

課題番号： 2-1803 (JPMEERF20182003)

研究実施期間：2018-2020年度

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

*- Better quantification of anthropogenic emissions of BC and CH₄ in East Asia
and cost-benefit analysis of emissions reduction -*

キーワード

- ・ **ブラックカーボン、メタン**・・・大気汚染物質であるとともに温室効果も有する物質で、短寿命気候汚染物質（Short-Lived Climate Forcers: **SLCF**）と呼ばれる
- ・ **人為起源排出量**・・・アジアの人間活動による排出は現在、欧米を上回っている
- ・ **削減感度**・・・排出を削減した際に、環境や気候の改善に現れる効果の尺度

代表・サブ1：国立環境研究所地球環境研究センター 谷本 浩志、池田恒平ほか

サブ2 分担： 海洋研究開発機構 金谷 有剛

サブ3 分担： 東京大学 成田 大樹

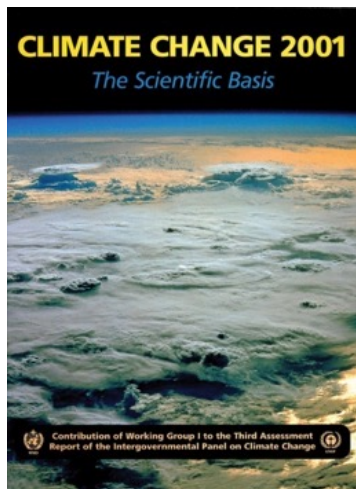
重点課題 主：⑧地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

副：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：（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

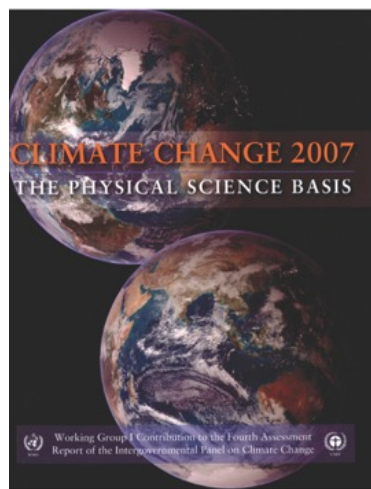
IPCC等国際的な場でのSLCFの認識の高まり

TAR



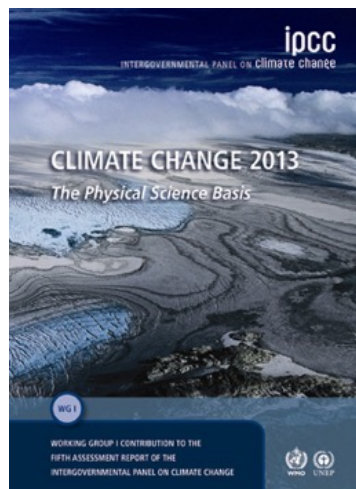
- エアロゾルの気候影響の重要性が認識
- Non-CO₂ GHGs (CH₄, N₂O, HFCs, O₃)の寄与がCO₂に匹敵

FAR



- 2004: IPCC総会で専門家会合の開催決定
- 2005: IPCC TFI/WG1専門家会合=大きな不確実性、信頼できるエアロゾルの国別排出量推計は現状では困難。不確実性低減を努力し将来会合を開く

AR5



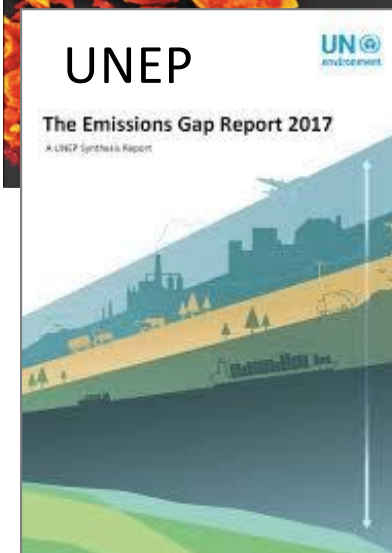
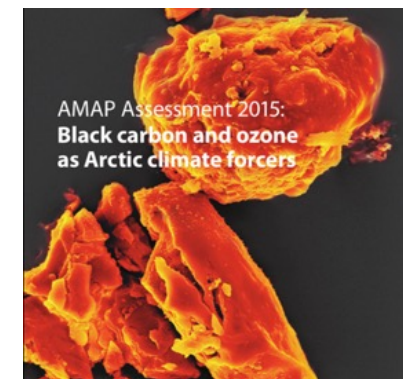
- エアロゾルの気候影響評価研究が進展
- メタン、対流圏オゾン、BCも併せたSLCF排出量削減が大気汚染改善とのコベネとしても認識
- CO₂に加え、短寿命ガスやエアロゾルであるSLCFの温暖化寄与も大きいことが明確に示された

AR6



- TFI主催のSLCF専門家会合 (2018.5)
- Chapter 6: SLCFがWG1で単独の章として初めて取り上げられ、WG2やWG3でも健康やコベネフィットの議論
- 今後SLCFインベントリのガイドラインの目次案が策定されることが決定

AMAP

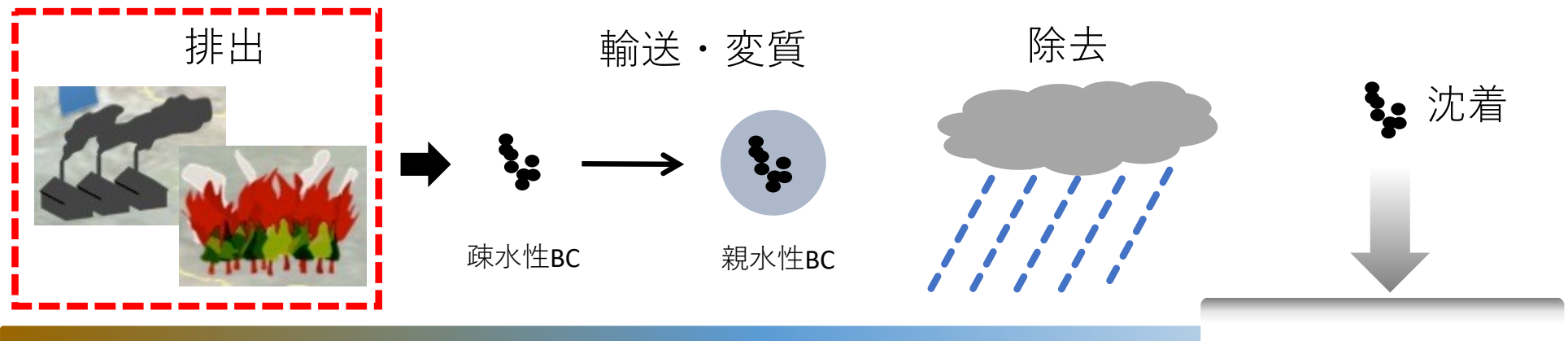


本研究課題のポイントと目的

FY2015-2017年北極BC推進費課題で開発、成果を挙げた
2種の全球モデリング技術を活用するとともに、
最新のTROPOMI衛星観測データ(2017.10月打ち上げ)を用い、
さらに環境経済学者を新たにチームに加えた

- BCに加えてCH₄を対象物質として、
- アジア排出量に特化し、推計の精緻化を進めるとともに、
- 削減感度の評価を重点化し社会経済的な分析を加味した

得られた知見を国内排出量推計などの施策に結びつけ、
さらにIPCC AR6/AR7、北極評議会、CCAC等の国際的枠組みに貢献する我が国の取組みを加速する
欧州TROPOMI衛星データ解析を通じて、2018年に打ち上がったGOSAT-2のデータ検証やモデル利用に活かす



達成目標

全体	世界各国で使われているBC・CH ₄ 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1	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2	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3	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。

