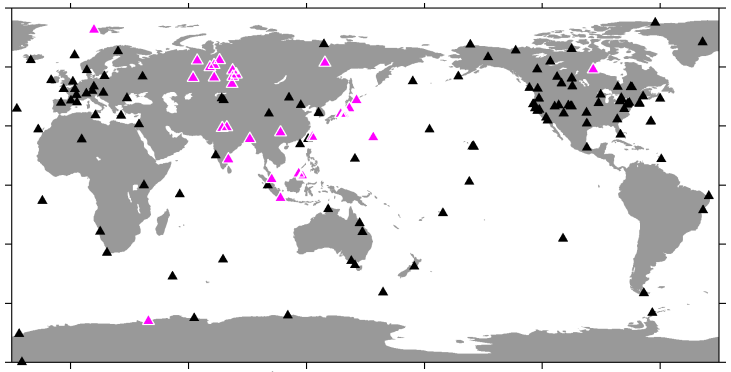
SII-8-1
大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価
（JPMEERF21S20810）

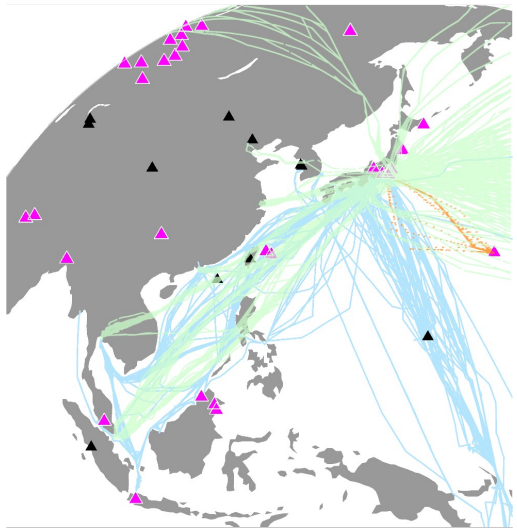
研究代表機関：国立環境研究所
研究代表者：丹羽 洋介
研究実施期間：令和３年度～令和５年度
研究分担機関：国立環境研究所、気象庁気象研究所

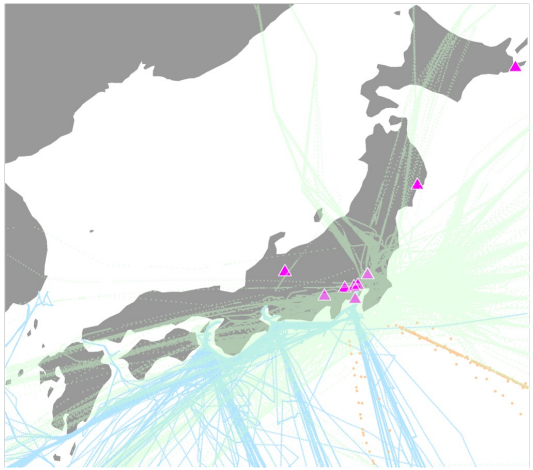
1. はじめに（研究背景等）

- 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 」

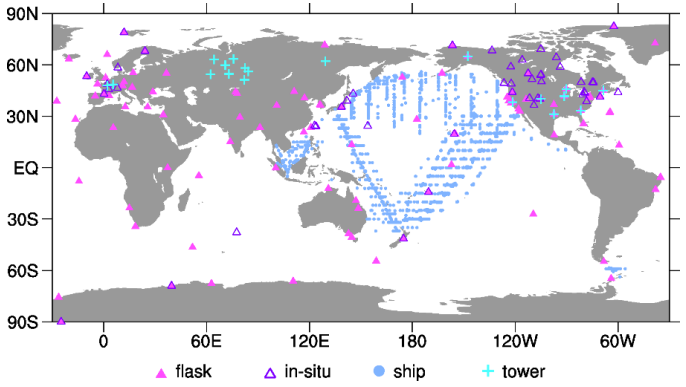
- 縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋pCO_2の分布・変動のデータプロダクトの作成
- 日本近海・北西太平洋域及び全球海洋におけるCO_2収支のデータセットを構築

