【SII-8-1】
JPMEERF21S20810

大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価

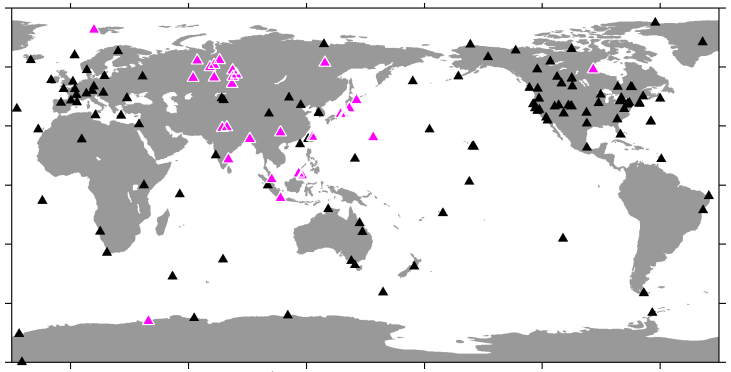
テーマ代表：丹羽 洋介
（国立環境研究所）

実施期間：2021年度 ― 2023年度

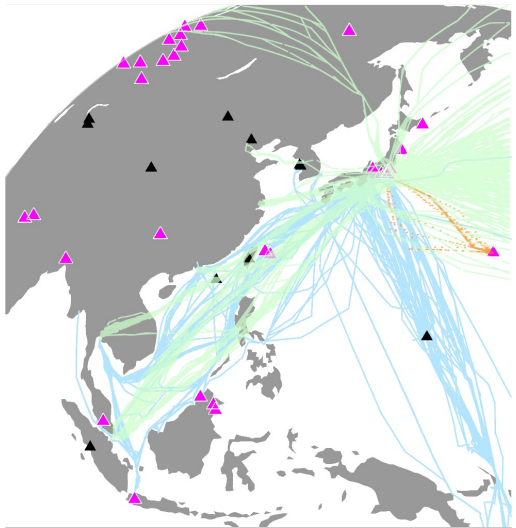
サブテーマ１代表：丹羽 洋介（国立環境研究所）
サブテーマ２代表：遠嶋 康徳（国立環境研究所）
サブテーマ３代表：石井 雅男（気象庁気象研究所）

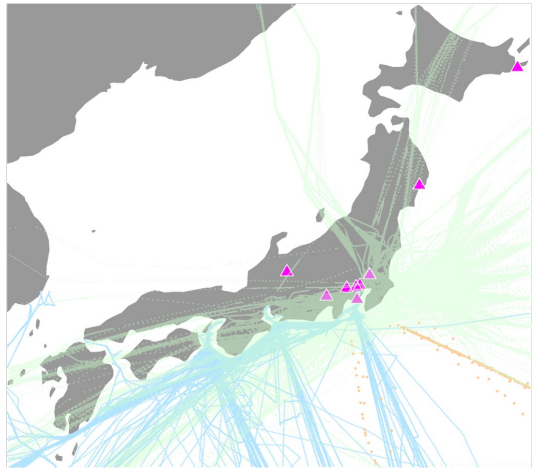
1. はじめに（研究背景等）

- パリ協定のもとで進められる温室効果ガス（GHG）排出削減には「最良の科学」に基づく評価が必要
- 大気観測から大気輸送モデルを用いてGHGフラックスを推定する「トップダウン・アプローチ」手法
- 実際の単位となりうる地域、国、大都市といったスケールでの研究は世界的にも日が浅く、早急に進める必要がある
- 効果的な削減に結びつけるには、継続的で速報性のある観測・解析体制が必要
- 環境研究総合推進費（2-1701）を発展させて、日本の大都市圏をも対象とするマルチスケールのGHG収支について大気観測をもとに解析を行っていく
- 最も経済発展が著しく排出が大きいアジアも対象
- 環境研究総合推進費（2-1710）など、アジアで最も広く展開する我が国の観測網を最大限に活用
- さらなる効果的な観測 、高解像度モデル、日本近海の大気−海洋CO_2交換量（より精緻なベースライン）の評価が必要



世界・アジア・日本のCO_2観測網
（▲は日本の機関による観測点）





＋日本の船舶、航空機観測網

2. 研究開発目的

- 大気輸送モデルの高解像度化と大都市や国・地域におけるGHG吸収・排出推定を行う手法の確立
- 今後の有効な観測展開について提案
- アジア・太平洋地域での大気観測データの継続的な取得体制および速報性のある整備体制の構築
- 日本近海の海洋CO_2分圧や大気・海洋間CO_2交換の評価の精緻化

3. 研究目標及び研究計画

全体目標

大気観測とモデル解析により、大都市から全球に至る様々なスケールのGHG収支について、スピーディに監視・報告できる体制を構築し、経年変動や大小様々なスケールの炭素収支メカニズムの理解を深化させる。また、そのために必要な観測体制について、新たな評価手法を確立し、提案する。

サブテーマ１「大気モデルを用いた観測体制検討とGHG収支評価」

- CO_2およびCH_4の全球長期（~30年）逆解析
- 大都市からの排出量推定のための高解像度シミュレーション（14km）
- 観測データのインパクト評価、有効な観測展開の提案

サブテーマ２「地上観測・航空機による大気中のGHG動態の把握」

- 都市域からのGHG排出の把握のための大気観測システムの開発
- 同位体・多成分観測に基づく起源分離・放出量変動推定
- マルチスケール大気観測データの迅速な整備体制の構築

サブテーマ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」

- 縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋pCO_2の分布・変動のデータプロダクトの作成
- 日本近海・北西太平洋域及び全球海洋におけるCO_2収支のデータセットを構築

