

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-8-2】

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

研 究 課 題 : 「排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証」

Research Title: GHG estimation for effectiveness assessment of emission reduction and validation of Earth system model

テーマリーダー: 羽島 知洋

テーマ代表機関: 国立研究開発法人海洋研究開発機構

研究分担機関: 国立研究開発法人海洋研究開発機構

キ ー ワ ー ド : グローバルストックテイク、排出削減実効性評価、温室効果ガス収支、地球システムモデル、インバージョン推定

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	5
3. 研究目標	6
4. 研究開発内容	9
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	13
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	17
6-1. 成果の件数	20
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	20
7. 国際共同研究等の状況	21
8. 研究者略歴	23
II. 成果の詳細	24
II-1 サブテーマ1「地球システムモデルを用いたGHG排出削減の実効性評価」	24
[サブテーマ1要旨]	24
1. サブテーマ1研究開発目的	24
2. サブテーマ1研究目標	24
3. サブテーマ1研究開発内容	26
4. サブテーマ1結果及び考察	27
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	36
II-2 サブテーマ2「トップダウン手法によるグローバルな GHG 収支変動把握」	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	39
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) 誌上発表	53
(3) 口頭発表	57
(4) 知的財産権	59
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	59
(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	60

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-8-2】
体 系 的 番 号	： （ J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 2 0 ）
研 究 課 題	： 排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証
テ ー マ リ ー ダ ー	： 羽島 知洋（国立研究開発法人海洋研究開発機構、グループリーダー代理）

＜キーワード＞

グローバルストックテイク
排出削減実効性評価
温室効果ガス収支
地球システムモデル
インバージョン推定

＜研究体制＞

サブテーマ1「地球システムモデルを用いたGHG排出削減の実効性評価」

＜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
海洋研究開発機構	地球環境部門	グループリーダー代理	羽島知洋	2021年4月～2024年3月
海洋研究開発機構	地球環境部門	特任研究員	渡辺路生	2021年4月～2022年3月
海洋研究開発機構	地球環境部門	招聘上席研究員	須藤健悟	2021年4月～2024年3月
海洋研究開発機構	地球環境部門	特任研究員	岡田靖子	2021年8月～2023年9月

＜サブテーマ1研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
海洋研究開発機構	地球環境部門	センター長代理	渡辺真吾（2021年4月～2024年3月）

海洋研究開発機構	地球環境部門	グループリーダー	建部洋晶（2021年4月～2024年3月）
海洋研究開発機構	地球環境部門	副主任研究員	阿部学（2021年4月～2024年3月）

サブテーマ2「トップダウン手法によるグローバルなGHG収支変動把握」

＜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
海洋研究開発機構	海洋研究開発機構/地球環境部門	グループリーダー代理	パトラ プラビール	2021年4月～2024年3月
海洋研究開発機構	海洋研究開発機構/地球環境部門	グループリーダー	滝川雅之	2021年4月～2024年3月
海洋研究開発機構	海洋研究開発機構/地球環境部門	ポストドクトラル研究員	スマン マイティ	2021年10月～2024年3月

＜サブテーマ2研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
海洋研究開発機構	海洋研究開発機構/地球環境部門	ポストドクトラル研究員	ナビーン チャンドラ（2021年4月～2024年3月）

＜テーマ2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	18,000千円	5,400千円	23,400千円
2022	18,000千円	5,400千円	23,400千円
2023	18,000千円	5,400千円	23,400千円
合計	54,000千円	16,200千円	70,200千円

1. はじめに（研究背景等）

世界各国が合意したパリ協定における温暖化緩和目標を達成するため、各国の対策実施状況の確認と目標再設定のためのグローバルストックテイクが実施される。ここで重要な点は、各国政府が最良の科学に基づき、各国の温室効果ガス排出量と削減目標に向けた進捗状況を把握することである。このため、国・地域・全球スケールにおいて主要な温室効果ガス(CO₂、CH₄、N₂O等、以下GHGs)の人為排出量、森林・海洋といった自然の吸収・放出速度、およびそれらの大気中濃度動態の科学的理解を深める必要がある。特に広域・全球スケールにおけるこれら収支・濃度動態の把握は十分ではなく、予測を行う上でも大きな課題となっている。近年、GHGs排出削減がどの程度の温暖化抑制効果をもたらすのかを調べるため、人為GHGs排出や自然の吸収・放出、および大気濃度と気候への影響を統合的にシミュレートできる地球システムモデル(温暖化予測モデル)が活用されるようになってきた。しかし、IPCC報告書等でも報告されているように、世界各国のモデル間相互比較等を通じ、人為排出量に加えて自然起源の吸収・放出速度、および気候変動とのフィードバック(相互作用)に大きな不確実性が残されている。温暖化緩和目標を達成する上で必要となる排出パスを議論し、排出削減による温暖化抑制の実効性評価を行うためには、全球スケールのGHGs動態に関する科学的理解を深化するとともに、精緻な収支・濃度情報を用いて地球システムモデルを評価・改良することが不可欠である。

収支・濃度動態の現状把握という観点では、これまで推進費2-1701および2-1802課題において、逆推定手法を用いることによってその収支把握が進められてきた。その成果は温室効果ガス収支の定期レポートを発行する国際研究プロジェクトGlobal Carbon Budget等でも度々活用され、引き続き日本からもこれに対して貢献していくことが期待されている。このような、逆推定手法による精緻なGHGs動態の把握は、グローバルストックテイクの着実な実施を科学面で支援するのみならず、予測モデルの検証・改良に強く資する。これまで、国内の温暖化予測研究やそのモデル開発は、文部科学省委託研究(統合的気候モデル高度化プログラムや気候変動予測先端研究プログラム)において主に実施され、国際研究プロジェクトCMIP6を通じて多くの予測情報を創出してきた。このような予測モデルの検証や改良を、逆推定手法と強く連携して同一研究課題内において実施することは、予測モデルの精度向上に対してより大きな科学的進展をもたらす可能性を有する。

2. 研究開発目的

本テーマでは、グローバルストックテイクの着実な実施を科学面で支援するため、全球スケールのモデルと観測データを活用し、全球の温室効果ガス収支評価を行うことを目的とする。また、パリ協定のNDC (Nationally Determined Contribution) といった今後の排出削減がもたらす近未来の温暖化抑制の実効性評価を行うとともに、その信頼性向上に向けた地球システムモデルの温室効果ガス動態の検証とモデル改良を行う。

このためサブテーマ2-1では、推進費SII-8課題全体を通じて得られる最新かつ精緻なGHGs情報(データおよび科学的知見)を活用し、温暖化予測に用いられる地球システムモデルのGHGs濃度や収支の検証と改良を行う。これにより、人間のGHGs排出とそれら地球上での動態、および温暖化の理解向上と予測精度の向上に寄与するとともに、観測(監視体制)とモデル(予測)の融合的な研究体制の礎を、他テーマと協力しながら築く。また、地球システムモデルを用いた排出削減の実効性評価シミュレーションを行うことにより、各国の排出削減への取り組みが、全球規模でどの程度の温暖化抑制効果を持ちうるのかについての科学的情報を提示する。

またサブテーマ2-2では、大気輸送モデルの輸送・化学過程の改良を行い、亜大陸レベルから国レベルでの温室効果ガス(CO₂、CH₄、N₂O)のトップダウン収支推定(逆推定)を行い、GCP等の国際プロジェクトおよびIPCC第6次評価報告書に貢献する。また、データ同化手法による収支推定システムの開発を進め、より高密度の現場観測データおよび広域・高頻度の衛星観測データを収支推定モデルに効率的に取り込み、高い空間分解能での温室効果ガスの排出・吸収量の推定を行う。大気輸送モデルで計算したCO₂、CH₄、N₂O濃度データを、GOSAT/GOSAT-2の温室効果ガス高度分布導出のための先験情報として利用し、濃度リトリバー精度の向上につなげるとともに、地球システムモデルによる将来の気候予測の精

度向上のため、過去数十年分についての温室効果ガス収支の逆推定の比較・評価を行うことで、温暖化予測の信頼性向上や排出削減の実効性評価に貢献する。

3. 研究目標

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

サブテーマ1	「地球システムモデルを用いたGHG排出削減の実効性評価」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人海洋研究開発機構
サブテーマ1 目標	本サブテーマでは、以下の具体的な目標達成を通じ、推進費SII-8課題の目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」の達成に貢献する。 ● 地球システムモデルで再現される GHGs 動態の検証 地球システムモデルで再現される各種GHGsの収支や濃度変動の検証を行うべく、サブテーマ2-(2)との協力のもと、インバージョン推定を始めとする観測事実と整合的な全球GHGs収支・濃度情報と、地球システムモデルによる過去再現実験の出力とを比較する。主たる対象期間は、より多くの観測データが揃い始める20世紀後半とする。CO₂については、全球収支のみならず、バイアスを生み出す原因となっている地域や季節、過程が特定できるよう分析を行う。CO₂と比較し、研究・開発の取り組みが始まったばかりのCH₄やN₂Oについては、その主たる放出/吸収源の全球収支が、他の手法等から示唆される推定幅に収まっているかどうかを主として確認する。 ● 上記検証作業に基づくモデル改良・調整 上記の検証作業に基づき、モデル改良を行う。科学的知見の蓄積が比較

	的進んでいるCO₂については、現在における大気濃度が±10ppmvに収まることを目指して改良を行う(ただし、長寿命気体であるCO₂の大気濃度は、観測データが少ない20世紀前半以前の履歴も強く影響するため、本課題で対象とする20世紀後半の観測情報だけでは十分に拘束できない可能性がある)。CH₄やN₂Oについては、インバージョン推定やその他手法から示唆される全球収支の推定幅に、モデル推定値が収まることを目標にその改良を行う。改良・調整版モデルを用いて過去再現実験を実施し、その効果を確認する。 ● 排出削減の実効性評価シミュレーションの実施 GHGsの排出削減が、近未来等においてどの程度の温暖化抑制効果を持ちうるのかについて調査・報告するため、地球システムモデルを活用したシミュレーションを実施する。テーマ1およびテーマ2から得られるGHGs人為排出量の最新情報等を活用し、シミュレーションのための入力値データを作成し、これを用いて実験を実施する。また、よりスピーディーな実効性評価を意図し、既存の簡易気候モデル(PCでもシミュレーション可能な全球1次元の気候-物質循環モデル)の利用可能性を検討し、利用可能であればこれを併用して研究を進める。
--	--

サブテーマ 2	「トップダウン手法によるグローバルな GHG 収支 変動把握」
サブテーマ 2 実施機関	国立研究開発法人海洋研究開発機構
サブテーマ 2 目標	政策立案のためのシームレスな温室効果ガス収支推定結果の共有 ●大気輸送モデルMIROC4-ACTMによる従来のトップダウン手法によるCO₂、CH₄、N₂O の収支推定(推進費 2-1701 課題および 2-1802 課題で開発)を継続し、推定した結果を収支評価のためにテーマ3に提供するとともに、GCP(グローバルカーボンプロジェクト)等の国際プロジェクトおよびIPCC 報告書に貢献する。 ●アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)等のデータ同化手法による温室効果ガス収支推定システムを構築し、より高密度の現場観測データおよびGOSAT/GOSAT- 2、OCO-2/OCO-3、TROPOMI 等の広域・高頻度の衛星観測データ(最初にCH₄、次に CO₂、N₂O)を同化システムに取り込むことで、これまでより高い空間分解能で温室効果ガスの排出・吸収量の推定を実施する。 →パリ協定に係る政策立案(グローバルストックテイク)のための温室効果ガス収支のデータセットを継続的に提供できる体制を整える。 地球システムモデルによる炭素-窒素サイクルの再現性向上への貢献 ●過去数十年(1960年代～現在)を対象に、地球システムモデル(MIROC-ES2L)によるシミュレーション結果と MIROC4-ACTM による温室効果ガス収支の逆推定の比較を行う。特に温室効果ガスの領域別フラックスや時間発展、様々な気候条件に対する変動の再現性という観点から評価を行う(テーマ2サブテーマ1と協力)。 ●上記の炭素-窒素循環(C-N循環)過程の検証によって地球システムモデ

ルの問題点が明らかになった場合、この知見をテーマ2サブテーマ1に提供することにより、地球システムモデルのパラメータ設定や感度実験、モデル改良に貢献する。

●以上の地球システムモデルの評価を行うことにより、テーマ2サブテーマ1で実施される排出削減の実効性評価シミュレーションの信頼性向上に貢献する。また、同シミュレーションを行う上で必要となる入力データ(人為 GHGs 排出量等)の準備に協力する。

大気輸送モデル MIROC の輸送および化学過程の改良

●MIROCの輸送過程(移流・対流)を改良し、ハイブリッド鉛直座標の実装で全体として再現性が改善した成層圏のブリューワー・ドブソン循環による下部成層圏での極方向への輸送の再現性をさらに向上させる。

●メチルクロロホルム(CH_3CCl_3)などの独立した化学トレーサーを用いて全球平均 ヒドロキシ基ラジカル(OH)濃度の経年変動を、さらにMIROC-ES2LやMIROC-Chem などのインタラクティブな化学モデルシミュレーションに基づいてOHの空間変動を明らかにする。

●上述の方法により再現性が向上したOHラジカルをもとに、対流圏でのOHとの化学反応による CH_4 消失のパラメタリゼーションを改善し、 CH_4 収支の逆推定の高精度化を図る。

→大気輸送モデルによる大気中の温室効果ガスの変動解析および温室効果ガスの排出・吸収量の収支評価の高精度化につなげる。

衛星データの高精度化のための先験値の提供

●MIROC4-ACTM で CO_2 、 CH_4 、 N_2O の濃度計算を実施し、テーマ3サブテーマ2に現実的な CO_2 、 CH_4 、 N_2O の高度分布データセットを提供する。

●テーマ3サブテーマ2と協力して、MIROC4-ACTMの CO_2 、 CH_4 、 N_2O の3次元濃度分布データセットをGOSAT/GOSAT-2の熱赤外バンドの温室効果ガス高度分布導出(リトリーバル)のための先験情報(アプリオリ)として使用し、GOSAT/GOSAT-2 の熱赤外バンドのスペクトルデータから CO_2 、 CH_4 、 N_2O の高度分布のリトリーバルを実施する。

●テーマ3サブテーマ2と協力して、MIROC4-ACTM のアプリオリデータに基づく GOSAT/GOSAT-2の CO_2 、 CH_4 、 N_2O のリトリーバル結果とNIES-TMおよびNICAM-TMの アプリオリデータに基づくGOSAT/GOSAT-2のリトリーバル結果(公式プロダクト) の比較・検証を実施する。

→衛星データのさらなる高精度化を図り、データを収支推定に利用するとともに、科学コミュニティへ提供する。

モデルデータ提供システムの構築

●本研究で得られた温室効果ガス濃度の3次元分布データおよび排出・吸収源の収 支情報を、政府および政策立案者、温室効果ガス観測コミュニティに提供するシステムを構築する。

→米国・欧米ですでに構築されているデータ提供システムを念頭に、本

研究の成果を速やかに共有できる枠組みを構築する。

4. 研究開発内容

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

サブテーマ2-1では、大きく分けて以下の3項目を実施した。

1. 地球システムモデルの GHGs 動態検証とモデル改良・調整

排出削減の実効性評価には、人為 CO₂ 排出量をもとに将来予測を行うこと（地球システムモデルの活用）が必要である。しかし、再現 CO₂ 濃度に大きなバイアスが存在するため、その原因を特定するためのマルチモデル解析およびフィードバック分析を行った。さらに CH₄ と N₂O について、サブテーマ2-(2)との協力のもと、地球システムモデルで再現される放出/吸収源の全球収支について、インバージョン推定結果との比較を行った。

2. 温室効果ガス排出削減の実効性評価に向けた取り組み

地球システムモデルは、地球上の様々な相互作用過程を陽に解くものの、バイアスを有する。排出削減の実効性評価の信頼性を向上させるため、観測情報に対して大気CO₂濃度をナッジングする手法をモデルに導入した。また、よりスピーディーな排出削減の実効性評価や、地球システムモデルのシミュレーション結果解釈の補助を意図し、既存の簡易気候モデル(PCでも実行可能な全球1次元の気候-物質循環モデル)を、複雑な地球システムモデルの結果をエミュレートできるようパラメータ調整を行った。

3. 温室効果ガス排出削減の実効性評価

上の研究開発作業の進捗を踏まえ、化石燃料CO₂排出削減が今後の温暖化緩和にどの程度の有効性を持ち得るのかについて、シミュレーション・評価を行なった。主として用いた将来シナリオ(排出削減シナリオ)は、Shared Socio-economic Pathways (SSPs)のSSP1-1.9とSSP1-2.6である。これを入力情報とし、上で改良・開発したシステムでシミュレーションを実施した。なお、CMIP6(第6期結合気候モデル相互比較プロジェクト)とは異なり、ここでは本研究目的に合わせ、所与の人為CO₂排出量で駆動する「排出駆動方式」で新たに実験を実施した。分析は2種実施した：(1) ベースラインシナリオ(現状のCO₂排出が継続すると仮定)とSSPsとの差の分析、および(2) SSPsシナリオによるシミュレーション結果だけを用い「人為CO₂排出の減少が大気CO₂濃度および全球平均気温の減少にいつ頃結びつくのか」を解析したものである。「I. 成果の概略」では、(2)のみを説明する。

また、サブテーマ2-2では、大きく分けて以下の5項目を実施した。

1. CO₂のインバージョン解析

本研究では、CO₂の発生源と吸収源を計算するインバージョン解析を行うにあたり、アンサンブルアプローチを採用した。具体的には、先験情報として陸域生物圏と大気-海洋 CO₂ フラックスを2セット使用し、MIROC4-ACTMによってアンサンブル実験とインバージョン解析を行った。検証にも取り組み、CO₂ インバージョンの精度向上に努める取り組みを行った。具体的には、半球スケールの陸域および海洋の推定 CO₂ フラックスと、その領域内におけるモデルおよび観測の CO₂ 濃度の関係を見出し、検証に役立てるというものである。このため、OC02 v10 MIP(2種のインバージョンタイプ×14

種のインバージョンモデルによるインバージョン推定)による CO₂ フラックスを活用した。さらにこの解析に基づき、インバージョンフラックスを検証・高精度化し、より信頼性の高い推定結果を得るための新たな評価手法を考案した。

より高い時空間分解能および衛星観測データ等の観測データ利用に基づく、次世代CO₂収支推定システムを構築するため、アンサンブルカルマンフィルタを用いたCO₂データ同化によるインバージョンシステムの開発を行った。その後、OCO-2データのOSSE (Observation System Simulation Experiment: 観測システムシミュレーション実験) の実施と、モデルの精度の検証を行い、本システムの枠組み構築を行った。

2. CH₄のインバージョン解析

CH₄のモデリングおよびインバージョンシステム開発の多くは、サブテーマ3-(2)との共同のもとなされており、該当サブテーマからその詳細が報告されるはずである。ここでは、本サブテーマPIが共同主導・貢献した、国際研究GCP-CH₄に関わる欧州”VERIFY”プロジェクトからの成果に注目して報告を行う。具体的には、トップダウン・ボトムアップアプローチによる全球・半球スケールでのCH₄フラックス比較と、セクター別フラックスの比較である。

3. N₂Oのインバージョン解析

本研究課題で、N₂O収支推定のための新たなインバージョンシステムを構築した。MIROC4-ACTMにより大気中N₂O濃度を計算し、その結果を1978年から2019年の現場測定による観測値と比較した。自然土壌、農地、その他の人間活動、および大気-海洋ガス交換による先験N₂O 排出量の5つの組み合わせを使用した。そのインバージョン計算では、1997 年から 2019 年までの世界 42 か所の観測値を使用し、全球 84領域に対してベジアン逆モデリングを使用して領域N₂O 月別排出量を最適化した。なお、本取り組みの結果により、第2回GCP-N₂Oでは、本サブテーマPIは主たるデータ・知見提供者として同プロジェクトに貢献するとともに、共同主導者としてトップダウン収支推定のとりまとめを行った。本報告書では、第2回GCP-N₂Oの収支推定結果の概要を説明する。

4. 国際的政策立案/研究枠組みへの貢献：RECCAP2 を通した国スケールの GHG 収支推定の取り組み

RECCAP2 (Regional Carbon Cycle Assessment and Processes2) は、インバージョン、陸域および海洋の生物地球化学(物質循環)モデル、船舶観測に基づくデータプロダクト、リモートセンシングベースのプロダクト、国別インベントリ情報など、GHGフラックスを推定するための複数かつ独立した最先端手法を活用している。RECCAP2では、CO₂、CH₄、N₂Oに関する収支推定を、地球全体を網羅するように分割された陸域10領域と 海洋5領域で行った。本サブテーマPIは、RECCAP2 運営委員会として活動し、RECCAP2報告書の複数章に貢献した。本報告書では、RECCAP2に関わる基本概念と主要な収支の一部について概説する。

5. 国際的政策立案/研究枠組みへの貢献：RECCAP2 を通した国スケールの GHG 収支推定の取り組み

IPCC では、5～10 年間隔で包括的な気候科学の知見を含む報告書が作成されているが、これを受け Future Earth では、気候科学における 10 の新しい洞察 (Ten New Insights in Climate Sciences, 10NICS) として最近の進歩に関する最新情報を提供している。本報告書では、本サブテーマ PI が関わった洞察 4 に関して概説する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

テーマ2として、まずサブテーマ1では、「観測情報を活用した予測モデルの精度向上と排出削減の実効性評価」という研究目的に忠実に沿いつつ、かつ今後の長期環境政策への示唆に関わる研究成果が得られた(一部準備中のものも含む)。サブテーマ2では、その目的である「大気輸送モデルの改良」「CO₂、CH₄、N₂Oのトップダウン収支推定を通じた各種国際プロジェクトやIPCC第6次評価報告書への貢

献」「データ同化手法を用いたシステム開発」「推定結果の提供を通じた濃度リトリバル精度の向上や地球システムモデルの精度向上」という主たる研究目的に向けた、多彩な研究成果が得られた。さらに、これらサブテーマ1,2の研究結果の一部は、UNFCCCのグローバルストックテイクに向け報告書内でとりまとめられ、提出された(成果26、成果27)。

まずサブテーマ1では、

[1]地球システムモデルで再現されるGHGs動態の検証のため、地球システムモデルのGHGs検証に活用可能な全球観測データベースの総括を行った(成果1)。その後、CO₂については、観測大気濃度とシミュレートされた濃度の比較、およびフィードバック解析を行い、濃度バイアスを生み出す原因となっている時期・地域を特定した(成果25、図1-1、図1-2)。CH₄やN₂Oについては、サブテーマ2-(2)で推定されたトップダウン推定によるエミッション量と地球システムモデルのものを比較し、その全球値が十分に妥当なものであることを確認した。さらに空間分布についても検証が可能となり(図1-3、図1-4)、今後の新たな研究フェーズを展開するための礎を築いた。

[2]上の検証を経た後に、地球システムモデルの改良・調整を行った。CO₂に関わる過程の改良により、約14ppmv過小評価されていたモデルの大気CO₂濃度(2014年の濃度)が、6.2ppmvにまで縮小され(表1-1)た。またこれと並行し、CO₂濃度バイアスが将来予測に悪影響を及ぼしにくくするための大気濃度ナッジング)を地球システムモデルに実装し、濃度バイアスの軽減と予測信頼性の向上につなげた(Okada & Hajima in prep., 図1-5)。なお、CH₄やN₂Oの全球収支は、他手法推定値に十分に収まっていたものの、海洋N₂O放出に関してはさらなる調査とモデル改良を行い、逆推定結果とさらに整合的になった。

[3]以上の研究開発を踏まえ、排出削減の実効性評価シミュレーションを実施した。最新化石燃料排出量を活用しながら、排出削減の実効性評価シミュレーションの実施(表1-2)と解析を行った。複雑な地球システムモデルをエミュレートできるよう調整した簡易気候モデルも併用した(図1-6、図1-7)。特に、大気CO₂濃度および全球平均気温の減少時期に着目した解析(図0-1、図1-8、図1-9)では、排出量の減少開始から大気CO₂濃度が下がるまでに数十年の時間スケールを要することを明らかにし、今後の緩和策および関連研究に対する重要な示唆を得ることが出来た。本成果の一部は、UNFCCCのグローバルストックテイク向け報告書(成果26、成果27、図1-7)に記載するとともに、詳細な分析結果をOkada & Hajima として執筆中である(表1-2、図1-7、図1-8、図1-9)。

