平成30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7－3

「次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発」
プロジェクト評価用資料
（終了時評価）

平成３０年１０月１５日

経済産業省事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

プロジェクト名	次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発
行政事業レビューとの関係	行政事業レビューシート（平成２９年度　事業番号００３５）
上位施策名	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　「エネルギー基本計画」（平成 22 年 6 月 18 日閣議決定） ④　「宇宙基本計画」（平成 28 年 4 月 1 日閣議決定）
担当課室	経済産業省製造産業局宇宙産業室

プロジェクトの目的・概要

本事業では、宇宙機搭載のハイパースペクトルセンサ（地球表面の物質が放射あるいは反射する電磁波のスペクトルを“連続して高い波長分解能で”観測できる最新型のセンサ）から得られる地球観測データの高度利用に係る研究開発を行う。

本事業の目的は、①取得するハイパースペクトルセンサ・データの信頼性を向上させるため、ハイパースペクトルセンサの校正技術及びデータ処理アルゴリズムの研究開発を行うこと、②石油資源、金属資源、森林、防災、農業、環境、海洋の 7 分野で観測ニーズを踏まえた効率的なデータ収集を行うため、長期および短期の観測計画の策定に係る研究開発を行うこと、そして、③石油資源、金属資源、森林、防災、農業、環境、海洋の 7 分野でユーザニーズに応えるため、ハイパースペクトルセンサの高度利用に係る研究開発を行うことである。

予算額等（委託・請負）　（単位：百万円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 18 年度	平成 29 年度	平成 21、24、27 年度	平成 29 年度	（一財）宇宙システム開発利用推進機構、（研）産業技術総合研究所
H27FY 執行額	H28FY 執行額	H29FY 執行額	総執行額	総予算額
306	306	250	862	872

Ⅰ．研究開発課題（プロジェクト）概要

１．事業アウトカム

事業アウトカム指標		
【指標】 以下により将来的にハイパースペクトルデータによるリモートセンシングの実利用が推進されること ①石油資源、金属資源、森林、防災、農業、環境、海洋の７分野の高度利用に係る研究開発の成果を、宇宙機に搭載したハイパースペクトルセンサを用いて実証する。 ②ハイパースペクトルデータの利用拡大に向けた研究公募５０件を運用する。 【指標設定の根拠】 エネルギー・資源の安定供給のためには、石油資源や金属資源の安定的な確保は重要な課題であり、資源探査に必要な上質かつ即時性のある情報を他国に先駆けて入手することが求められている。また、地球規模での気候変動や生物多様性の消失といった環境問題への対応や、食糧需要の増大にともなう農地の荒廃化や輸入作物の高騰化への対応など、我が国をとりまく様々な問題に対処してくことが求められている。		
指標目標値		
事業開始時（18 年度）	計画:事業アウトプット指標を達成する。	実績：なし。
中間評価時（21 年度）	計画:事業アウトプット指標を達成する。	実績：事業アウトプット指標を達成した。
中間評価時（24 年度）	計画:事業アウトプット指標を達成する。	実績：事業アウトプット指標を達成した。
中間評価時（27 年度）	計画:事業アウトプット指標を達成する。	実績：事業アウトプット指標を達成した。
終了時評価時（29 年度）	計画:事業アウトプット指標を達成する。	実績：事業アウトプット指標を達成した。
目標最終年度（33 年度予定）	計画：事業の開始時から終了時までに実施してきた７分野（石油資源、金属資源、森林、防災、農業、環境、海洋）の高度利用に係る研究開発の成果を宇宙機において実証し、また利用拡大に向けた研究公募を運用することにより、将来ハイパースペクトルデータによるリモートセンシングの実利用の推進が期待される。	

２．研究開発内容及び事業アウトプット

（１）研究開発内容

我が国のエネルギー・資源の安定供給のために、石油資源や金属資源の安定的な確保は重要な課題であり、資源探査に必要な上質かつ即時性のある情報を他国に先駆けて入手することが求められている。また、地球規模での気候変動や生物多様性の消失といった環境問題への対応や、食糧需要の増大にともなう農地の荒廃化や輸入作物の高騰化への対応など、我が国をとりまく様々な問題に対処してくことが求められている。

このような要求に対して、衛星を利用したリモートセンシング技術は、一度に広範囲のデータの取得、定期的な観測、立ち入りが困難な地域の観測を可能とするため、必要な情報の入手に対して大きく貢献できることが考えられ、今後国際的にさらなる活用の拡大が期待されている。さらにこれまでのリモートセンシング技術に加えて、高い波長分解能を有するセンサ（以下、ハイパースペクトルセンサ）を開発・利用することによって、さらに詳細な情報を取得することが可能となる。

一方で現状としては、可視から短波長赤外域までを高精度に観測する定常運用の全球観測ハイパースペクトルセンサが存在しないため、米国の HyspIRI やドイツの EnMap などの開発計画が多く存在しており、世界的なハイパースペクトルセンサ開発競争の段階にある。このような海外センサとの開発競争を制し、世界市場における我が国の技術の優位性を獲得する重要性も高まっている。

このような背景のもと経済産業省では、平成 19 年度から高い波長分解能を有するセンサ（ハイパースペクトルセンサ）の開発を進めてきており、本センサの早期の宇宙実証を行うべく「高性能ハイパースペクトルセンサ等研究開発プロジェクト」基本計画をまとめ、今後、本センサを国際宇宙ステーション（以下 ISS）に搭載し、その宇宙実証を行う方針を決定した。

本研究開発では、ISS に搭載したハイパースペクトルセンサについて、以下の 3 項目の個別要素技術の開発を実施し、宇宙実証を通じてその実用化を推進することを目的としている。

①校正技術及びデータ処理アルゴリズムの研究開発
②観測計画の策定に係る研究開発
③ハイパースペクトルセンサの高度利用に係る研究開発

（１－１）校正技術及びデータ処理アルゴリズムの研究開発

HISUI は、高空間分解能、高波長精度、高 S/N 比を有しており、石油探査技術等を高度化させ、探鉱開発をさらに効率化させることが期待されるが、その実用化には、従来のセンサには無い光学系歪みへの対応など、適切な校正・処理手法を開発する必要がある。そこで、HISUI データを想定した、放射量・波長校正（打上前室内校正、内部光源校正、代替校正、相互校正）および幾何校正を適切に行い、補正処理する手法を開発した。

（１－１－１）打上前室内校正および内部光源校正

打上前室内校正は、打ち上げ前に実験室において既知の光源を受光することにより、センサから出力されるデータを校正するものである。また内部光源校正は、機器に搭載した内部光源から受光することにより校正するものである。

400～2500 nm の広範な波長域における高分解能なセンサ感度校正・評価を可能とするため、新た

な高輝度標準光源を開発し、大開口径セルの作成および値付け試験を実施した。これにより、短波長域校正における光量増大および比較光学系による不確かさの低減を進めた。ハイパースペクトルセンサ特有の課題であるピクセル単位の相対分光応答度評価に関しては、高精度分光放射輝度比較技術を開発した。広帯域高輝度白色光源（スーパーコンティニュアム光源）をダブルモノクロメータと組み合わせた高波長純度光源システムの安定性向上およびパルス応答性評価を行った。開発した SC 光源システムを用いて実際に ISS ハイパーの相対分光応答度および波長特性の測定を実施し、開発したセンサの精度を評価した（図１）。さらに、絶対分光感度校正の妥当性を確認するため、検証用放射温度計を ISS ハイパーのトレーサビリティから独立した校正・特性評価を行い、SI トレーサブルな標準光源による校正を実現した。これらの解析結果は地上での放射量補正に係るデータ処理手法に反映される。

内部光源校正(オンボート機器校正)については、オンボード校正光源部の輝度温度モニタ検出に関し、標準分光放射輝度電球ベースのフィルタ分航測提携を用い、各波長の輝度測定から、輝度分布測定システムの不確かさを評価した。この結果は機上ランプ光源の経年劣化に対する不確かさモデルの検討に反映されうる。

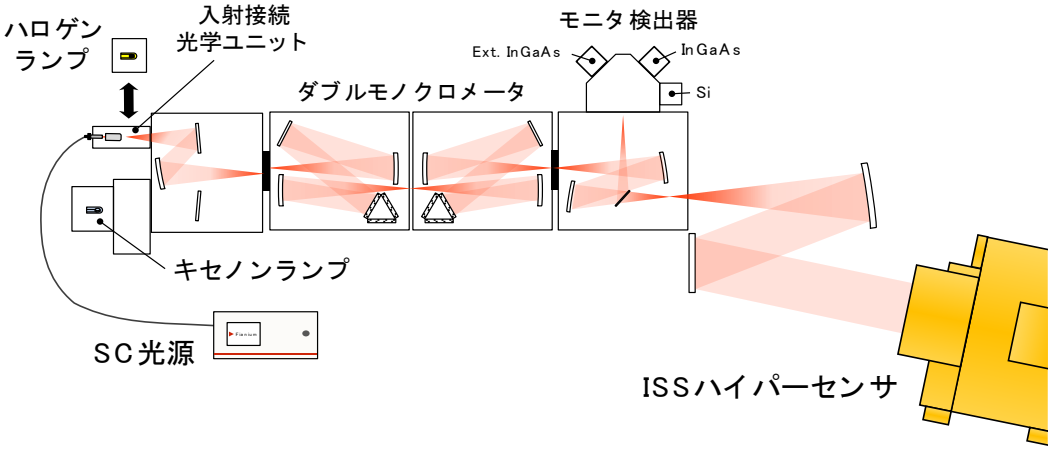


図１　センサ評価用分光測定装置

（１－１－２）代替校正

代替校正は、衛星センサの撮像時と同期し、地上測器で地表および大気等のパラメータを測定、これを処理・解析しセンサが本来観測しているであろう物理量を計算、その上で、実際に観測された衛星センサでの物理量と比較、その差から衛星センサの経年劣化を推測することにより、校正するものである。

HISUI センサの代替校正するための、反射板校正技術の開発、代替校正野外実験の整備を進めた。反射板校正については、現地観測で基準となる反射板の室内実験による校正手法の技術開発を進めた。また代替校正実験については、ハイパースペクトルセンサを ISS に搭載することによって生じる観測頻度減少・観測条件悪化に対応すべく、自動観測サイトの整備にあたった（図２、図３）。

