

中国からのブラックカーボン排出量は過去 10 年で 4 割もの大幅減少 —IPCC 気候モデルへの排出量入力値に見直しが必要—

国立研究開発法人海洋研究開発機構（以下「JAMSTEC」という。）地球環境部門地球表層システム研究センターの金谷有剛センター長代理らと神戸大学、国立環境研究所等は共同で、長崎県・福江島にて長期にわたり大気観測を実施し、中国から排出されるブラックカーボン（BC）量が過去 10 年で 4 割もの大幅減少を遂げたことを明らかにしました。

BC は化石燃料等の不完全燃焼によって大気中へ排出される「すす」粒子のことで、太陽光の直接吸収や雪氷面の反射率低下を通じて地球温暖化に寄与するため、CO₂ 等とともに排出量の変動を把握し、気候影響を評価することが課題となっています。BC の排出量は、社会経済的な統計情報に基づいて推計されますが、その不確かさの幅は中央値の 1/2~2 倍と広く、また世界の 30%にも上るとされる中国からの排出量について、増加しているのか減少しているのか、定まった見解がありませんでした。

中国から偏西風に乗って汚染大気が到達しやすい福江島において、大気中の BC 濃度を 2009 年から 2019 年まで 10 年以上継続観測し、その推移から、排出量とその変化を推定しました。その際、信頼度の高い 2 種の計測器の値を統合し、また、数値シミュレーションを併用して気象の年々変動の影響を取り除く工夫を加えました。その結果、中国からの BC 排出量の不確かさを±27%にまで絞り込むとともに、最近 10 年で 4 割もの大幅減少を遂げたことを見出しました。

2021 年の公表へ向けて現在とりまとめが進められている IPCC 第 6 次評価報告書では、中国からの BC 排出量は 2014 年まで増加したのものとしてその気候影響が評価されますが、それとは逆の傾向であることを初めて明確に示したものです。減少傾向の理由は、中国での PM_{2.5} 削減政策に伴いその一成分である BC 排出も抑制されたためと考えられます。

この結果は、BC による温暖化影響が、今後報告される IPCC 第 6 次評価報告書での評価より、実際は低く抑えられていることを意味しています。今回の成果は IPCC 第 7 次評価サイクルでのシミュレーション改善に役立てられるとともに、同サイクルにて新たに始まる「短寿命気候強制力因子 (SLCFs)」排出インベントリづくり等にも活用されることが期待されます。

研究背景

地球温暖化を引き起こす物質としてはCO₂等の「長寿命温室効果気体(GHGs)」がよく知られていますが、大気汚染物質でありかつ気候影響にも影響する「短寿命気候強制力因子(SLCFs)」についても、排出量や気候影響を定量化し、削減へ結び付けていくことが重要となっています。たとえば、BC粒子は太陽光の直接吸収や雪氷面の反射率低下を通じて地球温暖化を増進することが知られている代表的なSLCFです。BCの排出量は、社会経済的な統計情報に基づいて推計されますが、その不確かさの幅は中央値の1/2~2倍と広く、また世界の30%にも上るとされる中国からの排出量について、増加しているのか減少しているのか、定まった見解がありませんでした。一般に、排出量の検証には、独立な情報である大気中の濃度の観測値から逆算する手法が有効です。

たとえば、窒素酸化物(NO_x)ではその主要成分であるNO₂の衛星観測に基づいて、またCO₂では多地点での現場高精度観測に基づいて、それぞれ排出量が推定され、検証が進められています。しかしながら、BCの場合は信頼のおける長期観測データは乏しく、こうした検証は進められてきませんでした。また大気中に留まる時間を規定する「降水による除去速度」の不確実性も高いことから、大気中濃度から排出量を推定することは困難と見られてきました。そのため、中国等の大発生源についてでさえBCの排出量やその変化に関する観測からの評価はほとんどなされておらず、各種大気汚染物質の中でも解析が非常に遅れていました。

JAMSTECでは、2009年から長崎県・福江島大気環境観測施設(図1)においてPM_{2.5}やBC等の大気成分の濃度測定を長期継続し、巨大発生源である中国から偏西風によって大気汚染物質が運ばれてくる過程を明らかにしてきました。今回、この観測をさらに延長し、2009-2019年の10年間にわたる長期データとして、その期間の中国からの排出量と推移を評価しました。

