課題番号　SII-8
体系的番号　JPMEERF21S20800

中間評価ヒアリング資料　課題全体説明用

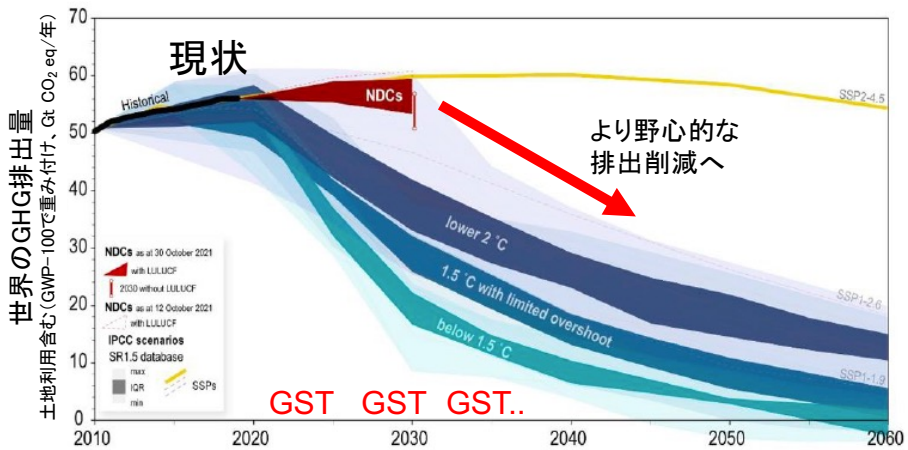
温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究

研究代表機関　国立環境研究所
研究代表者　伊藤昭彦

研究実施期間　令和3年度～令和5年度

研究分担機関名　海洋研究開発機構、気象研究所、千葉大学

SII-8 はじめに



2023年に第1回GST実施

COP26（2021/11）で作業工程を確認

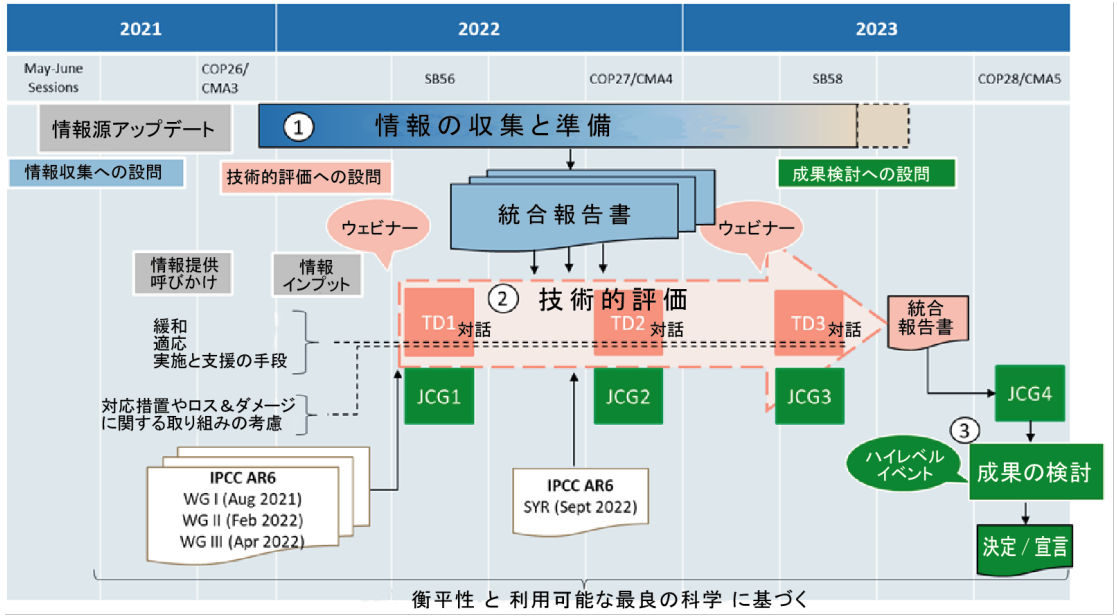
- 2022年前期に「情報収集」フェーズ
  → 早急なGHG収支評価の必要性
- 国際動向： GST貢献を目指す各種プロジェクトの進行（GCP、WMO、ICOS、CEOSなど） → 国内からの対応

背景

気候変動枠組み条約（UNFCCC）パリ協定で設定された長期目標（温度上昇1.5℃未満 [産業革命前比]）を達成するため、各国は温室効果ガス（GHG）排出削減目標（NDC）を提出

→ 達成状況をチェックし、より野心的な目標へ導く

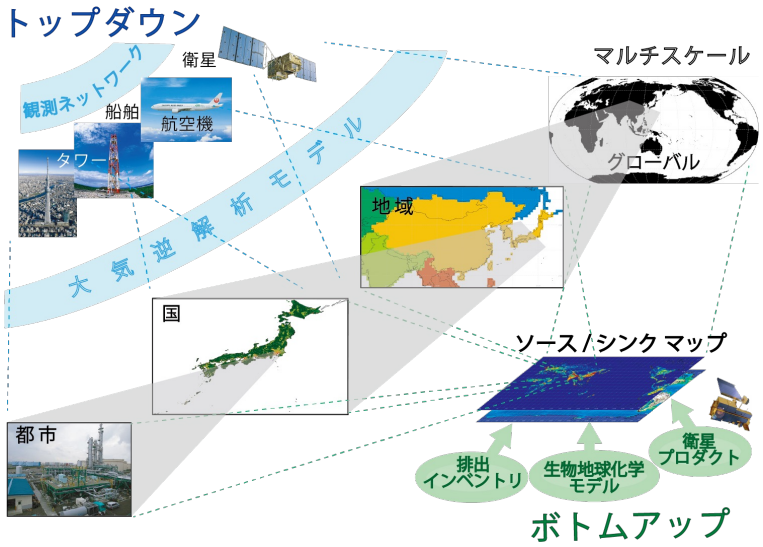
→ 5年に1回 グローバルストックテイク（GST）を実施



(UNFCCCホームページより)

