

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



National Institute for Environmental Studies
<https://www.nies.go.jp/>

要約

本報告書はSII-8プロジェクトによって推定された温室効果ガス収支の概要で、昨年提出した内容を更新したものです。パリ協定の第一回グローバル・ストックテイクへの貢献を目指しています。

1. 緒言

パリ協定の気候目標を達成するためには、世界全体、地域、国、局所スケールの温室効果ガス（GHG）収支についての評価が不可欠です。京都議定書（1997年）とは異なり、パリ協定（2015年）では、すべての締約国に、人為的な発生源による GHG 排出量についての国家インベントリと各国が決定する貢献（NDC）の提出が義務付けられています。透明性を確保するためにパリ協定が承認するグローバル・ストックテイク（世界全体としての実施状況の検討、GST）は、実施状況に関する 5 年ごとの検討過程であり、この協定の目的及び長期的な目標の達成に向けた世界全体としての進捗状況进行评估します。2023 年 11 月に実施が想定される第 1 回 GST は、1) 情報の収集及び準備、2) 技術的評価、3) アウトプットの検討の 3 部から構成されます。

この概要報告の目的は、第 1 回 GST への情報面での貢献度について国内研究活動の成果を提示することです。環境省の資金提供を受け、2021 年 4 月に戦略的研究開発プロジェクト SII-8（温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究）が発足しました。各研究参加グループは、観測プラットフォーム、先進的モデル、インベントリなどそれぞれが持つ手段を使ってマルチスケールで GHG 収支を評価しました（図 1）。GST では衡平性への貢献を考慮し、利用可能な最良の科学を横断的に活用すべきであることから、こうした試みが必要なのは明らかなです。この報告書では、このプロジェクトで採用された方法論の概略を簡潔に述べ、また第 1 回およびそれに続く GST を支援するものと期待される主要な結果を示します。本研究の強みは、1) 複数のアプローチ（ボトムアップとトップダウン）の統合的展開、2) 広い範囲をカバーする空間的スケール、3) 意思決定を支える迅速な報告にあると考えています。とりわけ本研究では、地域あるいは世界全体を対象とする他のモニタリング活動では手薄となっていたアジア太平洋地域に対し、より詳しく調査することができました。

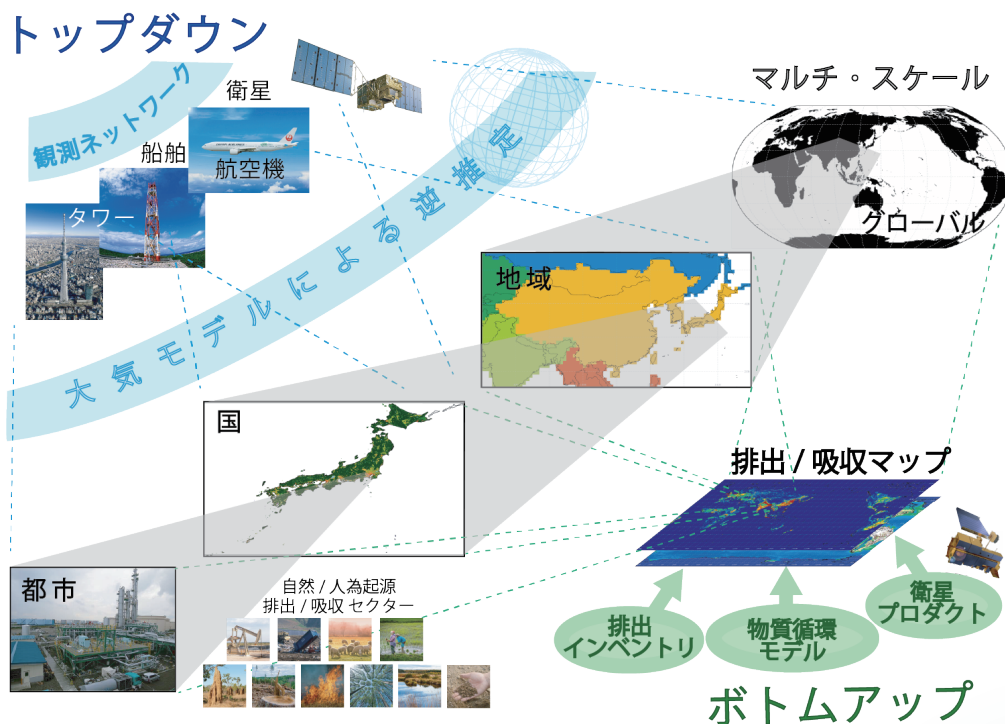


図1. トップダウン及びボトムアップのアプローチによるマルチスケールGHGモニタリングシステムの概要

2. 方法論

2.1. トップダウンアプローチ

a) 大気観測

地上観測所、船舶、CONTRAIL（航空機）、GOSAT シリーズ（衛星）ほか

気象庁（JMA）、気象研究所（MRI）、国立環境研究所（NIES）は、地上観測点（Mukai ら 2001、Tohjima ら 2002、Watanabe ら 2000、Tsuboi ら 2006）、気象庁の調査船（Ishii ら 2011、Ono ら 2019）、民間の貨物船（Terao ら 2011、Tohjima ら 2012）、航空機（Matsueda ら 2008、Machida ら 2008、Tsuboi ら 2013、Umezawa ら 2020）、人工衛星（Yokota ら 2009、Yoshida ら 2013）などさまざまなプラットフォームから大気中 GHG の監視を続けてきました（図 2）。GHG の測定は、現地で、あるいは容器に採取してそれぞれの研究室に返送された空気サンプルを用いて実施しました。研究室における分析では GHG のモル分率と同位体比を求めました。CO₂、CH₄、N₂O を含む GHG のモル分率は、互換性の確保された信頼性の高い標準スケールに基づいて正確に決定されました（Tsuboi ら 2017）。図 3 に示す 2010 年から 2022 年にかけてのアジア太平洋地域における CO₂ と CH₄ の経時変化のグラフでは、バックグラウンド（MNM など）、大陸（NTL など）、都市（YYG など）の各地点の空間・時間的変動を見ることができます。厳しい品質保証と品質管理を経て、これらの観測データは直ちに大気逆解析システムに送られます。

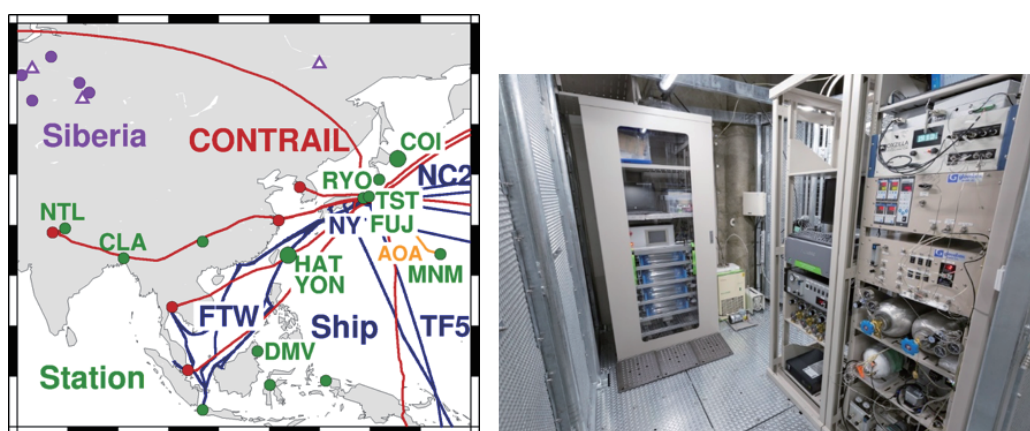


図 2. (左) アジア太平洋地域における大気中 GHG の観測地点を示す地図。緑の丸印は地上観測点、青線は観測船の航路、赤線は観測機の飛行経路を表す。(右) 東京スカイツリーに設置された大気観測システムの写真。

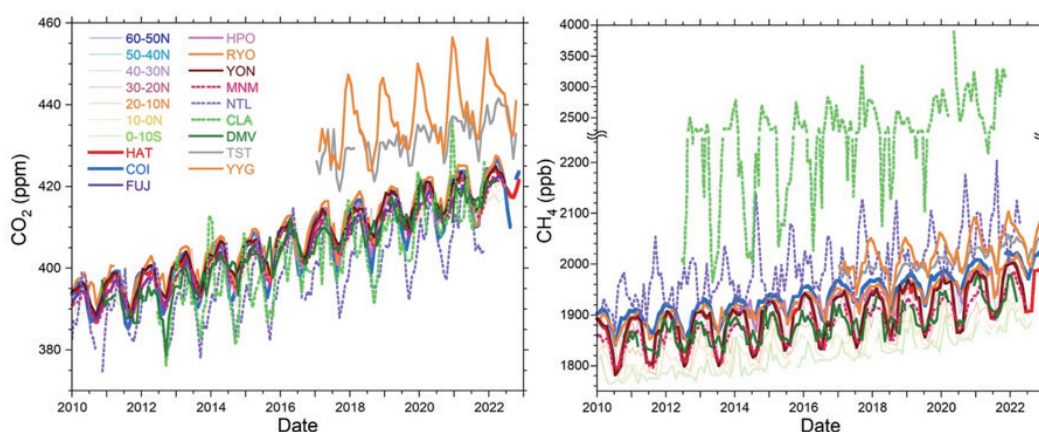


図 3. アジア太平洋地域において 2010 年から 2022 年にかけて観測された大気中の CO₂ (左) と CH₄ (右) の経時変化（1 か月平均値）。

NIES では、2022 年から鹿児島船舶株式会社に所属する貨物船、日侑丸を使って大気中 GHG の観測を実施してきました（図 4(a)）。この船は神奈川県・川崎と福岡県・苅田を一週間で往復し、途中豊橋、名古屋、神戸などに寄港します。たとえば、図 4(b) に示す、2022 年 5 月 5 日から同月 12 日にかけて観測された大気中 CO₂ 濃度の空間分布では、415 ppm から 500 ppm までの大きな変動が見られます。また時間的な CO₂ の変動、とりわけ各港湾で観測された変動から、港湾周辺の都市の規模と CO₂ の変動の間に関連の存在がうかがえます。こうした観測データは、都市における GHG 排出の検証に役立ちます。

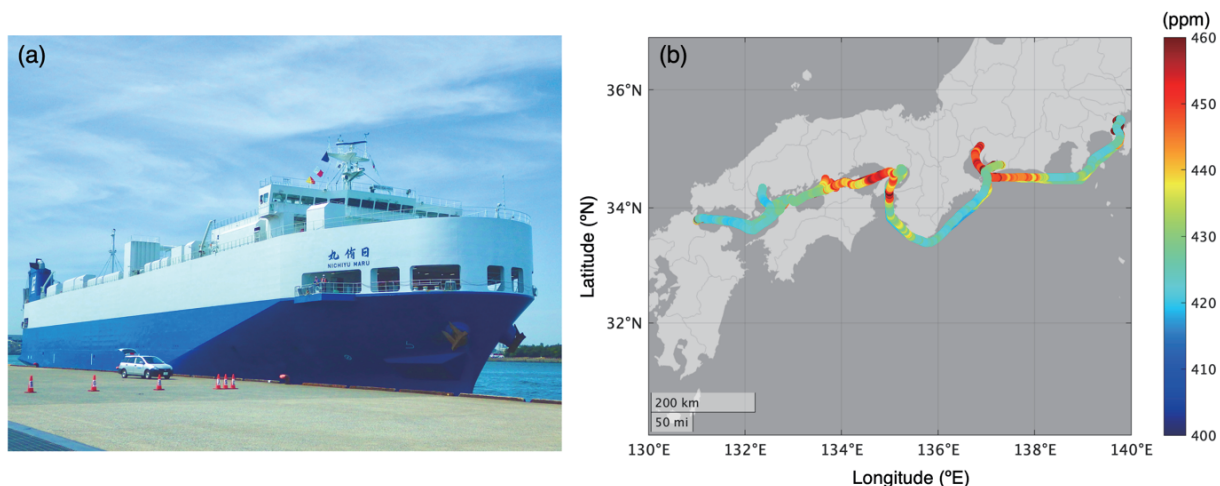


図4. (a)日俣丸の写真。(b)2022年5月5日から同月12日にかけて観測した大気中CO₂濃度の空間分布。

b) 大気逆推定モデリング

NICAM-TM and NISMON:

