

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研 究 区 分 : 環境問題対応型研究（一般課題）

研 究 実 施 期 間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課 題 番 号 : 2-2201

体 系 的 番 号 : JPMEERF20222001

研 究 課 題 名 : 燃焼起源SLCFの東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築

Project Title : Prompt Quantification of National SLCFs Emissions from Combustion Sources in East Asia, and Its Methodological Development

研 究 代 表 者 : 谷本 浩志

研 究 代 表 機 関 : 国立環境研究所

研 究 分 担 機 関 : 海洋研究開発機構、日本自動車研究所、神戸大学、九州大学、東京大学、広島大学

キ ー ワ ー ド : 短寿命気候強制因子、排出インベントリ、北極評議会、衛星観測データ

注： 研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

2025（令和7）年11月



環境研究総合推進費
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人
環境再生保全機構
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
研究課題情報.....	3
<基本情報>	3
<研究体制>	3
<研究経費>	4
<研究の全体概要図>	5
1. 研究成果.....	6
1. 1. 研究背景	6
1. 2. 研究目的	6
1. 3. 研究目標	6
1. 4. 研究内容・研究結果	7
1. 4. 1. 研究内容	7
1. 4. 2. 研究結果及び考察	8
1. 5. 研究成果及び自己評価	28
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	28
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価	33
1. 6. 研究成果発表状況の概要	36
1. 6. 1. 研究成果発表の件数	36
1. 6. 2. 主要な研究成果発表	36
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動	37
1. 7. 国際共同研究等の状況	37
1. 8. 研究者略歴	39
2. 研究成果発表の一覧	41
(1) 産業財産権	41
(2) 論文	41
(3) 著書	43
(4) 口頭発表・ポスター発表	43
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	50
(6) マスメディア等への公表・報道等	50
(7) 研究成果による受賞	51
(8) その他の成果発表	51
権利表示・義務記載.....	51

Abstract

研究課題情報

<基本情報>

研 究 区 分 :	環境問題対応型研究（一般課題）
研 究 実 施 期 間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研 究 領 域 :	気候変動領域
重 点 課 題 :	【重点課題9】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価 【重点課題7】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
行 政 ニ ー ズ :	(2-3) 燃焼起源 SLCF の排出量把握と削減効果の評価による気候変動政策手段としての可能性探求
課 題 番 号 :	2-2201
体 系 的 番 号 :	JPMEERF20222001
研 究 課 題 名 :	燃焼起源 SLCF の東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築
研 究 代 表 者 :	谷本 浩志
研 究 代 表 機 関 :	国立環境研究所
研 究 分 担 機 関 :	海洋研究開発機構、日本自動車研究所、神戸大学、九州大学、東京大学、広島大学
研 究 協 力 機 関 :	環境創生科学研究所

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

<研究体制>

サブテーマ1「野外・衛星観測とデータ同化を用いた国別排出量の迅速推計」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	海洋研究開発機構	地球表層システム研究センター	センター長	金谷有剛	
分担者	海洋研究開発機構	地球表層システム研究センター	研究員	関谷高志	
分担者	神戸大学	海事科学研究科	准教授	山地一代	
協力者	海洋研究開発機構	地球表層システム研究センター	ポストドクトラル研究員	Phuc Thi Minh Ha	2022年12月～2025年3月

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

サブテーマ2「排出インベントリの改良と気候・大気質モデリングへの反映」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	国立環境研究所	地球システム領域	副領域長	谷本浩志	
分担者	国立環境研究所	地球システム領域	主任研究員	池田恒平	
分担者	九州大学	応用力学研究 所地球環境力学部門	助教	板橋秀一	
協力者	国立環境研究所	地球システム領域	高度技能専門員	Yange Deng	

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

サブテーマ3「日本の排出インベントリの高精度化と削減政策に関する経済分析」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	日本自動車研究所	環境研究部	主席研究員	森川多津子	
分担者	日本自動車研究所	環境研究部	主任研究員	早崎 将光	
分担者	東京大学	大学院総合文化研究科	教授	成田 大樹	
分担者	広島大学	大学院人間社会科学部	准教授	山田 大地	
協力者	環境創生科学研究所		代表	小松 英司	

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

<研究経費>

<研究課題全体の研究経費（円）>

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2022	30,738,462	9,221,538	39,960,000	
2023	30,714,617	9,214,383	39,929,000	
2024	30,670,770	9,201,230	39,872,000	
全期間合計	92,123,849	27,637,151	119,761,000	

注： 環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

<研究の全体概要図>

燃烧起源SLCFの東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築

代表：国立環境研究所 分担：海洋研究開発機構、日本自動車研究所、神戸大学、九州大学、東京大学、広島大学



1. 研究成果

1. 1. 研究背景

パリ協定の「1.5℃目標」実現に向けて、世界的な脱炭素化を着実かつ早期に達成するには多方面からの研究開発が重要であり、達成された際には気候の安定化に加え、清浄な大気質を多くの人々が享受できる。気候と大気質の両方に関与する「短寿命気候強制因子SLCF」（Short-Lived Climate Forcers）は、温室効果ガス（GHG）同様に、SLCFインベントリ方法論報告書2027「2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-Lived Climate Forcers」が作成されることがIPCCで決定され、排出削減に向けて国際的な動きが加速している。

その際に鍵となる排出インベントリの課題の一つは「値の正確さ」であるが、もう一つは「タイムラグ」で、インベントリ算出には公式統計値が使われるため数年単位の時間を要する。このため、環境政策や経済危機、コロナ禍等で増減する排出状況を即座に把握することができない。一方、地上や衛星を含む大気観測データは取得後に迅速公開される時代となり、特に欧米では地上・航空機・船舶や衛星からの観測データを使ったトップダウン推計が盛んになっている。直近の排出インベントリを迅速に構築・評価することは、シナリオの妥当性「検証」にも重要であり、政策面でも削減対策効果を迅速に検証し、さらに対策に活かす上で重要である。化石燃料燃焼から排出されるSLCFはCO₂排出量の高精度化にも有益であり、脱炭素化に向けてGHG・SLCF両方の排出を一体的に考える必要があり、2025年度に日本（環境省、国立環境研究所）はCO₂とNO₂濃度を同時観測するGOSAT-GW衛星を打上げる予定である。

SLCFのうちブラックカーボン（BC）については、CMIP6等の最新の国際モデル相互比較実験で「BC削減による地表気温への影響は従来よりもやや低下する」という結果が得られている。しかしながら、北極ではBC削減に関する実効的な取り組みが進められるなど、日本や中国、韓国等の北極評議会オブザーバー国も含め、世界の約3割以上を占める東アジアのBC排出削減に向けて、自国の排出量の正確な推計への関心は高く、政策効果や経済危機等による排出の変化を即座に把握する社会的関心も増している中で、衛星データなど観測データとモデルを使った手法開発が進んでいる。

本課題の前々身となる2-1505課題では北極BCに特化した全球モデリング技術の開発を実施し、前身となる2-1803課題ではその技術を活用してアジア排出量に特化して排出量推計を行ってきた。国際的にも、IPCCの第六次評価報告書（AR6）の編さんに関わるとともに、北極評議会EGBCMに日本代表として参加するなど、独自の貢献をしてきた。

1. 2. 研究目的

GHG排出削減の透明性・正確性を確保するために始まった「自身の排出量を測定・報告・検証する」仕組みを「MRV: Measurement, Reporting and Verification（測定・報告・検証）」と呼ぶ。この考え方に基づいて、GHGについては、CO₂とCH₄を対象に「Global Carbon Budget」等として、観測に基づくトップダウン推計をボトムアップ推計と比較・検証する総合評価の考え方が確立されてきた。こうした考え方は短寿命成分であるSLCFにも有効であるが、これまでSLCFについて確立する動きは世界的にもなかった。そこで、「短寿命SLCF成分のためのボトムアップ・インベントリとトップダウン・インベントリの総合評価」を行って東アジアにおける国別排出量評価、インベントリの高精度化・迅速化に繋げ、日本におけるSLCFインベントリの国内基盤の確立に向けて、MRVシステムの確立を行うことを目的とした。SLCFインベントリ評価において優先度の高い燃焼起源物質であるとともに、CO₂と共に排出されるBC、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NO_x）について取り組んだ。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	燃焼起源SLCFの東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築
全体目標	排出インベントリ、野外・衛星観測、モデルを組み合わせ、日本を中心に、東アジア諸国における国別排出量評価を「東アジア地域におけるBCの収支レポート2024年版」としてまとめ、公開する。GHGと同程度に迅速な、燃焼起源SLCF排出量の総合的MRVシステムの方法論を構築し、国内基盤とする。

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	野外・衛星観測とデータ同化を用いた国別排出量の迅速推計
サブテーマ1実施機関	海洋研究開発機構、神戸大学
サブテーマ1目標	観測データを利用したトップダウン型の排出推計について、データ同化などの手法を整備して信頼度を向上させる。日本を含む東アジア諸国からの国別排出量とその推移を迅速に評価するシステムとして実証する。ボトムアップ推計法による結果の検証に資する情報を提供する。

<サブテーマ2の研究目標>

サブテーマ2名	排出インベントリの改良と気候・大気質モデリングへの反映
サブテーマ2実施機関	国立環境研究所、九州大学
サブテーマ2目標	ボトムアップ推計とトップダウン推計の比較から、国際モデル相互比較実験や、将来予測に用いられてきた排出インベントリ・シナリオの複数について妥当性を定量的に検証する。また、東アジアについて最新年の排出インベントリを修正してモデリングに組み込み、気候変動や越境汚染への影響度を推定する。

<サブテーマ3の研究目標>

サブテーマ3名	日本の排出インベントリの高精度化と削減政策に関する経済分析
サブテーマ3実施機関	日本自動車研究所、東京大学、広島大学
サブテーマ3目標	BC等SLCFのボトムアップ排出インベントリを、GHGと同程度の迅速性で整備できるよう、算出根拠となる排出原単位等のデータ整備、推計手順のマニュアル化を行う。関連する国内の排出インベントリの複数推計値を俯瞰し、統合評価して高精度化する。また、より早期の推計を目指して、民間データの利用可能性及び公式統計値との代替性を評価する。 また、気候変動とアジア大陸から日本への越境汚染を考慮しつつ、現状及び将来の排出動態や可能な排出削減策について地域の地理・経済的特性等も踏まえた経済分析を行う。費用と便益の両面において合理的な政策について経済学的な評価を行い、日本の環境基準及び北極環境に関する環境政策の議論に貢献可能な対策提言とする。

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

本課題では、排出インベントリ、観測（地上、衛星）、化学輸送モデルといったツールを、BC等SLCFに関する研究に特化し、特にアジア排出について知見の高度化、具体的には排出量推計の精緻化・迅速化、環境・気候影響に関する科学的知見、さらには社会経済的知見を発展させた。各サブテーマでは、本研究の目標達成のために重要な要素技術の開発・改良に取り組み、それらをサブテーマ間で比較または連携して、課題全体として解析結果に信頼性を増すとともに、相乗効果を得た。

サブテーマ1では、野外観測や衛星観測、データ同化を利用したトップダウン推計の迅速化の手法開発と応用に取り組み、国別排出量推計値や年々の推移を定量的に評価するとともにボトムアップ推計値の検証材料を提供した。

サブテーマ2では、サブテーマ1同様、野外観測とモデルを利用して、中国からのBC及びCO排出量のトップダウン検証を独立に実施し、総合的な検証過程を経て、東アジアの排出インベントリ・シナリオの妥当性を評価し、化学気候モデルや大気質モデル実験に反映して影響を解析した。

サブテーマ3では、日本のボトムアップBC排出インベントリについて、公式統計値による推計の高精度化とともに民間データを用いた迅速化にも取り組み、国内基盤を確立した。また、観測・モデル計算結果を用いて、北極を中心にした気候変動と、日本への越境汚染を考慮した排出削減に関する経済分析を行った。

サブテーマ1の研究手法と使用したデータの概要は次のとおりである。

- ・ 福江島観測の継続
- ・ 大気化学輸送モデルとデータ同化システムの改良
- ・ 「モデル比較法」や「BC/CO排出比法」の改良
- ・ 航空機観測データなど新たなデータへの適用

サブテーマ2の研究手法と使用したデータの概要は次のとおりである。

- ・ 地上観測と大気化学輸送モデルを用いて中国のBC排出量を迅速に推計するシステムを構築
- ・ CMIP6に参加した12の気候モデルの東アジアにおけるBC濃度を評価
- ・ 気候モデルを用いた大気海洋結合の大規模アンサンブル実験

サブテーマ3の研究手法と使用したデータの概要は次のとおりである。

排出インベントリ構築では、

- ・ BC排出量推計の迅速化
- ・ SLCFインベントリ構築を念頭においた国内排出インベントリの状況整理と課題確認

経済分析分野では、

- ・ PM2.5削減のための国内政策に関する費用対効果分析
- ・ PM2.5が国内の労働供給に与える影響の実証分析

1. 4. 2. 研究結果及び考察

大気質や気候への影響を評価するためのモデルの入力値として使用される大気汚染物質や温室効果気体の排出インベントリに関して、世界最大の人為起源排出源の一つであるアジアの推計値はまだ非常に不確実であることが知られている。特に、不完全燃焼起源のBCについて、いわゆる「積み上げ式の」ボトムアップ型インベントリには大きな不確実性があり、にもかかわらず、世界各国の研究者は、用途や目的、経緯により、異なるインベントリをモデリングに使用しており、それらの検証・評価がなされていないことが課題であった。

そこで、最新の野外観測や衛星観測、航空機観測のデータを利用して排出量を算出し、独立した手法としてボトムアップインベントリを比較評価した。特に、日本、中国、韓国からの国別公式排出量推計値を検証して科学的・客観的な評価を与えた。このような検証過程を経て、気候モデルの将来予測計算に用いられているBC 排出シナリオの妥当性を検証するとともに、東アジアの排出インベントリ過大評価の気候影響を解析するとともに、社会経済学的な分析を行った。GHGと同程度に迅速な、燃焼起源SLCF排出量の総合的MRVシステムの方法論を構築し、国内基盤とした。

本課題全体として、東アジア諸国における国別排出量の評価結果を「East Asian Black Carbon Emission Report 2024 (東アジアのBC排出量報告書2024年版)」としてまとめ、各機関の合同で公開した(成果84)。このレポートは、IPCC第7次評価報告書における気候モデル国際相互比較実験(CMIP7)やSLCFインベントリ方法論報告書「2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-Lived Climate Forcers」の作成、北極評議会におけるSLCF排出削減対策、世界保健機関から2021年に公表された新ガイドラインなど、広く国際的な気候変動および大気汚染対策への科学的知見の提供となるものである。

サブテーマ1では、観測データに基づいて、東アジア各国からのBC等の排出量について、2022-2023年を含み至近年まで迅速評価するために、福江島観測の継続、大気化学輸送モデルとデータ同化システムの改良、「モデル比較法」や「BC/CO排出比法」の改良および航空機観測データなど新たなデータへの適用を実施した。

福江島における長期観測データと2018年のEMeRGe-Asia航空機観測データを、「モデル比較法」や「BC/CO排出比法」、「データ同化」の複数手法と組み合わせて、中国のBC、CO排出量を推定した。異なる手法間での推定結果において整合性が得られ、信頼性が向上した。得られた結果から、ボトムアップ型の排出インベントリでは、CEDS2024年版などにおいて、2020年以降においてもBC排出量を2倍程度過大評価し、CO排出量を30%程度過小評価していることが示唆され（サブテーマ1と2との協力による）、CEDSが入力されるIPCC AR7での気候影響評価の見方について引き続き注意が必要であると考えられた。

日本・韓国のBC排出量についても観測に基づく排出量推計を行い、日本については最新の推定値は北極評議会への2015年の報告値と同程度か50%程度高い値となり、船舶などの排出量の確認や取り扱いなどが今後の課題であることを見出した。

衛星データ同化では、これまで困難だったCOの排出量評価について性能向上があり、コロナウイルス蔓延時期の排出量変化等の事例をもとに、評価の即時性を実証した。

IPCC AR7サイクルにおけるSLCFのインベントリ方法論報告書の執筆へ向け、その執筆インストラクションに合わせた形で、本課題で開発された観測に基づく排出量の推定方法論を、ボトムアップ排出量の確認(verification)に適するものとして示せるよう、取りまとめた。また、排出係数の不確かさもIPCC報告書で取り扱うようにインストラクションがあるため、本研究における信頼度の高い2種のBC計測器の併用による不確かさの軽減などについても示せるように、成果を取りまとめた。

サブテーマ2では、地上観測と大気化学輸送モデルを用いて中国のBC排出量を迅速に推計するシステムを構築して、2009-2023年の長期推計を実施した。その結果、中国のBC排出量は継続的な減少傾向を示し、過去15年間で62%減少したことがわかった。トップダウン推計は、IPCC第7次報告書に向けた第7次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP7)で使用予定のインベントリよりも速く減少するため、両者の差は広がりつつありインベントリが過大評価となっていた。

CMIP6に参加した12の気候モデルの東アジアにおけるBC濃度を評価した結果、中国のBC排出量の過大評価によってマルチモデル平均で観測値より約2倍高かった。この中国のBC排出量の過大評価によって、BCの直接放射効果は東アジア域で72%過大評価となることがわかった（成果2）。

また、気候モデルを用いた大気海洋結合の大規模アンサンブル実験によって、SLCF排出量の不確実性が地上気温や降水量に与える影響を評価した。CMIP6で使用されたインベントリは、アジア域のエアロゾルの過大評価によって、2010年代の中国、インド、東南アジアにおいて地上気温が統計的に有意に低くなる地域が見られるとともに、降水量についても主に中国南部で有意に減少することがわかった。

CO排出量については、最新の複数のインベントリやサブテーマ1の逆推計による排出量を用いた大気化学輸送モデルによる長期計算を行い、地上観測と比較して定量的に検証した。BC/CO比法に使用されるトップダウン推計のCO排出量を用いた計算は、ボトムアップ・インベントリで見られた西日本における過小評価を改善することがわかった。特に日本のCO排出量について、領域化学輸送モデルによる高解像度計算と東京スカイツリーを含む関東圏の観測と比較することによって定量的に検証し、再現性の水平解像度依存性を明らかにするとともに、県別・セクター別の発生源寄与評価を行い都市域でのCO濃度変動の支配要因を明らかにした。

サブテーマ3では、排出インベントリ構築分野と経済分析分野の2つのテーマに分かれて実施した。

排出インベントリ構築分野においては、BC排出量推計の迅速化、メタン(CH₄)排出量の地域分布作成、SLCFインベントリ構築を念頭においた国内排出インベントリの状況整理と課題の確認、を実施した。特に日本のBC排出量は従来、PM2.5排出量の公表を前提にBC比率から求めており、算出まで温室効果ガスインベントリの公表より2年近く遅い状況であったが、PM2.5排出量推計用の活動量を整理し、直接BC排出量を推計することにより、温室効果ガス公表から半年以内に推計値を算出することを可能とした。また、国際的な環境問題への取り組みに対し、既存の国内移動発生源の排出量データを再構成し、日本部分のBC排出量や排出インベントリを提供した（成果13）。

経済分析分野では、既存研究が不足している問題に焦点を置いて研究を進めた。具体的には、既存研究においては、BCなどのSLCF削減に関して日本の気象条件、地理的条件、また経済特性を十分に反映した政策の費用便益分析に行った例はほとんどない、また、そもそも大気汚染の経済セクターごとの影響や、直接の人間死亡・疾病リスク以上のどのような二次的・間接的な社会影響を及ぼしうるかということについての知見が全世界的に見ても乏しい、という問題が存在する。これらを踏まえ、PM2.5削減のための国内政策に

関する費用対効果分析、PM2.5が国内の労働供給に与える影響の実証分析、将来のシベリア森林火災の増加を想定した東アジア域における大気質・気候・経済影響の評価を実施し、今後の政策立案に資する知見の蓄積を図った。

以下が重要なハイライトであり、これらに沿って記述する。

1. 中国からのBC排出量の大幅な減少傾向とその気候影響（国際的なインベントリ・気候モデルコミュニティへの波及効果）
2. 日本からのBC等排出量の迅速な推計とSLCF排出インベントリの整理（国内インベントリの再評価、北極評議会への報告及び、今後始まるIPCCでのSLCF国別排出量報告への準備）
3. WHOの新指針値と日本国内の大気汚染対策への示唆

BCの排出量推定値について、中国・日本・韓国の2005年以降におけるトップダウン推計とボトムアップ・インベントリと将来シナリオを比較した（図1）。トップダウン推計による中国のBC排出量は、2009-2023年において1.39 Tg/年から0.53 Tg/年と算出され、過去15年間で62%の減少を示した。減少トレンドは -4.8 ± 0.4 %/年となっていた。この結果は、中国におけるBC排出量の削減が継続していることを示唆している。

これらの観測に基づく中国BC排出量推定結果は、ボトムアップ型の排出量とも比較された。特に、気候変動のシミュレーションの入力に用いられるCEDS系列では、IPCC AR6報告書用の結合モデル比較プロジェクトCMIP6用のCEDS(CMIP6)は2014年まで2 Tg/年を超える高い値で、上昇傾向を示していた点が明らかに誤りであることを、前身の推進費課題2-1803で指摘してきた。その結果、CEDSの2024年版(v2024-11-25)では大幅に下方修正され、2022年の1.06Tg/年まで低下した。CMIP6で使用されたCEDS(CMIP6)のときに見られた増加トレンドから減少トレンドに改善されており、トレンドの観点ではトップダウン推計と一致するようになった。ただし、減少ペースはトップダウン推計よりも遅く、継続的かつ速いペースでの減少を示すトップダウン推計値との差が広がり近年では過大評価になっていることに注意を要する。本研究での2022年の推定値(0.48-0.57 Tg/年)と比較して、依然として高止まりしていることが明らかとなった。このことは、CMIP7に向けてさらなる排出量の下方修正が必要であるとともに、中国からのBC排出量の推移を引き続き観測とモデルで監視することが重要であることを示している。最新版のCEDS(v2024-11-25)は、IPCC第7次評価報告書に向けた第7次気候モデル相互比較プロジェクト(CMIP7)で使用が予定されており、CEDSを用いた気候・大気汚染のシミュレーションの解釈については、この点に今後留意する必要がある。