SII-8 研究目標及び研究計画

温度上昇抑制・排出削減
目標達成を支援



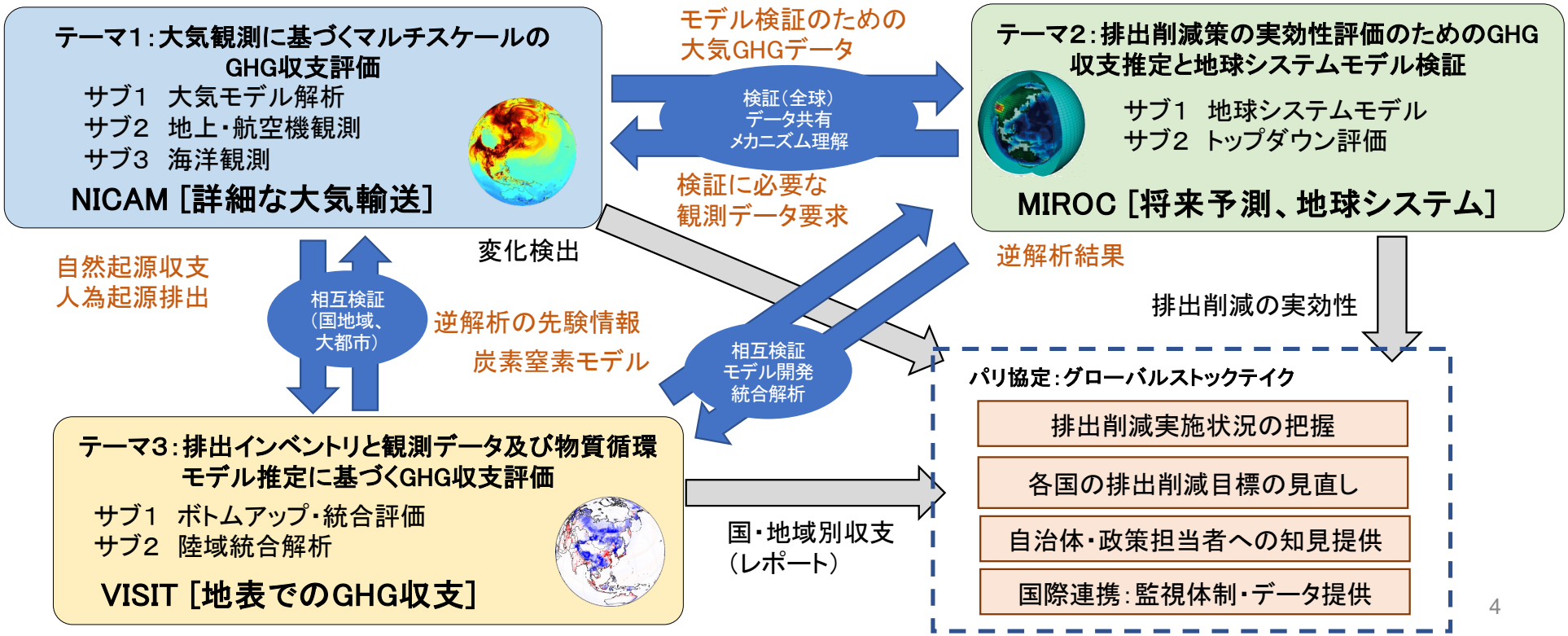
- ◆ パリ協定・グローバルストックテイク（2023年＋それ以降）に向け、最良の科学に基づいて、GHG吸収・排出量をスピーディ（1年以内を目指す）に把握する監視システムを構築する
- ◆ 本事業で提案する体制をベースに高精度化を継続することで、2028年以降にも対応できる世界的にも高レベルな監視システムを提案する
- ◆ 都市−国・地域−全球にわたるマルチスケールで、基準年（2013年）からできるだけ最近までのGHG収支を定量化する
- ◆ アジア太平洋域における観測システム模擬実験を行い、日本およびアジア数カ国でのグローバルストックテイク実施における最適な観測体制の検討を支援する
- ◆ GHG排出削減の実効性評価のため地球システムモデルを検証し再現性を向上させる
- ◆ 複数手法による評価結果を2022年分より報告書としてとりまとめる
- ◆ 他国の排出インベントリとの比較検証を行い、国際連携を通じてデータや監視技術を提供し、グローバルストックテイクの実施を支援する

SII-8 研究開発目的

本研究では、パリ協定・グローバルストックテイク等の政策的ニーズに応えられるよう、観測及びモデル研究を総合的に展開し、GHG動態を詳細に把握することを目的とする。 具体的には

① 都市−国・地域−全球にわたる空間的なマルチスケールでの把握
② 観測から収支評価までスピーディー（できるだけ迅速）に情報を提供する監視システムの構築
③ 温暖化の現象解明と予測精度の向上に寄与する、ことを目的とする

以上において、科学的に最良の推定を目指すとともに、成果を国民にわかりやすく示す。

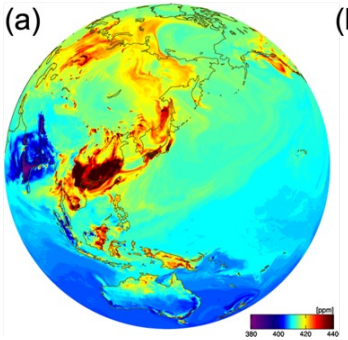


SII-8 研究開発内容・結果及び考察

サブテーマ1-1
「大気モデルを用いた観測体制検討とGHG収支評価 」

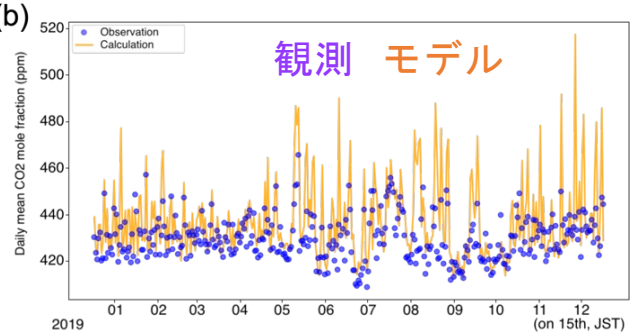
- CO_2、CH_4の全球長期解析
- 高解像度シミュレーション
- 観測展開の検討

