

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

研究期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【SII-8-3】

体系的番号： J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 3 0

研究課題： 「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」

Research Title: GHG budget evaluation using emission inventories, observational data, and biogeochemical models

テーマリーダー： 伊藤 昭彦

テーマ代表機関： 国立研究開発法人国立環境研究所

研究分担機関： 国立研究開発法人国立環境研究所、千葉大学

キーワード： ボトムアップ手法、排出インベントリ、物質循環モデル、国地域別排出量、統合評価

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
I. 成果の概要	3
1. はじめに（研究背景等）	5
2. 研究開発目的	6
3. 研究目標	6
4. 研究開発内容	8
5. 研究成果	10
5-1. 成果の概要	10
5-2. 研究目標の達成状況	12
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	16
6. 研究成果の発表状況の概要	19
6-1. 成果の件数	19
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	19
7. 国際共同研究等の状況	20
8. 研究者略歴	22
II. 成果の詳細	23
II-1 サブテーマ1 「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」	23
[サブテーマ1要旨]	23
1. サブテーマ1研究開発目的	23
2. サブテーマ1研究目標	23
3. サブテーマ1研究開発内容	24
4. サブテーマ1結果及び考察	29
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	37
II-2 サブテーマ2 「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」	38
[サブテーマ2要旨]	38
1. サブテーマ2研究開発目的	38
2. サブテーマ2研究目標	38
3. サブテーマ2研究開発内容	40
4. サブテーマ2結果及び考察	42
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	52
III. 研究成果の発表状況の詳細	53
(1) 成果の件数	53
(2) 誌上发表	53
(3) 口頭発表	56
(4) 知的財産権	58
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	58
(6) マスメディア等への公表・報道等	60
(7) 研究成果による受賞	60
(8) その他の成果発表	61

別紙 公募審査・中間評価等への対応

I. 成果の概要

<テーマ情報>

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
課 題 番 号	: 【SII-8-3】
体 系 的 番 号	: JPMEERF21S20830
研 究 課 題	: 「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 リ ー ダ ー	: 伊藤 昭彦 (国立研究開発法人国立環境研究所、主席研究員)

<キーワード>

ボトムアップ手法
排出インベントリ
物質循環モデル
国地域別排出量
統合評価

<研究体制>

サブテーマ1 「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領域	主席研究員	伊藤 昭彦	2021年度～2023年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領域	領域長	三枝 信子	2021年度～2023年度

<サブテーマ1研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
国立研究開発法人国立環境研究所	地球システム領域	特別研究員	殷 帥 (2021年度～2022年度)

サブテーマ2「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」

＜サブテーマ2リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
千葉大学	環境リモートセンシング研究センター	教授	市井 和仁	2021年度～2023年度
千葉大学	環境リモートセンシング研究センター	准教授	齋藤 尚子	2021年度～2023年度
千葉大学	国際高等研究基幹	教授	小槻 峻司	2021年度～2023年度

＜サブテーマ2研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
千葉大学	国際高等研究基幹	テニユアトラック助教	山本 雄平
千葉大学	環境リモートセンシング研究センター	特任助教	Ruci Wang
千葉大学	環境リモートセンシング研究センター	特任研究員	Dmitry Belikov
千葉大学	環境リモートセンシング研究センター	特任研究員	Jun Hu (2021.04-2022.03)

＜テーマ3の研究経費（間接経費を含む）＞

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
合計	72,681千円	21,804千円	94,485千円

1. はじめに（研究背景等）

温室効果ガス（GHG：CO₂、CH₄、N₂O）収支の評価において、推定手法間で量的な齟齬が生じる**不確実性**の問題は、特に**パリ協定グローバルストックテイク（GST）**などの政策に直結し、高い信頼度が求められる場合に深刻な問題となる。大気中のGHG濃度を連続的に観測し、そのデータをからモデルで逆推定を行う**トップダウン手法**（SII-8課題ではテーマ1・2で実施）は、広域を代表する評価が可能であり、観測の迅速性が高いという利点がある。しかし、観測地点の偏りや空白域が推定誤差の要因となっており、それはGOSATシリーズに代表される衛星観測が可能になった現在でも完全には解消されていない（例えば雲被覆を受ける熱帯や極夜となる冬季の高緯度域）。

地表での排出・吸収を発生源別に評価し、それらを積み上げることで国・地域レベル、そしてグローバルに拡張する方法を「**ボトムアップ手法**」と呼ぶ。ボトムアップ手法は、大気観測データを用いない独立した評価方法であり、トップダウン手法を補完する検証材料を提供するとともに、併記することで不確実性を検討することができる。一般的に、ボトムアップ手法は自然起源の排出・吸収を物質循環モデルなどで評価し、人為起源排出については統計値やインベントリを使用することが多い。原理的にはシンプルな手法であるが、包括的に実施するには、対象エリアや単位に注意した上で、多数のデータを収集・整理し、取捨選択して集計を行う必要があり、GHG収支に関する高度な知識とデータ処理が求められる。また、データや推計法に起因する不確実性にも注意が必要である。そのため、世界の研究機関ではトップダウン手法による評価を行っているものも含め、包括的かつ定常的にボトムアップ評価を行っているグループはほとんどないのが現状である。近年では、**排出インベントリの精度や更新頻度の向上**が図られている、**物質循環モデルで主要な自然起源GHGの排出・吸収を扱えるようになった**、**衛星観測データが飛躍的に増加した**、**深層学習などのデータ科学的手法が一般的に使われるようになった**、などの技術的進展によって、包括的なボトムアップ評価の実現性が高まっていた。

GHGに関する第一線の研究者により、「**グローバル・カーボン・プロジェクト（GCP）**」は定期的にグローバルなGHG収支評価を公表している。そこでは、トップダウンとボトムアップの両手法による評価結果が対等の重要度を以て併記されており、今後もGCPへの貢献を促進していくにはボトムアップ手法にも相応の研究開発が求められる。GCP統合解析の成果は、「**気候変動に関する政府間パネル**

（IPCC）」のGHG収支に関する章で必ず引用される重要な情報源となっている点にも留意する必要がある。実際に、環境省推進費「**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、実施期間2017～2019）」で開発されたCH₄収支に関するボトムアップ推定結果はIPCC第6次評価報告書に引用されるなど国際的に高く評価されている。

ボトムアップ手法を高度化する上での課題は、多数の排出・吸収セクターを評価する必要がある、その中には統計情報を用いる人為起源排出が含まれるため、準リアルタイムのような迅速性の高い推定は困難であった。GSTでは1年程度のタイムラグで評価したGHG収支を報告することになるため、推定の**迅速化**がボトムアップ手法の課題であった。また、地表からの排出・吸収の中には観測やモデル推定が難しいものや、推計特有のバイアスを持つインベントリなども含まれるため、それらの推定精度の向上にも研究開発が必要である。近年の地上でのフラックス観測や衛星観測、そしてデータ科学（機械学習など）の技術進歩により、これらの課題を克服することは徐々に可能となりつつある。例えば、**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）」で行われた、地上フラックスデータの解析や衛星観測データの分析は、森林など広域観測が困難な地表GHG放出源・吸収源の変動を迅速に把握することを可能にした。近年の静止気象衛星データを活用することで、この点はさらに強化が期待される。

ボトムアップ手法で作成された地表でのGHGフラックスは、トップダウン手法で実施される逆推定の**先験情報**として使用されてきた。そのため、ボトムアップ手法の高度化は、トップダウン手法にも恩恵をもたらし、全体的な不確実性の低減に寄与することができる。日本独自のボトムアップ手法を発達させることは、GSTに代表される**政策貢献**の促進や、**科学的理解**の深化に寄与する。

2. 研究開発目的

テーマ3の研究開発目的は、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、排出インベントリ、物質循環モデル、地表観測データを用いる**ボトムアップ的手法**によってGHG収支を高精度・迅速に評価する手法を開発することである。テーマ1による大気観測に基づくトップダウン評価とは異なるデータ・手法によるGHG収支評価を行うことで**独立した検証**を可能とし、GSTに提供するGHG収支評価の信頼性を向上させる。個々の排出・吸収源を扱う特性を活かして地表でのGHG収支変動の**メカニズム理解**を深め、衛星データなどを用いた変動の**早期検出**を試みる。そのためにボトムアップ評価に用いられる排出インベントリ、**物質循環モデル**、地表観測データ等の技術要素に関する研究開発を実施する。物質循環モデルで推定される自然起源GHG収支を、テーマ1および2に逆推定の**先験情報**として提供する。また、評価結果を視覚化し、GHG収支の空間分布や人為起源の寄与、時間的な変動をわかりやすく示す。テーマ1、2、3による成果をステークホルダーに分かりやすくかつ速報性を高めてとりまとめ、**レポート化**するための工程を検討する。さらに、Global Carbon Project、ICOSやNACPなど、**国際動向**の情報を収集し、日本国内の研究活動による**GSTへの情報提供**を主導的に実施する。

3. 研究目標

<p>テーマ全体目標</p>	<p>テーマ3は、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。</p> <p>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。</p>
<p>サブテーマ1</p>	<p>「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」</p>
<p>サブテーマ1 実施機関</p>	<p>国立研究開発法人国立環境研究所</p>
<p>サブテーマ1 目標</p>	<p>サブテーマ3-(1)では、パリ協定グローバルストックテイクに代表される温暖化政策において参照可能な、国地域スケールでの温室効果ガス収支に関する統合的でわかりやすい情報提供を行うことが目標である。またプロジェクト全体の中で、レポート取りまとめやアウトリーチ活動において総括的な役割を担う。</p>

	<p>① <u>人為排出インベントリ等を用いた独自のボトムアップ評価を実施</u> 全球および国地域スケールにおいて、人為起源については排出インベントリ、自然起源については放出・吸収モデルや衛星データ等を用いて、起源別かつ空間詳細な温室効果ガス収支評価を実施する。2000年以降の期間について、グローバルストックテイク等に貢献できるようできるだけ最近の期間までの評価を行う。テーマ1で実施されるトップダウン評価への参照情報として提供し、相互検証も行う。また、テーマ2で実施される地球システムモデルにおける再現性の検証材料としてのデータ提供も行う。使用する人為排出インベントリについては複数のデータセットを比較し整合性を確認する。また、排出インベントリの専門家の協力のもと、重要な項目や領域について代替データや手法の利用による精度向上の方策を提示する。</p> <p>② <u>複数手法の結果を集約した速報性のあるレポート作成</u> パリ協定グローバルストックテイクなど期限が設定された責務に確実に対応し、かつ大火災やコロナ禍のように突発的な事象に伴う温室効果ガス排出変化を迅速に把握する体制を構築する必要がある。そのため、観測データの収集とモデル解析をできるだけ速やかに行い、国地域から全球スケールの収支をレポートとしてとりまとめる。目標として2021年内のCO₂およびCH₄の収支を2022年末までに速報値としてとりまとめ、さらに2023年半ばまでに確報値として報告する体制を構築するグローバルストックテイクの実施日程に変更があった場合は、それに応じた作業工程の見直しを行う。人為起源排出は公開される各種インベントリを参照するが、社会経済データに基づいて直近の排出量を早期に推計する手法を試験開発する。</p> <p>③ <u>他国による収支評価と比較参照した不確実性・信頼性の評価を実施</u> 本課題で実施された温室効果ガス収支評価の信頼性を確認するため、他国で実施された評価との比較検討を実施する。全球スケールではGlobal Carbon Projectが、CO₂については毎年、CH₄については2年毎に統合解析を実施しており、過去の期間については本課題の評価結果と比較を行う。欧州で実施されているInternational Carbon Observation System (ICOS)や、米国で実施されているNorth America Carbon Program (NACP)における観測データ収集やモデル解析の手法を精査し、それらの長所を本課題に活かせるよう情報共有とテーマ横断での議論を進める。</p>
--	--

サブテーマ2	「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」
サブテーマ2実施機関	千葉大学
サブテーマ2目標	<p>地上観測・衛星観測・数値モデルの統合的に解析し、陸域の温室効果ガスを推定する。特に、GOSAT衛星やAsiaFluxなどの観測データ駆使した観測データに基づいたGHG収支の評価(以下①、②)、観測データと数値モデルを統合した陸域炭素循環の推定(以下③)、温室効果ガス収支推定のシステム化(以下④、⑤)を行う。</p> <p>① <u>地上観測と衛星観測データを統合した温室効果ガスフラックスデータ</u></p>

の構築

大気—陸域の温室効果ガス収支について、AsiaFlux、FLUXNETなど地上観測ネットワークデータに関して、衛星観測データと機械学習を活用したアップスケーリングを行い、月毎などの全球のCO₂収支データを構築する。さらに、アジア・オセアニア域については、ひまわり8号を活用するなどして、より高時間分解能（1時間～日別程度）の温室効果ガス収支データセットを構築する。いずれも1 km（アジア）～10 km（グローバル）程度の空間分解能のデータセットを構築する。

② GOSAT、GOSAT-2衛星データによる温室効果ガス濃度鉛直分布データの構築

大気中の温室効果ガス濃度に関して、GOSAT、GOSAT-2衛星観測を活用したCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直プロファイル推定を行い、全球レベルでのデータセットを構築する。これらのデータは本課題の他サブ課題の大気逆解析モデルの入力データとして利用するなど温室効果ガス収支の推定に貢献することとなる。

③ 種々の観測データに強化された陸域物質循環モデルの構築

陸域の物質循環モデルに対して、種々の衛星観測データを統合し駆動する、既存のモデルよりも様々な観測データセットに対して整合性の取れた陸域物質循環モデルを構築する。統合には、既存の物質循環モデル（VISITを想定）に対して、より多くの観測データセットを用いてモデルの検証を行う。更に、衛星観測を用いてモデルの境界条件を決定することや、データ同化技術などを実装することで、観測データへの再現性を高めるモデルを構築する。構築したモデルは、定期的に大気—陸域における温室効果ガス収支を0.5°グリッド程度の解像度で計算できることとする。

④ 温室効果ガス収支推定のシステム化

グローバルストックテイクなどの定期的な温室効果ガスの収支の報告ができるように、毎年更新できるシステムを構築する。これらの構築したデータセットは他サブ課題における温室効果ガス収支の把握や比較材料のために提供する。

⑤ スピーディな温室効果ガス収支システムの構築

森林火災や異常気象などがあつた際にスピーディに診断結果を得ることができるようなシステムを構築する。特に種々の衛星データとそれらにより得られる物理量をスピーディに処理できるようにし、突発的な環境変動があつた際の環境変動の把握、温室効果ガス収支へのインパクトを評価できるようにする。例として、大規模な森林火災の発生の事例、異常気象の発生の事例を挙げるができる。

4. 研究開発内容

テーマ3では、地表における温室効果ガス（GHG：CO₂、CH₄、N₂O）収支について排出インベントリ、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な評価を可能とする**ボトムアップ手法**を開発した（図0-1）。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た推定を行う**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、**複数手法間の整合性と不確実性**を検討することを可能とするものである。個々の排出・吸収の評価を積み上げるため、**セクター別の寄与評価**を行うことが

的にわかりやすい図表の使用と平易な記述を心がけた。またGSTで設定されたGuiding Questionsに回答する形でレポートの位置づけを明確にした。レポートには、トップダウン手法とボトムアップ手法で推定されたグローバルおよび東アジア地域のCO₂、CH₄、N₂O収支を併記して科学的な評価の現状がわかりやすくなるよう工夫した。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-GGGW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。さらに陸域生態系物質循環モデルの改善に取り組み、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

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。CO₂、CH₄、N₂O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0-2(図1-9))。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(成果2, 3, 4)。また、GCPが進めるGHG収支の統合解析および地域収支評価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、CH₄収支の詳細な解析を行った(成果6)。

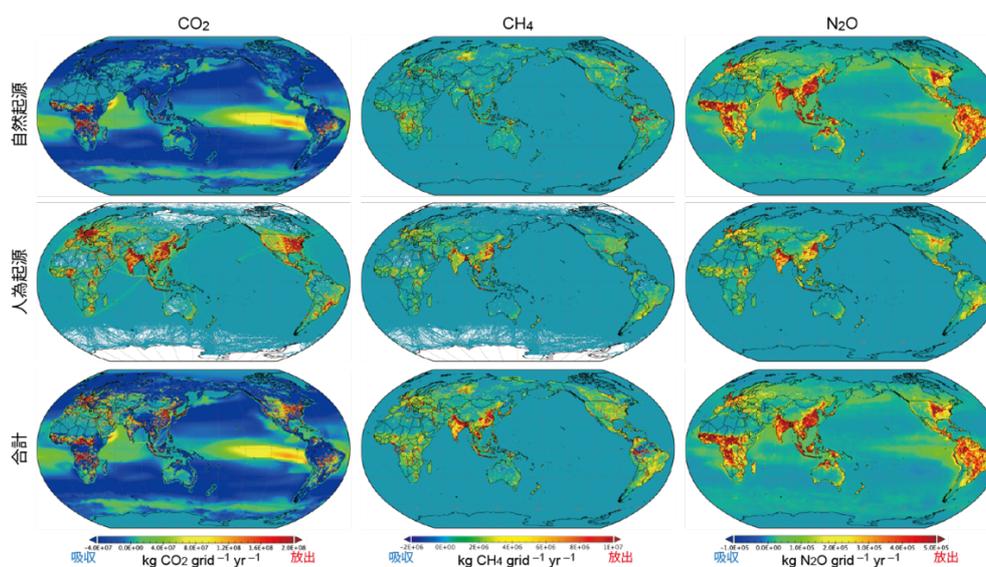
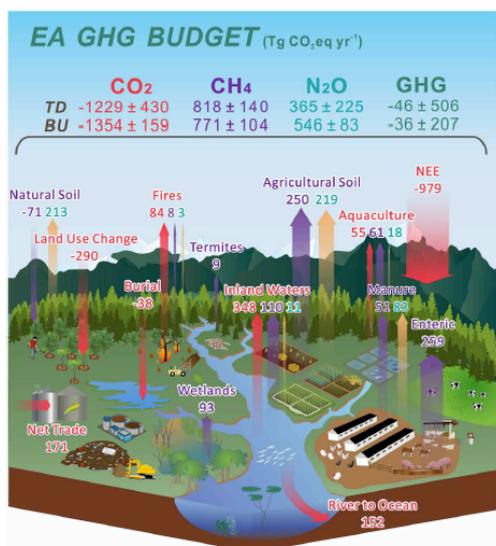


図0-2(図1-9). ボトムアップ手法で推定された地表におけるGHG収支の分布、2000-2022年の平均。

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CH₄放出源となっている水田(図1-5、成果1)や、自然起源CH₄のうち不確実性が大きいシロアリ放出(図1-6、成



果5) について、最近の研究動向を踏まえた改良を加え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(表1-4、図1-8)。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(図0-3、成果9)。またGCPによるグローバルなCH₄、N₂O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10)。

図0-3. GCP-RECCAP2による東アジア地域の生態系におけるGHG収支の総括(成果9)。

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年近く前倒して2022年3月、2023年3月にUNFCCCのGSTポータルより提出した(図0-4(図1-13)、成果17、18、19)。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課題の活動内容と期待される成果を各国のステークホルダーに示した。



図0-4(図1-13). SII-8課題で作成したGHG収支報告書(英文版)の表紙。

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、アジア1kmなど高空間解像度化を実施した(成果11、12、13)。テーマ2サブテーマ2の大気インパル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CO₂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0-5(図2-4))。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の年変動の役割を定量化した(成果11)。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。

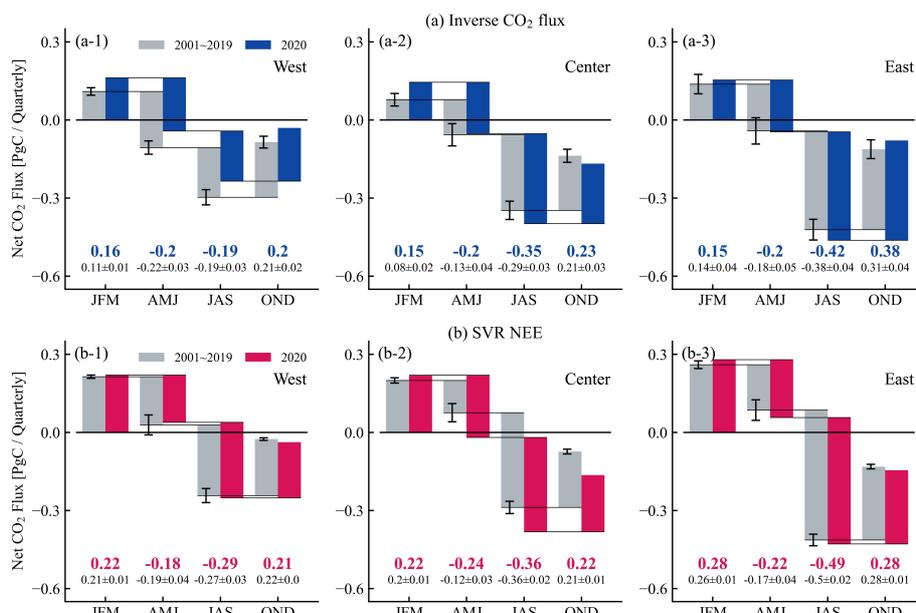


図0-5(図2-4). ロシア3地域(図2-1)における大気-陸面間のCO₂フラックス推定値(2001-19年vs2020年)。上段はトップダウン手法による推定値(Chandra et al. 2022)、下段は本サブテーマで構築した機械学習によるCO₂フラックス推定結果(サポートベクタ回帰)。

5-2. 研究目標の達成状況

<テーマ全体の達成状況>..... 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」

テーマ全体目標	テーマ全体の達成状況
<p>テーマ3は、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。</p> <p>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</p>	<p>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0-4(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提出版の完成にこぎつけた。また、複数論文に成果を発表し、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、国際活動も積極的に実施した(コロナ禍の間もオンラインを活用することで情報収集や成果発表を実施することができた)。</p> <p>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</p>

<p>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。</p>	<p>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12, 13）。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、手法の問題点であったタイムラグの短縮にも成功した。</p>
---	--

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」

サブテーマ1目標	サブテーマ1の達成状況
<p>サブテーマ3-(1)では、パリ協定グローバルストックテイクに代表される温暖化政策において参照可能な、国地域スケールでの温室効果ガス収支に関する統合的で分かりやすい情報提供を行うことが目標である。またプロジェクト全体の中で、レポート取りまとめやアウトリーチ活動において総合的な役割を担う。</p> <p>① 人為排出インベントリ等を用いた独自のボトムアップ評価を実施</p> <p>全球および国地域スケールにおいて、人為起源については排出インベントリ、自然起源については放出・吸収モデルや衛星データ等を用いて、起源別かつ空間詳細な温室効果ガス収支評価を実施する。2000年以降の期間について、グローバルストックテイク等へ貢献できるようできるだけ最近の期間までの評価を行う。テーマ1で実施されるトップダウン評価への参照情報として提供し、相互検証も行う。また、テーマ2で実施される地球システムモデルにおける再現性の検証材料としてのデータ提供も行う。使用する人為排出インベントリについては複数のデータセットを比較し整合性を確認する。また、排出インベントリの専門家の協力のもと、重要な項目や領域について代替データや手法の利用による精度向上の方策を提示する。</p> <p>② 複数手法の結果を集約した速報性のあるレポート作成</p> <p>パリ協定グローバルストックテイクなど期限が設定された責務に確実に対応し、かつ大火災やコロナ禍のように突発的な事象に伴う温室効果ガス排出変化を迅速に把握する体制を構築する必要がある。そのため、観測データの収集とモデル解析を</p>	<p>温室効果ガス収支を評価するための独自のボトムアップ手法を開発し、パリ協定グローバルストックテイクに提出したレポートを取りまとめるなど目標を達成した。</p> <p>① 人為排出インベントリ (EDGAR8.0) および物質循環モデル (VISIT) を用いた独自のボトムアップ手法を開発し、グローバル、アジア、国スケールでの評価を実施した(成果6)。1970年から2022年までの評価を行うことで、政策ニーズに求められる迅速な評価に対応することができた。アジア地域のCH₄収支に関する包括的評価を行い論文として発表した。個々の排出・吸収源に関する精査と推定法の改善にも取り組み、機械学習を利用した人為起源排出の代替推定法や、水田CH₄放出量の不確実性評価 (図1-5、成果1)、シロアリCH₄放出量の新しい推定法の開発 (図1-6、成果5)、などを行った。VISITモデルコードをテーマ2の地球システムモデル開発に提供し (成果15)、グローバルな推定結果をテーマ1およびテーマ2にトップダウン評価の先験情報や検証材料として提供した (成果2, 3, 4)。</p> <p>② パリ協定・グローバルストックテイクへの情報提出期限が2022年3月となったため、トップダウン評価を含むSII-8主要成果をとりまとめたレポート (図1-13、成果17, 18, 19) を前倒して作成する必要が生じた。そこで、2021年12月から2022年2月中にテーマ1、2の観測とモデル解析、テーマ3のボトムアップ評価を急いで進め、レポートの作成を間に合わせた。結果的に直近年の人為起源排出インベントリを使用することがで</p>

