

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 戦略的研究開発プロジェクトⅡ

研究期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【SII-8-1】

体系的番号： （J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 1 0）

研究課題： 「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」

Research Title: Multi-scale GHG budget evaluation based on atmospheric observations

テーマリーダー： 丹羽 洋介

テーマ代表機関： 国立研究開発法人国立環境研究所

研究分担機関： 国立研究開発法人国立環境研究所、気象庁気象研究所

研究協力機関： 気象庁

キーワード： 温室効果ガス、物質循環、大気観測、海洋観測、数値モデリング

令和6（2024）年5月

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに (研究背景等)	7
2. 研究開発目的	7
3. 研究目標	7
4. 研究開発内容	9
5. 研究成果	10
5-1. 成果の概要	10
5-2. 研究目標の達成状況	16
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	20
6. 研究成果の発表状況の概要	22
6-1. 成果の件数	22
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	22
7. 国際共同研究等の状況	23
8. 研究者略歴	25
II. 成果の詳細	26
II-1 サブテーマ1「サブテーマ1名」	26
[サブテーマ1要旨]	26
1. サブテーマ1研究開発目的	26
2. サブテーマ1研究目標	26
3. サブテーマ1研究開発内容	27
4. サブテーマ1結果及び考察	28
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	40
II-2 サブテーマ2「サブテーマ2名」	41
[サブテーマ2要旨]	41
1. サブテーマ2研究開発目的	41
2. サブテーマ2研究目標	41
3. サブテーマ2研究開発内容	42
4. サブテーマ2結果及び考察	42
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	55
II-3 サブテーマ3「サブテーマ3名」	56
[サブテーマ3要旨]	56
1. サブテーマ3研究開発目的	56
2. サブテーマ3研究目標	57
3. サブテーマ3研究開発内容	57
4. サブテーマ3結果及び考察	59
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	71
III. 研究成果の発表状況の詳細	72
(1) 成果の件数	72
(2) 誌上発表	72
(3) 口頭発表	75
(4) 知的財産権	78
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	78
(6) マスメディア等への公表・報道等	79
(7) 研究成果による受賞	79

(8) その他の成果発表.....	80
Abstract.....	81

別紙 公募審査・中間評価等への対応

## I. 成果の概要

## &lt;テーマ情報&gt;

公 募 区 分	: 戦略的研究開発プロジェクトII
研 究 期 間	: 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課 題 番 号	: 【SII-8-1】
体 系 的 番 号	: （J P M E E R F 2 1 S 2 0 8 1 0）
研 究 課 題	: 「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」
テ ー マ リ ー ダ ー	: 丹羽 洋介（国立研究開発法人国立環境研究所、主任研究員）

## &lt;キーワード&gt;

温室効果ガス
物質循環
大気観測
海洋観測
数値モデリング

## &lt;研究体制&gt;

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」

## &lt;サブテーマ1リーダー及び研究分担者&gt;

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	主任研究員	丹羽 洋介	2021年度 ～2023年度

## &lt;サブテーマ1研究協力者&gt;

機関名	部署名	役職名	氏名
国立研究開発法人国立環 境研究所	地球システム領域	特別研究員	山田 恭平（2022年度 ～2023年度）

## 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」

## ＜サブテーマ2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	室長	遠嶋 康德	2021年度 ～2023年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	室長	町田 敏暢	2021年度 ～2023年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	主任研究員	寺尾 有希夫	2021年度 ～2023年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	主任研究員	中岡 慎一郎	2021年度 ～2023年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	主任研究員	梅澤 拓	2021年度 ～2023年度
国立研究開発法人 国立環境研究所	地球システム領 域	副領域長	谷本 浩志	2021年度 ～2023年度

## ＜サブテーマ2 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
国立研究開発法人国立環 境研究所	地球システム領域	主幹研究員	笹川 基樹（2021年度 ～2023年度）
国立研究開発法人国立環 境研究所	地球システム領域	室長	白井 知子（2021年度 ～2023年度）

サブテーマ3 「船舶観測に基づく海洋CO<sub>2</sub>フラックスデータの精緻化」

## ＜サブテーマ3 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	主任研究官	石井 雅男	2021年度 ～2023年度
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	室長	辻野 博之	2021年度 ～2023年度
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	主任研究官	小杉 如央	2021年度 ～2023年度
気象庁気象研究所	全球大気海洋研 究部	室長	眞木 貴史	2021年度 ～2023年度
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	主任研究官	石島 健太郎	2021年度 ～2023年度
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	室長	田中 泰宙	2021年度
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	室長	坪井 一寛	2021年度 ～2023年度

## ＜サブテーマ 3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
気象庁大気海洋部	環境・海洋気象課	技術専門官	飯田 洋介（2021年度～2023年度）
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	主任研究官	遠山 勝也（2021年度～2023年度）

## ＜テーマ 1 の研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	29,538千円	7,362千円	36,900千円
2022	28,846千円	7,154千円	36,000千円
2023	26,077千円	6,323千円	32,400千円
合計	84,461千円	20,839千円	105,300千円

## 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とされている。大気観測から大気輸送モデルを用いて二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）やメタン（CH<sub>4</sub>）などの地表面フラックスを推定する手法は「トップダウン・アプローチ」とよばれ、排出削減の科学的評価の有力な手法であるが、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。また、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・解析体制が求められている。実際、世界気象機関（WMO）の全球大気監視計画（GAW）では、Integrated Global Greenhouse Gas Information System（IG3IS）と呼ばれるプロジェクトを立ち上げて人為起源排出推定に関する研究を奨励している。一方、陸域のみならず海洋も含めた全球規模のGHGの大気との交換量（GHG収支）にも未だ大きな不確定性が存在しており、Future Earthの研究プロジェクトの一つであるGlobal Carbon Project（GCP）では、定期的に最新のGHG収支に関する統合解析を行っている。環境研究総合推進費の「温室効果ガスの吸排出量監視に向けた統合型観測解析システムの確立」（2-1701）では、主に全球スケールでのGHG収支解析を行い、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）やGCPなどの国際共同研究に貢献を果たしてきた。本課題では、その研究を引き継ぐとともに、さらに発展させて、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。また、最も経済発展が著しく排出が大きいアジアも対象とし、環境研究総合推進費「メタンの合理的排出削減に資する東アジアの起源別収支監視と評価システムの構築」（2-1710）など、当該地域において最も広く展開する我が国の観測網を最大限に活用して研究を推進する。しかし、未だアジア・太平洋地域には観測空白域も多く存在し、大都市の排出量推定を可能とする観測網も十分でないことから、さらなる効果的な観測が望まれると同時に、小スケールの観測を取り込むことのできる新たな高解像度モデルが必要となっている。また、特に日本のGHG収支推定においてベースとして重要な日本近海の大気-海洋間のCO<sub>2</sub>交換量の見積もりにも、河川水流入など外洋とは異なるメカニズムや、船舶観測の不足により、大きな不確定性が存在する。

## 2. 研究開発目的

そこで本研究では大気輸送モデルの高解像度化を図り、大都市や国・地域における温室効果ガスの吸収・排出推定を行う手法の確立を目指す。さらに、現状の観測網が持つ情報量を定量的に評価するとともに、さらなる観測の充実、最適化にむけて、地点や頻度、精度などの観点から、今後の有効な観測展開について提案を行う。さらに、マルチスケール温室効果ガス収支の迅速かつ継続的な定量化を実現するために、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を目的とする。また、最新の海洋観測データと診断モデルに基づいて、日本近海の海洋CO<sub>2</sub>分圧や大気・海洋間CO<sub>2</sub>交換の時空間変化の評価を精緻化することも目的とする。

## 3. 研究目標

テーマ全体目標	<p>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。</p> <p>低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。さらに、GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立し、各観測の寄与度を把握するとともに、タグ付きトレーサー実験や観測システムシミュレーション実験OSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。</p> <p>東京都市圏内や内航船による観測を実施し、また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発し、都市域からのGHG排出の把握のための大気観測システムを開発する。さらに、波照間やアジア域で採取される大気試</p>
---------	--

	<p>料の<math>^{13}\text{CH}_4</math>測定や、GHGと同時に観測する各種関連成分(<math>\text{CO}</math>、<math>\text{O}_2</math>、<math>^{14}\text{CO}_2</math>等)のデータから、GHG収支の起源分離・放出量変動の推定を行う。</p> <p>北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベーリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(<math>\text{pCO}_2</math>)や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、<math>\text{pCO}_2</math>を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋<math>\text{pCO}_2</math>の分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダクトにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。</p> <p>上記の観測・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。</p>
--	--

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」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ1 目標	<p>低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。低解像度による解析では30年以上の長期にわたって従来よりも高い解像度(120km格子間隔)で逆解析を行う。一方、高解像度では大都市からの排出把握が可能な14km以下の格子間隔とし、対象領域外からの流入をもモデル内で計算するために全球一様格子またはストレッチ格子を用いてアジア・太平洋地域をターゲットとしたシミュレーションを行う。ダウンスケーリングなどを介してこれら低・高解像度モデルを融合させる。さらに、速報性を重視した解析体制を整え、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。</p> <p>GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立する。確立した手法を用いて、アジア・太平洋地域、また国内における観測のフラックス推定に対する寄与度を把握する。人為起源排出変化の検出可能性に着目し、高解像度シミュレーションを通して、現状の観測網の有効性を明らかにする。さらに、タグ付きトレーサー実験やOSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、サブ2と協同して新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。</p>

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」
サブテーマ2 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ2 目標	<p><u>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</u></p> <p>サブ1で計算される濃度変動を観測結果と比較し、観測がどの程度東京都市圏の排出シグナルを捉えているかを調べる。その上で、さらに有効な観測について検討する。また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを1台開発し、上述の都市排出把握に有効と推定された地点において追加観測を実施する。都市域からのGHG排出量を効率的にとらえるための移動体を用いた観測として、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船での大気観測を2021年夏頃までに開始する。最初に船舶の排気ガスの影響を取り除き、都市域からの排出シグナルを分離する手法を開発する。また、貨物船観測が捕捉できる範囲をモデル計算結果との比較から明らかにする。</p> <p><u>同位体・多成分観測に基づく起源分離・放出量変動推定</u></p> <p>波照間やアジア域で採取される大気試料の<math>^{13}\text{CH}_4</math>測定から、<math>\text{CH}_4</math>変動に対す</p>

	<p>る発生源毎の寄与率を推定する。さらに、<math>^{13}\text{CH}_4</math>観測をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システムを開発する。レーザー分光装置の性能評価を行い、最適な大気試料の導入法を検討して実際の大気観測への応用を可能とする。また、GHGと同時に各種関連成分の観測(<math>\text{CO}</math>、<math>\text{O}_2</math>、<math>^{14}\text{CO}_2</math>等)を実施し、GHGとの相関関係から放出量の時間変動や空間分布についての制約条件を課すことができるかどうか明らかにする。</p> <p><u>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</u></p> <p>これまで国環研が構築してきたアジア・太平洋域における大気中GHGの観測網を活用し、取得されたデータ精度の検証を進めながら、定常的に大気中GHGの時空間変動を把握することで、テーマ3で取りまとめる速報的な評価報告書作成に貢献する。また、観測結果を精査しできるだけ速やかにサブ1に提供できるよう、データ処理システムを構築する。さらに、一般のデータ利用促進のため、データ公開の手続きを確定し、国環研が運営する地球環境データベースでの公開を目指す。</p>
--	--

サブテーマ3	「船舶観測に基づく海洋 $\text{CO}_2$ フラックスデータの精緻化」
サブテーマ3 実施機関	気象庁気象研究所
サブテーマ3 目標	<p>北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベーリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(<math>\text{pCO}_2</math>)や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、<math>\text{pCO}_2</math>を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋<math>\text{pCO}_2</math>の分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダクトにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。サブ2で得られる大気<math>\text{CO}_2</math>観測データ、気象庁の運営するGHG世界資料センターで収集されるデータや衛星観測データ(GOSAT等)を用いて、サブ1とも協働して、大気<math>\text{CO}_2</math>濃度分布データの最適化を行う。前年のデータがデータセンターに報告される夏以降の早い段階でデータセットを迅速に構築する体制やシステムを整える。上記の大気<math>\text{CO}_2</math>データと海洋<math>\text{pCO}_2</math>データから、日本近海・北西太平洋域及び全球海洋における<math>\text{CO}_2</math>収支のデータセットを構築し、サブ1にて大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値として用いることが出来るものとする。これらの<math>\text{CO}_2</math>収支データセットを迅速に提供する体制を整える。また、Global Carbon Projectが推進するRECCAP2などを通じて、グローバルストックテイクやIPCC WG1の評価報告書などの作成にも貢献する。</p>

#### 4. 研究開発内容

サブテーマ1では、大気輸送モデルNICAM-TM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model-based Transport Model)や逆解析システムNICAM-based Inverse Simulation for Monitoring (NISMON)- $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ を用いて、全球から大都市までの様々なスケールの温室効果ガス (GHG) 収支推定をシームレスに行うことのできる解析システムを新たに開発した。また、アジア・太平洋地域から日本国内において展開されている観測データのインパクトを定量的に評価するための手法を確立した。解析誤差を用いた新規手法によるアジア太平洋地域における大気濃度の不確定性評価や、高解像度モデルとタグ付きトレーサー法を用いた東京大都市圏における $\text{CO}_2$ 大気輸送実験から、それぞれのスケールにおいてGHGの吸収・排出量推定の精度向上に向けて有効な観測を検討し提案した。

サブテーマ2では、東京都心部で実施している観測を活用し、東京大都市圏のGHG濃度とトレーサー成分のデータを整備すると同時に簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発した。さらに、川崎-荻田間を、瀬戸内海を経由して定期的に運航する貨物船に大気観測装置を搭載し、移動しながら大気観測を実施した。上記の観測を含め、アジア域などで展開する観測について、利便性の向上や観測か

らデータ公開までの時間をできるだけ短縮するよう整備体制の迅速化を行った。さらに、同位体比やトレーサー成分の測定に基づいた発生源セクター毎の推定、また、先端的な測定手法による精密観測による推定高度化へ向けた技術シーズの検討を行った。

サブテーマ3では、表面海水中のCO<sub>2</sub>観測データベースSurface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT) や、海洋内部の炭酸系データベースGlobal Ocean Data analysis Project Version 2 (GLODAPv2) の全アルカリ度データなどを用い、北西太平洋域の縁辺海を対象に表面海水のCO<sub>2</sub>分圧の診断モデルを構築した。このモデルに、衛星観測や海洋データ同化から得られる水温、塩分、クロロフィル濃度などのデータを適用し、海洋CO<sub>2</sub>分圧の時空間変動を評価した。また気象庁観測船による日本海や東シナ海の航海にてCO<sub>2</sub>分圧や全アルカリ度の観測を行い、診断モデルを検証した。大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換速度の算出に必要な地表付近の大気中CO<sub>2</sub>濃度の時空間変動の評価について最適化を図り、海洋CO<sub>2</sub>分圧データから日本近海におけるCO<sub>2</sub>収支のデータセットを構築し、広域を対象とした既存のデータセットと統合した。

図0-1に各サブテーマの研究開発内容とサブテーマ間連携、また、テーマ2やテーマ3との連携について示す。サブテーマ1で実施したNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>の逆解析やNICAM-TMの高解像度シミュレーションは、サブテーマ2で得られた観測データやサブテーマ3で計算された海洋CO<sub>2</sub>フラックスデータを用いた。一方、サブテーマ2は、上述の研究開発に加え、サブテーマ1で提案されたアジア太平洋域や東京大都市圏での新規観測の提案を受け、観測計画の策定や、実際に新規の観測を開始した。また、サブテーマ3はサブテーマ1の逆解析で推定された海洋フラックスデータを検証材料として、海洋CO<sub>2</sub>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も行った。サブテーマ1ではNISMOM-CO<sub>2</sub>の結果をテーマ2で得られたCO<sub>2</sub>収支と比較し、信頼性、不確定性の評価を行った。また、各サブテーマで得られたGHG収支に関する知見は、毎年、テーマ3が取りまとめるGHGレポートに反映した。

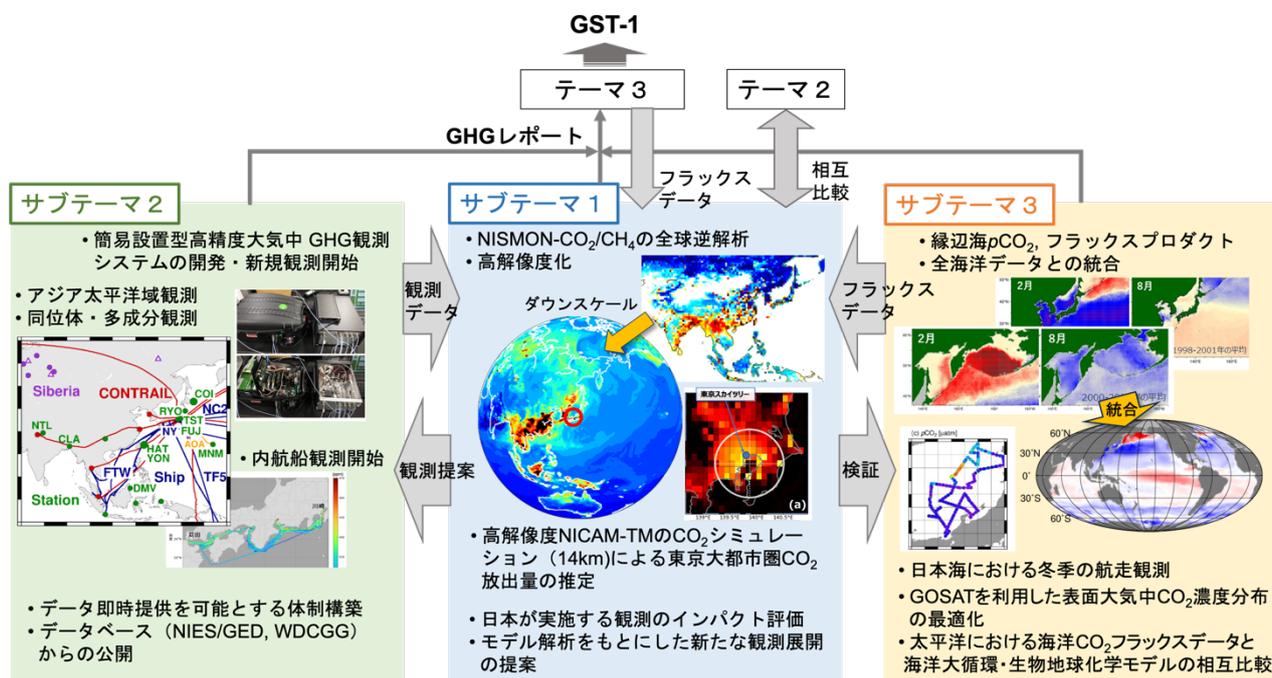


図0-1. 各サブテーマの研究開発内容とサブテーマ間の連携、また、テーマ2、3との連携の概念図。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

NICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>に新たにグリッド変換を組み込むことにより、従来よりも高い解像度 (1° × 1°) で全球での長期 (~30年) 逆解析が可能となった (図0-2; 成果3)。サブテーマ2とサブテーマ3による速報的なデータ提供を受けたのち、このNISMOMを用いて

即時に逆解析を実施し、得られたデータを国立環境研究所の地球環境データベースより公開(<https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20201127.001.html>)する体制を整えた。また、この公開データは、毎年、新たな観測データを用いて逆解析を実施するたびに更新した。さらに、この逆解析結果をもってGlobal Carbon Project (GCP) による統合解析に参加することにより、NISMON-CO<sub>2</sub>のデータが国際的なGHG収支データの一つとして認知され、広く利用された(成果1, 4, 7)。さらに、NISMON-CH<sub>4</sub>を用いて近年のCH<sub>4</sub>濃度上昇に関する逆解析を実施し、アジア地域の生物起源からの放出増加が主要因である可能性を示すことができた(図1-8)。これは、アジア太平洋域を中心として実施しているサブテーマ2による観測のデータを、船舶や航空機などの移動体によるものも含めて積極的に用いた結果であり、これらの観測によって当該地域のフラックス推定に強い拘束を与えていることが本研究の特徴である。さらにサブテーマ1では、NISMON-CO<sub>2</sub>で得られたフラックスデータをNICAM-TMの14km格子にダウンスケーリングすることにより、CO<sub>2</sub>大気輸送の再現シミュレーションを高解像度を実施することを可能とした。これにタグ付きトレーサー法を導入し、サブテーマ2による東京スカイツリー観測のデータから、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量を推定することに成功した(図0-3; 成果24, 43, 45)。以上のように、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に成功した。

また、NISMON-CO<sub>2</sub>を用いて、日本の機関が実施している観測のインパクト評価を実施するとともに、大気濃度の不確定性を定量的に評価する新たな手法を考案して、今後の有効な観測展開について考察した。その結果、アジアやインド洋の上空、またその沿岸地域において、濃度の3ヶ月平均の推定精度が0.3ppmほどに収まる観測が実施できれば有効であることが示唆された(図1-17)。この結果を踏まえ、サブテーマ2では新規の観測について検討を行い、次期推進費S-22において、中東航路を航行する貨物船を用いた新規のGHG観測を実施する予定となった。一方、NICAM-TMの高解像度シミュレーションにおいて、東京大都市圏を分割する詳細なタグ付きトレーサーを導入し、CO<sub>2</sub>放出量推定の精度向上に向けた新たな観測の設置場所として千葉を提案した。これを受け、サブテーマ2が開発した簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを用いて千葉大学西千葉キャンパスにて観測を2023年8月に開始した(図2-3, 2-4)。今後、この観測によって、東京湾東岸の工業地帯からの大規模CO<sub>2</sub>排出からのシグナルが効率よく補足され、東京大都市圏全体のCO<sub>2</sub>放出量の推定精度が向上することが期待される。

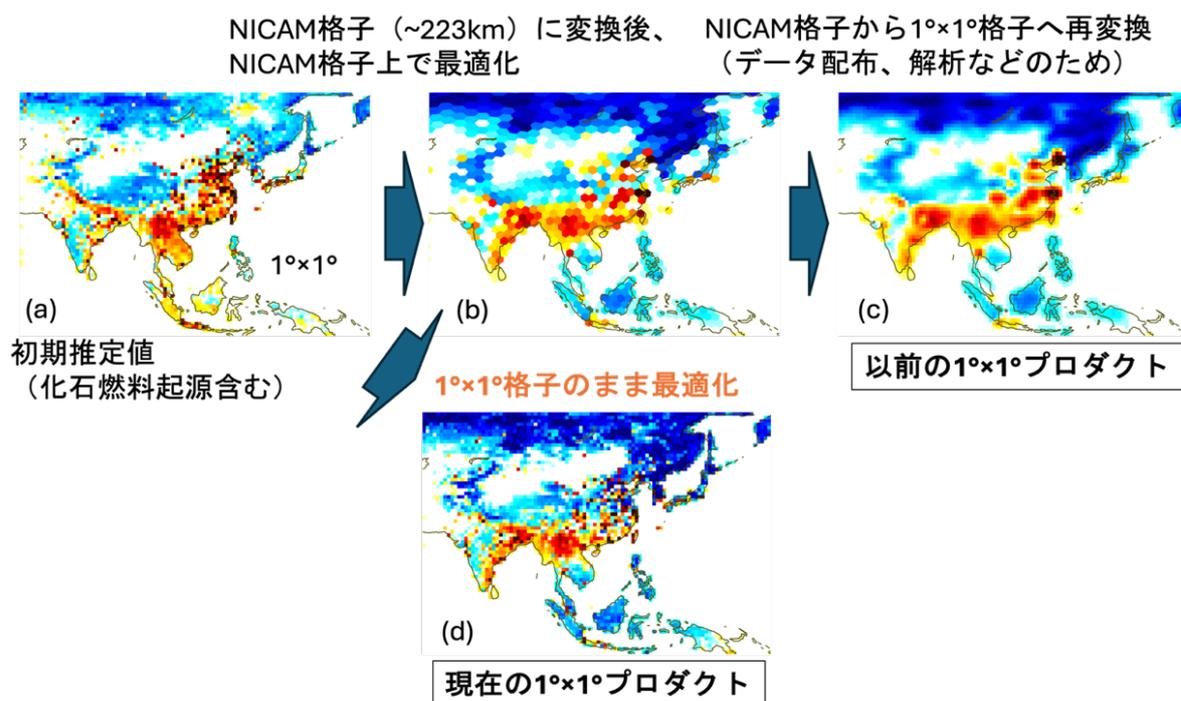


図0-2 (図1-4). NISMON-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>に新たに導入したグリッド変換によるフラックスプロダクトの高解像度化の様子。(c)と(d)はグリッド変換の有無の他は同じ観測データ、設定で得られたプロダクトである。

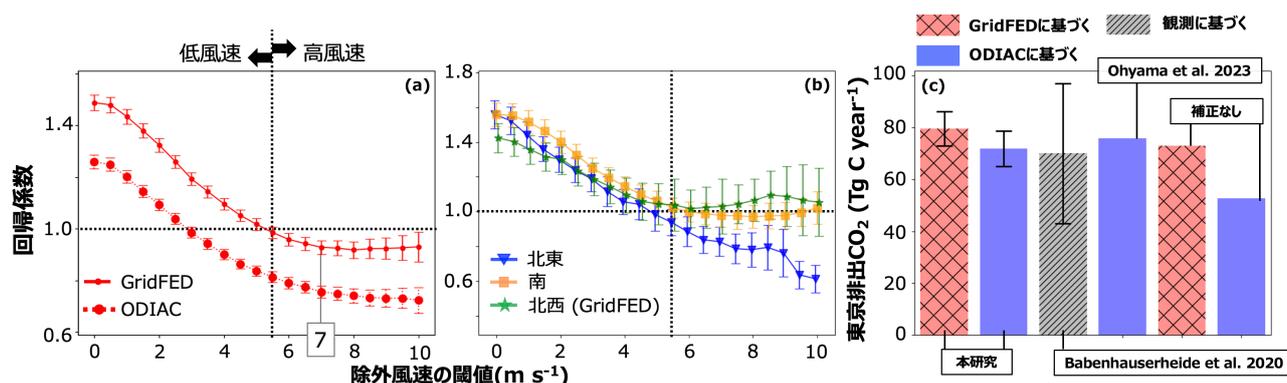


図0-3 (図1-13) . 一定以下の風速を取り除いたときの観測値に対する計算値の回帰係数の変化。エラーバーは相関係数の標準誤差の半分。(a) すべての風向でNICAM-TMの計算のCO<sub>2</sub>フラックスデータにGridded Fossil Emissions Dataset (GridFED) を用いた場合とOpen-Data Inventory for Anthropogenic Carbon dioxide (ODIAC) を用いた場合。(b) GridFEDで北東、南、北西のみの風向を用いた場合。(c) 本研究および先行研究で推定された東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量。

サブテーマ2では、東京大都市圏からのGHG排出量を把握するために、都内で観測されるCO<sub>2</sub>の短期変動についてサブテーマ1でのモデル計算結果と比較することにより、CO<sub>2</sub>の短期変動に対する起源別・地域別寄与率を明らかにした(図2-1)。また、大都市圏の排出シグナルを効果的に捉える観測地点を機動的に調べるために、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発した(図0-4)。図0-4(右)に示す通り、3濃度のCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の標準ガスを分析した結果、1分平均値の分析誤差(1分間に得られた約45個の分析値の標準偏差)は、濃度によらず、CO<sub>2</sub>で0.2ppm、CH<sub>4</sub>で0.4ppbであった。このように本システムは標準ガスの導入の頻度が非常に少なくても安定した分析が可能であり、またシステム全体のバッテリー駆動が可能であることから、観測場所の制限が非常に少ないことが大きなメリットである。このシステムを用いて、サブテーマ1のモデル解析から東京のCO<sub>2</sub>排出量を推定するために有効だと考えられた東京湾東岸において、大気観測を実施することに成功した(図2-3, 2-4)。

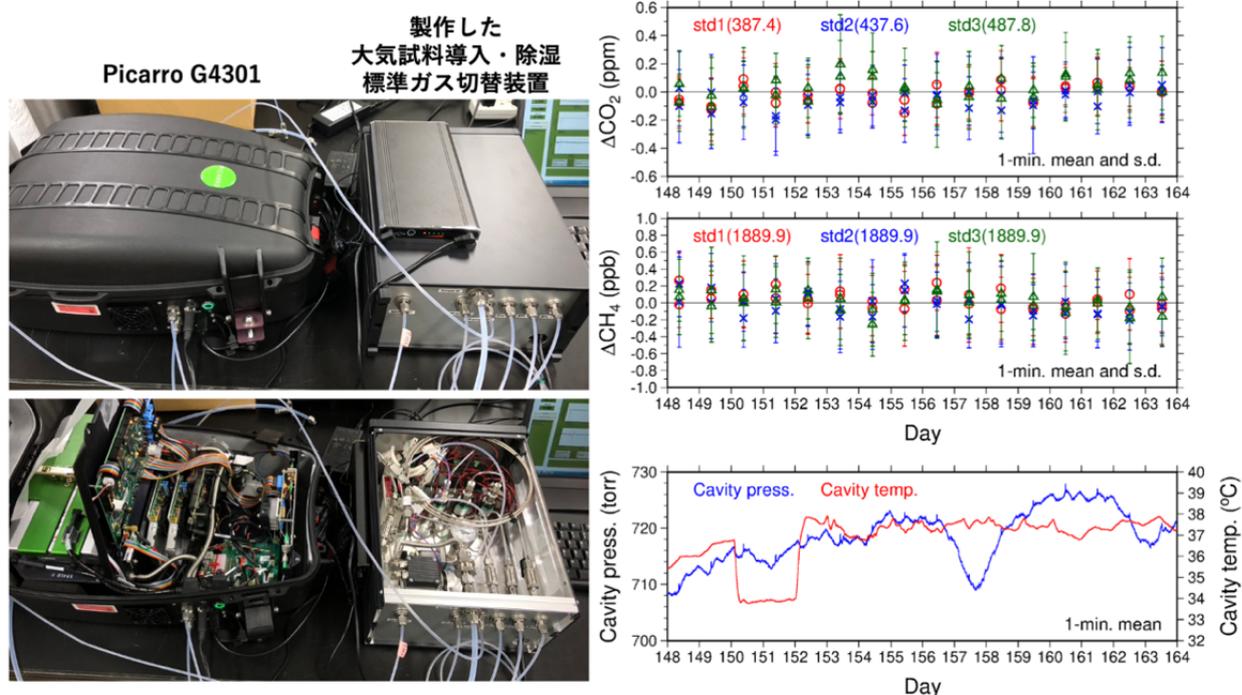


図0-4 (図2-2) . (左)製作した大気試料導入・除湿/標準ガス切替装置の写真、および(右)3濃度の標準ガスのCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>濃度(平均値からの差)と装置のキャビティ圧・温度の1分平均値の時間変化。

サブテーマ2ではさらに、国内の主要都市域からのGHG排出量を広範囲かつ継続的にとらえるため、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船（日荷丸）での大気観測を2022年1月に開始した。ここでまず、船舶の排気ガスの影響を取り除き都市域からの排出シグナルを分離したうえで、観測データを解析した。その結果、空間分布の傾向としてCO<sub>2</sub>濃度が高い地域が沿岸域（特に川崎・名古屋・神戸等）に点在する一方で、外洋域では比較的CO<sub>2</sub>濃度が低く空間変化も小さいこと、また、ベースラインが北半球の典型的なCO<sub>2</sub>濃度季節変化を示していることがわかった。

一方、地域によるCH<sub>4</sub>発生源の寄与を推定するため、波照間やインド、バングラデシュで採取された大気試料中の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>分析を行ったところ、バングラデシュの冬期では<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>の分析値がメタンのインベントリから推定される値より高かったことなど、それぞれのCH<sub>4</sub>排出源について、インベントリだけでは分からない排出源に関する情報が初めて観測から得られた（成果27, 30, 他）。さらに、CH<sub>4</sub>の発生源推定をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた高精度<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>連続的測定システムを開発し、つくばにおける外気の連続観測に成功した。また、波照間島及び与那国島で観測された大気中CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>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<sub>2</sub>の排出量の変化を推定する手法を開発し、2020年から2023年の1～3月の中国起源CO<sub>2</sub>排出量の変化を推定した（図0-5, 0-6；成果10, 11, 12, 26, 他）。この手法はモデルを直接用いない簡便な手法であることから観測データの取得後に即時に解析を行うことができる点が特徴である。本研究では、観測データの取得後、速やかに解析を行って推進費SII-8のホームページからその結果を公表するという準リアルタイムの解析体制を整えた（[https://www.nies.go.jp/sii8\\_project/materials\\_1-2.html](https://www.nies.go.jp/sii8_project/materials_1-2.html)）。

サブテーマ2では、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）に集約し、サブテーマ1で実施する逆解析に提供する体制を構築した。また、上記で得られたデータをGHG世界資料センター（WDCGG）や地球環境データベース（GED）を通じて一般に公開することで（表2-1）、国内外の全球炭素収支研究やモデル研究等で活用された（成果8, 9, 13, 他）。

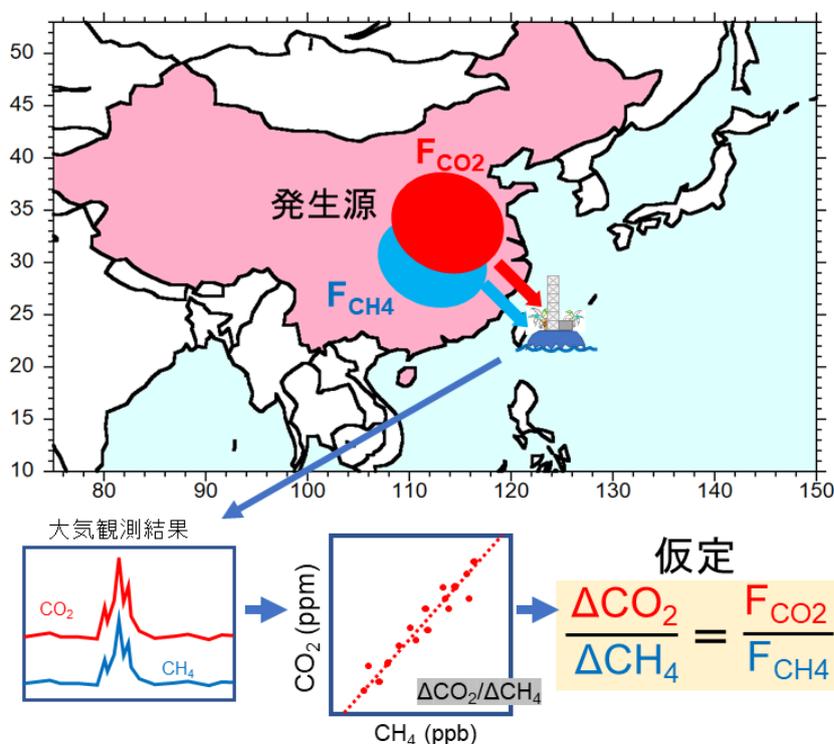


図0-5（図2-13）. 波照間・与那国島における大気観測に基づく中国におけるCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比推定手法の概念図。東アジアモンスーンの影響によりこれらの島は冬季に大陸の風下に位置し、観測されるCO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>の変動比（ $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比）は発生源における排出比を反映すると仮定できる。

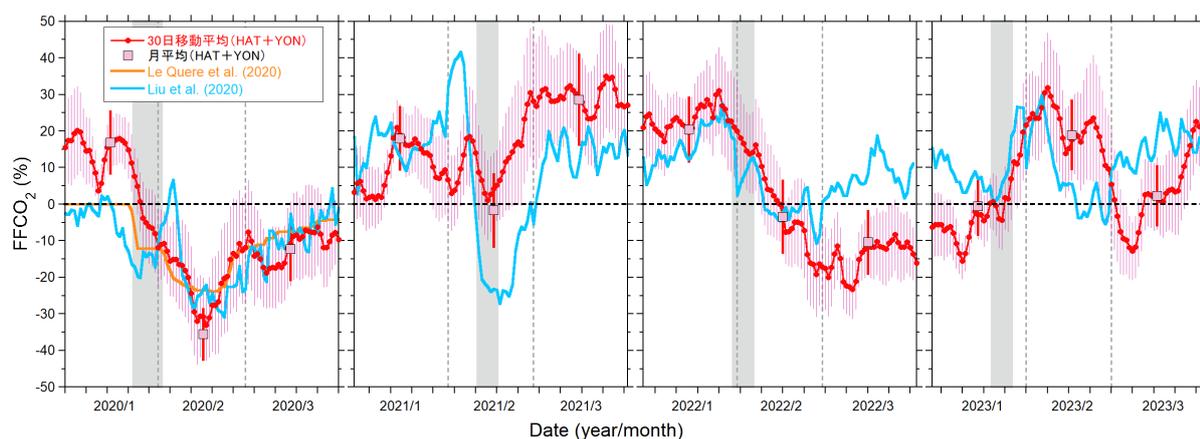


図0-6 (図2-16). 波照間・与那国島における大気中CO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>の濃度観測に基づく、2020年から2023年までの中国における1~3月の化石燃料起源CO<sub>2</sub>排出量の推定結果。赤が本研究の結果を表し、丸印は30日の移動平均を、四角は月平均値を表す。比較のため各種経済指標等の変化に基づくトップダウン的手法による中国起源FFCO<sub>2</sub>排出量変化の推定結果をオレンジ色の線 (Le Quéré et al., 2020)および水色の線 (Liu et al., 2020; Carbon Monitorから引用: <https://carbonmonitor.org/>)で示した。

サブテーマ3では、日本海やベーリング海など北太平洋縁辺海を対象に、海洋CO<sub>2</sub>分圧の診断モデルとそれに基づく海洋CO<sub>2</sub>分圧や海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータプロダクトを作成し、それらの分布・変動を評価した。それらの作成に当たっては、船舶観測による日本海の冬季の海洋CO<sub>2</sub>変動の実態と変動メカニズムの調査や、各種の衛星観測データや再解析データなども利用した (図3-3, 3-4)。また、海洋CO<sub>2</sub>フラックスの計算に必要な地表面付近の大気中CO<sub>2</sub>濃度分布の情報を、温室効果ガス観測技術衛星GOSATのデータを利用して改善した (成果15)。本研究の結果、1998年から2022年までの15年間の平均的な正味の吸収・放出量は、東シナ海が $-16.6 \pm 2.7 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、日本海南部が $-13.1 \pm 0.9 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、日本海北部が $-14.1 \pm 2.1 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、オホーツク海が $-19.9 \pm 7.8 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、ベーリング海陸棚域が $-4.5 \pm 16.7 \text{ TgC yr}^{-1}$ でCO<sub>2</sub>吸収域、ベーリング海海盆域が $+37.0 \pm 17.6 \text{ TgC yr}^{-1}$ でCO<sub>2</sub>放出域であると推定された (図0-7)。また、南西諸島近海については、診断モデルと地球システムモデルによる表面水温予測に基づいて、海洋CO<sub>2</sub>分圧の将来予測を行ったところ、海洋CO<sub>2</sub>分圧の年平均値は2010年から2100年の90年間に350  $\mu\text{atm}$ から900  $\mu\text{atm}$ 以上に増加し、この期間に海洋CO<sub>2</sub>分圧やその大気との分圧差の季節変化の振幅は、およそ60  $\mu\text{atm}$ から150  $\mu\text{atm}$ に増加することが予測された。こうした海洋CO<sub>2</sub>分圧の振幅の増加は、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の増加による水温変化に対する感度の増加と海水のCO<sub>2</sub>緩衝能の低下 (Revelle factorの増加)に起因する。(成果14; 図3-10)

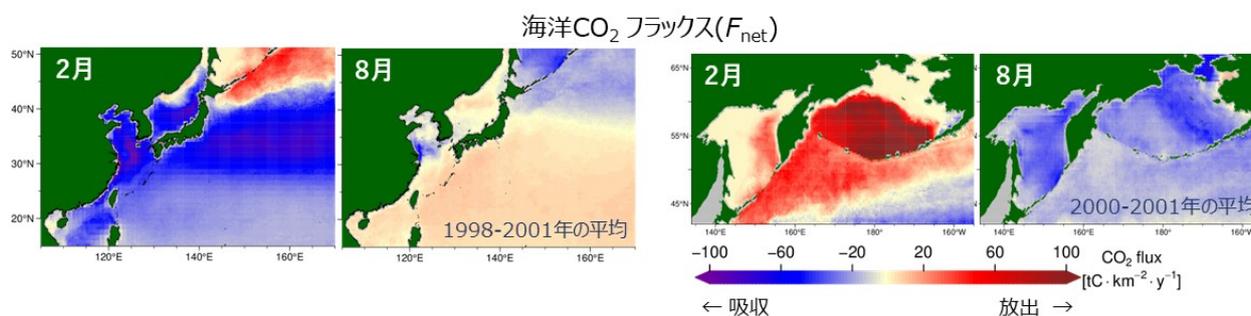


図0-7 (図3-7). 日本列島の周辺海域と北太平洋西部亜寒帯域における2月と8月の $F_{\text{net}}$ の分布

またサブテーマ3では、作成した北太平洋縁辺海の海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータプロダクトを、外洋域を対象とした既存のデータプロダクトと結合し (図0-8)、大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値としてサブテーマ1に提供したほか、GCPのCO<sub>2</sub>統合解析Global Carbon Budget (GCB) 2023にも貢献した。また、GCPの領域別炭素収支統合解析Regional Carbon Cycle Assessment and