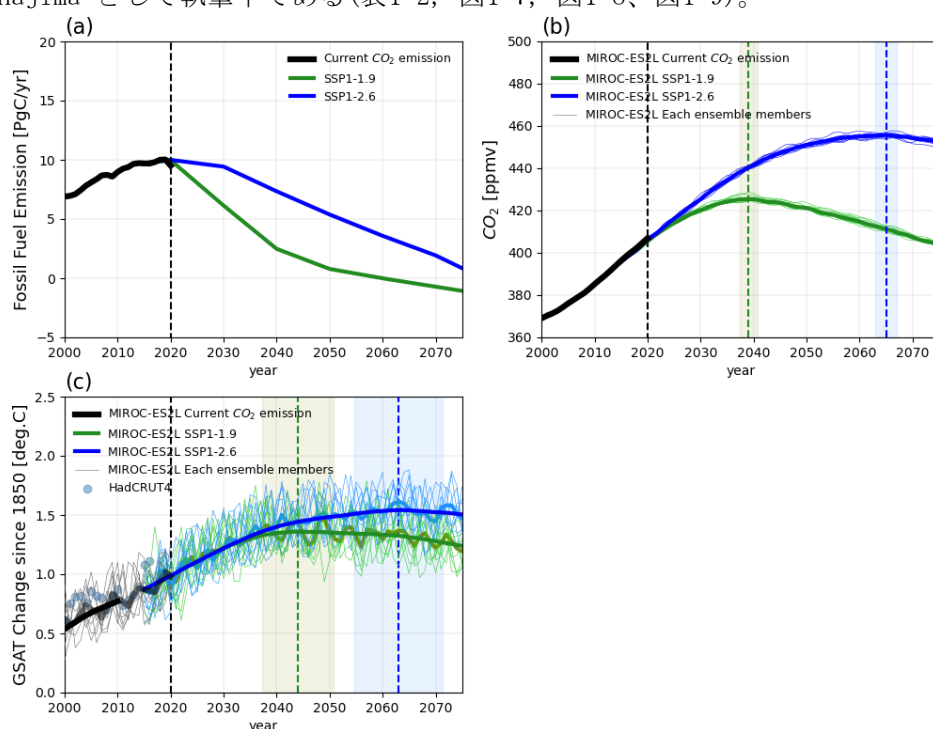


図0-1（図1-8と同）大気CO₂濃度および全球平均気温の低下時期に注目した解析結果。(a)入力値としてモデルに与えたSSP1-1.9(緑線)およびSSP1-2.6シナリオ(青線)の人為CO₂排出量(化石燃料)。いずれのシナリオ実験も、2015年-2100年の期間で実施した。黒線は、GridFEDによる2020年までの値(参考)。(b)MIROC-ES2Lによってシミュレートされた大気CO₂濃度と(c)全球平均気温の結果。いずれのシナリオも10アンサンブルの実験を実施(細線)し、そのアンサンブル平均値を太線で示す。縦破線は、人為CO₂排出(黒)、大気CO₂濃度(緑)、および全球平均気温(青)が減少に転じるタイミングを示す。縦陰影は、アンサンブルのばらつき(1シグマ)を表す。

サブテーマ2では、三大温室効果ガス(CO₂、CH₄、N₂O)の領域～全球規模での排出量と吸収量を同一手法で推定する、世界でも先端的なインバージョンシステムを構築した。またその成果をもとに、GCP等の国際プロジェクトやIPCC第6次評価報告書などに幅広く貢献した。

[1]CO₂のインバージョン解析では、複数の先験情報を使用するという新たなアプローチを採用したシステム開発と収支推定を行なった(成果6)。プロジェクト期間中、CO₂インバージョンでは検証が不足しているという科学的課題が浮かび上がったため、CO₂インバージョンの検証を行った(図2-2)。ここでは、2種のインバージョンタイプおよび14種のインバージョンモデルを比較した、OC02 v10 MIPによるCO₂フラックス(成果13)を活用した。さらにこの解析に基づき、複数のインバージョンフラックスからより信頼性の高い推定結果を得るための新たな評価手法を考案した(Maity et al. in prep.、図2-3)。また、より高い時空間分解能および衛星観測データ等の観測データの利用に対応できる、次世代CO₂収支推定システムを構築するため、アンサンブルカルマンフィルタを用いたCO₂データ同化によるインバージョンシステムの開発を行い、OSSE(Observation System Simulation Experiment: 観測システムシミュレーション実験)の実施とモデルの精度の検証を行い、本システムの枠組み構築を行った(Maity et al., in prep.、図2-4)。また、CO₂に関する他の成果として、成果4(CO₂を含む多種ガスの観測に関する国際研究協力成果)、成果11(左記研究を引き継ぐもの)、成果9(CO₂とCH₄の関係)、成果10(テーマ1連携の濃度追跡)、成果12(COSを用いたCO₂の制約)、成果18(左記と同様)などが得られている。

[2]CH₄のインバージョン解析では、そのモデリングおよびシステム開発の多くは、サブテーマ3-(2)と共同で実施された(成果8)。サブテーマ2-(2)では特に、本サブテーマ代表が共同主導し貢献した国際研究GCP-CH₄(トップダウン・ボトムアップアプローチによる全球・半球スケールでのCH₄フラックス比較)に関わる成果が得られる見込みである(Sauniois et al., submitted、図2-5)。その他、成果15(CH₄のLETKFシステム開発)、成果17(CH₄のボトムアップ推定)、成果7と成果24(観測およびインベントリ等)、成果19が得られた。

[3]N₂Oのインバージョン解析では、このための新たなシステムを構築した(成果5)。この成果を受け、第2回GCP-N₂Oでは、本サブテーマ代表は主たるデータ・知見提供者として同プロジェクトに貢献するとともに、共同主導者としてトップダウン収支推定のとりまとめを行った(成果22、図2-6)。また関連成果として、成果14(欧州CH₄およびN₂O)が得られている。

[4]RECCAP2(Regional Carbon Cycle Assessment and Processes2)を通した国スケールの温室効果ガス収支推定に貢献した。RECCAP2は、インバージョン、プロセスモデル、船舶観測に基づくデータプロダクト、リモートセンシングベースのプロダクト、国別インベントリ情報など、GHGフラックスを推定するための複数かつ独立した最先端手法を活用している。本サブテーマ代表は、RECCAP2運営委員として活動し、RECCAP2報告書の複数章に貢献した。RECCAP2に関わる国スケールでの温室効果ガス収支に関するフレームワーク構築(成果13)や、個別地域での成果が得られた：成果16(インド洋)、成果21(東南アジア)。他にも多数の準備中論文がある。

[5]国際的な政策立案/研究枠組みへ貢献する成果が得られた。IPCC第6次報告書において、執筆者として貢献した成果(成果2、成果3、図0-2)、国スケールでの温室効果ガス収支把握(グローバルストックテイク)のための研究フレームワーク構築(CO₂については成果13、CH₄については成果20)がある。また、Future Earthから発出された、2023年の気候科学における10の新しい洞察(Ten New Insights in Climate Science 2023)に直結する成果23が得られた。

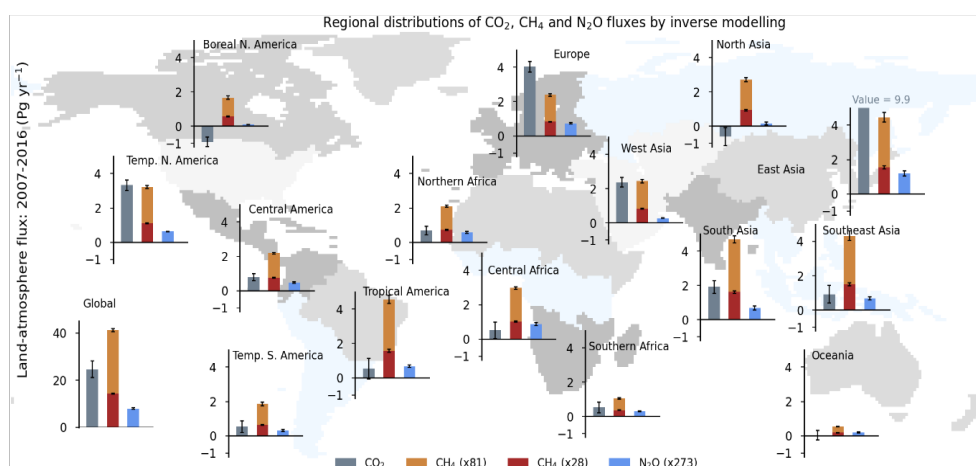


図0-2 (図2-1と同) 陸上から大気へのCO₂、CH₄、N₂Oを統合した排出量。CH₄とN₂Oの排出量をそれぞれGWP₂₀ (81) またはGWP₁₀₀ (28)、GWP₁₀₀ (273) で重み付けしたもの (Forster et al., 2021)。CH₄の大気中寿命は他の二種の温室効果気体に比べて短いため、GWPは放射強制力の積算時間によって大きく変化するため、CH₄の棒グラフではGWP20とGWP100のそれぞれ対応する排出量を薄い色と濃い色で表示している。(図：IPCC AR6 WG1第5章より抜粋、Canadell et al., 2021を元にPatraが作成 [成果2])。

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

「排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証」

テーマ全体目標	テーマ全体の達成状況
全球スケールのモデルとテーマ1による観測データを用い、大気中温室効果ガス濃度変動と対応した全球の温室効果ガス収支評価を行う。地球システムモデルにおける温室効果ガス動態の検証とモデル改良を行い、パリ協定のNDCをはじめとする排出削減が、近未来の温暖化抑制にもたらす実効性評価の信頼性向上に資する研究を進める。 まず、推進費SII-8課題の目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」の達成に貢献する。 次に、大気輸送モデルMIROC4-ACTMによる従来のトップダウン手法によるCO₂、CH₄、N₂Oの収支推定を継続し、推定した結果を収支評価のためにテーマ3に提供するとともに、GCP等の国際プロジェクトおよびIPCC第6次報告書に貢献する。また、地球システムモデルにおける炭素-窒素サイクルの再現性向上や、大気輸送および化学過程の改良を実施する。	MIROC4-ACTMを用いた領域～全球規模のCO₂、CH₄、N₂Oのインバージョン解析をサブテーマ2で実施した。この結果をテーマ3に提供、グローバルストックテイク向けインプット資料に重要知見を提供した。またGCP、RECCAP2等にデータ提供し、主導的立場で参加するなど、関連国際プロジェクトにも大きく貢献した。このインバージョンフラックス等を用いることにより、サブテーマ1で使用する地球システムモデルの物質循環過程を検証することが可能となり、予測モデルの大幅な予測精度向上が行えた。この改良された地球システムモデルを用いて排出削減の実効性評価シミュレーションを実施したところ、長期政策展望に資する知見を得ることができた(図0-1)。なお、3種ガスをGlobal Warming Potentialで重み付けした領域別評価(図0-2)は、サブテーマ2代表が主執筆参加したIPCC-AR6でも強調されている。またFuture Earthからの「気候科学の10の新しい洞察」発出にも貢献、テーマ2の計画・取り組み(予測モデルとインバージョンの研究協力)が時宜にかなったものであることが確認された。

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「地球システムモデルを用いたGHG排出削減の実効性評価」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
本サブテーマでは、以下の具体的な目標達成を通じ、推進費SII-8課題の目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」の達成に貢献する。 ● 地球システムモデルで再現される GHGs 動態の検証 地球システムモデルで再現される各種GHGsの収支や濃度変動の検証を行うべく、サブテーマ2-(2)との協力のもと、インバージョン推定を始めとする観測事実と整合的な全球GHGs収支・濃度情報と、地球システムモデルによる過去再現実験の出力とを比較する。主たる対象期間は、より多くの観測データが揃い始める20世紀後半とする。CO₂については、全球収支のみならず、バイアスを生み出す原因となっている地域や季節、過程が特定できるよう分析を行う。CO₂と比較し、研究・開発の取り組みが始まったばかりのCH₄やN₂Oについては、その主たる放出/吸収源の全球収支が、他の手法等から示唆される推定幅に収まっているかどうかを主として確認する。 ● 上記検証作業に基づくモデル改良・調整 上記の検証作業に基づき、モデル改良を行う。科学的知見の蓄積が比較的進んでいるCO₂については、現在における大気濃度が±10ppmvに収まることを目指して改良を行う(ただし、長寿命気体であるCO₂の大気濃度は、観測データが少ない20世紀前半以前の履歴も強く影響するため、本課題で対象とする20世紀後半の観測情報だけでは十分に拘束できない可能性がある)。CH₄やN₂Oについては、インバージョン推定やその他手法から示唆される全球収支の推定幅に、モデル推定値が収まることを目標にその改良を行う。改良・調整版モデルを用いて過去再現実験を実施し、その効果を確認する。 ● 排出削減の実効性評価シミュレーションの実施 GHGsの排出削減が、近未来等においてどの程度の温暖化抑制効果を持ちうるのかについて調査・報告するため、地球システムモデルを活用したシミュレーションを実施する。テーマ1およびテーマ2	以下に示す個別目標の達成を通じ、左記の2つの目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」を十分に達成したと判断する。 ● 地球システムモデルで再現される GHGs 動態の検証 まず、地球システムモデルのGHGs検証に活用可能な全球観測データの総括を行った(成果1)。その後、CO₂については、観測大気濃度とシミュレートされた濃度の比較とフィードバック解析を行い、濃度バイアスを生み出す原因となっている時期・地域を特定した(図1-1, 図1-2, 成果25)。CH₄やN₂Oについては、サブテーマ2-(2)と連携し、トップダウン推定によるエミッション量と地球システムモデルの結果を比較、その全球値が十分に妥当なものであることを確認できた。さらに空間分布についても検証が可能となり(図1-3, 図1-4)、今後の新たな研究フェーズを展開するための礎を築くことが出来た。サブテーマ2-(2)との連携体制が功を奏した。 ● 上記検証作業に基づくモデル改良・調整 上記検証作業に基づくモデル改良を行うことにより、約14ppmv過小評価されていた大気CO₂濃度(2014年の濃度)が、6.2ppmvにまで縮小され、挑戦的であった左記数値目標(±10ppmv)を達成することが出来た(表1-1)。加えて、濃度バイアスが将来予測に悪影響を及ぼしにくくするための新たなシステム(大気濃度ナッジング)をモデルに実装し、濃度バイアスの軽減と予測信頼性の向上につながった(図1-5, Okada & Hajima in prep.)。このような2種アプローチ(検証を通じた根本解決とナッジングによる現実的対処)の並行実施に踏み切れたことが、効率良い目標達成に役立った。なお、CH₄やN₂Oの全球収支は、他手法推定値に十分に収まっていたものの、海洋N₂O放出に関してはさらなる調査とモデル改良を行うことにより、逆推定結果とさらに整合的になった。以上、多数の研究開発工程と工夫が必要であったが、本項目の目標を十分に達成した。これはさらに、以下項目の効率的な目標達成にも繋がった。 ● 排出削減の実効性評価シミュレーションの実施 上の研究開発を踏まえ、最新化石燃料排出量を活用しながら、排出削減の実効性評価シミュレーションの実施(表1-2)と解析を行った。複雑な地球システムモデルをエミュレートできるよう調整し

から得られるGHGs人為排出量の最新情報等を活用し、シミュレーションのための入力値データを作成し、これを用いて実験を実施する。また、よりスピーディーな実効性評価を意図し、既存の簡易気候モデル(PCでもシミュレーション可能な全球1次元の気候-物質循環モデル)の利用可能性を検討し、利用可能であればこれを併用して研究を進める。	た簡易気候モデルも併用した(図1-6、図1-7)。特に、大気CO₂濃度および全球平均気温の減少時期に着目した解析(図1-8、図1-9)では、排出量の減少開始から大気CO₂濃度が下がるまでに数十年スケールの時間を要することを明らかにし、今後の緩和策および関連研究に関する重要な示唆を得ることが出来た(Okada & Hajima in prep)。簡易気候モデルは、研究開発の早期見通しと効率実施において有用であった。また、即戦力となるプロジェクト専任研究員を雇用できたことも、短期間での本目標達成の成否を決める鍵であった。
--	--

＜【サブテーマ2】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「トップダウン手法によるグローバルなGHG収支変動把握」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
政策立案のためのシームレスな温室効果ガス収支推定結果の共有 ●大気輸送モデルMIROC4-ACTMによる従来のトップダウン手法によるCO₂、CH₄、N₂O の収支推定(推進費 2-1701 課題および 2-1802 課題で開発)を継続し、推定した結果を収支評価のためにテーマ3に提供するとともに、GCP(グローバルカーボンプロジェクト)等の国際プロジェクトおよび IPCC 報告書に貢献する。 ●アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)等のデータ同化手法による温室効果ガス収支推定システムを構築し、より高密度の現場観測データおよびGOSAT/GOSAT-2、OCO-2/OCO-3、TROPOMI 等の広域・高頻度の衛星観測データ(最初にCH₄、次にCO₂、N₂O)を同化システムに取り込むことで、これまでより高い空間分解能で温室効果ガスの排出・吸収量の推定を実施する。 →パリ協定に係る政策立案(グローバルストックテイク)のための温室効果ガス収支のデータセットを継続的に提供できる体制を整える。	政策立案のためのシームレスな温室効果ガス収支推定結果の共有 ●MIROC4-ACTMによるトップダウン手法によって3種の収支推定を行い、これをテーマ3へと提供・温室効果ガス収支のマルチスケール推計に関する報告書に大いに貢献した([成果26], [成果27]; トップダウン・ボトムアップの統合解析も含む)。これらガス収支情報をGCP・RECCAPに提供・国際研究に貢献した(成果多数)。同一システムによる3種GHG収支推定が可能という強みを活かした「GWPを用いた3種GHGの複合解析(図0-2)」は、本課題のみならず、主執筆者としても貢献したIPCC-AR6 5章(成果2)にも活かされた。 ●LETKFを用いたCH₄収支推定システムを開発した(成果15)後に、同様にCO₂収支推定をするためのシステム開発を行い(図2-4)、今後への課題を含めて、これまでより高い空間分解能で温室効果ガスの排出・吸収量の推定を行うためのシステム開発を行った。これと並行し、衛星観測(OCO-2)のCO₂濃度情報を取り込んだ時の精度向上に関する知見を得るため、マルチモデル解析に貢献(成果13; 図2-2)した。また、このマルチモデルによる結果に見られるモデル間のバイアスを、観測情報によって制約する新たな手法を考案した(図2-3; Maity et al. in prep)。新型コロナロックダウンによるポストドク着任の見通しが不確かな中、柔軟な研究体制を築くことにより十分な成果を上げることができた。

地球システムモデルによる炭素-窒素サイクルの再現性向上への貢献

- 過去数十年(1960年代～現在)を対象に、地球システムモデル(MIROC-ES2L)によるシミュレーション結果と MIROC4-ACTM による温室効果ガス収支の逆推定の比較を行う。特に温室効果ガスの領域別フラックスや時間発展、様々な気候条件に対する変動の再現性という観点から評価を行う(テーマ2サブテーマ1と協力)。
- 上記の炭素-窒素循環(C-N循環)過程の検証によって地球システムモデルの問題点が明らかになった場合、この知見をテーマ2サブテーマ1に提供することにより、地球システムモデルのパラメータ設定や感度実験、モデル改良に貢献する。
- 以上の地球システムモデルの評価を行うことにより、テーマ2サブテーマ1で実施される排出削減の実効性評価シミュレーションの信頼性向上に貢献する。また、同シミュレーションを行う上で必要となる入力データ(人為 GHGs 排出量等)の準備に協力する。

大気輸送モデル MIROC の輸送および化学過程の改良

- MIROCの輸送過程(移流・対流)を改良し、ハイブリッド鉛直座標の実装で全体として再現性が改善した成層圏のブリューワー・ドブソン循環による下部成層圏での極方向への輸送の再現性をさらに向上させる。
- メチルクロロホルム(CH_3CCl_3)などの独立した化学トレーサーを用いて全球平均ヒドロキシラジカル(OH)濃度の経年変動を、さらにMIROC-ES2LやMIROC-Chem などのインタラクティブな化学モデルシミュレーションに基づいてOHの空間変動を明らかにする。
- 上述の方法により再現性が向上したOHラジカルをもとに、対流圏でのOHとの化学反応による CH_4 消失のパラメタリゼーションを改善し、 CH_4 収支の逆推定の高精度化を図る。
→大気輸送モデルによる大気中の温室効果ガスの変動解析および温室効果ガスの排出・吸収量の収支評価の高精度化につなげる。

地球システムモデルによる炭素-窒素サイクルの再現性向上への貢献

- CH_4 と N_2O の逆推定フラックスデータをサブテーマ1に提供・比較に協力し、地球システムモデルの検証(図1-3, 図1-4)に大きく貢献した。詳細検証を行う予定であった CO_2 収支については、 CO_2 の時間発展や気候条件の評価(図1-1, 図1-2)のための助言を行い、サブテーマ1の研究開発成果(成果25)に協力した。
- サブテーマ1では実際に、大気 CO_2 濃度の再現においてモデル内の炭素-窒素循環相互作用が問題であることが確認された。20世紀後半の大気汚染・窒素沈着等に関する助言を通じ、サブテーマ1のモデル改良に貢献した。
- 以上の作業を通じ、サブテーマ1の排出削減の実効性評価シミュレーション(図1-7, 図1-8)の信頼性向上に貢献した。また、地球システムモデルを駆動させる際の最新の人為 CO_2 排出量の提供などの協力を行った。

大気輸送モデル MIROC の輸送および化学過程の改良

- テーマ3-(2)との共同研究を通じ、GOSATに搭載された熱赤外(TIR)センサーで観測された CH_4 の全球3次元分布とMIROC4-ACTMシミュレーションを解析することにより、北半球と南半球を結ぶ輸送経路を明らかにした([成果8]Belikov et al., 2022)。
- 1985年から2018年までのOHの経年変動を CH_3CCl_3 を用いて導出し(Patra et al., 2020)、この知見に基づきOHの変動とENSO周期の線形関係を見出し、OHの経年変動を2021年まで拡張した。
- OHの経年変動を考慮してGCP- CH_4 のインバースモデリングの枠組みに適応することにより CH_4 収支の逆推定の高精度化に役立てた(図2-5; Saunois et al. submitted)。また、テーマ3-(2)と共同で本成果の一部を取りまとめ中である(Belikov et al. in prep.)

衛星データの高精度化のための先験値の提供 ●MIROC4-ACTM でCO₂、CH₄、N₂Oの濃度計算を実施し、テーマ3サブテーマ2に現実的なCO₂、CH₄、N₂Oの高度分布データセットを提供する。 ●テーマ3サブテーマ2と協力して、MIROC4-ACTMのCO₂、CH₄、N₂Oの3次元濃度分布データセットをGOSAT/GOSAT-2の熱赤外バンドの温室効果ガス高度分布導出(リトリート)のための先験情報(アプリア)として使用し、GOSAT/GOSAT-2の熱赤外バンドのスペクトルデータからCO₂、CH₄、N₂Oの高度分布のリトリートを実施する。 ●テーマ3サブテーマ2と協力して、MIROC4-ACTMのアプリアデータに基づくGOSAT/GOSAT-2のCO₂、CH₄、N₂Oのリトリート結果とNIES-TMおよびNICAM-TMのアプリアデータに基づくGOSAT/GOSAT-2のリトリート結果(公式プロダクト)の比較・検証を実施する。 →衛星データのさらなる高精度化を図り、データを収支推定に利用するとともに、科学コミュニティへ提供する。 モデルデータ提供システムの構築 ●本研究で得られた温室効果ガス濃度の3次元分布データおよび排出・吸収源の収支情報を、政府および政策立案者、温室効果ガス観測コミュニティに提供するシステムを構築する。 →米国・欧米ですでに構築されているデータ提供システムを念頭に、本研究の成果を速やかに共有できる枠組みを構築する。	衛星データの高精度化のための先験値の提供 ●MIROC4-ACTMによるCO₂、CH₄、N₂O濃度のシミュレーション結果をサブテーマ3-(2)に提供した。 ●ACTMのN₂O濃度を先験情報としてGOSAT-2のTIRスペクトルからN₂O濃度のリトリートを行った。また得られたN₂OリトリートプロダクトについてフランスCNRMの研究者と共同で比較評価した(Ricaud et al., 2021)。また、NIES研究者と協力しXCH₄とXCO₂リトリートのための検証データセットの開発を積極的に支援した(Muller et al., 2021 & 2024)。 ●MIROC4-ACTMとNICAM-TMによるCO₂フラックス等の解析結果は、本プロジェクトが毎年UNFCCCに提出しているGHG速報のために行っている。また、MIROC4-ACTMの結果は、シベリアのCO₂フラックス変動についてはテーマサブ3-(1)と、MIROC-ES2Lシミュレーションとの比較についてはテーマ2-(1)とそれぞれ共有している。 モデルデータ提供システムの構築 ●MIROC4-ACTMによって得られた3つの主要な温室効果ガスについて、月平均フラックスと3次元濃度を1時間間隔でzenodeサーバ(DOI付き)等を紹介して迅速に公開する体制を整え、国内外の研究コミュニティ等で幅広く活用された。
---	---

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、従来主流であった「CO₂濃度で駆動される方式」のシミュレーションではなく、「CO₂排出量によって駆動される方式」に早期から着目し、この方式で本研究課題を遂行した。近年、同様の議論が、IPCC第7次報告書に向けた国際マルチモデル比較プロジェクト(CMIP7)でも始まり(例: Sanderson et al. 2023)、現在投稿準備中のOkada & Hajimaの成果(表1-2、図1-5、図1-8、図1-9が内容に含まれる)は、先導性・先見性ある成果となる見込みが高い。加えて、成果25として取りまとめた研究結果は、CMIP7のコデザインのための議論材料等として参照され始めており(<https://wcrp-cmip.org/scenariomip-cmip7-proposal/>)、その国際的先導性の兆しが既に見られる。CO₂に加えて、CH₄やN₂Oの排出削減効果に関するモデル開発・研究議論も世界では始まりつつあり、サブテーマ2-(2)との連携により実現できたこれらガス放出量の検証作業は、次の研究フェーズ展開に向けた重要な礎と

なる。また、本研究課題で行われた検証と再現精度向上は、国内の予測モデル開発/温暖化予測研究プロジェクト、およびIPCC-AR7/CMIP7の予測精度向上にもつながり、大きな意義と波及効果が見込める。

