

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公 募 区 分 : 戦略的研究開発プロジェクトⅡ

研 究 予 定 期 間 : 令和3(2021)年度 ~ 令和5(2023)年度

プロジェクト番号 : 【SII-8】

体 系 的 番 号 : (J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 0 0)

プ ロ ジ ェ ク ト : 「温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究」

Project Title : Comprehensive Study on Multi-scale Monitoring and Modeling of Greenhouse Gas Budgets

プロジェクト代表者 : 伊藤 昭彦

プロジェクト代表機関 : 国立研究開発法人 国立環境研究所

研 究 キ ー ワ ー ド : グローバルストックテイク、ボトムアップ手法、トップダウン手法、温室効果ガス収支、インベントリ検証

令和6(2024)年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
[プロジェクト概要].....	1
1. はじめに（研究背景等）.....	1
2. 研究開発目的.....	1
3. 研究目標.....	2
4. 研究開発内容.....	4
5. 研究成果.....	6
5－1. 成果の概要.....	6
5－2. 得られた研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献.....	11
5－3. 研究目標の達成状況.....	14
6. 研究成果の発表状況.....	18
(1) プロジェクト全体の成果の件数.....	18
(2) 誌上発表.....	18
(3) 知的財産権.....	20
(4) 「国民との科学・技術対話」の実施.....	21
7. 国際共同研究等の状況.....	23
8. 研究者略歴.....	29
Abstract.....	1

別紙 公募審査・中間評価等への対応

[プロジェクト概要]
 <プロジェクト情報>

公 募 区 分	: 戦略的研究開発プロジェクトⅡ
研 究 期 間	: 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
プ ロ ジ ェ ク ト 番 号	: 【SII-8】
体 系 的 番 号	: （J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 0 0）
プ ロ ジ ェ ク ト	: 「温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究」
プ ロ ジ ェ ク ト リ ー ダ ー	: 伊藤 昭彦（国立環境研究所、主席研究員）

<キーワード>

グローバルストックテイク
ボトムアップ手法
トップダウン手法
温室効果ガス収支
インベントリ検証

<研究体制概要>

テーマ1	体系的番号	（J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 1 0）
	テーマ名：	「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」
	テーマ実施機関：	国立研究開発法人 国立環境研究所
	テーマリーダー：	丹羽 洋介
テーマ2	体系的番号	（J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 2 0）
	テーマ名：	「排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証」
	テーマ実施機関：	国立研究開発法人 海洋研究開発機構
	テーマリーダー：	羽島 知洋
テーマ3	体系的番号	（J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 3 0）
	テーマ名：	「排出インベントリと観測データ及び物質循環モデル推定に基づくGHG 収支評価」
	テーマ実施機関：	国立研究開発法人 国立環境研究所
	テーマリーダー：	伊藤 昭彦

<研究経費（間接経費を含む）>

<プロジェクト全体の研究経費>

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	70,380千円	19,615千円	89,995千円
2022	70,381千円	19,614千円	89,995千円
2023	70,381千円	19,614千円	89,995千円
全期間	211,142千円	58,843千円	269,985千円

<テーマ1の研究経費>

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	29,538千円	7,362千円	36,900千円
2022	28,846千円	7,154千円	36,000千円
2023	26,077千円	6,323千円	32,400千円
全期間	84,461千円	20,839千円	105,300千円

<テーマ2の研究経費>

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	18,000千円	5,400千円	23,400千円
2022	18,000千円	5,400千円	23,400千円
2023	18,000千円	5,400千円	23,400千円
全期間	54,000千円	16,200千円	70,200千円

<テーマ3の研究経費>

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	22,842千円	6,853千円	29,695千円
2022	23,535千円	7,060千円	30,595千円
2023	26,304千円	7,891千円	34,195千円
全期間	72,681千円	21,804千円	94,485千円

1. はじめに（研究背景等）

極端気象による災害や農業生産など気候変動の影響が顕在化しつつある中、その根本的解決を図り持続可能な社会を実現するには、原因物質である温室効果ガス（GHG）の大幅削減が不可欠である。**国連気候変動枠組条約（UNFCCC）パリ協定**で合意された1.5℃目標を達成するため、実質ネットゼロを早期に実現する排出削減が求められる。現在各国が提出した削減目標（NDC：Nationally Determined Contribution）では目標達成に不十分であり、野心的な方向に目標を引き上げるには、2023年から5年ごとに実施される**グローバルストックテイク（GST）**が重要な役割を果たす。日本の研究者も大きく貢献してきた「**気候変動に関する政府間パネル（IPCC）**」評価報告書は、GSTで使用される科学的データの代表例である。GSTは「最良の科学（best available science）」に基づく透明性のある評価を実施し、そのための科学的情報・データの提供が喫緊の課題となっていた。

地表には多様なGHG放出源・吸収源が不均質に分布し複雑に変動するため、限られた観測と簡略なモデルによる推定では精度と分解能が不十分である。そのため、航空機や人工衛星（GOSATシリーズなど）により、**大気中GHGの濃度変動を広域・高精度・連続的に観測し、さらに地表での収支を推定する高度な解析モデル**を開発することによって精度向上を図る必要がある。大気観測に基づいて収支を推定するトップダウンと呼ばれる手法と、地表での放出・吸収を積み上げるボトムアップと呼ばれる手法を併用することは、**グローバル・カーボン・プロジェクト（GCP）**などの国際的トップ研究では標準的な方法となっており、我が国の研究リソースを活用した貢献が望まれていた。

SII-8課題の開始時には、ヨーロッパでは地球観測を目的とするコペルニクス・プログラムや「統合的炭素循環観測システム」（ICOS：Integrated Carbon Observation System）が進行しており、アメリカでは「北米炭素プログラム」（NACP：North American Carbon Program:）などが実施されていた。一方で**アジア太平洋地域**には相当するGHG監視枠組みがない空白域となっており、観測やモデル研究を行ってきた実績がある日本の研究コミュニティが大きな役割を果たすことが期待されていた。課題開始後、GSTの実施を受けて、そのような国際的動向はさらに加速度的に進んできた。2022年には世界気象機関（WMO）による「**世界温室効果ガス監視（G3W：Global Greenhouse Gases Watch）**」が提案されて実現に向けて動き出している。また、アメリカ合衆国では「U.S. GHGセンター」が設立されて、科学的手法による国・地域レベルのGHG収支の評価結果を公表する体制が構築されている。

このような背景の中、日本の高度かつ多様な研究リソースを結集・強化し、**アジア太平洋域をカバーするGHG監視体制**を構築することには大きな意味がある。SII-8課題の参画者は、専攻課題として**推進費2-1701「温室効果ガスの吸排出量監視に向けた統合型観測解析システムの確立（代表者：三枝信子）」**、**2-1710「メタンの合理的排出削減に資する東アジアの起源別収支監視と評価システムの構築（代表者：伊藤昭彦）」**を実施してきた実績がある。しかし、GSTなど期限が設定された政策貢献を目的とする場合、必要なデータを必要なタイミングで提供する「報告の迅速性」を高める必要があり、大型プロジェクトによって緊密な協働基盤を構築することが望まれていた。このようなGHG監視体制の構築は、GSTに代表される政策貢献を促進し、日本の科学研究基盤を強化する意味でも有効である。

2. 研究開発目的

本課題の目的は、パリ協定・グローバルストックテイク等の政策的ニーズに応えられるよう、観測及びモデル研究を総合的に展開し、①都市・国・地域・全球での空間的なスケーラビリティと、②観測から収支評価までのスピーディさを満たす**GHG監視システムを構築**することである。各スケールでの排出・吸収の特徴を高い科学的水準による手法で把握するとともに、ニーズに応えるべく速報性のある報告が可能な体制の構築を目指す。複数手法を組み合わせることで推計の科学的な信頼性を向上させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する。その成果を国際的にアピールし、国際連携により他国での評価支援につなげ、国民にも「見える化」して提供し脱炭素意識を醸成する。アジア地域での研究蓄積、アウトプットとなる報告書の確立、大気・地球システムモデルの活用、GCPをはじめとする国際活動とのより緊密な連携など本課題の独自性・優位性を最大限に活用する。

3. 研究目標

全体目標	各種観測データ、物質輸送・循環モデル、排出インベントリを用いて、マルチスケール（主要都市、国・地域、全球）で、基準年（2013年）以降できるだけ近年までの温室効果ガス収支を包括的に監視・評価する手法を確立する。アジア太平洋域における観測システム模擬実験を行い、日本およびアジア数カ国でのグローバルストックテイクにおける最適な観測体制の検討を支援する。最新の排出状況と予測に基づいて、温暖化の現象解明とモデルによる予測精度の検証と向上のための研究を実施し、温度上昇抑制に対する実効性を評価する。2022年度開始を目標に、年度ごとにできるだけ速やかに収支推定を行って成果を報告書にとりまとめ、グローバルストックテイクに資する科学的データとして公開する。収支の評価結果を各国のインベントリと比較して検証し、他国のグローバルストックテイク実施を国際連携を通じて支援する。さらに、2023年度以降5年ごとに予定されているグローバルストックテイクに対して、温室効果ガス観測データを可能な限り迅速に収集し、適正な品質管理を行い、高度で包括的な解析システムと統合した体制を環境省は維持していく必要がある。本研究に基づき、我が国が最良の科学に基づくグローバルストックテイクを実施する体制を提案する。
------	---

テーマ1	「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」
テーマ1 実施機関	国立環境研究所、気象研究所
テーマ1 目標	大気観測とモデル解析により、大都市から全球に至る様々なスケールのGHG収支について、スピーディに監視・報告できる体制を構築し、経年変動や大小様々なスケールの炭素収支メカニズムの理解を深化させる。また、そのために必要な観測体制について、新たな評価手法を確立し、提案する。 低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。さらに、GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立し、各観測の寄与度を把握するとともに、タグ付きトレーサー実験や観測システムシミュレーション実験OSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。 東京都市圏内や内航船による観測を実施し、また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発し、都市域からのGHG排出の把握のための大気観測システムを開発する。さらに、波照間やアジア域で採取される大気試料の$^{13}\text{CH}_4$測定や、GHGと同時に観測する各種関連成分(CO、O_2、$^{14}\text{CO}_2$等)のデータから、GHG収支の起源分離・放出量変動の推定を行う。 北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベーリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(pCO_2)や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、pCO_2を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋pCO_2の分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダク

	トにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。 上記の観測・解析について、速報性を重視した体制を整え、テーマ3で作成するレポートや国際的なGHG収支解析プロジェクトにデータを提供し、グローバルストックテイクに資する科学的根拠を蓄積して環境政策に貢献する。
--	--

テーマ2	「排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証」
テーマ2 実施機関	海洋研究開発機構
テーマ2 目標	全球スケールのモデルとテーマ1による観測データを用い、大気中温室効果ガス濃度変動と対応した全球の温室効果ガス収支評価を行う。地球システムモデルにおける温室効果ガス動態の検証とモデル改良を行い、パリ協定のNDCをはじめとする排出削減が、近未来の温暖化抑制にもたらす実効性評価の信頼性向上に資する研究を進める。 まず、推進費SII-8課題の目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」の達成に貢献する。 次に、大気輸送モデルMIROC4-ACTMによる従来のトップダウン手法によるCO₂、CH₄、N₂Oの収支推定を継続し、推定した結果を収支評価のためにテーマ3に提供するとともに、GCP等の国際プロジェクトおよびIPCC第6次報告書に貢献する。また、地球システムモデルにおける炭素-窒素サイクルの再現性向上や、大気輸送および化学過程の改良を実施する。

テーマ3	「排出インベントリと観測データ及び物質循環モデル推定に基づくGHG収支評価」
テーマ3 実施機関	国立環境研究所、千葉大学
テーマ3 目標	テーマ1及び2と連携し、複数手法による温室効果ガス収支推定結果について統合的な評価を行う。個別データから統合評価までをシステム化し、定期的に行われるグローバルストックテイクへの情報提供や異常気象や森林火災等突発的なイベント発生時における影響評価がスピーディに行える監視体制を構築する。一方で、温室効果ガス収支推定の際に不確実性を生む要因となる化石燃料燃焼、土地利用変化、火災等の様々なインベントリの精度の向上を通して、温室効果ガス収支推定の不確実性幅を低減させる。 各種の地上観測、物質循環モデル、排出インベントリを用いるボトムアップ手法を用いて、温室効果ガス収支に関する統合的分析を実施し、その成果を他手法の推定とも合わせてわかりやすい形で報告書にまとめる。ボトムアップ的手法には、空間分布を詳細化できる点や排出源をセクター別に分離して示すことができる点など長所もあるが、十分な情報を収集するまでにタイムラグを要するなどの短所もある。テーマ1、2で実施される観測

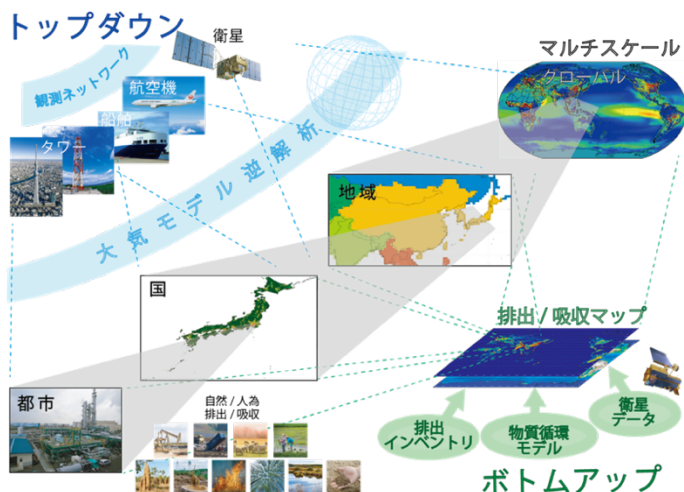
とトップダウン評価と相補的な役割を果たし、独立した評価結果を与えることで温室効果ガス収支評価の信頼性向上に貢献する。評価は主にアジア地域の国・地域、そして全球を対象に実施し、パリ協定の基準年である2013年からできるまで最近までの年別の温室効果ガス収支を評価する。