Processes 2 (RECCAP2)に参加し、太平洋全域を対象に、診断モデルによるデータプロダクト7個（サブテーマ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した（図0-9）。その結果、両者のアンサンブル平均がアンサンブル標準偏差の範囲内で一致することがわかった（図0-9(図3-12)；図3-13；表3-4）。さらに、観測データが比較的多い2001年～2018年における長期変化を見ると、海域毎には平均変化速度は異なっているものの、太平洋全体では、どちらもCO<sub>2</sub>吸収が増加傾向にあること、また、その平均変化速度も一致していることがわかった。

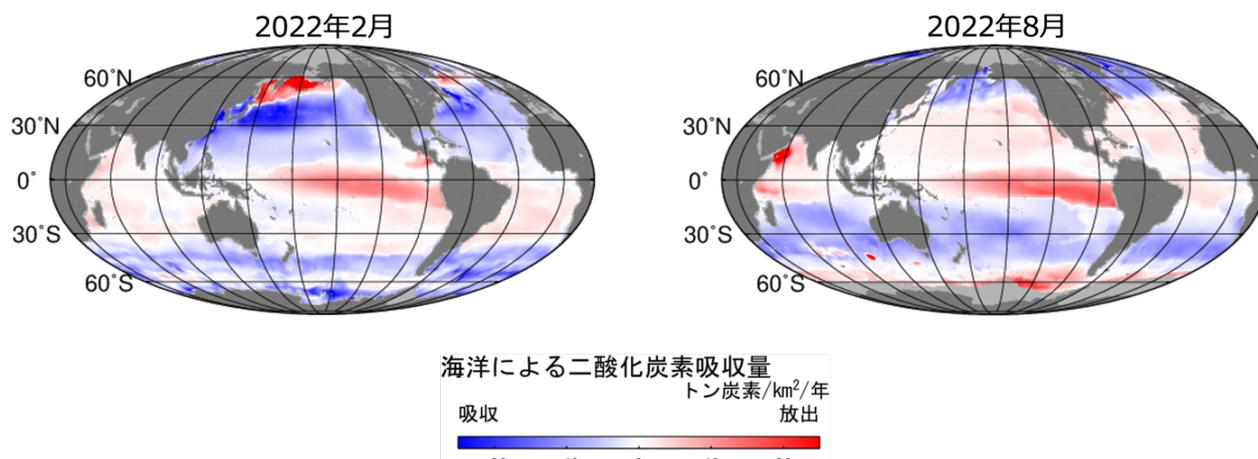


図0-8. 北太平洋縁辺海を含む全海洋スケールの大気・海洋間CO<sub>2</sub>フラックスの2月と8月のマッピング

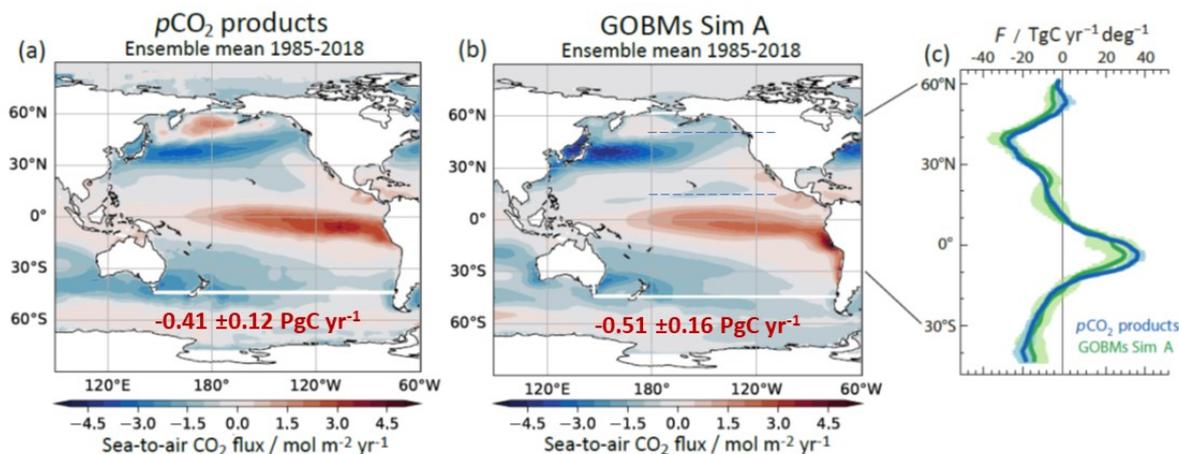


図0-9（図3-12）. (a)データプロダクトと(b)GOBMsによる太平洋の $F_{\text{net}}$ の比較（1985～2018年の期間平均値のアンサンブル平均値）。(c)は緯度1度の幅で東西に積算した $F_{\text{net}}$ の南北分布を示す。

テーマ1では、毎年、上記の各サブテーマの成果をテーマ3がまとめるGHGレポートにインプットした。特に2022版と2023年版では、それらを気候変動枠組み条約グローバルストックテイクの情報ポータルに提供した。また、上述の通り、各サブテーマではデータ公開を積極的に行うことで、本研究の透明性を高め、各データへのアクセシビリティを向上させた。

Le Quere, C., et al. 2020. Temporary reduction in daily global CO<sub>2</sub> emissions during the COVID-19 forced confinement. Nature Climate Change, 10, 647-653.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>

Liu, Z., et al. 2020. Near-real-time monitoring of global CO<sub>2</sub> emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. Nature Communications, 11, 5172.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>

5-2. 研究目標の達成状況

<テーマ全体の達成状況>..... 2. 目標を上回る成果をあげた

「大気観測に基づくマルチスケールのGHG収支評価」

テーマ全体目標	テーマ全体の達成状況
<p>1. 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。</p> <p>2. 低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。さらに、GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立し、各観測の寄与度を把握するとともに、タグ付きトレーサー実験や観測システムシミュレーション実験OSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。</p> <p>3. 東京都市圏内や内航船による観測を実施し、また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発し、都市域からのGHG排出の把握のための大気観測システムを開発する。さらに、波照間やアジア域で採取される大気試料の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>測定や、GHGと同時に観測する各種関連成分(CO、O<sub>2</sub>、<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>等)のデータから、GHG収支の起源分離・放出量変動の推定を行う。</p>	<p>1. サブテーマ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<sub>2</sub>放出量推定(成果24)、サブテーマ2の観測データを用いた準リアルタイムの中国CO<sub>2</sub>放出量変化の推定(図2-16; 成果10, 12)、サブテーマ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<sub>2</sub>収支のデータセット構築(成果2, 3, 21)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、サブテーマ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、実際、観測開始に繋げることができた。特にアジア域での観測展開は当初の目標に掲げていなかったため、日本-中東間の船舶観測の計画に繋げられた点は目標を上回る成果である。(図1-19, 2-3, 2-4)</p> <p>2. 低解像度のNICAM-TMを用いたNISMONによる逆解析の結果をダウンスケーリングすることにより、全球高解像度(~14km)でのCO<sub>2</sub>大気輸送の再現を可能とし、さらにタグ付きトレーサー法を導入することによって、大都市圏のCO<sub>2</sub>放出推定を可能にした(図1-13; 成果24, 43, 45)。さらに、2つの手法(疑似観測データ実験、誤差軽減率計算)を考案し、アジア太平洋地域において、日本の現業・研究機関による観測データのインパクトを客観的に評価することができた。また解析誤差を用いた新規手法やタグ付きトレーサー法を用いて、アジア太平洋地域および東京大都市圏において有効な観測を具体的に提案することができた。(図1-17, 1-19; 成果44)</p> <p>3. 都市からの排出把握に有効と推定された地点で即応的に追加観測を実現するための簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発に成功し(図2-2)、本システムを用いて、東京都市圏の排出把握に有効と推定された東京湾東岸(千葉大学西千葉キャンパス)における観測に成功した(図2-4)。東京以外の都市域からのGHG排出を効率的にとらえるため、川崎-荻田間を定期運航する貨物船での大気観測を2022年1月に開始し、川崎、名古屋、神戸等の都市域からの排出シグナルを捉えることに成功した(図2-6)。波照間やインド、バングラデシュで採取された大気試料</p>

<p>4. 北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベアリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(pCO<sub>2</sub>)や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、pCO<sub>2</sub>を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋pCO<sub>2</sub>の分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダクトにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。</p> <p>5. 上記の観測・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。</p>	<p>の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>測定から、CH<sub>4</sub>変動に対する発生源毎の寄与率を推定することに成功した(図2-8, 2-10; 成果27, 30, 46, 59)。また、<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>をより高時間分解能で観測するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システム(1時間の積算で0.1%の精度)の開発に成功した(図2-12)。さらに、波照間島・与那国島での大気観測に基づくΔCO<sub>2</sub>/ΔCH<sub>4</sub>比から、中国における放出量を準リアルタイムに推定する手法を開発し、2020年から2023年の排出量の変化を推定することに成功した(図2-16; 成果10, 12, 26)。</p> <p>4. 日本海の海洋CO<sub>2</sub>観測を冬季に実施するとともに、北太平洋の縁辺海を対象とした狭領域の海洋表層炭酸系の分布・変動を経験的に推定できる診断モデルを、全アルカリ度と全炭酸濃度の移動窓重回帰分析により作成した。作成した診断モデルや表面水温など様々なデータセットに基づいて、海洋表層CO<sub>2</sub>分圧の分布・変動のデータプロダクトを作成し、これを外洋域が対象の既存のデータプロダクトに統合した(図3-1~3-9; 表3-1; 成果62, 65他)。</p> <p>5. 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。このレポートは国連気候変動枠組条約(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(GCP)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(図1-9; 成果1, 4, 7)。以上のプロダクトは、国際的にも重要度の高いデータとして様々な研究に活用された点は、目標を上回る成果である。</p>
---	---

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「大気モデルを用いた観測体制検討とGHG収支評価」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
<p>1. 低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。低解像度による解析では30年以上の長期にわたって従来よりも高い解像度(120km格子間隔)で逆解析を行う。一方、高解像度では大都市からの排出把握が可能な14km以下の格子間隔とし、対象領域外からの流入をもモデル内で計算するために全球一様格子またはストレッチ格子を用いてアジア・太平洋地域をターゲットとしたシミュレーシ</p>	<p>1. 低解像度での30年以上の長期にわたる逆解析について、精緻なグリッド変換を逆解析システムNISMONに導入することにより、従来の解像度(~223km)よりも高解像度(1°×1°≒110km)でのフラックス最適化が可能となった(図1-14; 成果3, 41)。さらに、大気モデルNICAM-TMの効率化により、逆解析における大気輸送計算も従来よりも高解像度の格子(~112km)で実施可能となった(図1-5)。この低解像度(1°×1°)で最適化されたフ</p>

<p>ョンを行う。ダウンスケーリングなどを介してこれら低・高解像度モデルを融合させる。</p> <p>2. さらに、速報性を重視した解析体制を整え、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。</p> <p>3. GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立する。確立した手法を用いて、アジア・太平洋地域、また国内における観測のフラックス推定に対する寄与度を把握する。人為起源排出変化の検出可能性に着目し、高解像度シミュレーションを通して、現状の観測網の有効性を明らかにする。さらに、タグ付きトレーサー実験やOSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、サブ2と協同して新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。</p>	<p>ラックスデータを高解像度のNICAM格子(～14km)にダウンスケーリングすることで、全球高解像度のCO<sub>2</sub>大気輸送の再現計算を可能とし、さらに、日本や東アジア地域起源を分けたタグ付きトレーサーを導入することで、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出推定を可能とした(図1-13; 成果24, 43, 45)。</p> <p>2. サブテーマ2による大気観測データとサブテーマ3による海洋フラックスデータをうけて即時に逆解析を実施できる体制を整え、最新のCO<sub>2</sub>収支統合解析を行うGCPによるGlobal Carbon Budget (GCB) に対して、毎年、データ提供を行った。さらに、近年(2020～2022年)の急激なCH<sub>4</sub>濃度増加に対して速報的な逆解析を実施し、アジア地域の放出増加が主要因である可能性を示した。以上の成果を通して、UNFCCCに提出されたテーマ3によるGHGレポート作成に貢献した。また、GCBやGCPによるCH<sub>4</sub>統合解析に参加することで、本研究の成果は国際的に認知度の高い主要なGHG収支プロダクトの一つとなった(図1-9; 成果1, 4, 7)。</p> <p>3. 逆解析における観測データのインパクトを定量的に評価するため、それぞれ長短のある2つの手法(疑似観測データ実験、誤差軽減率計算)を考案し、アジア太平洋地域において、日本の現業・研究機関による観測データのインパクトを客観的に評価することができた。また、解析誤差を用いて逆解析における大気濃度の不確定性を評価する手法を新たに開発し、今後の観測展開において、東南アジアやインド洋の上空、またその沿岸地域において、濃度の3ヶ月平均の推定精度が0.3ppmほどに収まる観測が実施できれば有効である可能性があることを示した(図1-17; 成果44)。この結果をうけ、日本—中東間における新規の船舶観測の計画が立ち上がった。また、東京大都市圏を分割する詳細なタグ付きトレーサーを用いて、CO<sub>2</sub>放出量推定の精度向上に向けた新たな観測の設置場所として千葉を提案し、サブテーマ2の簡易設置型高精度大気中GHG観測システムによる観測開始に繋がった。(図1-19)</p>
--	---

<【サブテーマ2】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「地上観測・航空機による大気中のGHG 動態の把握」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
<p>1. <u>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</u> サブ1で計算される濃度変動を観測結果と比較し、観測がどの程度東京都市圏の排出シグ</p>	<p>1. 東京都市圏での大気中GHG濃度の現場測定結果をサブ1での計算結果と比較し、東京都市圏での排出と濃度変動の関係を明らかにした。また、都市からの排出把握に有効と推定</p>

<p>ナルを捉えているかを調べる。その上で、さらに有効な観測について検討する。また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを1台開発し、上述の都市排出把握に有効と推定された地点において追加観測を実施する。都市域からのGHG排出量を効率的にとらえるための移動体を用いた観測として、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船での大気観測を2021年夏頃までに開始する。最初に船舶の排気ガスの影響を取り除き、都市域からの排出シグナルを分離する手法を開発する。また、貨物船観測が捕捉できる範囲をモデル計算結果との比較から明らかにする。</p>	<p>された地点で即応的に追加観測を実現するための簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発に成功した(図2-2)。さらに、本システムを用いて、東京都市圏の排出把握に有効と推定された東京湾東岸(千葉大学西千葉キャンパス)における観測に成功した(図2-4)。東京以外の都市域からのGHG排出を効率的にとらえるため、川崎-荻田間を定期運航する貨物船での大気観測を2022年1月に開始し、川崎、名古屋、神戸等の都市域からの排出シグナルを捉えることに成功した(図2-6)。</p>
<p>2. <u>同位体・多成分観測に基づく起源分離・放出量変動推定</u> 波照間やアジア域で採取される大気試料の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>測定から、CH<sub>4</sub>変動に対する発生源毎の寄与率を推定する。さらに、<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>観測をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システムを開発する。レーザー分光装置の性能評価を行い、最適な大気試料の導入法を検討して実際の大気観測への応用を可能とする。また、GHGと同時に各種関連成分の観測(CO、O<sub>2</sub>、<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>等)を実施し、GHGとの相関関係から放出量の時間変動や空間分布についての制約条件を課すことができるかどうか明らかにする。</p>	<p>2. 波照間やインド、バングラデシュで採取された大気試料の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>測定から、CH<sub>4</sub>変動に対する発生源毎の寄与率を推定することに成功した(図2-8, 2-10; 成果27, 30, 他)。これらの結果はCH<sub>4</sub>インベントリの改善に役立つと期待される。また、<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>をより高時間分解能で観測するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システム(1時間の積算で0.1%の精度)の開発に成功した(図2-12)。さらに、波照間島・与那国島での大気観測に基づくΔCO<sub>2</sub>/ΔCH<sub>4</sub>比から、中国における放出量を準リアルタイムに推定する手法を開発し、2020年から2023年の排出量の変化を推定することに成功した(図2-16; 成果10, 11, 12, 26, 他)。</p>
<p>3. <u>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</u> これまで国環研が構築してきたアジア・太平洋域における大気中GHGの観測網を活用し、取得されたデータ精度の検証を進めながら、定常的に大気中GHGの時空間変動を把握することで、テーマ3で取りまとめる速報的な評価報告書作成に貢献する。また、観測結果を精査しできるだけ速やかにサブ1に提供できるよう、データ処理システムを構築する。さらに、一般のデータ利用促進のため、データ公開の手続きを確定し、国環研が運営する地球環境データベースでの公開を目指す。</p>	<p>3. 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)に集約し、サブテーマ1で実施する逆解析に提供する体制を構築した。また、上記で得られたデータをWDCGGやGEDを通じて一般に公開した(表2-1)。さらに、これらの各種観測データは内外の全球炭素収支研究やモデル研究等で活用された(成果8, 9, 13, 28, 他)</p>

<【サブテーマ3】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「船舶観測に基づく海洋CO<sub>2</sub>フラックスデータの精緻化」

サブテーマ3目標	サブテーマ3の達成状況
<p>1. 北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベーリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(pCO<sub>2</sub>)や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、pCO<sub>2</sub>を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋pCO<sub>2</sub>の</p>	<p>1. 日本海の海洋CO<sub>2</sub>観測を冬季に実施するとともに、北太平洋の縁辺海を対象とした狭領域の海洋表層炭酸系の分布・変動を経験的に推定できる診断モデルを、全アルカリ度と全炭酸濃度の移動窓重回帰分析により作成した。作成した診断モデルや表面水温など様々なデー</p>

<p>分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダクトにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。</p> <p>2. サブ2で得られる大気CO<sub>2</sub>観測データ、気象庁の運営するGHG世界資料センター(WDCGG)で収集されるデータや衛星観測データ(GOSAT等)を用いて、サブ1とも協働して、大気CO<sub>2</sub>濃度分布データの最適化を行う。</p> <p>3. 前年のデータがデータセンターに報告される夏以降早い段階でデータセットを迅速に構築する体制やシステムを整える。上記の大気CO<sub>2</sub>データと海洋pCO<sub>2</sub>データから、日本近海・北西太平洋域及び全球海洋におけるCO<sub>2</sub>収支のデータセットを構築し、サブ1にて大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値として用いることが出来るものとする。これらのCO<sub>2</sub>収支データセットを迅速に提供する体制を整える。</p> <p>4. Global Carbon Projectが推進するRECCAP2などを通じて、グローバルストックテイクやIPCC WG1の評価報告書などの作成にも貢献する。</p>	<p>タセットに基づいて、海洋表層CO<sub>2</sub>分圧の分布・変動のデータプロダクトを作成し、これを外洋域が対象の既存のデータプロダクトに統合した(図3-1~3-9; 表3-1; 成果62, 65他)。南西諸島近海の東シナ海については、別途作成した診断モデルと地球システムモデルにより、炭酸系の経験的な将来予測を行った(図3-10; 成果14)。</p> <p>2. バイアス補正した大気CO<sub>2</sub>濃度の衛星観測データ(GOSAT)と現地観測データ(WDCGG)を組み合わせた逆解析を行った。独立した現地観測データ(CONTRAIL)との比較検証を行い、主に対流圏中部から成層圏にかけてCO<sub>2</sub>濃度の解析精度が現地観測のみの逆解析(CNTL)に比べて向上することを示した(図3-11; 成果15, 37, 64他)。</p> <p>3. 作成した海洋CO<sub>2</sub>診断モデルや大気CO<sub>2</sub>データほか、様々なデータセットに基づいて、年末までに前年の海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータプロダクトを作成し、大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値として提供できる体制を整えた(成果2, 3, 21)。データセットは、気象庁のウェブサイト <a href="https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2_flux/co2_flux_data_en.html">https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2_flux/co2_flux_data_en.html</a> から公開もしている。</p> <p>4. 縁辺海の海洋CO<sub>2</sub>フラックスを統合した全海洋スケールのデータプロダクトは、GCB 2023に貢献した(成果1, 7)。GCPのRECCAP2において、太平洋の海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータプロダクトと海洋モデルの出力の相互比較を行い、整合点や課題を明らかにした(図3-12~3-16; 成果17, 18, 67, 68他)。</p>
---	---

### 5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

#### <得られた研究成果の学術的意義>

サブテーマ1の逆解析システムNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>高度化によって達成した1°×1°解像度での全球長期逆解析は、他の世界の研究機関と比べても最高レベルの解像度であり、今後、詳細な境界線を必要とする国別の収支評価などにおいて、大きなアドバンテージをもつものである。また、このシステム高度化において新規開発した、グリッド変換を通して大気輸送モデルとは異なる任意の格子でのフラックス最適化を可能とする手法は、今までにない独創性のあるものである。また、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量推定において用いたタグ付きトレーサー法は、高解像度モデル(~14km)への導入という点で先行研究にはない画期的な手法であり、通常逆解析手法よりも簡便であるために、様々なケースに応用可能な発展性のあるものである。

サブテーマ2では、アジア・太平洋域における大気観測網の整備およびデータ収集・公開を進めたが、これまでの欧米主導の観測網では比較的手薄であった地域におけるデータセットを整備することで、これ等の地域のGHG収支解析の精度向上に著しく貢献するものである。また、本サブテーマではCH<sub>4</sub>の同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )測定をインド、バングラデシュ、さらに中国の風下で採取されたサンプルについて実施し、これ等の地域のCH<sub>4</sub>発生源に関する情報が得られるようになったことは大きな成果である。さらに、波照間・与那国島で観測される大気中のCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の変動比の変化に着目し、冬季(1~3月)の中国からのCO<sub>2</sub>排出量を準リアルタイムに推定する手法は、簡便でありながら非常に独創的であるため、今後の発展が期待される。

サブテーマ3で作成した海洋表層CO<sub>2</sub>分圧の診断モデルは、全炭酸濃度と全アルカリ度それぞれの診断モデルをベースとしており、CO<sub>2</sub>分圧だけでなく、海洋酸性化の評価に重要なpHや炭酸カルシウム飽和度の診断も同時に行えることや、海水のCO<sub>2</sub>緩衝能の変化も評価できる点で、先進的である。また、国際共同研究RECCAP2の一環として行った太平洋の海洋CO<sub>2</sub>フラックスの比較実験においては、これまでに多く多くの最先端の診断モデル（7）と海洋モデル（11）の出力を比較した点や、人為起源CO<sub>2</sub>フラックスの出力も比較し、海洋CO<sub>2</sub>フラックスの評価の現状を明らかにした点で優れている。

本テーマでは、観測データの取得やフラックスデータの作成から逆解析によるGHG収支評価に至るまでの一連の流れが一つのチーム中で完結していることで、スピーディなGHG監視・報告が可能となった。このような体制は、世界気象機関が提唱するGlobal Greenhouse Gas Watch (GGGW)計画など、GHG解析の準リアルタイム化が進む世界の流れにおいて、先導性のあるものと言える。

#### <行政等に既に貢献した成果>

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<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>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。

#### <行政等に貢献することが見込まれる成果>

- 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に活用されることが期待される。
- 本研究で得られたCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>逆解析のデータや大気・海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータは、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。
- 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。

## 6. 研究成果の発表状況の概要

## 6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	19
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
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
知的財産権：	0
「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
その他の成果発表：	0

## 6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	【テーマ1】の主要な成果（10件まで）
1	Friedlingstein, P., ..., Y. Iida, ..., S.-I. Nakaoka, Y. Niwa, et al. (2022). Global Carbon Budget 2021. Earth System Science Data, 4. <a href="https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022">https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022</a> .
3	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-CO <sub>2</sub> v2021.1. Progress in Earth and Planetary Science, 9, 42, <a href="https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6">https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6</a> .
4	Friedlingstein P., Jones M. W., O'Sullivan M., ... Niwa Y., et al. (2022). Global Carbon Budget 2022. Earth System Science Data, 14, 4811-4900, <a href="https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022">https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022</a> .
7	Friedlingstein P., Jones M. W., O'Sullivan M., ... Niwa Y., et al. (2023). Global Carbon Budget 2023. Earth System Science Data, 15, 5301-5369, <a href="https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023">https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023</a> , 2023.

10	Tohjima, Y., Niwa, Y., Tsuboi, K., Saito, K. (2022). Did atmospheric CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO <sub>2</sub> reduction due to COVID-19 lockdown?, Journal of the Meteorological Society of Japan, 100(2), 437-444 (2022), <a href="https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021">https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021</a>
12	Tohjima, Y., Niwa, Y., Patra, P. K., Mukai, H., Machida, T., Sasakawa, M., Tsuboi, K., Saito, K., Ito, A. (2023). Near-real-time estimation of fossil fuel CO <sub>2</sub> emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, Progress in Earth and Planetary Science, 10:10, <a href="https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6">https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6</a>
14	Kosugi, N. Ono, H., Toyama, K., Tsujino, H. Ishii, M. (2023). An empirical projection of ocean acidification in southwestern Japan over the 21st century. Marine Chemistry, 255, 104290, 10.1016/j.marchem.2023.104290
15	Maki, T., Kondo, K., Ishijima, K., Sekiyama, T. T., Tsuboi, K, Nakamura, T. (2023). Independent bias correction method for satellite observation data introduced to CO <sub>2</sub> flux inversion, SOLA, 19, 157-164, doi:10.2151/sola.2023-021

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

## 7. 国際共同研究等の状況

### <国際共同研究等の概要>

- Global Carbon Budget (GCB)

Future Earthの研究プロジェクトであるGlobal Carbon Project (GCP)による全球CO<sub>2</sub>収支統合解析GCB (イギリス・エクスター大学のP. Friedlingstein氏が主導) について、サブテーマ1では、その2020年版、2021年版、2022年版の3回に逆解析データを提供し、逆解析比較の議論に参加した。また、サブテーマ2は逆解析比較のために、地上ステーションや航空機を利用した大気中濃度観測データを提供した。サブテーマ3は全海洋スケールの大気・海洋間CO<sub>2</sub>フラックスのデータを提供した。このGCBはIPCC AR6の第5章「地球規模の炭素と他の生物地球化学的循環及びそのフィードバック」において主要な科学的知見として引用されているほか、関連する様々な研究において、データが直接的に利用されている。また、この報告書もグローバル・ストックテイクに提出された。

- Global Methane Budget (GMB)

同じくGCPによって、全球のCH<sub>4</sub>収支統合解析GMB2022のプロジェクトにおいて、サブテーマ1で行ったCH<sub>4</sub>逆解析のデータを2022年6月に提供した。また、サブテーマ2は逆解析比較のために、地上ステーションや航空機を利用した大気中濃度観測データを提供した。このプロジェクトは米国・スタンフォード大学が拠点となっているが、リードしているのはフランス気候・環境科学研究所 (LSCE) のMarielle Saunoy氏とテーマ2の参画者である海洋研究開発機構 (JAMSTEC) のPrabir Patra氏である。他にオランダやフィンランド、米国などから研究者が参加している。このGMBも、前回の解析ではIPCC AR6に引用されるなど、当該分野で中心的な位置づけがされている。このGMBの成果を通して、本研究のCH<sub>4</sub>逆解析データが広く他研究に利用されている。

- アジアにおける温室効果ガス観測の共同実施

インドのアリヤバータ観測科学研究所 (Dr. Manish Naja) , バングラデシュのダッカ大学 (Prof. Md. Kawser Ahmad) , マレーシア気象局と共同で、観測空白域である南アジアとボルネオ島で大気プラスチックサンプリング観測を長期間にわたり定期的実施している。インド・ナイニタールとバングラデシュ・コミラの長期観測データについては、共同で論文発表を行ったことに加え、16件のオープンデータとして公開し、データの利活用が進んでいる。

- Regional Carbon Cycle Assessment and Processes 2 (RECCAP2)  
 GCPが推進するプロジェクトRECCAP2において、スイス・チューリッヒ工科大学 (ETH Zürich) のN. Gruber氏、J. D. Muller氏ら、アメリカ海洋大気局 (PMEL) のB. Carter氏、R. A. Feely氏、フランス LSCEのF. Chevallier氏ら、韓国Institute of Basic Science (IBS) のK. Rodgers氏と、診断モデルや海洋モデルの出力結果の収集・解析を協力して行い、共同で論文を作成している。
- Global Ocean Data Analysis Project Version 2 (GLODAPv2)  
 海洋観測船によって取得した炭酸系観測変数のデータを含む海洋各層の高品質観測データセットの全海洋的データ統合活動。サブテーマ3の研究代表者は、西部北太平洋における気象庁の多くのデータを提供するとともに、データ品質管理作業に協力している。太平洋のデータ統合活動はもともと北太平洋海洋科学機関 (PICES) の活動の一環として、研究代表者がリードして2010年代前半に実施され、GLODAPv2に統合された。現在は、国際学術連合会議 (ICSU) の海洋研究科学委員会 (SCOR) やユネスコ政府間海洋学委員会の国際海洋炭素観測連携プロジェクト (IOCCP) が支援し、欧州の研究プロジェクトも支援しているが、活動の多くは海洋炭酸系観測の研究者や観測・研究機関スタッフらのボランティアに支えられている。現在のプロジェクト代表は S. K. Lauvset (ベルゲン大学・ノルウェー)。作成・更新されるデータベースは米国海洋大気庁の National Centers for Environmental Information (NCEI) から公開され、海洋内部のCO<sub>2</sub>蓄積や酸性化の動向解明などに活用されており、その成果はIPCC WG1 評価報告書にも引用されている。
- Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT)  
 海洋観測船や商船の篤志観測船などから取得した海洋表層CO<sub>2</sub>分圧のデータセットの統合活動。本テーマ1の国立環境研究所や気象研究所の研究分担者は、南北太平洋における主要なデータ提供者であり、国立環境研究所の研究分担者は、北太平洋のデータ品質管理作業を推進している。この活動は、Taro Takahashiらが1990年代から作成していた統合データセットに触発されて地球圏-生物圏国際共同研究計画 (IGBP) のSOLAS-IMBER Joint Carbon Group 2 の活動として始まり、現在はIOCCPが支援しているが、活動の多くはGLODAP2と同様に世界の海洋炭酸系観測の研究者や観測・研究機関スタッフのボランティアに支えられている。現在のプロジェクト代表は D. C. E. Bakker (イーストアングリア大学・イギリス)。作成・更新されるデータベースはGLODAPv2と同様に、NCEIなどから公開され、大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックスの評価や、海洋表層の酸性化の動向解明などに活用されており、その成果は、IPCC WG1 評価報告書にも引用されている。
- WMO Global Greenhouse Gas Watch (GGGW)  
 2022年より世界気象機関World Meteorological Organization (WMO) において、GHGの準リアルタイム解析システムの構築が計画 (GGGW) され始めており、そのstudy groupの一員として参加して、コンセプトペーパーの執筆や実施計画の策定に貢献した。本研究で構築した、観測、フラックスデータ、逆解析システムから成る解析体制は、GGGWの有力な実施グループとして認識されている。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名 (本部所在地等)
Global Carbon Project (CO <sub>2</sub> )	イギリス
Global Carbon Project (CH <sub>4</sub> )	アメリカ合衆国

ETH Zürich	スイス連邦
NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory	アメリカ合衆国
Laboratoire des Sciences du Climat et de l' Environnement, IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay	フランス共和国
Center for Climate Physics, Institute for Basic Science, Busan	大韓民国
World Meteorological Organization	スイス
GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel	ドイツ連邦共和国
ICOS Ocean Thematic Centre	ノルウェー王国

## 8. 研究者略歴

## &lt;研究代表者（テーマリーダー）略歴&gt;

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
丹羽洋介	東京大学大学院理学系研究科修了 博士（理学） 気象庁気象研究所主任研究員を経て、 現在、国立環境研究所主任研究員 専門は大気物理、研究テーマは温室効果ガスの収支解析

## &lt;研究分担者（サブテーマリーダー）略歴&gt;

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
2) 遠嶋康徳	東京大学大学院理学系研究科（博士課程中退） 博士（理学） 東京大学理学部地殻化学実験施設・助手を経て、 国立環境研究所動態化学研究室室長 主に温室効果ガスや酸素の観測と炭素収支解析	2021年度 ～ 2023年度
3) 石井雅男	名古屋大学大学院理学研究科修了 理学博士 気象庁気象研究所研究官・主任研究官、室長、部長、研究総務官を経て、主任研究官（再任用） IPCC 第一作業部会 AR6 リードオーサー 主に海洋広域のCO <sub>2</sub> 変動とそのメカニズムを研究	2021年度 ～ 2023年度

## II. 成果の詳細

### II-1 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」

#### [サブテーマ1 要旨]

低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせることにより、全球から大都市スケールまでをカバーすることの可能な解析システムを構築した。NICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMON-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>に新たにグリッド変換を組み込むことによって、従来よりも高い解像度である1°×1°でのフラックス推定を可能とした。この高度化したシステムを用いて、長期のCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>の逆解析を行い、テーマ3によるGHGレポートに貢献した。さらに、Global Carbon Project (GCP) による統合解析に参加することにより、国際的なGHG収支データの一つとしてデータが広く利用された。また、サブテーマ2による速報的な観測データの提供をうけてNISMON-CH<sub>4</sub>を用いて近年のCH<sub>4</sub>濃度上昇に関する逆解析を実施し、アジア地域の放出増加が主要因である可能性を示した。さらに、NISMON-CO<sub>2</sub>で得られたフラックスデータをNICAM-TMの14km格子にダウンスケーリングすることにより、CO<sub>2</sub>大気輸送の再現シミュレーションを高解像度を実施することを可能とした。これにタグ付きトレーサー法を導入することによって、サブテーマ2による東京スカイツリー観測のデータから、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量を推定することに成功した。また、NISMON-CO<sub>2</sub>を用いて、日本の機関による観測のインパクト評価を実施するとともに、大気濃度の不確定性を定量的に評価する新たな手法を考案して、今後の有効な観測展開について考察した。その結果、アジアやインド洋の上空、またその沿岸地域において、濃度の3ヶ月平均の推定精度が0.3ppmほどに収まる観測が実施できれば有効であることが示唆された。一方、NICAM-TMの高解像度シミュレーションにおいて、東京大都市圏を分割する詳細なタグ付きトレーサーを導入し、CO<sub>2</sub>放出量推定の精度向上に向けた新たな観測の設置場所として千葉を提案し、サブテーマ2の簡易設置型高精度大気中GHG観測システムによる観測開始に繋げた。

#### 1. サブテーマ1 研究開発目的

本研究では大気輸送モデルの高解像度化を図り、大都市や国・地域における温室効果ガスの吸収・排出推定を行う手法の確立を目指す。さらに、現状の観測網が持つ情報量を定量的に評価するとともに、さらなる観測の充実、最適化にむけて、地点や頻度、精度などの観点から、今後の有効な観測展開について提案を行う。

#### 2. サブテーマ1 研究目標

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」
サブテーマ1 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ1 目標	<p>低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築する。低解像度による解析では30年以上の長期にわたって従来よりも高い解像度（120km格子間隔）で逆解析を行う。一方、高解像度では大都市からの排出把握が可能な14km以下の格子間隔とし、対象領域外からの流入をもモデル内で計算するために全球一様格子またはストレッチ格子を用いてアジア・太平洋地域をターゲットとしたシミュレーションを行う。ダウンスケーリングなどを介してこれら低・高解像度モデルを融合させる。さらに、速報性を重視した解析体制を整え、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。</p> <p>GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立する。確立した手法を用いて、アジア・太平洋地域、また国内における観測のフラックス推定に対する寄与度を把握する。人為起源排出変化の検出可能性に着目し、高解像度シミュレーションを通して、現状の観測網の有効性を明らかにする。さらに、タグ付きトレーサ</p>

<p>一実験やOSSEを実施し、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案(手法、位置、頻度、精度等)を行い、サブ2と協同して新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献する。</p>
---

### 3. サブテーマ1 研究開発内容

サブテーマ1では、まず大気輸送モデルNICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>を高度化し、従来よりも高い解像度である1°×1°での長期逆解析を可能とした。ここで、フラックスの初期推定値としてサブテーマ3による全球の大気-海洋間フラックスデータ、テーマ3による陸域生態系モデルの出力値を用いた。逆解析に入力する観測データとして、世界各国のデータがまとめられた観測パッケージ(ObsPack-GLOBALVIEW+)のほかに、サブテーマ2が独自にまとめた地上ステーション、タワーネットワーク、船舶、航空機などによるアジア・太平洋地域の最新の観測データセットを用いた(図1-1)。このNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>によって得られた長期のCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>の収支解析を実施し、Global Carbon Project(GCP)によるCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>統合解析に参加した。さらに、2020年から生じたCH<sub>4</sub>濃度の加速度的な上昇イベントに対する解析をGCPとは独自に行った。

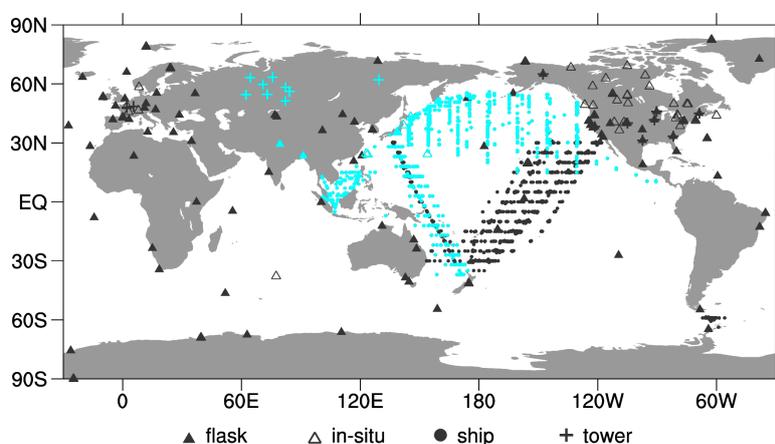


図1-1. NISMOM-CO<sub>2</sub>で用いたCO<sub>2</sub>の大気観測データの位置(地上のみ)。ここでは、2007-2018年の期間に得られたデータのみを示す。▲はフラスコサンプリング、△は連続観測装置による地上観測を示す。●は船舶の観測、+はタワーを使った観測を示す。水色で示したのは国立環境研究所および気象庁、気象研究所で実施している観測。

次にNICAM-TMによる全球高解像度のCO<sub>2</sub>大気輸送実験を実施し、そのシミュレーション結果を用いて東京大都市圏を対象としたCO<sub>2</sub>放出量の推定を行った。NICAM-TMによるシミュレーションの空間解像度は格子間隔14kmとした。また、現実大気を再現するための外部気象データを気象庁客観解析データJRA-55から作成し、そのデータを用いて現実の大気へと近づくよう随時フォーシングを与えながら(ナッジング手法を用いながら)2019年から2020年の2年間についてシミュレーションを行った。ここで、化石燃料起源のCO<sub>2</sub>フラックスデータはGridFEDを用い、それ以外の陸域植生起源や海洋起源のCO<sub>2</sub>フラックスデータについては、前述の逆解析で得られた1°×1°のデータを14km格子へと再配分(ダウンスケーリング)して作成した。さらに、東京大都市圏とその外からの寄与を別々に評価するためにタグ付きトレーサー法を用いた。ここでは、東アジア、日本、東京大都市圏の3地域にフラックスデータを与え(図1-2)、それぞれのフラックス起源の大気CO<sub>2</sub>輸送計算を独立に行うことで、各領域からの寄与を定量的に評価した。大気観測データは、サブテーマ2が取得した東京スカイツリーにおけるCO<sub>2</sub>の連続測定データ(およそ地上250mの高度)を用いた。本研究では、タグ付きトレーサーを活用して、東京大都市圏外のフラックスによる濃度変動(バックグラウンド濃度)を計算し、それを観測、シミュレーションの値から引くことで、東京大都市圏の影響のみを抽出し、その変動比から直接的にCO<sub>2</sub>放出量を推定した(図1-3)。

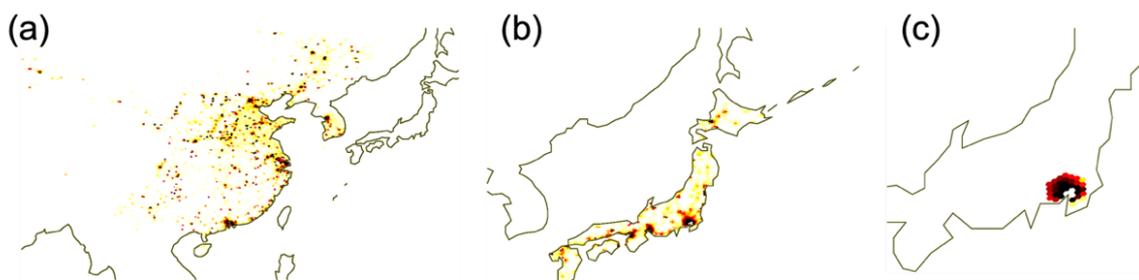


図1-2. タグ付きトレーサー法で用いた、(a)東アジア、(b)日本、(c)東京大都市圏の化石燃料起源フラックスの分布。

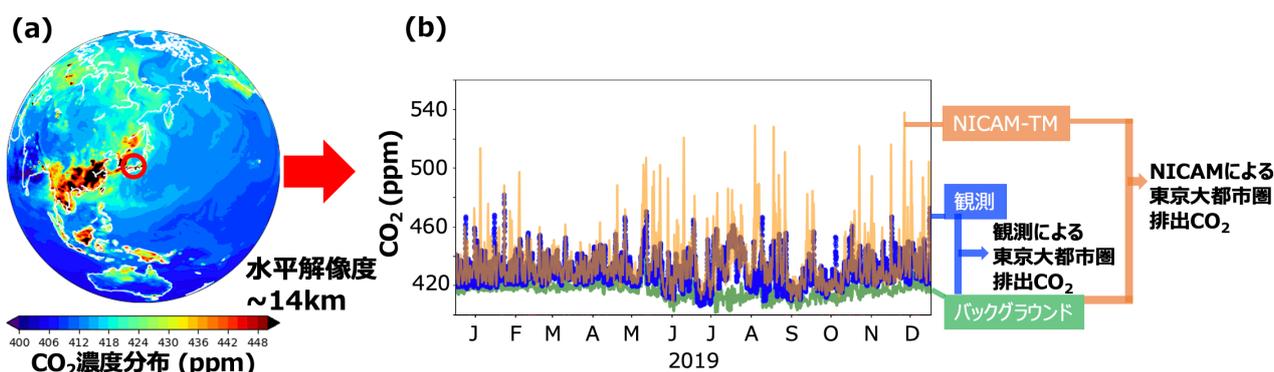


図1-3. (a) NICAM-TMで計算した地上CO<sub>2</sub>濃度分布の一例（2019年1月15日）。(b)2019年の東京スカイツリーにおけるNICAM-TM、観測、NICAM-TMで計算したバックグラウンドのCO<sub>2</sub>濃度。NICAM-TM、観測それぞれからバックグラウンドのCO<sub>2</sub>濃度を差し引くことで、モデルと観測のそれぞれの東京大都市圏起源CO<sub>2</sub>濃度を推定した。

