

「食糧-環境分野での広範な利用を支える地球観測衛星群による生態系監視基盤技術の創出」の成果について

研究 開発 体制	主管研究機関	独立行政法人農業環境技術研究所	研究 開発 期間	平成24年度～ 平成25年度 (2年間)	研究 開発 規模	予算総額（契約額） 26百万円		
	共同研究機関	(株)NTTデータ				1年目	2年目	3年目
						8百万円	17百万円	

研究開発の背景・全体目標

地球人口は70億人を超えて増加を続けている。温暖化影響は顕在化しつつあり、土地資源や生物多様性の劣化、食糧市場のグローバル化と価格の乱高下など、全球的な農業・環境問題が緊迫性を帯びている。これらの問題に適確に対処するためには、産地営農～政府～国際社会のいずれのレベルの意思決定においても、陸上生態系の実態に関する広域的かつ科学的に信頼性のある情報が不可欠となっている。このような情報を得る上で、地球観測衛星によるリモートセンシングはきわめて重要な役割を担っている。

すでに多様な波長・時間・空間分解能をもつ多くの衛星が地上を観測しているが、上記のような広範な食糧-環境分野に衛星利用を拡大する上で、①衛星データの信頼性・一貫性の確保、②衛星データをそれ以外の多様な生態系空間情報と一体的に使用できる利用環境の整備、③衛星によって得られる信号を利用場面で意味のある有用情報に変換する正確なアルゴリズムの開発と標準化・体系化、の3つが重要な共通技術課題となっている。

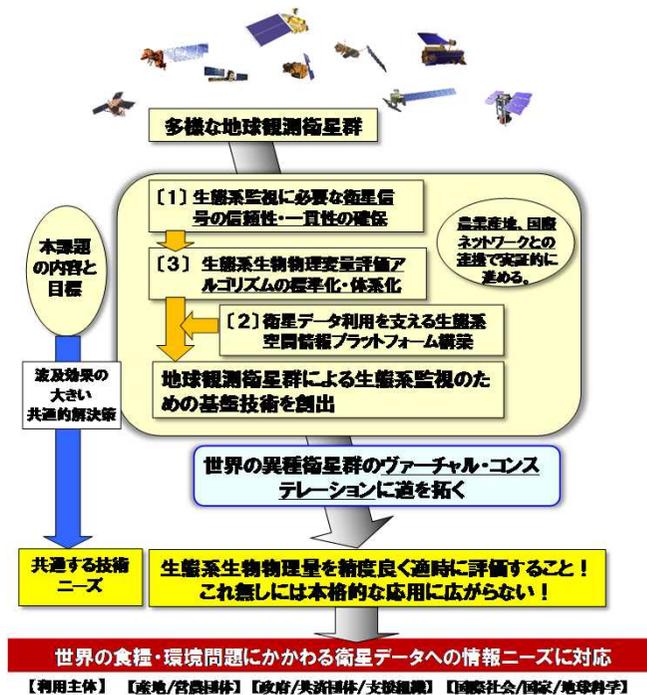
そこで本研究課題は、食糧-環境分野の広範な問題解決で求められる信頼性の高い生態系情報を地球観測衛星群によって精度よく安定的に提供する上で欠かせない上記の3つの問題の解消に向け、リモートセンシングによる生態系動態監視のための基盤技術を構築することを目標とする。

研究開発の全体概要と期待される効果

本研究課題は、異種多様な地球観測衛星群による生態系動態監視のための共通基盤技術の創出することをめざし、以下の3つの研究を実施する。

- ① 地球観測衛星データを信頼性が高く一貫性のある物理量に変換する上で必要な、地上観測と衛星を連携した広域的校正技術を開発する。
- ② 衛星データを他の広範な生態系空間情報とともに集積・分析・提供するための空間情報プラットフォームをアジアスケールで構築する。
- ③ 異種多様な地球観測衛星群による陸上生態系の生物物理特性の評価アルゴリズムの開発、標準化と統合的利用体系の創出を行う。

以上によって創出される基盤技術は、多くの陸域応用で共通的に待望されている3つの課題：①衛星データの信頼性・一貫性の確保、②衛星データをそれ以外の多様な生態系空間情報と一体的に使用できる利用環境の整備、③衛星によって得られる信号を陸上生態系の生物物理変量（付加価値情報）に変換する正確なアルゴリズムの整備、に 대응するものである。すなわち、衛星センサから得られる生態系情報の一貫性・信頼性を向上させ、広範な陸域応用における衛星データの利用機会を拡大する上で重要な役割を果たすものとなる。また、異種多様な地球観測衛星群の仮想的協働（ヴァーチャル・コンステレーション）に道を拓き、生態系監視の実質的な時間・空間解像度と情報の品質を向上させることによって、国内外の食糧-環境分野における宇宙利用の拡大と問題解決に、将来にわたって貢献することが期待される。