4. 研究開発内容

プロジェクト全体の研究開発内容

SII-8プロジェクトでは、パリ協定・グローバルストックテイク（GST）に代表される政策ニーズに応えられるよう、複数の観測とモデル手法を組み合わせた統合的研究を実施し、温室効果ガス（GHG：CO₂、CH₄、N₂O）収支に関する包括的な監視システムを構築した（図1）。

テーマ1は大気観測とモデル解析を用いるトップダウン手法により、大都市から全球に至る様々なスケールの温室効果ガス収支について、スピーディに監視・報告できる体制を構築した。また、そのために必要な観測体制について、新たな評価手法を確立し、提案した。テーマ2は、全球スケールのモデルとテーマ1による観測データを用い、大気中温室効果ガス濃度変動と対応した全球のGHG収支評価を行った。地球システムモデルにおける温室効果ガス動態の検証とモデル改良を行い、パリ協定のNDCを



はじめとする排出削減が、近未来の温暖化抑制にもたらす実効性評価の信頼性向上に資する研究を進めた。テーマ3は、テーマ1及び3と連携し、ボトムアップ評価を含む複数手法によるGHG収支に基づいて統合的な分析を行った。個別データから統合評価までをシステム化し、定期的に行われるグローバルストックテイクへの情報提供や異常気象や森林火災等突発的なイベント発生時における影響評価がスピーディに行える監視体制を検討した。

図1 SII-8で研究開発を行ったトップダウン手法とボトムアップ手法による包括的なマルチスケールGHG監視システムに関する模式図。

これらの研究開発により、基準年（2013年）以降できるだけ近年までのGHG収支をマルチスケールで包括的に監視・評価する手法を確立した。最新の排出状況と予測に基づいて、温暖化の現象解明とモデルによる予測精度の検証と向上のための研究を実施した。GSTなど国内外の環境政策に資する情報を提供するため、評価結果は各国のインベントリと比較して検証し、各年度にできるだけ速やかにGHG収支推定を行って成果を報告書にとりまとめて科学的データとして公開した。

【テーマ1】「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」の研究開発内容

サブテーマ1では、大気輸送モデルNICAM-TM（Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model-based Transport Model）や逆解析システムNICAM-based Inverse Simulation for Monitoring（NISMOM）-CO₂/CH₄を用いて、全球から大都市までの様々なスケールのGHG収支推定をシームレスに行うことのできる解析システムを新たに開発した。また、観測データのインパクトを定量的に評価するための手法を確立した。解析誤差を用いた新規手法による、アジア太平洋地域における大気濃度の不確定性評価や、高解像度モデルとタグ付きトレーサー法を用いた東京大都市圏におけるCO₂大気輸送実験から、精度向上に向けて有効な観測を検討し提案した。

サブテーマ2では、東京大都市圏のGHG濃度とトレーサー成分のデータを整備すると同時に簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発した。さらに、川崎-荻田間を、瀬戸内海を經由して定期的な

運航する貨物船に大気観測装置を搭載し、移動しながら大気観測を実施した。上記の観測を含め、アジア域などで展開する観測について、利便性の向上や観測からデータ公開までの時間をできるだけ短縮するよう整備体制の迅速化を行った。さらに、同位体比やトレーサー成分の測定に基づいた発生源セクター毎の推定、また、先端的な測定手法による精密観測による推定高度化へ向けた技術シーズの検討を行った。

サブテーマ3では、表面海水中のCO₂観測データベースSurface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) や、海洋内部の炭酸系データベースGlobal Ocean Data analysis Project Version 2 (GLODAPv2) の全アルカリ度データなどを用い、北西太平洋域の縁辺海を対象に表面海水のCO₂分圧の診断モデルを構築し、海洋CO₂分圧の時空間変動を評価した。また気象庁観測船によるCO₂分圧や全アルカリ度の観測を行い、診断モデルを検証した。大気中CO₂濃度の時空間変動の評価について最適化を図り、日本近海におけるCO₂収支のデータセットを構築し、広域を対象とした既存のデータセットと統合した。

サブテーマ1で実施したNISMOM-CO₂/CH₄の逆解析やNICAM-TMの高解像度シミュレーションでは、サブテーマ2で得られた観測データやサブテーマ3で計算された海洋CO₂フラックスデータを用いた。一方、サブテーマ2は、サブテーマ1で提案されたアジア太平洋域や東京大都市圏での新規観測の提案を受け、観測計画の策定や、実際に新規の観測を開始した。また、サブテーマ3はサブテーマ1の逆解析で推定された海洋フラックスデータを検証材料として、海洋CO₂フラックスデータと海洋大循環・生物地球化学モデルの相互比較も行った。サブテーマ1ではNISMOM-CO₂の結果をテーマ2で得られたCO₂収支と比較し、信頼性、不確定性の評価を行った。また、各サブテーマで得られたGHG収支に関する知見は、毎年、テーマ3が取りまとめるGHGレポートに反映した。

【テーマ2】「排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証」の研究開発内容

テーマ2全体で、グローバルストックテイクの着実な実施を科学面で支援するため、全球スケールのモデルと観測データを活用し、全球の温室効果ガス収支評価を行った。また、本取り組み成果を活かし、地球システムモデルの温室効果ガス動態の検証とモデル改良による信頼性向上に向けた取り組みを、サブテーマ1および2の協力の下、実施した。その後、サブテーマ1により今後の排出削減がもたらす近未来の温暖化抑制の実効性評価を行った。

サブテーマ1では、地球システムモデルにおける再現CO₂濃度のバイアスの原因を特定するため、マルチモデル解析およびフィードバック分析を行った。CH₄とN₂Oについて、サブテーマ2との協力のもと、地球システムモデルで再現される放出/吸収源の全球収支について、インバージョン推定結果との比較を行った。排出削減の実効性評価の信頼性を向上させるため、観測情報に対して大気CO₂濃度をナッジングする手法をモデルに導入した。また、よりスピーディーな排出削減の実効性評価や、地球システムモデルのシミュレーション結果解釈の補助を意図し、既存の簡易気候モデル(PCでも実行可能な全球1次元の気候-物質循環モデル)を、複雑な地球システムモデルの結果をエミュレートできるようにパラメータ調整を行った。さらに、化石燃料CO₂排出削減が今後の温暖化緩和にどの程度の有効性を持ち得るのかについて、シミュレーション・評価を行なった。Shared Socio-economic Pathways (SSPs)のSSP1-1.9とSSP1-2.6を入力情報とし、所与の人為CO₂排出量で駆動する「排出駆動方式」で、改良・開発したシステムでシミュレーションを実施した。

サブテーマ2では、温室効果ガスの地域排出量と吸収量を同一手法で推定する世界初のインバージョンシステムを構築するとともに、これを用いた最新の収支情報を作成・公開した。世界約50地点からの高精度かつ均質な現況観測データとMIROCバージョン4大気大循環モデルベース化学輸送モデル

(MIROC4-ACTM) とを用いて、全球84 (CO₂とN₂O、陸域と海洋) または54 (CH₄、陸域のみ) 地域の月平均排出量と除去量を算出した。国際モデル比較プロジェクトOC0-2 v10 MIPに参加し、2015年から2018年のCO₂濃度場などのシミュレーションを実施、比較を行った。より高い時空間分解能および衛星観測データ等の観測データ利用に基づくCO₂収支推定を行うため、アンサンブルカルマンフィルタを用いたCO₂データ同化による逆推定システムの開発を進めた。OC0-2データのOSSE (Observation System

Simulation Experiment: 観測システムシミュレーション実験)を実施してモデルの精度を検証した。IPCC、GCP、RECCAP2などのグローバルコミュニティと協力して、地球システムにおける多圏間の炭素交換量推定値を取りまとめ、グローバルストックテイクを見据えた研究枠組み構築に貢献した。

【テーマ3】「排出インベントリと観測データ及び物質循環モデル推定に基づくGHG 収支評価」の研究開発内容

テーマ3では、排出インベントリ、物質循環モデル、衛星プロダクトを併用して詳細かつ包括的にGHG (CO₂、CH₄、N₂O) 収支を評価するボトムアップ手法を開発した。この手法は、大気観測データと大気化学輸送モデルを用いるトップダウン手法とは独立した推定結果を与えることで、手法間の整合性と不確実性を検討することを可能とし、GHG収支推定の信頼度向上に寄与した。

サブテーマ1で開発したボトムアップ手法では、独自の物質循環モデル (VISIT) の開発と検証を進め、CO₂については森林などの吸収・放出、CH₄については湿原、水田、シロアリ、N₂Oについては土壌中の硝化・脱窒に伴う放出を推定可能にした。それぞれ観測データとの比較や、Global Carbon Projectで行われたモデル相互比較に参加して再現精度の確認を行った。また、テーマ1・2の大気化学輸送モデルに先験情報としてモデル推定結果を提供し、再現された大気中濃度を確認した。最新の気象データ・土地利用データを用い、バックアップ的な代替推定法を開発してタイムラグの短縮を図った。

サブテーマ1では、SII-8課題の成果をGSTへインプットし政策貢献を行うためのレポート作成を実施し、また国際動向の情報収集を行った。SII-8実施期間中、毎年、新しい観測とモデル解析に基づいてレポートを更新することでオペレーショナルな報告体制を実証した。GSTを含む最新の国際動向について情報収集に努め、WMO-G3Wなど新しい動きにも臨機応変に対応できるようにした。

サブテーマ2では、地上観測ネットワークデータと衛星観測データに対して機械学習を利用したフラックスアップスケール手法の確立と評価、高空間解像度化を実施した。このアプローチは観測データ駆動の経験的な手法であり、サブテーマ1のプロセスモデル(物質循環モデル)に基づくボトムアップ手法とは独立した推定結果を提供することとなる。さらに、逆解析に使用するモデルとGOSAT、GOSAT-2など衛星とCH₄の鉛直濃度分布の相互比較をもとにCH₄の大気輸送プロセスを定量化し、CH₄の消失プロセスにおけるOHの年変動の役割を評価した。さらにサブテーマ1で使用する物質循環モデルVISITの改善に取り組み、上記のフラックスアップスケール手法の結果との相互比較とパラメータ最適化ルーチンの試作を行った。また、フラックスアップスケール手法のシステム化・迅速化に取り組み、これらの結果を可視化し、一定の条件下で簡易に動作できるようなシステム化を試みた。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本課題では、パリ協定GSTに代表される温室効果ガス監視に対する政策ニーズに応えるため、最良の科学に基づく監視手法を開発して、その実施結果を2023年の第1回GSTに提出した。大気観測とそのデータを用いた逆解析によるトップダウン手法と、地上での排出・吸収を個別に推定して積み上げるボトムアップ手法を用いる統合的な評価手法を開発した。アジア太平洋地域における観測データの取得、高精度でマルチスケールなモデル開発、そして政策ニーズに応える迅速・オペレーショナルな評価・報告体制を構築することで、当初の目標を達成した。

テーマ1・サブテーマ1では、NICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMN-CO₂/CH₄に新たにグリッド変換を組み込むことにより、従来よりも高い解像度 (1° × 1°) での長期 (～30年) 逆解析が可能となった (図2; 成果2)。このデータは、国立環境研究所の地球環境データベースより公開し、毎年、新たな観測データを用いて逆解析を実施する毎に、データを更新した。さらに、この逆解析結果をもってGlobal Carbon Project (GCP) による統合解析に参加し、国際的なGHG収支データの一つとしてデータが認知され、広く利用された (成果1, 3, 4)。さらに、NISMN-CH₄を用いて近年のCH₄濃度上昇に関する逆解析を実施し、アジア地域の生物起源からの放出増加が主要因である可能性を示すことができた。

さらにサブテーマ1では、NISMON-CO₂で得られたフラックスデータをNICAM-TMの14km格子にダウンスケーリングすることにより、CO₂大気輸送の再現シミュレーションを高解像度を実施することを可能とした。これにタグ付きトレーサー法を導入し、サブテーマ2による東京スカイツリー観測のデータから、東京大都市圏からのCO₂放出量を推定することに成功した。以上のように、低・高解像度の気候輸送モデルNICAM-TMを組み合わせることにより、全球から大都市スケールまでをカバーする解析システムの構築に成功した。

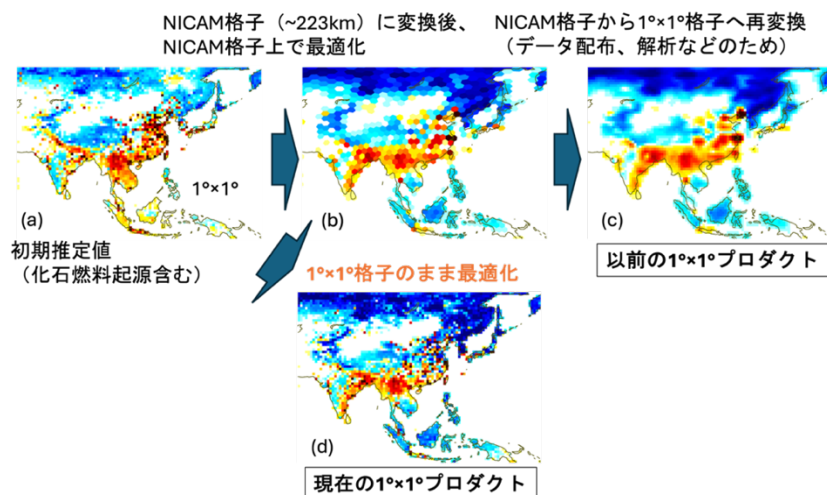


図2. NISMON-CO₂/CH₄に新たに導入したグリッド変換によるフラックスプロダクトの高解像度化の様子。(c)と(d)はグリッド変換の有無の他は同じ観測データ、設定で得られたプロダクトである。

NISMON-CO₂を用いて、日本の機関による観測のインパクト評価を実施するとともに、大気濃度の不確定性を定量的に評価する

新たな手法を考案して、今後の有効な観測展開について考察した。その結果、アジアやインド洋の上空、またその沿岸地域において、濃度の3ヶ月平均の推定精度が0.3ppmほどに収まる観測が実施できれば有効であることが示唆され、次期推進費S-22において、中東航路を航行する貨物船を用いた新規のGHG観測を実施する予定となった。一方、NICAM-TMの高解像度シミュレーションにおいて、東京大都市圏を分割する詳細なタグ付きトレーサーを導入し、CO₂放出量推定の精度向上に向けた新たな観測の設置場所として千葉を提案した。これを受け、サブテーマ2が開発した簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを用い千葉大学西千葉キャンパスにて観測を2023年8月に開始した。今後、この観測により東京湾東岸の工業地帯からの大規模CO₂排出からのシグナルを効率よく補足し、東京大都市圏全体のCO₂放出量の推定精度が向上することが期待される。