目標達成に向けた研究体制・テーマ構成

国内・国際的な政策貢献

政策立案者・政治へのインプット、政府における「見える化」

- 環境省インベントリ事業（GIOおよびJEI-DB）
- 北極評議会, IPCC AR6/AR7, CCAC, Asia Pacific Clean Air Partnership (ASPAC)

科学的な成果

- ・ インベントリとモデル技術の発展による排出量の高精度化及び削減感度の導出
- ・ 野外観測の強化および新規衛星観測データの利用による排出量検証の高精度化
- ・ 影響や削減感度を考慮した削減対策に関する社会経済分析と対策提言の検討

サブ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

国立環境研究所
谷本浩志ほか

サブ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

海洋研究開発機構
金谷有剛ほか

サブ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

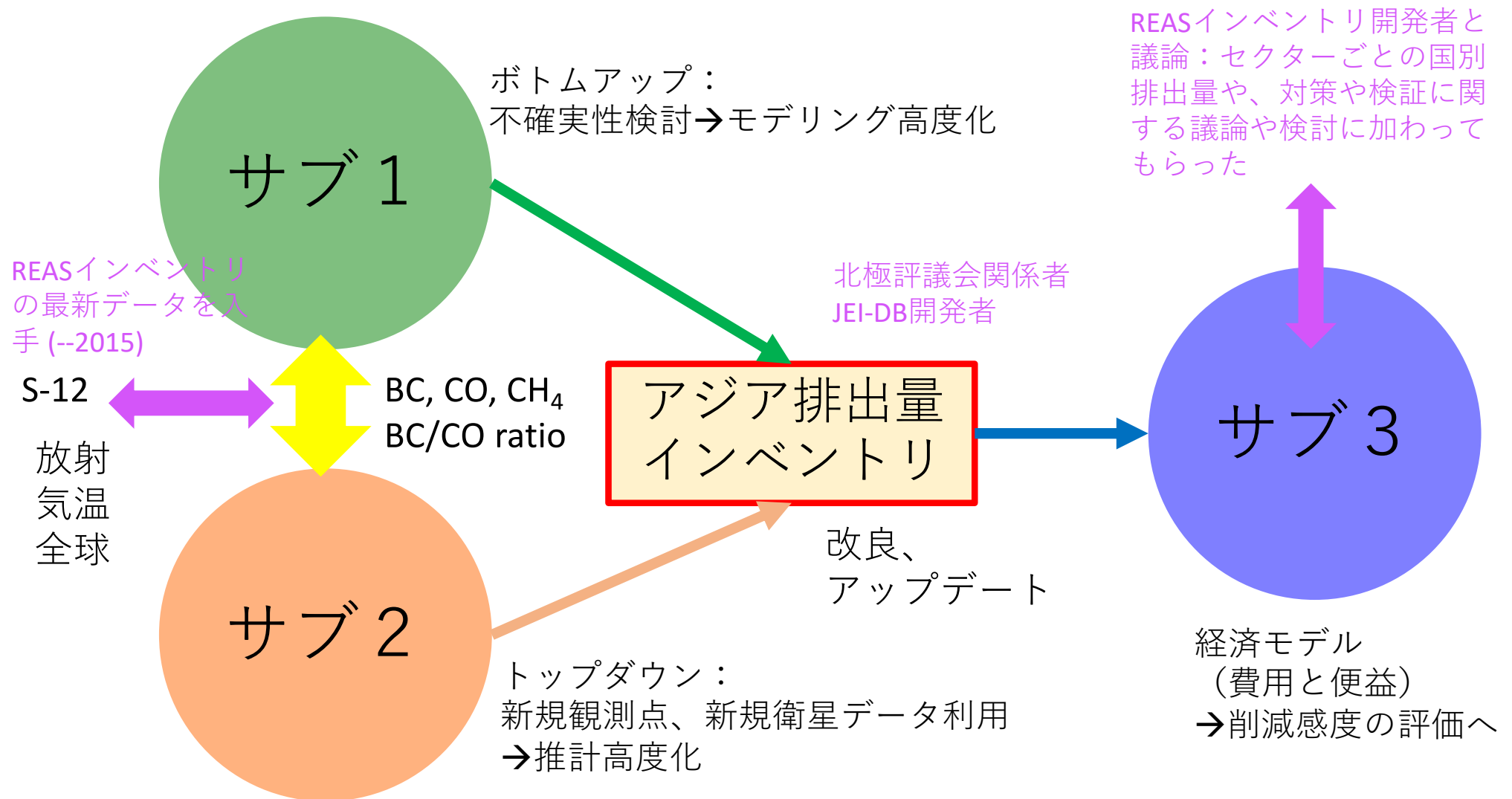
東京大学
成田大樹ほか

差別化、連携、最新の知見の共有

他の国内・国際科学プロジェクト

S-12課題 (BC)、2-1710課題 (CH₄)、文科省ArCS
IPCC TFI インベントリタスクフォース
IGAC, Future Earth

課題内外の連携とマネジメント



- 排出インベントリを共通項にして **自然科学と社会科学** を繋げる
- REASインベントリ開発者に協力を仰ぎ、**課題外のS-12と繋げる** 役割
- **環境省委託（準国家）の国内インベントリ** 開発者に協力を仰ぎ、国内推計と繋げる役割

成果の概要

研究の社会的意義、学術的意義、技術的意義

- 日本及び世界各国で開発されている6種のボトムアップ型の排出インベントリには、**家庭部門及び産業・エネルギー部門の推計誤差により、80%もの幅**があることを見出した
- 化学輸送モデルとデータ同化モデルを高度化し、日本・韓国等の4地点での野外観測を行うことで、東アジア（特に日中韓）の国別**BC**排出量について、**3種類のトップダウン推計手法**（タグ法、**BC/CO**排出比法、モデル比較法）を開発、方法論として確立し、**BC**排出量推計の**不確かさを200%から20%台へ大幅改善**
- CMIP6気候モデル相互比較実験で使用されている**CEDS**インベントリは**中国BC**の排出量が2倍近い大幅な過大評価となっていることを指摘。2010年代の中国**BC**排出の減少傾向の観測結果と併せて、**CEDS**の推計値が改訂され、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
- 社会経済分析に使用される**ECLIPSE**インベントリも中国**BC**排出量推計が**約50%下方修正**され、それに基づき**BCとCH₄のMAC（限界削減費用）曲線をアップデート**して、中国・家庭部門等からの限界削減費用を再度計算した。その結果を**REAS**インベントリ開発チーム（S-20）に情報提供した
- **BC**で培ってきた解析・モデル技術を**CH₄**に応用し、特に**タグ付きCH₄モデルを新たに開発**、**欧州のTROPOMI衛星（7 × 3.5 kmの空間解像度）を国内で唯一先行利用**するなど、排出源が多種多様なため実態把握が困難な**CH₄**の排出量についても示唆深い知見を得た

排出の検証・評価

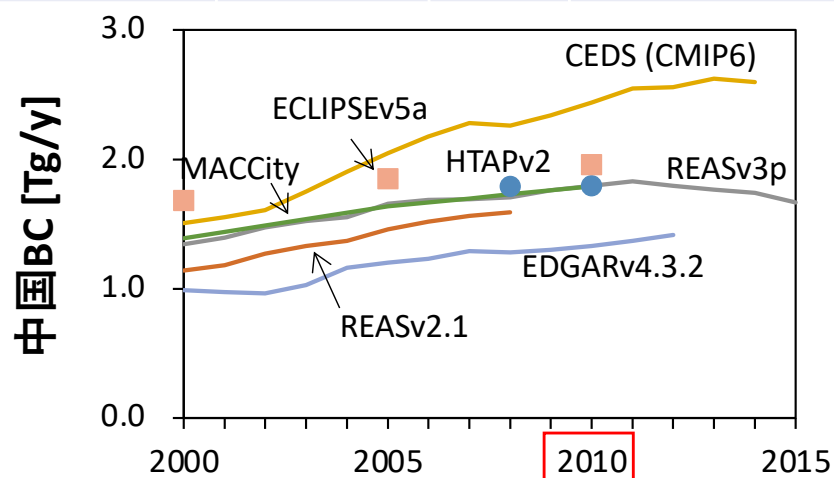


- 排出量データは**あらゆる解析・予測に重要**（将来予測のモデル計算、削減コスト、対策立案）
- しかし、その**検証は容易ではない**
- **現状を正確に知る**ことは、一丁目一番地に重要

