

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1803 ブラックカーボンおよびメタンの人為起源排出量推計の精緻化と削減感度に関する研究
(JPMEERF20182003)
平成30年度～令和2年度

*Better Quantification of Anthropogenic Emissions of Black Carbon and Methane in East Asia and
Cost-benefit Analysis of Emissions Reduction*

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立大学法人東京大学

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	14
II-1 アジアにおける人為起源排出インベントリの改良と全球モデリング （国立研究開発法人国立環境研究所）	14
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 野外・衛星観測を利用したアジアにおける排出量推計の検証 （国立研究開発法人海洋研究開発機構）	33
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 アジアにおける排出削減に関する社会経済的側面の分析 （国立大学法人東京大学）	57
要旨	

1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細 66
IV. 英文Abstract 74

I. 成果の概要

課題名 2-1803 ブラックカーボンおよびメタンの人為起源排出量推計の精緻化と削減感度に関する研究
 課題代表者名 谷本 浩志 (国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター 地球大気化学室 室長)

重点課題 主：【重点課題⑧】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

副：【重点課題⑮】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） (2-4) GOSAT-2等を利用したメタン放出量推定の精緻化と検証

研究実施期間 平成30年度～令和2年度

研究経費 (千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成30年度	35,100	30,139
令和元年度	39,000	43,667
令和2年度	39,000	39,055
合計額	113,100	112,861

本研究のキーワード 短寿命気候強制因子、インベントリ、社会経済評価、北極評議会、衛星観測

研究体制

- (サブテーマ1) アジアにおける人為起源排出インベントリの改良と全球モデリング (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (サブテーマ2) 野外・衛星観測を利用したアジアにおける排出量推計の検証 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)
- (サブテーマ3) アジアにおける排出削減に関する社会経済的側面の分析 (国立大学法人東京大学)

研究協力機関はない。

1. はじめに (研究背景等)

国連気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第五次報告書 (IPCC AR5) では、二酸化炭素 (CO₂) のみならず、「短寿命気候強制因子」 (SLCF: Short-Lived Climate Forcers: ブラックカーボン (BC)、メタン (CH₄)、対流圏オゾンなど、大気中寿命の短いガスやエアロゾル) の温暖化寄与も大きいことが明確に示されている。SLCFの削減からは、短期的な (10-30年) 温暖化抑制効果や、北極やヒマラヤなど、気候変化に対し脆弱な地域での不可逆的な変化を食い止める効果が期待されており、国際的な議論や対応が始まっている。北極評議会の「ブラックカーボン及びメタン専門家会合 (EGBCM: Expert Group on Black Carbon and Methane)」はその最たる例であ

る。また、UN Environmentによる「The Emissions Gap Report 2017」（2017年10月）では「2050年までの気温上昇へのSLCFの寄与は0.6℃（うちCH₄が0.3℃、BCが0.2℃）にも上り、SLCFの削減なしにはパリ協定のターゲットである「気温上昇2℃以内」の達成や1.5℃以内を視野に入れることすら難しい」旨、国連の公文書として初めて報告された。さらに、IPCC AR6（第六次報告書）では、SLCFがWorking Group Iで単独の章「Chapter 6: Short-Lived Climate Forcers」として初めて取り上げられ、Working Group IIやWorking Group IIIでも健康やコベネフィット（共便益）の関連議論が含まれるほか、2018年にはIPCC専門家会合がIPCCインベントリタスクフォース(TFI)の主催により開催されてSLCFインベントリの方法論が議論された。しかしながら、SLCFの収支や気候影響には依然として大きな不確実性が残っており、効果的な削減対策を見出すためには科学的理解度の本質的な向上のためさらなる研究が求められている（図0.1）。



図0.1 IPCC等国際的な場におけるSLCFの認識

2. 研究開発目的

本研究では、対象SLCFとしてBCとCH₄に注目し、アジア排出量推計の精緻化、削減感度の評価、社会経済的な分析を重点的に行う。具体的には、地上観測の強化に加えて、最新の衛星観測データ（TROPOMI等）を有効活用し、独自開発してきたタグ付き全球化学輸送モデルやデータ同化モデルを発展させ、我が国を含むアジア起源の排出量を推計するとともに検証する。さらに、政策貢献として、排出に伴う社会経済的な側面の分析を加味し、温暖化を緩和するための合理的な削減パス策定に資する情報をまとめる。こうした政策に資する科学的知見をもとに、環境省、IPCC AR6、北極評議会、Climate & Clean Air Coalition (CCAC)など、各種の国際的枠組みに貢献する我が国としての取組みを加速することを目的とする（図0.2）。



図0.2 研究内容のイメージ

3. 研究目標

全体目標	BCおよびCH ₄ について、世界各国で使われている排出インベントリの不確実性を複合的に診断し精度を向上させるとともに、排出インベントリを検証する大気化学的手法の高精度化を行う。こうして得られた最新の自然科学的知見を基に、国内および国際的なインベントリの実務者との連携の端緒を開くとともに、社会経済分析に有機的に統合し、アジアにおける対策提言に向けた道筋をつける。
サブテーマ1	アジアにおける人為起源排出インベントリの改良と全球モデリング
サブテーマリーダー/所属機関	谷本浩志/国立研究開発法人国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター
目標	モデル技術の改良を継続することにより、IPCCやAMAP、HTAP等、国内および国際的な評価報告書の基礎となる気候モデルや大気汚染モデルで使われている6種の人為起源排出インベントリについて、BCおよびCH ₄ のアジアにおける不確かさおよびそれらの相対的信頼性を評価するとともに、サブテーマ2と協力して、BCおよびCH ₄ 排出量のトップダウン推計手法を、インベントリ報告値と比較可能な程度に高精度化し、排出インベントリの検証に向けた道筋をつける。また、北極域や寒冷地域の温暖化・気候変動にBCがおよぼす影響について発生源別にブレイクダウンした情報を得る。
サブテーマ2	野外・衛星観測を利用したアジアにおける排出量推計の検証
サブテーマリーダー/所属機関	金谷有剛/国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

目標	日韓の地上観測データおよび新規TROPOMI衛星観測データの利用など、大気化学観測を強化することで、現在200%もの不確かさがあるアジアの国別BC排出量推計値について、他の大気汚染物質と同じ程度に推計精度を向上させるなど、サブテーマ1と協力して、BCおよびCH ₄ 排出量のトップダウン推計手法を、インベントリ報告値と比較可能な程度に高精度化し、排出インベントリの検証に向けた道筋をつける。また、最新の研究成果を環境省の国内インベントリ事業および国際的なインベントリ担当者に向けて情報発信し周知する。
サブテーマ3	アジアにおける排出削減に関する社会経済的側面の分析
サブテーマリーダー/所属機関	成田大樹/国立大学法人東京大学 大学院総合文化研究科国際環境学教育機構
目標	BCおよびCH ₄ について、排出削減の便益に見合う対策費用レベルの定量化の実証分析を行うとともに、サブテーマ1および2の自然科学的研究で得られた排出量推計値の不確かさを東アジアに特化して修正し、削減策導入に関するマクロ経済上の根拠を提示して、環境政策の議論に貢献可能な対策提言の道筋をつける。

4. 研究開発内容

本研究課題では、排出インベントリ、化学輸送モデル、観測（地上、衛星）といったツールを用いて、BCおよびCH₄研究に向けて特化・改良し、BC やCH₄といったSLCFのアジア排出源の推計の精緻化や環境・気候影響に関する科学的知見を発展させた（サブテーマ1とサブテーマ2）。加えて、環境経済学の視点から、削減感度の評価を行い、社会経済的な分析をおこなった（サブテーマ3）。各サブテーマでは、インベントリ、モデル、観測（地上、衛星）といった、本研究の目標達成のために重要な要素技術をBCおよびCH₄研究に向けて特化・改良し、発展させた（図0.3）。

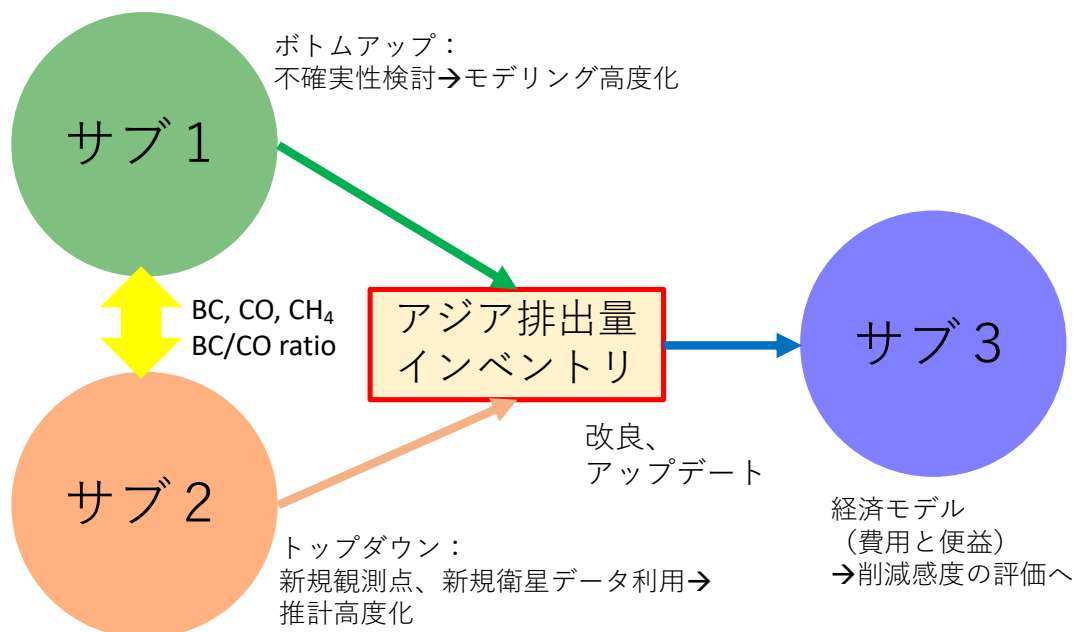


図0.3 サブテーマ連携のイメージ

サブテーマ 1：アジアにおける人為起源排出インベントリの改良と全球モデリング

化学輸送モデルの拡充・高度化のため、オイラー型の三次元大気化学輸送モデルGEOS-Chemモデルの最新版を導入し、特に、発生源別の評価に使用する全球タグ付きトレーサーモデルとして独自に改良、整備した。また、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ついて、5つのグローバルインベントリと1つのアジア領域インベントリのデータを収集し、BC、CH₄、CO排出量を地域別・部門別に相互比較した。各発生源からのBC排出量を検証するために「タグ付きBCシミュレーション」としてモデル計算を行い、とりわけ「発生源（日本・朝鮮半島・南・北中国）」を区別し、さらに「輸送効率」を用いて湿性除去の影響が少ないデータを抽出するトップダウン方式のBC排出量推計手法を構築した。このシミュレーション結果を用いてボトムアップ型インベントリのBC排出量の推計値の不一致の程度を比較し、原因を考察、妥当性を検証した。こうして開発された手法をCH₄についても応用し、初期的な結果を得た。BCについては、同じく観測データを用いたトップダウン方式の推計手法であるが、独立な手法で推計されたサブテーマ 2 のトップダウン排出量推計値と比較した。また、BC排出インベントリの違いが、北極圏のBC濃度のモデル計算結果に与える不確実性を調べた。こうした排出インベントリの不確実性の分析結果を、社会経済的な分析に必要な情報としてサブテーマ 3 に提供した。

サブテーマ 2：野外・衛星観測を利用したアジアにおける排出量推計の検証

サブテーマ 1 のボトムアップ推計値を検証するため、野外観測をベースにし、さらに観測地点を5地点に増やすことで、BC排出量のトップダウン推計精度を向上させた。具体的には、「BC/CO排出比」を降水履歴のない空気塊での観測データから求め、「CO排出量」との積として「BC排出量」とした。その際のBC/CO排出比は、従来の福江に加え、能登・韓国サイト等4点での観測をもとに、空気塊到達経路上の国別に算出した。またCO排出量は、新たに衛星データ同化法により推計した。得られたBC排出量をサブテーマ 1 のボトムアップ推計値と比較した。また、BC観測濃度のモデル再現を基準とする「モデル比較法」によるトップダウン排出量推計法も構築し、過去10年のトレンドを解析した。さらに、こうした観測データを用いて、ラグランジュ型の輸送モデルであるFLEXPARTに使用されているBC湿性除去スキームを調べ、長距離輸送のモデル表現を検証した。また、CH₄の濃度変動を、地上・衛星・モデルを統合して解析し、約10 kmスケールでの排出実態を検証した。特に、常時監視局のうち一般局について、年平均値で高濃度が記録された地点に着目し、クラスター解析を行い、季節変化を類型化した。また、都市域・冬季におけるNO_xとの相関関係から「CH₄/NO_x排出比」を導出し、「NO_x排出量」との積として「CH₄排出量」を推定し、ボトムアップ推計値と比較した。こうした、セクターごとのBCとCH₄の排出検証結果を、削減感度モデル実験や社会経済的な分析に必要な情報として、サブテーマ 3 に提供した。

サブテーマ 3：アジアにおける排出削減に関する社会経済的側面の分析

BC及びCH₄の排出削減費用と、それにより得られる便益について、大気汚染データと社会経済データの双方を用いて分析した。具体的には、ロシア（ヤクーツク、北東連邦大学）、中国（北京、清華大学）の排出インベントリ専門家のヒアリング等を通じて、大気汚染に関する社会経済的データの収集および整理を行なった。排出削減費用はボトムアップ型の排出推計値や各種統計データを使用し、日中韓の東アジア三か国について、個々の排出削減策を用いる場合の費用や排出削減量を推計するとともに、限界削減費用曲線（MAC (Marginal Abatement Cost) 曲線）を導出した。また、既存インベントリの不確実性や誤差、あるいは東アジアの実態と乖離した部分についての補正を行った。便益面では、特にBCがPM_{2.5}の構成物質であり、排出削減には温暖化対策のみならず大気汚染対策としての側面があることに鑑み、PM_{2.5}の排出削減が労働供給に与える影響を、日本の労働供給データと大気汚染観測データを通して計量経済学的・統計学的手法により分析した。さらに、日本で開発されたREAS (Regional Emission inventory in Asia) インベントリチームとの協力体制を構築した。最後に、アジアにおけるBC及びCH₄の排出削減に関する政策的含意について論じた。

注釈：

- ・タグ付きトレーサーモデル：モデル中で、排出源別に「タグ（印）」を付けて計算し、同じ化学物質であっても、その排出起源別に区別しトレースできるようにしたモデル。例えば、BCであれば、中国起源のBC、日本起源のBC、韓国起源のBCというように区別できる。
- ・SLCFとSLCP：「短寿命気候汚染物質」（Short-lived Climate Pollutants: SLCP）と「短寿命気候強制因子」（Short-lived Climate Forcers: SLCF）は類似しているが、SLCPは放射強制力が正の物質のみを指し、一方、SLCFは放射強制力が正負両方の物質を含み、より広義なので、最近ではSLCFが使われることが多くなっている。特に、最新のIPCC AR6（第六次評価報告書）では、章名にSLCFが使われていることから、本報告書ではSLCFを使用した。ただし、すでに出版済みの論文等でSLCPが使われている場合はその限りではない。
- ・オイラー型とラグランジュ型：輸送モデルの中の、流体の取り扱い方の種類で、オイラー型は一定の座標値の位置に成分を固定して、各時刻にその座標位置に存在する成分の運動方程式を記述する方法。ラグランジュ型は、成分の運動を追いかける形で運動方程式を記述する方法。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

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予想されており、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、国際モデル相互比較実験などで幅広く使用されている5種類の全球インベントリ及び1種類の領域インベントリを対象とし、東アジアの地域別・部門別にBC、メタン(CH₄)、一酸化炭素排出量の比較を行ったところ、中国からの2010年のBC排出量は1.3-2.4 Tg/年と推計され、最大値と最小値には約80%の差があること、インベントリ間の差は主に家庭部門および産業・エネルギー部門の差によるものであることがわかった。この6種類のインベントリを用いた「タグ付きBC三次元大気化学輸送モデル」による計算を行い、長崎県福江島でのBC観測値と比較してインベントリの検証を行ったところ、中国からのBC排出量は1.1 Tg/年と推計され、ボトムアップ型インベントリは概して過大評価傾向にあること、中でもIPCCの気候モデル実験で用いられているインベントリは約2倍も過大評価していることを見出した。さらに、こうした違いにより、北極圏のBCのモデル計算には、冬季には約3倍の濃度差が見られ、北極圏のBC濃度差に最も影響を及ぼす発源地域は、地表付近ではロシア、中部対流圏では東アジアであり、BCによる北極の気候への影響評価を高精度化するためには、これらの地域からのBC排出量の精緻化が重要であることがわかった。こうした排出インベントリ間の違いを十分に知ることは、モデルを用いて気候や環境への影響評価を行う上で重要な課題であり、本研究により、インベントリによるモデル計算結果の精度や誤差も評価することができる。

また、福江島、能登、及び韓国2地点に観測サイトを拡充し、これら複数の地点で得られた連続的な観測データを用いて東アジアからの国別BC排出量を推計し、ボトムアップ型の排出量統計値を評価した。そうじに観測されたCO₂との比率を用いる「BC/CO₂排出比法」、観測とモデルを比較すること「モデル比較法」を開発し、これら2種類の方法いずれからでも、中国のBC排出量は近年1.0 Tg/年程度であることが示され、IPCCの気候モデル実験で用いられているインベントリは2倍近い大幅な過大評価となっ

ていることを指摘した。また、長期観測データからは、2009年以降、中国からのBC排出がほぼ半減する顕著な減少傾向にあることも指摘した結果、IPCC AR6報告書の気候モデル相互比較実験（CMIP6）で用いられたCEDSボトムアップ推計値が改訂され、今後のIPCCでの気候シミュレーションが適正化される見込みとなった。さらに、コロナ蔓延による中国経済活動低下時期の福江島観測データの解析から、中国からのBC排出は主に家庭部門からであることを明らかにし、（サブテーマ3の）限界削減費用の経済分析からも家庭部門の排出削減が経済性の面でも効率的であることが見出された。

CH₄についても、BCと同様に、ボトムアップ排出量推計の不確実性やその検証に資する研究を行い、一定程度の成果を得た。BCを対象に開発し改良を重ねてきた「タグ付き三次元大気化学輸送モデル」をCH₄についても応用し、4種類の異なる人為起源排出インベントリを用いたモデル計算を行った。波照間島等における観測値と比較を行い、モデル計算結果は観測と比較して-7%から+13%の範囲に入ったことから、中国のCH₄排出量は大きく過大あるいは過小評価はされていないことが示唆された。野外観測の面では、国内常時監視局データの解析から、都市域で冬季に濃度が増大する季節パターンに着目し、NO_xとCH₄濃度が顕著に正相関することを見出した。東京都と5府県に共通した傾向であること、10年間ではCH₄/NO_x排出比に顕著な減少がみられるが、NO_x排出の減少で説明され、CH₄排出量は過去10年ほぼ一定であったことなどを見出した。排出比をNO_x排出量に乗じてCH₄排出量を推定したところ、東京都の排出量は都が推計したボトムアップ値を上回ることが示唆され、都市ガス網からのリークや廃棄物セクターの過小評価などの可能性が指摘された。

社会経済評価の面では、BC及びCH₄の排出削減費用と、それにより得られる便益について、大気汚染データと社会経済データの双方を用いた分析を行った。排出削減費用はボトムアップ型の排出推計値や各種統計データを使用し、日中韓の東アジア三か国について、個々の排出削減策を用いる場合の費用や排出削減量を推計するとともに、限界削減費用曲線を導出した。また、既存インベントリの不確実性や誤差、あるいは東アジアの実態と乖離した部分についての補正を行った。これにより、一般的に議論される炭素価格の水準の社会的負担の下でも、まだ多くの排出削減が可能である点が示された。便益面では、BCがPM_{2.5}の構成物質であり、排出削減には温暖化対策のみならず大気汚染対策としての側面があることに鑑み、日本の労働供給データと大気汚染観測データを通して、PM_{2.5}の排出削減が労働供給に与える影響を計量経済学的・統計学的手法により分析した。その結果、大気汚染が健康被害などを通して労働供給を低下させ、生産活動に負の影響を与えていること、逆に排出削減には温暖化対策のみならず、こうした社会的損失を解消する形でのコベネフィットがある点が示され、費用面・便益面の双方から、排出削減に関する新たな知見をもたらし、排出削減に関する政策策定や議論に貢献する成果が得られた。

世界的に、BC排出量の実態が適切に評価されないままで大気BC濃度の広域分布に関するモデル再現性が議論されることが多く、排出とも相互に作用する大気中滞在時間や消失過程のモデル表現に関する評価の適切性にも影響することが憂慮されてきたが、本研究では、世界のBC排出量の約1/4とされる東アジアからのBC排出量について、最新の観測から得られるデータに基づいてインベントリを修正に導くなど、排出量を適切に評価した上でのモデル計算が可能になった。これにより、気候の将来予測シミュレーションやアジアからの長距離輸送と北極のBC汚染実態に関して、より信頼のおける理解が可能となった。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

気候変動に関する政府間パネル(IPCC) 第六次報告書の作成においては、WG1 Chapter 6. Short-lived climate forcers(短寿命気候強制因子)について、金谷、谷本の2名が貢献し、金谷はReview Editorとして、谷本はExpert Reviewerとして、本課題からの知見をインプットした。特に、現在、

CMIP6に使用されるインベントリの過大評価を指摘し、それを受けてインベントリが改訂されるなど、緊急性の高い結果として国際的に認知され、世界的なスタンダードを書き換える大きなインパクトがあった。

「第3期海洋基本計画第2部に掲げた個別施策の実施状況一覧（令和2年度）」ならびに「第3期海洋基本計画に基づく工程表（令和3年5月改訂）」の「7. 北極政策の推進」において、本研究の成果であるブラックカーボンの排出量やモデリング、アジアのブラックカーボン排出が北極の気候や環境に及ぼす影響に関する日本の取り組みが、フィンランド環境研究所（SYKE）との国際連携の例として記載され、日本の北極政策における科学及び環境面での成果として貢献した（抜粋：「BCについては国立研究開発法人国立環境研究所及びSYKEを中心に、他機関も含めて両国研究者による研究会合を開催することにより、調査研究を推進しました」（環境省））。

2021年5月8日（土）～9日（日）、日本とアイスランドの共催により、アジア初として日本（東京）で開催された第3回北極科学大臣会合（ASM3：3rd Arctic Science Ministerial）において、Joint Statement（共同声明）とサマリーレポートに、アジアから排出されるブラックカーボンが北極の気候と環境に及ぼす影響について最新の科学的知見を情報提供した。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

我が国や、東アジア各国の国別BC排出量をトップダウン推計し、社会経済情報にもとづくボトムアップ推計値を独立に評価する知見を得たことで、CCACや北極評議会へ報告する国別BC排出量の値を評価する独立な視点を日本の報告書に付与するとともに、今後のボトムアップ値改訂の指針となる知見となった。特に、ボトムアップ推計値に付帯している大きな不確かさを軽減できた点は意義が大きい。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、国別排出量を報告しておらず、東アジア地域国で先んじて排出量を把握することができた。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るものであり、本研究により精度を高めた排出量値を得たことは、日本の関与をより強めることにも結び付く。

BCを含めたSLCFに関しては、その排出削減が短期の気候変動対策としても有効であると示唆されており、IPCC第49回総会(2019)では、従来CO₂等の長寿命温室効果気体(GHG)を対象としてきた国別の公式排出量報告に、今後SLCFを加えるため、インベントリタスクフォース(IPCC-TFI)がSLCFのインベントリ方法論を構築することが決定された。今後、SLCFの中でもとりわけ排出量算定に伴う不確かさが大きいとされるBCについて、不確かさを軽減させるための先進的な科学知見を今回得たことは、IPCCにおけるBCのインベントリ方法論の議論や実践において我が国がリーダーシップを発揮するための好材料となる。金谷は当該排出インベントリ方法論のためのSLCF専門家会合へ招待されており（コロナ影響で延期中）、方法論に関するデスクワークとデータ提供で貢献した。

メタン発生源の把握については、大気環境課が所管する常時監視と、研究調査室が主導するGOSAT・GOSAT-2衛星とを結びつける効果が期待できる。国内発生源の特徴が明らかになり、ボトムアップインベントリを評価する独立な視点を提供して、排出削減対策の効率化を促すことも可能である。

日本国内でのBC及びメタンの削減ポテンシャルに関する費用及び便益が明らかになり、削減策導入に関するマクロ経済上の根拠が提示でき、環境政策の議論に貢献することができる。また、東アジア、特に日本の大気環境に大きな影響を与える中国及び韓国におけるBC及びメタンの削減ポテンシャルと削減策の経済的な観点からの実現可能性を示し、三国間あるいは北極協議会やIPCCなど国際的枠組みでの我が国（環境省）の取り組みに貢献することも可能である。

総じて、環境省インベントリ事業（GIOおよびJEI-DB）、GOSAT-2のデータ検証やモデル利活用、北

極評議会、IPCC AR6、CCAC、Asia Pacific Clean Air Partnership (ASPAC)、IGAC、Future Earthなどにおいて日本の環境面での取り組み、国際社会における役割分担の一つとして成果を強くアピールできるとともに、国際的枠組みに貢献する我が国（環境省）の取り組みを加速する貢献が可能である（図0.4）。

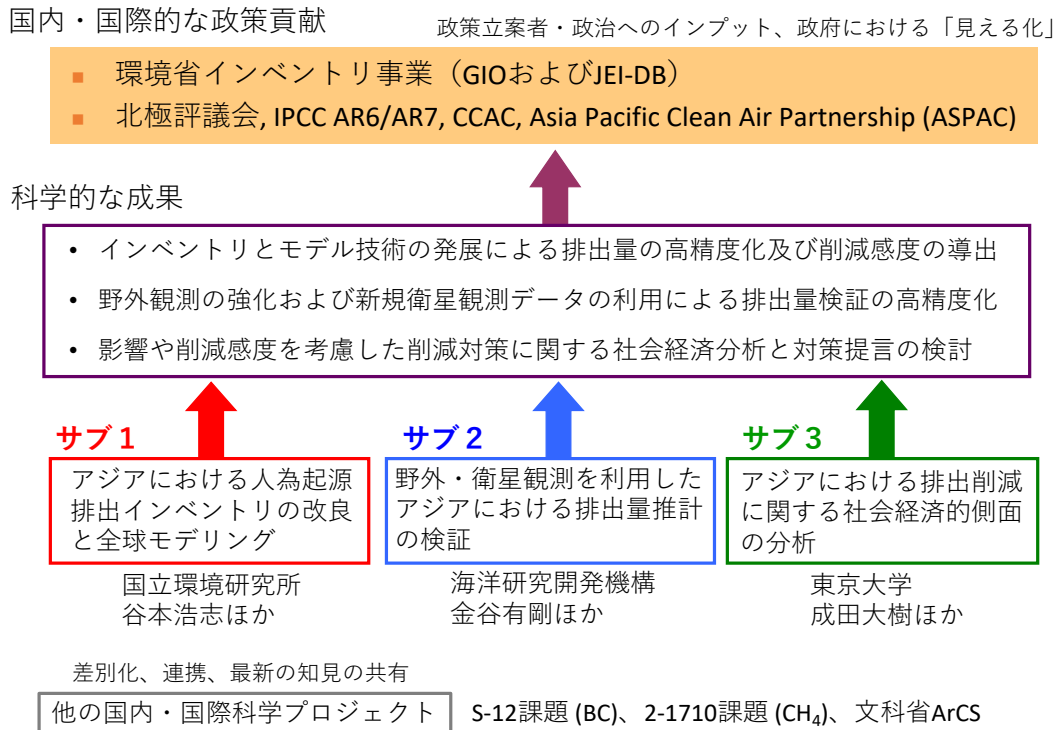


図0.4 研究成果を政策貢献に繋げるイメージ

5-3. 研究目標の達成状況

SLCFに関する国際研究プロジェクトで用いられている6種類のBC及びCH₄の人為起源インベントリについて、中国からのBC排出の推計値に200%（2倍）もの差異があること、主な差異は家庭部門および産業・エネルギー部門の差によるものであることを見出した（サブテーマ1）。こうしたボトムアップ型の排出インベントリの絶対値の確からしさを検証するために行った、大気化学的手法については、野外観測を5地点に拡充するとともに、化学輸送モデルに改良を重ねて、サブテーマ1とサブテーマ2においてタグ付きトレーサー法、BC/CO排出比法、モデル比較法の3種類のトップダウン推計手法を開発し、6種類のボトムアップ法は概して過大評価傾向にあること、IPCC AR6報告書で使用されている中国からのBC排出推計値が2倍近い大幅な過大評価となっていることを独立な3手法が共通して見出すなど、「現実の観測をベースにした」信頼度の高い成果を挙げた。

中国のみならず、日本及び韓国の国別BC排出量推計精度を向上させ、環境省が直接・間接に支援するボトムアップ排出インベントリであるJEI-DBやREAS、北極評議会への報告値とも比較することで、問題点や課題を明らかにした。CH₄についても、BCモデルを応用したトップダウン手法を開発するとともに、地上・衛星観測データを利用して排出量をトップダウン推計し、国や都の公式排出量と比較するまで達成できた。これらの知見を、インベントリの実務担当者や、環境省のPM2.5EIやJEI-DBインベントリの構築に携わる研究者、環境省や文部科学省にも情報提供した。

サブテーマ3では、サブテーマ1と2で得られた排出量推計値の不確実性や修正提案された値を考慮して、日韓中を対象に排出削減量や限界削減費用推計の精緻化を行う等、BC・CH₄の排出を共通項に、自然科学的知見と社会経済分析を有機的に統合して、アジアに特化して政策的含意について論じ

た。

総じて、3種類の大気化学的な排出インベントリ検証手法の開発を達成し、それらを用いてボトムアップ型の排出インベントリの不確実性を複合的に診断し修正させるなど精度向上に反映し、こうした最新の事実をもとに国内および国際的な実務者・政策担当者にも情報共有・意見交換することで今後の連携・改良の端緒を開くとともに、自然科学と社会経済分析を有機的に統合し、アジアにおける対策提言に向けた道筋につなげることができた。

特筆すべきは、次期のIPCC報告書などに向けた修正点となるだけでなく、現在のIPCC AR6報告書の気候モデル相互比較実験（CMIP6）に使用されるインベントリの過大評価を指摘し、それを受けてインベントリが改訂されるなど、緊急性の高い結果として国際的に認知され、大きなインパクトがあった点である。

従って、課題全体として、当初目標は達成したと考えられ、いくつかの点で目標を上回る成果や波及効果、国際的なインパクトも得られたと考えられる。これは、参画者全員がサブテーマ間の連携を強く意識して取り組んだため、と考えている。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

15件

<主な査読付き論文>

- 1) S. OKAMOTO, H. TANIMOTO, N. HIROTA, K. IKEDA, and H. AKIMOTO: J. Geophys. Res. Atmos., 123, <https://doi.org/10.1029/2018JD029266> (2018) Decadal shifts in wind patterns reduced continental outflow and suppressed ozone trend in the 2010s in the lower troposphere over Japan. (IF:3.82)
- 2) H. AKIMOTO, T. NAGASHIMA, H. TANIMOTO, Z. KLIMONT, and M. AMANN: Prog. Earth Planet. Sci., 7, 73 (2020), An empirical approach toward the SLCP reduction targets in Asia for the mid-term climate change mitigation. (IF:2.676)
- 3) K. IKEDA, H. TANIMOTO, T. SUGITA, H. AKIYOSHI, C. CLERBAUX, P.-F. COHEUR: J. Geophys. Res.: Atmos., 126, e2020JD033459 (2021) Model and satellite analysis of transport of Asian anthropogenic pollution to the Arctic: Siberian and Pacific pathways and their meteorological controls. (IF:3.82)
- 4) C. ZHU, Y. KANAYA, H. YOSHIKAWA-INOUE, T. IRINO, O. SEKI, and Y. TOHJIMA: Environ. Pollut., 247, 55-63 (2019) Sources of atmospheric black carbon and related carbonaceous components at Rishiri Island, Japan: The roles of Siberian wildfires and of crop residue burning in China. (IF:6.792)
- 5) Y. CHOI, Y. KANAYA, S.-M. PARK, A. MATSUI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, I. UNO, X. PAN, M. LEE, H. KIM, and D. H. JUNG: Atmos. Chem. Phys., 20, 83-98 (2020) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: assessment of representativeness for black carbon (BC) and carbon monoxide (CO) emission inventories. (IF:5.414)
- 6) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, Y. KOMAZAKI, K. IKEDA, Y. KONDO, and Z. KLIMONT: Atmos. Chem. Phys., 20, 6339-6356 (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009-2019 observations on Fukue Island, Japan. (IF:5.414)

- 7) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, and I. PISSO: Atmos. Chem. Phys., 20, 13655-13670 (2020) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXible PARTicle (FLEXPART) model v10.4. (IF:5.414)
- 8) D. NARITA, N.T. KIM OANH, K. SATO, M. HUO, D.A. PERMADI, N.N. HA CHI, T. RATANAJARATROJ and I. PAWARMART: Atmosphere, 10 (5), 227 (2019) Pollution Characteristics and Policy Actions on Fine Particulate Matter in a Growing Asian Economy: The Case of Bangkok Metropolitan Region. (IF:2.397)
- 9) D. NARITA, T. GAVRILYEVA, A. ISAEV: Polar Science, 27, 100573 (2021) Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem. (IF:1.389)
- 10) 【予定】山田大地, 成田大樹: 環境科学会誌, 日本における廃棄物由来メタンの限界排出削減費用-制度等の現状を踏まえた全国レベルでの削減費用の検証- (採択済み, 掲載号等未定) (IF:なし)

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	15件
その他誌上発表 (査読なし)	7件
口頭発表 (学会等)	59件
「国民との科学・技術対話」の実施	8件
マスコミ等への公表・報道等	3件
本研究に関連する受賞	3件

7. 国際共同研究等の状況

- 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。その一環として、国立環境研究所とフィンランド環境研究所(SYKE)の共同で、ブラックカーボン(BC)を中心にした短寿命気候強制因子(SLCF)に関する研究連携を行った。具体的には、国立環境研究所とSYKEを中心にオンラインワークショップを開催し、日本側は海洋研究開発機構、フィンランド側はフィンランド気象研究所(FMI)など、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、BCやメタンの観測、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を行った。北極圏やアジア、ヨーロッパを対象としたBC、SLCF研究の現状と課題を共有するとともに、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。こうした連携により、北極評議会のAMAP(北極監視評価プログラム)等、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に対してアジアからの成果を提供し、我が国の北極評議会への貢献とする。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。
- 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) 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、課題代表者の谷本浩志とサブ課題代表者の金谷有剛が研究推進メンバーとして加わっている (合計12人おりアジアからは2人)。欧州、北米、アジアやロシアから北極への大気汚染の輸送と気候、環境、社会への影響を評価する国際的な大気化学者のチームであり、本課題の目的や成果をインプットするとともに、最新の国際的動向を情報共有し、意見を交換している。主なカウンターパートは、Steve Arnold (University of Leeds, UK), Chuck Brock (NOAA/ESRL/CSD, USA), Kathy Law (LATMOS, France) である。

- ・韓国・ソウル大学、国立環境研究院 (NIER) 等と連携し、Baengneyong と Gosan における BC と CO 観測データの提供をうけ、国内データとの統一的な解析を行った。得られた排出インベントリ改良に資する情報は韓国側へフィードバックしている。韓国の研究コミュニティに通じている Yongjoo Choi ポストドクトラル研究員を雇用し、円滑な情報交換を進めた。また、韓国・プサンでの The First Workshop for the Development of Korean Air Quality Forecasting System 等において、本研究で明らかになった韓国のボトムアップインベントリの輸送セクターからの CO 排出推計に課題があることを情報提供した。こうした研究者間の連携を国レベルの協力に生かし、地域的なオゾン・PM_{2.5} 問題の改善や、地球温暖化緩和対策の機運を高めることが重要である。
- ・BC 観測データを活用した世界の複数モデル解析について、予備的な解析を NCAR や中国科学院大気物理研究所のモデルシミュレーション結果等を用いて行った。手元でパラメータの感度実験が可能な FLEXPART モデルの評価を重点化することとし、開発元の Norwegian Institute for Air Research (NILU) の Ignacio Pissso 博士と共同解析し共著論文文化した。
- ・CO に関する衛星データ同化や、メタンの衛星観測データ活用に関し、NASA, NCAR やオランダ王立気象研究所 (KNMI)、オランダ宇宙研究所 (SRON) との国際連携を進めた。
- ・ロシア・北東連邦大学 (ヤクーツク) の Tuyara Gavriilyeva 教授らとシベリア森林火災についての政策分析に関する論文を共同執筆した。
- ・中国・清華大学 (北京) の Shuxiao Wang 教授と大気汚染の経済分析に関する意見交換を行った。
- ・中国からの BC 排出量の過去10年間にわたる低下については、オーストリア・国際応用システム研究所 (IIASA) の Zbigniew Klimont 博士と意見交換し、ECLIPSEversion5a だけでなく、未発表の version6b も含めてボトムアップ型インベントリの提供を受け、その変化の確からしさや要因を考察し、共著論文文化した。その後のコロナ時期の解析から家庭部門の寄与を推定した論文についても同様である。さらに、中国・家庭部門等からの限界削減費用計算についても、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) の追加提供を受け、実施したものである。

8. 研究者略歴

研究代表者

谷本 浩志

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、国立環境研究所地球環境研究センター地球大気化学研究室 室長

研究分担者

1) 池田 恒平

神戸大学理学部地球惑星科学科卒業、東京大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、博士 (理学)。現在、国立環境研究所地球環境研究センター地球大気化学研究室 研究員

2) 永島 達也

東京工業大学理学部地球・惑星科学科卒業、東京大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、博士 (理学)。現在、国立環境研究所地域環境研究センター大気環境モデリング研究室 主任研究員

