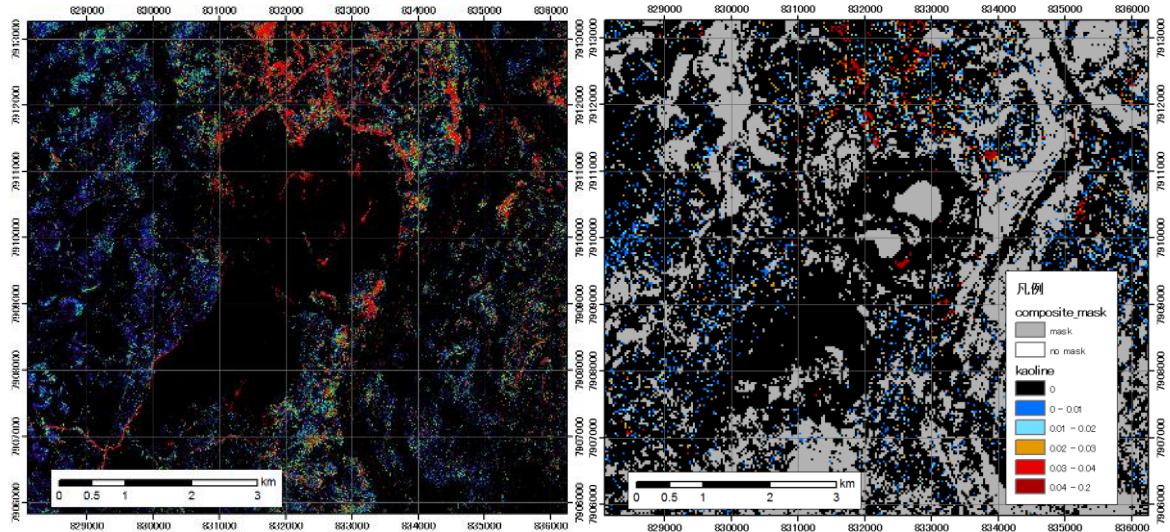


図 2-④-12 カオリン鉱物量の分布

左 : HyMAP 右 : HISUI

評価の結果、白雲母やカオリンのような 2200nm に吸収を持つ変質鉱物については、既存の結果との整合性が高く、ほぼ正しく検出が可能であることが明らかとなった。

3. 研究開発の実施・マネジメント体制等

(1) 研究開発計画

ハイパースペクトルセンサのプロジェクトは衛星搭載用としてのセンサ開発を 2017 年度に開始した。2012 年度からの搭載衛星計画の変更の結果、2015 年度に ISS 搭載が決定し、ISS 搭載用に同センサを機能強化している。図 3-1 にプロジェクト全体のスケジュールを示す。

	H19 2007 年度	H20 2008 年度	H21 2009 年度	H22 2010 年度	H23 2011 年度	H24 2012 年度	H25 2013 年度	H26 2014 年度	H27 2015 年度	H28 2016 年度	H29 2017 年度	H30 2018 年度	H31 2019 年度	R2 2020 年度	R3 2021 年度	R4 2022 年度	R5 2023 年度
プロジェクト事業評価		▲ NEDO中間評価		▲ NEDO成果報告/METI中間評価				▲ METI中間評価			▲ METI中間評価			▲ METI中間評価			
衛星搭載用としてのセンサ等開発				平成19年～平成28年度													
搭載衛星計画の変更							↔										
ISS搭載用に改修・開発（進行中） 1) ハイパースペクトルセンサの開発 2) 曝露ペイロードの開発 3) 宇宙実証支援システムの開発 4) ハイパースペクトルセンサの実証											平成27年度～（進行中）						

図 3-1 プロジェクト全体スケジュール

① ハイパースペクトルセンサの研究開発

本研究開発では、2016 年度までに高い波長分解能を有する高性能なハイパースペクトルセンサの技術の開発を行った。一方、2015 年度からは ISS 搭載用に同センサを機能強化している。

開発の内容は以下の通りである。

【2007 年度～2016 年度】

ア. 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、維持を行った。

イ. 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の要素技術開発を行った。

ウ. 評価モデルによる検証

ハイパー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、熱構造モデルおよび機能評価モデルを開発し、検証を行った。

エ. フライトモデルの開発

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した。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した。