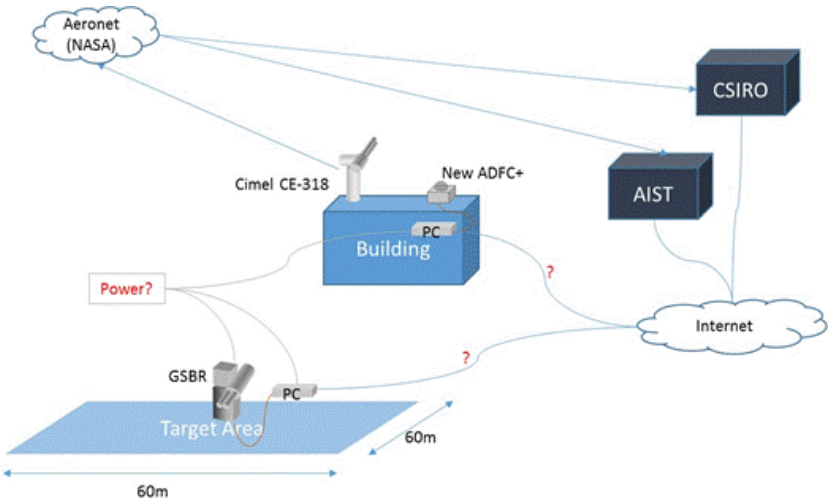


図２　自動観測サイトの最小限の構成

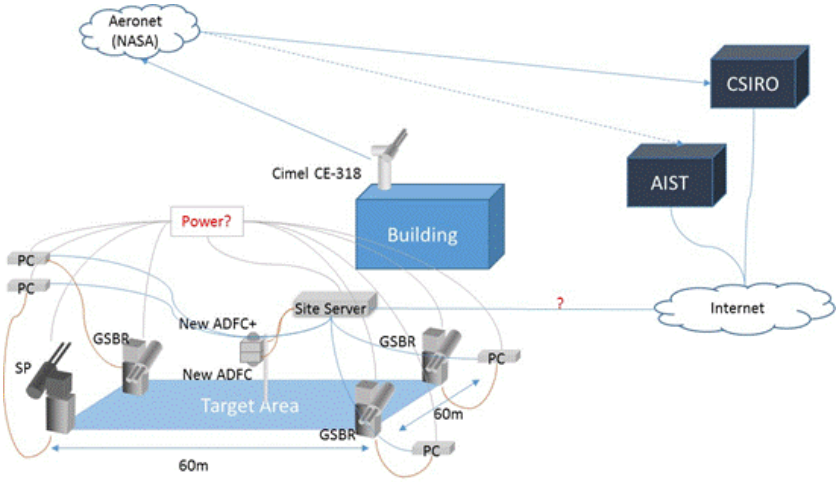


図３　自動観測サイトの望ましい最終形

（１－１－３）相互校正

相互校正とは、宇宙空間において感度の変化した校正対象のセンサと、リファレンスとなる品質管理された衛星センサが同時刻、もしくは環境条件の変化が少ない時間内に同地点を観測したデータ群から対象センサの感度変化を相対的に補正する手法である。

米国による ISS 搭載予定の CLARREO Pathfinder（CPF）を対象として、感度解析アルゴリズムにおける入力変数をより現実的なものに発展させて感度解析を行った。結果より、大気の窓における相互校正時では大気変数の正確な推定の必要は低いことが明らかとなり、また、太陽照度モデル値の精度改善が相互校正の精度改善に比較的寄与することを確認した（図４）。

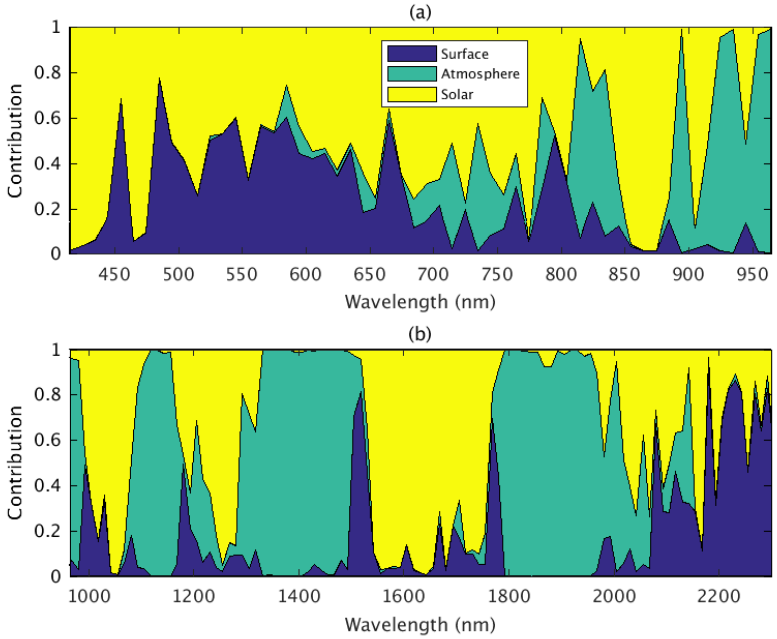


図４　(a)可視近赤外波長域における太陽照度モデル、大気、地表面に関する変数の不確かさの総合的な不確かさに対する寄与率。(b)短波長赤外域における寄与率の結果。

この解析結果に基づき相互校正のエラーバジェット表の作成を開始した。また近似した不確かさの正確さについて検証するための実験方法を提案し、実験結果から近似した不確かさは十分な正確さであることを確認した。さらにマルチスペクトルセンサの相互校正アルゴリズムの概念設計を行った

（１－１－４）L1 処理

HISUI の出力データは 512,000 個の素子毎に異なった特性が反映されている。データの品質を維持するために、素子の出力を均一化するとともに絶対値を正す補正が必要である。

HISUI の宇宙機側で測定する位置・姿勢の情報から地表面に投影することにより、正確な地表面位置情報を付加する必要がある。また HISUI には、波長帯により同一画素の観測位置がずれるキーストーン特性や、可視近赤外センサと短波長赤外センサの間の視差（レジストレーション）による位置ずれ等、幾何的なエラーが存在するため、それらを補正する必要がある。

ラジオメトリック（輝度）補正データベースを設計し、合わせて補正パラメータの生データ（L0 データ）への適用アルゴリズムを開発した。合わせて、地表面投影のアルゴリズム、キーストーン特性や視差の補正アルゴリズムを開発した。これら補正処理（L1 処理）およびプロダクトの生成アルゴリズムの流れについて図５に示す。

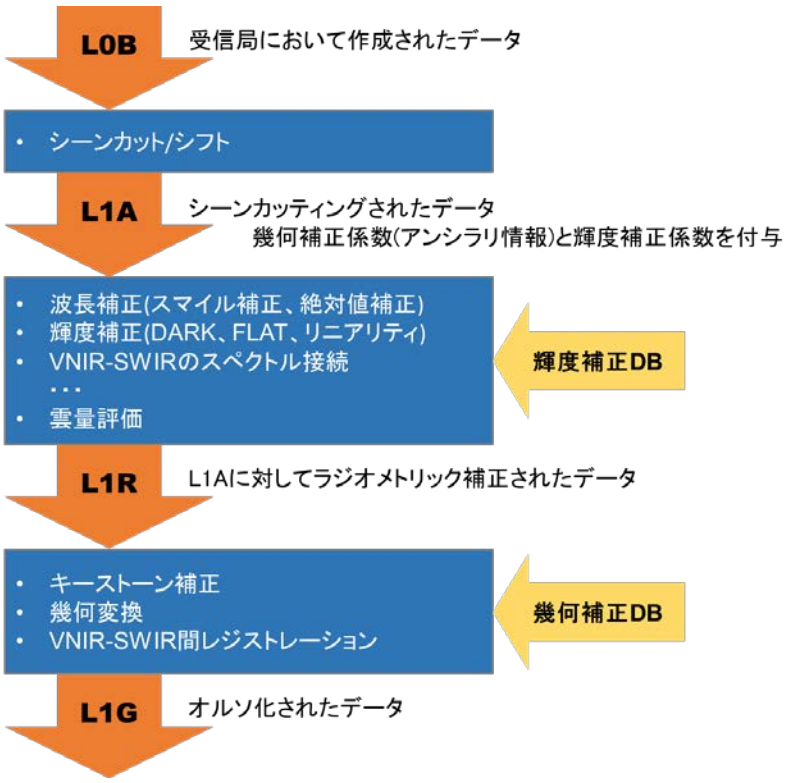


図５　HISUI L1 生成アルゴリズムの処理手順

（１－１－５）大気補正処理

大気補正とは、大気による散乱・吸収の影響を除去し、地表面反射率の画像を得ることである。ハイパースペクトルセンサは資源探査分野での利用において、衛星観測輝度ではなく、大気補正された地表面反射率であることが期待される。なお、大気補正処理プロダクトは標準プロダクトではなく、研究プロダクトとして本事業では位置付けている。

ISS 搭載に対応した、大気補正手法を確立し、大気補正処理プログラムのプロトタイプ(Stable 版)を開発した（図６）。この Stable 版を基に、ユーザへ補正情報を提供するためのサービス機能を追加など、継続的な改修・機能追加開発を Current 版で行っている。また、検証計画を実施するに必要な技術をとりまとめた。以上を反映させた、大気補正処理アルゴリズム理論基準書を作成した。

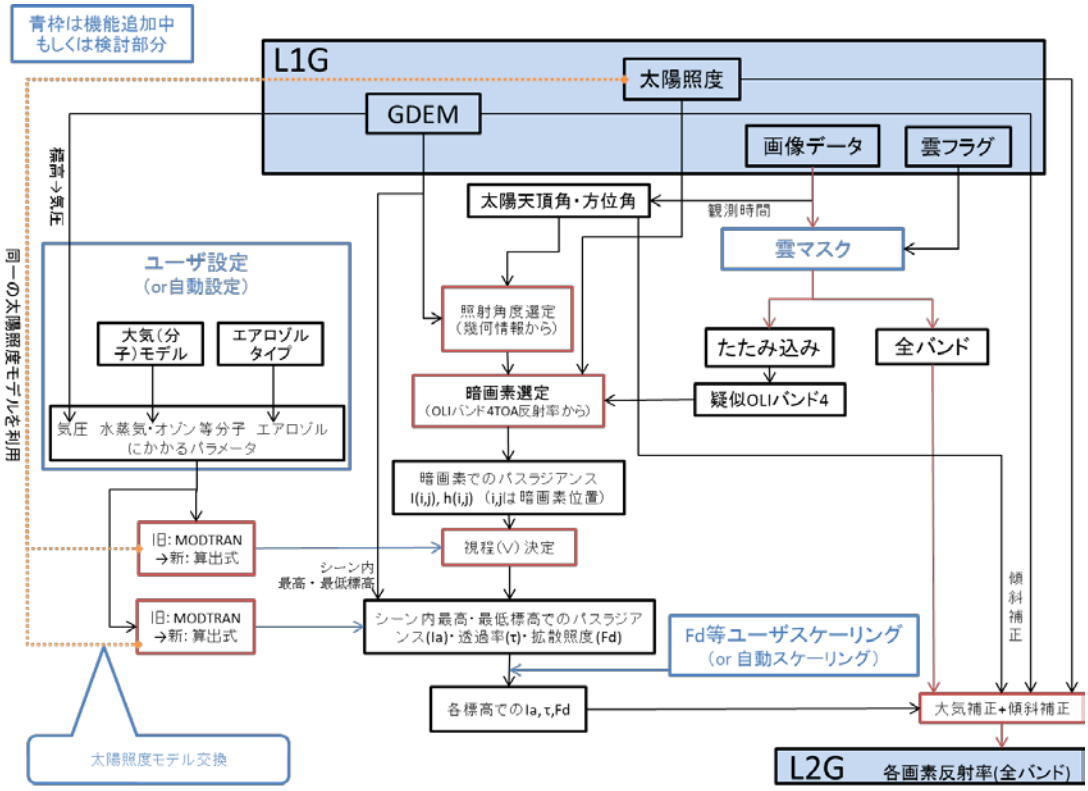


図6 大気補正処理フロー概要

（１－２）観測計画の策定に係る研究開発

HISUI は、観測波長数が多いうえに、従来の陸域観測衛星と同クラスの空間分解能と観測幅を維持しているため、大量のデータを取得することができる。一方で、データ転送量の制約、太陽非同期である ISS の軌道の制約、センサ駆動時間などの制約もあり、結果として観測地域を限定せざるを得ない。

このような制約の中で成果の最大化を図るためには HISUI データの活用が想定される分野において必要となるデータを観測要求として整理し、制約条件も踏まえて、運用期間全体を通じてどのような方針で観測を実施するのか（以下、長期観測計画）を最適に策定する必要がある。そのため、本研究開発では、長期観測シミュレーションツール（シミュレータ）を開発し、様々な制約条件および観測要求に応じた長期観測のシミュレーションを実施して、最適な計画を策定した。