CEDS(CMIP6)を除くインベントリは2010年ごろから減少傾向を示しており、本研究の推計結果と一致する。ただし、減少ペースはトップダウン推計（ -4.8% /年）のほうがどのインベントリ（ -2.6% /年から -4.2% /年）よりも速くなっていた。

トップダウン推計初期の2010年において、6種類の排出インベントリによる1.34-2.43 Tg/年と見積もられ、最大値と最小値間に80%の差が見られるが、本研究のトップダウン推計値（1.29 Tg/年）は、インベントリの中で最小値を示すECLIPSEv6bに近かった。ボトムアップ推計の最終年（2015-2022年）に向けて、トップダウン推計は急速な減少によって、すべてのインベントリの推計値よりも低くなった。中国における大幅なBC排出量の減少は、家庭部門における石炭から天然ガスや電力への転換や、産業部門における排出基準の強化など大気質政策の効果によるものと考えられる（Zheng et al., 2018）。なお、ボトムアップ・アプローチに基づく研究によると、2020年の中国のCOVID-19によるロックダウンは、年間のBC排出量にほとんど影響を与えなかった（2019年と比較して -1% ）と考えられている（Zheng et al., 2021） 実際Kanaya et al. (2021)によって、福江島での観測に基づき、中国のロックダウンによるBC排出量の減少はCO排出量の減少よりもはるかに小さかったことが報告されている。

日本のBC排出量推定値（モデル比較法）は、2009年から2018年までは大幅に減少したが、2018年から2023年までは横ばい傾向であった。2023年の最新の排出量は0.013 Tg/年と推定された（GEOS-Chem(Trajectory)）。この値は、2017年のEDGAR-HTAPv3の0.010 Tg/年からCEDS（v2024-07-08）の0.046Tg/年までのボトムアップインベントリ値の中間に位置している。これまでに、前身の推進費2-1803課題で示した値は2011-2017年に0.027-0.040 Tg/年と高い値となっていたが、CMAQモデルを用いた評価であったため、差の原因についてはモデル依存性の可能性が指摘された。PM2.5成分手分析に基づくモデル比較法では、2017年に0.025 Tg/年、2022年で0.019 Tg/年であった。これらの観測ベースの推

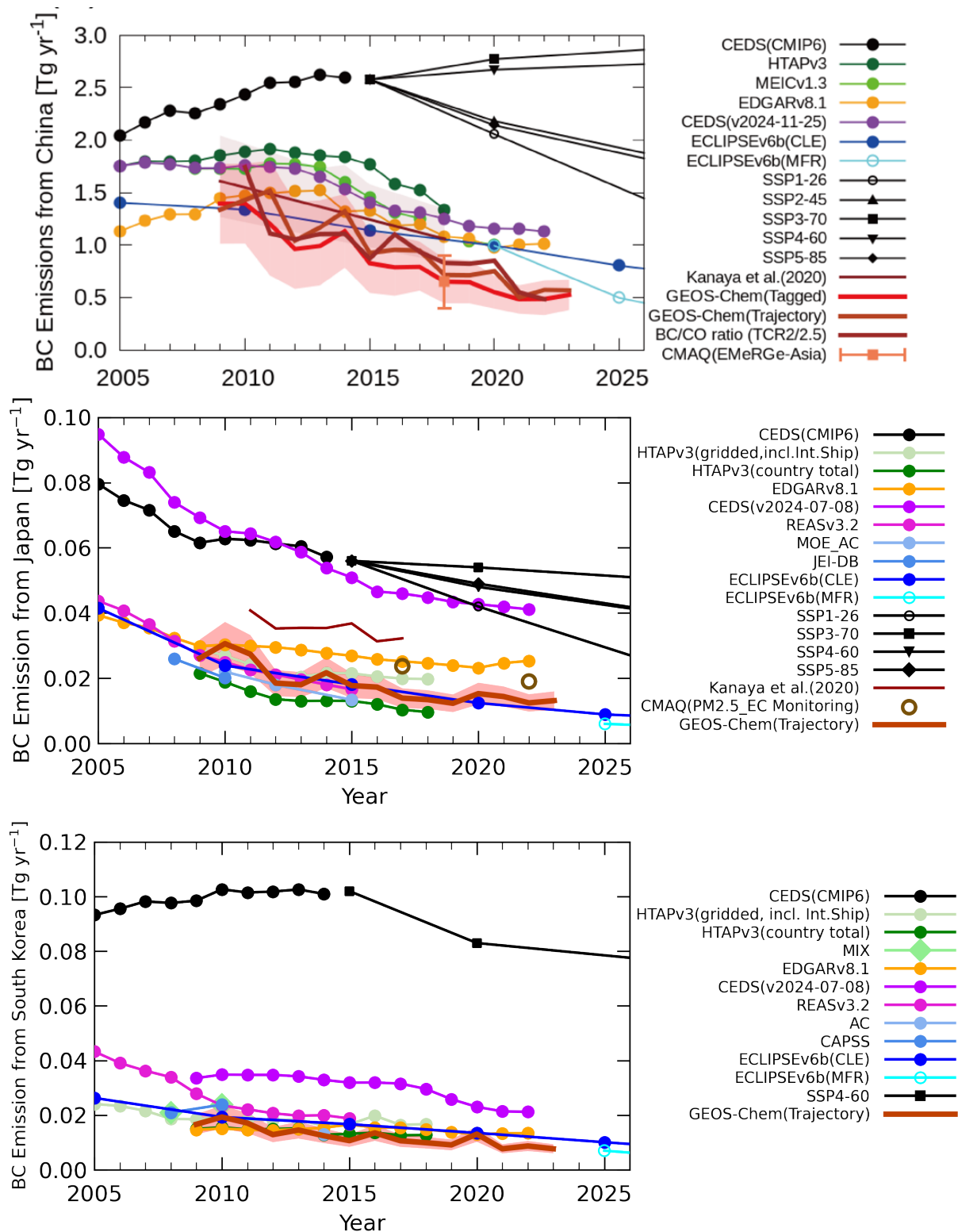


図1 (上) 中国、(中) 日本、(下) 韓国でのBC排出量の推定結果を、過去の排出量推定結果やボトムアップ方式での推計結果とも比較しながら示す。

定値の幅を基準と捉えると、近年のCEDS (v2024_07_08) の値は日本でも過大評価となっている可能性が高い。日本が北極評議会に報告したのは、国内のボトムアップインベントリの値 (2015年: 0.013 Tg/年) であり (MOE_AC)、今回の観測ベースの推定値よりも小さいため、注意が必要である。なお、モデル比較法GEOS-Chem(Trajectory)の解析では、HTAP v3を入力での排出量として用いており、基準となる日本からの排出量 (観測との違いを考慮する前) は2018年で0.0197 Tg/年 を用いていた。そのうち、58%

は日本の海域を航行する国際海運からとなっており、陸上の他のセクターからの排出量を上回る値となっていた。その大部分は京浜・名古屋・大阪などの港湾とその周辺からの排出であった。

韓国のBC排出量については、2009年の0.015 Tg/年から2023年の0.0073 Tg/年まで、有意な減少傾向が見られた。この値は、様々なボトムアップ排出インベントリの中で最も低い範囲にある。北極評議会に報告された2014年の0.013 Tg/年は、我々の推計値（0.012 Tg/年）とほぼ一致した。最新のCEDS(v2024_07_08)では、2014年以前についてはCMIP6のCEDSよりも3～4倍低い値が報告されるようになり、我々の推定値との一致度は向上したが、2022年については我々の推定値よりも2倍以上高い値（0.021 Tg/年）が報告されている。

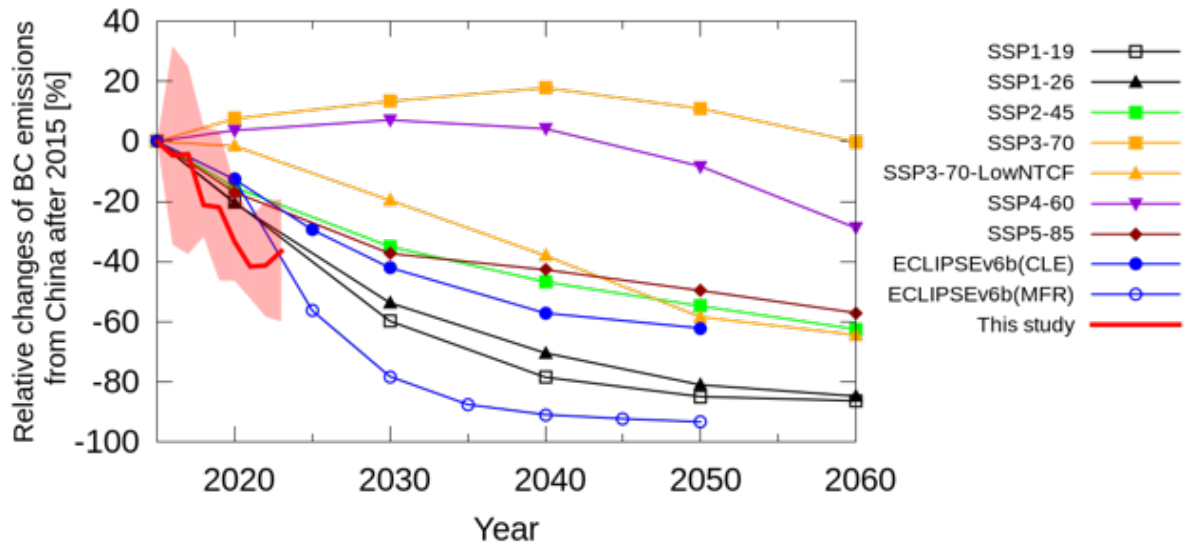


図2 2015年を基準とした、本研究の推定と将来シナリオとの変化率の比較。赤のシェードはトップダウン推計の不確実性を示す。

図2は、2015年を基準とした中国BC排出量の変化率についてトップダウン推計と、CMIP6で使用された将来シナリオである共通社会経済経路（SSP; Shared Socioeconomic Pathways）および、北極評議会のSLCF報告書で使用されたECLIPSEv6bによる将来シナリオと比較した。トップダウン推計による2015年から2023年の減少トレンドは -5.7 ± 0.7 %/年と算出され、2015-2030年においてそれぞれ -4.0 %/年

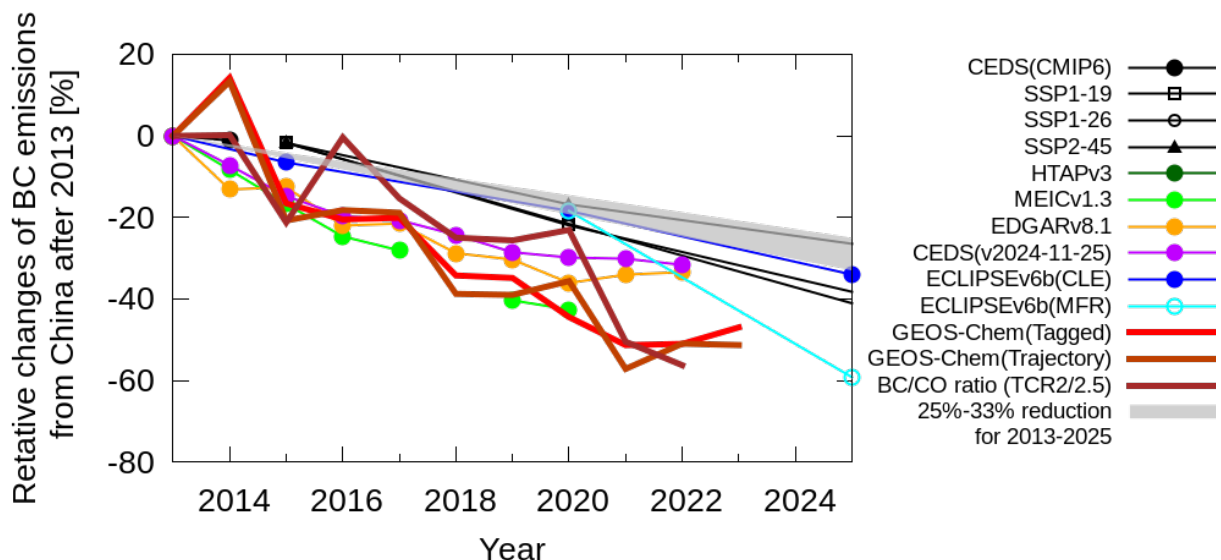


図3 中国からのBC排出量について、2013年を基準とした、本研究の推定と北極評議会の2025年までの削減目標との比較。

と-3.6%/年の減少を示すSSP1-1.9とSSP1-2.6シナリオよりも速いペースであった。SSP1シナリオは気候変動と大気汚染の強い緩和策によりSSPシナリオの中で最もBC排出量の低いシナリオとなっており、この結果からも中国における排出削減が効果的に進んでいることが伺える。また、ECLIPSEv6bの将来シナリオと比較すると、トップダウン推計は最大限の削減対策を想定したMFR(maximum technically feasible reductions)シナリオの減少ペース(-7.5%/年)には及ばないものの、現状の削減策を想定したCLE(current legislation)シナリオ(-2.8%/年)と比べると速いペースとなっていた。

また、北極評議会では2025年までに2013年比で25%から33%のBC排出量の削減目標を設けているが、トップダウン推計によると、2022年と2023年の排出量は2013年比で47%と51%の減少と算出され、北極評議会のオブザーバー国である中国はこの削減目標を達成する見込みであることもわかった(図3)。

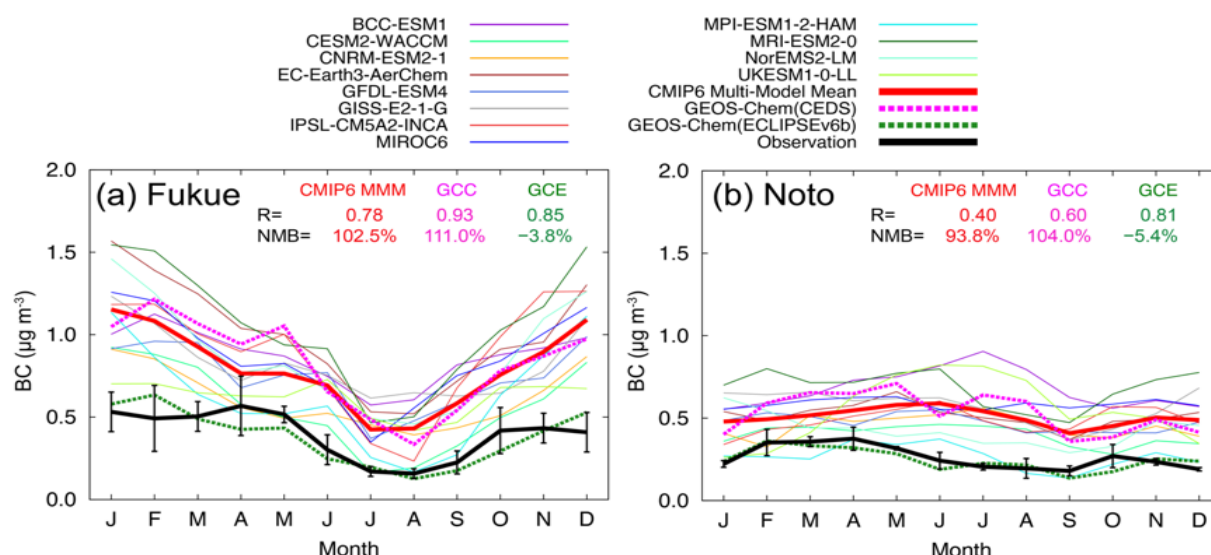


図4 (a)福江島と(b)能登における観測値(黒線)とCMIP6マルチモデル平均(赤線)、CEDSを用いたGEOS-Chem(ピンク破線)、ECLIPSEv6bを用いたGEOS-Chem(緑破線)のBC濃度季節変動の比較。福江では2009-2014年、能登では2011-2014年の平均値を示す。CMIP6の各モデルを細い線で示す。

2009-2014年で平均した福江島と能登における月平均値の季節変動をCMIP6モデルのhistorical実験および、GEOS-Chemの結果と比較した(図4)。福江で観測される冬～春季にかけて増加し夏季に減少する季節変動は、CMIP6の各モデルは概ね季節変動を再現しており、マルチモデル平均でも良い一致を示した(相関係数、 $R=0.78$)。一方、濃度レベルについては、historical実験の過大傾向が見られ、マルチモデル平均で約2倍高かった(正規化平均バイアス、 $\text{NMB}=+102.5\%$)。CMIP6と同じCEDS(CMIP6)インベントリを用いたGEOS-Chem計算は、観測の季節変動をよく再現するものの($R=0.93$)、濃度レベルは過大評価しており、CMIP6のマルチモデル平均と近い値となった($\text{NMB}=+111.0\%$)。この結果は、CEDS(CMIP6)が中国のBC排出量を過大評価であることを示した前述の結果と整合的である。また、本研究で使ったGEOS-ChemがCMIP6気候モデルの中で平均的な濃度を示すことがわかった。一方、ECLIPSEv6bインベントリを用いたGEOS-Chemは、季節変動と濃度レベルともに観測値と概ね一致した($R=0.85$, $\text{NMB}=-3.8\%$)。能登における2011-2014年の観測との比較でも、福江島と同様の結果となった。2014年の中国のBC排出量はCEDSで2.6 Tg/年、ECLIPSEv6bで1.2 Tg/年と推計されており、GEOS-Chemシミュレーション結果の濃度差は主にインベントリ間の中国BC排出量の違いによって生じている。

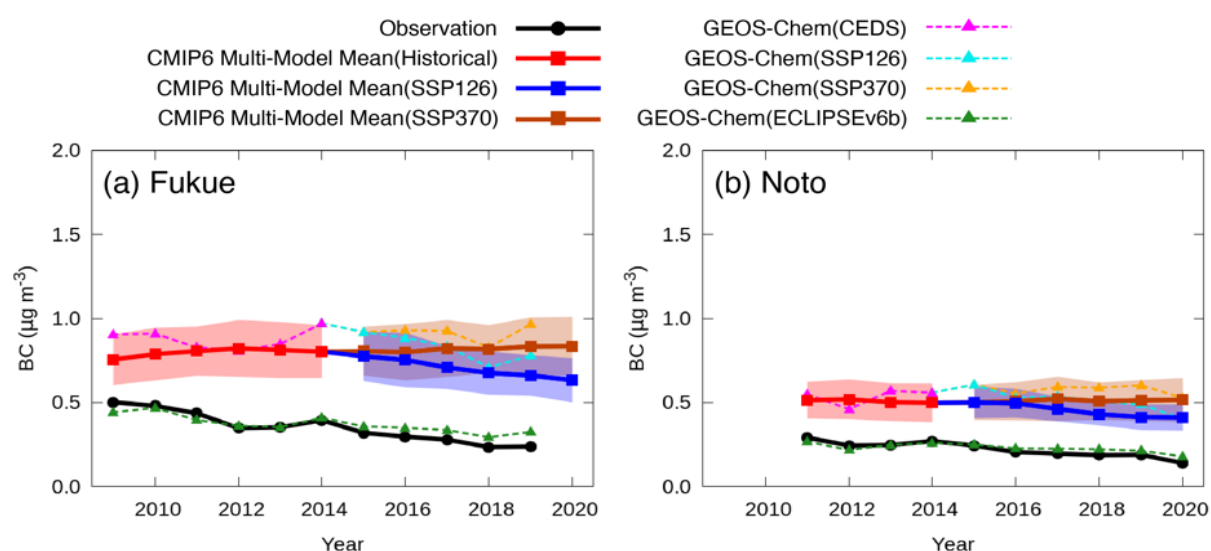


図5 (a)福江島と(b)能登における観測値（黒線）とCMIP6マルチモデル平均の過去再現実験、将来シナリオ実験（実線）、GEOS-Chemシミュレーション（破線）の年平均BC濃度変化の比較。赤線、青線、茶線は、それぞれ過去再現実験、SSP1-2.6、SSP3-7.0 シナリオを表す。シェードは CMIP6マルチモデルの標準偏差を示す。

次に、2009–2020年の福江と能登における年平均BC濃度の長期変化を比較した（図5）。福江の観測値は、2009–2019年まで -5.3 ± 0.53 %/年の減少傾向を示した。CMIP6のhistorical実験のマルチモデル平均とCEDSを用いたGEOS-Chemとともに、2009–2014年の間に減少傾向は見られなかった。これはCEDSにおいて中国の排出量が2014年まで増加トレンドであるためである。SSP1-2.6実験のマルチモデル平均は中国のBC排出量の減少によって、2015年から減少傾向を示した（ -3.9 ± 0.4 %/年）。しかし、将来シナリオの開始年（2015年）の排出量は、過大評価が示唆されるCEDSの最終年の値に基づくため、濃度レベルについては2015–2020年においてもhistorical実験と同様に過大傾向が見られた。一方、ECLIPSEv6bを用いたGEOS-Chem実験は、2009–2020年まで減少傾向を示し（ -3.1 ± 0.6 %/年）、濃度レベルについても観測と概ね一致した。

GEOS-Chemと放射伝達モデルRRTMGを用いて、2014年のCEDSとECLIPSEv6bインベントリ間のBCによる直接放射効果（DRE）の差を評価した。CEDS（CMIP6）による大気上端のDREは、東アジア領域平均（東経100–150度、北緯20–50度）で $+0.87 \text{ W m}^{-2}$ と推定され、ECLIPSEv6bよりも72%大きかった（図6）。CEDSによる東アジア域でのBC濃度の過大評価と、ECLIPSEv6による観測値との良い一致を考慮すると、この差はCEDSによるDREの過大評価に対応していると考えられる。したがってこの結果は、CMIP6シミュレーションにおいて、過去10年間の中国からのBC排出量の過大評価により、東アジア域においてBCによる大気加熱が2倍程度過大となっていることを示唆している。全球平均と北極域（北緯66度以北）平均では、CEDSによるDREはECLIPSEv6bよりも25%大きかった。東アジアを除くBC総排出量のCEDSとECLIPSEv6b間の差は10%程度であり、全球平均と北極平均のDREの差は、主に中国のBC排出量の差によるものと考えられる。したがって、東アジアのBC排出量を正確に推計することは、全球及び北極域の気候への影響を評価する上でも重要であることが示された。

