

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

温室効果ガスの吸排出量監視に向けた統合型
観測解析システムの確立

(2-1701)

平成29年度～令和元年度

Development of an Integrated Observation and Analysis System for Monitoring Greenhouse Gas
Sources and Sinks

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

気象庁気象研究所

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立大学法人千葉大学

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
8. 引用文献	
II. 成果の詳細	
II-1 統合型観測解析システムの設計と温室効果ガス吸排出量監視に関する研究（総括）	17
（国立研究開発法人国立環境研究所）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 同化技術を用いたメタン解析手法の開発	36
（気象庁気象研究所）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	

II-3	トップダウン推定における全炭素(CO ₂ , CH ₄ , CO)モデルシステムの開発	58
------	---	----

(国立研究開発法人海洋研究開発機構)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-4	トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析を通じた炭素収支推定の高精度化	76
------	-------------------------------------	----

(国立大学法人千葉大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

III.	英文Abstract	93
------	------------	----

I. 成果の概要

課題名 2-1701 温室効果ガスの吸排出量監視に向けた統合型観測解析システムの確立
 課題代表者名 三枝 信子 (国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター
 センター長)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費(累計額) 145,921千円

(平成29年度：49,600千円、平成30年度：46,721千円、令和元年度：49,600千円)

本研究のキーワード 地球温暖化、温室効果ガス、統合的観測解析システム、吸排出量推定、二酸化炭素、メタン、トップダウン推定、ボトムアップ手法

研究体制

- (1) 統合型観測解析システムの設計と温室効果ガス吸排出量監視に関する研究(総括)
(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) 同化技術を用いたメタン解析手法の開発(気象庁気象研究所)
- (3) トップダウン推定における全炭素(CO₂, CH₄, CO)モデルシステムの開発
(国立研究開発法人海洋研究開発機構)
- (4) トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析を通じた炭素収支推定の高精度化
(国立大学法人千葉大学)

1. はじめに(研究背景等)

地球温暖化の現状把握と将来予測の信頼性向上において、炭素循環メカニズムの解明と、気候変動に伴う炭素循環の変化の監視が必要不可欠である。近年では、「パリ協定」により各国は温室効果ガスの排出量削減に取り組むことが義務となり、国や地域ごとの吸排出量を科学的根拠に基づいて評価する手法の確立が急ぎ求められている。主要な温室効果ガスとしては二酸化炭素(CO₂)に加え、CO₂に次ぐ大きな温暖化効果をもつメタン(CH₄)が挙げられ、CO₂とCH₄は共通の排出源(石炭消費や森林火災等)を持つことから、両者を含む包括的な解析システムを構築することが最良である。

これまでに大気中温室効果ガスの観測においては、地上観測、船舶、航空機、衛星等による観測の拡充により地球規模で観測カバレッジを向上させてきた。先進国においては、温室効果ガスインベントリの整備と精度向上の取組も進められている。しかし、エネルギー消費増加の著しいアジアの途上国・新興国では、特に東南アジアや南アジアにおいて未だ深刻な観測空白域がある上に、排出量算出のためのデータが未整備、または大きな不確実性を含む地域があるのが現状である。

こうした状況の中で、地球規模の観測データを用いて温室効果ガスの地表での収支を求める手法の開発が開始されており、トップダウン手法(大気中濃度と大気輸送モデルに基づく逆解析)とボトムアップ手法(多点地表データのスケールアップ)の比較解析を観測強化と同時に進め、吸排出量推定の精度を上げる研究が近年急速に進展してきた。本研究はこれを発展させ、CO₂とCH₄を含む包括的な解析システムを構築し精度向上を図ると共に、トップダウン-ボトムアップ手法の統合解析に人為起源の独自排出量推計を加えることにより、エネルギー消費や排出係数等の不確実性にもさかのぼった評価を行い、各国のインベントリの精度向上に資する知見を得ることをめざす。

2. 研究開発目的

日本が強みを持つ大気中温室効果ガスの衛星観測や航空機観測のデータ(GOSAT, CONTRAIL等)、及び既存の地上ステーションや他機関の観測データ(世界気象機関(WMO)全球大気監視(GAW), OCO-2等)を利用し、より高分解能の多項目観測(GOSAT-2, OCO-3, Tropomi等)のデータを利活用することを見据えたインバージョン(逆解析)・データ同化手法を開発する。また、地球規模、特にアジアについて人為起源の独自排出量統計を加えたボトムアップ手法の強化を行い、複数のトップダウン・ボトムアッ

ブ手法の統合解析に基づき、吸排出量の変化と空間分布の情報に基づく不確実性評価を行う。

このために、主要な温室効果ガスであるCO₂とCH₄、さらには人為・自然起源分離の情報を得るためのCOを観測対象とし、航空機観測の強化に基づき、深刻な観測空白域をもつアジアのデータカバレッジを向上させる。あわせてCO₂とCH₄の同化解析システムを開発し、COを利用した解析結果を併せた包括的な炭素収支解析を行う。これら大気輸送モデルに基づくトップダウン手法のモデル開発は複数の研究機関で進められていることから、複数のモデル解析の結果を比較し不確実性の評価を行う。さらに、人為起源の独自排出量推計や多点地上観測データに基づいてボトムアップ手法を改良し、地球規模及び地域別の温室効果ガス吸排出量の評価、ならびに不確実性評価と高精度化を行う。

3. 研究開発の方法

(1) 統合型観測解析システムの設計と温室効果ガス吸排出量監視に関する研究（総括）

深刻な観測空白域をもつアジア域での大気中CO₂、CH₄、CO濃度の観測を強化した。具体的には、主要な温室効果ガスであるCO₂とCH₄に加えてCOを観測対象とし、民間航空機を利用した温室効果ガス観測プロジェクト（CONTRAILプロジェクト）において自動大気サンプリング装置（ASE）を搭載して、アジア路線の上部対流圏における水平分布及びアジアの都市上空における鉛直分布の観測をこれまでになく充実させた。これらの観測に基づき、本研究により開発される解析システムへの入力及び検証データを整備し、サブテーマ2、3、4へ提供した。

次に、温室効果ガスの人為発生量の推定精度を向上させるため、既存のインベントリに基づく人為起源排出量グリッドデータベースを構築した。対象物質はCO₂、CH₄、CO、対象年は2000、2005、2010、2015年、対象部門は農業、農業残渣焼却、民生、発電、産業、船舶、輸送、廃棄物の8部門とした。アジア各国別の排出量には、Evaluating the Climate and Air Quality Impacts of Short-Lived Pollutants (ECLIPSE) version 5aシナリオに基づき、Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)モデルで推計された値を用いた。この国別の排出量を、地球規模大気研究のための排出量データベース (Emissions Database for Global Atmospheric Research; EDGAR) version 4.3.2の排出量データに従って空間的に分解し、水平解像度0.1度の排出量グリッドデータベースとして揃えた。構築したデータは、本研究により開発される解析システムへの入力データとして、サブテーマ2、3、4へ提供した。

さらに、これまでの研究でボトムアップとトップダウンによる排出量推計に不一致があると指摘されていた中国のCH₄排出量に着目し、ボトムアップ推計の人為起源排出量に含まれる不確実性について検討を行った。このため、グリッドデータベースに用いたECLIPSE version 5aとEDGAR version 4.3.2の他、EDGAR version 4.2FT、United States Environmental Protection Agency (US EPA)による推計値ならびに関連学術論文を抽出し、全球、アジア、中国のCH₄排出量推計の不確実性と推計方法を精査した。

このほか、本研究課題全体の成果（特にサブテーマ3と4の統合的解析の成果）を国際的に普及することを目的とした国際会議開催と、サブテーマ2で開発されたデータ同化システムを国立環境研究所の大型計算機上で実運用するための準備を行った。

(2) 同化技術を用いたメタン解析手法の開発

逆解析におけるフラックス推定値の解析誤差共分散行列を、高解像度で高精度に推定する手法の開発を行った。ここでは4次元変分法をベースとし、誤差共分散行列の対角成分のみならず非対角成分までも高精度に推定することとした。本研究では、最適化手法であるBFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm) 法を用い、逆解析特有の線型性に着目して、共役性を保つ技術を新たに導入することで、高効率で精度の高い推定アルゴリズムを開発した。さらにアンサンブル法を導入することで大規模計算機と親和性を高め、計算の収束に至るまでの実時間を大幅に短縮させることを可能とした。

次に、大気輸送モデルNICAM-TMに新たにCH₄を実装した。ここでは、OHラジカルとの反応や成層圏での消失速度は入力データとして固定し、複雑な化学反応を大幅に簡略化した。これにより、CH₄の大気輸送計算の線型性は保たれ、CO₂と同様のシステムで逆解析が可能となる。OHラジカルや成層圏の消失速度のデータは、サブテーマ3でも用いられた、国際大気輸送モデル相互比較計画 (TransCom) のCH₄実

験の値を用いた。さらに、開発したモデルの性能評価を目的として、サブテーマ1で取得された航空機観測による日本—バンコック間のサンプリングデータや気象庁の航空機観測（厚木—南鳥島間）のデータを用いて、アジア・太平洋の上空で夏季に出現するCH₄の高濃度イベントの解析を行った。

さらに、NICAM-TMに新たにCOの簡易モデルを実装し、さらにそれを逆解析システムNICAM-TM 4D-Varに組み込むことで、CO₂とCOのジョイント逆解析システムを開発した。同システムを用いて、2015年に発生したインドネシアにおける森林火災のCO₂排出に関する逆解析を行った。本研究では、CONTRAILによるCO₂濃度データを観測データとして逆解析に入力した。さらに、国立環境研究所が実施している貨物船による東南アジア域での観測（NIES-VOS）のデータを独立データとして逆解析の評価に用いた。特に、当該観測のCOの観測データを用いることにより、森林火災起源のフラックス推定値の精度が逆解析によって向上したかどうかを調べた。

加えて、気象庁の大気輸送モデルGSAM-TMをベースとした逆解析システムを用いて長期のCO₂逆解析を行った。この逆解析システムは、TransComの逆解析比較プロジェクトで用いられたsynthesis inversion法を用いて亜大陸規模の解像度でフラックス推定を行うものであり、長期逆解析の実績を有するものである。ここでは、比較的長期間同一のセンサによる観測データが得られる温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）から国立環境研究所がリトリバルした大気柱平均濃度（XC_{CO2}濃度）を解析に導入するシステムの構築に取り組んだ。

最後に、本研究で開発したNICAM-TMのCH₄モジュールをNICAM-TM 4D-Varに適用し、CH₄の逆解析を行った。解析期間は1990–2017年と設定した。フラックスの初期推定値に用いたデータはGlobal Carbon Projectによる全球CH₄排出量推定計画（GCP-CH₄）から提供されたものを基本としつつも、湿地や水田からの排出や土壌吸収については、国立環境研究所で開発改良された陸域生態系モデルVISIT

（Vegetation Integrative Simulator for Trace gases）のデータを独自に用いた。このCH₄逆解析の結果は、ボトムアップ手法との比較解析のためにサブテーマ1に提供した。CO₂の逆解析についてもCH₄逆解析と同様にNICAM-TM 4D-Varを用いて1990–2017年の期間を解析対象とした。ここではフラックスの起源毎にスケール・ファクターを設定したが、どのフラックスについても月毎の時間解像度を設定した。化石燃料起源、総一次生産量（GPP）、生態系呼吸量（RE）、森林火災起源、海洋起源の初期推定値には、それぞれCDIAC（2016）、VISIT（GPP、REともに）、気象庁海洋フラックスデータを用いた。

（3）トップダウン推定における全炭素（CO₂, CH₄, CO）モデルシステムの開発

海洋研究開発機構（JAMSTEC）で開発された大気化学モデルAtmospheric Chemistry Transport Model（ACTM）の大気輸送プロセスを担うモデル部分を更新し、改良された逆解析システムの再構築を行った（以下、MIROC4-ACTMという）。これにより、北・南半球間の物質輸送、成層圏の空気齢の推定を大幅に改善させることに成功した。

次に逆解析で用いるCO₂放出量の先験情報の違いによる影響を評価するため、異なるCO₂フラックスデータセットを用いて大気輸送モデルによるフォワード計算を2014年から2016年の期間について実施し、観測データとの比較を行った。比較に使用した観測データは、GOSATとOCO-2による全球観測データ（それぞれGOSAT ACOS b7.3、OCO-2 v7 LITE LEVEL 2）及び地上観測サイトと全量炭素カラム観測ネットワーク（Total Carbon Column Observing Network; TCCON）サイトにおける観測データである。陸域と海洋のCO₂フラックスとして次の3つのデータセットを用意した。1) ACTM_CYC64：2008年についての64領域逆解析の結果を毎年繰り返し使用したもの、2) ACTM_IAV84：84領域逆解析の結果を使用したもの、3) ACTM_IAV84+GFAS：ACTM_IAV84にGFASによるバイオマス燃焼フラックスを加えたもの。いずれのケースも化石燃料消費・セメント生産（FFC）によるCO₂排出量はEDGAR v4.2を用いた。次に、気柱平均CO₂濃度（XC_{CO2}）についてのACTMフォワード計算値とOCO-2の観測値の差を求め、単純化したマスバランス逆解析によりCO₂フラックスを推定した。さらに、得られたフラックスを本研究とは独立した2つの全球逆解析モデルの結果と比較した。

炭素を含む主要な3つの化学種（CO₂, CH₄, CO）を使った全球と領域規模の炭素収支の理解に向けて、CH₄に関する大気輸送、大気化学、地表フラックスの改善を行った。特に、最新の放出量シナリオ

を用意するとともに大気輸送モデルの精度を向上させるため、大気化学モデルACTMのオンラインモデル部分を、より新しいモデルであるNIES/CCSR/JAMSTEC AGCM MIROC4.0 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)に置き換えた。湿地と水田からのCH₄放出は、陸域生態系モデルVISITによる最新の計算結果を用いた。産業由来の人為排出と反芻動物によるCH₄放出には2017年にアップデートされたEDGAR v4.3.2、疎林や草原でのバイオマス燃焼には、最新の火災による世界温室効果ガス排出量データベース (Global Fire Emissions Database; GFED) v4sデータベース (1997-2016年)を用いた。その他の森林でのバイオマス燃焼、白アリ、沿岸海洋、泥炭火山による放出は、従来と同じTransCom-CH₄プロジェクトで使用されたデータセットを使用した。ここでは、VISITの湿地・水田からのCH₄放出量計算スキームとして、2通りのケースを用いた。MIROC4-ACTMを用いて、29年間のスピニアップのうち1988年から2016年の計算を行い、観測値との比較を行った。

本サブテーマで開発したMICRO4-ACTMによるCO₂とCH₄逆解析の結果は、全球の炭素収支 (CO₂、CH₄、COを含む) 把握を目的とした国際的な統合解析プロジェクト (Global Carbon Project) の第2回地域炭素収支評価 (Regional Carbon Cycle Assessment and Processes-2: RECCAP-2) に提供すると同時に、海外他機関が実施した逆解析の結果と比較し、不確実性の把握を行った。

(4) トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析を通じた炭素収支推定の高精度化

複数のボトムアップ手法と複数のトップダウン手法を用いて、アジアや全球における陸域CO₂収支の解析を行った。ボトムアップ手法としては、本研究で独自開発した機械学習を利用したデータ駆動型モデルによるCO₂フラックス推定手法と、複数の陸域炭素循環プロセスモデル (TRENDYモデル結果)を用いた。トップダウン手法としては、サブテーマ1～3の結果を含む複数の逆解析モデルによる結果を用いた。使用したデータリストを表1に示す。

表1 本研究課題で用いた種々の陸域炭素収支把握手法の一覧

種別	手法	データセット名	主な特徴
ボトムアップ手法	機械学習	サポートベクタ回帰	FLUXNET, AsiaFluxデータと衛星データを組み合わせた機械学習 (サポートベクタ回帰) による推定。本課題独自の推定手法。
		FLUXCOM	FLUXNET観測ネットワークデータと複数の機械学習法を利用した推定。
	プロセスモデル	TRENDY ver 2	複数の陸域プロセスモデルによる陸域生態系モデル結果を収集。
		TRENDY ver 6	複数の陸域プロセスモデルによる陸域生態系モデル結果を収集 (2017年実施のバージョン)。
衛星観測	バイオマスデータ	マイクロ波リモートセンシングデータを利用した推定で、1993-2012年、0.25度の空間分解能でデータが公開されている。	
トップダウン手法	逆解析モデル	複数モデル	複数の逆解析モデルによるCO ₂ 収支解析結果。本課題サブテーマからの結果も含んでいる。
	残余法	Global Carbon Project	大気CO ₂ 濃度の年毎の増加量から化石燃料によるCO ₂ 排出、海洋とのCO ₂ 交換量推定値からの残差を陸域CO ₂ 収支とする。全球の推定に限られる。

まず機械学習を用いたデータ駆動型モデルによるCO₂フラックス推定手法の改良を行った。本業務における大きな変更として、Ichii et al. (2017)¹⁾ (環境研究総合推進費2-1401の成果)に比較して、入力データとして利用するTerraもしくはAqua衛星搭載MODISセンサデータのバージョンを更新し (Collection 5からCollection 6にバージョンアップさせた)、CO₂フラックスに関する長期変動が変わり得るかを調査した点である。また水や熱フラックスのデータを追加することにより、アジア域やグローバルにおける蒸発散や熱収支 (長波放射、正味放射、顕熱) を算出できるようにした。

次に、環境研究総合推進費2-1401の成果である「トップダウン手法・ボトムアップ手法の統合解析を通じた東南アジアにおけるCO₂収支の過去30年間の変動把握」に対して、新たに機械学習によるCO₂収支推定結果を適用し、更なる信頼性の確認を行った。機械学習によるCO₂収支推定結果については、FLUXCOMプロダクト (本課題で開発したモデルを含む複数のデータ駆動型モデルのアンサンブル) にお

ける気候データを入力として利用するタイプの推定結果を利用した。これらに基づき、過去30年の東南アジアにおけるCO₂収支の変動要因解析を行い、データ駆動モデルと陸域炭素循環モデル（プロセスモデル）の気候感度を調査した。

また、東南アジアのCO₂収支解析に使用したプロセスモデル、逆解析モデルを全球スケールに拡張し、過去100年間における陸域CO₂収支の変動を比較した。逆解析モデルに加え、より長期の推定値を持つ残余法(表1)についても比較の対象とした。特に手法間における比較が可能な最近50年に着目し、近年におけるCO₂収支の変動傾向の把握を行い、プロセスモデルの感度実験の結果も適用することにより、CO₂収支の変動傾向の要因解析と顕著な変動のある地域の特定を行った。

最後に、CO₂収支に関する様々な手法が存在する中で、全球スケールと亜大陸スケール(今回は全球を9地域に分割した)において、大気-陸域のCO₂収支が様々な手法間でどの程度一貫しているかを調査した。2013年に出版されたIPCC第5次評価報告書における亜大陸スケールでのトップダウン・ボトムアップ手法の陸域CO₂収支推定結果を再現し、各手法で推定されるCO₂収支の意味(どのフラックスが推定に含まれていたか等)を吟味し、各手法の定義の違いを埋めるフラックス(例えば土地利用変化に伴うフラックス、河川から海への流出分)を加味することにより、どの程度両者の推定が近づくかを解析した。

4. 結果及び考察

(1) 統合型観測解析システムの設計と温室効果ガス吸排出量監視に関する研究(総括)

アジア域の大気中CO₂、CH₄、CO濃度の観測を強化するため、航空機観測(CONTRAIL)において、東京(成田または羽田)からタイのバンコックに向かう航空機に自動大気サンプリング装置(ASE)を搭載し、飛行中12箇所で大気サンプリングを行った。飛行後に、国立環境研究所においてCO₂、CH₄、COの各濃度の他、亜酸化窒素(N₂O)、六弗化硫黄(SF₆)、水素(H₂)、CO₂の安定同位体及びハロカーボン類の濃度を測定した。サンプリングは指定した緯度ごとに実施し、前半6箇所は高度10-12kmにおける水平飛行中に同空域の緯度分布を、後半6箇所はバンコックへの降下中に鉛直分布を観測するよう設定した。

図1にバンコック路線の水平飛行時における北緯30°、20°、15°ならびにバンコック上空の高度3kmにおけるCO₂、CH₄、CO及びSF₆濃度の2017年2月から2020年3月までの時系列を示す。CO₂濃度はバンコック上空ならびに上部対流圏の各緯度帯において明瞭な季節変動が観測され、その振幅はほぼ同レベルであった。また、CO濃度以外の各成分ではどの緯度帯においても経年増加が確認できる。特にSF₆濃度は観測期間中に約1pptもの増加を示し、わずか3年間で濃度が1.1倍に達したことがわかる。また、バックグラウンドの緩やかな濃度変動に比べて明らかに高い濃度を示す観測値は地域的な放出源の影響を強く受けていると考えられ、本研究により、これまで深刻な観測空白域であり大気循環メカニズムも未解明であったアジア地域において、大気循環をより正確に把握しモデルの精度を向上する上で、これまでにない貴重なデータが得られた。

続いて、これまで不確実性が特に高いと考えられてきた東アジアのCH₄排出量に関し、インベントリの精度を確認するために、Peng、GAINS、EDGAR version 4.3.2にEDGARのversion 4.2FTを加えた4種類のボトムアップのデータベースによる中国の全部門、ならびに炭鉱、家畜、稲作からのCH₄排出量の推移を求めた。図2に、サブテーマ2で開発されたNICAM-TM 4D-Varによる1990~2018年の中国における逆解析の前後のデータと、ボトムアップデータベースの稲作以外の人為発生源からのCH₄排出量の推移を示す。炭鉱、家畜別の排出量の推移についても併せて示す。ここで示すIPCCの値は炭鉱と家畜のみを対象に排出量を推計したものである。逆解析前に比べて逆解析後は排出量が減少し、増加傾向が緩やかである。炭鉱と家畜に分けて見ると、炭鉱からの排出量は石炭産出量の増加により2000年以降増加傾向にある。ただし、EDGARのversion 4.2FT、4.3.2、5.0と更新されるにつれ、排出量は徐々に減少する結果となっている。一方、家畜からの排出量には年に対する増加傾向は見られない。EDGARよりもPengの方が多く、IPCCも改訂によりPengにより近い推計結果となっている。ボトムアップインベントリとトップダウン(逆解析)による空間分布の特徴に加え、これらの時系列の特徴から、炭鉱からの排出量は過大評価、家畜からの排出量は過小評価であることが示唆された。この結果は、従来のインベントリ推計手法に改良の必要性があることを示す知見である。

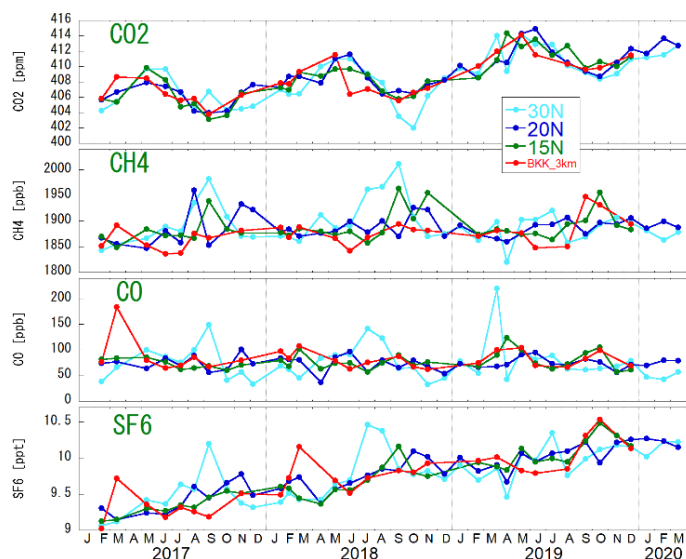


図1 バンコック路線上の北緯30°（水色）、20°（青）、15°（緑）及びバンコック上空3km（赤）で観測されたCO₂、CH₄、CO及びSF₆濃度の時系列。

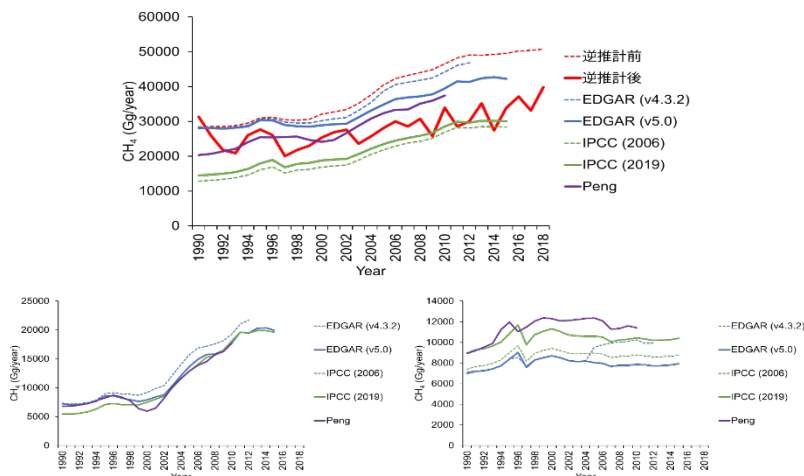


図2 1990～2018年の中国における逆推計（逆解析）前後と各データベースの稲作以外の人為発生源（上）及び炭鉱（左下）、家畜（右下）別のCH₄排出量の推移

また、サブテーマ1では、サブテーマ2で開発されたデータ同化システム（NICAM-TM 4D-Var）をGOSAT-2プロジェクトにおける全球CO₂・CH₄収支（レベル4プロダクト）の運用に応用するため、同システムを国立環境研究所が有する大型計算機へ移植した。システムの動作確認を実施すると共に、既存のGOSAT観測データを使用したモデル実験を行い、GOSAT-2プロジェクトにおいて同解析システムを用いて実運用するための準備を完了した。

さらに、サブテーマ3と4が主導したCO₂・CH₄収支の総合的評価の結果を総括し、成果の国際的普及をはかるため、Global Carbon ProjectにおけるRECCAP-2プロジェクトの一環として、2019年3月18～21日に静岡県御殿場市において国際会議を開催した。国内外の第一線の専門家（17カ国、約55名、IPCC第6次評価報告書の代表執筆者等複数含む）を招聘し本研究全体の成果である観測データ、モデル解析データ、複数の手法に基づく統合解析によって得られた知見を検討し、論文取りまとめに向けた議論を行った。得られた成果は、サブテーマ3と4の報告に詳細に記載されている。

（2）同化技術を用いたメタン解析手法の開発

包括的な温室効果ガス収支の推定を行うため、データ同化技術を用いてCO₂とCH₄の複合的な解析を行う高解像度逆解析システムを開発した。はじめに、開発した大気輸送モデルのCH₄輸送計算性能が高水

準であることを確認するため、サブテーマ1で得られた航空機観測データを用いた観測との比較解析を行うとともに、夏季に観測された高濃度イベントをもたらす輸送経路と地表面フラックスの寄与分布を求めた。モデルは、特に空間解像度を高めた設定で、観測された高濃度イベントを良好に再現することを確認した。さらに、明らかとなった高濃度に対するフラックス寄与分布から、サブテーマ1の航空機観測と高解像度モデルを用いることで、今まで困難であった中国や南アジア域等、大陸内部の地表発生源推定の不確定性を低減できる可能性が示された。(図3)。

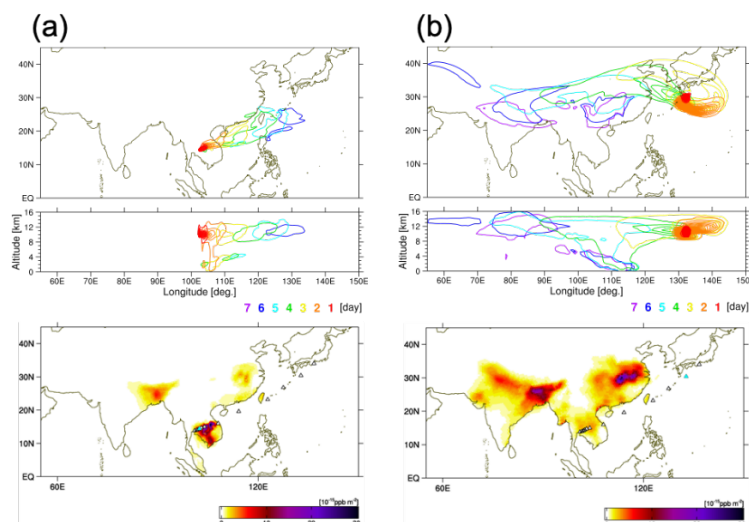


図3 NICAM-TMのアジョイント・モデルによって計算された高濃度イベントに対する逆追跡の結果。上段、中段はそれぞれ、高濃度空気塊の輸送経路（色で観測日までの時間を示す）の水平、鉛直断面図を示す。下段は濃度上昇に対する地表面フラックスの寄与度（フットプリント×フラックス）を示す。(a)、(b)はそれぞれ2017年9月12日における15° N付近、30° N付近での観測に対する結果を示す。

次に、本研究で開発・改良されたNICAM-TM 4D-Varによる長期CH₄逆解析で得られたCH₄フラックスの解析値と初期推定値からの差を図4に示す。ここでは解析期間の後半の10年間（2008-2017）の平均を示すが、解析期間の前半も傾向は一致しており、(a)中国、ヨーロッパのフラックスが通年で下方修正（特に中国が顕著）、(b)北米ハドソン湾周辺のフラックスが下方修正（特に秋から冬にかけての時期（9-11月））、(c)アメリカ南部のフラックスが上方修正、(d)夏季（7-8月）の西シベリアのフラックスが上方修正、といった変化が逆解析で得られた。(a)や(c)については、同じEDGARのフラックスデータを初期値として用いた先行研究と同様の傾向であり、ボトムアップ・アプローチによる化石燃料採掘等の人為起源フラックス推定値に大きな不確定性が存在することを示唆し、サブテーマ1で得られた知見と一致する。一方、(b)は、実際の湿地起源フラックスの季節変化が、初期推定値として用いたVISITが示すものと異なることを示している。

図5に全球のCH₄フラックスと、そのうちの化石燃料からの排出を主とする人為起源、また湿地起源のフラックスの年々変化を示す（なお、これら、人為起源、湿地起源のフラックスは合計のフラックスの大部分を占めていることに留意）。この図から逆解析によって、人為起源フラックスがやや下方修正され、一方で、湿地起源は上方修正されたことがわかる。また、初期値で示されていた2002年頃からの人為起源フラックスの上昇傾向は逆解析でも同程度に示されており、一方で、湿地起源の年々変動は初期値よりも大きなものとなった。これらのトレンドや年々変動のパターンは、それぞれの起源について初期値の年々変動を固定した場合（人為起源であれば2005年のものに固定、湿地起源であれば気候値に固定）でも、多少の変動幅に違いはあるものの、再現された。このことから、これらのフラックス変動は初期値だけでなく観測データからも抽出されうる情報であることが示唆された。

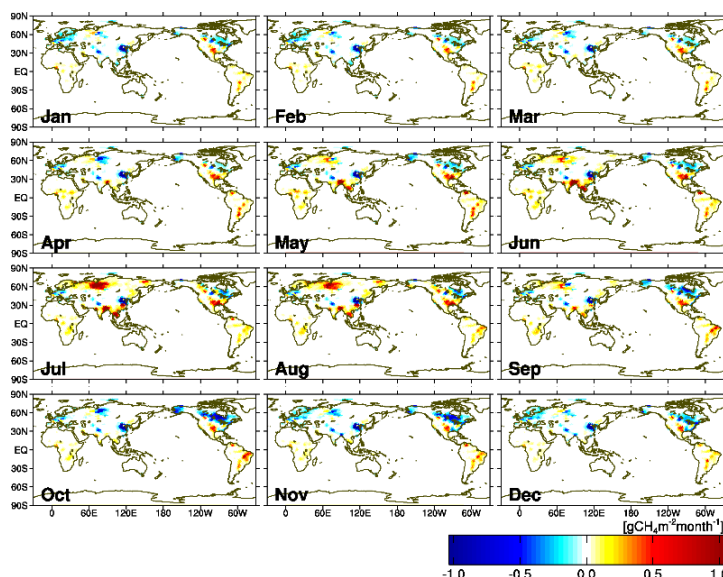


図4 NICAM-TM 4D-VarによるCH₄逆解析によるCH₄フラックスの解析値と初期推定値からの差。各月に対する2008-2017年間の平均を示す。逆解析によって推定値が増加したものを黄色-赤、減少したものを水色-青で示す。

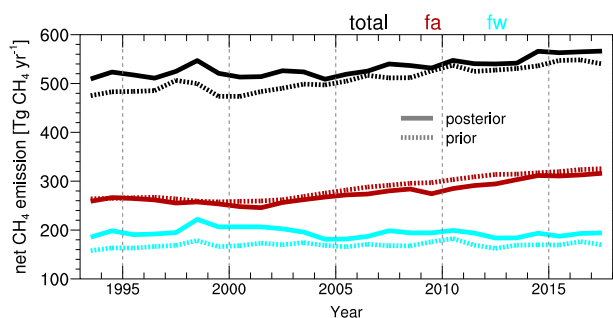


図5 全球のCH₄フラックス（黒）とそのうちの化石燃料からの排出を主とする人為起源（赤茶）、湿地起源（水色）のフラックスの年平均値。点線は初期推定値、実線は逆解析による結果を示す。

(3) トップダウン推定における全炭素(CO₂, CH₄, CO)モデルシステムの開発

本研究で開発したMICRO4-ACTMの結果は、Global Carbon Projectによる全球のCO₂収支の把握を目的とした国際的な統合解析に重要な貢献を果たした。図6は、複数のボトムアップモデル（プロセスモデル）とトップダウンモデル（逆解析モデル）による全球の陸域と海洋のCO₂収支の年次変化を示す。MICRO4-ACTMを含む4種の逆解析モデルは、2008年-2017年の期間で、陸域と海洋によるCO₂収支量を4.7から5.0 PgC/yearと推定した。30°以南では、逆解析モデルは陸域と海洋のCO₂吸収量を1.6-1.7 GtC/yearと推定し、これはプロセスモデルによる推定値1.4±0.7 PtC/yearと類似であった。一方、30°以北においては、逆解析モデル（2.6から3.6 PgC/year）とプロセスモデル（2.2±0.6 PgC/year）による陸域と海洋のCO₂吸収量の推定差があることがわかった。最新のトップダウン・ボトムアップモデルの比較解析により、過去に比べて地球規模の陸域と海洋のCO₂収支の年次変化を良好に再現し信頼性が向上したが、地域別に見るとCO₂収支の違いが大きい地域があり、今後更に改善できる余地があることも示唆された。

続いて、本研究で開発されたMICRO4-ACTMを含む22の逆解析モデルのアンサンブルにより、2008年-2017年の全球CH₄排出量を求め、572 [538-593] TgCH₄/yearと推定された。全球のCH₄収支はモデル間で良く整合し、プロセスモデル（ボトムアップモデル）に比べモデル間の不確実性は非常に低い値（～10%）を示した（図7）。この背景には、殆どの逆解析システムがTRANSCOM実験で使用した同一の水酸基ラジカル(OH)分布を用いたことにより、大気中CH₄の化学消失量が制約されていることが関係していると思われる。この全球の結果を緯度帯に分割すると、熱帯域が全球の64%を占める366 TgCH₄/year [321-399]を排出していた。その他、32%は中高緯度（185 TgCH₄/year [166-204]）、4%は高緯度（60°以北）から排出されている。トップダウン・ボトムアップモデルによるCH₄排出量を更に比較すると、2000年-2009年と

2008年-2017年の間に、熱帯域と北半球中高緯度で同様の増加を示した。熱帯域では農業活動と廃棄物が主要なCH₄の排出源であり（トップダウンモデルによると139 [127-157] TgCH₄/year、ボトムアップモデルによると130 [121-137] TgCH₄/year）、これらは熱帯域全体の総排出量の約38%を占めている。また、湿地帯におけるCH₄排出量においても、トップダウン・ボトムアップモデルは同様の結果を示したが（トップダウンモデルによると132 [102-155] TgCH₄/year、ボトムアップモデルによると115 [71-146] TgCH₄/year）、淡水からの排出量は両アプローチにおいて未だ不確実性が高いことがわかった。

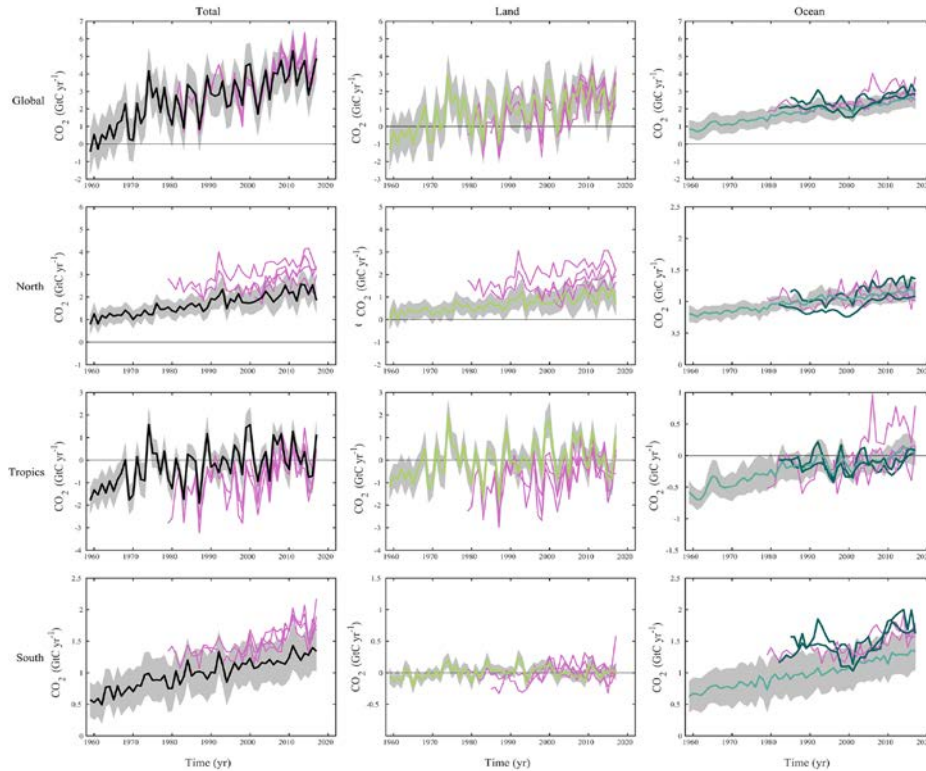


図6 全球及び各緯度帯（30°以北、熱帯域、30°以南）の陸域と海洋のCO₂収支の年次変化：陸域と海洋のCO₂収支の和（左）、陸域のCO₂収支（中央）、海洋のCO₂収支（右）。正の値はCO₂収支の正味吸収を示す。黒実線と幅は、プロセスモデルによる平均値と標準偏差を表し、桃色実線は逆解析モデルの推定値を表す。

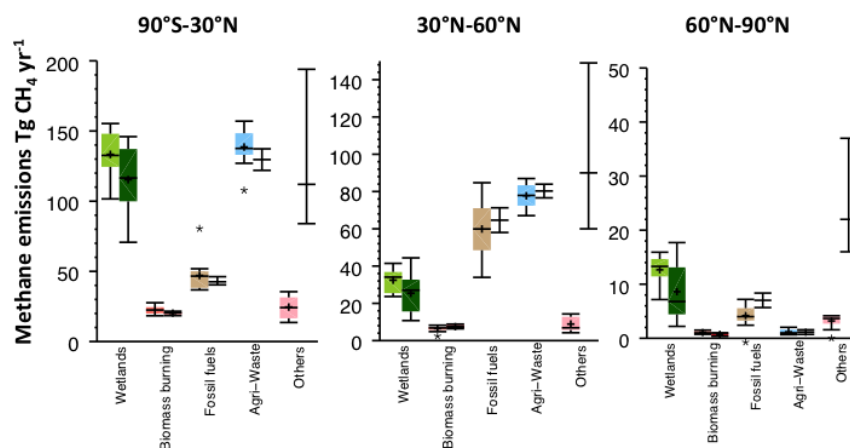


図7 複数のトップダウン・ボトムアップモデルによるCH₄排出量の統合解析。

世界の各地域に合わせた効果的な温室効果ガスの緩和策を導くためには、全球だけではなく、地域毎に人為・自然起源のCH₄排出量を把握することが重要である。ここでは、1988年から2016年を対象として、先見値として用いたさまざまなCH₄排出量とMICRO4-ACTMによる総CH₄排出量の相互比較解析により、世界

の各地域において、どのプロセスがCH₄排出の支配的要素であるかを調査した。その結果、先見値データとMICRO4-ACTMによる最適化後のCH₄排出量のアノマリは大凡合意を示した(図8)。また、36サイトの観測データを取り込んだ長期(1988年-2016年)の逆解析システムと、近年に特化した19サイトの観測データを取り込んだ逆解析システムを比較した結果、両システムは高い整合性を示した。これらの比較により、MICRO4-ACTMによる長期シミュレーションの精度がこれまでになく向上したことを確認した。

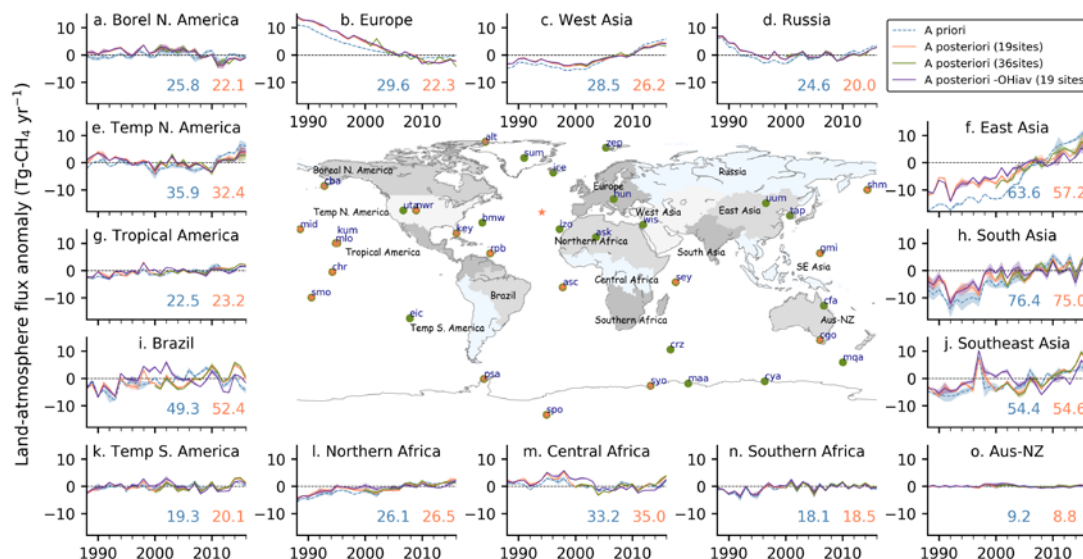


図8 2種の観測サイトデータを利用した逆解析システムによるCH₄排出量の年次変化。中央のマップに示した地域区分に則った15地域において、先見値(青点線、青幅)、逆解析システム(19サイトデータ: 橙実線、36サイトデータ: 緑実線)によるCH₄排出量を示す。パネル内の数値は、先見値(青字)と19サイトデータを利用した逆解析(橙字)によるCH₄排出量の長期平均値。

MICRO4-ACTMは、全球のCH₄排出量が1999年-2006年と2007年-2016年の間で27 TgCH₄/year (478±7 TgCH₄/yearから505±15 TgCH₄/year)増加していることを示したが、その84%をアジア域(東アジア: 28%、西アジア: 19%、南アジア: 18%、東南アジア: 19%)が占めることがわかった。先見値データは、石炭鉱業からの漏出と酪農からの排出が全球におけるCH₄排出量の増加の約70%を占めると示唆している。特に、石炭鉱業からの漏出は東アジア、西アジア、東南アジアで顕著であり、酪農による排出は南アジアで際立っていた。また、アフリカとアマゾンからは、家畜肥料と家畜動物の腸内発酵がCH₄排出の増加に寄与していた。その他、CH₄排出量の増加は、熱帯アメリカ(1.1 TgCH₄/year)、ブラジル(2.7 TgCH₄/year)、北アフリカ(2.8 TgCH₄/year)で顕著であった。

これらの結果は、CH₄増加率の年次変化に対し、どの地域のどのようなプロセスが寄与しているのかを示唆している。CH₄増加率は地球規模で1988年から1998年まで増加傾向にあったが、1999年から2006年まで停滞し、2007年以降に再度、増加傾向を示している。しかし、この年次変化パターンのメカニズムはこれまで解明されておらず、物質循環研究における大きな課題の一つであった。MICRO4-ACTMと先見値データの比較解析から、1988年-1998年の増加期から1999年-2006年の停滞期への移行は、主にヨーロッパ、ロシアにおける畜産活動やガス生成や石炭鉱業に伴う漏出の減少が原因であり、2007年以降の増加期は、アジア全域(東、西、南、東南アジア)において活発化した工業に伴う漏出の増加が原因であることが明らかとなった(図8)。

(4) トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析を通じた炭素収支推定の高精度化

本研究によって開発・改良された機械学習によるフラックススケールアップの手法を適用し、東南アジアに着目して、トップダウン手法(逆解析モデル)とボトムアップ手法(プロセスモデル)に加えて、フラックスアップスケール手法の結果を導入し陸域CO₂収支の経年変動の比較と要因解析を行った。陸域CO₂収支における最も大きなフラックスである総一次生産量(図9中でGPPに相当)に関してボトムアップ

ブ手法におけるプロセスモデル(図中TRENDYに相当)と経年変動と気候パラメータとの関係を調査した結果、両者は総一次生産量と気温の間に明確な負の相関を検出した(図9)。これは手法が異なる2つのボトムアップ手法について、推定された変動の感度に関しても両者がよく一致していることを示している。

