【2-1401】統合的観測解析システムの構築による全球・アジア太平洋の炭素循環の変化の早期検出（H26～H28 累計予算額 177,463 千円）
研究代表者　三枝　信子（国立研究開発法人国立環境研究所）

１．研究実施体制

（１）統合的観測解析システムの設計と全球・アジア太平洋の炭素収支評価に関する研究（国立研究開発法人国立環境研究所）
（２）統合的解析システム構築に向けた、大気輸送モデルとデータ同化手法の最適な融合に関する研究（国立研究開発法人海洋研究開発機構）
（３）航空機データの最適化と同化技術を用いたCO2解析手法の開発（気象庁気象研究所）
（４）統合された陸域観測データに基づく炭素収支空間分布の検証とホットスポット推定に関する研究（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

２．研究開発目的

GOSATや航空機を利用したCO2の地球規模での観測、アジア太平洋での炭素収支観測において我が国が持つ研究基盤の優位性を活かし、観測データのもつ情報を最大限に活かす統合的観測解析システムを構築する。そのための観測データの整備、解析システムの開発改良、炭素収支評価の高精度化を行う。開発される解析システムは、本研究終了後も、全球炭素循環の変化を検出するために複数の研究機関が手法を共有し、GOSAT-2 データ利用研究への応用をはじめ、オペレーショナルに利用可能なものとして、将来にわたり新規事実の発見と将来予測向上のために活用する。

そのために、これまでに複数の研究グループが開発改良してきた複数の大気輸送モデル（NIES-TM、NICAM-TM、ACTM等)、インバージョン・データ同化手法（シンセシスインバージョン法、4次元変分法、アンサンブルカルマンフィルタ等）の適用可能性を比較検討し、トップダウン手法による温室効果ガス収支の高精度評価、各種パラメータの自動設定が可能でかつ長期安定運用できるシステムとして最適な組み合わせを策定する。次に、衛星観測では雲による欠測の多い東南アジア等で特に有効性を発揮する航空機観測（CONTRAIL）について観測データを強化すると同時に、その時空間的な不均一性の影響を最小限にするための最適化手法を開発改良する。さらに、複数のトップダウン手法により全球・アジア太平洋の炭素収支の評価を行い、その結果を陸域観測データ、衛星データ、経験モデル、プロセスモデル等を用いた複数のボトムアップ手法による結果と比較し不確実性の評価を行う。さらに、近年の環境変動の影響を受け、CO2 収支の変化が大きいと推定される地域（炭素循環のホットスポット）の検出を行う。

３．本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

サブテーマ（1）では、温室効果ガス観測において世界的にも深刻な空白域であるアジア太平洋において、航空機観測（CONTRAIL）の観測を強化することにより、例えば地表での農耕地を含む植生によるCO2吸収や森林火災等による大規模放出源の情報を良好に含むCO2濃度データを大きく充実させた。特に、東南アジア地域はこれまでは非常に限られた観測例があるのみで、地表・上空を含めてCO2濃度の変動は未解明の部分が大きかった。本研究を通して取得した充実したデータによって、バンコックやシンガポール、ジャカルタ上空を含むCO2濃度の季節変動の特性を初めて明瞭に示すことができた。これはトップダウン手法によるアジア太平洋の炭素収支の解明を進め、特にアジア太平洋におけるCO2収支の高精度評価を可能にする上での大きな進展である。

サブテーマ（2）が取り組んだインバージョン解析に関しては、CONTRAIL による観測データを再現できないフラックスをアンサンブル解析から除外したことにより、得られた推定値はより信頼できる