サブテーマ2では、首都圏からのGHG排出量を把握するために、都内で観測されるCO₂の短期変動についてサブテーマ1でのモデル計算結果と比較することにより、CO₂の短期変動に対する起源別・地域別寄与率を明らかにした。また、都市圏の排出シグナルを効果的に捉える観測地点を機動的に調べるために、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発した(図3)。本システムは標準ガスの導入の頻度が非常に少なくても安定した分析が可能であり、またシステム全体のバッテリー駆動が可能であることから、観測場所の制限が非常に少ないことが期待される。さらに、サブテーマ1のモデル解析から東京のCO₂排出量を推定するために有効だと考えられた東京湾東岸において、本システムを用いて大気観測を実施することに成功した。

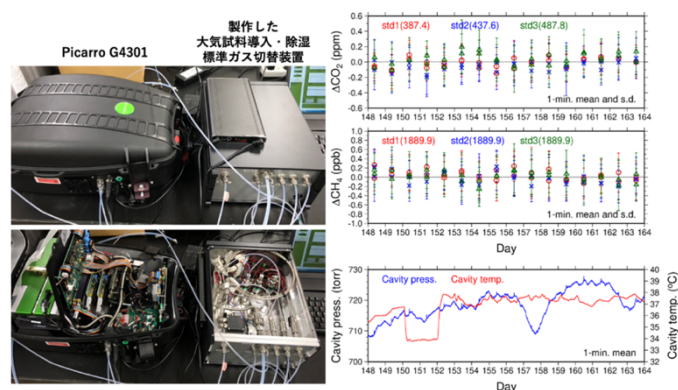


図3. (左)製作した大気試料導入・除湿/標準ガス切替装置の写真、および(右)3濃度の標準ガスのCO₂とCH₄濃度(平均値からの差)と装置のキャビティ圧・温度の1分平均値の時間変化。

サブテーマ2ではさらに、国内の主要都市域からのGHG排出量を広範囲かつ継続的にとらえるため、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船(日俣丸)での大気観測を2022年1月に開始した。ここでまず、

船舶の排気ガスの影響を取り除き都市域からの排出シグナルを分離したうえで、観測データを解析したところ、空間分布の傾向としてCO₂濃度が高い地域が沿岸域（特に川崎・名古屋・神戸等）に点在する一方で外洋域では比較的CO₂濃度が低く空間変化も小さいこと、また、ベースラインが北半球の典型的なCO₂濃度季節変化を示していることがわかった。

大気試料中の¹³CH₄分析を行い地域によるCH₄発生源の寄与を推定したところ、インベントリだけでは分からない排出源に関する情報が初めて観測から得られた。さらに、レーザー分光装置を用いた高精度¹³CH₄連続的測定システムを開発し、つくばにおける外気の連続観測に成功した。また、波照間島及び与那国島で観測された大気中CO₂とCH₄の短期変動成分の変動比から、中国における化石燃料起源CO₂の排出量の変化を推定する手法を開発し、2020年から2023年の1～3月の中国起源CO₂排出量の変化を推定した（成果5, 6, 他）。この手法は観測データの取得後に即時に解析を行うことができる点が特徴であり、観測データの取得後、速やかに解析を行って推進費SII-8ホームページからその結果を公表するという準リアルタイムの解析体制を整えた。

サブテーマ2では、国環研および気象庁・気象研が取り組む各種GHGモニタリングを継続し、得られたデータを短期間（約6か月）に集約し、サブテーマ1で実施する逆解析に提供する体制を構築した。また、上記で得られたデータをGHG世界資料センター（WDCGG）や地球環境データベース（GED）を通じて一般に公開することで、内外の全球炭素収支研究やモデル研究等で活用された（成果7, 他）。

サブテーマ3では、日本海やベーリング海など北太平洋縁辺海を対象に、海洋CO₂分圧の診断モデルとそれに基づく海洋CO₂分圧や海洋CO₂フラックスのデータプロダクトを作成し、それらの分布・変動を評価した。また、海洋CO₂フラックスの計算に必要な地表面付近の大気中CO₂濃度分布の情報を、温室効果ガス観測技術衛星GOSATのデータを利用して改善した（成果8）。本研究の結果、1998年から2022年までの15年間の平均的な正味の吸収・放出量は、東シナ海が $-16.6 \pm 2.7 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、日本海南部が $-13.1 \pm 0.9 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、日本海北部が $-14.1 \pm 2.1 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、オホーツク海が $-19.9 \pm 7.8 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、ベーリング海陸棚域が $-4.5 \pm 16.7 \text{ TgC yr}^{-1}$ でCO₂吸収域、ベーリング海海盆域が $+37.0 \pm 17.6 \text{ TgC yr}^{-1}$ でCO₂放出域であると推定された（図4）。また、南西諸島近海について将来予測を行ったところ、2010年から2100年の90年間に海洋CO₂分圧やその大気との分圧差の季節変化の振幅が増加することが予測された。

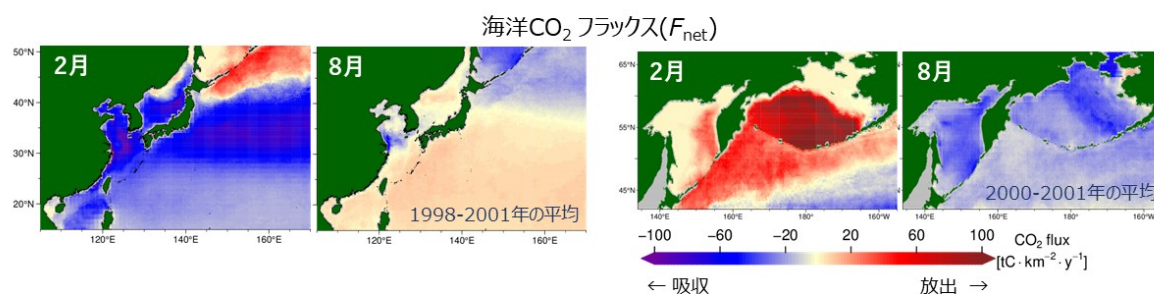


図4. 日本列島の周辺海域と北太平洋西部亜寒帯域における2月と8月の F_{net} の分布

サブテーマ3では、作成した北太平洋縁辺海の海洋CO₂フラックスのデータプロダクトを、外洋域を対象とした既存のデータプロダクトと結合し、大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値としてサブテーマ1に提供したほか、GCPのCO₂統合解析Global Carbon Budget (GCB) 2023 にも貢献した（成果4）。また、GCPの領域別炭素収支統合解析（RECCAP2）に参加し、データとモデルの相互比較を行った結果、両者のアンサンブル平均がアンサンブル標準偏差の範囲内で一致することがわかった。さらに、2001年～2018年における長期変化を見ると、太平洋全体ではCO₂吸収が増加傾向にあること、また、その平均変化速度も一致していた。

テーマ2では全体として、研究目的・目標に沿いつ今後の環境政策への示唆を含む研究成果が得られ、その研究結果をグローバルストックテイクに向けた報告書に提供した。

テーマ2・サブテーマ1では、地球システムモデルで再現されるGHGs動態の検証のため、地球システム

モデルのGHGs検証に活用可能な全球観測データの総括を行った(成果9)。その後、CO₂については、観測大気濃度とシミュレートされた濃度の比較とフィードバック解析を行い、濃度バイアスを生み出す原因となっている時期・地域を特定した(成果11)。CH₄やN₂Oについては、サブテーマ2と連携し、トップダウン推定による排出量と地球システムモデルの結果を比較、その全球値が十分に妥当なものであることを確認した。さらに空間分布についても検証が可能となり、今後の新たな研究フェーズを展開するための礎を築いた。検証を経た後に、モデル改良・調整を行った。本調整により、約14ppmv過小評価されていた地球システムモデルの大気CO₂濃度(2014年の濃度)が、6.2ppmvにまで縮小され、並行して実施していた手法(濃度バイアスが将来予測に悪影響を及ぼしにくくするための大気濃度ナッジング)を地球システムモデルに実装し、濃度バイアスの軽減と予測信頼性の向上につながった(Okada & Hajima in prep.)。なお、CH₄やN₂Oの全球収支は、他手法推定値に十分に収まっていたものの、海洋N₂O放出に関してはさらなる調査とモデル改良を行うことにより、逆推定結果とさらに整合的になった。

以上の研究開発を踏まえ、排出削減の実効性評価シミュレーションを実施した。特に、大気CO₂濃度および全球平均気温の減少時期に着目した解析では、排出量の減少開始から大気CO₂濃度が下がるまでに数十年スケールの時間を要することを明らかにし、今後の緩和策および関連研究に関する重要な示唆を得ることが出来た。本成果の一部は、UNFCCCのグローバルストックテイク向け報告書に記載するとともに、詳細な解析結果をOkada & Hajima として執筆中である。

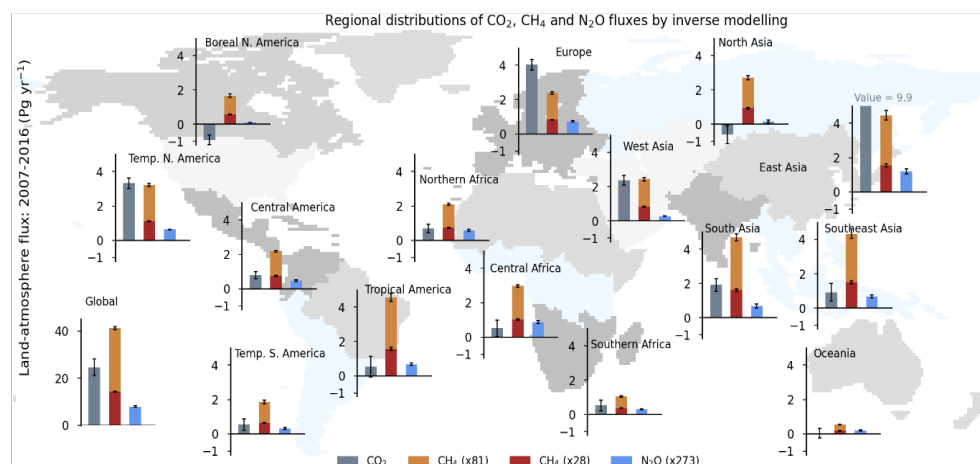


図5. 陸上から大気へのCO₂、CH₄、N₂Oを統合した排出量。CH₄とN₂Oの排出量をそれぞれGWP₂₀(81)またはGWP₁₀₀(28)、GWP₁₀₀(273)で重み付けしたもの(Forster et al., 2021)。CH₄の大気中寿命は他の二種の温室

室効果気体に比べて短いため、GWPは放射強制力の積算時間によって大きく変化し、各CH₄の棒グラフではGWP20とGWP100にそれぞれ対応する薄い色と濃い色で表示している。(図：IPCC AR6 WG1第5章より抜粋、Canadell et al., 2021を元にPatraが作成[成果15])。

サブテーマ2では、CO₂、CH₄、N₂Oの地域排出量と吸収量を同一手法で推定する世界初のインバージョンシステムを構築した。CO₂のインバージョン解析では、複数先験情報を使用したアンサンブルアプローチを採用したシステムを開発した(成果12)。CO₂インバージョンでは検証が不足しているという科学的課題が浮かび上がったため、CO₂インバージョンの検証と精度向上に努める取り組みを行った。ここでは、2種のインバージョンタイプ・14種のインバージョンモデルを比較した、OC02 v10 MIPによるCO₂フラックスを活用した。さらにこの分析に基づき、インバージョンフラックスを検証・高精度化しより信頼性の高い推定結果を得るための新たな評価手法を考案した。また、次世代CO₂収支推定システムを構築するため、アンサンブルカルマンフィルタを用いたCO₂データ同化によるインバージョンシステムの開発を行い、OSSE(Observation System Simulation Experiment: 観測システムシミュレーション実験)の実施とモデルの精度の検証を行い、本システムの枠組み構築を行った。

CH₄のインバージョン解析システムをサブテーマ3-(2)との共同のもと開発した。本システムで参加したGCP統合解析ではトップダウン・ボトムアップアプローチによる全球・半球スケールでのCH₄フラッ

クス比較を実施した。 N_2O のインバージョン解析では新たなシステムを構築し（成果エラー！参照元が見つかりません。）、第2回 GCP- N_2O では、本サブテーマ PI は主たるデータ・知見提供者として同プロジェクトに貢献するとともに、共同主導者としてトップダウン収支推定のとりまとめを行った。RECCAP2 を通した国スケールの温室効果ガス収支推定に貢献した。本サブテーマ PI は、RECCAP2 運営委員会として活動することにより、RECCAP2 報告書の複数章に貢献した。

国際的な政策立案/研究枠組みへの貢献する成果が得られた。IPCC 第6次報告書への執筆者としての貢献成果、国スケールでの温室効果ガス収支把握（グローバルストックテイク）のための研究フレームワーク構築がある。また、Future Earth からの気候科学における10の新しい洞察(Ten New Insights in Climate Science 2023、成果18)に直結する成果が得られた。

テーマ3では、GHG収支をセクター別・空間詳細に評価するための、人為排出インベントリ、物質循環モデル、衛星・地表観測データを組み合わせたボトムアップ手法を開発した。 CO_2 、 CH_4 、 N_2O それぞれについて排出源・吸収源を個別に評価し、積算することで空間分布と時間変化を明らかにした（図6）。物質循環モデル VISIT で推定された自然起源フラックスに関しては、テーマ1および2の大気化学輸送モデルによる逆推定の先験情報として提供した。また、GCPが進めるGHG収支の統合解析および地域収支評価 RECCAP2 にデータを提供した。アジア地域についてデータを抽出・集計し、 CH_4 収支の詳細な解析を行った（成果22）。