3. 研究目標及び研究計画

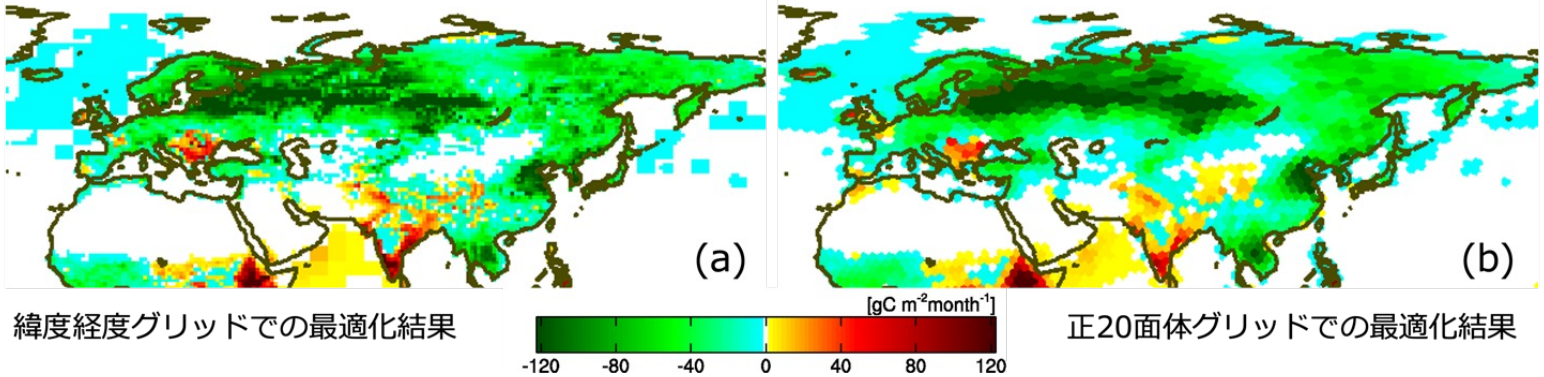
		2021年度	2022年度	2023年度
（サブ1）	• CO_2、CH_4の全球長期逆解析	解析(240km)		解析(120km)
	• 高解像度シミュレーション	14kmタグ付き実験	解析	排出量推定
	• 観測展開の検討	評価手法の検討	OSSEの実施	観測提案
（サブ2）	• スカイツリー解析	解析・排出量推定		
	• 簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発	設計・機器選定	システム完成・OSSEの検討	観測実施
	• 内航船観測	観測開始・データ処理法確立	解析	排出量推定
	• メタン同位体・多成分観測	広域サンプリング・$^{13}CH_4$による発生源推定・多成分解析		
	• $^{13}CH_4$測定システムの開発	性能評価	ガス導入法の検討	観測開始
	• アジアGHG動態把握	観測継続・品質維持・データ解析・動態把握		
	• データベース構築・公開	データ収集/整備・データベース構築・データ公開		
（サブ3）	• 縁辺海pCO_2データプロダクト作成	品質評価・船舶観測の実施・診断モデルの検証		
	• 海洋CO_2収支データセットの構築	GOSATを用いた大気CO_2濃度推定・解析の迅速化・データ提供		

4. 研究開発内容 /5. 結果及び考察（サブ１）

CO_2、CH_4の全球長期逆解析



サブ２を含む世界中の最新（~直近6ヶ月前まで）の観測データを収集し、CO_2とCH_4の逆解析を実施



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

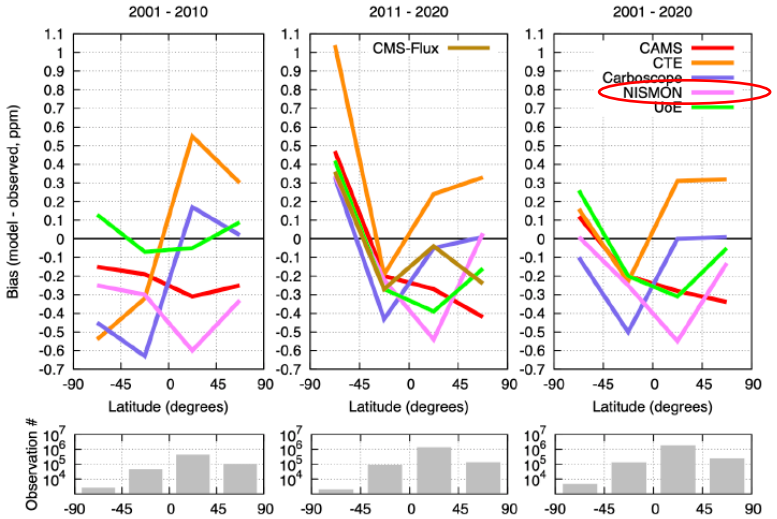
(Niwa et al., PEPS, 2022)

グリッド変換を最適化に導入

⇒ 任意の緯度経度グリッド上でフラックス推定が可能に

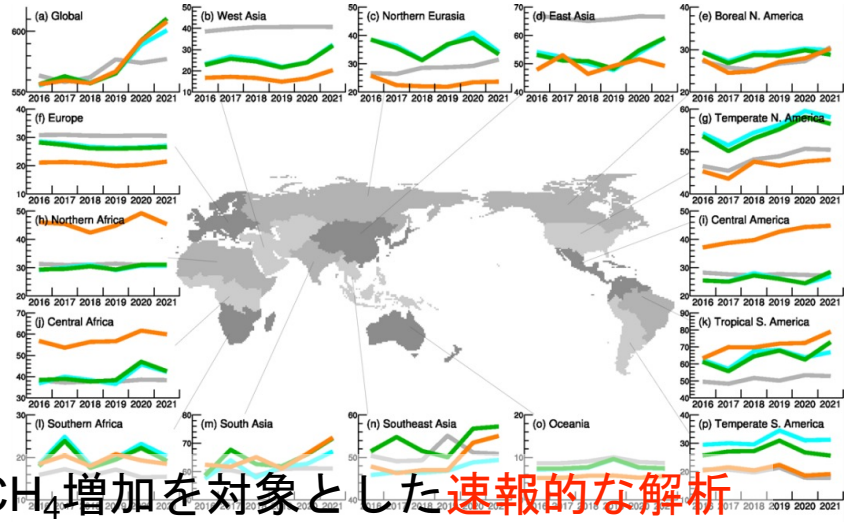
⇒ 高解像度（1x1）のフラックスプロダクト (大気モデルは~240km解像度のまま)