非静力学正 20 面体格子大気モデル (NICAM) は、東京大学、海洋研究開発機構 (JAMSTEC)、理化学研究所 (RIKEN) その他の国内研究機関によって開発された、全球高解像度シミュレーションのための数値シミュレーションモデルです (Sato et al. 2014)。NICAM ベースの輸送モデル (NICAM-TM) と温室効果ガス監視用の NICAM ベースの逆シミュレーション (NISMON) を用いて大気中の濃度変動をシミュレートし、CO₂ と CH₄ の表面フラックスを推定しました (Niwa et al. 2017a, b, 2022)。NICAM-TM は、Niwa et al. の研究 (2011) をもとに、GHG 研究のために開発されたものです。NISMON では、多数の観測結果を有効に利用して高解像度 (モデル格子点) のフラックス値を推定するため (いわゆる高次元問題)、最先端のデータ同化/逆解析手法である 4 次元変分法が実装されています (Niwa et al. 2017a, b)。この手法が CO₂ フラックスの推定に応用できることは (NISMON-CO₂)、Niwa et al. が実証しました (2021)。これを用いた長期解析が、2020 年以降数次の更新を経ながら年一回実施されており (Niwa 2020)、こうした手法はグローバルカーボンプロジェクト (Friedlingstein et al. 2022) による全球炭素サイクルの総合解析に利用されています。NISMON-CO₂ v2021.1 の事前フラックスを構成するのは、GCP-GridFED (Jones et al. 2021) の化石燃料排出、プロセスベースの陸域生態系モデル (VISIT, Inatomi et al. 2010, Ito et al. 2019) による陸域生物圏フラックス、人工衛星ベースのバイオマス燃焼排出プロダクトである全球火災排出データベース (GFED) v4.1s (van der Werf et al. 2017)、気象庁の船載測定ベースの海洋フラックスデータ (Iida et al. 2021) です。

MIROC4-ACTM:

Model for Interdisciplinary Research on Climate バージョン 4 (MIROC4) は、東京大学及び NIES との協力のもと JAMSTEC で開発されたモデルであり、MIROC4-ACTM はその大気中化学輸送版です (Patra et al. 2018)。大気中の長寿命ガス (CO₂、CH₄、N₂O、SF₆) のシミュレーションは、地表から気圧 0.0128 hPa (約 80 km) までは 67 の鉛直ハイブリッド気圧層とし、スペクトルトランケーション T42 の水平解像度 (約 2.8 度 × 2.8 度の緯度経度グリッド) で実施しています。大気中の輸送の総観および季節時間スケールでの変動をよりよく表すため、シミュレーションされた水平風 (U、V) と気温 (T) には、約 980 から 0.018 hPa の範囲の気象庁再解析データプロダクト (JRA-55, Kobayashi et al. 2015) によるナッジングを行いました。なお、SF₆ を用いた対流圏内シミュレーションと、対流圏と成層圏内の CO₂ に基づく空気齢 (Bisht et al. 2021, Patra et al. 2018 とその引用文献) を用いて、MIROC4-ACTM 内で大規模半球間輸送とブリュワー・ドブソン循環についてテストしています。MIROC4-ACTM 逆計算システムは、CO₂ と N₂O については地球上の 84 地域 (Saeki et al. 2017, Patra et al. 2022)、CH₄ については 54 の陸域 (Chandra et al. 2021 を更新) からの月平均フラックスを最適化します。本報告では、陸域と海洋の 2 組の事前フラックスについて、事前フラックスの不確実性 (PFU) と測定データの不確実性 (MDU) を変えながら (Chandra et al. 2022 と同様、ただし PFU と MDU の少数事例について)、MIROC4-ACTM による逆計算を実施しました。昨年度の報告と大きく異なるのは、化石燃料排出の取り扱いです (CO₂ 逆解析システムでは既知扱い)。

2.2. ボトムアップアプローチ

本アプローチは排出インベントリ、生物地球化学的モデル、地表リモートセンシングデータを用いて個々の GHG 吸収源と発生源を評価するものであり（図 5）、したがって大気観測データからは切り離されたものです。ボトムアップアプローチでは、空間解像度やセクターの明示性が長所となりますが、報告の時間的なずれやデータごとに特有の不確実性という短所もあります。一般に、ボトムアップアプローチでは、自然と人為両方のセクターについて、さまざまな吸収源と発生源を対象とするために、複数のデータソースが用いられます。本プロジェクトで主として私たちが用いたのは、自然セクターの GHG 発生源と吸収源の評価には生物地球化学的モデル、人為的排出には排出インベントリです。生物地球化学的モデルによる野外・森林火災のシミュレーションは不確実性が高いため、人工衛星から得られたデータ（プロダクトデータ）が用いられました。

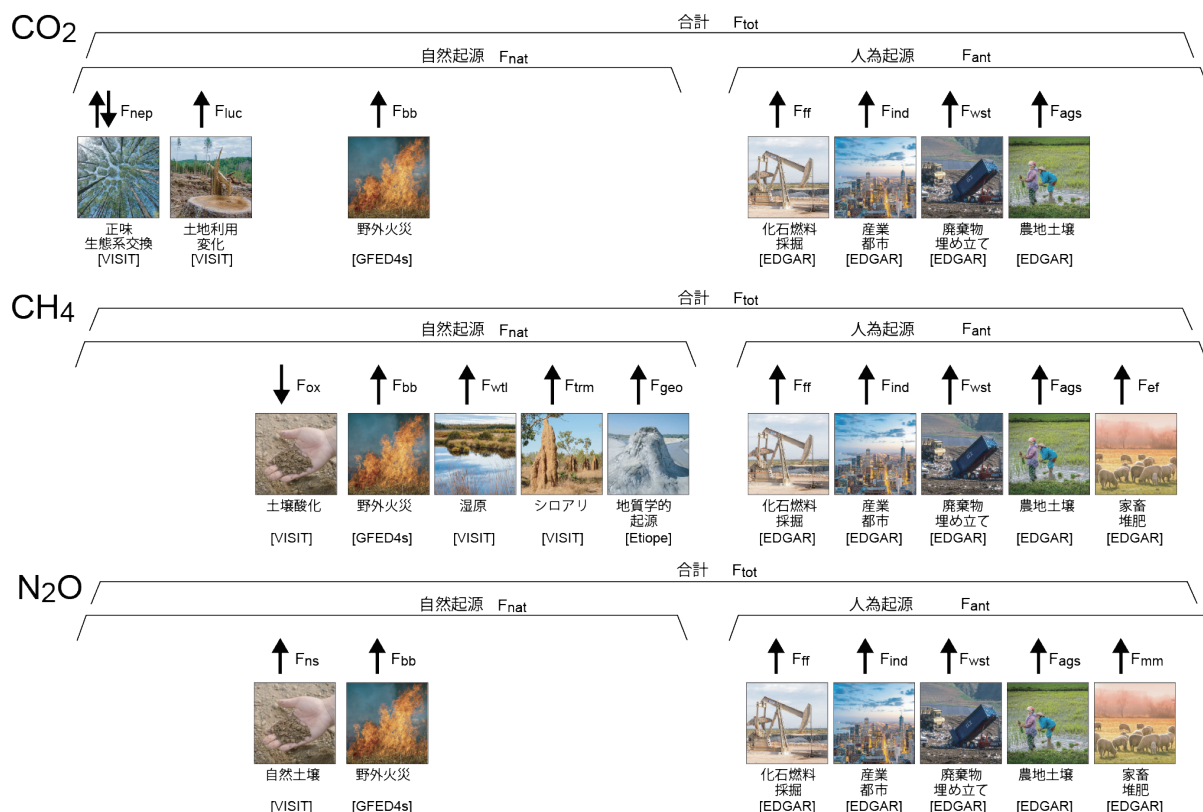


図 5. GHG 収支についてのボトムアップ推定の概要：CO₂（上）、CH₄（中）、N₂O（下）、角括弧内は使用した方法とデータ。

a) 生物地球化学的モデル

自然生態系の GHG 交換のシミュレーションにはプロセスベースの陸域生態系モデル VISIT が使用されました。このモデルは地域的及び全球的な陸域 GHG 収支の研究に使用され、大気及び野外の測定データ（Patra ら 2011、2022、Chandra ら 2021 など）を用いて評価されてきました。このモデルがシミュレートするのは、自然及び農業生態系の生物地球化学的プロセスで、それらの面積比率で加重した値が各格子の総フラックスを示します。このモデルは地表での物理的プロセスを扱うスキーム（放射収支など）及び生物地球化学スキームで構成され、水、炭素、窒素の循環をシミュレートします。農耕地の区分では、栽植、収穫、施肥といった農作業は簡略化して扱われます（Ito ら 2018）。

b) 排出インベントリと人工衛星プロダクト

人為起源排出量データベース

ボトムアップ推定では、大気逆解析の事前データとともに人為起源排出量インベントリが用いられました。地球規模大気研究のための排出量データベース (EDGAR, Crippa ら 2020) バージョン 6.0 は、すべての GHG を対象とし、高い空間解像度 (0.1 度 × 0.1 度) とセクター分類の明示性があることから使用されました。排出セクターは、化石燃料採掘、都市と産業、埋め立てを含む廃棄物、農業、間接的な排出 (大気沈着に由来するの N_2O) や家畜 (CH_4 のみ) の、4 ないし 5 種類のカテゴリーにまとめられました。比較のために参照した他の排出データセットは、人為起源二酸化炭素のオープンデータインベントリ (ODIAC)、化石燃料起源の CO_2 排出格子データベース (GridFED)、農業排出の FAOSTAT、 CH_4 と N_2O の GAINS/IIASA、コミュニティ排出量データシステム (CEDS) です。

火災排出データベース

バイオマス燃焼による CO_2 、 CH_4 、 N_2O の排出量は、小規模火災も含め GFED v4s (van der Werf ら 2017) から求めました。バイオマス単位重量あたりの燃焼による排出量である排出係数は、Akagi ら (2011) の報告から得ました。焼失面積の検出アルゴリズムと排出係数には不確実性があるため、GFEDv4s ベースのバイオマス燃焼排出量は、全球火災同化システム (GFAS) や米国大気研究センター (NCAR) の火災排出インベントリ (FINN) のような他の類似プロダクトと比較検証する必要があります。

2.3. 地球システムモデル

各国の GHG 排出削減努力がもたらす地球温暖化の緩和効果を定量的に評価するため、私たちは複雑さの程度が異なる地球システムモデル (ESMs) による気候変動予測を実施しました。

