

将来の地球観測への期待

Future perspectives and scopes of earth observations

佐藤 啓市¹・池田 恒平²・寺尾 有希夫²・山下 陽介²・町田 敏暢^{2*}・谷本 浩志²
Keiichi SATO¹, Kohei IKEDA², Yukio TERAO², Yousuke YAMASHITA²,
Toshinobu MACHIDA^{2*} and Hiroshi TANIMOTO²

¹ アジア大気汚染研究センター 大気圏研究部

² 国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域

¹ Atmospheric Research Department, Asia Center for Air Pollution Research

² Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

摘 要

現在既に進行している気候変動に対して人類としてできるだけ迅速に効果的な緩和策を実施するためには、大気中の二酸化炭素など長寿命の温室効果ガス（Greenhouse gas: GHG）の排出量を抑制するばかりでなく、メタン、オゾン、黒色炭素といった短寿命気候強制因子（Short-Lived Climate Forcers: SLCF）の大気中での循環や発生・消滅メカニズムを定量的に理解して排出量削減に結びつける必要がある。また、GHGの人為排出量はこれまで経済統計値が正しいとされて各国の報告にも使われてきたが、パリ協定で定められた排出削減目標の客観的検証の手段として、大都市でのGHG観測の必要性が近年急速に高まっている。本章では将来の地球観測への期待としてこれら2つの観測研究に関連して、SLCFの観測、SLCFのモデル研究、大都市GHGの観測、大都市GHGのモデル研究の4つの視点から解説を行った。

キーワード：温室効果ガス、短寿命気候強制因子、大都市、排出量インベントリ、モデル

Key words：GHG, SLCF, megacity, emission inventory, modeling

1. はじめに

地球温暖化・気候変動が、深刻な地球規模の環境問題として認識されて久しい。その地球温暖化の原因となっている二酸化炭素(CO₂)をはじめとした様々な温室効果ガスについて、人間活動に起因する排出を抑えてゆく「脱炭素化」は、2015年に採択されたパリ協定により世界的な約束事となった。2021年4月には米国や欧州連合等が温室効果ガスの削減目標を上積みし、日本政府も「2050年のカーボンニュートラル、2030年の温室効果ガス排出量46%削減(2013年比)」の削減目標を掲げた。

地球温暖化・気候変動に寄与する物質は温室効果ガスだけではない。大気中に存在する微量成分のうち寿命が短い大気汚染物質の中には、赤外線を吸収して温室効果に寄与する物質があり、SLCF(Short-Lived Climate Forcers: 短寿命気候強制因子)と呼ばれている。SLCFには酸化性の強い物質であるオゾン、いわゆる煤(すす)で微小粒子状物質(PM_{2.5})の1つの成分であるBC(Black Carbon: ブラックカーボン)、HFC(Hydrofluorocarbon: 代替フロン)も該当す

る。

近年、気候変動研究においてSLCFの重要性に対する認識が高まっている。複数の削減シナリオを用いた2070年までの温度上昇のモデルシミュレーションによると、今すぐCO₂の排出規制を始めた場合、2070年には一定の効果が見られるが、2040年までは何も規制しない場合と大きな差はなく、一方、メタン(CH₄)とBCの規制には即効性があり、2040年までの温度上昇を抑制する効果が大きく、この両者を組み合わせた場合に2070年における温度上昇を最も低く抑えられ、また、予測値の不確実性も小さくなるという結果が得られている(Shindell *et al.*, 2012)。

国際的な枠組みでもSLCFへの認識の高まりは顕著である。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル)AR5(Assessment Report 5: 第5次評価報告書)では、「CO₂のみならずSLCFの温暖化寄与も大きい」と明確に示された。SLCFの削減は、短期的な(10年~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、北極評議会に設け

受付：2021年10月26日、受理：2021年12月27日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, E-mail: tmachida@nies.go.jp

られた「BC 及び CH₄ 専門家会合 (Expert Group on Black Carbon and Methane: EGBCM)」でも議論が盛んである。UN Environment による“The Emissions Gap Report 2017”では「2050 年までの気温上昇への SLCF の寄与は 0.6℃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 6 次評価報告書)では、SLCF が WG1 (Working Group 1: 第 1 作業部会) 報告書で単独の章として初めて取り上げられ、現在、IPCC 専門家会合で SLCF インベントリガイドラインの策定に向けて SLCF インベントリ作成の方法論が議論されている。現在の GHG 排出量と同様、今後は SLCF 排出量も UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change: 気候変動に関する国連枠組条約) に報告する制度が国際的に整えられる見通しである。

GHG 及び SLCF は様々な発生源から大気中に放出されるが、人間活動やそれに伴う化石燃料の燃焼は主要な排出源である。それゆえ、人口が密集する都市部における排出は大きな割合を占める。また、オゾンや PM_{2.5} は大気汚染物質でもあり、近年、世界で 700 万人もの人が大気汚染による早期死亡の影響を受けていると WHO (World Health Organization: 世界保健機関) から報告されている。したがって、GHG と SLCF を同時に削減する対策を普及することにより、早期に気候を安定化することに加え、清浄な大気質を多くの人々が享受でき、気候変動緩和とともに大気質改善の共便益が期待できる。

GHG や SLCF 等、人間活動から大気中に排出される物質は、燃料使用量等の統計データと燃料単位当たりの排出量データから計算でき、「排出インベントリ」と呼ぶ。一方、大気観測データを使って排出量を計算する手法があり、しばしば「トップダウン推計」と呼ばれる。高度なトップダウン推計を行うためには、良質かつ最新の観測データが重要な役割を果たし、こうした観測は、広く濃度分布を知ることができる衛星観測に加えて、正確に濃度測定をできる地上、航空機、船舶による観測が重要である。地球規模だけでなく、国や都市といった規模で GHG と SLCF の同時観測・同時解析の研究が進展している。特に、大都市での GHG 観測の必要性が高まっている。

気候モデルにおいても、GHG に加えて SLCF をモデルに取り入れて気候変化予測の信頼性を改善する試み (Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project: AerChemMIP) もなされており、SLCF の取支や気候影響に依然として残る大きな不確定性を小さくする努力がなされている (Collins *et al.*, 2017)。

本稿では、SLCF の観測とモデル研究から最新の動向を、GHG については大都市に注目した観測と

モデル研究に注目し、個別に解説する。

2. SLCF の観測

我が国の地表面オゾンの長期観測は、環境省及び地方自治体が行っている大気常時監視測定、酸性雨及び関連物質を観測している国設酸性雨測定網、気象庁が全球大気監視 (Global Atmospheric Watch: GAW) 計画で行っている観測、国立環境研究所が設置している地球環境モニタリングステーションでの観測が挙げられる。

