

SII-8-2 排出削減策の実効性評価のための GHG推定と地球システムモデル検証

課題番号：SII-8-2 (FY2021-2023)

体系的番号：JPMEERF21S20820

研究課題名：排出削減策の実効性評価のためのGHG推定と地球システムモデル検証

テーマリーダー：羽島知洋

テーマ代表機関：海洋研究開発機構

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

研究分担機関 : 海洋研究開発機構

研究代表者 : 羽島知洋

研究分担者 : 須藤健悟、(岡田靖子、渡辺路生)

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

研究分担機関 : 海洋研究開発機構

研究代表者 : Prabir Patra

研究分担者 : 滝川雅之、Suman Maity

1. はじめに(研究背景等)

グローバルストックテイク：最良の科学に基づき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必要性

背景：GHGs収支の現状把握

現状全球スケールにおいて主要な温室効果ガス(CO₂、CH₄、N₂O)の人為排出量、自然の吸収・放出、大気中濃度動態の科学的理解を深める必要性



→逆推定手法による収支把握がこれまで進捗 (推進費2-1701, 2-1802)、
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)でも活用、
再現精度向上の努力と合わせ、既に実績あるトップダウン手法による継続的貢献が期待される

背景：将来予測

「今後のGHGs排出削減がどの程度の温暖化抑制効果をもたらしうるか」の定量評価は、
温暖化緩和目標を達成する上で必要となる排出パスの議論(NDC策定)において重要



→国内温暖化予測プロジェクト等で開発されてきた地球システムモデル(温暖化予測モデル)の活用が有効、
ただし自然の吸収・放出速度や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
→**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・改良し、温暖化緩和効果の定量評価が必要**

2. 研究開発目的

グローバルストックテイクの科学面支援のため、

- ・サブテーマ2-2: 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
- ・サブテーマ2-1: 排出削減がもたらす近未来の温暖化抑制の実効性評価 と 信頼性向上に向けた地球システムモデルの検証と改良

●サブテーマ2-1：

- ・推進費SII-8で得られる最新GHGs情報を活用、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
- ・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の実施、排出削減の温暖化抑制効果を評価

●サブテーマ2-2：

- ・従来手法による温室効果ガス(CO₂、CH₄、N₂O)のトップダウン収支推定(逆推定)を実施 →GCPやIPCC-AR6に貢献、データ同化手法による収支推定システムの開発 →高い空間分解能での温室効果ガスの排出・吸収量を推定
- ・温室効果ガス収支の逆推定の比較・評価や排出削減の実効性評価に貢献 →地球システムモデルの予測精度向上に寄与
- ・大気輸送モデルの輸送・化学過程の改良
- ・温室効果ガス高度分布導出のため大気輸送モデルで計算した CO₂、CH₄、N₂O濃度データを先験情報として提供、濃度リトリバー精度の向上につなげる

3. 研究目標および研究計画

サブテーマ(1) 目標	2021	2022	2023
地球システムモデルで再現される温室効果ガス動態の <u>検証</u>	逆推定値等を活用した温室効果ガス詳細検証 [サブテーマ2-2と連携]		
検証作業に基づくモデル <u>改良・調整</u>	温室効果ガス過程の改良/調整・ スピニングアップ・確認実験		
排出削減の <u>実効性評価シミュレーション</u> の実施	実効性評価実験のための事前準備 簡易気候モデルの利用可能性検討		排出削減の 実効性 評価実験
サブテーマ(2) 目標	2021	2022	2023
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	逆推定モデルによるCO ₂ , CH ₄ , N ₂ Oの収支推定		
	EnKFデータ同化システムの開発・検証	同システムによる収支推定	
地球システムモデルによる炭素-窒素サイクルの <u>再現性向上への貢献</u>	GHGs収支情報提供と検証協力(→2-(1))		排出削減実効性評価への 協力(→2-(1))
大気輸送モデルの輸送および化学過程の <u>改良</u>	大気輸送モデル・パラメタリゼーション改善		
衛星データの高精度化のための先験値の提供、データ提供体制	濃度先験値を提供(→3-(2))	テーマ間データ共有	濃度リトリバル評価(→3-(2))