3) 猪俣 敏

東京大学理学部地球物理学科卒業、同大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻修士課程修了、博士（理学）。現在、国立環境研究所環境計測研究センター反応化学計測研究室 室長

4) 金谷 有剛

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 センター長代理

5) 成田 大樹

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修士課程修了、コロンビア大学大学院、Ph. D. (Sustainable Development)。現在、東京大学大学院総合文化研究科国際環境学教育機構 准教授

II. 成果の詳細

II-1 アジアにおける人為起源排出インベントリの改良と全球モデリング

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター	地球大気化学研究室	谷本 浩志
地球環境研究センター	地球大気化学研究室	池田 恒平
地域環境研究センター	大気環境モデリング研究室	永島 達也
環境計測研究センター	反応化学計測研究室	猪俣 敏

[要旨]

人為起源のブラックカーボン (BC) 排出量について、ボトムアップ型のインベントリの相互比較によってインベントリ間の推計値の不確実性を把握し、モデル計算と観測値との比較から各インベントリの精度を定量的に検証した。ボトムアップ・インベントリは、BCによる気候や大気質への影響を評価するための気候モデルや大気質モデルの入力値として使用されるが、東アジアからの排出量推計には大きな不確実性がある。本研究では、地球温暖化や大気汚染を対象とした国際モデル相互比較実験などで幅広く使用されている5種類の全球インベントリ (HTAPv2, MACCity, ECLIPSEv5a, CEDS, EDGARv4.3.2) 及び、1種類の領域インベントリ (REASv2.1) を対象とし、東アジアの地域別・部門別にBC、メタン (CH₄)、一酸化炭素排出量の比較を行った。中国からの2010年のBC排出量は1.3-2.4 Tg/年と推計され、最大値 (CEDS) と最小値 (EDGARv4.3.2) には約80%の差があることがわかった。インベントリ間の差は主に、家庭部門および産業・エネルギー部門の差によるものであった。6種類のインベントリを用いた大気化学輸送モデル (GEOS-Chem) による計算を行い、サブテーマ2で得られた長崎県福江島でのBC観測値と比較して、各インベントリの定量的検証を行った。モデル計算では、排出量を検証するためにタグトレーサー法を用いて発生源地域別のBCを区別するとともに、輸送中に降水による除去の影響を受けていないデータのみを抽出した。データ抽出後のモデル計算と観測値の比較から中国からのBC排出量は1.1 Tg/年と推計され、CMIP6の気候モデル実験で用いられているCEDSインベントリは約2倍過大評価していることを指摘した。排出インベントリの違いによる北極圏のBCのモデル計算の不確実性を調べるために、上記のインベントリを入力値としたモデルシミュレーションの結果を解析した。北極圏の地上観測値とモデル計算を比較しBC濃度への影響を評価したところ、インベントリの違いによって冬季には約3倍の濃度差が見られた。北極圏のBC濃度差に最も影響を及ぼす発源地域は、地表付近ではロシア、中部対流圏では東アジアであり、BCによる北極の気候への影響評価を高精度化するためには、これらの地域からのBC排出量の精緻化が重要であることがわかった。CH₄については、化学輸送モデル (GEOS-Chem) にタグトレーサー法を導入して、発生源の種類及び地域ごとにトレーサーを区別するタグCH₄計算が行えるように改良した。4種類の異なる人為起源排出インベントリを用いたモデル計算を行い、波照間島での観測値と比較を行った。モデル計算結果は観測と比較して-7%から+13%の範囲に入り、中国のCH₄排出量は大きく過大あるいは過小評価はされていないことが示唆された。

1. 研究開発目的

ブラックカーボン (BC) やメタン (CH₄) は主要な短寿命気候強制因子 (SLCF) であり、CO₂などの長寿命温室効果気体とともに地球温暖化を引き起こす原因物質である。アジアは世界で最もBCの人為起源排出量の多い地域であり、アジア起源のBCは領域規模および北極圏を含む全球規模の気候変動・大気質に影響を及ぼす。BCやCH₄による気候変動や大気質への影響は、ボトムアップ手法によって推計された排出インベントリを入力値として与えた気候モデルや大気質モデルによって評価される。しかし、ボトムアップ・インベントリのアジアからのSLCF排出量には大きな不確実性があり、モデルや観測による検証・高精度化が重要な課題である。サブテーマ1では、地球温暖化 (CMIP6) や北極域の環境変動 (AMAP)、半球規模大気汚染 (HTAP) などの国際プロジェクトで使用されている人為起源の排出インベントリを対象としてBC、CH₄、CO排出量を相互比較するとともに、独自に改良してきた大気化学輸送モデル (GEOS-Chem) とサブテーマ2で得られた観測データを使用して、各インベントリのBC排出量推計値を定量的に検証する。北極圏におけるBCの時空間変動は、モデルによる再現が難しいことが報告されて

おり、その原因の一つに排出量の不確実性が指摘されている。そこで本研究では、人為起源排出インベントリの違いが北極域のBCシミュレーションに及ぼす影響に着目する。複数のインベントリを入力したタグBC計算を行い、北極圏のBC濃度差に及ぼす影響を発生源地域別に評価し、BCによる北極の気候への影響評価を高精度化するための知見を得る。またCH₄については、ボトムアップ・インベントリのアジア地域からの排出量推計値の検証を行うために、新たに化学輸送モデル（GEOS-Chem）にタグトレーサー法を導入し、発生源の種類及び地域ごとにトレーサーを区別するタグCH₄計算が行えるように改良する。

2. 研究目標

モデル技術の改良を継続することにより、IPCCやAMAP、HTAP等、国内および国際的な評価報告書の基礎となる気候モデルや大気汚染モデルで使われている6種の人為起源排出インベントリについて、BCおよびCH₄のアジアにおける不確かさおよびそれらの相対的信頼性を評価するとともに、サブテーマ2と協力して、BCおよびCH₄排出量のトップダウン推計手法を、インベントリ報告値と比較可能な程度に高精度化し、排出インベントリの検証に向けた道筋をつける。また、北極域や寒冷地域の温暖化・気候変動にBCがおよぼす影響について発生源別にブレイクダウンした情報を得る。

3. 研究開発内容

(1) ボトムアップ型の人為起源排出インベントリの比較

大気汚染物質や温室効果気体の排出インベントリは、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。アジアは世界最大の人為起源排出源の一つであるが、ボトムアップ型の排出インベントリにおける排出量推計には大きな不確実性が存在する。例えばREAS (Regional Emission inventory in Asia) v 2.1では、中国からのBC排出量の不確実性は±176%と見積もられている¹⁾。したがって、排出インベントリ間の違いを十分に知ることは、モデルを用いて気候への影響評価を行う上で重要な課題である。本研究では、まず既存の排出インベントリのデータ収集を行い、本課題で対象とするBC及びCH₄の地域別・部門別の排出量の相互比較を行った。また、BCと共通する発生源が多く、関係の深い一酸化炭素（CO）についても同様にインベントリ間の比較を行った。

本研究で比較対象とした排出インベントリは、全球インベントリ5つと、アジアを対象とした領域インベントリ1つの合計6つである（表1.1）。検証の対象年は、できるだけ多くのインベントリが対象期間として含んでおり、かつできるだけ新しい年として2010年を選んだ。REASv2.1は、日本の国立環境研究所とアジア大気汚染研究センターで開発されてきたアジアを対象とした領域インベントリである¹⁾。HTAPv2は、長距離越境大気汚染に関する国際プロジェクトTF HTAP (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution) のモデル実験のために開発された排出インベントリであり、2008年と2010年を対象としている²⁾。EDGARは、欧州委員会共同研究センター (Joint Research Centre, European Commission) で開発されてきたインベントリであり、本研究ではEDGARv4.3.2を使用した³⁾。MACCityは、IPCC AR5のモデル実験 (CMIP5) のために開発されたACCMIP (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project) インベントリの対象期間が延長されたものである⁴⁾。CEDSは、IPCC AR6の気候モデル実験 (CMIP6) に使用されている排出インベントリである⁵⁾。ECLIPSEv5aは、北極評議会のAMAPによるBCやCH₄の北極気候影響に関する報告書のモデル実験で使用された排出インベントリである⁶⁾。なお、HTAPv2とMACCityには、CH₄が対象成分として含まれていないため、CH₄については4つのインベントリについて比較した。前身の2-1505推進費課題におけるモデル計算ではHTAPv2を使用しており、今回の比較により、インベントリによるモデル計算結果の精度や誤差も評価することができる。

各インベントリのBC排出量を検証するために、サブテーマ2で得られた長崎県・福江島での $\Delta BC / \Delta CO$ 比の観測値⁷⁾を用いて、各インベントリのBC/CO排出比と比較した。排出インベントリにおけるCO排出量は、BC排出量と比べて不確実性が小さく、例えばREASv2.1における中国のCO排出量の不確実性は±

86%で、BCの約半分と報告されている。このことを利用して、排出時のBC/CO比が保持される、降水による影響を受けていない気塊の $\Delta BC/\Delta CO$ 観測値を用いることによって、BC排出量の検証が可能となる。

表1.1 本研究で比較に用いた人為起源排出インベントリ

インベントリ	対象期間	解像度	領域	成分	参照文献	関連プロジェクト
REASv2.1	2000-2008	0.25°	アジア	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , NMVOCs, SO ₂ , BC, OC, NH ₃ , PM2.5, PM10, TPM	Kurokawa et al. (2013) ¹⁾	
HTAPv2	2008, 2010	0.1°	全球	CO, NO _x , NMVOCs, SO ₂ , BC, OC, NH ₃ , PM2.5, PM10	Janssens-Maenhout et al. (2015) ²⁾	TF HTAP
EDGARv4.3.2	1970-2012	0.1°	全球	CO ₂ , CH ₄ , CO, NO _x , NMVOCs, SO ₂ , BC, OC, NH ₃ , PM10	Crippa et al. (2018) ³⁾	
MACCity	1960-2020	0.5°	全球	CO, NO _x , NMVOCs, SO ₂ , BC, OC, NH ₃	Granier et al. (2011) ⁴⁾	IPCCAR5, CCMI
CEDS	1750-2014	0.5°	全球	CO ₂ , CH ₄ , CO, NO _x , NMVOCs, SO ₂ , BC, OC, NH ₃	Hoesly et al. (2018) ⁵⁾	AerChemMIP, IPCCAR6
ECLIPSEv5a	1990-2050	0.5°	全球	CH ₄ , CO, NO _x , NMVOCs, SO ₂ , BC, OC, NH ₃ , PM2.5 PM10	Klimont et al. (2017) ⁶⁾	AMAP

(2) モデルと観測による東アジアからのBC排出量の検証および推計

三次元大気化学輸送モデルによるシミュレーションを行い、各インベントリのBC排出量を検証した。用いたモデルはGEOS-Chem化学輸送モデルであり、対流圏の詳細な気体及びエアロゾル化学過程を含み、NASA/GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) が提供する気象場データGEOS (Goddard Earth Observing System) によって駆動されるオフラインの全球化学輸送モデルである。本研究ではGEOS-Chem version 9-02、気象場にはGEOS-5を用い、水平解像度2° × 2.5°、鉛直方向には地上から0.01 hPaまでを47層に分割して計算した。

本研究では、各発生源からのBC排出量を検証するために、「タグ付きBCシミュレーション」が行えるよう改良したGEOS-Chemを使用した⁸⁾。タグ付きBCシミュレーションでは、発生源毎のBCを別個のトレーサー（“タグトレーサー”）として計算することによって、BCの発生源を区別することができ、各発生源の排出量の検証が可能となる。本研究では発生源「領域」で区別するだけでなく、人為起源発生源と自然起源発生源からのBCをそれぞれ別のタグトレーサーとして扱った。発生源の「種類」でも区別することによって、本課題で対象とする人為起源排出量を自然起源発生源と分離して検証できるようになっている。タグ付き計算のための人為起源発生源領域の区分は、主要な発生源であるアジアの各地域、北米、ヨーロッパ、ロシアなど、16領域を設定した（図1.1a）。特にアジアについては、本研究では東南アジアや南アジアを区別するとともに、日本と朝鮮半島、中国北部・中国南部を分けて東アジア域内の内訳も詳しく評価できるようにした。なお、排出インベントリの相互比較のための日本、朝鮮半島、中国北部、中国南部の各領域の定義も、図1.1aに示した範囲で行った。

モデルと観測値のBC濃度の比較は、降水の履歴による区別も考慮して行った。これは、モデルと観測を単純に比較するだけでは、BC排出量の誤差と、モデル内の降水による除去過程の誤差を分けることができないためである。仮に、モデル計算値と観測値が一致している場合でも、BC排出量の過大評価を降水除去の過大評価が打ち消した結果、合っているように見えている可能性がある。そこで本研究では、降水除去過程を含む標準実験と、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濃度から算出した輸送効率に基づき、降水の除去を受けていない期間のデータを使ってモデルと観測の比較

を行った。観測値には、サブテーマ2から提供された長崎県・福江島におけるBC濃度を使用した。(1)の6種類のボトムアップ型インベントリをそれぞれ用いたタグ付きトレーサー計算を行った。モデル計算は、2010年のBC排出量 (REASv2.1は2008年) を用いて、2009-2011年の3年間を対象に行った。

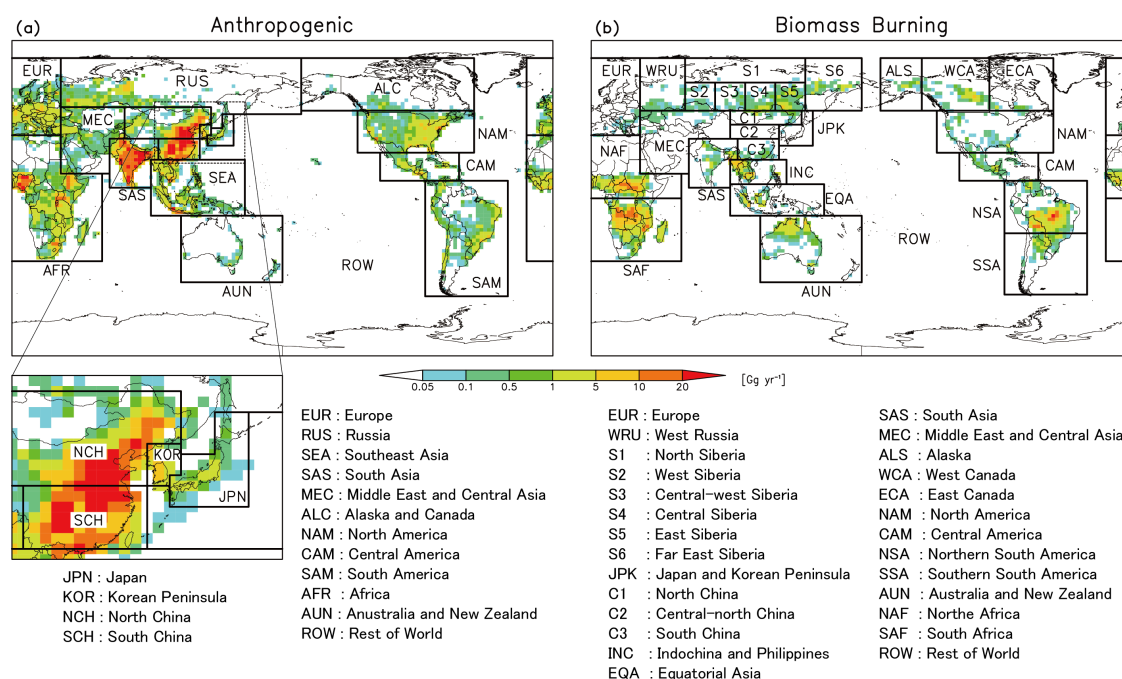


図1.1 全球化学輸送モデルGEOS-Chemによるタグ付きBCシミュレーションの (a)人為起源の発生源領域 (計16領域) 及び、(b)バイオマス燃焼起源の発生源領域 (計27領域) 区分の設定

(3) 人為起源排出インベントリの違いが北極BCシミュレーションに及ぼす影響

北極圏は地球上で最も速く温暖化が進行している地域であり、気温は全球平均のおよそ2倍の速度で上昇している。北極圏におけるBCの発生源や気候への影響を理解するには、モデルによる北極BCの時空間変動の再現が不可欠である。しかし、化学輸送モデルや化学気候モデルで北極域のBC濃度の季節変動を再現することは難しく、モデル間のばらつきも大きいことが報告されている。モデルによるBCの再現が困難な理由としては、まずBC排出量の推計には大きな不確実性が挙げられる。また、モデルの不確実性の原因には、BCの疎水性粒子から親水性粒子への変質過程や、湿性除去過程が十分に理解されていないことが指摘されている。本研究では、排出インベントリの違いによる北極BCモデル計算の不確実性を調べるために、全球化学輸送モデルGEOS-Chemを用いて、複数の人為起源インベントリのBC排出量を入力値として与えた計算を行い、北極圏のBC濃度への影響を評価した。排出インベントリには、(1)で述べた6種類に加え、ロシアを対象とした領域インベントリ (Huang et al., 2015)⁹⁾も使用した。GEOS-Chemの計算は、(2)と同様にタグトレーサー法を用いており、排出インベントリの違いによる北極BCへの影響を発生源地域別に分けて評価した。北極圏におけるBC観測として、Barrow (156.6°W, 71.3°N), Alert (62.3°W, 82.5°N), Ny-Alesund (11.9°E, 78.9°N), Tiksi (128.9°E, 71.6°N) におけるBCの地上観測値を用い、モデルによる計算結果と比較した。

(4) 化学輸送モデルによるメタンのシミュレーションと観測の比較

全球化学輸送モデルGEOS-Chem v12.8にCH₄のタグトレーサー法を導入して、発生源の種類及び地域ごとにトレーサーを区別するタグCH₄計算が行えるように改良した。表1.2にタグCH₄計算のトレーサーの分類を示した。発生源の種類については、「化石燃料 (エネルギー)」、「廃棄物・農業・その他の人為起源」、「バイオマス燃焼」、「湿地」、「その他の自然起源」の5種類に分けた。発生源の地域に

については、化石燃料と廃棄物・農業等の部門は、中国北部、中国南部、朝鮮半島、日本、それ以外の地域の5領域に分けた。湿地については、中国とそれ以外の地域の2領域に分けた。その他の発生源（バイオマス燃焼、その他の自然起源）については、領域によるタグ付けは行わない。

モデル計算に利用した人為起源排出インベントリは、REASv2.1、CEDS、ECLIPSEv5a、EDGARv4.3.2の4種類である。領域インベントリであるREASv2.1の計算については、アジア以外の領域にはCEDSの排出量を用いた。バイオマス燃焼の排出インベントリにはQFED2を使用した。モデルの解像度は、水平方向 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、鉛直方向は47層（モデルトップの高度は0.01 hPa）である。気象場にはNASA/GMAOが提供する再解析データのMERRA-2を使用した。モデル計算は、20年間スピニアップした後、2009-2011年の3年間を対象に行った。CH₄の観測値には沖縄県波照間島のモニタリングステーション（123.8°E, 24.1°N）のデータを使用し、モデル計算の結果と比較した。

表1.2 タグCH₄トレーサー計算における発生源種類と領域分けの定義

発生源種類	領域
化石燃料（エネルギー）	中国北部、中国南部、朝鮮半島、日本、それ以外の地域
廃棄物+農業+その他人為起源（家庭、輸送など）	中国北部、中国南部、朝鮮半島、日本、それ以外の地域
湿地	中国、それ以外の地域
バイオマス燃焼	全球
その他の自然起源（湖沼、シロアリなど）	全球

4. 結果及び考察

(1) ボトムアップ型の排出インベントリの比較

はじめに、東アジア4地域（中国北部、中国南部、日本、朝鮮半島）における各インベントリのBC排出量を部門別に比較した（図1.2）。比較した排出部門は、インベントリごとにセクターの分け方が異なっているため、BC及びCOについては表1.3のように、CH₄に関しては表1.4のように統合している。比較の対象年は、できるだけ多くのインベントリの対象期間に含まれていること、できるだけ新しい年であることを考慮して2010年とした。ただし、REASv2.1については2008年までのデータしかないので、REASv2.1のみ2008年の値を使用している。中国北部の年間BC総排出量は、0.64-1.19 Tg/年と見積もられ、最大値のインベントリ（ECLIPSEv5a）と最小値（EDGARv4.3.2）には1.9倍の差があった。中国南部

表1.3 BCとCOの排出量比較に用いた各部門の分類

	REASv2.1	HTAP2	MACCity	ECLIPSEv5a	CEDS	EDGARv4.3.2
家庭	domestic	residential	domestic	domestic	residential	residential
産業・エネルギー	industry, power plants	industry, energy	industry, energy	industry, energy	industry, energy	energy industry, oil refineries and transformation, combustion in manufacturing industry, fuel exploitation, non-metallic mineral processes, chemical processes, iron and steel production, aluminium, magnesium and lead production, other production, fossil fuel fires
輸送	road transport, other transport	transport	transport	transport	transport	road transport, non-road ground transportation
その他	aviation, international navigation	air, ships	ships, waste	ships, waste	ships, waste	aviation, ships, waste incineration

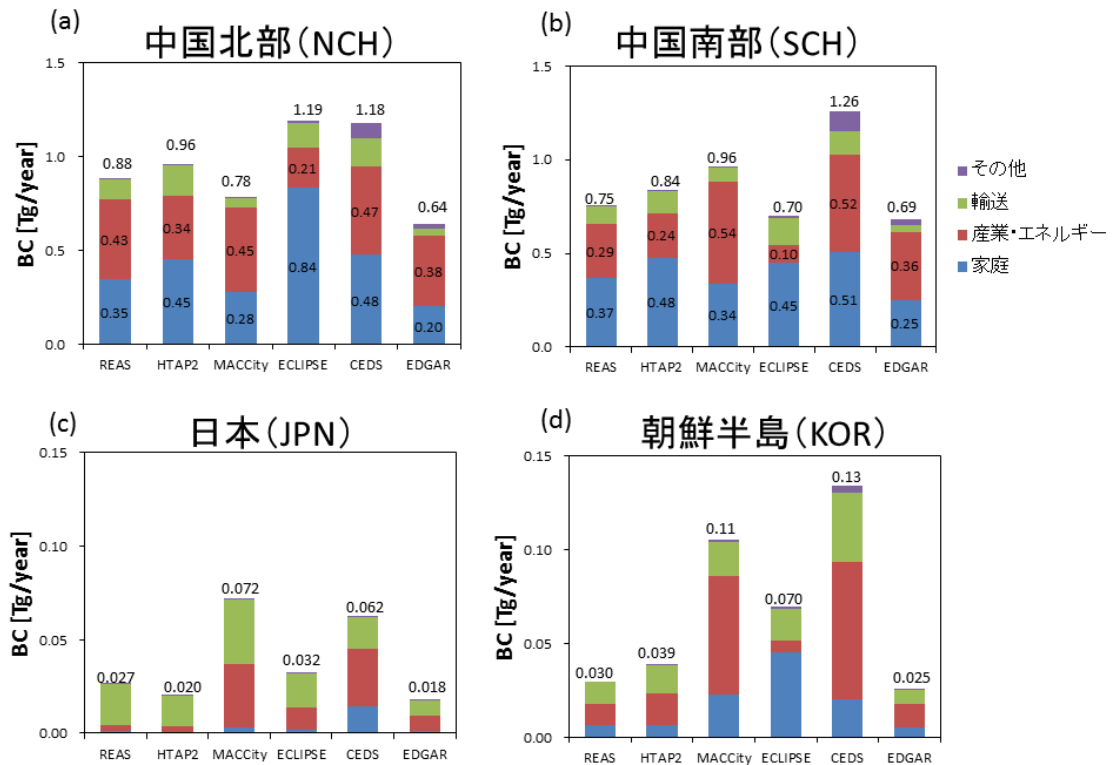


図1.2 2010年の(a)中国北部、(b)中国南部、(c)日本、(d)朝鮮半島における部門別BC排出量の比較

の総排出量は、0.69-1.29 Tg/年と見積もられ、中国北部の排出量と同程度であった。中国南部で最大の排出量であるCEDSは、最も少ないEDGARv4.3.2と比較して1.8倍多かった。中国においてBC排出量が大きい部門は家庭部門と産業・エネルギー部門であり、輸送部門がそれらに続く。各インベントリの家庭部門が総排出量に占める割合は、中国北部では32-70%、南部では35-64%であった。産業・エネルギー部門の割合は、北部で18-58%、南部では14-57%であった。排出量が最も大きい部門はインベントリによって異なっており、家庭部門が最大発生源であるインベントリ (ECLIPSEv5a、HTAP2) と、産業・エネルギー部門が家庭部門を上回り最大であるインベントリ (MACCity、EDGARv4.3.2)、両部門の排出量が同程度のインベントリ (REASv2.1、CEDS) が存在することがわかった。

中国の主要BC排出源である家庭部門と産業・エネルギー部門からの排出量の季節変化を比較した (図1.3)。家庭部門の排出量はいずれのインベントリも、冬季に最大、夏季に最小となる季節変化を示すことが特徴である。家庭部門の年間排出量は、0.20-0.84 Tg/年と、最大値 (ECLIPSEv5a) と最小値 (EDGARv4.3.2) には4.2倍の差があった。排出量が最大となる冬季 (1月) においても5倍以上の大きな差が存在していた。産業・エネルギー部門のBC排出量の季節変化は小さかった。産業・エネルギー部門の各インベントリの年間排出量は0.21-0.47 Tg/年で、インベントリ間には2.2倍の差があった。中国

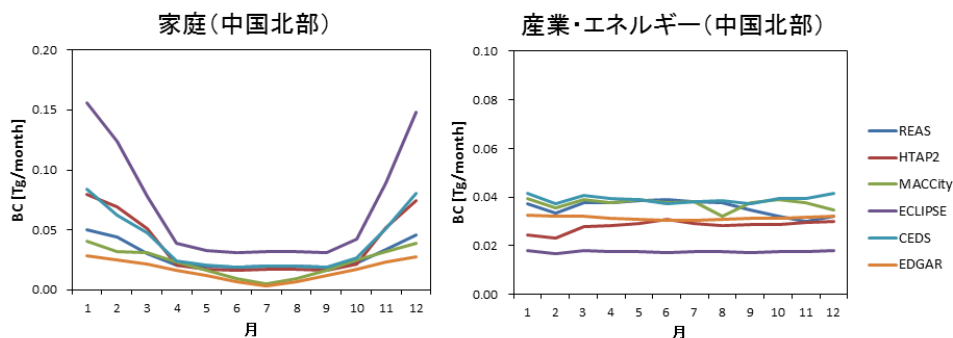


図1.3 中国北部における家庭部門及び産業・エネルギー部門のBC排出量の季節変化

北部、中国南部ともに総排出量はインベントリ間に約2倍の差があったが、部門ごとに比較した排出量の差はインベントリ間で2倍以上あり、各部門の排出量のばらつきが大きいことがわかった。総排出量の値に近いインベントリ同士（ECLIPSEv5aとCEDS）であっても、主要部門の排出量は互いに大きく異なっている場合があり、部門ごとに排出量を比較が重要であることを示している。

日本と朝鮮半島のBC総排出量は、それぞれ0.018-0.072 Tg/年、0.025-0.13 Tg/年と見積もられた（図1.2）。インベントリ間の差は、日本で約4倍、朝鮮半島で約5倍に達していることがわかった。日本における主要な発生源は輸送部門であり、総排出量に占める割合は、28-82%であった。REASv2.1のように輸送部門の寄与が8割を超え大半を占めるインベントリがある一方、EDGARv4.3.2やECLIPSEv5aは、CEDSは産業・エネルギー部門も38-49%と重要な寄与を持っており、インベントリによって内訳に大きな差異を示した。朝鮮半島における主要なBC発生源は、輸送部門と産業・エネルギー部門であるが、ECLIPSEv5aについては家庭部門の排出量が最も大きかった（66%）。輸送部門と産業・エネルギー部門は、それぞれ17-40%、8-60%を占めていた。朝鮮半島においてもインベントリによって、各セクターの排出量の差異は大きいことがわかった。

次にCH₄について、対象成分に含まれないHTAP2とMACCityを除く4つのインベントリの排出量を地域別・部門別に比較した（図1.4）。中国北部の総排出量は29-50 Tg/年と見積もられ、最も排出量の多いREASv2.1は、最も少ないECLIPSEv5aと比べ、約1.7倍大きかった。中国南部の総排出量は、23-30 Tg/年であり、中国北部と比べるとやや少なかった。中国南部で排出量の最も多かったEDGARv4.3.2と、最も少なかったECLIPSEv5aの差は約30%でありインベントリ間のばらつきは中国北部と比べると小さかった。中国北部で最も排出量の多い発生源はエネルギー部門であり、総排出量の55-78%を占めた。続いて排出量が多いのは、農業部門と廃棄物部門であり、それぞれ11-25%、8-14%を占めていた。インベントリの中で、エネルギー部門からの排出量が最も大きいのはREASv2.1の39 Tg/年であり、ECLIPSEv5aの18 Tg/年よりも2倍以上大きかった。中国北部のCH₄総排出量のばらつきは、エネルギー部門からの排出量の差が主な原因となっていることがわかった。一方、中国南部で最も排出量が多い発生源は農業部門であり、総排出量の37-60%を占めていた。農業部門に次いで排出量が多いのは、エネルギー部門と廃棄物部門であり、それぞれ10-35%、15-23%を占めた。中国南部における農業部門のCH₄排出量は、REASv2.1

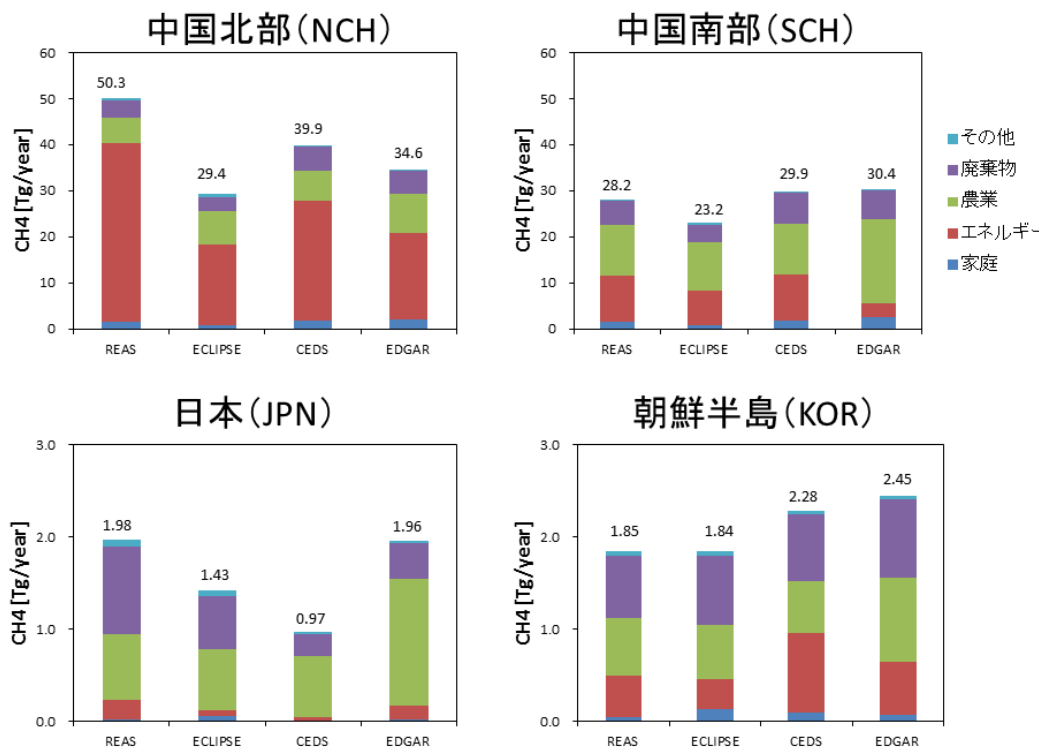


図1.4 2010年の中国北部、中国南部、日本、朝鮮半島における部門別CH₄排出量の比較

とECLIPSEv5a、CEDSは10-11 Tg/年と同様の値を示したが、最大値のEDGARv4.3.2は18 Tg/年で他のインベントリより大きな値を示した。中国南部のエネルギー部門の排出量は、3.1-10 Tg/年と見積もられ、最大値のREASv2.1と最小値のEDGARv4.3.2には、3倍以上の差があった。中国南部のCH₄排出量のインベントリ間ばらつきは、農業部門とエネルギー部門における差が原因となっており、総排出量の値に近いCEDSとEDGARv4.3.2も内訳を見るとこれらのセクターで互いに大きな差があることを示した。

日本における各インベントリのCH₄年間総排出量は、0.97-2.0 Tg/年と見積もられ、最大値のEDGARv4.3.2と最小値REASv2.1には約2倍の差があった。日本でCH₄排出量が多い発生源は、農業部門と廃棄物部門であり、それぞれ総排出量に占める割合は、36-70%と19-48%であり、いずれのインベントリもこの2つのセクターで80%以上を占めた。REASv2.1では、廃棄物部門からの排出量が最も多い一方、他の3インベントリでは農業部門の排出量が最大であった。日本の廃棄物部門と農業部門の各インベントリの排出量は、それぞれ0.24-0.95 Tg/年と0.67-1.4 Tgと見積もられ、インベントリ間には約4倍もしくは2倍の差があった。朝鮮半島のCH₄年間総排出量は、1.8-2.5 Tg/年であり、最も排出量の大きいEDGARv4.3.2と最も少ないECLIPSEv5aの差は約30%であった。朝鮮半島におけるCH₄の主要な発生源は、廃棄物部門、農業部門、エネルギー部門であり、それぞれ32-41%、25-37%、17-38%を占めた。朝鮮半島の発生源の内、インベントリ間で最もばらつきが大きいのはエネルギー部門（0.32-0.86 Tg/年）で、

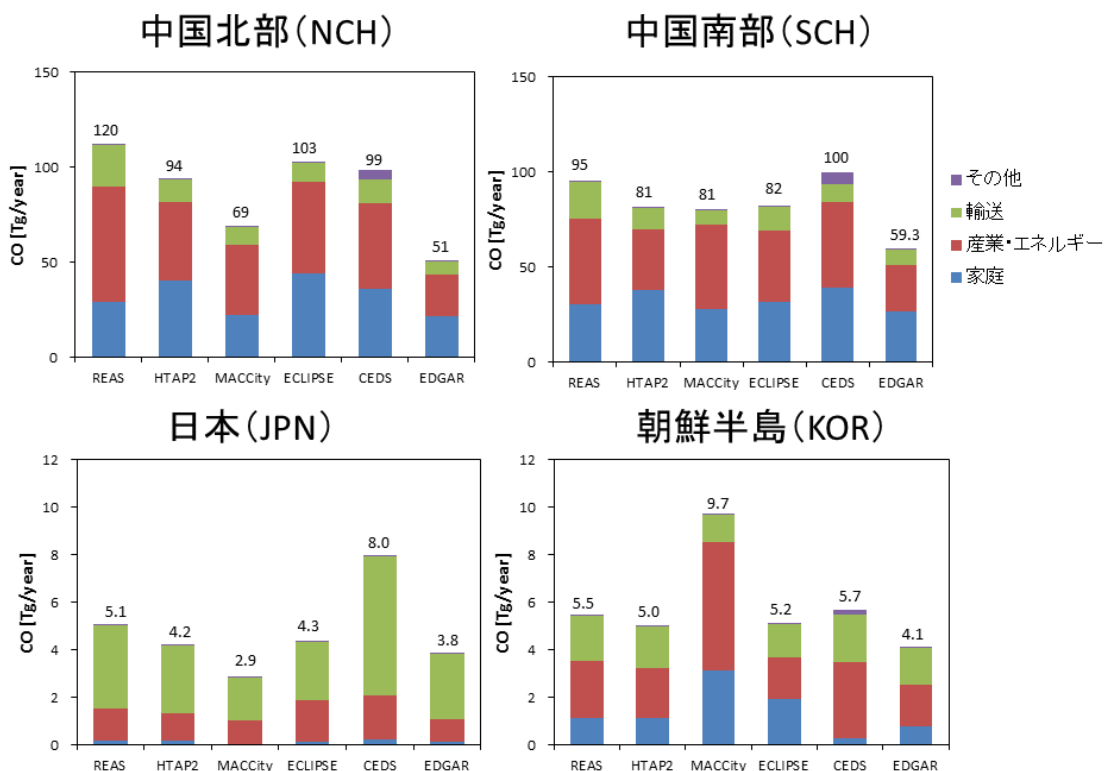


図1.5 2010年の中国北部、中国南部、日本、朝鮮半島における部門別CO₂排出量の比較

表1.4 CH₄排出量の比較に用いた各部門の分類

	REASv2.1	ECLIPSEv5a	CEDS	EDGARv4.3.2
家庭	domestic	domestic	residential	residential
エネルギー	power plants, fugitive emissions (coal, gas, and oil)	energy	energy	energy industry, oil refineries and transformation, fuel exploitation, fossil fuel fires
農業	enteric fermentation, manure management, rice cultivation	agriculture	agriculture	enteric fermentation, manure management, agricultural soils
廃棄物	waste	waste	waste	soil waste disposal, waste water, waste incineration
その他	road transport, other transport, industry, aviation, international navigation	transport, industry, ships	transport, industry,	road transportation, non-road ground transportation, combustion in manufacturing industry, chemical processes, iron and steel production, aviation, ships