3. 研究目標及び研究計画

4. 研究開発内容

GST-1

テーマ３

テーマ２

GHGレポート

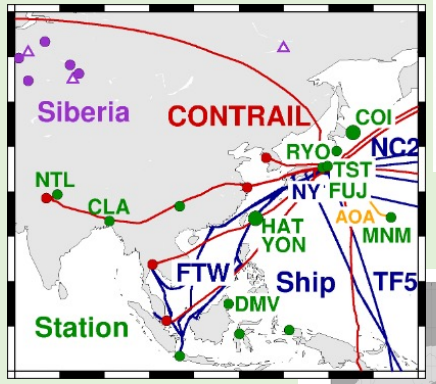
フラックス
データ

相互
比較

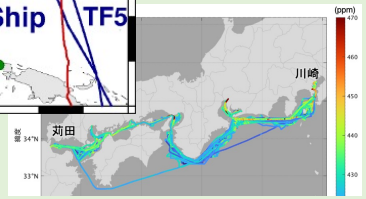
サブテーマ２

• 簡易設置型高精度大気中 GHG観測システムの開発・新規観測開始

• アジア太平洋域観測
• 同位体・多成分観測



• 内航船観測開始



• データ即時提供を可能とする体制構築
• データベース（NIES/GED, WDCGG）からの公開

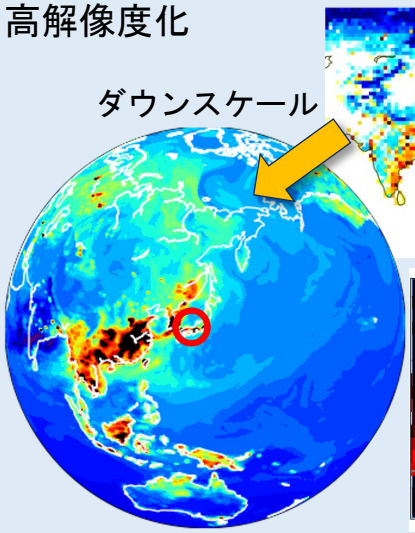
観測
データ

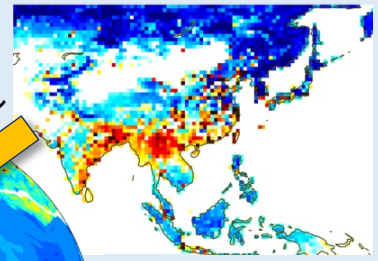
観測提案

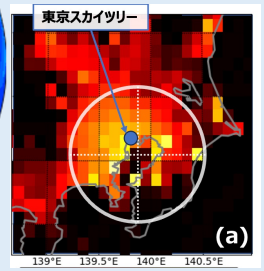
サブテーマ１

• NISMON-CO_2/CH_4の全球逆解析
• 高解像度化

ダウンスケール







• 高解像度NICAM-TMのCO_2シミュレーション（14km)による東京大都市圏CO_2放出量の推定

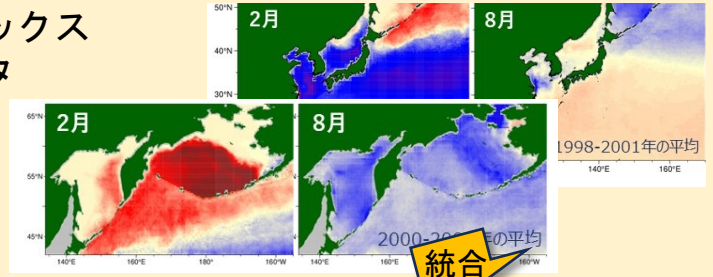
• 日本が実施する観測のインパクト評価
• モデル解析をもとにした新たな観測展開の提案

