

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

統合的観測解析システムの構築による全球・アジア太平洋の  
炭素循環の変化の早期検出  
(2-1401)

平成26年度～平成28年度

Integrated Observation and Analysis System for Early Detection of Carbon Cycle Change Globally  
and in Asia-Pacific Region

国立研究開発法人国立環境研究所

気象庁気象研究所

国立研究開発法人海洋研究開発機構

平成29年5月

環境省

総合環境政策局総務課環境研究技術室  
環境保健部環境安全課環境リスク評価室  
地球環境局総務課研究調査室

統合的観測解析システムの構築による全球・アジア太平洋の

炭素循環の変化の早期検出

(2-1401)

I. 成果の概要	.....	i
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		
II. 成果の詳細		
(1) 統合的観測解析システムの設計と全球・アジア太平洋の炭素収支評価に関する研究 (国立研究開発法人国立環境研究所)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	2
3. 研究開発方法	.....	3
4. 結果及び考察	.....	4
5. 本研究により得られた成果	.....	18
6. 国際共同研究等の状況	.....	20
7. 研究成果の発表状況	.....	21
8. 引用文献	.....	28
(2) 統合的解析システム構築に向けた、大気輸送モデルとデータ同化手法の最適な融合に関する 研究 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)	.....	31
要旨	.....	31
1. はじめに	.....	32
2. 研究開発目的	.....	32
3. 研究開発方法	.....	32
4. 結果及び考察	.....	33
5. 本研究により得られた成果	.....	44
6. 国際共同研究等の状況	.....	45
7. 研究成果の発表状況	.....	46
8. 引用文献	.....	50
(3) 航空機データの最適化と同化技術を用いたCO <sub>2</sub> 解析手法の開発 (気象庁気象研究所)	.....	52
要旨	.....	52
1. はじめに	.....	53
2. 研究開発目的	.....	54
3. 研究開発方法	.....	55
4. 結果及び考察	.....	60

5. 本研究により得られた成果	68
6. 国際共同研究等の状況	69
7. 研究成果の発表状況	70
8. 引用文献	73
(4) 統合された陸域観測データに基づく炭素収支空間分布の検証とホットスポット推定に関する 研究（国立研究開発法人海洋研究開発機構）	75
要旨	75
1. はじめに	76
2. 研究開発目的	76
3. 研究開発方法	76
4. 結果及び考察	80
5. 本研究により得られた成果	91
6. 国際共同研究等の状況	93
7. 研究成果の発表状況	93
8. 引用文献	97
III. 英文Abstract	99

課題名 2-1401 統合的観測解析システムの構築による全球・アジア太平洋の炭素循環の変化の早期検出

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 副センター長）

研究実施期間 平成26～28年度

累計予算額 177,463千円（うち平成28年度：56,147千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 地球温暖化、炭素循環、統合的観測解析システム、フラックス推定、アジア太平洋

#### 研究体制

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

## 研究概要

### 1. はじめに(研究背景等)

地球温暖化対策の新たな国際枠組み「パリ協定」が発効し、開発途上国を含むすべての国が温室効果ガスの排出削減に取り組むこととなった。喫緊の課題は、地球温暖化予測の高精度化に不可欠な全球炭素循環モデルの不確実性を低減させるとともに、気候変動に伴う炭素循環変化の早期検出、及び炭素管理に関する意思決定や気候変動対策の評価を可能にする精度を持った炭素循環評価手法の確立である。

これまでに、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)を始めとする地球環境観測衛星、航空機 (CONTRAILなど)、船舶、地上観測ネットワーク等を利用した二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) などの温室効果ガスの観測が行われ、多様なデータが蓄積されている。また、CO<sub>2</sub>濃度の観測値と大気輸送モデルを用いて、いわゆるインバージョン解析により大気の側からの拘束を利用して地域毎の温室効果ガスの地表面フラックスを推定する手法 (トップダウン手法) や、地表付近で観測された温室効果ガス収支を衛星データやプロセスモデルを用いて広域化する手法 (ボトムアップ手法) の研究も発展している。しかし、それぞれ空間分解能、時間分解能、速報性などに限界があることから、環境政策の立案に活用されるまでには至っていない。トップダウン・ボトムアップ手法を統合することにより、多様な観測データを取り込んで温室効果ガス収支の全球分布をオペレーショナルに評価する解析システムの確立が必要である。

こうした統合的な観測解析システムを用いて全球及び地域別の炭素収支の精緻な評価を行うと同時に、炭素循環のホットスポット (気候変化が炭素循環を変化させることにより大きな炭素放出が見込まれ、気候変化を加速させる可能性のある地域) の微小な変化を早期検出し、その変化と地球環境への影響を世界に向けて発信することができれば、国際社会に対し温暖化対策の緊急性を強く訴えることとなり、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた貢献となる。

### 2. 研究開発目的

GOSATや航空機を利用したCO<sub>2</sub>の地球規模での観測、アジア太平洋での炭素収支観測において我が国が持つ研究基盤の優位性を活かし、観測データのもつ情報を最大限に活かす統合的観測解析システムを構築する。そのための観測データの整備、解析システムの開発改良、炭素収支評価の高精度化を行う。開発される解析システムは、本研究終了後も、全球炭素循環の変化を検出するために複数の研究機関が手法を共有し、

GOSAT-2 データ利用研究への応用をはじめ、オペレーショナルに利用可能なものとして、将来にわたり新規事実の発見と将来予測向上のために活用する。

そのために、これまでに複数の研究グループが開発改良してきた複数の大気輸送モデル(NIES-TM、NICAM-TM、ACTM等)、インバージョン・データ同化手法(シンセシスインバージョン法、4次元変分法、アンサンブルカルマンフィルタ等)の適用可能性を比較検討し、トップダウン手法による温室効果ガス収支の高精度評価、各種パラメータの自動設定が可能でかつ長期安定運用できるシステムとして最適な組み合わせを策定する。次に、衛星観測では雲による欠測の多い東南アジア等で特に有効性を発揮する航空機観測(CONTRAIL)について観測データを強化すると同時に、その時空間的な不均一性の影響を最小限にするための最適化手法を開発改良する。さらに、複数のトップダウン手法により全球・アジア太平洋の炭素収支の評価を行い、その結果を陸域観測データ、衛星データ、経験モデル、プロセスモデル等を用いた複数のボトムアップ手法による結果と比較し不確実性の評価を行う。さらに、近年の環境変動の影響を受け、CO<sub>2</sub>収支の変化が大きいと推定される地域(炭素循環のホットスポット)の検出を行う。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 統合的観測解析システムの設計と全球・アジア太平洋の炭素収支評価に関する研究

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CO<sub>2</sub>濃度連続測定装置(CME)の搭載機を1機増やすことによって、アジア太平洋における上空のCO<sub>2</sub>濃度データセットを大幅に充実させた。整備された観測データは、濃度の変動要因を明らかにし解釈した上で、他サブテーマに提供した。また、国立環境研究所で開発されたインバースモデルに基づく地表CO<sub>2</sub>フラックスのデータ、陸域生態系プロセスモデルを用いた解析データ等についても、他サブテーマへ入力データ及び検証データとして提供した。さらに、本研究開発課題全体により開発される統合的観測解析システムを、研究期間終了後も運用するため、サブテーマ(3)で開発された新たなインバージョンシステム、並びに複数のトップダウン・ボトムアップ手法に基づく炭素収支の評価精度向上と不確実性評価の取組を、国内及び国際的な研究枠組みの中に位置付けた。

#### (2) 統合的解析システム構築に向けた、大気輸送モデルとデータ同化手法の最適な融合に関する研究

海洋研究開発機構で開発した大気化学輸送モデルACTMをベースとしてCO<sub>2</sub>とメタン(CH<sub>4</sub>)のインバージョンシステムを開発し、CO<sub>2</sub>は84領域(陸と海)について1990-2011年、CH<sub>4</sub>は53領域(陸のみ)について2002-2012年のフラックス推定を行なった。ここで、複数のインバージョン計算のアンサンブルを解析する際、サブテーマ(1)提供のCONTRAILによる観測データを用いてフラックスの検証を行い、濃度変動を再現できないフラックスをアンサンブル解析から除外することで、より信頼性の高い結果を導く手法を開発した。さらに、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>を同時に扱うインバージョン解析結果に基づき、東アジアの人為起源排出量の不確実性の原因を明らかにし、より現実的な人為起源排出量を推定するための補正方法を提案した。

#### (3) 航空機データの最適化と同化技術を用いたCO<sub>2</sub>解析手法の開発

アジア太平洋の炭素収支評価の精度向上に特に有効である高頻度航空機観測データを最大限に活かし、地表面CO<sub>2</sub>フラックスの高解像度推定を可能とするため、データ同化手法を用いたインバージョンシステムを新たに開発した。このシステムは、大気輸送モデルNICAM-TMのオフライン・フォワードモデル、アジョイントモデル、及び、降下法アルゴリズムPOpULarから成る4次元変分法システムとして構築される。さらに、このインバージョンシステムによるCO<sub>2</sub>フラックス推定の性能を高めるため、航空機データの時空間変動スケールを評価し、データ特性を詳細に把握したうえでデータの最適化を行った。次に、開発されたシステムに対し、フォワードモデルやアジョイントモデルの精度検証と双子実験によるシステム全体の検証を行い、その性能を確認した。さらに、同システムを使って、航空機観測プロジェクトCONTRAILの実観測データを用いたフラックス推定を行った。特に、2015年のエルニーニョ現象に起因する東南アジアの大規模森林火災に着目した事例解析を行い、森林火災起源CO<sub>2</sub>フラックスの診断に新たな解析システムが有効に活用可能であることを示した。

#### (4) 統合された陸域観測データに基づく炭素収支空間分布の検証とホットスポット推定に関する研究

全球規模においてトップダウン手法とボトムアップ手法によるCO<sub>2</sub>収支推定結果を収集し、亜大陸スケールで両者の比較解析を行った。また、東南アジア地域に着目し、過去30年における10年単位のCO<sub>2</sub>収支の変動の検出を、トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析により実施した。その際、ボトムアップ手法に土地利用変化の効果を考慮することにより、より現実に近いCO<sub>2</sub>収支の算出を行うことができることを示し、手法を改良した。また、様々な陸域観測データを駆使したボトムアップ推定を行うために、アジア域のCO<sub>2</sub>フラックス観測データを50サイト以上にわたり収集し、衛星観測データを用いて機械学習により広域推定を行った。これらのデータを利用して、近年の陸域CO<sub>2</sub>収支の変化が特に大きい地域(ホットスポット)を抽出し、その変化に対する気候変化の影響と

土地利用変化の影響を分離した。さらに、CO<sub>2</sub>収支変動のホットスポット領域として中国における植林政策による森林面積の増減モニタリングと、2015年エルニーニョ時における東南アジアの森林火災による影響について複数の衛星データを用いて解析を実施した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 統合的観測解析システムの設計と全球・アジア太平洋の炭素収支評価に関する研究

全球・アジア太平洋の各種プラットフォームで観測される大気中CO<sub>2</sub>濃度データ、地表でのCO<sub>2</sub>フラックスデータ等の時空間的に不均一で多様な形式をもつ観測データについて、本研究開発課題全体により開発されるインバージョン・データ同化手法に対して、入力データ及び検証データとして他のサブテーマへのデータ提供を行った。特に、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CO<sub>2</sub>濃度連続測定装置(CME)の搭載機を1機増やすことによって、アジア太平洋における上空の濃度データセットを大幅に充実させた(図1)。また、インド・デリー上空ではCO<sub>2</sub>の季節変動が北半球の代表的な季節変動から大きく逸脱していること、その原因が農耕地における強い吸収源にあることを明らかにした。この結果は、航空機による上空の大気観測が地域スケールのCO<sub>2</sub>収支を算出する上で非常に有用な手段であることを示している。

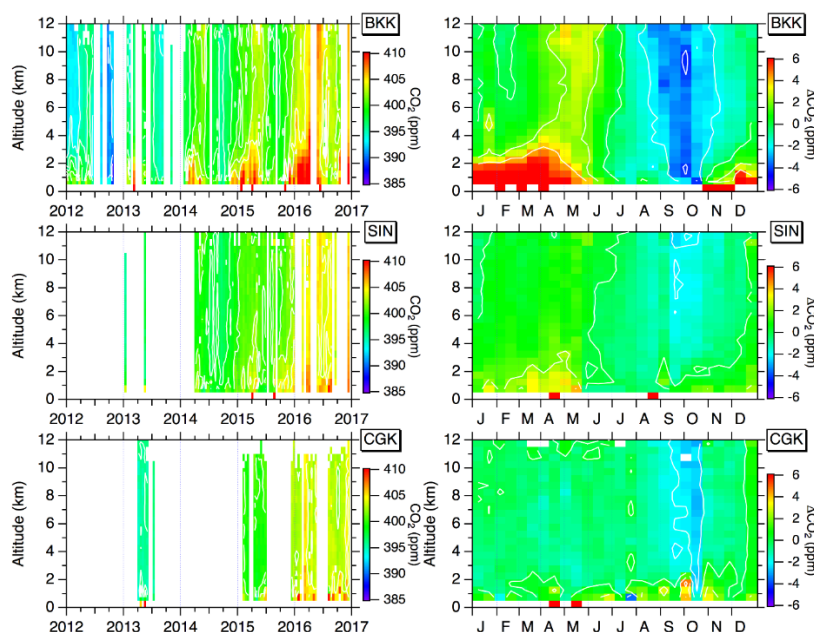


図1 航空機観測によって得られた、バンコック(BKK、上図)、シンガポール(SIN、中図)、ジャカルタ(CGK、下図)空港上空でのCO<sub>2</sub>濃度の2012年から2016年末までの時間変動(左図)とその気候値季節変動(右図)。いずれも高度-時間断面を表している。

##### (2) 統合的解析システム構築に向けた、大気輸送モデルとデータ同化手法の最適な融合に関する研究

海洋研究開発機構で開発した化学輸送モデルACTMをベースとしてCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>のインバージョンシステムを開発し、CO<sub>2</sub>は84領域(陸と海)について1990-2011年、CH<sub>4</sub>は53領域(陸のみ)について2002-2012年のフラックス推定をそれぞれ行ない、他の解析結果も合わせてCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>収支に関する解析を行った。CO<sub>2</sub>インバージョンの結果は、国内外のプロジェクトに提供された他、サブテーマ(4)のトップダウンとボトムアップによるCO<sub>2</sub>フラックス相互比較に使用された。また、本サブテーマ及びサブテーマ(1)(3)の結果を含む国内外のインバージョン計算の結果を解析することによって、アジア3域のCO<sub>2</sub>収支を推定した(図2)。この際、サブテーマ(1)提供のCONTRAILによる観測データを用いてフラックスの検証を行い、濃度変動を再現できないフラックスをアンサンブル解析から除外することにより、より信頼性の高い推定を行った。さらに、CH<sub>4</sub>のインバージョンの結果から、従来使われている人為起源排出に関するボトムアップインベントリが東アジアにおけるCH<sub>4</sub>排出量の増加率を過大評価していることや、2007年以降の濃度増加の原因として反芻動物からの排出量増加の可能性を明らかにした。CH<sub>4</sub>の推定フラックスは日本上空の航空機による独立した観測データをよく再現することが確認された。CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>のインバージョン解析の結果から、中国の石炭産業由来の排出量に大きな不確実性があることが結論づけられ、この問題に関する大気側からの補正方法として、CH<sub>4</sub>とCO<sub>2</sub>のインバージョンの結果を組み合わせた新たな解析手法を提示し、東アジアの人為起源排出量の増加率を下方修正する補正係数0.59を得た。インバージョンの先験情報として使用する中国の化石燃料起源のCO<sub>2</sub>排出量は2002年以降過大評価されており、これを補正すれば、インバージョン解析から推定された近年の東アジアでの陸域吸収量の増大はみられないという新たな見解が得られた。

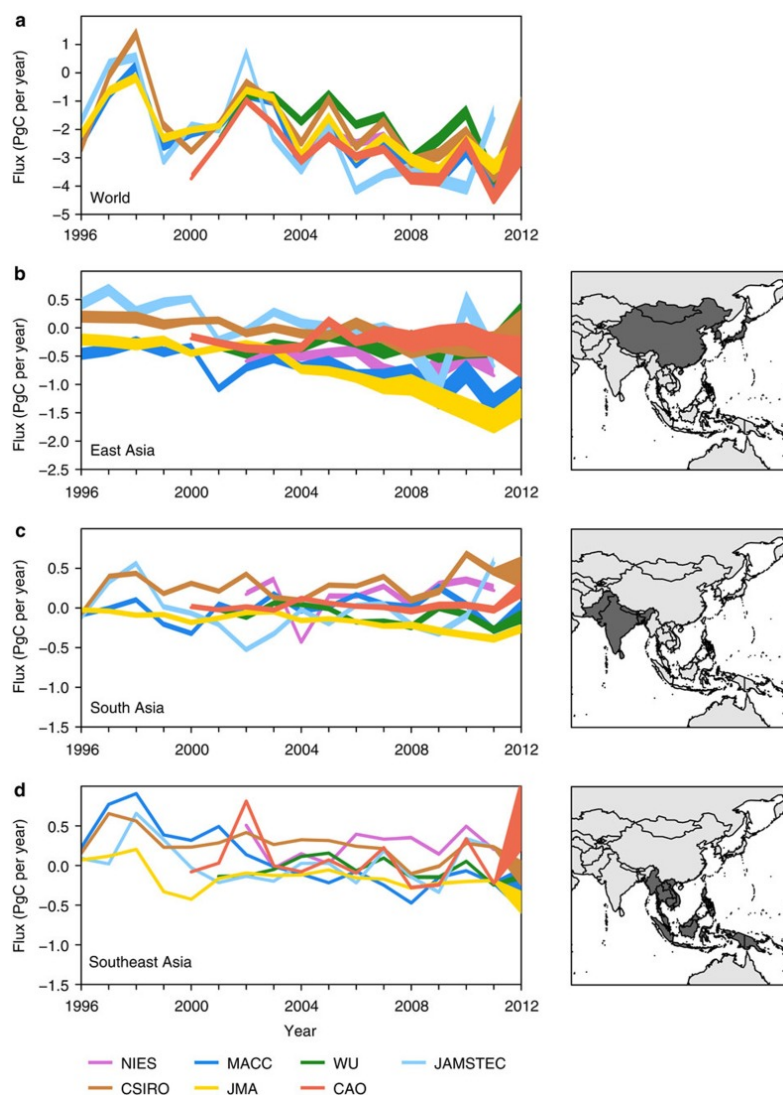


図2 7つのトップダウン手法から得られた1996年から2012年のCO<sub>2</sub>フラックス。a) 全球、b) 東アジア、c) 南アジア、d) 東南アジア。負の値は大気から陸(または海)へのフラックスを表す。

### (3) 航空機データの最適化と同化技術を用いたCO<sub>2</sub>解析手法の開発

近年、充実しつつある航空機などの機動プラットフォームによる大気CO<sub>2</sub>観測データを最大限に活かし、地表面CO<sub>2</sub>フラックスの高解像度推定を可能とするため、データ同化手法を用いたインバージョンシステムを新たに開発した。このシステムは、大気輸送モデルNICAM-TMのオフライン・フォワードモデル、アジョイントモデル、及び、降下法アルゴリズムPOpULarから成る4次元変分法システムとして構築されている。さらに、このインバージョンシステムによるCO<sub>2</sub>フラックス推定の性能を高めるため、航空機データの時空間変動スケールを評価し、データ特性を詳細に把握したうえでデータの最適化を行った。開発したシステムは、フォワードモデルやアジョイントモデルの精度検証から双子実験によるシステム全体の検証に至るまで、一連の検証実験を経て、十分な性能を発揮できることを確認した(図3)。さらに、同システムを使って、航空機観測プロジェクトCONTRAILの実観測データからフラックス推定を行った。2015年のエルニーニョ現象に起因する東南アジアの大規模森林火災に着目した解析から、森林火災起源CO<sub>2</sub>フラックスの診断モデル高度化に有用な示唆を得た。本研究により、スケールギャップによって今まで困難であったインバージョン解析(トップダウン手法)によるフラックス推定値と陸域生態系モデル等(ボトムアップ手法)によるフラックス推定値との比較が容易になった。さらに、得られる高解像度のCO<sub>2</sub>フラックス推定値は、大都市からの排出や森林火災など、小スケールのCO<sub>2</sub>フラックス変動の検出や監視に資する有用な情報を与えるものと期待される。

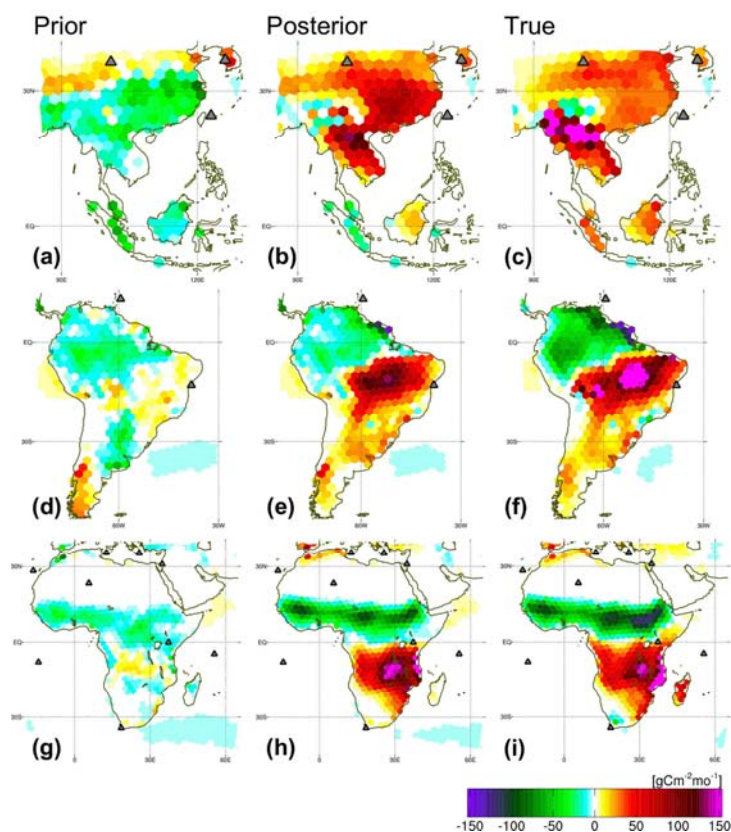


図3 双子実験におけるCO<sub>2</sub>フラックスの(左)初期値、(中央)解析値、(右)真値。  
 森林火災に注目して、3月の東南アジア(上段)、9月の南アメリカ(中段)、  
 9月のアフリカ(下段)について拡大して表示している。

#### (4) 統合された陸域観測データに基づく炭素収支空間分布の検証とホットスポット推定に関する研究

トップダウン手法とボトムアップ手法の統合解析を行うことにより、全球とアジア域において各手法の陸域のCO<sub>2</sub>の収支を推定した。まず、全球規模において複数のトップダウン手法とボトムアップ手法によるCO<sub>2</sub>収支推定結果を収集し、アジア域など地域ごとに集計して相互比較したところ、IPCC 第5次評価報告書における同様の解析結果に比べて両手法間でより一致する結果が得られた。結果が改善された主な理由は、CO<sub>2</sub>収支評価に土地利用変化の影響をより詳細に含めたことである。続いて、東南アジア地域に着目し、過去30年間における10年単位のCO<sub>2</sub>収支の変動を、トップダウン・ボトムアップ手法の統合解析により実施した(図4)。この結果、ボトムアップ手法に土地利用変化の効果を考慮した場合のみ(図4a 赤)、トップダウン手法(図4a 白)の結果と傾向が良好に一致した。この結果は、特に東南アジアにおいて、土地利用変化に伴うCO<sub>2</sub>放出の効果を適切に導入することが極めて重要であることを示すものである。

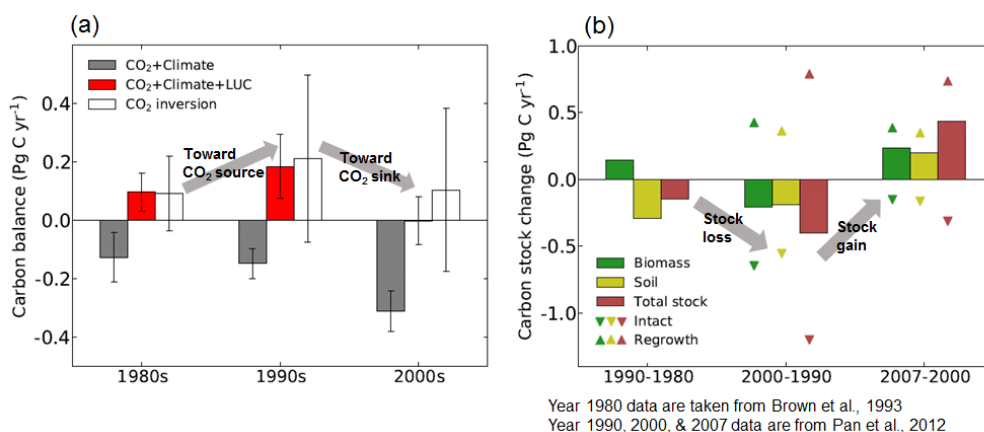


図4 東南アジアにおける(a)複数のボトムアップ手法(TRENDYv2モデル結果)、トップダウン手法(大気インバースモデル)による1980年-2009年の陸域炭素収支推定結果と(b)インベントリ法による炭素蓄積量(バイオマス・土壌有機炭素)変化。



次に、様々な陸域観測データを駆使したボトムアップ推定を行うため、アジア域のCO<sub>2</sub>フラックス観測データを50サイト以上に渡り収集し、衛星観測データを用いて機械学習により広域推定を行った。機械学習による広域推定とGOSAT L4A(トップダウン手法)の推定結果のCO<sub>2</sub>収支の比較においては、両者の定義の違いを加味し、土地利用変化や収穫などの定義の違いを埋めるフラックスを考慮することにより両者の推定値の差が縮まることが明らかとなった。これらのデータを利用して、近年の環境変化に伴うCO<sub>2</sub>収支の変化が大きいと考えられる地域(炭素収支変動に関するホットスポット域)を抽出したところ、アジア域やシベリア、北米、アフリカなどの領域が抽出された。また、これらの領域について気候による影響と土地利用変化による影響を分離した(図5)。さらに、CO<sub>2</sub>収支変動のホットスポット領域として中国南東部で吸収量の増加している地域と、東南アジアで放出量の増加している地域に着目し、中国における植林政策による森林面積の変化と、2015年エルニーニョ時における東南アジアの森林火災による影響について複数の衛星データを用いて解析し、それぞれの影響が顕著であることを明らかにした。

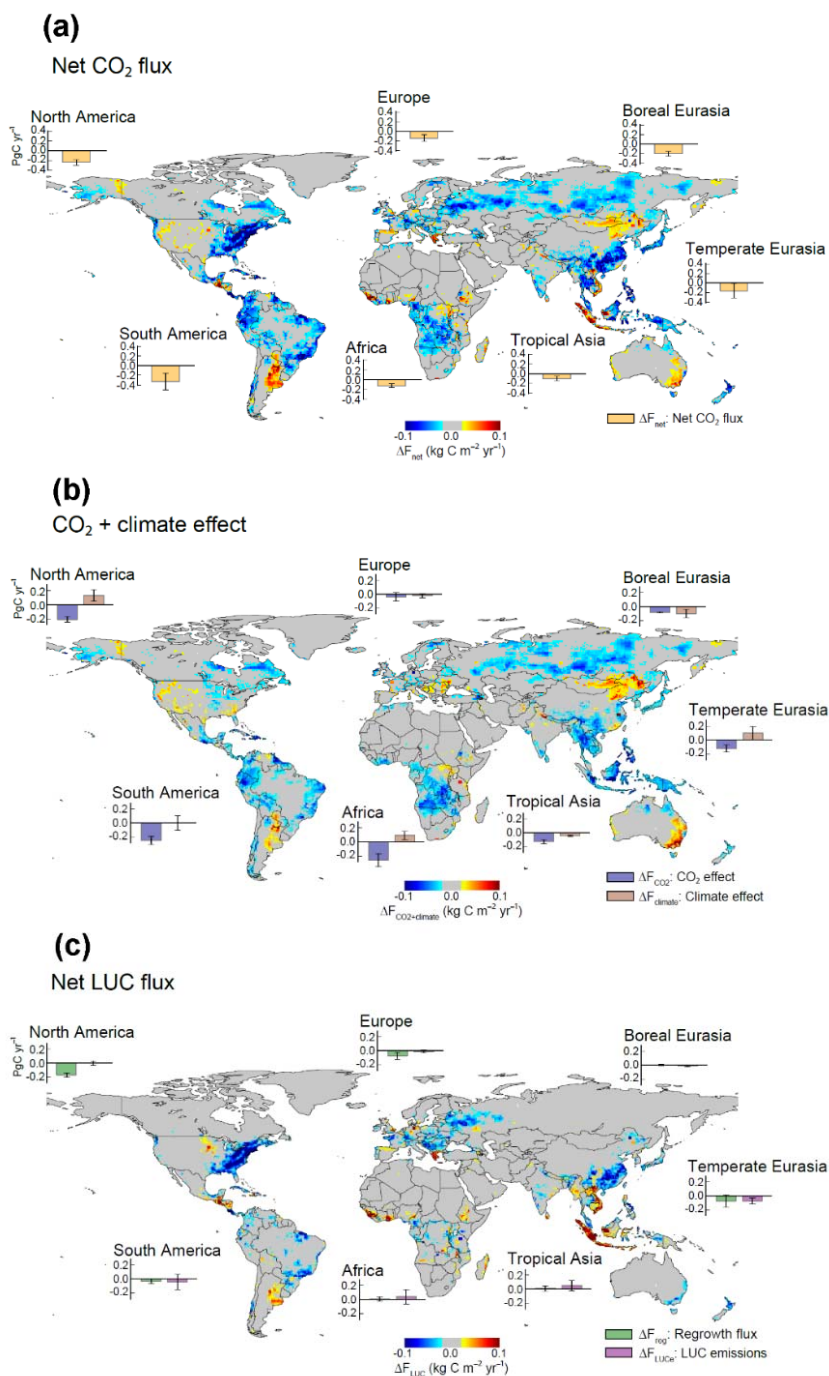


図5 (a) ボトムアップ手法(TRENDYv2モデル結果)による全球における陸域CO<sub>2</sub>収支の変化検出結果。2000-2009年平均値から1960-1999年平均値を引いた値を示す。陸域CO<sub>2</sub>収支については陸域での吸収が強まる場合は負値で示す。(b)大気CO<sub>2</sub>、気候による炭素収支の変化。(c)土地利用変化、森林再成長による炭素収支の変化。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

サブテーマ(1)では、温室効果ガス観測において世界的にも深刻な空白域であるアジア太平洋において、航空機観測(CONTRAIL)の観測を強化することにより、例えば地表での農耕地を含む植生によるCO<sub>2</sub>吸収や森林火災等による大規模放出源の情報を良好に含むCO<sub>2</sub>濃度データを大きく充実させた。特に、東南アジア地域はこれまでは非常に限られた観測例があるのみで、地表・上空を含めてCO<sub>2</sub>濃度の変動は未解明の部分が大きかった。本研究を通して取得した充実したデータによって、バンコックやシンガポール、ジャカルタ上空を含むCO<sub>2</sub>濃度の季節変動の特性を初めて明瞭に示すことができた。これはトップダウン手法によるアジア太平洋の炭素収支の解明を進め、特にアジア太平洋におけるCO<sub>2</sub>収支の高精度評価を可能にする上での大きな進展である。

サブテーマ(2)が取り組んだインバージョン解析に関しては、CONTRAILによる観測データを再現できないフラックスをアンサンブル解析から除外したことにより、得られた推定値はより信頼できるものとなった。実測値を用いたフラックスデータのスクリーニングは従来のアンサンブル解析ではほとんど行われていないものであり、本研究の新規的手法の一つである。一方、依然として中国の化石燃料消費・セメント生産によるCO<sub>2</sub>のボトムアップインベントリに大きな不確実性が伴っており、この補正方法として、本研究で開発したCH<sub>4</sub>インバージョンとCO<sub>2</sub>インバージョンの結果を組み合わせた新たな解析手法を提示した。これにより、先験情報として使用する東アジアの化石燃料消費・セメント生産由来の排出量は2002年以降過大評価されており、これを補正すれば、インバージョンのアンサンブル解析から推定された近年の東アジアでの陸域生物圏による吸収量増大はみられないという新たな見解を示した。また、長寿命気体であるCO<sub>2</sub>を領域モデルで計算するには、領域外からの流入の考慮が不可欠であるが、本研究で開発したシステムでは、全球モデルのACTMを領域モデルのWRF-VPRMを組み合わせることによってこの問題を解決し、3kmの高空間分解能での数値実験を可能とした。

サブテーマ(3)が開発した4次元変分法に基づく新たなインバージョンシステムは、従来よりも飛躍的に時空間解像度の高いCO<sub>2</sub>フラックス推定を行うことに成功した。これにより、スケールギャップによって今まで困難であったインバージョン(トップダウン手法)によるフラックス推定値と陸域生態系モデル等(ボトムアップ手法)によるフラックス推定値との直接比較が容易になり、CO<sub>2</sub>フラックスメカニズムの理解向上に資する詳細な解析が可能となった。これは、地球温暖化予測において大きな不確実性要因となっている気候-炭素循環フィードバックのモデル高精度化にも繋がる成果である。さらに、大都市からの人為起源排出や森林火災など、小スケールのCO<sub>2</sub>フラックス変動の検出や監視にも、本システムで得られる高解像度CO<sub>2</sub>フラックスは有効な情報を与えることが確認された。その結果、今後、不確実性の大きい開発途上国等による人為起源CO<sub>2</sub>排出量や、エルニーニョの影響を受けてインドネシア等で発生する大規模森林・泥炭火災によるCO<sub>2</sub>排出量の推定にも大きく貢献することが期待される。

サブテーマ(4)が取り組んだトップダウン手法・ボトムアップ手法の相互比較を通して、過去約30年の時間スケールにおけるCO<sub>2</sub>収支の変動が両手法で一貫していることを示し、またその変動要因を明らかにした。これはIPCC第5次評価報告書(2013年)の段階でトップダウン・ボトムアップの不一致が提示されていたことに比べ、本研究によりCO<sub>2</sub>収支評価がより信頼できるものになったことを示し、この分野の研究が大幅に進展したことを表している。特に、土地利用変化の影響を適正に加味してCO<sub>2</sub>収支を評価することの重要性が強調された。また、本解析により、シベリア、東アジア、東南アジア、南アジアなどの地域別のCO<sub>2</sub>収支を、トップダウン・ボトムアップ手法に基づき不確実性の幅を確認すると同時に整合的に評価できることを示した。さらに、最近の環境変化に伴い陸域炭素収支を大きく変化させている地域(ホットスポット)を抽出した。特に、2015年におけるエルニーニョの影響で発生した大規模森林火災に伴うCO<sub>2</sub>放出など、速報性が必要な現象についても衛星データなどを駆使することで検出可能になったことを示した。

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

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

1) 文科省第6期地球観測推進部会(第8回)にて、本研究の成果である地上・航空機・衛星観測等に基づく温

室効果ガス観測・解析の取組について説明し、地球観測に関する各省庁の取組に関する資料作成に貢献した(平成28年12月8日)。

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

### ＜行政が活用することが見込まれる成果＞

- 1) 国際的に有望なCO<sub>2</sub>観測であるGOSATやCONTRAILと先進的なモデル・同化技術を有機的に融合させる道筋をつけることができた。本研究で開発されインバージョンシステムは、環境省-国立環境研究所-宇宙航空研究開発機構が推進する衛星観測プロジェクト・温室効果ガス観測技術衛星-2号(GOSAT-2)のフラックス(L4)プロダクトの作成に用いられる見込みである。今後の温暖化対策の国際的枠組み「パリ協定」の効果検証に際し、本システムで得られる高解像度のCO<sub>2</sub>収支の推定値は有用な情報を与えるものである。
- 2) 本研究の成果は、今後発行されるIPCC各特別報告書、第6次評価報告書(AR6)、IPCC国別温室効果ガス排出インベントリガイドラインの改訂等に対し、重要な科学的インプットとして行うことが見込まれる。特に、インバージョン解析に基づくCO<sub>2</sub>フラックスの結果は、Asia-Pacific Network for Global Change Research (APN)の国際プロジェクト“Greenhouse gas inversion inter-comparison for Asia”に提供され、複数のインバージョンのアンサンブル解析に基づき、より確からしいアジア域のCO<sub>2</sub>収支を推定したことにより、IPCC及びグローバル・カーボン・プロジェクトなどの国際アセスメントへの貢献が期待できる。また、複数のトップダウン・ボトムアップ手法の統合解析に基づく全球及びアジアのCO<sub>2</sub>収支推定の成果は、2013年に発行されたAR5に比べて大きく進展した内容となっており、AR6への貢献が期待できる。IPCCへの貢献に向けて、2019年IPCC国別温室効果ガス排出インベントリガイドラインの改訂において、本研究開発課題分担者であるマクシュートフは、Lead Author(主執筆者)として既に任命を受け、本研究の成果を生かして科学的内容に責任のある役割を果たす予定である。また、代表者である三枝は、IPCC特別報告書Climate Change and Landのスコーピング会合に参加し、本研究の成果を生かしてアウトライン策定に貢献している。
- 3) 2019年に発行予定のIPBES (The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services; 生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム)評価報告書(グローバルアセスメント)に対し、本研究の成果に基づく重要な科学的インプットが見込まれる。特に、本研究分担者である市井は、第2章Natureにおける統括執筆責任者に既に任命されており、報告書全体を統括する役割を果たすと同時に、グローバルな観点から陸域生態系に大きな変動が起こる地域(ホットスポット)の抽出・解析のまとめを担当する予定である。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上发表

#### ＜査読付き論文＞

- 1) G. Tramontana, K. Ichii, G. Camps-Valls, E. Tomelleri, and D. Papale: Remote Sens. Environ., 168, 360-373, doi: 10.1016/j.rse.2015.07.015 (2015)  
“Uncertainty analysis of gross primary production upscaling using Random Forests, remote sensing, and eddy covariance data”
- 2) P. K. Patra, T. Saeki, E. J. Dlugokencky, K. Ishijima, T. Umezawa, A. Ito, S. Aoki, S. Morimoto, E. A. Kort, A. Croftwell, K. Ravikumar, and T. Nakazawa: J. Meteorol. Soc. Japan, 94, 91-113, doi:10.2151/jmsj.2016-006 (2016)  
“Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012)”
- 3) R. L. Thompson, P. K. Patra, F. Chevallier, S. Maksyutov, R. M. Law, T. Ziehn, I. T. van der Laan-Luijkx, W. Peters, A. Ganshin, R. Zhuravlev, T. Maki, T. Nakamura, T. Shirai, M. Ishizawa, T. Saeki, T. Machida, B. Poulter, J. G. Canadell and P. Giais: Nature Comm., 7, 10724, doi:10.1038/ncomms110724 (2016)  
“Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s”
- 4) R. Janardanan, S. Maksyutov, T. Oda, M. Saito, J. W. Kaiser, A. Ganshin, A. Stohl, T. Matsunaga, Y. Yoshida, and T. Yokota: Geophys. Res. Lett., 43, doi:10.1002/2016GL067843 (2016)  
“Comparing GOSAT observations of localized CO<sub>2</sub> enhancements by large emitters with inventory-based estimates”

- 5) G. Tramontana, Jung M, Camps-Valls G, Ichii K, Raduly B, Reichstein M, Schwalm CR, Arain MA, Cescatti A, Kiely G, Merbold L, Serrano-Ortiz P, Sickert S, Wolf S, Papale D: *Biogeosciences*, 13, 4291–4313. doi:10.5194/bg-13-4291-2016 (2016)  
“Predicting carbon and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms”
  - 6) M. Kondo, T. Saeki, H. Takagi, K. Ichii, and K. Ishijima: *SOLA*, 12, 181–186, doi: 10.2151/sola.2016-037 (2016)  
“The effect of GOSAT observations on estimates of net CO<sub>2</sub> flux in semi-arid regions of the southern hemisphere”
  - 7) L. Calle, J. G. Canadell, P. K. Patra, P. Ciais, K. Ichii, H. Tian, M. Kondo, S. Piao, A. Arneth, A. B. Harper, A. Ito, E. Kato, C. Koven, S. Sitch, N. Vivoy, A. Wiltshire, S. Zaehle, and B. Poulter: *Env. Res. Lett.*, 11, 074011, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074011 (2016)  
“Regional carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980–2009”
  - 8) T. Umezawa, Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, and H. Matsueda; *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070939 (2016)  
“Winter crop CO<sub>2</sub> uptake inferred from CONTRAIL measurements over Delhi, India”
  - 9) Y. Niwa, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan and N. Saigusa: *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157–1174, doi:10.5194/gmd-2016-231 (2017)  
“A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0): 1. Off-line forward and adjoint transport models”
  - 10) M. Jung, M. Reichstein, C.R. Schwalm, C. Huntingford, S. Sitch, A. Ahlström, A. Arneth, G. Camps-Valls, P. Ciais, P. Friedlingstein, F. Gans, K. Ichii, A.K. Jain, E. Kato, D. Papale, B. Poulter, B. Raduly, C. Rödenbeck, G. Tramontana, N. Viovy, Y.-P. Wang, U. Weber, S. Zaehle and N. Zeng: *Nature*, 541, 516–520 (2017)  
“Compensatory water effects link yearly global land CO<sub>2</sub> sink changes to temperature”
  - 11) M. Kondo, T.M. Saitoh, H. Sato, and K. Ichii: *Agric. For. Meteorol.*, 232, 632–634 (2017)  
“Comprehensive synthesis of spatial variability in carbon flux across monsoon Asian forests”
  - 12) K. Ichii, 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, and F. Zhao: *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 122, doi: 10.1002/2016JG003640 (2017)  
“New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression”
  - 13) Y. Niwa, Y. Fujii, Y. Sawa, Y. Iida, A. Ito, M. Satoh, R. Imasu, K. Tsuboi, H. Matsueda and N. Saigusa: *Geosci. Model Dev.*, doi:10.5194/gmd-2016-232 (2017) (印刷中)  
“A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0): 2. Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion”
  - 14) S. Koirala, M. Jung, M. Reichstein, I.E.M. de Graaf, G. Camps-Valls, K. Ichii, D. Papale, B. Raduly, C.R. Schwalm, G. Tramontana, and N. Carvalhais: *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2017GL072885 (2017) (印刷中)  
“Global distribution of groundwater-vegetation spatial covariation”
  - 15) T. Saeki, and Patra, P. K.: *Geoscience Lett.*, doi:10.1186/s40562-017-0074-7 (2017) (印刷中)  
“Implications of overestimated anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions on natural CO<sub>2</sub> sources and sinks estimations”
- (2) **主な口頭発表(学会等)** (該当多数のため、学会や国際会議への「招待講演」のみ記載)
- 1) N. Saigusa: iLEAPS-ASIA Initiative Meeting, Seoul, Korea, October 13 (2014)  
“Cross-disciplinary research collaboration and training during integrated long-term ecosystem-atmosphere greenhouse gas observations”
  - 2) S. Maksyutov, A. Shvidenko, and D. Schepaschenko: American Geophysical Union (AGU) 2014 Fall meeting, San Francisco, USA, December 15–19 (2014)  
“Inventory-based assessment of the Net Ecosystem Carbon Balance of Russian forests in 2010 for comparison to Top-down estimates”

- 3) K. Ichii, M. Kondo, M. Ueyama, T. Kato, A. Ito, T. Sasai, H. Sato, H. Kobayashi, and N. Saigusa: American Geophysical Union (AGU) 2014 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 15–19 (2014)  
“Detecting robust signals of interannual variability of gross primary productivity in Asia from multiple terrestrial carbon cycle models and long-term satellite-based vegetation data”
- 4) 三枝信子: 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張, 5 月 2 日 (2015)  
“気候変動下の陸域生態系応答検出に関するシームレスな科学の展開”
- 5) P. K. Patra, Thompson, and R., Saeki, T.: Second Decadal APO Meeting, Scripps Institution of Oceanography/UCSD, San Diego, USA, September 18 (2015)  
“Can O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> measurements help to constrain global total fossil fuel emission?”
- 6) T. Saeki, and Patra, P. K.: Joint Conference: AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS TC WG VIII/3 Meeting, Pune, India, November 22–29 (2015)  
“CO<sub>2</sub> flux estimation by top-down approach over Asian region”
- 7) K. Ichii: Workshop on Meteorological and Carbon Cycle Modeling over Forest and Agricultural Land, PyeungChang, Republic of Korea (2015)  
“Analysis of recent changes in terrestrial carbon cycles using bottom-up and top-down estimations”
- 8) P. K. Patra: International Land Cover/Land Use Changes Regional Science Team Meeting, Yangon, Myanmar, January 13–15 (2016)  
“Regional trends in land use/land cover change emissions of CO<sub>2</sub> in Asia”
- 9) K. Ichii, M. Kondo, M. Ueyama, and N. Saigusa: AsiaFlux Mini Workshop on Remote Sensing and Ecological/Environmental Monitoring, Taipei, Taiwan, March 2–4 (2016)  
“Linking AsiaFlux and GOSAT Observation for Terrestrial CO<sub>2</sub> Cycle Studies”
- 10) P. K. Patra: The Atmospheric Composition and Asian Summer Monsoon (ACAM) Training School on Satellite and Model Data use for Aerosols and Air Quality, Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok, Thailand, June 11 (2015)  
“Atmospheric Science Data Analysis Tools”
- 11) P. K. Patra, K. Ichii, and J. Miettinen: 13th Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting, Beijing, China, July 31 to 5 August 5 (2016)  
“Climate-carbon nexus in tropical Asia”
- 12) P. K. Patra: 2016 年度日本気象学会堀内賞受賞講演, 名古屋, 10 月 27 日 (2016)  
“モデル解析を基にした温室効果気体の全球規模循環に関する研究”