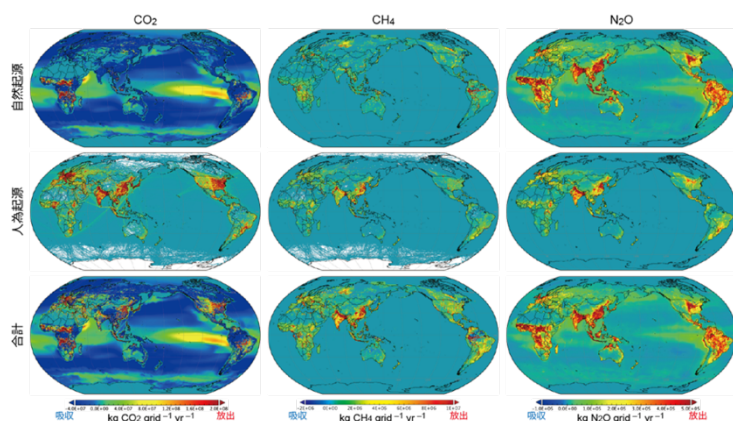


図6. ボトムアップ手法で推定された地表におけるGHG収支の分布、2000-2022年の平均。

2023年のCOP28において成果の検討が行われた第1回GSTへの情報インプットとして、SII-8の主要成果（テーマ1・2のトップダウン推定、テーマ3のボトムアップ推定）をとりまとめたレポートを作成し、

当初の計画を1年近く前倒しして2022年3月、2023年3月にUNFCCCのGSTポータルより提出した。COP26、27、28においてジャパンパビリオンでのセミナーを開催・参加し、SII-8課題の成果を各国のステークホルダーに示した。

サブテーマ1ではボトムアップ手法で使用する物質循環モデルを高度化し、アジアで重要な CH_4 放出源となっている水田（成果19）や、自然起源 CH_4 のうち不確実性が大きいシロアリ放出（成果20）について独自の推定を行った。また人為起源排出インベントリの問題点の1つであったデータ公開までのタイムラグを解消するため、国内総生産などの統計値から排出量を推定する代替手法を開発した。GCPが主導する国際的研究グループによる地域スケールGHG収支評価（RECCAP2）に参加し、物質循環モデルによる推定結果の提供などで貢献した（成果23）。またGCPによるグローバルな CH_4 、 N_2O 収支の統合解析にもモデル推定結果を提供するなどの貢献を行った（成果24）。

テーマ2サブテーマ2の大気インバース解析との比較を通して、両者が2020年春におけるシベリアの異常高温時の陸域 CO_2 フラックスの異常を示しており、両者の妥当性を示した（図7）。さらに、逆解析に使用するモデルとGOSAT、GOSAT-2など衛星と CH_4 の鉛直濃度分布の相互比較をもとに CH_4 の大気輸送プロセスを定量化し、 CH_4 の消失プロセスにおけるOHの年変動の役割を定量化した。さらに、フラックスアップスケール手法のシステム化・迅速化に取り組み、これらの結果を可視化し、一定の条件下で簡易に動作できるシステムを構築した。

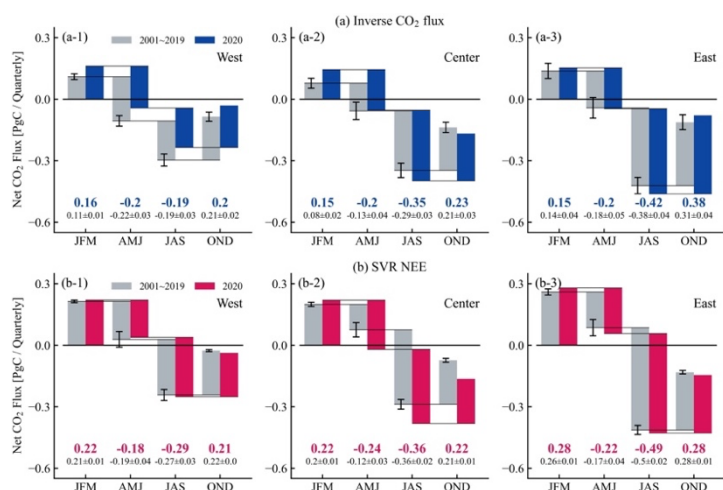


図7. ロシア3地域における大気—陸面間のCO₂フラックス推定値(2001-19年vs2020年)。上段はトップダウン手法による推定値(Chandra et al. 2022)、下段は本サブテーマで構築した機械学習によるCO₂フラックス推定結果(サポートベクタ回帰)。

※この項目で示した番号の成果は「6. 研究成果の発表状況」に記載しています。

5-2. 得られた研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

○テーマ1では、観測データの取得やフラックスデータの作成から逆解析によるGHG収支評価に至るまでの一連の流れが一つのチーム中で完結していることで、スピーディなGHG監視・報告が可能となった。このような体制は、世界気象機関が提唱するGlobal Greenhouse Gas Watch (WMO-G3W)計画など、GHG解析の準リアルタイム化が進む世界の流れにおいて、先導性のあるものと言える。

○テーマ1・サブテーマ1の逆解析システムNISMOM-CO₂/CH₄高度化によって達成した1°×1°解像度での全球長期逆解析は、他の世界の研究機関と比べても最高レベルの解像度であり、今後、詳細な境界線を必要とする国別の収支評価などにおいて、大きなアドバンテージをもつ。新規開発したグリッド変換を通して大気輸送モデルとは異なる任意の格子でのフラックス最適化を可能とする手法は画期的で独創的なものである。東京大都市圏からのCO₂放出量推定において用いたタグ付きトレーサー法は、高解像度モデル(〜14km)への導入という点で先行研究にはない画期的な手法であり、通常の逆解析手法よりも簡便にできるために、様々なケースに応用可能な発展性がある。

○テーマ1・サブテーマ2では、アジア・太平洋域における大気観測網の整備およびデータ収集・公開を進め、これ等の地域のGHG収支解析の精度向上に著しく貢献するものである。また、本サブテーマではCH₄の同位体比(δ¹³C)測定をインド、バングラデシュ、さらに中国の風下で採取されたサンプルについて実施したことは大きな成果である。さらに、波照間・与那国島での観測による冬季(1~3月)の中国からのCO₂排出量を準リアルタイムに推定する手法は、簡便かつ独創的であるため、今後の発展が期待される。

○テーマ1・サブテーマ3で作成した海洋表層CO₂分圧の診断モデルは、CO₂分圧だけでなく、海洋酸性化の評価に重要なpHや炭酸カルシウム飽和度の診断も同時に行えることや、海水のCO₂緩衝能の変化も評価できる点で先進的である。また、国際共同研究RECCAP2の一環として行った太平洋の海洋CO₂フラックスの比較実験においては、これまでになく多くの最先端の診断モデル(7)と海洋モデル(11)の出力を比較した点や、人為起源CO₂フラックスの出力も比較し、海洋CO₂フラックスの評価の現状を明らかにした点で優れている。

○テーマ2・サブテーマ1では、従来主流であった「CO₂濃度で駆動される方式」のシミュレーションではなく、「CO₂排出量によって駆動される方式」に早期から着目し、この方式で本研究課題を遂行した。近年、同様の議論がIPCC第7次報告書に向けた国際マルチモデル比較プロジェクト(CMIP7)でも始まり、本サブテーマの成果は、先導性・先見性ある成果となる見込みが高い。CH₄やN₂Oの排出削減効果に関するモデル開発・研究議論は、次の研究フェーズ展開に向けた重要な礎となる。また、本研究課題で行われた検証と再現精度向上は、国内の予測モデル開発/温暖化予測研究プロジェクト、およびIPCC-AR7/CMIP7の予測精度向上にもつながり、大きな意義と波及効果が見込める。

○テーマ2・サブテーマ2では陸域および海洋域におけるCO₂、CH₄、N₂Oのインパース/トップダウンモデ

リング解析を実施し、IPCC AR6、GCP、RECCAP2、EU-VERIFYなどの政策立案に特に有用な温室効果ガス収支評価の国際プロジェクトでの利用に向けて定期的に更新している。インバージョンシステムにおける先験的フラックスやパラメータの選択に依存する推定フラックスの不確実性を評価するなど、大気輸送プロセスに関する理解向上を図った。また、温室効果ガスの発生源および吸収源の部門別にアンサンブルインバージョンを実施し、**国際的なトップダウンモデリング研究**を支援した。

○テーマ3・サブテーマ1では、排出インベントリ、物質循環モデル、地表観測データを複合的に利用した**独自のボトムアップ手法**を確立した。この手法により任意の領域を対象として、セクター別の排出量・吸収量の評価を行うことが可能となった。冬季の湿原CH₄放出やシロアリCH₄放出など、個別の排出。吸収源を精査することで、GHG動態に関する**科学的理解は確実に深化**した。一方で、人為排出インベントリで使用される排出係数の高精度化や、アジア地域における農業起源放出の精緻化などの課題が残されており、それらを解決することでさらなる**発展が見込まれる**。

○テーマ3・サブテーマ2では、地上観測ネットワークデータと衛星観測データに対して**機械学習を利用したフラックスアップスケール手法**の確立と評価、**高空間解像度化**を実施した。このアプローチは観測データ駆動の経験的な手法であり、サブテーマ1のプロセスモデル(物質循環モデル)に基づくボトムアップ手法とは独立した推定結果を提供する。テーマ2のトップダウン手法との比較を通して、両者の結果(CO₂収支のアノマリ)が大規模な地域スケールで一致することを示した。逆解析に使用するモデルと衛星とCH₄の鉛直濃度分布の相互比較をもとに**CH₄の大気輸送プロセスを定量化**したこと、CH₄の消失プロセスにおいてOHの年変動を考慮したことにより、今後の大気輸送モデルを用いた**収支推定の精緻化**につながることが期待できる。

<行政等が既に活用した成果>

○ UNFCCC-GST に**情報提供**を行うためのレポートを作成し(図8)、SII-8 研究開発の成果である、複数の科学的手法による GHG 収支評価をインプットした。(テーマ1、2、3)

・Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2023 - National Institute for Environmental Studies (2023年3月3日)

<https://unfccc.int/documents/627117>

・Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets (2022年4月1日)

<https://unfccc.int/documents/461590>

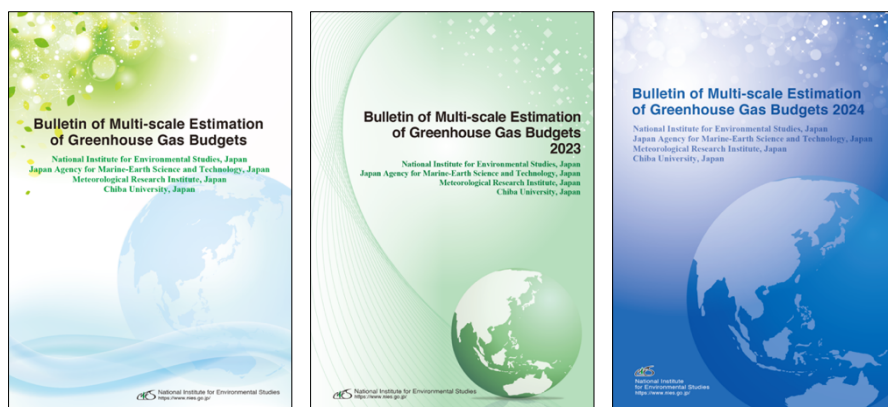


図8. SII-8課題で作成したGHG収支報告書(英文版)の表紙。

○ COP26、27、28において環境省ジャパンパビリオンでのセミナーを実施し、上記レポート、日本が展開しているアジア太平洋地域での観測、先端的モデルなどについてステークホルダー(各国の行政担当者・研究者)向けに発信し意見交換を行った。(テーマ1、2、3)

○ **行政主催の会合**で本課題の成果と意義を周知した。

・科学技術振興機構(JST)-研究開発戦略センター(CRDS)主催 環境・エネルギーセミナー

- ・科学技術振興機構(JST)-研究開発戦略センター(CRDS)主催 科学技術未来戦略ワークショップ
- ・文部科学省主催 第9期地球観測推進部会(第4回)
- ・日本学術会議主催 学術フォーラム
- **GOSAT-2 衛星観測プロジェクト**(環境省・JAXA・国立環境研究所が実施)において、NISMON-CO₂/CH₄およびVISITモデルは、L4プロダクト(衛星データから逆解析で求めたフラックスデータ)の作成に利用された。(テーマ1、3)
- **IPCC第6次評価報告書**に、本課題の参画者が責任著者および専門家査読者として多数参加し、また非常に多くの論文成果(80本以上)が引用される形で貢献した。(テーマ1、2、3)
- **日本政府が関与する地球観測の促進**に関しSII-8課題成果を踏まえた貢献を行った。GEO(地球観測に関する政府間会合)のアジア・オセアニア支部会合(AOGE0)において、温室効果ガス循環に関する部会(Taskgroup-3; Carbon and Greenhouse Gases)では共同議長を務め、以下の会合で貢献を行った。
 - ・文部科学省が主催する第9期地球観測推進部会(第3回)
 - ・地球観測衛星委員会(CEOS)主催による戦略的実装チームテクニカルワークショップ
 - ・衛星地球観測コンソーシアム(CONSEO)設立総会(基調講演)
- **温室効果ガス監視に関する国際会議**でSII-8課題成果を踏まえた貢献を行った。
 - ・アジアの温室効果ガスフラックス観測ネットワークの国際ワークショップ(基調講演)
 - ・フューチャー・アース日本サミット(招待講演)
 - ・イタリア大使館主催2050年カーボンニュートラルに向けた地球観測の役割に関する日-伊合同ウェビナー(講演)
 - ・欧州コペルニクスCO₂プロジェクト(CoC02)第1回全体会議(外部委員)
 - ・世界気象機関(WMO)主催Carbon Monitoring Workshop(講演、続くWMO-G3W構想への協力)