サブテーマ2では陸域および海洋域のサブ大陸/サブ流域スケールにおけるCO₂、CH₄、N₂Oのインバース/トップダウンモデリング解析を実施した。得られた結果についてはIPCC-AR6、GCP、RECCAP2、EU-VERIFYなどの政策立案に特に有用な温室効果ガス収支評価の国際プロジェクトでの利用に向けて定期的に更新している。また、温室効果ガスの発生源と吸収源の推定に関する理解を深めるため、温室効果ガスの発生源および吸収源の部門別にアンサンブルインバージョンを実施し、インバージョンシステムにおける先験フラックスやパラメータの選択に依存する推定フラックスの不確実性を評価した。地域スケールでの温室効果ガスの発生源と吸収源の変動要因等の理解、国際関連コミュニティにおける本サブテーマ成果物の利用促進、および大気輸送プロセスに関する知識向上などのために、様々な共同研究プロジェクトを実施した。例えば、GCP-CH₄におけるOHラジカルの変動、GCP-N₂OにおけるN₂O海洋フラックスの選定、CO₂フラックス検証のためのECを用いた関係性評価手法の開発など、MIR0C4-ACTMを用いた結果に基づく様々な情報を提供し、国際的なトップダウンモデリング研究を支援した。

<行政等に既に貢献した成果>

本研究課題では、国立環境研究所/海洋研究開発機構/千葉大学で作成したUNFCCC向けに報告書用に、3種の主要GHGの地域および世界の排出源と吸収源情報を作成し定期的に更新した。また、地球システムモデルおよび簡易気候モデルを使用した排出削減の実効性評価も合わせて同報告書に掲載した。特にMIR0C4-ACTMを用いた各種結果は、UNFCCC向けSII-8報告書、IPCC AR6 におけるトップダウン収支、およびフューチャーアースの下での GCP の 3 種ガス収支把握に関する活動すべてにおいて重要な役割を果たし、第 1 回グローバルストックテイク（2023 年）にインプットを提供し貢献している。サブテーマ2代表は、日本パビリオンの傘下で、グラスゴー（オンライン、2021年）、シャルム・エル・セイク（2022年）、ドバイ（2023年）で開催されたCOP会議でセッションを企画・発表も行い（成果40，44，49）、世界の政策決定者に向けてSII-8から得られた成果の公表と周知を行った。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

本研究で得られた知見（図1-8，図1-9）は、今後の温暖化緩和策の長期的政策展望に貢献しうる。今後、グローバルストックテイク等を通じて世界の総CO₂排出量が減少に転じた場合、一部（国・人）がその即効性を期待することが予想される。しかし、大気CO₂濃度低下や全球平均気温の低下といった「目に見える」効果が現れるのは、その十年後になる可能性が高い。「より早期に緩和効果を発現させるためには排出削減ペースの加速が必要である」という本研究の知見と将来展望に基づき、今後の長期政策を展開する必要がある。また、今後の排出削減の努力は、その効果の発現を「大気CO₂濃度の年増加率の低下」として連続的に監視できる可能性が高い（図1-9c）。より不確実性の高い自然シンクの精緻な把握と合わせ、関連科学政策を推進する必要性が示唆される。特に今後の自然シンクについては、サブテーマ1（図1-9）とサブテーマ2（図2-8）の双方から、その重要性が示唆されている。

主要な温室効果ガスの国内排出量を観測に基づき科学的に把握することは、排出削減政策を決定する上で極めて重要である。過去20年間のN₂Oの観測は、2100年までに2℃という地球温暖化目標を達成するための共有社会経済経路（SSP）の最も悲観的な排出シナリオよりも、観測された成長率が高いことを示している（〔成果22〕Tian et al., 2024）。また現在のCO₂観測も、SSPの中庸シナリオ程度の値を示しており、1.5/2.0度目標に到達する緩和シナリオ（SSP1-1.9，SSP1-2.6）にまだ届いていないことを示唆している（図1-9，Friedlingstein et al., 2023）。IPCC-AR6の執筆にあたり、GWP20による温室効果ガス排出量の統合分析を行ったところ、一部の地域では、20年間のCH₄排出量の影響がCO₂排出量よりも大きいことが示された（〔成果2〕Canadell et al. 2021）。日本を含むいくつかの国では、京都議定書後の1990年代以降、CH₄とN₂Oの排出削減がすでに大きく進展しており、これらの数十年にわたる過去の排出動向／努力を評価し、これらの排出削減対策を他国と共有することが推奨される。

引用文献:

-
- Sanderson, B. M. et al. (2023). The need for carbon emissions-driven climate projections in CMIP7. *EGUsphere*, 2023, 1–51.
 - Patra, P. K., Krol, M. C., Prinn, R. G., Takigawa, M., Mühle, J., Montzka, S. A., ... & Elkins, J. W. (2021). Methyl chloroform continues to constrain the hydroxyl (OH) variability in the troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4), e2020JD033862.
 - Ricaud, P., Attié, J. L., Chalinel, R., Pasternak, F., Léonard, J., Pison, I., ... & Zwaftink, C. G. (2021). The monitoring nitrous oxide sources (MIN2OS) satellite project. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112688.
 - Müller, A., Tanimoto, H., Sugita, T., Machida, T., Nakaoka, S. I., Patra, P. K., ... & Crisp, D. (2020). New approach to evaluate satellite derived XCO₂ over oceans by integrating ship and aircraft observations. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*.
 - Müller, A., Tanimoto, H., Sugita, T., Patra, P. K., Nakaoka, S. I., Machida, T., ... & Shiomi, K. (2024). Ship-and aircraft-based XCH₄ over oceans as a new tool for satellite validation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(4), 1297–1316.

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：	24
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）：	7
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）：	20
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	5
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	1
その他の成果発表：	3

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	【テーマ2】の主要な成果（10件まで）
25	T. Hajima, et al. (2024) Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models and suggestion for improved simulation of CO2 concentration [preprint; submitted to Biogeoscience], https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-188
1	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.
5	P. K. Patra et al. (2022) Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model. J. Meteorol. Soc. Jpn., 100, 1 (2022)
6	N. Chandra et al. (2022) Estimated regional CO2 flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO2 inversions, Atmos. Chem. Phys., 22, 9215-9243, https://doi.org/10.5194/acp-22-9215-2022
15	J.S.H. Bisht et al. (2023) Estimation of CH4 emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system, Geoscientific Model Development, 16, 1823-1838, 2023.

17	A. Ito et al. (2023) Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH ₄ models, Geophys. Res. Lett. doi:10.1029/2023GL103037
2	J.G. Canadell et al. (2021) Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673-816. doi: 10.1017/9781009157896.007
13	B. Byrne et al. (2023) National CO ₂ budgets (2015-2020) inferred from atmospheric CO ₂ observations in support of the global stocktake, Earth Syst. Sci. Data, 15, 963-1004, 2023.
22	H. Tian et al. (2024) Global Nitrous Oxide Budget 1980-2020, Earth Syst. Sci. Data, 16, in press.
23	M. Bustamante et al. (2023) Ten New Insights in Climate Science 2023/2024. Global Sustainability, 1-58, 2023. https://doi.org/10.1017/sus.2023.25

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

テーマ2では多岐にわたる国際共同研究を展開した。ここでは主たる4つの取り組みのみ示す。

地球システムモデルの気候-炭素循環過程の相互比較に関する国際共同研究の推進

地球システムモデルを用いた気候-炭素循環相互作用に関する国際研究コミュニティC4MIP (the Coupled Climate-Carbon Cycle Model Intercomparison Project)での共同研究として、CMIP6シミュレーション結果を用いた、地球システムモデルによる再現CO₂濃度に関する分析を行なった。この公開シミュレーションデータを活用し、本課題でその解析を行なった。なお本分析は、文部科学省受託研究「気候変動予測先端研究プログラム」とのジョイント研究として実施した([成果25]Hajima et al. (2024))。

<相手機関・国・地域名>

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

Global Carbon Projectに関する国際共同研究の推進

温室効果ガスの全球収支情報をとりまとめるGlobal Carbon Project (GCP)に参画し、国際共同研究を実施した。特にMIROC4-ACTMを用いた逆解析を行うサブテーマ2代表は、3種温室効果ガスをカバーし

ており、GCP-CO₂、GCP-CH₄、GCP-N₂Oの全てに貢献した。GCP-CO₂ (Friedlingstein et al. 2023)では[成果6]Chandra et al. (2022)の成果が、GCP-CH₄ (Saunois et al., submitted)では [成果8]Belikov et al. (2022)の成果が、GCP-N₂O ([成果22]Tian et al., 2024)では [成果5]Patra et al. (2022)の成果が活用されている。特にGCP-CH₄、GCP-N₂Oでは共同主催者や運営委員などを務め、世界をリードする立場にある。

<相手機関・国・地域名>

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

REgional Carbon Cycle Assessment and Processes2に関する国際共同研究の推進

RECCAP2(Regional Carbon Cycle Assessment and Processes2)を通じた国スケールの温室効果ガス収支推定に貢献した。RECCAP2は、インバージョン、プロセスモデル、船舶観測に基づくデータプロダクト、リモートセンシングベースのプロダクト、国別インベントリ情報など、GHGフラックスを推定するための複数かつ独立した最先端手法を活用している。本サブテーマPIは、RECCAP2 運営委員として活動し、RECCAP2報告書の複数章に貢献した。RECCAP2に関わる国スケールでの温室効果ガス収支に関するフレームワーク構築(成果13)や、個別地域での成果が得られた：成果16(インド洋)、成果21(東南アジア)。他にも多数の準備中論文がある。

<相手機関・国・地域名>

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

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

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

<相手機関・国・地域名>

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

8. 研究者略歴

<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）
羽島知洋	2008 東京大学大学院 農学生命科学研究科修了 2008 博士(農学) 取得 2008 JSPS PDを経て海洋研究開発機構 現在、同研究所 地球環境部門 環境変動予測研究センター 地球システムモデル開発・応用グループ グループリーダー代理 副主任研究員 専門は陸域生態系・炭素循環、研究テーマは地球システムモデリングと生態系・物質循環過程

<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) パトラ プラビール	グジャラート大学 物理学研究所、博士、 現在 海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター 物質循環・人間圏研究グループ グループリーダー代理	2021年度 ～ 2023年度

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1「地球システムモデルを用いたGHG排出削減の実効性評価」

[サブテーマ1 要旨]

本サブテーマでは、SII-8課題で得られる最新GHGs情報(データおよび科学的知見)を活用し、温暖化予測に用いられる地球システムモデルのGHGs濃度や収支の検証と改良を行い、温暖化メカニズムの理解向上・予測精度の向上を行うことを目的とする。また、地球システムモデルを用いた排出削減の実効性評価シミュレーションを実施し、排出削減の取り組みが全球規模でどの程度の温暖化抑制効果を持ちうるのかについての科学的情報を提示することも目的とする。

このため、サブテーマ2-(2)との協力のもと、トップダウン手法によるフラックス推定結果や濃度情報を活用し、地球システムモデルによる過去再現実験の出力結果と比較を行い、地球システムモデルで再現されるGHGs動態の検証を行った。CO₂については、観測濃度との比較を通じ、20世紀後半にその大気濃度が特異的に過小評価されることを特定した。またフィードバック解析を通じて、モデルの炭素循環-窒素循環相互作用に問題があるという示唆が得られた。CH₄およびN₂Oについては、サブテーマ2-(2)のトップダウン手法によるエミッション情報と比較し、地球システムモデルの全球エミッションフラックスがトップダウン手法の値に既に十分に近いものであることを確認した。

以上の検証作業に基づき、地球システムモデルの炭素循環-窒素循環相互作用過程の改良・調整を行ったところ、過小評価されていた現在の大気CO₂濃度を大幅に改善するに至った。さらに、このような濃度バイアスを回避するための新システムを地球システムモデルに実装し、より現実的な将来予測を行うための体制を整えた。

この新たなシステムとともに、簡易気候モデルを補助的に活用しながら、GHG排出削減の実効性評価シミュレーションおよびその解析を行った。化石燃料排出が減少に転じてから大気CO₂濃度および全球平均気温にその効果が現れる(減少に転じる)時期に着目して調べたところ、特に大気CO₂濃度が減少に転じるまでの時間が長く、約20年(SSP1-1.9シナリオ)もしくは約45年(SSP1-2.6シナリオ)の時間を要することが明らかになった。早期のCO₂濃度低下および気温低下を実現するためには、人為排出量が低下に転じたのちもその排出削減ペースを加速する必要があることが示唆された。また、正味人為排出量が海陸吸収量を下回った時にはじめて大気CO₂濃度の低下が実現されるため、今後の継続的なCO₂濃度増加率の監視と、不確実性が大きい自然シンクの正確な理解・モデル化が重要であることなどが示唆された。

1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1では、SII-8課題を通じて得られる最新かつ精緻なGHGs情報(データおよび科学的知見)を活用し、温暖化予測に用いられる地球システムモデルのGHGs濃度や収支の検証と改良を行う。これにより、人間のGHGs排出とそれら地球上での動態、および温暖化の理解向上と予測精度の向上に寄与するとともに、観測(監視体制)とモデル(予測)の融合的な研究体制の礎を、他テーマと協力しながら築く。また、地球システムモデルを用いた排出削減の実効性評価シミュレーションを行うことにより、各国の排出削減への取り組みが、全球規模でどの程度の温暖化抑制効果を持ちうるのかについての科学的情報を提示する。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「地球システムモデルを用いたGHG排出削減の実効性評価」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人海洋研究開発機構
サブテーマ1 目標	本サブテーマでは、以下の具体的な目標達成を通じ、推進費SII-8課題の目標「地球システムモデルでの排出削減による実効性評価を行うため、

GHGs動態の再現精度を検証し、物質循環の予測精度を向上させる」および「GHGs動態の不確実性を低減させ、温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する観測及びモデル研究を総合的に推進する」の達成に貢献する。

● 地球システムモデルで再現される GHGs 動態の検証

地球システムモデルで再現される各種GHGsの収支や濃度変動の検証を行うべく、サブテーマ2-(2)との協力のもと、インバージョン推定を始めとする観測事実と整合的な全球GHGs収支・濃度情報と、地球システムモデルによる過去再現実験の出力とを比較する。主たる対象期間は、より多くの観測データが揃い始める20世紀後半とする。CO₂については、全球収支のみならず、バイアスを生み出す原因となっている地域や季節、過程が特定できるよう分析を行う。CO₂と比較し、研究・開発の取り組みが始まったばかりのCH₄やN₂Oについては、その主たる放出/吸収源の全球収支が、他の手法等から示唆される推定幅に収まっているかどうかを主として確認する。

● 上記検証作業に基づくモデル改良・調整

上記の検証作業に基づき、モデル改良を行う。科学的知見の蓄積が比較的進んでいるCO₂については、現在における大気濃度が±10ppmvに収まることを目指して改良を行う(ただし、長寿命気体であるCO₂の大気濃度は、観測データが少ない20世紀前半以前の履歴も強く影響するため、本課題で対象とする20世紀後半の観測情報だけでは十分に拘束できない可能性がある)。CH₄やN₂Oについては、インバージョン推定やその他手法から示唆される全球収支の推定幅に、モデル推定値が収まることを目標にその改良を行う。改良・調整版モデルを用いて過去再現実験を実施し、その効果を確認する。

● 排出削減の実効性評価シミュレーションの実施

GHGsの排出削減が、近未来等においてどの程度の温暖化抑制効果を持ちうるのかについて調査・報告するため、地球システムモデルを活用したシミュレーションを実施する。テーマ1およびテーマ2から得られるGHGs人為排出量の最新情報等を活用し、シミュレーションのための入力値データを作成し、これを用いて実験を実施する。また、よりスピーディーな実効性評価を意図し、既存の簡易気候モデル(PCでもシミュレーション可能な全球1次元の気候-物質循環モデル)の利用可能性を検討し、利用可能であればこれを併用して研究を進める。

3. サブテーマ1 研究開発内容

1. 地球システムモデルの GHGs 動態検証とモデル改良・調整 (1) CO₂

本研究開発内容は、上記目標「地球システムモデルで再現される GHGs 動態の検証」と「モデル改良・調整」に関わるものとして実施した。温室効果ガス排出削減による気温低下を定量化するためには、人為排出量をもとに将来予測を行うことのできる地球システムモデルの活用が必要である。しかし、多くのモデルで、再現 CO₂ 濃度に大きなバイアスが存在する。その原因を特定するためのマルチモデル解析およびフィードバック分析を行った。並行し、どのような全球データセットが気候-炭素循環過程の検証で活用しうるのかについてレビューを行った。

2. 地球システムモデルの GHGs 動態検証とモデル改良・調整 (2) N₂O および CH₄

本研究開発内容は、上記目標「地球システムモデルで再現される GHGs 動態の検証」と「モデル改良・調整」に関わるものとして実施した。CH₄とN₂Oについて、サブテーマ2-(2)との協力のもと、地球システムモデルで再現される放出/吸収源の全球収支について、インバージョン推定結果との比較を行った。

3. 温室効果ガス排出削減の実効性評価に向けた取り組み (1) 地球システムモデル

本研究開発内容は上記目標「排出削減の実効性評価シミュレーションの実施」として実施した。地球システムモデルは、地球上の様々な相互作用過程を陽に解くものの、バイアスを有する。排出削減の実効性評価の信頼性を向上させるため、観測情報に対して大気CO₂濃度をナッジングする手法をモデルに導入した。

4. 温室効果ガス排出削減の実効性評価に向けた取り組み (2) 簡易気候モデル

本研究開発内容は上記目標「排出削減の実効性評価シミュレーションの実施」として実施した。よりスピーディーな排出削減の実効性評価や、地球システムモデルのシミュレーション結果解釈の補助を意図し、既存の簡易気候モデル(PCでも実行可能な全球1次元の気候-物質循環モデル)を、複雑な地球システムモデルの結果をエミュレートできるようパラメータ調整を行った。

5. 温室効果ガス排出削減の実効性評価:ベースラインシナリオとの差に着目した評価

本研究開発内容は上記目標「排出削減の実効性評価シミュレーションの実施」として実施した。上の研究開発作業の進捗を踏まえながら、現状で利用可能な情報・システムを最大限活用し、化石燃料CO₂排出の削減が今後の温暖化緩和にどの程度の有効性を持ち得るのかについてシミュレーション・評価を行なった。この際、上の項目3「大気濃度ナッジングシステムを導入した地球システムモデル」と、項目4「パラメータ調整済み簡易気候モデル」を活用した。なお、用いた将来シナリオは、「現状のCO₂排出が継続する」という仮定を置いたベースラインシナリオと、Shared Socio-economic Pathways (SSPs)である。なお、CMIP6(第6期結合気候モデル相互比較プロジェクト)では所与の大気CO₂濃度で駆動する「濃度駆動方式」で主たる実験が実施されたが、本研究では、本研究目的に合わせて、人為CO₂排出量を入力してモデルを駆動させる「排出駆動方式」で新たに実験を実施した。

6. 温室効果ガス排出削減の実効性評価:大気 CO₂ 濃度および全球平均気温の減少時期に着目した評価

上の内容5と同様、本研究開発内容も上記目標「排出削減の実効性評価シミュレーションの実施」として実施した。内容5では、ベースラインシナリオとSSPsを用いた2種シミュレーションの差により評価を行うため、その結果はベースラインシナリオの仮定の置き方に強く依存する。そこで、ベースラインシナリオを設けず、SSPsシナリオによるシミュレーション結果だけを用いることにより、「人為CO₂排出の減少が大気CO₂濃度および全球平均気温の減少にいつ頃結びつくのか」という観点で解析を行なった。

4. サブテーマ1 結果及び考察

地球システムモデルのGHGs動態検証 (1) CO₂

CMIP6/IPCC-AR6世代の地球システムモデルの過去再現実験(1850～2014年)の結果のうち、大気CO₂濃度を比較し、そのバイアスを評価した(図1-1a)。大気観測/氷床コアに基づく大気CO₂濃度(図中赤線)と比べ、各モデルが再現する大気CO₂濃度は、程度の違いはあるものの、全モデルがバイアスを有していることが確認された。マルチモデル平均は参照データと概ね合致するが、どのモデルも1940年～1960年の大気CO₂濃度を過大評価するという共通した問題も確認された(図1-1b)。本研究で使用する地球システムモデル(図中太青線)は、2014年時点での濃度を10ppmv以上過小評価するが、2000年以降の大気CO₂濃度の増加率は極めて良好である。CO₂濃度バイアスの原因をさらに探るべく、定性的特徴によって分けられた5期間での濃度変化を調べた(図1-1c)。この5つの期間は以下のように特徴付けられる。

- (1) 期間1、1850～1899年：土地利用変化が主たるCO₂排出源であった時期
- (2) 期間2、1900～1939年：化石燃料排出と土地利用排出と比肩する時期
- (3) 期間3、1940～1959年：大気CO₂濃度の直接観測の開始以前、濃度が大きく変動しない期間

(4) 期間4、1960～1999年：大気CO₂濃度の直接観測が開始され、また化石燃料排出が卓越しはじめる期間。農耕地拡大や大気汚染の悪化が進行し、炭素循環にも強い影響を及ぼしうる時期。

(5) 期間5、2000～2014年：炭素循環に関わる全球観測情報・データベースが豊富になり始める期間(成果1)。また、パリ協定締結以前であり、依然として化石燃料排出が増加するものの、土地利用由来の排出がやや抑制される。また欧州等での大気汚染等も改善が進む。

図1-1cの結果を見ると、MIROC-ES2Lによる大気CO₂濃度は、土地利用変化排出の影響が強い期間1および2において良好であり、土地利用変化の影響がモデル内で良好に再現されていることを示唆する。他モデルと比べ特徴的なのは期間4であり、MIROC-ES2Lはこの時期の大気CO₂濃度増加を大幅に過小評価していることが判明した。なお、期間5における濃度変化は良好である。

20世紀後半(期間4)で生じる大気CO₂濃度の過小バイアスの原因をさらに調べるため、上述の5つの時期における炭素収支変動のフィードバック分析を行った(図1-2、CMIP6で実施された複数実験結果を組み合わせるにより実施)。期間4では、化石燃料排出は199PgC(灰色矢印、モデル入力値)あり、また土地利用変化によっても27PgCの放出が生じている(茶色矢印、モデル内で計算)。このうち、大気CO₂濃度増加によって引き起こされる陸域への炭素蓄積(いわゆるCO₂施肥効果に起因する炭素蓄積)は90PgCである(緑矢印)。またこの時期は温暖化も顕在化しつつあり、CO₂由来の温暖化に応答した炭素放出(赤矢

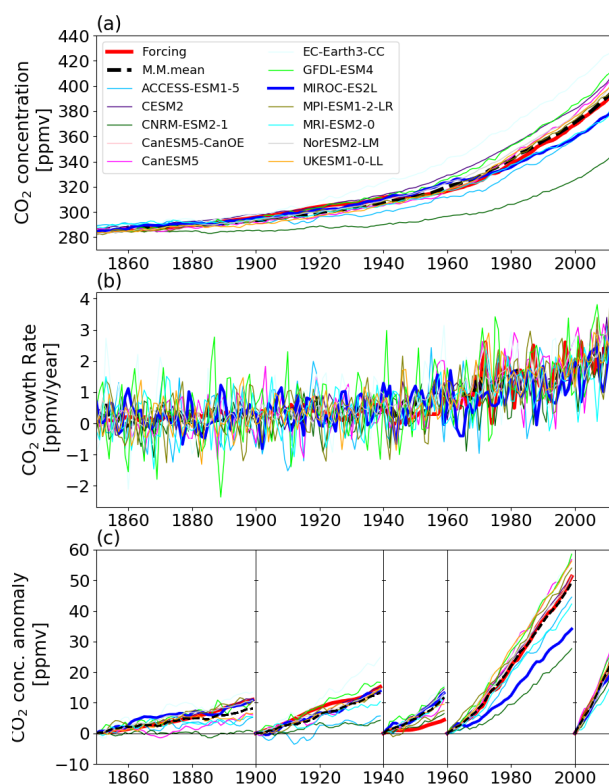


図1-1 CMIP6 (IPCC-AR6) 世代の地球システムモデルによる大気CO₂濃度の比較。(a) 大気CO₂濃度の絶対値、(b) 大気CO₂濃度の年成長率、(c) 定性的に分けられた5つの期間における大気CO₂濃度の変化。本課題で使用する地球システムモデル(MIROC-ES2L)は太青線、観測情報に準拠した大気CO₂濃度(CMIP6で共通利用されているデータ)は太赤線。

印、生態系呼吸の増大等に起因する)が見られる。紫矢印はそれ以外の影響であり、具体的にはメタンや亜酸化窒素、エアロゾルといったCO₂以外によって生じる温暖化/冷却を介した影響や、窒素沈着による栄養塩供給の影響などを表す。本解析で新たに判明したことは、この非CO₂の影響が大きいことである。同様の解析を他モデル(CanESM5)に対しても行なったところ、両モデル間でこの非CO₂影響の項が最も差が大きかった(MIROC-ES2Lは-30PgCであるのに対し、CanESM5は26PgC)。

以上から、MIROC-ES2Lに見られる大気CO₂濃度の過小評価は、特に1960年から2000年の間に生じていることが特定された。その原因の一つとして、CO₂以外の要因による陸域炭素吸収の変動がモデル内で適切に再現できていないことが疑われた。特にMIROC-ES2Lでは、大気からの窒素沈着とそれによる陸域光合成の促進効果が陽に扱われており、この時期に増大する窒素沈着に対する感度が過大である可能性が示唆された(なお、沈着量そのものは入力データとして与えている)。加えて、GCP2021(Friedlingstein et al. 2021)で用いられているBook keeping methodと比較すると、本モデルで計算される20世紀後半の土地利用エミッションが弱いことも確認された。この時期は、農地拡大と窒素施肥(工業的窒素固定によるもの)の投入が増加している時期にも対応し、農地における炭素吸収を過大推定している可能性も示唆された。