さらに本サブテーマでは、今後の観測展開に向けた考察を行った。まず、国立環境研究所や気象庁、気象研究所が展開するアジア太平洋地域を中心とした観測ネットワーク（図1-1）について、その逆解析におけるインパクトを評価した。ここで、観測システムシミュレーション（OSSE）実験とフラックスの解析誤差を用いた解析の2通りの手法で、多角的で定量的な評価を行った。さらに、これを踏まえたうえで、さらに有効な観測の展開について考察するため、大気濃度の不確定性を計算する新たな手法を考案し、アジア太平洋地域に着目した解析を実施した。一方、前述の東京大都市圏の解析において、用いた東京スカイツリーの観測に加えて、さらに放出量推定の信頼性を向上させるために効果的な新規観測について考察、提案した。

#### 4. サブテーマ1 結果及び考察

##### 4-1. CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の全球長期逆解析

##### 4-1-1. 逆解析システムの高解像度化

##### (1) グリッド変換の導入によるフラックス最適化の高解像度化

本研究では、任意の緯度経度格子からNICAMの格子である正20面体格子への精緻なグリッド変換を導入するとともに、その変換計算のアジョイントコードを開発・導入することで、従来のNICAM格子上ではなく、緯度経度格子上でフラックスの最適化を可能とした。図1-4に本手法によるフラックスプロダクトの高解像度化の様子を示す。初期推定値データは、通常、1°×1°など（データによってはより高解像度）の緯度経度データで提供されている（図1-4a）。NICAMをベースとするNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>では、従来、そのデータをNICAMの格子に変換した上でNICAMの格子状で最適化を行い（図1-4b）、解析後は、他研究への利用などのために、再度、1°×1°に変換したうえでプロダクトとして公開していた

(図1-4c)。しかしこれでは、図1-4aと図1-4cと見比べて分かる通り、初期推定値のデータが有する詳細な空間情報が失われており、陸海の境界も不明瞭になってしまっていた。しかし、本研究で導入したグリッド変換を内包した逆解析手法では、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の格子のままフラックスの最適化を行うことが可能であり、図1-4dに示すように、逆解析後でも初期推定値が持つ空間情報が保持されるようになった。このグリッド変換の他に、誤差共分散行列などの改良も加えたうえで、疑似観測データを用いた逆解析の理想実験を実施した。ここで、改良点毎に感度実験を行い、精度向上に対する個々の寄与を評価したところ、グリッド変換もフラックス推定の改善に寄与していることがわかった。このことから、グリッド変換による改良が、フラックスの高解像度化だけではなく高精度化にも寄与するものであることが確認された(成果3, 21, 22, 23)。この成果は、国境線といったはっきりとした境界線で収支を評価する上で有効であり、今後より重要になってくる国別のGHG収支評価の精度を向上させるものである。実際、逆解析の結果がそのような国別評価に使われる研究ができており、その一つにDeng et al. (2022)がある。そこでは、改善前のNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>の結果が利用されたが、その後に、Dengらが最新のデータを集めて評価した研究では、この改善後のNISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>が利用された。

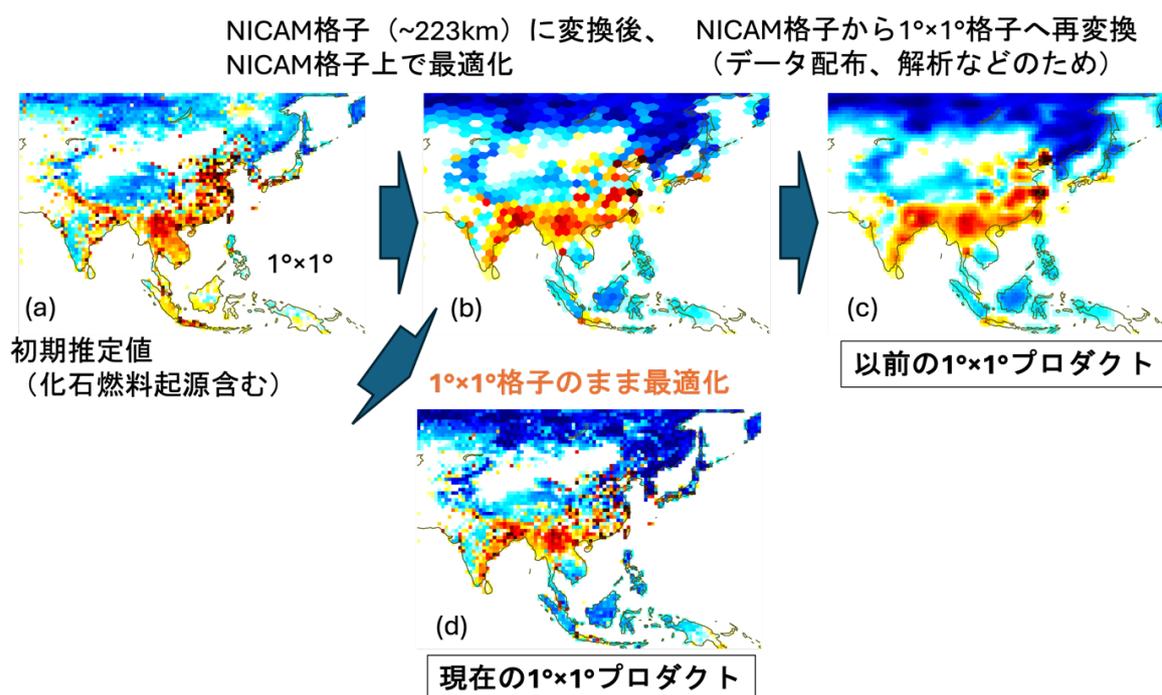


図1-4 (図0-2). NISMOM-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>に新たに導入したグリッド変換によるフラックスプロダクトの高解像度化の様子。(c)と(d)はグリッド変換の有無の他は同じ観測データ、設定で得られたプロダクトである。

Deng, Z., et al. 2022. Comparing national greenhouse gas budgets reported in UNFCCC inventories against atmospheric inversions, Earth System Science Data, 14, 1639–1675, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1639-2022>.

## (2) NICAM-TMの高解像度化

さらに、本研究では大気輸送NICAM-TMの高解像度化も行った。従来はNICAM-TMの空間解像度を223km格子としてNISMOMによる解析を行っていたが、本研究では、223km格子から112km格子へと空間解像度を上げて(大気輸送計算の計算コストが8倍となっても)30年の長期逆解析が可能となるように、NICAM-TMやNISMOMのプログラムを改修して、計算の効率化を進めた。図1-5に112km格子で実施した逆解析の結果を示す。図1-5aでは全球の陸域生態系の吸収量を示すが、従来の解像度による結果と整合性の取れたCO<sub>2</sub>収支が、30年という長期にわたって推定されていることが見てとれる。図1-5bでは、その逆解析で得られたCO<sub>2</sub>フラックスを用いて計算された南鳥島での大気CO<sub>2</sub>濃度を示す。ここで示されるように、空間解像度をあげることによって、高濃度イベントなどの再現性が向上していることがわかる。モデルの高解像度化によって、このように細かな変動まで観測を再現できる能力を得たことで、逆解析における自由度が高まり、観測データが持つ情報をより多く取り込めることが可能となった。計算効率を高めたとはいえ、解像度を上げたことによる追加の計算コストは膨大なため、様々な感度テストを要す

る解析に対してはまだ実用的ではないが、ある程度、設定の定まったオペレーショナルな解析に対しては、この112km解像度のNICAM-TMをベースとした逆解析は十分に適用可能である。

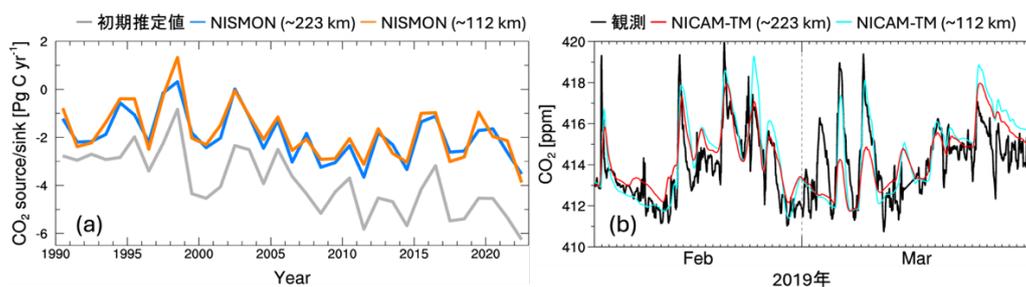


図1-5. (a)逆解析で得られた全球の陸域生態系による吸収量（負の符号は吸収を示す）と(b)気象庁南鳥島観測所における大気CO<sub>2</sub>観測と逆解析後の大気CO<sub>2</sub>濃度の計算値（最適化されたフラックスデータをNICAM-TMに入力して計算したもの）の比較（2019年2-3月）。

#### 4-1-2. 大気CH<sub>4</sub>濃度の2020年からの急上昇に関する逆解析

大気CH<sub>4</sub>濃度について、全球的な変動についてもまだ未解明な部分が多い。近年、大気CH<sub>4</sub>濃度は増加傾向にあったが、2020年頃からその上昇の速度が大幅に増加し、その後の2021年、2022年も濃度上昇率が高い状態であったことが全球的に観測されている。そこで本研究では、逆解析システムNISMOM-CH<sub>4</sub>を用いて、大気中のCH<sub>4</sub>消失源であるOHラジカルの変化はなかったものと仮定したうえで、各地域からのCH<sub>4</sub>放出の増加量を推定した。ここでは、地上観測のみを用いた場合、地上観測に加えて航空機観測を用いた場合、また、GOSAT (NIES V02.95/96) による鉛直カラム平均のデータを用いた場合と、3通りの逆解析を実施した。図1-6では、その3つの逆解析で得られたCH<sub>4</sub>フラックスについて、2020-2022年平均の2016-2019年平均からの偏差を示している。この図から、インド北部、バングラデシュ、インドシナ半島といった南アジアや東南アジアの地域でCH<sub>4</sub>フラックスが顕著に増加していることがわかる。また、中央アフリカや南米アマゾンなどでもCH<sub>4</sub>フラックスが増加していた。このような傾向は、3つの逆解析全てで共通に見られていた。ここで、地上観測の（または航空機観測を追加した）逆解析とGOSATの逆解析はそれぞれ、全く独立であるにも関わらず、互いの結果を支持していることから、得られたフラックス増加の傾向は信頼性が高いものと考えられる。

図1-7にそれぞれの逆解析で推定された各地域におけるCH<sub>4</sub>フラックスの年々変化を示す。これを見ると、インドシナ半島（図ではSoutheast Asia (N)）や南アジア (South Asia) でのCH<sub>4</sub>フラックス増加が2020年から始まり、その高い放出量が2022年まで維持されていることがわかる。一方、中央アフリカや南米におけるCH<sub>4</sub>フラックスの増加については、GOSATの逆解析で2020年に中央アフリカで一時的に増加しているが、それ以外は、2016年から長期的に上昇傾向となっていることがわかる。これらのことから、2020年から全球的に観測された急激な大気CH<sub>4</sub>濃度増加は、アジア地域におけるフラックス増加が大きく寄与していることが示唆された。

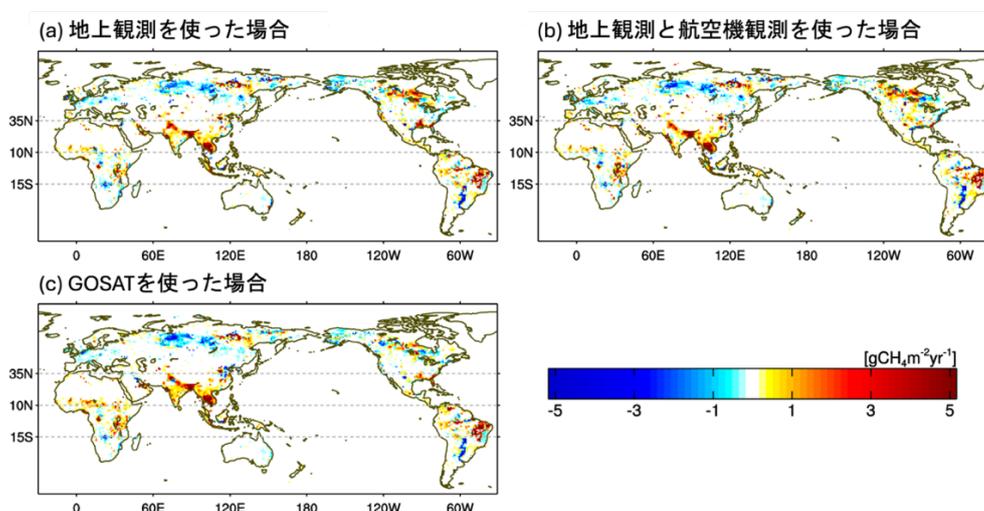


図1-6. (a)CH<sub>4</sub>フラックスの増減の分布。2020-2022年平均の2016-2019年平均からの偏差を示す。NISMOM-CH<sub>4</sub>の逆解析において、地上観測を使った場合、(b)地上観測と航空機観測を使った場合(b)、(c)GOSATを使った場合。

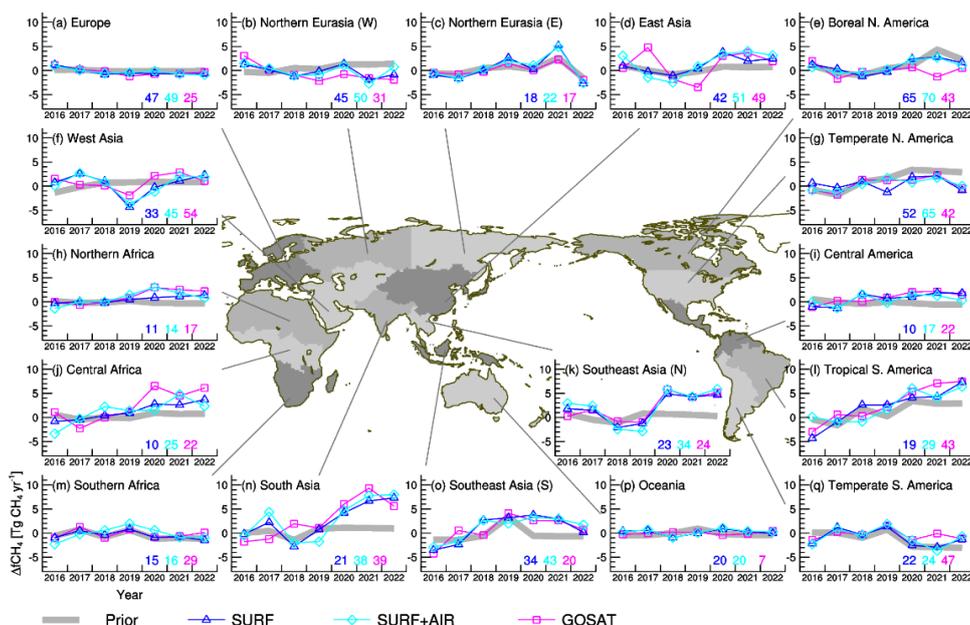


図1-7. 各地域におけるCH<sub>4</sub>フラックスの年々の変化。それぞれの2016-2019年間の平均値からの偏差で示す。灰色は初期推定値、青色、水色、マゼンタはそれぞれ、地上観測のみ（SURF）、地上観測と航空機観測（SURF+AIR）、GOSATを用いた逆解析（GOSAT）の結果を示す。

本研究で行った逆解析では、グリッド内でセクター別にも分けてフラックスの最適化を行っているため、どのセクターがフラックス増加に寄与しているかも推定することが可能である。図1-8に、そのセクター毎に推定されたフラックス増加量を示す。この結果から、2020年から生じたアジア地域のCH<sub>4</sub>フラックス増加は、主に湿地や農業起源の放出増加が寄与していることが示唆された。アジアでは水田が広く分布しており、農業起源の大部分は水田からの放出が占めていると考えられる。実際のところ、湿地と水田を分離することは難しいが、いずれにしろ、アジア地域の（湿地または水田に存在する）微生物からの放出が増加した可能性が今回の逆解析で示唆された。先行研究ではアフリカ地域の湿地起源が寄与した可能性が示されているが、本研究は、アジア地域の寄与という新たな可能性を示すものである。特にサブテーマ2による観測を中心としたアジア太平洋地域で充実した観測データを用いた本逆解析は、当該地域のフラックス推定に今までにない大きな拘束を与えるものであり、今後のCH<sub>4</sub>フラックスのメカニズム解明に貢献するものと期待される。

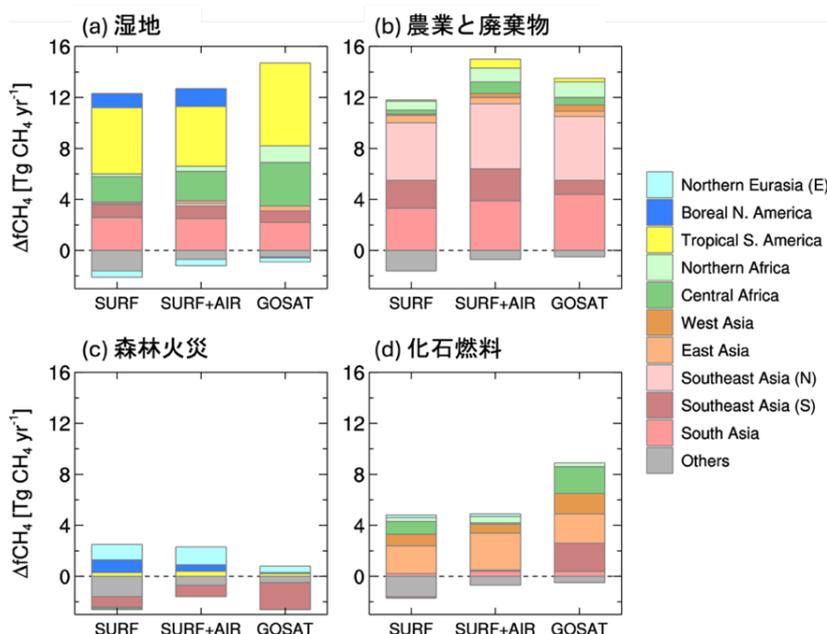


図1-8. 地上観測（SURF）、地上観測および航空機観測（SURF+AIR）、GOSATを用いた逆解析（GOSAT）から得られた2020-2022年におけるセクター毎の放出量の増加量（2016-2019年の平均からの差）。地域毎に色を分けて示す。

## 4-1-3. テーマ3によるGHGレポート、GCP/RECCAP-2などへの貢献

本研究期間中、毎年、NISMON-CO<sub>2</sub>を用いたCO<sub>2</sub>長期逆解析を実施し、テーマ2による逆解析の結果との比較解析を行いながら（成果2）、テーマ3によるGHGレポートへインプットした。また、国際的な研究組織Global Carbon Project (GCP) によるCO<sub>2</sub>収支の統合解析「Global Carbon Budget」(GCB)に参加した（成果1, 4, 7）。このGCPによるGCB解析は、IPCC第6次評価報告書第1作業部会報告書の第5章（地球規模の炭素と他の生物地球化学的循環及びそのフィードバック）に中核的な位置づけで引用されるなど、当該分野で最も信頼性の高い科学的成果の1つである。GCBでは陸域生態系モデルや海洋生物地球化学モデルといったものをベースとしてCO<sub>2</sub>収支の評価が行われているが、このモデルベースの収支評価は、実際の観測と整合性がとれているかを確認するために、観測ベースである逆解析の結果と比較されている。したがって、GCBにおいて逆解析はモデルと観測を繋げる重要な役割を担っている（図1-9a）。GCBでは、さらにこの逆解析自体の不確実性も評価するため、逆解析で得られた大気CO<sub>2</sub>濃度について、独立データ（逆解析に用いられていないデータ）である航空機観測との比較を行っている（図1-9b）。この比較から、NISMON-CO<sub>2</sub>の結果は他の逆解析と遜色なく航空機観測と整合性の取れたものであることが確認されている。なお、この航空機観測との比較で十分な精度が得られなければ、上記のCO<sub>2</sub>収支解析に採用されないことになっているが、NISMON-CO<sub>2</sub>は唯一、日本のグループとして採用されており、世界の中でも主要な逆解析システムの1つとして認識されている。このNISMON-CO<sub>2</sub>のデータはデジタルオブジェクト識別子（DOI）を付与したうえで、国立環境研究所の地球環境データベースより公開し、毎年、データの更新をしている（<https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20201127.001.html>）。このデータは、すでに国外の研究でも広く利用されている（Tang et al., 2023など）。さらに、GCPではRegional Carbon Cycle Assessment and Processes (RECCAP-2)プロジェクトのもと、全球の陸域と海洋をいくつかの地域にわけ、それぞれの地域における炭素収支の包括的な解析が進められている。このプロジェクトでもNISMON-CO<sub>2</sub>のデータが使われている（Hauck et al., 2023など）。なお、GCP以外にも国際的な輸送モデル比較（成果5, 6）、酸素や炭素安定同位体の観測による収支との比較など多角的な評価（成果25）を通じてNISMON-CO<sub>2</sub>による収支評価の信頼性を確認している。

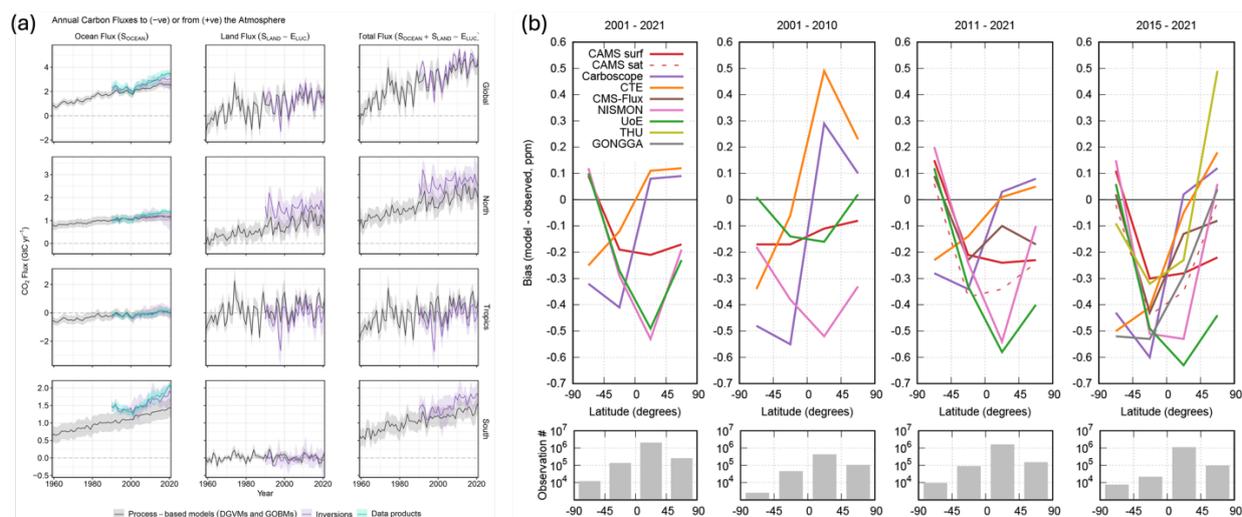


図1-9. (a)GCPによるCO<sub>2</sub>統合解析Global Carbon Budget 2022による全球および緯度別の陸・海・陸+海の吸収量の経年変化。紫の実線・陰影は、NISMON-CO<sub>2</sub>を含む複数の逆解析の結果の平均とばらつきを示す。(b)各期間における各緯度帯での航空機観測と逆解析による大気CO<sub>2</sub>濃度の計算値の比較。下段のパネルは各緯度帯での航空機観測のデータ数を示す。(a) (b)はそれぞれFriedlingstein et al., ESSD (2022b)（成果4）のFig. 13, Fig. B4より引用。

さらに、サブテーマ1ではGCPのCH<sub>4</sub>統合解析GMBにもNISMON-CH<sub>4</sub>の結果をもって参加した。ここでは、4-1-2と同じNISMON-CH<sub>4</sub>を用い、GMBで定められたプロトコル以外は全て同じ設定で逆解析を2000年から2020年の期間について行った。GMBでは、NISMON-CH<sub>4</sub>を含む複数の逆解析（トップダウン）とテーマ3を含む複数のボトムアップ推定結果が比較されている。また、このGMBでのNISMON-CH<sub>4</sub>のデータも他の研究に利用され、すでに論文としての成果もあがっている（Tibrewal et al., 2024）。

Tang, R., He, B., Chen, H.W. et al. 2022. Increasing terrestrial ecosystem carbon release in response to autumn cooling and warming. *Nature Climate Change*. 12, 380-385.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01304-w>

Hauck, J., Gregor, L., Nissen, C., Patara, L., Hague, M., Mongwe, P., et al. 2023. The

Southern Ocean carbon cycle 1985-2018: Mean, seasonal cycle, trends, and storage. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007848. <https://doi.org/10.1029/2023GB007848>.

Tibrewal, K., Ciais, P., Saunois, M. et al. 2024. Assessment of methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions. *Communications Earth & Environment*, 5, 26 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01190-w>

#### 4-2. 高解像度 NICAM-TM を用いた東京大都市圏からの CO<sub>2</sub> 放出量の推定

はじめに東京スカイツリーでのCO<sub>2</sub>濃度うち、東京大都市圏全体の濃度変化や化石燃料CO<sub>2</sub>濃度の変化に対して、それぞれの放出源や放出領域の変化の寄与がどの程度かを評価した。そのために全体の濃度変化の分散に対する各濃度変化の分散の比を寄与度の指標とし、その季節変化を図1-10aに示した。CO<sub>2</sub>のそれぞれの放出源ごとの濃度分散比を見ると、東京圏では夏季から秋季にかけては生物圏起源CO<sub>2</sub>の影響も強くなるが、基本的には化石燃料起源CO<sub>2</sub>が支配的であることがわかる。また、東京スカイツリーでの化石燃料起源CO<sub>2</sub>の濃度変化に対しては、日本、特に東京大都市圏からの寄与が大半であり、短時間スケールでの地上付近のCO<sub>2</sub>濃度変化に対しては、東アジア域はほとんど寄与していないことがわかった(図1-10b)。

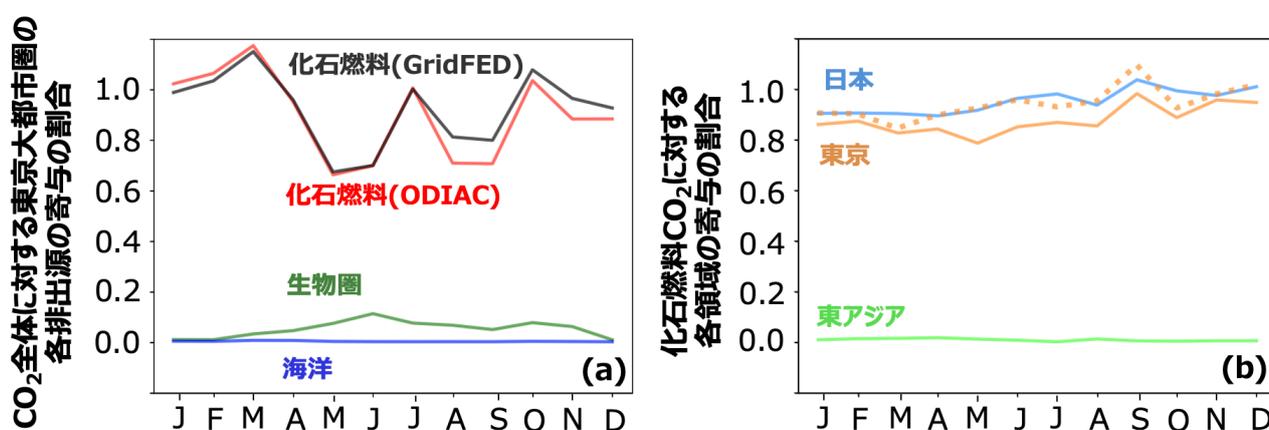


図1-10. (a) 1ヶ月ごとの東京スカイツリーでのCO<sub>2</sub>濃度の分散に対する各排出源からの濃度分散の比を取った濃度分散比。各排出源の寄与を示す。(b) 同じく東京スカイツリーでの化石燃料起源CO<sub>2</sub>の濃度分散に対する各領域からの化石燃料起源CO<sub>2</sub>の濃度分散比。点線は東京大都市圏からの化石燃料起源CO<sub>2</sub>濃度に生物圏起源CO<sub>2</sub>濃度を加えたものを示す。

図1-11aに2019年から2020年にかけての東京スカイツリーで行われた連続観測とNICAM-TMのシミュレーション結果それぞれについて、図1-3の手法を用いて東京大都市圏起源のCO<sub>2</sub>濃度として抽出したものを示す。この図からNICAM-TMで推定した東京圏起源CO<sub>2</sub>濃度は観測値の変化傾向をよく再現しているが、しばしば過大評価する傾向にあることがわかる。風速に対する東京大都市圏起源CO<sub>2</sub>濃度のNICAM-TM推定値と観測値の差の二次元頻度分布を取ったものが図1-11bである。NICAM-TMの推定値の過大評価傾向は風速が弱いほど強いが、風速が強くなると一致する頻度が増加していた。本研究期間における風速の中央値が約5.5m/sであることから、この風速を閾値として低風速と高風速に分割し、東京大都市圏起源CO<sub>2</sub>濃度のNICAM-TMの推定値と観測値で回帰直線を求め、その回帰係数を月ごとにプロットしたものが図1-11cである。回帰係数は低風速と高風速で明確に分かれ、高風速のみで線形回帰を行なった回帰係数はどの季節でも1前後となっており、観測をよく再現していた。一方でCO<sub>2</sub>とは異なる排出分布を持つラドンを用いて同様の解析を行うと(CO<sub>2</sub>同様にラドンも東京スカイツリーにおいて観測されている)、ラドンでも同様に過大評価傾向を示すが、その過大評価のタイミングはCO<sub>2</sub>とは一致しない。また、図1-11dのように高風速と低風速で場合分けをした場合、高風速のほうが低風速よりも回帰係数は1に近づくものの、CO<sub>2</sub>のように過大評価がほとんどなくなるわけではない。これはモデルに設定したラドンの排出フラックスに過大評価があるためであり、逆にCO<sub>2</sub>は広い範囲ではモデルに用いた排出フラックスがおおむね現実を再現しているためであると考えられる。

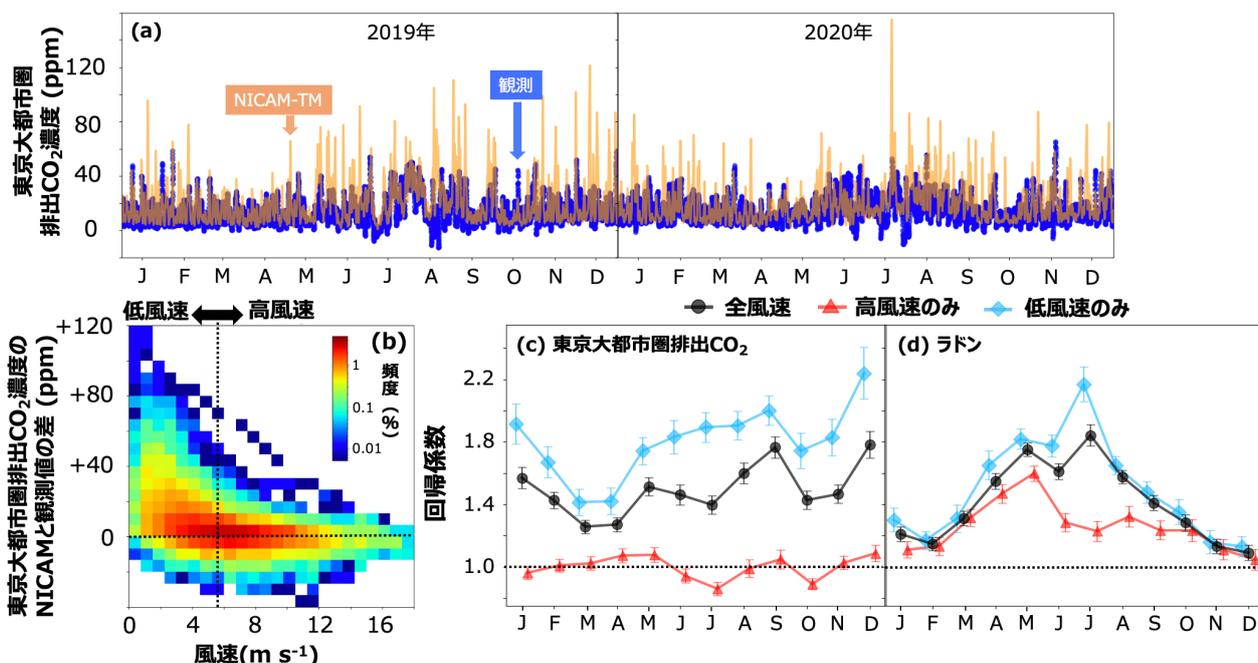


図1-11. (a) TSTにおける東京大都市圏から排出されたCO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>tk) のNICAM-TMによる見積もりと観測値の変動。(b) TSTにおけるCO<sub>2</sub>全体に対する東京圏の各排出源の寄与の割合（濃度分散比）。

本研究でNICAM-TMの計算に用いている化石燃料起源CO<sub>2</sub>フラックス分布 (GridFED) を示したのが図1-12aであり、白い円が本研究で設定した東京大都市圏を示す。この内外および円内を四分分割した領域ごとのCO<sub>2</sub>濃度分散比による寄与を示したものが図1-12bである。スカイツリーでのCO<sub>2</sub>濃度変化に対しては東京大都市圏内からの寄与が大半であり、特に南西領域の影響が強い。これは東京湾岸部に発電所や工場などの排出源が集中しており、特に西岸領域で強いことと、東京で卓越する風向が主に北と南であり、南風時にはやや西寄りの風の頻度が多いことが影響している。風速を変化させても各領域の濃度分散比は大きくは変化せず、風速10ms<sup>-1</sup>を越えるような風であったとしても東京大都市圏外からの影響は小さい。このことから、低風速を取り除いて高風速条件のみを抽出したとしても東京大都市圏内からの影響が弱くなるわけではないことがわかる。また、GridFEDで再現性の不十分な化石燃料フラックス分布の影響が、混合されることによって小さくなった結果、観測値を再現しやすくなったと考えられる。

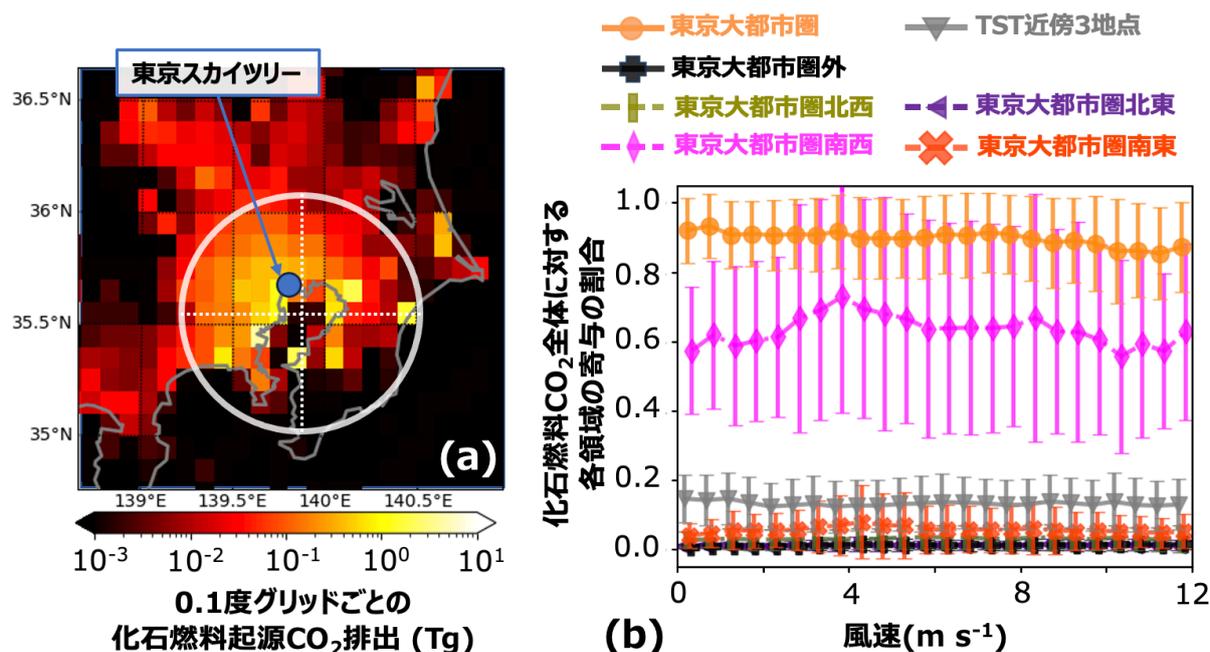


図1-12. (a) 2019年のGridFEDの化石燃料起源CO<sub>2</sub>排出分布。白円は本研究の東京大都市圏を表し、点線で四分分割する。(b) 東京スカイツリーでの化石燃料起源CO<sub>2</sub>濃度変化に対する領域ごとの寄与。東京大都市圏北西・東京大都市圏北東・東京大都市圏外はほぼ0である。

以上のように、低風速を取り除くことでNICAM-TMによる東京大都市圏起源CO<sub>2</sub>濃度の推定値は観測値をよく再現するため、観測値とNICAM-TMの推定値の比を取ることで、計算に用いた化石燃料起源フラックスと生物圏起源フラックスの合計値を回帰係数で補正し、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量を定量的に見積もった。最適な回帰係数を得るため、取り除く風速の閾値を変化させながら回帰係数を計算した結果を図1-13aに示す。この図から、回帰係数は7ms<sup>-1</sup>未満の風速を取り除くとほぼ一定になっていることがわかる。これは化石燃料起源CO<sub>2</sub>フラックスにGridFEDではなく、ODIACを使用した計算結果でも同様であった。図1-13bに示すように、特に南風の際、すなわち強い排出源のある領域からの影響を受けやすい風向のときに再現性が高かった。7ms<sup>-1</sup>未満の風速を取り除いて回帰係数を計算すると、GridFEDを用いた計算値の観測値に対する回帰係数は、0.93±0.08であった。すなわち、計算に用いたフラックス分布はよく混合された状態では若干過小評価していた。

本研究ではこの回帰係数でフラックス初期値の過小評価を補正し、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量を79.5 ± 6.6 Tg-C year<sup>-1</sup>と定量的に得ることができた。図1-13cに示すように、この推定値は類似した地域を対象とした先行研究 (Babenhauerheide et al., 2020; Ohyama et al., 2023) の推定値と比較して整合性のある値となっていた。

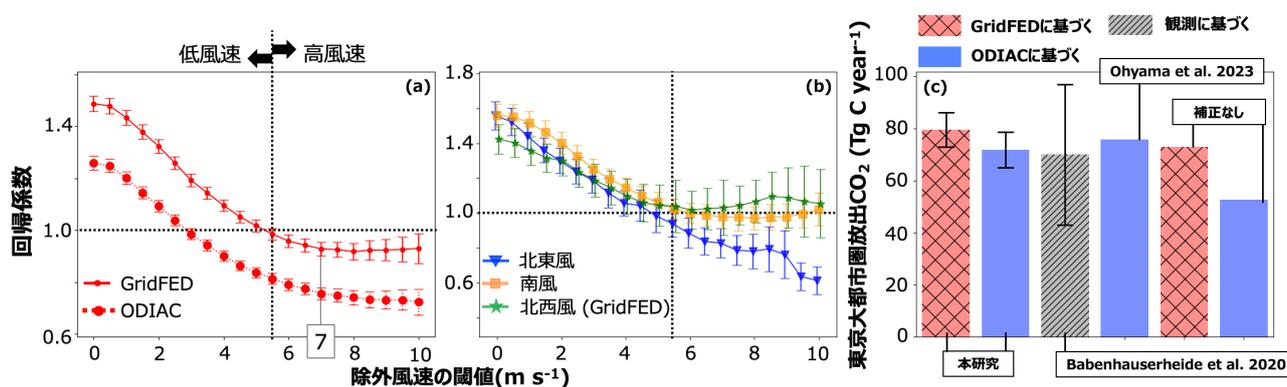


図1-13 (図0-3). 一定以下の風速を取り除いたときの観測値に対する計算値の回帰係数の変化。エラーバーは相関係数の標準誤差の半分。(a) すべての風向でNICAM-TMの計算にGridFEDを用いた場合とODIACを用いた場合。(b) GridFEDで北東、南、北西のみの風向を用いた場合。(c) 本研究および先行研究で推定された東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出量。

Babenhauerheide, A., F. Hase, & I. Morino, 2020. Net CO<sub>2</sub> fossil fuel emissions of Tokyo estimated directly from measurements of the Tsukuba TCCON site and radiosondes. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(5), 2697-2710.