最大値のCEDSと最小値のECLIPSEv5aには2.7倍の差があった。

続いてCOについて、各インベントリの排出量をBCとCH₄同様に地域別・部門別に比較した（図1.5）。CO排出量は、BC/CO比の観測値からBC排出量を推計する際に用いられることがあるため、その検証は重要な課題である。中国北部におけるCOの年間総排出量は、51-112 Tg/年と見積もられ、最も多いREASv2.1と最も少ないEDGARv4.3.2には、2.2倍の差があった。排出インベントリの推計における不確実性はBCよりもCOのほうが小さいとされているが、中国北部のCO排出量のインベントリ間のばらつきはBCと同程度であることがわかった。中国北部におけるCOの主要な発生源は、BCと同様に家庭部門と産業・エネルギー部門であり、輸送部門がそれに続く。家庭部門からの排出量は、22-44 Tg/年、産業・エネルギー部門の排出量は22-61 Tg/年と見積もられ、それぞれ、インベントリ間には2-3倍の差があった。中国南部のCO年間総排出量は59-100 Tg/年と中国北部と比べてインベントリ間のばらつきは小さいものの、最大値（CEDS）と最小値（EDGARv4.3.2）には80%の差があった。

日本におけるCOの年間総排出量は2.9-8.0 Tg/年と見積もられ、排出量の最も多いCEDSと最も少ないMACCcityには、2.8倍の差があった。インベントリ間のばらつきは日本の主要な発生源である輸送部門の排出量の違いが原因となっている。BCの排出量と比べるとインベントリ間のばらつきは小さいものの、CO排出量のインベントリ間にも2倍以上の差があることがわかった。朝鮮半島の各インベントリのCO総排出量は4.1-9.7 Tg/年で、最大値（MACCcity）と最小値（EDGARv4.3.2）には2.4倍の差があった。朝鮮半島においても、CO排出量のインベントリ間の差はBC排出量と比べると小さいものの、大きな差があることを示している。

サブテーマ2で得られた福江島での $\Delta BC / \Delta CO$ 観測値を各インベントリのBC/CO排出比と比較した結果を図1.6に示す。降水による除去を受けていない気塊の $\Delta BC / \Delta CO$ 比は、排出時のBC/CO比を保持していると考えられることから、これらと比較することでBC排出量の検証が可能となる。中国北部におけるインベントリのBC/CO排出比は、9.8-15.6 ng m⁻³ ppbv⁻¹であり、いずれのインベントリも観測の $\Delta BC / \Delta CO$ 比5.4 ng m⁻³ ppbv⁻¹よりも高い値を示した。また、中国南部においてもインベントリのBC/CO排出比は、観測値6.3 ng m⁻³ ppbv⁻¹より高かった（9.9-15.7 ng m⁻³ ppbv⁻¹）。この結果は、中国のBC排出量がインベントリで過大評価されていることを示唆している。

日本におけるインベントリのBC/CO排出比は、REASv2.1とHTAP2については、6.9 ng m⁻³ ppbv⁻¹と6.2 ng m⁻³ ppbv⁻¹となり、観測値5.9 ng m⁻³ ppbv⁻¹と比較的近い値を示した。一方、その他の4インベントリのBC/CO排出比は、8.9-31.1 ng m⁻³ ppbv⁻¹と観測値を過大評価していた。朝鮮半島でのBC/CO排出比は、REASv2.1については6.9 ng m⁻³ ppbv⁻¹で、観測値5.8 ng m⁻³ ppbv⁻¹と近かった。他の5つのインベントリについては、8.0-29.5 ng m⁻³ ppbv⁻¹と見積もられ、観測値より高かった。

観測値と $\Delta BC/\Delta CO$ とインベントリのBC/CO排出比の比較は、中国におけるBC排出量の過大評価を示唆する結果となった。ただし、前述したようにインベントリ間のCO排出量のばらつきはBC排出量と同程度に大きく、CO排出量の過小評価がBC/CO排出比の過大評価に影響している可能性は排除できない。BC/CO比の観測を用いてBC排出量の検証や推定を行うためには、CO排出量の高精度化も重要であることが明らかになった。

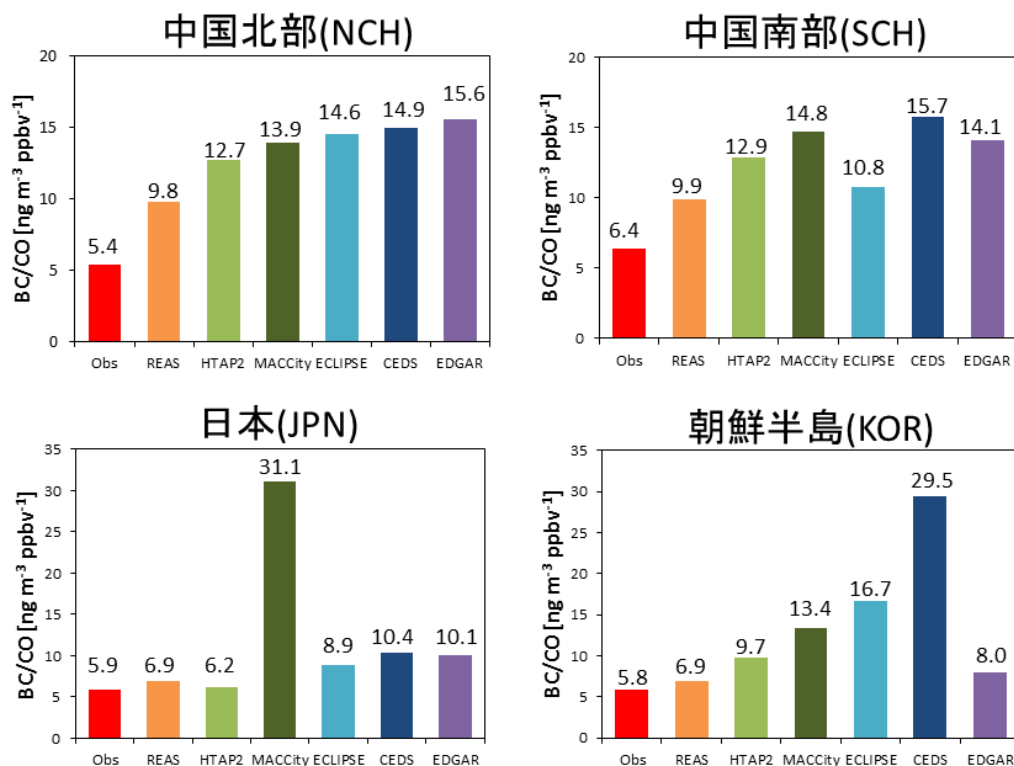


図1.6 福江島での観測から得られた各地域（中国北部、中国南部、日本、朝鮮半島）の $\Delta BC/\Delta CO$ 比と各インベントリのBC/CO排出比の比較

(2) モデルと観測による東アジアからのBC排出量の検証および推計

6つのインベントリをそれぞれ入力値として与えたGEOS-Chemのタグ付きトレーサー実験による計算と福江島におけるBC観測を用いて、排出量を検証した結果について述べる。図1.7aに、福江島において観測されたBC濃度の2009年4月から2011年12月までの月平均値とモデルで計算された結果を示す。表1.5には、観測されたBC濃度とモデルで計算されたBC濃度の各季節および全季節の平均値をまとめて示した。福江島で観測されたBC濃度が最も高くなるのは春季および冬季である。これらの季節は、総観規模の擾乱と偏西風によるアジア大陸からの長距離輸送が発生することによって、BC濃度が上昇する。BC濃度が最も低くなるのは、夏季である。夏季は、太平洋高気圧に伴う南風によって海洋性の清浄な気塊が流入することによって濃度が低下する。異なる排出インベントリを用いたシミュレーション間でBC濃度の絶対値の差が見られるものの、福江島で観測された季節変動はモデルによってよく再現されていた（図1.7a）。

図1.7bは、アジア大陸からの輸送が起りやすい冬と春（2010年1-5月）の福江島における観測およびモデル計算された1時間ごとのBC濃度の時間変化を示している。6種類のモデル計算はいずれも1時間値の変動を濃度の上昇を含めてよく捉えていることがわかる。全期間のBC濃度の1時間値に対する観測とモデル間の相関係数は0.68-0.73と算出された（表1.5）。これらの結果は、GEOS-Chemが東アジアにおける地域スケールでのBC濃度の変動を再現する能力を有していることを示している。

モデル計算による全期間の平均BC濃度は、0.463-0.942 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と算出され、最大値と最小値には約2

倍の差が見られた（表1.5）。最小値となったのはEDGARv4.3.2を用いた計算であり、観測の平均値 $0.461 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と近い値を示した。最大値を示したのはCEDSインベントリによるシミュレーションで、観測値を約100%過大評価していた。CEDSによる過大評価はいずれの季節で見られ、モデルと観測の季節平均値の比は1.80-2.30と算出された。その他の4つのインベントリに対するモデルと観測の平均値の比は、REASv2.1が1.07、HTAPv2が1.18、MACCityが1.47、ECLIPSEv5aが1.44と算出された。季節別に見ると、REASv2.1と、HTAPv2、ECLIPSEv5aについては、冬季にモデルと観測の濃度比が最も高くなっていた。

表1.5には、2009年-2011年の福江島のBC濃度に対する、東アジア4地域からの寄与も示している。中国北部と中国南部起源のBCは、それぞれ $0.215-0.425 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と $0.100-0.198 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の寄与があり、いずれのトレーサーでも最大値と最小値間には約2倍の差が見られた。福江島では、中国からの寄与が卓越しており、中国北部と中国南部起源のBCの合計は、REASv2.1、HTAPv2、ECLIPSEv5a、EDGARv4.3.2では約80%の寄与、MACCityとCEDSでは約60%の寄与を示した。したがって、6種類のシミュレーション間のBC濃度差は主に、中国における排出量推計値の違いに起因することがわかった。朝鮮半島起源BCの相対的寄与は、REASv2.1、HTAPv2、ECLIPSEv5a、EDGARv4.3.2では約10%と見積もられた一方、朝鮮半島からの排出量を高く推定するMACCityとCEDSについては、朝鮮半島からの寄与が30%を示した。日本からの寄与は $0.013-0.049 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と算出され、全てのシミュレーションにおいて東アジアの4つの地域の中で最小であった。

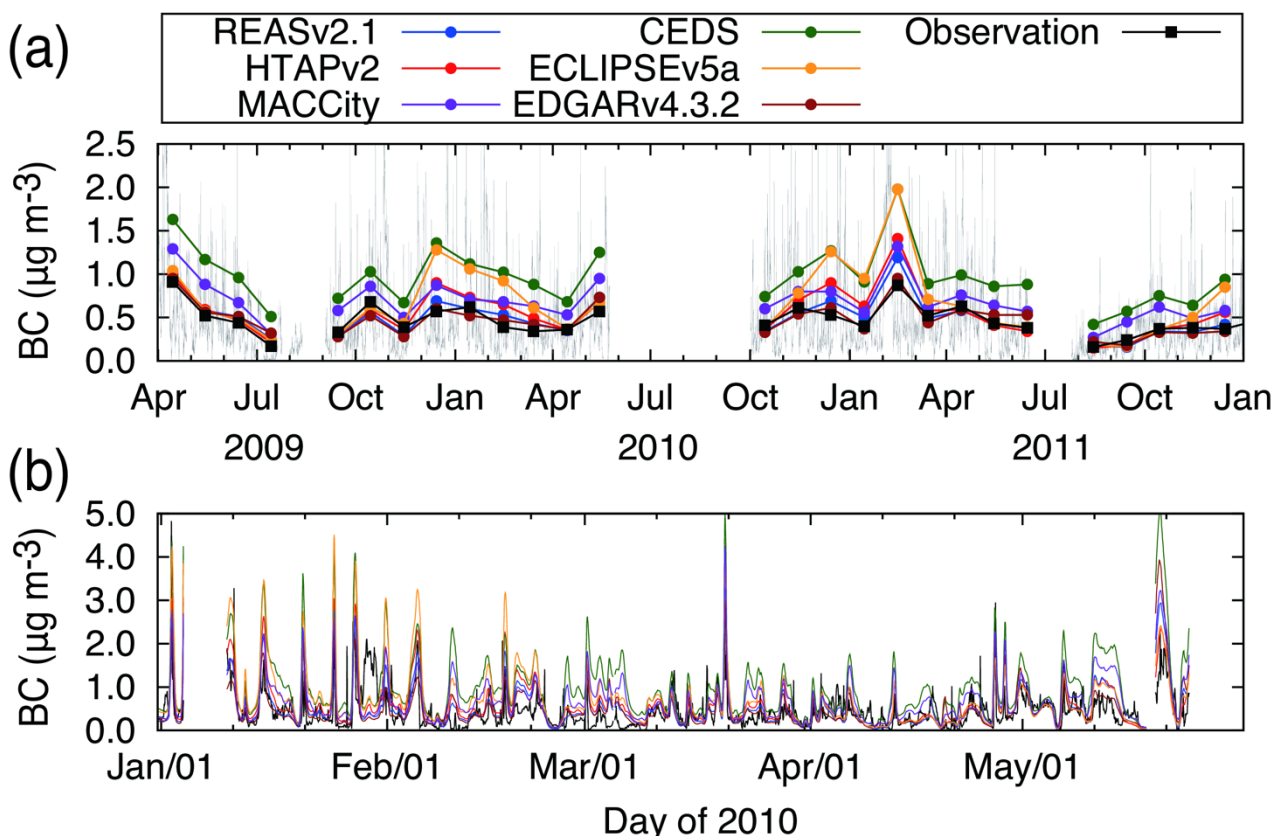


図1.7 (a)福江島における2009-2011年のBC濃度月平均値の観測もモデル計算の比較。観測値を黒線でモデルの結果を色付きの線で示す。細い黒線は観測の1時間値を示す。(b)2010年1-5月のBC濃度の1時間値の観測とモデルの比較。

表1.5 福江島における観測とモデルによる各季節平均のBC濃度（単位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。括弧内はモデルと観測値の比。1時間濃度の観測とモデル間の相関係数（ R ）。全季節で平均した東アジアの各領域からの寄与（単位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。

		観測値	REASv2.1	HTAPv2	MACCity	ECLIPSEv 5a	CEDS	EDGARv 4.3.2
BC	冬	0.534	0.666 (1.25)	0.825 (1.55)	0.786 (1.47)	1.184 (2.22)	1.228 (2.30)	0.549 (1.03)
	春	0.532	0.578 (1.09)	0.581 (1.09)	0.780 (1.47)	0.629 (1.18)	1.037 (1.95)	0.568 (1.07)
	夏	0.255	0.289 (1.14)	0.255 (1.00)	0.402 (1.58)	0.281 (1.10)	0.598 (2.35)	0.335 (1.31)
	秋	0.428	0.362 (0.85)	0.412 (0.96)	0.613 (1.43)	0.442 (1.03)	0.770 (1.80)	0.348 (0.81)
	全季節	0.461	0.493 (1.07)	0.545 (1.18)	0.676 (1.47)	0.664 (1.44)	0.942 (2.04)	0.463 (1.00)
相関係数 (R)	全季節	-	0.73	0.72	0.70	0.68	0.69	0.70
中国北部 起源BC	全季節	-	0.289	0.328	0.276	0.425	0.398	0.215
中国南部 起源BC	全季節	-	0.111	0.100	0.136	0.103	0.198	0.142
朝鮮半島 起源BC	全季節	-	0.048	0.075	0.188	0.089	0.274	0.052
日本起源 BC	全季節	-	0.019	0.013	0.049	0.016	0.037	0.021

冬：12-2月、春：3-5月、夏：6-8月、秋：9-11月。

続いて中国からのBC排出量を検証するために、次のように一時間値データを選択した後に観測値とモデル結果を比較した。第一に、中国からの寄与が卓越する期間を選択するために、中国北部と中国南部起源BCの合計が全濃度に占める割合が80%を超える期間のデータのみを用いた。第二に、輸送中の湿性除去による不確実性の影響を最小化するために、中国起源のBCの輸送効率が80%を超える期間のデータを使用した。これらの閾値はKondo et al. (2011)¹⁰⁾による先行研究と同じである。Kondo et al. (2011)は、辺戸岬で観測されたBC濃度とCO濃度の相関とモデルの結果を解析し、この輸送効率の閾値(80%)が湿性除去の影響を受けたデータを除外するために利用できるを報告している。

これらの閾値を用いてデータを選択した後の観測およびモデルの結果を表1.6にまとめた。データを選択した後は、6つのシミュレーションにおいて1933-2576時間(全データの内、10-13%)のデータが利用可能であった。データ選択後の観測とモデル間の相関係数は0.64-0.73であり、中国起源のBCが卓越し且つ、湿性除去の影響が少ない期間に限った場合でも、モデルは観測の時間変動を良好に再現できていることを確認した。中国の寄与が80%以上かつ、輸送効率が80%以上の期間のモデルの平均値は、1.257-2.144 $\mu\text{g m}^{-3}$ と見積もられた。各シミュレーションに対する観測の平均値は、0.993-1.062 $\mu\text{g m}^{-3}$ と算出された。観測と最も近い値を示したのは中国からのBC排出量推計値の最も小さいEDGARv4.3.2で、モデルと観測値の比は、1.24だった(表1.6)。REASv2.1とHTAPv2、MACCityを用いたモデル計算は、観測よりやや高い値を示したが、モデルと観測の平均値の比は1.5以内(1.37-1.47)であった。中国からのBC排出量が2番目に大きいECLIPSEv5aは、モデル観測比は1.79と算出され、過大評価が示唆された。排出量が最大のCEDSは、モデルと観測比が最も大きい2.16を示した。この結果もCEDSが中国のBC排出量を過大評価していることを示唆している。

図1.8は、データ選択後の季節ごとの観測およびモデルによる6つのシミュレーションの結果を示している。春季は、CEDSを除く5つのシミュレーションでは平均値のバイアスは0.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下であり、季節平均値のモデルと観測の比は1.5以内で一致した。CEDSを用いたシミュレーションは春季の平均値は2.00 $\mu\text{g m}^{-3}$ を示し、観測値(1.01 $\mu\text{g m}^{-3}$)よりおよそ2倍大きかった。秋季の結果は春季と同様であり、すべてのインベントリでバイアスは春季よりもやや小さくなっていた。冬季は家庭部門の排出量が増加するため(図1.3)、中国からのBC排出量推計値が全てのインベントリで最大となる。冬季は

4つのインベントリ（REASv2.1、HTAPv2、ECLIPSEv5a、CEDs）でバイアスが最も大きくなっていった。ECLIPSEv5aとHTAPv2は、冬の季節平均値のモデルと観測値の比はそれぞれ1.70、2.33と算出され、全季節の値（1.46と1.79）よりも大きくなっていった。これらの2つのインベントリは冬季の家庭部門の排出量がCEDs以外のインベントリの中で最も大きくなっていった（図1.3）。CEDsは全ての季節で最も高い排出量を推計しており、CEDsを用いたシミュレーションは全ての季節で6つのインベントリ中でバイアスが最も大きかった（図1.8）。

表1.6 福江島における中国からの寄与が80%以上でかつ、輸送効率が80%以上である期間のデータ抽出後のデータ数および、観測とモデルのBC濃度平均値と、モデルと観測の平均値の比。

	REASv2.1	HTAPv2	MACCity	ECLIPSEv5a	CEDs	EDGARv4.3.2
データ数(時間)	2413	2221	1980	2576	1933	2378
観測値 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	1.029	1.062	0.995	0.993	0.993	1.010
モデル ($\mu\text{g m}^{-3}$)	1.393	1.554	1.465	1.777	2.144	1.257
モデル/観測の平均値の比	1.35	1.46	1.47	1.79	2.16	1.24

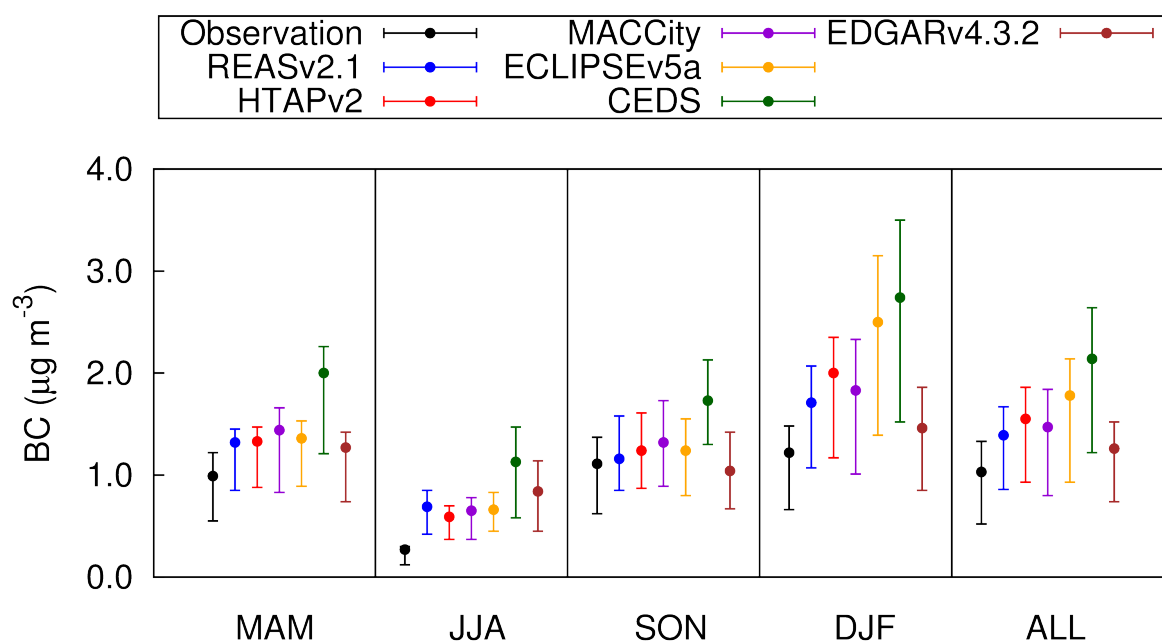


図1.8 福江島における中国からの寄与が80%以上でかつ、輸送効率が80%以上である期間のデータ抽出後の季節別および、全季節の平均値。丸点は平均値、エラーバーは25、75パーセンタイル値を示す。MAM：春（3-5月）、JJA：夏（6-8月）、SON：秋（9-11月）、DJF：冬（12-2月）、ALL：全季節。

各インベントリの排出量推計値をデータ選択後のモデルと観測の比で割ることによって、中国からの年間BC排出量を算出した。本研究では、6つの排出インベントリを用いた計算から推定された2009-2011年の中国からのBC排出量は、1.04-1.20 Tg/年で、平均値は1.14 Tg/年と算出された。この平均値の二乗平均平方根誤差(Root Mean Squared Error)は0.065と算出され、使用するインベントリの違いに伴う不確実性は5.7%(=0.065/1.14)と見積もられた。図1.9は、各インベントリの中国からのBC排出量とデータ選択後の平均濃度のモデル/観測比の相関関係を示している。モデル/観測比はインベントリの排出量と非常に相関が高くなっていった($R=0.96$ 、図1.9)。本研究では、インベントリの排出量推計値とモ

デル/観測比間の線形回帰を用いた中国のBC排出量の推計もおこなった。回帰直線上でモデル/観測比が1となる時の中国からのBC排出量は、1.14 Tg/年と算出された。この値は各インベントリの排出量をモデル/観測比で割ることによって算出した平均値と非常に近い値である。

本研究による中国からのBC排出量の推計値は、独立したトップダウン手法で推計を行ったサブテーマ2の結果とも整合する。福江島をはじめとする5地点の観測サイトにおける非降水時の $\Delta BC/\Delta CO$ 比にCO排出量をかけることで計算された2010-2016年の中国からのBC排出量は、 1.10 ± 0.23 Tg/年と推計されている（表2.1）。また、本研究とは異なる大気化学輸送モデル(WRF/CMAQ)を用いた推計では、2010-2018年の中国からのBC排出量は1.33 Tg/年（不確実性は $\pm 27\%$ ）と見積もられている（表2.1）。

CEDSとECLIPSEv5aの中国からのBC排出量の推計値は本研究の推計よりもかなり高い値であった（1.8 Tg/年と2.2 Tg/年）。CEDSはIPCC AR6のための気候モデル実験（CMIP6）で使用されているインベントリであり、CMIP6では中国起源のBCによる気候への影響が過大に評価されていることが示唆される。なお、2020年9月に更新されたCEDSの新しいバージョン（v_2020_09_11）では、2010年の中国からのBC排出量を1.48 Tg/年に下方修正された。また、ECLIPSEの次のバージョン（ECLIPSEv6b）でも、中国からのBC排出量は1.33 Tg/年とv5aよりも低い推計値となっており、CEDSと同様、本研究とより整合する方向で修正がなされている。

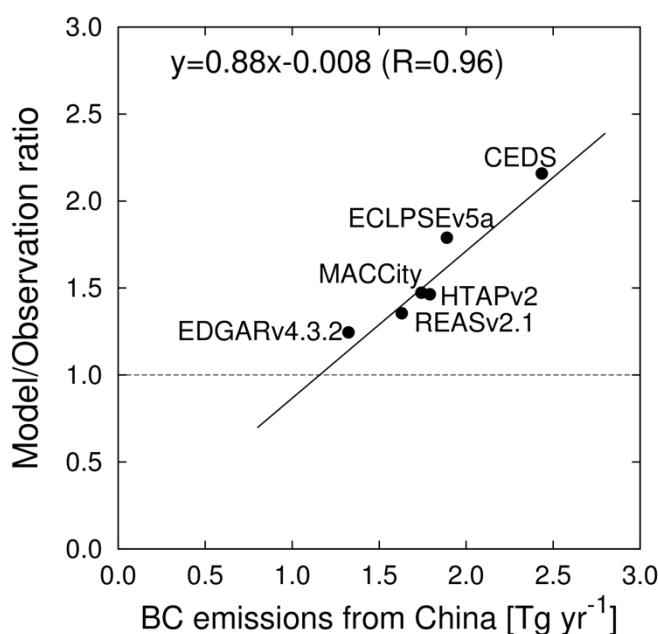


図1.9 ボトムアップ・排出インベントリの中国からの2010年の年間排出量（横軸）と、福江島における中国からの寄与が80%以上でかつ、輸送効率が80%以上の期間のデータ抽出後のモデルと観測の平均値の比（縦軸）の散布図。

(3) 人為起源排出インベントリの違いが北極BCシミュレーションに及ぼす影響

北極圏のBCに対する寄与が大きい北半球中高緯度の主要な発生源地域について、インベントリ間のBC排出量を比較した。図1.10にヨーロッパ、ロシア、北米からのBC排出量を示した（東アジアについては(1)で示したので含めていない）。ヨーロッパからのBC排出量は0.25-0.44 Tg/年と見積もられた。最大値を示したCEDSと最小値のEDGARv4.3.2には74%の差があった。北米からのBC排出量は0.21-0.34 Tg/年と算出され最大（HTAPv2）と最小（EDGARv4.3.2）のインベントリには65%の差があった。ロシアからのBC排出量は、0.042-0.197 Tg/年と推計され、排出量は他の北半球中緯度地域よりも小さいもののインベントリ間で大きなばらつきが見られた。最も排出量が多いのはHuang et al. (2015)⁹⁾による領域インベントリで、最小値のEDGARv4.3.2よりも3.7倍高い値を示した。

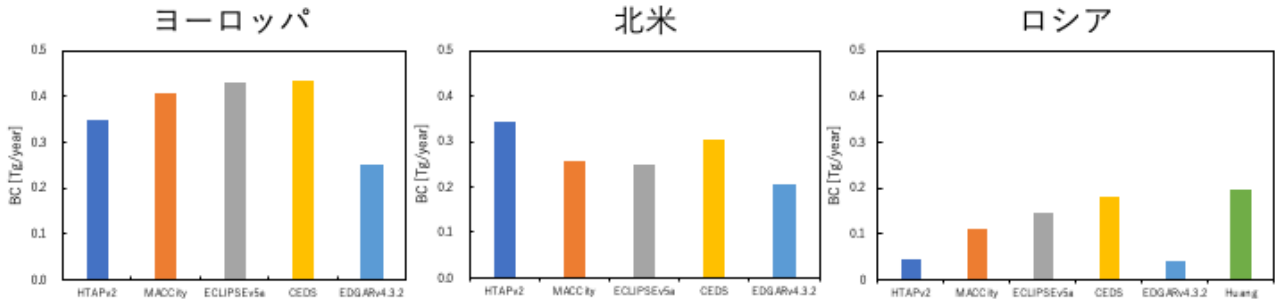


図1.10 2010年のヨーロッパ、北米、ロシアからのBC排出量の比較。

図1.11は、北極圏のBarrow, Alert, Ny-Alesund, TiksiにおけるBCの地上観測と6種類のモデル計算の月平均値を比較している。これらの観測サイトでは、冬季から春季にかけてBC濃度が上昇し、夏季に減少する。人為起源の排出インベントリによる濃度差は、いずれの観測点でも冬～春季に大きくなり、夏季は小さくなる。これは、北極の地表付近では人為起源BCの寄与が冬季と春季に大きくなり、夏に小さくなるためである。Barrow (アラスカ) では、モデルの1月平均値は33-110 ng/m^3 であり、最大値と

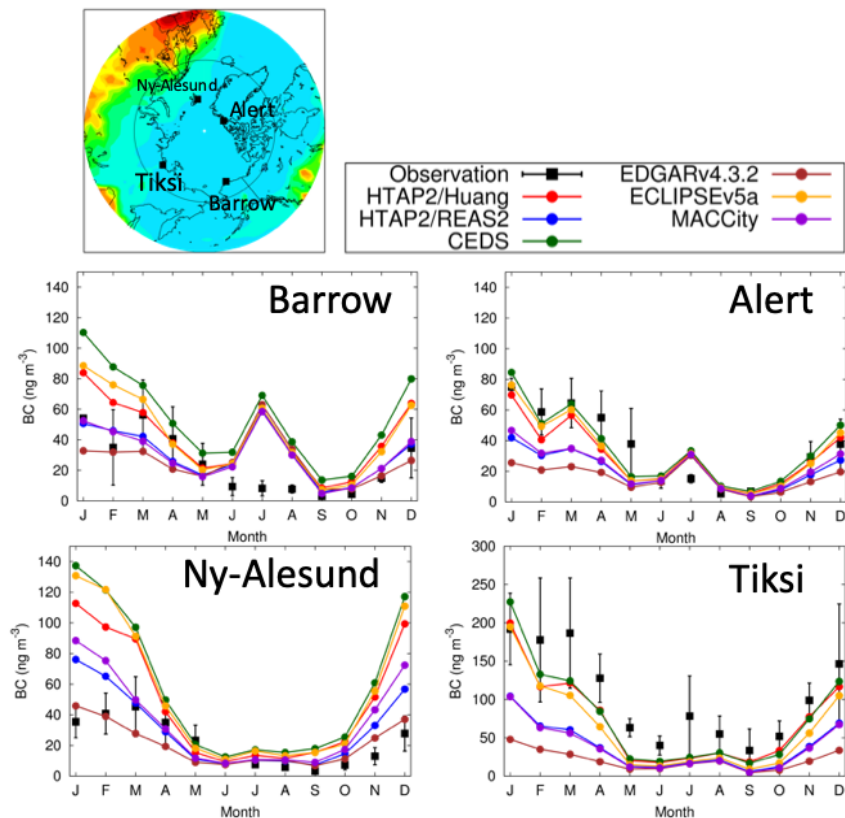


図1.11 北極圏の地上観測点 (Barrow, Alert, Ny-Alesund, Tiksi) における月平均BC濃度の観測値とモデル計算の比較。

最小値で約3倍の濃度差が見られた (2007-2011年平均の観測値は54 ng/m^3)。最も高い濃度を示したのはCEDSを用いた計算であり、次いでECLIPSEv5aが高く、最小値となったのはEDGARv4.3.2であった。発生源地域別のトレーサーに分けてみると、冬季に最も大きな差を示したのは、ロシア起源のBCであり、1月平均値は5-50 ng/m^3 と最大値 (CEDS) と最小値 (EDGARv4.3.2) に約10倍の差が見られた。その他の3つの観測サイトでも、1月にモデル間で最も大きな濃度差が見られ、Alert (カナダ) では26-85 ng/m^3 、Ny-Alesund (ノルウェー) では46-137 ng/m^3 、Tiksi (ロシア) では48-227 ng/m^3 とインベントリの違いによっておおよそ3-5倍の差が見られた。

次に、北極圏全域 (北緯66-90°) で平均したBCの年平均濃度の鉛直分布について、6種類の排出インベントリによるモデル計算の結果を比較した (図1.12)。図1.12には、北半球中緯度の主要な発生源地域 (ロシア、ヨーロッパ、東アジア、北米) からの寄与も示した。地表面から高度8 kmまでの対流圏では、インベントリの違いによって、20-50 ng/m^3 の濃度差が見られた。地表面でのBC濃度は、最大値 (CEDS) と最小値 (EDGARv4.3.2) に47 ng/m^3 (2.5倍) の差がみられた。発生源地域別のトレーサーに

ついて見ると、ロシア起源のBCには35 ng/m³の差があり、地表面のBC濃度差の主な原因となっていた。対流圏中層の高度5 kmでは、インベントリの違いによって20 ng/m³ (1.8倍) の濃度差があった。この内10 ng/m³は、東アジア起源のBCの差によるものであった。これらの結果は、インベントリの違いによるBC濃度差は北極圏内の高度によって、影響する発生源地域が異なることを示している。これはロシア起源BCは地表付近で輸送され、東アジア起源BCは対流圏中層から北極圏に流入するという、発生源地域による到達高度の違いが反映されている⁷⁾。BCによる北極の気候への影響評価を高精度化するためには、ロシアや東アジアからのBC排出量の精緻化が重要であることが明らかとなった。

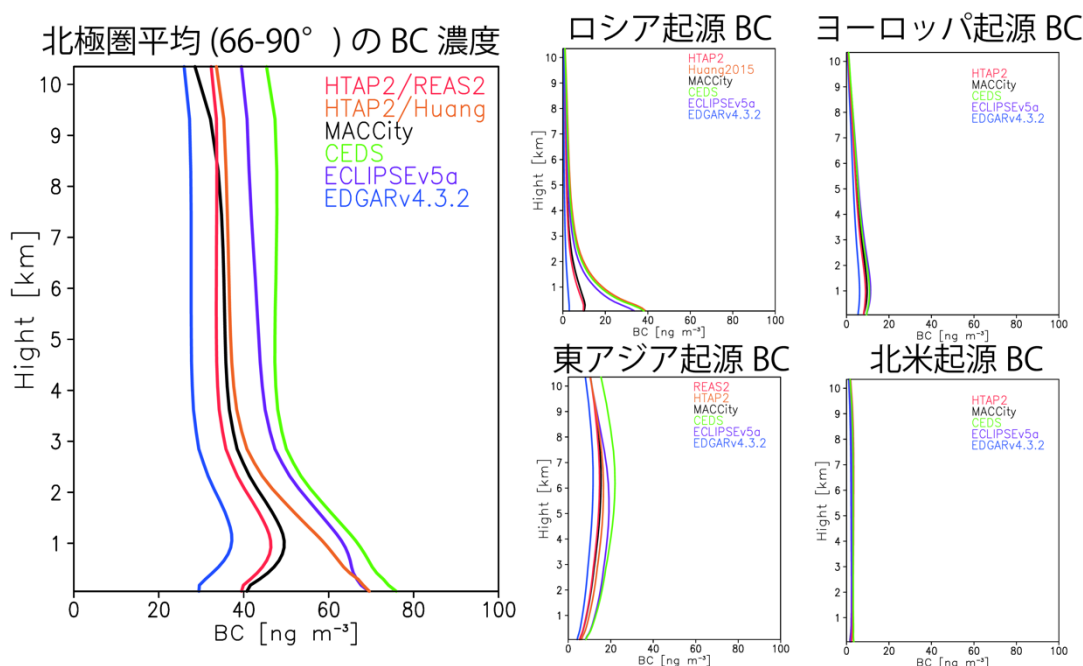


図1.12 モデルで計算された北極圏平均 (66-90°N) の年平均BC濃度の鉛直分布。左図は全BC濃度、右の図は各発生源地域からのBCトレーサー濃度を示す。

(4) 化学輸送モデルによるメタンのシミュレーションと観測の比較

4種類の人為起源排出インベントリを用いた化学輸送モデル (GEOS-Chem) によるタグCH₄トレーサー計算の結果と、波照間島の観測データを解析した結果について述べる。図1.13aに、波照間島において観測された2009-2011年のCH₄濃度と4種類のインベントリを用いたモデル計算の比較を示した。観測のCH₄濃度は、冬季に最大となり夏季に減少する季節変動を示す。CH₄濃度は長周期のバックグラウンド値の変動に加え、数時間から数日間上昇する短周期のイベントが発生していることがわかる。短い時間スケールの濃度上昇はアジア大陸からの輸送によって発生することから、東アジア域の排出量の検証は、バックグラウンド値からの増減成分 (ΔCH_4) を用いて行う。バックグラウンド値は、観測された1時間値からトレンド成分を除いた上で、フーリエ変換を行い5周期/年 (約70日周期) 以上の成分を除去して算出した¹¹⁾。そして、 ΔCH_4 は元の観測濃度からバックグラウンド値を引いた値として定義した。モデルで計算されたCH₄濃度に対しても、同じ方法で ΔCH_4 を算出した。図1.13bは、アジア大陸からの輸送イベントの発生頻度の高い冬季から春季 (2010年1-3月) の観測とモデルの ΔCH_4 を示した。モデルは観測の ΔCH_4 の時間変動をよく再現しており、濃度上昇のタイミングを捉えていることがわかる。

2009-2011年の3年間について、観測と各モデル計算の ΔCH_4 を比較した結果を図1.14に示す。観測とモデル間の ΔCH_4 の相関係数は0.80-0.82と算出され、いずれのモデル計算でも高い値を示し、モデルが短周期の濃度変動をよく再現していることを示している。4種類の人為起源インベントリを用いた各モデル計算に対する回帰直線の傾きは、REASv2.1は1.13、CEDSは1.05、ECLIPSEv5aは0.93、EDGARv4.3.2は

