

課題名 2RFa-1201 衛星データを複合利用したモデル・データ融合による陸域炭素循環モデルの高精度化

課題代表者名 市井 和仁（独立行政法人海洋研究開発機構地球表層物質循環研究分野）

研究実施期間 平成24～26年度

累計予算額 35,045千円（うち26年度11,480千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 陸域炭素循環、水循環、陸域炭素循環モデル、モデル・データ融合、最適化、リモートセンシング、北極域、アジア

研究体制

- (1)衛星観測・地上観測データと陸域炭素循環モデルの統合手法の構築（独立行政法人海洋開発研究機構）
- (2)衛星データを複合利用した陸域プロダクトの構築（独立行政法人海洋開発研究機構）
- (3)アジア地域における衛星データ利用型陸域モデルの改良と陸域生態系変動の把握
（国立大学法人筑波大学）
- (4)北極域における陸域生態系変動の把握（公立大学法人大阪府立大学）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

グローバルスケールの温暖化予測においては、予測の不確実性を与える一要因である陸域炭素循環のより正確な把握が求められている。また、地域スケールでも、森林による炭素収支の把握と管理、将来の気候変動に対応した陸域植生の変動予測などの政策決定のために炭素循環の把握が先進国・途上国において急務となっている。陸域炭素循環をより正確に把握・理解するために、サイトにおける観測、衛星観測、陸域生態モデリングなどの様々な手法を統合する試みが行われている。これらの達成には、(1)サイト観測を衛星データにより広域化(スケールアップ)して、広域プロダクトを構築する、(2)広域プロダクトを陸域生態系モデルに用いることでモデルの改善を行う、の2ステップが必要である。

衛星観測データをベースにした陸域プロダクトの構築はいろいろと進みつつある状況であり、いくつかのプロダクトも公開されている。例えば、Terra衛星搭載のMODISセンサを利用した植生指数・葉面積指数等がある。その他GOSAT衛星からの陸域CO₂収支やクロロフィル蛍光を利用した光合成量などの最新のデータも利用できる。これらのプロダクトについてはグローバルスケールで様々なプロダクトが作成されてはいるが、検証が十分にされていない、陸域炭素循環モデルの高精度化において、いくつか必要なプロダクトを構築できる余地がある、などの問題が残っている。

このような陸域プロダクトを利用した陸域モデルを改善する試みやデータとモデルを融合させる研究(データ・モデルフュージョン)はいくつか試みられているが、まだ初期段階である。例えば、衛星観測ベースの広域蒸発散、光合成量をモデルの制約として用い、植生の根の深さや最大光合成速度等を逆推定したモデル改善が進められている。しかし、これらは陸域モデル内の一部パラメータのみの改善にとどまっている。すなわち既往の研究は、ある特定のパラメータやプロダクトに着目したものであって、様々な衛星プロダクトを用いて統合的に陸域モデルを改良するものではなかった。

本研究では、様々な衛星プロダクトを有効利用したデータ・モデル融合を通じた陸域炭素循環モデルの高精度化を目標とした。まず、様々な衛星プロダクトを調査し、モデル制約に利用するデータ項目を選定、もしくは、必要なデータセットの構築または高精度化を試みた。その上で、データ・モデル融合型の陸域炭素循環モデルのフレームワークを構築し、モデルを構築した。さらに、構築されたモデルやデータを用いて、炭素収支変動において将来重要な役割を果たすと想定される、アジア域や北極域に着目し、特に炭素収支を規定する事象の把握、変動の把握を行った。本研究の概要を図1に示す。

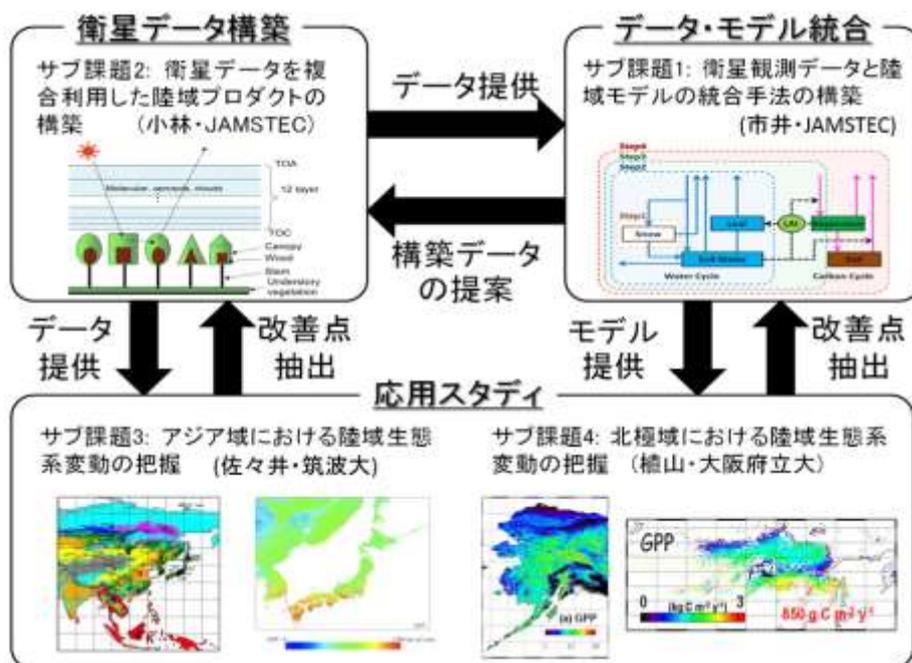


図1. 本研究課題の概念図。

2. 研究開発目的

本課題では、様々な衛星プロダクトを有効利用し、データ・モデル融合を通じた陸域炭素循環モデルの高精度化を目的とする。具体的には、(1) 既存の利用可能データを有効利用した陸域炭素循環モデル改善への道筋を立て、陸域炭素循環モデルを高精度化する、(2) データ融合実験を行い、新規モデルから期待出来る科学的知見を模索する、(3) 完成されたモデルを用いて陸域炭素循環の過去～将来の変動を再評価する、(4) 陸域炭素循環研究において必要であるが欠如しているデータ項目の抽出とデータ構築、という点を目的とする。

3. 研究開発の方法

(1) 衛星観測・地上観測データと陸域炭素循環モデルの統合手法の構築

観測データと陸域炭素循環モデルの融合のためのフレームワークを構築し、それを基にした陸域炭素循環モデルを構築した。陸域炭素循環モデルBiome-BGCモデルをベースにして、衛星観測された葉面積指数(LAI)を入力とするモードの追加、個々のサブモデルの改善、といった改善を施したのちに、様々な広域データを制約にしてパラメータ最適化を行うルーチンを追加した。パラメータ最適化にはLevenberg-Marquardt法を利用した。

構築したモデルを用いて、データ・モデル融合実験を実施した。例えば、陸域炭素循環モデルの雪サブモデルに着目し衛星観測を含む観測データとの比較検証、地上観測データと衛星観測データを組み合わせて機械学習(サポートベクタ回帰、SVR)を用いて経験的広域推定された蒸発散量や光合成量などのプロダクトを制約に用いた植生の根の深さや最大光利用効率などの逆推定などである。これらを通してモデルによる陸域炭素・水フラックス推定の改善を試みた。

観測サイトスケール、広域スケールのモデル実験を通して、陸域炭素循環理解のために必要なデータ項目の抽出を行った。さらに、本研究で構築が可能なデータセットについては、データの構築と独立なデータを用いた相互検証を実施した。本研究では、グローバルスケールの林齢データの構築、2種の純生態系生産量(NEP)データの相互比較を実施した。

(2) 衛星データを複合利用した陸域プロダクトの構築

本研究ではプロダクトの構築を行うために複数の衛星データを収集した。これらの衛星データを用いて北方林のLAIプロダクトとフェノロジープロダクトを作成した。LAIの推定に関してはシベリア・アラスカ地域でそれぞれの地域に最適なLAI推定アルゴリズムを適用して推定を行った。シベリアにおいては、サブ課題代表担当者が構築した手法を適用して1998-2012年までの葉面積指数プロダクトを作成した。アラスカに関しては現地調査で収集したクロトウヒの森林構造データや林床反射率情報を三次元植生放射伝達モデルに入力し、葉面積指数と赤・近赤外反射率の関係を計算してルックアップテーブルを作成し、そのテーブルを参照して葉面積指数を推定した。

(3) アジア地域における衛星データ利用型陸域モデルの改良と陸域生態系変動の把握

アジア域を対象として、衛星データ利用型陸域モデルによるシミュレーションとモデルの改良を行い、特に、

様々な衛星観測ベースのデータによって、どの程度モデルの結果が改善するかを検討しつつ、アジアにおける潜在的に将来の環境変動が大きい地域に着目して現象の解明を行った。アジアを地域に切り分けて入力データ評価やモデル改良を行い、それらをまとめる形で広域シミュレーションを行った。重要性の高い地表面データの評価・改良、各地域で重要視される生態系プロセスの新規導入を行い、そこで得られた科学的知見を基により高精度な“過去～将来の広域シミュレーション”へとつなげた。

(4) 北極域における陸域生態系変動の把握

アラスカ域における21サイトのタワーフラックス観測データを収集し、CO₂及びエネルギーフラックスのデータベースを構築した。構築したデータベースと衛星観測等から得られる環境変数(植生指数、表面温度、日射量、土地被覆分類、火災履歴、アルベド)との対応関係を構築し、機械学習型の経験モデル(サポートベクタ回帰)を構築した。構築された経験モデルと広域の入力データを用いて、アラスカ域を対象として総一次生産量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、純生態系交換量(NEE)、顕熱フラックス、潜熱フラックス、純放射量を推定した。

北極域全体をカバーできるCO₂・エネルギーフラックスデータとして、FLUXCOMプロジェクトにより構築されたプロダクトを検証した。FLUXCOMプロダクトは、複数の経験モデル手法のアンサンブル平均をとったものであり、信頼性の高いCO₂・エネルギーフラックス推定を目的としている。本課題でアラスカ域を対象として用いたサポートベクタ回帰も経験モデルの一つとしてFLUXCOMプロダクトの構築に利用されている。

上記の経験的手法による広域プロダクトを用いて、北極域において北極域のプロセスを組み込んだBiome-BGCモデルを最適化し、北極域におけるエネルギー・水・炭素収支の再現性を評価した。このモデルは、北極圏特有のサブモデルをサブ課題1に提供して構築されたモデルである。寒冷圏に特有のプロセスとして、簡易的な永久凍土モジュール、火災における植生の変化などを導入している。本課題では衛星プロダクトを利用して既往のモデルパラメータを最適化し、再現性を高めることを目的としている。

4. 結果及び考察

(1) 衛星観測・地上観測データと陸域炭素循環モデルの統合手法の構築

本課題では、様々な観測データを制約に用いることのできる「データ・モデル融合型陸域炭素循環モデル」を構築した。現状の様々な陸域炭素循環モデルにおける問題点として、①観測データの不足：様々な地上観測サイトは整備されているが、全球をカバーするには不十分、②無限に存在するパラメータの組み合わせ：観測されるパラメータの数に対してモデル内に含まれるパラメータは膨大であり、観測を再現可能なモデルパラメータの組み合わせの自由度が非常に高い、③パラメータチューニングが手作業：多くのモデルではモデルパラメータの調整(チューニング)には手作業で客観性に乏しい、④アルゴリズムの不確実性：モデル毎に使用する計算アルゴリズムが大きく異なり、どのモデル表現が最良であるかの判断が必要であること、などの潜在的な問題がある。

これらの潜在的な問題を軽減することを目指して設計されたデータ・モデル融合型モデルの概念図を図2に示す。本モデルの特徴としては、①種々の衛星プロダクトの利用：多くの衛星データをモデルの制約に利用することで様々な物理量に関しての再現が可能になること、②モデルーデータ融合手法の優位性：独立性の高いサブモデルに分割することによりパラメータの自由度が低く高速なパラメータが可能になること、③種々のモデルの統合化：既存のいくつかの陸域炭素循環モデルのアルゴリズムの比較を通して最良であると判断されるアルゴリズムの選択を行うこと等を挙げることができる。利用可能な衛星データプロダクトも合わせて図2に記載した。

次に、モデルーデータ融合モデルの実験として、AsiaFlux、FLUXNETなどのタワー観測と衛星データで広域化した蒸発散の季節変動を拘束として、モデルで定義される根の深さを逆推定し、顕著な空間分布が見られた。図3(a)から、1m以上の根の深さは特定の乾燥地域に多く見受けられた。特にインドシナ半島近辺では衛星データより推定された蒸発散の季節変化をモデルで再現するためには、3m以上の根の深さが必要であることが分かった。一般に利用されている土壌インベントリのデータ(土壌深など)においては、これらの地域では1～2mであり、それらの値を利用すると蒸発散の季節変化を再現することが困難であった。熱帯地域において根の深さが深く推定された地域においては、雨季と乾季が比較的明瞭であり、乾季においても土壌などに保持された水によって光合成・蒸発散が可能であると推測される。また、シベリアなどでは2m程度の深さが推定されているが、これらの地域では凍土の融解などによる水の供給のために植生成長期間においても光合成や蒸発散が維持されると考えられる。これらを再現するためには、モデルで凍土の影響を考慮することが必要である。また、光合成サブモデルに含まれるパラメータの最適化を行うことにより、光合成に関連したパラメータ(最大光利用効率)の空間分布がより現実的になった(図3(b))。例えば、中国やインドに広がる耕作地については、肥料や灌漑などがあるために、最大光利用効率が大きくなるのは妥当である。根の深さや最大光合成量については、他の陸域炭素循環でも共通して適用できるため、本研究で得られたパラメータの空間分布は高い拡張性を持つ。

さらに、本課題のモデルーデータ融合における必要なデータ項目のうちNEPと林齢の全球マップの構築と評価を行った。本課題で推定した全球林齢マップは人為活動を指標化したHuman Influence Indexと火災の強度を組

み合わせて試作した。顕著な特徴として、100年以上の林齢分布が北アメリカ北部、南アメリカ中央部、シベリア中央部に見られた。一方、北アメリカ中部から南部、ヨーロッパ、東アジア等の人為活動が活発な地域では低い林齢分布が見られた。実測された林齢を基に構築した広域データ(北米と中国のみ存在)と比較したところおおよそ整合していた。NEPについては、FLUXNETと衛星データを組み合わせた経験的広域化により推定したものとGOSAT衛星レベル4Aプロダクトの推定結果の比較をした結果、中高緯度については生態系純生産量の季節変化や振幅が一致していた(図4)。低緯度域・熱帯域では両者にはバイアスがあった。従って、中高緯度域については、SVR、GOSATプロダクトともに信頼性が高く、高空間解像度(現時点では最高1km)を持つSVRプロダクトが有用である。熱帯域については現時点ではSVRに改善の余地があり、サイトを増やすことなどが必要である。

今後充実させるべきパラメータとして、NEP、林齢、バイオマス、土壌(土壌深、土壌炭素量)が必要であると結論づけた。NEPに関しては種々の推定(トップダウン推定・ボトムアップ推定)の比較をさらに深める必要がある。

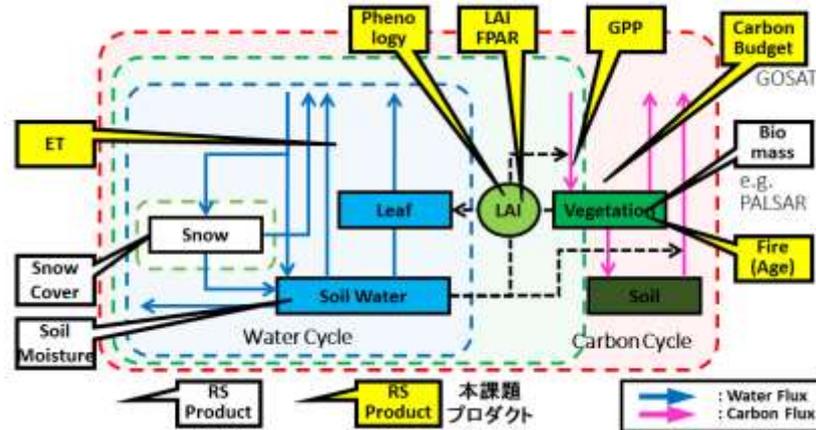


図2. 本研究におけるデータ-モデル融合のフレームワークと利用可能な衛星データプロダクト。吹き出しは既存の衛星プロダクト(白)、本研究で構築した衛星プロダクト(黄)を示す。

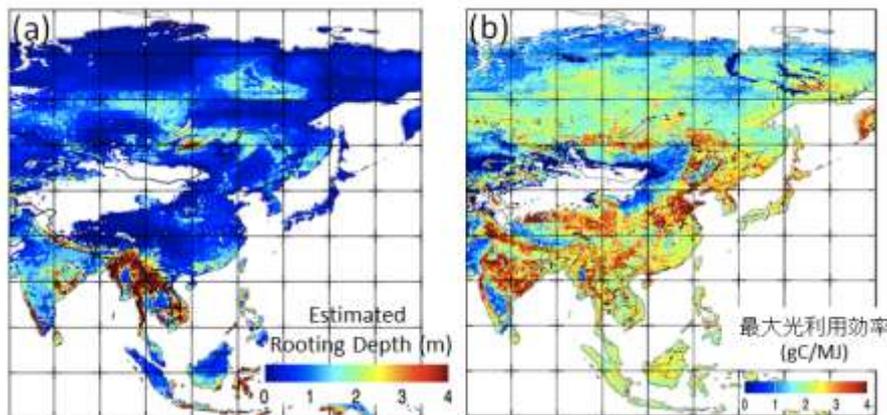


図3. データ-モデル融合実験によって逆推定されたパラメータ、(a)根の深さ(b)最大光利用効率の空間分布

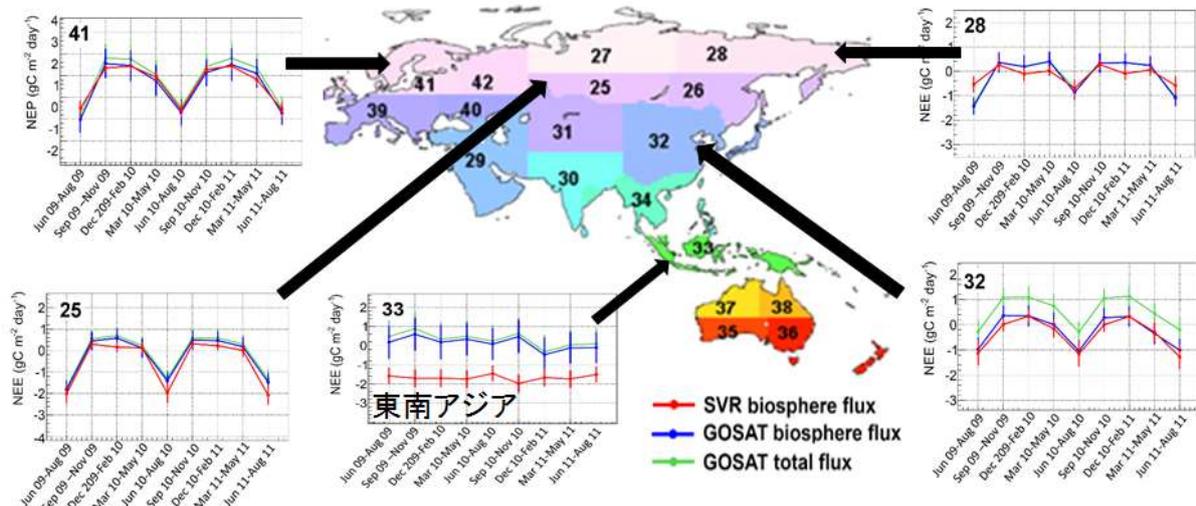


図4. 経験的広域化プロダクト(SVR)とGOSATレベル4Aプロダクトの大気-陸域CO₂交換量の比較

(2) 衛星データを複合利用した陸域プロダクトの構築

収集した衛星データを用いてLAIとフェノロジーのプロダクトを構築した(図5)。本サブテーマでMODISデータをベースにして新たに構築したLAI推定値の検証の結果、MOD15は地上観測値よりも大きい傾向にあり樹冠LAIを過大推定している事が明らかとなった。一方で、今回新たに推定したLAIは、より地上観測値に近い値となった。これはアラスカのクロトウヒの適切な林床反射率を用いて放射伝達モデルでルックアップテーブルを作成することで精度向上が見られたことを示している。本研究で推定された2011年7月のLAIと地上観測値との平均二乗誤差は0.47(誤差±33%)であった。この値はMOD15 LAIよりも小さく、本研究で構築したアラスカの常緑針葉樹のLAI推定値が既存の衛星プロダクトよりも高精度に推定できることが明らかとなった。フェノロジー推定結果に関しては、SPOT-VEGETATIONとTerra-MODISに3つのフェノロジー手法を適用して推定した展葉日と地上カメラデータから算出した展葉日を比較した結果、どの衛星データ・手法にも推定値にばらつきが見られた。また、他の手法と比較して明らかに高精度に推定可能な手法、衛星データの組み合わせを見出すことはできなかった。一方で、今回推定を試みた衛星データ・手法による展葉日の平均値を地上データと比較した結果(図6)、相関係数 $R=0.64$ と両者に比較的高い相関が見られた。この比較結果から、衛星データを用いて展葉日を高精度に推定するためには、できるだけ複数の衛星データ・手法を用いて展葉日の推定を行い、その平均値を計算することで代表性高い展葉日が推定できるとの結論に至った。落葉日に関しては、衛星データによる落葉日の推定値は地上カメラによる推定値より16-22日遅かった(図6)。

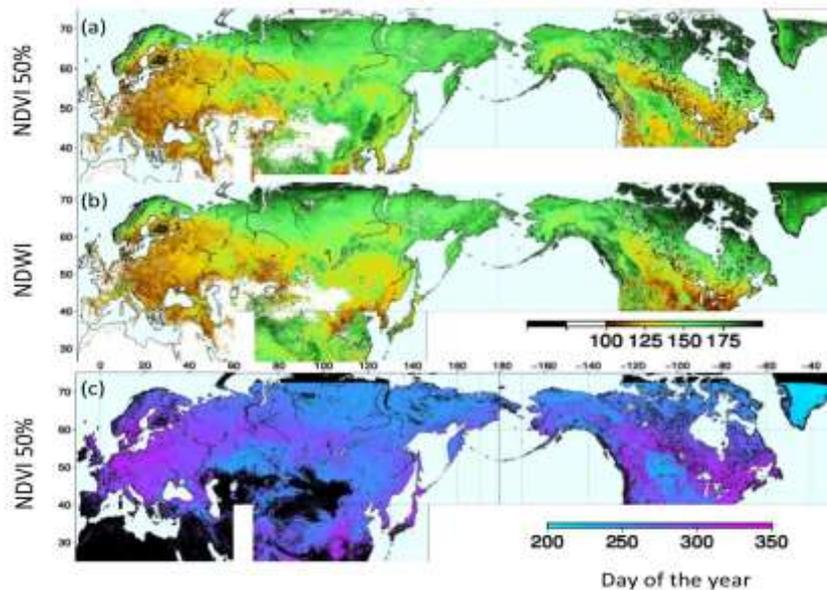


図5 SPOT-VEGETATIONデータから推定した北半球植生の展葉日・落葉日推定結果例(1998-2011年の平均値)((a) NDVIr法による展葉日推定結果、(b)NDWI法による展葉日推定、(c)NDVIr法による落葉日推定)。フェノロジー手法の詳細については詳細版に記載

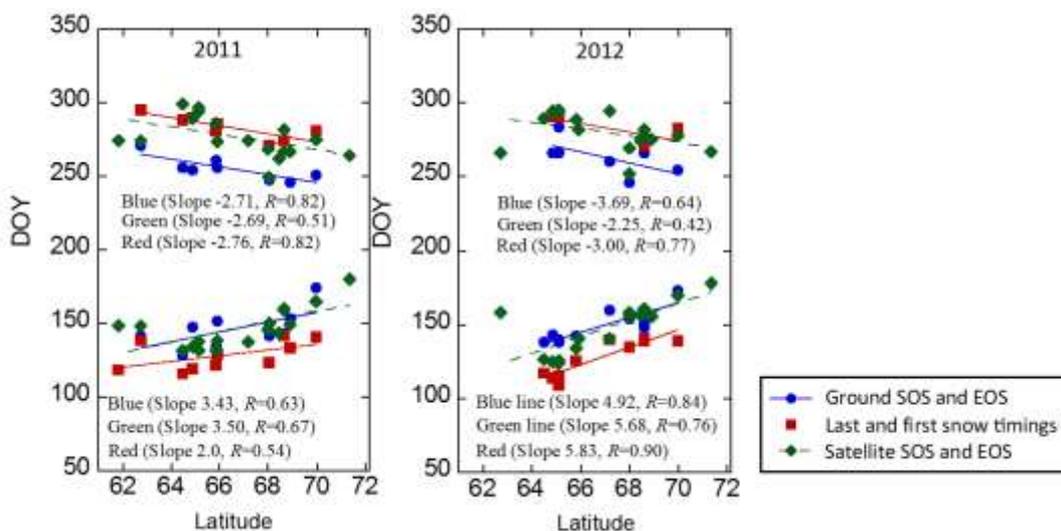


図6 衛星データから推定された展葉・落葉日のタイミング、地上カメラによる展葉・落葉日のタイミング及び雪解け・降雪のタイミングの緯度勾配(北緯 61° ~ 71°)

(3) アジア地域における衛星データ利用型陸域モデルの改良と陸域生態系変動の把握

高精度化モデルによる現在と将来における炭素循環シミュレーションを行いアジア地域における純生態系生産量の空間分布を調べた結果、温暖化傾向が強いシナリオほど大きな炭素吸収源になることがわかった(図7)。5つのシナリオ別に結果を比較すると、過去よりも将来の方が吸収量は多く、どの地域も全体的に吸収方向にシフトした。温暖化に伴って生態系に対する温度制限が緩和され、より大きな吸収源になる可能性がある。サブ課題1から提供されたSVRモデルによる推定結果、及び経験モデル相互比較プロジェクトFLUXCOMのモデルアンサンブルとの比較では、サブ課題3の純生態系生産量の方が熱帯で低い値を示した(図8)。この違いの妥当性を理解するためにフラックス観測タワー3地点の観測値を合わせて調べた結果、サブ課題3とフラックス観測タワーの結果は純生態系生産量が負になるなどの傾向が良く一致した。このため、サブ課題1で開発されたモデルの結果がやや過大評価である可能性があり、サブ課題1の担当者とモデル精度向上について議論をした。その結果、サブ課題1で開発したSVRモデルの元となる観測データが熱帯地域で不足しているため、精度が下がる可能性があるという結論に至った。熱帯地域のフラックス観測をより増やしていくことが、同地域の炭素収支解析において重要であると言える。また、純生態系生産量の推定値幅がサブ課題3とその他で大きく異なった。これは初期値を求めるspin-upが原因であり、サブ課題1が開発を進める林齢マップやバイオマス量などの炭素プール量に関わるデータが今後の重要な研究課題となることを指摘する。