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 三枝 信子

東北大学大学院理学研究科修了、博士(理学)、現在、国立環境研究所副センター長

研究分担者

### 1) 町田 敏暢

東北大学大学院理学研究科修了、博士(理学)、現在、国立環境研究所室長

### 2) 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、Ph.D、現在、海洋研究開発機構主任研究員

### 3) 丹羽 洋介

東京大学大学院理学系研究科修了、博士(理学)、平成29年3月時点、気象庁気象研究所研究官(平成29年4月より主任研究官)

### 4) 市井 和仁

名古屋大学大学院理学研究科修了、博士(理学)、平成29年3月時点、海洋研究開発機構主任研究員(平成29年4月より千葉大学教授)

## 2-1401 統合的観測解析システムの構築による全球・アジア太平洋の炭素循環の変化の早期検出

### (1) 統合的観測解析システムの設計と全球・アジア太平洋の炭素収支評価に関する研究

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター

大気・海洋モニタリング推進室

物質循環モデリング・解析研究室

三枝 信子

町田 敏暢

マクシュートフ シャミル・伊藤 昭彦

<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

大気・海洋モニタリング推進室

物質循環モデリング・解析研究室

地球環境データ統合解析推進室

陸域モニタリング推進室

梅澤 拓

ジャーナルダナン アーチャリ ラジェッシュ  
・石澤みさ

白井 知子

平田 竜一

平成26(開始年度)～28年度累計予算額：74,598千円（うち平成28年度：21,646千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

地球温暖化対策の新たな国際枠組み「パリ協定」が発効し、開発途上国を含むすべての国が温室効果ガスの排出削減に取り組むこととなった。このような中、本研究開発課題は、全体として、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)や航空機を利用した大気中二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の観測、アジア太平洋での炭素収支解析において、我が国のもつ研究基盤の優位性を活かし、観測データのもつ情報を最大限に活かす統合的観測解析システムを構築することとした。また、この統合的観測解析システムを、本研究終了後も、人為起源CO<sub>2</sub>排出を含む炭素収支の変化検出のためオペレーショナルに活用可能にすることとした。このため、本サブテーマでは、統合的観測解析システムによる炭素収支の評価精度を向上する上で、アジア太平洋において極めて有効である航空機観測(CONTRAIL)のデータを大幅に強化した。その結果、これまで系統的な観測が少なく観測空白域といわれていた東南アジア・南アジアにおいて、大気中CO<sub>2</sub>濃度の鉛直構造とその季節変化を明瞭に示す観測データを大量に整備することができた。特に、南アジアにおいては農業生産に伴うCO<sub>2</sub>吸収量を航空機観測から初めて示すことができるほどに詳細なデータが得られ、本研究によって強化された観測データはインバージョン解析による地域別CO<sub>2</sub>収支の評価精度を大きく向上することが示された。次に、サブテーマ(2)(4)が行う複数のトップダウン・ボトムアップ手法の統合解析に基づく炭素収支評価と不確実性評価の研究に貢献するため、本サブテーマの有するインバージョン解析結果、GOSATによる新たなプロダクト、陸域生態系モデルの出力デ

ータなどの各種データを提供した。最後に、本課題全体の成果である統合的観測解析システムを研究期間終了後も運用する道筋をつけた。具体的には、サブテーマ（3）が開発したデータ同化手法に基づく新たなインバージョンシステムを、環境省－国立環境研究所－宇宙航空研究開発機構の推進するGOSATシリーズの地表フラックス(L4)プロダクト作成に応用するため、運用に向けた準備を開始した。

#### [キーワード]

地球温暖化、炭素循環、統合的観測解析システム、フラックス推定、アジア太平洋

### 1. はじめに

将来の地球環境変化を予測するため、気候モデルと物質循環モデルに基づく地球システム統合モデルを用いた研究が進展し、大きな成果が生まれつつある。喫緊の課題は、地球温暖化予測の高精度化に不可欠な全球炭素循環の不確実性を低減させるとともに、気候変動などに伴う炭素循環変化の早期検出、及び炭素管理に関する意思決定を可能にする精度を持った炭素循環評価手法の確立である。これまでに、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)を始めとする地球環境観測衛星、航空機（CONTRAILなど）、船舶、地上観測ネットワーク等を利用したCO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの長期観測が行われ、多様なデータが蓄積されている。また、CO<sub>2</sub>濃度の観測値と大気輸送モデルを用いて、いわゆるインバージョン解析により大気の側からの拘束を利用して地域毎の温室効果ガスの地表面フラックスを推定する手法（トップダウン法）や、地表付近で観測された温室効果ガス収支を衛星データやプロセスモデルを用いて広域化する手法（ボトムアップ法）の研究も発展している。しかし、それぞれ空間分解能、時間分解能、速報性などに限界があることから、環境政策の立案に十分活用されるまでには至っていない。トップダウン手法・ボトムアップ手法を統合することにより、多様な観測データを取り込んで温室効果ガス収支の全球分布をオペレーショナルに評価する解析システム、複数のモデルや手法の比較解析に基づき結果の不確実性を評価する手法、及びそれらを可能にする国内研究機関・研究者の連携の確立が至急必要とされている。

### 2. 研究開発目的

このような背景のもと、GOSATや航空機を利用したCO<sub>2</sub>の地球規模での観測、アジア太平洋での炭素収支観測において我が国が持つ研究基盤の優位性を活かし、観測データのもつ情報を最大限に活かす統合的観測解析システムを構築することを本研究開発課題全体の目的とした。その中で、本サブテーマは、地球規模でも特に深刻な観測データ空白域といわれている東南アジアや南アジアにおいて、統合的観測解析システムの評価精度を向上させるために有効である航空機観測データの強化を行うことを第一の目的とした。得られた観測データは他サブテーマの行う研究に対し、入力データもしくは検証データとして提供すると同時に、大気中CO<sub>2</sub>濃度の時・空間変動に従来の知見から逸脱する点があれば、データ利用者が解釈を正しく行うことができるよう、その原因を明らかにすることとした。

次に、現状の全球及び地域別の炭素収支評価には未だ不確実性が大きいことから、複数手法に基づく結果の比較解析を観測データの強化と同時に進め、炭素収支推定の現状の問題点を明らか

にし、精度を上げる研究が必要とされる。特に、炭素収支評価の不確実性の幅を定量的に示すことは、独立した複数の手法に基づいて初めて可能になることから、複数のトップダウン手法と複数のボトムアップ手法を用いることが本研究開発課題全体のめざす統合的解析システムには必要不可欠である。本課題全体としてはこの比較解析をサブテーマ（２）（４）が担当することから、本サブテーマでは、航空機観測データのみならず、国立環境研究所が有するインバージョン解析システムによる計算結果、GOSATデータを利用した解析結果、及び陸域生態系の観測データやプロセスモデルの計算結果を、各種手法の入力データもしくは検証データとして、サブテーマ（２）（４）に提供することを第二の目的とした。

最後に、本研究開発課題全体が開発する統合的観測解析システムを、研究期間終了後も、将来の気候下における地球規模での自然起源CO<sub>2</sub>吸排出量の変化や、パリ協定の下での各個人為起源CO<sub>2</sub>排出量の変化を含む、全球及びアジア太平洋の炭素循環の変化検出に利用可能なものとするを第三の目的とした。具体的には、研究期間終了後も国立環境研究所が担当するGOSATシリーズの観測データ解析システムへの応用をはじめ、複数のトップダウン手法・ボトムアップ手法に基づく炭素収支の評価精度向上と不確実性評価の取組を、国内及び国際的な研究枠組みの中に位置付けることを目標とした。

### 3. 研究開発方法

#### （１）アジア太平洋上空における航空機観測データの強化・解釈・提供

##### 1) 民間航空機を利用したアジア太平洋上空のCO<sub>2</sub>データの充実

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）において二酸化炭素濃度連続測定装置（CME）の搭載機を1機増やすことによって、アジア太平洋における上空のCO<sub>2</sub>濃度データセットを充実させた。収集された観測データは、濃度の変動要因に対して解釈を行った上で、他サブテーマに入力データもしくは検証用データとして提供した。

##### 2) インド・デリー周辺地域における冬期栽培の農作物によるCO<sub>2</sub>吸収

インド・デリー空港上空において、2014年までに収集した航空機観測データに基づいて大気中CO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布の解析を重点的に実施した。特に、デリー上空のCO<sub>2</sub>の季節変動が北半球の代表的な季節変動から大きく逸脱していることが明らかになったため、その原因について、地表に大きな吸収源が存在する可能性を含めて調査した。

#### （２）全球大気中CO<sub>2</sub>観測データ及び地表フラックスに関する各種モデル解析データの提供

航空機観測以外にも、国立環境研究所で開発された大気輸送モデルとインバース解析に基づく地表CO<sub>2</sub>フラックスのデータ、各種プラットフォームで観測された大気中CO<sub>2</sub>濃度データと地表フラックスデータ、陸域生態系プロセスモデルを用いた解析データ等について、他サブテーマで利用可能な入力データ及び検証データとして提供した。



### 1) 国立環境研究所大気輸送モデル (NIES-TM) に基づく解析データの整備と提供

国立環境研究所で開発された大気輸送モデル (NIES-TM) に基づくインバーシオン解析の結果を他サブテーマに提供した。具体的には、NIES-TMと粒子拡散モデル (FLEXPART) のカップルモデル (GELCA; Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model) による10年間の全球CO<sub>2</sub>収支の時空間分布を整備し、他サブテーマへ提供した。

### 2) GOSATデータの解釈とその解析データの提供

他サブテーマにより実施される統合解析に対し、GOSAT L4 公式プロダクト、及びGOSAT L4 プロダクトの改訂として2009～2012年の全球CO<sub>2</sub>収支を新たに推定した結果を他サブテーマへ提供した。また、GOSATによる大気中CO<sub>2</sub>濃度の観測データは地表から大気上端に至る気柱平均の濃度であるが、これまで世界各地で行われてきた地上ステーション等での大気中CO<sub>2</sub>濃度の情報と異なり、こうした気柱平均のCO<sub>2</sub>濃度から地表面におけるCO<sub>2</sub>収支に関する情報をどの程度正確に抽出することが出来るかについて、特に、全球及び地域別の人為起源CO<sub>2</sub>排出量の情報の抽出可能性に着目して調査・確認した。

### 3) 陸域生態系モデル (VISIT) に基づく解析データ、及び陸域観測点のデータ提供

陸域生態系モデルVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) により1901年～2012年のアジアのCO<sub>2</sub>収支を空間分解能0.25° で算出した結果を、サブテーマ (4) の Asia-MIP に提供した。また、サブテーマ (3) で開発されたデータ同化手法に基づく解析システムは特に高い時間分解能の先験値データを必要とすることから、1時間ステップでCO<sub>2</sub>収支を算出できるよう改良されたVISITを用いて、その算出結果を提供した。一方、インバーシオン解析への利用に十分な精度を持つ大気中CO<sub>2</sub>濃度の観測、及び国内及びアジアにおけるCO<sub>2</sub>フラックス観測データについて、国内外機関が実施中の観測データを公開促進する取組を行った。

#### (3) 統合的観測解析システムの運用に向けた準備

本研究開発課題全体により開発される統合的観測解析システムの中で、サブテーマ (3) により開発される新たなインバーシオンシステムを、本研究期間終了後も、環境省-国立環境研究所-宇宙航空研究開発機構が共同で行うGOSATシリーズの地表フラックス (L4) プロダクト算出に運用する準備を開始した。また、複数のトップダウン手法・ボトムアップ手法に基づく炭素収支の評価精度向上と不確実性評価の取組を、国内及び国際的な研究枠組みの中に位置付けることを目標とした。

## 4. 結果及び考察

### (1) アジア太平洋上空における航空機観測データの強化・解釈・提供

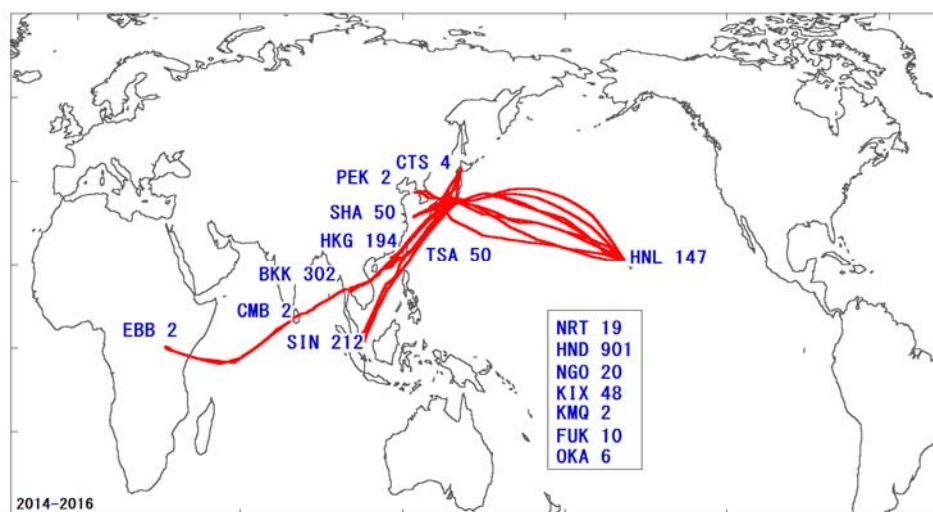
#### 1) 民間航空機を利用したアジア太平洋上空のCO<sub>2</sub>データの充実

サブテーマ (1) では、特に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、二酸化炭素濃度連続測定装置 (CME) の搭載機を1機増やすことによ

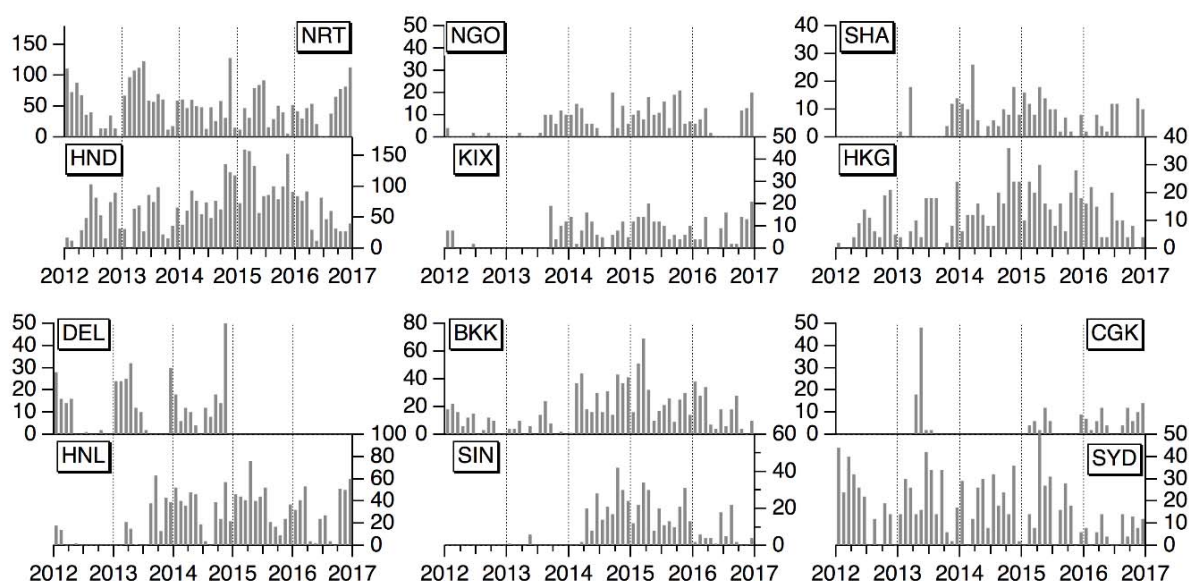
り、アジア太平洋における上空のCO<sub>2</sub>濃度データセットを充実させた。以下にその詳細を記す。

図(1)-1は2014年7月から2016年にかけての2年半の期間に日本航空が運航するボーイング777-200ER型機（2014年については機番JA705J、2015年と2016年については機番JA707J）にCMEを搭載して飛行観測を行った経路と行き先ならびに各空港上空の上昇中と下降中に得られたCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布観測回数を表している。JA705JとJA707Jは日本ではこの2年半の間は羽田空港をベースとしており、羽田の上空で901回もの観測に成功している。飛行先は特にアジア域に集中しており、バンコック上空で302回、シンガポール上空で212回、香港上空で194回、台北（松山空港）上空で50回、上海上空で50回のCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布観測を実施することができた。またハワイのホノルル上空でも147回の観測があった。1機のCME搭載機で極めて充実したアジア域のデータを取得できたと言える。また2015年には、これまでほとんど観測例のなかったスリランカのコロombo上空で2回、アフリカのウガンダ共和国エンテベ上空でも2回のCO<sub>2</sub>観測を行うことができた。

図(1)-1の例のように、本研究実施期間にCMEを搭載した航空機がアジア・太平洋地域に重点的に展開されたことにより、日本（NRT/HND/NGO/KIX）、中国（SHA/HKG）、インド（DEL）、東南アジア（BKK/SIN/CGK）、ハワイ（HNL）、オーストラリア（SYD）上空と各空港間の長距離フライト航路で大気中CO<sub>2</sub>濃度データを大量に取得することができた。図(1)-2には、上述の各空港上について、2012年から2016年末までの鉛直分布の月別取得数を示した。本研究実施期間の2014年以降について、特に羽田（HND）、バンコック（BKK）、シンガポール（SIN）、香港（HKG）などで著しくデータ取得数を増加したことが現れている。



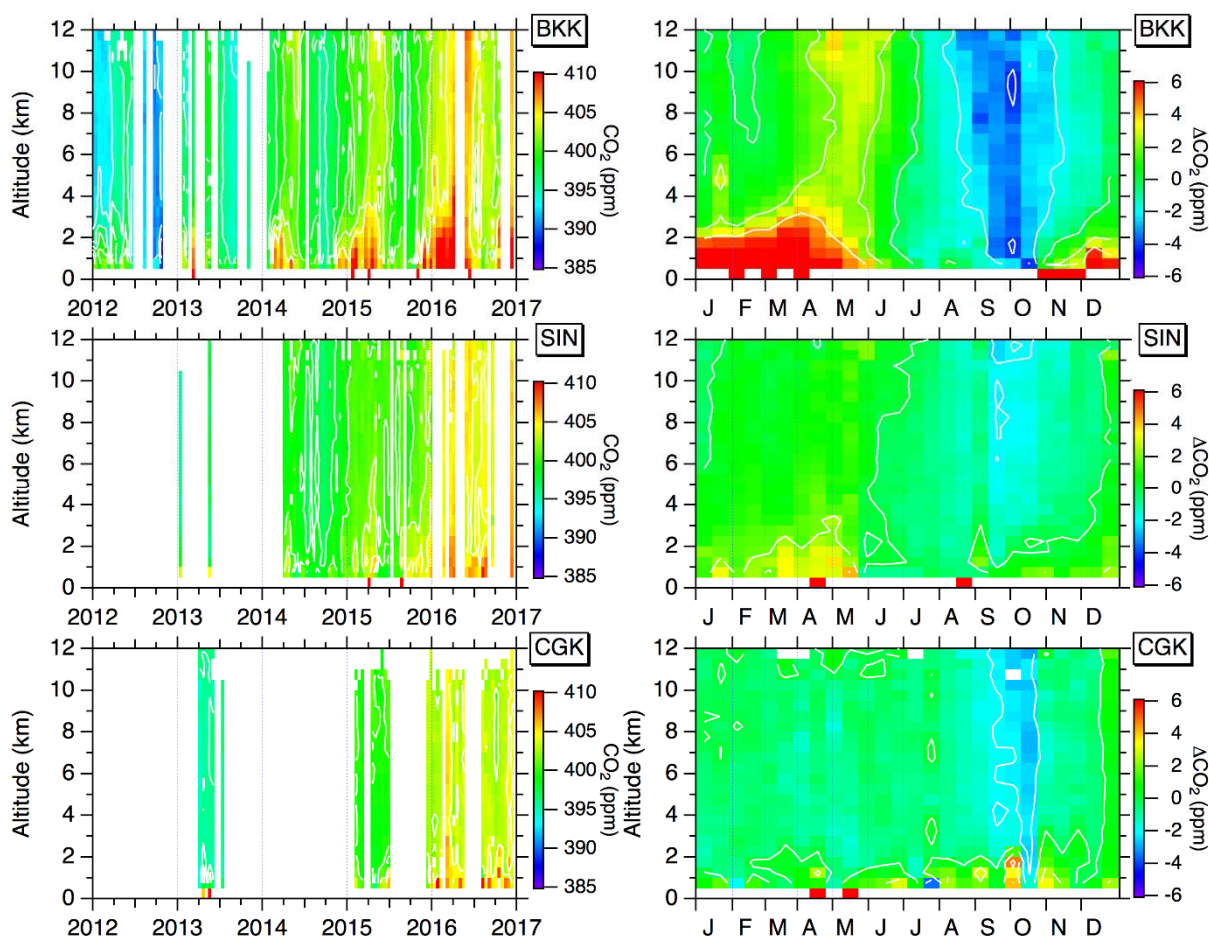
図(1)-1 CMEを搭載したJA705J及びJA707Jが2014年7月から2016年12月までの期間に飛行した航路と目的地、及び鉛直分布観測回数。



図(1)-2 成田 (NRT)、羽田 (HND)、名古屋 (NGO)、関西 (KIX)、上海 (SHA)、香港 (HKG)、  
 デリー (DEL)、ホノルル (HNL)、バンコック (BKK)、シンガポール (SIN)、  
 ジャカルタ (CGK)、シドニー (SYD) 各空港上での鉛直分布データの月別取得数。

特に重点的に上空データが取得できた空港として、図(1)-3左図に、2012年から2016年までのバンコック (BKK)、シンガポール (SIN)、ジャカルタ (CGK) 空港上空でのCO<sub>2</sub>濃度の高度-時間断面図を示した。この断面図においても、2014年にCME搭載機を1機増やしたことで、これらの東南アジアの都市上空のデータが非常に充実したことがわかる。特にシンガポール空港 (SIN) 上空では、2011年以降データ欠損が続いていたが、2014年以降はほぼ切れ目なくデータが取得されており、ジャカルタ空港 (CGK) 上空についても2015年から2016年にかけて大幅なデータ増加が達成できた。

これらの観測地域において大気中CO<sub>2</sub>濃度の空間代表性のある分布を抽出するため、米国ハワイ州マウナロア観測基地で観測されたCO<sub>2</sub>濃度の長期トレンドからの偏差を計算することで、全球的なCO<sub>2</sub>濃度の経年増加を除去した (Sweeney et al. 2015<sup>1)</sup>)。これにより、これまでのCONTRAIL観測データも含めて複数年のデータを組み合わせることで、特定の年・季節のデータ欠損を補って、観測期間中の平均的なCO<sub>2</sub>濃度の分布 (気候値) を解析できる。図(1)-3右上図に、このようにして導出したタイ・バンコック空港 (BKK) 上空の気候値季節変動を示した。冬から春のCO<sub>2</sub>濃度の増加や夏の低濃度がどの高度でも顕著に現れており、このような季節変動は他の北半球の地上観測基地でも共通して観測される特性である。しかし、東南アジアには地上観測点がほとんどない上、その季節変動が高度方向に一様でないこと (位相差があること) や、鉛直勾配が季節的に変動することが明瞭に示されたことは、本研究での観測強化により初めて明らかになった成果である。



図(1)-3 バンコック (BKK、上図)、シンガポール (SIN、中図)、ジャカルタ (CGK、下図) 空港上空でのCO<sub>2</sub>濃度の2012年から2016年末までの時間変動(左図)とその気候値季節変動(右図)。

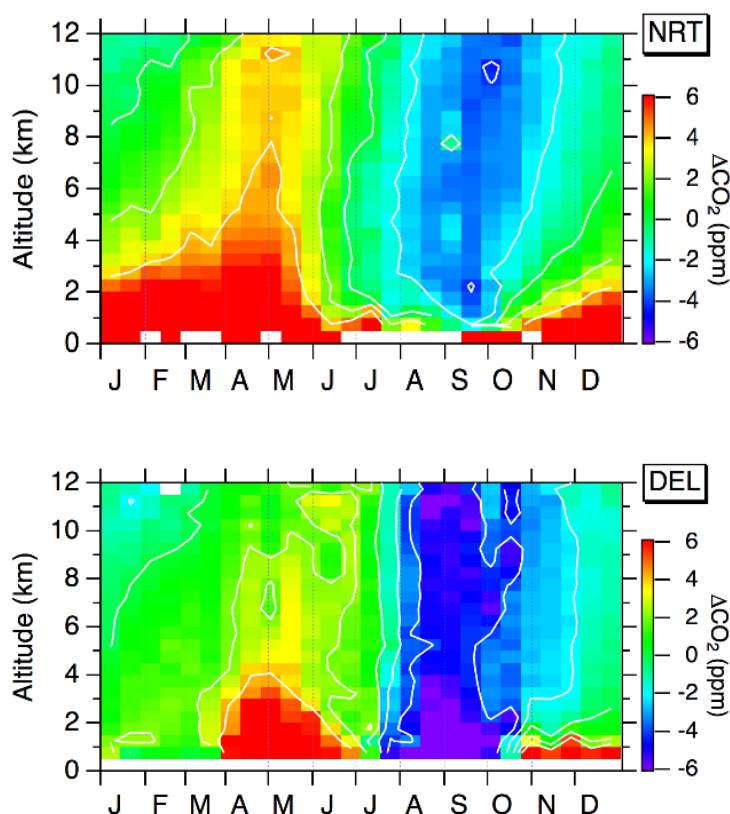
いずれも高度-時間断面を表している。

同様に、図(1)-3中図にはシンガポール空港 (SIN) 上空のCO<sub>2</sub>濃度の変動を示した。ほぼ赤道直下に位置するシンガポールでは、バンコックに比べてCO<sub>2</sub>濃度が全体的に低いことがわかる。図(1)-3右中図には気候値季節変動を示したが、バンコック上空と季節変動の位相については類似しているものの、全高度でその振幅は小さい。また、CO<sub>2</sub>濃度の鉛直勾配が年間を通して非常に小さく、熱帯域で鉛直混合が活発であることを反映していると考えられる。さらに、8月から11月の低いCO<sub>2</sub>濃度はバンコック上空の夏の低濃度とほぼ同時期に出現しており、北半球の植生の影響が現れていると考えられる。

南半球に位置するジャカルタ (CGK) においては、バンコックやシンガポール上空で見られた北半球特性の季節変動とは異なっている。すなわち、北半球で見られる冬期の高濃度は観測されず、季節変動の振幅も小さい(図(1)-3右下図)。自由対流圏においては、9月から10月にかけてCO<sub>2</sub>濃度の極小が観測されており、これはバンコックやシンガポール上空で観測されたCO<sub>2</sub>濃度の季節的な極小とほぼ同時期であり、北半球気塊の影響を示唆している。一方、地表付近においてはCO<sub>2</sub>濃度の不規則な変動が大きく、顕著な季節変動は見出せなかった。

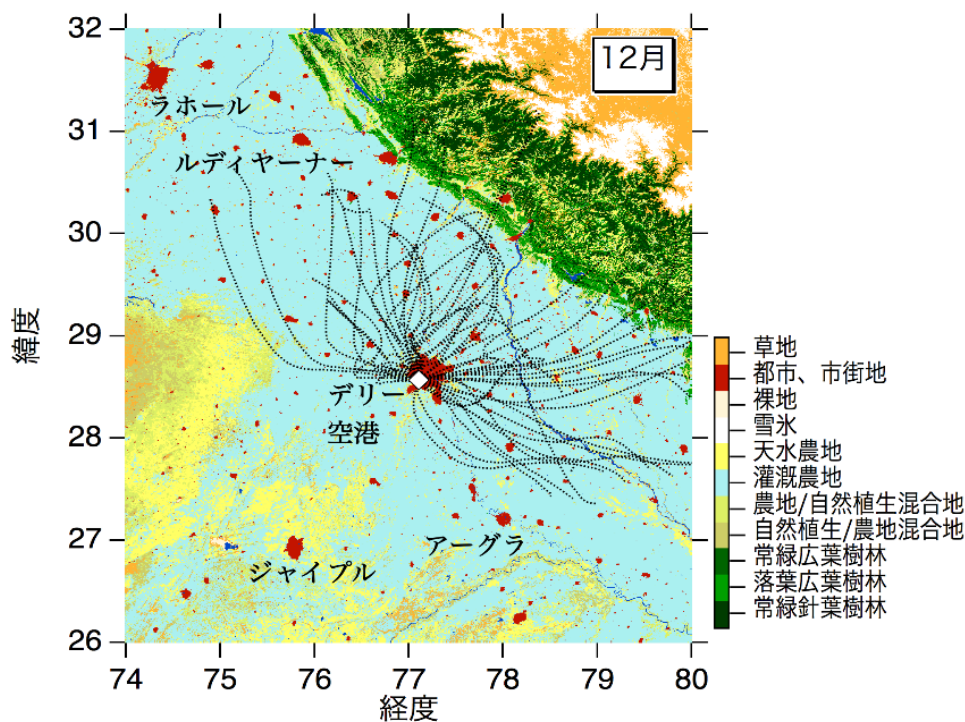
## 2) インド・デリー周辺地域における冬期栽培の農作物によるCO<sub>2</sub>吸収

インド・デリー空港上空では2014年までに充実したデータが取得され（図(1)-2）、このCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布の解析を重点的に実施した。これは、デリー上空のCO<sub>2</sub>の季節変動が、北半球の代表的な季節変動から大きく逸脱していることを発見したためである。図(1)-4では、成田空港（NRT、上図）とデリー空港（DEL、下図）上空の季節変動を比較した。成田空港上空では、図(1)-3のバンコック上空でも見られたように、北半球特性の季節変動、すなわち、冬期から春期の濃度増加と夏期の濃度減少が明瞭に見出せる。一方で、デリー上空では二つの特徴が際立っている。第一に、成田空港上空に見られるように、CO<sub>2</sub>濃度が冬期間に持続的に増加するのが北半球で共通して観測される特徴であるのに対し、デリー上空ではこの傾向が見られずに1月から3月のCO<sub>2</sub>濃度が停滞しており、4月になってから急激にCO<sub>2</sub>濃度が増加している。第二に、夏季の濃度減少が成田空港上空と比べて著しく大きく、かつ地表付近でその濃度減少がさらに強調されている。これは、地表に大きな吸収源があることを示唆している。本研究では、第一のCO<sub>2</sub>変動の要因解明に取り組んだ（Umezawa et al. 2016<sup>2)</sup>）。第二の特徴については、大陸上の活発な鉛直大気輸送とインドの陸上生物圏の強いCO<sub>2</sub>吸収を反映した結果であることが先行研究によって示されている（Patra et al. 2011<sup>3)</sup>；Niwa et al. 2012<sup>4)</sup>）。



図(1)-4 成田空港（NRT、上図）とデリー空港（DEL、下図）上空でのCO<sub>2</sub>濃度の気候値季節変動。

デリー上空における冬季の特異なCO<sub>2</sub>濃度について調べるため、1月から3月にかけてのCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布データを個別に解析したところ、地表付近で濃度減少を示す事例が多数見つかった。同時に地表付近での濃度増加も頻繁に観測され、この地域には地表吸収源と放出源の両方が分布し、その競合の結果、図(1)-4下に見られる冬期のCO<sub>2</sub>濃度の停滞が観測されることがわかった。そこで、この地域特有のCO<sub>2</sub>放出源と吸収源を検討するため、周辺地域の土地利用を調べるとともに、観測日に対応する後方流跡線解析を行った。図(1)-5に見られるように、デリー空港はデリー都市圏の南西部にあり、周辺広域での主要な土地利用は農地である。過去24時間の後方流跡線は、デリー上空のCO<sub>2</sub>濃度がこのような周辺農地の影響を受けている可能性が高いことを示唆している。インド経済統計局の農作物カレンダーによれば、この地域では、降水量の大きいモンスーン期（夏期）に稲作を行い、その後（冬期）に小麦を栽培するのが主要となっている。したがって、周辺の広大な農地において、1-3月に生育期にある小麦が吸収源として働く可能性が考えられる。

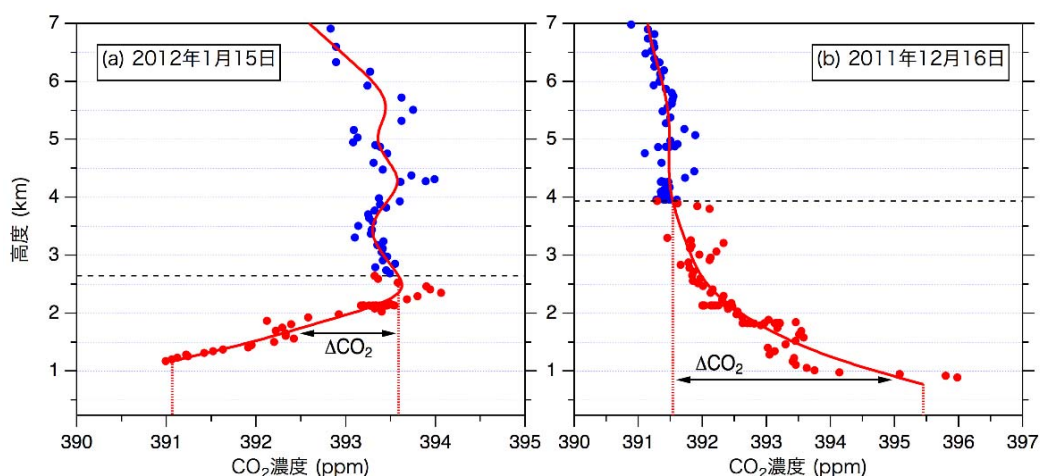


図(1)-5 デリー空港周辺地域の土地利用。土地被覆データはGlobCover 2009 (<http://www.esa-landcover-cci.org>) から取得した。また、点線は12月のCONTRAIL観測日について、METEX (<http://db.cger.nies.go.jp/metex>) で計算したデリー上空高度1kmの空気塊の過去24時間の後方流跡線解析を示す。同様に、1月から4月についても後方流跡線解析を行ったが、顕著な月毎の違いは見られなかった。

実際のデリー空港上空の鉛直分布の例を図(1)-6に示す。左図は地表付近で濃度減少が観測された事例、右図は濃度増加が観測された事例を示している。これらの鉛直分布データは、定期便スケジュールによっていずれも夕方取得されたため、日中に大気混合層が発達するとともに、大気混合層内に地表フラックスの影響が伝搬され保持された結果であると考えられる。そこで、航空機で取得された気温データをもとに、各鉛直分布データ取得時の大気混合層の高さを推定した。ここでは、温位の鉛直勾配が極大となる高度を大気混合層の上端とする手法 (Seidel et al. 2010<sup>5)</sup> など) を採用した。このようにして推定された大気混合層の高度は、CO<sub>2</sub>濃度の高度方向の変化と非常に良い対応が見られた (図(1)-6)。そこで、大気混合層内におけるCO<sub>2</sub>濃度の自由対流圏の値からの差を $\Delta CO_2$ と定義し (図(1)-6を参照)、 $\Delta CO_2$ のカラム量 $\Delta V_{CO_2}$ を大気混合層内で式(1)-1により積算した。

$$\Delta V_{CO_2} = \int_{z_0}^{z_{top}} \frac{M_{CO_2} p(z) [\Delta CO_2](z)}{RT(z)} dz \quad (\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}) \quad (1)-1$$

ここで $M_{CO_2}$ はCO<sub>2</sub>の分子量 ( $44.01 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ )、 $R$ は気体定数 ( $8.31 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )、 $p(z)$ と $T(z)$ は高度 $z$ における気圧と気温をそれぞれ表す。また、 $z_{top}$ は大気混合層の上端高度を表す。この解析においては、 $\Delta V_{CO_2}$ は大気混合層内におけるCO<sub>2</sub>の蓄積量を表している。 $\Delta V_{CO_2}$ が周辺地域における日中の地表フラックスの強度を反映すると仮定し、この解析を2006年から2014年の冬期 (12月から4月) にデリー上空で取得された計223本の鉛直分布データに適用した。

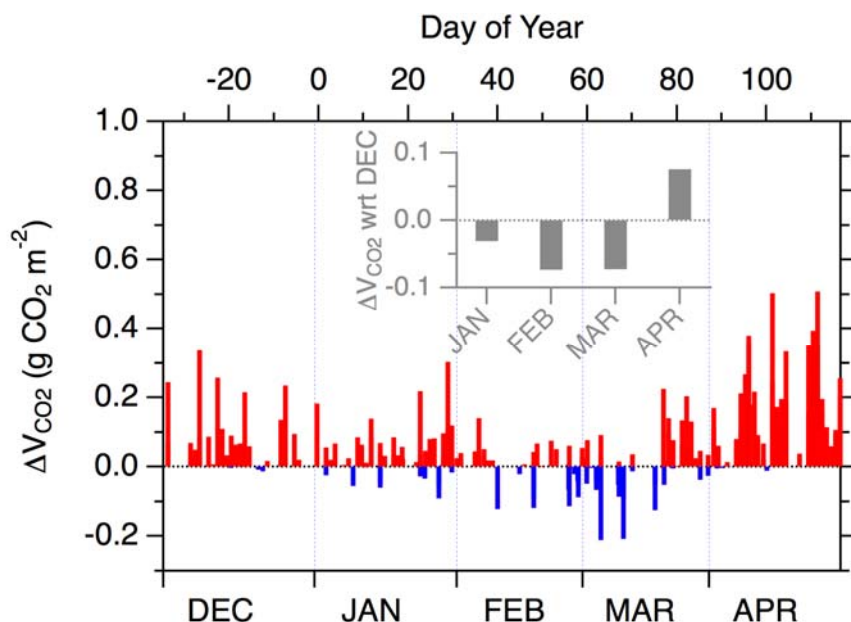


図(1)-6 デリー上空で観測されたCO<sub>2</sub>濃度の鉛直分布の例。黒点線は温位データから推定した大気混合層の上端を示し、その上下でCO<sub>2</sub>濃度データを色分けしている。

このようにして計算された $\Delta V_{CO_2}$ の冬期間 (12月から4月) 中の変動を図(1)-7に示す。地表付近で濃度増加を示した事例が正の $\Delta V_{CO_2}$ 値として、濃度減少を示した事例が負の $\Delta V_{CO_2}$ 値として計算されている。この図に明らかなように、地表付近での濃度増加、すなわち地表放出源の影響は、冬期間を通して観測されている。一方、地表吸収源の影響によって濃度減少を示した事例は1月から3月に限られており、かつ吸収が顕著になる時期は2月から3月である。また、4月になると吸収源の影響は検出されず、放出源の影響が強まることがわかった。これらの変動に寄与する

排出源・吸収源として、以下が考えられる。第一に、近傍のデリー都市圏からの人為的なCO<sub>2</sub>排出であり、これは季節によって大きく変化しないと考えられる。第二に、冬期の農作物栽培によるCO<sub>2</sub>吸収である。実際、図(1)-7で地表吸収源の影響が示された1月から3月については、前述の通り、周辺農地で栽培される小麦の生育期に対応している。第三に、植生呼吸の増大である。4月から5月にかけて、雨期であるモンスーンを前に一年を通して最も気温が高くなるためである。第四に、農作物残渣の燃焼である。冬期の小麦栽培の残渣は4月になって農地において燃やされるため、これがCO<sub>2</sub>濃度の増加に寄与している可能性もある。注目すべきは、2月から3月にかけての負の $\Delta V_{CO_2}$ 値が、12月の正の $\Delta V_{CO_2}$ 値とほぼ同等の強度を持っていることである。12月の濃度増加（正の $\Delta V_{CO_2}$ ）の要因はデリー都市圏からの排出であり、1月以降についてもほぼ一定の寄与を持つと仮定すると、2月から3月にかけての農地によるCO<sub>2</sub>吸収の最盛期の強度は、デリー都市圏からの排出の2倍に相当すると考えられる。

図(1)-7中の灰色の差込み図は、各月の $\Delta V_{CO_2}$ の12月からの偏差を表している。上述の四つの排出源・吸収源のうち、前述のように、都市圏からのCO<sub>2</sub>排出については冬期を通してほぼ一定の寄与であると考えられ、かつ12月にはその他の寄与が小さいと考えられるため、12月を基準とすることによって都市圏排出を除く三つの変動要因の変化を表している。1月から3月にかけては生育期の小麦によるCO<sub>2</sub>吸収が増加しているが、その吸収は4月の収穫とともになくなり、植生呼吸の増加や農作物残渣の燃焼によって、都市圏以外のCO<sub>2</sub>交換は吸収から排出へと一気に転じていると理解することができる。



図(1)-7 デリー上空で観測された大気混合層内におけるCO<sub>2</sub>蓄積量 ( $\Delta V_{CO_2}$ ) の冬期間中の変化。

灰色の差込み図は各月の中央値について、12月からの偏差を表す。



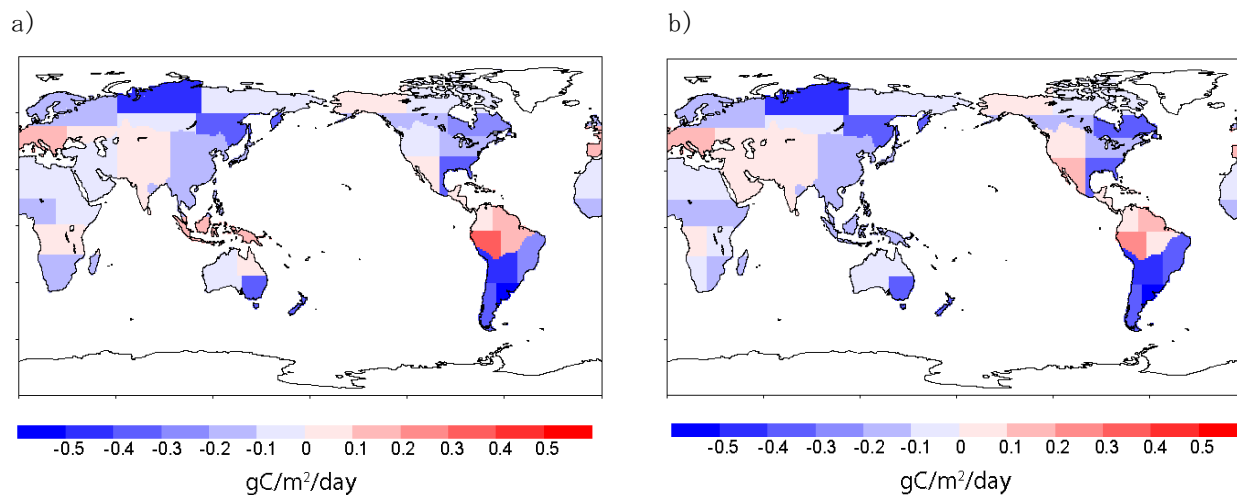
本研究で発見された冬期栽培の農作物によるCO<sub>2</sub>吸収の影響の地域性を検討するため、大気輸送モデルで計算された鉛直分布を観測データと比較した。この際に用いた大気輸送モデルは、世界各地の地上観測点データと自由対流圏のCONTRAILデータを用いた逆解析によって、地上フラックスを最適化している (Niwa et al. 2012<sup>4)</sup>)。この比較の結果、モデル計算は図(1)-6左図のような冬期農作物による大気混合層内のCO<sub>2</sub>濃度の減少を再現できないことがわかった。したがって、第一に現行の大気輸送モデルに用いられている地表フラックスはインド地域の農業の影響を十分に考慮できておらず、第二に、デリー周辺地域の農作物によるCO<sub>2</sub>吸収の影響は近傍の大気混合層内に限定されており、既存の地上観測ネットワークでは検出できないことが明らかになった。以上のようにアジア域には無視できない規模の未知の放出源・吸収源が存在しており、観測データさえあればそれらを特定できることを示した。今後はアジア域でのさらなる地上観測の充実と、航空機観測を含めた統合的なデータ解析がさらに重要になると言える。

## (2) 全球大気中CO<sub>2</sub>観測データ及び地表フラックスに関する各種モデル解析データの提供

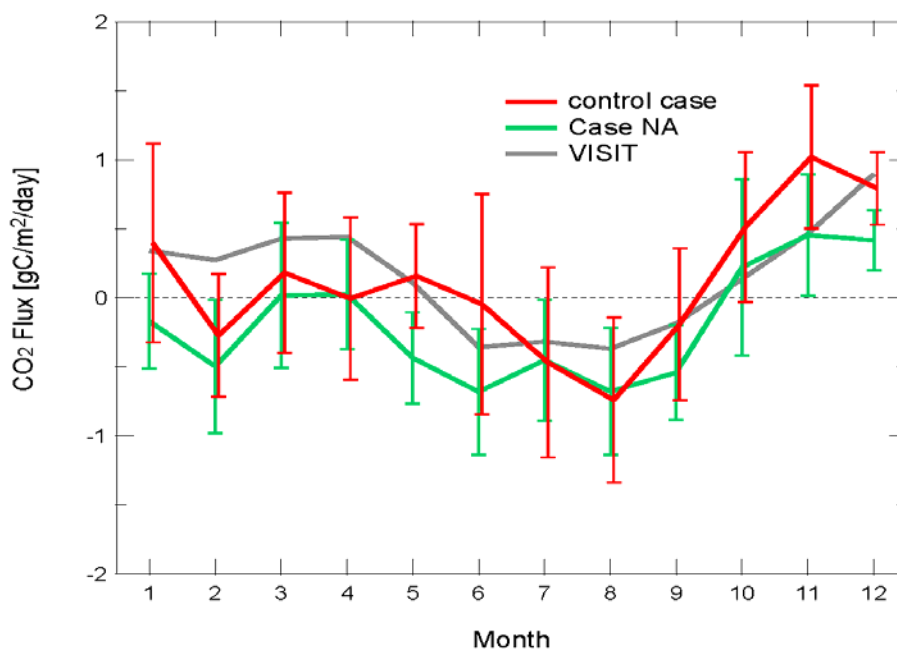
### 1) 国立環境研究所大気輸送モデル (NIES-TM) に基づく解析データの整備と提供

国立環境研究所で開発されたオイラー型全球大気輸送モデル (NIES-TM) とラグランジアン型粒子拡散モデル (FLEXPART) を組み合わせた結合モデル (GELCA; Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model) を用いた大気インバースモデルにより、2002年から2011年までの10年間の全球CO<sub>2</sub>収支を推定した。観測点の周辺で粒子拡散モデルを用いて高精度の計算を行うことで、観測点近傍の排出源・吸収源からの影響をより精密にフラックスの推定に適用することが可能となった。