また運用中は、観測状況・被雲状況・センサの制約状況・ISS の軌道などの多くの状況変化に合わせて、観測計画も日々変化していく必要がある。そのために、観測の数日前頃に最新の状況に合わせて観測対象地域を確定し、最新の ISS の軌道に対応したセンサ駆動時間帯・ポインティング方向等の、観測を実施する上で必要な情報セット（以下、「短期観測計画」という。）を作成する必要がある。短期観測計画は、自動作成システム（以下、「スケジューラ」という。）により作成するため、本研究開発では、このスケジューラのアルゴリズムを開発し、パラメータを検討した。

また、長期観測計画の策定と短期観測計画の作成アルゴリズムの開発に加えて、長期観測シミュレータおよびスケジューラが参照する、観測要求データおよび気象データの整備を実施した。

（１－２－１）長期観測計画の策定

（ａ）長期観測シミュレータの開発

長期観測シミュレータとは、予め設定された観測条件に対して実際に観測される場所を算出する数値計算プログラムであり、最適な観測計画を選出するために必須となるツールである。本研究開発では、このツールの開発をＣ++言語（Intel INT1565 コンパイラを使用）を用いて行った。

開発した長期観測シミュレータでは、衛星軌道、太陽高度条件（季節条件）、全球土地被覆図、センサが取得するデータのデータレートや、そのデータを地上に転送するダウンリンクリソース、連続陸域観測分割数、ポインティング観測条件、各種観測対象情報、および被雲に関する情報等を与えると、実際に雲のない画像が取得される場所および太陽高度などの観測条件を算出することが可能である。

（ｂ）長期観測計画の策定方針の検討

以下の観測条件・機器制約条件について整理した。

- ✓ ISS の軌道と HISUI の観測幅
- ✓ HISUI の駆動時間（温度条件）制約
- ✓ HISUI 観測データレート
- ✓ 曝露部・与圧部のデータストレージ容量
- ✓ 転送データレート・ストレージ運搬データ量
- ✓ ポインティングの角度設定・総回数
- ✓ 観測時間制限、観測要求の対象地域・観測条件

そして、それぞれ複数の条件に基づいて長期観測シミュレーションを実施し、ミッション期間を通じた観測結果を推定した。その推定観測結果より最も効率的な条件を判断し、ミッション要求案として設定するとともに、HISUI 機器開発側と機器制約条件について調整した。調整の結果を標準条件として設定した（表１）。

表１　長期観測シミュレーションにおける標準条件

項目	標準条件
ISS の軌道	高度 410 km、離心率 0.001071、軌道傾斜角 51.6419 度、太陽非同期軌道。回帰なし 3 年連続による軌道。高度修正なし。秋分点スタート。J2 永年摂動により軌道面が回転。
シーンサイズ	幅 20km×長さ 30km、観測マージン 5km。
観測時間制限	7.5 分/オービット。
分割数制限	3 分割/オービット。
被雲推定モデル	Terra/MODIS 被雲実績（2009-2011 年）を使用
雲回避	雲回避機能（RGU-B）を使用。
季節条件	季節条件なし。

太陽高度条件（S角）	全陸域観測、優先地域観測：$S \geqq 40^\circ$ 重要観測要求、日本優先観測：$S \geqq 30^\circ$
被雲判定のタイミング	120 日遅延。
ポインティング	直下視のみ
観測ターゲット （優先度順）	日本観測および重要観測（200 箇所） 優先観測域（石油堆積盆地）に対する優先一回観測 全陸域（陸域および浅海域）に対する全球一回観測