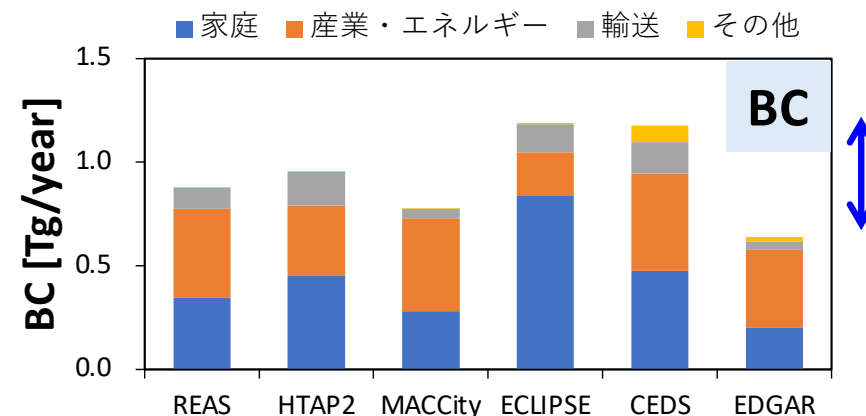
人為起源排出インベントリの相互比較

ボトムアップ型人為起源インベントリの
BC/CO/CH₄排出量を地域別・部門別に相互比較：
-- グローバル5・アジア領域1

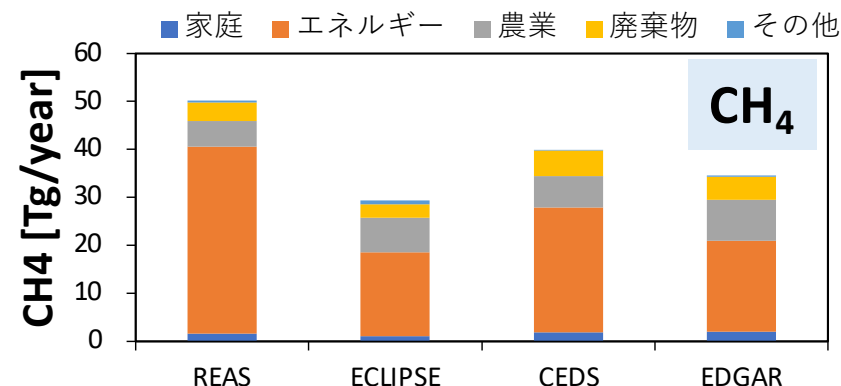
インベントリ	期間	解像度	参考文献
REASv2.1 (v3p) アジア S-12より	2000-2008 (1950-2015)	0.25°	Kurokawa et al. (2013)
HTAPv2 全球	2008, 2010	0.1°	Janssens-Maenhout et al. (2015)
MACCity (CMIP5) 全球	1960-2020	0.5°	Granier et al. (2011)
ECLIPSEv5a 全球	1990-2050	0.5°	Klimont et al. (2017)
CEDS (CMIP6) 全球	1750-2014	0.5°	Hoesly et al. (2018)
EDGARv4.3.2 全球	1970-2012	0.1°	Crippa et al. (2018)



中国北部（2010年）



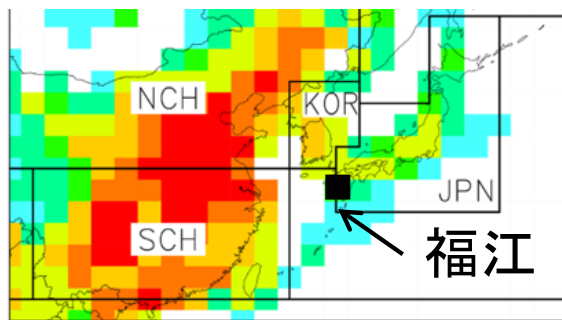
- 最大値と最小値の差は86%
- 各部門の差はより大きい（家庭部門は約4倍の差）



- 最大値と最小値の差は70%
- エネルギー部門の差がばらつきの原因

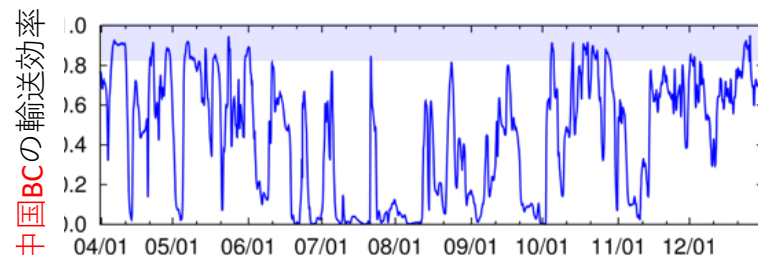
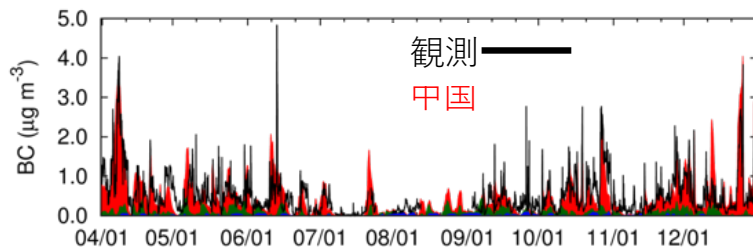
タグモデルによる中国BC排出量の検証

