# 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



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を示しており、昨年提出 した内容を更新したものです。パリ協定のグローバル・ストックテイク及び関連する環境政策への貢 献を目標としています。

# 1. 緒言

第一回グローバル・ストックテイク(世界全体としての実施状況の検討、GST)はパリ協定の目的及 び同協定の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を5年ごとに評価するため、 2023年12月にドバイのCOP28にて開催されました。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。これらの過程の透明性を確保するため、 世界全体、地域、国、地区の温室効果ガス(GHG)収支についての、利用可能な最良の科学を用い た評価は極めて重要です。

この報告書の目的は、第1回GSTへの情報提供として、国内研究活動から提出した成果のアップデー ト版を示すことです。環境省の資金提供を受け、2021年4月から2024年3月にかけて、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)が実施されました。各研究参加グループは、観測プラットホーム、先進的モデル、インベント リなどの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、利用可能な 最良の科学による知見を、衡平性を考慮しながら横断的に活用すべきであることから、こうした努力 が必要なのは明らかです。この報告書では、当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を支援するために行われた研究の主要な結果の最新版を提示しま 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 け本研究の範囲には、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が広く含まれます。



図1. トップダウン及びボトムアップの両方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、国立環境研究所 (NIES) は、地上観測点 (Watanabe ら 2000、 Mukaiら2001、Tohjimaら2002、Tsutsumiら2006)、JMA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 (Machida ら 2008、Matsueda ら 2008、Tsuboi ら 2013、Umezawa ら 2020)、人工衛星 (Yokota ら 2009、Yoshida ら 2013) などさまざまのプラットフォームによって大気中GHGの監視を続けています(図2)。GHGの測定は、 その場で実施されたり、あるいは容器に空気サンプルを採取してそれぞれの研究室に返送された後に 実施されました。研究室での分析では GHG のモル分率と同位体比を求めました。CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O を含む GHG のモル分率は、高精度に管理された標準スケールに基づいて正確に決定されました (Tsuboi ら 2017)。2010 年から 2023 年にかけてのアジア太平洋地域における CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の時系 列濃度は(図 3)、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接大 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、赤線は航空機観測の飛行経路を表す。(右) 電波塔(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 2023 年にかけて観測された大気中の CO<sub>2</sub>(左)と CH<sub>4</sub>(右)の月別時系列濃度。

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))。この船は本州の川崎(神奈川県)と九州の苅田(福岡県)を一週 間で往復し、豊橋、名古屋、神戸など途中の各港に寄港します。一例として、2022 年 1 月から 2023 年 12 月 12 日にかけて航路に沿って観測された大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の空間分布をみると(図 4b)、 400 ppm から 700 ppm までの大きな変動が見られます。さらに、NIES によって得られた時間的な CO<sub>2</sub> の変動、とりわけ各寄港先で観測された変動からは、港湾周辺の都市部の規模と CO<sub>2</sub> の変動の 間に関連性が存在することがうかがえます。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)日侑丸の写真、(b)2022年1月から2023年12月にかけて、本船の航路に沿って観測された大気中 CO2濃度の空間分布。

## ボックス1. 増大する大気中のメタン量

メタン (CH<sub>4</sub>) は重要な GHG であり、エネルギー、農業、廃棄物部門を含むさまざまな人為的 発生源や自然発生源(主として湿地)から排出されます。2021 年の COP26 で開始された[グロー バル・メタン・プレッジ] が目指すのは、上記の人為的セクターから排出される人為的 CH<sub>4</sub> 排 出量の迅速な削減です。世界全体の人為的 GHG 排出量を偶発的に低下させた COVID-19 によ るロックダウンにもかかわらず、民間の貨物船を使用して NIES が観測したように (図ボックス 1)、大気中 CH<sub>4</sub> 濃度の年間増加は 2020 年には加速しており、この結果は、全球を対象とする 他のモニタリングネットワークからの報告と一致します。またこの増加の加速は、その後数年に わたって続いていることが明らかです。大気中の CH<sub>4</sub> 存在量には排出と消失(主として大気中 での化学反応)が寄与しており、消失については、大気中で CH<sub>4</sub> を分解する化学反応に関与す る窒素酸化物 (NOx) の排出量低下により、ロックダウン中に弱まった可能性があります。最近 の大気中 CH<sub>4</sub> の全球的急増の原因は、大気観測データを用いたトップダウンアプローチにより 解明されることが期待されます。



