

課題名 RF-1007 GOSAT衛星データを用いた陸域生物圏モデルの改善とダウンスケーリング

課題代表者名 市井 和仁(福島大学共生システム理工学類 准教授)

研究実施期間 平成22～23年度

累計予算額 24,083千円(うち23年度 11,733千円)
予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1)GOSATデータを用いた陸域生物圏モデルの改善(福島大学共生システム理工学類)
- (2)陸域生物圏モデルのダウンスケーリング(名古屋大学大学院環境学研究科)
- (3)陸域生物圏モデルの相互比較を通じたGOSATデータの有効性の検討(大阪府立大学生命環境科学科)

研究協力機関

なし

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

陸域炭素循環モデル(陸域生物圏モデル)は、温暖化予測における不確実性をもたらす一つの重要な要因であると言われており、その改善が急務である。さらに、陸域生物圏モデルの向上は、地域・大陸・全球スケールの水・炭素収支のより正確な把握・予測に貢献し、将来の環境変動による影響予測として水資源・生物生産性・森林の炭素管理などの予測をより正確にすることが可能である。

従来、陸域生物圏モデルの改善にあたっては、地上観測データや光学衛星データ(NOAA/AVHRR、Terra/MODIS等)を利用した研究が広く行われてきた。例えば、全球的なフラックス観測ネットワークであるFLUXNETに代表される地上観測による炭素フラックスデータはモデル改善に有用である。しかし、観測網が荒く、偏りがある(北米、ヨーロッパ、一部アジアに集中)ことが問題である。また、衛星観測を利用した光合成量などの空間データを利用した陸域生物圏モデルの改良はより広範囲をカバーできるために有効である。しかし、従来の手法では、光合成量の見積もりは可能だが生態系呼吸量の見積もりは難しいとされている。すなわち、陸域の炭素循環を考える際に、主要なフラックスである光合成・呼吸・分解のうち、光合成のみ広域推定が可能であり、呼吸・分解量、もしくは純生態系炭素交換量については広域での見積もりが困難であった(図1)。地上大気CO₂濃度観測を用いたインバージョンモデル解析では広域での陸域炭素収支を把握することができるが、大気CO₂濃度網が荒いために、正確な見積もりは非常に困難である。

2009年に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT衛星)は、大気CO₂濃度の時空間分布を高精度で推定することができる。これはCO₂濃度観測点が飛躍的に増加することを意味する。GOSAT衛星から、この観測結果を利用して、大気インバージョンモデルを実行することにより、従来よりも格段に高精度な地表面CO₂収支分布が提供される。このデータを有効利用することにより、陸域生物圏モデルを向上させ、陸域炭素循環の推定の不確実性を減らすことができると期待できる。

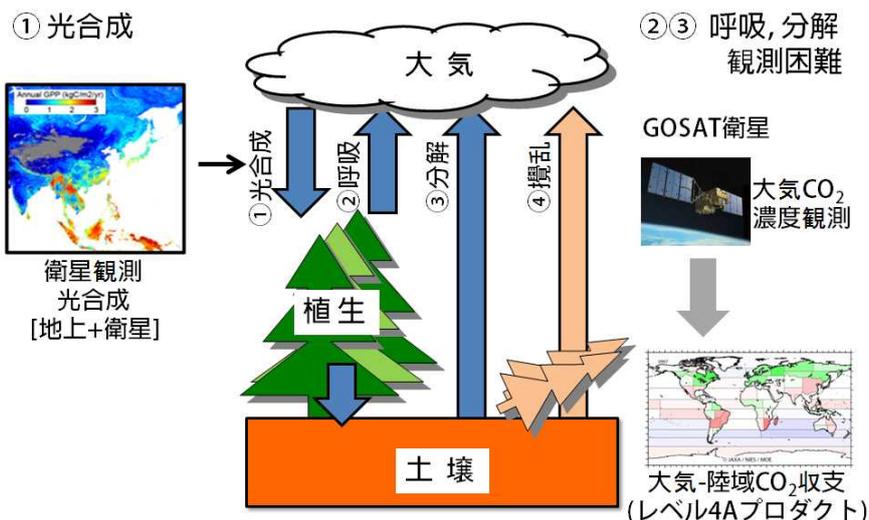


図1. 陸域炭素循環の概要とGOSAT衛星データの役割。GOSAT衛星によって、従来推定困難だった②③を含んだ大気-陸域CO₂収支の見積もりが高精度で提供される。

2. 研究開発目的

本研究では、GOSAT衛星からの地表面CO₂収支推定(GOSAT L4Aデータ)を有効利用して陸域生物圏モデルを格段に向上させることを第一の目的とする。さらに、そのモデルを用いて大陸スケール・地域スケールの地表面CO₂収支を推定することを第二の目的とする。詳細は以下の通り。

目的1: GOSAT L4Aデータの有効利用による陸域生物圏モデルの精度向上

- ・GOSAT L4Aデータを利用した、より細かい空間スケール(例: 1°グリッド)の炭素収支の推定
- ・GOSAT L4Aデータなどの広域の炭素フラックスデータを利用した陸域モデル改善手法の構築

目的2: 大陸スケール・地域スケールの大気-陸域CO₂収支の推定向上

- ・アジア域、アラスカにおける陸域炭素収支の推定
- ・特に「トップダウン」「ボトムアップ」手法の比較を通じた陸域炭素収支の推定

なお、現段階のGOSAT衛星データからの結果においては、GOSAT L4Aデータが未公開(GOSATプロジェクトにおける研究提案採択者のうちの特定の研究者に確認と評価のために提供されている)データであるため、それに基づく研究結果(数値)は暫定的である。従って、研究開発された手法の確認には十分であると言えるが、数値的な内容は今後のリリースされる公開版GOSAT L4Aデータに基づいて評価しなおす必要がある。また、本課題では、GOSAT L4Aデータについては、2011年12月末に受けたものであるため、時間的な制約のために、GOSAT L4Aデータのプロトタイプとして大気インバージョンモデルCarbonTrackerを利用した結果も含まれている。

3. 研究開発の方法

(1) GOSATデータを用いた陸域生物圏モデルの改善

1) GOSAT L4Aデータのダウンスケーリング

GOSAT L4Aデータは亜大陸スケールでの炭素収支推定であるために、陸域生物圏モデルの改良に直接利用するためには、「ダウンスケール」を行うことが望ましい。そこで、GOSAT L4Aデータに代表される「トップダウン」手法と、衛星データなどを利用して地上データを積み上げる「ボトムアップ」手法を組み合わせることで、GOSAT L4Aデータで推定されたCO₂収支を空間的により細かいスケールにダウンスケールすることを試みた。ボトムアップ手法としては、渦相関法によるCO₂フラックス観測ネットワーク「FLUXNET」などのデータと衛星データを組み合わせた回帰モデル(サポートベクタマシンによる回帰モデル)を用いて、光合成量と生態系呼吸量を算出して、両者の差より、純生態系炭素交換量のグローバル分布を推定した。「ボトムアップ」「トップダウン」を融合したダウンスケール手法については、「トップダウン」方式で推定された亜大陸スケールの炭素収支に合うように、「ボトムアップ」方式の炭素収支を補正することで、純生態系炭素交換量の空間分布を算出した。

2) 広域炭素フラックス量を利用した陸域生物圏モデルの改善

本研究では、これらGOSATに関連した陸域炭素フラックスの見積もりを利用した陸域生物圏モデルを改良手

法の構築を行った。陸域生物圏モデルとしては陸域炭素・水・エネルギーの循環を計算機上で再現できる Biome-BGCモデルを用いた。光合成量や生態系呼吸量、生態系純炭素交換量などの炭素フラックス量を制約条件としたモデルパラメータ最適化手法の構築を行った。陸域生物圏モデルについては、パラメータの数に比較して制約できる観測が少ないため、モデルパラメータの最適化は困難であるが、モデルの構造に着目して、モデルパラメータの自由度を減らしながら、モデルパラメータの最適化を行えるように工夫を行った。まずは、日本～アジア域における地上観測サイト(日本4サイト～アジア26サイト)においてモデルパラメータ最適化の効果を検証した。次に、これをグローバルに拡張した。その上で、モデルパラメータ最適化によって、どの程度、観測データに近づけることができたか、そして、フラックスに加えて、炭素プール量(今回はバイオマス量)を制約に加えた場合、モデル結果にどのような結果が表れるのかを検証した。いずれも1901年～2010年までの日単位のモデルランを行った。

(2) 陸域生物圏モデルのダウンスケーリング

アジア域や日本域を対象として、数キロ分解能という高空間解像度での炭素収支の把握をすることは、様々な政策上における炭素管理という観点で重要である。本サブ課題では、GOSAT衛星データによる亜大陸スケールでの炭素収支推定結果をモデルを用いて高解像度にダウンスケールし、数キロという高解像度で炭素収支マッピングを行うことを目的とした。陸域生態系の炭素・水・エネルギープロセスを再現する陸域生物圏モデル BEAMSは、衛星データを入力値とする診断型タイプのモデルである。BEAMSモデルと大気インバージョン解析との比較を行うため、グローバルスケールにおいて、CarbonTrackerによる結果との比較を行った。さらに、BEAMSモデルに衛星観測データを入力してシベリア地域の炭素・水・エネルギー収支の広域解析を行った。解析期間は2001年から2010年まで、空間分解能は10km、対象地域は北緯45-80度、東経60-西経170度とした。

(3) 陸域生物圏モデルの相互比較を通じたGOSATデータ有効性の検討

1) アジア域を対象とした大気インバージョンモデル解析と陸域生物圏モデルの比較

複数の陸域生物圏モデルと大気インバージョンモデル解析の結果を通して、アジア域の過去の陸域炭素循環、大気インバージョンモデル解析の結果と陸域生物圏モデルの結果の違いやその理由を考察した。対象領域は、アジア域の多くの部分・地上観測点を含むエリアに設定した。モデル比較のためのデータセットとして、グローバルスケールの気象データをベースにして、アジア域での切り出し・補正などを行い、1901年-2010年と、2001年-2010年の2種類の期間について、アジア広域をカバーする0.25度の分解能のデータを構築した。さらに、衛星データとして光合成有効放射吸収率(FPAR)や葉面積指数(LAI)や植生指数などのデータを準備した。陸域生物圏モデルとして、6種類のモデルのセットアップとモデルランを行った。利用したモデルは、サポートベクタマシン回帰モデル(以下SVM回帰モデルとする)、BEAMSモデル、CASAモデル、Biome-BGCモデル、LPJモデルであり、GOSATデータのプロトタイプデータとして、CarbonTrackerで推定された大気-陸域炭素収支データを用いた。これらのモデルを用いて、2000年-2010年の期間についてのシミュレーションを行い、各モデルの炭素収支の比較をした。

2) 北極域生態系における炭素フラックスの広域化と大気インバージョンモデルとの比較

GOSAT衛星データなどによる陸域炭素収支の推定結果が比較的狭い地域においても有効であるかを検証するために、アラスカ域において、ボトムアップ手法とトップダウン手法による陸域炭素交換量の比較を行った。まずは、地上観測データと人工衛星データを融合させることで、広域的な炭素フラックスを推定する手法の構築を行った。次に、この広域化手法を将来的に得られるGOSAT衛星によるCO₂交換量のダウンスケーリングのための一つのデータとして使用可能であるかについて検討した。タワー観測が高密度で展開されているアラスカ域(北緯72-68度、西経140-170度)を対象として、微気象観測により得られた炭素フラックスの広域化を実施した。SVM回帰モデルを用いて、12観測サイトにおける炭素フラックスを用い、広域化を行い、光合成量、生態系呼吸量、純生態系炭素交換量(生態系呼吸量-光合成量)の時空間分布を算出した。これらの手法で求められた純生態系交換量とCarbonTrackerによる大気-陸域炭素フラックスを比較した。さらに、過去11年における地表面炭素フラックスの変動傾向について、変動の要因を模索した。

4. 結果及び考察

(1) GOSATデータを用いた陸域生物圏モデルの改善

1) GOSAT L4Aデータのダウンスケーリング

まずは、地上観測データと衛星データを組み合わせたSVM回帰モデルによる経験的な炭素フラックス(光合

成・生態系呼吸)の推定を行った。その結果、光合成量と生態系呼吸量に関しては、過小評価気味ではあるものの、観測と推定結果の間には明瞭な線形関係が見られた。一方、純生態系炭素交換量に関しては、光合成量・生態系呼吸量に比較して弱いが線形関係が見られている。純生態系炭素交換量の推定については、今回の手法ではサイト履歴などの要素を入れていないことや、光合成量・生態系呼吸量に比較して、サイト間での違いが小さく、観測自体の精度の問題などの様々な要因が考えられる。空間的に拡張して、グローバル推定を行った結果、光合成量に関しては、空間的にも妥当な分布を示した。純生態系炭素交換量については、熱帯地域にて大きな吸収となっているがこの妥当性については今後の検証が必要である。現段階においては、おそらく、光合成に比較して呼吸量が過小評価されているために、両者の差で表現される純生態系炭素交換量については、過大評価されているものと考えている。純生態系炭素交換量の経験的な推定に関しては、サイトの情報などの導入が現段階では困難であり、今後の改善が望まれる。

次に、GOSAT L4Aデータを利用したダウンスケーリングを行った(図2)。今回は、GOSAT L4Aデータの算出単位である亜大陸毎(全部で陸上を44地域に分割)において、SVM回帰モデルにより推定された純生態系交換量の総量が、GOSAT L4Aデータによって推定された年間の炭素交換量と等しくなるように、SVM回帰モデルによる純生態系交換量に乗ずる係数を決定することでダウンスケールを行った。現時点においては、GOSAT L4Aデータにおいて、亜大陸のタイル間において大きな違いが見られたり、SVM回帰モデルによる純生態系交換量の推定の誤差の問題などの様々な問題があるため、今後、更なる評価・改善が必要ではある。一方で、GOSAT L4Aデータのダウンスケールという試みは、世界にない試みであるため、ダウンスケール手法の更なる検討を重ねることで、手法を改善し、GOSATデータを利用した新たなデータとしての地位の確立をめざしていくことが必要である。

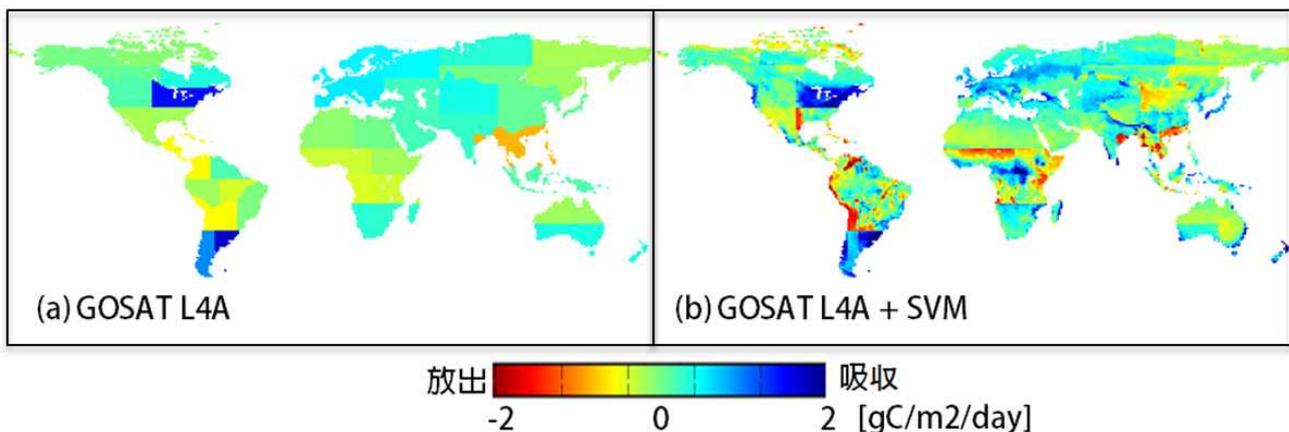


図2. (a)GOSAT L4Aデータと、(b)本研究のダウンスケール手法による陸域炭素収支。

2) 広域炭素フラックス量を利用した陸域生物圏モデルの改善

GOSAT衛星データなどによって推定される陸域炭素フラックスを制約条件に利用したモデルパラメータ最適化手法を構築した。まず、観測サイトにおいてテストをした結果、元のモデルでは、観測された炭素フラックスとは大きな開きがあったが、最適化手法を適用することによって、十分に炭素フラックスを再現できた。しかしながら、炭素プール量に関しては、炭素フラックスを制約と与えるだけでは十分に観測を再現することができず、バイオマス量などの炭素プール量についてもモデルを制約する上で必要であることが分かった。この手法をアジア26観測サイトに拡張してみたところ、多くのサイトで、パラメータ最適化手法の適用によって、陸域炭素フラックスのモデル再現性が向上することが分かった。その一方で、熱帯林観測サイトや耕作地観測サイトや特に高い光合成量・生態系呼吸量を示す観測サイト域については、最適化により観測結果に近づいたものの、依然として観測結果とは大きな開きがあり、今後のより詳細な解析が必要であることが分かった。

次に、Biome-BGCモデルに対して広域の炭素フラックスを制約として、サイトレベルでテストしたモデルパラメータ最適化手法を適用した(図3)。広域の炭素フラックスを最適化の制約条件として適用すると、光合成量に関しては、観測データに近くなった。一方、サイトレベルでの解析結果と同様、炭素フラックスのみを制約条件に用いたモデルパラメータ最適化手法では、バイオマス量については、十分に制約することができなかった。さらに、バイオマス量の広域データをモデルパラメータ制約条件に利用したところ、デフォルトモデル比較して、バイオマス観測値に近くなった。従って、GOSATデータに代表される陸域炭素フラックスの広域データは陸域生物圏モデルを改善するのに重要であることが分かった。しかし、バイオマス量は、将来予測をするうえでの潜在的な炭素放出源となる可能性があることから、バイオマス量のより正確な見積もりは必要である。従って、炭素フラックスのみならず、炭素プール量に関する制約も今後必要になることが分かった。

今後の課題としては、現段階では炭素フラックスに主に着目していたが、炭素フラックスのみならず、バイオマス量もモデルの重要な制約であるために、これらのデータ整備を行うことが挙げられる。例えば、衛星観測などを利用したバイオマス量の空間マッピングのグローバルスケールでの見積もりが必要である。特に、ALOS衛星に搭載されたPALSARセンサや今後打ち上げが計画されているGCOM-C1衛星などの衛星データを利用したバイオマス量の見積もりに期待が寄せられる。また、本研究においては、攪乱履歴が重要であることが分かった。特に、現在の炭素収支を説明するための一つの要因として、林齢が重要である。しかしながら、林齢のグローバルマップは存在しないため、林齢(攪乱履歴)のグローバルデータを構築することが炭素収支のシミュレーションに必要である。さらには、今回の研究では、光合成、生態系呼吸量、生態系純交換量に着目して研究を進めてきたが、森林火災や土地利用変化による炭素収支については言及していない。これらの影響もグローバルな炭素収支においても大きな影響を受けるために、これらの影響を評価することも重要である。さらに、今回の課題においては、炭素収支に焦点を当てていたが、陸域生物圏の炭素収支は、水やエネルギー収支によっても影響を受ける。従って、水・エネルギー循環に関する様々な観測データを利用したモデル改善手法の構築が必要である。

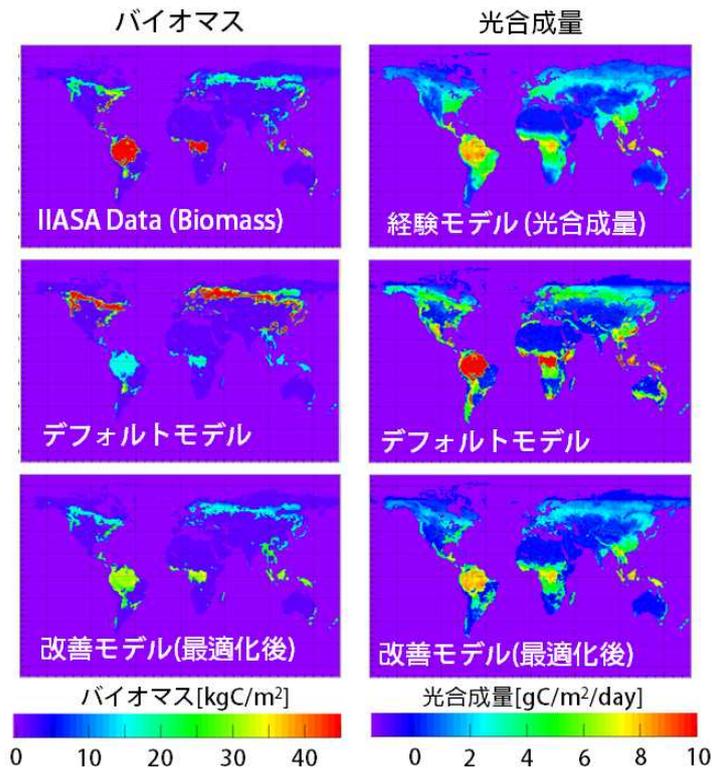


図3. 広域スケールにおけるモデルパラメータ最適化の効果。バイオマス量と光合成量についてモデルパラメータの最適化を行った結果、デフォルトモデルの状態では、観測データとの開きが大きかったが、最適化をすることで観測データに近づいた。

(2) 陸域生物圏モデルのダウンスケーリング

陸域生物圏モデルBEAMSと大気インバージョンモデルCarbonTrackerを比較した結果、概ね、季節変動のパターンは一致した。しかし、いくつかの地域では、BEAMSモデルとCarbonTrackerの間において、季節変動の位相のずれや、最大値のずれが見られた。CarbonTrackerについては、地上観測点をインバージョンモデルの入力として利用しているため、観測データの不足などの問題点が指摘されている。今後は、これらの違いの理由を説明するためのより詳細な解析が必要である。次に、アジア域(特にシベリアに着目)における空間分布では、北部で負(炭素放出)、中部から南部で正(吸収)の値を示した。標高が高い地域では、植生の生長活動が不活発なために生態系純交換量は低かった。対象地域全体で、陸域生態系は吸収源の役割であることがわかった($355.2 \text{ MtC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)。生態系純交換量の線形トレンド分布は、東シベリアで正(増加)、西～中央シベリアでは負(減少)の値を示した。対象地域全体では、炭素が吸収する方向にあることがわかった($+19.6 \text{ MtC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)。

(3) 陸域生物圏モデルの相互比較を通じたGOSATデータ有効性の検討

1) アジア域を対象とした大気インバージョンモデル解析と陸域生物圏モデルの比較

まず、亜大陸スケールの2001年-2006年の期間における平均的な炭素収支の比較を行った(図4)。3種類の陸域生物圏モデルと2種類の大気インバージョンモデルによる解析結果についての比較を行ったところ、手法毎

に大きな違いがみられた。例えば、CarbonTrackerなどのインバージョンモデルの結果では、シベリア域を中心に大きな炭素シンクとなっている。一方で、陸域生物圏モデルでは、どのモデルでもこの大きさの炭素シンクは見積もられていない。

次に、一つのケーススタディとして、2003年夏の異常気象が陸域炭素循環に及ぼす影響を解析した。特に、大気インバージョンモデルの結果と、陸域生物圏モデルの結果を比較した。まず、気象データの解析を通して、2003年の夏には、東アジアの広域において、冷夏・多雨・寡照であることを確認した。次に、モデル出力と大気インバージョンモデルの結果を比較した。東アジア～極東ロシア地域においては、5つのモデル・手法において、負の異常値(CO₂吸収量が小さい)が検出された。しかし、その大きさは、モデル・手法毎に大きくことなった。例えば、CarbonTrackerについては、最も大きな負のアノマリを示した。一方で、その他陸域生物圏モデルについては、CarbonTrackerに比較して、偏差の大きさは小さかった。また、陸域生物圏モデルについても、各モデルに応じて応答の大きさが異なった。BEAMSやBiome-BGCモデルでは、他のモデルに比較して、小さい偏差を示した。その他、LPJモデルについては、地域毎に正・負のアノマリが混在するという結果になった。

今後の課題としては、CarbonTrackerの見積もり、各陸域生物圏モデルの見積もりの違いの理由のさらなる検討が必要である。さらに、各陸域生物圏モデルについては、観測サイトにおける炭素フラックスなどとの詳細な比較とモデルの改善が必要である。現時点では、森齢による影響がモデルに反映されていないこと、CarbonTracker自体の見積もりの信頼性の問題、衛星入力データのより長期のデータが必要なこと、などを想定しているが、これらのさらなる検討が必要である。また、新たに得られるであろうGOSAT L4Aデータを利用した陸域炭素収支の見積もりデータなどは、これらの新たな制約に利用できる。