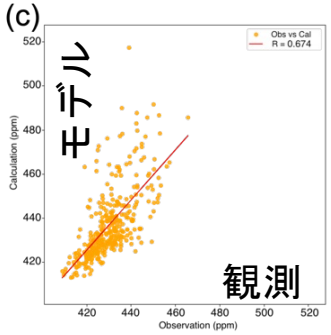
高解像度シミュレーション



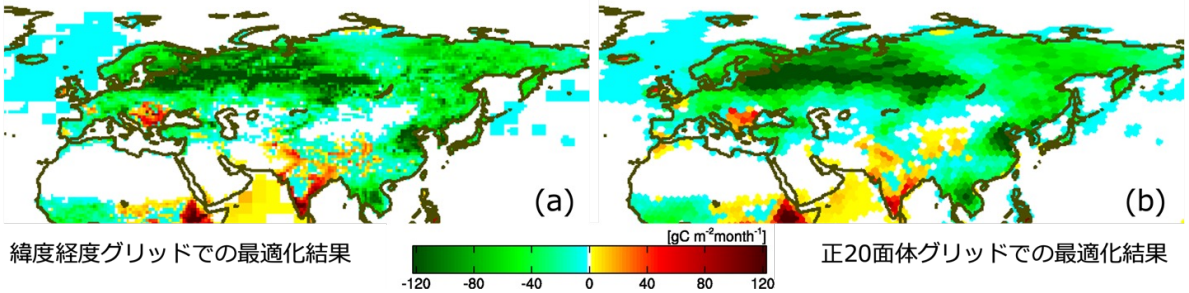
分解能14km

東京スカイツリー観測との比較解析の着手





CO_2、CH_4の全球長期逆解析

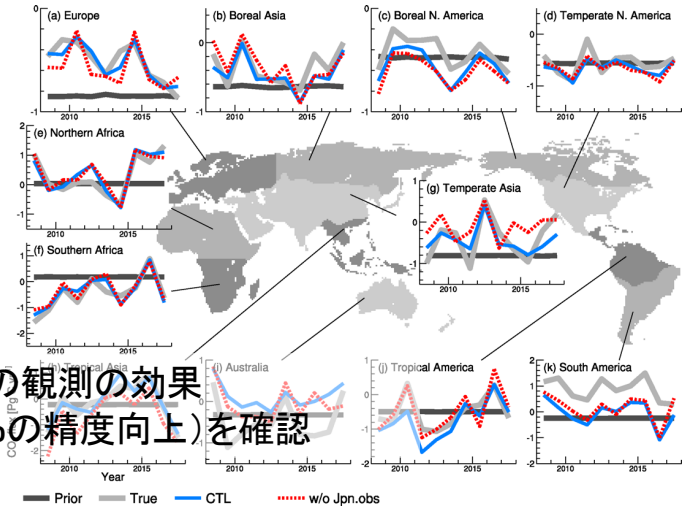


緯度経度グリッドでの最適化結果

正20面体グリッドでの最適化結果

任意の緯度経度グリッド上でフラックス推定が可能に
　→　地域別・国別の収支評価の精度向上
速報的な解析　→　GCPのCH_4統合解析2022に参加

CO_2逆解析の疑似観測実験（OSSE）



日本の観測の効果
（15%の精度向上）を確認

SII-8 研究開発内容・結果及び考察

サブテーマ1−2
「地上観測・航空機による大気中のGHG動態の把握」

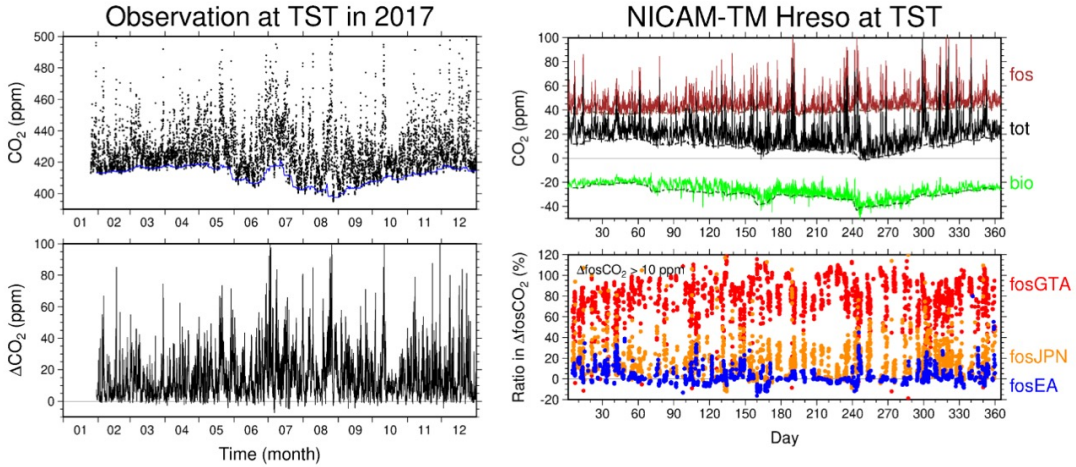
- スカイツリー解析
- 簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発
- 内航船観測
- メタン同位体・多成分観測
- $^{13}CH_4$測定システムの開発
- アジアGHG動態把握
- データベース構築・公開 (↓)