大気常時監視測定は、大気環境や発生源の状況及び高濃度地域の把握、汚染防止対策の効果の把握等を行うとともに、全国的な汚染動向、汚染に係る経年変化等を把握することを目的としている。1976 年度からのデータ収集結果がまとめられており、2019 年度の測定局数は、1,166 局 (一般局: 1,136 局、自排局: 30 局) であった (環境省 水・大気環境局, 2020)。地表面オゾン濃度の昼間の日最高 1 時間値の年平均値の推移は、1980 年代から漸増の傾向がみられた。また、光化学オキシダント濃度の長期的な改善傾向を評価するために導入した指標 (8 時間値の日最高値の年間 99 パーセンタイル値の 3 年平均値) によれば、2006~2008 年度頃から注意報発令レベルの高い地域の地内最高値は減少傾向であったが、近年ではほぼ横ばい傾向となっている。大気常時監視測定のリアルタイムデータ及び過去 1 年間データ速報値は、大気汚染物質広域監視システム (そらまめ君) のホームページで公開されている。

国設酸性雨測定網では、酸性雨原因物質やオゾン、PM_{2.5} 等の大気汚染物質の長距離越境輸送や長期トレンド等を把握し、また、越境大気汚染や酸性沈着の影響の早期把握や将来の影響を予測することを目的としている。また、いくつかの酸性雨測定所は、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: EANET) の観測地点にも登録されており、EANET と密接に連携している。環境省が 5 年ごとに取りまとめている長期モニタリング報告書の最新版によると (環境省, 2019)、遠隔地域のオゾン年平均濃度は、2007 年度まで上昇傾向であったが、2008 年度以降は有意な増減傾向は見られていない (図 1)。この変動傾向の変化については、八方尾根における解析で気候変化が長距離輸送パターンに影響を及ぼすことが示されている (Okamoto *et al.*, 2018)。また、2008 年に「リーマン・ショック」で経済活動が落ち込み、温室効果ガスの年間排出量が減っている報告もある (Kurokawa *et al.*, 2013)。国設酸性雨測定網のデータは、上述のそらまめ君及び EANET ホームページで公開されている。

GAW の地表面オゾンデータは、ノルウェー大気研究所 (Norwegian Institute for Air Research: NILU)

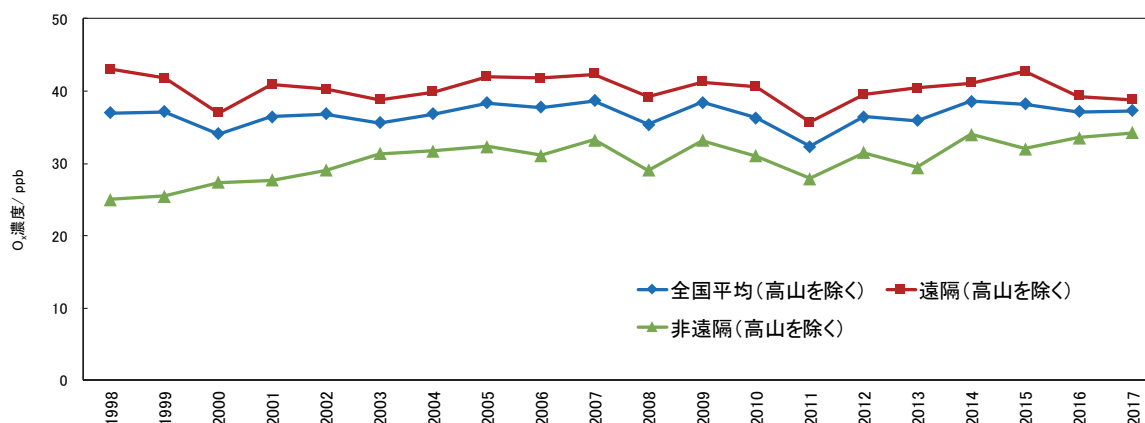


図1 国設酸性雨測定網の遠隔地域及び非遠隔地域におけるオゾン年平均濃度の経年変化。

が運営している反応性ガス世界資料センター(World Data Center for Reactive Gases: WDCRG)のホームページ、地球環境モニタリングステーションのオゾンデータについては、国立環境研究所の地球環境データベースで国設八方尾根酸性雨測定所の測定値が公開されている。

BCについては、アジア大気汚染研究センターがEANETの研究プロジェクトとして、東京、新潟、佐渡で降水及び粒子状物質中の有機炭素(Organic Carbon: OC)、元素状炭素(Elemental Carbon: EC)の長期観測を2011年より継続している。2011年～2012年に行った観測結果では、降水中ECの濃度は、東京で78.9 µg/L、佐渡で26.0 µg/L、新潟で24.6 µg/Lであった(Huo *et al.*, 2016)。降水量と粒子状物質中のECとOCの比率は、東京で最も高く、自動車排ガス等化石燃焼起源の影響が大きいことが示唆された。佐渡で冬と春に降水中のEC濃度が高かった。冬季の高濃度は燃料の燃焼によるものであり、春季の高濃度は大陸北東部でのバイオマスの燃焼によるものである可能性が考えられる。

また、海洋研究開発機構を中心とした研究グループが、中国から偏西風に乗って汚染大気が到達しやすい福江島にて、2009年～2019年にBCの長期観測を実施し、その推移から排出量とその変化を推定した(Kanaya *et al.*, 2020)。BC濃度が2010年から2018年の間に48%減少する顕著な変化を示された。この減少は、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ることから、気象要因を取り除いて排出量だけの影響を評価する解析を行った。空気塊が福江島まで達する経路上での積算降水量が1 mm以下の観測データのみを解析に用い、大気化学輸送モデルによる数値シミュレーションから風系の影響を打ち消し、残った年毎の排出量変化の要素が年率 $-5.3 \pm 0.7\%$ で顕著に減少していたことから、BC濃度変化の主要因が中国大陸におけるBC排出量の変化であることを結論付けた。

CH₄については、気象庁が綾里、南鳥島及び与那国島において、1994年から観測を行っており、GAW

の温室効果ガス世界資料センター(World Data Center for Greenhouse Gases: WDCGG)として、世界の測定地点のデータ収集も行っている(澤, 2021)。季節変動等の短い周期成分を取り除いた濃度年増加量の経年変化では、これら3地点では、1994年～2003年及び2007年以降に増加傾向が見られた。高緯度の綾里は他の地点より濃度が高く、与那国島の方が秋から春にかけて南鳥島より高くなっている。秋から春にかけての中国大陸から季節風による輸送の影響を、与那国島では強く受けるためと考えられる。国立環境研究所の地球環境データベースでは、1995年以降の落石岬、1996年以降の波照間島のCH₄測定値が公開されている。