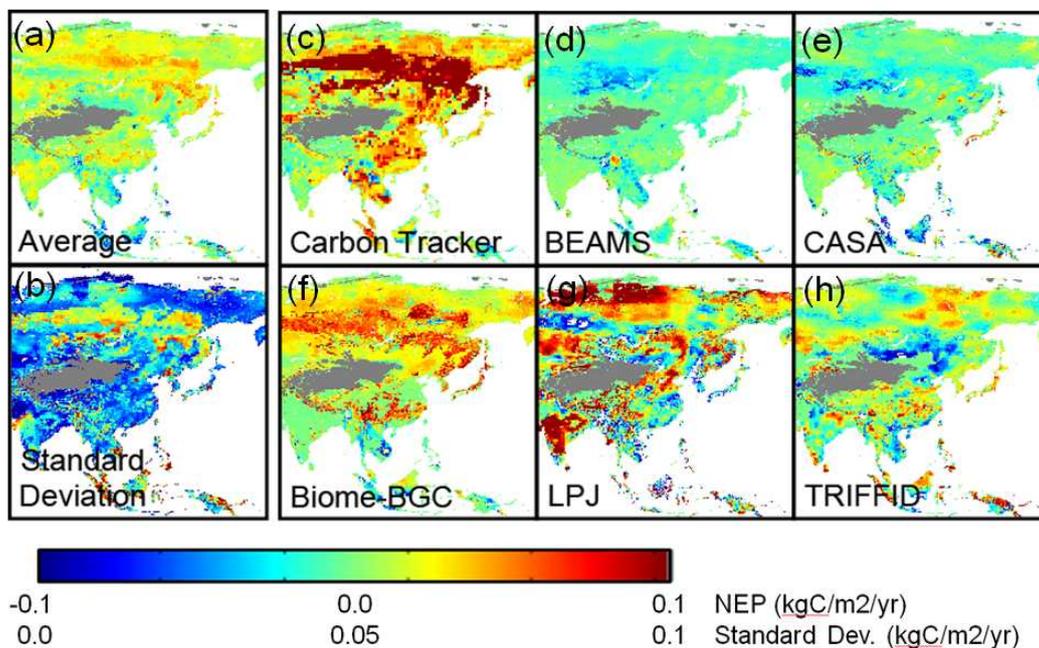


図4. 様々なモデル・手法による2001年—2006年の陸域CO₂吸収量の空間パターン。
(a)6種類の平均値・(b)6種類の標準偏差・(c-h)各モデルの結果を示す。

2) 北極域生態系における炭素フラックスの広域化と大気インバージョンモデルとの比較

本広域化手法においては、攪乱を受けたサイトを含み、学習をさせたことによって、攪乱による炭素フラックスの変動についても十分に再現できるモデルを構築することができた。さらに、学習されたSVM回帰モデル回帰モデルを用いて2000年～2010年の期間について対象領域の光合成量、生態系呼吸量、および純生態系炭素交換量の計算をした。アラスカ域の広域炭素フラックスの年次変動から、2004年、2007年は光合成量が高いため炭素吸収量が多くなり、逆に2006年は光合成量が低くなり炭素吸収量は少なかったことが分かった。

さらに、2000～2010年の11年間のトレンドを評価するために、炭素フラックスの年間値の直線回帰式の傾きを求めた。光合成量については、領域内に大きな正・負のトレンドをもつグリッドがみられた。このグリッドに注目すると、トレンドが大きくなるグリッドは過去に火災による攪乱を受けたグリッドであることが分かった。2001年以降に攪乱を受けた場所については、攪乱による光合成量の低下が大きくなるために大きな負のトレンド(-30～-8 gC m⁻² y⁻²)を持ち、それ以前に攪乱を受けた場所については、攪乱からの回復に伴って光合成量が正のトレンド(0～+28 gC m⁻² y⁻²)を持つことが分かった。一方で、攪乱を受けていない場所に関しては小さな正のトレンド(+2～7 gC m⁻² y⁻²)を持った。生態系呼吸量は有意な傾向がほとんどのグリッドで得られなかったため、純生態系炭素交換量の11年間のトレンドは、光合成量のトレンドによって決まる結果となった。攪乱を受けていないグリッドにつ

いては、緩やかな炭素吸収量の増加傾向(-6~+1 gC m⁻² y⁻²)、攪乱からの回復過程にあるグリッドについては吸収量の増加傾向(-2~-19 gC m⁻² y⁻²)が見積もられた。以上の結果をまとめると、北極域の炭素収支について、広域平均の年次間差は気温などの気候的な要因が重要であるのに対して、個々のグリッドでの10年程度の長期的な変動は攪乱の有無が最も重要な要因であるということが示唆された。

SVM回帰モデルで推定された純生態系炭素交換量とトップダウンモデル(CarbonTracker)により推定された純生態系炭素交換量との比較を行った。季節推移について注目すると、植物生育期間(通日145-281)についてはおおむね同様の傾向、値を示すことがわかった。一方、冬季についてみるとSVM回帰モデルは冬季のフラックスがほぼゼロであったのに対して、CarbonTrackerは0.2 gC m⁻² d⁻¹の炭素の放出傾向を見積もった。これは、SVM回帰モデルでは観測と衛星の両データの精度の悪さから冬季のフラックスの推定精度に問題があることが原因として考えられる。次に、生育期間の積算値を計算し、その年次変化について比較を行った。両者は2003年を除いておおむね同様の年次変化を示し、CarbonTrackerとSVM回帰モデルとで一貫性のある結果が得られた。

北極域生態系における炭素収支を、地上観測と可視・近赤外リモートセンシングの融合により推定できることが明らかとなった。その際に、入力変数として、攪乱を考慮した土地被覆分類および葉面積指数が重要であることが分かった。今後、これらの入力変数を高精度、高解像度化することができれば、より正確な炭素収支を評価することが可能となると考えられる。一方で、冬季に関しては、モデルに多くの不確実性が残される結果となり、チャンパー等の既往の研究をモデル学習に取り入れるなどの改善が必要であると考えられる。本研究で採用したボトムアップ手法では、トップダウン型のモデルと比べて高解像度の炭素フラックスを推定することができる。これは、GOSATデータを用いたトップダウンモデルによる炭素収支のダウンスケーリングに有効な手法であるとともに、その精度を検証するためのデータとしても使用できると考えられる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・これまで計算が困難であった陸域炭素収支の高解像度マッピングがGOSATデータと経験モデルを融合することによって可能になった。
- ・GOSATデータなどを制約に与えることで、従来よりも陸域生物圏モデルが正確になった。このモデル改良フレームワークは他のモデルにも適用が可能である。
- ・陸域生物圏モデルをさらに向上するには炭素プール量など他のパラメータ推定が必要だと指摘できた。
- ・衛星利用型陸域生物圏モデルBEAMSにより、陸面炭素収支がより正確に求められた。
- ・アジア域におけるマルチモデル-データ比較実験のフレームワークを構築することができ、アジアにおける陸域炭素収支の見積もりを行うことができた。
- ・現状の大気インバージョンモデルにおいても、陸域炭素収支の経年変動については、モデルなど一貫した結果を示しており、双方の手法が一定の妥当性があることを示唆していると考えられる。
- ・アラスカ域における近年の陸域炭素収支の変動においては、森林火災が非常に重要な役割を果たしていることが明らかになった。これは、既存の説として、温暖化→植生成長による吸収量の増加説と異なる解釈であり、科学的には興味深い。

(2) 環境政策への貢献

- ・陸域生物圏モデルが向上することから、今後、これらの改善されたモデルを利用した陸域炭素収支の見積もり、将来予測などの再評価を行うことになる。再評価した結果は、現状の結果とは異なることが予測されるため、本課題によって、より正確な炭素収支の見積もりが政策に提供できることとなる。
- ・陸域生物圏モデルの改善には、今後、バイオマス量などの炭素プール量の把握が必要であることが分かった。さらに、攪乱(森林伐採、森林火災)の履歴が炭素循環シミュレーションに必要であることが明らかになったので、これらのデータ整備が必要との指針を示すことができた。
- ・アジアの陸域炭素循環の見積もり自体は、温室効果気体の吸収能力を見積もることとなり、値自体が温暖化対策などの参考値として利用が可能である。
- ・GOSAT衛星において、さらに陸域炭素循環の推定精度が向上すれば、より陸域炭素循環の推定値を制約することができると予想され、将来の温暖化防止のための政策立案の材料となる。
- ・陸域での温室効果気体吸収能力の把握には、森林火災などの攪乱の効果を考慮することが必要であることが分かった。従って、陸域での炭素吸収量の推定の向上のためには、攪乱のデータの構築が必要であることが分かった。

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) M. UYAMA, A. KAI, K. ICHII, K. HAMOTANI, Y. KOSUGI, N. MONJI: Ecological Modelling, 222, 3216-3225 (2011)

“The sensitivity of carbon sequestration to harvesting and climate conditions in a temperate cypress forest.”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) K. ICHII, M. KONDO, K. TAKAHASHI, T. SUZUKI, J. TAKAHASHI: AsiaFlux Workshop 2010, Guangzhou, China (2010)

“Multi model and data analysis of terrestrial carbon cycles in Asia: First result from Asia-MIP.”

- 2) K. ICHII, M. KONDO: The 1st International Workshop on GOSAT data utilization, Tsukuba, Japan (2011)

“Potential Use of GOSAT data for terrestrial carbon cycle modeling.” (招待講演)

- 3) 市井和仁、近藤雅征、佐々井崇博、植山雅仁: 日本気象学会2011年度秋季大会、名古屋 (2011)

“大気逆解析モデルによる陸域CO₂収支推定を利用した陸域炭素循環モデル改善への試み”

- 4) 市井和仁: ユーラシア・アジアモンスーン地域の気候—陸域相互作用研究会、名古屋 (2011)

“アジア域の陸域水・炭素循環の把握: 観測とモデルの統合解析”

- 5) K. ICHII, Y.H. LEE, W. JU, S. WANG, M. KONDO他25名: 10th AsiaFlux Workshop, Johor Bahru, Malaysia (2011)

“Lessons learned from CarboEastAsia MIP: Current status of terrestrial carbon cycle modeling in Asia.”

- 6) M. KONDO, K. ICHII: 10th AsiaFlux Workshop, Johor Bahru, Malaysia (2011)

“Model based estimate of global carbon budget with optimization: Toward application of GOSAT products.”

- 7) M. KONDO, K. ICHII: American Geophysical Union Fall Meeting 2011, San Francisco, US (2011)

“Potential applications of GOSAT based carbon budget products to refine terrestrial ecosystem model.”

- 8) K. ICHII, M. KONDO, K. TAKAHASHI, T. SUZUKI, T. SASAI, M. UYAMA, N. SAIGUSA: American Geophysical Union Fall Meeting 2011, San Francisco, US (2011)

“Impact of meteorological anomalies in 2003 and 2010 summer on terrestrial carbon cycle in East Asia: Multi model and data analysis.”

- 9) ICHII K.: The 1st FLUXCOM Workshop, Jena, Germany (2012)

“Upscaling using Support Vector Machine Regression.”

- 10) ICHII K.: The 5th EAFES International Congress, Ohtsu, Japan (2012)

“Quantifying terrestrial carbon cycle in East Asia through multi model and data analysis.” (招待講演)

- 11) 近藤雅征、市井和仁: 日本気象学会2012年度春季学術講演会、つくば (2012)

“GOSAT衛星プロダクト用いた陸域炭素循環モデルの改善に向けて”

- 12) K. ICHII, M. KONDO: The 4th GOSAT RA PI Meeting, Pasadena, US (2012)

“Potential applications of GOSAT based carbon budget products to refine terrestrial ecosystem model.”

- 13) K. ICHII, M. KONDO, Y.H. LEE, S.Q. WANG, J. KIM, A. ITO, W. JU, N. SAIGUSA, S.G. LI, G.R. YU: The 55th Symposium of the International Association for Vegetation Science (IAVS2012), Mokpo, South Korea (2012)

“Quantifying terrestrial carbon budget in monsoon Asia through multi model and data analysis: From site-level to regional synthesis.”

14) K. ICHII, M. KONDO: Asia Oceania Geosciences Society and American Geophysical Union Joint Assembly, Singapore (2012)

“Refinement of a terrestrial biosphere model using multiple satellite-based products.” (招待講演)

7. 研究者略歴

課題代表者: 市井 和仁

1972生まれ、名古屋大学大学院理学研究科修了、博士(理学)

名古屋大学大学院環境学研究科 助手、名古屋大学 大学院工学研究科 助手、
米国サンノゼ州立大学地理学部 助手 (兼米国NASAエイムズ研究所 研究員)、
現在、福島大学共生システム理工学類准教授

研究参画者

(1): 市井 和仁(同上)

(2): 佐々井 崇博

1977生まれ、名古屋大学大学院環境学研究科修了、博士(理学)

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 産総研特別研究員、同研究員、
現在、名古屋大学大学院環境学研究科助教

(3): 植山 雅仁

1978生まれ、大阪府立大学農学生命科学研究科修了、博士(理学)

アラスカ大学フェアバンクス校 国際北極圏研究センター 客員研究員、
現在、大阪府立大学生命環境科学科 助教

RF-1007 GOSAT衛星データを利用した陸域生物圏モデルの改善とダウンスケーリング

(1) GOSATデータを用いた陸域生物圏モデルの改善

福島大学 共生システム理工学類

市井和仁

<研究協力者>

福島大学 共生システム理工学類

近藤雅征

平成22～23年度累計予算額：20,052千円

(うち、平成23年度予算額：9,262千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 陸域炭素循環モデル(陸域生物圏モデル)は、地球温暖化予測の不確実性をもたらす一つの重要な要因であり、その改善が急務である。従来は、陸域モデルに対して十分な制約を与えることができず、モデル不確実性をもたらす要因の一つであると考えられてきた。本課題では、2009年に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT衛星)から推定される大気-陸域のCO₂収支のデータ(GOSAT L4Aデータ)を利用し、陸域生物圏モデルを改善するためのフレームワークを構築し、陸域生物圏モデルBiome-BGCの改善を行った。まずは、陸域生物圏モデルとの比較を容易にするために、GOSAT L4Aデータのダウンスケールを行った。GOSAT L4Aデータでは、陸域炭素収支の総量の算出に利点があり、ボトムアップ手法(経験モデルを利用)では、空間分布の算出に利点があると仮定し、双方を組み合わせた陸域炭素収支データを試作した。次に、炭素フラックスを制約としたモデル改良手法として、最適化手法を用いたパラメータ推定手法を構築し、アジア域における様々な観測サイトでテストを行い、それをグローバルに拡張した。アジアにおける多くの森林サイトにおける炭素収支をモデル推定するには、人為的な影響(伐採等)を取り入れる必要があることが明らかとなった。それを踏まえて、様々な観測サイト(計26サイト)でモデルパラメータ最適化を行ったところ、最適化後のモデルは観測された炭素フラックスを十分に再現し、本課題で構築した手法が有効であることが分かった。最後に、空間的に拡張して、グローバルスケールでのモデルパラメータ最適化手法を適用した結果、最適化手法を適用した後には、炭素フラックスの推定が改善された。一方、バイオマス量に関しては、バイオマス量の制約がない限りは十分に再現されず、炭素フラックスのみならず、バイオマス量の空間データを整備する必要があることが分かった。

[キーワード] 陸域炭素循環、GOSAT、リモートセンシング、陸域生物圏モデル、最適化

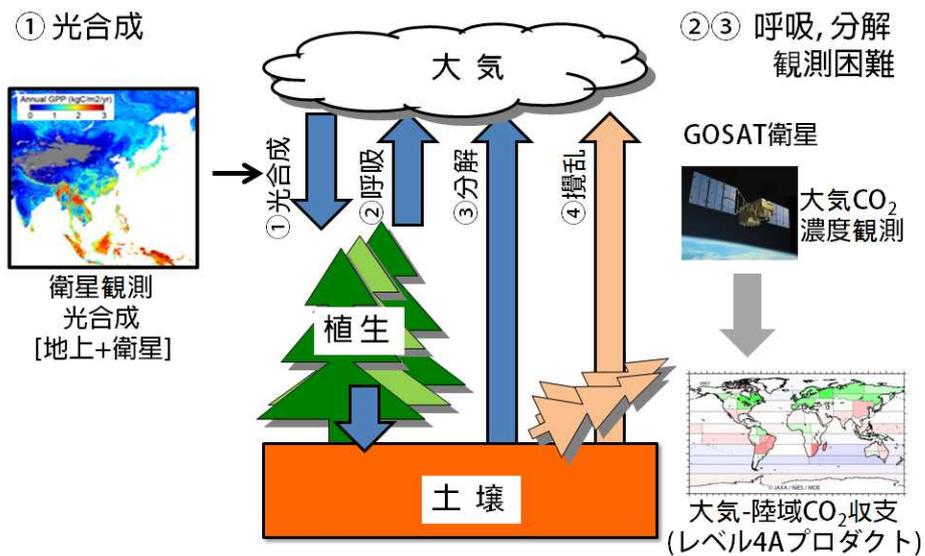
1. はじめに

陸域炭素循環モデル(陸域生物圏モデル)は、地球温暖化予測における不確実性をもたらす一つの重要な要因であると言われており、その改善が急務である。さらに、陸域生物圏モデルの向上は、地域・大陸・全球スケールの水・炭素収支のより正確な把握・予測に貢献し、将来の環境変動による影響予測として水資源・生物生産性・森林の炭素管理などの予測をより正確にすることが可能である。

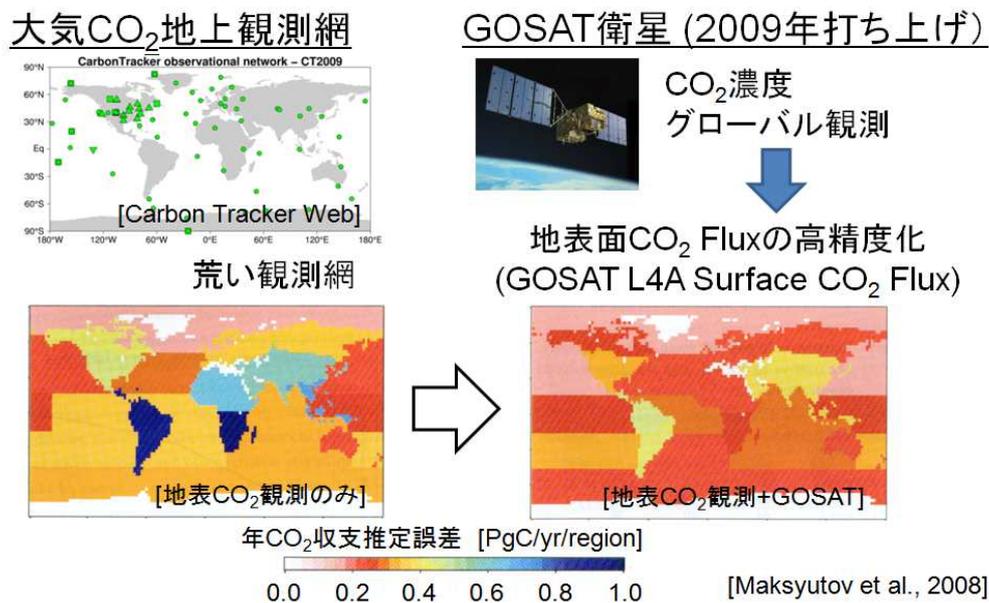
従来、陸域生物圏モデルの改善にあたっては、地上観測データや光学衛星データを利用した研究が広く行われてきた¹⁻⁴⁾。例えば、全球的なフラックス観測ネットワークであるFLUXNETに代表される地上観測による炭素収支や水収支データはモデル改善に有用である¹⁾。しかし、観測網が荒く、偏りがあること(北米、ヨーロッパ、アジアに集中)などの問題点が存在する。また、従来の地球観測衛星(例えばTerra衛星/MODISセンサなど)を用いた空間データを利用したモデル改良は有効である²⁻⁴⁾。しかし、地球観測衛星データなどを利用した手法では、広域の光合成量の見積もりは可能だが生態系呼吸量の見積もりは難しいとされている(図(1)-1)。すなわち、陸域の炭素循環を考える際に、主要なフラックスである光合成・呼吸・分解のうち、光合成量に関してのみ広域観測が可能²⁾であり、もう一つの重要なフラックスである呼吸・分解(合わせて生態系呼吸とする)、または、純生態系炭素交換量(光合成-生態系呼吸)については、広域スケールでの見積もりが困難であるのが現状である。一方、大気CO₂濃度観測を用いた大気インバージョンモデル解析では広域での陸域炭素収支を把握することができるが、大気CO₂濃度網が荒いために、正確な見積もりは非常に困難であると考えられている。

2009年に打ち上げられたGOSAT衛星は、大気CO₂濃度の時空間分布を高精度で推定することができる⁵⁾。これは従来の地上ステーションにおける観測と比較して、CO₂濃度観測点が飛躍的に増加することを意味する。GOSAT衛星からの大気CO₂濃度推定結果を利用して、大気インバージョンモデルを実行することにより、従来よりも格段に高精度な地表面CO₂収支分布が提供される(図(1)-2)⁶⁾。このデータ(GOSAT レベル4Aデータ; 以下GOSAT L4Aデータ、とする)は、亜大陸における大気-地表面CO₂交換量の推定結果であり、月単位、数千km単位の時空間領域における大気-地表面CO₂交換量が提供される。

GOSAT L4Aデータは、現時点で信頼性の高い唯一の大気-陸域の炭素収支データであるので、このデータを陸域生物圏モデルの改善に利用できるとすれば、陸域生物圏モデルの改善に大きな貢献となる。本課題では、亜大陸スケールの炭素収支推定結果であるGOSAT L4Aデータを利用して、陸域生物圏モデルを改善することを最終目標とした。そのために、まずは、陸域生物圏モデルの改良に使いやすいように、亜大陸スケールのデータをより高空間解像度(例:1°グリッド毎)にダウンスケールを行えることが望ましい。次に、構築されたグリッド毎の炭素収支推定値を利用して陸域生物圏モデルを改良することが必要である。陸域生物圏モデルの改良の際には、グリッド毎の陸域炭素フラックスを制約に利用したパラメータ最適化手法などの自動化手法の確立を行うことが有効である。



図(1)-1. 陸域炭素循環の概要と大気-陸の炭素フラックスを制約するためのデータについて。現状では、光合成量については衛星観測などで広域マッピングを行うことが可能であるが、呼吸や分解については、適切な広域データが存在しない。GOSATレベル4Aは、大気-陸の正味の炭素収支を推定できるために、陸域モデルの改良においては、これまで制約が不可能であった部分に制約を与えることが可能になる。



図(1)-2. 大気CO₂濃度観測値を利用した大気インバージョンモデル解析における地表面炭素収支の推定誤差の大きさ。従来の大気CO₂濃度地上観測網を用いた場合には、観測網が荒いために、インバージョン解析において推定される大気-地表面の炭素収支には大きな誤差があると言われている。一方で、GOSAT衛星による大気CO₂濃度観測においては、地上観測に比較して、格段に多くのデータが取得されるために、大気-地表面の炭素収支の推定誤差は格段に小さくなることが期待される。

2. 研究開発目的

本課題では、亜大陸スケールの炭素収支推定結果であるGOSAT L4Aデータを利用して、陸域生物圏モデルを改善する手法を構築することを最終目標とした。そのために、まずは、GOSAT L4Aデータをより高空間解像度（例：1° グリッド毎）にダウンスケールすることを第一の目的とした。次に、構築されたグリッド毎の炭素収支推定値を利用して陸域生物圏モデルを改良するために、陸域炭素フラックスデータを制約に利用したパラメータ最適化手法を通じた陸域生物圏モデルの改良手法の構築を第二の目標とした。本研究で得られた陸域生物圏モデルについて、いくつかの広域観測データと比較することによって、現状の陸域生物圏モデルをより改善するには、どのような広域データが必要であるかを議論した。

※なお、現段階の結果においては、GOSAT L4Aデータが未公開(GOSATプロジェクトにおける研究提案採択者のうちの特定の研究者に確認と評価のために提供されている)データであり、それに基づく研究結果(数値)は暫定的である。また、データ自体は2011年12月末に初期データを受け取った状態であり、解析が完了しているが未だ評価が不十分な状態での解析結果、またはGOSAT L4Aデータのプロトタイプとして利用した大気インバージョンモデルCarbonTracker⁷⁾に基づく結果の出力結果などに基づく部分が存在する。本課題の結果は、研究開発された手法の確認には十分であると言えるが、数値的な内容は今後の確認後のGOSAT L4Aデータに基づいて評価しなおす必要がある。