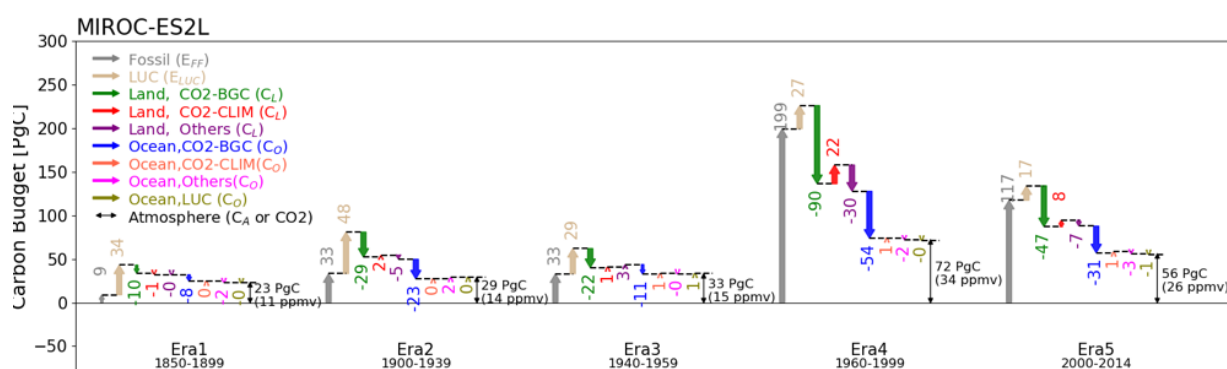


図1-2 地球システムモデルMIROC-ES2Lの過去再現実験における炭素収支変化のフィードバック分析。CMIP6の4種実験結果を組み合わせることによって解析。炭素収支変化は、定性的に分けられた5つの期間それぞれにおける積算値として表示。灰色はCMIP6で使用されている化石燃料排出量。陸域の炭素吸収変動は4つの要素に分解されている：土地利用変化による変動(茶色矢印、すなわち土地利用変化による排出量に相当)、CO₂濃度上昇に対する陸域炭素吸収の応答(緑矢印、いわゆるCO₂施肥効果に起因する炭素蓄積)、CO₂由来の温暖化に対する応答、非CO₂要素に対する応答(紫矢印、CO₂以外の温室効果ガスやエアロゾルによる温暖化/冷却効果の影響、および窒素沈着の影響)。同様に、海洋のフィードバック分析の結果を青、橙、ピンク、オリーブ色でそれぞれ表している。またこれらの残差として得られる大気中炭素量変化(括弧内の数字は濃度換算値)を黒線で表す。

以上のフィードバック解析から、MIROC-ES2Lにおける大気CO₂濃度が過小評価される原因は、窒素沈着の影響が強く疑われた。そこで、窒素沈着量だけを産業革命以前のレベルに固定する特殊な感度実験を実施したところ、1850-2014年における陸域の累積炭素吸収量が約35PgCほど低下するという結果が得られた。この値は、大気CO₂濃度に換算(海陸自然シンクへのCO₂再分配率=約0.5も含む)するとおよそ+8ppmvに相当し、特に農耕地が広がる欧州・アジア域・北米で顕著であった。モデルに与える窒素沈着量はCMIP6の入力データとして共通利用されたものであり、極端に非現実的なものであったとは考えにくい。したがって、窒素沈着量そのものよりも、沈着窒素に対する陸域の炭素吸収が過剰であり、その結果 大気CO₂濃度が過小評価されていることが強く示唆された。

この解決策については複数の可能性が考えられる。ここでは、農地における植物の光合成パラメータ(葉内窒素濃度あたりの最大光合成速度)を半減させることにより、窒素沈着に対する農地での炭素吸収を低下させる試みを行なった(表1-1)。その結果、調整前では大気CO₂を約14ppmvほど濃度を過小評価していたが、調整後にはそれを6.2ppmvまで縮小することに成功した。他にも調整方法は存在しうが、以下2点を鑑みるに、合理的な解決策の一つであると考えられる。

1. 窒素沈着によって引き起こされる炭素吸収が、主に農耕地で生じていたこと

2. 調整前にモデル与えていた当該光合成パラメータ(農作物は特にその値が大きい)は、メタ解析研究(Kattge et al. 2009)の文献値を使用していたものの、この値を約300kmのモデル陸域格子に空間的に一様に分布するというモデル化が行われていた；本来農地では、その植生密度が管理されており、陸域格子に一様に農作物が繁茂しているという仮定はあまり適当ではないことが既に懸念されていた

ここでは、このような農地における管理された植生密度の効果を、光合成パラメータとして間接的に表した。今後、このような植生密度の陽な取り扱いが必要であることが示唆される。

表1-1 農地における植物の光合成パラメータ(葉内窒素濃度あたりの最大光合成速度)を調整する前後での、シミュレーションで再現される大気CO₂濃度(2014年時点)

	観測値	MIROC-ES2L 調整前 (10アンサンブル メンバー平均)	MIROC-ES2L 調整後 (1メンバー)
2014年大気CO ₂ 濃度 [ppmv]	397.6	383.9±1.3	391.41
観測濃度との差 [ppmv]	—	13.7	6.2

以上の解析に加え、どのような全球データセットが気候-炭素循環過程の検証で活用しうるのかについてレビューを行った(成果1)。CMIP6世代の地球システムモデルで活用されている主たる検証用データセットを調べたところ、特に長いレコード長を持つ検証データは大気CO₂濃度観測(1950年代～)であった。また大気観測情報で拘束された全球CO₂フラックスデータ(逆推定)はおよそ1990年代以降のものが利用可能な状況にあった。炭素循環をはじめとする物質循環過程は生態系プロセスが強く関わっているため不確実性が大きく、このような観測事実に基づくデータセットを多面的に検証に活用していくことが重要であることが示唆された。現在、予測モデルにメタンや亜酸化窒素の動態を導入し予測に反映させる国際的研究機運も高まっており、CO₂以外の温室効果ガス動態の検証に資する全球データセットの必要性も高まっていくと予想され、その全球動態を把握する上で鍵となる変数(例えばCO₂炭素循環であれば陸域の総光合成速度など)のデータセット整備が強く望まれるという総括が得られた。

地球システムモデルのGHGs動態検証 (2)N₂OおよびCH₄

地球システムモデルによって再現されるN₂OおよびCH₄動態を評価するため、サブテーマ2-(2)の逆推定手法で計算された全球フラックスを用いて比較を行った。CH₄の比較(図1-3)では、地球システムモデルにおける全球放出量が逆推定結果とよく整合している。ただしその空間分布を比較すると、地球システムモデルの放出量は、ロシア中央部や北米などにおける放出量が過多であることが示唆された。また、熱帯における放出量が地球システムモデルではやや弱い、という傾向も確認された。

N₂Oの比較(図1-4)では、地球システムモデルにおける総N₂O放出量が逆推定結果とよく一致していることが確認された(ただし地球システムモデルの計算では、産業革命以前における大気N₂O濃度のドリフトする(増加する)ことを抑制するために偽のN₂O吸収源(7.5 TgN/year)を設けて実験している)。陸の放出量(自然土壌および農地)は逆推定結果とよく整合するが、海洋放出量はやや過大であった。逆推定結果と比べると、地球システムモデルは陸域および海洋放出の空間パターンの特徴をおおよそ捉えられていることが確認されたが、陸域では半乾燥～亜熱帯(豪州北部や一部アフリカ)において過剰な放出が、海洋では赤道湧昇域における放出が弱い代わりに外洋に広く放出が存在するなど、いくつかの問題が確認された。

特に海洋N₂O放出量については、空間分布および全球総量について逆推定結果といくつかの食い違いが見つかったため、さらなる調査を行った。その結果、海洋pN₂O計算過程に問題があることが判明し、このバグ修正と他改良(有効層厚さによるN₂O生成の制約)を加えたところ、全球の海洋N₂O放出量が4.4TgN/yearであったものが、3.5TgN/year程度にまで抑えられ、逆推定結果とさらに整合的なものになった。

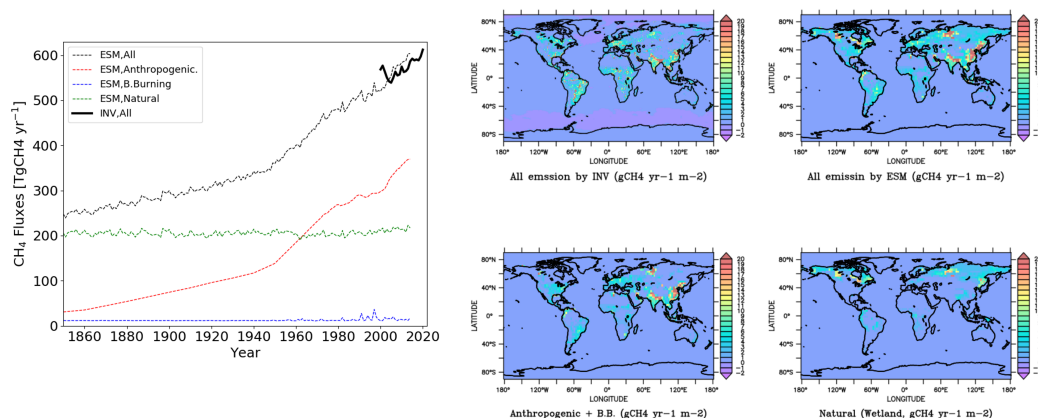


図1-3 地球システムモデルMIROC-ES2L(含む大気化学モデル)の過去再現実験におけるCH₄放出量の解析。比較対象データはサブテーマ2-(2)から提供を受けた逆推定結果を使用 (Patra, P. K. (2022). MIROC4-ACTM CH₄ inversion fluxes (2000-2020) <https://doi.org/10.5281/zenodo.5920070>)。左は全球収支の結果であり、太線が逆推定の結果、点線が地球システムモデルの結果。右の4つのパネルのうち上段は全放出量の比較(左が逆推定、右が地球システムモデル)、下段は地球システムモデル内での内訳(左は人為排出および燃焼由来、右は自然起源)。

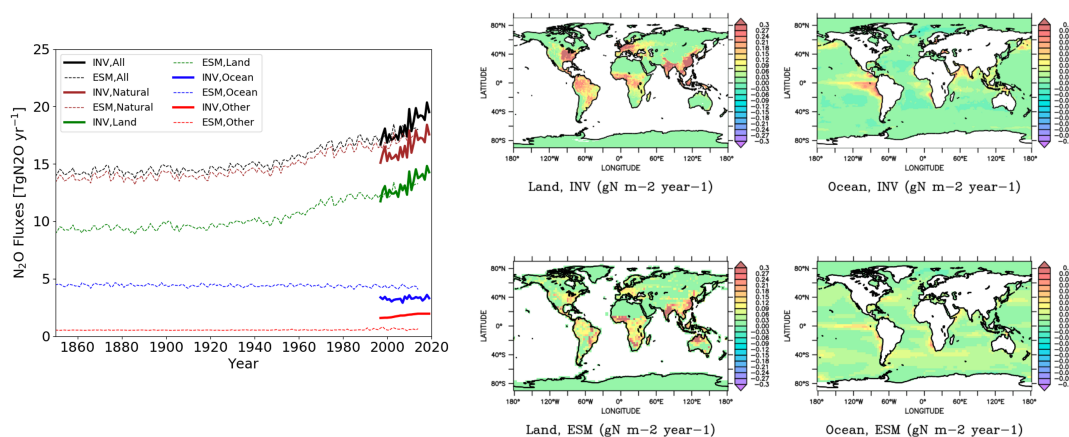


図1-4 地球システムモデルMIROC-ES2L(含む大気化学モデル)の過去再現実験におけるN₂O収支変化の解析。比較対象はサブテーマ2-(2)の成果であるPatra et al. (2021)の逆推定結果(Patra, P. K. (2022). MIROC4-ACTM N₂O inversion fluxes (1997-2019) <https://doi.org/10.5281/zenodo.5889524>)を使用。左は全球収支の結果であり、太線が逆推定の結果、点線が地球システムモデルの結果を表す。右の4つのパネルは陸域および海洋のN₂Oエミッションの比較であり、上がPatra et al. (2021)の結果、下が地球システムモデルの結果を表す。

温室効果ガス排出削減の実効性評価に向けた取り組み (1) 地球システムモデル

これまで示してきた通り、本課題で使用する地球システムモデルは2014年時点の大気CO₂濃度を過小評価し、そのバイアスが1960～1999年の間に集中して生じていることが特定された。ただしこの期間以前/以降の濃度変動の再現性は良好である。したがって、1960～1999年の間に生じる濃度バイアスを回避した上で近未来予測シミュレーションが可能であれば、排出削減の実効性評価の信頼性がより高まる。そこで、上述の大気CO₂濃度に関する調整・改良作業と並行し、大気濃度に大きなバイアスが生じないようにする新たな実験方式を考案・実装した。具体的には、観測大気CO₂濃度によってモデル中の大気濃度を緩やかに拘束(ナッジング)する、という方法である。

拘束に用いる大気CO₂濃度は、CMIP6で利用されている大気濃度(大気濃度観測開始以前はアイスコアに基づくもの、それ以降は観測情報を統合したもの)を使用した。ナッジングのための各種パラメータ設定等(例：対象大気層やナッジング時定数)を、複数実験を実施しながら経験的に決定し、確認実験を行なった(図1-5)。ナッジング駆動実験の結果(図中黒線)に比べ、通常実験の大気濃度(緑線)は1960年前後からバイアスが生じ始めるが、ナッジング駆動実験ではこれが拘束され、2014年の観測濃度

(397ppmv)を再現する。さらに赤線は、2000年を境に、ナudging駆動から通常方式の実験に切り替えた時の結果である。切り替え直後に不自然な大気濃度変動は全く見られず、時間経過とともにわずかに濃度低下しているものの、ナudging導入前の結果に比べて大幅に濃度再現性が向上した。

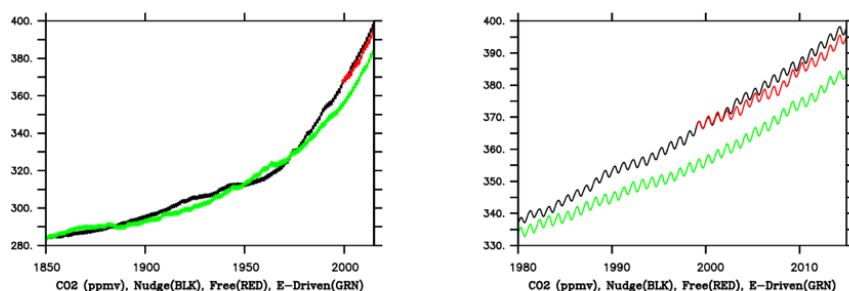


図1-5 地球システムモデルによる排出削減実効性評価に向けたシステム開発：大気CO₂濃度ナudgingシステムの結果(左：計算対象とする全期間、右：1980年以降のみを拡大表示)。緑線は、予報変数として得られる大気CO₂濃度を示す(CMIP6/IPCC-AR6に使われた地球システムモデルMIROC-ES2Lの結果)。黒線は、精緻な排出削減実効性評価のために、本研究で導入した大気CO₂濃度ナudging駆動による結果。赤線は、2000年を境に、このナudging駆動から通常の排出駆動実験方式に切り替えたときの大気CO₂濃度。

温室効果ガス排出削減の実効性評価に向けた取り組み (2) 簡易気候モデル

排出削減の実効性評価を行う上で、複雑な地球システムモデルを補助する目的で、簡易気候モデルを活用した。現在、様々な簡易気候モデルが開発・公開されIPCC報告書等でも活用されているが、グローバルストックテイクにおける公平かつ透明性の高さを鑑み、IPCC第6次報告書でも広く活用されたFaIR (Millar et al., 2017; Smith et al., 2018) を本研究課題で利用することとした(現在公開されている最新バージョン1.6.4、以下FaIRと表記)。同モデルは詳細なプロセスモデルではなく、温室効果ガス排出に対する大気中濃度のインパルス応答と全球平均気温の変化をモデル化しており、地球システムモデルの振る舞いをエミュレート可能とする。

MIROC-ES2Lの振る舞いをエミュレートするため、FaIRで再現される変数(CO₂と全球平均気温の偏差)を比較しながらパラメータ調整を行なった。まず、モデルの温度応答を大きく特徴づける気候感度(過渡的気候応答(TCR)および平衡気候感度(ECS))は、MIROC-ES2Lから得られる固有の値 (Tsutsui, 2020) を使用した。MIROC-ES2Lで実施された過去再現実験(1850-2014年)と将来予測実験(2015-2100年)の結果をエミュレートできるよう、主要なパラメータの一部を非線形最小二乗法により決定した。なお、FaIRの実験方式はCO₂排出駆動方式(人為CO₂排出量をモデルに与え、計算された大気CO₂濃度に基づき気温変化が予測される方式)とし、エアロゾル、対流圏オゾン、雪上ブラックカーボンの放射強制力は、Reduced Complexity Model Intercomparison Project (RCMIP, Nicholls et al., 2020) のデータを使用した。このような調整を行った結果(図1-6)、大気CO₂濃度および気温偏差ともに、MIROC-ES2Lの結果をよく再現していることが確認された。

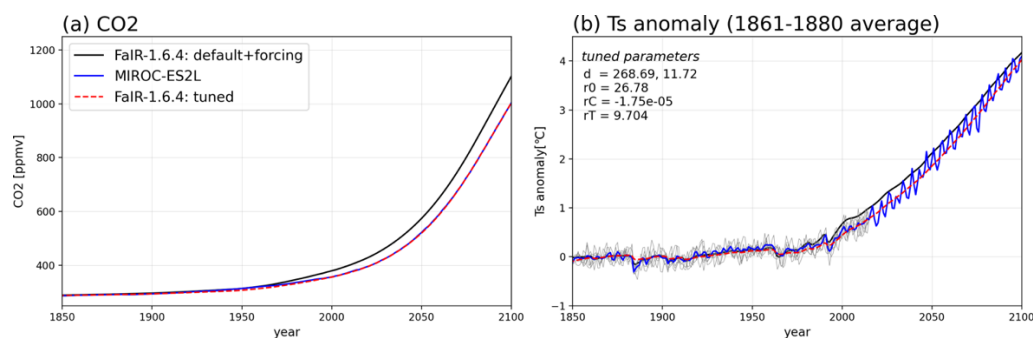


図1-6 FaIRを用いた自動パラメータ調整結果。(a) 大気CO₂濃度、(b) 1861～1880年平均を基準とした地上気温偏差。黒線はFaIRの初期設定のままの結果、青線はMIROC-ES2Lの実験結果(IPCC-AR6向けに提出された実験結果と同じもの；1850-2014年は10本のアンサンブル平均値を表示、2015-2100は1実験の結果を表示)、赤破線は自動パラメータ調整後のFaIRの結果を示す。パネル(b)内に調整したパラメータの値(炭素循環：r0, rC, rT、物理過程：d)を示す。

温室効果ガス排出削減の実効性評価：ベースラインシナリオとの差に着目した評価

温室効果ガス排出削減の実効性評価、すなわち今後のCO₂排出削減努力が全球平均気温の低下にどの程度の実効性を持ちうるのについて評価を行なった。使用モデルは、地球システムモデルMIROC-ES2Lおよびパラメータ調整を行った簡易気候モデルFaIRである。なお、両モデルとも、CO₂は排出量データで駆動する計算方式（「排出駆動」）であり、CH₄やN₂Oといった温室効果ガスは所与の濃度データで駆動する方式で実験を行った。実施した実験を表1-2に示す。過去再現実験では、上述のCO₂濃度ナッジング方式によって過剰な濃度低下バイアスの発生を抑止し（～1999年）、それ以降（2000～2020年）は、人為CO₂排出量（2014年まではCMIP6データ、2015～2020年はGCPベースのグリッド別排出量データ”GridFED”）に基づく実験を実施した。排出削減の実効性を評価するためには、比較対象となるベースラインシナリオが必要である。ここでは、NDC（INDC）履行以前に相当する2010年代の年CO₂排出量の成長率を維持させたものをベースラインシナリオとした（なお、化石燃料CO₂排出以外の排出量や濃度は、SSP3-7.0シナリオのものを使用）。また排出削減シナリオとして、SSP1-1.9（+1.5℃未満の温暖化緩和シナリオに相当）とSSP1-2.6（+2.0℃未満の温暖化緩和シナリオに相当）を用いた。

表1-2 CO₂排出削減努力の実効性評価のための実験一覧

実験	使用モデル	設定	1850-1999	2000-2014	2015-2020	～2050
過去再現実験 (1850-2020)	MIROC-ES2L +FaIR	CO ₂ 駆動方式	ナッジング駆動	排出駆動	排出駆動	
		CO ₂ 排出量	CMIP6データ(観測準拠値)	CMIP6データ(観測準拠値)	GridFED(観測準拠値)	
		CO ₂ 以外	CMIP6データ(観測準拠値)	CMIP6データ(観測準拠値)	SSP3-7.0(シナリオ)	
ベースライン (2020～2050)	FaIR	CO ₂ 駆動方式	同上	同上	同上	排出駆動
		CO ₂ 排出量				2010年代排出量成長率維持
		CO ₂ 以外				SSP3-7.0(シナリオ)
SSP1-1.9 (2015～2050)	MIROC-ES2L +FaIR	CO ₂ 駆動方式			排出駆動	排出駆動
		CO ₂ 排出量			SSP1-1.9	SSP1-1.9
		CO ₂ 以外			SSP1-1.9	SSP1-1.9
SSP1-2.6 (2015～2050)	FaIR	CO ₂ 駆動方式			排出駆動	排出駆動
		CO ₂ 排出量			SSP1-2.6	SSP1-2.6
		CO ₂ 以外			SSP1-2.6	SSP1-2.6

図1-7にその結果を示す。左上パネルは、モデル入力値である化石燃料排出量、その他パネルはMIROC-ES2L/FaIRによる実験結果である。化石燃料排出量を見ると、ベースラインシナリオ（ピンク）に比べ、GridFEDの2020年値が若干下がっている。これは新型コロナのロックダウンの一時的影響による。SSP1-2.6は2030年以降に目立った排出減少が始まり、SSP1-1.9は2020年以降に急激に減少する。このような排出に基づきシミュレーションを行なったところ、実際の大気CO₂濃度のピークは遅れて現れた。大気CO₂濃度が低下するためには、「正味人為CO₂排出量＜自然CO₂シンク」となることが必要だが、この状態に至るまでに時間を要する。地表面付近気温の排出削減に対する応答はさらに遅れ、排出削減ペースが異なるSSP1-1.9とSSP1-2.6の気温低下の違いが明瞭になるのは、およそ2030年代後半以降であった。さらに、実際の気温観測には気候システムの内部変動に由来する年々変動成分（右下パネル灰色部分）が含まれており、排出削減のシグナルが実際の気温観測で明瞭に判別できるまでにはさらなる時間を要すると示唆される。なお、地球システムモデルはこの気候の自然変動に由来する成分が含まれてしまうが、簡易気候モデルではこれが失われている（そもそも再現できない）ため、人為排出に対する応答が明瞭に可視化されている。

以上、ベースラインシナリオを仮定した上で排出削減の実効性評価を行なった。しかし、ベースラインシナリオの仮定次第で、評価結果が大きく変わり得ることに注意が必要である。本研究ではベースラインシナリオを「2010年代の化石燃料排出の平均増加率を維持するもの」としたが、例えば他にも、SSP3-7.0といったシナリオをベースラインとして使用する、という方策も考えられる。ベースラインシナリオの選択・設定に任意性があり、結論も変わり得ることに注意が必要である。

またその他の注意点・今後の課題として、簡易気候モデルの詳細パラメータ調整がさらに必要であることが挙げられる。ここではMIROC-ES2Lによる過去再現実験（1850-2014年）およびSSP5-8.5シナリオ実験の結果をエミュレートできるよう、簡易気候モデルのパラメータを自動調整した。図1-6で示されるように、SSP5-8.5のように単調に排出が増加していくシナリオではその振る舞いを良く再現できるが、

強い緩和策を想定したSSP1-1.9/1-2.6では人為排出量が著しく低下するため、外部強制力に対する気候-炭素循環システムの時間遅れ応答(慣性)がより顕になる。簡易気候モデルでは、このような時間遅れ応答をわずかに数種類のパラメータで表現しているため、複雑な地球システムモデルの振る舞いを十分にエミュレートできない可能性がある(例えば図1-7において、簡易気候モデルの気温が地球システムモデルに比べて僅かに高くなる、など)。このような、簡易気候モデルを用いたエミュレートに一定の限界がありうること、そして簡易気候モデルの高度なパラメータ調整やモデル改良が必要であることに、注意が必要である。