GEOS-ChemタグBCモデル

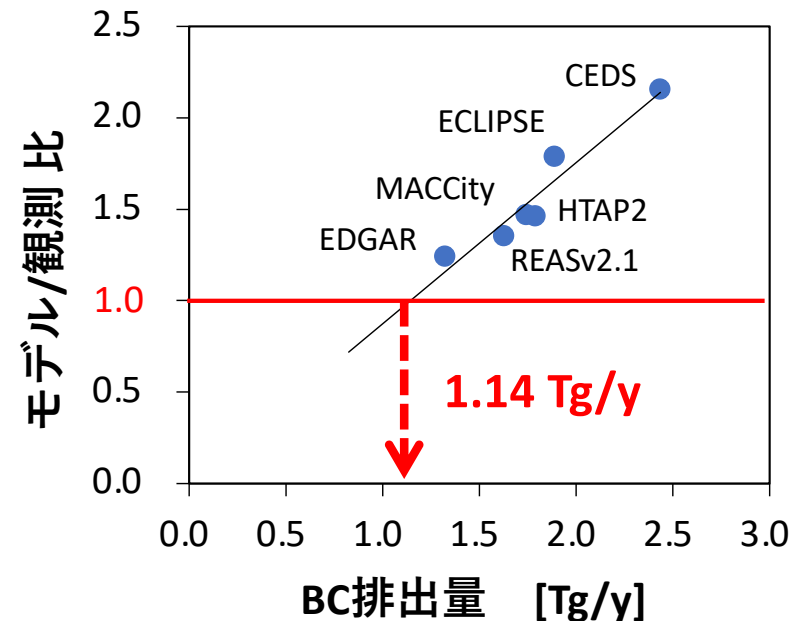
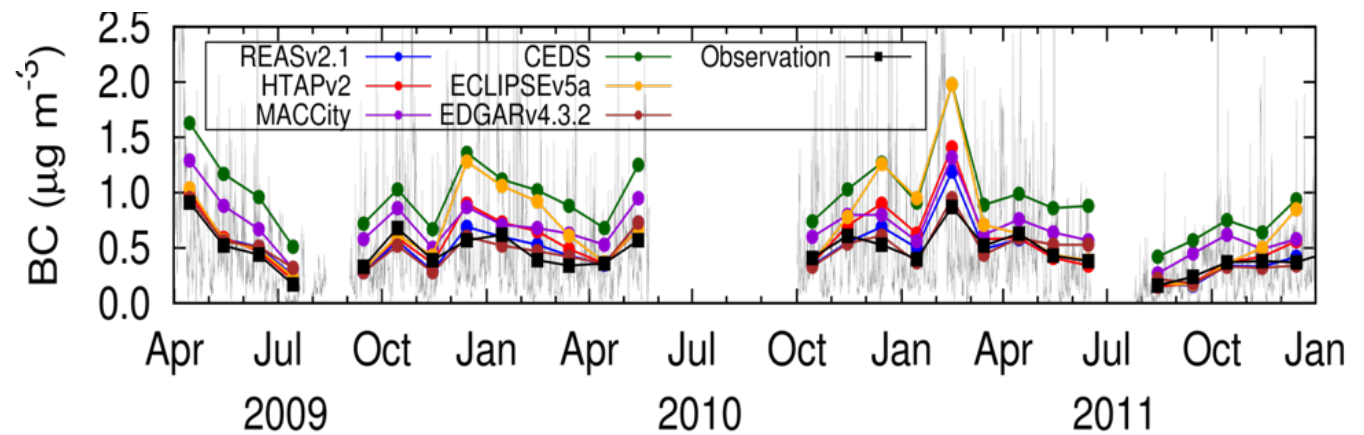


BC観測データ：サブ2 から提供

中国排出源の寄与 > 80%
輸送効率（湿性除去なし） > 80%



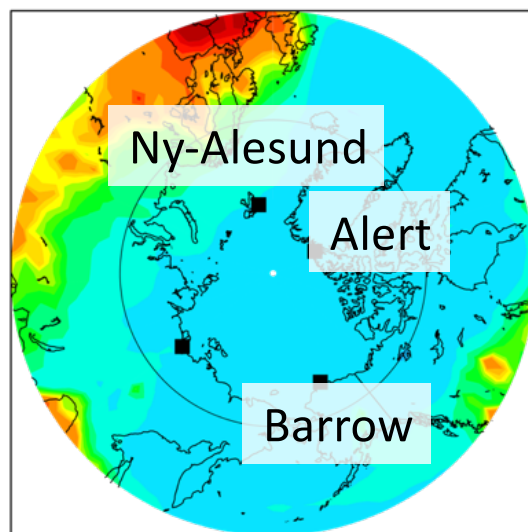
中国BCの輸送効率



- 全インベントリで中国排出量を過大推計(+25–116%)
- BC排出量=インベントリ×(モデル/観測比)
→中国のBC排出量：1.06–1.22Tg/y
- 線形回帰から算出：1.14 Tg/y (+/- 0.08)

Ikeda et al., in preparation, 2021

北極上空におけるBC濃度・分布の違い

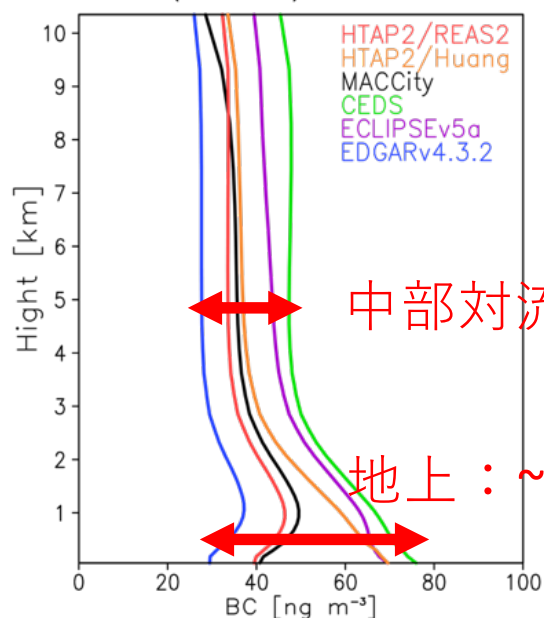


Ikeda et al., in preparation, 2021

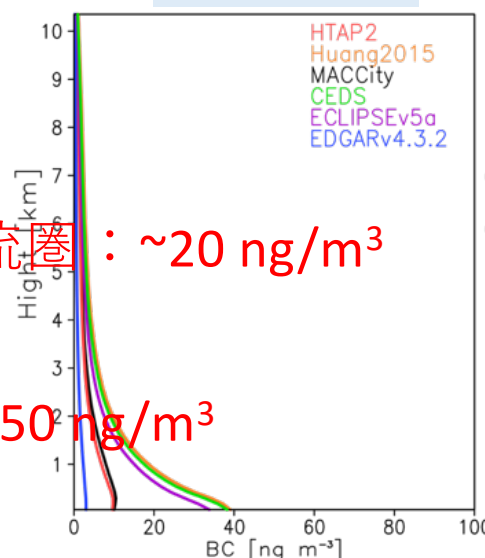
- 北極地上：インベントリにより冬季に3倍の差
- 地表付近ではロシア、中部対流圏では東アジアが最大の要因
- 北極の気候へのBC影響評価を高精度化するには、アジアとロシアからのBC排出量の精緻化が重要