MIROC-ES2L

今回の研究では、気候の予測には地球システムモデル MIROC-ES2L (Hajima ら 2020) を使用しています。このモデルは、大気海洋結合気候モデル相互比較プロジェクトのフェーズ 6 (CMIP6) の実験で広く用いられたものです。 CO_2 濃度のシミュレーション結果は、現在の世代の ESMs ではまだ偏りがあります。そこで、気候と炭素循環に関する数十年程度の予測精度を向上させる必要があることから、「ナッジング」と呼ばれるシステムを導入して、このモデルが全球 CO_2 濃度の観測結果を再現できるようにモデルを改良して使用しました。

FaIR v1.6.4

さらに、簡略化気候モデルを用いて、複雑な ESM によってシミュレートされた気候・炭素循環プロセスのエミュレーションと気候変動予測を実施しました。使用したエミュレーター FaIR (Millar ら 2017, Smith ら 2018) バージョン 1.6.4 は、前回の IPCC 報告書でも広く用いられたものです。このモデルは、上記の ESM の振る舞いを模擬し、複数の異なるシナリオを用いたシミュレーションに拡張することが可能です。このモデルの物理的気候・炭素循環プロセスに関するパラメーターは、非線形最小二乗法によって決定されました。エアロゾルや大気汚染物質など気候変動を駆動する他の要因の扱いは、Nicholls ら (2020) を踏襲しています。

3. 温室効果ガス収支

3.1. トップダウンアプローチ

a) 世界全体、地域別、国別の収支

図 6 は、4 分割した緯度帯における CO_2 フラックス量の推移を示し、2000 年から 2021 年までの期間について MIROC4-ACTM 逆計算システムによって推定したものです。

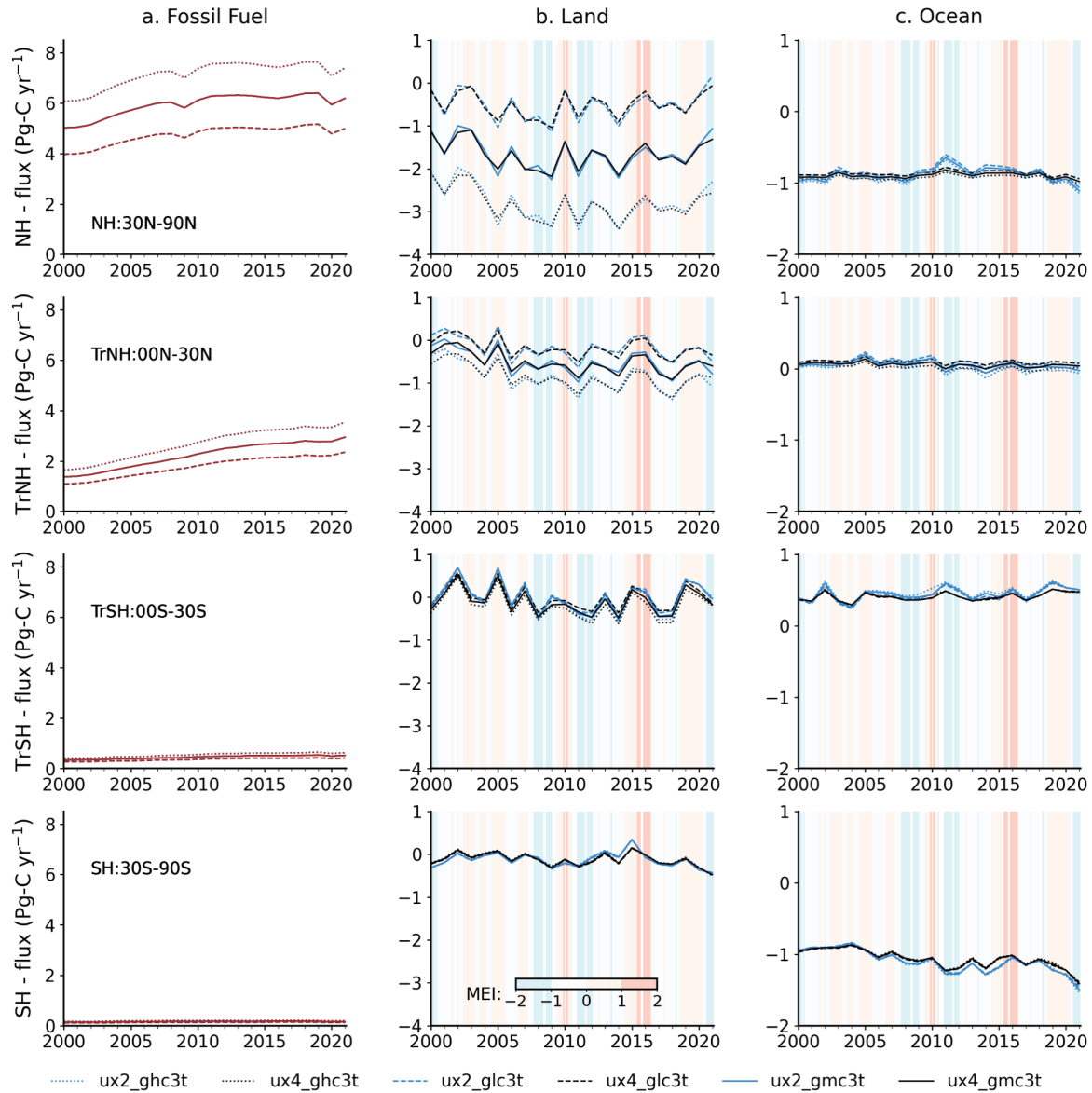


図6. 4分割した緯度帯における化石燃料からの年間CO₂排出量 (a、点線：上限、破線：下限、実線：平均)、MIROC4-ACTM 逆計算モデリングによって推定した、対応する陸域 (b) と海洋 (c) の炭素吸収源、背景色は複数データによるエルニーニョ・南方振動指数 (MEI)。青線と黒線は化石燃料起源の排出を上限、下限、平均を用いて観測データの不確実性の幅を変えた場合 (凡例の ux2 および ux4) の結果。

2002 年から 2010 年の間に化石燃料排出が最速で増加した場合、逆計算では陸上の吸収源もまた増加することが推定されました。CO₂ と CH₄ の逆計算の結果を統合解析することにより、東アジア地域ではこうした排出と吸収源の連動が浮き彫りとなりました (Saeki と Patra 2017) が、化石燃料からの排出量の不確実性に関する情報欠如のため、詳細な解析は実施されていませんでした。今回、格子化された化石燃料からの排出量の上限と下限は GridFED (Jones ら 2022) から得られています。4 分割した緯度帯における化石燃料からの排出量と陸域・海洋吸収源の変動を図 6 に示します。北半球の中緯度域では (北緯 30 度以北、上段)、化石燃料からの排出量に大きな、持続する偏りが見られ、それを埋め合わせる残余分の陸域吸収源も同様です。北半球低緯度域では (赤道から北緯 30 度まで、2 段目)、化石燃料からの排出量の増加速度に差が見られ、それに応じた陸域フラックスの変化速度も同様でした。南半球の低緯度及び中緯度域では (3・4 段目)、化石燃料からの排出量と残余フラックス推定値は顕著な違いはありませんでした。

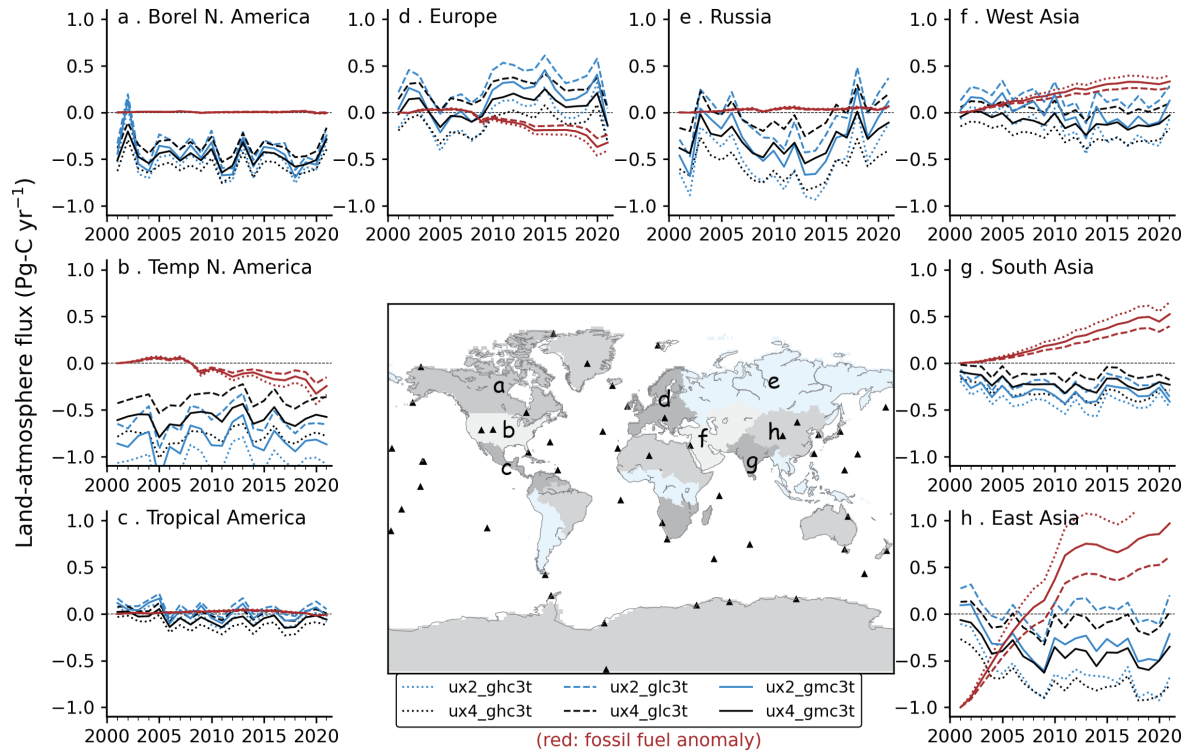


図 7. 異なる化石燃料からの排出量を用いて MIROC4-ACTM 逆計算により求めた 8 陸域の地域別 CO_2 フラックス量。2 通りの観測データの不確実性の幅 (ux2 と ux4) と 3 通りの化石燃料起源 CO_2 排出の変動 (赤線: 実線が平均。破線が下限、点線が上限を示す) を用いた 6 通りの推定結果。東アジア (h パネル) の化石燃料起源排出の変動は y 軸を合わせるために下に 1 Pg C yr^{-1} ずらした。