#### 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(Satohら2014)。NICAMベースの輸送モデル(NICAM-TM) とGHG監視用のNICAMベースの逆解析シミュレーション(NISMON)を用いて大気中のCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub> の濃度変動を再現し、これらのガスの地表フラックスを推定しました(Niwaら2017a, b, 2022)。 NICAM-TMは、Niwaらの研究(2011)において、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ら2017a,b)。この手法がCO<sub>2</sub>フラックスの推定に応用できることは(NISMON-CO<sub>2</sub>)、 Niwaらが実証しました(2021)。2020年以降に数回の更新を経ながら年一回実施されてきた長期 解析は(Niwa 2020)、直近のグローバルカーボンプロジェクト(GCP、Friedlingsteinら2022)に より作成された全球炭素サイクルの統合解析に利用されています。NISMON-CO<sub>2</sub>

v2021.1の事前フラックスを構成するのは、化石燃料起源のCO₂排出格子データベース、 GCP-GridFED (Jonesら2021)から得た化石燃料排出、プロセスベースの陸域生態系モデル (VISIT、Inatomiら2010、ItoとInatomi 2012、Ito 2019)から得た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ら2017)、JMAから得た船舶測定ベースの海洋フラックスデータ(Iidaら2021)です。

#### *MIROC4-ACTM*:

MIROC4 は、東京大学及び NIES との協力のもと JAMSTEC で開発された地球システムモデル (ESM) であり、MIROC4-ACTM は MIROC4 の大気中化学輸送を扱うバージョンです(Patra ら 2018)。大気中の長寿命ガス (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>)のシミュレーションは、地表から気圧 0.0128 hPa(約 80 km) までを 67 の鉛直ハイブリッド気圧層とし、水平解像度としてスペクトル トランケーション T42(緯度約 2.8 度 × 経度約 2.8 度のグリッド)を用いて実施しています。大気 中の輸送を総観及び季節時間スケールでよりよく表すため、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 IMA 再解析データプロダクト(IRA-55、 Kobayashi ら 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(Patra ら 2018、Bisht ら 2021 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ーワー・ドブソン循環の再現度をテス トしました。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 と Patra 2017、Patra ら 2022)、CH₄については 54 の陸域(Chandra ら 2021 を更新) からの月平均フラックスを最適化します。今回の報告では、陸域と海洋の 2 組の事前フラックスを用 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 ら 2022 と同様、ただし PFU と MDU のより少数の事例について)、MIROC4-ACTM による逆計算を実施した結果を示します。昨年の報告と大きく異なるのは、化石燃料排出です(CO2 逆解析システムには既知扱い)。

#### 2.2. ボトムアップアプローチ

ボトムアップアプローチは、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 データから得た個々の発生源と吸収源の総計として総収支を求めます(図5)。したがって、大気 データから導いたトップダウン推定を、独立した方法による結果と比較し検証することができます。 トップダウンアプローチに比べると、ボトムアップアプローチでは、より高い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があるという短所 もあります。総じて、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おける、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 して私たちが用いるのは、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、 人為起源排出には排出インベントリデータセットです。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、野外・森林火災からの排出には、人工衛星データを用い て作成したプロダクトが用いられます。



図 5. GHG 収支についてのボトムアップ推定の概要: CO<sub>2</sub>(上)、CH<sub>4</sub>(中)、N<sub>2</sub>O(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(農地にも適用可能)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。生物地球物理学(放射収支など)及び生物地球化学スキームで構成 されるこのモデルは、地域及び全球スケールの陸域GHG収支の研究に使用されてきたもので、大気 及び野外の測定データ(Patraら2011, 2016, 2022、Chandraら2021など)を用いて検証されてい ます。VISITは、各格子点での各ガスの総フラックスを、自然生態系と農地の結果を農地面積割合で 加重した値として返します。農耕地部分では、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)データ駆動型推定(フラックスのアップスケーリング)

リモートセンシングと渦相関フラックスタワーのデータを入力するサポートベクター回帰(SVR)モデルを用いて、アジア全域における大気と陸域生物圏の間での炭素フラックスを0.25度の解像度で推定しました。使用されたリモートセンシングのデータには、地表温度、土地被覆、葉面積指数、双方向反射率分布関数(BRDF)で補正した反射率が含まれます。フラックスタワーのデータについては、総一次生産量(GPP)などの炭素フラックスの観測値を使用しました。MODISプロダクトの異なるバージョン、5、6、6.1をSVRアルゴリズムに入力し、目標変数にはフラックスタワーのデータを使用しました。計算後、MODISの各バージョンによる結果を比較しました。

#### c)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

私たちが使用したのは、人為起源排出量インベントリ、特に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8.0です。その理由は、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ためです。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、間接な排出(大気沈着からのN<sub>2</sub>O)や家畜 (CH<sub>4</sub>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CO<sub>2</sub>のオープンデータインベントリ(ODIAC)、GridFED、農業排出の FAOSTAT、CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>OのGAINS/IIASA、Community Emissions Data System (CEDS)です。

#### 火災排出データベース

バイオマス燃焼による CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O の排出量は、小規模火災も含めた 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含 まれるため、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ー (FINN) のような類似プロダクトによる結 果との比較によって評価する必要があります。