標準条件における、長期観測シミュレーションの結果を図７～図１０に示す。

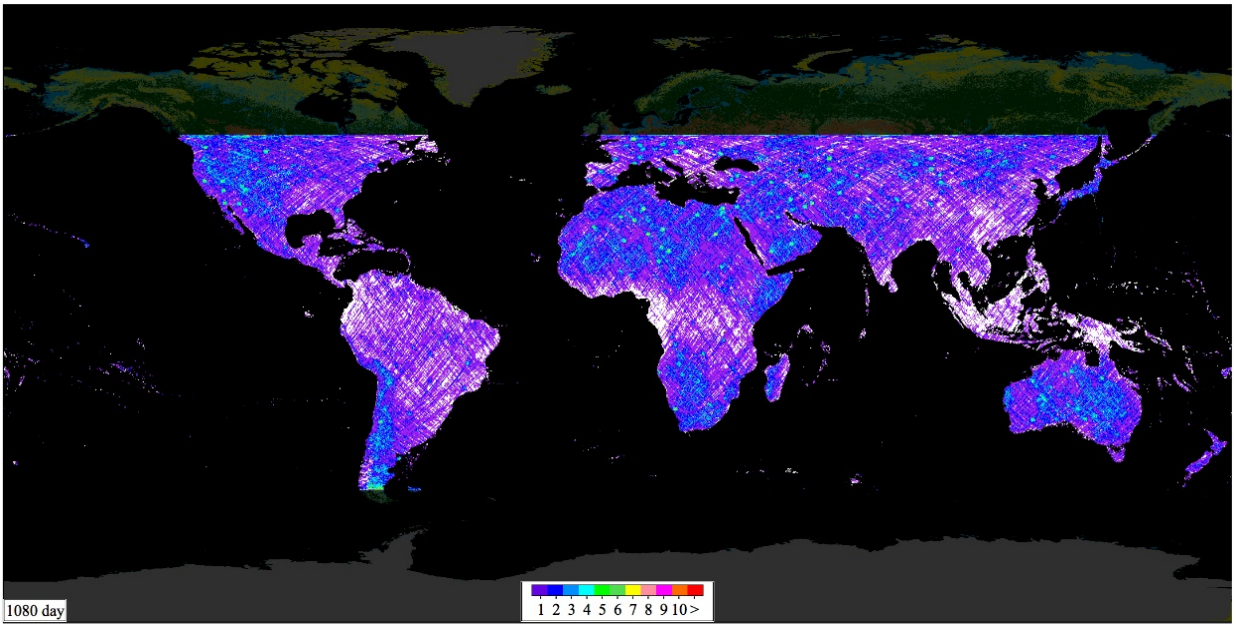


図７　ミッション３年間における観測マップ。白色は被雲により観測に成功しなかった場所。

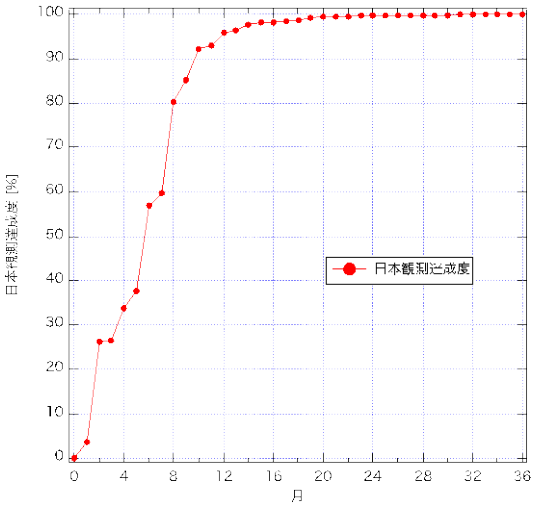


図８　日本観測達成度

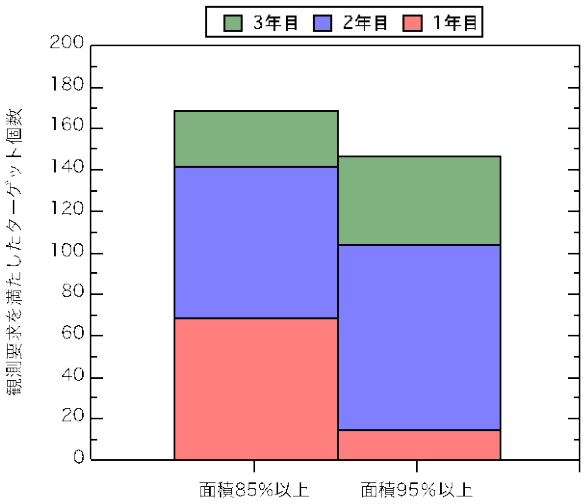


図９　重要観測達成度

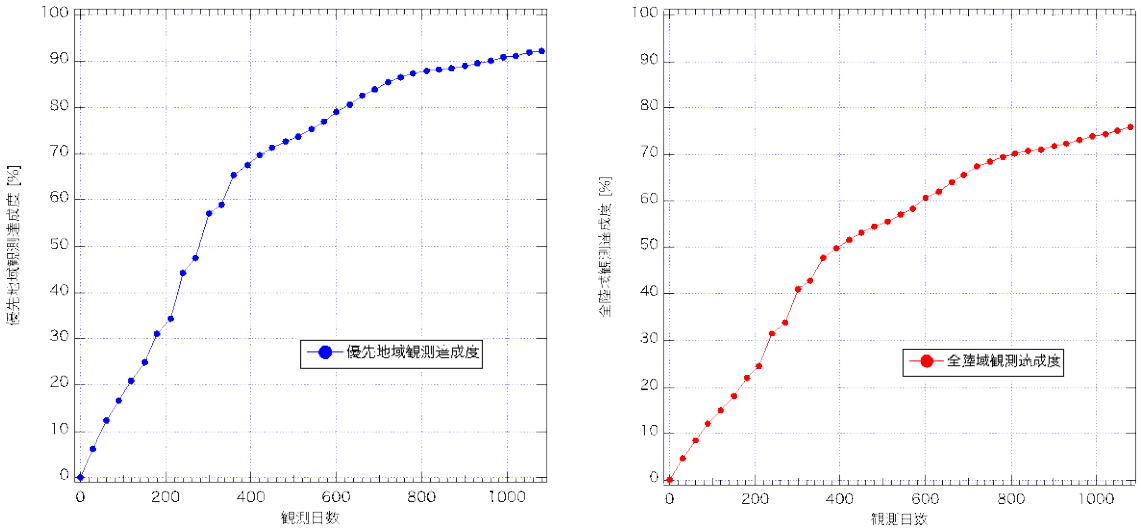


図１０　（左）優先観測域と（右）全陸域の観測達成度

（１－２－２）短期観測計画の策定

まず観測計画の運用方針について検討した。検討結果を図１１に示す。

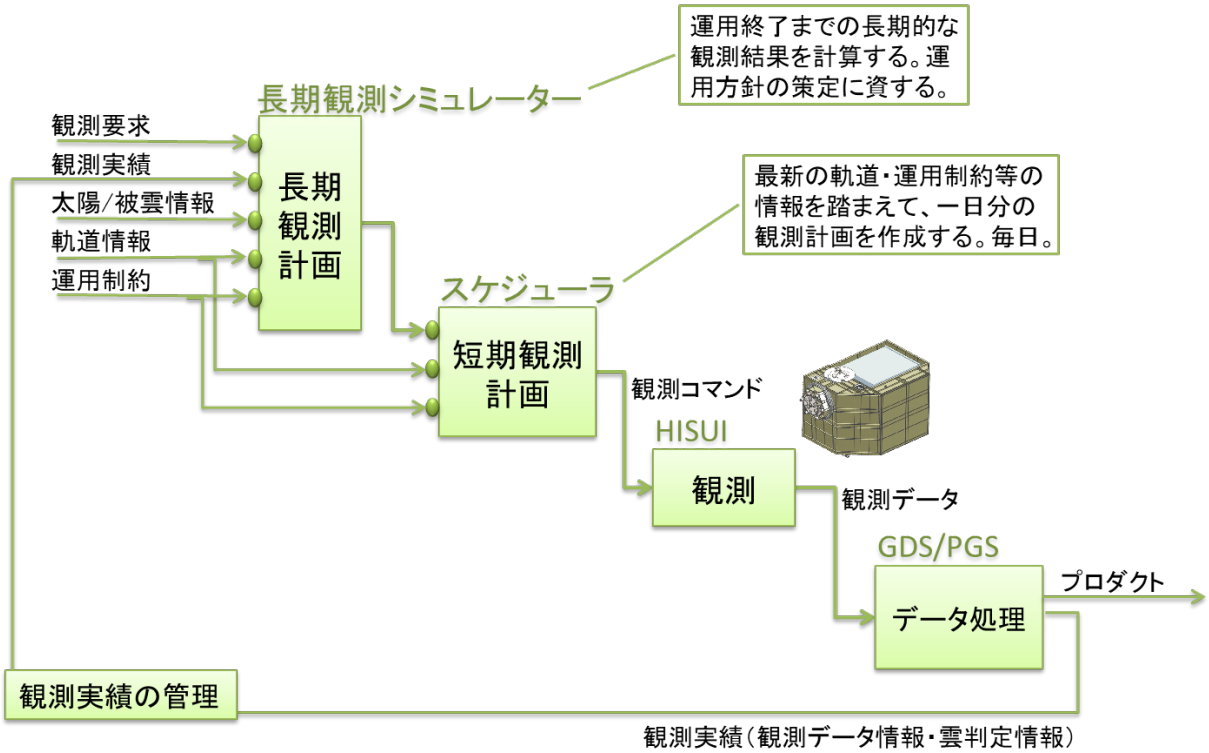


図１１　観測計画の運用方針

次に、アルゴリズムの細部検討とその結果に従いフローチャートを含む ATBD（アルゴリズム基準書）を作成した。複数アルゴリズムを併用し最もスコアが高い観測計画を採用するアプローチが有効であることを示唆する結果が得られたため、4 種類の観測 をベースに HISUI スケジューラアルゴリズムフローチャートを作成した。各プランの特色を以下に示す。

- ✓ アルゴリズム 1：最もスコアの高いシーンから順に抽出
- ✓ アルゴリズム 2：閾値より高いシーンをまとめて抽出
- ✓ アルゴリズム 3：単純移動平均を取り、その後はプラン 2 と同様に抽出
- ✓ アルゴリズム 4：最優先領域、準優先領域、通常の撮影領域の順に抽出

これら開発したスケジューラのアルゴリズムについては､HISUI の ISS への搭載に対応させるとともに、アルゴリズムが実際の運用に準じたものとするため、実装する地上システムとそのアルゴリズムの実装・運用に際しての負荷等について調整した。

（１－２－３）気象データの整備

スケジューラおよび長期観測シミュレーションでは、雲や雪域を避け観測効率を上げるアルゴリズムを採用している。そこで、スケジューラおよび長期観測シミュレーションにおいて参照する雲データおよび雪域データ等について、作成方針を検討し、必要に応じて作成・整備した。

（ａ）被雲データ

全球の毎日の被雲データを以下の通り整備した。非太陽同期軌道に対応するため、午前と午後両方の被雲データを整備した。

- ✓ Terra/MODIS（午前の被雲データ）：2008～2016 年
- ✓ Aqua/MODIS（午後の被雲データ）：2012～2016 年

これら毎日の被雲データは、長期観測シミュレーションにおける被雲実績の推定に利用した。
合わせて、整備したデータについては統計的な処理を行い、全球の各 1km メッシュにおける年間晴天率および月間晴天率の値を算出した。この被雲統計情報はスケジューラの被雲回避のソースとする。

（ｂ）雪域データ

外部データによる雪域判定を実施するための方針を検討した結果､HISUI の運用期間中に利用が可能であること､時間分解能および空間分解能が十分であること､という条件を満たしている MOD10 のサブセットレイヤである「8 Day Snow Cover」を用いることとした。ダウンロードファイルの容量は、1 セットあたり約 91MB(8 日分)であり、運用に支障の無い容量である。

（１－３）ハイパースペクトルセンサの高度利用に係る研究開発

ハイパースペクトルセンサは、観測対象から放射あるいは反射された電磁波を、高い波長分解能で連続して測定することができるセンサである。こうした特徴により、従来から利用されているマルチスペクトルセンサに比べて、より多くの観測対象物の種類を識別したり、より高い精度で観測対象の物理量を推定したりすることが可能となる。一方で、これまでにない新しいタイプのセンサであるため、データの解析方法に関する知見や、データの利用例に関する蓄積が十分とはいえない状況にある。

そこで本個別要素技術（ハイパースペクトルセンサの高度利用に係る研究開発）では、ハイパースペクトルデータの特徴を生かしたデータ処理方法や解析アルゴリズムを使用し、今後衛星データ利用の拡大が見込まれる分野における利用技術の研究開発をすすめるとともに、ユーザによるハイパースペクトルデータの利用を支援するためツールの開発を行った。図１２は、事業開始から終了までの 12 年間に、石油資源、金属資源、森林、防災、農業、環境、海洋の 7 分野で実施した、高度利用に係る研究開発、および支援ツール作成の一覧を表している。
平成 27 年度は「土砂災害の脆弱性評価」「半乾燥域から乾燥域での土壌塩分濃度推定手法」の 2 件、平成 28 年度は鉱石鉱物検出技術の開発および「沿岸海域の水深測定技術の開発」の 2 件、平成 29 年度は「堆積盆鉱物マッピング」の 1 件について、開発を完了させた。

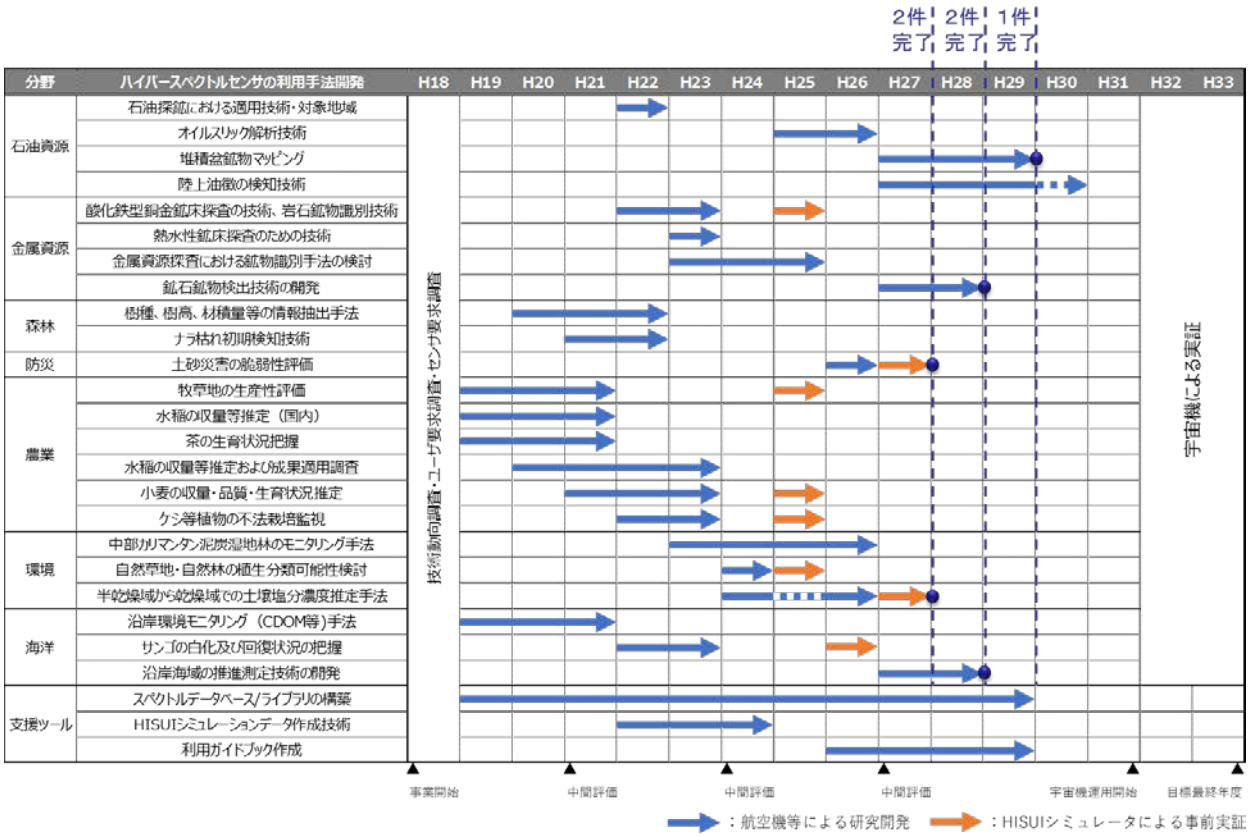


図１２　事業の開始時から終了時までに実施した、ハイパースペクトルセンサの高度利用に係る研究開発７分野と、各分野で実施した研究テーマの年表。支援ツールの整備状況も含む。

（１－３－１）石油資源分野

石油資源分野の研究開発では、石油探査有望地に特徴的にみられる岩石や鉱物、炭化水素の分布、海域にみられる油徴等をスペクトル特徴から抽出する手法を開発することが目的である。本分野で実施した研究開発は、「石油探鉱における適用技術・対象地域」、「オイルスリック解析技術」、「堆積盆鉱物マッピング」、「陸上油徴の検知技術」、「石油探鉱における鉱物識別技術の開発」の５件である。

図１３は、カリフォルニア州サンタバーバラ沖で実施した、海域における油膜（オイルスリック）のマッピング手法を開発した事例である。本事例から、オイルスリックと通常の海表面では、可視近赤外域でオイルスリックの方が高い輝度値を示すことが分かった。さらに、オイルスリックの輝度値パターンは、滲出点近くで放射輝度が相対的に小さく、その後、急激に放射輝度が増大し、滲出点から離れるにつれて放射輝度が漸減することが分かった。この関係を利用することで、オイルスリックの滲出点の推定が可能となった。このようなスペクトルパターンの細かな変化をとらえることは、ハイパースペクトルデータだからできることと言える。

