

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12216

研究課題名（和文）東アジアにおけるブラックカーボン排出インベントリの総合的検証と高精度化

研究課題名（英文）Comprehensive evaluation of black carbon emission inventories over East Asia

研究代表者

池田 恒平（Ikeda, Kohei）

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

研究者番号：60726868

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：気候シミュレーションに入力値として使用される排出インベントリは、中国からの人為起源ブラックカーボン（BC）排出量の不確実性が大きく、また推計までに数年の時間がかかるという課題があった。本研究では、大気観測と化学輸送モデルを用いて中国からのBC排出量を高精度かつ迅速に推計する解析システムの開発を行った。開発した手法を用いて推計を行ったところ、2009-2022年までに中国のBC排出量は約3分の1に減少していることがわかった。この急速な減少は最新の排出インベントリでは捉えることができておらず、次期IPCC第7次報告書で使用されるインベントリに反映する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エアロゾルが気候に及ぼす影響を評価するためには、気候シミュレーションに正確な排出量を用いる必要がある。しかし、東アジアのブラックカーボン（BC）排出量推計値には大きな不確実性があり、気候影響評価の不確実性の一つとなっていた。本研究では、大気観測と化学輸送モデルを用いて高精度かつ迅速に排出量推計手法を開発した。中国からのBC排出量は、2009-2022年までに約3分の1に減少しており、大気質対策による削減が有効に進んでいることが示唆された。この急速な排出量変化は、BCが気候変動に及ぼす影響を評価する上で重要な知見であり、次期IPCC第7次報告書において気候シミュレーションに反映する必要がある。

研究成果の概要（英文）：Emission inventories, which are used as input data for climate simulations, have a large uncertainty in anthropogenic emissions of black carbon (BC) from China and take several years to estimate. In this study, we have developed an analytical system to estimate BC emissions from China using atmospheric observations and chemical transport modelling to overcome the limitations of emissions inventories. Our estimation using the developed method showed that BC emissions from China have decreased by about one-third during 2009-2022. This rapid reduction has not been captured in the emission inventories and needs to be reflected in the historical inventory for the next IPCC 7th Assessment Report.

研究分野：大気化学

キーワード：ブラックカーボン エアロゾル 短寿命気候強制因子 SLCF 排出量推計 排出インベントリ 黒色炭素 化学輸送モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ブラックカーボン (BC) エアロゾルは、太陽光の吸収や、雲との相互作用、雪氷面のアルベド低下を引き起こすことによって、気候変動の原因となる。地域的には、東アジアのモンスーン循環や極端降水の頻度・強度に影響を及ぼす。BC による気候影響を高精度に評価するためには、適切な排出量に基づき気候モデルで時空間変動を再現・予測することが必要である。しかし、気候モデルの入力値に用いられるボトムアップ手法による排出インベントリにおいて、BC 排出量には大きな不確実性が存在し、モデルと観測との不一致の原因となることに注意を要する。例えば、IPCC 第 6 次報告書のために実施された第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP6) で使用された人為起源インベントリ (CEDS) は中国からの BC 排出量を過大評価していたことが報告されている (Kanaya et al., ACP, 2020)。このような排出量推計の不確実性が気候モデルの BC 濃度の再現性に及ぼす影響や、大気濃度場のバイアスが放射強制力の評価に与える影響は不明であった。

エアロゾルは大気中の寿命が数日程度と短いため、排出量の変化による気候応答が温室効果ガスよりも早期に現れることが予想される。また中国では、大気汚染物質の排出削減策により排出量変化が速いペースで起こっており、大気観測に基づくトップダウン手法による迅速な推計が重要となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、東アジアの地上観測と大気化学輸送モデルを用いて中国からの BC 排出量の高精度かつ迅速な推計を行うトップダウン解析システムの開発を行い、そのシステムを使用して排出量の長期推計を行うことである。ボトムアップ型のインベントリには、中国からの BC 排出量に大きい不確実性が含まれるとともに、社会経済活動の統計値を使用するため更新まで数年単位の時間がかかるという課題がある。それに対し、大気観測を用いた排出量解析ではボトムアップ・インベントリよりも迅速に (数ヶ月単位) 推計をできるという長所がある。本研究のトップダウンによる推計結果をモデル相互比較実験等で使用される最新のボトムアップ・インベントリや将来シナリオと比較し検証する。特に、次期 IPCC 第 7 次報告書サイクルの第 7 期結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP7) で使用されるインベントリの開発に対して、観測に基づく近年の知見を提供する。

### 3. 研究の方法

本研究では地上観測データとして、福江島大気環境観測施設 (32.75°N, 128.68°E) 及び能登大気観測スーパーサイト (37.45°N, 137.36°E) における BC 連続観測値を使用した。BC 質量濃度は MAAP (model 5012, Thermo) によって測定された (Kanaya et al., 2016, 2020; 竹谷ほか, 2016)。

本研究で使用した化学輸送モデルは GEOS-Chem version13.1.2 である。全球を  $2 \times 2.5^\circ$  の水平解像度で計算し、それを境界条件としてアジア領域を  $0.5 \times 0.625^\circ$  解像度でネスティング計算した。気象場には再解析気象データ MERRA2 を使用した。モデル計算は BC と一酸化炭素 (CO) を対象として、発生源の地域と種類 (人為起源と森林火災) の濃度を区別して計算するタグトレーサー法を用いて行った (Ikeda et al., ACP, 2017)。人為起源トレーサーの発源地域は、東アジアを日本、朝鮮半島、中国北部、中国南部の 4 地域と東アジア以外の地域の計 5 領域に分けた。人為起源 BC と CO の排出インベントリには、HTAPv3 を使用した。