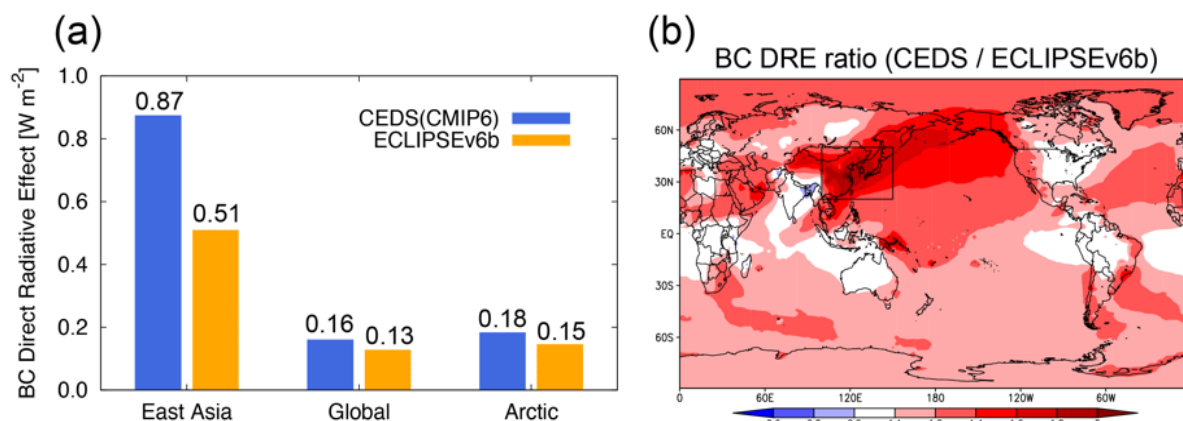


図6 (a) CEDS (CMIP6) とECLIPSEv6bによる2014年の東アジア、全球、北極域（北緯66度以北）の大気上端におけるBCの直接放射効果（DRE）の比較。(b) CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6bによるDRE比の水平分布。黒線の矩形は東アジア域を表す。

BC以外のSLCFである硫酸エアロゾルの前駆物質である二酸化硫黄（SO₂）、有機炭素エアロゾル（OC）について、1980年以降の中国の人為起源排出量変化を6種類のインベントリで比較した（図7）。まずSO₂について見ると、すべてのインベントリで中国の排出量は2000年以降急増するが、CEDS(CMIP6)とEDGARv8.1以外のインベントリは2000年代後半から減少している。一方、CEDS(CMIP6)は、ピーク時の排出量が2014年までほぼ一定のままであり他のインベントリと比べて排出量が大きくなっていることがわかる。CMIP6以降に更新されたCEDSv2021は、2006年以降は大きく下方修正され他のインベントリと同様の減少傾向を示している。ECLIPSEv6bは、CEDSv2021と近いトレンドになっているが、絶対値としてはやや低い値となった。

BCについては、すでに述べたようにCEDS(CMIP6)は他のインベントリと異なり、2000年代以降継続して増加傾向を示している。CEDSv2021は2000年代以降、下方修正され減少トレンドとなっている。ECLIPSEv6bはCEDSv2021と同様に減少傾向を示すが、絶対値としてはより低い値となっている。OC排出量のトレンドはBCよく似ており、CEDS(CMIP6)インベントリのみが2000年代以降も増加トレンドを示す一方、CEDSv2021やECLIPSEv6bを含む他のインベントリは減少傾向または横ばいとなっている。

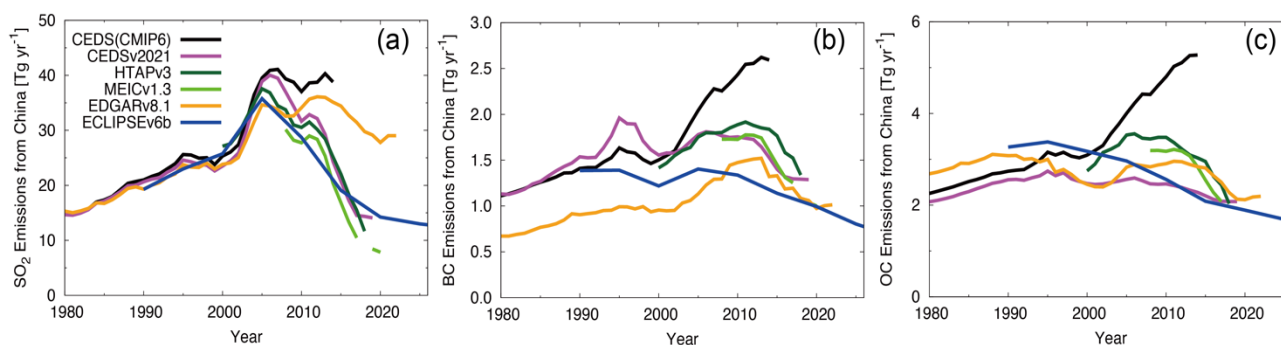


図7 中国からの(a)SO₂、(b)BC、(c)OCの人為起源排出量変化のインベントリ比較。

次に、MIROC6による大気海洋結合のアンサブル実験で計算された2010-2014年5年間平均の地上気温のアンサンブル平均をCEDS(CMIP6)とCEDSv2021および、CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6bで比較した（図8）。CEDS(CMIP6)はCEDSv2021と比較すると、中国やインド、東南アジア（インドシナ半島とマレー半島）において統計的有意(t検定で95%水準、以下同様)に低くなる領域が見られ、0.1 K以上の差が生じる場所も見られた。中国東部で領域平均（東経100-120度、北緯20-30度）すると、CEDS(CMIP6)のほうが0.10 K低かった。季節別に見ると、冬季（12-2月平均）の差が最も大きく(0.13 K)、夏季（6-8月）が最も小さかった（0.07 K）。また、CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6bによる地上気温の差は、東アジアと東南アジア、南ア

ジアの全域で有意に低くなっており、中国とインドではほぼ全域にわたって、0.2 K以上の差が見られた。中国の領域平均でみると、ECLIPSEv6bよりおCEDS(CMIP6)のほうが0.26 K低くなっていた。季節別には、春季（3-5月）の差が最も大きく（0.32 K）、夏季が最も小さかった（0.22 K）。

CEDS(CMIP6)を用いた過去再現実験において、CEDSv2021やECLIPSEv6bと比べて地上気温が低くなるのは、 SO_2 とOCの排出量と濃度が高く、硫酸エアロゾルとOCによる冷却効果がより強いことが原因と考えられる。加熱性エアロゾルであるBCについても、CEDS(CMIP6)は他の2つのインベントリよりも濃度が高くなっているが、エアロゾル全体の正味の効果としては冷却効果が上回って地上気温を低下させ、BCの過大評価はその一部を打ち消していたと考えられる。また、CEDS(CMIP6)との地上気温の差は、ECLIPSEv6bと比べたほうがCEDSv2021よりも大きくなっているが、これはECLIPSEv6bインベントリの中国の SO_2 とOCの排出量がCEDSv2021よりも少ないことに加え、中国以外のインドや全球の排出量で見ても、ECLIPSEv6bのほうが少ないためと考えられる。

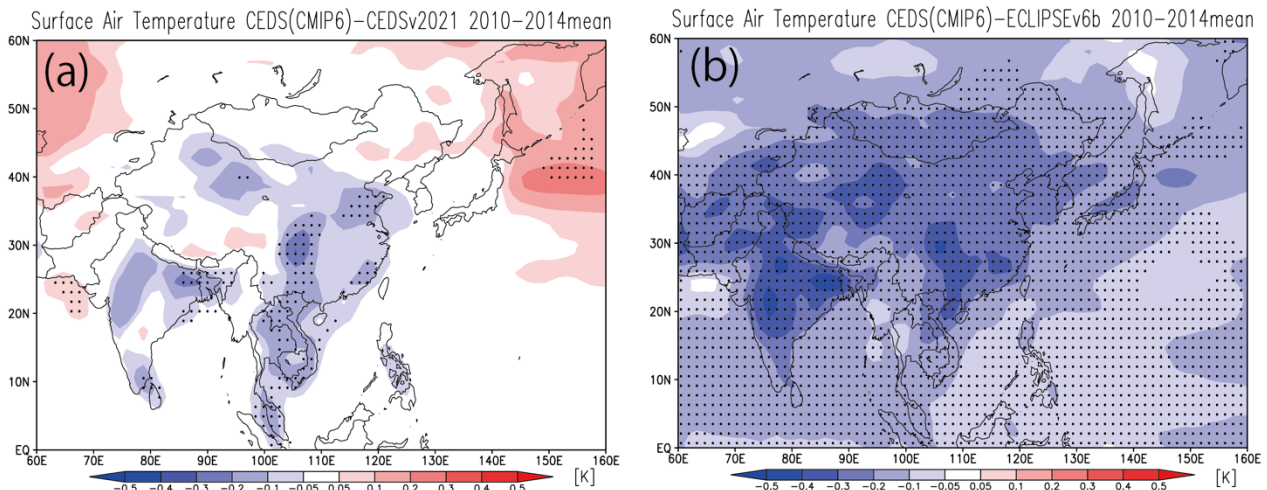


図8 MIROC6による大気海洋結合のアンサブル実験で計算された2010-2014年平均の地上気温のアンサブル平均をCEDS(CMIP6)とCEDSv2021(a)および、CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6b(b)で比較。黒色のドットはt検定で95%有意な領域を示す。

同様に、2010-2014年で平均した降水量についてもCEDS(CMIP6)と、CEDSv2021およびECLIPSEv6bとのアンサブル平均の比較を行った（図9）。CEDS(CMIP6)はCEDSv2021と比較すると、中国を中心に、

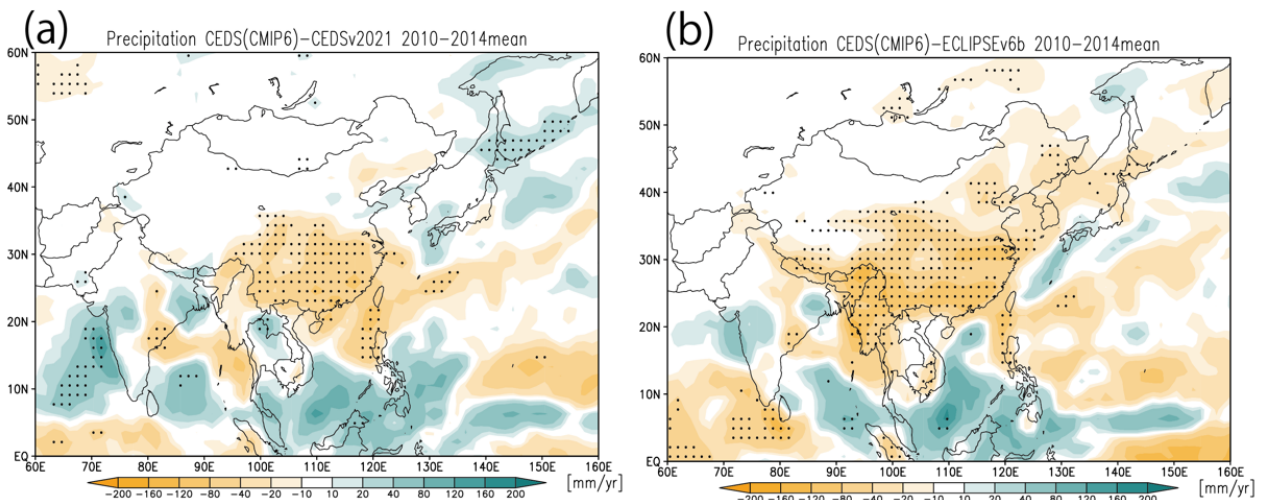


図9 MIROC6による大気海洋結合のアンサブル実験で計算された2010-2014年平均の降水量のアンサブル平均をCEDS(CMIP6)とCEDSv2021(a)および、CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6b(b)で比較。黒色のドットはt検定で95%有意な領域を示す。

インド、フィリピン、北西太平洋の一部で降水量の統計的有意に少なくなっていた。中国の領域平均で比較すると、年間降水量はCEDS(CMIP6)のほうが48 mm (3.0%) 少なかった。CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6bとの比較においても基本的に類似したパターンを示しており、主に中国で降水量が有意に少なくなっている。それに加えて、東南アジア、東シナ海やインド洋の一部でも有意に降水量が少ない領域が見られた。中国の領域平均の年間降水量はECLIPSEv6bよりCEDS(CMIP6)のほうが60 mm (3.7%) 少なくなっていた。季節別には、CEDS(CMIP6)とCEDSv2021および、CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6bとの降水量の差は両者とも夏季において最も大きくなっており、CEDS(CMIP6)とCEDSv2021との差は22 mm、CEDSとECLIPSEv6bとの差は26 mmとなっていた。

エアロゾルの多いインベントリ(すなわちCEDS(CMIP6))の方が少ない降水量となる原因としては、大気中のエアロゾルが増えることによって地表面に到達する短波放射が減少し、地表面の蒸発量が減ったことが考えられる。実際、地表面下向き短波放射(全天条件)は、CEDS(CMIP6)はCEDSv2021およびECLIPSEv6bと比べると、中国や、インド、東南アジア、日本周辺の広い範囲にわたって有意に低くなっている(図10)。中国の領域平均では、CEDSv2021とECLIPSEv6bと比べて、それぞれ2.5 W/m²と3.7 W/m²低くなっていた。また、潜熱フラックスの比較は、降水量の差とよく似たパターンを示しており、中国を中心にインドや東南アジアの一部で統計的有意に低くなっている。中国の領域平均では、CEDS(CMIP6)のほうがCEDSv2021およびECLIPSEv6bと比べて、それぞれ1.2 W/m²と1.9 W/m²低くなっていた。

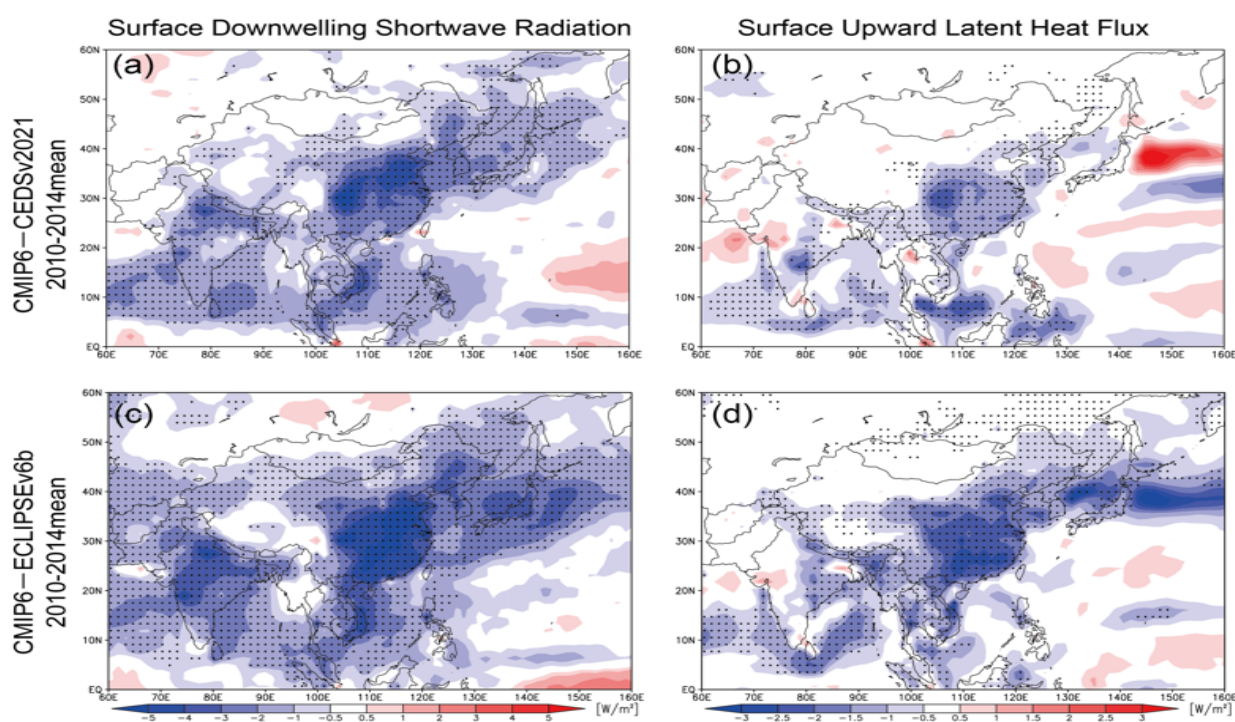


図10 MIROC6による大気海洋結合のアンサンブル実験で計算された2010-2014年平均の地表下向き短波放射(a)(c)と潜熱フラックス(b)(d)のアンサンブル平均をCEDS(CMIP6)とCEDSv2021(上段)および、CEDS(CMIP6)とECLIPSEv6b(下段)で比較。黒色のドットはt検定で95%有意な領域を示す。

MIROC6を用いた大気海洋結合アンサンブル実験によるインベントリ比較実験から、CEDS(CMIP6)インベントリを用いたCMIP6過去再現実験はアジア域のエアロゾルの過大評価によって、2010年代の中国、インド、東南アジアにおいて地上気温が統計的有意に低くなっていたことが示唆された。また、降水量についても主に中国の南部で有意に少なくなっていた。CEDS(CMIP6)インベントリにおいて、中国のSO₂、BC、OC排出量が高い原因が2000年代後半から中国で導入された大気質政策によるエアロゾルの排出削減が反映されていないためであったとすると、CEDS(CMIP6)とその後下方修正されたCEDSv2021を用いた気候シミュレーションの差は、中国における大気汚染対策の結果生じた気候応答に相当すると考えることができる。すなわち、2000年代後半からの中国におけるエアロゾルの減少は、冷却効果の減少によってアジアでの地

域的な温暖化に寄与するとともに、降水量の増加ももたらすことが示唆された。

BCと同様、比較的低温の燃料燃焼により大気中に放出されるCOの排出量推定値について、図11に中国・日本・韓国の結果を示す。中国では、GEOS-Chem(trajjectory.Fukue)がGEOS-Chemとのモデル比較法による値であり、GEOS-Chem (CO/BC ratio, Fukue)はモデル比較法で得られたBC排出量推定値にCO/BC排出比を乗じたもので、排出比法とのハイブリッド型で求めたCO排出量である。これらの値は2010年から2023年にかけて、約250 TgCO/年から160 TgCO/年まで低下傾向となった。この値の範囲は、後述するEMeRGe-Asia航空機観測とWRF/CMAQモデル比較法に基づく2018年の結果や、TCR2/TCR2.5の結果とも整合的であった。一方、ボトムアップによる推計値では、CEDS-2024年版、HTAPv3, MIXv2などでいずれも2010～2023年において同様の低下傾向を示したが、値が200 TgCO/年から130 TgCO/年までの低下となっており、全体として過小傾向であった。EDGARv8.1ではさらに低く、近年120 TgCO/年付近で横ばい傾向であった。これらのことから、中国のボトムアップCO排出量については、最新のデータであっても上方修正が必要であることが確からしいといえる。

日本では、モデル比較法：GEOS-Chem(trajjectory.Fukue)およびハイブリッド法：GEOS-Chem (CO/BC ratio, Fukue)に関し、2010年～2023年にかけて、6 TgCO/年から4 TgCO/年程度に低下したとの推定結果を得た。この値は国立環境研究所の温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)が長寿命温室効果ガスと合わせて報告しているCO排出量(GIO-Japan)やCEDS(v2024-07-08)とよく一致し、互いに適切度が高いものと評価された。また、HTAPv3はやや過小、EDGARv8.1はやや過大、と評価された。

韓国でのモデル比較法：GEOS-Chem(trajjectory.Fukue)およびハイブリッド法：GEOS-Chem (CO/BC ratio, Fukue)では、約1 TgCO/年と約2.5 TgCO/年に結果が分かれた。ともに値の不確かさは大きい、この差異の理由については特定できておらず、今後の研究が必要である。COはBCよりも寿命が長く、5日間遡る後方流跡線で排出地域を区分しているが、他の地域の影響が残りやすく、その影響を受けている可能性がある。ボトムアップ排出量との比較について、CEDS(v2024-07-08)やHTAPv3はやや過小、EDGAR8.1は高めのGEOS-Chem (CO/BC ratio, Fukue)と同程度であった。

同じく燃焼起源で大気中に放出され、SLCFであるオゾン前駆物質であるNO_xについて、データ同化法からトップダウン的に中国・日本・韓国のNO_x排出量を推定した結果について示す(図12)。得られた結果を、広く利用されているボトムアップ排出量インベントリと比較し、トップダウン・ボトムアップ型の排出量推定を相互に評価・検証した。

中国のNO_x排出量のデータ同化法による推定値は8.0 TgN/年であり、各種ボトムアップインベントリの値の範囲内であった(7.3–9.5 TgN/年)。データ同化法と排出インベントリ間の一致が良く、CEDS (CMIP6 version)を除き、10%以内の差異であった。また、データ同化法による推定では、2012年までの増加トレンドは4.0%/年、2012～2022年の減少トレンド-3.6%/年であった。一方、排出インベントリ推計の範囲については、2012年までの増加トレンドは3.8–5.7%/年(CEDS v2024, EDGARv8, HTAPv3)、2012年以降の減少トレンドは-5.0–3.0%/年であり(CEDS v2024, EDGARv8, HTAPv3, MEIC)、データ同化法による推定値はこれらの範囲内であった。また、2019年以降では、データ同化法による排出量推定の減少トレンドは鈍化しつつあり(-2.3%/年)、SSP1-2.6シナリオで予測される急激な減少(-5.0%/年)とは不一致が大きくなってきている。

中国のNO_x排出量について多数のボトムアップ型の排出量インベントリとトップダウン型の推定を比較した先行研究と比較すると、NO_x排出量については、先行研究(Ding et al., 2017; Elguindi et al., 2020)ではボトムアップ排出量間の差異が20–50%と報告されている。本研究での最新の排出インベントリの比較では、それらとデータ同化法によるトップダウン推定との差異は10%以内であったことから、近年のNO_x排出量インベントリの精度向上とデータ同化法の有効性を示した。