北極 (66-90N) の年平均BC高度分布@2010年

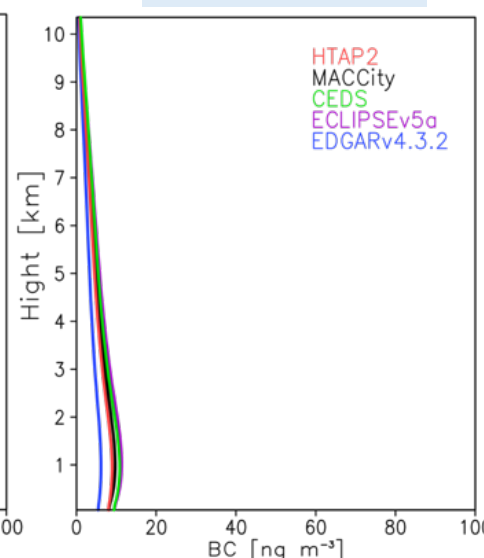
Arctic BC (66–90N) 2010 Annual Mean



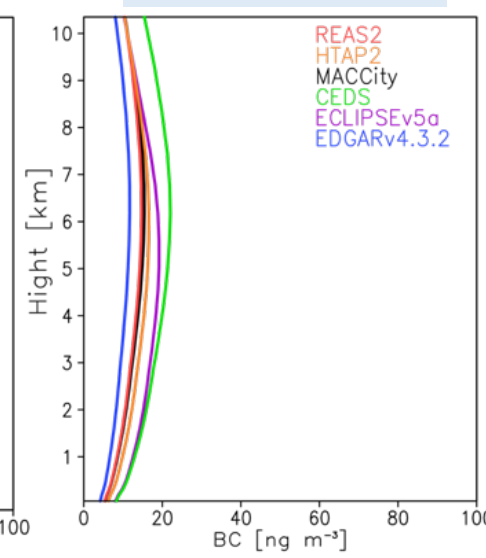
Russia BC

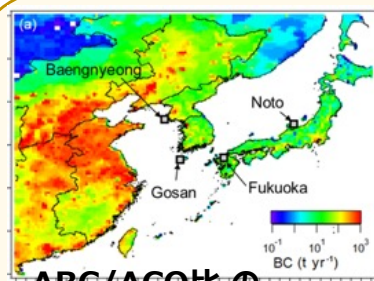


Europe BC

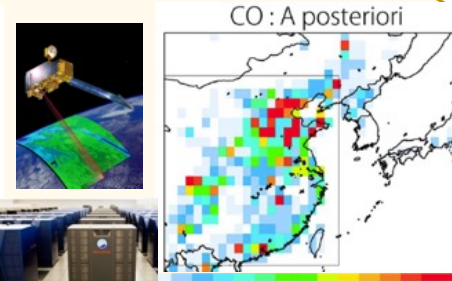


East Asia BC





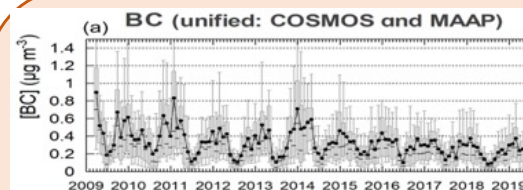
ΔBC/ΔCO比の
日韓5点評価



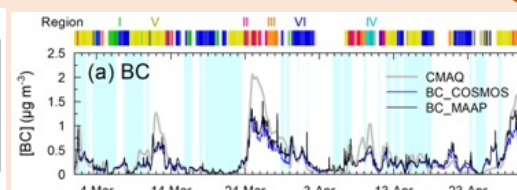
衛星データ+同化=CO排出量

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

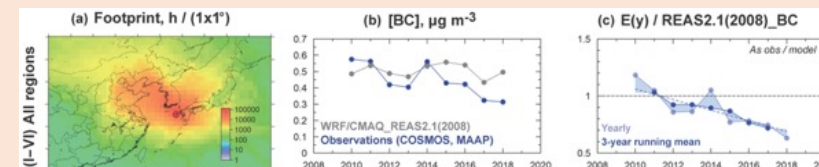
Choi et al., 2020a; Miyazaki et al., 2020



福江: BC濃度が10年で半減



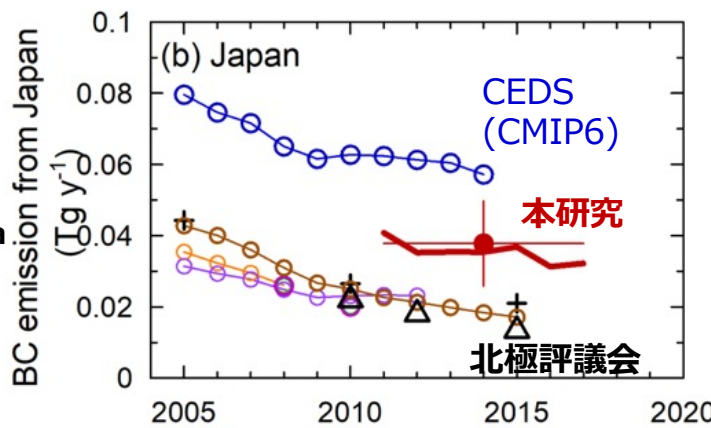
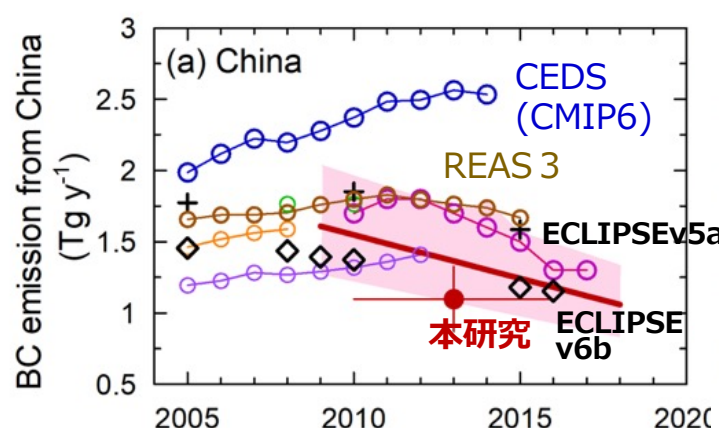
領域モデル: 濃度上昇イベントを再現



Kanaya et al., 2020

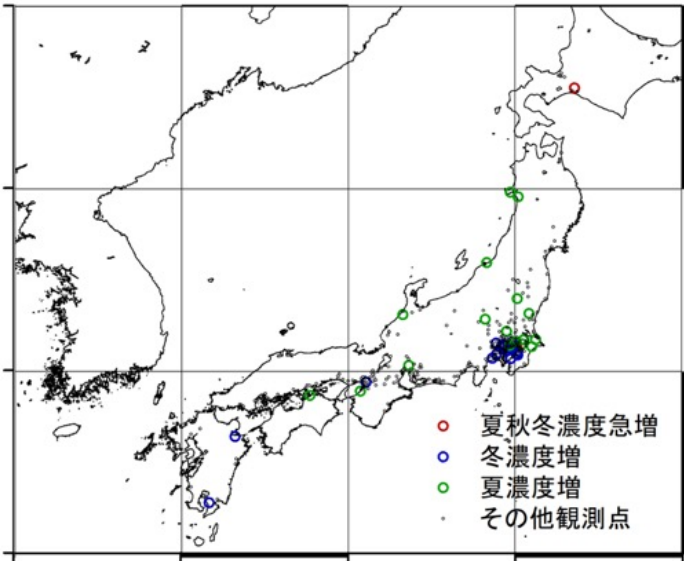
モデル濃度再現に必要な排出量・変化を観測/モデル比で推定 (気象年々変動補正)

国	BC排出量(1) 「BC/CO排出比法」 (2010-16)(Tg/y)	ΔBC/ΔCO比 (ng/m³·ppb)	CO排出量 (Tg/y)	BC排出量(2) 「モデル比較法」 (2010-18) (Tg/y)	比較 REAS2.1 (Tg/y, 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	報告なし	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	報告なし	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)	0.027



