

「食糧安全保障に向けた衛星入力を活用した環太平洋域での広域収量推定および短期予測の試み」の成果について

研究 開発 体制	主管研究機関	国立大学法人千葉大学	研究 開発 期間	平成25年度～ 平成27年度 (3年間)	研究 開発 規模	予算総額 (契約額) 35百万円		
	共同研究機関	京都大学 JAXA 名古屋大学		1年目		2年目	3年目	
				20百万円		7百万円	8百万円	

研究開発の背景・全体目標

衛星データを用いた我が国での農業応用のアプローチの多くは精密農業であり、高分解能衛星・航空機観測による圃場単位・圃場内管理の高度化である。高解像度衛星画像は対象圃場・地域に有益な情報を提供するが、個々の知見を拡張するには多数の高解像度衛星画像処理、地域毎のパラメータの算定等、膨大な作業を要する。本課題はこのアプローチではなく、近年研究・発展した高時間分解能（1時間、または3時間毎）衛星プロダクトをいかに有効活用するか？という視点で提案した。両者と数値シミュレーション有機的に組み合わせる（パッケージング化）ことで、1-10kmメッシュでの収量推定が「場所を問わず」可能となる。本研究課題はそのための第一歩である。

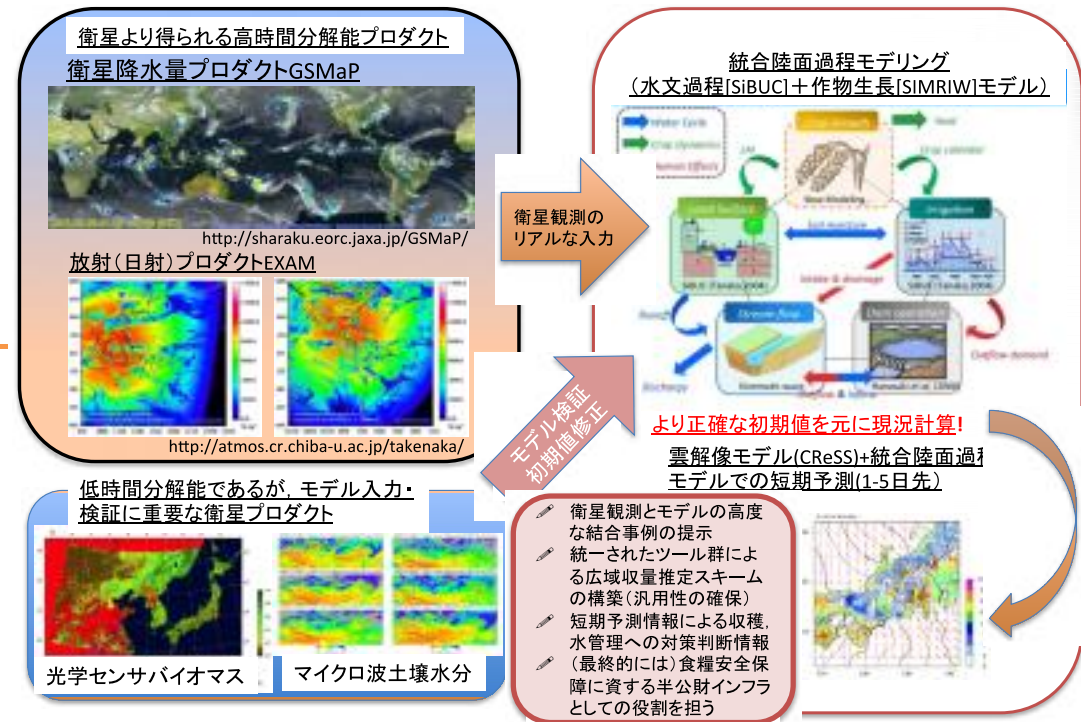
研究開発の全体概要と期待される効果

本研究課題は衛星観測以外での広域推定が困難な日射・降水量を入力とし、統合陸面過程モデルと作物生長モデルの組み合わせで環太平洋域での広域作物収量推定を行う。雲解像モデルと統合陸面過程+作物生長モデルの組み合わせで、1-5日先の作物生長推定を行い、収穫、水管理への対策判断情報に役立てる。モデル計算で得られた各要素を衛星推定バイオマス量、土壌水分量等、頻度は低いがモデル初期値、検証に重要なプロダクトとの比較検証で統合陸面過程・作物生長モデル内パラメータを最適化する方法を構築し、日本、あるいは世界の食糧安全保障に資する半公財インフラとしての役割を担うための第一段階とすることを最終目標として実施した。

「国民との科学・技術対話」の推進に関する取組について

平成27年7月7日のひまわり8号正式運用を記念し、千葉大学で記念イベントを実施した（左）。ひまわり8号の機能強化に関するマスコミの関心度は高く、本研究の成果も踏まえ講演を行い、その前後も含め計8件のテレビ取材に対応した。うち1件は本研究課題の目的、最終目標そのものについて放送して頂いた（平成27年7月12日 テレビ朝日「報道ステーションSUNDAY」）。
加えて、世間の関心度の高さから、千葉大学産学連携イベント（右）、企業技術セミナーでも積極的な情報発信を行った。加えて平成27年10月より、毎日新聞全国版「ひまわりEYE」の共同企画・監修に携わり、紙面を通じ、ひまわり8号を用いた研究例提示のお手伝いをしている。

提案目的:衛星入力(降水量, 日射量)とモデル, 検証・同化の組み合わせで半公財インフラの役割を担う。



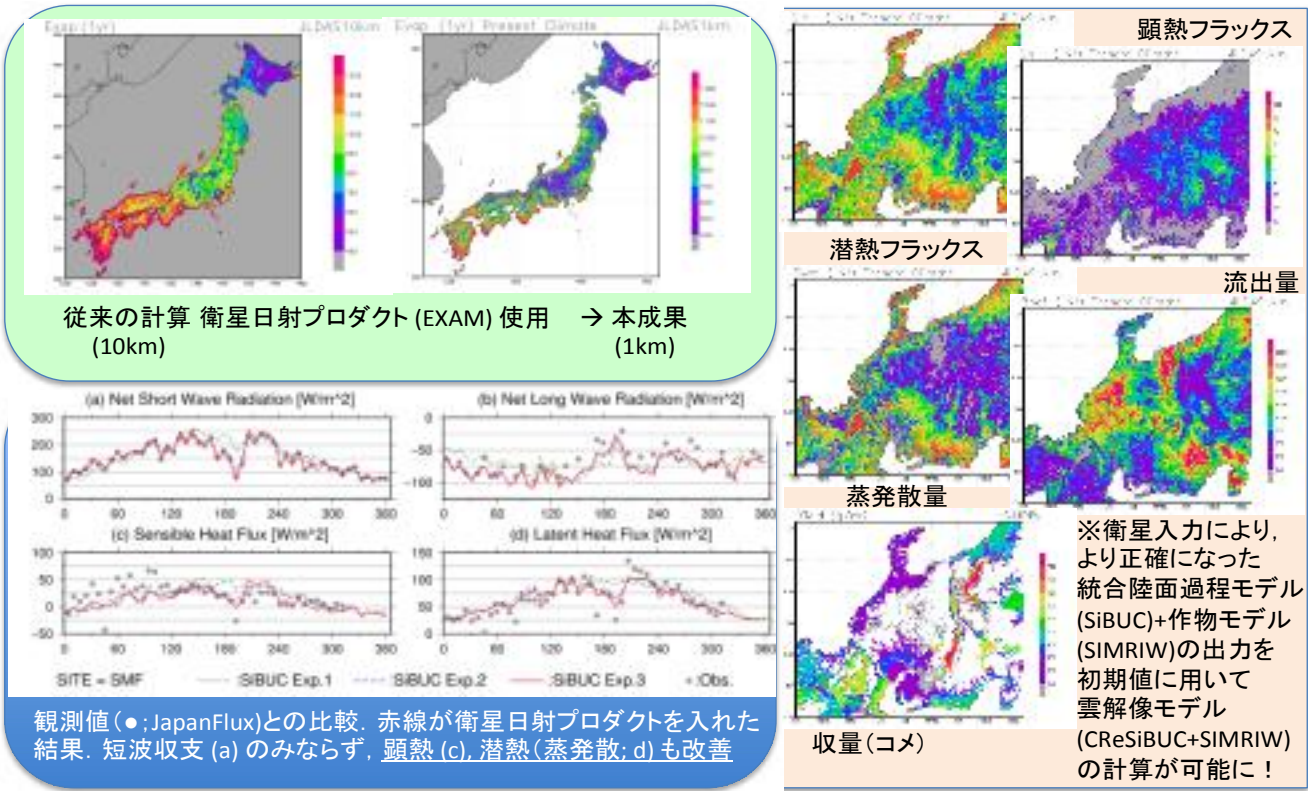
①-1 「1km解像度による日射プロダクトEXAMのインパクト計算（日本陸面過去解析）」