代替フロンであるハイドロフルオロカーボン類(HFCs)もSLCFの1つに含まれ、気象庁では2020年より南鳥島で観測を行っている。世界の観測結果と比較して、HFC-134a及びHFC-152a濃度は北半球のほかの観測地点とほぼ同程度の値となっている。世界の観測結果はHFC-152aを除いて1990年代から増加傾向にあり、日本の温室効果ガス排出量は2014年以降HFCsのみ増加傾向にあることから、排出量増加が濃度増加の要因だと思われる。

SLCFに関連のある大気汚染物質の大部分は人為活動由来であり、それらの排出量は、産業構造、エネルギー消費構造、大気浄化技術の進展、排出規制の導入等の要因が組み合わさって年々変化している。また、直近ではCOVID-19パンデミックによる経済活動の変化による大気組成濃度の変動も多くの研究で指摘されている。これまで説明してきたわが国におけるSLCFの長期観測データは、大気濃度の長期変動要因解明と将来予測のための基礎データとして重要な意義があると思われる。

大気濃度の長期変動要因を正確に評価し、国際データと比較するためには、SLCF観測データの精度保証精度管理(Quality Assurance/Quality Control: QA/QC)が重要である。GAWの世界校正センターは、観測所の監査を実施し、観測基準の比較及び校正を定期的に行っている。このようにして各国で用

いられている標準ガスまたは基準器が、世界基準のスケールと長期間にわたって高精度で一致するようにしている。

EANETでは、日本及び東アジア諸国の観測所の監査と技術交流を行い、QA/QCガイドブック、大気濃度測定マニュアル等の技術文書を作成しており、モニタリング手法の標準化、国際比較し得るモニタリングデータの取得のためのQA/QC体制の構築を行っている。

国内の大気常時監視測定についても、環境大気常時監視マニュアルに従って実施することとされており、同マニュアルには自動測定機の校正方法や、紫外線吸収法(UV法)に基づいて諸外国との国際比較が定期的に行われるオゾン一次標準器に対するトレーサビリティが確保された校正体制が記載されている。現行のマニュアルが作成された2010年以前は、多くの地方自治体で中性よう化カリウム溶液を用いる吸光光度法(KI法)を基準としており、長期的変動を解析する際には、このKI法からUV法への変更による影響を考慮する必要がある。

SLCFの観測に基づく知見は、国際的な大気汚染状況の報告や、大気汚染対策と気候変動対策を同時に進めるコベネフィット・アプローチへの提言等に利用されている。EANETでは、東アジアにおけるSLCFを含む大気質や大気沈着観測や大気モデリングに関する研究をレビューし、東アジアにおける大気汚染問題の状況を取りまとめた(Network Center for EANET, 2015)。また、アジア太平洋地域大気環境改善に関するパートナーシップ(Asia Pacific Clean Air Partnership: APCAP)は、アジア太平洋地域における大気汚染の現状と具体的な政策措置について科学的見地から包括的に分析したソリューション・レポートを出版しており、EANET等の東アジアの観測データを用い、オゾン、粒子状物質が農業や生態系に及ぼす影響について記載している(UNEP, 2019)。また、同レポートでは、社会的便益を最大化しつつSDGs(Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標)の達成にも貢献する費用対効果の高い25の対策を提示している。

大気汚染が社会問題として深刻化するアジア太平洋地域の発展途上国において、SLCFの排出削減は、温暖化問題だけでなく、大気汚染問題をも同時に解決し得る非常に有効な方策となり得る。大気環境の保全がもたらす健康被害・農作物被害の低減、生態系の保護などの便益を評価する上でも、今後もSLCFの継続的な観測が重要になると考えられる。

3. SLCFのモデル研究

3.1 はじめに

SLCFの時空間変動を把握し、大気中のプロセスを理解するためには、地上や衛星からの観測と合わ

せてモデルシミュレーションが利用される。モデルは、排出、大気中の化学反応、変質、輸送、沈着過程を表現することによって、SLCFの時空間変動の再現や将来予測が可能となる。SLCFのモデルシミュレーションは、大気質や気候への影響評価や、大気汚染・温暖化対策の評価、健康や生態系への影響評価等、幅広い役割を担っている。

モデルは対象とする現象のスケールによって、都市・領域規模の大気質・気候を扱う領域モデルと、地球規模の大気汚染や気候変動を扱う全地球を対象とした全球モデルが使い分けられる。また、モデルは気象場の扱い方によって、化学輸送モデル(Chemical Transport Model: CTM)とオンラインの化学気候モデル(Chemistry Climate Model: CCM)の2種に大別される。CTMは一般的にモデル内で気象計算を含まず、風速、温度、降水量などの気象場を外部から入力することによって、大気中の化学過程と輸送・沈着過程のみを計算する。一方、CCMは、気象・気候モデルの気象計算と結合し、オンラインで大気中の化学・輸送過程を計算することによって、大気中の物質と気象・気候との相互作用を扱うことができる。

3.2 東アジア～地球規模の大気汚染

東アジアでは2000年代から主に中国における経済発展によって燃料消費量が増加し、窒素酸化物(NO_x)や二酸化硫黄、一酸化炭素(CO)、CH₄等の炭化水素等、大気汚染物質の排出量が急増した。これらの一次物質は、大気中での光化学反応等により、オゾンやPM_{2.5}を生成し大気汚染が発生する。中国の大気汚染物質は、風下に位置する日本にも運ばれ越境大気汚染を引き起こす。また、東アジア起源のオゾンやエアロゾルは偏西風等によって、米国や北極等の上空にまで長距離輸送され、地球規模の大気質や気候に影響を及ぼす。こうしたローカルな都市大気汚染を超えた広範囲に及ぶ現象は、広域大気汚染や地球規模大気汚染と呼ばれる。

東アジアにおける広域大気汚染のメカニズムを明らかにするために多数のモデル研究が行われてきた。オゾンやPM_{2.5}汚染の実態を把握し対策を立てるためには、日本や東アジア域内の大気汚染物質がどこからどれくらい来たものか(ソース・レセプター関係)を解明することが有効であり、領域規模及び全球規模CTMによって定量的評価が行われてきた(Nagashima *et al.*, 2010; Ikeda *et al.*, 2015)。オゾンやPM_{2.5}以外にも、COや酸性沈着について、同様の解析が行われている(鶴野ほか, 2013; Kajino *et al.*, 2011)。大気汚染物質の起源については、地域別の推定だけでなく、発電所や工場、自動車といった発生源の種類別に寄与を評価した研究も行われてきた(Chatani *et al.*, 2020)。

大気汚染物質の長期トレンドや年々変動の原因を解明するためにもCTMが活用され、前駆物質の排

出量の変化と気象場による影響を切り分けて評価することによって、オゾン等の長期変動の理解が進められてきた(Kurokawa *et al.*, 2009)。また、将来の大気汚染物質の排出量シナリオを用いて、オゾンやPM_{2.5}を対象に大気質の将来変化を予測したシミュレーションも行われている(Yamaji *et al.*, 2008)。