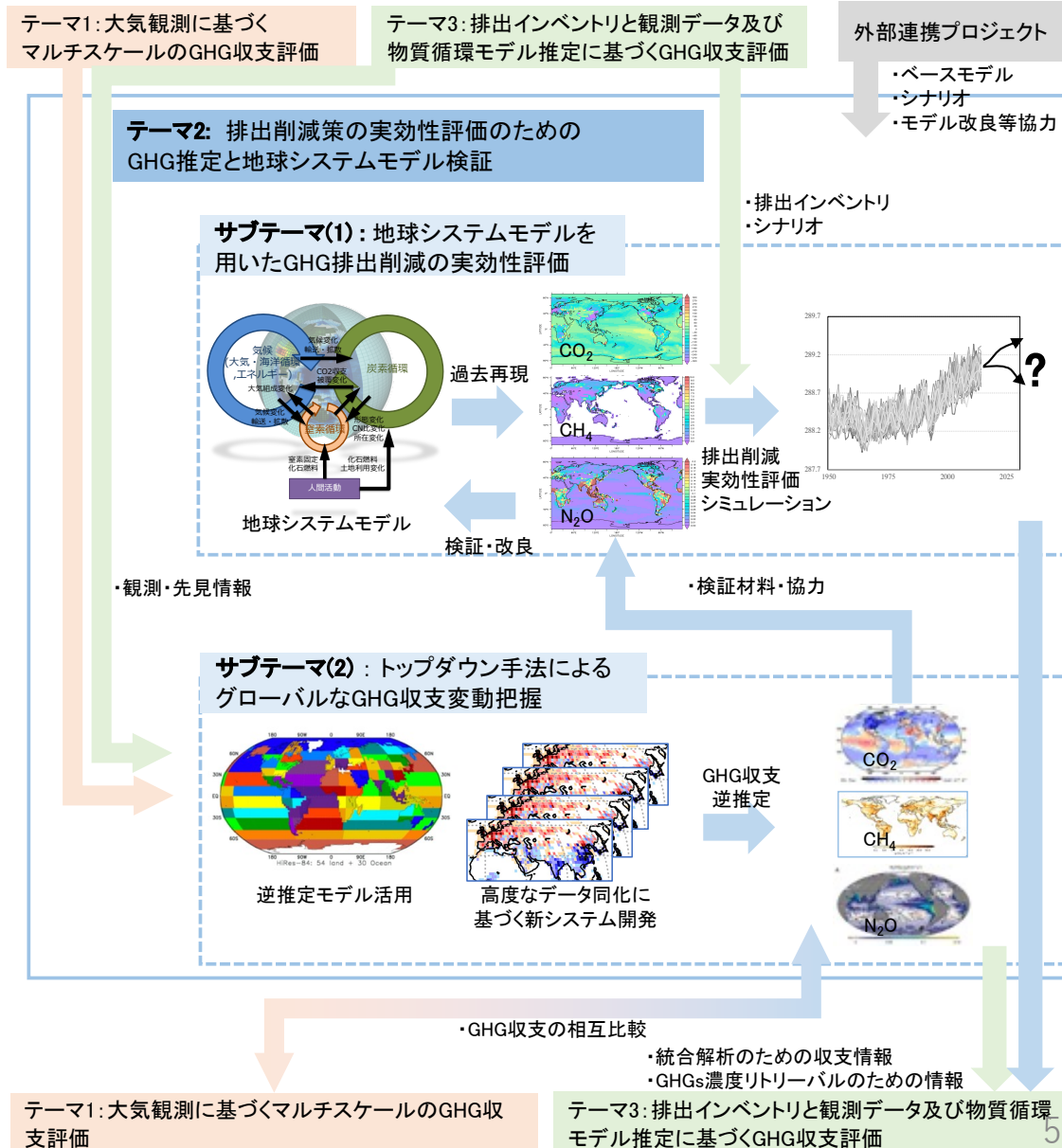
4. 研究開発内容

● サブテーマ(1)

- IPCC-AR6等にも使われた地球システムモデル (MIROC-ES2L)の温室効果ガス動態を **検証**
- モデルの **改良・調整**
- **排出削減の実効性評価シミュレーション**を実施

● サブテーマ(2)