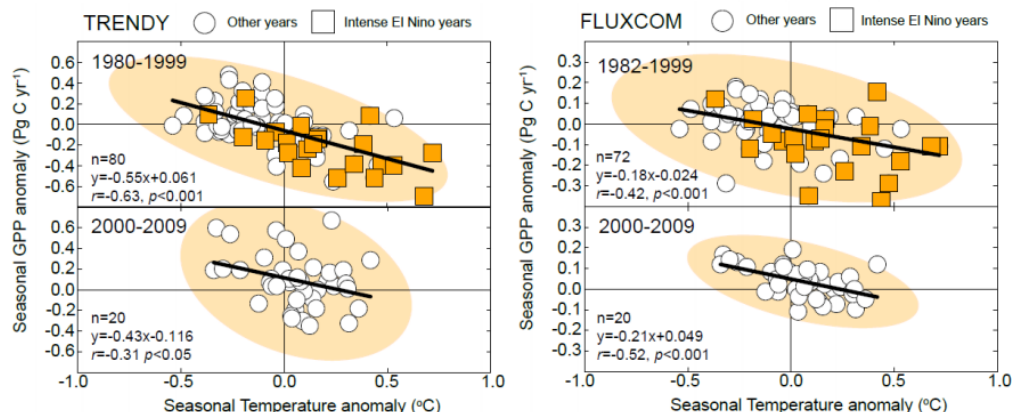


図9 1980年代から2009年までのボトムアップ手法(左:プロセスモデル, 右:フラックスアップスケーリング法)により推定された総一次生産量(GPP; Gross Primary Productivity - 光合成量に相当)と気温の経年変動の関係。経年変動については、3ヶ月毎に集約し、平均場(3ヶ月毎の長期平均)からの偏差と経年変動成分として用いた。

(Kondo et al., 2018a)

次に、過去100年間におけるグローバルスケールでの陸域CO₂収支変動解析を地球規模で行った。10年毎の陸域CO₂収支の変動を解析した結果、比較が可能な1960年代以降においてプロセスモデル、逆解析モデル、残余法(化石燃料の燃焼によるCO₂排出量、大気CO₂濃度の変動、大気-海間のCO₂収支の差を陸域CO₂収支とする手法)の手法間でよい一致を示した(図10)。過去100年間の長期スケールではそれぞれの手法の推定期間に違いがあるものの、1950年と1960年代の間を境に継続的なCO₂の吸収傾向を示し、2000年代が最も高いCO₂吸収量であることが一致した。この結果は、本研究により改善されたCO₂収支推定結果が地球規模でこれまでになく高い信頼性を持つことを示している。

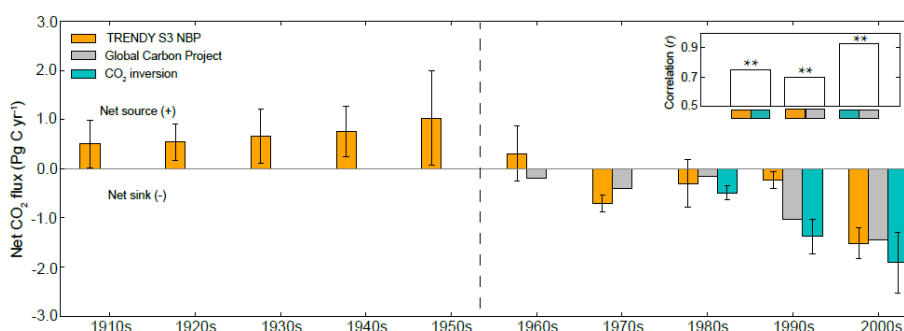


図10 過去100年における10年毎の陸域CO₂収支の変化。3種類(陸域プロセスモデル, 大気逆解析モデル, 残余法)による結果。(Kondo et al., 2018b)

続いて、10種のプロセスモデル、サブテーマ3と4のモデルを含む8種の逆解析モデルに加え、残余法、地上・衛星観測による2種のバイオマス変化量、大気O₂・CO₂観測、Global Carbon Projectの地域炭素収支評価(RECCAP)の結果を用い、2000年代を対象に全球、地域スケールでCO₂収支量の比較解析を行った。特に、プロセスモデル、大気インバースモデルの結果を用いてIPCC第5次評価報告書の結果を再現し、定義の違いが如何に陸域CO₂収支量に影響を及ぼすのかを調査した。

IPCC第5次評価報告書による比較解析では、プロセスモデルに土地利用変化の影響が考慮されておらず、また、逆解析モデルによる推定には生物圏に加え水圏(河川や湖沼の炭素流入・流出量)が考慮されていた。陸域CO₂収支量の定義を「大気-陸域生物圏(水圏を含まない)によるCO₂交換量」とし、こ

の定義に合わせてそれぞれの手法に補正をかけ比較した結果、「土地利用変化を考慮したプロセスモデル」・「生物圏のみを考慮した逆解析モデル」による陸域CO₂収支量は、他の手法（残余法、バイオマス変化量、大気O₂・CO₂観測、RECCAP）と高い整合性を示した。一方で、「土地利用変化を考慮しないプロセスモデル」・「水圏を含んだ逆解析モデル」による陸域CO₂収支量（IPCC第5次評価報告書の再現結果）は、他の手法に比べ大幅に全球のCO₂吸収量を過大評価した。この結果は、IPCC第5次評価報告書に見られたトップダウン・ボトムアップ手法によるCO₂収支の非整合性の主要な原因が定義の違いに起因することを示した。

最後に、全球の陸域圏を9地域に分離したところ、北アメリカ、南アジア、東南アジア、オセアニアで高い整合性が確認された一方で、東アジア、アフリカ、南アメリカで手法間の差が見られた（図11）。また、ヨーロッパと北方アジアでは逆解析モデルの推定幅が大きく、これらの地域のCO₂収支が吸収であるか排出であるかの判断が困難であった。9地域の中でも、特に、南アメリカではCO₂吸収・放出の傾向に手法間の整合性が無く、東アジアではCO₂吸収量の違いが顕著であった。これらの結果は、本研究がIPCC第5次評価報告書では解決できていなかった「手法間の定義の違い」の解消を進めたことにより、従来に比べて正確なCO₂収支量の推定を可能にしたことを示す一方で、地域ごとの問題には更なる確認と検証が必要であることを示している。

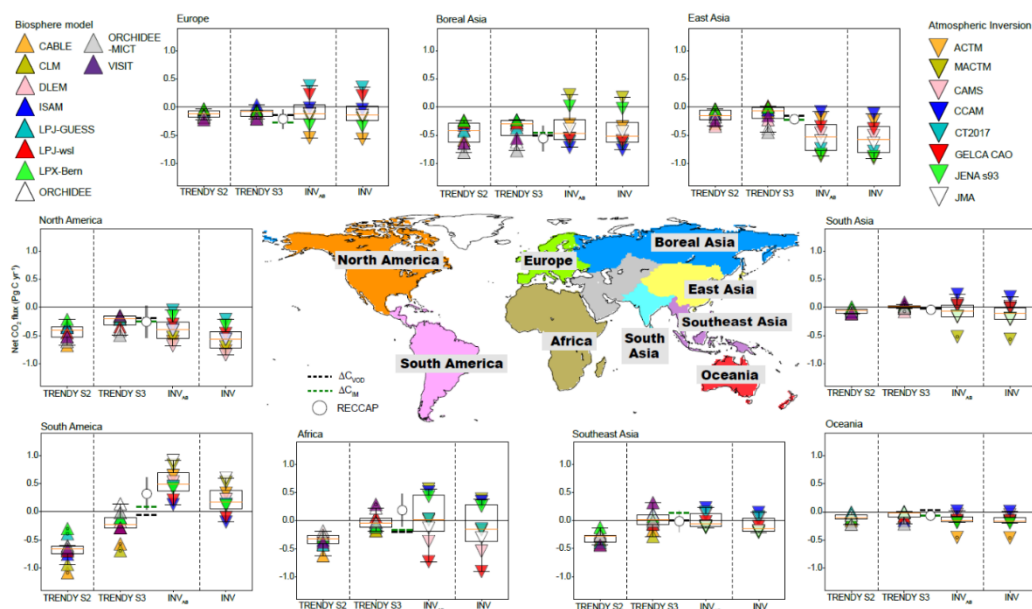


図11 2000年代における地域別陸域CO₂収支量の推定結果。推定は、プロセスモデル（土地利用変化あり：TRENDY S3、なし：TRENDY S2）、逆解析モデル（補正あり：INV_{AB}・なし：INV）、残余法（Residual method）、バイオマス変化量（衛星マイクロ波： ΔC_{VOD} 、森林インベントリ： ΔC_{TM} ）、大気O₂・CO₂観測（O₂-based method）、残余法（RECCAP）によるもの。▲はプロセスモデル、▼は逆解析モデルを示し、色は其々の手法における個々のモデルを示す。（Kondo et al., 2020）

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまで地上付近でさえ高精度での長期観測が極めて限られていた東南アジアにおいて、CO₂、CH₄、CO濃度の緯度及び鉛直分布の観測をほぼ月1回の頻度で強化することに成功した。また、緯度別・高度別の濃度の季節変動や経年増加の特徴を明らかにした。不規則に発生する高濃度データには放出源・吸収源や輸送過程の情報が含まれるため、複数成分の同時観測がその同定に有効であることを示した。

各国の温室効果ガス人為発生量については、ボトムアップとトップダウンの推計値に乖離があることまではわかっていたが、その原因は解明されていなかった。本研究でボトムアップ・トップダウンの専門家が乖離の原因について精査することにより、特にCH₄において実際にボトムアップインベントリデータの問題点を見出したことは、今後の排出量の検証の先駆的な例として科学的意義が大きい。

本研究により、逆解析システムNICAM-TM 4D-Varに新たにCH₄モジュールを実装し、CH₄逆解析の高解像度化を達成した。これにより、CO₂とCH₄について長期逆解析が同一のシステムで実施可能となった。空間解像度は、ベースとなる大気輸送モデルの高並列計算効率等により、先行研究に比べて各段に高いものとなり、解像度の面で世界的に優位性を持つシステムとなった。

さらに、COをNICAM-TM 4D-Varに組み込み、CO₂-COジョイント解析システムを新たに開発した。その結果、逆解析における燃焼起源と非燃焼起源の分離精度が向上し、さらに高解像度推定を行うことで、小さな空間スケールの森林火災や化石燃料消費からの排出を同定することが可能となった。今後、同システムにより、近年、頻繁する大規模森林火災や、不確定性の高いとされる新興国における化石燃料消費からのCO₂放出量を正確に推定できることが期待される。この解析システムによって初めて可能となる研究の幅は広く、例えば観測データのインパクト評価が高精度で可能となることから、定量的で客観的な指標に基づいて、最適な観測ネットワークの計画・提案を行うことが可能になる。

本研究によって複数の独立した手法を比較解析したことにより、IPCC第5次評価報告書の時点では大きな不整合があると指摘されていた手法間の違いが、主に定義の違いに起因することがつきとめられた。このように、本研究により開発改良された統合型観測解析システム（大気観測や地表フラックスの観測データを統合利用したトップダウンの手法とボトムアップの手法の相互比較に基づく解析手法）は、人為起源・自然起源の温室効果ガス吸収・排出量の変動を地域別に報告できる段階にまで精緻化され、IPCC第6次評価報告書の編纂に対しても、過去の知見の改善を迫る最新の科学的知見をタイムリーに提供することができた。

（２）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

航空機観測（CONTRAIL）による上空のCH₄濃度データは世界でも希少であることから、Global Carbon Projectによる全球CH₄排出量推定計画（GCP-CH₄）からデータ提供を要請された。GCPが発表する全球炭素収支の年次報告「Carbon Budget」や項目別の報告「CH₄ Budget」は、IPCC報告書を初めとする各種政策決定者向けの報告書に重要な知見を提供しており、本研究課題はその取組に貢献した。本研究の航空機観測によって得られた上空のCH₄濃度データは、環境省・国立環境研究所・宇宙航空研究開発機構の三者が進める温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）プロジェクトの検証データとして活用されている。さらに、本研究で開発した大気輸送モデルNICAM-TMのCO₂やCH₄の大気濃度計算値は、GOSAT-2プロジェクトにおいて、衛星観測リトリバル値（L2）導出の際に必須の初期推定値として用いられている。

本研究課題で得られた科学的知見に基づき、関係府省庁・機関と連携して「パリ協定における我が国の貢献のための温室効果ガス観測及びデータ利活用」を地球観測連携拠点（温暖化分野）の報告としてとりまとめ、文部科学省地球観測推進部会（2018年8月、11月）、内閣府総合科学技術・イノベーション会議政策討議（2019年3月）に専門家として知見を提供し、統合イノベーション戦略2019にその一部が反映された。加えて、これらの日本の取組を気候変動枠組条約第25回締約国会議（COP25）の公式サイドイベント等で国際的に普及した（2019年12月）。

IPCC等への直接の貢献としては、当課題代表者（三枝）は、2019年に公開された特別報告書「Climate Change and Land」第6章Lead Author（LA）に任命され、科学的内容に責任のある役割を果たした。サブテーマ4代表者（市井）は、IPBES（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）評価報告書の第2章Coordinating Lead Author（CLA）に任命され、本研究の成果を生かして報告書に貢献した。特に、2000年代に陸域CO₂吸収量が増加したことを示した本研究の成果（Kondo et al. 2018b; Geophys. Res. Lett.）は、IPBESの地球規模評価報告書の第2章 Nature: Status and Trendに引用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の航空機観測によって得られた上空のCO₂濃度データ及びCH₄濃度データはDOIを付与して国立環境研究所のデータベースから公開する準備をしている（※）。

※和文 <http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20180208.001.html>

英文 <http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20180208.001-e.html>

これらは世界的に見ても貴重な上空での高精度観測の結果として、IPCC各種報告書を初めとする国際的に重要な報告書とりまとめの際に、科学的知見として活用されることが見込まれる。

本研究で開発した逆解析システムNICAM-TM 4D-Varは、GOSAT-2プロジェクトにおいて、CO₂とCH₄の地表面フラックスプロダクト (L4) を作成するシステムとして今後運用される。また、今回開発した衛星観測データを用いたGSAM-TMをベースとするCO₂逆解析システムは気象庁が実施しているCO₂分布情報の解析システムとして活用される予定である。さらに、同システムを用いて実施した長期間のCO₂逆解析は2021年に出版予定のIPCC第6次評価報告書等に引用される見込みである。

サブテーマ3代表者 (パトラ) はIPCC第6次評価報告書の第5章LAに任命され、科学的内容に責任のある役割を果たしている。サブテーマ3と4による温室効果ガス収支の成果は、第5次評価報告書の内容に比べて推定精度を各段に向上していることから、パリ協定における温室効果ガス排出の許容量を決定する際の基礎資料として利用可能であり、IPCC第6次評価報告書に知見が反映される見込みである。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表 ※本研究課題メンバーが筆頭である主要なもののみ抜粋

<査読付き論文>

- 1) 茶谷聡, P. CHEEWAPHONGPHAN, 小林伸治, 田邊潔, 山地一代, 高見昭憲: 大気環境学会誌, 54, 2, 62-74 (2019), 日本国内大規模固定発生源の業種別・施設種別・燃料種別大気汚染物質排出インベントリの構築.
- 2) P. CHEEWAPHONGPHAN, S. CAHTANI, N. SAIGUSA: Sustainability, 11, 7, 2054 (2019), Exploring Gaps between Bottom-Up and Top-Down Emission Estimates Based on Uncertainties in Multiple Emission Inventories: A Case Study on CH₄ Emissions in China.
- 3) P. CHEEWAPHONGPHAN, T. HANAOKA, S. CAHTANI: Environmental Research Communications, 2 (5), 051009 (2020), Long-term trend of regional passenger road transport demand and emission estimation under exhaust emission regulation scenario in Thailand.
- 4) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, J.G. CANADELL, B. POULTER, S. SITCH, L. CALLE, Y.Y. LIU, A. I. J. M. van DIJK, T. SAEKI, N. SAIGUSA, P. FRIEDLINGSTEIN, A. ARNETH, A. HARPER, A.K. JAIN, E. KATO, C. KOYAN, F. LI, T.A.M. PUGH, S. ZAEHLE, A. WILTSHIRE, F. CHEVALLIER, T. MAKI, T. NAKAMURA, Y. NIWA, C. RÖDENBECK: Nature Communications, 9, 1154, doi:10.1038/s41467-018-03374-x (2018a), Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia.
- 5) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, B. POULTER, L. CALLE, C. KOYAN, T.A.M. PUGH, E. KATO, A. HARPER, S. ZAEHLE, A. WILTSHIRE: Geophysical Research Letters, 45, 4820-4830, doi:10.1029/2018GL077633 (2018b), Plant regrowth as a driver of recent enhancement of terrestrial CO₂ uptake.
- 6) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, P. FRIEDLINGSTEIN, B. POULTER, F. CHEVALLIER, P. CIAIS, J.G. CANADELL, A. BASTOS, R. LAUERWALD, L. CALLE, K. ICHII, P. ANTHONI, A. ARNETH, V. HAVERD, A.K. JAIN, E. KATO, M. KAUTZ, R.M. LAW, S. LIENERT, D. LOMBARDOZZI, T. MAKI, T. NAKAMURA, P. PEYLIN, C. RÖDENBECK, R. ZHURAVLEV, T. SAEKI, H. TIAN, D. ZHU, T. ZIEHN T. Global Change Biology, 26, 3, 1068-1084, doi:10.1111/gcb.14917 (2020), State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget.
- 7) Y. NIWA and Y. FUJII: Q. J. R. Meteorol. Soc. (2020), A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem. (accepted)
- 8) P.K. PATRA, D. CRISP, J.W. KAISER, D. WUNCH, T. SAEKI, K. ICHII, T. SEKIYA, P.O. WENNBERG, D.G. FEIST, D. POLLARD, D.W.T. GRIFFITH, V.A. VELAZCO, M. De MAZIRE, M.K. SHA, C. ROEHL,

- A. CHATTERJEE, K. ISHIJIMA: Scientific Reports, doi: 10.1038/s41598-017-13459-0 (2017), Orbiting carbon observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-grams increase of carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño.
- 9) P.K. PATRA, M. TAKIGAWA, S. WATANABE, N. CHANDRA, K. ISHIJIMA, Y. YAMASHITA: SOLA, 14, 91-96 (2018), Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM).
- 10) T. UMEZAWA, H. MATSUEDA, Y. SAWA, Y. NIWA, T. MACHIDA, L. ZHOU: Atmos. Chem. Phys., 18, 14851-14866 (2018), Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements.
- 11) T. UMEZAWA, H. MATSUEDA, T. ODA, K. HIGUCHI, Y. SAWA, T. MACHIDA, Y. NIWA and S. MAKSYUTOV: Scientific Reports, 10.1038/s41598-020-64769-9 (2020), Statistical characterization of urban CO₂ emission signals observed by commercial airliner measurements.

(2) 主な口頭発表 (学会等) ※本研究課題メンバーが筆頭である主要なもののみ抜粋

- 1) N. CHANDRA, P.K. PATRA, J.S.H. BISHT, A. ITO, S. MORIMOTO, G. JANSSENS-MAENHOUT, T. UMEZAWA, R. FUJITA, M. TAKIGAWA, S. WATANABE, S. AOKI, N. SAITOH, N. SAIGUSA: AGU Chapman Conference, San Diego, USA (2019)
“An explanation for interdecadal shift in CH₄ growth rate using inverse modeling”
- 2) P. CHEEWAPHONGPHAN, S. CHATANI: AOGS 15th Annual Meeting (2018)
“A Comparative Study on Anthropogenic Emission Inventory Development: Case Study Methane Emissions over China”
- 3) P. CHEEWAPHONGPHAN, S. CHATANI, N. SAIGUSA: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
“The 2019 Refinement emission estimation: CH₄ emission in Asia during last decades”
- 4) K. ICHII: 1st International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) Regional Conference, Nanjing, China. (2019) (基調講演)
“Model-Data Synthesis Toward Better Understandings of Terrestrial Carbon Cycle in Asia”
- 5) K. ICHII: GEO Week. Site Event “Satellite Remote Sensing of Greenhouse Gases and 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”
Canberra, Australia (2019)
“Application of GOSAT L4A terrestrial CO₂ budget product for intercomparison with empirical data-driven bottom-up estimates”
- 6) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, P. CIAIS, F. CHEVALLIER, J.G. CANADELL, A. BASTOS, B. POULTER, L. CALLE, K. ICHII: American Geophysical Union Fall (AGU) Meeting 2018 (2018)
“Global and regional CO₂ budget comparison between top-down and bottom-up approaches”
(invited)
- 7) M. KONDO: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting (2019)
“The Kamide Lecture: the role of CO₂ release and uptake induced by land use changes in recent terrestrial carbon balance” (invited)
- 8) Y. NIWA, A. ITO, T. MACHIDA, M. SASAKAWA, Y. TOHJIMA, Y. TERAU, T. UMEZAWA, S. MORIMOTO, S. AOKI, Y. SAWA, K. TSUBOI, H. MATSUEDA, E. DLUGOKENCKY, C. HARTH, P. B. KRUMMEL, R. L. LANGENFELDS, Z. M. LOH, J. MÜHLE, S. O’ DOHERTY, R. G. PRINN, M. RAMONET, P. SALAMEH, C. SWEENEY, R. WEISS, D. YOUNG, S. CASTALDI, S. NOCE, M. SAUNOIS and A. R. STAVERT: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)
“Global inverse analysis of CH₄ fluxes using NICAM-TM 4D-Var”
- 9) 丹羽洋介: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
「全球CH₄逆解析によるフラックス推定値の独立性評価, 日本気象学会2019年度秋季大会」

- 10) P.K. PATRA, N. CHANDRA, K. TANAKA: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2019)
 “Regional budgets of carbon dioxide, methane and nitrous oxide using JAMSTEC’s MIROC4-ACTM inverse modelling”
- 11) N. SAIGUSA, T. MACHIDA, P.K. PATRA, Y. NIWA, K. ICHII: 日本地球惑星科学連合2017年大会 (2017)
 “Monitoring carbon cycle change using an integrated observation, modeling and analysis system—project summary. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan”

7. 研究者略歴

研究代表者

三枝 信子

東北大学大学院理学研究科修了、現在、国立環境研究所 センター長

研究分担者

1) 町田 敏暢

東北大学大学院理学研究科修了、現在、国立環境研究所 室長

2) 丹羽 洋介 (2018年3月まで気象庁気象研究所 主任研究官)

東京大学大学院理学系研究科修了、現在、国立環境研究所 主任研究員

3) 眞木 貴史

京都大学理学部卒業、現在、気象庁気象研究所 室長

4) パトラ プラビール

グジャラート大学大学院理学研究科 (インド・アーメダバード) 修了、現在、海洋研究開発機構 主任研究員

5) 市井 和仁

名古屋大学大学院理学研究科修了、博士 (理学)、現在、千葉大学 教授

8. 引用文献

- 1) Ichii K., M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, Ma. C. Alberto, J. Ardö, E.S. Euskirchen, M. Kang, T. Hirano, J. Joiner, H. Kobayashi, L. B. Marchesini, L. Merbold, A. Miyata, T.M. Saitoh, K. Takagi, A. Varlagin, M. S. Bret-Harte, K. Kitamura, Y. Kosugi, A. Kotani, K. Kumar, S.-G. Li, T. Machimura, Y. Matsuura, Y. Mizoguchi, T. Ohta, S. Mukherjee, Y. Yanagi, Y. Yasuda, Y. Zhang, F. Zhao (2017) New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*. 122, 767-795, doi:10.1002/2016JG003640.

II. 成果の詳細

II-1 統合型観測解析システムの設計と温室効果ガス吸排出量監視に関する研究（総括）

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター		三枝 信子
	大気・海洋モニタリング推進室	町田 敏暢
	物質循環モデリング・解析研究室	齊藤 誠
地域環境研究センター	大気環境モデリング研究室	茶谷 聡
環境計測研究センター	動態化学研究室	梅澤 拓

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター	物質循環モデリング・解析研究室	佐伯 田鶴（平成29年度末まで）
地域環境研究センター	大気環境モデリング研究室	Penwadee Cheewaphongphan

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：59,178千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：18,840千円、平成30年度：21,498千円、令和元年度：18,840千円）

[要旨]

本研究課題全体がめざすトップダウン手法・ボトムアップ手法の統合解析に基づく温室効果ガスの自然吸収・人為排出の高精度評価に向けて、特に観測データの乏しい地域の観測強化と、不確実性の高い地域の人為起源排出量推計の強化を行った。はじめに、主要な温室効果ガスであるCO₂とCH₄、さらには人為・自然起源分離の情報を得るためのCOを観測対象とし、既存の観測プラットフォーム（特に航空機観測）のデータを最大限活用するための整備を行うと同時に、深刻な観測空白域をもつアジアのデータカバレッジを向上させた。次に、全球、特にアジアについて人為起因排出量をボトムアップ的に推計して高解像度のデータベースを構築し、トップダウン手法・ボトムアップ手法の乖離の原因を精査することにより、ボトムアップ手法の問題点を指摘した。さらに、本研究課題の全サブテーマで得られた観測データ、解析データ、及び統合的解析により得られた知見を検討するための国際ワークショップを開催し、成果とりまとめの議論を行うと同時に、国際的に重要な報告書等への成果の普及に道筋をつけた。最後に、本研究課題全体で開発改良された解析システムを、環境省・国立環境研究所・宇宙航空研究開発機構の三者が共同で進める温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)シリーズの重要なプロダクト作成のために活用する準備を完了した。

[キーワード]

統合型観測解析システム、温室効果ガス、吸排出量推定、インベントリ

1. はじめに

温暖化予測の信頼性向上において、炭素循環メカニズムの解明と、気候変動に伴う炭素循環変化の定常的監視が必要である。さらに、新たな国際枠組「パリ協定」により、各国は温室効果ガスの排出量削減に取り組むこととなったため、国別・地域別といった小スケールの吸排出量を科学的根拠に基づいて評価する手法の確立が求められている。重要な監視対象として、二酸化炭素(CO₂)の他に、CO₂に次ぐ大きな温暖化効果をもつメタン(CH₄)が挙げられる。CO₂とCH₄は共通の排出源（石炭消費や森林火災等）を持つため、吸排出量の推定精度と削減策の効果を評価する上で、両者を含む包括的な解析システムの構築が不可欠である。

これまでに、大気の温室効果ガス観測の分野では、地上観測の拡充や、船舶、航空機、衛星等の広

域移動観測により、地球規模でのカバレッジは向上した。先進国においては国別排出インベントリの整備も進められてきた。しかし、東南アジアや南アジアには未だ深刻な観測空白域がある上に、エネルギー消費増加の著しいアジアの途上国や新興国では、排出インベントリが未整備、または大きな不確実性を含むのが現状である。このため、本研究課題全体として、日本が強みを持つ大気中温室効果ガスの衛星観測や航空機観測のデータ（GOSAT, CONTRAIL等）、及び既存の地上ステーションや他機関の観測データを利用し、将来期待されるより高分解能の多項目観測のデータを利活用することを見据えたインバージョン（逆解析）・データ同化手法（トップダウン的手法）を開発し、複数のトップダウン手法・ボトムアップ手法の統合解析に基づいて、吸排出量の長期的変化と空間分布の情報に基づく不確実性評価と高精度化を行うこととした。

2. 研究開発目的

本研究課題全体の中で、サブテーマ1では、はじめに、主要な温室効果ガスであるCO₂とCH₄、さらには人為・自然起源分離の情報を得るためのCOを観測対象とし、航空機観測に基づき、特に深刻な観測空白域をもつアジアのデータカバレッジを向上させることを目的とする。次に、トップダウン手法（大気中濃度からの逆解析）とボトムアップ手法（多点地上データをスケールアップ）の比較を観測強化と同時に進め、トップダウン-ボトムアップ手法の統合解析に独自の人為排出量推計を加えることにより、インベントリに内在する不確実性にさかのぼった評価を行い、各国排出インベントリの精度向上を目指す。さらに研究課題全体の成果を国際的に普及すると同時に、本研究課題が終了した後に、本研究課題全体の成果を衛星観測等による温室効果ガス関係のプロジェクトや事業で活用できるよう道筋をつけることを目的とする。

3. 研究開発方法

(1) アジア域でのCO₂、CH₄、CO濃度観測の強化

各種プラットフォームで観測される大気中温室効果ガスデータについて、本研究により開発される解析システムに入力及び検証データとして用いるデータを整備し、サブテーマ2、3、4へ提供した。このため主要な温室効果ガスであるCO₂とCH₄、さらには人為・自然起源分離の情報を得るための一酸化炭素（CO）を観測対象とし、既存のマルチプラットフォームのデータを最大限活用するための整備を行うと同時に、深刻な観測空白域をもつアジアのデータカバレッジを向上させた。特に、航空機を用いたアジア域でのCO₂、CH₄、CO濃度観測を強化するため、民間航空機を利用した温室効果ガス観測プロジェクト（CONTRAILプロジェクト）において自動大気サンプリング装置（ASE）を搭載してアジア路線の上部対流圏における水平分布及びアジアの都市上空における鉛直分布の観測を充実させた。

(2) 排出インベントリデータの精度向上

既往研究において、トップダウンとボトムアップ、さらには複数のボトムアップによる温室効果ガスの排出量推計の間に、不一致が報告されている。本研究では、アジア域、特に排出量の多い中国におけるCH₄の排出量に焦点を当て、考えられる不一致の原因を検討し、ボトムアップによる排出量推計の改良の方向性を見いだすことにした。不一致の原因として、排出量が多く、かつ不確実性が大きい部分に、問題がある可能性が高いと考えた。本研究では、不確実性として、複数のボトムアップによる排出量推計の手法の違いに起因するものと、空間的・時間的な変動の違いに起因するものの2種類を対象に、不一致の原因についての解析を進めた。

複数のボトムアップによる、中国のCH₄排出量推計の手法の違いを検討するために、3つの主要なデータベースを使用した。1つ目は、Peng et al.¹⁾（以下Pengと表記）による推計である。省別の詳細なデータを用い、中国における1980～2010年の部門別のCH₄排出量が推計されている。2つ目は、The Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS) による推計である。GAINSは、International Institute for Applied System Analysis (IIASA) が温室効果ガスと大気汚染物質の排出量推計ならびに最適な排出抑制策の検討のために開発したモデルである。本研究では、

Evaluating the Climate and Air Quality Impacts of Short-Lived Pollutants (ECLIPSE) version 5a²⁾シナリオに基づき、中国の省別に推計された部門別のCH₄排出量を使用した。3つ目は、欧州のJoint Research Centerを中心に継続的に構築されている、Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) である。本研究では、EDGARのversion 4.3.2³⁾の中国の部門別のCH₄排出量を使用した。なお、前身のEDGAR version 4.2FTについて、トップダウンによる推計との比較により、中国をはじめとする東アジアにおけるCH₄排出量が過大評価である可能性が指摘されている⁴⁾。基本的に、CH₄の排出量は、活動量（燃料の消費量や自動車の走行量等、対象物質の排出を伴う活動の量）に、排出係数（単位活動量あたりの排出量）を乗じることによって推計される。3つのデータベースで用いられている活動量と排出係数にどのような違いがあるのかを精査し、その違いによって生じる排出量の不確実性を、elementary effect methodによって評価した。

空間的・時間的な変動の違いについては、サブテーマ2より、稲作にはVegetation Integrative Simulator for Trace gases (VISIT)⁵⁾、それ以外の人為発生源にはEDGAR version 4.3.2を使用した逆解析 (NICAM-TM 4D-Var) の前と後のCH₄排出量のグリッドデータの提供を受けた。これらを、ボトムアップによる2種類のスキーム (CaoとWH) を用いたVISITによる推計、EDGAR version 4.3.2、PengのCH₄排出量グリッドデータと比較することにより、空間分布の違いから示唆される原因を検討した。また、近年公開されたEDGARの後継版であるversion 5.0、IPCCの2006年ガイドライン、ならびに2019年に京都で開催されたIPCCの総会で採択されたガイドラインの改訂版を基に推計した排出量も含めて、1990～2018年の排出量の推移を相互に比較し、傾向の違いから示唆される原因を検討した。

(3) 継続的に運用可能なシステムへの応用

サブテーマ2で開発を進める逆解析システム (NICAM-TM 4D-Var) を、GOSAT-2プロジェクトにおける全球CO₂・CH₄吸収排出量推定値 (レベル4プロダクト) の導出へ応用することを目指し、同システムを国立環境研究所が有する大型計算機へ移植した。システムの動作確認を実施すると共に、既存のGOSAT観測データを使用したモデル実験を開始し、GOSAT-2プロジェクトでの同システムの実運用に向けたシステム開発を行った。

(4) 国際ワークショップの開催

特にサブテーマ3と4が主導するCO₂・CH₄収支の総合的評価の結果を総括し課題の抽出を行うため、平成31年3月18～21日に、国内外の当該分野第一線の専門家を招聘した国際ワークショップを開催し、本研究全体の成果の国際的普及と論文への取りまとめに向けた議論を行った。

4. 結果及び考察

(1) アジア域でのCO₂、CH₄、CO濃度観測の強化

CONTRAILプロジェクトにおいて、東京 (成田または羽田) からタイのバンコックに向かう航空機にASEを搭載し、飛行中の12箇所で大気サンプリングを行った。ASEは飛行後に国立環境研究所においてCO₂、CH₄、COの各濃度の他、亜酸化窒素 (N₂O)、六弗化硫黄 (SF₆)、水素 (H₂)、CO₂の安定同位体及びハロカーボン類の濃度測定を行った。サンプリングはあらかじめ指定した緯度ごとに実施し、前半の6箇所は高度10-12kmにおける水平飛行中に同空域における緯度分布を、後半の6箇所はバンコックへの降下中に鉛直分布を観測するよう設定した。例として2017年の複数の飛行におけるサンプリング地点の水平分布と緯度・高度分布を図4.1.1に示す。

図4.1.2にバンコック路線の水平飛行時における北緯30°、20°、15°ならびにバンコック上空の高度3kmにおけるCO₂、CH₄、CO及びSF₆濃度の2017年2月から2020年3月までの時系列を示す。CO₂濃度はバンコック上空ならびに上部対流圏の各緯度帯において明瞭な季節変動が観測され、その振幅はほぼ同レベルであった。また、CO濃度以外の各成分ではどの緯度帯においても経年増加が確認できる。特にSF₆濃度は観測期間中に約1 pptもの増加を示し、わずか3年間で濃度が1.1倍に達してしまったことがわかる。また、バックグラウンドの緩やかな濃度変動に比べて明らかに高い濃度を示す観測値は地域的な放出源

の影響を強く受けていると考えられる。例えば、2017年3月のバンコック上空3kmや2017年9月の北緯30°ではCO₂、CH₄、CO、SF₆の全ての成分が高濃度になっており、2018年7月と8月の北緯30°ではCH₄、CO、SF₆の濃度が高く、この空気塊が人間活動の影響を強く受けたものであることが予想できる。これに対して2017年9月12日の北緯15°や2018年9月の北緯30°ではCH₄濃度が同緯度帯の他の季節に比べて明らかに高いが、CO₂、CO、SF₆の各濃度は前後の月と同程度かやや低い値になっている。この結果はCH₄の高濃度が自然起源であることを示している。夏季にはアジアモンスーンによって南アジアの地表の影響を受けた空気塊がチベット上空の高気圧帯に補足され、その一部が太平洋上空の上部対流圏に漏れ出すことがCONTRAILを含む複数の観測結果から知られている。本観測でもその現象を捉えることに成功したと考えられ、アジア地域の気候循環メカニズムを知る上で貴重なデータが得られたと言える。

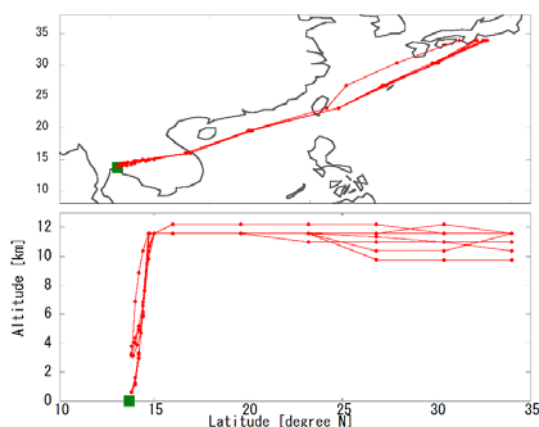


図4. 1. 1 2017年の複数の観測飛行におけるサンプリング地点の水平分布と緯度高度分布。赤丸がASEのサンプリング地点を、緑四角がバンコック空港の位置を表す。

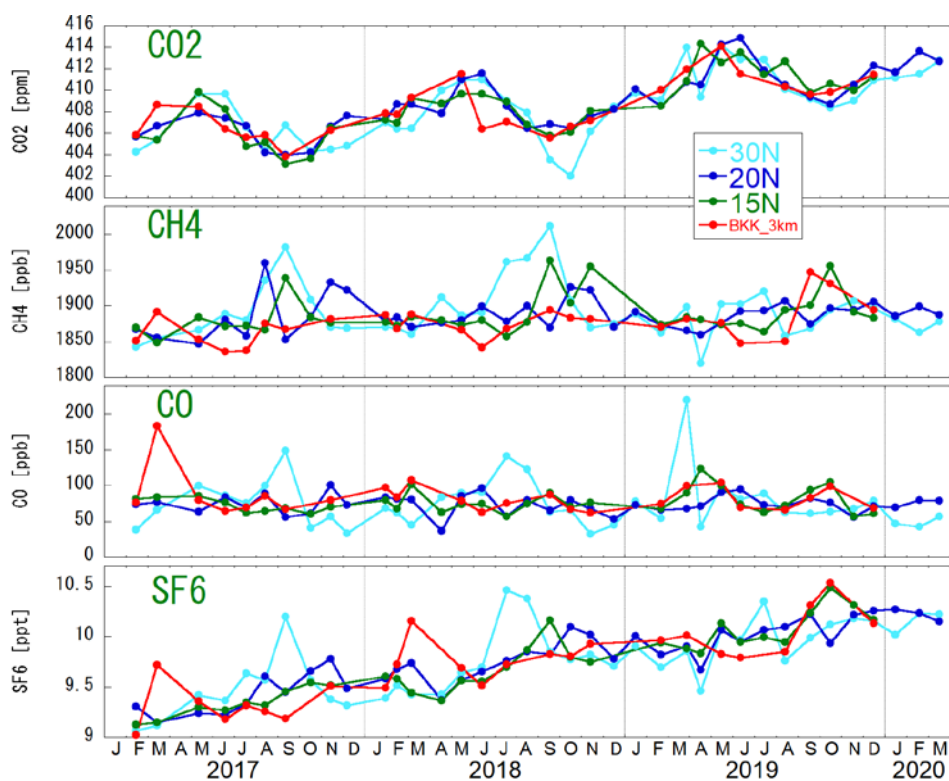


図4. 1. 2 バンコック路線上の北緯30°（水色）、20°（青）、15°（緑）及びバンコック上空3km（赤）で観測されたCO₂、CH₄、CO及びSF₆濃度の時系列。

図4. 1. 3はバンコック上空におけるCO₂、CH₄、CO及びSF₆濃度の鉛直分布である。高度3km以下の濃度は

大気境界層内でのサンプリングされた場合が多く、低高度ほど地表面の放出源・吸収源の影響を強く受けている。バンコック上空ではいずれの成分も地表面が放出源となっている場合が多く、特に CH_4 と CO については顕著である。

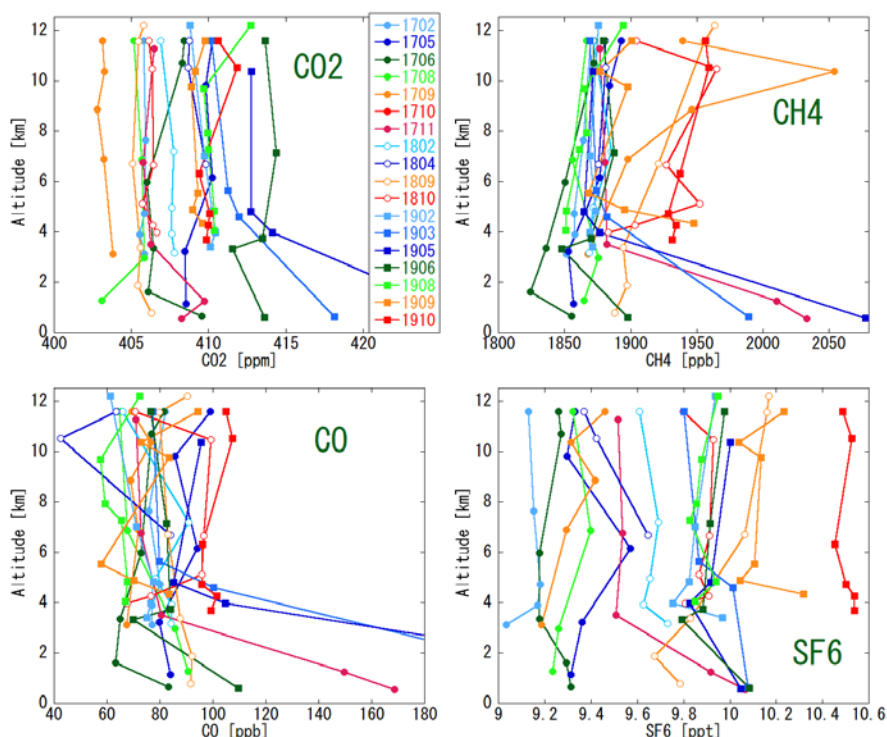


図4. 1. 3 バンコック上空における CO_2 、 CH_4 、 CO 及び SF_6 濃度の鉛直分布。
4桁の数字は西暦の下2桁と月を表す。

一方、高度3km以上の自由対流圏では比較的空間代表性が高く、ばらつきも小さい。また、自由対流圏の鉛直勾配は境界層内とは明らかに異なっており、成分によっては季節的な違いも見られる。図4. 1. 4は SF_6 濃度、 CO_2 濃度、 CH_4 濃度及び CO 濃度の高度3kmと10kmにおける差（すなわち、自由対流圏の鉛直勾配）の季節変動を表している。説明のし易さのために図4. 1. 3とは順を入れ替えてある。 SF_6 の自由対流圏における鉛直勾配は3月に低高度ほど濃度が高い正の勾配が見られるが、他の月は SF_6 の大気中の長い寿命を反映して濃度差が全て ± 0.2 ppt以下であり、ほぼ勾配がないと言える。これに対して CO_2 濃度には春季に弱い正の勾配、夏季に明瞭な負の勾配が観測されており、陸上生態系による CO_2 の放出・吸収の影響が自由対流圏にまで及んでいることが確認できる。言い換えれば、バンコック付近の緯度帯の広域にわたる平均として地表面が春季に放出源、夏季に吸収源となっていると言える。一方 CH_4 は夏季から冬季にかけて負の勾配が見られる。 CH_4 は地球上のほぼ全域で地表面は放出源として機能しており、大気中ではOHラジカルによる消滅反応が存在するため、一般的には対流圏では上空に行くほど濃度が減少する傾向がある。バンコック付近でも地表面は放出源であると考えられるが、夏季から秋季にかけて上空ほど高い濃度が観測される背景には、より遠方の風上にバンコック付近より強い CH_4 の放出源があり、上空ほどこれらの強い放出源の影響を強く受けているという輸送メカニズムの存在が考えられる。この輸送メカニズムも図4. 1. 2で説明したアジアモンスーンによる輸送の一環と言えるであろう。 CO 濃度は、春季に正の鉛直勾配、夏季から秋季にかけては勾配が小さい傾向が観測されている。図4. 1. 5は、図4. 1. 4のうち CH_4 濃度と CO 濃度の月平均値を同時にプロットしたものである。両者のゼロ点には明らかなオフセットが存在するが、季節的な変動傾向は極めて良く一致している。 CO も CH_4 と同様に地表が放出源であり大気中にはOHラジカルによる消滅反応が存在することから、鉛直勾配の季節性の一致は、 CO についてもバンコック付近に比べて風上の放出源が強いことを示唆している。なお、 CH_4 濃度とのオフセットの違いは、 CO がOHラジカルとの反応性に富んでいるためにバックグラウ

ンドでの鉛直勾配が大きいためであると説明することができる。

以上のように航空機によるASEを使った複数成分の同時観測を行うことによってアジア域におけるCO₂、CH₄及びCOの放出源の地域差や大気輸送の季節による違いを明らかにすることができた。これらの新たな情報はサブテーマ2で使われるモデルの制約条件として極めて有効であると考えられる。

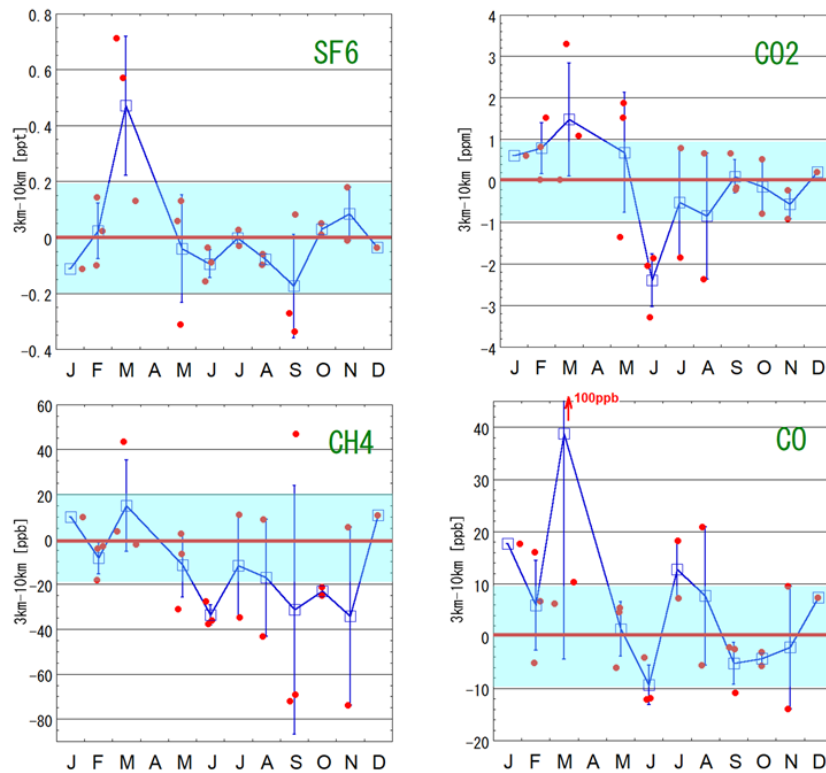


図4.1.4 バンコック上空におけるSF₆濃度、CO₂濃度、CH₄濃度及びCO濃度の高度3kmと10kmにおける差の季節変動。赤丸は個々の鉛直分布における濃度差、青四角は月平均値、エラーバーは月ごとの標準偏差を表す。