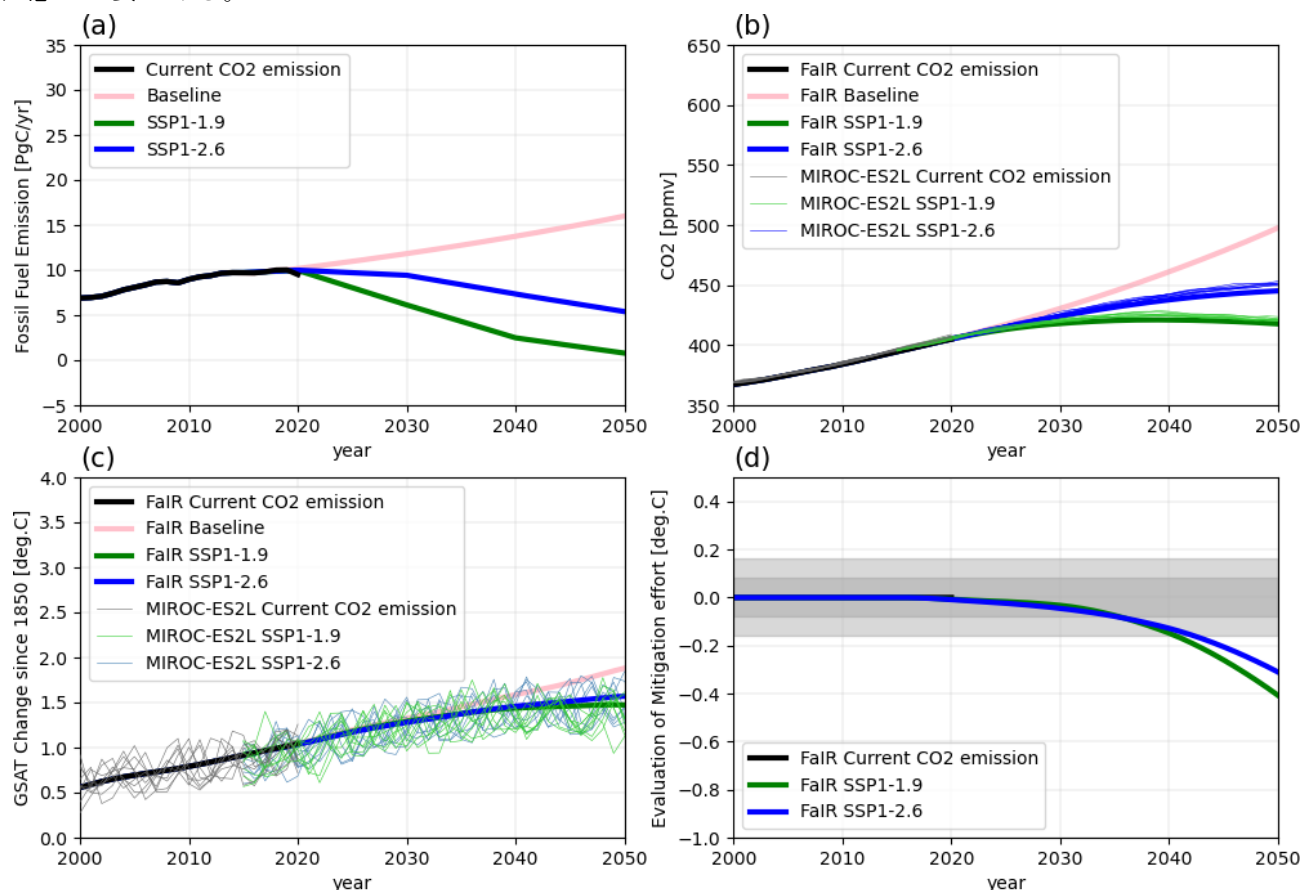


図1-7 地球システムモデル(細線, 10アンサンブルメンバーの結果)および簡易気候モデル(太線)による排出削減実効性評価の試行結果: (a)化石燃料排出量(モデル入力値)、(b)大気CO₂濃度、(c)気温変化、(d)CO₂排出削減の全球平均気温低下に対する実効性評価。1850年から2020年の期間は過去(現況)再現実験であり、そのCO₂排出量は最新の排出データに基づく(黒線)。2021年~2050年はシナリオ実験×3種の結果: (1) ベースラインシナリオ(ピンク)、(2) +1.5°C未満に抑える緩和シナリオSSP1-1.9(緑線)、(3) +2.0°C未満に抑える緩和シナリオSSP1-2.6(青線)。ベースラインシナリオにおける人為CO₂排出量は、INDC履行以前である2010-2019年代の排出量増加ペースが今後維持されると仮定して作成し、CO₂以外はSSP3-7.0のものを使用。CO₂排出削減の全球平均気温低下に対する実効性評価は、ベースラインシナリオとの気温偏差として示されている。灰色陰影部は、観測気温に見られる年々変動のばらつき(1σ(濃灰色)および2σ(薄灰色))。

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

○地球システムモデルで再現されるGHGs動態の検証の進捗状況

地球システムモデルで再現されるCO₂濃度変動を、観測準拠の濃度情報を活用して評価し、濃度バイアスを生み出す時期や地域、プロセスをおおよそ特定した(図1-1, 1-2, これらを成果25としてまとめた)。また、CH₄およびN₂Oの収支(エミッション)をサブテーマ2-(2)から得られる逆推定結果と比較し、その全球値が妥当なものであることを確認、さらには空間詳細の評価も可能となり(図1-3, 図1-4)、計

画通り目標を達成した。

○上記検証作業に基づくモデル改良・調整の進捗状況

上記検証作業を通じ、特に「20世紀後半の農地が広がる地域において、窒素沈着増加に対する陸域の炭素吸収の感度が高すぎる」ことが強く示唆された。実際に、この感度を下げる改良を施したところ、約14ppmvあった大気CO₂濃度の過小バイアスを約6ppmvまで縮小させることに成功(表1-1)し、数値目標「±10ppmvに収まることを目指して改良を行う」を達成した。さらにこれと並行し、上述の20世紀後半に特異的に生じるモデルの大気CO₂濃度バイアスを回避し信頼性を高めた排出削減実効性評価を行うための新実験方式(図1-5)を考案し、地球システムモデルへの実装を行った。また、上の検証作業を通じて見つかった海洋N₂O放出に関してモデル改良を施し、逆推定結果とより整合的なものになった。よりスピーディーな実効性評価や地球システムモデルによる実験補完を意図した簡易気候モデルの活用を行い、実際にパラメータ調整やエミュレーションが期待以上のペースで進捗し(図1-6)、実際にレポートで活用した(成果26、成果27；これら日本語版は成果28、成果29)。以上、目標に掲げていた内容を十分・早期に達成したことにより、下記に示す排出削減の実効性評価シミュレーションを効率的に実施出来た。

○排出削減の実効性評価シミュレーションの実施の進捗状況

以上を踏まえ、最新の化石燃料排出量データおよび各種改良・調整済みの地球システムモデルを活用し、排出削減の実効性評価シミュレーションを実施(表1-2)、2種の解析を行った(図1-7と図1-8)。地球システムモデルと簡易気候モデルを併用した解析(図1-7、GST向けレポート2023)では、ベースラインシナリオと排出削減シナリオの2種シミュレーションを実施・解析し、排出削減の効果が観測全球平均気温の低下として現れる時期を示唆・可視化することが出来た。また、より詳細な解析「大気CO₂濃度および全球平均気温の減少時期に着目した評価」(図1-8、Okada & Hajima in prep)では、排出削減が大気CO₂濃度に結びつくまでに数十年スケールの時間を要することが示され、この期間における排出削減ペースの強化の重要性や、今後の自然シンク変動の精緻な見積もりの重要性など、今後の政策・科学に関わるメッセージに結びつけることができ、目標を十分に達成した。

引用文献

- Friedlingstein, P. et al. (2022). Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data Discussions*, 2022, 1-159.
- Kattge, J., Knorr, W., Raddatz, T., & Wirth, C. (2009). Quantifying photosynthetic capacity and its relationship to leaf nitrogen content for global - scale terrestrial biosphere models. *Global Change Biology*, 15(4), 976-991.
- Millar, R. J., Nicholls, Z. R., Friedlingstein, P., & Allen, M. R. (2017). A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(11), 7213-7228.
- Nicholls, Z., Meinshausen, M., Lewis, J., Gieseke, R., Dommenges, D., Dorheim, K., ... & Xie, Z. (2020). Reduced Complexity Model Intercomparison Project Phase 1: introduction and evaluation of global-mean temperature response. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5175-5190.
- Patra, P. K. et al. (2022). Forward and inverse modelling of atmospheric nitrous oxide using MIROC4-atmospheric chemistry-transport model. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 100(2), 361-386.
- Smith, C. J., Forster, P. M., Allen, M., Leach, N., Millar, R. J., Passerello, G. A., & Regayre, L. A. (2018). FAIR v1. 3: a simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. *Geoscientific Model Development*, 11(6), 2273-2297.
- Tsutsui, J. (2020). Diagnosing transient response to CO₂ forcing in coupled

atmosphere - ocean model experiments using a climate model emulator. Geophysical Research Letters, 47(7), e2019GL085844.

- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., ... & Ziehn, T. (2020). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. Earth System Dynamics Discussions, 2020, 1-50.

II-2 サブテーマ2「トップダウン手法によるグローバルな GHG 収支変動把握」

〔サブテーマ2 要旨〕

サブテーマ2の研究は、主要3種の温室効果ガス（CO₂、CH₄、および N₂O）の領域別および全球のフラックス（排出源と吸収源）を、観測情報を制約として与えて推定するものである（トップダウン手法またはインバースモデリング手法と呼ぶ）。ここには、固定観測サイト、船舶や航空機による大気サンプリング/分析（現場観測）、地上や衛星に搭載されたりリモートセンシング機器などで観測された情報が活用されている。現場観測は全球をカバーできないという問題がある一方で、リモートセンシングによる観測にはリトリバルの不確実性が伴う。さらに、大気プロセスをできるだけ正確に表す大気化学輸送モデルも必要となる。本研究では、海洋研究開発機構で開発した大気化学輸送モデルMIROC4-ACTMを使用し、3種の温室効果ガスすべてについてトップダウン手法によるフラックス推定を行った。過去10年間にわたり、モデル中の輸送過程および化学過程を、独立した化学種トレーサー（SF₆、CO₂、CH₄、N₂O、CH₃CCl₃、COS など）を用いて検証してきており、本プロジェクトにおいてもこれを継続した。CO₂とCH₄の基本的な逆モデリングシステムは開発済であったが、本課題では新たに、インバースモデリングシステムにおけるアプリオリ（先験）フラックスおよびパラメータの選択に起因する推定フラックスの不確実性を評価するためにアンサンブル推定を行えるシステムを構築した。CO₂のインバージョン推定では、北半球/南半球の中高緯度と熱帯において、推定されるフラックスにモデル間で大きな差が見つかったため、OC02 v10 MIP フラックスを使用し、モデル相互比較におけるフラックスバイアス補正のための新たな制約である「Emergent Constraint (EC)」を提案した。さらに、各種の観測データを有効活用するため、CO₂データ同化システムの開発と観測システムシミュレーション実験

(OSSE)を実施した。本データ同化システムの大枠が完成したものの、OSSEの微調整やGOSAT等の衛星観測情報の同化に関する今後の課題が得られた。N₂Oに関し、MIROC4-ACTMを使用したインバースモデリングシステムを新たに開発し、南大洋をはじめとする海洋N₂O放出とその全球放出に対する寄与をより適切に定量化できるようになった。3種ガスすべてのインバースモデリング結果は、IPCC-AR6、GCP-CO₂/CH₄/N₂O、欧州”VERIFY”プロジェクト、RECCAP2、UNFCCCグローバルストックテイクなどの世界的なコミュニティの研究/統合活動に提出された。GCPの枠組みおよび多機関での研究協力における研究活動を、本サブ課題は強く牽引した。

1. サブテーマ2 研究開発目的

本サブテーマは、高密度の現場観測データと衛星データをモデルに同化することにより、これまでより高い空間分解能で温室効果ガスの収支を推定することを目指すものである。温室効果ガスの濃度変動の要因を解析し、地球システムモデルおよび物質循環モデルの検証・高度化に資する情報を提供することを目的とする。

より具体的には、大気輸送モデルMIROC4-ACTMの輸送・化学過程の改良を行い、従来の全球84領域においてトップダウン手法による温室効果ガス（CO₂、CH₄、N₂O）の収支推定（逆推定）を継続するとともに、引き続きGCP等の国際プロジェクトに貢献する。また並行して、アンサンブルカルマンフィルター（EnKF）等のデータ同化手法による収支推定システムの開発を進める。新たなシステムにより、より高密度の現場観測データおよびGOSAT/GOSAT-2、OCO-2/OCO-3、TROPOMI等の広域・高頻度の衛星観測データを収支推定モデルに効率的に取り込むことが可能となり、これまでより高い空間分解能で温室効果ガスの排出・吸収量の推定を実施できる。次に、MIROC4-ACTMで計算したCO₂、CH₄、N₂O濃度データを、GOSAT/GOSAT-2の熱赤外バンドの温室効果ガス高度分布導出（リトリバル）のための先験情報として利用し、衛星の濃度リトリバルにおける先験情報への感度評価を実施することで、衛星の濃度リトリバル精度の向上につなげる。さらに、地球システムモデル（MIROC-ES2L）による将来の気候予測の精度向上のため、炭素－窒素循環（C-N循環）の検証を行い、地球システムモデル改良に資する研究を行う。特に、過去数十年分についての地球システムモデルによるシミュレーション結果とMIROC4-ACTMによる温室効果ガス収支の逆推定の比較・評価を行うことで、温暖化予測の信頼性向上や排出削減の実効性評価に貢献する。本研究で、最良の科学に基づいて、亜大陸レベルから国レベルの温室効果ガス

の排出・吸収源の逆推定を実施し、毎年の収支推定結果をサイエンスコミュニティおよび政策立案者に提供・共有することにより、パリ協定のNDCをはじめとする排出削減目標の進捗状況を評価することが可能となる。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「トップダウン手法によるグローバルな GHG 収支変動把握」
サブテーマ2 実施機関	国立研究開発法人海洋研究開発機構
サブテーマ2 目標	政策立案のためのシームレスな温室効果ガス収支推定結果の共有 ●大気輸送モデルMIROC4-ACTMによる従来のトップダウン手法による CO₂、CH₄、N₂O の収支推定(推進費 2-1701 課題および 2-1802 課題で開発)を継続し、推定した結果を収支評価のためにテーマ3に提供するとともに、GCP(グローバルカーボンプロジェクト)等の国際プロジェクトおよび IPCC 報告書に貢献する。 ●アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)等のデータ同化手法による温室効果ガス収支推定システムを構築し、より高密度の現場観測データおよびGOSAT/GOSAT-2、OCO-2/OCO-3、TROPOMI 等の広域・高頻度の衛星観測データ(最初にCH₄、次に CO₂、N₂O)を同化システムに取り込むことで、これまでより高い空間分解能で温室効果ガスの排出・吸収量の推定を実施する。 →パリ協定に係る政策立案(グローバルストックテイク)のための温室効果ガス収支のデータセットを継続的に提供できる体制を整える。 地球システムモデルによる炭素-窒素サイクルの再現性向上への貢献 ●過去数十年(1960年代～現在)を対象に、地球システムモデル(MIROC-ES2L)によるシミュレーション結果と MIROC4-ACTM による温室効果ガス収支の逆推定の比較を行う。特に温室効果ガスの領域別フラックスや時間発展、様々な気候条件に対する変動の再現性という観点から評価を行う(テーマ2サブテーマ1と協力)。 ●上記の炭素-窒素循環(C-N循環)過程の検証によって地球システムモデルの問題点が明らかになった場合、この知見をテーマ2サブテーマ1に提供することにより、地球システムモデルのパラメータ設定や感度実験、モデル改良に貢献する。 ●以上の地球システムモデルの評価を行うことにより、テーマ2サブテーマ1で実施される排出削減の実効性評価シミュレーションの信頼性向上に貢献する。また、同シミュレーションを行う上で必要となる入力データ(人為 GHGs 排出量等)の準備に協力する。 大気輸送モデル MIROC の輸送および化学過程の改良 ●MIROCの輸送過程(移流・対流)を改良し、ハイブリッド鉛直座標の実装で全体として再現性が改善した成層圏のブリュワー・ドブソン循環による下部成層圏での極方向への輸送の再現性をさらに向上させる。 ●メチルクロロホルム(CH₃CCl₃)などの独立した化学トレーサーを用いて全球平均ヒドロキシ基ラジカル(OH)濃度の経年変動を、さらにMIROC-

	ES2LやMIROC-Chem などのインタラクティブな化学モデルシミュレーションに基づいてOHの空間変動を明らかにする。 ●上述の方法により再現性が向上したOHラジカルをもとに、対流圏でのOHとの化学反応によるCH₄消失のパラメタリゼーションを改善し、CH₄収支の逆推定の高精度化を図る。 →大気輸送モデルによる大気中の温室効果ガスの変動解析および温室効果ガスの排出・吸収量の収支評価の高精度化につなげる。 衛星データの高精度化のための先験値の提供 ●MIROC4-ACTM でCO₂、CH₄、N₂Oの濃度計算を実施し、テーマ3サブテーマ2に現実的なCO₂、CH₄、N₂Oの高度分布データセットを提供する。 ●テーマ3サブテーマ2と協力して、MIROC4-ACTMのCO₂、CH₄、N₂Oの3次元濃度分布データセットをGOSAT/GOSAT-2の熱赤外バンドの温室効果ガス高度分布導出(リトリバーバル)のための先験情報(アプリオリ)として使用し、GOSAT/GOSAT-2の熱赤外バンドのスペクトルデータからCO₂、CH₄、N₂Oの高度分布のリトリバーバルを実施する。 ●テーマ3サブテーマ2と協力して、MIROC4-ACTMのアプリオリデータに基づくGOSAT/GOSAT-2のCO₂、CH₄、N₂Oのリトリバーバル結果とNIES-TMおよびNICAM-TMのアプリオリデータに基づくGOSAT/GOSAT-2のリトリバーバル結果(公式プロダクト)の比較・検証を実施する。 →衛星データのさらなる高精度化を図り、データを収支推定に利用するとともに、科学コミュニティへ提供する。 モデルデータ提供システムの構築 ●本研究で得られた温室効果ガス濃度の3次元分布データおよび排出・吸収源の収支情報を、政府および政策立案者、温室効果ガス観測コミュニティに提供するシステムを構築する。 →米国・欧米ですでに構築されているデータ提供システムを念頭に、本研究の成果を速やかに共有できる枠組みを構築する。
--	--

3. サブテーマ2 研究開発内容

1. CO₂のインバージョン解析

本研究では、CO₂の発生源と吸収源を計算するインバージョン解析を行うにあたり、アンサンブルアプローチを採用した([成果6]Chandra et al., 2022)。具体的には、先験情報として陸域生物圏と大気-海洋CO₂フラックスを2セット使用し、MIROC4-ACTMによってアンサンブル実験とインバージョン解析を行う、というものである。また、地域・半球スケールでのインバージョンフラックスの検証方法が欠如しているという指摘が関連研究コミュニティによってなされ、本プロジェクト期間中に注目を集めたため、本サブテーマでもインバージョンフラックスの検証について取り組み、CO₂インバージョンの精度向上に努める取り組みを行った(図2-2, 図2-3)。具体的には、半球スケールの陸域および海洋(北半球温帯、熱帯、南半球温帯)の推定CO₂フラックスと、その領域内におけるモデルおよび観測のCO₂濃度の関係を見出し、検証に役立てるというものである。本研究では2種のインバージョンタイプ、14種のインバージョンモデルを比較した、OC02 v10 MIPによるCO₂フラックス([成果13]Byrne et al., 2023))を活用した。さらにこの解析に基づいて、インバージョンフラックスを検証・高精度化し、より信頼性の高い推定結果を得るための新たな評価手法を考案した。

また、より高い時空間分解能および衛星観測データ等の利用に対応できる、次世代CO₂収支推定システムを構築するため、アンサンブルカルマンフィルタを用いたCO₂データ同化によるインバージョンシス

テムの開発を行った。その後、OCO-2 データの OSSE (Observation System Simulation Experiment: 観測システムシミュレーション実験) の実施と、モデルの精度の検証を行い、本システムの枠組み構築を行った(図 2-4)。以上の結果と考察を、この後の「CO₂, CH₄, N₂O のインバージョン推定と統合評価」「OC02_MIP の結果を用いた CO₂ フラックスの評価」「LETKF データ同化システムを用いた CO₂ フラックス推定」などの項目で報告する。

2. CH₄ のインバージョン解析

CH₄ のモデリングおよびインバージョンシステム開発の多くは、サブテーマ 3-(2) との共同のもと実施されており、該当サブテーマからその詳細が報告されるはずである。ここでは、本サブテーマ PI が共同主導し貢献した、国際研究 GCP-CH₄ に関わる欧州”VERIFY”プロジェクトの、いくつかの成果に注目して報告を行う(図 2-5)。具体的には、トップダウン・ボトムアップアプローチによる全球・半球スケールでの CH₄ フラックス比較と、セクター別フラックスの比較を行った。これらの結果と考察について、この後の「CO₂, CH₄, N₂O のインバージョン推定と統合評価」と「トップダウンおよびボトムアップ手法による CH₄ 収支」の項目で報告する。

3. N₂O のインバージョン解析

本研究課題で、N₂O 収支推定のための新たなインバージョンシステムを構築した([成果5]Patra et al. 2022)。本システム(MIROC4-ACTM)により大気中N₂O濃度を計算し、その結果を1978年から2019年の現場測定による観測値と比較した。自然土壌、農地、その他の人間活動、および大気-海洋ガス交換による先験N₂O 排出量の 5 つの組み合わせを使用した。そのインバージョン計算では、1997 年から 2019 年までの世界 42 か所の観測値を使用し、全球 84 領域についてベイジアン逆モデリングを使用して領域N₂O 月別排出量を最適化した。なお、第 1 回GCP-N₂Oにおいて、海洋N₂O発生源に関してトップダウンアプローチとボトムアップアプローチで大きな食い違いを示していることが問題視されていた(Tian et al., 2020)。Patra et al. 2022[成果5]では、大気と海洋の3 つの異なる N₂O 先験フラックスを用いた解析により、南大洋の排出量を少なく見積もる海洋排出量推定結果が、インバージョンによって予測される推定値と最もよく適合することがわかった。このような取り組みの結果により、第 2 回GCP-N₂Oでは、本サブテーマPIは主たるデータ・知見提供者として同プロジェクトに貢献するとともに、共同主導者としてトップダウン収支推定のとりまとめを行った。本報告書では、第 2 回GCP-N₂Oの収支推定結果の概要([成果22]Tian et al., 2024, 図2-6)を説明する。これらの結果と考察を、この後の「CO₂, CH₄, N₂O のインバージョン推定と統合評価」と「トップダウンおよびボトムアップ手法によるN₂O収支」で報告する。

4. 国際的政策立案/研究枠組みへの貢献：RECCAP2 を通した国スケールの GHG 収支推定の取り組み

RECCAP2(Regional Carbon Cycle Assessment and Processes2)は、2019年に日本の御殿場で開幕し、現在は世界20カ国以上から150人以上の研究者が参加している。さまざまなキャリアにある研究者が参加するとともに、シロアリに関する生態学や温室効果ガスの衛星観測といった、多様な専門分野をカバーしている。RECCAP2 の特にユニークな点は、インバージョン、陸域および海洋の生物地球化学(物質循環)モデル、船舶観測に基づくデータプロダクト、リモートセンシングベースのプロダクト、国別インベントリ情報など、GHG フラックスを推定するための複数かつ独立した最先端手法を活用していることである。これら排出量と吸収量に関する様々な推定値を統合解析すると、より頑健な知見の創出や、収支推定の不確実性の高い領域の特定が可能になる。また、不確実性軽減に向けた今後の研究プログラムの展開や、その支援に資することも可能である。RECCAP2 では、CO₂, CH₄, N₂Oに関する収支推定を、地球全体を網羅するようにデザインされた陸域10領域と 海洋5領域で行う。ここには「特定重点領域」や、陸域-海洋-水圏の連続体(Land-Ocean-Aquatic Continuum, LOAC)の最新の推定も含まれる。本サブテーマPIは、RECCAP2 運営委員会として活動し、RECCAP2報告書の複数章に貢献した。本報告書では、RECCAP2 に関わる基本概念と主要な収支の一部(図2-7)について概説する。これらの結果と考察を、この後の「RECCAP2への貢献」で報告する。

5. 国際的政策立案/研究枠組みへの貢献:Future Earth ”10NICS”の GHG 収支の不確実性低減の必要性

IPCC では、5~10 年の間隔で包括的な気候科学の知見を含む報告書が作成されている。これを受け Future Earth では、気候科学における 10 の新しい洞察 (Ten New Insights in Climate Sciences,

10NICS) として最近の進歩に関する最新情報を提供している。本報告書では、本サブテーマ PI が関わった洞察 4 に関して概説する(成果 23, 図 2-8, “自然炭素吸収源への過度の依存は危険であり、それらの将来の寄与は不確実である”)。洞察 4 では、陸上と海洋の自然の吸収源が今後数十年間でどのように振る舞うかについて、現在の理解レベルに強い確信がないことが強調されている。地球システムのポジティブフィードバック(気候変動による自然起源の炭素放出強化)は、地球温暖化の緩和と適応に深刻な影響を与える可能性があることが示唆されている。これらの結果と考察を、この後の「Future Earth の 10NICS で示された温室効果ガス収支の不確実性を低減する必要性」で報告する。

4. サブテーマ 2 結果及び考察

CO₂, CH₄, N₂O のインバージョン推定と統合評価

サブテーマ2-2では、MIROC4-ACTM 全球化学輸送モデルを用いた地域および全球のインバージョン解析手法を用い、最新の統計データ等を用いて定期的に更新した排出量分布をサブテーマ2-1やテーマ3とも共有し、トップダウンとボトムアップのフラックスの統合解析や、研究・政策立案の国際的な連携のために活用した。本研究では、JAMSTEC、環境省・環境再生保全機構環境研究・技術開発費、文部科学省グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 事業(北極気候変動分野)および北極域研究推進プロジェクト Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) などにより個別に開発されてきた三大温室効果ガス (CO₂, CH₄, N₂O) の地域排出量と吸収源の除去量について統合的に推定するインバージョンシステムを構築した。これらの結果は、本プロジェクトの参加機関(国立環境研究所、海洋研究開発機構、電力中央研究所、千葉大学)が共同で作成した「温室効果ガス収支のマルチスケール推計に関する報告書」にまとめられている。このインバージョンシステムは、世界約50地点の高精度かつ均質な現場測定による観測データとMIROCバージョン4大気大循環モデルベース化学輸送モデル (MIROC4-ACTM; Patra et al., 2018) を用いて、全球の84 (CO₂とN₂O、陸域と海洋) または54 (CH₄、陸域のみ) の月平均排出量と除去量を算出するものである。