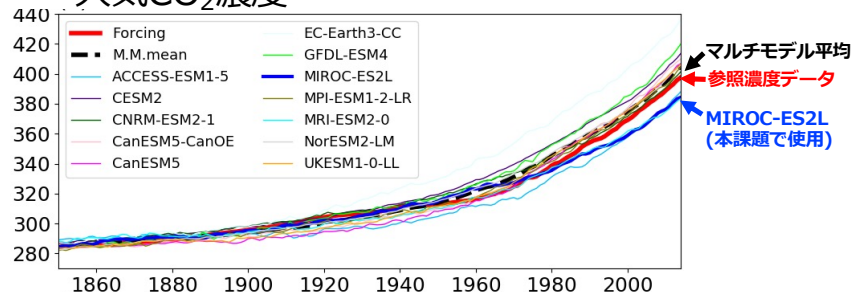
- 政策立案のためのシームレスな **温室効果ガス収支推定と結果の共有**
- **地球システムモデル**による炭素-窒素サイクルの **再現性向上への貢献**
- **大気輸送モデル**の輸送および化学過程の **改良**
- 衛星データの高精度化のための **先験値の提供、データ提供体制**



5. 結果と考察 (1) 地球システムモデルのCO₂, CH₄, N₂Oの検証と改良

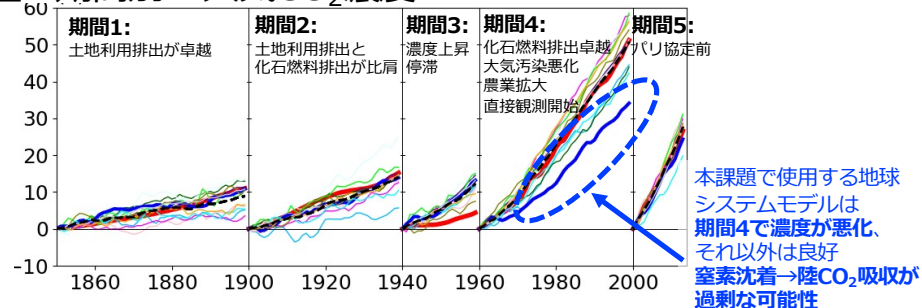
CO₂

大気CO₂濃度



濃度観測比較と
フィードバック
解析による評価検証

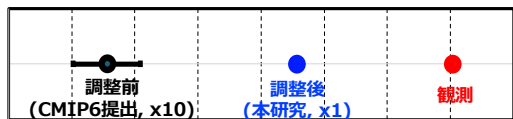
期間別 Δ大気CO₂濃度



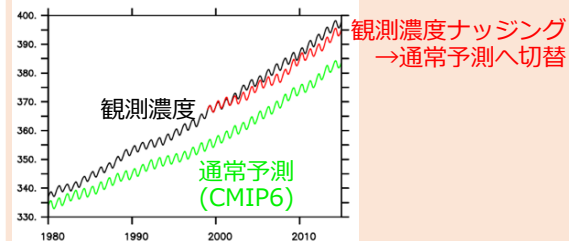
モデル改良と CMIP7向けモデルへの貢献

モデル改良前後の大気CO₂濃度 (2014年) [ppmv]

380 383 385 388 390 393 395 398 400



ナッジングシステムの導入と 予測信頼性向上

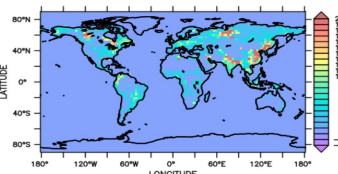
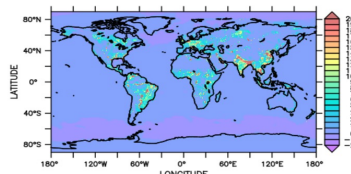


CH₄ & N₂O

トップダウン推定(サブ2)

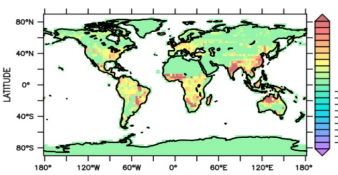
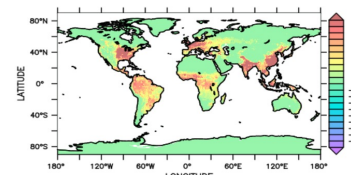
地球システムモデル(サブ1)

CH₄
(人為+自然)

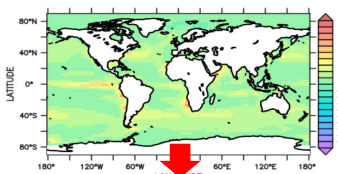
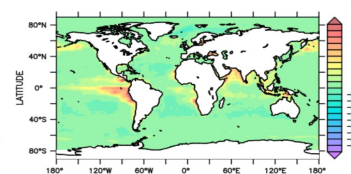


All emiss by ESM (gCH4 yr-1 m-2)