3. 研究開発方法

(1) GOSAT L4Aデータのダウンスケーリング

GOSAT L4Aデータには、GOSAT衛星により観測される大気CO₂カラム濃度を大気インバージョンモデルに入力することにより推定される大気-地表面の炭素交換量を亜大陸スケールにて推定した結果が格納されている。GOSAT衛星では、大気CO₂濃度を従来の地上観測よりも高空間密度で測定することが可能であるため、従来の地上観測を用いた一般的な大気インバージョンモデルと比較して、大気-地表のCO₂交換量を高精度に推定できるとされている⁶⁾。

しかしながら、GOSAT衛星データを含む一般の大気逆推定モデルによる大気-地表CO₂交換量の推定に関しては、亜大陸スケール程度(1000km以上)の炭素収支が推定できるのみである。従って、これらを陸域生物圏モデルの制約に利用する場合は、より詳細な空間スケールに「ダウンスケール」を行うことが望ましい。ダウンスケール(例えば全球1° グリッド程度)を行うことによって、個々のグリッドでの炭素収支が推定でき、モデルの改善に直接利用ができるようになる。

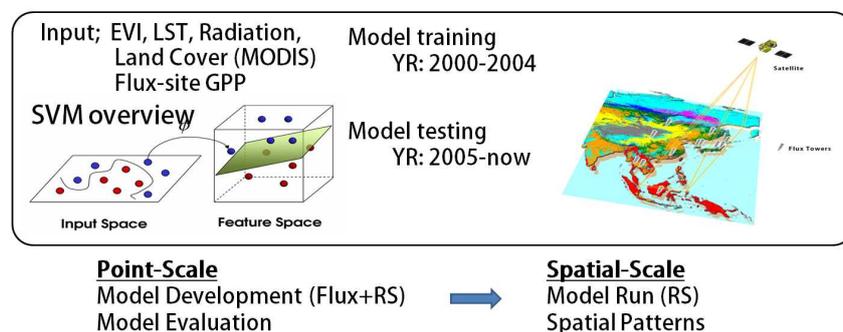
本課題では、GOSAT L4Aデータのダウンスケールを行い、亜大陸スケールの炭素収支をグリッド毎(1°)の陸域炭素収支を推定した。GOSAT L4Aデータは、大気CO₂濃度から大気-地表の炭素収支を推定する「トップダウン方式」であるため、広域での炭素収支の総量に関する制約が与えられていることになる。一方、個々のグリッドの炭素収支を積み上げる「ボトムアップ方式」では、衛星データなどを利用することにより、空間分布は詳細に推定できると予想されるが、広域での総計に関しては、不確実であることが考えられる。本課題では、「トップダウン方式」として、

GOSAT L4Aデータによる広域での炭素収支に関する制約を与え、「ボトムアップ方式」として、サポートベクタマシン回帰モデル(以下、SVM回帰モデルとする)を利用した光合成・生態系呼吸量の空間分布を利用した。最後に、この両者を組み合わせることで、「トップダウン方式」により広域の総計が制約された、空間的に詳細な炭素収支空間分布を推定した。

本研究においては、GOSAT L4Aデータ、Terra衛星/MODISセンサによる植生分類図(MCD12Q1)⁸⁾、地表温度(MOD11A2)⁹⁾、拡張植生指数(EVI; MOD13A2)¹⁰⁾、宇宙研究開発機構JASMES(JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies)より取得した日射量¹¹⁾を広域データとして利用した。さらに、FLUXNETに含まれる約120地上観測サイトにおける日射、光合成、生態系呼吸量などの観測値を利用した。FLUXNETではアジア域の地上観測点が多くは含まれていないため、日中韓研究ネットワークにより収集されたCarboEastAsiaデータセット(<http://www.carboeastasia.org/>)を利用した。

GOSAT L4Aデータに関しては、現段階(2011年12月末に提供を受けた)では、大気と地表における純炭素交換量がデータとして格納されている。例えば、陸では、化石燃料の消費による炭素放出量、土地利用変化や森林火災による炭素交換量、なども加味した形での炭素総収支が格納されている。本研究では、最終的に陸域生物圏モデルによって推定される大気-陸域の炭素交換量に対する制約を与えたいために、GOSAT L4Aデータの大気-地表CO₂交換量より、化石燃料によるCO₂排出量の先験値(GOSAT L4Aデータに格納されている)と、森林火災によるCO₂放出量(GFEDデータを利用)を差し引いた値を大気-地表のCO₂交換量とした。これを2009年6月から2010年5月までの12カ月に關して算出し、亜大陸スケールにおける大気-陸域CO₂交換量とした。

「ボトムアップ方式」による空間的分布が詳細な大気-陸域炭素交換量に関しては、経験モデルから推定された光合成量・生態系呼吸量の差を取ることで推定を行った。光合成量の推定・生態系呼吸量の推定には、SVM回帰モデル^{2, 3, 12, 13)}による推定結果を利用した(図(1)-3)。このモデルは、渦相関法による地上観測データ(FLUXNETデータ)と、衛星観測(植生指数・地表温度・日射量・土地被覆分類)を利用して、機械学習的に回帰モデルを作成する。さらに、観測サイトのスケールで構築されたモデルを広域に適用して、広域での光合成量を算出する方法である。これらのモデルは、アメリカ^{2, 3)}、日本¹⁴⁾、アジア域¹³⁾などで適用されており、これまでの研究では、およそ25%程度の精度での8日間の光合成量推定が可能である。



図(1)-3. SVM回帰モデルに衛星観測データと地上観測データを適用したモデルによる地上観測データの広域化の概念図。サポートベクタマシンは、入力データ空間を高次元に投影した上で、線形回帰モデルを用いることで、入力データとターゲット物理量間の関係をモデル化する、機械学習法に分類される手法である。観測サイトレベルで構築されたモデルに衛星データを適用し、

広域での物理量（ここでは光合成・生態系呼吸量）を推定した。

（２）広域炭素フラックス量を利用した陸域生物圏モデルの改善

本研究では、これらGOSATに関連した陸域炭素フラックスの推定値を制約に用いた陸域生物圏モデルの改善手法の構築を行った。光合成量や生態系呼吸量、生態系純炭素交換量などを制約条件としたうえで、モデルパラメータを自動で決定できるための最適化手法の適用を含め、GOSAT L4Aデータを利用したモデルの改良フレームワークを構築した。

1) 人為的な伐採が陸域炭素吸収量に及ぼす影響の評価

まず始めに、観測サイトレベルにおいて、陸域生物圏モデル(Biome-BGC¹⁵)を用いた)を適用して、陸域生物圏モデルが観測されたCO₂フラックスを再現できるのか、再現できない場合は、どのような要素をモデルに加える必要があるのか、を確かめた。本研究においては、桐生サイト(滋賀県)において陸域生物圏モデルBiome-BGCを適用した。本サイトは、ヒノキ林であり、1959年～1977年にかけて伐採・植林などの管理が行われている。Biome-BGCモデルにサイトにおける気候データを入力することで陸域炭素循環を計算した。また、この森林では、人為的な伐採などの影響が入るために、森林伐採のルーチンをモデルに組み込んだ。その上で、観測された炭素フラックス、炭素吸収量は、どのような要素を導入することによって実現されるのかを実験した。この段階では、モデルパラメータチューニングなどは、手作業によって行っている。

2) 観測サイトにおけるモデルパラメータ最適化手法の構築

次に、パラメータチューニングを自動化させるために、観測された炭素フラックスを制約に用いたモデルパラメータ最適化手法の構築を行い、構築されたパラメータ最適化ルーチンの有効性を評価した(概要を図(1)-4に示した)。対象サイトとしては、苫小牧・高山・富士吉田・ラオシャンの4サイトを用いた。これらのサイトは、伐採後数十年過ぎた現在再成長過程にある森林である。Biome-BGCモデル¹⁵)に伐採ルーチン^{15, 16)}を組み込んだうえで、観測された光合成量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、にフィットするようにモデルパラメータの最適化を行った。その他、観測されたバイオマス量などについても、最適化の際の制約に用いた。

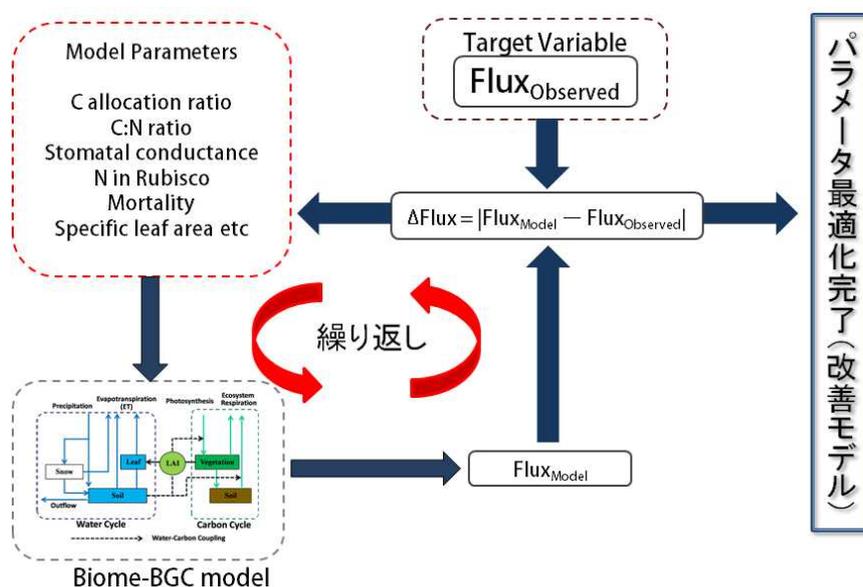
陸域生物圏モデルでは、観測可能なパラメータ数と比較して、モデルパラメータが非常に多いため、最適化を行っても、解を一意にすることは困難である。この問題を解決するために、本研究では、モデルの構造に着目して、パラメータの最適化をいくつかのステップに分割して、モデルパラメータの自由度を減らすことを試みた。さらに、制約に用いる観測量に対して、モデルパラメータの感度が高いかどうかを数多くのパラメータに対して確認を行い、感度の高いパラメータを選択することで、パラメータの自由度を減らし、計算時間を短縮させた。

モデル構造を詳細に検証した結果、本研究では、以下の手順でモデルパラメータを行った。(1) 観測された地上部・地下部バイオマス量を利用して、炭素分配パラメータ(幹と根)を決定した。(2) 観測されたバイオマス量に近づくように、幹・葉の炭素分配比を最適化手法により決定した。(3) パラメータの感度解析を行っている過去の研究¹⁷⁻¹⁹⁾に従って、光合成量に感度の高いパラメータを選択し、パラメータ最適化を行った。具体的には、細根と葉への炭素分配比、葉の炭素窒素比、細根の炭素窒素比、最大気孔コンダクタンス、ルビスコ(Ribulose 1, 5-bisphosphate

carboxylase/oxygenase)中の窒素量の5つである。(4) ステップ(3)におけるいくつかのパラメータはバイオマス量にも大きく影響を及ぼすので、炭素フラックスとバイオマス量のバランスを取るための最終的な調整を行う。

最適化の際の評価関数として、 χ^2 値を利用した。 χ^2 値が最小になるようにパラメータの組み合わせを探索した。ステップ(2)、(3)それぞれにおいて、バイオマス量をより再現するためのパラメータ、光合成量をより再現できるパラメータを探索した。なお、パラメータについては、文献値の範囲を超えないように制約を設定した。

また、用いる観測データの重要性を把握するために、(1) 炭素フラックスのみを利用した最適化(テストFOPT)、(2) バイオマスのみを利用した最適化(テストBMC)、(3) 炭素フラックス・バイオマスの両方を用いた最適化(テストOPT)の3つの観測データの組み合わせにて、入力データの重要性を議論した。



図(1)-4. 本研究で構築した陸域生物圏モデルBiome-BGCのパラメータ最適化の仕組み。

3) グローバルへの拡張とモデルパラメータ最適化の効果の検証

次に、前述の手法を広域に拡張することを目的として、広域の炭素フラックスデータをモデルの制約条件としたモデルパラメータ最適化手法の構築を行った。本研究では、全球 1° グリッドで、1901年～2010年までの日単位のシミュレーションを行った。林齢が炭素収支を決める重要なファクターであるが、現段階では、全球スケールの詳細な林齢は得られない。従って、今回は、簡略化のため、全球で森林に関しては、林齢50年と仮定したシミュレーションを行った。すなわち、1960年に一度、攪乱を与えた。

モデルパラメータの最適化にあたっては、サイトスケールの研究より得られた知見を利用して、最適化の対象となるパラメータの選択を行った。また、最適化の際の制約条件としては、(1) SVM回帰モデルによる光合成量、(2) バイオマス。そして、検証としては、生態系呼吸量、純生態系炭素、の広域データを利用した。炭素フラックスに関しては、すべて前述のデータである。

4. 結果及び考察

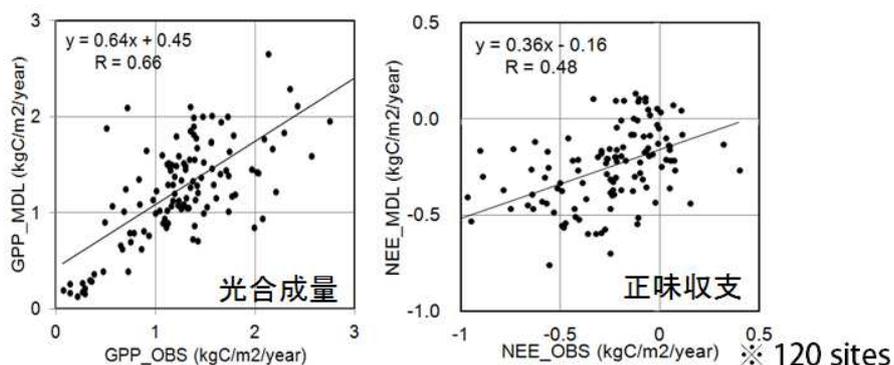
(1) GOSAT L4Aデータのダウンスケーリング

モデルのトレーニングにおいては、2005年以前の観測データを利用した。このトレーニングのプロセスにおいては、データセットをランダムに3つのセットに分割して、3重交差確認(3-fold validation; データの2/3をモデル構築に利用して、残り1/3をモデルのテストに用いた)を行った。さらに、構築されたモデルを利用して、2006年以降のデータに関して、モデルのテストを行い、モデルの精度評価を行った。これを光合成量・生態系呼吸量に関して行い、純生態系炭素、としては、生態系呼吸量から光合成量を差し引くことによって算出した。

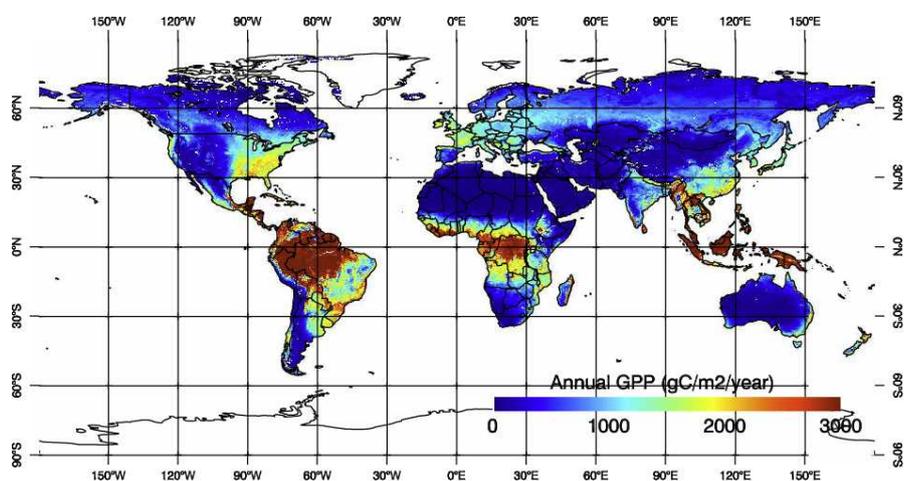
その結果、光合成量と生態系呼吸量に関しては、過小評価気味ではあるものの、観測と推定結果の間には明瞭な線形関係が見られた(図(1)-5)。一方、純生態系炭素、に関しては、光合成量・生態系呼吸量に比較して弱い線形関係が見られている(図(1)-5)。純生態系炭素、の推定については、今回の手法ではサイト履歴などの要素を入れていないことや、光合成量・生態系呼吸量に比較して、サイト間での違いが小さく、観測自体の精度の問題などの様々な要因が考えられる。

空間的に拡張して、グローバル推定を行った結果、光合成量に関しては、空間的にも妥当な分布を示している(図(1)-6)。純生態系炭素交換量については、熱帯地域にて大きな吸収となっているがこの妥当性については今後の検証が必要である(図(1)-7)。現段階においては、おそらく、光合成に比較して呼吸量が過小評価されているために、両者の差で表現される純生態系炭素交換量については、過大評価されているものと考えている。純生態系炭素交換量の経験的な推定に関しては、サイトの情報などの導入が現段階では困難であり、今後の改善が望まれる。しかしながら、現在の段階においては、絶対値については難しいながらも空間的な変動は妥当であると考えられる。理由としては、衛星データなどの空間的に詳細な情報を入力しており、サイトレベルでは、弱いながらも観測と推定結果の間に正の相関が見えていることが挙げられる。一方で、渦相関法による観測データにおいては、欠損や観測条件の悪い際にデータを補間するギャップフィル手法などにも大きな不確実性があり、観測データ自体の改善、またはより慎重なデータ品質チェックなどが必要であると考えられる。

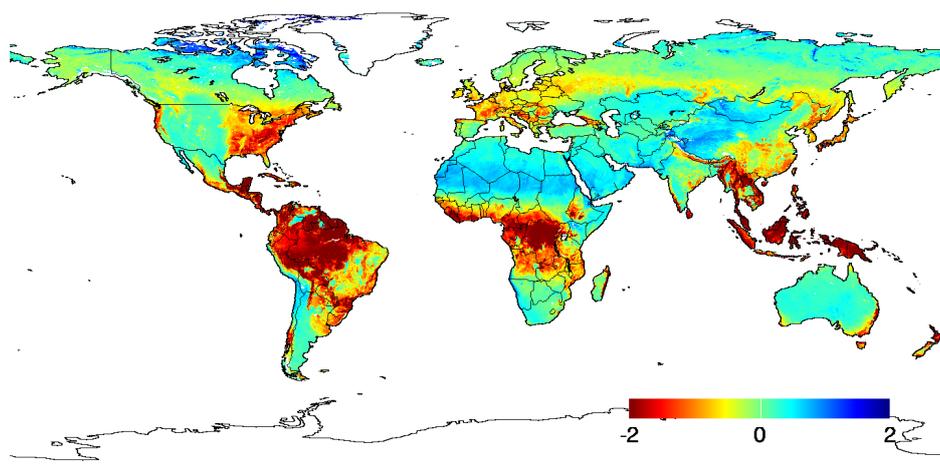
次に、GOSAT L4Aデータを利用したダウンスケーリングを行った。今回は、GOSAT L4Aデータの算出単位である各亜大陸毎(全部で陸上を44地域に分割)において、SVM回帰モデルにより推定された純生態系炭素交換量の総量が、GOSAT L4Aデータによって推定された年間の炭素交換量図(1)-8(a)と等しくなるように、SVM回帰モデルによる純生態系炭素交換量に乗ずる係数を決定することでダウンスケールを行った。これによって推定された炭素収支の詳細マップを図(1)-8(b)に示す。現時点においては、GOSAT L4Aデータにおいて、亜大陸のタイル間において大きな違いが見られたり、SVM回帰モデルによる純生態系炭素交換量の推定の誤差の問題などの様々な問題があるため、今後、更なる評価・改善が必要ではある。一方で、GOSAT L4Aデータのダウンスケールという試みは、世界にない試みであるため、ダウンスケール手法の更なる検討を重ねることで、手法を改善し、GOSATデータを利用した新たなデータとしての地位の確立をめざしていくことが必要である。



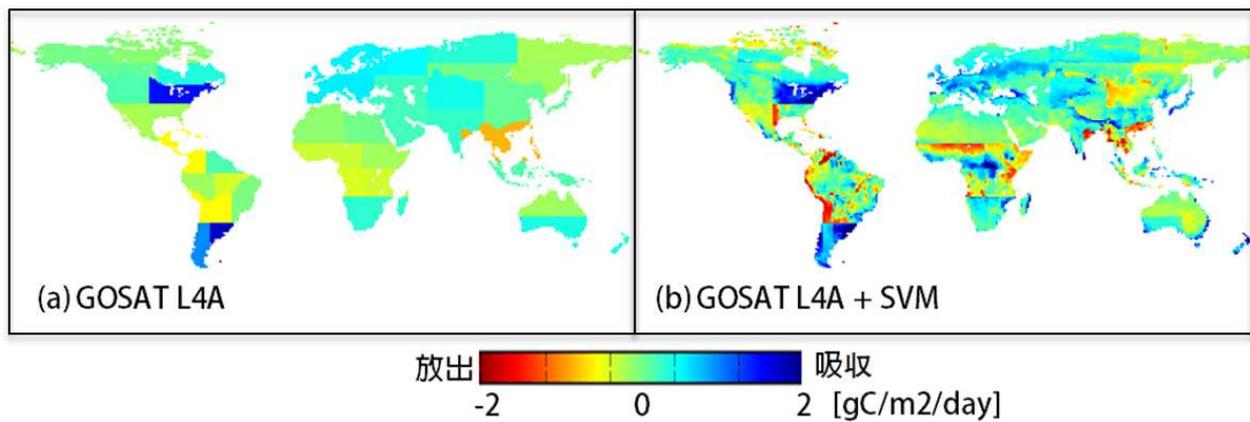
図(1)-5 SVM回帰モデルの検証。モデルテストに利用したFLUXNETとCarboEastAsia計120サイトにおける年間光合成量(左)と純生態系炭素交換量(右; 吸収を負とした)の推定結果(観測期間の年平均値)。横軸は観測値、縦軸は推定結果。



図(1)-6 SVM回帰モデルによる年間光合成量の推定結果(2000年-2010年平均)。



図(1)-7. SVM回帰モデルの利用により推定された年間純生態系炭素交換量(NEE; 単位gC/m²/day)の空間分布(2009年6月~2010年5月までの出力を利用)。光合成量、生態系呼吸量をSVM回帰モデルより推定し、その差を純生態系炭素交換量とした。

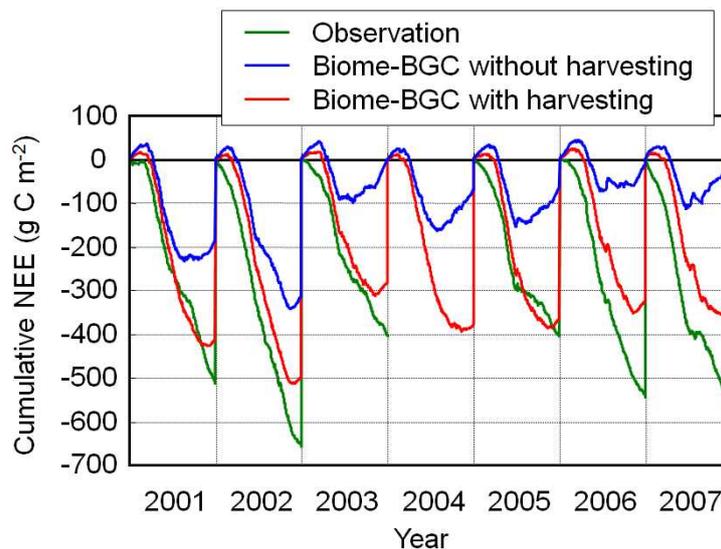


図(1)-8. (a)GOSAT L4Aデータと、(b)本研究のダウンスケール手法による陸域炭素収支。

(2) 広域炭素フラックス量を利用した陸域生物圏モデルの改善

1) 人為的な伐採が陸域炭素吸収量に及ぼす影響の評価

桐生サイトにおいてBiome-BGCモデルを適用する際に、必要なモデルパラメータについては、文献調査を行うなどして、パラメータの改善を行った。さらに、観測された光合成量や生態系呼吸量等に合うようにパラメータの調整を行った。その結果を図(1)-9に示す。当サイトにおいて、観測された炭素収支を説明するには、人為的な伐採の影響を考慮することが最も必要であることが分かった。2001年～2007年において、年間の炭素吸収量をモデルで計算してみたところ、モデルに伐採の効果を入れた場合のみ、観測された炭素吸収量を説明できた。一方で、伐採の影響を考慮しない場合は、炭素吸収量に関して、過小評価(半分以下)となり、人為的な影響がある比較的若い年代の森林については、伐採(林齢)を導入することは不可欠であることが指摘できた。