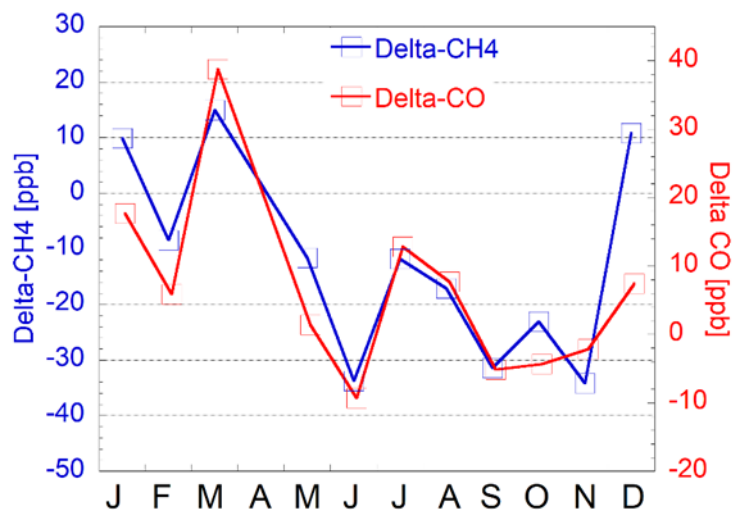


図4.1.5 バンコック上空におけるCH₄濃度とCO濃度の鉛直勾配の季節変動の比較。

(2) 排出インベントリデータの精度向上

Peng、GAINS、EDGAR version 4.3.2にEDGARのversion 4.2FTを加えた4種類のボトムアップのデータベースによる中国の全部門ならびに炭鉱、家畜、稲作からのCH₄排出量の推移を図4.1.6に示す。全部門の排出量は1990～2000年までほぼ横ばいで、その後増加に転じている。4種類のデータベースの中では、EDGARのversion 4.2FTが最も多く、次いでEDGARのversion 4.3.2、さらにGAINSとPengがほぼ同程度という順になっている。部門別には炭鉱の寄与が最も高く、家畜と稲作が続いている。炭鉱からの排出量が2000年以降の全部門の排出量増加の主要因である。経済成長に伴う石炭産出量の増加により、排出量が大幅に増加する結果となっている。トップダウンにより過大評価の可能性が指摘されているEDGARのversion 4.2FTが最も多いが、EDGARのversion 4.3.2はGAINSやPengと同程度まで減少している。家畜からの排出量は微増傾向で、データベース間の違いは小さい。一方、稲作からの排出量は、耕作面積の減少の影響により微減傾向である。EDGARが最も多く、GAINSやPengとの間に大きな違いが見られる。

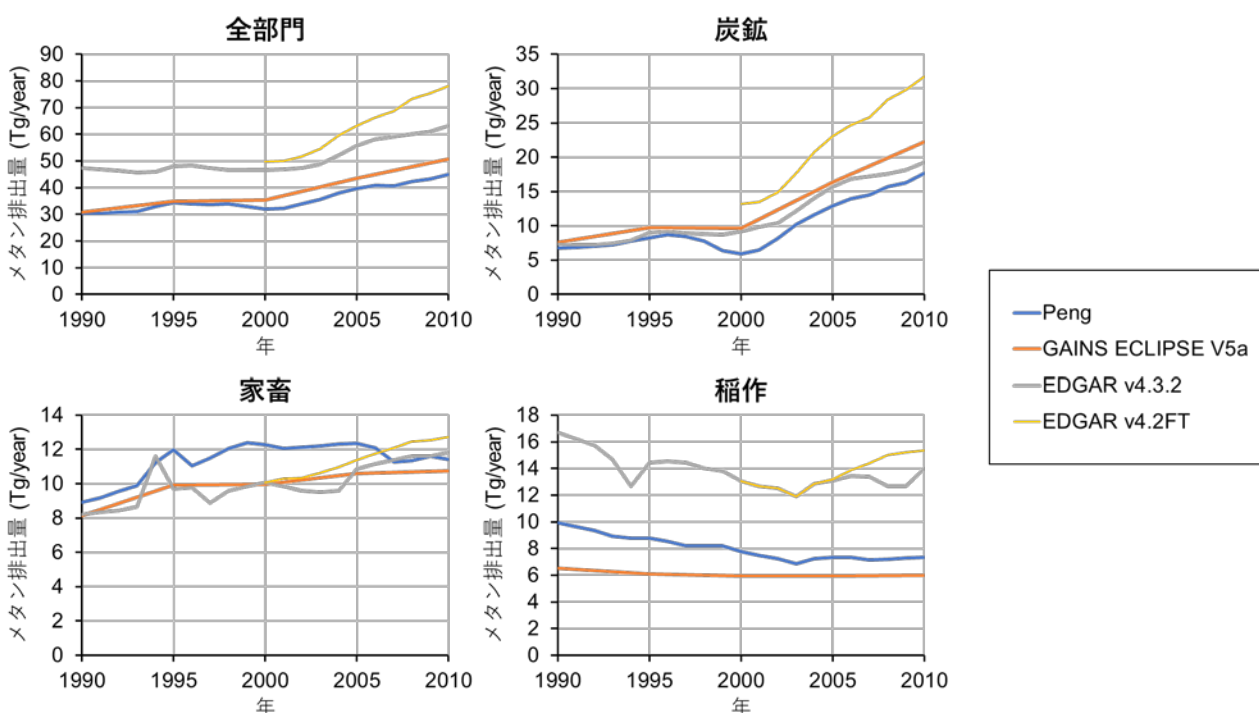


図4.1.6 4種類のデータベースによる中国の全部門ならびに炭鉱、家畜、稲作からのCH₄排出量の推移

中国の炭鉱、家畜、稲作からのCH₄排出量の推計に使用する活動量と排出係数、さらにその両方の不確実性に起因する排出量の不確実性を図4.1.7に示す。色付きの範囲が、不確実性によって生じる排出量の幅を表している。いずれの部門についても、活動量に起因する不確実性は小さい。炭鉱、家畜、稲作のそれぞれの活動量として用いられている石炭産出量、家畜頭数、耕作面積の出典とされている統計データに大きな違いはないためである。家畜については、稲作よりも排出量が多いものの、炭鉱や稲作に比べて、排出係数に起因する不確実性も比較的小さい。一方、稲作の排出係数に起因する不確実性は、排出量の多い炭鉱や家畜よりも大きい。この結果から、炭鉱と稲作の排出係数の不確実性が、CH₄の排出量総量の推計結果に大きく影響していることが示唆される。

炭鉱の排出係数は採掘の深さと炭層ガスの量に依存する。Pengは、中国内の地域による炭鉱の特徴の違いを考慮し、地域別に5.58～20.35 m³/tの排出係数（石炭産出重量あたりのCH₄排出量）を与えている。そのうち、石炭産出量の多い中国北東部における排出係数は6 m³/t弱である。一方、IPCCのガイドラインでは、デフォルトの排出係数として10～25 m³/tが提示されており、EDGAR version 4.3.2では自身のversion 4.2FTよりも低いものの10 m³/t、GAINSでは9.3 m³/tという値が採用されている。これら

の排出係数の違いが、炭鉱からの排出量の違いに大きく影響していると考えられる。稲作の排出係数は、多くの因子の影響を受ける。地域による気候、耕作期間、灌漑方式、施肥等の違いによって、排出係数は大きく変化する。各データベースにおけるこれらの因子の設定の違いにより、排出量の推計結果にも大きな違いが生じていると考えられる。炭鉱と稲作のいずれについても、現地の発生源の特徴を反映した適切な排出係数を与えることが重要であると言える。

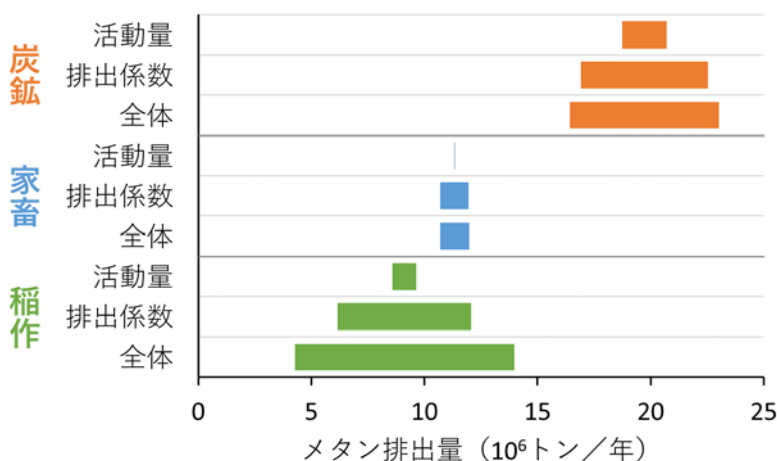


図4.1.7 中国の炭鉱、家畜、稲作からのCH₄排出量の推計に使用する活動量と排出係数、さらにその両方の不確実性に起因する排出量の不確実性

2010年の中国におけるトップダウンによる逆解析前後とボトムアップによる各データベースの稲作からのCH₄排出量、ならびに逆解析前との差分の水平分布を図4.1.8に示す。逆解析のデータは、サブテーマ2で開発されたNICAM-TM 4D-Varによる計算結果である。逆解析前ならびに逆解析に用いられたVISIT (Cao) では中国の南沿岸部で排出量が多く、逆解析により、該当地域の排出量がさらに多く推計されている。一方、VISIT (WH)、EDGAR、Pengでは、排出量が逆解析前よりもやや北側で多い一方、沿岸付近では少なくなっている。この南北の空間的なずれを逆解析の限界もしくは誤差とみなすことができれば、VISIT (Cao) よりもVISIT (WH)、EDGAR、Pengの方が、逆解析後により近い排出量が推計されていると言える。また、VISIT (WH)、EDGAR、Pengには、中国東北部にも比較的高い排出量が見られるにもかかわらず、逆解析前後やVISIT (Cao) には中国東北部における排出がほとんど現れていない。逆解析前には排出がほとんどない地域における排出をトップダウンで推計するのは難しいためか、中国東北部における排出は現実とは乖離しておりVISIT (Cao) の方が正確な推計ができていないのか、原因は不明である。中国東北部における土地利用の実態や稲作の特徴を把握した上で説明する必要がある。

1990～2018年の中国における逆解析前後と各データベースの稲作からのCH₄排出量の推移を図4.1.9に示す。逆解析前に比べて逆解析後は排出量が若干増加している。しかしながら、VISIT (Cao) を除く全てのボトムアップによる排出量は、全て逆解析後よりもさらに多くなっている。1990年から2003年にかけて、逆解析前後及びVISIT (Cao) はやや増加傾向にある一方、EDGAR、IPCC、Pengは減少している。統計データから得られる耕作面積が減少しているためである。もし増加傾向が正しいとすれば、耕作面積の統計データに問題があるか、耕作面積以外の何らかの因子が耕作面積の減少の影響を打ち消しているということになる。中国東北部における排出にも違いが見られることから、地域別の耕作面積の傾向と稲作の特徴の精査を要する。IPCCの改訂版では、新たに地域別の排出係数の設定等が施されており、改定前に比べて排出量が増加し、逆解析後との乖離が大きくなっている。しかしながら、IPCCよりも排出量の少ないPengの方が中国内の実情をより忠実に表現していると考えられることから、IPCCのガイドラインの改訂が、地域によっては、実情をよりよく表現する方向性には必ずしも寄与しないことも示唆される。いずれにしても、逆解析後の排出量は、複数のボトムアップによる排出量の大きな不確実性の範囲に含まれる。その中から排出実態をより正確に表現できる推計方法を模索する必要がある。

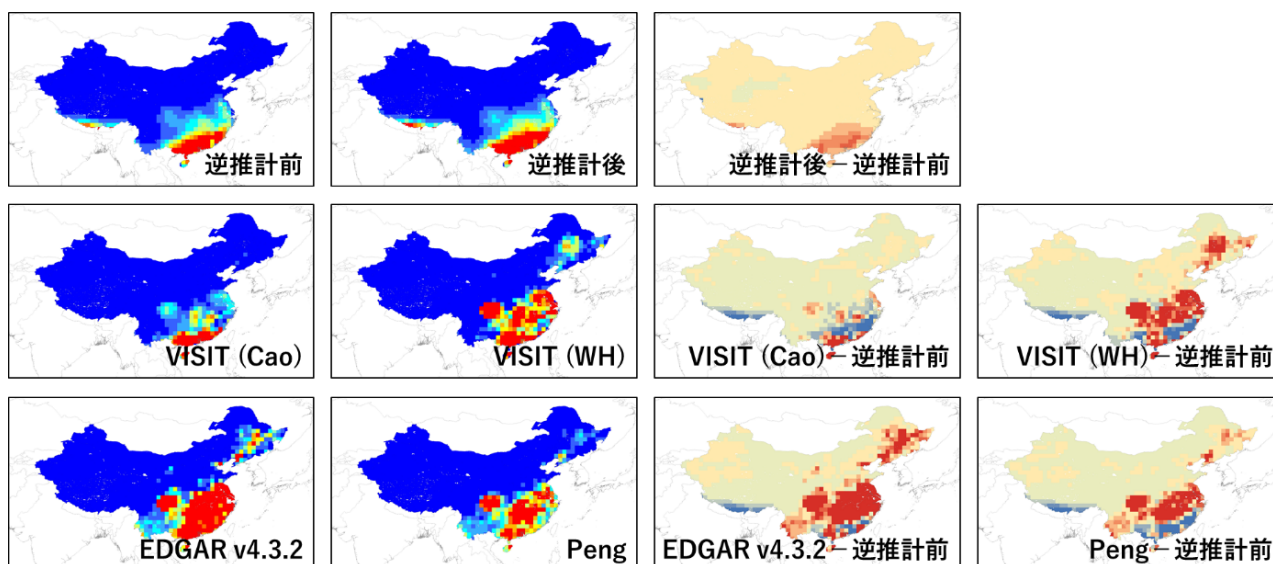


図4.1.8 2010年の中国における逆推計（逆解析）前後と各データベースの稲作からのCH₄排出量（左側）及び逆推計（逆解析）前との差分（右側）の水平分布

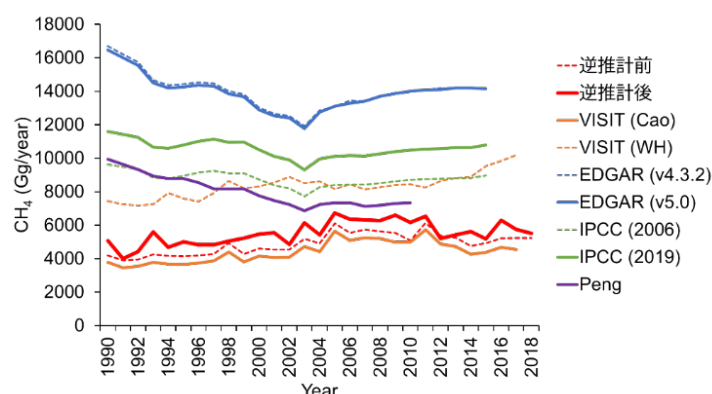


図4.1.9 1990～2018年の中国における逆推計（逆解析）前後と各データベースの稲作からのCH₄排出量の推移

2010年の中国におけるトップダウンによる逆解析前後とボトムアップによる各データベースの稲作以外の人為発生源からのCH₄排出量及び逆解析前との差分の水平分布を図4.1.10に示す。なお、EDGARとPengについては、炭鉱と家畜別に排出量の水平分布を示しており、差分は示していない。逆解析前後の排出量は黄海の西側で多い。逆解析により山東半島の付け根あたりで排出量が増加し、その周辺では減少する結果になっている。EDGARとPengの炭鉱からの排出量は、黄海からはやや西側にそれた炭鉱の多い山西省や陝西省あたりで多い一方、家畜からの排出量は黄海に近く飼養頭数の多い河北省、山東省、河南省あたりで多くなっている。すなわち、逆解析により排出量が多くなった地域が家畜、排出量が少なくなった地域が炭鉱からの排出の多い地域に一致する。したがって、このような排出量の空間分布の特徴から、炭鉱からの排出量は過大評価、家畜からの排出量は過小評価であることが示唆される。

1990～2018年の中国における逆解析前後と各データベースの稲作以外の人為発生源からのCH₄排出量の推移を図4.1.11に示す。また、炭鉱、家畜別の排出量の推移についても図4.1.11に併せて示す。なお、ここで示すIPCCの値は炭鉱と家畜のみを対象に排出量を推計したものである。逆解析前に比べて逆解析後は排出量が減少し、増加傾向が緩やかになっている。炭鉱と家畜に分けて見ると、炭鉱からの排

出量は石炭産出量の増加により、2000年以降増加傾向にある。ただし、図4.1.6にも示したように、EDGARのversion 4.2FT、4.3.2、5.0と更新されるにつれ、排出量は徐々に減少する結果となっている。一方、家畜からの排出量には年に対する増加傾向は見られない。EDGARよりもPengの方が多く、IPCCも改訂によりPengにより近い推計結果となっている。なお、EDGAR version 4.3.2に見られた2004年以降の不自然な増加はversion 5.0では解消されている。空間分布の特徴に加え、これらの時系列の特徴からも、炭鉱からの排出量は過大評価、家畜からの排出量は過小評価であることが示唆される。ボトムアップによる推計の改良により、排出量の推移が逆解析後により近づくと考えられる。

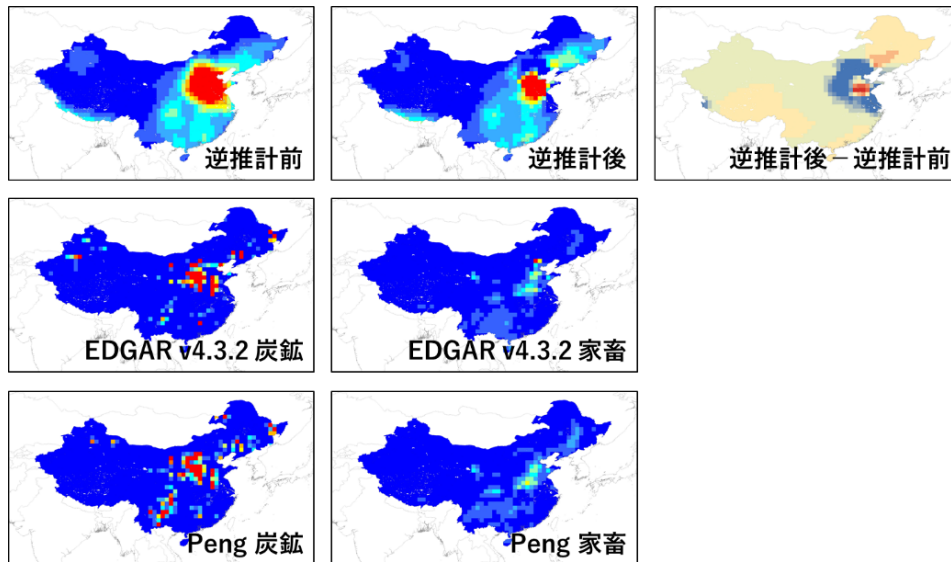


図4.1.10 2010年の中国における逆推計（逆解析）前後と各データベースの稲作以外の人為起源からのCH₄排出量（左側）及び逆推計（逆解析）前との差分（右側）の水平分布

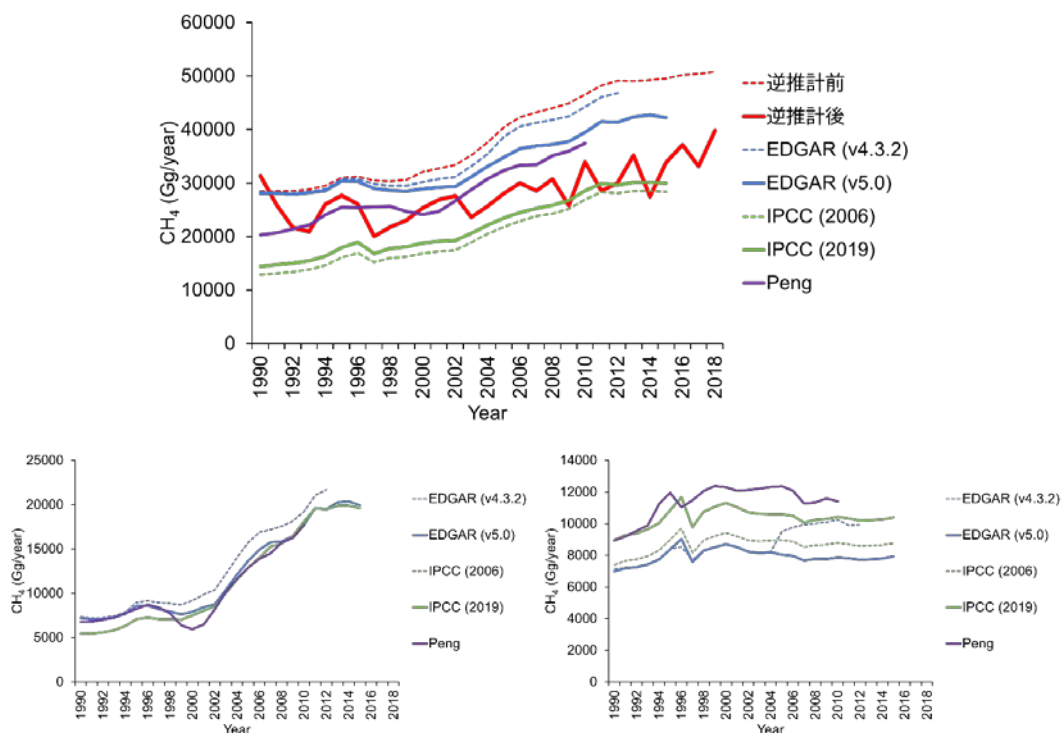


図4.1.11 1990～2018年の中国における逆推計（逆解析）前後と各データベースの稲作以外の人為発生源（上）及び炭鉱（左下）、家畜（右下）別のCH₄排出量の推移

(3) 継続的に運用可能なシステムへの応用

サブテーマ2で開発を進めるデータ同化システム（NICAM-TM 4D-Var）を、GOSAT-2プロジェクトにおける全球CO₂・CH₄吸収排出量推定値（レベル4プロダクト）の導出へ応用することを目指し、同システムを国立環境研究所が有する大型計算機へ移植した。システムの動作確認を実施すると共に、既存のGOSAT観測データを使用したモデル実験を開始し、GOSAT-2プロジェクトでの同システムの実運用に向けたシステム開発を行った。

(4) 国際ワークショップの開催

特にサブテーマ3、4が主導したCO₂・CH₄収支の総合的評価の結果を総括し課題の抽出を行うため、Global Carbon ProjectにおけるRECCAP-2プロジェクトの一環として、2019年3月18日～21日に静岡県御殿場市において国際会議を開催した。国内外の当該分野第一線の専門家（17ヵ国、約55名、IPCC第6次評価報告書、第5章代表執筆者等複数含む）を招聘し本研究全体の成果として得られたモデル解析データや複数の手法比較に基づく統合的解析によって得られた知見の検討や、論文への取りまとめに向けた議論を行った。得られた成果は、特にサブテーマ3、4の報告に詳細に記載されている。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで地上付近でさえ観測がほとんど存在していなかったバンコック上空を含む東京ーバンコック路線においてCO₂、CH₄、CO濃度の緯度分布及び鉛直分布の観測をほぼ月1回の頻度で確実に実施することに成功した。また、緯度別・高度別の各濃度の季節変動や経年増加の特徴を明らかにするとともに、不規則な高濃度データにも地域の放出源・吸収源や輸送過程の情報が含まれており、複数成分の同時観測がその同定に有効であることを示した。さらに大気境界層や自由対流圏における鉛直勾配に明瞭な季節変動が存在することを明らかにし、その特徴からCH₄やCOの強い放出源が風上に存在することや、モンスーン循環に伴う大気輸送がアジア域の濃度分布に大きく影響していることを示すことができた。

これまでにボトムアップ、トップダウンそれぞれによる排出量の推計が行われ、両者による推計値の乖離が存在するところまでは既往研究においても指摘されつつあるが、その原因についてボトムアップによる推計の詳細まで遡って検討し問題点を見出すような例は限られていた。本研究課題が組織されたことにより、人為起因の排出量をボトムアップ的に推計して高解像度のデータベースを構築すると同時に、ボトムアップとトップダウンのそれぞれの専門研究者が乖離の原因について直接議論する機会が得られ、実際にボトムアップの問題点を見出せたことは、今後の排出量の検証の先駆的な例として、科学的意義が大きいと言える。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

航空機観測（CONTRAIL）による上空のCH₄濃度データは世界でも希少であることから、Global Carbon Projectによる全球CH₄排出量推定計画（GCP-CH₄）からデータ提供の要請を受けた。GCPは、全球炭素循環の自然科学的・人間社会的側面を総合的に扱う国際プロジェクトで、GCPが発表する全球炭素収支の年次報告「Carbon Budget」、項目別の報告「CH₄ Budget」等は、IPCC報告書を初めとする各種政策決定者向けの報告書に重要な知見を提供している。さらに、本研究の航空機観測によって得られた上空のCH₄濃度データはGOSATチームに提供され、検証データとして活用されている。IPCCへの直接的貢献としては、当課題代表者は2019年8月に公開されたIPCC特別報告書「Climate Change and Land」において第6章Lead Author（LA）として任命され、科学的内容に責任のある役割を果たした。

本研究課題で得られた科学的知見に基づき、国内の関係府省庁・機関と連携して「パリ協定における我が国の貢献のための温室効果ガス観測及びデータ利活用」を地球観測連携拠点（温暖化分野）の報告としてとりまとめ、文部科学省地球観測推進部会（2018年8月、11月）、内閣府総合科学技術・イノベーション会議政策討議（2019年3月）に専門家として知見を提供し、統合イノベーション戦略2019

にその一部が反映された。加えて、これらの日本の取組を気候変動枠組条約第25回締約国会議（COP25）の公式サイドイベント等で国際的に普及した（2019年12月）。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の航空機観測によって得られた上空のCO₂濃度データ及びCH₄濃度データはDOIを付与して国立環境研究所のデータベースから公開する準備をしている（※）。

※和文 <http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20180208.001.html>

英文 <http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20180208.001-e.html>

これらのデータは世界でも貴重な上空での高精度観測値としてIPCC報告書を初めとする各種政策決定者向けの報告書に重要な知見として活用が見込まれる。

パリ協定に基づき各国が提示する目標が達成されているかを確認するために、観測結果に基づくトップダウンによる逆解析により、各国から提出されるボトムアップによる温室効果ガス排出量を検証することが、2019年に出されたIPCCガイドラインの改訂版でも謳われている。本研究における取り組みは、排出量検証の一つの例として、気候変動緩和を進める国際的取組に貢献するものである。

6. 国際共同研究等の状況

本研究の航空機観測は欧州の民間航空機観測プロジェクトであるIAGOS-COREとの協力関係が成立しており、IAGOS-COREでCO₂濃度やCH₄濃度の観測が開始された際には観測値の相互比較研究を実施する予定である。

米国のNCARとNOAAが主導するアジアモンスーンによる物質輸送をターゲットとした航空機観測キャンペーンであるACCLIPとの共同研究を行う計画があり、ACCLIP観測の際には本研究の成果を含むCONTRAILプロジェクトの観測値を提供する予定である。

地球観測に関する政府間会合（GEO）活動として、2017年9月GEOSSアジア太平洋会議（ベトナム・ハノイ、分科会共同議長）、2018年6月GEOパリ協定ワークショップ（スイス・ジュネーブ）、2018年10月GEOSSアジア太平洋会議（京都、分科会共同議長）、2019年11月開催AOGEOシンポジウム（オーストラリア・キャンベラ）等の活動に参画し、各国地球観測機関・研究者に向けて本研究の成果を普及した。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 茶谷聡, P. CHEEWAPHONGPHAN, 小林伸治, 田邊潔, 山地一代, 高見昭憲: 大気環境学会誌, 54, 2, 62-74 (2019), 日本国内大規模固定発生源の業種別・施設種別・燃料種別大気汚染物質排出インベントリの構築.
- 2) P. CHEEWAPHONGPHAN, S. CAHTANI, N. SAIGUSA: Sustainability, 11, 7, 2054 (2019), Exploring Gaps between Bottom-Up and Top-Down Emission Estimates Based on Uncertainties in Multiple Emission Inventories: A Case Study on CH₄ Emissions in China.
- 3) P. CHEEWAPHONGPHAN, T. HANAOKA, S. CAHTANI: Environmental Research Communications, 2 (5), 051009 (2020), Long-term trend of regional passenger road transport demand and emission estimation under exhaust emission regulation scenario in Thailand.
- 4) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, J.G. CANADELL, B. POULTER, S. SITCH, L. CALLE, Y.Y. LIU, A. I. J. M. van DIJK, T. SAEKI, N. SAIGUSA, P. FRIEDLINGSTEIN, A. ARNETH, A. HARPER, A.K. JAIN, E. KATO, C. KOYAN, F. LI, T.A.M. PUGH, S. ZAEHLE, A. WILTSHIRE, F. CHEVALLIER, T. MAKI, T. NAKAMURA, Y. NIWA, C. RÖDENBECK: Nature Communications, 9, 1154, doi:10.1038/s41467-018-03374-x (2018a), Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia.
- 5) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, P. FRIEDLINGSTEIN, B. POULTER, F. CHEVALLIER, P.

- CIAIS, J.G. CANADELL, A. BASTOS, R. LAUERWALD, L. CALLE, K. ICHII, P. ANTHONI, A. ARNETH, V. HAVERD, A.K. JAIN, E. KATO, M. KAUTZ, R.M. LAW, S. LIENERT, D. LOMBARDOZZI, T. MAKI, T. NAKAMURA, P. PEYLIN, C. RÖDENBECK, R. ZHURAVLEV, T. SAEKI, H. TIAN, D. ZHU, T. ZIEHN T. *Global Change Biology*, 26, 3, 1068-1084, doi:10.1111/gcb.14917 (2020) State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget
- 6) P.K. PATRA, D. CRISP, J.W. KAISER, D. WUNCH, T. SAEKI, K. ICHII, T. SEKIYA, P.O. WENNERBERG, D.G. FEIST, D. POLLARD, D.W.T. GRIFFITH, V.A. VELAZCO, M. De MAZIRE, M.K. SHA, C. ROEHL, A. CHATTERJEE, K. ISHIJIMA: *Scientific Reports*, doi: 10.1038/s41598-017-13459-0 (2017), Orbiting carbon observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-grams increase of carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño.
- 7) T. UMEZAWA, H. MATSUEDA, Y. SAWA, Y. NIWA, T. MACHIDA, L. ZHOU: *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14851-14866 (2018), Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements.
- 8) T. UMEZAWA, H. MATSUEDA, T. ODA, K. HIGUCHI, Y. SAWA, T. MACHIDA, Y. NIWA and S. MAKSYUTOV: *Scientific Reports*, 10.1038/s41598-020-64769-9 (2020), Statistical characterization of urban CO₂ emission signals observed by commercial airliner measurements.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 町田敏暢: エコひょうご春号, 2018年3月号 (2018)
「JALの期待で二酸化炭素を測る-民間航空機を使った世界をカバーする観測プロジェクト-」
- 2) 町田敏暢, 坪井一寛, 丹羽洋介, 梅澤拓, 石島健太郎, 松枝秀和: JETI、vol.68 No.1、2020年1月号 (2020)
「民間航空機が切り拓く大気中二酸化炭素の新たな観測ネットワーク」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) S. Chatani, S. Garivait, P. Cheewapongphan, A. Junpen, P. Thao, T. Boonman (2017) JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan.
“Development and validation of fine-scale gridded emission inventory of anthropogenic GHGs and air pollutants for Thailand”
- 2) N. Saigusa, T. Machida, P.K. Patra, Y. Niwa, K. Ichii (2017) JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan.
“Monitoring carbon cycle change using an integrated observation, modeling and analysis system—project summary”
- 3) T. Machida, S. Aoki, H. Matsueda, Y. Sawa, S. Ishidoya, T. Umezawa, Sugawara, D. Goto, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Nakazawa, S. Morimoto (2017) JpGU-AGU Joint Meeting, Chiba, Japan.
“Distributions and temporal changes of greenhouse gases in upper atmosphere observed by aircraft”
- 4) Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa, N. Saigusa (2017) JpGU-AGU Joint Meeting, Chiba, Japan.
“CO₂ flux variation in Southeast Asia for 2015 estimated by in-situ aircraft measurements”
- 5) 梅澤拓, 松枝秀和, 丹羽洋介, 澤庸介, 町田敏暢, Zhou L. (2017) JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan.

- “Climatological variations of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements”
- 6) Y. Niwa, Y. Fujii (2017) JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan.
“Estimation of a posterior error covariance using a linear quasi-Newton method and its application to an inversion of CO₂ sources and sinks”
- 7) Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Katsumata, H. Eto, D. Goto, S. Morimoto, S. Aoki (2017) Global Monitoring Annual Conference, Boulder, USA.
“10 years of observation for greenhouse gases by commercial airliner in the CONTRAIL project”
- 8) T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi (2017) 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland.
“Present activities and future plan for CONTRAIL project”
- 9) T. Umezawa, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Machida, L. Zhou (2017) 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland.
“Variations of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements”
- 10) Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa, N. Saigusa (2017) 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland.
“Spatiotemporal variation of CO₂ flux in Southeast Asia estimated from CONTRAIL”
- 11) Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, T. Umezawa (2017) 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland.
“Sensitivity analysis of CO₂ growth rates estimation with sub-sampling method for occasional observation opportunities by commercial airliner”
- 12) Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Katsumata, T. Umezawa (2017) 19th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2017), Dubendorf, Switzerland
“11-year statistics for in-situ CO₂ data obtained in airliner project of CONTRAIL.”
- 13) 松枝秀和, 町田敏暢, 澤庸介, 丹羽洋介, 梅澤拓 (2017) 第23回大気化学討論会, 高松.
“人為源二酸化炭素の増加による鉛直濃度勾配の長期変化”
- 14) N. Saigusa, T. Machida, P.K. Patra, Y. Niwa, K. Ichii (2017) The 13th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS), Helsinki, Finland.
“Detecting (Monitoring) carbon cycle change using an integrated observation, modeling and analysis system.”
- 15) N. Saigusa, T. Machida, T. Umezawa, P.K. Patra, T. Saeki, Y. Niwa, K. Ichii, M. Kondo (2017) AsiaFlux Workshop 2017, Beijing, China.
“Detecting carbon cycle change using an integrated observation, modeling and analysis system.”
- 16) N. Saigusa, M. Ueno, H. Kobayashi (2017) The 10th GEOSS Asia-Pacific Symposium
“Accelerating the realization of the SDGs with Earth Observations: Lessons from the Asia-Oceania Region.”, Hanoi, Vietnam.
“Earth Observation Platforms for Monitoring GHGs by Multi-Agency Coordinated with Japanese Alliance for Climate Change Observation”
- 17) T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa and K. Tsuboi (2018) JpGU Annual Meeting, Chiba, Japan.
“Observations of Atmospheric Greenhouse Gases using Commercial Aircraft by CONTRAIL

- project”
- 18) T. Machida, M. Sasakawa, S. Nakaoka, H. Mukai, K. Katsumata, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi, and H. Matsueda, (2018) AOMP 2018 Focus Group Workshop on Climate Change and Clean Air, Singapore. (invited)
“Monitoring of atmospheric greenhouse gases in Asia-Pacific region”
- 19) T. Machida, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi and H. Matsueda (2018) GEOS-AP Symposium, Kyoto, Japan.
“Characteristics of atmospheric greenhouse gases over Asia-Pacific region observed by CONTRAIL aircraft project”
- 20) T. Machida, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi, and H. Matsueda, 2018 joint 14th iCAGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan, 25-29 September 2018. (invited)
“Contributions of commercial aircraft for researching atmospheric greenhouse gases”
- 21) Y. Niwa, AOGS 2018, Honolulu, USA, June 2018 (invited to Biogeosciences Section’s Kamide Lecture by an Early Career Researcher). 【招待講演】
“Inverse modeling with aircraft observations for constraining CO₂ flux estimates in Asia”
- 22) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Saito, H. Matsueda, and N. Saigusa, 地球惑星科学連合2018年大会, (千葉, 2018年5月).
“Forward and backward model analyses on high CH₄ events observed over the western North Pacific”
- 23) P. Cheewaphongphan and S. Chatani: AOGS 15th Annual Meeting (2018)
“An Inventory of Air Pollutions from Road Transport in Thailand: Status and Trend During the Past Decade”
- 24) P. Cheewaphongphan and S. Chatani: AOGS 15th Annual Meeting (2018)
“A Comparative Study on Anthropogenic Emission Inventory Development: Case Study Methane Emissions over China”
- 25) 茶谷聡, Penwadee Cheewaphongphan, 小林伸治, 田邊潔, 山地一代, 高見昭憲: 第59回大気環境学会年会 (2018)
“固定発生源の業種別・施設種別・燃料種別汚染物質排出インベントリの構築”
- 26) Y. Niwa, A. Ito, T. Machida, M. Sasakawa, Y. Tohjima, Y. Terao, T. Umezawa, S. Morimoto, S. Aoki, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, E. Dlugokencky, C. Harth, P. B. Krummel, R. L. Langenfelds, Z. M. Loh, J. Mühle, S. O’Doherty, R. G. Prinn, M. Ramonet, P. Salameh, C. Sweeney, R. Weiss, D. Young, S. Castaldi, S. Noce, M. Saunio, and A. R. Stavert, 日本地球惑星科学連合2019年大会, AAS04-28, 千葉県千葉市, 2019年5月26-30日.
“Global inverse analysis of CH₄ fluxes using NICAM-TM 4D-Var”
- 27) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Saito, H. Matsueda, and N. Saigusa, 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG8), Amsterdam, The Netherlands, June 12-14, 2019.
“Transport pathways of high CH₄ events observed over the western North Pacific”
- 28) T. Machida, Y. Sawa, Y. Niwa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Ishijima, H. Matsueda, CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation AC-VC-15, Tokyo, June 2019.
“CONTRAIL project used for validating GOSAT and Modeling,”
- 29) T. Machida, M. Sasakawa, K. Ishijima, M. Arshinov, S. Mitin and T. Maximov, iLEAPS / IGAC-Japan 合同研究集会2019, 名古屋、2019年9月

“3-D distributions of atmospheric greenhouse gases over Siberia,”

- 30) P. Cheewaphongphan, S. Chatani and N. Saigusa: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
 “The 2019 Refinement emission estimation: CH₄ emission in Asia during last decades”

(3) 知的財産権

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) 町田敏暢, 関西創価高等学校スーパーグローバルハイスクールフィールドワークにて講義
 「Monitoring of Atmospheric CO₂, its temporal changes and global distribution (英語)」
 (2017年7月19日、24名)
- 2) 町田敏暢, トークイベント「そらエコinつくばーJAL国際線パイロットと温室効果ガス研究者によるクロストークー」(主催: 国立環境研究所、2017年7月22日)にて講演ならびに市民と対話
- 3) 町田敏暢, 埼玉県立熊谷高等学校スーパーサイエンスハイスクール見学会での講義「増え続けるCO₂ーグローバルな視点でCO₂の循環を探るー」(2017年11月24日、38名)
- 4) 町田敏暢, COOL CHOICE普及啓発事業環境セミナー「そらエコinいけだ」(主催: 大阪府池田市、2017年12月3日、池田市くれは音楽堂、200名)にて講演ならびに市民と対話
- 5) 町田敏暢, 航空機観測の活動と成果ならびにデータ配布情報はWebページにて国内外に発信,
<http://www.cger.nies.go.jp/contrail/>
- 6) 三枝信子, 日本科学未来館, 2018年1月20日, 「第二部 地球を観る技術」, 日本科学未来館トークイベント「宇宙飛行士と考える、地球と私たちとのつながり」にて観測活動を紹介、市民と対話(ニコニコ生放送 <http://live.nicovideo.jp/watch/lv309324096>、アクセス数11,227人、2018年5月現在)
- 7) 町田敏暢, 講演: “CONTRAIL Project”, Earth Day/ Boeing Externship Program, 2018年4月27日, ボーイングジャパン、東京会場及びボーイング本社ネット中継
- 8) 町田敏暢, イベント: IGAC2018 サイエンスカフェ、2018年9月28日、高松
- 9) 三枝信子, 国立京都国際会館, 2018年10月31日「Terrestrial observations on the carbon cycle: Why do we need to thoroughly observe the land sink?」第15回地球観測に関する政府間会合パネルセッションにて各国政府関係者に当課題の成果の一部を紹介
- 10) 三枝信子, 東京大学伊藤謝恩ホール, 2018年12月26日「パリ協定への貢献に向けた地球システムモニタリング・予測へ向けた研究の展望」東京大学大気海洋研究所気候システム研究系シンポジウムにて一般来場者に当課題の成果の一部を紹介
- 11) 町田敏暢, 講演: 「増え続けているCO₂ー北海道では? 世界では?ー」、十勝環境セミナー: 変貌する十勝の気候と地球温暖化、2019年2月16日、帯広
- 12) 町田敏暢, ニコニコ生放送「【国立環境研究所】気候[変]会議&潜入ツアー」にて民間航空機による温室効果ガス観測を紹介。2019年4月20日、38,000視聴。
- 13) 三枝信子, ニコニコ生放送「【国立環境研究所】気候[変]会議&潜入ツアー」にて衛星観測をはじめとする温室効果ガスの観測と吸収・排出源推定に関する研究の役割を紹介。2019年4月20日、38,000視聴。
- 14) 三枝信子, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2019年5月17日, 日本気象学会2019年度春季大会シンポジウム「多重階層システムとしての気候の研究」にて「地球温暖化時代の気候研究」にて本研究の成果の一部を来場者に紹介。
- 15) 町田敏暢, 講演: 「増え続けているCO₂ 最新の観測事実を知る」令和元年度北海道地球温暖化防止活動推進員学習会、2019年9月、札幌
- 16) 三枝信子, 地球環境パートナーシッププラザ (GEOC), 2019年10月16日, 2019年環境ジャーナリスト講座. において一般来場者 (ジャーナリスト) に向けて気候変動と陸域環境における課題に

ついて説明（土地関係特別報告書内容紹介）

- 17) 町田敏暢，出前授業：「二酸化炭素（CO₂）はどこから来てどこに行くのだろう」北海道陸別中学校、2019年11月、陸別
- 18) 三枝信子，東京大学伊藤謝恩ホール，2019年11月21日，IPCCシンポジウム「暮らしの中の気候変動」において、当課題の成果の一部を含めてIPCC土地関係特別報告書の内容を一般来場者に向けて解説
- 19) 町田敏暢，丹羽洋介，梅澤拓 イベント：国立環境研究所春の一般公開及び夏の大公開において CONTRAILプロジェクトの活動や実績を一般の来場者に紹介。2017年4月22日、2017年7月22日、2018年4月20日、2018年7月21日、2019年7月20日、国立環境研究所

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞（2017年10月25日）、全国版、17頁、「精度高め温暖化対策促進、温室効果ガスの長期監視」にて「民間企業の協力で航空機でも」と紹介）
- 2) 成果記者発表（2018年3月20日）、文部科学省記者会（筑波研究学園都市記者会、環境記者会、環境省記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、神奈川県政記者クラブ、横須賀市政記者クラブ、青森県政記者会、むつ市政記者会、高知県政記者クラブ、沖縄県政記者クラブ、名護市駐在3社、気象庁記者クラブ同時配付）、千葉大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所・気象研究所、近藤雅征・市井和仁・プラビール・パトラ・佐伯田鶴・三枝信子・眞木貴史・丹羽洋介「気候の自然変動が、大規模森林伐採による二酸化炭素の排出を相殺した現象を世界で初めて検出！東南アジアの生態系によるCO₂排出量が2000年代に減少した原因を解明、地球温暖化現象の理解に向けての新たな足掛かり」
- 3) NHK NEWS WEB（2018年3月20日）「気候の自然変動がCO₂排出抑制 千葉大など調査」
- 4) つくばサイエンスニュース（2018年3月20日）「周期的自然変動がCO₂排出に影響—森林伐採による増加抑制も」
- 5) 時事ドットコムニュース（2018年3月20日）「強いエルニーニョで増加懸念＝東南アジアCO₂排出量—千葉大など」
- 6) 日本経済新聞（2018年3月26日）「弱いエルニーニョ現象 東南アCO₂排出抑制」
- 7) 日刊工業新聞（2018年3月27日）「森林伐採によるCO₂排出 気候変動で相殺 千葉大など解明」
- 8) 環境情報メディア環境展望台「千葉大など、東南アジアの森林伐採等に由来するCO₂排出とエルニーニョ現象の因果関係を解明」
- 9) 東京新聞「地球温暖化を裏で操る」（2018年4月23日）
- 10) 中日新聞「地球温暖化を裏で操る」（2018年4月26日）
- 11) 成果記者発表（2018年11月6日）、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会、気象庁記者クラブ同時配付、梅澤拓ほか「10年間の民間旅客機観測（CONTRAIL）によりアジア太平洋地域の大气中二酸化炭素分布の三次元構造を解明—アジアモンスーン高気圧による隔離と流出が明らかに—」
- 12) 成果記者発表（2019年12月12日）、環境省記者クラブ、環境記者会、千葉県政記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、筑波研究学園都市記者会、気象庁記者クラブ同時配付、千葉大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所・気象研究所、近藤雅征・プラビール・パトラ・市井和仁・佐伯田鶴・三枝信子・眞木貴史「CO₂の放出と吸収のより正確な推定に成功～IPCC第5次評価報告書からの進展と第6次評価報告書に向けた課題～」
- 13) Physics.org（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 14) Agenparl（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 15) Pharma Jobs（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved

- towards the goal of the Paris agreement]
- 16) Science Codec (2019年12月12日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 17) Bioengineer.org (2019年12月12日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 18) One News Page (2019年12月12日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 19) ScienceDaily (2019年12月12日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 20) Environmental News Network (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 21) Terra Daily (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 20) Live Science Tech (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 23) Long Room.com (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 24) Industry Global News24 (2019年12月13日) 「Advancement in estimation of carbon removal by terrestrial ecosystems」
- 25) Eurasia Review (2019年12月14日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 26) SCIENMAG (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 27) 電気新聞(2019年12月16日) 「千葉大などがCO₂収支を精度よく推定する手法を整理」
- 28) 化学工業日報(2019年12月18日) 「千葉大などがCO₂収支を精度良く推定する手法を整理」
- 29) 大学ジャーナルONLINE(2019年12月18日) 「CO₂の放出と吸収、より正確に推定 千葉大など新手法」
- 30) 環境情報メディア 環境展望台(2019年12月19日) 「千葉大など、「陸域CO₂収支量」推定手法間のばらつきを解消」
- 31) 成果記者発表 (2020年5月15日)、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配信、梅澤拓・町田敏暢・丹羽洋介・Shamil Maksyutov・松枝秀和・澤庸介・小田知宏・Kaz Higuchi 「民間旅客機が捉えた都市圏からのCO₂排出 ～世界35都市上空でのCO₂観測データの統計解析～」

(6) その他

- 1) 町田敏暢, 丹羽洋介, 梅澤拓, 澤庸介, 坪井一寛, 松枝秀和 平成29年度地球温暖化防止活動環境大臣表彰, 国際貢献部門, CONTRAILチーム, 2017年12月
- 2) 町田敏暢, 丹羽洋介, 梅澤拓, 澤庸介, 坪井一寛, 松枝秀和 第1回日本オープンイノベーション大賞環境大臣賞、CONTRAILチーム、2019年3月

8. 引用文献

- 1) S. Peng, S. Piao, P. Bousquet, P. Ciais, B. Li, X. Lin, S. Tao, Z. Wang, Y. Zhang and F. Zhou: Atmos. Chem. Phys., 16, 22, 14545-14562 (2016), Inventory of Anthropogenic Methane Emissions in Mainland China from 1980 to 2010.
- 2) A. Stohl, B. Aamaas, M. Amann, L. H. Baker, N. Bellouin, T. K. Berntsen, O. Boucher, R. Cherian, W. Collins, N. Daskalakis, M. Dusinska, S. Eckhardt, J. S. Fuglestedt, M.