⇒ 地域別・国別の収支評価の精度向上



Global Carbon Project (GCP)による統合解析"Global Carbon Budget 2021"へデータを提供

(Friedlingstein et al., ESSD, 2022)



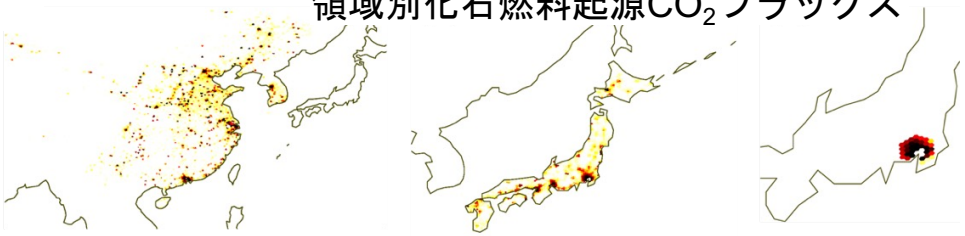
2020-2021年のCH_4増加を対象とした速報的な解析

GCPのGlobal Methane Budget 2022への参加

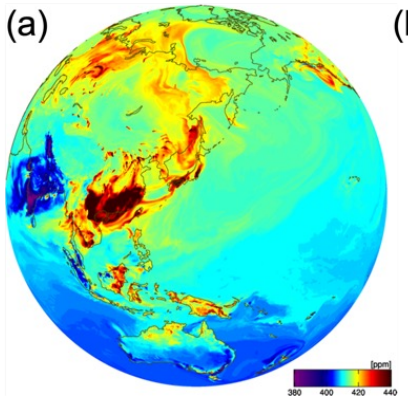
4. 研究開発内容 /5. 結果及び考察（サブ１）

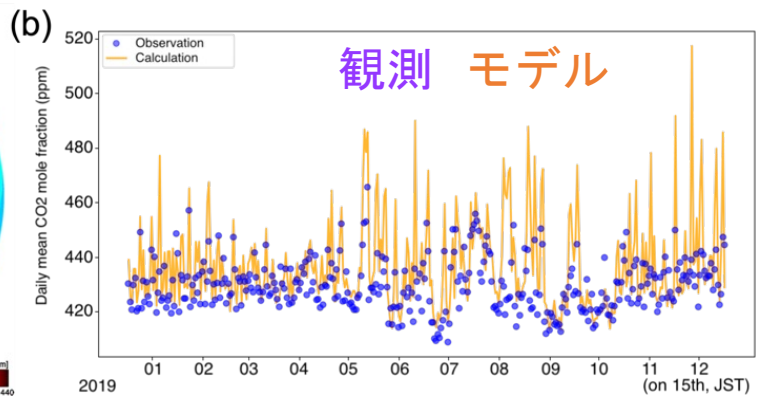
高解像度シミュレーション

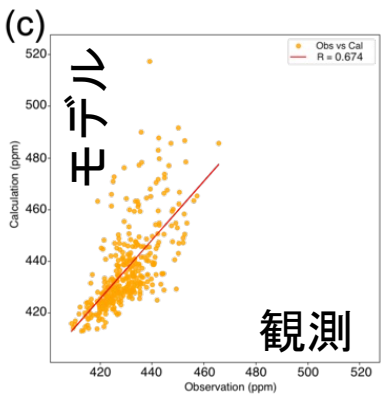
領域別化石燃料起源CO_2フラックス



タグ付きシミュレーションの実施(14km)
（起源別 x 領域別）

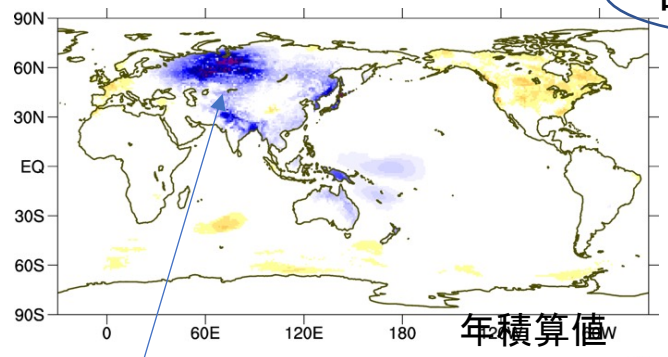






気象データ（JRA-55）用いたナッジング実験