【2015 年度～】

オ. ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサの機能強化

「エ.」で開発したフライトモデルを、ISS 搭載用に機能強化する改修を行った。

カ. 軌道上実証

2019 年 12 月に打ち上げられ JEM 曝露部に設置された後、軌道上の実証を実施している。

② 曝露ペイロードの研究開発

本研究開発は、公募による選定審査手続を経て、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 2015 年度より実施した。①で開発してきたハイパースペクトルセンサを ISS に搭載するための JEM 曝露部設置用ペイロード（曝露ペイロードシステム）を開発し、2019 年度に SpaceX 社の Dragon 輸送機を用いて打上げられた。

打ち上げ後は JEM 曝露部に設置され、軌道上での実証を実施している。

③ 宇宙実証支援システムの研究開発

ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサの宇宙実証に必要な宇宙実証支援システムとして、JAXA ISS 運用管制系を経由して曝露ペイロードシステムと接続し、観測計画の送信、一部の観測データやテレメトリーの受信を行う管制系システムの開発およびHDD輸送またはダウンリンクした観測データやテレメトリーの受配信、プロダクトの作成、保尊管理等を実施する地上データ処理システムの開発を実施している。

④ ハイパースペクトルセンサの実証

ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサは 2019 年度下期に SpaceX/Dragon 輸送機で ISS に運ばれ、JEM 曝露部に設置されて運用を開始し、取得した画像の品質を高めるためのデータ評価を実施している。宇宙機の機能性能の実証については①および②にて実施している。また観測計画に基いて観測データを取得、宇宙実証システムでデータ処理されて利用実証に供される。

図 3-2 に、ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサ、曝露ペイロードおよび宇宙実証支援システムの研究開発およびハイパースペクトルセンサの実証および運用の全体スケジュールを示す。

	H27 2015年度	H28 2016年度	H29 2017年度	H30 2018年度	H31 2019年度	R2 2020年度	R3 2021年度	R4 2022年度	R5 2023年度
イベント		△ 設計審査(PDR) (安全審査-1)	△ 設計審査(CDR) (安全審査-2)	△ 品質確認審査 (安全審査-3)	打上(12月)				
HISUI総合システム		■ 基本設計/詳細設計		■ 維持設計					
曝露ペイロード		■ 設計 部品調達・製造		■ 組立・試験					
ハイパースペクトルセンサ (ISS搭載用機能強化)			■ 設計確認会△			■ 軌道上性能評価			
宇宙実証支援システム ・HISUI管制系システム ・地上データ処理システム		■ 基本設計/詳細設計		■ 製造/試験					
ハイパースペクトルセンサの実証				■ 評価・開発 ■ 観測計画策定 ■ 初期運用準備	■ 試験 ■ 予備評価 ■ 初期チェックアウト				
校正等									
観測計画									
データ利用実証						■ 利用実証			
運用					■ トラブルによる中断	■ 定期運用			■ 廃棄準備

図 3-2 ISS 搭載型ハイパースペクトルセンサ、曝露ペイロード、宇宙実証支援システムおよびハイパースペクトルセンサの実証、運用の研究開発スケジュール（2015～2023 年度）

(2) 資金配分

2007 年度から 2020 年度までの資金配分を表 3-1 および図 3-3 に示す。図 3-1、3-2 の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 3-1 資金年度配分

年度		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	合計
研究開発項目																
センサ	ハイバースペクトルセンサ開発	465	950	2,373	2,033	2,170	1,634	835	220	59	10	—	—	—	—	10,749
	ISS搭載用機能強化	—	—	—	—	—	—	—	—	227	51	126	133	113	104	754
曝露ペイロード開発	—	—	—	—	—	—	—	—	—	403	897	890	599	573	99	3,461
宇宙実証システム開発	—	—	—	—	—	166	695	430	182	192	135	65	123	385	2,373	
宇宙実証	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	78	34	133	245	
計	465	950	2,373	2,033	2,170	1,692	1,602	655	871	1,149	1,149	875	843	721	17,548	