逆問題の精度は、用いる観測情報の質・量・分布に大きく影響を受ける。本研究では、世界各機関から集めた、連続観測値や航空機観測値を含む大気中CO<sub>2</sub>観測値を基本データセットとして、いくつかの異なるサブセットを用いた場合とのフラックス推定結果の比較を行った (図(1)-8)。注目すべき結果として、太平洋上空の航空機観測データを使用した場合、熱帯アジア地域のフラックス推定の不確定性が大幅に減少し、その季節変化はボトムアップ手法による推定値 (Hirano et al., 2007<sup>6</sup>; Hirano et al., 2012<sup>7</sup>) に近づくことが明らかになった (図(1)-9)。このことは、地上観測の少ない熱帯域において航空機観測データが特に有用であることを改めて示している。



図(1)-8 a)基本データセットを用いて推定した2002年～2011年平均の全球の陸域由来CO<sub>2</sub>フラックス分布（世界を64分割した亜大陸スケールで地域フラックスを推定）。b) 航空機観測データを使わず a)と同様に推定した分布。正のフラックスは放出、負のフラックスは吸収を表す(Shirai et al., 2017<sup>8)</sup>)。



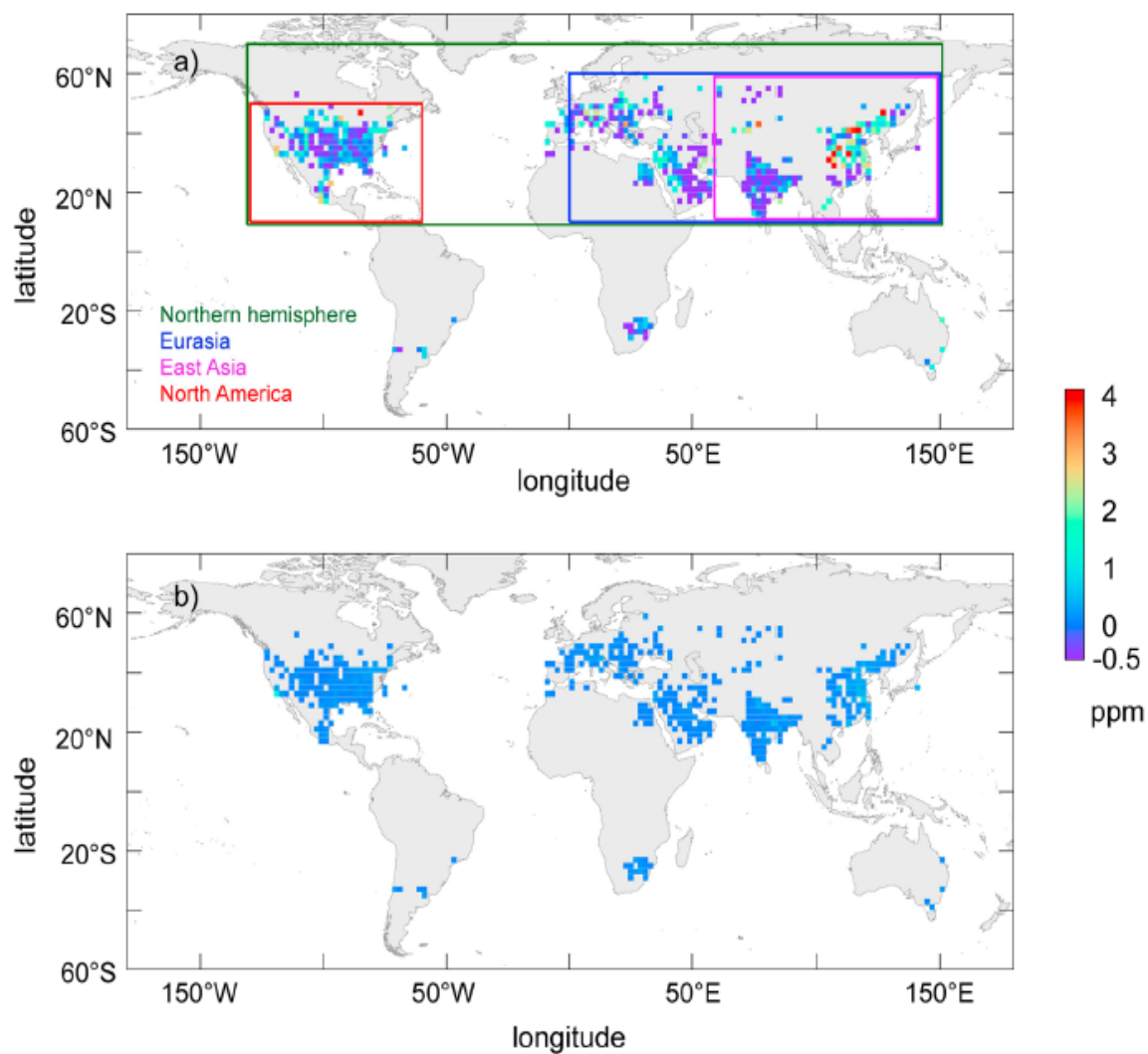
図(1)-9 熱帯アジア域の2002年～2011年平均月毎CO<sub>2</sub>フラックス推定値。基本データセットを用いた事後推定値（赤）、航空機観測値を使わなかった場合の事後推定値（緑）、陸域生態系モデルによる事前推定値（灰）。エラーバーは年によるばらつき（標準偏差）を表す(Shirai et al., 2017<sup>8)</sup>)。

## 2) GOSATデータの解釈とその解析データの提供

サブテーマ(2)(4)が実施する複数のトップダウンモデルの結果を用いた統合解析に貢献するため、GOSAT L4 公式プロダクト、及びGOSAT L4 プロダクトの改訂として2009～2012年の全球CO<sub>2</sub>収支を新たに推定した結果を提供した。なお、GOSATの観測データは地表から大気上端に至る気柱のCO<sub>2</sub>濃度であるが、これまで世界各地で行われてきた地上ステーション等での大気中CO<sub>2</sub>濃度の情報と異なり、こうした気柱平均のCO<sub>2</sub>濃度から地表面におけるCO<sub>2</sub>収支に関する情報をどの程度正確に抽出することが出来るかについて、特に、全球及び地域別の人為起源CO<sub>2</sub>排出量の情報の抽出可能性に着目して以下の方法で調査・確認した。

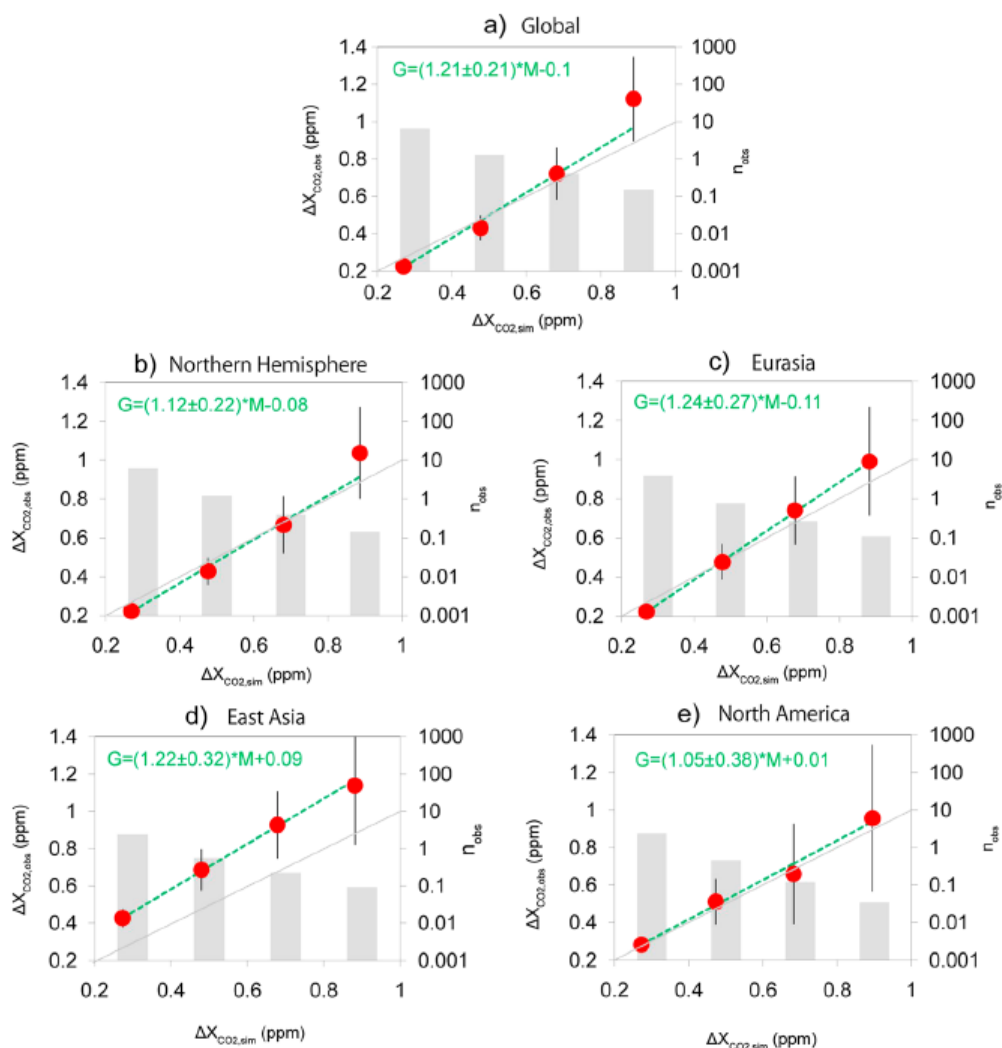
まず、人工衛星から見た夜間の地球表面の明るさと、火力発電所のデータベースに基づく化石燃料消費による人為起源CO<sub>2</sub>排出量データ(排出インベントリ)、さらに大気輸送モデルを用いて、人為起源CO<sub>2</sub>排出によるCO<sub>2</sub>濃度の時空間分布を推定した。次に、この推定結果をもとに2009年から2012年にGOSATにより観測されたCO<sub>2</sub>濃度データを人為起源CO<sub>2</sub>排出の影響を受けているデータと受けていないデータとに分類した。最後に、人為起源CO<sub>2</sub>排出の影響を受けていると判断されたデータとその周辺で影響を受けていないと判断されたデータの差の平均値を求め、更に森林火災やシミュレーションで推定した植物の影響等を取り除いた濃度上昇分をGOSATによる「人為起源CO<sub>2</sub>濃度」とした。

図(1)-10aに、GOSATにより高濃度のCO<sub>2</sub>が観測された領域を示し、図(1)-10bには人為起源CO<sub>2</sub>排出インベントリに基づきCO<sub>2</sub>濃度上昇を推定した結果を示す。図(1)-10a, bともに、人口が密集した地域、火力発電、油・ガス田開発を含めた産業活動が盛んな北米、欧州、中東、インド、中国等において人為起源CO<sub>2</sub>の濃度が高いことが分かる。



図(1)-10 a) GOSATにより高濃度の人為起源CO<sub>2</sub>が観測された領域（色は濃度上昇量）、  
b) 排出インベントリ等に基づきCO<sub>2</sub>濃度上昇を推定した結果を示す（Janardanan et al., 2016<sup>9)</sup>）

次に、インベントリ等による人為起源CO<sub>2</sub>濃度とGOSATによる人為起源CO<sub>2</sub>濃度との関係を図(1)-11に地域別に表示す。すべての地域において、GOSATによる人為起源CO<sub>2</sub>濃度とインベントリ等による人為起源CO<sub>2</sub>濃度の相関は高く、その差はGOSATの観測誤差範囲程度であることから、衛星観測による温室効果ガスの気柱平均濃度から地表での大規模排出源における排出量の定量推定が可能であることが確認された。将来、衛星観測のデータがさらに蓄積され、高精度化が進めば、国レベル・地域レベルの収支解析を行う上で衛星観測のデータがさらに重要な役割を果たすことが見込まれる。



図(1)-11 全球(a)、北半球(b)、ユーラシア(c)、東アジア(d)、北アメリカ(e)における、領域別のインベントリ等による人為起源CO<sub>2</sub>濃度上昇量とGOSATにより算出された人為起源CO<sub>2</sub>濃度上昇量。インベントリ等による人為起源CO<sub>2</sub>濃度を0.2ppmごとに階級分けし、各階級におけるGOSATの人為起源CO<sub>2</sub>濃度の平均値とGOSATデータのばらつきの範囲(誤差)を示す。

### 3) 陸域生態系モデル (VISIT) に基づく解析データ、及び陸域観測点のデータ提供

陸域生態系モデルVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases: Ito and Inatomi, 2012a<sup>10)</sup>, 2012b<sup>11)</sup> ほか) は、陸域生態系における炭素の循環、および大気との間でのCO<sub>2</sub>交換を評価することのできるモデルであり、生態系内では炭素の貯留と移動をコンパートメントとフローに概念化して、光合成・呼吸などの生態系のはたらきやダイナミクスを表現している。近年ではCO<sub>2</sub>以外の微量ガスの交換プロセス (メタンや亜酸化窒素など) も導入し、大気に対する陸域生態系の役割を包括的に解析することが可能になっている。また、VISITは全球規模の陸域モデルであるが、過去の研究においては、地点用に別途開発されたモデルを使って時間ステップを短縮のうえ、地上における複数のCO<sub>2</sub>フラックス観測点の現場データと比較検証することでさまざまな改良が図られている。本サブテーマにおいては、VISITモデルにより1901年～2012年におけるアジアのCO<sub>2</sub>収支を高い空間分解能 (0.25°) で算出し、結果をサブテーマ (4) のAsia-MIP に提供した。また、サブテーマ (3) によって開発された新たなデータ同化システムは特に高い時間分解能の先験値データを必要とすることから、1時間ステップでCO<sub>2</sub>収支を算出できるように改良したVISITを用いてCO<sub>2</sub>収支を計算し提供した。

また、インバージョン解析への利用に十分な精度を持つCO<sub>2</sub>濃度、及びCO<sub>2</sub>フラックスデータについては、国内外機関がアジアで実施中の観測データを公開促進する取組を行い、本研究開始以降、9サイト (25サイト・年) のフラックス観測点のデータを新たに公開し、他のサブテーマにて利用可能なものとした (日本3サイト (9サイト・年)、中国5サイト (13サイト・年)、台湾1サイト (3サイト・年))。

#### (3) 統合的観測解析システムの運用に向けた準備

本研究開発課題全体により開発された統合的観測解析システムを、本研究期間終了後もオペレーショナルに利用可能なものとするため、環境省-国立環境研究所-宇宙航空研究開発機構が推進する温室効果ガス観測技術衛星-2号 (GOSAT-2) のフラックス (L4) プロダクトを作成する解析システムとして、サブテーマ (3) により開発された新たなインバージョンシステムを利用する準備を開始した。具体的には、サブテーマ (3) によって開発された、大気輸送モデルNICAM-TM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model-based Transport Model) をベースとする4次元変分法を用いたCO<sub>2</sub>インバージョンシステムを、GOSATシリーズのデータ解析システムに用いることとなり、現在、GOSAT-2 データ解析システムの構築に向けて国立環境研究所のスーパーコンピュータシステムに移植され、動作テストが進められている。これにより、大量の観測データを活用した高い時間・空間解像度の地表CO<sub>2</sub>フラックス推定を、オペレーショナルに実施することが可能となる見込みである。

また、最新の解析システムをもってしても、全球及びアジア太平洋の炭素収支を国別・地域別に評価する上で、科学的には未だ不確実性の幅が大きいのが現状である。このため、本研究開発課題終了後も、複数の手法に基づく炭素収支の評価精度向上と不確実性評価の取組を、統合的観測解析システムの機能として、本課題の参画機関と中心とする国内外の研究機関が連携して実施できるよう、以下の取組を行った。第一に、GEO (Group on Earth Observations; 地球観測に関する政府間会合) の活動として、2017年以降の作業計画「GEO Work Programme 2017-2019」に承認された炭素および温室効果ガス分野の国際的取組「GEO Carbon and GHG Initiative」に、日

本からの取組として位置づけた（Tokyo Statement 2017 に記載）。第二に、学术界に対して、日本学術会議 第23期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2017）に「地球環境変化の早期検出に向けた温暖化等関連物質の統合型観測・評価システムの構築」と題する研究計画を国立環境研究所から提案し、これが「特に速やかに推進すべき」とされる「重点大型研究計画」の一つに選ばれた。この計画の中で「全球およびアジア太平洋における温暖化等関連物質の排出量評価、変化の早期検出、各種削減策の効果の評価」を、国立環境研究所、海洋研究開発機構、気象庁気象研究所が実施すると位置付けた。以上の取組は、当推進費の研究課題の計画範囲を超えた活動であるが、当研究課題全体の成果をもって働きかけ、実現した活動であるのでここに記載した。

以上の結果、「パリ協定」発効により今後各国が取り組むCO<sub>2</sub>排出削減策の効果、本研究開発課題全体の成果である、観測データを最大限に活用した統合的観測解析システムによる科学的手法に基づき、将来にわたり、その不確実性の情報を含めて評価することが可能になったといえることができる。

## 5. 本研究により得られた成果

### （1）科学的意義

温室効果ガス観測において世界的にも深刻な空白域であるアジア太平洋を対象に、地表付近での農耕地を含む植生によるCO<sub>2</sub>吸収や森林火災等による大規模放出源の情報を良好に含むCO<sub>2</sub>濃度データを、特にアジア太平洋上空において大きく充実させた。特に、東南アジア地域はこれまでは非常に限られた観測例があるのみで、地表・上空を含めてCO<sub>2</sub>濃度の変動は未解明の部分が大きかった。本研究を通して取得した充実したデータによって、バンコックやシンガポール、ジャカルタ上空を含むCO<sub>2</sub>濃度の季節変動の特性を初めて明瞭に示すことができた。これはトップダウン法によるアジア太平洋の炭素収支の解明に向けた着実な進展である。

インド・デリー周辺地域において、北半球として特異なCO<sub>2</sub>の季節変動を見出した。これまではインド地域での系統的な観測がなかったため、本研究によって初めて明らかになった季節変動の特性である。また、航空機による鉛直分布データが取得できたことによって、このCO<sub>2</sub>変動が大気混合層内に限定された地域スケールの現象であることも明らかとなった。このように、民間旅客機を利用した観測データが地域スケールの地表フラックスに関する知見を得る非常に有用な手段であることを示した。また、冬期栽培の農作物がデリー周辺地域の炭素収支に無視できない影響を及ぼしていることを示したが、地球規模あるいは南アジアの炭素循環研究の中で、このような農業の影響はまだ十分に考慮されておらず（Patra et al. 2013<sup>12)</sup>）、今後は本研究の知見も活かされながら検討が進むと考えられる。

当該研究分野においては、これまでも、個人単位の研究としては国際的に高いレベルの研究が蓄積されてきた。本研究開発課題全体で取り組んだ大気輸送モデルの開発やインバージョン技術高度化の分野でも、国際的な大気輸送モデル相互比較計画（TransCom）に、国内機関から常に複数の研究者が参加してきた。観測分野においても、全球特にアジア太平洋の炭素循環に関しては、大気・海洋・陸域をカバーする世界で他に類を見ない高密度かつ長期のデータを蓄積している。しかし、これまでこれらの複数の研究機関が協力し、共同で一つの解析システムを開発し、

現存する多様な観測プラットフォームのデータをそこに統合し、炭素循環変動把握を将来にわたりオペレーショナルに実施しようとする総合的な取組は計画されてこなかった。GOSATのデータ配信が順調に行われ、衛星による温室効果ガスのデータ解析に世界中の研究機関が着手できるようになった今、米国・欧州においても本研究と同様の研究計画が既に実行に移されていることから、本研究開発課題全体が、サブテーマ間で強く連携して統合的観測解析システムを構築し、それを本研究開発課題終了後も継続するための道筋をつけたことは、将来にわたり日本の研究機関が当該分野の研究を先導していく上で大きな進展となった。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

- 1) 文科省第6期地球観測推進部会（第8回）において、本研究の成果の一つである地上・航空機・衛星観測等に基づく温室効果ガス観測・解析の取組について委員に説明し、地球観測に関する各省庁の取組に関する資料作成に貢献した（平成28年12月8日、三枝）。
- 2) GEO（地球観測に関する政府間会合）の活動推進の一環として、第9回GEOSSアジア太平洋シンポジウム（東京、平成29年1月11～13日）にて「GEO炭素及び温室効果ガスイニシアティブ」分科会を共同議長として開催し、本研究開発課題全体の成果をアジア太平洋の地球観測の重要な成果として普及した（三枝）。また、同シンポジウムにおいて採択されたTokyo Statement 2017（東京宣言2017）の策定に参画し、「特にアジア太平洋地域においては、とりわけUNFCCCやIPCC国別温室効果ガスインベントリ報告の枠組において、現場観測（航空機観測や船舶観測を含む）と衛星観測による炭素循環と温室効果ガスに関連した観測の使用を提唱する。また、地球観測データの利用法に関するガイダンスを、バイアスと不確実性のよりわかりやすい説明を含めユーザーに提供することの重要性を強調する（和訳）」等の内容が盛り込まれた。日本におけるこうした温室効果ガス観測分野の最近の取組は、文部科学省によって第39回GEO執行委員会（スイス、2017年3月9～10日）にて報告された。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 1) 国際的に有望なCO<sub>2</sub>観測であるGOSATやCONTRAILと先進的なモデル・同化技術を有機的に融合させる道筋をつけることができた。この成果に基づき、我が国が有する観測技術とモデル開発技術の両者の優位性を活かした、国際的にリードできる炭素循環解析システムの運用が可能になった。成果の一部については、国立環境研究所が担うGOSATシリーズ解析システムの開発に応用され、将来の運用に向けた準備が進められている。
- 2) 本研究の成果は、今後発行されるIPCC各特別報告書、第6次評価報告書(AR6)、IPCC国別温室効果ガス排出インベントリガイドラインの改訂等に対し、重要な科学的インプットを行うことが見込まれる。特に、2019年インベントリガイドライン改訂に向けて、本サブテーマ分担者であるマクシュートフは、Volume 1 Chapter 6 “Quality Assurance / Quality Control verification”のLead Author（主執筆者）として既に任命を受けており、本研究の成果を生かして科学的内容に責任のある役割を果たす予定である。また、サブテーマ代表者である三枝は、IPCC特別報告書Climate Change and Landのスコーピング会合に参加し



(平成 29 年 2 月 13~16 日)、特に Chapter 2: Land-Climate Interactions のアウトライン策定に、本研究の成果を生かして貢献した。

- 3) UNFCCC の補助機関である「科学・技術上の助言に関する補助機関(SBSTA)」の Research Dialog に参加し(マクシュートフ)、本研究の成果を含め当該分野の研究の進捗を報告し、科学技術的知見の普及に貢献した。(平成 29 年 5 月 10 日)

## 6. 国際共同研究等の状況

- 1) 海洋研究開発機構・国立環境研究所共催 ” International workshop on Asian Greenhouse Gases ” (アジア温室効果ガス国際ワークショップ、平成27年3月2~4日、横浜) を特にサブテーマ(2)と協力して開催し、アジアのCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>などの温室効果気体収支の精緻化に関し、本課題の成果を多く含む最新の結果とその論文化について具体的な議論を行った。参加者は、当該地域を対象に研究を行っている国内外の研究者17名(P. Canadell・連邦科学産業研究機構・オーストラリア、B. Poulter・モンタナ州立大・米国、R. Thompson・ノルウェー大気研究所・ノルウェー、P. Ciais(スカイプ参加)・気候環境科学研究所、フランス、他)。
- 2) 気候変動に対するシベリアの応答に関する国際研究プロジェクトを推進し、その成果を米国地球物理学会のニュースレターに活動を紹介した(” Earth System Studies in Northern Eurasia” Eos Trans. AGU, 95(16), 133, 2014)。(P. Groisman・米国海洋大気庁、S. Gulev・シルシヨフ海洋学研究所・ロシア、他)(マクシュートフ)
- 3) 陸域生態系モデルの国際相互比較研究への参加。陸域生態系モデルVISITを用いて、本課題に関連するアジア地域のモデル比較(Asia-MIP)に加え、米国等が先導するマルチ空間スケールでのモデル相互比較(MsTMIP)、地球規模の温暖化影響評価に関するモデル相互比較(ISI-MIP)等に参加し、国際コミュニティと連携して全球及びアジアにおけるCO<sub>2</sub>収支の高精度化に取り組んだ。(伊藤)
- 4) GEO(Group on Earth Observations; 地球観測に関する政府間会合)活動の推進。本研究により実現する地球規模での温室効果ガス収支のオペレーショナルな評価は、GEOにおける2017年以降の作業計画「GEO Work Programme 2017-2019」に承認された炭素および温室効果ガス分野の国際的取組「GEO Carbon and GHG Initiative」(日本からは国立環境研究所、海洋研究開発機構、気象庁、宇宙航空研究開発機構等が参画)における中核的取組である。
- 5) AsiaFluxの推進。アジア陸域における温室効果ガスフラックス観測の推進を世界規模ネットワークFLUXNETの地域活動として実施。現在、6カ国・18名の運営委員、アジア諸国の観測サイト(登録数101サイト)と連携し、観測研究の推進に取り組んでいる。特に、国立環境研究所共催の第12回AsiaFluxワークショップ「フラックスモニタリングから国内及び国際的気候変動イニシアティブへの連携」(平成26年8月18日-23日、フィリピン・ロスバニョス、会議全体の参加者は18カ国、約110名)、及び第13回AsiaFluxワークショップ(平成27年11月22-29日、インド・プネー、会議全体の参加者は12カ国、約150名)において、他サブテーマ協力して複数のセッションを開催、成果を普及した。

## 7. 研究成果の発表状況

## (1) 誌上発表

## &lt;論文(査読あり)&gt;

- 1) T. Umezawa, Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, and H. Matsueda: *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070939 (2016)  
 “Winter crop CO<sub>2</sub> uptake inferred from CONTRAIL measurements over Delhi, India”
- 2) R. Janardanan, S. Maksyutov, T. Oda, M. Saito, J. W. Kaiser, A. Ganshin, A. Stohl, T. Matsunaga, Y. Yoshida, and T. Yokota: *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL067843 (2016)  
 “Comparing GOSAT observations of localized CO<sub>2</sub> enhancements by large emitters with inventory-based estimates”
- 3) L. Calle, J. G. Canadell, P. K. Patra, P. Ciais, K. Ichii, H. Tian, M. Kondo, S. Piao, A. Arneth, A. B. Harper, A. Ito, E. Kato, C. Koven, S. Sitch, N. Vivoy, A. Wiltshire, S. Zaehle, and B. Poulter: *Env. Res. Lett.*, 11, 074011, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074011 (2016)  
 “Regional carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980–2009”
- 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. Ravi Kumar, and T. Nakazawa, *J. Meteor. Soc. Japan*, 94(1), 91-113, doi:10.2151/jmsj.2016-006 (2016)  
 “Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012)”
- 5) Y. Niwa, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan, and N. Saigusa: *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157-1174 (2017)  
 “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”
- 6) Y. Niwa, Y., Y. Fujii, Y. Sawa, Y. Iida, A. Ito, M. Satoh, R. Imasu, K. Tsuboi, H. Matsueda, and N. Saigusa: *Geosci. Model Dev.*, doi:10.5194/gmd-2016-232 (2017) (印刷中)  
 “A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0): 2. Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion”
- 7) K. Ichii, M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, Ma. C. Alberto, J. Ard, 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: *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 122, doi: 10.1002/2016JG003640 (2017)  
 “New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a

standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression”

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) N. Saigusa, T. Hirano, J. Hong, SG. Li, and S. Tanaka: AsiaFlux Newsletter, 38, 24-25 (2015)  
“Report on AsiaFlux database, policy and management working group”
- 2) 町田敏暢:河村公隆（代表）編，低温環境の科学事典，朝倉書店，52-53（2016）  
“2-9 シベリア上空の温室効果ガス”
- 3) 町田敏暢，村山昌平，森本真司，松枝秀和，青木周司，藤谷徳之助:天気，63（2），131-136（2016）  
“2015年度秋季大会スペシャルセッション「温室効果気体研究の観測・測定技術の進展による新たな展開」報告”
- 4) 岩田拓記、沖元洋介、佐伯田鶴、和田龍一、平田竜一：生物と気象、16:D1-5（2016）  
“AsiaFlux Workshop 2015: Challenges and Significance of Ecosystem Research in Asia to Better Understand Climate Change 参加報告”

#### （2）口頭発表（学会等）

- 1) R. Janardanan, A. Ganshin, Y. Niwa, R. Zhuravlev, T. Oda, M. Saito, A. Ito, V. Valsala, M. Sawada, M. Satoh, and S. Maksyutov: Transcom Workshop, Groningen, June 25, (2014)  
“Atmospheric CO<sub>2</sub> transport simulation using high resolution NICAM meteorology and flux maps”
- 2) S. Maksyutov, H. Takagi, H.S. Kim, M. Ishizawa, T. Shirai, M. Saito, A. Ito, D.A. Belikov, R. Janardanan, T. Oda, V. Valsala, R. Zhuravlev, A. Ganshin, Y. Yoshida, I. Morino and T. Yokota: Transcom Workshop, Groningen, June 25, (2014)  
“Recent developments in inverse modeling of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes using GOSAT observations in NIES”
- 3) N. Saigusa: iLEAPS-ASIA Initiative Meeting, Seoul, Korea, (2014)  
“Cross-disciplinary research collaboration and training during integrated long-term ecosystem-atmosphere greenhouse gas observations”（招待講演）
- 4) S. Maksyutov, T. Oda, A. Ito, M. Saito, D. Belikov, R. Janardanan, R. Zhuravlev, A. Ganshin, V. Valsala, Y. Yoshida and T. Yokota: MSJ fall Meeting, Fukuoka, Oct 22, (2014)  
“Inverse model for estimation of the surface CO<sub>2</sub> fluxes at grid scale resolution with GOSAT data”
- 5) 梅澤拓, A. K. Baker, C. A. M. Brenninkmeijer, A. Zahn, D. Oram, P. van Velthoven: 第4回生物起源微量ガスワークショップ、茨城県つくば市、11月20-21日（2014）  
「塩化メチルのグローバル分布と熱帯空気塊トレーサーとしての利用」

- 6) T. Machida, Y. Sawa, Y. Niwa and H. Matsueda: 2nd Annual Meeting of IGAS, Geneva, Switzerland (2014)  
 “Present status of the CONTRAIL project”
- 7) S. Maksyutov, A. Shvidenko, and D. Schepaschenko: AGU Fall meeting, San Francisco, (2014)  
 “Inventory-based assessment of the net ecosystem carbon balance of Russian forests in 2010 for comparison to Top-down estimates” (招待講演)
- 8) S. Maksyutov, T. Oda, A. Ito, J. W. Kaiser, D.A. Belikov, R. Janardanan, A. Yaremchuk, A. Ganshin, R. Zhuravlev, and V. Valsala: AGU Fall meeting, San Francisco, (2014)  
 “Development of the inverse model for estimation of the surface CO<sub>2</sub> fluxes at grid scale and high resolution with GOSAT data”
- 9) T. Umezawa, A.K. Baker, D. Oram, C. Sauvage, D. O’Sullivan, A. Rauthe-Schöch, S.A. Montzka, A. Zahn, and C.A.M. Brenninkmeijer: 2014 AGU Fall Meeting, A23K-3404, San Francisco, California, USA, 15-19 December (2014)  
 “Methyl chloride in the UT/LS observed by the CARIBIC: Global distribution, Asian summer monsoon outflow, and use as a tracer for tropical air”
- 10) R. Janardanan, J. W. Kaiser, S. Maksyutov, A. Ito, A. Ganshin, R. Zhuravlev, and Y. Yoshida: AGU Fall meeting, San Francisco, (2014)  
 “High resolution CO<sub>2</sub> simulation for detecting emission hotspots signal in GOSAT XCO<sub>2</sub> data”
- 11) D. A. Belikov, S. Maksyutov, F. Chevallier, T. Kaminski, A. Ganshin, S, and Blessing: EGU-2014, Vienna, Austria, 27 April - 02 May (2014)  
 “Development of CO<sub>2</sub> inversion system based on the adjoint of the global coupled transport model”
- 12) M. Ishizawa, K. Mabuchi, T. Shirai, M. Inoue, I. Morino, Y. Yoshida, R. Zhuravlev, A. Ganshin, D. Belikov, M. Saito, T. Oda, V. Valsala, O. Uchino, T. Yokota S. Maksyutov: European Geosciences Union General Assembly 2015. 12-17 April (2015)  
 “Inter-annual variability in CO<sub>2</sub> exchange in Northern Eurasia inferred from GOSAT-XCO<sub>2</sub>”
- 13) S. Maksyutov, T. Oda, R. Janardanan, A. Yaremchuk, J. W. Kaiser, A. Ito, D. Belikov, R. Zhuravlev, A. Ganshin, V. Valsala: European Geosciences Union General Assembly (2015)  
 “A global inverse model for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes at a 0.1x0.1 degree resolution”
- 14) 三枝信子: 日本地球惑星科学連合2015年大会, U06-07, May 24. (2015) (招待講演)  
 「気候変動下の陸域生態系応答検出に関するシームレスな科学の展開」
- 15) N. Saigusa, T. Machida, P. K. Patra, Y. Niwa, K. Ichii, T. Matsunaga, Y. Yoshida, M. Saito, Y. Sasano: JpGU 2015, Makuhari, ACG09-33, May 28. (2015)

- “Monitoring and detection of carbon cycle change using an integrated observation, modeling and analysis system”
- 16) S. Maksyutov, T. Oda, R. Janardanan, A. Yaremchuk, J. W. Kaiser, A. Ito, D. Belikov, R. Zhuravlev, A. Ganshin, V. Valsala: Japan Geoscience Union 2015, 24-28 May (2015)
- “On the optimal design for a global high-resolution surface CO<sub>2</sub> flux inversion model”
- 17) T. Umezawa, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, and Y. Niwa: The 43rd NOAA ESRL Global Monitoring Annual Conference, Boulder, Colorado, 19-20 May (2015)
- “Climatology of spatiotemporal variations of tropospheric CO<sub>2</sub> observed by CONTRAIL-CME”
- 18) T. Umezawa, T., A. K. Baker, C. A. M. Brenninkmeijer, A. Zahn, D. Oram and P. F. J van Velthoven: The 43rd NOAA ESRL Global Monitoring Annual Conference, P-31, Boulder, Colorado, 19-20 May (2015)
- “Methyl chloride as a tracer of tropical tropospheric air in the lowermost stratosphere inferred from CARIBIC passenger aircraft measurements”
- 19) 梅澤拓, A. K. Baker, C. A. M. Brenninkmeijer, A. Zahn, D. Oram, P. van Velthoven: 日本気象学会2015年度春季大会, B204, 茨城県つくば市, 2015年5月21-24日 (2015)
- 「CARIBICで観測された下部成層圏での塩化メチル濃度の変動」
- 20) 梅澤拓, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和, 丹羽洋介: 日本地球惑星科学連合2015年大会, AAAS21-P24, 千葉県千葉市, 2015年5月24-28日 (2015)
- 「CONTRAIL-CMEで観測された対流圏CO<sub>2</sub>の平均的時空間変動」
- 21) R. Janardanan, T. Oda, S. Maksyutov, J. Kaiser, M. Saito, A. Ganshin, Y. Yoshida, T. Yokota: 12th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, August (2015)
- “Signature of Fossil Fuel Emission of CO<sub>2</sub> from Large Point Sources in GOSAT XCO<sub>2</sub> Data”
- 22) N. Saigusa: The 8th GEOSS Asia-Pacific Symposium. Beijing, China, Sep. 10. (2015)
- “Integrated observation and analysis system for early detection of carbon cycle change globally and in the Asia-Pacific region”
- 23) T. Umezawa, C. A. M. Brenninkmeijer, T. Röckmann, S. Tyler, S. Aoki and S. Morimoto: InGOS International Conference, P-22, Utrecht, the Netherlands, 21-24 September (2015)
- “Methane isotope measurements of CARIBIC air samples and preliminary inter-laboratory comparisons”
- 24) T. Machida, M. Sasakawa, T. Umezawa, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, S. Murayama, S. Morimoto, and S. Aoki: InGOS International Conference, Utrecht, the Netherlands, 21-24 September (2015)
- “Observations of atmospheric CH<sub>4</sub> using aircraft platforms”
- 25) N. Saigusa: International Seminar on “Environmental Management and Development in

- Indonesia” Serpong, Indonesia, Oct. 8. (2015)  
 “Integrating ground observation, satellite remote sensing, and terrestrial ecosystem model for future carbon monitoring system”
- 26) N. Saigusa: International Conference of Low Carbon ASIA in conjunction with The 4th Annual Meeting of the LoCARNet, Jphor Bahru, Malaysia, Oct. 12. (2015)  
 “Monitoring and detection of carbon cycle change using an integrated observation modeling and analysis system”
- 27) T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Umezawa, H. Eto, S. Morimoto and S. Aoki: IGAS Annual Meeting, Toulouse, France, November (2015)  
 “Comparisons of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases sampled by three different methods in the CONTRAIL project”
- 28) T. Machida, M. Sasakawa, N. Vinnichenko, M. Arshinov, B. Belan, N. Fedoseev, S. Mitin, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, S. Murayama, S. Morimoto and S. Aoki: Moscow, Russia, November (2015)  
 “Aircraft observation of atmospheric greenhouse gases over Siberia, Russia/Japan Joint Workshop on Environmental Investigations in West Siberia and the Arctic using a synergy of Russian Airplane-Laboratory and Japanese Satellites”
- 29) 梅澤拓, 菅原敏, 川村賢二, 杉山貴規, 森本真司, 青木周司, 中澤高清: 第6回極域科学シンポジウム, IAp17, 東京都立川市, 2015年11月16-19日 (2015)  
 「過去250年間の大気中メタンの同位体比変動の復元: フィルン空気・アイスコア測定とフィルン空気輸送モデルの適用」
- 30) M. Ishizawa, T. Shirai, Y. Terao, H. Mukai, S. Nomura, M. Mohamad, M. Jahaya, M. Inoue, I. Morino, Y. Yoshida, O. Uchino, R. Zhuravlev, A. Ganshin, S. Maksyutov: AGU Fall Meeting (2015)  
 “Carbon Flux Estimation in Southeast Asia using a Eulerian-Lagrangian Coupled Inversion System and Observational Data from Multiple Platforms”
- 31) S. Maksyutov, Sedykh V., Kuzmenko E., Farber S., Kalinicheva S., Fedorov A., Schepaschenko D.: EGU General Assembly 2016, EGU2016-13348, Vienna, Austria, 17-22 April (2016)  
 “Current state of forest type mapping with Landsat data in Siberia”
- 32) T. Machida, T. Umezawa, Y. Sawa, Y. Niwa, and H. Matsueda: EGU General Assembly 2016, EGU2016-13348, Vienna, Austria, 17-22 April (2016)  
 “The recent changes and topics in CONTRAIL project”
- 33) T. Umezawa, H. Matsueda, T. Machida, Y. Sawa, and Y. Niwa: 日本地球惑星科学連合2016年大会, AAS01-06, 千葉県千葉市, 2016年5月22-26日 (2016)  
 “Fine-scale CO<sub>2</sub> variations over the Tokyo megacity observed by CONTRAIL”
- 34) 梅澤拓, 丹羽洋介, 澤庸介, 町田敏暢, 松枝秀和: 日本地球惑星科学連合2016年大会, AAS12-06, 千葉県千葉市, 2016年5月22-26日 (2016)

「デリー上空でのCONTRAIL観測から明らかになった冬期農作物によるCO<sub>2</sub>吸収」

- 35) Saigusa N., Machida T., Patra P., Niwa Y., Ichii K.: 日本地球惑星科学連合2016年大会, AAS01-P10 (2016)  
 “Achievements and Future Visions: Monitoring Carbon Cycle Change using an Integrated Observation, Modeling and Analysis System”
- 36) Saigusa N.: Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia, Ulaanbaatar, Mongolia. 2016. 7. 28 (2016)  
 “Terrestrial monitoring and GHG inventories”
- 37) Ishizawa M., Shirai T., Maksyutov S., Inoue M., Morino I., Nakatsuru T., Yoshida Y., Uchino O., Mabuchi K.: The 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2016)  
 “Analysis on Uncertainties in Regional CO<sub>2</sub> inversions from GOSAT XCO<sub>2</sub> Retrievals”
- 38) Maksyutov S., Takagi H., Kim H., Janardanan R., Mabuchi K., Ishizawa M., Shirai T., Oda, T., Saito M., Ito A., Belikov D., Valsala V., Kaiser J., Morino I., Yoshida Y., Yokota T.: 3rd Carbon from Space Workshop (2016)  
 “Contribution of the GOSAT observations to understanding the natural and anthropogenic fluxes of carbon dioxide and methane in 2009-2012”
- 39) Umezawa, T., T. Machida, Y. Niwa, Y. Sawa, H. Matsueda, and L. Zhou: 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, AS13-A023, Beijing, China, 31 July-5 August (2016)  
 “Structure of the Asian summer monsoon anticyclone observed by CONTRAIL commercial airliner trace gas measurements,”
- 40) Umezawa, T., Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, and H. Matsueda: 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, BG08-007, Beijing, China, 31 July-5 August (2016)  
 “CONTRAIL commercial airliner CO<sub>2</sub> measurements to detect regional/local fluxes”
- 41) 梅澤拓, 丹羽洋介, 町田敏暢, 澤庸介, 松枝秀和: 日本気象学会2016年度秋季大会, 愛知県名古屋市, 2016年10月26-28日 (2016)  
 「CONTRAILで観測されたアジア上空のCO<sub>2</sub>変動とアジアンモンスーンとの関連」
- 42) Shirai T: Japanese-American Kavli Frontiers of Science Symposium, Agenda Book, 95, Irvine, December (2016)  
 “A decadal estimate of global carbon dioxide flux distribution by the inverse modeling using a global Eulerian-Lagrangian coupled atmospheric model”
- 43) Ishizawa M., Shirai T., Maksyutov S., Yoshida Y., Morino I., Inoue M., Nakatsuru T., Uchino O., Mabuchi K.: 2016 AGU Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 12-16 December (2016)  
 “Analysis of uncertainties in GOSAT-inferred regional CO<sub>2</sub> fluxes”
- 44) Umezawa, T., Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida and H. Matsueda: 2016 AGU Fall Meeting, B33C-0608, San Francisco, California, USA, 12-16 December (2016)  
 “Winter crop CO<sub>2</sub> uptake inferred from CONTRAIL CO<sub>2</sub> measurements over Delhi,

India”

### (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) 国立環境研究所主催公開シンポジウムにおける講演「大気中温室効果ガスの今ー止まらない濃度上昇ー」（平成 26 年 6 月 13 日、東京会場（メルパルク東京、参加者 690 名）、及び 6 月 27 日、奈良会場（奈良県公会堂、411 名）において、民間航空機を利用した温室効果ガスの観測成果を含め、増え続ける温室効果ガス濃度の現状について、SSH の高校生ら一般市民に向けて説明。講演の様子は国立環境研究所動画チャンネルならびに YouTube によって発信。動画チャンネル再生回数 445 回(2 年 8 ヶ月))
- 2) 国立環境研究所一般公開における観測成果の展示（民間航空機を利用した観測の成果を中心に、大気中二酸化炭素濃度の変動について一般来場者に説明）（平成 26 年 7 月 19 日、所全体参加人数 4144 名、平成 27 年 4 月 18 日、所全体参加人数 595 名、平成 27 年 7 月 18 日、所全体参加人数 4433 名、平成 28 年 4 月 23 日、所全体参加人数 654 名、平成 28 年 7 月 23 日、所全体参加人数 5250 名）
- 3) 日本動物学会関東支部公開講演会における講演「みどりの地球とわたしたちの未来」（平成 26 年 8 月 25 日、中央大学水道橋キャンパスにおいて、約 120 名の参加者（高校の教師や大学の学部学生など）に向けて、地球温暖化と炭素循環に関する講演と対話を実施）
- 4) 国立環境研究所富士北麓フラックス観測サイトにおける地上観測研修「富士北麓 500 m 地上検証ワークショップ」における指導（平成 26 年 8 月 27 日-29 日、富士吉田市、AsiaFlux サイトの一つである富士北麓フラックス観測サイトにおいて、筑波大・千葉大・宇宙航空研究開発機構等と共同で、学部学生・大学院生・専門外の研究者・技術者らに、森林炭素吸収・炭素蓄積量等に関する調査の意義を学び実地体験する機会を提供。参加者約 30 名）
- 5) 北海道陸別町立陸別小学校、陸別中学校における出前授業（平成 26 年 11 月 14 日、陸別小学校 5 学年ならびに陸別中学校 1 学年の生徒に対して、民間航空機を利用した温室効果ガスの観測を紹介）
- 6) 国立環境研究所富士北麓フラックス観測サイトにおける地上観測手法の研修「富士北麓 500 m 地上検証ワークショップ」の指導（平成 27 年 9 月 19～22 日、富士吉田市、AsiaFlux サイトの一つである富士北麓フラックス観測サイトにおいて、筑波大・千葉大・宇宙航空研究開発機構等と共同で、学部学生・大学院生・専門外の研究者・技術者らに、森林炭素吸収・炭素蓄積量等に関する調査の意義を学び実地体験する機会を提供。参加者約 30 名）
- 7) 北海道陸別町立陸別中学校において出前授業を実施（平成 27 年 11 月 28 日）（陸別中学校 3 学年の生徒に対して、民間航空機を利用した温室効果ガスの観測を紹介）
- 8) 日本地球惑星連合大会 2016 「全球炭素循環観測・解析」国際セッション開催（平成 28 年 5 月 24 日、参加者約 60 名）
- 9) 国立環境研究所主催公開シンポジウムにおける講演「地球をめぐる温室効果ガス」（平成 28 年 6 月 17 日、京都会場（ロームシアター京都、参加者 238 名）、及び 6 月 24 日、東京会場（東京メルパルクホール、488 名）において、一般市民に向けて地球規模温室効果ガス吸排出量のモニタリングについて研究の成果を説明。国立環境研究所動画チャンネルならびに