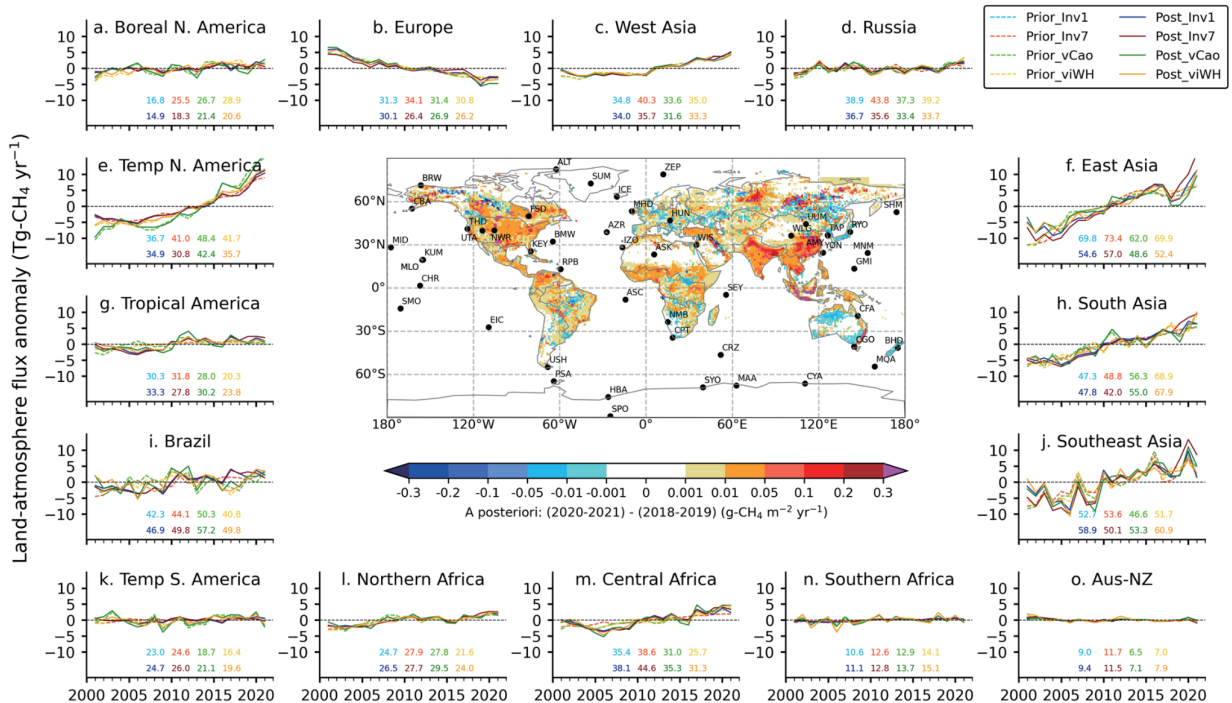


図 8. 2 例の MIROC4-ACTM 逆計算 (線: 平均値、陰影部: 2 例でのデータの広がり) によって推定された地域別 CH_4 排出異常の時系列 (2003 年から 2021 年)。2020 年から 2021 年までと 2018 年から 2019 年までの間の排出量の変化を示す地図上に、15 地域の境界 (黒の線) と 60 の地点 (緑の円) を示す。地域ごとに個々の逆計算事例の長期平均 (2003 年から 2021 年) を減じ、それぞれの排出異常 (各グラフ内の長期平均値、単位は Tg/年) を算出した。グラフは Chandra ら (2021) から転用したもので、千葉大学の Dmitry Belikov が逆計算期間を 2021 年まで延長し、更新した。

亜大陸規模のフラックス量に対する化石燃料からの排出量の影響を図 7 に示します。この結果から、MIROC4-ACTM 逆計算によって推定した陸域フラックス量は、想定される化石燃料からの排出量の差異と密接に連動していることが明らかです。最も顕著な差異が認められるのは東アジア地域で、中国における化石燃料からの排出量の不確実性に左右されています。他地域の多くでは、推定された陸域フラックス量のプロットは、化石燃料排出量の平均・上限・下限で並行しており、したがって、異なる逆計算によって推定した陸域フラックス量は、類似した年次変動と推移を示しています。東アジアについては、化石燃料からの排出量の不確実性は、2000 年には約 $\pm 0.3 \text{ Pg C/年}$ であったのが、2021 年には約 $\pm 0.7 \text{ Pg C/年}$ まで増大しています。その結果、陸域フラックス推定量は、2002 年から 2010 年までの期間に東アジアの陸域吸収源がどのように変化したかについて、大きな差異を示しています。CO₂ 吸収源の増加は、化石燃料からの排出量の上限を用いた場合、2001 年から 2009 年までの短期間で 0.5 Pg C/年 に達します (図 7、グラフ m)。このような結果は、気候 - 炭素応答の予測と地球システムモデル開発、および各国の CO₂ 吸収源を追跡する上で大きな示唆をもたらします。

図 8 は、2001 年から 2021 年までの期間に 15 の陸域で見られた CH₄ 排出の平年値からの差を示したものです。いくつかの主要発生源についての地域特異的なボトムアップ排出量と地域別トップダウン総排出量に関する統合解析を実施し、CH₄ 増加速度の低下した時期 (1990 年から 1998 年)、ほぼ定常だった時期 (1999 年から 2005 年)、再び増加した時期 (2006 年以降) の変動原因を調べました。全般的に、2002 年以降の東アジア地域での突出した不一致を除けば、トップダウン排出の推移はボトムアップ排出の推移との一致が良好で、OH 濃度に年次変動がないケースにおいて、インベントリ排出量が観測された CH₄ 濃度とおおむね一致していることを示唆しています。ボトムアップ推定量とトップダウン推定量の一致は逆計算法の欠点ではなく、むしろ排出量先験値の改善と解釈すべきであり、ボトムアップ及びトップダウン排出推定量は、政策立案にとって補完的な情報を与えるものなのです。その点を強調するために、先験値を 4 通りに変えた CH₄ 逆推定を行いました。1) Post_Inv1: GCP-CH₄ プロジェクトから提供されたものと同じ、2) Post_Inv7: 淡水からの放出 $46 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ を加えた以外は 1) と同じ、3) Post_vCao: 湿原放出に VISIT モデルの Cao スキームのものを用いた以外は 1) と同じ、4) Post_viWH: 湿原放出に VISIT モデルの Walter-Heimann スキームのものを用いた以外は 1) と同じ。どの逆推定結果も、GCP-CH₄ の先験値における人為起源排出の長期トレンドと合致するような CH₄ 放出の変動が得られました (図 8)。ほとんどの地域では (各パネル)、推定された放出量の長期平均は、先験値よりも、4 通りの結果がよく一致していました。

陸域の多くでは、1997 年から 2019 年までの間に、大きな年次変動と、N₂O 排出予想量の系統的な増加が認められ (図 9、色付きの線)、系統的な増加はほとんどの地域で事前情報とした排出シナリオ (灰色の線) と同調していました。このことから、FAOSTAT の施肥量データで運用した VISIT モデルは、農作業による N₂O 排出を良好にシミュレートしていることがうかがえます。注目に値する例外は熱帯アメリカと中央アメリカで、これらの地域では予想された排出増加の速度が事前情報の排出増加速度の倍以上となっていました (図 9d, h)。私たちの結果から、解析対象期間における欧州から排出された N₂O 量の削減が確認されました。この排出削減をもたらしたのは、化学工業における、主として肥料生産用の硝酸製造、さらにナイロン生産用のアジピン酸製造に対する最新技術の導入です (EDGAR を参照)。インベントリ推定では、日本における同様の N₂O 排出削減が報告されています。

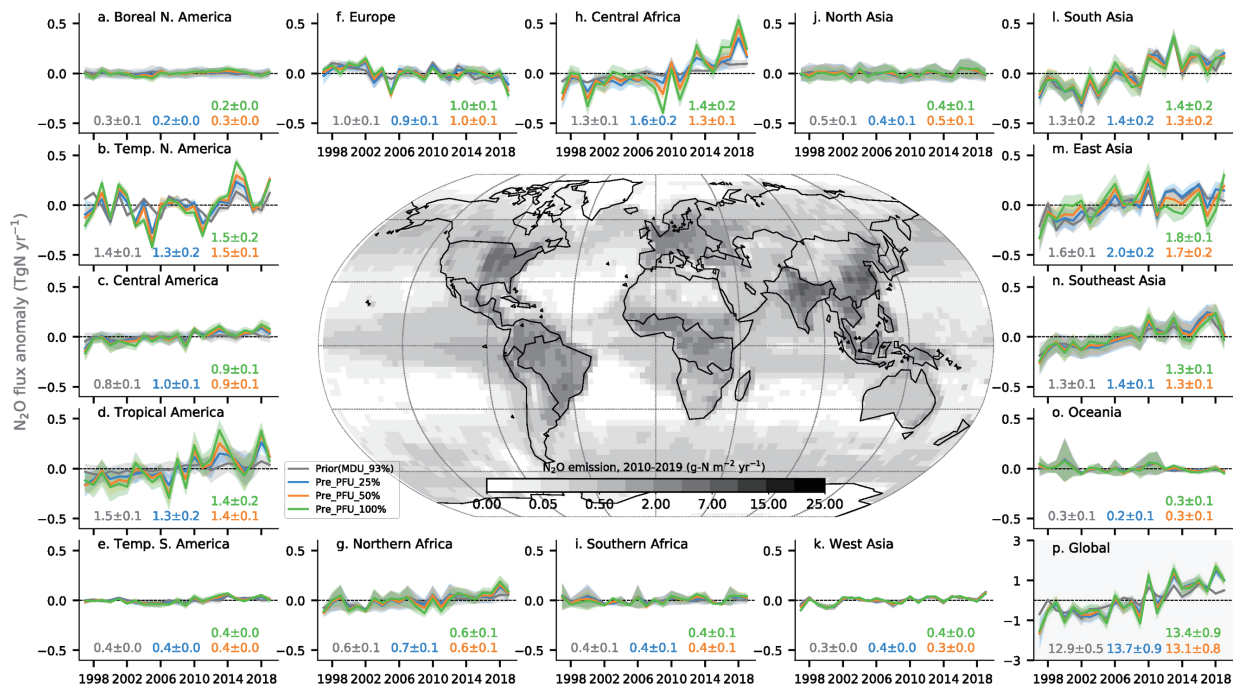


図 9. 2010 年代の平均排出量を示す地図に黒い線で区分けした 15 陸域の地域別 N₂O 排出量、3 例のボトムアップ排出量（灰色）と事前フラックスの不確実性（PFU、青：25%、橙：50%、緑：100%）を変えて得られたトップダウン排出量を示す。トップダウンの結果は、すべて MDU を 93% とした場合（詳細は Patra ら 2022）。長期平均地域別排出量（1997 年から 2019 年、各グラフ内の数値）を年平均排出量から減じ、異なる先験値から 1 シグマの標準偏差（陰影部）を算出している。中央の地図は格子化された N₂O 排出量を示す。グラフは Patra ら（2022）から入手。

b) YON での大気観測値に基づく中国からの FFCO₂ 排出量に対する準リアルタイム推定

波照間島（HAT、北緯 24.06 度、東経 123.81 度）と与那国島（YON、北緯 24.47 度、東経 123.01 度）で観測された大気中の CO₂ と CH₄ のモル分率は、晩秋から初春にかけて、相関性のある比較的大きな総観規模の変動を頻繁に示していました。その理由は、この時期になると、しばしば東アジアのモンスーンによって CO₂ と CH₄ 濃度の高い大陸の空気塊が日本列島に運ばれてくるためです。過去の研究により、冬季に HAT と YON で得られた CO₂ と CH₄ の変動比（ $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比）は、中国における相対排出強度の変化の良い指標であることが判明しています（Tohjima ら 2014, 2020, 2022）。実際、 $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比の 3 か月間（1 月、2 月、3 月）の月別平均値は、中国の経済活動が未曾有の成長を示した 2000 年から 2010 年にかけて徐々に増加しています。さらに、中国で実施された嚴重な全国規模のロックダウンによって化石燃料由来の CO₂（FFCO₂）排出量が著しく削減されたと推定される 2020 年 2 月には、 $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比が急激な減少をしめました。

こうした事実をもとに、私たちは HAT と YON における大気中 $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ の変動比による中国からの CO₂ 排出量についての準リアルタイム推定法を開発しました（Tohjima ら 2023）。大気輸送モデル（NICAM-TM、Niwa ら 2011）と CO₂ 及び CH₄ の必要なすべての地表フラックスを用いて大気中の CO₂ と CH₄ をシミュレートし、前述の 3 か月間にシミュレートされた $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比と中国における FFCO₂/CH₄ 排出比との間に直線関係を見出しました。この直線関係を用いることで、観測された $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比を中国での FFCO₂/CH₄ 排出比に変換することができたのです。そこで、前の 9 年間（2011 年から 2019 年）では比較的安定した $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比が観測されていることから、その期間に対応する平均値との比較によって FFCO₂/CH₄ 排出比の変化率を算出しました。さらに、生物圏の CO₂ と CH₄ のフラックスには年次変動はないとの仮定することで、FFCO₂/CH₄ 排出比の変化率を中国からの FFCO₂ 排出量の変化率として読み取ることができます。そして最終的に、HAT と YON についての推定変化率の加重平均値を算定しました。