⇒ 東京スカイツリー観測との比較解析の着手

観測展開の検討



シベリア観測による誤差減少
~70%

計算負荷大

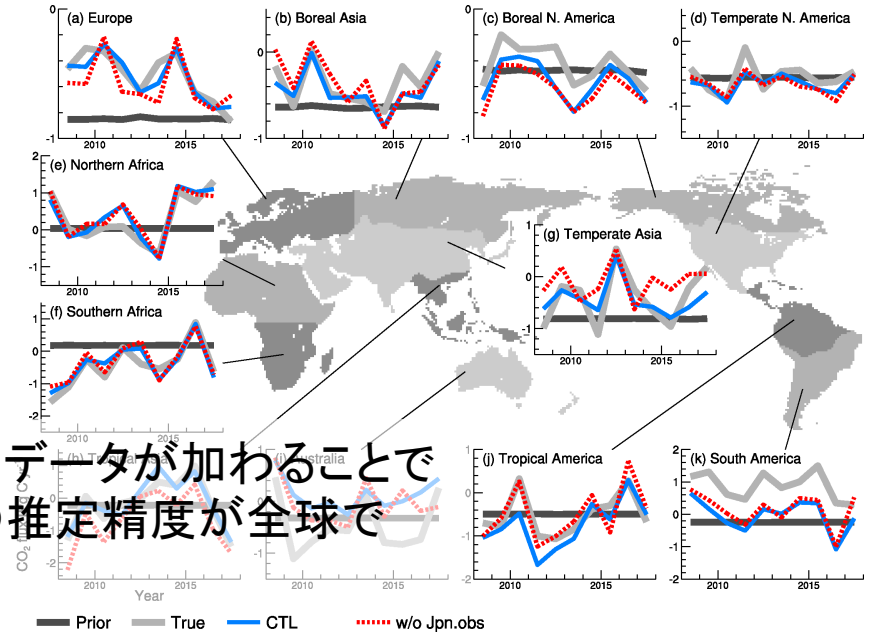
両者を組み合わせて評価

実験設定によって評価が異なる

日本の観測が加わった際の解析誤差減少率（理論的誤差の減少割合）

独自の手法（Niwa and Fujii, 2020）による

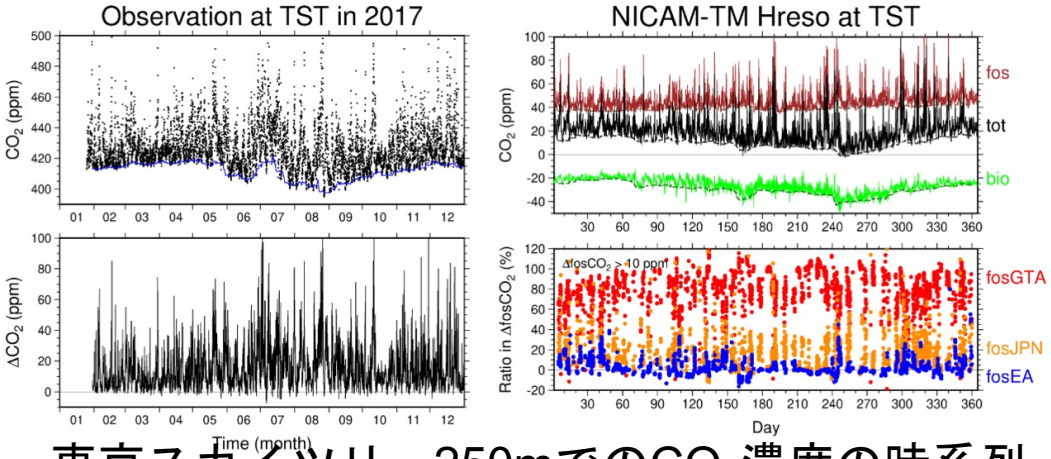
CO_2逆解析の疑似観測実験（OSSE）



日本の観測データが加わることでフラックスの推定精度が全球で15%向上

4. 研究開発内容 /5. 結果及び考察（サブ２）

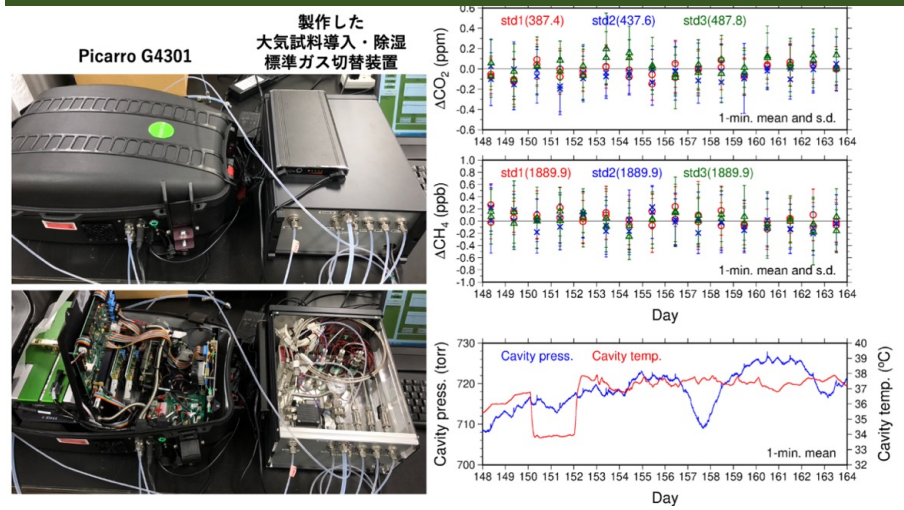
スカイツリー解析



観測されるCO$_2$の短期変動に対する化石燃料起源CO$_2$の地域別寄与率：関東圏起源で80～100%

東京スカイツリー250mでのCO$_2$濃度の時系列

簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発