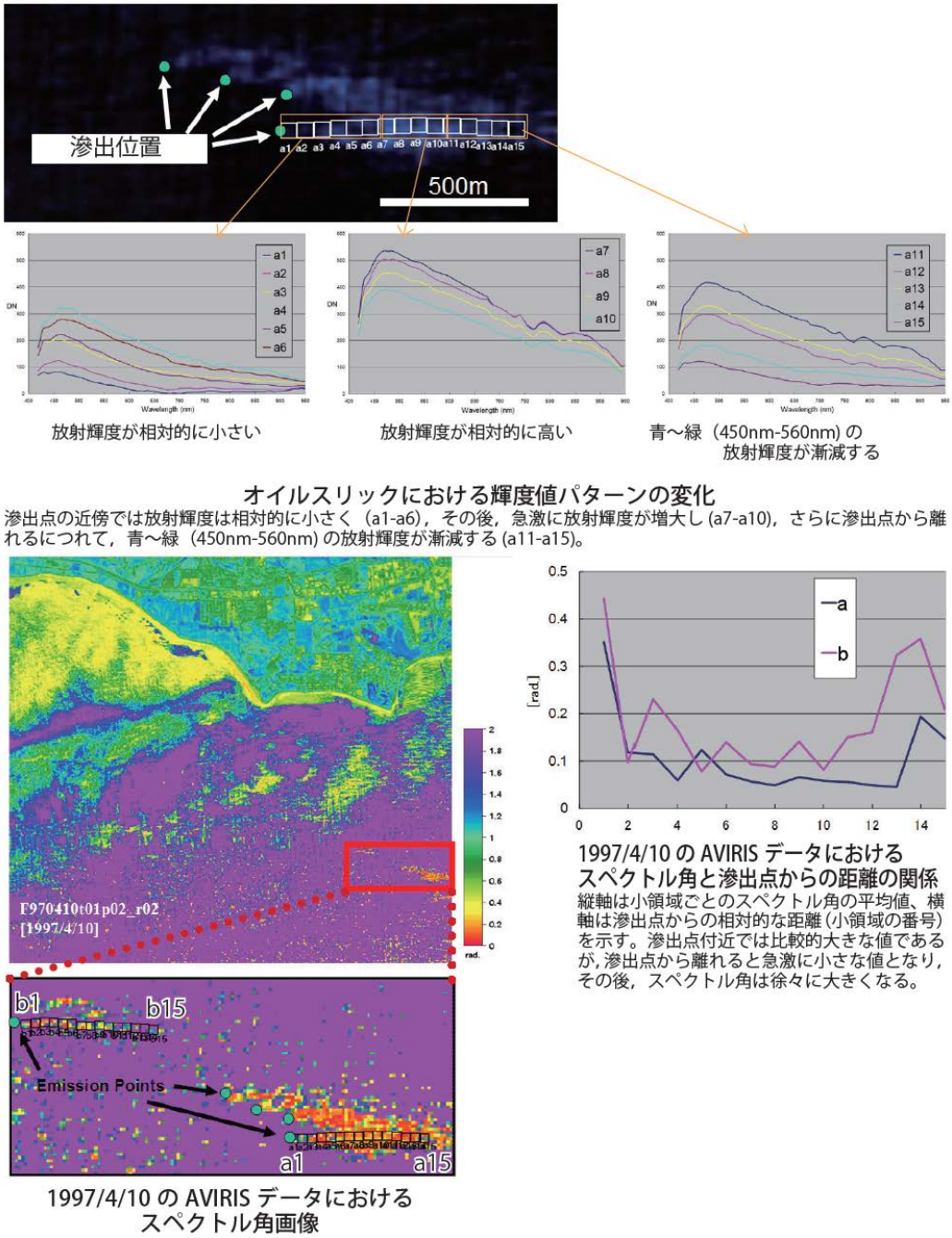


図１３　オイルスリックマッピング結果

（１－３－２）金属資源分野

金属資源分野の研究開発では、鉱床有望地を効率的に見つけ出すため、特定の鉱床タイプで特徴的にみられる岩石・鉱物を、そのスペクトル特徴から抽出する手法を開発することが目的である。本分野で実施した研究開発は、「酸化鉄型銅金鉱床探査の技術」、「岩石鉱物識別技術」、「熱水性鉱床探査のための技術」、「金属資源探査における鉱物識別手法の検討」、「鉱石鉱物検出技術の開発」の５件である。

図１４は、メキシコで実施した鉱物の抽出事例である。本アルゴリズムでは、最初に各ピクセルのスペクトルの吸収ピーク位置がスペクトルライブラリの教師データと同じであるか確認し、次にスペクトルの波形と教師データの波形の相関係数を計算し、相関が高いほど対象の鉱物が存在して

いる可能性が高いと判断する。本手法を用いることで、探鉱に有効と考えられる 10 種の鉱物を抽出することに成功した。抽出された鉱物の組み合わせから、鉱床探査に役立つ変質帯の性状が推定できる。さらに、マルチスペクトルデータでは分からなかった同じ鉱物内の結晶の大きさや密度などの差によって起こる、わずかなスペクトルの違いも認識できることが分かった。

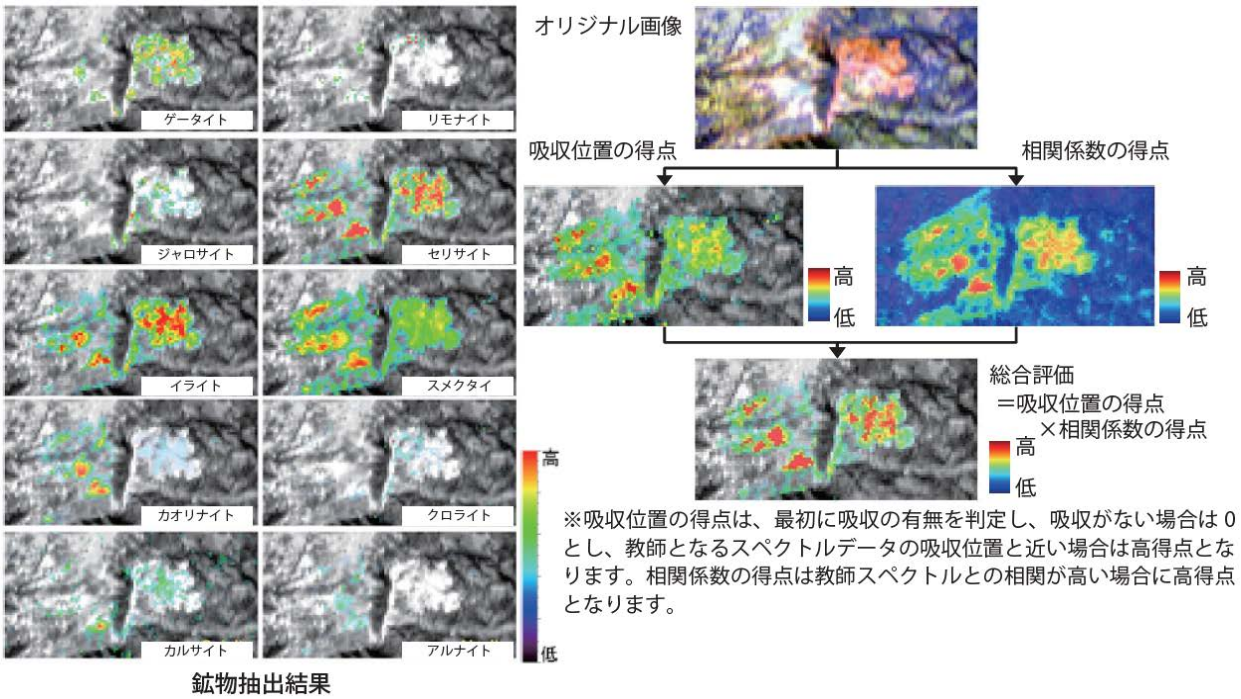


図１４　岩石鉱物分類

（１－３－３）森林分野

森林分野の研究開発では、樹種や林齢、材積量を推定することによって林業における資産管理や気候変動における森林炭素蓄積量の推定などを行うこと、また、スペクトルの僅かな違いから樹木の健康状態や病気の有無などを判断することが目的である。本分野で実施した研究開発は、「樹種、樹高、材積量等の情報抽出手法」、「ナラ枯れ初期検知技術」の 2 件である。

図１５は、東京都八王子市の森林を対象として、様々な樹種の分類図を作成した事例である。本事例では、まずハイパースペクトルデータを用いて既知の樹種の樹冠スペクトルライブラリを作成し、このライブラリを教師データとして未知のピクセルとの類似度を求め、最も類似度が高かったスペクトルをそのピクセルの樹種として分類した。また、樹冠の領域を抽出し、領域内で多数を占める樹種をその樹冠の樹種とする多数決処理も行った。多数決処理により、樹冠にできた影の影響を抑え、樹冠全体を正しく分類することができた。本手法により、12 種の樹木を分類することに成功し、マルチスペクトルセンサよりも多くの種類を精度よく分類できることが分かった。

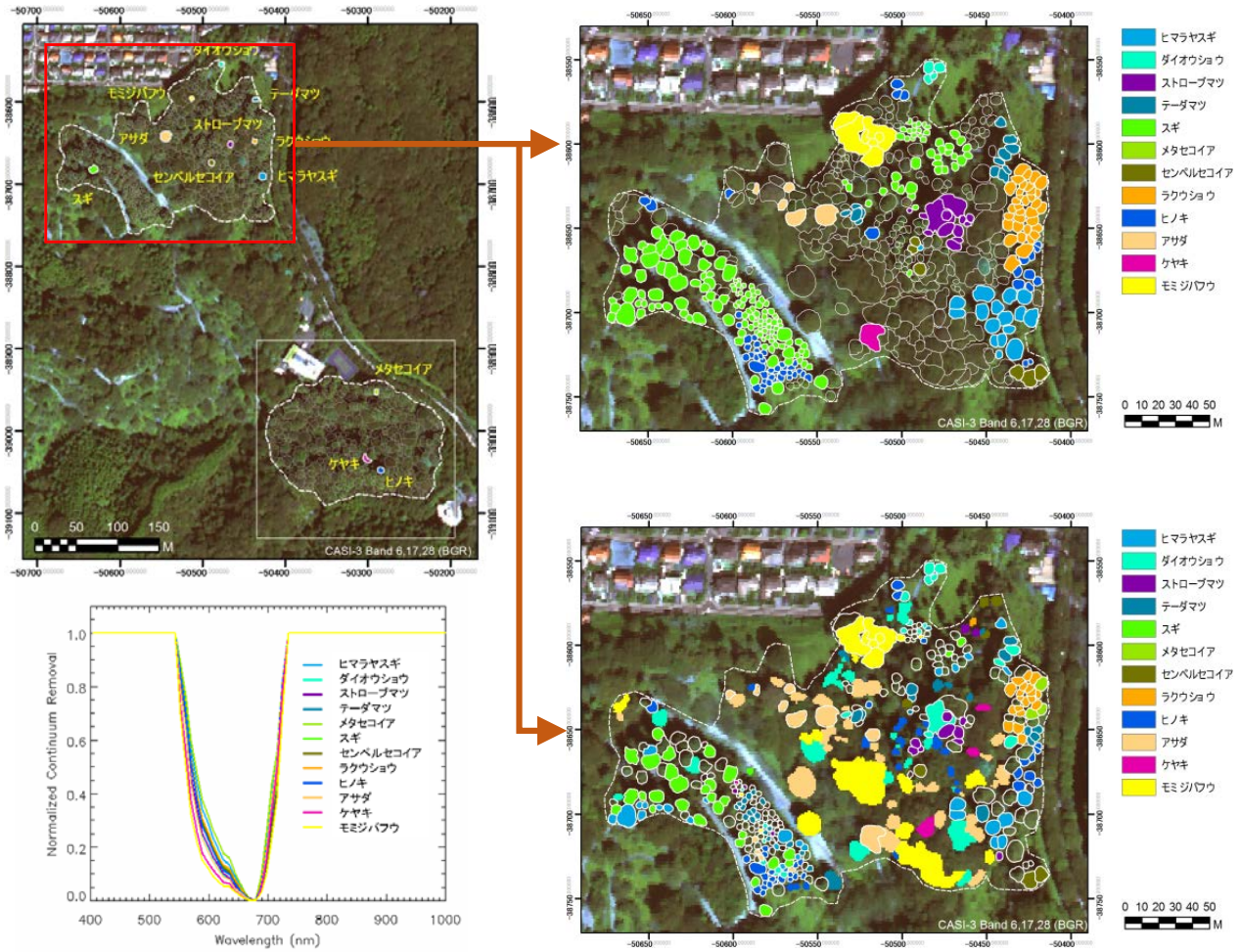
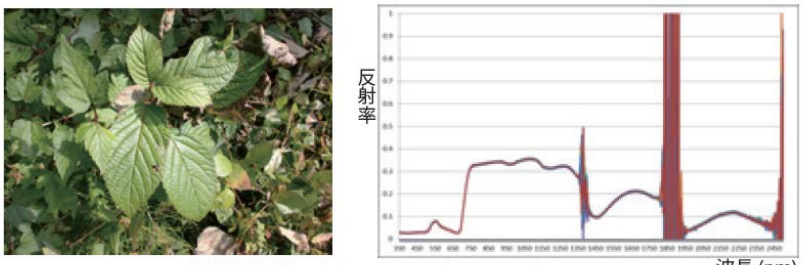