領域規模CTMの代表的なものとしてはCMAQ(Community Multiscale Air Quality: <https://www.cmascenter.org/cmaq/>)が挙げられ、国内でも利用実績が多い。全球スケールCTMでは、国内で使用されてきた代表的なものとして、日本で開発されたCHASER(Sudo *et al.*, 2002)や、GEOS-Chem(<https://geos-chem.seas.harvard.edu>)がある。CHASERについては、後述のようにオンラインのCCMとしても使用される。

モデル研究は大気汚染の実態把握やプロセス理解に不可欠であるが、CTMには観測の再現性の問題や、異なるモデル間でのシミュレーション結果のばらつきが存在する。モデルの性能を検証し、不確実性を把握して改良することを目的とした活動として、モデル間相互比較実験が行われてきた。アジアにおける大気汚染を対象としたモデル間相互比較プロジェクトとしては、MICS-Asia(Model Inter-Comparison Study for Asia)があり、10種類以上の領域規模CTMが参加している(Itahashi *et al.*, 2020a)。大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染を対象とした全球規模CTMの相互比較実験として、HTAP(Hemispheric Transport of Air Pollution)プロジェクトが行われている(HTAP, 2010)。また、日本国内の大気質シミュレーションを対象としたモデル間相互比較の取組としては、J-STREAM(Japan's Study for Reference Air Quality Modeling)がある(Chatani *et al.*, 2018)。

3.3 SLCFの気候影響

SLCFは、大気中の寿命(滞留時間)が数日~10年程度の地球温暖化に影響を及ぼす大気汚染物質を指し、2010年頃から用いられるようになった。SLCFのうち、対流圏オゾンやBC、CH₄等、正の放射強制力を持ち温暖化を促進する成分を短寿命気候汚染物質(Short-Lived Climate Pollutants: SLCP)と呼ぶこともある。近年、豪雨や干ばつ、熱波といった気候変動による極端現象が顕在化し、人的被害・経済的損失を低減するためにも温暖化抑制が急務となり、SLCFが重要視されるようになった。その背景には、CO₂をはじめとする長寿命GHGの削減のみでは、中期未来(20~30年後)の気温上昇の抑止効果が十分に現れないと予想されること、2050年以前の温暖化抑止には、大気中の寿命が短いSLCFの排出削減が有効であると考えられていることがある。

SLCFの気候への影響は、微量気体・エアロゾル成分と気候との相互作用を表現する化学・エアロゾル気候モデル(CCM)により評価される。国内で開発

が行われてきたモデルとして、MIROC-ESM-CHEM(Hajima *et al.*, 2020)があり、大気化学・エアロゾル過程に加え海陸生態系や炭素循環を含むものは地球システムモデルとも呼ばれる。気候モデルMIROCをベースとして、大気化学モデルCHASERとエアロゾルモデルSPRINTARS(Takemura *et al.*, 2005)を結合することによって、オゾンやCH₄による放射吸収、エアロゾルによる放射の散乱・吸収効果(エアロゾル・放射相互作用)と雲・降水への影響(エアロゾル・雲相互作用)が表現されている。日本ではこのほかに、気象研究所で地球システムモデル(MRI-ESM)の開発が行われている(Oshima *et al.*, 2020)。

気候モデルに関する代表的な相互比較プロジェクトとして、IPCC評価報告書に向けたCMIP(Coupled Model Intercomparison Project)があり、第6期(CMIP6)まで行われている。CMIP6の中には、SLCFと関連の深い相互比較実験として、AerChemMIP(Aerosol Chemistry Model Intercomparison Project)があり、上述の日本の気候モデルも参加した。AerChemMIPでは、エアロゾルや短寿命気体成分が過去及び将来の気候変動や大気質に及ぼす影響の評価が行われた。

モデル相互比較実験への貢献に加え、CCMを用いたSLCF研究の例として、アジアにおけるオゾン前駆物質(NO_x/NMVOCとCH₄)の同時削減が大気質改善と温暖化緩和の双方にとって有効であることを示した研究(Akimoto *et al.*, 2015)や、エアロゾルの各成分(BCと硫酸塩エアロゾル)による地上気温への影響を調べた研究がある(Takemura and Suzuki, 2019)。

3.4 まとめと今後の展望

大気汚染や地球温暖化の問題において、SLCFモデル研究がプロセス理解から大気汚染の実態解明、気候変動への影響評価、そして将来予測まで果たしてきた役割は大きい。様々なモデル相互比較実験を含む国際プロジェクトにおいても、国内で開発されてきたモデルや日本のモデル研究者が重要な貢献を行ってきた。これまで、地球環境問題としての大気汚染と気候変動は異なる分野としてそれぞれ研究されてきたが、近年はその距離が縮まっており、今後も大気質と気候変動の相互作用の研究の重要性は増すと考えられる。IPCCにおいて、第6次評価報告書からSLCFが単独の章として扱われるようになったこと、また将来的にはGHGと同じように、各国によるSLCF排出量の報告が予定されていることは、こうした動向を示している。

モデルによるSLCFの大気質や気候変動への影響評価や将来予測を高精度化するためには、排出量推計や大気中の化学・輸送・沈着過程の精緻化が不可欠である。衛星観測データとCTMを用いた研究として、データ同化による大気汚染物質の排出量推計(Miyazaki *et al.*, 2012)や再解析データセットの作成

が行われてきた(Miyazaki *et al.*, 2015; Yumimoto *et al.*, 2017)。今後、大気汚染対策や温暖化緩和策の効果を早期に検出するためにも、各種観測とCTMを用いたSLCF排出量の迅速かつ高精度な把握がますます重要になるだろう。実験や観測による大気化学・エアロゾル過程の理解に基づくモデルの高度化も引き続き求められる。エアロゾルモデリングの精緻化の例としては、CTMによる過小評価が課題となっていた二次有機エアロゾルのモデル開発・改良や(Matsui *et al.*, 2014a; Morino *et al.*, 2018)、BCとそのほかのエアロゾル成分の詳細な混合状態を表現したモデルの開発が行われてきた(Matsui *et al.*, 2014b)。

SLCFの気候変動への影響については、平均的な気温や降水量に加え、人的・経済的被害をもたらす極端現象への影響を評価することも重要である。SLCFの削減は大気質の改善をもたらす一方、冷却成分の減少は温暖化抑制効果の一部を相殺する可能性があるため、SLCF削減策全体としての影響を注意深く解析する必要がある。