バッテリで駆動可能。標準ガス導入の頻度を少なくしても安定した分析が可能。

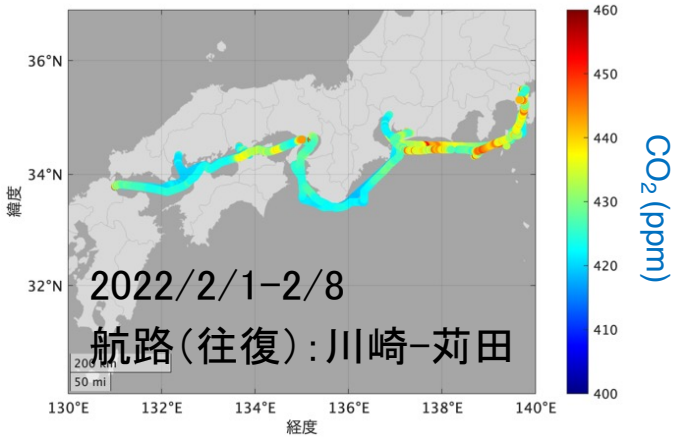
⇒ 観測場所の制限が非常に小さい

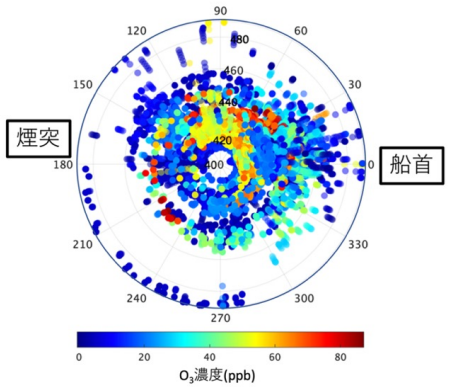
装置の外観と試験結果

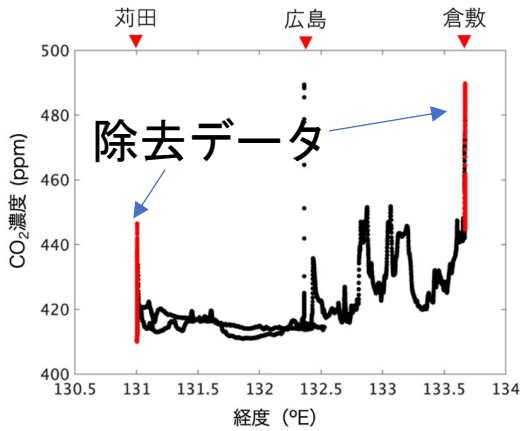
内航船観測

2022年1月：本観測開始

関東南部～九州北部間を1週間で1往復の高頻度観測



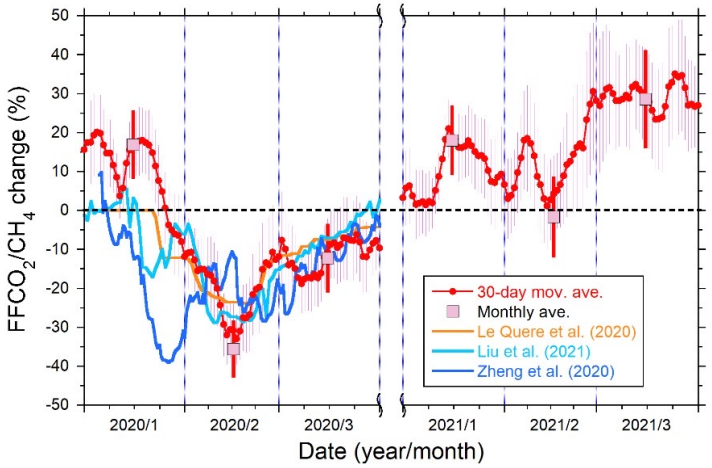




データ処理法の確立：風向90°～280°、CO$_2$濃度480 ppm以上、オゾン濃度10 ppb以下の空気塊をここでは自船排煙空気塊と規定してデータ除去

4. 研究開発内容 /5. 結果及び考察（サブ２）

メタン同位体・多成分観測



化石燃料起源CO_2排出（対CH_4比）の変化の時系列

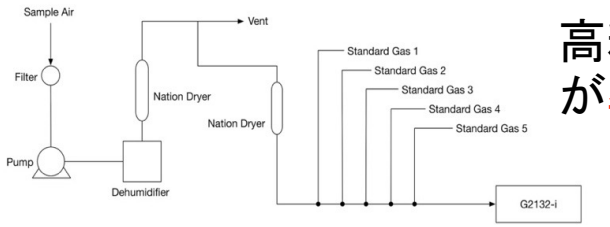
波照間島・与那国島のCO_2/CH_4観測を用いて中国CO_2排出変化の検出に成功 (Tohjima et al., JMSJ, 2022)