実施内容及び主な研究開発成果

開発した陸面過去・速報解析システムを用いて、日本域で高解像度の陸面解析を行った。この実験は、EXAM短波放射の有効性を実証することを目的（インパクト計算）として実施した。加えて、最新の衛星データ由来の気象強制力を用いた、高精度・高解像度陸面再解析データを作成することも目的の一つとして設定した。短波放射が陸面解析に与える効果に絞って調査を行うため、精度の高い降水量が利用可能である日本域を対象とした。気象強制力を変えつつ、3つの感度実験を行った。降水量データを除いて、実験1は速報解析に倣った設定（従来の陸面過程モデル出力結果に準じた結果）、実験3は過去解析に倣った設定になっている。実験2は、EXAM短波放射を利用できない場合の過去解析となっている。いずれも1km解像度で計算を行っているが、これは現地のフラックス観測データと比較可能な解像度であることを意図している。解析対象期間はEXAMの再解析が終了していた2007年とし、計算結果を地上の4点でのフラックス観測（Japan Flux）データと比較した。

長波放射収支(LWn)、顕熱(SHF)及び、潜熱(SHF)を比較した例を右に示す。長波放射収支(b)を見ると、実験1と実験3で大きく異なり、期待したように実験3の長波放射収支が観測に近い値を示している。短波放射収支(a)の比較でも、実験3が、観測に最もよく整合している。実験2と3の違いは、EXAM短波放射を用いるか否かであるが、EXAMを用いることで、短波放射収支のみならず、他のフラックスにも改善が見られることが分かる(c, d)。一方、実験1は、3実験中で最も観測に整合していないことが分かった。

1km 日本域陸面過去解析



平成26年度成果
ハイライト論文

Kotsuki et al. (2015): 1-km-resolution land surface analysis over Japan: Impact of satellite-derived solar radiation, *Hydrol. Res. Lett.*, **9** (1), 14-19.

より定量的な評価の結果、従来式（実験1）の陸面過程計算では短波収支の観測値との間の決定係数 (R) は0.6-0.7であるのに対し、EXAMを用いた実験3は0.95にも達した。加えて、放射収支が大幅に改善されたことにより、エネルギー分配の結果である、顕熱（地面からの熱輸送）および潜熱（蒸発散による熱輸送）フラックスも、実験1ではRが0.2-0.4（顕熱）および0.5-0.7（潜熱）であるのに対し、EXAM導入により、それぞれ0.5-0.68（顕熱）、0.69-0.89（潜熱）と同じく大幅に改善した。地表面での陸面過程モデル上での各項目の改善は陸面過程の定量的な理解の深化、および陸面過程モデルの出力を基に一体として計算される作物生長モデル SIMRIW の出力、すなわち収量推定向上に寄与する結果であり、我々の志向した研究開発のアプローチが極めて有効であることを実証した結果となった。

①-2 「陸面過去解析-速報解析-近未来計算のシームレスな計算スキーム構築, および実装」

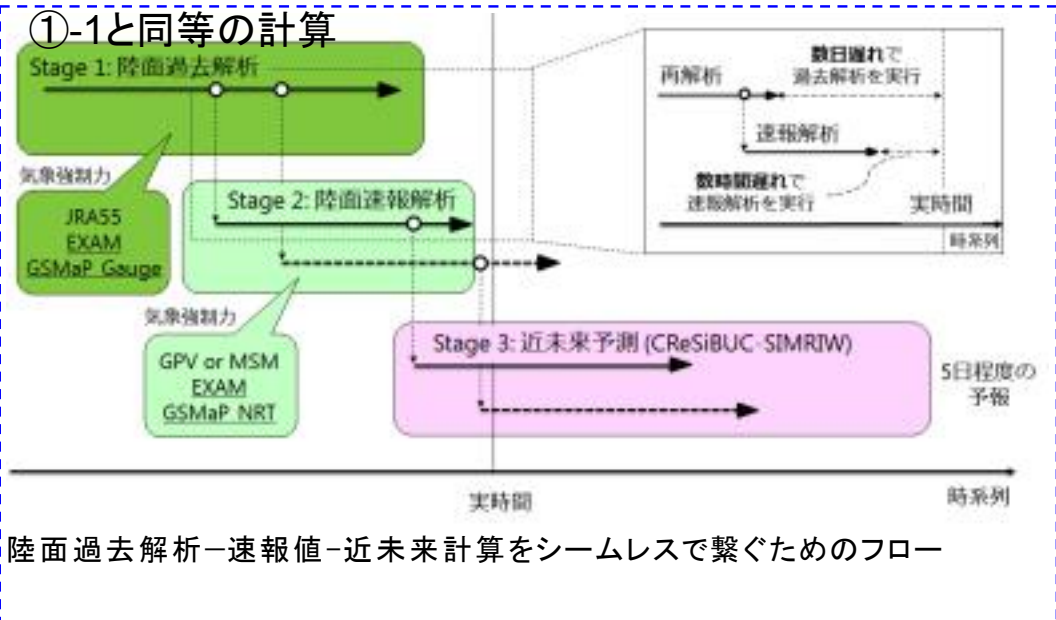
実施内容及び主な研究開発成果

本研究課題の中核となる過去-現在-近未来までをシームレスで繋ぐ計算スキーム（パッケージ）の構築に関するデザイン設計は、課題開始段階より綿密な議論や実際の計算スキームの改善等を経てブラッシュアップさせた。