1.06と算出された（図1.14）。いずれのインベントリを用いたモデル計算でも回帰直線の傾きは1に概ね近い値を示すことがわかった。波照間島における CH_4 濃度の短期的な濃度変動には中国起源の CH_4 が大きな影響を及ぼすと考えられることから、インベントリの中国からの CH_4 排出量が大きく過大あるいは過小評価はされていないことが示唆された。インベントリ間の違いは、中国からの CH_4 排出量の差を反映していると考えられ、排出量推計値の最も大きいREASv2.1（78.5 Tg/年）の傾きは最も高い値を示し、最小値のECLIPSEv5a（52.6 Tg/年）の傾きも最も小さい値を示した。

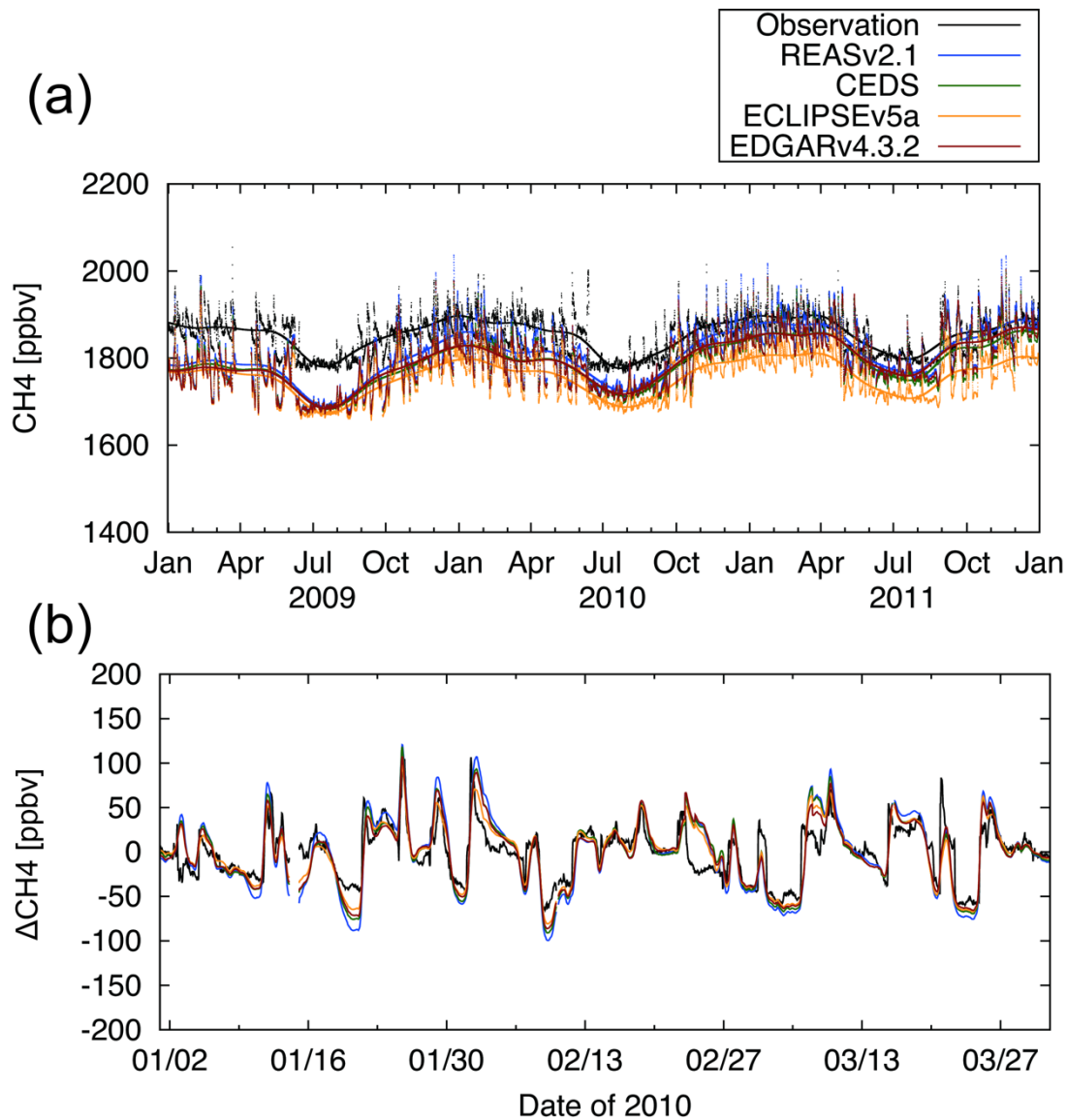


図1.13 (a)波照間島における2009-2011年の CH_4 濃度の観測とモデル計算の時系列。観測値を黒線でモデルの結果を色付きの線で示す。点は1時間値を、実線でバックグラウンド値を示す。(b)2010年1-3月の ΔCH_4 の1時間値の観測とモデルの時系列。

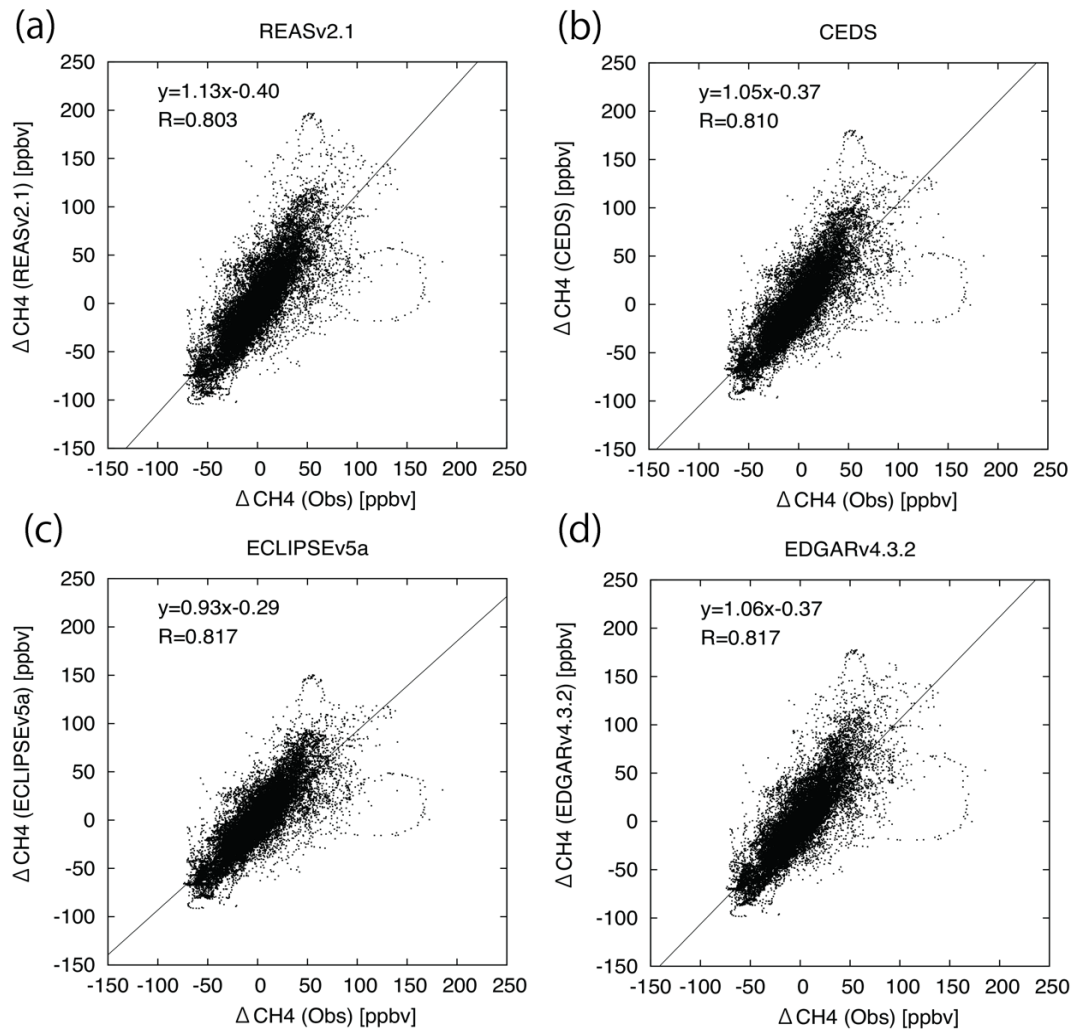


図1.14 ΔCH_4 の観測（横軸）とモデル計算（縦軸）の散布図。(a)REASv2.1、(b)CEDS、(c)ECLIPSEv5a、(d)EDGARv4.3.2によるモデル計算を示す。図中に回帰直線の式と相関係数(R)の値を示した。

5. 研究目標の達成状況

地球温暖化や大気汚染の国際プロジェクトを含め、世界的にモデル研究で用いられている6種類の人為起源インベントリを対象として、BC、 CH_4 、COの東アジアからの排出量を地域別・部門別に相互比較し、インベントリ間の推計値の差を明らかにした。化学輸送モデルによる6種類のインベントリを用いたBCタグトレーサー実験を行い、サブテーマ2で得られた福江島での観測データと比較し、各インベントリの定量的検証を行った。特に、CMIP6で用いられているCEDSインベントリは、中国からのBC排出量を過大評価していることを示し、次期のIPCC報告書などに向けた修正点を指摘することができた。北極圏のBCについては、人為起源排出インベントリの違いによる北極BCモデル計算の不確実性に着目した解析を行った。インベントリによる北極圏のBC濃度差に及ぼす影響を発生源地域別に定量化し、今後BCによる北極の気候への影響評価を高精度化するための重要な知見を得ることができた。メタンについては、化学輸送モデルを発生源種類別・地域別にトレーサーを区別するタグ CH_4 計算ができるように改良し、排出インベントリの検証・高精度化に向けた道筋をつけた。

6. 引用文献

- 1) Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., Hanayama, S., Janssens-Maenhout, G., Fukui, T.,

- Kawashima, K., and Akimoto, H. (2013) Emissions of air pollutants and green-house gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11019-11058.
- 2) Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Dentener, F., Muntean, M., Pouliot, G., Keating, T., Zhang, Q., Kurokawa, J., Wankmüller, R., Denier van der Gon, H., Kuenen, J. J. P., Klimont, Z., Frost, G., Darras, S., Koffi, B., and Li, M. (2015) HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11411-11432.
 - 3) Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., van Aardenne, J. A., Monni, S., Doering, U., Olivier, J. G. J., Pagliari, V., and Janssens-Maenhout, G. (2018) Gridded emissions of air pollutants for the period 1970-2012 within EDGAR v4.3.2, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1987-2013.
 - 4) Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., Angiola, A. D., Van Der Gon, H. D., Frost, G. J., Heil, A., Kaiser, J. W., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J. -F., Liousse, C., Masui, T., Meleux, F., Mieville, A., Ohara, T., Raut, J. -C., Riahi, K., Schultz, M. G., Smith, S. J., Thompson, A., Aardenne, J. V., Vander Werf, G. R., and Van Vuuren, D. P. (2011) Evolution of anthropogenic and biomass burning emission of air pollutants at global and regional scales during the 1980-2010 period, *Climatic Change*, 109, 163-190.
 - 5) Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R. J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J. -I., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O'Rourke, P. R., and Zhang, Q. (2018) Historical (1750-2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS), *Geosci. Model Dev.*, 11, 369-408.
 - 6) Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J., and Schöpp, W. (2017) Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8681-8723.
 - 7) Kanaya, Y., Pan, X., Miyakawa, T., Komazaki, Y., Taketani, F., Uno, I., and Kondo, Y. (2016) Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009-2015: constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 10689-10705.
 - 8) Ikeda, K., Tanimoto, H., Sugita, T., Akiyoshi, H., Kanaya Y., Zhu, C., and Taketani, F. (2017) Tagged tracer simulations of black carbon in the Arctic: Transport, source contributions, and budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10515-10533.
 - 9) Huang, L., Gong, S. L., Jia, C. Q., and Lavoue, D. (2015) Importance of deposition processes in simulating the seasonality of the Arctic black carbon aerosol, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 115, D17207.
 - 10) Kondo, Y., Oshima, N., Kajino, M., Mikami, R., Moteki, N., Takegawa, N., Verma, R. L., Kajii, Y., Kato, S., and Takami, A. (2011) Emissions of black carbon in East Asia estimated from observations at a remote site in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 116, D16201.
 - 11) Tohjima, Y., Kubo, M., Minejima, C., Mukai, H., Tanimoto, H., Ganshin, A., Maksyutov, S., Katsumata, K., Machida, T., and Kita, K. (2014) Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄ / CO₂ and CO / CO₂ correlations observed at Hateruma Island, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1663-1677.

II-2 野外・衛星観測を利用したアジアにおける排出量推計の検証

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境部門

地球表層システム研究センター

金谷 有剛

〈研究協力者〉

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門地球表層システム研究センター

Yongjoo Choi

カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所

宮崎 和幸

金沢大学 環日本海域環境研究センター

松木 篤

大阪府立大学 工学研究科

定永 靖宗

[要旨]

短寿命気候強制力因子(SLCF)であるブラックカーボンについて、主要な排出地域である東アジアからの国別排出量を、福江島・能登・及び韓国2地点の観測を用いて推計し、ボトムアップ型の排出量統計値を評価した。BC/CO排出比法およびモデル比較法の2種の方法いずれからも、中国のBC排出量は近年1.0Tg/年程度であることが示され、CMIP6用に用いたCEDSインベントリには2倍近い大幅な過大評価となっていることを指摘した。また、2009年以降、排出がほぼ半減する顕著な減少傾向にあることも指摘した結果、CEDSが値を改訂し、AR7サイクルでの気候シミュレーションが適正化される見通しが立った。コロナ蔓延による中国経済活動低下時期の福江島観測データの解析から、中国からのBC排出は主に家庭部門からであることを明らかにし、限界削減費用の経済分析からも家庭部門の排出削減が経済性の面でも効率的であることが見出された。多地点での観測データから、BC湿性除去による輸送効率を積算降水量の関数で近似し、東アジア広域における描像を得た。その観測事実を基準として、FLEXPARTモデルによる長距離輸送・湿性除去の表現を評価したところ、雲底下除去については適切であったが、雲内除去についてはモデルでの除去効率が一桁近く低いことが明らかとなり、BCの長距離輸送表現についても改善に必要なポイントを明確にした。メタンについては、国内常時監視局データの解析から、都市域で冬季に濃度が増大する季節パターンに着目し、NO_xとメタン濃度が顕著に正相関することを見出した。東京都と5府県に共通した傾向であること、10年間ではメタン/NO_x排出比に顕著な減少がみられるが、NO_x排出の減少で説明され、メタン排出量は過去10年ほぼ一定であったことなどを見出した。排出比をNO_x排出量に乗じてメタン排出量を推定したところ、東京都の排出量は都が推計したボトムアップ値を上回ることが示唆され、都市ガス網からのリークや廃棄物セクターの過小評価などの可能性が指摘された。

1. 研究開発目的

地球温暖化には、CO₂の排出だけでなく、ブラックカーボン(BC)およびメタンの人間活動からの排出も大きく寄与している。とくにアジア地域からのBCおよびメタンの排出は近年急速に増加していると考えられ、BC等の大気中濃度や放射強制力・気候気象影響のシミュレーションには、社会経済統計に基づいて寄与を積み上げた「ボトムアップ型」の排出量を入力することが不可欠である。しかしながら、排出係数・活動度などに由来する不確かさが大きく、観測からの独立な「トップダウン推計」による評価や、整合性の確認が求められている。そこで本サブテーマでは、信頼性の高い地上での長期観測や、近年進展が著しい衛星観測からのデータをもとに、BCおよびメタンの排出量を「トップダウン推計」し、ボトムアップ値を評価して、統合的に精度を向上させることを目的とした。その際、気象要因再現性に優れた大気化学輸送モデルシミュレーションの援用やデータ同化手法の適用、複数成分の排出比の推定など、新たな工夫を重ねた。また、BCの主な消失項である湿性除去の速度についても観測から知見を得て、大気化学モデルでの表現を検証・改善して長距離輸送効率の表現を適切化することについても目的に加え研究開発を推進した。

2. 研究目標

日韓の地上観測データおよび新規TROPOMI衛星観測データの利用など、大気化学観測を強化することで、現在200%もの不確かさがあるアジアの国別BC排出量推計値について、他の大気汚染物質と同じ程度に推計精度を向上させるなど、サブテーマ1と協力して、BCおよびCH₄排出量のトップダウン推計手法を、インベントリ報告値と比較可能な程度に高精度化し、排出インベントリの検証に向けた道筋をつける。また、最新の研究成果を環境省の国内インベントリ事業および国際的なインベントリ担当者に向けて情報発信し周知する。

3. 研究開発内容

(1) 東アジアからのブラックカーボン(BC)排出量のトップダウン推計① (BC/CO排出比法)

BCに関する東アジアの国別ボトムアップ排出インベントリを検証するため、大気観測データを用いた「トップダウン」推計を行った。その際、BCと同様に化石燃料燃焼の不完全燃焼等によって大気中に排出される一酸化炭素(CO)排出量の推計に立脚し、観測から得られた $\Delta BC/\Delta CO$ 比に基づいて次式によりBC排出量を推計した：

$$\text{BC排出量} = \text{CO 排出量} \times \Delta BC/\Delta CO \text{比}$$

ここで Δ はベースライン濃度からの増分を表す。COについては、前後14日間における5パーセンタイル値をベースライン濃度とし、そのレベルからの増分として ΔCO を算出することで、季節変化する半球規模のバックグラウンド濃度を考慮した。寿命が短いBCについてはベースライン濃度を0と仮定し、 ΔBC はBC濃度と同等とした。前身の2-1505推進費課題においても、同様のアプローチによる推計を行ったが、「CO排出量推計」、「 $\Delta BC/\Delta CO$ 比の観測からの推定」のいずれのステップにおいても、今回新たな方法を取り入れた。前者の「CO排出量推計」については、前回は、既存のボトムアップインベントリREASv2.1の値をそのまま採用したが、今回は、CO衛星データ同化から得られたCO排出量の最適推計値を採用した。後者については、前回は、長崎県・福江島(32.75°N, 128.68°E)一点の観測に基づき、国別の $\Delta BC/\Delta CO$ 比を推定したが、今回は、図2.1に示すように、能登(37.5°N, 137.4°E)、福岡(33.52°N, 130.47°E)、Gosan(韓国, 126.17°E, 33.28°N)、Baengnyeong(韓国, 124.63°E, 37.97°N)の4地点のデータを加えることでフットプリントを広げ(図2.2)、 $\Delta BC/\Delta CO$ 比の信頼性を高めた。BC質量濃度の衛星観測は得られないため、COを利用した間接的な方法であるが、トップダウン推計としては最善な方法の1つとなる。

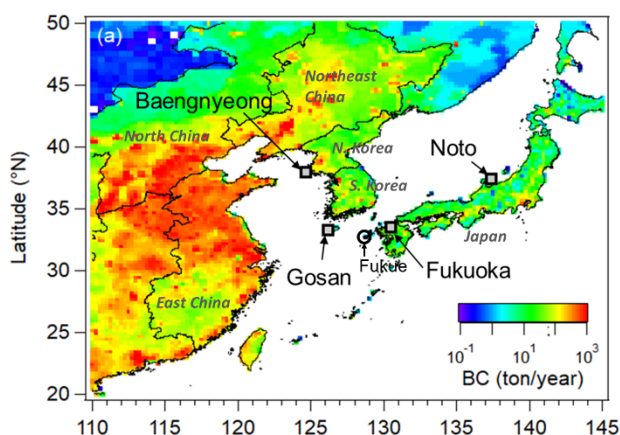


図2.1 BC, CO観測データを用いたサイト(能登、福岡、Gosan, Baengnyeong, 福江)と、起源地域区分(Northeast/North/East China, S/N Korea, Japan)。背景はBCのボトムアップ排出インベントリ(REASv2.1による値)

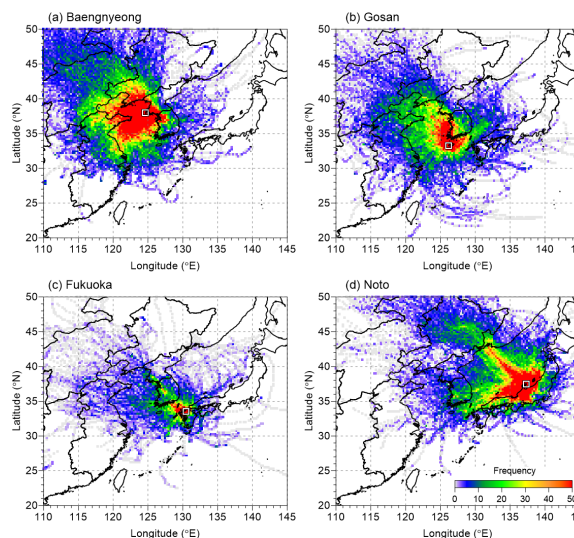


図2.2 Baengnyeong, Gosan, 福岡、能登からの後方流跡線のフットプリント

CO濃度測定には、能登、福岡、Gosan、Baengnyeong いずれにおいてもThermo社Model48iを用いた。能登、福岡ではPM2.5(能登)、PM1(福岡)中のBCをMAAP model 5012 (Thermo)で計測した。その際にMAAPの質量吸収断面積には $10.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ を用いた(メーカー推奨値 $6.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ とは異なる)。この値は、福江島に

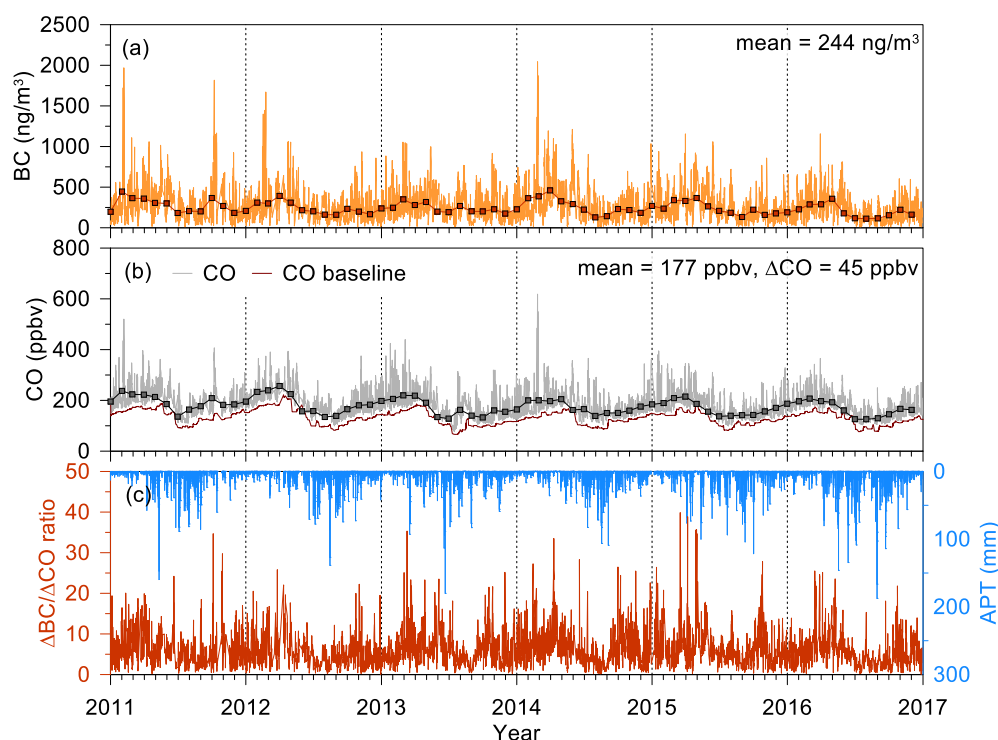


図2.3 能登におけるBC, CO濃度, $\Delta \text{BC} / \Delta \text{CO}$ 比、APTの変動

における2つのBC計測法(MAAPおよびCOSMOS(日本カノマックス社製、BCM3130)の平行観測データの比較から得られたものであり(Kanaya et al., 2013¹⁾)、我々はBC計測の標準化にも最大限の注意を払ってきた。GosanでのBC計測はCLAPに基づくもので、質量吸収断面積 $10 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ を用いたが、散乱性粒子からの寄与の補正については、nephelometerによって計測された散乱係数を元にCLAPへの感度 $2.11 (\text{ng m}^{-3} / \text{Mm}^{-1})$ (Sinha et al., 2017²⁾)を考慮した。Baengnyeongでは、ECOC計(PM2.5サイズカット、NIOSH昇温プログラムを適用)によるEC濃度1時間値を用いた。これらの観測データは金沢大・大阪府立大・ソウル大・韓国国立環境研究院から提供を受け、JAMSTECにて統一的に解析した。図2.3に、能登におけるBC, CO濃度変動を例として示す。

気塊の起源地域と湿性除去影響の有無を判定する目的で、後方流跡線(HYSPLITによる)を観測点ごとに6時間間隔で計算した。気象場にはGDAS1を用いた。起源地域は6地域(図2.1 :

Northeast/North/East China, North Korea, South Korea, Japan)のうち、後方流跡線の滞在時間が最も長い地域として判定した。後方流跡線上で、過去72時間に記録された降水量の積算値(APT)を湿性除去影響の指標とし、APT=0の気塊のみ解析することにより、BCに対する湿性除去の影響を排除した。

衛星データ同化モデルに基づく再解析TCRは、大気化学輸送モデルCHASER(水平解像度 2.8° (TCR-1), 1.1° (TCR-2))を基礎モデルとし、OMI(NO_2), MLS(成層圏オゾン、 HNO_3), TES(対流圏オゾン)、MOPITT(CO)の衛星データをアンサンブルカルマンフィルター法によって同化して得たもので、 O_3 , CO, NO_2 等の3次元濃度分布に加え、地表および雷起源の NO_x 排出(発生)量および、本研究で用いる地表CO排出量を同時に最適推定するものである(Miyazaki et al., 2015³⁾)。 NO_2 等の同化は、COの消失速度を規定するOHラジカル濃度を適切に見積もるために重要である。COの衛星データとしてはTCR-1ではMOPITT(v6, NIR), TCR-2ではMOPITT(v7, TIR/NIR)を使用した。TCR-2では水平解像度向上の利点があるもののCO排出量に過大評価傾向がみられるため、今回の目的にはTCR-1とTCR-2からの排出量推計値を平均して用いることとした。TCR-2でのCO排出量・広域濃度分布については、洋上での観測や韓国上空でのKORUS-AQ航空機観測などによって評価された(Kanaya et al., 2019⁴⁾; Miyazaki et al. 2019⁵⁾)。

(2) 東アジアからのBC排出量のトップダウン推計② (モデル比較法)

上述の排出比法とは独立に、大気化学輸送モデルによる観測濃度再現を指標とした、「モデル比較法」によるBC排出量のトップダウン推計も行った。観測データとしては、前身の推進費S-7, 2-1505などで2009年から10年超にわたり長期実施してきた、長崎県・福江島でのBC計測データを用いた。福江ではBC(Thermo社MAAP5012), COSMOS(日本カノマックス社製、BCM3130)の2機種によるBC計測を行っており、相互比較により信頼度を高め、また、欠測データを補っている。COSMOSについては国立極地研究所・近藤豊教授との共同計測データである。ともにPM1サイズカットのサイクロン(2011年9月17日以前はPM2.5)を経由した大気を機器に取り込み、BCと共存する散乱性粒子の影響を受けにくいフィルター吸光計測を実現したことを特徴とする。具体的

には、MAAPではフィルターの透過光強度変化だけでなく、2方向の異なる角度での反射光計測も行い、フィルターに対する放射伝達式を解くことで、散乱項を分離して吸収項を高精度に決定することができる。一方COSMOSでは、前段に設置されたプレヒーター(300°C)に大気を通過させることで、硫酸アンモニウム等の散乱性成分の大部分を分解し、フィルター吸光測定の手間を省く工夫がある。前述のとおり、平行観測の比較から、MAAPについてはCOSMOSとの一致度が高くなるよう、BCの質量吸収断面積を $10.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ に修正してBC濃度を算出した。その結果、2009~2019年の長期にわたり、両者の1時間値の間の相関は非常に強く(図2.4)、MAAP-COSMOS濃度比の平均値と標準偏差から、系統誤差・ランダム誤差をそれぞれ $\pm 14\%$ 、 $\pm 17\%$ と評価した(全体の不確かさは $\pm 22\%$ 、Kanaya et al., 2020⁶⁾)。BCの大気中濃度は排出量の影響だけでなく、湿性除去の影響も受ける。これまでの我々の研究から、とくに福江での解析の場合、湿性除去の影響度の指標として、後方流跡線上に沿った過去72時間の降水積分量(APT)の有用性が高いことがわかっている(Kanaya et al., 2016⁷⁾)。本研究では1時間ごとの後方流跡線の計算にHYSPLIT(前述)を用いてAPTを算出し、閾値を $\text{APT} < 1 \text{ mm}$ と設定して湿性除去の影響が無視できるデータのみを抽出して、排出量の影響を評価した。また、HYSPLITによる後方流跡線が、2500m以下の高度で初めて通過した境界線を指標とすることで、気塊の起源地域を、I:中国東北部、II:中国中東部北側、III:中国中東部南側、IV:中国南部、V:韓国、VI:日本に分類し、それぞれの気塊ごとに平均をとるなどして排出量やその推移を評価した(図2.5)。

CO(Thermo社Model48C)の観測も継続し、2009-2019年にわたる長期観測データを得て、BCと同様に、

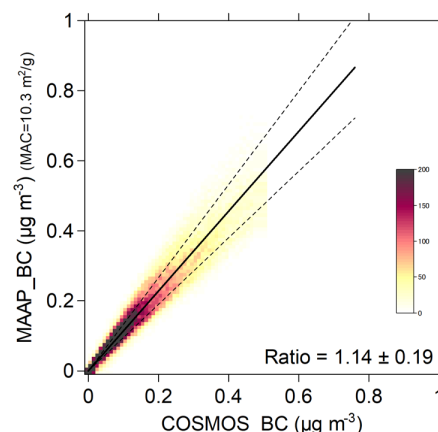


図2.4 福江におけるMAAP, COSMOSによるBC濃度計測データ間の相関

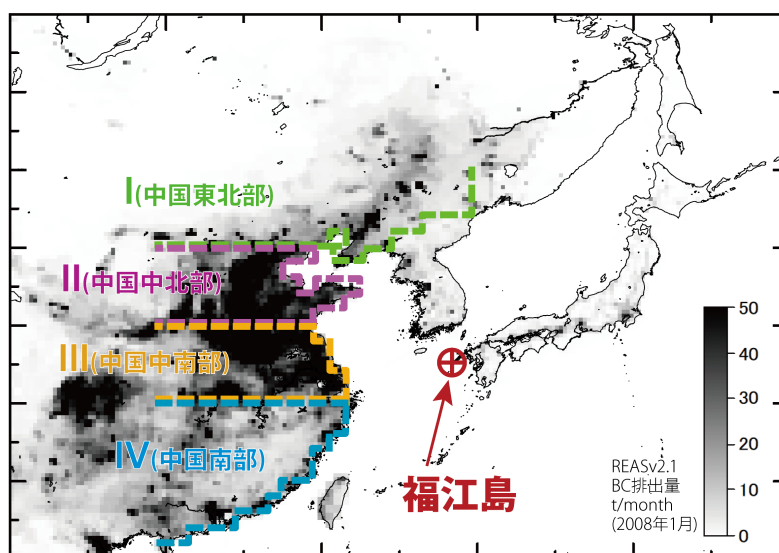


図2.5 「モデル比較法」でのBC排出推定の際に用いた、中国起源地域の分類(I~IV)。地図の背景はブラックカーボンの排出量推計マップ。福江島には、中国中北部・中南部等主要な排出源地域から6~46時間程度で東シナ海上を大気が運ばれてくる。

モデル比較法による排出量評価にデータを用いた。CO長期観測データのうち2016年春に韓国上空で行われた航空機観測KORUS-AQ期間については、CAMSやCAM-Chemモデルの評価にも用いた(Tang et al., 2018⁸⁾, 2019⁹⁾。

大気化学輸送モデルとしては、東アジア規模のWRF/CMAQを用いた(Yamaji et al., 2014¹⁰⁾)。本モデルは神戸大/JAMSTECの山地一代准教授の主導により前身の推進費課題S-7から条件を変えずに長期実施しているもので、2009年から10年超の結果を得た。気象場についてはNCEPの Final (FNL) Operational Global Analysis data (ds083.2) をもとにWRFモデル(version 3.3.1)で計算したものをを用いた。CMAQは version 4.7.1で、80kmの水平解像度、37高度層を備えたものである。CMAQのエアゾルモジュールはAERO5で、大気化学スキームには Statewide Air Pollution Research Center version 99 (SAPRC-99) を用いた。BC湿性沈着にはcloud_acm_ae5スキームを用いた。 $\Delta BC/\Delta CO$ 比のAPT増加に対する減衰は、湿性除去に対する感度を表すが、本モデル結果は観測値よりやや大きい減衰を示し、湿性除去に対する感度が現実よりやや高いことが示唆された。しかしながら、観測の場合と同様に、APT<1mmの条件を満たすデータのみを解析することで、湿性除去への感度差がもたらす影響は-2%程度と非常に小さくなり、結論に与える影響は無視できると考えた。

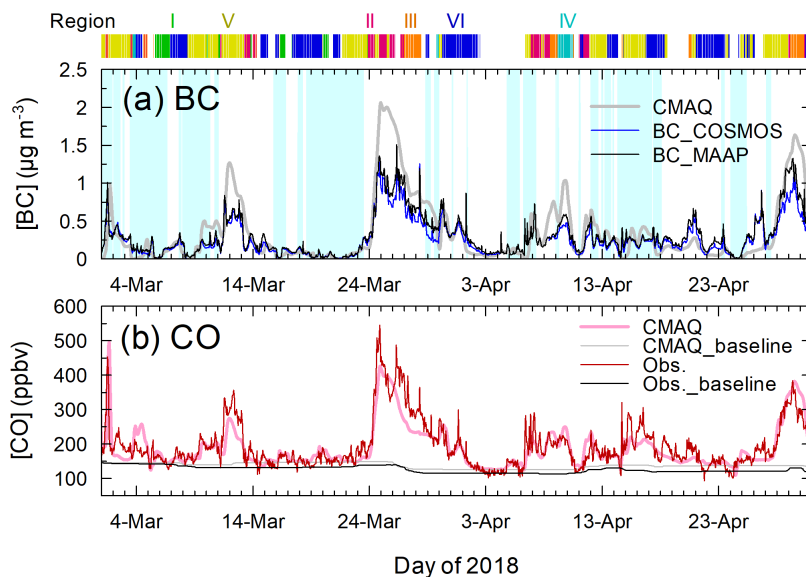


図2.6 2018年3-4月でのBC, CO観測結果とWRF/CMAQモデル結果との比較。上に示したRegionは、後方流跡線解析で分類された気塊の起源地域を示す。また、(a)での水色の縦線は、APT>1mmとなり湿性除去項の影響が無視できず、本研究では棄却したデータ時間を表す。

を示す。3/12ごろ、3/25ごろ、4/29ごろを中心に、BC, COともに濃度極大が観測され、それぞれ起源地域V(韓国(経由)), II(中国中東部北側), III(中国中東部南側)の影響を受けていることがわかる。そして、CMAQモデル結果も非常によくそれらの汚染気塊の福江への到来のタイミングを再現していることがわかる。これらはAPT<1mm以下の条件を満たし、大気の輸送経路上で湿性除去の影響が無視できる事例である。絶対濃度の再現性については、とくにBCについて、モデルの過大評価がみられる。このことから、モデルで敢えて固定した2008年のREASver.2.1の排出量は2018年には過大であったことがうかがえる。そこで、BCまたはCO濃度に関するモデル/観測比が「排出量の補正項」の推定値を与えると考え、年毎に、また場合によっては大気の起源地域ごとのレベルにまで事例を分解して比の平均値を算出し、その年の、起源地域ごとの「排出量の補正項」を推定した。その補正項の地域ごとの差異やトレンドの評価を行った。ここで解析の対象としている、湿性除去が無視できる事例については、排出量と濃度との間に線形関係があるものとして評価を行った。

NCEP/FNLを入力値とした排出インベントリとしてはREASver.2.1 (Kurokawa et al., 2013¹¹⁾)による2008年の値(0.25x0.25°解像度)を敢えて年次を追わずに固定して用いた。このような条件において、湿性除去の影響が無視できる場合、その他の気象要因による地表面BC濃度のモデル推定値の不確かさはおよそ±16%と評価した。

図2.6には、10年間のデータのうち、ドイツの大気観測専用航空機HALOが東アジア上空を観測するEMerGe-Asiaキャンペーンが行われた2018年春における、BC,COの濃度時間変動

(3) BC湿性除去速度の多点での観測評価とモデル評価

BCとCOは共通の発生源をもつものの、BCのみ大気輸送中に湿性除去を受けて消失することを利用して、多点での $\Delta BC/\Delta CO$ 比の観測からBCの湿性除去速度を評価した。具体的には上記の1)で述べた、能登、Gosan、Baengnyeongでの $\Delta BC/\Delta CO$ 比について、今度はAPTが正の値となる時間のデータを活用して、湿性除去が無視できる場合の $\Delta BC/\Delta CO$ 比を基準として、BCの大気残存率TEを下式で求めた。

$$TE = [\Delta BC/\Delta CO]_{APT>0} / [\Delta BC/\Delta CO]_{APT=0}$$

APTに対するTEの減衰を、観測からの湿性除去の評価とした($TE = 1 - \text{湿性除去度}$)。

なお、APTの算出と主要排出地域の決定にはHYSPLITによる後方流跡線解析を用いたが、ここでは気

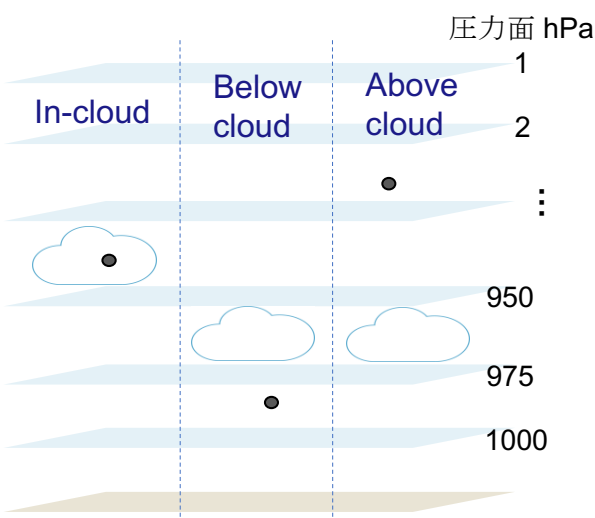


図2.7 ERA5での高度層ごとの雲情報と空気塊の移動経路とを対応させることで、雲内(In-cloud)、雲底下(Below cloud)湿性除去を区別した点に関する概念図