<行政等が活用することが見込まれる成果>

- SII-8課題からパリ協定・第1回GSTに情報提供されたマルチスケールでのGHG収支に関する情報は、技術的対話とC028での総括を経て、2024-25年に行われる各国の排出削減目標(NDC)のより野心的な方向への引き上げ検討に活用することが見込まれる。
- 2028年に実施される第2回GSTは、国際社会が2030年時点で排出量半減を達成するうえでの重要なマイルストーンであり、本課題はそれに向けた技術的基礎と国内体制を固める貢献を果たした。
- 本課題で得られたCO₂、CH₄逆解析のデータや大気・海洋CO₂フラックスのデータは、GCPの全球・地域別の統合GHG収支解析へと提供しているが、これらGCPの統合解析は世界でもっとも参照されるランドマーク的な存在であり、IPCC報告書の当該分野において主要な知見のもとにもなっている。
- 本課題で実施している観測は、世界のGHG観測網において、アジア地域という重要な地域をカバーしており、これをもとに得られる科学的知見は、各国・地域の排出削減目標の策定にも貢献できる可能性を有している。また、「環境研究・環境技術開発の推進戦略」(令和元年5月21日環境大臣決定)が「必要な研究」と定める「国際的な環境協力等にも資する地球温暖化現象の解明、予測、対策評価に焦点を当てた」研究を支える基礎的データを提供している。
- 現在実施に向けて動き出しているWMO-G3Wへの貢献が見込まれる。本研究で開始した内航船による観測データは、次期GHG観測衛星プロジェクトGOSAT-GWの評価・検証データとしても利用される。
- 地球システムのGHG収支変動メカニズムに関する理解深化は、今後の温暖化緩和策の長期的政策展望に貢献しうる。より不確実性の高い自然吸収源の精緻な把握と合わせ、関連科学政策を推進する必要性が示唆されている。
- 本課題では観測による現状把握から将来予測までをシームレスに実施した点に大きな特徴があり、それによって現在IPCCなどで使用している社会経済・排出シナリオを検証する材料を提供する。2024年時点で、IPCC次期報告書(AR7)の作成に向けた動きが活発化しており、温室効果ガス収支の分野で貢献を拡大するうえで、長期・広域の研究実績を持つSII-8課題の成果は重要な意味を持つ。

5-3. 研究目標の達成状況

<プロジェクト全体の達成状況>…………… 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究」

全体目標	全体の達成状況
各種観測データ、物質輸送・循環モデル、排出インベントリを用いて、マルチスケール（主要都市、国・地域、全球）で、基準年（2013年）以降できるだけ近年までの温室効果ガス収支を包括的に監視・評価する手法を確立する。アジア太平洋域における観測システム模擬実験を行い、日本およびアジア数カ国でのグローバルストックテイクにおける最適な観測体制の検討を支援する。最新の排出状況と予測に基づいて、温暖化の現象解明とモデルによる予測精度の検証と向上のための研究を実施し、温度上昇抑制に対する実効性を評価する。2022年度開始を目標に、年度ごとにできるだけ速やかに収支推定を行って成果を報告書にとりまとめ、グローバルストックテイクに資する科学的データとして公開する。収支の評価結果を各国のインベントリと比較して検証し、他国のグローバルストックテイク実施を国際連携を通じて支援する。さらに、2023年度以降5年ごとに予定されているグローバルストックテイクに対して、温室効果ガス観測データを可能な限り迅速に収集し、適正な品質管理を行い、高度で包括的な解析システムと統合した体制を環境省は維持していく必要がある。本研究に基づき、我が国が最良の科学に基づくグローバルストックテイクを実施する体制を提案する。	各テーマが担当する内容を着実に遂行し、包括的で迅速なマルチスケールの温室効果ガス収支評価が行われ、実施期間である2021-2023年度について 毎年レポートを公開 することができた。それにより、全体目標であるパリ協定・グローバルストックへの情報を 当初計画より前倒しで達成 することができた。アジア太平洋地域における 観測ネットワーク と共同研究の強化、GOSATなど 衛星データの活用促進、先端的なモデル開発 などの最良の科学を目指した研究開発を実施して、多数の研究論文を発表し、 IPCCなどの気候・環境政策を支援 する研究活動に重要な貢献を行った。テーマ間・サブテーマ間では緊密な連携が進められ、観測・モデル計算データの共有、観測に基づくモデル検証、モデル解析に基づく観測最適化などが 当初計画を上回るレベル で実施された。グローバルカーボンプロジェクトによる統合解析へのデータ提供や、2022年度から検討が始まった世界気象機関によるグローバル温室効果ガス監視（WMO-G3W）などの国際活動に積極的にコミットした。これらの内容により、 課題全体としては成果を大きく上回る成果をあげた と判断した。

<【テーマ1】達成状況>……………

2. 目標を上回る成果をあげた

「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」

テーマ1 目標	テーマ1 の達成状況
① 大気観測とモデル解析により、大都市から全球に至る様々なスケールのGHG収支について、スピーディに監視・報告できる体制を構築し、経年変動や大小様々なスケールの炭素収支メカニズムの理解を深化させる。また、そのために必要な観測体制について、新たな評価手法を確立し、提案する。	（図表・成果番号はテーマ1報告書のもの） ① サブテーマ1による即時的な逆解析や高解像度NICAM-TMとタグ付きトレーサー法を用いた大都市圏からのCO ₂ 放出量推定（成果24）、サブテーマ2の観測データを用いた準リアルタイムの中国CO ₂ 放出量変化の推定（図2-16；成果10,12）、サブテーマ3の迅速な日本近海・北西太平洋域及び全
② 低・高解像度の大气輸送モデルNICAM-TMを組	

み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。さらに、GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立し、各観測の寄与度を把握するとともに、タグ付きトレーサー実験や観測システムシミュレーション実験OSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。

③ 東京都市圏内や内航船による観測を実施し、また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発し、都市域からのGHG排出の把握のための大気観測システムを開発する。さらに、波照間やアジア域で採取される大気試料の $^{13}\text{CH}_4$ 測定や、GHGと同時に観測する各種関連成分(CO 、 O_2 、 $^{14}\text{CO}_2$ 等)のデータから、GHG収支の起源分離・放出量変動の推定を行う。

④ 北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベーリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(pCO_2)や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、 pCO_2 を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋 pCO_2 の分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダクトにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。

⑤ 上記の観測・解析について、速報性を重視した体制を整え、テーマ3で作成するレポートや国際的なGHG収支解析プロジェクトにデータを提供し、グローバルストックテイクに資する科学的根拠を蓄積して環境政策に貢献する。

球海洋における CO_2 収支のデータセット構築(成果2, 3, 21)により、全球、中国、日本周辺、東京大都市圏といった様々なスケールにおいて、スピーディにGHG収支を監視・報告できる体制を構築することができた。また、サブテーマ1から、アジア太平洋地域、また、東京大都市圏において、有効な**新規観測の提案**を行い、実際、観測開始に繋げることができた。(図1-19, 2-4)

② 低解像度のNCIAM-TMを用いたNISMONによる逆解析の結果をダウンスケーリングすることにより、全球高解像度(〜14km)での CO_2 大気輸送の再現を可能とし、さらにタグ付きトレーサー法を導入することによって、**大都市圏の CO_2 放出推定**を可能にした(図1-13; 成果24, 43, 45)。さらに、2つの手法(疑似観測データ実験、誤差軽減率計算)を考案し、アジア太平洋地域において、日本の現業・研究機関による観測データのインパクトを客観的に評価することができた。また解析誤差を用いた新規手法やタグ付きトレーサー法を用いて、アジア太平洋地域および東京大都市圏において**有効な観測を具体的に提案**することができた。(図1-17, 1-19; 成果44)

③ 都市からの排出把握に有効と推定された地点で即応的に追加観測を実現するための**簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発**に成功し

(図2-2)、本システムを用いて、東京都市圏の排出把握に有効と推定された東京湾東岸(千葉大学西千葉キャンパス)における観測に成功した

(図2-4)。東京以外の都市域からのGHG排出を効率的にとらえるため、川崎一荏田間を定期運航する貨物船での大気観測を2022年1月に開始し、川崎、名古屋、神戸等の都市域からの排出シグナルを捉えることに成功した(図2-6)。波照間やインド、バングラデシュで採取された大気試料の $^{13}\text{CH}_4$ 測定から、 CH_4 変動に対する**発生源毎の寄与率を推定**することに成功した(図2-8, 2-10; 成果27, 30, 46, 59)。また、 $^{13}\text{CH}_4$ をより高時間分解能で観測するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システム(1時間の積算で0.1‰の精度)の開発に成功した(図2-12)。さらに、波照間島・与那国島での大気観測に基づく $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比から、中国における放出量を**準リアルタイムに推定**する手法を開発し、2020年から2023年の排出量の変化を推定することに成功した(図2-16; 成果

	10, 12, 26)。 ④ 日本海の海洋CO₂観測を冬季に実施するとともに、北太平洋の縁辺海を対象とした狭領域の海洋表層炭酸系の分布・変動を経験的に推定できる診断モデルを、全アルカリ度と全炭酸濃度の移動窓重回帰分析により作成した。作成した診断モデルや表面水温など様々なデータセットに基づいて、海洋表層CO₂分圧の分布・変動のデータプロダクトを作成し、これを外洋域が対象の既存のデータプロダクトに統合した（図3-1～3-9；表1-3-1；成果62, 65他）。 ⑤ 観測やフラックスデータの作成、逆解析などを通して、即時的なGHGフラックスの推定する体制を整え、そのプロダクトをテーマ3でとりまとめるGHGレポートにインプットした。このレポートは国連気候変動枠組条約（UNFCCC）に提出されるなどグローバルストックテイクに貢献した。また、それぞれのGHG収支プロダクトはGlobal Carbon Project（GCP）などの国際的な研究活動にも活用され、環境政策策定の基礎となる科学的根拠の創出をした（図1-9；成果1, 4, 7）。
--	--

<【テーマ2】達成状況>・・・・・・・・

2. 目標を上回る成果をあげた

「排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証」

テーマ2 目標	テーマ2 の達成状況
全球スケールのモデルとテーマ1による観測データを用い、大気中温室効果ガス濃度変動と対応した全球の温室効果ガス収支評価を行う。地球システムモデルにおける温室効果ガス動態の検証とモデル改良を行い、パリ協定のNDCをはじめとする排出削減が、近未来の温暖化抑制にもたらす実効性評価の信頼性向上に資する研究を進める。 まず、推進費SII-8課題の目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」の達成に貢献する。 次に、大気輸送モデルMIROC4-ACTMによる従来のトップダウン手法によるCO₂、CH₄、N₂Oの収支推定を継続し、推定した結果を収支評価のためにテーマ3に提供するとともに、GCP等の国際プロジェク	MIROC4-ACTMを用いた領域～全球規模のCO₂、CH₄、N₂Oのインバージョン解析をサブテーマ2で実施した。この結果をテーマ3に提供、グローバルストックテイク向けインプット資料に重要知見を提供した。またGCP、RECCAP2等にデータ提供し、主導的立場で参加するなど、関連国際プロジェクトにも大きく貢献した。このインバージョンフラックス等を用いることにより、サブテーマ1で使用する地球システムモデルMIROC-ES2Lの物質循環過程を検証することが可能となり、予測モデルの大幅な予測精度向上が行えた。この改良された地球システムモデルを用いて排出削減の実効性評価シミュレーションを実施したところ、長期政策展望に資する知見を得ることができた。なお、3種ガスをGlobal Warming Potentialで重み付けした領域別評価（本報告書の図5）は、サブテーマ2代表が主執筆参加したIPCC-AR6でも強調されている。またFuture Earthからの「気候科学の10の新しい洞

トおよびIPCC第6次報告書に貢献する。また、地球システムモデルにおける炭素-窒素サイクルの再現性向上や、大気輸送および化学過程の改良を実施する。	察」発出にも貢献、テーマ2の計画・取り組み(予測モデルとインバーションの研究協力)が時宜にかなったものであることが確認された。
---	---

<【テーマ3】達成状況>・・・・・・・・

2. 目標を上回る成果をあげた

「排出インベントリと観測データ及び物質循環モデル推定に基づくGHG収支評価」

テーマ3目標	テーマ3の達成状況
テーマ1及び2と連携し、複数手法による温室効果ガス収支推定結果について統合的な評価を行う。個別データから統合評価までをシステム化し、定期的に行われるグローバルストックテイクへの情報提供や異常気象や森林火災等突発的なイベント発生時における影響評価がスピーディに行える監視体制を構築する。一方で、温室効果ガス収支推定の際に不確実性を生む要因となる化石燃料燃焼、土地利用変化、火災等の様々なインベントリの精度の向上を通して、温室効果ガス収支推定の不確実性幅を低減させる。 各種の地上観測、物質循環モデル、排出インベントリを用いるボトムアップ的手法を用いて、温室効果ガス収支に関する統合的な分析を実施し、その成果を他手法の推定とも合わせてわかりやすい形で報告書としてまとめる。ボトムアップ的手法には、空間分布を詳細化できる点や排出源をセクター別に分離して示すことができる点など長所もあるが、十分な情報を収集するまでにタイムラグを要するなどの短所もある。テーマ1、2で実施される観測とトップダウン評価と相補的な役割を果たし、独立した評価結果を与えることで温室効果ガス収支評価の信頼性向上に貢献する。評価は主にアジア地域の国・地域、そして全球を対象に実施し、パリ協定の基準年である2013年からできるまで最近までの年別の温室効果ガス収支を評価する。	(図表・成果番号はテーマ3報告書のもの) 本課題独自の温室効果ガス収支に関するボトムアップ手法を確立し、CO₂、CH₄、N₂Oを対象に、1970～2022年の期間についてグローバルから国・地域別のスケールで評価を実施した。テーマ1及び2と連携して成果を取りまとめたレポートを作成し(図1-13)、成果17、18、19)、パリ協定・グローバルストックテイクに情報提供するなど、目標に掲げた政策貢献を遂行した。本課題の提案当初、レポートの提出は2022年度を想定していたが、課題開始後に2021年度中の提出が必要なことが判明したため、作業を大幅に前倒しして出版の完成にこぎつけた。また、複数論文に成果を発表し、気象学会での専門分科会開催、COPでのセミナー実施やGCP統合解析(成果9, 10)に参加するなど、国内・国際活動も積極的に実施した。 ボトムアップ評価では、計画通りに物質循環モデル、衛星観測、排出インベントリデータを使用してセクター別かつ空間詳細な評価を行う手法を確立して科学的理解を深化させた(成果5, 6, 7)。各種衛星データを用いた陸域収支変動の早期検出システムを構築した(成果26, 27)。モデル計算の迅速化、排出インベントリ情報収集、機械学習を用いた推定手法の開発により、ボトムアップ手法の問題点であったタイムラグの短縮にも成功した。

6. 研究成果の発表状況

(1) プロジェクト全体の成果の件数

成果の種別	テーマ 1 件数	テーマ 2 件数	テーマ 3 件数	合計
査読付き論文：	19	24	13	56
査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)：	0	0	0	0
その他誌上発表 (査読なし)：	0	7	6	13
口頭発表 (国際学会等・査読付き)：	19	0	0	19
口頭発表 (学会等・査読なし)：	30	20	46	96
知的財産権：	0	0	0	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	12	5	15	32
マスコミ等への公表・報道等：	4	4	6	14
研究成果による受賞：	3	1	1	5
その他の成果発表：	0	3	4	7

(2) 誌上発表

< 主要な査読付き論文・準ずる成果 >

成果 番号	【テーマ 1】の主要な成果
1	Friedlingstein, P., ..., Y. Iida, ..., S.-I. Nakaoka, Y. Niwa, et al. (2022). Global Carbon Budget 2021. Earth System Science Data, 4. https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022 .
2	Niwa, Y., Ishijima, K., Ito, A., Iida, Y. (2022). Toward a long-term atmospheric CO ₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMN-CO ₂ v2021.1. Progress in Earth and Planetary Science, 9, 42, https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6 .
3	Friedlingstein P., Jones M. W., O'Sullivan M., ... Niwa Y., et al. (2022). Global Carbon Budget 2022. Earth System Science Data, 14, 4811–4900, https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022 .