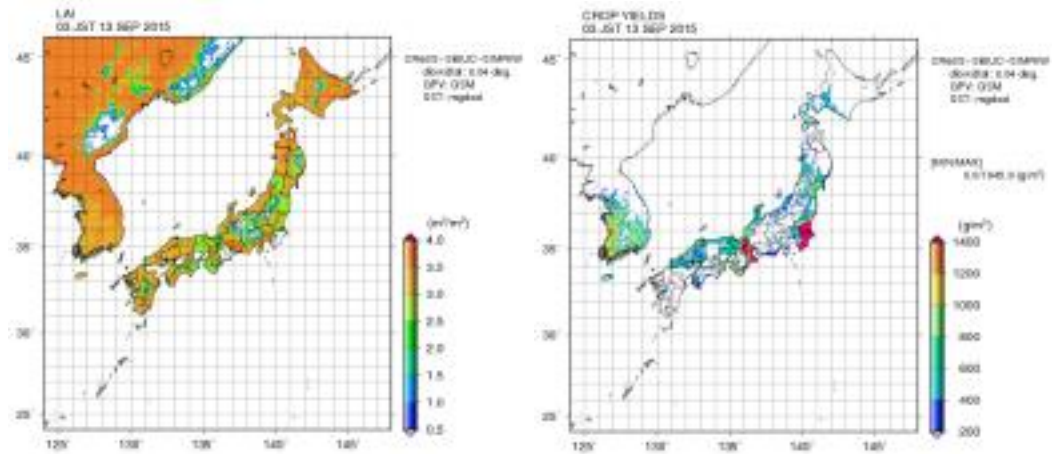
基本デザインは右上図のようになる。気象強制力のデータ提供時間の問題で、最高品質のデータ（特に気象庁提供の再解析データであるJRA55、数日遅れで提供される）を待つと、現況値が「現在（実時間）」と乖離する問題が発生する。そのため、最高品質データ（JRA55, EXAM, GSMaP_Gauge）が出揃った段階で陸面過程モデル（SiBUC-SIMIW）計算を実施し、これを「陸面過去解析」とした（①-1の実験3に相当）。一方、陸面過去解析を近未来計算の初期値としてそのまま利用してしまうと、「現在」の状態を飛ばして計算してしまうことになる。そのため、過去解析値を初期値（親）として、できる限り「現在」に近い利用可能なデータセット（気象庁客観解析データ GPV/MSM, EXAM, GSMaP_NRT [これは②-2 の努力の結果, GSMaP_NOWとなった]）を用いて「現在」の陸面状態の計算を行った「陸面速報解析（SiBUC-SIMRIW）」。陸面速報値をフラックス値も含めほぼ全ての計算要素を初期値として受け渡し、近未来計算（CReSiBUC-SIMRIW）で計算する、というスキーム（シームレスなパッケージ）がデザインされた。計画段階では、CReSiBUCとSIMRIWのカップリングが出来ない場合には別計算とする予定であったが、事前の各モデル間のパラメータの受け渡し、およびSIMRIWの計算時間（SIMRIWの計算タイムステップは1日、他のモデルはもっと短い）を合わせるための工夫、等を平成26年度迄につめることが出来た。

計算スキームのデザインだけでは机上の空論となるため、平成27年度に朝鮮半島、中国北東部を含む日本域全体を含めた計算ドメインでの“実時間”での計算を実施した。研究計画段階ではこのタイミングで基幹静止気象衛星のひまわりが「ひまわり8号」に切り替わるため、実行に関して不確定要素が強かったが、研究推進メンバーの全面的な協力により、ほぼ全自動で止まることなく本スキームでの実時間計算が実現した。右下の図は実際に実時間で計算したCReSiBUC-SIMRIWの144時間先の近未来計算結果の例（SIMRIWの出力である葉面積指数（LAI）と推定収量）である。

一連のシームレスな計算スキームで計算された結果は詳細な検証を行う必要がある（①-1の過去解析より精度向上は認められた）が、**本研究課題の最終目的である、“統合陸面過程モデルと作物生長モデルの組み合わせで環太平洋域での広域作物収量推定を行う。雲解像モデルと統合陸面過程+作物生長モデルの組み合わせで、1-5日先の作物生長推定を行い、収穫、水管理への対策判断情報に役立てる”ためのスキーム構築は成功した。**



陸面過去解析-速報値-近未来計算をシームレスで繋ぐためのフロー



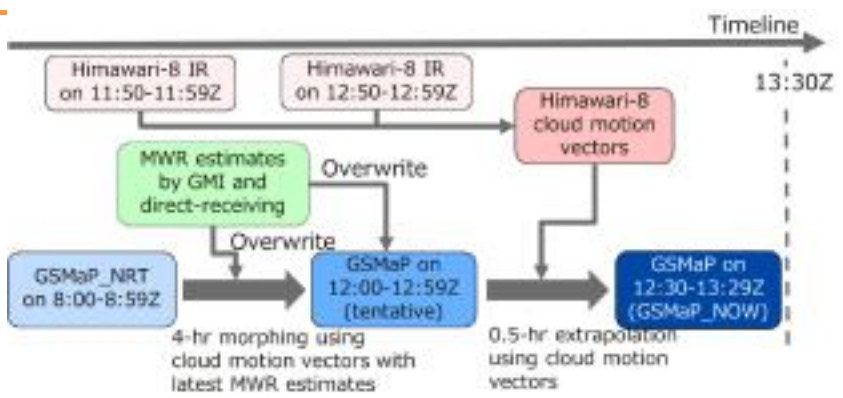
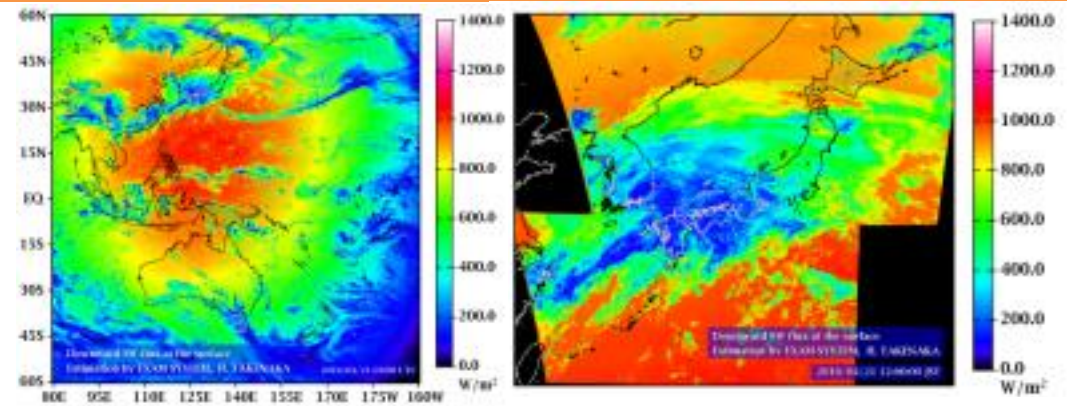
過去解析-速報解析の出力を初期値として計算した近未来計算の例 (2015/09/07/03JST初期値, 計算144時間後(2015/09/13/03JST)のCReSiBUC-SIMRIWによる(左) 葉面積指数 (LAI) と(右) 推定収量

②-1 「衛星入力 (EXAM, GSMaP) の高度化, 特にひまわり8号対応」

実施内容及び主な研究開発成果

日射プロダクトEXAM

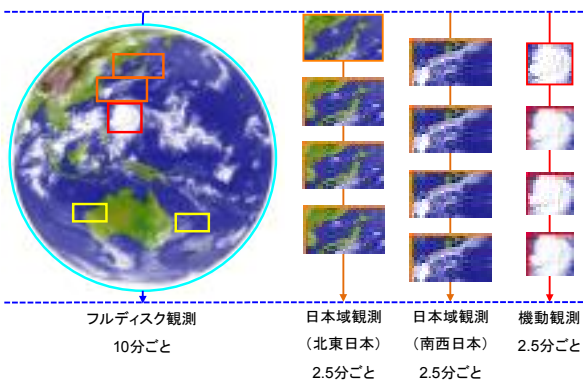
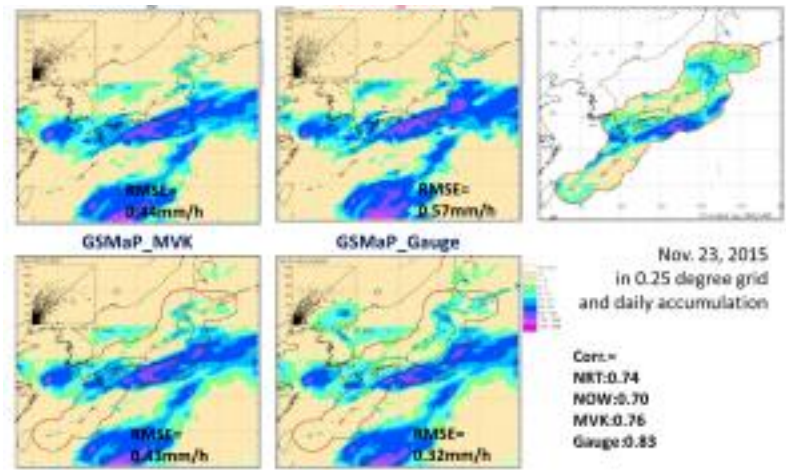
日射プロダクトEXAMの開発は別プロジェクト群で行われている (JST/CREST TEEDDA 等) . 本課題は過去計算分も利用するため, 過去データ計算 (再解析) 支援, 計算結果のアーカイブ等を担った (その結果を①-1で利用した) .
 本期間中のハイライトは「ひまわり8号」への対応である. 全球観測がMTSAT時代の1時間から10分, 日本域に限れば2.5分の超高頻度化がひまわり8号の特長である. この特長に対応するため, 計算スキームを全て見直し, 特に a). 幾何補正精度の向上, b) 計算スキームの見直しによる更なる高速化 を行い, **ひまわり8号正式運用前に全ての処理計算が約140秒で終了する** システムを構築した. 一連のひまわり8号対応システム構築, 特に処理高速化により, ①-2の計算スキームの陸面速報解析でもEXAMを衛星入力として遅延無く利用することが可能となった.