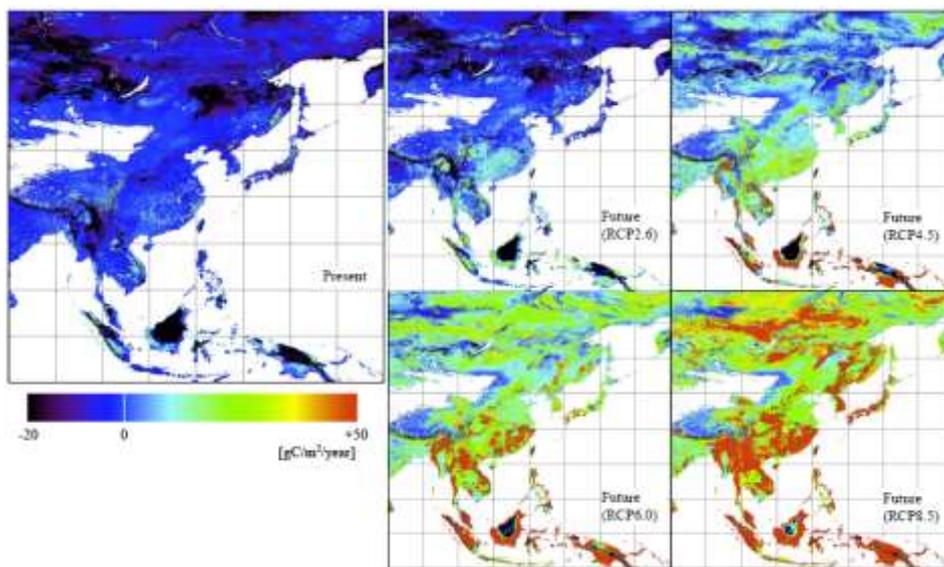


図7 衛星観測(左)と4つの将来予測シナリオ(右)を基にしたアジア地域の純生態系生産量の空間分布。

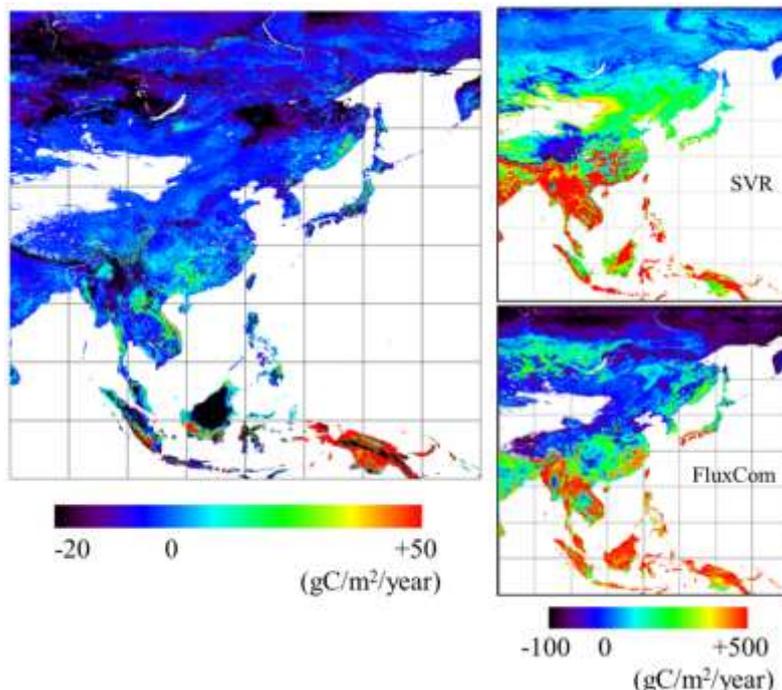


図8 純生態系生産量の空間分布。本研究(左)とサブ課題1が開発したSVRモデルによる(右上)、及びFLUXCOMの結果(右下)。カラーバーは、左図が左下、右の2図が右下。

(4) 北極域における陸域生態系変動の把握

アラスカ域を対象とした2000～2011年における広域化された総一次生産量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、純生態系交換量(NEE)を図9に示す。GPP及びREは、森林帯である内陸部において高く、北極海沿岸のツンドラ生態系において低い値を示した(図9a,b)。広域化されたNEEから、ツンドラ生態系はこの期間においてCO₂の放出源、森林生態系はCO₂の吸収源として作用していることが明らかとなった。

この期間におけるCO₂収支の空間分布には、原野火災による影響(図9f)が強いことが明らかとなった(図9d,e)。火災の影響は森林が有する内陸地域で特に顕著であり、近年に森林火災が起こった地域においてはGPPの減少(図9d)に伴ってNEEが放出傾向となっていることが見積もられた(図9e)。一方、森林火災が起こった後10年以上が経過している地域については、植生の回復によるGPPの増加により、年間のCO₂吸収量が増加することが示された(図10)。領域平均のGPP、REは、2000～2011年でそれぞれ369 ± 22、362 ± 12 Tg C yr⁻¹であり、対象とした12年間でCO₂ニュートラルであり、吸収・放出に有意な傾向は見られなかった⁷⁾。

森林火災による土地被覆変化は、アラスカ域全体のエネルギー収支を変化させた。特に、火災跡地では冬季のアルベドが増加するため純放射量が低下した。冬季における純放射量の低下は年間の純放射量を低下させた。このことは森林火災によって地表面の放射強制力が低下することを表す。純放射量の低下に伴って顕熱フラックスの低下が見積もられており、森林火災は対流圏下層の気温を低下させる効果をもつことが示唆された。将来の温暖化環境下においては森林火災が多発・大規模化することが懸念されているが、火災後の生態系は純放射量や顕熱フラックスを低下させるため、温暖化に対してネガティブフィードバックとして作用する可能性があることが示された。

北極域における経験的広域化プロダクトとしてFLUXCOMプロダクトの評価を行った。北極域におけるGPPについてはシベリアや北アメリカ北部などに分布するツンドラ植生において低く、北ヨーロッパやロシアなどに広がる森林域で高い値を示した。NEEは、ツンドラ地域の広範囲で炭素の正味収支がゼロ、もしくは炭素放出を示した。一方で、多くの森林域では強い吸収となった。この傾向は、アラスカ域について構築したデータ(図9c,d)と同様であった。また、アラスカ域で構築したデータ(図9)と季節変動・経年変動を比較した結果、季節変動については、概ね、両者の結果が一致した。経年変動に関しては、項目によって絶対値に差がみられるものがあるが、変動成分に着目すると、顕熱フラックスとNEEを除いて、変動のパターンが一貫していた。以上のことから、北極域を対象とした解析においてはFLUXCOMデータが有効であることが分かった。

広域蒸発散量データをモデル制約に用いたパラメータの最適化実験を行った。サブ課題1で構築されたパラメータ最適化手法を利用し、未知数として最大気孔コンダクタンスと遮断蒸発係数の2変数を選択してパラメータの最適化実験を行った。得られた最大気孔コンダクタンス(図11)については、空間的には植生タイプに応じた分布を示した。一部、海岸近辺においては大きな値が得られているが、これは気候データの解像度に起因した問題と考えられる。蒸発散量に関するRMSEについては0.2～0.3 mm day⁻¹程度であったが、モデルに付随する既存パラメータを使った実験と比較して、大幅な改善が得られた。最大気孔コンダクタンスなどの植物生理パラメータの調整によりプロセスモデルの再現性が向上する可能性が示されたことから、この地域における植物生理パラメータの観測の重点化や推定法を確立することがモデルの不確実性を低減させる上で重要であるといえる。

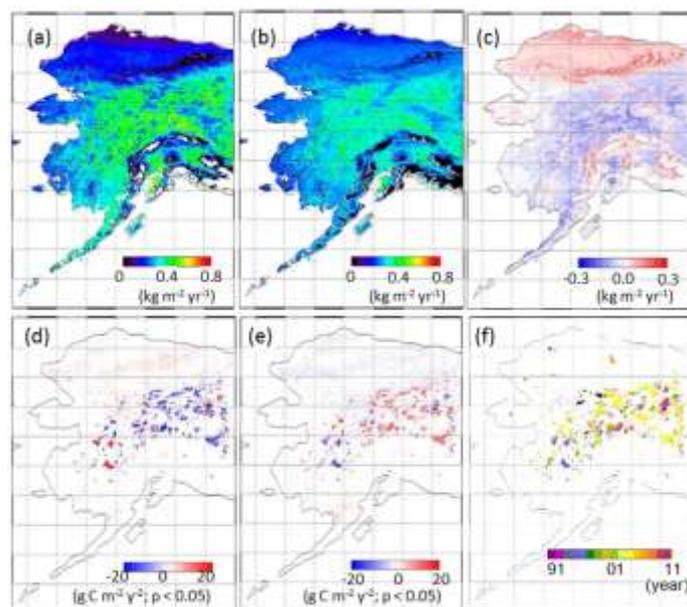


図9 経験的広域化手法により推定された2000～2011年の年間平均(a)GPP、(b)RE、(c)NEE及び、同期間における(d)GPPと(e)NEEの増減傾向と(f)原野火災が生じた年。

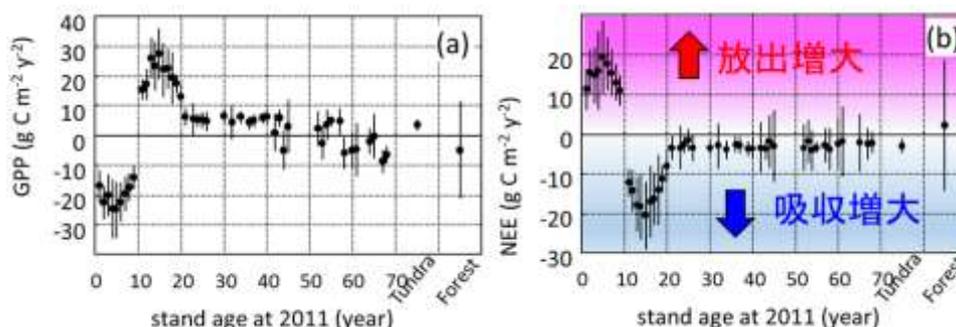


図 10 火災からの年数に対する 2000～2011 年における(a)GPP と(b)NEE の増減傾向。
図 8 を林齢ごとに整理した。

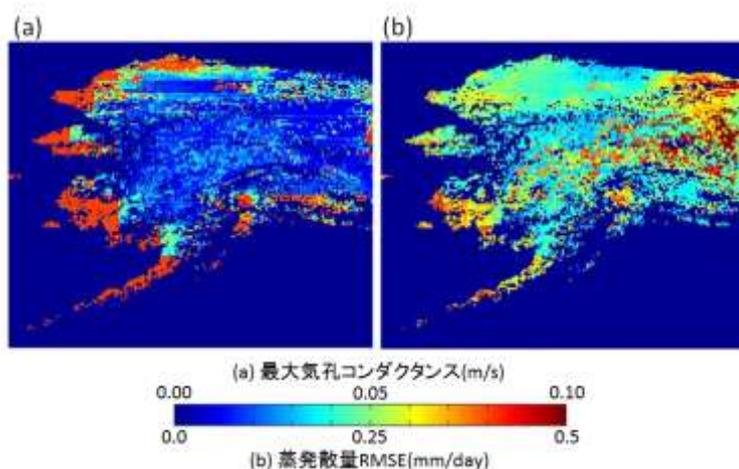


図 11 アラスカ域を対象とした広域衛星プロダクトを利用したモデルパラメータ最適実験の結果の一例。(a)推定された最大気孔コンダクタンス、(b)モデル・データ間の蒸発散のRMSE。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・本研究で構築された地上観測と衛星観測を組み合わせたプロダクト(経験的広域化プロダクト)は多くの地上観測データを反映させていることから信頼度が高く、炭素循環解析における重要なプロダクトとなる。従って、炭素循環に関わる多くの研究者に利用されることが期待できる。プロダクトは地域的にも多岐(アラスカ・アジア・グローバル)にわたる。
- ・特に、観測点不足からこれまでに広域的な評価が困難であった北極域生態系におけるCO₂・エネルギー収支に関して、地上観測データと衛星観測データを利用した高精度な広域評価を可能にした。
- ・既存の葉面積指数やフェノロジーのグローバル衛星プロダクトでは北方林の葉面積指数が過大評価であった。その原因を突き止め、検証作業を行うことにより、より正確なデータ構築ができた。
- ・全球スケールでの林齢や生態系純交換量は、陸域炭素循環の再現には必要であったが、これまでには存在しないデータであった。従って、これらデータ構築と検証自体に意義が高いものである。
- ・本研究で構築したモデルは、既存の多くのモデルに比較してより多種の広域データを制約にするために、再現性が格段に高くなる。従って、現代や将来などの炭素収支の推定がより正確になる。
- ・広域炭素・エネルギーフラックスのデータをモデルの制約として用いることで、根の深さなど測定が困難なパラメータを空間的に逆推定できる可能性を示した。逆推定したパラメータは汎用性が高く他モデルにも利用可能である。従って一般的な陸域モデルの向上という波及効果が期待できる。
- ・本研究で構築したデータ・モデル融合のフレームワークは、一般的な陸域炭素循環モデルへの適用も可能である。従って、陸域炭素循環モデル全体への波及効果と、陸域炭素循環モデルが改善されることによる温暖化予測の不確実性低減への貢献が期待できる。
- ・詳細な解像度で炭素循環のホットスポットを解析することで、熱帯での地上観測の充実の必要性や炭素プール量関連の研究促進など、炭素循環モデル研究分野における本質的な課題を創出することができた。
- ・プロセスモデルによる確度の高い純生態系生産量の計算を全球1kmグリッドまで詳細化する研究の道筋がついた。衛星観測データを複合利用した炭素循環研究では例がないことから、自然生態系の二酸化炭素の吸収・放出量を診断的に把握する新規的な研究成果である。

・北極域生態系におけるCO₂・エネルギー収支には、原野火災や火災からの植生回復が重要なプロセスであることが明らかとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・今後、陸域炭素収支の推定をより精緻化する上での必要な観測項目、データセット項目として、正味炭素フラックス、バイオマス、樹齢、火災履歴などを抽出した。これらの項目は、今後のモニタリング政策策定への提言として利用できる。
- ・衛星観測データをモデルに統合させることにより、陸域炭素循環モデルの精度が向上した。このモデルの利用により広域炭素フラックスがより正確に再現される。この結果は大気と陸域の炭素収支をより正確に推定することとなり、国別、地域別などの炭素管理の方策に利用できる。
- ・東アジア、東南アジアにおける純生態系生産量の主題図は、我が国やアジア地域の温暖化抑止政策の立案の基礎資料として利用可能である。温暖化啓蒙活動の一環として、極東アジア地域を対象としたデータ配信事業(国立環境研究所ホームページ内)を行っており、これらの主題図の一部はその事業への活用を検討している。主題図は、自然生態系の二酸化炭素吸収量を現状把握するデータであり、温暖化抑制策における自然生態系の価値を定める基礎データそのものであることから、温暖化抑止政策の立案に貢献することが見込まれる。
- ・日本は北極評議会のオブザーバ資格を有するなど、国際的にも北極圏において重要な役割を果たすようになってきている。本課題では、北極域における葉面積・フェノロジーデータの精緻化、多くの観測データを用いた炭素、エネルギーフラックスの広域データの構築などを完成させており、これらのデータは既存研究に比較して多くのサイトを利用するなどして、炭素収支のメカニズムなどの解明に貢献している。これらの成果を生かして、北極評議会のための基礎資料として利用できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Ueyama M., Ichii K., Iwata H., Euskirchen E., Zona D., Rocha A., Harazono Y., Iwama C., Nakai T., Oechel W. (2013) Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 118, 1266–1281, doi:10.1002/jgrg.20095.
- 2) Kondo M., Ichii K., Ueyama M., Mizoguchi Y., Hirata R., Saigusa N. (2013) The role of carbon flux and biometric observations in constraining a terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia. *Ecological Research*, 28, 893–905.
- 3) Ichii K., Kondo M., Okabe Y., Ueyama M., Kobayashi H., Lee S.J., Saigusa N., Zhu Z., Myneni R.B. (2013) Recent changes in terrestrial gross primary productivity in Asia from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, 5, 6043–6062.
- 4) Kobayashi H., Suzuki R., Nagai S., Nakai T., Kim Y. (2014) Spatial scale and landscape heterogeneity effects on FAPAR in an open canopy black spruce forest in interior Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(2), 564–568, 10.1109/LGRS.2013.2278426.
- 5) Shi Y., Sasai T., Yamaguchi Y. (2014) Spatio-temporal evaluation of carbon emissions from biomass burning in Southeast Asia during the period 2001–2010. *Ecological Modelling*, 272, 98–115, doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.09.021.
- 6) Ueyama M., Ichii K., Iwata H., Euskirchen E.S., Zona D., Rocha A.V., Harazono Y., Iwama C., Nakai T., Oechel W.C. (2014) Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming based on upscaling eddy covariance measurements. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 119, 1947–1969, doi:10.1002/2014JG002717.
- 7) Kondo M., Ichii K., Ueyama M. (2015) Impact of anomalous climates on carbon allocation to biomass production of leaves, woody components, and fine roots in a cool-temperate deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 38–50.

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Sasai T., Nakai S., Setoyama Y., Ono K., Kato S., Mano M., Murakami K., Miyata A., Saigusa N., Nemani R.R., Nasahara K. (2012) Analysis of the spatial variation in the net ecosystem production of rice paddy fields using the diagnostic biosphere model, BEAMS. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA.
- 2) Ichii K. (2012) Recent changes in terrestrial carbon cycle in Asia: Multimodel and data analysis. The Second International Workshop on Diagnosis of Environmental Health by Remote Sensing, Chengdu, China (招待講演)
- 3) 市井和仁, 近藤雅征, 植山雅仁, 佐々井崇博, 小林秀樹 (2013) 衛星データを複合利用したモデルデータ統合による陸域炭素循環モデルの改善のフレームワーク, 日本地球惑星科学連合大会2013年大会, 千葉.
- 4) 佐々井崇博, 山田大輔, 相庭一輝, 脊戸山祐子, 林美晴, 小谷亜由美, 太田岳史, 村上和隆, 加藤創史, 吉田龍平, 檜山哲哉, 松永恒雄, 三枝信子, 奈佐原顕郎 (2013) 衛星観測データを複合利用した診断的手法によるシベリア地域の炭素収支解析, 日本気象学会2013年度秋季大会, 仙台.
- 5) Kobayashi H., Ichii K., Ashwani K., Aoyama K., Nagai S. (2013) Analysis of green-up onset across east Siberian and Alaskan forests. AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, USA.
- 6) Ueyama M., Ichii K., Iwata H., Euskirchen E., Zona D., Rocha A., Harazono Y., Iwama C., Nakai T., Oechel W. (2013) Simulating carbon and water fluxes at Arctic and boreal ecosystems in Alaska by optimizing the modified BIOME-BGC with eddy covariance data. AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, USA.
- 7) Kondo M., Ichii K. (2014) Estimation of global forest age by biosphere model inversion. AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo.
- 8) Ueyama M., Tahara N., Iwata H., Nagano H., Harazono Y. (2014) Inverse estimation of parameters for a coupled photosynthesis and stomatal conductance model using eddy covariance measurements at a black spruce forest in Alaska. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA.
- 9) Ichii K. (2015) Analysis of recent changes in terrestrial carbon cycles using bottom-up and top-down estimations. Workshop on Meteorological and Carbon Cycle Modeling over Forest and Agricultural Land, PyeungChang, Korea (招待講演)
- 10) Ueyama M., Iwata H., Ichii K., Nagano H., Harazono Y., Euskirchen E., Donatella Z., A. Rocha, T. Nakai (2015) Long-term observations and synthesis for evaluating carbon dioxide fluxes over Alaska. Fourth International Symposium on the Arctic Research, Toyama.

7. 研究者略歴

課題代表者: 市井 和仁

名古屋大学大学院修了、博士(理学)、福島大学准教授、
現在、海洋開発研究機構主任研究員

研究分担者

- 1) 市井 和仁 (同上)
- 2) 小林 秀樹
東京工業大学大学院修了、博士(工学)、現在、海洋開発研究機構主任研究員
- 3) 佐々井 崇博
名古屋大学大学院修了、博士(理学)、名古屋大学助教、現在、筑波大学助教
- 4) 植山 雅仁
大阪府立大学農学部卒業、理学博士、大阪府立大学助教、現在、大阪府立大学准教授

2RFa-1201 衛星データを複合利用したモデルデータ融合による陸域炭素循環モデルの高精度化

(1) 衛星観測・地上データと陸域炭素循環モデルの統合手法の構築

独立行政法人 海洋研究開発機構

地球表層物質循環研究分野

市井 和仁

<研究協力者>

独立行政法人 海洋研究開発機構

地球表層物質循環研究分野

近藤 雅征（平成24-25年度）

平成24～26年度累計予算額：15,957千円

（うち、平成26年度予算額：909千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

全球規模の温暖化予測においては、予測の不確実性を与える一要因である陸域炭素循環のより正確な把握が求められている。また、地域スケールでも、森林による炭素収支の把握と管理、将来の気候変動に対応した陸域植生の変動予測などの政策決定のために炭素循環の把握が先進国・途上国において急務となっている。陸域炭素循環をより正確に把握・理解するために、サイトにおける観測、衛星観測、陸域炭素循環モデリングなどの様々な手法を効率的に統合することが必要である。本サブ課題では、(1) 既存の利用可能データを有効利用した陸域炭素循環モデル改善への道筋を立て、陸域炭素循環モデルを高精度化する、(2) データ融合実験を行い、新規モデルから期待出来る科学的知見を模索する、(3) 完成されたモデルを用いて陸域炭素循環の過去～将来の変動を再評価する、(4) 陸域炭素循環研究において必要であるが欠如しているデータ項目の抽出とデータ構築の4項目を実施した。(1) (2) については、Biome-BGCモデルを基盤とし、衛星プロダクトなどの利用できるデータセットを有効利用した陸域炭素循環モデリングのフレームワークを構築し、その上でパラメータ最適化を含む陸域炭素循環モデルを構築した。サイトレベル実験では、モデルでの炭素動態（フラックス・蓄積量）を表現するには炭素フラックスのみならず、バイオマスなどの炭素プール量に関するデータも必要であることが明らかになった。また広域実験では、いくつかの物理量の逆推定を試み、根の深さや最大光利用効率などの空間分布を推定し、広域炭素循環シミュレーションの再現性も向上した。また、これらの解析より、陸域炭素循環シミュレーションを今後改善するには、炭素プール量や林齢などが必要であることが明らかとなるなど、今後、整備が必要であると想定されるパラメータをまとめた。さらに、生態系純炭素交換量と林齢については、グローバルデータセットの構築と既存のプロダクトとの比較を行った。

[キーワード]

陸域炭素循環モデル、水・炭素循環、データ融合、最適化、リモートセンシング

1. はじめに

全球規模の温暖化予測においては、予測の不確実性を与える一要因である陸域炭素循環のより正確な把握が求められている。また、地域スケールでも、森林による炭素収支の把握と管理、将来の気候変動に対応した陸域植生の変動予測などの政策決定のために炭素循環の把握が先進国・途上国において急務となっている。陸域炭素循環をより正確に把握・理解するために、サイトにおける観測、衛星観測、陸域生態モデリングなどの様々な手法を統合する試みが行われている。これらの達成には、(1)サイト観測を衛星データにより広域化(スケールアップ)して、広域プロダクトを構築する、(2)広域プロダクトを陸域炭素循環モデルに用いることでモデルの改善を行う、の2つのステップが必要である。衛星観測データをベースにした陸域プロダクトの構築は過去にも行われており、いくつかのプロダクトも公開されている。例えば、Terra 衛星搭載のMODIS センサを利用した植生指数・葉面積指数等がある。その他GOSAT衛星からの陸域CO₂収支や光合成活性に関係するクロロフィル蛍光などの最新のデータも利用できる。一方、このような陸域プロダクトを利用した陸域炭素循環モデルを改善する試みやデータとモデルを融合させる研究(データ・モデルフュージョン)も広く行われている。例えば、衛星観測ベースの広域蒸発散、光合成量をモデルの制約として用い、植生の根の深さや最大光合成速度等を逆推定したモデル改善が進められている^{1), 2), 3)}。しかし、これらは陸域炭素循環モデル内の一部パラメータのみの改善にとどまっている。すなわち既往の研究は、ある特定のパラメータやプロダクトに着目したものであって、様々な衛星プロダクトを用いて統合的に陸域炭素循環モデルを改良するものではなかった。

2. 研究開発目的

本課題では、様々な衛星プロダクトを有効利用し、データ・モデル融合を通じた陸域炭素循環モデルの高精度化を目的とする。具体的には、(1)既存の利用可能データを有効利用した陸域炭素循環モデル改善への道筋を立て、陸域炭素循環モデルを高精度化する、(2)データ融合実験を行い、新規モデルから期待出来る科学的知見を模索する、(3)完成されたモデルを用いて陸域炭素循環の過去～将来の変動を再評価する、(4)陸域炭素循環研究において必要であるが欠如しているデータ項目の抽出とデータ構築、という点を目的とする。

3. 研究開発方法

(1) 衛星観測・地上観測データと陸域炭素循環モデルの統合手法の構築

本課題では、様々な観測データを制約に用いることのできる「データ・モデル融合型陸域炭素循環モデル」を構築した。モデルの概念設計を行うにあたり、現存する種々の陸域炭素循環モデルに共通する問題点を整理した。その結果、現状の様々な陸域炭素循環モデルにおける問題点として、①観測データの不足：様々な地上観測サイトは整備されているが、全球をカバーするには不十分であること、②無限に存在するパラメータの組み合わせ：観測されるパラメータの数に対してモデル内に含まれるパラメータは膨大であり(例えばBiome-BGCモデルでは50以上のパラメータが存在する)、観測を再現可能なモデルパラメータの組み合わせの自由度が非常に高いこと、③パラメータチューニングが手作業：多くのモデルではモデルパラメータの調整(チューニング)には手作業で行う必要がある。従って、決定されたモデルパラメータは研究者の主観や技量に依

存してしまうこと、④アルゴリズムの不確実性：モデル毎に使用する計算アルゴリズムが大きく異なり、どのモデル表現が最良であるかの判断が必要であること、などの潜在的な問題があると整理できた。これらの問題点を解決できるモデルフレームワークの設計を行った。

本課題で作成したモデルは、これら既存モデルの問題点（①－④）を改善する試みのもと設計した。①に関しては、地上観測ネットワークと衛星観測データを組み合わせた空間的な物理量プロダクトをモデルの制約に利用することを試みた。既存研究では広域スケールにおいては単一プロダクトの利用に留まっている研究がほとんどである^{1),2),3)}。本研究では複数の広域プロダクトを利用することとした。②に関しては、複雑であるとされている陸域炭素循環モデル構造をいくつかの独立性の高いサブモデルに分割することによって解決を図った。モデル全体は様々な素過程を表現するサブモデルの組み合わせで構成されている。これらを独立なサブモデルに分割することにより、比較的パラメータの自由度を小さくすることができる。パラメータ自由度が小さくなることはパラメータ最適化の際の反復計算の回数の節約にもつながる。③に関しては、近年、様々な観測データを制約にしてモデルパラメータを自動決定するモデルパラメータ最適化手法が開発されている。また、最適化を行うためには、計算速度の高速化が求められ、モデル自体をなるべくシンプルなものにする必要がある。④に関しては、代表的なモデルで用いられているサブモデルを比較・評価することによって最適なサブモデルを選択できる。

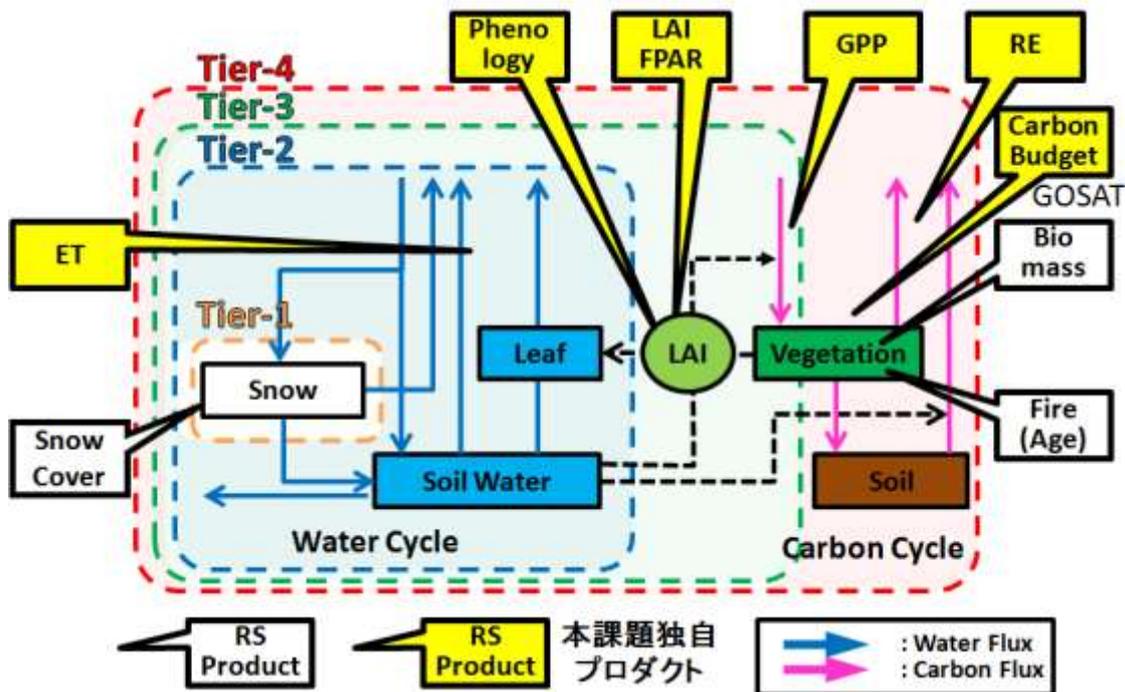
以上の事項を踏まえた新規陸域炭素循環モデルの概念図を図(1)-1に示す。このモデルの大きな特徴としては、①種々の衛星プロダクトの利用：多くの衛星データをモデルの制約に利用することで様々な物理量に関しての再現が可能になること、②モデルデータ融合手法の優位性：独立性の高いサブモデルに分割することによりパラメータの自由度が低く高速なパラメータが可能になること、③種々のモデルの統合化：既存のいくつかの陸域炭素循環モデルのアルゴリズムの比較を通して最良であると判断されるアルゴリズムの選択を行うことを挙げることができる。以下に各特徴の概略を述べる。