表2-1は、MIROC4-ACTMを用いた逆モデリング(トップダウン推定)により推定されたCO₂, CH₄, N₂Oの全球排出量と吸収量収支の概要である。陸域および海洋環境における炭素・窒素循環の研究において、これら3種の地球規模および地域的な収支には多大な関心が集まっている (Canadell et al., 2021 [成果2])。しかし、エネルギー消費や経済活動に関する各国の統計量や地表付近でのプロセスベースのモデリング(「ボトムアップ」推定)を用いて、地表フラックスの測定に基づいて各セクターやガス種別の排出量と吸収量の収支を正確に求めることは、極めて難しい。そこで、大気観測とACTMによるモデルシミュレーションを用いて、大陸間スケールの月平均フラックスと逆モデリングによる排出・除去量を推定し、2つの推定値の間の誤差を最小化することで、より信頼性の高い推定結果を求めている。三大温室効果気体のうち、とくにCH₄とN₂Oにおいて、大気中の光化学反応、とくに水酸基(OH)ラジカルとの反応に伴う消失過程については、短寿命で反応性の高いOHラジカルの大気中動態の不確実性のため、研究コミュニティにとって依然として大きな課題として残っている。化学的性質および消失過程の不確かさの両方が、インバージョンモデルによる領域スケールの収支推定において、大きな差異をもたらす。このため本研究では、複数のモデルによるトップダウンフラックスの評価を実施する。

表2-1 MIROC4-ACTMで推定した過去30年間の3つの主要温室効果ガスの総量 (B)、排出 (E)、損失 (L)/吸収 (S) 収支 ([成果6]Chandra et al., 2022; [成果5]Patra et al., 2022) 筆者らのモデリングシステムから、CO₂, CH₄, N₂Oの濃度に対する総量の比はそれぞれ2.12 PgC ppm⁻¹, 2.838±0.003 Tg ppb⁻¹, 4.785±0.005 TgN ppb⁻¹と推定される。

Species	CO ₂			CH ₄			N ₂ O		
	B [PgC]	E [PgC yr ⁻¹]	S [PgC yr ⁻¹]	B [TgCH ₄]	E [Tg yr ⁻¹]	L [Tg yr ⁻¹]	B [TgN]	E [TgN yr ⁻¹]	L [TgN yr ⁻¹]
1996-2000	774.5 ± 6.4	6.68 ± 0.11	評価期 間外	5002 ± 29.5	548.5 ± 14.8	501.6 ± 4.0	1502 ± 6.8	15.6 ± 0.7	11.5 ± 0.2

2001–2005	794.3 ± 7.1	7.48 ± 0.42	-1.67 ± 0.63	5035 ± 6.2	560.4 ± 18.0	508.2 ± 2.9	1521 ± 5.2	15.6 ± 0.3	12.1 ± 0.4
2006–2010	815.5 ± 6.3	8.68 ± 0.24	-2.89 ± 0.46	5070 ± 26.3	563.7 ± 8.2	519.1 ± 6.0	1539 ± 6.1	16.4 ± 1.0	12.2 ± 0.4
2011–2015	837.3 ± 7.6	9.59 ± 0.11	-3.04 ± 0.80	5155 ± 34.6	579.1 ± 12.9	535.6 ± 6.2	1561 ± 7.4	17.0 ± 0.7	12.5 ± 0.3
2016–2020	863.9 ± 8.0	9.78 ± 0.42	-2.73 ± 0.67	5275 ± 41.0	599.4 ± 10.0	554.8 ± 4.3	1584 ± 7.4	17.5 ± 0.7	12.9 ± 0.4

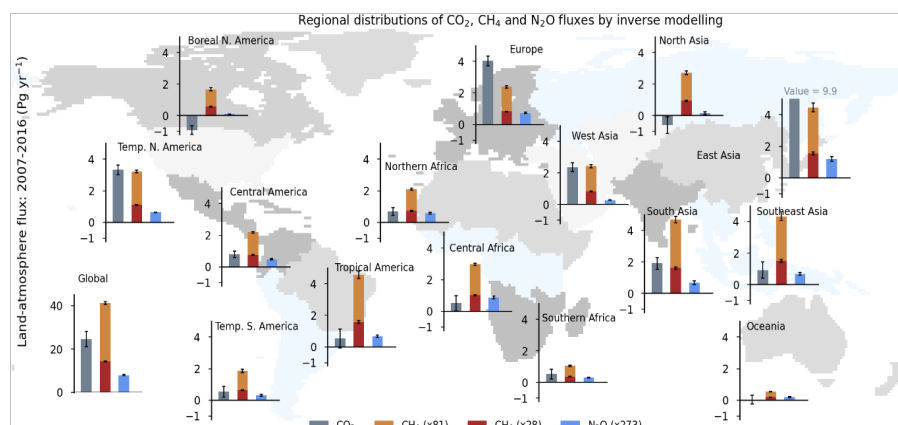


図2-1（図0-2と同）陸上から大気へのCO₂、CH₄、N₂Oを統合した排出量。CH₄とN₂Oの排出量をそれぞれGWP₂₀（81）またはGWP₁₀₀（28）、GWP₁₀₀（273）で重み付け（Forster et al., 2021）したもの。CH₄の大気中寿命は他の二種の温室効果気体に比べて短いため、GWPは放射強制力の積算時間によって大きく変化するため、CH₄の棒グラフではGWP20とGWP100のそれぞれ対応する排出量を薄い色と濃い色で表示している。（図：IPCC AR6 WG1第5章のCanadell et al., 2021を元にPatraが作成〔成果2〕）

人為起源の温室効果ガスが地球の放射収支に及ぼす直接的な影響と、それにより付随的にもたらされる影響は、すべての温室効果ガスの複合効果として理解する必要がある。これまでに得られた先行研究の結果によると、パリ協定の気温目標達成のためにはCO₂が最も重要な存在であることに変わりはない。一方、メタンは寿命が短く（大気寿命およそ12年）、また排出後20年間の放射強制力の積算を基準にCO₂排出量に換算した際の地球温暖化係数が非常に大きい（GWP₂₀=81）ため、20年以内に人為的CH₄排出の全要素を排除した場合、気温上昇を最大0.5℃まで抑制できると期待されている。図2-1は、CO₂換算した三大温室効果ガスの総排出量の地域分布を示している。北米、ヨーロッパ、東アジア、西アジアのほとんどの先進国では、自然および人為的なCO₂の純粋な総排出量が、GWP₂₀およびGWP₁₀₀の双方においてCH₄とN₂Oの排出量を上回っており、中長期的な温暖化緩和策立案においてCO₂が最も重要であることがわかる。経済発展移行地域（中南米、アフリカ、東アジアを除くアジア）、および世界全体では、GWP₂₀を用いた中期的な気候影響の評価では、CH₄排出量がCO₂排出量よりも多く、結果として世界全体でもCH₄排出量が増加した。一方で、GWP₁₀₀では大きく減少した（図2-1）。また、南アジア、東南アジア、ブラジル、熱帯アメリカ地域でも、GWP₁₀₀（=5.4）を選択すると、CH₄の影響は小さくなることがわかる。N₂Oは100年より長い寿命を持つため、GWPで重み付けした排出量は20年でも100年でも大差がないことが明らかになった。このような分析から、パリ協定の目標達成への道筋は、CO₂以外の温室効果ガスの排出量管理にも依存することが示唆された。

メタンの大気中からの除去は、高排出部門（炭鉱、ガスフレア、畜産、廃棄物管理）からの排出を削減するか、メタンを回収してクリーンエネルギー源として利用することで効率的に行うことができると考えられる。N₂O排出の大部分は、農業における窒素肥料の使用によるものであり、大気中のN₂O量を持

続的に増加させる原因となっている。窒素肥料を使用しない場合、現在の人口の半分しか維持できないといわれている。しかし、西ヨーロッパの一部の国や日本では、京都議定書以降の1990年代からCH₄やN₂Oの排出削減ですでに大きな進展を見せている。新しい国別の目標が策定された場合、より新しい時期（例えば、京都議定書の1990年と比較して2020年）を参考の期間とすることがあるが、排出量削減目標の新しい政策が策定された際には、初期の成果についても認識する必要がある。したがって、各国内の産業部門ごとの排出量および排出量削減の進捗を評価する際には、例えば京都議定書の基準時または相互に合意できる期間まで遡って評価するなど、数十年以上にわたる過去の排出量の推移を評価することが推奨される。

図2-1はIPCC AR6の第5章で作成されたマルチモデルによるインバーション解析結果を用いて、Global Carbon Project (GCP) のデータベースを用いて作成されている。MIROC4-ACTMは、GCPの3つの活動（CO₂、CH₄、N₂O収支評価）の全てに貢献した。

OC02_MIPの結果を用いたCO₂フラックスの評価

本サブテーマで得られたインバーションの結果について各種推定結果との比較・検証を行うため、アンサンブルインバーションを用いた[成果6]Chandra et al. (2022) (以降NC22と表記)について全球およびRECCAP1の10地域における地域別排出量および吸収量を他のインバーション結果と比較した。次に、OC02フラックスモデル相互比較プロジェクト (OC0-2 v10 MIP)、2015年から2020年の期間をカバーするOC02リトリバルv10rを用いたバージョンなど、他のインバーション解析結果との比較を通じ、フラックスの評価を行った。OC02 v10 MIPは、OC02によるカラム濃度(XCO₂)のデータプロダクトの収支推定における影響を定期的に評価するためのモデル相互比較プロジェクトである。複数の米国のモデリンググループ、カナダ、ヨーロッパ、および日本の複数グループがこのプロジェクトに参加している (以後BB23と記載: Byrne et al., 2023 [成果13])。

1°×1°グリッドの陸域と海洋の月別フラックス推定値を用いて、2015年から2018年の解析期間のCO₂濃度場のシミュレーションを行った。この際、OC0-2 MIPから得られた陸域の生物圏正味フラックス（光合成、呼吸、森林火災、バイオ燃料などの合計）、および大気-海洋間の正味フラックスなどのCO₂フラックス成分を使用した。いずれのフラックスでも日内変動は考慮されていない。化石燃料のCO₂排出量はGCP-2020から一か月ごとに取得しているが (Jones et al., 2021)、インバーション解析の際にはODIACの化石燃料CO₂排出量を用いている (Oda et al., 2018)。

図2-2はOC02_MIPのマルチモデルフラックスと本研究のMIROC4-ACTMインバーション解析で推定されたCO₂フラックス (NC22) の比較結果である。MIROC4-ACTMの結果は、海陸それぞれの正味フラックスと同様に、陸と海を合計した正味フラックスについてもOC0_MIPモデルの範囲内に収まっていることを確認した。次に、モデル間比較プロジェクトで得られたフラックスに対する独立した評価を行うため、さらなる解析も進めた。具体的には、得られた放出量分布を用いてMIROC4-ACTMによって大気中の濃度を計算し、現場観測によるCO₂濃度および地上および衛星による鉛直カラム量観測 (TCCON XCO₂、GOSAT XCO₂、OC02 XCO₂) と比較した (Maity et al., in preparation)。

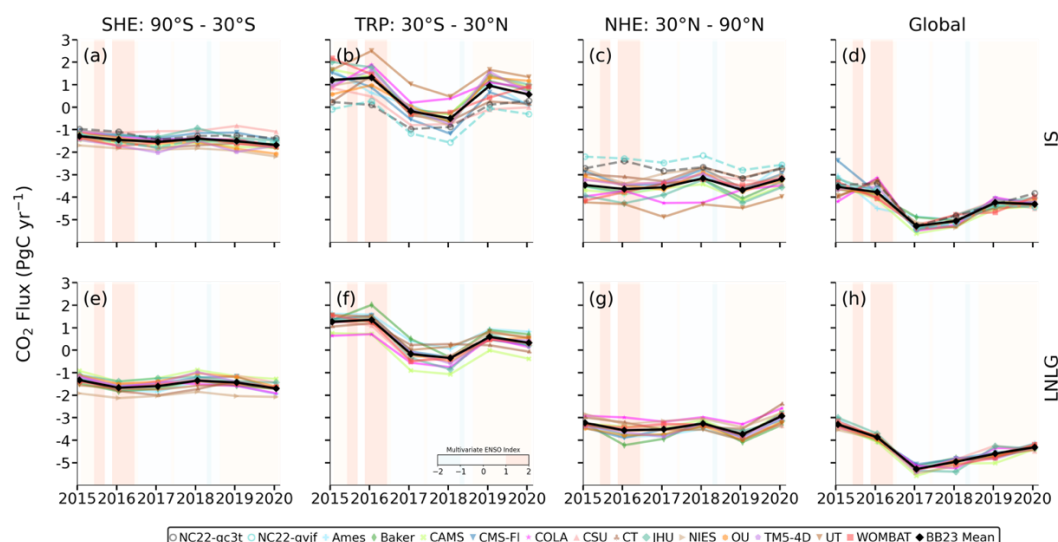


図2-2 CO₂正味フラックス（海洋＋陸域）の年間変動。上段および下段に異なる観測値を用いた推定結果（上段：CO₂現場観測値、下段：OCO-2 XCO₂）を、また横4列に3つの異なる緯度帯（左から南半球中高緯度、熱帯、北半球中高緯度）と全球平均の推定結果をそれぞれ示す。OCO-2 v10比較プロジェクト参加モデルのマルチモデル平均（太い黒線に菱形のマーカ記号）ではMIROC-ACTMによるアンサンブルインバージョンの結果（NC22）は考慮されていないため、この比較で併せて評価している。また縦陰影は ENSO 指数 (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>) を表す。

これまで、インバージョン推定で得られたCO₂フラックスの検証には、独立した観測データを用いた検証が主に行われてきた。しかし、地域別もしくは半球レベルでは、フラックス推定値の推定精度検証については一部の限られた地域に留まっていた（例えば、Thompson et al., 2016やBB2023）。Friedlingstein et al. (2023)によるGlobal Carbon Budget (GCB)では、緯度帯別の「モデル-観測間のCO₂の差」としてインバージョンフラックスの評価を行ってきたが、モデル間で見られる半球CO₂フラックス推定値の大きなばらつきは既存手法では評価できなかった。また先に示したOCO-2 v10 MIPでは、使用された様々なインバージョンの組み合わせ（すなわち異なる化学輸送モデル、異なるインバージョン設定、および同化に用いられた観測データの異なる組み合わせ）を、独立した観測を用いて評価した。観測に対するモデルのCO₂バイアスは±0.5ppm以内に収まったが、熱帯域北部のフラックス（正味の炭素交換）は、各インバージョン間で±1.1PgC yr⁻¹という大きな幅があった（BB23）。このようなトップダウン推定におけるフラックス推定値の不確かさに関するこれまでの知見を踏まえ、本サブテーマではさらに、(1)現場観測（IS）と陸域衛星観測（LNLG）を用いたインバージョンにより得られた解析フラックスと、(2)リモート域の実測値を用いて、全球化学輸送モデル（MIROC4-ACTM）を用いたOCO-2 v10 MIPフラックスの解析を実施した（Maity et al., in prep.）

本解析は異なる推定手法によるフラックス推定値の不確か性の幅を評価し、より確実性の高い推定値を導出することを目的としており、そのためにフラックスと濃度の間の対応関係に関する新しい評価方法を考案した。これは、OCO-2 v10 MIPインバージョンによるフラックス解析値を入力値としてMIROC4-ACTMによるフォワード計算で輸送計算を行い、フラックスの評価指標を導出する、というものである。

ここでは、Emergent Constraint (EC)と呼ばれる、観測情報によるモデル推定結果の評価・拘束を行なった。3つの異なる緯度帯におけるCO₂フラックス総量に関するECを、MIROC-ACTMにより計算された濃度のモデル値と各緯度帯に存在する観測サイトによる観測値を用いて「CO₂濃度のモデル-観測差」を指標として行なった（図2-3）。なお、MIROC4-ACTMの解像度が粗いため（～2.8° x 2.8°）、近傍に大きなCO₂フラックスがある陸域サイトでの観測結果は本解析から除外した。また手法的に時空間的に不連続な観測データによる評価を行うことが難しいため、移動プラットフォーム（航空機、気球、船舶）による観測も除外した。全CO₂フラックスと「CO₂濃度のモデル-観測差」は、NC22によるMIROC4-ACTMアンサンブルインバージョンを用いた解析では3つの緯度帯の全てで、またOCO-2 v10 MIPでは南緯度帯のみで統計的に有意な相関（95%有意水準）を示した（同図上段）。最適化されたOCO-2 v10 MIPモデル

によるフラックス解析値を用いた評価では、フラックス最適化時と異なる輸送モデルによる輸送過程を用いたことによる差異が生じていた結果、最適化されていないMIROC4-ACTM MIPシミュレーションと比較して相関係数が低い（同図a, 南半球(SHE)）か、あるいは全く有意ではなかった（同図b, 熱帯(TRP)）。一方で、共通の輸送モデル(MIROC4-ACTM)を用いて各モデルのCO₂フラックスを評価すると、「CO₂濃度のモデル-観測差(X軸)」と「緯度別フラックス総量(Y軸)」の間に相関関係が見え始め、制約が可能になる（同図d, e, f）。これらの結果から、フラックス推定の際と共通の輸送モデルを用いた輸送計算を行うことで、フラックスと濃度の関係をより明瞭にすることができることがわかった。またフラックスと濃度の間の相関関係については別の輸送モデルでも維持される可能性が高いと考えられる。

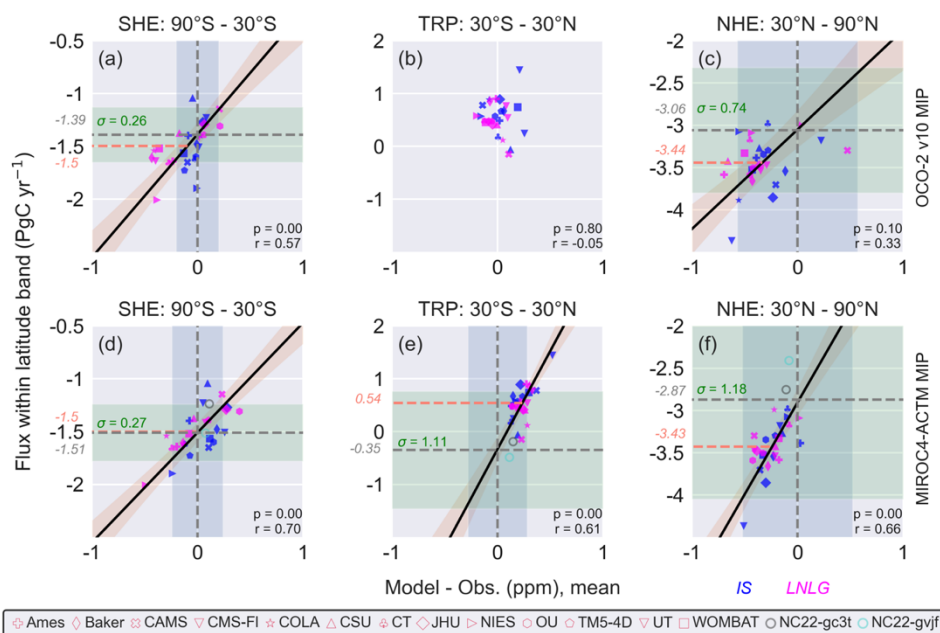


図2-3 異なる緯度帯（南半球中高緯度：左列、熱帯：中列、北半球中高緯度：右列）における全（海洋+陸域）フラックス解析値と、現場観測CO₂濃度推定誤差(モデル-観測)の平均値。記号はモデルの違いを表し、色はインバージョン手法を示す（ISは青、LNLGはマゼンタ）。各点は各モデルの6年間平均（2015-2020年）のバイアスとフラックス値を示す。上段（a-c）は

OCO-2 v10 MIPフラックスを用いた推定濃度（インバージョンで使用したのと同じモデル輸送）を使用したものであり、下段（d-f）はMIROC4-ACTMによるCO₂シミュレーション（独立した輸送モデル）を使用している。斜体の数字とY軸の灰色はECの推定フラックスを表す。赤の数字はマルチモデルの平均フラックスを表す。フィットした直線の傾きを計算するために直交距離回帰（ODR）法を使用した。相関係数（ r ）とp値は各サブプロットの右下に記載されている。青い陰影はバイアスに関連する不確実性を表し、茶色の陰影はフィットからの1- σ 予測区間を、緑色の陰影はECから予測されたフラックスの不確かさをそれぞれ表す（緑色の数字）。

LETKFデータ同化システムを用いたCO₂フラックス推定

従来のインバージョンよりも詳細な空間スケールでのフラックス推定、すなわち国別スケール、あるいは化学輸送モデルの各格子でのCO₂排出量の推定を可能にするとともに、衛星観測データをより効率的に利用するため、CO₂データ同化システムの開発を進めた。CO₂データ同化システム(Data Assimilation, DA)は、衛星やその他の地上観測データ（CO₂またはXCO₂）を用い、各格子における最適なCO₂フラックスを推定するシステムである。本システムはMiyazaki et al. (2011)によって開発されたLocal Ensemble Kalman Filter (LETKF:局所アンサンブルカルマンフィルタ)による大気微量成分を対象とした同化システムを基に実装されている。本同化システムではCO₂濃度を状態ベクトルとし、地表CO₂フラックスをモデルパラメータとしており、また状態ベクトル増強法(state vector augmentation)を適用している。MIROC4を用いた同化システムを構築し、OCO2データのOSSE

(Observation System Simulation Experiment) 実験を実施することにより、本同化システムの精度を検証した。OSSE実験とは仮想的な観測場を用いた同化再現実験のことであり、OSSE実験を通じて本同化システムの機能を理解し、実観測データによる同化実験に向けた様々なパラメータ調整を行うことを目的としている。MIROC4 同化システムにおけるOSSE実験に際しては、以下の過程で実施した。

1. 手順1：フラックス先験値の生成：OSSE 実験における DA システムの摂動フラックスを生成するために用いる。
2. 手順2：仮想的な観測 XCO_2 データの作成：データ同化に必要とされる観測データについて、仮定したフラックス真値から仮想的に生成する。
3. 手順3：OSSE実験の実施：フラックス先験値に摂動を加えたアンサンブルメンバーの各メンバーに対する地表フラックスを生成する。次に、この摂動したフラックスを用いたアンサンブル計算が同化のタイムウィンドウ期間について実施される。この同化ウィンドウ期間内のアンサンブル計算における解析誤差などをもとに CO_2 濃度とフラックスの解析値が作成され、これらの解析値が次のタイムウィンドウにおける同化計算に使用される。

評価対象期間である2015年の先験フラックスについては真値フラックスから一定値減じる形で作成した。次に、 CO_2 初期値を350ppmとして2015年の先験フラックスを用いて2010年から2014年まで5年間スピニングアップした。この際、エミッションの年々変動は考慮しなかった。スピニングアップ終了時点の全球分布を2015年の CO_2 同化OSSE実験の際の初期濃度とした。アンサンブルメンバーの初期値作成に際し、MIROC-ACTMのモデル各グリッド(128x64)において正規分布に従うランダムメンバーを使って100個のランダムファクターを用意するとともに、各グリッドで10%のフラックスの不確実性を仮定した。また、強い空間変動を平滑化するため、20%の空間相関を併せて仮定した。最後に、これらの係数を2015年の先験フラックスに乗じて100のアンサンブルメンバーごとの地表フラックスを生成した。またこの実験における仮想観測情報については、各グリッドで0.7ppmの観測誤差があるものと仮定した。

OSSE実験の結果、熱帯アメリカ、アフリカ北部、アフリカ中央部、オーストラリア・ニュージーランド、南東アジアなどの地域では、同化計算後も CO_2 フラックスの真値との差がまだ残っていた（図2-4左下図）。これは、同化システムは機能しているものの、正確に収束させるにはまだ十分でないことを示している。同化により得られたフラックス解析値が真値フラックスに正確に収束しないため、 CO_2 の収束に支障をきたし、それが2ppmの系統的なバイアスを発生させる原因の一つになっている可能性がある。収束が正確でない原因は複数考えられるが、その一つとしてアンサンブルメンバー数が十分でなかった可能性がある。これまでMIROC-LETKFで主に適用してきた NO_2 のような短寿命気体と異なり、 CO_2 のような長寿命気体では、今回用いたアンサンブルメンバー数（100メンバー）では背景誤差の共分散行列が適切に表現されず、収束に影響を与えていた可能性がある。その他、初期スプレッド生成手法、インフレーションおよび気象場のナッジングについてもさらなる精査が必要であると考えられる。

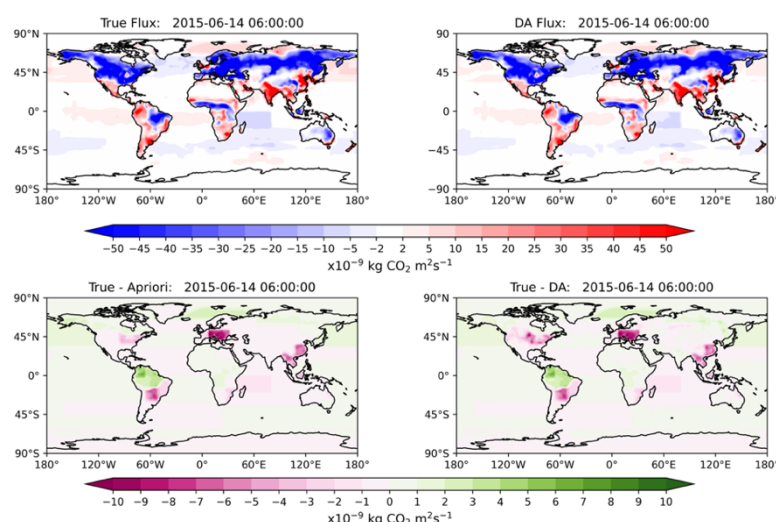


図2-4 上段：2015年6月14日のフラックス真値(上段左)およびOSSE実験によるフラックス解析値(上段右)。下段：フラックス真値と先験値との差(下段左)、および真値と解析値との差(下段右)。