- Harju, C. Heyes, Ø. Hodnebrog, J. Hao, U. Im, M. Kanakidou, Z. Klimont, K. Kupiainen, K. S. Law, M. T. Lund, R. Maas, C. R. MacIntosh, G. Myhre, S. Myriokefalitakis, D. Olivié, J. Quaas, B. Quennehen, J.-C. Raut, S. T. Rumbold, B. H. Samset, M. Schulz, Ø. Seland, K. P. Shine, R. B. Skeie, S. Wang, K. E. Yttri and T. Zhu: *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 18, 10529-10566 (2015), Evaluating the Climate and Air Quality Impacts of Short-Lived Pollutants.
- 3) G. Janssens-Maenhout, M. Crippa, D. Guizzardi, M. Muntean, E. Schaaf, F. Dentener, P. Bergamaschi, V. Pagliari, J. G. J. Olivier, J. A. H. W. Peters, J. A. van Aardenne, S. Monni, U. Doering, A. M. R. Petrescu, E. Solazzo and G. D. Oreggioni: *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 3, 959-1002 (2019), EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the Three Major Greenhouse Gas Emissions for the Period 1970-2012.
- 4) P. K. Patra, T. Saeki, E. J. Dlugokencky, K. Ishijima, T. Umezawa, A. Ito, S. Aoki, S. Morimoto, E. A. Kort, A. Crowell, K. R. Kumar and T. Nakazawa: *J. Meteor. Soc. Japan*, 94, 1, 91-113 (2016), Regional Methane Emission Estimation Based on Observed Atmospheric Concentrations (2002-2012).
- 5) A. Ito, M. Inatomi: *Biogeosciences*, 9, 2, 759-773 (2012), Use of a Process-Based Model for Assessing the Methane Budgets of Global Terrestrial Ecosystems and Evaluation of Uncertainty.

II-2 同化技術を用いたメタン解析手法の開発

気象庁気象研究所

全球大気海洋研究部 第三研究室
気候・環境研究部 第三研究室

眞木 貴史 (2018年度より分担から代表へ移行)
坪井 一寛
石島 健太郎 (2018年7月より参加)
澤 庸介 (2019年3月まで参加)

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター

物質循環モデリング・解析研究室

丹羽 洋介

(2018年3月まで気象庁気象研究所在籍。2018年度より代表から分担へ移行)

(2018年4月より現職にて研究分担者として参加)

<研究協力者>

気象庁地球環境・海洋部

中村 貴

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：19,840千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：8,420千円、平成30年度：4,000千円、令和元年度：7,420千円）

[要旨]

包括的な温室効果ガス収支の推定を行うためには、二酸化炭素 (CO₂) だけでなく第2の温室効果ガスであるメタン (CH₄) も含めた複合的な解析が必要である。さらに、地表面フラックスの起源毎の推定精度向上のためには、燃焼起源トレーサーである一酸化炭素 (CO) 等を活用した解析が有効である。本研究ではCO₂とCH₄を複合的に解析可能とするため、データ同化技術を用いて開発してきた高解像度逆解析システムNICAM-TM 4D-Varに新たにCH₄モジュールを実装し、高解像度のCH₄逆解析システムを開発した。また、同システムをベースとした解析誤差共分散行列の推定手法を新たに開発し、高精度かつ高解像度の誤差解析を可能とした。さらに、COを含めたCO₂-COジョイント逆解析システムを開発した。

開発した大気輸送モデルのCH₄輸送計算性能について、アジア・太平洋域の航空機観測を用いて、季節変動の再現性を確認した。さらに、同観測で夏季に捕捉される高濃度イベントについて、モデルの解像度による再現性の評価や高濃度をもたらす輸送経路、地表面フラックスの寄与分布を明らかにした。また、CO₂-COジョイント逆解析システムを2015年インドネシアで発生した大規模森林火災の事例に適用し、森林火災起源のフラックス推定について、逆解析による精度向上を確認した。GSAM-TMを用いたCO₂の長期逆解析では、新たにGOSATのカラム平均濃度のデータを用いて解析を行い、GOSATデータに施す補正のフラックス推定値に対する影響を明らかにした。本研究ではさらに、NICAM-TM 4D-Varを用いてCH₄とCO₂の長期逆解析を実施した。CH₄の逆解析では、中国の排出量が過大評価である可能性がある等、ボトム・アプローチで推定されたフラックスデータに対する詳細な示唆を得ることができた。CO₂の逆解析においても高解像度のフラックスが推定される一方で、長期逆解析の実績があるGSAM-TMと整合的な経年変動パターンが導出されていることを確認した。しかし、アノマリーの強度等には差異も見られるため、さらなる信頼性向上を目指して、継続して複数の逆解析の結果を比較し、推定値に新たな拘束をもたらす観測拡充の検討や、さらなる手法開発に繋げていく必要がある。

[キーワード]

メタン、二酸化炭素、同化、逆解析、大気輸送モデル

1. はじめに

大気中のメタン (CH_4) は二酸化炭素 (CO_2) に次ぐ温室効果ガスであるが、その排出源は多岐にわたる一方で、排出プロセスに関する知見は十分ではないため、統計やモデルによるボトムアップ・アプローチからの推定量の不確定性は CO_2 よりも大きい。そのため、 CH_4 の排出量推定において、大気観測を用いるトップダウン・アプローチの重要度は高い。特に CH_4 は CO_2 よりも比較的小スケールの排出源（化石燃料採掘場や湿地、水田等）を有することから、高解像度の地表面フラックスを推定することが肝要である。トップダウン・アプローチの代表的な手法である逆解析において高解像度のフラックス推定を行うためには、気象予報等の分野で用いられているデータ同化の技術を取り入れる等、従来の手法から脱却して抜本的なシステムの開発が必要となってくる。

4次元変分法は、気象予報分野等で用いられる最先端のデータ同化技術の一つであり、温室効果ガスの逆解析の分野でも導入されている手法である。しかし、温室効果ガス特有の線型性や、質量保存性の問題、また長寿命気体であるがゆえに気象予報よりも同化ウィンドウ（1つの最適化計算で対象とする解析期間の長さ）をはるかに長く設定しなければならないことから、温室効果ガスの逆解析に向けた独自の開発も必要不可欠となっている。Niwa et al., (2017a, b)^{1), 2)}は4次元変分法の逆解析システムNICAM-TM 4D-Varを開発し、 CO_2 の逆解析に適用しているが、 CH_4 の逆解析については、ベースとしている大気輸送モデルNICAM-TMに CH_4 が未実装であり、着手されていなかった。さらにNICAM-TM 4D-Varシステム自体の高度化も必要となっており、今後の起源別推定を可能とするためのフラックスモデルの導入や解析誤差共分散行列の推定手法の開発が課題となっていた。

CH_4 には CO_2 と共通、または類似の排出源もあることから、 CH_4 のフラックスを正確に推定することにより、 CO_2 のフラックス推定値の精度を向上させることが可能であることが先行研究³⁾により示されている。さらに、燃焼起源のトレーサーである一酸化炭素 (CO) を用いることにより、 CO_2 や CH_4 のフラックスについて人為起源や森林火災起源の分離を可能とすることが期待されている。

2. 研究開発目的

そこで本研究では、 CO_2 や CH_4 の逆解析を行い、さらに CO の解析も含めることで、包括的な温室効果ガス収支の推定を高精度に行うことを可能とすることを最終的な目標とする。その最終目標に向けて、逆解析のためのデータ同化技術の開発や大気輸送モデルへの CH_4 の実装、また、それらを用いたアジア・太平洋域における CH_4 濃度変動の特性把握を行う。さらに、 CO の簡易モデルの開発・実装も行い、逆解析における燃焼起源の起源別推定を行う。また、地上観測や航空機観測、衛星観測等のデータを用いて CO_2 と CH_4 の長期逆解析をそれぞれ実施し、温室効果ガス収支の長期変動を把握することを目的とする。

3. 研究開発方法

(1) 解析誤差共分散行列の高精度推定手法の開発

逆解析におけるフラックス推定値の解析誤差共分散行列を、高解像度で高精度に推定する手法の開発を行う。ここでは4次元変分法をベースとし、誤差共分散行列の対角成分のみならず非対角成分までも高精度に推定することを目指す。本研究では、最適化手法であるBFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm) 法を用い、逆解析特有の線型性に注目して、共役性を保つ技術を新たに導入することで、高効率で精度の高い推定アルゴリズムを開発した。さらにアンサンブル法を導入することで大規模計算機と親和性を高め、計算の収束に至るまでの実時間を大幅に短縮させることを可能とした。BFGS公式の計算に必要なベクトルデータの生成には、NICAM-TM 4D-Varでも用いている降下法スキームPOpULar⁴⁾を用い、さらに共役性を保つために、新たにexact line searchと呼ばれる手法や行列直交化を実装した。開発したアルゴリズムの有用性を確認するため、1次元の移流モデルやNICAM-TM 4D-Varに実装して実験を行った。さらに、実験で得られた解析誤差共分散行列から観測データのインパクト評価や解析フラックスの誤差相関特性の抽出を試みた。

(2) NICAM-TMへのCH₄実装とアジア・太平洋上空におけるCH₄高濃度イベントに関する解析

大気輸送モデルNICAM-TMに新たにCH₄を実装した。ここでは、OHラジカルとの反応や成層圏での消失速度は入力データとして固定し、複雑な化学反応を大幅に簡略化した。これにより、CH₄の大気輸送計算の線型性は保たれ、CO₂と同様のシステムで逆解析が可能となる。ここで、OHラジカルや成層圏の消失速度のデータはTransCom-CH₄実験⁵⁾のものを用いた。さらに、開発したモデルの性能評価も目的の一つとして、サブテーマ1で取得されたCONTRAILによる日本—バンコック間の航空機サンプリングデータや気象庁の航空機観測（厚木—南鳥島間）のデータ⁶⁾を用いて、アジア・太平洋域の上空で夏季に出現するCH₄の高濃度イベントについて解析を行った。本解析ではNICAM-TMの水平解像度をglevel-5（モデル格子間隔約240km）からglevel-8（モデル格子間隔約30km）まで変えた感度実験を行い、CH₄の高濃度イベントに対するモデル再現性の解像度依存性を調べた。また、NICAM-TMのアジョイントモデル¹⁾を用いて、上記航空機観測で捕らえられた高濃度CH₄の空気塊がどの地域による排出のものか、また、どのような輸送経路を経てきたものかを調べた。ここでアジョイントモデルとは、観測時刻・場所から時間を後方に遡って、観測に対する地表面フラックスの感度を導出するものである。大気輸送モデルNICAM-TMの気象場は気象庁客観解析データJRA-55の水平風速データでナッジングを行い、現実の輸送場を再現した。

(3) NICAM-TMへのCO実装と2015年インドネシア森林火災に関する逆解析への適用

NICAM-TMに新たにCOの簡易モデルを実装し、さらにそれを逆解析システムNICAM-TM 4D-Varにも組み込むことで、CO₂とCOのジョイント逆解析システムを開発した。さらに同システムを用いて、2015年に発生したインドネシアにおける森林火災のCO₂排出に関する逆解析を行った。

NICAM-TMにおけるCOの主な消失源はCH₄同様、OHラジカルであり、そのデータも(2)と同じTransCom-CH₄のデータを用いた。COの地表面フラックスは、化石燃料起源にEDGARv4.3.2⁷⁾を用い、生物起源揮発性有機化合物(BVOC)由来のCOについては陸域生態系モデルVISIT⁸⁾から得られた計算値を用いた。さらに森林火災起源としては、GFEDv4.1s⁹⁾やGFASv1.2¹⁰⁾のデータを用いた。COを含めたCO₂逆解析システムの構築では、COの輸送やCOが酸化してCO₂になる化学過程も含め、それらのアジョイントモデルを開発した。さらに、本研究では、解析対象となるパラメータについて、フラックスの絶対値ではなく、フラックスにかかるスケーリング・ファクターとする機能を新たに追加した。これにより、CO₂とCOで共通の起源を持つフラックスについて、スケーリング・ファクターを共有することにより、どちらか一方の化学種の観測データを使って最適化を行っても、もう一方の化学種のフラックスにまで観測データの情報を伝播させることが可能となる。本研究では、森林火災起源について、CO₂とCOのスケーリング・ファクターを共有化し、CO₂の観測データのみを用いて逆解析を行った。逆解析後に、上記機構によって最適化されたCOのフラックスを用いて大気濃度を再現することにより、本研究で得られたフラックス推定値、特に森林火災起源の信頼性について検証を行った。図3.2.1に、本逆解析の地表面フラックスから大気濃度に至るまでの計算経路の概念図を示す。図に示す通り、本逆解析では、森林火災起源以外の起源についても分けてスケーリング・ファクターを設定しており、化石燃料起源、GPP（総一次生産）とRE（呼吸）等といった起源で分けている。

本研究では、CONTRAILによるCO₂濃度データ¹¹⁾を観測データとして逆解析に入力した。さらに、国立環境研究所が実施している貨物船による東南アジア域での観測¹²⁾（NIES-VOS）のデータを独立データとして逆解析の評価に用いた。特に、当該観測のCOの観測データを用いることにより、森林火災起源のフラックス推定値の精度が逆解析によって向上したかどうかを調べた。

本逆解析におけるCO₂フラックスの初期推定値は化石燃料起源についてはCDIAC（2016）¹³⁾のものを用い、海洋起源については気象庁が作成した船舶観測に基づくフラックス分布データ¹⁴⁾を用いた。森林火災起源についてはCOと同様にGFEDv4.1sやGFASv1.2を用いた。GPPとREについてはCASAモデル¹⁵⁾から得られた月平均の気候値をベースとし、さらにNiwa et al.（2012）の逆解析による修正値を加えた上でJRA-55の気象データで3時間毎にダウンスケーリングしたものを用いた。

逆解析に用いた大気輸送モデルNICAM-TMの解像度は、東南アジア域特有の島嶼地域を出来るだけ詳細

に表現するためglevel-6（モデル格子間隔約120km）とした。NICAM-TMの気象場は（2）と同様にJRA-55を用いて計算を行った。

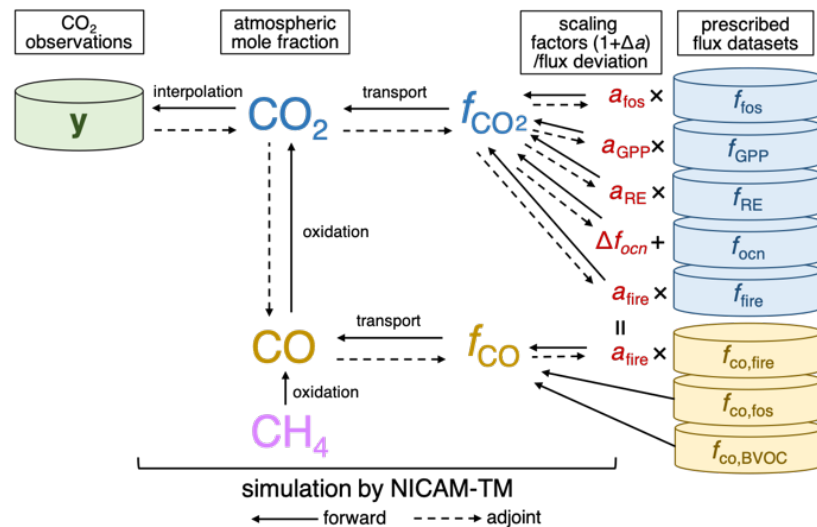


図3.2.1 CO₂-COジョイント逆解析システム内の各フラックスから大気濃度までの計算経路の概念図。実線はNICAM-TM内のフォワード計算、点線はアジョイント計算を示す。また、図の右側で示す通り、CO₂フラックスは5つの起源に分けており、そのうちの森林火災起源（fire）については、COの森林火災起源と同じスケリング・ファクターを共有している。

（4）GSAM-TMを用いた衛星データを含む長期逆解析

本実験では、気象庁の大気輸送モデルGSAM-TMをベースとした逆解析システムを用いて長期のCO₂逆解析を行った。この逆解析システムは、TransCom¹⁶⁾の逆解析比較プロジェクトで用いられたsynthesis inversion法を用いて亜大陸規模の解像度でフラックス推定を行うものであり、長期逆解析の実績¹⁷⁾を有するものである。

ここでは、比較的長期間同一のセンサーによる観測データが得られる温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）から国立環境研究所がリトリバルしたXCO₂濃度を解析に導入するシステムの構築に取り組んだ。この際に大きな問題となる衛星XCO₂濃度のバイアスである。衛星観測データのバイアスは独立した観測によって評価・修正することが最も望ましい。しかしながら、この目的で構築されている国際的な観測ネットワーク（TCCON）は観測所数が全世界で約30地点に過ぎず地理的にも偏っているため、空間的に変化すると考えられているバイアスを評価・修正するには不十分である。そこで今回は、先に衛星観測を含まない独立した逆解析を行い解析したXCO₂濃度と衛星から得られたXCO₂濃度を長期間平均し、これらの平均的な差を衛星観測のバイアスと見なして補正する方法を用い、以下のいくつかの補正法についてCO₂解析に与えるインパクトを調査した。

- ① RAW：補正を行わない場合
- ② FIX：全球を一様の値で補正した場合
- ③ ALL：全期間の差から場所に依存する差のみを補正した場合
- ④ CLM：月毎に全期間の差を計算して時間・場所に依存する差を補正した場合
- ⑤ MON：衛星観測の場所のみを利用して値は独立解析値を用いた場合

今回の独立解析の自由対流圏（衛星観測データから得られるXCO₂に最も寄与が大きい箇所）における解析精度（二乗平均平方根誤差）は独立観測に対して概ね1.0 ppm前後である。今回の解析に用いた観測点の分布は図3.2.2のとおりである。

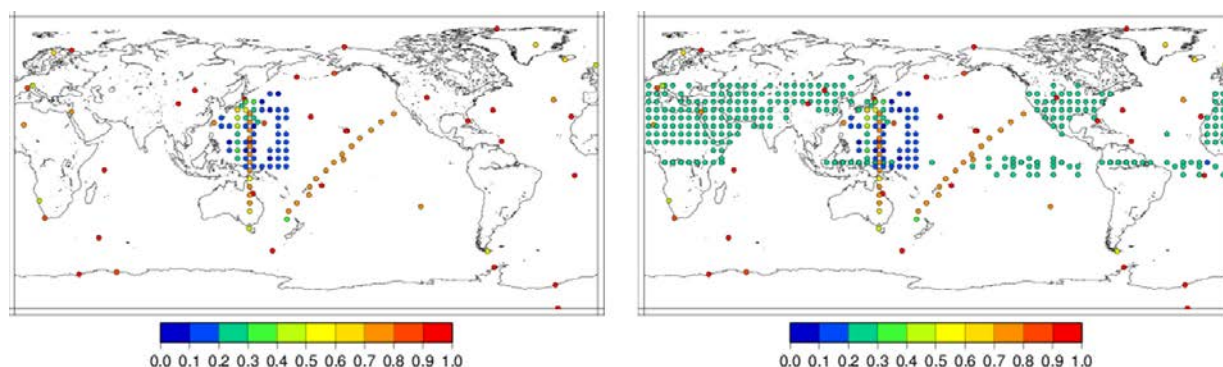


図3.2.2 衛星観測を含まない逆解析（左）と衛星観測を含んだ逆解析（右）における観測地点の分布を示す。色は解析期間（1985～2017）における観測値の存在する割合を示す。

（5）NICAM-TM 4D-Varを用いたCH₄・CO₂の高解像度長期逆解析

（a）CH₄逆解析

本研究では（2）で開発したNICAM-TMのCH₄モジュールをNICAM-TM 4D-Var^{1),2)}に適用し、CH₄の逆解析を行った。解析期間は1990-2017年と設定した。フラックスの初期推定値に用いたデータはGlobal Carbon Projectによる全球CH₄排出量推定計画（GCP-CH₄）¹⁸⁾から提供されたものを基本としつつも、湿地や水田からの排出や土壌吸収については、独自にVISITのデータを用いた¹⁹⁾。ここでVISITの湿地や水田からの排出量はCao et al.（1996）²⁰⁾に基づく計算方法で算出されている。石炭やオイル・ガス採掘、家畜やバイオ燃料を起源とする排出に関してはGCP-CH₄から提供されたEDGARv4.3.2のデータを用い、森林火災起源についてはGFEDv4.1sのデータを用いた。火山やシロアリ、海洋等を起源とする排出については、GCP-CH₄が取りまとめた、それぞれのボトムアップ推定によるデータを用いた。本逆解析でも、（3）と同様に、それぞれの起源について別々にスケールリング・ファクターを設定した。表3.2.1に示す通り、7種のスケールリング・ファクターを設け、それぞれについて、月別や年別、また月別であるが年々の変動は固定する（cyclostationary）等、時間方向の解像度もそれぞれの起源の特性に応じて個々に設定した。

表3.2.1 CH₄逆解析で最適化の対象とした起源別CH₄フラックスとそれぞれが含むCH₄フラックスの要素、解析の際の時間解像度、初期フラックスデータの参考文献

フラックス名	要素	時間解像度	参考文献
fa	coal, oil, gas, livestock, waste, biofuel	年別	GCP-CH ₄ (Saunois et al., 2019.) EDGAR v4.3.2 (Janssens-Maenhout et al., 2019)
fb	biomass burning	月別	GFED v4.1s (van der Werf et al., 2017)
fr	rice cultivation	月別	VISIT with the Cao scheme (Cao et al., 1996; Ito and Inatomi, 2012)
fw	wetland	月別	VISIT with the Cao scheme (Cao et al., 1996; Ito and Inatomi, 2012)
fo	soil oxidation	月別	VISIT (Ito and Inatomi, 2012)
fn	geological, termite	月別 (cyclostationary)	GCP-CH ₄ (Saunois et al., 2019)
fs	ocean	月別 (cyclostationary)	GCP-CH ₄ (Saunois et al., 2019)

本研究では地上ステーションや船舶、航空機による観測データを逆解析に用いた。これらのデータは、各研究・現業機関や観測プロジェクトからGCP-CH₄を経て提供されたin-situまたはフラスコ・サン

プリングのデータであり、本研究ではAGAGE、CSIRO、EC、FMI、JMA、LSCE、NIES、そしてNOAA/ESRLから提供されたデータを用いた（図3.2.3）。

逆解析に用いた大気輸送モデルNICAM-TMの解像度はglevel-5（モデル格子間隔約240km）で、ここでの気象場の計算も（2）、（3）と同様にJRA-55の水平風速を用いた。CH₄の大気中での消滅過程は（2）と同様にOHラジカル等を含むTransCom-CH₄のデータを用いて計算を行った。

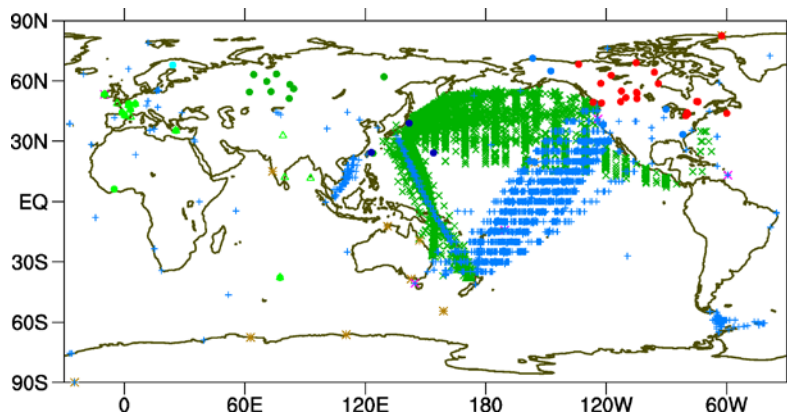


図3.2.3 NICAM-TM 4D-VarによるCH₄逆解析で用いた観測データの分布図（解析期間1990-2017年の全てを示す）。各色はそれぞれの提供機関を示す（紫：AGAGE、濃緑：NIES、オレンジ：CSIRO、赤：EC、水色：FMI、緑：LSCE、紺：JMA、青：NOAA/ESRL）。●はin-situの連続観測を示し、他の記号はフラスコ・サンプリング観測を示す。

(b) CO₂逆解析

CO₂の逆解析についても（a）のCH₄逆解析と同様に、NICAM-TM 4D-Varを用いて1990-2017年の期間を解析対象とした。ここでも（3）と同様にフラックスの起源毎にスケールリング・ファクターを設定しているが、どのフラックスについても月毎の時間解像度を設定した。ここで、化石燃料起源、GPP、RE、森林火災起源、海洋起源の初期推定値は、それぞれCDIAC（2016）、VISIT（GPP、REともに）、気象庁海洋フラックスデータを用いた。観測データは（a）のCH₄逆解析で用いた場合と同じ研究・現業機関が提供しているデータを用いた（AGAGEは除く）。ただし、ここでは今後の発展的な解析のベースとするため、航空機観測は用いず、地上ステーションや船舶観測等の地表における観測のデータのみを用いた（図3.2.4）。大気輸送モデルNICAM-TMの各種設定は（a）と同様のものを用いた。

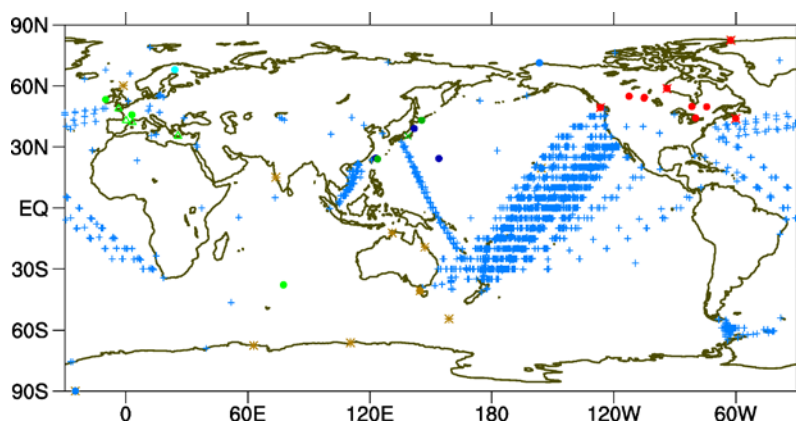


図3.2.4 NICAM-TM 4D-VarによるCO₂逆解析で用いた観測データの分布図（解析期間1990-2017年の全てを示す）。各色はそれぞれの提供機関を示す（濃緑：NIES、オレンジ：CSIRO、赤：EC、水色：FMI、緑：LSCE、紺：JMA、青：NOAA/ESRL）。●はin-situの連続観測を示し、他の記号はフラスコ・サンプリング観測を示す。

4. 結果及び考察

(1) 解析誤差共分散行列の高精度推定手法の開発

本研究で開発した新たな解析誤差共分散行列の推定手法について、その推定精度を測るため、1次元の移流モデルや低解像度のNICAM-TM 4D-Varを用いて解析を行った。その結果、それぞれの実験において、解析的に計算した結果とほぼ同一のものを導出することが可能であることがわかった。この手法の顕著な特徴は、誤差共分散行列の非対角成分についても高精度に推定することができる点で、先行研究で提案されている手法（例えばBousserez et al., (2015)²¹⁾よりも優れていることが確認された。

さらに実際に逆解析で用いるモデル解像度、解析期間（1年）で解析誤差共分散行列を推定したところ、200アンサンブルメンバーを用いれば、数十回の反復で十分な精度の誤差共分散行列を導出することができた。図4.2.1にその解析誤差共分散行列の対角要素（分散）から得られた、初期誤差からの誤差軽減率（（解析誤差-初期誤差）/初期誤差×100）の各月の分布を示す。この誤差軽減率は観測データのフラックス推定に対するインパクトを定量的に示すものであり、温室効果ガスの逆解析分野においてしばしば用いられるものである。図4.2.1で示されるように、観測データのインパクトは比較的夏季に大陸内部で大きいことがわかる。これは夏季に活発化する陸域植生のフラックスにあわせて初期値の誤差も大きくしているため、相対的に観測データの情報が推定値に反映されやすくなっていることが影響していると考えられる。また、図4.2.2は解析誤差共分散行列の非対角成分から導出したフラックスの誤差相関の分布を示す。ここでは、中国南部のフラックス（図中に白抜きの○で示す）を対象とする誤差相関の分布を示しているが、対象とするフラックスのごく近傍では初期誤差に導入した正の誤差相関の影響が現れているものの、その周辺では負の誤差相関が存在していることがわかる。これは観測データのギャップに起因するものであるが、その負の誤差相関の分布も季節によって変化することが見てとれる。

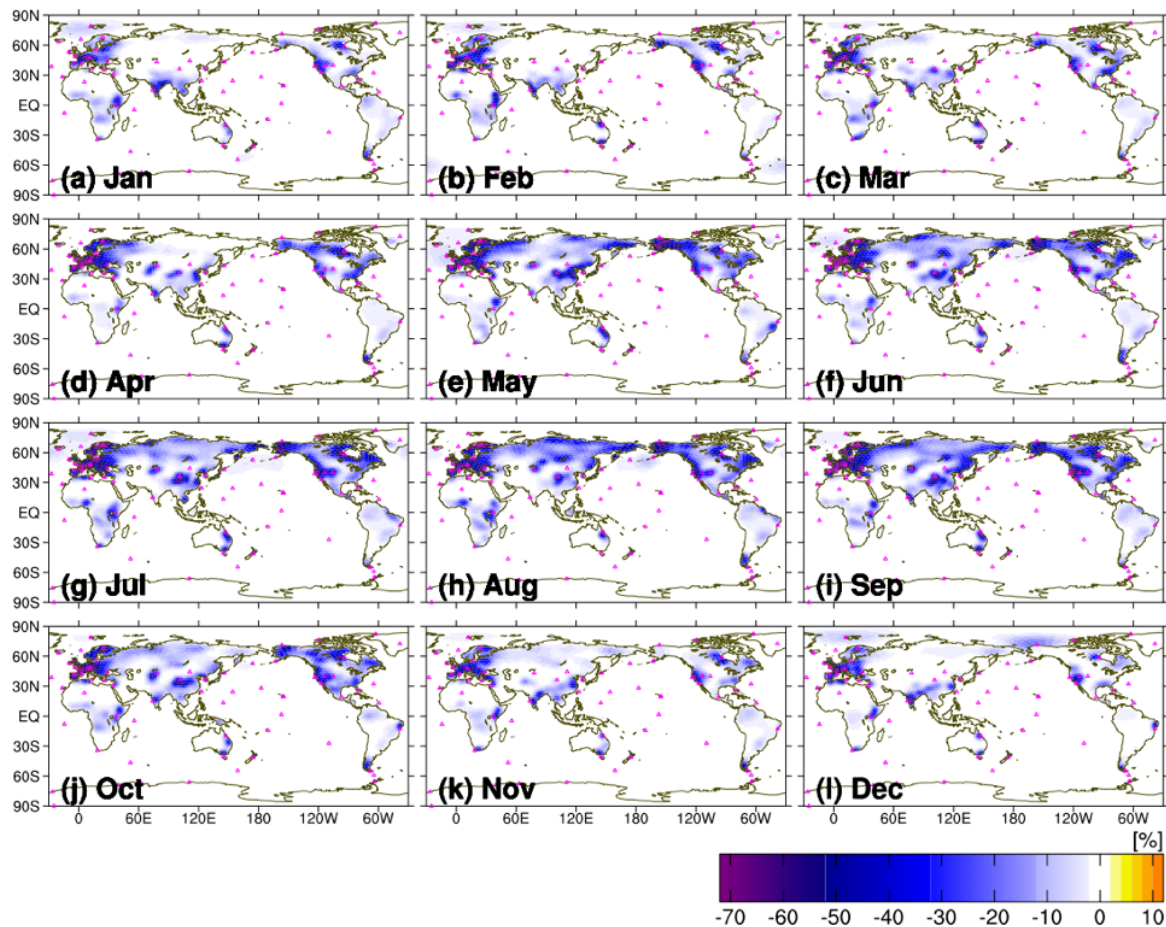


図4.2.1 推定された解析誤差共分散行列の対角要素（分散）から得られた誤差軽減率（（解析誤差-初期誤差）/初期誤差×100）。観測データのインパクトの強度分布を示している。

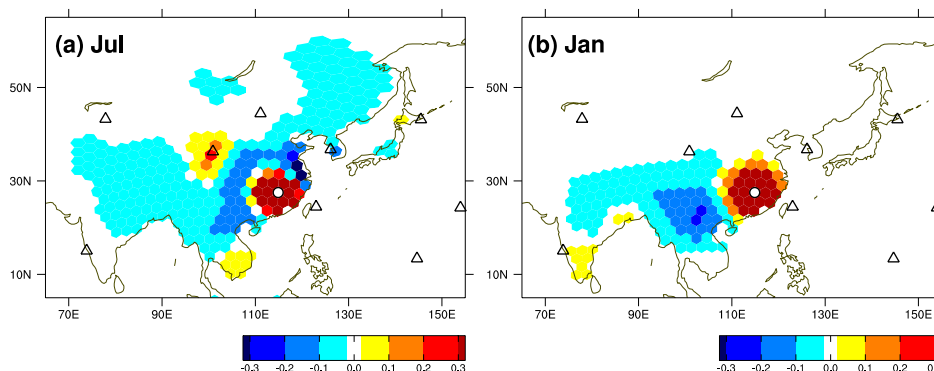


図4.2.2 推定された解析誤差共分散行列の非対角要素（共分散）から得られた中国南東域のフラックス（○でその位置を示す）に対する誤差相関の分布

従来の逆解析手法では、亜大陸規模等の低解像度であったため、解析誤差共分散行列は解析的に導出することができていたが、4次元変分法等を用いた高解像度（モデル・グリッドスケール）での逆解析においては、解析的な計算は不可能であり、また、低解像度ほどの精度で導出することは困難であった。本研究では、新たな手法を開発することにより、高解像度の逆解析においても、精度よく解析誤差共分散行列を推定することに成功した。これにより、観測データについて、詳細で高精度のインパクト評価を行うことが可能となった。

（2）NICAM-TMへのCH₄実装とアジア・太平洋上空におけるCH₄高濃度イベントに関する解析

大気輸送モデルNICAM-TMへCH₄を実装し、サブテーマ1の課題で実施された日本—バンコック間のCONTRAIL-ASEによるCH₄観測のデータ解析を行った。アジア大陸の風下に位置する西太平洋の上空では、しばしば夏季に高濃度のCH₄が観測されている⁶⁾。この高濃度は気温上昇に伴う湿地からのCH₄放出増加によるものと考えられ、フラックスのメカニズム理解に繋がる重要な情報となりうる。逆解析にこの観測データの情報を有効に取り込むためには、高濃度イベントのモデル再現性を高めると同時に、モデルの輸送誤差や輸送メカニズムをあらかじめ把握しておく必要がある。

まず、本研究で新たに実装したNICAM-TMのCH₄モジュールが適切に機能していることを確認するため、地上観測データとモデルとの比較解析を行った。その結果、季節変動等について、モデルが先行研究⁵⁾と同程度に再現できていることを確認した。さらに、日本—バンコック間のCONTRAIL-ASE観測で得られた上空の季節変動についても、各緯度帯においてモデルが概ね再現していることを確認した。しかし、夏季に頻繁に観測された1900 ppbを超える高濃度については、モデルの水平解像度によって、その再現性に差が出ることがわかった。図4.2.3にNICAM-TMで再現した2017年9月12日の高度約10 kmにおけるCH₄濃度分布を示す。当該日に実施されたCONTRAIL-ASE観測では、15° N付近と30° 付近に2000 ppb前後の高濃度が観測された。この図の計算では、水平解像度30kmのモデル格子（glevel-8）を用いており、観測された高濃度がモデルでよく再現されていることがわかる。一方、水平解像度240kmのモデル格子（glevel-5）を用いた場合では、これら高濃度はどちらも明瞭に再現されていなかった。240kmから30kmまで段階的に解像度を上げて行った感度実験から、これら高濃度イベントを再現するためには少なくとも120kmの水平解像度を要することがわかった。

さらに図4.2.3から、CONTRAIL-ASEは、15° Nと30° Nとで、それぞれ異なるCH₄高濃度空気塊を捉えたことが推察される。15° Nのインドシナ半島上の高濃度は局所的に分布していることから、積雲対流等の比較的小さいスケールの現象によって生じていることが示唆される。一方、30° Nの日本付近の高濃度は中国から日本にかかる前線付近に位置しているため、前線活動によって生じている可能性がある。また、バングラディッシュ上空でも高濃度の空気塊が生じており、この高濃度空気塊が切離して生じている可能性も考えられる。なお、バングラディッシュ上空の高濃度はインドやバングラディッシュの湿地から放出された大量のCH₄がインド・モンスーンによる高気圧性循環によってトラップされて形成されたものであると考えられる。

図4.2.4に、上記CH₄高濃度について、NICAM-TMのアジョイント・モデルを用いて逆追跡を行なった結果を示す。図4.2.4aより、15° N付近のインドシナ半島上空の高濃度については、インドシナ半島内のフラックスが大きく寄与していること、また、2日程度の短時間で地表から観測点まで到達していることがわかった。特に地表から上空までほぼ垂直に1日以内で輸送されていることが見て取れる。このことから、積雲対流による輸送が寄与していることが強く示唆される。一方、30° Nの日本付近の高濃度については、図4.2.4bに示すようにインドやバングラディッシュ、中国から上空へと輸送され、その後、西風によって日本近辺まで移流し、最後に時計回りに曲がって観測点まで到達していることがわかる。フラックスの寄与度を見ると、中国とインド・バングラディッシュの寄与が同程度であることがわかる。このことから、インド・モンスーンからの切離と前線活動による上空への輸送の両者が、観測された高濃度イベントの形成メカニズムとして重要であることがわかった。以上のような解析により明らかとなった高濃度に対するフラックス寄与分布から、サブテーマ1の航空機観測と高解像度モデルを用いることで、今まで困難であった中国や南アジア域等、大陸内部の地表発生源推定の不確定性を低減できる可能性が示された。

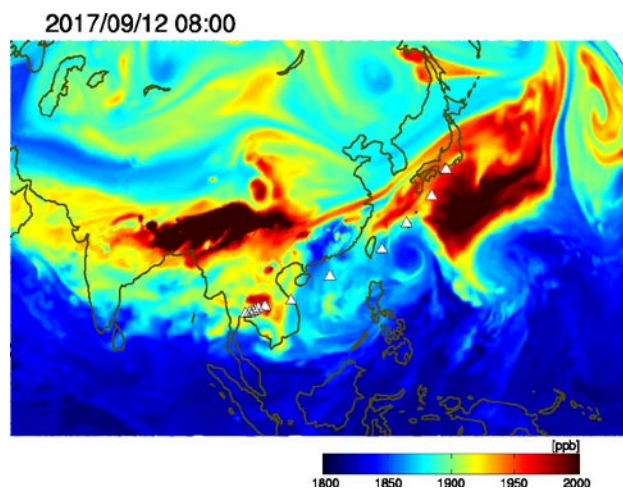


図4.2.3 NICAM-TMで再現された上空約10kmにおけるCH₄濃度の分布（2017年9月12日）。△はCONTRAIL—ASEの日本—バンコック間におけるサンプリング地点を示す。

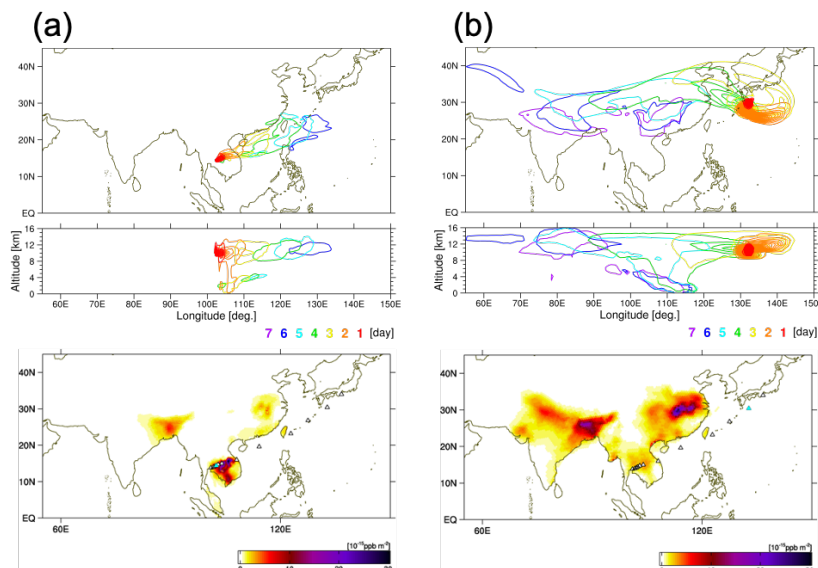


図4.2.4 NICAM-TMのアジョイント・モデルによって計算された高濃度イベントに対する逆追跡の結果。上段、中段はそれぞれ、高濃度空気塊の輸送経路（色で観測日までの時間を示す）の水平、鉛直断面図を示す。下段は濃度上昇に対する地表面フラックスの寄与度（フットプリント×フラックス）を示す。(a)、(b)はそれぞれ2017年9月12日における15° N付近、30° N付近での観測に対する結果を示す。

(3) NICAM-TMへのCO実装と2015年インドネシア森林火災に関する逆解析への適用

図4.2.5に逆解析システムNICAM-TM 4D-Varによって推定された、2015年10月の東南アジア域における炭素フラックス (CO_2 とCOの合計フラックスで、炭素換算で示す) の分布を示す。この月は、2015年の大規模なエルニーニョに伴って発生した森林火災がピークに達した時期である。図4.2.5dから、初期値のフラックスデータでは、スマトラ島の南東部やカリマンタン島の南部で、フラックスが顕著となっていることがわかる。この森林火災起源のフラックスデータは、人工衛星搭載の光学センサMODISによる火災ホットスポット観測をもととしており、実際にこれらの地域で甚大な火災が発生していたことがわかっている。本研究の逆解析では、これら火災からの炭素フラックスの分布はほとんど変化しておらず(図4.2.5b)、上記衛星による観測結果と整合的なものとなっている。一方で、東南アジア域の合計の炭素放出量については、初期値では9-10月の間に357 Tg Cであったのに対し、逆解析では324 Tg Cと約10%小さく推定された。異なる初期値を用いた感度解析でも、初期値に森林火災起源を除いた場合(C_NO) (図4.2.5e) 以外の実験全てで、この傾向は一致していた。 C_NO 実験では211 Tg Cとより低い値が推定されたが、図4.2.5eで示されるように、解析前に除かれていた森林火災による炭素放出の分布が解析後に再現されており、このことから、本解析で使った観測データ (CONTRAIL-CME) に森林火災の情報が含まれていることがわかる。

図4.2.6は逆解析で修正された CO_2 フラックスやCOフラックスを再びNICAM-TMに入力し、大気輸送計算を行って、逆解析とは独立の観測であるNIES-VOSのデータとの相関係数や差の2乗平均平方根 (RMSD) を計算した結果を示す。図より、 CO_2 のみならずCOについても相関係数やRMSDが逆解析によって改善したことがわかる。この結果から、逆解析によって CO_2 のフラックス精度が向上したこと、さらには、その中でも森林火災起源のフラックスの精度が向上したことが示唆される。一方で、 C_NO 実験では、前述の通り9-10月の炭素放出量が他の実験よりも100 Tg C小さかったにもかかわらず、逆解析後には CO_2 、CO共に他の感度実験と同等の相関係数、RMSDが得られた。このことから、東南アジア域全ての炭素フラックスについて検証できているわけではないことも伺える。そのため、今後は、より多点での観測展開や、異なる化学種等の情報も用いた推定手法の開発が必要である。

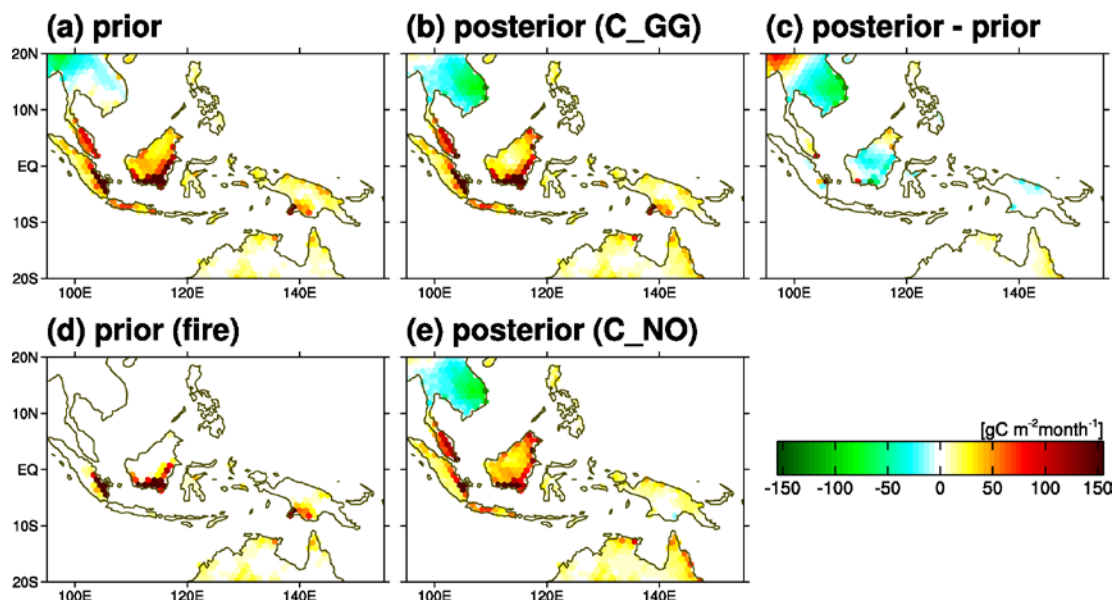


図4.2.5 2015年10月の炭素フラックス (CO_2 とCOの合計フラックスで、炭素換算で示す) の分布。初期推定値 ((a):全起源合計値、(d):森林火災起源(d)) と逆解析システムNICAM-TM 4D-Varで得られた推定値 ((b): 初期値の森林火災起源としてGFEDとGFASの平均値を用いた場合、(e):初期値から森林火災起源を除いた場合) を示す。(c)は(b)と(a)の差を示す。