Ohyama, H., M. M. Frey, I. Morino, K. Shiomi, M. Nishihashi, T. Miyauchi, ... & F. Hase, 2023. Anthropogenic CO<sub>2</sub> emission estimates in the Tokyo Metropolitan Area from ground-based CO<sub>2</sub> column observations. *EGU sphere*, 2023, 1-38.

#### 4-3. 今後の観測展開に向けた考察

##### 4-3-1. アジア太平洋地域における考察

###### (1) 日本の機関による観測のインパクト評価

今後の観測展開を考えるうえで、まず、国立環境研究所や気象庁などの日本の現業・研究機関が展開している現状の観測ネットワーク (図1-1) について、逆解析におけるインパクトを評価した。ここで、2通りの方法を用いた。まず、国立環境研究所や気象庁が国内外で展開する観測データを除外したOSSEを実施し、解析後のフラックスがどれだけ既知である真のフラックスから離れるかを評価した。次に、最適化後の理論的なフラックス誤差 (解析誤差) を独自のアルゴリズム (Niwa and Fujii, 2020) で計算し、日本の観測データの拘束強度を定量的に評価した。この両者の手法は、それぞれ長短がある。前者は比較的簡便である一方、結果がフラックスの初期推定値や真値の選択に強く依存してしまうという欠点がある。後者は、前者と比べて計算コストが大きいと、解析期間は1年ほどしかとることができないが、初期推定値などの設定条件への依存度が小さく、より客観的に観測データのインパクトを評価することが可能である。

図1-14にOSSEで得られた各地域のCO<sub>2</sub>フラックスの年々変化を示す。ここでは初期推定値、真値および2つの逆解析 (日本の観測を含める・含めない) のCO<sub>2</sub>フラックスを示しているが、日本の観測を抜いた場合では、アジア中緯度地域 (Temperate Asia) やアジア熱帯地域 (Tropical Asia) において、顕著に真値からの差が大きくなっていることがわかる。また、ヨーロッパやアジア高緯度地域 (Boreal

Asia) においてもフラックスの再現性の低下が見られていた。これは、国立環境研究所が西シベリア地域で展開するタワー観測網JR-STATIONを抜いたためと考えられる。一方、日本の観測網を抜いたことにより、南米アマゾン地域 (Tropical America) では逆に若干の改善もみられたが、これは、観測データによる拘束がアジア地域で弱まり、全球的な地域バランスが変化したためと考えられる。しかし全球におけるフラックスの二乗平均平方根誤差でみると、日本の観測網を逆解析に入れることによって15%の精度向上が見られた。このことから、逆解析において、日本の機関によって得られた観測データが大きな貢献を果たしていることがわかった。

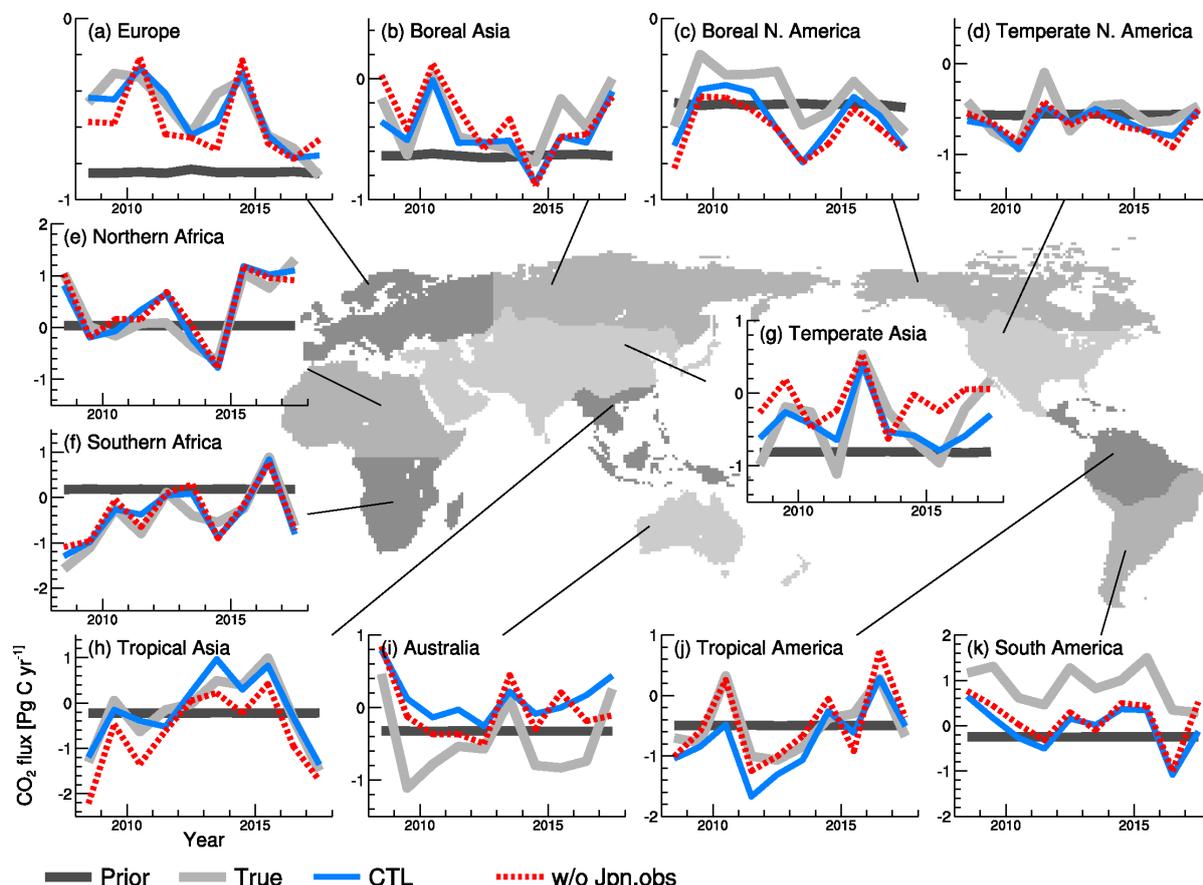


図1-14. 疑似観測データを用いた逆解析実験で得られた各地域のCO<sub>2</sub>フラックスの年々変動。通常の観測網を用いた場合（青線）とそこから日本の観測網を抜いた場合（赤点線）、初期推定値（濃灰色線）、真値（薄灰色線）を示す。

次に、これらの日本の観測ネットワークの拘束強度について、解析誤差を用いた評価を行った。まず通常の観測網を用いて計算した年平均のCO<sub>2</sub>フラックス推定値の解析誤差を図1-15aに示す。この図から、アフリカや南米、アジアの低緯度地域において、観測データによる拘束力が弱く、逆解析後もフラックス推定値に大きな誤差が残っていることがわかる。ここではさらに、通常の観測網から日本の観測データ（図1-1）を抜いた場合の解析誤差を計算し、日本の観測データを入れることによって解析誤差がどれほど減少するかを調べた（図1-15b）。この図1-15bから、日本の観測データのインパクトが日本域で最も高く、他に西シベリアや、東南アジア島嶼地域や南アジア北部、中国東北部・ロシア沿海地方においても高いインパクトが得られていることがわかる。これらは、国立環境研究所が実施しているシベリアのタワー観測やアジア地域のフラスコサンプリング観測、東南アジア周辺を航行する船舶観測などの寄与が大きいと考えられる。しかし、図1-15aで示す通り、アジア太平洋地域においても依然として推定誤差が大きい地域は多く、中国南部やインドシナ半島、インド南部では、図1-15bで示している誤差減少率も低いことがわかった。

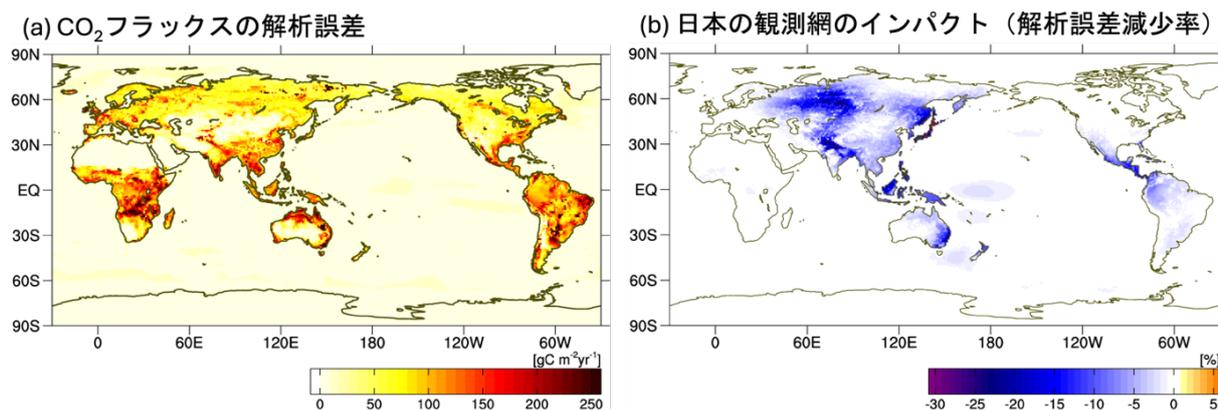


図1-15. CO<sub>2</sub>逆解析で得られた年平均のフラックス推定値の解析誤差：(a)通常の観測網を入れた場合と(b)その解析誤差の日本の観測網によって得られる減少率。日本の観測データが入っている場合を $\sigma_{all}$ 、入っていない場合を $\sigma_{no\_jpn}$ としたときに、減少率は $(\sigma_{all} - \sigma_{no\_jpn}) / \sigma_{no\_jpn} \times 100$ として計算される。負の値が大きい箇所ほどフラックス推定値に対する日本の観測データの拘束力が強いことを示す。

Niwa Y, Fujii Y. 2020. A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 146: 3118-3143. <https://doi.org/10.1002/qj.3838>

## (2) 逆解析におけるアジア太平洋地域の気体CO<sub>2</sub>濃度の不確実性

4-3-1 (1) ではCO<sub>2</sub>の地表面フラックスについての評価を示したが、実際に大気観測での測定対象は大気濃度である。そこで本研究では、今後、新たな観測を展開する際に、どこでどのような観測が効果的であるかを考察するために、逆解析後に、どこでどの程度、濃度に不確実性が残されているかを評価した。ここで、前述の評価で用いた解析誤差を大気輸送モデルNICAM-TMを用いて大気濃度へと射影する新たな手法を考案した(成果44)。この手法は、解析誤差のもととなっている解析誤差共分散行列PとNICAM-TMで計算される大気輸送(演算行列Mと表現する)から、MPM<sup>T</sup>という行列計算を行うもので(Tは転置行列を示す)、実際には、解析誤差共分散行列を求める計算の前後にNICAM-TMによる大気輸送計算を1回ずつ(フォワード計算とアジョイント計算(転置行列の部分))、求めたい濃度の対象(場所、時間)毎に行うものである。しかし、利用可能な計算資源にも限りがあることから、対象の数を絞る必要があるため、本研究では、アジア太平洋地域内の緯度経度5度毎の地点に限定し、年平均や3ヶ月平均と時間方向にも平均化して解析を行った。

その結果を図1-16に示す。ここでは、比較のため、逆解析のフラックス初期推定値の誤差共分散行列から計算した結果も並べて(図1-16a)、逆解析の前と後で、どれだけ濃度の誤差(フラックスデータとNICAM-TMによって計算される大気濃度の不確実性)が地表面で減少したかを示している。この図から、逆解析によって全体的に濃度の不確実性が減少しているものの陸上や沿岸地域では不確実性が残されている一方、太平洋やインド洋などの外洋域では不確実性が非常に小さくなっていることがわかる。図1-17では、さらに季節毎(7-9月と1-3月)、また地上と上空(高度10km)とに分けた逆解析後の濃度誤差を示す。ここで上空の解析は、旅客機を用いた上部対流圏の観測を想定している。この図から、東南アジア島嶼地域の西側で7-9月に不確実性がやや大きくなっているものの、全体的に誤差が大きい地域の分布は地表面ではあまり変化がないことが伺える。なお、陸上で不確実性の大きさが季節によって変化しているのは、その場所のフラックスの不確実性(フラックスの強度とほぼ比例)が変化しているためと考えられる。一方、上空では濃度の不確実性が存在する地域が、季節によって大きく異なることがみとれる。北半球中緯度以北では、冬季(1-3月)にほとんど濃度の誤差がない一方、夏季(7-9月)には地上と同じように陸地や沿岸地域の上空で誤差が大きくなっていた。

このように、陸上付近だけでなく、特に東南アジア周辺やインド洋などの沿岸地域、またその上空において濃度の不確実性が大きい、すなわち、これらの場所に新たに観測データをおくことによって、逆解析にインパクトをもたらす可能性があることがわかる。陸上での観測はステーションの設置が容易ではなく、また、フラックスの不均一性も大きいことから、代表性の高いデータを取得することは困難である。そのため、サブテーマ2で実施している船舶観測や航空機観測をさらに充実させることが有効であると考えられる。図1-17をみると、上空と地上の沿岸地域、両者ともに、3ヶ月平均濃度で0.3ppmほどの不確実性が見られる。このことから、3ヶ月間の濃度平均値の推定精度が0.3ppmほどに収まるほどの頻度、精度で、追加的に観測をすることができれば、逆解析にインパクトをもたらすと思われる。この結果を受け、次期推進費S-22では、日本から中東へと航行する貨物船を用いて、新規のGHG観測を実施する予定となった。

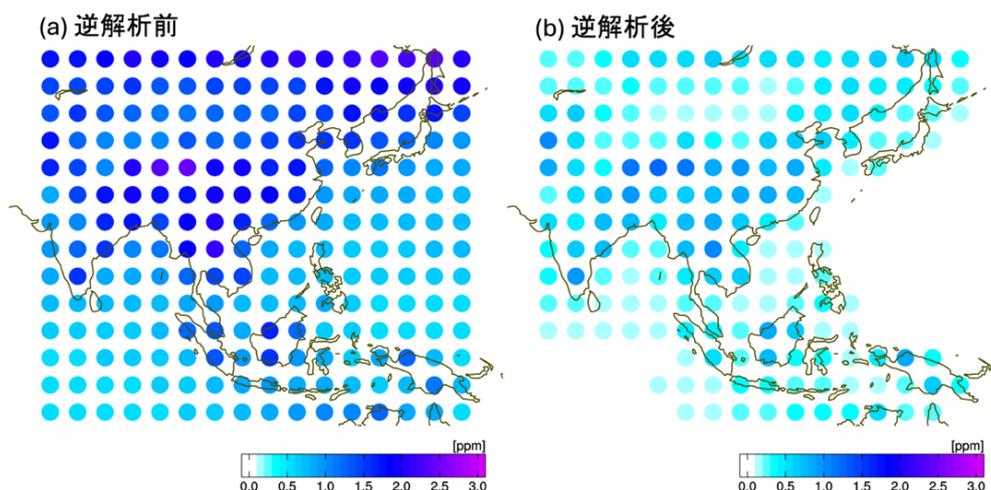


図1-16. 逆解析の(a)前(b)後における各緯度経度での大気CO<sub>2</sub>濃度(地上、年平均値)の誤差。それぞれ、フラックスの初期推定誤差、解析誤差をNICAM-TMを用いて大気濃度へと射影した。

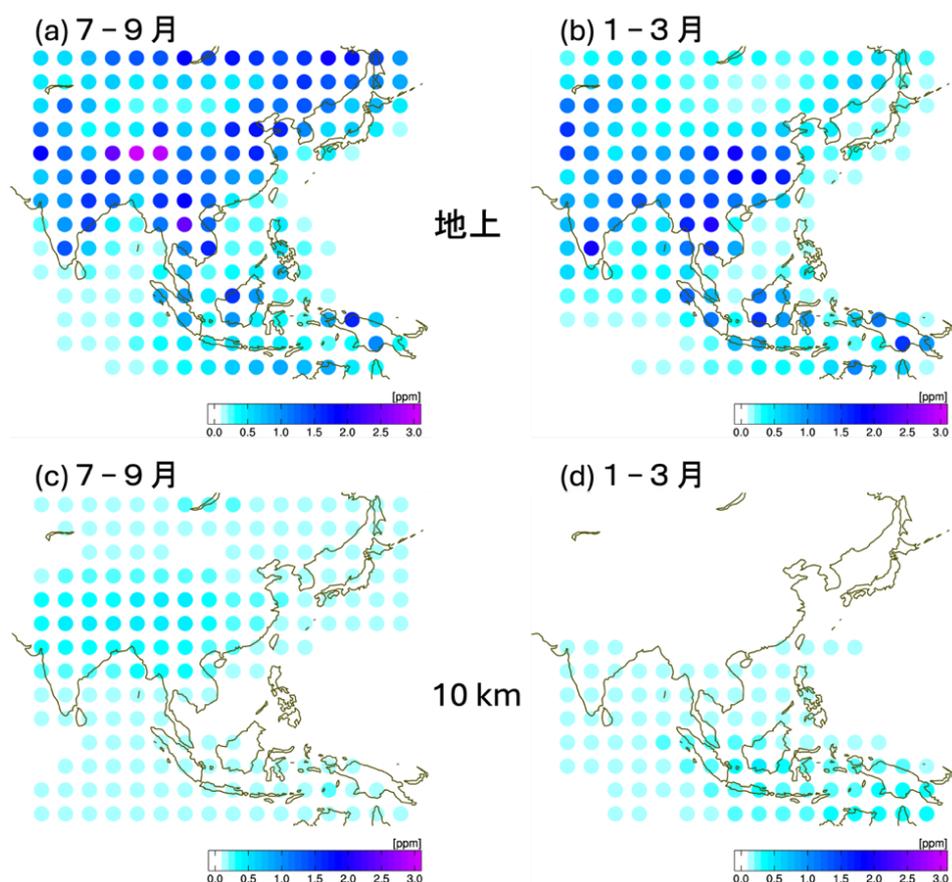


図1-17. 逆解析後の各緯度経度での大気CO<sub>2</sub>濃度の誤差。(a, b)地上と(c, d)上空高度10kmにおける夏季(7-9月平均値)、冬季(1-3月)の平均濃度について示す。

#### 4-3-2. 東京大都市圏における考察

図1-18aで示すように、東京大都市圏から排出されるCO<sub>2</sub>量は特に東京湾沿岸部の発電・工業地帯からが多い。図1-18bに東岸・西岸それぞれの合計の排出量を示す。西岸のほうが東岸よりも排出量が多いものの、東岸でも西岸の60%程度の排出があり、東京大都市圏全体に対する割合は大きい。しかし図1-12で示したように、東京スカイツリーでのCO<sub>2</sub>濃度変化に対しては大部分が東京大都市圏南西部、すなわち東京湾西岸部からの寄与が大きく、東岸部(東京大都市圏南東部)の寄与は非常に小さい。

東京スカイツリーで東岸部の寄与が小さい原因は風向である。図1-18cに2019年から2020年にかけての東京スカイツリー250mでの風向を示す。東京の多くの場所で卓越風向は北と南であり、東京スカイツリーでは特に北北東、北北西、および南南東(西岸の影響が強い)の頻度が高く、東岸の影響を受けやすい南東風の頻度は非常に少ない。

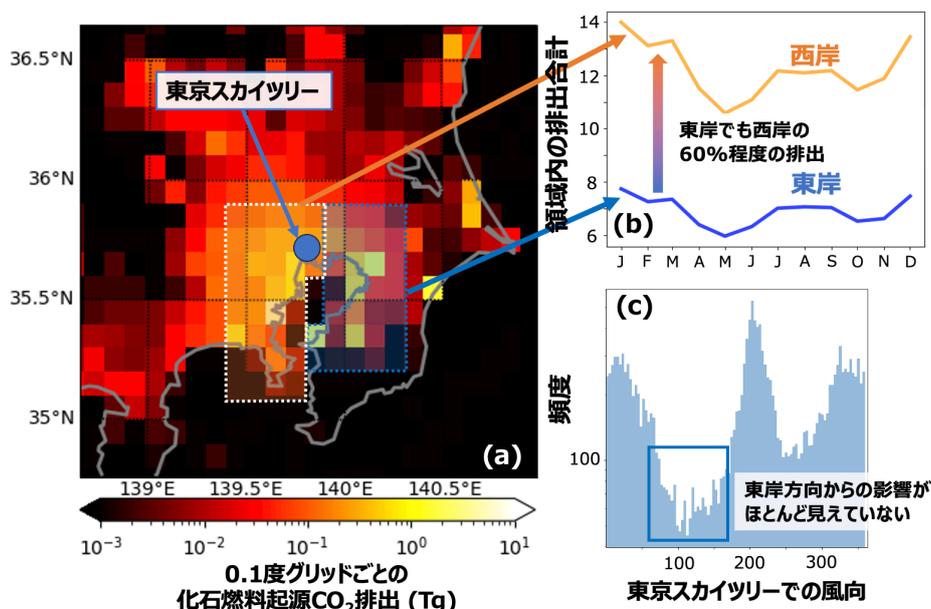


図1-18. (a) 2019年のGridFEDの化石燃料起源CO<sub>2</sub>排出分布と、東京湾の東岸西岸の分割。(b) 東岸・西岸の領域ごとのCO<sub>2</sub>排出量の月変化。(c) 2019年から2020年の東京スカイツリー250m高度での風向の頻度分布。

図1-19に東京湾の影響を受けやすくなる南風が卓越する6-8月において、各地点のCO<sub>2</sub>濃度変化に対して東京大都市圏やその南東部の寄与の強さの分布を示す。全体の化石燃料CO<sub>2</sub>濃度変化に対しては、本研究で用いた東京スカイツリーや既存サイトであるつくば国立環境研究所、横浜防衛大学校などでは東京大都市圏全体の化石燃料CO<sub>2</sub>の変化の寄与をよく受けている(図1-19a)。しかし南東部の寄与に限った場合、スカイツリー、環境研、防衛大といった既存のサイトではいずれも風向きの影響で南東部の影響をほとんど受けることができない(図1-19b)。

東京湾東岸の排出のシグナルを捉えるためには、東京圏全体からの寄与と南東領域の割合のどちらも強い領域に観測地点を置くことが有効である。そのため、2023年8月よりこの条件両者を満たす位置にある千葉大稲毛キャンパス内施設屋上にサブテーマ2が開発した簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを設置し、連続観測を開始した。今後、本観測データを用いることで、東京湾東岸部を含めた東京圏全体のCO<sub>2</sub>フラックスをより正確に見積もることができると期待される。

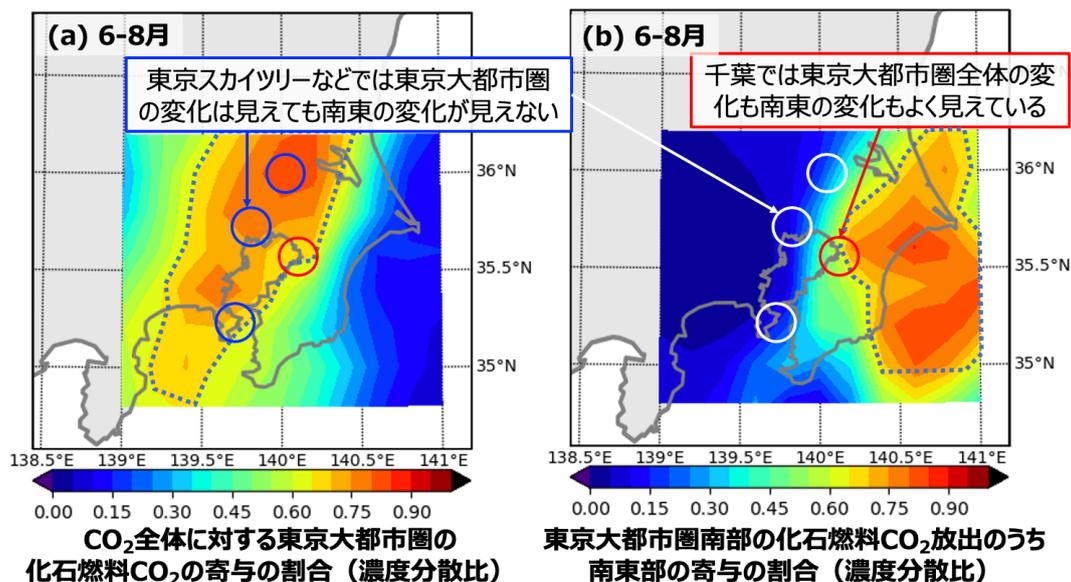


図1-19. (a) 2019年から2020年の6-8月の場所ごとの化石燃料CO<sub>2</sub>濃度変化に対する東京大都市圏排出の化石燃料CO<sub>2</sub>の寄与分布。色が赤いほど東京大都市圏の寄与をよく受けていることを示す。青点線は寄与が0.7以上。赤丸は千葉大学稲毛キャンパス、青丸は既存のサイトである東京スカイツリー、国立環境研究所、横浜防衛大学校の位置を示す。(b) 同じく東京大都市圏南部の化石燃料CO<sub>2</sub>濃度の変化に対する南東部の寄与分布。赤いほど南東部の寄与をよく受けていることを示す。

## 5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

低・高解像度の大気輸送モデルNICAM-TMを組み合わせたマルチスケールの総合的な解析システムを構築するという目標に対し、本研究では、まず低解像度での30年以上の長期にわたる逆解析について、精緻なグリッド変換を逆解析システムNISMONに導入することにより、従来の解像度（ $\sim 223\text{km}$ ）よりも高解像度（ $1^\circ \times 1^\circ \approx 110\text{km}$ ）でのフラックス最適化を可能とした（図1-14、成果3, 41）。さらに、大気モデルNICAM-TMの効率化により、逆解析における大気輸送計算も従来よりも高解像度の格子（ $\sim 112\text{km}$ ）で実施可能とした（図1-15）。この低解像度で最適化されたフラックスデータ（ $1^\circ \times 1^\circ$ ）を高解像度のNICAM格子（ $\sim 14\text{km}$ ）にダウンスケーリングすることで、全球高解像度のCO<sub>2</sub>大気輸送の再現計算を可能とし、さらに、日本や東アジア地域起源を分けたタグ付きトレーサー法を導入することで、東京大都市圏からのCO<sub>2</sub>放出推定を可能とした（図1-13；成果24, 43, 45）。以上のようにして、マルチスケールの解析システムを構築し、目標を達成した。

速報性を重視した解析体制を整え、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という目標も達成した。具体的には、サブテーマ2による大気観測データとサブテーマ3による海洋フラックスデータをうけて即時に逆解析を実施できる体制を整え、最新のCO<sub>2</sub>収支統合解析を行うGlobal Carbon Project (GCP) によるGlobal Carbon Budget (GCB) に対して、毎年、データ提供を行える体制を構築した。さらに、近年（2020～2022年）の急激なCH<sub>4</sub>濃度増加に対して速報的な逆解析を実施し、アジア地域の放出増加が主要因である可能性を示した。以上の成果を通して、UNFCCCに提出されたテーマ3によるGHGレポート作成に貢献し、また、GCBやGCPによるCH<sub>4</sub>統合解析に参加することで、本研究の成果は国際的に認知度の高い主要なGHG収支プロダクトの一つとなった（図1-9；成果1, 4, 7）。

GHGフラックス推定に対する観測データのインパクトを定量的に把握するための評価手法を確立し、また、アジア・太平洋地域から日本国内において有効な観測について具体的な提案を行い、サブテーマ2とともに新たな観測を展開して収支推定の向上に貢献するという目標も達成した。具体的には、逆解析における観測データのインパクトを定量的に評価するため、それぞれ長短のある2つの手法（疑似観測データ実験、誤差軽減率計算）を考案し、アジア太平洋地域において、日本の現業・研究機関による観測データのインパクトを客観的に評価することができた。また、解析誤差を用いて逆解析における大気濃度の不確定性を評価する手法を新たに開発し、今後の観測展開において、東南アジアやインド洋の上空、またその沿岸地域において、濃度の3ヶ月平均の推定精度が0.3ppmほどに収まる観測が実施できれば有効である可能性があることを示した（図1-17；成果44）。また、東京大都市圏を分割する詳細なタグ付きトレーサーを用いて、CO<sub>2</sub>放出量推定の精度向上に向けた新たな観測の設置場所として千葉を提案し、サブテーマ2の簡易設置型高精度大気中GHG観測システムによる観測開始に繋げた（図1-19）。

## II-2 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」

### [サブテーマ2 要旨]

サブテーマ2では、首都圏からのGHG排出量を把握するために、都内で観測されるCO<sub>2</sub>の短期変動についてサブテーマ1でのモデル計算結果と比較することにより、CO<sub>2</sub>の短期変動に対する起源別・地域別寄与率を明らかにした。また、都市圏の排出シグナルを効果的に捉える観測地点を機動的に調べるために、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発した。さらに、サブテーマ1のモデル解析から東京のCO<sub>2</sub>排出量を推定するために有効だと考えられた東京湾東岸において（II-1の4-3-2を参照）、本システムを用いて大気観測を実施することに成功した。さらに、国内の主要都市域からのGHG排出量を広範囲かつ継続的にとらえるため、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船（日侑丸）での大気観測を2022年1月に開始し、沿岸に位置する各都市域からのGHG排出量を検証するためのデータを継続的に取得できるようになった。地域によるCH<sub>4</sub>発生源の寄与を推定するため、波照間やインド、バングラデシュで採取された大気試料中の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>分析を行い、それぞれのCH<sub>4</sub>排出源について、インベントリだけでは分からない排出源に関する情報が得られた。また、CH<sub>4</sub>の発生源推定をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた高精度<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>連続的測定システムを開発し、つくばにおける外気の連続観測に成功した。さらに、波照間島及び与那国島で観測された大気中CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>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<sub>2</sub>の排出量の変化を推定する手法を開発し、2020年から2023年の1～3月の中国起源CO<sub>2</sub>排出量の変化を推定した。これまで国環研・気象庁・気象研が構築してきたアジア・太平洋域における大気観測網から取得されたGHG濃度の観測データを、逆解析計算によるGHGの収支解析に速やかに提供できる体制を構築すると共に、これらのGHG濃度データの公開を進めた。

### 1. サブテーマ2 研究開発目的

本研究課題では、マルチスケールGHG収支の迅速かつ継続的な定量化を実現するために、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を目的とする。推進費SII-8課題全体では2022年12月末までに2021年度中のGHG収支評価の速報値を出し、それ以降も継続して収支評価を続けることを目標にしており、本研究ではその目標に合わせてデータ取得・整備体制を構築する。

### 2. サブテーマ2 研究目標

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」
サブテーマ2 実施機関	国立研究開発法人国立環境研究所
サブテーマ2 目標	<p><u>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</u>  サブ1で計算される濃度変動を観測結果と比較し、観測がどの程度東京都市圏の排出シグナルを捉えているかを調べる。その上で、さらに有効な観測について検討する。また、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを1台開発し、上述の都市排出把握に有効と推定された地点において追加観測を実施する。都市域からのGHG排出量を効率的にとらえるための移動体を用いた観測として、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船での大気観測を2021年夏頃までに開始する。最初に船舶の排気ガスの影響を取り除き、都市域からの排出シグナルを分離する手法を開発する。また、貨物船観測が捕捉できる範囲をモデル計算結果との比較から明らかにする。</p> <p><u>同位体・多成分観測に基づく起源分離・放出量変動推定</u>  波照間やアジア域で採取される大気試料の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>測定から、CH<sub>4</sub>変動に対する発生源毎の寄与率を推定する。さらに、<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>観測をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システムを開発する。レーザー分光装置の性能評価を行い、最適な大気試料の導入法を検討して実際の大気観測への応用を可能とする。また、GHGと同時に各</p>

	<p>種関連成分の観測 (CO、O<sub>2</sub>、<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>等)を実施し、GHGとの相関関係から放出量の時間変動や空間分布についての制約条件を課すことができるかどうか明らかにする。</p> <p><u>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</u></p> <p>これまで国環研が構築してきたアジア・太平洋域における大気中GHGの観測網を活用し、取得されたデータ精度の検証を進めながら、定常的に大気中GHGの時空間変動を把握することで、テーマ3で取りまとめる速報的な評価報告書作成に貢献する。また、観測結果を精査しできるだけ速やかにサブ1に提供できるよう、データ処理システムを構築する。さらに、一般のデータ利用促進のため、データ公開の手続きを確定し、国環研が運営する地球環境データベースでの公開を目指す。</p>
--	---

### 3. サブテーマ2 研究開発内容

サブテーマ2では、首都圏のGHG排出量を把握するために、都内で観測されるCO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>の短期変動についてサブテーマ1でのモデル計算結果と比較した。また、都市圏の排出シグナルを効果的に捉える観測地点を機動的に調べるため、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発を進めた。本観測システムを用いて、モデル解析から東京のCO<sub>2</sub>排出量を推定するために有効だと考えられた東京湾東岸（千葉大学環境リモートセンシング研究センター）において、2023年8月からCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の濃度観測を実施した。さらに、国内の主要都市域からのGHG排出量を広範囲かつ継続的にとらえるため、日本沿岸域を定期的に運航する貨物船（日侑丸）での大気観測を2022年1月に開始し、2024年度末まで順調に観測を継続した。

地域によるCH<sub>4</sub>発生源の寄与を推定するため、波照間やインド、バングラデシュで採取された大気試料中の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>分析を行い、取得された観測データを解析した。また、CH<sub>4</sub>の発生源推定をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた高精度（1時間平均で±0.2%）<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>連続的測定システムを開発し、つくばにおける外気の観測を実施した。さらに、波照間島及び与那国島で観測された大気中CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>のシノプティックスケールの変動比の解析から、中国における化石燃料起源CO<sub>2</sub>の排出量を推定する手法を開発し、2020年から2023年の1～3月の中国起源CO<sub>2</sub>排出量の変化を推定した。

これまで気象庁・気象研・国環研が構築してきたアジア・太平洋域における大気観測網から取得されたGHG濃度の観測データを、逆解析計算にもとづくGHGの収支解析に速やかに提供できる体制を構築すると共に、これらのGHG濃度の観測結果の多くについては、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）や、国環研が運営する地球環境データベース等からの公開を進めた。

### 4. サブテーマ2 結果及び考察

#### 4-1. 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

東京大都市圏で観測されるCO<sub>2</sub>の短期変動について、サブテーマ1での予備的な計算であるナッジング（NICAM-TMの水平風速を客観解析データで強制して、現実の大気輸送場を再現する手法）なしの理想実験との比較を行った。図2-1(左)に、東京スカイツリー(TST)の250m付近で2017年に観測されたCO<sub>2</sub>濃度の1時間平均値とベースライン濃度、ならびにベースラインからのCO<sub>2</sub>濃度増分を示す。ベースラインの季節変動に加えて、数十から100ppm程度のCO<sub>2</sub>の短期変動が観測された。図2-1(右)に、NICAM-TMのタグ付きトレーサ実験（図1-3を参照。ただし、ここでは異なる化石燃料起源のフラックスデータ（ODIAC）を利用）で計算されたTSTの緯度経度高度におけるCO<sub>2</sub>濃度を示す。これらの結果から、TSTで観測されるCO<sub>2</sub>の短期変動に対する化石燃料起源CO<sub>2</sub>の地域別寄与率を調べると、最も高いのは関東圏起源で80～100%であることがわかった。一方で、イベント的に数日～10日程度の周期で、関東圏外の日本で排出されたCO<sub>2</sub>が到達して50%程度の寄与率に達することがあること、また、特に冬季は東アジア起源のCO<sub>2</sub>が到達するイベントが発生し、20%程度の寄与率を持つことがわかった。今後、東京の大気観測から首都圏のCO<sub>2</sub>排出量を把握するために、季節やイベントによっては関東圏外の日本や東アジアの影響を考慮する必要があることが示唆された。

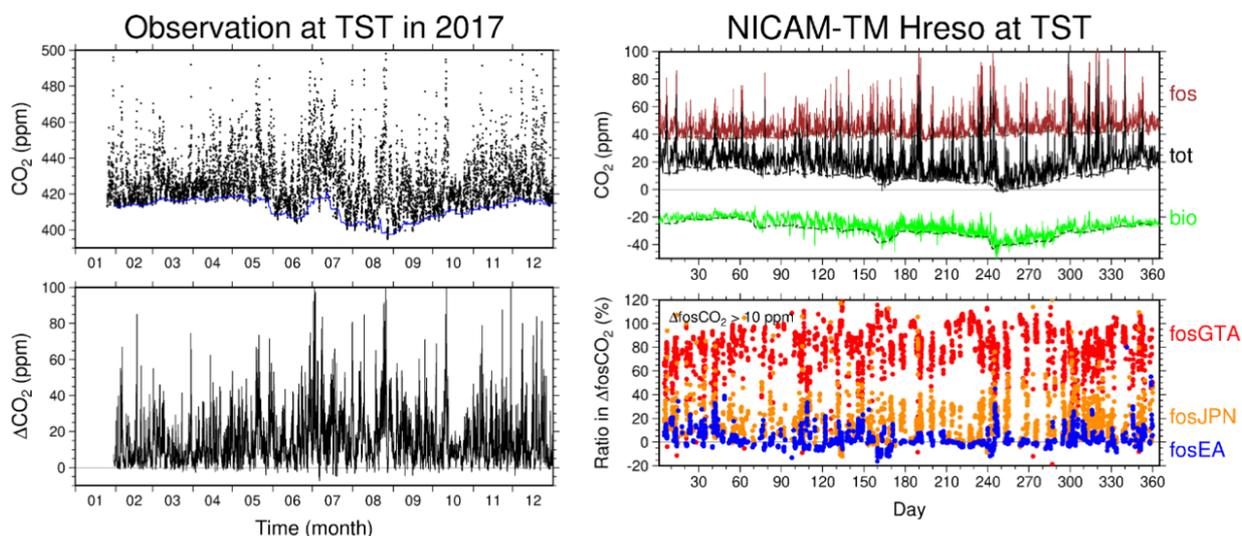


図2-1. 東京スカイツリー(TST)で2017年に観測された、(左上) CO<sub>2</sub>濃度の1時間平均値(黒点)とベースライン(±5日間の下位10%濃度の移動平均、青波線)、(左下) ベースラインからのCO<sub>2</sub>濃度増分、およびNICAM-TMで計算された、(右上)TSTのCO<sub>2</sub>濃度とその内訳(総量が黒、化石燃料が茶、生態系が緑)、(右下) 化石燃料起源CO<sub>2</sub>の排出域の寄与率(赤が関東、オレンジが関東以外の日本、青が東アジア)。

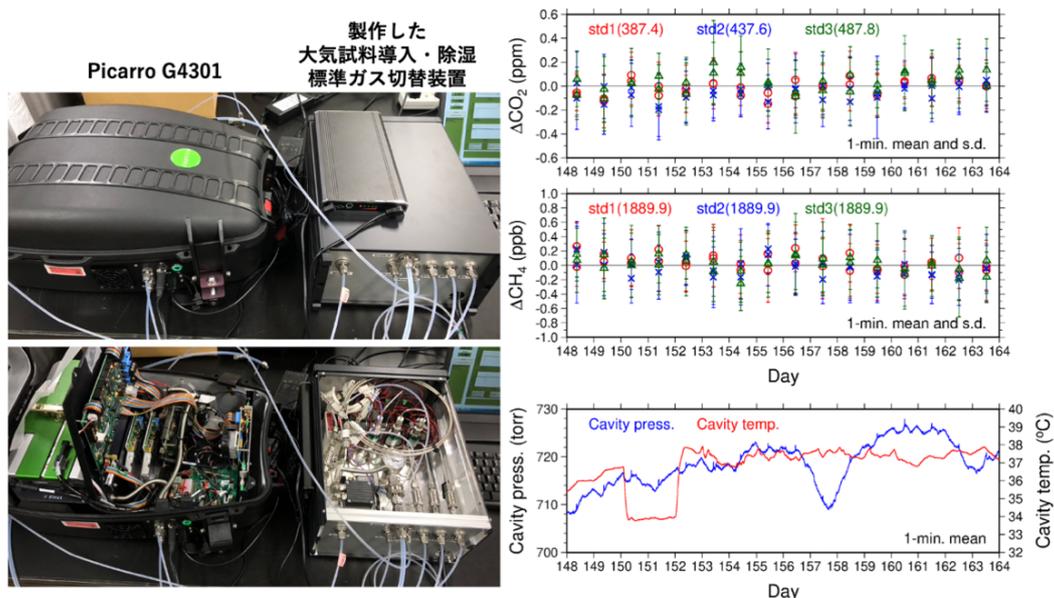


図2-2 (図0-4). (左)製作した大気試料導入・除湿/標準ガス切替装置の写真、および(右) 3濃度の標準ガスのCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>濃度(平均値からの差)と装置のキャビティ圧・温度の1分平均値の時間変化。

簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの開発を以下のように進めた。システムの中核となるレーザー分析計は米国Picarro社製 G4301を選定した。G4301は5秒平均の測定精度がカタログ値でCO<sub>2</sub> 0.4ppm、CH<sub>4</sub> 3ppbと高精度である。また、キャビティの圧力がほぼ大気圧なため排気ポンプが小さく、気温と圧力の制御が不要であることから、省電力でバッテリー駆動が可能であり、GPSも搭載できるため、移動体観測に適する。ただし、キャビティ圧力の制御をしていないため、標高などにより大気圧が大きく変わると濃度が変動する。また、サンプル流量が1 L/minであり、標準ガスを定期的に流して校正するには流量が大きすぎる。我々は、国立環境研究所のCO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>スケールに準じた観測値を得るために、G4301に標準ガスと除湿した大気試料を導入するガス切替装置を製作した(図2-2左)。製作した大気試料導入・除湿/標準ガス切替装置の特徴は、1) 小型マスフローコントローラを備え、G4301に導入するサンプル流量の調整が可能、2) 3種類の標準ガスを切り替えて導入することが可能、3) ガ