①種々の衛星プロダクトの利用に関しては、水に関しては積雪分布や蒸発散量、炭素循環に関してはフェノロジー、光合成量・呼吸量、バイオマス量、森林火災情報など様々な衛星データをモデル制約として利用することができる(図(1)-1)。本課題独自のデータとしては、サブ課題2で構築されるフェノロジー(展葉時期)と葉面積指数とサブ課題1担当者がこれまで構築してきた機械学習モデルを利用した経験的広域化手法(Support Vector Regression (SVR) モデル)^{2),3)}による総一次生産量(Gross Primary Productivity; GPP)、生態系純生産量(Net Ecosystem Productivity; NEP)、GOSAT L4Aプロダクトによる大気-陸域炭素交換量などである。

②データモデル融合手法の優位性に関しては、陸域炭素循環モデルを独立性の高いサブモデルに分割し、独立性の高い順に最適化を行うこととした。例えば、陸域炭素循環モデルの多くのモデルに共通する基本構造としては、炭素循環・水循環で構成される。この構造のうち、サブモデルの独立性を考慮した場合に、それぞれのサブモデルを段階的に最適化することが可能である(Sequential Optimization)。例えば、最も独立なサブモデルとしては、雪モデルが挙げられる(Tier-1; 図(1)-1)。次に葉面積指数の衛星プロダクトを用いることにより、水循環サブモデル全体に制約を与えることが可能である(Tier-2)。炭素循環については水循環サブモデルの影響を大きく受けるため、水循環サブモデルの改良がおこなわれたのちに最適化をする必要がある。この場合、まずは、衛星で観測された葉面積指数を境界条件として与えることにより、光合成量に関

するモデルが制約できる (Tier-3)。一方で森林や草原のフェノロジー (展葉・落葉) については独立にモデル制約が可能である (Tier-3)。さらには生態系呼吸量やバイオマス量などの制約を与えることにより炭素循環全体のモデルの最適化を行う (Tier-4)。

③種々のモデルの統合化については、本課題グループにてソースコードのアクセスが可能なモデルを選び、それら各モデルの構造を調査することにより、どのサブモデルの構造が望ましいのかの決定を進めた。本課題においては、Biome-BGCモデルを基盤としているが、その他、BEAMSモデル、CASAモデル、LPJモデル、TOPSモデル、TRIFFIDモデル、VISITモデルなどのモデルの構造を精査し、水循環サブモデルや炭素循環サブモデルの構築を行った。



図(1)-1 本課題で構築する予定のデータ・モデル融合型陸域炭素循環モデルの概念設計。モデルの基本構造は、一般的な陸域炭素循環モデルにも適用できる形(水循環・炭素循環の結合モデル)とし、水循環・炭素循環においてモデルの制約として利用可能な広域データを吹き出しで示した。なお黄色の吹き出しは本課題の担当者が構築する独自データとなる。各Tierはモデルパラメータ最適化の段階を示す。

(2) サイトスケールにおけるモデルーデータ融合実験

上記の概念でのモデル構築の前実験として、観測サイトスケールでのモデルーデータ融合実験、モデルパラメータ最適化実験を行った。本課題では2種類の実験を行った。

まずは、AsiaFluxに所属する4サイト (高山、苫小牧、富士吉田、Laoshan(中国)) において、比較的パラメータが入手しやすいと考えられる炭素フラックス (総光合成量GPPと純生態系生産量NEP) とプール量 (バイオマス・土壌炭素量) を再現させるためのパラメータ最適化実験を行った。Biome-BGCモデルを利用し、そのモデルパラメータの最適化を行った。特に、フラックスとプール量の双方を妥当に再現させるには、どの観測項目が必要かを議論した。

次に、より多様な観測データが存在するサイトにおいて、未知のモデルパラメータを逆推定する試みを行った。サイトは多数のフラックス項目・プール項目が通年観測されている高山サイトを選択した。モデルは新規モデルの基盤となるBiome-BGCを用い、高山観測サイトで観測された微気象学的な観測(渦相関法による観測)と生態学的手法による観測(植生各部の炭素プール量)などで得られた様々な炭素フラックス・プール量を利用して、実際の観測が困難である細根へのアロケーション比を逆推定し、観測された植生各部の炭素プールの経年変動を再現することを試みた。

(3) 広域におけるモデルデータ融合実験

上述のモデル設計方針やサイトレベルでの試行実験を基に水循環サブモデル・炭素循環サブモデルの構築を行った。水循環サブモデルに関しては、植生の葉面積の動態を衛星データから入力することとした。炭素循環サブモデルにおいては、植生の葉面積の動態を衛星データから入力するモードとモデル内部で計算するモードの2つを存在させた。

水循環モデルの構造としては、雪モデルと植生・土壌などの蒸発散モデルの2つのサブモデル・階層にて構成される。Tier-1の雪モデル(降雪・融雪プロセス)は、熱収支を考慮に入れたプロセスベースのモデル⁴⁾を採用した。一方で、経験的モデル(Temperature-index model)や半経験的モデル(温度指数・放射バランス)などの異なるアプローチのモデルを比較材料とした。雪モデルの評価は日本のアメダス観測点(計247地点)や北米の積雪水当量観測ネットワーク(SNOTEL; 約700地点)における積雪日数やアジア広域(10° S~80° N, 70° E~160° E)における衛星ベースの雪プロダクトを用いて行った。

蒸発散モデルはBiome-BGCに含まれる水循環モデルをベースにした。水循環サブモデルの評価としてデータ融合実験を行った。蒸発散の季節変動の広域マップ(SVR法による推定結果^{2),5)}を制約にしてモデル中の根の深さ(Rooting Depth)を推定した。この手法は元々アメリカ・カリフォルニアを対象に開発された³⁾もので、アジア域・グローバルへの適用を検証した。

炭素循環サブモデルのデータ融合実験を行った。炭素循環モデルについてもBiome-BGCモデルの炭素循環をベースにした。さらに、Biome-BGCモデルに対して衛星観測データから推定した葉面積指数(LAI)や光合成有効放射吸収率(FPAR)の変化データを入力して動作するモードを追加した。最適化にはLevenberg-Marquardt法を実装してパラメータの最適化を実施できるようにした。構築したモデルのデータ融合実験として、光合成部分に着目し、光合成量の空間的な推定結果を制約とすることで光利用効率の推定を試みた。

(4) 陸域炭素循環理解のための必要データの構築

上述の(1)~(3)の実験等を通して、陸域炭素循環のモデルシミュレーションにおいて、必要であるが、現状ではデータセットが存在しないパラメータがいくつか存在することが明らかになった。本課題では全球林齢マップ、全球生態系純生産量(NEP)の2データに関して構築と評価を行った。

1) 全球林齢マップの作成

森林における炭素吸収・放出量は成長過程により大きく変化する。従って、林齢情報は森林炭素循環を推定する上で重要であり、本サブ課題で提示する「データ・モデル融合型陸域炭素循環モデル」の精

度向上に必要なデータである。そこで全球スケールの林齢マップ（解像度 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ）を作成し、既存の北アメリカ・中国域の林齢マップ^{6),7)}との比較を行った。

林齢マップ作製において、既存研究では実測林齢データを、衛星観測データを拠り所に空間的に広げる手法がとられている。しかし、この手法は密に実測データが存在する地域にのみ適用可能であり、全球における林齢分布の推定には不向きである。そこで、本研究では、現在の森林生態系が過去に受けた攪乱影響を推定することにより、林齢を逆算する手法を適用した。また、本研究では、林齢に影響を及ぼす攪乱（干ばつ、風害、熱害、虫害、等）の中でも、人為活動、森林火災を主要な要因と考えた。過去の人為活動による影響は、人為活動が生態系に与えた影響を指数化したHuman Influence Index⁸⁾を使用した。過去の森林火災による影響は、全球火災消失面積データ（GFEDv3.1⁹⁾）から火災頻度を基に計算した。これらのデータを融合させ、過去の人為活動・森林火災が現在の森林生態系に及ぼした影響（0から100%）を指数化した（以下、人為・火災影響指数）。この人為・火災影響指数を陸域炭素循環モデルBiome-BGCに組み込むことにより、現在（2000年とした）から300年後の森林成長を推定し、更にMitcherich式¹⁰⁾を用い2000年以前まで回帰することで林齢を推定した。

以上の手法で作成された全球林齢マップは、本サブ課題で作成した新規モデルに適用し、陸域炭素循環の広域シミュレーションを高精度化することが目的である。従って、プロットスケールの実測値や特定の小規模地域との比較に耐えられるプロダクトではない。

2) 全球陸域CO₂交換量プロダクトの評価

本サブ課題で作成した新規モデルの一利用法として、陸域CO₂交換量データを融合し陸域炭素循環の細部プロセス（光合成量、呼吸量、炭素蓄積量、分解量、等）を高精度に推定することが期待できる。より精度の高いプロダクトを判別するため、本サブ課題ではトップダウン・ボトムアップ手法から推定した2つの陸域CO₂交換量プロダクトを比較・評価した。トップダウン手法は大気CO₂濃度を制約とし、地表面CO₂交換量を推定する手法である。一方、ボトムアップ手法は陸域炭素循環のプロセスを考慮し陸域CO₂交換量を推定する手法である。IPCC第5次評価報告書による比較で、この2つの異なる手法による見積もりには未だ隔たりがあることが明らかとなっており、この誤差を如何に縮小させるかが今後の研究の課題である¹¹⁾。

本サブ課題では観測データを基に推定されたプロダクトに限定し、トップダウン手法からはGOSAT L4Aプロダクト¹²⁾、ボトムアップ手法からはSVRモデル^{2),3),5)}によるCO₂交換量プロダクトを比較した。GOSAT L4Aは、全球220サイトで観測されたCO₂濃度（GLOBALVIEW）に加えGOSAT衛星から観測された全球カラム平均CO₂濃度を制約とし、大気輸送モデルから推定したCO₂交換量プロダクトである。SVRモデルによるCO₂交換量は、全球144サイトの渦相関法による炭素フラックスデータを教師データとして、複数の衛星観測データプロダクト（土地被覆分類、地表面温度、葉面積指数、種々の植生指数（NDVI, EVI, GRなど））を説明変数とする高解像度（ $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ）の経験的なプロダクトである（以下、SVRフラックス）。これらのプロダクトの比較はGOSAT L4Aに合わせ、全球42陸域タイルにおいて2009年6月から2011年10月（月別分解能）の期間で行った。また、SVRフラックスと同等の基準で比較するため、GOSAT L4Aから化石燃料、火災によるCO₂排出量を差し引き、生態系によるCO₂交換量とした（以下、GOSATフラックス）。

（5）陸域炭素循環の理解促進のために必要な地上観測・衛星観測項目の抽出

これまでの成果において得られた知見より、今後の陸域炭素循環の理解やその不確実性低減のために

必要な地上観測・衛星観測の項目をまとめた。

4. 結果及び考察

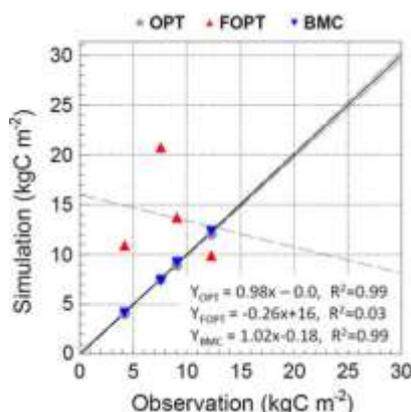
(1) 衛星観測・地上観測データと陸域炭素循環モデルの統合手法の構築

図(1)-1の概念設計を基にデータ・モデル融合型の陸域炭素循環モデルを構築した。本モデルは、Biome-BGCモデルを基盤とするモデルで、観測データを制約にしてLevenberg-Marquhart法に基づいたモデルパラメータ最適化アルゴリズムを実装したものである。Biome-BGCに対する変更点としては、(1)雪モデルの改訂、(2)長波フラックス、顕熱フラックスの実装、(3)火災履歴を含む攪乱履歴の導入、(4)衛星データからのLAI/FPARを入力としてモデルが動作する診断型モードの追加、などである。最適化するパラメータのターゲットを容易に変更できるようにするために、最適化するパラメータをテキストファイルに列挙するのみでパラメータの選択ができるようにした。広域におけるモデル実験（(3)広域におけるモデルデータ融合実験）においては、本モデルを利用した。

(2) サイトスケールにおけるモデルデータ融合実験

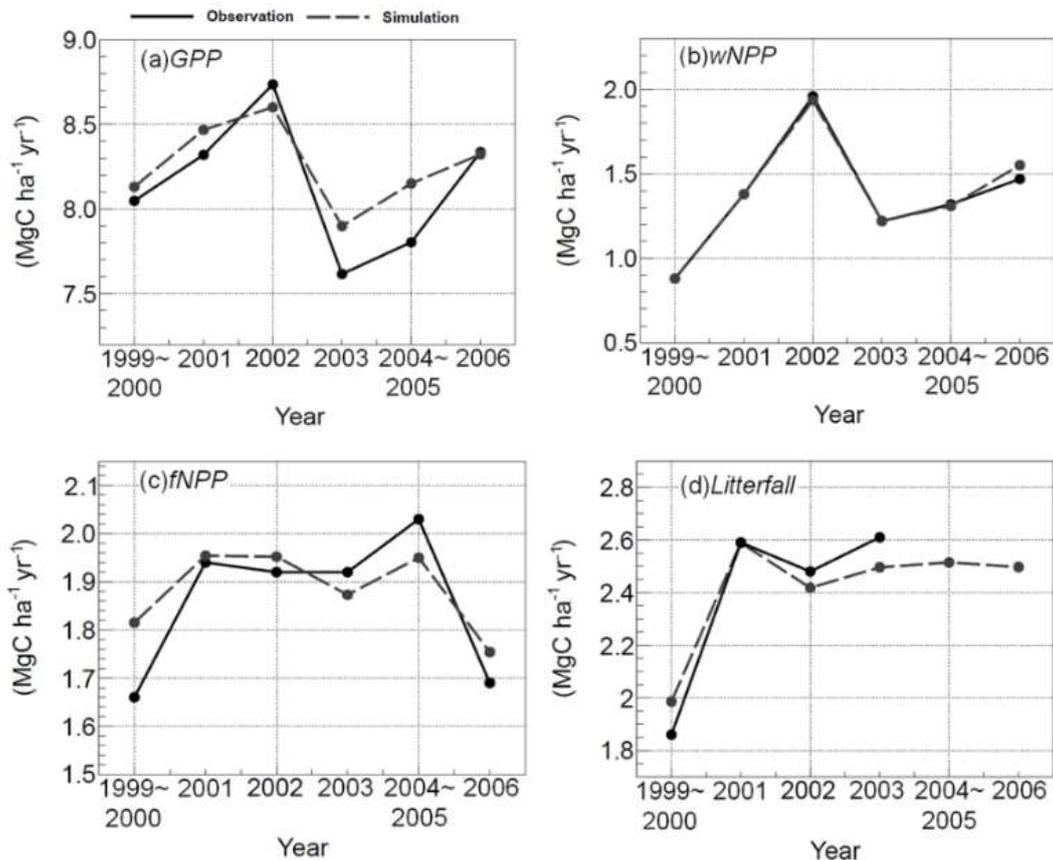
AsiaFlux 4サイトにおける実験では、炭素フラックス・炭素プール量の観測データのうち、片方のみをモデル制約にした場合、もう片方のパラメータをモデルで再現するのは困難であることが明らかになった。例えば、モデルで再現されたバイオマスと観測されたバイオマスを比較すると(図(1)-2)、バイオマス量とフラックスの双方を制約にした場合(図中OPT)とバイオマス量のみを制約にした場合(図中BMC)では、バイオマス量に関してモデルは観測値をよく再現していた。しかし、炭素フラックスのみを制約にした場合(図中FOPT)では、観測とモデルのバイオマス量の違いが大きかった。

サイトスケール（高山サイト）におけるモデル実験においては、バイオマスや様々な炭素フラックスの素過程の大きさが分かることにより、Biome-BGCにおける葉・幹・根への炭素の配分比が制約されることが分かり、その結果、モデルのバイオマスや炭素フラックス再現性が向上することが分かった(図(1)-3)。特にこれらの配分比の経年変化についてもモデルによって再現できることが分かり、これまでの光合成や生態系呼吸のみならず、バイオマス量、土壌呼吸、純一次生産量などの自動測定が困難なパラメータについても収集することがモデルの改良にも重要であることが示唆された。



図(1)-2 AsiaFlux 4サイトにおけるモデル再現と観測されたバイオマスの比較。バイオマス量と

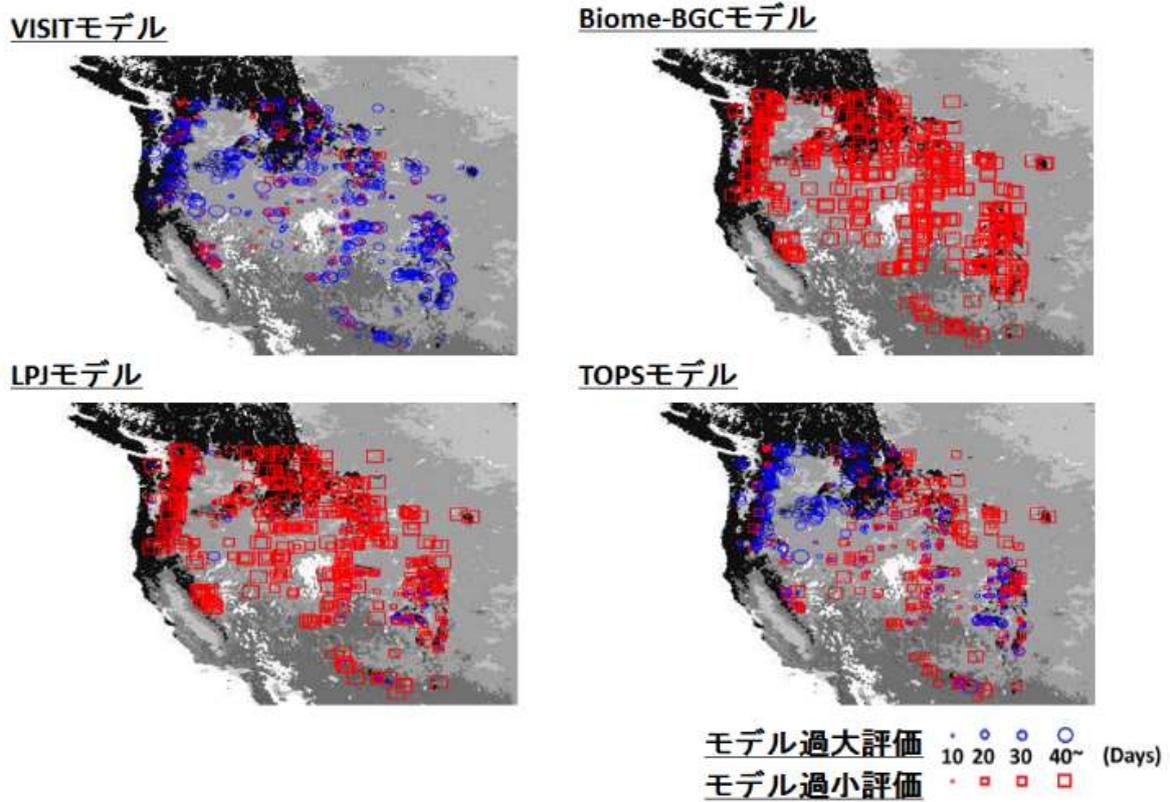
フラックスの双方を制約にした場合(図中OPT)、炭素フラックスのみを制約にした場合(図中FOPT)、バイオマスのみを制約にした場合(図中BMC)。



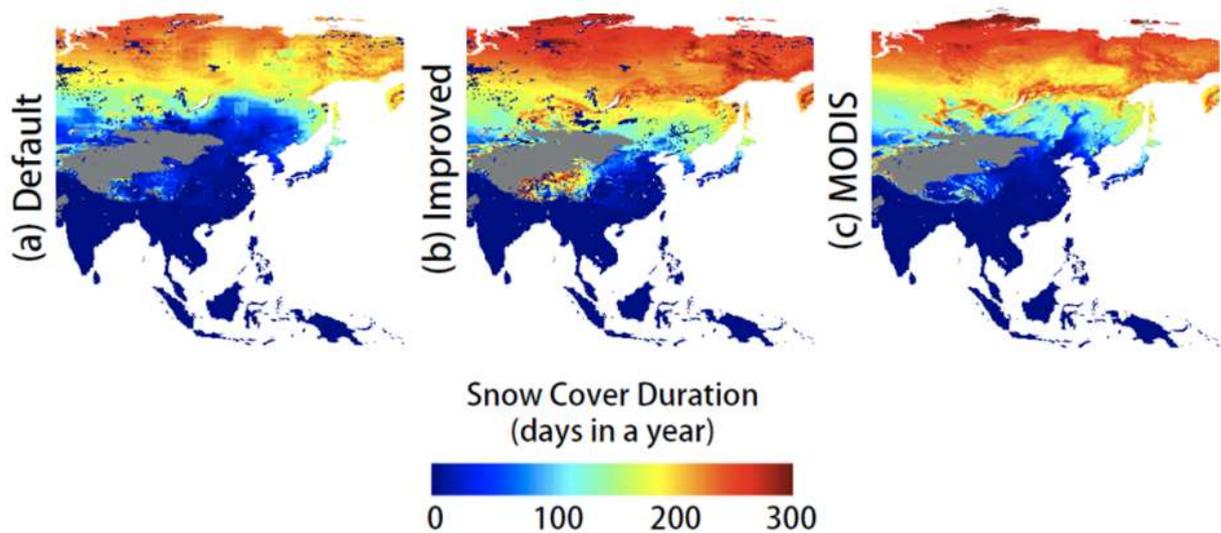
図(1)-3 高山サイトにおいて入手できる観測結果をモデル制約に利用した場合の炭素フラックスの経年変動の推定結果。(a) 光合成量、(b) 幹部純一次生産量、(c) 葉部純一次生産量、(d) リターフォール。Biome-BGCモデルを利用した結果。

(3) 広域におけるモデルーデータ融合実験

まず陸域炭素循環モデルに含まれる雪サブモデルの評価の結果を図(1)-4、5に示す。いくつかの陸域炭素循環モデルに含まれる雪サブモデルを利用して北米の積雪量観測ネットワーク(SNOTELサイト)で評価した結果、TOPSモデルに含まれる雪サブモデル⁴⁾が観測された積雪日数を最もよく再現できていた。従って、TOPSモデルに含まれる雪サブモデルを本モデルの雪サブモデルに採用した。さらに、アジア域において本課題の雪モデル⁴⁾、Biome-BGC雪モデル、MODIS積雪プロダクトと比較した結果、Biome-BGCの積雪日数(図(1)-5a)はMODIS積雪日数プロダクト(図(1)-5c)に比較して過小評価であった。本課題の雪モデル(図(1)-5b)は、一部で過大評価の傾向も見られたものの、全体的にはMODIS積雪プロダクトに近かった。他の陸域炭素循環モデルにおいてもBiome-BGCに含まれる雪サブモデルと同様の構造を取るモデルがいくつかあるため、他のモデルにおいてもBiome-BGC雪モデル程度の誤差を含むと考えられる。従って、今回採択したモデルは、現存のいくつかの陸域炭素循環に含まれる雪モデルのうち、最適なモデルであると結論付けた。



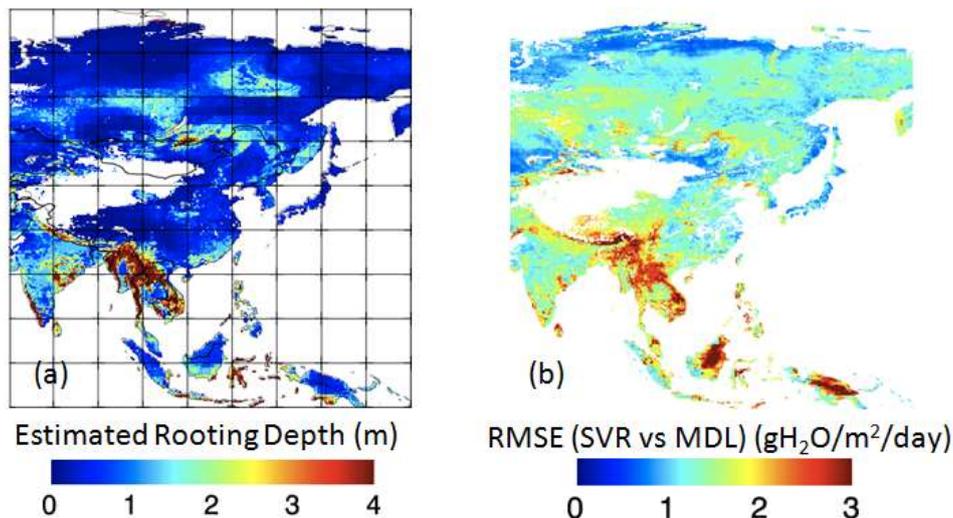
図(1)-4 SNOTEL 観測地点とモデル間の積雪日数比較。横軸は観測値、縦軸はモデル推定結果。



図(1)-5 積雪日数の分布。(a)Biome-BGC モデル, (b)本課題モデル, (c)MODIS 積雪プロダクト。

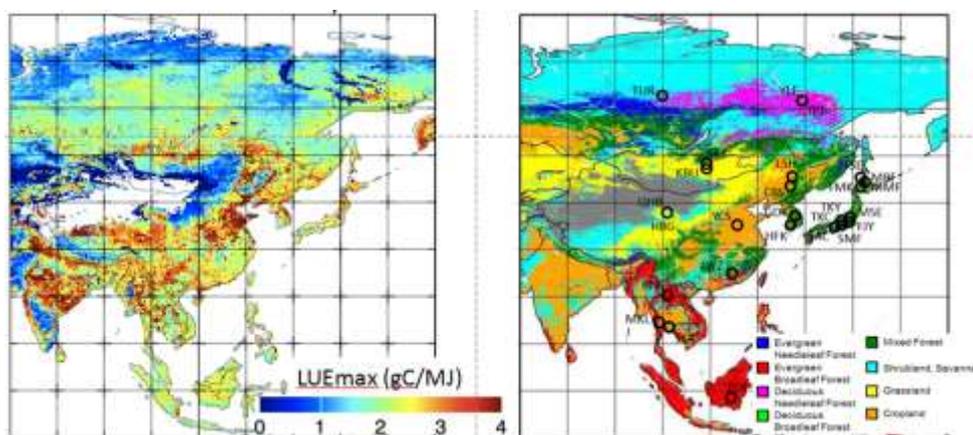
次に、観測ベースで推定した蒸発散の季節変動を拘束として、根の深さを逆推定した。その結果、空間的な変化がアジア域の根の深さに見られた。図(1)-6から、1 m以上の根の深さは特定の

乾燥地域に多く見受けられた。特にインド、ミャンマー近辺では衛星データより推定された蒸発散の季節変化をモデルで再現するためには、3m以上の根の深さが必要であることが分かった。一般に利用されている土壌インベントリのデータ(土壌深など)においては、これらの地域では1~2mであり、それらの値を利用すると蒸発散の季節変化を再現することが困難であった。熱帯地域において根の深さが深く推定された地域においては、雨季と乾季が比較的明瞭であり、乾季においても土壌などに保持された水によって光合成・蒸発散が可能であると推測される。また、シベリアなどでも2m程度の深さが推定されているが、これらの地域では凍土の融解などによる水の供給のために植生成長期間においても光合成や蒸発散が維持されると考えられる。これらを再現するためには、モデルにおける凍土の影響を考慮することが必要である。