フラックス
データ

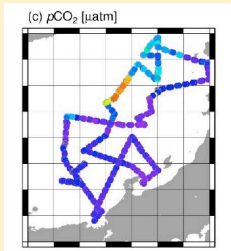
検証

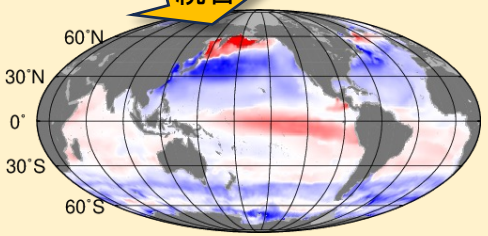
サブテーマ３

• 縁辺海pCO_2, フラックスプロダクト
• 全海洋データとの統合



統合

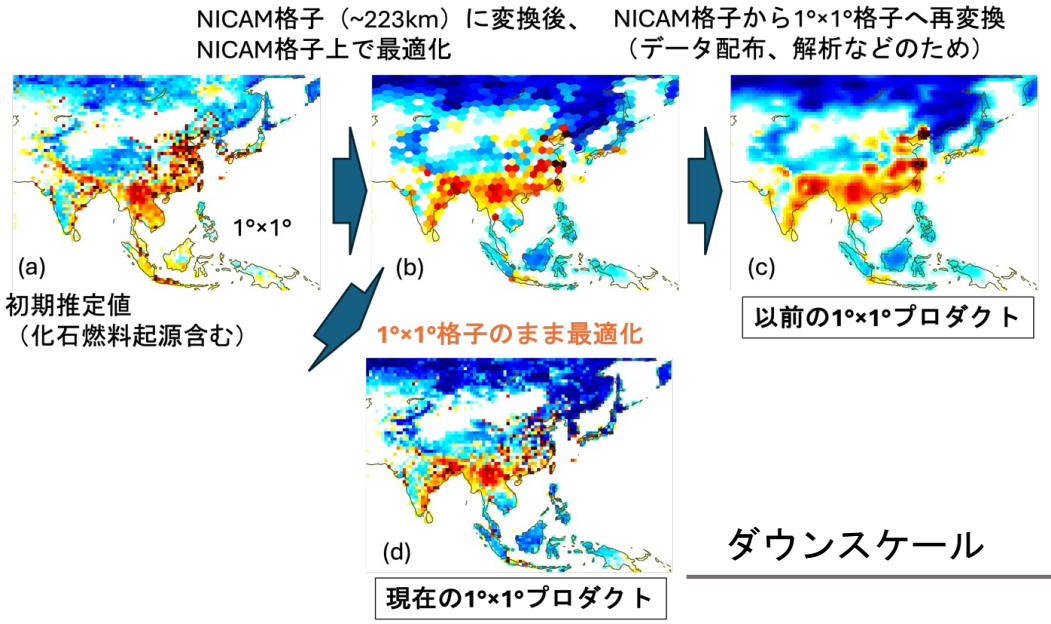




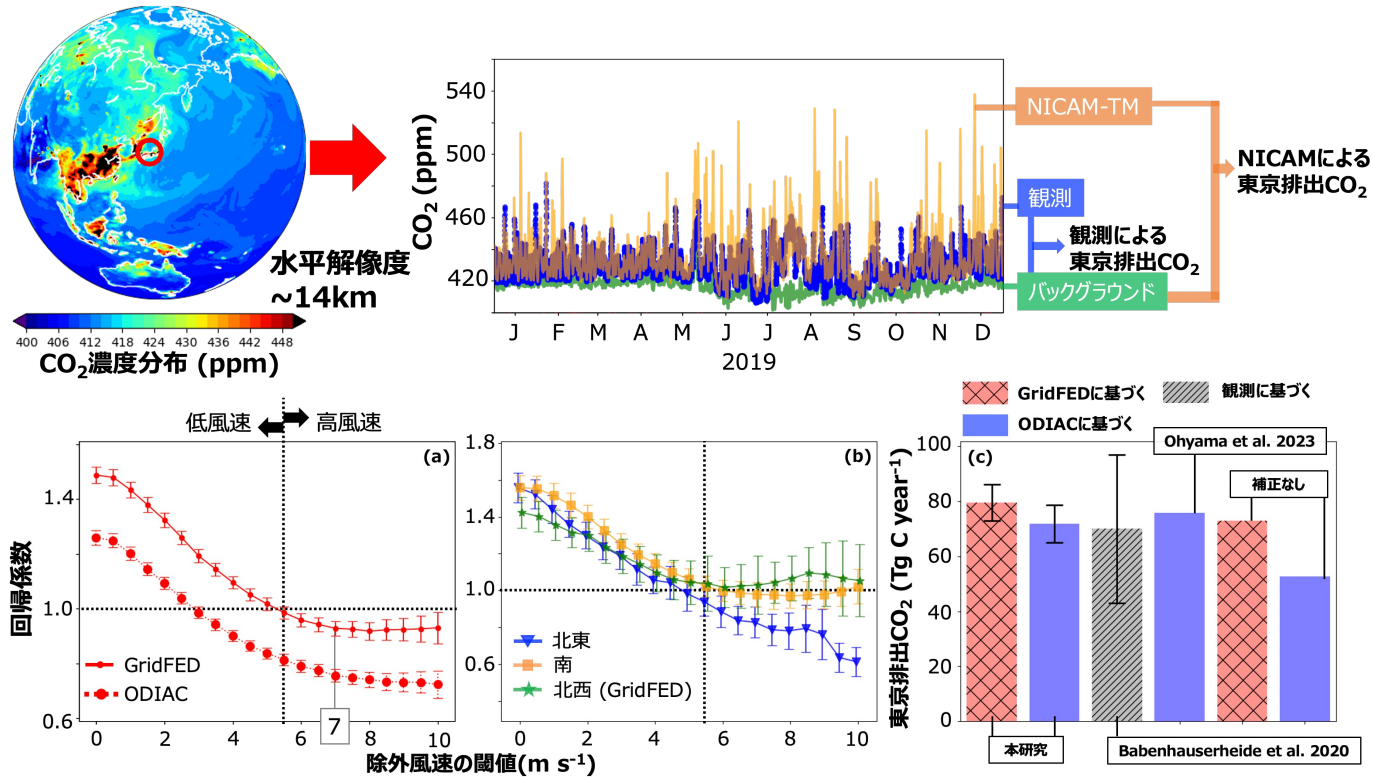
• 日本海における冬季の航走観測
• GOSATを利用した表面大気中CO_2濃度分布の最適化
• 太平洋における海洋CO_2フラックスデータと海洋大循環・生物地球化学モデルの相互比較

5. 結果および考察 サブテーマ１

NICAM-TM/NISMONを用いた全球から大都市スケールまでをカバーする解析システムの構築



NISMON逆解析とNICAM-TM高解像度計算を整合的に接続



NISMON-CO_2/CH_4の高度化により、従来よりも高解像度（1°×1°）で長期（~30年）の逆解析が可能に

(Niwa et al., PEPS 2022)

⇒ Global Carbon Project のCO_2/CH_4統合解析に貢献

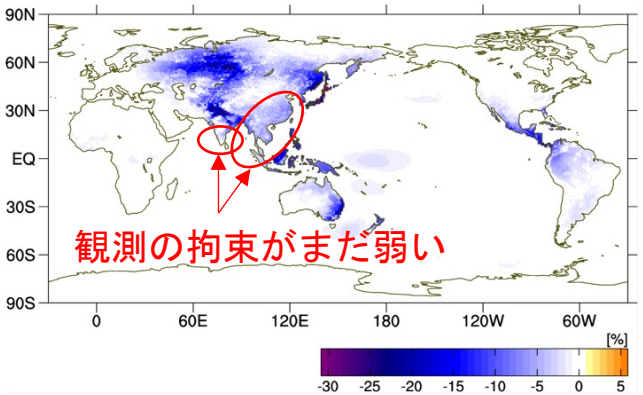
(Friedlingstein et al., 2022a,b, ESSD 2023)

高解像度NICAM-TM（~14km）にタグ付きトレーサを導入することにより、サブ２のスカイツリー観測データから東京大都市圏のCO_2放出量を推定することに成功

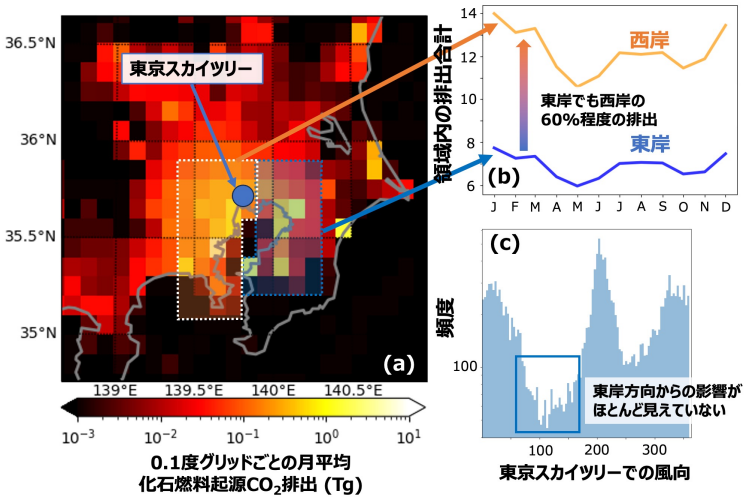
(Yamada et al., submitted)