降水プロダクト GSMaP

降水プロダクトGSMaPはJAXAが開発・運用を続けている全球降水データセットである. GSMaPは複数の極軌道, 周回軌道衛星に搭載されたマイクロ波放射計, 降水レーダ (TRMM/PR, GPM/DPR) によるプロダクト (GSMaP_MVR), 静止気象衛星群を加えたプロダクト (GSMaP_MVK), GSMaP_MVKの速報部分を用いたプロダクト (GSMaP_NRT), および雨量計データで補正されたプロダクト (GSMaP_Gauge) が存在する.

本課題期間中に, TRMM時代からGPM時代に切り替わるバージョンアップを行った. 加えて, 本課題を代表とした「データ提供時間」の低減 (速報値である GSMaP_NRTでも4時間遅れ) のため, **ひまわり観測域に特化したGSMaPリアルタイム版 GSMaP_NOWの開発**に着手し, テストプロダクトの提供, および公式運用にこぎ着けた. GSMaP_NOWの精度は他のプロダクトに比べやや劣る (平均絶対誤差が0.14mm/hr, 他プロダクトは0.11-0.13) が, 精度劣化は想定したより低いことが検証の結果明らかになった.



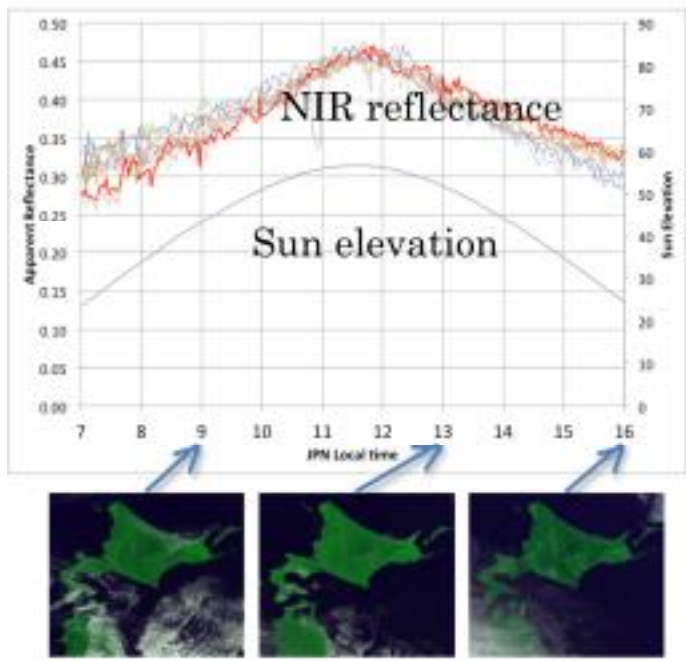
第3世代静止気象衛星「ひまわり8号」

平成27年7月より正式運用が開始したひまわり8号は, 観測頻度の超高頻度化に加え, 観測バンドの増加 (MTSAT:5 → 16) 等, 大幅な機能強化を果たした. 機能強化は爆発的なデータ量増大をもたらすが, **気象庁-千葉大学・JAXA等の協定により, 研究向けデータ配布機関として, 正式運用前から両機関共にデータ提供を受けた.** この準備期間, 膨大な観測データのアーカイブ対応を事前に行えたことは, 本研究課題遂行において極めて重大な意義を持つ.

②-3 「衛星光学センサによる二方向反射特性 (BRDF) を応用したバイオマス量推定」

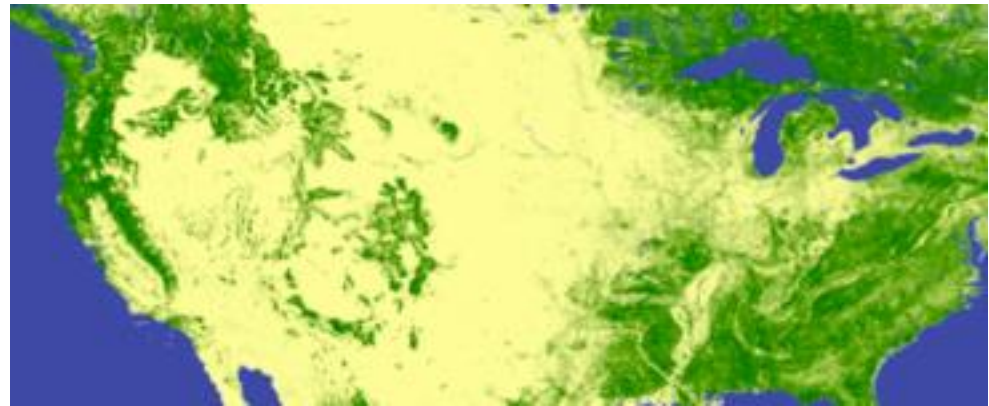
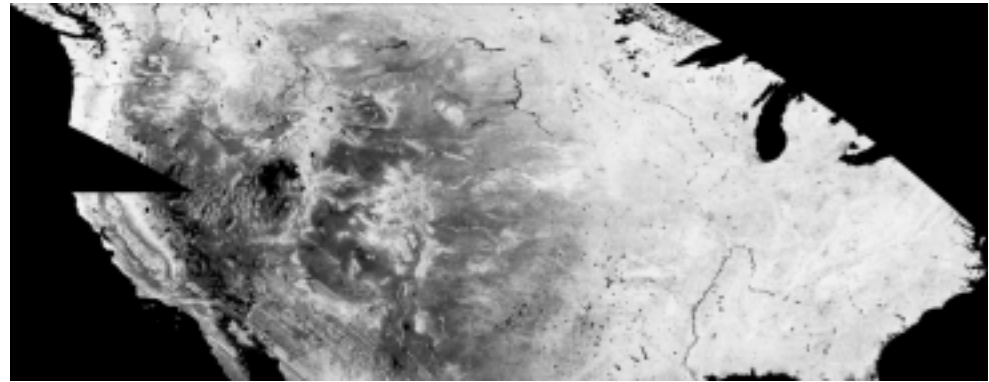
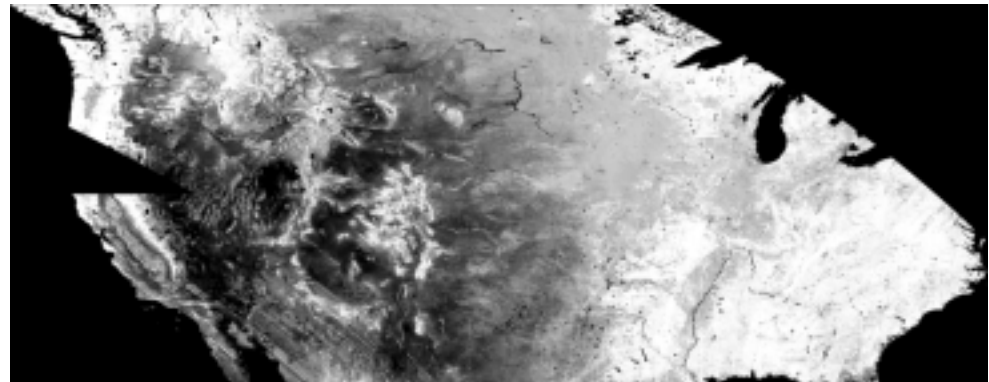
実施内容及び主な研究開発成果