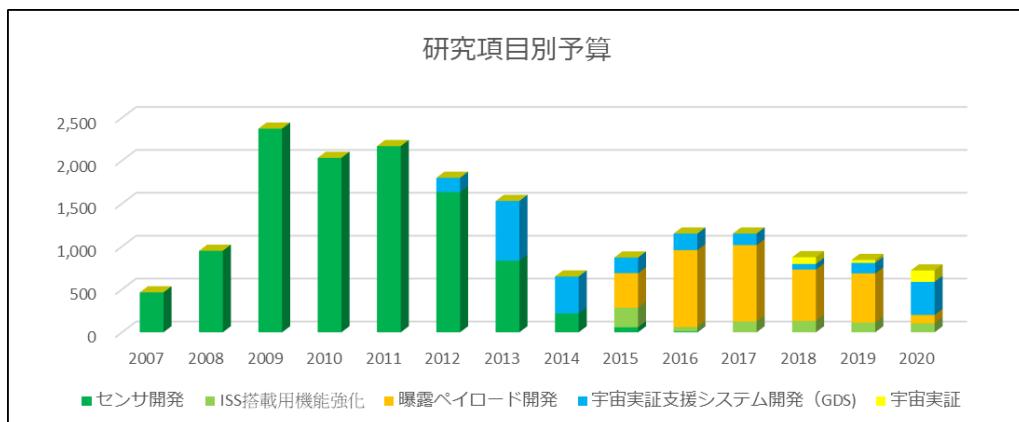


図 3-3 研究費目別予算

(3) 研究開発の実施・マネジメント体制

ハイパースペクトルセンサの研究開発および曝露ペイロードの開発（2015年度～）の体制図を図3-4に示す。

研究開発実施者である一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構は、1986年の設立以来、宇宙システム（衛星システム、地上システム、衛星リモートセンシング等）に関する研究開発、調査研究、普及啓発及び人材育成を行ってきており、資源探査用センサ JERS-1、ASTER 等の開発および20年以上の運用の経験を有し、ハイパースペクトルデータについてはその利用技術の研究開発を2006年から12年に亘り実施してきたおり、本事業を実施するのに適格である。

研究開発の実施にあたって経済産業省が指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダ：東京大学 岩崎晃教授）の下で効果的な研究開発を実施した。また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「ISSハイパースペクトルセンサ等研究開発技術委員会」を設置した。