5. 結果および考察 サブテーマ１

NICAM-TM/NISMONを用いた新規観測（アジア太平洋、東京）の提案



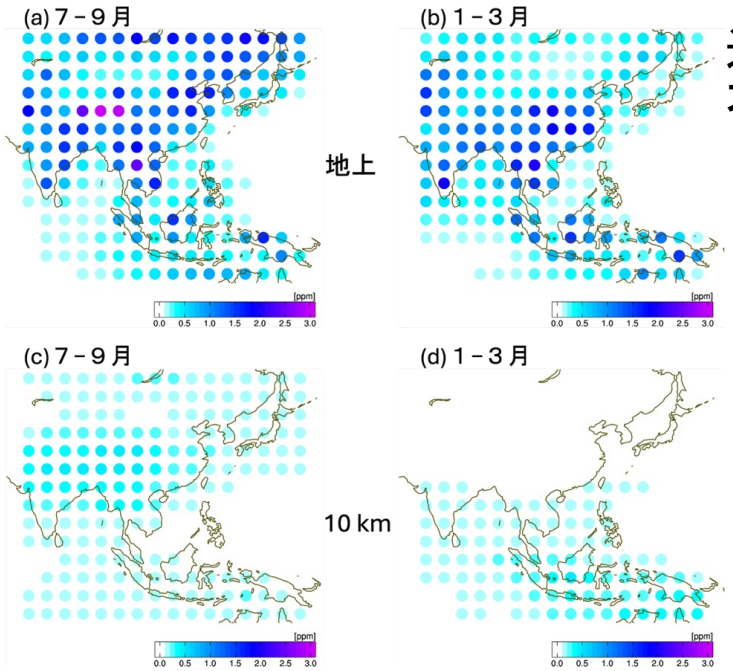
日本の機関が実施する観測のCO_2逆解析におけるインパクトの評価



東京大都市圏CO_2放出量の推定精度を向上させるための新規観測の検討

⇒ 東京湾東岸のシグナルを補足する千葉を選定

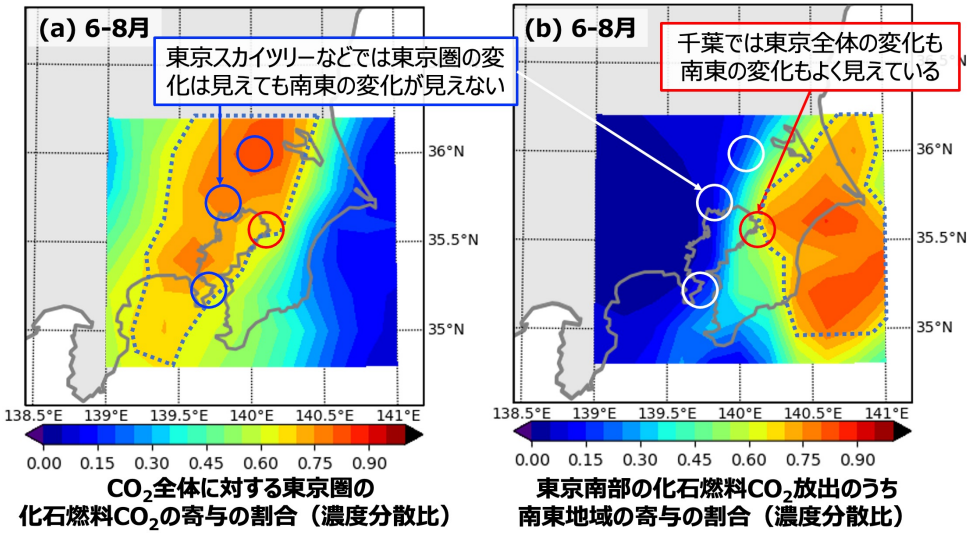
⇒ サブ２で新規観測



逆解析後のCO_2濃度の不確定性評価（新規手法）

アジア沿岸域、上空の観測データの有効性を定量的に示した

⇒ 中東航路（船舶）における新規観測（次期推進費S-22-1）



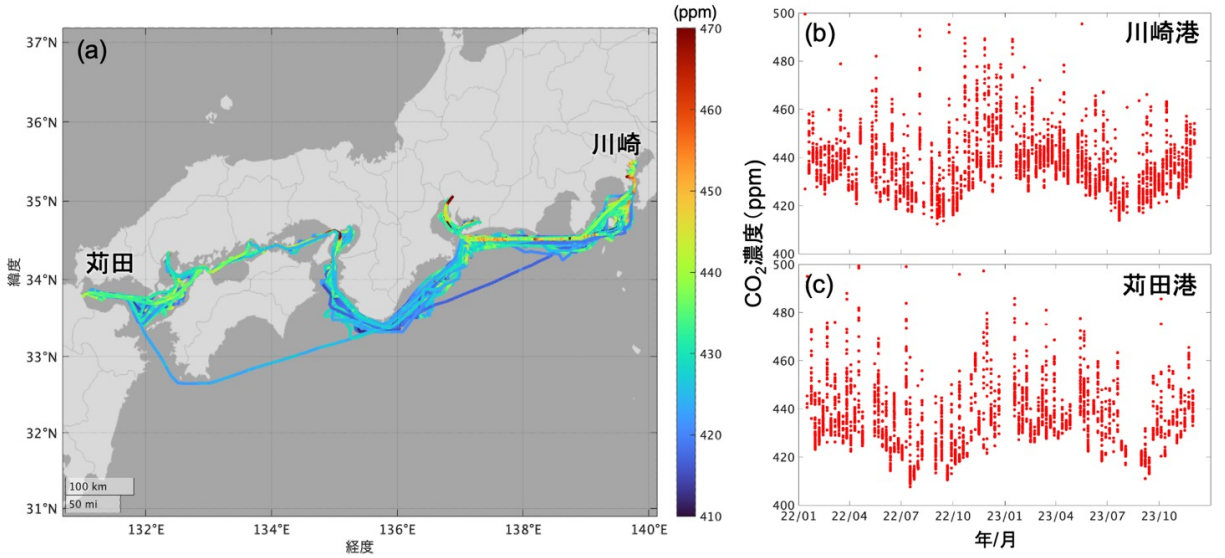
5. 結果および考察 サブテーマ２

大都市GHG排出量を推定するための装置開発、新規観測の開始

簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発。安定した分析に成功。バッテリ駆動のため、観測場所の制限が非常に小さい。