モデル計算では収量のみならず、その手前の段階であるバイオマスも計算される。収量そのものを光学衛星センサで直接計測することは不可能であるため、作物生長モデル計算収量妥当性の検証のために、各国の集計結果のみならず、バイオマスでの比較が必要となる。そのため、農耕地での衛星光学センサによるバイオマス量推定が必要である。従来の研究では植生指標をベースにした経験式、あるいは放射伝達モデルを組み合わせた半理論モデル等があるが、それぞれ推定時に欠点を持つ。そのため、植生面の二方向反射特性 (BRDF; Bi-Directional Reflectance Distribution Function) を利用した植生の立体構造に着目した分光反射率の変化に着目した推定手法の構築を行なった。現状利用できる光学センサは Terra/Aqua の MODIS であるが、雨季の被雲確率の問題に対処するために Daily プロダクトである MOD/MYD09GA を用いる必要がある。このため、解析対象年度の全てのデータを Dailyベースで処理せねばならず、大量データ処理負荷が生じ、ストレージの確保および自動処理システムの開発が必要である。雲被覆率の高いアジア域ではBRDFを介したバイオマス推定が、検討の結果困難であることから、テストサイトを北米大陸の耕作地域として選定し、BRDFによる相対的バイオマス (最大バイオマスを想定し、それ以下のバイオマスを0-1に規格化したもの) 推定アルゴリズムの開発、および試験的処理を行った(右)。



ひまわり8号の運用により、同一地点の観測頻度が劇的に増加する。一日内の変化は太陽高度の変化に伴い、画像の見え方も変化していく(左図下の画像群)。この特性はBRDF変化を見ていることになり、本手法の適用ポテンシャルを示している。

しかし、アジア域、特に中緯度帯では前線活動等の雲被覆変化は時間変化に乏しく、得られる地点サンプルがひまわり8号で劇的に増加するとは限らないことが分かった。ひまわり8号データを使った応用例は今後の課題である。



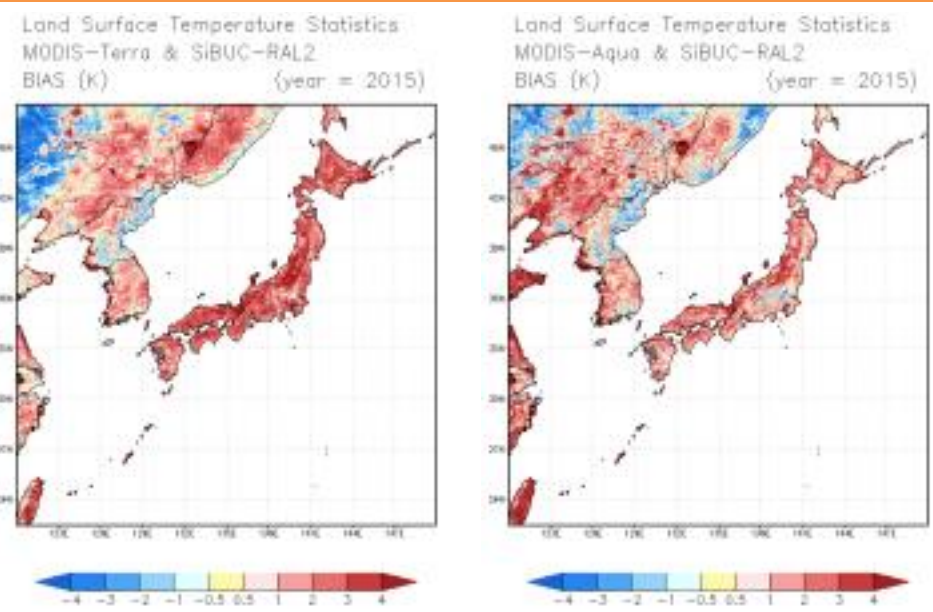
上図：(上段) 本研究で開発したBRDF特性を考慮した相対バイオマス推定量、(中段) 解析期間の最大NDVI (上・中段共に白ほど値が高い)、および(下段) 参考: JAXA ALOS PALSAR (合成開口レーダ) による森林・非森林データベース (緑が森林域)。上段はBRDFを考慮しているため下段と整合的である。

③ 「モデル出力の検証, 特に検証に関するデザインについての考察」

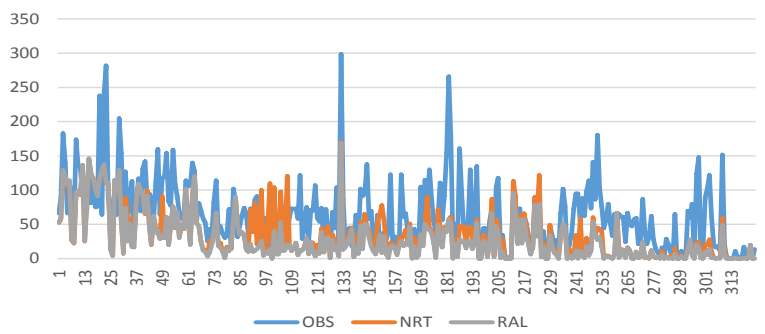
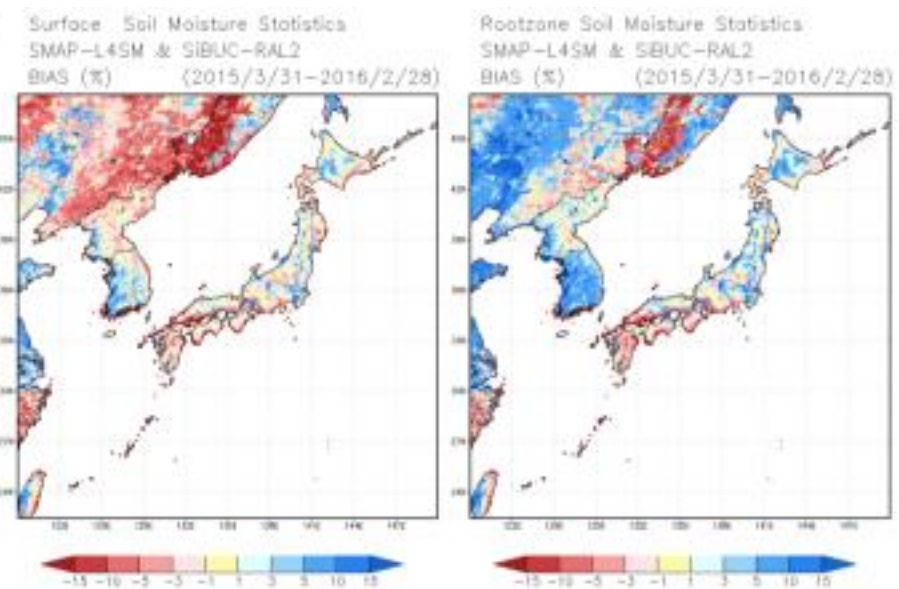
実施内容及び主な研究開発成果