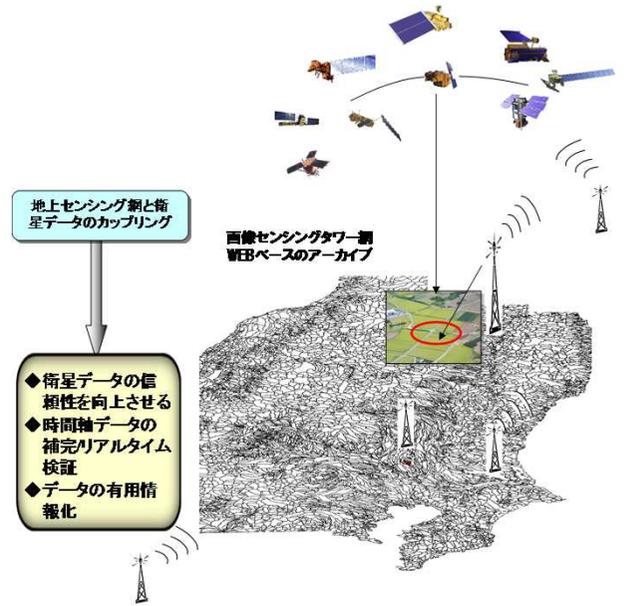


① 「陸上生態系応用に向けた衛星データの広域リアルタイム校正システムの構築」

達成目標と実施内容

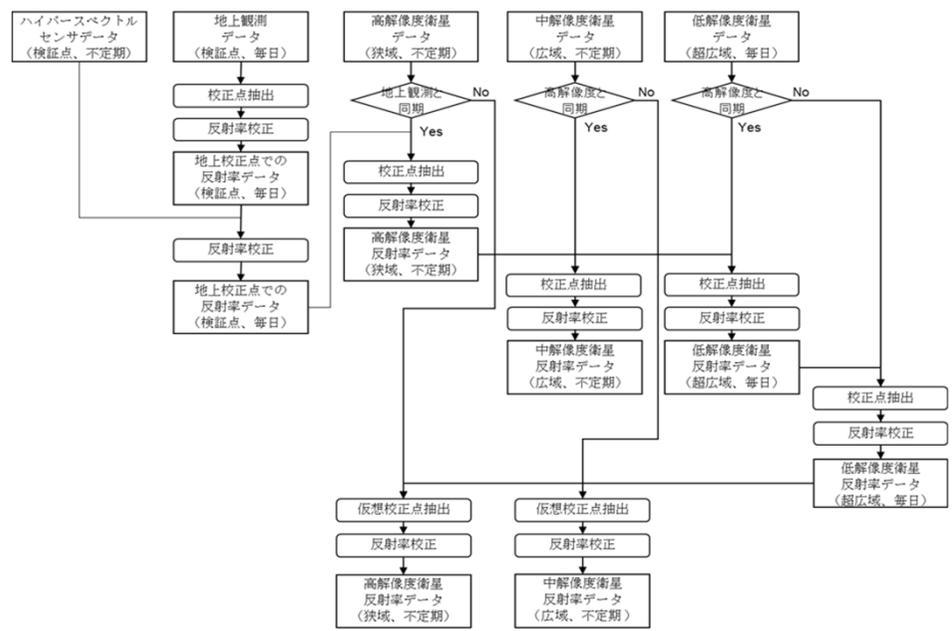
本課題は、不定期・随時に得られる異種仕様（範囲・波長・頻度）の衛星データをリアルタイムで校正する手法の構築に向け、地上タワーに設置した画像計測システムによって連続・自動的に観測される分光輝度データに基づいた校正手法ならびにそれらを相互に連携させたマルチスケール（空間解像度×観測頻度）の校正技術の構築をめざす。

そのため、地上校正ネットワークを拡張するため高解像度マルチスペクトル画像センサを製作し、国内の複数サイト（青森県黒石市、茨城県つくば市および常総市、熊本県合志市）の地上タワー高所に設置して、地表面反射率画像を毎日、連続・自動・遠隔・一元的に収集・整備する先駆的なシステムモデルを確立した。また、異種衛星センサ（WorldView-2, ASTER, MODIS等）による画像データ、ならびに地上におけるハイパースペクトル計測データも併せて取得し解析した。これらに基づいて、波長特性や空間解像度、観測頻度の異なる多様な衛星データによって取得される物理信号の変換精度を検証・向上させるための校正処理技術を確立した。以上のシステム、技術、ノウハウを統合することによって、地上観測ネットワークと異種衛星を仮想的に連携させマルチスケールの校正技術体系の基本モデルを構築した。日本の複数地域に地上校正ネットワークを効率的に配置して、体系化された校正技術に基づき処理を行えば、異種衛星データを定量的な尺度である物理量（反射率）へ精度よく校正可能である。



主な研究開発成果

- ① 広域的な地上校正ネットワークに適した小型・自律電源方式の6バンドマルチスペクトル画像計測システムを確立した。本システムは耐候性に優れ長期連続の定点観測に好適である。Web経由の管理により画像データをリアルタイムでデータ集約サーバに電送しアーカイブすることが可能である。
- ② 不定期・随時に得られる異種仕様（範囲・波長・頻度）の衛星データをリアルタイムで校正する手法の構築に向け、地上タワーに設置した画像計測システムによって連続・自動的に観測される分光輝度データに基づいた校正手法ならびに、それらを相互に連携させたマルチスケール（空間解像度×観測頻度）の校正技術を開発した。
- ③ 広域地上校正ネットワークと異種衛星を仮想的に連携させた、スケール網羅的な校正技術を体系化した。具体的には、地上タワー及び建物に設置した地上観測センサを活用して、高解像度衛星データ、中解像度衛星データ、低解像度衛星データの4種類のデータに対して、「空間的制約（範囲）および時間的制約（月日）」に依存せずに、校正可能な校正システムである。
- ④ 日本の複数地域に地上校正ネットワークを効率的に配置して、体系化された校正技術に基づき処理を行えば、異種衛星データを精度よく、定量的な尺度である物理量（反射率）へ校正可能であることが実験的に検証された。衛星リモートセンシングの陸上生態系への応用においては更なる定量的な利用が求められており、本広域リアルタイム校正システムは衛星利用促進に向けた先駆的成果である。