図１５　樹種分類

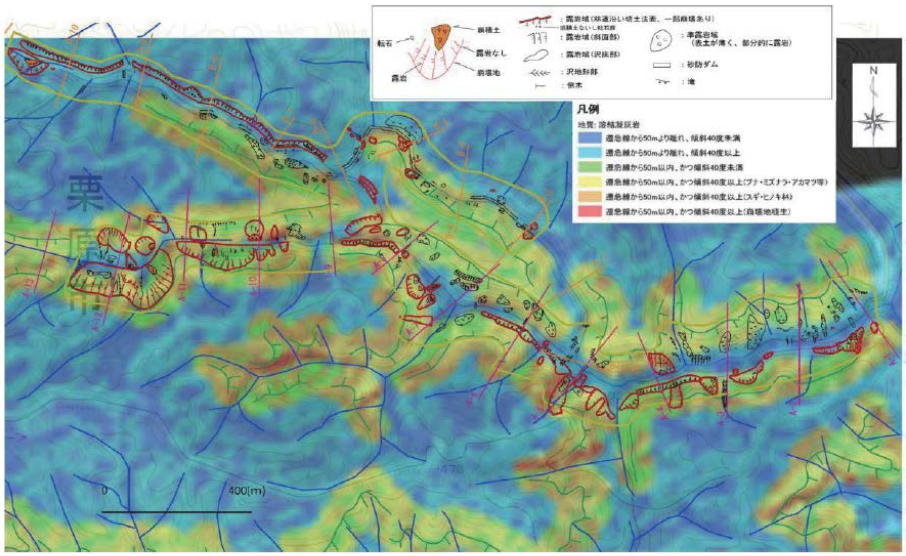
（１－３－４）防災分野

防災分野の研究開発では、従来の土砂災害予測や危険性の評価に植生の情報を加えることで、植生の斜面崩壊抑制効果を考慮した精度の高い災害危険度マップを作成することが目的である。本分野で実施した研究開発は、「土砂災害の脆弱性評価」の１件である。

図１６は、宮城県の大崎市で行った表層崩壊危険度マップの作成事例である。本事例では、現地調査をもとに対象地域の森林タイプを決定し、ハイパースペクトルデータを用いて森林タイプの分類を行った。次に、遷急線と斜面勾配による評価マップを作成し、さらに地質や岩相情報から最も危険と判定された溶結凝灰岩の部分を抽出した。これに、ハイパースペクトルデータの解析で得られた植生情報を加えて、表層崩壊危険度マップを作成した。この表層崩壊危険度マップと現地での崩壊地を比較すると、表層崩壊危険度マップで危険度の高い場所に地形および地質調査で確認された崩壊地が含まれていることが確認できた。本事例による森林タイプの分類精度は約 89%と高い値を示しており、ハイパースペクトルデータが危険度マップの精度に大きく寄与していることが示された。



崩壊地植物（タニウツギ）のスペクトル



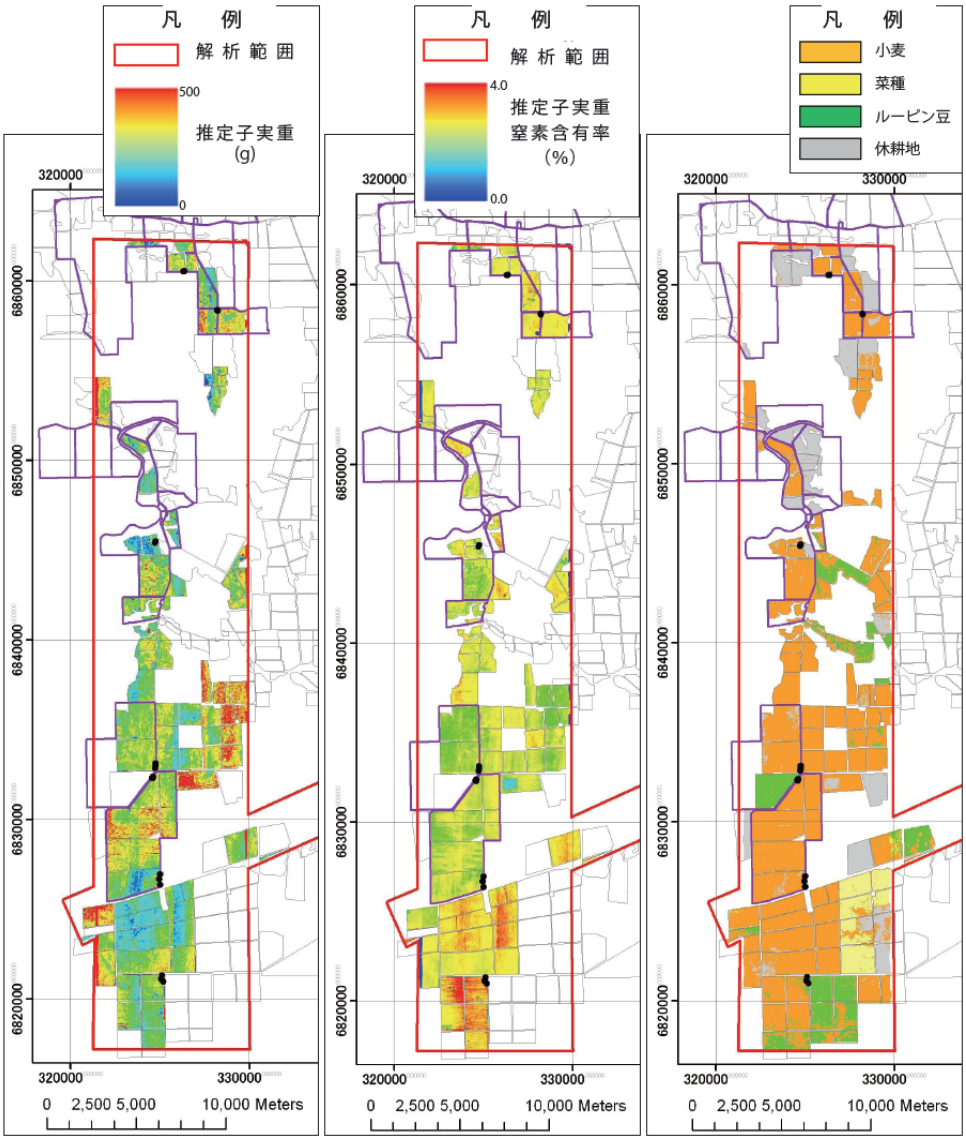
表層崩壊危険度マップと現地の崩壊地の重ね合わせ図

図１６　表層崩壊危険度マップ

（１－３－５）農業分野

農業分野の研究開発では、異なる作物の作付分類、対象とする作物の生産量、品質、生育ステージ、収穫適期等を推定する技術の開発が主な目的である。本分野で実施した研究開発は、「牧草地の生産性評価」、「水稲の収量等推定（国内）」、「茶の生育状況把握」、「水稲の収量等推定（インドネシア）」、「小麦の収量・品質・生育状況推定」、「ケシ等植物の不法栽培監視」、「オイルパーム農園のモニタリング手法の開発」の３件である。

図１７は、オーストラリアの小麦を対象に行った、作付分類、および収量と品質の推定結果の例である。小麦の作付分類は、作物間の分光反射特性の違いから小麦とそれ以外の作物を分類できることが分かった。また、小麦の収量に相当する子実重は iPLS 法と重回帰分析を、品質に相当する子実窒素含有率は重回帰分析を用いることで、実用レベルの推定が可能であることが分かった。これらの解析は、既存の中分解能多頻度衛星（MODIS 等）でも可能だが、ハイパースペクトルデータの短波長赤外域に現れる波長の形状のわずかな違いを利用しているため、解析精度を大幅に向上できることが示された。



子実重推定結果
（推定モデル決定係数：0.66）

子実窒素含有率推定結果
（推定モデル決定係数：0.94）

作付け分類図
（正解率：79.0%）

図１７　小麦のモニタリング

（１－３－６）環境分野

環境分野の研究開発では、気候変動の一因となっている泥炭湿地林の減少と劣化、生物多様性の保全に関係する自然植生の分布、農業生産性の低下の原因となる土壌の塩害化をモニタリングする技術の開発が目的である。本分野で実施した研究開発は、「中部カリマンタン泥炭湿地林のモニタリング手法」、「自然草地・自然林の植生分類可能性検討」、「半乾燥域から乾燥域での土壌塩分濃度推定手法」の３件である。

図１８は、オーストラリアの圃場を対象とした、土壌塩害推定マップの作成事例であ。本事例では、土壌の塩分濃度の増加に伴う反射スペクトルの変化に着目して解析を行った。その結果、2027.3nm と 2008.6nm における反射率の差分値と塩分濃度に相当する電気伝導度（EC1:5）との間に高い相関がみられることが分かった。この関係式を用いて作成した土壌塩害推定マップから、土壌の塩分濃度の分布パターンを正しく抽出できていることを確認した。既存の土壌塩害推定マップでは塩分集積の有無しか分からなかったが、ハイパースペクトルデータを用いた解析では塩分濃度の

大小まで推定できた。

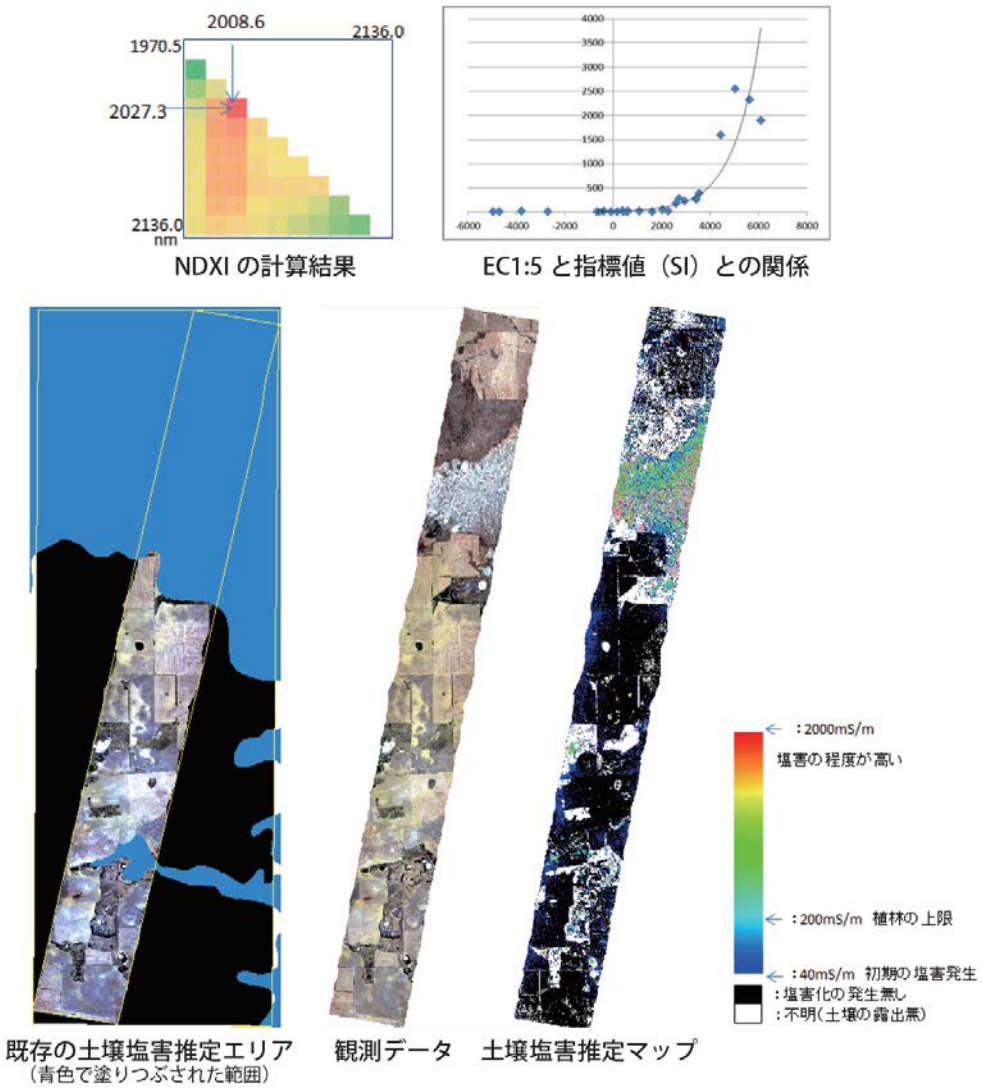


図１８　土壌塩害マップ

（１－３－７）海洋分野

海洋分野の研究開発では、ハイパースペクトルセンサでの観測が期待される沿岸域を対象に、海水の性質そのものを測定することや海面下にある底質の状況や水深を測定することが目的である。本分野で実施した研究開発は、「沿岸環境モニタリング（CDOM 等)手法)、「サンゴの白化及び回復状況の把握」、「沿岸海域の推進測定技術の開発」の３件である。