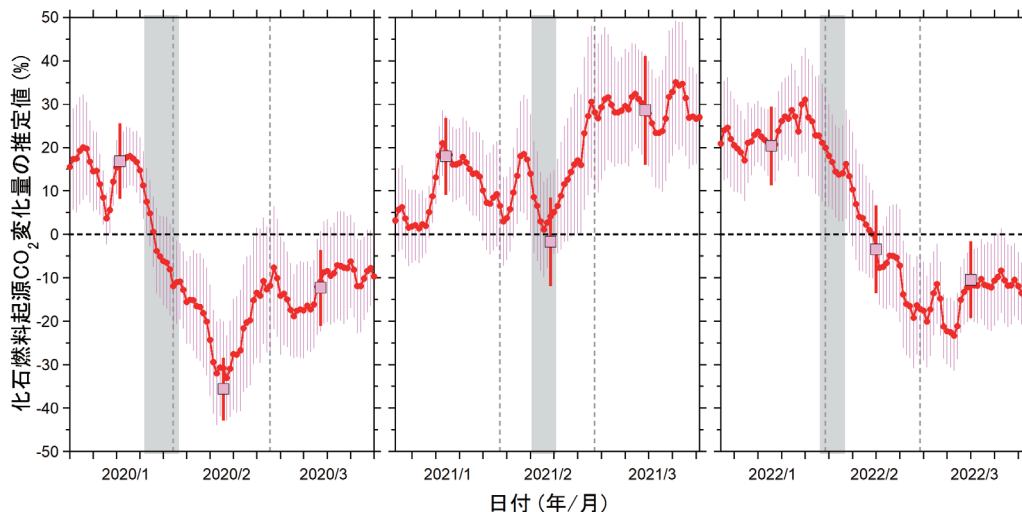


図 10. HAT と YON で観測された $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比をもとに推定した中国における FFCO₂ 排出量の変化。2020 年、2021 年、2022 年の 3 か月（1 月、2 月、3 月）についてそれ以前の 9 年間（2011-2019）の平均値からの変化量として推定した結果をそれぞれ左、中央、右のグラフに示す。赤の丸印と線およびピンクの四角は、観測された $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比の 30 日間移動平均と月間平均に基づく推定値をそれぞれ示す。上下方向の線は不確実性を示し、灰色の帯は中国の春節にあたる期間を示す。

こうして開発した方法により、2020 年、2021 年、2022 年の中国からの FFCO₂ 排出量について、それまでの 9 年間の平均値と比較した変化を推定しました（図 10）。その結果得られた 1 月、2 月、3 月の FFCO₂ 排出量の変化は、2020 年にはそれぞれ $17 \pm 8\%$ 、 $-36 \pm 7\%$ 、 $-12 \pm 8\%$ （3 か月全体では $-10 \pm 9\%$ ）、2021 年にはそれぞれ $18 \pm 8\%$ 、 $-2 \pm 10\%$ 、 $29 \pm 12\%$ （3 か月全体では $15 \pm 10\%$ ）、2022 年にはそれぞれ $20 \pm 9\%$ 、 $-3 \pm 10\%$ 、 $-10 \pm 9\%$ （3 か月全体では $2 \pm 9\%$ ）でした。私たちの推定では、中国からの FFCO₂ 排出量は、2020 年 2 月には著しく減少したものの、COVID による中国でのロックダウン後の社会経済活動の回復とともに再上昇したことがうかがわれます。しかしながら、推定した 2022 年 3 月の FFCO₂ の変化はわずかな減少を示し、中国からの FFCO₂ 排出量は、いまだ中国での COVID-19 感染状況の影響下にあることを示唆します。

c) NICAM-TM による東京大都市圏からの正味 CO₂ フラックス推定

NISMON-CO₂ から得た逆計算フラックスデータと東京スカイツリーでの観測結果を NICAM-TM に使用し、大都市である東京からの正味 CO₂ フラックスを推定しました。この際、モデル内の東京地域をより細かく分割するため、逆計算フラックスデータについて 1 度四方だった格子を NICAM の高解像度格子（約 14 km）まで縮小しました。その結果、シミュレーションでは、東京スカイツリーでの観測結果と著しい不一致があることが分かりました（図 11、中央上のグラフ）。この不一致には、使用した排出データが不正確であったことや、モデルの代表性が未だ不十分であったことが寄与している可能性があります。後者については気象データを用いたデータ選択で解消することができます。解消したのち、シミュレーションで求めたバックグラウンド濃度を基準値としてシミュレーションと観測結果を比較することで、東京からの正味 CO₂ フラックスを推定することが可能です。ここでバックグラウンド濃度は東京以外の地域のフラックスから求めており、世界各地の観測データをつかって全球的に最適化した逆計算フラックスデータを使用していることから、シミュレーションされたバックグラウンド濃度の値はほぼ現実的なものであると考えました（バックグラウンド観測所、南鳥島ではモデルと観測結果がよく一致することに注目。図 11、中央下のグラフ）。

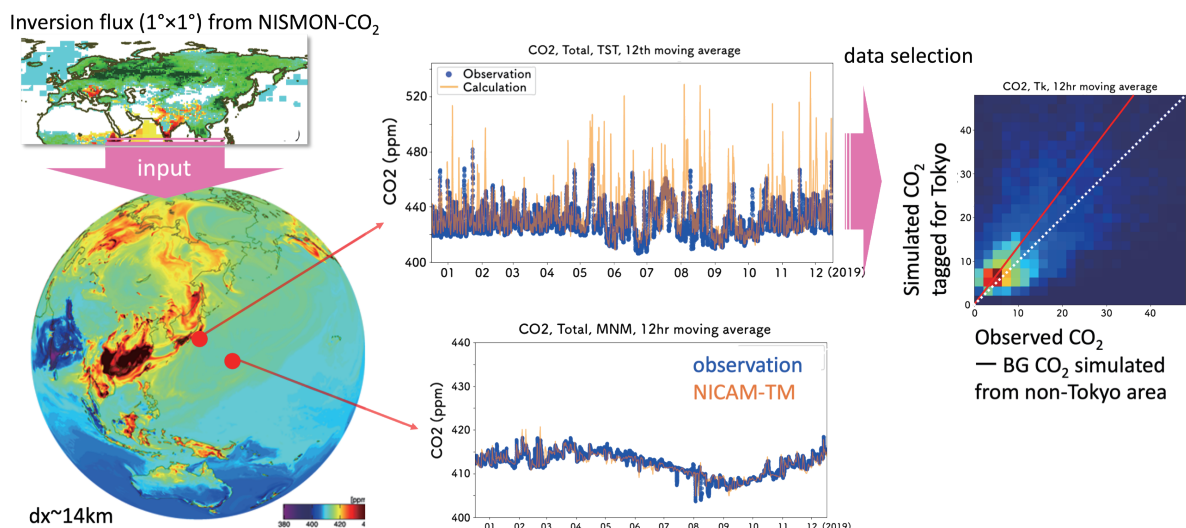


図11. 東京大都市圏におけるCO₂フラックス推定解析の模式図。左はNISMOM-CO₂から得た逆計算フラックスとNICAM-TMによって14 kmの解像度でシミュレートした地表CO₂濃度場。中央は東京スカイツリー(上)と南鳥島(下)におけるシミュレーションと観測結果の比較。右は東京起源の濃度についてのシミュレーションと観測結果の比較、東京起源の濃度は東京以外の地域からシミュレートしたバックグラウンド濃度を基準として導いた。

3.2. ボトムアップアプローチ

ボトムアップアプローチからは、GHG とセクターのそれぞれについて、排出源と吸収源の全球地図が得られます。地図をまとめることで、世界全体、各地域（たとえば東アジア）、各国（たとえば日本）の GHG 収支を得ました。このアプローチは、いずれの地域や国にも適用可能で、スケールの違いを超えて整合性のある収支が得られることに注意してください。つまり、地域や国ベースの収支の合計は全球収支と一致します。

CO₂ 収支 (2001 年から 2021 年)

世界全体：人為排出源による排出は 36,488 Tg CO₂/ 年と推定され、最も寄与が大きいセクターは産業と都市 (F_{ind}) でした。自然収支は-17,730 Tg CO₂/ 年の正味吸収と推定され、主として陸域生態系 (F_{nep}) の成長に伴うものでした。

地域別 (東アジア)：人為排出源による排出は 10,993 Tg CO₂/ 年と推定され、主として中国での産業と都市からの排出量の急速な増加によるものでした (9,054 Tg CO₂/ 年)。自然収支は-1961 Tg CO₂/ 年の正味吸収となりました。

国別 (日本)：人為排出源による排出は 962 Tg CO₂/ 年と推定され、2013 年以降増加が止まっています。自然収支は森林の成長による 156 Tg CO₂/ 年の正味吸収となりました。

CH₄ 収支 (2001 年から 2021 年)

世界全体：人為排出源による排出は 320.6 Tg CH₄/ 年と推定され、最も寄与が大きいセクターは産業と都市 (F_{ind}) でした。自然収支は 172.0 Tg CH₄/ 年の正味放出と推定され、主として湿地 (F_{wet}) の排出によるものでした。

地域別 (東アジア)：人為排出源による排出は 65.1 Tg CH₄/ 年と推定され、中国における化石燃料利用の急増 (8.8 から 15.9 Tg CH₄/ 年) を示しました。自然収支は 4.4 Tg CH₄/ 年の弱い正味放出でした。

国別 (日本)：人為的な排出源による排出は 1.99 Tg CH₄/ 年と推定され、漸減を示しています。自然収支は湿地と地学的な排出源 (F_{geo}) による 0.7 Tg CH₄/ 年の正味排出でした。

N₂O 収支 (2001 年から 2021 年)

世界全体：人為排出源による排出は 8.4 Tg N₂O/ 年と推定され、最も寄与が大きいセクターは農業 (F_{ags}) でした。自然収支は 10.1 Tg N₂O/ 年の正味放出と推定され、主として土壌からの自然排出 (F_{ns}) によるものでした。

地域別 (東アジア)：人為的な排出源による排出は 1.6 Tg N₂O/ 年と推定され、1970 年以降の中国における農業用肥料利用の急増を示しました。自然収支は中程度で、0.7 Tg N₂O/ 年の正味放出でした。

国別 (日本)：人為的な排出源による排出は 0.06 Tg N₂O/ 年と推定され、1999 年以降漸減を示しています。自然収支は土壌からの自然排出による 0.04 Tg N₂O/ 年の弱い正味放出でした。