象場にはGDAS1ではなく解像度が 0.25×0.25 度と高いECMWFのERA5を用いた。ERA5では37層の高度層(1000hPa~1hPa)にわたり、雲の3次元分布に関する詳細情報が得られる。空気塊の移動経路(高度情報を含む)と照らし合わせることで、雲底下での湿性除去が主要であった場合か、あるいは雲内での湿性除去が主要であった場合かを区別して評価することが可能となった(図2.7)。また、主要排出地域を特定する際にも、グリッドごとの空気塊の通過時間(高度2500m以下の場合)を重みとして考慮することで精度を高めた。APTについても、特定された主要排出地域を通過する前の時間における降水量は無視することによって、大気中にBCが供給されたのちに受けた湿性除去度の影響を確実に評価できるようにした。

BC湿性除去を表すTEのAPT依存性を観測地点・起源地域・季節別に評価して相互に比較した。さらに、このように得られた観測からのBC湿性除去に関する評価を真として、FLEXPARTモデルでの湿性除去の表現が適切であるかどうか、評価した。FLEXPARTのバージョンは10.4で、湿性除去モジュールを考慮することができる(Pisso et al., 2019¹²); Grythe et al., 2017¹³)。気象場としてはERA-Interim(1x1度、0.1hPaから地表までの60層)を用いた。FLEXPARTの水平グリッドも1°とした。FLEXPARTではBCが疎水性から親水性を獲得するエイジングやサイズ分布変化は考慮できないが、Miyakawa et al. 2017¹⁴)での福江でのBC観測をもとに、mean diameter 0.16 μm ($\sigma=1.84$)を考慮した。

観測およびFLEXPARTモデルによるTEの算出結果をまず比較した。次に洗浄係数 $\Lambda(\text{s}^{-1})$ を推定し比較した。洗浄係数の評価は、雲底下での湿性除去が主要な場合と、雲内での湿性除去が主要な場合を区別して行った。観測からはいずれの場合にも、空気塊が通過したグリッド(n)ごとの除去率 η_n を用いてTEを表すことができる。

$$TE = (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n)$$

$$\eta = [1 - \exp(-\Lambda \cdot t)] \cdot f_g$$

t と f_g はグリッドごとの滞在時間とサブグリッド降水率の係数を表す。

FLEXPARTからの雲底下洗浄係数 Λ_{below} は、シミュレーションではなく、precipitation rateとエアロゾルサイズを考慮しFLEXPARTでのスキームを簡略化した方法で解析的に値を得た。また、FLEXPART

からの雲内洗浄係数 Λ_{in} については、

$$\Lambda_{in} = [i_{cr} \cdot F_{nuc} \cdot I_{total} \cdot TCC] / [CTWC \cdot f_g]$$

と表される。

$i_{cr} \cdot F_{nuc}$ はcloud water replenishment factor (6.2, 固定値)、nucleation efficiencyである。TCC, CTWCはtotal cloud cover, specific cloud total water contentを表す。 Λ_{below} は輸送イベントごと(831回かつグリッドごと)に最適評価を行いその分布で観測とモデルとの一致度を評価したが、 Λ_{in} はイベント全体(769回)の統計的なmedian(Λ_{in}^*)を観測とモデルで評価して比較した。

(4) メタン観測データ解析と都市部からの排出推計

環境省の大気環境常時監視測定局データ(そらまめ君)では全国約500局でメタンを測定している(図

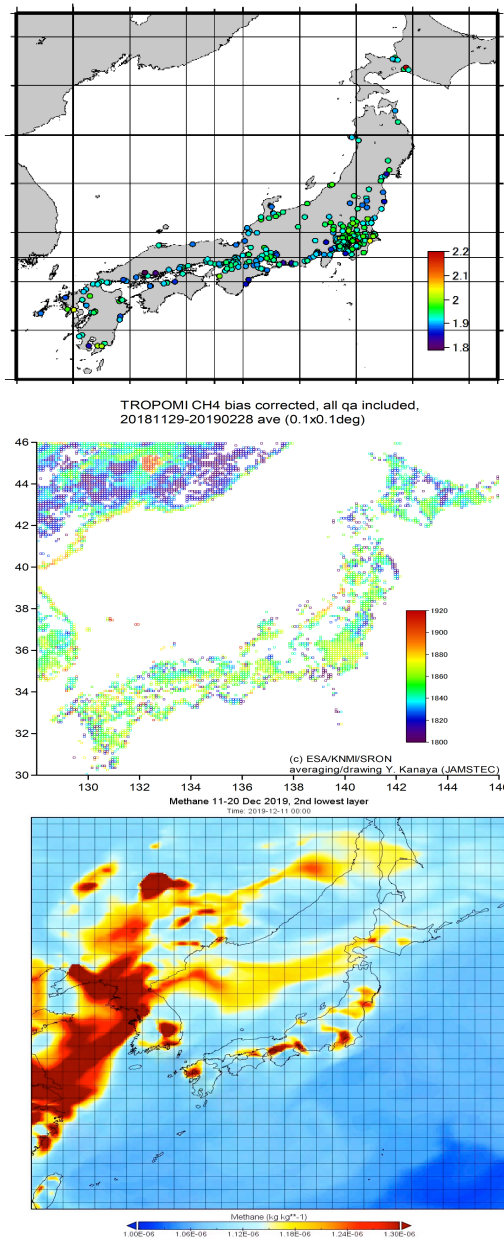


図2.8 メタン解析で利用した、(上段)常時監視測定局の分布、(中段)TROPOMIメタン観測値を2018/11/29-2019/2/28の期間平均したもの、(下段)CAM5モデルでの地表付近濃度(最下層の次の層)のスナップショット

2.8上段)が、全炭化水素からメタン分を差し引いて得られる「非メタン炭化水素」がオゾン・PM2.5の前駆物質として重要であるために専ら解析に利用され、メタンについてはほとんどこれまで解析されてこなかった。本研究ではこの点に着目し、国内での排出パターンを把握するため、全国測定局のデータを得て統計解析を行った。

メタン計測法はバックフラッシュ型のGC/FIDで、1時間値として分解能0.01ppmでメタン濃度が報告されている。この濃度分解能はメタンの高精度計測法であるキャピティリングダウン法などと比較すると2桁程度悪く、バックグラウンド地域で変動幅が小さい地点などでは十分な情報をもたらさない。その一方で、付近に一定規模以上の発生源が存在する都市域などでは0.1~0.5ppmまたはそれ以上の短期濃度変動がみられる場合が多く、0.01ppm単位の分解能でも十分な濃度変動情報が得られる。温室効果気体の研究ではこの精度不足によりデータを活用してこなかった経緯があり、本研究では大気汚染と温室効果気体を統合的に解析する「GHG-AQ解析」の新たな視点で本データの利用を試みた。1990~2000年代初頭においては、埋め立て地などからのメタン大気放出がまだ大きいこともあり、気象要因解析を含みいくらか解析例があったが(伊藤ほか(1999)¹⁵⁾、小峯と上野(2004)¹⁶⁾など)、最近の約20年間ではこのデータセットの解析報告例はほぼ皆無といつてよい。

まず、濃度変動の季節変動パターンの特徴をつかむために、全国2009~2016年度の8年間について、一般局・自排局それぞれについて、各年度の年平均値で一度でも上位20局に含まれた地点(高濃度局)に着目し、月平均濃度をもとに、季節変動パターンの特徴を分類するためのクラスター解析を行った。季節変動パターンを周囲の土地利用と対応付けるために「国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ」を用いた。また、24時間値や6~9時・12~15時の濃度平均値について、高濃度発生時の気象因子解析、NOx等との相関解析を行った。NOx濃度は同じく環境省の大気環境常時監視測定局データとして得られるものであり、近年はほとんどが酸化モリブデン触

媒/化学発光法による計測で、正確には NO_x^* (NO , NO_2 に加え、PANなどの酸化物も計測値に含まれる)と呼ばれるべきものである。

他成分との試験的な相関解析から、後述のように東京都内の計測データで冬季のメタンと NO_x との間に強い正の相関がみられることが確かめられた。その一般性を確かめるために、東京都から5府県（埼玉県、千葉県、神奈川県、愛知県、大阪府）へ解析地域を広げて相関を解析した。測定局の選定方針としては、都府県ごとに、2018年度または2009～2018年度の冬季(12～2月)のメタン濃度平均値のいずれかが上位10位となる地点とし、千葉(15地点うち自排局3地点), 埼玉(12地点うち自排局6地点), 東京(11地点うち自排局4地点), 神奈川(12地点うち自排局3地点), 愛知(11地点うち自排局7地点), 大阪(10地点うち自排局5地点)を選定した。2009～2018年度に対象期間を拡張し、冬季(12～2月)の年毎の排出比を解析しその推移についても評価した。

さらに、Sentinel-5P/TROPOMI衛星からのメタン観測データをCopernicus Sentinel-5P Pre-operations Data Hub(<https://s5phub.copernicus.eu/dhus/>)から収集して解析を開始した。TROPOMIは2017年10月に打ち上げられ、世界で初めて「水平解像度7kmクラス」で対流圏メタン平均濃度の「面分布」を計測する衛星センサで、本課題では、特に日本上空での濃度変動の特徴をつかみ、上述の常時監視データ等の特徴との比較を行うことを目的とし、2018年11月以降の解析に使用したデータはOFFLINEアルゴリズム version1.2によるbias corrected のメタン平均濃度Level2プロダクトを解析した(図2.8中段)。衛星観測では対流圏平均濃度であり、その場の排出だけでなく、風上地域で排出されたメタンが長距離輸送される場合の影響も受けることにも留意が必要である。そこで、欧州CAMS(Copernicus Atmosphere Monitoring Service)で公開しているGHG analysis on IFS model (CY43R1, CY45R1, CY46R1)のプロダクトのうち2018年11月～2020年2月のデータを手入れし、地表付近濃度(図2.8下段)とカラム平均濃度と対応関係を解析した。本プロダクトは全球9kmメッシュのモデル結果を $0.1 \times 0.1^\circ$ に再グリッド化したもので、人為起源排出量には2020年1月まではEDGARver4.2FT2010をスケールしたもので、2020年1月21日以降(2月まで)は月別のCAMS-GLOB-ANTv2.1排出量が用いられている。火災からの排出はGFASv1.2を、自然起源フラックスについてはCTESSEL Net Ecosystem Exchange surface fluxesに結合されているものである。

4. 結果及び考察

(1) アジアからのブラックカーボン(BC)排出のトップダウン推計① (BC/CO排出比法)

図2.9には、福江と4観測点での $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 排出比を、起源地域ごとに分類し、平均した結果を示す(Choi et al., 2020a¹⁷⁾)。いずれの起源地域についても、 $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 排出比の観測点間のばらつきは小さいことがわかる。また、前身の2-1505推進費において、福江島からの観測結果から評価した $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 排出比(図2.9, ▼)とも整合的であることがわかる。このことから、フットプリントを拡大した解析によって、従来の結果が支持されるとともに、信頼性が向上した。また、Baengnyeongでの観測を取り込むことで、北朝鮮での排出比を初めて評価することができた。日本の値は、海洋地球研究船「みらい」で国内の港湾付近で計測された値とも整合的であった。4地点間の $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 比のばらつき、および、地点横断的な排出比平均値の四季の変動を考慮して不確かさの幅を

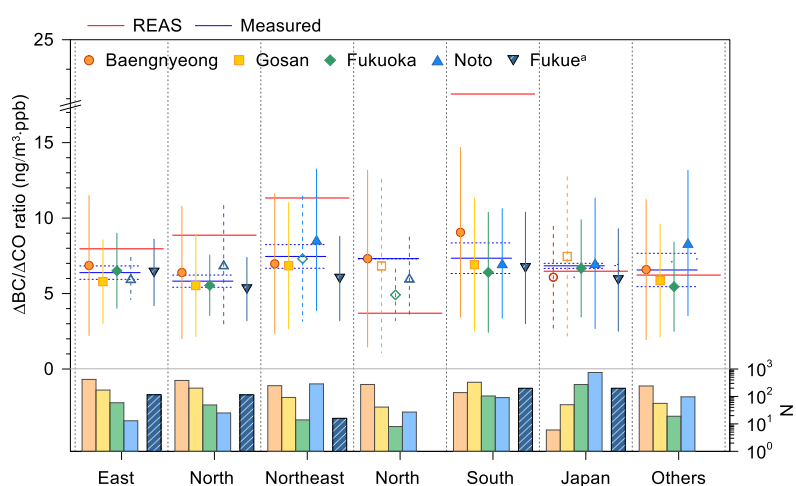


図2.9 各起源地域に対する各測定点からの $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 比評価結果のまとめ。青水平線が観測からの平均、赤水平線がREAS2.1による値。下は測定点ごとの有効データ数。

表2.1 ①「BC/CO排出比法」および②「モデル比較法」によって本研究で得られた、東アジア各国からのBC排出量の推定値

国	BC排出量① 「BC/CO排出比法」 (2010-16) (Tg/y)			BC排出量② 「モデル比較法」 (2010-18) (Tg/y)	比較	
	$\Delta BC/\Delta CO$ 比 ($\text{ng}/\text{m}^3 \cdot \text{ppb}$)	CO排出量 (Tg/y)	REAS2.1 (2008)		北極評議会 への報告値 (Tg/y)	2-1505推 進費時点 (Tg/y)
中国	1.10±0.23	6.59±1.03	208±28	1.33, -4.6%/年	1.59	0.9-1.1
北朝鮮	0.030±0.005	7.09±0.69	5.28±0.76	-	0.015	
韓国	0.010±0.005	7.38±0.69	1.68±0.71	0.014, -8.4%/年	0.013	0.0046
日本	0.038±0.012	6.79±1.01	6.96±1.94	0.035, -3.3%/年	0.026	0.022 (2010) 0.013 (2015)

評価した(表2.1)。

ボトムアップイベントリ REASver2.1での排出比(図2.9, 赤水平線)は、観測に対し、中国の3地域・韓国で過大、北朝鮮で過小、日本ではほぼ一致する傾向を示した。とくに韓国ではREASver2.1において $\Delta BC/\Delta CO$ 排出比が $23.2 \text{ ng}/\text{m}^3 \text{ ppb}^{-1}$ と高く、3倍超も観測値を過大評価した。REASver2.1の内訳の解析から、とくに輸送セクターにおけるCO排出量の著しい過小評価が原因とわかった。たとえば、乗用車台数は韓国では1250万台で、日本(5760万台)の22%に相当するが、CO排出量は韓国が0.21Tg/年で、日本(1.62Tg/年)の13%に留まる点を見出した。韓国での二輪自動車からの排出量(0.06Tg/年)についても、日本の約2倍の台数があるものの排出量は40%となっており、明らかな過小評価が指摘された。このような台数をもとにした補正を行うとREASver2.1での排出比は $14.8 \text{ ng}/\text{m}^3 \text{ ppb}^{-1}$ まで低下したが、依然として観測値を2倍以上過大評価しており、産業セクターなどでの過大評価の修正も必要であることがわかった。

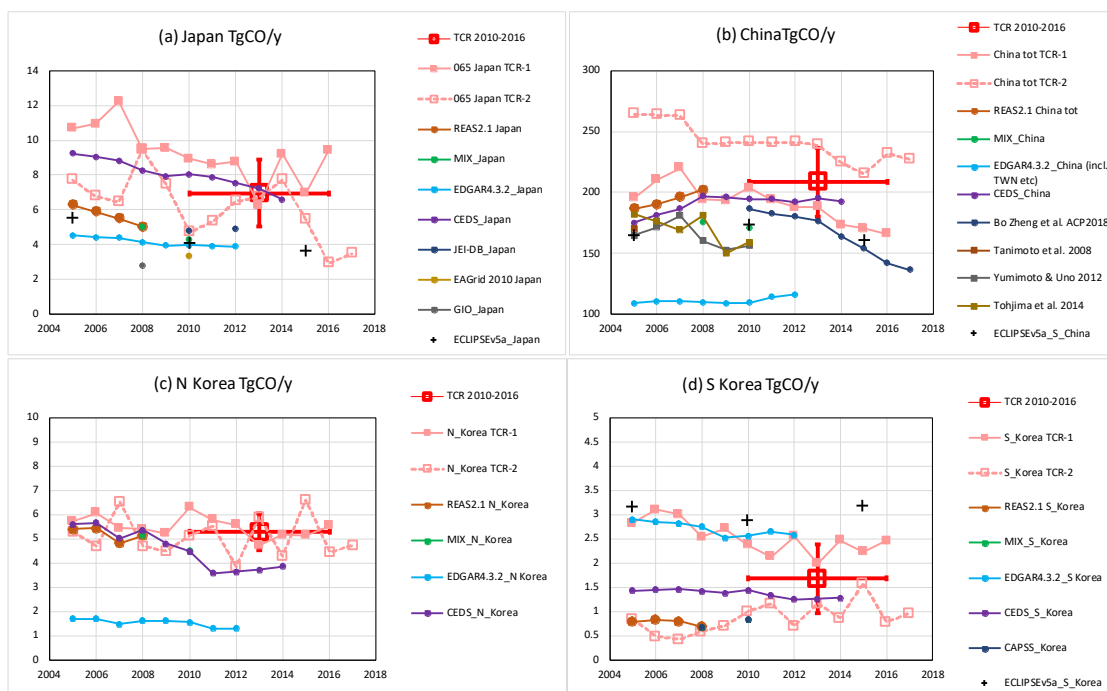


図2.10 日本、中国、北朝鮮、韓国からのCO排出量推計値。本研究での推計値(TCR 2010-2016, 赤)を各種ボトムアップインベントリ(○、+)およびトップダウン推計(□)と比較した。

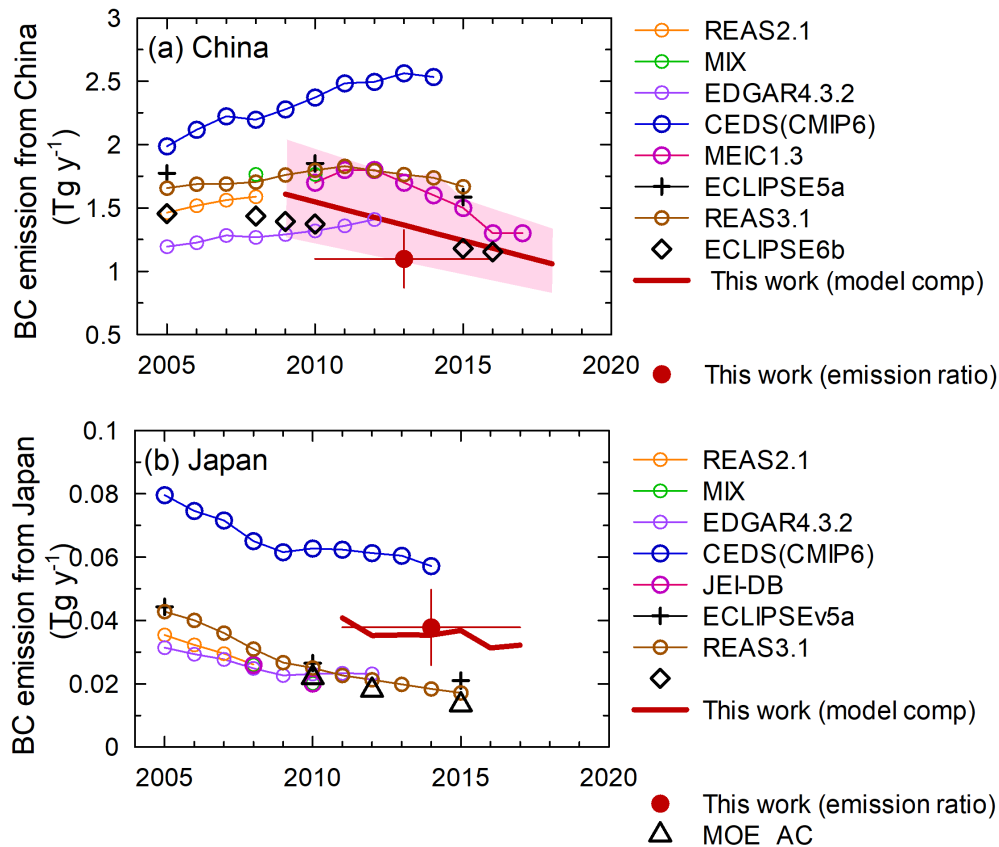


図2.11 中国および日本のBC排出量推計値。本研究での「モデル比較法」による推計値（赤実線）および「BC/CO排出比法」による推計値（赤丸）を各種ボトムアップインベントリや報告値と比較して示す。

一方、TCRからのCO排出量国別推計値(2010-2016年平均値)は、日本が 6.96 ± 1.94 Tg/年、中国が 208.3 ± 28.4 Tg/年、北朝鮮 5.28 ± 0.76 Tg/年、韓国 1.68 ± 0.71 Tg/年となった(表2.1)。不確かさは2010-2016年の年排出量値の標準偏差で評価した。これらの値を各種ボトムアップインベントリ(丸および+)と比較した(図2.10)。日本においてはボトムアップインベントリでは4-5 Tg/年のものが多いのに対し、それを上回る値となった。中国、北朝鮮でも傾向は同様であり、その一因は森林火災や野焼きなどのバイオマス燃焼が十分に考慮されていない場合もあるためと考えた。EDGAR4.3.2(水色)や、サブテーマ3で利用を検討したECLIPSEv5a(+)では日本、中国では過小、韓国では過大の傾向を示した。

最後に、 $\Delta BC/\Delta CO$ 比にCO排出量を乗じて得たBCの各国排出量推計値を表2.1、図2.11に示す。本研究による日本のBC排出量 0.038 ± 0.012 Tg/年は、2010年以降 $0.02-0.03$ Tg/年の範囲に入るREASver2.1, JEI-DB(=MIX), EDGAR4.3.2, 環境省がCCAC及び北極評議会に提出した値(MOE_AC)、ECLIPSEv5aより高い値となった。一方、CMIP6用のインベントリCEDSでは 0.06 Tg/年程度であり本研究の値より高かった。本研究による中国のBC排出量 1.10 ± 0.23 Tg/年は、ECLIPSEv6bを除くいずれのボトムアップ推計値より低い特徴がある。前述のようにCO排出量はボトムアップ値より高めであったが、 $\Delta BC/\Delta CO$ 比が低いことが支配要因となり、結果としてBC排出量はボトムアップ値より低い結果となった。とくにECLIPSEv5aで50%程度、CEDSで2倍程度過大評価となっており、サブテーマ3での解析でECLIPSEv5aを使う際には留意を促した。北朝鮮では各種ボトムアップインベントリ間で3倍程度の開きがあるが、今回、最も高いCEDSに近い値を得た。韓国では低めの値となり(0.010 ± 0.005 Tg/年)、ECLIPSEv5aは2倍程度、CEDSは10倍程度過大評価となっている可能性が指摘された。REASv2.1(2008年値)と比して、日本は45%増、中国は31%減、韓国は23%減となった。

中国でのボトムアップインベントリの不確かさは、最新の報告でもCOで $\pm 70-86\%$ 程度、BCで $\pm 200\%$

程度に上ると見積もられており(Li et al., 2017¹⁸⁾)、本研究ではそれらを $\pm 14\%$ 、 $\pm 21\%$ まで減少させることができた。

(2) 東アジアからのBC排出量のトップダウン推計② (モデル比較法)

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 $-5.8 \pm 1.5\%$)する顕著な変化を示したことを見出した⁶⁾(図2.12)。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あるが、本研究では、上述のように信頼性が高い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た。

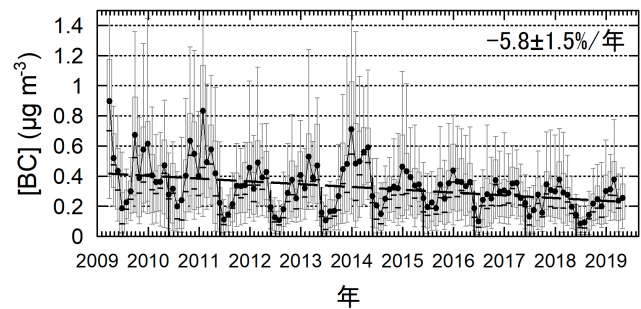


図2.12 福江島での大気中BC濃度の長期減少傾向

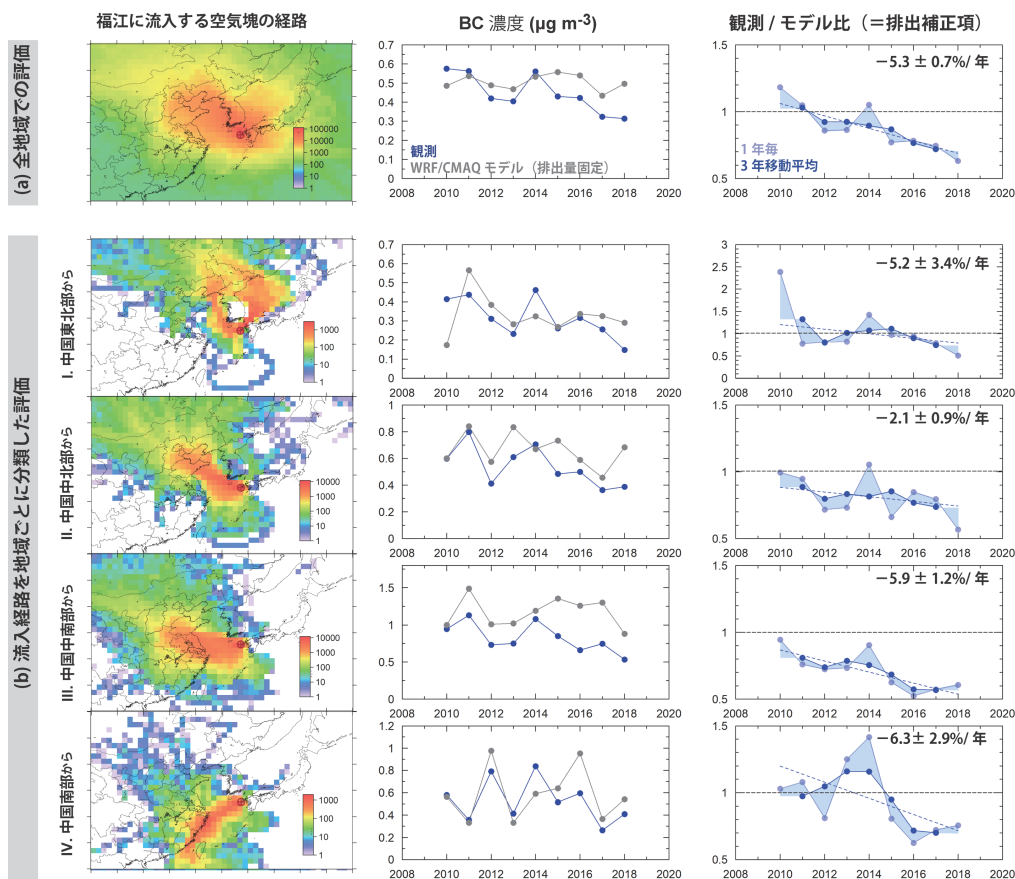


図2.13 (左) 福江に流入する空気塊の経路の分布、(中央) BC濃度の年々変動(観測:青線、WRF/CMAQモデル(排出量を固定し風による変動をモデル化したもの):灰色線)、(右) 観測/モデル比を「排出補正項」として評価し、風による影響を除いたその項の長期変化を排出量の推移として評価した。(a) 空気塊の経路を分類せず、全地域で評価した場合、(b) 中国4地域ごとに評価。

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、気象要因を取り除いて排出量だけの影響を評価した。まず、方法の項で述べたように、湿性除去の年々変動の影響を無視できるよう、APT<1mmのデータのみを解析に用いた(図2.13a、中央での青折れ線)。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、排出量については基準年の値を継続的に与え、気象場については各

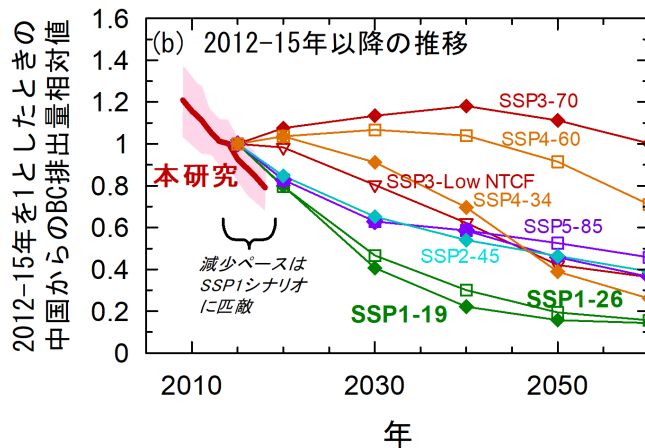


図2.14 本研究での減少トレンドを2012-15年での値で相対化し、各種社会経済シナリオ (SSP1~5) での中国からのBC排出量と比較したもの。本研究で推定されたBC排出量減少ペースは最も厳しい削減を想定したSSP1-19, SSP1-26シナリオにも匹敵している。

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2.13b)、南側の2地域 (-5.9~-6.3%/年) のほうが北側の2地域 (-2.1~-5.2%/年) より減少率が大きい傾向にあることがわかった。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。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た⁶⁾ (図2.11b青線)。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NO_x排出量削減速度並みとも評価されるものである。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、独立な角度から大幅に絞り込むことができた。

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た (図2.11b)。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、これまで見解は定まっていなかった。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きたが、これは本研究が示した下降傾

年の実際の状況を与えた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2.13a、中央灰色折れ線)、観測と対照した。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った。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た (図2.13a、右図)。この項が年率-5.3±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ることができた⁹⁾。

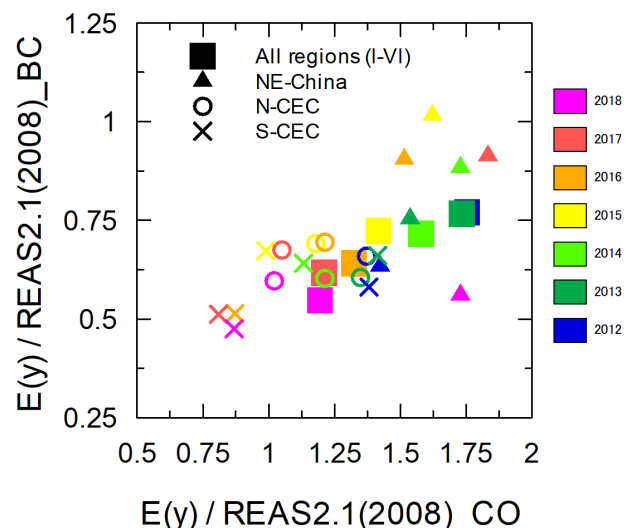


図2.15 CO, BCの冬季の排出補正係数の年々変化を、全地域 (中国・韓国・日本)、および中国東北部、中国中東部北側・南側について示した。全地域ではBC, COとも排出補正係数は年を追って減少しているが (■)、中国東北部 (▲) では2017年までむしろ逆行し増加する傾向が確認された。

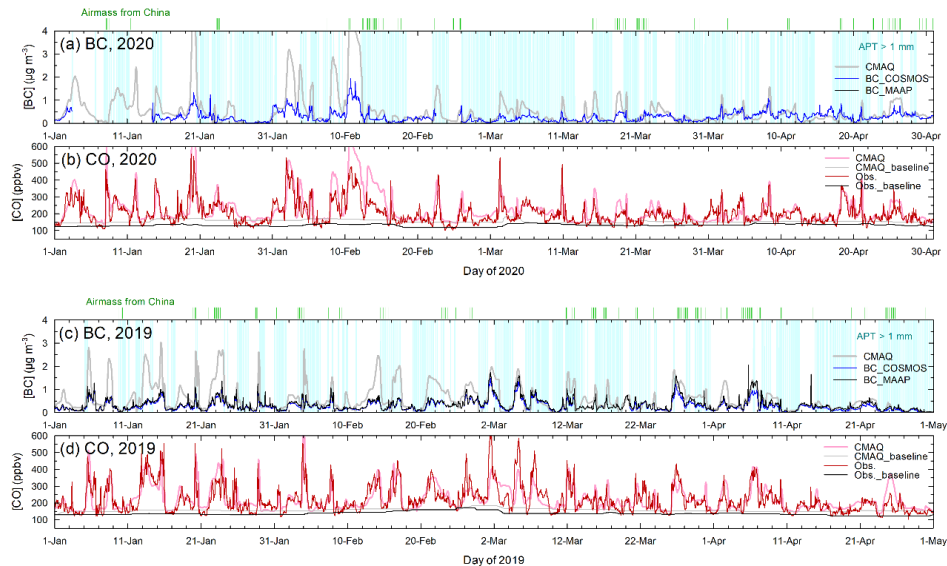


図2.16 2020年1-4月および2019年1-4月における福江でのBC, CO濃度の観測・モデル比較

向とは逆であり、支持されなかった。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った。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た。

本研究の成果等を受けて、2020年9月に公表されたCEDS最新版では、早速、中国からのBC排出量の下方修正と、下降トレンドが取り入れられている(O'Rourke et al., 2020)¹⁹。CEDSはオープンソース型のコミュニティ共有インベントリであり、情報の透明性に優れるとともに、このような機動的な修正もすぐにウェブ発信され、即時性も高い。IPCC AR6 WG1での評価(2021年公表)には間に合わないが、少なくともAR7のサイクルでは、より正確な中国からのBC排出量に基づいて気候影響評価を行うことが可能となった。

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

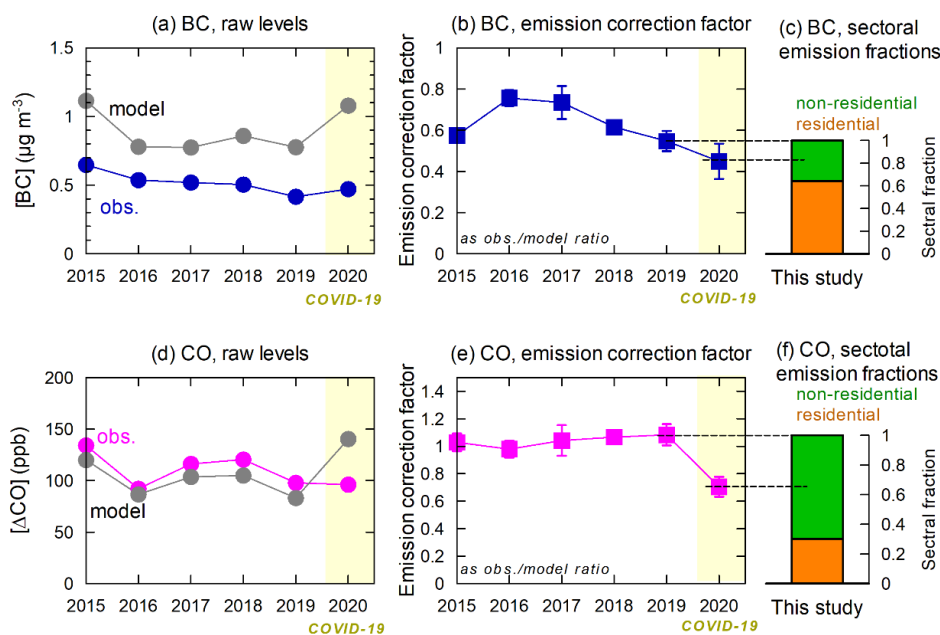


図2.17 2020年1-4月および2019年1-4月における福江でのBC, CO濃度の観測・モデル比較

表2.2 中国からのBC, CO排出に関する家庭部門・非家庭部門寄与と寄与率を本研究と、各種ボトムアップインベントリで比較した。

	BC, 家庭部門 (Tg yr ⁻¹)	BC, 非家庭部門 (Tg yr ⁻¹)	CO, 家庭部門 (Tg yr ⁻¹)	CO, 非家庭部門 (Tg yr ⁻¹)
本研究	0.56 (64 %)	0.31 (36 %)	66 (30 %)	153 (70 %)
REAS version 3.1 ² (2015)	0.67 (40 %)	0.99 (60 %)	50 (28 %)	126 (72 %)
MEIC version 1.3 ¹⁴ (2017)	0.63 (50 %)	0.63 (50 %)	57 (42 %)	79 (58 %)
ECLIPSE version 6b ¹³ (2015)	0.74 (63 %)	0.43 (37 %)	43 (27 %)	118 (73 %)
EDGAR version 5.0 ¹² (2015)	0.29 (22 %)	1.03 (78 %)	32 (25 %)	98 (75 %)
CEDS (v_2016_07_16, CMIP6 Release) ¹ (2014)	1.29 (51 %)	1.25 (49 %)	92 (48 %)	101 (52 %)

排出トレンドとも比較した(図2.14)。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た。

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BC, CO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た(図2.15)。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ある。