迅速なデータ公開

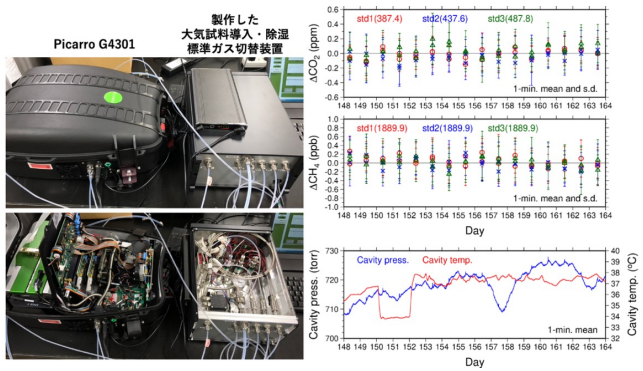
スカイツリー解析

短期変動に対する化石燃料起源CO_2の寄与80～100%

サブテーマ1−1より

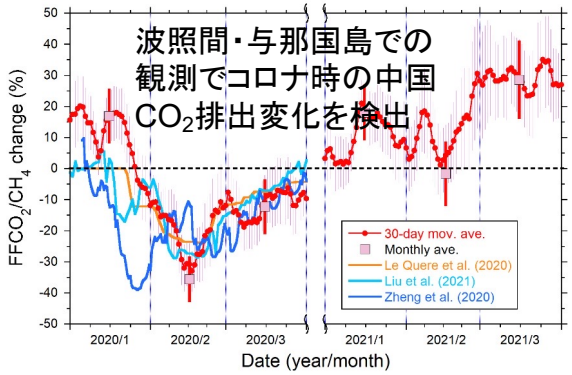


簡易設置型高精度GHG観測システム



バッテリ駆動、野外でも安定した分析が可能

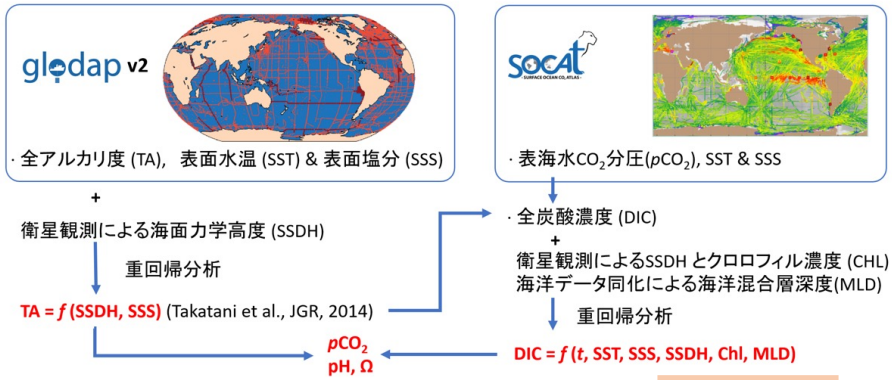
メタン同位体・多成分分析

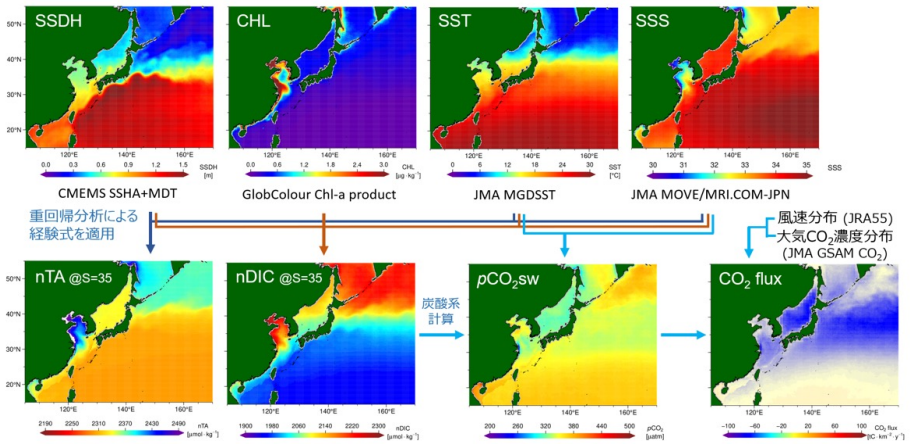


SII-8 研究開発内容・結果及び考察

サブテーマ1−3
「船舶観測に基づく海洋CO_2フラックスデータの精緻化 」

縁辺海pCO_2データプロダクト作成



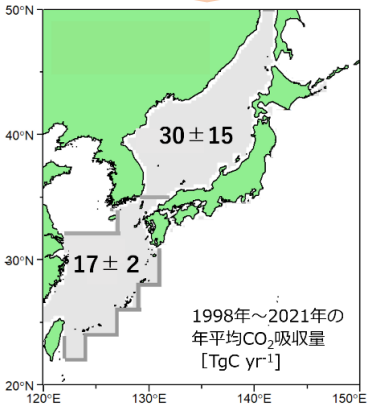


評価

検証

海洋CO_2収支データセットの構築

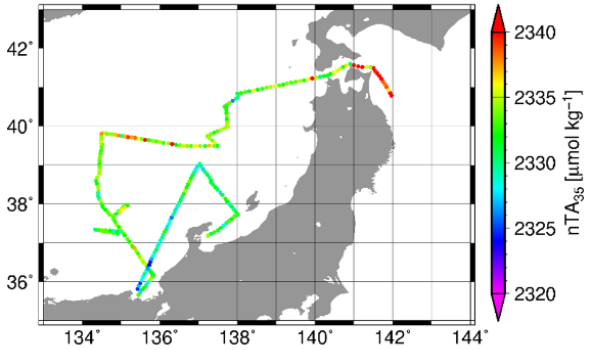
1998年～2018年の年平均CO_2吸収量（Tg C）



GCPが推進する地域別炭素収支解析プロジェクトRECCAP2に参加
=> 海洋モデルとの比較解析

日本海の全アルカリ度航走観測

（気象庁凌風丸22-01航海 2022年2月）



サブテーマ1−1へ

SII-8 研究開発内容・結果及び考察

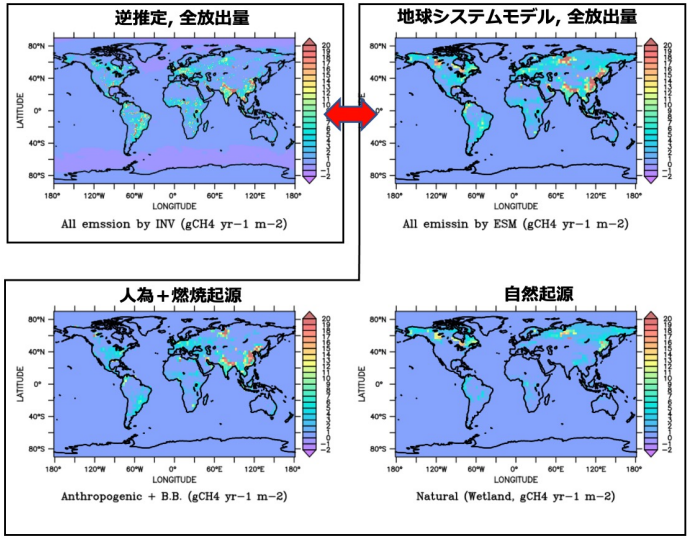
サブテーマ2−1
「地球システムモデルを用いた
GHG排出削減の実効性評価」

- 地球システムモデルMIROC-ES2Lの検証・改良・調整
- 排出削減の実効性シミュレーション実施
  (計画を前倒し)

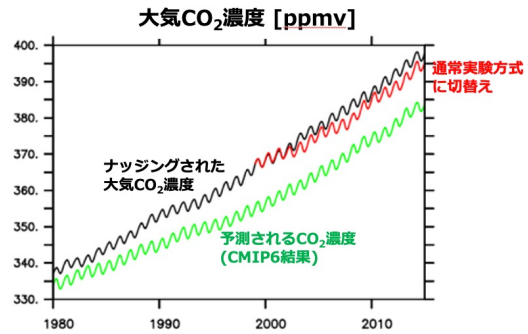
温室効果ガス動態の検証

CH_4の例

サブ3-1より湿原モデル



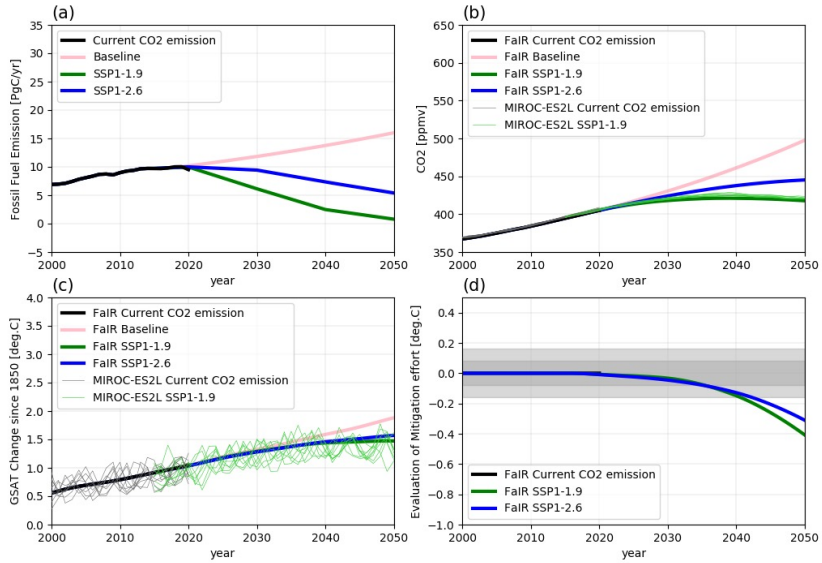
検証作業に基づくモデル改良・調整



サブテーマ2−2と連携

バイアスが目立った〜2000年まで大気CO_2濃度をナッジングにより拘束

排出削減の実効性評価シミュレーションの実施



排出削減シナリオ

簡易気候モデルを用いたアンサンブル実験

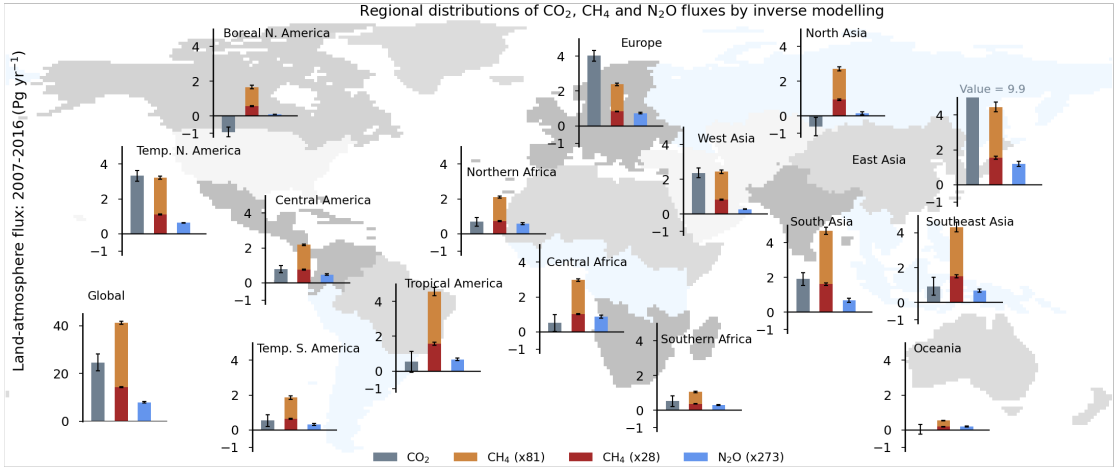
温度上昇抑制効果

SII-8 研究開発内容・結果及び考察

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

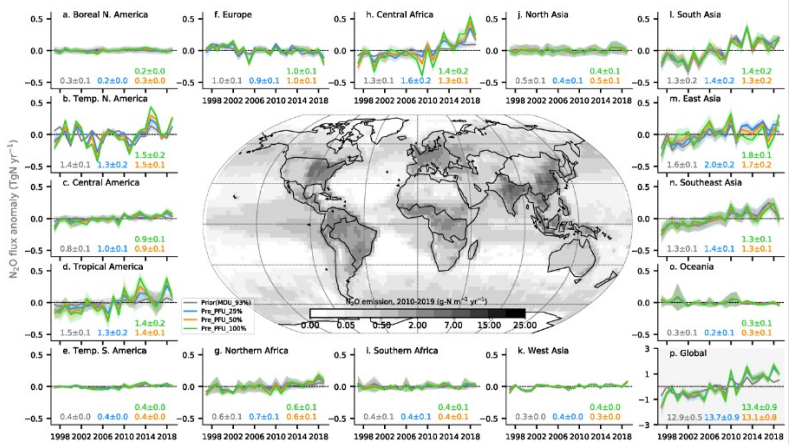
- 政策立案のためのシームレスなGHG収支推定結果の共有
- 地球システムモデルによるC-N循環の再現性向上への貢献
- 大気輸送モデルの輸送および化学過程の改良
- 衛星データの高精度化のための先験値の提供、データ提供体制