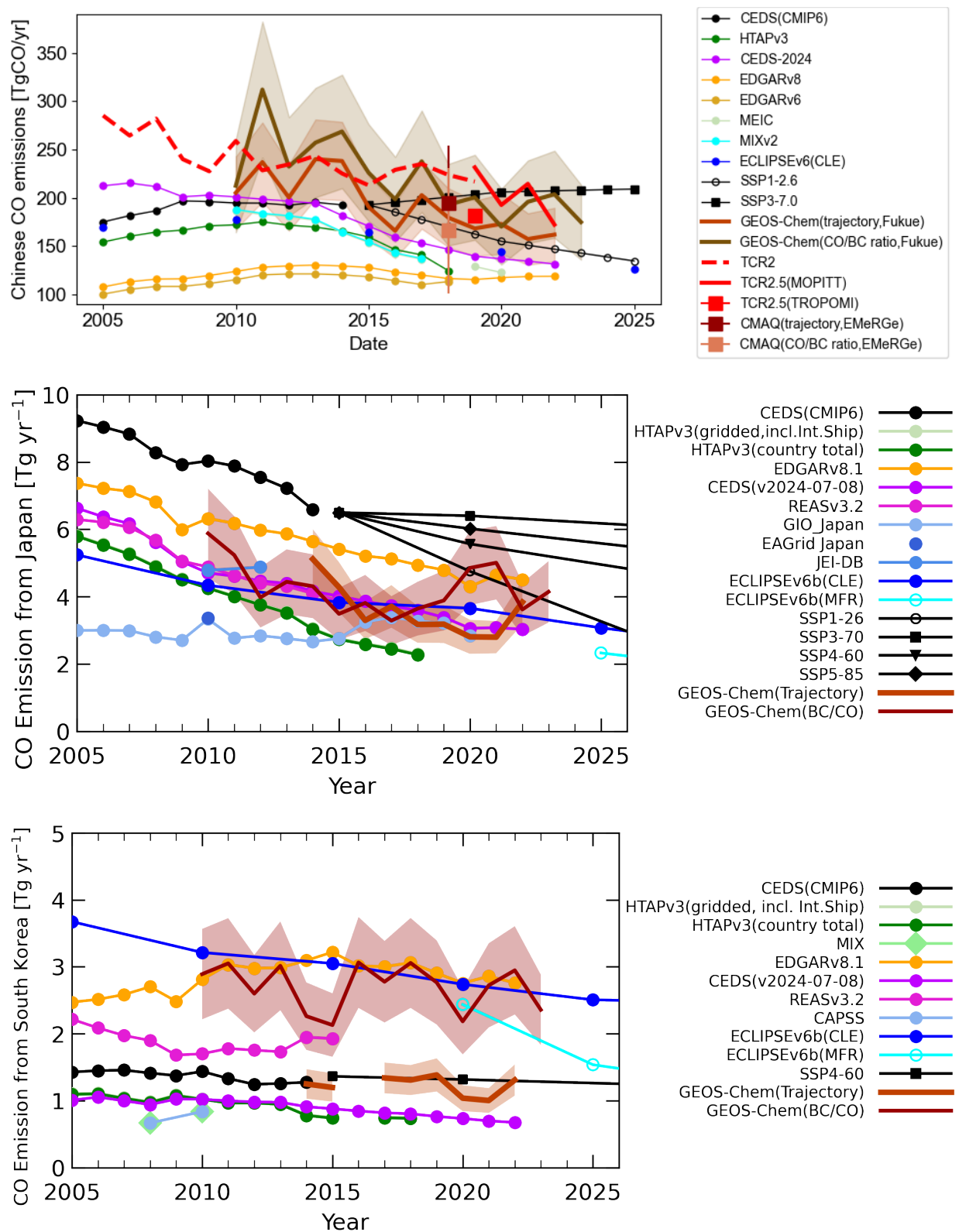


図11 (上) 中国、(中) 日本、(下) 韓国でのCO排出量の推定結果を、過去の排出量推定結果やボトムアップ方式での推計結果とも比較しながら示す。

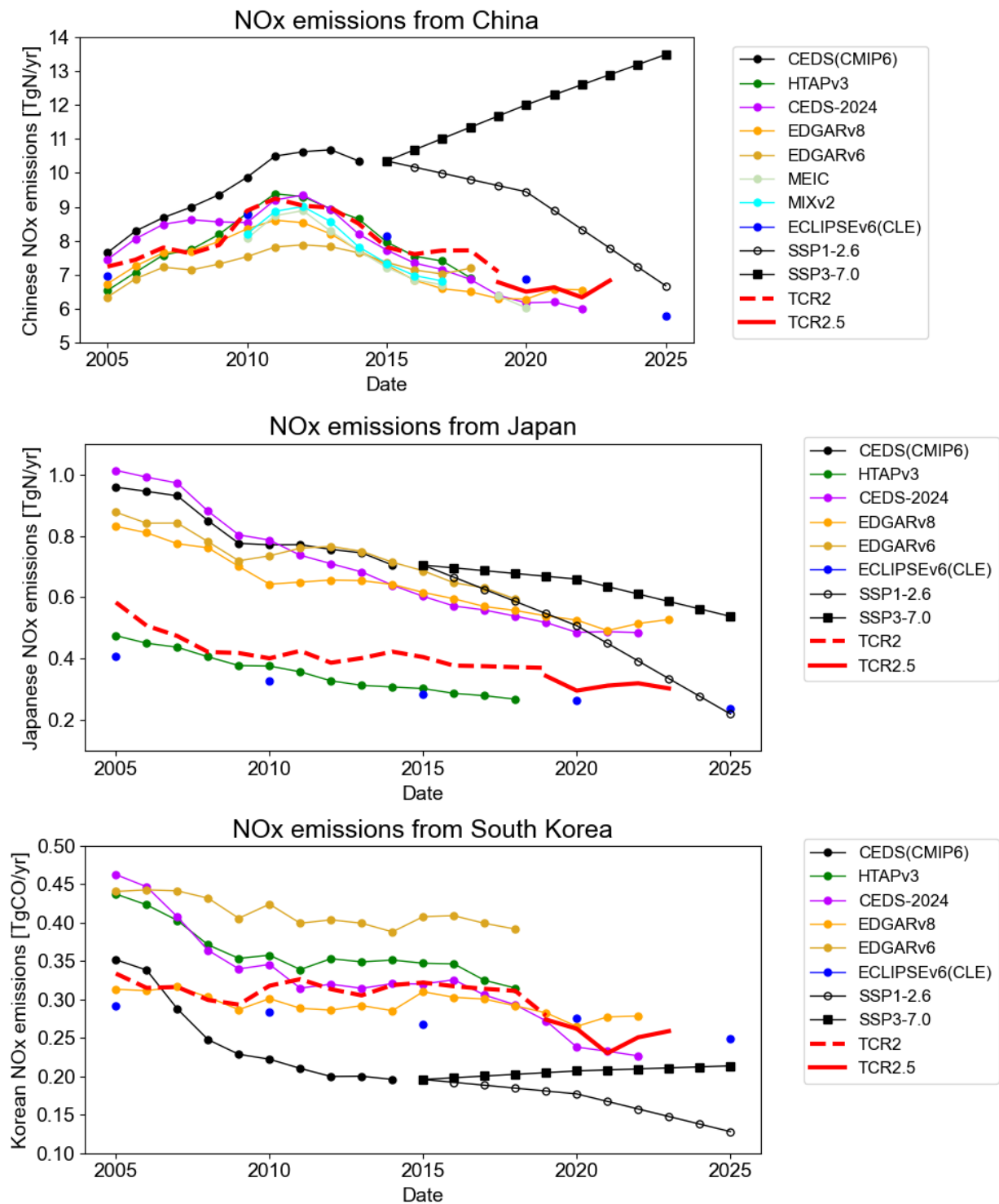


図12 中国（上段）、日本（中段）、韓国（下段）における年平均のNOx排出量の推移。単位はそれぞれ Tg N/yr。

日本においては、データ同化法による2005-2018年のNOx排出量は0.43 TgN/年と推定された。ほとんどの排出インベントリ（CEDS CMIP6 ver.、CEDS v2024、EDGAR v6、EDGAR v8）による推計範囲が 0.68–0.82 TgN/年であり、データ同化法による推定よりも58%以上大きかった。一方、日本国内の排出インベントリがハーモナイズされているHTAPv3の推計値は 0.36 TgN/年であり、データ同化法の推定値にも比較的近い値であった（-17%）。また、2005-2022年の変化傾向については、データ同化法による推定からは-

2.9%/年の減少トレンドが得られた。排出量インベントリ（CEDS v2024、EDGAR v8、HTAPv3）における変化傾向は、-4.8%/年から-2.9%/年の範囲であり、データ同化法の推定値は排出インベントリの下限值付近であった。CMIP6の将来シナリオとの対応を評価するために、2015-2022年のデータ同化法の減少トレンドを算出すると-4.0%/年であった。推定値は、SSP1-2.6シナリオで予測される急激な減少（-7.8%/年）とSSP3-7.0シナリオにおける緩やかな減少トレンド（-1.9%/年）の間に位置していた。

韓国においては、データ同化法による2005-2018年のNO_x排出量は0.31 TgN/年と推定された。この推定値と比較すると、排出インベントリの推計では、CEDS CMIP6 version（0.25 TgN/年）が21%小さく、EDGAR v6（0.41 TgN/年）は30%大きかった。しかし、比較的近年に構築された排出インベントリ（CEDS v2024、HTAPv3、EDGARv8）の推計値の範囲は0.30-0.36 TgN/年とデータ同化法の推定値から±15%以内の差に収まっていた。2005-2022年の変化傾向に関しては、データ同化法による推定では-1.2%/yrであり、EDGARv8の-0.6%/yrと近い値となった。一方、韓国の国内インベントリがハーモナイズされているHTAPv3やCEDS v2024では、それぞれ-2.4%/年、-3.5%/年と大きな減少トレンドが確認された。この不一致は、韓国国内の排出インベントリにみられる、2005-2008年におけるNO_x排出量の急激な減少に起因している。しかしながら、韓国の地上観測ネットワークによるNO₂測定では2001-2018年まで緩やかな減少が観測されている（Kim et al., 2023）。2015年以降に変化傾向とCMIP6将来シナリオとの対応関係については、データ同化法による変化傾向の推定は-4.4%/yrであり、SSP3-7.0シナリオで予測されるような緩やかな増加傾向（1.0%/年）というよりは、SSP1-2.6シナリオで予測されている減少傾向（-2.8%/年）に近くなっている。

現在まで、日本におけるBC排出量は、環境省の大気汚染物質排出インベントリ(旧名:PM2.5等大気汚染物質排出インベントリ (PM2.5EI))などの大気汚染物質の排出インベントリによる粒子状物質 (PM) に対し、PM組成比率中のEC (BC) 比率を乗じて算出している。図13はPM2.5EIの国内のPM2.5排出量を発生源・成分別にまとめたものである。固定発生源のPM組成比率の国内調査結果での見直しにより、BC排出量は従前のものより1.9倍増加しているが、BC排出量の約7割は移動発生源起因である。また、97.5%が燃焼起因である。

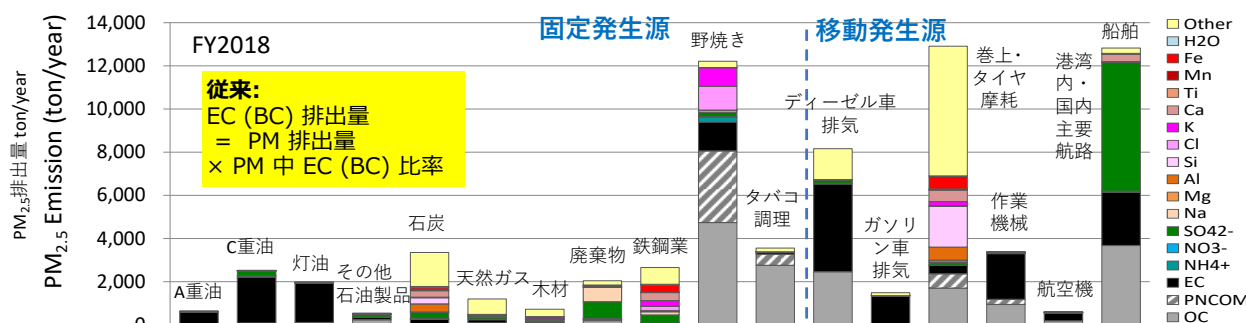


図13 国内のPM_{2.5}発生源別組成別排出量とBC排出内訳

この推計手法では元のPM排出量データが既知であることが前提だが、大気汚染物質の排出インベントリは時空間分布情報も必須となり、整備には時間がかかる（PM2.5EIは全国約1km四方グリッド、月別・時刻別データ、2015年度排出量の公開は2019年度、2018年度排出量は2023年度）。そこで、BC排出量の迅速把握のため、PM総量を介さず、推計に必要な統計データからBC排出量の直接推計を行なった。表1は2021年度のBC排出量推計に必要な主な統計データと公開時期である。「簡易的」の意味は、排出係数や推計手法の更新は行わず、活動量の変化に応じて全国値かつ年間値を求めるということである。それによると、多くの統計資料は毎年更新されており、おおむね2023年度の前半には2021年度の推計に必要なデータがほぼ揃うことが確認できた。そのため、同じく燃焼起因のCOやNO_xに対しても簡易的な手法で全国の排出量の推計が今後可能と考えられる。ただし、詳細な推計に必要な大気汚染物質排出総合調査や道路交通センサスは毎年実施ではなく、データ公表にも時間がかかるため、それらの結果を反映するには、従来の大気汚染排出インベントリを元にした手法が良いと考えられた。

表1 2021年度のBC排出量の簡易的な推計に必要な主な統計資料と公表時期の例

発行元	統計資料名	推計利用先	FY 2021	FY2022				FY2023	
				4～ 6	7～ 9	10～ 12	1～ 3	4～ 6	それ 以降
経済産業省	総合エネルギー統計	燃料使用全 般				●			
環境省	廃棄物処理技術情報施設別整備状 況	一般廃棄物						●	
環境省	廃棄物の広域移動対策検討調査及 び 廃棄物等循環利用量実態調査報告 書	産業廃棄物							●
環境省	ダイオキシン類対策特別措置法施 行状況	小型焼却炉					●		
農林水産省	作物統計	野焼き	●						
日本たばこ 協会	紙タバコ年度別販売実績	タバコ	●						
厚生労働省	年齢（5歳階級）男女別人口	調理	●						
環境省	自動車排出ガス原単位及び総量算 定検討調査報告書	自動車 特殊機械						●	
環境省	PRTR届出外排出量推計	航空機					●		

こうした統計資料から、日本のBC排出量を推計した結果を図14に示す。船舶についてはIMO（国際海事機関）規制に付随したPM低減の効果のみ考慮している。2021年度におけるBC排出量は2015年度に比較して37%減となった。内訳には、移動発生源は47%減少、固定発生源は22%減である。

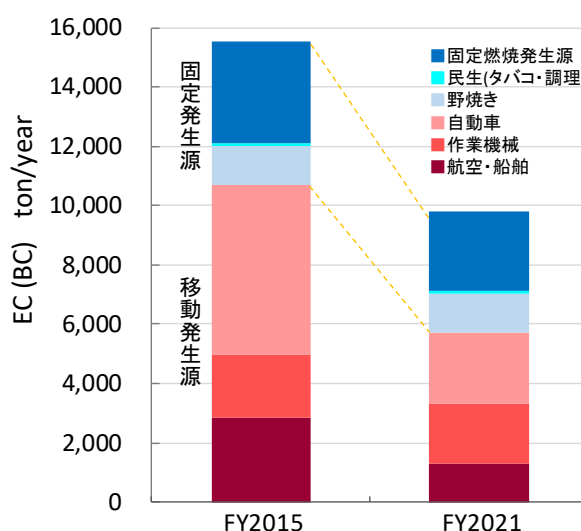


図14 簡易・迅速推計による2021年度のBC排出量（日本）

次に、温室効果ガスインベントリと大気汚染物質排出インベントリの状況を整理した。国内で排出インベントリに関わるSLCFインベントリの対象物質は、温室効果ガスインベントリにおいては前駆物質として推計されているものがあり、大気汚染物質排出インベントリではほぼすべての物質が対象となっている。しかしながらそれぞれの実施体制は組織のあり方から大きく異なっている。表2にそれぞれの排出インベントリ作成にあたる体制を示す。

表2 温室効果ガスインベントリと大気汚染物質排出インベントリの作成時の体制

項目	温室効果ガスインベントリ	大気汚染物質排出インベントリ
実施根拠	国連気候変動枠組条約（UNFCCC）4条（作成）12条（提出）、パリ協定 13条 地球温暖化対策推進法 7 条	PM2.5に関する総合的な取組（政策パッケージ）、光化学Oxワーキングプラン
所轄	地球環境局 脱炭素社会移行推進室	水・大気環境局 環境管理課/モビリティ環境対策課
予算	（国立環境研究所）	請負業務（役務）
実務担当	国立環境研究所 地球システム領域 地球環境センター 温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）	民間業者（年度ごとに入札で決定） （数理計画/NTTデータCCS/日本自動車研究所/社会システム）
データ作成サイクル	（毎年度単位）年度計画→温室効果ガス排出量算定方法検討会→ 確報値公表/国連提出（4月） 2024年4月に2022年度値	大気汚染物質排出インベントリ検討会開催 時空間分布を持つ詳細版は3年毎、 総量のための簡易推計は毎年 2023年度末に2021年度簡易推計実施 2024年度末に2021年度詳細版作成
検証	（温室効果ガスのみ） 温室効果ガス排出量算定方法検討会 インベントリ保証WG UNFCCC インベントリ審査	（検討会/実務担当/所轄部署）

それによると、実施根拠だけでなく、データ作成サイクルや検証の仕組みが大きく異なる。それぞれ推計しているSLCFインベントリ対象物質については、推計対象発生源はほぼ共通しているものの、温室効果ガスインベントリは、温室効果ガス同様、全国一律の年間値で整理しているのに対し、大気汚染物質排出インベントリは、約1km四方・1時間単位の解像度で整備されている。それらの違いを表3に示す。

表3 SLCF対象物質である温室効果ガスインベントリの前駆物質等と大気汚染物質排出インベントリの違い

項目	温室効果ガスインベントリ	大気汚染物質排出インベントリ
対象物質	NO _x , CO, NMVOC, SO _x	NO _x (NO, NO ₂), CO, VOC (NMVOCと同じ、個別成分), SO _x , NH ₃ , PM (TSP, PM _{2.5} , BC・OCを含むPM _{2.5} 13成分)
時間配分	なし、年間値	月別1時間値、発生源によって平日/休日別
空間配分	なし、全国値	地域基準メッシュ（3次メッシュ=約1km四方）
対象発生源	人為 燃焼発生源	固定・移動発生源
	人為 蒸発発生源	溶剤・塗料・燃料蒸発・工業プロセス
	自然発生源	含めない 火山、土壌からのNH ₃ 、参考値として植物VOC、野生動物からのNH ₃
推計対象年範囲	1990～2022年度	2012～2020年度

遡及改訂	1990年度に遡り実施	最大10年程度、詳細遡及改定は3年に1回推計
基本の考え方	排出係数×活動量	排出係数×活動量
検証	検証の程度は不明(要確認)	(検討会/実務担当/所轄部署)

大気汚染物質排出インベントリでは、温室効果ガスインベントリの前駆物質にはない、PM2.5やアンモニア(NH3)を推計しており、BCおよびOCについてもPM2.5排出量に対し、PM2.5発生源プロファイルを乗じることによって求めることができる。その一方で、時空間的にも高解像度の排出インベントリであり、最新の知見を逐次更新しているため、整備にはある程度の時間がかかる。現状では詳細推計を3年毎に、全国値のみの推計を毎年実施としているが、いずれも推計に必要な統計値が出揃った後に推計を実施している（図15）。

大気汚染物質排出インベントリの整備状況													現在
年	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
総量推計	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2025.3
地域・時刻配分(詳細版)	○			○			○			○			
													※ 年度ではなく、年単位で整理
推計に使用している主要な調査、統計情報、報告書													現在
年	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
幹線道路交通量/車速							△2015道路交通センサス一般交通量公表					△2021道路交通センサス一般交通量公表	数字は月
							△2015道路交通センサスODデータ公表					△2021道路交通センサスODデータ公表	
マップ調査（大規模煙源）				▼2011マップ調査公表	▼2014マップ調査公表	▼2017マップ調査公表				▼2020マップ調査公表			
総合エネルギー統計	確定版 4○ 暫定版 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	4○ 11○	11○ 予定	
VOC排出インベントリ	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○		年度末に前年度
自動車排出ガス原単位	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○	3○		年度末に前年度
自動車燃料消費量調査	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6○	6○	月報有、2-3カ月後
自動車輸送統計	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	9○	9○	月報有、4-5カ月後
産業廃棄物	12○	12○	12○	3○	1○	1○	3○	2○	3○	3○	5○		
温室効果ガス排出インベントリ	4○	4○	4○	4○	4○	4○	4○	4○	4○	4○	4○		

図15 大気汚染物質排出インベントリと関連統計資料の整備状況

SLCFインベントリをUNFCCCに提出する際には、おそらく2006 IPCCガイドラインに準ずると想定されるため、温室効果ガスインベントリと同様の提出体制が必要になるのではないかと考えられる。現状、温室効果ガスインベントリで未算定の物質など、大気汚染物質排出インベントリとの連携も考えられるが、その際には推計対象年次やデータ検証の体制整備も含め、検討していく必要があると考えられる。

続いて、越境移流及び日本国内での物質輸送を反映したPM2.5削減のための政策に関する費用対効果分析を行なった。

そのため、国内のPM2.5濃度が比較的高い関東・中部・近畿・瀬戸内といった地域ブロックにおいて、費用を考慮した前駆物質の排出削減対策とその効果を導くための基礎データとして、化学輸送モデルCMAQ（Community Multiscale Air Quality）を用いた推計を実施した。対象地域ブロックの前駆物質の影響は、当該地域の前駆物質排出量をすべて取り除いた場合のPM2.5濃度変化により求められる（ゼロアウト法・・・ゼロにすることにより計算から除外すること）。