計算機の発達により、モデルの高分解能化が今後に進んでいくだろう。これまで全球モデルの典型的な水平解像度は100～数100 km程度であったが、近年では10 km程度の解像度で全球シミュレーションが行われた研究もある(Goto *et al.*, 2020)。一方、領域規模CTM側は、従来の計算領域である大陸スケールを超えて北半球全体に拡張したシミュレーションも行われるようになってきている(Itahashi *et al.*, 2020b)。モデルの高分解能化は、衛星観測の水平分解能の向上によって必要性を増している面もあり、日本が2023年度に打ち上げ予定のGOSAT-GW(温室効果ガス・水循環観測技術衛星)では、最高1 kmの分解能が計画されている。GOSAT-GWでは、CO₂とCH₄に加えて二酸化窒素の観測も予定されており、短寿命から長寿命成分まで含む多成分を複合解析するために、従来別々のモデルが使用されてきたGHGと大気汚染物質(SLCF)を一緒にシミュレーションできるCTMの開発も今後期待される。

4. 都市におけるGHG観測

これまでGHGモニタリングは、沖縄県の波照間島や北海道の落石岬などCO₂排出源から離れたバックグラウンドサイトで行われてきた。これは、排出源近傍の局所的な激しい濃度変動を除き、経済統計に基づく人為起源GHG排出量インベントリが正しいと仮定した上で、全球・領域スケールの大気・陸域生態系・海洋間のGHGの動態を解析するためである。多くのCO₂排出源が点在する都市圏の大気中CO₂濃度は、バックグラウンドサイトより高いだけでなく、数分から総観規模といった様々な時間スケールで、数十から数百ppmの幅で変動する。このような都市圏内の激しいGHG濃度変動を観測し

て解析することは、これまで困難であった。

近年、都市のGHGに着目した観測研究が急速に進められている。都市のCO₂排出量モニタリングは、化石燃料起源CO₂排出量の70%以上が都市活動から排出されているため、重要であることは認識されていた。特にパリ協定が採択されて以降、グローバルストックテイクやゼロエミッション社会実現のために、排出量インベントリを検証する手段としての都市GHG観測の重要性が更に高まった。また、CO₂排出源を評価する指標となる関連物質の観測とその解析の拡充、安定性に優れたキャビティリングダウン分光法(Cavity Ring Down Spectroscopy: CRDS)の普及などのGHG分析技術の進展、そして排出インベントリと大気輸送モデルを用いた逆解析の高精度化といった研究開発が進んだことによって、都市スケールの解析が可能となった。

都市におけるGHG観測で最長レコードをもつのがソルトレイクシティである(Lin *et al.*, 2018)。ソルトレイクシティでは、固定点観測に加えて、路面電車にCRDS分析計を搭載し移動体観測を実施している。また、Googleストリートビュー車を用いた路地スケールの観測も試験している。このように、定点や移動体でCO₂やCH₄濃度を高精度観測するのが定石であり、世界中の多数の都市で大気観測が進められている(文献は省略)。国立環境研究所も、インドネシアのジャカルタ大都市圏を対象にしてGHGと大気汚染物質の総合的大気観測を開始した(Nishihashi *et al.*, 2019)。

GHG濃度に加えて関連物質を観測することで、大気観測からCO₂排出源を推定するアプローチの先駆となったのが、インディアナポリスで行われたIndianapolis Flux Experiment(INFLUX)プロジェクトである(Turnbull *et al.*, 2015)。大気観測からCO₂排出量を求めるためには、主に化石燃料燃焼に起因する人為起源CO₂と、生態系が吸収・排出するCO₂(植物の光合成・呼吸に加えて人間呼吸も含む)を分離評価することが必要となる。INFLUXプロジェクトでは、CO₂の放射性炭素同位体比(¹⁴CO₂)とCO濃度を用いて化石燃料起源CO₂量の推定を行った。¹⁴CO₂は、炭素の年代に関する情報を含むことから、化石燃料起源CO₂を直接捉えることのできるトレーサである。また、COは燃焼過程を推定するトレーサとして利用することが可能である。

国立環境研究所、産業技術総合研究所、防衛大学校などの研究グループは、世界最大規模の東京大都市圏をターゲットとして、東京スカイツリーや東海大学代々木キャンパスなどでGHGと関連物質の大気観測を実施している(寺尾・石戸谷, 2021)。CO₂とCH₄濃度の高精度観測に加え、¹⁴CO₂とCO、そして大気中酸素濃度を観測しているのが強みである。酸素濃度観測は、生態系CO₂と化石燃料CO₂を分離することはできないが、生態系CO₂を仮定すること

で石油、都市ガス、石炭を分離することが可能である (Ishidoya *et al.*, 2020)。また、代々木では CO₂ フラックスの直接観測も実施している。このように、INFLUX や東京観測が行っている高精度で多成分な大気観測は、CO₂ 排出量の起源別推定に非常に有効であり重要なアプローチであるが、観測コストが高く、観測地点数を増やすのには限界がある。

全く異なるアプローチとして、都市圏内に低コストの簡易 CO₂ センサを大量に配置する観測が実施されている。BERkeley Atmospheric CO₂ Observation Network (BEACO₂N) では、低コストの NDIR (Non-dispersive Infrared: 非分散型赤外分光法) センサをオークランド周辺に配置し、都市内の CO₂ 濃度の時間変化と分布を捉えることに成功した (Shusterman *et al.*, 2016)。現在では、サンフランシスコを含めたベイエリアに 70 個以上のセンサを配置してモニタリングを行っている。低コストセンサを用いた観測ネットワークの構築には、装置間のバイアス補正、気温変化に対する補正、CRDS など高精度センサでの検定、などが必須となる。

2020 年、新型コロナ感染が世界中に拡大した。いくつかの都市観測は、新型コロナ感染拡大に伴う活動規制の影響を捉えることに成功した。代々木における CO₂ フラックス、酸素濃度、CO 濃度観測を用いて 2020 年 4~5 月の緊急事態宣言期間における代々木街区の CO₂ 排出を排出源別に評価した結果、同宣言下の CO₂ 排出総量は例年と比較して約 20% 低下しており、その主要因は自動車などの石油消費の減少 (約 40%) であること、一方で外出自粛の影響により都市ガス消費は若干増加 (約 20%) したことが示された (Sugawara *et al.*, 2021)。また、BEACO₂N 観測データと大気輸送モデルを用いた逆計算の結果から、サンフランシスコベイエリアでは外出禁止発令中に人為起源 CO₂ 排出量が 30% 減少し、その主要因は交通の減少 (48%) であることが示された (Turner *et al.*, 2020)。これらにより、都市大気 GHG 観測によって排出量変動を捉えることができることが実証された。

大気を測るだけでは GHG 排出量は減らないが、脱炭素社会に向けて、都市からの排出量が減少していくさま (年々変動やトレンド) を直接監視でき、その変動を迅速にとらえることができるのが大気モニタリングである。そのため、都市の GHG 観測はキャンペーン的に行うのではなく、バックグラウンドモニタリングと同様に維持していく必要がある。上述したように、都市の GHG 観測のデザインは、①限られた高精度観測機器を定点もしくは移動体に搭載する、②濃度以外の他成分観測を充実させる、③低コストセンサを大量に配置する、という流れがある。GHG 排出量モニタリングに必要な観測精度と観測数、そしてコスト (人と予算) を考えつつ、十分戦略を練る必要がある (著者自身、どういうデザ