3種類のGHG収支に関する統合解析　→GST報告書へ

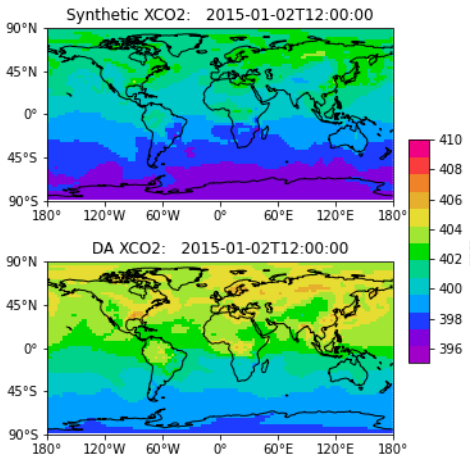


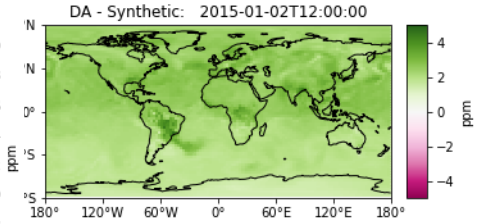
N_2Oの地域別収支評価

CO_2、CH_4についても実施



LETKFを用いたデータ同化システム開発





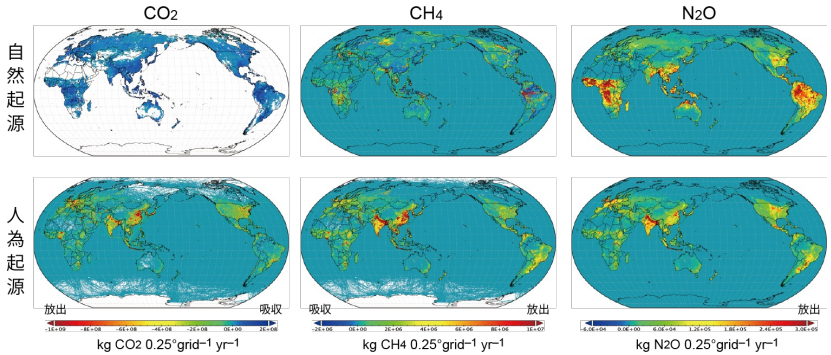
系統的誤差の検出

SII-8 研究開発内容・結果及び考察

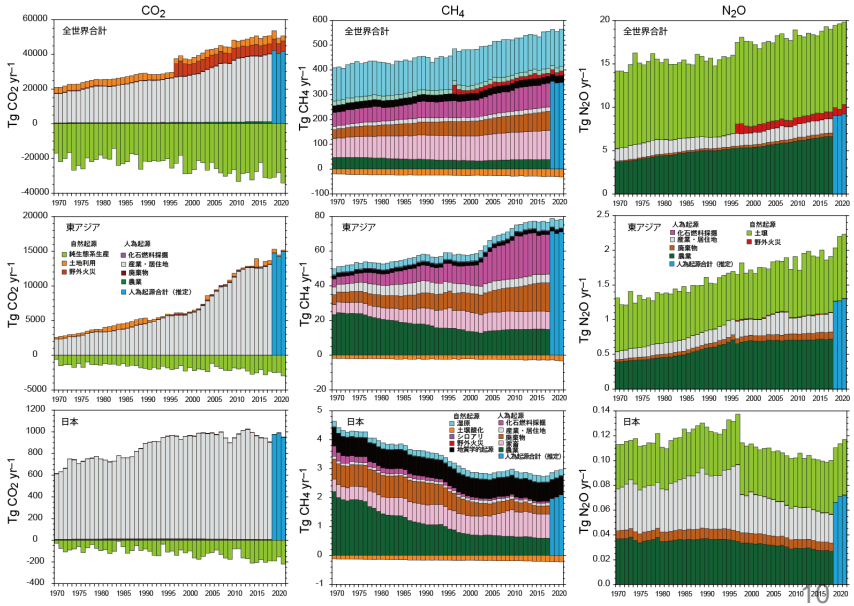
サブテーマ3−1
「人為起源インベントリを含むGHG収支のボトムアップ評価と分析」

- ボトムアップGHG収支評価
- 排出インベントリ改良
  →機械学習アルゴリズムを用いた迅速化
- 物質循環モデルの開発・改良・検証
- GHG報告書作成
- 情報収集/共有、アウトリーチ

ボトムアップ手法による国・地域別GHG収支評価



テーマ1、2へ

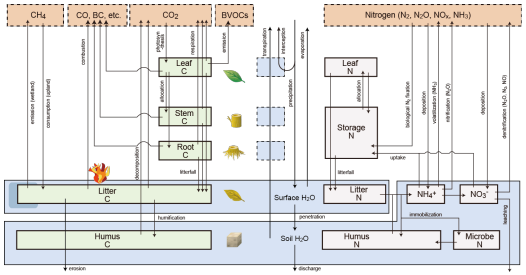


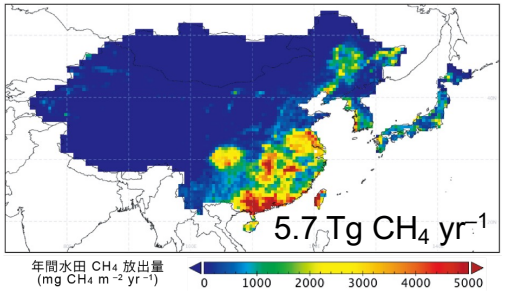
世界

東アジア

日本

物質循環モデルの改良：水田CH_4放出の推定



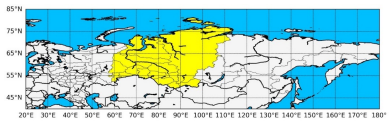


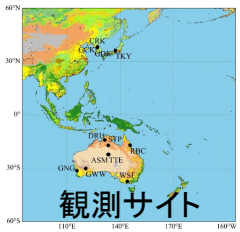
SII-8 研究開発内容・結果及び考察

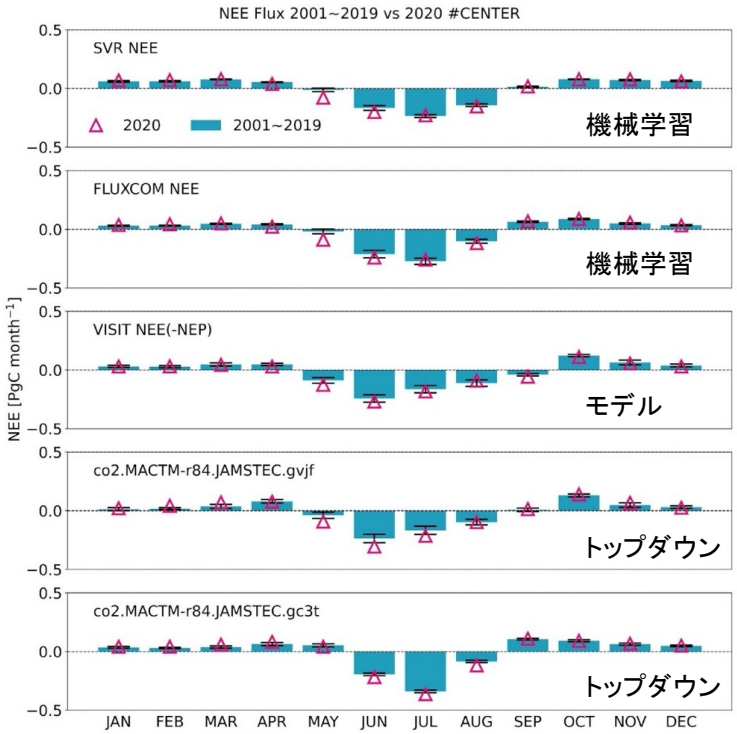
サブテーマ3−2
「観測データ及びモデル推定の統合解析による陸域のGHG収支評価」