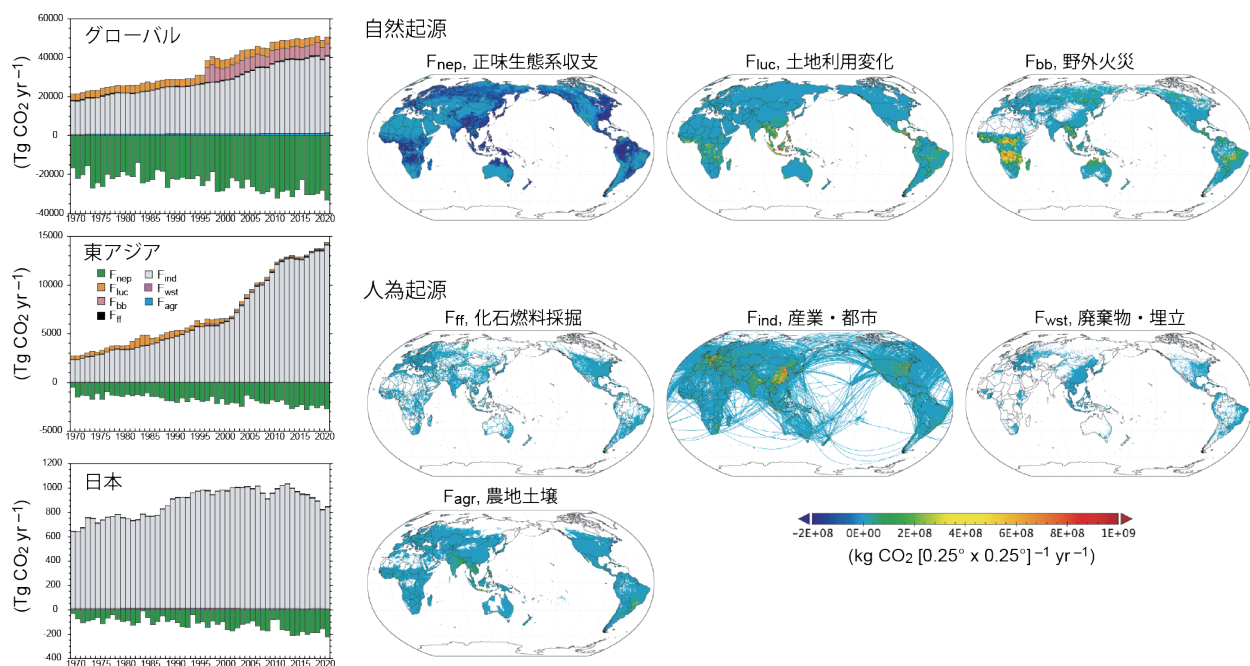


図 12. ボトムアップアプローチによる CO₂収支の推定、地図は 2001 年から 2021 年までの平均年間収支を示す。

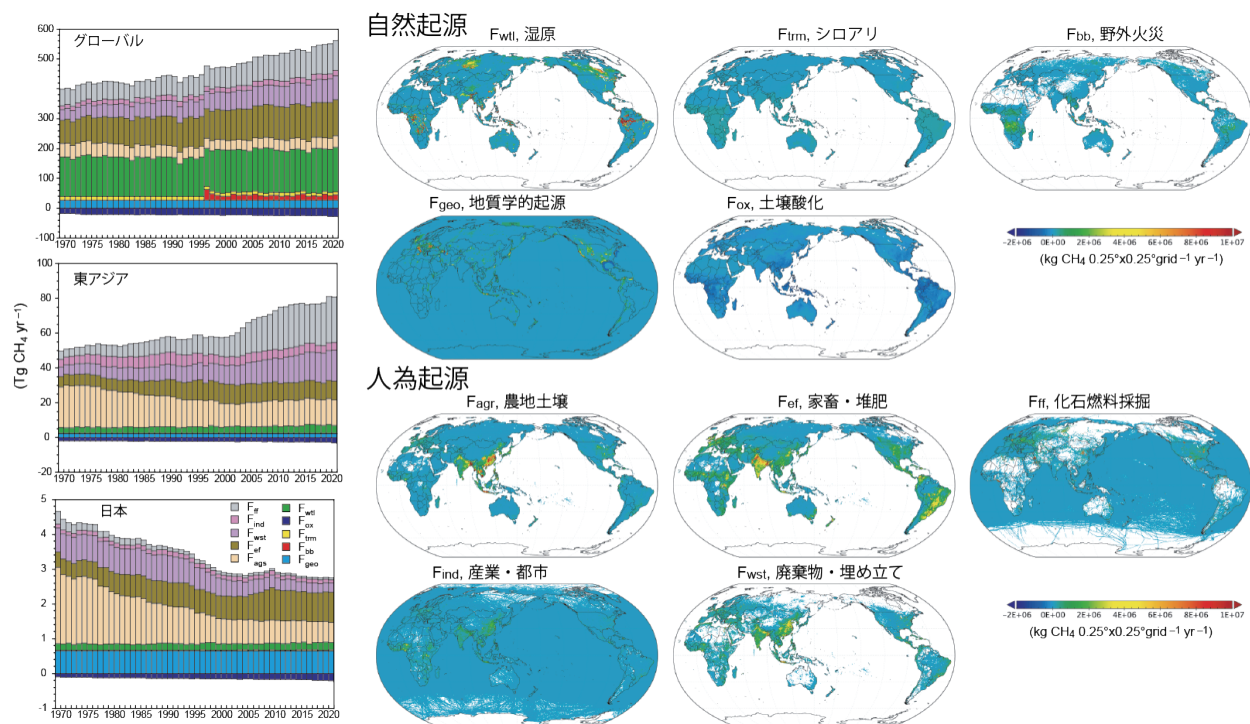


図 13. ボトムアップアプローチによる CH₄収支の推定

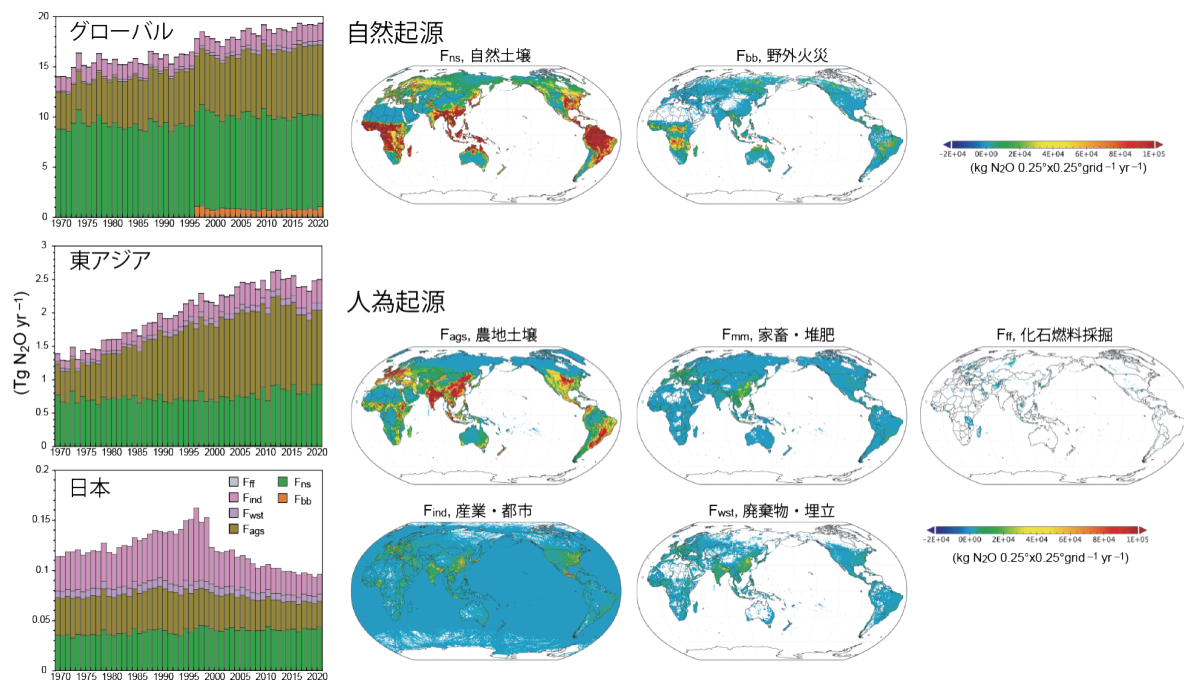


図 14. ボトムアップアプローチによる N₂O 収支の推定

3.3. トップダウン推定とボトムアップ推定の比較

トップダウンとボトムアップのアプローチの違いは、仮定や方法に関連する不確実性の範囲を表します。表 1 と表 2 は、1996 年から 2020 年までの 5 年間について、トップダウンとボトムアップの二つのアプローチによって推定した世界全体及び地域別（東アジア）の GHG 収支を比べたものです。ふたつのアプローチは使用するデータとモデルが異なり、その結果偏りや誤差の方向と大きさも異なります。トップダウンとボトムアップの結果を比較した先行研究からは、二つのアプローチの間の根本的な概念上の（あるいは用語上の）違いが重大な影響をもたらした可能性が読み取れます。例をあげると、排出についての「自然」と「人為」の定義には曖昧さが残り、たとえば土地利用とバイオマス燃焼による排出の発生には空間的、時間的に異質なものが含まれ、理由もさまざま、といった具合です。また、農産物や伐採した材木の河川輸送や運搬といった横方向の流れには、トップダウンとボトムアップのいずれのアプローチにとっても、未だに組み入れにくさがあります。こうした問題は、炭素サイクルや温室効果ガスを研究対象とする学術集会では注目される話題となっています。

本報告書では、概念上の曖昧さを避け、二つのアプローチから得た結果の比較について正確を期するため、以下の定義を採用しました。CO₂については、化石燃料燃焼による排出を人為起源の排出、純生態系生産と土地利用による排出を正味の自然排出（吸収も含める）とします。こうした定義により、土地利用による森林や草地からの排出の扱いに伴う難しさと不確実性を避けることができます。CH₄と N₂O については、自然と人為両方の起源による排出を含め、世界全体及び地域別の総収支を比較します。というのは、これら二つのガスは排出源の種類が多く、大気から得た情報によって区別するのは困難だからです。このように単純化したとは言え、本稿に示す比較は、とりわけ GST に対する適用性の面で、私たちが得た GHG 収支の整合性の検証に役立ちます。

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

			1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
CO ₂	Nat. + LUC	top-down (NISMOM)	-1.29 ± 1.25	-1.13 ± 1.06	-2.53 ± 0.73	-2.15 ± 1.14	-1.58 ± 0.78
		(MIROC4-ACTM)	-1.17 ± 1.02	-1.55 ± 0.64	-2.79 ± 0.49	-2.82 ± 0.83	-2.57 ± 0.68
		bottom-up	-1.71 ± 1.19	-1.10 ± 0.91	-2.46 ± 0.46	-2.63 ± 0.94	-1.85 ± 1.37
	Anthr. (FF)	bottom-up (GridFED)	6.60 ± 0.12	7.38 ± 0.46	8.55 ± 0.26	9.41 ± 0.11	9.59 ± 0.21
CH ₄	Total (Emis. – Soil sink)	top-down (MIROC4-ACTM)	--	541.8 ± 6.2	555.7 ± 11.2	571.4 ± 9.4	595.9 ± 16.2
		bottom-up	443.4 ± 11.2	458.5 ± 7.6	486.2 ± 3.1	501.3 ± 6.1	516.0 ± 10.8
N ₂ O	Total	top-down (MIROC4-ACTM)	15.6 ± 0.7	15.6 ± 0.3	16.4 ± 1.0	17.0 ± 0.7	17.5 ± 0.7
		bottom-up	11.3 ± 0.5	11.2 ± 0.2	11.8 ± 0.3	11.8 ± 0.1	12.2 ± 0.1

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

表 2. 東アジアの陸域総 GHG 収支に関するトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの比較
(年次変動の平均 $\pm$ SD)