ス切替のための電磁弁の制御はWindows OS標準搭載のWindows .NET Frameworkを用いてUSB DIOユニット経由で行う、4) 大気試料を採取するポンプとナフィオンドライヤーを内蔵し、大気試料を除湿してG4301に導入することが可能、5) コンパクトな箱に収めて24Vのバッテリーで駆動するため可搬、などである。

G4301と製作したガス切替装置を用いて3濃度のCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の標準ガスを分析した結果を図2-2(右)に示す。3本の標準ガスを、1日1回、100ml/minで各濃度5分間分析し、最後の2分間の1分平均値を示した。1分平均値の分析誤差(1分間に得られた約45個の分析値の標準偏差)は、濃度によらず、CO<sub>2</sub>で0.2ppm、CH<sub>4</sub>で0.4ppbであった。16日間の試験の間、標準ガスの分析値が平均から大きくずれることはなく、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の全期間の標準偏差はそれぞれ±0.08ppmと±0.1ppbであり、1分平均値の分析誤差より十分小さかった。濃度のドリフトも非常にわずかで(CO<sub>2</sub>が±0.05 ppm/10日、CH<sub>4</sub>が-0.1ppb/10日)、安定した分析値が得られることが確認された。分析期間中、キャビティ圧力は708~726torr、温度は34~38°Cの範囲で変動したが、キャビティ圧力と温度の変化に対応した標準ガス濃度分析値の変化は確認されなかった。本課題で開発した簡易設置型高精度大気中GHG観測システムは、全てバッテリーで駆動すること、また標準ガスの導入の頻度が非常に少なくても安定した分析が可能なることから、観測場所の制限が非常に少ないことが期待される。

実際に、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを用いて、東京のCO<sub>2</sub>排出量を推定するために有効だと考えられる地点で追加観測を実施した。サブテーマ1のモデル解析の結果から、TSTでは大規模排出源が存在する東京湾東岸の影響がほとんど見えないが、千葉市内では東京湾東岸の寄与を捉えることができるかと推測された(Ⅱ-1の4-3-2を参照)。よって、千葉での大気観測をモデルに加えることで、東京圏CO<sub>2</sub>排出量推定が向上できる可能性がある。そこで、千葉大学環境リモートセンシング研究センター(CEReS)入江仁士教授の研究室の協力を得て、千葉大学西千葉キャンパス工学系総合研究棟I屋上(標高60 m)に簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを設置し、2023年8月からCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>濃度観測を実施した。図2-3に、屋上に設置した大気採取口と東京湾方面の景色、ならびに屋内に設置した簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを示す。

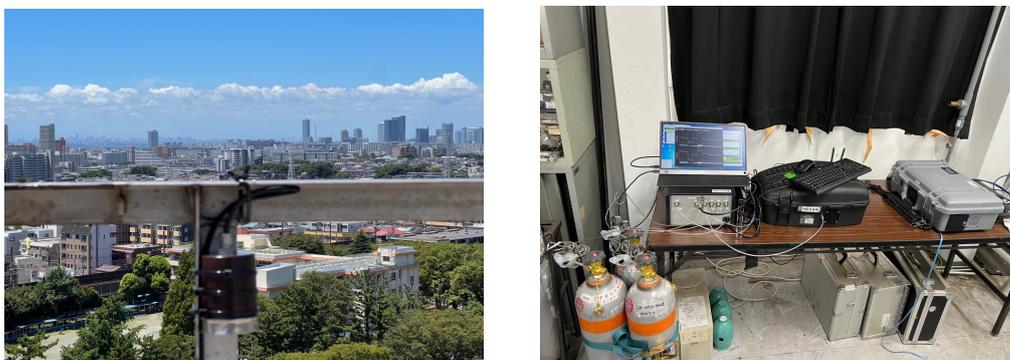


図2-3 千葉大学西千葉キャンパスに設置した(左)屋上の大気採取口、(右)屋内に設置した簡易設置型高精度大気中GHG観測システム。

図2-4(左)に、標準ガス分析時におけるCO<sub>2</sub>濃度とCH<sub>4</sub>濃度の1分平均値の時間変化を示す。3濃度の標準ガスをそれぞれ5分ずつ装置に流し、後半3分のデータのみ使用した。2023年8月から10月は50時間間隔で標準ガス分析を行ったが、予想より標準ガスの消費量が大きかったため、2023年11月に配管を改修するとともに標準ガス分析頻度を4日毎とした。CO<sub>2</sub>について、標準ガス濃度の分析値は0.2 ppm程度のばらつきを持ち、さらに2023年10月から2023年12月にかけて約0.3 ppm増加するドリフトが発生した。CH<sub>4</sub>については、2024年1月中旬に0.5 ppb程度の階段状の変化が発生した。一方で、標準ガス分析時におけるCO<sub>2</sub>濃度とCH<sub>4</sub>濃度の1分平均値の標準偏差は、全期間平均でCO<sub>2</sub>が0.25±0.05 ppm、CH<sub>4</sub>が0.6±0.2 ppbであった。CO<sub>2</sub>の分析精度はWM0が求める0.1 ppmには達していないが、CH<sub>4</sub>の分析精度は非常に高かった。以上のことから、CO<sub>2</sub>の分析誤差は0.3 ppmで、8ヶ月間で最大0.3 ppm程度のドリフト

が発生したこと（ただし標準ガス分析値で補正可能）、CH<sub>4</sub>の分析誤差は0.6 ppbで、有意なドリフトは発生しなかったことがわかった。なお、標準ガス濃度分析は絶対値を決めるためには必須だが、都市大気観測においては0.3 ppmのCO<sub>2</sub>濃度ドリフトは問題とならない場合が多いと考えられるため、頻繁に標準ガス分析を実施する必要性は低いと考えられる。一方で、バックグラウンド大気観測においては0.3 ppmのCO<sub>2</sub>濃度ドリフトは問題であり、定期的な標準ガス濃度分析による校正が必須であると考えられる。本報告書では8ヶ月間の結果を示したが、連続観測を継続するとさらに大きな濃度ドリフト・濃度ギャップが発生する可能性もあるため、装置の安定性についてはさらなる調査の継続が必要である。

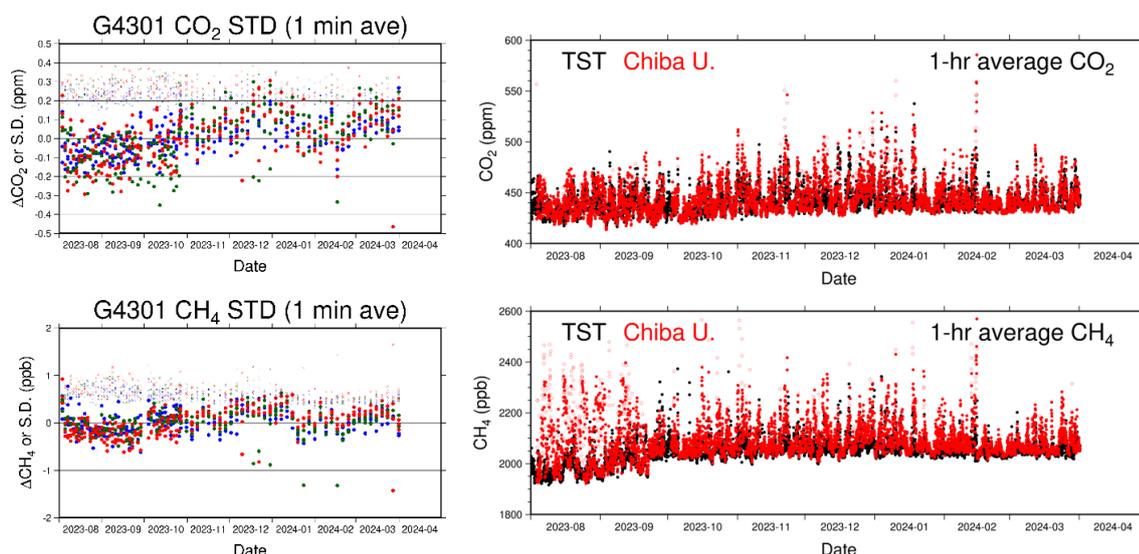


図2-4（左）千葉大学西千葉キャンパスに設置した簡易設置型高精度大気中GHG観測システムの標準ガス分析時における（上）CO<sub>2</sub>濃度と（下）CH<sub>4</sub>濃度の1分平均値の時間変化。値は全期間平均値からの差で示した。青はCO<sub>2</sub> 391.15ppm, CH<sub>4</sub> 1902.3ppb、緑はCO<sub>2</sub> 441.22ppm, CH<sub>4</sub> 2100.0ppb、赤はCO<sub>2</sub> 489.45ppm, CH<sub>4</sub> 2304.5ppbの標準ガスを表す。また、クロスは1分値の標準偏差を表す。（右）観測された（上）CO<sub>2</sub>濃度と（下）CH<sub>4</sub>濃度の1時間平均値（赤丸）。黒丸はTSTの観測データを表す。

図2-4（右）に、千葉大学西千葉キャンパスで観測されたCO<sub>2</sub>濃度とCH<sub>4</sub>濃度の1時間平均値の時系列を示す。参考としてTSTの観測データも示した。千葉大学とTSTを比較すると、CO<sub>2</sub>濃度についてはベースライン濃度の差は平均で $0.08 \pm 0.69$ ppmでよく一致し、高CO<sub>2</sub>濃度イベントの濃度増大幅と頻度も同程度であった。一方CH<sub>4</sub>濃度については、ベースライン濃度は千葉大学の方がTSTより平均で $10.1 \pm 4.6$ ppb高く、CH<sub>4</sub>の高濃度イベントはTSTより千葉大学の方が濃度増大幅と頻度ともに大きかった。特に、夏季において千葉大学ではCH<sub>4</sub>の高濃度イベントが観測された。これは、装置を設置した建物の屋上にある換気ダクトが影響していると考えられた。屋上の換気ダクトはインレットの南側に位置し、夏季の南風が卓越する気象場の時にダクトの影響が大きく現れる可能性がある。ダクトの影響と考えられる夏季の高濃度イベントはCH<sub>4</sub>に顕著で、CO<sub>2</sub>濃度にはあまり現れていない。よって、CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>比を用いて高CH<sub>4</sub>濃度データを削除するなどの検討が必要である。一方、CO<sub>2</sub>濃度データはダクトの影響が小さいと考えられたので、サブテーマ1のモデル解析に利用してCO<sub>2</sub>排出量推定に活用していくことが可能である。

国内都市域からのGHG排出量を広域的かつ継続的にとらえるため、日本沿岸域を定期的に運航する国内航路貨物船舶（内航船）「日侑丸」（鹿児島船舶株式会社所属）にCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>などの大気中GHG濃度を測定する観測機器を設置し2022年1月に大気観測を開始し、2024年3月まで継続して実施した。日侑丸は川崎港（神奈川県）から荻田港（福岡県）を1週間で往復する自動車運搬船であり、航海中に豊橋港・名古屋港（愛知県）、神戸港（兵庫県）、坂出港（香川県）等に寄港する。大気試料採取口は船首のブリッジ上方（海面からの高さはおよそ10m）に設置され、配管を通して約30m離れた大気観測室の分析装置に試料空気を導入し、10秒ごとに連続測定をおこなっている。また10Lシリンダー容器3本にGHG濃度

が既知の標準ガスを充填し、定期的に分析装置に導入することで観測されたGHG濃度を校正した。

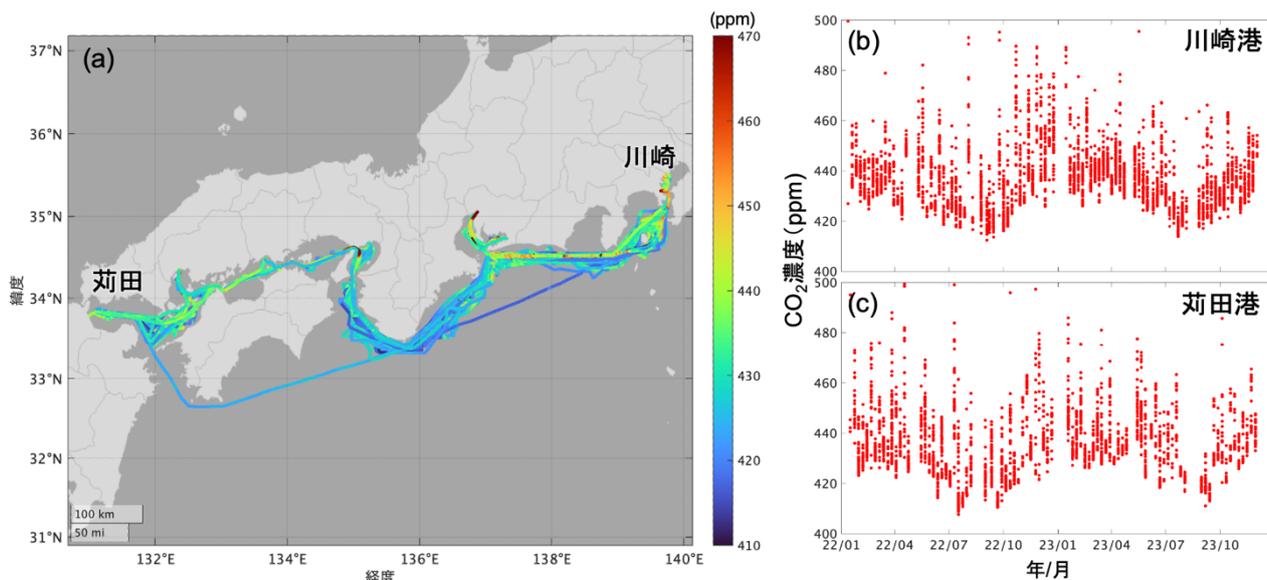


図2-5 (a) 2022年1月から2023年12月に日俣丸で観測された洋上大気中CO<sub>2</sub>濃度分布。(b) 川崎港と (c) 荻田港における大気中CO<sub>2</sub>濃度の時間変化。

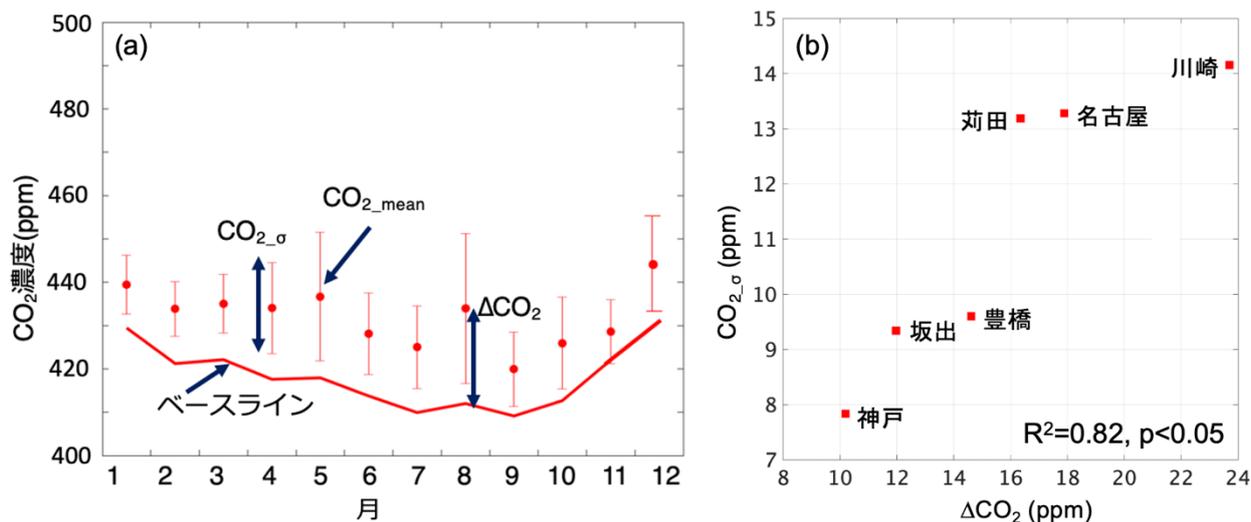


図2-6 (a) ΔCO<sub>2</sub>とCO<sub>2\_σ</sub>算出方法のイメージ。(b) 各港でのΔCO<sub>2</sub>とCO<sub>2\_σ</sub>の関係（観測期間平均）。

本課題ではまず初期観測データを用いて船舶の排気ガスの影響を取り除き都市域からの排出シグナルを分離する手法について検討し、観測データから風向範囲が90°~280°、CO<sub>2</sub>濃度が480 ppm以上、オゾン濃度が10 ppb以下のすべての条件を満たす大気試料をここでは自船排煙大気と規定してデータを除去した。上記データ処理を行なった2022年1月から2023年12月までのCO<sub>2</sub>濃度の空間分布と、川崎港および荻田港のCO<sub>2</sub>濃度の時間変化をそれぞれ図2-5a-cに示す。空間分布の傾向としてCO<sub>2</sub>濃度が高い地域が沿岸域（特に川崎・名古屋・神戸等）に点在する一方で外洋域では比較的CO<sub>2</sub>濃度が低く空間変化も小さいことがわかる（図2-5a）。これは人間活動によるCO<sub>2</sub>排出や陸域生態系によるCO<sub>2</sub>吸収・放出が盛んな陸域大気の影響を沿岸域が強く受ける一方で、外洋域では陸域大気の影響を受けていない、いわゆるバックグラウンド大気を観測しているためであると考えられる。次に川崎港と荻田港のCO<sub>2</sub>濃度の時系列変化から、寄港時に捉えた最小CO<sub>2</sub>濃度の時間変化（ここではベースラインと呼ぶ）は夏季から秋季の間に極小、冬季から春季に極大となっており、北半球の典型的なCO<sub>2</sub>濃度季節変化を示していることがわかる（図2-5b-c）。また、各港で観測されたベースラインからのCO<sub>2</sub>濃度増加は人間活動によるCO<sub>2</sub>排出影響を捉えたことが主要因であると考えられる。各港におけるCO<sub>2</sub>変化の特徴を把握するために、各月の平均CO<sub>2</sub>濃度（CO<sub>2\_mean</sub>）とベースラインとの差ΔCO<sub>2</sub>、標準偏差CO<sub>2\_σ</sub>を算出した（図2-6a）。観測期

間で平均した $\Delta\text{CO}_2$ と $\text{CO}_2_{\sigma}$ の関係を各港で調べたところ明瞭な相関関係 ( $R^2=0.82$ ,  $p<0.05$ ) が見られることが明らかとなった (図2-6b)。一般的に、大規模 $\text{CO}_2$ 排出源の周辺域で観測される $\Delta\text{CO}_2$ や $\text{CO}_2_{\sigma}$ はベースラインから大きく乖離することは予想されるが、この図で示されるような相関関係はこれまで知られていなかった。これらのパラメータは発生源 (ここでは都市域) の $\text{CO}_2$ 排出量や発生源から観測点までの距離によって変化すると考えられるため、特に $\text{CO}_2$ 排出量の情報を観測から抽出することができるか、課題終了後も引き続き解析を進めていく。

#### 4-2. 同位体・多成分観測に基づく起源分離・放出量変動推定

実効的な $\text{CH}_4$ の排出量削減に向けては、様々な排出源の寄与を地域別に適確に把握する必要がある。 $\text{CH}_4$ の安定炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) は排出源の種類によって特徴的な値を示すことが知られており、複数の排出源の相対的な寄与を推定する手がかりとなる。本研究では、波照間島、インド・ナイニタール、バングラデシュ・コミラの三地点で採取した大気試料について安定同位体比質量分析計を用いた $\delta^{13}\text{C}$ の分析を行い、その観測データを解析した。

##### (1) 波照間島

後述するように、波照間島では冬季に大陸起源の空気塊の到達にともなって高い $\text{CH}_4$ 濃度が観測される。このような冬季の高濃度イベントに合わせ、二種類の大気サンプラーを用いて大気試料を採取し、実験室に持ち帰って分析した。第一の大気サンプラー (HEV) で採取された大気試料は $\text{CH}_4$ 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ をどちらも分析し、第二の大気サンプラー (CASPER) で採取された大気試料は $\delta^{13}\text{C}$ のみを分析した。CASPERは $\delta^{13}\text{C}$ 分析用に特化して小試料量でサンプリングを行い、 $\text{CH}_4$ 濃度はサンプリング時刻の現場観測値を参照することとしている。このようにして、波照間島における冬季の高濃度イベント発生時に、 $\text{CH}_4$ 濃度の増加に同期して $\delta^{13}\text{C}$ がどのように変動するかを調べた。図2-7には、高濃度イベント毎に $\delta^{13}\text{C}$ を $\text{CH}_4$ 濃度の逆数に対して図示した例を示した (Keeling plot)。このように、 $\text{CH}_4$ 濃度の増加に対して、 $\delta^{13}\text{C}$ が増加したイベントも減少したイベントも観測された。Keeling plotへの直線回帰分析から、濃度増加に寄与した排出源の $\delta^{13}\text{C}$ の値を推定することができ、それぞれの高濃度イベントでは図中に数字で示した $\delta^{13}\text{C}$ を持つ放出源が顕著に寄与したと推定される。

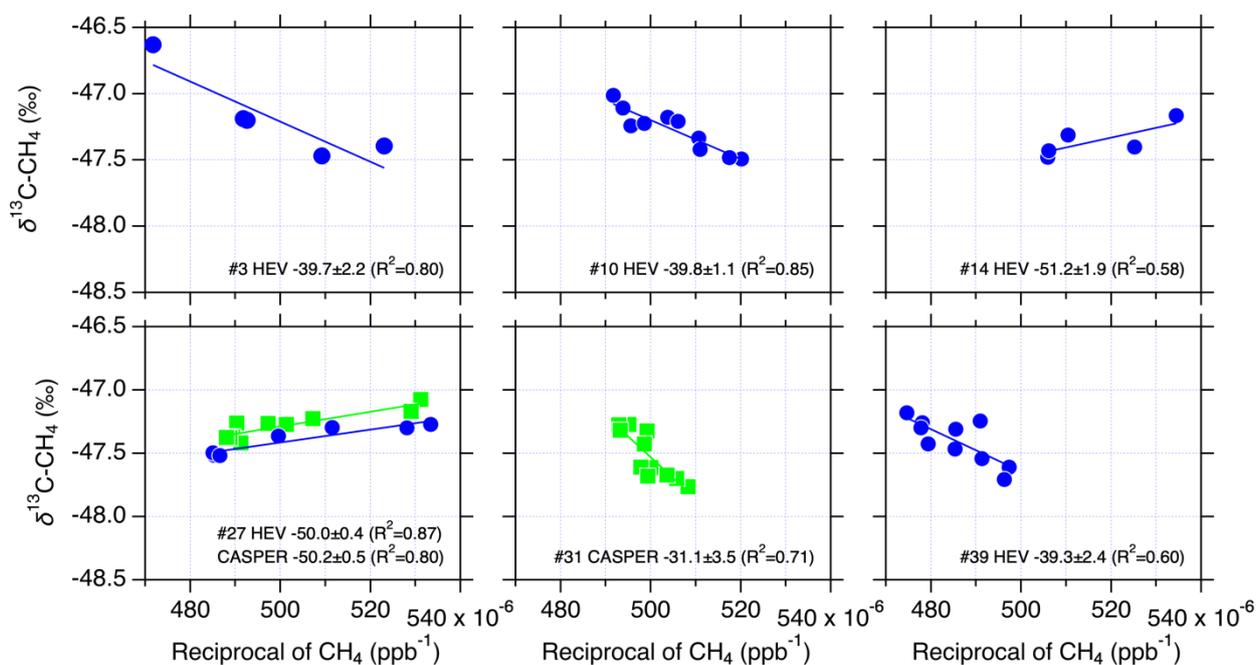


図2-7. 波照間島で観測された $\delta^{13}\text{C}$ と $\text{CH}_4$ 濃度の逆数との関係 (Keeling plot) の例。青丸はHEV、緑四角はCASPERにより採取された試料空気の分析結果を示す。

図2-7の解析と同様に、2017年12月以降に観測された高濃度イベント発生時のデータから排出源の $\delta^{13}\text{C}$ 値を推定した結果を図2-8に示す。これらの値は波照間島の風上に位置する大陸の複数排出源の寄与を反映していると考えられるが、図2-8に見られるように、 $\text{CH}_4$ 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の変動の相関係数が高いイベントでは、排出源の $\delta^{13}\text{C}$ が $-40\text{‰}$ 付近の値が頻出していることがわかる。波照間島の風上となる中国の $\text{CH}_4$ 排出は約90%が人為起源であり、そのうち最大の排出源は化石燃料（主に石炭）の採掘にともなう漏出と考えられている（Ito et al., 2019）。天然ガスや石炭の採掘にともなって排出される $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ は一般に $-40\text{‰}$ 付近の値だが、実際には地域性が大きく、中国の化石燃料 $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ は $-35\text{‰}$ 程度であるとする報告もある（Sherwood et al., 2017）。波照間島の観測結果は、化石燃料漏出が中国の最大の $\text{CH}_4$ 排出源であることを支持しており、今後はモデル研究とも組み合わせながら、その定量的な寄与評価を進める必要がある（成果27）。

## （2）インド・ナイニタールおよびバングラデシュ・コミラ

南アジアでは、化石燃料起源の $\text{CH}_4$ に加えて、水田や家畜等の $\text{CH}_4$ 生成菌に由来する生物起源の $\text{CH}_4$ の放出も大きいと考えられているが、多様な放出源が同じ地域に分布しているため、放出量推定には未だ不確実性が高い。そこで、南アジアの $\text{CH}_4$ 濃度変動を起源別に捉えることを目的として、インドのヒマラヤ山岳地帯・ナイニタール（29.36°N, 79.46°E, 1940 m a. s. l.）とバングラデシュの水田地帯・コミラ（23.43° N, 91.18° E, 30 m a. s. l.）の両サイトにおいて週1回の頻度で採取された大気試料の $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ の分析を行った。

図2-9に、ナイニタールとコミラで観測された $\text{CH}_4$ 濃度と $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ の時系列を示す。ナイニタールでは、ガンジス川流域の空気が流入するモンスーンの9月に $\text{CH}_4$ 濃度が極大となるとともに、 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ が1‰程度減少する季節変動パターンが観測された。また $\text{CH}_4$ 濃度が増加する期間は、 $\text{CO}$ （一酸化炭素）濃度は低い傾向だった。一方、コミラでは、稲作が行われる8-11月と12-3月に $\text{CH}_4$ 濃度と $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ の相関が観測されたが、 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ の変動傾向は逆で、8-11月は $\text{CH}_4$ 濃度が増加すると $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ が減少するのに対し、12-3月は $\text{CH}_4$ 濃度が増加すると $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ も増加した。 $\text{CO}$ 濃度の傾向も異なり、8-11月より12-3月の方が $\text{CO}$ 濃度が高かった。

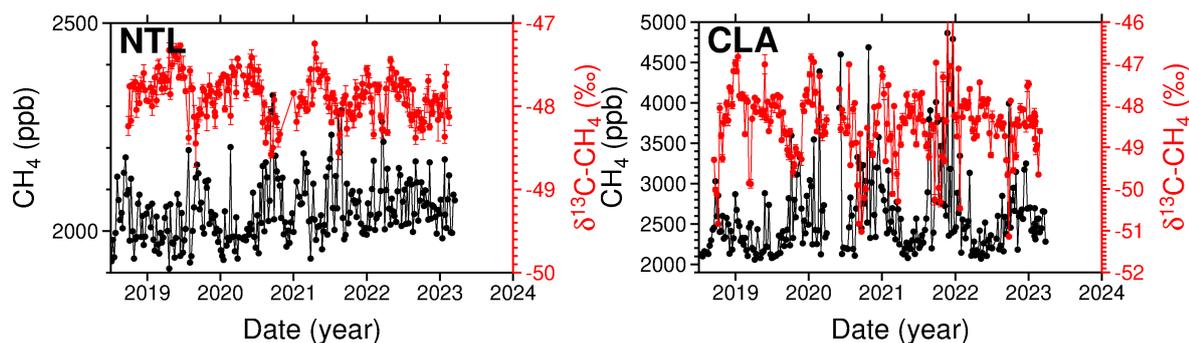


図2-9 ナイニタール（左）とコミラ（右）で観測された $\text{CH}_4$ 濃度（黒）と $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ （赤）の時系列。

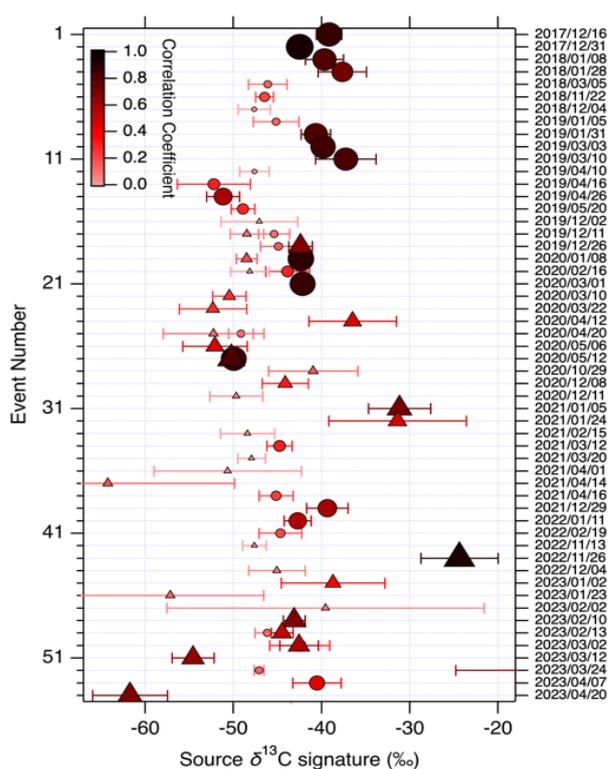


図2-8. 波照間島における高濃度イベントに対応した放出源の $\delta^{13}\text{C}$ 値の推定結果。 $\text{CH}_4$ 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の変動の相関係数が高いイベントでシンボルサイズを大きくかつ濃色として表示した。丸と三角のシンボルでは異なる大気試料採取装置を使用している。

図2-10に、ナイニタールとコミラで観測されたCH<sub>4</sub>濃度と  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ のKeeling plot解析の結果を示す。ナイニタールでは、通年を通してCH<sub>4</sub>放出源の  $\delta^{13}\text{C}$ は $-53.2 \pm 0.3\%$ であることがわかった。一方、コミラでは、8-11月と12-3月にCH<sub>4</sub>濃度と  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ の相関が観測されたが、CH<sub>4</sub>放出源の  $\delta^{13}\text{C}$ は8-11月が $-52.5 \pm 0.8\%$ 、12-3月が $-46.2 \pm 0.8\%$ と大きく異なることが明らかになった。このことは季節によってコミラ周辺の主要な排出源が変化することを示している。冬季稲作期には  $\delta^{13}\text{C}$ の高いCH<sub>4</sub>排出が強まることが考えられ、これはこの時期にバイオマス燃焼の寄与が大きくなっていることが原因と考えられる。

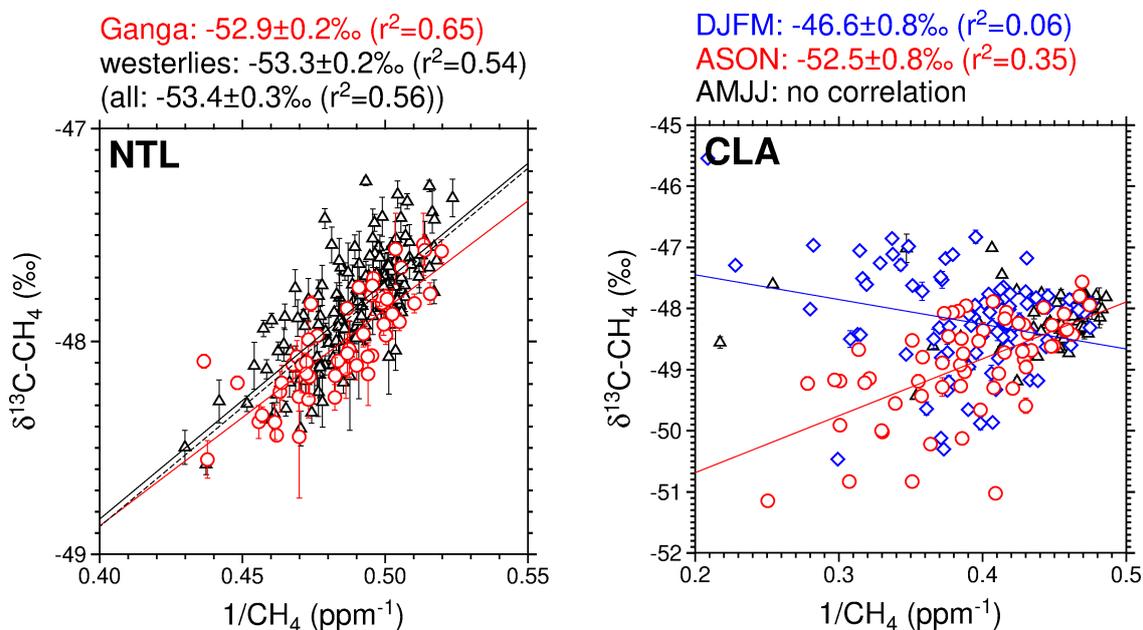


図2-10 ナイニタール（左）とコミラ（右）で観測されたCH<sub>4</sub>濃度の逆数と  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ の相関。ナイニタールの赤丸はモンスーン期間のデータ、コミラの赤丸と青四角はそれぞれ8-11月と12-3月のデータを表す。

$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ は放出源によってその値が大きく異なることが知られており、水田等の微生物起源のCH<sub>4</sub>は $-60\%$ 、化石燃料起源は $-40\%$ 、バイオマス燃焼起源は $-25\%$ が全球的な代表値として報告されているが、南アジアにおける実観測データはこれまでに無い。本解析では、我々の別プロジェクトの観測結果を用いて、微生物起源のCH<sub>4</sub>は $-60\%$ 、化石燃料起源は $-41\%$ 、バイオマス燃焼起源は $-35\%$ として以下の推定を行った。

CH<sub>4</sub>放出源の  $\delta^{13}\text{C}$ を用いて、Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v7 ([https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset\\_ghg70](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg70)) の2021年のCH<sub>4</sub>放出量インベントリから放出源の  $\delta^{13}\text{C}$ を推定すると、インドで $-55.3\%$ 、バングラデシュで $-55.4\%$ となった。インベントリから推定したCH<sub>4</sub>放出源の  $\delta^{13}\text{C}$ は、コミラの8-11月とナイニタールの通年の大気観測結果から推定されるCH<sub>4</sub>放出源の  $\delta^{13}\text{C}$ と比較的一致するが、コミラの12-3月の大気観測結果とは大きく異なることが明らかになった。コミラの冬期では、化石燃料もしくはバイオマス燃焼起源のCH<sub>4</sub>放出の割合がインベントリ推定より高いと考えられた（成果30, 46, 59）。

このようなCH<sub>4</sub>排出源の種類別解析をより高解像度で実施するため、準連続的な測定が可能なレーザー分光装置を導入し、実観測に向けた試験を行った。計測システムの中心となるレーザー分析計は米国Picarro社製G2132-iを選定した。G2132-iのカタログ表記の測定精度は、大気濃度レベルの試料について15分平均で $0.5\%$ 以下とされる。実際の観測を想定した分析計の測定精度を評価するため、大気濃度レベル（2 ppm）の標準ガスを複数用意し、分析計へのガス導入切替装置も製作するとともに、ナフィオンドライヤーを使用した大気試料除湿装置も導入した。開発した測定システムの概略図と写真を図2-11に示した。この測定システムにより、標準ガス（合成空気ベースでCH<sub>4</sub>濃度は約2 ppm）の繰り返し分

析を行ったところ、 $\delta^{13}\text{C}$ 測定値の30分平均で0.09‰、60分平均で0.05‰という標準偏差が得られた。これらの繰り返し精度は、安定同位体比質量分析計による測定と同等レベルである。また、 $\text{CH}_4$ 濃度が約10 ppmの標準ガスを使用した場合の30分および60分平均の標準偏差は0.02‰となり、高濃度の試料空気では測定精度が向上することも確認された。一方、窒素ベースの標準ガスを使用すると $\delta^{13}\text{C}$ 測定値に系統的な差が生じるなど、レーザー分析計に特有の課題も特定された。除湿装置により大気試料は水蒸気濃度で0.06%程度まで除湿されることが確認でき、同モデルを使用した先行研究が高精度測定のために必要と報告した

0.1%以下の基準を十分に満たしている。さらに、同位体比質量分析計を用いて値付けされた複数の標準ガスでレーザー分析計を校正した。一方で、測定中に測定値の突発的なオフセットを生じることが見つかったため、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が既知の参照ガスを定期的に導入することで補正を行うこととした。このような条件のもと、同位体比質量分析計との比較分析を行ったところ、約2日間の屋外空気の両者の測定結果は概ね0.2‰以内で一致した。

2023年11月より、国立環境研究所構内で外気観測を継続的に実施している。図2-12に示すように、 $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ が準連続的に観測できており、 $\text{CH}_4$ 濃度が夜間に増加する日変動に対応して $\delta^{13}\text{C}$ が減少する事例が多数見られた。 $\text{CH}_4$ 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の関係から近隣排出源の $\delta^{13}\text{C}$ を推定すると-60‰付近の値が頻出した。この結果は、同位体比質量分析計を用いて同じく国立環境研究所構内で $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ を測定した際の結果 (Umezawa et al., 2020) と整合的で、本研究で開発したレーザー分析計は今後の大気観測に活用できると考えられる。

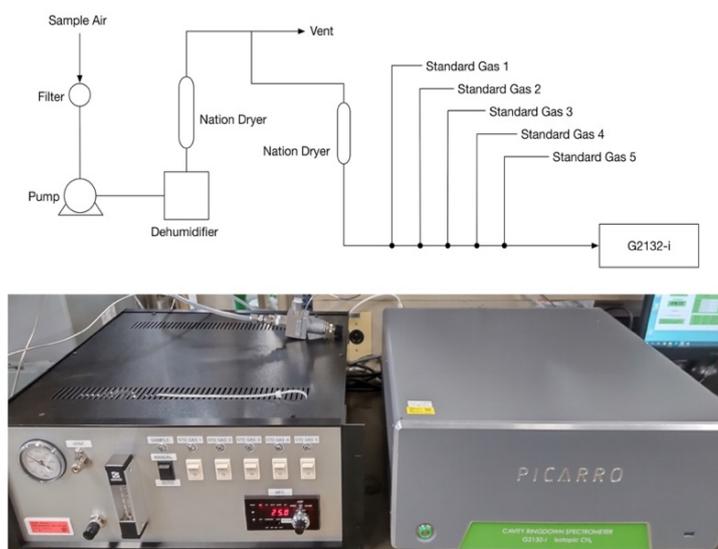


図2-11. 開発された $\text{CH}_4$ の安定炭素同位体比の準連続測定システムの概略図（上）と写真（下）。

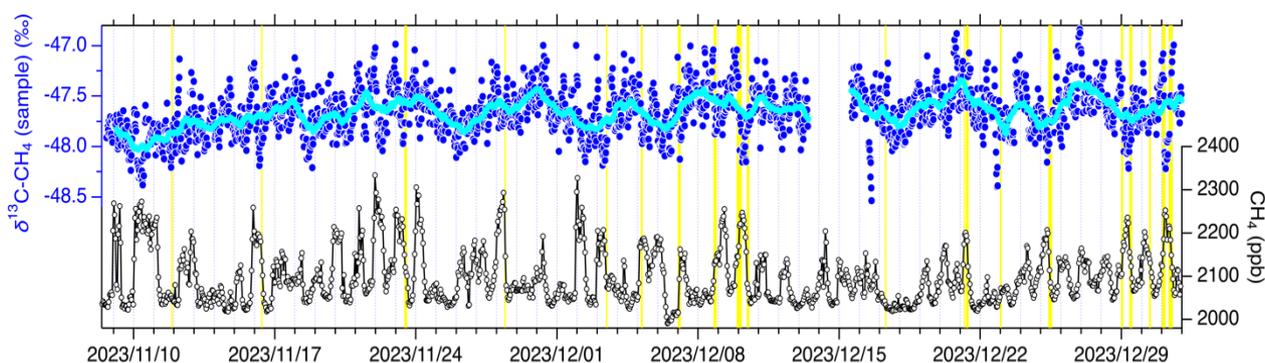


図2-12. 国立環境研究所（茨城県つくば市）におけるレーザー分析計を用いた $\text{CH}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ の観測結果（2023年11月から12月）。青丸がレーザー分析計測定値の30分平均値であり、24時間の移動平均を水色で示した（左軸）。また、同じ場所に設置されている濃度分析用レーザー分析計（Picarro社製G2401）による $\text{CH}_4$ 濃度の1時間平均値を白抜き丸（右軸）で示した。6時間の時間窓で $\delta^{13}\text{C}$ と $\text{CH}_4$ 濃度の相関を取り、相関係数が0.8を上回った日時については黄色の影を付けた。