インが最適なのかは未だ判断できていない)。また、都市からの GHG 排出を考える上では CH₄ も重要である。都市域では、インベントリには反映されていないガス配管からのリークなどがあると考えられている。CH₄ 濃度観測を充実させるとともに、排出起源推定のための同位体比連続観測などもチャレンジしていく必要がある。

日本国内では、都市 GHG 観測を進めていく上で適した観測装置があまり無いという問題もある。例えば CO₂ の場合、バックグラウンドサイトでは 0.1 ppm の精度が必須だが、都市観測では 1 ppm 程度で十分な場合が多い。ところが日本国内では、「高精度だが高価すぎるセンサ」と「安価だが精度が悪すぎるセンサ」に二分化される。例えば、CRDS は高精度で安定性が高いため GHG 分析業界を席巻しているが、米国製であるため、日本では非常に高価で購入せざるを得ないのが現状である。国内企業に都市 GHG 観測に適したスペック・価格のセンサを開発していただきたいと強く望んでいる。

5. 大都市 GHG のモデル研究

世界人口の約 60% が居住し、大きな経済活動の場である都市域からの CO₂ 排出量は、消費ベースで全球の化石燃料燃焼起源の CO₂ 排出量の約 4 分の 3 を占めており (Seto *et al.*, 2014)、削減ポテンシャルは高い。このポテンシャルを最大限に活用して世界の CO₂ 排出量を削減することは、パリ協定の目標達成に向けて大きな鍵となるが、排出削減の実効性を担保するためには都市やその周辺における排出量の推定が必須となる。この 10 数年で、地上・航空機・衛星などの観測プラットフォームが急速に利用可能となり、排出量推定に有用と期待される大気 GHG データが得られるようになってきた。我が国は地上や航空機を用いた高精度の長期観測や、衛星による温室効果ガス観測を推進しており、特に世界の大気濃度を一様に把握できる衛星観測を活用した国際社会への貢献が大きく期待されている。加えて、世界気象機関 (World Meteorological Organization: WMO) の統合全球温室効果ガス情報システム (Integrated Global Greenhouse Gas Information System: IG3IS) が、都市域等の排出量定量化のために GHG 観測と大気輸送モデルの統合利用を推進するとしており、日本の関係機関の輸送モデルへの期待も高いと考えられる。ここでは、都市域等の排出量定量化に利用されてきた GHG モデル研究の現状と将来展望について述べる。

大都市における GHG 濃度や排出量を把握するためのモデル研究手法は、(1)都市における排出量を空間的・時間的に詳細に再現し推定する排出モデル、(2)格子点ごとの濃度を計算するオイラー型の輸送モデルとフォワード計算やデータ同化を用いた

濃度推定手法、(3)オイラー型モデルで推定されたGHG濃度と物質の動きを追跡するラグランジュ型輸送モデルを組み合わせ、都市を1つのソースとしてGHG濃度と排出量を結びつける手法、(4)オイラー型の輸送モデルと排出量の最適化手法を組み合わせ、GHG観測から排出量マップを作成する逆解析法、以上の4つに大別される。

都市における排出量を推定する排出モデルは近年可能となってきたもので、人口や自動車保有数などの活動ごとデータや個々の排出源に関連するプロセスとその量についての詳細な情報が用いられる(Sovacool and Brown, 2010; Hoornweg *et al.*, 2011)。発電所や工場等の点源(ポイントソース)や交通機関等の線源(ラインソース)の位置は地図情報等を用いて特定することができ、空間的に詳細な排出量マップを作成できる。こうした手法を用いて、米国全体の排出量マップであるVulcan排出量データが作成され、ロサンゼルスやインディアナポリスなどの都市域における詳細な排出量マップ(Hestia)作成時には都市域の総排出量として用いられた(Gurney *et al.*, 2009)。一方で、個々の排出源に関連する全ての排出プロセスの把握が必要であるため、定量化が難しいという課題もある(Turnbull *et al.*, 2019)。国内においては、大阪大学による多次元大阪解像インベントリ(The Multi-resolution Osaka-Resolving Inventory: MORI-Grid)作成時に排出モデルが利用された例がある(森, 2016)。

オイラー型の輸送モデルとフォワード計算やデータ同化を用いた濃度推定手法は、全球・領域モデルに組み込まれるようになってきた炭素循環モデルによるGHGシミュレーション結果を用いるものである。モデルの気象場を観測された気象場に合わせる(ナッジング)ことで、実際の気象条件におけるGHG輸送計算を行うことができる。データ同化は、GHG観測データと輸送モデルのシミュレーションを用いて最適な3次元GHG濃度を推定するもので、全球モデルと観測情報を組み合わせた準リアルタイムな濃度モニタリングの試みがある(Agustí-Panareda *et al.*, 2014; Massart *et al.*, 2014; Flemming *et al.*, 2015; 2017; Weir *et al.*, 2021)。このうち、欧州中期予報センター(European Center for Medium-range Weather Forecasts: ECMWF)のCopernicus Atmosphere Monitoring Service(CAMS)全球オペレーショナルデータでは、GHGや他の化学種濃度を中心に運用が行われている。なお、アンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化では、アンサンブル数分だけ輸送モデルの実行数が増えるため、計算コストが高く解像度はなかなか上げられないという課題がある。

大気観測とラグランジュ型輸送モデルを組み合わせた手法は、都市圏全体の排出量推定に用いられる。米・ソルトレークシティを対象とした排出量推

定では、領域気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting)によるCO₂シミュレーション結果にラグランジュ型輸送モデルSTILT(Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport)が用いられた(McKain *et al.*, 2012)。STILTでは、ソース・レセプター関係を考慮することで、排出量と濃度変化を直接的に結びつけられる。

大気GHG観測から排出量マップを作成する逆解析法では、全球気候モデルに組み込まれた炭素循環モデルを用いて全球でのCO₂排出量推定値が求められている(Takagi *et al.*, 2011; Maksyutov *et al.*, 2013; Niwa *et al.*, 2017)。逆解析法による排出量推定では、点源等の位置までは推定できないため、国別や地域別といった広域の排出量マップの作成に向いており、都市内部の排出量マップの作成は難しい。