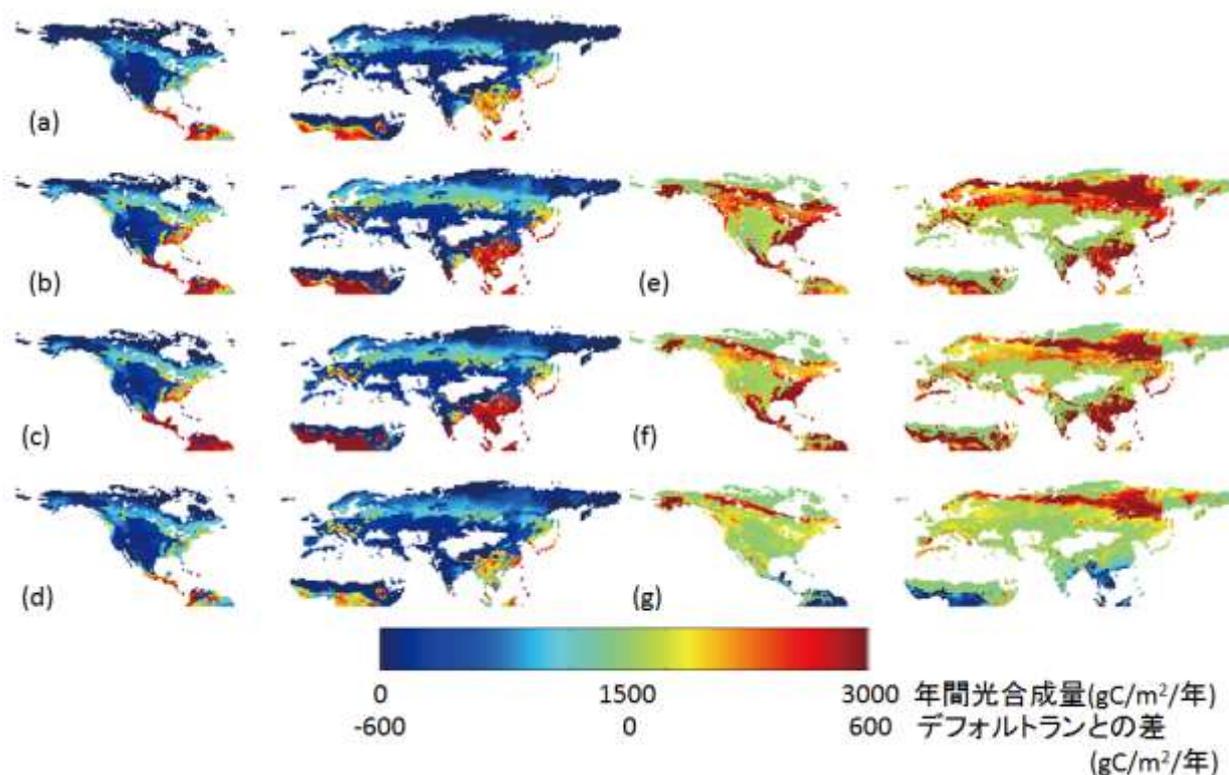
図(1)-6 土壌水循環モデルの構築を通して得られたモデルパラメータと蒸発散の再現性評価。(a) 広域観測(SVR)とモデルを利用して逆推定した根の深さ、(b)逆推定された根の深さを用いてモデル計算した際の蒸発散と広域観測(SVR)蒸発散のRMSE誤差(8日平均; 2001-2005年を対象)。

次に特に光合成部分に関するパラメータの最適化を行うことにより、光合成に関連したパラメータ(最大光利用効率)の空間分布が、現実的になった(図1-7)。例えば、中国やインドに広がる耕作地については、肥料や灌漑などがあるために、最大光利用効率が大きくなるのは現実的である。



図(1)-7 本課題で構築したモデルによるアジアの最大光利用効率の空間分布(左)とアジアの植生分布。

将来予測の結果(図(1)-8(a-d))としては、大気CO₂濃度と気温の両者を変動させた場合には、全球的に光合成量が増加する結果となった(図(1)-8(e))。この内訳を解析したところ、大気CO₂濃度の増加のみによる効果としては全球的に光合成を増加させるが(図(1)-8(f))、気温増加による効果では北方では光合成量が増加するが、一方で、熱帯域などの低緯度地域では光合成量を減少させていた(図(1)-8(g))。これらの地理分布の違いについては、基本的には、中高緯度では温暖化が起こっても、光合成の最適気温を超えないことで、継続的に光合成の増加が起こるが、低緯度では光合成の最適気温を超えてしまうなどの効果により、気温の上昇が逆に光合成を抑制することになる。将来の気候変動・二酸化炭素濃度変動による陸域炭素循環の変動の理解においては、気温に対する応答と二酸化炭素濃度に対する応答の組み合わせで決定されることとなり、それらの影響が今後も持続するか飽和するかをより解明することが重要となるだろう。



図(1)-8 将来予測モデルランの結果。(a)-(d)は年間光合成量(a: 気候, CO₂ともに現状; b: 気候, CO₂ともに変動; c: CO₂濃度のみ変動; d: 気温のみ変動)、(e)-(g)はシミュレーション(a)との差(e: (b)-(a); f: (c)-(a); g: (d)-(a))。

(4) 陸域炭素循環理解のための必要データの構築

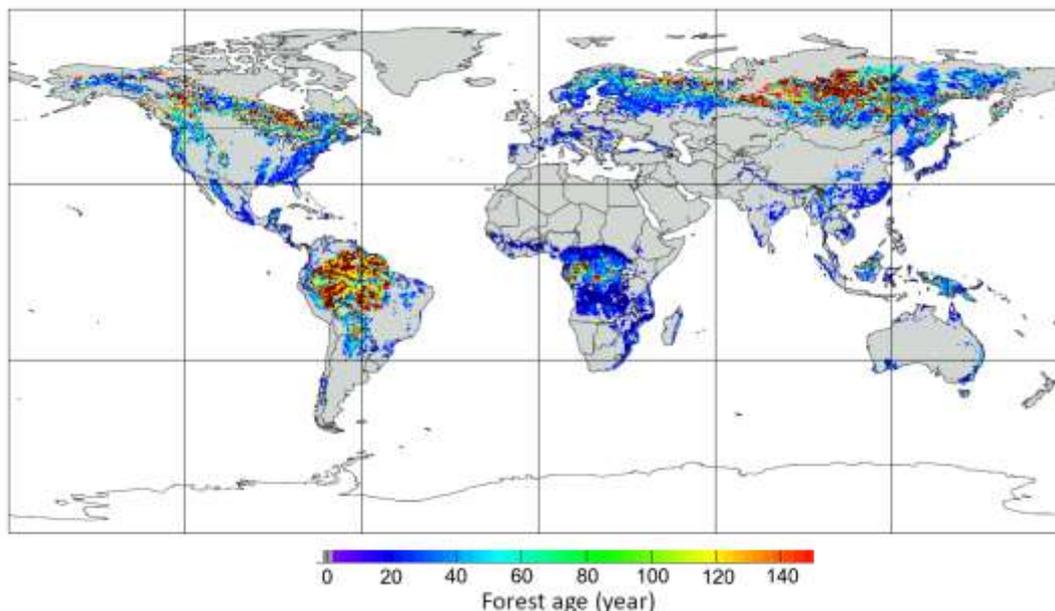
1) 林齢マップの構築と評価

本サブ課題で推定した全球林齢マップを図(1)-9に示す。顕著な特徴として、100年以上の林齢分布が

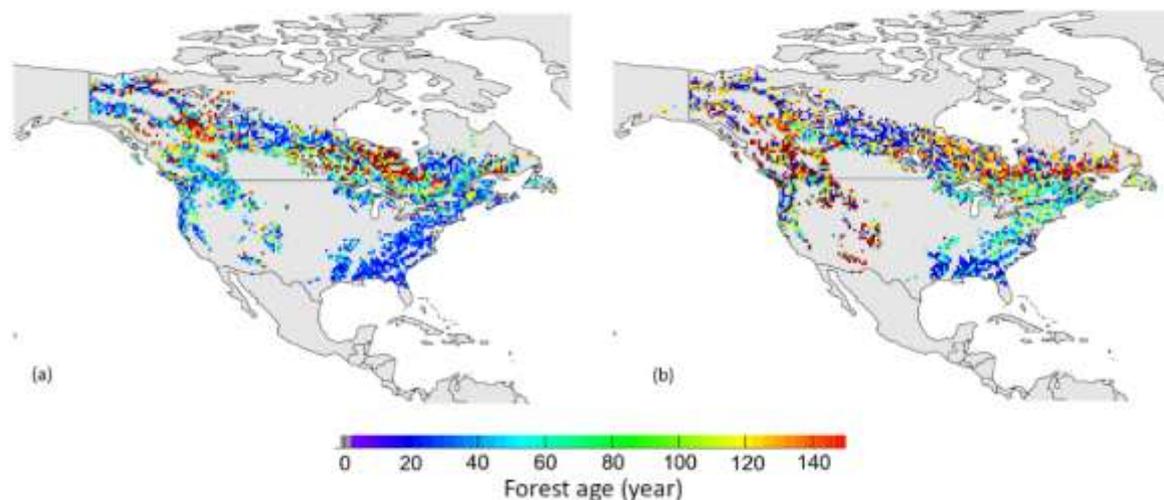
北アメリカ北部、南アメリカ中央部、シベリア中央部に見られた。一方、北アメリカ中部から南部、ヨーロッパ、東アジア等の人為活動が活発な地域では低い林齢分布が見られた。中央アフリカ、東南アジアの熱帯地域では強い人為・火災影響により、南アメリカ中央部に比べ林齢が低く見積もられている。

推定した林齢マップを、実測データを基に推定した北アメリカ、中国地域の林齢マップと比較したところ総体的に整合性が見られた（図は北米のみを示す；図(1)-10）。北アメリカ東部は、林業を主にした人為攪乱が頻繁に行われている地域であり¹³⁾、2つのマップで若い森林の分布が認められた。また、これらのマップは、北部の亜寒帯で高齢の森林が分布している点で整合している。しかし、西部太平洋側の森林分布において、実測データを基にしたマップでは140年以上の高い林齢が広く分布しているのに対し、本サブ課題で推定したマップでは100年以下の比較的若い森林が分布している。この誤差は、この地域における人為活動が比較的活発であるとHuman Influence Indexで推定されていることによる。中国においては、中央部の広範囲において林齢50年以下の若い森林分布が、実測データを基にしたマップと本サブ課題で推定したマップに認められた。中国の森林は、過去20年において非常に活発な人為攪乱の影響を受けてきたことが分かっており¹⁴⁾、この影響が双マップにおいて非常に高い精度で反映されていると思われる。しかし中国北東部・南西部においては、局所的に高い林齢分布が両マップに認められるものの、50年以上の林齢の違いが見られた。

以上の比較結果は、特定の地域での誤差はあるものの、推定した林齢マップは広域スケールで信頼できることを示唆している。陸域炭素プール量（バイオマス量等）を再現するには林齢が重要な要素となるが、これまでは本マップのようなグローバルデータは存在しなかった。本データは、陸域炭素循環モデルの入力データとして用いることにより、炭素循環における林齢影響を評価でき、より正確な陸域炭素循環の現状把握と予測が可能になると期待できる。



図(1)-9 本サブ課題で推定した全球林齢マップ。



図(1)-10 北アメリカにおける林齢分布。(a)実測データを基にした林齢マップ(Pan et al. 2011)、(b)本サブ課題で推定した林齢マップ。

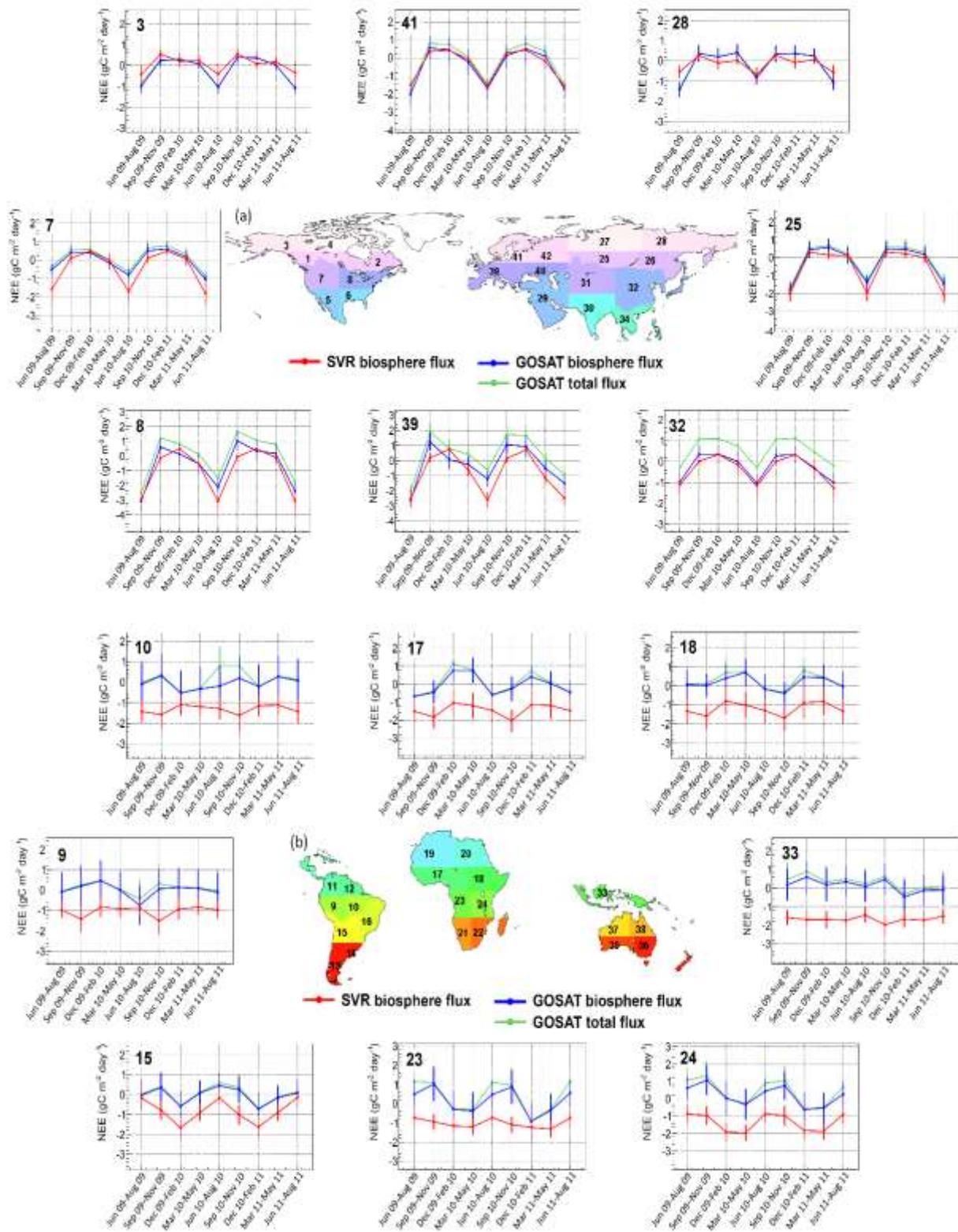
2) 大気-陸域CO₂交換量データ(GOSATフラックスとSVRフラックス)の比較・評価

GOSATフラックスとSVRフラックスの季節変動を比較したところ、北半球の亜寒帯、温帯地域において整合性がみられた(図(1)-11)。亜寒帯地域では、北西アメリカ(地域ID3)、北西ヨーロッパ(地域ID41)、北東、南西ユーラシア(地域ID28, 25)等の地域において高精度で一致した。アメリカ南西部(地域ID8)、南ヨーロッパ(地域ID39)、北東アジア(地域ID32)等の温帯地域では、高い人口密度が特徴あるため、化石燃料・火災によるCO₂排出量を加味したGOSATトータルフラックスとSVRフラックスとでは相対的に乖離が見られた。しかし、それらの排出量を差し引いたGOSATフラックス(生態系によるCO₂交換量)は、SVRフラックスと高い整合性を示した。

一方、熱帯地域では2つのフラックスに大きな乖離が見られた。南アメリカ(地域ID9, 10, 15)、アフリカ中央部(地域ID17, 18, 23, 24)、東南アジア(地域ID33)に共通して、SVRフラックスの季節変動は常に強いCO₂吸収傾向を示しているのに対し、GOSATフラックスはCO₂ニュートラル付近を中心とした季節変動を示した。

熱帯地域におけるCO₂フラックスの大きな誤差は、其々のプロダクトに使用された観測データに依存する。GOSATフラックスは、GOSAT衛星観測データによる全球でおおよそ一様なCO₂濃度データに依存するため、地域的なバイアスは少ない。一方、SVRフラックスの推定に使用した144フラックスサイトデータは、亜寒帯・温帯地域に集中しており、熱帯地域においては3サイトデータがあるのみである。従って、SVRフラックスの熱帯地域の見積もりには、データ不足による強いバイアスがあると考えられる。

これらの結果は、GOSATフラックスがより信頼性の高い全球CO₂交換量プロダクトであることを示しているが、必ずしも新規モデルに適用するプロダクトとして適切である訳ではない。GOSATフラックスは、陸域42タイルの地域別の見積もりであると共に、データ期間が2009年6月から2011年10月と短いため、応用範囲が限定的である。一方、SVRフラックスは高解像度プロダクト(0.25° × 0.25°)であると共に、データ期間は説明変数として用いる衛星観測データに依存するため過去10年以上を網羅することが出来る。従って、熱帯地域での精度には制限があるが、SVRフラックスはGOSATフラックスに比べ、空間的・時間的にも応用範囲が広いと言える。



図(1)-11 GOSATフラックス (GOSAT biosphere flux)、SVRフラックス (SVR biosphere flux) の季節変動。(a) 亜寒帯、温帯地域、(b) 熱帯地域での比較結果。GOSATフラックスと共に化石燃料、森林火災によるCO₂排出量を加味したGOSATトータルフラックス (GOSAT total flux) を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

・本課題で構築された衛星観測や地上観測などを組み合わせたプロダクト（光合成量、純生態系CO₂交換量、林齢）は広域スケールにおける陸域炭素循環解析の重要なプロダクトであり、陸域炭素循環に関わる多くの研究者に利用されることが期待できる。特に純生態系CO₂交換量については独立な推定であるGOSAT レベル4Aプロダクト（GOSAT衛星による大気CO₂濃度観測値と大気インバースモデルによる推定）との相互比較を通して特に北半球中高緯度地域においては十分な精度で一致することが分かり、推定の信頼性が高いことを示すことができた。

・本課題で構築されたモデルでは、様々な衛星観測データを基にしたプロダクトを制約に用いることによりモデルの再現性を格段に向上させることができた。これまでの多くの解析では、地上観測の結果をモデル制約に利用することに主眼が置かれていたが、広域観測値をモデル制約にすることで格段にモデルの精度が向上することとなった。

・陸域炭素循環モデルと衛星観測ベースの広域プロダクトを利用することにより、これまで推定が困難であった物理量の推定も可能になった。例えば、根の深さなどの土壌に関する物理量は水循環・炭素循環を規定するうえで重要であったにも関わらず、その推定は困難であった。本研究ではこの広域マップをアジアなどの広域スケールで構築することに成功した。これは水循環・炭素循環のモデル推定の再現性向上に役立つ。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

・モニタリングや広域データの構築が必要となる観測項目・データセット項目を抽出したため、今後の観測計画の立案への利用が期待できる。例えば、GOSAT L4Aによる広域炭素収支のプロダクトは他の手法との整合性が取れていることが明らかとなり、これまでの陸域での地上観測と衛星による観測による炭素収支が把握できることが判明した。その結果、次の段階としては、長期観測が必要であると予想され、その場合のモニタリングの必要性についても示すことができる材料となる。さらに、バイオマスについては、広域の信頼できる見積もりがないが、陸域炭素循環や温暖化予測には必須であることから、今後の観測計画、広域化計画の中に組み込まれる必要がある。そういった場面で本研究は利用される。

・炭素循環のホットスポットにおけるモニタリング・モデリングは、現在や将来の環境変動に対する温室効果ガス収支を把握する上で重要である。本研究では、炭素循環のホットスポットと考えられる高緯度植生域、耕作地、熱帯雨林に関する炭素循環の定量化とその原因把握を行うことを含んでいる。

6. 国際共同研究等の状況

1) The Second Research Announcement Themes on GOSAT (GOSAT-RA), Multi-model experiment of terrestrial carbon cycles in Asia and North America based on GOSAT carbon budget products, Counterpart-PI: Dr. Ramakrishna R. Nemani, NASA Ames Research Center, US. (2009年～現在も実施中)

GOSAT-RAとして採択された国際共同研究（無償）。本課題の研究代表者は、市井和仁（海洋研究開発機構）が務め、佐々井崇博（筑波大学；サブ課題3担当者）、植山雅仁（大阪府立大学；サブ課題4担当者）も共同研究者として参加している。GOSATのデータを利用した研究として、日本側はアジア域を中心に、米国側は北米域を中心にして、研究のディスカッションやデータ交換などを通して共同研究を進めている。訪問時には本課題より支出してきた。また本研究で得られた成果の一部は本共同研究を通じて優先的に得られたデータ（GOSAT L4Aプロダクト）を利用したものである。

2) 日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業、東アジア陸域生態系における炭素動態の定量化のための日中韓研究ネットワークの構築（CarboEastAsia）、日本側研究代表者：平野高司（北海道大学大学院農学研究科 教授、中国側研究代表者：Prof. Guirui Yu 中国科学院、韓国側研究代表者：Prof. Joon Kim ソウル大学. (2008年～2012年7月)

日中韓のアジア域3カ国間における陸域炭素循環解明のための国際共同研究。市井和仁（海洋研究開発機構）は、上記事業におけるモデル統合グループの日本側の代表を務めた。また、植山雅仁（大阪府立大）は共同研究に参加していた。本課題で用いている地上観測データの一部は、この事業の成果として得られたデータを用いている。市井和仁（海洋研究開発機構）は、国際間でのモデル比較やモデル・データ融合をリードしてきた。

3) FLUXCOM “an intercomparison of ‘data-oriented’ approaches of estimating carbon and energy fluxes at continental/global scale using FLUXNET data, Counter Part: Dr. Martin Jung, Max Planck Institute for Biogeochemistry (Germany). (2012年～現在も実施中)

渦相関法による炭素・熱フラックス観測ネットワークであるFLUXNETにおいて、これらの観測データと広域データを利用した広域化手法の比較を通して、観測ベースの広域熱、炭素循環データを構築するための国際共同研究。ヨーロッパ、北米を中心に約10グループが参加している。市井和仁（海洋研究開発機構）は、本課題を通じて整備したSVRモデルによる広域化手法を提供して参加している。また、本課題で構築した様々な衛星データ（Terra衛星MODISセンサデータなど）を、モデルの入力データとして提供した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) M. KONDO, K. ICHII, M. UYAMA, Y. MIZOGUCHI, R. HIRATA, and N. SAIGUSA: Ecological Research, 28, 893-905 (2013)

“The role of carbon flux and biometric observations in constraining a terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia”

- 2) K. ICHII, M. KONDO, Y. OKABE, M. UHEYAMA, H. KOBAYASHI, S. -J. LEE, N. SAIGUSA, Z. ZHU, and R. B. MYNENI: *Remote Sensing*, 5, 6043-6062 (2013)

“Recent changes in terrestrial gross primary productivity in Asia from 1982 to 2011”

- 3) M. UHEYAMA, K. ICHII, H. IWATA, E. S. EUSKIRCHEN, D. Z. ZONA, A. V. ROCHA, Y. HARAZONO, C. IWAMA, T. NAKAI and W. C. OECHEL: *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 118, 1-16 (2013)

“Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression”

- 4) M. UHEYAMA, K. ICHII, H. IWATA, E. S. EUSKIRCHEN, D. Z. ZONA, A. V. ROCHA, Y. HARAZONO, C. IWAMA, T. NAKAI and W. C. OECHEL: *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 119, 1947-1969 (2014)

“Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming, based on upscaling eddy covariance measurements”

- 5) M. KONDO, K. ICHII, and M. UHEYAMA: *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 38-50 (2015)

“Impact of anomalous climates on carbon allocation to biomass production of leaves, woody components, and fine roots in a cool temperate deciduous forest”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 市井和仁、植山雅仁：海外の森林と林業，92，58-63（2015）

「地上観測データと衛星観測データの統合による広域の陸域二酸化炭素収支の推定」

- 2) K. ICHII, W. JU, K. S. CHENG, S. NIU, Y. H. LEE, Y. F. D LAI: *AsiaFlux Newsletter*, 38, 25-27 (2015)

“Synthesis and assessment of carbon and water budget: current and future aspects”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) K. ICHII AND M. KONDO: AOGS-WPGM Joint Assembly, Singapore, 2012（招待講演）

“Refinement of a terrestrial biosphere model using satellite-based products.”

- 2) 近藤雅征，市井和仁：日本気象学会2012年度秋季大会（2012）

「GOSATL4Aプロダクトを利用した全球生態系呼吸量の算出」

- 3) K. ICHII, M. KONDO, W. WANG, H. HASHIMOTO AND R. NEMANI: AGU Fall meeting, San Francisco USA, 2012

“Sequential optimization of a terrestrial biosphere model constrained by multiple satellite based products: Carbon and water cycle simulations in Asia.”

- 4) K. ICHII: The Second International Workshop on Diagnosis of Environmental Health by Remote Sensing, Chengdu, China, 2012（招待講演）

“Recent changes in terrestrial carbon cycle in Asia: Multimodel and data analysis”

- 5) 高橋和也, 市井和仁: 第22回生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」(2013)
「日本におけるTerra/MODIS雪被覆プロダクトの検証と雪モデルとの比較」
- 6) 市井和仁, 近藤雅征, 植山雅仁, 佐々井崇博, 小林秀樹: 日本地球惑星科学連合大会2013年大会 (2013)
「衛星データを複合利用したモデル-データ統合による陸域炭素循環モデルの改善のフレームワーク」
- 7) 近藤雅征, 市井和仁: 日本地球惑星科学連合大会2013年大会 (2013)
「全球での生態系モデル・GOSAT L4Aを含む観測主体プロダクトの相互比較」
- 8) 近藤雅征, 市井和仁, 植山雅仁, 溝口康子, 平田竜一, 三枝信子: 日本地球惑星科学連合大会2013年大会(2013)
「アロケーション比を基にした陸域生態系モデルの多変量最適化」
- 9) K. ICHII, M. KONDO, Y. OKABE, S. J. LEE, W. JU, A. ITO, T. SASAI, M. UHEYAMA, P. K. PATRA, N. SAIGUSA, J. KIM, 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing, China, 2013
“Model-data synthesis of terrestrial carbon cycles in Asia: CarboEastAsia perspective.”
- 10) M. KONDO, K. ICHII, 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing, China, 2013
“Global scale model inter-comparison with GOSAT L4A and empirical upscaling based estimates of terrestrial biospheric variables.”
- 11) K. ICHII, M. KONDO, S. -J. LEE, J. JU, A. ITO, T. SASAI, H. SATO, M. UHEYAMA, C. H. CHO, P. K. PATRA, N. SAIGUSA, J. KIM: Joint conference of 11th AsiaFlux international workshop, 3rd HESSS, and 14th annual meeting of Korean society of agricultural and forest meteorology on “Communicating science to society: coping with climate extremes for resilient ecological-societal systems”, Seoul, Korea, 2013
“Model-data synthesis of terrestrial carbon cycles to quantify carbon budget in Asia”
- 12) K. ICHII, M. KONDO, A. ITO, S. J. LEE, T. SASAI, H. SATO, M. UHEYAMA, H. KOBAYASHI, N. SAIGUSA, J. KIM: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2013.
“ASIA-MIP: Multi model-data synthesis of terrestrial carbon cycles in Asia”
- 13) 近藤雅征, 市井和仁, 植山雅仁: 日本地球惑星科学連合 連合大会 (2014)
「冷温帯落葉広葉樹林におけるアロケーションの年次変化解析」
- 14) M. KONDO, K. ICHII: AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan, 2014
“Estimation of global forest age by biosphere model inversion”
- 15) K. ICHII, M. KONDO, P. PATRA, A. ITO, T. SASAI, H. SATO, M. UHEYAMA, H. KOBAYASHI, N. SAIGUSA: AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan, 2014
“Comparison of top-down and bottom-up approaches toward refinements of terrestrial carbon cycles estimation in Asia”
- 16) M. KONDO, K. ICHII: AsiaFlux Workshop 2014, Los Banos, Phillipines, 2014
“Spatial variation in global scale estimates of carbon-use efficiency: ecosystem model, remote sensing, and empirical upscaling”

- 17) 市井和仁、近藤雅征、植山雅仁：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）
「GOSAT L4Aプロダクトと種々のボトムアップ手法の陸域炭素収支の比較」
- 18) K. ICHII: Workshop on Meteorological and Carbon Cycle Modeling over Forest and Agricultural Land, PyeungChang, Republic of Korea, 2015（招待講演）
“Analysis of recent changes in terrestrial carbon cycles using bottom-up and top-down estimations”

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 市井和仁，地球温暖化の将来予測 ～高校から大学への橋渡し～，福島大学オープンキャンパス模擬講義，福島大学，2012年8月5日
- 2) 市井和仁，地球温暖化の仕組みと将来予測，模擬講義，福島県立橋高等学校，2013年10月30日

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Bonan G.B., Lawrence P.J., Oleson K.W., et al. (2011) Improving canopy processes in the Community Land Model version 4 (CLM4) using global flux fields empirically inferred from FLUXNET data. *Journal of Geophysical Research*, 116, G02014.
- 2) Ichii K., Wang W., Hashimoto H., et al. (2009) Refinement of rooting depths using satellite-based evapotranspiration seasonality for ecosystem modeling in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1907-1918.
- 3) Yang F., Ichii K., White M., et al. (2007) Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. *Remote Sensing of Environment*, 110, 109-122.
- 4) Ichii K., White M.A., Votava P., et al. (2008) Evaluation of snow models in terrestrial biosphere models using ground observation and satellite data: Impact on terrestrial ecosystem processes. *Hydrological Processes*, 22, 347-355.