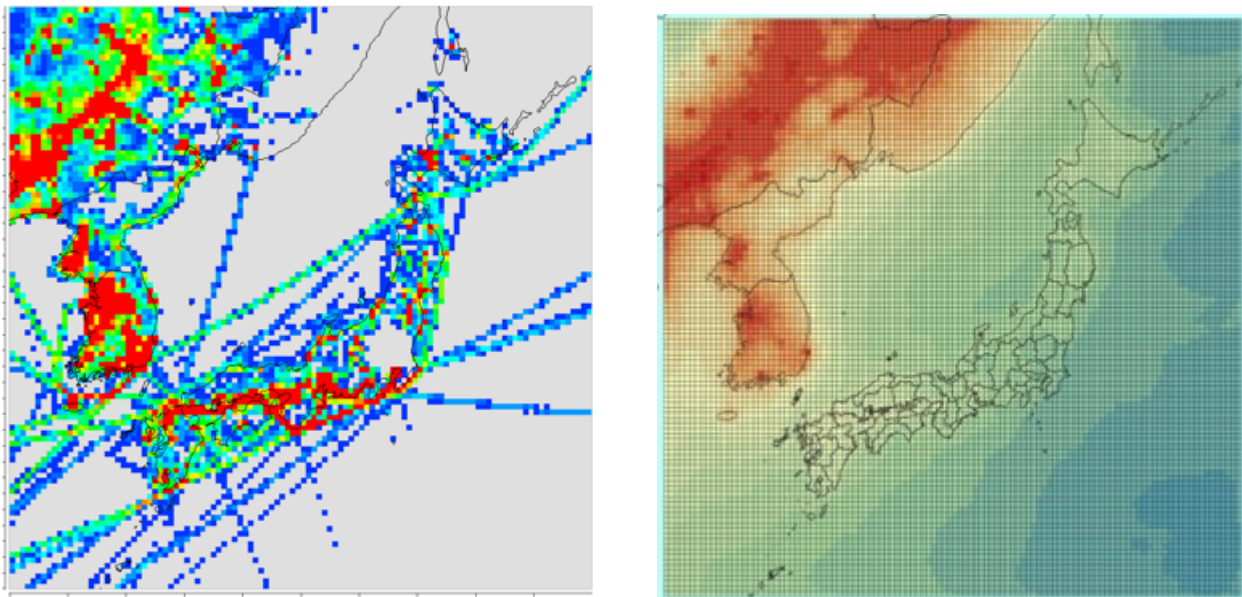


図16 大気化学輸送モデルCMAQを用いた地域ブロック単位のゼロアウト法について、関東地域の例。
左：PM2.5の排出量マップ、右：モデル計算されたPM2.5濃度

日本国内各地域のPM2.5濃度は、地域内の排出による寄与と地域外（日本国内他地域及び国外）からの汚染輸送の寄与の両方が反映されたものとなっている。後者を定量化するには一般的には化学輸送モデルによる計算が必要となるが、本分析のように数多くの異なる政策シナリオの効果を評価する場合、全てのケースに対応したモデル計算を行うとすると計算量が膨大になってしまう。そこで、化学輸送モデルCMAQを用いて各圏域の人為期起源の排出をゼロアウトにすることにより各圏域に及ぶ汚染濃度の割合の変化をマトリックス化し、汚染物質の地域間輸送による寄与割合を近似した（図16）。

本方法により推定した圏域間寄与割合の表（マトリックス）を表4に示す。一番左の列に示されている各圏域の汚染濃度が各列の上に示された各圏域等の影響をどれだけ受けているかを割合で示している。例えば関東の汚染濃度については、25%が関東内での人為的排出、2%が中部における人為的排出、0.5%が近畿における人為的排出により構成されている、ということを示している。それぞれの圏域について圏域内排出が最も濃度寄与が大きいが、近接の圏域の排出も圏域内排出に比べ1割程度濃度寄与している。日本全域の排出のゼロアウトを計算した結果、国内での人為起源排出源の濃度寄与は約14%（瀬戸内）～29%（関東）となり、それぞれ半分を大きく下回る数字となった。なお、この値に関して、西日本のものが全体的に東日本のものより低くなっていることも明確に示されている。これらの結果から、国内対策だけでなく、アジア大陸からの越境移流、地球規模移流及びバックグラウンドの寄与も重要であり、日本以外の削減シナリオを考慮した検討が必要となることがわかる。

表4 CMAQのゼロアウト法により推定した圏域間寄与割合。（4圏域以外寄与は日本全域のゼロアウトと4圏域のゼロアウトとの差分から推定。バックグラウンドは、人為起源の排出以外の寄与とした。）

	国内寄与						国内寄与	越境移流寄与＋ バックグラウンド
	関東	中部	近畿	瀬戸内	4圏域合計	4圏域以外寄与		
関東	0.250	0.020	0.005	0.003	0.278	0.012	0.290	0.710
中部	0.011	0.146	0.020	0.005	0.181	0.010	0.191	0.809
近畿	0.003	0.004	0.176	0.012	0.194	0.011	0.205	0.795
瀬戸内	0.001	0.001	0.017	0.101	0.120	0.019	0.140	0.860
九州	0.0005	0.0005	0.002	0.005	0.007	0.122	0.130	0.870

次に、即時導入が可能な削減技術（RACT）を適用する場合の排出削減ポテンシャルと限界排出削減費用を算出した。曲線削減シナリオについて、RACTを適用した場合のPM_{2.5}とBCに関するセクター別の排出量及び排出削減ポテンシャルを示す（図17と図18）。RACTの削減ポテンシャルをベースに、対象物質の削減に関する限界削減費用関数を算出した。図19に全国及び関東圏のBCとPM_{2.5}（一次生成粒子）に関する限界排出削減費用曲線を示す。この関数をこの後に示す追加対策費用の評価に用いた。日本におけるBCの限界排出削減費用曲線については既存の評価例がなく、今回新規に見積もられた。計算に用いた方法論の性格上、傾き等の形状がPM_{2.5}のものと全体的に似ているが、PM_{2.5}の曲線を単に縮小しているだけとは言えない特徴の違いも存在する。

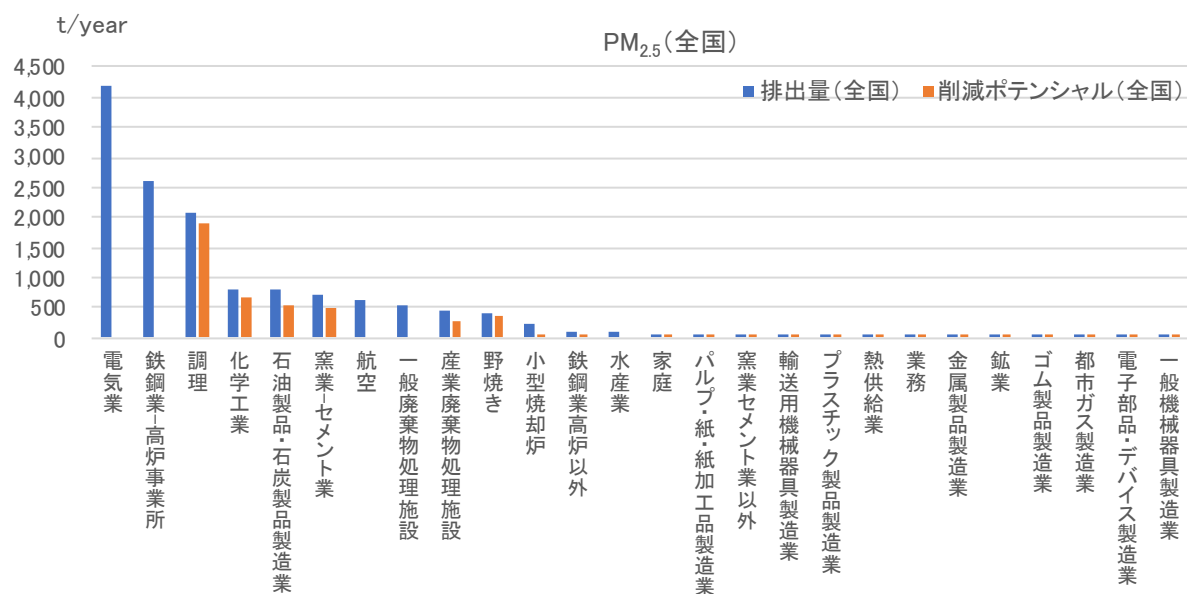


図17 PM_{2.5}に関するセクター別の排出量及び削減ポテンシャル（全国）

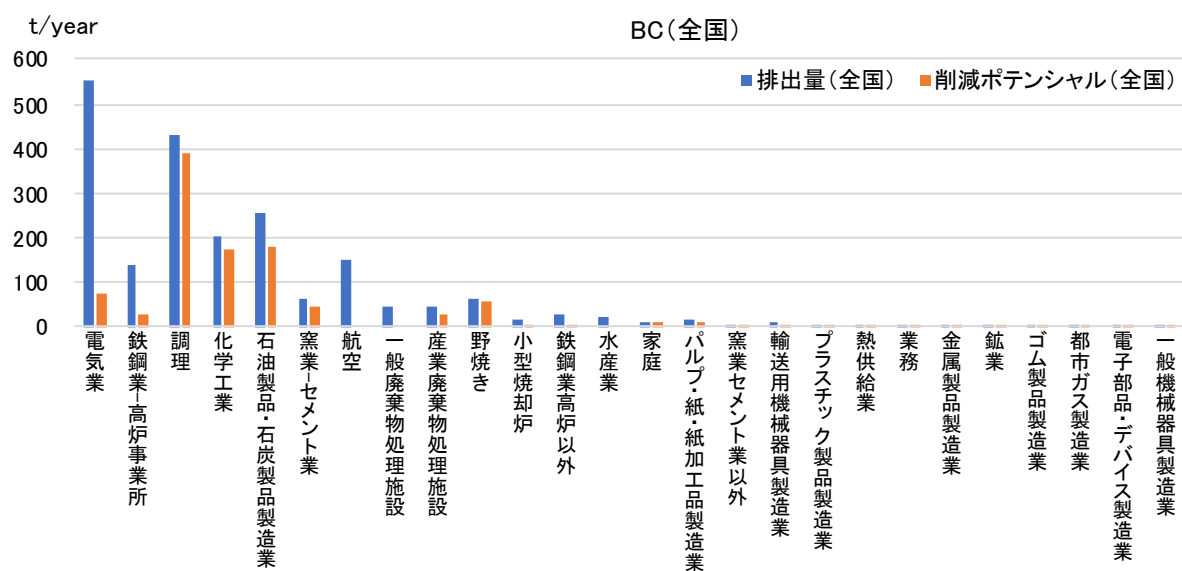


図18 BCに関するセクター別の排出量及び削減ポテンシャル（全国）

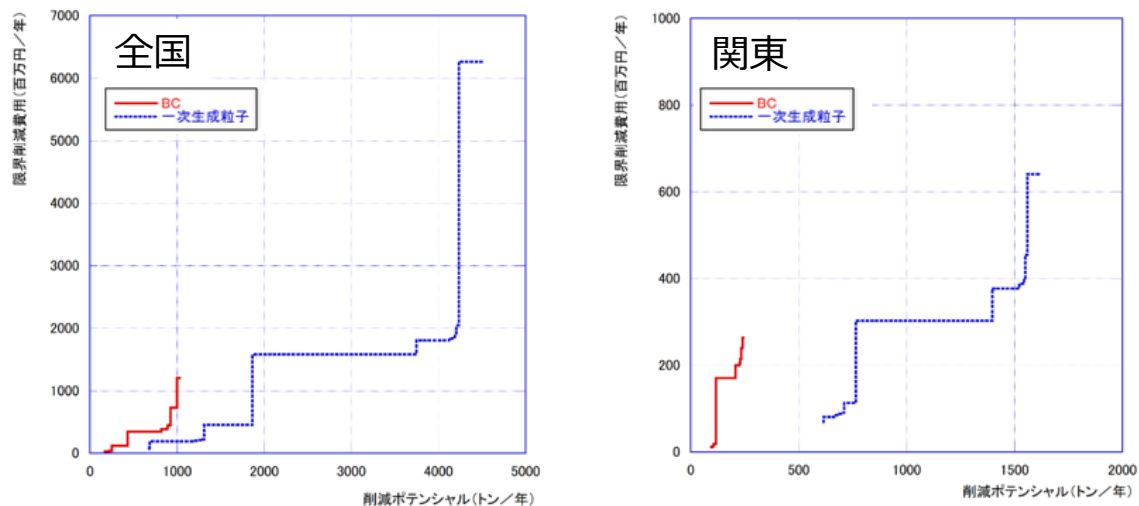


図19 BC（赤）とPM2.5（一次生成粒子、青）に関する限界排出削減費用曲線（左図:全国、右図:関東）

これらを用いて、PM2.5基準値達成のための追加対策費用の評価として、RACTの導入を前提とした、2018年ベースでの年間基準値達成のために必要な追加対策費用の合計額に関する評価を行った。対象物質の排出源については、排出削減費用が高いものと低いものが混在しており、排出削減費用が低い排出源から優先的に排出削減を行うことで削減費用の総額を抑えることができる。そのような費用を抑えた汚染削減は、排出権取引などの経済的規制手段を導入することで実現できる。関東圏についての計算結果を表5に示す。圏域内の高濃度域での濃度ギャップ（＜各測定地点の測定濃度＞ - 環境基準値である $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を削減するため、排出賦課金やカーボンプライスなどの経済的規制手法を適用しつつ対策費用の最小化を図った場合（ケース1）、各部門・各成分を一律に削減し環境基準に適合する場合（ケース2）、及びこれらの折衷の形態として、大規模排出源に排出総量規制を行い、その他については排出権取引を用いて削減する場合（ケース3）の三つについて評価を行なった。

各排出源、各成分の一律削減（ケース2）は圏域全体で年間165億円の費用となる一方、経済的規制手法を最大限に活用した場合（ケース1）の削減費用の総額は年間17億円となり、後者を採用した場合の排出削減費用の低減が顕著であることがわかる。ケース1とケース2を折衷したより現実性の高いシナリオとしてのケース3については、総費用についてはケース1と2の中間の値となっている。ケース1とケース2を削減量に関して比較すると、ケース1ではSOxの削減量がケース2に比べて少なく、その代わりにPM_{2.5}の削減量がケース2よりも多くなっている。この結果は、PM_{2.5}の排出源に関しては削減費用が高いものと低いものの違いが比較的大きく、削減費用が低い排出源で排出削減の多くを担うことで圏域全体としての削減費用を全体として低減できる余地があることを示唆している。

なお、近畿圏、瀬戸内圏では、RACTを適用しても一部の高濃度地点では基準達成はそもそも困難であるという結果となった。各排出源のそれ以上の追加削減やその他圏域及び越境移流の寄与を削減する政策が必要であることが示唆される。

表5 即時導入が可能な削減技術（RACT）の導入を前提とした、2018年ベースでの関東圏における年間基準値達成のために必要な追加対策費用の合計額。ケース1の経済的規制手法としては、排出権取引、排出賦課金（環境税）及び小規模排出源の削減補助金の導入を想定。ケース3は、排出総量規制を大規模排出源に課し、それ以外の対象物質（PM_{2.5}, SO_x, NO_x）の排出に関して排出権取引市場を導入した場合。

削減 排出物質	ケース1： 経済的規制手法を用いて対策 費用を最小化した場合		ケース2： 直接的規制手法により各排出 源、各成分を一律削減した場 合		ケース3： 排出総量規制（大規模排出 源）と排出権取引により削減 した場合	
	削減量	削減費用	削減量	削減費用	削減量	削減費用
	トン／年	百万円／年	トン／年	百万円／年	トン／年	百万円／年
PM _{2.5}	1,338	289	869	305	717	285
NO _x	27,737	1,366	28,739	2,004	34,810	2,585
SO _x	0	0	29,450	14,233	1,157	136
合計	29,075	1,655	59,058	16,543	36,684	3,007

ケース3の「大規模排出源」とは、それぞれの物質ごとに定義しており、具体的には以下を表す。

PM_{2.5}: 電気業、鉄鋼業-高炉事業所、化学工業、石油製品・石炭製品製造業、窯業-セメント業、産業廃棄物処理施設

NO_x: 電気業、鉄鋼業-高炉事業所、窯業-セメント業、化学工業、石油製品・石炭製品製造業、産業廃棄物処理施設、鉄鋼業（高炉以外）

SO_x: 電気業、鉄鋼業-高炉事業所、化学工業、石油製品・石炭製品製造業、産業廃棄物処理施設、窯業-セメント業

1. 5. 研究成果及び自己評価

1. 5. 1. 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>

IPCCではAR6を経て、BCをはじめとするSLCFの気候・大気質への影響の理解が進んだ。また、AR7に向けては、排出削減に向けた動きが加速している。他方、北極評議会ではこれまでもBC削減に関する実効的な取り組みが継続して進められるなど、世界の約3割以上を占める東アジアのBC排出量とその推移の正確な把握と、削減に向けた世界的な関心は高い。また、こうした国際的な対策の効果や、リーマンショック、コロナ禍といった社会・経済の一時的な危機による、GHGとSLCFの排出量変化を即座に把握する社会的関心も増している。GHGについては、CO₂やCH₄を対象に「Global Carbon Budget」等として、観測に基づくトップダウン推計をボトムアップ推計と比較・検証する総合評価の考え方が確立されてきたが、短寿命成分については確立されておらず、**本課題全体**として「東アジア諸国のBC排出量に関するボトムアップ・インベントリとトップダウン・インベントリの総合評価」を達成できた点は、学術的な価値及び意義が高い。

サブテーマ1に関しては、燃焼起源のSLCF(BC, CO, NO_x)に関し、大気中濃度観測・起源地域の分析・大気化学輸送モデルを組み合わせ、迅速に、かつ現実的に即して、東アジア各国の年毎の排出量を推定する手法群（データ同化法、モデル比較法、排出比法）を確立した点が大きい。また、従来はモデル比較法については地上観測のみが用いられてきたが、今回、「航空機観測」にも適用することで、方法論が拡張された点も重要である。その結果、航空機観測から得られた中国からのBC排出量は、地上濃度をもとに算出された排出量とよく整合し、これまでの解析では、高度分布表現に特性があれば、モデル特性バイアスが排出量推定値にも伝播しうることが懸念されてきたが、今回、より高高度の航空機観測に基づく排出量推定を初めて行い、その結果が地表濃度に基づく結果と一致したことから、こうした特性バイアスが低く、信頼性の高い評価がなされていたことが裏付けられた（成果15）。

燃焼起源からの排出量が大きな割合を占めるSLCFについては、個別の物質を評価する場合と比較して、複数物質を横断的に捉え、排出比などを用いて評価することで解析の効率性を高め、不確かさの範囲を絞ることができることを実証した点は、学術的に大きな進展となった。

衛星データ同化では、これまで全球での衛星を利用した解析において、再解析のCO濃度場が実大気濃度の変化トレンドを過小評価する課題が残されていたが、本課題では、先験情報として用いる排出量インベントリに含まれる誤差を、系統誤差とランダム誤差に分けて2段階で考慮するように工夫することで、課題を

解決した。これにより、CO排出量推定精度の向上に大きく貢献することはもちろん、NOxや他の物質の挙動の表現の適切化にも結び付くため、学術的な波及効果が大きい。実際、コロナウイルス蔓延時期や2023年の観測を題材として、TROPOMI衛星データなどを利用した化学データ同化により、窒素酸化物等について迅速な排出量評価が可能であることを実証した（成果9）。

観測に基づく中国からのCO排出量がある程度収束し、ボトムアップ値は過小評価となっていることがほぼ事実となったこと、逆にBCの中国からの排出量については、ボトムアップ値は過大評価が続いていることが明らかとなった。COはオゾンを生じる元となるOHラジカルの濃度分布にも影響するため、CO排出量が全球の約20%を占める中国からの排出量のバイアスを評価し不確かさを絞り込むことによって、SLCF類の排出が気候変動に与える影響や、広域なオゾン大気汚染に与える影響などの評価を確かなものにする学術的な意義がある。

サブテーマ2に関しては、CMIP6に参加した12の気候モデルのBC濃度場自体の再現性を観測値と比較して、マルチモデル平均で約2倍の過大評価となっていることを示したことにより、大気化学・エアロゾルのコミュニティ(Aerosols and Chemistry Model Intercomparison Project : AerChemMIP)以外には十分に理解されていないSLCF排出量の気候モデリングにおける重要性を喚起した点で意義が大きい。具体的には、CMIP6気候モデルにおけるBC濃度の再現性の問題を直接示したことは、CMIP実験に使用するインベントリは観測に基づき十分に検証をした上で使用することの重要性をAerChemMIPだけでなく、幅広くCMIPコミュニティにアピールするために有効な成果となった（成果2）。

IPCC報告書で引用される気候モデル実験の結果においては、マルチモデルアンサンブルのばらつきに基づいて気候モデルの不確実性評価が行われているが、それに対してSLCF排出量に含まれる不確実性が気候シミュレーションに与える影響に関しては、このような定量的な評価は行われておらず、単一のインベントリ（CEDS）が過去再現実験に適用されている点に警鐘を鳴らした点も意義がある。本研究ではCMIP6に参加した気候モデルMIROC6を用いて、大気海洋結合アンサンブル計算によるインベントリ比較実験を行い、SLCF排出量の不確実性が地上気温や降水量に与える影響を定量的に評価した。その結果、CEDS(CMIP6)インベントリを用いたCMIP6過去再現実験はアジア域のエアロゾルの過大評価によって、2010年代の中国、インド、東南アジアにおいて地上気温が統計的に有意に低くなるとともに、降水量についても主に中国南部で有意に減少することがわかった。さらに、CEDS(CMIP6)インベントリを、2000年代後半から中国で導入された大気質政策による排出削減が行われなかったシナリオと見なせば、下方修正されたCEDSv2021を用いた感度実験との差は、中国における大気汚染対策の結果生じた気候応答に相当すると考えることができる。すなわち、2000年代後半からの中国におけるエアロゾルの減少は、冷却効果の減少によってアジアでの地域的な温暖化に寄与するとともに、中国で降水量の増加をもたらすことが示唆された。