都市内部の詳細な排出量マップは、活動度データや排出モデル等で作成されたものが利用されるものの、そうした排出量データを入力した領域モデルによる都市域の高解像度計算が行われた例がある(McKain *et al.*, 2012)。領域モデルでは可能となってきた高解像度計算を全球モデルでも行うことができるようになれば、気候変動対策に取り組む大都市で構成されるC40(<https://www.c40.org/>)の都市域同時シミュレーションにもつながる。今後打ち上げが予定されている温室効果ガス・水循環観測技術衛星(GOSAT-GW)による都市域GHGの高解像度観測などと組み合わせ、C40都市域の大気濃度を一様に把握していくなど、将来的な都市域GHG研究の発展が期待できる。GOSAT-GWではCO₂、CH₄に加え二酸化窒素(NO₂)の高解像度観測(精密観測モードで1~3 km)が予定されており、化石燃料燃焼起源で放出されるCO₂と同じく燃焼起源であるものの生物起源の影響を受けないNO₂を同時観測することによりCO₂排出シグナルの検出性能向上が期待されている。日本の全球雲解像モデル非静力学正20面体大気モデル(Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: NICAM, Tomita and Satoh, 2004; Satoh *et al.*, 2008; 2014)は、近年、エアロゾル・炭素循環・大気化学へも拡張されており(例えばNiwa *et al.*, 2011)、高解像度の計算実績を上げつつあることから、将来の都市域GHG高解像度観測をサポートするための全球高解像度計算における活用が期待できる。ただし新たな課題として、CO₂輸送を扱う炭素循環モデルとNO₂等の化学反応を扱うモデルの統合、生態系によるCO₂吸収を扱う植生モデルの取込み、衛星サウンディングのフットプリントより小さいモデル格子へデータ同化する際の手法開発、高解像度計算時に数値不安定を起ささない計算手法の確立などが浮かび上がる。これら全ての課題の克服には時間を要するかもしれないが技術開発を鋭意続けていく必要がある。

引用文献

- Agustí-Panareda, A., Massart, S., Chevallier, F., et al. (2014) Forecasting global atmospheric CO₂. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 11959–11983. <https://doi.org/10.5194/acp-14-11959-2014>
- Akimoto, H., Kurokawa, J., Sudo, K., et al. (2015) SLCP co-control approach in East Asia: Tropospheric ozone reduction strategy by simultaneous reduction of NO_x/NMVOC and methane. *Atmospheric Environment*, 122, 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.003>
- Chatani, S., Shimadera, H., Itahashi, S., et al. (2020) Comprehensive analyses of source sensitivities and apportionments of PM_{2.5} and ozone over Japan via multiple numerical techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 10311–10329. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10311-2020>
- Chatani, S., Yamaji, K., Sakurai, T., et al. (2018) Overview of model inter-comparison in Japan's study for reference air quality modeling (J-STREAM). *Atmosphere*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.3390/atmos9010019>
- Collins, W. J., Lamarque, J.-F., Schulz, M., et al. (2017) AerChemMIP: quantifying the effects of chemistry and aerosols in CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 10, 585–607. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-585-2017>
- Flemming, J., Benedetti, A., Inness, A., et al. (2017) The CAMS interim Reanalysis of Carbon Monoxide, Ozone and Aerosol for 2003–2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 1945–1983. <https://doi.org/10.5194/acp-17-1945-2017>
- Flemming, J., Huijnen, V., Arteta, J., et al. (2015) Tropospheric chemistry in the integrated forecasting system of ECMWF. *Geoscientific Model Development*, 8, 975–1003. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-975-2015>
- Goto, D., Sato, Y., Yashiro, H., et al. (2020) Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14 km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geoscientific Model Development*, 13, 3731–3768. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3731-2020>
- Gurney, K. R., Mendoza, D., Zhou, Y., et al. (2009) High resolution fossil fuel combustion CO₂ emissions fluxes for the United States. *Environmental Science and Technology*, 43, 5535–5541. <https://doi.org/10.1021/es900806c>
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., et al. (2020) Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscience Model Development*, 13, 2197–2244. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>
- Hoornweg, D., Sugar, L. and Gómez, T. C. L. (2011) Cities and greenhouse gas emissions: moving forward. *Environment and Urbanization*, 23(1), 207–227. <https://doi.org/10.1177/0956247810392270>
- HTAP (2010) Hemispheric transport of air pollution 2010: Part A: Ozone and particulate matter. In: Dentener, F., Keating, T. and Akimoto, H. (eds.) *Air Pollution Studies*, No.17, Economic Commission for Europe, Geneva.
- Huo, M., Sato, K., Ohizumi, T., Akimoto, H. and Takahashi, K. (2016) Characteristics of carbonaceous components in precipitation and atmospheric particle at Japanese sites. *Atmospheric Environment*, 146, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.017>
- Ikeda, K., Yamaji, K., Kanaya, Y., et al. (2015) Source region attribution of PM_{2.5} mass concentrations over Japan. *Geochemical Journal*, 49(2), 185–194. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0344>
- Ishidoya, S., Sugawara, H., Terao, Y., et al. (2020) O₂: CO₂ exchange ratio for net turbulent flux observed in an urban area of Tokyo, Japan, and its application to an evaluation of anthropogenic CO₂ emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 5293–5308. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5293-2020>
- Itahashi, S., Ge, B., Sato, K., et al. (2020a) MICS-Asia III: overview of model intercomparison and evaluation of acid deposition over Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 2667–2693. <https://doi.org/10.5194/acp-20-2667-2020>
- Itahashi, S., Mathur, R., Hogrefe, C., et al. (2020b) Modeling stratospheric intrusion and trans-Pacific transport on tropospheric ozone using hemispheric CMAQ during April 2010: Part 1: Model evaluation and air mass characterization for stratosphere-troposphere transport. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 3373–3396. <https://doi.org/10.5194/acp-20-3373-2020>
- Kajino, M., Ueda, H., Sato, K., et al. (2011) Spatial distribution of the source-receptor relationship of sulfur in Northeast Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 6475–6491. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6475-2011>
- Kanaya, Y., Yamaji, K., Miyakawa, T., et al. (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009–2019 observations on Fukue Island, Japan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 6339–6356. <https://doi.org/10.5194/acp-20-6339-2020>