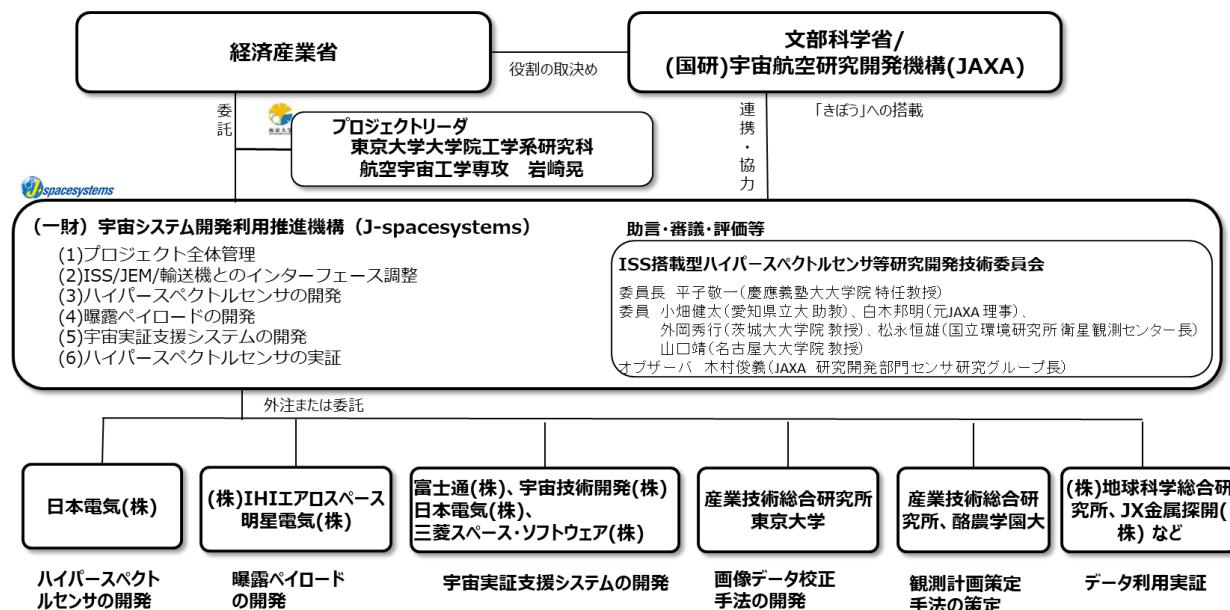


図3-4 研究開発の実施体制

(4) 知財や研究開発データの取扱い

①ハイパースペクトルセンサ

ハイパースペクトルセンサは、メークが2009年度（国内）、2010年度（外国）に以下に示す特許を出願しており、その管理についてはメークが対応している。

- | |
|--|
| 1) 特願 2009-150811 撮像装置、撮像方法及び撮像回路 （出願：2009. 6. 25） |
| 2) PCT/JP2010/0004034 (同上の国際特許) （出願：2010. 6. 17） |

③ ハイパースペクトルデータ

HISUI のデータは、他の宇宙用ハイパースペクトルデータに比べ、エネルギー資源・鉱物資源探査に有用な SWIR のデータの SN は、世界的にも最高レベルであり、その配布に際しては、経済安全保障の観点から国内企業の裨益が損なわれないように配慮する必要がある。

そのため、海外へのデータ配布に際しては、データを要求するユーザについて、予め利用目的、データの二次配付の禁止等の事前確認を行う一方、そのデータの観測地域が重要地域である場合には何らかの制限を付けるなど、産官学の関係者・有識者間で現在協議中であり、今後データポリシー、配付方針を決めていく。

一方、HISUI のデータそのものの保管場所は、民間のデータセンターを利用しておらず、外部からの違法な侵入を防ぐ、サイバーセキュリティについては十分安全対策が施され、データ流出のないような体制下で管理されている。

4. 事業アウトプット

(1) 研究開発目標

研究開発項目	中間目標（2020年）	最終目標（2023年）	設定（変更）理由
ハイパースペクトルセンサの開発	<ul style="list-style-type: none"> ISS 搭載への適合性、目標性能を達成したハイパースペクトルセンサ HISUI の製造・試験を完了する。 品質確認に係る審査を実施後、打上げに供するため NASA 側へ引渡し、曝露部へ搭載し、観測を開始する。 	<ul style="list-style-type: none"> 観測を 3 年間程度行うとともに、機能性能を確認し、宇宙実証する。 	<ul style="list-style-type: none"> 世界の石油堆積盆地域について約 85~90% を観測するために必要な観測期間（3 年間程度）を運用するため。
曝露ペイロードの開発	<ul style="list-style-type: none"> ISS 搭載への適合性、目標性能を達成した曝露ペイロードの製造・試験を完了する。 品質確認に係る審査を実施後、打上げに供するため NASA 側へ引渡し、曝露部および与圧部へ搭載する。 HISUI で観測したデータを船内データ保存システムに記録し、そのデータの一部を地上に伝送する。 	<ul style="list-style-type: none"> データの記録と伝送を 3 年間程度行うとともに、機能性能を確認し、宇宙実証が実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 同上
宇宙実証支援システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙実証支援システムの製造・試験を完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地上データ処理システムにより、L1 データを作成し、アーカイブする。 	<ul style="list-style-type: none"> 同上
ハイパースペクトルセンサの実証	<ul style="list-style-type: none"> HISUI データの校正に着手する。 HISUI の長期観測計画を立案し、それに基づき短期観測計画を運用し画像データを取得する。 宇宙実証システムで作成した L0B データを用いて処理・解析し、エネルギー資源、鉱物資源、その他分野での利用可能性について検討・評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> HISUI データを校正する。 観測計画の運用を 3 年間程度行う。 エネルギー資源分野、鉱物資源分野、その他の分野における実証を行い、その有用性について評価する。 本研究開発内容に係る論文または学会発表数 54 件以上、特許出願 2 件 	<ul style="list-style-type: none"> HISUI データの有用性を評価することで、国内ユーザが、エネルギー資源・鉱物資源分野のみならず、森林、防災、農業、環境、海洋等の様々な分野にて HISUI データを利用し、それぞれ直面する課題解決に貢献できるようにするため。