陸域N₂O



海洋N₂O

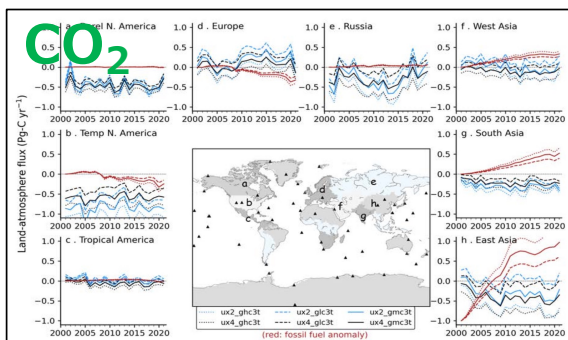


改良前: 4.4TgN/yr
→改良後: 3.5TgN/yr
トップダウン推定とより整合

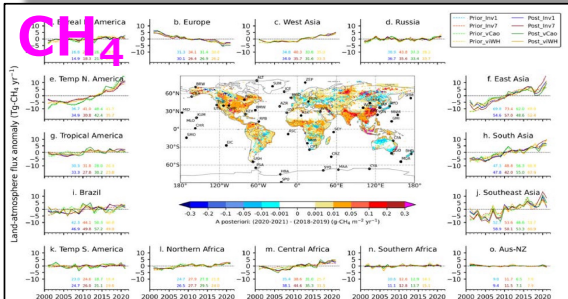
- CO₂: 詳細な検証と効率的な改良を実施、排出削減の実効性評価の信頼性向上に繋がる
- CH₄ & N₂O: 同一システムで3種GHGsを扱える強み(サブ1・サブ2ともに)を活かし検証を実施、今後のさらなる研究展開の礎に

5. 結果と考察 (3) CO₂, CH₄, N₂O逆解析

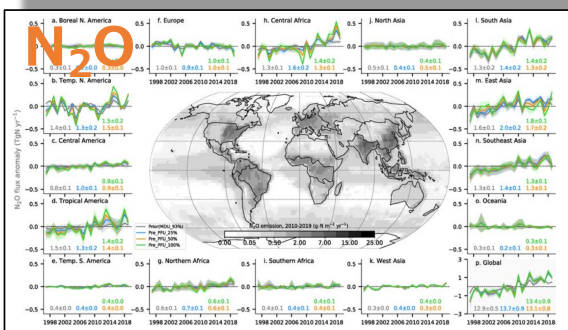
同一システムによる3種ガス収支の インバージョン解析と定期報告



- ・複数先経験情報活用
- ・マルチインバージョン(OCO2-MIP)を活用した検証と観測による制約
- ・次世代版モデル開発:データ同化
- ・GCP-CO₂への継続貢献

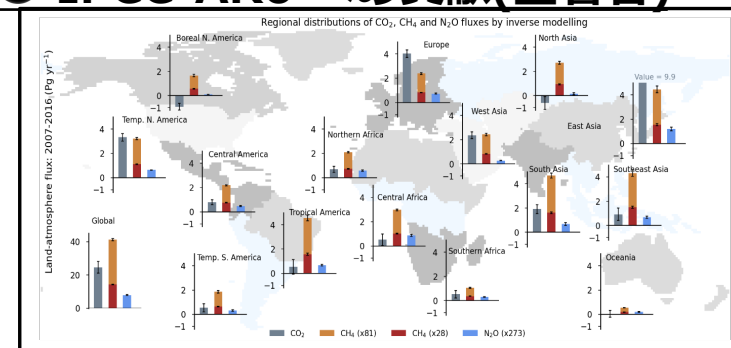


- ・テーマ3(千葉大)と共同実施
- ・GCP-CH₄での国際研究リード
- ・次世代版モデル開発:データ同化



- ・新システム開発
- ・GCP-N₂Oでの国際研究リード

● IPCC-AR6 への貢献(主著者)