本研究の解析対象を、コロナ禍の影響で中国の経済活動が特定の排出部門で低下した、2020年春季まで延長した。季節としては2020年の排出低下時期に合わせ、2-3月に限定し、過去年度に遡って中国起源大気での排出補正係数変動を評価した。2020年2-3月は、中国からの空気塊が福江に流入し、BCやCOの濃度が上昇する事例が例年並みに確認された(図2.16)。湿性除去が無視できるAPT<1mmのみで平均すると、2020年はモデル濃度は過去6年で2015年と並ぶ最高レベルにあり、気象場だけからすると越境汚染のいわば当たり年であったと考えられた。観測ではBCは2020年に濃度が2019年より微増したが、一方でCOの観測濃度は増加しなかった(図2.17a,d)。観測/モデル比から排出補正係数を推定すると(図2.17b,e)、BCは2019年と比べ2020年は18%の減少であったが、COでは2020年にこれまでの傾向とは明らかに異なり、35%もの急激な減少がみられた。このことは、図2.16において、BCでは2020年には2019年とほぼ同程度にモデル過大評価となっていたが、COでは2020年には顕著にモデルの過大評価傾向が見られた点にも表れている。2019年から2020年への主な変化は、2020年にコロナ禍の影響でロックダウン・ステイホーム政策が敷かれ、家庭部門の排出はほぼ変化せず、一方で輸送部門・産業部門などが大きな活動量低下の影響を受けたことに起因すると考えられる。この後者の部門群を「非家庭部門」と総称し、2020年の活動量(排出量)低下度を本観測とは独立な情報(Forster et al.(2020)²⁰)およびChina Highway: Passenger Traffic, <https://www.ceicdata.com/en/china/highway-passenger-traffic> からBC, COともに-50±14%と見積もった。この低下度とBC全体の18%の減少とから、2019年のBC排出に占める「非家庭部門」の寄与割合を、36%と見積もることができた(図2.17c)。その結果、残りの寄与64%(50-72%)が家庭部門に由来し、主要な排出部門であることを見極めた。

COに関しては、同様の考察から70%(55-97%)が「非家庭部門」の寄与と見積もられた。BCとCOとは同様の不完全燃焼起源をもつという程度にしかこれまで考察してこなかったが、今回コロナ禍によって予期せぬ形でBCとCOとの間には主要排出部門に大きな違いがあることが浮き彫りとなった。

表2.2は、上記の本研究結果を、主要なボトムアップ型排出インベントリでのBC, COの家庭部門・非家庭部門の寄与割合と比較したものである。BCの家庭起源割合はEDGAR version5.0の22%からECLIPSE version6bの63%まで広く分布しているが、我々の結果(64%)はこの広い幅の上端の値を支持している。EDGAR version5.0で割合が低い理由は、IPCCカテゴリーでの石油精製(1.A.1.b)、固体燃料製造及びその他エネルギー産業の寄与率が大きすぎることに起因している。一方、COの家庭起源寄与割合は25-48%と範囲はBCよりは狭く、今回の推定値(30%)と比較的よく整合している。絶対値でみると、本研究で評価されたBCの家庭起源寄与(0.56 Tg yr⁻¹)に対し、EDGARは再び過小であり、その他はすべて過大であった。非家庭部門については本研究の推定値(0.31 Tg yr⁻¹)はECLIPSE6bの0.43 Tg yr⁻¹と近いが、その

他での値(0.63-1.25Tg yr⁻¹)は過大傾向にあった。その一因として、年次が2014-2017年の範囲であるため、2019年までの間に産業起源のBC排出が低下した可能性も考えられる。BC排出総量としては2019年で0.87 Tg yr⁻¹であり、ボトムアップインベントリの1.17-2.54 Tg yr⁻¹は過大であることが示唆された。COの排出絶対量については、家庭部門の66Tg yr⁻¹と推定され、CEDSの92Tg yr⁻¹は過大、EDGAR version 5.0の

32 Tg yr⁻¹は過小と考えられた。非家庭部門のCO排出量は153 Tg yr⁻¹と推定され、79-126 Tg yr⁻¹の範囲のいずれのボトムアップインベントリ値よりも高かった。

中国BC排出の主要な部門である家庭起源への対策が有効であるかどうか、サブ課題3が経済的観点から評価を行った²¹⁾。図2.18には、本研究と一致度が高かったECLIPSEversion6bを利用して算出した限界削減費用(MAC)曲線の分析結果を示す。住宅部門のMACは、0.55 TgまでのBC排出削減範囲で約2~5 kJPY kg⁻¹で維持されたが、非住宅部門のMACは、BC削減が0.2Tg未満でもすでに20 kJPYkg⁻¹以上に増加した。これは、主に石炭ベースの調理ストーブまたは暖房ストーブをガスベースの代替品に置き換えることによって達成される住宅部門のBC排出削減が、非家庭部門と比較し低コストで大きな削減ポテンシャルをもちうることを示唆している。この研究では、BC以外の種との同時放出変化による影響は含まれていないため、今後は詳細な分析が必要である。

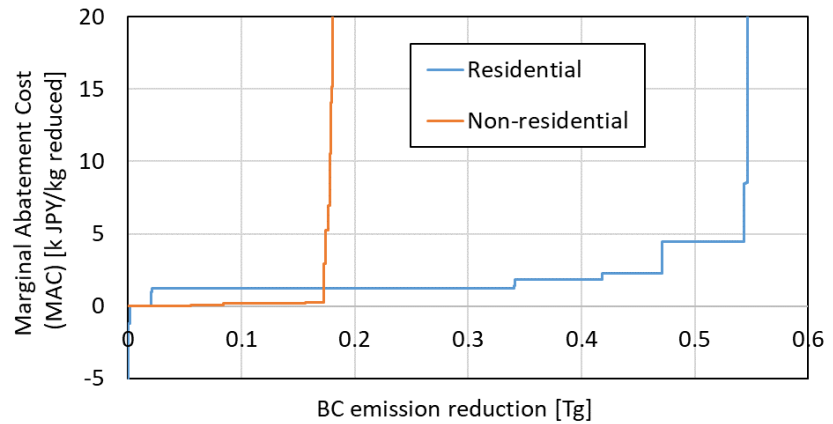


図2.18 中国からの家庭起源および非家庭起源別でのBC排出に関する限界削減費用の分析結果（サブテーマ3による）。

(3) BC湿性除去速度の多点での観測評価とモデル評価

能登、Baengnyeong, Gosanにおける $\Delta BC/\Delta CO$ 比観測値を用いて算出した輸送効率(TE)は、前身の2-1505推進費課題で福江でのデータについて見出されたように、APTに対して減衰を示した(図2.19, Choi et al., 2020b²²⁾)。APTを0.01-0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 2.5, 5.0, 10, 20, 30 mmで区切られた9ビンに分類してTEの平均を求め、その減衰をstretched exponential decay (SED)式 $\exp(-A1 \times APT^{A2})$ で近似して整理した。3観測地点全データでのフィッティング結果は $A1 = 0.269 \pm 0.039$, $A2 = 0.385 \pm 0.035$)となり、福江での $A1 = 0.109$, $A2 = 0.68$ とやや異なる結果となった。A1が大きいと、APTが小さい値の範囲でTEが小さくなる傾向となり、今回の結果は福江より近距離でのTEが小さいことを表している。一方、A2が小さいとAPTが大きい値の範囲でTEが大きくなる傾向があり、今回の結果は福江より長距離輸送でのTEが高まることを表している。Baengnyeongでの結

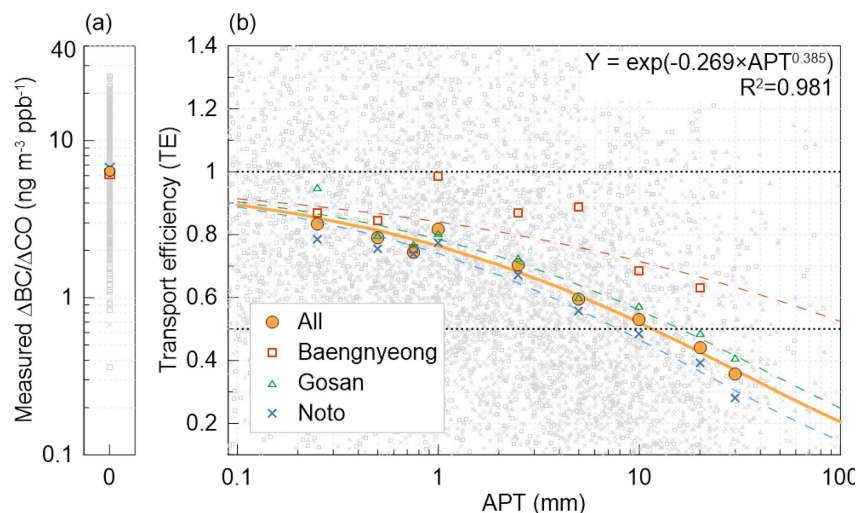


図2.19 3地点で観測された $\Delta BC/\Delta CO$ 比から算出した輸送効率(TE)のAPTに対する減衰とその近似評価結果

果は福江より長距離輸送でのTEが高まることを表している。Baengnyeongでの結

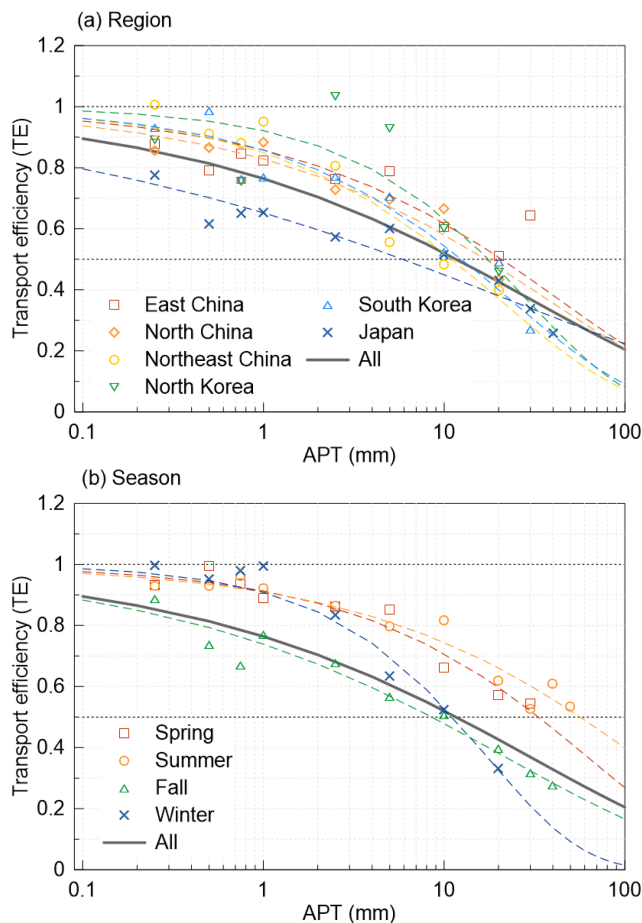


図2.20 (a) 起源地域別および(b) 季節別のBC輸送効率評価

Gosanが0.70, 能登が0.68であったが、FLEXPARTでは全ケースで0.91, Baengnyeongで0.95, Gosanで0.94, 能登で0.87と、いずれも高い値となり、観測事実と比べ湿性除去が顕著に弱いことがわかった。雲底下除去と雲内除去のどちらに問題があるのかを引き続いて検討した。

雲底下除去に関する Λ_{below} 値の観測からの評価(図2.21)では、サブグリッドレベルの I_{total} (降水強度: 降水量を f_g で除した値)に依存することに留意して解析した²²⁾。解析した869ケースで、 Λ_{below} はそれぞれ負~正の広い範囲

の値をとったが、その中央値は $7.9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ であった。 I_{total} の閾値を0.01mm(全ケースの場合)から0.2mmに引き上げると、 Λ_{below} の中央値は $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ となった。閾値0.01mmの場合に Λ_{below} と I_{total} の関係を指数関数でフィッティングすることができた(図2.21右)。

本研究で得られたprecipitation intensityごとの Λ_{below} を先行研究での値(オレンジ色で示される計算値で評

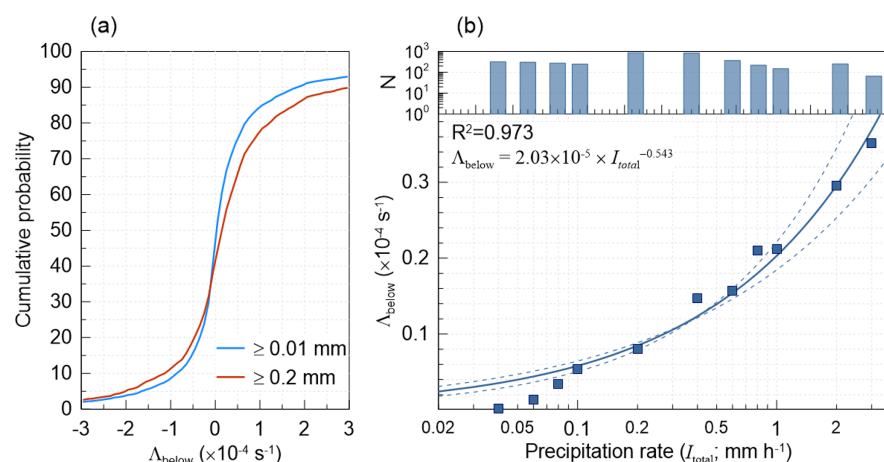


図2.21 (a) 観測から得られた Λ_{below} の頻度分布。 I_{total} の閾値ごとに評価した。(b) 観測された Λ_{below} の中央値を降水強度ビンごとに整理し指数関数曲線で近似したもの。

果は明らかに他の2地点よりTEが高止まりしていた。その理由としては、大排出源である中国により近いため輸送高度が低い一方で、また降水量が低く雲底高度が比較的高いため、輸送経路上で湿性除去を受けにくい可能性が指摘された。全地点の結果から、TEが0.5となるのに必要なAPTは11.7mmとなり、前報の福江での15mmよりやや少ない結果となった。

次に同様の評価を起源地域別・季節別に行った²²⁾(図2.20)。TE=0.5となるAPT値は、中国東部または北部で高まる傾向を示した。その理由としては上記のBaengnyeongの考察と同様に、雲底高度より低い高度を輸送される場合が多かったためと考えられた。また、観測地点まで輸送される間にエイジングにより親水性を帯びて湿性除去を受けやすくなるかどうかについても重要と考えられた。季節性では、秋・冬にTEが低下しやすい傾向が見出された。秋・冬は春よりin-cloud scavengingの効果を受けて気塊が到来する割合が高いことがその原因と考えられた。

続いて、観測とFLEXPARTモデルでTEを比較した²²⁾。観測値では全ケースのTEの中央値は0.72, 観測地点別ではBaengnyeongが0.88,

価された場合では粒径を200nmと仮定)と比較したところ、ほぼそれらのばらつきの中央付近の値となることがわかった(図2.22)。図中Lで示される点がLaakso et al. (2003)による値で、FLEXPART version 10で採用されているものであり、本研究で観測から得られた値とよく一致することが確かめられた。このことから、FLEXPARTの雲底下での湿性除去には問題がないものと結論付けられた。一方で北京の二次エアロゾル観測値から算出されたXu et al. (2017) (図中X) では大幅に過大評価となっていた。仮定された粒径の違い(500nmで評価されている)では説明できず、注意が必要である。

一方、雲内除去に関わる Λ_{in} 値については、観測からの評価値(中央値として Λ_{in}^*)が $8.06 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ となり、FLEXPARTからの値($7.28 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)が1桁も過小評価となっていることを見出した²²⁾。またFLEXPARTでの Λ_{in} 値を10倍高めて再計算すると、3地点でのTE中央値は0.73まで低下し、観測値(0.72)とよく一致するようになることが確かめられた。このことから、FLEXPARTでの湿性除去の問題は、雲内除去に付随したものであると結論付けた。このことで、BC湿性除去のモデル比較をとりまとめ、長距離輸送のモデル表現を改善した。

観測値の Λ_{in}^* の変動(CV, 標準偏差を平均値で割った値)は0.78であるのに対し、計算値では0.23と小さかったことから、計算では現実的な大きな幅を評価できていないと推察された。 Λ_{in}^* の算出式で含まれていない気象パラメータでCVが大きかったのは、対流有効位置エネルギーCAPE(CV=0.31)であった。CAPEはMori et al. (2014)²³⁾においても鉛直不安定さの指標としてBCの湿性除去に関わっている可能性が指摘されてきたものである。さらに本研究では、人工ニューラルネットワーク解析により、一時間ごとの Λ_{in} 値の決定因子としてのCAPEの重要度を、他の気象パラメータ入力値(CTWC, f_g , F_{nuc} , I_{total} , and TCC)と相対的に比較して評価した。その結果、CAPEのスコアは35%で、他の考慮済みのパラメータよりもむしろ重要であることが指摘された。また、今後はWRF-FLEXPARTなどの利用により、本研究での0.25°グリッドサイズよりも高い解像度で対流性の雲の評価を進めることなどが重要であることが指摘された。

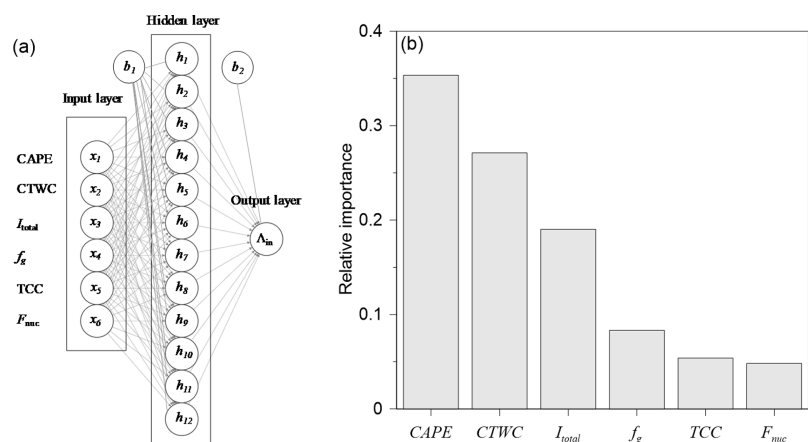


図2.23 人工ニューラルネットワーク解析により、 Λ_{in} の決定因子としてのCAPEの重要性を、すでに考慮されている5つの気象パラメータと相対的に評価した。

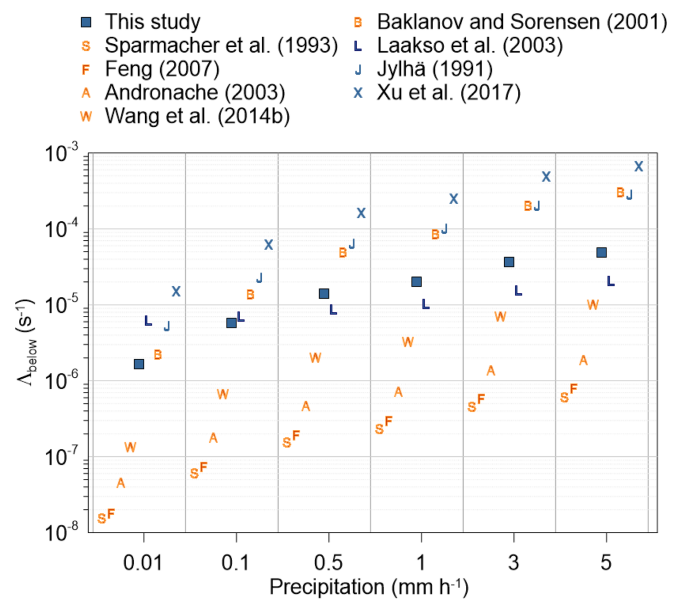


図2.22 Λ_{below} の本研究での観測値(■)を先行研究と比較

(4) メタン観測データ解析と都市部からの排出推計

一般局のうち高濃度局のクラスター分析結果（図2.24）では、大きく3パターン（夏秋冬濃度急増型（赤）、冬濃度増加型（青）、夏濃度増加型（緑））に分類できることが分かった。

夏秋冬濃度急増型に分類されたのは遠浅（北海道）・習志野鷺沼（千葉）の2地点で、前者については近隣の牧場や農用地からの影響が強いものと考えられた。冬濃度増加型は東京近郊で多く見られ、都市大気汚染型と解釈された。夏濃度増加型は郊外でも多く見られ、6-8月に近隣の水田からのメタン発生の影響を強く受けたものと考察した。自排局での解析でも同様に、冬濃度増、夏濃度増のパターンがみられた。本研究ではこれらのパターンのうち、都市域で見られた冬濃度増加型に特に着目して、東京などからの排出量の評価を試みた。

まず2017年12月、都心部の代表的な一般測定局である世田谷区世田谷において、図2.25に示すように、メタンのNOxの1時間値が非常に高い正の相関をもって変動していることがわかった

($R=0.87$)。メタンの濃度変動幅は0.6ppmにも上り、0.01ppmの分解能でも十分に変動がとらえられることがわかった。東京都の一般局・自排局計28地点でも、図2.26に示すように、メタン・NOx濃度間に $R>0.7$ 以上の正相関がみられる地点

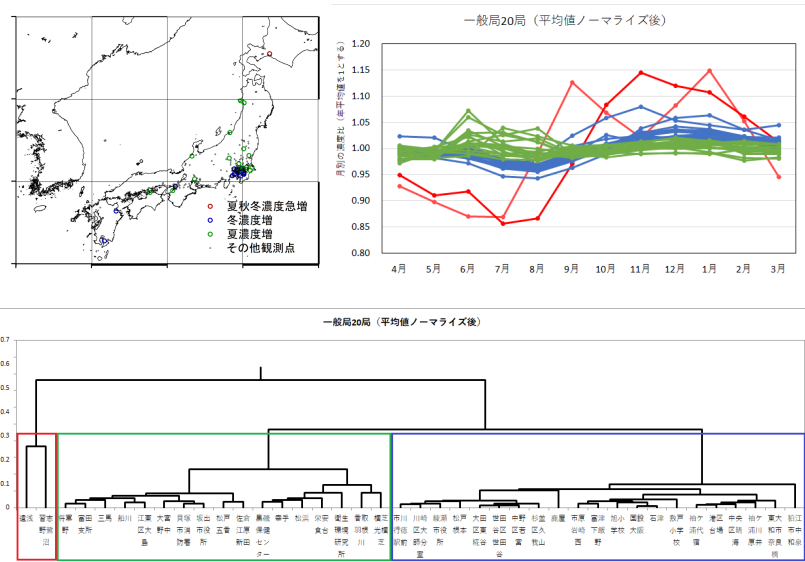


図2.24 一般局のうちメタン高濃度局に関するクラスター分析結果

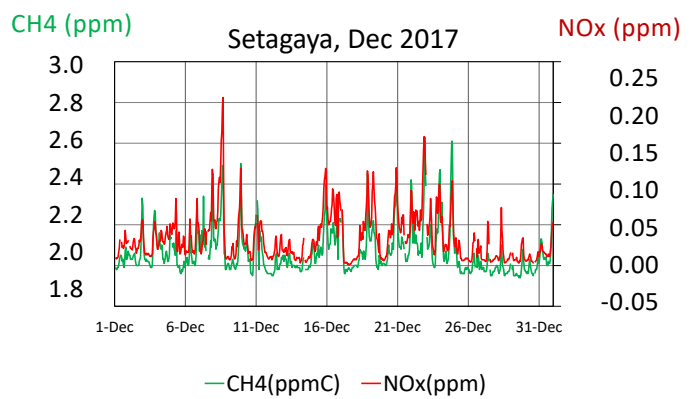


図2.25 2017年12月に世田谷局で見られたメタンとNOx濃度の相関

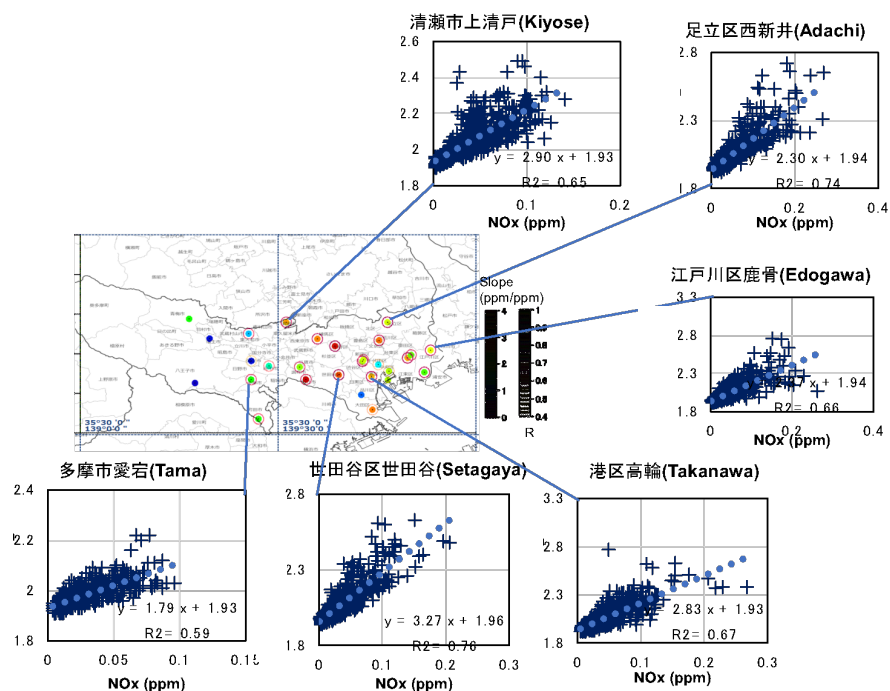


図2.26 2017年12月の東京都内の28測定局におけるメタン・NOx濃度間の正相関

が多いことがわかった。日変化・風向依存性のパターンは、メタンとNOxとで必ずしも共通ではなかったことから、排出部門まで共通ではなく、接地逆転層への蓄積度が共通項となり正相関がみられたものと考えた。しかしながら回帰直線の傾き $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{NO}_x$ は1.8~3.3ppb/ppb程度で、この地域での排出量比を反映していることは間違いなく、インベントリ(REAS2.1)での値 3.5

ppb/ppb(2008年)よりはやや低い値であることが示された。

2017年12月~2019年12月まで、月ごとに相関係数を評価し、季節性を確認したところ、夏季には回帰直線の傾きは5ppb/ppb程度に上昇するものの、相関係数が0.5以下に下がることがわかった。NOx値は実際にはPANなどを含むNOx*として計測されているものの、夏季には排出されたNOxの一部の酸化が進み、NOx*として濃度検出される割合が下がるために、見かけ上傾きが上昇する可能性や、メタンは高温となる夏季には排出量が増加するために傾きが上昇する可能性が指摘された。冬季であれば、2018年12月、2019年12月にも2017年12月の相関がほぼ再現されることも示された。以上により、本研究ではNOxとの相関から排出量を議論するのは冬季のみが適切と判断した。

2018年度の冬季(2018年12月~2019年2月)について、東京都以外でも同様の高いメタン・NOx間の相関性($R>0.7$)が得られることが、近隣の埼玉県・千葉県・神奈川県や、愛知県・大阪府のメタン平均濃度高濃度地点での評価結果から明らかとなり(図2.27)、東京での結果は広く日本の都市域を代表するものであることがわかった。回帰直線の傾きについては、東京の都心部より他府県のほうが若干低い傾向がみられた。図2.28には、 $R>0.7$ を示した一般局に関し、この回帰直線の傾きが測定局の住所地が含まれる地方自治体(最高で区レベル)の人口密度と相関することも確かめられ、何らかの都市型の社会経済活動によって排出されている可能性が示唆された。

さらに、過去10年間(2009-2018年度)の長期的なCH₄/NO_x排出比の変動を地点ごとに評価し、都府県別に集約した(図2.29左)ところ、いずれの都府県でも、排出比が上昇する傾向にあることがわかった。東京都では+4.1%/年の顕著な上昇トレンドとなったが、この期間にNO_x濃度は-4.0%/年の下降トレンドを示しており(図2.29右)、この効果が排出比上昇を引き起こしていることが明らかとなった。つまり、この方法で評価されるCH₄の排出量はこの10年間ほぼ変化していないことが示された。

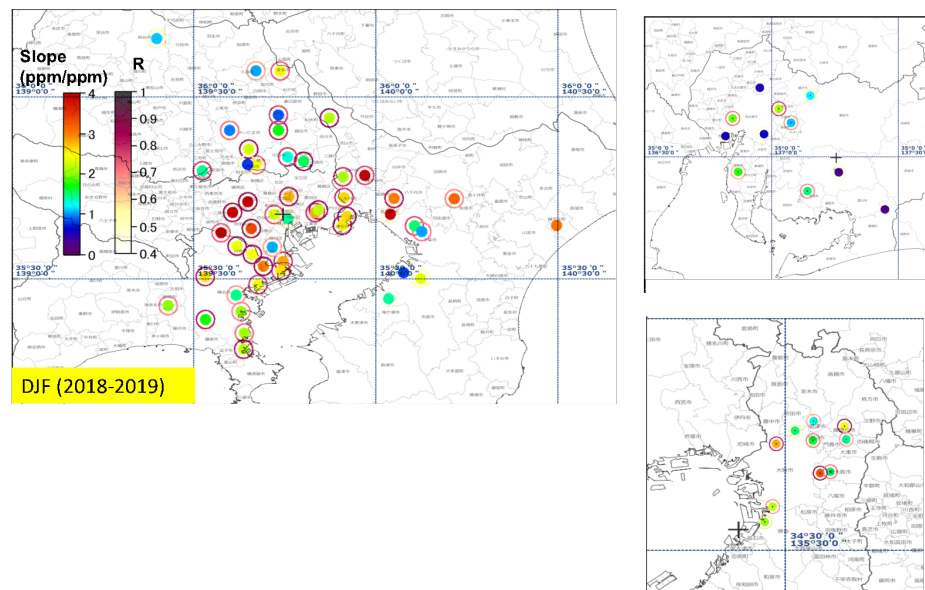


図2.27 2018年12月~2019年2月の東京都および5府県でのメタン・NOx濃度間の相関係数と回帰直線の傾き

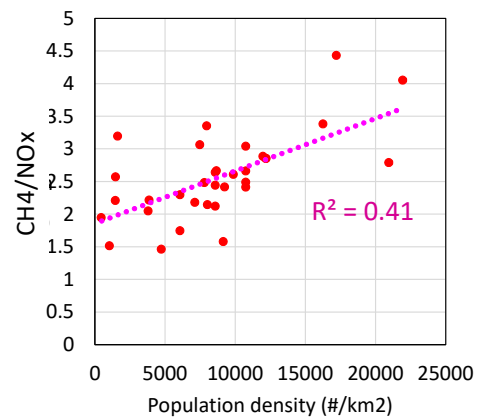


図2.28 CH₄/NO_x排出比と人口密度との相関。 $R>0.7$ となった6都府県の一般局のデータを使用。

CH₄/NO_x排出比約2.5ppm/ppmをモル換算したのちに、東京都からのNO_x排出量を掛けることによって、東京都からのメタン排出量を推計した(表2.3)。その際、NO_x排出量については、東京都(2015年度

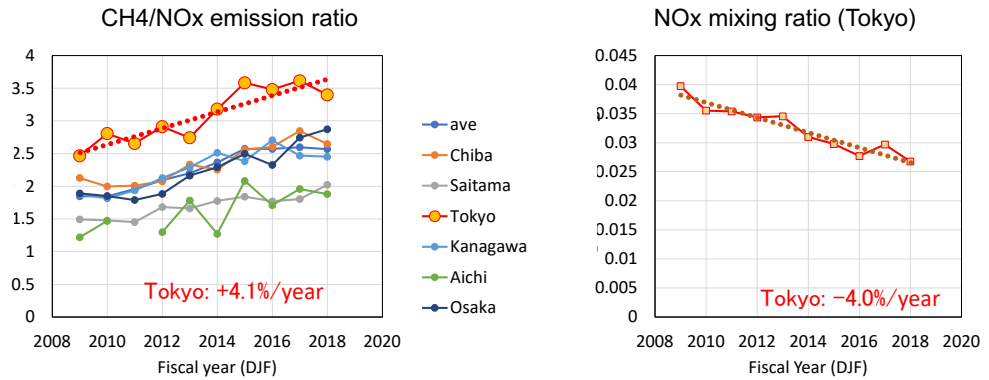


図2.29 (左)冬季のCH₄/NO_x排出比の2009-2018年度にわたる長期傾向。(右)同期間におけるNO_x濃度(ppm)の低減傾向。

に関する2019年の報告値)とEDGAR version 5.0(2015年)の2種類の推計値を用いた。東京都の値に基づいた場合のメタン排出量は0.036Tg/年、EDGAR値に基づいた場合のメタン排出量は0.090Tg/年と推定された。それぞれが別途見積もっているボトムアップ型のメタン排出量は0.022,

表2.3 (ΔCH₄/ΔNO_x)排出比に基づいた、東京都内からのメタン排出量の推計と、ボトムアップインベントリ値との比較

(ΔCH ₄ /ΔNO _x) 排出比 ppm/ppm	NO _x 排出量 (t/年)	CH ₄ 排出量 (Tg/年)	比較 ボトムアップCH ₄ 排出量 (Tg/年)
2.5 (This work)	41050 (2019東京都環境白書;2015年度)	0.036	0.022 (2019東京都環境白書; 2015年度)
	102000 (EDGAR5.0; 2015)	0.090	0.050 (EDGAR5.0; 2015)

0.050Tg/年であり、それらの値をそれぞれ上回るメタン排出量が実際にはあることが観測データから示唆された。東京都の値に基づいた場合の差異0.014Tg/年(0.036-0.022で算出)の排出源について以下のように考察した。第一に、自動車からの排気については、CH₄/NO_x排出比の実測値が0.005-0.025ppm/ppmの範囲であり(サブテーマ1, 国立環境研究所、猪俣敏氏の情報、2019年)、観測された排出比より一桁以上小さいこと、また、東京都でのボトムアップ評価での自動車からのメタン排出量は2010-2018年に0.0049Tg/年から0.00059Tg/年まで、一桁程度低下したとされており(アドバイザー、森川多津子氏の情報、2020年)、上述の解析から推定された過去10年間ほぼ一定の排出量と整合しないこと、0.014Tg/年のごく一部しか説明できないことから、この差異の要因ではないと考えた。第二に、ボトムアップ排

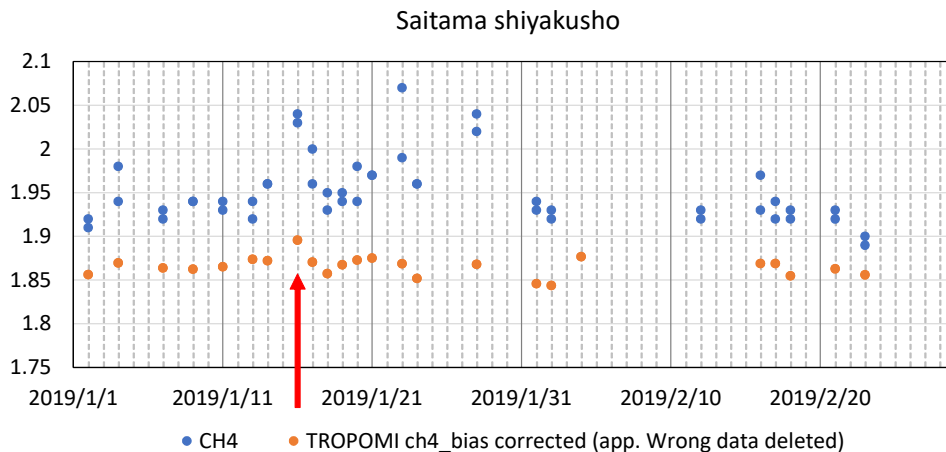


図2.30 さいたま市役所での地表メタン濃度と、同期したTROPOMI衛星観測によるカラム平均メタン濃度との時間変動パターン類似性

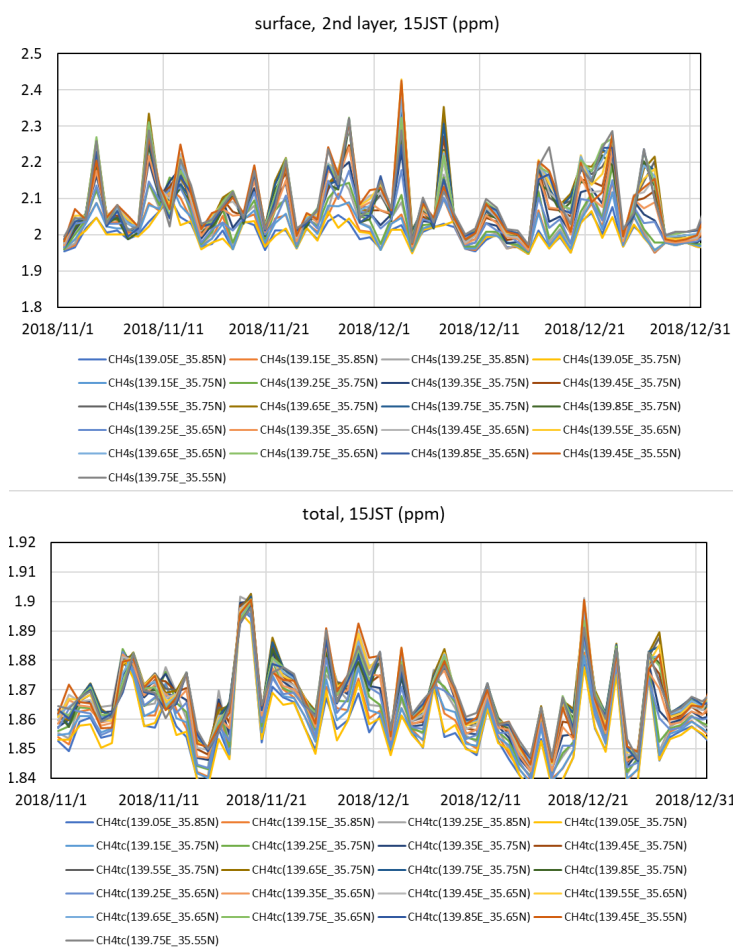


図2.31 2018年11-12月における、CAMSモデルによる東京都でのメタン地表付近濃度の変動（上）と、カラム平均濃度の変動（下）パターンは、越境大気汚染の影響などもありやや異なっている。