これまでの研究から、波照間島（北緯24.06度、東経123.81度）で冬季に観測される $\text{CO}_2$ と $\text{CH}_4$ の変動比（ $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$ 比）は中国における $\text{CO}_2$ と $\text{CH}_4$ の排出比の変化を反映していることが明らかにされてきた (Tohjima et al., 2014; 2020)。これは、東アジアモンスーンの影響により冬季は主に中国から汚染

されたエアマスが波照間島に運ばれることに起因する（この概念図を図2-13に示した）。具体的には、波照間島で観測された  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比には、中国における化石燃料起源  $CO_2$  ( $F_{CO_2}$ ) 排出量の長期的な増加傾向や、2020年2月のCOVID-19の感染拡大阻止のためのロックダウンによる  $F_{CO_2}$  排出量の急減を反映した変化が確認されている。そこで、本研究では①波照間島の西約100kmに位置する与那国島（北緯24.47度、東経123.01度）での大気観測に基づく  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比が波照間島と同様に中国の排出量変化を検出できるかどうかを検討し、②これら離島での大気観測結果を用いて中国からの  $F_{CO_2}$  排出量の変化を早期に推定する手法の開発を試みた。

与那国島での観測結果を波照間島での観測結果に適応した手法と同様の手法を用いて  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比を計算した。なお、 $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比は24時間の時間窓内の  $CO_2$  および  $CH_4$  濃度（1時間平均値）の回帰直線の傾きとして求められ、時間窓を1時間ずつ進めながら全データに対し回帰計算を実施し、求められる傾きがある基準 ( $R > 0.7$ ,  $1\sigma_{CO_2} > 0.1\text{ppm}$ ) を満たす場合にのみ月平均値や30日の移動平均値の計算に用いた。なお、解析期間は波照間島の場合と同様に1~3月の3か月間とした。しかし、このようにして求められた与那国島の  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比は波照間島の値よりも大きく、中国での排出量変化に起因するシグナルを捉えることが難しいことが分かった（図2-14a）。この原因を調べると、与那国島で観測される  $CO_2$  濃度には島の植生に起因する呼吸・光合成による日変動が強く現れ、 $CO_2$  の変動が相対的に大きくなるためであった。そこで、植生の影響が緩和される夜間（現地時間20時から6時）のデータを用い、さらに日変動の影響を相対的に小さくするため解析に用いる時間窓の間隔を24時間から84時間と長くすることで、植生の影響の低減を行った。その結果、与那国島でも波照間島とほぼ同じ  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比の変化が得られことが分かった（図2-14b）。この結果については日本気象学会学会誌で発表した（成果10）。

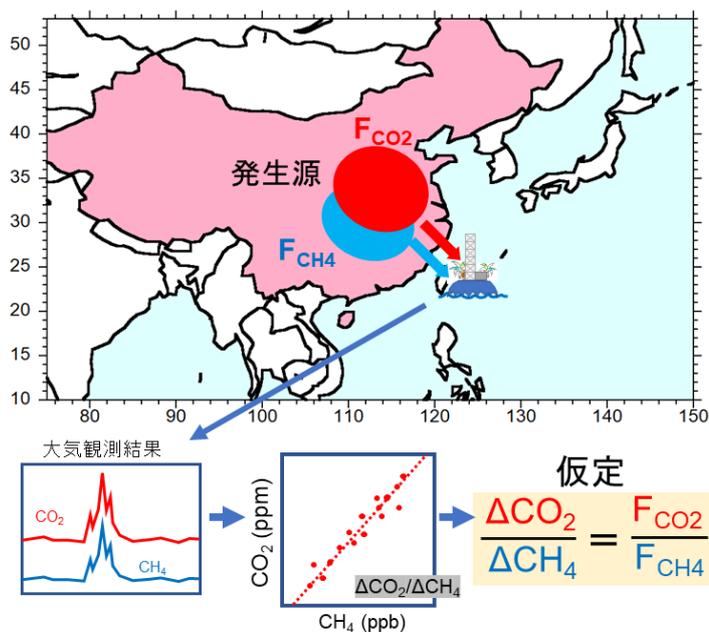


図2-13（図0-5）. 波照間・与那国島における大気観測に基づく中国における  $CO_2/CH_4$  排出比推定手法の概念図。東アジアモンスーンの影響によりこれらの島は冬季に大陸の風下に位置し、観測される  $CO_2$  および  $CH_4$  の変動比 ( $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比) は発生源における排出比を反映すると仮定できる。

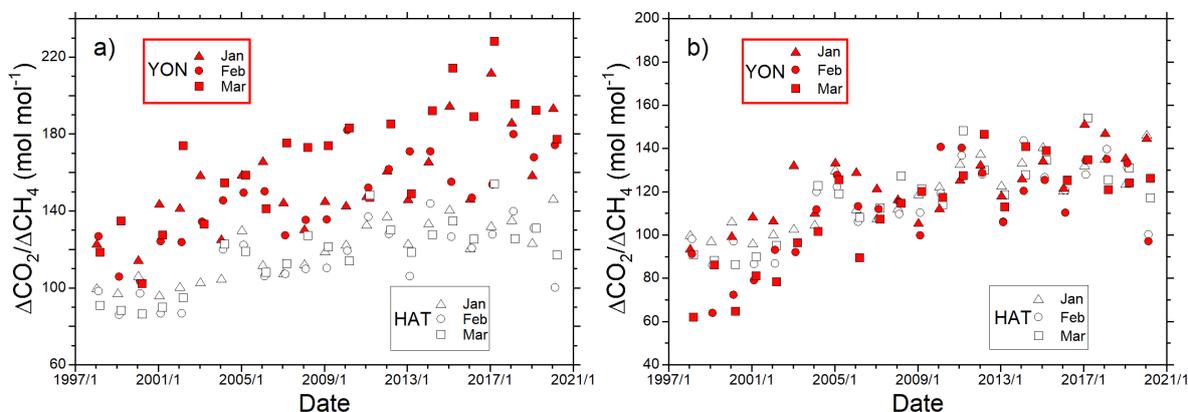


図2-14. 与那国島での大気観測に基づく  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比の月平均値（1, 2, 3月、赤記号）の時系列。(a) 全測定データを用い移動平均に24時間の時間窓を使った結果、および (b) 夜間（20時から6時）のデータを用い84時間の時間窓を用いた結果。白抜き記号は波照間での大気観測に基づく  $\Delta CO_2 / \Delta CH_4$  比の月平均値を表す。（成果10より転載）

次に、波照間島・与那国島で観測される  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比を用いて中国からのFFCO<sub>2</sub>排出量の変化を推定する手法の開発を行った。サブテーマ1の大気輸送モデル (NICAM-TM) とCO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>フラックス式を用いて2000年から2021年までの波照間島におけるCO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>濃度を計算し  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比を求め、観測結果と比較した。その結果、計算による  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比は観測結果をよく再現し、長期的な変化傾向は主にFFCO<sub>2</sub>排出量の変化に起因することが分かった。また、モデル計算における中国でのFFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比と  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比との関係を調べると、両者の間には直線的な関係が見られることが分かった (図2-15)。そこで、両者の関係を表す回帰直線を用いて1~3月に観測される  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比を中国におけるFFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比に変換することを考えた。また、2011~2019年の9年間に観測された  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比が比較的一定であることに着目し、2020年以降に波照間島と与那国島で観測される  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  比について過去9年間 (2011~2019年) の平均からの偏差を求めることで、排出比の変化を推定することとした。さらに、冬季は生物起源CH<sub>4</sub>の排出量が比較的小さいことから、CH<sub>4</sub>排出量の年々変化の影響も少ないと考えられることから、CH<sub>4</sub>排出量の年々変動を無視することで、FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>排出比の変化をFFCO<sub>2</sub>排出量の変化と読み替えることができる。このようにして得られた推定手法については、日本地球惑星科学連合が運営する国際誌、Progress in Earth and Planetary Science、で発表した (成果12)。

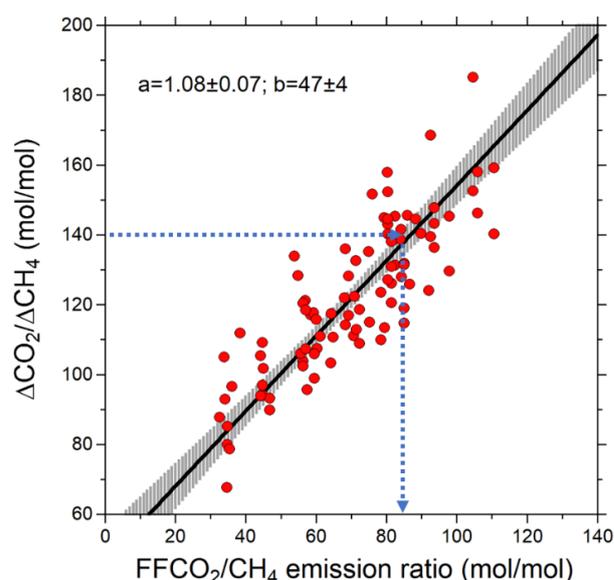


図2-15. 大気輸送モデルに基づく1~3月の中国のFFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>放出比と  $\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$  変動比の関係。(成果12より一部改変の上転載)

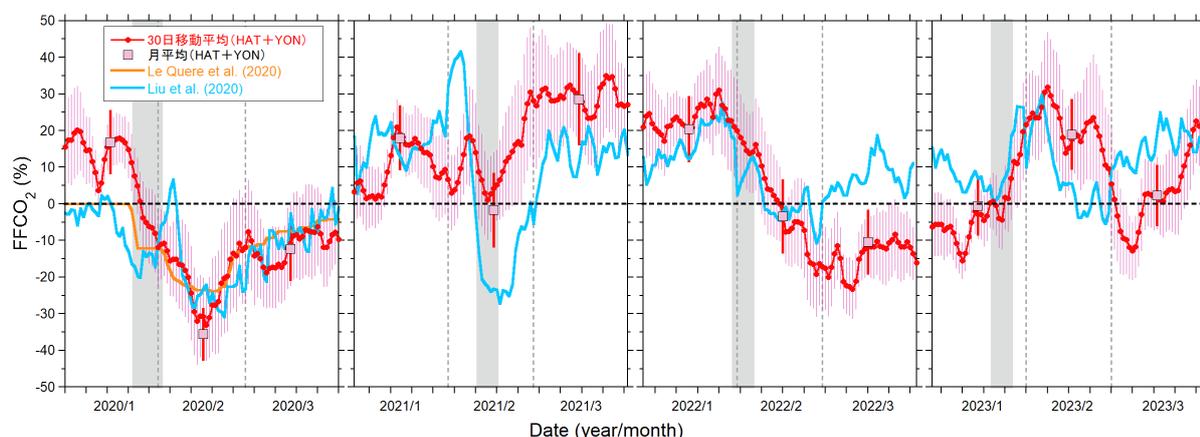


図2-16 (図0-6). 波照間・与那国島における大気中CO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>の濃度観測に基づく、2020年から2023年までの中国における1~3月の化石燃料起源CO<sub>2</sub>排出量の推定結果。赤が本研究の結果を表し、丸印は30日の移動平均を、四角は月平均値を表す。比較のため各種経済指標等の変化に基づくトップダウン的手法による中国起源FFCO<sub>2</sub>排出量変化の推定結果をオレンジ色の線 (Le Quéré et al., 2020) および水色の線 (Liu et al., 2020; Carbon Monitorから引用: <https://carbonmonitor.org/>) で示した。

本手法を用いて推定した、2020年から2023年の4年間のFFCO<sub>2</sub>排出量の変化を図2-16に示す。比較のため、経済統計等の指標の変化に基づくボトムアップ推定による中国からのFFCO<sub>2</sub>排出量の変化 (Le Quéré et al. (2020) および Liu et al. (2020) に基づく推定) も同時にプロットした。2020年1~3月のFFCO<sub>2</sub>排出量の推定結果を見ると、COVID-19によるFFCO<sub>2</sub>の減少を再現し、他のボトムアップ推定結果と

もよい一致を示すことが分かった。また、3ヶ月の平均変化率は $-10 \pm 9\%$ であった。一方、2021年1～3月の変化を見ると、FFCO<sub>2</sub>排出量は3ヶ月の平均で $15 \pm 10\%$ の増加となり、中国における経済活動がCOVID-19の影響を脱して増加したと整合的であった。しかし、2022年1～3月はCOVID-19の再拡大等の影響のためか、FFCO<sub>2</sub>排出量は $2 \pm 9\%$ と若干減少し、2023年も $7 \pm 8\%$ とそれほどの増加を見せていない。なお、上記の推定では中国のCH<sub>4</sub>フラックスの変化はFFCO<sub>2</sub>の変化よりも小さいと仮定して議論したが、今後はサブ1で算出される中国におけるCH<sub>4</sub>放出量の変化や、大気輸送の年々変動の影響等を補正することで、FFCO<sub>2</sub>排出量の変化に対する推定精度を高めてゆく必要がある。

- Ito, A., et al. 2019. Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation. *Science of The Total Environment*, 676, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.263>
- Sherwood, O.A., et al. 2017. Global Inventory of gas geochemistry data from fossil fuel, microbial and burning sources, version 2017. *Earth System Science Data*, 9, 639-656. <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>
- Tohjima Y., et al. 2014. Temporal changes in the emissions of CH<sub>4</sub> and CO from China estimated from CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> and CO/CO<sub>2</sub> correlations observed at Hateruma Island. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1663-1677. <https://doi.org/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. *Scientific Reports*, 10, 18688. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75763-6>
- Umezawa et al. 2020. A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 98, 115-127. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-007>

#### 4-3. 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

国環研や気象庁・気象研がアジア太平洋域を中心に実施している地上ステーションや貨物船、航空機を利用した大気観測を継続し、アジア太平洋域におけるGHGの時空間分布の動態を把握した（成果26, 31, 50, 58）。本研究課題において収集し、サブテーマ1における逆解析用データとして提供したアジア太平洋域における観測サイトを図2-17に示した。また、これ等の観測サイトにおける大気中CO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>濃度の時系列を図2-18にプロットした。一例として、南アジア（インド・バングラデシュ）におけるフラスコサンプリングに基づく観測結果を解析したところ、インドで観測されたCO<sub>2</sub>濃度増加率がマウナロア（MLO）などとは異なりENSOの影響を受けていないことや、CH<sub>4</sub>とSF<sub>6</sub>濃度の長期変動パターンはMLOと逆相関になっていることなどが明らかとなり、インドモンスーンに伴う大気循環場やガンジス川流域の農業形態などの地域的な要因が温室効果ガスの季節変動と長期変動に大きな影響を与えていることが示唆された（成果8）。また、アジア太平洋域で得られたこれらのデータを半年ほどの期間内に集約し、サブテーマ1で実施する逆解析で用いるデータとして迅速に提供する体制を構築した。また、これまで観測データの公開に関しては温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）を通じて実施されてきたが、国環研が実施する航空機、波照間・落石、南アジアにおける観測結果については最新のデータも含めてDOIを付与し、地球環境データベース（GED、<https://db.cger.nies.go.jp/ged/ja/index.html>）を通じての公開を進めた。サブテーマ2において、本推進費期間内にGEDから公開されたデータについて表2-1に一覧を示す。これらのデータは全球炭素収支研究や

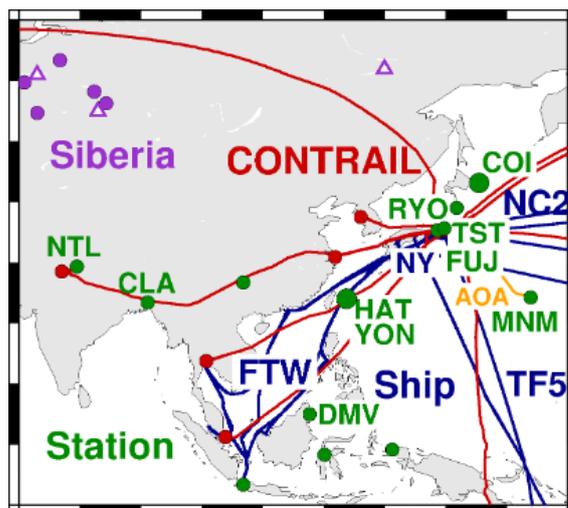


図2-17. 本研究課題においてデータ収集したアジア太平洋域における大気中GHG濃度の観測サイト。緑丸は地上サイト、青線は貨物船、赤線・赤丸は旅客機（CONTRAILプロジェクト）、三角は航空機による観測地点をそれぞれ表す。

モデル研究等で活用されている（成果1, 4, 7, 13）。

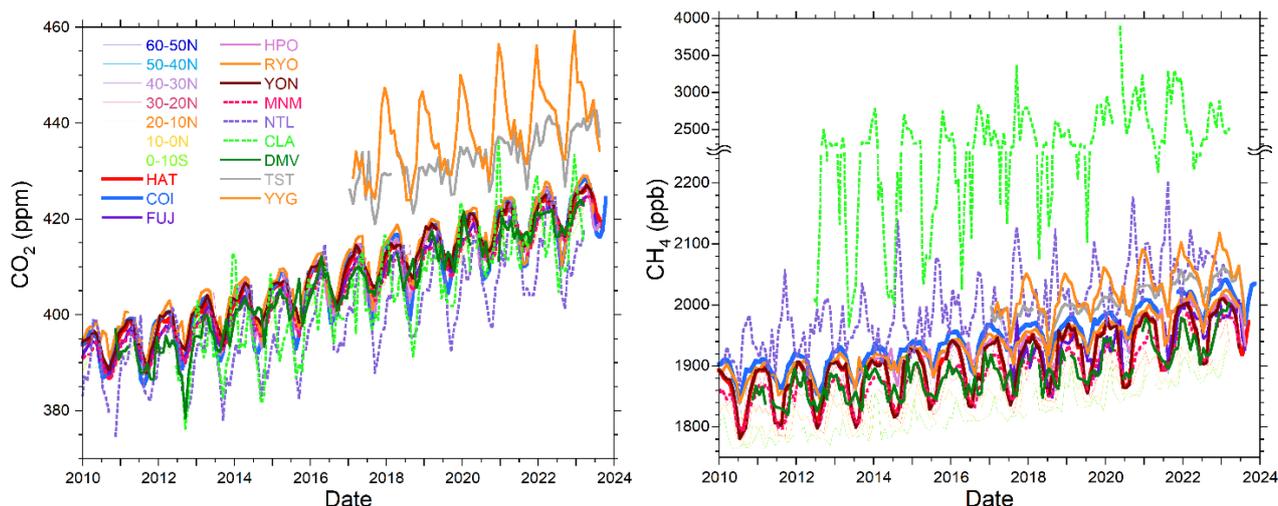


図2-18. 本課題で集約し、サブテーマ1課題における逆解析に提供されたアジア太平洋域に展開された各地点における大気中（左）CO<sub>2</sub>濃度、および（右）CH<sub>4</sub>濃度の観測結果の時系列。

表2-1. 本推進費期間内に国環研の地球環境データベースから公開された観測データ

公開日	データ内容	DOI:
2021-05-10	東京・代々木の大气CO <sub>2</sub> 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气CO <sub>2</sub> 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气CH <sub>4</sub> 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气CO <sub>2</sub> 濃度	10.17595/20220301.001
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大气CO <sub>2</sub> 濃度	10.17595/20220301.002
2022-03-01	インドのナイニタールの大气CH <sub>4</sub> 濃度	10.17595/20220301.003
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大气CH <sub>4</sub> 濃度	10.17595/20220301.004
2022-03-01	インドのナイニタールの大气N <sub>2</sub> O濃度	10.17595/20220301.009
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大气N <sub>2</sub> O濃度	10.17595/20220301.010
2022-03-01	インドのナイニタールの大气SF <sub>6</sub> 濃度	10.17595/20220301.011
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大气SF <sub>6</sub> 濃度	10.17595/20220301.012
2022-03-01	インドのナイニタールの大气CO <sub>2</sub> の炭素同位体比 (C <sup>13</sup> /C <sup>12</sup> )	10.17595/20220301.013
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大气CO <sub>2</sub> の炭素同位体比 (C <sup>13</sup> /C <sup>12</sup> )	10.17595/20220301.014
2022-03-01	インドのナイニタールの大气CO <sub>2</sub> の酸素同位体比 (O <sup>18</sup> /O <sup>16</sup> )	10.17595/20220301.015
2022-03-01	バングラデシュのコミラの大气CO <sub>2</sub> の酸素同位体比 (O <sup>18</sup> /O <sup>16</sup> )	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 <sub>2</sub> カラム平均濃度のデータセット	10.17595/20220805.001
2022-12-09	富士山頂の大气中CO <sub>2</sub> 濃度データ	10.17595/20170616.001
2023-02-08	波照間ステーションの大气CO <sub>2</sub> 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气CH <sub>4</sub> 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气CO <sub>2</sub> 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气CO <sub>2</sub> 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气CH <sub>4</sub> 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气CH <sub>4</sub> 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气微量気体データ（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气微量気体データ	10.17595/20190828.001
2023-07-25	CONTRAILフラスコサンプリングによる大气微量気体データ	10.17595/20230725.001
2023-07-25	CONTRAILフラスコサンプリングによる大气微量気体データ（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 <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 比とCO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 比とCO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 比とCO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 比とCO <sub>2</sub> モル分率	10.17595/20230830.004

## 5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では①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、②同位体・多成分観測に基づく起源分離・放出量変動推定、③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を目標として研究を実施した。①については、東京都市圏での大気中GHG濃度の現場測定結果を、サブテーマ1で計算される計算結果と比較し、東京都市圏での排出と濃度変動の関係を明らかにすると同時に、大気観測から首都圏のCO<sub>2</sub>排出量を把握するために首都圏外や東アジアの影響も考慮する必要があることが分かった（図2-1）。また、上述の都市排出把握に有効と推定された地点において追加観測を実現するために、簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを開発した（図2-4）。さらに、東京以外の都市域からのGHG排出を効率的にとらえるため、日本沿岸域を定期運航する貨物船での大気観測を2022年1月に開始し、その後も順調に観測を継続することができた（図2-5）。得られた観測結果は、川崎、名古屋、神戸、瀬戸内海における都市域からの排出シグナルを捉えることに成功した（図2-6）。②については、波照間やアジア域でフラスコに採取される大気試料の<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>測定から、CH<sub>4</sub>変動に対する発生源毎の寄与率を推定することに成功した（図2-8, 2-10）。さらに、<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>観測をより高時間分解能で実施するために、レーザー分光装置を用いた半連続的測定システムの開発に取り組み、大気濃度レベルの場合1時間の積算時間で0.1%の精度を実現した（図2-10）。また、波照間島・与那国島での大気観測に基づくΔCO<sub>2</sub>/ΔCH<sub>4</sub>比から、中国における放出量を準リアルタイムに推定する手法を開発し、2020年から2023年の排出量の変化を推定することに成功した（図2-16；成果10, 11, 12）。③については、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）に集約し、サブテーマ1で実施する逆解析に提供する体制を構築した（成果8, 9, 13）。また、こうして得られたデータをWDCGGやGEDを通じて一般に公開した（表2-1）。

このように、サブテーマ2が当初掲げた目標をほぼ予定通り達成することに成功した。

## II-3 サブテーマ3 「船舶観測に基づく海洋CO<sub>2</sub>フラックスデータの精緻化」

### [サブテーマ3 要旨]

サブテーマ3では、日本海やベーリング海など北太平洋縁辺海を対象に、海洋CO<sub>2</sub>分圧の診断モデルとそれに基づく海洋CO<sub>2</sub>分圧や海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータプロダクトを作成し、それらの分布・変動を評価した。それらの作成に当たっては、船舶観測による日本海の冬季の海洋CO<sub>2</sub>変動の実態と変動メカニズムの調査や、温室効果ガス観測技術衛星のデータを利用した大気中CO<sub>2</sub>濃度分布情報の向上も実現し、各種の衛星観測データや再解析データなども利用した。南西諸島近海については、診断モデルと地球システムモデルによる表面水温予測に基づいて、海洋CO<sub>2</sub>分圧の将来予測を行った。作成した海洋CO<sub>2</sub>フラックスのデータプロダクトは、外洋域を対象とした既存のデータプロダクトと結合し、大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値としてサブテーマ1に提供したほか、Global Carbon Budget (GCB) 2023にも貢献した。また、Global Carbon Project (GCP) のRegional Carbon Cycle Assessment and Processes 2 (RECCAP2)に参加し、太平洋全域を対象に、多くのデータプロダクトと海洋モデルの海洋CO<sub>2</sub>フラックスを比較し、整合点や課題を明らかにした。以上により、当初の研究目標を達成した。

### 1. サブテーマ3 研究開発目的

日本は四方を海に囲まれた島嶼国であり、大気・海洋間のCO<sub>2</sub>フラックス（以下、「海洋CO<sub>2</sub>フラックス( $F_{net}$ )」と表す)もテーマ1の目標を達成するために評価すべき重要な要素である。

$F_{net}$ は、大気中のCO<sub>2</sub>分圧( $pCO_2^{air}$ )と表面海水のCO<sub>2</sub>分圧( $pCO_2^{sw}$ )の差( $\Delta pCO_2$ )とガス交換係数で表現される海面の擾乱によって駆動される。 $pCO_2^{sw}$ は、水温変化、海水の混合や海流、生物活動など、様々な海洋学的因子や、それらと相互作用している気象・気候学的因子によって海域的・時間的に大きく変化しており、一般にその変化は $pCO_2^{air}$ の変化よりずっと大きい。こうした $pCO_2^{sw}$ の変化や海面擾乱の変化のために、 $F_{net}$ も海域や時期によって大きく変化している。気象庁は、1980年代初めから実施してきた観測船による北西太平洋の海洋CO<sub>2</sub>観測のデータや、国際協力によって構築された $pCO_2^{sw}$ のデータベースSOCAT(Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas : <https://socat.info/>)に収納された国立環境研はじめ国内外の多くの海洋調査機関による海洋CO<sub>2</sub>観測のデータも活用して $pCO_2^{sw}$ の診断モデルを作成し、それによって世界的規模で $pCO_2^{sw}$ と $F_{net}$ のデータプロダクトを作成して公開している。しかし、日本海、東シナ海、オホーツク海、ベーリング海といった北太平洋北部・西部の縁辺海では、米国を除く他の沿岸国の排他的経済水域 (EEZ) 内において政治的な理由から海洋観測が実施できないことや、河川水流入の影響などによって外洋域の診断モデルを適用できない蓋然性があることから、診断モデルの空白域となっていた。しかし、近年、気象庁が日本海や東シナ海の日本のEEZ内でも海洋CO<sub>2</sub>観測を開始したことや、北極海の海洋観測の推進によってベーリング海の海洋観測データも増えていること、そして他国の機関がそのEEZ内で行った観測のデータも、数は多くないがSOCATを通じて入手できるようになってきたことから、サブテーマ3では、海洋CO<sub>2</sub>観測の充実や大気CO<sub>2</sub>濃度の分布・変動情報の向上を図りながら、これら北太平洋の縁辺海についても $pCO_2^{sw}$ 診断モデルを構築し、それらに基づいて $F_{net}$ のデータプロダクトを作成し、その時間・空間変化を1998年から2022年の過去15年間を対象に評価する。これを研究分担者や協力者がすでに作成した全海洋規模で外洋を対象としたデータプロダクトJMAMLR (Iida et al., 2021)と統合し、サブテーマ1に提供する。JMAMLRほか他機関で作成されたデータプロダクトについては、Global Carbon Projectが推進するRECCAP2などを通じて、気象研究所や他機関の全球海洋生物地球化学モデルの出力と比較して、 $F_{net}$ のアンサンブル評価に活用するとともに、整合点や課題を明らかにする。

Iida, Y., Takatani, Y., Kojima, A., Ishii, M. 2021. Global trends of ocean CO<sub>2</sub> sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *Journal of Oceanography*, 77, 323-358. <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00571-5>

## 2. サブテーマ3 研究目標

サブテーマ3	「船舶観測に基づく海洋CO <sub>2</sub> フラックスデータの精緻化」
サブテーマ3 実施機関	気象庁気象研究所
サブテーマ3 目標	北西太平洋の縁辺海(日本海、東シナ海、ベーリング海など)を対象に、表面海水中の二酸化炭素分圧(pCO <sub>2</sub> )や全アルカリ度などの炭酸系観測データに基づいて、pCO <sub>2</sub> を経験的に推定できる診断モデルを作成し、これらの縁辺海を対象とした狭領域の精緻な海洋pCO <sub>2</sub> の分布・変動のデータプロダクトを作成する。外洋域を対象とした既存のデータプロダクトにこれを統合し、縁辺海を含む北西太平洋のデータプロダクトへと拡張する。サブ2で得られる大気CO <sub>2</sub> 観測データ、気象庁の運営するGHG世界資料センターで収集されるデータや衛星観測データ(GOSAT等)を用いて、サブ1とも協働して、大気CO <sub>2</sub> 濃度分布データの最適化を行う。前年のデータがデータセンターに報告される夏以降早い段階でデータセットを迅速に構築する体制やシステムを整える。上記の大気CO <sub>2</sub> データと海洋pCO <sub>2</sub> データから、日本近海・北西太平洋域及び全球海洋におけるCO <sub>2</sub> 収支のデータセットを構築し、サブ1にて大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値として用いることが出来るものとする。これらのCO <sub>2</sub> 収支データセットを迅速に提供する体制を整える。また、Global Carbon Projectが推進するRECCAP2などを通じて、グローバルストックテイクやIPCC WG1の評価報告書などの作成にも貢献する。

## 3. サブテーマ3 研究開発内容

サブテーマ3の研究参加者らは、太平洋や全球海洋スケールのpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>の分布・変動の診断モデルと、これによるpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>とF<sub>net</sub>のデータプロダクトJMAMLRを、外洋域を対象に作成・公開し(Iida et al., 2015, 2021)、国際比較実験(Rödenbeck et al., 2015)にも参加して、IPCC WG1 AR6にも貢献した。サブテーマ3では、北太平洋西部・北部に分布する縁辺海を対象に、海洋CO<sub>2</sub>観測データはじめ各種の衛星観測データや再解析データをもとにpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>やF<sub>net</sub>の時間・海域変動を推定する診断モデルとデータプロダクトを作成し、JMAMLRと統合した。

こうした診断モデルやデータプロダクトを向上させるために、日本海における冬季のpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>、水温、塩分、全アルカリ度(TA)、溶存酸素濃度の航走観測を行ったほか、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)を利用した表面大気中CO<sub>2</sub>濃度分布の最適化も行った。

日本海の海洋観測は、2022年2月の気象庁凌風丸22-01航海と2023年2月～3月の啓風丸23-01航海にて、日本のEEZ内で行われた。日本海で冬季のpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>観測データが取得できたのはこれらの航海が初めてである。凌風丸22-01航海の第二航程では、pCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>観測と同時に海洋表層の溶存酸素濃度と全アルカリ度(TA)の航走観測も行った。また、pCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>の長期変化や年々変化を評価するには、シャワーヘッド式平衡器と非分散型赤外線ガス分析計(またはキャビティリングダウン分光光度計)を用いて、WMOトレーサブルな標準ガスで検定しながら、高い精度で測定を行う必要があるが、pCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>の時間・空間変化がおそらく大きい沿岸域などで観測を促進するには、精度は高くなくてもより安価で簡便なpHセンサーによる観測も推進する必要がある。そこで啓風丸23-01航海では、凌風丸22-01航海にも実施したpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>と溶存酸素濃度の航走観測に加えて、海水用pHセンサーSPS-14-2H(紀本電子)を使用して試験的にpHの航走観測も行った。

表面大気中CO<sub>2</sub>濃度分布の最適化においては、気象庁の大気輸送モデルGSAM-TMをベースとした逆解析システムを用いてCO<sub>2</sub>逆解析を行い、大気CO<sub>2</sub>濃度の分布を算出した。この解析過程で、衛星データ(GOSAT等)を取り込むシステムを構築した。また、気象庁が運営する世界気象機関のWorld Data Centre for Greenhouse Gasesに報告される最新の観測データを利用した。

診断モデルの作成手順を図3-1に示す。気象庁の観測データを含み、国際協力によって作成・更新している高品質の海洋各層炭酸系データベースGLODAPv2(成果19)に収納されている海洋表層の全アルカリ度データを用いて、Takatani et al., (2014)と同様の方法により、全アルカリ度を海面力学高度と塩分から推定する経験式を作成した。海面力学高度は、海洋上層の循環場を反映しているのを、これを導入することで海洋循環場の変化を反映する診断モデルを作成できた。この経験式を、SOCAT2022と気象庁の最新の $pCO_2^{sw}$ のデータや、これらと同時に測定された水温・塩分のデータと組み合わせて、物理化学的な計算式で全炭酸濃度を計算した。さらに、外洋域を対象としたIida et al., (2021)の全炭酸濃度診断モデルに使用した線形重回帰分析を移動窓重回帰分析に改良し、全炭酸濃度を観測年、水温、塩分、海面力学高度、クロロフィル濃度、混合層深度の経験式で表した。

全アルカリ度と全炭酸濃度それぞれの診断モデルを作成して、それらの分布と変化を推定し、それらから $pCO_2^{sw}$ の分布と変化を計算するこの方法は、 $pCO_2^{sw}$ だけでなくpHや炭酸カルシウム飽和度といった海洋酸性化に関する変数の分布と変化も推定できる利点がある。このほか、 $pCO_2^{sw}$ の変動要因や全球海洋生物地球化学モデルの出力との差異の要因を考察できる、海洋への $CO_2$ 蓄積が海水の $CO_2$ 緩衝能の低下によって $pCO_2^{sw}$ の季節変化の振幅を増大させる効果を定量できる、といった利点もある。

この $pCO_2^{sw}$ の診断モデルの出力を上記の大気中 $CO_2$ 濃度分布や、大気再解析データセットJRA55の海面風速データと組み合わせ、バルク法で1998年～2022年を対象に月毎に $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ の水平解像度で $F_{net}$ の分布・変動を評価した(図3-2)。

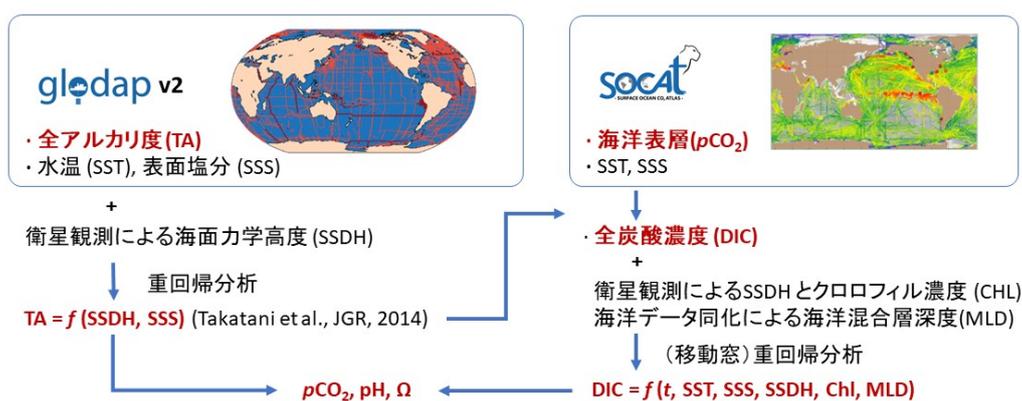


図3-1. 重回帰分析による全アルカリ度と全炭酸濃度の経験式の導出と $pCO_2^{sw}$ の計算

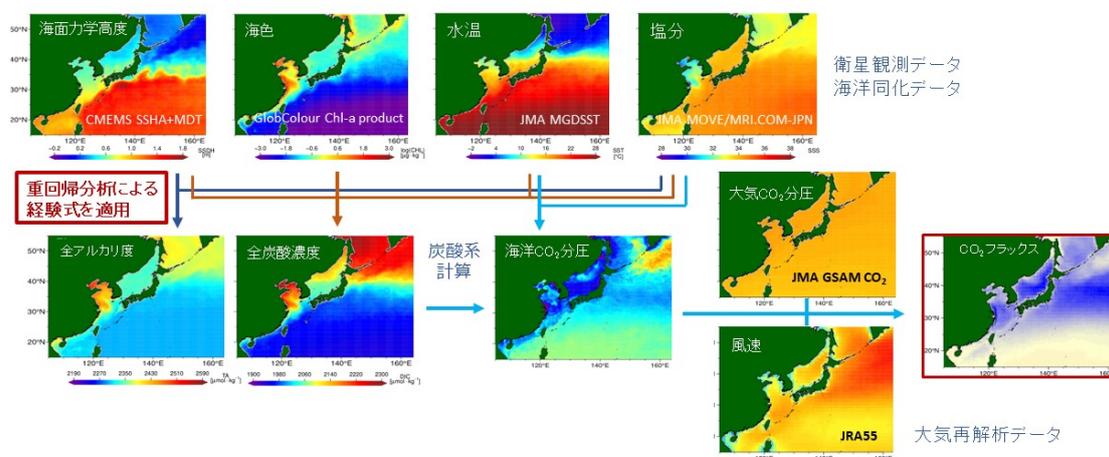


図3-2. 海洋 $CO_2$ フラックス ( $F_{net}$ ) マッピング(月毎、 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ )方法の概念図

また、南西諸島近海の亜熱帯域を対象に、SOCAT2021に収録されている1995年～2009年の $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ のデータと全アルカリ度( $n\text{TA} = 2297 \mu\text{mol kg}^{-1}$ )などに基づいて全炭酸濃度の診断モデルを作成した。これにCMIP5に参加した地球システムモデル(ESM)MRI-ESM1とGFDL-ESM2MのRCP8.5シナリオにおける水温・塩分予測データを使用して $\Delta p\text{CO}_2$ などの将来予測を経験的に行った。この海域におけるESMの水温と塩分のバイアスは、海洋データ同化FORA-WNP30のデータで補正した。

Iida, Y. et al. 2015. Trends in  $p\text{CO}_2$  and sea-air  $\text{CO}_2$  flux over the global open oceans for the last two decades. *Journal of Oceanography*, 71, 637-661. <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0306-4>

Rödenbeck, C. et al. 2015. Data-based estimates of the ocean carbon sink variability - first results of the Surface Ocean  $p\text{CO}_2$  Mapping intercomparison (SOCOM). *Biogeosciences*, 12, 7251-7278, <https://doi.org/10.5194/bg-12-7251-2015>.