YouTube によって発信。動画チャンネル再生回数 219 回(9 か月))

- 10) 環境省主催シンポジウムにおける講演(平成 28 年 9 月 9 日、コクヨホール(東京)で開催された「地球を見守る宇宙の眼～温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」の今とこれから～」にて、「地球をめぐる温室効果ガス—全球規模での監視の必要性—」と題して、一般市民に向けて地球規模温室効果ガス吸排出量のモニタリングについて研究の成果を説明。ニコニコ動画、Abema TV、Ustream などで配信。

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 記者発表「大気化学輸送モデルを用いた新たな手法により地域別のメタン放出量を推定～熱帯域、東アジアの放出量に従来推定と異なる結果～」(2016年2月1日、海洋研究開発機構・国立環境研究所ウェブサイト及び筑波研究学園都市記者会、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社同時配布)
- 2) 記者発表「いぶき」(GOSAT)観測データによる大都市等の人為起源二酸化炭素濃度の推定結果について(2016年9月1日、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ同時配付)
- 3) 記者発表「インド・デリー周辺の冬小麦が都市排出を上回る二酸化炭素を吸収～民間航空機観測(CONTRAIL)から明らかになった新たな炭素吸収～(お知らせ)」(2016年12月1日、国立環境研究所・気象研究所ウェブサイト及び筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、気象庁記者クラブ同時配付)
- 4) 環境新聞掲載「小麦がCO<sub>2</sub>を大量に吸収」2016年12月14日
- 5) 毎日新聞掲載「二毛作の小麦栽培 冬場のCO<sub>2</sub>吸収」2016年12月28日
- 6) 記者発表「東アジアの炭素収支推定に決着：東アジア陸域生態系によるCO<sub>2</sub>吸収は進んでいない—中国からの人為起源排出量のバイアス影響を新たな手法で評価—」(2017年5月15日発表予定、海洋研究開発機構・国立環境研究所ウェブサイト及び環境省記者クラブ、筑波研究学園都市記者会、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社同時配布)

#### (6) その他

特に記載すべき内容はない。

### 8. 引用文献

- 1) C. Sweeney, et al.: J. Geophys. Res. Atmos., 120, 5155-5190, doi:10.1002/2014JD022591 (2015)  
“Seasonal climatology of CO<sub>2</sub> across North America from aircraft measurements in the NOAA/ESRL Global Greenhouse Gas Reference Network”
- 2) T. Umezawa, Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, and H. Matsueda: Geophys. Res. Lett., 43, doi:10.1002/2016GL070939 (2016)

- “Winter crop CO<sub>2</sub> uptake inferred from CONTRAIL measurements over Delhi, India”
- 3) P. K. Patra, Y. Niwa, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa: *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 4163-4175, doi:10.5194/acp-11-4163-2011 (2011)
- “Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO<sub>2</sub> measurements”
- 4) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, R. Imasu, and M. Satoh: *J. Geophys. Res.*, 117, D11303, doi:10.1029/2012JD017474 (2012)
- “Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes using passenger aircraft based measurements”
- 5) D. J. Seidel, C. O. Ao, and K. Li: *J. Geophys. Res.*, 115, D16113, doi:10.1029/2009JD013680 (2010)
- “Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis”
- 6) T. Hirano, Segah, H., Harada, T., Limin, S., June, T., Hirata R, and Osaki M.: *Global Change Biol* 13, 412-425 (2007)
- “Carbon dioxide balance of a tropical peat swamp forest in Kalimantan, Indonesia”
- 7) T. Hirano, Segah, H., Kusin, K., Limin, S., Takahashi, H. and Osaki M.: *Global Change Biol* 18, 3410-3422 (2012)
- “Effects of disturbances on the carbon balance of tropical peat swamp forests”
- 8) T. Shirai, Ishizawa M., Zhuravlev R., Ganshin A., Belikov D., Saito M., Oda T., Valsala V., Gomez-Pelaez A. J., Langenfelds R. Maksyutov S.: *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 69, 1291158 (2017)
- “A decadal inversion of CO<sub>2</sub> using the Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model (GELCA): sensitivity to the ground-based observation network”
- 9) R. Janardanan, S. Maksyutov, T. Oda, M. Saito, J. W. Kaiser, A. Ganshin, A. Stohl, T. Matsunaga, Y. Yoshida, and T. Yokota: *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL067843 (2016)
- “Comparing GOSAT observations of localized CO<sub>2</sub> enhancements by large emitters with inventory-based estimates”
- 10) A. Ito and M. Inatomi: *Biogeosciences*, 9, 759-773, doi:10.5194/bg-9-759-2012, (2012a)
- “Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty”
- 11) A. Ito and Inatomi M: *J. Hydrometeorology*, 13(2), 681-694, (2012b)
- “Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles”

- 12) P. K. Patra, J. G. Canadell, R. A. Houghton, S. L. Piao, N.-H. Oh, P. Ciais, K. R. Manjunath, A. Chhabra, T. Wang, T. Bhattacharya, P. Bousquet, J. Hartman, A. Ito, E. Mayorga, Y. Niwa, P. A. Raymond, V. V. S. S. Sarma, and R. Lasco:  
Biogeosciences, 10, 513-527, doi:10.5194/bg-10-513-2013 (2013)  
“The carbon budget of South Asia”

## (2) 統合的解析システム構築に向けた、大気輸送モデルとデータ同化手法の最適な融合に関する研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球表層物質循環研究分野

北極環境変動総合研究センター

Prabir K. Patra

滝川 雅之

<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

佐伯 田鶴

平成26～28年度累計予算額：34,821千円（うち平成28年度：11,000千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

海洋研究開発機構(JAMSTEC)で開発した大気化学輸送モデルACTMをベースとして二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)とメタン(CH<sub>4</sub>)のインバージョンシステムを開発し、CO<sub>2</sub>は84領域(陸と海)について1990-2011年、CH<sub>4</sub>は53領域(陸のみ)について2002-2012年のフラックス推定をそれぞれ行ない、他の解析結果も合わせてCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>収支に関する種々の解析を行った。今回、大気輸送の再現性に優れたACTMをインバージョンに用いることで、輸送誤差の影響の少ないフラックス推定が期待される。CO<sub>2</sub>インバージョンの結果は、国内外のプロジェクトに提供された他、サブテーマ(4)のトップダウンとボトムアップによるCO<sub>2</sub>フラックス相互比較に使用された。本サブテーマ及びサブテーマ(1)(3)のインバージョンによる結果を含む国内外のインバージョン計算のアンサンブルを解析することによって、アジア3域のCO<sub>2</sub>収支を推定した。この際、サブテーマ(1)提供のCONTRAILによる観測データを用いてフラックスの検証を行い、濃度変動を再現できないフラックスをアンサンブル解析から除外した。CH<sub>4</sub>のインバージョンの結果から、従来使われている人為起源排出に関するボトムアップインベントリが東アジアにおけるCH<sub>4</sub>排出量の増加率を過大評価していることや、2007年以降の濃度増加の原因として反芻動物からの排出量増加の可能性を明らかにした。CH<sub>4</sub>の推定フラックスは日本上空の航空機による独立観測データをよく再現することが確認された。CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>のインバージョン解析の結果から、中国の石炭産業由来の排出量に大きな不確実性があることが結論づけられ、この問題に関する大気側からの補正方法として、CH<sub>4</sub>とCO<sub>2</sub>のインバージョンの結果を組み合わせた新たな解析手法を提示し、東アジアの人為起源排出量の増加率を下方修正する補正係数0.59を得た。インバージョンの先験情報として使用する中国の化石燃料起源のCO<sub>2</sub>排出量は2002年以降過大評価されており、これを補正すれば、インバージョンのアンサンブル解析から推定された近年の東アジアでの陸域生物圏による吸収量増大はみられないという新たな見解が得られた。

### [キーワード]

二酸化炭素、メタン、大気輸送モデル、吸収排出量推定、インバージョン解析・トップダウン法

## 1. はじめに

効率的な炭素管理、地球温暖化予測の高精度化のためには、現状の炭素収支の正確な把握が不可欠である。全球並びに領域規模の炭素収支推定の手法のひとつとして、大気輸送モデルと精密な大気観測データから地表面フラックスを推定するインバージョン解析（トップダウン法）が有効な手法として挙げられている。大気輸送モデルを用いたインバージョン解析に関しては、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前提となっている。CCSR/NIES/FRCGC大気大循環モデルを基にしたJAMSTECの大気化学輸送モデル（ACTM）は、これまでにSF<sub>6</sub>、<sup>222</sup>Radon、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>などのトレーサーのフォワード計算及び観測データとの比較を通して、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をインバージョンに用いることで、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インバージョン解析のシステムを開発し、全球と領域規模のCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>フラックスを推定する。また、本研究開発課題並びに過去に実施された複数のインバージョン・データ同化手法による推定フラックスやボトムアップ法による解析結果を合わせて、総合的なCO<sub>2</sub>収支の解析を行う。特にアジア域の解析を進める。

## 3. 研究開発方法

### （1）CO<sub>2</sub>のインバージョンシステムの開発

JAMSTECの化学輸送モデルACTMと大気CO<sub>2</sub>観測データを用いたCO<sub>2</sub>のインバージョンシステムを開発し、全球84領域について1990年から2011年のCO<sub>2</sub>収支を推定した。得られたCO<sub>2</sub>フラックスをモデルに入力してフォワード計算を実施し、CONTRAILデータ（サブテーマ1より提供）などの独立観測データ（インバージョンに使用していない観測データ）を用いてフラックスの検証を行った。次に、インバージョンで得られたCO<sub>2</sub>フラックスとGFASデータベースのバイオマス燃焼フラックスを用いてフォワード計算を行い、XCO<sub>2</sub>濃度の計算結果を、GOSAT衛星とOCO-2衛星からのACOSリトリバルによるXCO<sub>2</sub>と比較し、全球炭素収支の解析を行った。

### （2）アジアのCO<sub>2</sub>収支の解析

7つのインバージョン計算（参加機関：CAO、CSIRO、JAMSTEC、JMA、MACC、NIES、WU）から得られたCO<sub>2</sub>フラックスを解析し、アジアの3地域における1996～2012年の陸域CO<sub>2</sub>収支（植生、土地改変、バイオマス燃焼を含む）を推定した。本課題からは、JAMSTECのACTM、NIESのGELCA、JMAのJMA\_CDTMによる計算結果が提供された。解析の際、推定フラックスを用いてフォワード計算を行い、CONTRAILの濃度観測データ（サブテーマ1）を用いて検証し、フラックスの選別を行った。

### (3) CH<sub>4</sub>のインバージョンシステムの開発

炭素循環や全炭素量を考える上で、CH<sub>4</sub>はCO<sub>2</sub>について重要な気体である。そのため大気輸送とモデル内のOHラジカル濃度が十分に評価されたACTMを用いて、CH<sub>4</sub>のインバージョンシステムを開発し、39サイトの観測値を用いて、陸域53地域における2002年から2012年のCH<sub>4</sub>フラックスを推定した。

### (4) CH<sub>4</sub>を用いた新手法による東アジアのCO<sub>2</sub>収支の解析

CO<sub>2</sub>フラックス推定のインバージョンでは、化石燃料消費・セメント生産（FFC）からのCO<sub>2</sub>排出量を統計的によく見積もられた値としてインバージョンの前後で値を保存し、残差フラックスを陸上生物圏と海洋のフラックスとして推定する。そこで、FFCのCO<sub>2</sub>先験情報の違いがインバージョンによるCO<sub>2</sub>フラックス推定値に与える影響を定量的に評価するため、これまでに開発したCO<sub>2</sub>のインバージョンシステムと3つのFFC-CO<sub>2</sub>排出データベース（CDIAC, EDGAR, IEA）を用いて2001年から2011年のインバージョン解析を行った。また、CO<sub>2</sub>インバージョンの結果とCH<sub>4</sub>インバージョンの結果を併せた新たな手法により、中国のFFC-CO<sub>2</sub>排出量の補正を行い、東アジア域のCO<sub>2</sub>収支の解析を行った。

### (5) ACTMとアンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化システムの開発

より高度なデータ同化の実現のため、これまでに仮想データを用いてテストされてきたACTMとアンサンブルカルマンフィルター（EnKF）を用いたデータ同化システムを実データに適用する作業を行なった。

### (6) CO<sub>2</sub>濃度シミュレーションのためのCO<sub>2</sub>領域モデルの開発

全球化学輸送モデルと高解像度な領域化学輸送モデルを組み合わせた手法により炭素収支推定の精緻化を行うため、診断的植生モデルVPRMを組み込んだ領域化学輸送モデルWRF-VPRMをアジア域に適用し、全球規模及び領域規模の炭素収支の双方を適切に評価できるモデルの開発に着手し、予備解析を行った。

### (7) アジアの土地利用土地被覆変化の解析

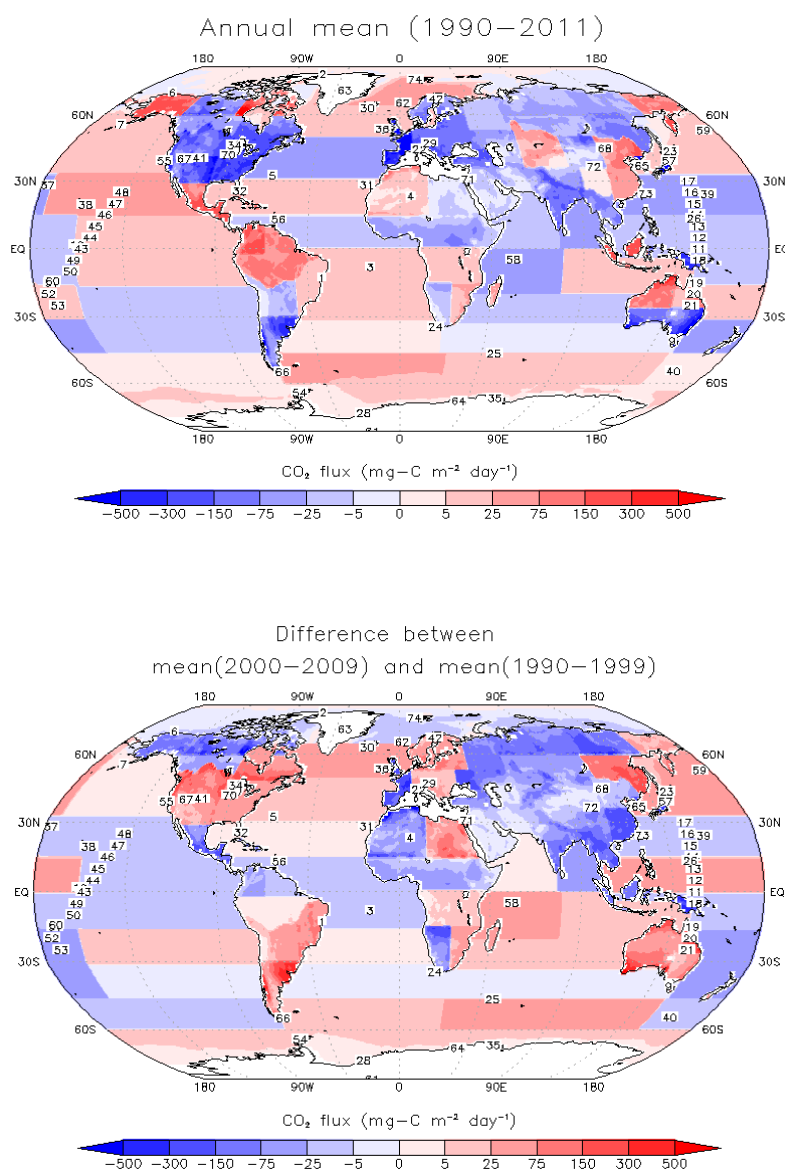
過去30年のアジア域の土地利用土地被覆変化（LULCC）によるCO<sub>2</sub>排出量を評価するため、8つの動的全球植生モデル（DGVM）、ボトムアップインベントリ等による複数のLULCCデータセットを解析した。

## 4. 結果及び考察

### (1) CO<sub>2</sub>のインバージョンシステムの開発

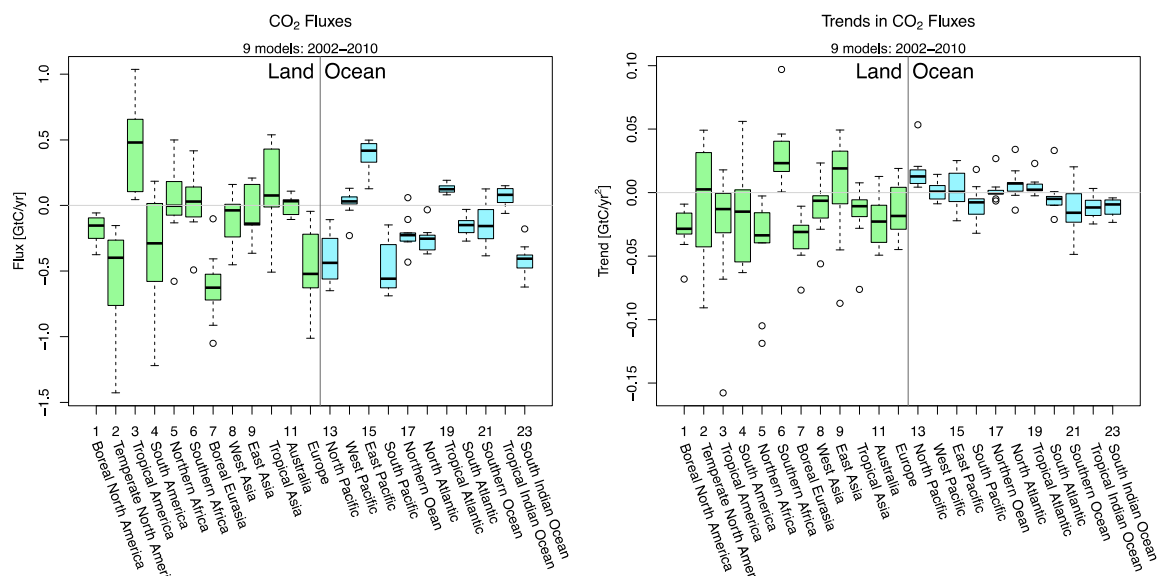
JAMSTECの大気化学輸送モデルACTMと大気CO<sub>2</sub>観測データ（obspack-GLOBALVIEW-CO<sub>2</sub>）を用いたCO<sub>2</sub>のインバージョンシステムにより、全球84領域（陸域54、海域30）について1990年から2011年のCO<sub>2</sub>収支を推定した（図(2)-1上）。化石燃料消費起源のCO<sub>2</sub>を除く全球CO<sub>2</sub>収支は、 $-3.24 \pm 0.33$

GtC/yrとなり、北半球中高緯度の陸域が吸収量の約半分を占める結果となった。1990年代と2000年代の平均的なフラックスを比較したところ（図(2)-1下）、アジア、寒帯、北アメリカではCO<sub>2</sub>吸収が増加、一方、南アメリカ南部、オーストラリアでは、CO<sub>2</sub>吸収が減少する結果が得られた。インバージョンにより得られたフラックスをモデルに入力してフォワード計算を行い、独立データであるHIPPO航空機観測と比較した結果、最大差異2 ppm程度の範囲で、モデルと観測値は良い一致を示した。同様に、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)から得られたXCO<sub>2</sub> (RemoTeC v2.3) との比較を行い、2009年6月～2012年12月の期間において、バイアス -0.2 ppm、相関係数 0.80、標準偏差 1.99 ppm (n=64673) という結果を得た。



図(2)-1 推定されたCO<sub>2</sub>フラックス [mg-C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>] (1°×1°グリッド)。(上) 1990年から2011年の平均値（正の値が大気へのCO<sub>2</sub>排出、負の値がCO<sub>2</sub>吸収）。(下) 2000年代の平均フラックスと1990年代の平均フラックスの差。化石燃料排出を除く。図中の数字はインバージョンに用いた観測サイトの位置を表す。

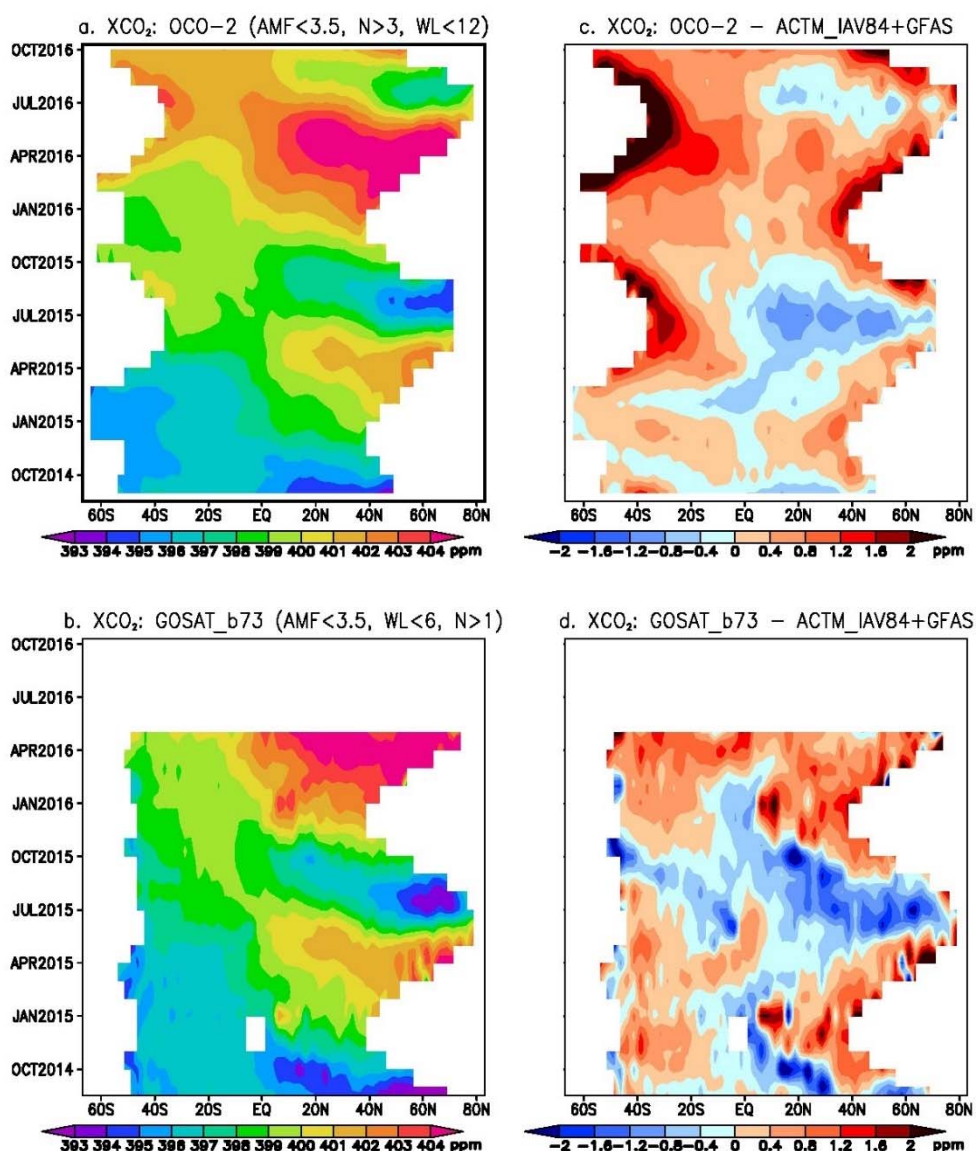
ACTM及びサブテーマ（1）（3）のモデル（GELCA-NIES、NICAM-TM、JMA）を含む9つの大気インバースモデルによる炭素収支推定の結果を比較したところ（図(2)-2）、2002年から2010年の期間において、モデル間のCO<sub>2</sub>フラックス推定値にバラ付きはあるものの、いずれのモデルでも北アメリカ・寒帯ユーラシア・ヨーロッパはCO<sub>2</sub>の吸収域となった。また対象期間におけるCO<sub>2</sub>フラックスの経年変化は、いずれのモデルでも寒帯北アメリカ・北アフリカ・寒帯ユーラシアにおいて負となる結果が得られ、これら地域での炭素収支変動が大きいことが示唆された。



図(2)-2 9つのインバースモデルから得られた全球23領域におけるCO<sub>2</sub>フラックス（左）とCO<sub>2</sub>フラックスの経年変化（右）。正の値が大気へのCO<sub>2</sub>排出、負の値がCO<sub>2</sub>吸収。2002年から2010年の結果。

続いて、OCO-2及びGOSAT衛星観測によるXCO<sub>2</sub>データとACTMによるXCO<sub>2</sub>計算値との比較を図(2)-3に示す。OCO-2、GOSATそれぞれの観測期間内において、モデル計算値は北半球夏季において両観測値よりも低い傾向にあったが、系統的なバイアスはなく、概ねOCO-2で±1ppm程度、GOSATで±1.5ppm程度の差に収まった。インバージョンによるフラックス推定値は2011年の地上観測データを用いて推定されたものであり、これを用いたフォワード計算は2014年中期まではNOAA地上観測データやTCCON観測データをよく再現したが、強いエルニーニョが発生した2015-2016年の衛星観測データを再現するには、地表から大気へ2.4 ± 0.2 PgC yr<sup>-1</sup>の追加のフラックスが必要なことがわかった。これは主に、乾燥により植生によるネットの吸収が減少したことならびにバイオマス燃焼が若干増加したことに起因すると考えられる。

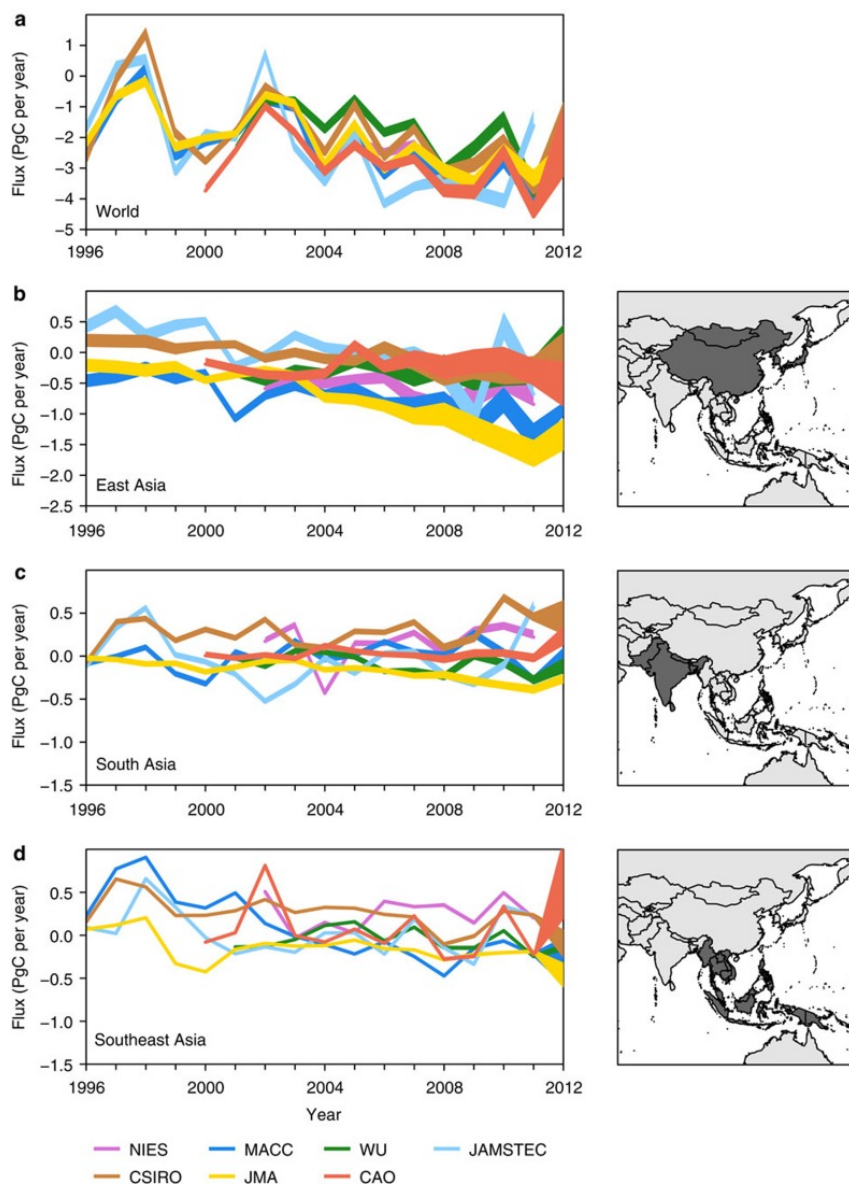




図(2)-3 OCO-2衛星 (a) とGOSAT衛星 (b) から得られたXCO<sub>2</sub>の緯度-時間分布及び衛星観測値とACTMによるモデル計算値との差(観測-モデル) (c, d)。

## (2) アジアのCO<sub>2</sub>収支の解析

国内外の7つのインバージョン計算により推定されたCO<sub>2</sub>フラックスを解析した結果、1996～2012年におけるアジア陸域のネット吸収量は  $-0.46$  ( $-0.70 \sim 0.24$ ) PgC/yr (中央値とその範囲) となった(図(2)-4、表(2)-1)。東アジアで吸収が強く、南アジアと東南アジアではほぼニュートラルであった。東アジアの年間CO<sub>2</sub>吸収量は、1996-2001年から2008-2012年にかけて $0.56$  ( $0.30 \sim 0.81$ ) PgC増加しており、この値は、全球陸域の吸収量増加の約35%に相当する。化石燃料排出量の不確実性は陸域植生吸収量の不確実性にかなりの影響(約32%)を及ぼすことがわかった。



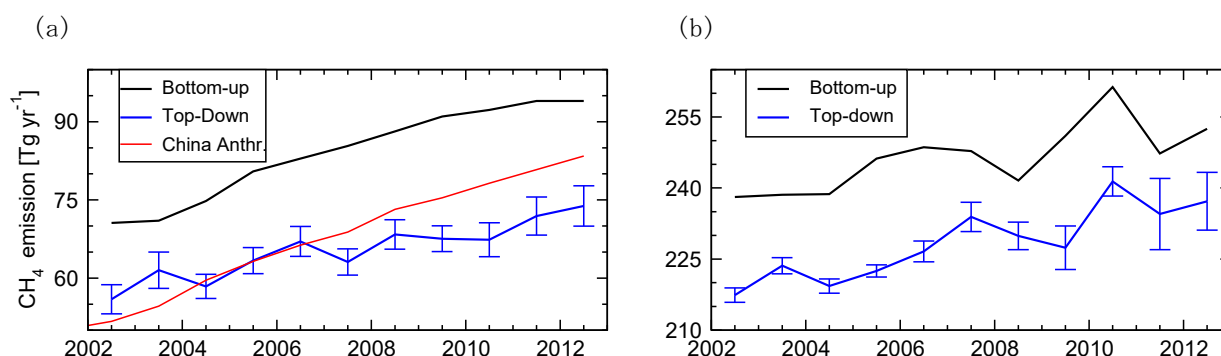
図(2)-4 7つのトップダウン手法から得られた1996年から2012年のCO<sub>2</sub>フラックス (Thompson et al., 2016<sup>1)</sup>)。a) 全球、b) 東アジア、c) 南アジア、d) 東南アジア。負の値は大気から陸(または海)へのフラックスを表す。

表(2)-1 アジアの3領域における化石燃料消費・セメント生産（FFC）からのCO<sub>2</sub>排出量と陸域CO<sub>2</sub>フラックス（7つのトップダウン手法の中央値）（PgC yr<sup>-1</sup>）（Thompson et al., 2016<sup>1</sup>）

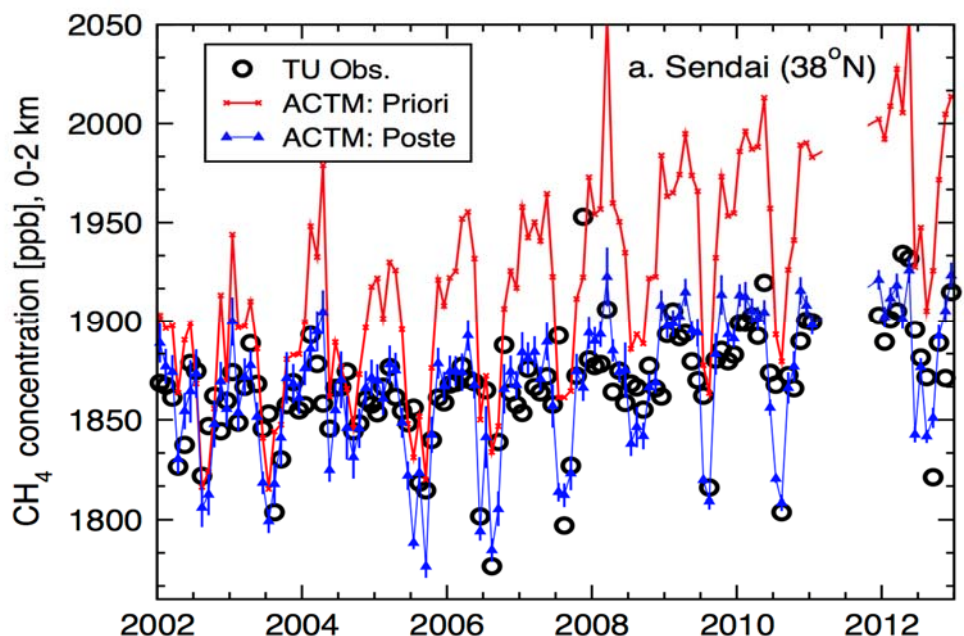
Region Period	East Asia		South Asia		South-east Asia	
	FFC	Land	FFC	Land	FFC	Land
1996 – 2001	1.48	-0.06	0.35	-0.06	0.22	0.26
2002 – 2007	2.03	-0.33	0.45	-0.09	0.27	0.02
2008 – 2012	2.85	-0.46	0.64	-0.07	0.34	-0.03

### (3) CH<sub>4</sub>のインバージョンシステムの開発

ACTMを用いたCH<sub>4</sub>についてのインバージョンを実施した結果、全球CH<sub>4</sub>排出量は、2002–2004年と2010–2012年の期間において、それぞれ平均値は505–509 Tg yr<sup>-1</sup>、524–531 Tg yr<sup>-1</sup>と推定された（数字の幅は7つのインバージョンの範囲）。本研究からは近年のEDGARインベントリ（v4.2FT2010）は、2010年における全球CH<sub>4</sub>排出量を少なくとも25 Tg yr<sup>-1</sup>過大評価していることが示唆された。東アジア（主として中国）のCH<sub>4</sub>排出量増加は2002–2006年から2008–2012年にかけて7–8 Tg yr<sup>-1</sup>という結果が得られ、先験値の17 Tg yr<sup>-1</sup>から大幅に減少した（図(2)-5(a)）。得られたフラックスを用いて、仙台上空の航空機によるCH<sub>4</sub>濃度観測値（Umezawa et al. 2014<sup>2</sup>）と比較した結果、本研究で推定した排出量を用いた方が観測値の再現性が良いことがわかり、得られた排出量がより確からしいことが示された（図(2)-6）。2004年に始まるCH<sub>4</sub>排出量の増加は、熱帯域と南半球に起因することが明らかとなった（図(2)-5(b)）。これは、非乳牛の家畜頭数が2002年（10.56億頭）から2012年にかけて約10%増加したことと一致し（CH<sub>4</sub>量にして10Tgyr<sup>-1</sup>の増加に相当）、排出量増加が家畜起源である可能性が示唆された。



図(2)-5 東アジア域（中国、日本、韓国）(a)及び熱帯域(b)におけるCH<sub>4</sub>排出量推定値。黒線はボトムアップ法によりインベントリ、青線はインバージョン計算によるCH<sub>4</sub>排出量を表す。(a)の赤線は、中国の人為起源CH<sub>4</sub>排出量推定値（主に石炭産業）であり、東アジアにおけるCH<sub>4</sub>排出量の継続的な増加は人為的要因によるものであることが分かる。



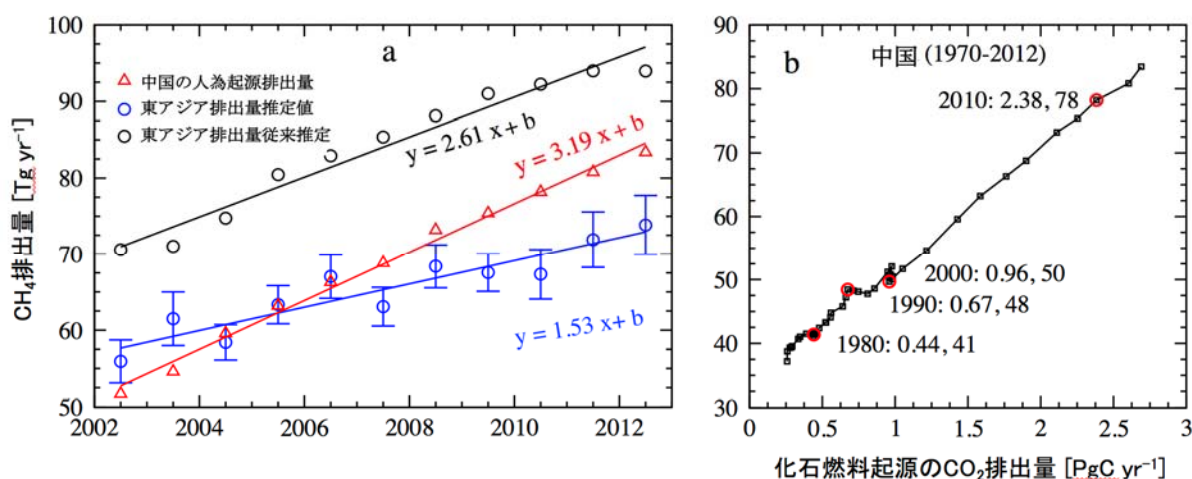
図(2)-6 東北大学が航空機を用いて仙台市上空高度0~2kmで観測したCH<sub>4</sub>濃度（黒丸）とACTMによる計算値。モデル計算値には従来試算のCH<sub>4</sub>排出量を用いて算出したCH<sub>4</sub>濃度（赤線）と本研究で推定した排出量を用いて算出したCH<sub>4</sub>濃度（青線）をそれぞれ示してある。仙台は中国で排出されたCH<sub>4</sub>が流れてくる風下に位置しているため、このように濃度変化を調べることは本研究で推定された中国のCH<sub>4</sub>排出量の良い検証となる。実際に、従来試算による排出量を用いたモデル計算値（赤線）は仙台上空で観測されたCH<sub>4</sub>濃度（黒丸）を明らかに過大評価しているが、その一方で本研究で推定した排出量を用いたモデル計算値（青線）は観測値を良く再現している。

#### (4) CH<sub>4</sub>を用いた新手法による東アジアのCO<sub>2</sub>収支の解析

世界の各領域について3つの異なるFFC排出データベースを比較した結果、東アジア（日本、韓国、中国、モンゴル）においてデータベース間の差異が最も大きくなり、2000年代の平均で約0.5 PgC yr<sup>-1</sup>であった。これに伴いインバージョンによる東アジア域のCO<sub>2</sub>フラックス推定値も大きく異なる結果となり、排出量の大きい（小さい）データベースを使ったインバージョンではCO<sub>2</sub>吸収量も大きく（小さく）なる良い相関が得られた。また、その影響がその領域内にとどまらず、大気輸送を通じて周辺の領域のインバージョン推定値にも影響をおよぼすことが、実際にインバージョンを実施することにより定量的に明らかとなった。

一方、2-(2)節で述べたように7つのインバージョンの結果を用いたアンサンブルCO<sub>2</sub>フラックスの解析では、東アジアの年間CO<sub>2</sub>吸収量は、1996-2001年から2008-2012年にかけて0.56 (0.30~0.81) PgC yr<sup>-1</sup>増加するという結果が得られたが (Thompson et al., 2016<sup>1)</sup>；図(2)-(4)bまたは図(2)-8bの“Top-down model mean”)、原因は明らかになっていない。同様に2-(3)節で述べたCH<sub>4</sub>インバージョンからは、東アジアのCH<sub>4</sub>排出量の増加率をボトムアップインベントリが過大評価していることが明らかとなっている。東アジアの排出量増加率はCO<sub>2</sub>もCH<sub>4</sub>ともに中国の石炭起

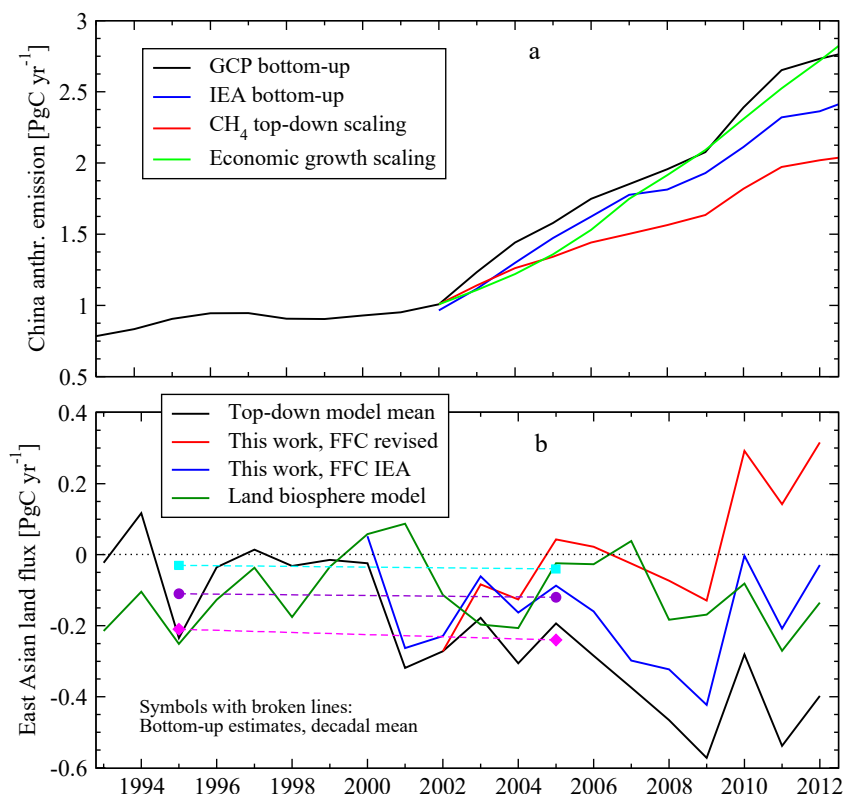
源の寄与が大きいことから、このセクターのインベントリに関してはCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の排出量の増加率が良い相関を持つとの仮定のもと（図(2)-7(b)）、CH<sub>4</sub>のインバージョンから得られたスケーリングファクター0.59を用いて（図(2)-7(a)）、FFC排出量とCO<sub>2</sub>フラックス推定値の増加率の補正を行った。この補正は2002年以降のFFC増加率に0.59をかけることで行った（図(2)-8a “CH<sub>4</sub> top-down scaling”）。補正後のCO<sub>2</sub>フラックス（図(2)-8b “This work, FFC revised”）では従来推定（図(2)-8b “Top-down model mean”）に見られるような東アジアの吸収量の増加は見られなかった。動的植生モデルの比較プロジェクトTRENDYのS2シミュレーションによるCO<sub>2</sub>フラックス推定値（図(2)-8b “Land biosphere model”）も、同様に吸収量の経年増加は示唆していない。ただし、補正後CO<sub>2</sub>フラックス（“This work, FFC revised”）の2010～2012年はTRENDY S2の結果と比較して大きな排出となっており、考えられる原因として、この時期の中国の経済成長は依然として増加している（図(2)-8a “Economic Growth scaling”）のに対し、CDIACデータベース（図(2)-8a “GCP bottom-up”）は鈍化しているため、その補償分が推定CO<sub>2</sub>フラックスに現れた可能性が挙げられる。



図(2)-7 (a) 東アジア域（中国、日本、韓国、モンゴル）におけるCH<sub>4</sub>排出量推定値（図(2)-5の再掲及び加筆）。黒線は社会経済統計による従来試算、青線は大気化学輸送モデルと大気濃度観測データを用いた推定によるCH<sub>4</sub>排出量を表す。赤線は、中国の人為起源CH<sub>4</sub>排出量推定値（主に石炭産業）であり、東アジアにおけるCH<sub>4</sub>排出量の継続的な増加は主として中国の人為的CH<sub>4</sub>排出量要因によるものであることが分かる。

各年の排出量の線形回帰から傾きを求め（それぞれ2.61と1.53）、増加率の補正係数を得た

（1.53/2.61=0.59）。(b) 1970年から2012年の中国における化石燃料起源のCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の排出量の関係（「Trends in global CO<sub>2</sub> emissions: 2014 Report」より）。10年おきの値に赤丸と数値を記す。両者の増加量の比はほぼ一定の関係にあることがわかる。



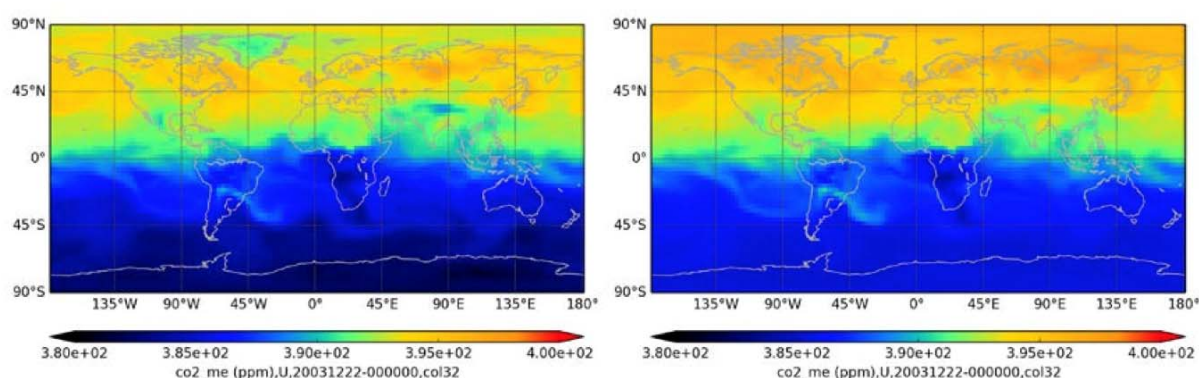
図(2)-8 (a)1993年から2012年の東アジアにおける化石燃料消費のCO<sub>2</sub>排出量。社会経済統計による推定値（グローバル・カーボン・プロジェクト（GCP；黒線）と国際エネルギー機関（IEA；青線））と本研究で得られた補正係数による推定値（赤線）を示す。参考のため、2002年以降の排出量を中国の経済成長で補正した結果も示す（緑線）。(b) 東アジアの陸域生態系によるCO<sub>2</sub>排出吸収量。正の値が陸域から大気への排出、負の値が陸域から大気への吸収。大気輸送モデルと大気観測データを用いた従来推定（黒線；Thompson et al., 2016<sup>1)</sup>）は2000年代に大きな吸収量の増加を示すが、本研究で得られた手法で2002年以降を補正した推定値（赤線）は1990年代から2000年代には吸収量の増加はみられず、TRENDYプロジェクトの陸域生態系モデルによる独立した推定値（緑線）や土地利用等の統計を基にした森林炭素吸収の推定値（シンボルと点線；1990年代と2000年代の平均値）と良い一致を示す。参考のためIEAの値で補正した推定値（青線）も示す。