サブ１での解析結果を受け、千葉大学西千葉キャンパスにて観測を開始（2023年8月）

CO_2濃度について既存観測（東京スカイツリー）とベースラインが一致していることを確認

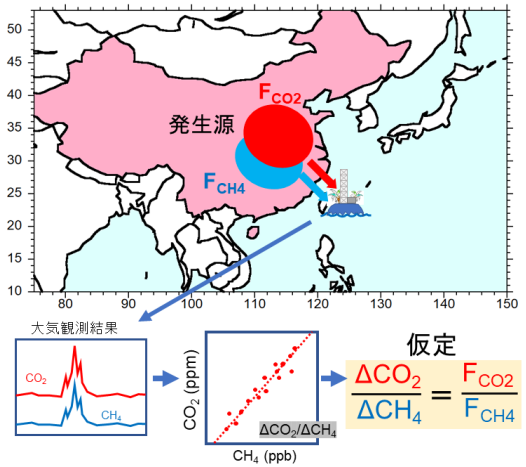


１週間で往復する自動車運搬船を使った観測を2022年1月に開始

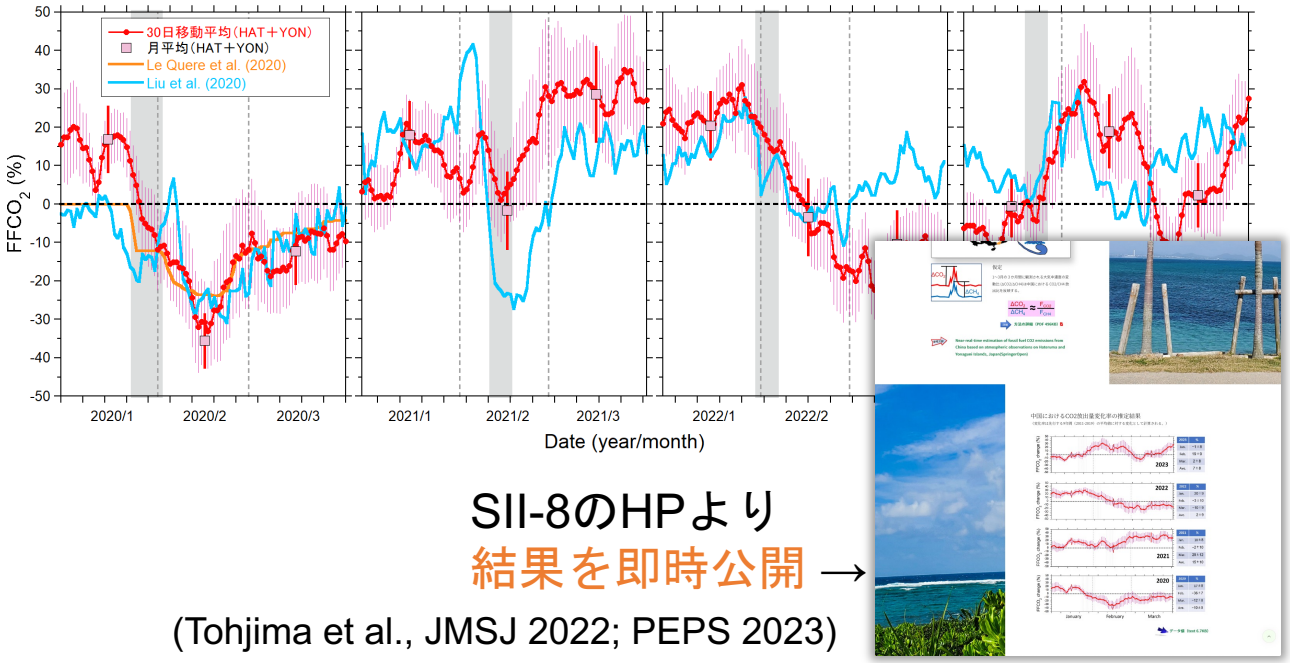
東京大都市圏だけでなく、中部、関西、中国地方の大都市に対しても、継続的にGHG排出量を検証するための観測データ取得が可能に

5. 結果および考察 サブテーマ２

CO_2/CH_4変動比による中国CO_2排出量変化監視・$^{13}CH_4$観測によるCH_4の発生源推定

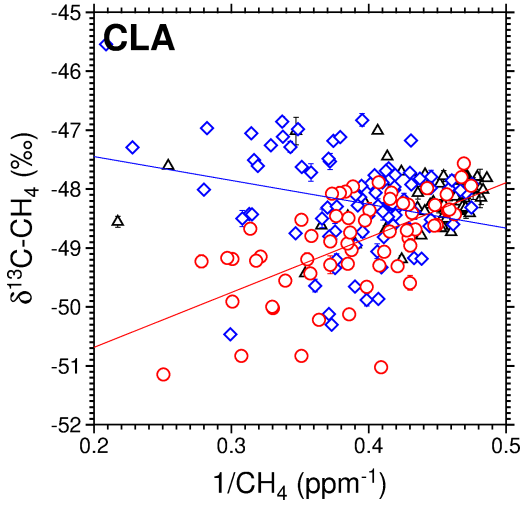


大気中CO_2とCH_4の短期変動成分の変動比から中国における化石燃料起源CO_2の排出量の変化を準リアルタイムに推定する手法を開発。
2020年から2023年の1-3月の中国起源CO_2排出量の変化を推定。



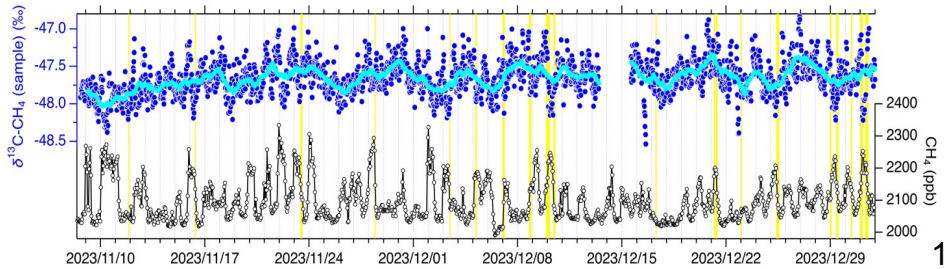
SII-8のHPより結果を即時公開 →

(Tohjima et al., JMSJ 2022; PEPS 2023)



インド、バングラデシュ、さらに中国の風下における$^{13}CH_4$観測により、これらの地域のCH_4発生源に関する情報が初めて観測から得られた

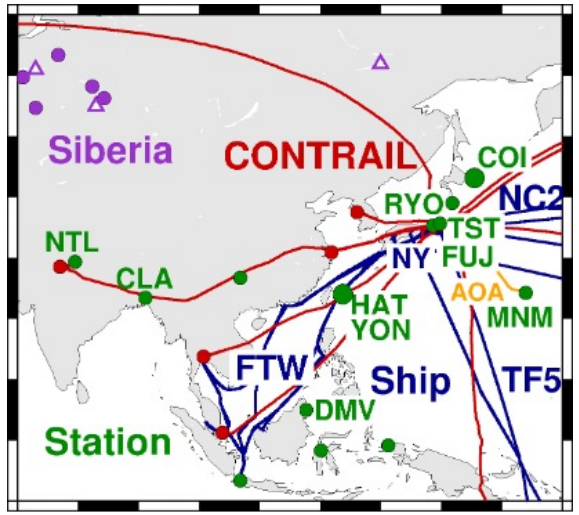
高精度$^{13}CH_4$連続的測定システムの開発
⇒発生源推定をより高時間分解能に