マルチスケール衛星データ校正システムの処理体系図

② 「衛星データと協働するアジアスケールの生態系空間情報プラットフォーム構築」

達成目標と実施内容

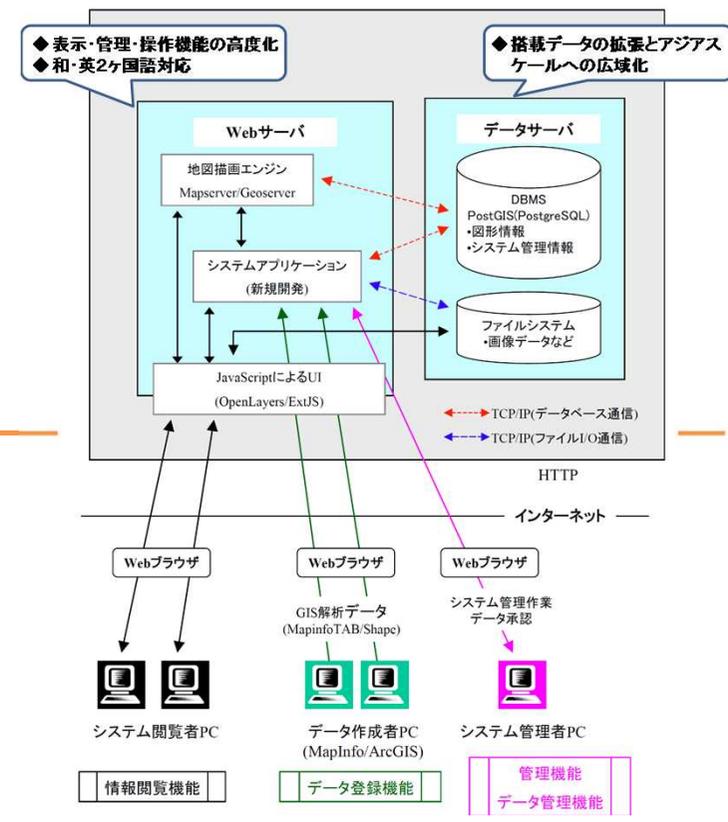
本課題は、地球観測衛星群からのデータを多くの利用ニーズに高度利用していく上で不可欠な、衛星以外の多様な生態系空間情報を総合的に集積・分析・共有するための地図サーバを機軸とする空間情報システムを構築する。さらに、それに多様な生態系空間データをアジアスケールで集積・整備し、Webベースの生態系空間情報プラットフォームを構築する。

そのため、生態系に関わる多様な空間解像度の異なる空間データを一元的に収集、管理、共有するための地図サーバと機軸とする空間情報システムを構築し、その機能を改良・拡張した。また、衛星データの解析結果を含む独自データならびに地形、気候、土壌データ等をアジアスケールで収集・処理し、同システムに搭載した。

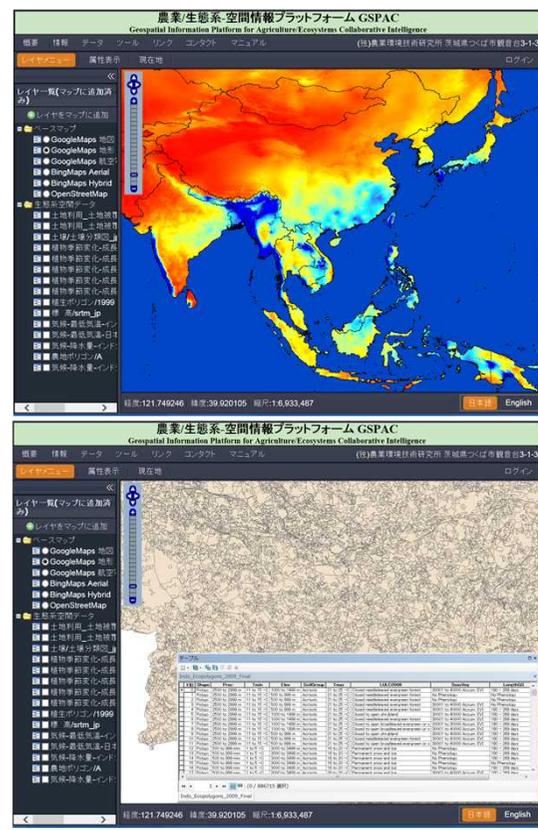
主な研究開発成果

① 土壌・気象・地形・圃場条件等の基本的な空間データを衛星画像データ等とともに体系的に収集・蓄積し、処理・解析・提供する機能と構造を有する農業・生態系空間情報プラットフォームGSPACを構築した。本システムはオープンソースのエンジンをベースに開発しており、管理者が一定の自律性をもってシステムの持続的な改良と拡張を行うことが可能な柔軟性のあるユーザインターフェイスを搭載しており、搭載済みのデータセットの広範なユーザに向けた表示方法の改良や、新たに搭載するデータセットの整備と管理を体系的に行うことが可能である。

② アジアのほぼ全域（南北：インドネシア～モンゴル、東西：日本～カザフスタン）を対象として、気候（毎月の最高・最低・平均気温、降水量）、土壌分類図（FAO）、土地利用・土地被覆図（2001, 2005, 2009）、MODISデータによる生物季節データ（成長開始期、成長盛期、成長停止期、成長期間、最大成長量）、標高データ、等の高精度生態系空間データの整備を進めGSPACに搭載した。本システムは、世界的に使用されている主要なデータフォーマットをデータ変換すること無く直に搭載することが可能である広範なユーザにとっての利便性が高い。今後とも、農地、林地、草地、都市域、河川、湖沼、沿岸域等の多様な生態系空間データを順次持続的に搭載する予定である。



農業・生態系空間情報プラットフォームGSPACの構造



農業・生態系空間情報プラットフォームGSPAC搭載データの表示例

③ 「衛星データによる生態系生物物理量評価のための新規アルゴリズム体系の創出」

達成目標と実施内容

地球観測衛星群のヴァーチャル・コンステレーションの基盤として、衛星データを陸上生態系の基本的な生物物理特性に変換するための新規アルゴリズムを開発するとともに、異種衛星データの協働的・補完的な利用アルゴリズム体系の構築をめざす。

特に、新世代センサである高解像度の光学・マイクロ波センサを機軸にした利用手法を明らかにするとともに、食糧-環境分野への応用ニーズからみた地球観測衛星群の標準的な利用アルゴリズムを提示する。

そのため、解像度・周波数の異なる衛星SAR、光学センサ等の画像データを収集するとともに、蓄積された豊富かつ詳細な地上検証データを比較分析した。また、新規性の高い新世代の高解像度SARセンサおよび高解像度光学センサ（RADARSAT-2衛星によるCバンドSAR画像やCOSMO-SkyMed・Terra-SAR衛星によるXバンドSAR画像、WorldView-2等高解像度光学衛星画像等）を中心に新規アルゴリズムや利用手法を検討した。さらに、将来的な潜在能力の探索に向け、精密な地上計測データの解析も併せて進めた。これらに基づいて、異種衛星センサによる土地被覆や植物成長形質の評価アルゴリズムのデータ要求や情報抽出力を比較分析し、それらの体系的利用法について検討した。