#### 2.3. 地球システムモデル (ESM)

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 ESM による気候予測を実施しました。

#### *a) MIROC-ES2L*

今回の研究では、気候の予測には ESM「MIROC-ES2L」(Hajima ら 2020)を使用しています。こ のモデルは、第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)の実験で広く用いられたものです。 CO2濃度のシミュレーションは、現在の世代の ESMs ではまだ偏りがあり、10 年規模の気候と炭素 サイクルのシミュレーションについて、その精度を向上させる必要があることから、データ同化の 1 種である「ナッジング」システムを導入して、このモデルが全球 CO2濃度の観測結果を再現できるよ うに改変しました。

#### *b) FaIR v1.6.4*

簡略化気候モデルも補助的に用いることで、フル結合版の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を実施しました。使用したのはFaIRエミュレーターのバージョン 1.6.4 (Millarら2017、Smithら2018)で、これは前回のIPCC報告にも広く用いられたものです。 このエミュレーターは、上記のESMによるシミュレーションに加え、異なるシナリオを使用したシ ミュレーションの結果を素早く得ることが可能です。このモデルの物理的気候・炭素サイクルプロセ スに関するパラメーターは、非線形最小二乗法によって自動的に決定されました。エアロゾルや大気 汚染物質など他の気候変動を促す要因の扱いは、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<sub>2</sub>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。一般的に、化石燃料排出量が最速で増加していた2002年から2010年の間に、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。すでにSaekiとPatra (2017)が、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の逆計算結果の総合解析によって、東アジア地域における同様の排出と吸収源が連動していたことを示しているのですが、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、詳細な解析は実施していませんでした。

その後、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)から入手 可能となりました。図6では、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 の変動を示しており、北半球の中緯度域で(北緯 30度以北、上段)、化石燃料からの排出量(左列)と、 従ってそれを埋め合わせる残余分の陸域吸収源に(中列)、持続する大きな偏りが見られます。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す。南半球の低緯度(3段目)及び中緯度域(4段目) では、化石燃料からの排出量と残余フラックス推定値は大きな数値にはなりませんでした。



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 色は多変量 ENSO 指標(MEI: Wolter と Timlin 2011)の値。青線と黒線は、化石燃料排出量の上限、下限、 平均(それぞれ点線、破線、実線の曲線)に対応する、異なる 2 通りの観測データを用いた場合の逆計算に おける不確実性。

図 7 では、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が見られますが、 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 の差異と明確かつ密接に連動していることは明らかです。最も顕著な差異が認められるのは東アジア で、ここは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は、化石燃料からの排出レベルの平均値と上限・下限について平行な曲 線となり、異なる逆計算によって推定した陸域フラックス量が、類似した年次変動と推移を示してい ることが分かりました。東アジアでは、化石燃料からの排出量の不確実性は、2000 年には約 ± 0.3 Pg C/年、2021年には約 ± 0.7 Pg C/年まで増大していました。その結果、陸域フラックス推定量は、 2002 年から 2010 年までの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。CO<sub>2</sub>吸収源は、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/ 年もの増加となります(図 7、グラフ h)。このような結果は、ESM の 開発に対し、とりわけ炭素気候応答を予測し、また各国において CO<sub>2</sub>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排出量の平均値からの偏差を 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活用して、低下時期(1990年から1998年)、準定常時期 (1999年から2005年)、再増加時期(2006年以降)におけるCH4増加速度の変動原因を検討しました。 全般的に、2002年以降の東アジア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よく一致しました。この結果は、対照に用いた事例については、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ます。メタン消失に関わるヒドロキ シラジカル(OH)濃度の年次変動は、2000年から2018年の期間でのメチルクロロホルム (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>)の観測をもとに計算し、その後の期間(2019年から2021年)について、OHのばら つきと多変量ENSO指数(Patra 6 2020)の直線関係を用いて外挿しました。



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<sub>2</sub>フ ラックス。異なる 2 通りの観測データの不確実性を使用し、化石燃料 CO<sub>2</sub>排出量の平均値からの偏差(赤線、 平均:実線、下限:破線、上限:点線)の3事例について、6 通りの逆計算を実施(凡例参照)。東アジアの 化石燃料 CO<sub>2</sub>排出量異常については、共通の y 軸範囲に収めるため、-1 Pg C/ 年だけずらせた(グラフ h)。



図8.事前フラックス(破線)に対応する4例のMIROC4-ACTM逆計算(実線)によって推定された地域 別CH₄排出量の平均値からの偏差の時系列(2003年から2021年)。濃度のシミュレーションには年ごとに 異なるOH分布を使用した。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 示す地図は、15地域の境界(黒線)と60地点の位置(黒の円)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)を全球平均から減じ、排出偏差(各グラフ内に長期平均値を示す、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。