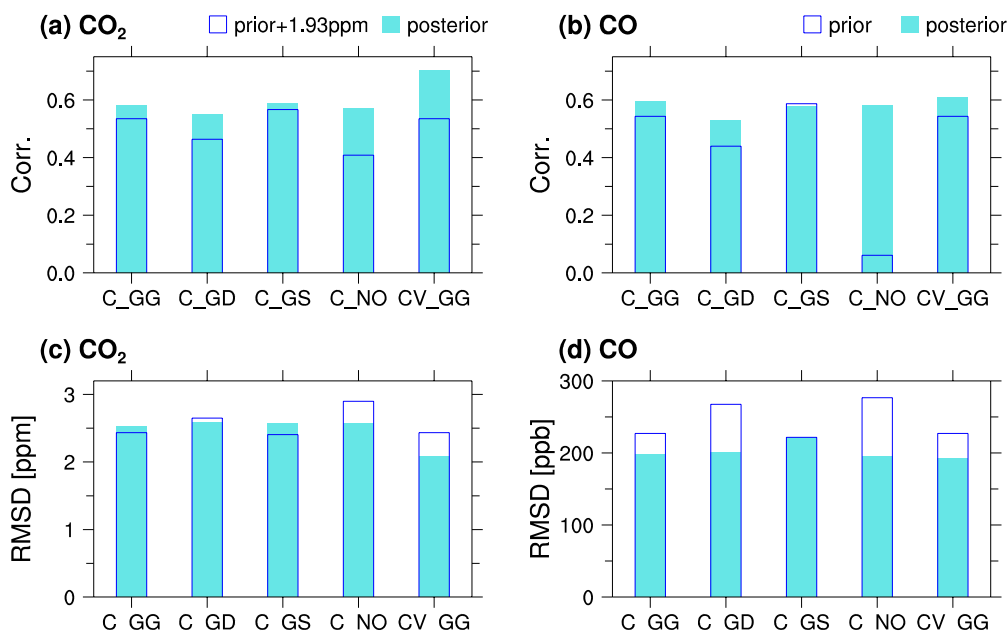


図4.2.6 NIES-VOSによるCO₂とCO観測に対するNICAM-TMによる計算値の相関係数（上段）と差の2乗平均平方根（RMSD）（下段）（prior: 初期値フラックスを用いた場合、posterior: 逆解析で得られた推定フラックスを用いた場合）。ここでの観測データは、2015年の9月から10月に得られたもので、95-125° Eと10° S-15° Nの範囲内に収まるものを用いている。C_GG、C_GD、C_GSはそれぞれ、異なる森林火災起源フラックスを初期値で用いたもの、C_NOは森林火災起源を初期値から抜いた場合を示す。また、これらは観測データとしてCONTRAILを用いた。CV_GGはC_GGと同じ初期フラックスを用いており、観測データにはCONTRAILとNIES-VOSを用いている。

（4）GSAM-TMを用いた衛星データを含む長期逆解析

衛星観測データのバイアス補正法が全球規模のCO₂収支解析に与える影響を図4.2.7に示す。当然のことながら衛星観測が導入される2009年以前の結果に違いは見られず、2009年以降に陸域（図4.2.7）と海洋（図略）のCO₂収支バランスが変化していることが分かる。特に衛星観測データのバイアスを補正しなかった結果（RAW）の違いが顕著であり、最大で約年1 Pg C程度の違いが生じている。他の補正法は陸と海のCO₂収支バランスで見ると大きな違いは見られない。2009年～2017年における陸域の年平均CO₂吸収量は、CNTで2.9 Pg C yr⁻¹、RAWで3.5 PgC yr⁻¹、FIXで3.1 PgC yr⁻¹、ALLで3.3 PgC yr⁻¹、CLMで3.2 Pg C yr⁻¹、MONで3.2 Pg C yr⁻¹となった。衛星観測データの負バイアス（全球平均で1.0 ppm前後）とその地理的分布（主に陸域の観測点が採用された）により、バイアスを補正しなかった場合（RAW）は陸域の吸収を従来以上に強めたものと考えられる。

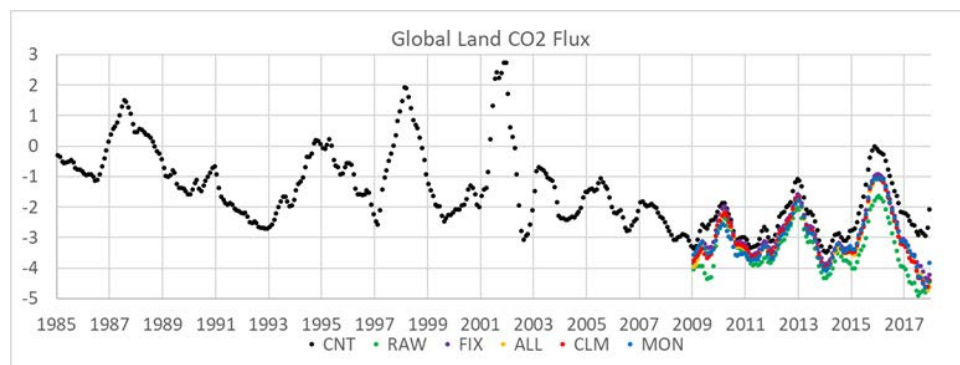


図4.2.7 陸域のCO₂フラックスの変化。黒（CNT）は衛星観測を使わない逆解析を、緑（RAW）は衛星観測データのバイアスの補正なし、紫（FIX）は全球一定値で補正、橙（ALL）は全期間の平均差、赤（CLM）は月毎の平均差、青（MON）は独立解析値で置き換えた解析結果を示す。

地域的に見ると、既存観測に比較して衛星観測の比重が大きくなる地域でバイアス補正法による違いが大きく見られた。以下にいくつかの地域における衛星観測導入後のCO₂収支を示す。

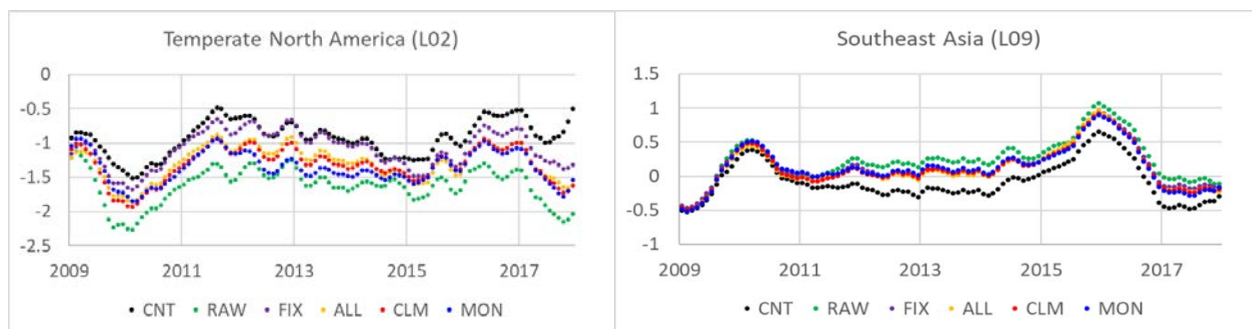


図4.2.8 温帯北アメリカ（左）と東南アジア（右）における陸域のCO₂フラックスの変化。黒（CNT）は衛星観測を使わない逆解析を、緑（RAW）は衛星観測データのバイアスの補正なし、紫（FIX）は全球一定値で補正、橙（ALL）は全期間の平均差、赤（CLM）は月毎の平均差、青（MON）は独立解析値で置き換えた解析結果を示す。

図4.2.8を見ると、地域的なCO₂収支は衛星観測データのバイアス補正法によって大きな影響を受けることが分かる。特にバイアス補正を行わずに衛星観測データを逆解析に導入した実験が、地域的なCO₂収支の面から見ても従来の逆解析との違いが最も大きい。北米においてはバイアス補正により衛星観測によるXC_{CO2}を増やす方向に修正しているが、バイアス補正を行わない場合（RAW）北米のCO₂フラックスが大きく減少している。一方、東南アジアにおいては衛星観測のバイアス補正量が北米と比較すると小さいため（図略）、観測の空白域に衛星観測データが追加されることにより例えば2015年秋に同地域で大規模に発生した森林火災の影響をより強く表現できている。

このように、衛星観測データをこれまで実施してきた地上観測データベースの逆解析に導入することによって全球規模ではバイアス補正の有無によりCO₂収支の海陸バランスが変化し、地域的にはバイアス補正法により年々のCO₂収支が変わることが分かった。衛星観測データのバイアスは地域的・時間的に変化することが見込まれるため、これらを考慮した補正方法（今回の例ではCNT）が必要になると考えられる。

（5）NICAM-TM 4D-Varを用いたCH₄・CO₂の高解像度長期逆解析

（a）CH₄逆解析

図4.2.9にNICAM-TM 4D-Varによる長期CH₄逆解析で得られたCH₄フラックスの解析値と初期推定値からの差を示す。ここでは解析期間の後半の10年間（2008-2017）の平均を示すが、解析期間の前半も傾向は一致しており、

- (a) 中国、ヨーロッパのフラックスが通年で下方修正（特に中国が顕著）
- (b) 北米ハドソン湾周辺のフラックスが下方修正（特に秋から冬にかけての時期（9-11月））
- (c) アメリカ南部のフラックスが上方修正
- (d) 夏季（7-8月）の西シベリアのフラックスが上方修正

といった変化が逆解析で得られた。(a)や(c)については、同じEDGARのフラックスデータを初期値として用いた先行研究と同様の傾向であり、ボトムアップ・アプローチによる化石燃料採掘等の人為起源フラックス推定値に大きな不確実性が存在することを示唆するものである。一方、(b)は、実際の湿地起源フラックスの季節変化が、初期推定値として用いたVISITが示すものと異なることを示唆している。

図4.2.10に全球のCH₄フラックスと、そのうちの化石燃料からの排出を主とする人為起源、また湿地起源のフラックスの年々変化を示す（なお、これら、人為起源、湿地起源のフラックスは合計のフラックスの大部分を占めていることに留意）。この図から逆解析によって、人為起源フラックスがやや下方修正され、一方で、湿地起源は上方修正されていることがわかる。また、初期値で示されていた2002年

頃からの人為起源フラックスの上昇傾向は逆解析でも同程度に示されており、一方で、湿地起源の年々変動は初期値よりも大きなものとなった。これらのトレンドや年々変動のパターンは、それぞれの起源について初期値の年々変動を固定した場合（人為起源であれば2005年のものに固定、湿地起源であれば気候値に固定）でも、多少の変動幅に違いはあるものの、再現された。このことから、これらのフラックス変動は初期値だけでなく観測データからも抽出されうる情報であることが示唆された。

本研究では上記の様に起源別にCH₄フラックスを推定したが、それぞれの起源がどの程度、独立に推定できているかを調べるため、本研究の（1）で開発した手法を用いて、本解析における解析誤差共分散行列を導出した。その結果、湿地起源と人為起源のフラックス推定値の間には有意な負の誤差相関が存在することがわかった（全球平均値で-0.51）。これは、全球であっても起源を分けるには観測データがまだ不十分であり、さらなる観測データの拡充が必要であることを示すものである。しかし、その負の誤差相関が最も強く存在する地域が、観測データが比較的充実している北米地域であった。これは、同地域で人為起源と湿地起源のフラックスが混在している傾向が強いためであるが、単純に観測データの密度を増やすだけではなく、同位体や他化学種の観測データを利用する必要があることを示すものである。

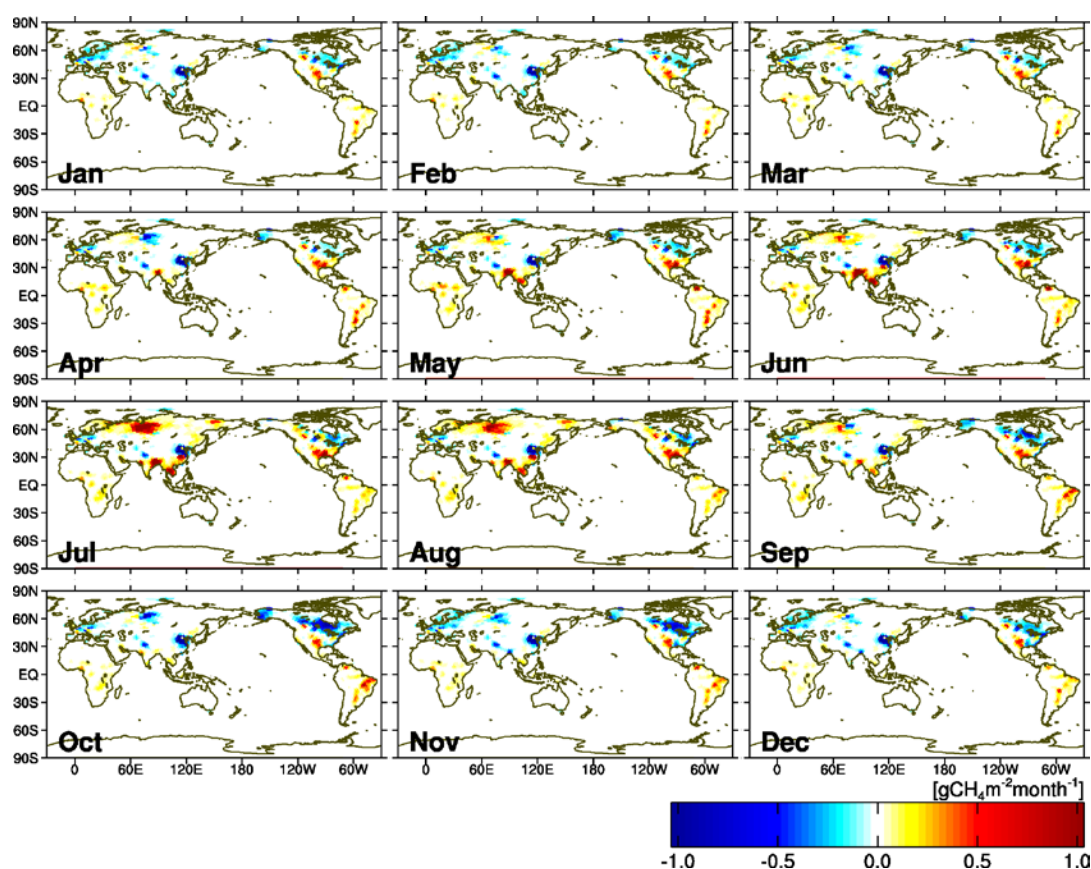


図4.2.9 NICAM-TM 4D-Varによる長期CH₄逆解析によって得られたCH₄フラックスの解析値と初期推定値からの差。各月に対する2008-2017年間の平均を示す。逆解析によってフラックスの推定値が大きくなったものを黄色-赤の色で、小さくなったものを水色-青の色で示す。

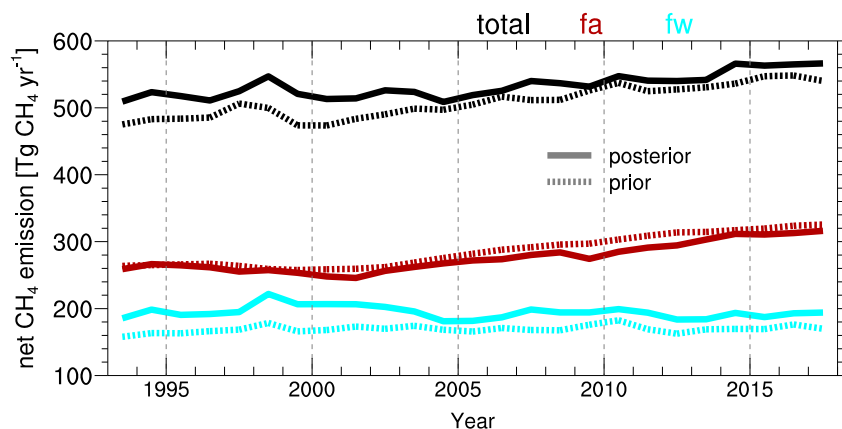


図4.2.10 全球のCH₄フラックス（黒）とそのうちの化石燃料からの排出を主とする人為起源（赤茶：表3.2.1のfa）、湿地起源（水色：表3.2.1のfw）のフラックスの年平均値。点線は初期推定値、実線は逆解析によって得られた結果を示す。

(b) CO₂逆解析

図4.2.11にNICAM-TM 4D-Varによる長期逆解析で得られたCO₂フラックス分布を示す。当該システムを用いることにより、CO₂についても全球を高解像度にフラックス推定することができることを実証した。得られたCO₂フラックスの解析値は初期値と比べ、6-8月に北米や中国における吸収のフラックスが増加（または、排出が減少）していた。ヨーロッパでは年間を通して排出が減少（または吸収が増加）しており、一方で、南米やアフリカではやや排出が増加（または吸収が減少）した。図4.2.12は逆解析によって得られた全球陸域におけるCO₂フラックスの経年変動を示す。ここでは、(4)で示したGSAM-TMによる逆解析結果と比較を行っている。図で示す通り、NICAM-TM 4D-Varによって得られたフラックスは、過去20年間でおよそ1-3 Pg C yr⁻¹の吸収を示しており、GSAM-TMによる結果とよく整合していた。また、1997年や2002年、2009年、2015年にエルニーニョの影響と思われるフラックスの正のアノマリー（排出が増加、または吸収が減少）についても、変動パターンが概ね一致していた。特に1997年や2015年のアノマリーに関してはピークの高さもよく一致していた。一方で、他の年では必ずしもピークの高さや位相について整合的な結果となっていないことも見てとれる。今後は、どの地域、季節のフラックスがこれらの差異を生み出しているか等といった詳細な解析もしつつ、継続して複数の逆解析の結果を比較し、観測拡充の検討やさらなる手法開発に繋げていく必要がある。

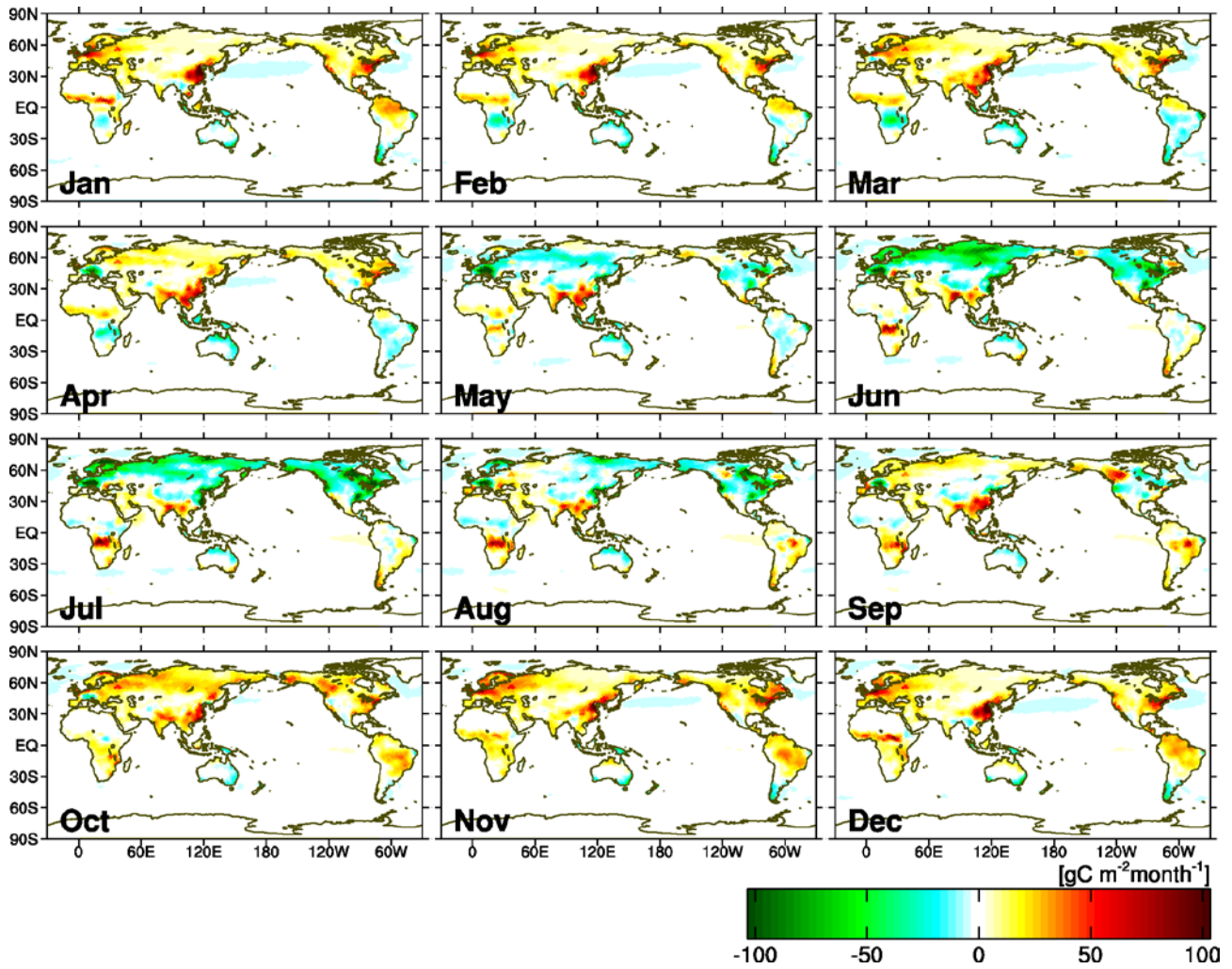


図4.2.11 NICAM-TM 4D-Varによる逆解析によって得られた高解像度CO₂フラックスの分布。2008-2017年の10年間の各月の平均値を示す。

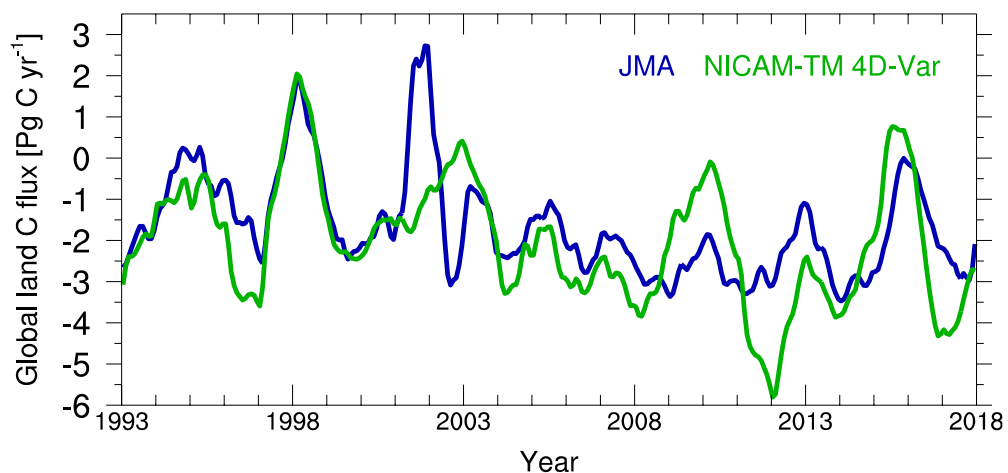


図4.2.12 逆解析によって得られた全球陸域におけるCO₂フラックスの経年変動。月毎のデータに1年の移動平均を施したものを示す。ここでは、NICAM-TM 4D-Var（緑）と気象庁GSAM-TM（青、図4.2.7の黒点と同じ）による解析値の比較を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では逆解析システムNICAM-TM 4D-Varに新たにCH₄モジュールを実装し、CH₄逆解析の高解像度を達成した。これにより、比較的小スケールの排出源を持つCH₄について効果的な逆解析を行うことが可能となった。例えば、本研究で得られた中国のフラックス推定値の減少は、華北とその周辺域に限られており、水田や湿地が存在する華南地域では見られなかった。このことから、中国のフラックス推定値の減少は人為起源排出によるものであると考えられる。このように、空間的に解像度の高いフラックス推定からフラックスの起源に踏み込んだ示唆を得ることができるようになった。なお、この空間解像度は、ベースとなる大気輸送モデルの高並列計算効率等により、先行研究によるものよりも1、2段高いものとなっており、本研究で開発したシステムは解像度の面で世界的に優位性を持つものとなっている。

本研究で開発した解析誤差共分散行列の推定手法は、4次元変分法(4D-Var)をベースとしており、高解像度のフラックス推定に対応したものとなっている。先行研究においても高解像度のフラックス推定に対応した解析誤差共分散行列の推定手法はいくつか提案されてきたが、精度が十分ではなく、特に誤差相関を調べるために必要な非対角成分の推定精度に大きな問題があった。本研究では、高い計算効率で非対角成分までも高精度に導出可能な手法の開発に成功した。ここでは、共役性という性質に着目したという点で新規性があるが、本研究で実装したNICAM-TM 4D-Varのみならず、どの4次元変分法システムにも適用可能な汎用性のあるものとなっている。今後、この手法を用いることにより、より精度の高い観測データのインパクト評価が可能となり、定量的で客観的な指標に基づいて、最適な観測ネットワークの計画・提案を行うことができるようになる。

本研究では、新たにCOをNICAM-TM 4D-Varに組み込み、CO₂-COジョイント解析システムを開発した。これにより、逆解析におけるCO₂フラックス推定値に対して燃焼起源と非燃焼起源の分離精度が向上し、さらに高解像度推定を行うことで、空間的に小さなスケールの森林火災や化石燃料消費からの排出を同定することが可能となった。今後、同システムを活用することにより、近年、頻繁している大規模森林火災や、不確定性の高いとされる、新興国における化石燃料消費からのCO₂放出量を正確に推定できることが期待できる。

本研究により、CO₂とCH₄について世界最先端の高解像度で長期の逆解析が同一のシステム実行可能となった。これにより、人為起源排出等の推定値を双方の観測データから拘束することで、両者の推定精度の向上が期待できる。さらに、トレンドやエルニーニョに応答する自然起源フラックスの変化等について、高解像度の推定から、よりフラックスメカニズムに直結した知見が得られることも望まれる。また、衛星データの特性把握や補正方法の検討が進んだことで、今後、観測データの不均一性の影響が少ないという衛星観測の特徴を活かしたフラックス推定が可能となる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本研究で開発した大気輸送モデルNICAM-TMのCO₂やCH₄の大気濃度計算値は、環境省・国立環境研究所・宇宙航空研究開発機構の3者が共同で進めるGOSAT-2プロジェクトにおいて、衛星観測リトリバル値(L2)導出の際に必要な初期推定値として用いられた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発した逆解析システムNICAM-TM 4D-Varは、GOSAT-2プロジェクトにおいて、CO₂やCH₄の地表面フラックスプロダクト(L4)を作成するシステムとして用いられる予定である。また、今回開発した衛星観測データを用いたGSAM-TMをベースとするCO₂逆解析システムは気象庁が実施しているCO₂分布情報の解析システムとして活用される予定である。また、同システムを用いて実施した長期間のCO₂逆解析は現在執筆中のIPCC第6次評価報告書等に引用される見込である。

6. 国際共同研究等の状況

本研究で整備されたGSAM-TMによるCO₂逆解析のデータを、Global Carbon Projectが計画している第2回地域炭素収支アセスメント (RECCAP-2) に提出した。このデータは、世界的にも稀少な20年を超える長期解析の結果であり、国際的な比較解析で大きな貢献を果たすことが期待される。また、このデータはIPCC第5次評価報告書に引用された地球システムモデルの評価 (ESMVal Tool) にも提供し、第6次評価報告書等に引用される見込である。

本研究で開発したNICAM-TM 4D-VarもCH₄逆解析システムを用いて、GCPが行なったCH₄の統合解析プロジェクト (GCP-CH₄) に参加し、プロジェクトをリードするフランスLSCEのMarielle Saunois氏に逆解析のデータを提供した。

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, P.K. PATRA, ET AL.: Nat. Commun., 9, 1154, doi:10.1038/s41467-018-03374-x (2018a), Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia.
- 2) M. KONDO, P. K. PATRA, S. SITCH, ..., T. MAKI, ET AL.: Glob. Change Biol., 26, 3, 1068-1084 (2020), State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget.
- 3) Y. NIWA and Y. FUJII: Q. J. R. Meteorol. Soc. (2020), A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem. (accepted)
- 4) T. UMEZAWA, H. MATSUEDA, Y. SAWA, Y. NIWA, T. MACHIDA, L. ZHOU: Atmos. Chem. Phys., 18, 14851-14866 (2018), Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements.
- 5) T. UMEZAWA, H. MATSUEDA, T. ODA, K. HIGUCHI, Y. SAWA, T. MACHIDA, Y. NIWA and S. MAKSYUTOV: Scientific Reports, 10.1038/s41598-020-64769-9 (2020), Statistical characterization of urban CO₂ emission signals observed by commercial airliner measurements.

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) M. SAUNOIS, A. R. STAVERT, B. POULTER, P. BOUSQUET, J. G. CANADEL, ..., Y. NIWA, ET AL.: Earth Syst. Sci. Data Discuss., doi.org/10.5194/essd-2019-128 (2019), The Global Methane Budget 2000-2017. (under review for Earth Syst. Sci. Data)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Y. NIWA, Y. SAWA, T. MACHIDA, H. MATSUEDA, T. UMEZAWA and N. SAIGUSA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Chiba, Japan (2017)
"CO₂ flux variation in Southeast Asia for 2015 estimated by in-situ aircraft measurements"
- 2) Y. NIWA and Y. FUJII: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Chiba, Japan (2017)
"Estimation of a posterior error covariance using a linear quasi-Newton method and its application to an inversion of CO₂ sources and sinks"
- 3) T. MAKI, T. T. SEKIYAMA, Y. NIWA, T. NAKAMURA, K. MIYAZAKI and T. IWASAKI: 13th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS), Helsinki, Finland (2017)

- “Observing System Experiments with Multiple Satellites for CO₂ Analysis using the LETKF”
- 4) Y. SAWA, T. MACHIDA, H. MATSUEDA, Y. NIWA, T. UMEZAWA, K. TSUBOI, K. KATSUMATA, H. ETO, D. GOTO, S. MORIMOTO and S. AOKI : 2017 Global Monitoring Annual Conference, Boulder, USA (2017)
- “10 years of observation for greenhouse gases by commercial airliner in the CONTRAIL project”
- 5) Y. NIWA, Y. SAWA, T. MACHIDA, H. MATSUEDA, T. UMEZAWA and N. SAIGUSA : 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland (2017)
- “Spatiotemporal variation of CO₂ flux in Southeast Asia estimated from CONTRAIL”
- 6) Y. SAWA, T. MACHIDA, H. MATSUEDA, Y. NIWA and T. UMEZAWA : 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland (2017)
- “Sensitivity analysis of CO₂ growth rates estimation with sub-sampling method for occasional observation opportunities by commercial airliner”
- 7) Y. SAWA, T. MACHIDA, H. MATSUEDA, Y. NIWA, K. KATSUMATA and T. UMEZAWA : GGMT-2017, Dubendorf, Switzerland (2017)
- “11-year statistics for in-situ CO₂ data obtained in airliner project of CONTRAIL”
- 8) 江口菜穂, 齋藤尚子, 丹羽洋介 : 第23回大気化学討論会 (2017)
- “GOSAT TANSO-FTS TIRより導出されたメタンの上部対流圏の季節変動について”
- 9) 坪井一寛, 松枝秀和, 丹羽洋介, 澤庸介, 村山昌平, 石戸谷重之, 中村雅道, 齋藤和幸, 高辻慎也, 古積健太郎, 細川周一, 幸田笹佳 : 第23回大気化学討論会 (2017)
- “ラドン観測による温室効果ガスデータの選別手法”
- 10) 眞木貴史, 関山剛, 三好建正, 中村貴, 岩崎俊樹 : 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「複数の衛星観測データを用いたCO₂データ同化実験 (II)」
- 11) T. MAKI, T. T. SEKIYAMA, Y. NIWA, T. NAKAMURA, K. MIYAZAKI and T. IWASAKI : 14th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS), Toronto, Canada (2018)
- “Satellite Bias estimation by independent CO₂ inversion Analysis”
- 12) Y. NIWA, T. MACHIDA, Y. SAWA, T. UMEZAWA, K. TSUBOI, K. SAITO, H. MATSUEDA and N. SAIGUSA : 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018)
- “Forward and backward model analyses on high CH₄ events observed over the western North Pacific”
- 13) Y. NIWA : Asia-Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting, Honolulu, USA (2018)
- “Inverse modeling with aircraft observations for constraining CO₂ flux estimates in Asia” (Biogeosciencesセクションの若手研究者によるKamide Lectureとして招待講演).
- 14) Y. NIWA, T. MACHIDA, Y. SAWA, T. UMEZAWA, K. TSUBOI, K. SAITO, H. MATSUEDA and N. SAIGUSA : Asia-Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting, Honolulu, USA (2018)
- “Adjoint analysis on high CH₄ mole fractions observed by aircraft. Asia Oceania”
- 15) K. TSUBOI, H. MATSUEDA, Y. SAWA, Y. NIWA, M. NAKAMURA, K. SAITO, T. KAWASAKI, S. TAKATSUJI, K. KOZUMI, S. HOSOKAWA and H. KODA : the 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan (2018)
- “JMA aircraft observation for greenhouse gases over the western North Pacific”
- 16) Y. NIWA and Y. FUJII : IG3IS/TRANSCOM workshop on inverse modelling of greenhouse gas fluxes from atmosphere observations, Lund, Sweden (2018)
- “New BFGS-based methods to accurately estimate a posterior error covariance matrix”
- 17) T. MAKI, T. NAKAMURA and K. KONDO : IG3IS/TRANSCOM workshop on inverse modelling of greenhouse gas fluxes from atmosphere observations, Lund, Sweden (2018)

- “Satellite bias estimation system by independent CO₂ inversion analysis”
- 18) 眞木貴史, 中村貴, 近藤圭一: 日本気象学会2018年度秋季大会 (2018)
“衛星観測データの炭素循環逆解析への導入について”
- 19) 丹羽洋介, 藤井陽介: 日本気象学会2019年度春季大会 (2019)
“4次元変分法-逆解析における解析誤差共分散の高精度推定”
- 20) Y. NIWA, A. ITO, T. MACHIDA, M. SASAKAWA, Y. TOHJIMA, Y. TERAU, T. UMEZAWA, S. MORIMOTO, S. AOKI, Y. SAWA, K. TSUBOI, H. MATSUEDA, E. DLUGOKENCKY, C. HARTH, P. B. KRUMMEL, R. L. LANGENFELDS, Z. M. LOH, J. MÜHLE, S. O’ DOHERTY, R. G. PRINN, M. RAMONET, P. SALAMEH, C. SWEENEY, R. WEISS, D. YOUNG, S. CASTALDI, S. NOCE, M. SAUNOIS and A. R. STAVERT: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)
“Global inverse analysis of CH₄ fluxes using NICAM-TM 4D-Var”
- 21) Y. NIWA and Y. FUJII: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)
“Accurate estimation of posterior error covariance in a 4D-Var inverse analysis”
- 22) T. MAKI: The 15th Meeting of the Atmospheric Composition Virtual Constellation, Nakano, Tokyo (2019)
“Implications for bias in flux inversions”
- 23) T. MAKI, T. T. SEKIYAMA, K. KONDO and T. NAKAMURA, 15th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS), Sapporo, Hokkaido (2019)
“Constructing a carbon flux estimation system with bias corrected satellite data”
- 24) Y. NIWA, T. MACHIDA, Y. SAWA, T. UMEZAWA, K. TSUBOI, K. SAITO, H. MATSUEDA AND N. SAIGUSA: 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG8), Amsterdam, Netherland (2019)
“Transport pathways of high CH₄ events observed over the western North Pacific”
- 25) K. ISHIJIMA, H. MATSUEDA, K. TSUBOI, K. KOZUMI, G. UMEZAWA, K. SAITO, T. KAWASAKI and Y. SAWA: GGMT-2019, Jeju, Korea (2019)
“New calibration system for methane and carbon dioxide at JMA”
- 26) T. MAKI, K. KONDO, S. YABU and T. NAKAMURA: The Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG3IS) -Transcom Workshop, Paris, France (2019)
“Constructing a global carbon flux estimation system with bias corrected satellite data”
- 27) 丹羽洋介: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
“全球CH₄逆解析によるフラックス推定値の独立性評価, 日本気象学会2019年度秋季大会”
- 28) 石島健太郎, 松枝秀和, 坪井一寛, 古積健太郎, 梅澤研太, 齊藤和幸, 川崎照夫, 澤庸介: 第24回大気化学討論会 (2019)
“気象庁におけるレーザー分光法を用いたメタン及び二酸化炭素の新校正装置”
- 29) Y. NIWA, Y. SAWA, H. NARA, T. MACHIDA, H. MATSUEDA, U. UMEZAWA, A. ITO, S. NAKAOKA and H. TANIMOTO: AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA (2019)
“Fire-induced CO₂ emission in Equatorial Asia during the 2015 drought estimated by aircraft and ship observations”
- 30) T. MAKI, T. NAKAMURA, K. KONDO and S. YABU: AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA (2019)
“Constructing a carbon flux estimation system with originally bias corrected satellite 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

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

- 1) 成果記者発表（2018年3月20日）、文部科学省記者会（筑波研究学園都市記者会、環境記者会、環境省記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、神奈川県政記者クラブ、横須賀市政記者クラブ、青森県政記者会、むつ市政記者会、高知県政記者クラブ、沖縄県政記者クラブ、名護市駐在3社、気象庁記者クラブ同時配付）、千葉大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所・気象研究所、近藤雅征・市井和仁・プラビール・パトラ・佐伯田鶴・三枝信子・眞木貴史・丹羽洋介「気候の自然変動が、大規模森林伐採による二酸化炭素の排出を相殺した現象を世界で初めて検出！東南アジアの生態系によるCO₂排出量が2000年代に減少した原因を解明、地球温暖化現象の理解に向けての新たな足掛かり」
- 2) NHK NEWS WEB（2018年3月20日）「気候の自然変動がCO₂排出抑制 千葉大など調査」
- 3) つくばサイエンスニュース（2018年3月20日）「周期的自然変動がCO₂排出に影響—森林伐採による増加抑制も」
- 4) 時事ドットコムニュース（2018年3月20日）「強いエルニーニョで増加懸念＝東南アジアCO₂排出量—千葉大など」
- 5) 日本経済新聞（2018年3月26日）「弱いエルニーニョ現象 東南アCO₂排出抑制」
- 6) 日刊工業新聞（2018年3月27日）「森林伐採によるCO₂排出 気候変動で相殺 千葉大など解明」
- 7) 環境情報メディア環境展望台「千葉大など、東南アジアの森林伐採等に由来するCO₂排出とエルニーニョ現象の因果関係を解明」
- 8) 東京新聞「地球温暖化を裏で操る」（2018年4月23日）
- 9) 中日新聞「地球温暖化を裏で操る」（2018年4月26日）
- 10) 成果記者発表（2019年12月12日）、環境省記者クラブ、環境記者会、千葉県政記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、筑波研究学園都市記者会、気象庁記者クラブ同時配付、千葉大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所・気象研究所、近藤雅征・プラビール・パトラ・市井和仁・佐伯田鶴・三枝信子・眞木貴史「CO₂の放出と吸収のより正確な推定に成功～IPCC第5次評価報告書からの進展と第6次評価報告書に向けた課題～」
- 11) Physics.org（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 12) Agenparl（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 13) Pharma Jobs（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 14) Science Codec（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 15) Bioengineer.org（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 16) One News Page（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 17) ScienceDaily（2019年12月12日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 18) Environmental News Network（2019年12月13日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 19) Terra Daily（2019年12月13日）「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」

- 20) Live Science Tech (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 21) Long Room.com (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 22) Industry Global News24 (2019年12月13日) 「Advancement in estimation of carbon removal by terrestrial ecosystems」
- 23) Eurasia Review (2019年12月14日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 24) SCIENMAG (2019年12月13日) 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 25) 電気新聞(2019年12月16日) 「千葉大などがCO₂収支を精度よく推定する手法を整理」
- 26) 化学工業日報(2019年12月18日) 「千葉大などがCO₂収支を精度良く推定する手法を整理」
- 27) 大学ジャーナルONLINE(2019年12月18日) 「CO₂の放出と吸収、より正確に推定 千葉大など新手法」
- 28) 環境情報メディア 環境展望台(2019年12月19日) 「千葉大など、「陸域CO₂収支量」推定手法間のばらつきを解消」
- 29) 成果記者発表 (2020年5月15日)、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会同時配信、梅澤拓・町田敏暢・丹羽洋介・Shamil Maksyutov・松枝秀和・澤庸介・小田知宏・Kaz Higuchi 「民間旅客機が捉えた都市圏からのCO₂排出 ～世界35都市上空でのCO₂観測データの統計解析～」

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Niwa, Y., Tomita, H., Satoh, M., Imasu, R., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Machida, T., Sasakawa, M., Belan, B. and Saigusa, N. (2017a) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 1: Offline forward and adjoint transport models. *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157-1174.
- 2) Niwa, Y., Fujii, Y., Sawa, Y., Iida, Y., Ito, A., Satoh, M., Imasu, R., Tsuboi, K., Matsueda, H. and Saigusa, N. (2017b) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO₂ inversion. *Geosci. Model Dev.*, 10, 2201-2219.
- 3) Saeki, T., Patra, P.K. (2017) Implications of overestimated anthropogenic CO₂ emissions on East Asian and global land CO₂ flux inversion. *Geosci. Lett.* 4, 9.
- 4) Fujii, Y. (2005) Preconditioned optimizing utility for large-dimensional analyses (POpULar). *J. Oceanogr.*, 61, 167-181.
- 5) Patra, P. K., et al. (2011) TransCom model simulations of CH₄ and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH₄ variability in the troposphere and lower stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12813-12837.
- 6) Niwa, Y., et al. (2014) Seasonal Variations of CO₂, CH₄, N₂O and CO in the Mid-Troposphere over the Western North Pacific Observed Using a C-130H Cargo Aircraft, *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 55-70.
- 7) Janssens-Maenhout, G., et al. (2019) EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970-2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 959-1002.
- 8) Ito, A. (2019) Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-

- induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment, *Earth Syst. Dynam.*, 10, 685-709.
- 9) van der Werf, G. R., et al. (2017) Global fire emissions estimates during 1997-2016, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 697-720.
 - 10) Kaiser, J. W., et al. (2012) Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences*, 9, 527-554.
 - 11) Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y. and Niwa, Y. (2018), Atmospheric CO₂ mole fraction data of CONTRAIL-CME, Ver.2019.1.0, Center for Global Environmental Research, NIES, DOI:10.17595/20180208.001,
 - 12) Nara, H., Tanimoto, H., Tohjima, Y., Mukai, H., Nojiri, Y. and Machida, T. (2017) Emission factors of CO₂, CO and CH₄ from Sumatran peatland fires in 2013 based on shipboard measurements, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 69:1, 1399047.
 - 13) Andres, R. J., Boden, T. A., and Marland. G. (2016) Monthly Fossil-Fuel CO₂ Emissions: Mass of Emissions Gridded by One Degree Latitude by One Degree Longitude, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi:10.3334/CDIAC/ffe.MonthlyMass.2016.
 - 14) Iida, Y., Kojima, A., Takatani, Y., Nakano, T., Sugimoto, H., Midorikawa, T. and Ishii, M. (2015) Trends in pCO₂ and sea-air CO₂ flux over the global open oceans for the last two decades. *J. Oceanogr.*, 71, 637-661.
 - 15) Randerson, J. T., Thompson, M. V., Conway, T. J., Fung, I. Y., and Field, C. B. (1997) The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide, *Global Biogeochem. Cy.*, 11, 535-560.
 - 16) Baker, D. F., Law, R. M., Gurney, K. R., Rayner, P., Peylin, P., Denning, A. S., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Prather, M., Pak, B., Taguchi, S., and Zhu, Z. (2006) TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1988-2003, *Global Biogeochem. Cy.*, 20, <https://doi.org/10.1029/2004GB002439>.
 - 17) Kondo, M., et al. (2020) State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget, *Glob Change Biol.*, 26:1068-1084.
 - 18) Saunois, M., et al. (2019) The Global Methane Budget 2000-2017, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, doi.org/10.5194/essd-2019-128
 - 19) Ito, A. and Inatomi, M. (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, 9, 759-773.
 - 20) Cao, M., Marshall, S., and Gregson, K. (1996) Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model, *J. Geophys. Res.*, 101, 14399-14414.
 - 21) Bousseres, N., Henze, D. K., Perkins, A., Bowman, K. W., Lee, M., Liu, J., Deng, F. and Jones, D. B. A. (2015) Improved analysis- error covariance matrix for high-dimensional variational inversions: application to source estimation using a 3D atmospheric transport model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1906-1921.