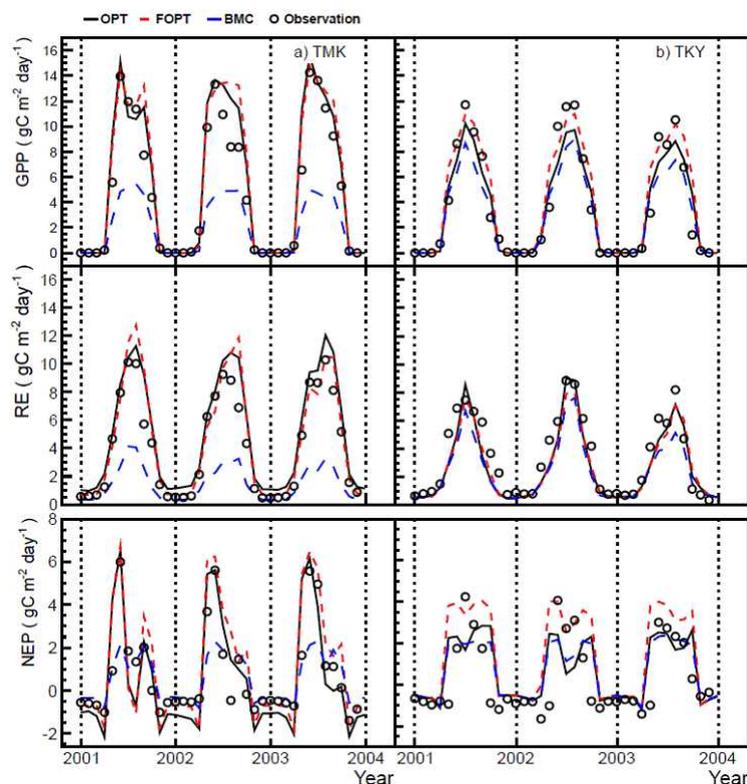


図(1)-9. 桐生サイトにおけるBiome-BGCモデルのシミュレーション結果¹⁵⁾。2001年～2007年にかけての年間の純生態系炭素交換量(炭素吸収を負としている)の積算値とした。観測値は緑、伐採の影響を考慮したモデル結果は赤、伐採の影響を考慮しないモデル結果は青。

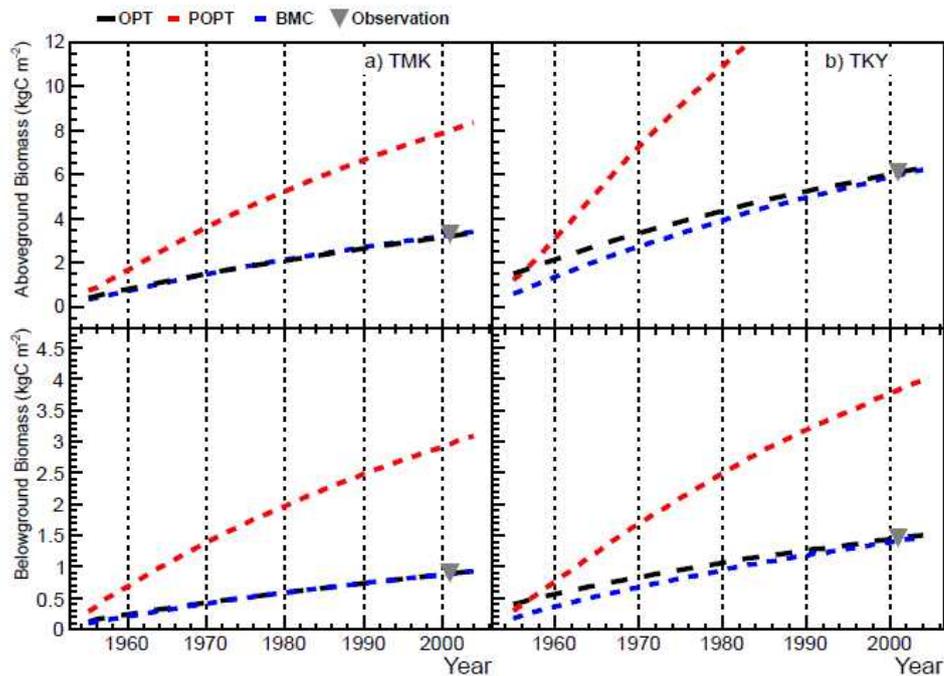
2) 観測サイトにおけるモデルパラメータ最適化手法の構築

次に、パラメータの最適化ルーチンを構築し、観測サイトにおいてテストするために、JapanFlux 4サイト(高山・苫小牧・富士吉田・ラオシャン)に対して、パラメータ最適化ルーチンを適用した。炭素フラックスと炭素プール量の両者を制約に用いてパラメータ最適化を行った結果、GPPやREの季節変動については、おおよそ観測に一致し、 χ^2 値は、 $20\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$ 以下程度になった(図(1)-10)。また、バイオマスについても、おおよそ観測と一致し、観測との差は3%以下となった(図(1)-11)。一方、いくつかの問題点も残っており、例えば、苫小牧サイトにおいては冬の呼吸の過大評価、高山におけるGPPの最大値の過小評価、富士吉田におけるREの最大値の過小評価などの不一致が見られた。純生態系生産量(NEP)についても、フラックス+炭素プール量による最適化によってモデルは改善した。

一方で、炭素フラックスのみを利用したモデルパラメータ最適化(図(1)-10中のFOPT)では、炭素フラックス+炭素プールの両方を用いた最適化と比較して、炭素フラックスの再現性は同程度であった。しかし、本実験においては、バイオマスについては、十分に再現できなかった。例えば、苫小牧サイトでは観測の260%(過大評価)、高山サイトでは274%、富士吉田サイトでは観測の81%、ラオシャンサイトでは、観測の142%など、大きくずれていた。特に、苫小牧サイト、高山サイトで顕著な不一致が見られた。一方で、バイオマス量を観測に近づけるためには、バイオマス量の制約を設ける必要があることも分かった(図(1)-11)。

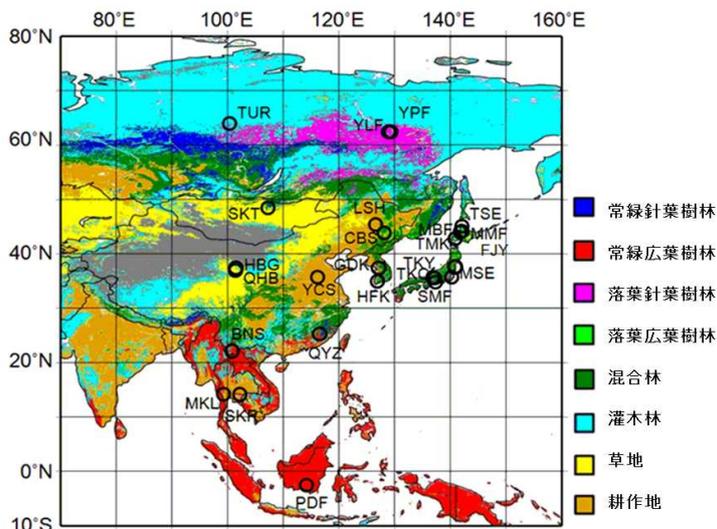


図(1)-10. (a) 苫小牧サイト (b) 高山サイトにおける炭素フラックス(光合成量(GPP)、生態系呼吸量(RE)、純生態系生産量(NEP)の月別変動。観測値と3通りのモデルパラメータ最適化の際の制約についての結果を表示²⁰⁾。黒実線(OPT)はフラックス+バイオマスで制約した場合、赤点線(FOPT)はフラックスのみで制約した場合、青点線(BMC)はバイオマスのみで制約した場合。○は観測。

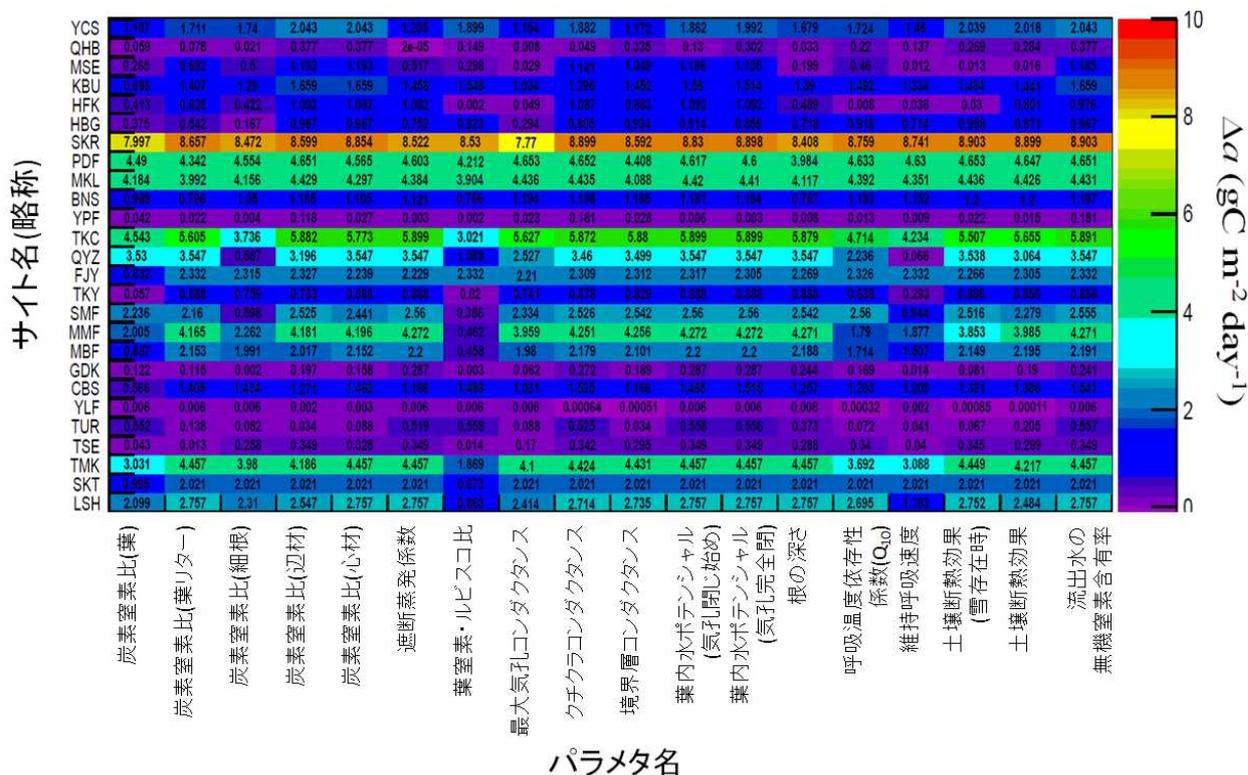


図(1)-11. (a) 苫小牧サイト、(b)高山サイトにおける地上(上図)・地下(下図)バイオマス量の時系列変化。観測値と3通りのモデルパラメータ最適化の際の制約についての結果を表示²⁰⁾。黒線(OPT)はフラックス+バイオマスで制約した場合、赤点線(FOPT)はフラックスのみで制約した場合、青点線(BMC)はバイオマスのみで制約した場合。▼は観測。

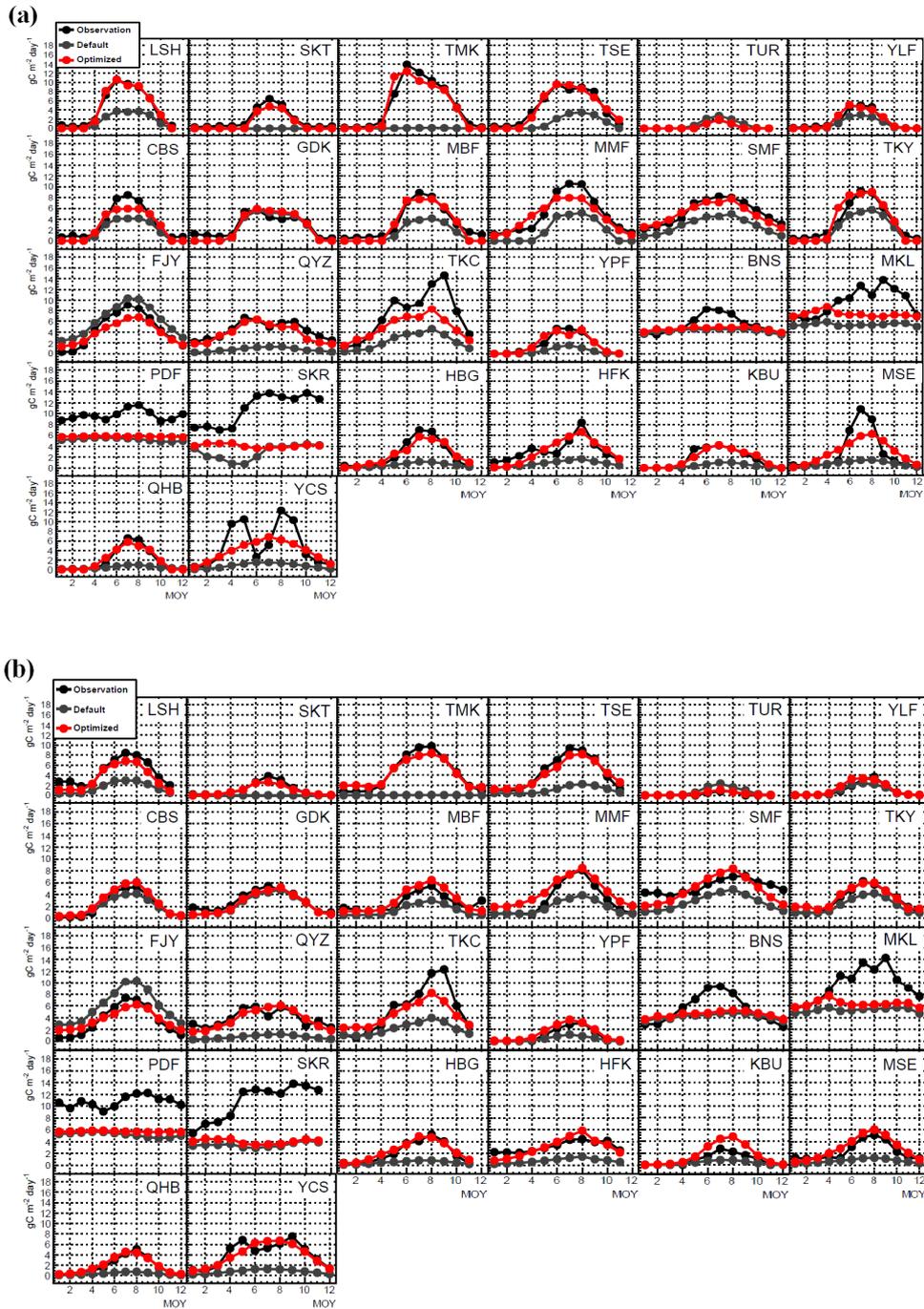
さらに、本手法をより多くの観測サイトで検証し、数多く含まれるモデルパラメータの内、パラメータ最適化に用いるべき感度の高いパラメータの決定を行った。本解析では、CarboEastAsia観測ネットワークに含まれる26観測サイト(図(1)-12)を対象にした。モデルに含まれる各パラメータをデフォルト値より10%-200%の範囲で変動させることにより、各モデルパラメータの感度を解析し、最適化の際の対象のパラメータの選択のための材料とした(図(1)-13)。さらに、これらを利用して、パラメータ最適化手法を適用して、モデルの改善を試みた(図(1)-14)。その結果、本課題にて構築したモデルパラメータ最適化手法を適用することによって、アジア域の観測サイトにおいては、デフォルトのモデル(最適化前)に比較して、格段にモデルが観測に近づいた。その一方で、熱帯林観測サイト(PDF、MKL、SKR;略語は図(1)-12中の観測サイトを示す)や耕作地観測サイト(YCS、MSE;略語は図(1)-12中の観測サイトを示す)や特に高い光合成量・生態系呼吸量を示す観測サイト(TKC等;略語は図(1)-12中の観測サイトを示す)については、最適化により観測結果に近づいたものの、依然として観測結果とは大きな開きがあり、今後のより詳細な解析が必要であることが分かった。



図(1)-12. 本課題で用いたCarboEastAsia観測サイトの分布。観測サイトの略称と位置を示した。



図(1)-13. Biome-BGCモデルに含まれるモデルパラメータの光合成量に対する感度解析。各サイト毎に、18種類のパラメータをデフォルト値を基準として10-200%の範囲で変化させた。観測された光合成量に最も合うパラメータに対して算出された光合成量と観測された光合成量の間の差を表示した。青色はモデルパラメータを動かすことによって、モデルの改善が望めるサイトであることを示す。例えば、QYZサイトにおいては、炭素窒素比(葉)、葉窒素・ルビスコ比、維持呼吸速度の3つのパラメータが観測に一致させるためには重要であることを示す。また、熱帯地域(図中のSKR、PDF、MKL)については、パラメータを動かしたのみでは光合成量の再現精度が悪く、Biome-BGCモデルではパラメータ調整では観測の再現が困難なことを示す。

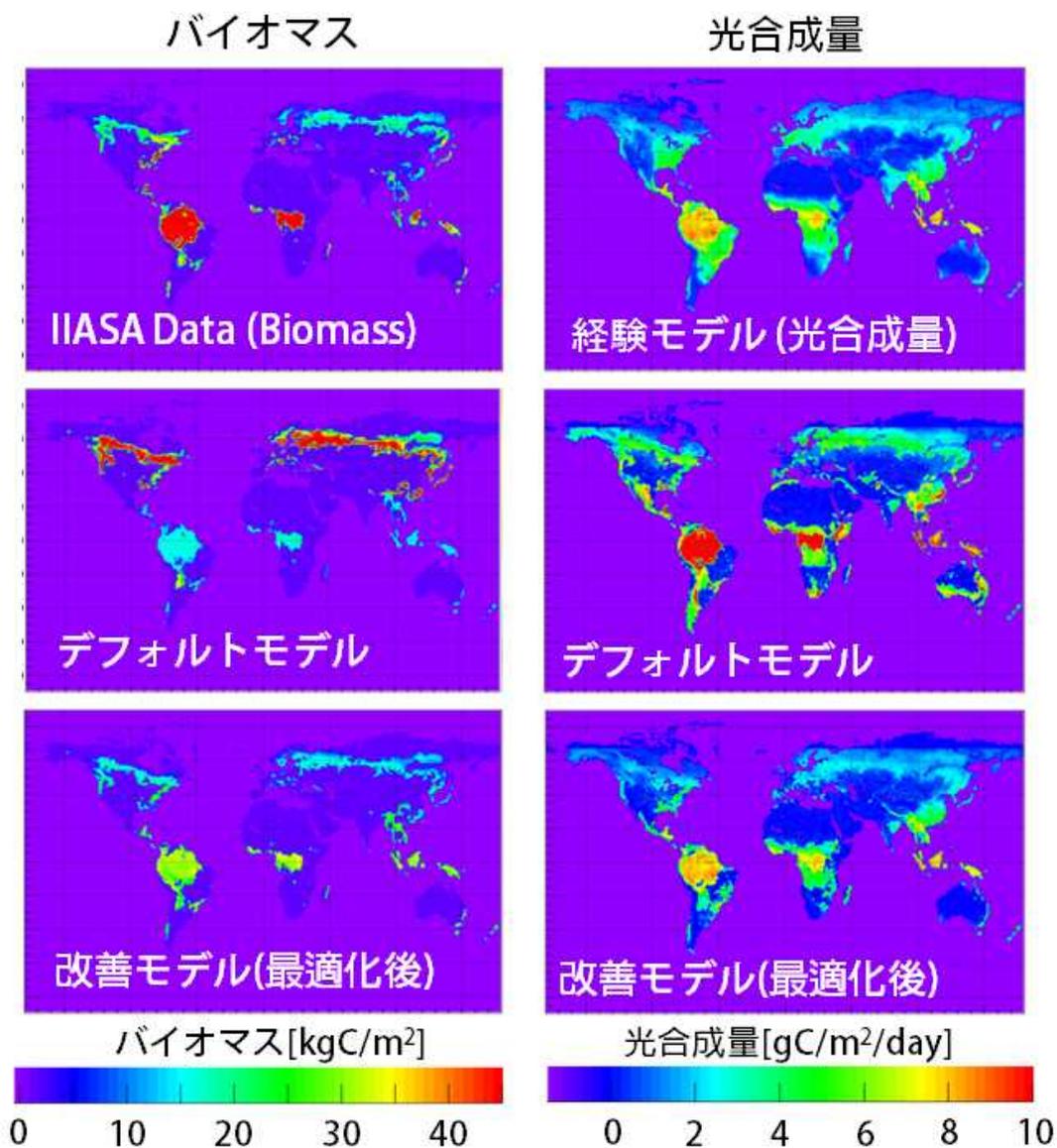


図(1)-14. 本課題において構築されたモデルパラメータ最適化手法によるモデル改善の効果。(a) 光合成量、(b)生態系呼吸量。いずれも全観測期間における月別平均を表示。CarboEastAsia 26観測サイトにおいて検証を行った。黒線は観測、灰色線はデフォルトモデル、赤色線は最適化されたモデルを示す。

3) グローバルスケールへの拡張とモデルパラメータ最適化の効果の検証

Biome-BGCモデルに対して炭素フラックスを制約として、サイトレベルでテストしたモデルパラメータ最適化手法を適用した。炭素フラックスを最適化の制約条件として適用すると、光合成量に関しては、観測データ(経験モデルによる手法; 図(1)-6)に近くなった(図(1)-15)。一方、サイトレベルでのモデルパラメータ最適化と同様に、炭素フラックスのみを制約条件に用いたモデルパラメータ最適化手法では、バイオマス量については、十分に制約することができなかった。さらに、バイオマス量の広域データをモデルパラメータ制約条件に利用したところ、デフォルトモデル比較して、バイオマス観測値に近くなった。従って、GOSATデータに代表される陸域炭素フラックスの広域データは陸域生物圏モデルを改善するのに重要であることが分かった。しかし、バイオマス量は、将来予測をするうえでの潜在的な炭素放出源となる可能性があることから、バイオマス量のより正確な見積もりは必要である。従って、炭素フラックスのみならず、炭素プール量に関する制約も今後必要となる。

今後の課題としては、現段階では炭素フラックスに主に着目していたが、炭素フラックスのみならず、バイオマス量もモデルの重要な制約であるために、これらのデータ整備を行うことが挙げられる。現段階のバイオマスデータについては、例えば、国別バイオマス量をダウンスケールしたものであり、直接観測を行なったものではない。従って、衛星観測などを利用したバイオマス量のグローバルスケールでの見積もりが必要である。特に、ALOS/PALSARや今後打ち上げが計画されているGCOM-C1衛星などのバイオマス量の見積もりが期待される。また、本研究においては、攪乱履歴が重要であることが分かった。特に、現在の炭素収支を説明するための一つの要因として、林齢が重要である。しかしながら、林齢のグローバルマップは存在しないため、林齢(攪乱履歴)のグローバルデータを構築することが炭素収支のシミュレーションに必要である。さらには、今回の研究では、光合成、生態系呼吸量、純生態系炭素交換量に着目して研究を進めてきたが、森林火災や土地利用変化による炭素収支については言及していない。これらの影響もグローバルな炭素収支においても大きな影響を受けるために、これらの影響を評価することも重要である。さらに、今回の課題においては、炭素収支に焦点を当てていたが、陸域生物圏の炭素収支は、水やエネルギー収支によっても影響を受ける。従って、水・エネルギー循環に関する様々な観測データを利用したモデル改善手法の構築が必要である。



図(1)-15. 広域スケールにおけるモデルパラメータ最適化の効果。バイオマス量と光合成量についてモデルパラメータの最適化を行った結果、デフォルトモデルの状態では、観測データとの開きが大きかったが、最適化をすることで観測データに近づいた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・これまで計算が困難であった陸域炭素収支の高解像度マッピングが潜在的に可能になった。
- ・GOSATデータなどを制約に与えることで、従来よりも陸域生物圏モデルが正確になった。
- ・陸域生物圏モデルをさらに向上するには炭素プール量の推定が必要だと指摘できた。

(2) 環境政策への貢献

- ・陸域生物圏モデルが向上することから、今後、これらの改善されたモデルを利用した陸域炭

素収支の見積もり、将来予測などの再評価を行うことになる。再評価した結果は、現状の結果とは異なることが予測されるため、本課題によって、より正確な炭素収支の見積もりが政策に提供できることとなる。

・陸域生物圏モデルの改善には、今後、バイオマス量などの炭素プール量の把握が必要であることが分かった。さらに、攪乱(森林伐採、森林火災)の履歴が炭素循環シミュレーションに必要であることが明らかになったので、これらのデータ整備が必要との指針を示すことができた。

6. 国際共同研究等の状況

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.