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 情報を与えるものとみなせます。このことをはっきりと示すため、以下の異なる 4 件の先行事例を用 いて CH<sub>4</sub>の逆計算を行いました。1)Post\_Inv1:GCP-CH<sub>4</sub> プロジェクトから提供されたものと同じ、 2) Post\_Inv7:1) に淡水排出の 46 Tg-CH<sub>4</sub>/ 年を加算したものと同じ、3) Post\_vCao:湿地排 出に VISIT Cao スキームのものを用いた以外は 1) と同じ、4) Post\_viWH:湿地排出に VISIT Walter-Heimann スキームのものを用いた以外は 1) と同じ。全ての逆計算で同様の CH<sub>4</sub>排出異常 が推定され、これらは人為的 GCP-CH<sub>4</sub>放出の先験的な長期傾向と一致しました(図 8)。

ほとんどの地域で、推定された排出の長期平均値は(各グラフに表示)、先験値に用いた排出よりも 4 通りの逆計算に近い値となりました。本年の報告書のハイライトのひとつは、MIROC4-ACTM 逆 計算により、CH<sub>4</sub>の全球総排出量が、2005年には全体で550Tg CH<sub>4</sub>/年未満だったものが、2020 年には 600Tg CH<sub>4</sub>/年を超えると示唆されたことです(表 1)。そして、MIROC4-ACTM 逆計算 の結果は、ボトムアップ推定量よりもはるかに低いのです(表 2)。

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、N<sub>2</sub>O 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の排出シナリオ(灰 色の線)と同調していました。この結果から、FAOSTATの施肥量データで運用した VISIT モデルは、 農作業による N<sub>2</sub>O 排出を良好にシミュレートす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、解析対象となった期間に、欧州から排出された N<sub>2</sub>O 量が削減されたことが確認されました。この排出削減は、化学工業による、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採用によるものです (EDGAR を参照)。インベントリ推定では、日本における同様の N<sub>2</sub>O 排出削減が報告されています。 N<sub>2</sub>O のボトムアップ排出量に対する本報告の更新で、東アジア地域についてのトップダウン推定と のより良い一致が得られました(表2)。しかしながら、トップダウンによる全球総排出量とボトムアッ プ排出量の間の隔たりは拡大しました。



図 9.15 陸域 (2010 年代の平均排出量を示す地図に黒線で描き込み)からの地域別 №O 排出量、事前情報 のフラックス (PFU)の不確実性を変更した (青:25%、橙:50%、緑:100%)3 例のボトムアップ排出量 (灰色) と 3 例の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 σの標準偏差 (陰影部)を算出した。中央の地図は格子化された №O 排出量を示す。グ ラフは Patra ら (2022)から入手。

b) HAT と YON のモニタリングステーションにおける大気観測値に基づく中国からの化石燃料由来 の CO₂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 CO<sub>2</sub>と CH<sub>4</sub>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ます。これは、冬季には東アジアのモンスーンの影響によって、CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub>濃度の高いエアマスが大陸からこれらの島々にしばしば運ばれてくるためです。過去の研究に より、冬季に HAT と YON で観測された CO<sub>2</sub>と CH<sub>4</sub>の変動比 ( $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>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分かっています (Tohjima ら 2014, 2020, 2022)。 実際に、 $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>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ました。さらに、中国で実施された全国 規模のロックダウンによって化石燃料由来の CO<sub>2</sub>(FFCO<sub>2</sub>) 排出量が著しく削減されたと推定される 2020 年 2 月には、 $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>比が急激に減少しました。

こうした事実を考慮して、私たちは、HAT と YON における大気中 $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>の変動比を用いて、 中国からの CO<sub>2</sub>排出量についての準リアルタイム推定法を開発しています(Tohjima ら 2023)。大 気輸送モデル(NICAM-TM、Niwa ら 2011)と CO<sub>2</sub>及び CH<sub>4</sub>の全ての地表フラックスを用いて大 気中の CO<sub>2</sub>と CH<sub>4</sub>を計算したところ、1 月、2 月、3 月について計算された $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>比と中国 における FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比との間に直線関係があることを見出しました。したがって、観測された  $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>比を中国での FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比に変換するために、この直線関係を用いることがで きます。そして、前の 9 年間(2011 年から 2019 年)では比較的安定した $\Delta$ CO<sub>2</sub>/ $\Delta$ CH<sub>4</sub>比が観測 されているので、その期間に対応する平均値と比較した FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比の変化率を算出しました。 さらに、生物圏の CO<sub>2</sub>と CH<sub>4</sub>のフラックスには年次変動はないとの仮定することで、FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 排出比の変化率を中国からの FFCO<sub>2</sub>排出量の変化率として解釈することが可能となります。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 $\Delta CO_2/\Delta CH_4$ 比をもとに推定した中国における FCO<sub>2</sub>排出量の変化。 2020 年、2021 年、2022 年、2023 年の 1 月、2 月、3 月についての推定結果をそれぞれ左から右のグラ フにプロットした。赤の丸と線、ピンクの四角は、観測された $\Delta CO_2/\Delta CH_4$ 比に基づく、それぞれ 30 日間 移動平均と月間平均の推定値を示す。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。 オレンジ色と青の線は、それぞれ Le Quéré ら (2020) と Liu ら (2020) のボトムアップ推定に基づく中 国からの FFCO<sub>2</sub>排出量の変化を示す。