II-3 トップダウン推定における全炭素(CO₂, CH₄, CO)モデルシステムの開発

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野 パトラ プラビール

<研究協力者>

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野 Naveen Chandra

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：32,214千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：10,920千円、平成30年度：10,374千円、令和元年度：10,920千円）

[要旨]

海洋研究開発機構（JAMSTEC）で開発された大気化学モデルAtmospheric Chemistry Transport Model（ACTM）の大気輸送プロセスを担うモデル部分を更新し、逆解析システムの再構築を行った（以下、MIROC4-ACTMという）。これにより、北・南半球間の物質輸送、成層圏の空気齢の推定において、MIROC4-ACTMが以前の逆解析モデルに比べ大きく改善した。

続いて、地球全体を54の陸域と30の海洋の地域に分割してそれぞれの地域の地表におけるCO₂収支を推定するCO₂逆解析モデルを開発し、1996年-2016年を解析対象としてCO₂収支の推定を行った。特に、CO₂排出の先験情報と大気観測データの不確実性による影響を評価するため、異なるCO₂フラックスデータセットを用いて大気輸送モデルによるフォワード計算を2014年から2016年の期間について実施し、気柱平均CO₂濃度（XC_{CO2}）観測データとの比較を行った。比較に使用した観測データは、GOSAT衛星とOCO-2衛星による全球観測データ、及び、地上観測サイトとTCCONサイトにおけるサイトスケールの観測データである。本サブテーマで開発したMICRO4-ACTMによるCO₂逆解析の結果は、全球の炭素収支（CO₂、CH₄、COを含む）把握を目的とした国際的な統合解析プロジェクト（Global Carbon Project：GCP）の第2回地域炭素収支評価（Regional Carbon Cycle Assessment and Processes-2：RECCAP-2）において、ボトムアップ・アプローチ（海洋プロセスモデル、陸域生態系プロセスモデル）との比較解析に重要な役割を果たした。

炭素を含む主要な3つの化学種（CO₂、CH₄、CO）を使った全球と領域規模の炭素収支の理解に向けて、CH₄に関する大気輸送、大気化学、地表フラックスのさらなる改善を行った。MIROC4-ACTMを用いて、29年間のスピンアップのうち1988年から2016年の計算を行い、バックグラウンドサイトでの観測値との比較を行った。CH₄逆解析と先見値データの結果を用い、全球、半球、地域スケールのそれぞれにおいて、大気中CH₄濃度、並びにCH₄排出の年次変動の傾向を評価した。CO₂逆解析と同様に、MICRO4-ACTMによるCH₄逆解析の結果はGCPのCH₄収支の統合解析に利用された。

[キーワード]

大気輸送モデル、トップダウン推定、二酸化炭素、メタン、全球炭素収支推定

1. はじめに

海洋研究開発機構（JAMSTEC）で開発された大気化学モデルAtmospheric Chemistry Transport Model（ACTM）は、これまでにも地球規模の大気中微量気体の循環や、海洋及び陸域における温室効果ガス（特にCO₂）の収支評価のために重要な役割を果たしてきた。ここで、CO₂に次ぐ大きな温暖化効果をもつCH₄は、CO₂と共通の排出源（石炭消費や森林火災等）を持つことから、吸排出量の推定精度を向上し削減策の効果を評価する上で、両者を含むより包括的な解析システムを構築することが効果的である。しかし、CH₄の発生源は、野生の反芻動物、湿地、湖沼、海洋、シロアリ、メタンハイドレート、森林火災、泥火山等の自然起源のものから、水田、廃棄物の埋め立て地、飼育されている反芻動物、焼畑や土地利用改変に伴う火災、石炭や天然ガスの採掘・輸送時の漏えい等の人為起源のものまで多岐にわたり、これらが独自の季節変化・年々変化を伴って陸域に複雑に分布しているため、地球上の各地域

からのCH₄排出量の高精度な推定は困難である。

大気輸送モデルを用いた逆解析手法に関しては、これまでにモデルの輸送誤差が推定フラックスに与える影響が指摘されており、使用する大気輸送モデルの正確さが必要条件である。CCSR/NIES/FRCGC大気大循環モデルを基にした大気化学輸送モデル (ACTM) は、SF₆、²²²Radon、CO₂、CH₄等のフォワード計算と観測データとの比較を通して、これまでに総観規模から南北半球間規模での輸送の再現性に優れたモデルであることが確認されている。大気輸送の再現性に優れたACTMをさらに改良して逆解析に用いることで、輸送誤差の影響の少ないフラックス推定が可能になると期待される。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、JAMSTECの大気化学輸送モデル (ACTM) と大気観測データから地表面フラックスを推定する逆解析のシステムを開発改良し、全球と領域規模のCO₂やCH₄フラックスを推定する。また、本研究並びに過去に実施された複数のトップダウン推定による解析結果を合わせて、総合的なCO₂・CH₄収支の解析を行い、不確実性の評価を行うと同時に、最適な評価を行う手法の検討を行う。さらに、これらの推定結果を用いて、Future Earthの重要な国際プロジェクト (Global Research Projects) の一つである Global Carbon Projectの国際共同解析に貢献する。

3. 研究開発方法

大気化学モデルACTMの大気輸送プロセスを担うモデル部分をNIES/CCSR/JAMSTEC AGCM MIROC4.0 (Model for Interdisciplinary Research on Climate version 4.0) に更新し、逆解析システムの再構築を行った (以下、MIROC4-ACTMという)。これにより、北・南半球間の物質輸送、成層圏の空気齢の推定において、MIROC4-ACTMが以前の逆解析モデル (CCSR/NIES/FRCGC大気大循環モデル: AGCM5.7b) に比べ大きく改善していることを確認している (図3.3.1)。また、新旧ACTMの対流圏・成層圏における物質輸送の比較、及び、改善結果の詳細はPatra et al. (2018) (誌上発表5) に記した。2018年以降、MIROC4-ACTMを本サブテーマの逆解析モデルとして使用した。

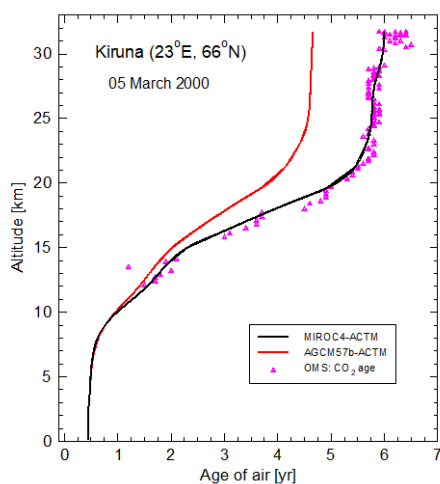


図3.3.1 新旧ACTMによる空気齢のシミュレーション結果と観測データとの比較。観測データはOMS (the Observations of the Middle Atmosphere: Ray et al., 2017) 気球による北極圏の観測 (2000年3月) を使用した。

次に、CO₂逆解析モデルは、54の陸域と30の海洋の地域、期間は1996年-2016年、を対象として開発を行った (図3.3.2)。特に、CO₂逆解析で用いるCO₂排出の先験情報と大気観測データの不確実性による影響を評価するため、異なるCO₂フラックスデータセットを用いて大気輸送モデルによるフォワード計算を2014年から2016年の期間について実施し、気柱平均CO₂濃度 (XCO₂) 観測データとの比較を行った。比較に使用した観測データは、GOSAT衛星とOCO-2衛星による全球観測データ (それぞれGOSAT ACOS b7.3、

OCO-2 v7 LITE LEVEL 2)、及び、地上観測サイトとTCCONサイトにおけるサイトスケールの観測データである。陸域と海洋のCO₂フラックスとして次の3つのデータセットを用意した。1) ACTM_CYC64: 2008年についての64領域逆解析の結果 (Patra et al., 2011) を毎年繰り返し使用したもの、2) ACTM_IAV84: 84領域逆解析の結果 (Saeki and Patra, 2017) を使用したもの、3) ACTM_IAV84+GFAS: ACTM_IAV84にGlobal Fire Assimilation System (GFAS) によるバイオマス燃焼フラックス (Kaiser et al., 2012) を加えたもの。いずれのケースも化石燃料消費・セメント生産 (FFC) によるCO₂排出量はEmission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v4.2 (Janssens-Maenhout et al., 2017) を用いた。次に、XCO₂についてのACTMフォワード計算値とOCO-2の観測値の差を求め、単純化したマスバランス逆解析によりCO₂フラックスを推定した。さらに、得られたフラックスを本研究とは独立した2つの全球逆解析モデルの結果と比較した。

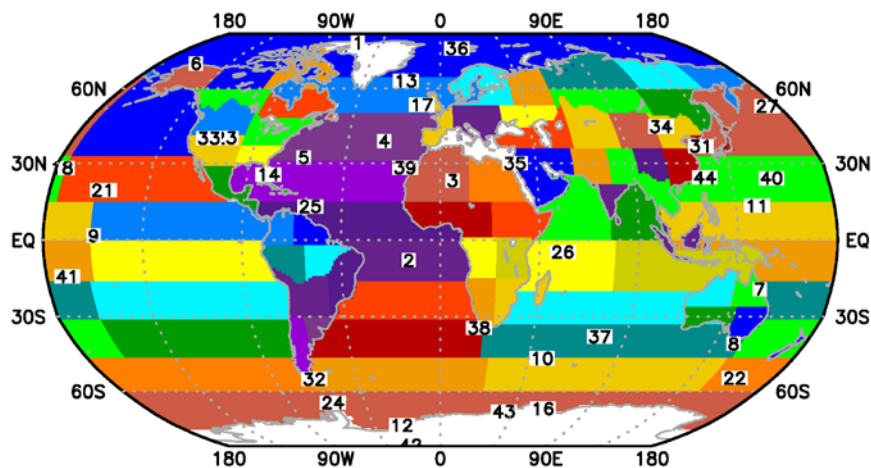


図3.3.2 CO₂逆解析に使用した84 (54の陸域と30の海洋) の領域区分。

現在の逆解析システムを更に改善するため、MICRO4-ACTMを含んだ複数の新世代逆解析モデルの統合解析を行った。特に、1) 逆解析に使用する先見値データ (化石燃料の燃焼によるCO₂排出量等) の違い、2) 航空機観測を逆解析モデルの制約とするか否か、がシミュレーション結果に及ぼす影響を調査した。また、本サブテーマで開発したMICRO4-ACTMによるCO₂逆解析の結果は、全球の炭素収支 (CO₂、CH₄、COを含む) の把握を目的とした国際的な統合解析プロジェクト (Global Carbon Project) において、ボトムアップアプローチ (海洋プロセスモデル、陸域生態系プロセスモデル) との比較解析に貢献した (Le Quere et al., 2018、誌上発表6; Friedlingstein et al., 2019)。

炭素を含む主要な3つの化学種 (CO₂、CH₄、CO) を使った全球と領域規模の炭素収支の理解に向けて、CH₄に関する大気輸送、大気化学、地表フラックスのさらなる改善に着手した。大気CH₄の増加率は、過去30年で大きく変化しており、1988-1991年は約15 ppb/year、1992-2005年は0-5 ppb/year、2006-2016年は8 ppb/yearを観測しているが (WMO, 2017)、この変化の原因はいまだ解明されていない。CH₄の排出量は自然の気候変動及び人間活動と密接に関係があることが報告されている (Patra et al., 2016)。しかしながら、プロセスモデルと排出インベントリによるCH₄排出量を用いたシミュレーションでは、過去のCH₄増加率を再現できなかった (Ghosh et al., 2015)。この問題を解決するため、最新の排出量シナリオを用意するとともに大気輸送モデルの改良を行った。湿地と水田からのCH₄排出は、陸域生態系モデルVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases; Ito and Inatomi, 2012) による最新の計算結果を入手した。産業由来の人為排出と反芻動物によるCH₄排出は2017年にアップデートされたEDGAR v4.3.2、バイオマス燃焼は最新のGlobal Fire Emissions Database (GFED) v4sデータベース (1997-2016年) を用いた。その他の白アリ、沿岸海洋、泥炭火山による排出は、従来と同じTransCom-CH₄プロジェクトで使用されたデータセットを使用した。MIROC4-ACTMを用いて、29年間のスピニアップのち1988年から2016年の計算を行い、バックグラウンドサイトでの観測値との比較を行った。

また、CH₄逆解析と先見値データの結果を用い、全球、半球、地域スケールのそれぞれにおいて、大気中CH₄濃度、並びにCH₄排出の年次変動の傾向を評価した。CO₂逆解析と同様に、MICRO4-ACTMによるCH₄逆解析の結果はGCPのCH₄収支の統合解析に利用された (Saunois et al., 2019)。

なお、人為起源と自然起源の排出量分離に向けた大気輸送モデルへのCOの導入と、森林火災等による影響が大気CO濃度に与える影響の評価については、特にサブテーマ2と3が協力して実施した。成果はサブテーマ2の報告に詳しく記載した。

4. 結果及び考察

(1) 衛星観測との比較を通じたCO₂逆解析システムの精度検証

衛星観測によるXC_{CO₂}との比較を通じ、CO₂逆解析システムの精度検証を行った。図4.3.1に、帯状平均XC_{CO₂}の緯度-時間分布について、OCO-2衛星観測値（上段）、GOSAT衛星観測値（下段）、及び、それぞれの観測値とACTM計算値との差を示す。ACTM_IAV84+GFASケースでは、OCO-2観測値とGOSAT観測値とのいずれにおいても非常に良い一致が見られ、特に熱帯域での一致は顕著である。さらに、GOSAT観測を陸域と海域を分けてACTM計算値と比較した結果、高緯度域の正のモデルバイアスは主として海域に起因していることがわかった。2015年から2016年にかけて発生した非常に強いエルニーニョは地球の自然気候システムに大きな影響を及ぼしたことから、このエルニーニョがCO₂フラックスのアノマリに及ぼす影響を評価するため、準リアルタイムの解析を行った。2014年9月から2016年10月の期間についてOCO-2衛星観測値とACTMのモデル計算値との差を解析した結果、2014年の年平均フラックスと比較して、エルニーニョが発生した2015年7月から2016年6月までの期間は、地表（陸域と海洋）からのCO₂排出が2.4±0.2 PgC 増加したという結論を得た。このCO₂排出の増加は、主として乾燥化により陸域生態系のCO₂吸収が低下したことと、バイオマス燃焼が若干増えたこと起因する。このアノマリは、1997/1998エルニーニョ現象によるCO₂フラックスアノマリ (4.4~6.7 PgC) の約半分に対応する。化石燃料消費による排出量を10.1 PgCと仮定した場合、年合計吸収量は3.9±0.2 PgCと推定された。誤差の主要因は、人為排出量のトレンドや衛星データ、大気輸送等と考えられる。以上の成果を論文として公表した (Patra et al., 2017; 誌上発表1)。

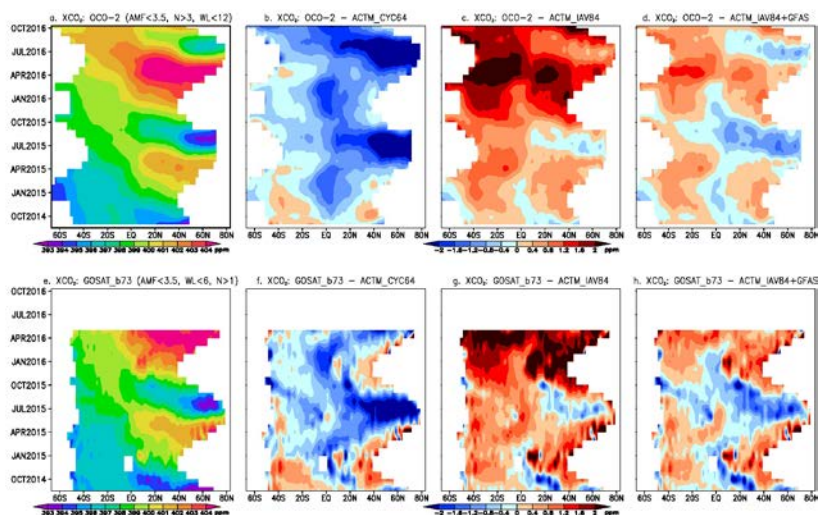


図4.3.1 衛星観測とモデル計算によるXC_{CO₂} (ppm)の緯度-時間分布。OCO-2衛星観測値 (a)、GOSAT衛星観測値 (e)、衛星観測値とAGCM57b-ACTMによる3通りのシミュレーション結果との差 (それぞれb-d、f-h)。期間はOCO-2観測については2014年9月7日から2016年10月31日まで、GOSATについては今回使用したGOSAT ACOS b7.3データセットに含まれる2016年5月31日まで (Patra et al., 2017; 誌上発表1)

さらに、ACTM簡易逆解析から得られた補正フラックスを、2つの独立した逆解析モデルによるCO₂フラックスの緯度分布と比較した (図4.3.2)。2つの逆解析モデルは、National Oceanic and Atmospheric

Administration USA (NOAA) によるCarbonTracke (CT-NOAA) と Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS-LSCE) を使用した。これらの逆解析モデルによるCO₂フラックスの間では大きな違いが見られ、その違いは先験情報として用いた化石燃料消費・セメント生産 (FFC) による排出量に依存していた。概して、強いFFC排出を仮定したモデルでは強い生態系吸収を推定しており、特に北半球中高緯度でこの傾向が顕著である。このことは、XCO₂観測とACTMモデルシミュレーションを用いた単純な逆解析モデルが準リアルタイムの全球CO₂フラックスのアノマリ推定に有用であることを示す。

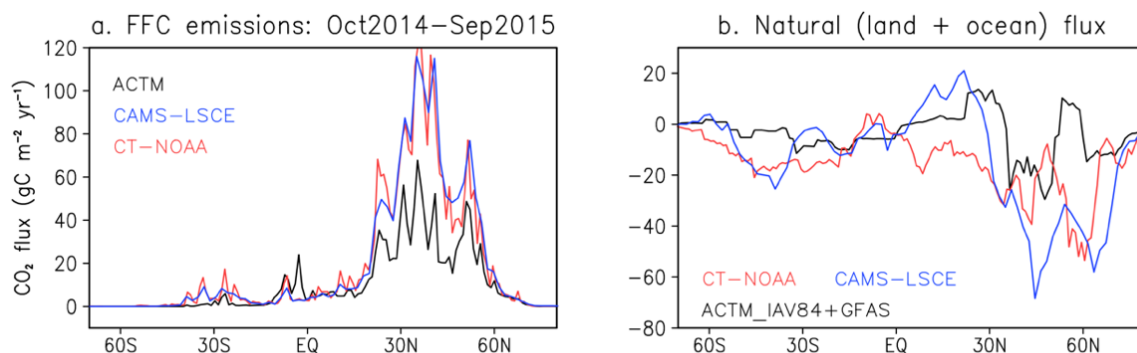


図4.3.2 化石燃料消費・セメント生産 (FFC) 起源のCO₂排出量の先験値 (a) と逆解析で推定された自然起源 (陸と海の合計) のフラックス (b)。本研究の結果 (ACTM) と合わせて、2つの独立した既存の逆解析の結果 (CT-NOAA、CAMS-LSCE) を示す。CT-NOAA: NOAAの逆解析モデルCarbonTracker (Peters et al., 2007; version: CT2016; www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/)、CAMS-LSCE: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) の逆解析モデルCAMS (Chevallier et al., 2010; version: v15r4; <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-ghg-inversions/>)。

(2) 化石燃料の燃焼によるCO₂排出量が陸域・海洋CO₂フラックスの推定に及ぼす影響

全球スケールの炭素循環の理解を深めるためには、大気観測が示唆する地表 (陸域と海洋) へのCO₂吸収量が如何に陸域と海洋に分配されているかを解明しなければならない。この課題に対し、GCPが発表したGlobal Carbon Budget 2016 (GCB2016) による陸域と海洋のCO₂吸収量と、異なる2つのACTM実験結果 (International Energy Agency (IEA) とCarbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) の2種のFFC排出データに基づく) を含む新世代の10種の逆解析モデルを比較した (Gaubert et al., 2019, 誌上発表7)。2009年-2011年を対象にした逆解析モデルとGCB2016によるCO₂収支の陸域・海洋への配分を図4.3.3に示す。逆解析モデルは、平均で -2.04 ± 0.51 PgC/yearのCO₂が海洋で吸収され、 -2.61 ± 0.42 PgC/yearのCO₂が陸域で吸収されていると推定した (図4.3.3a)。GCB2016と比較すると、海洋のCO₂収支量は逆解析モデルと近似しているが、陸域のCO₂収支量は逆解析モデルの推定がGCB2016 (-3.04 ± 0.5 PgC/year) を下回っていた。海洋と陸域のCO₂収支量の関係を見ると、モデル間のばらつきは大きく (1 PgC/year以上)、これは陸域と海洋へのCO₂吸収量の分配がモデル間で未だ大きく異なることを意味している (図4.3.3a, b)。

この不一致の原因の一つに、先見値として利用したFFC排出データがモデル間で異なること (また、同一のデータを基にしても、欠損期間を異なる手法で補完したこと) が挙げられる。陸域と海洋のCO₂吸収量と先見値として利用したFFC排出データの間には密接な相関関係があり ($r^2 = 0.93$)、モデル間のばらつきがFFC排出量によって主に制御されていることを示している (図4.3.3c)。FFC排出 (逆符号) とFFC排出から陸域と海洋のCO₂吸収量を差し引いた値との関係性を見ると、逆解析モデルの結果はGCB2016が示す許容範囲から大きく外れている (図4.3.3d)。この結果は、個々の逆解析モデルが、これまでの開発過程においてFFC排出データの精度に留意していなかったことを明示している。また、先行研究が示唆したように (Saeki and Patra, 2017)、先見値に使用したFFC排出データが過大評価の傾向にあるにもかかわらず、CO₂収支の妥当な空間分布の算出を優先したため、地表へのCO₂吸収量を過大評価してい

る可能性は否めない。この議論はGCP2016にも当てはまる。GCP2016は逆解析モデルの先見値を更に大きく上回るFFC排出量を推定している。この結果により、GCP2016が逆解析モデルに比べ陸域のCO₂吸収量を過大評価したと考えられる。

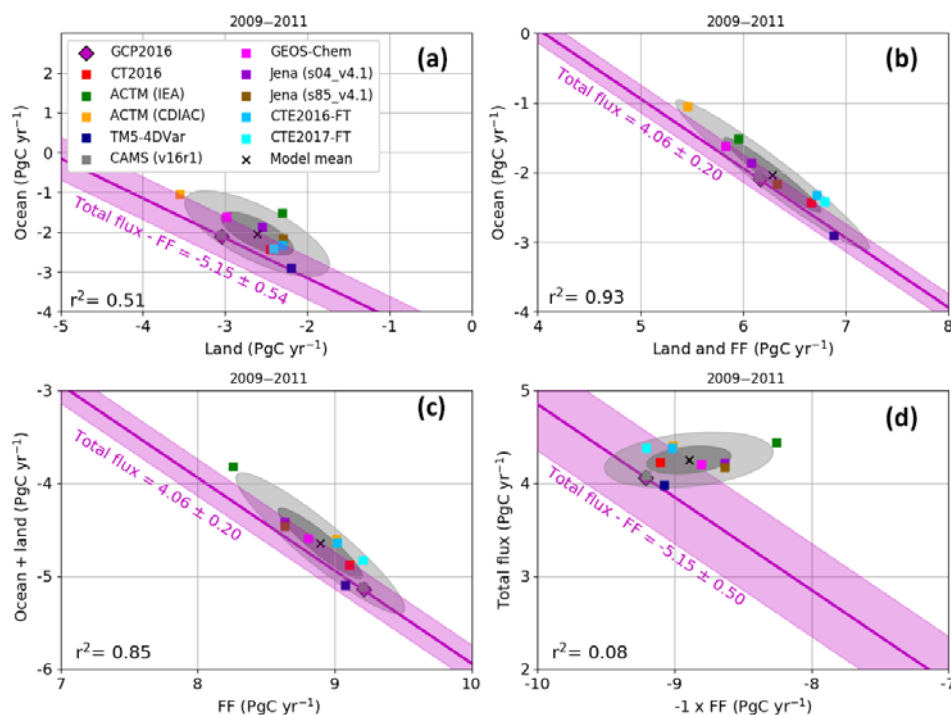


図4.3.3 2009年-2011年を対象とした全球スケールのCO₂収支の配分関係。(a) 陸域と海洋のCO₂収支、(b) 海洋CO₂収支とFFC排出-陸域CO₂収支の和、(c) 陸域-海洋CO₂収支の和とFFC排出、(d) FFC排出(逆符号)とFFC排出から陸域と海洋のCO₂吸収量を差し引いた値。それぞれの逆解析モデルの結果は□で、モデル平均値は×で、GCB2016はひし形で示す。赤紫色の実線と幅は、GCB2016によるマスバランスと標準偏差を表す。(Gaubert et al., 2019; 誌上発表 7)

(3) 航空機観測データを利用した半球間のCO₂収支の統合解析

これまで、北半球と南半球(特に、熱帯域)のCO₂収支に関してさまざまな議論が行われてきたが、未だ収束には至っていない。北半球は全球のCO₂吸収量の多くを担っていると考えられているが、絶対量の推定には大きな不確実性を伴う。また、熱帯域においては、正味CO₂を吸収しているのか、排出しているのか、または、カーボンニュートラル(吸排出量が同等)であるのか明確ではない。

この課題に対し、上節と同様の10種の新世代逆解析モデルを用い、北半球温帯地域(northern extra-tropics: NET)と南半球熱帯温帯域(the tropical and southern extra-tropics: T+SET)におけるCO₂収支の比較実験を行った(図4.3.4)。特に、半球内・半球間(87°Nから67°Sまで)を跨ぐ大気中のCO₂濃度の航空機観測(HIPPO: Wofsy, 2011)による制約が、これらの地域におけるCO₂収支の推定に及ぼす影響を調査した。この際、比較する期間を、2009年-2011年(HIPPOによる観測データが利用可能)、1992年-1996年(TransCom3実験(旧世代逆解析モデルの統合解析、TransCom3 inversions: T3L2)の実施期間)、2001年-2004年(地域炭素収支評価(RECCAP)の実施期間)、2004年-2014年(近年を対象)、に区分けし、旧世代逆解析モデルとの比較を行った。また、使用した10種の逆解析モデルは、モデル間の誤差はあれどHIPPOデータが示す大気中CO₂濃度の鉛直分布に大凡一致していることを確認した。

上記それぞれの期間で、NETとT+SETのCO₂収支を比較したところ、2009年-2011年において新世代モデル間の一貫性が顕著であった(図4.3.4a)。NETでは2PgC/yearを上回るCO₂吸収量(-2.24±0.29 PgC/year)を、T+SETでは弱い吸収量(-0.38±0.31 PgC/year)を示した。この結果から、2009年-2011年では、北・南半球両方の陸域がCO₂吸収の役割を果たしていたと言える。1990年代と比べ2000年代では、熱帯域における森林伐採活動の低下や気候ストレスの鈍化が報告されており、CO₂収支が吸収に転じた原因だと考え

られている (Kondo et al., 2018 a, 誌上発表 2)。2004年-2014年においても、同様に新世代モデル間の一致が顕著であった (図4.3.4d)。ただし、この期間においては、T+SETは弱いCO₂吸収よりもカーボンニュートラルを示している。一方、1992年-1996年の期間では、旧世代モデル (T3L2) によるCO₂収支は大きくばらつき、NETとT+SETの両方において3PgC/year以上の推定幅を示した (図4.3.4 b)。2001年-2004年では、旧世代モデル (RECCAP) の推定幅は減少し、GCB2016によるマスバランスとの整合性が高まった (図4.3.4 c)。しかし、依然、新世代モデルに比べ推定幅は大きく (NETとT+SETの両方で約2PgC/year)、これら旧世代モデル (T3L2、RECCAP) のから北・南半球のCO₂吸収に関する役割を明示するのは困難である。

新旧世代逆解析モデルによるNETとT+SETのCO₂収支比較から明らかなのは、北・南半球を跨ぐ航空機観測 (HIPPO) の重要性である。航空機観測からの制約によりモデル推定幅は大幅に減少し、北・南半球陸域のCO₂吸収における役割をより良く解釈できるようになった。

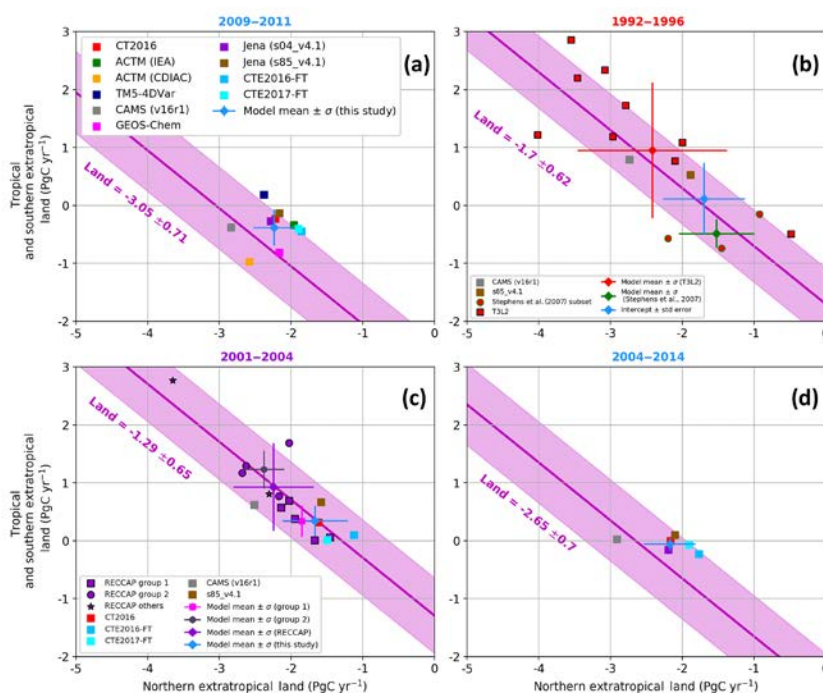


図4.3.4 北半球温帯地域 (northern extra-tropics : NET) と南半球熱帯温帯域 (the tropical and southern extra-tropics : T+SET) におけるCO₂収支の比較、(a) 2009年-2011年 : HIPPOデータが利用可能、(b) 1992年-1996年 : T3L2の実施期間、(c) 2001年-2004年 : RECCAPプロジェクト対象期間、(d) 2004年-2014年。それぞれの逆解析モデルの結果は□で、モデル平均値は×で、GCB2016はひし形で示す。赤紫色の実線と幅は、GCB2016によるマスバランスと標準偏差を表す。(Gaubert et al., 2019 ; 誌上発表 7)

(4) Global Carbon Budgetへの貢献

本サブテーマで開発したMICRO4-ACTMの結果は、全球の炭素収支 (CO₂、CH₄、COを含む) の把握を目的としたGCPによる国際的な統合解析に利用された (Le Quere et al., 2018, 誌上発表 6; Friedlingstein et al., 2019)。図4.3.5は、複数のボトムアップモデル (プロセスモデル) ・トップダウンモデル (逆解析モデル) による全球、並びに、緯度帯に分割した陸域・海洋のCO₂収支の年次変化を示す。MICRO4-ACTMを含む4種の逆解析モデルは、2008年-2017年の期間で、陸域と海洋によるCO₂収支量を4.7から5.0 PgC/yearと推定した。このわずかな推定幅は、逆解析モデルが大気観測に制約されていることに起因する。30°以南では、逆解析モデルは陸域と海洋のCO₂吸収量を1.6-1.7 GtC/yearと推定し、これはプロセスモデルによる推定値1.4±0.7 PtC/yearと近似している (図4.3.5)。しかし、30°以北において

は、逆解析モデル (2.6から3.6 PgC/year) とプロセスモデル (2.2 ± 0.6 PgC/year) による陸域と海洋のCO₂吸収量の推定差が際立つ結果となった。陸域と海洋を個別に評価すると、緯度帯ごとの推定差は更に際立っている。30° 以北の陸域で逆解析モデルがプロセスモデルのCO₂吸収量を大きく上回り、熱帯域では、逆の結果が見られた。また、30° 以南の海洋では、逆解析モデルによるCO₂吸収量がプロセスモデルを大きく上回っている。これらの結果は、最新のトップダウン・ボトムアップモデルにおいてもCO₂収支の違いは未だ大きく、更なる改善が必要であることを示唆している。

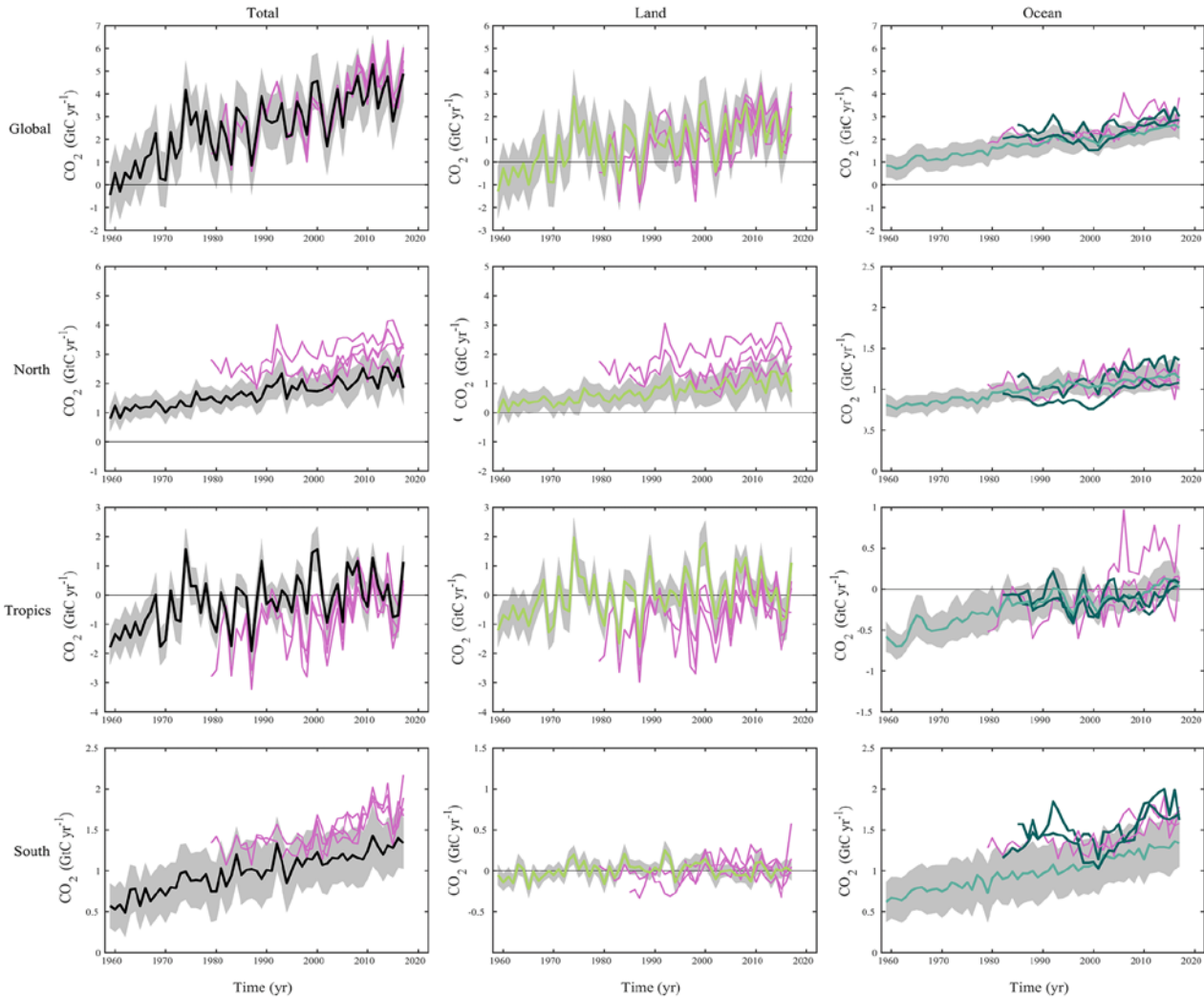


図4.3.5 全球、及び、緯度帯 (30° 以北、熱帯域、30° 以南) に分割した陸域と海洋のCO₂収支の年次変化：陸域と海洋のCO₂収支の和 (左パネル)、陸域のCO₂収支 (中央パネル)、海洋のCO₂収支 (右パネル)。正の値はCO₂収支の正味吸収を示す。黒実線と幅は、プロセスモデルによる平均値と標準偏差を表し、桃色実線は逆解析モデルの推定値を表す。海洋パネルの緑実線は、pCO₂ (大気-海洋のCO₂分圧差) を基に推定したCO₂収支を表す。(Le Quere et al., 2018 ; 誌上発表 6)

上記のプロセスモデルと逆解析モデルによる陸域のCO₂収支の差は、全球スケールにおいて約 0.5 PgC yr^{-1} のインバランスをもたらした (図4.3.6)。このインバランスを解消させるには、FFCや土地利用変化によるCO₂排出、生態系によるCO₂吸収等、それぞれのプロセスに伴う不確実性を減少させることが必要である。これらの不確実性により、これまでトップダウン・ボトムアップモデルの間には、さまざま過大評価・過小評価の事例が報告されている (Bastos et al., 2020, 誌上発表 8 ; Saeki and Patra, 2017)。例えば、1991年のピナツボ山の噴火によって引き起こされた地表面温度の低下は陸域のCO₂吸収を促進したと考えられている。この影響は逆解析モデルにおいて顕著に見られる一方で、プロセスモデルにおいては微弱にしか見られない。また、エルニーニョ・ラニーニャ現象の発生に伴って、

陸域のCO₂収支は突発的に吸収、排出に転ずるが、この傾向は逆解析モデルとプロセスモデルの間で未だ大きく異なることが分かっている。トップダウン・ボトムアップ手法の基礎的なプロセスを今一度再考察し、これらのCO₂収支に取り巻く不確実性を減少させることが今後の課題である。

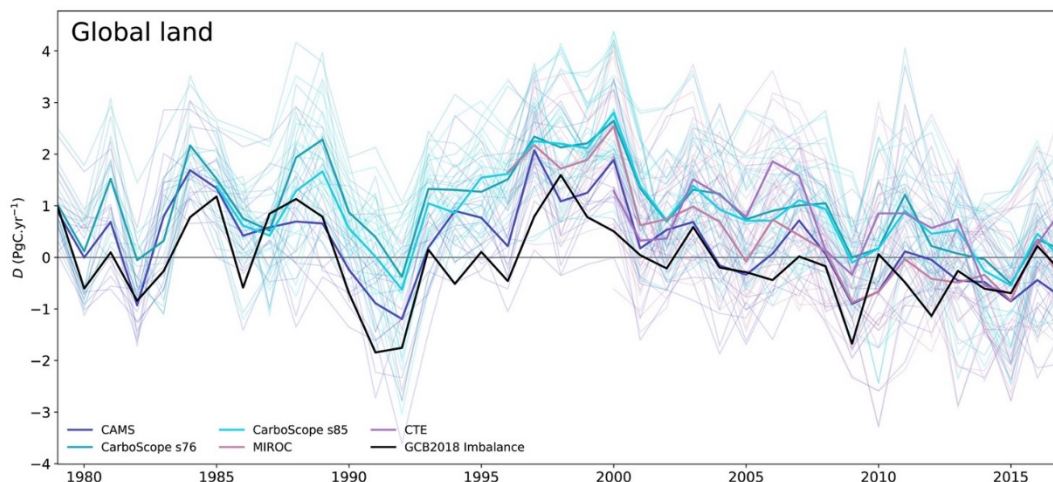


図4.3.6 全球スケールにおける陸域CO₂収支の逆解析モデルとプロセスモデルの誤差 (D)。薄線はプロセスモデルと個別の逆解析モデルとの差を表す（青：CAMS；濃シアン：CarboScope inversions s76、薄シアン：CarboScope inversions s85；桃：MIROC4-ACTM；紫：CarbonTracker Europe [CTE]）。実線はプロセスモデルと個々の逆解析モデルの差の平均、黒の実線はGCP2017 (Le Quéré et al., 2018) で計算されたインバランスを表す。（Bastos et al., 2020；誌上発表 8）

（5）MIROC4-ACTMを用いたメタン逆解析システムの開発

本サブテーマでは、CO₂と同様にメタン（CH₄）の逆解析システムの開発を行った。CH₄の逆解析は、全球53地域を対象にCH₄総排出量の最適化を行うこととした（ただし、海岸浅瀬を発生源とするCH₄量は最適化の対象としなかった）。逆解析に必要なCH₄排出量の先見値として、土壌バクテリアによる吸収量を除いた人為起源と自然起源の排出量を月別に用意した（図4.3.7）。主要な人為排出源（産業石油ガス、反芻動物の腸内発酵や家畜肥料、固形廃棄物や排水処理等）の推定値はEDGARv4.3.2から取得し、火災によるCH₄排出の月別推定値は、GFEDv4sとthe NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) のデータセットを結合したプロダクトを用いた。また、湿地帯と稲作農業からのCH₄排出量は、異なる二つのパラメータ群を基にした生態系モデルVISITの結果を利用した。その他の排出量（海洋、シロアリ、火山活動からの排出）はTransCom-CH₄モデル間相互比較実験の結果を用いた。

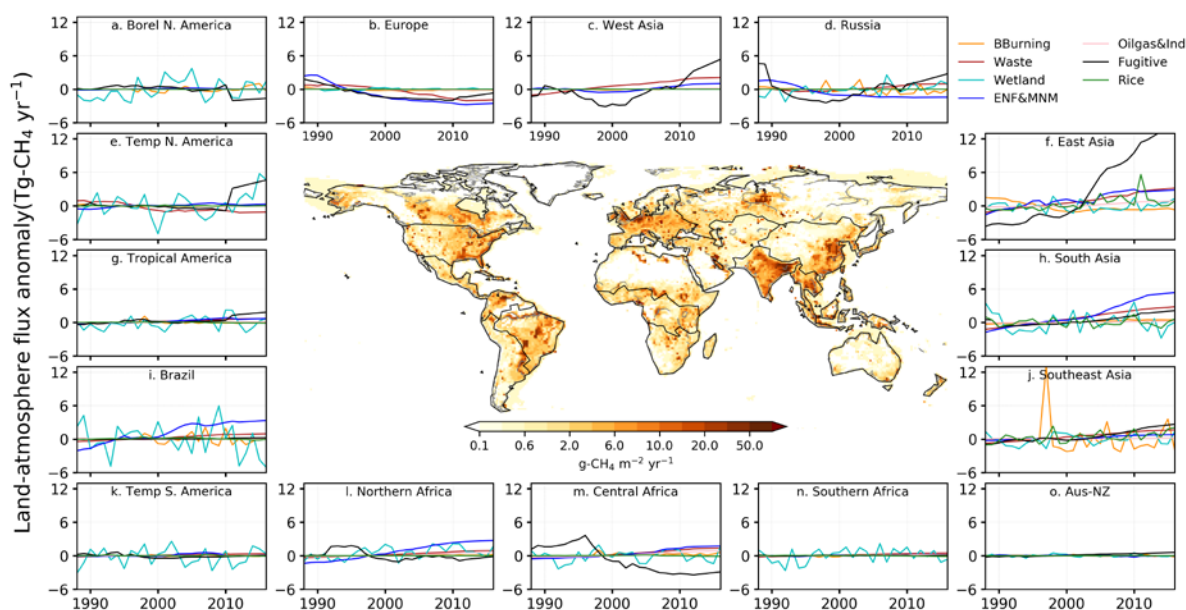


図4.3.7 逆解析システムの先見値とした利用したCH₄排出量の全球分布（1988年-2016年の平均値：中央）。パネルは世界15地域における主要なCH₄排出源の年次変化を示す（BBurning（火災）、Waste（廃棄物）：固形廃棄物埋立地、焼却、排水処理等、Wetland（湿地）、ENF&MNM（畜産）：反芻動物の腸内発酵や家畜肥料等、Oilgas&Ind（産業石油ガス）、Fugitive（漏出）：ガス生成や石炭鉱業に伴うCH₄漏出、Rice（稲作）。

（6）全球、半球スケールにおけるメタン排出量と大気中濃度の年次変化

図4.3.8a, bは南半球全域を対象に平均化した大気中CH₄濃度と増加率 ($d[\text{CH}_4]/dt$) を示す。前述の先見値を利用したMIROC4-ACTMの結果は、1988年から2002年において大気観測と整合する結果を示した（図4.3.8a, b）。この整合性の背景には、2017年にリリースされたEDGARv4.3.2によるCH₄排出量の更新とVISITモデルによる浸水区域のシミュレーション推定結果が大きく改善されたこと（Ito et al., 2019）が関係していると考えられる。EDGARv4.3.2によると、化石燃料消費によるCH₄排出量が1988年から2000年の間に、96 TgCH₄/yearから84 TgCH₄/yearに減少しており、これはCH₄同位体 ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) とエタン (C₂H₆) の結果と整合している。表4.3.1に年代別のCH₄排出量と大気中濃度の結果を示す。

大気中CH₄濃度の増加率は、1991年-1993年と1997年-2000年の間で大きな変動を示した。これは1991年に起こったピナツボ山の噴火、1997年-2000年の間で発生した強いエルニーニョ、ラニーニャ現象に起因している。ピナツボ山の噴火（1991年6月）後のCH₄増加率の大幅な減少は約12 ppb/yearに及び、VISITモデルの結果によると、大気中に排出された火山灰と二酸化硫黄 (SO₂) による地表面温度の低下が湿地帯のCH₄排出量の減少させた（Ito & Inatomi, 2012）と考えられる。1997年から1998年にかけて発生したエルニーニョ現象下では大幅なCH₄濃度の増加（~8 ppb）が見られ、1990年から2000年にかけて発生したラニーニャ現象下では濃度の減少（~10 ppb）が見られたが、これらのアノマリはエルニーニョ南方振動 (ENSO) が引き起こす正と負の気象フェイズに伴う火災の規模に関係していると考えられる。

しかし、2002年から2014年の期間では、MICRO4-ACTMと観測値の不一致が顕著に表れ（図4.3.8a）、特にMICRO4-ACTMが大気中CH₄濃度の増加率を5 ppb/yearほど過大評価する結果となった（図4.3.8b）。この原因の一つとして、EDGARv4.3.2による石炭鉱業から発生するCH₄の漏出が中国で過大推定されている可能性がある（Patra et al., 2016; Peng et al., 2016）。先見値データによると、2002年以降のCH₄排出の急激な増加は漏出プロセスが大きく寄与している（図4.3.8d）。以前のバージョン(EDGARv4.2FT)と比較すると、最新のEDGARv4.3.2では、漏出によるCH₄排出量は2002年-2008年の期間で26 TgCH₄/yearからは17 TgCH₄/yearと減少しているが、排出量は未だに多く、それに伴い高い不確実性を持つと考えられる。