主な研究開発成果

- ① 植物成長・農業生産および大気CO₂固定の機能を担う根源的な役割をもつクロロフィル量に着目してハイパースペクトルデータの実測値を用い、多変量回解析法、分光指数法、および放射伝達モデル法の予測力の総合的な比較分析を行った。その結果、従来のアルゴリズムに比べてより高い評価力を有するアルゴリズムが開発された。また本アプローチによって得られる推定力図法（図2）は、多様な波長仕様をもつ衛星センサによって得られたデータを各種の生物物理変量の評価に適用する際、最適な波長域や波長幅の選定にきわめて有用であることを検証した。光学域の衛星センサ全般の最適利用指針を支える基盤的役割を果たすものである。
- ② 多様なSARセンサによるデータの一貫性確保に向けて、開放水面の後方散乱係数 σ^0 を基準として用いる新たな正規化アルゴリズム（Water-point法）を提案し、衛星搭載のXバンド・Cバンドセンサによる観測データを用いてその有効性を検証した。現在、世界で報告されている多くの論文において、同一バンドの異種センサ間（例：CSKとTSX）の差異や入射角による差異が問題にされており、本成果はそれらの解消に向けて大きく貢献することが期待される（図2）。
- ③ 多バンド（Ka, Ku, X, C, L）、多偏波（HH, HV, VH, VV）および多入射角（25~55°）のマイクロ波後方散乱係数の観測データセットを用いて、多様な偏波・入射角によって得られるSAR後方散乱係数の相対的な評価力を見定める応用性の高い総合的な比較手法を開発した。これによって現在利用できる衛星SARセンサのほぼすべての仕様・観測緒元に対応した潜在的な評価能力を総合的に予測することが可能となった。
- ④ 衛星SARによる群落形質計量において最も実用性の高いアルゴリズムとして、Cバンド σ^0 による葉面積指数と光合成有効放射吸収能の評価モデル、また、Xバンド σ^0 によるイネ群落収量評価モデルを開発した。
- ⑤ 地球観測衛星を広範な食糧-環境分野の問題解決に活用する標準的なプロトコルを提案した。各分野（研究、行政、産業等）の専門家・実務家とリモートセンシングの専門家間の情報交換や協議などの連携により、リモートセンシングの応用を成功に導くための指針となることが期待される。

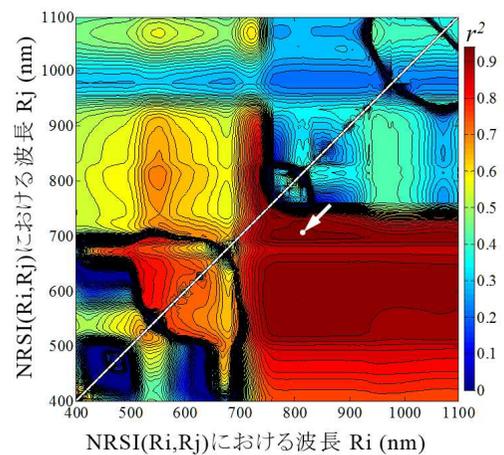


図1 最適の分光指数モデルの探索する手法
— 群落クロロフィル量の予測力マップの例 —

注) 全波長を組み合わせた2波長分光指数の推定力を示す。有力波長域のピークと広がりを俯瞰可能。矢印は最良の波長組み合わせを示す。

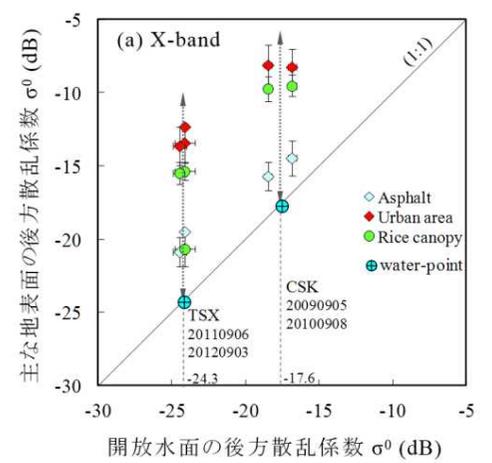


図2 開放水面のSAR後方散乱係数 σ^0 に対する各種対象面の σ^0 の比較結果とSAR後方散乱係数の正規化アルゴリズム

注) 開放水面の σ^0 (Water-point) を用いる正規化により異種センサ間のバイアスを解消可能

その他の研究開発成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	研究論文 (査読付き)	その他研究発表	プレスリリース	展示会	受賞等
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 2 国際 : 4	国内 : 14 国際 : 6	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0

研究開発成果発表会の開催等について

本課題の主旨と成果を、官民の非専門家を含む広範な人々を対象に普及啓蒙するため、東京において次の二つの公開ワークショップを開催した。政府行政部局、都道府県部局、民間会社、大学、研究機関、報道機関を含む多数の参加を得て、農業生産や食糧安全保障分野へのリモートセンシングの広範な普及に向けた研究紹介ならびに議論を行った。

- (1) 「作物産地インテリジェンスへの空間情報技術の戦略的利用に向けて」 (2013年10月31日 東京)
- (2) 「リモートセンシングの食糧インテリジェンスへの戦略的利用に向けて」 (2014年2月14日 東京)

また、本研究による成果の一部を取り纏めた学術論文は、すでにリモートセンシング分野の国際的なトップジャーナルに掲載されており、内外での引用も進んでいる。今後さらに刊行予定である。

今後の研究開発計画

本課題の基本的な目的は、食糧・環境分野への地球観測衛星群の高度利用促進し、多くの農業・食糧問題と環境問題の解決に資することである。本課題の問題意識ならびに具体的成果は以下のように持続的に展開する。

1. 内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の採択課題は、リモートセンシングを農業分野に高度利用し営農現場での生産性・収益性の向上を支援することを目的とするもので、アルゴリズムや手法等は本課題の成果の上に成立するものである。したがって、当該課題を平成26年度より5か年にわたって進めることは、本課題の成果を社会実装に向けて本格的に展開する直接かつ具体的な方策となる。本SIP課題は、国内農業への実装だけでなく、衛星リモートセンシング技術を主軸とした標準技術構築とその海外展開も見据えたものであり、衛星利用の多角的促進に貢献するものと期待される。
2. 本課題で構築した先駆的な地上校正システムは、それを我が国に数万本設置済みの無線基地局タワー等のインフラの一部を活用する等の方法で本格的に整備拡張することによって、我が国を世界の地球観測衛星群のキャリブレーションセンターにすることに展開できる可能性がある。このような発想はこれまで世界のどこにもなく、またその実現も我が国のようなインフラが整った国でしか不可能であるため、今後の本格的な構想と体制が求められる。
3. 多くの食糧・環境問題については、すでに国境が透明化しており、国際コンソーシアム等を介して成果の広範な利活用を進めることが必要である。特に、本課題で開発した生態系空間情報プラットフォームGSPACは、アジアでの諸問題解決に向けて地球観測衛星群を活用する上で極めて有効な機能を有しており、国際コンソーシアムCoRGAAその他、多様な国際ネットワークでの活用が期待される。