### (5) ACTMとアンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化システムの開発

より高度なデータ同化の実現のため、ACTMとアンサンブルカルマンフィルター（EnKF）を用いたデータ同化システム（Miyazaki et al. 2011<sup>3)</sup>）を実データに適用した。そのため、GOSAT XCO<sub>2</sub>データ（RemoTeC v2.3）、CONTRAIL 航空機観測データ（ver 2013）、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）の地上観測データ、The Total Carbon Column Observing Network（TCCON）によるXCO<sub>2</sub>データを整備した。これらの観測データを順次処理し、EnKFシステムの入力フォーマッ

トに変換するプリプロセスシステムを構築し、実際にEnKFシステムに入力し実行することで、動作確認を行った。また、ACTMの成層圏輸送の再現性向上のため、SF<sub>6</sub>プロファイルを用いた成層圏年代補正のモジュールを開発し、システムに実装した。年代補正の結果の例を図(2)-9に示す。年代補正を行うことにより、高緯度では約4 ppmの補正が成されることが分かった。

次に、アンサンブル計算に関連するパラメータを自由に変更できるようにシステム構成プログラム・スクリプトの改修を行った。システム動作確認と実行時間の見積もりのため、同化期間とアンサンブルサイズを変えたテスト計算を28通り行った。また、出力データの可視化のため、Pythonを使ったスクリプト群を作成した。以上により、実データを用いたシステム運用の準備をほぼ整えることができた。



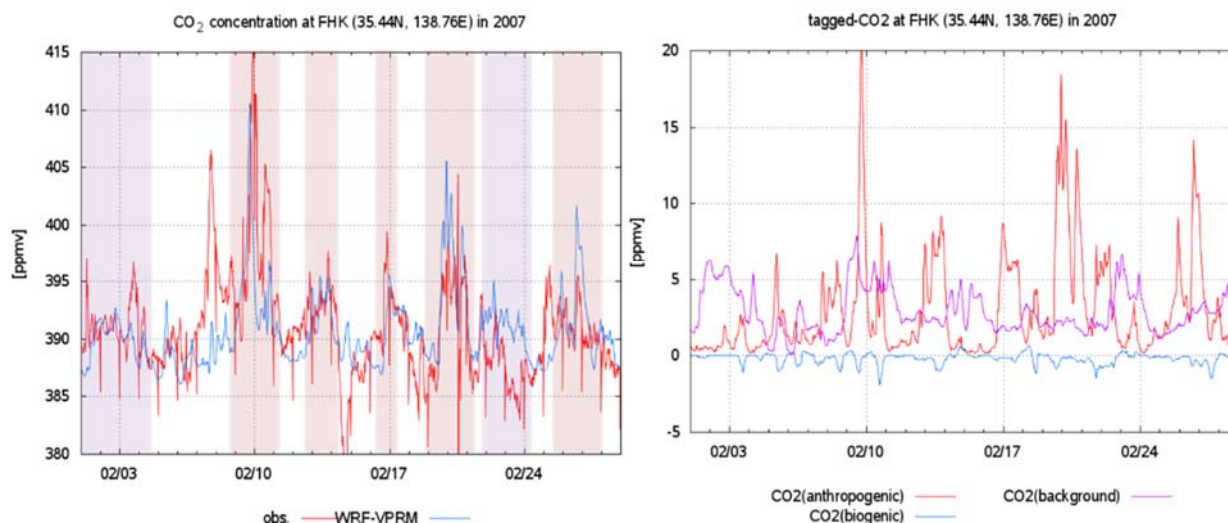
図(2)-9 EnKFシステムによって得られた2009年5月19日のCO<sub>2</sub>カラム平均濃度[ppm]。  
(左) SF<sub>6</sub>年代による濃度補正を行った結果、(右) 補正を行わない結果。

#### (6) CO<sub>2</sub>濃度シミュレーションのための領域モデルの開発

アジア域の急激な経済発展及び気候変動に由来する土地改変等に対応するため、診断的植生モデルVPRMを組み込んだ領域化学輸送モデルWRF-VPRMを用い、全球及び領域規模の炭素収支を適切に評価できるモデルを開発した。領域モデルとしては米国NOAAなどが中心となり開発しているコミュニティモデルWRF-ARW Ver. 3.5を基とし、気象場として気象庁メソ解析を、標高データとして国土地理院の50mメッシュ地形データを、側面境界としてACTMの結果をそれぞれ利用できるように改変した。

領域モデルを用いたACTMダウンスケーリングの予備解析として、WDCGG及びAsiaFluxの観測値との比較を行った。対象領域は東日本域、水平解像度は3km、鉛直層数は35層である。対象領域内にはAsiaFlux観測点が3箇所(岐阜県高山市のTKY/TKC、山梨県富士吉田市のFHK、愛知県瀬戸市のSMF)、WDCGGの観測点が4箇所(綾里、堂平山、騎西、三河一宮)あるが、そのうち富士北麓(FHK)における大気中CO<sub>2</sub>濃度を図(2)-8に示す。領域モデルは概ね良好な時間変動を示している。とくに2月9-11日、13-14日、17日、20-21日、27日などにイベント的な増大が見られるが、右図の起源別タグトレーサ実験の結果と比較すると、当該時期はおおむね領域内の人為起源排出に由来することがわかる。これは関東域などから高濃度のCO<sub>2</sub>を含む気塊が輸送されたためと考えられ

る。また2月2-3日などはタグトレーサ実験の結果によるとおもに側面から流入してくる背景場の影響を受けて増大しており、より大規模な輸送場の影響を受けていたと考えられる。これらの結果から、本モデルシステム (ACTM/WRF-VPRM) は全球規模輸送と領域規模の輸送過程の双方を適切に表現しているものといえる。

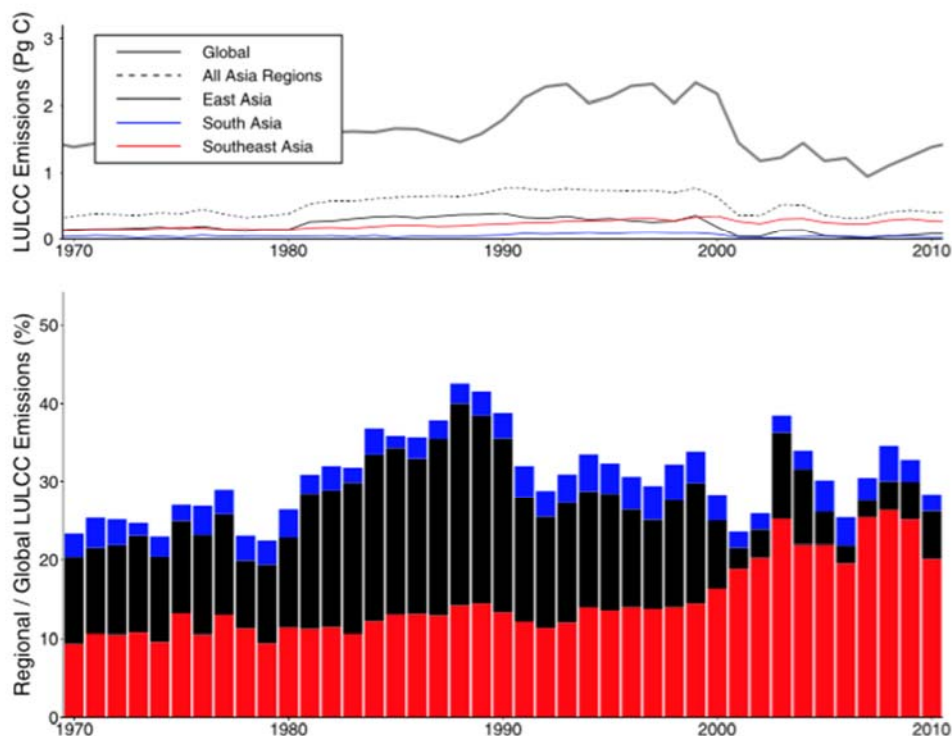


図(2)-10 AsiaFlux FHK(富士北麓)におけるCO<sub>2</sub>濃度(左図)とモデルによる起源別タグトレーサ実験の結果(右図)。単位はppm。左図の赤線は観測値、青線はモデル計算結果を示す。右図の赤線は計算対象領域における人為起源排出を、青線は同じく植物起源排出を、紫線は領域外からの流入からオフセット値を差し引いたものを示す。

### (7) アジアの土地利用土地被覆変化の解析

さらに、複数のLULCCデータセットを解析した結果、1980年から2009年の期間、アジアのLULCCからのネット炭素排出量は全球LULCC排出量の20%~40%を占めていることがわかった。8つのDGVMの解析によると(図(2)-11)、東アジアの排出量の割合は1970年代に10%程度であったが、1980年代に入ってから増加し、1980年末には25%のピークを迎えた。アジア全体の割合が1990年に入って減少するのは、同じ時期に全球LULCC排出量が増加したためである。東南アジアの排出量は1990年代末までは10%前後の推移であったが、2000年代に入って全球と東アジアの排出量が減少したため、相対的に東南アジアの寄与が大きくなり、2000年代末には全球排出量の20%~25%を占めることが示された。





図(2)-11 1970年から2012年における全球及びアジア3地域（東アジア、南アジア、東南アジア）の土地利用土地被覆変化（LULCC）によるCO<sub>2</sub>排出量（上）と全球LULCC排出量に対するアジア3地域のLULCC排出量の割合（下）。LULCCフラックス排出量は8つのDGVMのアンサンブル平均による。（Calle et al., 2016<sup>4)</sup>）

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

大気輸送モデルを用いたインバージョン解析に関しては、これまでにCO<sub>2</sub>収支推定の際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いる。今回、大気輸送の再現性に優れたACTMをインバージョンに用いることで、輸送誤差の影響の少ないCO<sub>2</sub>インバージョンシステムを開発することができたといえる。また、CH<sub>4</sub>についても、インバージョンシステムを構築し、従来使われている排出インベントリが東アジアにおいてCH<sub>4</sub>排出量を過大評価していることや、2007年以降の濃度増加の原因として反芻動物の可能性を示唆したことは、CH<sub>4</sub>循環の解明に新たな視座を与えるものである。インバージョン計算のアンサンブルを解析することによって、より確からしいアジア域のCO<sub>2</sub>収支を推定することができた。この際、CONTRAILによる観測データを再現できないフラックスをアンサンブル解析から除外したため、得られた推定値はより信頼できるものとなったといえる。この実測値を用いたフラックスデータのスクリーニングは従来のアンサンブル解析

ではほとんど行われていないものであり、本研究の特徴の一つである。しかしながら、依然として中国の化石燃料消費・セメント生産（FFC）によるCO<sub>2</sub>のボトムアップインベントリに大きな不確実性が伴っており、この補正方法として、本研究で開発したCH<sub>4</sub>インバージョンとCO<sub>2</sub>インバージョンの結果を組み合わせた新たな解析手法を提示した。これにより、先験情報として使用する東アジアのFFC-CO<sub>2</sub>排出量は2002年以降過大評価されており、これを補正すれば、インバージョンのアンサンブル解析から推定された近年の東アジアでの陸域生物圏による吸収量増大はみられないという新たな見解を示した。長寿命気体であるCO<sub>2</sub>を領域モデルで計算するには、領域外からの流入の考慮が不可欠であるが、本研究で開発したシステムでは、全球モデルのACTMを領域モデルのWRF-VPRMを組み合わせることでこの問題を解決し、3kmの高空間分解能での数値実験を可能とした。

## （２）環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究によるインバージョン解析によって推定されたCO<sub>2</sub>フラックスの結果は、Asia-Pacific Network for Global Change Researchの活動の一環である国際プロジェクト”Greenhouse gas inversion inter-comparison for Asia”に提供され、複数のインバージョンのアンサンブル解析に基づき、より確からしいアジア域のCO<sub>2</sub>収支を推定したこと（論文発表済み）によって、IPCCやグローバル・カーボン・プロジェクトなどの国際アセスメントへの貢献が期待でき、また環境政策立案の科学的根拠となるデータを提供できたものと思われる。CO<sub>2</sub>の人為起源排出量は各国統計などにより比較的精度よく求められているが、地域によっては排出量データベースに不確実性が残るため、温室効果ガス排出量規制のための測定、報告及び検証（Measurement, Reporting and Verification; MRV）のためには、独立した検証方法の開発が重要であることが示唆された。各国の自主的決定草案（Intended Nationally Determined Contributions; INDC）では基準年の推計が異なると削減目標達成値にも影響しうるため（例えば中国は基準年を2005年とGDPあたりのCO<sub>2</sub>排出量で算出）、人為起源排出量を含む炭素収支推定のより一層の精緻化が必要といえる。

## 6. 国際共同研究等の状況

- 1) 海洋研究開発機構・国立環境研究所共催 ”International workshop on Asian Greenhouse Gases”（アジア温室効果ガス国際ワークショップ、平成27年3月2～4日、横浜）を開催。アジア域のCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>などの温室効果ガス収支の精緻化に関し、本課題の成果を多く含む最新の結果とその論文化について具体的な議論を行った。参加者は、当該地域を対象に研究を行っている国内外の研究者17名（P. Canadell・連邦科学産業研究機構・オーストラリア、B. Poulter・モンタナ州立大・米国、R. Thompson・ノルウェー大気研究所・ノルウェー、P. Ciais（スカイプ参加）・気候環境科学研究所、フランス、他）。

- 2) アジア域における温室効果気体収支の相互比較の推進。上記ワークショップでの議論を受け、トップダウンとボトムアップによる炭素収支推定値の解析・比較を連携して進めた (R. Thompson・ノルウェー大気研究所・ノルウェー、F. Chevallier・気候環境科学研究所・フランス、他)。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) R. L. Thompson, Patra, P. K., Chevallier, F., Maksyutov, S., Law, R. M., Ziehn, T., van der Laan-Luijkx, I. T., Peters, W., Ganshin, A., Zhuravlev, R., Maki, T., Nakamura, T., Shirai, T., Ishizawa, M., Saeki, T., Machida, T., Poulter, B., Canadell, J. G., and Ciais, P.: Nature Comm., Doi:10.1038/Ncomms10724 (2016)  
“Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s”
- 2) P. K. Patra, Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravi Kumar, K., and Nakazawa, T.: Journal of The Meteorological Society of Japan, 94, 1, 85-107 (2016)  
Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012)”
- 3) M. Kondo, Saeki, T., Takagi, H., Ichii, K., and Ishijima, K.: SOLA, 12, 181-186 (2016)  
“The effect of GOSAT observations on estimates of net CO<sub>2</sub> flux in semi-arid regions of the southern hemisphere”
- 4) Calle, L., Canadell, J. G., Patra, P. K., Ciais, P., Ichii, K., Tian, H., Kondo, M., Piao, S., Arneeth, A., Harper, A. B., Ito, A., Kato, E., Koven, C., Sitch, S., Vivoy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S., and Poulter, B.: Env. Res. Lett., 11, 074011 (2016)  
“Regional Carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980-2009”
- 5) T. Saeki and Patra, P. K.: Geoscience Lett., doi:10.1186/s40562-017-0074-7 (2017)  
(印刷中)  
“Implications of overestimated anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions on natural CO<sub>2</sub> sources and sinks estimations”

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 岩田拓記、沖元洋介、佐伯田鶴、和田龍一、平田竜一：生物と気象、16:D1-5 (2016)  
“AsiaFlux Workshop 2015 ~Challenges and Significance of Ecosystem Research in Asia to Better Understand Climate Change~参加報告”

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) M. Takigawa and Patra, P. K. : 15<sup>th</sup> annual WRF Users' Workshop, Boulder, USA (2014)  
"CO<sub>2</sub> simulation over Japan using WRF-VPRM"
- 2) P. K. Patra: TransCom meeting, Groningen, Netherland (2014)  
"Asian Greenhouse Gases Budget - an invitation to join the Asian emission synthesis activity"
- 3) T. Saeki, Patra, P. K., Kawa, S. R., and Collatz, G. J. : the 13th Science Conference of the International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC), Natal, Brazil (2014)  
"Carbon flux estimation using ACTM for the period 1990-2011"
- 4) T. Saeki and Patra, P. K. : American Geophysical Union Fall Meeting 2014, San Francisco, USA (2014)  
"Carbon flux estimation by using AGCM-based chemistry transport model for the period 1990-2011"
- 5) T. Saeki, Patra, P. K., Kawa, S. R., and Collatz, G. J. : 日本気象学会2014年度秋季大会、福岡市(2014)  
"Carbon flux estimation by using ACTM for the period 1990-2011"
- 6) P. K. Patra, et al. : Symposium on Coupled Chemistry-Meteorology/Climate Modelling, Status and relevance for numerical weather prediction, air quality and climate research, WMO Headquarters, Geneva, Switzerland (2015)  
"Diagnosing inter-hemispheric OH ratio and transport in chemistry-climate models"
- 7) P. K. Patra: EGU annual meeting, Vienna, Austria, 12-17 April (2015)  
"Inverse and forward modelling of CH<sub>4</sub> using ACTM, the WDCGG, SRON/KIT and ACTM Teams"
- 8) P. K. Patra, Thompson, R., and Saeki, T. : Second Decadal APO Meeting, Scripps Institution of Oceanography/UCSD, San Diego, USA, 18 September (2015) (招待講演)  
"Can O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> measurements help to constrain global total fossil fuel emission?"
- 9) T. Saeki and Patra, P. K. : 大気化学討論会 2015、東京都、2015年10月19-21日.  
"Influence of Fossil Fuel Emissions on CO<sub>2</sub> Flux Estimates by Atmospheric Inversions"
- 10) T. Saeki and Patra, P. K. : 気象学会秋季大会、京都市、2015年10月28-30日.  
"Carbon flux estimation over Asian region for the period 1990-2011"
- 11) T. Saeki and Patra, P. K. : Joint Conference: AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS TC WG WIII/3 Meeting, Pune, India, 22-29 November (2015) (招待講演)  
"CO<sub>2</sub> flux estimation by top-down approach over Asian region"
- 12) T. Saeki, Patra, P. K., van der Laan-Luijkx, I. T., and Peters, W. : AGU fall meeting 2015, San Francisco, USA, 14-18 December (2015)  
"Influence of fossil fuel emissions on CO<sub>2</sub> flux estimation by atmospheric inversion"
- 13) P. K. Patra, Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A.,

- Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravi Kumar, K., and Nakazawa, T.: Global Carbon Project - CH<sub>4</sub> workshop, San Francisco, USA, 16 December (2015)  
 “Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012)”
- 14) P. K. Patra: International Land Cover/Land Use Changes Regional Science Team Meeting, Yangon, Myanmar, 13-15 January (2016) (招待講演)  
 “Regional trends in land use/land cover change emissions of CO<sub>2</sub> in Asia”
- 15) T. Saeki, Patra, P. K., Morimoto, S., and Aoki, S.: 日本気象学会 2016 年度春季大会, 東京都渋谷区, 2016 年 5 月 22~26 日.  
 “Influence of fossil fuel emissions on CO<sub>2</sub> flux estimates by atmospheric inversions”
- 16) T. Saeki., Patra, P. K., Morimoto, S., and Aoki, S.: Japan Geoscience Union meeting 2016, 千葉県千葉市, 2016 年 5 月 22~26 日.  
 “Influence of fossil fuel emissions on CO<sub>2</sub> flux estimates by atmospheric inversions”
- 17) P. K. Patra, Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravi Kumar, K., Nakazawa, T.: JpGU Annual Meeting, Chiba, May (2016)  
 “Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012)”
- 18) P. K. Patra, Saeki, T., Ichii, K., Kaiser, J. W., Crisp, D.: 12th IWGGMS, Kyoto, June (2016)  
 “Orbiting carbon observatory (OCO-2) tracks 2 Giga tons of carbon release to the atmosphere during the El Nino 2015”
- 19) T. Saeki and Patra, P. K.: The 26th Goldschmidt Conference, Yokohama, June 26 - July 1 (2016)  
 “CO<sub>2</sub> flux estimation by top-down approach over the arctic region”
- 20) Welp, L. R., Patra, P. K., Roedenbeck, C., Nemani, R., Bi, J., Piper, S. C., and Keeling, R. F.: The 26th Goldschmidt Conference, Yokohama, June (2016)  
 “Increasing summer net CO<sub>2</sub> uptake in high northern ecosystems on land”
- 21) P. K. Patra, Ichii, K., and Miettinen, J.: AOGS Annual Meeting, Beijing, China, August (2016) (招待講演)  
 “Climate-carbon nexus in tropical Asia”
- 22) Saito, R., Patra, P. K., and Saeki, T.: AOGS Annual Meeting, Beijing, China, August (2016)  
 “A comparison of simulated greenhouse gas concentrations with satellite observations”
- 23) P. K. Patra, Saeki, T., Aoki, S., Morimoto, S., Nakazawa, T.: AOGS Annual Meeting, Beijing, China, August (2016)

- “Anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from china are likely overestimated”
- 24) T. Saeki and Patra, P. K.:第22回大気化学討論会, 北海道札幌市, 2016年10月12~14日.
- “Decadal trends in regional CO<sub>2</sub> fluxes estimated from atmospheric inversions”
- 25) T. Saeki and P. Patra, P. K.:日本気象学会2016年度秋季大会, 愛知県名古屋市, 2016年10月26~28日.
- “Decadal trends in regional CO<sub>2</sub> fluxes estimated from atmospheric inversions”
- 26) P. K. Patra, Saeki, T., Morimoto, S., Matsueda, H., Machida, T., Sawa, Y., Umezawa, T., Aoki, S., and Nakazawa, T.: MSJ Fall Meeting, Nagoya, October (2016)
- “On the use of aircraft CO<sub>2</sub> observations for carbon cycle studies”
- 27) T. Saeki and Patra, P. K.: American Geophysical Union fall meeting 2016, San Francisco, USA, 12-16 December (2016)
- “Decadal trends in regional CO<sub>2</sub> fluxes estimated from atmospheric inversions”
- 28) P. K. Patra, Crisp, D., Kaiser, J. W., Wunch, D., Saeki, T., Ichii, K., Sekiya, T., Wennberg, P. O., Feist, D. G., Pollard, D., Griffith, D. W. T., Velazco, V. A., De Maziere, M., Sha, M. K., Roehl, C., and Chatterjee, A.: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December (2016)
- “Orbiting carbon observatory (OCO-2) tracks increase of carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño”
- 29) P. K. Patra: Workshop on Satellite GHG Concentration Measurement and National GHG Emission Inventories, Tokyo, February (2017)
- “An attempt to separate anthropogenic CO<sub>2</sub> emission from natural component using CH<sub>4</sub> emission inversion”

### (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) 2014 JAMSTEC横浜研究所施設一般公開(2014年10月11日)の一環として開催された公開セミナー(聴講者約130名)にて講演を行い、本研究開発課題の研究成果を紹介した。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表「大気化学輸送モデルを用いた新たな手法により地域別のメタン排出量を推定 ～熱帯域、東アジアの排出量に従来推定と異なる結果～」(2016年2月1日、海洋研究開発機構ウェブサイトにて)
- 2) 成果の記者発表「東アジアの炭素収支の問題に決着：東アジア陸域生態系によるCO<sub>2</sub>吸収は進んでいない —中国からの人為起源排出量のバイアス影響を新たな手法で評価—」(2017年5月15日(予定)、海洋研究開発機構ウェブサイトにて)

## (6) その他

- 1) P. K. Patra, M. van der Schoot, M. Zhang, H. Lee, Y. Tiwari: AOGS 12th annual meeting, Singapore, 2-7 August 2015.  
"BG05: Greenhouse Gases Budget of Asia in Global Perspectives" (セッション開催)
- 2) X. Wang, P. K. Patra, L. Cao, S. Lin, V. Valsala, S. Yasunaka: AOGS 12th annual meeting, Singapore, 2-7 August 2015.  
"BG11: General Session" (セッション開催)
- 3) K. Ichii, P. K. Patra, N. Saigusa: AsiaFlux Workshop, IITM, Pune, 25-27 November 2015.  
"Integrated analysis of greenhouse gases fluxes of Asia" (セッション開催)
- 4) P. K. Patra, R. Singh, H. El-Askary, G. Winckler: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December 2015.  
"A21L: Long-Range Transport of Dust and Pollution in the Past, Present, and Future" (セッション開催)
- 5) P. K. Patra: The Atmospheric Composition and Asian Summer Monsoon (ACAM) Training School on Satellite and Model Data use for Aerosols and Air Quality, Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok, 11 June 2015.  
"Atmospheric Science Data Analysis Tools"  
(バンコクのアジア工科大学院にて開催されたトレーニングコースへ講師として招待され、大学院生・若手研究者を対象に、標記の講義を行った。)
- 6) P. K. Patra: 2016年度日本気象学会堀内賞受賞。対象研究業績「モデル解析を基にした温室効果気体の全球規模循環に関する研究」(日本気象学会参加者に向けて、温室効果気体の全球規模循環に関する研究成果を受賞講演として紹介した。)(2016年10月27日)
- 7) P. K. Patra, K. Ichii, and J. Miettinen: "Climate-carbon nexus in tropical Asia" (第13回アジア・オセアニア地球科学連合大会(2016年7月31日~8月5日)において招待講演を行い、気候と炭素循環の関連について理解を深めた。)
- 8) P. K. Patra: Institute of Environment and Sustainable Development, Banaras Hindu University, Varanasi, India, "Global Climate Change: Role of human activity, ecosystems and agriculture"  
(インド・ヴァーラーナシーのバナラス・ヒन्दゥー大学にて、大学院生(約20名)・教員(約20名)を対象に、標記の講義を行った。)(2017年2月21日)

## 8. 引用文献

- 1) R. L. Thompson, Patra, P. K., Chevallier, F., Maksyutov, S., Law, R. M., Ziehn, T., van der Laan-Luijkx, I. T., Peters, W., Ganshin, A., Zhuravlev, R., Maki, T., Nakamura, T., Shirai, T., Ishizawa, M., Saeki, T., Machida, T., Poulter, B., Canadell, J. G., and Ciais, P.: Nature Comm., Doi:10.1038/Ncomms10724 (2016)

“Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s”

- 2) T. Umezawa, Goto, D., Aoki, S., Ishijima, K., Patra, P. K., Sugawara, S., Morimoto, S., and Nakazawa, T.: *Tellus B*, 66, 23837, doi:10.3402/tellusb.v66.23837 (2014)

“Variations of tropospheric methane over Japan during 1988-2010”

- 3) K. Miyazaki, Maki, T., Patra, P. K., and Nakazawa, T.: *J. Geophys. Res.*, 116, D16306 (2011)

“Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO<sub>2</sub> flux estimation using an ensemble-based 4D data assimilation system”

- 4) L. Calle, Canadell, J. G., Patra, P. K., Ciais, P., Ichii, K., Tian, H., Kondo, M., Piao, S., Arneeth, A., Harper, A. B., Ito, A., Kato, E., Koven, C., Sitch, S., Vivoy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S., and Poulter, B.: *Env. Res. Lett.*, 11, 074011 (2016)

“Regional Carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980-2009”



### (3) 航空機データの最適化と同化技術を用いたCO<sub>2</sub>解析手法の開発

気象庁気象研究所

海洋・地球化学研究部	第四研究室	丹羽 洋介
		松枝 秀和・澤 庸介
環境・応用気象研究部	第一研究室	眞木 貴史

<研究協力者>

気象庁気象研究所

海洋・地球化学研究部	第四研究室	坪井 一寛
------------	-------	-------

気象庁

地球環境・海洋部	環境気象管理官	中村 貴
----------	---------	------

平成26～28年度累計予算額：34,882千円（うち平成28年度：11,000千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

近年、充実しつつある航空機などの機動プラットフォームによる大気CO<sub>2</sub>観測データを最大限に活かし、地表面CO<sub>2</sub>フラックスの高解像度推定を可能とするため、データ同化手法を用いたインバージョンシステムを新たに開発した。このシステムは、大気輸送モデルNICAM-TMのオフライン・フォワードモデル、アジョイントモデル、及び、降下法アルゴリズムPOpULarから成る4次元変分法システムとして構築されている。さらに、このインバージョンシステムによるCO<sub>2</sub>フラックス推定の性能を高めるため、航空機データの時空間変動スケールを評価し、データ特性を詳細に把握したうえでデータの最適化を行った。開発したシステムは、フォワードモデルやアジョイントモデルの精度検証から双子実験によるシステム全体の検証に至るまで、一連の検証実験を経て、十分な性能を発揮できることを確認した。さらに、同システムを使って、航空機観測プロジェクトCONTRAILの実観測データからフラックス推定を行った。2015年のエルニーニョ現象に起因する東南アジアの大規模森林火災に着目した解析から、森林火災起源CO<sub>2</sub>フラックスの診断モデル高度化に有用な示唆を得た。本研究により、スケールギャップによって今まで困難であったインバージョン解析（トップダウン・アプローチ）によるフラックス推定値と陸域生態系モデル等（ボトムアップ・アプローチ）によるフラックス推定値との比較が容易になった。さらに、得られる高解像度のCO<sub>2</sub>フラックス推定値は、大都市からの排出や森林火災など、小スケールのCO<sub>2</sub>フラックス変動の検出や監視に資する有用な情報を与えるものと期待される。

#### [キーワード]

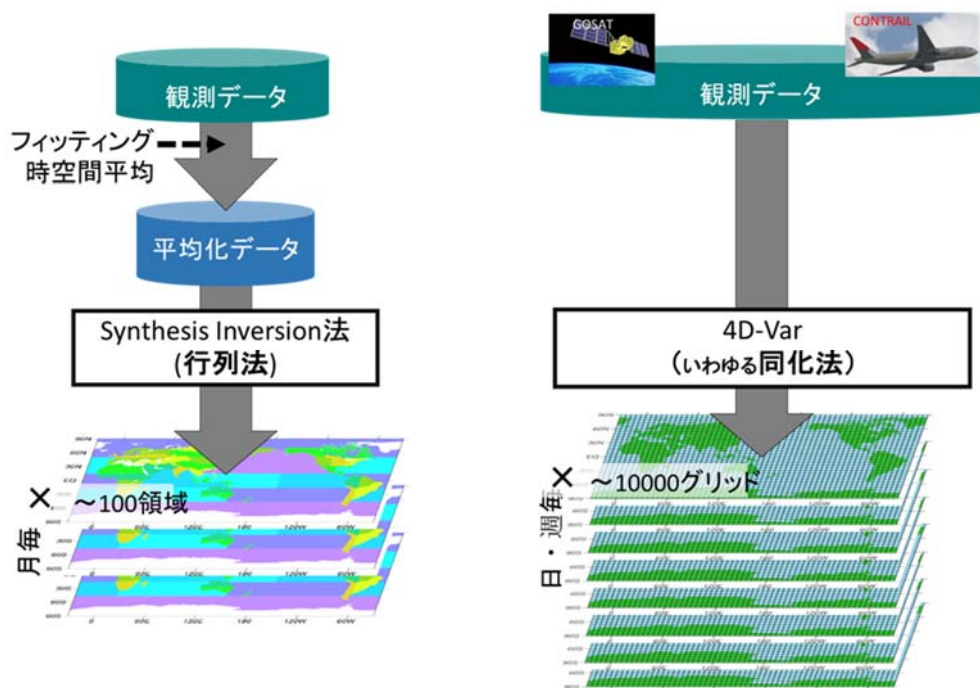
二酸化炭素、航空機観測、データ同化、インバージョン解析

## 1. はじめに

従来の大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の観測は、清浄大気をターゲットとしたバックグラウンド・サイトにおけるフラスコ・サンプリングが主流であり、観測点数が全球で数十カ所、観測頻度が1週間程度と時空間的に疎であった。また、これらの観測データと大気輸送モデルを用いたインバージョン解析 (トップダウン・アプローチ) による地表面CO<sub>2</sub>フラックス推定では、月～年毎、亜大陸規模領域 (全球を数十に分割した領域) 毎といった解像度に限られたものであった (図(3)-1、左)。しかし近年、レーザー分光法による高頻度観測装置の普及や、航空機、人工衛星といったプラットフォームでの機動的観測の充実により、大気CO<sub>2</sub>濃度の観測数は飛躍的に増加し、観測ネットワークが密になってきている。これらの観測データを最大限利用することによって高解像度のフラックス推定が可能となり、森林火災や大都市からの大規模排出といった小スケールのCO<sub>2</sub>フラックス変動の検出・監視、また、インバージョンフラックスとの比較解析を通して陸域生態系モデル (ボトムアップ・アプローチ) などの精度向上ができることと期待されている。

フラスコ・サンプリング観測が主流であった時期には、インバージョン手法として、グリーン関数を用いるシンセシス・インバージョン法 (synthesis inversion method: Enting, 2002<sup>1)</sup>) が多く用いられてきた。この手法は、行列・ベクトルの式を直接計算するため、問題のサイズ (フラックスのパラメータ数や観測データ数) に制限があるものの、従来のフラスコ・サンプリング観測を用いた亜大陸規模のフラックス推定においては十分な性能を発揮していた。しかし、近年の大量の観測データの利用、高解像度フラックス推定には、シンセシス・インバージョン法ではもはや対応することが出来ず、新たなインバージョン手法の開発が必要とされていた。そのため、欧州や米国では4次元変分法 (4D-Var) やアンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) をインバージョン解析に応用したシステムが盛んに開発されており、オペレーショナルな運用もされ始めている。4次元変分法やアンサンブル・カルマンフィルタは、気象予報や海洋力学の分野において研究・開発が進んでいる高度なデータ同化手法であり、反復やアンサンブルをとることによって解を近似的に解くため、問題のサイズにはほぼ制限はない (図(3)-1、右)。

我が国では民間航空機を用いた温室効果ガス観測プロジェクトCONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner: Machida et al., 2008<sup>2)</sup>) や温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) (Greenhouse gases Observing Satellite: Yokota et al., 2009<sup>3)</sup>) に代表されるように、全球的なCO<sub>2</sub>観測ネットワークの拡充に大きな貢献を果たしている。一方で、上述のデータ同化手法を用いたインバージョンシステムの開発は欧米に遅れをとっており、早急にデータ同化手法を用いたインバージョンシステムの研究開発が必要となっている。さらに、将来にわたって、国際的なCO<sub>2</sub>フラックスのトップダウン・アプローチ研究を主導するためには、大気輸送モデルやデータ同化に関する先駆的な手法開発、また、観測データの最適化なども含めた、データ同化システム全体の高度化を図っていく必要がある。



図(3)-1 インバージョン解析の概念図。左は従来のシンセシス・インバージョン法によるもの。右は本研究で開発した同化手法によるもの。

## 2. 研究開発目的

そこで本サブテーマ（3）では、統合的解析システムのトップダウン・アプローチ部分について中核となるシステムを目指し、具体的に以下の3つの項目を目的とする。

### （1）航空機観測で得られるCO<sub>2</sub>濃度変動の時空間スケールの把握

データ同化手法によって観測データ数に制限はなくなるものの、大気輸送モデルの解像度以上のデータや似通った情報を持つ（互いに相関関係のある）データを多く導入することは、同化計算を非効率にするとともにフラックス推定の精度低下を引き起こす恐れがある。CONTRAILプロジェクトによるCO<sub>2</sub>観測は非常に密であるため、同化システムに導入する前にデータの最適化を施す必要がある。この最適化のために、CONTRAILによって観測されるCO<sub>2</sub>濃度変動について時空間スケールの評価を行う。

### （2）データ同化手法を用いたCO<sub>2</sub>インバージョンシステムの開発

大量の観測データを利用した高解像度のフラックス推定を可能にするため、大気輸送モデルNICAM-TM(Nonhydrostatic ICOSahedral Atmospheric Model-based Transport Model)をベースと

して、4次元変分法を用いたCO<sub>2</sub>インバージョンシステムを開発する。NICAM-TMは数値的な補正スキームを用いずともトレーサの質量の全球積分値を保存することが可能であり、CO<sub>2</sub>のような長寿命気体の大気輸送計算に適したモデルである。これにより、解析期間を長期にわたってとったとしてもCO<sub>2</sub>収支を正確に見積もることができると期待される。

### (3) 東南アジア地域のCO<sub>2</sub>フラックス変動の把握

サブテーマ(1)で強化されたCONTRAILのアジア・太平洋におけるCO<sub>2</sub>観測を活かしてインバージョン解析を行い、特に大規模なエルニーニョが発生した2015年の東南アジア地域に着目してCO<sub>2</sub>フラックスの高解像度の時空間変動を把握する。ここで、上記(1)の結果をもとにしてCONTRAILデータの最適化を行い、上記(2)で開発した同化システムに導入してインバージョン解析を行う。

## 3. 研究開発方法

### (1) CONTRAILデータの時空間変動スケールの評価

CONTRAILプロジェクトで得られた広範囲かつ高時空間分解能のCO<sub>2</sub>濃度データについて、個々の観測データが持つ時空間代表性の評価を行った。航空機は対流圏界面付近を航行するため、通常、1フライト内の観測データであっても対流圏と成層圏の観測値が混在している。そこで本解析では、選択した2地点が両方とも対流圏である観測データを対象にし、観測データ間の距離と濃度差を指標として対流圏内のCO<sub>2</sub>濃度の空間的変動強度を求めた。

### (2) インバージョンシステムNICAM-TM 4D-Varの開発

#### 1) NICAM-TMのオフライン化

本研究で用いるデータ同化手法、4次元変分法では、数十回程度の反復計算をしながら最適解を探索する。この反復計算には大気輸送モデルによる計算が大きな割合を占めているため、大気輸送モデルの高速化を図ることで、全体の計算時間が大幅に節約され、長期の解析を行う事が可能となる。そこで本研究では、大気輸送計算の高速化のためにNICAM-TMのオフライン化を行った。

NICAM-TMは、もともと親モデルNICAM (Tomita and Satoh, 2004<sup>4)</sup>; Satoh et al., 2008<sup>5)</sup>, 2014<sup>6)</sup>) にパッシブトレーサを追加したモデルで、トレーサの大気輸送計算を気象計算と同時にオンラインモデルであった (Niwa et al., 2011<sup>7)</sup>)。本研究で開発したオフラインモデルでは、このオンラインモデルにおける気象計算を省略してトレーサの輸送計算だけを行う。

大気中におけるトレーサの輸送計算は、基本的に以下の式で表すことが出来る。

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} q) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho K_v \left( \frac{\partial q}{\partial z} \right) \right] + f_c(\rho, q_w, T, M_B, q), \quad (3)-1$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $q$ はトレーサの混合比、 $\nabla \cdot$ は3次元の発散、 $\mathbf{v}$ は風速の3次元ベクトルを表す。また、 $z$ は鉛直座標で、 $K_v$ は鉛直方向の拡散係数、また $f_c$ は積雲対流による輸送を表し、 $\rho$ 、 $q$ の他、気温 $T$ や水蒸気、雲水量など水物質の混合比 $q_w$ 、雲底での質量フラックス $M_B$ などから

計算される。この式にある $q$ 以外の気象パラメータを、親モデル（またはNICAM-TMのオンライン版）であらかじめ計算をしてストレージに格納しておき、オフラインモデルはそのデータを随時読み込みながら計算を行う。なお本研究で行ったインバージョン解析を含む全てのNICAM-TMによる計算では、水平解像度をglevel-5（格子間隔約240 km）とし、鉛直層数は40層とした。

## 2) NICAM-TMのアジョイントモデル

上記オフラインモデルからNICAM-TMのアジョイントモデルを開発した。アジョイントモデルは、通常の大気輸送モデル（アジョイントモデルとの対比でフォワードモデルとも呼ぶ）とは逆に、大気中の濃度の観測値から地表面のフラックス値に向かって“感度”を計算するモデルである。ここで“感度”とはフラックスの強度が変化した際にどれだけ大気中で観測される濃度値が変化するかを示したものである。このアジョイントモデルは、4次元変分法の反復計算に必要な評価関数の勾配（後述）を求めるために用いられる。本研究では、2種類のアプローチでアジョイントモデルを開発した。一つは、フォワードモデルを直接、転置して作成する離散アジョイント（discrete adjoint: DA）、もう一つは、連続系における大気輸送の式をラグランジュの未定乗数法と部分積分を用いてアジョイント輸送方程式を導出し、それから離散化して作成する連続アジョイント（continuous adjoint: CA）である。

## 3) 4次元変分法システムの構築

### a. システムの概要

以上の1)、2)で開発したNICAM-TMのオフラインのフォワードモデル及びアジョイントモデルを用いて、4次元変分法システムNICAM-TM 4D-Varを構築した。図(3)-2に構築したシステムの概念図を示す。

4次元変分法では以下のような式を用いて評価関数を定義する。

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{B}^{-1}\mathbf{x} + \frac{1}{2}(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y}^{\text{dobs}})^T\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y}^{\text{dobs}}), \quad (3)-2$$

ここで $\mathbf{M}$ はモデル輸送を表現する行列、ベクトル $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}^{\text{dobs}}$ はそれぞれ、モデル内で表現される地表面フラックス（場合によっては初期値の濃度も含む）の初期値 $\mathbf{x}^{\text{pri}}$ からの偏差、フラックス初期値からフォワードモデルで計算される濃度値を観測値 $\mathbf{y}$ から引いたもの（ $\mathbf{y}^{\text{dobs}} \equiv \mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{x}^{\text{pri}}$ ）を表す。また、 $\mathbf{B}$ は $\mathbf{x}$ の初期値誤差共分散行列、 $\mathbf{R}$ はモデル-観測間誤差共分散行列を表す。4次元変分法では、この評価関数の値が最小となるような $\mathbf{x}$ を反復法によって求める。その反復計算では評価関数とその勾配、

$$\mathbf{g} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{x} + \mathbf{M}^T\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y}^{\text{dobs}}), \quad (3)-3$$

から降下法を用いて最適な解 $\mathbf{x}$ が探索される。ここで $\mathbf{M}$ の転置行列 $\mathbf{M}^T$ がアジョイントモデルに相当する。4次元変分法の反復計算について、流れをまとめると以下ようになる（各番号は図(3)-2内の番号と対応している）。

(i) : NICAM-TMのオンラインモデルを用いて、解析期間中のオフラインモデルを駆動するための気象データを作成し、ストレージに格納する。この計算の際、客観解析データでモデルをナッジ

ングし、現実の気象場を再現する。

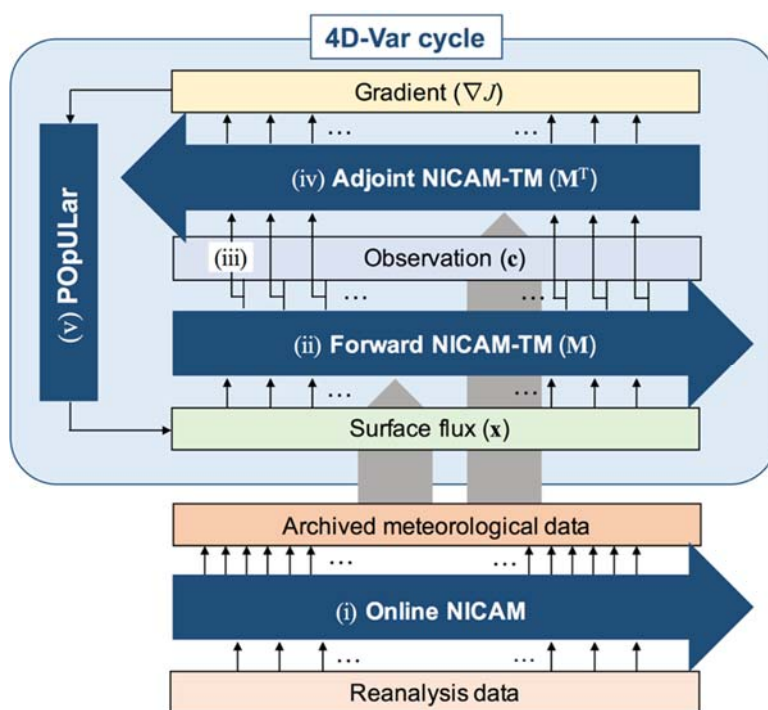
(ii) : フラックス初期値からオフラインのフォワードモデルを用いて各観測データに対応する大気CO<sub>2</sub>濃度を計算する (式(3)-3の $\mathbf{M}\mathbf{x}$ に相当)。

(iii) : (ii)の値と観測値の差に対して観測誤差で重み付けし、アジョイントモデルへの入力データを作成する (式(3)-3の $\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{x}-\mathbf{y}^{\text{dobs}})$ に相当)。

(iv) : (iii)のデータを入力しながらアジョイントモデルを走らせ (式(3)-3の $\mathbf{M}^T\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{x}-\mathbf{y}^{\text{dobs}})$ に相当)、式(3)-3で表される評価関数の勾配を計算する。

(v) : (iv)で得られた勾配と評価関数の値から降下法によりフラックス初期値 $\mathbf{x}$ を修正する。

フラックス初期値を(v)で得られたものに置き換えた後、再度(ii)に戻って同様の(v)までの計算を行う。この一連の計算を評価関数の値が収束するまで繰り返すことにより、最適な $\mathbf{x}$ の解を求める。