4	Friedlingstein P., Jones M. W., O'Sullivan M., ... Niwa Y., et al. (2023). Global Carbon Budget 2023. <i>Earth System Science Data</i> , 15, 5301–5369, https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023 , 2023.
5	Tohjima, Y., Niwa, Y., Tsuboi, K., Saito, K. (2022). Did atmospheric CO ₂ and CH ₄ observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO ₂ reduction due to COVID-19 lockdown?, <i>Journal of the Meteorological Society of Japan</i> , 100(2), 437–444 (2022), https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021
6	Tohjima, Y., Niwa, Y., Patra, P. K., Mukai, H., Machida, T., Sasakawa, M., Tsuboi, K., Saito, K., Ito, A. (2023). Near-real-time estimation of fossil fuel CO ₂ emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, <i>Progress in Earth and Planetary Science</i> , 10:10, https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6
7	Kosugi, N. Ono, H., Toyama, K., Tsujino, H. Ishii, M. (2023). An empirical projection of ocean acidification in southwestern Japan over the 21st century. <i>Marine Chemistry</i> , 255, 104290, 10.1016/j.marchem.2023.104290
8	Maki, T., Kondo, K., Ishijima, K., Sekiyama, T. T., Tsuboi, K, Nakamura, T. (2023). Independent bias correction method for satellite observation data introduced to CO ₂ flux inversion, <i>SOLA</i> , 19, 157–164, doi:10.2151/sola.2023-021

成果 番号	【テーマ2】の主要な成果
9	Hajima, T. et al. (2024) Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models and suggestion for improved simulation of CO ₂ concentration [preprint; submitted to <i>Biogeoscience</i>], https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-188
10	羽島知洋、伊藤昭彦、野口真希 (2022) 地球システムモデリングにおける炭素循環過程の検証と発展、 <i>地球環境</i> 、26、101–110.
11	Patra, P. K. et al. (2022) Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model. <i>J. Meteorol. Soc. Jpn.</i> , 100, 1 (2022)
12	Chandra, N. et al. (2022) Estimated regional CO ₂ flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO ₂ inversions, <i>Atmos. Chem. Phys.</i> , 22, 9215–9243, https://doi.org/10.5194/acp-22-9215-2022
13	Bisht, J.S.H. et al. (2023) Estimation of CH ₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system, <i>Geoscientific Model Development</i> , 16, 1823–1838, 2023.
14	Ito, A., Li, T., Qin, Z., Melton, J. R., Tian, H., Kleinen, T., Zhang, W., Zhang, Z., Joos, F., Ciais, P., Hopcroft, P. O., Beerling, D. J., Liu, X., Zhuang, Q., Zhu, Q., Peng, C., Chang, K.-Y., Fluet-Chouinard, E., McNicol, G., Patra, P., Poulter, B., Sitch, S., Riley, W., and Zhu, Q. (2023) Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH ₄ models, <i>Geophys. Res. Lett.</i> doi:10.1029/2023GL103037
15	Canadell, J.G. et al. (2021) Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In <i>Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change</i> [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816. doi: 10.1017/9781009157896.007
16	Byrne, B. et al. (2023) National CO ₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO ₂ observations in support of the global stocktake, <i>Earth Syst. Sci. Data</i> , 15, 963–1004, 2023.
17	Tian, H. et al. (2024) Global Nitrous Oxide Budget 1980–2020, <i>Earth Syst. Sci. Data</i> , 16, in press.
18	Bustamante, M. et al. (2023) Ten New Insights in Climate Science 2023/2024. <i>Global Sustainability</i> , 1–58, 2023. https://doi.org/10.1017/sus.2023.25

成果 番号	【テーマ3】の主要な成果
19	Ito, A., Inoue, S., and Inatomi, M. (2022) Model-based evaluation of methane emissions from paddy fields in East Asia, <i>J. Agric. Meteorol.</i> , 78, 56-65, https://doi.org/10.2480/agrmet.D-21-00037 .
20	Ito, A. (2023) Global termite methane emissions have been affected by climate and land-use changes, <i>Scientific Reports</i> , 13, 17195, https://doi.org/10.1038/s41598-023-44529-1 .
21	Ito, A., Patra, P. K., and Umezawa, T. (2023) Bottom-up evaluation of the methane budget in Asia and its subregions, <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 37, e2023GB007723, https://doi.org/10.1029/2023GB007723 .
22	Ito, A., Li, T., Qin, Z., Melton, J. R., Tian, H., Kleinen, T., Zhang, W., Zhang, Z., Joos, F., Ciais, P., Hopcroft, P. O., Beerling, D. J., Liu, X., Zhuang, Q., Zhu, Q., Peng, C., Chang, K.-Y., Fluett-Chouinard, E., McNicol, G., Patra, P., Poulter, B., Sitch, S., Riley, W., and Zhu, Q. (2023) Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH ₄ models, <i>Geophysical Research Letters</i> , 50, e2023GL103037, https://doi.org/10.1029/2023GL103037 .
23	Wang, X., Gao, Y., Jeong, S., Ito, A., Bastos, A., Poulter, B., Wang, Y., Ciais, P., Tian, H., Yuan, W., Chandra, N., Chevallier, F., Fan, L., Hong, S., Lauerwald, R., Li, W., Lin, Z., Pan, N., Patra, P. K., Peng, S., Ran, L., Sang, Y., Sitch, S., Maki, T., Thompson, R. L., Wang, C., Wang, K., Wang, T., Xi, Y., Xu, L., Yan, Y., Yun, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Zheng, B., Zhou, F., Tao, S., Canadell, J. G., and Piao, S. (2024) The greenhouse gas budget of terrestrial ecosystems in East Asia since 2000, <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 38, e2023GB007865, https://doi.org/10.1029/2023GB007865 .
24	Tian, H., Pan, N., Thompson, R. L., Canadell, J. G., Suntharalingam, P., Regnier, P., Davidson, E. A., Prather, M., Ciais, P., Muntean, M., Pan, S., Winiwarter, W., Zaehle, S., Zhou, F., Jackson, R. B., Bange, H. W., Berthet, S., Bian, Z., Bianchi, D., Bouwman, A. F., Buitenhuis, E. T., Dutton, G., Hu, M., Ito, A., Jain, A. K., Jeltsch-Thömmes, A., Joos, F., Kou-Giesbrecht, S., Krummel, P. B., Lan, X., Landolfi, A., Lauerwald, R., Li, Y., Lu, C., Maavara, T., Manizza, M., Millet, D. B., Mühle, J., Patra, P. K., Peters, G. P., Qin, X., Raymond, P., Resplandy, L., Rosentreter, J. A., Shi, H., Sun, Q., Tonina, D., Tubiello, F. N., van der Werf, G. R., Vuichard, N., Wang, J., Wells, K. C., Western, L. M., Wilson, C., Yang, J., Yao, Y., You, Y., and Zhu, Q.: Global nitrous oxide budget 1980-2020, <i>Earth System Science Data</i> . [印刷中、2024年5月出版予定]
25	Belikov, D, Saitoh, N and Patra, P. K. (2022) An analysis of inter-hemispheric transport pathways based on 3-dimensional methane data by GOSAT observations and model simulations, <i>J. Geophys. Res.</i> , 127, 14. https://doi.org/10.1029/2021JD035688
26	Yamamoto, Y., Ichii, K., Ryu, Y., Kang, M., and Murayama S. (2022) Uncertainty quantification in land surface temperature retrieved from Himawari-8/AHI data by operational algorithms, <i>ISPRS J. Photogramm. Remote Sen</i> , 191, 171-187. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.008 .
27	Tibrewal, K. et al. (2024) Assessment of methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions, <i>Commun. Earth & Environment</i> , 5, 26. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01190-w .
28	羽島知洋、伊藤昭彦、野口真希 (2022) 地球システムモデリングにおける炭素循環過程の検証と発展、 <i>地球環境</i> 、26、101-110.

(3) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
----------	-----	-----	----	-------------	-----------

	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

成果番号	実施年度	【テーマ1】の実施状況
29	2021	丹羽洋介, オンラインイベント「日本の脱炭素化を考えるための世界の科学者からの、気候変動10の最新メッセージ」, 2021年6月9日, 観測とモデルで診る温室効果ガスの収支 (参加者400名以上)
30	2022	丹羽洋介, オンラインイベント「観測とシミュレーションで読み解く「温室効果ガス収支」― 最良の科学」に向けて―」, 2023年2月22日, 大気シミュレーションを用いた温室効果ガス放出・吸収量の推定 (参加者400名以上)
31	2023	丹羽洋介, 国立環境研究所公開シンポジウム「モニタリングから読みとく環境 ～次世代につなげるために～」, 2023年6月22日, 大気観測とモデルの融合による温室効果ガス放出・吸収量の監視 (参加者200名以上)
32	2021	中岡慎一郎, オンラインイベント「温室効果ガス研究の最前線 ―パリ協定の目標達成に向けて―」, 2022年2月10日, 地球を巡る二酸化炭素を追う ～Global Carbon Budget報告～ (参加者400名以上)
33	2021	遠嶋康徳, オンラインイベント「温室効果ガス研究の最前線 ―パリ協定の目標達成に向けて―」, 2022年2月10日, 波照間島における大気観測に基づくCOVID-19に関連した中国からのCO ₂ 排出量の変化の推定 (参加者400名以上)
34	2022	遠嶋康徳, オンラインイベント「観測とシミュレーションで読み解く「温室効果ガス収支」― 最良の科学」に向けて―」, 2023年2月22日, 大気観測に基づく温室効果ガスの動態解明 ～都市大気からバックグラウンド大気まで～ (参加者400名以上)
35	2023	町田敏暢, 「実験室潜入! 地球環境モニタリング～CO ₂ 観測の実験に参加したよ～」国立環境研究所夏の公開、2023年7月22日
36	2021	石井雅男, IPCCセミナー「気候変動を知る ～最新報告書が示すこれまでとこれから」、2021年10月・11月 (オンライン・録画)、「二酸化炭素排出・温暖化と海の変化」
37	2021	石井雅男, 気候変動アクション日本サミット2021、2021年10月13日 (オンライン)、「日本も直面する気候危機」 (参加者2000名) _
38	2022	石井雅男、三鷹市生涯学習センター市民大学事業総合コース、2022年6月10日、「二酸化炭素増加・地球温暖化と海の変化」
39	2023	石井雅男、IPCCシンポジウム「IPCC第7次評価サイクル (AR7) 始動! 2024年3月4日 虎ノ門ヒルズフォーラム

成果番号	実施年度	【テーマ2】の実施状況
40	2022	羽島知洋 ウェビナー「温室効果ガス研究の最前線―パリ協定の目標達成に向けて―」(主催: 国立環境研究所/グローバルカーボンプロジェクト/フューチャーアース、2022年2月10日、オンライン)にて「人為CO ₂ 排出量に基づく温暖化予測: 地球システムモデル」として講演
41	2023	海洋研究開発機構 横須賀本部一般公開 (2023年10月14日、参加者約2500名) にて成果紹介(簡易気候モデルを用いたクイズ・シミュレーション体験)
42	2021	P. K. Patra、第18回「地球環境シリーズ」講演会「カーボンニュートラルの科学 (2021) Emissions from human activities caused rise in greenhouse gases
43	2022	P. K. Patra、国立環境研究所/グローバルカーボンプロジェクト/フューチャーアース ウェビナー「温室効果ガス研究の最前線―パリ協定の目標達成に向けて―」(2022) 大気観測に基づいた主要な温室効果ガス3種の地域別収支見積もり

44	2023	P. K. Patra, Future Earth's 10NICS (Bustamante et al.; INSIGHT 4; Patra); Public lecture in Japan on 13 Dec 2023 (300 online participants)
----	------	--