5. 結果および考察

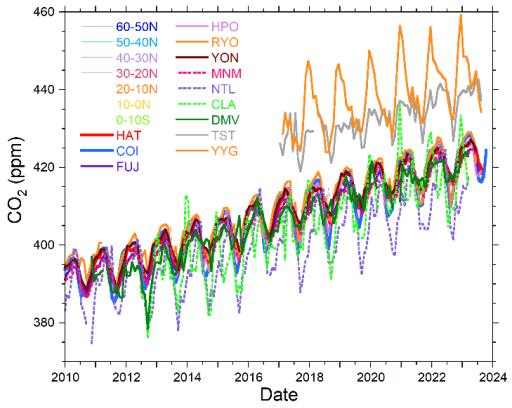
サブテーマ２

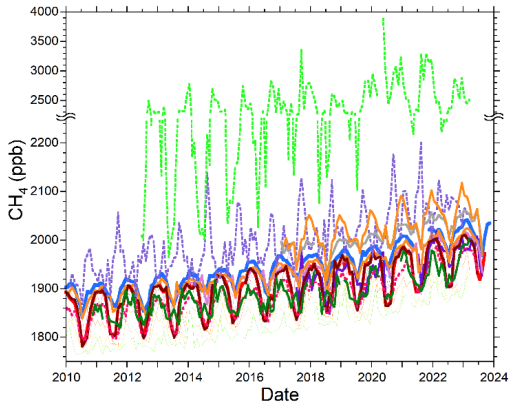
速やかなデータ提供体制の構築・データ公開



国環研および気象庁・気象研が取り組む各種GHGモニタリングを継続し、得られたデータを短期間（約6か月）に集約

⇒ サブ1で実施する逆解析に提供





データをWMO/GHG世界資料センター（WDCGG）や国環研の地球環境データベース（GED）を通じて一般に公開

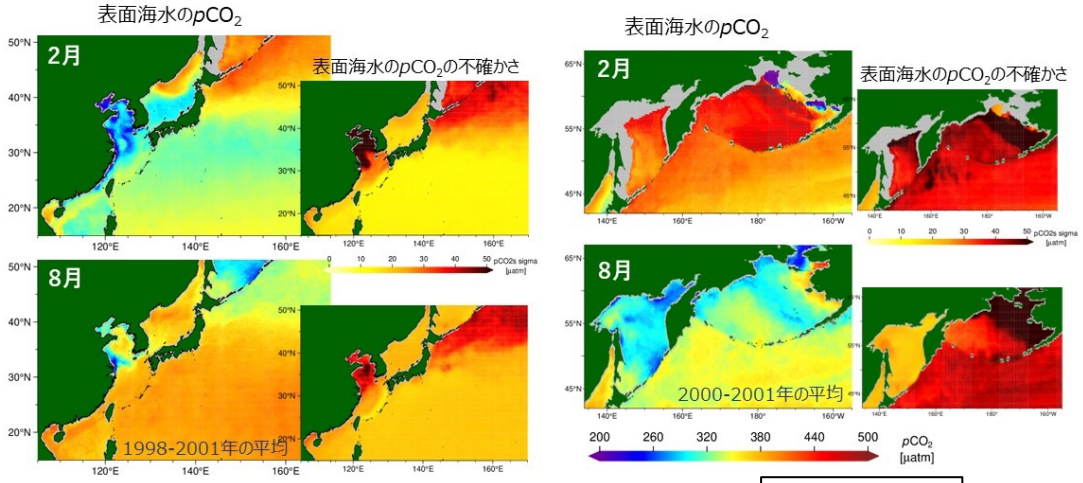
GEDから公開したGHGデータのリスト

公開日	データ内容	DOI:
2021-05-10	東京・代々木の大気CO_2濃度データ	10.17595/20210510.001
2021-11-09	波照間ステーションにおける大気CO_2濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.001
2021-11-09	波照間ステーションにおける大気CH_4濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.003
2022-03-01	インドのナイニタールの大気CO_2濃度	10.17595/20220301.001
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大気CO_2濃度	10.17595/20220301.002
2022-03-01	インドのナイニタールの大気CH_4濃度	10.17595/20220301.003
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大気CH_4濃度	10.17595/20220301.004
2022-03-01	インドのナイニタールの大気N_2O濃度	10.17595/20220301.009
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大気N_2O濃度	10.17595/20220301.010
2022-03-01	インドのナイニタールの大気SF_6濃度	10.17595/20220301.011
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大気SF_6濃度	10.17595/20220301.012
2022-03-01	インドのナイニタールの大気CO_2の炭素同位体比(C^{13}/C^{12})	10.17595/20220301.013
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大気CO_2の炭素同位体比(C^{13}/C^{12})	10.17595/20220301.014
2022-03-01	インドのナイニタールの大気CO_2の酸素同位体比(O^{18}/O^{16})	10.17595/20220301.015
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大気CO_2の酸素同位体比(O^{18}/O^{16})	10.17595/20220301.016
2022-08-05	西太平洋上の民間協力観測をベースとしたCO_2カラム平均濃度のデータセット	10.17595/20220805.001
2022-12-09	富士山頂の大気中CO_2濃度データ	10.17595/20170616.001
2023-02-08	波照間ステーションの大気CO_2濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.001
2023-02-08	波照間ステーションの大気CH_4濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.003
2023-04-25	日本－東南アジア航路の定期貨物船(Trans Harmony 1)による洋上GHGガス濃度	10.17595/20230425.001
2023-06-30	波照間ステーションの大気CO_2濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.001
2023-06-30	落石岬ステーションの大気CO_2濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.002
2023-06-30	波照間ステーションの大気CH_4濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.003
2023-06-30	落石岬ステーションの大気CH_4濃度の連続観測データ	10.17595/20160901.004
2023-07-25	CONTRAILフラスコサンプリングによる太平洋上空の大気微量気体データ（速報値）	10.17595/20220722.001
2023-07-25	CONTRAILフラスコサンプリングによる太平洋上空の大気微量気体データ	10.17595/20190828.001
2023-07-25	CONTRAILフラスコサンプリングによる大気微量気体データ	10.17595/20230725.001
2023-07-25	CONTRAILフラスコサンプリングによる大気微量気体データ（速報値）	10.17595/20230725.002
2023-08-30	落石岬で採取された大気試料のO_2/N_2比とCO_2モル分率	10.17595/20230830.001
2023-08-30	波照間島で採取された大気試料のO_2/N_2比とCO_2モル分率	10.17595/20230830.002
2023-08-30	南鳥島で採取された大気試料のO_2/N_2比とCO_2モル分率	10.17595/20230830.003
2023-08-30	太平洋域を航行する貨物船上で採取された大気試料のO_2/N_2比とCO_2モル分率	10.17595/20230830.004