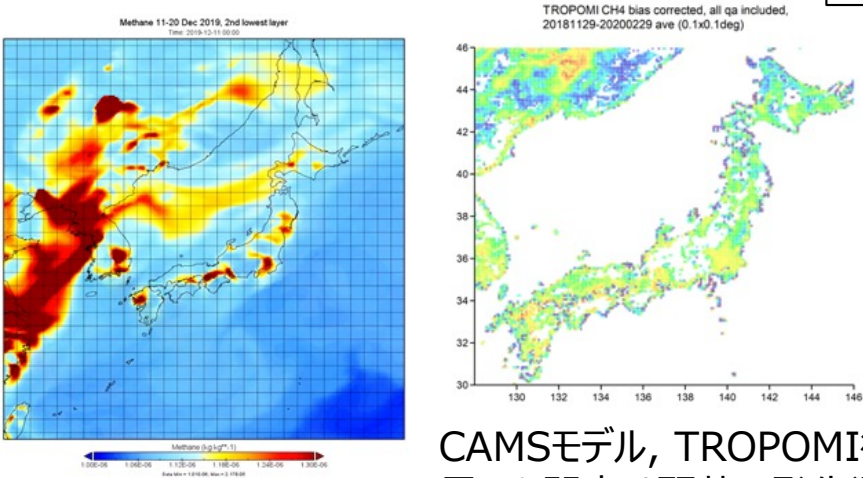
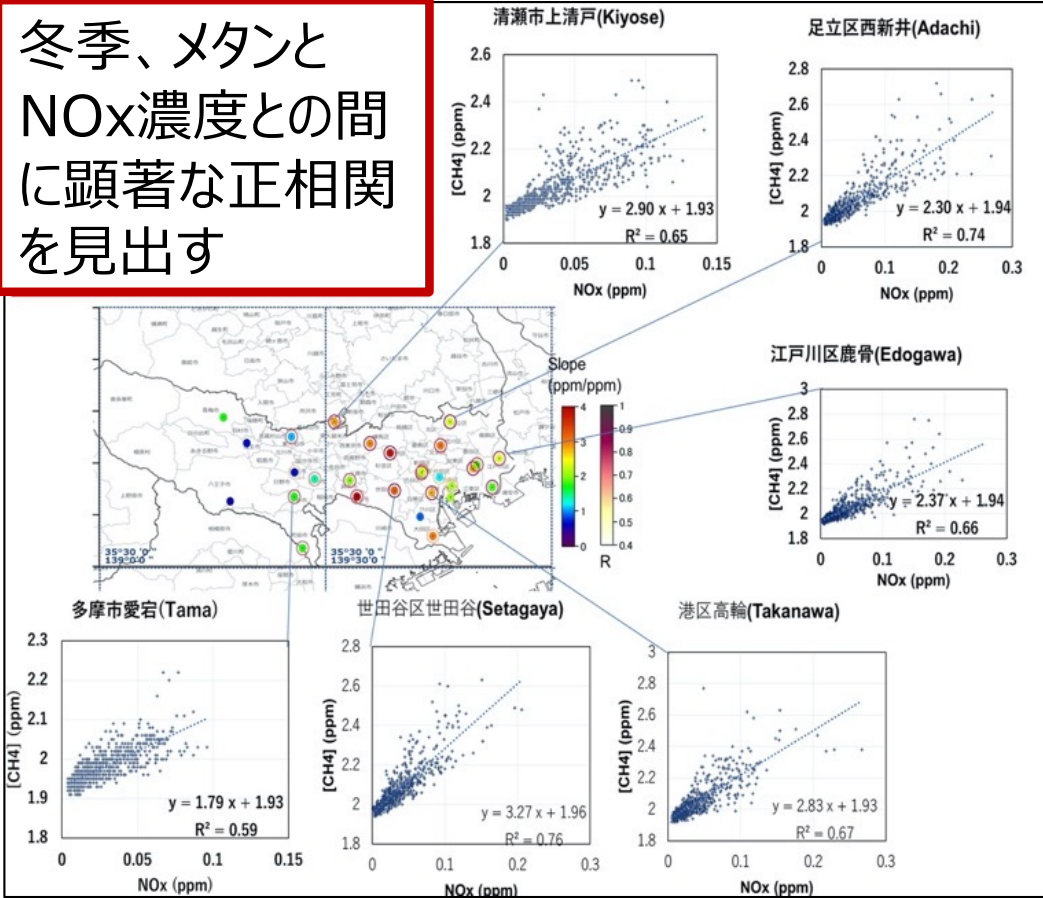
- 中国BC排出は統計値の下限 (~1Tg)が真 (CMIP6は大幅過大・増加: 本研究を受けて修正)
- サブ3で用いるECLIPSEv6bを支持(v5aは5割過大)
- 日本BC排出は国内推計値・北極評議会への報告値より高い可能性
- 不確かさを200%から21-27%に軽減

国内メタン-NOx相関:東京メタン排出量は過小評価か



全国約500点の「そらまめくん」データの季節性をクラスター分析、「冬濃度増」パターンをもつ都市部に着目

冬季、メタンとNOx濃度との間に顕著な正相関を見出す



CAMSモデル, TROPOMI衛星でも関東は顕著な発生源

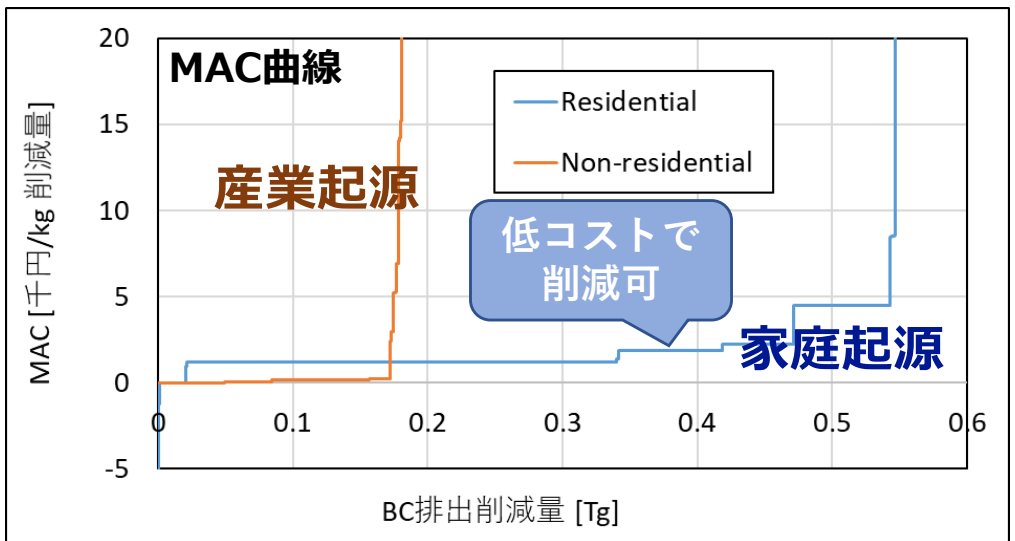
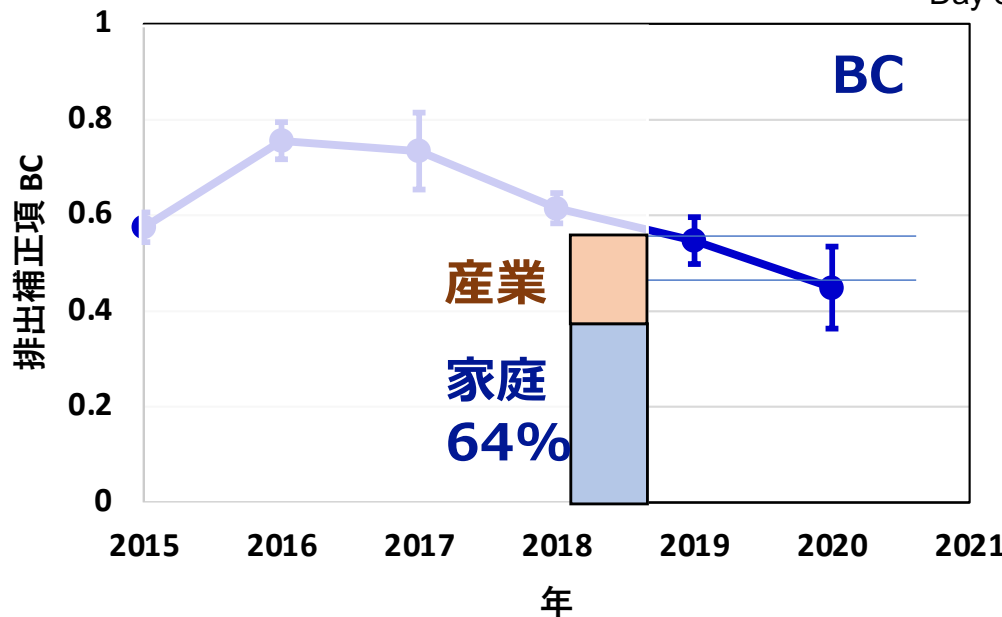
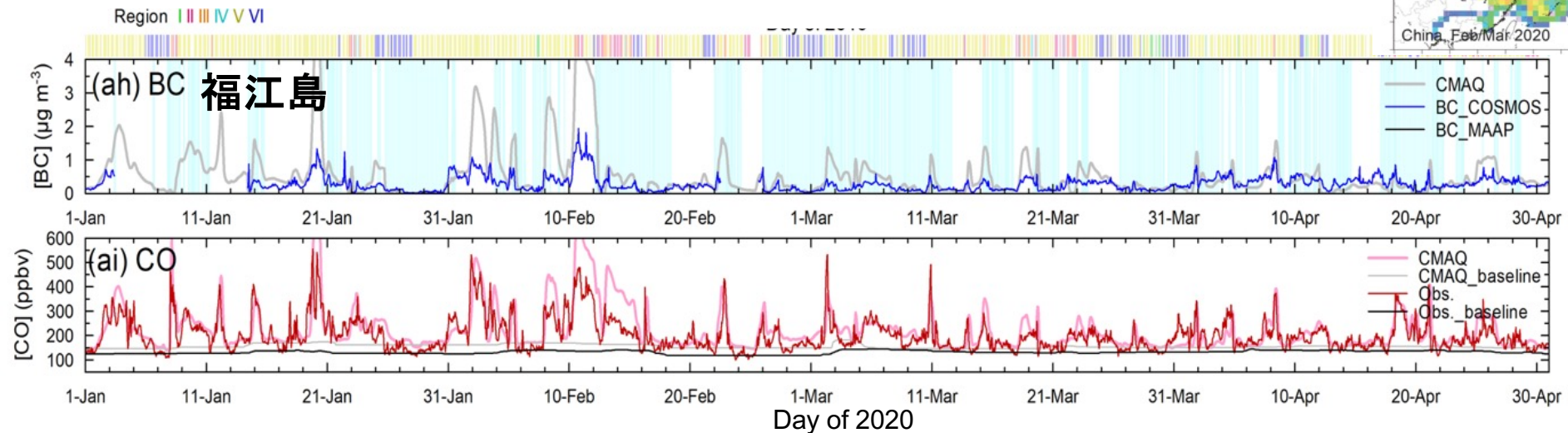
$(\Delta CH_4 / \Delta NO_x) \times NO_x \text{排出量} = CH_4 \text{排出量}$