トップダウンおよびボトムアップ手法による CH_4 収支推定

CH_4 収支に関し、MIROC4-ACTMのフォワードシミュレーションとインバージョン計算を2021年まで更新し、その結果をUNFCCC向けに温室効果ガス収支速報等として、プロジェクト期間内に3回更新した(うち

2回の情報をグローバルストックテイクに提出した)。CH₄の収支推定結果に詳細については、サブテーマ3-(2)の報告書を参照されたい。ここでは、Global Carbon Project (GCP)の Global CH₄ budget (Saunois et al., submitted)と、世界の8大排出国における観測ベースとインベントリベースのメタン排出量の比較([成果24]Petrescu et al., 2024(査読中))を通じた、本サブテーマから国際的な研究枠組みへの貢献の一部を紹介する。CH₄研究に対するその他注目すべき貢献は、テーマ3との共同研究([成果17]Ito et al, 2023; Ito et al., 2024; [成果8]Belikov et al, 2022; Belikov et al., 2024 (査読中))や国際共同研究([成果9]Takele Kenea et al, 2023; [成果7]Zhang et al, 2022; Chang et al, GCB, 2023)などが挙げられる。

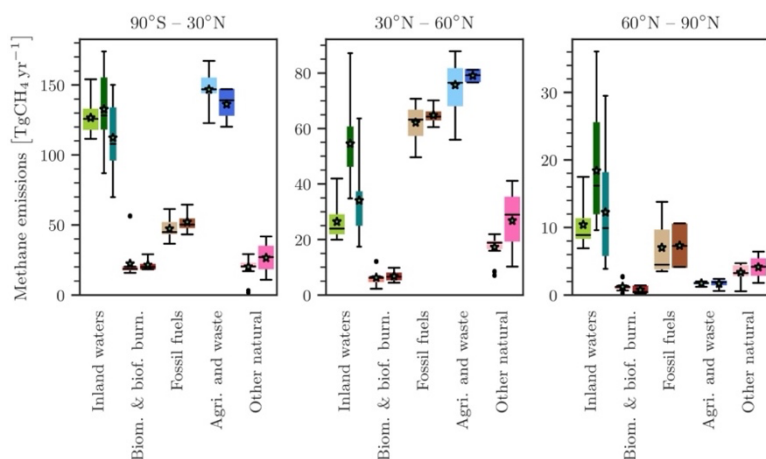


図2-5 2010～2019年の10年間における5種の排出源の緯度帯別のメタン排出量について、トップダウン（インバージョンモデル）を箱ひげ図左の薄い色で、ボトムアップ手法（モデルおよびインベントリ）は箱ひげ図右の濃い色で示す。単位はTg CH₄ yr⁻¹である。

湿地と内陸の淡水の組み合わせについては、3つの推定値が示されている：左＝トップダウン推定値、中央＝ボトムアップ推定値、右＝湿地のみのボトムアップ推定値である。中央値、第1四分位値、第3四分位値はボックス内に示されている。ひげは、外れ値の疑いがあるものを取り除いたときの最小値と最大値を表す。外れ値と思われるものには星印をつけてある。なお四分位値は、湿地排出量を除き、ボトムアップの推定値では利用できない。図はSaunois et al. (submitted)より。

排出源カテゴリー別、緯度帯別のCH₄収支解析（図2-5）は、ボトムアップ・アプローチおよびトップダウン・アプローチの双方で実施可能だが、限界があった(Saunois et al., submitted)。本研究で我々は、農業と廃棄物が熱帯地方におけるCH₄排出の最大の排出源であることを発見した（ボトムアップ手法による収支は137 [121-147] Tg CH₄ yr⁻¹、トップダウン手法では147 [123-168] Tg CH₄ yr⁻¹、この地域のCH₄総排出量の約40%を占める）。一方で、内陸淡水からの排出量は、ボトムアップ手法では133 [87-174] Tg CH₄ yr⁻¹、トップダウン手法では127 [111-155] Tg CH₄ yr⁻¹と、ほぼ同規模であった。北半球の中緯度地域では、人為起源の排出が大部分を占め、農業と廃棄物による排出（トップダウン推定では総排出量の40%）が最も大きく、化石燃料による排出（トップダウン推定では総排出量の32%）が僅差で続く。北方地域では、内陸淡水からの排出が大部分を占めている（トップダウン推定では総排出量の41%、ボトムアップ予算では54%）。トップダウン推定とボトムアップ推定との間に最も大きな乖離が見られるのは、中緯度地域と北方地域の自然排出源であり、特に内陸淡水のカテゴリーでは、ボトムアップの推定値がトップダウンの推定値の2倍となっている。内陸の淡水排出量の不確実性は、トップダウンモデルよりもボトムアップモデルの方が大きい。一方、人為起源排出量の不確実性は、ボトムアップインベントリよりもトップダウンモデルの方が大きい。

トップダウンおよびボトムアップ手法によるN₂O収支推定

大気化学輸送モデル（ACTM）を用いて大気中のN₂Oをシミュレーションし、まずその結果を現場測定による観測値と比較した。自然土壌、農地、その他の人間活動、および大気-海洋間のガス交換による5種類のN₂O先験排出量の組み合わせを用いた。ACTMによるコントロール実験では、N₂Oの寿命は127.6±4.0年であった（範囲は経年変動を示す）。1997年から2019年の世界42地点での観測値を用いて、全球84領域においてベイズ逆モデリングを用いて領域別のN₂O月別排出量を最適化した（[成果5]Patra et al.,

2022)。最もよく推定された全球陸域および海洋の排出量は、2000年～2009年ではそれぞれ $12.99 \pm 0.22 \text{ TgN年}^{-1}$ と $2.74 \pm 0.27 \text{ TgN年}^{-1}$ であり、2010年～2019年ではそれぞれ $14.30 \pm 0.20 \text{ TgN年}^{-1}$ と $2.91 \pm 0.27 \text{ TgN年}^{-1}$ であった。

我々の最新の推定によると、領域規模では、海洋放出量は南大洋域で少なく、インバージョン推定とボトムアップ推定がより整合的になることがわかった（これにより、Tian et al., 2020のトップダウンとボトムアップのフラックス間の大きなギャップが解消され、[成果22]Tian et al. の2024年ではPatra et al. 2022の結果も活用された）。世界の陸域と海洋の排出量の変動は、エルニーニョ南方振動（ENSO）と統計的に有意な相関を示している。地域別の陸域 N_2O 排出量の解析では、2000年代から2010年代にかけて、アメリカ（温帯北、中央、熱帯）、中央アフリカ、アジア（南、東、南東）で増加が見られた。ヨーロッパ全体だけが、化学産業による N_2O 排出量のわずかな減少となった。インバージョンでは、15の陸域のうち3つの地域（東アジア、温帯北米、中央アフリカ）と南大洋の季節的な排出変動が修正されていることが示唆された。なお、ボトムアップ推定に用いているVISIT（テーマ3のボトムアップ推定で使用している陸域生態系モデルであり、かつテーマ2-(1)の地球システムモデルの陸域コンポーネント）は、1978年以降に観測された N_2O 増加率と一致する年間総排出量をシミュレートすることができているが、窒素肥料施用と N_2O 排出の時間遅れを修正する必要性を示唆している。

[成果22]Tian et al. (2024)において、マルチモデルの枠組みで領域別 N_2O 収支を評価するために、ボトムアップとトップダウンの比較を、世界の陸地を18の地域に分割して行った（図2-6）。領域別の解析には以下が含まれる：1) 利用可能なトップダウン手法(TD, 1997-2020)とボトムアップ手法(BU, 1980-2020)の推定値で得られる、全放出源からの領域別 N_2O 総放出量のトレンドと変動（図2-6）、2) BU手法から得られた、1980-2020年の全発生源からの地域別人為起源 N_2O 排出量のトレンドと変動、3) BUとTD手法の両方から得られた、10年ごとの地域の N_2O 収支（2010-2019）。同図bは、世界の海洋のトップダウン排出量とボトムアップ排出量がよりよく一致していることを示している。BU手法の N_2O フラックスは、すべての陸域において、TD手法のアンサンブルから得られたフラックスに比べて不確実性の幅が非常に大きい。地域別排出量の時系列トレンドは、2つの排出量推定手法の間でよく一致している。

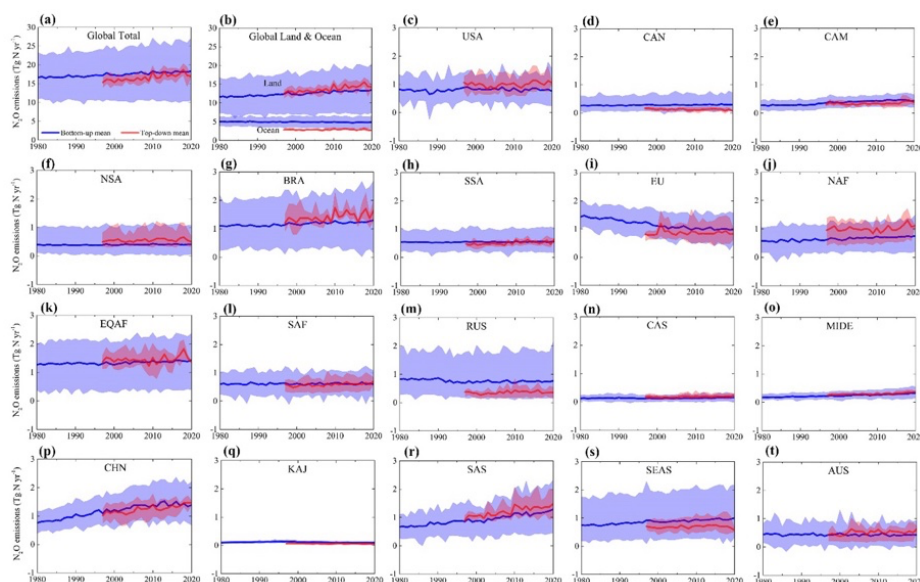


図2-6 ボトムアップ手法(BU)とトップダウン手法(TD)によって推定された世界と地域の N_2O 排出量の比較。18の地域には、アメリカ合衆国（USA）、カナダ（CAN）、中央アメリカ（CAM）、北南アメリカ（NSA）、ブラジル（BRA）、南西南アメリカ（SSA）、ヨーロッパ（EU）、北アフリカ（NAF）、赤道アフリカ（EQAF）、南アフリカ（SAF）、ロシア（RUS）、中央アジア（CAS）、中東（MIDE）、中国（CHN）、韓国・日本（KAJ）、南アジア（SAS）、東南アジア（SEAS）、オーストラレーシア（AUS）が含まれる。青線はBUによる N_2O 排出量の平均値を表し、網掛け部分は最小値と最大値を示す。赤線はTDによる N_2O 排出量の平均値、網掛け部分は最小値と最大値を示す。図はTian et al. (2024) より。

RECCAP2への貢献

RECCAP2の枠組みで、温室効果ガスの地域的な放出/吸収に関する収支推定評価取り組みが、2019年に御殿場でキックオフされた（代表：三枝伸子）。本サブテーマリーダーは、RECCAP2サイエンスチームの運営委員を務め（Poulterら、EOS、2022）、領域別温室効果ガス収支に関する査読付き論文が出版された（東アジアは[成果21]Wang et al., 2024、インド洋は[成果16]Sarma et al., 2023）。また他にも複数成果が投稿/レビュー/準備中である（北極圏永久凍土はHugelius et al. (改訂中)、ヨーロッパはLauerwald et al. (改訂中)、ロシアはShvidenko et al. (準備中)、東南アジアはKondo et al. (準備中)、南アジアはJain et al. (準備中)、南アジアはJain et al. (準備中)）。また、Global Carbon Project (GCP) の全球GHG収支の更新にも貢献している：CO₂はFriedlingstein et al. (2023)、CH₄はSaunio et al. (投稿中)、N₂Oは[成果22]Tian et al. (受理済み)。RECCAP2の研究例として、東南アジアの温室効果ガス収支の例を示す（Kondo et al.、準備中）。東南アジアでは、産業活動による炭素排出量は、ここ数十年で着実に増加している。石油は、この地域の主要なエネルギー資源として、また実質的なCO₂排出源として大きな役割を果たしてきた（図2-7a）。石油からの排出量は、1980年代から1990年代後半にかけて増加したが、2000年代末までは比較的安定し、その後2019年まで増加する。特筆すべきは、石炭からの排出量が2005年頃から急増し、過去数十年間におけるエネルギー部門の前例のない成長率を示す点である（同図a）。同様に、石炭採掘からのCH₄排出量も2005年以降急増し、2010年代の石油・ガス生産からの排出量が安定していたのとは対照的である（同図4b）。1990年代と2010年代の排出量を比較すると、石炭燃料と採掘からの炭素排出量は増加傾向にあり、近い将来、石炭が東南アジアにおける化石燃料排出の主要な原因となる可能性を示唆する（同図4cと4d）。

グローバル・エネルギー・モニター (<https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>) に基づく最近の調査結果は、今後の懸念すべき状況を示している。2020年時点で計画・建設中の石炭発電所が全稼働した場合、東南アジアの電力セクターからの炭素排出量は、2020年から2030年にかけて72%増加する可能性がある。これらの予測は、再生可能エネルギー資源の効率的な利用と化石燃料依存度の低減を目指すASEAN加盟国が提唱するエネルギー転換の構想に、難題を突きつける。これらの結果は、新興国においてカーボンニュートラルという長期的な目標を達成するための行動が緊急に必要なことを示唆する。低エネルギー集約型のインフラ整備の早期実施により、過去10年間に於ける3つのGHG濃度の急激な上昇を緩和することが可能かもしれない。

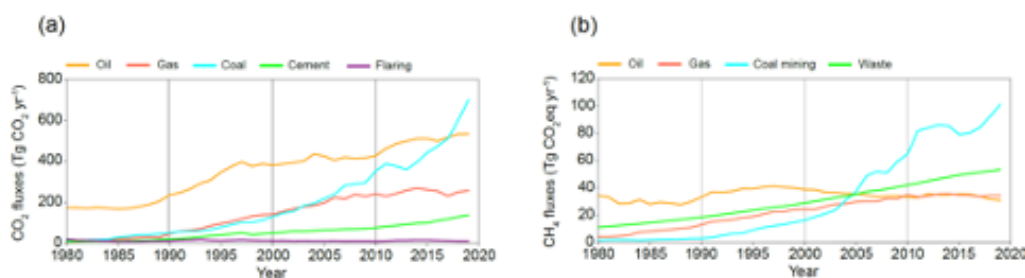


図2-7 産業活動に起因するCO₂とCH₄フラックスの10年ごとの変化。1980年から2019年までの産業活動による

(a)CO₂排出量と(b)CH₄排出量の経年変動。(c)1990年代と(d)2010年代のCO₂とCH₄が占める産業炭素排出量の割合(外側の円)とCO₂とCH₄排出の構成要素(内側の円)。図はKondo et al. (in prep.).

Future Earthの10NICSで示された温室効果ガス収支の不確実性を低減する必要性

オンラインアンケートで様々な分野の専門家から意見を集め、現在の気候科学のうち特に政策的意義の高い10の重要な研究洞察に優先順位をつける取り組み(10 New Insights in Climate Science, 10NICS)を行った(成果23, 成果56)。本論文ではこれら洞察の説明、その政策的含意の考察、および政策に関連するメッセージを統合的に示した。なお本成果は、Future Earth、The Earth League、World Climate Research Programme (世界気候研究計画)が共同で制作し注目を集めた。ここでは、この10の洞察のうち、本研究課題に関わりのある洞察4「New reasons for concern: the uncertain future contribution of land and ocean carbon sinks」について、以下、概説する。

CO₂排出量の増加にもかかわらず、過去50年間、約44%という比較的一定の割合でCO₂は大気中に留まってきた（[成果2]Canadell et al. 2021）。これは陸上と海洋の吸収源が、大気中CO₂の増加に伴って強くなっているからである。しかし最近のデータでは、陸域吸収源の強度の増加率が鈍化している点が示唆されている（[成果6]Chandra et al., 2022; Friedlingstein et al., 2023）。これは、自然変動による陸域の変動の結果である可能性もあるが、陸域生態系のCO₂吸収・貯留能力が低下していることを示している可能性もある（例：気温の上昇、降雨パターンの変化、高温と乾燥の同時発生のような極端な天候）。また、人間による複合的な攪乱によって吸収源が不安定化するリスクもある。さらなる人為的要因やモデルの限界などがあるため、これらの解釈は非常に不確実であるものの、陸域の吸収源が予想以上に急速に変化していることを強く示唆する研究事例が、数は限られるものの現れ始めている。

こうした懸念がある以上、科学者や政策立案者は潜在的問題に注意を払う必要がある。パリ協定の緩和要件の評価は、モデルにおけるCO₂吸収能の予測に依存している（[成果2]Canadell et al. 2021）。一般的にモデルは、将来の自然の炭素吸収源を、過去の期間における振る舞いと同等に予測する傾向がある。したがって、もし吸収量を過大評価していた場合、残余カーボンバジェット（ある温暖化緩和目標を達成するために排出可能な総CO₂排出量であり、自然科学的な意味での”収支”の意とは異なる）は、既存推定値よりもさらに小さくなる可能性がある（詳細は[成果23]Bustamante et al. (2023)の考察4を参照）。また、ネットゼロエミッションを目指す政策が不十分である可能性もある。残余カーボンバジェットの算出に用いられている地球システムモデルは、特に陸域における炭素吸収（土地利用変化による攪乱を含む）に大きな不確実性を有することが、サブテーマ1の研究（成果25）でも示唆されている。この不確実性を減らすとともに、自然炭素吸収源の恩恵に過度に期待してしまう可能性を避けるためには、より信頼に足る吸収源の定量評価とその不確実性を知ることが、今後も引き続き重要である。

残余カーボンバジェットの考え方は、全球気温の目標上限を確実に守るために構築されたものであり、CO₂を排出する度にその値は縮小する。50%の確率で地球温暖化を1.5℃以下に抑えることを目指したい場合、じきにその残余が枯渇する可能性がある。残余カーボンバジェットの大きさは、将来の陸域および海洋の自然炭素吸収源からの寄与をどう見込むかに強く依存している。残余カーボンバジェットの推定に利用される地球システムモデルは、複雑な生物地球化学過程をモデル化しているが、最新のモデルであっても、炭素循環に内在する非線形性を十分に捉え切れていない可能性がある（図2-8）。将来の気候-炭素フィードバックを適切に表すための地球システムモデリングと、過去の放出/吸収をより良く推定するインバージョンモデリングの間で強い研究協力体制を築くことは、残余カーボンバジェットの不確実性低減に役立つと考えられる。

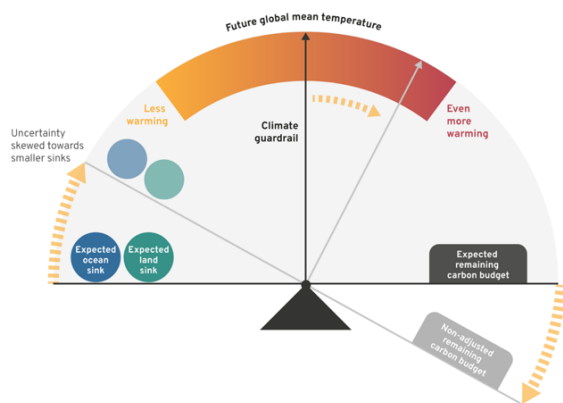


図2-8 どのような気温の「限界」であっても、残りの炭素収支（最近指定された日付からの累積の世界的な人為的CO₂純排出量）は、自然の炭素吸収源（他の変数の中で）の将来の能力に関する予想と釣り合うように構築される。もし吸収源が予想よりも小さければ（特に陸地については、その方向に偏った不確実性があるため）、残りの炭素収支が調整されない限り、予想よりもさらに温暖化が進むことになる。[成果23]Bustamante et al. (2023) より引用。

引用文献

- Chandra, N., et al. (2021). Emissions from the oil and gas sectors, coal mining and ruminant farming drive methane growth over the past three decades. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 99(2), 309-337.
- Chang, K.-Y., et al. (2023). Observational constraints reduce model spread but not uncertainty in global wetland methane emission estimates. *Global Change Biology*, 29, 4298-4312. <https://doi.org/10.1111/gcb.16755>.

- Forster, P., et al. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- Friedlingstein, P. et al., (2023). Global carbon budget 2023. Earth System Science Data, 15(12), 5301-5369.
- Jones, M. W., et al. (2021). Gridded fossil CO₂ emissions and related O₂ combustion consistent with national inventories 1959–2018. Scientific Data, 8(1), 2.
- Kondo, M. et al. (2018). Plant regrowth as a driver of recent enhancement of terrestrial CO₂ uptake. Geophysical Research Letters, 45(10), 4820-4830.
- Miyazaki, K. et al. (2011). Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO₂ flux estimation using an ensemble-based 4-D data assimilation system. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D16).
- Oda, T., et al. (2018). The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, version 2016 (ODIAC 2016): a global monthly fossil fuel CO₂ gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions, Earth Syst. Sci. Data, 10, 87–107, <https://doi.org/10.5194/essd-10-87-2018>.
- Patra, P. K., et al. (2018). Improved chemical tracer simulation by MIROC4.0-based atmospheric chemistry-transport model (MIROC4-ACTM). SOLA, 14, 91-96.
- Thompson, R. L., et al. (2016). Top down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s, Nat. Commun., 7, 10724.
- Tian, H., et al. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. Nature, 586(7828), 248-256.

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

○政策立案のためのシームレスな温室効果ガス収支推定結果の共有

既に実績ある大気輸送モデルと最新データを活用したCO₂, CH₄, N₂Oのトップダウン収支推定を着実に実施(表2-1、図2-2、成果6)するとともに、SII-8テーマ間での共有やGCPやRECCAP2へのデータ提供、一般向けデータ公開も計画通り完了した。また同一システムによる3種GHG収支推定が可能という強みを活かし、IPCC第6次報告書の第5章での成果取りまとめなどにも積極的に貢献するとともに、COP等を通じて知見の普及も積極的に行なった。より挑戦的なLETKFを用いた同化システムについてもCH₄およびCO₂を対象とした同化システム開発を行った(成果15、図2-4)。またこれらに加え、衛星観測のCO₂濃度情報を用いたマルチモデルによるインバージョン推定プロジェクトに参加(成果13)するとともに、モデルバイアスを観測情報を用いて制約する新たな評価手法を考案し(図2-3)、計画通り目標を達成した。

○地球システムモデルによる炭素-窒素サイクルの再現性向上への貢献

サブテーマ2-(1)にCH₄/N₂Oのトップダウン収支推定結果を提供、その比較解析に貢献(図1-3, 図1-4)し、地球システムモデルの炭素-窒素循環の問題点洗い出しに貢献した。また、排出削減実効性評価に用いる排出データ等についても助言を行い成果創出(図1-7, 図1-8)に貢献、計画通り目標を達成した。

○大気輸送モデルMIROCの輸送および化学過程の改良

CH₄に関する南北輸送過程の評価が論文化される(成果8)とともに、メチルクロロホルムを用いたOH動態に関する解析およびそれに基づく長期変動推定を実施した。また本成果はGCP-CH₄におけるCH₄収支の逆推定の高精度化に貢献した(図2-5)。これらの結果から、計画通り目標を達成したと自己評価した。

○衛星データの高精度化のための先験値の提供、モデルデータ提供システムの構築

計画通り高度分布情報導出のための濃度先験情報のテーマ3への提供を完了させるとともに、GOSAT-2のTIRスペクトルを用いたN₂O濃度のリトリバーバルを行った。また得られたN₂OリトリバーバルプロダクトについてはフランスCNRMの研究者と共同で比較評価した。また、既存データ配信システムなどを活用した速やかなデータ配布体制も確立し、計画通り目標を達成した。

○目標達成度の自己評価

以上を踏まえ、主たる4項目について計画通り目標を達成したものと思料している。特に、既に実績のあるトップダウン手法を活用した主要温室効果ガス3種の収支把握は世界でも先駆的なものとなり、これを継続・拡張することにより、Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2022の中心的情報の一つとなった。最重要の当初目標、とくにGCP等の国際プロジェクトやIPCC第6次報告書への貢献に加え、新システム開発やモデル改良、サブテーマ2-(1)や他テーマへの貢献も含め、目標を十分に達成した。

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：	24
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）：	7
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）：	20
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	5
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	1
その他の成果発表：	3

(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	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.

成果番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
2	CANADELL, J.G., P.M.S. MONTEIRO, M.H. COSTA, L. COTRIM DA CUNHA, P.M. COX, A.V. ELISEEV, S. HENSON, M. ISHII, S. JACCARD, C. KOVEN, A. LOHILA, P.K. PATRA, S. PIAO, J. ROGELJ, S. SYAMPUNGANI, S. ZAEHLE, K. ZICKFELD, 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.