こうして開発した方法により、2020年、2021年、2022年、2023年の中国からのFFCO<sub>2</sub>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(JFM)のFFCO<sub>2</sub>排出量の変化は、2020年にはそれぞれ17±8%、-36±7%、-12 ±8%(JFM3か月全体では-10±9%)、2021年にはそれぞれ18±8%、-2±10%、29± 12%(JFM3か月全体では15±10%)、2022年にはそれぞれ20±9%、-3±10%、-10± 9%(3か月全体では2±9%)、2023年にはそれぞれ-1±8%、19±9%、2±8%(JFM3か 月全体では7±8%)でした。私たちの推定結果では、中国からのFFCO<sub>2</sub>排出量は、2020年2月 には著しく減少したものの、新型コロナウイルスによるロックダウン後の中国における社会経済活動 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FFCO<sub>2</sub> のわずかな減少は、中国からのFFCO<sub>2</sub>排出量が、いまだ中国での新型コロナウイルス感染状況の影響を受けつつあることを示唆しています。2023年には、中国からのFFCO<sub>2</sub>排出量は、おそらくは 中国のゆるやかな経済回復を反映して、新型コロナウイルス感染症感染拡大前のレベルに到達したよ うに見えます。私たちの推定結果には、図10に示すように、ボトムアップアプローチに基づく推定 の他の報告事例との整合性が認められます(Le Quéré 6 2020、Liu 6 2020)。

c) NICAM-TM による東京都市圏からの正味 CO<sub>2</sub>フラックス の推定と東京スカイツリーでの観測結果 NISMON-CO<sub>2</sub>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、東京都市圏からの正味 CO<sub>2</sub>フラックスを推定しました。逆計算フラックスデータについ てはモデル内の東京地域をより細かく分割するために、水平解像度 1 度の格子を高解像度(約 14 km)まで縮小しました。東京以外の地域から導いたバックグラウンド濃度は、世界各地の観測結果 によって全球的に最適化された逆計算フラックスデータを使用しているため、現実をよく再現しうる と考えました(南鳥島のような遠隔地では、モデルと観測結果がよく一致します)。しかし、シミュレー ションの結果と東京スカイツリーでの観測結果の間には著しい不一致がありました(図 11、中央上 のグラフ)。



図 11. 東京都市圏についての CO<sub>2</sub>フラックス推定の概要。左上は NICAM-TM によって 14km の解像度で 計算した地表 CO<sub>2</sub>濃度場。上の中央では、計算結果を東京スカイツリーにおける観測結果と比較する。東京 起源の濃度は、東京スカイツリーにて計算及び観測した濃度から、計算したバックグラウンド濃度を減じて 導いた。左下では、東京起源の濃度についてのモデルと観測結果の差を風速と比較した。下中央のグラフは、 東京起源の CO<sub>2</sub>濃度についての NICAM-TM と観測値の間の回帰係数の季節変化である。風速で分類する ことにより、回帰係数も分離された。右下のグラフは、本研究及び先行研究において推定された東京からの 正味 CO<sub>2</sub>フラックスを示す。

東京からの正味 CO<sub>2</sub>フラックスは、バックグラウンド濃度を差し引いた計算結果と観測値を比較する ことで推定できます。東京起源の CO<sub>2</sub>濃度を NICAM-TM と観測値を比較すると、低風条件下では 高頻度で不一致が認められました(図11、左下のグラフ)。データを風速が高い方の 50%(高風速条件) と低い方の 50%(低風速条件)に分類すると、東京起源の CO<sub>2</sub>濃度についての NICAM-TM と観測 値の間の回帰係数は高風速条件ではおよそ 1 になります(図 11、下中央のグラフ)。観測値と NICAM-TM の不一致の原因には、化石燃料排出分布の不適切な配分、モデルの不十分な解像度、あ るいはモデル輸送の誤差が考えられます。高風速条件のみでデータを評価することで、上記の誤差に よる影響は平滑化されます。その結果、全ての季節について、モデルと観測値の間に一貫性のある回 帰が得られました。東京起源の CO<sub>2</sub>についての最良の回帰係数をもとに、東京からの正味 CO<sub>2</sub>フラッ クスを 79.5 ± 6.6 Tg C/ 年と推定しました。この推定には、先行研究との整合性があります(図 11、右下のグラフ)。