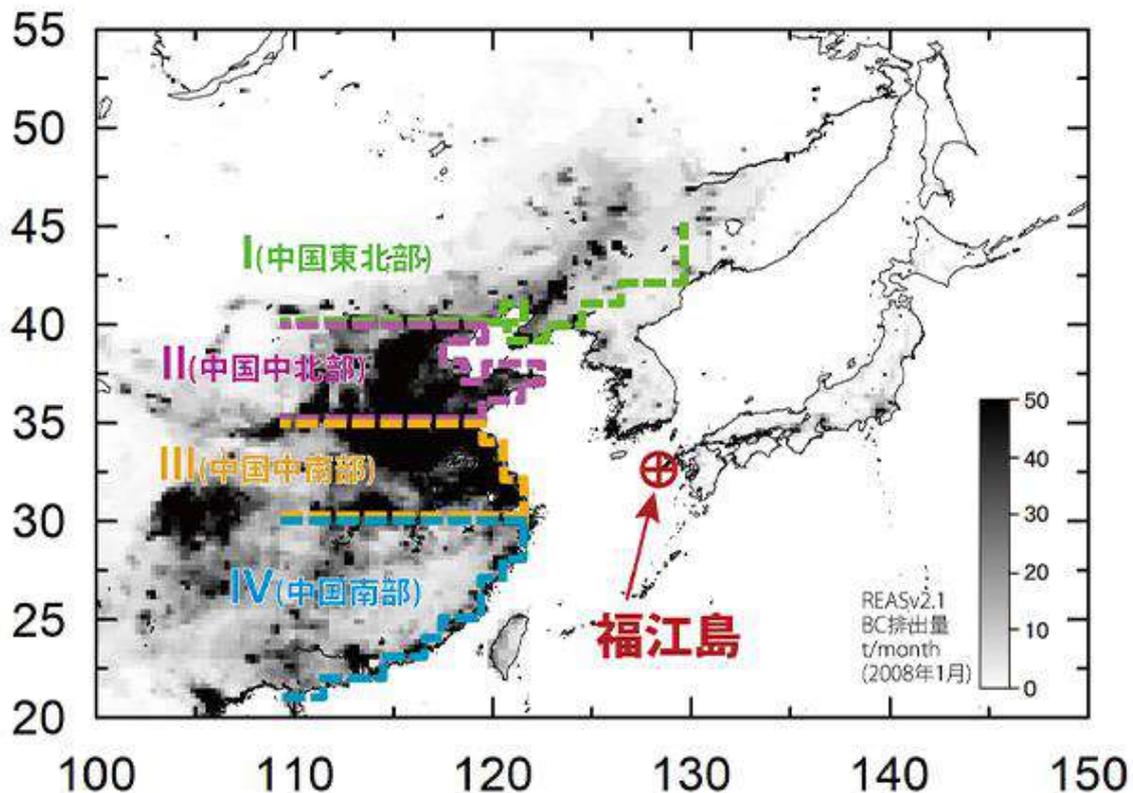


図1 長崎県・福江島の位置。

地図の背景はブラックカーボンの排出量推計マップ。福江島には、中国中北部・中南部等主要な排出源地域から 6~46 時間程度で東シナ海上を大気が運ばれてくる。

成果

まず、福江島での長期観測から、BC 濃度が 2010 年から 2018 年の間に 48%減少 (年率では $-5.8 \pm 1.5\%$) (図 2) する顕著な変化を示したことを見出しました。遠隔地域での無人長期観測では、台風の影響や停電等により、欠測データが発生しがちですが、本研究では、共存する他のエアロゾル粒子 (硫酸塩等) による妨害を受けにくいという観点で信頼性が高い 2 種の計測器 (COSMOS, MAAP) を並行運転してデータを統合し、欠測期間があっても補い合うことにより、122 か月間無欠測のデータを取得し、長期傾向の評価に結びつけることができました。