中国からの BC 排出量の算出は、中国起源 BC トレーサーの寄与が全 BC 濃度の 80% を超え且つ、中国起源 BC トレーサーの輸送効率が 80% 以上である期間のみを選択し、観測とモデルの濃度比を用いて行った (Ikeda et al., ESA, 2022)。輸送効率は、標準実験と降水除去過程を含まない感度実験を行い、2 つの実験の BC 濃度から算出した。中国 BC 排出量の推計は 2009-2022 年を対象に実施した。

### 4. 研究成果

#### 中国からの BC 排出量の長期推計

中国からの BC 排出量のトップダウン推計値を最新のインベントリと比較した。中国 BC 排出量は 2009-2022 年で 1.33 Tg/年から 0.42 Tg/年と算出され、過去 13 年間で 68% の減少を示した。6 種類の排出インベントリによる 2010 年の BC 排出量は、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。CMIP6 で使用された CEDS (v2017-05-18) を除くインベントリは 2010 年以降減少傾向を示し、本研究の推計結果の傾向と一致する。ただし、トップダウン推計はすべてのインベントリよりも早い減少傾向 (-5.2%/年) を示した。CEDS の最新版 (v2021-04-21) では、他のインベントリと同様に減少傾向となり、排出量も下方修正されている。ただし、2015 年以降の排出量はほぼ一定と推計されており、継続的な減少トレンドを示す本研究のトップダウン推計との差が広がりつつある。このことは、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とともに、次期 CMIP7 に向けて今後

さらなる排出量の修正が必要となる可能性を示している。

2015 年を基準とした中国 BC 排出量の変化率を将来シナリオと比較した。トップダウン推計は 2022 年までに 52%減少しており、気候変動と大気汚染の緩和策により最も早い削減を推定している SSP1-19 シナリオよりも 5 年以上早いペースとなっていた。また、北極評議会の SLCF 報告書で使用された ECLIPSEv6b において、最大限の削減対策を想定した MFR シナリオよりも大きな減少率となっている。

#### CMIP6 の気候モデルにおける BC エアロゾルの再現性検証

人為起源の BC 排出量が最も多い東アジアを対象に、CMIP6 に参加した 12 の気候モデルを用いて、過去再現実験と将来シナリオ実験における BC の質量濃度レベルと長期的な傾向の再現性を評価した。特に、CMIP6 で使用された人為起源インベントリの不確実性が気候モデルの濃度場の再現性に与える影響と、大気濃度のバイアスに伴う放射強制力への影響を評価した。福江島と能登における 2009-2020 年の地上観測と比較したところ、CMIP6 のマルチモデル平均値は、観測の BC 濃度よりも約 2 倍高く、減少傾向を再現しないことがわかった。化学輸送モデルを用いた感度実験から、CMIP6 で使用されたインベントリ (CEDSV2017-05-18) における中国の BC 排出量の過大評価と増加傾向が、BC 濃度の過大評価と観測と逆のトレンドになっていることの原因であることが示された。CEDS インベントリを用いた場合の BC 直接放射効果は、観測された BC 濃度をよく再現する ECLIPSEv6b インベントリと比べて東アジアで 72%高かった (Ikeda et al., SOLA, 2023)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ikeda Kohei, Tanimoto Hiroshi, Kanaya Yugo, Taketani Fumikazu, Matsuki Atsushi	4. 巻 19
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 239 ~ 245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/sola.2023-031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda Kohei, Tanimoto Hiroshi, Kanaya Yugo, Taketani Fumikazu	4. 巻 2
2. 論文標題 Evaluation of anthropogenic emissions of black carbon from East Asia in six inventories: constraints from model simulations and surface observations on Fukue Island, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Science: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 416-427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1EA00051A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 竹谷文一, 松木篤
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第28回大気化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tanimoto H., Ikeda K., Kanaya Y., Taketani F., Matsuki A.
2. 発表標題 Observation-based evaluation of East Asian black carbon emission inventories and its implications for the CMIP6 climate model simulations
3. 学会等名 5th Atmospheric Composition and the Asian Monsoon (ACAM) workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永島達也, 秋元肇, 池田恒平, 谷本浩志
2. 発表標題 SLCP削減による気候変動緩和に向けた経験的アプローチのCMIP6気候モデルデータによる検証
3. 学会等名 第28回大気化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下陽介, 丹羽洋介, 五藤大輔, 八代尚, 池田恒平, 打田純也, 齊藤誠, 佐伯田鶴, 佐藤正樹, 田上雅浩, 永島達也, LIU Guangyu, 谷本浩志
2. 発表標題 衛星観測と化学輸送モデルによる簡易的なNO2排出量推定手法の開発
3. 学会等名 第28回大気化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤縄環, 猪俣敏, 杉田考史, 池田恒平, 谷本浩志
2. 発表標題 Analysis of the COVID-19 influence on an air quality in urban cities in Japan with multiple satellite and ground-base measurements
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 竹谷文一, 松木篤
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第27回大気化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ikeda, K., Tanimoto H., Kanaya Y., Taketani F., Matsuki A
2. 発表標題 Evaluation of black carbon simulations in CMIP6 with long-term observations in East Asia during 2009-2020
3. 学会等名 ISAR-7 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ikeda Kohei
2. 発表標題 Impact of anthropogenic emission inventories on simulations of Arctic black carbon
3. 学会等名 4th PACES Open Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ikeda K., Tanimoto H., Kanaya Y., Taketani F.
2. 発表標題 Evaluation of black carbon emissions in East Asia: Comparisons of six inventories and constraints from surface observations and model simulations
3. 学会等名 16th IGAC Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田恒平, 谷本浩志, 遠嶋康徳
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第26回大気化学討論会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------