図(3)-2 NICAM-TM 4D-Var の概要図

## b. 降下法POpULar

本インバージョンシステムでは、降下法に、海洋モデルでのデータ同化を目的として開発されたPOpULar (Fujii and Kamachi, 2003<sup>8)</sup>; Fujii, 2005<sup>9)</sup>)を用いた。POpULarは基本アルゴリズムとして準ニュートン法を採用しているが、通常アルゴリズムとは異なり、初期推定値の誤差共分散行列 $\mathbf{B}$ の逆行列や $\mathbf{B}^{1/2}$ を陽に計算する必要がないため、 $\mathbf{B}$ に非対角要素を容易に導入できるという利点がある。 $\mathbf{B}$ の非対角要素は異なるフラックス間の誤差相関を表すが、この誤差相関を

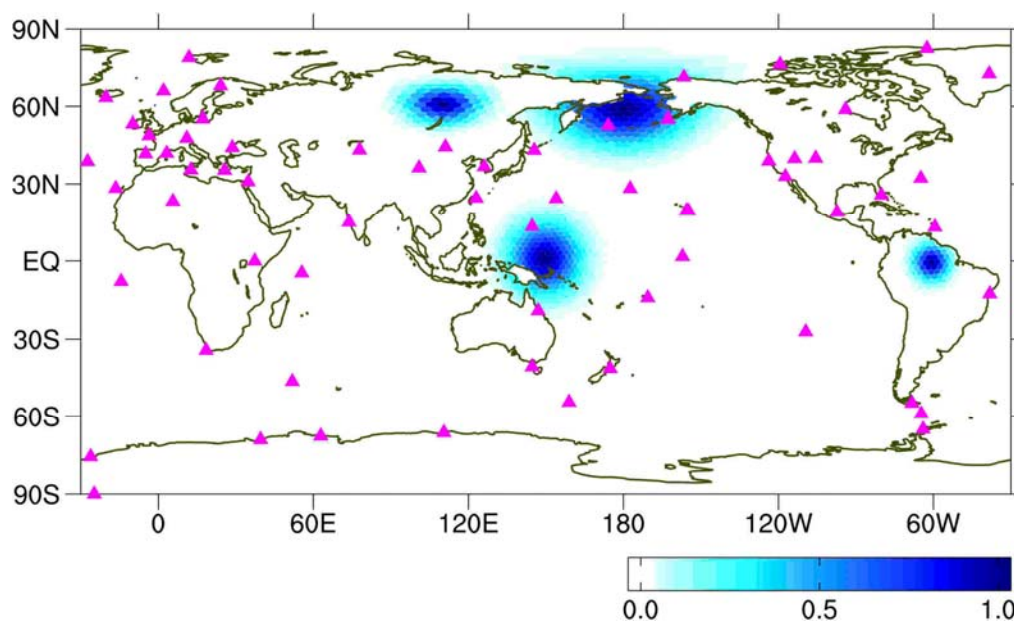
導入することにより、観測データの情報をより幅広くフラックス修正に伝播させることが出来る。特に、観測データが疎な場合には、この誤差相関を導入することにより、解析精度を高めることが出来ると期待される。

#### 4) 双子実験による検証

本研究で構築したシステムの検証のため、CO<sub>2</sub>インバージョン解析の双子実験を行った。双子実験では、まず、あるフラックスデータを真値とし、そのフラックスからフォワードモデルを使って擬似的な観測データを作成する。その後、真値に用いたものとは異なるフラックスデータを初期値とし、疑似観測データをシステムに同化してインバージョン解析を行う。最終的にフラックス解析値が初期値から真値に近づいたかどうかをみることで、システムが適切にフラックスの最適化を行うことが出来るかどうかを検証することが出来る。

図(3)-3はこの双子実験で用いた観測点の分布を示す。ここでは、従来のインバージョン解析で良く用いられる地上観測の65カ所を選定し、また、簡単のため、全て1週間毎のフラスコ・サンプリング観測と仮定して疑似観測データを作成した。解析期間は2010年の1年間でCO<sub>2</sub>フラックスは真値も初期値も月毎に与え、フラックスの解析も月毎に行った。真値のフラックスデータには、陸域植生モデルCASA (Carnegie-Ames-Stanford-Approach: Randerson et al., 1997<sup>10</sup>) と森林火災エミッションデータGFED (Global Fire Emissions Database) のversion 3 (van der Werf et al., 2010<sup>11</sup>)、海洋起源フラックスとしてTakahashi et al., (2009)<sup>12</sup>を用いた。一方、初期値のフラックスとしては、陸域生態系モデルVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases: Ito and Inatomi, 2012<sup>13</sup>) のNBP (Net Biome Production)、海洋起源フラックスとしてIida et al., (2015)<sup>14</sup>を用いた。また、真値、初期値共にCDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) の化石燃料起源フラックス(Andres et al., 2013)<sup>15</sup>も与えた。

初期値誤差共分散行列の非対角要素には、陸域で500kmの相関スケール、海洋で1000kmの相関スケールのガウス分布を空間方向の相関分布と仮定して与えた(図(3)-3に陸域、海洋の相関分布の例をそれぞれ2つ示す)。一方、本実験では月毎と比較的粗い時間解像度のフラックスを解析するため、時間方向の相関は無視した。



図(3)-3 双子実験で用いた観測点の位置（マゼンタの▲）と初期値誤差共分散行列の非対角要素に用いた相関の分布（青の陰影）。相関は例として、二つの陸上のグリッド（60°N, 110°E と 60°N, 180°）と二つの海上のグリッド（0°, 150°E と 0°, 60°W）に対する分布を示す。

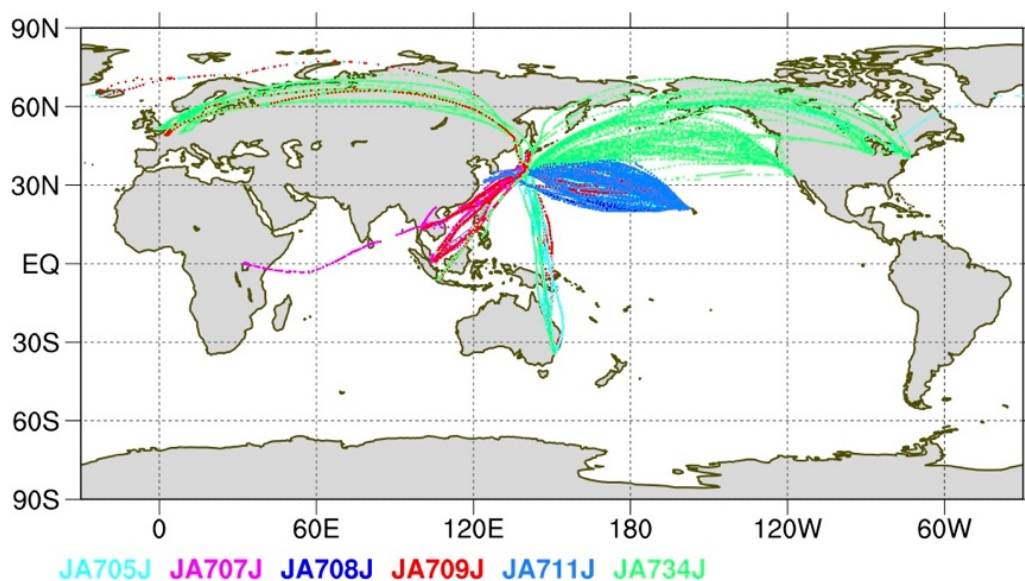
### （3）CONTRAILデータの最適化とインバージョン解析

上記インバージョンシステムNICAM-TM 4D-Varを用いて、CONTRAILプロジェクトによる実観測データからCO<sub>2</sub>フラックス推定を行った。ここでは、観測データとしてCONTRAILのCO<sub>2</sub>連続データのみを用い、解析期間は2015年の1月から12月までの1年間とした。2015年は大規模なエルニーニョ現象が発現した年で、東南アジアでは多くの森林火災が発生し、大量のCO<sub>2</sub>が大気へ放出された可能性が指摘されている。そのため、本研究では、特に東南アジアに注目して解析を行った。

実観測データを用いたインバージョン解析の予備調査として、（2）-4）と同様な双子実験を、2015年のCONTRAIL観測の疑似データを用いて行った。この実験では、まず、（1）で得たCONTRAILデータの時空間変動スケールをもとにCONTRAILデータの最適化を施し、その効果を評価した。さらに、フラックスの時間解像度を（2）-4）の双子実験で用いた月毎から日毎に高めた実験も行い、森林火災による短期的なCO<sub>2</sub>放出イベントの再現可能性について調査した。この双子実験による予備調査の後、CONTRAILの実観測データを用いたインバージョン解析を行った。

図(3)-4に2015年の1年間の期間におけるCONTRAILのCO<sub>2</sub>連続観測の観測点を示す。これを見ると、ヨーロッパや北米、ハワイ、東南アジア（バンコク、シンガポール）、オーストラリア（シドニー）など様々な航路においてデータが取得されていることが分かる。特に本解析がターゲットとしている東南アジアでは、ほぼ毎月、数フライト以上のデータが取得されており、観測データが充実しているため、精度の良いフラックス推定を行うことができると期待される。



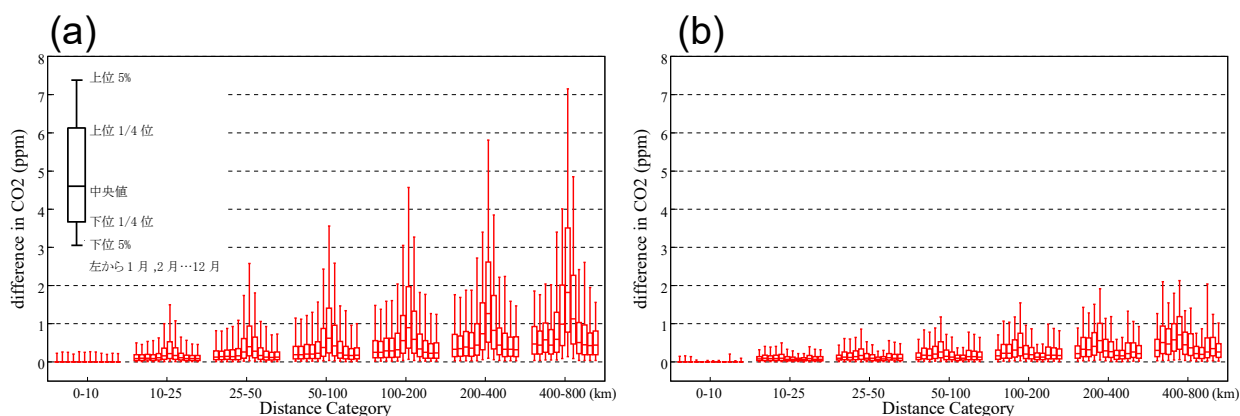


図(3)-4 2015年のCONTRAILによるCO<sub>2</sub>連続観測の分布。航空機の機番別に色で分けて示す。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) CONTRAILデータの時空間変動スケールの評価

日本と欧州を結ぶ路線（計1137便）で観測されたCO<sub>2</sub>濃度データについて、同一フライト、北緯40度から70度、高度8km以上対流圏界面高度以下、高度差100m以内である2点の濃度差の分布を求めたものを図(3)-5(a)に示す。



図(3)-5 2点間の距離に対するCO<sub>2</sub>濃度差の分布。(a)ヨーロッパ便と(b)オーストラリア便南緯10度から20度の上部対流圏の観測データについての計算結果。各距離カテゴリー別に、左から1月、2月…12月までの箱ひげ図で示す。

観測された変動強度の季節変化を見ると、9月から5月は比較的空間変動が小さく、200km以下の距離では2点間の濃度差は75%以上の確率で0.6ppm以下、400kmまで距離を伸ばしても75%以上で1ppm以下の濃度差となっており、濃度変動は比較的小さく、ひとつひとつのCO<sub>2</sub>観測値の持つ空間代表性は極めて高いことが示唆された。これに対して、6月から8月には変動強度が9-5月の2-3倍に増大し、空間スケールの小さい変動が多く観測されていることがわかった。例えば7月には、濃度差が1ppm以下に収まる確率が75%以上であるのは50km以内、差が2ppmであると200km以内といった空間スケールでCO<sub>2</sub>濃度の変動が生じていることがわかった。

次に南半球低緯度におけるCO<sub>2</sub>濃度の変動強度の例を示す。日本とオーストラリアを結ぶ路線(計836便)を対象とし、同一フライト、南緯10度から20度、高度8km以上対流圏界面以下、高度差100m以下について濃度差を求めた結果を図(3)-5(b)に示す。西太平洋上で観測された濃度差は欧州便と比較して小さく、距離が800km程度離れていても濃度差は75%以上の確率で1ppm以下であった。図(3)-5(b)では5月頃に変動強度が極大となり(~1ppm)、他の月に比較して2-3倍の空間変動を持ち、濃度極大時に変動強度が大きくなる傾向が認められた。他の緯度帯でも解析を行い、75%以上の確率でCO<sub>2</sub>濃度差が、それぞれ0.5, 1.0, 2.0ppm以内となる空間スケールを推定することができた(表(3)-1)。

表(3)-1 各領域・季節において濃度差が閾値以下となる空間スケール

	濃度差の 閾値(75%)	ユーラシア大陸上 (40-70N)	西太平洋上 (20-30N)	西太平洋上 (10N-Eq.)	西太平洋上 (20-30S)
1月	~0.5 ppm	<200 km	<400 km	~800 km	<400 km
	~1.0 ppm	>800 km	>800 km	-	>800 km
	~2.0 ppm	-	-	-	-
4月	~0.5 ppm	<100 km	<100 km	<200 km	<100 km
	~1.0 ppm	>800 km	<200 km	>800 km	>800 km
	~2.0 ppm	-	~800km	-	-
7月	~0.5 ppm	<25 km	<200 km	~800 km	~400 km
	~1.0 ppm	<50 km	>800 km	-	>800 km
	~2.0 ppm	<200 km	-	-	-
10月	~0.5 ppm	<200 km	<400 km	~800 km	~100 km
	~1.0 ppm	>800 km	>800 km	-	~400 km
	~2.0 ppm	-	-	-	~800 km

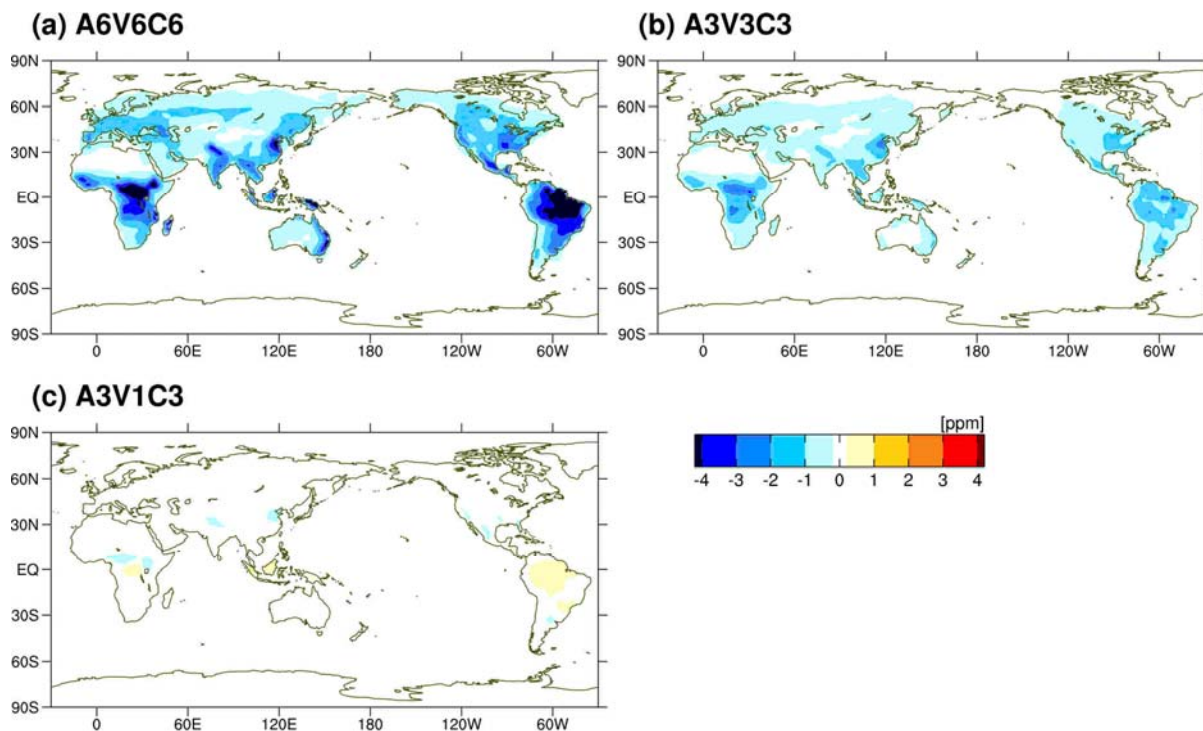
## (2) インバージョンシステムNICAM-TM 4D-Varの開発

### 1) オフラインモデルの誤差評価

まず始めに、開発したNICAM-TMのオフライン・フォワードモデルについて評価を行った。オフラインモデルは前述の通りオンラインモデルから得られる気象データを用いて駆動されるが、そ

の気象データはストレージ容量の制約上、モデルステップよりも大きい時間ステップで出力する必要がある。このように、オフラインモデルでは間引かれた気象データでトレーサの輸送計算が行われるため、オンラインモデルの計算結果と差異が生じる。この差異は気象データを間引いたことによって生じる誤差 (data thinning error) であり、出来るだけ小さく抑える必要がある。本研究では、ストレージの容量に収まる範囲内で、この気象データの間隔を、移流、鉛直拡散、積雲対流の3つの輸送過程について、それぞれ変化させ、data thinning errorを評価した。

図(3)-6にオフラインモデルとオンラインモデルで計算されたCO<sub>2</sub>地表面濃度の年間平均値の差を示す。ここでは3通りのオフラインモデルの計算結果 (A6V6C6:全てのプロセスで6時間毎、A3V3C3:全てのプロセスで3時間毎、A3V1C3:移流(A)と積雲対流(C)は3時間毎、鉛直拡散(V)は1時間毎)のみ示している。この図より、気象データが3、6時間毎と粗い場合 (A6V6C6、A3V3C3) には、植生の活発な地域で特に負のバイアスが生じることがわかる。これは、植生によるCO<sub>2</sub>フラックスが大きく日変化している一方で、気象場の日変化が正しく表現されていない (具体的には夜間混合層内での植物呼吸による高濃度CO<sub>2</sub>の蓄積が弱まる) ために生じるもので、植物の光合成/呼吸が活発な夏季や雨季にバイアスが特に顕著であった。一方、移流や積雲対流に関わるデータについては3時間毎のまま、鉛直拡散にかかわるデータのみを1時間毎とすると (A3V1C3)、オフラインとオンラインモデルの間で差はほとんど生じなくなることがわかる。また、オフラインとオンラインモデル間の差の二乗平均平方根をとると、A3V1C3のケースにおいては、地表のみならずモデル内の全ての領域において、0.2 ppm以内にほぼ収まっていた。これは、実際の観測データとモデルの比較をした場合に、ほぼ無視出来る程度に小さいものであり、A3V1C3の気象データ間隔を用いれば、オフラインモデルはオンラインモデルと同等の性能を有していると言える。また、A3V1C3の気象データの容量は、2バイト整数を用いた圧縮操作を用いれば、~50GB/年程度であり、長期のインバージョン解析も可能な大きさとなっている (なお、この圧縮操作による精度低下はほとんど無いことを確認している)。このことより、以後、オフライン及びアジョイントモデルを駆動する際の気象データの時間間隔は、A3V1C3をデフォルトとすることにした。

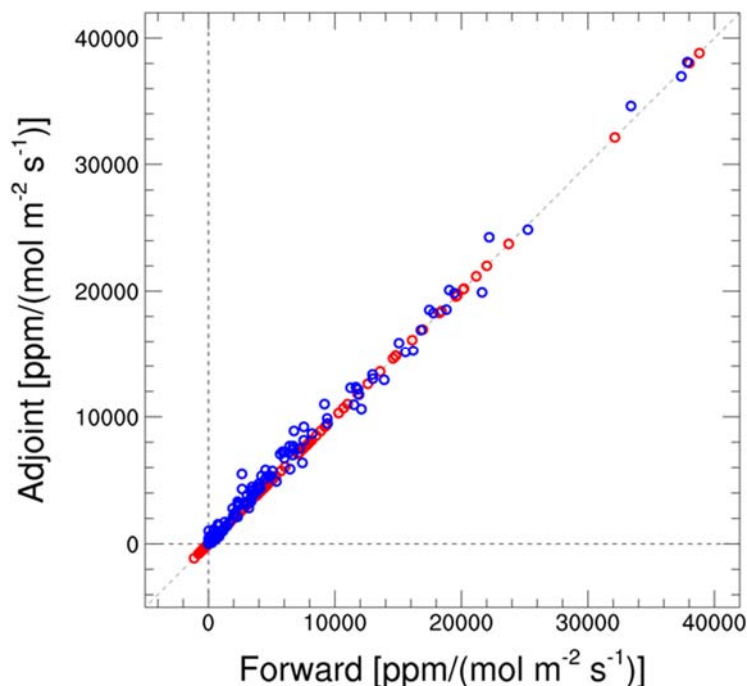


図(3)-6 CO<sub>2</sub>地表面濃度の年平均値のオフラインモデルとオンラインモデルの差。負値はオフラインモデルの値が小さいことを示す。

## 2) アジョイントモデルの検証

本研究で開発したアジョイントモデルの検証のため、アジア大陸からのアウトフローイベントについて、いくつかの地点における観測値のフラックスに対する感度を、アジョイントモデルとフォワードモデルでそれぞれ計算し、比較した(図(3)-7)。この比較により、理論的なフォワード計算とアジョイント計算の関係( $(\mathbf{M}\mathbf{x})^T\mathbf{y}=\mathbf{x}^T(\mathbf{M}^T\mathbf{y})$ )が成り立っているかどうかを調べることが出来る。図(3)-7では、2通りのアジョイントモデル(DAとCA)を使った場合を示しているが、DAでは完全に $(\mathbf{M}\mathbf{x})^T\mathbf{y}=\mathbf{x}^T(\mathbf{M}^T\mathbf{y})$ が成り立っていることがわかる。CAでも、多少のずれはあるものの、十分に $(\mathbf{M}\mathbf{x})^T\mathbf{y}=\mathbf{x}^T(\mathbf{M}^T\mathbf{y})$ の関係が保たれていることがわかる。また、図ではDAの感度に負の値が生じていることも見て取れる。これは、DAモデルの作成の際に、モデルを線形化するため、非線形のフラックスリミッターをオフにしたためである。一方、CAモデルでは、必ずしも線形である必要はなく、フラックスリミッターをそのまま使うことが出来る。このため、図(3)-7で分かるとおり、CAの感度には負の値が生じていない。

本研究では、さらに、4次元変分法の計算においても、CAとDAとほぼ同等の収束速度を持っていることも確認したため、負の感度が生じないCAをデフォルトとして、以後のインバージョン解析に用いることにした。

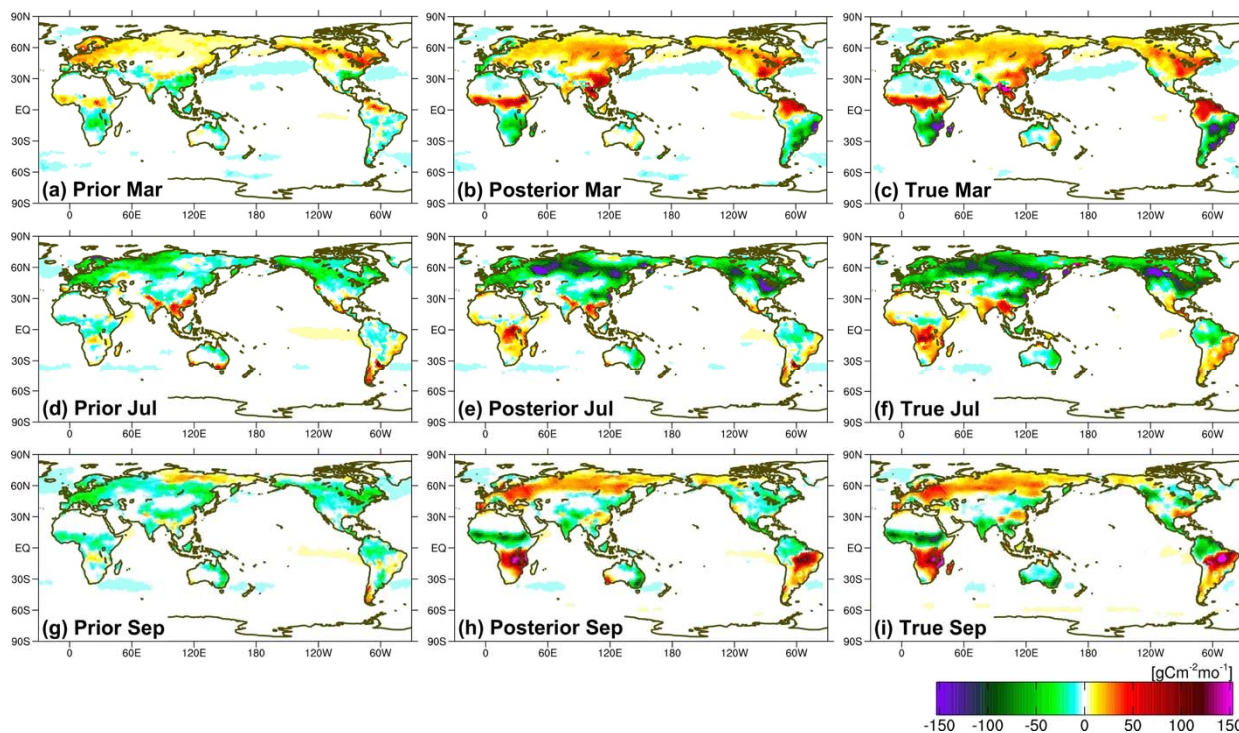


図(3)-7 アジョイントモデル及びフォワードモデルで計算された観測値のフラックスに対する感度の比較。赤、青はそれぞれ離散アジョイント (DA)、連続アジョイント (CA) を用いた場合を示す。

### 3) 双子実験

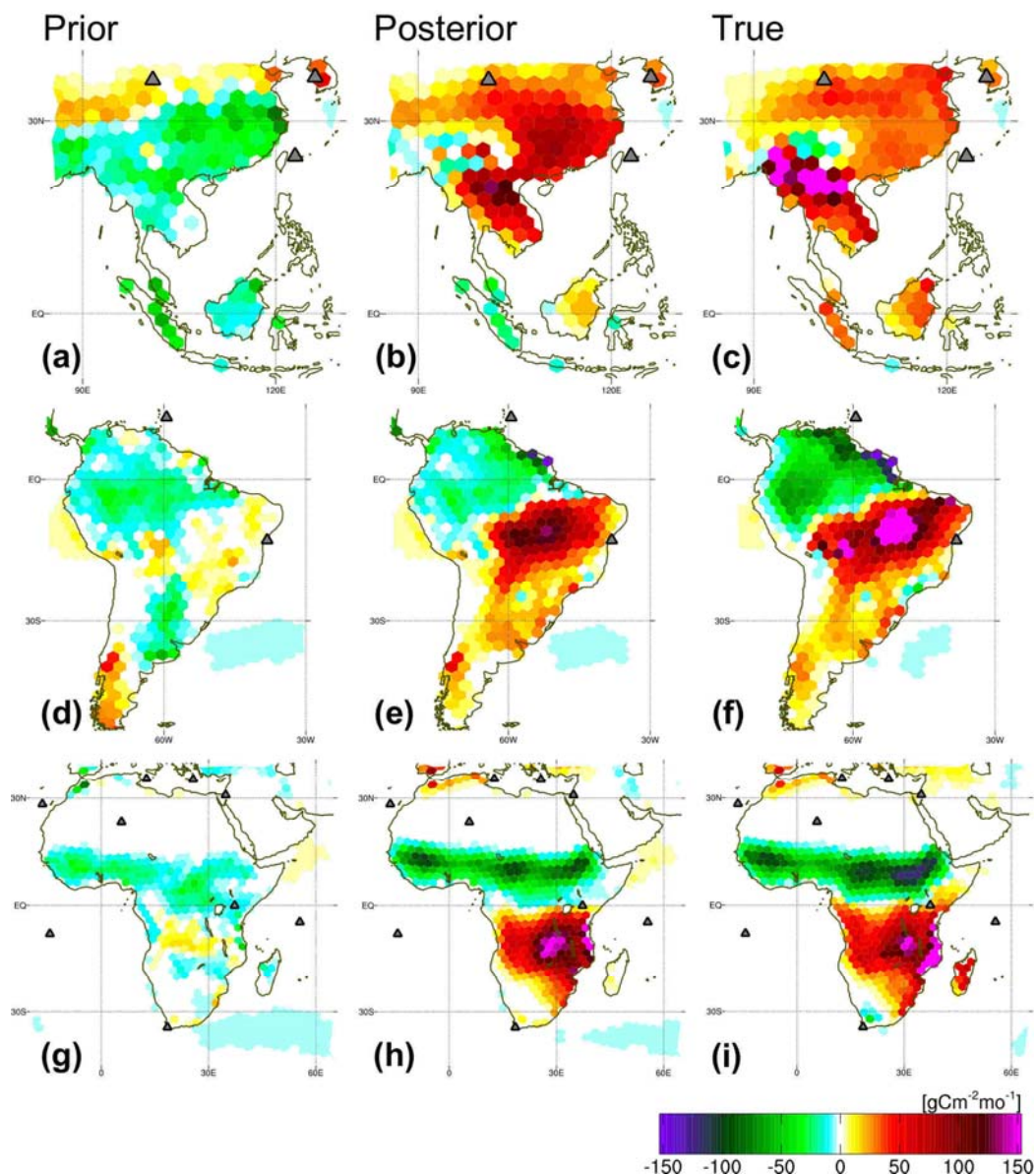
前述の通り、この双子実験では、オフラインモデルとアジョイントモデルを駆動するための気象データのデータ間隔としてA3V1C3を選択し、アジョイントモデルはCAを用いて4次元変分法の計算を行った。また、フラックス解析値を得るまでの反復回数は、評価関数の値が十分に収束する60回とした。

図(3)-8に、CO<sub>2</sub>インバージョン解析の双子実験で得られたCO<sub>2</sub>フラックスの分布を初期値及び真値と共に示す。この図より、全体的に、フラックス解析値は初期値より解析値に近づいていることがわかり、本サブテーマで構築した4次元変分法インバージョンシステムが適切に動作することが分かる。3、9月のフラックス分布では、初期値で低く見積もられていた北半球中高緯度の大陸上のCO<sub>2</sub>放出が、インバージョン解析では、大きく見積もられ、より真値に近づいている。また、真値のフラックスで南米や南アフリカに見られる赤道を境にした放出・吸収の強いコントラストなども、インバージョン解析で良く再現できることがわかった。一方、7月のフラックス分布では、北半球中高緯度の大陸上のCO<sub>2</sub>吸収が、インバージョン解析で初期値よりも大きく見積もられ、真値に近くはなっているものの、強い吸収域が真値と解析値では異なっていることも見て取れる。これは、フラックスのシグナルが夏季の活発な対流活動によって上空へと運ばれやすくなり、上の観測点では補足されにくくなるためと考えられる。また、ユーラシア大陸内では観測点(図(3)-3)が少ないため、フラックス推定値がより拘束されにくくなっていることも影響していると考えられる。



図(3)-8 双子実験におけるCO<sub>2</sub>フラックスの(左)初期値、(中央)解析値、(右)真値。上段に3月、中段に7月、下段に9月の分布を示す。負の値が大気からの吸収、正の値が大気への放出を示す。

また、インバージョン解析によって森林火災の放出イベントが検出できることも、この双子実験からわかった。図(3)-9は、図(3)-8と同様、CO<sub>2</sub>フラックスの初期値、解析値、真値の分布を示す。この図(3)-9では、特に大規模な森林火災が起こった地域(東南アジア、南米、アフリカ)・時期(それぞれ3月、9月、9月)にクローズアップして、フラックス分布を示している。この図を見ると、強度に差異はあるものの、真値で見られるフラックスの正のアノマリーが、インバージョン解析でもよく再現されていることが分かる。これら真値で見られる正のフラックスアノマリーは、主に森林火災データGFEDによってもたらせているものであり、実際、2010年にはこれらの地域で大規模な森林火災が起こったことが報告されている。正確なフラックス量の推定には、さらなる観測データの充実、また、初期値誤差共分散行列の精緻化(この双子実験では、システムの動作検証を主な目的としているため、理想的な誤差共分散行列を与えた)が必要であるが、この双子実験により、所謂ホットスポットといえる、このような空間スケールのフラックス変動を検知・監視することができる可能性を本システムが有していることがわかった。

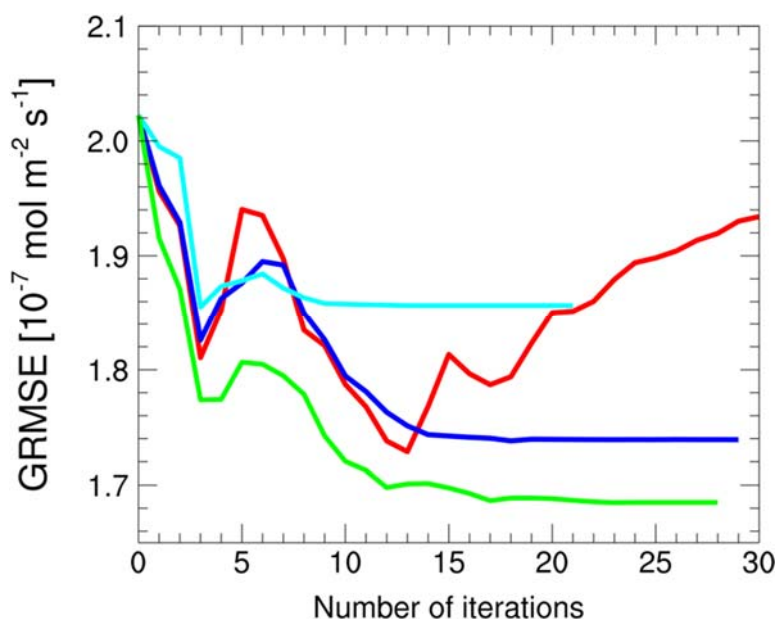


図(3)-9 図(3)-8と同じCO<sub>2</sub>フラックス分布。ただし森林火災に注目して、3月の東南アジア（上段）、9月の南アメリカ（中段）、9月のアフリカ（下段）について拡大して表示している。

### (3) CONTRAILデータの最適化とインバージョン解析

上述のCONTRAILデータの時空間変動スケールの評価結果（表(3)-1）を見ると、モデル-観測間誤差を1 ppmとしてみた場合には、CONTRAILによって観測される上部対流圏のCO<sub>2</sub>濃度は、場合によっては800kmと、モデル解像度（ $\sim 240$ km）よりも大きな空間スケールを持っていることが分かる。そこでCONTRAILデータを用いたインバージョン解析の予備調査として行った双子実験において、CONTRAILデータに対する処理を変えて4通りの解析を行った。1つは、CONTRAILデータをそのまま用いた場合、残りの3つはCONTRAILデータを時空間的に平均化した。ここで空間方向に

は、モデル格子（ $\sim 240\text{km}$ ）、または、その2倍の範囲（実際には便宜的にglevel-4のモデル格子（ $\sim 480\text{km}$ ）内で平均。この場合でもインバージョン解析はモデル解像度をglevel-5として行った）の2通りのスケールで、データを平均化した。さらに時間方向には日毎、240kmスケールの場合には、月毎にも平均化した。この双子実験の結果を図(3)-10に示す。図をみると、CONTRAILデータをそのまま用いた場合には、フラックスの解は収束せず、ある程度の回数の反復計算を経ると、誤差が大きくなっていくことがわかる。一方、時空間的にCONTRAILデータを平均化した場合は、どのケースにおいても解が収束していくことが見て取れる。また、空間方向の平均化スケールを240kmから480kmに大きくすると誤差が小さくなり、一方、時間方向のスケールを日毎から月毎に広げた場合には、誤差が大きくなることがわかった。

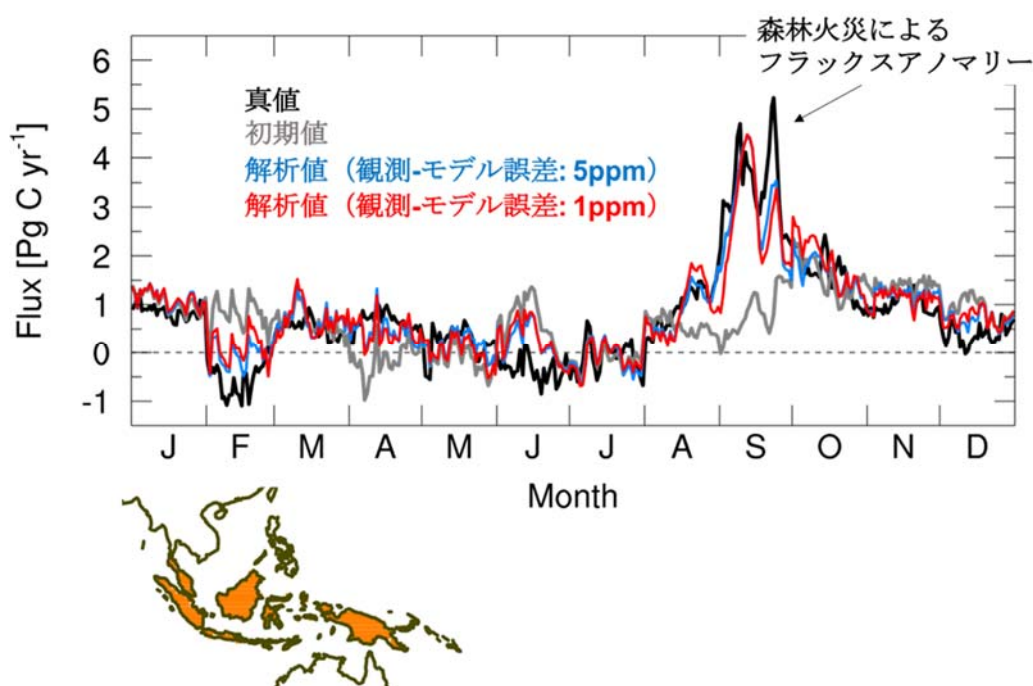


図(3)-10 フラックス解析値の全球二乗平均平方根誤差（GRMSE）の反復計算における推移。赤は観測データをそのまま用いた場合。青、水色は観測データを約240km間隔に平均し、さらにそれぞれ、日平均、月平均した場合。緑は観測データを約480km間隔で平均し、さらに日平均した場合。

CONTRAILデータを想定した次の双子実験では、フラックスの時間解像度を月毎から日毎に上げて、東南アジアで2015年の乾季後半（9、10月）に起こった大規模な森林火災によるフラックスイベントの再現性について調査した。この双子実験で得られた東南アジア域のフラックス解析値を、図(3)-11に真値と初期値と併せて示す。ここでは、真値の森林火災起源フラックスにGFED version 4の日毎の解像度のデータを用いた。この図で示すように、真値のフラックス変動には、9-10月の間に森林火災による放出イベントがあり、特に2つの時期（9月前半と9月後半）に非常に顕著なフラックス放出イベントが表現されている。双子実験では、これら9月内の2つのフラックスアノマリーが非常に良く再現されていた。このことから、CONTRAILの実データを用いた場合に、日毎といった高時間解像度であっても、東南アジア域のフラックスを精度良く推定することが出来ると期待される。



最後にCONTRAILの実データを用いたインバージョン解析を行った。この解析では、上述の双子実験で真値として用いたGFED version 4の森林火災によるCO<sub>2</sub>放出データを初期値に用い、また、海洋起源フラックスについては、船舶によるpCO<sub>2</sub>観測にもとづいて気象庁が診断的に作成したデータを用いた (Iida et al., 2015<sup>14)</sup>)。この海洋起源フラックスデータには、2015年のエルニーニョ現象に対応する変動も表現されている。このインバージョン解析の結果、大規模な森林火災が起きたとされるカリマンタン島の南部やスマトラ島において、フラックス解析値にも顕著な放出アノマリーが確認された。これらの放出アノマリーは、GFEDのものとは比べて同程度かやや小さい傾向にあり、一方で、時間的なずれも確認され、森林火災起源CO<sub>2</sub>フラックスの診断モデル高度化に有用な示唆を与えた。



図(3)-11 東南アジア域（下の図でオレンジ色の領域）におけるCO<sub>2</sub>フラックスの変動（日毎）。黒は双子実験での真値、灰色は初期値、青、赤は解析値で、それぞれ観測-モデル間誤差を5ppmと1ppmとした場合。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは、4次元変分法に基づくインバージョンシステムを開発し、さらにそのシステムを用いることにより、従来よりも飛躍的に時空間解像度の高いCO<sub>2</sub>フラックス推定を行うことに成功した。これにより、スケールギャップによって今まで困難であったインバージョン（トップダウン・アプローチ）によるフラックス推定値と陸域生態系モデル等（ボトムアップ・アプロ

チ)によるフラックス推定値との比較が容易になり、CO<sub>2</sub>フラックスメカニズムの理解向上に資する詳細な解析が可能となった。これは、地球温暖化予測において大きな不確定性要因となっている気候-炭素循環フィードバックのモデル高精度化にも繋がる成果である。

一方、大都市からの排出や森林火災など、小スケールのCO<sub>2</sub>フラックス変動の検出や監視にも、本システムで得られる高解像度CO<sub>2</sub>フラックスは有効な情報を与えることができると期待される。近年、開発途上国の化石燃料消費によるCO<sub>2</sub>排出は大幅に増加しており、先進国の排出を上回るほどになってきている。しかし、化石燃料消費統計にもとづくこれらの排出量の推定（排出インベントリ）は、先進国と比べて不確定性が大きい。インバージョンフラックスの高解像度化によって、都市域といった小スケールのCO<sub>2</sub>フラックスの検証を行うことが出来ると期待される。また、大規模なエルニーニョが出現した2015年には、世界各地で高温・干ばつが起これり、これに伴ってCO<sub>2</sub>放出が大幅に増加し、特にインドネシアでは、大規模な森林・泥炭火災が起こった。サブテーマ（1）で強化を行ったCONTRAILによるCO<sub>2</sub>観測は、この東南アジア地域を十分な密度でカバーしており、このデータを本サブテーマで開発したシステムに入力することで、当該地域のCO<sub>2</sub>フラックスを高精度に推定することに成功した。全球では熱帯地域にCO<sub>2</sub>観測が著しく不足しているなか、この成果の科学的意義は大きい。

また、現在はCONTRAILが民間航空機を用いたCO<sub>2</sub>観測の主立ったプロジェクトであるが、欧州の研究グループも同様な民間航空機を使った温室効果ガス観測を始めるなど、今後ますます定常的な航空機観測が充実してくる見込みである。こうした中、航空機観測データの特性を把握し、同化システムへ適用した本研究は世界に先立つものである。

## （2）環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 1) 本研究で開発したインバージョンシステムは、環境省-国立環境研究所-宇宙航空研究開発機構が共同で行っている衛星観測プロジェクト・温室効果ガス観測技術衛星-2号（GOSAT-2）のフラックス（L4）プロダクトの作成に用いられる見込みである。
- 2) 今後の温暖化対策の国際的枠組み「パリ協定」の効果検証に際して、本システムで得られる高解像度のCO<sub>2</sub>フラックス推定値は有用な情報を与えるものである。

## 6. 国際共同研究等の状況

- 1) 欧州の航空機観測プロジェクトIAGOSの会議に定期的に参加し、情報交換を行うと共に、今後の協力などについて議論を行っている。
- 2) 本研究で解析したCONTRAILの航空機データを米国のCO<sub>2</sub>観測衛星OCO-2のサイエンスチームに提供し、共同研究を行っている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) Y. Niwa, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan, and N. Saigusa: Geosci. Model Dev., 10, 1157-1174 (2017)  
 “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”
- 2) Y. Niwa, Y., Y. Fujii, Y. Sawa, Y. Iida, A. Ito, M. Satoh, R. Imasu, K. Tsuboi, H. Matsueda, and N. Saigusa: Geosci. Model Dev. Discuss., doi:10.5194/gmd-2016-232 (2017), accepted for Geosci. Model Dev. (2017/04/20)  
 “A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0): 2. Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion”

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 丹羽洋介：月刊海洋，3月増刊号（号外59号），60-65（2017）  
 「4次元変分法を用いたCO<sub>2</sub>インバージョン解析」

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) T. Maki and T. Nakamura: TransCom meeting, Groningen, Netherland (2014)  
 “The Impact of satellite bias correction in CO<sub>2</sub> data assimilation.”
- 2) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, R. Imasu, and M. Satoh: AOGS Annual Meeting, Sapporo, Japan (2014)  
 “Interannual variations of CO<sub>2</sub> fluxes in the Asian tropics inferred by measurements on board commercial airliner”
- 3) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, M. Nakamura, Y. Fukuyama, M. Takahashi, S. Takatsuji, H. Fujiwara, H. Nishi, K. Dehara, and Y. Baba: 13th IGAC Science Conference, Natal, Brazil (2014)  
 “Three-dimensional variations of greenhouse gases over the Asia and Pacific regions monitored by two Japanese regular aircraft observation programs”
- 4) Y. Fukuyama, M. Nakamura, M. Takahashi, S. Takatsuji, H. Fujiwara, H. Nishi, K. Dehara, Y. Baba, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, and Y. Niwa: 13th IGAC Science Conference, Natal, Brazil (2014)  
 “Operational aircraft observation of atmospheric CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO and N<sub>2</sub>O in the mid-troposphere over the western North Pacific”
- 5) 松枝秀和、町田敏暢、澤庸介、丹羽洋介：平成26年度日本気象学会秋季大会（2014）  
 「CONTRAILで観測された上部対流圏の微量気体濃度の分布と変動」