- フラックス観測データのスケールアップ
- GOSATデータによる大気GHG濃度プロファイル作成
- 物質循環モデル（サブ3-1）の改良と迅速化

スケールアップしたフラックス観測データ作成とトップダウンとの比較

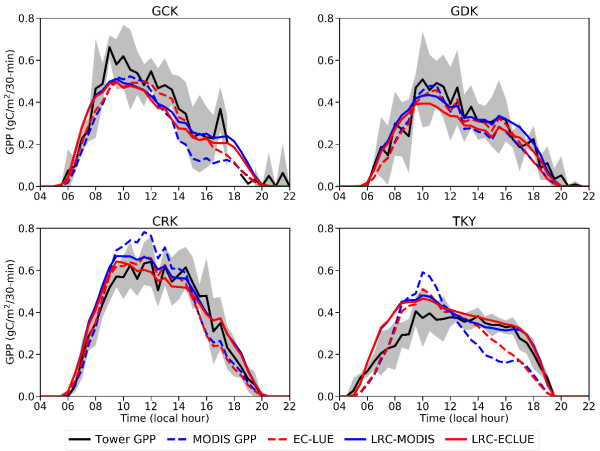




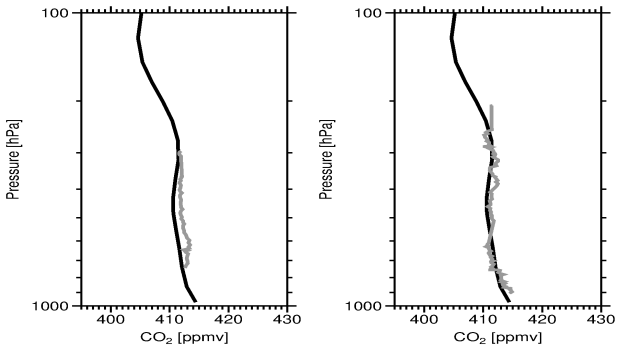


静止衛星データを用いた光合成推定

→迅速化



GOSAT観測データを用いたGHG濃度プロファイル作成と検証



CONTRAILとの比較

SII-8 進捗状況

〇計画通り、△計画遅れ、×未達成、◎計画を前倒し実施

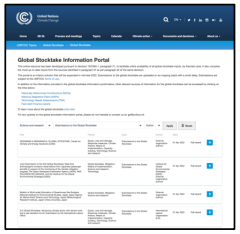
テーマ	サブ	令和3	令和4	令和5 （計画）
1	1	〇 長期逆解析、高解像度モデル	〇 OSSE実施、長期逆解析	TD排出量推定、観測提案
	2	〇 地上・航空機・船舶観測、簡易測器設計	〇 CH_4同位体分析、データ公開	観測最適化、排出量推定
	3	〇 船舶観測、データ品質評価、診断モデル	〇 診断モデル検証、GOSAT解析	プロダクト作成
2	1	〇 ESM検証、実効性評価検討	〇 モデル改良、実効性評価準備	◎ 実効性評価
	2	〇 GHG地域別収支推定、ESM検証協力	〇 データ同化開発、モデル改良	同化システム評価、実効性評価
3	1	〇 BU手法、手法改良、報告書工程	〇 BU評価、報告書プロトタイプ	◎ 報告書とりまとめ、GST提出
	2	〇 フラックス拡張、GOSAT解析	〇 衛星データ利用、迅速化、モデル改良	陸域GHG収支評価、データ公開

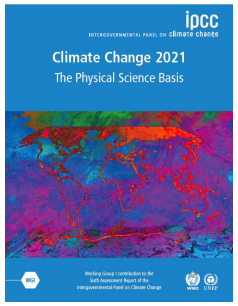
コロナ影響、ウクライナ情勢、円安など

サブ間連携（データ共有、モデル検証・改良）は順調、国民との対話も実施

SII-8 環境政策等への貢献

COP27: Japan Pavilion セミナー実施
WMO GHG/C イニシアティブに貢献





＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

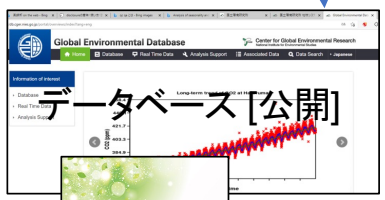
1. 本課題の研究成果を報告書「Bulletin of Multi-scale Emission of Greenhouse Gas Budgets」にとりまとめ、国立環境研究所がオブザーバー機関となって国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出（2022年3月）。この報告書を通して、本研究の成果が第１回GSTに活用される見込み。
2. IPCC第６次評価報告書に多大な貢献がなされた。WG1報告書には責任執筆者2名（石井、パトラ）と80本以上の論文引用、WG2報告書には17本の論文が引用され、気候政策の基礎となる科学的理解に貢献した。
3. CO_2、CH_4逆解析のデータや大気・海洋CO_2フラックスのデータをグローバルカーボンプロジェクト（GCP）の全球・地域別の統合GHG収支解析へと提供。
4. 世界のGHG観測網において、アジア地域という重要な地域をカバーしており、科学的知見は各国・地域の排出削減目標の策定にも貢献できる可能性を有している。また、「環境研究・環境技術開発の推進戦略」（令和元年５月21日環境大臣決定）が「必要な研究」と定める「国際的な環境協力等にも資する地球温暖化現象の解明、予測、対策評価に焦点を当てた」研究を支える基礎的データを提供している。
5. 環境省・JAXA・国立環境研究所が実施しているGOSAT-2衛星観測プロジェクトにおいて、本研究で開発しているNISMON-CO_2/CH_4は、L4プロダクト（衛星データから逆解析で求めたフラックスデータ）の作成に利用される予定である。
6. 本研究で開始した内航船による観測データは、次期GHG観測衛星プロジェクトGOSAT−GWの評価・検証データとしても利用される。
7. 長期的なNDC策定に資する成果を創出した。GHG排出の削減効果が自然変動幅を越えて気温低下として明瞭に現れるのは2040年以降となる見込みが示され、気候－炭素循環システムの時間遅れ応答を見越した上でのNDC策定や科学的評価の重要性が示唆された。NDC策定・記述手法の統一化・洗練化も求められる。
8. 地球をめぐる温室効果ガス. JST-CRDS環境・エネルギーセミナー (2021.5.27)科学技術振興機構(JST)-研究開発戦略センター(CRDS)が主催した環境・エネルギーセミナー(オンライン)において講演を行い、日本における温室効果ガス観測・解析研究の動向を解説するとともに推進費SII-8の必要性や意義を周知した。
9. イタリア大使館が主催した2050年カーボンニュートラルに向けた地球観測の役割に関する日-伊合同ウェビナーにおいて講演を行い、日本の研究と推進費SII-8の意義を周知した。
10. 1st General Assembly of the Copernicus CO_2 (CoCO2) Project (2021.1117)　欧州コペルニクスCO_2プロジェクト(CoCO2)第1回全体会議（オンライン）において、CoCO2と類似の目的を持つ日本のプロジェクト推進費SII-8の意義と進捗状況を周知した。
11. 文部科学省が主催する第9期地球観測推進部会（第3回）において、地球観測によるパリ協定への貢献及びCOP26対応に関する我が国からの貢献として、推進費SII-8の意義や公開可能なデータ情報を含めて国内関係府省庁・機関へ説明した。
12. GEO (地球観測に関する政府間会合)のアジア・オセアニア支部会合(AOGEO)において、温室効果ガス循環に関する部会(Taskgroup-3; Carbon and Greenhouse Gases)の共同議長を務めている。各国の研究チームとの分科会を開催し、AOGEOの本会合に向けた宣言文へのインプットを行っている。
13. 米国科学・工学・医学アカデミー（NASEM）は、今後の米国の意思決定のために活用される地球規模の温室効果ガス排出情報の評価枠組みに関する報告書を2022年9月に発表する予定である。この報告書に対し、日本学術会議により三枝が査読者に推薦された。

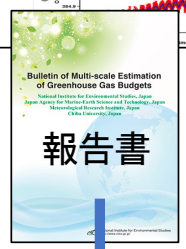
＜行政等が既に活用した成果＞

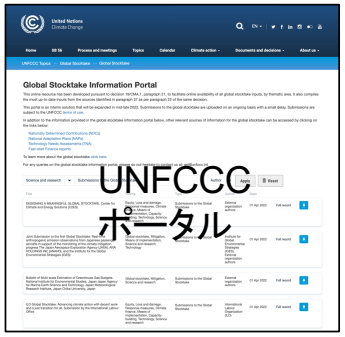
1. 文部科学省が主催する第9期地球観測推進部会（第4回）において、環境省地球環境局総務課脱炭素化イノベーション研究調査室による「グローバルストックテイクに向けたGHG監視に関する取り組みの報告」に推進費SII-8の成果が活用された。