2021年の排出増加を検出
⇒ プレスリリース（2021/11/9）

早期検出手法の開発（論文準備中）

簡便で速報性に優れた手法
⇒ 常時モニタリングに

$^{13}CH_4$測定システムの開発

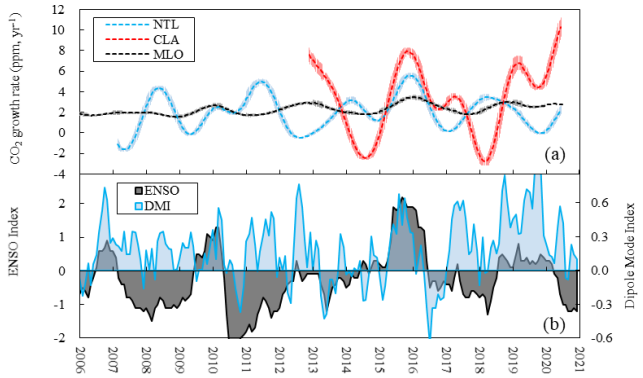


開発中の測定システム

高精度の $\delta^{13}C$測定が準連続的に可能に

アジアGHG動態把握/データベース構築・公開

インド・バングラデシュのデータ解析論文の出版
地球環境データベースよりデータを公開
観測結果の統合・整備と迅速なデータ公開に向けた体制構築

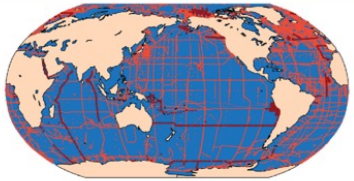


(Nomura et al., ACP, 2021)

4. 研究開発内容 /5. 結果及び考察（サブ３）

縁辺海pCO_2データプロダクト作成

glodap v2



· 全アルカリ度 (TA)，表面水温 (SST) & 表面塩分 (SSS)

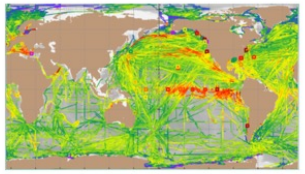
+

衛星観測による海面力学高度 (SSDH)

重回帰分析

TA = *f* (SSDH, SSS) (Takatani et al., JGR, 2014)

socat



· 表海水CO_2分圧(pCO_2), SST & SSS

· 全炭酸濃度 (DIC)

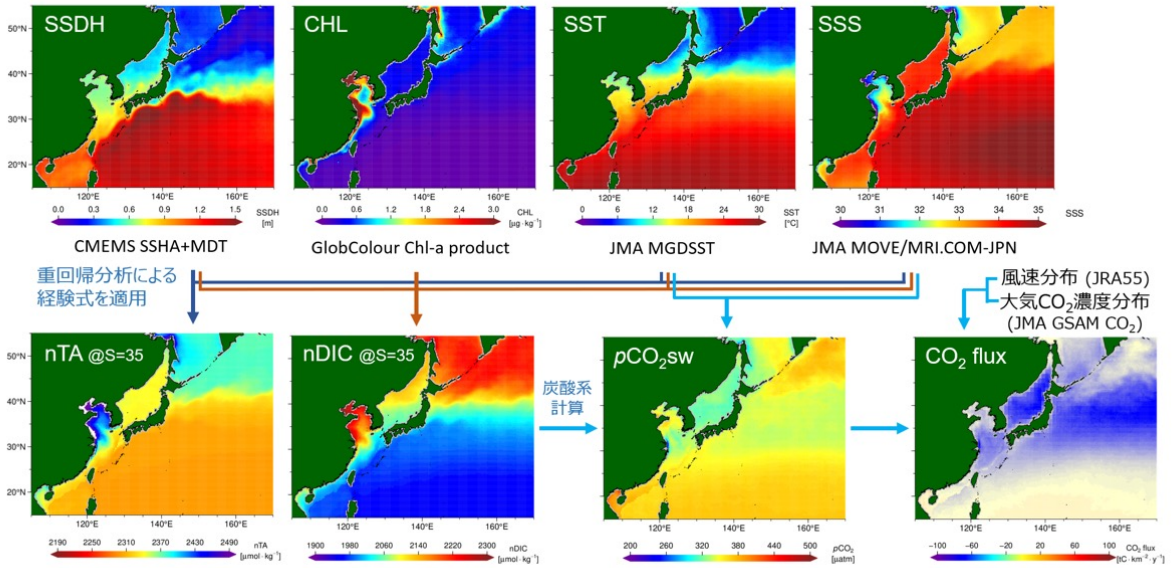
+

衛星観測によるSSDH とクロロフィル濃度 (CHL)
海洋データ同化による海洋混合層深度(MLD)

重回帰分析

DIC = *f* (*t*, SST, SSS, SSDH, Chl, MLD)