- 5) Ueyama M., Ichii K., Iwata H., et al. (2013), Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1266-1281.
- 6) Pan Y., Chen J.M., Birdsey R., et al. (2011) Age structure and disturbance legacy of North American forests. *Biogeosciences*, 8, 715-732.
- 7) Zhang C., Ju W., Chen J.M., et al. (2014), Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data, *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 119, 1163-1179, doi:10.1002/2013JG002515.
- 8) Wildlife Conservation Society (WCS); Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University. (2005) Last of the Wild Project, Version 2, 2005 (LWP-2): Global Human Influence Index (HII) Dataset (Geographic). Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/wildareas-v2-human-influence-index-geographic>.
- 9) Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R., et al. (2010), Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products, *Biogeosciences*, 7, 1171-1186.
- 10) Richards F.J. (1959), A flexible growth function for empirical use, *Journal of Experimental Botany*, 10, 290-300.
- 11) Ciais P., Sabine C., Bala G., et al. (2013), Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 12) Maksyutov S., Takagi H., Valsala V.K., et al. (2013), Regional CO₂ flux estimates for 2009-2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9351-9373.
- 13) Birdsey R.A., Lewis G.M. (2003), Current and historical trends in use, management, and disturbance of US forestlands. In: *The potential of US forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*, (eds Kimble JM, Linda HS, and Birdsey RA), CRC Press LLC, New York, NY, USA, pp. 15-33.
- 14) Fang J.Y., Chen A.P., Peng C.H., et al. (2001), Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998, *Science*, 292, 2320-2322.
- 15) Kondo M., Ichii K., Ueyama M., et al. (2013) The role of carbon flux and biometric observations in constraining a terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia, *Ecological Research*, 28, 5, 893-905.

(2) 衛星データを複合利用した陸域プロダクトの構築

独立行政法人 海洋研究開発機構

地球表層物質循環研究分野

小林 秀樹

<研究協力者>

独立行政法人 海洋研究開発機構

地球表層物質循環研究分野

近藤 雅征 (平成26年度)

平成24(開始年度)～26年度累計予算額： 11,665千円

(うち、平成26年度予算額：8,321千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

地球規模での陸域炭素循環過程の評価を行うためには陸域炭素循環モデルや統合評価モデルの構築、地上観測サイトのネットワーク化と観測プロトコルの共通化に加えて、これらの手法の入力値やスケールアップデータとなる衛星プロダクトの開発が必要不可欠である。本研究では、陸域炭素循環モデルの不確実性低減と将来予測に資するべく、モデルの制約となる衛星データを収集し陸域プロダクトを構築した。特に、様々な衛星プロダクトの中でも葉面積指数LAIと生物季節(フェノロジー)に着目し、疎な樹冠を形成しLAIの推定精度の向上が望まれる北方林についてLAIと展葉日のプロダクトを新たに構築し精度を検証した。LAIに関しては、アラスカの現地調査やデータ収集で集められたクロトウヒの樹木構造データや林床反射率などを入力値として三次元放射伝達モデルで適切なルックアップテーブルを構築して推定した。その結果、代表的なグローバルLAIプロダクトであるMODISのMOD15のLAI過大傾向が改善され、より現場データに近いLAIを得られることが明らかとなった。また、フェノロジー推定に関しては、アラスカにおいて北緯61°～71°にかけて地上カメラから算出した展葉日・落葉日のタイミングを用いて複数のフェノロジーアルゴリズムを比較・検証した。その結果、北方林で最も精度の良い単一のアルゴリズムは見いだせず、それぞれのアルゴリズムの特徴に応じて推定精度のばらつきが存在することが分かった。この結果から、特定のアルゴリズムを利用するのではなく、複数手法・複数衛星データの平均値を利用することで安定的に高い精度が保証されると結論づけた。

[キーワード] 衛星リモートセンシング、葉面積指数、展葉日、フェノロジー、北方林、MODIS、SPOT-VEGETATION

1. はじめに

地球規模での陸域炭素循環過程の評価を行うためには陸域炭素循環モデルや統合評価モデルの構築、地上観測サイトのネットワーク化と観測プロトコルの共通化に加えて、これらの手法の入力値やスケールアップデータとなる衛星プロダクトの開発が必要不可欠である。衛星観測は、グ

ローバルスケールで高頻度に均一な観測値が得られる唯一の方法であり、地上観測値と異なり特定の地域のデータに依存しないため、グローバルな生態系モデルの検証に適した観測手法であると言える。米国海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration) は、1970年代からTIROS/NOAAシリーズの極軌道地球観測衛星を用いて大気・海洋観測を始めた。そのNOAAに搭載されたAVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) は、赤と近赤外域の分光チャンネルから計算される正規化植生指数 (NDVI) を用いることで、陸域の植生変動解析にも応用できることが明らかとなった。このNOAA/AVHRRのNDVIデータセットを用いることで大気のコ₂濃度と植生活動の関係¹⁾や10年スケールの高緯度植生変動²⁾など、地球規模の陸域植生変動が次々に明らかとなった。

一方で、NDVIは植生量を強調するために考案された衛星分光指標であり、特定の生態系パラメータ (例えば、展葉日や葉面積指数、地上部バイオマスなど) と1対1対応する物理量ではない。1980年代後半に構想が持ち上がった米国航空宇宙局 (NASA) のEOS (Earth Observing System) 計画では、陸域生態系や大気・海洋の物理量の高精度推定を目標に定め、そのための衛星アルゴリズム開発研究が進められた。1999年に打ち上げられたNASAの衛星Terraは、そのデータ処理系において高次プロダクト作成アルゴリズムを実装した初めての地球観測衛星であり、Terraに搭載されたMODISセンサからは葉面積指数 (LAI; Leaf Area Index)、フェノロジータイミング、総光合成量などが衛星観測後にほぼリアルタイムで処理され、インターネットを通じてオンラインで無償提供されている。

こうした衛星プロダクトの蓄積とともに、グローバルLAIやフェノロジー情報については、地上データによる検証活動が進められ次第に精度が明らかとなった。その中で北方林における葉面積指数やフェノロジーデータの定義の不明瞭さが生態系モデルで衛星プロダクトを利用する際の問題となることが明らかとなった³⁾。LAIに関してはMODISのLAIプロダクト (MOD15) やヨーロッパの研究コミュニティで作成されたCYCLOPES、カナダ・トロント大学のGLOBMAPなど、従来から様々な機関がグローバルなデータセットを作成している。しかし、これらの多くの衛星プロダクトでは、北方の疎林でLAIを過大推定するという問題がある。Kobayashi et al. ⁴⁾は、シベリアのカラマツ林において中間赤外反射率を利用した植生指数NDII (Normalized Difference Infrared Index) の季節変化を利用することで、カラマツ樹冠のLAIを林床と分離して推定する手法を開発し精度を明らかにした。一方で、北米に広く分布するクロトウヒなどの常緑針葉樹の樹冠LAIについては、研究が進んでおらず、その精度の改善が強く望まれる。また、フェノロジープロダクトに関しては、北方林の検証事例が乏しく、衛星フェノロジータイミングが実際の植生の展葉や落葉 (常緑樹の場合には、林床植生の季節変化を含む) とどのような対応関係があるかについては未知な部分が多い。本サブテーマでは、モデルによる陸域炭素循環推定値の制約データとして利用可能な衛星プロダクトを構築することを目指し、その中でも特に炭素収支解析への感度の大きい葉面積指数とフェノロジータイミングのデータについてその精度を明らかにしサブテーマ1へ提供することを目的としている。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、陸域炭素循環モデルの不確実性低減と将来予測に資するべく、モデルの制約となる衛星データを収集し陸域プロダクトを構築する。その中でも本サブテーマでは、単葉スケ

ールの光合成速度や蒸発散計算値を群落レベルにアップスケールするために必要となる代表的な生態系構造パラメータであるLAIと生物季節（フェノロジー）の衛星推定値に着目してグローバルなデータ収集を行う。さらに、疎な樹冠を形成しLAIの推定精度の向上が望まれる北方林についてLAIと展葉日のプロダクトを新たに構築する。

3. 研究開発方法

(1) 衛星データの収集と構築

本研究ではプロダクトの構築を行うために複数の衛星データを収集した。NASAのMODISセンサのプロダクトについては、大気補正済み地表面反射率データMOD09（2000-2013年まで全球）、葉面積指数/FAPARデータMOD15（2000-2013年まで全球）の8日間コンポジットデータを収集した。MOD09とMOD15のそれぞれのプロダクトの空間分解能は500m及び1kmである。また、フランスの衛星SPOT-VEGETATIONの10日間コンポジット大気補正済み地表面反射率データS10（1998-2013年まで全球）のデータも収集した。SPOT-VEGETATIONの空間分解能は1/112°である。この他に、より長期のフェノロジーデータセット構築のために、NASAゴダード宇宙飛行センターが作成したNOAA/AVHRRのGlobal Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) データを利用した。GIMMSでは赤と近赤外の反射率から計算されるNDVIの15日毎の最大値を代表値として各月2枚のデータ（上旬1-15日、下旬16～最終日）を提供している。空間分解能は0.0833°（中緯度で約8km）である。

(2) 北方林のLAIプロダクトの構築と検証

LAI推定に関してはシベリア・アラスカ地域でそれぞれの地域に最適なLAI推定アルゴリズムを適用して推定を行った。いずれの地域でも、樹冠部が疎な状態（つまりLAIが低い）であり衛星観測値に対する林床の影響が強く出ている。その為、林床の影響をうまく補正してLAIを推定する必要がある。シベリアではサブ課題担当者が過去の研究で開発した手法⁴⁾を用いて2012年までのLAI推定を行った。この手法では、カラマツ林が落葉針葉樹で春先の雪解け後かつ展葉前後に林床植生層からの分光反射情報を観測できることに着目している。この方法では、まず、展葉日のNDII（林床NDII）と林床LAIの関係式を予め三次元放射伝達モデル (FLiES)⁵⁾で作成しておく。次にDelbart et al.⁶⁾の方法を用いて、植生指数NDIIの季節変化から展葉日を推定し、展葉日のNDIIを林床NDIIと定義する。さらに林床NDIIと林床LAIの関係式から林床LAIを推定する。カラマツ樹冠のLAI推定は林床LAI毎に三次元放射伝達モデルで計算したNDIIと樹冠LAIの関係式を用いて行うものである。また、アラスカでは、フェアバンクス郊外で観測されたクロトウヒ林の毎木調査、シュート構造データなどを用いて3次元放射伝達計算を行い、LAIと赤反射率、近赤外反射率との関係を予め計算してルックアップテーブルとして作成する。そしてこのルックアップテーブルを用いてLAIの推定を行う。クロトウヒの樹冠LAI推定を行う際にも、カラマツ同様に林床反射率の影響を強く受ける。しかし、常緑針葉樹林では一年を通じて常に樹冠に葉が存在するため落葉樹であるカラマツと同じ方法で林床の影響を補正することはできない。そのためアラスカのクロトウヒ林で測定した林床反射率のデータをルックアップテーブル作成の入力値として利用し、林床の影響を適切に取り込こんだ。

本研究ではLAI推定値の検証はアラスカのクロトウヒ林を中心に実施した。現場データを収集するために、米国アラスカ州フェアバンクス郊外のアラスカ大学フェアバンクス校の森林調査地

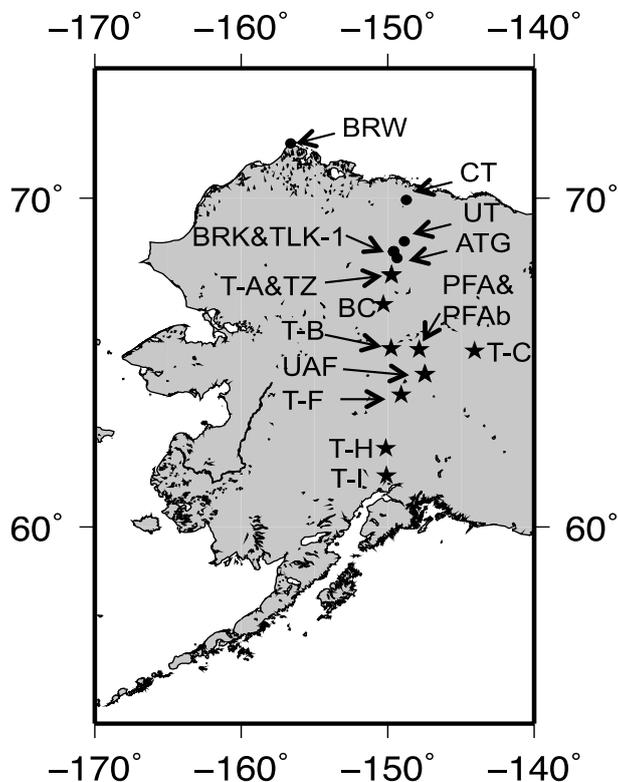
Poker Flat Research Rangeにて現地調査を2013年7月下旬に実施し、クロトウヒのシュート構造を調べた。Poker Flat Research Rangeの葉面積指数データは、このシュート構造データとLAI-2000による森林ギャップ観測のデータ(2011年9月に取得)から見積もった。その他に、2011年にアラスカ州のダルトンハイウェイに沿って観測されたトウヒ林のギャップ観測値(LAI-2000)のデータを収集し、検証データとして利用した。

(3) シベリア・アラスカのフェノロジープロダクトの構築と検証

収集した衛星データから算出した植生指数(NDVI, NDII, NDSI)から展葉日と落葉日の推定を行った。展葉日と落葉日を推定するアルゴリズムとして、NDII法⁷⁾、NDVI_r法⁸⁾、Zhang et al.⁹⁾法(以下、Zhang法とする)の3つの手法を採用した。NDII法はNDIIが雪解け後、展葉前に最小となる特徴を利用した方法であり、NDVI_r法は植生成長期における各ピクセルのNDVIの最小値(NDVI_{min})と最大値(NDVI_{max})を計算し、これらの値で規格化したNDVI_r=(NDVI - NDVI_{min})/(NDVI_{max} - NDVI_{min})が0.5(50%)を超えた場合にonsetとする閾値法(NDVI 50%)である。Zhang法はMODISの標準フェノロジーアルゴリズムで採用されている手法である。図(2)-1に衛星によるフェノロジー推定値の精度検証を行ったサイトをまとめた。本研究では、インターバル地上カメラで撮影された植生の季節変化の情報を検証データとして採用し、アラスカの北緯61°~71°に至る内陸性常緑樹林帯(クロトウヒ)とツンドラ生態系を含む計17サイトのデータを収集して解析した。使用した地上カメラでは1~6時間おきに植生を撮影したスナップショット画像もしくは動画が記録されており、これらの画像の中から最も撮影条件の良い一枚を毎日抽出した。内陸性常緑樹林帯では樹冠の季節変化は小さいため、森林の林床に設置した画像を利用し、林床植生の季節変化を解析した。地上カメラによるフェノロジータイミングの決定法は、以下の通りである。まず、春から秋にかけてのカメラ画像から植物の写っている画角を切り出し、その画角の中の赤(R)、緑(G)、青(B)のそれぞれの256階調のデジタル値の平均を計算した。このR, G, BからGreen Excess Index(GEI=2G-R-B)の季節変化を算出し、Zhang法でフェノロジータイミングを算出した。Zhang法ではGEI指標をロジスティック関数でフィッティングし、その三次微分がゼロとなる4点(“green-up”=D₁, “maturity”=D₂, “senescence”=D₃, “dormancy”=D₄)を展葉・落葉のタイミングと関連付けている。本研究では、植生の季節変化がクリアに撮影されているカメラ画像を用いて目視で春・秋の展葉・落葉日を抽出し、この結果とZhang法によるD₁とD₂の関係から、地上データを用いた展葉日として展葉日=(0.75 x D₁ + 0.25 x D₂)、落葉日=(D₄ - 9.2)の関係を得た。この値を地上で得られた展葉日の最確値として2つの衛星データ(SPOT-VEGETATION及びTerra-MODIS)に対する3手法(NDVI_r法、NDII法、Zhang法)との比較を行った。

さらに衛星データを用いたフェノロジー観測手法の適用限界について、三次元植生放射伝達モデルFLiES⁵⁾を用いた理論的考察を行った。この理論的考察ではアラスカ・フェアバンクスのポーカーフラット調査地で行った森林調査で得られたクロトウヒの疎林の葉面積指数や、別途収集した林分構造と林床反射率のデータをもとに、樹冠率15%と45%の仮想林分を作成し、雪解け前の5月20日(積算日140)から秋の10月1日(積算日274)の降雪後のタイミングまでの植生指数NDVIの季節変化を計算した。その際に、クロトウヒの樹冠の葉面積と針葉の反射率・透過率は季節変化せず一定とし、林床植生の分光反射率を季節変化させてシミュレーションを行った。シミュレーションを実施した日時と太陽天頂角及び林床植生の赤・近赤外の反射率を表(2)-1にまとめた。太陽

天頂角は、SPOT-VEGETATIONやTerra-MODIS衛星の通過時刻に近い午前10:30における角度を利用した。



図(2)-1 展葉日推定のために用いた地上カメラデータの位置

表(2)-1 放射伝達シミュレーションを行った日時と太陽天頂角及び林床反射率

	DOY	SZA	Understory reflectance	
			Red	NIR
Spring-1 w/snow	140 (May 20th)	47.57	0.561	0.466
Spring-2	140 (May 20th)	47.57	0.0737	0.294
Summer-1	182 (Jul. 1st)	44.31	0.0527	0.330
Summer-2	213 (Aug. 1 st)	49.14	0.0527	0.330
Autumn-1	244 (Sep. 1 st)	58.62	0.0737	0.294
Autumn-2	274 (Oct. 1 st)	69.93	0.0737	0.294
Autumn-2 w/snow	274 (Oct. 1 st)	69.93	0.561	0.466

4. 結果及び考察

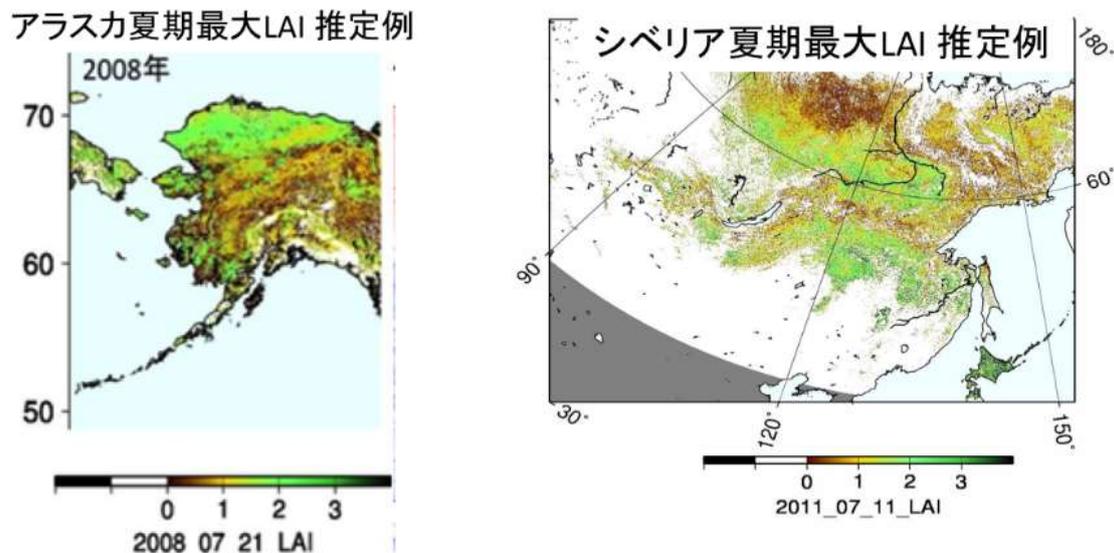
(1) 衛星データの収集と構築

MODISセンサのプロダクトについては、大気補正済み地表面反射率データMOD09(2000-2013年まで全球)、葉面積指数/FPARデータMOD15(2000-2013年まで全球)の8日間コンポジットデータを収集した。収集されたデータは全球で合成を行い、グローバルなデータセットを構築した。この際、各ピクセルの品質情報を用いて、良質のピクセルのみを用いてデータセットを構築した。

SPOT-VEGETATIONのデータについても、大気補正済地表面反射率S10を収集(1998-2013年)し、10日毎の反射率データ、植生指数データを構築した。

(2) 北方林のLAIプロダクトの構築と検証

本サブテーマで構築したアラスカとシベリアのLAIを図(2)-2に示す。表(2)-2に、本サブテーマでMODISデータをベースにして新たに構築したLAI推定値の検証結果をまとめた。MOD15はR7-16サイトを除いて、地上観測値よりも大きい傾向にあり、MOD15は樹冠LAIを過大推定している事がわかる。一方で、今回新たに推定したLAIは、より地上観測地に近い値となった。これはアラスカのクロトウヒの適切な林床反射率を用いて放射伝達モデルでルックアップテーブルを作成することで精度向上が見られたことを示している。本研究で推定された2011年7月のLAI (maximum LAI compositing)と地上観測値とのRoot mean square error (RMSE)は0.47 (誤差±33%)であった。一方で、MOD15 LAI (同じく2011年7月のmaximum composite LAI)を同じサイトで比較したところ、RMSE=0.94(誤差±66%)であり、本研究で構築したアラスカの常緑針葉樹のLAI推定値が既存の衛星プロダクトよりも高精度であることが明らかとなった。



図(2)-2 シベリアとアラスカの葉面積指数の推定結果例 (左:アラスカ、右:シベリア)

表(2)-2 アラスカにおける衛星LAI推定値の検証結果

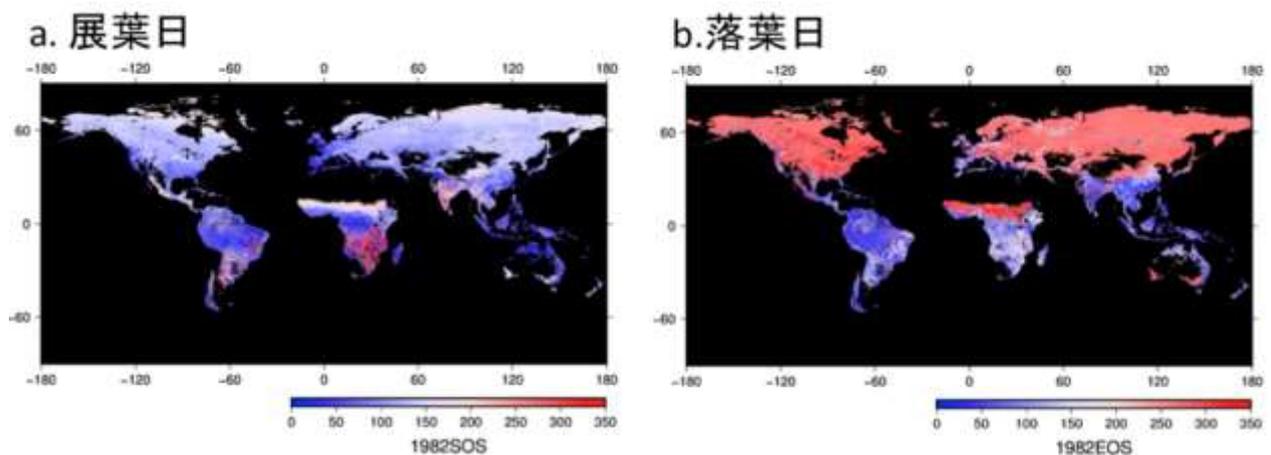
サイトID	緯度(北緯)	経度(西経)	地上LAI	本研究	MODIS LAI
R7-01	67.990	149.762	0.96	0.28	0.90
R7-3	67.516	149.847	1.58	0.96	2.40
R7-16	66.027	150.122	3.47	2.96	1.60
R7-18	65.842	149.648	1.98	1.96	2.30
US-Prr	65.123	147.487	0.82	0.96	1.10

(3) シベリア・アラスカのフェノロジープロダクトの構築と検証

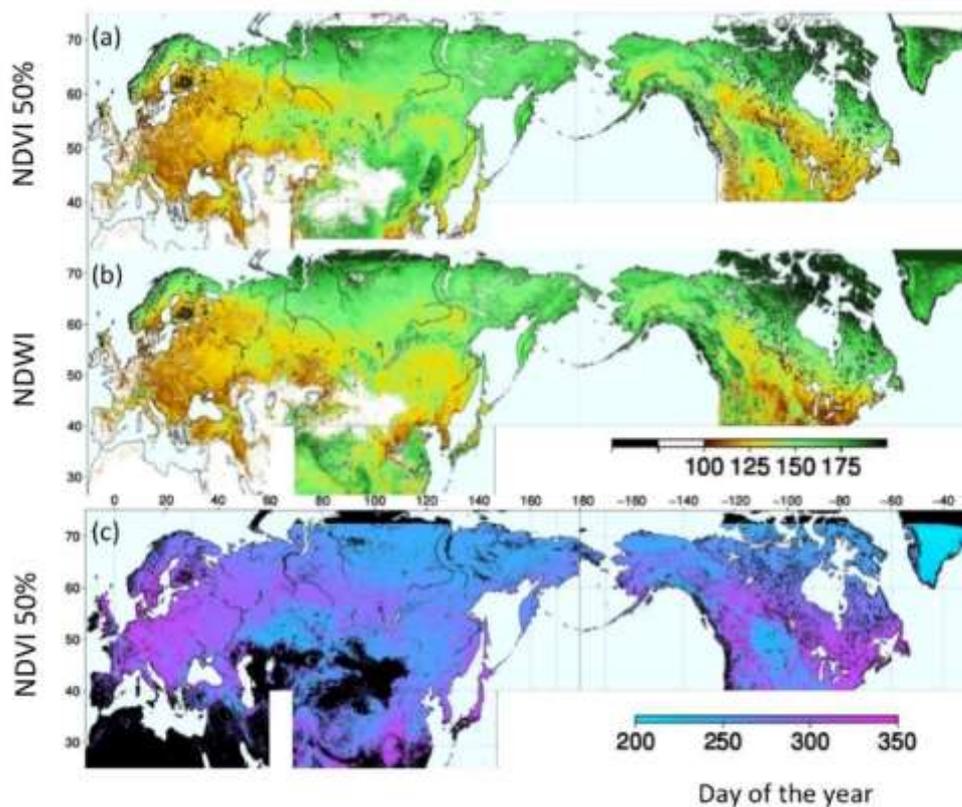
構築したフェノロジーデータの例としてNOAA/AVHRRによる展葉・落葉データセット(図(2)-3)、SPOT-VEGETATIONによる展葉・落葉データセット(図(2)-4)を示す。本サブテーマでは、NOAA-AVHRR

は全球、SPOT-VEGETATIONとMODISデータによるフェノロジーとLAIのデータセットはシベリアとアラスカで構築した。

SPOT-VEGETATIONとTerra-MODISに3つのフェノロジー観測手法を適用して推定した展葉日と地上カメラデータから算出した展葉日を比較した結果、どの衛星データ・手法も推定値にばらつきが見られた。また、他の手法と比較して明らかに高精度に推定可能な手法、衛星データの組み合わせを見出すことはできなかった。森林地域での比較結果から、春先の展葉日は手法により地上カメラから算出した実際の展葉日より2.9-12.7日早めに推定されることが明らかとなった。NDII法は森林地域では比較的良好に推定できていた。ツンドラ地域では、採用した手法により実際より早く推定されているもの(NDVIr法 (MODIS利用)、Zhang法 (SPOT-VEGETATION利用)、Zhang法 (MODIS利用))と実際よりも遅く推定された手法 (NDVIr (SPOT-VEGETATION利用)、NDII法 (MODIS利用)、NDII法 (SPOT-VEGETATION利用))が混在していた。一方で、今回推定を試みた衛星データ・手法による展葉日の平均値を地上データと比較した結果、相関係数 $R=0.64$ と両者に比較的高い相関が見られた。この比較結果から、衛星データを用いて展葉日を高精度に推定するためには、できるだけ複数の衛星データ・手法を用いて展葉日の推定を行い、その平均値を計算することで代表性高い展葉日が推定できるとの結論に至った。



図(2)-3 NOAA-AVHRR GIMMSデータによるグローバルなフェノロジー (展葉・落葉日) 推定の結果。図は1982年の推定結果である。NDVIr法により推定した。