$(\Delta CH_4 / \Delta NO_x)$ 排出比 ppm/ppm	NOx 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 (本研究)	41050 *	0.036	0.022 *

(*2019東京都環境白書;2015年度)

約1.6倍

コロナ・経済低下時のデータから中国BC排出は家庭起源が主と判明－削減策は経済的にも有効



Kanaya et al., in preparation, 2021

限界削減費用の経済分析から(サブ3) 家庭部門の排出削減が効率的であると示唆
石炭ベースの調理・暖房ストーブをガスベースの代替品に置き換える

BC・CH₄の排出量と排出の限界削減費用 (MAC)分析

- BC・CH₄排出削減の社会的便益と費用を定量的に評価する
- 排出削減の限界便益：排出を1単位削減することによる便益（排出による温暖化や大気汚染を通じた被害＝社会的費用の減少分）を貨幣換算したもので、いわゆるコベネフィットを含む
- 限界排出削減費用（MAC）：排出を1単位削減する際に発生する費用
- 排出削減の便益に見合う対策費用レベルの定量化（下図M*）
 - 直接の排出削減対策の経済評価のみでなく、排出量に影響するインフラ一般（例えば、都市公共交通）の経済評価にも活用可能

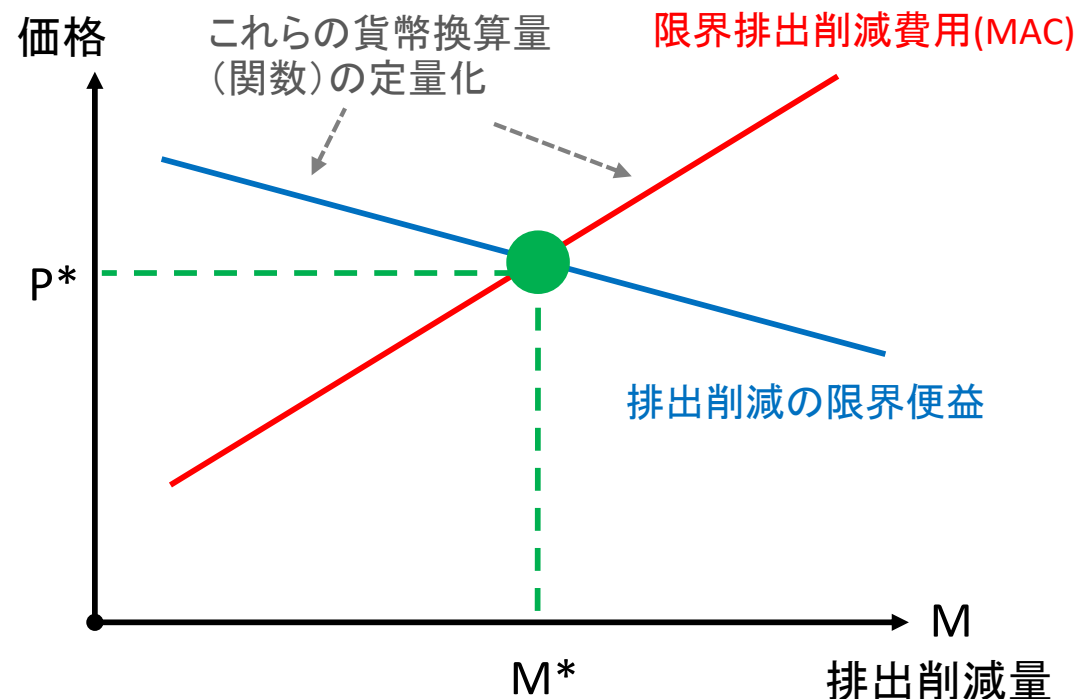
近年、欧米や中国では実証分析が蓄積されているが、日本では実証分析がほとんど行われていない

限界便益についての分析：

- BCはPM_{2.5}の構成物質でもあり、大気汚染対策としての側面（コベネフィット）もある
- 労働供給を通じた生産活動への影響を、日本におけるデータを用いて計量経済学的・統計学的に分析（交絡因子の効果を除いた因果関係を見出す）