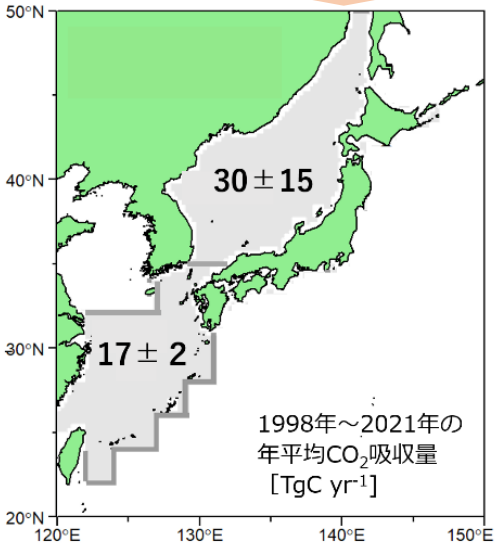
pCO_2
pH, Ω



海洋CO_2収支データセットの構築

評価

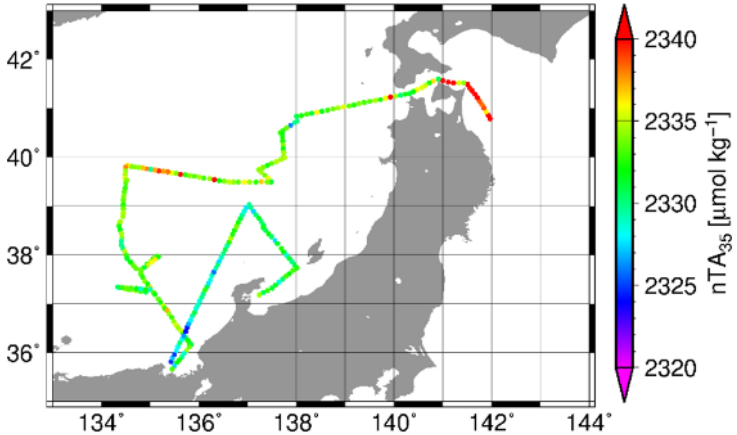
1998年～2018年の年
平均CO_2吸収量 (Tg C)



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

検証

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）



6. 研究の進捗状況と環境政策などへの貢献

【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

〇計画の進捗状況

・計画通り進展している。

低解像度モデルを用いたCO_2とCH_4の長期逆解析を実施し、GCPに提供を行うまでに至った。また、 観測データのインパクト評価や、高解像度実験にも着手し、サブ2と協働して順調に解析が進んでいる。

〇目標達成の見通し

・目標達成が可能と考えている。

CO_2やCH_4の長期逆解析の結果は、GCPでプロダクト間比較においても良好であり、さらなる高解像度化への目途もつきつつある。また、高解像度CO_2輸送実験においても、観測と比較可能なレベルでのシミュレーション結果が得られている。

6. 研究の進捗状況と環境政策などへの貢献

【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

〇計画の進捗状況

・計画通り進展している。

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のいずれにおいて当初計画の通り順調に進捗している。特に、離島での$\Delta CO_2/\Delta CH_4$比に基づく中国における放出量の早期推定手法の開発では、波照間島だけでなく与那国島での観測結果を追加することで、より信頼性の高い推定手法の構築の目処が立った。

〇目標達成の見通し

・目標達成が可能と考えている。

上記の通り、初年度の段階でほぼ計画通り順調に進捗していることから、当初計画で設定して目標を達成できるものと考えている。

6. 研究の進捗状況と環境政策などへの貢献

【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

〇計画の進捗状況

・計画通り進展している。

日本海と東シナ海を対象に、1998年から2020年まで月毎に、緯度1/4度、経度1/4度の水平分解能で、大気・海洋間のCO_2フラックスを推定し、データセットを作成した。

〇目標達成の見通し

・目標達成が可能と考えている。

海洋CO_2のデータベースGLODAPv2とSOCATを活用して、北西太平洋縁辺海を対象とした海洋炭酸系診断モデルの作成と、大気・海洋CO_2フラックスのマッピングを順調に進めており、NetCDFでサブテーマ1に提供できる体制も整えた。令和3年度は厳冬期にもかかわらず、日本海における航走全アルカリ度観測を、気象庁現業によるCO_2分圧の航走観測などとともに順調に実施できた。

さらに、大気CO_2濃度の逆解析システムに、地上CO_2観測データに加えてGOSATのCO_2衛星観測データを導入したほか、国際共同研究RECCAP2を通じて、多くの全球海洋大循環・物質循環モデルや海洋CO_2の診断モデルの出力を収集でき、それらの比較・検討も進めている。

6. 研究の進捗状況と環境政策などへの貢献

- 本研究で得られた観測データやGHG収支などの研究成果は、テーマ3によって、報告書「Bulletin of Multi-scale Emission of Greenhouse Gas Budgets」にとりまとめられ、国立環境研究所がオブザーバー機関となって“パリ協定に基づく第1回グローバルストックテイク（GST）への情報提供”として国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出した。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である。