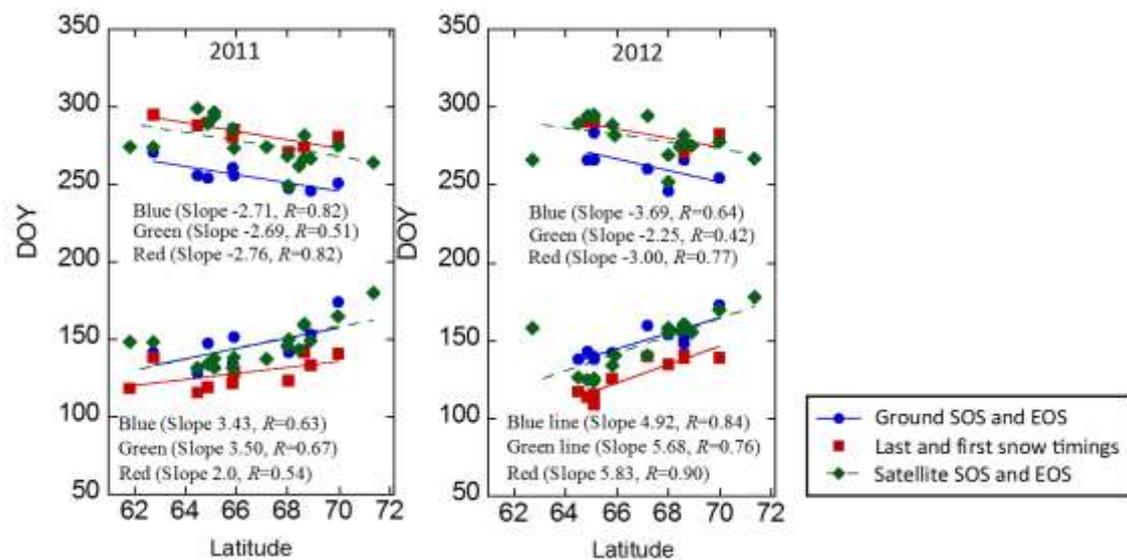


図(2)-4 SPOT-VEGETATIONデータから推定した北半球植生の展葉日・落葉日推定結果例（1998-2011年の平均値）（(a) NDVIr法による展葉日推定結果、(b)NDWI法による展葉日推定、(c)NDVIr法による落葉日推定）

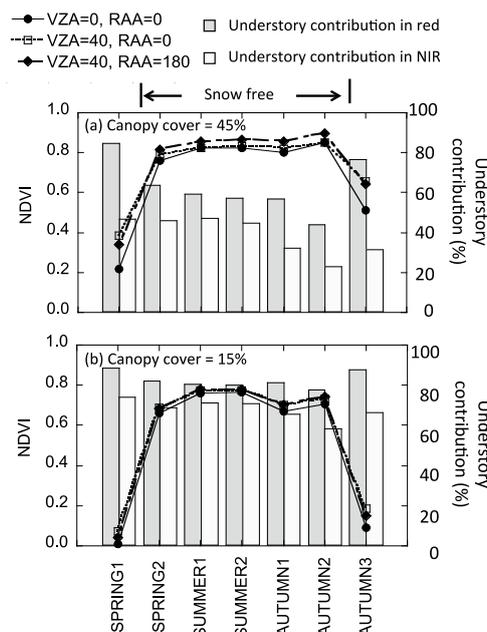
図(2)-5は、2011年と2012年における、地上データによる展葉日と落葉日、複数衛星手法の平均展葉日と落葉日、融雪日・降雪開始日の緯度勾配をプロットしたものである。北緯68°付近を境にして南側は森林、北側はツンドラ地域である。春先には、雪解けのタイミングは衛星推定の展葉日より16-19日早く起こっていた（北緯66°における回帰式の幅から評価）。また、衛星データと地上カメラによる展葉日にはほとんどタイムラグがなかった。図(2)-5には秋の落葉のタイミングも同時にプロットしてある。秋には、衛星データによる落葉日の推定値は地上カメラによる推定値より16-22日遅かった。また、降雪のタイミングと衛星データから推定した落葉のタイミングはほぼ一緒であった。このことから、衛星データによる落葉のタイミングは、実際の植生の紅葉・落葉よりも降雪日より強い影響を受けていることが明らかとなった。

図(2)-6は、植生放射伝達モデルによって計算したNDVIの季節変化である。シミュレーションによって得られたNDVIの季節変化は、北方林の典型的な季節変化を表していた。また、図(3)-6には3つの異なる衛星観測幾何条件における結果を示している。本研究の結果から、衛星観測条件がNDVIの季節変化に及ぼす影響は、降雪時期を除いて小さいことが明らかとなった（coefficient of variation < 3.5%）。図(2)-6の棒グラフは、NDVIを算出する際に利用される赤と近赤外反射率に対する林床の寄与（百分率）を示している。林床反射率の寄与は樹冠率（15%、45%）によって異なるが、両者とも季節変化は一致しており、赤及び近赤外の反射率ともに林床反射率の寄与は春

先から秋にかけて徐々に低下している。つまり、春先の展葉日付近は林床の観測に最も向いている時期であり、北方の常緑針葉樹林では、樹冠が常緑であっても林床植生の展葉日の推定が可能であることを示している。また、春先は、融雪のタイミングと展葉のタイミングには一定の相関があると言える。従って、仮に衛星データによる展葉日の推定値が融雪タイミングの影響を受けていたとしても、展葉と融雪に一定の相関があることから展葉日を推定することが可能となっている。一方で、落葉期は太陽天頂角が高くなるため、林床を見通しにくくなり、衛星観測値はより樹冠の影響を受けることになる。この結果、秋は、春先に比べてより常緑の葉の影響を受け、林床が落葉してもNDVIが下がりにくくなることが明らかとなった。



図(2)-5 衛星データから推定された展葉・落葉日のタイミング、地上カメラによる展葉・落葉日のタイミング及び雪解け・降雪のタイミングの緯度勾配（北緯61°～71°）



図(2)-6 放射伝達モデルによるフェノロジータイミングのシミュレーション結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

・葉面積指数についてはより現実に則した森林の構造パラメータや林床の境界条件情報を盛り込むことで推定精度の改善が見込まれることを明らかにし、その広域データセットを構築した。2000年以降、様々な研究グループによって、葉面積指数が構築されてきたが個々の地域を見るとそのプロダクトの精度にはばらつきが見られるのが現状であり、特に、北方林においては、林床の考慮が必要であると考えられていた。本研究では現地の観測を基に推定手法の改良を行いプロダクトを高度化できた。

・フェノロジー推定手法については、複数のカメラ観測点のデータを用いることにより、複数の衛星データ・手法を用いて展葉日の推定を行い、その平均値を計算することで代表性の高い展葉日を推定できることが明らかとなった。一方で落葉日の衛星推定値は実際の落葉よりも遅くなりがちであり、プロダクト利用の際には注意が必要である。

・これらのデータセットについては、今後、論文が受理され次第公開する予定であり、公開後には多くの研究者が利用できるデータとなり波及効果が大きいと想定される。

・モデルによる生態系炭素循環過程の計算結果の不確実性には、モデル構造やモデルの素過程の仮定条件に由来する不確実性のほかに、モデルの入力データとなる観測値（衛星プロダクトなど）の不確実も含まれる。従って、モデルの計算値に対して感度の高いパラメータから順に不確実性を低減させることは、結果的に生態系炭素循環過程の改善につながる。本研究では、今後温暖化の影響がより顕著に現れると予想されている北方林を中心に、生態系モデルの代表的なパラメータである葉面積指数とフェノロジータイミングの改善を行ったが、今後もモデルの高度化と並行してモデルの入力値となる衛星プロダクトの高度化を継続する必要がある。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に特筆すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、北方林を中心に植生変動解析に利用可能な葉面積やフェノロジーの主題図を作成した。これらの主題図は、極域における温暖化政策の立案の基礎資料として利用が可能である。

6. 国際共同研究等の状況

1) RAMI “Radiation Model Intercomparison project (Phase IV)”, Organizer: Dr. Jean-Luc Widlowski, EU-Joint Research Center, Italy. 2010-現在

衛星データから葉面積指数などの植生パラメータを逆推定するための植生放射伝達モデルの相互

比較実験である。サブ2課題担当者の小林秀樹は2010年より、Phase IVの相互比較実験に参加し、実験結果の比較を通じて自身の開発した放射モデルFLiESの改善につなげてきた。アラスカやシベリアでの葉面積指数マッピングには、この相互比較実験で相互比較された放射モデル (FLiES) が使われている。

2) JICS (JAMSTEC and IARC collaborative studies), ” Greenhouse gas dynamics of boreal forest and tundra ecosystems vulnerable to Arctic warming” , Counter part: International Arctic Research Center, University of Alaska, Fairbanks, 2011年-2013年 (Phase 1), 2014年-2016年 (Phase 2).

アラスカ州フェアバンクス市郊外のポーカーフラット調査地にクロトウヒ林の熱・水・炭素収支及び生態パラメータを測定するスーパーサイトを設置し、衛星プロダクトの検証データ取得などを行っている。本サブ課題で利用したデータの一部はこのJICSプロジェクトと連携して取得されたものである。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) K. ICHII, M. KONDO, Y. OKABE, M. UEYAMA, H. KOBAYASHI, S. -J. LEE, N. SAIGUSA, Z. ZHU, and R. B. MYNENI: Remote Sensing, 5, 6043-6062 (2013)
“Recent changes in terrestrial gross primary productivity in Asia from 1982 to 2011”
- 2) H. KOBAYASHI, R. SUZUKI, S. NAGAI, T. NAKAI, and Y. KIM: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Volume 11, Issue 2, 564-568, 10.1109/LGRS.2013.2278426, (2014)
“Spatial scale and landscape heterogeneity effects on FAPAR in an open canopy black spruce forest in interior Alaska”

<その他誌上発表 (査読なし) >

特に特筆すべき事項はない。

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) H. KOBAYASHI, R. SUZUKI, S. NAGAI, T. NAKAI and Y. KIM: AGU Fall Meeting, San Francisco USA, 2012
“The 3D plant canopy radiative transfer analysis in an Alaskan black spruce forest: the characteristics of fraction of absorbed photosynthetically active radiation in the heterogeneous landscape.”
- 2) H. KOBAYASHI, D. BALDOCCHI, Y. RYU, Q. CHEN, S. MA, J. OSUNA and S. USTIN: AOGS-WPGM Joint Assembly, Singapore, 2012
“Energy and carbon fluxes in an oak woodland in California as simulated by the 1D and 3D models.”

- 3) H. KOBAYASHI, Y. RYU, D. BALDOCCHI, J. WELLES, and J. NORMAN : Asiaflux International Workshop 2013, Seoul, 2013
 “Removal of scattered radiation in canopy gap fraction measurements from LAI-2200 Plant Canopy Analyzer”
- 4) H. KOBAYASHI, K. ICHII, K. ASHWANI, K. AOYAMA, and S. NAGAI: AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, USA, 2013
 “Analysis of green-up onset across east Siberian and Alaskan forests”
- 5) H. KOBAYASHI, Y.A. PULPADAN, S. NAGAI (他12名), 極域シンポジウム、立川、2014年12月3日
 “Estimation of tundra and forest understory vegetation phenology in Alaska from time-lapse cameras and satellite measurements”
- 6) W. YANG, H. KOBAYASHI, R. SUZUKI, AND N. K. NASAHARA 第5回極域科学シンポジウム、2014年12月3日、国立極地研究所
 “Retrieval of understory NDVI in sparse needleleaf forests over Alaska by MODIS BRDF data”,

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 小林秀樹、「3つの地域の樹木と気候の関係を観察する」, 海洋研究開発機構 一般公開 地球情報公開セミナー 173, 2013年10月12日

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Tucker C. J., I. Y. Fang, C. D. Keeling, and R. H. Gammon (1986), Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index, *Nature*, 319, 195-199.
- 2) Myneni R. B., C. D. Keeling, C. J. Tucker, G. Asrar, and R. R. Nemani (1997), Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991, *Nature*, 386, 698-702.
- 3) 小林秀樹 (2008), 衛星データから推定されたグローバル葉面積指数プロダクトの定義, 不確かさ, 検証方法, 日本リモートセンシング学会誌, 28, 1, 1-16.

- 4) Kobayashi, H., N. Delbart, R. Suzuki, and K. Kushida (2010), A satellite-based method for monitoring seasonality in the overstory leaf area index of Siberian larch forest, *Journal of Geophysical Research*, 115, G01002, doi:10.1029/2009JG000939.
- 5) Kobayashi, H. and H. Iwabuchi (2008), A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, *Remote Sensing of Environment*, 112, 173-185.
- 6) Delbart, N., Kergoata, L., Toana, T. L., Lhermitte, J. & Picard, G. 2005. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 97: 26-38.
- 7) Delbart, N., Toan, T. L., Kerogoats, L. & Fedotova, V. 2006. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sensing of Environment*, 101: 52-62.
- 8) White, M.A., Thornton, P.E. & Running, S.W. (1997) A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11, 217-234.
- 9) Zhang, X.Y., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C. & Huete, A. (2003) Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471-475.

(3) アジア地域における衛星データ利用型陸域モデルの改良と陸域生態系変動の把握

筑波大学・生命環境系 佐々井 崇博

平成24(開始年度)～26年度累計予算額：3,737千円

(うち、平成26年度予算額：1,014千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

サブ課題3では、陸域炭素循環モデルの入力データ整備、およびアジアにおける炭素循環のホットスポット（水田地帯の灌漑や自然・人為起源の火災）に着目したモデル高度化を行い、アジア広域での現在と将来における炭素収支量の推定、および両者の違いを把握した。高精度化したモデルを用いて広域シミュレーションを行い、サブ課題1で開発されたSVRモデルとの比較や過去と将来での空間分布の違いを調べた。その結果、温暖化が促進されるほど陸域生態系全体の吸収量は高いことがわかった。ただし、低緯度地域ではモデル間の違いが大きく、サブ課題1と議論した結果、その原因はフラックス観測データの不足という結論に至った。確度の高い炭素収支量を把握する上で、今後、熱帯のフラックス観測網を充実させることは欠かせないと言える。また、純生態系生産量の推定には炭素プールの初期値が重要であり、衛星観測で得られたバイオマスデータによる初期条件の最適化が良いアプローチの一つであることがわかった。ただし、条件の最適化に有用なリファレンスデータは限られており、植生バイオマスや土壌有機炭素データを観測に基づいて開発することが、生態系の二酸化炭素量を評価する上で必要だと言えよう。このように、「炭素収支の現状把握」に必要とされる具体的な課題が把握できたことがサブ課題3における成果であり、今後はこれらの研究課題へ取り組むことで国内外の炭素収支研究を大きく前進させるものと考えている。

[キーワード] 炭素循環、純生態系生産量、リモートセンシング、BEAMS、MODIS

1. はじめに

本課題の全体目標は、様々な衛星プロダクトを有効利用し、データ・モデル融合を通じた陸域炭素循環モデルの高精度化である。特に、(1)既存の利用可能データを有効利用した陸域炭素循環モデル改善への道筋を立て、陸域炭素循環モデルを高精度化する、(2)完成されたモデルを用いて陸域炭素循環の過去～将来の変動を再評価する、ことを目的とする。精度向上のために、モデル入力データの再評価や改良・導入プロセスの選定が欠かせず、改良モデルによる炭素収支の再評価を行うことが本課題の全体目標を達成させる上で最も重要な作業の一つとなる。モデル入力データの評価では、新たな地上観測網データの利用と各項目固有の空間データ処理方法の開発を行う必要がある。改良プロセスの選定では、各地域の生態系の特徴を踏まえたプロセス選定を行う必要がある。

2. 研究開発目的

サブ課題3の研究目的は、アジア域を対象として、衛星データ利用型陸域炭素循環モデルによるシミュレーションとモデルの改良を行い、特に、様々な衛星観測ベースのデータによって、どの程度モデルの結果が改善するかを検討しつつ、アジアにおける潜在的に将来の環境変動が大きい地域に着目して現象の解明を行うことである。植生、光、水、温度のデータ評価や、水田地帯の灌漑プロセスの開発、熱帯における人為・自然起源の火災プロセスの導入を軸とした作業を行い、衛星データ利用型陸域生物圏モデルBEAMS^{1), 2), 3)}を用いて過去と将来での陸域炭素循環シミュレーションを行った。以下が、サブ課題3が担当した業務内容である。

- 平成24年度：アジア域での陸域炭素循環モデル試行のための環境整備やサブ課題2で構築されたシベリアの葉面積指数が陸域炭素循環シミュレーションに与える影響を評価した。
- 平成25年度：サブ課題1で構築されたモデルと陸域生物圏モデルBEAMSを利用してアジア域の陸域炭素循環シミュレーションを行った。特に大きな変動が起こる可能性のある個所に着目して陸域炭素循環のシミュレーションを行った。
- 平成26年度：サブ課題1と陸域生物圏モデルBEAMSで構築されるモデルを利用してアジア域の陸域炭素循環シミュレーションを行った。特に、過去から将来までの陸域炭素循環のシミュレーションを行った。

3. 研究開発方法

サブ課題3の研究全体フローを図(3)-1に示す。アジアを地域に切り分けて入力データ評価やモデル改良を行い、それらをまとめる形で広域シミュレーションを行った。重要性の高い地表面データの評価・改良、各地域で重要視される生態系プロセスの新規導入を行い、そこで得られた科学的知見を基により高精度な“過去～将来の広域シミュレーション”へとつなげた。

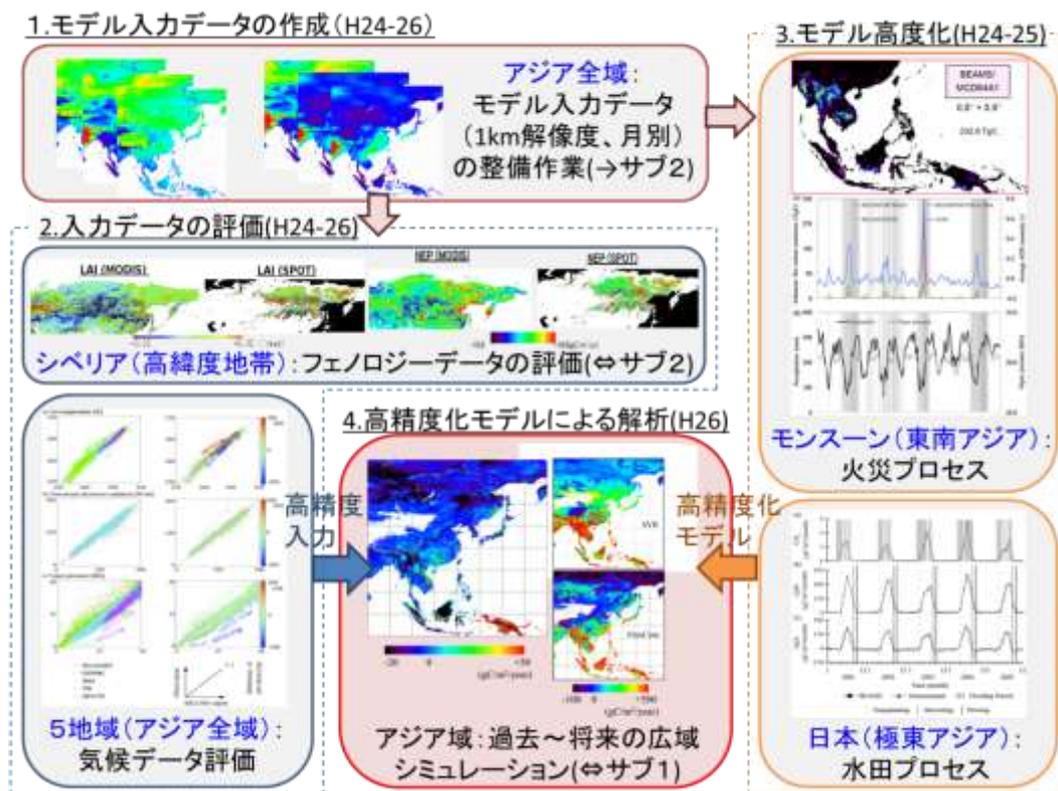
モデル入力データの作成・整備作業を行った。対象項目は、日射量、降水量、気温、水蒸気圧、風速、fPAR、LAI、アルベド、土地被覆図である。データ対象期間は2001年から2010年、分解能は1kmグリッドである。将来10年間（2091～2100年）のデータセットは、IPCC第5次評価報告書で使用された4つのRepresentative Concentration Pathways（RCP）シナリオによるGeneral Circulation Model(GCM)の計算結果を用いた。同データの解像度が粗いため、Setoyama and Sasai (2013)⁴⁾の手法を用いてダウンスケーリングした。データの一部は、サブ課題2へ提供した。

入力データの評価を行った。まず、シベリアを対象に陸域炭素循環シミュレーションを行い、フェノロジーデータの重要性を調べた。サブ課題2から提供されたLAIデータと既存のMODISデータを用いた。LAIデータと気候データ（気温、降水量、下向き短波放射量）の整合性を調べた。二つのLAIデータを使った極域シベリアのベースラインシミュレーションを行い、LAIデータが純生態系生産量の推定結果に与える影響を評価した。また、各地域をカバーする複数の気象観測網のデータセットを用いて、日射量、水蒸気圧、気温データの評価を行った。

水田の灌漑プロセス、及び火災プロセスをBEAMSに導入して、新規プロセスの重要性を調べた。水田の炭素収支解析では、農業プロセスを導入した耕作地用モデルBEAMS-C⁵⁾にメタンプロセスを導入した。同プロセスは、酸化還元電位の低下に伴うメタン基質の生成、稲の成長、バブル、拡散に伴うメタン放出、酸化によるメタン消失である。真瀬水田サイト（茨城県つくば市）で検証を行った。火災プロセスは、自然起源、もしくは人為的な火災イベントが頻発する東南アジアを対象とした。衛星データで検知された火災面積（MODISのMCD64、MCD45プロダクト）を基に炭素収

支解析を行った⁶⁾。火災による消失炭素量推定を植生バイオマス由来と土壌泥炭由来に分けて記述した。バイオマス量は、衛星観測データ⁷⁾を用いてフィッティングし、モデルラン初期条件を改善させた。

アジア地域における過去と将来の陸域炭素循環シミュレーションを行った。過去のモデルラン解析では、サブ課題1で開発されたSVRモデルによる炭素循環シミュレーションを行った。その後、BEAMS、SVR、サブ課題1から提供されたFLUXCOMデータから得られた3つの純生態系生産量を比較した。最後に、衛星観測データに基づく過去モデルランと4つのRCPシナリオデータに基づく4つの将来モデルランを行った。5つのモデルランによる純生態系生産量の空間分布の比較から、炭素収支研究における今後の技術的な課題について考察した。



図(3)-1 サブ課題3の研究フロー。

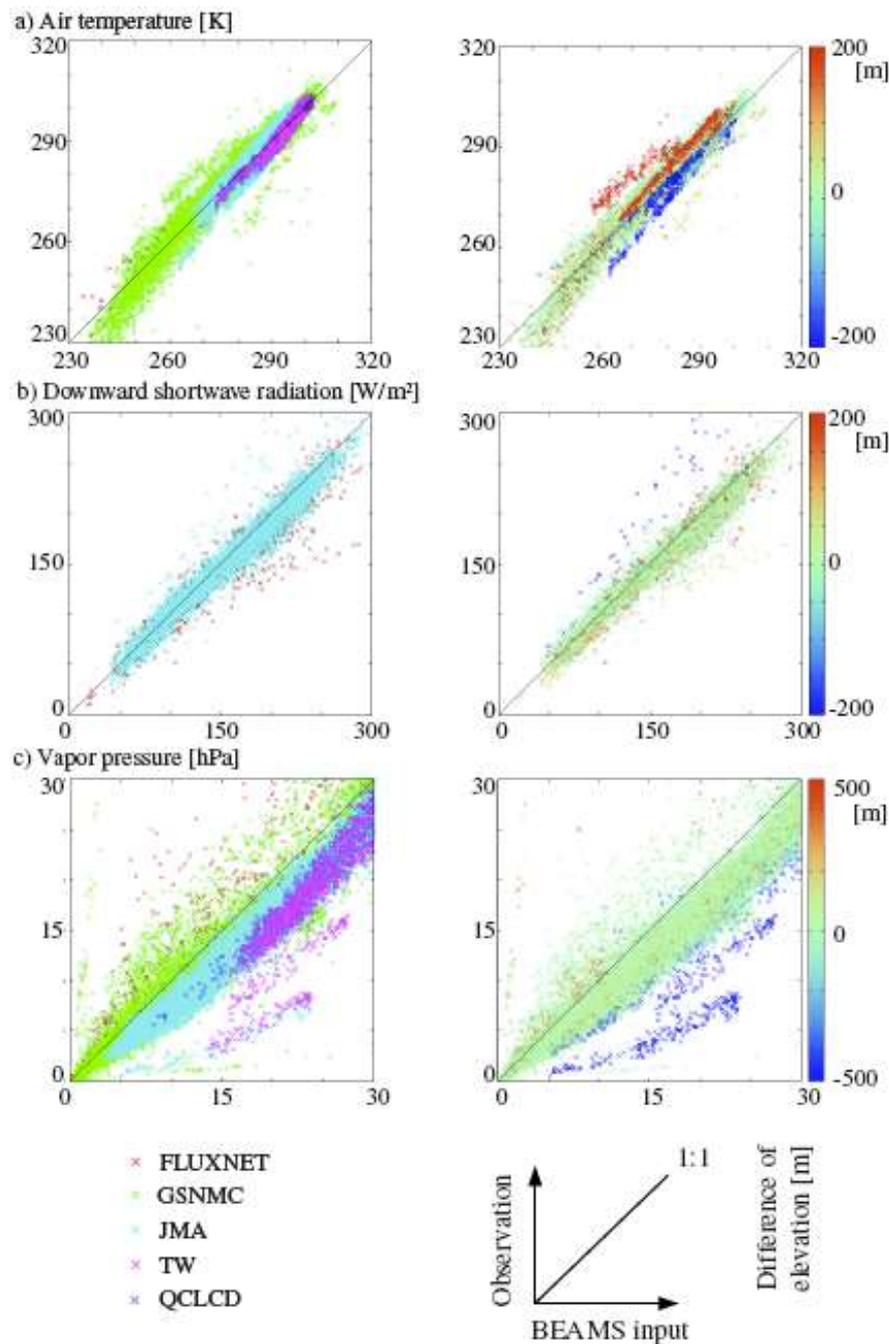
4. 結果及び考察

(1) モデル入力データの評価

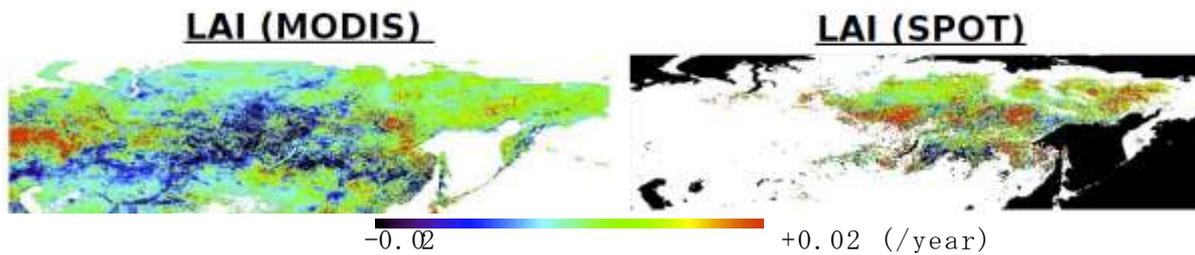
気象データの検証を行い、妥当な範囲の時空間パターンを確認できた(図(3)-1)。比湿はやや違いがみられたため、観測地点の標高と1グリッドの比湿データで想定した標高との差との関係を調べた。その結果、比湿の誤差が大きいほど標高の差が大きく、その傾向は気温減率と整合的であることがわかった。誤差は空間代表性に起因するものであり、サブ課題3で作成した1kmグリッド解像度の気候データは概ね妥当であることがわかった。

シベリア域を対象にLAIデータの評価、及びモデルランによる炭素循環への影響評価を行った。その結果、サブ課題2で作成されたLAIデータと既存のMODISプロダクトの空間分布はほぼ同じ傾向であるものの、その増減傾向(線形トレンド)は大きな違いがあった。シベリア中央部では、