成果展開の状況について

1. 青森県(津軽平野)での産地スケールの農業応用を通じた衛星リモートセンシングの社会実装に大きく貢献している。これは本事業の基盤的成果を研究協力・指導により特定地域に適用したもので、当初、約100haの水田地帯に導入し、衛星データを用いた高品質ブランド米としての販売が軌道に乗せることに成功した。H26年度には大幅に適用面積を拡大している。これは本事業に基盤的学術的成果の社会実装を先駆するもので、今後さらに多くの地域で同様な試みを進める動きがある。
2. 本課題成果を本格的な社会実装に向けて展開すべく、内閣府「総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)」が主導する内閣府総合科学SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)に対して提案した課題「作物・環境診断情報の先進リモートセンシングおよび高度利用技術の創出」(代表機関:農業環境技術研究所)が採択された。これにより、平成26年度から5年間の研究開発を通して、地球観測衛星群を農業・環境分野に社会実装すべく、本事業(文部科学省宇宙利用促進調整委託費)の成果を着実に展開する予定である。

事後評価票

(平成26年3月現在)

1. 課題名 食糧-環境分野での広範な利用を支える地球観測衛星群による生態系監視基盤技術の創出
2. 主管研究機関 独立行政法人農業環境技術研究所
3. 事後評価結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 本課題は、食糧-環境分野の広範な問題解決に欠かせない陸域生態系情報を、衛星センサによって精度良く安定的に提供することを目的として、異種多様な地球観測衛星群による生態系動態監視のための共通的基盤技術の構築を目標とするものである。その実現のために、以下の3つのサブ課題を設け、研究が進められた。 ① 陸上生態系観測の応用に向けた衛星データの広域リアルタイム校正システムの構築 地球観測衛星データを信頼性が高く一貫性のある物理量に変換するために必要な、地上観測と衛星を連携した広域的な校正技術の画期的な先導モデルの開発が実施された。地上校正用の新規マルチスペクトル画像センサを開発し、それらを東北から九州の4サイトで無線基地局タワー等の高所に設置することで、地表面反射率画像を毎日、連続的・遠隔的・自動的・一元的に収集・整備する先駆的なシステムモデルが確立された。これに基づいて、波長特性や空間解像度、観測頻度の異なる多様な衛星データによって取得される物理信号の変換精度を検証・向上させるための革新的な校正処理技術が確立された。以上のシステム、技術、ノウハウを統合し、地上観測ネットワークと異種衛星を仮想的に連携させるマルチスケールの校正体系が構築された。 ② 衛星データと協働するアジアスケールの生態系空間情報プラットフォーム構築 衛星データを用いて広範な生態系空間情報を集積・分析・提供するために、アジア全域（東西：日本～カザフスタン、南北：インドネシア～モンゴル）を対象とする生態系空間情報プラットフォームの構築が行われた。まず、Webベースの地図サーバを機軸とした汎用性の高い統合解析システム「生態系空間情報プラットフォーム（GSPAC）」が構築され、次に広域アジアを対象として、地球観測衛星群の解析を促進する上で不可欠な、気候・地形・土壌・土地利用・土地被覆・生物季節パラメータ等に関する生態系空間データを収集・整備し、GSPACプラットフォームに搭載した。これによって国内外の多くの研究者が多様な生態系空間情報をWebベースで共有し、これまでと比べてはるかに容易に地球観測衛星群の画像と重ね合わせて利用することが可能となった。GSPACは現時点では、本プログラムで構築した空間情報技術の生態系・環境利用に関する国際コンソーシアム（14カ国）のメンバを中心とした技術者・実務者が登録制で利用できる状態となっている。今後、機能を限定して一般公開を進めることも検討している。

③ 衛星データによる生態系生物物理量評価のための新規アルゴリズム体系の創出

異種多様な地球観測衛星群による生態系特性評価のための新規アルゴリズムの開発と統合的な利用体系の構築が行われた。生態系監視への衛星利用促進のカギとなる解像度・周波数の異なる高解像度の新規衛星センサ（マルチスペクトルおよびハイパースペクトル光学およびX・C・Lバンドの合成開口レーダ SAR）に着目し、植物生長特性（バイオマスや作物収量等）や生態系管理情報の定量評価法において世界をリードする新規性の高いアルゴリズムと異種センサの画期的な協働的利用法が開発された。また、仕様の異なる地球観測衛星群を、生態系監視に向け、一体的に活用するための共通基盤的な利用法や標準化法を提案し、実応用ニーズに則した地球観測衛星群利用のためのガイドラインがとりまとめられた。

上述の3つのサブ課題によって創出された上記のような諸成果は、GSPAC プラットフォーム上に一元的に集約され、Web ベースで利用可能となっている。また、得られた学術的な成果は、国際的な学術論文等での公表も進んでいる。本課題の成果は、地球観測衛星群を実業・実務場面での多面的なニーズに応じて高度に利用するための先導的な技術知見を提供するもので、今後の食糧-環境問題の解決に向けた地球観測衛星群の利用促進に着実な貢献をするものと考えられる。

以上、提案時に設定した本課題の研究目標は達成されたと考えられる。また、研究成果から学術的に有用な知見が得られたことに加え、農業生産現場での実用化など、本基盤成果を活用した衛星リモートセンシングの具体的な社会実装が飛躍的に進んだことも特筆すべき点である。さらに、本成果でのイノベーションの新規性・革新性が評価された結果、継続事業が H26 年度開始の内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）に採択されて本事業が継続・展開されることにより、その成果が戦略的に活用されることが見込まれており、成果の出口戦略も明瞭となっていることも付記する。