成果 番号	実施 年度	【テーマ3】の実施状況
45	2021	伊藤昭彦、COP26ジャパンパビリオンハイブリッド形式（現地[英国グラスゴー]+Zoom）ウェビナー（環境省主催、推進費SII-8協力）、2021年11月2日、Project for the Global Stocktake 2023 現地約20人、オンライン約100人の参加者（一般人、政策担当者、海外の研究者など）に本課題の研究内容を紹介し質疑を実施。
46	2021	三枝信子、伊藤昭彦、COP26ジャパンパビリオンハイブリッド形式（現地[英国グラスゴー]+Zoom）ウェビナー（環境省主催、推進費SII-8協力）、2021年11月2日、今後に向けたパネルディスカッション 現地約20人、オンライン約100人の参加者（一般人、政策担当者、海外の研究者など）とともに温室効果ガス監視に関する課題を議論した。
47	2022	伊藤昭彦、Zoomウェビナー「温室効果ガス研究の最前線—パリ協定の目標達成に向けて—」（国立環境研究所、グローバル・カーボン・プロジェクト、フューチャーアース主催、推進費SII-8協力）、2022年2月10日、パリ協定・グローバルストックテイクに向けたGHG監視 一般参加者（登録約630人）に向けて本課題の本課題の目的、内容、成果と政策貢献について説明し、オンライン機能を用いた質疑を行った。
48	2022	伊藤昭彦、国立環境研究所公開シンポジウム Zoomブレイクアウトルームを利用したポスターセッション、2022年6月23日、温室効果ガスを監視する：パリ協定達成に向けて 1時間のセッション中に約20人の参加者に対して本課題の研究目的、内容、成果を紹介するポスターの内容を説明しオンライン機能を用いた質疑応答を行った。
49	2022	伊藤昭彦、東京工業大学での集中講義（Zoomを用いたオンライン形式） 2022年6月29日、7月6日 「気候変動と生物地球化学的循環」の題名で講義を行い、本課題の研究目的、研究内容、成果、IPCCなどへの貢献について説明し、参加した約70名の学生と質疑応答を行った。
50	2023	伊藤昭彦、GCPウェビナー「観測とシミュレーションで読み解く『温室効果ガス収支』— 最良の科学—」に向けて—、オンライン発表（2023）温室効果ガス収支の包括的な監視に向けて、オンラインウェビナーで成果紹介とオンライン機能を用いた質疑を実施。（参加者400名以上）
51	2022	伊藤昭彦、COP27 ジャパンパビリオンセミナー Current status and future perspectives on greenhouse gas emission mitigation and impacts, シャルム・エル・シェイク、エジプト（2022）Greenhouse gas monitoring with Japanese observational facilities and models. COP27ジャパンパビリオン（約30名）でのセミナー+オンラインでの質疑を実施。
52	2023	伊藤昭彦、IGES COP28直前ウェビナーシリーズ 第1回「政治的局面を迎えるグローバルストックテイク 世界の軌道修正成るか」（2023）IPCCに関与する科学者の立場から 第1回GSTへの期待と考察 一般参加登録者数953名、オンラインでの質疑を実施。
53	2023	Ito, A., COP28 ジャパンパビリオンセミナー Contribution of GOSAT series satellites to Greenhouse Gas and Air Pollutant observations for Sustainable Development (2023) Introduction of SII-8 and follow-up projects for integrated monitoring COP28ジャパンパビリオン（約30名）でのセミナー+オンラインでの質疑を実施。
54	2023	伊藤昭彦、日本メジフィジックス株式会社主催講演会「学びの扉第11回：カーボンニュートラルに向けた温室効果ガスの削減と監視」2023年6月21日 一般参加者（主に社員）約60名。対面+オンラインでの講演・質疑を実施。
55	2022	伊藤昭彦、名古屋大学主催・中京テレビ共催環境シンポジウム「地球・都市の温暖化に立ち向かう」～どうなる・どうする地球と名古屋の暮らし～ 招待講演「科学の目で温室効果ガスを見張る：都市から世界まで」2023年7月20日現地開催・中京テレビ（YouTubeで講演内容を配信中 https://www.youtube.com/watch?v=8of1IHejYis ）

56	2022	三枝信子、MEM2023フォーラム（脱炭素をめざす技術革新に関する国際会議）にて招待講演を行い、地球規模で温室効果ガスの吸収排出量を把握する取組として推進費SII-8の必要性や意義を周知した（三枝、2023年12月13日、オンライン）
57	2023	三枝信子、第5回環境研究機関連絡会研究交流セミナー（環境研究に従事する国立研究開発法人等の公的機関のセミナー）にて口頭発表と総合討論パネリストを務め、カーボンニュートラルに向けた環境研究の事例として推進費SII-8の成果を周知した（三枝、2024年1月24日、オンライン）
58	2021-2023	SII-8課題ホームページを開設し成果や会議情報など継続的に情報発信を行った。本課題の目的、体制、内容について分かりやすい説明を掲載した（視覚障害のある方にも配慮）。グローバルストックテイクに提供した温室効果ガス収支レポートについても本ホームページより公開ダウンロード可能とした。 ホームページURL https://www.nies.go.jp/sii8_project/
59	2022	市井和仁、明日の経営を考える会(AKK)「気候変動と生物多様性」（主催：一般社団法人グローバル・コンパクト・ネットワーク・ジャパン(GCNJ)、2022年1月15日、国連大学本部ビル、観衆約50名）
60	2022	市井和仁、生物多様性 x 気候変動 - 同時解決に向けた科学のいま - （主催：国立環境研究所 地球環境研究センター）、2022年7月26日、オンラインウェビナー）
61	2023	市井和仁、令和5年度得意な才能を伸ばす教育（理数）「人工衛星から見える地球環境変化を調べてみよう」（主催：東京都教育委員会、2023年8月23-24日、千葉大学、受講者6名）

7. 国際共研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

Global Carbon Projectに関する国際共同研究の推進

- Global Carbon Budget (GCB)

Future Earthの研究プロジェクトであるGlobal Carbon Project (GCP)による全球CO₂収支統合解析GCB（イギリス・エクスター大学のP. Friedlingstein氏が主導）について、サブテーマ1-(1)では、その2020年版、2021年版、2022年版の3回に逆解析データを提供し、逆解析比較の議論に参加した。また、サブテーマ1-(2)は逆解析比較のために、地上ステーションや航空機を利用した大気中濃度観測データを提供した。サブテーマ1-(3)は全海洋スケールの大気・海洋間CO₂フラックスのデータを提供した。また、サブテーマ2-(2)からも、本課題の使用システムで得られた逆解析データを提出している。このGCBはIPCC AR6の第5章「地球規模の炭素と他の生物地球化学的循環及びそのフィードバック」において主要な科学的知見として引用されているほか、関連する様々な研究において、データが直接的に利用されている。また、この報告書もグローバル・ストックテイクに提出された。

- Global Methane Budget (GMB)

同じくGCPによって、全球のCH₄収支統合解析GMB2022のプロジェクトにおいて、サブテーマ1-(1)で行ったCH₄逆解析のデータを2022年6月に提供した。また、サブテーマ1-(2)は逆解析比較のために、地上ステーションや航空機を利用した大気中濃度観測データを提供した。またサブテーマ2-(2)からも、その逆解析データを提供した(JAMSTEC/千葉大)。このプロジェクトは米国・スタンフォード大学が拠点となっているが、リードしているのはフランス気候・環境科学研究所 (LSCE) のMarielle Saunois氏とサブテーマ2-(2)代表である。他にオランダやフィンランド、米国などから研究者が参加している。このGMBも、前回の解析ではIPCC AR6に引用されるなど、当該分野で中心的な位置づけがされている。このGMBの成果を通して、本研究のCH₄逆解析データが広く他研究に利用されている。

- Global Nitrous Oxide Budget

同じくGCPによって、全球のN₂O収支統合解析において、サブテーマ2-(2)で行ったN₂O逆解析 (Patra et al. 2022)のデータを提供した。第2回GCP-N₂O (Tian et al., 2024)では、本サブテーマPIは主たるデータ・知見提供者として同プロジェクトに貢献するとともに、共同主導者としてトップダウン収支推定のとりまとめを行った。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Global Carbon Project (CO ₂)	イギリス
Global Carbon Project (CH ₄)	アメリカ合衆国
Josep G. Canadell . CSIRO Environment/Global Carbon Project	オーストラリア . キャンベラ
Rob Jackson . Stanford University	米国 . カリフォルニア
Rona Thompson . The Climate and Environmental Research Institute NILU	ノルウェー、ケラー
Marielle Sauniois . Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	フランス . パリ
Hanqin Tian . Boston College	米国 . マサチューセッツ
Glen P. Peters . CICERO Center for International Climate Research	ノルウェー . オスロ

- REgional Carbon Cycle Assessment and Processes 2 (RECCAP2) に関する国際共同研究の推進
GCPが推進するプロジェクトRECCAP2において、スイス・チューリッヒ工科大学 (ETH Zürich) の N. Gruber氏、J. D. Muller氏ら、アメリカ海洋大気局 (PMEL) のB. Carter氏、R. A. Feely氏、フランス LSCEのF. Chevallier氏ら、韓国Institute of Basic Science (IBS) のK. Rodgers氏と、診断モデルや海洋モデルの出力結果の収集・解析を協力して行い、共同で論文を作成している。またサブテーマ2-(2)代表は、RECCAP2の運営委員を務め、複数成果が得られている。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Philippe Ciais . Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	フランス . パリ
V.V.S.S. Sarma . National Institute of Oceanography	インド . ヴィシャカパトナム
Gustaf Hugelius . Stockholm University	スウェーデン . スtockホルム
Atul K. Jain . University of Illinois, Urbana-Champaign	米国 . イリノイ
Benjamin Poulter . White House Office of Science and Technology	米国 . ワシントンDC
A.M.R. (Roxana) Petrescu . Vrije Universiteit Amsterdam	オランダ . アムステルダム

- 陸域モデル相互比較に関する国際共同研究の推進
Global Carbon Projectにおける陸域モデル相互比較およびCO₂、CH₄、N₂O収支推定、地域炭素収支

推定において共同研究を実施し、共著論文として発表した。陸域モデル相互比較プロジェクトTRENDYに参加し、プロトコル論文の執筆に参加した（論文投稿中）。グローバルな湿原CH₄放出量について、共通プロトコルに基づくモデル計算を実施し、推定データを提供するとともに解析に参加した（論文投稿中）。グローバルな土壌からのN₂O放出量について、共通プロトコルに基づくモデル計算を実施し、推定データを提供するとともに解析に参加した（成果9）。1990～2020年の東アジア地域における炭素収支統合解析プロジェクトに参加し、モデル推定データを提供するとともに解析に参加した。米国地球物理学学会のジャーナルより刊行されるRECCAP2特集において成果が発表された。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Stephen Sitch・University of Exeter	英国（グレートブリテン及び北アイルランド連合王国）
Hanqin Tian・Boston College	アメリカ合衆国・ボストン
Benjamin Poulter・NASA-GSFC	アメリカ合衆国・メリーランド州
Xuhui Wang・Peking University	中華人民共和国・北京
Sujung Jeong・Seoul National University	大韓民国・ソウル

大気海洋観測に関する国際共同研究の推進

- アジアにおける温室効果ガス観測の共同実施
 インドのアリヤバータ観測科学研究所（Dr. Manish Naja），バングラデシュのダッカ大学（Prof. Md. Kawser Ahmad），マレーシア気象局と共同で、観測空白域である南アジアとボルネオ島で大気フラスコサンプリング観測を長期間にわたり定常的に実施している。インド・ナイニतालとバングラデシュ・コミラの長期観測データについては、共同で論文発表を行ったことに加え、16件のオープンデータとして公開し、データの利活用が進んでいる。
- Global Ocean Data Analysis Project Version 2 (GLODAPv2)
 海洋観測船によって取得した炭酸系観測変数のデータを含む海洋各層の高品質観測データセットの全海洋的データ統合活動。サブテーマ3の研究代表者は、西部北太平洋における気象庁の多くのデータを提供するとともに、データ品質管理作業に協力している。太平洋のデータ統合活動はもともと北太平洋海洋科学機関（PICES）の活動の一環として、研究代表者がリードして2010年代前半に実施され、GLODAPv2に統合された。現在は、国際学術連合会議（ICSU）の海洋研究科学委員会（SCOR）やユネスコ政府間海洋学委員会の国際海洋炭素観測連携プロジェクト（IOCCP）が支援し、欧州の研究プロジェクトも支援しているが、活動の多くは海洋炭酸系観測の研究者や観測・研究機関スタッフらのボランティアに支えられている。現在のプロジェクト代表は S. K. Lauvset（ベルゲン大学・ノルウェー）。作成・更新されるデータベースは米国海洋大気庁の National Centers for Environmental Information (NCEI) から公開され、海洋内部のCO₂蓄積や酸性化の動向解明などに活用されており、その成果はIPCC WG1 評価報告書にも引用されている。
- Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)
 海洋観測船や商船の篤志観測船などから取得した海洋表層CO₂分圧のデータセットの統合活動。本テーマ1の国立環境研究所や気象研究所の研究分担者は、南北太平洋における主要なデータ提供

者であり、国立環境研究所の研究分担者は、北太平洋のデータ品質管理作業を推進している。この活動は、Taro Takahashiらが1990年代から作成していた統合データセットに触発されて地球圏－生物圏国際共同研究計画（IGBP）のSOLAS-IMBER Joint Carbon Group 2 の活動として始まり、現在はIOCCPが支援しているが、活動の多くはGLODAP2と同様に世界の海洋炭酸系観測の研究者や観測・研究機関スタッフのボランティアに支えられている。現在のプロジェクト代表はD.C.E Bakker（イーストアングリア大学・イギリス）。作成・更新されるデータベースはGLODAPv2と同様に、NCEIなどから公開され、大気海洋間CO₂フラックスの評価や、海洋表層の酸性化の動向解明などに活用されており、その成果は、IPCC WG1 評価報告書にも引用されている。

- WMO Global Greenhouse Gas Watch (G3W)

2022年より世界気象機関World Meteorological Organization (WMO) において、GHGの準リアルタイム解析システムの構築が計画（G3W）され始めており、そのstudy groupの一員として参加して、コンセプトペーパーの執筆や実施計画の策定に貢献した。本研究で構築した、観測、フラックスデータ、逆解析システムから成る解析体制は、G3Wの有力な実施グループとして認識されている。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
ETH Zürich	スイス連邦
NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory	アメリカ合衆国
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay	フランス共和国
Center for Climate Physics, Institute for Basic Science, Busan	大韓民国
World Meteorological Organization	スイス
GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel	ドイツ連邦共和国
ICOS Ocean Thematic Centre	ノルウェー王国