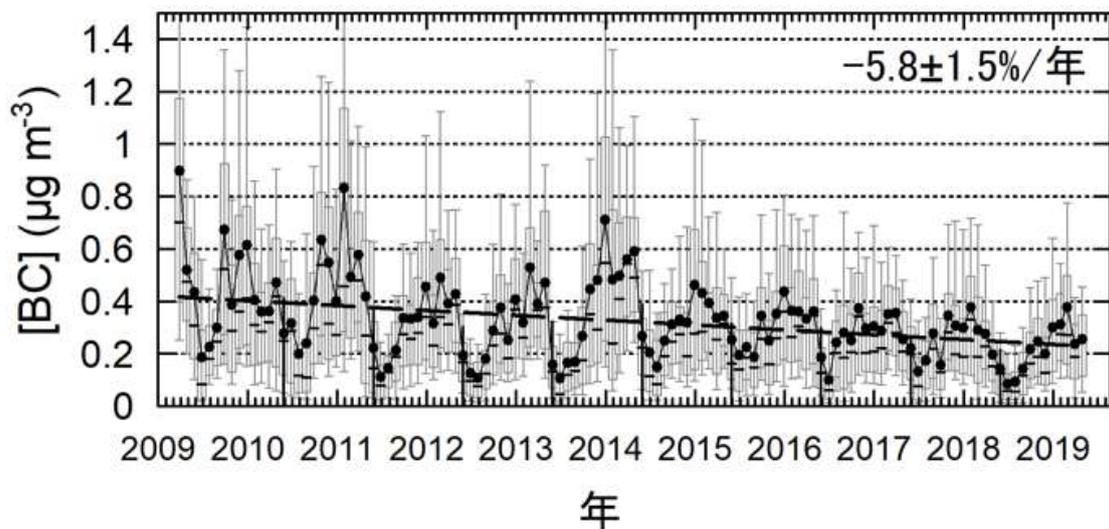


図 2 福江島での大気中 BC 濃度の長期減少傾向。

信頼性が高い 2 種の計測器 (COSMOS, MAAP) を併用し、個々の機器の故障で欠測期間が発生しても補い合う「データ統合化」により、122 か月間、欠測なくデータを取得した。

このように記録された濃度変化は、排出量の変化だけでなく、気象的要因の影響を受けている可能性があります。そこで本研究では気象要因を取り除いて排出量だけの影響を評価するための 2 つの工夫を取り入れました。まず、BC を大気から洗い流す「降水」の変化の影響を受けないようにするため、空気塊が福江島まで達する経路上での積算降水量が 1mm 以下の観測データのみを解析しました (図 3a、中央での青折れ線。積算降水量に基づき、排出量と湿性除去の影響を分離して評価する方法については、2016 年 8 月 31 日 (JAMSTEC ウェブサイト) の既報参照のこと)。

次に、降水とは別に、大気汚染物質が発生源から福江まで運ばれてきやすいかどうかに関する「風系」の年々変動の影響を、「大気化学輸送モデル WRF/CMAQ による数値シミュレーション」から推定し (図 3a、中央灰色折れ線)、解析で考慮しました。その際、排出量については基準年の値 (REASver2.1 インベントリの 2008 年の排出量、図 1 背景) で固定し、気象のみ、それぞれの年の情報を用いました。実際に 2011 年や 2014 年等、汚染が流れ込みやすい年には観測・シミュレーションともに濃度が増大する傾向があり、こうした風系の年々変動の影響を受けていることがわかります。そのうえで、年毎に観測された平均濃度を、同じ年の WRF/CMAQ モデルシミュレーションでの値で除することによって、この風系の影響を打ち消し、シミュレーションで唯一考慮していない、「年毎の排出量

変化」の補正項を浮かびあがらせました（図 3a、右図）。この項が年率 $-5.3 \pm 0.7\%$ で顕著に減少していたことから、濃度変化の主因が実際に「排出量の変化」だったことを結論付けました。

この解析を、空気塊が福江島に到来するまでに通った主要な排出地域毎（中国東北部、中北部、中南部、南部）に行い、地域別の排出量変化の傾向を評価したところ（図 3b）、南側の 2 地域（ $-5.9 \sim -6.3\%$ /年）のほうが北側の 2 地域（ $-2.1 \sim -5.2\%$ /年）より減少率が大きい傾向にあることがわかりました。