Takatani, Y. et al. 2014. Relationships between total alkalinity in surface water and sea surface dynamic height in the Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 2806-2814. <https://doi.org/10.1002/2013JC009739>

#### 4. サブテーマ3結果及び考察

##### 4-1. 海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのデータプロダクト作成

##### 4-1-1. 日本海における海洋表層 $\text{CO}_2$ 系観測

2022年2月に実施された気象庁凌風丸22-01航海では、日本海の日本のEEZ内においてこれまで観測データが得られていなかった冬季の $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の観測が実施された。この航海の第二航程では、海洋表層の溶存酸素濃度と全アルカリ度の航走観測も行った。日本海南部の対馬暖流域では、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ が $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ より低く、海洋が $\text{CO}_2$ を吸収していると考えられた。一方、北緯40度付近に位置する極前線より北の日本海北部では $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ は $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ より高く、500  $\mu\text{atm}$ に達する海域もあった(図3-3)。このように $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ が高い海域では溶存酸素が対して未飽和(Apparent Oxygen Utilizationが正の値)となっており、高 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ ・低酸素の深層水の影響を強く受けていることが示唆される。極前線以北では深層水が比較的浅い水深にまで分布しているため、冬季の深い鉛直混合によって深層水の影響が表面に及んでいると考えられる。この観測によって、日本海北部には太平洋亜寒帯域と同様に冬に $\text{CO}_2$ を放出している海域があり、日本海の中の南北で $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の季節変化に大きな差異があることが確認できた。

航走全アルカリ度測定精度は、凌風丸22-01航海中に認証標準物質を分析した結果から0.044% (0.98  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )と0.038% (0.84  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )であり、極めて高い精度で測定できた。蒸発や降水による海水の濃縮・希釈を補正するため塩分35における値に換算した表面海水の全アルカリ度( $n\text{TA}$ )は、観測海域の大部分で $2330 \pm 5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ の範囲内であった。このことから亜熱帯起源の対馬暖流水( $n\text{TA} < 2320 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (Kosugi et al., 2016)と、秋季に山陰沿岸域に流入する長江希釈水域( $n\text{TA} > 2350 \mu\text{mol kg}^{-1}$ )の混合によって生成した表層水が、観測海域に広く分布していたと推測される。

凌風丸23-01航海では、航走中やCTD観測点で表面海水を採水し、塩分と全アルカリ度を測定して、両変数の経験的な関係式を求めた(図3-4)。また、全炭酸濃度も分析し、全アルカリ度と全炭酸濃度から計算したpHにより、pHセンサーを校正した。そして、塩分とpHの航走観測データと経験的な関係式から求めた全アルカリ度から $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ を計算し、平衡器を使用した高精度の $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の測定データとの差を算出したところ、80%以上のデータが $\pm 10 \mu\text{atm}$ 以内に収まった(図3-4)。この結果は、全アルカリ度を精度良く推定出来れば、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ をpHセンサーのデータから $F_{\text{net}}$ の評価に実用的な精度で推定できることを示す。pHセンサーは精度の高い $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の測定装置に比べて安価・小型・省電力のため、小型の船舶やブイやフロートなどのプラットフォームでも $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ データが得られるようになる。ただし、全アルカリ度とpHセンサーの校正用のサンプルを定期的に取得する必要がある、それが実施しづらい環境下での測定は、今後の検討課題である。

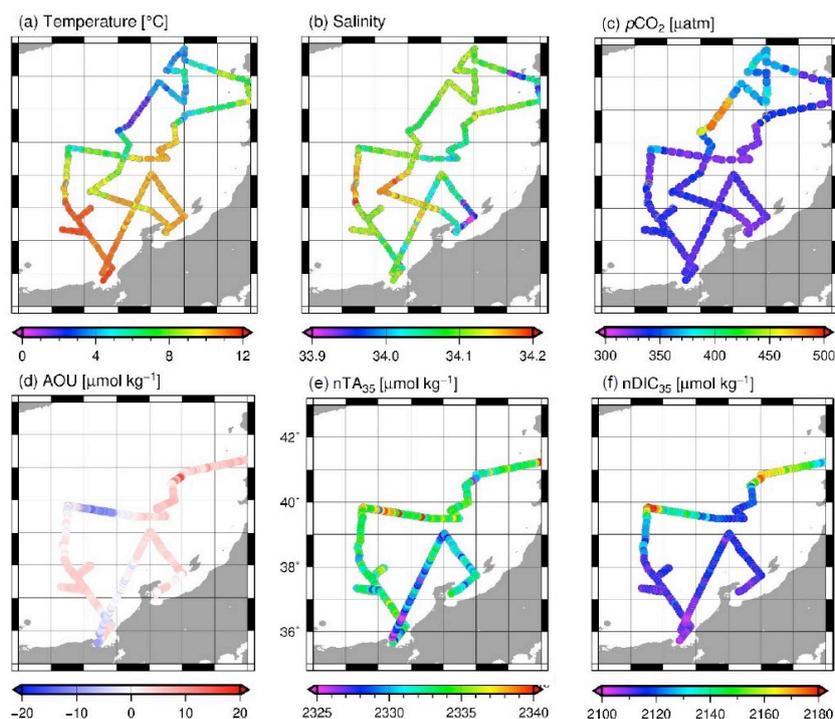


図 3-3. 凌風丸 22-01 航海で観測した日本海の表面水の水温、塩分、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ 、AOU、塩分 35 に規格化した全アルカリ度と全炭酸濃度の分布（2022 年 2 月～3 月）

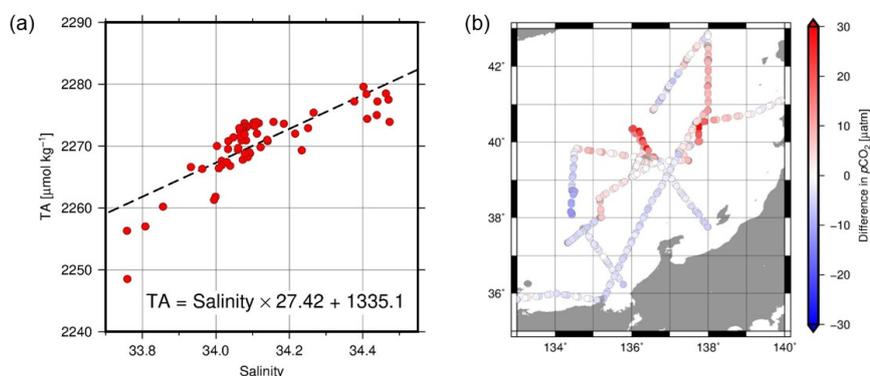


図 3-4. (a) 全アルカリ度と塩分の関係と (b) pH と全アルカリ度（推定値）から求めた  $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$  と直接測定した  $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$  の差の分布（右）

Kosugi, N. et al. 2016. Autumn  $\text{CO}_2$  chemistry in the Japan Sea and the impact of discharges from the Changjiang River. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 6536-6549. <https://doi.org/10.1002/2016JC011838>

#### 4-1-2. 北太平洋縁辺海における $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の診断モデルとデータプロダクト

##### (1) 観測データに基づく診断モデルの作成

診断モデルの作成には、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$  のデータベース SOCAT2022 (図 3-5) と気象庁の最新の観測データを使用した。2022 年と 2023 年の冬に気象庁が観測を行ったことで、日本海の日本の EEZ 内では四季を通じて観測データが得られたが、ロシアと北朝鮮の EEZ 内では観測データ全くない状況が続いている。東シナ海

でも南西諸島付近では四季を通じてデータが得られているが、中国のEEZ内ではデータが少ない。ベーリング海では、アリューシャン列島付近では四季を通じてデータが多く得られており、東部の陸棚域でも海氷に覆われない5月～12月にデータが得られている。オホーツク海では四季を通じて観測データが乏しく、特に冬季は北西太平洋亜寒帯域の診断モデルを適用せざるを得ない状況が続いている。

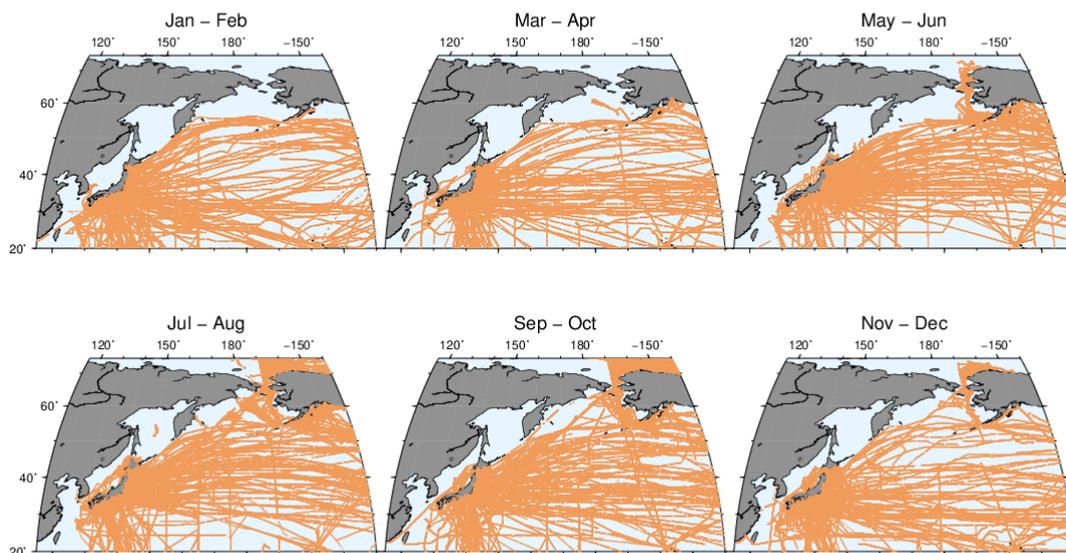
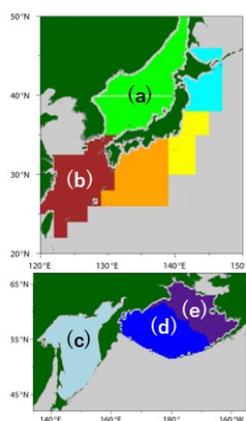


図3-5. SOCAT2022に収納されている $pCO_2^{sw}$ データの北太平洋北西部における2か月ごとのデータ分布

重回帰分析の結果から得られた海域毎の全アルカリ度、全炭酸濃度、 $pCO_2^{sw}$ の推定値の不確かさを表3-1に示す。低緯度側に位置する東シナ海や日本海では $pCO_2^{sw}$ の推定精度は6～10  $\mu atm$ ほどだが、オホーツク海やベーリング海では生物生産が高まる春から夏に推定精度が低い。これは生物生産の活発化に伴う全炭酸濃度の低下を衛星海色データ使ってもよく表現できないことが主な原因である。

表3-1. 重回帰分析による全アルカリ度、全炭酸濃度、 $pCO_2^{sw}$ の不確かさ。



	全アルカリ度(塩分35) / $\mu mol kg^{-1}$			全炭酸濃度(塩分35) / $\mu mol kg^{-1}$						$pCO_2^{sw}$ / $\mu atm$		
	バイアス	RMSE	n	バイアス	RMSE					n	バイアス	RMSE
					通年	1-3月	4-6月	7-9月	10-12月			
(a) 日本海	+0.4	5.5	387	+0.6	6.1	4.7	5.2	7.2	6.2	4,811	+1.0	10.3
(b) 東シナ海	0.0	4.0	385	+0.3	3.7	2.9	4.3	5.9	2.6	7,197	+0.5	6.2
(c) オホーツク海	-0.7	6.5	23	+0.8	5.6	-	6.2	4.9	-	228	+1.6	11.6
(d) ベーリング海 海盆域	+1.3	4.3	37	+0.5	11.3	7.1	17.9	12.7	7.0	3,946	+1.1	24.9
(e) ベーリング海 陸棚域	+0.7	6.7	16	+0.3	20.7	12.1	35.7	17.4	17.8	12,054	+0.5	34.9

(2)  $pCO_2^{sw}$ と $F_{net}$ のデータプロダクトの作成

日本海や東シナ海を含む日本列島の周辺海域とオホーツク海やベーリング海を含む北太平洋西部亜寒帯域における2月と8月の $pCO_2^{sw}$ の分布と、それらの不確かさの分布を図3-6に示す。また、同域同期間での $F_{net}$ の分布を図3-7に示す。

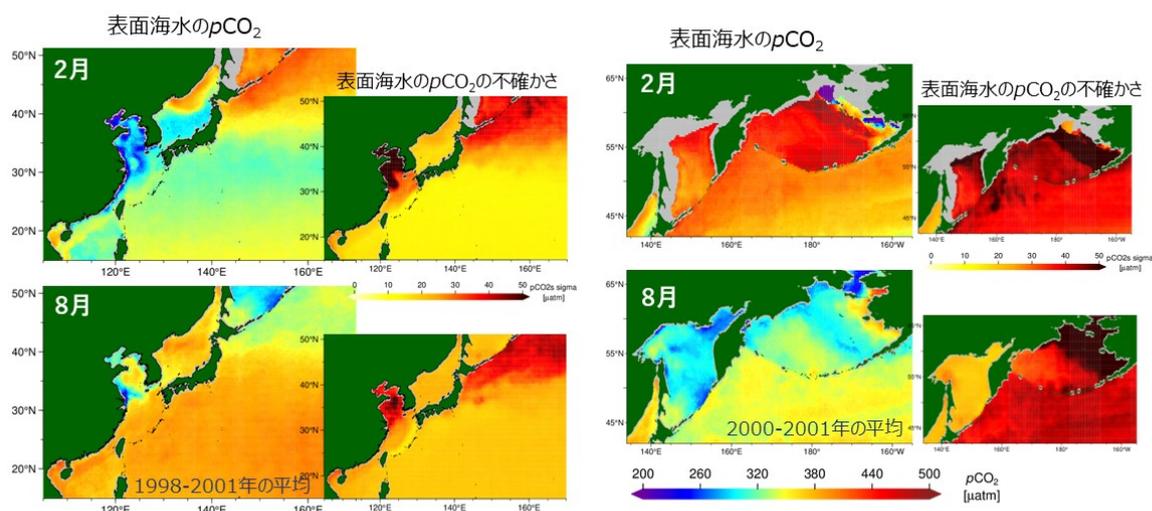


図3-6. 日本列島の周辺海域と北太平洋西部亜寒帯域における2月と8月の $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ と、それらの不確かさの分布

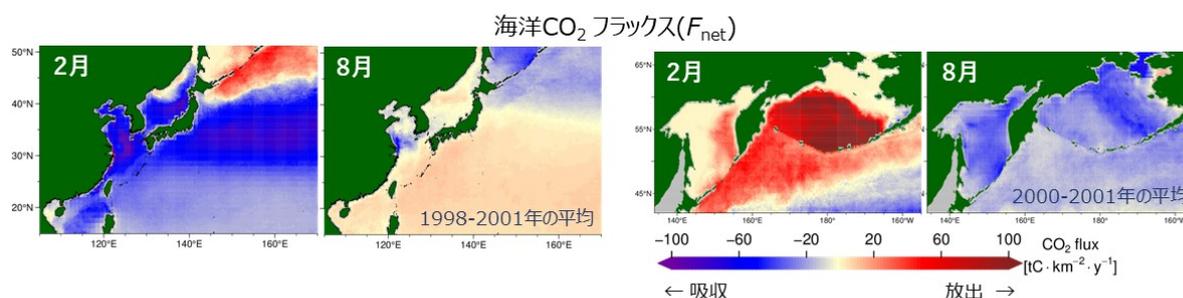


図3-7 (図0-7). 日本列島の周辺海域と北太平洋西部亜寒帯域における2月と8月の $F_{\text{net}}$ の分布

東シナ海や日本海南部では、太平洋亜熱帯域と同様に $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ は冬に低く、夏に高い。これは表面水温の季節変化が大きく、これが $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の季節変化に及ぼす影響が、夏に低く冬に高い全炭酸濃度の季節変化の影響より大きいためである。その結果、冬は表面水が $\text{CO}_2$ 未飽和 ( $p\text{CO}_2^{\text{sw}} < p\text{CO}_2^{\text{air}}$ ) になって強い $\text{CO}_2$ 吸収域になるが、夏は $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ と $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ が同等で $F_{\text{net}}$ は小さくなる(図3-8)。高緯度域に位置するベーリング海とオホーツク海では、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ は冬に高く夏に低い(図3-9)。これは、全炭酸濃度の季節変化の影響が水温の季節変化の影響を上回るためである。そのため、これらの海域は冬に $\text{CO}_2$ 放出域、夏に $\text{CO}_2$ 吸収域になっている。また夏の $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の低下は冬の $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ 上昇ほどは $F_{\text{net}}$ の季節変化に影響していない。これは夏に風が比較的弱く、大気・海洋間の $\text{CO}_2$ 交換が冬ほど活発ではない(ガス交換係数が小さい)ためである。 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ や $F_{\text{net}}$ の季節変化の振幅は、高緯度域で大きい傾向にある。亜熱帯域と亜寒帯域の間に位置する日本海の北部における領域平均の季節変化は、対馬暖流の影響を受けて、太平洋の同等の緯度帯に位置する北海道・三陸沖とは反対に、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ が冬に低く夏に高く、冬に強い $\text{CO}_2$ 吸収域、夏は $F_{\text{net}}$ の絶対値は小さいが、初夏に生物生産の影響を受けて $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ がいったん下がり、そのため $\text{CO}_2$ 吸収がわずかに増える(成果33, 65)。

1998年から2022年までの15年間の $F_{\text{net}}$ の領域積分値の平均値とその年々変化の標準偏差は、東シナ海が $-16.6 \pm 2.7 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、日本海南部が $-13.1 \pm 0.9 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、日本海北部が $-14.1 \pm 2.1 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、オホーツク海が $-19.9 \pm 7.8 \text{ TgC yr}^{-1}$ 、ベーリング海陸棚域が $-4.5 \pm 16.7 \text{ TgC yr}^{-1}$ で $\text{CO}_2$ 吸収域、ベーリング海海盆域が $+37.0 \pm 17.6 \text{ TgC yr}^{-1}$ で $\text{CO}_2$ 放出域だった。海洋では太平洋赤道域が強い $\text{CO}_2$ 放出域であることが知られているが、そのほかではベーリング海海盆域や西部北太平洋亜寒帯域も数少ない $\text{CO}_2$ 放出域である。また、年々変動は高緯度海域で大きい傾向にある。

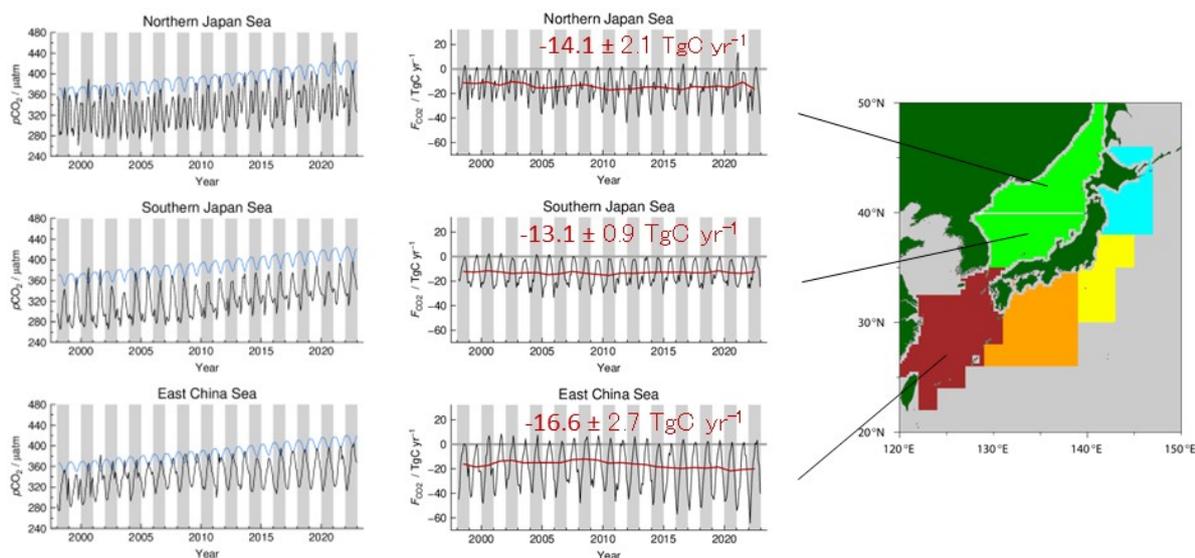


図3-8. 日本周辺域における $pCO_2^{sw}$ （領域平均値）と $F_{net}$ （領域積分値）のトレンド

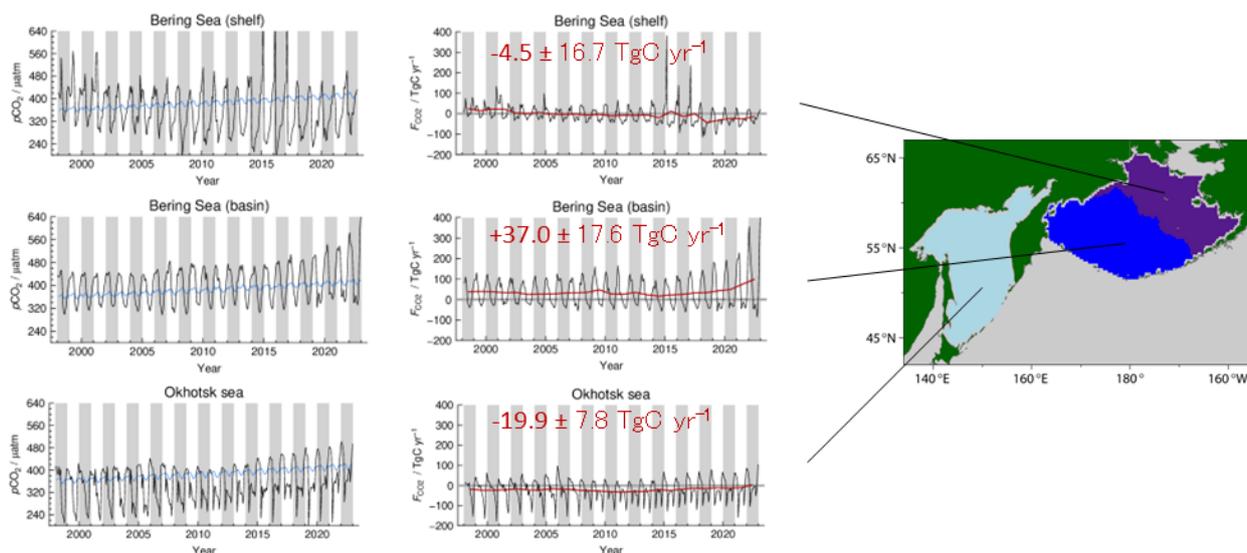


図3-9. オホーツク海とベーリング海における $pCO_2^{sw}$ （領域平均値）と $F_{net}$ （領域積分値）のトレンド

#### 4-1-3. 南西諸島近海における海洋CO<sub>2</sub>系の将来予測

南西諸島近海では、1995年-2019年の25年間の塩分35に規格化した全炭酸濃度(nDIC)は、経験的に

$$nDIC / \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ yr}^{-1} = 1972.57 + 1.15(Y - 2006) - 3.61(T - 24.85) - 7.29(S - 34.64)$$

( $Y$ は観測年、 $T$ は水温、 $S$ は塩分)

と表すことができた。観測年に係る係数 $+1.15(\pm 0.03) \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ は、人為起源CO<sub>2</sub>吸収によるnDICの増加速度を表しており、同じ期間の大気CO<sub>2</sub>濃度の増加速度から計算されるnDICの増加速度 $+1.13(\pm 0.01) \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ とよく一致した。このことから、将来もこの海域のnDICは大気CO<sub>2</sub>濃度の増加速度からnTAが変化しない条件で計算されるnDICの増加速度と一致すると仮定し、RCP8.5シナリオの下で $pCO_2^{sw}$ や $\Delta pCO_2$ が今世紀末までどう変化するか計算した(図3-10)。

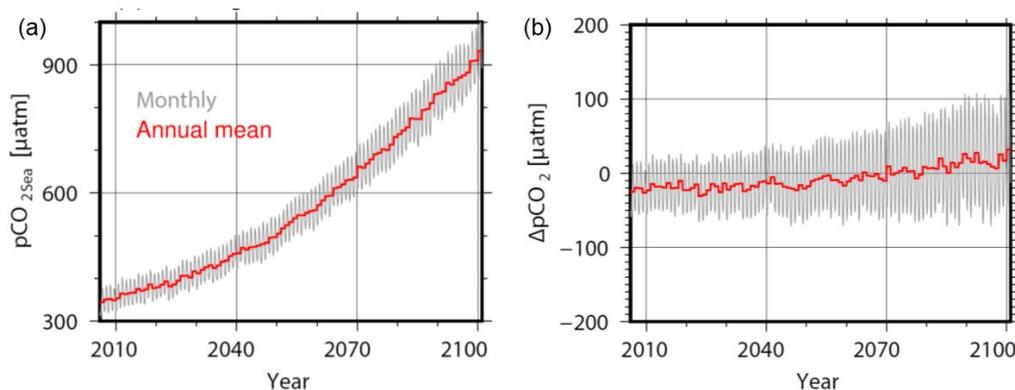


図3-10. 観測に基づいて作成した診断モデルとESMの水温・塩分の将来予測に基づいて推定した今世紀末までの（左） $pCO_2^{sw}$ （左）と（右） $\Delta pCO_2$ のトレンド

$pCO_2^{sw}$ の年平均値は2010年から2100年の90年間に、350  $\mu\text{atm}$ から900  $\mu\text{atm}$ 以上に増加するが、この期間に $pCO_2^{sw}$ や $\Delta pCO_2$ の季節変化の振幅も、およそ60  $\mu\text{atm}$ から150  $\mu\text{atm}$ に増加することは注目に値する。こうした $pCO_2^{sw}$ の振幅の増加は、 $pCO_2^{sw}$ の増加による水温変化に対する感度の増加と海水の $CO_2$ 緩衝能の低下（Revelle factorの増加）に起因する。（成果14）

#### 4-2. 地表面大気中 $CO_2$ 濃度分布の最適化

衛星観測は広い範囲を同一のセンサーで観測できる利点がある。しかし、衛星観測データを逆解析に導入するには時空間変化が見られる観測データのバイアスを適切に補正することが必須である。サブテーマ3では、逆解析に温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）から得られた $XCO_2$ （NIES Ver. 2.97-2.98、NIESによるバイアス補正済）を導入するにあたり、現地観測データ（地上、船舶、航空機；GHG世界資料センターより入手）のみを用いて衛星観測とは独立した逆解析後の $CO_2$ 濃度を真値と見なし、長期間の月平均を取ることによりランダム誤差等を除去して衛星観測データのバイアスを補正する手法を考案して実装した。この手法で推定されたGOSAT観測データ（ $XCO_2$ ）のバイアスを図3-11に示す。

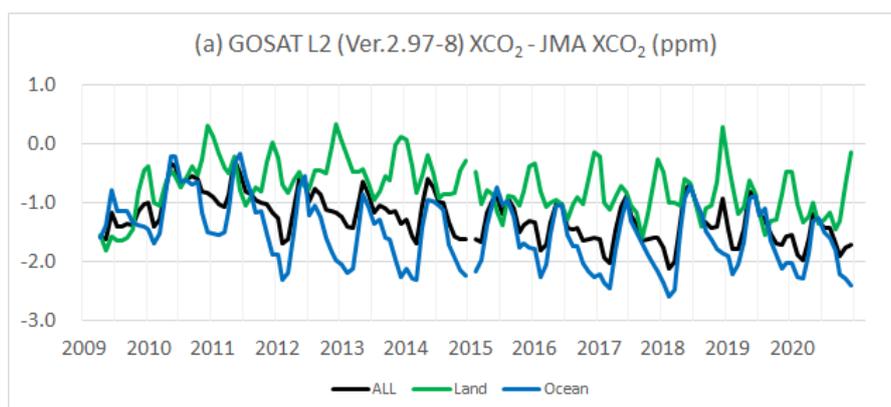


図3-11. GOSAT  $XCO_2$ （NIES L2 Ver. 2.97-8）と独立した現地観測のみの逆解析から得られた $XCO_2$ との差（単位：ppm）。黒が全球、緑が陸域、青が海洋の平均を示す。

GOSATの $XCO_2$ は、現地観測データを用いた逆解析と比較して全球的に低い値を示した（全球平均で-1.26 ppm）。陸域（平均-0.76 ppm）と海洋（平均-1.54 ppm）では、この差（バイアス）の季節変化が異なり、これらを適切に補正しないと逆解析後の炭素収支の結果に悪影響を与える可能性が懸念される。差の月毎の空間分布を見ると（図略、詳細は成果15）、陸域、海洋ともに高緯度の観測限界に近い領域などでGOSATの $XCO_2$ が低い濃度を示す傾向が見られた。また、アフリカ中部など一部ではGOSATの $XCO_2$ が高い濃度を示す領域もあり、バイアスの季節依存性に加えて空間依存性も無視できないことを示

している。今回は現地観測に衛星観測データを追加した逆解析を実施するにあたって、衛星データバイアス補正法として、NIES L2 Ver. 2.97-8をそのまま用いるもの（RAW）、バイアス評価に用いた逆解析値と置き換えたもの（JMA）、全球固定値（-1.26ppm）で補正したもの（FIX）、バイアスの空間依存のみを考慮し、季節変化を考慮しなかったもの（ALL）、バイアスの月変化と空間変化を考慮したもの（MAV）について試した。

これらのバイアス補正後の衛星観測データと現地観測データを組み合わせた逆解析を行い、サブテーマ2で得られた独立した現地観測データ（CONTRAIL）との比較検証を行い、主に対流圏中部から成層圏にかけて、大気CO<sub>2</sub>濃度の解析精度が現地観測データのみの逆解析（CNTL）に比べて向上することを示した（表3-2）。XCO<sub>2</sub>の感度（アベレージングカーネル）が対流圏下層から上層で高く、地上観測が中心だった現地観測データのみの逆解析（CNTL）よりも上層で解析精度の改善が図られたものと考えられる。NIESによるL2プロダクトをそのまま逆解析に追加すると（RAW）、追加する前（CNTL）より改善が見られたが改善幅は小さい。衛星観測データを独立解析から算出したXCO<sub>2</sub>で置換する（JMA）と、バイアスとRMSEは最も小さくなったが、衛星観測の意義が失われるのであくまでも参考情報に留める。バイアスのみで見ると全球固定値による補正（FIX）が全層平均で最も小さいが、これは下層での負バイアスと上層での正バイアスが打ち消し合った結果である。JMAの次にRMSEが小さいのが衛星観測データの空間依存バイアスを補正して導入した解析（ALL）と、時間・空間依存バイアスを補正して導入した解析（MAV）である。

表3-2. 上段は各逆解析における高度別の独立観測（CONTRAIL）との差（2009年から2020年の平均）、下段は根平均二乗誤差（RMSE）を示す。CNTLは現地観測のみによる逆解析、RAWは現地観測と衛星データ（NIES L2 Ver. 2.97-8）を用いた逆解析、JMAは現地観測と衛星観測データ（独立した解析値と置き換えた）を用いた逆解析、ALLは現地観測と衛星観測データ（空間依存性のみを補正）を用いた逆解析、FIXは現地観測と衛星観測データ（全球固定値で補正）を用いた逆解析、MAVは現地観測と衛星観測データ（時間・空間依存性を補正）を用いた逆解析をそれぞれ示す。

BIAS(ppm)	900-700 hpa	700-300 hPa	300 hPa-	All
CNTL	-0.422	-0.071	-0.141	-0.195
RAW	-0.420	-0.043	-0.096	-0.173
JMA	-0.366	0.019	-0.007	-0.108
ALL	-0.365	0.022	0.001	-0.105
FIX	-0.345	0.047	0.039	-0.079
MAV	-0.364	0.020	-0.003	-0.106

RMSE(ppm)	900-700 hpa	700-300 hPa	300 hPa-	All
CNTL	1.352	0.923	1.013	1.076
RAW	1.385	0.937	1.004	1.092
JMA	1.382	0.936	0.998	1.089
ALL	1.387	0.939	1.001	1.093
FIX	1.392	0.944	1.005	1.097
MAV	1.387	0.939	1.001	1.093

これらの結果は、衛星観測データをバイアス補正（特に空間依存バイアス）後に導入することによって逆解析の精度を高められることを示しており、これまで困難だった衛星観測データの逆解析への導入への第一歩となる成果である。解析された地域スケールのCO<sub>2</sub>収支は、先行研究で見られたような衛星観測データの導入によるCO<sub>2</sub>収支の大幅な変動は見られず、現地観測が不足している熱帯やアフリカ等での変化に留まった。今回開発した手法は全期間の解析を一度に行うというベイズ統合逆解析の特徴を生かした手法であり、原理的に複数の衛星に関して適用可能なことから、これまであまり行われてこなかった複数衛星の逆解析同時利用への道を拓くものである。一方、南半球においては比較検証データ

が地理的に偏っていることもあり、影響はほとんど見られなかった（図略）。これはバイアス補正に用いた現地観測データのみでの逆解析の精度が南半球では十分でないことを示しており、これらの領域における現地観測網の充実も必要であることを示唆している。

#### 4-3. 太平洋における海洋CO<sub>2</sub>フラックスに関するデータプロダクトと海洋大循環・生物地球化学モデルの相互比較（成果17, 18, 36, 66, 67, 68）

Global Carbon Project (GCP) のRECCAP2に参加し、スイスやアメリカなど海外の研究者とも協力して、1985年～2018年の太平洋における海洋CO<sub>2</sub>フラックスの相互比較を行った。相互比較にはJMAMLRを含む（ただしRECCAP2のスケジュールの関係で縁辺海の診断モデルのプロダクトは含まれていない）データプロダクト7個と全球海洋生物地球化学モデル(GOBMs) 11個の出力を使用した（表3-3）。JMAMLR以外のデータプロダクトの多くは、機械学習によってSOCATのpCO<sub>2</sub><sup>sw</sup>データの時空間的な補間を行っている。GOBMsの多くは地球システムモデルの海洋コンポーネントであり、大気再解析データと工業化によって増加し始めた大気CO<sub>2</sub>濃度のデータに駆動されている。また、GOBMsの多くは、大気再解析データと工業化以前の大気CO<sub>2</sub>濃度(約280ppm)で駆動されたモデルランの「自然」の海洋CO<sub>2</sub>フラックス( $F_{\text{nat}}$ )も提供している。ここでは、産業革命後に増加した大気CO<sub>2</sub>濃度データで駆動したシミュレーション (Sim A) の $F_{\text{net}}$ と、産業革命前の大気CO<sub>2</sub>濃度で駆動したシミュレーション (Sim D) の $F_{\text{nat}}$ の差を、「人為起源の海洋CO<sub>2</sub>フラックス( $F_{\text{ant}}$ )」と呼ぶ。なお、データプロダクトの $F_{\text{net}}$ には陸から河川と海洋を経由して大気に放出されるCO<sub>2</sub>のフラックス( $F_{\text{riv}}$ )が暗に含まれるが、GOBMsにはこれが含まれないか小さい。太平洋（ここでは南緯44度以北と定義した）の $F_{\text{riv}}$ は、全体で0.15PgC yr<sup>-1</sup>と見積もられているが、誤差は大きい（50%）と考えられている。

表3-3. Global Carbon Project RECCAP2の太平洋CO<sub>2</sub>フラックスの相互比較に用いたデータプロダクトと全球海洋生物地球化学モデル(GOBMs)

pCO <sub>2</sub> データプロダクト		全球海洋生物地球化学モデル (GOBMs)	
略称	文献	略称	文献
CMEMS-LSCE-FFNN	Chau et al., 2022; 2023	CCSM-WHOI	Doney et al., 2009
CSIR-ML6	Gregor et al., 2019	CESM-ETHZ	Yang and Gruber, 2016 ほか
JenaMLS-v2011	Rödenbeck et al., 2022	CNRM-ESM2-1	Séférian et al., 2019, 2020 ほか
<b>JMAMLR</b>	<b>Iida et al., 2021</b>	EC-Earth3	Döscher et al., 2022
MPI-SOMFFN	Landschützer et al., 2016	FESOM-REcoM-LR	Sein et al., 2018 ; Hauck et al., 2020
NIES-ML3	Zeng et al., 2022	MOM6-Princeton	Liao et al., 2020 ; Stock et al., 2020
Ocean SODA ETHZ	Gregor and Gruber, 2021	MPIOM-HAMOC	Mauristsen et al., 2019 ほか
		MRI-ESM2-1	Nakano et al., 2011 ; Urakawa et al., 2020
		NorESM-OC1.2	Schwinger et al., 2016
		ORCA1-LIM3-PISCES	Friedlingstein et al., 2021 ほか
		PlankTOM12	Wright et al., 2021ほか

##### 4-3-1. 海洋CO<sub>2</sub>フラックス ( $F_{\text{net}}$ ) の平均分布

太平洋の $F_{\text{net}}$ は、熱帯域の中部・東部が強いCO<sub>2</sub>放出域、中緯度域の西部が強いCO<sub>2</sub>吸収域であることが、観測から知られている。こうした分布をGOBMsは概ねよく再現している（図3-12）。太平洋全域の $F_{\text{net}}$ のデータプロダクトとGOBMsそれぞれの1985年～2018年のアンサンブル平均値±標準偏差は、データプロダクトが $-0.41 \pm 0.12$  PgC yr<sup>-1</sup>（JMAMLRは $-0.63$  PgC yr<sup>-1</sup>）、GOBMsが $-0.51 \pm 0.16$  PgC yr<sup>-1</sup>だった。標準偏差が小さくないため、両者のアンサンブル平均値に有意な差はない。しかし、それらの差の0.10 PgC yr<sup>-1</sup>について敢えて論じるなら、これはデータプロダクトに含まれる太平洋の $F_{\text{riv}}$  ( $+0.15$  PgC yr<sup>-1</sup>) とほぼ一致している。しかし、熱帯域（南緯18度～北緯18度）における $F_{\text{net}}$ のアン

サンプル平均（データプロダクト： $+0.48 \pm 0.05 \text{ PgC yr}^{-1}$ ；GOBMs  $+0.37 \pm 0.05 \text{ PgC yr}^{-1}$ ）の差ともよく一致しており（図3-12c, 図3-13）、 $F_{riv}$ の不確かさが大きいことを考慮すると、熱帯域の $F_{net}$ の差が太平洋全体の $F_{net}$ の差となっていると見なすこともできる。

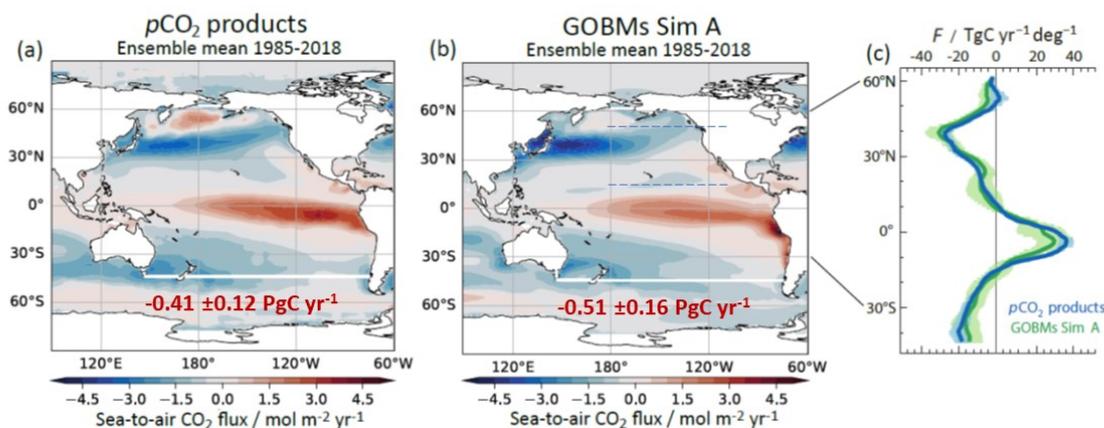


図3-12（図0-9）．（a）データプロダクトと（b）GOBMsによる太平洋の $F_{net}$ の比較（1985～2018年の期間平均値のアンサンブル平均値）。（c）は緯度1度の幅で東西に積算した $F_{net}$ の南北分布を示す。

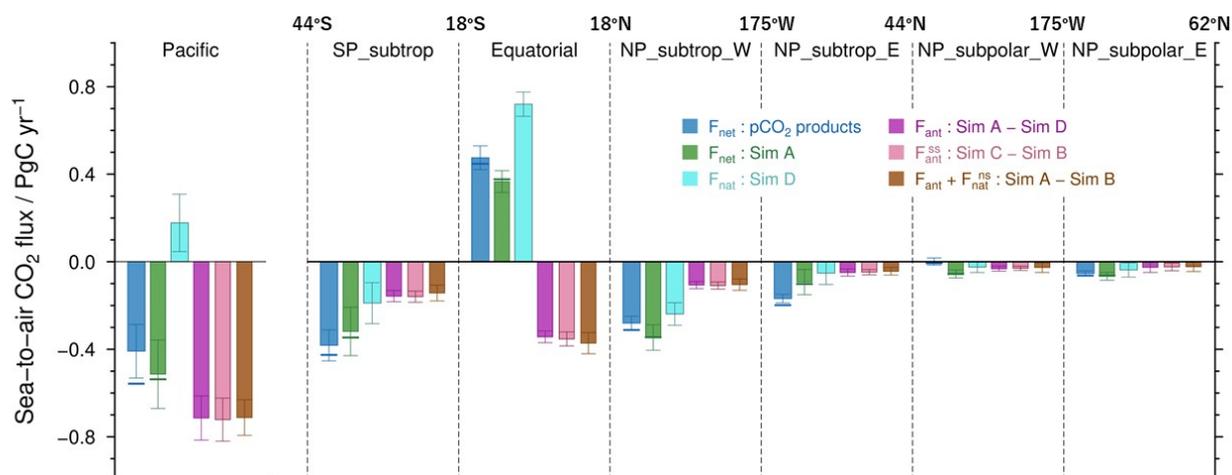


図3-13．太平洋の海域ごとの積算海洋CO<sub>2</sub>フラックス（1985年～2018年の平均値）のアンサンブル平均値の比較。棒グラフのエラーバーはアンサンブル標準偏差を表す。

#### 4-3-2．海洋CO<sub>2</sub>フラックス( $F_{net}$ )の長期変化と季節変化（成果67, 68）

太平洋全体の $F_{net}$ は、データプロダクトもGOBMsも熱帯域におけるエルニーニョ南方振動（ENSO）の影響を受けて大きく年々変動しているが、全期間にわたってGOBMsの方が大きなCO<sub>2</sub>吸収（大きな負の $F_{net}$ ）を示している（図3-14a）。また、 $F_{net}$ の平均変化速度はデータプロダクトでは  $-0.088 \pm 0.062 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ 、GOBMsでは  $-0.079 \pm 0.016 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ で有意な差はなく、どちらもCO<sub>2</sub>吸収の増加傾向を示している（表3-4）。観測データが比較的多い2001年～2018年では、前者は  $-0.170 \pm 0.038 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ 、後者は  $-0.172 \pm 0.045 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ で、よく一致している。

しかし、海域別に調べるとそれらの平均変化速度は必ずしも一致していない。熱帯域では、1985年～2018年の平均変化速度は、データプロダクトでは  $+0.001 \pm 0.020 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ で長期変化が見られないが、GOBMsでは  $-0.041 \pm 0.009 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ で、CO<sub>2</sub>放出が有意に減少している。この違

いは主に $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の増加速度の違いに由来する。 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の平均増加速度は、データプロダクトでは $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ の平均増加速度と同等で $\Delta p\text{CO}_2$ に有意な長期変化は見られないが、GOBMsでは $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ の平均増加速度は $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ の平均増加速度より10%ほど低い。この差が何に起因するのかわかりにくい。南太平洋や北太平洋亜熱帯域東部では反対にデータプロダクトがGOBMsより $\text{CO}_2$ 吸収の増加速度が速い傾向を示しているが、その理由も明らかではない。こうした海域ごとの $F_{\text{net}}$ の変化速度の違いが相殺して、太平洋全体ではデータプロダクトとGOBMsの平均変化速度がほぼ一致しているのである。