			1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
CO ₂	Nat. + LUC	top-down (NISMOM)	-0.23 ± 0.20	-0.07 ± 0.24	-0.13 ± 0.38	-0.02 ± 0.22	0.25 ± 0.14
		top-down (MIROC4-ACTM)	--	-0.24 ± 0.17	-0.45 ± 0.14	-0.44 ± 0.07	-0.49 ± 0.10
		bottom-up	-0.11 ± 0.06	-0.20 ± 0.16	-0.17 ± 0.05	-0.28 ± 0.13	-0.38 ± 0.07
	Anthr. (FF)	bottom-up(GridFED)	1.44 ± 0.03	1.79 ± 0.27	2.56 ± 0.21	3.20 ± 0.05	3.27 ± 0.09
CH ₄	Total (Emis. – Soil sink)	top-down (MIROC4-ACTM)	--	52.2 ± 1.7	57.7 ± 2.1	60.1 ± 2.5	48.9 ± 2.4
		bottom-up	56.0 ± 0.6	59.1 ± 3.3	68.1 ± 1.8	73.8 ± 0.9	75.4 ± 1.9
N ₂ O	Total	top-down (MIROC4-ACTM)	1.48 ± 0.13	1.57 ± 0.10	1.76 ± 0.13	1.71 ± 0.12	1.75 ± 0.16
		bottom-up	1.37 ± 0.05	1.41 ± 0.06	1.51 ± 0.03	1.56 ± 0.07	1.49 ± 0.05

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

3.4. CO₂排出削減努力の定量評価

図 15 は MIROC-ES2L (細線) と FaIR-1.6.4 (太線) によってシミュレートした全球平均地表気温の変化を示したものです。1850 年から 2014 年までは、両モデルとも CMIP6 に使用された入力データを用いていますが、2015 年から 2020 年までの化石燃料からの CO₂ 排出量は、GCP-GridFED から得た排出量の格子データ (Jones ら 2021) を使用しています。排出削減努力がもたらす気温変化を評価するため、CO₂ 排出の基準シナリオ (ピンクの線) では、2021 年以降の年間 CO₂ 排出増加率は 2010 年代の平均値 (1.52 Pg C/ 年) と同一、と仮定しました。2010 年代は INDC の実施前であり、また COVID-19 によるロックダウンで排出量が一時的に大きく低下する前の時期にあたります。CO₂ 以外の将来シナリオは SSP3-7.0 と同じとしました。SSP1-1.9 と SSP1-2.6 の二つのシナリオは、それぞれパリ協定の +1.5℃と +2.0℃の目標に対応するもので、排出削減事例の気候を想定したシミュレーションに用いました。シミュレーションでは、SSP1-1.9 と SSP1-2.6 に基づく全球地表気温は 2030 年代後期に基準シナリオから乖離し始めることが示されました。複雑な ESM とは異なり、全球地表気温の自然変動はエミュレーターでは捉えられず、排出削減の努力が気温の観測値によって明瞭に検知される時期は、さらに遅れる可能性が高いと考えられます。

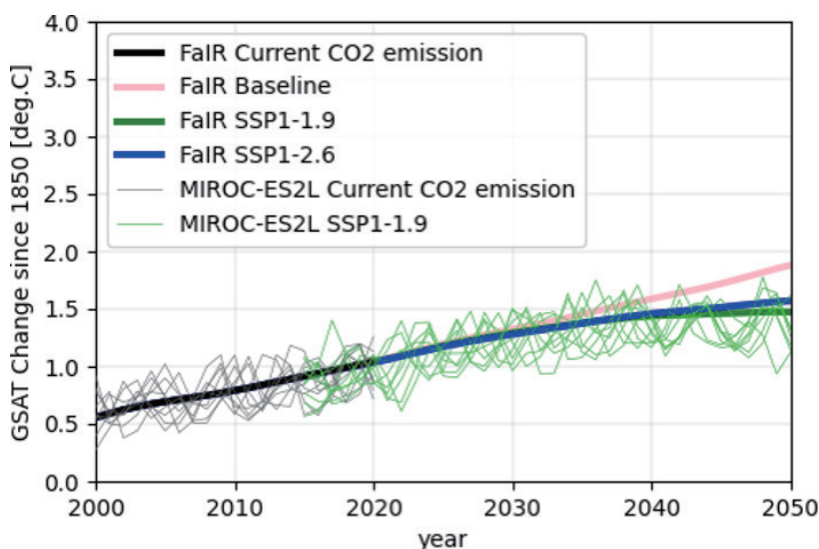


図 15. MIROC-ES2L (細線、アンサンブルメンバー数 = 10) と FaIR-1.6.4 (太線) によってシミュレートされた全球地表気温の変化。1850 年から 2020 年までは「過去 (historical)」実験に該当 (黒線)、1850 年から 2014 年までの全ての強制データセットは CMIP6 に使用したものと同一である。さらに、2014 年から 2020 年までの化石燃料からの CO₂ 排出量 (GCP) を与え、また SSP3-7.0 に記述されるその他の人為排出量や濃度を用いることにより、過去実験を 2020 年まで延長した。CO₂ 濃度は過去実験における観測ベースの濃度にナッジングした。2021 年から 2050 年まではシナリオベースのシミュレーションに該当、構成する 3 シナリオは (1) 基準シナリオ (ピンクの線)、(2) SSP1-1.9 (緑の線)、(3) SSP1-2.6 (青の線)。基準シナリオの人為起源 CO₂ 排出量は 2010 年代 (2010 年から 2019 年まで) の排出増加率がその後も変化しないと仮定して作成した。

4. 結び

本報告書では、利用可能な最良の科学に基づくパリ協定の GST に根拠をもたらすことを目的として、観測データとモデルを用いて作成した世界全体、地域別、国別の GHG 収支に関する成果の概要を示しました。SII-8 プロジェクトが提案する GHG モニタリングシステムは、GHG 収支の空間的・時間的特性を過不足なく捉え、緩和の努力や漏れを客観的に、かつ透明性を保って検出することができました。このシステムのアジア太平洋地域への対応は良好で、欧州のコペルニクスや統合的炭素循環観測システム (ICOS)、北アメリカ炭素プログラム (NACP) のような他地域の活動を補完することになるでしょう。今回の GHG 収支の推定は、公開データセット (排出インベントリや人工衛星プロダクトなど) とともに、私たち自身の観測データとモデルシミュレーションデータを用いることで達成された点に注意してください。モニタリングからモデリングに至る共同作業により、このプロジェクトではステークホルダーに対する速報が可能です (図 16)。しかし、まばらな観測範囲に起因する軽視できない不確実性、未成熟なモデルにおける推定誤差、排出インベントリの偏りは残された問題です。このプロジェクトで続けられている努力により、これらの制約を克服し、透明性のある GST 達成を支援するより信頼性の高い GHG 収支を提供することが期待されます。

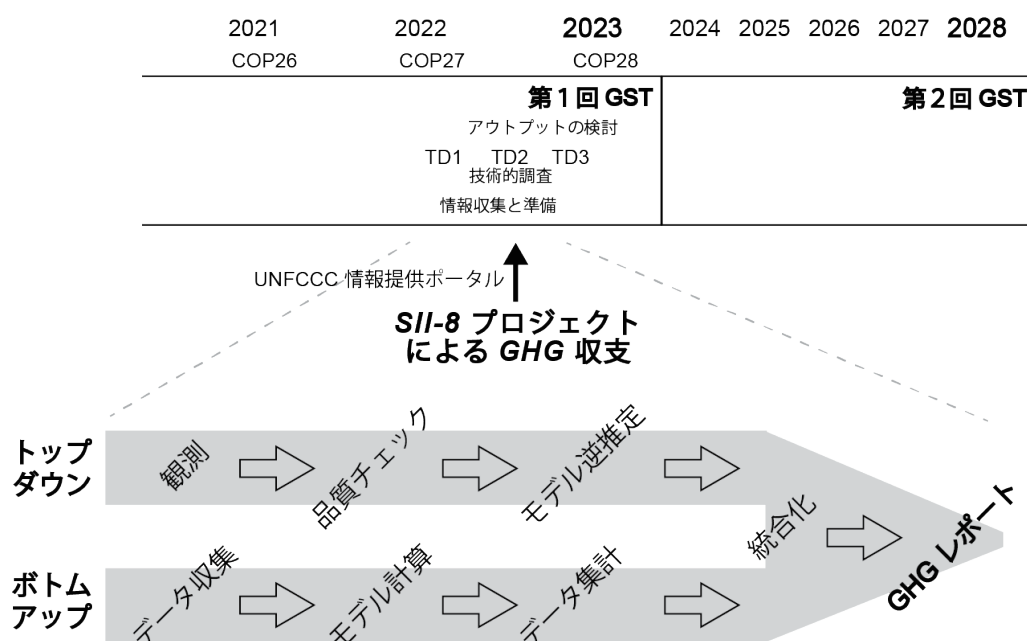


図 16. グローバル・ストックテイク (GST) に対する GHG 収支の貢献について予想されるタイムライン

該当する第 1 回 GST の検討に向けた設問 (SB 議長による 2022 年 2 月 18 日版) および私たちの回答

<緩和策>

Q1. パリ協定の条項 2.1(a)1 と 4.12 で定義された目標の達成に向けた緩和活動の現在の実施状況に関する全体的な進捗と抱負は？

A1. GHG モニタリングは、この報告書に示す通り、総合的かつ迅速な評価と報告において進捗を得、緩和目標の達成を支援しました。

Q2. 国別に決められた貢献、長期 GHG 低排出開発戦略、関連する取り組みやイニシアティブを勘案した上で、パリ協定の条項 2.1(a) と 4.1 で定義された目標を達成するため、予想される 2030 年と 2050 年の世界全体の GHG 排出量と、なお必要となる排出削減は？

A2. 地球温暖化を工業化以前よりも 1.5°C 高い水準を十分に下回るものに抑えるため、遅くとも 2050 年までにネットゼロ排出を達成しなければなりません。本報告書で示した GHG モニタリングシステムには、科学的な裏付けによってその完遂を支援することが期待されます。

Q3. パリ協定の条項 2.1(a) と 4.1 で定義された目標の達成に向けて、緩和活動を計画、実施、促進するために現在どのような努力がなされているのか？

A3. 必要とされる透明性を保って国ごとの GHG 収支を評価するには、国際的に連携した観測と解析を通じた努力が行われており、今後さらなる努力が必要です。

Q4. パリ協定の条項 2.1(a) と 4.1 の達成に向けた緩和活動に与えた現在の緩和努力と支援の妥当性と有効性はどの程度か？

A4. 現在の緩和努力はネットゼロ排出と1.5℃という地球温暖化防止目標を達成するには不十分であり、学術共同体は緩和努力を検証するための GHG モニタリングシステムを確立し、維持しなければなりません。

Q5. パリ協定の条項 2.1(a) と 4.1 で定義された目標を達成するため、

a) さらにどのような活動が必要か？

A5-a. 緩和努力に加えて求められるのは、透明性のための国家間の連携による GHG モニタリングシステムの確立です。

b) 障害や課題は何か、またそれらに対し、国、地域、国際レベルでどのような対処が可能か？

A5-b. GHG モニタリングには、未だに推定の信頼性を低下させる観測上の空白地帯（熱帯林や南極海など）やモデルのバイアスがあります。研究コミュニティにとって、それら空白やバイアスの削減が課題となっています。

c) 将来の見込み、優良事例、教訓、成功事例にはどんなものがあるか？

A5-c. 国家間の連携による総合的 GHG モニタリングシステムの確立は、学術コミュニティと気候政策のいずれにとっても有益です。

<分野横断的な問題>

Q20. パリ協定の目的と長期目標を達成するため、当事者たちは海洋を含めた生態系を確実に無傷で残すことや生物多様性の保護の重要性をどのように認識しているのか？

A20. 本稿で私たちが提案する GHG モニタリングシステムには生態系による GHG の吸収と排出、たとえば光合成による CO₂吸収やバイオマス燃焼による排出が含まれます。観測されたデータは、地区から全球までのスケールで、時間の経過を通じて生態系が損なわれずにいるかどうかを評価するために役立てることができます。