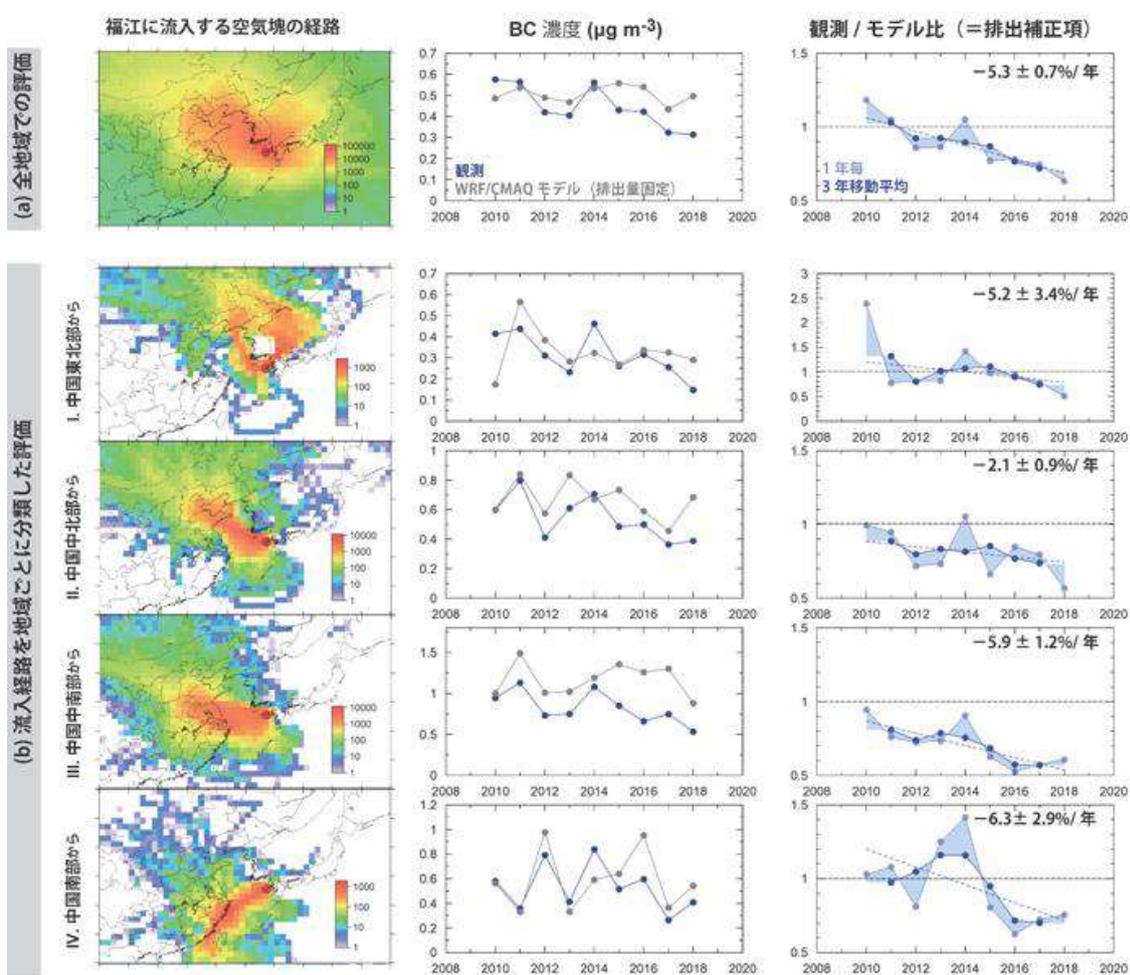


図 3(左) 福江に流入する空気塊の経路の分布、(中央) BC 濃度の年々変動（観測：青線、WRF/CMAQ モデル（排出量を固定し風による変動をモデル化したもの）：灰色線）、(右) 観測/モデル比を「排出補正項」として評価し、風による影響を除いたその項の長期変化を排出量の推移として評価した。(a) 空気塊の経路を分類せず、全地域で評価した場合、(b) 中国 4 地域ごとに評価した場合。