<p>できるだけ速やかに行い、国地域から全球スケールの収支をレポートとしてとりまとめる。目標として2021年内のCO₂およびCH₄の収支を2022年末までに速報値としてとりまとめ、さらに2023年半ばまでに確報値として報告する体制を構築するグローバルストックテイクの実施日程に変更があった場合は、それに応じた作業工程の見直しを行う。人為起源排出は公開される各種インベントリを参照するが、社会経済データに基づいて直近の排出量を早期に推計する手法を試験開発する。</p> <p>③ 他国による収支評価と比較参照した不確実性・信頼性の評価を実施</p> <p>本課題で実施された温室効果ガス収支評価の信頼性を確認するため、他国で実施された評価との比較検討を実施する。全球スケールではGlobal Carbon Projectが、CO₂については毎年、CH₄については2年毎に統合解析を実施しており、過去の期間については本課題の評価結果と比較を行う。欧州で実施されているInternational Carbon Observation System (ICOS)や、米国で実施されているNorth America Carbon Program (NACP)における観測データ収集やモデル解析の手法を精査し、それらの長所を本課題に活かせるよう情報共有とテーマ横断での議論を進める。</p>	<p>きたが、機械学習により国内総生産などの統計データや衛星観測によるプロキシから早期に排出量を推定するバックアップ手法も開発した(表1-4、図1-8)。</p> <p>③ 物質循環モデル VISITによるCH₄とN₂Oの推定結果は、国際モデル相互比較への参加を通じてGCP統合解析に貢献した(CO₂については課題外部の共同研究者を介して貢献)(成果9)。CH₄については低温期の湿原排出量に関する比較解析・検証論文の担当となり、国際共著論文の執筆を主著者としてリードした(成果7)。SII-8実施期間中に、世界気象機関主導により「グローバルGHG監視(WMO-G3W)」の検討が進められたため、欧州コペルニクスプログラムなどと並んでアジア太平洋地域を代表する活動として構想段階から会合に参加し、最新動向の情報収集を行うとともにワークショップでの発表を行うなど、日本の科学的部分を担う研究課題としての貢献をアピールした(図1-14)。</p>
---	--

<【サブテーマ2】達成状況> 2. 目標を上回る成果をあげた

「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2の達成状況
<p>地上観測・衛星観測・数値モデルの統合的に解析し、陸域の温室効果ガスを推定する。特に、GOSAT衛星やAsiaFluxなどの観測データ駆使した観測データに基づいたGHG収支の評価(以下①, ②)、観測データと数値モデルを統合した陸域炭素循環の推定(以下③)、温室効果ガス収支推定のシステム化(以下④, ⑤)を行う。</p> <p>① 地上観測と衛星観測データを統合した温室効果ガスフラックスデータの構築</p> <p>大気—陸域の温室効果ガス収支について、AsiaFlux、FLUXNETなど地上観測ネットワークデータに関して、衛星観測データと機械学習を活用したアップスケーリングを行い、月毎などの全球のCO₂収支データを構築する。さらに、アジア・オセアニア域については、ひまわり8号を活用するなどして、より高時間分解能(1時間～日別程</p>	<p>以下の①～⑤の各項目について概ね達成した。その中でも、1kmスケールでのAsiaFluxやFLUXNET観測ネットワークデータと衛星データを活用した広域推定については、テーマ2-2のトップダウン推定と変動が一致するなど良好な結果を示した(図2-4.)。さらにはモンゴルの研究者との共同研究に発展するなどの波及性も高い(図2-3.)。さらに、可視化、迅速化にも成功しており、目標を上回ると判断した。</p> <p>① 地上観測と衛星観測データを統合した温室効果ガスフラックスデータの構築</p> <p>AsiaFluxとFLUXNETを用いた機械学習によるCO₂収支(光合成量と生態系正味CO₂収支)をそれぞれアジア域・全球にて、2022年までの推定を実施した。アジア域については、東アジア(中国・モンゴル・朝鮮半島・日本)を含む地域に関して、1km</p>

度)の温室効果ガス収支データセットを構築する。いずれも1 km (アジア) ~10 km (グローバル) 程度の空間分解能のデータセットを構築する。

② GOSAT、GOSAT-2衛星データによる温室効果ガス濃度鉛直分布データの構築

大気中の温室効果ガス濃度に関して、GOSAT、GOSAT-2衛星観測を活用したCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直プロファイル推定を行い、全球レベルでのデータセットを構築する。これらのデータは本課題の他サブ課題の大気逆解析モデルの入力データとして利用するなど温室効果ガス収支の推定に貢献することとなる。

③ 種々の観測データに強化された陸域物質循環モデルの構築

陸域の物質循環モデルに対して、種々の衛星観測データを統合し駆動する、既存のモデルよりも様々な観測データセットに対して整合性の取れた陸域物質循環モデルを構築する。統合には、既存の物質循環モデル (VISITを想定) に対して、より多くの観測データセットを用いてモデルの検証を行う。更に、衛星観測を用いてモデルの境界条件を決定することや、データ同化技術などを実装することで、観測データへの再現性を高めるモデルを構築する。構築したモデルは、定期的に大気-陸域における温室効果ガス収支を0.5°グリッド程度の解像度で計算できることとする。

④ 温室効果ガス収支推定のシステム化

グローバルストックテイクなどの定期的な温室効果ガスの収支の報告ができるように、毎年更新できるシステムを構築する。これらの構築したデータセットは他サブ課題における温室効果ガス収支の把握や比較材料のために提供する。

⑤ スピーディな温室効果ガス収支システムの構築

森林火災や異常気象などがあつた際にスピーディに診断結果を得ることができるようなシステムを構築する。特に種々の衛星データとそれらにより得られる物理量をスピーディに処理できるようにし、突発的な環境変動があつた際の環境変動の把握、温室効果ガス収支へのインパクトを評価できるようにする。例として、大規模な森林火災の発生の事例、異常気象の発生の事例を挙げることができる。

での推定を実施した (例:図2-3)。また、グローバルでは0.1度(10km相当)での実施を行った。一方、ひまわり8号を活用した光合成量の推定も試み(成果12, 図2-5., 2-6.)、東アジア域を1kmの空間分解能で実施した。

② GOSAT、GOSAT-2衛星データによる温室効果ガス濃度鉛直分布データの構築

GOSAT/TANSO-FTS、GOSAT-2/TANSO-FTS-2の熱赤外バンドからCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直濃度プロファイルを高精度に導出し(図2-7)、全球で各種の航空機観測等との比較にもとづいてデータ質を検証したうえで、衛星の鉛直濃度プロファイルとテーマ2サブテーマ2の大気輸送モデルによるシミュレーション結果を比較し、CH₄の半球輸送のプロセスを明らかにする(成果11, 図2-8~14)など、**温室効果ガス収支推定に資するデータセット**を構築した(成果13)。

③ 種々の観測データに強化された陸域物質循環モデルの構築

陸域物質循環モデルとしてVISITモデルを用いて、いくつかの衛星観測ベースのプロダクト、大気インバース解析からの結果との比較を通して、**モデルの改善**を試みた。具体的には、①で構築したデータ駆動型の炭素フラックスプロダクトを光合成量の比較材料とし、VISITモデルとの比較を実施した。特にアジア地域を中心にして検証・モデル改良を試みた(図2-16)。また衛星データ(LAI)を用いた**モデルパラメータ最適化**を実施した(図2-15)。

④ 温室効果ガス収支推定のシステム化

本サブテーマの独自手法である①に関して、作業をルーチン化させることにより、**容易に更新が可能なシステム**として作成した。

テーマ2サブテーマ2と協力して、トップダウン型の逆解析により全球および54の領域別の2000-2020年のCH₄収支を年毎に推定し、GCPに提供した(成果13, 図2-9)。

⑤ スピーディな温室効果ガス収支システムの構築

上記のように本サブテーマの手法(データ駆動型推定)を中心に、早期に解析のできるような**作業フローを確立**した。具体的には2020年の春のシベリアの異常高温イベントに対して、雪、植生指数、葉面積指数などの様々なデータセットをルーチン的に生成し、**アノマリの検出**といった普遍的

な処理を行うことによって、異常高温が陸域炭素収支に及ぼす影響を解析した(図2-4)。
--

5-3. 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>

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CO₂、CH₄、N₂Oについて全世界を対象に解析が実施されており、ボトムアップ手法をこのように**包括的・系統的にボトムアップ評価を運用している機関・プロジェクトはほとんど例がない**。その理由として、ボトムアップ評価では多数のセクターについて共通した方法で推定を実施し、データを集計する必要があり、各ガスとデータについて深い理解と高度な技術が必要とされるためである。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。その成果は、アジア地域でのCH₄収支評価(成果6)、N₂O収支評価(Ito and Nishina, 投稿中)などの論文として発表されている。冬季の湿原CH₄放出(成果7)やシロアリCH₄放出(成果5)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**。物質循環モデルを用いた推定結果は、**グローバル・カーボン・プロジェクト**による統合解析にデータを提供しており、国際プロジェクトによる温室効果ガス動態解明に貢献している(成果9)。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**。

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。衛星観測データに基づくボトムアップ手法の特徴は高い空間解像度であり、本手法が空間的に詳細なCO₂フラックスを提供できることを提示した。さらに、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。

<行政等に既に貢献した成果>

○ テーマ3が開発したボトムアップ手法によるグローバル・国地域別のGHG収支評価の結果を、**パリ協定・GSTに情報提供**したSII-8によるレポートに収録し、複数手法によるマルチスケールでの温室効果ガス収支に関する評価結果を示すことができた。ボトムアップ手法による評価は、大気観測に基づくトップダウン評価を補完し、セクター別評価が可能で日本のように小面積の国や島嶼国にも適用可能であり、世界的にも系統的に実施している期間は稀であることから、本課題独自の成果として貢献することができた。また、その成果と意義を様々な行政主催の会で周知した。

【貢献】**UNFCCCパリ協定グローバルストックテイクへの情報提供**

・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>

【貢献】**科学技術振興機構(JST)-研究開発戦略センター(CRDS)が主催した環境・エネルギーセミナー(オンライン)**において講演を行い、日本における温室効果ガス観測・解析研究の動向を解説するとともに推進費SII-8の必要性や意義を周知した(三枝)。地球をめぐる温室効果ガス。JST-CRDS環境・エネ

ルギーセミナー（2021.5.27）

【貢献】文部科学省が主催する第9期地球観測推進部会（第4回）において、環境省地球環境局総務課脱炭素化イノベーション研究調査室による「グローバルストックテイクに向けたGHG監視に関する取り組みの報告」に推進費SII-8の成果が活用された。（三枝、2021.12.24）

https://www.mext.go.jp/content/20211227-mxt_kankyoku-000019769_8.pdf

【貢献】科学技術振興機構(JST)-研究開発戦略センター(CRDS)が主催した科学技術未来戦略ワークショップ・バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究において講演を行い、大気中の温室効果ガス濃度低下に向けた取り組みを支援する監視システムの必要性を指摘した。（伊藤、2022年11月18日、東京）科学技術未来戦略ワークショップ報告書 p6-17.

<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-WR-09.html>

【貢献】日本学術会議主催の学術フォーラムにて、気候変動分野における地球観測とモデルの融合、データ利活用の取組として推進費SII-8の成果を周知した（三枝、2023年6月26日東京、8月20日オンライン）

○ IPCC第6次評価報告書に、テーマ3関連成果は多数の貢献を行っている。第1作業部会報告書には、温室効果ガス収支に関する成果論文が22本引用されており、その多くは物質循環モデルを用いた成果であり、テーマ1、2参画者との共著論文も含まれる。独自の物質循環モデルを開発運用することで、温室効果ガス収支動態の理解を促進し、またグローバルな収支評価の精度向上に寄与している。第2作業部会報告書にも18本が引用されている。これらはモデルを用いた将来の影響評価に関するものであるが、本課題で実施された生態系動態に関するモデルの高精度化・検証が、影響評価の信頼度を高め、間接的な貢献を行った。

○ 日本政府が関与する地球観測の促進に関する貢献を行った。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た。この会合では、本部会においてアジア・オセアニア域における各国の研究チームとの分科会を開催し、地球観測に関しての分科会の宣言文を取りまとめ、AOGE0の本会合に向けた宣言文へのインプットを行っている。本課題のメンバーの多くが参加するAOGE0の分科会に参加し議論をすることにより、政府組織に対する要望を挙げることもつながっており、行政が利用できる情報の集約、提供を行っている。その中でテーマ3が開発した物質循環モデルにより推定された地表での温室効果ガスフラックスは、GOSATを含む大気観測に基づく地表収支の逆解析の先験情報として提供されており、日本の衛星観測事業による成果創出に貢献した。

【貢献】文部科学省が主催する第9期地球観測推進部会（第3回）において、地球観測によるパリ協定への貢献及びCOP26対応に関する我が国からの貢献として、推進費SII-8の意義や公開可能なデータ情報を含めて国内関係府省庁・機関へ説明した。（三枝、2021年10月15日）

https://www.mext.go.jp/content/20211025-mxt_kankyoku-000018589_4.pdf

【貢献】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で講演を行い、日本のプロジェクト推進費SII-8の意義を周知した(三枝、2022年9月12日、オンライン)

【貢献】衛星地球観測コンソーシアム(CONSEO)設立総会にて基調講演を行い、気候変動対策への貢献に向けた地球観測データの利活用としての推進費SII-8の必要性や意義を周知した（三枝、2022年10月12日、オンライン）

○ 温室効果ガス監視に関する国際会議においてSII-8課題の成果をアピールし、日本の観測ネットワークによる国際貢献を促進する活動を行った。各種の国際プロジェクト・プログラムに参加してプレゼンスを高め、WMO-G3Wにつながる国際的温室効果ガス監視に向けた基礎固めを行った。

【貢献】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にて基調講演を行い、日本における温室効果ガス観測・解析研究の動向とともに推進費SII-8の必要性や意義を周知した（三枝、2022年9月20日、マレーシア）

【貢献】フューチャー・アース日本サミットにて招待講演を行い、持続可能な地球のためのグローバル研究ネットワークの取組の一つとして推進費SII-8の必要性や意義を周知した（三枝、2023年11月21

日、オンライン)

【貢献】イタリア大使館が主催した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-伊合同ウェビナーにおいて講演を行い、日本における温室効果ガス観測・解析の現状と推進費SII-8の意義を周知した。

Saigusa N., Ito A., Niwa Y., Machida T., Matsunaga T., Tanimoto H., Terao Y., 2021: Current Status and Challenges of GHG Observations: Japan's Contribution to the Paris Agreement. Towards climate neutrality within 2050: Italy-Japan approaches to Earth observation for CO₂ monitoring (2021.6.25) https://ambtokyo.esteri.it/ambasciata_tokyo/it/chi-siamo/dall-ambasciata/towards-climate-neutrality-within_2.html

【貢献】欧州コペルニクスCO₂プロジェクト(CoCo2)第1回全体会議(オンライン)において、CoCo2と類似の目的を持つ日本のプロジェクト推進費SII-8の意義と進捗状況を周知した。

Saigusa N., Ito A., Niwa Y., Machida T., Matsunaga T., Tanimoto H., 2021: Monitoring of GHG sinks & sources to contribute to the Global Stocktake: Challenges in Asia and Oceania. 1st General Assembly of the Copernicus CO₂ (CoCo2) Project (2021.1117)

【貢献】世界気象機関(WMO)によるCarbon Monitoring Workshopに参加し、SII-8による大気中温室効果ガス監視活動について紹介し、グローバルな監視体制に向けた情報提供を行った。

Ito, A. GHG monitoring project of Japan for the Global Stocktake 2023. (伊藤、2022年5月11日、オンライン)(成果24)

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

SII-8課題からパリ協定・第1回グローバルストックテイク(GST)に情報提供されたマルチスケールでの温室効果ガス収支に関する情報は、技術的対話とC028での総括を経て、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。本課題の手法は、衛星観測に加えて地表観測、同位体などトレーサー、先端的モデル解析を併用したもので世界的にも「最良の科学」と呼べる水準に達している。アジア太平洋地域での観測に基づく優位性が認められることで、アジア諸国などでの排出インベントリ検証に活用されることが期待される。テーマ1、2によるトップダウン手法による評価に加え、テーマ3ではボトムアップ手法による包括的な評価結果を提供しており、自然起源と人為起源の排出・吸収が明確に分けられているため、各国の温室効果ガス収支の包括的な把握と、観測情報(例えば各国における温室効果ガス濃度の増減)の解釈に特に有用であると考えられる。

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になることが予想され、SII-8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。2024年4月から開始された推進費戦略課題S-22「気候変動緩和に向けた温室効果ガスおよび大気質関連物質の監視に関する総合的研究」では、SII-8課題を発展させることで、SLCF(短寿命気候駆動因子)と呼ばれる関連物質を含めたさらに包括的な監視を行う。また大気化学輸送モデルや物質循環モデルをさらに高度化する。それにより、第2回GSTに向けた国内活動の貢献を促進する。

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。本課題で高度化された物質循環モデル(VISIT)による陸域GHG収支評価に関する成果は多数の研究論文で発表されており、IPCC AR7への成果提供が見込まれる。特にグローバルカーボンプロジェクト(GCP)による統合解析に参加することで、国際コミュニティによる最も信頼度の高いGHG収支評価に加わったことは、第2回GSTの主要な情報源となるIPCC AR7につながる成果である。GHG収支の信頼度向上において現在大きな問題となっている農業・土地利用起源(AFOLU)排出の評価に関して、2024年7月にIPCC主催の専門家会合が開催されることになっており、テーマ3代表(伊藤)が参加し、本課題による物質循環モデルを用いた成果を踏まえてAR7に向けた議論を積極的に行う方向である。

本課題で発展させた地上観測・衛星観測を用いたデータ駆動型のCO₂フラックス推定については、これまでGCPにはこのアプローチによる成果が他機関も含めて掲載されてはいないが、衛星データによる高い空間分解能を持つことから国レベルでの適用や異常気象などの突発的なイベントに対する地表面への影響を把握することに利点を持ち、IPCC AR7に向けた新しい成果として積極的に発信する方向である。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

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

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	【テーマ3】の主要な成果（10件まで）
1	Ito, A., Inoue, S., and Inatomi, M. (2022) Model-based evaluation of methane emissions from paddy fields in East Asia, <i>Journal of Agricultural Meteorology</i> , 78, 56-65, https://doi.org/10.2480/agrmet.D-21-00037 .
5	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 .
6	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 .
7	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., Fluets-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, Geophys. Res. Lett., 50, e2023GL103037, https://doi.org/10.1029/2023GL103037 .
9	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, Global Biogeochem. Cycles, 38, e2023GB007865, https://doi.org/10.1029/2023GB007865 .
10	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, Earth System Science Data. [印刷中、2024年5月出版予定]
11	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, J. Geophys. Res., 127, 14. https://doi.org/10.1029/2021JD035688
12	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, ISPRS J. Photogramm. Remote Sen, 191, 171-187. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.008 .
13	Tibrewal, K. et al. (2024) Assessment of methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions, Commun. Earth & Environment, 5, 26. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01190-w .
15	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、地球環境、26、101-110.

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

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

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)、また、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

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もち、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

8. 研究者略歴

<研究代表者（テーマリーダー）略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
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

<研究分担者（サブテーマリーダー）略歴>

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 市井和仁	名古屋大学大学院理学研究科 修了 博士（理学） 名古屋大学助手、米国NASA Ames研究センター研究員、福島 大学准教授、海洋研究開発機構主任研究員を経て、 現在、千葉大学 教授 専門は生物地球科学、研究テーマは、衛星データを用いた陸 域炭素循環推定	2021年度 ～ 2023年度

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1 「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1では、**独自のボトムアップ手法を開発**してグローバルから国地域スケールの温室効果ガス（GHG：CO₂、CH₄、N₂O）収支の包括的評価を実施した。また、温室効果ガス収支評価に関する国際動向を踏まえ、パリ協定の**第1回グローバルストックテイク（GST）に、SII-8の成果をとりまとめたレポートを作成・提出**した。これらにより**当初の目標を上回る成果**をあげることができた。

ボトムアップ手法は、地表でのGHG放出・吸収を排出インベントリや物質循環モデルを用いてセクター別に評価するため、大気観測に基づくトップダウン手法を補完し独立した検証材料となる推定結果を提供できる。ボトムアップ手法を包括的・系統的に実施するには高度なデータ収集・分析技術が必要であり、本課題を通じて**世界的に先進的な手法を確立**することができた。自然起源については物質循環モデル（VISIT）を用いた推定を行い、人為起源については排出インベントリ（EDGAR）を、火災起源放出については衛星観測に基づくプロダクトを主に使用した。推定不確実性を加味するため、複数のモデル推定・排出インベントリの比較も実施した。

ボトムアップ手法の高度化として、CH₄放出源である水田については衛星観測ベースの高分解能水田マップを開発し、アジア地域に適用して推定精度向上を図った。また同じくCH₄放出源となるシロアリに関して、最新の観測データベースと土地利用マップを用いたグローバルな推定を実施し、気候変動や森林破壊による時間的変化を検討した。人為起源放出に関しては、排出インベントリ公開の時間遅れを回避するため、機械学習を用いた社会経済指標・衛星データからの排出マップ作成手法を開発した。主要な自然起源・人為起源の排出・吸収をマップ化し、国地域別に集計することで統合的解析を行った。これらの成果論文はGCP統合解析やIPCC第6次評価報告書に引用され、**COP26、27、28で開催されたセミナー**で最新の結果を発表するなど、国際的なGHGに関する研究活動に貢献した。

1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1の目的は、排出インベントリ、物質循環モデル、地表観測データを用いる先進的なボトムアップ的手法を独自に開発し、GSTに「最良の科学」として貢献しうる高精度・迅速なGHG収支評価を実施することである。ボトムアップ評価を行うことで、大気観測に基づくトップダウン評価とは独立した推定値を与え、両手法を比較したより信頼性の高いGHG収支評価を達成できる。また、空間詳細なマップを作成することで国地域レベルの評価を行い、排出源・吸収源をセクター別に分離した分析を可能とする。サブテーマ1は、SII-8課題の出口であるGSTへの情報提出を担っており、課題全体をとりまとめたレポート作成を行うことも目的である。また、GCPなど国際プロジェクトの動向を把握し、適宜対応することで本課題の国際的な成果発信を強化する。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ1 目標	サブテーマ3-(1)では、パリ協定グローバルストックテイクに代表される温暖化政策において参照可能な、国地域スケールでの温室効果ガス収支に関する統合的で分かりやすい情報提供を行うことが目標である。またプロジェクト全体の中で、レポート取りまとめやアウトリーチ活動において総括的な役割を担う。 ① <u>人為排出インベントリ等を用いた独自のボトムアップ評価を実施</u>

全球および国地域スケールにおいて、人為起源については排出インベントリ、自然起源については放出・吸収モデルや衛星データ等を用いて、起源別かつ空間詳細な温室効果ガス収支評価を実施する。2000年以降の期間について、グローバルストックテイク等に参加できるようなできるだけ最近の期間までの評価を行う。テーマ1で実施されるトップダウン評価への参照情報として提供し、相互検証も行う。また、テーマ2で実施される地球システムモデルにおける再現性の検証材料としてのデータ提供も行う。使用する人為排出インベントリについては複数のデータセットを比較し整合性を確認する。また、排出インベントリの専門家の協力のもと、重要な項目や領域について代替データや手法の利用による精度向上の方策を提示する。

② 複数手法の結果を集約した速報性のあるレポート作成

パリ協定グローバルストックテイクなど期限が設定された責務に確実に対応し、かつ大火災やコロナ禍のように突発的な事象に伴う温室効果ガス排出変化を迅速に把握する体制を構築する必要がある。そのため、観測データの収集とモデル解析をできるだけ速やかに行い、国地域から全球スケールの収支をレポートとしてとりまとめる。目標として2021年内のCO₂およびCH₄の収支を2022年末までに速報値としてとりまとめ、さらに2023年半ばまでに確報値として報告する体制を構築するグローバルストックテイクの実施日程に変更があった場合は、それに応じた作業工程の見直しを行う。人為起源排出は公開される各種インベントリを参照するが、社会経済データに基づいて直近の排出量を早期に推計する手法を試験開発する。

③ 他国による収支評価と比較参照した不確実性・信頼性の評価を実施

本課題で実施された温室効果ガス収支評価の信頼性を確認するため、他国で実施された評価との比較検討を実施する。全球スケールではGlobal Carbon Projectが、CO₂については毎年、CH₄については2年毎に統合解析を実施しており、過去の期間については本課題の評価結果と比較を行う。欧州で実施されているInternational Carbon Observation System (ICOS)や、米国で実施されているNorth America Carbon Program (NACP)における観測データ収集やモデル解析の手法を精査し、それらの長所を本課題に活かせるよう情報共有とテーマ横断での議論を進める。

3. サブテーマ1 研究開発内容

【サブテーマ1】人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析

ボトムアップ手法の開発とGHG収支評価

パリ協定GSTが求める「最良の科学」に基づくGHG収支評価を行うため、本サブテーマではGHG収支を広域スケールで評価する独自のボトムアップ手法を開発した。地表には複数の放出・吸収源が空間的に不均質に混在し、それらが別個に時間変化しているため(図1-1)、広域でのGHG収支評価には大きな不確実性が残されている。政策ニーズを満たすには不確実性を軽減する必要がある。本研究では自然起源と人為起源それぞれでセクター別に評価を行い、空間詳細に排出・吸収をマッピングする新しいボトムアップ手法の開発を検討した。推進費2-1710において行われたCH₄収支評価手法の開発経験を活かし、CO₂やN₂Oを含むGHGについて各種統計・排出インベントリ、物質循環モデル、地表観測データを使用する手法を確立した。特に近年の大気中濃度増加と緩和ポテンシャルが注目されているCH₄については、水田

人為起源	野外火災[バイオマス燃焼] (放出)	GFED4s+Akagi et al. (2011) 排出係数
	化石燃料採掘 (放出)	EDGAR8.0
	工業・交通・居住地 (放出)	EDGAR8.0
	廃棄物・埋立 (放出)	EDGAR8.0
	間接的放出 (放出)	EDGAR8.0
	農地土壌 (放出)	EDGAR8.0 [比較: VISITモデル推定]

【引用文献】

Akagi, S. K., et al.: Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atm. Chem. Phys.*, 11, 4039-4072, 10.5194/acp-11-4039-2011, 2011.