#### ボックス 2. フラックス測定値のアップスケーリング

現時点で、アジアにおける GPP 推定には、2000 年から 2015 年には MODIS バージョン5 (こ れ以降バージョン5 は生産停止)、2000 年から 2020 年にはバージョン6 と 6.1 に対する結果 があります。フラックスタワーからの GPP 観測値との比較において、この方法は、バージョン 5、6、6.1 で r<sup>2</sup> 値(決定係数)がそれぞれ 0.73、0.73、0.71 となり、これまでのところかなり 正確であることが示されています。しかしながら、これら 3 バージョンでは、GPP の傾向にあ る程度大きな差が見られます。アジアの4地域を対象に、2000 年から 2005 年にかけての GPP 平均値の年次変動に Theil-Sen 回帰を行って推定年次トレンドラインを生成し、これについて Mann-Kendall 単調傾向検定を実施しました。図ボックス 2 に示すとおり、バージョン 5 の東 南アジアとシベリアについての結果以外、全てのバージョンが、4地域すべてで GPP の増加傾 向を示しました。どの地域かにもよりますが、バージョン6と6.1 が最も高い傾向を示しています。 バージョン5 にはデータが 2015 年までしかなく、図の中では回帰の結果を使ってトレンドライ ンを 2020 年まで伸ばしていることにご注意ください。



#### 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 発生源と吸収源の空間的に明示されたマップとセクター別の ばらつきが得られました(図 5)。図 12 は、アジアにおける自然と人為両方のセクター及びその合計 について、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの平均年間収支を示すものです。CO<sub>2</sub>については、主として CO<sub>2</sub>施肥効果、 植林、温暖化による成育促進により、陸域の大部分が生態系への正味吸収源となっていました。東南 アジアでは、大規模な野外・森林火災が正味発生源となっていました。人為起源の CO<sub>2</sub>排出は都市部 と産業地帯からのもので、そのため総収支では、発生域と吸収域が空間的に不均質となっています。 CH<sub>4</sub>については、主として湿地、泥炭地、河川のデルタで自然排出が起きていた一方、広大な乾燥地 帯は土壌の酸化によって弱い吸収源となっていました(Ito ら 2023)。人為起源の発生源は、水田、 家畜を伴う牧草地、化石燃料の採掘地、都市部にありました。この結果、総収支の地図は多数の発生 源を反映した不均質なものとなっています。N<sub>2</sub>O については、自然排出が起きていたのは、主に熱 帯及び亜熱帯地域の自然土壌、とりわけ農耕地と都市部の周辺でした。人為起源の排出は、主として 東アジアと南アジアの農業地帯で起きていました。N<sub>2</sub>O の総収支マップは CH<sub>4</sub>のものと類似してお り、それぞれの主要発生源の類似性がうかがわれました。



図 12. ボトムアップアプローチによって推定された  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$  収支の地図。地図は 2001 年から 2022 年までの平均年間収支を示す。

図 13 は、世界と日本について、セクター別の GHG 発生源と吸収源の年次変化を示したものです。 CO<sub>2</sub>の全球収支については、自然の吸収源(純生態系生産)によってかなりの程度相殺されるものの、 主として産業からの排出によって人為起源の排出が増加しました。日本でも、排出には産業セクター の影響が支配的ですが、2010 年以降は減少傾向が見られます。CH<sub>4</sub>の全球収支については、主とし て化石燃料の採掘、家畜、廃棄物セクターのため総排出量が増加した一方、自然排出は比較的一定で した。日本では、水田、廃棄物、化石燃料採掘における減少のため総排出量は一貫して減少しましたが、 家畜からの排出は若干増加しています。N<sub>2</sub>O の全球収支については、主として化学肥料と有機肥料 の使用に起因する農業からの排出のため、総排出量が増加しました。日本では、総排出量は 2000 年 までは産業からの排出により増加し、その後は産業及び農業セクターにおける減少のため減少してい ました。

#### 3.3. トップダウン推定とボトムアップ推定の比較

GHG 収支についての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2022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2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。2つのアプローチは使用するデータとモデルが異なるため、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示唆さ れていました。例えば排出についての「自然」と「人為」の定義には曖昧さが残り、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、理由もさまざまである可能 性があります。また、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、農産物や伐採 した材木の運搬や河川輸送といった横方向の流れには、未だに組み入れにくさがあります。こうした 問題は、今後炭素サイクルや GHG を研究対象とする諸分野が検討すべきテーマとなっています。



図 13. ボトムアップアプローチによって推定された世界全体(上)と日本(下)における  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、  $N_2O$  収支の一時的変化。

本報告書では、概念上の曖昧さを避け、二つのアプローチで得られた結果の比較について正確を期す 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と考え、 純生態系生産と土地利用による排出は正味の自然排出(吸収も含める)です。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方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 比較しました。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基づいて 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、とりわけこれら が GST に適用できるという点で、私たちが得た GHG 収支の整合性の評価に役立ちます。