「必要性」

現在、地球人口は70億人を超えて増加を続けている。地球温暖化の影響は顕在化しつつあり、それによる異常気象の増加が懸念されている。さらに、土地資源や生物多様性の劣化、食糧市場のグローバル化と価格の乱高下など、全球的な農業・環境問題は解決すべき喫緊の課題である。

これらの課題に適確に対処するためには、産地～政府～国際社会のいずれのレベルの意思決定においても、陸上生態系の実態に関する広域的かつ科学的に信頼性のある情報が不可欠となっている。このような情報を得る上で、地球観測衛星によるリモートセンシングはきわめて重要な役割を担う。たとえば、多くの国際会議や多国間の枠組み、日本における施策等において地球観測衛星によるリモートセンシングに対して強い期待と重要性が指摘されている。これら要請に応え、上記のような広範な食糧-環境分野に衛星利用を拡大する上で次の3つが共通的な技術的基盤としてきわめて重要である。具体的には、

- ① 衛星データの信頼性・一貫性の確保
- ② ②衛星データをそれ以外の多様な生態系空間情報と一体的に使用できる利用環境の整備
- ③ ③衛星によって得られる信号を陸上生態系の生物物理変量（利用場面で意味のある有用情報）に変換する正確なアルゴリズムの開発と標準化・体系化

の3つである。しかし、これらの3つ技術基盤はいずれも現状では十分な技術レベルになく、これら

の解決をめざす本課題の動機・役割・位置付けはきわめて明瞭であり、重要と考えられる。

「有効性」

地球観測衛星群を陸域の食糧・環境分野に活用する上で、信号の物理的一貫性の確保および画像精度の確保は重要な技術課題である。本課題（１）では、その実現のために衛星データの広域リアルタイム校正システムの構築を行っている。具体的には、地上校正ネットワークを拡張するため高解像度マルチスペクトル画像センサを製作し、国内の複数サイト（青森県黒石市、茨城県つくば市および常総市、熊本県合志市）の地上タワー高所に設置して、地表面反射率画像を毎日、連続・自動・遠隔・一元的に収集・整備するシステムモデルを確立した。また、異種衛星センサ（WorldView-2, ASTER, MODIS 等）による画像データ、ならびに地上におけるハイパースペクトル計測データも併せて取得し解析した。これらに基づいて、波長特性や空間解像度、観測頻度の異なる多様な衛星データによって取得される物理信号の変換精度を検証・向上させるための校正処理技術を確立している。

さらに、これらのシステム・技術・ノウハウを統合することによって、地上観測ネットワークと異種衛星を仮想的に連携させマルチスケールの校正技術体系の基本モデルを構築している。今後、日本の多地点の定点連続サイトによる地上校正ネットワークを効率的に配置して、体系化された校正技術に基づき処理を行えば、異種衛星データを定量的な尺度である物理量（反射率）へ精度よく校正することが可能である。本システムは他の枠組みでは実現困難な技術成果として重要な役割を果たすものと考えられる。

また、地球観測衛星群を陸域の食糧・環境分野に活用する上で、衛星画像データをそれ以外の多様な生態系空間データと統合・相補的に使用することが必要不可欠である。本課題（２）で構築したアジアスケールの生態系空間情報プラットフォームは、それを大きく促進する役割をもつものと考えられる。すなわち本研究開発で構築した空間情報プラットフォームは、アジア全域を対象として多様な空間データを体系的・持続的・効率的に搭載・管理し、共有するための操作性の高いプログラム体系である。すなわち、広域アジアの生態系における気候・地形・土壌・土地利用・土地被覆・生物季節パラメータ等に関する広域空間データが体系的に搭載されており、地図サーバを機軸とする汎用性の高い生態系空間情報プラットフォームの統合システムとして機能するものと考えられる。本システムは、汎用的な Web を介して内外の研究者が高い自由度で空間データを共有し、地球観測衛星群の多面的な利用を支援するものとなっており、食糧・環境分野における地球観測衛星群データの解析と高度利用に大きく貢献することが期待される。

さらに、多様な地球観測衛星センサによるリモートセンシングデータを、農業生産の現場や環境施策等に活かすためには、作物のバイオマスや活性、収量、干ばつ等のストレス、CO₂ 等温室効果ガスの発生・吸収速度、土壌肥沃度等、食糧・環境分野で意味を持つ、様々な有用情報・付加価値データに変換することが必要である。本課題（３）では、衛星センサによる土地利用・生態系管理や植物成長特性（バイオマスや作物収量等）の評価アルゴリズムや異種センサの協働的利用法を探索し、生態系監視の基礎として有望なアルゴリズムとモデルを明らかにしている。さらに、それらの実応用に向けた標準的・体系的利用指針を明らかにし、リモートセンシングや空間情報技術の専門家でなくとも、知りたい変量に応じた波長帯や解像度から使用すべきセンサの選定、得られたデータから目的とする情報に変換する過程を、容易に導くことができ、実業・実務に結びつけるためのガイドラインを示している。これらの成

果は、食糧生産や環境施策に関わる多様な用途で、地球観測衛星群を高度に利用する上に大きく貢献するものと考えられる。例えば、開発したアルゴリズムの一部は有数の穀倉地帯である青森県津軽平野のブランド米生産事業に活用され、衛星データの社会実装の先駆例となっている。

以上のように、本課題の成果の一部はすでに産地スケールの農業生産場面で社会実装されている。また、異なる地域・作目・営農条件への横展開も進みつつあり、地球観測衛星群によるリモートセンシングを国内農業の強化や食糧安全保障に活用する上で重要な貢献をするものであり、有効性の非常に高い研究であると考えられる。今後の継続的な応用展開を行うことが期待される。

「効率性」

本課題は所期の目標を効果的に達成すべく、本事業におけるこれまでの実績の活用、実施体制、ならびに協力関係の活用の面で、以下のような工夫のもとに行われている。

1. 地球観測技術等調査研究委託事業による既存成果の効果的活用

本課題は平成21～23年度の地球観測技術等調査研究委託事業によって実施された「食糧-環境インテリジェンスのための恒常的生態系資源観測システムと国際連携ネットワークの構築」（課題代表 独立行政法人農業環境技術研究所 井上吉雄）による成果をふまえ、上記の社会的全球的ニーズに応えるべく、一貫したコンセプトのもとで展開されており、それにもとづいて成果を最大限に活用・発展させ、効率化を図っている。