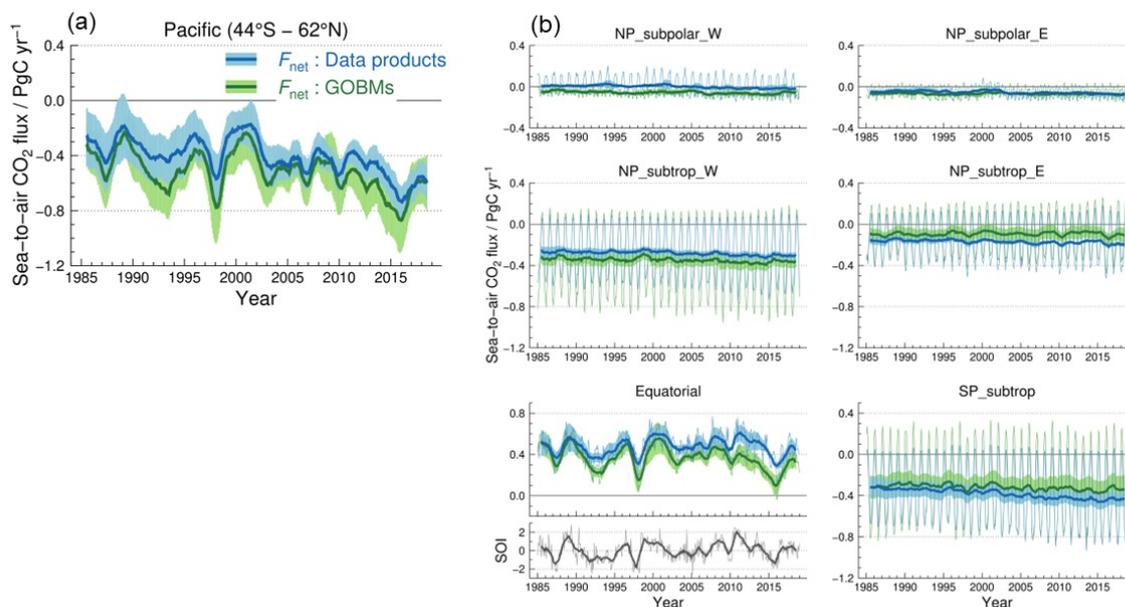


図3-14. 1985年～2018年の(a)太平洋と(b)その各領域におけるデータプロダクトとGOBMsそれぞれの $F_{\text{net}}$ 積算値のアンサンブル平均の12か月移動平均。(b)の細い線は月平均値を示す。

表3-4. データプロダクトの $F_{\text{net}}$ とGOBMsの $F_{\text{net}}$ と $F_{\text{ant}}$ の1985年～2018年のアンサンブル平均±標準偏差及びそれらの変化速度のアンサンブル平均±標準偏差

海域	位置		$p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ データプロダクト		全球海洋生物地球化学モデル(GOBMs)			
			$F_{\text{net}}$ /PgCyr <sup>-1</sup>	$F_{\text{net}}$ 変化速度 /PgCyr <sup>-1</sup> decade <sup>-1</sup>	$F_{\text{net}}$ /PgCyr <sup>-1</sup>	$F_{\text{net}}$ 変化速度 /PgCyr <sup>-1</sup> decade <sup>-1</sup>	$F_{\text{ant}}$ /PgCyr <sup>-1</sup>	$F_{\text{ant}}$ 変化速度 /PgCyr <sup>-1</sup> decade <sup>-1</sup>
Pacific	44°S - 62°N		-0.41 ± 0.12	-0.088 ± 0.062	-0.51 ± 0.16	-0.079 ± 0.016	-0.71 ± 0.10	-0.102 ± 0.013
NP_subpolar_W	44°N - 62°N	-175°W	0.00 ± 0.02	-0.011 ± 0.010	-0.06 ± 0.02	-0.007 ± 0.003	-0.03 ± 0.01	-0.004 ± 0.002
NP_subpolar_E	44°N - 62°N	175°W	-0.05 ± 0.01	-0.010 ± 0.007	-0.07 ± 0.02	-0.001 ± 0.005	-0.03 ± 0.02	-0.003 ± 0.003
NP_subtrop_W	18°N - 44°N	-175°W	-0.28 ± 0.03	-0.015 ± 0.011	-0.35 ± 0.06	-0.013 ± 0.005	-0.11 ± 0.02	-0.014 ± 0.003
NP_subtrop_E	18°N - 44°N	175°W	-0.17 ± 0.02	-0.012 ± 0.006	-0.09 ± 0.06	+0.001 ± 0.003	-0.05 ± 0.02	-0.006 ± 0.002
Equatorial	18°S - 18°N		+0.48 ± 0.05	+0.001 ± 0.020	+0.37 ± 0.05	-0.041 ± 0.009	-0.34 ± 0.03	-0.054 ± 0.004
SP_subtrop	44°S - 18°S		-0.38 ± 0.07	-0.041 ± 0.022	-0.32 ± 0.11	-0.016 ± 0.008	-0.16 ± 0.03	-0.021 ± 0.004

このほか、北太平洋の亜寒帯域や亜熱帯域西部では、データプロダクトとGOBMsの $F_{\text{net}}$ の季節変化の違いが目立つ。北太平洋亜寒帯域では、観測に基づくデータプロダクトはどれも夏に $\text{CO}_2$ 吸収・冬に $\text{CO}_2$ 放出を示すが、GOBMsの多くは逆に夏に $\text{CO}_2$ 放出・冬に $\text{CO}_2$ 吸収を示す。北太平洋の亜熱帯域西部では、どちらも冬に強い $\text{CO}_2$ 吸収を示すが、GOBMsの方がより強く $\text{CO}_2$ 吸収を示し、そのためにこの海域では年平均でもGOBMsがデータプロダクトよりも多くの $\text{CO}_2$ 吸収を示している。こうした季節変化の違いは、 $p\text{CO}_2^{\text{sw}}$ 変化の主因である水温変化と全炭酸濃度変化のうち、全炭酸濃度の季節変化の振幅がGOBMsの両海域でともに過小に評価されていることが原因である(成果17)。

4-3-3. GOBMsによる人為起源海洋CO<sub>2</sub>フラックス( $F_{ant}$ )の分布と長期変化 (成果66, 67, 68)

海洋はどの海域においても人為起源CO<sub>2</sub>の吸収域である。GOBMsによる1985年～2018年の太平洋の積算 $F_{ant}$ のアンサンブル平均は  $-0.71 \pm 0.10 \text{ PgC yr}^{-1}$ に達する。これは全海洋の積算 $F_{ant}$ のアンサンブル平均 ( $-2.11 \pm 0.33 \text{ PgC yr}^{-1}$ ) の34%に相当する。また、4-3-1に示した太平洋の積算 $F_{net}$ のアンサンブル平均 ( $-0.51 \pm 0.16 \text{ PgC yr}^{-1}$ ) よりも40%大きい。単位面積当たりの $F_{ant}$ が特に大きい海域は、北太平洋中緯度域西部 ( $F_{ant} < -1.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )と熱帯域の北緯10度と南緯10度付近 ( $F_{ant} < -0.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )である (図3-15)。北太平洋中緯度域西部は自然のCO<sub>2</sub>吸収 ( $F_{nat}$ )が大きい上に人為起源のCO<sub>2</sub>吸収 ( $F_{ant}$ )も大きいために、 $F_{net}$ が太平洋で最も大きくなっている ( $< -4.0 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ; 図3-13)。北緯40度付近では、大気CO<sub>2</sub>濃度の増加による $\Delta p\text{CO}_2$ の低下が東西平均でおよそ  $8 \text{ } \mu\text{atm}$ であり、これが $F_{ant}$ が大きい ( $\approx -0.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )理由である。一方、熱帯域における $\Delta p\text{CO}_2$ の低下はおよそ  $14 \text{ } \mu\text{atm}$ で、北太平洋中緯度域に比べるとさらに大きい、中緯度域より風が弱い (ガス交換係数が小さい) ために単位面積あたりの $F_{ant}$ は小さく、赤道付近で $F_{ant}$ が極小となる。しかし、熱帯域 (南緯18度～北緯18度)は面積が広いために積算 $F_{ant}$ が  $-0.34 \pm 0.03 \text{ PgC yr}^{-1}$ に達し、太平洋の積算 $F_{ant}$ のほぼ半分を占めている。

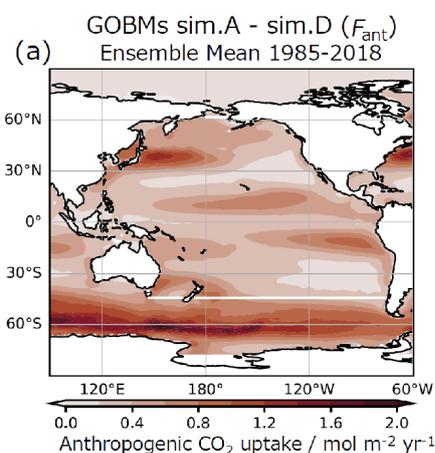


図3-15. GOBMsによる太平洋の $F_{ant}$ の分布 (1985～2018年のアンサンブル平均値)。

1985年～2018年の太平洋のGOBMsの $F_{ant}$ 積算値アンサンブル平均の12か月移動平均を図3-16(a)に、各海域の $F_{ant}$ の積算値のアンサンブル平均の月平均と12か月移動平均を図3-16(b)に示す。

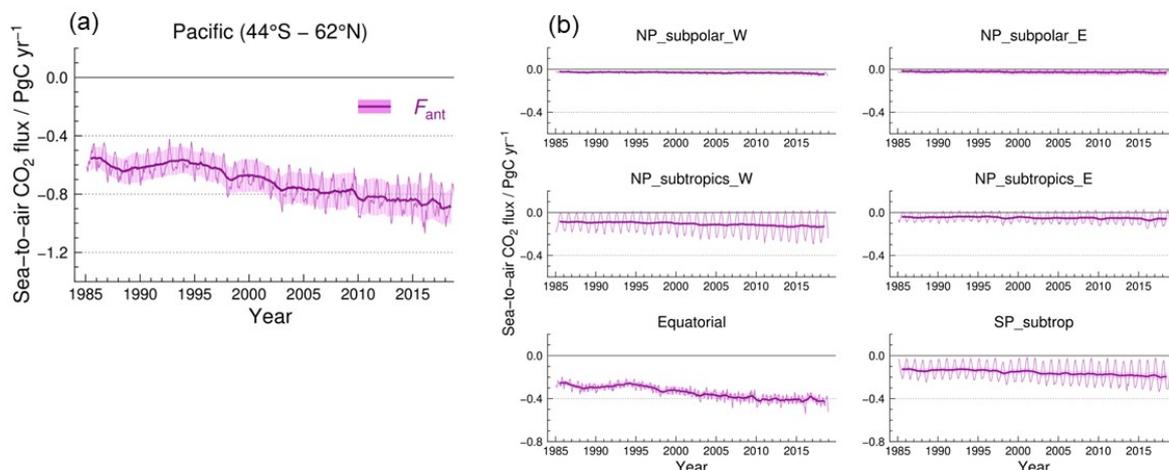


図3-16. 1985年～2018年の(a)太平洋と(b)その各領域におけるデータプロダクトとGOBMsそれぞれの $F_{ant}$ 積算値のアンサンブル平均の月平均値 (細線) と12か月移動平均 (太線)。

$F_{\text{ant}}$ の平均変化速度は  $-0.102 \pm 0.013 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ であり、大気 $\text{CO}_2$ 濃度の増加とともに太平洋の人為起源 $\text{CO}_2$ フラックスも増加している。4-3-2に述べたように、GOBMsの $F_{\text{net}}$ の平均変化速度は  $-0.076 \pm 0.017 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ なので、 $F_{\text{net}}$ と $F_{\text{ant}}$ の変化の差、すなわち気候変化・変動による海洋 $\text{CO}_2$ フラックスの変化が、1985年から2018年の $F_{\text{net}}$ の変化を $F_{\text{ant}}$ に比べて $23 \pm 20\%$ 小さくしている。 $F_{\text{ant}}$ は工業化以前にはゼロなので、 $F_{\text{ant}}$ が大きい北太平洋中緯度域西部や熱帯域は $F_{\text{ant}}$ の変化も速い海域であり、その平均変化速度は北太平洋中緯度域西部では  $-0.014 \pm 0.003 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ 、熱帯域では  $-0.054 \pm 0.004 \text{ PgC yr}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ だった。

## 5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

目標どおりの成果をあげることができた。

- (1) 冬季に日本海の海洋 $\text{CO}_2$ 観測を実施し、海洋表層水の $\text{CO}_2$ 分圧の変動要因の解明やセンサーによる航走pH観測も試みながら（図3-3, 3-4）、北太平洋の縁辺海を対象に海洋表層炭酸系の分布・変動を経験的に推定できる診断モデルを作成した（図3-1）。この診断モデルや表面水温など様々な衛星観測データや海洋同化データなどに基づいて、海洋 $\text{CO}_2$ 分圧や海洋 $\text{CO}_2$ フラックスの時間・空間変動に関するデータプロダクトを作成し（図3-2）、外洋域を対象とした既存のデータプロダクトに統合した（図3-6, 3-7; 成果65など）。南西諸島の周辺海域については、別途作成した診断モデルと地球システムモデルの水温予測などに基づいて、炭酸系の経験的な将来予測を行い、海洋 $\text{CO}_2$ 分圧の季節変化の振幅が今世紀内に2倍以上に増加することを予測した（図3-10; 成果14）。しかし、東シナ海、日本海、オホーツク海においては、他国のEEZ内では観測データが特に乏しい状況に大きな改善は見られず、診断モデルの検証に課題を残した（図3-5）。また、高緯度域の夏の海洋 $\text{CO}_2$ 分圧の推定値の不確かさの大きさにも課題を残した（表3-1）。
- (2) バイアスを補正した大気 $\text{CO}_2$ 濃度の衛星観測データ（GOSAT）と現地観測データを組み合わせた逆解析を行って独立した現地観測データ（CONTRAIL）と比較検証し、主に対流圏中部から成層圏にかけて大気 $\text{CO}_2$ 濃度の解析精度が現地観測のみの逆解析（CNTL）に比べて向上することを示した（表3-2; 成果15, 34他）。
- (3) 作成した海洋 $\text{CO}_2$ 分圧の診断モデルや大気 $\text{CO}_2$ 濃度の分布情報のほか、様々なデータセットに基づいて海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのデータプロダクトを必要なデータセットが手に入り次第作成し、大気輸送モデルの境界値及び逆解析における初期値として提供できる体制を整えた。データセットは、[https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2\\_flux/co2\\_flux\\_data\\_en.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2_flux/co2_flux_data_en.html)から公開している（成果3, 7, 21）。このデータプロダクトは、海洋 $\text{CO}_2$ 分圧と海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのデータプロダクトの国際比較実験SOCOM2に参加している。また、IPCC WG1 AR7への貢献が期待される。

サブテーマ3で作成した縁辺海の海洋 $\text{CO}_2$ フラックスの分布データを統合した全海洋スケールの海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのデータプロダクトは、Global Carbon Budget (GCB) 2023に貢献した（成果7）。Global Carbon Project (GCP) のRECCAP2に参加し、太平洋の海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのデータプロダクトと全球海洋生物地球化学モデルの出力の相互比較を行い、診断モデルによる海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのアンサンブル平均と海洋生物地球化学モデルによる海洋 $\text{CO}_2$ フラックスのアンサンブル平均が、それぞれの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（図3-12, 3-13; 成果66）。しかし、熱帯域においては、データプロダクトでは $\Delta p\text{CO}_2$ の減少が見られないが、海洋モデルでは $\Delta p\text{CO}_2$ に有意な減少が見られること（図3-14; 成果68）や、海洋モデルでは全炭酸濃度の季節変化の振幅が小さいために、海洋 $\text{CO}_2$ フラックスの季節変化の位相や大きさがデータプロダクトと異なる（図3-14; 成果17）といった課題も見つかった。現在、データプロダクトの国際比較実験SOCOM2に参加している。

## Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

## (1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	19
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
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
知的財産権：	0
「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
その他の成果発表：	0

## (2) 誌上発表

## &lt; 査読付き論文 &gt;

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Friedlingstein, P., ..., Y. Iida, ..., S.-I. Nakaoka, Y. Niwa, et al. (2022). Global Carbon Budget 2021. Earth System Science Data, 4. <a href="https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022">https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022</a> .
2	Chandra, N., Patra, P. K., Niwa, Y., Ito, A., Iida, Y., Goto, D., Morimoto, S., Kondo, M., Takigawa, M., Hajima, T., and Watanabe, M. (2022). Estimated regional CO <sub>2</sub> flux and uncertainty based on an ensemble of atmospheric CO <sub>2</sub> inversions. Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 9215–9243, <a href="https://doi.org/10.5194/acp-22-9215-2022">https://doi.org/10.5194/acp-22-9215-2022</a> , 2022.
3	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-CO <sub>2</sub> v2021.1. Progress in Earth and Planetary Science, 9, 42, <a href="https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6">https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6</a> .
4	Friedlingstein P., Jones M. W., O' Sullivan M., ... Niwa Y., et al. (2022). Global Carbon Budget 2022. Earth System Science Data, 14, 4811-4900, <a href="https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022">https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022</a> .

5	Remaud, M., Ma, J., Krol, M., Abadie, C., Cartwright, M. P., Patra, P., Niwa, Y., Rödenbeck, C., Belviso, S., Kooijmans, L., Lennartz, S., Maignan, F., Chevallier, F., Chipperfield, M. P., Pope, R. J., Harrison, J. J., Vimont I., Wilson, C., Peylin, P. (2023). Intercomparison of atmospheric carbonyl sulfide (TransCom-COS; part one): Evaluating the impact of transport and emissions on tropospheric variability using ground-based and aircraft data. <i>Journal of Geophysical Research: Atmospheres</i> , 128, e2022JD037817, <a href="https://doi.org/10.1029/2022JD037817">https://doi.org/10.1029/2022JD037817</a> .
6	Ma, J., Remaud, M., Peylin, P., Patra, P., Niwa, Y., Rodenbeck, C., et al. (2023). Intercomparison of atmospheric carbonyl sulfide (TransCom-COS): 2. Evaluation of optimized fluxes using ground-based and aircraft observations. <i>Journal of Geophysical Research: Atmospheres</i> , 128, e2023JD039198. <a href="https://doi.org/10.1029/2023JD039198">https://doi.org/10.1029/2023JD039198</a>
7	Friedlingstein P., Jones M. W., O' Sullivan M., ... Niwa Y., et al. (2023). Global Carbon Budget 2023. <i>Earth System Science Data</i> , 15, 5301–5369, <a href="https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023">https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023</a> , 2023.

成果番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
8	Nomura, S., Naja, M., Ahmed, M. K., Mukai, H., Terao, Y., Machida, T., Sasakawa, M., and Patra, P. K. (2021). Measurement report: Regional characteristics of seasonal and long-term variations in greenhouse gases at Nainital, India, and Comilla, Bangladesh. <i>Atmospheric Chemistry and Physics</i> , 21, 16427–16452, <a href="https://doi.org/10.5194/acp-21-16427-2021">https://doi.org/10.5194/acp-21-16427-2021</a> .
9	寺尾有希夫, 石戸谷重之, (2021). 大都市における温室効果ガスと関連物質の大気観測, <i>大気化学研究</i> , 45(045A01).
10	Tohjima, Y., Niwa, Y., Tsuboi, K., Saito, K. (2022). Did atmospheric CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO <sub>2</sub> reduction due to COVID-19 lockdown?, <i>Journal of the Meteorological Society of Japan</i> , 100(2), 437–444 (2022), <a href="https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021">https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021</a>
11	遠嶋康徳. (2022). 大気中のCO <sub>2</sub> 観測はCOVID-19の影響を捉えたか? <i>大気化学研究</i> , 46, 046A01.
12	Tohjima, Y., Niwa, Y., Patra, P. K., Mukai, H., Machida, T., Sasakawa, M., Tsuboi, K., Saito, K., Ito, A. (2023). Near-real-time estimation of fossil fuel CO <sub>2</sub> emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, <i>Progress in Earth and Planetary Science</i> , 10:10, <a href="https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6">https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6</a>
13	Vogel, B., Volk, C.M., Wintel, J., Lauther, V., Müller, R., Patra, P. K., Riese, M., Terao, Y., and Stroh, F. (2023). Reconstructing high-resolution in-situ vertical carbon dioxide profiles in the sparsely monitored Asian monsoon region. <i>Communications Earth &amp; Environment</i> 4, 72. <a href="https://doi.org/10.1038/s43247-023-00725-5">https://doi.org/10.1038/s43247-023-00725-5</a> .

成果番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
14	Kosugi, N. Ono, H., Toyama, K., Tsujino, H. Ishii, M. (2023). An empirical projection of ocean acidification in southwestern Japan over the 21st century. <i>Marine Chemistry</i> , 255, 104290, <a href="https://doi.org/10.1016/j.marchem.2023.104290">10.1016/j.marchem.2023.104290</a>
15	Maki, T., Kondo, K., Ishijima, K., Sekiyama, T. T., Tsuboi, K, Nakamura, T. (2023). Independent bias correction method for satellite observation data introduced to CO <sub>2</sub> flux inversion, <i>SOLA</i> , 19, 157–164, <a href="https://doi.org/10.2151/sola.2023-021">doi:10.2151/sola.2023-021</a>
16	Müller, J. D., Gruber, N., Carter, B., Feely, R., Ishii, M., et al. (2023). Decadal trends in the oceanic storage of anthropogenic carbon from 1994 to 2014. <i>AGU Advances</i> , 4, e2023AV000875. <a href="https://doi.org/10.1029/2023AV000875">https://doi.org/10.1029/2023AV000875</a>

17	Rodgers, K. B., Schwinger, J., Fassbender, A. J., Landschützer, P., et al. (2023). Seasonal variability of the surface ocean carbon cycle: A synthesis. <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 37, e2023GB007798. <a href="https://doi.org/10.1029/2023GB007798">https://doi.org/10.1029/2023GB007798</a>
18	Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Urakawa, L. S., et al. (2024). Impact of increased horizontal resolution of an ocean model on carbon circulation in the North Pacific Ocean. <i>Journal of Advances in Modeling Earth Systems.</i> , 16, e2023MS003720. <a href="https://doi.org/10.1029/2023MS003720">https://doi.org/10.1029/2023MS003720</a>
19	Lauvset, S. K., Lange, N., Tanhua, T., Bittig, H. C., et al. (2024). The annual update GLODAPv2.2023: the global interior ocean biogeochemical data product, <i>Earth System Science Data</i> , <a href="https://doi.org/10.5194/essd-2023-468">https://doi.org/10.5194/essd-2023-468</a>

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ 1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

< その他誌上発表（査読なし） >

成果 番号	【サブテーマ 1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 3】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

## (3) 口頭発表

&lt;口頭発表（国際学会等・査読付き）&gt;

成果番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
20	Ito, A., N. Saigusa, Y. Niwa., T. Hajima (2021) Toward multi-scale greenhouse gas monitoring system for supporting global stocktake, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2021 Annual Meeting, Singapore. (online)
21	Niwa Y., Tohjima Y., Ishii M., Ito A., Yamada K., Terao Y., Machida T., Umezawa T., Nakaoka S., Tanimoto H., Iida Y., Tsujino H., Kosugi N., Maki T., Ishijima K., Tsuboi K., Fujita R. (2023) Multiple observation platforms and inverse/transport simulations for monitoring GHGs around Asia, WMO International Greenhouse Gas Monitoring Symposium, Geneva, Switzerland.
22	Niwa Y., Tohjima Y., Ishii M., Ito A., Yamada K., Terao Y., Machida T., Umezawa T., Nakaoka S., Tanimoto H., Iida Y., Tsujino H., Kosugi N., Maki T., Ishijima K., Tsuboi K., Fujita R. (2023) Observations and simulations for estimating CO <sub>2</sub> fluxes in Asia, Asian Conference on Low Carbon Technology and Innovation - China-Japan-ROK Youth Low-Carbon Forum (Invited), Zhuhai, China (online).
23	Niwa Y. (2023) NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO <sub>2</sub> (NISMON-CO <sub>2</sub> ), Global Greenhouse Gas Watch Modeling Workshop, Bonn, Germany. (online)
24	【予定】 Yamada, Y., Niwa, Y., Terao, Y., Tohjima, Y., Tsuboi, K., Ishijima, K., Murayama, S. (2024) A Net CO <sub>2</sub> Flux from Tokyo Evaluated by a Model Simulation and a Tower Observation, AOGS, Incheon, Korea.
25	【予定】 Niwa, Y., Nakaoka, S., Tohjima, Y., Ito, A., Iida, Y., Zeng, J., Ishii, M., Terao, Y., Mukai, H., Tsujino, H., Toyama, K., Sasakawa, M., Machida, T., Shirai, T., Tanimoto, H. (2024) Decadal changes of terrestrial and ocean CO <sub>2</sub> fluxes inferred by multiple top-down and bottom-up approaches, ICDC11, Manaus, Brazil.

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
26	Tohjima, Y., et al. (2022) Near-real-time estimation of fossil fuel CO <sub>2</sub> emissions from China based on atmospheric observations at remote islands in Japan, AGU fall meeting, Chicago, USA. (online)
27	Umezawa T., Terao Y., Tohjima Y., Saito T., Sasakawa M., Mukai H. (2022) Measurements of stable carbon isotope ratio of methane at Hateruma Station, Japan, The 21st expert meeting on Greenhouse Gas Measurement Techniques (WMO GAW GGMT-2022), Wageningen, Netherland. (online)
28	Machida, T., et al. (2023) Observation activities for atmospheric greenhouse gases by CONTRAIL and other platforms by NIES and collaborators, GGGW Workshop, Geneva, Switzerland.
29	Umezawa T., Terao Y., Machida T., Niwa Y., Sasakawa M., Ito A., Matsueda H., Tsuboi K., Ishijima K., Fujita R., Chandra N., Patra P. K., Aoki S., Nakazawa T., Morimoto S. (2023) Growing emissions and Asian monsoon as dominant factors for atmospheric greenhouse gas variations over Asia, The 5th Atmospheric Composition and the Asian Monsoon (ACAM) workshop, Dhaka, Bangladesh.
30	Terao Y., Umezawa T., Ahmed M.K., Manish Naja, Nomura S., Machida T., Sasakawa M., Mukai H., Patra P.K., Rani S. (2023) Methane sources in South Asia inferred from observations of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane. The 5th Atmospheric Composition and the Asian Monsoon (ACAM) workshop, Dhaka, Bangladesh.
31	【予定】 Machida, T., Niwa, Y., Tsuboi, K., Umezawa, T., Ishijima, K., Fujita, R., Matsueda, H., Sasakawa, M., Goto, D., Murayama S., Morimoto, S. (2024) The next stage of observation project for atmospheric greenhouse gases by commercial aircraft -CONTRAIL-, 11th International Carbon Dioxide Conference, Manaus, Brazil.

成果番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
32	Ishii, M., Ono, H., Iida, Y., Kosugi, N., Toyama, K., Tsujino, H. (2021) Trends of ocean acidification in the western North Pacific, western equatorial Pacific warm pool, and in the seas around Japan, 2021年度日中ハイレベル研究者交流会～海洋科学（気候・環境）～, online (invited).
33	Iida, Y., Ishii, M. (2021) Ocean acidification in marginal seas of the western North Pacific, IMBeR West Pacific Symposium 2021, online.
34	Maki, T., Nakamura, T. (2022) Comparison of GOSAT-2 XCO <sub>2</sub> and independent inversion analysis, IWGMS-18, online.
35	Kosugi, N., Ono, H., Toyama, K., Tsujino, H., Ishii, M. (2022) An empirical projection of ocean acidification in southwestern Japan during the 21st century, The 5th Symposium on the Ocean in a High-CO <sub>2</sub> World, Sep. online.
36	Müller, J. D., Hauck, J., Gruber, N., Ishii, M., et al. (2023) RECCAP2-ocean REgional Carbon Cycle Assessment and Processes Phase 2, WMO International Greenhouse Gas Symposium, Geneva, Switzerland.
37	Maki, T., Kondo, K., Ishijima, K., Tsuboi, K., Sekiyama, T. T., Nakamura, T. (2023) Introduction of Satellite Observation Data with Independent Bias Correction Method to Carbon flux Inverse Analysis, WMO International Greenhouse Gas Symposium, Geneva, Switzerland.
38	Ishii, M., Nakaoka, S.-I., Iida, Y., Niwa, Y. (2023) The value chain of surface ocean pCO <sub>2</sub> measurements, illustrated with current activities in Japan, Workshop on surface ocean pCO <sub>2</sub> observation, synthesis and data products, Oostende, Belgium. (invited)

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
39	Niwa, Y., Ito, A., Iida, Y. (2021) Inverse analysis of atmospheric CO <sub>2</sub> for elucidating seasonal and interannual variations of natural carbon fluxes, JpGU. (online)
40	Ito, A., Niwa, Y., Hajima, H., Saigusa, N. (2021), Toward multi-scale greenhouse gas monitoring system for supporting the global stocktake, JpGU. (online)
41	丹羽洋介, 石島健太郎 (2021) NISMON-CO <sub>2</sub> の逆解析における任意緯度経度格子での最適化, 第26回大気化学討論会. (online)
42	Niwa, Y. (2022) (Online, Japan), Multi-species inversion for better constraining Asian GHG emissions, JpGU. (online)
43	山田恭平, 丹羽洋介, 寺尾有希夫, 遠嶋康徳, 笹川基樹, 町田敏暢 (2022) 東京スカイツリーにおける二酸化炭素濃度観測とモデル計算値の比較解析, 日本気象学会2022年度秋季大会, 札幌.
44	丹羽洋介 (2023) 温室効果ガス逆解析における観測データのインパクト評価と今後の観測展開に向けた考察, 日本気象学会2023年度秋季大会, 仙台.
45	山田恭平, 丹羽洋介, 寺尾有希夫, 遠嶋康徳, 笹川基樹, 町田敏暢, 坪井一寛, 村山昌平, 石島健太郎 (2023) 東京スカイツリー観測を用いた東京圏二酸化炭素排出推定, 日本気象学会2023年度秋季大会, 仙台.

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
46	寺尾有希夫, 他 (2021) Seasonal variations of methane sources in South Asia inferred from observations of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane, JpGU. (online)

47	Tohjima, Y., Patra, P. K., Niwa, Y., Mukai, H., Sasakawa, M., Machida, T., and Nakaoka, S. (2021) Changes in the atmospheric CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> variability in the East Asian outflow region caused by plummet of fossil fuel-derived CO <sub>2</sub> in China due to COVID-19 outbreak?, JpGU. (online)
48	梅澤拓, 寺尾有希夫, 遠嶋康徳, 丹羽洋介, 伊藤昭彦, 森本真司, Chandra Naveen, Patra Prabir (2021) 大気中のメタン濃度の変動と現代の同位体測定の問題, 日本地球化学会第68回年会
49	梅澤拓, 丹羽洋介, 齊藤拓也, 齋藤尚子, 豊田栄 (2021) 大気化学の将来構想: 温室効果気体とオゾン層破壊物質, 第26回大気化学討論会. (online)
50	梅澤拓, 他 (2021) 全球メタン濃度の2020年の急増加の原因を探る—NIES観測ネットワークによるメタン濃度の時空間変動の解析—, 第26回大気化学討論会. (online)
51	池田恒平, 谷本浩志, 遠嶋康徳 (2021) タグ付きトレーサーモデルを用いた東アジアにおける人為起源メタン排出量の検証, 第26回大気化学討論会. (online)
52	遠嶋康徳, 丹羽洋介, 坪井一寛, 齋藤和幸 (2021) 与那国島で観測されたCO <sub>2</sub> はCOVID-19の影響をとらえることができたか?, 第26回大気化学討論会. (online)
53	Tohjima, Y., et al. (2022) Recovery of CO <sub>2</sub> emissions from China after COVID-19 lockdown estimated from the atmospheric observation at Yaeyama Islands, JpGU, Chiba.
54	寺尾有希夫, 他 (2022) 波照間島と落石岬で観測されたバックグラウンド大気中二酸化炭素の放射性炭素同位体比, 日本気象学会2022年度秋季大会, 札幌.
55	遠嶋康徳, 他 (2022) 大気観測に基づく中国からの人為起源二酸化炭素排出量変化の準リアルタイム推定法, 第27回大気化学討論会, つくば.
56	Tohjima, Y., et al. (2023) Global carbon budgets for a recent two decadal period based on atmospheric O <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> observations in the western Pacific region, JpGU, Chiba.
57	遠嶋康徳, 他 (2023) 大気観測に基づく中国からの人為起源二酸化炭素の2020-2023年における排出量変化の推定, 第70回日本地球化学会年会, 品川.
58	梅澤拓, 遠嶋康徳, 寺尾有希夫, 向井人史, 中岡慎一郎, 笹川基樹, 町田敏暢, 野村渉平, 西橋政秀, MUELLER Astrid, 奈良英樹, 杉田考史, 谷本浩志, 丹羽洋介, 伊藤昭彦, FREY Matthias Max, 大山博史, 森野勇, 佐伯田鶴, 曾継業, 野田響, 齊藤誠, 吉田幸生, 松永恒雄, 石島健太郎, 坪井一寛 (2023) 全球メタン濃度の2020年以降の急増加の原因を探る—NIES観測ネットワークによるメタン濃度の時空間変動の解析—, 第28回大気化学討論会, 長崎.
59	寺尾有希夫, 梅澤拓, Md. Kawser Ahmed, Manish Naja, 野村渉平, 町田敏暢, 笹川基樹, 向井人史, Prabir Patra (2023) 南アジアにおける大気中メタン安定炭素同位体比観測. 第28回大気化学討論会
60	Tohjima, Y., Shirai, T., Ishizawa, M., Mukai, H., Machida, T., Sasakawa, M., Terao, Y., Tsuboi, K., and Nakaoka, S. (2023) Average seasonal cycles of atmospheric potential oxygen (APO) in the Pacific region: possible autumn oceanic O <sub>2</sub> emissions, APO workshop (WA04), Bowdoin College, ME, USA.

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表 (学会等・査読なし)
61	眞木貴史, 中村貴, 近藤圭一 (2021) 衛星観測を用いた領域二酸化炭素収支推定, 2021年度気象学会春季大会, オンライン.
62	石井雅男 (2021) 海洋へのCO <sub>2</sub> 吸収, その中緯度大気海洋相互作用の重要性, 日本海洋学会2021秋季大会シンポジウム「中緯度大気海洋相互作用研究の現状と展望」, オンライン (招待講演).
63	飯田洋介, 石井雅男 (2021) 日本周辺海域における海洋酸性化と二酸化炭素の吸収・放出, 日本海洋学会西南支部九州沖縄地区合同シンポジウム2021, オンライン.
64	眞木貴史, 近藤圭一, 中村貴 (2021) 衛星観測を用いた領域二酸化炭素収支推定, 第26回大気化学討論会, オンライン.

65	飯田洋介, 石井雅男 (2022) 北西太平洋縁辺海における二酸化炭素の吸収・放出, 日本気象学会2022年秋季大会, 札幌.
66	石井雅男, 遠山勝也, 辻野博之, 飯田洋介 (2022) 太平洋における大気・海洋間CO <sub>2</sub> フラックスの変動, 日本気象学会2022年秋季大会, 札幌.
67	Ishii, M., Toyama, K., Iida, Y., Kitamura, Y., Tsujino, H. (2023) Trends of CO <sub>2</sub> uptake by the Pacific Ocean, JpGU, Chiba.
68	石井雅男, Brendan Carter, 遠山勝也, Keith B. Rodgers, 飯田洋介, 他 (2023) 熱帯太平洋における大気・海洋間CO <sub>2</sub> 交換: 観測と数値モデルによる評価, 日本海洋学会2023年度秋季大会, 京都.

## (4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
	特に記載すべき事項はない。				

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
69	2021	丹羽洋介, 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)
70	2022	丹羽洋介, オンラインイベント「観測とシミュレーションで読み解く「温室効果ガス収支」―最良の科学―に向けて―」, 2023年2月22日, 大気シミュレーションを用いた温室効果ガス放出・吸収量の推定 (参加者400名以上)
71	2023	丹羽洋介, 国立環境研究所公開シンポジウム「モニタリングから読みとく環境 ～次世代につなげるために～」, 2023年6月22日, 大気観測とモデルの融合による温室効果ガス放出・吸収量の監視 (参加者200名以上)

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
72	2021	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 ―パリ協定の目標達成に向けて―」, 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)
73	2021	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 ―パリ協定の目標達成に向けて―」, 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 <sub>2</sub> 排出量の変化の推定 (参加者400名以上)
74	2022	遠嶋康徳, オンラインイベント「観測とシミュレーションで読み解く「温室効果ガス収支」―最良の科学―に向けて―」, 2023年2月22日, 大気観測に基づく温室効果ガスの動態解明 ～都市大気からバックグランド大気まで～ (参加者400名以上)
75	2023	町田敏暢, 「実験室潜入! 地球環境モニタリング～CO <sub>2</sub> 観測の実験に参加したよ～」国立環境研究所夏の大大公開, 2023年7月22日
76	2023	町田敏暢, 二酸化炭素はどこから来てどこに行くのだろう、北海道陸別小学校出前授業, 2023年11月24日

成果番号	実施年度	【サブテーマ3】の実施状況
------	------	---------------

77	2021	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」
78	2021	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）
79	2022	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」
80	2023	石井雅男、IPCC シンポジウム 「IPCC 第7次評価サイクル (AR7) 始動！ 2024年3月4日 虎ノ門ヒルズフォーラム

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
81	プレスリリース「大気観測が捉えた新型ウイ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
82	NHKニュース（2021年12月14日、上記プレスリリース（中国の排出量変動）の成果について5分ほど紹介）
83	プレスリリース「大気観測から中国のCO <sub>2</sub> 排出量の準リアルタイム推定法を開発—波照間島・与那国島で観測されるCO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> 変動比に基づき推定が可能に—」 遠嶋康徳, 伊藤昭彦, 丹羽洋介, 町田敏暢, 笹川基樹, 向井人史, Prabir K. Patra, 2023年3月23日

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
84	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

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
85	正野賞、日本気象学会、2022年10月、丹羽洋介「観測とモデルの融合による全球温室効果ガス収支に関する研究」

成果番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
86	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」

87	科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（研究部門）、2024年4月、石井雅男「炭酸系精密観測技術の開発による海洋の二酸化炭素動態の研究」
----	--

## (8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

## Abstract

## [Research Title]

## Multi-scale GHG budget evaluation based on atmospheric observations

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Niwa Yosuke
(PI ORCID) :	ORCID0000-0002-7600-9816
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies Tsukuba, Ibaraki, JAPAN Tel: +81-29-850-2314
Cooperated by :	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
Keywords :	Greenhouse Gases, Biogeochemical cycle, Atmospheric observation, Oceanic observation, Numerical modeling

## [Abstract]

Theme 1 leveraged an observational network of GHGs across the Asia–Pacific region using a variety of platforms, such as ground-based stations, ships, aircraft, and satellites, to estimate GHG budgets on multiple spatial scales from a global to a city scale. The atmospheric transport model NICAM was employed to connect surface fluxes and atmospheric concentrations of GHGs. A global high-resolution ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) inverse analysis system was developed using the NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (NISMON-CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) for long-term inverse analysis (Niwa et al., 2022). Downscaling the optimized CO<sub>2</sub> fluxes of NISMON-CO<sub>2</sub>, a further high-resolution (~14 km) atmospheric CO<sub>2</sub> transport simulation was performed, which involved the introduction of tagged CO<sub>2</sub> tracers to estimate CO<sub>2</sub> fluxes from the Greater Tokyo Region. Experimental analyses of NISMON-CO<sub>2</sub> and the high-resolution tagged tracer simulation proposed potential observations that can better constrain GHG flux estimates in the Asia–Pacific region and the Greater Tokyo Region, respectively. In fact, a new portable GHG measurement system was developed and installed at a building of Chiba University in 2023 to better constrain the flux estimate from the Great Tokyo area. Moreover, a new shipboard observation along the Pacific Belt Zone in Japan began in 2022 to efficiently capture GHG emission signals from other large cities. A near-real-time estimation method of CO<sub>2</sub> emission changes in China was developed using enhancement ratios between CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observed at the Hateruma and Yonaguni Islands (Tohjima et al., 2022, 2023). Flask and in situ measurements of the stable isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of CH<sub>4</sub> were also conducted to evaluate the sectoral contributions of CH<sub>4</sub> emissions. For ocean fluxes, which are important to determine the background levels of atmospheric concentrations, Theme 1 produced a global sea–air CO<sub>2</sub> flux data product by integrating the newly produced data product for marginal seas in the northwestern North Pacific with the existing data product for open ocean. Measurements were conducted in the winter of 2022 and 2023 onboard the research vessel of the Japan Meteorological Agency to support the flux estimation for marginal seas. The globally integrated sea–air CO<sub>2</sub> flux data were provided to the international research project led by the Global Carbon Project and the inverse analysis of NISMON-CO<sub>2</sub>. The abovementioned datasets related to GHG budgets are made publicly available to improve the transparency of the studies, and they are expected to support policymaking in terms of GHG emission reduction to achieve the goal of the Paris Agreement.

## [References]

- 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-CO<sub>2</sub> v2021.1, *Progress in Earth and Planetary Science*, 9, 42, <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6>.
- Tohjima, Y., Niwa, Y., Tsuboi, K., Saito, K. (2022) Did atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO<sub>2</sub> reduction due to COVID-19 lockdown?, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 100(2), 437-444 (2022), <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021>
- Tohjima, Y., Niwa, Y., Patra, P. K., Mukai, H., Machida, T., Sasakawa, M., Tsuboi, K., Saito, K., Ito, A. (2023) Near-real-time estimation of fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10:10, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF) (JPMEERF21S20810).

## 別添

(参考資料) 【公募審査・中間評価等への対応】

指摘等	対応状況・非対応理由等
中間評価時コメント「簡易設置型高精度大気中 GHG 観測システムの開発が他の研究活動 と結びついていないように感じる。」	サブテーマ1のモデル解析で千葉での観測がCO <sub>2</sub> 放出量推定の精度向上に役立つことが示唆され、それを受けてサブテーマ2で開発された簡易設置型高精度大気中GHG観測システムを千葉大学西千葉キャンパスに設置して大気観測を2023年8月に開始し、東京湾東岸のからCO <sub>2</sub> 排出シグナルを効率よく補足したデータを取得することができた。