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	2021-2022
CO <sub>2</sub>	自然 +土地利用	トップダウン (NISMON) (MIROC4-ACTM)	$-1.25 \pm 1.25$	$-1.38 \pm 0.95$ $-1.73 \pm 0.74$	$-2.70 \pm 0.59$ $-2.91 \pm 0.50$	$-2.49 \pm 0.98$ $-2.93 \pm 0.88$	$-1.93 \pm 0.65$ $-2.66 \pm 0.76$	$-3.07 \pm 0.64$ $-3.11 \pm 0.25$
		ボトムアップ[VISIT]	$-2.42 \pm 1.08$	$-2.02 \pm 0.76$	$-3.27 \pm 0.41$	$-3.44 \pm 0.85$	$-2.52 \pm 0.89$	$-3.66 \pm 0.37$
	人為(化石燃料)	ボトムアップ (GridFED)	$6.62 \pm 0.14$	$7.42 \pm 0.43$	$8.54 \pm 0.27$	$9.42 \pm 0.11$	$9.66 \pm 0.20$	$9.93 \pm 0.01$
$\mathrm{CH}_4$	合計 (排出 - 土壌吸収)	トップダウン (MIROC4-ACTM)		$540.5\pm9.6$	$537.6 \pm 10.8$ $486.5 \pm 3.5$	$573.8 \pm 8.5$ $500.5 \pm 5.9$	$594.4 \pm 14.1$ $513.8 \pm 10.9$	535.2 ± 7.6
	(,	ボトムアップ	$443.4 \pm 11.2$	$458.2 \pm 7.8$				
$N_2O$	合計	トップダウン (MIROC4-ACTM)	$15.6 \pm 0.7$	$15.6 \pm 0.3$	$16.4 \pm 1.0$	$17.0 \pm 0.7$	$17.5 \pm 0.7$ $12.2 \pm 0.2$	
		ボトムアップ	$11.3 \pm 0.5$	$11.4 \pm 0.2$	$11.8 \pm 0.2$	$12.1 \pm 0.2$		$12.5 \pm 0.2$

CO2 in Pg C yr<sup>-1</sup>, CH4 in Tg CH4 yr<sup>-1</sup>, N2O in Tg N yr<sup>-1</sup>

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 ± SD)

			1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2022
CO <sub>2</sub>	自然 +土地利用	トップダウン (NISMON) (MIROC4-ACTM) ボトムアップ[VISIT]	$-0.19 \pm 0.24$ $-0.34 \pm 0.05$ $1.46 \pm 0.04$	$-0.03 \pm 0.29$ $-0.32 \pm 0.14$ $-0.34 \pm 0.13$	$-0.21 \pm 0.14$ $-0.46 \pm 0.08$ $-0.31 \pm 0.05$	$-0.18 \pm 0.15$ $-0.56 \pm 0.14$ $-0.36 \pm 0.08$ $2.20 \pm 0.05$	$\begin{array}{c} 0.10 \pm 0.13 \\ -0.52 \pm 0.12 \\ -0.44 \pm 0.05 \\ 2.21 \pm 0.11 \end{array}$	$-0.22 \pm 0.02$ $-0.23 \pm 0.13$ $-0.54 \pm 0.01$ $2.52 \pm 0.02$
	入為 (化石燃料)	ホトムアッフ (GridFED)	$1.46 \pm 0.04$	$1.83 \pm 0.24$	$2.56 \pm 0.21$	$3.20 \pm 0.05$	$3.31 \pm 0.11$	$3.52 \pm 0.03$
$\mathrm{CH}_4$	合計 (排出 – 土壌吸収)	トップダウン (MIROC4-ACTM)		$48.3\pm2.7$	$52.2 \pm 2.6$ $68.0 \pm 2.0$	$58.1 \pm 3.3$ $74.6 \pm 0.8$	$60.3 \pm 4.7$ $76.1 \pm 1.4$	79.9 ± 1.6
N <sub>2</sub> O	合計	ボトムアップ トップダウン	$\begin{array}{c} 56.1 \pm 0.9 \\ 1.48 \pm 0.13 \end{array}$	$58.8 \pm 3.4$ $1.57 \pm 0.10$	1.76 ± 0.13	1.71 ± 0.12	$1.75 \pm 0.16$	
		(MIROC4-ACTM) ボトムアップ	$1.44 \pm 0.04$	$1.47\pm0.06$	$1.57 \pm 0.04$	$1.62 \pm 0.06$	$1.55 \pm 0.03$	$1.61 \pm 0.00$

CO2 in Pg C yr<sup>-1</sup>, CH4 in Tg CH4 yr<sup>-1</sup>, N2O in Tg N yr<sup>-1</sup>

#### 3.4. CO2排出削減努力の評価

図 14 は ESM「MIROC-ES2L」によるシミュレーションの結果を示すもので、気候予測には SSP1-1.9 と SSP1-2.6 の2種類のシナリオを使用しました。このモデルは、基本的に CMIP6 で使 用したものと同じですが、SII-8 プロジェクトにおける取り組みを通じて、CO<sub>2</sub>濃度の再現性能が向 上しています。



図14. 排出駆動で設定された地球システムモデル「MIROC-ES2L」によるシミュレーションの結果。シナリ オには SSP1-1.9(緑線)と SSP1-2.6(青線)を使用。縦線は各変数が減少に転ずる時期を示す。(a)化石 燃料からの CO<sub>2</sub>排出量(外部入力)、(b)本モデルによりシミュレートした大気中の CO<sub>2</sub>濃度、(c)本モデ ルによりシミュレートした全球平均地表気温(産業化以前の状態からの偏差として表示)。細線は各アンサン ブルメンバー(総数 10)、太線はアンサンブル平均を示す。