出統計に含まれていない「都市ガスのリーク」の可能性を検討した。2018年度の都道府県別エネルギー消費統計によると、東京都での産業・家庭での都市ガス消費量は3670M Nm³(= 2.6Tg)であり、そのわずか0.5%がリークしているとすれば0.014Tg/年の未把握排出量は説明しうるのではないかと考えた。第三に、東京都で0.022Tg/年のメタン排出量をボトムアップ推計する際には95.7%が埋め立てや下水処理といった廃棄物管理が主な排出部門とされており、その排出量に過小評価がある可能性があるとも推察された。以上のように排出部門までは特定に至らなかったが、本研究からは日本の都市部から未把握のメタン排出があり、今後その究明と対策が緩和策の一つとなりうることを示した。

温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)がとりまとめている我が国からのメタン年間排出量

(https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000000x4g42-att/NIR-JPN-2021-v3.0_J_GIOweb.pdf) は1.14Tg/年であるが、大部分は農業関連であり、非農業部門からの排出量は0.27Tg/年と推計されている(2018年値)。本研究で見積もった未把握排出量0.014Tg/年は、東京都と全国の人口比(約9倍)を考慮すると、0.13Tg/年と外挿されるが、把握分の0.27Tg/年の約50%に相当する可能性があり、注視が必要である。一方、世界的なメタンの排出量は576-737 Tg/y (GCP-CH₄ 2020による2008-2017年値)と見積もられており、その量からすると0.13Tg/年は0.02%程度と小さい寄与である。

このような都心部からのメタン排出量が、近年急速に発達が進む人工衛星からのメタン観測によってとらえられるかどうかについて、考察した。図2.30は、埼玉市役所(常時監視局)での地表付近メタン濃度とTROPOMI衛星によるカラム平均メタン濃度の間に相関があり、とくに2019年1月16日などには両者に有意な上昇がみられたことを示している。CAMSモデルによる3次元シミュレーションによれば、冬季の関東地域上空でのカラム平均メタン濃度には、その場の地表からの排出だけでなく、中国等での排出が地表よりも高い高度で長距離輸送されてくる寄与分の影響がむしろ強くみられる場合があり、必ずしも地表濃度とカラム濃度が共変しないことが示唆された(図2.31)ため、今後はこれらの寄与を分離して注意深く衛星からの観測可能性を評価してゆく必要があることが示された。

5. 研究目標の達成状況

サブ課題2では研究目標を上回って達成した。具体的には、日韓5地点の研究観測サイトのBC/COデータをもとに、BC/CO排出比法とモデル比較法の2種の方法で、中国・日本・韓国などの国別BC排出量推計精度を向上させ、CMIP6に用いられるCEDSインベントリによる中国BC排出量を大幅に下方修正させるなど、IPCC報告書などにも影響をもたらす大きなインパクトのある成果を得た。また、環境省の各種インベントリに用いられているJEI-DBやREAS、北極評議会への報告値などとも比較し、インベントリ間の現在のギャップを明らかにしつつ、今後、相互評価比較に活用し情報精度を向上させてゆくための筋道を確立した。GIOのボトムアップインベントリ担当者や、環境省のPM2.5EIやJEI-DBインベントリの構築に携わる研究者等にも情報をインプットした。メタンについては国内常時監視局データ、TROPOMIメタンデータなどを利用し、NOxとの相関関係を利用して東京都での排出量を推計し、都の公式排出量を評価するとともに、国の公式統計値とも比較できた。2019年5月に開かれたIPCC第49回総会では、インベントリタスクフォース(TFI)を主体として実施している国別の公式排出量報告を、これまでのGHGからSLCFに拡張する方法論を構築してゆくことが決定された。本課題で得られた情報についてもインプットし、また、招待を受けている専門家会合でも有用な方法論などの情報を提供してゆく方向について、環境省や文部科学省にも情報共有した。

6. 引用文献

- 1) Y. KANAYA, F. TAKETANI, Y. KOMAZAKI, X. LIU, Y. KONDO, L. K. SAHU, H. IRIE, and H. TAKASHIMA: *Aerosol Sci. Technol.*, 47, 1-10 (2013) Comparison of black carbon mass concentrations observed by Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP) and Continuous Soot-Monitoring System (COSMOS) on Fukue Island and in Tokyo, Japan.
- 2) P. R. SINHA, Y. KONDO, M. KOIKE, J. A. OGREN, A. JEFFERSON, T. E. BARRETT, R. J. SHEESLEY, S. OHATA, N. MOTOKI, H. COE, D. LIU, M. IRWIN, P. TUNVED, P. K. QUINN, and Y. ZHAO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 3544- 3572 (2017) Evaluation of ground - based black carbon measurements by filter - based photometers at two Arctic sites.
- 3) K. MIYAZAKI, H. J. ESKES, and K. SUDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8315-8348 (2015) A tropospheric chemistry reanalysis for the years 2005-2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data.
- 4) Y. KANAYA, K. MIYAZAKI, F. TAKETANI, T. MIYAKAWA, H. TAKASHIMA, Y. KOMAZAKI, X. PAN, S. KATO, K. SUDO, T. SEKIYA, J. INOUE, K. SATO, and K. OSHIMA: *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 7233-7254 (2019) Ozone and carbon monoxide observations over open oceans on R/V Mirai from 67° S to 75° N during 2012 to 2017: Testing global chemical reanalysis in terms of Arctic processes, low ozone levels at low latitudes, and pollution transport.
- 5) K. MIYAZAKI, T. SEKIYA, D. FU, K. W. BOWMAN, S. S. KULAWIK, K. SUDO, T. WALKER, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, K. OGOCHI, H. ESKES, K. F. BOERSMA, A. M. THOMPSON, B. GAUBERT, J. BARRE, and L. K. EMMONS: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(1), 387-413 (2019) Balance of emission and dynamical controls on ozone during the Korea - United States Air Quality campaign from multi-constituent satellite data assimilation.
- 6) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, Y. KOMAZAKI, K. IKEDA, Y. KONDO, and Z. KLIMONT: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 6339-6356 (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009-2019 observations on Fukue Island, Japan.
- 7) Y. KANAYA, X. PAN, T. MIYAKAWA, Y. KOMAZAKI, F. TAKETANI, I. UNO, and Y. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 10689-10705 (2016) Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009-2015: constraining wet removal

rates and emission strengths from East Asia.

- 8) W. TANG, A. F. ARELLANO, J. P. DIGANGI, Y. CHOI, G. S. DISKIN, A. AGUSTI-PANAREDA, M. PARRINGTON, S. MASSART, B. GAUBERT, Y. LEE, D. KIM, J. JUNG, J. HONG, J.-W. HONG, Y. KANAYA, M. LEE, R. M. STAUFFER, A. M. THOMPSON, J. H. FLYNN, and J.-H. WOO: *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 11007-11030 (2018) Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign.
- 9) W. TANG, L. K. EMMONS, A. F. ARELLANO JR, B. GAUBERT, C. KNOTE, S. TILMES, R. R. BUCHHOLZ, G. G. PFISTER, G. S. DISKIN, D. R. BLAKE, N. J. BLAKE, S. MEINARDI, J. P. DIGANGI, Y. CHOI, J.-H. WOO, C. HE, J. R. SCHROEDER, I. SUH, H.-J. LEE, H.-Y. JO, Y. KANAYA, J. JUNG, Y. LEE, and D. KIM: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124 (2019) Source contributions to carbon monoxide concentrations during KORUS - AQ based on CAM - chem model applications.
- 10) K. YAMAJI, K. IKEDA, H. IRIE, J.-I. KUROKAWA, and T. OHARA: *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 64, 436-444 (2014) Influence of model grid resolution on NO₂ vertical column densities over East Asia.
- 11) J. KUROKAWA, T. OHARA, T. MORIKAWA, S. HANAYAMA, G. JANSSENS-MAENHOUT, T. FUKUI, K. KAWASHIMA, and H. AKIMOTO: *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11019-11058 (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2.
- 12) I. PISSO, E. SOLLUM, H. GRYTHE, N. I. KRISTIANSEN, M. CASSIANI, S. ECKHARDT, D. ARNOLD, D. MORTON, R. L. THOMPSON, C. D. GROOT ZWAAFTINK, N. EVANGELIOU, H. SODEMANN, L. HAIMBERGER, S. HENNE, D. BRUNNER, J. F. BURKHART, A. FOUILLOUX, J. BRIOUDE, A. PHILIPP, P. SEIBERT, and A. STOHL: *Geosci. Model Dev.*, 12, 4955-4997, (2019) The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4.
- 13) H. GRYTHE, N. I. KRISTIANSEN, C. D. GROOT ZWAAFTINK, S. ECKHARDT, J. STROEM, P. TUNVED, R. KREJCI, and A. STOHL: *Geosci. Model Dev.*, 10, 1447-1466 (2017) A new aerosol wet removal scheme for the Lagrangian particle model FLEXPART v10.
- 14) T. MIYAKAWA, N. OSHIMA, F. TAKETANI, Y. KOMAZAKI, A. YOSHINO, A. TAKAMI, Y. KONDO, and Y. KANAYA: *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5851-5864 (2017) Alteration of the size distributions and mixing states of black carbon through transport in the boundary layer in east Asia.
- 15) 伊藤彰記、高橋一郎、永田陽子、猿渡英之、千葉光一、原口紘丞：地球化学、33, 55-64 (1999) 名古屋市における都市大気中メタン濃度変化と煙霧層形成の関係。
- 16) 小峯美奈子、上野広行：東京都環境科学研究所年報 2004, 18-23 (2004) 都内における大気中メタンの濃度変動。
- 17) Y. CHOI, Y. KANAYA, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, I. UNO, X. PAN, M. LEE, H. KIM, and D. H. JUNG: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 83-98 (2020a) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: assessment of representativeness for black carbon (BC) and carbon monoxide (CO) emission inventories.
- 18) M. Li, H. LIU, G. GENG, C. HONG, F. LIU, Y. SONG, D. TONG, B. ZHENG, H. CUI, H. MAN, Q. ZHANG, and K. HE: *National Science Review*, 4 (6), 834-866 (2017) Anthropogenic emission inventories in China: a review.
- 19) P. R. O' ROURKE, S. J. SMITH, E. E. McDUFFIE, M. CRIPPA, Z. KLIMONT, A. MOTT, S. WANG, M. B. NICHOLSON, L. FENG, and R. M. HOESLY (2020): CEDS Version Comparison: CEDS_v_2020_9_11 vs CMIP6 Release (v_2016_07_16)
https://github.com/JGCRI/CEDS/blob/master/documentation/Version_comparison_figures_v_2020

_09_11_vs_v_2016_07_16(CMIP6).pdf

- 20) P. M. FORSTER, H. I. FORSTER, M. J. EVANS, M. J. GIDDEN, C. D. JONES, C. A. KELLER, R. D. LAMBOLL, C. LE QUERE, J. ROGELJ, D. ROSEN, C-F. SCHLEUSSNER, T. B. RICHARDSON, C. J. SMITH, and S. T. TURNOCK: *Nature Climate Change*, 10(10), 913-919 (2020) Current and future global climate impacts resulting from COVID-19.
- 21) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, K. IKEDA, H. TANIMOTO, D. YAMADA, D. NARITA, Y. KONDO, and Z. KLIMONT: to be submitted to *Sci. Rep.* (2021) Dominance of the residential sector in Chinese BC emissions based on downwind atmospheric BC concentrations in the COVID-19 Pandemic.
- 22) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, and I. PISSO: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 13655-13670 (2020b) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXible PARTicle (FLEXPART) model v10.4.
- 23) T. MORI, T., Y. KONDO, S. OHATA, N. MOTOKI, H. MATSUI, N. OSHIMA, and A. IWASAKI: *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 10485-10498 (2014) Wet deposition of black carbon at a remote site in the East China Sea.

II-3 アジアにおける排出削減に関する社会経済的側面の分析

国立大学法人東京大学

大学院総合文化研究科

成田 大樹

〈研究協力者〉

国立大学法人東京大学

大学院総合文化研究科

山田 大地

〔要旨〕

ブラックカーボンおよびメタンの排出削減費用と、それにより得られる便益について、大気汚染データと社会経済データの双方を用いて分析した。排出削減費用はボトムアップ型の排出推計値や各種統計データを使用し、日韓中の東アジア三か国について、個々の排出削減策を用いる場合の費用や排出削減量を推計するとともに、限界削減費用曲線を導出した。また既存インベントリの不確実性や誤差、あるいは東アジアの実態と乖離した部分についての補正を行った。これにより、一般的に議論される炭素価格の水準の社会的負担の下でも、まだ多くの量の排出削減が可能である点が示された。便益面では、とくにブラックカーボンがPM_{2.5}の構成物質であり、排出削減には温暖化対策のみならず大気汚染対策としての側面があることに鑑み、PM_{2.5}の排出削減が労働供給に与える影響を、日本の労働供給データと大気汚染観測データを通して計量経済学的・統計学的手法により分析した。結果としては大気汚染が健康被害などを通して労働供給を低下させ、生産活動に負の影響を与えていること、また逆に排出削減には温暖化対策のみならず、こうした社会的損失を解消する形でのコベネフィットがある点を示した。これらの分析結果は、費用面・便益面双方から、排出削減に関する新たな知見をもたらすものであり、排出削減に関する政策策定や議論に貢献するものである。

1. 研究開発目的

短寿命気候強制力因子（SLCFs）であるブラックカーボン（BC）およびメタン（CH₄）は、地球温暖化対策として、また大気汚染対策として、排出削減が求められる物質である。とくに東アジア地域は人口が稠密でありまた産業活動が活発であることにより、これらの物質の人為的排出が大きいと、排出削減の重要性も大きい。しかしながら、排出削減にどの程度の費用がかかるのか、また削減によりどの程度の便益が発生するのかについては、まだ知見が不足している。そこで本サブテーマでは、大気汚染データと社会経済データを統合し、BCやCH₄の排出削減費用の推計、および排出削減の便益についての知見を得ることを目的とした。

2. 研究目標

BCおよびCH₄について、排出削減の便益に見合う対策費用レベルの定量化の実証分析を行うとともに、サブテーマ1および2の自然科学的研究で得られた排出量推計値の不確実性を東アジアに特化して修正し、削減策導入に関するマクロ経済上の根拠を提示して、環境政策の議論に貢献可能な対策提言の道筋をつける。

3. 研究開発内容

はじめに、本研究にて分析する排出削減の便益や費用の考え方について概説する。

地球温暖化や大気汚染の社会経済的被害は、厚生経済学的枠組みを用いた定義づけが可能である。将来にわたる社会厚生関数は以下のように定義される：

$$V_t = \int_t^{\infty} U[C_\tau(S_\tau), A_\tau(S_\tau)] e^{-\rho(\tau-t)} d\tau$$

なお、 U は各時点での社会厚生関数、 C は消費（あるいは所得、生産額）、 A はアメニティ（非市場価

値)、 U は汚染ストックであり、 ρ は時間選好率である。汚染ストックは $(1-\alpha)$ の割合で自然減少するものとし、 E を汚染排出量とすると、時間とともに $dS_t/dt = E_t - \alpha S_t$ の式に従って変化する。これらの定義の下で、汚染排出が一単位減少する（あるいは汚染排出削減量 M を一単位増加させる）場合に発生する限界便益は以下のように導出される：

$$-\frac{\partial V}{\partial E} = \frac{\partial V}{\partial M} = -\left(\frac{\partial C}{\partial E} \frac{\partial V}{\partial C} + \frac{\partial A}{\partial E} \frac{\partial V}{\partial A}\right) = -\left(\frac{\partial C}{\partial E} + \frac{\partial A}{\partial E} \cdot \frac{\frac{\partial V}{\partial A}}{\frac{\partial V}{\partial C}}\right) \frac{\partial V}{\partial C}$$

一方で、排出削減を実行する際に発生する総費用を $TAC(M)$ 、排出削減量 M を一単位増加させる際にかかる限界費用（Marginal Abatement Cost, MAC）を $MAC(M) = dTAC(M)/dM$ と定義できる。

地球温暖化対策や大気汚染対策に関する、経済学的観点から望ましい実施水準は、限界削減便益と限界削減費用が均衡する点（すなわち便益と総削減費用の差 $V - TAC$ が最大化される点）である。図3.1はこれを示したものである。限界排出削減費用は、削減量が少ないうちは割安な排出削減手段を使用できるが、削減量が増えると割高な手段を用いざるを得なくなることから右上がりの曲線として描かれる。限界便益は、限界効用逓減の法則（今回の文脈で言えば、削減量が少なく排出量が多い状況の方が、すでに多くの排出削減をしている状況よりも、一単位の排出削減にともなう便益の増加分が大きくなる）により右下がりの曲線となると考えられる。この場合最適な排出削減量は M^* で表され、 P^* の費用負担は社会的に許容することが望ましい。こうした考え方は、2018年度ノーベル経済学賞を受賞したWilliam NordhausによるDICEモデル（Nordhaus 1994¹⁾、2019²⁾）、IIASAのGAINSモデル³⁾、あるいは炭素税の議論⁴⁾などでも一般的に用いられており、排出削減策の議論・立案・実施においては限界便益と限界排出削減費用の理解が不可欠である。しかしながら、BCやCH₄などのSLCFに関しては、削減便益や費用についての知見がまだ不足しており、適切な政策設計のためにはさらなる理解が求められる。

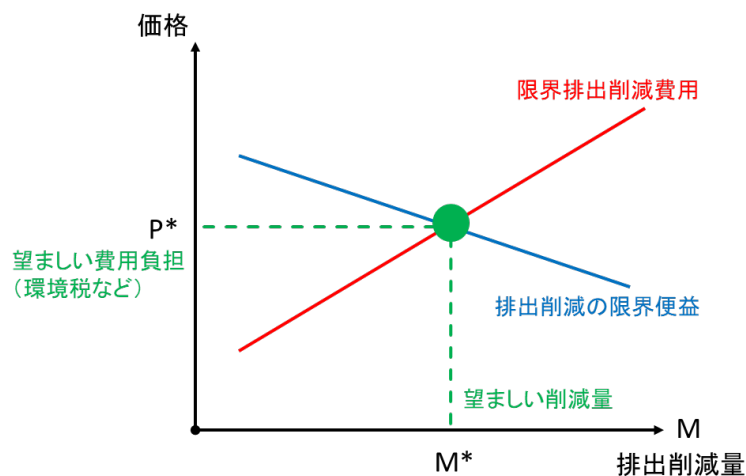


図3.1 最適排出削減量と望ましい費用負担

(1) 日本における廃棄物由来CH₄の限界削減費用の推計

日本における廃棄物由来CH₄の排出削減に係る限界削減費用を推計した。廃棄物処理部門は日本における人為的起源CH₄排出の約25%を占め、また他の人為的起源CH₄源である稲作や酪農と比較し、排出削減手段は実用化されているため、現実的に排出削減の余地は大きい。しかしながらこの問題について経済的な側面から分析を行った既存研究はほぼ皆無である。CH₄排出削減の限界費用そのものは、IIASAのGAINSモデルやUS EPA⁵⁾などの国際的インベントリなどでも広く分析がなされており、日本も分析対象とされている。しかしながらこうした国際的インベントリでは必ずしも各国ごとの現状を詳細に考慮する性質のものではなく、日本における具体的な排出削減策を考慮するには日本の現状を踏まえ

た独自の推計が必要となる。例えば廃棄物処理の実態を詳細に反映するには、日本の実際のデータを踏まえた推計が求められる。また日本では地方自治制度の特徴を反映し廃棄物処理が主に各自治体レベルで小規模に行われる傾向にあるため、諸外国の大規模な廃棄物処理の際の費用推計値をそのまま使用することはできない。

限界削減費用は概念的には上記のように定義されるものであるが、ここでは具体的には以下のように導出する。地域 r において廃棄物種別 i を処理方法 j および k を用いて処理する際の、廃棄物処理量一単位当たりの費用を C_{ijr} 、 C_{ikr} とし、 CH_4 排出量（排出係数）を EF_{ij} 、 EF_{ik} とする。なお $EF_{ij} < EF_{ik}$ 、すなわち処理方法 j の方がより CH_4 排出の少ない処理方法であり、また処理方法 k は現実に行われている方法とする。このとき、処理方法 k により処理していた廃棄物を処理方法 j に置き換える場合の費用の増分は $C_{ijr} - C_{ikr}$ 、排出削減量は $EF_{ik} - EF_{ij}$ であり、排出削減量あたりの費用の増分、すなわちこれらの種別および処理方法の間での限界削減費用は $MAC_{ijkr} = (C_{ijr} - C_{ikr}) / (EF_{ik} - EF_{ij})$ となる。現状で種別 i の廃棄物量を $Waste_{ir}$ 、そのうち処理方法を k から j に置き換える割合を $\Delta\sigma_{ijr}$ とすると、 $M_{ijkr} = Waste_{ir} \times \Delta\sigma_{ijr} \times (EF_{ik} - EF_{ij})$ の CH_4 がこの限界削減費用にて削減可能となる。すべての地域 r 、種別 i および処理方法 j 、 k について MAC_{ijkr} をもとめ、 MAC_{ijkr} が低い (i, j, k, r) から順に $MAC_1, MAC_2, \dots, MAC_n, \dots, MAC_N$ 、ならびに $M_1, M_2, \dots, M_n, \dots, M_N$ と順を振ると、任意の排出削減量 M に対応する限界削減費用 $MAC(M)$ は以下のように求められる：

$$MAC(M) = \begin{cases} MAC_1 & 0 \leq M \leq M_1 \\ MAC_2 & M_1 < M \leq M_1 + M_2 \\ \vdots & \vdots \\ MAC_n & \sum_{m=1}^{n-1} M_m < M \leq \sum_{m=1}^n M_m \\ \vdots & \vdots \\ MAC_N & \sum_{m=1}^{N-1} M_m < M \leq \sum_{m=1}^N M_m \end{cases}$$

本研究では廃棄物としては一般廃棄物、産業廃棄物、し尿・有機性汚泥、ならびに家畜糞尿を考慮し、処理方法としては焼却、メタン発酵（ともに熱・電力回収を行うもの）、たい肥化、リサイクル（紙のみ）、埋め立てを考慮し、排出係数の高い埋め立てやたい肥化により処理されている廃棄物を、焼却、リサイクル、メタン排出の低いたい肥化およびメタン発酵に全量移行する場合を考慮した。日本の廃棄物統計や家畜統計に基づき、現状の廃棄物量や処理の現状を踏まえている。排出係数は日本国温室効果ガスインベントリ⁶⁾に基づく。費用には処理施設建設等の投資費用、運営およびメンテナンス費用、処理後残渣の処理費用を計上するとともに、回収した熱・電力やリサイクルの収益を差し引いている。また廃棄物処理にはスケールメリットが存在し、そのため処理施設規模が異なれば費用も異なってくる点を考慮し、地域ごと、人口規模ごとに費用を評価している。なお分析の基準年は2015年に設定し、統計等も2015年時点でのものを使用している。

費用については、事業者にとっての費用（私的費用）と社会全体にとっての費用（社会的費用）という二種類の定義が可能であり、それらに基づき私的限界削減費用と社会的限界削減費用の二つの限界削減費用を考慮した。私的限界削減費用では設備投資や熱・電力の売却に対する補助金を差し引き、廃棄物処理主体が実際に支払うことになる費用のみを計上する。社会的限界削減費用では、こうした補助金もまた税等の社会全体での負担のもと支払われていることを考慮し、補助金を差し引かない。社会全体にとっての排出削減の望ましさを考慮する上では、社会的限界削減費用が重要である（図3.1での議論もこれに該当する）一方、廃棄物処理主体（自治体、農家、企業）にとっての低メタン排出処理方法への移行の誘因を議論する上では私的限界削減費用も有用である。

(2) 日韓中における CH_4 、 BC の限界削減費用の推計

(1)の方法論を、日韓中の三か国に、また廃棄物以外を含めた CH_4 と BC にも拡張した。 CH_4 については、日本の廃棄物関連部分は1)の結果をそのまま利用し、韓国については同様の方法論

において、韓国の廃棄物統計を用いて推計している。日韓の廃棄物以外の分野、並びに中国の全分野については、GAINSモデルのV5aバージョンを利用している。

BCについては、日韓については国立環境研究所のREASv3.1での活動量、排出係数データと、GAINSモデルV5aバージョンでの費用推計を用いている。中国については、GAINSモデルV6bバージョン（本稿執筆時点で非公開）を使用している。中国のBC排出については、GAINSモデルの過去のバージョンでは過大であることがサブテーマ2の分析結果1)にて示されているが、V6bバージョンでは改善されている。また並行して、REASv3.1に基づきつつ、サブテーマ2の議論を踏まえ、家庭部門と産業部門の排出比率や化石燃料由来とそれ以外での比率などを通して排出量を補正した分析も行い、結果を確認している。ただし中国に関する分析結果については、サブテーマ2の分析結果2)にて報告しているため、本節における以下の分析結果・考察の項では報告は割愛する。

(3) 日本におけるPM_{2.5}の労働供給への影響の計量経済学的・統計学的分析

BCはPM_{2.5}の構成物質の一つでもあり、排出削減の便益は長期的な温暖化の抑制のみならず、短期的にも大気汚染に由来する健康被害の軽減や、それにともなう経済活動損失の低下という形での便益（いわゆるコベネフィット）をもたらす。こうしたコベネフィットは、排出削減の限界便益（とくに $\partial C/\partial E$ 部分）に含まれるべきものである一方、まだ知見が不足している部分であり、さらなる分析が求められている。

ここでは日本においてPM_{2.5}による大気汚染が健康被害を通して労働供給に与える影響を分析した。労働供給の低下は生産量の低下と言う形で、社会的費用を発生させるものであり、また逆に大気汚染削減により労働供給が上昇する場合にはコベネフィットの一部となるものである。これまで大気汚染の労働供給への影響としては、新興工業国などの汚染が激しい国や地域を対象にした分析^{7,8)}がなされてきており、汚染水準の上昇が労働者自身の、あるいは家族の体調不良を通して、欠勤を増加させることが指摘されている。しかしながら、現在の日本のような比較的軽度の汚染のもとでも同じような影響が見られるのかどうかはあまり分析されてきていない。また健康被害があったとしてもそれは必ずしも労働供給の低下につながることも限らない。例えば健康被害により有給等により仕事を休んだとしても、その時間別の日に残業するなどして労働供給の埋め合わせをする可能性がある。そのため、労働供給が実際に変化したかどうか、労働者の行動を反映したデータに基づく分析が必要となる。

ここでは計量経済学的・統計学的手法により、以下の式を推定することで分析を行っている：

$$L_{ijt} = \beta \times PM_{jt} + X_{jt}\gamma' + \eta_i + \varepsilon_{ijt}$$

なお、 i は事業所を、 j は所在地を、 t は年月次を表すインデックスである。 L_{ijt} は各事業所における労働者の労働供給の指標であり、労働者一人当たり月間総労働時間数、労働者一人当たり月間総出勤日数、および出勤日数当たり平均労働時間数で測る。 PM_{jt} は月間平均PM_{2.5}濃度、 X_{jt} は気象、疾病状況、経済環境等の交絡要因のベクトル、 η_i 及び ξ_t は各事業所及び年次の固定効果、 ε_{ijt} は誤差項である。

PM_{2.5}の労働供給への影響は係数 β によって測られ、 $\beta < 0$ ならば労働供給を低下させることを意味する。ただし統計データに基づいてこうした式を推定する際には、内生性と呼ばれる問題に対処する必要がある。内生性にはいくつかの種類がある。例えば労働時間の長い職種の事業所が高濃度汚染地域に立地しているならば、労働時間と汚染濃度の間に正の相関関係が生まれ、仮にPM_{2.5}が労働供給を減らす効果を持っているとしても、これら正負の効果が打ち消し合ってしまう、 $\beta < 0$ と言う結果が得られなくなりうる。こうした問題は選択的ソーティングと呼ばれ、そのためにPM_{2.5}濃度の高い地域と低い地域で労働供給に差があるかどうかを比較しても、PM_{2.5}の効果を正確に評価することが出来なくなってしまう可能性がある。別の例としては、特に環境負荷が大きい事業所において、需要ショック（景気変動等による）などにより労働供給が増え、生産活動が増大し、結果として地域のPM_{2.5}濃度が上昇するというような逆因果関係もまた、 β をもちいてPM_{2.5}が労働供給に与える影響を議論する際の障壁となりうる。加えて内生性とは別の問題として、PM_{2.5}濃度と別の汚染物質の濃度が相関することにより、得

られた β がPM_{2.5}の効果なのか別の物質の効果なのか判別しがたくなる可能性がある。特に日本では光化学オキシダントがこれに該当する。

本研究ではこうした問題に以下のように対処した上で、係数 β によってPM_{2.5}が労働供給に対して持つ因果関係の効果を明らかにする。第一に事業所固定効果 η_i は、時間とともに変化しない事業所固有のあらゆる要因を制御するものであり、これにはその事業所が高濃度汚染地域に立地しているかどうかという要因も含まれる。そのため固定効果を用いた本モデルでは、選択的ソーティングの影響を排除できる。 β は時間とともに変動するPM_{2.5}濃度が労働供給に与える影響を捉える形となる。

第二に、固定効果操作変数モデルと呼ばれる手法の下、降水量の月ごとの変化が月間平均PM_{2.5}濃度を与えた変化が、労働供給に与える影響を推定する。この手法ではPM_{2.5}濃度の時間的変化の中でも降水によりもたらされた変化（湿性除去等）のみに焦点を当てることとなり、例えば需要ショックのような逆因果の原因となりうる要素を排除することが出来る。

第三に、NO_x濃度を利用する。NO_xは短時間で分解されるため、その濃度はローカルな汚染排出を強く反映すると考えられ、またPM_{2.5}のローカルな排出とも相関する。そのため交絡要因としてNO_x濃度を式に追加することにより、PM_{2.5}のローカルな排出の影響を制御することが出来ると考えられる。加えて光化学オキシダント濃度も交絡要因として式に追加することにより、 β がその効果を捉えてしまうリスクを回避する。

データとしては、厚生労働省の毎月勤労統計調査における、日本全国の事業所レベルでの雇用・就労時間のパネル統計データと、国立環境研究所の環境数値データベースにおける全国500から1000か所以上で測定された大気中汚染物質濃度データ、ならびにさまざまな交絡要因データを統合したものをを用いる。分析対象期間は2013年1月から2017年12月までである。この研究手法においては、高頻度で複数

回同一の事業所に対して行った調査（パネル調査）が不可欠であり、毎月勤労統計調査はこの条件に合致する。同時に月次間でPM_{2.5}濃度に十分な変動が見られることも不可欠である。図3.2は日本の6つの地点での分析機関内の月平均PM_{2.5}濃度の推移である。月次間で濃度には大きな変化が見られ、また濃度の時系列的変化のパターンは各地点でさまざまであることが見て取れる。

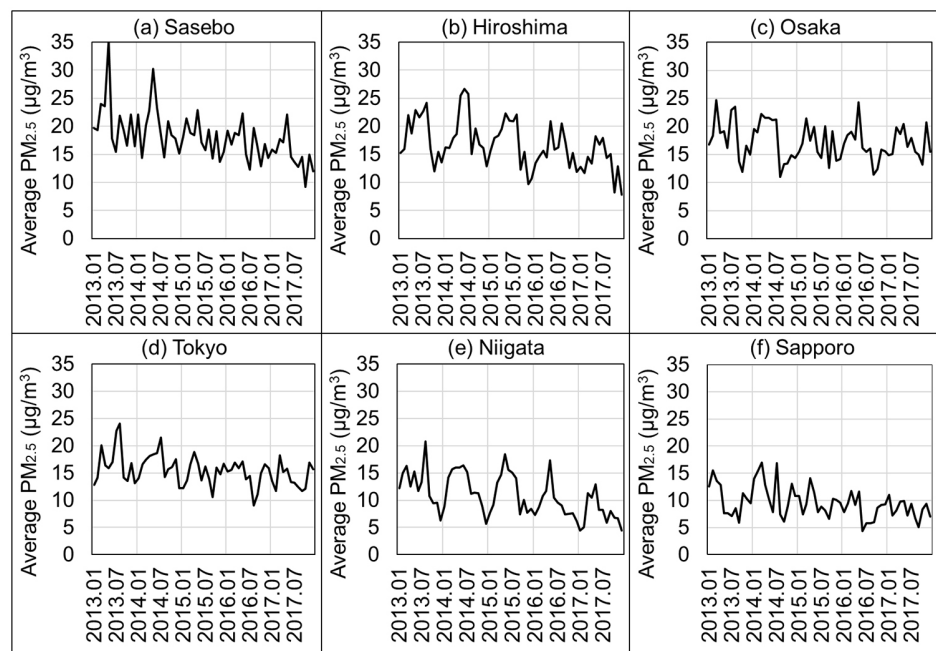


図3.2 日本の6地点での月平均PM_{2.5}濃度の推移

4. 結果及び考察

(1) 日本における廃棄物由来CH₄の限界削減費用の推計

本研究の推計での、現状での廃棄物からのメタン排出量は219千トン（CO₂換算で5.5百万トン）であった。この値は、日本国温室効果ガスインベントリ⁶⁾での値である242千トンともほぼ同水準である。

これをもとに限界削減費用曲線（MAC曲線）を求めると、図3.3のようになった。累積メタン排出

削減量（横軸）が M に対応する。約35千トン（0.9CO₂換算百万トン）までは、負の社会的MACで排出削減が可能である（主に家畜糞尿のたい肥化処理の効率化、大規模都市圏での廃棄物の焼却、紙のリサイクルが該当し、費用が抑えられる、あるいは電力やリサイクル収益が発生するために正味の利益が発生する）。一方で個々の廃棄物処理主体にとっての私的MAC曲線は、社会的MAC曲線より大きく下にシフトする。85千トン（2.1CO₂換算百万トン）程度までは負の費用で削減が可能であり、中小規模都市での焼却やし尿・有機性汚泥のメタン発酵といった処理方法が、助成により処理主体にとっては追加的費用なしに導入可能となっている。しかしながら、いくつかの低メタン排出処理方法は助成を考慮しても正の費用がかかる。

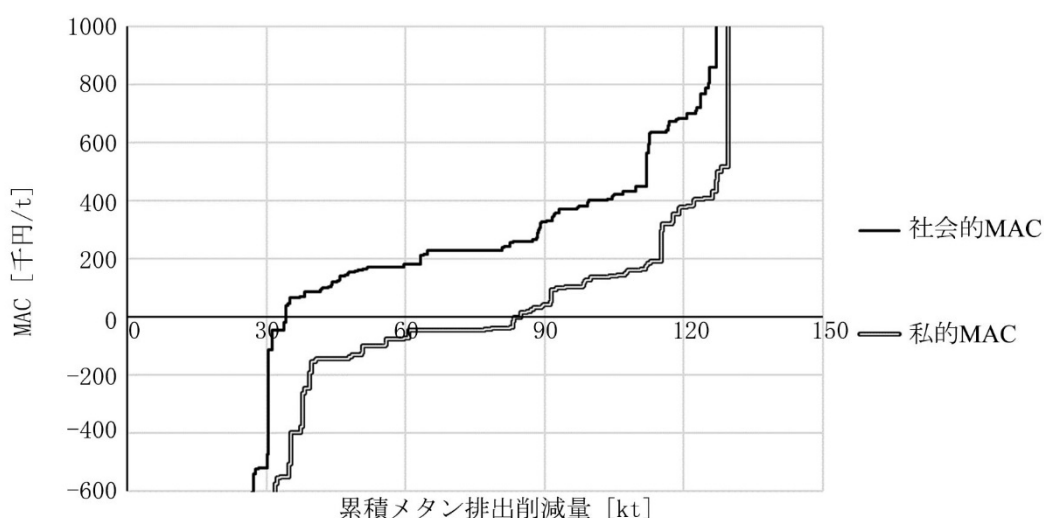


図3.3 日本の廃棄物由来CH₄排出削減の限界削減費用（MAC）曲線

表3.1はこれを廃棄物分野・排出削減策ごとに集計しなおしたものである。とくにし尿・有機性汚泥や家畜糞尿の処理において削減可能量は大きくなっているが、一般・産業廃棄物処理からの排出も無視できない規模である。また焼却は大規模なほどMAC曲線の値が小さくなっているが、これは廃棄物処理のスケールメリットを反映している。