謝辞

プロジェクト SII-8「温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究」は環境省の資金で実施されました (JPMEERF21S20800)。MIROC-ES2L の開発と CMIP6 のためのシミュレーションは文部科学省プロジェクト TOUGOU で実施されました。

MIROC4-ACTM 逆計算活動は、北極域研究加速プロジェクト II (ArCS-II ; JPMXD1420318865) から一部支援を受けています。

データの入手先

• CONTRAIL-CME

CO₂: <https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20210827.001-e.html>

• Hateruma Station observation data

CO₂: <http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20160901.001-e.html>

CH₄: <http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20160901.003-e.html>

• MIROC4-ACTM data:

CO₂: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5776197>, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5776212>

CH₄: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5920070>

N₂O: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5889524>

- NISMON-CO₂:

CO₂: <https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20201127.001-e.html>

- VISIT output:

CO₂, CH₄, N₂O: <https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20210521.001-e.html>

引用文献

- Akagi SK, et al. (2011) Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atm Chem Phys* 11, 4039–4072. DOI: 10.5194/acp-22-9215-2022
- Bisht JSH, et al. (2021) Seasonal variations of SF₆, CO₂, CH₄, and N₂O in the UT/LS region due to emissions, transport, and chemistry. *J Geophys Res Atm*, 126, e2020JD033541. DOI: 10.1029/2020JD033541
- 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. *J Meteor Soc Jpn*, 99, 309–337. DOI: 10.2151/jmsj.2021-015
- Chandra N et al. (2022) Estimated regional CO₂ flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO₂ inversions. *Atmos Chem Phys*, 22, 9215–9243, DOI: 10.5194/acp-22-9215-2022
- Crippa M, et al. (2020) High resolution temporal profiles in the emissions database for global atmospheric research. *Sci Data* 7, 121. DOI: 10.1038/s41597-020-0462-2
- Friedlingstein P, et al. (2022) Global carbon budget 2022. *Earth System Sci Data*, 14, 4811–4900. DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022
- Hajima T, et al. (2020) Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geosci Model Dev* 13, 2197–2244. DOI: 10.5194/gmd-13-2197-2020
- Iida Y, et al. (2021) Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *J Oceanogr*, 77, 323–358. DOI:10.1007/s10872-020-00571-5
- Inatomi, M., A. Ito, K. Ishijima, S. Murayama (2010) Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems*, 13, 472–483, DOI: 10.1007/s10021-010-9332-7
- Ishii M, et al. (2011) Ocean acidification off the south coast of Japan: A result from time series observations of CO₂ parameters from 1994 to 2008, *J Geophys Res*, 116, C06022. DOI: 10.1029/2010JC006831
- Ito A (2019) Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment. *Earth System Dyn*, 10, 685–709. DOI: 10.5194/esd-10-685-2019
- Ito A, Inatomi M (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosci*, 9, 759–773. DOI: 10.5194/bg-9-759-2012
- Ito A, et al. (2018) Emissions of nitrous oxide (N₂O) from soil surfaces and their historical changes in East Asia: a model-based assessment. *Progr Earth Planet Sci*, 5. DOI: 10.1186/s40645-018-0215-4
- Jones MW, et al. (2021) Gridded fossil CO₂ emissions and related CO₂ combustion consistent with national inventories 1959–2018. *Sci Data*, 8, 2. DOI: 10.1038/s41597-020-00779-6

- Kobayashi S, et al. (2015) The JRA-55 reanalysis: General specification and basic characteristics. *J Meteor Soc Jpn*, 93, 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001
- Machida T, et al. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J Atm Ocean Technol*, 25, 1744–1754. DOI: 10.1175/2008JTECHA1082.1
- Matsueda H, et al. (2008) Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask air sampling of JAL airliner observations. *Papers Meteorol Geophys*, 59, 1–17. DOI:10.2467/mripapers.59.1
- Millar RJ, Nicholls ZR, Friedlingstein P, Allen MR (2017) A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. *Atm Chem Phys*, 17, 7213–7228.
- Mukai Y, et al. (2001) Characterization of atmospheric CO₂ observed at two-background air monitoring stations (Hateruma and Ochiishi) in Japan. In *Sixth International Carbon Dioxide Conference* (ed. Nakazawa, T.)
- Nicholls ZRJ, et al. (2020). Reduced Complexity Model Intercomparison Project Phase 1: introduction and evaluation of global-mean temperature response. *Geosci Model Dev*, 13, 5175–5190. DOI: 10.5194/gmd-13-5175-2020.
- Niwa Y (2020) Long-term global CO₂ fluxes estimated by NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO₂ (NISMUN-CO₂), ver.2022.1, Center for Global Environmental Research, NIES. DOI:10.17595/20201127.001, (Reference date: 2022/12/27)
- Niwa Y, et al. (2011) Three-dimensional variations of atmospheric CO₂: aircraft measurements and multi-transport model simulations. *Atm Chem Phys*, 11, 13359–13375. DOI: 10.5194/acp-11-13359-2011
- Niwa Y, et al. (2017a) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 1: Offline forward and adjoint transport models. *Geosci Model Dev*, 10, 1157–1174. DOI: 10.5194/gmd-10-1157-2017
- Niwa Y, et al. (2017b), A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO₂ inversion, *Geosci Model Dev*, 10, 2201–2219. DOI: 10.5194/gmd-10-2201-2017
- Niwa Y, et al. (2021) Estimation of fire-induced carbon emissions from Equatorial Asia in 2015 using in situ aircraft and ship observations. *Atm Chem Phys*, 21, 9455–9473. DOI: 10.5194/acp-21-9455-2021
- Niwa Y, Ishijima K, Ito A, Iida Y (2022) Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMUN-CO₂ v2021.1, *Prog. Earth Planet Sci.*, 9, 42. DOI: 10.1186/s40645-022-00502-6
- Ono H, et al. (2019) Acceleration of ocean acidification in the Western North Pacific. *Geophys Res Lett*, 46, 13161–13169. DOI: 10.1029/2019GL085121
- Patra PK, et al. (2011) TransCom model simulations of CH₄ and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH₄ variability in the troposphere and lower stratosphere. *Atm Chem Phys*, 11, 12813–12837. DOI: doi:10.5194/acp-11-12813-2011
- Patra PK, et al. (2016) Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002–2012). *J Meteor Soc Jpn*, 94, 91–113. DOI: 10.2151/jmsj.2016-006
- Patra PK, et al. (2018) Improved chemical tracer simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM). *SOLA*, 14, 91–96. DOI: 10.2151/sola.2018-016

- Patra PK, et al. (2022) Forward and inverse modelling of atmospheric nitrous oxide using MIROC4-atmospheric chemistry-transport model. *J Meteorol Soc Jpn*, 100. DOI:10.2151/jmsj.2022-018
- Saeki T, Patra PK (2017) Implications of overestimated anthropogenic CO₂ emissions on East Asian and global land CO₂ flux inversion. *Geosci Lett*, 4, DOI: 10.1186/s40562-017-0074-7
- Satoh M, et al. (2014) The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Progr Earth Planet Sci*, 1, 18. DOI: 10.1186/s40645-014-0018-1
- Smith C, et al. (2018) FAIR v1.3: a simple emission-based impulse response and carbon cycle model. *Geosci Model Dev*, 11, 2273–2297. DOI: 10.5194/gmd-11-2273-2018
- Terao Y, et al. (2011) Interannual variability and trends in atmospheric methane over the western Pacific from 1994 to 2010. *J Geophys Res* 116: DOI:10.1029/2010JD15467
- Tohjima Y, et al. (2002) Analysis and presentation of in situ atmospheric methane measurements from Cape Ochi-ishi and Hateruma Island. *J Geophys Res*, 107, 4148. DOI: 10.1029/2001JD001003
- Tohjima Y, et al. (2012) Analysis of seasonality and annual mean distribution of atmospheric potential oxygen (APO) in the pacific region. *Global Biogeochem Cycles*, 26. DOI: 10.1029/2011GB004110
- Tohjima Y, et al. (2014) Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄ / CO₂ and CO / CO₂ correlations observed at Hateruma Island. *Atm Chem Phys*, 14, 1663–1677. DOI: 10.5194/acp-14-1663-2014
- Tohjima Y, et al. (2020) Detection of fossil-fuel CO₂ plummet in China due to COVID-19 by observation at Hateruma. *Sci Rep*, 10, 18688. DOI: 10.1038/s41598-020-75763-6
- Tohjima Y, et al. (2022) Did atmospheric CO₂ and CH₄ observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO₂ reduction due to COVID-19 lockdown? *J Meteor Soc Japan*, 100, 437–444. DOI: 10.2151/jmsj.2022-021
- Tohjima Y, et al. (2023) Near-real-time estimation of fossil fuel CO₂ emissions from China based on atmospheric observations on Hateruma and Yonaguni Islands, Japan. *Prog Earth Planet Sci* 10, 10. DOI: 10.1186/s40645-023-00542-6
- Tsuboi K, et al. (2013) Evaluation of a new JMA aircraft flask sampling system and laboratory trace gas analysis system. *Atm Measur Tech*, 6, 1257–1270, DOI: 10.5194/amt-6-1257-2013
- Tsuboi K, et al. (2017) Inter Comparison Experiments for Greenhouse Gases Observation (iceGGO) in 2012–2016, Tech Rep Meteorol Res Inst. No.79. DOI: 10.11483/mritechrepo.79
- Tsutsumi Y, et al. (2006) Long-term trends of greenhouse gases in regional and background events observed during 1998–2004 at Yonagunijima located to the east of the Asian continent. *Atm Env*, 40, 5868–5879. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.036
- Umezawa T, et al. (2020) Statistical characterization of urban CO₂ emission signals observed by commercial airline measurements. *Sci Rep*, 10, 7963. DOI: 10.1038/s41598-020-64769-9
- van der Werf GR, et al. (2017) Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Sys Sci Data*, 9, 697–720. DOI: 10.5194/essd-9-697-2017
- Watanabe F, et al. (2000) Interannual variation of growth rate of atmospheric carbon dioxide concentration observed at the JMA's three monitoring stations: Large increase in concentration of atmospheric carbon dioxide in 1998. *J Meteorol Soc Jpn*, 78, 673–682. DOI: 10.2151/jmsj1965.78.5_673
- Wolter K, Timlin MS (2011) El Niño / Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Int J Climatol*, 31, 1074–1087. DOI: 10.1002/joc.2336

Yokota T, et al. (2009) Global Concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First Preliminary Results. SOLA, 5, 160–163. DOI: 10.2151/sola.2009-041

Yoshida Y, et al. (2013) Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data. Atm Measur Tech, 6, 1533–1547. DOI: 10.5194/amt-6-1533-2013

問い合わせ先

国立研究開発法人国立環境研究所 企画部 国際室

脚注

ppm: 百万分率, 乾燥空気における 10^{-6} mol mol⁻¹ のモル分率

Pg: ペタグラム (petagram) (10^{15} g)

Tg: テラグラム (teragram) (10^{12} g)

EDGAR: Emission Data for Global Atmospheric Research

GFED: Global Fire Emission Database

MIROC: Model for Interdisciplinary Research on Climate

NICAM: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

VISIT: Vegetation Integrative Simulator for Trace gases