本シミュレーションは、排出量をデータで与える一般に「CO<sub>2</sub>排出駆動型」と呼ばれるモードで実施 され、CO<sub>2</sub>濃度はモデルによって予測したものです(参考:CMIP6の大多数は「濃度駆動型」モー ドで実施されています)。化石燃料からの CO<sub>2</sub>排出量は外部からの入力データとしてモデルに入力さ れています。SSP1-1.9 と SSP1-2.6 の2つのシナリオは、ともに排出の減少開始を 2020 年と想定 しています。大気中 CO<sub>2</sub>濃度が減少する時期は、SSP1-1.9 によれば約 20 年、SSP1-2.6 では約 45 年の遅延が生じ、排出減少の影響が大気中 CO<sub>2</sub>濃度の減少として現れるためには、より時間がかかる ことがうかがわれます。これは、CO<sub>2</sub>濃度の減少は、人為起源からの排出が、陸域や海洋における自 然による炭素の取り込みを下回った時にはじめて実現するものだからです。この結果は、排出量が低 下を始めた後も、その削減のための努力を強化しなければならないことを示唆します。

## 4. 結び

昨年私たちは、利用可能な最良の科学に基づいてパリ協定の 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 収支に関する報告書を刊 行しました。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・ 時間的特性を不足なく捉え、緩和の努力やリーケージ(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 動を補完し、それにより、世界気象機関の全球 GHG 監視(WMO-GGGW)において、将来重要な 役割を果たすものと思われます。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 用いることで得られた点にご留意ください。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やかな情報提供が可能となりました(図 15)。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、モデルの不完全さによる誤差、偏りのある 排出インベントリなどは残された問題です。幸い、現在続けられている努力により、本プロジェクト 及び後続のプロジェクト群には、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 15. 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のタイムライン

参考: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°C 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、学術共同体と気候政策のいず れにとっても有益です。

<分野の横断>

- 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 境省から資金提供をいただきました(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 から支援を受けました。MIROC4-ACTM による逆推定計算は、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

CO<sub>2</sub>: https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20210827.001-e.html

 ・波照間モニタリングステーションにおける観測データ

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

CH<sub>4</sub>: http://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20160901.003-e.html

• MIROC4-ACTM data:

CO<sub>2</sub>: https://doi.org/10.5281/zenodo.5776197, https://doi.org/10.5281/zenodo.5776212

- CH<sub>4</sub>: https://doi.org/10.5281/zenodo.5920070
- N<sub>2</sub>O: https://doi.org/10.5281/zenodo.5889524

• NISMON-CO<sub>2</sub>:

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, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O 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 CO<sub>2</sub> flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> parameters from 1994 to 2008, J Geophys Res, 116, C06022. DOI: 10.1029/2010JC006831
- Ito A (2019) Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO<sub>2</sub> budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO<sub>2</sub> 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 (N<sub>2</sub>O) 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
- Ito A, et al. (2023), Bottom-up evaluation of the methane budget in Asia and its subregions. Global Biogeochem Cycles, 37, e2023GB007723. DOI: 10.1029/2023GB007723

- Jones MW, et al. (2021) Gridded fossil CO<sub>2</sub> emissions and related CO<sub>2</sub> 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
- Liu Z, et al. (2020) Near-real-time monitoring of global CO<sub>2</sub> emissions reveals the efects of the COVID-19 pandemic. Nat Commun, 11:5172. DOI: 10.1038/s41467-020-18922-7.
- Le Quéré C, et al. (2020) Temporary reduction in daily global CO<sub>2</sub> emissions during the COVID-19 forced confinement. Nat Clim Chang, 10, 647–653, DOI: 10.1038/s41558-020-0797-x.
- Machida T, et al. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> fluxes estimated by NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO<sub>2</sub> (NISMON-CO<sub>2</sub>), 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 CO<sub>2</sub>: 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: Optimalization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion, Geosci Model Dev, 10, 2201–2219. https://doi.org/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 CO<sub>2</sub> inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-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 CH<sub>4</sub> 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: 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
- Patra PK, et al. (2020) Methyl Chloroform continues to constrain the hydroxyl (OH) variability in the troposphere, J Geophys Res, 126, e2020JD033862.
- Saeki T, Patra PK (2017) Implications of overestimated anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions on East Asian and global land CO<sub>2</sub> 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 CH<sub>4</sub> and CO from China estimated from CH4 / CO<sub>2</sub> and CO / CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> 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 XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> 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<sup>-6</sup> mol mol<sup>-1</sup>の略語 Pg: ペタグラム (10<sup>15</sup> g) Tg: テラグラム (10<sup>12</sup> 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