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(福島大)が務める。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。

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。

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(福島大)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る。本課題におけ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(福島大)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いる。

FLUXCOM “an intercomparison of ‘data-oriented’ approaches of estimating carbon and energy fluxes at continental/global scale using FLUXNET data、Counter Part: Drs. Martin Jung and Markus Reichstein、Max Planck Institute for Biogeochemistry (Germany).

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(福島大)は、本課題を通じて準備した、SVM回帰モデルによる広域化手法を提供して参加している。また、本課題で構築された様々な衛星データ(Terra衛星

/MODISセンサーデータなどを、モデルの入力データとして提供することも行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) M. UYAMA, A. KAI, K. ICHII, K. HAMOTANI, Y. KOSUGI, N. MONJI: Ecological Modelling, 222, 3216-3225 (2011)

“The sensitivity of carbon sequestration to harvesting and climate conditions in a temperate cypress forest.”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 近藤雅征、市井和仁：日本気象学会2010年度秋季大会、京都（2010）

“Establishment of the acceptable parameter range of chlorophyll photointeractions for terrestrial ecosystem model.”

- 2) K. Ichii, M. Kondo, K. Takahashi, T. Suzuki, J. Takahashi: AsiaFlux Workshop 2010, Guangzhou, China (2010)

“Multi model and data analysis of terrestrial carbon cycles in Asia: First result from Asia-MIP.”

- 3) M. Kondo, K. Ichii: AsiaFlux Workshop 2010, Guangzhou, China (2010)

“A new method of terrestrial ecosystem evaluation with the parallel coordinates plot.”

- 4) K. Ichii, M. Kondo: The 1st International Workshop on GOSAT data utilization, Tsukuba, Japan (2011)

“Potential use of GOSAT data for terrestrial carbon cycle modeling.”（招待講演）

- 5) 市井和仁、近藤雅征、佐々井崇博、植山雅仁：日本気象学会2011年度秋季大会、名古屋（2011）

“大気逆解析モデルによる陸域 CO₂ 収支推定を利用した陸域炭素循環モデル改善への試み”

- 6) 市井和仁：ユーラシア・アジアモンスーン地域の気候—陸域相互作用研究会、名古屋大学（2011）

“アジア域の陸域水・炭素循環の把握：観測とモデルの統合解析”

- 8) K. Ichii, Y.H. Lee, W. Ju, S. Wang, M. Kondo 他25名：10th AsiaFlux Workshop, Johor Bahru, Malaysia (2011)

- "Lessons learned from CarboEastAsia MIP: Current status of terrestrial carbon cycle modeling in Asia."
- 9) M. Kondo, K. Ichii: 10th AsiaFlux Workshop, Johor Bahru, Malaysia (2011)
 "Model based estimate of global carbon budget with optimization: Toward application of GOSAT products."
- 10) M. Kondo, K. Ichii: American Geophysical Union Fall Meeting 2011. San Francisco, US (2011)
 "Potential applications of GOSAT based carbon budget products to refine terrestrial ecosystem model."
- 11) K. Ichii K., M. Kondo, K. Takahashi, T. Suzuki, T. Sasai, M. Ueyama, N. Saigusa: American Geophysical Union Fall Meeting 2011. San Francisco (2011)
 "Impact of meteorological anomalies in 2003 and 2010 summer on terrestrial carbon cycle in East Asia: Multi model and data analysis."
- 12) Ichii K.: The 1st FLUXCOM Workshop, Jena, Germany (2012)
 "Upscaling using support vector machine regression."
- 13) Ichii K.: The 5th EAFES International Congress, Ohtsu, Japan (2012)
 "Quantifying terrestrial carbon cycle in East Asia through multi model and data analysis." (招待講演)
- 14) 近藤雅征、市井和仁: 日本気象学会2012年度春季学術講演会、つくば (2012)
 "GOSAT衛星データを用いた陸域炭素循環モデルの改善に向けて"(アブストラクト提出済)
- 15) K. Ichii, M. Kondo: The 4th GOSAT RA PI Meeting, Pasadena, US (2012)
 "Potential applications of GOSAT based carbon budget products to refine terrestrial ecosystem model." (アブストラクト提出済)
- 16) K. Ichii, M. Kondo, Y.H. Lee, S.Q. Wang, J. Kim, A. Ito, W. Ju, N. Saigusa, S.G. Li, G.R. Yu: The 55th Symposium of the International Association for Vegetation Science (IAVS2012), Mokpo, South Korea, (2012)
 "Quantifying terrestrial carbon budget in monsoon Asia through multi model and data analysis: From site-level to regional synthesis." (アブストラクト提出済)
- 17) M. Kondo, K. Ichii, M. Ueyama, R. Hirata, J. Kim, H. Kwon, S.G. Li, A. Miyata, N. Saigusa, G.R. Yu: The 55th Symposium of the International Association for Vegetation Science (IAVS2012), Mokpo, South Korea (2012)
 "Model based sensitivity analysis of terrestrial carbon fluxes in ecosystems of East Asia." (アブストラクト提出済)
- 18) K. Ichii, M. Kondo: Asia Oceania Geosciences Society and American Geophysical Union Joint Assembly, Singapore (2012)
 "Refinement of a terrestrial biosphere model using multiple satellite-based products." (招待講演) (アブストラクト提出済)

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(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) Williams M., Richardson A.D., Reichstein M., Stoy P.C., Peylin P., Verbeeck H., Carvalhais N., Jung M., Hollinger D.Y., Kattge J., Leuning R., Luo Y., Tomelleri E., Trudinger C.M., and Wang Y.P. (2009) Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences* 6, 1341-1359, doi:10.5194/bg-6-1341-2009.
- 2) Yang, F., Ichii K., White M., Hashimoto H., Michaelis A.R., Votava P., Zhu A.-X., Huete A., Running S.W., and Nemani R.R. (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.
- 3) Ichii K., Wang W., Hashimoto H., Yang F., Votava P., Michaelis A.R., Nemani R.R. 2009. Refinement of rooting depths using satellite-based evapotranspiration seasonality for ecosystem modeling in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1907-1918.
- 4) Bonan, G.B., Lawrence P.J., Oleson K.W., Levis S., Jung M., Reichstein M., Lawrence D.M., and Swenson S.C. (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, doi:10.1029/2010JG001593.
- 5) Takagi H., Saeki T., Oda T., Saito M., Valsala V., Belikov D., Saito R., Yoshida Y., Morino I., Uchino O., Andres R.J., Yokota T., Maksyutov S. (2011) On the benefit of GOSAT observations to the estimation of regional CO₂ fluxes. *SOLA*, 7, 161-164.
- 6) Maksyutov S., Kadygrov N., Nakatsuka Y., Patra P.K., Nakazawa T., Yokota Y., and Inoue G. (2008) Projected Impact of the GOSAT Observations on Regional CO₂ Flux Estimations as a Function of Total Retrieval Error, *日本リモートセンシング学会誌* 28, 190-197.
- 7) Peters W., Jacobson A.R., Sweeney C., Andrews A.E., Conway T.J., Masarie K., Miller J.B., Bruhwiler L.M., Petron G., Hirsch A.I., Worthy D.E.J., van der Werf G.R., Randerson J.T., Wennberg P.O., Krol M.C., and Tans P.P. (2007) An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 18925-18930.

- 8) Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., and Huang X. (2010) MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment* 114, 168-182.
- 9) Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., and Li Z.L. (2002) Validation of the landsurface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 83, 163-180.
- 10) Huete A., Didan K., Miura T., Rodoriguez E.P., Gao X., and Ferreira L.G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213.
- 11) Frouin R., and Murakami H. (2007) Estimating Photosynthetically Available Radiation at the Ocean Surface from ADEOS-II Global Imager Data. *Journal of Oceanography* 63, 493-503.
- 12) Yang F., White M., Michaelis A., Ichii K., Hashimoto H., Votava P., Zhu A.X., Nemani R.R. (2006) Prediction of continental scale evapotranspiration by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11), 3452-3461.
- 13) Saigusa N., Ichii K., Murakami H., Hirata R., Asanuma J., Den H., Han S.J., Ide R., Li S.G., Ohta T., Sasai T., Wang S.Q., Yu G.R. 2010. Impact of meteorological anomalies in the 2003 summer on gross primary productivity in East Asia. *Biogeosciences*, 7, 641-655.
- 14) Ichii K., Suzuki T., Kato T., Hajima T., Ueyama M., Sasai T., Hirata R., Saigusa N., Ohtani Y., Takagi K. 2010. Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan: Limitations and implications of model calibration using eddy flux observations. *Biogeosciences*, 7, 2061-2080.
- 15) Thornton P.E., Law B.E., Gholz H.L., Clark K.L., Falge E., Ellsworth D.S. 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.
- 16) Ueyama M., Kai A., Ichii K., Hamotani K., Kosugi Y., Monji N. (2011) The sensitivity of carbon sequestration to harvesting and climate conditions in a temperate cypress forest. *Ecological Modelling* 222, 3216-3225.
- 17) White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. (2000) Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem process model: net primary production controls. *Earth Interactions* 4, 1-85.
- 18) Tatarinov F.A., Cienciala E. (2006) Application of BIOME-BGC model to managed forests. 1. Sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management* 237, 267-379.
- 19) Mitchell S., Beven K., and Freer J. (2009) Multiple sources of predictive uncertainty in modeled estimates of net ecosystem CO₂ exchange. *Ecological Modelling* 220, 3259-3270.
- 20) Kondo M., Ichii K., Ueyama M., Hirata R., Mizoguchi Y., Saigusa N. (submitted) Role of carbon flux and pool observations to constrain terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia. *Ecological Modelling*.

(2) 陸域生物圏モデルのダウンスケーリング

名古屋大学 大学院環境学研究科 佐々井崇博

平成22～23年度累計予算額：1,690千円（うち、平成23年度予算額：1,300千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 森林などの陸域植生はCO₂の吸収源として着目されており、炭素管理などの政策の上でも陸域植生の炭素吸収量を正確に把握することが重要である。特にアジア域や日本域での陸域炭素収支を推定することは、日本の温暖化対策の政策決定のための重要なデータとなりうる。本サブ課題においては、衛星観測データを重視した陸域生物圏モデルBEAMSに対して、GOSAT衛星データに代表されるトップダウン方式の炭素収支を用いた精度評価を行い、その上で、アジア域の陸域炭素収支を高空間分解能にて推定することを最終目標とした。本課題では、GOSAT L4Aデータのプロトタイプとして、大気インバージョンモデルCarbonTrackerによる解析結果を利用して、BEAMSモデルによって推定される陸域炭素収支との比較を行った。さらに、アジア域において、約10kmの空間分解能にて、過去9年間の陸域炭素収支を推定した。

[キーワード] 陸域炭素循環、モデル、アジア、シベリア、リモートセンシング

1. はじめに

アジア域や日本域を対象として、数キロ分解能という高空間解像度での炭素収支の把握をすることは、様々な政策上における炭素管理という観点で重要である。これまで様々なモデルが提案され、様々な高空間分解能の見積もりがなされてきたが、いずれのモデルにおいても、陸域の吸収量の見積もりは困難であった。その理由の一つとしては、陸域モデルではボトムアップ方式で陸域炭素吸収量の見積もりを行うが、本来与えるべき大気からの制約に関する精度が低く、十分にモデルを制約できていなかったことが挙げられる。本サブ課題では、GOSAT衛星データによる亜大陸スケールでの炭素収支推定結果を利用して、これを高解像度にモデルを用いてダウンスケールし、数キロという高解像度で炭素収支マッピングを行うことを最終目標とした。但し、データ入手の遅れから、GOSAT L4Aデータのプロトタイプとして、大気インバージョンモデルCarbonTracker¹⁾の出力結果を用いて解析を行った。これにより、大気の観測情報からの制約・地上からの制約の両方を取り入れた、より精度の高いモデルと陸域炭素収支のより高精度のマッピングが期待される。

2. 研究開発目的

本課題の目的は、以下の2点である。

- ・大気インバージョンモデルからの広域炭素収支とBEAMSモデルの結果を比較して、広域スケール

でBEAMSがどの程度炭素収支を再現できるかの評価を行うこと

- ・アジア域を対象としてBEAMSモデルを用いて高空間分解能での陸域炭素収支の推定をすること

3. 研究開発方法

陸域生態系の炭素・水・エネルギープロセスを再現する陸域生物圏モデルBEAMSは、衛星データを入力値とする診断型タイプのモデルである²⁻⁴⁾。観測値に基づくモデル結果を算出することで、各フラックス・プールの現実的な時空間分布を再現する。本研究では、寒冷圏の活動層を再現させるためにBEAMSに土壌中の水・エネルギー輸送プロセスを統合したモデルを用いた。土壌を多層化（水プール6層、エネルギープール15層）し、1層の厚さは50cmとした。各層の土壌温度は、鉛直一次元熱伝導方程式を解いて算出する。各層の土壌水分量はダルシーの法則を使い、水ポテンシャルと透水係数から算出する。活動層や雪氷プロセスに伴う土壌中の相互作用を再現できる。本モデルは、シベリア地域の2地点のフラックスデータによる検証で、既に妥当な結果が推定できていることがわかっている。

まずは、BEAMSモデルの出力とCarbonTrackerによる大気-陸域炭素交換量の比較を行った。BEAMSモデルについては、グローバル1°グリッドでの実行を行い、その結果をCarbonTrackerにおける陸のタイル毎に集計して比較した。

次に、BEAMSをアジア域において高空間解像度で動作させるための入力データの整備を行った。具体的には、気候・衛星観測データの入手とその整備、高解像度モデルランのセットアップを行った。モデルへ入力する衛星観測値は、時系列データである地表面温度(LST)、葉面積指数(LAI)、光合成有効放射吸収率(FPAR)、下向き短波放射、時間固定データである植生分類図である。Terra衛星とAqua衛星に搭載されたMODISセンサーデータを使用し、モザイク、クオリティーチェック、月別コンポジット、Terra衛星とAqua衛星データの合成、分解能1km×1kmから分解能10km×10kmへの平均化処理を施した。10kmメッシュのモデルランにおいては、準備した全てのデータの解像度を10kmメッシュに平均化処理し、モデル入力データとして整備した。

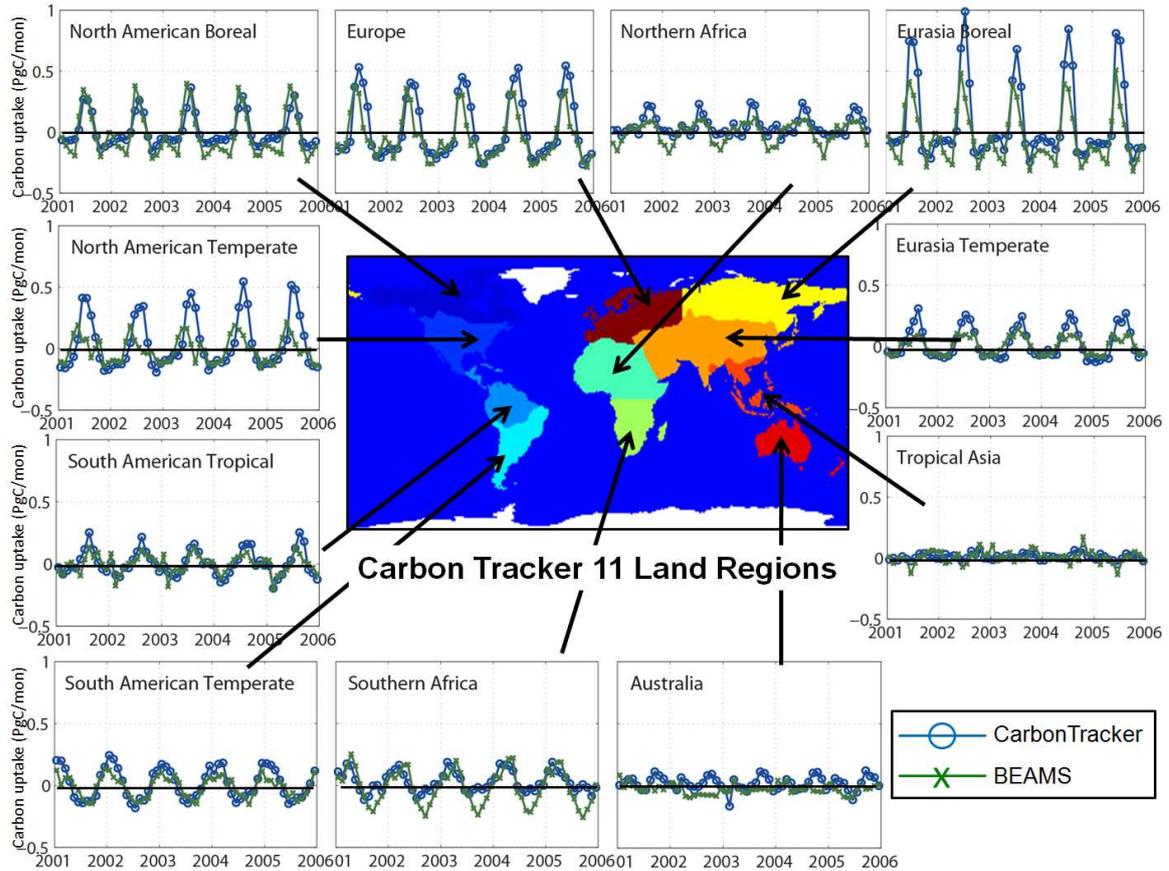
次に、2001年から2010年までの10年間分をモデルランし、モデルのパフォーマンスチェックとして計算時間やモデル出力の定性的なチェックなどを行った。そして、BEAMSに衛星観測データを入力してシベリア地域の炭素・水・エネルギー収支の広域解析を行った。解析期間は2001年1月から2010年12月まで、時間ステップは1ヶ月、空間分解能は10km×10km、対象地域はE60°～W170°、N45°～N80°の範囲である。

4. 結果及び考察

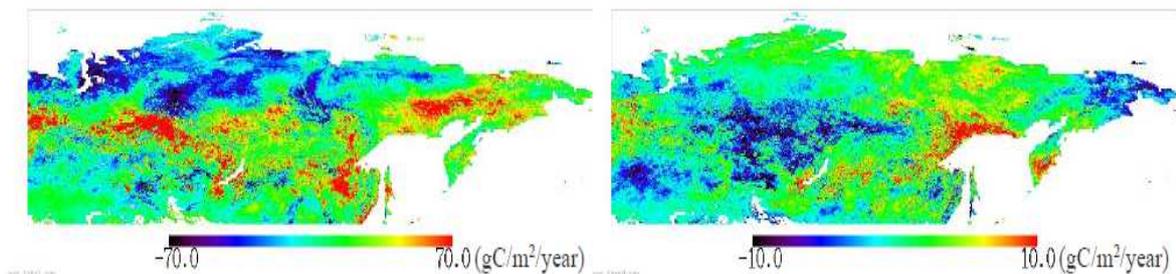
まずは、陸域生物圏モデルBEAMSと大気インバージョンモデルCarbonTrackerの結果を比較した(図(2)-1)。BEAMSの結果としては、全球でのシミュレーション結果³⁾を利用し、各亜大陸において、CarbonTrackerの結果と比較した。解析の対象としては、2001年-2005年の月単位の生態系炭素交換量を比較した。CarbonTrackerとBEAMSモデルを比較した結果、概ね、季節変動のパターンは一致した。しかし、いくつかの地域では、BEAMSモデルとCarbonTrackerの間において、季節変動の位相のずれや、最大値のずれが見られた。CarbonTrackerについては、地上観測点をインバージョ

ンモデルの入力として利用しているため、観測データの不足などの問題点が指摘されている。今後は、これらの違いの理由を説明するためのより詳細な解析が必要である。

アジア域(特にシベリアに着目)における炭素収支の空間分布を計算したところ、北部で負(炭素放出)、中部から南部で正(吸収)の値を示した(図(2)-2)。標高が高い地域では、植生の成長活動が不活発なために純生態系生産量(NEP)は低かった。対象地域全体で、陸域生態系は吸収源の役割であることがわかった(355.2 MtC yr⁻¹)。NEP線形トレンド分布は、東シベリアで正(増加)、西～中央シベリアでは負(減少)の値を示した。対象地域全体では、炭素が吸収する方向にあることがわかった(+19.6 MtC yr⁻¹)。今後、同地域ではより大きな炭素吸収源へと成長する可能性がある。



図(2)-1. BEAMSモデルとCarbonTrackerによる亜大陸別の陸域炭素収支の比較。
2001年-2005年を対象にし、月別の炭素収支を比較した。



図(2)-2. 純生態系生産量(NEP)の年積算値(左)と線形トレンド(右)の空間分布

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・衛星利用型陸域生物圏モデルBEAMSにより、陸面炭素収支がより正確に求められる。
- ・BEAMSモデルがインバージョンモデルとよく一致し、信頼性を確かめることができた。

(2) 環境政策への貢献

- ・陸域炭素収支の見積もりがより正確になることで、陸域炭素管理などの政策に貢献できる。

6. 国際共同研究等の状況

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.

GOSAT-RAとして採択された国際共同研究(無償)。共同研究者として参画。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。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(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

8. 引用文献

- 1) Peters W., Jacobson A.R., Sweeney C., Andrews A.E., Conway T.J., Masarie K., Miller J.B., Bruhwiler L.M., Petron G., Hirsch A.I., Worthy D.E.J., van der Werf G.R., Randerson J.T., Wennberg P.O., Krol M.C., and Tans P.P. (2007) An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 18925-18930.
- 2) Sasai T., Ichii K., Yamaguchi Y., and Nemani R.R. (2005) 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.
- 3) Sasai T., Okamoto K., Hiyama T., and Yamaguchi Y. (2007) 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.
- 4) Sasai T., Saigusa N., Nasahara K.N., Ito A., Hashimoto H., Nemani R.R. Hirata R., Ichii K., Takagi K., Saitoh T.M., Ohta T., Murakami K., Yamaguchi Y., and Oikawa T. (2011) 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.