Etiopie, G., et al.: Gridded maps of geological methane emissions and their isotopic signature, *Earth System Science Data*, 11, 1-22, 10.5194/essd-11-1-2019, 2019.

水田からのCH₄放出に関する物質循環モデル評価

水田はアジア地域で特徴的なCH₄放出源であり、グローバルなCH₄収支の中でも重要な人為起源ソースと考えられている。従来は水田面積と単位面積あたりの排出に基づく簡便な推定が行われてきたが、場所毎の気象条件などを考慮可能なモデルを用いることで評価の高精度を図った(成果1)。図1-2に示すように東アジア地域を対象として、物質循環モデルVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) を使用し、近年の人工衛星観測に基づく高分解能な水田マップ (Inoue et al., 2020)、農業モデルによる湛水の季節変化などを用いた推定を行った。4種類の水田マップ、2種類の湛水季節変化、2種類のCH₄生成放出スキームを組み合わせることで16通りの計算を実施し、それらの平均値とばらつき(標準偏差)を求めた。従来の統計データ(EDGAR, FAOSTAT)だけでなく日本を中心に実施された現地観測による水田CH₄放出量と比較することでモデルの検証を実施した。

【引用文献】

Inoue, S., Ito, A., and Yonezawa, C.: Mapping paddy fields in Japan by using a Sentinel-1 SAR time series supplemented by Sentinel-2 images on Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 12, 1622, 10.3390/rs12101622, 2020.

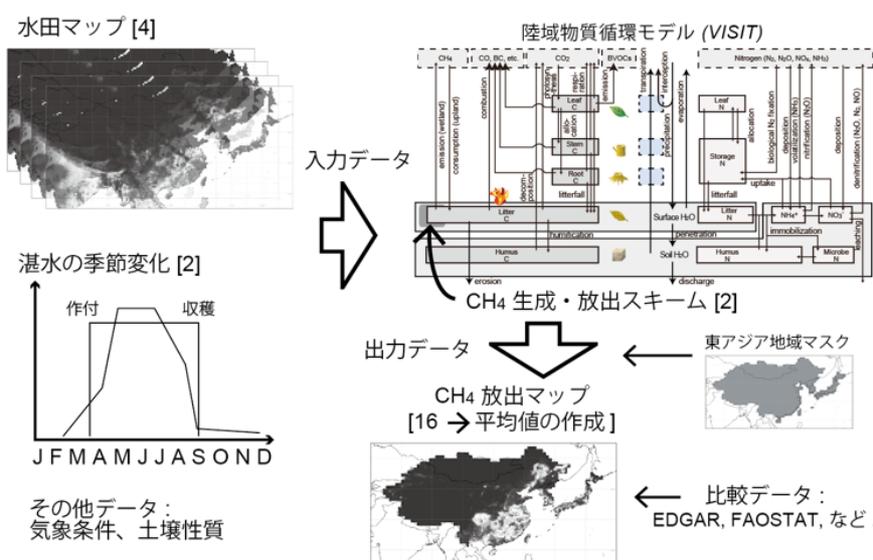


図1-2. 物質循環モデルを用いた水田CH₄放出量の推定手順を示す図. []中の数字は推定幅を考慮するために使用したデータやスキームの数を示す。

シロアリからのCH₄放出量推定高精度化

シロアリが体内にセルロース類を分解する微生物を共生させており、その消化活動によってCH₄が放出

されることは古くから知られていた。シロアリは熱帯林、亜熱帯サバンナ、木造家屋などに広く分布しているため、総CH₄放出量は無視できないほど大きいと考えられていたが、広域での定量的評価は困難であり不確実性の原因となっていた。一方で、気候変動や森林破壊などの土地利用変化は直接・間接にシロアリのCH₄放出量に影響を与えることが予想されるが（図1-3）、その実態は解明されておらず、定量的な評価は殆ど行われてこなかった。ここでは、最新の測定値データベース、土地利用マップ、気象データ、そして物質循環モデルで推定された生態系炭素循環に関する指標を用いて、グローバルなシロアリ起源CH₄放出量の推定を行った（成果5）。シロアリの単位バイオマス重あたりのCH₄放出量は、Zhou et al. (2023)によるデータベースを使用し、不確実性を考慮するため1000回の無作為抽出を行った値でCH₄放出量の推定を行い、平均した結果を使用した。土地利用は森林や耕作地の面積を変化させることでシロアリの分布とCH₄放出に影響を与えるため、IPCC評価報告書のモデル実験で使用されているLUH2を使用して過去から将来の変化を考慮した。シロアリの分布は主に熱帯・亜熱帯であり、温度が生存の制限要因になっていると考えられる。そこで、シロアリの観察データベース（フロリダ大学の学術データベース、市民観察のiNaturalist、その他文献）で分布を調べ、閾値となる温度条件を探索した。それで決定されたシロアリ分布可能域について、単位面積あたりのシロアリバイオマスをSanderson (1996)が集計したデータに基づいて土地利用別に割り当てた。ただし、熱帯林については、総一次生産量（GPP）とシロアリバイオマスの関係を使用したKirschke et al. (2013)の方法を採用した。観測に基づくCRU TS4.06データベースの気象条件を用いて過去から現在の推定を行い、2100年まで予測を行うためCMIP6の気候モデルによる出力値を使用した。なお、GPPおよび好氣的土壌によるCH₄酸化量の推定は物質循環モデルVISITの出力結果を使用した。

【引用文献】

Kirschke, S., et al.: Three decades of global methane sources and sinks, *Nature Geoscience*, 6, 813-823, 10.1038/NGEO1955, 2013.

Sanderson, M. G.: Biomass of termites and their emissions of methane and carbon dioxide: A global database, *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 543-557, 1996.

Zhou, Y., Staver, A. C., and Davies, A. B.: Species-level termite methane production rates, *Ecology*, 104, e3905, 10.1002/ecy.3905, 2023.

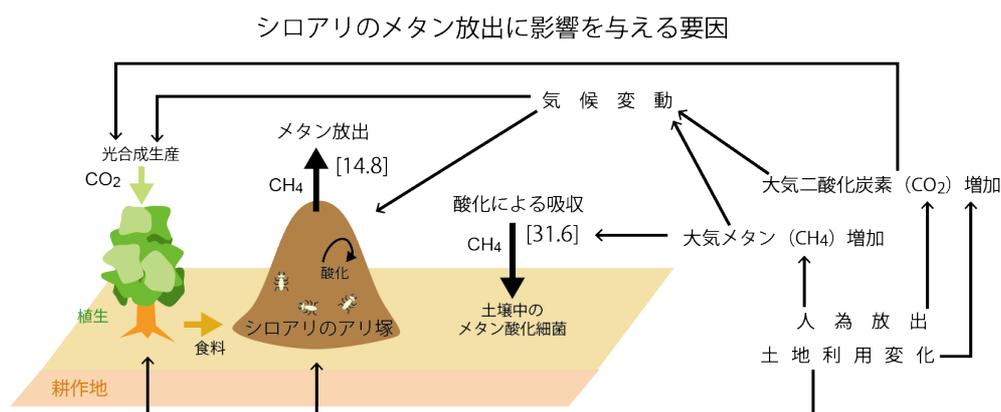


図1-3. シロアリのCH₄放出量に影響を与える要因. []数字は推定CH₄フラックス (Tg CH₄ yr⁻¹).

迅速化のための排出インベントリ改良

人為排出インベントリでは、基本的に経済・産業活動量に、活動量あたりのGHG排出量（排出係数）を乗じることで推計が行われている。そのため実際の排出から推計値が出るまでに数年のタイムラグを伴うのが通例であり、実際に本課題で2021年まで使用していた代表的排出インベントリであるEDGAR 6.0では2018年までのデータしか提供されていなかった。排出インベントリの迅速化がボトムアップ手法の大きなボトルネックとなる可能性があった。そこで、比較的早期に入手可能な代替データと機械学習アルゴリズムを用いて排出インベントリが入手困難な直近数年間（2019、2020、2021年）の排出量を

予測する手法を開発した(図1-4)。

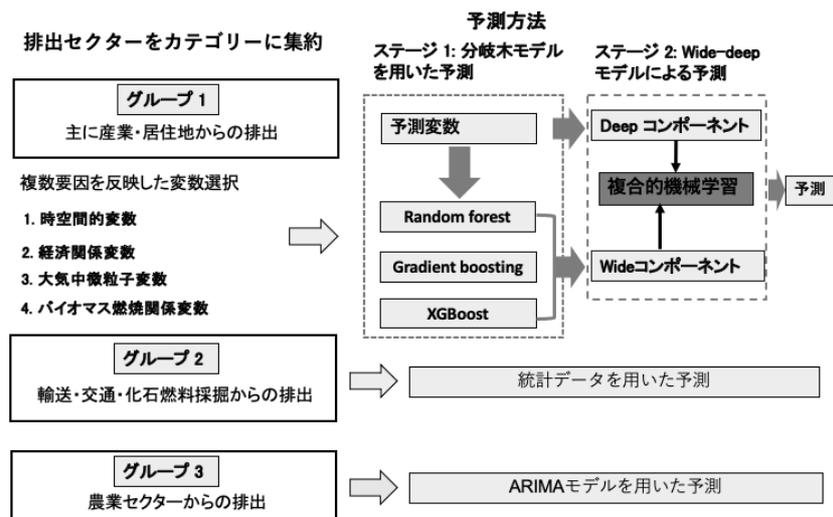


図1-4. 機械学習アルゴリズムを用いて近年の排出量を予測する手法の概要

まず人為排出を排出源の性質に基づいて3グループにカテゴリ化した。グループ1は工業活動など産業・居住地からの排出であり、短期変動（例えば新型コロナ蔓延に伴う経済停滞）の影響を最も顕著に受け、国地域別の差違が著しい部門とした。そのため、複雑な空間分布や時間変動を反映できるように、複数の入力データと機械学習アルゴリズムを適用した推計を行った。グループ2は輸送・交通・化石燃料採掘に伴う排出であり、国を超えて影響が及ぶため世界全体で変動が同調的に発生すると仮定して推計を行った。グループ3は農業部門からの排出であり、食料生産を担うためグループ1ほどは顕著な変動を伴わないと仮定し、時系列分析で用いられるARIMAモデルを適用して過去のトレンドを外挿することで推計を行った。

グループ1の排出量推定で使用した機械学習手法は、広域（wide）的な排出量の特徴を再現するため3種類のアルゴリズム（ランダムフォレスト、勾配ブースティング、Extreme Gradient [XB]ブースティング）を適用するステージ1と、より詳細（deep）に排出量分布を推定するステージ2から構成される。使用した入力変数は、時間（年、月）や緯度経度などの空間的位置情報、国別の総国内生産（GDP）などの経済指標に加え、衛星観測および気象再解析による大気中微粒子変数（光学的厚さ）やブラックカーボン、有機炭素、SO₄、バイオマス燃焼関係変数（乾物燃焼量）である。大気中微粒子変数は、工業など人間活動起源排出の分布を反映するものを選択した。

人為排出インベントリ間の比較

人為排出インベントリは、排出係数の設定、推計上の仮定、活動量データの誤差など、様々な要因で不確実性を生じることが認識されており、それが大気観測とそれに基づくトップダウン手法による結果と解釈に強い影響を与える。そのため、排出インベントリを使用する場合には、複数データセットを比較しばらつきの大きさを確認しておく必要がある。本課題で主に使用した EDGAR v8.0に対し、UNFCCCへの国別報告値、Community Emissions Data System (CEDS: IPCC第6次評価報告書の気候モデル実験用に開発された排出インベントリ; Hoesley et al., 2018)、FAOSTAT（農業セクター排出）などの排出インベントリを用いて、主要な国・地域についてGHG排出量の比較を行った。

【引用文献】

Hoesly, R. M., et al.: Historical (1750-2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS), *Geoscientific Model Development*, 11, 369-408, 10.5194/gmd-11-369-2018, 2018.

SII-8実施期間中である2021～2023年度の間には、IPCC第6次評価報告書公開や第1回GST実施などの大きな節目があり、それに対応して国際的な政策・研究的な動向も急速であった。本課題においてそれらの動向を踏まえた対応を進め、成果を効果的にアピールするための活動を行った。国内専門家との情報・意見交換を目的として日本気象学会2022年秋季大会では専門分科会「温室効果ガス監視の最新動向」を世話人の一人として開催した。海外で実施されている関係プロジェクト（CoC02、GE0SSなど）会合への参加、関連学会における温室効果ガスセッションへの参加などを通じて最新動向に関する情報を収集した。特に2022年から開始され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）」のスコーピングには、テーマ1参加者および気象庁・JAXA担当者らとともに日本のGHG研究コミュニティによる貢献の観点から積極的に議論に参加した。また、GSTに関する普及啓発活動を行っている地球環境変動戦略研究機関（IGES）と連携し、COP28直前ウェビナーでSII-8の活動状況を国内ステークホルダーに紹介した。また、2023年度に米国で立ち上げられたU. S. GHGセンターの動向などに関する情報収集を行った。

本サブテーマでは、SII-8課題で得られた各種手法によるマルチスケールでの温室効果ガス収支評価結果をとりまとめ、参照しやすい形のレポートへのとりまとめとUNFCCCへの提出を担当した。2021度はプロトタイプ作成を行う予定であったが、GSTの情報収集フェーズが2022年2月というスケジュールとなったため計画を前倒しし、2021度中に提出形態のレポート作成作業を実施した。2022年度においてもアップデートしたレポートを作成し、第2回の技術的検討に向けて提出を行った。2023年度は、本課題の最終的な成果を取りまとめる形でレポートを作成し、ホームページで公開した。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し、SII-8の成果を説明することで各国の政策担当者や研究者に向けて情報発信を行った。

4. サブテーマ1 結果及び考察

【サブテーマ1】人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析

水田からのCH₄放出に関する物質循環モデル評価

東アジア地域（日本、中国、韓国、モンゴル、台湾）にVISITモデルを適用し水田からのメタン放出量は、2000～2015年の期間について $5.7 \pm 3.2 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と推定された（図1-5右）。ばらつき（標準偏差）の原因のうち水田マップの差違が最大の寄与を持っており、湛水の季節性とCH₄生成放出スキームの際も相当の寄与を持っていた。どの設定を使用した場合でも、中国中南部、四川盆地、日本・韓国の平野部など強いCH₄放出を示す地域は共通に見られたが（図1-5左）、その強度は異なっており、また中国北部のようにマップによる水田分布の差違を反映してCH₄放出強度が大きく異なって推定される地域も見られた。いずれの結果でも高温多雨となり水稻栽培が中心に行われる春～夏季にCH₄放出量は最大となっていた。関東北部で実施されたチャンパー観測によるCH₄放出推定研究と比較を行ったところ、年間の放出量や季節変化について妥当な結果が得られたことが確認された。

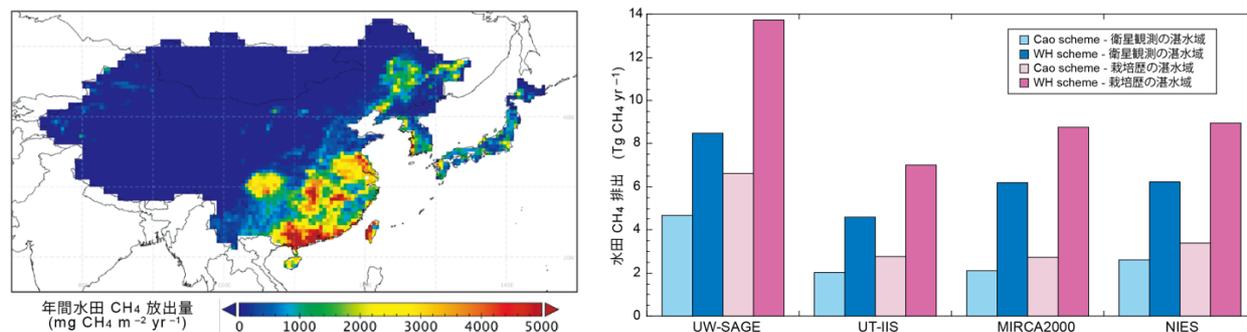


図1-5. 物質循環モデルで推定された東アジア地域の水田からのCH₄放出量。（左）2000-2015年における平均CH₄放出分布。（右）湛水季節性、CH₄生成スキームの組合せによる16通りの推定結果の平均。

従来のボトムアップ評価 (Ito et al. 2019) で使用されていた排出インベントリ (例: EDGAR v4.3.2) では、アジア地域のデータが十分に範囲されていなかったため、特に水田CH₄放出は大幅に過大評価されている可能性が指摘されていた。今回の推定結果はEDGAR 6.0に基づく推定 (14.7 Tg CH₄ yr⁻¹) より大幅に低く、国別データを集計したFAOSTATに近い値が得られた。このような物質循環モデルを用いた推定手法は、IPCCによる排出推定ガイドラインのTier 3に相当するものであり、今後は入力データと農業活動を扱う物質循環モデルの精緻化を進めることで更なる高精度化が見込まれる。

なお、ここで実施されたボトムアップ評価で使用された物質循環モデルによる出力データは、国立環境研究所の地球環境データベースより公開済みである (<https://doi.org/10.17595/20210521.001>)。

【引用文献】

Ito, A., et al.: Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation, *Science of Total Environment*, 676, 40-52, 10.1016/j.scitotenv.2019.04.263, 2019.

シロアリからのCH₄放出量に関する推定高精度化

最新の観測データベースと土地利用マップに基づく推定を行ったところ、2020年のシロアリ起源CH₄放出量は世界全体の合計で14.8 ± 6.7 Tg CH₄ yr⁻¹と推定された。この値は初期の大気モデル研究で仮定されていた20 Tg CH₄ yr⁻¹と、近年のGlobal Carbon Projectで採用されている9 Tg CH₄ yr⁻¹のほぼ中間にあたる。過去の気候変動は主に温度上昇によるシロアリ分布域の拡大によって放出量を増加させた一方、土地利用変化による自然生態系の縮小は放出量の減少を招いており、それらの影響が相殺した結果、1901年から2021年の間に放出量は約0.7 Tg CH₄ yr⁻¹増加したことが示唆された。主な放出域は熱帯林および亜熱帯サバンナ・草原に見られ、高緯度や高山域では低温が分布の制限要因となり放出はほとんど見られなかった (図1-6a)。主な放出源であるアリ塚の周辺における好氣的土壌による酸化吸収分を差し引いたところ、多くの地域では吸収分が上回っていたが、一部の半乾燥域ではシロアリ放出が量的に勝ることで正味放出源となっている可能性がみられた (図1-6b)。このようなシロアリ起源放出を含む熱帯林から半乾燥地域にかけてのCH₄収支は、本研究によって初めて明らかにされたものであり (成果5)、CH₄収支の精緻化に寄与することが期待される。

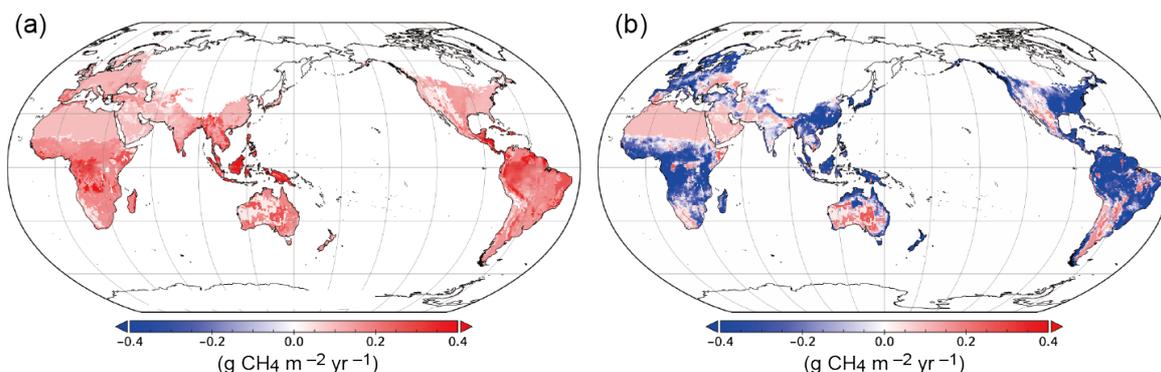


図1-6. 推定されたシロアリ起源CH₄放出. (a)シロアリからの総放出フラックス、(b)好氣的土壌によるCH₄酸化を差し引いた正味フラックス. 赤色域が放出、青色域が吸収を示す。

人為排出インベントリ間の比較

本課題で使用したEDGAR人為排出インベントリと、他のインベントリの比較を行った。アジア地域のCH₄排出については、CEDS、ECLIPSE、US-EPAは過去の時間変化パターンについては整合していたが、最大のもとの最小のもので約30 Tg CH₄ yr⁻¹の差が見られた (図1-7) (成果6)。人為排出インベントリでは排出係数の時間変化 (例えば技術革新など) は十分考慮されておらず、時間変化パターンは共通の活動量データを使用しているため整合していたと考えられる。一方、排出インベントリ間の系統的な差は、設定された排出係数の違いを反映していた可能性が高い。本課題で使用したEDGARはアジア全体、特に中国と日本では最も高い排出量を与えており、インドについては他のものとはほぼ同等であった。

UNFCCCへの報告値と比較すると、EDGARインベントリを使用した分析結果は高めであった。一方、IEAによるMethane Trackerとは比較的近い結果となっていた（成果6）。

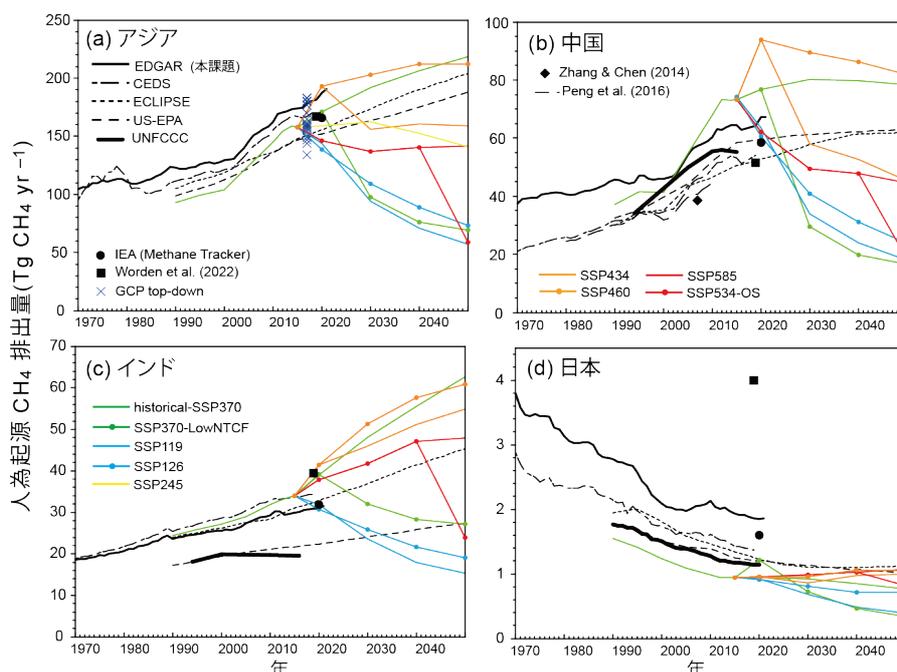


図1-7. アジア地域における人為起源CH₄排出量に関するインベントリ間比較. (a)アジア全域、(b)中国、(c)インド、(d)日本.