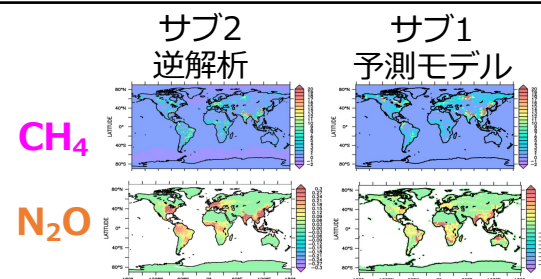
GWPを用いた3種GHGs統合解析と総合評価

● SII-8 収支報告書・GCP報告書



3種ガス領域～全球収支という重要なインプット材料を提供

● 地球システムモデル検証・改良



予測モデルの検証・改良に貢献

5. 結果と考察 (4) 国際的統合研究から得られた知見

CO₂逆解析フラックスの観測制約の可能性

(d) SHE: 90°S - 30°S
 $\sigma = 0.27$
 $r = 0.70$
 $p = 0.00$

(e) TRP: 30°S - 30°N
 $\sigma = 1.11$
 $r = 0.61$
 $p = 0.00$

(f) NHE: 30°N - 90°N
 $\sigma = 1.18$
 $r = 0.66$
 $p = 0.00$

Model - Obs. (ppm), mean

Legend: Ames, Baker, CAMS, CMS-FI, COLA, CSU, CT, JHU, NIES, OU, TM5-4D, UT, WOMBAT, NC22-gc3t, NC22-gvjf

複数の逆推定フラックス(Y軸)を観測濃度(X軸)で拘束できる可能性

Mity et al., in prep.

CH₄のトップダウン/ボトムアップ統合解析

90°S - 30°N
 30°N - 60°N
 60°N - 90°N

Inland waters
 Biom. & biof. burn.
 Fossil fuels
 Agri. and waste
 Other natural

各色薄色がTD推定、濃色がBU推定

- 熱帯の最大放出源が農業・廃棄物と特定
- 湿地・陸水放出源に最大の不確実性

Saunois et al., submitted

N₂Oのトップダウン/ボトムアップ統合解析

(a) Global Total
 (b) Global Land & Ocean
 (c) USA
 (d) CAN
 (e) CAM
 (f) NSA
 (g) BBA
 (h) SSA
 (i) EU
 (j) NAF
 (k) EQAF
 (l) SAF
 (m) RUS
 (n) CAS
 (o) MIDE
 (p) CHN
 (q) KAJ
 (r) SAS
 (s) SEAS
 (t) AUS

TD/BU推定の変化傾向がよく一致、特に海洋に改善

Tian et al. (2024)

国別収支推定の研究枠組み構築とRECCAP2運営

Cement + Fossil fuel CO₂
 CO₂ emissions
 BB CO₂
 CO₂ sink
 GPP
 R_{net}
 export to ocean
 R_{net} (excluding respired carbon from lateral fluxes)

LEGEND: Fossil Fuel, Ecosystem metabolism, Biomass burning, F_{wood} trade, F_{crop} trade, F_{forest} export

- 国別収支では水平輸送が重要
- 国規模推定RECCAP2の個別成果

Byrne et al. (2023); Wang et al. (2024)他

Future Earth 10の洞察

Future global mean temperature
 Climate guardrail
 Less warming
 Even more warming
 Expected remaining carbon budget
 Uncertainty skewed towards smaller sinks

- 陸域シンクの増加率弱体化傾向、残余カーボンバジェット見積もりとパリ協定履行に影響する可能性

Bustamante et al. (2023)