(3) 陸域生物圏モデルの相互比較を通じたGOSATデータの有効性の検討

大阪府立大学 生命環境科学科 植山雅仁

平成22～23年度累計予算額：2,341千円（うち、平成23年度予算額：1,171千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 陸域炭素循環モデル(陸域生物圏モデル)は、地球温暖化予測において、不確実性をもたらす一つの重要な要因であり、その改善が急務である。一方で、大気CO₂濃度を利用した大気インバージョンモデルによる広域での炭素収支の見積もりは、陸域生物圏モデルに対しての独立な制約を与えるために、陸域生物圏モデルの評価・改善には有用である。本サブテーマでは、2009年に打ち上げられたGOSAT衛星から推定される大気と陸域のCO₂収支のデータを陸域生物圏モデルの評価に利用することを想定して、アジア、アラスカに着目して、陸域生物圏モデルと大気インバージョンモデルによる解析結果の両者の相違を評価した。アジアについては、陸域生物圏モデルから推定された広域の陸域炭素収支と大気インバージョンモデルからの推定結果については、経年変動の傾向については比較的一致するものの、炭素収支の総量については大きく異なることが分かった。一方、アラスカ域に関して、陸域生物圏モデルと大気インバージョンモデルの結果を比較した結果、両者の間には多少のバイアスがあるが、経年変動の傾向などはよく一致することが分かった。これらの解析は、温室効果ガス観測衛星(GOSAT衛星)データの観測が継続され、大気インバース陸域炭素収支の精度が向上することにより、陸域炭素収支の見積もりがより制約されると期待される。GOSAT衛星による観測は、現在の大気インバースモデル(CarbonTracker)のように長期にわたってデータを提供することが必要である。一方、本課題によって、アジア域における複数の陸域モデルやデータの相互比較を通じた陸域炭素収支の推定手法のフレームワークを構築することができたこと、さらには、近年の陸域炭素収支の傾向を把握するには、火災跡地などの攪乱の影響を考慮することが重要であることが分かった。

【キーワード】 陸域炭素循環、大気インバージョンモデル、陸域生物圏モデル、広域化、攪乱

1. はじめに

GOSAT衛星は、衛星観測によって大気CO₂のカラム濃度を観測することができるため、従来の地上観測に比較して高密度・高頻度の観測が可能となる。この特徴を利用して、大気インバージョンモデルの適用により、GOSAT衛星データの標準プロダクト(レベル4Aデータ)として、大気-地表面CO₂交換量が提供されている。従来の地上観測データを利用した大気インバージョンモデルの解析に比較して、より高精度の大気-地表面のCO₂交換量を推定できるようになると期待されている。このような手法は、「トップダウン手法」と呼ばれ、大気CO₂濃度に対しての制約を与えた上で、大

気-地表のCO₂交換量を推定できる。但し、空間解像度が荒い、インバースモデル、大気輸送モデル、先験値(A-priori flux)の不確実性などによって、炭素交換量の推定値には不確実性を持つ。

一方、陸域モデルや衛星観測などによって、各地上の計算値を集めて、空間的にCO₂フラックスを計算する、「ボトムアップ手法」も、現在の陸域の炭素収支を推定する上での一つの重要な方法である。しかし、これまでのところ、様々な陸域モデル比較研究においては、モデル毎に結果が異なり、炭素収支の見積もりの不確実性が高いと言われている。

本サブ課題においては、陸域生物圏モデルによる陸域炭素収支推定に代表される「ボトムアップ」方式による炭素収支推定と、大気インバージョンモデルに代表される「トップダウン」方式による炭素収支推定の比較を行い、両者でどの程度の相違がみられるのかを評価した。対象領域としては、特に、「アジア」と「アラスカ」の2領域を選択し、それらの地域において、「ボトムアップ方式」と「トップダウン方式」の炭素収支の見積もりの違いの解析を行った。

アジア域については、北米やヨーロッパに比較して、陸域炭素循環に関する理解が不足しているために、様々なモデルやデータを利用した陸域炭素循環の統合解析が必要である。東アジアについては、過去約100年の陸域炭素収支が推定されている¹⁾が、その研究は、気候データを入力とする陸域生物圏モデルを走らせて、その結果を利用しただけの研究に留まっており、様々な観測データを利用したモデルの検証や結果のクロスチェックなどは行われていない。近年得られるようになってきたAsiaFlux観測網における炭素フラックスなどの観測データや衛星データ、陸域生物圏モデルなどを利用する一方で、GOSAT L4Aデータのような大気インバージョンモデルによる解析も陸域炭素循環を理解するための重要なデータとなりうる。本解析は、GOSAT L4Aデータの今後の利用の可能性を探るために、現存のボトムアップ方式の炭素フラックスの推定手法との比較を行った。

アラスカ域を始めとする北極域では低緯度と比べて温暖化傾向が顕在化しており、それに伴って陸域生態系を取り巻く環境が大きく変化している。高緯度生態系の物質循環は、温度によって強く制限を受けているため、温暖化によって陸域生態系の応答が変化し、地球規模での気候変動にフィードバックを及ぼすことが懸念されている^{2, 3)}。例えば、人工衛星データを用いた近年の植生指数の観測からは、温暖化に伴って北極域ツンドラの活性が高まり、CO₂の吸収量が増加してきていることが報告されている⁴⁾。一方で、温暖化は乾燥化を引き起こすことから、植物の乾燥ストレス⁴⁾、森林火災の増加と大規模化⁵⁾が誘引され、CO₂の吸収量が減少することも懸念されている。北極域では土壌に大量の有機炭素が蓄積されているため⁶⁾、有機炭素の分解が温暖化によって促進されれば、CO₂の放出量が増加するといった報告もなされている⁷⁾。このように北極域では温暖化に伴って炭素循環が大きく変化することが予期されているが、地上観測が不足しているために十分な知見が得られてこなかった。そこで、本課題では地上観測データと人工衛星データを融合させることで、広域的な炭素フラックスを推定する手法について検討した。また、本課題による広域化手法をGOSAT衛星によるCO₂交換量のダウンスケーリングに使用可能であるかについて検討を行った。

2. 研究開発目的

本サブ課題の目的は、以下の2つである。

- ・アジア域を対象とした複数モデル・観測データを利用したGOSATデータ有効性の評価
GOSAT L4Aデータによるモデル改善の有無によって、複数の陸域モデルによる炭素収支推定値の幅がどのように変化するかを評価し、広域での炭素収支をより正確にする。
- ・北極域炭素循環広域評価
GOSAT L4Aデータの利用の一つのテストケースとして、北極域の広域陸域炭素収支を推定する。

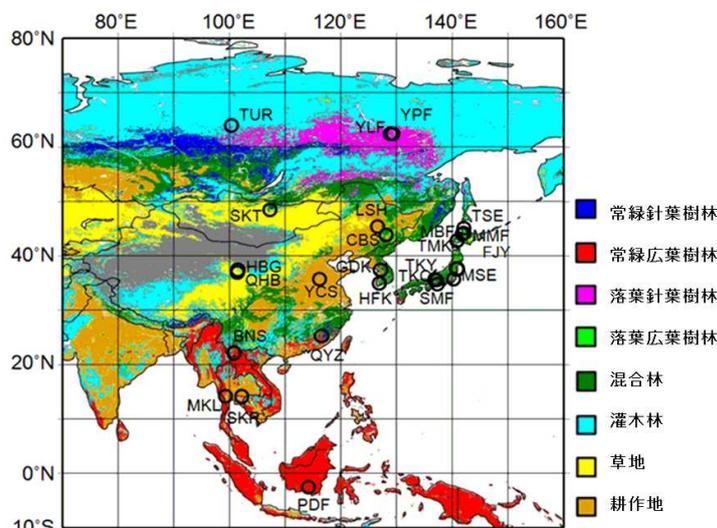
3. 研究開発方法

(1) アジア域を対象とした大気インバースモデル解析と陸域生物圏モデルの比較

ボトムアップ手法で広域の陸域炭素収支を推定する上では、陸域生物圏モデルの利用が不可欠である。しかしながら、陸域生物圏モデルによる炭素収支のシミュレーションについては大きな不確実性を持つため、陸域生物圏モデルの精度評価が必要である。本課題においては、陸域炭素収支のモデル結果の検証のために、日中韓研究ネットワークにより収集されたアジア域における渦相関法によるCO₂フラックス観測網のデータ(CarboEastAsiaデータセット；<http://www.carboeastasia.org/>)を利用した(利用した観測点を図(3)-1に記す)。これらの観測点において、モデル計算された炭素フラックスと観測結果との比較を行った。

次に、アジア広域(図(3)-1)において、複数の陸域生物圏モデルと大気インバージョンモデル解析の結果を通して、アジア域の過去の陸域炭素循環について、大気インバージョンモデル解析の結果と陸域生物圏モデルの結果の違いやその理由を考察した。モデル比較のためのデータセットとして、グローバルスケールの気象データをベースにして、アジア域での切り出し・補正などを行い、1901年-2010年と、2001年-2010年の2種類の期間について、アジア広域をカバーする0.25°の分解能のデータを構築した。さらに、衛星データとして光合成有効放射吸収率(FPAR)や葉面積指数(LAI)や植生指数などのデータを準備した。

陸域生物圏モデルとして、6種類のモデルのセットアップとモデルランを行った。利用したモデルは、サポートベクタマシン回帰モデル(以下SVM回帰モデルとする)⁸⁾、BEAMSモデル⁹⁾、CASAモデル¹⁰⁾、Biome-BGCモデル¹¹⁾、LPJモデル¹²⁾、TRIFFIDモデル¹³⁾などである。現時点では、GOSAT衛星から推定された地表面炭素収支データについては、2009年6月から2010年5月の期間でしか得られなかったため、GOSAT L4Aデータのプロトタイプとして、大気インバージョンモデルCarbonTracker¹⁴⁾で推定された大気-陸域炭素収支を用いた。これらのモデルとデータを用いて、2000年-2010年の期間についてのシミュレーションを行い、各モデルの陸域炭素収支やその経年変動に関する比較を行った。



図(3)-1. アジア域での複数モデルランの解析範囲と植生分類。利用した地上観測点を○で示す。

(2) 北極域生態系における炭素フラックスの広域化と大気インバージョンモデルとの比較

GOSAT衛星データなどによる陸域炭素収支の推定結果が比較的狭い地域においても有効であるかを検証するために、アラスカ域において、ボトムアップ手法とトップダウン手法による陸域炭素交換量の比較を行った。それを通して、まずは、地上観測データと人工衛星データを融合させることで、広域的な炭素フラックスを推定する手法について検討した。次に、本課題による広域化手法を将来的に得られるGOSAT衛星によるCO₂交換量のダウンスケーリングのための一つのデータとして使用可能であるかについて検討した。

タワー観測が高密度で展開されているアラスカ域（図(3)-2）を対象として、微気象観測により得られた炭素フラックス観測結果の広域化を実施した。この地域では、ブルックス山脈以南の内陸部に北方林が優占し、山脈より北には北極性ツンドラが優占している。対象地域の年平均気温は-12℃、年間降水量は100~130 mm y⁻¹である。

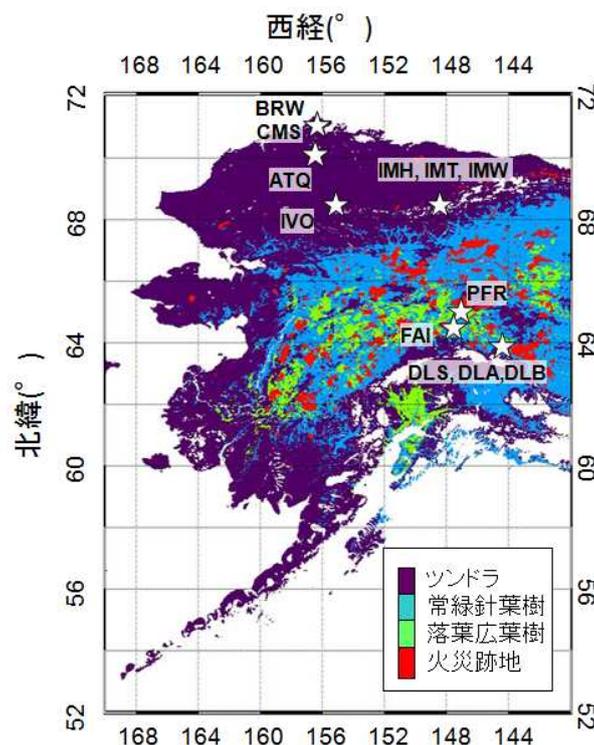
機械学習法（Support Vector Machine based regression; SVM⁸⁾）を用いて、微気象観測サイトで得られた炭素フラックスの広域化を行った。広域化に用いられたデータは、対象地域に展開される12サイトから得られたもので、クロトウヒ林（2サイト）、落葉広葉樹（1サイト）、森林火災跡地（2サイト）、北極性山岳ツンドラ（4サイト）、北極性沿岸ツンドラ（3サイト）を含む合計33年のデータである（図(3)-2）¹⁵⁾。本研究では、これらの観測から得られた総一次生産量（Gross Primary Productivity; GPP）、生態系呼吸量（Ecosystem Respiration; RE）、純生態系炭素交換量（Net Ecosystem Exchange; NEE）の各フラックスの8日平均値を学習データと検証データに分けて、SVM回帰モデルの学習を行った。

SVM回帰モデルの入力データとして、地表面温度（Land Surface Temperature; LST）、日射量、植生指標、土地被覆分類の4つを検討した。植生指標については、NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）、EVI（Enhanced Vegetation Index）、LAI（Leaf Area Index）のうちどの指標を用いるとよいか検討を行った。また、土地被覆分類には、常緑針葉樹林、落葉広葉樹林、火災跡地、ツンドラの3つの植生タイプを考慮した。

学習されたSVM回帰モデルを用いて広域フラックスを計算する際に、広域気候・植生データを用

いた。日射量については日本25年気候再解析データ(JRA25)データ¹⁶⁾、LSTと植生指標についてはTerra/MODISデータ^{17、18、19)}を用いた。土地被覆分類は、アラスカに特化した土地被覆分類図²⁰⁾にアラスカ森林火災センタ(Alaska Fire Service)から提供された森林火災地図を組み合わせ作成した。火災跡地の土地被覆区分については、毎年の森林火災があった場所を考慮して各年で変化するように考慮した。これら広域データは、空間解像度2.5 km に投影し、モデルの入力とした。

最後に、本研究で構築した炭素フラックスとGOSAT L4AデータのプロトタイプとしてのCarbonTracker¹⁴⁾による炭素収支の見積もり結果との比較を行った。さらに、過去約10年のアラスカ域の炭素収支の時系列変化を解析した。



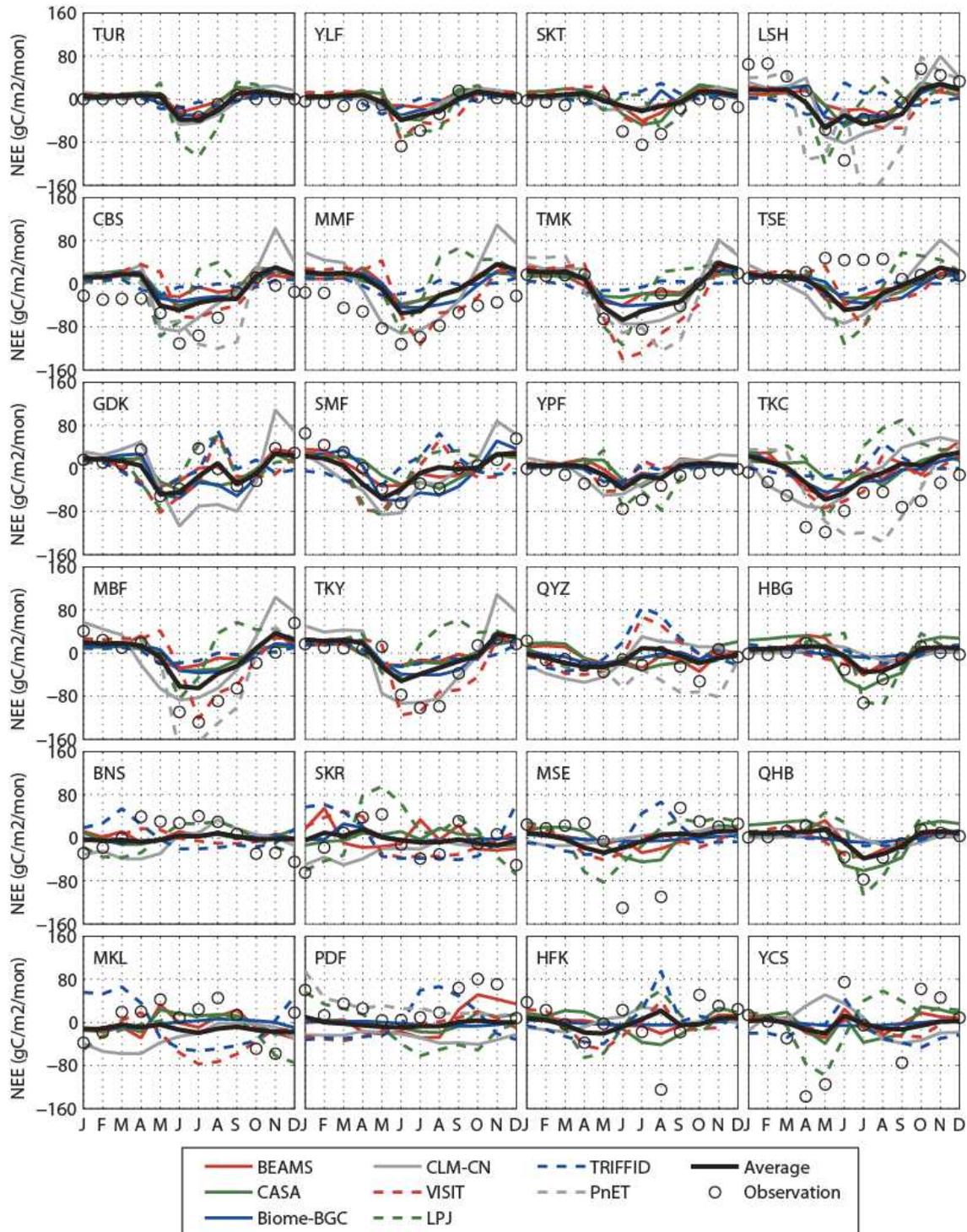
図(3)-2. 解析領域と観測サイトの位置

4. 結果及び考察

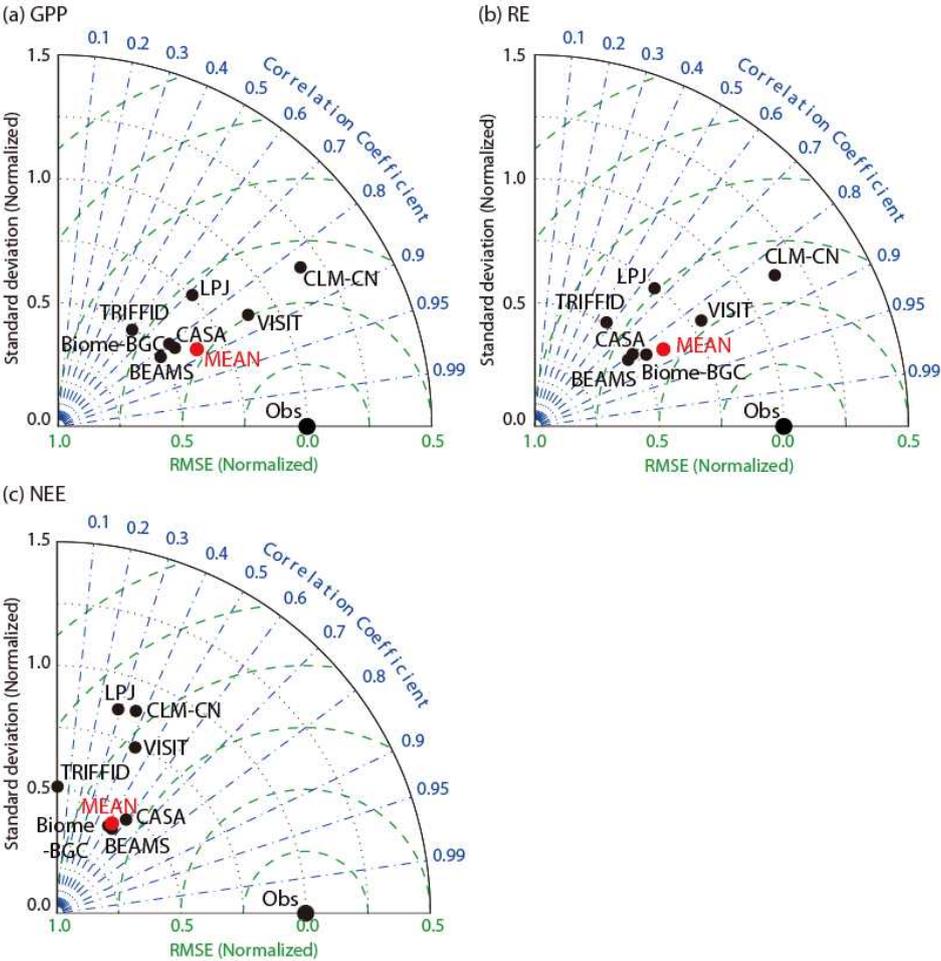
(1) アジア域を対象とした大気インバースモデル解析と陸域生物圏モデルの比較

広域評価の前段階として、地上観測と陸域生物圏モデルの結果を行った(図(3)-3)。炭素収支の季節変動に関しては、多くのモデルで観測に近い結果が出ているが、モデルが観測を再現できていないサイトもかなり多く存在している。例えば、年間を通して強い炭素吸収を示しているCBS、MMFなどのサイトでは、モデルが観測された強い炭素吸収を再現できていない。また、夏季における炭素吸収の最大値を再現できていないサイトも多く存在している(例: MBF、TKY、TKC等)。さらに熱帯地域(BNS、MKL、SKR、PDF)においては、観測に比較して、炭素収支の季節変動の大きさを過小評価していることが分かる。また、耕作地については、モデルと観測結果の不一致が際立っている。次に、各モデル毎の観測データの再現性を調べるために、各モデル毎、全24サイトの月単位の変化について、観測とモデルの誤差などを比較した。本研究では、Taylor Diagram²¹⁾を利用して、モデルと観測データの相関係数、2乗平方誤差、平均を中心とした標準偏差(これは主に

月別変動の振幅の大小を表現することとなる)について、3つの情報を一つのグラフに表現できるようにした。この結果、各陸域生物圏モデルについては、特に炭素収支の面で観測を十分に再現できていない(図(3)-4)ことが分かり、今後、引き続き、モデルの改良が必要とされることが分かった。



図(3)-3. CarboEastAsia観測サイトにおける大気-陸炭素収支(8モデル+観測)。(上向き(陸→大気; 陸から大気への放出)フラックスを正とした)の月別変動²²⁾



図(3)-4 月別炭素フラックス ((a) 光合成(GPP)、(b)生態系呼吸(RE)、(c)純生態系炭素交換量(NEE))に関する各陸域生物圏モデルのパフォーマンス。Taylor Diagramにより、モデル-観測の誤差の要因(相関係数・季節変動の大きさ(標準偏差)・モデル-観測の誤差の大きさ(RMSE)を一つの図にて表現した。各モデル毎にCarboEastAsia全24観測サイトにおける大気-陸炭素収支(8モデル+観測)を利用してモデルの精度を評価した²²⁾。

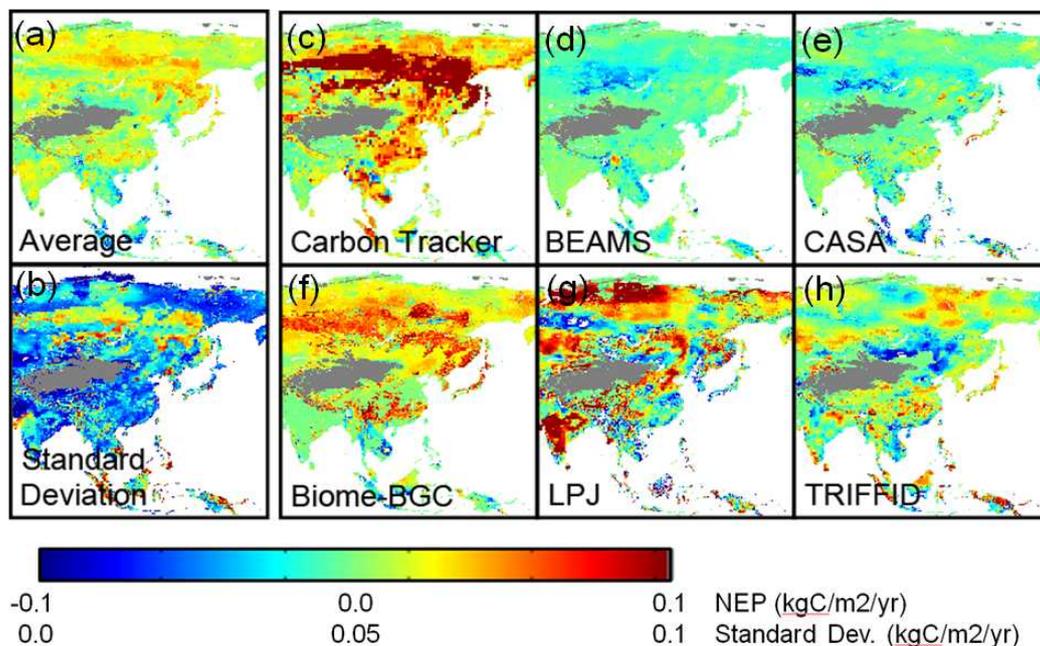
次に、広域解析を行った。まず、亜大陸スケール(インバージョンモデルのエリアに従う)における2001年-2006年の期間における炭素収支の比較を行った(図(3)-5、6)。3種類の陸域生物圏モデルと2種類の大気インバースモデルによる解析結果についての比較を行ったところ、手法毎に大きな違いがみられた。例えば、CarbonTrackerなどのインバージョンモデルの結果では、シベリア域を中心に大きな炭素シンクとなっている。一方で、陸域生物圏モデルでは、どのモデルでもこの大きさの炭素シンクは見積もられていない。