ここでの補正項は、観測された年毎の濃度を数値シミュレーションで再現するのに必要な値とみることができます。そこで、シミュレーションで基準とした「REASver2.1 インベントリの 2008 年の排出量」にこの補正項を乗じることで、中国 4 地域の正しい排出量を年毎に推計しなおしました。そしてさらに 4 地域の和として集計し中国全体からの排出量の変化を推定しました。その結果、中国からの BC 排出量は 2009 年の 1.61 Tg/年から 2018 年の 1.06 Tg/年まで、35%もの急速な減少（年率-4.6%）を遂げたことが推定されました（図 4a 赤線）。この 10 年で 4 割にも上る減少速度は、日米欧等先進国での NOx 排出量削減速度並みとも評価されず（例：2017 年 1 月 27 日（JAMSTEC ウェブサイト）既報）。また、今回の方法では、BC 排出量推定値の不確かさが、観測やモデルの不確かさ等から±27%と推定され、これまでの 200%（中央値の 1/2~2 倍）もの不確かさを大幅に絞り込むことができました。

観測から推定された排出量を、社会経済情報から推計された中国からの BC 排出量インベントリの比較評価に用いました（図 4a）。インベントリによっては中国からの BC 排出量に 2 倍近い差があり、近年の変化傾向にも上昇・下降の両方がある等、これまで定まった見解はありませんでした。例えば、IPCC の第 6 次評価報告書に用いられる CEDS インベントリによる値は顕著に大きく、また 2014 年まで上昇したとされていますが、これは本研究が示した下降傾向とは逆であり、支持されませんでした。その一方で、MEIC1.3 や ECLIPSEv6b 等、中国での PM2.5 改善政策による排出量削減効果を取り入れたインベントリでは下降傾向を示し、本研究と整合的であることがわかりました。このことから、中国での PM2.5 削減政策が奏功し、その一部である BC の排出量も減少したものと考えられました。

また、推定された BC 排出変化速度（-4.6%/年）を、2012-2015 年を基準とする相対値ベースで、IPCC 第 6 次評価報告書での将来気候予測に用いられる各種社会経済シナリオ (SSP1~5) での中国の今後の BC 排出トレンドとも比較しました（図 4b）。その結果、最も厳しい削減が早期に始まると想定した SSP1-19, SSP1-26 シナリオでの BC 排出削減速度（-3.9, -3.5%/年）をも上回る速度となっており、非常に速いペースで BC 排出削減が進みつつあることが示唆されました。