	673-816, 2022. doi: 10.1017/9781009157896.007
3	SZOPA, S., V. NAIK, B. ADHIKARY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, W.D. COLLINS, S. FUZZI, L. GALLARDO, A. KIENDLER-SCHARR, Z. KLIMONT, H. LIAO, N. UNGER, P. ZANIS, 2021: Short-Lived Climate Forcers. In <i>Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change</i> [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817-922, 2022, doi: 10.1017/9781009157896.008.
4	S. NOMURA, M. NAJA, M. K. AHMED, H. MUKAI, Y. TERA0, T. MACHIDA, M. SASAKAWA, and P. K. PATRA: <i>Atmos. Phys. Chem.</i> , 21, 16427-16452 (2021) Measurement report: Regional characteristics of seasonal and long-term variations in greenhouse gases at Nainital, India, and Comilla, Bangladesh
5	P. K. PATRA, E. J. DLUGOKENCKY, J. W. ELKINS, G. S. DUTTON, Y. TOHJIMA, M. SASAKAWA, A. ITO, R. F. WEISS, M. MANIZZA, P. B. KRUMMEL, R. G. PRINN, S. O'DOHERTY, D. BIANCHI, C. NEVISON, E. SOLAZZO, H. LEE, S. JOO, E. A. KORT, S. MAITY, M. TAKIGAWA: <i>J. Meteorol. Soc. Jpn.</i> , 100, 1 (2022) Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model
6	N. CHANDRA, P.K. PATRA, Y. NIWA, A. ITO, Y. IIDA, D. GOTO, S. MORIMOTO, M. KONDO, M. TAKIGAWA, T. HAJIMA, and M. WATANABE (2022) Estimated regional CO ₂ flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO ₂ inversions, <i>Atmos. Chem. Phys.</i> , 22, 9215-9243, https://doi.org/10.5194/acp-22-9215-2022
7	Z. ZHANG, B. POULTER, S. KNOX, A. STAVERT, G. MCNICOL, E. FLUET-CHOUINARD, A. FEINBERG, Y. ZHAO, P. BOUSQUET, J. G. CANADELL, A. GANESAN, G. HUGELIUS, G. HURTT, R. B. JACKSON, P. K. PATRA, M. SAUNOIS, L. HÖGLUND-ISAKSSON, C. HUANG, X. LI (2022) Anthropogenic emissions are the main contribution to the rise of atmospheric methane (1993-2017), <i>National Science Review</i> , 9(5), nwab200. https://doi.org/10.1093/nsr/nwab200
8	D. BELIKOV, N. SAITOH, and P. K. PATRA, An analysis of inter-hemispheric transport pathways based on 3-dimensional methane data by GOSAT observations and model simulations, <i>J. Geophys. Res.</i> , 2022; https://doi.org/10.1029/2021JD035688
9	S. TAKELE KENEA, H.-Y. LEE, P. K. PATRA, S. LI, L. D. LABZOVSKII, S. JOO (2023) Long-term changes in CH ₄ emissions: Comparing $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ ratios between observation and proved model in East Asia (2010-2020), <i>Atmos. Environ.</i> , 293, 119437. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119437
10	TOHJIMA, Y., Y. NIWA, P. K. PATRA, H. MUKAI, T. MACHIDA, M. SASAKAWA, K. TSUBOI, K. SAITO, A. ITO, Near-real-time estimation of fossil fuel CO ₂ emissions from China based on atmospheric observations on Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, <i>Progress in Earth and Planetary Science</i> , 10, 10, 2023.
11	VOGEL, B., C.M. VOLK, J. WINTEL, V. LAUTHER, R. MULLER, P. K. PATRA, M. RIESE, Y. TERA0, F. STROH, Reconstructing high-resolution in-situ vertical carbon dioxide profiles in the sparsely monitored Asian monsoon region, <i>Commun Earth Environ</i> , 4, 72, 2023.
12	REMAUD, M., J. MA, M. KROL, C. ABADIE, M.P. CARTWRIGHT, P. K. PATRA, Y. NIWA, C. RODENBECK, S. BELVISO, L. KOOIJMANS, S. LENNARTZ, F. MAIGNAN, F. CHEVALLIER, M.P. CHIPPERFIELD, R.J. POPE, J.J. HARRISON, I. VIMONT, C. WILSON, AND P. PEYLIN, Intercomparison of atmospheric carbonyl sulfide (TransCom-COS; part one): Evaluating the impact of transport and emissions on tropospheric variability using ground-based and aircraft data, <i>J. Geophys. Res.</i> , 4, 2022.
13	BYRNE, B., D. BAKER, S. BASU, M. BERTOLACCI, K. BOWMAN, D. CARROLL, A. CHATTERJEE, F. CHEVALLIER, P. CIAIS, N. CRESSIE, D. CRISP, S. CROWELL, F. DENG, Z. DENG, N. DEUTSCHER, M. DUBEY, S. FENG, O. GARCÍA, D. GRIFFITH, B. HERKOMMER, L. HU, A. JACOBSON, R. JANARDANAN, S. JEONG, M. JOHNSON, D. JONES, R. KIVI, J. LIU, Z. LIU, S. MAKSYUTOV, J. MILLER, S. MILLER, I. MORINO, J. NOTHOLT, T. ODA, C. O' DELL, Y.-S.

	OH, H. OHYAMA, P. K. PATRA, H. PEIRO, C. PETRI, S. PHILIP, D. POLLARD, B. POULTER, M. REMAUD, A. SCHUH, M. SHA, K. SHIOMI, K. STRONG, C. SWEENEY, Y. TÉ, H. TIAN, V. VELAZCO, M. VREKOUSSIS, T. WARNEKE, J. WORDEN, D. WUNCH, Y. YAO, J. YUN, A. ZAMMIT-MANGION, N. ZENG, National CO ₂ budgets (2015-2020) inferred from atmospheric CO ₂ observations in support of the global stocktake, <i>Earth Syst. Sci. Data</i> , 15, 963-1004, 2023.
14	PETRESCU, R., C. QIU, M. MCGRATH, P. PEYLIN, G. PETERS, P. CIAIS, R. THOMPSON, A. TSURUTA, D. BRUNNER, M. KUHNERT, B. MATTHEWS, P. PALMER, O. TARASOVA, P. REGNIER, R. LAUERWALD, D. BASTVIKEN, L. HÖGLUND-ISAKSSON, W. WINIWARTER, G. ETIOPE, T. AALTO, G. BALSAMO, V. BASTRIKOV, A. BERCHE, P. BROCKMANN, G. CIOTOLI, G. CONCHEDDA, M. CRIPPA, F. DENTENER, C. D. GROOT ZWAFTINK, D. GUIZZARDI, D. GUNTHER, J.-M. HAUSSAIRE, S. HOUWELING, G. JANSSENS-MAENHOUT, M. KOUYATE, A. LEIP, A. LEPPÄNEN, E. LUGATO, M. MAISONNIER, A. MANNING, T. MARKKANEN, J. MCNORTON, M. MUNTEAN, G. OREGGIONI, P. K. PATRA, L. PERUGINI, I. PISON, M. RAIVONEN, M. SAUNOIS, A. SEGERS, P. SMITH, E. SOLAZZO, H. TIAN, F. TUBIELLO, T. VESALA, G. VAN DER WERF, C. WILSON, S. ZAEHLE, The consolidated European synthesis of CH ₄ and N ₂ O emissions for the European Union and United Kingdom: 1990-2019, <i>Earth Syst. Sci. Data</i> , 15, 1197-1268, 2023.
15	BISHT, J.S.H, P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, T. SEKIYA, Y. KANAYA, N. SAITOH, K. MIYAZAKI, Estimation of CH ₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system, <i>Geoscientific Model Development</i> , 16, 1823-1838, 2023.
16	SARMA, V.V.S.S., B. SRIDEVI, N. METZL, P. K. PATRA, Z. LACHKAR, K. CHAKRABORTY, C. GOYET, M. LEVY, M. MEHARI, N. CHANDRA, Air-Sea Fluxes of CO ₂ in the Indian Ocean Between 1985 and 2018: A Synthesis Based on Observation-Based Surface CO ₂ , Hindcast and Atmospheric Inversion Models, <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 37, 2023. https://doi.org/10.1029/2023GB007694
17	ITO, A., T. LI, Z. QIN, J. R. MELTON, H. TIAN, T. KLEINEN, W. ZHANG, Z. ZHANG, F. JOOS, P. CIAIS, P. HOPCROFT, D. BEERLING, X. LIU, Q. ZHUANG, Q. ZHU, C. PENG, K.-Y. CHANG, E. FLUET-CHOUINARD, G. MCNICOL, P. K. PATRA, B. POULTER, S. SITCH, W. RILEY, Q. ZHU, Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH ₄ models, <i>Geophys. Res. Lett.</i> , 2023. doi:10.1029/2023GL103037
18	MA, J., M. REMAUD, P. PEYLIN, P. K. PATRA, Y. NIWA, C. RODENBECK, M. CARTWRIGHT, J. J. HARRISON, M. P. CHIPPERFIELD, R. J. POPE, C. WILSON, S. BELVISO, S. A. MONTZKA, I. VIMONT, F. MOORE, E. L. ATLAS, E. SCHWARTZ, M. C. KROL, Intercomparison of atmospheric carbonyl sulfide (TransCom-COS; Part Two): Evaluation of optimized fluxes using ground-based and aircraft observations, <i>J. Geophys. Res.</i> , 2023. https://doi.org/10.1029/2023JD039198
19	PATEL, A., C. MALLIK, N. CHANDRA, P. K. PATRA, M. STEINBACHER, Revisiting regional and seasonal variations in decadal carbon monoxide variability: Global reversal of growth rate, <i>Science of the Total Environment</i> , 909, 168476, 2023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168476
20	TIBREWAL, K., P. CIAIS, M. SAUNOIS, A. MARTINEZ, X. LIN, J. THANWERDAS, Z. DENG, F. CHEVALLIER, C. GIRON, C. ALBERGEL, K. TANAKA, P. K. PATRA, A. TSURUTA, B. ZHENG, D. BELIKOV, Y. NIWA, R. JANARDANAN, S. MAKSYUTOV, A. SEGERS, Z. A. TZOMPA-SOSA, P. BOUSQUET, J. SCIARE, Assessment of national methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions, <i>Commun Earth Environ</i> 5, 26, 2024. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01190-w
21	WANG, X., Y. GAO, S. JEONG, A. ITO, A. BASTOS, B. POULTER, Y. WANG, P. CIAIS, H. TIAN, W. YUAN, N. CHANDRA, F. CHEVALLIER, L. FAN, S. HONG, R. LAUERWALD, W. LI, Z. LIN, N. PAN, P. K. PATRA, S. PENG, L. RAN, Y. SANG, S. SITCH, M. TAKASHI, R. L. THOMPSON, C. WANG, K. WANG, T. WANG, Y. XI, L. XU, Y. YAN, J. YUN, Y. ZHANG, Y. ZHANG, Z. ZHANG, B. ZHENG, F. ZHOU, S. TAO, J. G. CANADELL, S. PIAO, The greenhouse gas budget of terrestrial ecosystems in East Asia since 2000. <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 38, e2023GB007865, 2024. https://doi.org/10.1029/2023GB007865
22	TIAN, H., N. PAN, R. L. THOMPSON, J. G. CANADELL, P. SUNTHARALINGAM, P. REGNIER, E. A. DAVIDSON, M. PRATHER, P. CIAIS, M. MUNTEAN, S. PAN, W. WINIWARTER, S. ZAEHLE, F.

	ZHOU, R. B. JACKSON, H. W. BANGE, S. BERTHET, Z. BIAN, D. BIANCHI, A. F. BOUWMAN, E. T. BUITENHUIS, G. DUTTON, M. HU, A. ITO, A. K. JAIN, A. JELTSCH-THÖMMES, F. JOOS, S. KOU-GIESBRECHT, P. B. KRUMMEL, X. LAN, A. LANDOLFI, R. LAUERWALD, Y. LI, C. LU, T. MAAVARA, M. MANIZZA, D. B. MILLET, J. MÜHLE, P. K. PATRA, G. P. PETERS, X. QIN, P. RAYMOND, L. RESPLANDY, J. A. ROSENTERETER, H. SHI, Q. SUN, D. TONINA, F. N. TUBIELLO, G. R. VAN DER WERF, N. VUICHARD, J. WANG, K. C. WELLS, L. M. WESTERN, C. WILSON, J. YANG, Y. YAO, Y. YOU, Q. ZHU, Global Nitrous Oxide Budget 1980-2020, Earth Syst. Sci. Data, 16, in press, 2024.
23	BUSTAMANTE, M., J. ROY, D. OSPINA, P. ACHAKULWISUT, A. AGGARWAL, A. BASTOS, W. BROADGATE, J. G. CANADELL, E. R. CARR, D. CHEN, H. A. CLOUGH, K. L. EBI, C. EDWARDS, C. FARBOTKO, M. FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, T. L. FRÖLICHER, S. FUSS, O. GEDEN, N. GRUBER, L. J. HARRINGTON, J. HAUCK, Z. HAUSFATHER, S. HEBDEN, A. HEBINCK, S. HUQ, M. HUSS, M. L. P. JAMERO, S. JUHOLA, N. KUMARASINGHE, S. LWASA, B. MALLICK, M. MARTIN, S. MCGREEVY, P. MIRAZO, A. MUKHERJI, G. MUTTITT, G. F. NEMET, D. OBURA, C. OKEREKE, T. OLIVER, B. ORLOVE, N. S. OUEDRAOGO, P. K. PATRA, M. PELLING, L. M. PEREIRA, Å. PERSSON, J. PONGRATZ, A. PRAKASH, A. RAMMIG, C. RAYMOND, A. REDMAN, C. REVECO, J. ROCKSTRÖM, R. RODRIGUES, D. R. ROUNCE, E. L. F. SCHIPPER, P. SCHLOSSER, O. SELOMANE, G. SEMIENIUK, Y.-J. SHIN, T. A. SIDDIQUI, V. SINGH, G. B. SIOEN, Y. SOKONA, D. STAMMER, N. J. STEINERT, S. SUK, R. SUTTON, L. THALHEIMER, V. THOMPSON, G. TRENCHER, (2023) Ten New Insights in Climate Science 2023/2024. Global Sustainability, 1-58, 2023. https://doi.org/10.1017/sus.2023.25
24	PETRESCU, A. M. R., G. P. PETERS, R. ENGELEN, S. HOUWELING, D. BRUNNER, A. TSURUTA, B. MATTHEWS, P. K. PATRA, D. BELIKOV, R. L. THOMPSON, L. HÖGLUND-ISAKSSON, W. ZHANG, A. J. SEGERS, G. ETIOPE, G. CIOTOLI, P. PEYLIN, F. CHEVALLIER, T. AALTO, R. M. ANDREW, D. BASTVIKEN, A. BERCHET, G. BROQUET, G. CONCHEDDA, J. GÜTSCHOW, J.-M. HAUSSAIRE, R. LAUERWALD, T. MARKKANEN, J. C. VAN PEET, I. PISON, P. REGNIER, E. SOLUM, M. SCHOLZE, M. TENKANEN, F. N. TUBIELLO, G. R. VAN DER WERF, J. R. WORDEN, Reconciliation of observation- and inventory- based methane emissions for eight large global emitters, Earth Syst. Sci. Data, in review, 2024. https://doi.org/10.5194/essd-2023-516

< 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）
25	T. Hajima, et al. (2024) Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models and suggestion for improved simulation of CO ₂ concentration [preprint; submitted to Biogeoscience], https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-188

26	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
27	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
28	温室効果ガス収支のマルチスケール推定に関する報告書 2023, 国立環境研究所/海洋研究開発機構/気象研究所/千葉大学, https://www.nies.go.jp/sii8_project/img/SII8_GHG2023_J.pdf
29	温室効果ガス収支のマルチスケール推定に関する報告書 2024, 国立環境研究所/海洋研究開発機構/気象研究所/千葉大学, 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）
30	P. K. PATRA and T. UMEZAWA: SPARC Newsletter, 57, 36-38 (2021) Multi-species analysis key for testing chemistry-transport models in the upper-troposphere and lower stratosphere (UT/LS)
31	FreeK KORTEKAAS: Report of internship at University of Boulder (2022) Validating N ₂ O inversion models using NOAA Observations, Colorado, USA.

(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）
32	羽島知洋ら、JpGU Annual Meeting, 生態系－大気化学相互作用と地球システムモデル（招待講演、オンライン）、2021/6/6
33	岡田靖子、羽島知洋、日本気象学会2022年度秋季大会、北海道大学、簡易気候モデルを用いた地球システムモデルMIROC-ES2Lのエミュレート
34	T. Hajima et al., JpGU Annual Meeting, Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models, 2024/5/30 【予定】

成果 番号	【サブテーマ 2】の口頭発表（学会等・査読なし）
35	P. K. Patra IGAC-2021 meeting (online; International) (2021) Understanding of the space-time variations of hydroxyl (OH) using Methyl Chloroform (CH ₃ CCl ₃)
36	P. K. Patra, The 10th Asia-Pacific GAW Workshop on Greenhouse Gases (Invited; Online; International) (2021) Inverse modelling of CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O fluxes using MIROC4-ACTM and atmospheric data
37	P. K. Patra, Task Group Meeting on AOGE TG3: Carbon and Greenhouse Gases (Invited; Online; International) (2021) The state of carbon cycle in IPCC AR6 and future policy expectations
38	P. Patra, JpGU Annual Meeting (Online, international) (2022) Trend in Southern Ocean CO ₂ sink - a review and outlook
39	S. Maity, P. K. Patra and OCO2 modellers, TRANSCOM (2022) Analysis of OCO-2 CO ₂ flux inversion (MIP-2) using MIROC4-ACTM simulations
40	P. K. Patra, Japan Pavilion; COP26 (Invited; Online, International) (2022) Satellite data helping estimation and evaluation of regional CO ₂ and CH ₄ fluxes
41	P. K. Patra, N. Chandra, D. Belikov, JpGU annual meeting (2022) Top-down estimation of regional emissions and removals of CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O, 26 May 2022, Makuhari messe
42	P. K. Patra, N ₂ O Sources Workshop (2022) Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model, 07 July 2022, Toulouse, France (in person)
43	P. K. Patra (Invited), N. Chandra, D. Belikov, AOGS annual meeting (2022) Understanding Carbon-Nitrogen Cycle Through Inverse Modelling of CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O, abstract no., BG03-A005, 03 Aug 2022, Online
44	P. K. Patra, Japan Pavilion; COP27 (main Organiser; session moderator) (2022) Sharm El Sheikh, Egypt.
45	S. Maity, P. K. Patra, N. Chandra et al., JpGU Annual Meeting (2023) Majority of atmospheric CO ₂ inversion models overestimate northern extratropical carbon uptake (compared to MIROC4-ACTM?), Makuhari Messe, Japan
46	P. K. Patra, S. Maity, et al., IWGMS19 (2023) Assessment of sub-hemispheric CO ₂ fluxes from OCO-2 v10 MIP and MIROC4-ACTM inversions, Paris, France
47	P. K. Patra, Global Greenhouse Gas Watch Modeling Workshop (2002) Estimation of regional sources and sinks of CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O using MIROC4-ACTM at JAMSTEC, Bonn, Germany
48	S. Maity, and P. K. Patra, CORDEX (2023) CO ₂ surface flux estimation using ensemble based Kalman Filter approach, IITM, Pune, India
49	P. K. Patra, Regional emissions and removals of carbon dioxide (2000-2022), and cobenefits of biomass burning emission reduction for air pollution control, Japan Pavilion; COP28 (Co-Organiser; presenter) (2023) Dubai, UAE.
50	S. Maity, and P. K. Patra, AGU Fall Meeting (2023) Advancing sub-hemispheric CO ₂ flux estimation: unveiling insights through OCO-2 v10 MIP and MIROC4-ACTM inversions, San Francisco, USA
51	P. K. Patra, Space-based Greenhouse Gases, Air Quality and Climate Change (2023) Uncertainty in fossil-fuel emissions in China (2002-2012) limits understanding of global, hemispheric and regional land carbon budgets, Hyderabad, India

(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
52	2022	羽島知洋 ウェビナー「温室効果ガス研究の最前線ーパリ協定の目標達成に向けてー」(主催：国立環境研究所/グローバルカーボンプロジェクト/フューチャーアース、2022年2月10日、オンライン)にて「人為CO ₂ 排出量に基づく温暖化予測：地球システムモデル」として講演
53	2023	海洋研究開発機構 横須賀本部一般公開(2023年10月14日、参加者約2500名)にて成果紹介(簡易気候モデルを用いたクイズ・シミュレーション体験)

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
54	2021	P. K. Patra、第18回「地球環境シリーズ」講演会「カーボンニュートラルの科学(2021) Emissions from human activities caused rise in greenhouse gases
55	2022	P. K. Patra、国立環境研究所/グローバルカーボンプロジェクト/フューチャーアース ウェビナー「温室効果ガス研究の最前線ーパリ協定の目標達成に向けてー」(2022) 大気観測に基づいた主要な温室効果ガス3種の地域別収支見積もり
56	2023	P. K. Patra, Future Earth's 10NICS (Bustamante et al.; INSIGHT 4; Patra); Public lecture in Japan on 13 Dec 2023 (300 online participants)

(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
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
57	NIES/JAMSTEC: 貨物船と旅客機の民間協力観測によりCO ₂ の人工衛星観測データを評価する新手法を開発; https://www.nies.go.jp/whatsnew/20210625/20210625.html
58	NDTV Global Warming Is Now Faster. Will India Step Up Action? (India; https://www.ndtv.com/), https://www.youtube.com/watch?v=u0QufVtu9X4 ”
59	The Third Pole, Why India is neglecting its methane problem; https://www.thethirdpole.net/en/climate/why-india-neglecting-methane-problem/ ”
60	NIES/JAMSTEC: 大気観測が捉えた新型ウィルスによる中国の二酸化炭素放出量の変動〜ロックダウン解除後は前年レベルに〜; https://www.nies.go.jp/whatsnew/20211109/20211109.html

(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
------	--------------------

61	2022年度 日本気象学会堀内賞(2022年9月18日)【注：ある特定の研究成果に紐づけられる受賞ではない】
----	--

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

(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
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
62	P. K. Patra, Atmospheric gaseous pollutants: Fundamentals of monitoring, remote sensing, budget and climatic impacts over South Asia, AICTE Virtual School on Atmospheric Pollutants and Their Impact, 7-13 Mar 2022, Indian Institute of Technology Madras, Online (200 people registered)
63	P. K. Patra, Global Greenhouse Gas Watch Modeling Workshop (2023) Organizer of the roundtable and reporting “Day 2, Session 4: Sources and application of a priori data for flux estimation”, Bonn, Germany
64	P. K. Patra, Space-based Greenhouse Gases, Air Quality and Climate Change (2023) Meeting organizer/session chair, Hyderabad, India

Abstract

[Research Title]

GHG estimation for effectiveness assessment of emission reduction and validation of Earth system model

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Hajima Tomohiro
(PI ORCID) :	ORCID0000-0002-4828-5100
Principal Institution :	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa, 237-0061, Japan
Cooperated by :	
Keywords :	Global Stocktake, effectiveness assessment of emission reduction, Greenhouse gas flux, Earth system model, Inversion

[Abstract]

Theme 2 conducted global scale modeling, observational data utilization, and data analysis, including climate-carbon cycle simulations, to support the steady implementation of the global stocktake from a scientific perspective. To achieve the global warming mitigation targets in the Paris Agreement, it is necessary to better understand the anthropogenic emissions of the major greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O, hereafter GHGs), and their natural sinks/sources distributions on land and ocean, and concentration distribution in the atmosphere. We have achieved development of a system for estimation of regional sources and sinks of all three species by top-down/inverse modeling of atmospheric data. The system allowed these three gases to be compared and discussed in the CO₂-equivalent unit, and further contribute to the international research involving multiple data streams and reconciliation of top-down and bottom-up estimations. We have contributed and co-led various GHG budget activities of the Global Carbon Project (GCP), under the auspices of Future Earth, and the Regional Carbon Cycle Assessment and Processes, phase 2 (RECCAP2). The budgets of CO₂, CH₄, and N₂O on a global scale were used to validate and improve the performance of the Earth system model, in comparison with those obtained from inverse modeling. The improved model was used to perform simulations in which future anthropogenic CO₂ emission reduction is assumed. This study focused on the period when the atmospheric CO₂ concentration and global mean temperature start to decrease after anthropogenic emissions are mitigated. The results suggest stronger emphasis on both the pace of emission reductions and early intervention are necessary not only to maintain the global temperature well below the 1.5/2.0°C target but also to achieve earlier the effectiveness of mitigation measures. The Theme 2 activities have directly or indirectly contributed to the recently concluded IPCC 6th assessment report through the submission of inversion and earth system model results, and to the 1st global stocktake by the UNFCCC.

[References]

Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2022, NIES/JAMSTEC/MRI/Chiba University, UNFCCC HP "Documents" (submissions to the Global Stocktake), 2022/04/01,

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/202203011207---GST_NIES_GHGbudget_202202.pdf

Bulletin of Multi-scale Estimation of Greenhouse Gas Budgets 2023, NIES/JAMSTEC/MRI/Chiba University, UNFCCC HP "Documents" (submissions to the Global Stocktake) 2023/03/03, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/202303021439---GST_NIES_GHGbudget_202303.pdf

GST_NIES_GHGbudget_202303.pdf

T. Hajima, et al. (2024) Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models and suggestion for improved simulation of CO₂ concentration, pre-print EGU sphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-188>

N. Chandra, P. K. Patra, Y. Niwa, A. Ito, Y. Iida, D. Goto, S. Morimoto, M. Kondo, M. Takigawa, T. Hajima, and M. Watanabe (2022) Estimated regional CO₂ flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO₂ inversions, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 9215-9243, <https://doi.org/10.5194/acp-22-9215-2022>

P. K. Patra et al. (2022) Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 100, 1 (2022)

J.S.H. Bisht et al. (2023) Estimation of CH₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system, *Geoscientific Model Development*, 16, 1823-1838, 2023.

B. Byrne et al. (2023) National CO₂ budgets (2015-2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 963-1004, 2023.

H. Tian et al. (2024) Global Nitrous Oxide Budget 1980-2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 16, in press.

M. Bustamante et al. (2023) Ten New Insights in Climate Science 2023/2024. *Global Sustainability*, 1-58, 2023. <https://doi.org/10.1017/sus.2023.25>

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