2001年から2006年における経年変動に関しては、各手法間で比較的一致した結果が得られている(図(3)-7)。例えば、2003年には広範囲で冷夏が記録されているがアジア域東側の地点においては、モデルとCarbonTrackerの値が比較的一致している。一方で、シベリア西地方においては、モデルとCarbonTrackerの値が逆符号を示すなど、大きな違いがみられる。また、TRIFFIDモデル

においては、他のモデルと挙動が異なる点が指摘できる。例えば、東アジア(図の黄色域)や東南アジア域(図の青色域)について、他のモデル・手法とは大きく異なる挙動を示す。一方で、シベリア西(図の赤色域)では、TRIFFIDモデルの結果は、CarbonTrackerの結果とよく一致しており、この相違の原因については、さらに究明する必要がある。

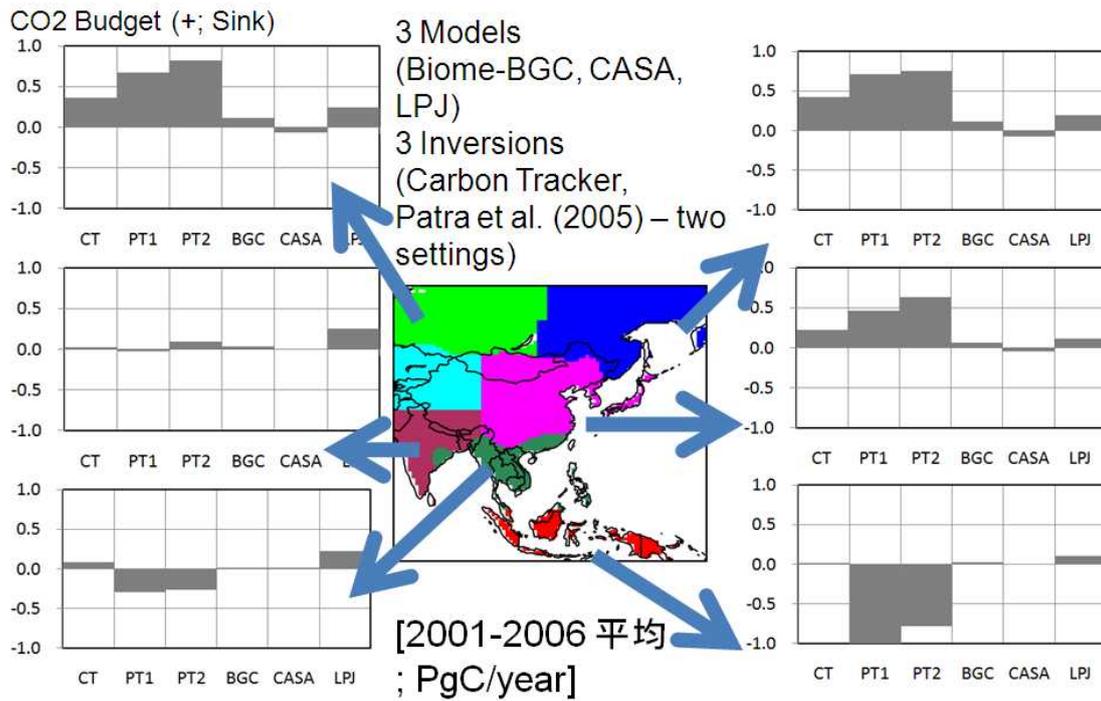
次に、一つのケーススタディとして、2003年夏の異常気象が陸域炭素循環に及ぼす影響を解析した(図(3)-8)。特に、大気インバージョンモデルの結果と、陸域生物圏モデルの結果を比較した。まず、気象データの解析を通して、2003年の夏には、東アジアの広域において、冷夏・多雨・寡照であることを確認した。次に、モデル出力と大気インバージョンモデルの結果を比較した。東アジア～極東ロシア地域においては、5つのモデル・手法において、負のアノマリ(CO₂吸収量が小さい)が検出された。しかし、その大きさは、モデル・手法毎に大きくことなつた。例えば、CarbonTrackerについては、最も大きな負のアノマリを示した。一方で、その他陸域生物圏モデルについては、CarbonTrackerに比較して、偏差の大きさは小さかった。また、陸域生物圏モデルについても、各モデルに応じて応答の大きさが異なつた。BEAMSやBiome-BGCモデルでは、他のモデルに比較して、小さい偏差を示した。その他、LPJモデルについては、地域毎に正・負のアノマリが混在するという結果になつた。

今後の課題としては、CarbonTrackerの見積もり、各陸域生物圏モデルの見積もりの違いの理由のさらなる検討が必要である。さらに、各陸域生物圏モデルについては、観測サイトにおける炭素フラックスなどとの詳細な比較とモデルの改善が必要である。現時点では、森齢による影響がモデルに反映されていないこと、CarbonTracker自体の見積もりの信頼性の問題、衛星入力データのより長期データが必要なこと、などを想定しているが、これらのさらなる検討が必要である。また、新たに得られるであろうGOSAT L4Aデータを利用した陸域炭素収支の見積もりデータなどは、これらの新たな制約に利用できる。

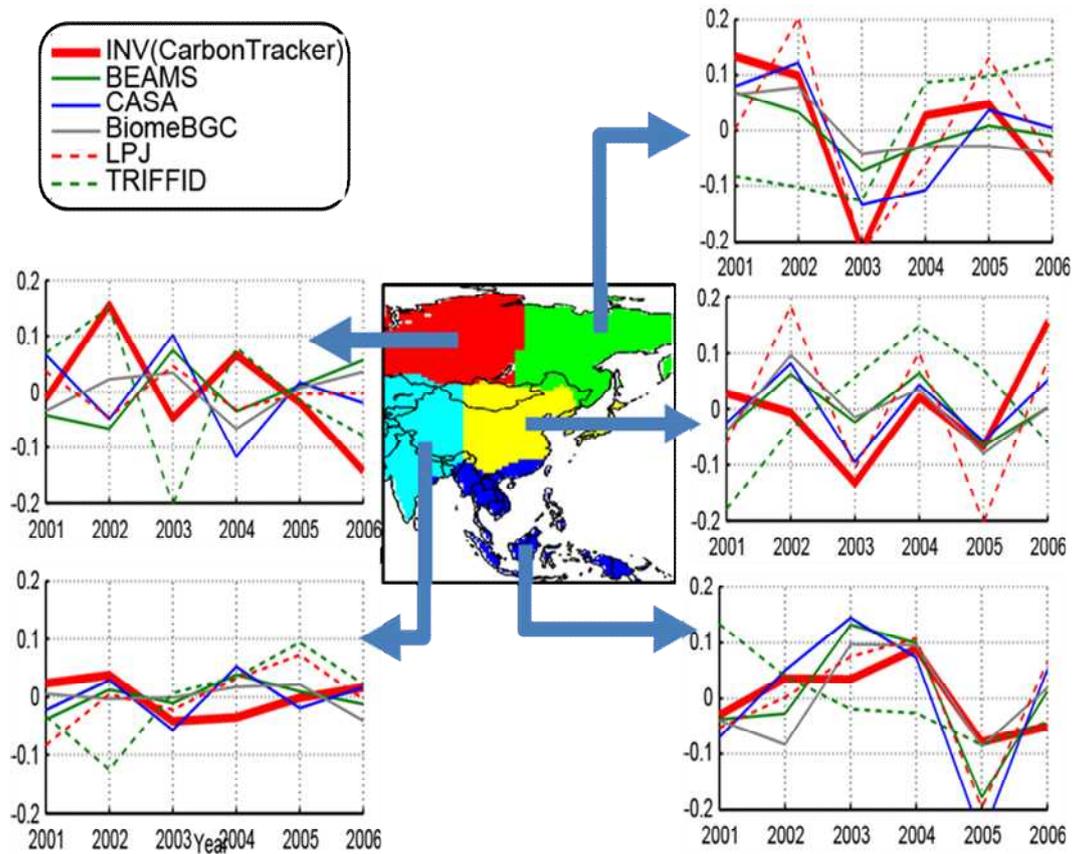


図(3)-5. 様々なモデル・手法による2001年-2006年の陸域CO₂吸収量の空間分布。

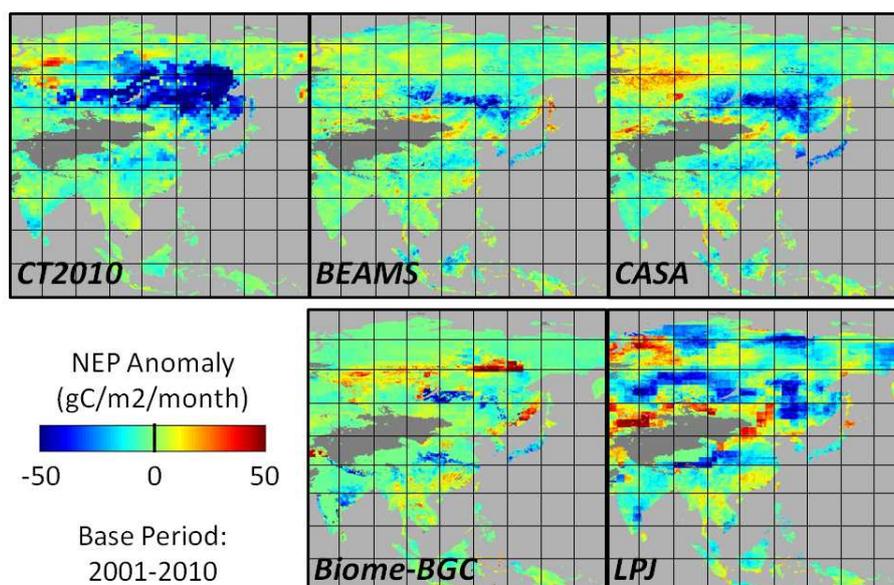
(a)6種類の平均値・(b)6種類の標準偏差・(c-h)各モデルの結果を示した。



図(3)-6. 様々なモデル・手法による2001年-2006年の陸域CO₂吸収量(単位 PgC y⁻¹).



図(3)-7. 様々なモデル・手法による2001年-2006年の陸域CO₂吸収量(単位 PgC y⁻¹)の経年変動。



図(3)-8. 様々なモデル・手法による2003年夏における陸域炭素吸収量の偏差
(基準年2001年-2010年)

(2) 北極域生態系における炭素フラックスの広域化と大気インバージョンモデルとの比較

地上観測データを用いてSVM回帰モデルモデルを学習した。はじめに、NDVI、EVI、LAIの中からの植生指標を用いると炭素フラックスの再現性が高まるかについて感度実験を行った。その結果、LAIを入力とした場合に、GPP、REのいずれに対してもモデルの再現性が高まることが明らかとなった。これまで中・低緯度の植生での先行研究から炭素フラックスの広域化にはEVIが有用であることが報告されてきたが⁸⁾、本研究から北極域に関してはLAIがより有用であることが明らかとなった。この理由としては、NDVIやEVIと炭素フラックスの関係性がツンドラと北方林とで異なるからであると考えられる²³⁾。

次に、LST、日射量、LAI、土地被覆分類のうちどの入力データがもっとも重要な要因であるかを調べた。4つの入力データのうち1つを除いた3つのデータでモデルを学習させ、モデルの再現性をRMSE (Root Mean Square Error) の値から評価した。GPPについては土地被覆分類を入力としない場合、RMSEが最も高い値を取り (RMSE = 0.78 g C m⁻² d⁻¹)、土地被覆分類が最も重要な入力データであることが明らかになった。このことは、GPPを推定する上で森林、火災跡地、ツンドラを区分することが重要であることを示している。同様に、REについても入力データに対する感度実験を行ったところ、REについてはLAIを入力変数に含めない場合に、RMSEが最も高くなった (RMSE = 0.64 g C m⁻² d⁻¹)。以上のことから、REの時空間変動を説明する上でLAIが重要な要因であることが示された。また、REの入力変数に対する感度実験から、REの推定には土地被覆分類が不要であることが分かった。このことは、アラスカ域においてはREの変動が森林、火災跡地、ツンドラで同じ特性を持つことを示唆している。

学習されたモデルによる8日毎のGPP、REおよび、その差から計算されたNEEを観測結果と比較した (図(3)-9)。SVM回帰モデルと観測値の間で高い相関関係が得られ ($R^2 = 0.88$ for GPP、 $R^2 = 0.94$ for RE、 $R^2 = 0.64$ for NEE)、GPP、RE およびNEEのRMSEはそれぞれ0.58 g C m⁻² d⁻¹、0.25 g C m⁻² d⁻¹、0.59 g C m⁻² d⁻¹となった。空間分布に対する再現性を確認するために、観測値とSVM回帰モデ

ルを各サイトで平均し、図(3)-10にその比較結果を示した。空間分布の再現性についても高い R^2 を示し、また、回帰係数が1.0に近い値をとったことから、学習されたSVM回帰モデルが精度よく観測を再現できていることが確認された。

学習されたSVM回帰モデルを用いて2000年-2010年の期間について対象領域のGPP、RE、およびNEEの計算をした。図(3)-11に解析期間におけるフラックスの空間分布の平均値を示す。解析期間の平均でアラスカ域の陸域生態系のGPP、REは、それぞれ $281 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、 $203 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ となり、この領域が $78 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の炭素の吸収源として作用していたと計算された。空間分布に注目すると森林が優占する内陸部においてGPP、REが高く、北部のツンドラが優先する地域においてGPP、REが低い値をとった。一方、NEEについてはGPPとREとは異なり、北極海沿岸のツンドラを除いて空間変異が小さい結果となった。

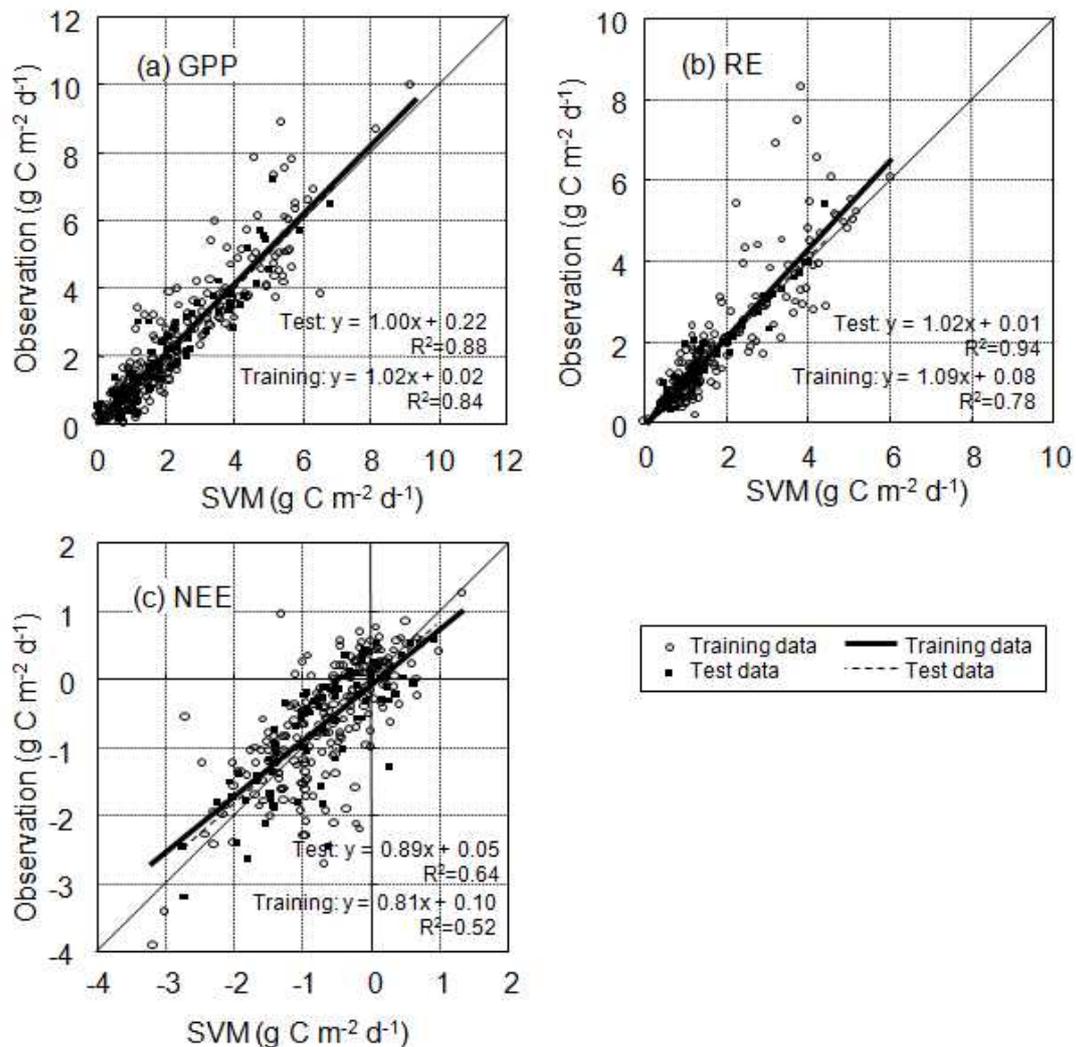
アラスカ域の広域炭素フラックスの年次変動から、2004年、2007年はGPPが高いため炭素吸収量が多くなり、逆に2006年はGPPが低くなり炭素吸収量は少なかったことが分かった(図(3)-12)。これを広域の気温データと比較してみると、2004、2007年は気温が高く、2006年は気温が低い年に対応することが分かった。すなわち、広域炭素フラックスは、気温の変化に相関して変動を示すことがわかった。

2000年～2010年の11年間のトレンドを評価するために、炭素フラックスの年間値の直線回帰式の傾きを図(3)-13に示した。GPPについてみると領域内に大きな正・負のトレンドをもつグリッドがみられた(図(3)-13a)。このグリッドに注目すると、トレンドが大きくなるグリッドは過去に火災による攪乱を受けたグリッドであることが分かった(図(3)-13c)。2001年以降に攪乱を受けた場所については、攪乱によるGPPの低下が大きくなるために大きな負のトレンド($-30 \sim -8 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-2}$)を持ち、それ以前に攪乱を受けた場所については、攪乱からの回復に伴ってGPPが正のトレンド($0 \sim +28 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-2}$)を持つことが分かった。一方で、攪乱を受けていない場所に関しては小さな正のトレンド($+2 \sim 7 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-2}$)を持った。REは優位な傾向がほとんどのグリッドで得られなかったため、NEEの11年間のトレンドは(図(3)-13b)、GPPのトレンドによって決まる結果となった。攪乱を受けていないグリッドについては、緩やかな炭素吸収量の増加傾向($-6 \sim +1 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-2}$)、攪乱からの回復過程にあるグリッドについては吸収量の増加傾向($-2 \sim -19 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-2}$)が見積もられた。以上の結果をまとめると、北極域の炭素収支について、広域平均の年次間差は気温などの気候的な要因が重要であるのに対して、個々のグリッドでの10年程度の長期的な変動は攪乱の有無が最も重要な要因であるということが示唆された。

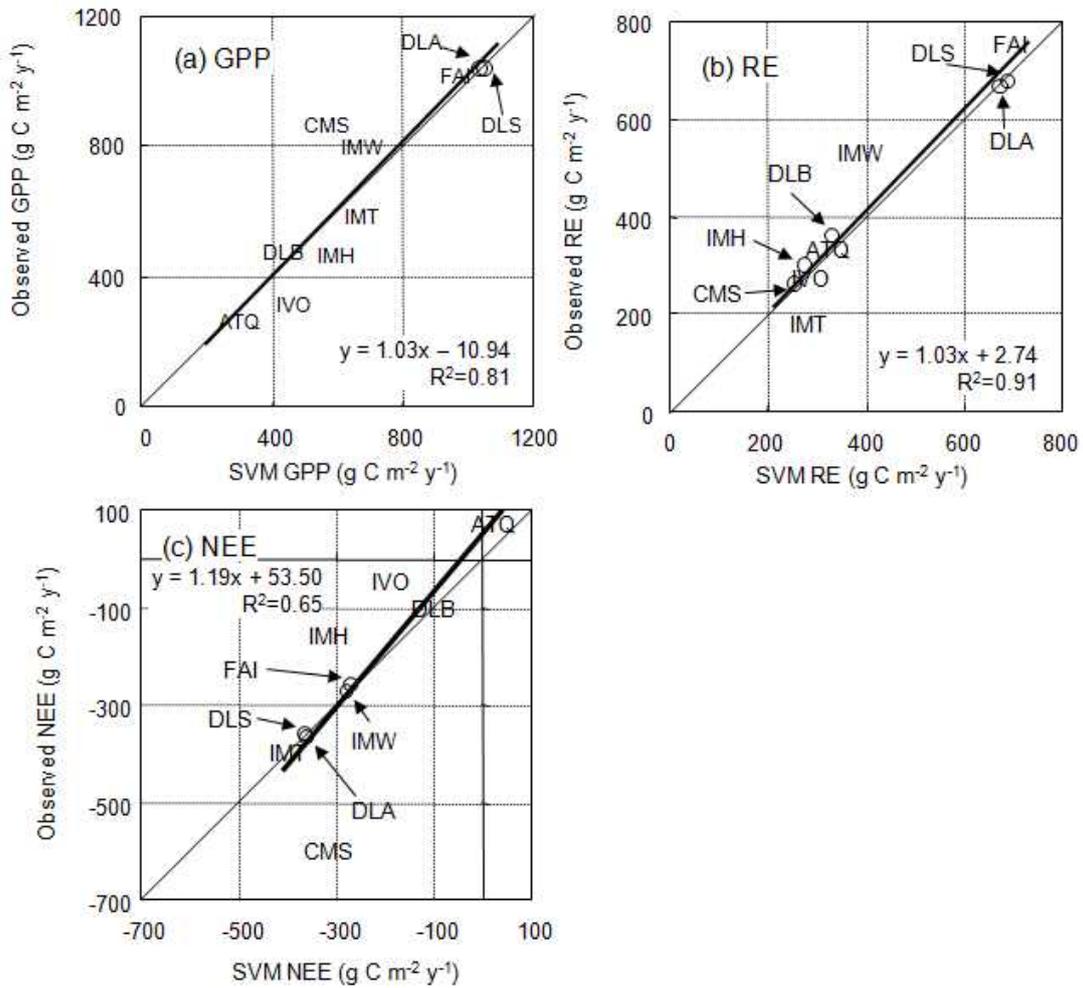
SVM回帰モデルで推定されたNEEとトップダウンモデル(CarbonTracker¹⁴⁾)により推定されたNEEとの比較を図(3)-14に示した。季節推移について注目すると(図(3)-14)、植物生育期間(通日145-281)についてはおおむね同様の傾向、値を示すことがわかった。一方、冬季についてみるとSVM回帰モデルは冬季のフラックスがほぼゼロであったのに対して、CarbonTrackerは $0.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の炭素の放出傾向を見積もった。これは、SVM回帰モデルでは観測と衛星の両データの精度の悪さから冬季のフラックスの推定精度に問題があることが原因として考えられる。一方で、CarbonTrackerが見積もった冬季フラックスは、チャンパー等を用いた既往の研究^{24, 25)}の値と比べて大きな値で推移しており、CarbonTrackerにも検討の余地が残された。生育期間積算値では、SVM回帰モデル(79 g C m^{-2} ; 105 TgC)がCarbonTracker(61 g C m^{-2} ; 80 TgC)に比べて $18 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 大きな吸収量を見積もった。観測データの不確実性($25 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$)²⁶⁾や大気インバージョンモデ

ルの不確実性 (30 TgC y^{-1})²⁷⁾を考慮すると、両モデルによるこの差は有意であるとは考えられない。次に、生育期間の積算値を計算し、その年次変化について比較を行った(図(3)-15)。両者は2003年を除いておおよそ同様の年次変化を示し、CarbonTrackerとSVM回帰モデルとで一貫性のある結果が得られた。