計算結果の検証は非常に重要なプロセスであるが、気象強制力に現実に近い値を用いているため、そもそものようなデータを用いて検証を行うかについてデザイン設計が必要である。検証データは強制力で用いたデータとは独立であることが望ましい。広域性、反復性、連続性の観点から衛星観測放射輝度、分光反射率等を基に計算されたプロダクト群は、広域性があるため、本再解析・速報値の検証に向いている。しかし、検証に用いるデータは「入力として扱っていない」ことが条件である。加えて、「地表面温度」や「土壌水分」等に計算された(リトリーブされた)衛星由来の物理量そのものにも、アルゴリズム特性による系統的な誤差を含むことも考慮に入れる必要がある。

右図は午前衛星Terra(左図), 午後衛星Aqua(右図) 搭載MODISより計算された地表面放射温度とモデル値(過去解析RAL; SiBUC-SIMRIW出力)との系統誤差(BIAS; K)を示す。暖色系がモデル側が高温, 寒色系が低温バイアスを示す。日本列島では高温バイアスがあるように見えるが、この結果はそのまま見るのでは無く、衛星側過小評価の可能性も検討する必要がある。MODISプロダクトには雲フラグがあるが、雲フラグは空間解像度(1km)より小さいスケールは解像できない。取り除けないより小さなスケールでの雲、とくに地形性の孤立性対流雲の初期段階を検出していない。そのため、Terra, Aqua の日本列島上の系統誤差を精査すると、Terraの高温バイアスが大きい主な理由は、検出できない小さな孤立対流雲のコントラミ(衛星算出地表面放射温度を下げる方向に働く)の可能性がある。



土壌水分は、NASA SMAPのデータ同化プロダクト(L4)との比較を行った。左に第1層(表層), 右に第2層(根系層)とのBIASを調べたが、L4プロダクトのため、同化に使ったモデル上での地表面解釈がそのまま反映された結果となっている。見かけ上日本でモデル土壌水分が過大となっているのは、NASAデータ同化モデルが「水田」を扱っていないためであり、この比較は我々のアプローチがアジア稲作域では有効であることを示している。更なる検証実施の際は、単に「合う」「合わない」という単純作業では無く、それぞれ(モデル・検証データ)の特性を踏まえた解釈を基に慎重に改良を進める必要がある。



複数の陸面過程プロセスが複雑に作用した結果である「積雪深(等価積雪水量)」はイネの生育、特に水稻灌漑水資源量の評価に極めて重要である。気象庁官署観測値とモデル出力との比較を示す(上)。過去解析、速報値による違いはそれ程無く、大まかにモデルの積雪深は観測値の45%程度である。衛星による固体降水(雪)推定は極めて難しく、GSMapのみならず、世界の主要な衛星降水プロダクトでもその精度は現段階では低い。

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	査読付き 投稿論文	その他研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会展
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 1 国際 : 3	国内 : 30 国際 : 24	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 9 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0
	受賞・表彰リスト		平成28年度文部科学大臣表彰 科学技術賞「衛星全球降水マップ (GSMaP)」 (沖理子, 可知美佐子, 久保田拓志)			

成果展開の状況について

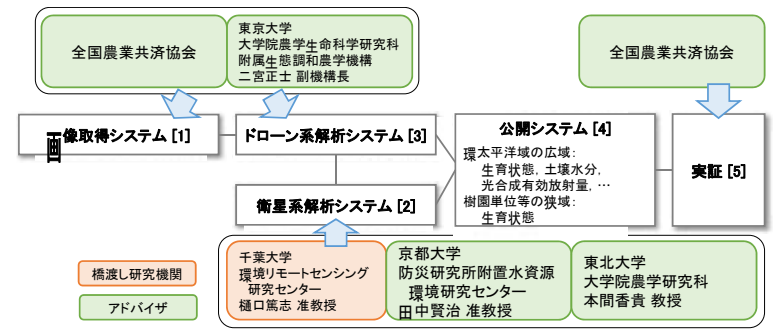
成果発表について

関連する研究集会等で本研究課題の概要, 初期成果を絡めて成果発表することにより, PEPS (Progress in Earth and Planetary Science) のレビューペーパーとしての正式な執筆依頼を受けた (レビューペーパーは編集委員による依頼執筆のみ). 平成28年の秋に投稿し, レビューペーパーとしての成果発表を行う予定である. 加えて, 個々の要素に関する研究成果に関して, 論文として公表していく予定である.

本研究課題で構築したパッケージの発展利用 (ドローンによる精密農業との融合 [国内展開])

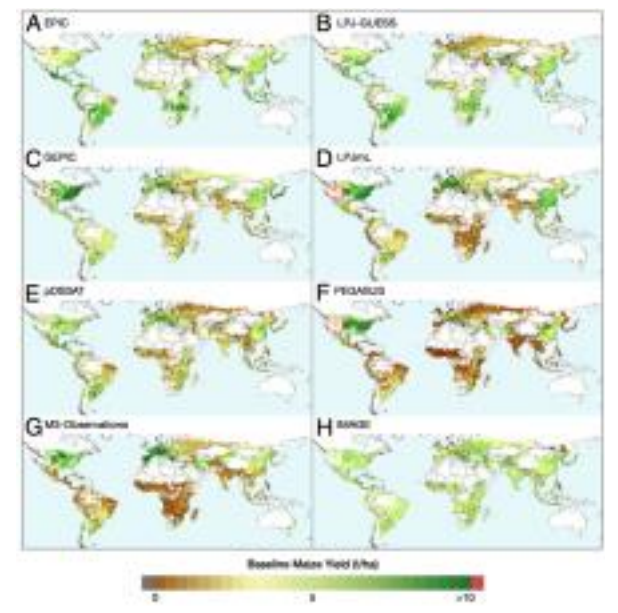
国内を対象に本研究課題開発パッケージと, ドローンによる精密農業を融合させた形の発展利用形態を模索すべく, NEDO 平成28年度「先着的基盤技術高度化支援事業 (プロジェクト委託型)」に「農業生産管理のための衛星およびドローンを利用したスマート農業情報サービスの開発」として提出した (提案者宇宙技術開発株式会社, 橋渡し研究機関として千葉大学が参画, 左模式図). 本研究課題パッケージが「ドライブレコーダ」の役割を果たし, ドローンによる精密農業が「現場検証」に該当し, 相補的な提案となっている.

今後の研究開発計画



全球展開

「食糧安全保障」の枠に留まらず, 地球温暖化に代表される気候変動に対する陸域応答の更なる理解のためには, 観測と数値モデルのこれまで以上の綿密な連携が必須である. 本研究課題では「データ同化」技術の活用を行っていない. 観測 (衛星のみならず, 現地観測も) に基づく誤差, および数値モデルに内包する不確実性を低減するためにはアンサンブル同化も含めたデータ同化技術の活用が必要である. また, 陸面過程モデルの精度向上も必要であるが, 「パッケージ」として考えるのであれば, 鉛直1次元で捉える陸面過程モデルの改善より, 動的に変化する陸面状態をいかに現実に近づけるかに労力を割く必要がある. できる限りリアルタイム性を加味した上で衛星観測を動的に取り込める (衛星活用による多層的な陸域精緻化) ように設計した方が, 精度向上にはより近道である. 本来の (最終的な) 目的の「全球食糧安全保障」の文脈で考えると, 主要穀物全ての網羅による全球展開は一つの完成形である. しかし, 現行で世界の主要な研究機関で実施した全球主要穀物収量は未だモデル群のバラツキが大きく (Rosenzweig et al., 2014; 右図), 短期的には改善すると見込めない. 一つの方策は農研機構・農業環境変動研究センターとの連携であり, 水・熱に関する全球計算は当グループで実施し, それらの結果を基に同センターで開発した作物生長モデルを駆動するという方向が考えられる. 現在その連携を模索している段階である.