ものとなった。実測値を用いたフラックスデータのスクリーニングは従来のアンサンブル解析ではほとんど行われていないものであり、本研究の新規的手法の一つである。一方、依然として中国の化石燃料消費・セメント生産による CO_2 のボトムアップインベントリに大きな不確実性が伴っており、この補正方法として、本研究で開発した CH_4 インバージョンと CO_2 インバージョンの結果を組み合わせた新たな解析手法を提示した。これにより、先験情報として使用する東アジアの化石燃料消費・セメント生産由来の排出量は2002年以降過大評価されており、これを補正すれば、インバージョンのアンサンブル解析から推定された近年の東アジアでの陸域生物圏による吸収量増大はみられないという新たな見解を示した。また、長寿命気体である CO_2 を領域モデルで計算するには、領域外からの流入の考慮が不可欠であるが、本研究で開発したシステムでは、全球モデルのACTMを領域モデルのWRF-VPRMを組み合わせることでこの問題を解決し、3kmの高空間分解能での数値実験を可能とした。

サブテーマ（3）が開発した4次元変分法に基づく新たなインバージョンシステムは、従来よりも飛躍的に時空間解像度の高い CO_2 フラックス推定を行うことに成功した。これにより、スケールギャップによって今まで困難であったインバージョン（トップダウン手法）によるフラックス推定値と陸域生態系モデル等（ボトムアップ手法）によるフラックス推定値との直接比較が容易になり、CO_2 フラックスメカニズムの理解向上に資する詳細な解析が可能となった。これは、地球温暖化予測において大きな不確定性要因となっている気候−炭素循環フィードバックのモデル高精度化にも繋がる成果である。さらに、大都市からの人為起源排出や森林火災など、小スケールの CO_2 フラックス変動の検出や監視にも、本システムで得られる高解像度 CO_2 フラックスは有効な情報を与えることが確認された。その結果、今後、不確実性の大きい開発途上国等による人為起源 CO_2 排出量や、エルニーニョの影響を受けてインドネシア等で発生する大規模森林・泥炭火災による CO_2 排出量の推定にも大きく貢献することが期待される。

サブテーマ（4）が取り組んだトップダウン手法・ボトムアップ手法の相互比較を通して、過去約30年の時間スケールにおける CO_2 収支の変動が両手法で一貫していることを示し、またその変動要因を明らかにした。これはIPCC第5次評価報告書(2013年)の段階でトップダウン・ボトムアップの不一致が提示されていたことに比べ、本研究により CO_2 収支評価がより信頼できるものになったことを示し、この分野の研究が大幅に進展したことを表している。特に、土地利用変化の影響を適正に加味して CO_2 収支を評価することの重要性が強調された。また、本解析により、シベリア、東アジア、東南アジア、南アジアなどの地域別の CO_2 収支を、トップダウン・ボトムアップ手法に基づき不確実性の幅を確認すると同時に整合的に評価できることを示した。さらに、最近の環境変化に伴い陸域炭素収支を大きく変化させている地域（ホットスポット）を抽出した。特に、2015年におけるエルニーニョの影響で発生した大規模森林火災に伴う CO_2 放出など、速報性が必要な現象についても衛星データなどを駆使することで検出可能になったことを示した。

当該研究分野においては、本研究開始前にも、温室効果ガスの観測分野でも、大気輸送モデルやインバージョンシステムの開発改良の分野でも、個人単位、個々の研究機関単位の研究としては国際的に高いレベルの研究が蓄積されてきた。しかしこれまでは、これらの複数の研究機関が協力し、共同で解析システムを開発し、多様な観測データをそこに統合し、炭素循環の変動把握を将来にわたり実施することを可能にする総合的な取組は計画されてこなかった。GOSATのデータ配信が順調に行われ、衛星による温室効果ガスのデータ解析に世界中の研究機関が着手できるようになった今、米国・欧州においても本研究と同様の研究計画が既に実行に移されていることから、本研究開発課題全体が、サブテーマ間で強く連携して統合的観測解析システムを構築し、それを本研究開発課題終了後も継続するための道筋をつけたことは、日本の研究機関が将来にわたり当該分野の研究を先導していく上で大きな進展となった。