2. 内外の機関間連携の効率的活用

本課題では、地上観測ネットワークの将来展開を見据えて、全国に数万本を超える無線基地局タワーを活用する可能性をも視野に、参画機関であるNTT データを介して、NTT ドコモが有する高高度タワーを用いた観測を実現した。また、これに関しては、地方独立行政法人・青森県産業技術センターや独立行政法人農業研究機構九州沖縄農業研究センター等との良好な協力関係を新たに築くことによって、青森・つくば・熊本をつなぐ多地点での遠隔観測ネットワークの観測実験を成功させている。

また、本課題では、生態系空間情報プラットフォームの開発・拡張や新規アルゴリズムの研究開発に際して、米国ミシガン州立大学地球環境変化監視研究センターとオランダ国トゥエンテ大学空間情報科学・地球観測研究所を中心とする海外機関との密接な連携協力関係を研究推進に効果的に活用している。

一方、アジアスケールでのデータ整備が完成した生態系空間情報プラットフォームなど本課題の成果の広範な活用面においても、「アジアにおける食糧-環境インテリジェンスのための空間情報技術利用コンソーシアム」（14カ国機関）のネットワークを効果的に活用することができた。

以上のように、短期間の課題中にも関わらず、本委託事業の既存成果や協力ネットワークを最大限に活用することによって、経費の有効活用と研究の効率的推進が達成されていることは特記すべき点である。

(2) 成果

「アウトプット」

本課題の成果は以下のように要約される。

[1] 陸上生態系応用に向けた衛星データの広域リアルタイム校正システムの構築

地上校正ネットワークを拡張するため高解像度マルチスペクトル画像センサを製作し、国内の複数サイト（青森県黒石市、茨城県つくば市および常総市、熊本県合志市）の地上タワー高所に設置して、地表反射率画像を毎日、連続・自動・遠隔・一元的に収集・整備するシステムモデルを確立した。また、異種衛星センサ（WorldView-2, ASTER, MODIS 等）による画像データ、ならびに地上におけるハイパースペクトル計測データも併せて取得・解析した。これらに基づいて、波長特性や空間解像度、観測頻度の異なる多様な衛星データによって取得される物理信号の変換精度を検証・向上させるための革新的な校正処理技術を確立した。以上のシステム、技術、ノウハウを統合することによって、地上観測ネットワークと異種衛星を仮想的に連携させマルチスケールの校正技術体系の基本モデルを構築された。日本の複数地域に地上校正ネットワークを効率的に多点配置して、体系化された校正技術に基づき処理を行えば、異種衛星データを定量的な尺度である物理量（反射率）へ精度よく校正可能であることを明らかにしている。衛星リモートセンシングの陸上生態系への応用においては、更なる定量的な利用が求められており、本広域リアルタイム校正システムは利用促進の重要な要素技術と考えられる。今後、打ち上げが計画されている新しい衛星データの活用を進めるとともに、より個別の陸上生態系アプリケーションへ適用することにより実利用を進めることが望まれる。本システムは他の枠組みでは実現困難な技術成果として重要な役割を果たすものと考えられる。

[2] 衛星データと協働するアジアスケールの生態系空間情報プラットフォーム構築

アジア域を対象として、生態系動態を衛星センサによって精度よく監視するための基盤となる多様な空間データを搭載・管理し、共有するための操作性の高いプログラム体系を完成している。また、広域アジアの生態系における多様な広域空間データを収集・処理し、空間情報システム独自のデータ内容を大幅に拡充した。以上により、地図サーバを機軸とする汎用性の高い生態系空間情報プラットフォームの統合システム GSPAC を完成した。本システムは、Web を介して内外の研究者が高い自由度で空間データを共有し、地球観測衛星群の多面的な利用を支援するものと考えられる。現在は限られたユーザのみ利用可能としているが、今後機能を限定して一般公開を進めることを検討している。

[3] 衛星データによる生態系生物物理量評価のための新規アルゴリズム体系の創出

解像度・周波数の異なる衛星合成開口レーダ SAR（Radarsat-2, TerraSAR-X 等）および光学衛星センサ（WorldView-2 等）の衛星データを、地上での直接観測調査データとともに収集し、前年度までの収集したデータセットとともに解析した。さらに衛星センサによる土地利用・生態系管理や植物成長特性（バイオマスや作物収量等）の評価アルゴリズムや異種センサの協働的利用法を探索し、仕様の異なる地球観測衛星群を生態系監視に一体的に活用するための基本的な利用法が提案されている。

特に重要な成果は、植物群落クロロフィル量を評価するための精度が高くかつ汎用性の高いアルゴリズムが開発された点である。群落クロロフィル保有量は作物の生産力や植物群落と大気のコ₂交換を支

配する最も重要な生態系変量の一つである。本課題で開発したアルゴリズムは、その精度ならびに汎用性が他で提案された従来手法よりも優位性があることを、世界各地の観測データセットを用いて示した。

現在、世界各国で高波長分解能を持つハイパースペクトルセンサを搭載した衛星の打ち上げが計画されており、本研究で得られた予測モデルは、今後、作物生産性や自然植生の劣化などを広域的に把握する上で活用されることが期待される。

また、本成果で提案した、スペクトルデータを用いる汎用的な波長選択手法は、それぞれの変量に応じて最適な評価指標を考案する際に応用範囲の広い方法であり、さまざまな光学センサの高度利用に適用可能であり、その応用性は高く波及効果が高いことが認められる。一方、SAR についても、X バンドセンサ、C バンドセンサによって得られる物理的特性を明らかにするとともに、それらによって得られる後方散乱係数と農業生態系監視に重要な植物形質の相関性が分析・解明されている。最も重要な知見は X バンドの後方散乱係数とイネ群落の穂重量との間には高い相関関係が認められたことであり、従来から知られている知見と整合性の高い結果が得られた。この関係は広域的な穀実収量の直接計量に衛星 SAR データを利用できる可能性を示唆する重要な結果である。また、C バンドについても、後方散乱係数の空間分布から群落の葉面積指数 LAI および光合成有効放射吸収能 fAPAR を高い精度で検出できることを明らかにした。さらに、異種の SAR センサや観測条件の異なるデータを、より一貫性を持って利用するための正規化手法（Water-point 法）を提案し、その有効性を示した。