図１９は、沖縄県阿嘉島の沿岸域を対象に実施した、水深分布図の作成事例である。本事例では、ハイパースペクトルデータから得られる反射率と、放射伝達理論に基づいてシミュレーションした反射率のスペクトルマッチングによって水深を求めた。シミュレーションによる反射率は、Inversion 法と呼ばれる方法の中でも拡張性の高い Semi-analytical モデルを採用した。作成した水深分布図を、市販の水深データから作成した水深分布図と比較したところ、分布傾向は概ね一致していることが確認できた。また、精度検証の結果、阿嘉島では水深 20m(RMSE2.7m)程度まで推定できることが分かった。

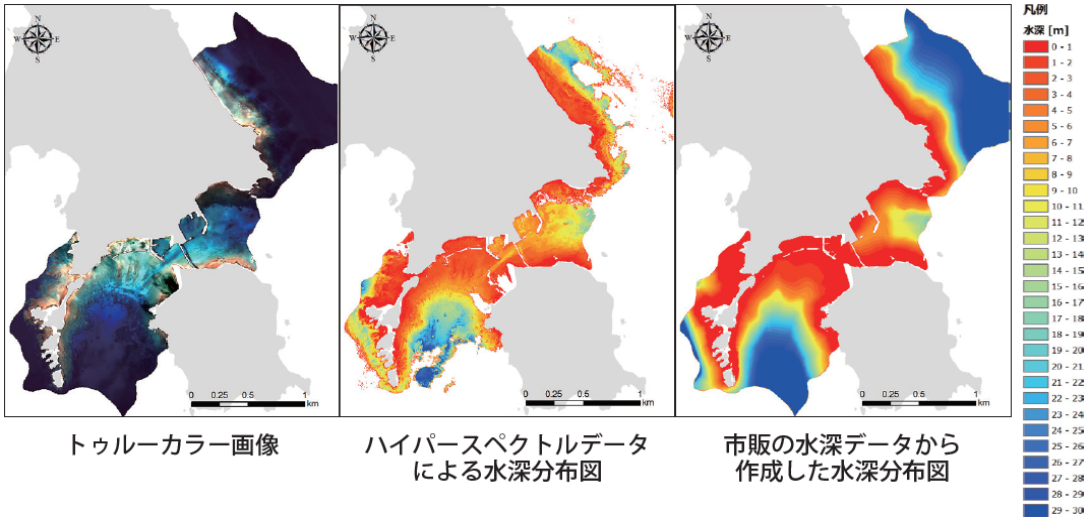


図１９　水深分布図

（１－３－８）支援ツールの整備

支援ツールの整備では、宇宙機に搭載したハイパースペクトルセンサの利用促進に不可欠なツールをユーザに提供することが目的である。本事業では、「HISUI シミュレーションデータ作成ツール」、「スペクトルデータベース/ライブラリ」、「利用ガイドブック」の 3 つの支援ツールを整備した。

HISUI シミュレーションデータ作成は、航空機で取得したハイパースペクトル画像を、宇宙機に搭載するハイパースペクトルセンサと同じ波長特性や空間分解能を持つ画像に変換するための技術を活用している。変換した画像は、宇宙機による実証試験に先立ち、本事業で実施した研究開発の成果を事前に実証するために使用した。

スペクトルデータベース/ライブラリは、宇宙機に搭載したハイパースペクトルセンサで取得したデータが、地上の何の物質のスペクトルであるかを推測するために必要となる。本事業では、取得したハイパースペクトルデータをライブラリとして整理するとともに、Web ベースでこれらのスペクトルを検索可能なシステムを構築した。

利用ガイドブックは、ユーザがハイパースペクトルデータを利用する際に必要とされる知見、経験、情報等を提供するために作成した。利用ガイドブックの内容は、ハイパースペクトルデータの特徴や本事業で蓄積してきた利用事例の他に、ハイパースペクトルデータの入手方法や前処理の方法、利用可能なソフトウェアの情報などを網羅している。本ガイドブックを潜在的ユーザに配布することによってハイパースペクトルデータの利用を促進し、実用化や事業化に繋がる。

（２）事業アウトプット

事業アウトプット指標１		
HISUI データの利用実証を実施し、そして実用化を推進するためには、HISUI の従来のセンサには無い光学系歪み等に対して、適切に校正を施し、高品質な HISUI データを提供する必要がある。このため、HISUI データを想定した、校正・補正処理手法を開発する。		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時（22 年度）	計画：校正・補正処理手法の検討を開始する。	実績：校正・補正処理手法の検討を開始した。
中間評価時（26 年度）	計画：打上前室内校正、代替校正、相互校正のそれぞれの既存技術評価を行い、各校正の改良技術を開発する。補正処理のためのアルゴリズムを開発する。	実績：打上前室内校正、代替校正、相互校正のそれぞれの既存技術評価を行い、各校正の改良技術を開発した。補正処理のためのアルゴリズムを開発した。
終了時評価時（29 年度）	計画：HISUI が搭載される衛星を考慮して、各校正手法および補正処理のためのアルゴリズムを開発する。	実績：ISS 搭載の HISUI を前提として、各校正手法および補正処理のためのアルゴリズムを開発した。
事業目的達成時	計画：データの高度利用を実証するために、HISUI データを校正し高品質なデータを提供する。	－

事業アウトプット指標２		
HISUI データの利用実証においては、主目的である石油資源探査の他、多様な分野への応用可能性を利用実証するため、各分野での利用実証に適切な地域の観測データを取得することが必要である。また利用実証後の実利用を推進するためには、可能な限り多くの観測データを取得することが必要である。これらを実現するために、衛星の地球周回軌道やダウンリンク・レート等の観測制約を踏まえつつ、観測効率の最大化を実現する観測計画策定手法を開発する。		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時（22 年度）	計画：長期観測計画および短期観測計画の検討を開始する。	実績：長期観測計画および短期観測計画の検討を開始した。
中間評価時（26 年度）	計画：長期観測計画の最適化に必要な長期観測シミュレーションソフトウェアを完成する。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。 短期観測計画の作成アルゴリズムを開発する。	実績：長期観測シミュレーションソフトウェアを完成させた。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した。 短期観測計画の作成アルゴリズムを開発した。

終了時評価時（29 年度）	計画：HISUI が搭載される衛星を考慮して、長期観測計画策定方針の策定および短期観測計画の作成アルゴリズムの開発を実施する。	実績：HISUI が ISS に搭載されることを前提とした上で、その仕様に踏まえた長期観測計画策定方針の策定および短期観測計画の作成アルゴリズムの開発を実施した。
事業目的達成時	計画：データの高度利用を実証するために、HISUI の長期観測計画を達成する。	－

事業アウトプット指標３
①事業アウトカムで挙げた７分野における利用技術開発、およびハイパースペクトルセンサ・データの利用を支援するツールの開発を実施する。 ②研究開発内容にかかる論文および学会における発表を実施する。 ７分野における研究テーマは、事業開始時に行ったハイパースペクトルセンサに関する技術動向調査、ユーザ要求調査、およびセンサ要求調査の結果を踏まえて設定した。また、事業開始後も調査を継続して行い、社会情勢の変化や技術の進歩に合わせて新規の研究テーマを設定した。これらの研究テーマは、最終的に事業終了時のアウトカムとして、宇宙機に搭載されたハイパースペクトルセンサで実証する。以下は、７分野のそれぞれで実施した研究テーマとその件数である。 （１－３－１）石油資源分野（4 件） 「石油探鉱における適用技術・対象地域」、「オイルスリック解析技術」、「堆積盆鉱物マッピング」、「陸上油徴の検知技術」 （１－３－２）金属資源分野（4 件） 「酸化鉄型銅金鉱床探査の技術・岩石鉱物識別技術」、「熱水性鉱床探査のための技術」、「金属資源探査における鉱物識別手法の検討」、「鉱石鉱物検出技術の開発」 （１－３－３）森林分野（2 件） 「樹種、樹高、材積量等の情報抽出手法」、「ナラ枯れ初期検知技術」 （１－３－４）防災分野（1 件） 「土砂災害の脆弱性評価」 （１－３－５）農業分野（6 件） 「牧草地の生産性評価」、「水稲の収量等推定」、「茶の生育状況把握」、「水稲の収量等推定および成果適用調査」、「小麦の収量・品質・生育状況推定」、「ケシ等植物の不法栽培監視」 （１－３－６）環境分野（3 件） 「中部カリマンタン泥炭湿地林のモニタリング手法」、「自然草地・自然林の植生分類可能性検討」、「半乾燥域から乾燥域での土壌塩分濃度推定手法」 （１－３－７）海洋分野（3 件）

「沿岸環境モニタリング（CDOM 等)手法)、「サンゴの白化及び回復状況の把握」、「沿岸海域の推進測定技術の開発」 （１－３－８）支援ツールの整備（3 件） 「HISUI シミュレーションデータ作成技術」、「スペクトルデータベース/ライブラリの構築」、「利用ガイドブックの作成」		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時（18 年度）	計画：技術動向調査、ユーザ要求調査、センサ要求調査を踏まえて、高度利用に係る研究開発を開始する。	実績：なし
中間評価時（21 年度）	計画：高度利用に係る研究開発、および支援ツールの整備を開始する。	実績：森林分野で 1 件、農業分野で 4 件、海洋分野で 1 件の研究開発を開始した。また、支援ツールであるスペクトルデータベース/ライブラリの構築を開始した。
中間評価時（24 年度）	計画：高度利用に係る研究開発、および支援ツールの整備を継続して行う。	実績：石油資源分野の 1 件、森林分野の 2 件､農業分野の 2 件、海洋分野の 1 件の研究開発を完了した。また、支援ツールであるスペクトルデータベース/ライブラリの構築を継続して行うとともに、HISUI シミュレーションデータ作成技術の開発を開始した。
中間評価時（27 年度）	計画：高度利用に係る研究開発、および支援ツールの整備を継続して行う。また、HISUI シミュレーションデータを用いた事前実証を行う。	実績：石油資源分野で 1 件、金属資源分野で 3 件、農業分野で 4 件、環境分野で 2 件、海洋分野で 1 件の研究開発を完了した。さらに、既に完了している 7 つのテーマに対して HISUI シミュレーションデータを用いた事前実証を行った。また、支援ツールであるスペクトルデータベース/ライブラリの構築を継続して行うとともに、利用ガイドブックの作成を開始した。