人為起源N₂Oの主要排出源は農業セクターにあり、特に排出量が多い中国とインドについて EDGAR v8.0とFAOSTATの比較を行った。農業起源の総排出量については、両国ともにFAOSTATの方が大きな排出量を与えていた（中国で本研究の0.9 Tg N₂O yr⁻¹に対し1.1 Tg N₂O yr⁻¹）。これらの比較分析は、評価に使用している排出インベントリの特徴を把握する上で有用であり、今後のインベントリ精度向上において優先度が高いガス、発生源、地域の特定に有用な知見をもたらしている。

迅速化のための排出インベントリ改良

機械学習アルゴリズムを用いた新手法（deep-wide model）により、人為排出インベントリを2019-2021年分に延長することが可能となった。この期間は新型コロナウイルス感染症による経済活動の著しい停滞と直後の回復という、予期せぬ希な変動が生じていた期間であり、単純な線形外挿が難しい時期のため期せずして推定手法の適用性を検証するのに適していた。本課題で開発した手法により、温室効果ガスの排出量とその変動は妥当に捉えることができた（表1-4）。総CO₂排出量は、2018年から2019年にかけて増加し、2020年には顕著に（-6.2%）減少したと推定されたが、これはGCPによる推定（-7%）と整合的である。また、続く2021年には経済活動が再開され、2019年に近い水準まで回復したことも再現されていた。2020年にはCH₄やN₂Oの排出量も減少していたがその幅はCO₂よりも小さく、その原因は農業などコロナの影響を受けにくい部門の排出が依然として大きかったためと考えられる。

表1-4. 推定された総人為GHG排出量とインベントリ値との比較（前年に対する変化%）

年	データ・手法	CO ₂ 排出 (×10 ⁸ ton)	CH ₄ 排出 (×10 ⁶ ton)	N ₂ O排出 (×10 ⁴ ton)
2018	EDGAR 排出インベントリ	376	375	915
2019	機械学習（deep-wide model）による予測値	395 (4.9%)	384 (2.4%)	935 (2.2%)
2020	機械学習（deep-wide model）による予測値	371 (-6.2%)	376 (-1.9%)	930 (-0.6%)
2021	機械学習（deep-wide model）による予測値	393 (5.9%)	390 (3.5%)	955 (2.6%)

本課題で開発した手法による排出量の推定精度を確認するため、過去の期間について推定結果とインベントリ値の比較を行った。図1-8が示すように、変動が大きいグループ1について各格子点のCO₂、CH₄、N₂O排出量を機械学習アルゴリズムを用いる手法で妥当に再現できていることが確認された。

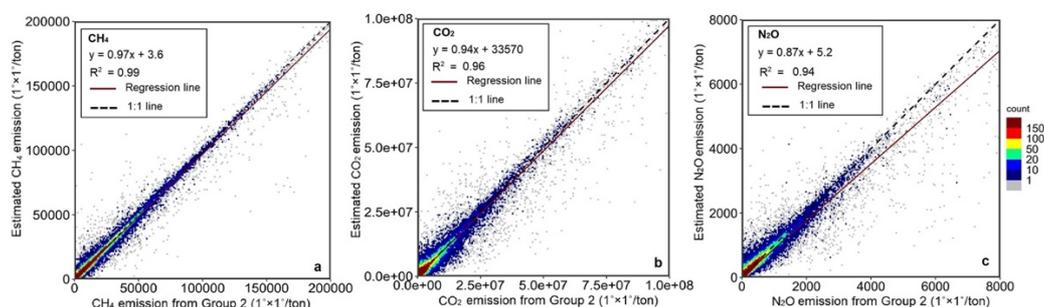


図1-8. 機械学習アルゴリズムで推定された排出量とインベントリとの比較. 2005-2018年についてグループ1（産業・居住地起源）排出について格子ごとの値を比較した。

ボトムアップ手法によるGHG評価

前項までに記述した物質循環モデルの開発、排出インベントリに関する分析に基づいて、表1-1～3に示された各セクターの推定を行うことで、CO₂、CH₄、N₂Oの収支評価を行うためのボトムアップ手法を独自に構築した。図1-9は本課題のボトムアップ手法による各GHGの自然起源、人為起源、合計の収支のグローバルな収支をマップ化したものである。陸域の自然・人為起源だけでなく海洋も含めたこのような包括的なマップが作成されたのは世界初であり、GHG収支の全体像を把握するうえで極めて有用な成果である。この結果はGSTにおける国・地域別収支の評価を可能にするだけでなく、トップダウン手法における大気輸送拡散モデルによる逆推定の先験情報としてテーマ1、2にも提供されている。

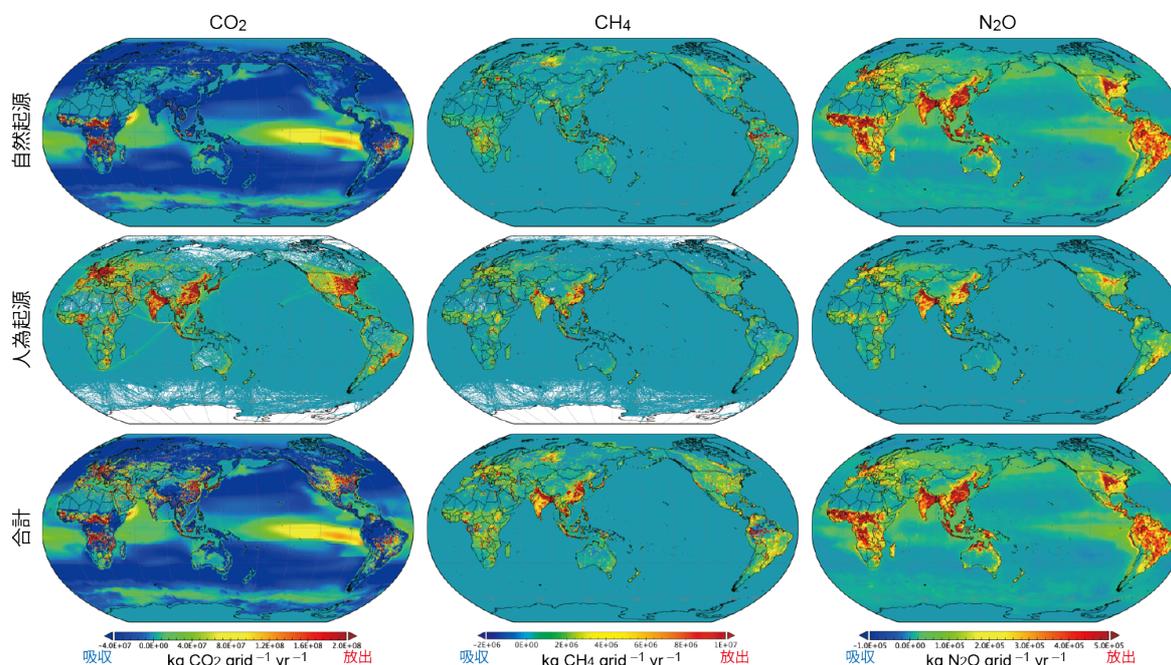


図1-9. ボトムアップ手法で推定された地表でのGHG収支の分布. 2000-2022年の平均。

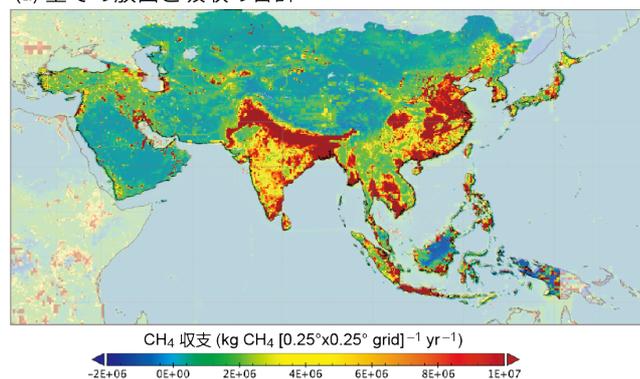
CO₂については、自然起源は海洋・陸域とも吸収源が広く分布し、火災域や湧昇流によって熱帯域での放出が示された。人為起源は欧米・アジアの都市域を中心に強い放出域が見られた。その合計として放出・吸収の不均質な分布が図示された（図1-9左）。CH₄については、自然起源は湿原などの局在化した排出源と、自然土壌による弱いが広域に分布する吸収源が示された。人為起源CH₄排出は、アジア地域

の水田、化石燃料（天然ガス、石炭）採掘の漏洩、家畜、廃棄物などによる分布が偏った強い放出源が示された。N₂Oについては、自然起源は土壌中の硝化・脱窒に伴う放出が熱帯・亜熱帯の森林域で多く見られ、人為起源については農地を中心に強い放出が生じていた。

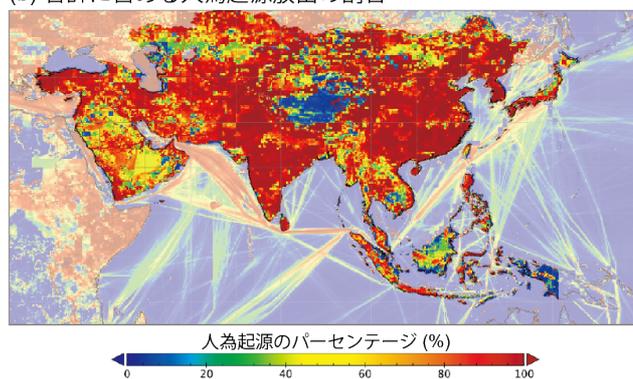
次に、アジアに焦点を当てて国・地域別の評価を行った（成果6）。本研究で開発したボトムアップ・アプローチによると、2001-2021年の期間においてアジア地域は平均して約196.9 Tg CH₄ yr⁻¹（1 Tg [テラグラム] = 10¹² g）の放出源となっており、その約82.6%が人為起源による放出であった。最も大きな寄与があったのは化石燃料採掘に伴う放出で、炭鉱やガス田からの放出や輸送時の漏出などが原因と考えられた。次に寄与が大きかったのは農業起源で、アジア地域に特有な水田からの放出が原因となっており、家畜（反芻動物）による放出も大きくなっていった。人口増加と都市への集中が進むアジア地域では、廃棄物・埋立地からの放出も相当の寄与をもっていた。

アジア地域のCH₄放出・吸収の分布を図1-10に示した。図1-10aは放出と吸収の強さを示しており、赤く示された領域は強い放出源を表す。前記のように水田や都市などの放出源が分布する領域は明らかに強い放出源となっていたが、それ以外にも化石燃料の採掘地、湿原、野外火災などでスポット的に強い放出を示す部分が見られた。図1-10bは、各格子での人為起源放出の寄与率を示しており、湿原が分布する東南アジアやチベット高原などを除くと、アジア地域では多くの領域で人為起源が優占的であることがわかる。図1-10cとdは、それぞれ自然起源と人為起源について2000年から2021までの変化を示している。主に気候変動の影響を受ける自然起源では増加と減少が地域的に別れて分布する傾向があるのに対し、人為起源の放出は大部分の場所で増加が起こったことが分かる。ただし、日本のように放出源の水田面積が減少し廃棄物起源の放出も減少した地域もあった。

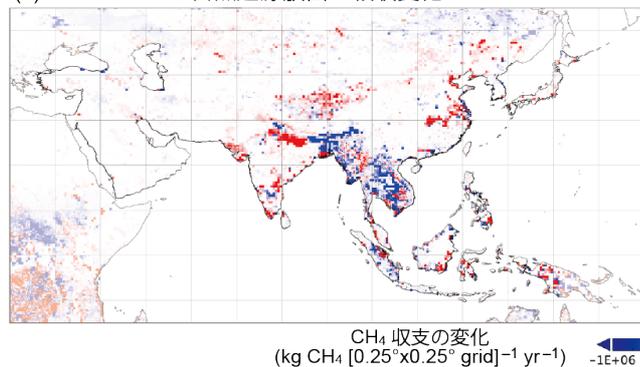
(a) 全ての放出と吸収の合計



(b) 合計に占める人為起源放出の割合



(c) 2000-2021 の自然起源放出・吸収変化



(d) 2000-2021 の人為起源放出変化

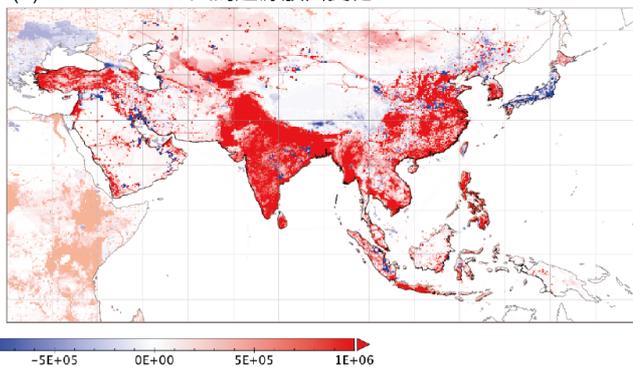


図1-10. ボトムアップ・アプローチで開発されたアジア地域のCH₄収支マップ。(a) 合計収支、(b) 総放出に対する人為起源放出の割合、(c) 自然起源放出の2000年から2021年までの変化、(d) 人為起源放出の2000年から2021年までの変化。

図1-11は、ボトムアップ手法による前回および日本のCO₂、CH₄、N₂O収支の年々変化である（火災による放出はGFEDデータが利用可能な1997年以降である点に注意）。人為起源排出は、全世界ではいずれの

GHGも、多少の年々変動がありつつ長期的には増加してきたことが明らかである。年々変動は2008年のリーマン・ショックや、2020年のCOVID-19蔓延の影響による一時的な減少がCO₂排出量に見て取れる。日本の傾向は世界と異なっており、CO₂については2013年以降に徐々に減少しており、東日本大震災に伴う影響もありつつ削減が進んでいることがわかる。CH₄については、水田からの放出減少が明らかで、炭鉱など化石燃料採掘に伴う排出減も寄与していた。N₂Oについては、世界的には農地で使用される窒素肥料に起因する放出増加が大きいのが、日本では産業起源の放出が2000年頃から大きく減少していた。

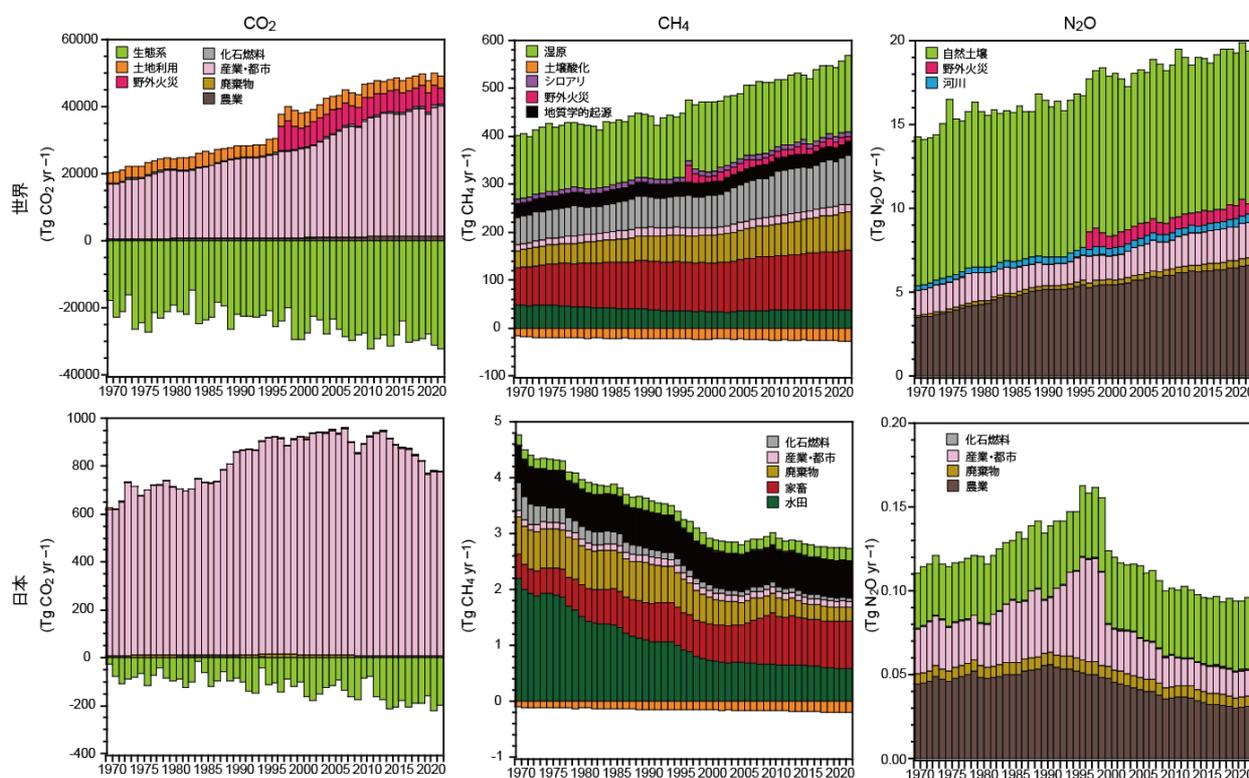


図1-11. ボトムアップ手法で評価された1970～2018年の（上）全世界、（中）東アジア地域、（下）日本の温室効果ガス収支。

表1-5および1-6は、全世界と東アジア地域について、トップダウン（テーマ1のNISMOMおよびテーマ2のMIROC4-ACTM）と、本研究によるボトムアップ評価の比較を行ったものである（SII-8温室効果ガスレポートに掲載）。両手法で扱う排出・吸収の定義などに注意しながらおよそ5年毎の間隔で比較を行った。世界のCO₂収支については、ボトムアップ手法がやや吸収を大きく見積もる傾向にあるが、これは森林などの炭素循環をシミュレートしたVISITモデルによる純バイオーム生産（NBP）に、CO₂以外の炭素放出も含まれている点に関係していると考えられた。世界のCH₄収支については、ボトムアップ手法のほうが総排出量（土壌酸化分を除く）を低めに見積もっており、その原因として現在のボトムアップ評価では湖沼・河川の放出が含まれていないなどの原因が考えられる。世界のN₂O収支においてボトムアップ手法の推定値がやや低い原因も、同様に、対象とする排出源の差が原因の1つと考えられる。東アジア地域については、CO₂収支についてトップダウン手法の推定にモデル間の差があり、2021-2022年を除くと、ボトムアップ手法の推定はトップダウン推定の間にある場合が多かった。CH₄収支については、全世界の場合と異なり、ボトムアップ手法のほうが高い排出量を示していたが、農業起源（主に水田）や化石燃料採掘（主に中国の炭鉱）の排出をインベントリが高めに見積もっていた可能性がある。N₂Oについては、トップダウンとボトムアップの推定値は比較的近かった。これらの比較結果は、トップダウンとボトムアップの手法がいずれも地域スケールのGHG収支を把握するのに有効であることを示している。一方で、手法間の差はデータの質・量、推計手法、モデル推定による不確実性を示しており、さらなる観測とモデル精緻化を進める必要がある。

表1-5. 全球陸域総GHG収支に関するトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの比較
(年次変動の平均 ± SD)

			1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2022
CO ₂	自然 + 土地利用	トップダウン (NISMON)	-1.25 ± 1.25	-1.38 ± 0.95	-2.70 ± 0.59	-2.49 ± 0.98	-1.93 ± 0.65	-3.07 ± 0.64
		(MIROC4- ACTM)		-1.73 ± 0.74	-2.91 ± 0.50	-2.93 ± 0.88	-2.66 ± 0.76	-3.11 ± 0.25
	ボトムアップ [VISIT]	-2.42 ± 1.08	-2.02 ± 0.76	-3.27 ± 0.41	-3.44 ± 0.85	-2.52 ± 0.89	-3.66 ± 0.37	
	人為 (化石燃料)	ボトムアップ (GridFED)	6.62 ± 0.14	7.42 ± 0.43	8.54 ± 0.27	9.42 ± 0.11	9.66 ± 0.20	9.93 ± 0.01
CH ₄	合計 (排出 - 土壌吸収)	トップダウン (MIROC4- ACTM)	--	540.5 ± 9.6	537.6 ± 10.8	573.8 ± 8.5	594.4 ± 14.1	
		ボトムアップ	443.4 ± 10.9	458.2 ± 7.8	486.5 ± 3.5	500.5 ± 5.9	513.8 ± 10.9	535.2 ± 7.6
N ₂ O	合計	トップダウン (MIROC4- ACTM)	15.6 ± 0.7	15.6 ± 0.3	16.4 ± 1.0	17.0 ± 0.7	17.5 ± 0.7	
		ボトムアップ	11.3 ± 0.4	11.4 ± 0.2	11.8 ± 0.2	12.1 ± 0.2	12.2 ± 0.2	12.5 ± 0.2

CO₂ in Pg C yr⁻¹, CH₄ in Tg CH₄ yr⁻¹, N₂O in Tg N yr⁻¹

表1-6. 東アジアの陸域総GHG収支に関するトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの比較 (年次変動の平均 ± SD)

			1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2022
CO ₂	自然 + 土地利用	トップダウン (NISMON)	-0.19 ± 0.24	-0.03 ± 0.29	-0.21 ± 0.14	-0.18 ± 0.15	0.10 ± 0.13	-0.22 ± 0.02
		トップダウン (MIROC4- ACTM)	--	-0.32 ± 0.14	-0.46 ± 0.08	-0.56 ± 0.14	-0.52 ± 0.12	-0.23 ± 0.13
	ボトムアップ [VISIT]	-0.34 ± 0.05	-0.34 ± 0.13	-0.31 ± 0.05	-0.36 ± 0.08	-0.44 ± 0.05	-0.54 ± 0.01	
	人為 (化石燃料)	ボトムアップ (GridFED)	1.46 ± 0.04	1.83 ± 0.24	2.56 ± 0.21	3.20 ± 0.05	3.31 ± 0.11	3.52 ± 0.03
CH ₄	合計 (排出 - 土壌吸収)	トップダウン (MIROC4- ACTM)	--	48.3 ± 2.7	52.2 ± 2.6	58.1 ± 3.3	60.3 ± 4.7	
		ボトムアップ	56.1 ± 0.9	58.8 ± 3.4	68.0 ± 2.0	74.6 ± 0.8	76.1 ± 1.4	79.9 ± 1.6
N ₂ O	合計	トップダウン (MIROC4- ACTM)	1.48 ± 0.13	1.57 ± 0.10	1.76 ± 0.13	1.71 ± 0.12	1.75 ± 0.16	
		ボトムアップ	1.44 ± 0.04	1.47 ± 0.06	1.57 ± 0.04	1.62 ± 0.06	1.55 ± 0.03	1.61 ± 0.00