CO長期計算による東アジア排出量の検証については、20年間の長期タグトレーサー実験を行い最新の複数のインベントリに加えて、サブテーマ1による逆推計の排出量（TCR-2）についても逆推計システムとは異なる化学輸送モデルを用いて定量的に検証した。TCR-2のCO排出量を用いた実験では、ボトムアップ・インベントリで見られた西日本での過小評価が改善されることがわかり、BC/CO比法に使用されるCO排出量を独立した手法で妥当性を確かめることができた。

サブテーマ3に関しては、これまでの大気汚染影響及び政策の経済評価に関するモデル分析の既存研究では、（例えばGAINS-Asiaモデルのように）日本全国を一つの単位として扱うことが通例であり、国内の異なる地域間の汚染物質輸送の寄与については分析が行われていなかったが、今回、国内主要4圏域（関東、中部、近畿、瀬戸内）を分割して取り組んだ点で新規性が高い。化学輸送モデルCMAQ上で国内主要4圏域（関東、中部、近畿、瀬戸内）の汚染排出をゼロアウトしながらシミュレーション計算を行うことにより、各圏域の汚染が他の圏域にどれだけ寄与するかを表すマトリックスを構築し、地域間移流を簡易的に分析する手法を見出した点は、学術的に新規性があり意義が大きい。分析の結果、日本の各地域においては現在すぐに導入可能な排出削減技術（RACT）の追加導入だけでは汚染低減の余地がすでに限られており、国内全体として汚染削減費用を抑えるためには経済的規制手段を積極的に用いることが効果的であることがわかった点も、環境経済学の分野で価値が高い。労働供給に関する社会経済データに、大気汚染の観測データ、CMAQを用いた要因分析の結果、またNASA大気データなどを統合した学際色のある分析であり、それを通して経済学的な厳密性を追求している点でユニークな方法である（成果14）。

<環境政策等へ既に貢献した研究成果>

本課題は、【重点課題⑨】「地球温暖化現象の解明・予測・対策評価」および【重点課題⑦】「気候変動の緩和策に係る研究・技術開発」に該当するとともに、行政ニーズ（2-3）「燃烧起源SLCFの排出量把握と削減効果の評価による気候変動政策手段としての可能性探求」に該当する。

このため、「SLCFに関するIPCC AR7や北極評議会の動向に関する科学側支援の強化、国内体制の強化」の貢献を行った。特に、日本として遅滞なく、かつ科学的合理性を備えて政策対応の支援を行うため、国立環境研究所「GHG-SLCF インベントリ高度化連携研究グループ」

(<https://esd.nies.go.jp/ja/about/organization/inventory/>)とも協力して、本課題の参画者と、温室効果ガスインベントリオフィスの間で情報交換を進め、国際動向を踏まえた「インベントリ関連研究エフォートの集約」、「行政・実務・研究の連携強化」など、今後の日本国SLCF排出インベントリ策定も見据えて進めた。

本課題における最大の政策貢献は、専門家向けの論文等だけでなく、国内外の政策決定者が参照しやすい短いレポートの冊子（約25ページ）を作成し、「East Asian Black Carbon Emission Report 2024（東アジアのBC排出量報告書2024年版）」として2025年3月31日に公表したことである（図20）。

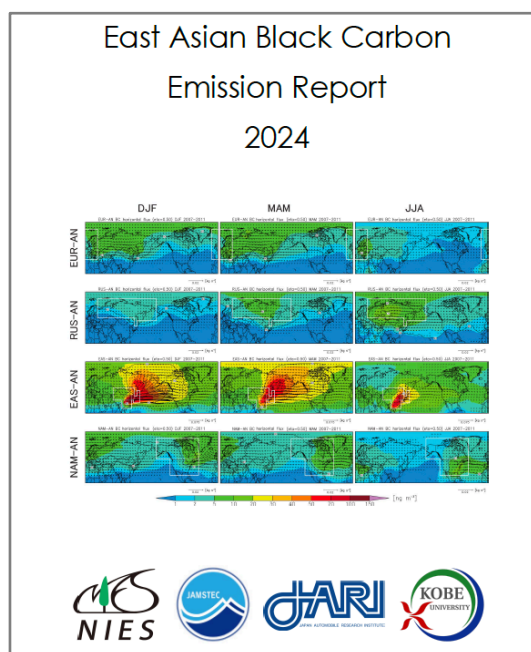


図20 2025年3月31日に公表したEast Asian Black Carbon Emission Report 2024（東アジアのBC排出量報告書2024年版）」のカバー

個別の政策貢献は、(1) IPCC第7次評価報告書におけるSLCF排出量計算方法論の策定、(2) 北極評議会における CH_4 ・BC排出量報告、(3) WHOの新環境基準ガイドラインに沿った大気汚染対策（今後見込まれる成果）、の3点である。

(1) IPCC第7次評価報告書でのSLCF排出量計算方法論の策定

2023年にIPCC事務局より、第7次評価報告書（AR7）で作成予定の「SLCF排出量計算に関する方法論報告書」のスコーピング会合（2024年2月）への専門家推薦の要請が日本政府にあり、政府推薦の結果、谷本、金谷が参加した。本スコーピング会合の結果がIPCC総会で承認され、SLCFインベントリ方法論報告書2027「2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-Lived Climate Forcers」の執筆者（約200名以上の想定）として、本課題からは金谷、森川が選ばれ、執筆活動を開始した。特に、インベントリ作成の際の課題や方法論の在り方などについて、ボトムアップ方式に加えて衛星や現場観測からのトップダウン型の排出量推計実施の有効性をインプットした。今後も、日本としてこの動きに遅滞なく、かつ科学的合理性を備えて政策対応できるよう貢献する。

(2) 北極評議会でのCH₄・BC排出量報告

日本政府は北極評議会にオブザーバー国として加盟しており、北極海航路の利用といった社会経済的な関与だけでなく、北極の環境に関する科学的知見や環境政策への貢献を強化する「北極外交」を推進している。オブザーバー国は「BC及びCH₄専門家会合（EGBCM: Expert Group on Black Carbon and Methane）」から「BC/CH₄排出量の隔年National Report（Biennial National Report）」の提出を求められ、外務省がフォーカルポイントとして国内に照会して、研究者が作成、外務省経由で提出していた。CH₄についてはGIO（温室効果ガスインベントリオフィス）のレポートを参照できるが、BCについては環境省PM2.5等大気汚染物質排出インベントリに関わっている研究者に作業を依頼していた。そこで、本課題で研究者側での体制や情報を整理することで、研究側からの行政支援をスムーズかつ迅速に行なった（図21）。2024年は、作業依頼から1ヶ月以内の提出締め切りだったにも関わらず、作成から提出まで対応することができた。

これらの排出量を報告したオブザーバー国は、非北極圏国であっても北極圏国と対等な地位でExpert Groupに参加して今後の対策につき議論に参加することができ、実際にEGBCMの日本代表メンバーの谷本が、各国のNational Reportを取りまとめて作成する「EGBCM 4th Summary of Progress and Recommendations (2025)」の編集会合に参加した。韓国・中国も日本と同様に北極評議会のオブザーバー国であるが、両国は国別排出量を報告しておらず、東アジア地域のオブザーバー国として日本が継続的に推計値を報告することは、北極評議会への日本の関与をさらに強めることにも結び付く。

また、北極評議会に貢献するEUプロジェクトである「Synthesis of Arctic Council Member and Observer Country Emissions of Black Carbon and Methane. Arctic Black Carbon impacting on Climate and Air Pollution (ABC-iCAP) Project Technical Report 2」にも日本の排出量を報告し、谷本、金谷、森川がcontributorとして記載された。

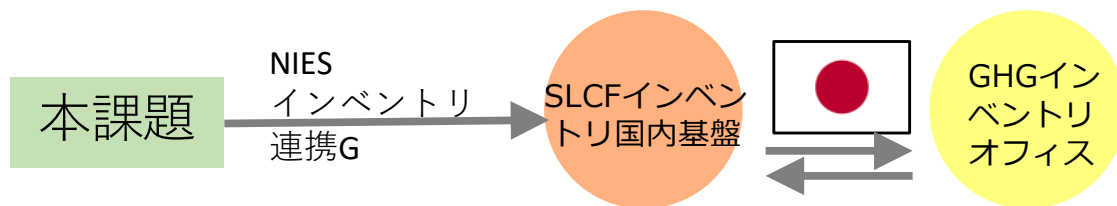


図21 SLCFとGHGのインベントリ国内連携

その他、環境省中央環境審議会 大気・騒音振動部会：サブ課題代表の森川が委員を務めており、「今後の水・大気環境行政の在り方(意見具申)」の作成の議論に参加し、「2050CN実現と水・大気環境改善の両立及び相乗効果の活用」でも挙げられているSLCPs(SLCF)の実態把握や総合的な取り組みに対し、PM2.5EI等の知見を多いに利用することができる旨を述べた。今後も本課題の知見を共有してゆく。

<環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

(1) IPCC第7次評価報告書でのSLCF排出量計算方法論の策定（継続）

IPCC AR6では、中国からのBC排出量を大幅に過大評価してしまい、AR7では気候モデルシミュレーションの入力値として、東アジアからのBC (SLCF)排出量として適正な排出量を使用してモデル計算をすることは世界的に重要な課題である。本研究での排出量推定・評価は、AR7のモデル相互比較CMIP7に用いられるCEDS2024年版を評価する位置づけとなる。AR6の場合よりは改善したが、それでも今回、2021年ごろ

(AR7でのpresent day（「現在」の基準年））にて、中国のBC排出量が依然として過大評価となっている点が明らかとなった。このことは、今後の気候影響シミュレーションを解釈する上で重要なポイントの1つであり、引き続き大気観測と化学輸送モデルを用いたトップダウン推計によって監視を続けることの重要性を示している。

本研究で得られたトップダウン型のSLCF排出量推計法による、ボトムアップ排出量の迅速な評価は、排出量検証の優れた慣行(good practice)として、SLCFインベントリ方法論報告書2027「2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-Lived Climate Forcers」に記述されるのに値するものであ

り、世界の全体の動向を踏まえ、執筆者として検討を進める。また、BCの排出係数の不確かさは測定法の選択にも起因する点についても、同方法論報告書にて記述が求められており、長期にわたる2種の計測器による比較結果は、参照例としてふさわしいものである。

(2) 北極評議会でのCH₄・BC排出量報告（継続）

PM2.5排出量の推計値（インベントリ）を介さず、PM2.5の排出係数とBCの発生源プロファイルを組み合わせた手法を用いることにより、GHGインベントリと遜色ない迅速さ（正確にはGHGより半年程度の遅れ）でBC排出量推計が可能になったことから、北極評議会に最新年のBC排出量推計値を提出できるようになった。排出量の変化やトレンドをより早く確認でき、対策効果の現れ方や、対策の方向性の議論を迅速に行えるようになる。

また、北極評議会では2025年までに2013年比で25%から33%のBC排出量の削減目標を設けているが、トップダウン推計によると、2022年と2023年の排出量は2013年比で47%と51%の減少と算出され、北極評議会のオブザーバー国である中国はこの削減目標を達成する見込みであるという重要な知見も得ることができた。アジアから排出されたBCは長距離輸送により北極域にも運ばれ、北極の気候変動に影響する点でも重要である。北極評議会EGBCMへの中国、韓国の研究者の関与は弱く、一方で、欧州の研究者ではこうしたアジアの排出の解析をすることは困難である。日本がアジアの影響について客観的な解析を行い、北極評議会に共有することは大きな価値がある。

(3) WHOの新環境基準ガイドラインに沿った取り組み

2021年9月に公表されたWHOの新環境基準ガイドラインは、PM2.5の日平均値15 $\mu\text{g m}^{-3}$ 、O₃の季節最大値30 ppbと、ガイドラインとはいえ基準の達成が非常に困難な数値となっている。

そこでPM2.5を対象とした分析を行なった結果、日本においては過去数十年で大気汚染の低減が大幅に図られた一方、例えばPM2.5に関してはWHOガイドラインに示されている濃度水準を超えている地域が多くあるなど、汚染水準をさらに下げる必要は存在することがわかった。また、2050年にむけた長期的なPM2.5削減に関しては、様々な脱炭素技術を導入することにより国内排出の更なる削減が可能となるものの、WHOガイドライン基準を達成するためには大陸からの越境移流分の現在想定されている以上の減少が必要となることがわかった。これらの結果は今後の大気汚染規制政策の立案に直接的に活用可能な情報となると考えられる。

特に日本のような比較的低水準のPM2.5汚染であっても、大気汚染が労働供給に顕著な影響を与えることを示した点は政策的にも意義がある。近年WHOの基準値引き下げに伴い、先進各国においても環境基準の引き下げが実行・検討されてきているが、この結果はそうした基準の引き下げ（と実際の汚染水準の抑制）は労働供給損失を解消する形で、社会にコベネフィットをもたらすことを示すものである。さらに、わが国の国内・国際政策へも示唆をもたらすものである。国内政策の面では、大気汚染が中小企業や製造業において労働供給損失が顕著であり、大気質の改善がこれら企業にとって顕著なベネフィットを生む。国際政策の面では、わが国のPM2.5のうち大半はアジア大陸からの越境汚染であり、さらに限界排出削減費用の分析によれば国内での排出削減は高額になり得ること、中国家庭部門からの排出削減策にはまだまだ比較的低コストなものが残っていることから、排出削減と大気質の改善には東アジア地域全体での協調が不可欠であることを示唆している。本研究の推計では、PM2.5水準を10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ からWHO基準の5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に低下させることで、労働供給は約1.5%増加、平均的な時間当たり給与額を用いて金額換算すると年間で7600億円相当のコベネフィットが発生することになり、排出削減の費用対効果を議論する際には、こうした労働供給への影響を踏まえ、より包括的な社会的費用の計上をすることが求められる。

その他、以下の政府委員会等への貢献が挙げられる。

環境省中央環境審議会・大気汚染物質小委員会、自動車排出ガス専門委員会：サブ課題代表の金谷、森川が委員を務めており、本課題の知見をPM2.5濃度削減、基準値達成のための方策として提供可能である。特に、日本のBC排出量は、必要に応じて大気汚染物質としての粒子状物質(PM)排出量をベースとしEC(元素炭素)/PM2.5組成比率により推計してきたが、ベースとなるPM排出量結果が必要であり、推計結果を得るまで時間がかかるという難点があった。本研究ではPM排出量を介さず、必要な統計資料に着目し、BCの全国年間排出量を約1年半遅れで推計する手順を整備した。また、大気モデルを用いた観測値との検証では日本のBC排出量はかなり過小ということが示されている。最新のEC/PM2.5組成比率の見直しによりEC比

率は増加し、過去の北極協議会へのBC排出量の提供値より約2割増となったが、BCに着目した発生源の洗い出しが必要と考えられた。

文部科学省・気象庁・環境省・経済産業省IPCCAR6WG1国内幹事会、IPCCAR6国内連絡会：サブ課題代表の金谷が委員を務めており、本課題の知見を我が国のIPCCへの貢献拡大のための議論として提供可能である。

国土交通省気象庁品質評価科学活動懇談会：サブ課題代表の金谷が委員を務めており、本課題の知見を気象庁が行っているWMO/GAW全球大気監視計画に沿ったGHGs、オゾン、エアロゾル、放射計測の品質向上に関する議論として提供可能である。

文部科学省 地球観測推進部会：課題代表の谷本が委員を務めており、SLCFに関する地球観測の長期維持や連携については体制の強化が望まれてきたところ、本課題の知見を提供し、関係各府省や機関等が連携して地球観測を推進するための実施方針や実施計画の策定に貢献可能である。

東京都環境審議会、茨城県環境審議会、茨城県地方港湾審議会、茨城県環境影響評価審査会、長野県環境影響評価技術会、千葉市環境影響評価審査会、九都県市低公害自動車指定委員会：サブ課題代表の森川が委員を務めており、本課題の知見を地方自治体の環境対策、気候変動対策のための方策として提供可能である。

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

<全体達成状況の自己評価>

3. 目標どおりの成果をあげた

「燃焼起源SLCFの東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築」（国立環境研究所、谷本浩志）

全体目標	全体達成状況
排出インベントリ、野外・衛星観測、モデルを組み合わせ、日本を中心に、東アジア諸国における国別排出量評価を「東アジア地域におけるBCの収支レポート2024年版」としてまとめ、公開する。GHGと同程度に迅速な、燃焼起源SLCF排出量の総合的MRVシステムの方法論を構築し、国内基盤とする。	東アジア諸国における国別排出量評価を「East Asian Black Carbon Emission Report 2024（東アジアのBC排出量報告書2024年版）」としてまとめ、2025年3月31日に公開した（成果84）。また、BCについて、GHGと同程度に迅速な排出量の総合的MRVシステムの方法論を構築して国内基盤とできた。これにより、1ヶ月以内の提出が求められた北極評議会へのインプットを遅滞なく実施できた。また、IPCCインベントリタスクフォースによる2027年SLCFインベントリ方法論報告書へ向けては、SLCF専門家会合、スコーピング会合に参加したのち2名が執筆者に選出され、本課題の方法論や成果も執筆に加えていけるなど、日本の先導性を発揮できる状況にある。 サブテーマ1と2では目標を上回る成果を上げ、全体としては、目標通りの達成状況であるといえる。

<サブテーマ1 達成状況の自己評価>

2. 目標を上回る成果をあげた

「野外・衛星観測とデータ同化を用いた国別排出量の迅速推計」（海洋研究開発機構、金谷有剛）

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 達成状況
観測データを利用したトップダウン型の排出推計について、データ同化などの手法を整備して信頼度を向上させる。日本を含む東アジア諸国からの国別排出量とその推移を迅速に評価するシステムとして実証する。ボトムアップ推計法による結果の検証に資する情報を提供する。	福江島でのブラックカーボン(BC)等の高精度計測の長期化、モデル比較法、BC/CO（一酸化炭素）排出比法や衛星データ同化システムの改良により、観測と整合性のあるトップダウン型の東アジア国別BC, CO, NOx排出量を至近年まで推定し、迅速性を実証した（成果84）。ボトムアップ型の推計値で

	<p>は、中国からのBC・CO排出量について、ボトムアップインベントリの値がそれぞれ過大・過小評価となっており修正が必要なことを、本課題開始前と比べて確実度を大幅に向上し、取りまとめることができた。</p> <p>TROPOMI衛星データなどを利用した化学データ同化により、窒素酸化物等について迅速な排出量評価が可能であることを実証した（成果9）。航空機観測のデータ解析から、当初の計画になかったフィリピン・マニラからの排出量を推計した（成果15）。</p>
--	---

<サブテーマ2達成状況の自己評価>・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「排出インベントリの改良と気候・大気質モデリングへの反映」（国立環境研究所、谷本浩志）

サブテーマ2目標	サブテーマ2達成状況
<p>ボトムアップ推計とトップダウン推計の比較から、国際モデル相互比較実験や、将来予測に用いられてきた排出インベントリ・シナリオの複数について妥当性を定量的に検証する。また、東アジアについて最新年の排出インベントリを修正してモデリングに組み込み、気候変動や越境汚染への影響度を推定する。</p>	<p>中国のBC排出量を迅速にトップダウン推計するシステムを構築して長期推計を行い、IPCC報告書のための国際モデル相互比較実験であるCMIPや北極評議会のSLCF報告書で使用されたインベントリ・将来シナリオを定量的に検証し、特に2024年11月に公開されたCMIP7のためのインベントリ（CEDSV2024-11-25）と比較した結果を論文投稿、CMIP6参加気候モデルは中国のBC排出量の過大評価によって東アジア域のBC濃度がマルチモデル平均で約2倍の過大評価、この誤差によるBC直接放射強制力への影響を定量的に評価した（成果2）ことで、サブ2第一の研究目標「ボトムアップ推計とトップダウン推計の比較から、国際モデル相互比較実験や、将来予測に用いられてきた排出インベントリ・シナリオの複数について妥当性を定量的に検証する」の目標を達成することができた。</p> <p>さらに、CEDS(CMIP6)インベントリを用いたCMIP6過去再現実験はアジア域のエアロゾルの過大評価によって、2010年代の中国、インド、東南アジアにおいて地上気温が統計的に有意に低くなるとともに、降水量についても主に中国南部で有意に減少することがわかった。本課題の主な対象成分であるBCに加えてSO₂についても中国の排出量の過大評価を見出すとともに、それがCMIP6の過去再現実験に与えた影響を評価したことは、サブ2のもう一つの研究目標「東アジアについて最新年の排出インベントリを修正してモデリングに組み込み、気候変動や越境汚染への影響度を推定する」の研究目標を超える成果である。</p>

<サブテーマ3達成状況の自己評価>・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「日本の排出インベントリの高精度化と削減政策に関する経済分析」（日本自動車研究所、森川多津子）