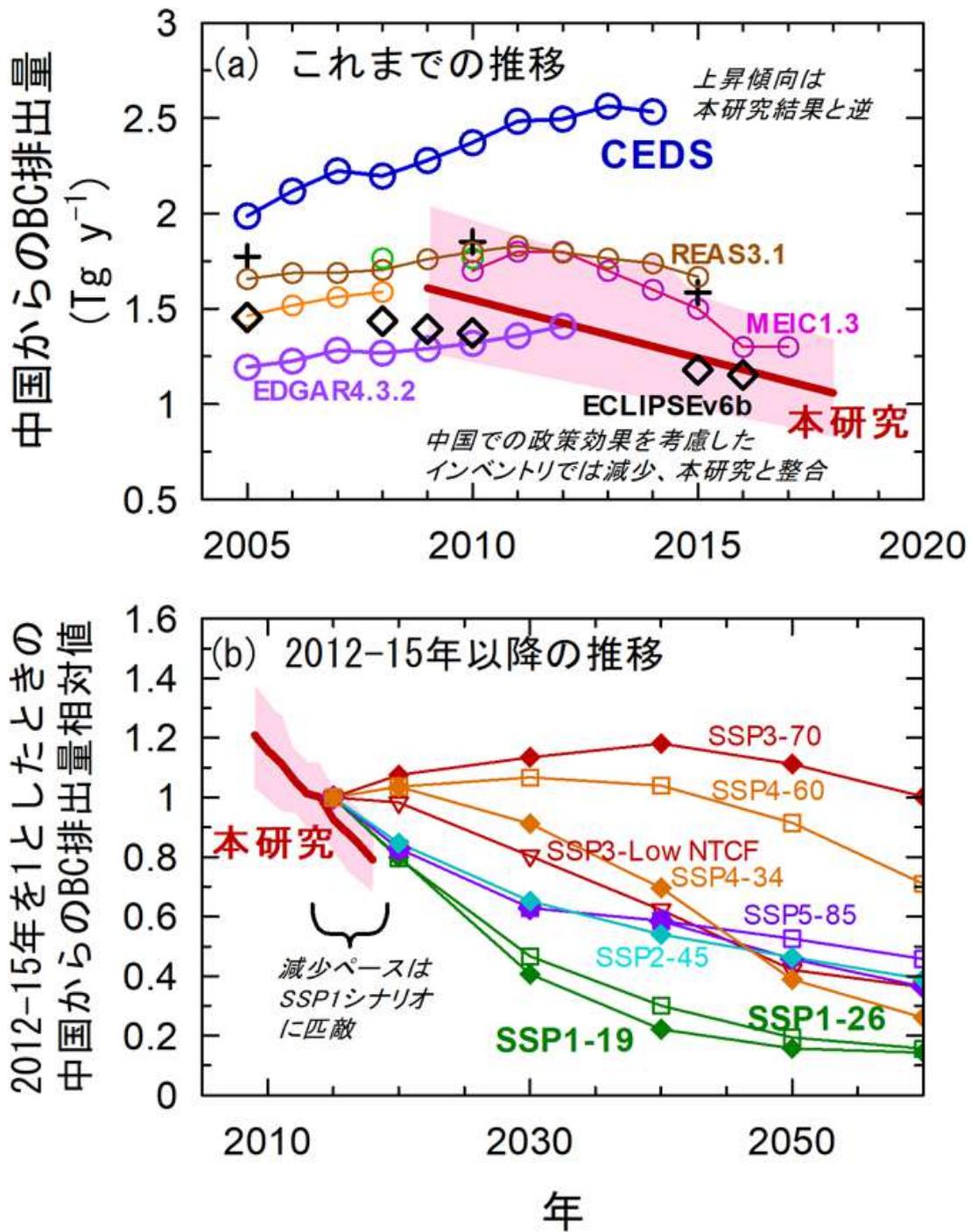


図 4(a) 本研究で推定された中国からの BC 排出量の減少傾向（赤線）。IPCC AR6 で採用されている排出インベントリ CEDS では上昇傾向が続いており、本研究結果とは逆となっている。REAS3.1, MEIC1.3, ECLIPSEv6b 等、中国での PM2.5 対策等の効果を取り入れたインベントリでは減少傾向となっており、本研究と整合している。(b) 本研究での減少トレンドを 2012-15 年での値で相対化し、各種

社会経済シナリオ（SSP1~5）での中国からのBC排出量と比較したもの。本研究で推定されたBC排出量減少ペースは最も厳しい削減を想定したSSP1-19, SSP1-26シナリオにも匹敵している。

今後の展望

今後もこうした速いBC排出削減ペースが中国で維持されるのかどうか、観測による検証を継続することが重要です。また、本研究からは、北極方面へ運ばれるBCの起源地域でもある中国東北部での排出量減少が鈍く、冬季だけでみると2017年まではむしろ増加傾向であったことも示されました。温暖化が顕著に進む北極域への気候影響の観点でもその推移を注視していくことが重要です。

なお、本研究ではどの部門（産業部門、自動車等の輸送部門、家庭部門等）からのBC排出が最近削減されたのか、また現在主要な排出源となっている部門は何かについては解析できませんでしたが、放射性炭素同位体の測定結果から化石燃料燃焼が主な排出源となっていること（2019年10月1日（JAMSTECウェブサイト）既報）を手掛かりとするとともに、2020年春に新型コロナウイルス感染症の蔓延による産業活動の大幅な低下がもたらしたBC濃度減少を今後解析すること等により、こうした排出部門別の評価を行う計画です。

中国からのBC排出量がIPCC第6次評価報告書での現在気候シミュレーションに用いられている値より低く、また減少傾向が顕著であるとした本研究からは、BCによる実際の温暖化影響は当評価報告書での評価より低く抑えられていることが示唆されます。しかしながらその一方で、寒冷化に寄与する硫酸エアロゾル濃度等も、BCよりやや先行して著しく減少し、むしろ温暖化を増強する傾向を生み出していることから、今回明らかになったBC排出削減進展による効果はその一部を打ち消す程度とみられています。この結果はIPCC第7次評価サイクルでのシミュレーション改善に役立てられるとともに、同サイクルにて新たに始まるSLCF排出インベントリづくり等にも活用されることが期待されます。

論文情報

タイトル : Rapid reduction of black carbon emissions from China: evidence from 2009-2019 observations on Fukue Island, Japan

雑誌 : Atmospheric Chemistry and Physics

DOI : 10.5194/acp-2019-1054

日本語原文

https://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2020_06_05_01.html

文 JST 客観日本編集部