終了時評価時（29 年度）	計画：高度利用に係る研究開発、および支援ツールの整備を完了する。	実績：石油資源分野で 1 件、金属資源分野で 1 件、防災分野で 1 件、環境分野で 1 件、海洋分野で 1 件の研究開発を完了した。また、支援ツールであるスペクトルデータベース/ライブラリの構築と利用ガイドブックの作成を完了した。
事業目的達成時	計画：高度利用に係る研究開発の宇宙実証を完了する。	－

＜共通指標実績＞

論文数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	国際標準への寄与
249	2	0	0

３．当省（国）が実施することの必要性

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、エネルギー基本計画に記載されている「2030 年までに自主開発比率を 40%以上にする」という目標に貢献するものであり、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。

平成 27 年 1 月に改訂された、宇宙基本計画において「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」と記載されており、政策目的の達成手段として必要かつ適切な事業である。

４．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までのロードマップを図２０に示す。事業開始から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、食糧安全保障への貢献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。

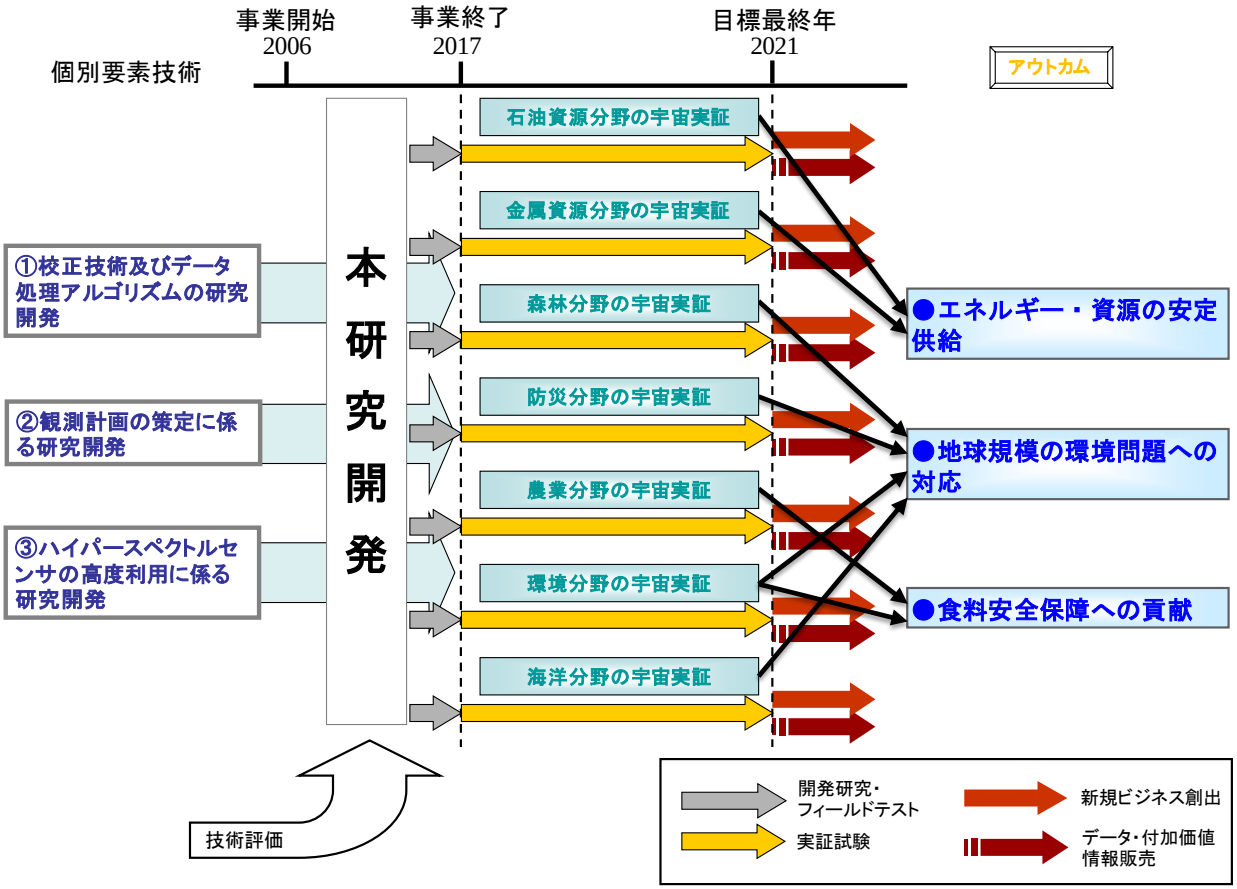
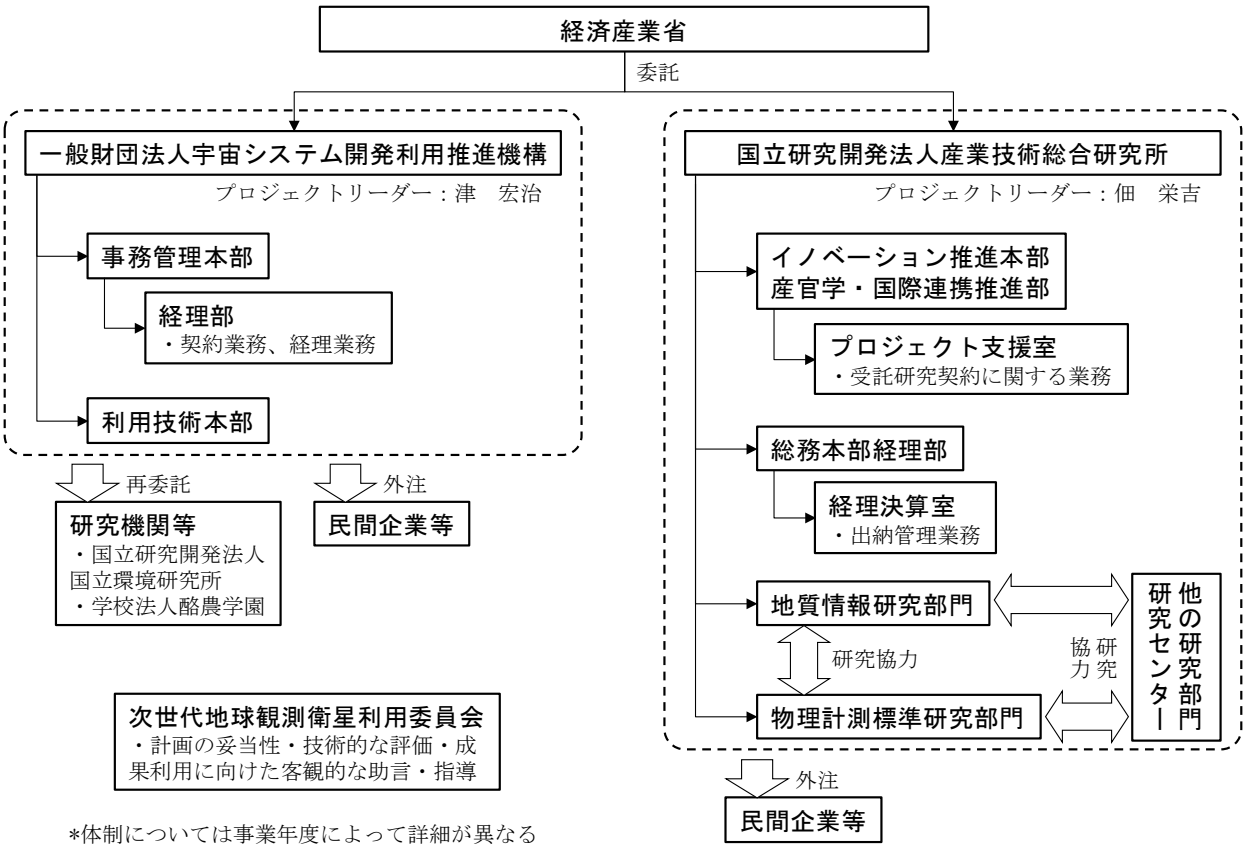


図２０　事業開始から目標最終年度、さらにその後のビジネス化に向けたロードマップ

５．研究開発の実施・マネジメント体制等

研究開発の体制について図２１に示す。もともと本事業では、ハイパースペクトルセンサを搭載する宇宙機に単独衛星を想定していたが、社会情勢の変化により ISS に搭載されることになった。そのため、①校正技術及びデータ処理アルゴリズムの研究開発、②観測計画の策定に係る研究開発、③ハイパースペクトルセンサ高度利用に係る研究開発の 3 つの個別要素技術において、衛星搭載を前提に開発した技術を ISS 搭載でも適用可能なように改修する必要が生じ、効率的・効果的に本事業の目標達成を目指すには、既存の宇宙機搭載センサにおいて実績と能力を有している実施機関が研究開発を担うことがコストパフォーマンス的にもふさわしい。こうした理由から、①校正技術及びデータ処理アリルゴリスムの研究開発を産業技術総合研究所が、②観測計画の策定に係る研究開発と③ハイパースペクトルセンサ高度利用に係る研究開発を宇宙システム開発利用推進機構が継続して実施する体制とした。また、高度利用の潜在的なユーザとなる研究機関等や民間企業等に研究開発を外注することで、将来的なハイパースペクトルデータによるリモートセンシングの実利用を推進するようにした。それぞれの機関における研究開発体制を以下に示す。



*体制については事業年度によって詳細が異なる

図２１　研究開発の実施・マネジメント体制

６．費用対効果

アメリカの地球観測衛星 Landsat の経済効果分析によると、その経済効果は米国内で$1.70billion、国際的に$400million、合計$2.19billion と評価されている（表２）。本事業で実利用を想定しているハイパースペクトルセンサは、Landsat よりも高機能であることから、これ以上の経済効果が期待される。

表２　アメリカの地球観測衛星 Landsat の経済効果分析。利用分野別の経費の節約効果

利用分野	データ利用による節約効果
1. USDA Risk Management Agency	over $100 million
2. U.S. Government Mapping	over $100 million
3. Monitoring Consumptive Agricultural Water Use	$20 - $80 million
4. Monitoring Global Security	$70 million
5. Landsat Support for Fire Management	$28 - $30 million
6. Forest Fragmentation Detection	over $5 million
7. Forest Change Detection	over $5 million
8. World Agriculture Supply and Demand Estimates	over $3 - $5 million
9. Vineyard Management and Water Conservation	$3-5 million/year
10. Flood Mitigation Mapping	over $4.5 million
11. National Agricultural Commodities Mapping	over $4 million
12. Waterfowl Habitat Mapping and Monitoring	$1.9 million/year
13. Coastal Change Analysis Program	$1.5 million
14. Forest Health Monitoring	$1.25 million
15. NGA Global Shoreline	over $90 million (one time)
16. Wildfire Risk Assessment	$25-50 million (one time)

引用資料：National Geospatial Advisory Committee - Landsat Advisory Group1
The Value Proposition for Landsat Applications - 2014 Update
https://www.fgdc.gov/ngac/meetings/december-2014/ngac-landsat-economic-value-paper-2014-update.pdf

また、BCC Research による地球観測衛星の世界市場規模（2019 年予測）の金額に対して、ハイパースペクトルデータの市場が 20%で且つ日本はハイパースペクトルの市場の 10%を占めると想定して金額を計算した場合、森林分野では 1 億円、防災分野では 5 億円、農業分野では 13 億千、環境分野では 10 億円、海洋分野では 4 億円と試算される。石油資源分野や金属資源分野については、ハイパースペクトルデータを利用することによって日本の資源開発の総投資額が 1%削減されるとして市場規模を想定した場合、それぞれ 15 億円と 6 億円とに試算される。