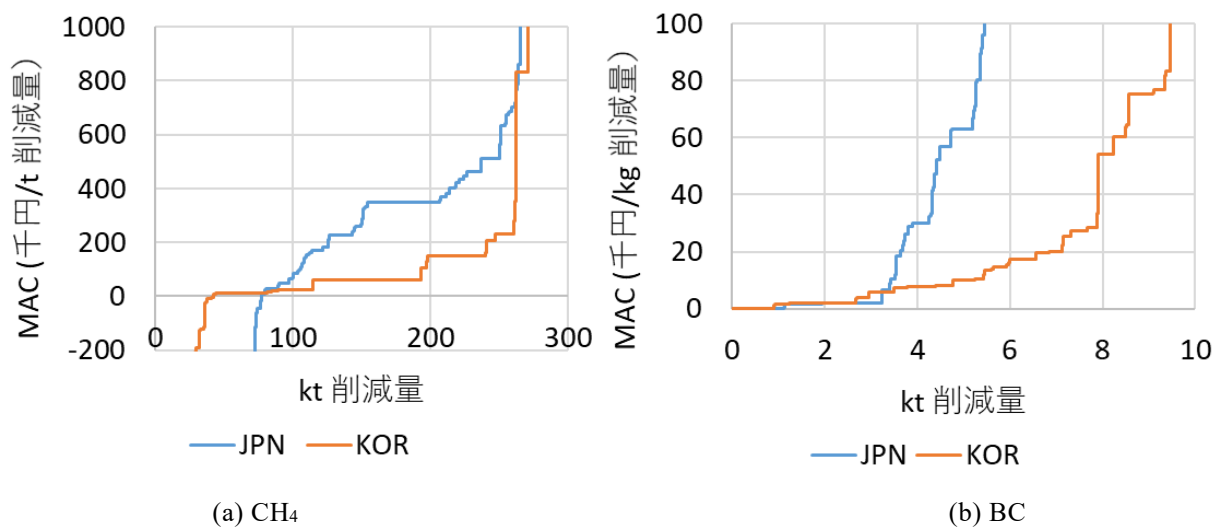
図3.1にて見たように、社会的に最適な排出削減策の水準は限界便益と限界費用が一致する点で決まる。国際的な炭素税の議論において、温暖化対策としての最適費用水準（図3.1の p^* ）が導出されており、CO₂で1トン当たり8-14千円程度、CH₄に換算すると1トン当たり200-350千円程度までは許容可能な社会的負担と考えられる^{4,9)}。したがって63-92千トンのCH₄が、社会的に許容可能な社会的MACの下で削減可能である。これはおおむね私的MACが負となる範囲と一致するため、現行の廃棄物処理関連助成金（必ずしもメタン排出削減を目的としたものではない）によってすでにCH₄排出削減への経済的誘因は十分に作られていることを意味する。日本政府はCH₄排出を176千トン程度削減することを目標に掲げているが、廃棄物量そのものを減らすことがその手段として述べられる一方、処理方法の変更はあまり考慮されておらず、ここでの分析結果は政府目標からのさらなるCH₄排出削減が可能であることを示唆するものである。

表3.1 限界削減費用と排出削減量の廃棄物分野・排出削減策別集計結果

排出削減策	排出削減量[千トン]	加重平均MAC [千円/トン]		
		社会的	私的	
一般・産業廃棄物	埋立⇒焼却（大規模都市圏）	11.5	96	-109
	埋立⇒焼却（中小規模都市圏）	10.3	197	20
	埋立⇒焼却（農村地域）	6.0	376	204
	堆肥・飼料化⇒メタン発酵	0.6	-9,824	-69,883
	紙の埋立⇒リサイクル	9.2	-862	-864
し尿・有機性汚泥	埋立⇒焼却（大規模）	31.6	187	-106
	埋立⇒焼却（中規模）	22.3	380	106
	埋立⇒焼却（小規模）	12.7	708	402
	堆肥・飼料化⇒メタン発酵	5.6	386	-16,455
家畜糞尿	堆積発酵⇒強制発酵（大規模）	6.5	-1,067	-1,285
	堆積発酵⇒強制発酵（小規模）	13.3	-5,007	-4,973
	堆積発酵⇒メタン発酵（大規模）	6.9	12,706	7,073
	堆積発酵⇒メタン発酵（小規模）	13.4	20,735	16,103

(2) 日韓中におけるCH₄、BCの限界削減費用の推計

日韓におけるCH₄およびBC限界削減費用は図3.4のようになった（ここでは社会的限界削減費用に注目し、排出削減の社会的望ましさのみを考慮する）。日本より韓国の方がより低い限界削減費用で排出削減できる領域が広がっている。しかしながら両国とも、とくにCH₄については負の、あるいは低い限界削減費用にて排出削減できる領域が存在する。BCについては、その温暖化ポテンシャルの不確実性や、多くの排出削減策がBC以外のSLCFsの排出削減効果を持つという性格を踏まえ、社会的に許容可能なMACの値はここでは議論しない。

図3.4 日韓のCH₄、BCの限界削減費用

中国に関しては規模が大きく異なることから、別のグラフに示す。図3.5は中国のCH₄の限界削減費用である（BCはサブテーマ2の分析結果に既出のため省略）。人口・経済規模の大きさに加え、CH₄排出削減技術のうち比較的安価なものも現状では導入されていない部分を含むことから、日韓と比較し同水準の限界費用でも30倍程度のCH₄の削減が可能である。

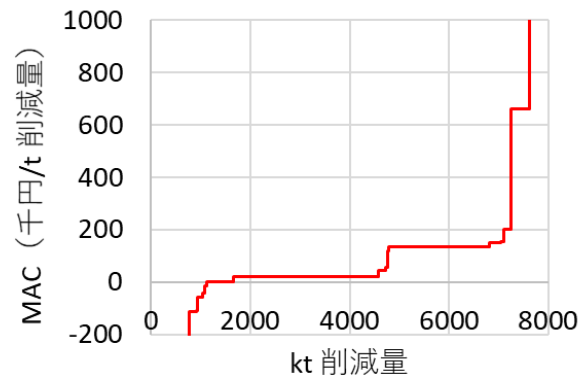


図3.5 中国のCH₄の限界削減費用

(3) 日本におけるPM_{2.5}の労働供給への影響の計量経済学的・統計学的分析

表3.2は固定効果モデル、固定効果操作変数モデル、固定効果にNO_x水準を加えたモデルで、それぞれ光化学オキシダント（Ox）を制御しない場合とする場合での、推定された係数 β の値を示す。どの推定モデルにおいても、PM_{2.5}濃度は月間総労働時間と総出勤日数に対し負の効果を持っており、PM_{2.5}濃度の上昇によって労働者が有給等により休みを取る、もしくは企業側が休業することにより、労働時間が低下することがわかる。係数 β の値は限界効果を示し、例えば固定効果操作変数モデルでOxを制御した場合の係数の値（内生性の議論を考えると、この手法が最も正確であると考えられる）は、月間平均PM_{2.5}濃度が1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇することにより、一人当たり月間総労働時間が0.223時間低下し（あるいは4.48人につき1時間低下する）、出勤日数が0.0354日低下する（あるいは28.2人に一人が1日休む）ことを意味する。その一方で、労働日当たりの労働時間に対しては、係数 β は正の値を取り、労働日数が減った分別の日に残業をするなどして労働時間の埋め合わせをしていることがわかる。ただしそれでも総労働時間の損失を完全には埋め合わせることが出来てはいない。

表3.2 PM_{2.5}の労働供給への影響

	固定効果モデル		固定効果操作変数モデル		固定効果+NO _x	
	Ox なし	Ox 制御済	Ox なし	Ox 制御済	Ox なし	Ox 制御済
月間総労働時間への影響（単位：時間）						
β 推定値	-0.183	-0.103	-0.258	-0.223	-0.199	-0.139
	(0.0105)	(0.0118)	(0.0220)	(0.0265)	(0.108)	(0.0143)
月間総出勤日数への影響（単位：日）						
β 推定値	-0.0260	-0.0161	-0.0391	-0.0354	-0.0279	-0.0200
	(0.0012)	(0.0004)	(0.0027)	(0.0033)	(0.0013)	(0.0017)
労働日あたり労働時間への影響（単位：100時間）						
β 推定値	0.130	0.112	0.283	0.298	0.127	0.0762
	(0.0170)	(0.0190)	(0.0418)	(0.0484)	(0.0172)	(0.0214)
観測数	1,255,615	1,255,579	1,255,615	1,255,579	1,255,476	1,255,458

注：カッコ内はクラスター頑健標準誤差。

追加的分析により、労働供給への負の影響は男性よりも女性に対して強いこと、大企業に対しては影響がないものの中小企業に対して強い影響を持つこと、サービス業よりも製造業に対して効果が強いことが分かった。例えば分析を中小企業のみ限定すると、月間平均PM_{2.5}濃度が1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇することにより、一人当たり月間総労働時間は0.337時間低下する。

これらの結果は日本のような比較的低濃度の汚染状況であっても、大気中PM_{2.5}の汚染度の上昇は労働供給を低下させることを示す。限界効果の大きさそのものは、新興工業国などの高濃度汚染と比較すると小さくなっており、これは健康被害が高濃度汚染の場合ほど大きくはないことを示唆するものの、それでも中小企業での一人当たり0.337時間の労働損失は、限界生産性（すなわち労働供給を1単位低下させた際に失われる生産量）が賃金率と一致すると仮定すると、全国・年間で2400億円の損失に相当し、無視できない経済損失となる。またこの経済損失は、BC等SLCFの排出削減のコベネフィットの一つとなるものであり、温暖化の予防や疾病予防と言った便益と合わせて考慮に入れる必要があることが指摘される。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ3は研究目標を達成した。独自のデータ検証を行うことにより対策費用レベルを限界削減費用曲線として導出し、日韓中での費用レベルの定量化を行った。また他のサブテーマにて指摘される排出量推計値の不確実性を考慮し、排出削減量や限界削減費用推計の精緻化を行った。また便益面では、国際的文献においてもこれまであまり注目されてこなかった、比較的低水準の汚染であっても労働供給損失による社会的費用がある点、また排出削減にはこれを回避することのコベネフィットが無視できない規模で存在する点を、計量経済学的手法を用いて示した。排出削減策導入にあたっては、費用面・便益面双方からの国家規模（マクロ経済規模）での根拠が求められるが、これらはこうした根拠を構成する要因であり、新たな観点から環境政策の議論に貢献するものである。

6. 引用文献

- 1) Nordhaus W. (1994) *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA.
- 2) Nordhaus W. (2019) *Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics*. *American Economic Review*, 109, 1991-2014.
- 3) International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA, 2020) GAINS Online, <https://gains.iiasa.ac.at/models/index.html>, (参照 2020-11-10) .
- 4) Carbon Pricing Leadership Coalition (2017) *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*, World Bank Publication, Washington D. C.
- 5) United States Environmental Protection Agency (US EPA, 2013) *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 2010-2030*, https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/mac_report_2013.pdf, (参照 2020-11-10) .
- 6) 日本国温室効果ガスインベントリオフィス (2019) *日本国温室効果ガスインベントリ報告書2019年*, http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2019/NIR-JPN-2019-v3.0_J_GIOweb.pdf, (参照2020-11-10) .
- 7) Aragón, Fernando M., Juan J. Miranda, and Paulina Oliva. 2017. "Particulate matter and labor supply: The role of caregiving and non-linearities." *J. Environ. Econom. Manag.* 86: 295-309.
- 8) Hanna, Rema, and Paulina Oliva. 2015. "The effect of pollution on labor supply: Evidence from a natural experiment in Mexico City." *J. Public Econom.* 122: 68-79.
- 9) US EPA (2016) *Addendum to Technical Support Document on Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis under Executive Order 12866: Application of the Methodology to Estimate the Social Cost of Methane and the Social Cost of Nitrous Oxide*, <https://archive.epa.gov/epa/climatechange/social-cost-carbon-technical-documentation.html> (参照 2020-11-10) .

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) S. OKAMOTO, H. TANIMOTO, N. HIROTA, K. IKEDA, and H. AKIMOTO: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, <https://doi.org/10.1029/2018JD029266> (2018) Decadal shifts in wind patterns reduced continental outflow and suppressed ozone trend in the 2010s in the lower troposphere over Japan. (IF:3.82)
- 2) H. AKIMOTO, T. NAGASHIMA, H. TANIMOTO, Z. KLIMONT, and M. AMANN: *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, 73 (2020), An empirical approach toward the SLCP reduction targets in Asia for the mid-term climate change mitigation. (IF:2.676)
- 3) K. IKEDA, H. TANIMOTO, T. SUGITA, H. AKIYOSHI, C. CLERBAUX, P.-F. COHEUR: *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 126, e2020JD033459 (2021) Model and satellite analysis of transport of Asian anthropogenic pollution to the Arctic: Siberian and Pacific pathways and their meteorological controls. (IF:3.82)
- 4) A. MUELLER, H. TANIMOTO, T. SUGITA, T. MACHIDA, S. NAKAOKA, P. K. PATRA, J. LAUGHNER, D. CRISP: *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8255-8271 (2021), New approach to evaluate satellite derived XCO₂ over oceans by integrating ship and aircraft observations. (IF:5.414)

【サブテーマ2】

- 1) W. TANG, A. F. ARELLANO, J. P. DIGANGI, Y. CHOI, G. S. DISKIN, A. AGUSTI-PANAREDA, M. PARRINGTON, S. MASSART, B. GAUBERT, Y. LEE, D. KIM, J. JUNG, J. HONG, J.-W. HONG, Y. KANAYA, M. LEE, R. M. STAUFFER, A. M. THOMPSON, J. H. FLYNN, and J.-H. WOO: *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 11007-11030 (2018) Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign. (IF:5.414)
- 2) K. MIYAZAKI, T. SEKIYA, D. FU, K. W. BOWMAN, S. S. KULAWIK, K. SUDO, T. WALKER, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, K. OGOCHI, H. ESKEES, K. F. BOERSMA, A. M. THOMPSON, B. GAUBERT, J. BARRE, and L. K. EMMONS: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(1), 387-413 (2019) Balance of emission and dynamical controls on ozone during the Korea - United States Air Quality campaign from multiconstituent satellite data assimilation. (IF:3.82)
- 3) C. ZHU, Y. KANAYA, H. YOSHIKAWA-INOUE, T. IRINO, O. SEKI, and Y. TOHJIMA: *Environ. Pollut.*, 247, 55-63 (2019) Sources of atmospheric black carbon and related carbonaceous components at Rishiri Island, Japan: The roles of Siberian wildfires and of crop residue burning in China. (IF:6.792)
- 4) W. TANG, L. K. EMMONS, A. F. ARELLANO JR, B. GAUBERT, C. KNOTE, S. TILMES, R. R. BUCHHOLZ, G. G. PFISTER, G. S. DISKIN, D. R. BLAKE, N. J. BLAKE, S. MEINARDI, J. P. DIGANGI, Y. CHOI, J.-H. WOO, C. HE, J. R. SCHROEDER, I. SUH, H.-J. LEE, H.-Y. JO, Y. KANAYA, J. JUNG, Y. LEE, and D. KIM: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124 (2019) Source contributions to carbon monoxide concentrations during KORUS - AQ based on CAM - chem model applications. (IF:3.82)
- 5) Y. KANAYA, K. MIYAZAKI, F. TAKETANI, T. MIYAKAWA, H. TAKASHIMA, Y. KOMAZAKI, X. PAN, S. KATO, K. SUDO, T. SEKIYA, J. INOUE, K. SATO, and K. OSHIMA: *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 7233-7254 (2019) Ozone and carbon monoxide observations over open oceans on R/V

Mirai from 67° S to 75° N during 2012 to 2017: Testing global chemical reanalysis in terms of Arctic processes, low ozone levels at low latitudes, and pollution transport. (IF:5.414)

- 6) Y. CHOI, Y. KANAYA, S.-M. PARK, A. MATSUI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, I. UNO, X. PAN, M. LEE, H. KIM, and D. H. JUNG: Atmos. Chem. Phys., 20, 83-98 (2020) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: assessment of representativeness for black carbon (BC) and carbon monoxide (CO) emission inventories. (IF:5.414)
- 7) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, Y. KOMAZAKI, K. IKEDA, Y. KONDO, and Z. KLIMONT: Atmos. Chem. Phys., 20, 6339-6356 (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009-2019 observations on Fukue Island, Japan. (IF:5.414)
- 8) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, and I. PISSO: Atmos. Chem. Phys., 20, 13655-13670 (2020) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXible PARTicle (FLEXPART) model v10.4. (IF:5.414)

【サブテーマ 3】

- 1) D. NARITA, N.T. KIM OANH, K. SATO, M. HUO, D.A. PERMADI, N.N. HA CHI, T. RATANAJARATROJ and I. PAWARMART: Atmosphere, 10 (5), 227 (2019) Pollution Characteristics and Policy Actions on Fine Particulate Matter in a Growing Asian Economy: The Case of Bangkok Metropolitan Region. (IF:2.397)
- 2) D. NARITA, T. GAVRILYEVA, A. ISAEV: Polar Science, 27, 100573 (2021) Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem. (IF:1.389)
- 3) 【予定】山田大地, 成田大樹: 環境科学会誌, 日本における廃棄物由来メタンの限界排出削減費用-制度等の現状を踏まえた全国レベルでの削減費用の検証- (採択済み, 掲載号等未定) (IF:なし)

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ 1】

- 1) 谷本浩志: 現代化学, 2019年3月号, 48-51 (2018) 大気汚染と気候変動.
- 2) 池田恒平: 大気化学研究, 42, 042A06 (2020) 大気化学輸送モデルを用いたPM2.5およびブラックカーボンの発生源解析に関する研究. (日本大気化学会2019年度奨励賞受賞論文)
- 3) 池田恒平: 国立環境研究所ニュース, 39(3), 9-12, (2020) 北極のブラックカーボンはどこから来るのか?
- 4) 【予定】谷本浩志, 池田恒平, 永島達也, 猪俣敏, 金谷有剛, チョイヨンジュウ, 成田大樹, 山田大地, 国立環境研究所地球環境研究センターニュース, 2021年6月号, (2021) アジアのブラックカーボン排出量を正しく推計する 環境研究総合推進費2-1803「ブラックカーボンおよびメタンの人為起源排出量推計の精緻化と削減感度に関する研究」.
- 5) 【予定】池田恒平, 谷本浩志, 国立環境研究所地球環境研究センターニュース, 2021年7月号, (2021) 距離と時差を超えて - Webによるブラックカーボン・短寿命気候強制因子研究の NIES-SYKE合同ワークショップ -.

【サブテーマ 2】

- 1) 金谷有剛: 天気, 67(9), 519 - 529 (2020) 分光学的手法を用いた観測によるアジア大気汚染の統合的理解の推進 (堀内賞受賞記事) .

【サブテーマ 3】

- 1) D. YAMADA and D. NARITA: SSRN Working Paper Series, 3678420 (2020) The Effects of Air Pollution on Labor Supply in Japan: A Panel Data Analysis based on PM 2.5 Pollution and Labor Data.

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ 1】

- 1) K. IKEDA, H. TANIMOTO, T. SUGITA, H. AKIYOSHI, 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 幕張 (2018) Long-range transport of carbon monoxide and black carbon from East Asia to the Arctic.
- 2) K. IKEDA, H. TANIMOTO, T. SUGITA, H. AKIYOSHI, Y. KANAYA, C. ZHU, F. TAKETANI, 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan (2018) Impacts of East Asian black carbon emissions on the Arctic climate and air quality: Contributions from anthropogenic and biomass burning sources.
- 3) H. TANIMOTO, M.G. LAWRENCE, M.L. MELAMED, 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 幕張 (2018) 大気化学研究と国際連携のこれまで、現在、そしてこれから.
- 4) 谷本浩志, 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 幕張 (2018) 地球大気化学国際協同研究計画 (IGAC) : 大気化学研究と国際連携.
- 5) 岡本祥子, 谷本浩志, 奈良英樹, 北和之, Davide Putero, 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 幕張 (2018) Analysis of springtime high ozone events at Mt. Happo from 2014 to 2016.
- 6) S. OKAMOTO, H. TANIMOTO, N. HIROTA, K. IKEDA, H. AKIMOTO, 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan (2018) Persistent La Niña-like climate in 2010s reduced export from China and suppressed ozone trend in the lower troposphere over Japan.
- 7) H. TANIMOTO, Air pollution in East Asia: Views from space, ground and models, COSPAR 2018 Assembly, Pasadena, 2018. (招待)
- 8) K. IKEDA, H. TANIMOTO, T. SUGITA, H. AKIYOSHI, The 9th International GEOS-Chem Meeting (IGC9), Boston (2019) Long-range transport events of black carbon and carbon monoxide from East Asia to the Arctic.
- 9) H. TANIMOTO, K. IKEDA, S. OKAMOTO, The 27th IUGG General Assembly, Montreal (2019) Issues and challenges in modeling ozone and aerosols in Asia: A few perspectives from recent studies. (招待)
- 10) K. IKEDA, Workshop on Air Quality and Climate Research Across Scales, Tokyo (2019) Transport and contribution of East Asian black carbon to the Arctic. (招待)
- 11) K. IKEDA, CMI Science Workshop 2019, Hong Kong (2019) Uncertainties in black carbon simulations from source regions to the Arctic. (招待)
- 12) K. IKEDA, Third PACES Open Science Meeting, Oslo (2019) Model and satellite analysis of transport of Asian anthropogenic pollution to the Arctic: Siberian and Pacific pathways, and their meteorological controls.
- 13) 池田恒平, 第24回大気化学討論会, 蒲郡 (2019) 大気化学輸送モデルを用いたPM2.5およびブラックカーボンの発生源解析に関する研究. (招待)
- 14) 池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 竹谷文一, 第24回大気化学討論会, 蒲郡 (2019) 東アジア域

の人為起源ブラックカーボン排出量の検証.

- 15) N. SAIGUSA, H. TANIMOTO, The 15th Meeting of the Atmospheric Composition Virtual Constellation, Tokyo (2019) Carbon cycle and satellite data contribution to the global stocktake.
- 16) K. IKEDA, H. TANIMOTO, T. SUGITA, H. AKIYOSHI, Y. KANAYA, C. ZHU, F. TAKETANI, Sixth International Symposium on Arctic Research, online (2020) Transport of black carbon from Asia to the Arctic: Siberian and Pacific pathways, and their meteorological controls.
- 17) H. TANIMOTO, K. IKEDA, Y. KANAYA, D. NARITA, T. NAGASHIMA, S. INOMATA, Sixth International Symposium on Arctic Research, online (2020) Black carbon emissions from Asia: Scientific highlights and implications for the Arctic climate policy.
- 18) 山下陽介, 谷本 浩志, 小田 知宏, 第25回大気化学討論会, オンライン: 千葉大学 (2020) グローバル・ストックテイクに向けた人為起源CO₂排出量推定に貢献する衛星観測計画と大気輸送モデル開発の展望.
- 19) H. TANIMOTO, K. IKEDA, Y. KANAYA, Y. CHOI, D. NARITA, D. YAMADA, T. NAGASHIMA, and S. INOMATA, 金沢大学環日本海域環境研究センター国際シンポジウム Joint International Symposium: Challenging the Research Development and Collaboration Through Online Discussion (2020) Black carbon emissions from Asia: Scientific highlights and policy implications. (招待)
- 20) 池田恒平, 谷本浩志, 第25回大気化学討論会, オンライン: 千葉大学 (2020) 人為起源排出インベントリの違いが北極ブラックカーボンのシミュレーションに及ぼす影響.
- 21) K. IKEDA, NIES-SYKE Meeting for Future Collaboration on Black Carbon and SLCP Research, online (2021) BC modeling research at NIES: From East Asia to the Arctic.

【サブテーマ2】

- 1) K. MIYAZAKI, T. SEKIYA, D. FU, K. BOWMAN, S. KULAWIK, K. SUDO, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, K. OGOCHI, H. ESKES, B. GAUBERT, J. BARRE, T. WALKER, and L. EMMONS, AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii, USA (2018) Application of multiple-species satellite data assimilation for KORUS-AQ and air quality monitoring over East Asia.
- 2) Y. KANAYA, T. MIYAKAWA, C. ZHU, F. TAKETANI, M. TAKIGAWA, K. MIYAZAKI, T. SEKIYA, K. SUDO, M. D. ANDRES HERNANDEZ, and J. P. BURROWS, 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan (2018) Regional air pollution reaching Fukue Island, western Japan: Highlights during EMERGE-Asia/ KORUS-AQ and long-term variations during 2009-2018.
- 3) 金谷有剛, 国立環境研究所シンポジウム 東アジアの越境大気汚染—辺戸岬観測ステーションでの成果を中心に—, 那覇市 (2018) Decadal variations in ozone, PM_{2.5}, and precursors at Cape Hedo and Fukue.
- 4) Y. KANAYA, F. TAKETANI, T. MIYAKAWA, Y. KOMAZAKI, C. ZHU, Y. CHOI, K. MIYAZAKI, X. PAN, I. UNO, Y. KONDO: The First Workshop for the Development of Korean Air Quality Forecasting System, Busan, Korea (2018) Observations of black carbon & related species from East Asia to the Arctic: Implication for emission inventory & wet removal rates.
- 5) Y. KANAYA, AQ-GHG meeting, Tokyo (2018) From JAMSTEC's observations on atmospheric composition to integrated AQ/GHG studies
- 6) Y. KANAYA, EMERGE Topical Workshop TEAM-3, Bremen, Germany (2019) Japanese activities on observations and model simulations during EMERGE-Asia.

- 7) K. MIYAZAKI, T. SEKIYA, D. FU, K. W. BOWMAN, T. WALKER, S. S. KULAWIK, K. SUDO, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, K. OGOCHI, B. GAUBERT, J. BARRE, and L. EMMONS, USTH workshop on Upper Air Sounding and Air Quality, Hanoi, Vietnam, (2018) Applications of satellite, ozonesonde, and aircraft measurements and chemical transport models on air quality research.
- 8) Y. CHOI, Y. KANAYA, H.-J. SHIN, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, I. UNO, and X. PAN, 日本地球惑星科学連合 2019年大会 (2019), Evaluation of BC and CO emission inventory based on long-term in-situ observations over East Asia.
- 9) Y. KANAYA, F. TAKETANI, T. MIYAKAWA, C. ZHU, H. KOBAYASHI, Y. KIM, P. MORDOVSKOI, T. MAXIMOV, K. YAMAJI, M. TAKIGAWA, Y. KONDO, and H. MATSUI. 3rd PACES Open Science Conference, Oslo (2019) From Asia to the Arctic/remote Oceans: Recent BC observations by JAMSTEC and plans of model intercomparisons.
- 10) 金谷有剛, 山地一代, 宮川拓真, 竹谷文一, 朱春茂, Yongjoo Choi, 池田恒平, 近藤豊, 第24回大気化学討論会, 蒲郡 (2019) 中国からのブラックカーボン排出量急減: 長崎県福江島における10年間観測からの証拠.
- 11) C. ZHU, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, K. IKEDA, H. TANIMOTO, F. TAKETANI, T. MIYAKAWA, H. KOBAYASHI, I. PISSO, SOLAS Open Science Conference 2019, Sapporo (2019) Sources of black carbon in the Arctic Ocean simulated by FLEXPART transport model.
- 12) Y. KANAYA, H. TAKASHIMA, T. SEKIYA, K. MIYAZAKI, H. ESKES, G. PINARDI, D. S. DIAZ, M. MUELLER, A. CEDE, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco (2019) Advanced validation of TROPOMI satellite observations of NO₂ column densities using co-located direct and scattered sunlight measuring spectrometers (Pandora and MAX-DOAS) at Yokosuka, Japan.
- 13) Y. CHOI, Y. KANAYA, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, I. UNO, X. PAN, M. LEE, H. KIM, and D. H. JUNG, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco (2019) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: Assessment of representativeness for BC and CO emission inventories.
- 14) 金谷有剛, 大気環境学会近畿支部シンポジウム, 大阪 (2019) 大気汚染と温暖化を招く短寿命気候強制因子 (SLCFs): オゾンやブラックカーボンの動態はどこまでわかったか. (招待)
- 15) 金谷有剛, 日本気象学会2019年度秋季大会, 福岡 (2019) 分光学的手法を用いた観測によるアジア大気汚染の統合的理解の推進. (招待)
- 16) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, K. IKEDA, and Y. KONDO, Chozen International Symposium on Transboundary Pollution at North-South Transect at Marginal Sea in western Pacific Ocean, Kanazawa (2019) Evolution of regional air pollution in East Asia: Elucidation of BC emission trend and broadening scope to the Arctic/open oceans. (招待)
- 17) Y. KANAYA, O. POSTYLYAKOV, A. BOROVSKY, A. DZHOLA, E. GRECHKO, T. MIYAKAWA, P. MORDOVSKOI, T. MAXIMOV, F. TAKETANI, H. KOBAYASHI, Y. KIM, C. ZHU, and Y. TOBO, iLEAPS/IGAC-Japan 合同研究集会2019, 名古屋 (2019) 北方圏の温暖化と森林火災: 大気組成変動と地球表層システム変化.
- 18) Y. CHOI, Y. KANAYA, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, I. UNO, X. PAN, M. LEE, H. KIM, and D. H. JUNG, Korean Society for Atmospheric Environment (2019) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: Assessment of representativeness for BC and CO emission inventories.
- 19) Y. CHOI, Y. KANAYA, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, and X. PAN,

- Korean Society for Atmospheric Environment (2019) Investigation of wet removal rate of black carbon in East Asia; Perspective of air mass pathway.
- 20) Y. KANAYA, H. TAKASHIMA, T. SEKIYA, K. MIYAZAKI, H. ESKES, G. PINARDI, D. S. DIAZ, M. MUELLER, A. CEDE, and M. VAN ROOZENDAEL, The 10th International GEMS Workshop, Seoul (2019) Causes of discrepancies between ground-based and TROPOMI NO₂ column densities explored with co-located direct and scattered sunlight measuring spectrometers (Pandora and MAX-DOAS) at Yokosuka, Japan.
- 21) Y. KANAYA, F. TAKETANI, T. MIYAKAWA, C. ZHU, H. KOBAYASHI, Y. KIM, P. MORDOVSKOI, T. MAXIMOV, Y. CHOI, K. YAMAJI, K. IKEDA, H. TANIMOTO, M. TAKIGAWA, H. MATSUI, Y. KONDO, Z. KLIMONT, Sixth International Symposium on Arctic Research, online (2020) Emissions, transport, and removal of atmospheric black carbon particles: Synthetic analyses of observations from Asia to the Arctic Ocean.
- 22) 金谷有剛, 山地一代, 宮川拓真, 竹谷文一, Yongjoo Choi, 朱春茂, 近藤豊, 宮崎和幸, Zbigniew Klimont, 山田大地, 成田大樹, 池田恒平, 谷本浩志, 第25回大気化学討論会, オンライン: 千葉大学 (2020) 新型コロナ流行・経済活動低下時の福江島での大気ブラックカーボン濃度応答: 中国での家庭起源排出割合の評価.
- 23) 金谷有剛, Prabir Patra, 関谷高志, 谷本浩志, 笠井康子, 日本大気化学会大気環境衛星検討委員会, 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン (2020) アジア大気組成観測静止衛星: 第二幕を見据えて.
- 24) Y. KANAYA, K. YAMAJI, T. MIYAKAWA, F. TAKETANI, C. ZHU, Y. CHOI, Y. KOMAZAKI, K. IKEDA, Y. KONDO, Z. KLIMONT, AGU Fall Meeting 2020, online (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009-2020 observations on Fukue Island, Japan.
- 25) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, I. PISSO, I. UNO, M. LEE, H. KIM, D. H. JUNG, Joint International Symposium: Challenging the Research Development and Collaboration, Kanazawa University, online (2020) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: assessment of emission inventories and wet removal scheme.
- 26) 金谷有剛, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020) 日本における大気メタン濃度の時空間分布: 常時監視データとTROPOMI衛星データの大气汚染研究的視点での解析.
- 27) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, I. PISSO, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online (2020) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXPART v10.4.
- 28) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, I. PISSO, Korean Society for Atmospheric Environment (2020) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXPART v10.4.
- 29) Y. CHOI, Y. KANAYA, M. TAKIGAWA, C. ZHU, S.-M. PARK, A. MATSUKI, Y. SADANAGA, S.-W. KIM, X. PAN, I. PISSO, Korean Meteorological Society (2020) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXPART v10.4.
- 30) Y. KANAYA, NIES - SYKE Meeting for Future Collaboration on Black Carbon and SLCP Research, online (2021) Atmospheric BC observations over East Asia and the Arctic Ocean: Linking concentrations to emissions and removal processes.

【サブテーマ3】

- 1) D. NARITA, N. T. KIM OANH, K. SATO, M. HUO and D. A. PERMADI, 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference, Takamatsu, Japan, Fine Particle Pollution and Acid Deposition in Bangkok Metropolitan Region: Project Overview and Policy Implications.
- 2) 山田大地, 成田大樹, 第24回大気化学討論会, 蒲郡 (2019) 日本における廃棄物由来メタンの限界排出削減費用: 制度等の現状を踏まえた全国レベルでの削減費用の検証.
- 3) D. NARITA, T. YASUNARI, and T. TAKEMURA, Xth International Symposium/First Symposium of JRL at ARC, Sapporo (2019) Scaling Potential Macroeconomic Impacts of Climate Effects of Siberian Wildfires: Insights from MIROC-SPRINTARS AOGCM Experiments.
- 4) D. NARITA, T. YASUNARI, and T. TAKEMURA, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco (2019) Scaling Potential Macroeconomic Impacts of Climate Effects of Siberian Wildfires: Insights from MIROC-SPRINTARS AOGCM Experiments.
- 5) D. NARITA, T. YASUNARI, and T. TAKEMURA, ISAR-6, online (2020) Scaling Potential Macroeconomic Impacts of Climate Effects of Siberian Wildfires: Insights from MIROC-SPRINTARS AOGCM Experiments.
- 6) 山田大地, 成田大樹, 日本経済政策学会第77回全国大会, 茨木 (オンライン) (2020) The Effects of Air Pollution on Labor Supply in Japan: A Panel Data Analysis based on PM2.5 Pollution and Labor Data.
- 7) 山田大地, 成田大樹, 日本経済学会2020年度春季大会, 福岡 (オンライン) (2020) The effects of PM2.5 air pollution on labor supply in Japan.
- 8) D. YAMADA and D. NARITA, 25th Annual Conference of the European Association Environmental and Resource Economists, Berlin (online) (2020) The Effects of Air Pollution on Labor Supply in Japan: A Panel Data Analysis based on PM2.5 Pollution and Labor Data.

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 国立環境研究所春の公開講座 (2018年4月21日、つくば市・国立環境研究所、参加者約750名) にて「北極域では今」展示発表
- 2) 国立環境研究所夏の公開 (2018年7月21日、つくば市・国立環境研究所、参加者約5000名) にて「北極域では今」展示発表
- 3) 香川県立高松高等学校における特別授業「地球大気化学特別講義」 (2018年9月21日、聴講者約200名)
- 4) 高松第一高等学校における特別授業「地球大気化学特別講義」 (2018年9月21日、聴講者約90名)
- 5) 香川県立三木高等学校における特別授業「大気化学と地球環境問題: サイエンスから国際活動まで」 (2018年12月3日、聴講者約200名)
- 6) 神戸大学付属中等教育学校における特別授業「大気化学と地球環境問題: サイエンスから国際活動まで」 (2019年3月15日、聴講者約250名)
- 7) 一般公開シンポジウム「変わりゆく環境と私たちの健康」 (主催: 国立環境研究所、2019年6月14日、北九州市立男女共同参画センタームーブ、観客約500名 および 2019年6月21日、東京都メルパルクホール、観客約1000名) にて「大気汚染と気候変動の関係を探る - 短寿命気候汚染物質の観測とモデリング -」ポスター展示
- 8) 公益財団法人海洋化学研究所73周年秋季講演会「人間と生物が関与するグローバルな大気化学

研究の最前線」（2019年11月16日、京都大学宇治キャンパス、聴講者約50名）

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

- 1) 成果の記者発表（2018年12月21日、国立環境研究所プレスリリース、筑波研究学園都市記者会・環境省記者クラブ同時配信、谷本浩志、池田恒平、岡本祥子、秋元肇、廣田渚郎「中国大気汚染悪化にも関わらず、日本の大気質が改善していた～気候的要因による2008年以降の越境汚染減少が原因～」, <http://www.nies.go.jp/whatsnew/20181221/20181221.html>)

【サブテーマ2】

- 1) 成果の記者発表（2020年6月5日、海洋研究開発機構プレスリリース、「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—」, http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20200605/)
- 2) 毎日新聞（2020年7月14日、朝刊4面、「中国のすす粒子排出、10年で35%減 温暖化一因「ブラックカーボン」 汚染対策進展」）

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

- 1) 谷本浩志、国立環境研究所 2018年度 NIES 賞「国際的な研究活動において内外から高い評価を受けたことに対して」、2019年3月
- 2) 池田恒平、日本大気化学会 2019年度奨励賞「大気化学輸送モデルを用いたPM2.5およびブラックカーボンの発生源解析に関する研究」、2019/11/6

【サブテーマ2】

- 1) 金谷有剛、日本気象学会 2019年度堀内賞「分光学的手法を用いた観測によるアジア大気汚染の統合的理解の推進」、2019/10/29

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Better Quantification of Anthropogenic Emissions of Black Carbon and Methane in East Asia and Cost-benefit Analysis of Emissions Reduction

Principal Investigator: TANIMOTO, Hiroshi

Institution: National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa,
Tsukuba, Ibaraki 305-8506, JAPAN

Tel: +81-29-850-2930

E-mail: tanimoto@nies.go.jp

Cooperated by: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, The Univ. of Tokyo

[Abstract]

Key Words: Short-lived climate forcers, Emission inventory, Socio-economic assessment, Arctic Council, Satellite Earth observation

Black carbon (BC) is one of key air pollutants that have great impacts on the climate and environment from urban to global scales. Together with methane (CH₄), BC is recognized as one of short-lived climate forcers (SLCFs), with other species including 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 recognized to be a major source region of BC and CH₄, with its emissions having dominant and substantial contributions, respectively, in the northern hemisphere. For BC, there exist several “bottom-up” emissions inventories, but they still have huge (approximately 200%) uncertainties. In order to better understand the climatic and environmental impacts of Asian BC and CH₄, reduce the uncertainties in the emissions estimates, and thereby provide policy implications in the international framework on air pollution and climate change, our project focuses on the following three analyses. (1) Global source-receptor modeling: By comparing six BC inventories by source region and sector, the differences in China’s annual BC emissions were as large as 80%, with the main uncertainty being attributed to those in the emissions from domestic, industry, and energy sectors. (2) Top-down estimates of Asian emissions: From observations of BC at multiple sites in East Asia, the emissions inventories generally overestimated China’s emissions approximately by a factor of two for the years of early 2010s, suggesting that the calculated climatic effects were overestimated. (3) Cost-benefit analysis of Asian emissions: Marginal abatement costs (MAC) of BC emissions from East Asian countries (China, Korea, and Japan) were estimated and low-cost emission reduction potentials were identified in China, relative to the other East Asian nations. Regional-scale estimates of BC emission reduction costs can be used as a basis in designing realistic and effective mitigation policies for the Arctic.

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”.