- 6) 澤庸介、町田敏暢、松枝秀和、丹羽洋介：平成26年度日本気象学会秋季大会（2014）  
「CONTRAILで観測された上部対流圏CO<sub>2</sub>の濃度増加速度の変動」
- 7) 丹羽洋介、藤井陽介、澤庸介、伊藤昭彦、飯田洋介、富田浩文、佐藤正樹、今須良一、松枝秀和、町田敏暢、三枝信子：平成26年度日本気象学会秋季大会（2014）  
「トップダウン・アプローチのCO<sub>2</sub>フラックス推定の高解像度化に向けて」
- 8) 眞木貴史、関山剛、三好建正、中村貴、岩崎俊樹：平成26年度日本気象学会秋季大会（2014）  
「衛星観測データのバイアスがCO<sub>2</sub>データ同化に与える影響」
- 9) Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Niwa: 2nd Annual Meeting of IGAS, Geneva, Switzerland (2014)  
“Variability and representativeness of CO<sub>2</sub> mixing ratios observed in CONTRAIL project”
- 10) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Fujii, A. Ito, Y. Iida, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, and N. Saigusa: 2nd Annual Meeting of IGAS, Geneva, Switzerland (2014)  
“CONTRAIL and NICAM-TM”
- 11) Y. Niwa, Y. Fujii, Y. Sawa, A. Ito, Y. Iida, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, H. Matsueda, T. Machida, and N. Saigusa: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014)  
“A 4D-Var CO<sub>2</sub> inversion system with NICAM-TM: development and sensitivity analyses”
- 12) Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, and T. Umezawa: 11th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Pasadena, USA, 2015  
“Global aircraft measurements of GHGs by CONTRAIL”
- 13) T. Maki, K. Miyazaki, and T. Iwasaki: 11th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Pasadena, USA (2015)  
“Results from a LEFTK assimilation of GOSAT CO<sub>2</sub> measurements”
- 14) Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, K. Katsumata, T. Umezawa, H. Eto, S. Morimoto, and S. Aoki: 18th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2015), San Diego, USA (2015)  
“Comparisons of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases sampled by three different methods in the CONTRAIL project”
- 15) K. Dehara, H. Koide, Y. Esaki, A. Takizawa, S. Takatsuji, T. Okuda, Y. Mori, S. Hosokawa, H. Matsueda, Y. Sawa, K. Tsuboi, and Y. Niwa: 18th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2015), San Diego, USA (2015)  
“Greenhouse Gas Observation Network of Japan Meteorological Agency in the western North Pacific”
- 16) 丹羽洋介、藤井陽介、澤庸介、松枝秀和、町田敏暢、今須良一、佐藤正樹、三枝信子：平成27年度日本気象学会秋季大会（2015）

- 「NICAM-TM 4D-Varを用いたCO<sub>2</sub>フラックス推定における観測データのインパクト評価」
- 17) 澤庸介、町田敏暢、松枝秀和、丹羽洋介、梅澤拓：平成27年度日本気象学会秋季大会 (2015)
- 「民間航空機を用いた温室効果気体の広範囲モニタリング」
- 18) 眞木貴史、関山剛、三好建正、中村貴、岩崎俊樹：平成27年度日本気象学会秋季大会 (2015)
- 「GOSAT TIR L2データを用いたCO<sub>2</sub>データ同化実験」
- 19) Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, and T. Umezawa: European Geoscience Union General Assembly 2016, Vienna, Austria (2016)
- “Inter-annual variations of CO<sub>2</sub> observed by commercial airliner in the CONTRAIL project”
- 20) Y. Niwa, Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa and N. Saigusa: JpGU Meeting 2016, Makuhari, Japan (2016)
- “Toward assimilation of CONTRAIL data to estimate surface CO<sub>2</sub> fluxes”
- 21) Y. Niwa, Y. Fujii, Y. Sawa, Y. Iida, A. Ito, M. Satoh, R. Imasu, H. Matsueda, and N. Saigusa: the 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS-12), Kyoto, Japan (2016)
- “A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var)”
- 22) T. Maki, K. Miyazaki, Y. Niwa, and T. Iwasaki: 8th GOSAT RA PI meeting, Kyoto, Japan (2016)
- “Results from a LETKF assimilation of GOSAT CO<sub>2</sub> measurements”
- 23) 眞木貴史：GOSAT専門家会合 (2016)
- 「GOSAT観測データを用いたデータ同化研究」
- 24) 眞木貴史、関山剛、三好建正、中村貴、岩崎俊樹：平成28年度日本気象学会秋季大会 (2016)
- 「複数の衛星観測データを用いたCO<sub>2</sub>データ同化実験」
- 25) 松枝秀和、町田敏暢、梅澤拓、寺尾有希夫、向井人史、澤庸介、丹羽洋介：平成28年度日本気象学会秋季大会 (2016)
- 「CONTRAILで観測された上部対流圏のメタン濃度の分布と変動」
- 26) 澤庸介、町田敏暢、松枝秀和、丹羽洋介、梅澤拓：第22回大気化学討論会 (2016)
- 「サブサンプリング法を用いた上部対流圏CO<sub>2</sub>濃度増加速度の変動評価」
- 27) 松枝秀和、町田敏暢、澤庸介、丹羽洋介、梅澤拓：第22回大気化学討論会 (2016)
- 「旅客機観測CONTRAILによる上空のCO濃度の年々変動」
- 28) Y. Niwa and Y. Fujii: the 97th AMS Annual Meeting, Seattle, USA (2017)
- “Uncertainty quantification of CO<sub>2</sub> flux estimates with a 4D-Var inversion system”

### (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) 気象研究所研究成果発表会「自然災害の軽減に向けた研究の最前線」（主催：気象研究所、平成27年3月5日、一橋大学一橋講堂、観客約260名）にて講演

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

- 1) I. G. Enting: Cambridge University Press, New York (2002)  
“Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport”
- 2) T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirotsu, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa, and T. Ogawa: J. Atmos. Oceanic Technol., 25, 1744-1754, doi:10.1175/2008JTECHA1082.1 (2008)  
“World-wide Measurements of Atmospheric CO<sub>2</sub> and Other Trace Gas Species Using Commercial Airlines”
- 3) T. Yokota, Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe, and S. Maksyutov: SOLA, 5, 160-163, doi:10.2151/sola.2009-041 (2009)  
“Global Concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results”
- 4) H. Tomita and M. Satoh: Fluid Dyn. Res., 34, 357-400, doi:10.1016/j.fluidyn.2004.03.003 (2004)  
“A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid”
- 5) M. Satoh, T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga: J. Comput. Phys., 227, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006 (2008)  
“Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations”
- 6) M. Satoh, H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue, and H. Kubokawa: Progress in Earth and Planetary Science, 1, 1-32, doi:10.1186/s40645-014-0018-1 (2014)  
“The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development”
- 7) Y. Niwa, H. Tomita, M. Satoh, and R. Imasu: J. Meteor. Soc. Japan, 89, 255-268, doi:10.2151/jmsj.2011-306 (2011)  
“A Three-Dimensional Icosahedral Grid Advection Scheme Preserving Monotonicity

and Consistency with Continuity for Atmospheric Tracer Transport”

- 8) Y. Fujii and M. Kamachi: *Tellus A*, 55, 450-454, doi:10.1034/j.1600-0870.2003.00030.x (2003)  
 “A nonlinear preconditioned quasi-Newton method without inversion of a first-guess covariance matrix in variational analyses”
- 9) Y. Fujii: *J. Oceanogr.*, 61, 167-181, doi:10.1007/s10872-005-0029-z (2005)  
 “Preconditioned Optimizing Utility for Large-dimensional analyses (POpULar)”
- 10) J. T. Randerson, M. V. Thompson, T. J. Conway, I. Y. Fung, and C. B. Field: *Global Biogeochem. Cycles*, 11, 535-560, doi:10.1029/97GB02268 (1997)  
 “The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide”
- 11) G. R. van der Werf, J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen: *Atoms. Chem. Phys.*, 10, 11 707-11 735, doi:10.5194/acp-10-11707-2010 (2010)  
 “Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009)”
- 12) T. Takahashi, S. C. Sutherland, R. Wanninkhof, C. Sweeney, R. A. Feely, D. W. Chipman, B. Hales, G. Friederich, F. Chavez, C. Sabine, A. Watson, D. C. Bakker, U. Schuster, N. Metzl, H. Yoshikawa-Inoue, M. Ishii, T. Midorikawa, Y. Nojiri, A. Koertzing, T. Steinhoff, M. Hoppema, J. Olafsson, T. S. Arnarson, B. Tilbrook, T. Johannessen, A. Olsen, R. Bellerby, C. Wong, B. Delille, N. Bates, and H. J. de Baar: *Deep-Sea Research, Part II*, 56, 554-577 (2009)  
 “Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans”
- 13) A. Ito and M. Inatomi: *Biogeosciences*, 9, 759-773, doi:10.5194/bg-9-759-2012 (2012)  
 “Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty”
- 14) Y. Iida, A. Kojima, Y. Takatani, T. Nakano, H. Sugimoto, T. Midorikawa, and M. Ishii: *J. Oceanogr.*, 71, doi:10.1007/s10872-015-0306-4 (2015)  
 “Trends in pCO<sub>2</sub> and sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global open oceans for the last two decades”
- 15) R. J. Andres, T. Boden and G. Marland: 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.2013 (2013)  
 “Monthly Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions: Mass of Emissions Gridded by One Degree Latitude by One Degree Longitude”

#### (4) 統合された陸域観測データに基づく炭素収支空間分布の検証とホットスポット推定に関する研究

国立研究開発法人 海洋研究開発機構

地球表層物質循環研究分野

市井和仁

<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

近藤雅征、柳 裕二

平成26～28年度累計予算額：33,162千円（うち平成28年度：12,501千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本サブテーマでは、トップダウン法とボトムアップ法の統合解析を行うことにより、全球とアジア域において各手法の陸域の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の収支の一致・不一致を把握した上でCO<sub>2</sub>収支を推定することと、近年の環境変動によるCO<sub>2</sub>収支の変動が大きいと考えられる地域（炭素収支変動に関するホットスポット域）を抽出し、いくつかの地域について様々なデータを用いてメカニズムを解明することを目的とした。まず、全球規模においてトップダウン・ボトムアップ手法によるCO<sub>2</sub>収支推定結果を収集し、亜大陸スケールでの比較を行い、アジア域などいくつかの地域においてIPCC 第5次評価報告書における同様の解析結果に比べてより一致する地域が得られた。この主な理由は評価に土地利用変化の影響を含めたことに起因すると考えられる。次に、東南アジア地域に着目し、過去30年における10年単位のCO<sub>2</sub>収支の変動をトップダウン・ボトムアップ手法の統合解析により実施した。この結果、ボトムアップ法に土地利用変化の効果を考慮した場合のみトップダウン法からの結果と一致し、土地利用変化による効果を導入することの重要性を指摘した。一方で様々な陸域観測データを駆使したボトムアップ推定を行うために、アジア域のCO<sub>2</sub>フラックス観測データを50サイト以上に渡り収集し、衛星観測データを用いて機械学習により広域推定を行った。機械学習による広域推定とGOSAT L4A(トップダウン法)の推定結果のCO<sub>2</sub>収支の比較においては、両者の定義の違いを加味し、土地利用変化や収穫などの定義の違いを埋めるフラックスを考慮することにより両者の推定値の差が縮まることが明らかとなった。これらのデータを利用して、近年の陸域CO<sub>2</sub>収支の変動が大きいところを抽出したところアジア域やシベリア、北米、アフリカなどの領域が抽出された。これらの領域について気候による影響と土地利用変化による影響を分離した。さらに、CO<sub>2</sub>収支変動のホットスポット領域として中国における植林政策による森林面積の増減モニタリングと2015年エルニーニョ時における東南アジアの森林火災による影響について複数の衛星データを用いて解析を実施した。

#### [キーワード]

炭素循環、陸域観測ネットワーク、統合解析、グローバル、アジア



## 1. はじめに

全球規模の温暖化予測や対策の上では、陸域をはじめとしてCO<sub>2</sub>の収支のより正確な把握が必要とされている。地域スケールにおいても2015年に策定されたパリ協定において温室効果ガスの収支のモニタリングの精緻化が必要とされるなど、CO<sub>2</sub>収支を正確に把握することは重要である。特にCO<sub>2</sub>収支の不確実性を低減させることによって、地球温暖化予測の信頼性が向上できるようになるとともに、大陸や地域スケールにおいても、気候変動などに伴う炭素循環変化の早期の検出や炭素管理に関する政策決定を支援するデータの提示が可能になる。

これまでは、陸域モデルに代表されるボトムアップ手法、大気インバースモデルに代表されるトップダウン手法が主に亜大陸スケールにおけるCO<sub>2</sub>の収支の把握に利用されてきたが、両者の推定についてはあまり合致していなかった。例えば、2013年に発行されたIPCCの第5次評価報告書の第6章では、トップダウン手法・ボトムアップ手法による陸域CO<sub>2</sub>の収支推定結果の比較が提示されているが、多くの地域で不一致が見られた。例えば、東南アジアなどのいくつかの地域では、両手法の間で、吸収・放出の符号さえも一致していなかった。従って、CO<sub>2</sub>収支について、IPCC第5次評価報告書では考慮されていない要素やデータセットを用いて、両者の推定がどの程度一致するようになるのか、より深い解析が必要となる。

IPCCの第5次評価報告書以降、陸域や大気などでは様々な観測データが利用できるようになり、上述のトップダウン手法やボトムアップ手法を統合して解析することにより、CO<sub>2</sub>収支をより正確に把握できる可能性が生まれた。具体的な観測の例としては、陸域の観測については、地上観測ネットワークのデータ整備の進行や新たな衛星観測プロダクトの登場、大気の観測については、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)の観測期間の伸長やデータ品質の向上などが挙げられる。また、これらの結果を利用し、アジア域などにおいて、炭素循環のホットスポット（気候変化が炭素循環を変化させることにより大きな炭素放出が見込まれ、気候変化を加速させる可能性のある地域）になりうる地域の抽出、変化の大きさの把握、と原因解明を行うことは、国際社会に対し温暖化対策の緊急性を強く訴えることにもなり、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた貢献となる。

## 2. 研究開発目的

本課題では、地上観測・衛星観測を含む様々な陸域観測データ、陸域プロセスモデルの出力（ボトムアップ推定法）、さらには複数のトップダウン推定法などからの大気―陸面のCO<sub>2</sub>吸収排出推定値を統合的に解析することにより、CO<sub>2</sub>収支の空間分布やそのメカニズムの推定を亜大陸スケールで行うことを第一の目的とする。次に上記のデータを利用して近年の環境変化が大きい地域（炭素循環変動のホットスポット地域）を抽出し、その環境変化の大きさを定量化し、そのメカニズムを推定することを第二の目的とする。

## 3. 研究開発方法

サブテーマ（4）では、「トップダウン手法とボトムアップ手法の統合解析を通じた炭素収支空間分布の検証」と「炭素循環変動のホットスポットの推定」を目的とし、主に全球を対象にした解析とアジア域を中心とした特定の地域を対象とした解析の両者を進めた。

手法としては、動的陸域生態系モデル（DGVM）の相互比較プロジェクト（TRENDYv2<sup>1)</sup>）、アジ

ア域における陸域炭素循環モデル相互比較研究 (Asia-MIP<sup>2)</sup>) の出力データに加え、サブテーマ (2) で構築した大気インバースモデル (ACTM)、サブテーマ (3) で開発した航空機データを同化した大気インバースモデル (NICAM-TM)、の結果を取り入れた統合解析手法を利用した。さらに、サブテーマ (1) と協力して構築した地上観測ネットワークデータ、地上観測データと衛星データに対し機械学習法を用いて推定したフラックス広域化プロダクト (FLUXCOM<sup>3)</sup>、Asia-SVR<sup>4)</sup> (サポートベクタ回帰アジア版)、Terra衛星MODISセンサなどのグローバル観測を行うセンサーデータから構築された様々な物理量プロダクト、GOSAT衛星による大気CO<sub>2</sub>濃度、また、それを利用した大気インバースモデル (GOSAT L4A<sup>5)</sup>) の結果など、さまざまなデータを利用した。AsiaFluxなどの陸域地上観測ネットワークデータやGOSAT L4Aはサブテーマ (1)、ACTMモデル結果はサブテーマ (1)、JMA, NICAM結果はサブテーマ (3) より提供を受け、FLUXCOM, Asia-SVR, Asia-MIPはサブテーマ (4) が構築したものである。

各サブテーマとの連携については、上記に述べたデータの提供に限らず、各種出力結果の妥当性などを統合的に解析することにより、サブテーマ (4) の結果を各サブグループにフィードバックすることによって各手法の改善に生かすなど、相互のフィードバックを重視して研究を進めた。

表 (4)-1 本研究において用いた主要な炭素フラックスデータセット・モデル出力一覧

アプローチ	手法	データセット名	概要
ボトムアップ法	衛星観測	植生指数など	衛星観測による植生指数、エアロゾル指数、火災頻度、土地被覆図、森林被覆率など。
	機械学習 広域化	Asia-SVR	AsiaFlux等のアジア域地上フラックス観測サイトと衛星データを用いた大気—陸域の炭素フラックスの経験的広域化推定。
		FLUXCOM	FLUXNET地上フラックス観測サイトと衛星データ等を用いた大気—陸域の炭素フラックスの経験的広域化推定。複数手法の平均値。
	プロセス モデル	Asia-MIP	アジア域における複数の陸域炭素循環モデルによる大気—陸域炭素交換量モデル比較プロジェクトの結果。アジアを対象。
TRENDYv2		複数の動的植生動態モデルによる大気・陸域炭素交換量の推定結果。全球を対象。	
トップ ダウン法	大気インバースモデル	GOSAT L4A 地上観測CO <sub>2</sub> 濃度のみからの推定	GOSAT衛星からの公式プロダクト (Ver 02.03) 地上観測CO <sub>2</sub> 濃度のみを利用した大気インバースモデル解析による結果

## (1) トップダウン法とボトムアップ法の統合解析を通じた炭素収支空間分布の検証

### 1) 全球を対象とした複数のボトムアップ法・トップダウン法の比較解析

炭素収支空間分布の検証の予備解析として、全球を対象に複数のボトムアップ法とトップダウン法による統合データの結果を取りまとめ、領域毎にCO<sub>2</sub>収支の大きさを比較した。ボトムアップ

法としてTRENDYv2（6モデル）、トップダウン法としてサブテーマ（2）（3）の結果を含む5種の大気インバースモデルの結果を利用した。また、異なる2時期のインベントリ法によるバイオマス量<sup>6)</sup>、マイクロ波衛星から推定されたバイオマス量<sup>7)</sup>より、バイオマス蓄積量の年差（以下、バイオマス増減量とする）を算出しモデル結果の比較対象とした。さらに、さまざまなデータを基に地域別の炭素収支を集約したプロジェクト（RECCAP<sup>8)</sup>）から河川への炭素流出量データ等を取得し、比較解析に加えた。

本解析では既存のIPCC 第5次評価報告書におけるトップダウン法・ボトムアップ法の比較に比較して、ボトムアップ法のTRENDYv2モデルにおいては土地利用変化の影響を考慮したモデルシミュレーションを用いた点、トップダウン法・ボトムアップ法の比較においては、河川への炭素流出量を評価に含めた点やバイオマス増減量を評価に含めた点が新たな点となる。

## 2) 東南アジアにおける複数のボトムアップ法・トップダウン法による過去30年間の炭素収支変動

続いて、全球炭素収支空間分布の比較解析において異なる手法間で最も高い整合性を示した地域の一つである東南アジア地域に着目し、過去30年間（1980年－2009年）の陸域炭素収支の変動把握とその要因の推定を行った。データは全球比較解析において取りまとめたTRENDYv2モデル、大気インバースモデル、バイオマス増減量、を使用し、これら複数手法から推定された10年単位の炭素収支について、データ相互の一貫性の確認、一貫した変動の抽出、及びその解釈を行った。特に、炭素収支変動の要因解析では、TRENDYv2モデルから大気CO<sub>2</sub>、気候、土地利用変化の個別の変化による影響を抽出し、炭素収支変動に強く影響している要素を、年代別に明らかにした。

## 3) 陸域地上観測データ統合による陸域炭素収支の把握とトップダウン推定との整合性検証

次に、既存のボトムアップ法である陸域モデルに対し地上観測データによる制約を与えるため、陸域の地上観測データを収集・構築し、空間変動パターンの解析と地上観測データの広域化を行った。本研究では、渦相関法によるCO<sub>2</sub>フラックスに加え生態学的観測（純一次生産、リターフォール、根呼吸、土壌呼吸等）、炭素蓄積量（バイオマス量、リター量、土壌有機炭素量）を文献調査により複数観測サイトで取りまとめた。本研究で利用した地上観測サイトを図(4)-1に示す。渦相関法によるCO<sub>2</sub>フラックスについては、AsiaFluxや森林総研FLUXNET、CarboEurope等の既存データベースよりデータを収集し、品質チェックや光合成・呼吸分離等の共通の処理を行い、サイト間で可能な限り均質なデータを構築した（図(4)-1 左図）。生態学的観測値については文献値を整理した（図(4)-1 右図）。

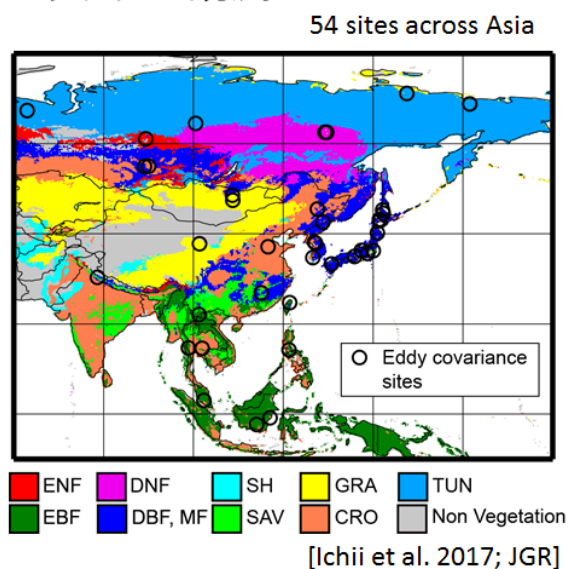
更に、亜大陸スケールよりも更に詳細な炭素収支空間分布の理解に向けて、構築したデータを解析した。まずは図(4)-1右図のサイトにおいて生態学的観測値などを利用して陸域炭素循環の様々な要素の空間分布を統計的に解析し、アジア域の炭素収支空間分布の詳細な変動要因を明らかにした。

次に、フラックス観測サイトデータ（図(4)-1左図）と衛星観測データ（Terra衛星MODISセンサの種々のプロダクト）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用いることにより、フラックス観測サイトデータの広域化を行い、光合成量と生態系CO<sub>2</sub>交換量に関してアジア域を対

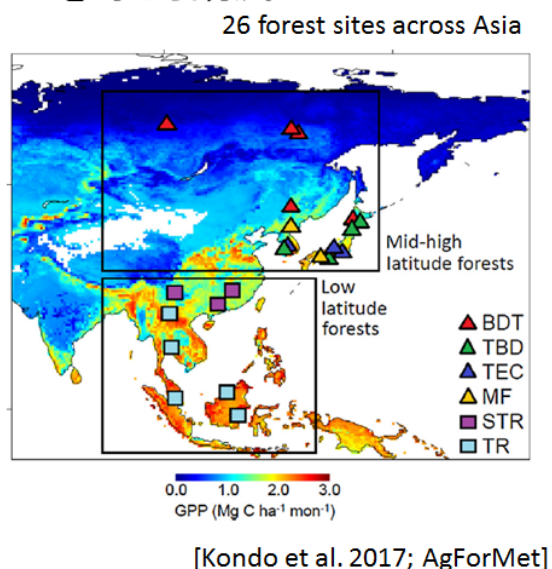
象に広域推定を行った。本解析においては54サイト約270サイト・年のデータをモデル構築・検証に利用した。モデル構築、検証の際には、10分割交差検定を利用した。精度検証を行った後に、光合成量の増減傾向の把握や、トップダウン手法であるGOSAT L4Aデータとの比較を行い、相互の手法の一貫性を相互比較した。

さらに機械学習による広域化プロダクトとして、本サブグループが参画している国際共同研究FLUXCOMプロジェクト<sup>3)</sup>において構築された、生態系CO<sub>2</sub>交換量を利用し、そのプロダクトとGOSAT L4Aデータを比較することにより、全球スケールでFLUXCOMプロダクトとGOSAT L4Aプロダクトの陸域CO<sub>2</sub>収支の一貫性の確認を行った。

## フラックス観測



## 生態学的観測



図(4)-1 本研究で用いたアジア域における陸域地上観測サイトの分布。

(左：フラックス観測、右：生態学的観測)

## (2) 炭素収支空間分布のホットスポット推定

### 1) 全球における炭素収支変動のホットスポット推定

全球を対象にしたホットスポット解析については、TRENDYv2を利用して、1960-1990年代の陸域炭素収支と2000年代の陸域炭素収支の差をとることにより、過去において大きな変動がみられた地域を抽出した。さらに、TRENDYv2モデルシミュレーションから、CO<sub>2</sub>濃度のみを変化させたシミュレーション結果、CO<sub>2</sub>濃度と気候を変化させたシミュレーション結果、CO<sub>2</sub>濃度、気候、土地利用変化を変化させたシミュレーションの3種のシミュレーション結果を利用することにより、過去の炭素収支の変動メカニズムの解析を行った。

また、GOSAT衛星プロダクトを用いたホットスポットのモニタリングの可能性を探るために、2011年の強いラニーニャ現象下で起こったとされる南半球半乾燥域の強いCO<sub>2</sub>吸収について、GOSAT衛星を用いた大気インバースモデルを用い陸域におけるCO<sub>2</sub>吸収量を定量化し、GOSAT衛星による大陸スケールの炭素収支変動検出の可能性を評価した。

## 2) アジア域における炭素収支変動のホットスポット解析

上述の1)において抽出された地域のうち、アジア域に焦点を絞り、炭素収支の大きな変動があったと考えられる領域について、種々の観測データを用いることにより、変動の大きさとその原因の把握を行った。具体的には、シベリア、中国、東南アジアの3地域に着目した。

### a. シベリアにおける過去30年間の陸域CO<sub>2</sub>収支の変動解析

また、大きな環境変動の起こりうる地域の変化要因解明解析を目的として、シベリアを選択し、ボトムアップ手法のプロセスモデル (Asia-MIP)<sup>2)</sup>、機械学習による広域化プロダクト (3(1) - 3) 章)<sup>4)</sup>、大気インバースモデルとの解析を行い、過去30年間の陸域CO<sub>2</sub>収支の変動の大きさとそのメカニズムの把握を行った。

### b. 中国の植林政策による森林面積の変化モニタリング

中国の森林植林政策による植生被覆変化の着目し、様々な衛星観測データを元にした推定結果を統合利用することにより、森林被覆の変化域の抽出を行った。さらに、植林があったと考えられる地域とその他の地域における植生指数の増加傾向の違いを解析することにより、植林政策が陸域CO<sub>2</sub>フラックスに与える影響の大きさを評価した。本解析においては、ALOS PALSARデータやLANDSATデータなどの25-30m分解能を持つ高解像度データやTerra MODISデータなどの中解像度データ(空間分解能1km程度)などの様々なプロダクトを利用した。

### c. 東南アジアにおけるエルニーニョに伴う森林火災のモニタリング

アジア域におけるホットスポットの顕著な一例として、2015年に起こった強いエルニーニョとそれに伴う東南アジアの森林火災が挙げられる。この現象による植生被覆変化の検出に向けて、複数の衛星観測プロダクト、TRMM衛星による降水量、MODISセンサによる地表面温度、植生指数、日射量、森林火災域、OMIセンサによるエアロゾル指数などを0.25度の空間解像度で8日の時間間隔でデータの準備を行い、2005-2015年における各データの推移を解析した。

## 4. 結果及び考察

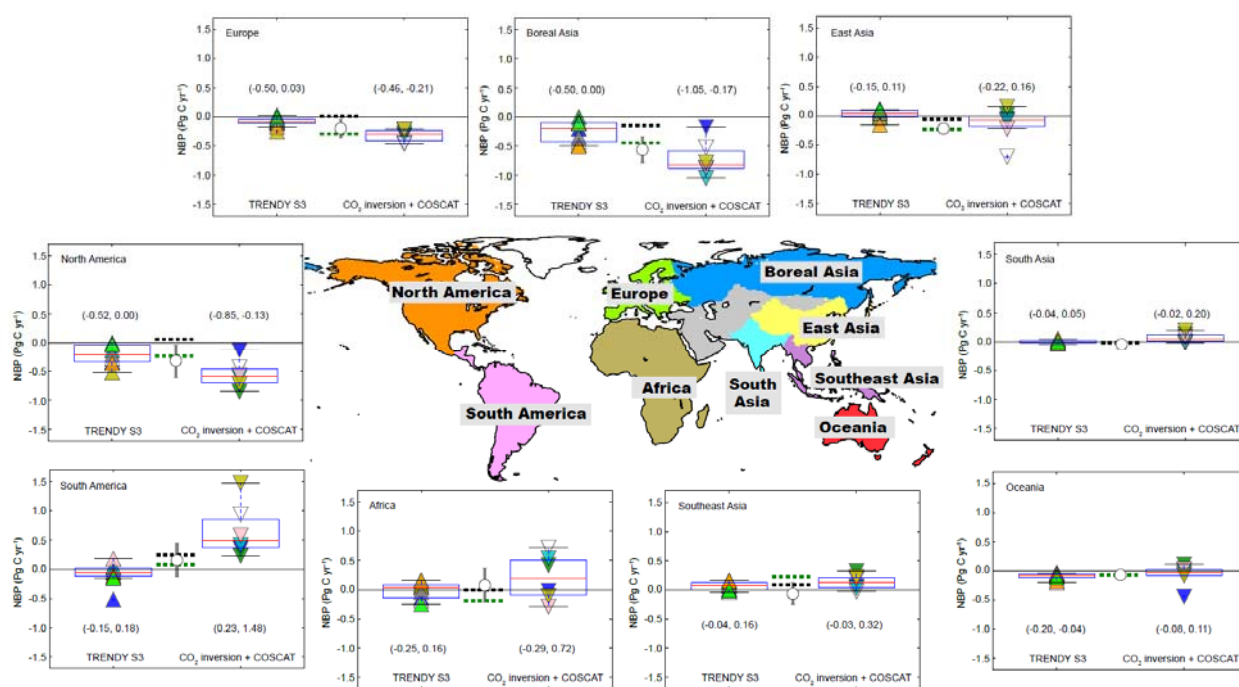
### (1) トップダウン法とボトムアップ法の統合解析を通じた炭素収支空間分布の検証

#### 1) 全球を対象とした複数のボトムアップ法・トップダウン法の比較解析

複数のボトムアップ法 (TRENDYv2) と複数のトップダウン法 (ACTM, JMA, NICAM, Jena-Inversion, MACC) の結果に加えバイオマス増減量、RECCAPの比較解析から、地域的な整合性・非整合性が明らかとなった。全球の9地域に (図(4)-2) について、1994-2009年間の炭素収支を

調査した結果、東アジア（East Asia）、南アジア（South Asia）、東南アジア（Southeast Asia）、オセアニア（Oceania）が高い手法間の整合性を示した一方で、北アメリカ（North America）、南アメリカ（South America）、亜寒帯アジア（Boreal Asia）が大きく乖離した。アジア域（東アジア・南アジア・東南アジア）については、IPCC AR5においてはトップダウン法・ボトムアップ法の間で乖離があったが、土地利用変化を考慮することにより、両手法の推定値の違いは大きく減少した。

また、北半球の地域において、大気インバースモデルがTRENDYv2より強い吸収傾向を示すことが明らかとなった。ボトムアップ法とトップダウン法による炭素収支の乖離の原因を探るためには、DGVMモデル間の詳細なパラメータの比較、感度解析、また、大気インバースモデル間の物質輸送速度の比較、モデルに使用したCO<sub>2</sub>濃度観測データの比較、などより詳細な比較解析を行うことが必要である。バイオマス増減量、RECCAPによる推定値は、ボトムアップ法とトップダウン法の間で位置し、これは、殆どの地域において強い吸収・放出のバイアスが無いことを意味している。

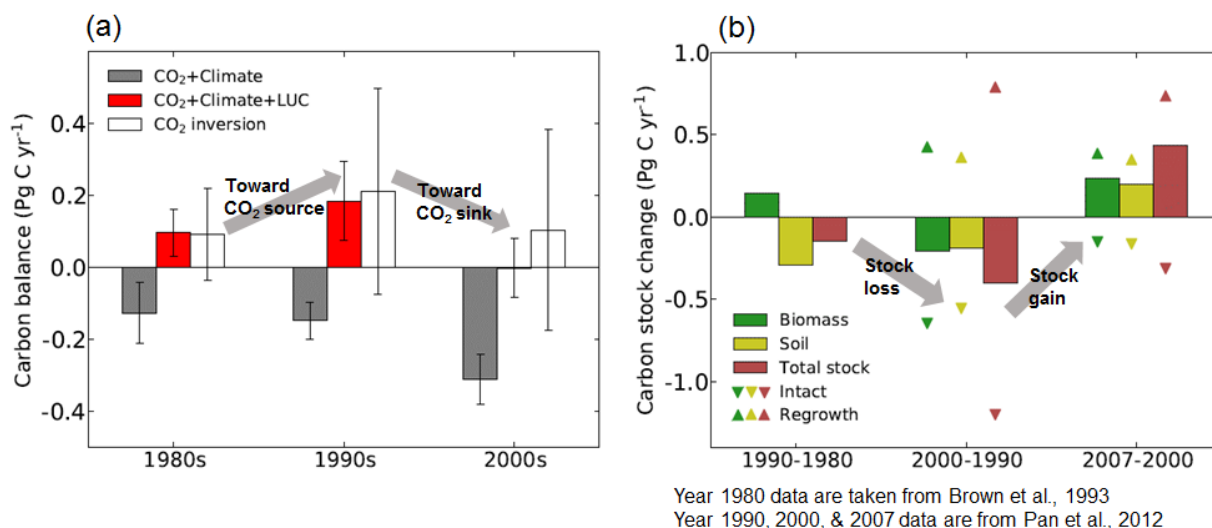


図(4)-2 全球9地域における複数のボトムアップ(TRENDY S3)・トップダウン手法(CO<sub>2</sub> inversion + COSCAT)による炭素収支の比較結果。TRENDY S3は大気CO<sub>2</sub>、気候、土地利用データにより駆動したシミュレーション結果。大気インバースモデルには手法間の定義を合わせるため、河川への炭素流出量(COSCATデータ)を加えた。衛星観測とインベントリに基づくバイオマス変化量は○で示した。Kondo et al. (準備中) から引用。

## 2) 東南アジアにおける複数のボトムアップ法・トップダウン法による過去30年間の炭素収支変動

東南アジアについては、TRENDYv2モデルと大気インバースモデル、さらにはバイオマス増減量を比較することにより、1980年代から2000年代にわたる過去30年の陸域CO<sub>2</sub>収支を解析した。10年ごとに見た場合、1980年代、90年代、2000年代の3時期について、土地利用変化による影響を考慮した場合のTRENDYv2モデル(図中 赤; CO<sub>2</sub> + Climate + LUC)と大気インバースモデルの結果が一貫した炭素収支の増減傾向を示した(図(4)-3(a) 赤vs白)。これらの傾向は、バイオマスや土壌炭素の10年毎の変動傾向ともほぼ一致した(図(4)-3(b))。一方でTRENDYv2モデルに土地利用変化による影響を考慮しない場合のシミュレーション結果を比較すると、大気インバースモデルによる推定と変動傾向が一致しなかった(図(4)-3(a) 灰vs白)。

更なる解析から、1980年代から1990年代における炭素放出の増大傾向は、土地利用変化の活発化に伴った森林減少による影響であることが分かった。また、1990年代から2000年代においては、大きなエルニーニョによる気候の変化が見られなかったことが炭素吸収の増大傾向へ向かわせることも分かった。従って東南アジアにおいては陸域炭素収支を把握するには、土地利用変化とエルニーニョなどの極端な気象現象、の2つが重要になることが明らかとなった。

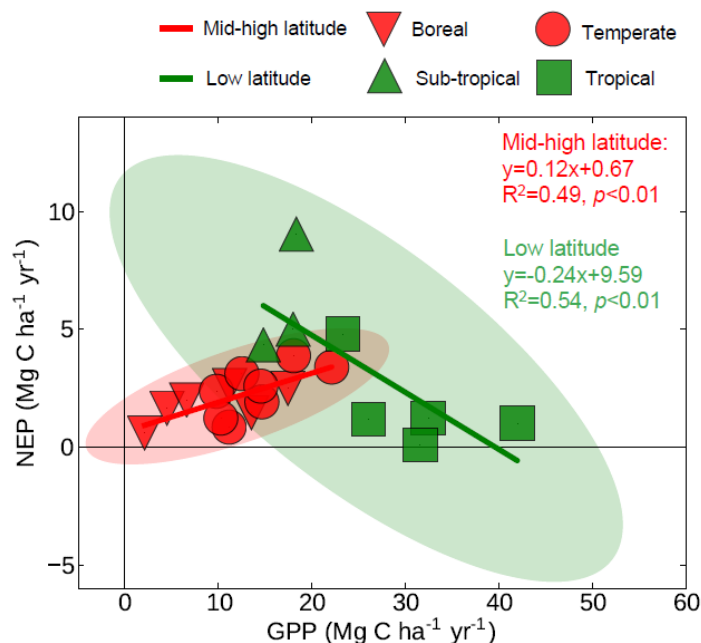


図(4)-3 東南アジア地域における (a) 複数のボトムアップ手法 (TRENDYv2モデル結果), トップダウン手法 (大気インバースモデル) による1980年-2009年までの陸域炭素収支推定結果と (b) インベントリ法による炭素蓄積量 (バイオマス・土壌有機炭素) 変化。Kondo et al. (投稿中) から引用。

## 3) 陸域地上観測データ統合による陸域炭素収支の把握とトップダウン推定との整合性検証

アジア域の森林生態系を対象に、炭素循環に関わるあらゆる観測値 (生態系観測、気象観測、地理情報) のメタデータから、陸域炭素循環の空間変動の特異なパターンが明らかになった。アジア域に広く分布する23サイト (図(4)-1) の解析から、亜寒帯域から温帯域では光合成量と炭素収支量は正の関係にあり、亜熱帯域から熱帯域では負の関係にあることが判明した (図(4)-

4)。亜寒帯域から温帯域における正の関係は、ヨーロッパ・北米の森林でも同じ結果が報告されている<sup>9)</sup>。一方で、亜熱帯域から熱帯域の負の関係は、アジア亜熱帯域に強い窒素肥沃の影響と活発な土地利用による若年林と老齢林による炭素吸収の対比に起因することが明らかになった。これらの特徴が、アジア域に特有の炭素収支空間変動を形成している。



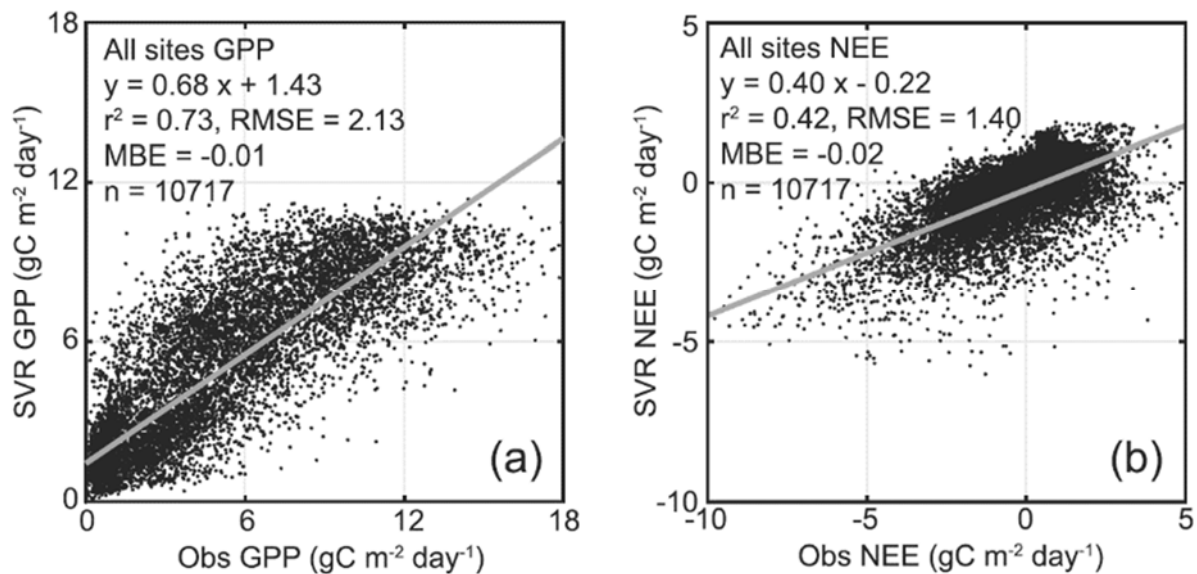
図(4)-4 アジア域のメタデータセットに使用した観測サイトにおける光合成量と炭素収支量の関係性。

Kondo et al., (2017)<sup>10)</sup> より引用。

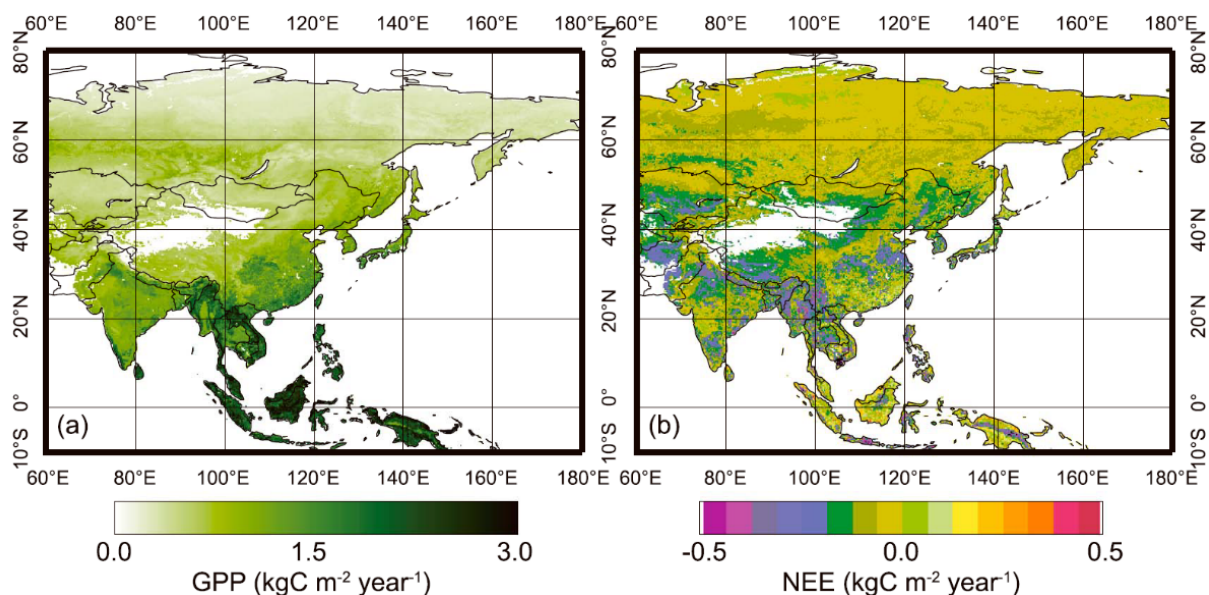
アジア域におけるフラックス観測データと衛星観測データを利用した機械学習による広域化の結果を図(4)-5, 6に示す。その結果、総一次生産量は生態系CO<sub>2</sub>交換量よりも観測の再現性が高い。いずれも機械学習の適用は広域化に有用であることを示した。なお、機械学習による推定は、衛星プロダクトであるMODIS-GPPプロダクトや陸域プロセスモデルに比べても精度が格段に高いことも示した<sup>4)</sup>。また得られた総一次生産量と生態系CO<sub>2</sub>交換量の空間分布を図(4)-6に示す。

さらに機械学習による広域化で得られた生態系CO<sub>2</sub>交換量とGOSAT L4Aからの生態系CO<sub>2</sub>交換量の比較を行った。シベリア・東アジアなどでは両者からのCO<sub>2</sub>交換量が比較的一致しているが、南アジアや東南アジアでは開きが大きかった(表(4)-2における(1)-(3)欄)。ただし、機械学習による広域化からの生態系CO<sub>2</sub>交換量は、渦相関法から得られるものであり「呼吸-光合成量」に相当するが、GOSATからの推定値は呼吸、光合成以外にも土地利用変化、河川を通じた流出、収穫などのフラックスを含むものであるために、それらの値をRECCAP<sup>8)</sup>での推定値などを加味すると、本解析の推定値とGOSATからの推定値の間の違いは小さくなった(表(4)-2における(2)-(3)欄)。従って、各手法によるCO<sub>2</sub>収支を比較する際には、定義の違いを考慮し補正することも重要であることが重要であることが明らかとなった。





図(4)-5 フラックス観測データと衛星観測データを利用した広域化の検証結果。(a)は光合成量、(b)は生態系CO<sub>2</sub>交換量の結果であり、いずれも8日平均のCO<sub>2</sub>フラックスで、すべての観測データを利用したものである。(Ichii et al. 2017<sup>4)</sup>より引用)