(2) 研究開発の成果

研究開発項目	中間目標（2020年度）	成果・意義	達成状況	未達の原因分析 /今後の見通し
ハイパースペクトルセンサの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ISS搭載への適合性、目標性能を達成したハイパースペクトルセンサ HISUI の製造・試験を完了する。 ・品質確認に係る審査を実施後、打上げに供するため NASA 側へ引渡し、曝露部へ搭載し、観測を開始する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・開発した曝露ペイロードと共に 2019 年 12 月に ISS に搭載した。 ・2020 年 9 月 4 日に初画像を取得し、その後、観測運用を継続している。 	達成	-
曝露ペイロードの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ISS搭載への適合性、目標性能を達成した曝露ペイロードの製造・試験を完了する。 ・品質確認に係る審査を実施後、打上げに供するため NASA 側へ引渡し、曝露部および与圧部へ搭載する。 ・HISUI で観測したデータを船内データ保存システムに記録し、そのデータの一部を地上に伝送する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ISS 搭載用に機能改修したハイパースペクトルセンサと共に、2019 年 12 月に ISS に搭載した。 ・発生していた不具合を解消し、2020 年 9 月 4 日に初画像を取得了。 ・その後、観測運用を継続している。 	達成	-
宇宙実証支援システムの開発	・宇宙実証支援システムの製造・試験を完了する。	・2020 年 9 月 4 日に初画像を取得し、画像を公開した。	達成	-
ハイパースペクトルセンサの実証	<ul style="list-style-type: none"> ・HISUI データの校正に着手する。 ・HISUI の長期観測計画を立案し、それに基づき短期観測計画を運用し画像データを取得する。 ・宇宙実証システムで作成した L0B データを用いて処理・解析し、エネルギー資源、鉱物資源、その他分野での利用可能性について検討・評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・オンボード校正データを取得して解析した。 ・長期観測計画を立案するとともに、短期観測計画を運用した。 ・作成した L0B データから、左記各分野での利用可能性の検討・評価を行った。 	達成	-

(3) 活動指標

年度	論文数	国内特許出願	国外特許出願	PCT 出願
2018 年	5 件	0 件	0 件	0 件
2019 年	5 件	0 件	0 件	0 件
2020 年	3 件	0 件	0 件	0 件

2017 年度までは 38 件

国際標準への寄与

現在および将来の宇宙用ハイパースペクトルのミッションに関する情報を共有する

“GSIS(Geoscience Spaceborne Imaging Stereoscopy)”は 2007 年に設立された（設立当初の名称 ISIS (International Spaceborne Imaging Spectroscopy)）は国際コミュニティであり、HISUI はその設立当初からメンバーである。

GSIS は、「国家宇宙機関、データプロバイダー、研究機関、ユーザコミュニティ間の新しいパートナーシップの機会提供」「地球科学コミュニティによる宇宙用ハイパースペクトルセンサが採用されるべく、ハイパースペクトルミッションに必要な基本となる機能に関する知識の構築」を目指し、全体会議を年 1 回開催し、情報交換を行っており、HISUI も毎年参加している。

プロトタイプの作成

HISUI ハイパースペクトルセンサは、既に ISS に搭載され、宇宙実証を進めている。

5. 事業アウトカム

(1) 事業アウトカムの内容

本事業のアウトカムとして、事業目的を踏まえ次の3項目を設定した。

- 1) エネルギー資源・鉱物資源分野の他、多様な分野でのデータの利用拡大
- 2) ハイパースペクトルデータの付加価値製品の開発と、その有償提供の開始
- 3) ハイパースペクトルセンサの販売

(2) 事業アウトカム目標

- ・2023年度までに取得したHISUIデータをISSから地上に輸送し、共同研究にて解析評価を行った成果を公表することで、エネルギー資源・鉱物資源分野のみならず、地球規模環境分野、森林、防災、農業、問題での利活用を広め、各分野でのHISUIデータ利用を増やす。
- ・HISUIデータとその解析事例等をデータプラットフォームTellusに搭載し公開するなどの環境整備を整えることでも、多くの企業ユーザにハイパースペクトルデータの利用価値を理解し、データ利用件数を増やす。
- ・今後、民間事業による多くの小型衛星データが増大することが予想される。HISUIデータと、それとの組み合わせにより、新しい付加価値製品開発が見込まれる。
- ・HISUIのような品質の良いデータ取得が可能なハイパースペクトルセンサの小型・軽量化が実現できることで、小型衛星に搭載可能となり、コンステレーション運用も可能となるため、世界的に競争力のあるセンサとなり得る。