5. 結果および考察

サブテーマ３

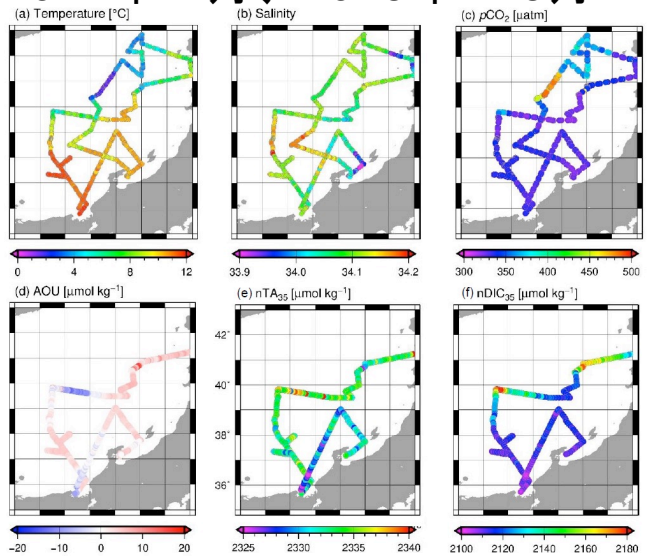
北太平洋縁辺海におけるpCO_2^{sw}の診断モデルとデータプロダクトの統合



SOCATと気象庁の最新の航走観測データ ←
を用いたpCO_2^{sw} 診断モデルの作成

地球システムモデルと組み合わせた pCO_2^{sw}将来予測も実施
（Kosugi et al., Mar. Chem. 2023）

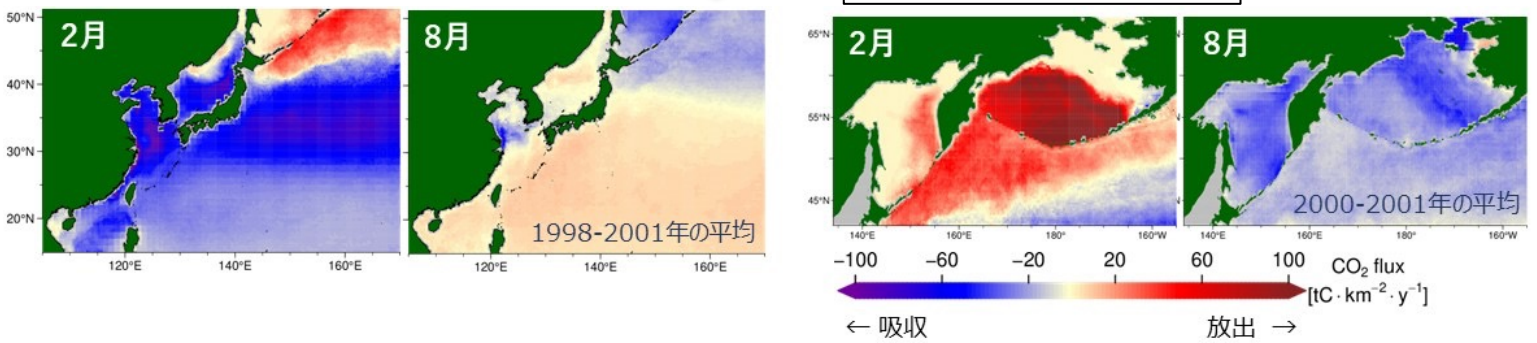
2022年２月、2023年２-3月



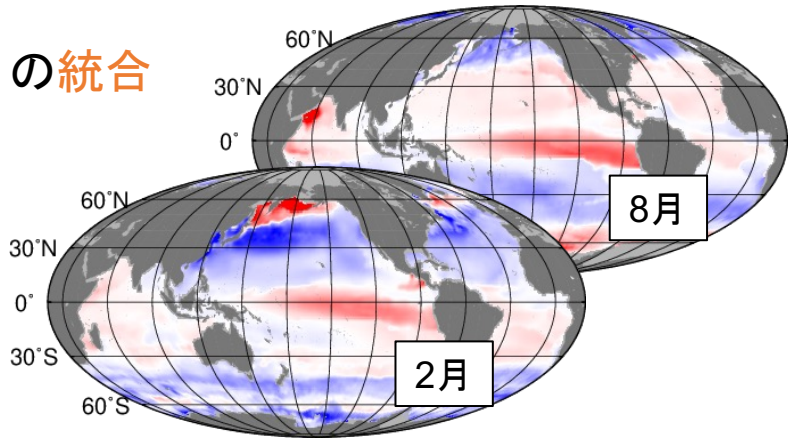
GOSATを使った地表大気CO_2濃度（$pCO2^{air}$）の最適化
(Maki et al., SOLA 2023)

pCO_2^{sw}

air-sea CO_2 flux



全海洋データとの統合



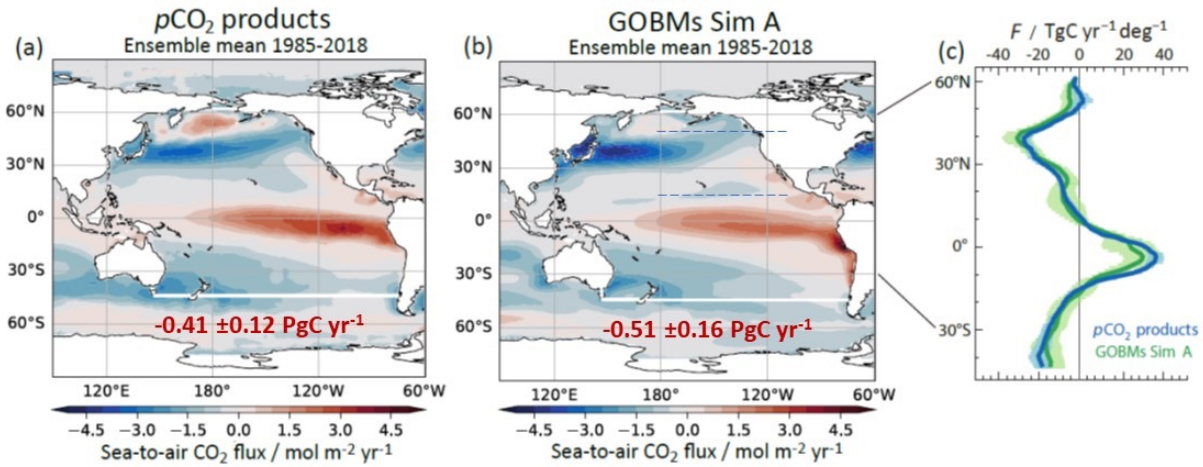
東シナ海　　＋　日本海　　：-43.8 Tg C yr^{-1}（吸収）
オホーツク海＋　ベーリング海：　12.6 Tg Cyr^{-1}（放出）

気象庁ウェブサイトより公開
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/mar_env/results/co2_flux/animation/index.html