事後評価票

平成28年3月末現在

1. 課題名	食糧安全保障に向けた衛星入力を活用した環太平洋域での広域収量推定 および短期予測の試み
2. 主管実施機関	国立大学法人千葉大学
3. 共同実施機関	国立大学法人京都大学 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 国立大学法人名古屋大学
4. 事業期間	平成25年度～平成27年度
5. 総事業費	35百万円
6. 課題の実施結果	
.....	
(1) 課題の達成状況	
.....	
「所期の目標に対する達成度」	
<p>「本研究課題は衛星観測以外での広域推定が困難な日射・降水量を入力とし、統合陸面過程モデルと作物生長モデルの組み合わせで環太平洋域での広域作物収量推定を行う。雲解像モデルと統合陸面過程+作物生長モデルの組み合わせで、1-5日先の作物生長推定を行い、収穫、水管理への対策判断情報に役立てる」ことを目的として実施した。</p> <p>モデル入力となる日射・降水量は、日射量 (EXAM) はひまわり8号に対応し、全域観測で10分、日本域で2.5分の驚異的な時間分解能を持つ入力データが準リアルタイムで提供可能となった。降水量 (GSMaP) はひまわり8号を用いて最新の時間 (GSMaP_NOW) でのデータセットが提供された。これらの発展は、近年の衛星データのリアルタイム性向上に資する成果である。モデル側では、SiBUC-SIMRIWによる、過去解析-速報値、速報値を初期値とする、CReSiBUC-SIMRIWによる「数日間予測計算」実験がシームレスで繋がるパッケージング化に成功した。モデル班、衛星班それぞれのすり合わせ、本研究課題の目的は概ね達成できたと考える。</p> <p>一方、課題も残った。動的に陸面状態を上記パッケージに入れ込む方法については検討を行ったものの、実現には至らなかった。また、シームレスでパッケージングされた計算結果が妥当であるかの検証は大変重要である。本研究課題終了後に実施予定であった計算結果検証を一部実施し、比較は可能であるが、その解釈は慎重に行うべきであることが改めて分かった。加えて、本研究課題では、「同化」を扱わなかったことにより、技術的に動的な陸面過程変化を入れ込む術を持っていないことを再認識した。他地域への展開は今回計算対象とした日本域、および近郊諸国と比べ、境界データの精度等の吟味が必要である。以上より、所期の目標は、概ね達成したと考える。</p>	

「必要性」

衛星データを用いた日本での農業応用へのアプローチの多くはいわゆる“精密農業”であり、高解像度衛星・航空機観測による圃場単位・圃場内管理の高度化である。高解像度衛星画像は対象とする圃場・地域に対し有益な情報を提供するが、個々の事例で得られた知見を拡張するには膨大な画像処理、および地域毎のパラメータ算定、という膨大な作業を要する。本課題はこのアプローチではなく、近年研究・発展してきた高時間分解能（1時間、または3時間毎）衛星プロダクトをいかに有効活用するか、の視点で協議した。降水プロダクトは防災・水資源モニタリングの観点から有効であり、日射プロダクトは放射量モニタリングという基礎的な観点のみならず、太陽光可能発電量モニタリングという実用分野でも有益である。両者を組み合わせ、モデル推定が困難な要素を補完することで5-10kmメッシュでの主要穀物の収量推定が場所を問わず可能となる。これは精密農業とは異なり、両者は敵対せず、相補的である。

「場所を問わず」収量推定が可能となることは、食料自給率の低い日本では国の食料安全保障の観点から非常に重要である。しかし、経済活動を優先した国策の結果、日本は「食べ物はお金で（足りなければ他国から）買う」ことを暗黙の前提としている。この前提は本来主要穀物輸出（加えて輸入に転じる可能性のある）国の生産量（収量）を的確にモニターし、安全、かつ適正な価格で入手できる仕組みを国として設けた上で成立する。しかし、関連する政府関係機関担当の方々に話を聞く限り、こうした枠組みは確認できていない。以上の科学技術的、社会的観点から、本課題の必要性は十分にあると考える。

「有効性」

モデル入力となる日射・降水量は、日射量（EXAM）はひまわり8号に対応し、全域観測で10分、日本域で2.5分の驚異的な時間分解能を持つ入力データが準リアルタイムで提供可能となった。降水量（GSMaP）はひまわり8号を用いて最新の時間（GSMaP_NOW）でのデータセットが提供された。これらの発展は、近年の衛星データのリアルタイム性向上に資する。モデル側は、SiBUC-SIMRIWによる、過去解析-速報値、速報値を初期値とする、CReSiBUC-SIMRIWによる「数日間予測計算」実験がシームレスで繋がるパッケージング化に成功した。衛星、モデルそれぞれを有機的に繋げることにより、新たな情報を、「リアルタイム性」を前面に出してパッケージとして実施するアプローチは、衛星の高度利用の新たな局面を提示しており、有効性は高いと考える。

「効率性」

本課題のアプローチの妥当性を検証するため、日本域で高解像度の陸面解析を行った。この実験は、EXAM短波放射の有効性を実証することを目的（インパクト計算）として、初期の段階で実施した。定量的な評価の結果、従来式の陸面過程計算では短波収支の観測値と間の決定係数（R）は0.6-0.7であるのに対し、EXAMを用いた実験3は0.95に達した。加えて、放射収支が大幅に改善されたことにより、エネルギー分配の結果である、顕熱（地面からの熱輸送）および潜熱（蒸発散による熱輸送）フラックスも、従来式ではRが0.2-0.4（顕熱）および0.5-0.7（潜熱）であるのに対し、EXAM導入により、それぞれ0.5-0.68（顕熱）、0.69-0.89（潜熱）と同じく大幅に改善した。地表面での陸面過程モデル上で

の各項目の改善は陸面過程の定量的な理解の深化、および陸面過程モデルの出力を基に一体として計算される作物生長モデル SIMRIW の出力、すなわち収量推定向上に寄与する結果であり、今回の研究開発のアプローチが極めて有効であることが実証された (Kotsuki et al.、2015)。

本課題のアプローチの有効性を初期の段階で明示的に示せたことにより、全体像やその後の見通しについてイメージが共有できたことで、モデル班、衛星班共に進めるべき課題を進めることができた。最終年度に全てを統合することとなったが、不確定要素の高かった衛星入力の「ひまわり8号」に関して、気象庁-千葉大学・JAXA等の協定により、研究向けデータ配布機関として、正式運用前から両機関共にデータ提供を受けた。この準備期間、膨大な観測データのアーカイブ対応を事前に行えたことにより、円滑なパッケージング化が行えた。

本研究課題は他の関連するプロジェクトや機関業務と密接に関連しているところがあり、全てが本課題の支援により行われた訳ではない。そのため、特に若手研究者は本務の合間に参画するような状態であったが、若手研究者が本研究のアプローチを良い意味で「面白い」と思って積極的にボランティアベースで関与してくれたことが非常に大きい。事業として考えると望ましく無い運営形態ではあったが、結果として、全ての歯車が上手く噛み合った印象であった。必要なタイミングで必要なメンバーでメールベースではなく、顔を合わせて打ち合わせをすることが、本課題の支援の元を実施できたことが大きく、経費・人的リソースを最大限活用できたと考える。

(2) 成果

「アウトプット」

1-1. 1km 解像度による日射プロダクト EXAM のインパクト計算 (日本陸面過去解析)