SII-8 環境政策等への貢献

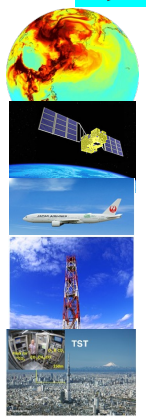
グローバルストックテイクの情報収集に対応するため、<u>計画を前倒しして</u>SII-8課題成果をまとめた報告書を作成し、2022年3月に UNFCCC-GST ポータルより提出







トップダウン推定（テーマ1、2）



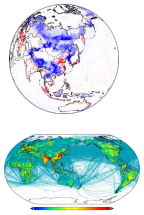
<u>グローバル</u>

- CO_2, CH_4 収支マップ：1 x 1deg, NICAM, 1990–2020
- CO_2, CH_4, N_2O収支マップ：地域分割, MIROC4-ACTM, 2000–2020
- CO_2, CH_4、N_2O 10年毎の集計表

<u>国 / 地域</u>

- CO_2、CH_4収支：地域別、NICAM, 1990–2020
- CO_2、CH_4, N_2O 収支：11–15 地域 / top 20 放出源, 2000–2019
- 大気中 CO_2, CH_4 濃度：地表, 船舶, 航空機, 1994–2021

ボトムアップ推定（テーマ3）



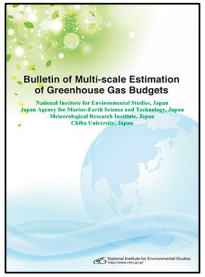
<u>グローバル</u>

- 自然起源 CO_2, CH_4, N_2O収支マップ：0.5 x 0.5deg, VISIT, 1990–2020
- 人為排出インベントリ：0.25 x 0.25deg, 1990–2018
- CO_2, CH_4, N_2O 10年毎の集計表

<u>国 / 地域</u>

- CO_2, CH_4, N_2O 収支：地域別（RECCAP2 地域）, 1990–2018
- 陸域 CO_2 収支（GPP, NEE）：アジア、0.25×0.25deg, 2000–2020

SII-8 UNFCCC GST提出レポート



内容を毎年アップデート（期間の延長、追加データを用いた再解析など）
プロジェクトホームページより公開　https://www.nies.go.jp/sii8_project/

Guiding Questionsへの回答

Corresponding GST1 Guiding Questions (by SB chairs, ver. 20 Oct. 2021) and our answers

<Mitigation>

Q2. *What is the collective progress made towards achieving the long-term mitigation goal in Article 4.1 of the Paris Agreement, in the light of equity and the best available science?*

A2. This report provides our up-to-date estimates of global, regional, and national greenhouse gas (GHG) budgets mainly based on atmospheric observations and modeling, allowing us to transparently examine the state of emission reduction toward achieving the long-term mitigation goal.

Q3. *What are the projected global GHG emissions and what actions are Parties undertaking to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of GHGs, on the basis of equity, and in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty (Article 4.1 Paris Agreement, Decision 19/CMA.1, paragraph 36(b))?*

A3. The GHG budgets provided in this report account for not only net budgets but also sources and sinks of natural and anthropogenic sectors, allowing us to examine the balance between anthropogenic GHG emissions by sources and removals by sinks. By using the Earth system model, our project is also examining the projected global GHG emissions in terms of mitigation effectiveness.

<Cross-cutting>

Q16. *To achieve the purpose and long-term goals of the Paris Agreement (mitigation, adaptation, and finance flows and means of implementation, as well as loss and damage, response measures), in the light of equity and the best available science, taking into account the contextual matters in the preambular paragraphs of the Paris Agreement:*

a. What are the good practices, barriers and challenges for enhanced action?

b. What is needed to make finance flows consistent with a pathway towards low GHG emissions and climate-resilient development?

c. What are the needs of developing countries related to the ambitious implementation of the Paris Agreement?

A16-c. The methodology of GHG monitoring adopted in this report is applicable to developing countries and therefore supports their ambitious implementations of the Paris Agreement, at least in terms of mitigation.

Q17. *What is needed to enhance national level action and support, as well as to enhance international cooperation for climate action, including in the short term?*

A17. Reliable GHG budgets are prerequisites for national and international actions; therefore, establishing a continuous GHG monitoring system that encompasses multi-scale observations and modeling through international collaborations is needed.

Q18. *What is the collective progress made by non-Party stakeholders, including indigenous peoples and local communities, to achieve the purpose and long-term goals of the Paris Agreement, and what are the impacts, good practices, potential opportunities, barriers and challenges (Decision 19/CMA.1, paras 36(g) and 37(i))?*

A18. This report comprehensively covers GHG budgets and therefore is useful for non-Party stakeholders to obtain overviews for planning actions toward long-term goals.

手法の説明

2. Methodology

2.1. Top-down approach

a) Atmospheric observations

Ground observatory, ship, CONTRAIL (aircraft), GOSAT series (satellite) etc.

The Japan Meteorological Agency (JMA), the Meteorological Research Institute, and the National Institute for Environmental Studies (NIES) have been monitoring atmospheric GHGs from a variety of platforms, including ground sites (Mukai *et al*., 2001; Tohjima *et al*., 2002; Watanabe *et al*., 2000; Tsutsumi *et al*., 2006), JMA research vessels (Ishii *et al*., 2011; Ono *et al*, 2019), commercial cargo ships (Terao *et al*., 2011; Tohjima *et al*., 2012), aircrafts (Matsueda *et al*., 2002; Machida *et al*., 2008; Tsuboi *et al*., 2013; Umezawa *et al*., 2020), and satellites (Yokota *et al*., 2009; Yoshida *et al*., 2013). The GHGs are measured on-site or in air samples that are collected in canisters and sent back to the individual laboratories to determine mole fractions of the GHGs and C/H/N isotopic composition. The mole fractions of the GHGs, including CO_2, CH_4, and N_2O, are precisely determined based on highly compatible standard scales (Tsuboi *et al*., 2017). The time courses of CO_2 over the Asia Pacific area from 2010 through 2021 are plotted in Fig. 2, showing the spatio-temporal variability of CO_2 at background (e.g., MNM), continental (e.g., NTL), and urban (e.g., YYG) sites. These observed data are provided immediately to the atmospheric inversion systems, following strict quality assurance and quality control procedures.

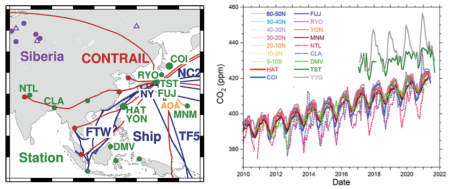


Figure 2. (left) Map showing the locations of the atmospheric GHG observations in the Asia-Pacific region. Green circles represent ground sites, blue lines shipboard routes, and red lines airplane routes. (right) Time courses of atmospheric CO_2 observed over the Asia Pacific region from 2010 through 2021 are shown at monthly intervals.

NIES has observed the atmosphere in Tokyo megacity since 2016. The time courses of atmospheric CO_2 observed at Tokyo Skytree (TST) are plotted in Fig. 3, showing large (up to 100 ppm) increases in CO_2 from baseline concentrations, which is calculated by smoothly connecting the data below 10th percentile for a 5-day time window. The high-resolution NICAM model indicated that the fossil fuel CO_2 emitted from the Greater Tokyo area was the major source (61% of annual average) of CO_2 increases larger than 20 ppm, supplemented by fossil fuel CO_2 emitted from other areas (15%) and from the biosphere (23%). These observed data and high-resolution modeling are especially useful for monitoring GHG emissions in Tokyo megacity.