5. 結果および考察

サブテーマ３

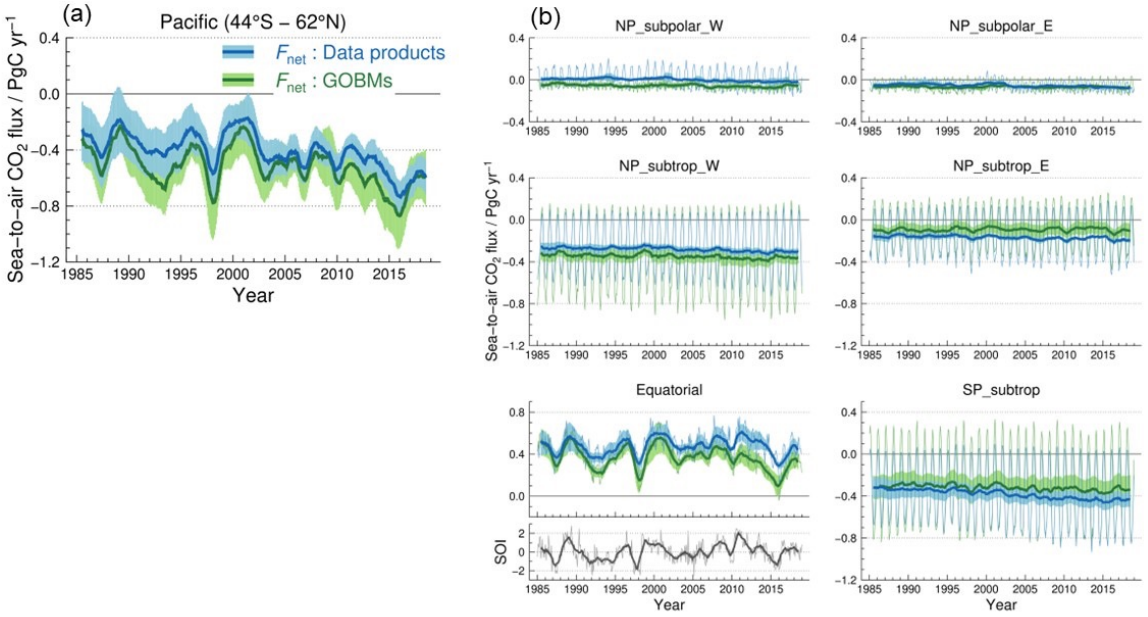
太平洋のCO_2フラックスに対する診断モデルと全球海洋生物地球化学モデルの相互比較



Global Carbon ProjectのRECCAP2（領域別炭素収支統合解析）の 太平洋パートをリード

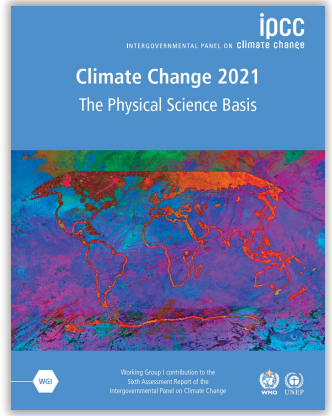
診断モデルによるデータプロダクト7個（サブ3によるプロダクトを含む）と全球海洋生物地球化学モデル(GOBMs)の11個、それぞれのアンサンブルを相互比較

⇒両者のアンサンブル平均値は、アンサンブル標準偏差の範囲内で一致することを見出した



太平洋全体では、どちらもCO_2吸収が増加傾向
平均変化速度もほぼ一致（海域毎には異なる）

サブ3の研究分担・協力者による成果も含まれる広域の大気・海洋間CO_2フラックスの評価はIPCC AR6の第5章で大きく取り上げられた。本研究によるAR7への貢献も期待。



6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

自己評価:５点　－　目標を上回る成果をあげた

マルチスケールでのスピーディーなGHG監視・報告体制の構築や新規観測提案などは難易度の高い目標。
それらを達成するとともに、実際に２つの観測の開始に繋がったことは大きな成果

目標

大気観測とモデル解析により、大都市から全球に至る様々なスケールのGHG収支について、スピーディに監視・報告できる体制を構築し、経年変動や大小様々なスケールの炭素収支メカニズムの理解を深化させる。また、そのために必要な観測体制について、新たな評価手法を確立し、提案する。

達成状況

サブ１による即時的な逆解析や高解像度NICAM-TMとタグ付きトレーサー法を用いた大都市圏からのCO_2放出量推定、サブ２の観測データを用いた準リアルタイムの中国CO_2放出量変化の推定、サブ３の迅速な日本近海・北西太平洋域及び全球海洋におけるCO_2収支のデータセット構築により、全球、中国、日本周辺、東京大都市圏といった様々なスケールにおいて、スピーディにGHG収支を監視・報告できる体制を構築することができた。また、サブ１から、アジア太平洋地域、また、東京大都市圏において、有効な新規観測の提案を行い、観測開始に繋げることができた。

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

自己評価：５点　－　目標を上回る成果をあげた

国際的な研究活動に積極的に参加し、重要度の高いデータ・知見の創出を行うことができた。

目標

観測・解析について、速報性を重視した体制を整え、テーマ３で作成するレポートや国際的なGHG収支解析プロジェクトにデータを提供し、グローバルストックテイクに資する科学的根拠を蓄積して環境政策に貢献する。

達成状況

観測やフラックスデータの作成、逆解析などを通して、即時的なGHGフラックスの推定する体制を整え、そのプロダクトをテーマ３でとりまとめるGHGレポートにインプットした。このレポートはUNFCCCに提出されるなどグローバルストックテイクに貢献した。また、それぞれのGHG収支プロダクトはGlobal Carbon Projectなどの国際的な研究活動にも活用され、環境政策策定の基礎となる科学的根拠となった。

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

すでに貢献した成果

- 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）の作成に利用された。

貢献が見込まれる成果

- テーマ３によってUNFCCCに提出された報告書を通して、本研究の成果が第１回GSTに活用されることが期待。
- 本研究で得られたデータはGCPの全球・地域別の統合GHG収支解析に提供されている。これらGCPの統合解析は世界でもっとも参照されるランドマーク的な存在であり、IPCC報告書の当該分野において主要な知見のもとにもなっている。IPCC AR７にも反映される見込みである。
- 本研究で実施している観測は、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、これをもとに得られる科学的知見は、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。
- 本研究で開始した内航船による観測データはGOSAT-GWの評価・検証データとしても利用される。

7. 研究成果の発表状況

テーマ１の主要な成果

- Niwa, Y., Ishijima, K., Ito, A., Iida, Y. (2022) Progress in Earth and Planetary Science 9:42.　逆解析システムの高解像度化
- Tohjima, Y., Niwa, Y., Tsuboi, K., Saito, K. (2022) Journal Meteorological Society of Japan, 100(2), 437-444.
- Tohjima, Y., Niwa, Y., Patra, P. K., Mukai. H., Machida, T., Sasakawa, M.,Tsuboi, K., Saito, K., Ito, A. (2023) Progress in Earth and Planetary Science, 10:10.

　CO_2/CH_4変動比による中国CO_2排出量変化監視

- Kosugi, N. Ono, H., Toyama, K., Tsujino, H. Ishii, M. (2023) Marine Chemistry, 255, 104290.　診断モデルを使ったpCO_2^{sw}将来予測
- Maki, T., Kondo, K., Ishijima, K., Sekiyama, T. T., Tsuboi, K., Nakamura T. (2023) SOLA 19, 157-164. GOSATを使った$pCO2^{air}$の最適化
- Friedlingstein, P., et al. (2022) Earth System Science Data, 14, 1917–2005.
- Friedlingstein, P., et al. (2022) Earth System Science Data, 14, 4811–4900.
- Friedlingstein, P., et al. (2023) Earth System Science Data, 15, 5301–5369.

Global Carbon Project の CO_2 統合解析
サブ１、２、３の分担者が共著

成果の種別	件数
査読付き論文：	19
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	19
口頭発表（学会等・査読なし）：	30
「国民との科学・技術対話」の実施：	12
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	3