CO₂ in Pg C yr⁻¹, CH₄ in Tg CH₄ yr⁻¹, N₂O in Tg N yr⁻¹

GSTに関する国際動向の収集とGSTへの情報提供

SII-8課題全体の成果を取りまとめたレポートを作成し (成果17, 18, 19)、GSTに提出することで目的としていた政策貢献を達成した。COP26において情報収集フェーズ (Information Collection and Preparation) は2022年1月から実施されることが明らかになり、本課題は予定を約1年前倒ししてGHG収支評価を報告書にとりまとめる必要が生じた。そこで、2021年12月から2022年1月にかけて、各テーマの主要成果を取りまとめ、背景や手法の説明、政策的意義に関する説明 (GSTのガイディング・クエスチョンへの対応) を加えて報告書の作成を主導的に実施した。結果的に2022年3月1日に国立環境研究所より、本課題による日本独自のGHG収支評価として、UNFCCC GSTポータルへの情報提出を完遂することができたのは予定を大きく超える成果であった。提出された報告書 (図1-13左) は、UNFCCCのポータルサイトから4月1日付で公開された (<https://unfccc.int/documents/461590>)。翌2022年にも引き続きGSTの情報収集と技術的対話 (Technical Dialogue) が実施され、2023年3月6日が追加情報の提出期日となった。昨年度のレポートにおけるGHG収支評価をアップデートし、解析期間を延長するとともに追加データを使用した再計算を行うなど信頼度を高めたいうで、2023年版 (図1-13中) を同ポータルよ

り提出した (<https://unfccc.int/documents/627117>)。



図1-13. SII-8課題で作成したGHG収支報告書（英文版）の表紙。

GSTへの情報提供は、日本からJAXAおよびIGESによる衛星観測データ、AP-PLATによる適応関連データなどがあるが、他地域と比べると件数が少なく、SII-8成果のインパクトは日本の研究活動によるインパクトを高めるうえで大きな意味があった。2023年度は、GSTの成果検討（Consideration of Outputs）段階にあり、新たな情報提供は呼びかけられていなかったが、SII-8課題の最終年度にあたるため、最新の観測データとモデル解析によるGHG収支推定を掲載した2024年版のレポート（図1-13右）を作成した。そのレポートはSII-8プロジェクトホームページ

(https://www.nies.go.jp/sii8_project/) から公開されており、自由にダウンロードして参照していただくことができる。なお、2023年版と2024年版については、国内ステークホルダーへの利便性のため、英文版をベースに和文版も作成している。

GSTに関する情報収集と本課題の成果アピールのため、COP26（英国、グラスゴー：2021年11月2-6日）、COP27（エジプト、シャルム・エル・シェイク：2022年11月5-12日）、COP28（アラブ首長国連邦、ドバイ：2023年12月6-11日）に参加した。それぞれ環境省主催ジャパンパビリオンでセミナーを開催してSII-8課題の概要と成果に関する口頭発表を行った（成果66, 72, 74）。セミナーには会場およびオンラインで各国の政策担当者や関連研究者が参加しており、本課題の成果をアピールした。COP27ではGOSAT事業が主催するサイドイベントにも参加し、SII-8課題における衛星データ活用について説明を行った。COPにおいては、Global Carbon ProjectがCO₂収支に関する統合解析の最新結果を発表するなどしており、GSTを踏まえた温室効果ガス収支研究の最新情報を収集することができた。COP28では、地球環境研究戦略機関（IGES）が主催する「COP28直前ウェビナー」で発表を行い、COP28の動向に関心を持つ多くの国内ステークホルダーに対して本課題の科学的手法によるGHG収支評価を紹介した。

国内外の関連プロジェクト会合や国際学会のGHG関連セッションに参加して最新動向を収集し、また本課題の成果アピールを行った。三枝（分担者）は欧州で実施されているCoC02の外部評価委員を務めており、欧州での観測・分析に関する動向の把握に努めた。また、伊藤（代表者）は世界気象機関によるグローバルGHG監視（WMO-GGGW）に関するワークショップに参加して口頭発表を行うと併に、各国機関によるGHG収支評価に関する情報収集を進めた（図1-14）。WMOが推進するGHG監視イニシアティブ設立に向けた提言作成に協力した。

GSTなどへの政策貢献にあたり専門家の意見を聞くため、日本気象学会では専門分科会「温室効果ガス監視の最新動向」を対面形式で開催し、また日本地球惑星連合ではセッション「Global Carbon Cycle」を企画した。その他の活動として、地球観測システム・アジアオセアニア（AOGeo）におけるタスクグループ・ミーティング（TG3: Carbon and Greenhouse Gases）に参加し、SII-8の活動内容を紹

介するともにアジア地域における関連活動に関する情報を収集した。関連学会におけるGHG関連セッションでの活動として、欧州地球科学連合（EGU）、アジアオセアニア地球科学連合（AOGS）、日本地球惑星科学連合（JPGU）、米国地球物理連合（AGU）への参加と成果発表を行った。

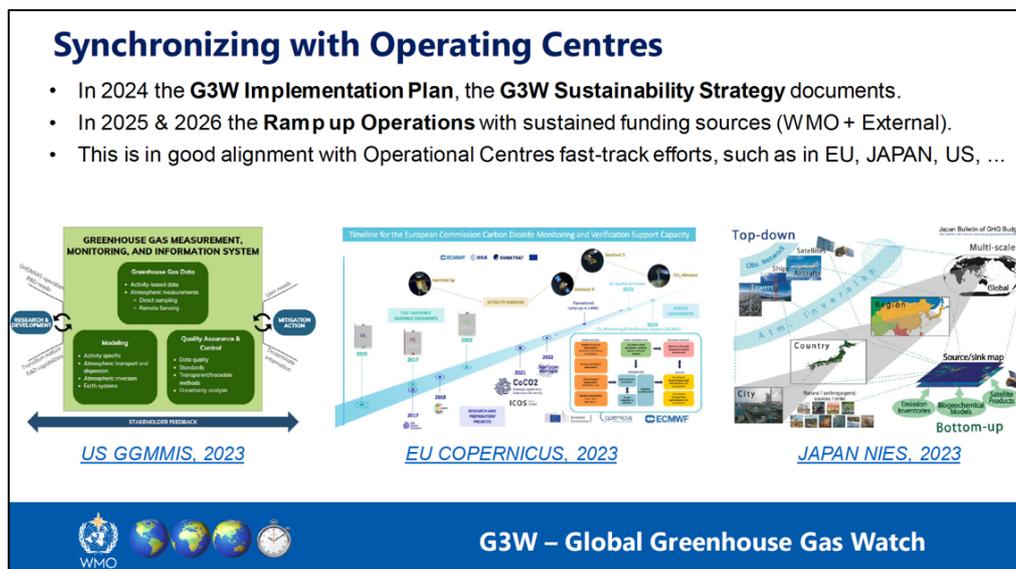


図1-14. WMO-G3W発表資料にアジア太平洋地域の活動として掲載されたSII-8の概要図。

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

本サブテーマの目標はいずれも計画通り、あるいは計画以上に達成された。研究期間の半分以上はコロナ禍のため対面での打ち合わせ等が制限されたが、オンラインを活用することで計画に支障をきたすことなく内容を実施することができた。

- ① ボトムアップ手法の開発は順調に実施され、CO₂、CH₄、N₂Oを包括的に評価するシステムを開発することができた。独自の物質循環モデルによって自然起源の排出・吸収を網羅的に推定可能になった。人為起源排出インベントリは、最新のデータセットを使用するだけでなく、代替推定手法を新しく開発し、迅速な報告に対応することが可能となった。物質循環モデルによる推定結果は、テーマ1およびテーマ2のトップダウン手法（大気モデルによる逆推定）の先験情報として提供し、テーマ2の地球システムモデルにおけるGHG収支を介した生物地球化学的フィードバック推定高度化にも協力した。水田やシロアリのCH₄放出など、重要かつ新規性の高いテーマに取り組むことで複数の主著論文を発表した。
- ② パリ協定GSTへの情報提供は、当初計画を前倒して達成することができた。計画では2023年に提出する予定であった結果を、2022年3月に提出したが、このような臨機応変な対応が可能となったのはCOPにおけるGST動向をいち早く国内外より収集し、流動的な情勢に対応できるよう様々な想定をしていたためである。テーマ間の緊密な連携関係を築くことによって観測からモデル解析までの時間を短縮し、オンラインドキュメントを用いた共同執筆・編集を行うことで、迅速な報告書作成を実現した。
- ③ コロナ禍により2023年まで多くの国際学会・シンポジウムがオンラインで実施されたが、それらに積極的に参加することで十分に情報収集と成果アピールを行うことができた。WMO-G3Wのように2022年から始まった新しい動向にも対応し、日本からの、アジア太平洋地域を代表するGHG監視プロジェクトとして貢献可能性をアピールした。GCPによるCO₂、CH₄、N₂Oの統合解析に物質循環モデルによる計算出力データを提供し、国際共著の論文執筆にも参加した。そこでは複数モデルによる相互比較が実施されており、GHG収支のモデル推定に関する不確実性を定量的に検討することができた。

II-2 サブテーマ2 「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」

[サブテーマ2要旨]

サブテーマ2では、種々の地上観測ネットワーク、衛星観測データ、数値モデルを統合的に用い、ボトムアップ手法・トップダウン手法の両者手法を用いて陸域温室効果ガス収支の推定を試みた。また、各推定手法のうち2種類の手法について、スピーディに容易に解析結果を閲覧できるシステム化を試みた。サブテーマ2の独自手法である機械学習を用いたフラックスアップスケーリングにおいては、これまで開発を続けてきたサポートベクタ回帰による手法を発展させ、主に高空間解像度化と年次の延長を試みた。さらに、静止気象衛星ひまわり8号を用いて、陸面の変動を迅速に把握できるように、地表面温度データセットの評価(成果12)、光合成量の推定を実施した。地表面温度を入力とするモデルを構築することで猛暑による植生光合成活動のダメージを再現することに成功し、植生の生育異常を早期に検出できる可能性を示した。これらの結果は、容易に解析ができるようにシステム化を行い、結果の画像の生成を通して迅速に可視化できるようにした。また、GOSAT/TANSO-FTS、GOSAT-2/TANSO-FTS-2の熱赤外バンドからCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直濃度プロファイルを高精度に導出し、全球で各種の航空機観測等との比較にもとづいてデータ質を検証したうえで、衛星の鉛直濃度プロファイルとMIROC4-ACTMによるシミュレーション結果を比較し、CH₄の半球輸送のプロセスを明らかにするなど、GHG収支推定に資するデータセットを構築した(成果11)。また、トップダウン型の逆解析により全球および54の領域別の2000-2020年のCH₄収支を年毎に推定し(成果13)、大気中のOH濃度の変動がCH₄収支推定に与える影響を評価し、本課題で実施している南アジアのフラスコサンプリング観測のCH₄収支推定における有用性を示した。さらに、陸域物質循環モデルVISITモデルを用いて、いくつかの衛星観測ベースのプロダクト、大気インバース解析からの結果との比較を通して、モデルの評価を行い、特にフラックスアップスケーリングの結果と比較したところ、シベリア域では光合成量の増加トレンドが異なる、東南アジアでは光合成量の経年変動の大きさが異なるなど、改善すべき点が明らかになった。

1. サブテーマ2研究開発目的

サブテーマ2の目的は、地上観測・衛星観測のビッグデータにより強化された大気-陸域の温室効果ガスの収支を国・地域スケールで推定すること、急速な環境変動に応じた陸域環境の変動を素早く監視できるシステムを作り早期に急速な変化の検出やモニタリングを実現させること、である。地球環境変動は急速に起こりつつあり、世界の様々な地域で劇的な地球表層環境の変動が起こっている。このような時間スケールでは、パリ協定のグローバルストックテイクの間隔よりも、よりスピーディな環境変動の把握が必要である。また急速な変動が見えた場合には、環境変動の進行を止めるための現状の把握や温室効果ガス収支の見積もりの修正が求められる。陸域の温室効果ガスの収支の推定は不確実性が高いとされている。その一方で、その収支を精緻化するための観測データが増大しており、衛星観測・地上観測ともに多くのデータを得ることができる。これらを機械学習などの適用により統合し、観測データに基づいたデータセットの構築や、観測データに強化された数値モデルなど、陸域における温室効果ガスの収支を精緻化することを行う。

2. サブテーマ2研究目標

サブテーマ2	「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」
サブテーマ2実施機関	国立大学法人千葉大学
サブテーマ2目標	地上観測・衛星観測・数値モデルの統合的に解析し、陸域の温室効果ガスを推定する。特に、GOSAT衛星やAsiaFluxなどの観測データ駆使した観

測データに基づいたGHG収支の評価(以下①, ②)、観測データと数値モデルを統合した陸域炭素循環の推定(以下③)、温室効果ガス収支推定のシステム化(以下④, ⑤)を行う。

① 地上観測と衛星観測データを統合した温室効果ガスフラックスデータの構築

大気-陸域の温室効果ガス収支について、AsiaFlux、FLUXNETなど地上観測ネットワークデータに関して、衛星観測データと機械学習を活用したアップスケーリングを行い、月毎などの全球のCO₂収支データを構築する。さらに、アジア・オセアニア域については、ひまわり8号を活用するなどして、より高時間分解能(1時間~日別程度)の温室効果ガス収支データセットを構築する。いずれも1 km(アジア)~10 km(グローバル)程度の空間分解能のデータセットを構築する。

② GOSAT、GOSAT-2衛星データによる温室効果ガス濃度鉛直分布データの構築

大気中の温室効果ガス濃度に関して、GOSAT、GOSAT-2衛星観測を活用したCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直プロファイル推定を行い、全球レベルでのデータセットを構築する。これらのデータは本課題の他サブ課題の大気逆解析モデルの入力データとして利用するなど温室効果ガス収支の推定に貢献することとなる。

③ 種々の観測データに強化された陸域物質循環モデルの構築

陸域の物質循環モデルに対して、種々の衛星観測データを統合し駆動する、既存のモデルよりも様々な観測データセットに対して整合性の取れた陸域物質循環モデルを構築する。統合には、既存の物質循環モデル(VISITを想定)に対して、より多くの観測データセットを用いてモデルの検証を行う。更に、衛星観測を用いてモデルの境界条件を決定することや、データ同化技術などを実装することで、観測データへの再現性を高めるモデルを構築する。構築したモデルは、定期的に大気-陸域における温室効果ガス収支を0.5°グリッド程度の解像度で計算できることとする。

④ 温室効果ガス収支推定のシステム化

グローバルストックテイクなどの定期的な温室効果ガスの収支の報告ができるように、毎年更新できるシステムを構築する。これらの構築したデータセットは他サブ課題における温室効果ガス収支の把握や比較材料のために提供する。

⑤ スピーディな温室効果ガス収支システムの構築

森林火災や異常気象などがあつた際にスピーディに診断結果を得ることができるようなシステムを構築する。特に種々の衛星データとそれらにより得られる物理量をスピーディに処理できるようにし、突発的な環境変動があつた際の環境変動の把握、温室効果ガス収支へのインパクトを評価できるようにする。例として、大規模な森林火災の発生の事例、異常気象の発生の事例を挙げるができる。

3. サブテーマ2 研究開発内容

観測データに基づくアップスケーリング

観測データ（地上観測・衛星観測）に基づいたアップスケール手法による大気-陸域CO₂フラックスの構築を行った。本研究では、サブテーマ2担当者がこれまで構築してきた機械学習サポートベクタ回帰による手法(Ichii et al., 2017; Kondo et al., 2015)と、複数の機械学習を用いた推定値の平均をとったFLUXCOMグループによる手法の2種類の更新を行った。FLUXCOMにおける機械学習法の一つにサブテーマ2担当者の手法が含まれている。概要を表2-1に示す。サポートベクタ回帰による手法については、入力に用いる衛星データの更新を行い、2022年末までの結果を構築した。さらに中国や日本域など領域を絞ったうえで、1kmの高空間解像度でのランを実行した。また、FLUXCOMデータについては、Max Planck 生物地球化学研究所の協力を得て、本サブテーマで構築したMODISセンサデータを含む衛星データセットを提供し、FLUXCOMにおける炭素フラックスのプロダクトを構築した。

表2-1. 機械学習によるCO₂フラックスの推定のアップデート一覧

	領域	空間解像度	時間分解能	主なアップデート点
サポートベクタ回帰 (Ichii et al. 2017)	アジア	0.25°	8日	2022年末まで延長
	アジア	1km	8日	2022年末まで延長 1km空間分解能で実施
サポートベクタ回帰 (Kondo et al. 2015)	グローバル	0.25°	8日	2022年末まで延長
FLUXCOM (Jung et al. 2020)	グローバル	10km	8日	2021年末まで延長

上記で構築したデータセットの応用として、テーマ2で構築されたトップダウン手法（大気インバースモデル）によるCO₂収支(Chandra et al. 2022)との相互比較を行いプロダクトの妥当性を評価した。特に2020年のシベリア域を対象にして、2020年の異常高温が陸域CO₂収支に及ぼす影響を評価した。2020年春から夏にかけて、シベリアでは、800年に1度といった異常高温を経験した。この異常高温が陸域CO₂循環に与える影響を評価するため、ロシアを西・中央・東と分割して解析した(図2-1)。

図2-1. トップダウン手法、ボトムアップ手法で推定した大気-陸面CO₂吸収排出量の比較解析対象地域。

また、静止気象衛星ひまわり8号データと地上フラックス観測を用いて、地表面温度や総一次生産量(GPP; Gross Primary Productivity; 光合成量に相当)の推定を行いスピーディな結果の出力に向けた準備を行った。ひまわり8号は2015年より観測が始まることから、2015年を含むそれ以降の年の観測値が入手可能なデータセットの調査も合わせて実施した。ひまわり8号からの地表面温度については、協力者が従来構築した熱赤外域の3バンドを用いた手法を基に、アジア・オセアニア全域への拡張を行った(Yamamoto et al. 2022)。AsiaFluxとOzFluxの12観測サイトデータを収集し(図2-2)、本研究提案手法を含む複数の地表面温度算出アルゴリズムの相互比較を行った。さらに、光合成量の算出手法として、こ

れまで広く使われてきたTerra衛星搭載MODISセンサなどの極軌道衛星データを用いて広く利用されてきたEC-LUEモデルを用いて、東アジアのGPPを推定した。期間は2018年6月から8月とした。韓国・日本の4つの植生サイト（CRK, GCK, GDK, TKY）（図2-2の東アジア部分）で観測されたGPPデータを用いて、GPP推定モデルのテストと改良を行ったが、特に温度にひまわり8号で推定した地表面温度を利用した場合に猛暑時における光合成量の低下が再現できるか試行した。

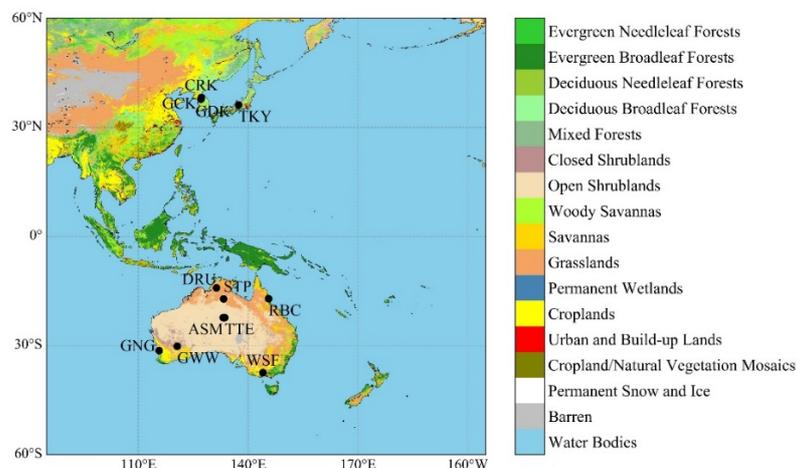


図2-2. 静止気象衛星ひまわり8号の観測域と地表面温度の推定に用いた検証地点の分布 (Yamamoto et al., 2022). 東アジアの検証点(4サイト)は光合成量推定においても利用した。

GOSATなど観測データを用いた温室効果ガス収支解析

GOSAT/TANSO-FTSおよびGOSAT-2/TANSO-FTS-2の熱赤外バンド（TIRバンド）のスペクトルデータを用いて、GHG（CO₂、CH₄、N₂O）の鉛直濃度分布の導出を行い、航空機観測等のデータとの比較に基づいた検証解析を行った。GHG濃度導出には線形写像付き非線形最大事後確率推定法を用いた (Saitoh et al., 2016)。TANSO-FTSおよびTANSO-FTS-2のTIRバンドのレベル1スペクトルデータから、地表面から0.1 hPaまでのGHGの鉛直濃度分布を導出し、対流圏の濃度分布、季節変動について妥当性を評価した。ここでは、CONTRAIL/CME、IAGOS/CARIBIC、気象庁による航空機観測により、世界各地の空港上空で取得されたGHGの鉛直濃度分布データとの比較を実施した。衛星と航空機の近傍観測の条件を300 km以内かつ72時間以内とし、衛星観測のアベレーシングカーネルを適用して航空機観測の高度分解能を衛星観測の高度分解能に合わせた上で、比較・評価を行った。

そのうえで、テーマ2サブテーマ2（以降、テーマ2-2）と協力して、検証解析を行ったGOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドのCH₄鉛直濃度分布データとMIROC4-ACTM (Watanabe et al., 2008; Patra et al., 2018)のCH₄シミュレーションデータを用いて、対流圏における物質の半球輸送（IHT）のプロセスを調べた。2009年4月から2014年5月までのGOSAT/TANSO-FTSとMIROC4-ACTMのCH₄鉛直濃度分布データを用いて、350 hPaから150 hPaの気圧面について、それぞれ緯度・経度3°グリッドでデータのリサンプリングを行い、季節および領域ごとに半球間のCH₄の輸送量を調べた。IHTを定量的に評価するために、低緯度（10°S-10°N）の上部対流圏でCH₄の移流傾向（advective tendency）を計算した。ここでは、各グリッドでの対流圏界面+200 hPaから対流圏界面までの高度層を「上部対流圏」と定義した。

また、テーマ2-2と協力して、MIROC4-ACTMを用いたトップダウン型の逆解析により、全球の陸域の54領域について2000-2020年のCH₄収支（排出量・吸収量）を推定した。式（1）に、逆解析で推定するCH₄の月平均排出量 S と誤差共分散 C_S を示す。ここで、 S_0 は54の各領域のCH₄排出量のアприオリ、 D_{obs} 、 D_{ACTM} は観測データおよびMIROC4-ACTMモデルによるフォワード計算データのCH₄濃度、 C_{S_0} 、 C_D はCH₄排出量のアприオリおよびCH₄観測データの誤差共分散、 G は領域ごとのソース・レセプター関係を定義するグリーン関数である。

$$S = S_0 + (G^T C_D^{-1} G + C_{S_0}^{-1})^{-1} G^T C_D^{-1} (D_{obs} - D_{ACTM}) \quad \text{式（1）}$$

$$C_S = (G^T C_D^{-1} G + C_{S_0}^{-1})^{-1}$$

ここでは、グローバルカーボンプロジェクト（Global Carbon Project: GCP）のプロトコルに従って逆解析を実施した。

MIROC4-ACTMを用いた逆解析によるCH₄収支推定において、ヒドロキシルラジカル（OH）の酸化による大気中からのCH₄の除去（約90%）プロセスを高精度化することは重要である。OHは水蒸気と励起酸素原子（O^{1D}）との反応によって生じ、大気中のOH濃度は大気組成および湿度、紫外線、気温などの気象学的要因に大きく影響される。そこで本研究では、大気中のOH濃度の変動がCH₄収支に与える影響を定量的に評価するために、気候値のOH濃度（以降、OH_{CLM}）を用いた逆解析によるCH₄収支の推定結果と、月毎に変動するOH濃度（以降、OH_{IATV}）（メチルクロロホルムを用いた逆解析により導出（Patra et al. 2021））を用いた逆解析によるCH₄収支の推定結果を比較した。

さらに、テーマ1サブテーマ2（以降、テーマ1-2）とも協力して、国立環境研究所が長期間にわたってインドのナイニタール（NTL、2006年～）とバングラデシュのコミラ（CLA、2012年～）で実施しているフラスコサンプリングによるCH₄観測データをMIROC4-ACTMによる逆解析に投入した場合のCH₄収支推定への影響を定量的に評価した。