本研究課題のアプローチの妥当性を示すため、日本域で高解像度の陸面解析を行った。日射プロダクト EXAM が陸面解析に与える効果に絞って調査を行うため、精度の高い降水量が利用可能である日本域を対象とした。気象強制力を変えつつ、3つの感度実験を行った。定量的な評価の結果、従来式の陸面過程計算では短波収支の観測値の間の決定係数 (R) は 0.6-0.7 であるのに対し、EXAM を用いた実験は 0.95 に達した。加えて、放射収支が大幅に改善されたことにより、顕熱および潜熱フラックスも、従来式で R が 0.2-0.4 (顕熱) および 0.5-0.7 (潜熱) に対し、EXAM 導入により、それぞれ 0.5-0.68 (顕熱)、0.69-0.89 (潜熱) と大幅に改善した。陸面過程モデル上での各項目の改善は陸面過程の定量的な理解、陸面過程モデルの出力を基に計算される作物生長モデルの出力、すなわち収量推定向上に寄与する結果であり、本研究のアプローチが極めて有効であることを実証した。

1-2. 陸面過去解析-速報解析-近未来計算のシームレスな計算スキーム構築、および実装

気象強制力のデータ提供時間の問題で、最高品質データ (気象庁提供 JRA55。数日遅れで提供されるもの) を待つと、現況値が「現在 (実時間)」と乖離する問題が発生する。そのため、最高品質データ (JRA55、EXAM、GSMaP_Gauge) が出揃った段階で陸面過程モデル (SiBUC-SIMIWI) 計算を実施し、これを「陸面過去解析」とした (1-1 の EXAM 実験に相当)。一方、陸面過去解析を近未来計算初期値で利用する、「現在」の状態を飛ばすため、過去解析を初期値として、できる限り「現在」に近い利用可能なデータセット (GPV/MSM、EXAM、GSMaP_NRT [2 より、GSMaP_NOW]) を用い「現在」の陸面状態の計算

を行った「陸面速報解析 (SiBUC-SIMRIW)」、陸面速報値のほぼ全ての計算要素を初期値として受け渡し、近未来計算 (CRESiBUC-SIMRIW) で計算する、というスキーム (シームレスなパッケージ) をデザインした。事前の各モデル間のパラメータの受け渡し、および SIMRIW の計算時間 (SIMRIW の計算タイムステップは 1 日、他のモデルはもっと短い) を合わせるための工夫、等を平成 26 年度までに実施した。平成 27 年度に朝鮮半島、中国北東部を含む日本域全体を含めた計算ドメインでの“実時間”での計算を実施し、ほぼ全自動で止まることなく本スキームでの実時間計算が実現した。

2. 衛星入力 (EXAM、GSMaP) の高度化、特にひまわり 8 号対応

日射プロダクト EXAM 開発は別プロジェクト群で行われている (JST/CREST TEEDDA 等)。本課題は過去データ計算 (再解析) 支援、アーカイブ等を担った。全球観測が 1 時間から 10 分、日本域は 2.5 分の超高頻度化がひまわり 8 号の特長である。この特長対応のため、計算スキームを見直し、特に a). 幾何補正精度の向上、b) 計算スキームの見直しによる更なる高速化を行い、ひまわり 8 号正式運用前に全ての処理計算が約 140 秒で終了するシステムを構築した。一連のひまわり 8 号対応システムの構築、特に処理高速化により、1-2 の計算スキームの陸面速報解析でも EXAM を入力として遅延無く利用できた。

降水プロダクト GSmAP は JAXA が開発・運用を続けている全球降水データセットである。GSmAP は複数のプロダクトが存在するが、速報性の高いプロダクト (GSmAP_NRT) でも従来では 4 時間遅れであった。本課題を代表とした「データ提供時間」の低減のため、ひまわり観測域に特化した GSmAP リアルタイム版 GSmAP_NOW の開発に着手し、テストプロダクトの提供、公式運用に至り、1-2 の計算で利用した。

「アウトカム」

平成 27 年 7 月 7 日のひまわり 8 号正式運用を記念し、千葉大学で記念イベントを実施した。本研究の成果も踏まえ講演を行い。その前後も含め計 8 件のテレビ取材に対応した。うち 1 件は本課題の目的、最終目標そのものについて放送された (平成 27 年 7 月 12 日 テレ朝「報道ステーション SUNDAY」)。加えて、世間の関心度の高さから、千葉大学産学連携イベント、企業技術セミナーでも積極的な情報発信を行った。

他にも関連する研究集会等で本研究課題の概要、初期成果を絡めて成果発表することにより、PEPS (Progress in Earth and Planetary Science) のレビューペーパーとしての正式な執筆依頼を受けた。平成 28 年の秋に投稿し、レビューペーパーとしての成果発表を行う予定である。

関係省庁との調整として、農林水産省統計局を訪問し、本研究課題の初期成果と今後の展開、農水省としての利用可能性について意見交換する機会を得た。本研究課題の概要、初期成果について説明し、率直な意見交換を行った。本課題は研究フェーズであるため、直ぐに「半公共財インフラ」として進めるには克服すべき問題が多いが、本課題のようなアプローチがあること、かつ実際に試験的に計算を行い、処理は可能であることを担当官らに示せた。

(3) 今後の展望

本研究課題で構築したパッケージの発展利用（ドローンによる精密農業との融合〔国内展開〕）

国内を対象に本研究課題開発パッケージと、ドローンによる精密農業を融合させた形の発展利用形態を達成するため、NEDO 平成 28 年度「先着的基盤技術高度化支援事業（プロジェクト委託型）」に「農業生産管理のための衛星およびドローンを利用したスマート農業情報サービスの開発」として提出した（提案者宇宙技術開発株式会社、橋渡し研究機関として千葉大学が参画）。本研究課題パッケージが「ドライブレコーダ」の役割を果たし、ドローンによる精密農業が「現場検証」に該当し、「必要性」で既述したように、相補的な提案となっている。

全球展開

「食糧安全保障」の枠に留まらず、地球温暖化に代表される気候変動に対する陸域応答の更なる理解のためには、観測と数値モデルのこれまで以上の綿密な連携が必須である。本研究課題では「データ同化」技術の活用を行っていない。観測（衛星のみならず、現地観測も）に基づく誤差、および数値モデルに内包する不確実性を低減するためにはアンサンブル同化も含めたデータ同化技術の活用が必要である。また、陸面過程モデルの精度向上も必要であるが、「パッケージ」として考えるのであれば、鉛直 1 次元で捉える陸面過程モデルの改善より、動的に変化する陸面状態をいかに現実に近づけるかに労力を割く必要がある。できる限りリアルタイム性を加味した上で衛星観測を動的に取り込める（衛星活用による多層的な陸域精緻化）ように設計した方が、精度向上にはより近道である。

本来の（最終的な）目的の「全球食糧安全保障」の文脈で考えると、主要穀物全ての網羅による全球展開は一つの完成形である。しかし、現行で世界の主要な研究機関で実施した全球主要穀物収量は未だモデル群のバラツキが大きく、短期的には改善すると見込めない。一つの方策は農研機構・農業環境変動研究センターとの連携であり、水・熱に関する全球計算は当グループで実施し、それらの結果を基に同センターで開発した作物生長モデルを駆動するという方向が考えられる。現在その連携を調整している段階である。

評価点	
A	<p>評価を以下の5段階評価とする。</p> <p>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。</p> <p>A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>D) 成果はほとんど得られていない。</p>
評価理由	
<p>本研究は、多くの農業応用へのアプローチとなっている精密農業と異なり、衛星観測以外での広域推定が困難な日射・降水量を入力とし、統合陸面過程モデルと作物生長モデルの組み合わせで環太平洋域での広域作物収量推定に役立つ研究開発をしている。また、ひまわり8号のデータを最大限に活用し、陸面過去解析-速報解析-近未来計算のシームレスな計算スキーム構築及び実装などがされている。以上より、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献している。</p> <p>なお、本推定方法について、実用化にむけて具体的な取組内容が示されることが望まれるが、今後、目的に応じて最適化され、多面的広域的に発展活用されることを期待する。</p>	