サブテーマ3目標	サブテーマ3達成状況
<p>BC 等SLCF のボトムアップ排出インベントリを、GHG と同程度の迅速性で整備できるよう、算出根拠となる排出原単位等のデータ整備、推計手順のマニュアル化を行う。関連する国内の排出インベントリの複数推計値を俯瞰し、統合評価して高精度化する。また、より早期の推計を目指して、民間データの利用可能性及び公式統計値との代替性を評価する。</p> <p>また、気候変動とアジア大陸から日本への越境汚染を考慮しつつ、現状及び将来の排出動態や可能な排出削減策について地域の地理・経済的特性等も踏まえた経済分析を行う。費用と便益の両面において合理的な政策について経済学的な評価を行い、日本の環境基準及び北極環境に関する環境政策の議論に貢献可能な対策提言とする。</p>	<p>排出インベントリ構築は、BC排出量の迅速推計を行い、温室効果ガスインベントリと同程度（半年遅れ）で公表可能になった点で、目標を達成した。関連する国内排出インベントリの統合評価から高精度化につなげる目標は、各々の排出インベントリの持つ役割により特徴が大きく異なり、特徴を整理したにとどまったものの、（計画当初の予定ではなかった）BC排出インベントリをはじめ、大気汚染物質の排出量データを国際的な排出インベントリ構築の取り組みに反映できたことは、本来の排出インベントリの意義としての目標を達成した（成果13）。</p> <p>経済分析は、日本国内の地域単位での削減対策・政策に関する現在・将来の費用評価を、越境汚染による寄与ならびに日本国内各地域の地理・経済的特性も考慮した形で評価し、現実的に即時導入が可能な削減技術（RACT）をベースにした削減費用の分析（成果69, 70）、排出削減のコベネフィットとして日本におけるPM2.5の労働供給への影響に関する実証分析など、具体的な定量経済評価を得て、政策含意を直接的に示す成果を得た点で、当初予定されていた分析が行われ、実際に定量的な結果を得るまでに至ったこと、論文数は少ないが、労働供給への影響の分析についての論文が環境経済学分野のトップジャーナルに採択されたことは、研究目標を達成できたと考える（成果14）。</p>

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	15
査読無し論文	0
著書	1
「国民との科学・技術対話」の実施	11
口頭発表・ポスター発表	54
マスコミ等への公表・報道等	1
成果による受賞	1
その他の成果発表	1

1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果 番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋)
1	Sekiya, T., K. Miyazaki, H. Eskes, K. Bowman, K. Sudo, Y. Kanaya, M. Takigawa, The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative budget, Science Advances, 9, eadh2688 (2023).
2	Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, F. Taketani, A. Matsuki, Evaluation of black carbon concentration levels and trends in East Asia from CMIP6 climate models: Comparison to long-term observations in Japan and biases due to Chinese emissions, SOLA: Scientific Online Letters on the Atmosphere, 19, 239 - 245 (2023).
4	Yahara, K., Yamaji, K., Taketani, F., Takigawa, M., Kanaya, Y., Ohata, S., Kondo, Y., and Koike, M., Controlling factors of spatiotemporal variations in black carbon concentrations over the Arctic region by using a WRF/CMAQ simulation on the Northern Hemisphere scale, Polar Sci., 41, 101093, https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101093 (2024).
5	Deng, Y., Tanimoto, H., Ikeda, K., Kameyama, S., Okamoto, S., Jung, J., Yoon, Y. J., Yang, E. J., Kang, S.-H., Measurement report: Shipborne observations of black carbon aerosols in the western Arctic Ocean during summer and autumn 2016-2020: boreal fire impacts, Atmos. Chem. Phys., 24, 6339-6357, https://doi.org/10.5194/acp-24-6339-2024 (2024).
6	Itahashi, S., Terao, Y., Ikeda, K., and Tanimoto, H., Source identification of carbon monoxide over the greater Tokyo area: Tower measurement network and evaluation of

	global/regional model simulations at different resolutions, Atmos. Environ. X, 23, 100284, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100284 (2024).
8	Narita, D., and Motohashi, K., Reducing Arctic black carbon emissions: Features of national regulatory systems as a key factor, Polar Science, 41, 101065 (2024).
9	Sekiya, T., Emili, E., Miyazaki, K., Inness, A., Qu, Z., Pierce, R. B., Jones, D., Worden, H., Cheng, W. Y. Y., Huijnen, V., and Koren, G., Assessing the relative impacts of satellite ozone and its precursor observations to improve global tropospheric ozone analysis using multiple chemical reanalysis systems, Atmos. Chem. Phys., 25, 2243–2268, https://doi.org/10.5194/acp-25-2243-2025 (2025).
11	谷本浩志, 藤縄環, 池田恒平, 杉田考史, 猪俣敏, Müller Astrid, 最新の衛星観測はどう大気汚染政策に役立つか?—衛星観測と地上観測の相補的役割—, 大気環境学会誌, 60(3), 21–30, https://doi.org/10.11298/taiki.60.21 (2025).
13	Li, M., J. Kurokawa, Q. Zhang, J.H. Woo, T. Morikawa, S. Chatani, Z. Lu, Y. Song, G. Geng, H. Hu, J. Kim, O. R. Cooper, B. C. McDonald "MIXv2: a long-term mosaic emission inventory for Asia (2010–2017)", Atmos. Chem. Phys., 24, 3925–3952 (2024) https://doi.org/10.5194/acp-24-3925-2024
14	Yamada, D., and Narita, D., Effects of Air Pollution on Labor Supply: Evidence from Japan, Journal of Environmental Economics and Management (2025) https://doi.org/10.1016/j.jeem.2025.103178

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動は、合計で11件行った。そのうち特に重要なものとして以下が挙げられる。

金谷有剛、第25回日本気象学会中部支部公開気象講座にて講演、「エアロゾルは最新のIPCC報告書でどう語られたか」、オンライン（2022年9月3日、参加者約80名）

山地一代、テクノオーシャン2023にて、環境研究総合推進費研究概要紹介(パネル紹介)、神戸ポートターミナル（2023年10月7日）

谷本浩志、一般財団法人大気環境総合センター定期セミナー（第4期定期セミナー 環境省・環境研究総合推進費新規研究紹介）にて、技術者・企業に講演、「燃烧起源SLCFの東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築に向けて」、オンライン（2023年2月28日、参加者約50名）

谷本浩志、国立環境研究所公開シンポジウム2023にて、一般市民に成果紹介、「アジアのブラックカーボンと気候変動」、オンライン（2023年6月22日、参加者約200名）

谷本浩志、国立環境研究所公開シンポジウム2024にて、一般向け講演、「地球環境研究のこれまでとこれから～新たな研究のあり方～」、イイノホール・オンライン（2024年6月12日、参加者約500名）

1. 7. 国際共同研究等の状況

< 国際共同研究の概要 >

国立環境研究所とフィンランド国立環境研究所(SYKE)の研究協力協定(MoC)において、北極域を含む環境の保全と改善、および気候変動問題を含む持続可能な開発に関する課題に対する研究協力を行なっている。SLCFに関しては「NIES-SYKE Meeting for Future Collaboration on Black Carbon and SLCP Research」のセミナーシリーズにおいて、排出インベントリやシナリオ、観測、モデリングの幅広い研究内容を共有している。2023年3月3日には、コロナ後初の対面ワークショップ（ハイブリッド）を開催し、NIES及びSYKE以外に両国の関連研究機関から20名を超える研究者が参加して、SLCFの観測、モデル、排出インベントリ、将来シナリオに関する研究発表と今後の連携強化について議論を行った。また、国立極地研究所が毎年開催している北極関係のシンポジウム「International Symposium on Arctic Research (ISAR)」でも、本課題のJAMSTECとNIES関係者がSYKEとともにSLCFに関するセッションをホストした。今後も定期的にセミナーや相互訪問を通じて情報交換を行う予定である。なお、SYKEのカウンターパートは、Mikael Hilden（部長）、Niko Karvosenoja（室長）、Ville-Veikko Paunu（研究員）、Eeva Primmer（所長）である。FMIのカウンターパートはAntti Hyvärinen（室長）、Aki Virkkula（研究員）、Aki

Tsuruta（研究員）である。

こうした連携により、SYKEは、北極評議会専門家会合等の北極における気候及び環境変化に関する国際研究プロジェクトの場で、本課題及び広く日本の研究成果を共有してくれており、我が国の北極研究の国際的認知度を高める一助となっている。北極評議会に關係するEUプロジェクトABC-iCAP (Arctic Black Carbon impacting on Climate and Air Pollution)(<https://abc-icap.amap.no/>)では北極圏に影響するBCの排出インベントリをアジア諸国も含めて調査することになり、SYKEの紹介により我々も関与を開始した。Sabine Schindlbacher博士（オーストリア連邦環境庁）がカウンターパートである。また、2023年6月には、北極評議会・北極圏監視評価プログラム(AMAP)に対し、ブラックカーボン等SLCFのアジアから北極域への長距離輸送に関し、データや情報提供を行った。Simon Wilson 氏(AMAP, ノルウェー)らと協力し、SLCFアセスメントレポートのスコーピングや取りまとめなどへの協力を行った。課題代表の谷本は、北極評議会EGBCM (Expert Group on Black Carbon and Methane)のメンバーであり、今後も情報提供を続ける。

IPCC AR7サイクルでの2027SLCFインベントリ方法論報告書では、サブ課題1代表者の金谷有剛が第1巻 一般ガイダンスの代表執筆者(LA)として、CLA（統括執筆者）を務めるSteven Smith (米国)やVeronika Ginzburg (ロシア)や他のLAらと連携し、執筆活動を開始した。

Future EarthのGlobal Research ProjectであるIGAC (International Global Atmospheric Chemistry, 国際地球大気化学協同計画)では、国際科学スティアリングメンバーをサブ課題1代表者の金谷有剛が務めており、Co-chairのClare Murphy (University of Wollongong, Australia)、Abdus Salam (University of Dhaka, Bangladesh)らと大気化学の国際研究開発戦略を議論し、実装している。また、IUGG/IAMAS傘下のiCACGP(international Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution, 大気化学と地球汚染に関する国際委員会)では、課題代表の谷本が副委員長を務めており、広く地球科学分野においてもSLCFの国際研究開発戦略を議論している。上述IGACとIASC (International Arctic Science Committee, 国際北極科学委員会)の合同による国際的な北極研究プロジェクトであるPACES (air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies, <http://www.igacproject.org/PACES>)において、サブ課題代表者の金谷が研究推進メンバーとして加わっている。リード役のSteven Arnold (リーズ大、英国)、Kathy Law (Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales、フランス)らと国際的な北極域の研究戦略を議論し、研究開発を実施している。同様に、IGACのプロジェクトであるACAM (Atmospheric Composition and the Asian Monsoon)では課題代表者の谷本が研究推進メンバーとして加わっている。リード役のMian Chin (NASA、米国)、Hans Schlager (DLR、ドイツ)らと国際的な北極域の研究戦略を議論し、研究開発を実施している。さらに、IGACのアジアにおける活動であるIGAC – MANGO (Monsoon Asia and Oceania Networking Group) (モンスーンアジア・オセアニアネットワーキンググループ)において、本課題代表の谷本が代表を務めており、本研究の内容をアジア・オセアニア地域の第一線の大気化学者と共有するとともに、定期的な会合においてアジアにおけるSLCF研究の議論を主導している。

その他、課題代表者の谷本はCEOS AC-VC (Committee on Earth Observation Satellites, Atmospheric Composition-Virtual Constellation)、WMO GAW Expert Team on Atmospheric Composition Network Design and Evolution (ET-ACNDE)のCo-Chairを務め、SLCFの衛星観測、広く地球観測ネットワークのデザインについて、Ben Veihelmann (European Space Agency)、Barry Lefer (NASA)、Richard Eckman (NASA)とともに国際的なイニシアチブを形成している。

中国からSLCF排出量変化の評価に関しては、Zvigniew Klimont博士 (国際応用システム研究所(IIASA)、オーストリア)と連携し、ECLIPSEversion6bに関する詳細データ（活動量、燃料種別、技術ごとの推計パラメータ）をもとに分析を進め、メールでの議論等で共同研究を進めている。

EMeRGe-Asia航空機観測国際サイエンスチームにサブ課題1代表者の金谷有剛がメンバーとして加わっており、計画をリードしているAndrés Maria Dolores Hernández博士、John Philip Burrows博士（ブレーメン大学、ドイツ）らと、EMeRGe-Asia航空機観測・モデルデータを共有し、オンライン会合などで解析の進捗を議論している。

TROPOMI衛星観測に基づく化学データ同化システムの開発、およびTCRによる排出量推計・大気成分濃度再解析の高度化は、サブ課題1分担者の関谷高志が、Henk Eskes博士（オランダ王立気象研究所、オランダ）、宮崎和幸博士（NASAジェット推進研究所、米国）らと共同で進めているもので、定期的なオンライン会合や人的交流で開発や解析を継続している。

GEMS静止衛星観測の地上検証・データ利用については、サブ課題1代表者の金谷有剛がサイエンスチー

ムメンバーに加わっており、Jhoon Kim教授（延世大学、大韓民国）、Limseok Chang博士（韓国国立環境研究院、大韓民国）、Yongjoo Choi博士（韓国外国語大学校、大韓民国）らと解析結果を共有し、定期的な会合や人的交流により、研究開発を継続している。

以上が、当推進費の研究課題に深く関連する国際共同研究や人的交流の概況である。

<相手機関・国・地域名>

機関名（正式名称）	（本部所在地等の）国・地域名
フィンランド国立環境研究所(SYKE)	フィンランド
IPCC	スイス連邦
IGAC	米国
国際応用システム研究所(IIASA)	オーストリア
ブレーメン大学	ドイツ
オランダ王立気象研究所	オランダ
NASAジェット推進研究所	米国
韓国国立環境研究院	大韓民国
延世大学	大韓民国
韓国外国語大学校	大韓民国

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
金谷有剛	サブテーマ1リーダー 東京大学理学部化学科卒業、同大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了博士（理学） 現在、海洋研究開発機構・地球環境部門・地球表層システム研究センター センター長。IPCC AR6 WG1 Chapter 6 (SLCFs)レビューエディター、IPCC AR7 SLCFインベントリ方法論報告書リードオーサー、日本大気化学学会会長（2025年6月まで）を務める。 専門は大気化学、地球環境物質科学。
谷本浩志	研究代表者及びサブテーマ2リーダー 東京大学理学部化学科卒業、同大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了博士（理学） 現在、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。 これまで、地球大気化学国際協同研究計画 (IGAC)共同チェア、日本大気化学学会会長等を歴任。現在、地球観測衛星委員会(CEOS)大気組成バーチャルコンステレーション

	(AC-VC)共同チェア、大気化学と地球汚染に関する国際委員会(iCACGP)副議長、日本学術会議第26期連携会員を務める。 専門は大気化学、地球規模大気汚染、衛星による地球観測。
森川多津子	サブテーマ3リーダー 北海道大学工学部卒業 博士（工学） 北海道大学工学部機械工学科助手を経て、現在、一般財団法人日本自動車研究所 主席研究員。 大気環境学会論文賞(2012年、2021年)、自動車技術会技術部門貢献賞(2016)を受賞。 2023年度より、中央環境審議会大気・騒音振動部会委員を務める。 専門は大気環境工学、研究テーマは大気シミュレーション、排出インベントリ。

2. 研究成果発表の一覧

(1) 産業財産権

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

(2) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2023	Sekiya, T., K. Miyazaki, H. Eskes, K. Bowman, K. Sudo, Y. Kanaya, M. Takigawa, The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative budget, Science Advances, 9, eadh2688 (2023).	1	有
2	2023	Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, F. Taketani, A. Matsuki, Evaluation of black carbon concentration levels and trends in East Asia from CMIP6 climate models: Comparison to long-term observations in Japan and biases due to Chinese emissions, SOLA: Scientific Online Letters on the Atmosphere, 19, 239 - 245 (2023).	2	有
3	2024	Müller, A., Tanimoto, H., Sugita, T., Patra, P. K., Nakaoka, S., Machida, T., Morino, I., Butz, A., and Shiomi, K.: Ship- and aircraft-based XCH ₄ over oceans as a new tool for satellite validation, Atmos. Meas. Tech., 17, 1297–1316, https://doi.org/10.5194/amt-17-1297-2024 (2024).	2	有
4	2024	Yahara, K., Yamaji, K., Taketani, F., Takigawa, M., Kanaya, Y., Ohata, S., Kondo, Y., and Koike, M., Controlling factors of spatiotemporal variations in black carbon concentrations over the Arctic region by using a WRF/CMAQ simulation on the Northern Hemisphere scale, Polar Sci., 41, 101093, https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101093 (2024).	1	有
5	2024	Deng, Y., Tanimoto, H., Ikeda, K., Kameyama, S., Okamoto, S., Jung, J., Yoon, Y. J., Yang, E. J., Kang, S.-H., Measurement report: Shipborne observations of black carbon aerosols in the western Arctic Ocean during summer and autumn 2016–2020: boreal fire impacts, Atmos. Chem. Phys., 24, 6339–6357, https://doi.org/10.5194/acp-24-6339-2024 (2024).	2	有
6	2024	Itahashi, S., Terao, Y., Ikeda, K., and Tanimoto, H., Source identification of carbon monoxide over the greater Tokyo area: Tower measurement network and evaluation of global/regional model simulations	2	有

		at different resolutions, Atmos. Environ. X, 23, 100284, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100284 (2024).		
7	2024	Yasunari, T. J., Narita, D., Takemura, T., Wakabayashi, S., and Takeshima, A., Comprehensive impact of changing Siberian wildfire severities on air quality, climate, and economy: MIROC5 global climate model's sensitivity assessments, Earth's Future, 12, 4 (2024).	3	有
8	2024	Narita, D., and Motohashi, K., Reducing Arctic black carbon emissions: Features of national regulatory systems as a key factor, Polar Science, 41, 101065 (2024).	3	有
9	2024	Sekiya, T., Emili, E., Miyazaki, K., Inness, A., Qu, Z., Pierce, R. B., Jones, D., Worden, H., Cheng, W. Y. Y., Huijnen, V., and Koren, G., Assessing the relative impacts of satellite ozone and its precursor observations to improve global tropospheric ozone analysis using multiple chemical reanalysis systems, Atmos. Chem. Phys., 25, 2243–2268, https://doi.org/10.5194/acp-25-2243-2025 (2025).	1	有
10	2024	Tanimoto, H., Matsunaga, T., Someya, Y., Fujinawa, T., Ohyama, H., Morino, I., Yashiro, H., Sugita, T., Inomata, S., Müller, A., Saeki, T., Yoshida, Y., Niwa, Y., Saito, M., Noda, H., Yamashita, Y., Ikeda, K., Saigusa, N., Machida, T., Frey, M. M., Lim, H., Srivastava, P., Jin, Y., Shimizu, A., Nishizawa, T., Kanaya, Y., Sekiya, T., Patra, P., Takigawa, M., Bisht, J., Kasai, Y., Sato, O. T., The greenhouse gas observation mission with Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW): objectives, conceptual framework and scientific contributions. Progress in Earth and Planetary Science, 12, 8, https://doi.org/10.1186/s40645-025-00684-9 (2025).	2	有
11	2024	谷本浩志, 藤縄環, 池田恒平, 杉田考史, 猪俣敏, Müller Astrid, 最新の衛星観測はどう大気汚染政策に役立つか? —衛星観測と地上観測の相補的役割—, 大気環境学会誌, 60(3), 21 – 30, https://doi.org/10.11298/taiki.60.21 (2025).	2	有
12	2024	Itahashi, S., Long-term 30-year variation (1990s–2020) of background tropospheric ozone concentration at Japanese remote stations, SOLA, 21, 94–100, https://doi.org/10.2151/sola.2025-012 (2025).	2	有
13	2024	Li, M., J. Kurokawa, Q. Zhang, J.H. Woo, T. Morikawa, S. Chatani, Z. Lu, Y. Song, G. Geng, H. Hu, J. Kim, O. R. Cooper, B. C. McDonald "MIXv2: a long-	3	有

		term mosaic emission inventory for Asia (2010–2017)", Atmos. Chem. Phys., 24, 3925–3952 (2024) https://doi.org/10.5194/acp-24-3925-2024		
14	2024	Yamada, D., and Narita, D., Effects of Air Pollution on Labor Supply: Evidence from Japan, Journal of Environmental Economics and Management, 2025 https://doi.org/10.1016/j.jeem.2025.103178	3	有
15	2024	Ha, P. T. M., Kanaya, Y., Yamaji, K., Itahashi, S., Chatani, S., Sekiya, T., Hernández, M. D. A., Burrows, J. P., Schlager, H., Lichtenstern, M., Poehlker, M., and Holanda, B.: Assessing BC and CO Emissions from China Using EMERGE Aircraft Observations and WRF/CMAQ Modelling, Atmos. Chem. Phys., accepted, 2025.	1	有

(3) 著書

< 著書 >

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
16	2023	Handbook of Air quality and Climate Change, eds. Hajime Akimoto and Hiroshi Tanimoto, Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8 . ISBN-10: 9811527598, ISBN-13: 978-9811527593 eBook ISBN: 978-981-15-2760-9, Print ISBN: 978-981-15-2759-3	2,3

(4) 口頭発表・ポスター発表

< 口頭発表・ポスター発表 >

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ	査読 の有無
17	2022	関谷 高志、宮崎 和幸、Henk Eskes、須藤 健悟、滝川 雅之、金谷 有剛、二次エアロゾル生成に対するCOVID-19ロックダウンの全球規模影響、日本地球惑星科学連合2022年大会、幕張、2022年5月	1	無
18	2022	Yugo Kanaya, Asian Aerosols as air pollutants and SLCFs: IPCC AR6 report and beyond, The 12th Asian Aerosol Conference (AAC) 2022, Taipei and online, June 2022	1	無
19	2022	Yugo Kanaya, IPCC AR6 and aerosol management, The 7th International Conference on Environmental Development Administration 2022 "The Nexus between Environment and Sustainability for the Next Decade", Bangkok and online, August 2022	1	無
20	2022	Yugo Kanaya, Kazuyo Yamaji, Takuma Miyakawa, Fumikazu Taketani, Chunmao Zhu, Yongjoo Choi, Kohei Ikeda, Hiroshi Tanimoto, Daichi Yamada, Daiju Narita, Yutaka Kondo,	1	無