観測データを活用した陸域炭素循環モデルの改良

地上観測データ・衛星観測データなど近年様々な観測データが入手できるようになり、これらを生かした陸域炭素循環モデルの改良が必要とされている。本研究では陸域炭素循環モデルVISITを用いて、複数の観測データを用いてモデル・データの統合を行い、陸域炭素循環モデルを改善することを目的とした。ここでは、VISITモデルに対して、モデルパラメータの最適化ルーチンを組み込むことによって、地上観測によるCO₂フラックスデータを制約条件にして、モデルパラメータの改善を試みた。CO₂フラックスのうち、今回は、GPPを拘束条件として用いた。VISITに含まれる100を超えるモデルパラメータのうち、今回は、最大光合成量を最適化の対象として、差分進化法を用いて、観測を再現できる最良のパラメータを決定した。JapanFlux, AsiaFluxに属する高山サイトを対象にモデル実験を行った。さらに、VISITモデルの評価の一つとして、アジア域においてVISITモデルとサポートベクタ回帰による光合成量の経年変動の相互比較を行った。

温室効果ガス収支推定のシステム化・迅速化

温室効果ガス収支推定の迅速なシステム化に向けて、本研究では、サポートベクタ回帰による陸域CO₂フラックスの推定と、衛星観測データ利用型の陸域生態系モデルBESS (Breathing Earth System Simulator; Ryu et al. 2011)による光合成量の推定を行い、これらの一部を簡易的に動作するように修正を行った。さらに、解析成果の一部をブラウザ上で画像表示できるようにした。

4. サブテーマ2 結果及び考察

観測データに基づくアップスケーリング

機械学習によるCO₂フラックスの推定手法のアップデートについては、入力データに用いるTerra, Aqua搭載MODISセンサデータなどの衛星観測データを2022年12月末まで延長させた。本研究では、サポートベクタ回帰による推定方法と、FLUXCOMアプローチによる推定方法の2つのデータセットをそれぞれ2022年12月末、2021年12月末まで計算した。また、サポートベクタ回帰による手法では従来は0.25°程度の空間解像度であったものを1kmの空間分解能に向上させた。高空間解像度版の一例として、アジア1kmで構築したデータのうちモンゴル国部分を図2-3に示す。過去約20年間においては主に国土の北東地域を中心に光合成量の偏差が顕著であることが分かる。

構築したデータセットの応用として、シベリア域中央(図2-1)において、テーマ2-2で構築されたトップダウン手法（大気インバースモデル）によるCO₂収支との比較を行った。2020年の春から夏にかけては

シベリア域では異常高温が続いていた。これにより、2020年5・6月において、例年に比較して、CO₂吸収量が大きかったことが、トップダウン(Chandra et al. 2022)でも、本研究のアウトプットである機械学習によるCO₂収支推定手法でも両者で一貫した結果を得ることができた(図2-4)。

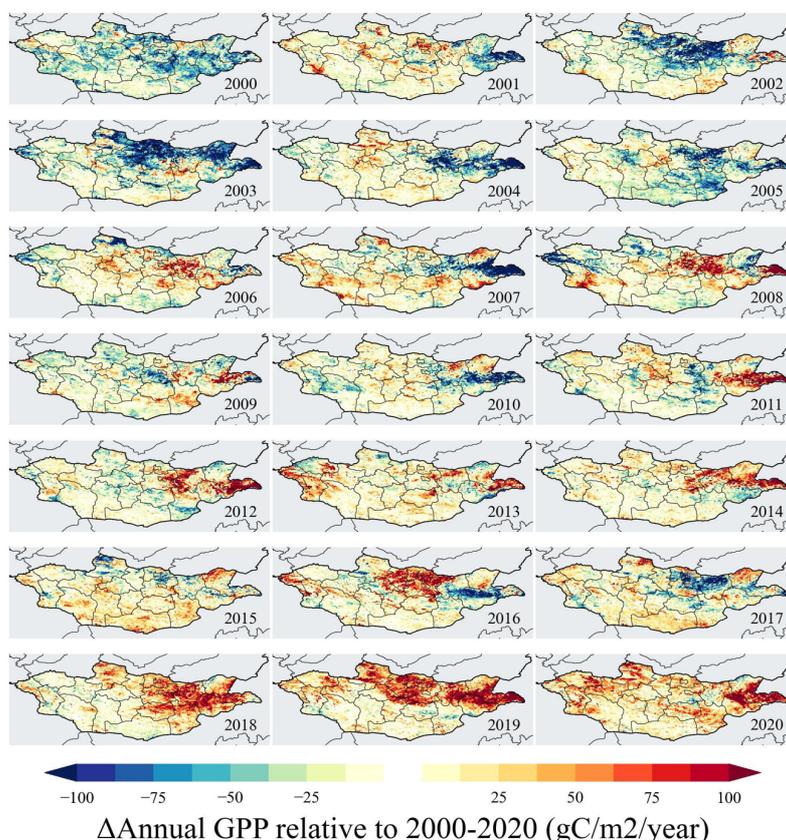


図2-3. モンゴルにおける光合成量の経年変動の偏差(サポートベクタ回帰・アジア1kmランの結果)

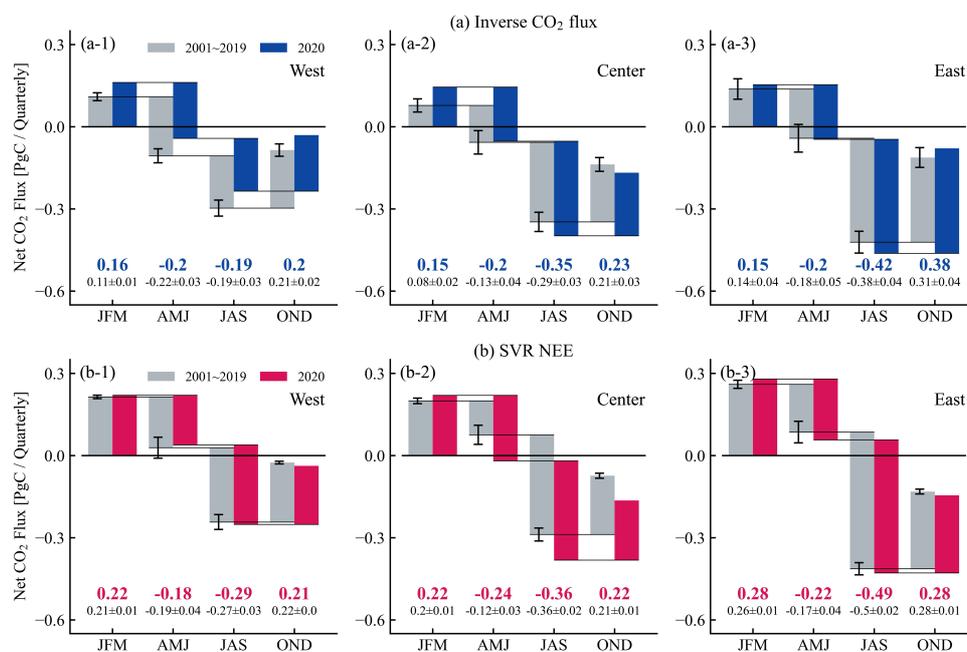


図2-4. ロシア3地域(図2-1)における大気—陸面間のCO₂フラックス推定値(2001-19年vs2020年). 上段はトップダウン手法による推定値(Chandra et al. 2022)、下段は本サブテーマで構築した機械学習によるCO₂フラックス推定結果(サポートベクタ回帰)。

この結果は、本サブテーマの推定結果(観測データに基づく機械学習による推定)が妥当な結果を提示することを示す。さらに本サブテーマの成果は1kmといった高空間解像度の解析にも有用なデータであることから、トップダウン法での比較的粗い解像度の結果をより詳細の空間解像度で解析できるといった大きな長所がある。

静止気象衛星ひまわり8号を用いた陸面状況のモニタリングに関しては、植生の乾燥度の早期モニタリングを実現させることを目的に、その基盤データセットとなる、地表面温度のアルゴリズムを既存手法の相互比較により選定した。図2-5は相互比較の結果を示し、地表面温度の推定誤差の空間分布を示している。静止気象衛星の熱赤外域の観測データを用いて推定できる3つの代表的な手法の相互比較を行うことにより、(c)のYAMアルゴリズム(Yamamoto et al. 2018)が空間的な推定誤差の違いが最も小さくなっており、ひまわり8号のようにセンサの位置が固定されており、角ピクセル毎に観測条件が異なる静止軌道の衛星に対しては有効であることが分かった。

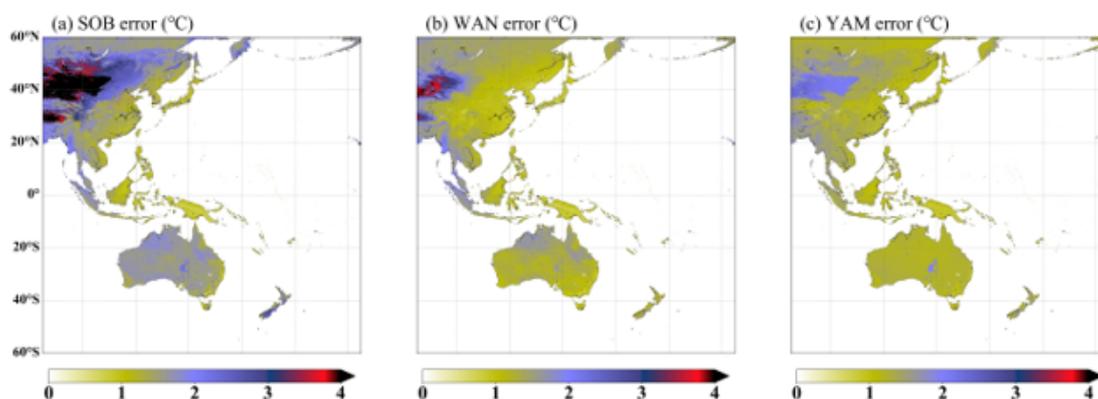


図2-5. 2018年10月の02:30-03:30 UTCに推定された地表面温度の平均推定誤差 (a-c)の空間分布(Yamamoto et al. 2022). (a)はSOBアルゴリズム、(b)はWANアルゴリズム、(c)はYAMアルゴリズム(Yamamoto et al. 2018)の推定誤差分布. 推定誤差はセンサ天頂角や地表面温度、可降水量とともに増大する傾向があるが、YAMアルゴリズムはその傾向が最も弱く、約1°Cの安定した誤差が広域に分布。

静止気象衛星ひまわり8号を用いた陸域植生の光合成量の推定については、東アジア4サイトにおいて、推定モデルの改善を試みた。EC-LUEモデルに対して、観測データを用いてRMSE誤差が最小になるようにモデルパラメータのフィッティングを行った結果である。まず、各サイト毎にデータをすべて利用した際のモデルの再現性については、パラメータフィッティングをすることによりおおむね再現できる結果となった。

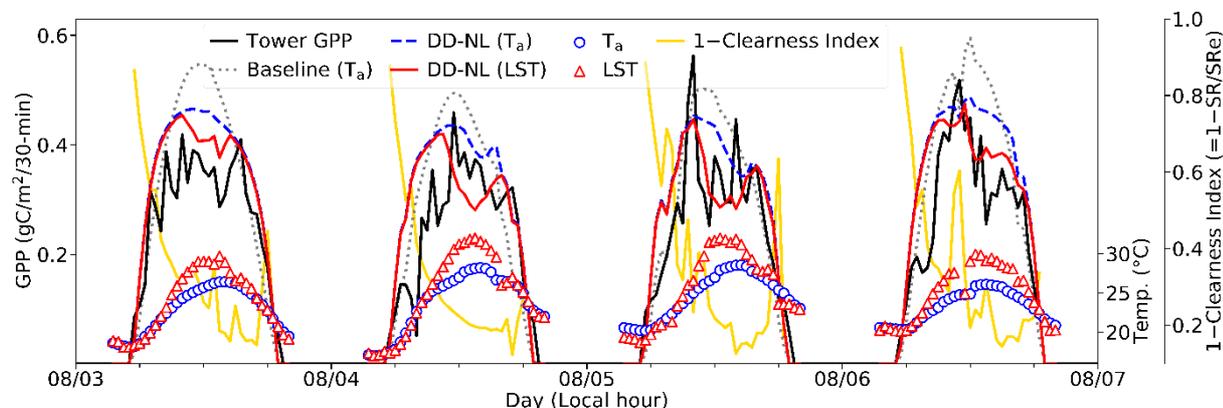


図2-6. 高山サイトにおける2018年8月猛暑時における光合成量と気象パラメータの変化. 光合成量はEC-LUEモデルで計算した. 入力の温度として、気温、地表面温度の入力を試行し、観測された光合成量の日変動を再現できるか確認した。

そのモデルに対して、地表面温度を入力に用いて光合成量を計算した結果、2018年8月の猛暑時においては、地表面温度を入力としたモデル(図2-6. 赤線DD-NL(LST))は、気温を入力としたモデル(図2-6. 青点線DD-NL(Ta))に比較して、観測された光合成量の日内変動をより再現できた。これは日内での光合成の減少を衛星観測データをもとにして検出できることを示している。ひまわりデータは即時性が高いため、光合成の減少を早期に検出できることにつながる。

GOSATなど観測データを用いた温室効果ガス収支解析

図2-7に、GOSAT-2/TANSO-FTS-2のTIRバンドから導出したCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直濃度分布データを航空機観測の鉛直濃度分布データと比較した結果を示す。CO₂については、領域に依存した濃度バイアスが見られるものの、概ね0.5-1%程度の確度で航空機観測データと一致していた。CH₄およびN₂Oについては、0.5-2%程度以内で航空機観測データと一致していたが、CO₂と比べて全体に濃度のバラつきが大きいことがわかった。しかしながら、開発中の濃度導出アルゴリズムを適用することにより、CH₄およびN₂Oについてはデータ質が大幅に改善することが確認できており、GOSATデータと併せて、大気輸送モデルとの比較に有用なCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直濃度分布の全球3次元データセットを作成することができたと考える。

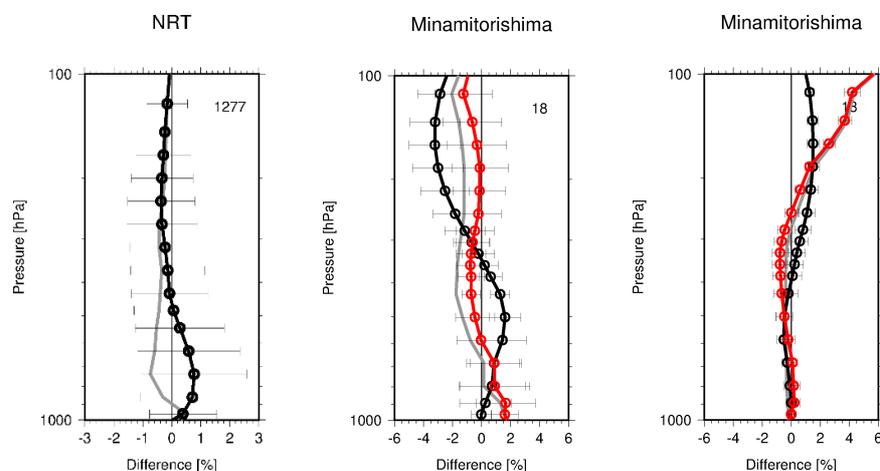


図2-7. GOSAT-2/TANSO-FTS-2の(左)成田上空のCO₂、(中)南鳥島上空のCH₄、(右)南鳥島上空のN₂Oの鉛直濃度分布と近傍の航空機観測の鉛直濃度分布の比較結果(衛星-航空機)の一例。黒線はアベレーシングカーネルを適用した航空機観測データと衛星データの差分の平均値、赤線はオリジナルの航空機観測データと衛星データの差分の平均値、灰線はオリジナルの航空機観測データと衛星のアプリオリデータの差分の平均値、図中の数字は比較した近傍観測ペア数である。

検証済のGOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドのCH₄鉛直濃度分布データとMIROC4-ACTMのCH₄鉛直濃度分布データを比較した結果、上部対流圏では、両者のCH₄濃度分布が互いにより一致を示していた。上部対流圏のCH₄の高濃度域は、1-3月は熱帯の南半球側にあり、7-9月にはITCZが北方に遷移するに伴って北西側に移動していた。また、7-9月の特徴として、チベット高原～インド上空にインドーガンジス平原で排出され上空に輸送されたCH₄の高濃度域があり、夏モンスーン性高気圧の南端の東風によって高濃度CH₄が大西洋および南半球に輸送されていた。一方、インド洋や太平洋では夏モンスーンによってCH₄の輸送が阻害されていることがわかった。図2-8に、上部対流圏の低緯度(10°S-10°N)についてCH₄の移流傾向を計算した結果を示す。CH₄の移流傾向を解析した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 熱帯南アメリカ(図2-8: 青紫)、熱帯アフリカ(図2-8: 緑と黄)、東南アジア(図2-8: 赤紫)において年間を通して最も活発に半球輸送が起こっている。
- (2) これらの領域では移流傾向がどの季節も負(北半球から南半球へ輸送される)になっており、北半球で排出された物質が南半球へ輸送され、効率的に全球に「分配」される。一方、熱帯インド

洋（図2-2：オレンジ）では夏モンスーンの影響で半球輸送に大きな季節性があること、熱帯アフリカも東西（緑と黄）で夏モンスーンの影響が異なっている。

- (3) 北半球の夏季は ITCZ の位置が北方に遷移しているため多くの領域で移流傾向が正（南半球から北半球への輸送）となっているが、熱帯アフリカ東部（図2-2：黄）では8月から9月にかけて南半球への輸送が強化される。

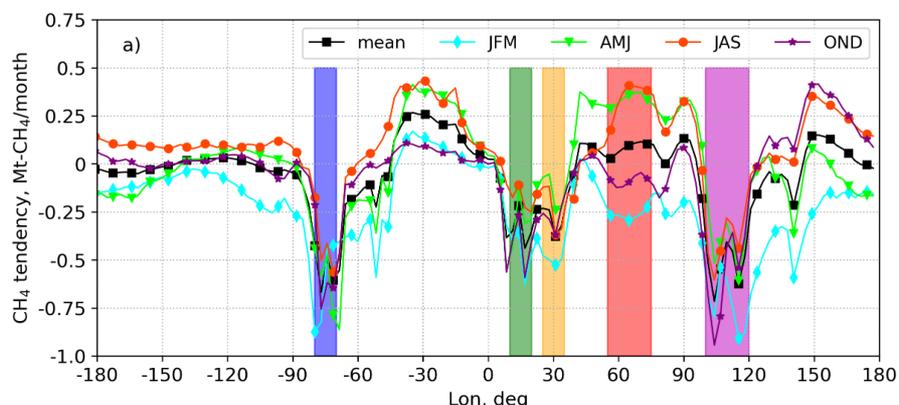


図2-8. MIROC4-ACTMから算出した熱帯（10°S-10°N）の上部対流圏における2010-2013年の季節平均のCH₄の質量フラックスの移流傾向 [Mt-CH₄/月]。正の値は北半球へ、負の値は南半球へ向かう傾向を示している。カラーは季節（JFM、AMJ、JAS、OND）を表している。

図2-9および図2-10に、MIROC4-ACTMを用いて推定した2000-2020年のCH₄排出量[Tg/yr]を15地域に分類して示す。全球CH₄総排出量は2000-2005年の526 Tg/yr（25-75パーセントイル：512-550 Tg/yr）から2015-2020年の568 Tg/yr（554-586 Tg/yr）に増加しており、東アジア、東南アジア、南アジア、ブラジル、中央アフリカの5つの地域がCH₄総排出量の約半分弱を占めていた（2000-2005年は46%、2015-2020年は48%）。

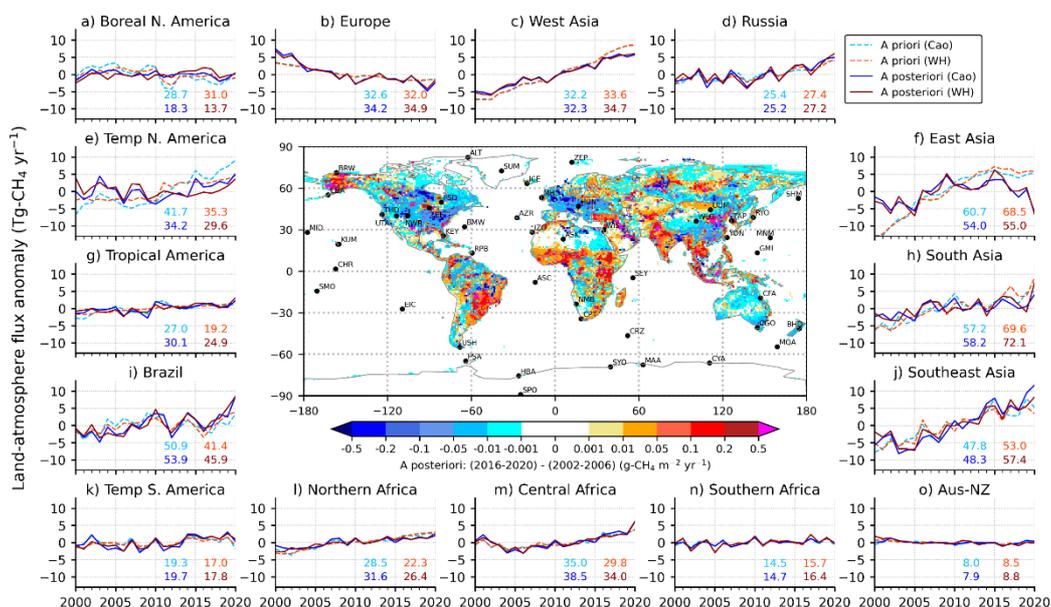


図2-9. MIROC4-ACTMの逆解析による2000-2020年の領域別CH₄排出量。中央のパネルに2002-2006年と2016-2020年のCH₄排出量の事後推定値の差分を示す。周囲のパネルは各地域のCH₄排出量の事後推定値の長期平均（2000-2020年）を差し引いて算出したCH₄排出量の偏差であり、各パネルの数字はアプリオリ（上段）および事後推定値（下段）の長期平均CH₄排出量[Tg/yr]である。

2000-2020年のCH₄排出量の特徴から全球を3つのグループに分けることができ、第1のグループであるヨーロッパは過去20年間にわたり排出量が減少していた。北アメリカとオーストラリア・ニュージーランドも第1のグループに属すると考えられるが、着実に減少しているのはヨーロッパだけであった。第2のグループの南部アフリカと熱帯アメリカはほぼ一定のCH₄排出量を維持していた。第3のグループは、ほとんどの地域、特にアジアで構成されており、CH₄排出量は増加傾向を示していた。

東アジア、南アジア、東南アジアは世界の人為起源CH₄排出量の30%以上を占める主要地域であり (Stavert et al., 2022)、東アジアと南アジアのCH₄排出の大部分 (75%以上) が人為起源である。地域的には、東アジア、西アジア、南アジア、東南アジアが、2000年から2017年の間に世界のCH₄排出量が約10% (50~70 Tg-CH₄) 増加した最大の要因である (Jackson et al., 2020)。中国と中東のCH₄増加は化石燃料による排出が要因であり、東アジアからの石炭排出の増加だけで過去10年間の世界のCH₄排出量増加の~15%を占めている。近年、石炭が減少しているにもかかわらず (Liu et al., 2021; Scarpelli et al., 2022)、中国と南アジアは合わせて世界の人為起源CH₄排出量の29%を占めている (Stavert et al., 2022)。南アジアでのCH₄排出量の増加は主に家畜と廃棄物に起因しているが、東南アジアでのCH₄排出量の増加は石炭、水田、家畜、廃棄物からの寄与がほぼ同等である (Janssens-Maenhout et al., 2019)。本研究を含め、それぞれ異なるインベントリを用いて主要国の石炭、石油、ガス採掘からのCH₄排出量を推定している複数の研究グループの推定結果は、特に石油およびガス採掘からのCH₄排出量で不一致がより顕著であり、この主な原因はサブセクターのデータソースの違いであると推測される。