- 本研究で得られた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は、Global Carbon Project (GCP)の全球・地域別の統合GHG収支解析へと提供しているが、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。今後もGCP統合解析は定期的に実施される予定であり、IPCC第7次評価報告書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。

- 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。

- 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。

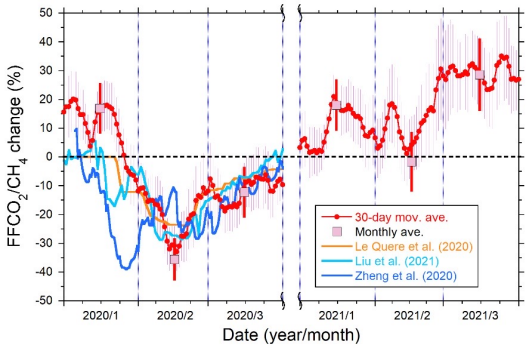
7. 研究成果の発表状況

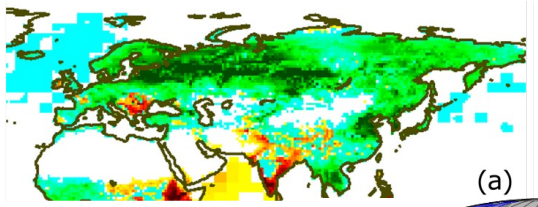
主要な科学的成果

Tohjima, Y., Y. Niwa, K. Tsuboi, and K. Saito: J. Meteor. Soc. Japan, 100-2, 437-444 (2022) (IF:2.2) Did atmospheric CO_2 and CH_4 observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO_2 reduction due to COVID-19 lockdown? https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021. **（サブ1、2）**

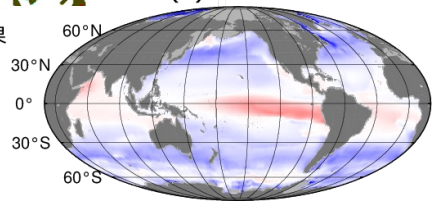
Niwa, Y., K. Ishijima, A. Ito, Y. Iida: Progress in Earth and Planetary Science, accepted (2022) (IF:3.875) Toward a long-term atmospheric CO_2 inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO2 v2021.1. **（サブ1、3）**

Friedlingstein, P., ･･･, Y. Iida, ･･･,S.-I. Nakaoka, Y. Niwa, et al.: Earth Syst. Sci. Data, 14, 1917-2005 (2022) (IF:11.3) Global Carbon Budget 2021, https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022. **（サブ1、2、3）**





緯度経度グリッドでの最適化結果



誌上・口頭発表

【サブ 1】論文４報、国際学会１、国内学会５

【サブ2】論文５報、国内学会６

【サブ3】論文3報、国際学会4、国内学会9

7. 研究成果の発表状況

「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

1. 丹羽洋介, (2021) オンラインイベント「日本の脱炭素化を考えるための世界の科学者からの、気候変動10の最新メッセージ」, 2021年6月9日、観測とモデルで診る温室効果ガスの収支（参加者400名以上）

【サブテーマ2】

1. 中岡慎一郎, オンラインイベント「温室効果ガス研究の最前線　ーパリ協定の目標達成に向けてー」, 2022年2月10日、地球を巡る二酸化炭素を追う ～Global Carbon Budget報告～ （参加者400名以上）
2. 遠嶋康徳, オンラインイベント「温室効果ガス研究の最前線　ーパリ協定の目標達成に向けてー」, 2022年2月10日, 波照間島における大気観測に基づくCOVID-19に関連した中国からのCO_2排出量の変化の推定（参加者400名以上）

【サブテーマ3】

1. 石井雅男、IPCCセミナー「気候変動を知る　～最新報告書が示すこれまでとこれから」、2021年10月・11月（オンライン・録画）、「二酸化炭素排出・温暖化と海の変化」
2. 石井雅男、気候変動アクション日本サミット2021、2021年10月13日（オンライン）、「日本も直面する気候危機」（参加者2000名）
3. 石井雅男、獨協大学全学総合講座「環境学I」、2022年5月31日、「海洋環境の変化と将来予測　最新のIPCCによる報告」
4. 石井雅男、三鷹市生涯学習センター市民大学事業総合コース、2022年6月10日、「二酸化炭素増加・地球温暖化と海の変化」

7. 研究成果の発表状況

マスコミ等への公表・報道等

1. プレスリリース「大気観測が捉えた新型ウィルスによる中国の二酸化炭素放出量の変動～ロックダウン解除後は前年レベルに～」遠嶋康徳, 町田敏暢, 伊藤昭彦, 丹羽洋介, 笹川基樹, 向井人史, Prabir K. Patra, 2021年11月9日 **（サブ1、2）**
2. 朝日新聞、2021年11月5日、気候変動アクション日本サミット2021紙上採録、世界と日本が直面する気候危機の概要の解説と今の行動が将来の気候を決定することについて**（サブ3）**

本研究費の研究成果による受賞

1. 【内定】日本海洋学会賞、日本海洋学会、2022年9月、石井雅男「高精度炭酸系観測による海洋炭素循環と酸性化に関する研究」