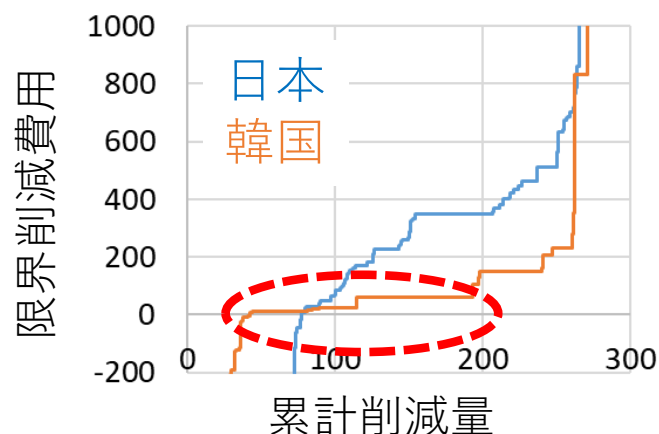
限界削減費用についての分析：

- BCやCH₄排出削減の限界費用を、日韓中について推計

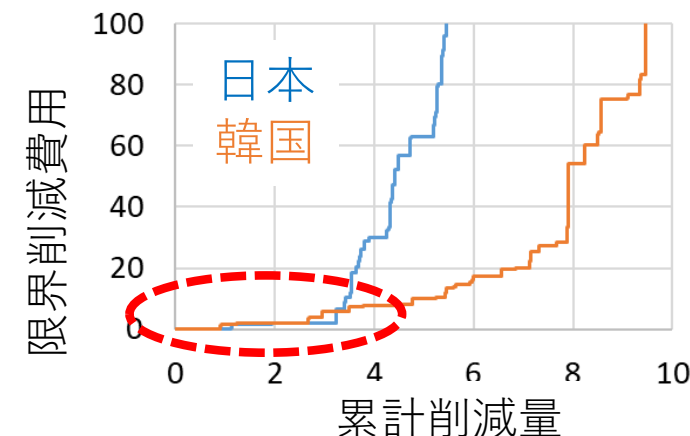


日韓中のBC・CH₄排出削減とMAC

CH₄排出削減MAC



BC排出削減MAC

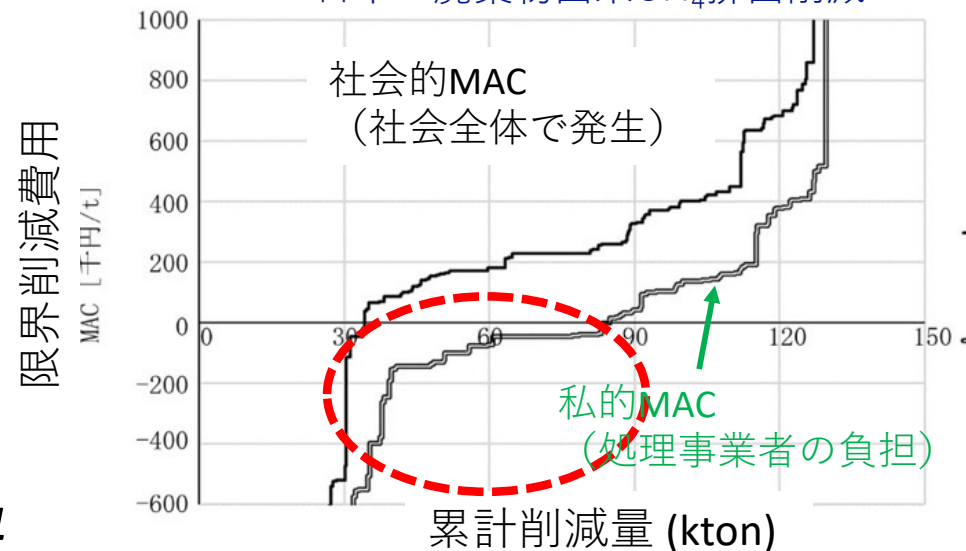


- GAINSモデル(ECLIPSE_v5aインベントリ)に基づきつつも、不確実性と現実との乖離を考慮し、REAS（アジアに特化）や日本国温室効果ガスインベントリ（各国統計データ）を用いて推計
- 中国の削減可能性が突出しているが、日韓とも低い費用で削減可能

- 日本は廃棄物由来CH₄が人為起源の25%
- 日本の廃棄物処理は市町村単位で小規模（= 割高）に行われており政策的に排出削減の余地あり
- 近年の国際的な炭素価格の議論から、社会的MACは約200～350千円/tまで許容
- この水準で63～92千tが削減可能（政府目標の大部分）
- 私的MACは約85千tまでは負、むしろ利潤が生まれうる

山田ら, 2021

日本の廃棄物由来CH₄排出削減



日本におけるPM_{2.5}の労働供給への影響

- PM_{2.5}水準 (PM_{jt}) が労働供給 (L_{ijt}) に与える影響を式で記述

$$L_{ijt} = \beta \times PM_{jt} + \mathbf{X}_{jt} \boldsymbol{\gamma}' + \eta_i + \varepsilon_{ijt}$$

- PM_{2.5}が労働供給を下げる（＝排出削減で労働供給が増加する）ならば $\beta > 0$
- 単なる相関ではなく、市町村ごと・月ごとの降水量の変化がPM_{2.5}水準の変化を通して労働供給に与える影響を分析（固定効果操作変数モデル）

「厚生労働省・毎月勤労統計調査」「国環研・環境数値データベース」をもとに推定

	固定効果モデル		固定効果操作変数モデル		固定効果+NOx	
	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

- PM_{2.5}水準の1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の上昇が、労働時間を0.223時間/人/月（中小企業では0.337時間/人/月）減らし、**特に出勤日数に影響**
- 生産量への影響**は2400億円程度：無視できない
- 労働時間のロスを**残業等で多少カバー**しているが、完全には不可能

Yamada et al., in preparation, 2021

環境政策への貢献：インプット、エンゲージメント

- 2018-2021年 IPCC AR6 WG1 Chapter 6 : SLCFsへの貢献・リード（Review Editor: 金谷、Expert Reviewer: 谷本）、IPCC インベントリタスクフォース SLCF専門家会合（金谷）
 - 本課題の知見を強く働きかけ、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、緊急性の高い結果として国際的に認知
- IPCC関係者と意見交換
 - 国際動向：インベントリと大気化学コミュニティ（谷本はIGAC 共同代表、金谷は国際オゾン委員会委員）
 - インベントリの実務－研究連携
 - トップダウン検証の有効性
 - 衛星データ利用（TROPOMI, GOSATなど）
- 政府関係者と意見交換
 - 北極BC、SLCP、パリ協定、温暖化リスク、Future Earth、SDGs
 - Future Earth傘下の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)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)で谷本と金谷が科学委員
- 2019年6月21日閣議決定：内閣「統合イノベーション戦略2019」
 - 2020年に日本開催の北極科学大臣会合への貢献
 - 北極域における環境変動が地球全体へ及ぼす影響・・・
- 2021年5月「第3期海洋基本計画」
 - 「北極政策の推進」に科学的知見を提供
- 2021年5月 第3回北極科学大臣会合（ASM3）
 - 共同声明とサマリーレポートにアジアのBC排出について最新知見を提供

今後、AR7で、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可能

北極議員連盟へ定常的な貢献

成果の発表

学術論文15件（査読付き国際誌）、学会発表59件（うち国際会議41件、招待講演9件）
「国民との科学・技術対話」8件、マスコミ等への公表・報道3件、本研究に関連する受賞3件

- S. OKAMOTO et al.: **J. Geophys. Res. Atmos.** (2018), Decadal shifts in wind patterns reduced continental outflow and suppressed ozone trend in the 2010s in the lower troposphere over Japan.
- C. ZHU et al.: **Environ. Pollut.** (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.
- D. NARITA et al.: **Atmosphere** (2019), Pollution Characteristics and Policy Actions on Fine Particulate Matter in a Growing Asian Economy: The Case of Bangkok Metropolitan Region.
- H. AKIMOTO et al.: **Prog. Earth Planet. Sci.** (2020), An empirical approach toward the SLCP reduction targets in Asia for the mid-term climate change mitigation.
- Y. CHOI et al.: **Atmos. Chem. Phys.** (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.
- Y. KANAYA et al.: **Atmos. Chem. Phys.** (2020), Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009–2019 observations on Fukue Island, Japan.
- Y. CHOI et al.: **Atmos. Chem. Phys.** (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.
- K. IKEDA et al.: **J. Geophys. Res.: Atmos.** (2021), Model and satellite analysis of transport of Asian anthropogenic pollution to the Arctic: Siberian and Pacific pathways and their meteorological controls.
- D. NARITA et al.: **Polar Science** (2021), Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem.
- 山田大地ら：環境科学会誌 (2021), 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－

市民対話/特別授業/一般講演

- 谷本浩志：大気汚染と気候変動、現代化学、2019年3月号、48-51 (2018).
- 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
- 国立環境研究所夏の大公開（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
- 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）
- 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）
- 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）
- 神戸大学附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）
- 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
- 高松第一高等学校による研究所訪問（2019年7月30日、聴講者45名）
- 東京大学教養学部学生への研究所訪問（2019年7月30日、聴講者6名）