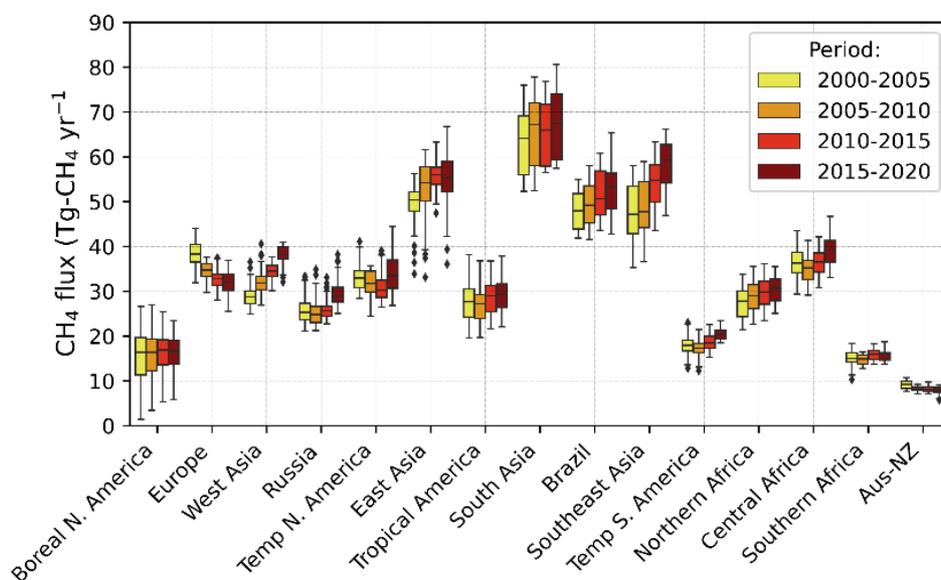


図2-10. 各地域の異なる期間におけるCH₄総排出量の推定値の箱ひげ図。異なるアプリアリおよび逆解析の設定で計算された推定値を各期間について平均した。箱は25-75パーセンタイルの範囲、シンボルは外れ値、ひげは外れ値を除いた最小値と最大値を表す。

図2-11および図2-12に、異なるOHの濃度場 (OH_{CLM}とOH_{IATV}) を与えた場合のCH₄排出量の推定値の比較結果を示す。OHの濃度場を変えた場合の2001年から2020年のCH₄排出量は、北半球中緯度域と北半球熱帯域で大きな差が生じていることがわかる (図2-11d, g)。OH濃度の変動により、北半球中緯度域のCH₄総排出量は177.1 (OH_{CLM}) から186.1 (OH_{IATV}) に9.0 Tg-CH₄ yr⁻¹増加し、一方、熱帯域ではCH₄総排出量は212.1 (OH_{CLM}) から202.6 (OH_{IATV}) に9.4 Tg-CH₄ yr⁻¹減少し、人為的要因および自然要因のCH₄排出量への影響はそれぞれ約65%、約35%であることがわかった。OH_{IATV}およびOH_{CLM}を与えた場合の逆解析による全球のCH₄総排出量の推定値の差から、OH_{IATV}を与えた場合のCH₄排出量の推定値がOH_{CLM}の推定値に対して正の影響を与える期間 (2000-2004年、2011-2014年、2017-2019年) と負の影響を与える期間 (2004-2011年、2014-2017年、2019-2020年) があることがわかる (図2-11p)。これらの期間について、OH_{IATV}およびOH_{CLM}のCH₄

排出量の推定値の差分の空間分布を比較したところ、いくつかの共通パターンが見られた。アメリカ西部、カナダ南東部、アラスカ、ユーラシア大陸中央部、スカンジナビア、日本については強い正の影響を示しており、逆に、アフリカ北部、西ヨーロッパ、ユーラシア北東部、熱帯アメリカは強い負の影響を示していた。インド、熱帯南米、アフリカ南部および東部は、 OH_{IAV} と OH_{CLM} の CH_4 排出量の推定値の差分の変動が最も大きく、影響の正負が期間によって逆転していた（図2-12）。 OH_{IAV} と OH_{CLM} の CH_4 排出量の推定値の差分は2006年と2012年に最小値と最大値を取っており、2006年から2012年にかけてそれぞれ25.2 Tg- CH_4 、55.5 Tg- CH_4 の有意な排出量の増加を示していた。2006-2012年で OH_{IAV} を与えた場合の CH_4 排出量は OH_{CLM} の CH_4 排出量よりさらに30.3 Tg- CH_4 の排出量の増加を示しており、これは主にアジアでの CH_4 排出量の増加によるものである。地理的な内訳を見ると、西アジア、南アジア、東アジア、東南アジアの合計で22.9 Tg- CH_4 がこの増加に寄与していた。この結果より、この期間の全球 CH_4 排出量の増加においてこれらのアジア地域が重要な役割を果たしたことが明らかになった。さらに、中国上空では、 OH_{IAV} を与えた場合の逆解析で CH_4 排出量が年平均で10 Tg- CH_4 増加していた。これはOHラジカルとの化学反応による大気中の CH_4 の消失量が増加したことによる結果である。観測されたOHレベルの上昇に大きく寄与しているのは窒素酸化物（ NO_x ）と一酸化炭素（CO）の排出であり、 NO_x やCOの排出は大気中にOHの追加的な発生源をもたらすことから、領域別の CH_4 収支推定を行う上で大気化学が中心的な役割を果たしていることを示している。

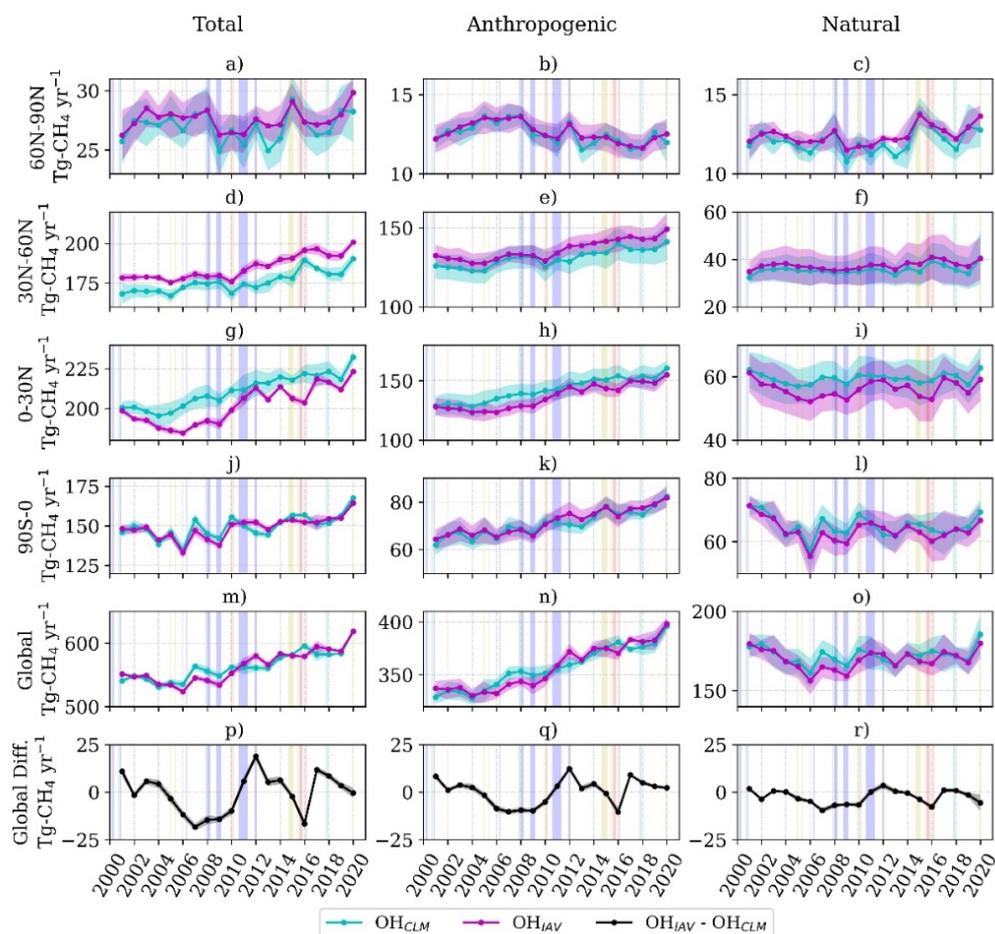


図2-11. OH_{CLM} と OH_{IAV} を与えてMIROC4-ACTMによる逆解析によって推定した CH_4 排出量 (Tg- CH_4 yr⁻¹) の時系列を、4つの緯度帯（上から1-4パネル目）と全球（5パネル目）に分けて、総排出量（左）、人為起源排出量（中）、自然起源排出量（右）の3つのカテゴリーで示した。6パネル目は OH_{CLM} と OH_{IAV} の CH_4 排出量の推定値の差分を示している。背景の陰影はENSO指数を示す。

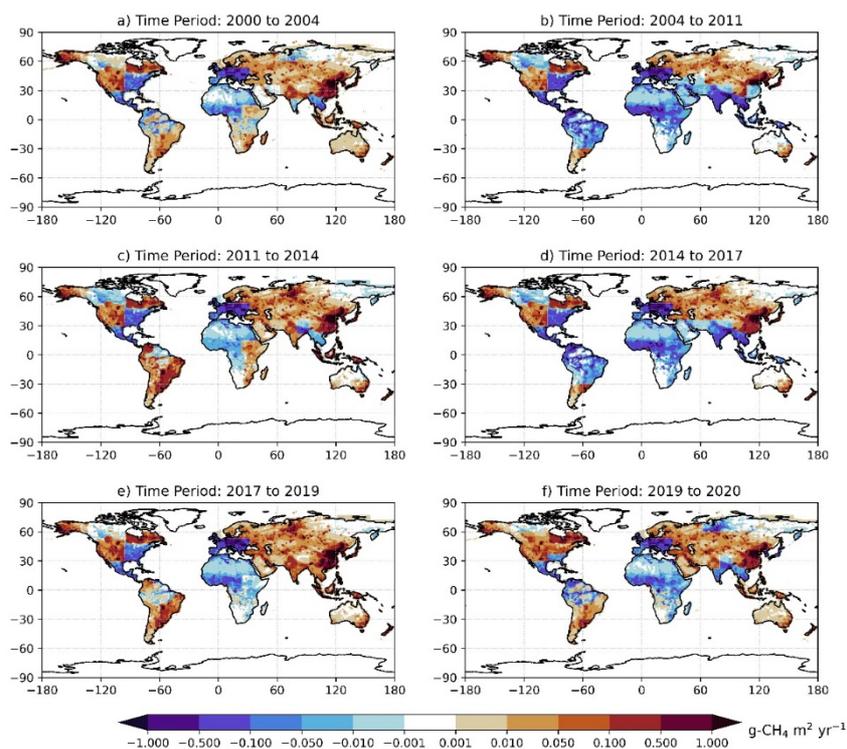


図2-12. OH_{CLM} と OH_{IAV} を与えてMIROC4-ACTMによる逆解析によって推定した期間ごとの CH_4 排出量の差分 ($g-CH_4 m^2 yr^{-1}$) の空間分布. (a) 2000-2004年、(b) 2004-2011年、(c) 2011-2014年、(d) 2014-2017年、(e) 2017-2019年、(f) 2019-2020年。

図2-13に、全球の地上観測データ (ObsPack GLOBALVIEW) にNTLおよびCLAのフラスコサンプリングデータを加えて、MIROC4-ACTMの逆解析により CH_4 の収支推定を行った場合の誤差低減率 (事前誤差と事後推定誤差の比較) を示す。2013年から2020年までのNTLおよびCLA観測データを用いた逆解析により、ObsPack GLOBALVIEWデータのみを用いた逆解析からさらに最大40%も誤差が低減することがわかった。このことは、NTLおよびCLAのフラスコサンプリング観測の重要性を示すものである。図2-14より、南アジアにおけるフラスコサンプリングデータを追加した効果は、NTLの観測が開始された2006年以降に明らかに見られる (図2-14a)。

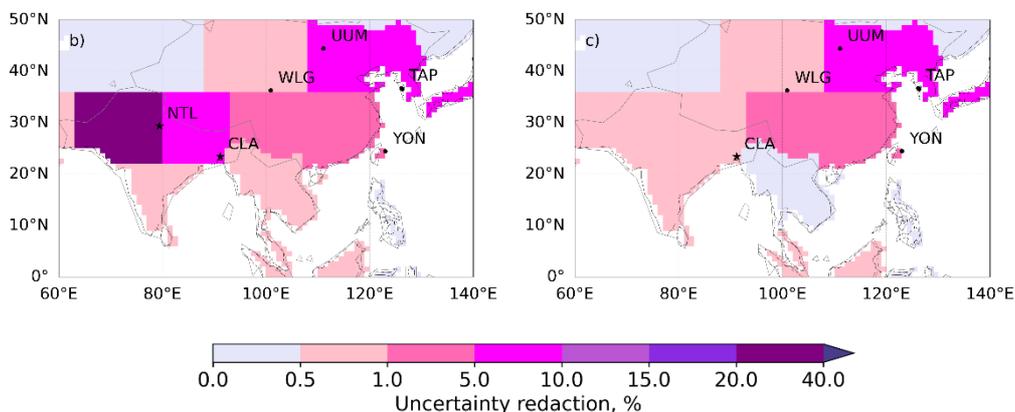


図2-13. MIROC4-ACTMの逆解析により CH_4 の収支推定を行った場合の標準計算 (ObsPack GLOBALVIEWデータのみ使用) からの誤差低減率. (b) CLAとNTLの観測データを両方追加した場合、c)CLAの観測データのみを追加した場合。誤差低減率が低い領域は CH_4 の収支推定値がアプリアリ値より変化しない (情報もたらされない) ことを示す。

NTLの観測データは、数年にわたって事後推定のCH₄フラックスを増加させていることがわかる。これに対し、2012年に観測が開始されたCLAの観測データを追加したことによるCH₄フラックスの増加は顕著ではない。特にCLAの観測データはCH₄濃度の変動が大きく、多くの外れ値があり、これが逆解析によるCH₄収支推定の安定性と信頼性を低下させているものと考えられる。NTLおよびCLAの観測データを用いた逆解析では、農業セクターのCH₄フラックスが修正されることによって、トータルフラックスの季節サイクルが変化した。アプリアリのCH₄フラックスには8月に1つのピークが現れていたが、事後推定のCH₄フラックスには5月と9月に2つのピークが現れていた。これは、夏作物の圃場準備や稲の刈り取り段階の水田からのCH₄排出に関連している可能性が高い。本研究により、NTLとCLAの観測データは主に南アジアの北東部（インドーガンジス平原）のCH₄の変動に感度があるものの、インド南部の情報量は乏しいことが明らかになった。今後は、後方流跡線解析を実施し、南アジアのCH₄の変動に感度がある観測サイトを選定するなど、観測網を中央と南インドまで拡張する必要があることが示唆される。

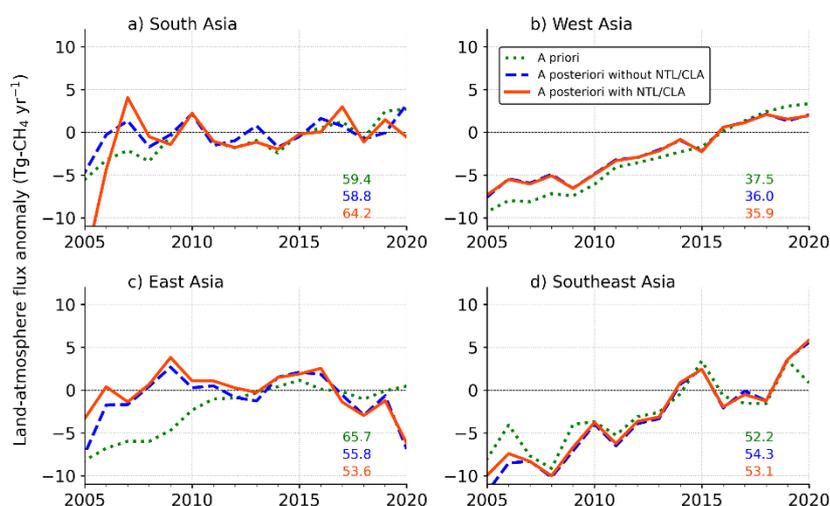


図2-14. MIROC4-ACTMの逆解析により推定した各領域のCH₄排出量アノマリーのアプリアリ、標準計算（ObsPack GLOBALVIEWデータのみ使用）、CLAとNTLの観測データを両方追加した場合の時系列（2005～2021年）。各領域の個々の推定値の長期平均（2013～2020年）を差し引いて排出量の平年値を計算した。各パネルの数字はアプリアリと事後推定の長期平均CH₄排出量（単位：Tg-CH₄ yr⁻¹）である。

観測データを活用した陸域炭素循環モデルの改良

モデルパラメータ最適化のルーチンの構築にあたっては、C言語で記載されているVISITモデル全体に対して、Pythonによる最適化ルーチンよりVISITモデルを呼び出す形で構築した。今回は差分進化法をパラメータ最適化アルゴリズムに選定した。まずはVISITモデルをデフォルトパラメータセットで実行したところ、図2-15のように観測値に対してモデルはGPPを過大評価していた（青線）。VISITモデルそこでGPPは炭素循環における大気と陸域のCO₂交換の重要な最初の入力フラックスであるために、GPPの修正を試みている。今回構築したパラメータ最適化では、RMSEを最小になるパラメータを選定するようにした。本最適化を適用した結果、今回の最適化の対象パラメータとした最大光合成能力(pmax)について、観測値に近づくような形でpmaxの値は初期状態の値（デフォルト値）に比較して小さい値が推定され、観測された光合成量に対してRMSE値も低下した（デフォルトモデル→最適化モデルにおいて、RMSE=2.34 → 2.11 gC/m²/dと低下）。このように今回構築したパラメータ最適化を通したモデル・データの統合システムが妥当に動作することを確認できた。一方で、GPPの大きさに関しては、最適化を通して、改善されることを確認できたが、春や秋におけるGPPの変化のタイミングが現在のモデルでは再現できていない。これらの改善には、VISITモデルに含まれるフェノロジーモデルの改良などが必要である。

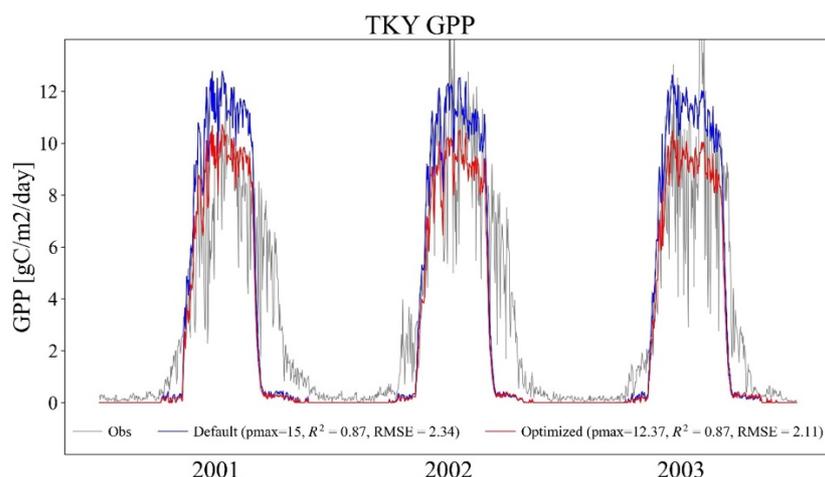


図2-15. 陸域生態系モデルVISITを用いたパラメータ最適化を通じたモデル改良実験の結果の一例. 高山フラックスサイトにおける実験. モデル（改善前後）出力値、観測値の光合成量の日別変動を示している. また、デフォルトのモデルパラメータは $p_{max} = 15$ 、改善後は $p_{max} = 12.37$ となった.

さらに陸域生態系モデルVISITの出力とサポートベクタ回帰による推定結果を比較した(図2-16)。シベリア域については、VISITモデルとサポートベクタ回帰の両者の長期変動の傾きは異なるものの、経年変動のパターンは一致している。一方、東アジア・南アジアについては、長期変動成分の傾きは非常に近いものの、東アジアでは経年変動は両者の一致は良好ではない、南アジアは良好である。東南アジアについては、VISITモデルではサポートベクタ回帰による推定に比較して経年変動が大きかった。東南アジアでは雲被覆が多いため衛星データを主体とするサポートベクター回帰モデルは東南アジアでは推定の不確実性が高い可能性がある。

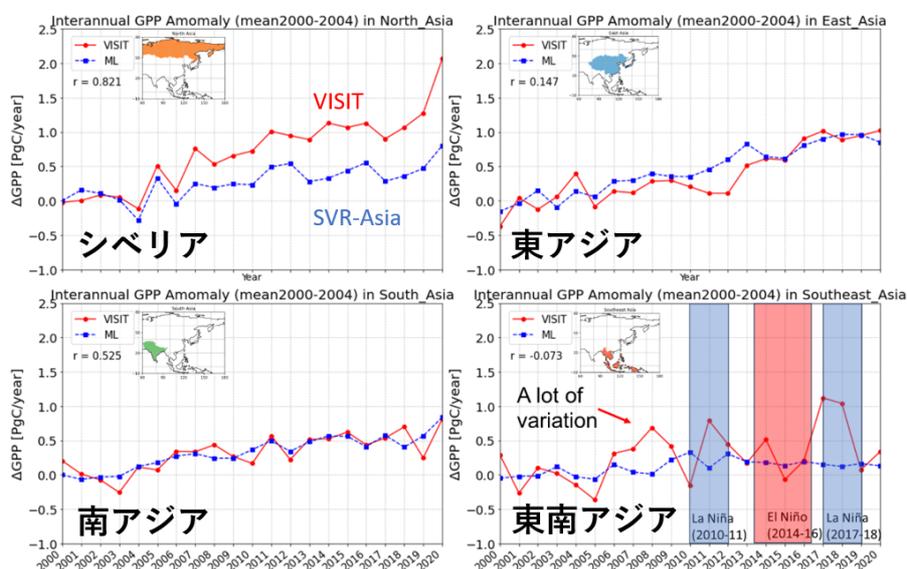


図2-16. アジア4地域における陸域生態系モデルVISITとサポートベクタ回帰モデルによる光合成量の経年変動。

迅速なシステム構築

本研究では主に衛星観測に基づく陸域炭素フラックス推定手法に着目し、サポートベクター回帰による推定と、衛星データ利用型のBESSモデルの両者について、半自動化を試み、結果の一部を千葉大学環境リモートセンシング研究センターで開発を進めるCEReSphere上で可視化できるようにした。

両者の陸域炭素フラックス推定手法について、動作プログラムを組みなおし、対象年・対象日を入力

することで入力データ取得から結果の作図までを自動で遂行できるようにした。その結果の一部をCEReSphereで表示した一例を図2-17に示す。

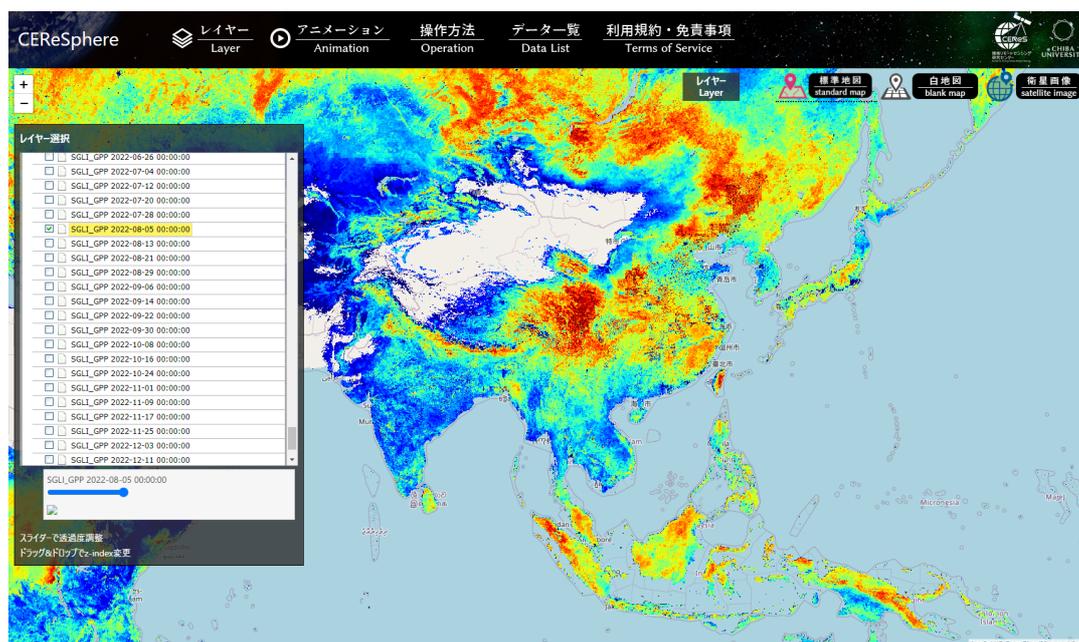


図2-17. 可視化システム上に掲載した衛星データ重視型モデル(BESS)による光合成量の空間分布。

URL: https://ceresphere-data.cr.chiba-u.jp/cmap_layer/

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

地上観測データに基づくアップスケールについて、1kmスケールでのAsiaFluxやFLUXNET観測ネットワークデータと衛星データを活用した広域推定結果がテーマ2-2のトップダウン推定と変動が一致するなど良好な結果を示した。さらにはモンゴルの研究者との共同研究に発展するなどの波及性も高い。一方、ひまわり8号を活用した光合成量の推定と関連する地表面温度の評価(成果12)も試み、猛暑による植生のダメージを検出できることが分かるなど即時性の高い変動の検出を可能にした。

GOSAT/TANSO-FTS、GOSAT-2/TANSO-FTS-2の熱赤外バンドからCO₂、CH₄、N₂Oの鉛直濃度プロファイルを高精度に導出し、全球で各種の航空機観測等との比較にもとづいてデータ質を検証したうえで、衛星の鉛直濃度プロファイルとMIROC4-ACTMによるシミュレーション結果を比較し、CH₄の半球輸送のプロセスを明らかにする(成果11)など、GHG収支推定に資するデータセットを構築した。また、トップダウン型の逆解析により全球および54の領域別の2000-2020年のCH₄収支を年毎に推定し、大気中のOH濃度の変動がCH₄収支推定に与える影響を評価し、本課題で実施している南アジアのフラスコサンプリング観測のCH₄収支推定における有用性を示すことができた(成果12)。

本サブテーマの独自手法であるアップスケール手法に関して、作業をルーチン化させることにより、容易に更新が可能なシステムとして作成した。さらに本サブテーマの手法を中心に、早期に解析の可能な作業フローを確立した。具体的には2020年の春のシベリアの異常高温イベントに対して、雪、植生指数、葉面積指数などの様々なデータセットをルーチン的に生成し、アノマリの検出といった普遍的な処理を行うことによって、異常高温が陸域炭素収支に及ぼす影響を解析できるようにした。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 成果の件数

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

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Ito, A., Inoue, S., and Inatomi, M.: Model-based evaluation of methane emissions from paddy fields in East Asia, <i>J. Agric. Meteorol.</i> , 78, 56-65, 10.2480/agrmet.D-21-00037, 2022. 国立環境研究所・地球環境研究センターニュース (Vol. 33 No. 3) よりオンライン紹介 https://cger.nies.go.jp/cgernews/202206/379006.html
2	Chandra, N., Patra, P. K., Niwa, Y., Ito, A., Iida, Y., Goto, D., Morimoto, S., Kondo, M., Takigawa, M., Hajima, T., and Watanabe, M.: Estimated regional CO ₂ flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO ₂ inversions, <i>Atm. Chem. Phys.</i> , 22, 9215-9243, 10.5194/acp-22-9215-2022, 2022.
3	Niwa, Y., Ishijima, K., Ito, A., and Iida, Y.: Toward a long-term atmospheric CO ₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO ₂ v2021.1, <i>Progress in Earth and Planetary Science</i> , 9, 42, 10.1186/s40645-022-00502-6, 2022.