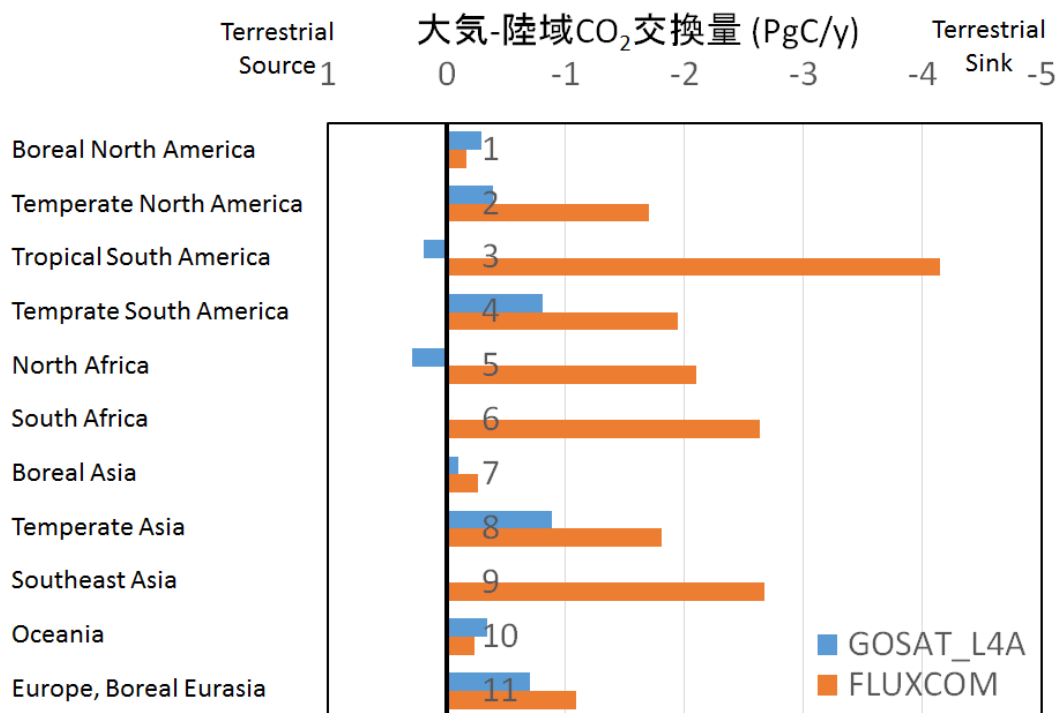
図(4)-6 フラックス観測データと衛星観測データを利用した広域化の結果の一例。(a)総一次生産量、(b)生態系CO<sub>2</sub>交換量。2000-2015年の平均値。(Ichii et al. 2017<sup>4)</sup>より引用)

表(4)-2 トップダウン(GOSAT L4Aデータ)法とボトムアップ法(フラックス観測データ広域化)によるアジア各地域のCO<sub>2</sub>収支の違い (Ichii et al. 2017<sup>4)</sup>より引用)

	シベリア	東アジア	南アジア	東南アジア
本研究 (1)	-0.56	-0.91	-0.47	-0.96
バイオマス燃焼 (火災)	0.15	0.00	0.01	0.16
土地利用変化	-0.15*	0.04	-0.02	0.32
収穫	0.07*	0.33	0.21	0.22
木材生産	0.03*	0.03	0.01	0.02
ボトムアップ合計 (2)	-0.46	-0.51	-0.26	0.24
トップダウン(GOSAT) (3)	-0.28	-0.71	0.06	0.36
トップダウンとボトムアップの違い				
(1)-(3)	-0.28	-0.20	-0.53	-1.36
(2)-(3)	-0.18	0.20	-0.32	-0.70

(単位: Pg C year<sup>-1</sup>)

同様の解析をグローバルスケールにおいて、FLUXCOMプロダクトとGOSAT L4Aデータを利用して試行した。その結果を図(4)-7に示す。温帯～寒冷域については、FLUXCOMプロダクトとGOSAT L4AプロダクトによるCO<sub>2</sub>吸収排出量は非常によい一貫性を示している。しかしながら、熱帯や南半球域などではFLUXCOMプロダクトにおいて非常に大きな炭素吸収量を示している。この炭素吸収量の際がどの地域からくるかを解析するためにアフリカ域の炭素フラックスを解析したが、主な相違は熱帯雨林地域に起因することが分かった。ただし、こちらの解析については、両者のフラックスの定義の相違を考慮した解析には至っておらず、今後、アジア域と同様に両者の定義の違いを考慮した上で、土地利用変化による放出量や収穫量などの光合成と呼吸以外のCO<sub>2</sub>フラックスを収集した上での一致・不一致の検証が必要となる。



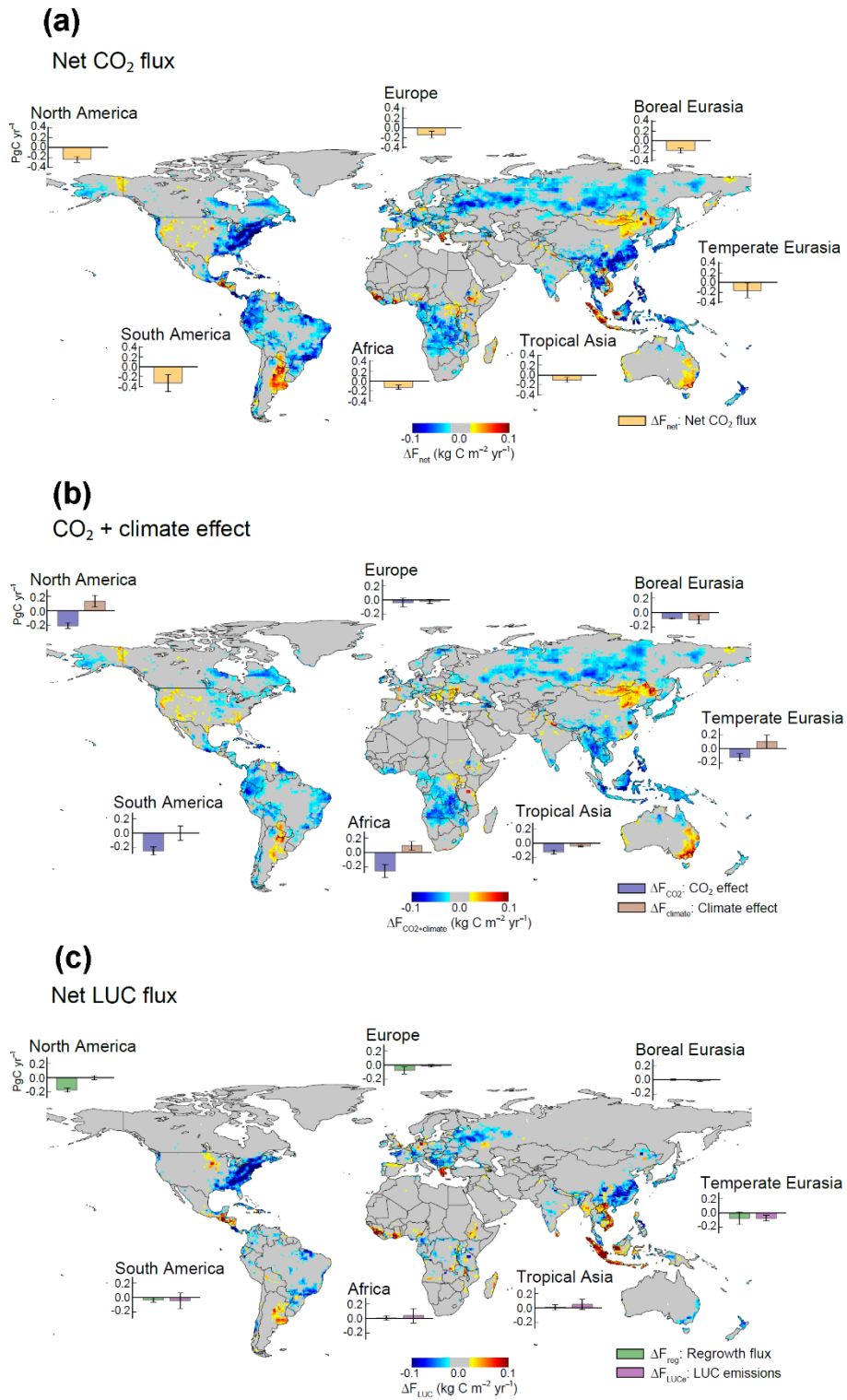
図(4)-7 FLUXCOMとGOSAT L4Aによる大気-陸域炭素フラックスの比較。GOSAT L4Aはデータ提供期間である2009年6月から2011年9月まで、FLUXCOMは2001-2011年の平均値より年間値を計算した。地域の定義については図(4)-2に準拠する。

## (2) 炭素収支空間分布のホットスポット推定

### 1) 全球における炭素収支変動のホットスポット推定

全球を対象にして、TRENDY v2モデルによる1960-1999年までの陸域CO<sub>2</sub>収支と2000-2009年の陸域炭素収支の違いを図(4)-8(a)に示す。本解析においてはNBPが負の値であることは陸域で2000-2009年の期間は1960-1999年の期間に比較して炭素シンクになっていることを示している。炭素収支が変化したところとしては、アメリカ東部、ユーラシア（ロシア・中国・東南アジア）、アフリカ大陸中～南部などの多くの地域で炭素吸収が増加している傾向が見える。一方で、中国東北部やオーストラリア東部においては炭素の吸収が弱くなっている（もしくはCO<sub>2</sub>放出が強くなっている）傾向が見られた。

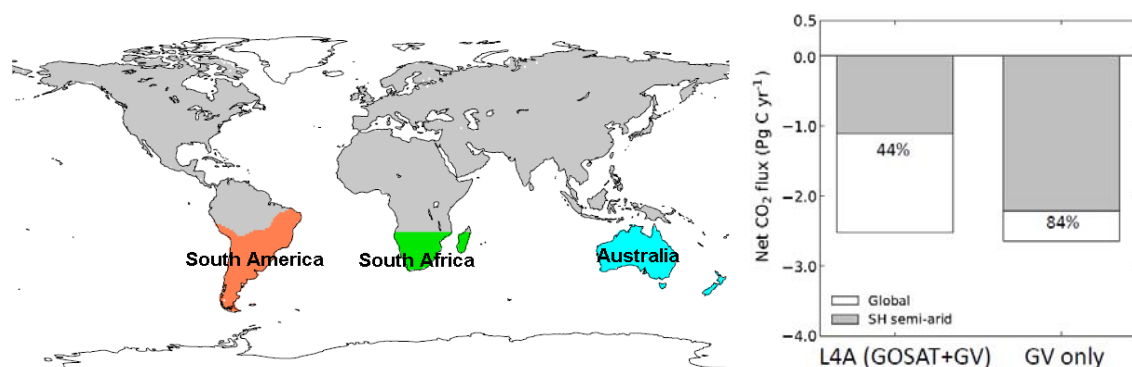
この傾向について更に要因解析を行った結果、大気CO<sub>2</sub>が強く陸域の炭素吸収の強く要因であることが判明した一方で、気候の要素がこの炭素吸収を弱める傾向にあった。大気CO<sub>2</sub>と気候の両方の影響を考慮した場合、ロシア、南アメリカ沿岸部、中央アフリカ、東南アジアで近年の炭素収支が強まっている傾向にある(図(4)-8(b))。



図(4)-8 (a) TRENDYv2モデル結果による全球における陸域CO<sub>2</sub>収支の変化。2000-2009年平均値から1960-1999年平均値を引いた値を示した。陸域CO<sub>2</sub>収支については陸域での吸収が強まる場合は負の値で示す。  
(b) 大気CO<sub>2</sub>、気候による炭素収支の変化。(c) 土地利用変化、森林再成長による炭素収支の変化。

続いて、土地利用変化の影響を評価したところ、炭素放出傾向においては過去から現在まで東南アジア以外の地域で顕著な放出傾向がなかった。一方で、森林の再成長などによる顕著な炭素吸収が北アメリカの東部、ヨーロッパ、中国東南部で検出された（図(4)-8(c)）。森林の再成長による効果は、これら地域を対象とした先行解析でも示唆されており<sup>11, 12, 13, 14</sup>、信憑性のある結果であると考えられる。これらの結果は、現在の炭素収支の推定において、大気CO<sub>2</sub>や気候のみならず、土地利用による炭素放出や森林の再成長まで考慮する必要があることを示唆している。以上の結果、炭素循環のホットスポットとなりうる地域として、特にアジアに焦点を絞ると、(1) 自然要因ではシベリアや東南アジア、(2) 人為的要因では東アジア、東南アジアなどが挙げられる。シベリアでは、広大な範囲でCO<sub>2</sub>吸収量の増加や植生指数の増加傾向が検出されている一方、一部の領域では過剰な水分によるカラマツ林の枯死が地上観測により報告されている。CO<sub>2</sub>吸収量の増加の原因は何か、一方で発生しているカラマツの枯死はどの程度の範囲に広がるかなどの詳細な解析が必要である。そのためには衛星データの解析を詳細に進める必要があり、樹高センサーやSARデータの解析、Terra/MODISなどを利用した広域解析などが必要になるであろう。中国に関しては人為的な影響や気候の変化などが植生増加の要因として考えられ、土地利用変化のデータや気候データを詳細に解析することによりその植生活動の増加要因を探ることが可能である。東南アジアにおいては人為的な影響に加えて森林火災など様々な要因が複合して現在の炭素収支の変化が引き起こされていると考えられる。

南半球の半乾燥地域を対象に（図(4)-9）、大気インバースモデルから2011年の強いラニーニャ下で炭素収支の変動を検出した。ラニーニャの影響で半乾燥域の炭素収支は大きな吸収傾向を示したが、GOSATによるCO<sub>2</sub>濃度観測データを用いることで、大気インバースモデルによる炭素吸収量が大きく減少した。地上観測が希薄な南半球の半乾燥域で予測が大きく乖離した結果は、GOSAT観測データを使用しない場合は、半乾燥域の炭素吸収が過剰評価することを示唆しており、つまり、今後の炭素収支の推定において、GOSAT観測データの重要性を再認識する必要がある。



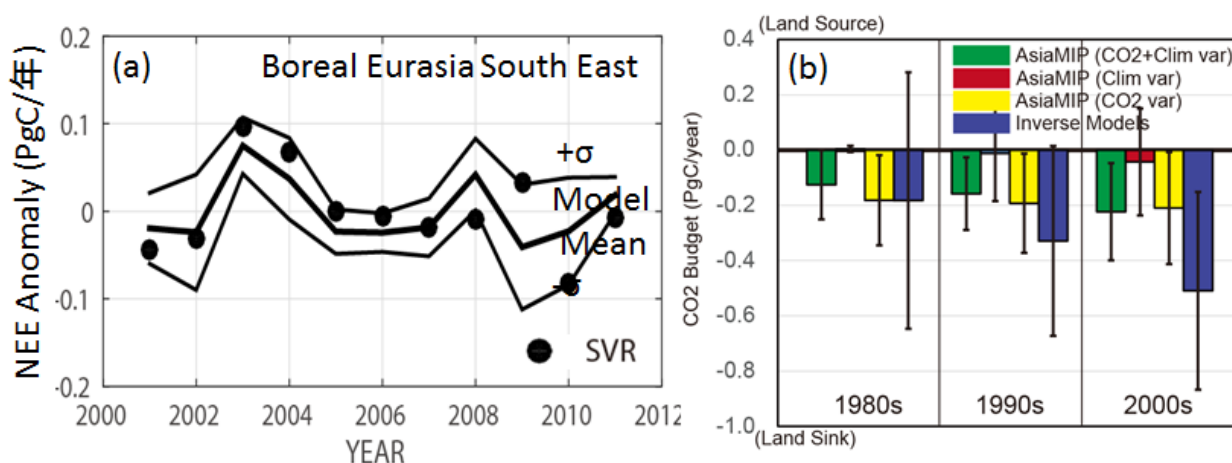
図(4)-9 (a: 左) 解析対象地域対象の南半球の半乾燥地域。(b: 右) GOSAT観測データを使用した場合としない場合の陸域全球炭素収支と半乾燥域の炭素収支。(Kondo et al., 2016<sup>15</sup>)より引用)

## 2) アジア域における炭素収支変動のホットスポット解析

### a. シベリアにおける過去30年間の陸域CO<sub>2</sub>収支の変動解析

シベリアにおける変動抽出解析については、複数のボトムアップ法 (TRENDYv2, Asia-MIP) と、複数のトップダウン法 (ACTM, JMA, NICAM, Jena-Inversion, MACC)、また、機械学習による広域化推定 (SVR) の結果を用い、過去30年間で10年単位でみた場合 (1980年台、90年台、2000年台) の炭素収支の変化と手法間の比較を行った。

予備解析ではSVRとAsia-MIPモデルの季節変動に高い一貫性が検出されたが (図(4)-10(a))、ボトムアップ法・トップダウン法による炭素収支では、大気インバースモデルがAsia-MIPモデルより強く吸収するといったバイアスが検出された (全球解析においても同様の結果: 図(4)-2)。一方で、両者は経年変動の面からは非常によく一致した (図(4)-10b)。特に、1980年以降の30年においては、AsiaMIPモデルからも大気インバースモデルからも同様な炭素吸収量の増加が見られた (図(4)-10(b) 緑・青)。変動要因解析の結果、シベリアでの陸域炭素吸収は、気候変動よりも、主にCO<sub>2</sub>濃度の増加に起因することが示唆された (図(4)-10(b) 黄)。

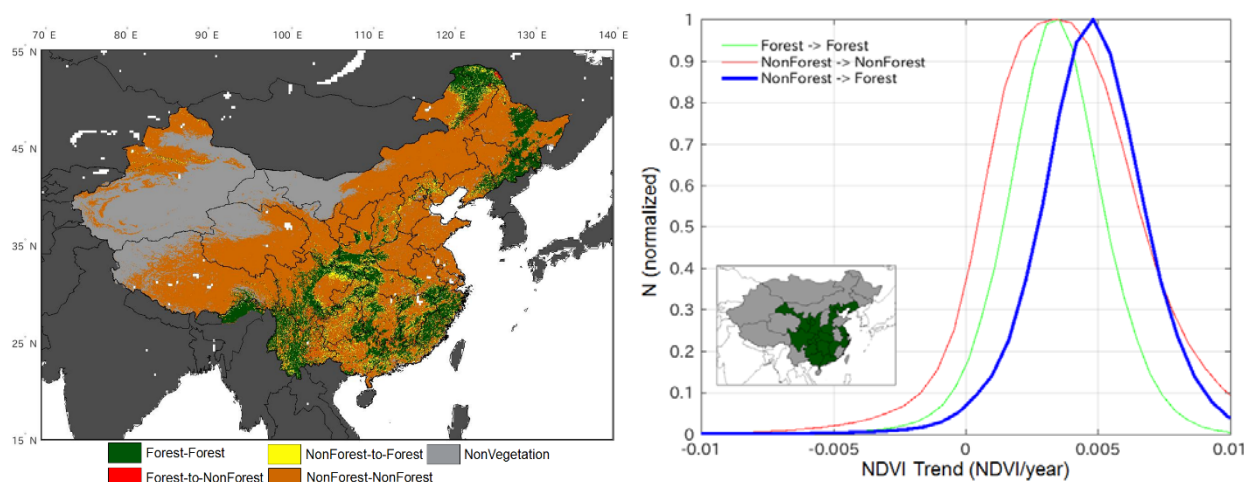


図(4)-10 (a) シベリア (シベリア南東域) における複数の陸域炭素循環モデル (Asia-MIPモデル結果) とAsiaFluxを用いた経験的広域化推定 (SVR) による大気-陸域炭素収支の経年変動の比較、(b) シベリア域の1980年台、90年台、2000年台におけるAsia-MIPモデルと大気インバージョンモデルによる大気-陸域炭素収支の比較。Ichii et al. (準備中)より。

### b. 中国の植林政策による森林面積の変化モニタリング

中国の植林政策による陸域植生変化モニタリングに関しては、まずは中国の森林インベントリデータとして各省毎の森林面積のインベントリデータを収集し、インベントリデータと高空間分解衛星プロダクト (LANDSAT, PALSARデータから推定された森林面積被覆率)、中空間分解能衛星

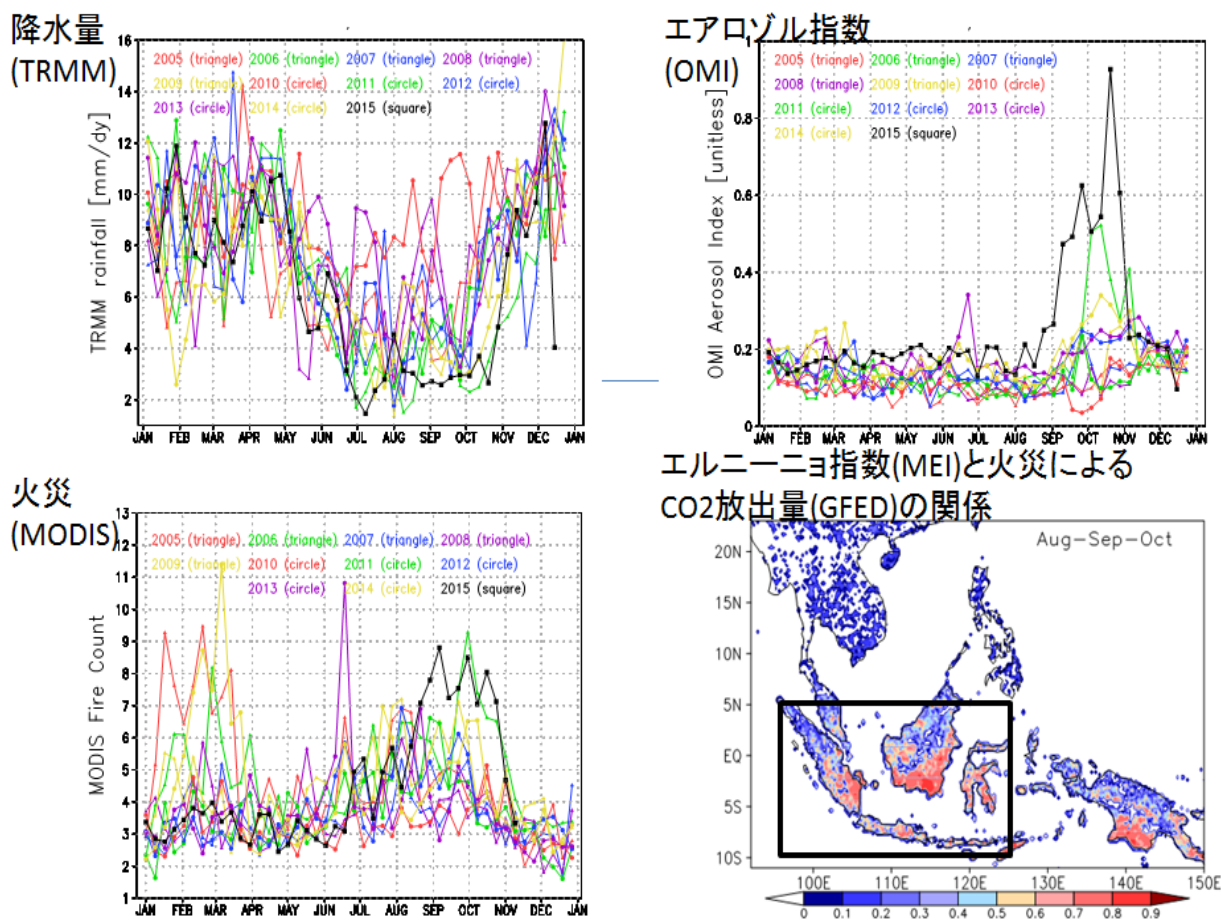
星プロダクト (MODIS Land Cover と MODIS Tree Cover プロダクト) を利用することで、10年程度の期間の森林被覆変化のモニタリングに最適なMODISプロダクトとして、MODIS Land Cover プロダクトを選択することができた。このMODIS Land Coverプロダクトを利用して、2000-2013年における森林被覆の変化を図(4)-11(a)に示す。さらに、各森林・非森林変化の違いによるNDVI増減傾向の違いを見たところ、非森林→森林の変化を持つ箇所でNDVIの増加傾向が最も強かった(図(4)-11(b))。そのため、中国の植林政策は陸域炭素収支にも大きな影響を与えたことが示唆される。



図(4)-11 (a: 左) MODIS Land Coverを元にした中国における森林・非森林域の変化の分布図。2000-03年の期間と2011-13年の期間における被覆の変化を示した。(b: 右) 植林が広く行われた省における2000-2013年の各森林・非森林の変化の違いに応じたMODIS NDVIの増加率のヒストグラム。

### c. 東南アジアにおけるエルニーニョに伴う森林火災のモニタリング

東南アジアにおける森林火災の解析については、収集したデータを用いて、東南アジア領域(図(4)-12)を対象にして、2005-2015年における各データの推移を解析した。2015年は、降水量は例年に比較して非常に低く、地表面温度は高かった。それに伴い、火災の頻度が高くなることで、エアロゾル指数についても正のアノマリを示した。これらの火災の要因を解析するために、エルニーニョ指数と火災による炭素排出量を解析したところ、カリマンタン島東部～ボルネオ島南部にかけて、エルニーニョ指数と火災による炭素排出量の間強い正の相関がみられ、エルニーニョの大きさが火災頻度に大きな影響を与えることが示唆された。



図(4)-12 2005年～2015年における東南アジア（右下図矩形域）における降水量(左上)・エアロゾル指数(右上)・火災(左下)の推移。2015年における推移は黒で示した。（右下図）エルニーニョ指数(MEI)と火災によるCO<sub>2</sub>放出量(GFEDデータ)の8-10月期における経年変動の相関係数。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

既存のトップダウン手法・ボトムアップ手法の相互比較を通して、過去約30年程度の時間スケールにおけるCO<sub>2</sub>収支の変動が一貫していることを示し、その要因が明らかとなった。これはIPCC第5次評価報告書(2013年出版)の段階でトップダウン・ボトムアップの不一致が提示されていたことに対して、過去の30年程度のCO<sub>2</sub>収支の把握がより信頼できるものになったことを示し、大幅に研究が進んだことを示す。特に土地利用変化の影響を加味してCO<sub>2</sub>収支を評価することの重要性を示した。

アジア域で陸域の地上観測ネットワークデータを衛星データを用いることにより陸域CO<sub>2</sub>フラックスの時空間分布を推定することができるようになった。この手法は従来のモデルに頼った方法に比較して、格段に地上観測データを利用できる方法であり、観測データに基づく新たなCO<sub>2</sub>フ



ラックスデータとして活用できる。

トップダウン法とボトムアップ法によるCO<sub>2</sub>収支の整合性を評価する際に、両者の手法の定義の違いを勘案して、定義の違いを埋めるフラックスを加味することにより、トップダウン法・ボトムアップ法のCO<sub>2</sub>収支推定値の違いを小さくすることができた。

本解析はシベリア、東アジア、東南アジア、南アジアなどの領域毎のCO<sub>2</sub>収支を比較しトップダウン法・ボトムアップ法の推定値の整合性を確認できた。これによりアジアの地域別のCO<sub>2</sub>収支については信頼できる推定ができるようになったことを示している。

アジア域における陸域炭素収支を大きく変化させる可能性のある地域を抽出し、衛星観測データを用いてモニタリングを実施することにより、複数衛星データを利用することにより、より高い信頼性のある解析結果を得ることができた。また2015年におけるエルニーニョが森林火災に及ぼす影響など比較的速報性がある解析についても衛星データなどを駆使することで解析できるようになったことを示すことができた。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

### <行政が活用することが見込まれる成果>

#### 1) アジア域・全球におけるCO<sub>2</sub>収支の推定とその政策利用、IPCC第6次評価報告書への貢献

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CO<sub>2</sub>収支を定量的に推定した。特にシベリア・東アジア・東南アジアなどの地域別スケールで複数の手法で一貫したCO<sub>2</sub>収支を得ることができたために、これらの地域ではCO<sub>2</sub>収支の推定の信頼性が高いと考えられる。この推定された収支は、2015年に策定された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できる。また、本研究で推定された陸域CO<sub>2</sub>収支については、2013年に発行されたIPCC第5次評価報告書に比較して、土地利用変化による効果を導入したモデルを利用できることを示すことになり、CO<sub>2</sub>収支の把握をより進歩させるものとなり、IPCC第6次評価報告書に対しての大きな貢献となりうる。

#### 2) IPBES評価報告書の統括執筆責任者としての貢献

本サブテーマ代表者 市井和仁は、2016年10月よりIPBES (The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services; 生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム)における評価報告書(2019年発行予定)における第2章 Global Assessmentにおける統括執筆責任者に任命された。この業務においては、生物地球化学循環の観点からの専門家として、Lead Author(主執筆者)としての任命を受けたのち、2017年4月よりCoordinating Lead Author (統括執筆責任者)となった。

本研究業務における地球観測衛星データから得られる陸域生態系の変動を中心として、グローバルな観点から大きな変動が起こる地域(ホットスポット)の抽出・解析のまとめが主な担当となるが、本研究の成果を生かし、報告書の全体を統括する役割を果たす予定となっている。

## 6. 国際共同研究等の状況

- 1) FLUXCOM “an intercomparison of ‘data-oriented’ approaches of estimating carbon and energy fluxes at continental/global scale using FLUXNET data, Counter Part: Dr. Martin Jung, Max Planck Institute for Biogeochemistry (Germany). (2012年～現在も実施中) 渦相関法による炭素・熱フラックス観測ネットワークであるFLUXNETにおいて、これらの観測データと広域データを利用した広域化手法の比較を通して、観測ベースの広域熱、炭素循環データを構築するための国際共同研究。ヨーロッパ、北米を中心に約10グループが参加している。市井和仁は、本課題を通じて整備したSVRモデルによる広域化手法を提供して参加している。また、本課題で構築した様々な衛星データ(Terra衛星MODISセンサデータなど)を、モデルの入力データとして提供した。
- 2) The Second Research Announcement Themes on GOSAT (GOSAT-RA), Multi-model experiment of terrestrial carbon cycles in Asia and North America based on GOSAT carbon budget products, Counterpart-PI: Dr. Ramakrishna R. Nemani, NASA Ames Research Center, US. (2009年～現在も実施中) GOSAT-RAとして採択された国際共同研究(無償)。本課題の研究代表者は、市井和仁が務め、協力者の近藤雅征も共同研究者として参加している。GOSATのデータを利用した研究として、日本側はアジア域を中心に、米国側は北米域を中心にして、研究のディスカッションやデータ交換などを通して共同研究を進めている。訪問時には本課題より支出してきた。また本研究で得られた成果の一部は本共同研究を通じて優先的に得られたデータ(GOSAT L4Aプロダクト)を利用したものである。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) G. Tramontana, K. Ichii, G. Camps-Valls, E. Tomelleri, D. Papale: Remote Sens. Environ., 168, 360-373 (2015)  
“Uncertainty analysis of gross primary production upscaling using random forest, remote sensing, and eddy covariance data”
- 2) M. Kondo, T. Saeki, H. Takagi, K. Ichii and K. Ishijima: Sola, 12, 181-186 (2016)  
“The effect of GOSAT observations on estimates of net CO<sub>2</sub> flux in semi-arid regions of the southern hemisphere”
- 3) L. Calle, J. G. Canadell, P. K. Patra, P. Ciais, K. Ichii, H. Tian, M. Kondo, S. Piao, A. Arneeth, A. B. Harper, A. Ito, E. Kato, C. Koven, S. Sitch, N. Vivoy, A. Wiltshire, S. Zaehle, and B. Poulter: Environ. Res. Lett., 11, 074011, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074011 (2016)  
“Regional Carbon Fluxes from Land Use and Land Cover Change in Asia, 1980-2009”
- 4) G. Tramontana, M. Jung, G. Camps-Valls, K. Ichii, B. Raduly, M. Reichstein, C. R. Schwalm, M. A. Arain, A. Cescatti, G. Kiely, L. Merbold, P. Serrano-Ortiz,

- S. Sickert, S. Wolf, D. Papale: *Biogeosciences* 13, 4291-4313. doi:10.5194/bg-13-4291-2016 (2016)  
 “Predicting carbon and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms”
- 5) M. Kondo, T.M. Saitoh, H. Sato, K. Ichii: *Agric. For. Meteorol.*, 232, 632-634 (2017)  
 “Comprehensive synthesis of spatial variability in carbon flux across monsoon Asian forests”
- 6) M. Jung, M. Reichstein, C. R. Schwalm, C. Huntingford, S. Sitch, A. Ahlström, A. Arneth, G. Camps-Valls, P. Ciais, P. Friedlingstein, F. Gans, K. Ichii, A. K. Jain, E. Kato, D. Papale, B. Poulter, B. Raduly, C. Rödenbeck, G. Tramontana, N. Viovy, Y. P. Wang, U. Weber, S. Zaehle and N. Zeng: *Nature*, 541, 516-520 (2017)  
 “Compensatory water effects link yearly global land CO<sub>2</sub> sink changes to temperature”
- 7) K. Ichii, M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, M. 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: *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, doi: 10.1002/2016JG003640 (2017)  
 “New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression”
- 8) S. Koirala, M. Jung, M. Reichstein, I.E.M. de Graaf, G. Camps-Valls, K. Ichii, D. Papale, B. Raduly, C.R. Schwalm, G. Tramontana, and N. Carvalhais: *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2017GL072885 (印刷中)  
 “Global distribution of groundwater-vegetation spatial covariation”

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) K. Ichii, W. Ju, K.S. Cheng, S. Niu, Y.H. Lee, and Y.F.D Lai: *AsiaFlux Newsletter*, 38, 25-27 (2015)  
 “Synthesis and assessment of carbon and water budget: current and future aspects”

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) K. Ichii, M. Kondo, P. Patra, A. Ito, T. Sasai, H. Sato, M. Ueyama, H. Kobayashi, and N. Saigusa: AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan (2014)  
 “Comparison of top-down and bottom-up approaches toward refinements of terrestrial carbon cycles estimation in Asia”
- 2) 市井和仁、近藤雅征、植山雅仁：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）

「GOSAT L4Aプロダクトと種々のボトムアップ手法の陸域炭素収支の比較」

- 3) K. Ichii, M. Kondo, and Y. Yanagi: International Conference on Weather/Climate Models and Remote Sensing Applications for Sustainable Agriculture and Food Security Community, Jeju, Republic of Korea (2014)  
 “Analyzing Recent Changes in Terrestrial Carbon Cycle in Asia by Synthesizing Site Observation, Satellite Observation and Modeling”
- 4) 市井和仁：寒冷圏陸域植生と大気微粒子・気体成分を介した大気環境の相互作用，北海道大学低温科学研究所 平成26年度共同利用研究集会，札幌（2014）  
 「地上観測・衛星観測・陸域生態系モデルを利用した過去30年のアジア寒冷域の陸域炭素循環の変動」
- 5) K. Ichii, M. Kondo, M. Ueyama, T. Kato, A. Ito, T. Sasai, H. Sato, H. Kobayashi, and N. Saigusa: American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco, USA (2014) (招待講演)  
 “Detecting robust signals of interannual variability of gross primary productivity in Asia from multiple terrestrial carbon cycle models and long-term satellite-based vegetation data”
- 6) K. Ichii: Workshop on Meteorological and Carbon Cycle Modeling over Forest and Agricultural Land, PyeungChang, Republic of Korea (2015) (招待講演)  
 “Analysis of recent changes in terrestrial carbon cycles using bottom-up and top-down estimations”
- 7) K. Ichii, M. Ueyama, M. Kondo, A. Ito, T. Kato, H. Sato, T. Sasai, H. Kobayashi, Y. Yanagi, N. Saigusa: Fourth International Symposium on the Arctic Research, Toyama (2015)  
 “Recent changes in terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Siberia inferred from multiple bottom-up estimations”
- 8) K. Ichii, M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, M.C. Alberto, K. Kitamura, A. Kotani, Y. Kominami, T. Maeda, Y. Mizoguchi, T. Shimizu, Y. Yasuda: Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) TC WG VIII/3: Weather, Atmosphere and Climate Studies Weather, Atmosphere and Climate Studies, Pune, India (2015)  
 “Upscaling terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using an intergrated database of eddy-covariance measurements”
- 9) K. Ichii, M. Kondo, M. Ueyama, A. Ito, H. Kobayashi, S. Maksyutov, T. Maki, T. Namamura, Y. Niwa, P. Patra, T. Saeki, H. Sato, T. Sasai, N. Saigusa, H. Tian, Y. Yanagi, B. Zhang : AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, USA (2015)  
 “Changes in terrestrial CO<sub>2</sub> budget in Siberia in the past three decades”
- 10) M. Kondo, K. Ichii: AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, USA (2015)  
 “Recent pattern of seasonal and interannual variability inferred from data-driven global terrestrial net CO<sub>2</sub> exchange”

- 11) K. Ichii, M. Kondo, M. Ueyama, N. Saigusa: AsiaFlux Mini Workshop on Remote Sensing and Ecological/Environmental Monitoring, Taipei, Taiwan (2016) (招待講演)  
 “Linking AsiaFlux and GOSAT Observation for Terrestrial CO<sub>2</sub> Cycle Studies”
- 12) 市井和仁、近藤雅征、植山雅仁：第24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 (2016)  
 「地上観測と衛星観測を利用した広域陸域CO<sub>2</sub>フラックスの経験的広域化手法の現状と応用」
- 13) 市井和仁：第63回日本生態学会大会、仙台 (2016)  
 「リモートセンシングによる福島原発事故後の植生被覆分布変化の把握」
- 14) M. Kondo, K. Ichii, P. Patra, T. Saeki: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 22-26, May (2016)  
 “Current state of terrestrial CO<sub>2</sub> exchange estimations: progresses and remaining issues”
- 15) K. Ichii, P. Patra, M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 22-26, May (2016)  
 “Data-driven synthesis on terrestrial CO<sub>2</sub> budget changes in Asia”
- 16) K. Ichii, M. Kondo, P. Patra, T. Saeki, T. Maki, T. Nakamura, Y. Niwa, M. Ueyama, M. Hayashi, H. Pingchun, Y. Yanagi, N. Saigusa, and Asia-MIP member: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 22-26, May (2016)  
 “Synthesis of top-down and bottom-up estimations of terrestrial CO<sub>2</sub> budget in Asia”
- 17) 市井和仁、近藤雅征、植山雅仁、柳 裕二、三枝信子：日本気象学会2016年度秋季学術講演会、2016年10月26日～28日 (2016)  
 「データ駆動型モデルで推定された陸域CO<sub>2</sub>収支の変動把握」
- 18) K. Ichii, J. Xiao, Y. Yanagi: American Geophysical Union Fall Meeting 2016, San Francisco, California, USA, 12-16 December (2016)  
 “Detecting vegetation changes induced by government policy in China using multiple satellite products”

### (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

特に記載すべき事項はない

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

### (6) その他

特に記載すべき事項はない

## 8. 引用文献

- 1) S. Sitch, P. Friedlingstein, N. Gruber, S. D. Jones, G. Murray-Tortarolo, A. Ahlström, S. C. Doney, H. Graven, C. Heinze, C. Huntingford, S. Levis, P. E. Levy, M. Lomas, B. Poulter, N. Viovy, S. Zaehle, N. Zeng, A. Arneth, G. Bonan, L. Bopp, J. G. Canadell, F. Chevallier, P. Ciais, R. Ellis, M. Gloor, P. Peylin, S. L. Piao, C. Le Quéré, B. Smith, Z. Zhu, and R. Myneni: *Biogeosciences*, 12, 653–679 (2015)  
"Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide"
- 2) K. Ichii, M. Kondo, Y. Okabe, M. Ueyama, H. Kobayashi, S.-J. Lee, N. Saigusa, Z. Zhu, R.B. Myneni: *Remote Sensing*, 5, 6043–6062, (2013)  
"Recent changes in terrestrial gross primary productivity in Asia from 1982 to 2011"
- 3) M. Jung, M. Reichstein, C.R. Schwalm, C. Huntingford, S. Sitch, A. Ahlström, A. Arneth, G. Camps-Valls, P. Ciais, P. Friedlingstein, F. Gans, K. Ichii, A.K. Jain, E. Kato, D. Papale, B. Poulter, B. Raduly, C. Rödenbeck, G. Tramontana, N. Viovy, Y.-P. Wang, U. Weber, S. Zaehle and N. Zeng: *Nature*, 541, 516–520 (2017)  
"Compensatory water effects link yearly global land CO<sub>2</sub> sink changes to temperature"
- 4) K. Ichii, M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, M. 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: *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 122 (2017)  
"New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression"
- 5) S. Maksyutov, H. Takagi, V. K. Valsala, M. Saito, T. Oda, and T. Saeki: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9351–9373 (2013)  
"Regional CO<sub>2</sub> flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO<sub>2</sub> observations"
- 6) Y. Pan, R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, D. Hayes: *Science* 333, 988–993 (2011)  
"A large and persistent carbon sink in the world's forests"
- 7) Y.Y. Liu, A.I.J.M. van Dijk, R.A.M. de Jeu, J.G. Canadell, M.F. McCabe, J.P. Evans, G. Wang: *Nature Climate Change*, 5, 470–474 (2015)  
"Recent reversal in loss of global terrestrial biomass"

- 8) I. G. Enting, P. J. Rayner and P. Ciais: *Biogeosciences*, 9, 2889–2904 (2012)  
“Carbon Cycle Uncertainty in REgional Carbon Cycle Assessment and Processes (RECCAP)”
- 9) B. Law, E. Falge, L. Gu, D. Baldocchi, P. Bakwin, P. Berbigier, K. Davis, A. Dolman, M. Falk, J. Fuentes, A. Goldstein, A. Granier, A. Grelle, D. Hollinger, I.A. Janssens, P. Jarvis, N.O. Jensen, G. Katul, Y.G. Mahli, M. Meyers, T. Monsont, R. Mungeru, W. Oechel, W. Olson, R. Pilegaard, K.U. Paw, K.T. Thorgeirsson, H. Valentini, R. Verma, S. Vesala, T. Wilson, K.S. Wofsy: *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 97–120 (2002)  
“Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation”
- 10) M. Kondo, T.M. Saitoh, H. Sato, K. Ichii: *Agric. For. Meteorol.*, 232, 632–634 (2017)  
“Comprehensive synthesis of spatial variability in carbon flux across monsoon Asian forests”
- 11) C.W. Woodall, B.F. Walters, J.W. Coulston, A.W. D’Amato, G.M. Domke, M.B. Russell and P.A. Sowers: *Scientific Reports*, 5, 17028 (2015)  
“Monitoring Network Confirms Land Use Change is a Substantial Component of the Forest Carbon Sink in the eastern United States”
- 12) J.W. Coulston, D.N. Wear and J.M. Vose: *Scientific Reports* 5, 8002 (2015)  
“Complex forest dynamics indicate potential for slowing carbon accumulation in the southeastern United States”
- 13) P. Ciais, M. J. Schelhaas, S. Zaehle, S. L. Piao, A. Cescatti, J. Liski, S. Luyssaert, G. Le-Maire, E.-D. Schulze, O. Bouriaud, A. Freibauer, R. Valentini, and G. J. Nabuurs: *Nature Geoscience* 1, 425 – 429 (2008)  
“Carbon accumulation in European forests”
- 14) S.L. Piao, A. Ito, S.G. Li, Y. Huang, P. Ciais, X.H. Wang, S.S. Peng, H.J. Nan, C. Zhao, A. Ahlström, R.J. Andres, F. Chevallier, J.Y. Fang, J. Hartmann, C. Huntingford, S. Jeong, S. Levis, P.E. Levy, J.S. Li, M.R. Lomas, J.F. Mao, E. Mayorga, A. Mohammad, H. Muraoka, C.H. Peng, P. Peylin, B. Poulter, Z.H. Shen, X. Shi, S. Sitch, S. Tao, H.Q. Tian, X.P. Wu, M. Xu, G.R. Yu, N. Viovy, S. Zaehle, N. Zeng, and B. Zhu: *Biogeosciences*, 9, 3571–3586 (2012)  
“The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades”
- 15) M. Kondo, T. Saeki, H. Takagi, K. Ichii and K. Ishijima: *Sola*, 12, 181–186 (2016)  
“The effect of GOSAT observations on estimates of net CO<sub>2</sub> flux in semi-arid regions of the southern hemisphere”

## **Integrated Observation and Analysis System for Early Detection of Carbon Cycle Change Globally and in Asia-Pacific Region**

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)

[Abstract]

Key Words: Global warming, Carbon cycle, Integrated observation and analysis system, Flux estimation, Asia-Pacific

There has been an increase in the number of observational platforms for monitoring atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). However, owing to uncertainties in modeling tools, and limited observational data coverage, global CO<sub>2</sub> sources/sinks estimations still contain high uncertainty. The purpose of this study is to produce the best possible estimations of the carbon budget, to detect carbon cycle changes under the changing climate, and to provide timely scientific knowledge to policymakers.

We developed an integrated observation and analysis system based on satellite, airborne, and ground-based observations. Atmospheric transport modeling and inverse modeling were improved for better utilization of reinforced observation data. The atmospheric CO<sub>2</sub> concentration data was significantly enhanced by installing additional Continuous CO<sub>2</sub> Measuring Equipment (CME) on the B777-200ER aircraft of Japan Airlines. Seasonal variations and vertical profiles of CO<sub>2</sub> were well characterized in Asia, a region that was previously not well covered by existing ground networks.

Systems for inversion analyses were developed and improved based on the atmospheric chemistry-transport model (ACTM) of JAMSTEC, to estimate fluxes of CO<sub>2</sub> and methane (CH<sub>4</sub>). This enabled us to identify the large uncertainties in the bottom-up CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> inventories attributed to coal mining and consumption in China. Based on the joint analysis of the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> inversion results, we derived a scaling factor (0.59) for lowering the rate of anthropogenic emission increase during 2002-2012 for East Asia, in order to improve the CO<sub>2</sub> sink estimation in the East Asian terrestrial biosphere.

To exploit a large number of atmospheric CO<sub>2</sub> data from mobile platform observations such as aircraft, a new high-resolution inversion system was developed using



the four-dimensional variational (4D-Var) method. The system combines offline forward and adjoint models with a quasi-Newton optimization scheme. The new system demonstrated that the inversion system could detect regionally limited flux anomalies such as biomass burning. Comparing high-resolution inversion fluxes with flux estimates from a bottom-up approach would help us to enhance our understanding of CO<sub>2</sub> flux mechanisms and improve global warming predictions.

Using the top-down and bottom-up approaches, terrestrial CO<sub>2</sub> budgets were evaluated globally and across Asia, and hotspot regions with drastic changes in the CO<sub>2</sub> budget were identified and analyzed. Both El Nino effects and land use changes played dominant roles in determining interdecadal variations in the terrestrial CO<sub>2</sub> budget in Southeast Asia. We also identified a few key hotspot regions of terrestrial CO<sub>2</sub> budget changes in Asia, such as Siberia, China, and Southeast Asia, and we analyzed the cause of these changes in the terrestrial environment.