陸域フラックス研究に関する国際共同研究の推進

- AsiaFlux, FLUXNETなどの大気－陸域地上フラックス観測ネットワークを介し、AsiaFluxデータの利用と共同研究、機械学習によるアップスケーリング国際比較プロジェクトFLUXCOMを介した共同研究の推進。観測データに基づくアップスケーリング手法の構築において、FLUXCOMプロジェクトの推進（本年度はサブ2からの衛星データ提供と先方グループによるモデルラン（Martin Jung, Markus Reichsteinなど）、AsiaFluxにおける韓国サイトからのデータ提供と共同研究推進（Youngryel Ryuなど）。これら成果物はFLUXCOMプロジェクトの一つのアウトプットとしてコミュニティに公開される見込みである。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Martin Jung, Markus Reichstein・Max Planck Institute for Biogeochemistry	ドイツ・イエナ

Youngryel Ryu・Seoul National University	大韓民国・ソウル
Minseok Kang・National Center for AgroMeteorology	大韓民国・ソウル

- 本研究で構築する機械学習によるCO₂フラックス推定については、アジア地域に特化した推定ではあるものの必ずしも観測データが十分に存在していなかった。ただし、その手法自体は、新たなサイトのデータとの親和性が高く、この手法が一つの利点となり、日中韓の共同研究(JSPSの日中韓フォーサイト事業；2023-2027年度)に発展している。国際共同研究の母体はJapanFlux, KoFlux, ChinaFluxである。本課題サブ課題2より、日本学術振興会の日中韓フォーサイト事業の日本側の衛星・モデルグループのリーダーを務めており、今後、国際共同研究がさらに発展する見込みである。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Hyunseok Kim・Seoul National University	大韓民国・ソウル
Zhi Chen, Shuli Niu・Chinese Academy of Science	中華人民共和国・北京

- 本研究の成果の一つとして、国レベルでの陸域CO₂フラックスの推定がある。サブテーマ2の機械学習によるCO₂フラックス推定データの高空間解像度版に関して、モンゴルの研究者が強い関心を持ち、モンゴルのCO₂収支のモニタリングを推定する国際共同研究に発展した（現在論文修正中）。2000年～2020年におけるモンゴルの光合成量の変化を県ごとに推定し、気候の経年変動との関連を解析した。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Tsolmon Renchin・National University of Mongolia	モンゴル・ウランバートル

衛星リモートセンシング研究に関する国際共同研究の推進

- 本研究の成果として、静止衛星ひまわりによる地表面温度と光合成量の推定がある。AsiaFluxやそのオセアニア組織であるOzFluxなどの地上観測グループとの国際共同研究として、韓国やオーストラリアの研究グループとのデータ交換を通して、地表面温度や光合成量などの現地観測データの検証を介した研究を遂行した。地表面温度についてはYamamoto et al. (2022)として出版し、光合成量に関しては論文を準備中である。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Jamie Cleverly・James Cook University	オーストラリア・タウンズビル
Youngryel Ryu・Seoul National University	大韓民国・ソウル

Minseok Kang・National Center for AgroMeteorology	大韓民国・ソウル
--	----------

地球システムモデルの気候－炭素循環過程の相互比較に関する国際共同研究の推進

- 地球システムモデルを用いた気候-炭素循環相互作用に関する国際研究コミュニティC4MIP (the Coupled Climate-Carbon Cycle Model Intercomparison Project)での共同研究として、CMIP6シミュレーション結果を用いた、地球システムモデルによる再現CO₂濃度に関する分析を行なった。この公開シミュレーションデータを活用し、本課題でその解析を行なった。なお本分析は、文部科学省受託研究「気候変動予測先端研究プログラム」とのジョイント研究として実施し、Hajima et al. (2024)としてプレプリント出版された。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Chris Jones/Spencer Liddicoat・Met Office Hadley Center	英国・エクセター
Vivek Arora・Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, University of Victoria,	カナダ・ビクトリア
Victor Brovkin・Max-Planck-Institute for Meteorology	ドイツ・ハンブルグ
Roland Séférian・CNRM, Université de Toulouse, Météo-France	フランス・トゥールーズ
Pierre Friedlingstein・University of Exeter	英国・エクセター
Elena Shevliakova・NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	米国・プリンストン

Transport model inter-Comparison (TransCom)プロジェクトにおける国際共同研究の推進

- Transport model inter-Comparison (TransCom)プロジェクトは、大気輸送モデルを開発・評価し、関連コミュニティに向けた知見を提供する、最も長く続いている研究活動の一つである。大気輸送モデルを使う研究協力や国際貢献の多くは、このプロジェクトから発展してきたものである。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
Maarten Krol . Wageningen University and Research	オランダ . ワーヘニンゲン
Philippe Peylin . Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	フランス . パリ
Ralph F. Keeling . Scripps Institution of Oceanography, UCSD	米国 . カリフォルニア
Steve Montzka . NOAA Global Monitoring Division	米国 . コロラド
Britton Stephens . National Center for Atmospheric Research	米国 . コロラド
Rona Thompson . The Climate and Environmental Research Institute NILU	ノルウェー、ケラー

8. 研究者略歴

<プロジェクト代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、略歴、現職）
伊藤 昭彦	筑波大学大学院博士課程生物科学研究科修了 博士（理学） 海洋研究開発機構研究員、国立環境研究所研究員・室長を経て、 現在、東京大学大学院農学生命科学研究科教授 専門は地球生態学、研究テーマは陸域の温室効果ガス収支

<テーマリーダー略歴>

分担者氏名	略歴（学歴、学位、略歴等、現職）	参画期間
1) 丹羽 洋介	東京大学大学院 理学系研究科修了 博士（理学） 気象庁気象研究所主任研究員を経て、 現在、国立環境研究所主任研究員 専門は大気物理、研究テーマは温室効果ガスの収支解析	2021年度 ～ 2023年度
2) 羽島 知洋	東京大学大学院 農学生命科学研究科修了 博士（農学） JSPS PDを経て海洋研究開発機構 現在、同研究所 地球環境部門 環境変動予測研究センター 地球システムモデル開発・応用グループ グループリーダー 代理 副主任研究員 専門は陸域生態系・炭素循環、研究テーマは地球システム モデリングと生態系・物質循環過程	2021年度 ～ 2023年度

Abstract

[Project Title]

Comprehensive study on multi-scale monitoring and modeling of greenhouse gas budgets

Project Period :	FY2021-2023
Project Leader :	Ito Akihiko
(PL ORCID) :	ORCID 0000-0001-5265-0791
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 3058506, JAPAN Tel: +81-29-850-2981 Fax: +81-29-850-2219 E-mail: itoh@nies.go.jp
Theme Leaders (ORCID) :	Niwa Yosuke (ORCID0000-0002-7600-9816), Hajima Tomohiro (ORCID0000-0002-4828-5100)
Cooperated by :	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Meteorological Research Institute, Chiba University
Keywords :	Greenhouse gas flux, Global Stocktake, Bottom-up estimation, Top-down estimation, Inventory validation

[Abstract]

Reliable and comprehensive monitoring of greenhouse gases (GHGs), such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O), is crucial in accomplishing the long-term goals of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Paris Agreement, with special emphasis on temperature rise below 1.5°C from the preindustrial level. The global stocktake is an important 5-year milestone to facilitate the collective progress for mitigation by revising the Nationally Determined Contributions toward an increasingly ambitious direction. The global stocktake must be performed using the best available science; therefore, it has become an essential and urgent task for the research community to provide reliable data and perform practical analyses. The research community of Japan has a long experience in monitoring atmospheric GHG in the Asia–Pacific region and was therefore highly expected to contribute to the global stocktake and associated international activities. From April 2021 to March 2024, the SII-8 project entitled “Comprehensive Study on Multi-scale Monitoring and Modeling of Greenhouse Gas Budgets,” funded by the Environmental Restoration and Conservation Agency and the Ministry of the Environment, Japan, was conducted to enhance the contributions of Japan to the global stocktake. The project is composed of three research components: (1) high-level observation and top-down estimation of GHG budget, (2) evaluation of the effect of GHG mitigation using an Earth system model, and (3) bottom-up estimation of GHG budget. Every year, the research outcomes of the project are summarized in a concise report, “Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets.” In March 2022 and 2023, the reports were submitted to the UNFCCC portal for the information collection and technical dialogue phases of the global stocktake, followed by the consideration of the outcome at the COP28 in Dubai.

Theme 1 leveraged an observational network of GHGs across the Asia–Pacific region using various platforms, such as ground-based stations, ships, aircraft, and satellites. To estimate GHG budgets on multiple spatial scales from a global to a city scale, a global high-resolution inverse analysis system was developed, and a high-resolution atmospheric CO₂ transport simulation was performed. Furthermore, a new portable GHG measurement system was developed and installed at Chiba in 2023

to better constrain the flux estimate for the Great Tokyo area. Shipboard observation along the Pacific Belt Zone in Japan also started in 2022 to efficiently capture GHG emission signals from other large cities. A global sea–air CO₂ flux data product was also produced by integrating the newly produced data product for marginal seas in the northwestern North Pacific with the existing product for the open ocean.

Theme 2 estimated the regional/global budgets of three GHG species (CO₂, CH₄, N₂O) with the top-down approach, and the outcomes contributed to international scientific discussions. Budget information was also used to validate and improve Earth system model performance. The improved model was used to assess the effectiveness of emission reduction efforts in the future, suggesting that the earlier emergence of a decrease in atmospheric CO₂ concentration will require more enhanced emission reduction.

Theme 3 developed a bottom-up method to spatially and explicitly evaluate GHG budgets using emission inventories, biogeochemical models, and satellite products. Technical developments were achieved for paddy field and termite CH₄ emissions and anthropogenic emissions. Satellite image analyses were conducted for the early detection of anomalies in surface GHG budgets. Individual sources and sinks were aggregated to evaluate national and regional GHG budgets, contributing to the global stocktake and Intergovernmental Panel on Climate Change reports.

[References]

- Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2022, NIES/JAMSTEC/MRI/Chiba University, UNFCCC HP "Documents" (submissions to the Global Stocktake), 2022/04/01, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/202203011207---GST_NIES_GHGbudget_202202.pdf
- Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2023, NIES/JAMSTEC/MRI/Chiba University, UNFCCC HP "Documents" (submissions to the Global Stocktake) 2023/03/03, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/202303021439---GST_NIES_GHGbudget_202303.pdf
- Belikov, D. A., Saitoh, N., Patra, P. K. 2022. An analysis of interhemispheric transport pathways based on three-dimensional methane data by GOSAT observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 127, e2021JD035688. DOI: 10.1029/2021JD035688
- Chandra, N., et al. (2022) Estimated regional CO₂ flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO₂ inversions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 9215–9243, DOI: 10.5194/acp-22-9215-2022
- Ito, A., Inoue, S. & Inatomi, M. 2022. Model-based evaluation of methane emissions from paddy fields in East Asia. *Journal of Agricultural Meteorology*, 78, 56–65. DOI: 10.2480/agrmet.D-21-00037
- Niwa, Y., Ishijima, K., Ito, A., Iida, Y. (2022) Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO₂ v2021.1, *Progress in Earth and Planetary Science*, 9, 42, DOI:10.1186/s40645-022-00502-6.
- Patra, P. K. et al. (2022) Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 100, 1. DOI: 10.2151/jmsj.2022-018
- Tohjima, Y., Niwa, Y., Tsuboi, K., Saito, K. (2022) Did atmospheric CO₂ and CH₄ observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO₂ reduction due to COVID-19 lockdown?, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 100(2), 437–444 (2022), DOI: 10.2151/jmsj.2022-021
- Yamamoto, Y., Ichii, K., Ryu, Y., Kang, M., Murayama, S. (2022) Uncertainty quantification in land surface temperature retrieved from Himawari-8/AHI data by operational algorithms. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 191, 171–187. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.07.008
- Bisht, J.S.H. et al. (2023) Estimation of CH₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system, *Geoscientific Model Development*, 16, 1823–1838, 2023. DOI: 10.5194/gmd-16-1823-2023
- Byrne, B. et al. (2023) National CO₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake, *Earth System Science Data*, 15, 963–1004, 2023.
- Bustamante, M. et al. (2023) Ten New Insights in Climate Science 2023/2024. *Global Sustainability*, 1–58, 2023. DOI:10.1017/sus.2023.25
- Ito, A., Patra, P. K., Umezawa, T. (2023) Bottom-up evaluation of the methane budget in Asia and its subregions. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007723. <https://doi.org/10.1029/>

2023GB007723

- Ito, A. (2023) Global termite methane emissions have been affected by climate and land-use changes. *Scientific Reports*, 13, 17195. DOI:10.1038/s41598-023-44529-1
- Ito, A. et al. (2023) Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH₄ models. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103037. DOI:10.1029/2023GL103037
- Tohjima, Y. et al. (2023) Near-real-time estimation of fossil fuel CO₂ emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10:10, DOI: 10.1186/s40645-023-00542-6
- Hajima, H., et al. (2024) Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models and suggestion for improved simulation of CO₂ concentration, pre-print EGU sphere [preprint], DOI: 10.5194/egusphere-2024-188
- Tibrewal, K. et al. (2024) Assessment of methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions. *Communications Earth and Environment*, 5, 26. DOI: 10.1038/s43247-023-01190-w
- Tian, H. et al. (2024) Global Nitrous Oxide Budget 1980–2020, *Earth System Science Data*, 16, in press.

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別紙

(参考資料) 【公募審査・中間評価結果等への対応】

指摘等	対応状況・非対応理由等
中間評価コメント「このプロジェクトを実施することによって、これまで実現できなかった何が具体的に実現できて、それによって提供される結果がどのような効果を持つ可能性があるのかをもっと説明していただけるとよかったように感じた。」	コメントありがとうございます。 SII-8課題によってアジア太平洋地域における観測強化とモデル開発が行われ、CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ Oについて包括的に、かつグローバルストックテイクに貢献できるスピード感を持って、収支を評価に可能になった点を終了評価ではより明確に説明いたします。
中間評価コメント「GST への貢献」については、国際的な議論を通じて、求められるものも変化することが想定されるので、的確な貢献を行うために、成果のとりまとめについては臨機応変な対応をお願いしたい」	コメントありがとうございます。本課題ではCOP26-28への参加やIGESとの情報交換を進めるなど、GSTをめぐる最新動向に気を配り、適切なタイミングでレポートをインプットするなど臨機応変な対応を心がけて進めてまいりました。