さらに、本研究で開発された手法の実応用に向けた標準的・体系的利用指針を示し、リモートセンシングや空間情報技術の専門家でなくとも、知りたい変量に応じた波長帯や解像度から使用すべきセンサの選定、得られたデータから目的とする情報に変換する過程等を、比較的容易にたどることによって地球観測衛星群を実業・実務に結びつけるためのガイドラインを示していることは、最終的な現業利用において極めて重要な成果であると考えられる。

これらの成果の一部は、短期間の研究期間にも関わらず、6 編がリモートセンシング分野のトップジャーナルを含む国内外の論文として公表され、国内外の学会や国際シンポジウム（招待講演含む）において 20 件の成果が公表されていることは評価に値する。さらに、Scopus によると本事業により公表した国際誌論文は短期間にも関わらず、すでに 200 件を超える引用がなされており、成果のアウトプットも高いレベルにあると考えられる。また、一般に向けて研究成果の活用を促進するため、東京において 2 つの公開ワークショップを開催し（いずれも 120 名を超えかつ約半数が民間機関）、多数の参加者に対して成果を公表することで、その利活用法について広く周知していることも特筆すべき点である。

以上のように、本研究の所期の目標は十分達成されるとともに、それらの国際誌への公表だけでなく一般向けの公表や啓蒙も順調に進んでおり、地球観測衛星群を食糧・環境分野の広範なニーズに向けて活用する上で着実に貢献していると考えられる。

「アウトカム」 ※ 効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）があったか

① 青森県（津軽平野）での産地スケールの農業応用を通じた衛星リモートセンシングの社会実装に大きく貢献した。これは本事業の基盤的成果を研究協力・指導により地域適用したもので、当初、約 100ha の水田地帯に導入し、衛星データを用いた高品質ブランド米としての販売を軌道に載せることに成功し、H26 年度には大幅に適用面積を拡大しており、重要な成果である。今後さらに多くの地域で同様な試みを多角的に進め、その有効性を検証する必要性がある。

② 内閣府「総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）」が主導する戦略的イノベーション創造プログラム SIP（平成 26 年度開始 5 カ年計画）の公募に対し、本課題の成果の社会実装への展開を本格的に進めるべく課題「作物・環境診断情報の先進リモートセンシングおよび高度利用技術の創出」（代表機関：農業環境技術研究所）を提案し、採択が決定しており、宇宙科学技術におけるイノベーションを推進するものとして、大きな成果の創出が期待されている。今後 5 年間の研究開発を通して、文部科学省による宇宙利用促進調整委託費の事業成果を着実に活かし、迅速に農業・環境分野への社会実装を目指すべきである。

③ 本課題の主旨と成果を、官民の非専門家を含む広範な人々を対象に普及啓蒙するため、東京において次の 2 つの公開ワークショップを開催することによって参加者が中心となって新たな研究開発に関するプロポーザルをまとめるなど、将来につながる展開が進んでいることは、社会実装、横展開を考える上で極めて重要な成果であり、同種の公開ワークショップ等を継続して開催することが望まれる。

④ 本研究による成果の一部を取り纏めた学術論文は、すでにリモートセンシング分野の国際的なトップジャーナルに掲載されている。また、これら論文は国内外の多くの研究論文において引用が進みつつあり、成果を積極的に公開していると評価できる。

⑤ GSPAC は、Web 上で全世界から利用可能なシステムとして完成されているが、現時点では、目的や用途が明確な利用者（研究者・技術者・実務者）が登録制で利用できる状態である。すなわち、本システムの「フル機能」については、

- ・食糧-環境分野で地球観測衛星群を活用する研究者や普及・教育分野の利用者を対象としていること
- ・搭載しているデータによっては公開制約があること
- ・利用者の顔が見える形でデータを持続的に増強する運用方針であること

の諸点のため、ビジネスモデルというよりもむしろまずはパブリックサービスモデルとして国内外の研究者・技術者・実務者に展開されている。現在は、本事業で構築した空間情報技術の生態系・環境利用に関する国際コンソーシアム（14 か国）のメンバや農林系研究機関の研究者、学会等を通じた広報により、国内外の登録研究者等が利用を進めている。今後、システム・データ利用の機能を限定して段階的に一般 Web も公開されることによって、生態系空間情報の普及・啓蒙にも貢献すると考えられる。

(3) 今後の展望

本課題の大局的な目的は、食糧・環境分野への地球観測衛星群の高度利用を促進し、多くの農業・食糧問題と環境問題の解決に資することである。本課題の問題意識ならびに具体的成果は、今後、以下のような観点から継続して展開されるべきものである。

1. 内閣府「総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）」が主導する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において採択された課題において、本課題での成果を多面的に利活用していくことで、より迅速に社会実装を進める。さらに国内だけに留まらず、衛星リモートセンシング技術を主軸とした標準技術体系の構築とその海外展開をも見据え、衛星利用の多角的促進を進めるべきである。

2. 本課題で提案・構築された地上校正システムは、我が国に数万本設置済みの無線基地局タワー等を利活用したものであった。これらをより多点に展開することで我が国を世界の地球観測衛星群のキャリアブレーションセンター的役割に発展させられる可能性がある。様々な機会を通して、今後の本格的な検討が必要であると考えられる。

3. 多くの食糧・環境問題は、すでに国境を越えた問題となっているため、国際コンソーシアム等を介して成果の広範な利活用を進める必要がある。特に、本課題で開発した生態系空間情報プラットフォーム GSPAC は、アジアでの諸問題解決に向けて地球観測衛星群を活用する上で極めて有効な機能を有する可能性があり、他の同様のプラットフォームとの差別化を進めながら国際コンソーシアム CoRGAA その他、多様な国際ネットワークでの活用を迅速に進めることが期待される。

評価点

S

評価を以下の5段階評価とする。

S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。

A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。

B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。

D) 成果はほとんど得られていない。