GHG収支評価

3. Greenhouse gas budgets

3.1. Top-down approach

Global, regional, and national budgets

Figure 5 shows the global trends in global CO_2 fluxes estimated by two inversion systems (MIROC4-ACTM and NISMON). NISMON inversion used one set of prior flux and model input parameters, but MIROC4-ACTM performed an ensemble of 16 inversions for two sets of prior fluxes and by varying prior flux uncertainty (PFU) and measurement data uncertainty (MDU). The MIROC4-ACTM uncertainties in the predicted fluxes due to different priors are found to be 0.35 and 0.1 Pg C yr^{-1} for global land and ocean, respectively. Ensemble mean land and ocean fluxes are in good agreement with the IPCC 6th Assessment Report "mean" estimates of −2.6 ± 1.14 and −1.7 ± 0.6 (Chandra *et al*., 2021b). Global total sinks estimated with both NISMON and MIROC4-ACTM are in good agreement with the observed global mean CO_2 growth rate (Fig. 5d), although differences remain in land-ocean partitioning of carbon uptakes in the post-2012 period (Fig. 5b,c).

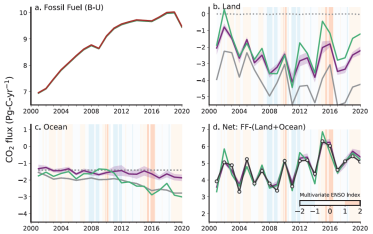


Figure 5. Global annual CO_2 emissions from fossil-fuel (a) and estimated land (b) and oceanic (c) carbon sink from MIROC4-ACTM and NISMON inversions. In panel d, net CO_2 flux (FF emission – land sink – oceanic sink) is compared with the observed global growth rate from the NOAA/ESRL (Dlugokencky and Tans, 2021). CO_2 growth rate is the converted to net flux calculated using a factor 2.13 Pg C ppm^{-1} (d). The background shading in panels b, c and d shows Multivariate El Niño Southern Oscillation (ENSO) Index (Wolter and Timlin, 2011).

Figure 6 shows regional CO_2 fluxes and flux uncertainties from the 16-member ensemble inversions for 15 land regions at 5-yearr intervals for the past two decades, as estimated by MIROC4-ACTM. Flux estimates for all the land regions remain quite uncertain, as seen from the 95th percentiles of the 16-inversion ensemble (error bars) at about 0.3 Pg C yr^{-1}. However, by employing the 16-inversion ensemble approach we could obtain flux uncertainties that are an order of magnitude smaller compared to the traditional methods, and often less than the regional fluxes themselves. The mean/median fluxes are consistent for the ensemble inversions and represent the true state of CO_2 flux estimation for the MIROC-ACTM and 50 sites used in the inversion. The changes in regional CO_2 fluxes between 5-year periods are generally attributed to the changes in human induced land use, naturally occurring drought, or fire emission intensities at decadal time scales (Chandra *et al*., 2021b). The step increases in East Asian CO_2 flux between 2001–2005 and 2011–2015 is suggested to be related to the biased fossil-fuel emissions from China, affecting the natural/managed land flux estimation by inversion (Saeki and Patra, 2017).

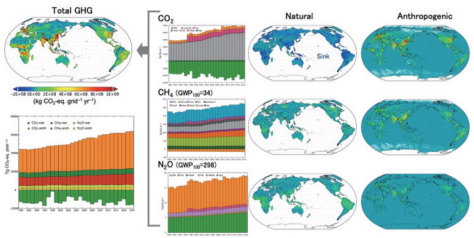


Figure 10. Global GHG budgets estimated by the bottom-up approach. Maps show mean annual budgets during 2000–2018.

Regional GHG budget

We present a regional GHG budget for East Asia. In this region, natural and anthropogenic CO_2 budgets over 2010 to 2018 were estimated as –1639 ± 446 (net sink) and 12,500 ± 500 Tg CO_2 yr^{-1} (source), respectively (Fig. 11). The regional total CO_2 budget was a net source of 10,800 ± 300 Tg CO_2 yr^{-1}. Natural and anthropogenic CH_4 emissions over 2010 to 2018 were estimated as 10.5 ± 0.9 and 69.1 ± 1.3 Tg CH_4 yr^{-1}, respectively. The high contribution of anthropogenic emissions (87% of total budget), especially from fossil fuel mining, characterizes the CH_4 budget of this region. Using the GWP over 100 years, the annual mean CH_4 source was equivalent to 2707 ± 53 Tg CO_2-eq yr^{-1}. Natural and anthropogenic N_2O emissions over 2010 to 2018 were estimated as 0.86 ± 0.08 and 0.71 ± 0.01 Tg N_2O yr^{-1}, respectively. Using the GWP over 100 years, the annual mean N_2O source was equivalent to 571.5 ± 25.1 Tg CO_2-eq yr^{-1}.

Table 1. Comparison of global land total GHG budgets between top-down and bottom-up approaches (mean ± SD of interannual variability).

			1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
CO_2	Nat. + LUC	top-down (NISMON)	−1.39 ± 0.87	−1.46 ± 0.95	−2.90 ± 0.61	−2.51 ± 1.40	−1.86 ± 0.71
		(MIROC4-ACTM)	–	−1.67 ± 0.63	−2.89 ± 0.46	−3.04 ± 0.80	−2.73 ± 0.67
		bottom-up	−3.01 ± 1.72	−2.48 ± 0.68	−3.45 ± 0.52	−3.95 ± 0.52	−3.84 ± 0.74
	Authr. (FF)	top-down & bottom-up	6.68 ± 0.11	7.48 ± 0.42	8.68± 0.24	9.59 ± 0.11	9.78 ± 0.20
CH_4	Total	top-down (MIROC4-ACTM)	548.5 ± 14.8	560.4 ± 18.0	563.7 ± 8.2	579.1 ± 12.9	599.4 ± 10.0
		bottom-up	440.1 ± 7.5	451.0 ± 7.2	476.7 ± 6.2	496.7 ± 5.3	515.0 ± 9.1
N_2O	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	17.0 ± 0.7	17.0 ± 0.3	17.9 ± 0.5	18.2 ± 0.1	19.0 ± 0.3

CO_2 in Pg C yr^{-1}, CH_4 in Tg CH_4 yr^{-1}, N_2O in Tg N_2O yr^{-1}

Table 2. Comparison of land total GHG budgets between top-down and bottom-up approaches for East Asia (mean ± SD of interannual variability).

			1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
CO_2	Nat. + LUC	top-down	−0.20 ± 0.43	−0.02 ± 0.28	−0.19 ± 0.41	−0.05 ± 0.31	0.28 ± 0.14
		bottom-up	−0.32 ± 0.09	−0.31 ± 0.11	−0.31 ± 0.06	−0.43 ± 0.10	−0.53 ± 0.08
		bottom-up	1.47 ± 0.03	1.83 ± 0.25	2.63 ± 0.20	3.29 ± 0.05	3.34 ± 0.06
	Authr. (FF)	top-down (MIROC4-ACTM)	–	52.2 ± 1.7	57.7 ± 2.1	60.1 ± 2.5	48.9 ± 2.4
CH_4	Total	bottom-up	61.3 ± 1.1	64.2 ± 3.3	73.5 ± 2.3	79.7 ± 1.6	80.7 ± 1.0
		top-down (MIROC4-ACTM)	1.48 ± 0.13	1.57 ± 0.10	1.76 ± 0.13	1.71 ± 0.12	1.75 ± 0.16
N_2O	Total	bottom-up	1.72 ± 0.06	1.75 ± 0.07	1.85 ± 0.07	1.90 ± 0.10	2.02 ± 0.11

CO_2 in Pg C yr^{-1}, CH_4 in Tg CH_4 yr^{-1}, N_2O in Tg N_2O yr^{-1}

公開データ（DOI）に関する情報