アウトカム目標		目標達成の見込み
2025 年度	・エネルギー資源・鉱物資源分野、地球規模の環境分野、森林、防災、農業、海洋等でのHISUIデータの利用拡大 ・データ利用数 5400 シーン、共同研究応募 50 件以上（論文・学会発表 54 件、特許出願 2 件）。	・各分野の対象地域の観測データ取得とそのデータの提供可能時期に目標達成年度は依存するものの、計画通りの運用が実施できれば、達成の見込みはある。
2030 年度	ハイパースペクトルデータの付加価値製品の開発と、その有償提供の開始	今後、衛星の小型化が進み、コンステレーション運用による観測の高頻度化、センサ技術の向上による観測波長帯の多バンド化等が進むことが想定され、それらのデータの組み合わせによる付加価値製品開発が可能となる。
2035 年度	ハイパースペクトルセンサの販売	センサの高空間分解能化、小型軽量化を実現し、小型衛星搭載化する必要がある。

6. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

事業アウトカム達成に至るまでのロードマップを図 6-1 に示す。事業終了までの期間、「ハイパースペクトルセンサの高度利用に係る研究開発」において、潜在的なユーザとなりうる研究機関や民間企業が 7 分野の研究開発を実施した。これらの研究機関や民間企業が、宇宙機に搭載されたハイパースペクトルセンサの運用開始とともに、開発した技術の宇宙実証を行い、目標最終年度にはエネルギー・資源の安定供給、地球規模の環境問題への対応等に資する成果をもたらす計画である。これらの成果は、将来的にハイパースペクトルデータを用いた新規ビジネスの創出や、データ及び付加価値情報の販売などの収益モデルに繋がるものと期待される。