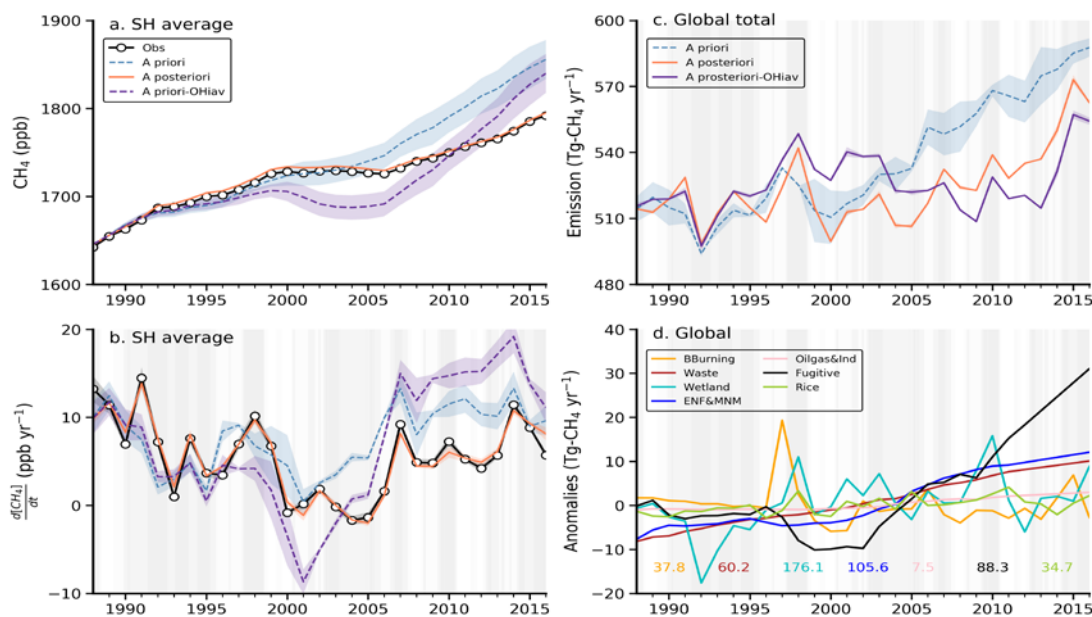


図4.3.8 1988年から2016年まで南半球における大気中CH₄濃度 (a) と増加率 (b) のシミュレーションと観測結果、及び、全球のCH₄排出量 (c) と7種の排出源 (d) の年次変化のアノマリ。CH₄濃度は乾燥空気中のモル分率 (parts per billion: ppb) を単位とする。大気中のCH₄濃度の観測値は、南半球に分布する4サイト (Cape Grim, Palmer Station, Syowa and South Pole) の平均値とした。時系列の色付けした幅は、(b) 4サイトの標準偏差、(c) 2つの排出ケースの標準偏差、を示す。(b) - (d) の縦の色付けはエルニーニョ南北振動 (ENSO) の強度を示し、灰色はエルニーニョ現象、白はラニーニャ現象を表す。

表4.3.1 CH₄の大気負荷、化学反応による消失、正味の排出 (総排出と土壌微生物による吸収の差)、の年代別推定値 (±は平均値からの標準偏差を示す)。

平均期間	正味の排出 (TgCH ₄ / year)	化学消失 (TgCH ₄ /year)	大気負荷 (TgCH ₄)	大気中濃度 (ppb)	増加率* (ppb /year)	GCP T-D 範囲* (Tg/year)
1988年-1989年	514±1	486±0.3	4692±26	1698.8±8.1	10.9±0.2	490-565
1990年-1999年	520±12	501±6	4824±52	1744.6±17.7	6.3±4.2	502-569
2000年-2009年	518±10	512±2	4922±18	1778.2±7.1	2.2±3.9	495-518
2010年-2016年	549±15	522±10	5048±77	1817.6±16.4	7.2±3.0	
1999年-2006年 (停滞期)	513±7	511±2	4911±5	1774.1±2.2	0.7±3.1	
2007年-2016年 (増加期)	543±16	522±8	5001±55	1808.5±20.6	7.0±2.6	511-548

*増加率はNOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) から取得した。 #GCP top-down (T-D) 範囲: 複数のトップダウン逆解析システムによる推定幅。1980年-1989年、1990年-1999年の推定値はKirschke et al. (2013) から、2000年-2009年、2007年-2016年の推定値はSaunois et al. (2019) から取得した。

(7) Global Carbon Project (GCP) による全球メタン収支量の統合解析

MICRO4-ACTMを含む22の逆解析モデル (トップダウンモデル) のアンサンブルは、2008年-2017年の期間における全球CH₄排出量を572 [538-593] TgCH₄/yearと推定した。全球のCH₄収支はモデル間で良く整合し、プロセスモデル (ボトムアップモデル) に比べモデル間の不確実性は非常に低い値 (~10%) を示し

た(図4.3.9)。この背景には、殆どの逆解析システムがTRANSCOM実験で使用した同一の水酸基ラジカル(OH)分布(Patra et al., 2014)を用いたことにより、大気中CH₄の化学消失量が制約されていることが関係していると思われる。この全球の結果を緯度帯に分割すると、熱帯域が全球の64%を占める366 TgCH₄/year [321-399]を排出していた。その他、32%は中高緯度(185 TgCH₄/year [166-204])、4%は高緯度(60°以北)から排出されている。トップダウン・ボトムアップモデルによるCH₄排出量を更に比較すると、2000年-2009年と2008年-2017年の間に、熱帯域と北半球中高緯度で同様の増加を示した。熱帯域では農業活動と廃棄物が主要なCH₄の排出源であり(トップダウンモデルによると139 [127-157] TgCH₄/year、ボトムアップモデルによると130 [121-137] TgCH₄/year)、これらは熱帯域全体の総排出量の約38%を占めている。また、湿地帯におけるCH₄排出量においても、トップダウン・ボトムアップモデルは同様の結果を示したが(トップダウンモデルによると132 [102-155] TgCH₄/year、ボトムアップモデルによると115 [71-146] TgCH₄/year)、淡水からの排出量は両アプローチにおいて未だ不確実性が高いままであった。

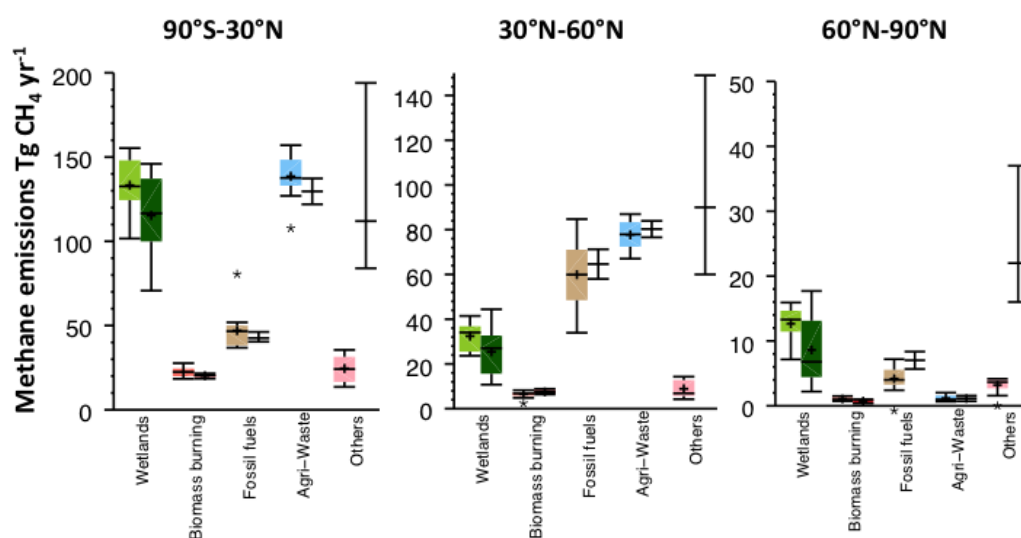


図4.3.9 複数のトップダウン・ボトムアップモデルによるCH₄排出量の統合解析。

(8) 全球地域におけるメタン排出のトレンド

世界の各地域に合わせた効果的な温室効果ガスの緩和策を導くためには、全球だけではなく、地域毎に人為・自然起源のCH₄排出量を把握することが重要である。しかし、CH₄排出の個々の要素は地域毎に大きな不確実性を伴うことから、逆解析モデルによってそれらを推定することは難しい。だが、現状利用可能なさまざまなCH₄排出インベントリデータを用いることで、逆解析モデルから推定した地域別の総CH₄排出量の変動を、補足的に説明することは可能である。ここでは、1988年から2016年を対象として、先見値として用いたさまざまなCH₄排出量(図4.3.7)とMICRO4-ACTMによる総CH₄排出量(図4.3.10)の相互比較解析により、世界の各地域において、どのプロセスがCH₄排出の支配的要素であるかを調査した。

先見値データとMICRO4-ACTMによる最適化後のCH₄排出量のアノマリは大凡合意を示した(図4.3.10)。また、36サイトの観測データを取り込んだ長期(1988年-2016年)の逆解析システムと、近年に特化した19サイトの観測データを取り込んだ逆解析システムを比較した結果、両システムは高い整合性を示した。これらの比較により、MICRO4-ACTMによる長期シミュレーションの精度を確認した。

MICRO4-ACTMは、全球のCH₄排出量が1999年-2006年と2007年-2016年の間で27 TgCH₄/year (478±7 TgCH₄/yearから505±15 TgCH₄/year)増加していることを示したが、その84%をアジア域(東アジア:28%、西アジア:19%、南アジア:18%、東南アジア:19%)が占めていた(図4.3.10)。先見値データは、石炭鉱業からの漏出と酪農からの排出が全球におけるCH₄排出量の増加の約70%を占めると示唆している。特に、石炭鉱業からの漏出は東アジア(図4.3.10f)、西アジア(図4.3.10c)、東南アジア(図4.3.10j)

で顕著であり、酪農による排出は南アジア（図4.3.10h）で際立っていた。また、アフリカとアマゾンからでは、家畜肥料と家畜動物の腸内発酵がCH₄排出の増加に寄与していた。その他、CH₄排出量の増加は、熱帯アメリカ（1.1 TgCH₄/year）、ブラジル（2.7 TgCH₄/year）、北アフリカ（2.8 TgCH₄/year）、の地域で顕著であった。

これらの結果は、メタン増加率の年次変化に対し、どの地域のどのようなプロセスが寄与しているのかを示唆している。前述のように、メタン増加率は1988年から1998年まで増加傾向にあったが、1999年から2006年まで停滞し、2007年以降に再度、増加傾向を示している（図4.3.8）。しかし、この年次変化パターンメカニズムはこれまで解明されておらず、物質循環研究における大きな課題の一つであった。MIROC4-ACTMと先見値データの比較解析から、1988年－1998年の増加期から1999年－2006の停滞期への移行は、主にヨーロッパ、ロシアにおける畜産活動やガス生成や石炭鉱業に伴う漏出の減少が原因であり、2007年以降の増加期は、アジア全域（東、西、南、東南アジア）において活発化した工業に伴う漏出の増加が原因であることが明らかとなった（図4.3.7、図4.3.10）。

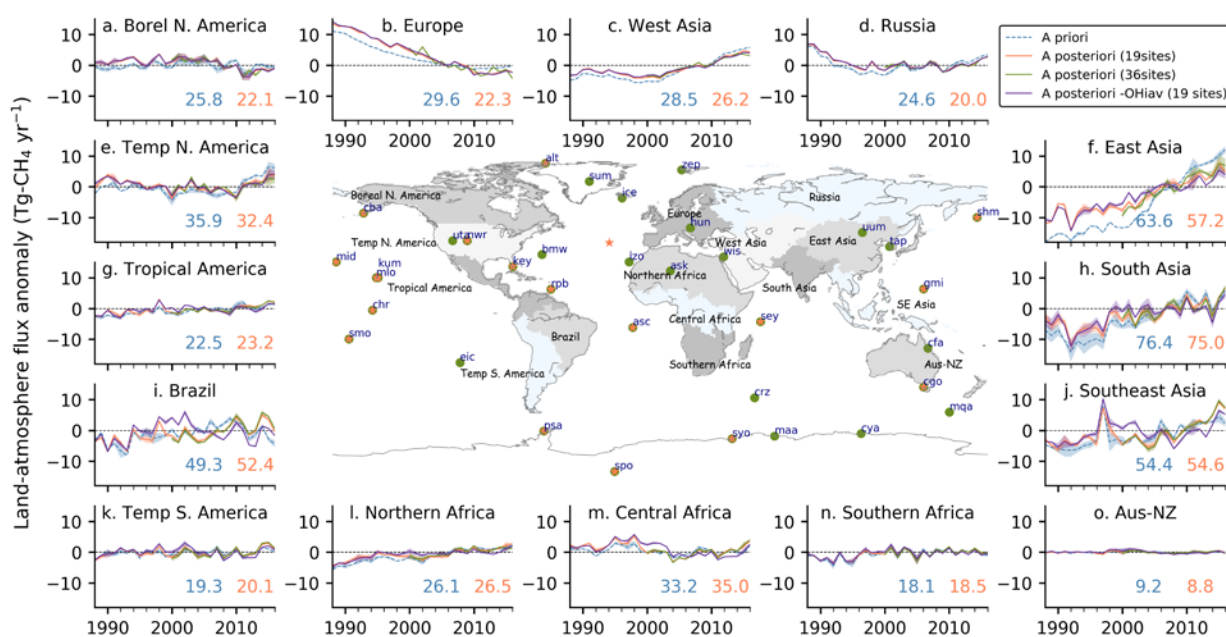


図4.3.10 2種の観測サイトデータを利用した逆解析システムによるCH₄排出量の年次変化。中央のマップに示した地域区分に則った15地域において、先見値（青点線、青幅）、逆解析システム（19サイトデータ：橙実線、36サイトデータ：緑実線）によるCH₄排出量を示す。パネル内の数値は、先見値（青字）と19サイトデータを利用した逆解析（橙字）によるCH₄排出量の長期平均値。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- CO₂逆解析モデルの不確実性の原因が、先見値として利用した化石燃料消費によるCO₂排出（FFC）によるものであることを明らかにできたことは大きな意義がある。この結果は、個々のCO₂逆解析モデルがこれまでの開発過程においてFFC排出データの精度に留意していなかったことを明示している。
- 先見値データとメタン逆解析モデルの詳細な解析により、これまで解明が困難とされていた複雑なメタン増加率の年次変化に対し、原因である地域とプロセスを特定することに成功した。
- 本課題で開発したMIROC4-ACTMの結果は、我が国を代表し、国際的研究枠組みにおける主要なデータの一つとして利用されており、今後もその役割を担うものと期待される。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ・サブテーマ代表であるパトラは、我が国を代表し、気候変動枠組条約第25回締約国会議（COP25）への招待を受けると共に、国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）が発行したCOP25報告書の作成に尽力した（https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sbsta2019_L15E.pdf）。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・サブテーマ代表であるパトラは、国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第1作業部会（WG1）第6次評価報告書の第5章のLead Authorに任命され、本推進費課題全体の成果を生かし報告書の執筆、調整を行っている。報告書は2021年4月に出版予定である。

6. 国際共同研究等の状況

- ・Global Carbon Project, カウンターパート：Dr. Josep J. Canadell・オーストラリア連邦科学産業研究機構、Future Earthの重要な国際プロジェクトの一つである Global Carbon Projectの国際共同解析において、本課題で開発したMICRO4-ACTMの結果を継続的に提供している。
- ・RECCAP2、カウンターパート：Dr. Josep J. Canadell・オーストラリア連邦科学産業研究機構、本課題で開発したMICRO4-ACTMの結果を継続的に提供すると共に、サイエンスコーディネートのサポートを行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) P. K. PATRA, D. CRISP, J.W. KAISER, ET AL.: Scientific Reports, doi: 10.1038/s41598-017-13459-0 (2017), Orbiting carbon observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-grams increase of carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño.
- 2) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, ET AL.: Nat. Commun., 9, 1154, doi:10.1038/s41467-018-03374-x (2018a), Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia.
- 3) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, ET AL.: Geophys. Res. Lett, 45, 4820-4830, doi:10.1029/2018GL077633 (2018b), Plant regrowth as a driver of recent enhancement of terrestrial CO₂ uptake.
- 4) S. BASU, D. F. BAKER, F. CHEVALLIER, P. K. PATRA, J. LIU AND J. B. MILLER: Atmos. Chem. Phys., 18, 7189-7215 (2018) The impact of transport model differences on CO₂ surface flux estimates from OCO-2 retrievals of column average CO₂.
- 5) P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, S. WATANABE, N. CHANDRA, K. ISHIJIMA, Y. YAMASHITA: SOLA, 14, 91-96 (2018), Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM).
- 6) C. LE QUERE, C., R. M. ANDREW, P. FRIEDLINGSTEIN, ... P. K. PATRA, ET AL.: Earth Syst. Sci. Data, 10, 2141-2194 (2018), Global Carbon Budget 2018.
- 7) B. GAUBERT, B. B. STEPHENS, S. BASU, ... P. K. PATRA, ET AL.: Biogeosciences, 16, 117-134 (2019), Global atmospheric CO₂ inverse models converging on neutral tropical land exchange but diverging on fossil fuel and atmospheric growth rate.
- 8) BASTOS, M. O' SULLIVAN, P. CIAIS, ... P. K. PATRA, ET AL.: Global Biogeochemical Cycles, 34, e2019GB006393, doi:10.1029/2019GB006393 (2020), Sources of uncertainty in regional and global terrestrial CO₂-exchange estimates.
- 9) M. KONDO, P. K. PATRA, S. SITCH, ... T. MAKI, ET AL.: Glob. Change Biol., 26, 3, 1068-

1084 (2020), State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget.

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) P. FRIEDLINGSTEIN, M. W. JONES, M. O'SULLIVAN, ET AL.: Earth Syst. Sci. Data, 11, 1783-1838, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019> (2019) Global Carbon Budget 2019.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) P.K. PATRA, N. CHANDRA, K. TANAKA: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2019)
“Regional budgets of carbon dioxide, methane and nitrous oxide using JAMSTEC's MIROC4-ACTM inverse modelling”
- 2) N. CHANDRA, P.K. PATRA: IG3IS-TransCom meeting, Paris, France (2019)
“Carbon budget imbalance in atmospheric CO₂ inversion using MIROC4-ACTM”
- 3) N. CHANDRA, P.K. PATRA, J.S.H. BISHT, A. ITO, S. MORIMOTO, G. JANSSENS-MAENHOUT, T. UMEZAWA, R. FUJITA, M. TAKIGAWA, S. WATANABE, S. AOKI, N. SAITOH, N. SAIGUSA: AGU Chapman Conference, San Diego, USA (2019)
“An explanation for interdecadal shift in CH₄ growth rate using inverse modeling”
- 4) P.K. PATRA, N. CHANDRA, J. BISHT: AOGS Annual meeting, Singapore (2019)
“Paris Agreement: Tracking of Greenhouse Gases (CO₂, CH₄ and N₂O) by Inverse Modelling”
- 5) P.K. PATRA, N. CHANDRA, J. BISHT: JpGU Annual Meeting, Japan (2019)
“Regional budgets of 3 major greenhouse gases using inverse modelling of atmospheric data”
- 6) N. CHANDRA, P.K. PATRA: JpGU Annual Meeting, Japan (2019)
“Attribution of the ambiguity in methane's growth rate shifts during 1988-2016”
- 7) N. CHANDRA, P.K. PATRA, A. ITO, M. TAKIGAWA, S. WATANABE, G. JANSSEN-MAENHOUT: AGU Fall meeting, Washington DC, USA (2018)
“Global inversion of CH₄ during 1988-2016”
- 8) N. CHANDRA, P.K. PATRA, A. ITO, M. TAKIGAWA, S. WATANABE, E.J. DLUGOKENCKY: TransCom meeting, Lund, Sweden (2018)
“Modelling of CH₄ using improved prior simulations and transport model”
- 9) N. CHANDRA, P.K. PATRA, A. ITO, M. TAKIGAWA, S. WATANABE: AOGS Annual Meeting, Hawaii, USA (2018)
“Modelling of sources and sinks budgets of atmospheric CH₄ for the period of 1995-2016”
- 10) N. CHANDRA, A. ITO, P.K. PATRA, M. TAKIGAWA, S. WATANABE: JpGU Annual Meeting, Japan (2018)
“Large decrease in CH₄ emissions due to the Mount Pinatubo triggered atmospheric CH₄ stabilization in the 1990s”
- 11) P.K. PATRA: JSPS-US Alumni 2018 Seminar on “Growing Atmospheric Pollution and Its Impact on Climate”, Orange, USA (2018)
“Understanding the sources of air pollutants key to effective mitigation policy - a case of methane”
- 12) P.K. PATRA: AMOS-ICSHMO, Sydney, Australia (2018)
“Budgets of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in the southern land and ocean”
- 13) N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, P.K. PATRA, T. SAEKI: AGU fall meeting, New Orleans, USA (2017)

“Methane over South Asian region from GOSAT observations and ACTM simulations”

- 14) N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, P.K. PATRA, T. SAEKI: Japan Society of Atmospheric Chemistry, Takamatsu, Japan (2017)

“Role of Asian monsoon circulation on the formation of columnar CH₄”

- 15) P.K. PATRA: JpGU annual meeting, Japan (2017)

“The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-gram increase in carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño”

- 16) P.K. PATRA: ACAM meeting, Guangzhou, China (2017)

“Variabilities in greenhouse gases in South Asia due to monsoon”

(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) Prabir K. Patra, インド熱帯気象研究所 (Indian Institute of Tropical Meteorology: IITM, インド・プネ) においてワークショップを主催「GHGs workshop: Measurements, Interpretation and Inverse Modelling」(2017年7月の5日間に渡って50人の学生を対象に以下の講義を実施) ; a) 演習「TransCom Inversion」, b) 講義「Global GHGs modelling」, c) 講義「Introduction to inverse problems」, d) 講義「Overview of Atmospheric greenhouse gases」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 記者発表 (海外の研究機関が本研究の成果であるPrabir K. Patraの論文の内容を解説的に発表したもの) 「Nearly nine billion more tonnes of CO₂ through El Niño」 (2017年10月19日、Max Planck Institute for Chem/BGC より発表、<https://www.bgc-jena.mpg.de/www/index.php/PublicRelations/NewsSingle?jahr=2017&id=1508359735>) (Informationsdienst Wissenschaft, Innovations Report, Jura Forum, LABO Online に掲載)
- 2) 成果記者発表 (2018年3月20日)、文部科学省記者会 (筑波研究学園都市記者会、環境記者会、環境省記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、神奈川県政記者クラブ、横須賀市政記者クラブ、青森県政記者会、むつ市政記者会、高知県政記者クラブ、沖縄県政記者クラブ、名護市駐在3社、気象庁記者クラブ同時配信)、千葉大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所・気象研究所、近藤雅征・市井和仁・プラビール・パトラ・佐伯田鶴・三枝信子・眞木貴史・丹羽洋介「気候の自然変動が、大規模森林伐採による二酸化炭素の排出を相殺した現象を世界で初めて検出！ 東南アジアの生態系によるCO₂排出量が2000年代に減少した原因を解明、地球温暖化現象の理解に向けての新たな足掛かり」
- 3) NHK NEWS WEB (2018年3月20日) 「気候の自然変動がCO₂排出抑制 千葉大など調査」
- 4) つくばサイエンスニュース (2018年3月20日) 「周期的自然変動がCO₂排出に影響—森林伐採による増加抑制も」
- 5) 時事ドットコムニュース (2018年3月20日) 「強いエルニーニョで増加懸念＝東南アジアCO₂排出量—千葉大など」
- 6) 日本経済新聞 (2018年3月26日) 「弱いエルニーニョ現象 東南アCO₂排出抑制」
- 7) 日刊工業新聞 (2018年3月27日) 「森林伐採によるCO₂排出 気候変動で相殺 千葉大など解明」
- 8) 環境情報メディア環境展望台「千葉大など、東南アジアの森林伐採等に由来するCO₂排出とエルニーニョ現象の因果関係を解明」
- 9) 東京新聞「地球温暖化を裏で操る」 (2018年4月23日)

- 10) 中日新聞「地球温暖化を裏で操る」(2018年4月26日)
- 11) Prabir K. Patra「Global forests soaking up carbon at quickening rate」(2019年02月25日、NCAR/UCAR News より発表、<https://news.ucar.edu/132654/global-forests-soaking-carbon-quickening-rate>)
- 12) 成果記者発表(2019年12月12日)、環境省記者クラブ、環境記者会、千葉県政記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、筑波研究学園都市記者会、気象庁記者クラブ同時配信、千葉大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所・気象研究所、近藤雅征・プラビール・パトラ・市井和仁・佐伯田鶴・三枝信子・眞木貴史「CO₂の放出と吸収のより正確な推定に成功～IPCC第5次評価報告書からの進展と第6次評価報告書に向けた課題～」
- 13) Physics.org(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 14) Agenparl(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 15) Pharma Jobs(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 16) Science Codec(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 17) Bioengineer.org(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 18) One News Page(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 19) ScienceDaily(2019年12月12日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 20) Environmental News Network(2019年12月13日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 21) Terra Daily(2019年12月13日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 22) Live Science Tech(2019年12月13日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 23) Long Room.com(2019年12月13日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 24) Industry Global News24(2019年12月13日)「Advancement in estimation of carbon removal by terrestrial ecosystems」
- 25) Eurasia Review(2019年12月14日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 26) SCIENMAG(2019年12月13日)「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」
- 27) 電気新聞(2019年12月16日)「千葉大などがCO₂収支を精度よく推定する手法を整理」
- 28) 化学工業日報(2019年12月18日)「千葉大などがCO₂収支を精度良く推定する手法を整理」
- 29) 大学ジャーナルONLINE(2019年12月18日)「CO₂の放出と吸収、より正確に推定 千葉大など新手法」
- 30) 環境情報メディア 環境展望台(2019年12月19日)「千葉大など、「陸域CO₂収支量」推定手法間のばらつきを解消」

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Chevallier F. *et al.* (2010) CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements. *J. Geophys. Res.*, 115, D21307.
- 2) Ghosh A. *et al.* (2015) Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 2595-2612.
- 3) Ito, A., Inatomi M. (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, 9, 759-773.
- 4) Ito *et al.* (2019) Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation, *Sci. Total Environ*, 676, 40-52.
- 5) Janssens-Maenhout, G. *et al.* (2019) EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970-2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 959-1002
- 6) Kaiser J.W. *et al.* (2012) Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences* 9, 527-554.
- 7) Kirschke *et al.* (2013) Three decades of global methane sources and sinks, *Nat. Geosci.*, 6, 813-823.
- 8) Kondo M. *et al.* (2018) Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia, *Nat. Commun.*, 9, 1154, doi:10.1038/s41467-018-03374-x.
- 9) Patra P.K. *et al.* (2011) Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO₂ measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 4163-4175.
- 10) Patra P.K. *et al.* (2014) Patra, P. K., *et al.* (2014) Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity, *Nature*, 513, 219-223.
- 11) Patra P.K. *et al.* (2016) Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012). *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 94, 91-113.
- 12) Peng S. *et al.* (2016) Inventory of anthro-pogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 14545-14562.
- 13) Peters W. *et al.* (2007) An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)* 104, 18925-18930.
- 14) Ray E.A., *et al.* (2017) Quantification of the SF₆ lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 4626-4638.
- 15) Saeki T., P.K. Patra (2017) Implications of overestimated anthropogenic CO₂ emissions on East Asian and global land CO₂ flux inversion, *Geoscience Lett.*, 4:9, 2017.
- 16) Saunio, M., *et al.* (2019) The Global Methane Budget 2000-2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697-751.
- 17) WMO (2017) WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) No. 13: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016.
(https://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=20041#.Wq8tKIK-ml4)
- 18) Wofsy S.C. (2011) HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO): fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 369, 2073-86.

II-4 トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析を通じた炭素収支の高精度化

国立大学法人 千葉大学

環境リモートセンシング研究センター 市井和仁

<研究協力者>

国立大学法人 千葉大学

環境リモートセンシング研究センター 近藤雅征

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：34,690千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：11,420千円、平成30年度：10,850千円、令和元年度：12,420千円）

[要旨]

複数のボトムアップ手法と複数のトップダウン手法を用いて、アジアや全球における陸域CO₂収支の解析を行った。ボトムアップ手法としては、本サブテーマ独自開発の機械学習を利用したデータ駆動型モデルによるCO₂フラックス推定手法と、複数の陸域炭素循環プロセスモデル(TRENDYモデル結果)を用いた。トップダウン手法としては、サブテーマ1～3からの結果を含む複数の大気逆解析モデルによる結果を用いた。

はじめに機械学習を用いたデータ駆動型モデルによるCO₂フラックス推定手法についての改良を行った。本業務における大きな変更は、これまでの手法に新たに水フラックスや熱フラックスのデータを追加することにより、アジア域やグローバルにおける蒸発散や熱収支（長波放射、正味放射、顕熱）を算出できるようにしたことである。さらに入力データとして利用するTerraもしくはAqua衛星搭載MODISセンサデータのバージョンを更新した点(Collection 5からCollection 6にバージョンアップさせた)である。

次に、これまでに開発された手法に新たに機械学習によるCO₂収支推定結果を適用し、これまでの成果に対し更なる信頼性の確認を行った。機械学習によるCO₂収支推定結果については、FLUXCOMプロダクトにおける気候データを入力として利用するタイプの推定結果を利用した。過去30年の東南アジアにおけるCO₂収支の変動要因解析を行い、データ駆動モデルによる結果と陸域炭素循環モデル（プロセスモデル）との間に共通の気候感度を確認した。これにより、1980年から続く活発な森林伐採によって長らく排出傾向にあった東南アジアのCO₂収支が、2000年代ではカーボンニュートラル（吸排出量が同等）に転じたことを明らかにした。

最後に、全課題の結果を含むさまざまなモデル・観測データを用いた統合解析を執り行った。まず、東南アジアのCO₂収支解析に使用したプロセスモデル、逆解析モデルを全球スケールに拡張し、過去100年間における陸域CO₂収支の変動を比較し、更に手法間における比較が可能な最近50年に着目し、近年におけるCO₂収支の変動傾向の把握を行った。その結果、大規模な土地利用変化から回復した植生が近年のCO₂吸収の増加に貢献していることを明らかにした。また、複数のトップダウン・ボトムアップ手法の統合解析から、IPCC第5次評価報告書に見られた手法間の非整合性の主要な原因が「CO₂収支の定義の違い」に起因することを突き止めた。

[キーワード]

二酸化炭素、統合解析、ボトムアップ推定、トップダウン推定、フラックス

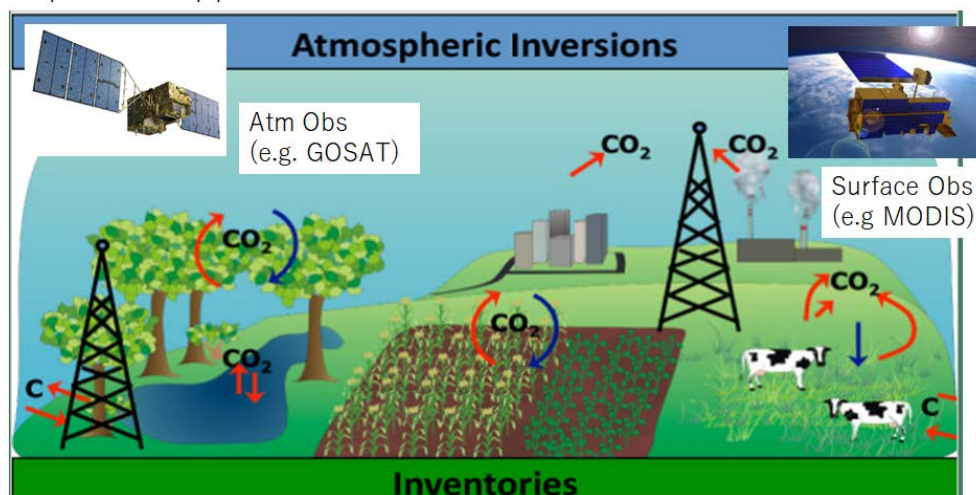
1. はじめに

大気―陸面等の温室効果ガス収支を推定することは、人為的温室効果ガス排出量の削減目標の達成を目指すパリ協定の目標達成において、目標の達成度を判断するための材料として基本的なデータとなる。特に、これからは2023年に第一回となるグローバルストックテークにおける提示データとして必要不可欠なデータセットとなりうるために、科学技術が社会へ貢献するための重要なステップとなる。現在はGlobal Carbon Project等が定期的にグローバルな温室効果ガス収支の推定を出しているが(Le Quere et al., 2018; Friedlingstein et al., 2019)、これが我が国でも独自の手法を開発する等して、透明性のある推定を行うことが望まれる。

温室効果ガスの収支を推定するには、様々なアプローチ(図1.4.1)が存在し、それぞれの手法に長短がある。トップダウン手法では、主には大気CO₂濃度等の濃度観測を利用する。濃度観測については、地上観測に加えて、GOSAT等の衛星観測も利用されている。これらの大気濃度観測と大気輸送モデルを用い、地表面におけるフラックスを逆推定する(Chevallier et al., 2010; Maki et al., 2010; Saeki and Patra, 2016; Patra et al., 2018; Rödenbeck et al., 2003)。ボトムアップ手法では、個々の地点やプロセスを集計することにより地表面におけるフラックスを推定する。例えば、一般的に陸域炭素循環モデルと呼ばれるモデルでは、陸域生態系における光合成や呼吸等の様々な素過程と、バイオマスや土壌炭素等の様々なプール量を計算することにより大気と陸域生態系(植生、土壌)の間のフラックスを推定する(Sitch et al., 2015)。植生については、様々な自然植生(森林・草地・灌木林)に加えて、人為的な活動(森林伐採、土地利用変化、耕作)等も重要である。また、世界各地に展開されている大気―陸面のフラックス観測網と衛星観測データ等の広域データを用いたアップスケールについても様々な手法が提案されている。衛星観測については、受動型マイクロ波センサによる植生光学的厚さ(VOD; Vegetation Optical Depth; Liu et al., 2015)等も新たなデータセットとして期待されており、長期データセットを用いることにより植生バイオマス量の変化を追跡することも可能である。

サブテーマ1～3では、民間航空機常時観測や温室効果気体観測衛星(GOSAT等)を大気CO₂濃度の観測データセットの応用としてトップダウン手法による大気―地表フラックスの推定に主な焦点をあてている。その一方で大気―地表面のフラックスを推定するには、加えてボトムアップ手法による推定と両者手法を統合的に解析することにより大気―陸域の温室効果ガスの収支を精緻化する必要がある。

Top-down approach:



Bottom-up Approach:

図1.4.1 大気―陸域CO₂収支の推定に関する様々なアプローチの概要。トップダウン手法、ボトムアップ手法それぞれに様々な手法があり、これらを統合してCO₂収支が推定される。または統合することにより、今後の課題を洗い出すことができる。図の出典は<http://biocycle.atmos.colostate.edu>。

2. 研究開発目的

大気―陸面における温室効果ガス気体の収支をこれまでの推定に比較して精緻化することを本サブテーマの主目的とする。この目的を達成するために、他のサブテーマで構築したトップダウン手法のみならず、地上フラックス観測等の観測網と地球観測衛星データを用いたボトムアップ推定手法による推定を実施する必要がある。従って、本サブテーマの目的の一つは、地上フラックス観測網と衛星データ等を用いたボトムアップ推定について、従来の研究よりも高精度化することである。もう一つの目的は、サブテーマ1から3により構築されたトップダウン手法による大気―陸面温室効果ガスフラックス推定と、サブテーマ4のボトムアップ推定、その他ボトムアップ推定のプロセスモデルや衛星観測等のデータセットを用いて、現状の大気―陸域の温室効果ガス収支を推定すること、収支の推定をより正確にするための今後の課題を抽出すること、である。

3. 研究開発方法

本サブテーマでは、複数のボトムアップ手法と複数のトップダウン手法を用いて、アジアや全球における陸域CO₂収支の解析を行った。使用したデータリストを表3.4.1.に示す。ボトムアップ手法としては、本サブテーマ独自開発の機械学習を利用したデータ駆動型モデルによるCO₂フラックス推定手法(Kondo et al., 2015; Ichii et al., 2017)と、複数の陸域炭素循環プロセスモデル(TRENDYモデル: Sitch et al. 2015)を用いた。さらには衛星観測による受動型マイクロ波センサデータから推定されたバイオマス量(Liu et al., 2015)等も用いた。トップダウン手法としては、サブテーマ1～3からの結果を含む複数の大気逆解析モデルとGlobal Carbon Projectによる残余法の結果を用いた。

表3.4.1. 本研究課題で用いた種々の陸域炭素収支把握手法の一覧

種別	手法	データセット名	主な特徴
ボトムアップ 手法	機械学習	サポートベクタ回帰	FLUXNET, AsiaFluxデータと衛星データを組み合わせた機械学習(サポートベクタ回帰)による推定。本課題独自の推定手法。
		FLUXCOM	FLUXNET観測ネットワークデータと複数の機械学習法を利用した推定。
	プロセスモデル	TRENDY ver 2	複数の陸域プロセスモデルによる陸域生態系モデル結果を収集。
		TRENDY ver 6	複数の陸域プロセスモデルによる陸域生態系モデル結果を収集(2017年に実施された最新バージョン)。
衛星観測	バイオマスデータ	マイクロ波リモートセンシングデータを利用した推定で、1993-2012年、0.25度の空間分解能でデータが公開されている。	
トップダウン 手法	逆解析モデル	複数モデル	複数の逆解析モデルによるCO ₂ 収支解析結果。本課題サブテーマからの結果も含んでいる。
	残余法	Global Carbon Project	大気CO ₂ 濃度の年毎の増加量から化石燃料によるCO ₂ 排出、海洋とのCO ₂ 交換量推定値からの残差を陸域CO ₂ 収支とする。全球の推定に限られる。

(1) AsiaFluxなど地上フラックス観測網と衛星観測データを用いた機械学習による広域推定

機械学習を用いたデータ駆動型モデルによるCO₂フラックス推定手法についての改良を行った。本サブテーマ担当者は、環境研究総合推進費2-1401の成果として、AsiaFluxデータとTerra, Aqua衛星搭載MODISセンサデータからのプロダクトに対して、機械学習法の一つであるサポートベクタ回帰を適用した推定手法を開発し、アジア域における陸域光合成量とCO₂吸排出量を2000-15年の範囲で推定した。衛星観測データとしては、陸域プロダクトとして、植生指数、葉面積指数、地表面温度、土地被覆分布図、

日射量等を用いており、AsiaFluxを主とする54観測サイトのデータセットを用いて推定を行った。

本課題では、既存の手法の改良と更なる解析を実施した。既存の手法では、衛星データとしてMODIS Collection-5(バージョン5に相当)を利用していたが、このバージョンではセンサの経年劣化の補正に問題があることが指摘され、データセットが近年更新された。そこで、これまでの手法で用いた衛星データをすべて最新のバージョンに更新し、機械学習において、トレーニング・テストを実行することにより、最新の衛星データ(Collection-6; バージョン6に相当)に基づく推定に更新した。

既存の結果と本課題での結果と比較して、結果の妥当性の評価を行った。MODIS Collection-5に基づく結果とMODIS Collection-6に基づく結果のそれぞれについて、観測サイトにおける検証(8日単位・年平均値・アノマリ成分)、空間分布の比較、時間変化の比較を行った。特に時間変化の解析については、陸域炭素循環モデル(プロセスモデル)の結果(TRENDY-v6)を相互比較の対象として利用した。

(2) 東南アジアにおける過去30年の炭素収支の変動解析

環境研究総合推進費2-1401の成果であった「トップダウン手法・ボトムアップ手法の統合解析を通じた東南アジアにおけるCO₂収支の過去30年間の変動把握」に対して、新たに機械学習によるCO₂収支推定結果を適用し、これまでの成果に対し更なる信頼性の確認を行った。機械学習によるCO₂収支推定結果については、FLUXCOMプロダクトにおける気候データを入力として利用するタイプの推定結果(本サブテーマのモデルを含む、Jung et al., 2017)を利用した。また、過去30年の東南アジアにおけるCO₂収支の変動要因解析を行い、データ駆動モデルと陸域炭素循環モデル(TRENDY-v2)の気候感度を調査した。

(3) 過去100年間におけるグローバルスケールでの陸域CO₂収支変動解析

東南アジアのCO₂収支解析に使用したプロセスモデル、逆解析モデルを全球スケールに拡張し、過去100年間における陸域CO₂収支の変動を比較した。特に、CO₂収支が継続的に吸収トレンドを示している1960年から2009年に着目し、トレンドの背景にあるメカニズムの把握、また、ホットスポットの検出を行った。この際、複数のプロセスモデルを用い、CO₂施肥、気候変動、土地利用変化、植生の再成長等、CO₂収支に関わる複数の寄与を個別に評価できるシステムを構築した。

(4) 現段階での大気—陸域CO₂収支におけるモデル推定精度の確認

最後に、最新のプロセスモデル・逆解析モデルを用いた統合解析により、現在のCO₂収支におけるモデルの推定精度の確認を行った。まず、IPCC第5次評価報告書に見られるCO₂収支の非整合性(Ciais et al. 2013)は、「CO₂収支の定義」が手法間で必ずしも同一で無いことに起因すると考えた。そこで、CO₂収支の定義を「大気—陸域生物圏(陸域水圏を除く)のCO₂交換量」と定義し、また、手法間で統一し、2000年代のCO₂収支量の詳細な比較を行った。これにより、CO₂収支におけるトップダウン・ボトムアップの手法の間で、定義の違いにより生じる誤差を除去した「推定精度により生じる誤差」を明らかにした。

4. 結果及び考察

(1) AsiaFluxなど地上フラックス観測網と衛星観測データを用いた機械学習による広域推定

これまでのMODIS Collection-5に基づく手法に対して、すべての入力データをMODIS Collection-6データにした上で機械学習のトレーニング・テストを実施した。アジアの54観測サイトにおいては、すべてのサイトを用いて検証を行った結果、モデルの再現性については、Collection-5, -6の両モデルともに大きな違いは見られなかった(図4.4.1.)。この結果は、他の評価基準でもモデルの精度は大きく変わらず、例えば、年間値での評価、植生タイプ毎の評価、アノマリの評価等を実施したが、いずれも大きな違いは見られなかった。

構築されたモデルと広域衛星データプロダクトを利用して広域推定を行い、2000-15年の光合成量とCO₂吸排出量を推定した。まず光合成の年間平均値の空間分布を確認したところ、MODISのCollectionの違いによる空間分布の違いはほとんど見られなかった(図4.4.2.)。

一方で、光合成量の増減傾向を調べると、MODISのバージョンに応じて傾向が大きく異なった(図4.4.3.)。Collection-5に基づく結果では、2000-15年の期間で有意な増減傾向を示すグリッドは多くない。Collection-6では、より多くの地域が増加傾向と判定されている。例えば、シベリア東部、中国、インド等において光合成量の有意な増加を検出した。

これらの増減傾向の妥当性を確認するため、相互比較として、陸域プロセスモデルの結果と比較した(図4.4.4.)。本解析では、TRENDY v6の結果を用いて、機械学習による推定と同期間の結果を利用して、増減傾向を確認した。MODIS Collection-6に基づく推定では、アジア全体で光合成量の有意な増加傾向が見られた一方で、Collection-5に基づく推定では、有意な増減傾向は見られなかった。一方、陸域プロセスモデルの結果では、アジア全体で有意な光合成量の増加がみられた。これらの相互比較の結果は、衛星データのセンサ劣化の補正を考慮したMODIS Collection-6でなければ、アジア域の光合成量の増加傾向を捉えることができないことを示している。

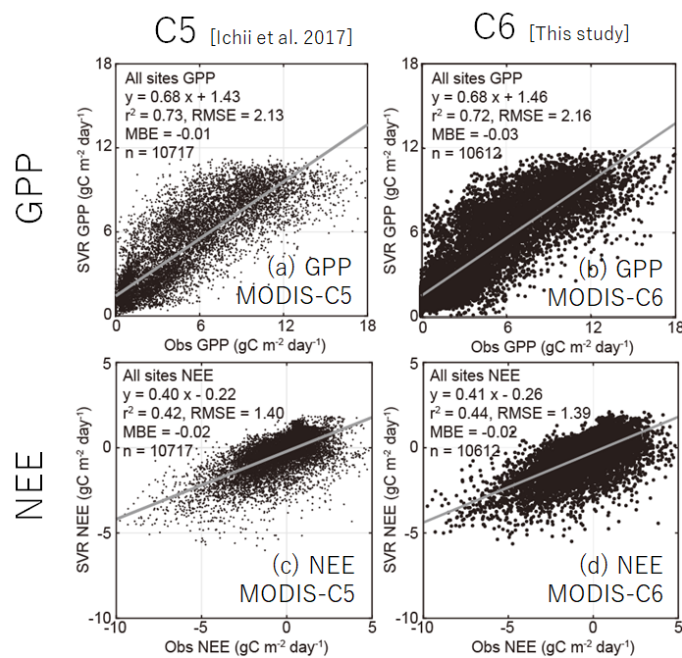


図4.4.1. MODIS Collection-5, -6それぞれを入力データに用いた機械学習モデルの結果の比較。AsiaFluxを含むアジア54サイトで8日毎の結果に基づく評価結果。

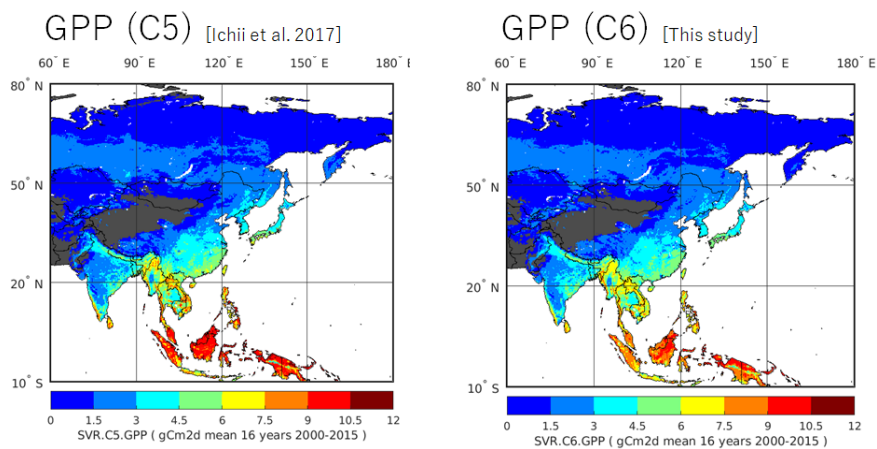


図4.4.2. MODIS Collection-5, -6それぞれを入力データに用いた機械学習モデルを用いた光合成量の年間平均値の空間分布。2000-2015年の平均値を表示した。

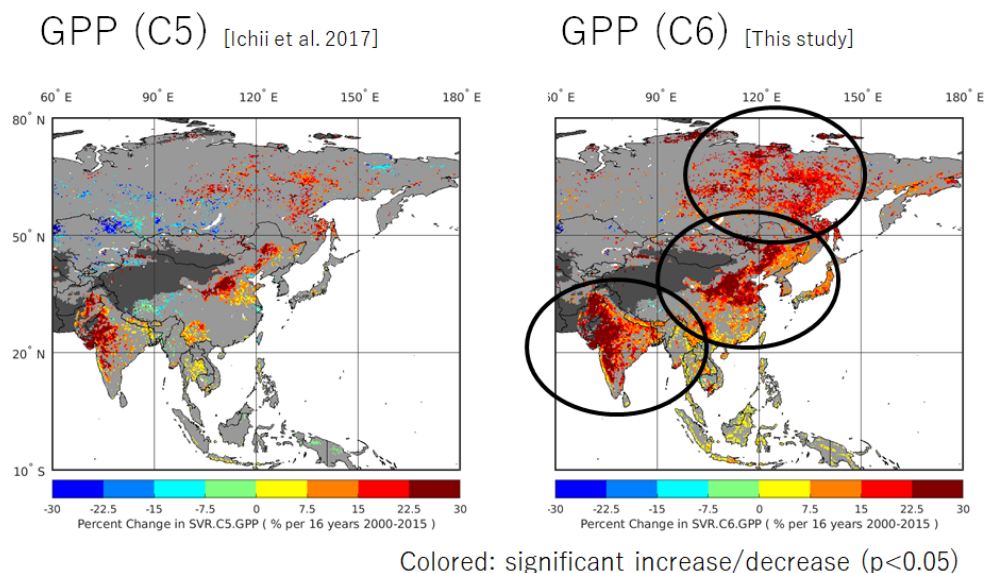


図4.4.3. MODIS Collection-5, -6それぞれを入力データに用いた機械学習モデルによる年平均光合成量の変動。2000-2015年の光合成量の増減を示した(統計的に有意な増減を示すグリッドを色付け)。