(2)環境政策への貢献（研究代表者による記述）

＜行政が既に活用した成果＞

1) 文科省第6期地球観測推進部会（第8回）にて、本研究の成果である地上・航空機・衛星観測等に基づく温室効果ガス観測・解析の取組について説明し、地球観測に関する各省庁の取組に関する資料作成に貢献した（平成28年12月8日）。

2) GEO（地球観測に関する政府間会合）活動の一環として、第9回GEOSSアジア太平洋シンポジウム（東京、平成29年1月11～13日）にて「GEO炭素及び温室効果ガスイニシアティブ」分科会を共同議長として開催し成果を普及すると同時に、会議のまとめであるTokyo Statement 2017の策定に貢献した（UNFCCCやIPCC国別温室効果ガスインベントリ報告の枠組において、現場観測と衛星観測による炭素循環と温室効果ガスに関連した観測の使用を提唱するとの内容が盛り込まれた）。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

1) 国際的に有望なCO_2観測であるGOSATやCONTRAILと先進的なモデル・同化技術を有機的に融合させる道筋をつけることができた。本研究で開発されインバージョンシステムは、環境省−国立環境研究所−宇宙航空研究開発機構が推進する衛星観測プロジェクト・温室効果ガス観測技術衛星-2号（GOSAT-2）のフラックス（L4）プロダクトの作成に用いられる見込みである。今後の温暖化対策の国際的枠組み「パリ協定」の効果検証に際し、本システムで得られる高解像度のCO_2収支の推定値は有用な情報を与えるものである。

2) 本研究の成果は、今後発行されるIPCC各特別報告書、第6次評価報告書(AR6)、IPCC国別温室効果ガス排出インベントリガイドラインの改訂等に対し、重要な科学的インプットとして行うことが見込まれる。特に、インバージョン解析に基づくCO_2フラックスの結果は、Asia-Pacific Network for Global Change Research (APN) の国際プロジェクト"Greenhouse gas inversion inter-comparison for Asia"に提供され、複数のインバージョンのアンサンブル解析に基づき、より確からしいアジア域のCO_2収支を推定したことにより、IPCC及びグローバル・カーボン・プロジェクトなどの国際アセスメントへの貢献が期待できる。また、複数のトップダウン・ボトムアップ手法の統合解析に基づく全球及びアジアのCO_2収支推定の成果は、2013年に発行されたAR5に比べて大きく進展した内容となっており、AR6への貢献が期待できる。IPCCへの貢献に向けて、2019年IPCC国別温室効果ガス排出インベントリガイドラインの改訂において、本研究開発課題分担者であるマクシュートフは、Lead Author（主執筆者）として既に任命を受け、本研究の成果を生かして科学的内容に責任のある役割を果たす予定である。また、代表者である三枝は、IPCC特別報告書Climate Change and Landのスコーピング会合に参加し、本研究の成果を生かしてアウトライン策定に貢献している。

3) 2019年に発行予定のIPBES（The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services; 生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム)評価報告書（グローバルアセスメント）に対し、本研究の成果に基づく重要な科学的インプットが見込まれる。特に、本研究分担者である市井は、第2章Nature における統括執筆責任者に既に任命されており、報告書全体を統括する役割を果たすと同時に、グローバルな観点から陸域生態系に大きな変動が起こる地域（ホットスポット）の抽出・解析のまとめを担当する予定である。

４．委員の指摘及び提言概要

ボトムアップ手法・トップダウン手法にそれぞれ取り組み、相互比較を行った結果、IPCC 第五次評価報告書の段階より改善された。炭素収支の推定において土地利用変化の影響をより詳細に含める必要性を突き止め、メタンの 2007 年以降の増加の原因が反芻動物の数の増加に対応することを示し、またエルニーニョが森林火災に及ぼす影響の解析を可能にするなど新しい知見を見出している。東南アジアの都市部における CO2 濃度の変動を航空機観測（CONTRAIL）により明らかにしたことも成果であ

る。ただし、タイトルにある「早期検出」の意味が成果報告書からは読み取れない。

５．評点

総合評点：A