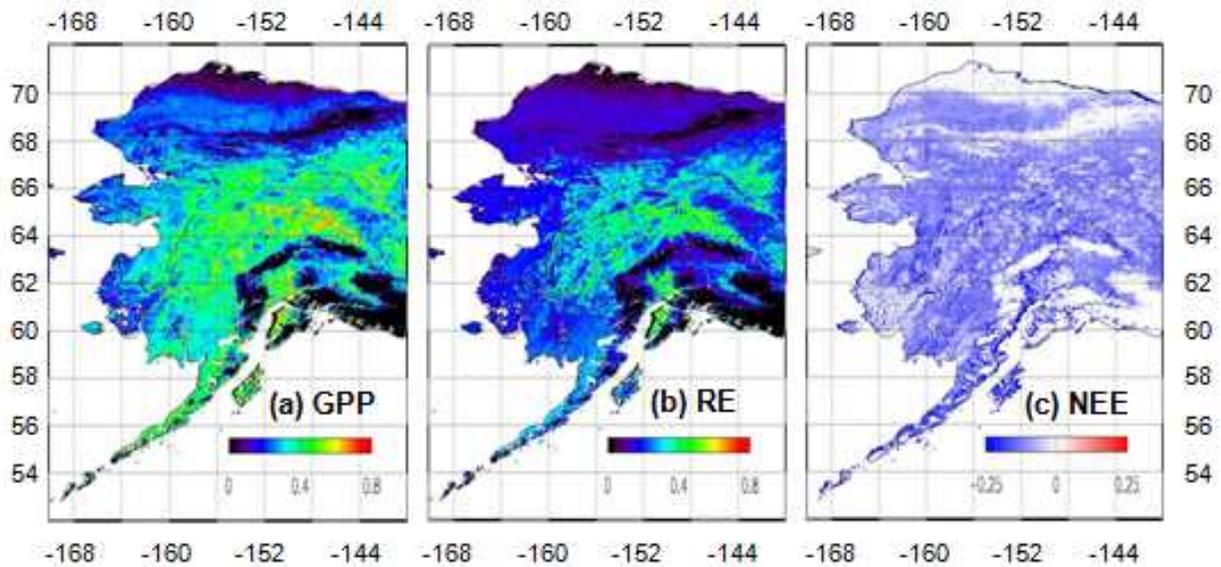
北極域生態系における炭素収支を、地上観測と可視・近赤外リモートセンシングの融合により推定できることが明らかとなった。その際に、入力変数として、攪乱を考慮した土地被覆分類および葉面積指数が重要であることが分かった。今後、これらの入力変数を高精度、高解像度化することができれば、より正確な炭素収支を評価することが可能となると考えられる。一方で、冬季に関しては、モデルに多くの不確実性が残される結果となり、チャンパー等の既往の研究をモデル学習に取り入れるなどの改善が必要であると考えられる。本研究で採用したボトムアップ手法では、トップダウン型のモデルと比べて高解像度の炭素フラックスを推定することができる。これは、GOSAT L4Aデータのダウンスケーリングに有効な手法であるとともに、その精度を検証するためのデータとしても使用できると考えられる。



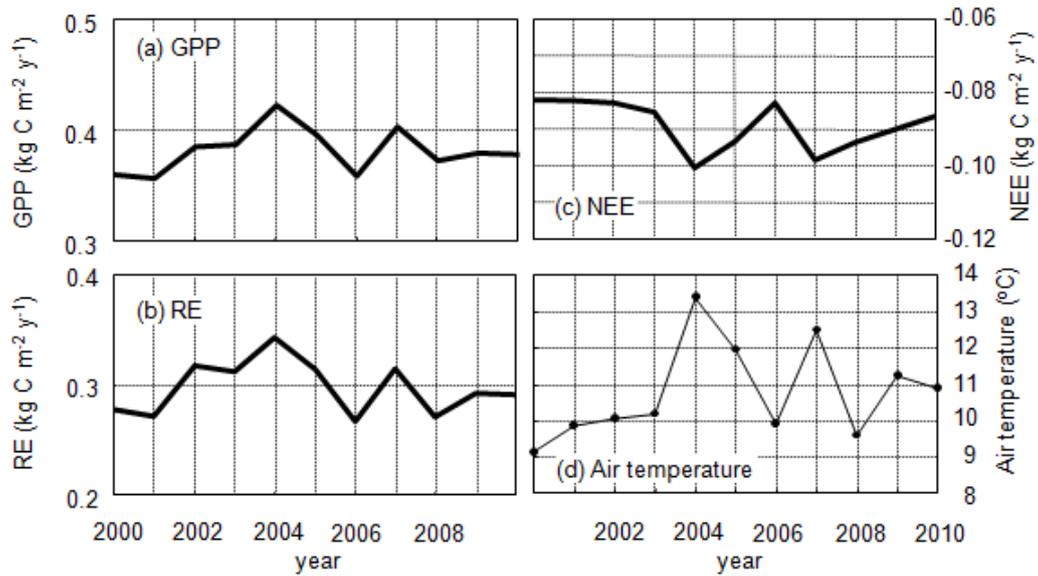
図(3)-9. SVM回帰モデルと観測値の8日平均値の(a)GPP、(b)RE、(c)NEEの比較



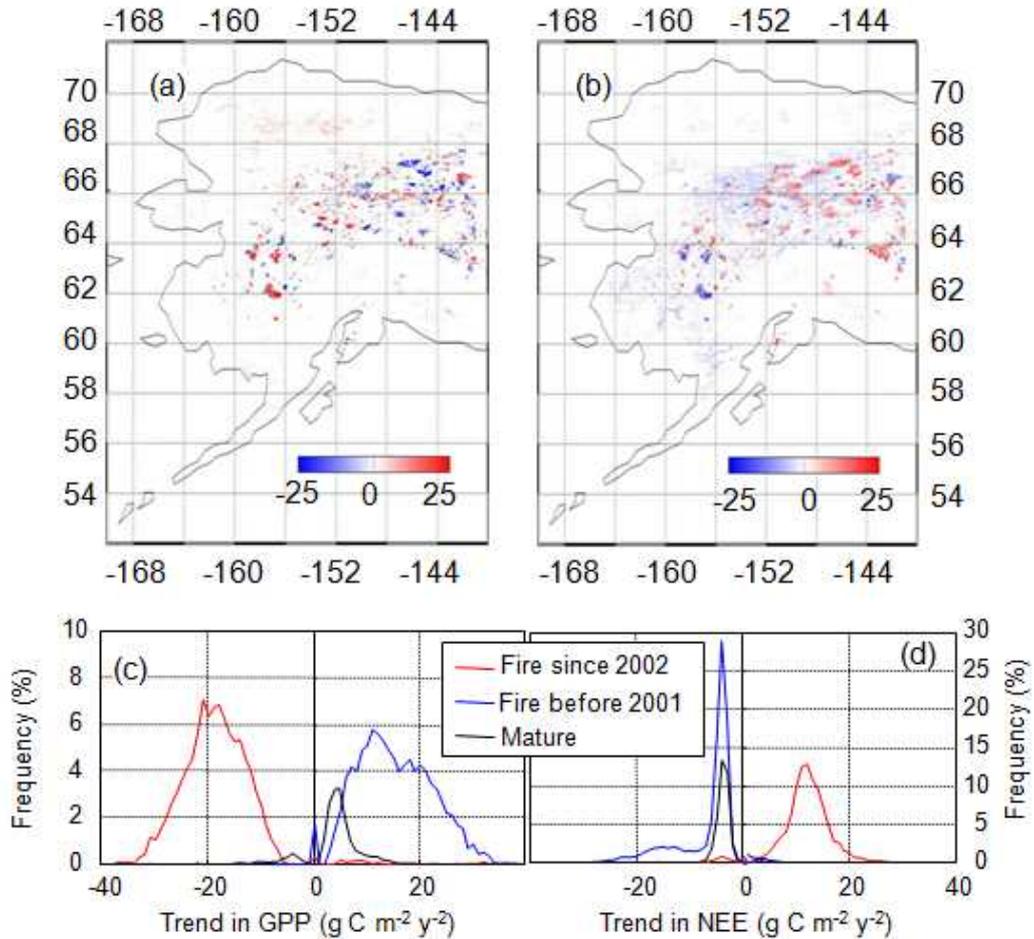
図(3)-10. SVM回帰モデルと観測値の空間平均値の(a)GPP、(b)RE、(c)NEEの比較



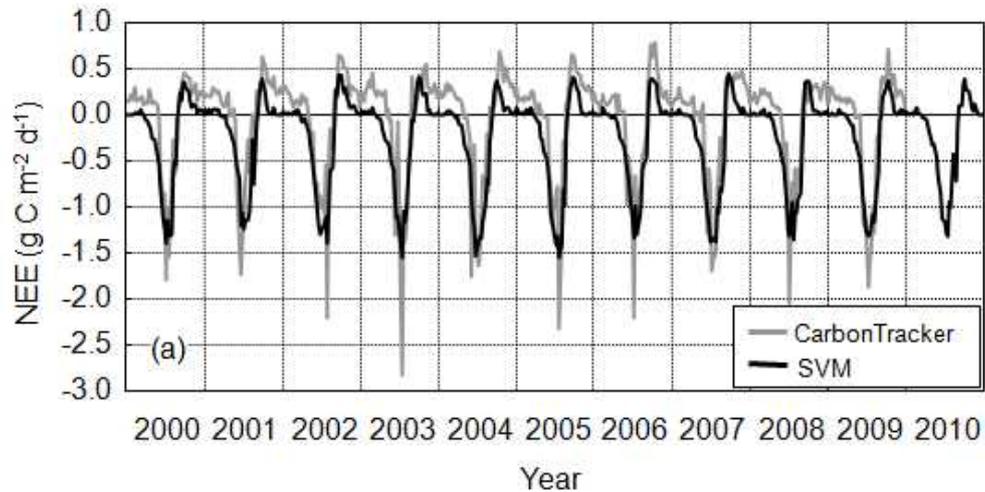
図(3)-11. SVM回帰モデルによる2000年～2010年における(a)GPP、(b)RE、(c)NEEの平均値の空間分布



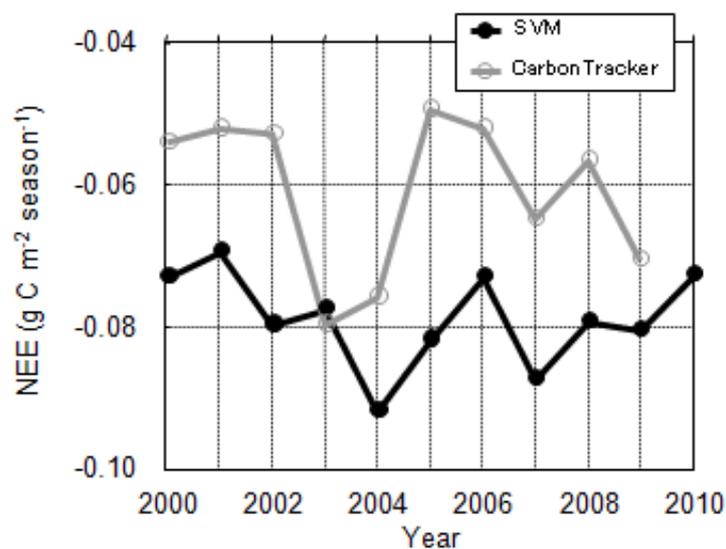
図(3)-12. SVM回帰モデルによる(a)GPP、(b)RE、(c)NEE、および(d)気温の空間平均値



図(3)-13. 2000年～2010年における(a)GPPと(b)NEEの直線トレンド($\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-2}$)の空間分布、及び(c、d)頻度分布。(c)(d)において、“Fire since 2002”は2002年以降に火災の発生したグリッドのみを集計した結果、“Fire before 2001”は2001年以前に火災の発生したグリッドのみを集計した結果、“Mature”は火災の履歴が検出されなかったグリッドのみを集計した結果である。



図(3)-14. SVM回帰モデルとCarbonTrackerによるアラスカ域の平均NEE



図(3)-15. SVM回帰モデルとCarbonTrackerによるアラスカ域の平均NEE
(生育期間(通日145-281)積算値)の年次変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・アジア域におけるマルチモデル-データ比較実験のフレームワークを構築することができ、アジアにおける陸域炭素収支の見積もりを行うことができた。
- ・現状の大気インバースモデルにおいても、陸域炭素収支の経年変動については、モデルなどと一貫した結果を示しており、双方の手法が一定の妥当性があることを示唆していると考えられる。
- ・アラスカ域における近年の陸域炭素収支の変動においては、森林火災が非常に重要な役割を

果たしていることが明らかになった。これは、既存の説として、温暖化が植生成長を引き起こすことによる吸収量の増加説と異なる解釈であり、科学的には興味深い。

(2) 環境政策への貢献

- ・アジアの陸域炭素循環の見積もり自体は、温室効果気体の吸収能力を見積もることとなり、値自体が温暖化対策などの参考値として利用が可能である。
- ・GOSAT衛星において、さらに陸域炭素循環の推定精度が向上すれば、より陸域炭素循環の推定値を制約することができると思われ、将来の温暖化防止のための政策立案の材料となる。
- ・陸域での温室効果気体吸収能力の把握には、森林火災などの攪乱の効果を考慮することが必要であることが分かった。従って、陸域での炭素吸収量の推定の向上のためには、攪乱のデータの構築が必要であることが分かった。

6. 国際共同研究等の状況

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.

GOSAT研究公募における研究提案として採択された国際共同研究（無償）。この中で、共同研究者として研究に従事している。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。

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PI: 平野高司 (北海道大学大学院農学研究科 教授、中国側PI: Prof. Guirui Yu 中国科学院、韓国側PI: Prof. Joon Kim ソウル大学。

日中韓のアジア域3カ国間の陸域炭素循環解明のための国際共同研究。モデル比較・データ統合のグループに所属し、アジア域のモデル比較・構築解析に貢献を行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

（２）口頭発表（学会等）

1) 植山雅仁、市井和仁、岩田拓記、原菌芳信：日本農業気象学会2011年度全国大会、鹿児島市。（2011）

“北方林炭素収支の広域化における森林火災の重要性”

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

（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

８．引用文献

- 1) Piao S., Ciais P., Lomas M., Beer C., Liu H., Fang J., Friedlingstein P., Huang Y., Muraoka H., Son Y., Woodward I. (2011) Contribution of climate change and rising CO₂ to terrestrial carbon balance in East Asia: A multi-model analysis. *Global and Planetary Change* 75, 133-142.
- 2) Chapin III F.S., Sturm M., Serreze M.C., McFadden J.P., Key J.R., Lloyd A.H., McGuire A.D., Rupp T.S., Lynch A.H., Schimel J.P., Beringer J., Chapman W.L., Epstein H.E., Euskirchen E.S., Hinzman L.D., Jia G., Ping C.L., Tape K.D., Thompson C.D.C., Walker D.A., Welker J.M. (2005) Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, 310, 657-660.
- 3) Randerson J.T., Liu H., Flanner M.G., Chambers S.D., Jin Y., Hess P.G., Pfister G., Mack M. C., Treseder K.K., Welp L.R., Chapin F.S., Harden J.W., Goulden M.L., Lyons E., Neff J.C., Schuur E.A.G., Zender C.S. (2006) The impact of boreal forest fire on climate warming. *Science* 314, 1130-1132.
- 4) Goetz A. J., Bunn A. G., Fiske G. J., Houghton R. A. (2006) Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102, 13521-13525.
- 5) Kasischke E.S., Turetsky M.R. (2006) Recent changes in the fire regimes across the North American boreal region - Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophysical Research Letters* 22, L09703. [doi: 1029/2006GL025677]
- 6) Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C., Wisniewski J. (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263, 185-190.

- 7) Ueyama M., Harazono Y., Kim Y., Tanaka N. (2009) Response of carbon cycle to in sub-arctic black spruce forests to climate change; Reduction of a carbon sink related to the sensitivity of heterotrophic respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 582-602.
- 8) Yang F., Ichii K., White M., Hashimoto H., Michaelis A.R., Votava P., Zhu A.X., Huete A., Running S., Nemani R.R. (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.
- 9) Sasai T., Ichii K., Nemani R.R., Yamaguchi Y. (2005) Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model "biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data" (BEAMS). *Journal of Geophysical Research* 110, G02014, doi:10.1019/2005JG000045.
- 10) Potter C.S., Randerson J.T., Field C.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A., Klooster S.A. (1993) Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 811-841.
- 11) Thornton, P.E., Law B.E., Gholz H.L., Clark K.L., Falge E., Ellsworth D.S., Goldstein A.H., Monson R.K., Hollinger D., Falk M., Chen J., Sparks J.P. (2002) Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needle forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 113, 185-222.
- 12) Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M., Thonicke, K., Venevsky, S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model. *Global Change Biology* 9, 161- 185.
- 13) Cox, P.M. 2001. Description of the "TRIFFID" Dynamic Global Vegetation Model, Hadley Centre technical note 24, Met Office Hadley Centre Technical Notes.
- 14) Peters W., Jacobson A.R., Sweeney C., Andrews A.E., Conway T.J., Masarie K., Miller J.B., Bruhwiler L.M.P., Petron G., Hirsch A. I., Worthy D.E. J., van der Werf D.E. J., Randerson J.T., Wennberg P.O., Krol M.C., Tans P.P. 2007. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 18925-18930.
- 15) Ueyama M., Iwata H., Harazono Y., Euskirchen E.S., Oechel W.C., and Zona D. (submitted) Growing season and spatial variations of carbon fluxes of Arctic and boreal ecosystems in Alaska. *Ecological Applications*, 投稿中.
- 16) Onogi K., Tsutsui J., Koide H., Sakamoto M., Kobayashi S., Hatsushika H., Matsumoto T., Yamazaki N., Kamahori H., Takahashi K., Kadokura S., Wada K., Kato K., Oyama R., Ose T., Mannoji N., and Taira R. (2007) The JRA-25 Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 85, 369-432.
- 17) Huete A., Didan K., Miura T., Roderiguez E.P., Gao X., and Ferreira L.G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213.

- 18) Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., and Running S.W. (2002) Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83, 214-231.
- 19) Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.L. (2002) Validation of the land surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 83, 163-180.
- 20) Fleming M. (1997) A statewide vegetation map of Alaska using phenological classification of AVHRR data. Proc. Second Circumpolar Arctic Vegetation Mapping Workshop and the CAVM-North America Workshop, Anchorage, Alaska, U.S. Geological Survey, 25-26.
- 21) Taylor K.E. (2001) Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research* 106, 7183-7192.
- 22) Ichii K., Kondo M., Lee Y.H., Wang S.Q., Kim J., Ueyama M., Lim H.J., Shi H., Suzuki T., Ito A., Ju W., Huang M., Sasai T. et al. (submitted) Site level model-data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEastAsia eddy-covariance observation network: Toward future modeling efforts. *Journal of Forest Research*.
- 23) Ueyama M., Ichii K., Iwata H., Euskirchen E.S., Zona D., Harazono Y., Iwama C., Oechel W., Rocha A.V. (submitted) Upscaling terrestrial carbon dioxide balance in Alaska with satellite remote sensing based on support vector machine approach.
- 24) Zimov S.A., Zimova G.M., Daviodov S.P., Daviodova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V. (1993) Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect. *J. Geophys. Res.* 98, 5017-5023.
- 25) Kim Y., Ueyama M., Nakagawa F., Tsunogai U., Harazono Y., Tanaka N. (2007) Assessment of winter fluxes of CO₂ and CH₄ in boreal forest soils of central Alaska estimated by the profile method and the chamber method: a diagnosis of methane emission and implications for the regional carbon budget. *Tellus* 59B, 223-233.
- 26) Moffat A., Papale D., Reichstein M., Hollinger D.Y., Richardson A.D., Barr A.G., Beckstein C., Braswell B.H., Churkina G., Desai A.R., Falge E., Gove J.H., Heimann M., Hui D., Jarvis, A.J., Kattge J., Noormets A., and Stauch V.J. (2007) Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 147, 209-232.
- 27) Houweling S., Aben I., Breon F.M., Chevallier F., Deutscher N., Engelen R., Gerbig C., Griffith D., Hungershofer K., Macatangay R., Marshall J., Notholt J., Peters W., Serrar S. (2010) The importance of transport model uncertainties for the estimation of CO₂ sources and sinks using satellite measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 9981-9992.

Refinement of Terrestrial Biosphere Models and its Downscaling Using GOSAT Satellite Data

Principal Investigator: Kazuhito ICHII

Institution: Fukushima University

1, Kanayagawa, Fukushima, 960-1296, JAPAN

Tel: +81-24-548-5256 / Fax: +81-24-548-5256

E-mail: ichii@sss.fukushima-u.ac.jp

Cooperated by: Nagoya University, Osaka Prefecture University

[Abstract]

Key Words: GOSAT, Terrestrial carbon cycle, Model, Optimization, Remote sensing

Estimation of carbon budget in terrestrial ecosystem associates with difficulties due to complex entanglement of physical and biological processes: thus, the terrestrial carbon budget estimated from simulation often differs among models. In addition to complexity of the system, validation can only be conducted in a point scale since reliable observation is only available from ground observations. With a lack of large spatial data, extension of model simulation to a global scale results in large uncertainty in the future carbon balance and climate change. Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT), launched in January, 2009, is the 1st operational satellite promised to deliver the terrestrial carbon budget at sub-continental scales. Using that information, the terrestrial ecosystem model is expected to improve: hence, gives a better estimation of the terrestrial carbon budget at both global and regional scales.

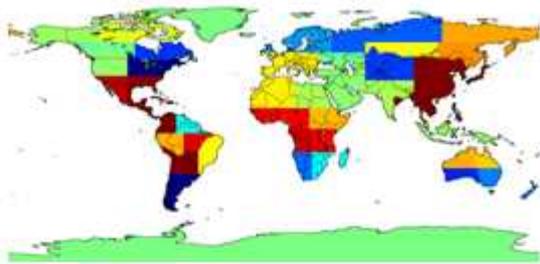
The present study was conducted in three processes: downscaling sub-continental scale carbon budget into finer gridded resolutions, application of the gridded carbon budget estimations to refine a terrestrial ecosystem model using parameter optimization schemes, and estimation of regional carbon cycles.

In the first phase of the experiment, downscaling of sub-continental estimation of carbon budget was attempted by merging empirical model based estimation and GOSAT L4A data. It was verified that the downscaled products provide spatial estimation of carbon budget at a fine scale. Then, the gridded estimation of carbon budget was applied to optimize model parameters. We found that these spatial data help to improve the model's overall reproducibility.

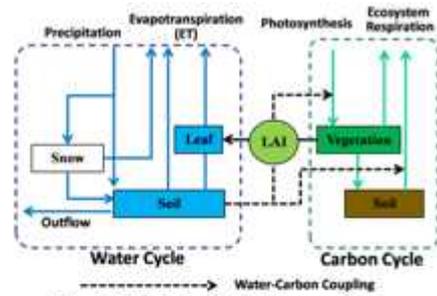
Finally, the regional analyses were conducted to evaluate terrestrial carbon budget in Asia and Alaska with synthesizing available models and data.

The GOSAT product is expected to have higher accuracy since it uses global CO₂ observations. Therefore, with the application of GOSAT data, a better estimation of terrestrial carbon cycle can be achieved with optimization. It is anticipated to carry out more detailed analysis upon the arrival of finalized GOSAT product and to verify the reduction in the uncertainty in the future carbon budget and the climate change with the calibrated models, which can be the major contribution from GOSAT.

We also pointed out the requirement of other spatial data such as biomass, soil carbon, and forest age to better simulate terrestrial carbon cycles. The simultaneous use of multiple satellite-based products such as continuous GOSAT product, biomass estimation, and other carbon and water budget estimation will improve terrestrial carbon cycle modeling significantly.

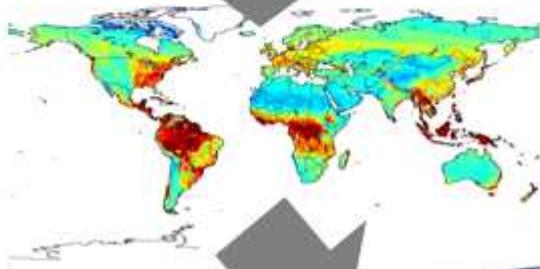


GOSATデータ(大気-陸CO₂収支)

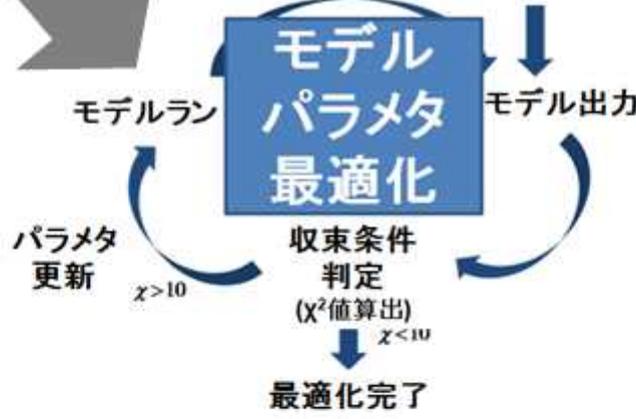


陸域炭素循環モデル

ダウンスケール



観測データ



陸域炭素循環
モデル改善