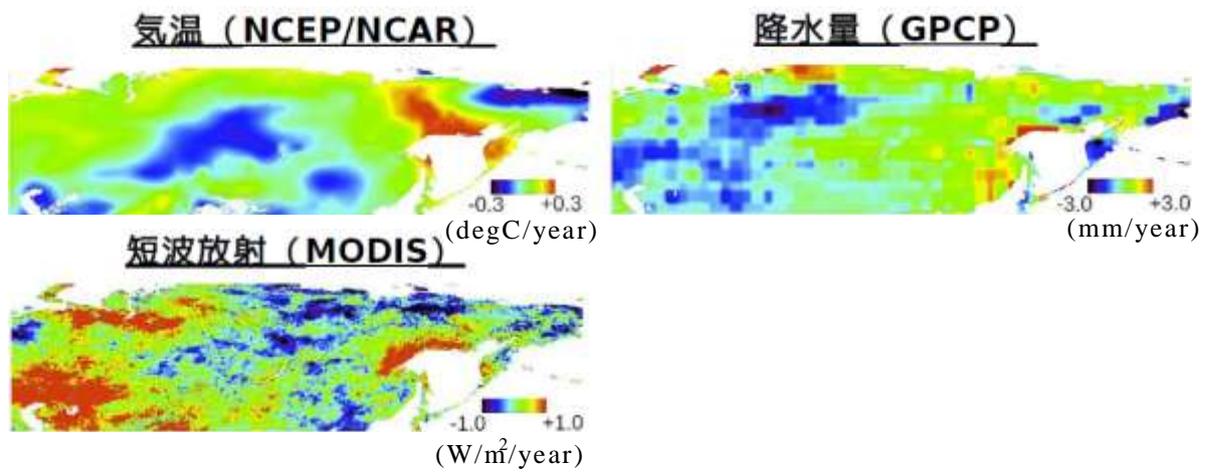
MODISが減少、サブ課題2データが増加傾向であった(図(3)-2)。そこで、気温、降水量、短波放射の増減傾向を計算し、各気象要素との整合性を調べた(図(3)-3)。その結果、気温と短波放射は減少、降水量はほとんど変化しなかった。本地域では光や温度の低下は植生の生長活動を抑制する方向に働くことを踏まえると、サブ課題2データとは整合的でないことがわかった。更に、両データをBEAMSへ入力して純生態系生産量を計算した結果、LAIデータと同様の増減傾向を示した(図(3)-4)。LAIの時空間的な推定精度は炭素収支解析において非常に重要であることがわかったため、サブ課題2との情報共有、およびSPOT/VEGETATION固有の問題も含めた議論を行った。本サブ課題3では、MODIS/LAIデータを採用することとした。



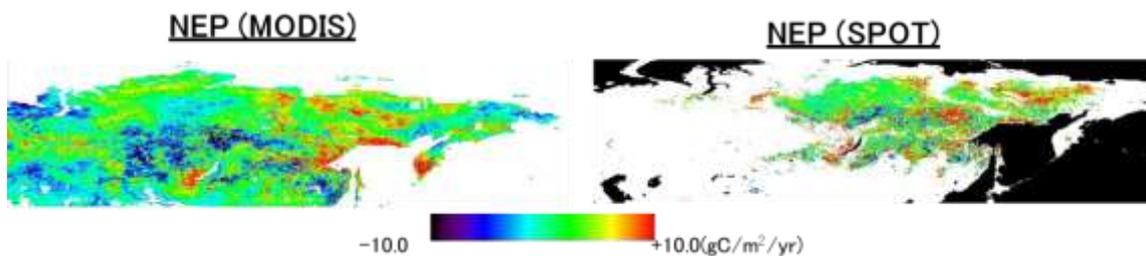
図(3)-1 モデル入力である気温、日射量、比湿の検証結果。



図(3)-2 MODIS (左) とサブ課題 2 で作成されたLAI (右) の増減トレンド分布(2001-2010年)。



図(3)-3 気温 (左上)、降水量 (右上)、短波放射 (左下) の増減トレンド分布。



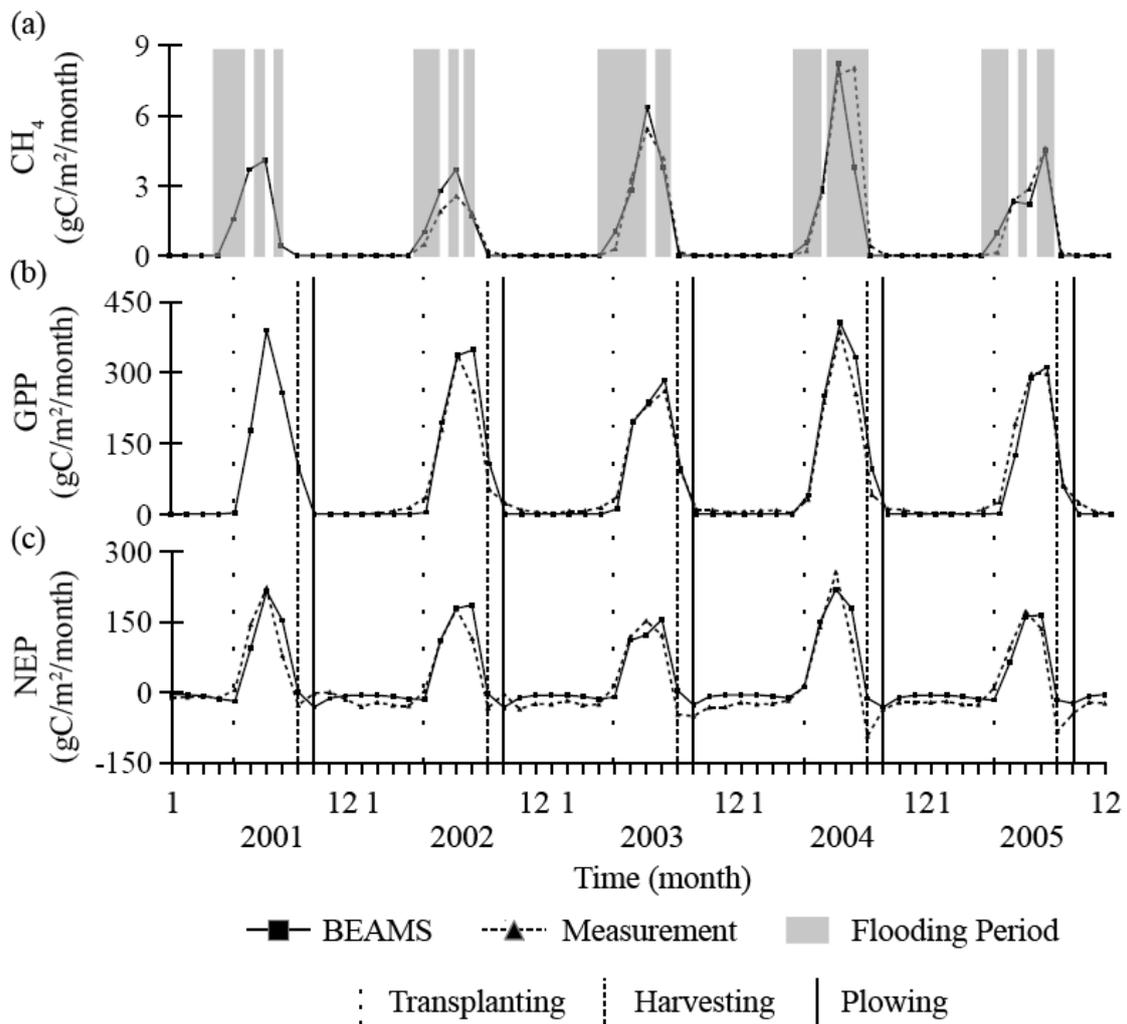
図(3)-4 MODIS (左) とサブ課題 2 の SPOT (右) ベースのLAIから推定された純生態系生産量 (NEP) の増減トレンド分布。

(2) モデルの高度化

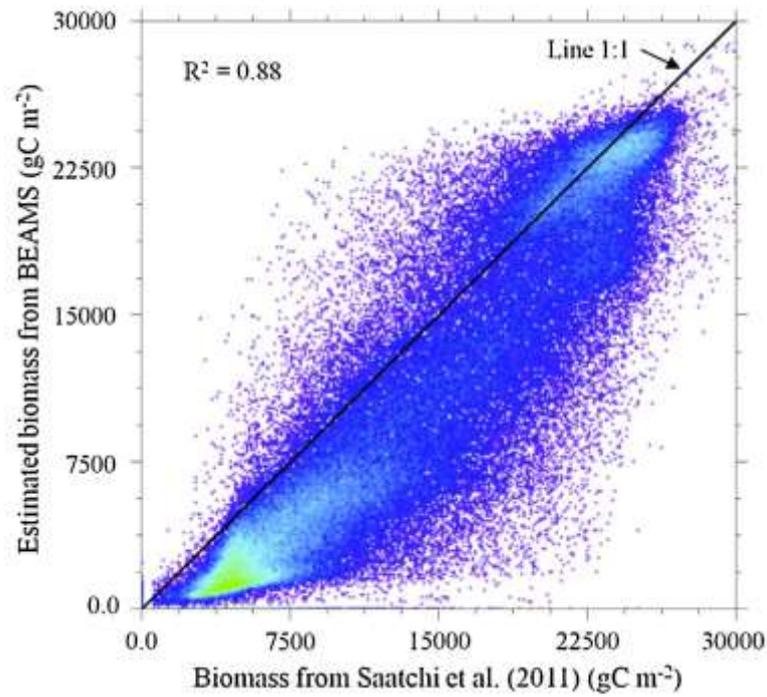
灌漑プロセスの開発とBEAMSへの統合を行い、水田（茨城県つくば市）のGPP、NEP、メタンフラックスのポイントスケールシミュレーション及び検証を行った(図(3)-5)。真瀬サイトにおいて、モデル推定結果はおおむね地上観測値と良い一致を示しており、栽培暦の田植え、収穫イベント、灌漑期間とも整合的な季節パターンを示した。各検証項目の年々変動もうまく再現できており ($R > 0.87$ 、GPP・NEPのRMSE=30.0, 1.1gC/m²/month)、水田の炭素循環を概ね妥当に再現できたと考えられる。

火災に伴う炭素放出量の推定を目的としたモデル改良を行い、東南アジア全体の炭素放出量を計算した。バイオマス量の推定精度を改善するため、モデルラン初期条件を変えてバイオマス量

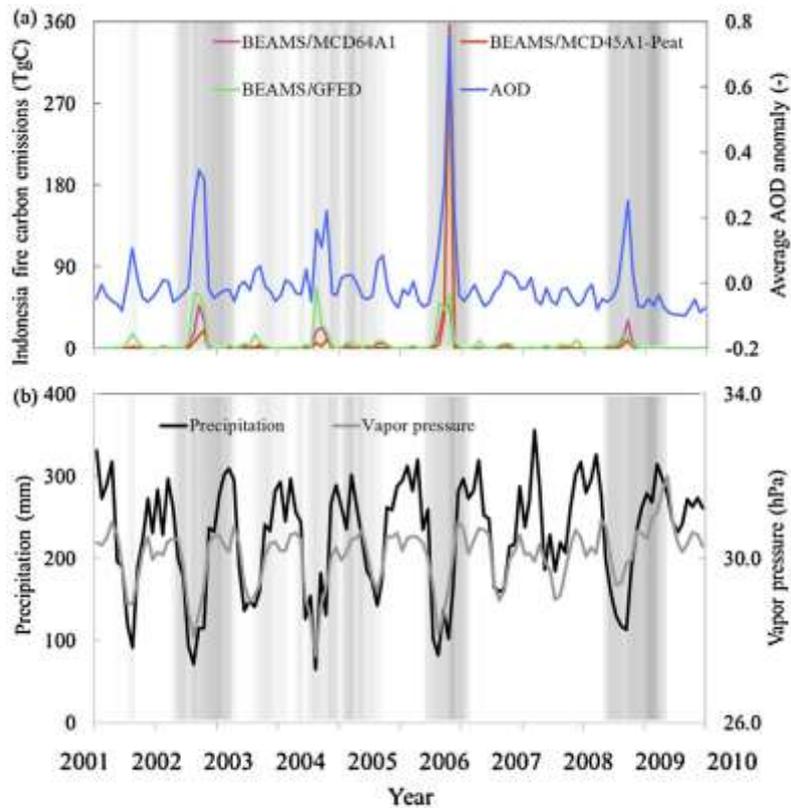
の空間パターンを推定し、既存研究である衛星観測データ⁷⁾との比較を行った（図(3)-6）。その結果、概ね妥当な空間パターンを再現できた ($R^2=0.88$)。差がある地域は、評価データとモデル推定結果の対象期間が異なることに大きく依存していると考えられる。次に、森林火災に伴う炭素排出量を解析した。泥炭地帯を含む熱帯林や一部の耕作地で火災に伴う炭素放出量が多い傾向を示した（図(3)-7）。泥炭地帯や人為的活動が活発な地域で放出量が多くなる傾向が概ね妥当に推定されていることがわかった。地域を分けて詳細に解析した結果、インドネシアでは水蒸気圧や降水量が下がる時期に乾燥によって火災面積が広がり、炭素放出量が増えてエアロゾルが増えることが確認できた。これらをコントロールする最も大きな要因は、エルニーニョであり、ENSO インデックスとも整合的な結果を示した。



図(3)-5 真瀬水田サイトにおける CH_4 放出量（上） CO_2 収支量（中、下）の検証



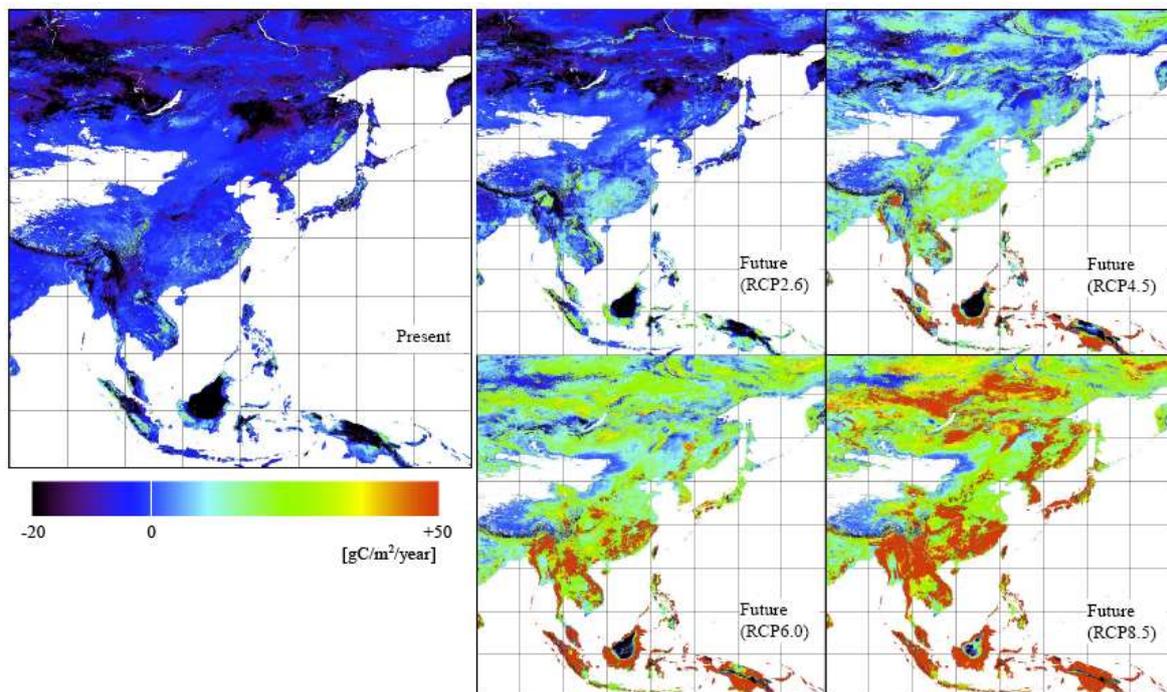
図(3)-6 初期条件の最適化に伴うバイオマス量の比較



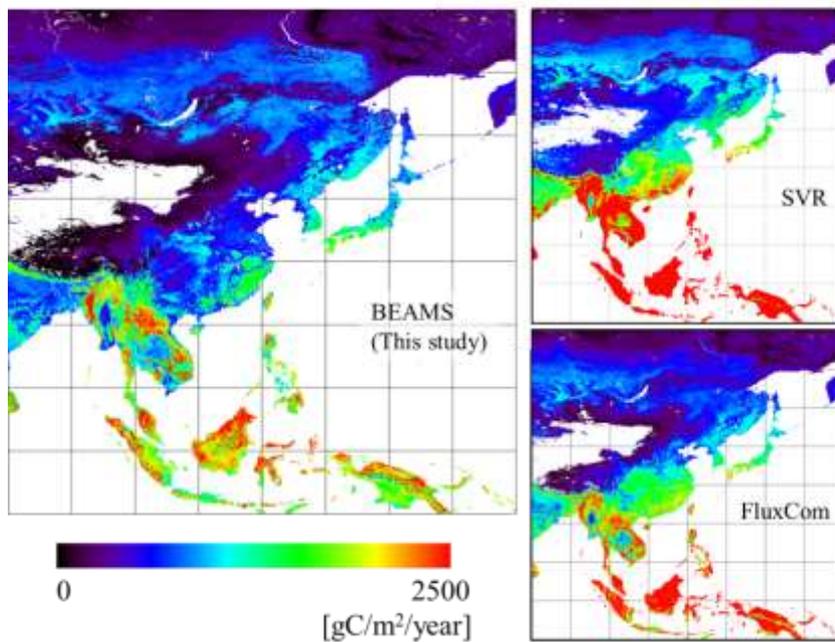
図(3)-7 インドネシアの炭素収支解析。火災による炭素放出量とエアロゾルの光学的厚さとの関係（上）、及び降水量と水蒸気圧の経年変化（下）。背景の濃淡はENSOインデックス（MEI）の強度を表す。

(3) 現在と将来における炭素循環シミュレーション

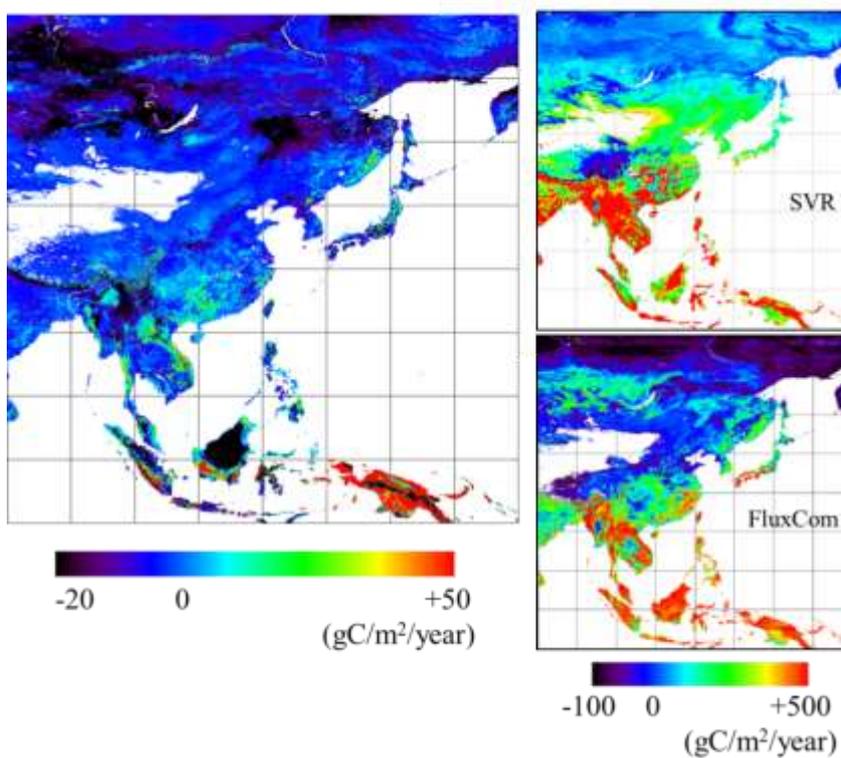
アジア地域における純生態系生産量の空間分布を調べた結果、温暖化傾向が強いシナリオほど大きな炭素吸収源になることがわかった（図(3)-8）。5つのシナリオ別に結果を比較すると、過去よりも将来の方が吸収量は多く、どの地域も全体的に吸収方向にシフトした。温暖化に伴って生態系に対する温度制限が緩和され、より大きな吸収源になる可能性があることがわかった。サブ課題1から提供されたSVRモデルによる推定結果、及び経験モデル相互比較プロジェクトFLUXCOMのモデルアンサンブルとの比較では、サブ課題3の総一次生産量の方が熱帯で低い値を示し、純生態系生産量もそれに呼応して同様の傾向がみられた（図(3)-9、図(3)-10）。この違いの妥当性を理解するためにフラックス観測タワー3地点の観測値を合わせて調べた結果、サブ課題3とフラックス観測タワーの結果は純生態系生産量が負になるなどの傾向が良く一致した。このため、サブ課題1で開発されたモデルの結果がやや過大評価である可能性があり、サブ課題1の担当者とモデル精度向上について議論をした。その結果、サブ課題1で開発したSVRモデルの元となる観測データが熱帯地域で不足しているため、精度が下がる可能性があるという結論に至った。熱帯地域のフラックス観測をより増やしていくことが、同地域の炭素収支解析において重要であると言える。また、純生態系生産量の推定値幅がサブ課題3とその他で大きく異なった。これは初期値を求めるspin-upが原因であり、サブ課題1が開発を進める林齢マップやバイオマス量などの炭素プール量に関わるデータが今後の重要な研究課題となることを指摘する。



図(3)-8 衛星観測（左）と4つの将来予測シナリオ（右）を基にしたアジア地域の純生態系生産量の空間分布。



図(3)-9 総一次生産量の空間分布。本研究結果（左）とサブ課題1が開発したSVRモデルによる結果（右上）、及びサブ課題1の結果を含むモデル相互比較プロジェクトの結果（右下）。



図(3)-10 純生態系生産量の空間分布。本研究（左）とサブ課題1が開発したSVRモデルによる（右上）、及びFLUXCOMの結果（右下）。カラーバーは、左図が左下、右の2図が右下。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

衛星データ利用型モデルBEAMSにより作成された衛星観測データをベースとするプロダクトは、炭素循環の現状把握における重要なデータセットであり、今後は炭素収支解析に関わる多くの研究者に利用されることが期待できる。

詳細な解像度でホットスポット解析を行うことで、熱帯での地上観測の充実や炭素プール量関連の研究促進など、炭素循環モデル研究分野における本質的な課題を創出することができた。

プロセスモデルによる確度の高い純生態系生産量の計算を全球1 kmグリッドまで詳細化する研究の道筋がついた。衛星観測データを複合利用した炭素循環研究では例がないことから、自然生態系の二酸化炭素の吸収・放出量を診断的に把握する新規的な研究成果だと考える。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に特筆すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

東アジア、及び東南アジアにおける純生態系生産量の主題図は、我が国やアジア地域の温暖化抑止政策の立案の基礎資料として利用可能である。

温暖化啓蒙活動の一環として、極東アジア地域を対象としたデータ配信事業（国立環境研究所ホームページ内）を行っており、本課題で得られた成果はその事業への活用を検討している。

サブ課題3では自然生態系の二酸化炭素吸収量を現状把握するデータを作成した。これは、温暖化抑制策における自然生態系の価値を定める基礎データそのものであることから、排出権取引やグリーン電力証書のような現状の環境政策とは異なる、新たな温暖化抑止政策の立案に貢献することが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

1) 日本学術振興会 外国人招へい研究者事業、衛星リモートセンシングMODISを用いた陸域炭素収支の解析（研究代表者：佐々井崇博、招へい研究者：Ramakrishna Nemani博士、NASA Ames研究所、2012年実施。

上記事業の枠組みをベースに、本課題の出張予算で年1回ペースでのNemani博士と議論を行った。衛星観測データとモデル計算資源に関する最新情報を収集しながら進めることで、国内外の動向を踏まえた先駆的な研究を行うことができた。本課題終了後、より連携を深める予定で合意している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Y. SHI, T. SASAI, and Y. YAMAGUCHI: Ecological Modelling, 272, 98-115 (2014)
 “Spatio-temporal evaluation of carbon emissions from biomass burning in Southeast Asia during the period 2001-2010.”

<その他誌上発表（査読なし）>

特に特筆すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 相庭一輝、佐々井崇博、小谷亜由美、太田岳史：日本気象学会2012年度秋季大会(2012)
 「陸域生物圏モデルBEAMSを用いたシベリア地域の水、エネルギー、炭素収支解析」
- 2) T. SASAI, S. NAKAI, Y. SETOYAMA, K. ONO, S. KATO, M. MANO, M. KAZUTAKA, A. MIYATA, N. SAIGUSA, R. NEMANI and K. NASAHARA: AGU Fall meeting, San Francisco USA, 2012
 “Analysis of the spatial variation in the net ecosystem production of rice paddy fields using the diagnostic biosphere model, BEAMS.”
- 3) Y. SETOYAMA and T. SASAI: AGU Fall meeting, San Francisco USA, 2012
 “Analyzing decadal net ecosystem production control factors and the effect of recent climate events in Japan.”
- 4) Y. SHI, T. SASAI: 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing (CHINA), 2013
 “Evaluations of the spatial and temporal variations of biomass burning emissions in Southeast Asia during 2001-2010.”
- 5) 帯川裕基、佐々井崇博：日本気象学会2013年度秋季大会(2013)
 「東アジアにおけるNEP変動要因の地域的特徴の解析」
- 6) 山田大輔、佐々井崇博：日本気象学会2013年度秋季大会(2013)
 「微生物成長プロセスを統合した陸域生物圏モデルによる全球土壌分解量の解析」
- 7) 佐々井崇博、山田大輔、相庭一輝、脊戸山祐子、林美晴、小谷亜由美、太田岳史、村上和隆、加藤創史、吉田龍平、檜山哲哉、松永恒雄、三枝信子、奈佐原顕郎：日本気象学会2013年度秋季大会
 「衛星観測データを複合利用した診断的手法によるシベリア地域の炭素収支解析」
- 8) 帯川裕基、佐々井崇博：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）
 「アジア東部における陸域炭素収支量の変動要因解析」

(3) 出願特許

特に特筆すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 独立行政法人科学技術振興機構(JST) スーパーサイエンスハイスクール(SSH) 支援事業、自然科学部交流会、名古屋大学(名古屋)、2012年11月11日.
- 2) NHK文化センター主催、NHK大河講座「ひとの大学」、NHK文化センター名古屋総支社(名古屋)、2013年11月27日.

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に特筆すべき事項はない。

(6) その他

特に特筆すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Sasai, T., K. Ichii, Y. Yamaguchi, R.R. Nemani, Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model BEAMS: Biosphere model integrating Eco-physiological And Mechanistic approaches using Satellite data, *Journal of Geophysical Research*, 110, G02014, doi:10.1029/2005JG000045., 2005.12.
- 2) Sasai, T., K. Okamoto, T. Hiyama, Y. Yamaguchi, Comparing terrestrial carbon fluxes from the scale of a flux tower to the global scale, *Ecological Modelling*, 208, 135-144, doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.05.014., 2007.10.
- 3) Sasai, T., N. Saigusa, K.N. Nasahara, A. Ito, H. Hashimoto, R.R. Nemani, R. Hirata, K. Ichii, K. Takagi, T.M. Saitoh, T. Ohta, K. Murakami, Y. Yamaguchi, T. Oikawa, Satellite-driven estimation of terrestrial carbon flux over Far East Asia with 1-km grid resolution, *Remote Sensing of Environment*, 115, 7, 1758-1771, doi:10.1016/j.rse.2011.03.007., 2011.6.
- 4) Setoyama, Y., T. Sasai, Analyzing decadal net ecosystem production control factors and the effects of recent climate events in Japan, *Journal of Geophysical Research*, 118, 1, 337-351, doi:10.1002/jgrg.20038., 2013.3.
- 5) Sasai, T., S. Nakai, Y. Setoyama, K. Ono, S. Kato, M. Mano, K. Murakami, A. Miyata, N. Saigusa, R.R. Nemani, K.N. Nasahara, Analysis of the spatial variation in the net ecosystem production of rice paddy fields using the diagnostic biosphere model, BEAMS, *Ecological Modelling*, 247, 175-189, doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.08.016., 2012.12.
- 6) Shi, Y., Sasai, T., Y. Yamaguchi, Spatio-temporal evaluation of carbon emissions from biomass burning in Southeast Asia during the period 2001-2010, *Ecological Modelling*, 272, 98-115, doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.09.021., 2014.1.
- 7) Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A., 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 108, 9899-9904.