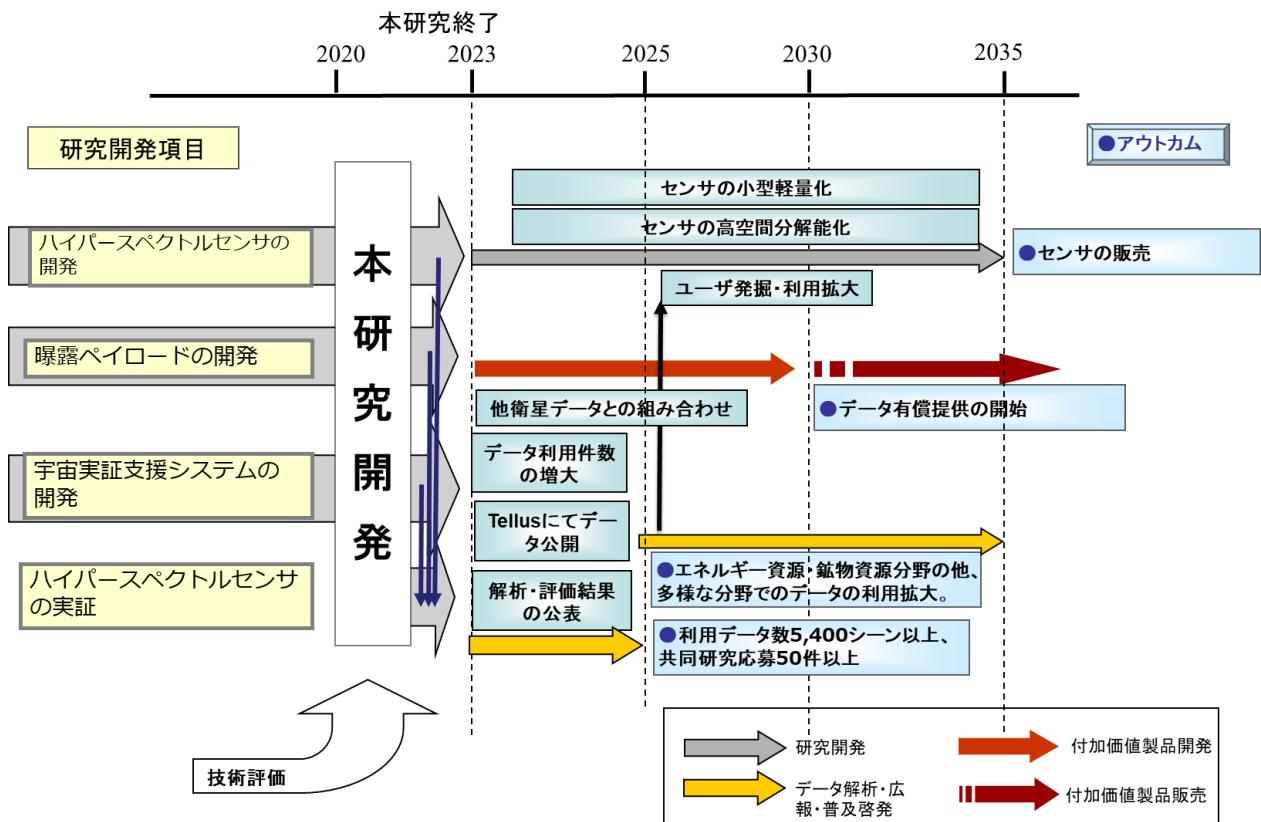


図 6-1 目標最終年度、さらにその後のビジネス化に向けたロードマップ

7. 費用対効果

我が国のエネルギー資源・鉱物資源の安定供給のためには、今後の探鉱・開発が継続的に必要である。資源エネルギー庁では、「JOGMECによる探査技術・専門的知見の蓄積を基に、国の委託等を受けて探鉱・開発事業を実施し、我が国企業による開発への参入を先導していく。(中略) この実現のためには資源開発情報が重要であり、JOGMEC等を通じた正確な情報発信を行っていくことが重要。」(2021年3月30日、資源エネルギー庁資料)と、鉱山開発コストの近年の増加に対する懸念を表すとともに提示している図を図7-1に引用する。

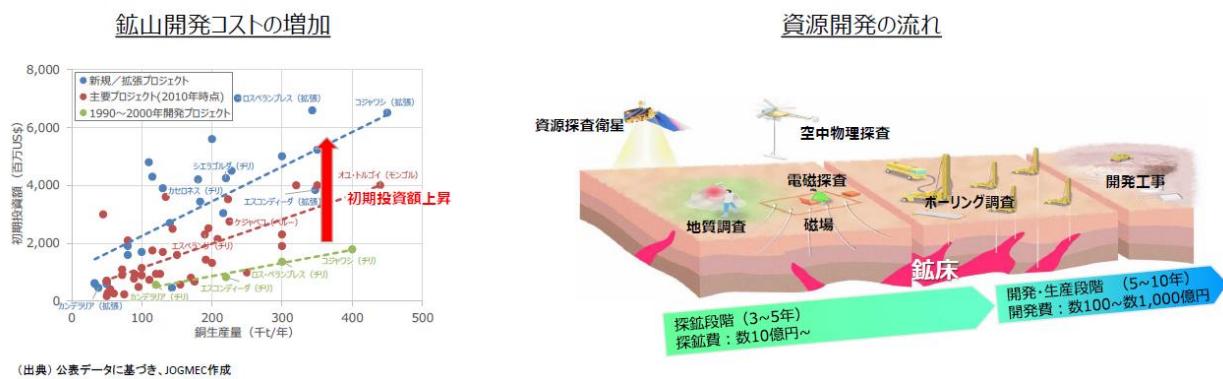


図7-1 鉱山開発コストの増加と資源開発の流れ（資源エネルギー庁資料(2021)）

この図から、年間300千tを生産する銅鉱山では、約3,000～4,000百万US\$（1US\$=110円とすると約3,300億円～4,400億円）の初期投資額となっており、表7-1に示すようにHISUI事業の総予算額約178億円と比べても非常に大きな投資額を要する事業に対する貢献が求められていることが分かる。

表7-1 開発当初からの総予算額と費用対効果

総予算額（百万円）	費用対効果
17,780	・有識者による構成される研究開発技術委員会および今後予定しているデータ利用委員会の助言・評価を得ることで、着実な実証を進める、並行して、データプラットフォームTellusにHISUIデータとその解析事例等を搭載し公開するなどの環境整備を整えることで、多くの企業ユーザにハイパースペクトルデータの利用価値を理解し、データ利用件数を増やす。 ・実証を通じて衛星画像データの品質担保に必要な運用手法の確立（校正・補正）により、エネルギー資源・鉱物資源・その他多様な分野での活用拡大への貢献が期待。 ・データ利用シーン数5400件、共同研究応募50件以上、論文・学会発表54件、特許出願2件の達成。
うち過去3年の執行額 (百万円)	
2018年度 875	
2019年度 843	
2020年度 721	