		Zbigniew Klimont, Rapid reduction in black carbon emissions from China and the dominance of the residential sector: evidence from 2009-2022 observations on Fukue Island, Japan, iCACGP-IGAC Joint International Atmospheric Chemistry Conference 2022, Manchester, September 2022		
21	2022	Takashi Sekiya, Kazuyuki Miyazaki, Henk Eskes, Kengo Sudo, Masayuki Takigawa, Yugo Kanaya, The global COVID-19 lockdown impacts on secondary inorganic aerosols, iCACGP-IGAC Joint International Atmospheric Chemistry Conference 2022, Manchester, September 2022	1	無
22	2022	Takashi Sekiya, Kazuyuki Miyazaki, Henk Eskes, Kengo Sudo, Masayuki Takigawa, Yugo Kanaya, A comparison of the impact of TROPOMI and OMI tropospheric NO2 on global chemical data assimilation, Sentinel-5P 5 years anniversary conference (2022), Taormina, October 2022	1	無
23	2022	Yugo Kanaya, Yongjoo Choi, Hisahiro Takashima, Tamaki Fujinawa, Hiroshi Tanimoto, GEMS v1.0 (NO2, HCHO and O3) validation results from GnGval team, The 13th International GEMS workshop, Seoul, November 2022	1	無
24	2022	Yugo Kanaya, Japan session: Overall introduction and state of air pollution research and development, Asia Summit on Global Environmental Measurement & Monitoring, Singapore, December 2022	1	無
25	2022	Yugo Kanaya, Kazuyo Yamaji, Takuma Miyakawa, Fumikazu Taketani, Chunmao Zhu, Yongjoo Choi, Kohei Ikeda, Hiroshi Tanimoto, Daichi Yamada, Daiju Narita, Yutaka Kondo, Zbigniew Klimont, Synthesis of bottom-up and observation-based black carbon emission estimates from China, Japan and Korea as Observer States of Arctic Council, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), Tachikawa, March 2023	1	無
26	2022	金谷有剛、気候変動の物質科学：IPCC AR6と自然過程研究・人間活動評価のこれから（基調講演）、金沢大学環日本海域環境研究センター2022年度共同研究成果報告会、金沢・オンライン、2023年3月	1	無
27	2022	Kohei Ikeda, Hiroshi Tanimoto, Yugo Kanaya, Fumikazu Taketani, Atsushi Matsuki, Evaluation of black carbon simulations in CMIP6 with long-term observations in East Asia during 2009-2020, Seventh International Symposium on Arctic	2	無

		Research (ISAR-7), Tachikawa, March 2023		
28	2022	K. Yahara, K. Yamaji, F. Taketani, M. Takigawa, Y. Kanaya, Evaluation of black carbon in the Arctic region using the WRF/CMAQ simulation on the Northern Hemisphere scale, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), Tachikawa, March 2023	1	
29	2022	山地一代, Phuc HA, 金谷有剛, EMeRGe-Asia関係者, 茶谷 聡, J-stream関係者, 東アジア域を対象とした大気質モデルの物質濃度(PM2.5,BC)の再現性などについて、第6回アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会(九州大学応用力学研究所研究集会)、福岡、2023年3月2日	1	無
30	2022	池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 竹谷文一, 松本篤, 東アジアにおけるブラックカーボンの長期観測を用いたCMIP6シミュレーションと排出インベントリの検証, 大気化学討論会, つくば, 2022年11月	2	無
31	2022	K. Motohashi, D. Narita, Toward Reducing the Arctic Black Carbon Emissions: Comparative Assessment of Policy Instruments across Arctic and non-Arctic States, Seventh International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), Tachikawa, March 2023	3	無
32	2023	Kanaya, Y., K. Yamaji, T. Miyakawa, F. Taketani, C. Zhu, Y. Choi, K. Ikeda, H. Tanimoto, D. Yamada, D. Narita, Y. Kondo, and Z. Klimont, Long-term black carbon observations on Fukue Island, Japan revealed rapid emission reduction from China and dominance of residential sector, ACID RAIN 2020, Niigata, April 2023	1	無
33	2023	金谷有剛、Y. Choi, H. Takashima, K. Park, Y. Endo, L. Chang, J-H. Kim, H. Lee, R. Park, J. Kim, 大気環境静止衛星GEMS：オゾン、NO2, ホルムアルデヒドversion 1.0データの検証と最新状況, 日本地球惑星連合2023年大会、千葉、2023年5月	1	無
34	2023	Ha, P. T. M., Y. Kanaya, T. Sekiya, K. Yamaji, A. M. Dolores Hernández, J. P. Burrows, H. Ziereis, P. Stock, H. Schlager, M. Lichtenstern, M. Poehlker, B. Holanda, EMeRGe-Asia science team, Performance evaluation of the Regional Air Quality Model CMAQ during the EMeRGe-Asia aircraft observations in spring 2018, 日本地球惑星連合2023年大会、千葉、2023年5月	1	無
35	2023	Kanaya, Y., K. Yamaji, T. Kinase, T. Miyakawa, F. Taketani, C. Zhu, Y. Choi, T. Sekiya, K. Ikeda, H. Tanimoto, D. Yamada, D. Narira, Y. Kondo, Z. Klimont, Y.-W. Kim, M. Takigawa, Improved estimation of black carbon emissions from East Asia in the context of long-range transport to the Arctic, PACES 5th Open Science Meeting,	1	無

		Helsinki, June 2023		
36	2023	Ha, P. T. M., Y. Kanaya, K. Yamaji, T. Sekiya, A. M. Dolores Hernández, J. P. Burrows, M. Poehlker, B. Holanda, H. Schlager, M. Lichtenstern, EMeRGe-Asia science team, Performance comparison of the regional air quality model (CMAQ) with comprehensive air quality model with extensions (CAMx) during the emerge-asia aircraft observations in spring 2018, 2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific, Saitama, July 2023	1	無
37	2023	Kanaya, Y., Integration of observations and numerical models to elucidate emissions and processes controlling aerosols and ozone over the Asia-Pacific region, 2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific, Saitama, July 2023	1	無
38	2023	Kanaya, Y., Y. Choi, Validation of GEMS L2 NO2 and O3 v2.0 using MAX-DOAS and Pandora: from GnGval team, The 14th International GEMS workshop, Seogwipo, South Korea, September 2023	1	無
39	2023	Sekiya, T., K. Miyazaki, H. Eskes, K. Bowman, K. Sudo, Y. Kanaya, M. Takigawa, The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative budget, ECMWF Annual Seminar 2023, 2023年09月	1	無
40	2023	湯浅玲奈, 山地一代, 茶谷聡, 嶋寺光, 板橋秀一, 櫻井達也, 金谷有剛, 微小粒子状物質成分測定との比較によるブラックカーボン濃度のモデル再現性について, 第64回 大気環境学会年会、つくば市、2023年09月13日	1	無
41	2023	Ha, P. T. M., Y. Kanaya, K. Yamaji, T. Sekiya, M. D. Andrés Hernández, J. P. Burrows, H. Schlager, L. M. Lichtenstern, M. Poehlker, B. Holanda, EMeRGe-Asia science team, An integrated analysis of the Regional Air Quality Model (CMAQ) and EMeRGe-Asia aircraft observations during early spring 2018 provides information on China's emissions of black carbon, CO, and CO2, 第 28 回大気化学討論会、長崎市、2023 年 11 月	1	無
42	2023	山地一代, 湯浅玲奈, 茶谷聡, 嶋寺光, 板橋秀一, 櫻井達也, 大気質モデル間相互比較実験に基づく二次生成粒子濃度のモデル予測性能の評価, 第64回 大気環境学会年会, 2023年9月13日 関谷高志、化学気候モデルCHASERを応用した大気微量成分とその変動の研究、第28回大気化学討論会、長崎市、2023年11月	1	無

43	2023	Ha, P. T. M., Y. Kanaya, K. Yamaji, T. Sekiya, M. D. Andrés Hernández, J. P. Burrows, H. Schlager, M. Lichtenstern, M. Poehlker, B. Holanda, EMeRGe-Asia science team, Insights into China's Black Carbon, CO, and CO ₂ Emissions from Integrated Analysis of the Regional Air Quality Model (CMAQ) and EMeRGe-Asia Aircraft Observations during Early Spring 2018, AGU Fall Meeting 2023, San Francisco, December 2023	1	無
44	2023	Sekiya, T., K. Miyazaki, H. Eskes, K. W. Bowman, K. Sudo, Y. Kanaya, M. Takigawa, The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative budget, AGU Fall Meeting 2023, San Francisco, December 2023	1	無
45	2023	Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, F. Taketani and A. Matsuki, Observation-based evaluation of East Asian black carbon emission inventories and its implications for the CMIP6 climate model simulations, ACAM workshop, Dhaka, Bangladesh, June 2023	2	無
46	2023	池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 竹谷文一, 松本篤、地上観測と化学輸送モデルを用いた中国からのブラックカーボン排出量の長期推計、第28回大気化学討論会、長崎市、2023年11月	2	無
47	2023	板橋秀一、寺尾有希夫、菅原広史、石戸谷重之、池田恒平、谷本浩志、関東地方における一酸化炭素観測網を活用したモデル高解像度化の必要性の検討、第28回大気化学討論会、2023年11月	2	無
48	2023	成田大樹, 安成哲平, 竹村俊彦, 若林成人, 竹島滉, MIROC5 sensitivity experiments on increasing Siberian wildfires. Part II: Socioeconomic impacts, 日本地球惑星科学連合2023年大会, 2023年5月21日-26日, 千葉	3	無
49	2023	安成哲平, 成田大樹, 竹村俊彦, 若林成人, 竹島滉, MIROC5 sensitivity experiments on increasing Siberian wildfires. Part I: impacts on aerosols, air quality, and climate, 日本地球惑星科学連合2023年大会, 2023年5月21日-26日, 千葉	3	無
50	2023	Morikawa, T., E. Komatsu, D. Narita, M. Hayasaki, D. Yamada, Trial Calculation of Countermeasures' Costs Considering Inter-Regional Interaction of Air Pollutants, CMAS-Asia-Pacific, Saitama, Japan, July 2023	3	無
51	2023	森川多津子、早崎将光、BC(ブラックカーボン)排出量推計の迅速化と課題、第64回大気環境学会年会、つくば市、2023年9月	3	無
52	2023	Yasunari, T. J., D. Narita, T. Takemura, S. Wakabayashi, and A. Takeshima, How much	3	無

		does the increased Siberian wildfire impact air quality, human health, and the economy? AGU Fall Meeting 2023, San Francisco, December 2023		
53	2023	Wang, Z., D. Narita, H. Wu and J. Lin, The Strategy of Royalty-Free Licensing and its Impact on Firm Innovation: The Case of Tesla, Seventh Annual Wharton Innovation Doctoral Symposium, Philadelphia, March 15-16, 2024	3	無
54	2023	森川多津子、日本のBC排出量推計の精度向上について、第7回アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会、福岡市、2024年3月	3	無
55	2024	Ha, P. T. M., Kanaya, Y., Yamaji, K., Sekiya, T., Andrés Hernández, M. D., Burrows, J. P., Schlager, H., Lichtenstern, M., Poehlker, M., Holanda, B., and EMERGE-Asia science team, China's black carbon, CO, and CO2 emissions from integrated analysis of the Regional Air Quality Model (CMAQ) and EMERGE-Asia aircraft observations during early spring 2018, JpGU2024, 千葉、2024年5月	1	無
56	2024	Sekiya, T., Miyazaki, K., Eskes, H., Bowman, K., Sudo, K., Kanaya, Y., and Takigawa, M., The Worldwide COVID-19 Lockdown Impacts on Global Secondary Inorganic Aerosols and Radiative Budget, AOGS2024, June 2024	1	無
57	2024	Kanaya, Y., Choi, Y., and GnGval team, TROPOMI and GEMSv3 NO2 validation using MAX-DOAS & Pandora at Yokosuka with improved consistency, TEMPO/GEMS Joint Science Team Workshop, Kailua-Kona, 2024	1	無
58	2024	Sekiya, T., Miyazaki, K., Eskes, H., Bowman, K., Sudo, K., Kanaya, Y., Takigawa, M., The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative budget, iCACGP-IGAC2024, Kuala Lumpur, 2024年9月	1	無
59	2024	Ha, P.T.M., Kanaya, Y., Yamaji, K., Sekiya, T., Andrés Hernández, M.D., Burrows, J.P., Schlager, H., Lichtenstern, M., Poehlker, M., Holanda, B., and EMERGE-Asia science team, Biomass-burning and anthropogenic emissions of black carbon, CO, and CO2 from South East Asia and China: an integrated analysis of Regional Air Quality Model (CMAQ) and EMERGE-Asia aircraft observations during early spring 2018, iCACGP-IGAC2024, Kuala Lumpur, 2024年9月	1	無
60	2024	Sekiya, T., Emili, E., Miyazaki, K., Inness, A., Qu, Z., Pierce, B., Jones, D., Worden, H., Cheng, W., Huijnen, V., Koren, G., Assessing the relative	1	無

		impacts of satellite ozone and its precursor observations to improve global tropospheric ozone analysis using multiple chemical reanalysis systems, Quadrennial Ozone Symposium 2024, Boulder, 2024年		
61	2024	関谷高志, Emili, E., 宮崎和幸, Inness, A., Qu, Z., Pierce, B., Jones, D., Worden, H., Cheng, W., Huijnen, V., and Koren, G., 複数の化学再解析システムを用いた全球対流圏オゾン解析に対するオゾンとその前駆体の衛星観測の影響評価, 第29回大気化学討論会, 神戸市, 2024年10月	1	無
62	2024	西山朋輝, 山地一代, 矢原京馬, 竹谷文一, 滝川雅之, 金谷有剛, 大畑祥, 近藤豊, 小池真, 2015年北極圏BC濃度に対するバイオマス燃焼起源排出の影響, 第29回大気化学討論会, 神戸市, 2024年10月	1	無
63	2024	Ha, P.T.M., Kanaya, Y., Choi, Y., Chang, L., Lee, H., Kim, J., Validating GEMS retrievals of tropospheric NO ₂ column: Improvement of v3.0 from v2.0 studied with MAX-DOAS observations at urban and rural sites in Japan, 第29回大気化学討論会, 神戸市, 2024年10月	1	無
64	2024	西山朋輝, 山地一代, 矢原京馬, 竹谷文一, 滝川雅之, 金谷有剛, 大畑祥, 近藤豊, 小池真, 春季北極圏BC濃度の高度分布に対するバイオマスバーニングの影響, 2024年度大気環境学会近畿支部研究発表会, 2024年	1	無
65	2024	Deng, Y., Tanimoto, H., Ikeda, K., Kameyama, S., Okamoto, S., Jung, J., Yoon, Y.J., Yang, E.J., Kang, S.-H., Shipborne observations of black carbon aerosols in the western Arctic Ocean during summer and autumn 2016–2020 indicate significant influences from boreal fires, iCACGP-IGAC Conference 2024, Kuala Lumpur, 2024年9月	2	無
66	2024	Deng, Y., 谷本浩志, 池田恒平, Contribution of East Asian black carbon aerosol to the Arctic declined from 2009 to 2020, 第29回大気化学討論会, 神戸, 2024年10月	2	無
67	2024	板橋秀一, 金谷有剛, 茶谷聡, 山地一代, 嶋寺光, 櫻井達也, 永島達也, 池田恒平, 谷本浩志, 黒色炭素表面上の不均一反応過程が東アジア域の対流圏オゾン濃度に与える影響, 第29回大気化学討論会, 神戸市, 2024年10月	2	無
68	2024	森川多津子, 早崎将光, CH ₄ 排出量の地域分布, 第65回大気環境学会年会, 2024年	3	無
69	2024	小松英司, 成田大樹, 森川多津子, 山田大地, 早崎将光, 大気環境及び地球温暖化の長期目標達成に関する考察, 第65回大気環境学会年会, 2024年	3	無
70	2024	Komatsu, E., Narita, D., Morikawa, T., Yamada, D., Hayasaki, M., Study on a Co-benefit Policy	3	無

		Frameworks for Driving toward Large Emission Reduction of Air Pollutants and Greenhouse Gases in Asia region using Policy Simulation with Cost-benefit Analysis Models, SETAC North America 45th Annual Meeting, 2024		
--	--	---	--	--

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
71	2022	山地一代、2022年度神戸大学海洋政策科学部オープンキャンパスにて、学生・一般市民に成果紹介、「環境研究総合推進費研究概要紹介」、神戸大学海洋政策科学部（2022年8月18日）	1
72	2022	金谷有剛、第25回日本気象学会中部支部公開気象講座にて講演、「エアロゾルは最新のIPCC報告書でどう語られたか」、オンライン（2022年9月3日、参加者約80名）	1
73	2022	谷本浩志、一般財団法人大気環境総合センター定期セミナー（第4期定期セミナー 環境省・環境研究総合推進費新規研究紹介）にて、技術者・企業に講演、「燃焼起源SLCFの東アジア国別排出量の迅速把握と方法論構築に向けて」、オンライン（2023年2月28日、参加者約50名）	2
74	2023	谷本浩志、国立環境研究所公開シンポジウム2023にて、一般市民に成果紹介、「アジアのブラックカーボンと気候変動」、オンライン（2023年6月22日、参加者約200名）	2
75	2023	金谷有剛、海洋研究開発機構横須賀本部施設一般公開、（2023年10月14日）	1
76	2023	山地一代、2023年度神戸大学海洋政策科学部オープンキャンパスにて、学生・一般市民に成果紹介、「環境研究総合推進費研究概要紹介」、神戸大学海洋政策科学部（2023年8月9日）	1
77	2023	山地一代、テクノオーシャン2023にて、環境研究総合推進費研究概要紹介(パネル紹介)、神戸ポートターミナル（2023年10月7日）	1
78	2024	関谷高志、JAMSTEC横須賀本部施設一般公開、「地球温暖化に関わるCO2を詳しく知ろう～なぜ地球は温暖化しているの？」（2024年5月18日）	1
79	2024	山地一代、2023年度神戸大学海洋政策科学部オープンキャンパスにて、学生・一般市民に成果紹介、「環境研究総合推進費研究概要紹介」、神戸大学海洋政策科学部（2024年8月8日）	1
80	2024	谷本浩志、国立環境研究所公開シンポジウム2024にて、一般向け講演、「地球環境研究のこれまでとこれから～新たな研究のあり方～」、イイノホール・オンライン（2024年6月12日、参加者約300名）	2
81	2024	谷本浩志、「最新の科学で調べる地球の大気と惑星の大気」シンポジウムにて、一般・高校生・小中学生向け講演「地球の空気を宇宙から調べる」、アストくにさき（2024年12月1日、参加者約300名）	2

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
82	2023	ロックダウンによる人為起源エアロゾル減少が気候に与える影響を全球規模で解明—衛星観測に基づく原料物質の排出量変化から現実的な評価を可能に— 2023年7月29日プレスリリース	1

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
83	2023	関谷高志、化学気候モデルCHASERを応用した大気微量成分とその変動の研究、第19回日本大気化学会奨励賞、2023年11月	1

(8) その他の成果発表

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
84	2024	Tanimoto, H., Y. Kanaya, K. Ikeda, T. Morikawa, T. Sekiya, P. T. M. Ha, and K. Yamaji, East Asian Black Carbon Emission Report 2024, 22pp., https://doi.org/10.34462/0002000234 , 2025. (東アジアのBC排出量報告書2024年版)	2

権利表示・義務記載

本研究課題の成果の一部は、国立環境研究所（スーパーコンピュータ(NEC SX-Aurora TSUBASA)）、海洋研究開発機構（地球シミュレータ所内課題「地球表層における物質循環モデルの開発研究」）の支援を受けて得られたものである。

本研究課題の成果の一部は、「Synthesis of Arctic Council Member and Observer Country Emissions of Black Carbon and Methane」 Arctic Black Carbon impacting on Climate and Air Pollution (ABC-iCAP) Project Technical Report 2. December 2023 iv+47pp., by Matthews, B., K. Seuss, B. Ullrich, S. Schindlbacher に記載されている。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract**[Project Information]**

Project Title : Prompt Quantification of National SLCFs Emissions from Combustion Sources in East Asia, and Its Methodological Development

Project Number : JPMEERF20222001

Project Period (FY) : 2022-2024

Principal Investigator : Tanimoto Hiroshi

(PI ORCID) : ORCID0000-0002-5424-9923

Principal Institution : National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Tel: +81298502930
E-mail: tanimoto@nies.go.jp

Cooperated by : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kobe University, Kyushu University, Japan Automobile Research Institute, The University of Tokyo, Hiroshima University

Keywords : short-lived climate forcer, emission inventory socio-economic assessment, Arctic Council, satellite observation

[Abstract]

Black carbon (BC) is one of key air pollutants that have great impacts on the climate and environment from urban to global scales. BC is recognized as one of short-lived climate forcers (SLCFs), with other species including methane (CH₄), tropospheric ozone and hydrofluorocarbons. There is a general consensus that BC plays a key role in the Arctic climate, causing ice melting. In addition, BC, as one of the constituents of PM_{2.5}, has detrimental effects on human health, in particular in developing countries. East Asia is a major source region of BC, with its emissions having approximately 30% contributions to the global total. There exist several “bottom-up” emissions inventories, but they still have huge (approximately 200%) uncertainties. In order to reduce the uncertainties in the BC emissions estimates in East Asian countries, our project aimed to provide the scientific basis that is necessary to make national and international policy decisions, such as mitigation measures, on global environmental changes including climate change and Arctic pollution. The goal was to compile the country-specific BC emission assessments of East Asian countries and publish them as the “East Asian Black Carbon Emission Report 2024” (Tanimoto et al., 2025). Using ground-based/satellite observations and chemistry-transport models (CTMs), we derived “top-down” estimates of BC emissions as independent estimates, for each country of East Asia, and compared them to “bottom-up” emission inventories, with the aim to improve the accuracy, transparency, and reliability of country-specific emission inventories of BC. In particular, we put a great emphasis on promptness in assessing the BC emissions, as the BC emission inventories are not yet reported on an annual and national basis in many countries, nor reported to international bodies such as the

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), in contrast to the emissions of greenhouse gases (GHGs). This is one step forward to establish a methodology for a Measurement, Reporting, and Verification (MRV) system for the emissions of not only BC but also a broad range of combustion-derived SLCFs. These scientific highlights have important policy implications with a great emphasis on the Asian emissions, contributing to the Arctic Council's "Framework for Action on Black Carbon and Methane" as well as an inventory methodology for SLCFs, entitled "2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-Lived Climate Forcers", led by the Inventory Task Force of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-TFI).

[References]

Tanimoto, H., Y. Kanaya, K. Ikeda, T. Morikawa, T. Sekiya, P. T. M. Ha, and K. Yamaji, East Asian Black Carbon Emission Report 2024, 22pp., <https://doi.org/10.34462/0002000234>, 2025.

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20222001) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.