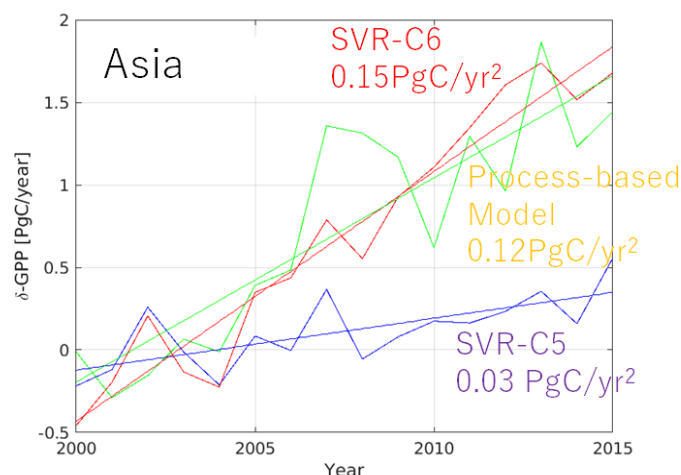


図4.4.4. アジア域(図4.4.2, 4.4.3の地域)における陸域生態系による光合成量の時間変化。Y軸は2000-2005年からの変化を表す。SVR-C5はMODIS Collection-5を用いて構築したサポートベクタ回帰、SVR-C6はMODIS Collection-6を用いて構築したサポートベクタ回帰を示す。Process-based ModelはTRENDY v6の結果を意味する。

(2) 東南アジアにおける過去30年の炭素収支の変動解析

環境研究総合推進費2-1401の成果であった「トップダウン手法・ボトムアップ手法の統合解析を通じた東南アジアにおけるCO₂収支の過去30年間の変動把握」に対して、新たに機械学習によるCO₂収支推定結果を適用し、変動要因の更なる検証を行った。既存の陸域プロセスモデル(TRENDY v2)データとFLUXCOMによる経年変動成分を比較した結果、両データとも、気温のアノマリに対して負の線形関係、SPI-6month(6か月の降水量を基に算出した水分量指数)のアノマリに対し正の線形関係を示した(図4.4.5)。特に、強いエルニーニョ現象が起こった年では、両データにおいて、気温アノマリやSPIに関連して同様のCO₂排出のパターンが検出された。2つのデータに共通したこの結果は、強いエルニーニョ現象が起こらなかったことが、1990年代から2000年代にかけて減少したCO₂排出量の原因(光合成を阻害する高温・渇水から解放されたことから生態系によるCO₂吸収量が増加)であることを裏付けている。本成果は、国際社会の懸念事項である森林伐採・劣化によるCO₂排出が、自然変動(強いエルニーニョ現象の発生の有無)によって大きく緩和されたことを世界で初めて示した事例である。

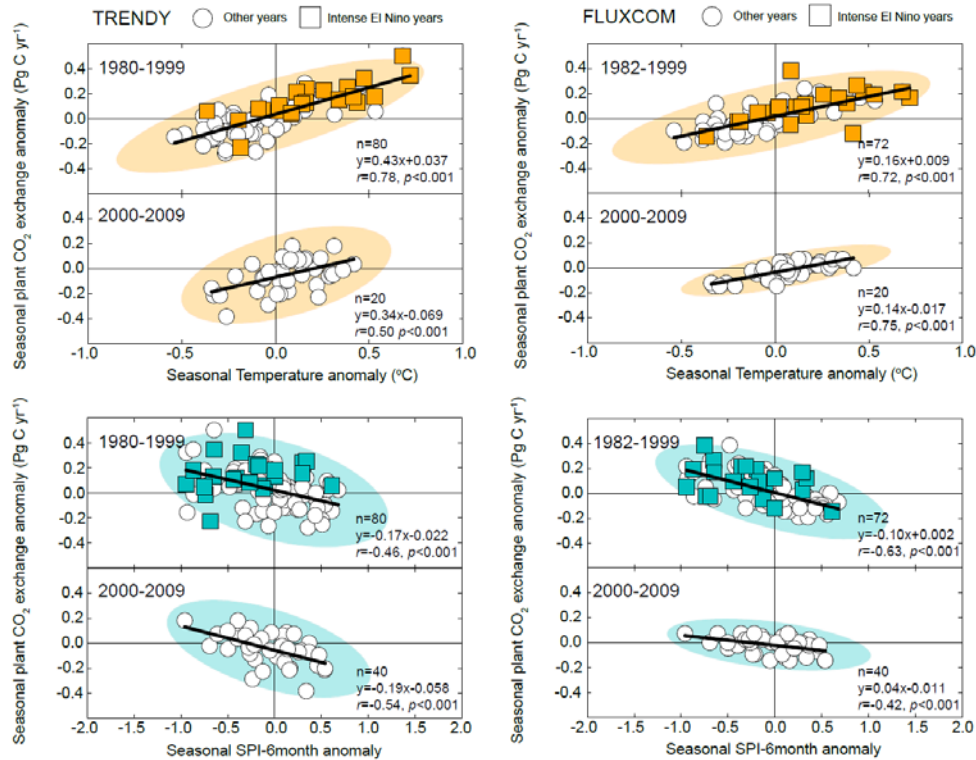


図4.4.5. 東南アジアにおけるデータ駆動型モデル (FLUXCOM; 右図) とプロセスモデル (TRENDY; 左図) で推定されたCO₂収支と気候要素 (気温・SPI) アノマリの関係 (Kondo et al., 2018a; 誌上発表2)。

(3) 過去100年間におけるグローバルスケールでの陸域CO₂収支変動解析

研究対象を全球スケールに拡張し10年毎の陸域CO₂収支の変動を解析した結果、比較が可能な1960年代以降においてプロセスモデル、逆解析モデル、残余法 (化石燃料の燃焼によるCO₂排出量、大気CO₂濃度の変動、大気-海間のCO₂収支の差を陸域CO₂収支とする手法) の手法間でよい一致を示した (図4.4.6.)。過去100年間の長期スケールではそれぞれの手法の推定期間に違いがあるものの、1950年と1960年代の間を境に継続的なCO₂の吸収トレンドを示し、2000年代が最も高いCO₂吸収量であることが一致した。この複数モデルの結果は、陸域と海洋のCO₂吸収量が1960年から2009年までに2倍に増加したとする先行研究 (Ballantyne et al., 2012) に同意している。従って、推進費課題 (2-1401) における陸域生態系モデルによるCO₂収支推定結果は東南アジアだけではなく、グローバルにおいても信頼性があると考えられる。

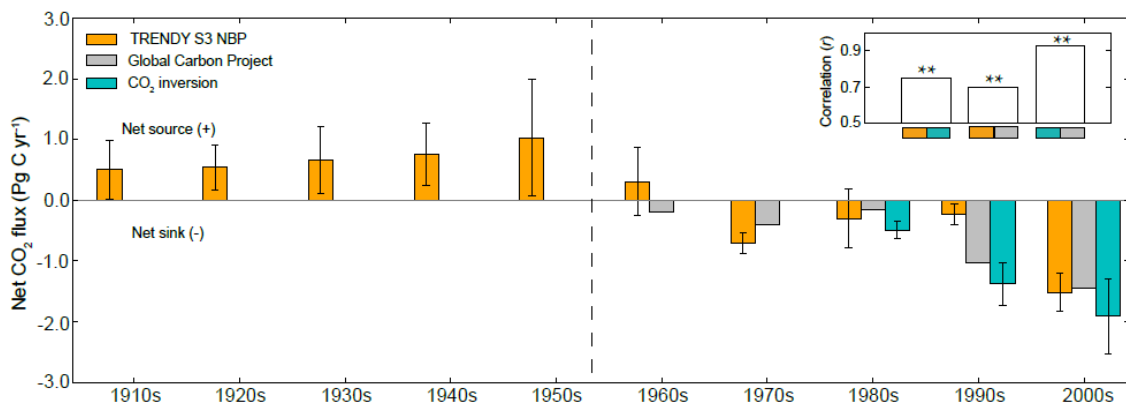


図4.4.6. 過去100年における10年毎の陸域CO₂収支の変化。3種類の手法 (陸域プロセスモデル, 大気逆解析モデル, 残余法) による結果。 (Kondo et al., 2018b; 誌上発表3)

さらに、プロセスモデルを用いてこのCO₂収支の吸収トレンドに寄与する要素（CO₂施肥、気候変動、土地利用変化、植生の再成長）を調査したところ、先行研究で示唆されたように（Keenan et al., 2016; 2018）、最も寄与していたのはCO₂施肥（大気中のCO₂濃度の増加に伴い、植生の光合成活動が活発化する現象）であった。一方、気候変動はユーラシアの極域でCO₂吸収の増加をもたらしたが、中高緯度と低緯度では大きく排出の傾向を示した。土地利用変化によるCO₂排出は、東アジア南部で減少傾向にあるものの、低緯度では変わらず大きく排出していた。2000年代と過去40年（1960年代-1990年代）のCO₂収支を比較すると、気候変動と土地利用変化は全球スケールでCO₂を正味排出する傾向にあることが分かった。

一方で、CO₂施肥だけでは2000年代のCO₂吸収量を説明できず、残りの吸収量は植生の再成長によるものであることが判明した。2000年代と1960年代-1990年代のCO₂収支の差を見ると、全球の広範囲において2000年代のCO₂吸収量が高いことが分かる（図4.4.7.）。熱帯域（アマゾン、中央アフリカ、東南アジア）における吸収量の増加はCO₂施肥によるものであるが（図4.4.7.）、北アメリカ東部、ヨーロッパ、東アジア等、過去に大規模な土地利用変化が行われ、その後、植林・森林管理が行われている地域においては、植生の再成長による影響が強い（図4.4.8.）。

この結果は、CO₂収支の吸収トレンドにおいてCO₂施肥が最も強く寄与していることを確認したものの、特定の地域においては過去の土地利用変化から回復した植生の影響が重要であることを示唆している。植生の再成長はCO₂施肥効果に比べ影響範囲が限定的だが、2000年代の全球におけるCO₂吸収量の増加（1960年代-1990年代の平均値に対し）の約26%を占めており、今後の炭素循環において重要になると考えられる。尚、全球における植生再成長によるCO₂吸収量の推定結果は、本研究が世界で初めて提示したものである。林齢マップを取り込んだプロセスモデルによる本研究の追試においても、植生の再成長が近年のCO₂吸収量の増加に強い貢献をしていることを確認している（Pugh et al., 2019）。

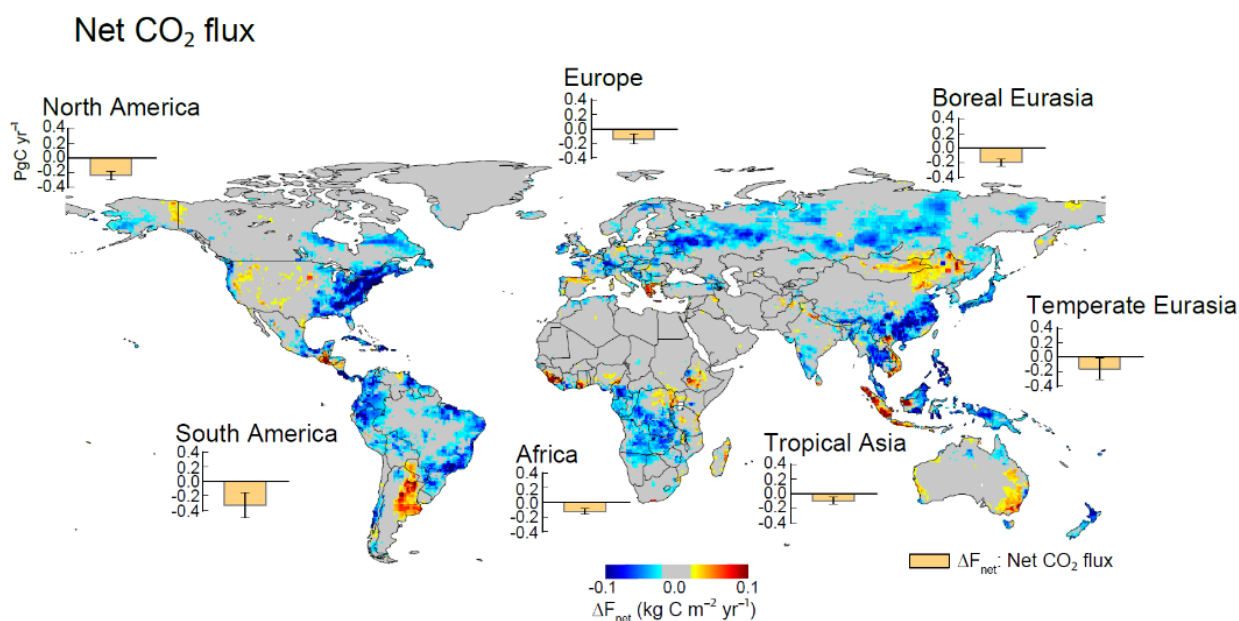


図4.4.7. 2000年代と1960年代-1990年代におけるCO₂収支の差（ ΔF ）の空間分布。負の値（青）は2000年代が1960年代-1990年代よりも強いCO₂吸収傾向であることを示す。結果は4種の生態系モデル（TRENDY v2）のアンサンブルによる推定。（Kondo et al., 2018b；誌上発表 3）

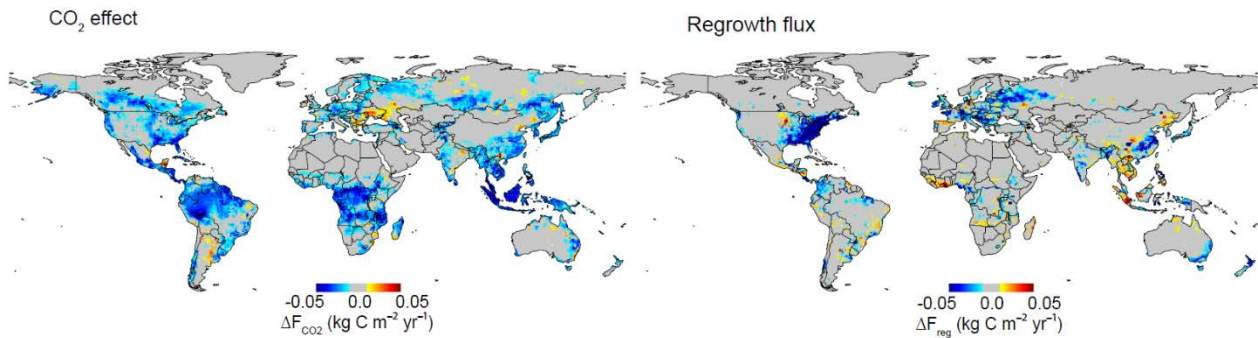


図4.4.8. 2000年代と1960年代-1990年代におけるCO₂吸収量の差 (ΔF) の空間分布。右はCO₂施肥 (CO₂ effect : ΔF_{CO_2})、左は植生再成長によるCO₂吸収量 (regrowth flux : ΔF_{reg}) の空間分布。負の値 (青) は2000年代が1960年代-1990年代よりも強いCO₂吸収傾向であることを示す。結果は4種の生態系モデル (TRENDY v2) のアンサンブルによる推定。(Kondo et al., 2018b ; 誌上発表 3)

(4) 現段階での大気-陸域CO₂収支におけるモデル推定精度の確認

10種のプロセスモデル (TRENDY v6)、8種の逆解析モデル (サブテーマ3のモデルを含む) に加え、残余法、地上・衛星観測による2種のバイオマス変化量、大気O₂・CO₂観測、地域炭素収支評価 (RECCAP)、の独立した手法を用い、2000年代を対象に全球、地域スケールでCO₂収支量の比較解析を行った。特に、プロセスモデル、逆解析モデルの結果を用いてIPCC第5次評価報告書の結果を再現し、「陸域CO₂収支の定義」の違いが如何に収支量の推定に影響を及ぼすのかを調査した。

IPCC第5次評価報告書による比較解析では、プロセスモデルに土地利用変化の影響が考慮されておらず、また、逆解析モデルによる推定には生物圏に加え水圏 (河川や湖沼の炭素流入・流出量) が考慮されていた (Ciais et al. 2015)。陸域CO₂収支量の定義を「大気-陸域生物圏 (水圏を含まない) によるCO₂交換量」とし、この定義に合わせてそれぞれの手法に補正をかけ比較した結果、「土地利用変化を考慮したプロセスモデル」・「生物圏のみを考慮した逆解析モデル」による陸域CO₂収支量は、他の手法 (残余法、バイオマス変化量、大気O₂・CO₂観測、RECCAP) と高い整合性を示した (図4.4.9)。一方で、「土地利用変化を考慮しないプロセスモデル」・「水圏を含んだ逆解析モデル」による陸域CO₂収支量 (IPCC第5次評価報告書の再現結果) は、他の手法に比べ大幅に全球のCO₂吸収量を過大評価した (図4.4.9)。この結果は、IPCC第5次評価報告書に見られたトップダウン・ボトムアップ手法によるCO₂収支の非整合性の主要な原因が定義の違いに起因することを示唆している。

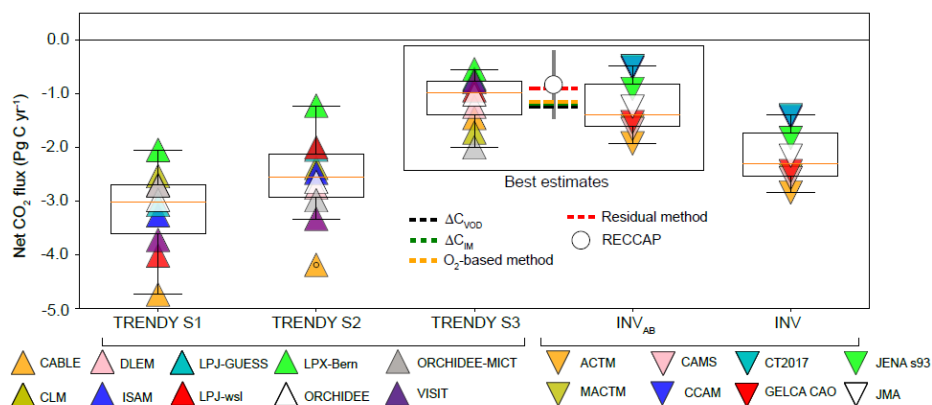


図4.4.9. 2000年代における全球陸域CO₂収支量の推定結果。推定は、プロセスモデル (土地利用変化あり : TRENDY S3、なし : TRENDY S2)、逆解析モデル (補正あり : INV_{AB}・なし : INV)、残余法 (Residual method)、バイオマス変化量 (衛星マイクロ波 : ΔC_{VOD} 、森林インベントリー : ΔC_{IM})、大気O₂・CO₂観測 (O₂-based method)、残余法 (RECCAP) によるもの。▲はプロセスモデル、▼は逆解析モデルを示し、色は其々の手法における個々のモデルを示す。(Kondo et al., 2020 ; 誌上発表 4)

しかし、地域スケールでは、定義の違いを解消するだけでは手法間の推定結果のばらつきは解消されなかった（図 4.4.10.）。全球の陸域圏を 9 地域に分離したところ、北アメリカ、南アジア、東南アジア、オセアニアで高い整合性が確認された一方で、東アジア、アフリカ、南アメリカでは手法間のばらつきが見られた。ヨーロッパ、北方アジアでは逆解析モデルの推定幅が大きく、これらの地域の CO₂ 収支が吸収であるか排出であるかの判断が難しい。9 地域の中でも、特に、南アメリカでは CO₂ 吸収・放出の傾向に手法間の整合性が無く、東アジアでは CO₂ 吸収量の違いが顕著であった。

これらの結果は、IPCC第5次評価報告書では解決できていなかった「手法間の定義の違い」を解消することにより、より正確なCO₂収支量の推定が可能になったことを示唆している。しかし一方で、特定の地域においては、今後解決すべき手法間の違いが明らかになった。特に最も手法間の整合性が低かった南アメリカは、大気CO₂観測が乏しく、また、森林伐採、森林劣化等土地利用変化による影響が複雑であることから、今後のプロセスモデル、逆解析モデルの開発において重要な地域であると考えられる。

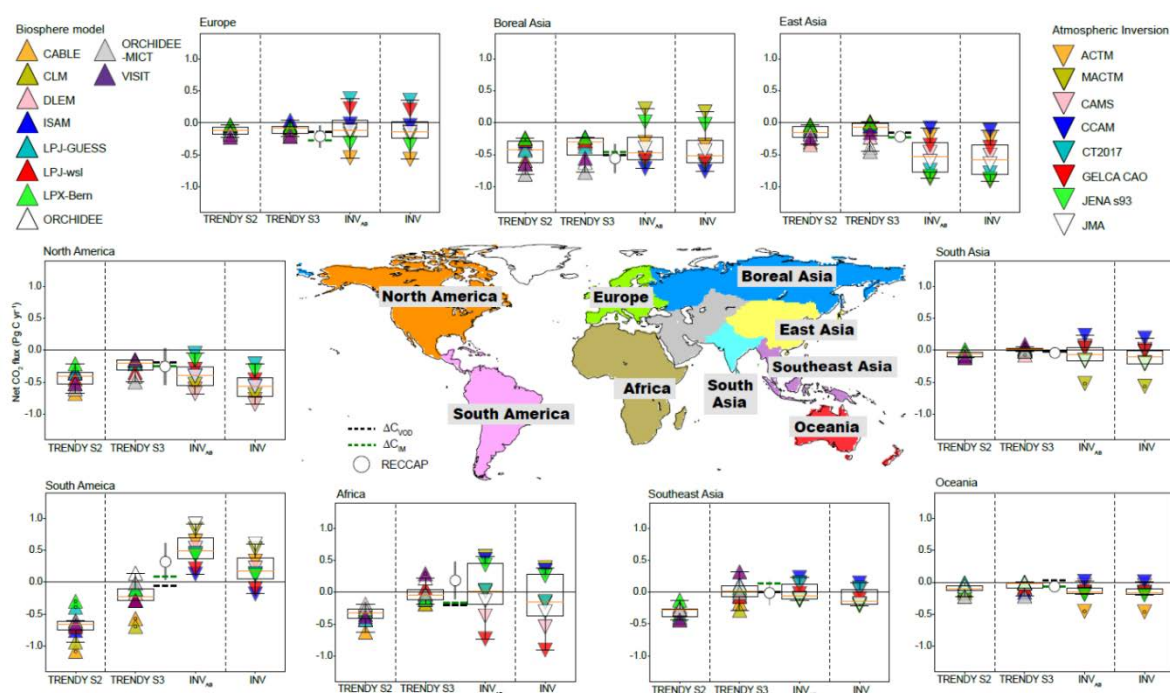


図4.4.10. 2000年代における地域別陸域CO₂収支量の推定結果。推定は、プロセスモデル（土地利用変化あり：TRENDY S3、なし：TRENDY S2）、逆解析モデル（補正あり：INV_{AB}・なし：INV）、残余法（Residual method）、バイオマス変化量（衛星マイクロ波： ΔC_{VOD} 、森林インベントリー： ΔC_{LM} ）、大気O₂・CO₂観測（O₂-based method）、残余法（RECCAP）によるもの。▲はプロセスモデル、▼は逆解析モデルを示し、色は其々の手法における個々のモデルを示す。（Kondo et al., 2020；誌上発表 3）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 本研究によって複数の独立した手法を比較解析したことにより、IPCC第5次評価報告書の時点では大きな不整合があると指摘されていた手法間の違いが、主に定義の違いに起因することがつきとめられた。このように、本研究により開発改良された統合型観測解析システム（大気観測や地表フラックスの観測データを統合利用したトップダウン的手法とボトムアップ的手法の相互比較に基づく解析手法）は、人為起源・自然起源のCO₂吸収・排出量の変動を地域別に報告できる段階にまで精緻化され、IPCC第6次評価報告書の編纂に対しても、過去の知見の改善を迫る最新の科学的知見をタイムリーに提供することができた。

(2) 環境政策への貢献

- ・様々なトップダウン推定・ボトムアップ推定の結果を統合解析することにより、アジア域や全球におけるCO₂収支を定量的に推定した。特に東南アジアで複数の手法で一貫したCO₂収支を得ることができたために、これまで信頼性の低かったこれらの地域においてCO₂収支の推定精度を向上した。推定された収支の結果は、パリ協定における温室効果ガス排出の許容量を決定する際の基礎資料として利用可能であり、IPCC第6次評価報告書への大きな貢献ともなりうる。
- ・サブテーマを担当する市井は、IPBES（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）評価報告書の第2章Coordinating Lead Author（統括執筆責任者）に任命され、本研究の成果を生かして報告書の全体の調整を行った。この成果は2019年5月にPlenaryにて採択され、報告書等も出版された。

<行政が既に活用した成果>

- ・植生の再成長が近年の陸域CO₂吸収量の増加に寄与していることを示した成果(Kondo et al. 2018; Geophys. Res. Lett.)は、IPBESの地球規模評価報告書のChapter 2. Nature: Status and Trendに引用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・本成果のトップダウン手法・ボトムアップ手法の統合解析の結果は、IPCCの第5次報告書の第6章で指摘されている大陸スケールのCO₂収支の推定の推定結果の違いを説明し、CO₂収支の理解に対して大幅な進展を示す成果である。従って、2021年に出版予定のIPCCの第6次報告書に成果が引用される可能性が高い。

6. 国際共同研究等の状況

- ・FLUXCOMプロジェクト、カウンターパート：Dr. Martin Jung・マックスプランク生物地球化学研究所、継続的に連携、サブテーマ4で用いるサポートベクタ回帰による陸域CO₂フラックス計算手法を提供し、リモートセンシングによるプロダクトを主導している。
- ・RECCAP2、カウンターパート：Dr. Josep J. Canadell・オーストラリア連邦科学産業研究機構、サブテーマ4の協力者である近藤はRECCAP2東南アジア炭素収支解析グループのサイエンスリーダーを務めている

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

<論文（査読あり）>

- 1) P. K. PATRA, D. CRISP, J.W. KAISER, ... K. ICHII, ET AL.: Scientific Reports, doi: 10.1038/s41598-017-13459-0 (2017), Orbiting carbon observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-grams increase of carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño.
- 2) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, ET AL.: Nat. Commun., 9, 1154, doi:10.1038/s41467-018-03374-x (2018a), Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia.
- 3) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, ET AL.: Geophys. Res. Lett., 45, 4820-4830, doi:10.1029/2018GL077633 (2018b), Plant regrowth as a driver of recent enhancement of terrestrial CO₂ uptake.
- 4) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, ... K. ICHII, ET AL.: Glob. Change Biol., 26, 1-17, doi:10.1111/gcb.14917 (2020), State of the science in reconciling top-down and bottom-

up approaches for terrestrial CO₂ budget.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) K. ICHII, M. KONDO, M. UHEYAMA: iLEAPS Newsletter 3 Special Issue Asia (2018), Current status of empirical estimates of terrestrial carbon and water cycles using eddy-covariance network and remote sensing data.
- 2) 市井和仁, 渡辺裕之, 谷口弘智, 植山雅仁, 近藤雅征: 日本リモートセンシング学会誌, 38, 114-120 (2018) 機械学習を用いた地上観測・衛星観測データの統合による広域陸域熱・水・炭素フラックスの推定.

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) ICHII K. (2019) Application of GOSAT L4A terrestrial CO₂ budget product for intercomparison with empirical data-driven bottom-up estimates. GEO Week. Site Event "Satellite Remote Sensing of Greenhouse Gases and 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" Canberra, Australia.
- 2) ICHII K. (2019) The 12th AOGEO Symposium. AOGEO Task Group 3: The GEO Carbon and GHG Initiative. Canberra, Australia.
"Progress of empirical bottom-up estimation of terrestrial CO₂ fluxes using AsiaFlux"
- 3) ICHII K. (2019) Expectations from Carbon and GHG initiative. The 12th AOGEO Symposium. AOGEO Task Group 3: The GEO Carbon and GHG Initiative. Canberra, Australia.
- 4) M. KONDO: The 12th Asia-Oceania Group on Earth Observations (AOGEO) Symposium 2019, Canberra, Australia (2019)
"Carbon budget assessment in Southeast Asia: multi-data and -model synthesis"
- 5) LIU Z., K. ICHII, M. UHEYAMA (2019) Data-driven GPP and NEE estimation with lag effect, remote sensing, and machine learning. AsiaFlux 2019, Takayama, Japan.
- 6) ICHII K., Z. LIU, R. KAWASE, M. KONDO, M. UHEYAMA (2019) An updated data-driven terrestrial CO₂ flux estimation using remote sensing and eddy covariance network data. The 2019 Chapman Conference on Understanding Carbon Climate Feedbacks, San Diego, CA, USA.
- 7) M. KONDO: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting (2019)
"The Kamide Lecture: the role of CO₂ release and uptake induced by land use changes in recent terrestrial carbon balance" (invited)
- 8) M. KONDO: the 3rd international Conference of Climate Change 2019, Kuala Lumpur, Malaysia (2019)
"The effect of land use changes on current terrestrial carbon cycle, the 3rd international Conference of Climate Change 2019, Kuala Lumpur, Malaysia" (invited)
- 9) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, P. CIAIS, F. CHEVALLIER, J.G. CANADELL, A. BASTOS, B. POULTER, L. CALLE, K. ICHII: American Geophysical Union Fall (AGU) Meeting 2018, Washington USA (2018)
"Global and regional CO₂ budget comparison between top-down and bottom-up approaches" (invited)
- 10) M. KONDO: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting, Singapore (2019)
"On recent trend of land use change emissions: reality or fallacy?"
- 11) M. KONDO, P. LANDSCHÜTZER, Y. IIDA, R.A. HOUGHTON, S. SITCH: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting, Singapore (2019)
"Contrasting mechanisms behind atmospheric CO₂ growth between two El Niño events"

- 12) M. KONDO, P. LANDSCHÜTZER, Y. IIDA, R.A. HOUGHTON, S. SITCH: Japan Geoscience Union (JPGU) meeting 2019 (2019)
 “Ocean uptake and land use change emissions suppressed atmospheric CO₂ growth in the 2015/16 El Niño”
- 13) M. KONDO: European Geophysical Union (EGU) General Assembly 2019, Vienna, Austria (2019)
 “On recent trend of land use change emissions: reality or fallacy?”
- 14) ICHII K., K. MURAKAMI, H. OSHIO, Y. YOSHIDA: 16th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore (2019)
 “Impact of heatwave in summer 2018 on terrestrial vegetation detected by multiple satellite-based products”
- 15) LIU Z., K. ICHII, Y. HAYASHI, R. KAWASE, K. HAYASHI, M. UYAMA, Y. KOMINAMI, K. KUMAR, S. MUKHERJEE: 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2019), Yokohama, Japan (2019)
 “Updated data-driven GPP and NEE estimation with remote sensing and machine learning across Asia”
- 16) 川瀬 陸, 市井和仁, 林 悠介, Zhiyan Liu, 植山雅仁, 小南裕志: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (JpGU 2019), Chiba, Japan (2019)
 “衛星データを用いた機械学習によるアジアの陸域生態系の炭素循環の推定”
- 17) ICHII K.: 1st International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) Regional Conference, Nanjing, China. (2019) (基調講演)
 “Model-Data Synthesis Toward Better Understandings of Terrestrial Carbon Cycle in Asia.”
- 18) 市井和仁, 植山雅仁, 柳 裕二, 小林秀樹: 日本リモートセンシング学会第63回(平成29年度秋季) 学術講演会, 江別, 北海道 (2018)
 “AsiaFluxデータと衛星データによる広域陸域物質循環の推定”
- 19) 市井和仁: *JapanFlux10周年記念集会*, つくば (2018)
 “フラックス観測網と衛星データを利用した広域フラックス研究の現状”
- 20) 市井和仁: 第26回生研フォーラム「宇宙からの地球環境・災害のモニタリングとリスク評価」, 東京 (2018)
 “JapanFluxとリモートセンシングの役割”
- 21) 市井和仁, 植山雅仁, 近藤雅征: 日本農業気象学会75周年記念大会, 福岡 (2018)
 “AsiaFluxデータを利用した広域陸域CO₂フラックスの推定とその応用”
- 22) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, K. ICHII: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, Hawaii, USA (2018)
 “Current status of terrestrial carbon budget estimates”
- 23) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, B. POULTER, L. CALLE: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, Hawaii, USA (2018)
 “Plant regrowth as a driver of the recent enhancement of terrestrial carbon uptake”
- 24) M. KONDO M., K. ICHII, P.K. PATRA, B. POULTER, L. CALLE: Japan Geoscience Union (JPGU) meeting 2018, Chiba, Japan (2018)
 “The role of plant regrowth in recent enhancement of terrestrial carbon uptake”
- 25) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, J.G. CANADELL, B. POULTER, L. CALLE, S. SITCH, T. SAEKI, N. SAIGUSA: Japan Geoscience Union (JPGU) meeting 2018, Chiba, Japan (2018)
 “Carbon balance shifts controlled by land use change and El Niño-Southern Oscillation in Southeast Asia”

- 26) ICHII K., K. MURAKAMI, H. TAKAYAMA, T. HAJIMA, M. KONDO, K. TACHIIRI: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2018, Washington D.C., USA (2018)
 “Evaluating Modeled Terrestrial Carbon Cycles in Earth System Models and Offline Models Using Multiple Observation-based Estimates.”
- 27) 市井和仁・村上和隆・林 悠介・劉 治彦:日本リモートセンシング学会 第65回(平成30年度秋季) 学術講演会, 高松 (2018)
 “2018年猛暑における東アジアの植生パラメタ偏差の解析”
- 28) ICHII K.: GEOSS Asia Pacific Symposium, Kyoto Terrsa, Kyoto (2018)
 “Data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes across Asia using AsiaFlux observation network and remote sensing data”
- 29) ICHII K.: ILTER Annual Coordinating Committee Meeting and ILTER EAP Scientific Conference, Taichung, Taiwan (2018)
 “Data-driven analysis of terrestrial CO₂ fluxes using AsiaFlux data”
- 30) ICHII K., M. UYAMA, M. KONDO: OzFlux-AsiaFlux Conference, Darwin, Australia (2018)
 “Estimating terrestrial CO₂ fluxes across Asia based on synthesis of AsiaFlux data, remote sensing, and ecosystem modeling”
- 31) ICHII K., Y. YANAGI, J. XIAO, M. KONDO: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, Honolulu, HI, USA (2018)
 “Detecting Vegetation Changes Induced by Afforestation in China Using Multiple Satellite Products”
- 32) M. KONDO, K. ICHII, P.K. PATRA, J.G. CANADELL, B. POULTER, L. CALLE, S. SITCH, T. SAEKI, N. SAIGUSA: the 10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland (2017)
 “Decadal carbon balance shifts controlled by land use change and ENSO in Southeast Asia”
- 33) M. KONDO: the joint conference of AsiaFlux Workshop 2017 and the 15th Anniversary Celebration of ChinaFLUX, Beijing, China (2017)
 “Toward integrated understanding of spatial variability in Asian carbon fluxes using AsiaFlux network and AsiaMIP datasets”
- 34) M. KONDO, P.K. PATRA, S. SITCH, K. ICHII, T. SAEKI: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, Singapore (2017)
 “Current status of global and regional carbon budgets: a synthesis analysis of multiple estimations including top-down and bottom-up approaches”
- 35) K. ICHII: FLUXCOM Workshop 2017, Jena, Germany (2017)
 “FLUXCOM CO₂ fluxes overview synthesis: comparison with data-driven, model-based estimates”
- 36) K. ICHII: FLUXNET conference 2017. Berkeley, USA (2017)
 “AsiaFlux updates”
- 37) K. ICHII, S. KANO, Y. YOSHIDA, K. NISHIMURA, N. FURUHASHI, P.K. PATRA: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore (2017)
 “Satellite-based monitoring of biomass burning across tropical Southeast Asia in 2015 El Nino year. AOGS 14th Annual Meeting, Singapore”
- 38) K. ICHII, M. JUNG, G. TRAMONTANA, G. CAMPS-VALLS, C. SCHWALM, M. KONDO, D. PAPALE, M. REICHSTEIN, U. WEBER, Y. YANAGI: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore (2017)
 “FLUXCOM remote sensing data based CO₂ flux products: overview and synthesis”
- 39) K. ICHII, M. UYAMA, M. KONDO, N. SAIGUSA: the 10th International Carbon Dioxide

Conference (ICDC10), Interlaken, Switzerland (2017)

“A new data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression”

40) 近藤雅征, 高木宏志, 市井和仁, 佐伯田鶴: 日本気象学会2017年度秋季大会, 札幌 (2017)

“エルニーニョ南方振動に対応した近年の陸域CO₂吸収・排出傾向: 地上・衛星観測に基づいた異なるプロダクトの相互比較”

(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, 千葉市科学館, 2018年1月20日, . (聴講者約25名)

2) 市井和仁 (2019) 環境リモートセンシングと学校教育への繋がりの可能性. 東総教頭会視察見学会, 千葉大学, 千葉, 2019/11/25. (聴講者約25名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) Kondo et al. (2018a)に基づく成果の記者発表、近藤雅征、市井和仁、プラビールパトラ、眞木貴史 (2018年3月20日、文部科学者会、「気候の自然変動が大規模森林伐採による二酸化炭素の排出を相殺した現象を世界で初めて検出! ~東南アジアの生態系によるCO₂排出量が2000年代に減少した原因を解明、地球温暖化現象の理解に向けて新たな足掛かり~」)

2) NHK NEWS WEB「気候の自然変動がCO₂排出抑制 千葉大など調査」, 2018年3月20日

3) つくばサイエンスニュース「周期的自然変動がCO₂排出に影響—森林伐採による増加抑制も」, 2018年3月20日

4) 時事ドットコムニュース「強いエルニーニョで増加懸念=東南アジアCO₂排出量—千葉大など」, 2018年3月20日

5) 日本経済新聞「弱いエルニーニョ現象 東南アCO₂排出抑制」, 2018年3月26日

6) 日刊工業新聞「森林伐採によるCO₂排出 気候変動で相殺 千葉大など解明」, 2018年3月27日

7) 環境情報メディア環境展望台「千葉大など、東南アジアの森林伐採等に由来するCO₂排出とエルニーニョ現象の因果関係を解明」

8) 東京新聞「地球温暖化を裏で操る」, 2018年4月23日

9) 中日新聞「地球温暖化を裏で操る」, 2018年4月26日

10) Kondo et al. (2018b)に基づく成果の記者発表、近藤雅征、市井和仁、プラビールパトラ (2018年5月16日、千葉大学工学部松陰会館、「2000年代の陸域CO₂吸収量が過去100年間で最大! 過去の大規模土地利用変化から回復した植生が原因の一つ~陸域生態系による大気CO₂増加の緩和プロセスに新たな理解~」)

11) 日刊工業新聞「CO₂吸収増加続く 60年代以降森林管理が奏功」, 2018年5月18日

12) 日本経済新聞「陸上のCO₂吸収最大に—千葉大など」, 2018年5月18日

13) 環境情報メディア環境展望台「千葉大、2000年代における陸域CO₂吸収量の変化要因を解明」

14) Climate Wire, 「EMISSIONS Abandoned farms are absorbing CO₂」 2018年5月23日

15) Kondo et al. (2020)に基づく発表成果の記者発表、近藤雅征、佐伯田鶴、三枝信子 (2019年12月12日、環境省記者クラブ、「CO₂の放出と吸収のより正確な推定に成功~IPCC第5次評価報告書からの進展と第6次評価報告書に向けた課題~」)

16) Physics.org「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日

- 17) Agenparl 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日
- 18) Pharma Jobs 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日
- 19) Science Codec 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日
- 20) Bioengineer.org 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日
- 21) One News Page 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日
- 22) ScienceDaily 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月12日
- 23) Environmental News Network 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月13日
- 24) Terra Daily 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月13日
- 25) Live Science Tech 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月13日
- 26) Long Room.com 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月13日
- 27) Industry Global News24 「Advancement in estimation of carbon removal by terrestrial ecosystems」, 2019年12月13日
- 28) Eurasia Review 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月14日
- 29) SCIENMAG 「Estimates of ecosystem carbon mitigation improved towards the goal of the Paris agreement」, 2019年12月14日
- 30) 電気新聞 「千葉大などがCO₂収支を精度よく推定する手法を整理」, 2019年12月16日
- 31) 化学工業日報 「千葉大などがCO₂収支を精度良く推定する手法を整理」, 2019年12月18日
- 32) 環境情報メディア 環境展望台 「千葉大など、「陸域CO₂収支量」推定手法間のばらつきを解消」, 2019年12月19日
- 33) 大学ジャーナルONLINE 「CO₂の放出と吸収、より正確に推定 千葉大など新手法」, 2019年12月18日

(6) その他

- 1) Asia Oceania Geosciences Society Kamide Lecture Award、受賞者：Masayuki Kondo, 「the role of CO₂ release and uptake induced by land use changes in recent terrestrial carbon balance」, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting, July 31, 2019.

8. 引用文献

- 1) Ballantyne A. *et al.* (2012) Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, 488, 70-2.
- 2) Chevallier F. *et al.* (2010) CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements. *J. Geophys. Res.*, 115, D21307.
- 3) Ciais P. *et al.* (2013) Carbon and other biogeochemical cycles. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, ... P.M. Midgley (Eds.),

- Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 465-570). Cambridge: Cambridge University Press.
- 4) Friedlingstein P. *et al.* (2019) Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1783-1838.
 - 5) Ichii K. *et al.* (2017) New data - driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 122, 767-795.
 - 6) Jung M. *et al.* (2017) Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature. *Nature*, 541, 516-520.
 - 7) Keenan T.F. *et al.* (2016). Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nat. Commun.*, 7, 13428.
 - 8) Keenan T.F. & Williams C.A. (2018) The terrestrial carbon sink. *Annu. Rev. Env. Resour.*, 43, 219-243.
 - 9) Kondo M. *et al.* (2015) Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 120, 1226-1245.
 - 10) Le Quéré C. *et al.* (2018b) Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141-2194.
 - 11) Liu Y.Y., *et al.* (2015) Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. *Nat. Clim. Change*, 5, 470-474.
 - 12) Maki T., *et al.* (2010). New technique to analyse global distributions of CO₂ concentrations and fluxes from non-processed observational data. *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.*, 62, 797-809.
 - 13) Patra P.K. *et al.* (2018) Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM). *SOLA*, 14, 91-96.
 - 14) Pugh T.A.M. *et al.* (2019) Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, 116, 4382-4387.
 - 15) Rödenbeck C. *et al.* (2003) Time-dependent atmospheric CO₂ inversions based on interannually varying tracer transport. *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.*, 55, 488-497.
 - 16) Saeki T., P.K. Patra (2017) Implications of overestimated anthropogenic CO₂ emissions on East Asian and global land CO₂ flux inversion, *Geoscience Lett.*, 4:9, 2017.
 - 17) Sitch S. *et al.* (2015) Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 12, 653-679.

III. 英文Abstract

Development of an Integrated Observation and Analysis System for Monitoring Greenhouse Gas Sources and Sinks

Principal Investigator: Nobuko SAIGUSA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
 16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
 Tel: +81-29-850-2517 / Fax: +81-29-858-2645
 E-mail: n.saigusa@nies.go.jp

Cooperated by: Meteorological Research Institute (MRI), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Chiba University

[Abstract]

Key Words: Absorption and emission estimates, Bottom-up approach, Carbon dioxide, Global warming, Greenhouse gas, Integrated observation and analysis system, Methane, Top-down approach

The Paris Agreement established a long-term goal of achieving a balance between anthropogenic emissions and removals by sinks of greenhouse gases (GHGs). To evaluate the impacts of climate change measures, accurate knowledge of emission trends and reliable GHG inventories are essential. This study aimed to develop an integrated observation and analysis system by combining data with advanced analysis systems such as "top-down" (with inverse models) and "bottom-up" (with surface flux/emission data) methods and to provide timely scientific knowledge to policymakers.

We firstly enhanced atmospheric carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and carbon monoxide (CO) concentration observations based on a commercial airliner-based measurement project (CONTRAIL) over Asia which is only sparsely monitored for atmospheric GHGs. Bottom-up CH₄ emission inventories were also intensively developed from statistical analyses of activity data and country-specific emission factors where high uncertainties had been detected particularly in coal mining and livestock.

To integrate those datasets, a new inverse system of atmospheric CH₄ was developed based on NICAM-TM 4D-Var. Using a state-of-the-art data assimilation technique, the system has the capability of estimating spatially high-resolution fluxes. A function of using CO as a proxy for combustion sources was also newly incorporated in the system, whose utility was demonstrated by a CO₂-CO joint inversion for Indonesian biomass burning events in 2015.

We have performed regional inverse modeling of CO₂ and CH₄ at monthly time intervals for the periods 1990s-2010s using MIROC4-ACTM. Natural (non-fossil fuel) CO₂ fluxes were analyzed for hemispheric and global budgets for land and ocean regions and compared with several other inverse models and

bottom-up estimations. Our results show a dominance of anthropogenic CH₄ emissions over the loss for driving the growth rate decrease in the 1990s, quasi-equilibrium in the early 2000s, and regrowth in the late 2000s through 2016. Both the CO₂ and CH₄ emission and uptake datasets have contributed to various national and international research and assessments, including the IPCC AR6 and Global Carbon Project.

By integrating all efforts by sub-groups, we analyzed inter-decadal variation of terrestrial CO₂ fluxes at global scale using both top-down and bottom-up approaches, and found that both outputs consistently estimated largest land CO₂ sink in 2000s among past 100 years. The largest CO₂ sink were attributed by recovery from past land use changes. Finally, land CO₂ budgets were assessed at sub-continental scales using top-down and bottom-up approaches, and the both estimations became closer if we fill the gaps of definition of CO₂ budget.