	国立環境研究所・地球環境研究センターニュース (Vol.33 No.8) よりオンライン紹介 https://cger.nies.go.jp/cgernews/202211/384004.html
4	Patra, P. K., Dlugokencky, E. J., Elkins, J. W., Dutton, G. S., Tohjima, Y., Sasakawa, M., Ito, A., Weiss, R. F., Manizza, M., Krummel, P. B., Prinn, R. G., O’Doherty, S., Bianchi, D., Nevison, C., Solazzo, E., Lee, H., Joo, S., Kort, E. A., Maity, S., and Takigawa, M.: Forward and inverse modelling of atmospheric nitrous oxide using MOROC4 – Atmospheric Chemistry-Transport Model, <i>J. Meteor. Soc. Jpn.</i> , 100, 361-386, https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-018 , 2022.
5	Ito, A.: 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 , 2023. 国立環境研究所・地球環境研究センターニュース (Vol.34 No.9) よりオンライン紹介 https://cger.nies.go.jp/cgernews/202312/397002.html
6	Ito, A., Patra, P. K., and Umezawa, T.: Bottom-up evaluation of the methane budget in Asia and its subregions, <i>Global Biogeochem. Cycles</i> , 37, e2023GB007723, https://doi.org/10.1029/2023GB007723 , 2023. 2023年6月16日 国立環境研究所よりプレスリリース実施およびSNS配信 https://www.nies.go.jp/whatsnew/2023/20230616/20230616.html
7	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.: Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH ₄ models, <i>Geophys. Res. Lett.</i> , 50, e2023GL103037, https://doi.org/10.1029/2023GL103037 , 2023. 2023年9月26日 国立環境研究所よりプレスリリース実施およびSNS配信 https://www.nies.go.jp/whatsnew/2023/20230926/20230926.html
8	Tohjima, Y., Niwa, Y., Patra, P. K., Mukai, H., Machida, T., Sasakawa, M., Tsuboi, K., Saito, K., and Ito, A.: Near-real-time estimation of fossil fuel CO ₂ estimation from China based on atmospheric observations on Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, <i>Progress in Earth and Planetary Science</i> , 10, 10, 10.1186/s40645-023-00542-6, 2023. 国立環境研究所・地球環境研究センターニュース (Vol.33 No.3) よりオンライン紹介 https://cger.nies.go.jp/cgernews/202206/379004.html
9	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 Biogeochem. Cycles</i> , 38, e2023GB007865, https://doi.org/10.1029/2023GB007865 . 国立環境研究所・地球環境研究センターニュース (Vol.35 No.1) よりオンライン紹介 https://cger.nies.go.jp/cgernews/202404/401006.html
10	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> . [受理済、2024年5月出版予定、プレスリリース準備中]

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
11	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, J. Geophys. Res., 127, 14. https://doi.org/10.1029/2021JD035688
12	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, ISPRS J. Photogramm. Remote Sen, 191, 171-187. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.008 .
13	Tibrewal, K. et al. (2024) Assessment of methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions, Commun. Earth & Environment, 5, 26. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01190-w .

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

< その他誌上発表（査読なし） >

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
14	持田陸宏、伊藤昭彦、松田和秀、谷晃：大気化学研究，陸域生態系と大気化学（第47号），047A05（2022）日本の研究活動例としてSII-8を紹介
15	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、地球環境、26、101-110.
16	伊藤昭彦、特集：温室効果ガスを「見る」ための科学 グローバル・ストックテイクに向けた広域観測の必要性、国環研ニュース 41(6) p2.
17	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
18	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
19	Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2024, NIES/JAMSTEC/MRI/Chiba University https://www.nies.go.jp/sii8_project/img/SII8_GHG2024_J.pdf

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
20	伊藤昭彦、丹羽洋介、羽島知洋、三枝信子、プラビール・パトラ、市井和仁、日本地球惑星連合2021年大会（2021、オンライン発表）パリ協定グローバルストックテイクに向けたマルチスケール温室効果ガス監視システムの構築
21	A. ITO, Y. NIWA, T. HAJIMA, N. SAIGUSA, Y. TOHJIMA, M. ISHII, P. Patra, K. ICHII: European Geoscience Union (2021, 国外online) Development of a multi-scale greenhouse gas budget estimation system in Japan
22	A. ITO, Y. NIWA, T. HAJIMA, N. SAIGUSA, Y. TOHJIMA, P. Patra, K. ICHII: Asia-Oceania Geophysical Society (2021, 国外online) Toward multi-scale greenhouse gas monitoring system for supporting the global stocktake
23	伊藤昭彦、井上晋平、稲富素子、日本農業気象学会2022年全国大会（2022、オンライン発表）、プロセスモデルを用いた東アジア水田からのメタン放出量推定
24	A. Ito. GHG monitoring project of Japan for the Global Stocktake 2023. WMO GHG / Carbon Monitoring Workshop. オンライン発表
25	A. ITO, Y. NIWA, T. HAJIMA, N. SAIGUSA, Y. TOHJIMA, M. ISHII, P. Patra, K. ICHII: American Geophysical Union (2021, 国外online) Toward developing a multi-scale estimation system of greenhouse gas budgets in Asia for supporting the Global Stocktake
26	A. ITO, American Geophysical Union 2022 Fall Meeting, Chicago, USA (2022) Development of a multi-scale monitoring system of carbon and greenhouse gas budgets in Asia-Pacific region. 現地ポスター発表
27	A. ITO, iLEAPS-OzFlux Joint Conference, Auckland, New Zealand (2023) Bottom-up evaluation of CH ₄ and N ₂ O budget at regional scales. 現地ポスター発表
28	A. ITO, Global Climate Change Symposium (2023、韓国ソウル国立大) Bottom-up evaluation of CH ₄ budget in Asia and contribution to the Global Stocktake. 現地での招待講演
29	伊藤昭彦、日本気象学会2023年秋季大会（2023、仙台国際センター）湿原モデルによる高緯度域の低温期CH ₄ 放出量の推定、口頭発表
30	伊藤昭彦、日本生態学会第71回全国大会（2024、オンライン）気候変動と土地利用を考慮したシロアリによるメタン放出のグローバルな推定

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
----------	-------------------------

31	D. BELIKOV, N. SAITOH, P. K. PATRA: 日本地球惑星科学連合2021年大会 (2021, online) The interhemispheric transport pathways of methane as observed by GOSAT and simulated by ACTM.
32	張鼎坤, 齋藤尚子, D. BELIKOV, P. K. PATRA, N. CHANDRA: 日本地球惑星科学連合2021年大会 (2021, online) MIROC4-ACTMモデルを用いたインド上空のメタン高度分布の特徴解析.
33	J. S. H. BISHT, P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, T. SEKIYA, Y. KANAYA and N. SAITOH: 日本地球惑星科学連合2021年大会 (2021, on line) CH ₄ surface flux estimation based on local ensemble transform Kalman filter.
34	N. SAITOH, R. IMASU, K. SHIOMI: 日本地球惑星科学連合2021年大会 (2021, online) Data quality of GOSAT-2/TANSO-FTS-2 GHG profile data retrieved from the V102.102 radiance spectra.
35	D. BELIKOV, N. SAITOH, P. K. PATRA: 17th IWGGMS (2021, online) An analysis of interhemispheric transport pathways of methane as observed by GOSAT-TIR.
36	J. S. H. BISHT, P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, T. SEKIYA, Y. KANAYA and N. SAITOH: 17th IWGGMS (2021, online) Estimation of CH ₄ emissions based on LETKF data assimilation technique.
37	J. S. H. BISHT, P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, T. SEKIYA, Y. KANAYA and N. SAITOH: 第26回大気化学討論会 (2021, online) CH ₄ surface flux estimation using local ensemble transform Kalman filter.
38	D. BELIKOV: CITES-2021 (2021, hybrid/Moscow) Methane remote sensing from space: new insights from vertical profiles observations.
39	K. ICHII: The 14th AOGeo Symposium (2021, online, Keynote Speech) Current Status of Climate and Carbon Cycle: Findings from the IPCC 6th Assessment Report
40	Y. SHIKAKURA, K. ICHII, Y. YAMAMOTO, M. KANG, Y. RYU: AsiaFlux Conference 2021 (2021, online) Estimating diurnal GPP variation in East Asia using Himawari-8 data.
41	D. BELIKOV, N. SAITOH, Y. TERA0, P. K. PATRA: AGU Fall Meeting 2021 (2021, online) Regional characteristics of CO ₂ and CH ₄ in South Asia derived by GOSAT and ground-based observations.
42	N. SAITOH, R. IMASU, K. SHIOMI: AGU Fall Meeting 2021 (2021, online) GHG and temperature profiles retrieved from GOSAT-2/TANSO-FTS-2 TIR spectra.
43	D. BELIKOV, P. K. PATRA, N. SAITOH, N. CHANDRA, Y. TERA0: 日本地球惑星科学連合2022年大会 (2022, hybrid/幕張) Estimation of regional CH ₄ flux based on an ensemble of atmospheric inversions.
44	T. TAGUCHI, K. ICHII: 日本地球惑星科学連合2022年大会 (2022, hybrid/幕張): Assessment of future carbon cycle of CMIP5 and CMIP6 Models in tropical forests.
45	K. ICHII, T. TAGUCHI, D. BELIKOV, Y. YAMAMOTO, P. PATRA, S. KOTSUKI, K. SUZUKI, T. HIYAMA: 日本地球惑星科学連合2022年大会 (2022, hybrid/幕張): Impact of anomalous high temperature in the 2020 spring-summer season on terrestrial carbon cycle across Siberia
46	D. BELIKOV, N. SAITOH, P. K. PATRA: 18th IWGGMS (2022, hybrid) An analysis of GOSAT-TIR observation sensitivity to the near-surface CH ₄ .
47	D. BELIKOV, Y. TERA0, P. K. PATRA, N. SAITOH, N. CHANDRA: 日本気象学会2022年秋季大会 (2022, 札幌) Assessment of the impact of observations at Nainital (India) and Comilla (Bangladesh) on the CH ₄ flux inversion.
48	田口琢斗, 市井和仁, 山本雄平, Dmitry Belikov, 小槻峻司, Prabir K. Patra, Naveen Chandra, 鈴木和良, 檜山哲哉: 日本気象学会 2022年度秋季大会 (2022, 札幌) シベリア全域で発生した2020年の異常高温が陸域炭素循環に及ぼした影響
49	Xieaili Reyila, Zhang Beichen, 山本雄平, 市井和仁: 日本リモートセンシング学会第73回 (令和4年度秋季) 学術講演会 (2022, 津) 中央アジアの長期的な植生変動に対する気候的および非気候的影響
50	D. BELIKOV, B. BELAN, M. ARSHINOV, N. SAITOH, P. PATRA: ISAR-7 (2023, 立川) Estimation of the Arctic CH ₄ flux based on an ensemble of atmospheric inversions and aircraft observations.

51	T. TAGUCHI, K. ICHII: EGU General Assembly 2023 (2023, Vienna) Analyzing the sensitivity of gross primary production to the water stress in the Amazon rainforest using CMIP6 models
52	D. BELIKOV, P. K. PATRA, N. SAITOH, N. CHANDRA: 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023, hybrid/幕張) The Impact of Trend and Variability on the Hydroxyl Radical (OH) in the Global Methane Budget.
53	田口琢斗、市井和仁、山本雄平、BELIKOV DMITRY、PATRA PRABIR、NAVEEN CHANDRA、小槻峻司、鈴木和良、檜山哲哉: 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023, hybrid/幕張) Impact of anomalous high temperature in the 2020 spring-summer season on the terrestrial carbon cycle in Russia.
54	王 汝慈、市井 和仁、PATRA PRABIR、NAVEEN CHANDRA: 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023, hybrid/幕張) Assessment of a process-based terrestrial carbon cycle model, VISIT, using multiple data-driven estimations
55	市井 和仁、栗原 茜、王 汝慈、NAVEEN CHANDRA、PATRA PRABIR: 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023, hybrid/幕張) Analyzing changes in terrestrial carbon cycle using a terrestrial carbon cycle model, VISIT and an inversion based estimation
56	王 汝慈、市井 和仁、PATRA PRABIR、NAVEEN CHANDRA: FLUXNET Conference 2023 (2023, Bruno, チェコ) Assessment of a process-based terrestrial carbon cycle model, VISIT, using multiple data-driven estimations
57	D. BELIKOV, P. K. PATRA, N. SAITOH: 5 th ACAM workshop (2023, Dhaka) Influence of the South Asian Summer Monsoon Anticyclone on Atmospheric Methane Distribution and Cross-equatorial Transport of Airmass.
58	D. BELIKOV, N. SAITOH, P. K. PATRA: 19 th IWGMS (2023, hybrid/Paris) Study of the GOSAT-TIR observation sensitivity to the near-surface CH ₄ .
59	N. SAITOH, R. IMASU, K. SHIOMI: 19 th IWGMS (2023, hybrid/Paris) Initial validation results of the current released GOSAT-2/TANSO-FTS-2 TIR products (V01.06) and future algorithm updates.
60	D. BELIKOV, N. SAITOH, P. K. PATRA: AOGS2023 (2023, Singapore) The Impact of the Hydroxyl Radical (OH) on the Trend and Variability of the Global and Regional Methane Budget.
61	D. BELIKOV, N. SAITOH, P. K. PATRA: 第28回大気化学討論会 (2023, 長崎) Impact of the Hydroxyl Radical (OH) on the Trend and Variability of the Global and Regional Methane Budget.
62	方志鵬, 齋藤尚子: 第28回大気化学討論会 (2023, 長崎) GOSATによる中国における領域別のメタン濃度の変動解析.
63	齋藤尚子, 今須良一, 塩見慶: 第28回大気化学討論会 (2023, 長崎) GOSAT-2/TANSO-FTS-2熱赤外バンドのGHG高度分布データ導出アルゴリズムと検証結果について.
64	M. BEAK, K. ICHII, R. WANG, D. HENRI: AsiaFlux Conference 2023 (2023, Jeju, Korea) Changes in terrestrial carbon cycle in Asia using process-based model and a data-driven model.
65	R. WANG, K. ICHII: AGU Fall Meeting 2023 (2023, San Francisco) Evaluation of a process-based terrestrial model for the response to carbon cycle changes.

(4) 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。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
66	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。
67	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。
68	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。
69	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。
70	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。
71	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年11月12日）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。
72	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。
73	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。
74	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。
75	2023	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)
76	2023	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）

77	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）
----	------	--

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
78	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)
79	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)
80	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)

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
81	NHKおはよう日本(2021年11月3日7:00、「発足 メタン削減で国際的な枠組み」COP28およびグローバルメタンブレッジに関連したメタン関連成果について伊藤のコメントを放送)
82	毎日新聞2021年12月28日朝刊13面「メタン削減の高い壁」メタン収支に関する成果とその政策的意義を解説
83	朝日新聞2022年10月2日朝刊グローブG1面「メタン 忘れられた温室効果ガス」メタン収支把握の意義を説明
84	NHK映像の世紀バタフライエフェクト「地球破壊」2023年12月6日放送(温室効果ガス排出や温暖化影響について取材協力(クレジット表示))

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
85	成果の記者発表(環境省記者クラブ、環境記者会、文部科学記者会、科学記者会、千葉県政記者クラブ同時配布)(2022年9月30日、「メタンの半球輸送におけるアジアモンスーンの役割を解明 ～温室効果ガスの収支評価の高精度化につながる知見～」)
86	日刊工業新聞(2022年10月13日、全国版、26面)「メタン輸送過程解明」

(7) 研究成果による受賞

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
87	2023年6月 優秀論文発表賞「ひまわり8号データを用いた地表面温度推定における不確実性の評価」日本リモートセンシング学会(受賞者：山本雄平、市井和仁、村山昌平、Youngryel Ryu, Minseok Kang)

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
88	日本気象学会2022年秋季大会での専門分科会「温室効果ガス監視の最新動向」開催. SII-8課題参画者（伊藤、市井、梅沢、羽島）が世話人となって開催.
89	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。
90	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/
成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
91	日本地球惑星連合2022、2023年大会でのセッション「Global Carbon Cycle」コンビーナ（市井、伊藤、Patra）として開催.

Abstract

[Research Title]

GHG budget evaluation using emission inventories, observational data, and biogeochemical models

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Ito Akihiko
(PI 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
Cooperated by :	Chiba University
Keywords :	Biogeochemical models, Bottom-up evaluation, Emission inventories, Global stocktake, Integrated evaluation

[Abstract]

Theme 3 developed a bottom-up approach to evaluate the surface GHG budget by aggregating individual sources and sinks. The SII-8 project employs a unique bottom-up approach to evaluate the surface GHG budget. This approach is necessary to compensate for the alternative top-down approach that derives the budget from atmospheric observational data and models. The bottom-up approach uses emission inventories, biogeochemical models, and land surface data to evaluate individual sources and sinks. This approach estimates the budget spatially explicitly and in the long-term and allows decomposing sectoral contributions. Moreover, it usually does not require expensive instruments. However, this approach has disadvantages in quick reporting and is susceptible to sector-specific errors and biases. The bottom-up GHG evaluation system developed by Subtheme 1 in 2023 uses the biogeochemical model VISIT to estimate natural sources (e.g., CH₄, N₂O, and CO₂ from wetlands, soils, and land use, respectively) and sinks (e.g., CO₂ and CH₄ by afforestation and soil oxidation, respectively). Most of the anthropogenic emissions, conventionally separated into five categories (fossil fuel mining, industry and urban sources, waste management, agriculture, and livestock), were derived from up-to-date emission inventories (EDGAR v8.0). Moreover, emissions from wildfires were derived from the Global Fire Emission Dataset. Spatial maps of annual fluxes at 0.25° latitude and 0.25° longitude were produced for all sources and sinks, which allowed spatial and temporal analyses for arbitrary areas. To improve the accuracy and integrity of the bottom-up estimation, original schemes were developed for paddy field and termite CH₄ emissions, and an alternative estimation method was developed for anthropogenic emissions using machine learning algorithms. The bottom-up system was successfully demonstrated for the CH₄ and N₂O budgets of Asia. Subtheme 2 developed an early warning system for the CO₂ budget of terrestrial ecosystems using time series data from geostationary satellites (Himawari), allowing the detection of the impacts of extreme events such as droughts and heatwaves. Moreover, Subtheme 2 attempts to optimize the VISIT model parameters using numerical algorithms to improve the accuracy of retrieving the observed terrestrial CO₂ budget. Many scientific papers have published the achievements of Theme 3, and the IPCC Assessment Reports cited some of these papers. In

conjunction with Themes 1 and 2, these outcomes were aggregated into the annual report and successfully submitted to the global stocktake.

[References]

- 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. DOI: 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., 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-CHOUIARD, E., MCNICOL, G., PATRA, P., POULTER, B., SITCH, S., RILEY, W. & ZHU, Q. 2023. Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH₄ models. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103037. DOI: 10.1029/2023GL103037
- 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
- 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
- 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
- TIBREWAL, K., CIAIS, P., SAUNOIS, M., MARTINEZ, A., LIN, X., THANWERDAS, J., DENG, Z., CHEVALLIER, F., GIRON, C., ALBERGEL, C., TANAKA, K., PATRA, P., TSURUTA, A., ZHENG, B., BELIKOV, D., NIWA, Y., JANARDANAN, R., MAKSYUTOV, S., SEGERS, A., TZOMPA-SOSA, Z. A., BOUSQUET, P. & SCIARE, J. 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

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

別添

(参考資料) 【公募審査・中間評価等への対応】

指摘等	対応状況・非対応理由等
<p>中間評価コメント「時間のかかる土地利用データは、検証とインベントリ作成を並行して行わなければならないので、サブテーマ1、2の強い連携が必要である。一次生産量把握は諸要因に依存するので、ひまわりとGOSAT-2観測等の組み合わせなども検討してもらいたい。」</p>	<p>コメントありがとうございます。土地利用データは、MODIS、ESA CCIなど複数のプロダクトが公開されていますが現在でも決定版ができておりません。日本の「しきさい (GCOM-C)」による土地利用データは最新のアルゴリズムと検証に基づくものとされており、その公開を待つて使用したいと考えています。一次生産量の把握は、地表状態の短期変動を把握できるひまわりと、植生のクロロフィル蛍光を観測できるGOSAT-2を組み合わせることで精度向上が期待されますが、現在進行中の研究であり、後継課題によって実現したいと考えております。</p>
<p>中間評価コメント「サブテーマ1、2ともボトムアップ推定ということだが、専門外の人にとっても、手法の違い、両方とも行う必要性、サブテーマ間の連携が分かり易い資料の作成をお願いしたい。」</p>	<p>コメントありがとうございます。サブテーマ1は主に人為排出インベントリと物質循環モデルの開発・統合解析を担い、サブテーマ2は主に衛星データを用いた陸域変動を担っております。これらの分担と手法の違いがわかりやすいような資料作成を心がけます。</p>