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

(1) 達成状況自己評価：2（目標を上回る成果をあげた）

テーマ 大目標	具体目標(サブテーマ)	達成状況
<u>地球システムモデル</u>における温室効果ガス動態の<u>検証</u>とモデル<u>改良</u>を行い、今後の排出削減が近未来の温暖化抑制にもたらず<u>実効性評価</u>を行う	地球システムモデルで再現されるGHGs動態の <u>検証</u>	- 検証に利用可能なデータセットの<u>総括</u>を実施（羽島ら2021） - CO₂：観測比較とフィードバック解析により<u>問題特定ができた</u>（Hajima et al. 2024） - CH₄とN₂O：<u>サブ2結果を</u>全球・領域フラックス<u>検証に活用</u>
	上記検証作業に基づくモデル <u>改良・調整</u>	- CO₂：ナudgingシステム導入と誤差の根本解決の<u>2方面でバイアス改善</u>（数値目標±10ppmv以内も達成） - 問題が見られた<u>海洋N₂Oも改善</u>し、逆推定結果とより整合的に
	排出削減の実効性評価シミュレーションの <u>実施</u>	- SSPsを用いた<u>排出削減の実効性評価を実施</u> - 簡易気候モデルを用いた迅速実施とSII8の<u>GST向け報告書へのインプット</u> <u>CO₂排出減少に遅れる気候-炭素循環システム</u>の応答を指摘（Okada & Hajima in prep）
<u>大気輸送モデル</u>によるトップダウン手法で<u>CO₂,CH₄,N₂Oの収支推定</u>を実施し、<u>SII-8間での共有</u>や<u>国際プロジェクト/IPCC-AR6等への貢献</u>、および地球システムモデル等の<u>改良に資する</u>	政策立案のための温室効果ガス収支推定結果の共有	- CO₂, CH₄,N₂Oの収支推定を同一システムで<u>実施</u>（Chandra et al., 2021; Patra et al., 2022等） - テーマ3へ共有、SII8の<u>GST向け報告書への重要基礎情報</u>に <u>GCPへのデータ提供</u>（Friedlingstein et al., 2023等）のみならず、GCP-CH₄/N₂O やRECCAP2で<u>コアメンバーとして国際リード</u>（Saunois et al., submitted等）、<u>IPCC-AR6への主執筆貢献</u>（Canadell et al., 2021等） - LETKFを用いた次世代型システム（データ同化）の<u>開発</u>（Belikov et al., 2022等）
	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1にインバージョン<u>結果を提供</u>、これまで難しかった地球システムモデルのCH₄とN₂Oの検証材料に - 大気汚染・窒素沈着による炭素-窒素サイクルの変動に関する<u>助言</u> <u>最新の人為排出データなどの提供</u>による実効性評価シミュレーションの補助
	大気輸送モデル MIROC の輸送および化学過程の改良	- 半球間での物質輸送経路と<u>モデル改良</u>（Belikov et al., 2022） - 独立化学トレーサーを用いた<u>検証</u>と、<u>改良</u>モデルによる高精度CH₄<u>収支推定</u>（Saunois et al., submitted）
	衛星データの高精度化のための先験値の提供	- MIROC4-ACTMの濃度情報をサブテーマ3-(2)に<u>提供</u> - これを用いたN₂O<u>濃度リトリバー作成に貢献</u>（Ricaud et al., 2021等）
	モデルデータ提供システムの構築	- MIROC4-ACTMによる収支推定結果を<u>迅速に公開できる体制を構築</u> - 幅広い研究コミュニティで活用された実績

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

(2) 環境政策等への貢献, 長期的政策展望への示唆

- UNFCCC グローバルストックテイク向けSII-8報告書へ知見を記載
- COPにおける成果の公表と周知 (2021グラスゴー、2022シャルムエルセイク、2023ドバイ)

- 排出削減に転じてから、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、その数十年後になる可能性
 - 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
 - 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

- 過去20年間のN₂O観測では、共有社会経済経路 (SSP) のどの排出シナリオよりも成長率大きい ; CO₂もSSPの中庸シナリオ程度のペース

- GWP20による評価によると、一部地域では、20年間のCH₄排出量の影響がCO₂排出量よりも大きい

- 日本を含むいくつかの国では、CH₄とN₂Oの排出削減がすでに大きく進展しており、過去の努力を評価し排出削減対策が他国と共有されることを推奨

- 不確実性の高い自然シンクのより精緻な把握に向けた関連科学政策の推進

7. 研究成果の発表状況

成果概要

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

主要な成果

成果番号	【テーマ2】の主要な成果（10件のみ）
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 [CMIP6世代の地球システムモデルにおけるCO ₂ 濃度再現性評価、CMIP7に向けた国際研究潮流に合致]
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. [地球システムモデルの検証に資する全球データベースの総括]
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) [N ₂ Oインバージョンシステムの開発論文、GCP-N ₂ Oなどにも波及]
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 [複数先験情報を活用したCO ₂ インバージョンシステムによる収支推定、GCP-CO ₂ などにも波及]
15	J.S.H. Bisht et al. (2023) Estimation of CH ₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system, Geoscientific Model Development, 16, 1823-1838, 2023. [LETKFを使用したCH ₄ インバージョンシステム開発論文、テーマ3との連携成果]
17	A. Ito et al. (2023) Cold-season methane fluxes simulated by GCP-CH ₄ models, Geophys. Res. Lett. doi:10.1029/2023GL103037 [ボトムアップアプローチによるCH ₄ 収支推定、GCP-CH ₄ と関連]
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 [IPCC-AR6 第5章にリードオーサーとして貢献、GWPIによる3種ガス統合解析など]
13	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. [国スケール収支把握(グローバルストックテイク)における枠組みを議論]
22	H. Tian et al. (2024) Global Nitrous Oxide Budget 1980–2020, Earth Syst. Sci. Data, 16, in press. [第2回GCP-N ₂ O]
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 [Future Earth の「最新気候科学における10の洞察」の発出に直結]