(4) 北極域における陸域生態系変動の把握

公立大学法人 大阪府立大学

生命環境科学研究科

植山 雅仁

平成24～26年度累計予算額：3,675千円

(うち、平成26年度予算額：1,125千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

北極域を対象としてCO₂及びエネルギー収支を広域的に評価した。アラスカ域を対象として21サイトでの観測データからデータベースを整備した。整備された観測データと人工衛星リモートセンシングデータとの関係を機械学習法により決定し、総一次生産量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、純生態系交換量(NEE)、純放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックスを2000～2011年の期間について広域化した。アラスカ域では、森林火災及び火災からの植生回復過程におけるGPPの変化やCO₂収支の変動が森林域の炭素収支に重要であることが明らかとなった。また森林火災は、冬季のアルベドを上昇させ、アラスカ域全体の純放射量を有意に低下させることが明らかとなった。このことは、森林火災が北極域生態系の地表面の放射強制力を低下させることを意味する。以上のことから、森林火災が北極域生態系におけるCO₂及びエネルギー収支を評価する上で不可欠な要因であることが明らかとなった。そこで、重要なプロセスである火災攪乱の効果、及び永久凍土のふるまいをプロセスモデル(Biome-BGC)に導入し、アラスカ域についてCO₂収支を評価した。プロセスモデルでは、改良前後ともに、経験的手法により算出されたCO₂交換量の空間分布を再現することは出来なかった。経験的手法を用いたCO₂交換量及び蒸発散量を入力として改良モデルを最適化すると再現精度が向上することが明らかとなった。最適化対象とするパラメータについては、最大気孔コンダクタンスが重要なパラメータであることが示された。北極域全体のCO₂及びエネルギー収支を評価するために、全球スケールのデータであるFLUXCOMデータを、本研究で広域化したアラスカ域のデータを用いて検証した。検証の結果、FLUXCOMの結果は北極域生態系におけるCO₂・エネルギー収支をある程度、妥当に評価できていることが分かった。今後、北極域生態系においては、森林火災の効果、及び気孔コンダクタンスに係わる情報を広域で評価することが重要であるといえる。

[キーワード]

CO₂・エネルギーフラックス、北極域生態系、経験的広域化、最適化、リモートセンシング

1. はじめに

北極域では温暖化や雪氷面積の減少、永久凍土の劣化などの急激な環境変動が進行している¹⁾。これらの環境変動は今後も北極域において継続・激化することが予測されており^{1),2)}、陸域生態系の炭素やエネルギーの収支が将来大きく変化しうることが懸念されている^{1),3)}。観測研究からは、

近年の温暖化による春の早期化により北極域生態系の炭素吸収量の増大⁴⁾や、秋の温暖化による積雪時期の遅れによる炭素放出量の増大^{5), 6)}が生じていることが明らかとなっている。一方、広大な北極域の炭素・エネルギー収支を観測のみから明らかにすることは困難であるため、陸域炭素循環モデルの高度化やリモートセンシングを用いた観測データの広域化技法の構築がこの地域の炭素・エネルギー収支を評価するうえで不可欠である。

2. 研究開発目的

本課題の目的は、北極域を対象として陸域生態系の炭素・エネルギー収支に関する観測データをリモートセンシングで広域化する手法を構築し、構築された広域データを使ってプロセスモデルを高度化する手法を開発することである。

3. 研究開発方法

アラスカ域における21サイトのタワーフラックス観測データを収集し、CO₂及びエネルギーフラックスのデータベースを構築した。構築したデータベースと人工衛星リモートセンシング等から得られる環境変数（植生指数、表面温度、日射量、土地被覆分類、火災履歴、アルベド）との対応関係を構築し、機械学習型の経験モデル（サポートベクタ回帰）を構築した^{7), 8)}。構築された経験モデルと広域の入力データを用いて、アラスカ域を対象として総一次生産量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、純生態系交換量(NEE)、顕熱フラックス、潜熱フラックス、純放射量を推定した。

北極域全体をカバーできるCO₂・エネルギーフラックスデータとして、近年、FLUXCOMにより経験モデルを用いて構築されたプロダクトを検証した。このプロダクトでは、複数手法のアンサンブル平均をとることにより、信頼性の高いCO₂・エネルギー収支を推定することを目的としている。本課題でアラスカ域を対象として用いたサポートベクタ回帰^{7), 8), 9)}も経験モデルの一つとしてFLUXCOMプロダクトの構築に利用されている。

上記の経験的手法による広域プロダクトを用いて、北極域のプロセスを組み込んだBiome-BGCモデル¹⁰⁾を最適化し、北極域におけるエネルギー・水・炭素収支の再現性を評価した。このモデルは、北極圏特有のサブモデルをサブ課題1に提供して構築されたモデルである。寒冷圏に特有のプロセスとして、簡易的な永久凍土モジュール¹¹⁾、火災における植生の変化などを導入している。本課題では衛星プロダクトを利用して既往のモデルパラメータを最適化し、再現性を高めることを目的としている。

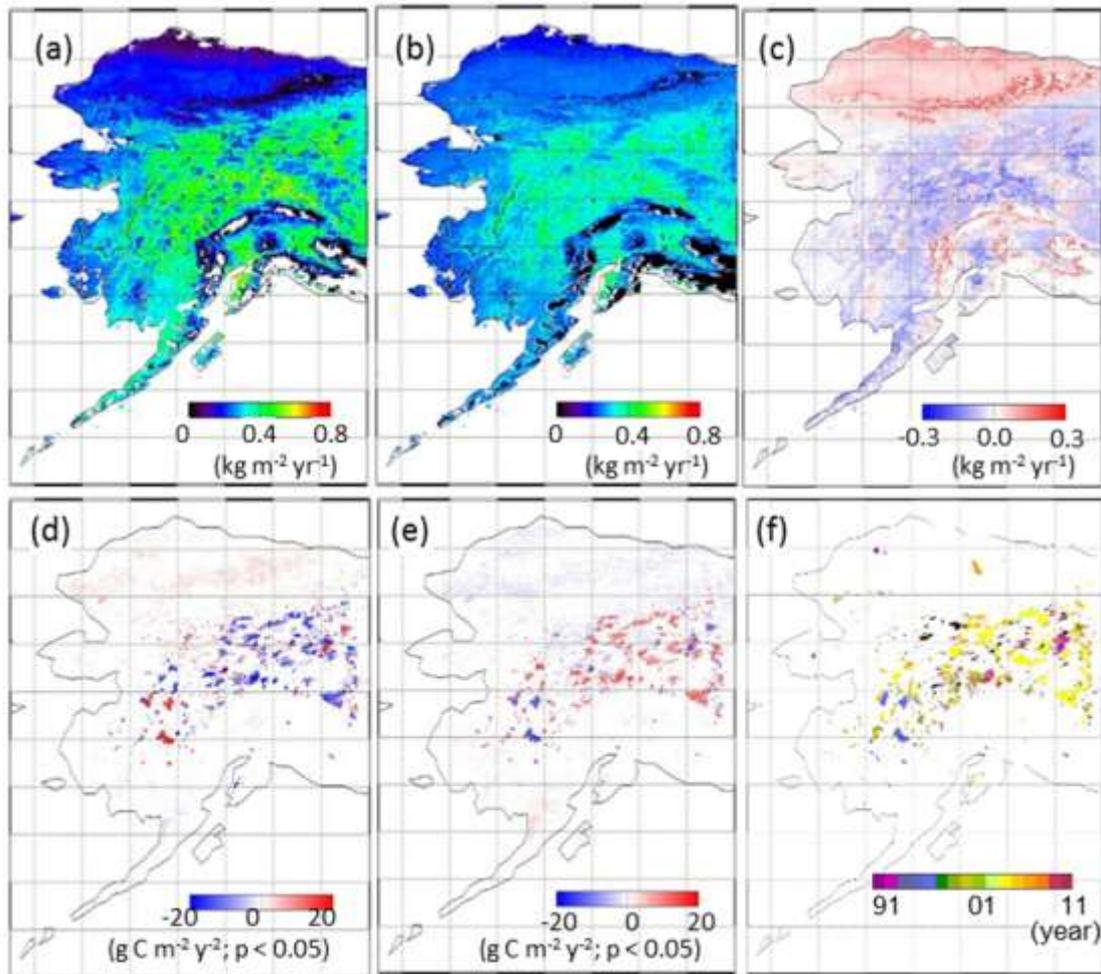
4. 結果及び考察

(1) アラスカ・北極域を対象とした陸域フラックスの経験的広域化

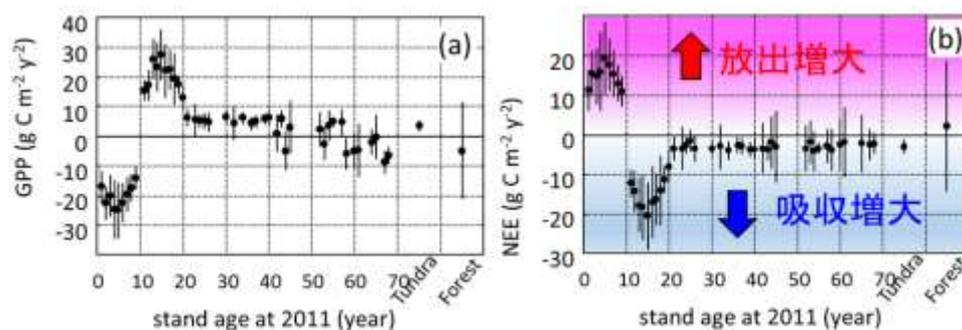
アラスカ域を対象とした2000～2011年における広域化された総一次生産量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、純生態系交換量(NEE)を図(4)-1に示す。GPP及びREは、森林帯である内陸部において高く、北極海沿岸のツンドラ生態系において低い値を示した(図(4)-1a, b)。広域化されたNEEから、ツンドラ生態系はこの期間においてCO₂の放出源、森林生態系はCO₂の吸収源として作用していることが明らかとなった。

この期間におけるCO₂収支の空間分布には、原野火災による影響(図(4)-1f)が強いことが明らかとなった(図(4)-1d, e)。火災の影響は森林が優占する内陸地域で特に顕著であり、近年に森林火

災が起こった地域においてはGPPの減少(図(4)-1d)に伴ってNEEが放出傾向となっていることが見積もられた(図(4)-1e)。一方、森林火災が起こった後10年以上が経過している地域については、植生の回復によるGPPの増加により、年間のCO₂吸収量が増加することが示された(図(4)-2)。対象領域のGPP、REは、2000~2011年でそれぞれ369 ± 22、362 ± 12 Tg C yr⁻¹であり、対象とした12年間でCO₂ニュートラルであり、吸収・放出に有意な傾向は見られなかった⁷⁾。

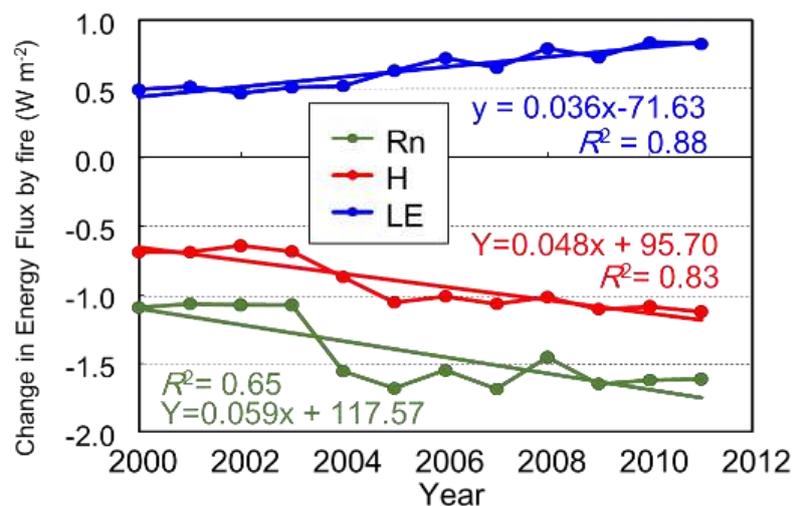


図(4)-1 経験的広域化手法により広域化された2000~2011年の年間平均GPP(a)、RE(b)、NEE(c)及び、同期間におけるGPPとNEEの線形トレンド(d、e)と原野火災が生じた年(f)



図(4)-2 火災からの年数に対する2000~2011年におけるGPP(a)とNEE(b)の線形トレンド。図(4)-1d、eを林齢ごとに整理した。

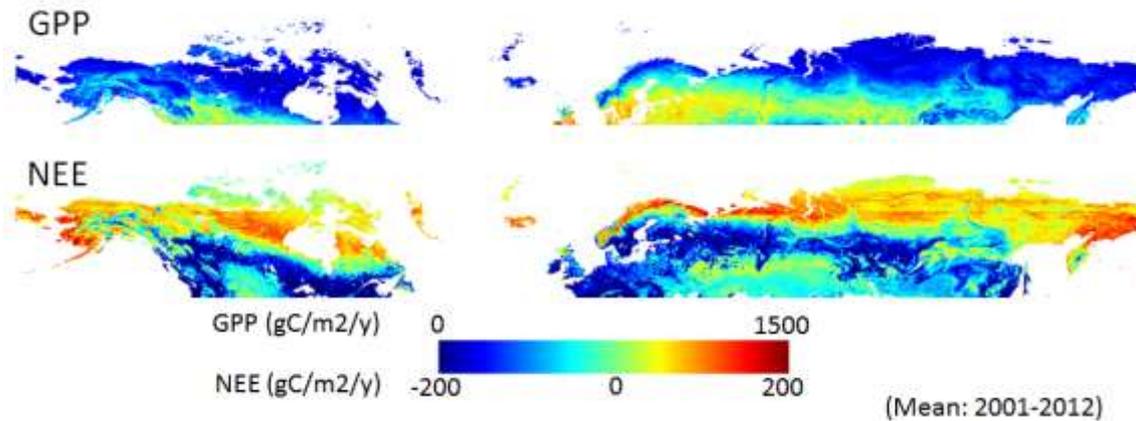
森林火災による土地被覆変化は、アラスカ域全体のエネルギー収支を変化させた(図(4)-3)。特に、火災跡地では冬季のアルベドが増加するため純放射量が低下した。冬季における純放射量の低下は年間の純放射量を低下させた。このことは森林火災によって地表面の放射強制力が低下することを表す。純放射量の低下に伴って顕熱フラックスの低下が見積もられており、森林火災は対流圏下層の気温を低下させる効果をもつことが示唆された。将来の温暖化環境下においては森林火災が多発・大規模化することが懸念されているが、火災後の生態系は純放射量や顕熱フラックスを低下させるため、温暖化に対してネガティブフィードバックとして作用する可能性があることが示された。



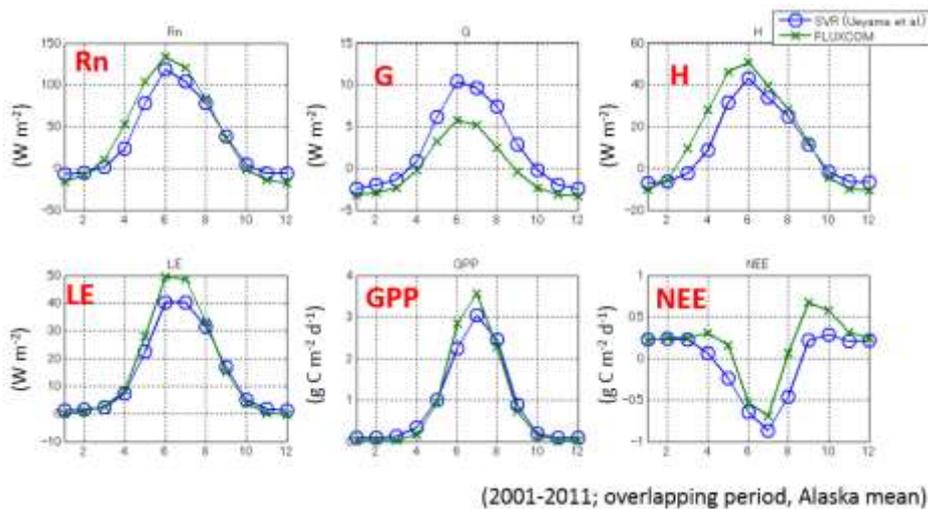
図(4)-3 アラスカ域を対象とした森林火災に伴うエネルギーフラックスの変化量。

FLUXCOMプロダクトにおける結果の一例として、GPP, NEEの空間分布を図(4)-4に示す。北極域におけるGPPについてはシベリアや北アメリカ北部などに分布するツンドラ植生において低く、北ヨーロッパやロシアなどに広がる森林域で高い値を示した。NEEは、ツンドラ地域の広範囲で炭素の正味収支がゼロ、もしくは炭素放出を示した。一方で、多くの森林域では強い吸収となった。この傾向は、アラスカ域について構築したデータ(図(4)-1c, d)と同様であった。

FLUXCOMプロダクトとアラスカ域について構築したデータ(図(4)-1)の季節変動(図(4)-2)と経年変動を比較した。季節変動については、概ね、両者の結果が一致した(図(4)-5)。NEEについては季節変化のタイミングに関して、特に春(4-5月)のNEEが吸収に転じるタイミングでFLUXCOMが構築したデータ(図(4)-1)に比較して遅くなる傾向となった(図(4)-5)。また、秋(9-10月)についてはNEEが放出に転じるタイミングがFLUXCOMで早いなどの違いが見られた。経年変動に関しては、項目によって絶対値に差がみられるものがあるが、変動成分に着目すると、顕熱フラックスとNEEを除いて、変動のパターンが一貫していた。以上のことから、北極域を対象とした解析においてはFLUXCOMデータが有効であることが分かった。



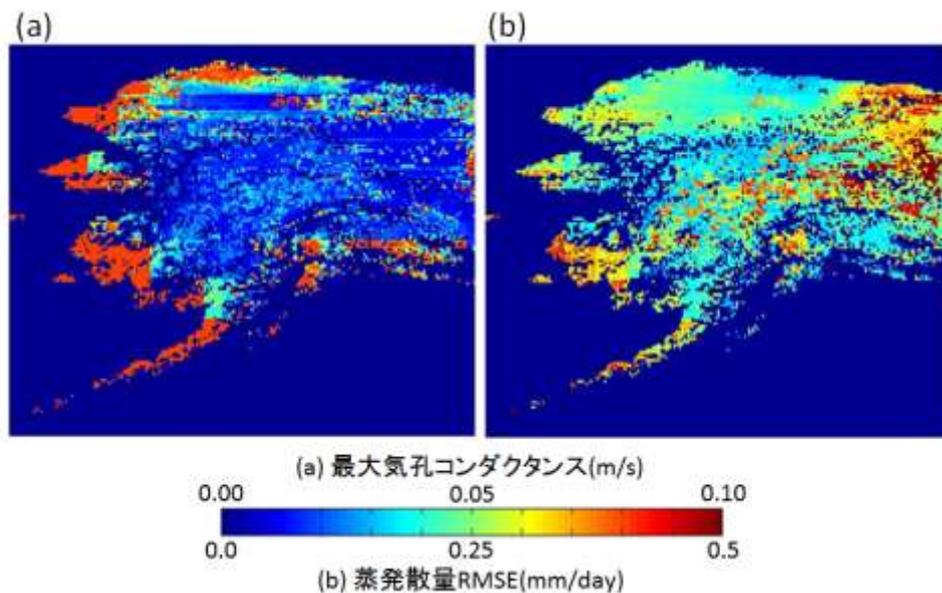
図(4)-4 FLUXCOMプロダクトのGPP, NEEの空間分布。NEEについては負の値は大気→陸への吸収を示す。2001-2012年の平均値を示す。



図(4)-5 アラスカ全域におけるサポートベクタ回帰による推定値^{7), 8)}とFLUXCOMプロダクトの推定値の月別平均値の比較。2001-2011年の平均値を示す。

(2) 広域プロダクトを用いたプロセスモデルの最適化

広域蒸発散量データ(図(4)-3)をモデル制約に用いたパラメータの最適化実験を行った。未知数として最大気孔コンダクタンスと遮断蒸発係数の2変数を選択してパラメータの最適化実験を行った。得られた最大気孔コンダクタンス(図(4)-6)については、空間的には植生タイプに応じた分布を示した。一部、海岸近辺においては大きな値が得られているが、これは気候データの解像度に起因した問題と考えられる。蒸発散量に関するRMSEについては $0.2 \sim 0.3 \text{ mm day}^{-1}$ 程度であったが、モデルに付随する既存パラメータを使った実験と比較して、大幅な改善が得られた。最大気孔コンダクタンスなどの植物生理パラメータの調整によりプロセスモデルの再現性が向上する可能性が示されたことから、この地域における植物生理パラメータの観測の重点化や推定法を確立することがモデルの不確実性を低減させる上で重要であるといえる。



図(4)-6 アラスカ域を対象とした広域衛星プロダクトを利用したモデルパラメータ最適実験の結果の一例。左：推定された最大気孔コンダクタンス、右：モデル・データ間の蒸発散のRMSE。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

・観測点の不足からこれまでに広域的な評価が困難であった北極域生態系におけるCO₂・エネルギー収支に関して、地上観測データと衛星観測データを利用して、高精度に広域評価することが可能となった。本課題では観測データをできるだけ多く利用するというアプローチのもとの広域評価であり、既存研究に多くみられるモデルを利用した評価と比較して、実態をより表現できていると考えられる。

・北極域生態系におけるCO₂・エネルギー収支には、原野火災や火災からの植生回復が重要なプロセスであることが明らかとなった。

・本手法を用いた広域CO₂・エネルギー収支のデータをプロセスモデルの制約として用いることで、モデルパラメータを空間的に逆推定できる可能性が示され、モデルの高度化につながる事が明らかとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

・日本は北極評議会のオブザーバ資格を有するなど、国際的にも北極圏において重要な役割を果たすようになってきている。その中で、本課題の成果は、既存の研究成果と比較して、より多くの観測データを利用するアプローチで現状の陸域炭素・エネルギー収支の変動を把握することに成功している。他国の研究成果と比較して、より実際の炭素収支・エネルギー収支・植生変動を

把握することができるようになってきており、変動のメカニズムもより解明できるようになってきたために、これらの成果を生かして、北極評議会などのための基礎資料として利用することが可能である。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. UYAMA, K. ICHII, H. IWATA, E. S. EUSKIRCHEN, D. Z. ZONA, A. V. ROCHA, Y. HARAZONO, C. IWAMA, T. NAKAI and W. C. OECHEL: Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 118, 1-16 (2013)
 “Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression”
- 2) M. KONDO, K. ICHII, M. UYAMA, Y. MIZOGUCHI, R. HIRATA, and N. SAIGUSA: Ecological Research, 28, 893-905 (2013)
 “The role of carbon flux and biometric observations in constraining a terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia”
- 3) K. ICHII, M. KONDO, Y. OKABE, M. UYAMA, H. KOBAYASHI, S. -J. LEE, N. SAIGUSA, Z. ZHU, and R. B. MYNENI: Remote Sensing, 5, 6043-6062 (2013)
 “Recent changes in terrestrial gross primary productivity in Asia from 1982 to 2011”
- 4) M. UYAMA, K. ICHII, H. IWATA, E. S. EUSKIRCHEN, D. Z. ZONA, A. V. ROCHA, Y. HARAZONO, C. IWAMA, T. NAKAI and W. C. OECHEL: Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 119, 1947-1969 (2014)
 “Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming, based on upscaling eddy covariance measurements”
- 5) M. KONDO, K. ICHII, and M. UYAMA: Agricultural and Forest Meteorology, 201, 38-50 (2015)
 “Impact of anomalous climates on carbon allocation to biomass production of leaves, woody components, and fine roots in a cool temperate deciduous forest”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 市井和仁、植山雅仁: 海外の森林と林業, 92, 58-63 (2015)
 「地上観測データと衛星観測データの統合による広域の陸域二酸化炭素収支の推定」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) M. UYAMA, K. ICHII, H. IWATA, E. EUSKIRCHEN, D. ZONA, A. ROCHA, Y. HARAZONO, C. IWAMA,

- T. NAKAI and W. OECHEL: AGU Fall meeting, San Francisco USA, 2012
 “Increase of surface energy fluxes due to warming climate in Alaska based on upscaling of eddy covariance measurements”
- 2) 植山雅仁、市井和仁、岩田拓記、中井太郎、原藺芳信：日本気象学会2013年度秋季大会、仙台、2013
 「アラスカ域における北極生態系のCO₂収支の広域評価：フラックス観測ネットワークと経験的広域化」
- 3) M. UEYAMA, K. ICHII, H. IWATA, E. EUSKIRCHEN, D. ZONA, A. ROCHA, Y. HARAZONO, C. IWAMA, T. NAKAI and W. OECHEL: AGU Fall meeting, San Francisco USA, 2013
 “Simulating carbon and water fluxes at Arctic and boreal ecosystems in Alaska by optimizing the modified BIOME-BGC with eddy covariance data”
- 4) M. UEYAMA, N. TAHARA, H. IWATA, H. NAGANO, and Y. HARAZONO, AGU Fall meeting, San Francisco USA, 2014
 “Inverse estimation of parameters for a coupled photosynthesis and stomatal conductance model using eddy covariance measurements at a black spruce forest in Alaska”
- 5) 植山雅仁：信州大学数理・自然情報科学科・数理科学談話会、松本、2015
 「陸域生態系をめぐる温室効果気体とエネルギーの流れ—数理でつなぐスケールの溝—」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 植山雅仁：農業気象学会近畿支部大会 公開シンポジウム、大阪、2013年11月30日
 「北極域における環境変動と炭素収支 —温暖化は生態系バイオマスを増加させるか？」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Hinzman et al. (2005), Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions. *Climate Change*, 72, 251-298.
- 2) Chapman, W., and J. E. Walsh (2007), Simulations of arctic temperature and pressure by global coupled models, *J. Clim.*, 20, 609-632.
- 3) Chapin III, F. S., et al. (2005), Role of land-surface changes in arctic summer warming,

- Science, 310, 657-660.
- 4) Euskirchen, E. S., A. D. McGuire, and F. S. Chapin III (2007), Energy feedbacks of northern high-latitude ecosystems to the climate system due to reduced snow cover during 20th century warming, *Global Change Biol.*, 13, 2425-2438.
 - 5) Ueyama, M., H. Iwata, and Y. Harazono (2014), Autumn warming reduces the CO₂ sink of black spruce forest in interior Alaska based on a nine-year eddy covariance measurement, *Global Change Biol.*, 20, 1161-1173.
 - 6) Piao et al. (2008), Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451, 49-53.
 - 7) Ueyama, M., et al. (2013), Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 118, doi:10.1002/jgrg.20095.
 - 8) Ueyama, M., et al. (2014), Change in surface energy balance in Alaska due to fire and spring warming, based on upscaling eddy covariance measurements, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 119, 1947-1969, doi:10.1002/2014JG002717.
 - 9) Yang, F., et al. (2007), Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through support vector machine approach, *Remote Sens. Environ.*, 110, 109-122.
 - 10) Thornton, P. E., et al. (2002), Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 185-222.
 - 11) Beer et al., (2007), Effects of soil freezing and thawing on vegetation carbon density in Siberia: A modeling analysis with the Lund-Potsdam-Jena dynamic global vegetation model (LPJ-DGVM), *Global Biogeochemical Cycles*, 21, doi:10.1029/2006GB002760.

Refinement of Terrestrial Carbon Cycle Models through Model-Data Fusion Constrained by Multiple Satellite-based Products

Principal Investigator: Kazuhito ICHII

Institution: Japan Agency for Marine-Earth Science and
Technology (JAMSTEC)

3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama,
Kanagawa, 236-0001, JAPAN

Tel: +81-45-778-5556 / Fax: +81-45-778-2XXX

E-mail: ichii@jamstec.go.jp

Cooperated by: University of Tsukuba, Osaka Prefecture University

[Abstract]

Key Words: Carbon and water cycles, Terrestrial carbon cycle model, Model-data integration, Optimization, Remote sensing, circumpolar region, Asia

For better assessment and future projection of terrestrial water and carbon cycles, we developed a multiple data-integrative biosphere model. This new data-integrative model is designed to function as both a diagnostic mode with satellite-based leaf area index (LAI) a prognostic mode without satellite-based LAI, and it integrates spatial datasets of biospheric variables (mostly remote sensing data) as constraints of model simulations. This implementation allows not only improvement of carbon and water cycle simulations, but also inverse estimation of ecophysiological parameters. We developed a model parameter optimization routine into a model constructed based on an existing biosphere model, Biome-BGC, and conducted both site-level and continental-scale experiments. Site-level experiments were conducted at multiple eddy-covariance sites in Asia, and we found that both biomass and flux constraints are necessary to simulate these accurately. Continental simulations, having a new parameter set (e. g., rooting depth and maximum light use efficiency) inferred from inverse estimation of model parameters, successfully improved carbon and water cycle simulations.

We also constructed new datasets to simulate terrestrial carbon cycles. First, LAI and phenology were generated in boreal and Arctic regions evaluated by ground observations. Additionally, CO₂ fluxes at the global scale were generated using a network of eddy-covariance measurements and remote sensing

data and further validated with the GOSAT Level 4A product. Moreover, global forest age data, which are lacking at present, were developed experimentally using a model inversion technique based on a legacy of global disturbances represented by indices of human and fire influence, and we found that the established data were consistent in both North America and China. We anticipate that these newly established data can be integrated into carbon cycle simulations and thus contribute to reducing uncertainties in our understandings of the terrestrial carbon budget.

To understand the terrestrial CO₂ budget, the selected regions, Asian, boreal, and Arctic regions, were analyzed intensively. The Asian regions were analyzed using a diagnostic biosphere model, BEAMS, to detect recent drastic changes in the carbon budget. Emissions from fire in southeast Asia, the methane budget of rice paddy, and the CO₂ budget in Siberia were analyzed. The CO₂ and energy budgets in Alaska were analyzed by integrating 21 eddy covariance site data, remote sensing data, and Biome-BGC. We found from analyses of Asia and circumpolar regions that the role of fire is one of the important factors determining terrestrial carbon budgets.