- 環境省(2019)越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書(平成 25~29 年度). <http://www.env.go.jp/air/acidrain/monitoring/rep4.html>(2021 年 9 月 1 日確認)
- 環境省 水・大気環境局(2020)令和元年度大気汚染物質(有害大気汚染物質等を除く)に係る常時監視測定結果. https://www.env.go.jp/air/mat01R1_rep.pdf(2021 年 9 月 1 日確認)
- Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., et al. (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000–2008: Regional emission inventory in ASia (REAS) version 2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 11019–11058. <https://doi.org/10.5194/acp-13-11019-2013>
- Kurokawa, J., Ohara, T., Uno, I., et al. (2009) Influence of meteorological variability on interannual variations of springtime boundary layer ozone over Japan during 1981–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 6287–6304. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6287-2009>
- Lin, J. C., Mitchell, L., Crosman, E. et al. (2018) CO₂ and carbon emissions from cities: Linkages to air quality, socioeconomic activity, and stakeholders in the Salt Lake City urban area, *Bulletin of American Meteorological Society*, 99(11), 2325–2339. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0037.1>
- Maksyutov, S., Takagi, H., Valsal, V. K., et al. (2013) Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9351–9373. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9351-2013>
- Massart, S., Agustí-Panareda, A., Aben, I., et al. (2014) Assimilation of atmospheric methane products into the MACC-II system: from SCIAMACHY to TANSO and IASI. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 6139–6158. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6139-2014>
- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., et al. (2014a) Volatility basis-set approach simulation of organic aerosol formation in East Asia: implications for anthropogenic-biogenic interaction and controllable amounts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 9513–9535. <https://doi.org/10.5194/acp-14-9513-2014>
- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., et al. (2014b) Development of an aerosol microphysical module: Aerosol Two-dimensional bin module for foRmation and Aging Simulation (ATRAS). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 10315–10331. <https://doi.org/10.5194/acp-14-10315-2014>
- McKain, K., Wofsy, S. C., Nehr Korn, T., et al. (2012) Assessment of ground-based atmospheric observations for verification of greenhouse gas emissions from an urban region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(22), 8423–8428. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116645109>
- Miyazaki, K., Eskes, H. J. and Sudo, K. (2012) Global NO_x emission estimates derived from an assimilation of OMI tropospheric NO₂ columns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 2263–2288. <https://doi.org/10.5194/acp-12-2263-2012>
- Miyazaki, K., Eskes, H. J. and Sudo, K. (2015) A tropospheric chemistry reanalysis for the years 2005–2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 8315–8348. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8315-2015>
- 森 豊(2016)大阪府における高時空間分解能人為起源二酸化炭素排出インベントリの開発, 大阪大学大学院 修士論文. <http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seege/seege/material/2016/mori.pdf>(2021 年 10 月 26 日確認)
- Morino, Y., Chatani, S., Tanabe, K., et al. (2018) Contributions of condensable particulate matter to atmospheric organic aerosol over Japan. *Environmental Science & Technology*, 52(15), 8456–8466. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01285>
- Nagashima, T., Ohara, T., Sudo, K., et al. (2010) The relative importance of various source regions on East Asian surface ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11305–11322. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11305-2010>
- Network Center for EANET (2015) Task Force on Research Coordination of EANET: Review on the State of Air Pollution in East Asia, p.411, Niigata, Japan.
- Nishihashi, M., Mukai, H., Terao, Y., et al. (2019) Greenhouse gases and air pollutants monitoring project around Jakarta megacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012038>
- Niwa, Y., Tomita, H., Satoh, M. and Imasu, R. (2011) A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 89, 255–268. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2011-306>
- Niwa, Y., Tomita, H., Satoh, M., et al. (2017) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0): 1, Off-line forward and adjoint transport models. *Geoscientific Model Development*, 10, 1157–1174. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1157-2017>
- Okamoto S., Tanimoto, H., Hirota, N., et al. (2018)

- Decadal shifts in wind patterns reduced continental outflow and suppressed ozone trend in the 2010s in the lower troposphere over Japan. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2018JD029266>
- Oshima, N., Yukimoto, S., Deushi, M., et al. (2020) Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 38. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00348-w>
- Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., et al. (2008) Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, 227, 3486–3514. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.02.006>
- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., et al. (2014) The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
- 澤 庸介 (2021) 気象庁における温室効果ガス観測. 地球環境, 26, 3–12.
- Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., et al. (2014) Human settlements, infrastructure, and spatial planning. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., et al. (eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge/New York.
- Shindell, D., Kuylenstierna J., Vignati, E., et al. (2012) Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, 335, 183–189. <https://doi.org/10.1126/science.1210026>
- Shusterman, A. A., Teige, V. E., Turner, A. J., et al. (2016) The BERkeley atmospheric CO₂ observation network: initial evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 13449–13463. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13449-2016>
- Sovacool, B. K. and Brown, M. A. (2010) Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 38 (9), 4856–4869.
- Sudo, K., Takahashi, M., Kurokawa, J., et al. (2002) CHASER: A global chemical model of the troposphere1, Model description. *Journal of Geophysical Research*, 107(D17), 4339. <https://doi.org/10.1029/2001JD001113>
- Sugawara, H., Ishidoya, S., Terao, Y., et al. (2021) Anthropogenic CO₂ emissions changes in an urban area of Tokyo, Japan, due to the COVID-19 pandemic: A case study during the state of emergency in April–May 2020. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092600. <https://doi.org/10.1029/2021GL092600>
- Takagi, H., Saeki, T., Oda, T., et al. (2011) On the benefit of GOSAT observations to the estimation of regional CO₂ fluxes, *SOLA*, 7, 161–164. <https://doi.org/10.2151/sola.2011-041>
- Takemura, T., Nozawa, T., Emori, S., et al. (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *Journal of Geophysical Research*, 110, D02202. <https://doi.org/10.1029/2004JD005029>
- Takemura, T. and Suzuki, K. (2019) Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions. *Scientific Reports*, 9, 4419. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41181-6>
- 寺尾有希夫・石戸谷重之(2021)大都市における温室効果ガスと関連物質の大気観測. 大気化学研究, 45 (045A01).
- Tomita, H. and Satoh, M. (2004) A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dynamics Research*, 34, 357–400. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2004.03.003>
- Turnbull, J. C., Sweenet, C., Karion, A., et al. (2015) Toward quantification and source sector identification of fossil fuel CO₂ emissions from an urban area: Results from the INFLUX experiment. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 120, 292–312. <https://doi.org/10.1002/2014JD022555>
- Turner, A. J., Kim, J., Fitzmaurice, H., et al. (2020). Observed impacts of COVID-19 on urban CO₂ emissions. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090037. <https://doi.org/10.1029/2020GL090037>
- UNEP (2019) Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions. United Nations Environment Programme (UNEP), ISBN: 978-92-807-3725-7
- 鵜野伊津志・弓本桂也・大原利真ほか(2013)タグ付き CO 輸送モデルを用いたアジア域のソース・リセプター解析. 大気環境学会誌, 48, 123–132. <https://doi.org/10.11298/taiki.48.123>
- Weir, B., Ott, L. E., Collatz, G. J., et al. (2021) Bias-correcting carbon fluxes derived from land-surface satellite data for retrospective and near-real-time assimilation system. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 9609–9628. <https://doi.org/10.5194/acp-21-9609-2021>
- Yamaji, K., Ohara, T., Uno, I., et al. (2008) Future prediction of surface ozone over east Asia using

models-3 community multiscale air quality modeling system and regional emission inventory in Asia. *Journal of Geophysical Research*, 113, D08306. <https://doi.org/10.1029/2007JD008663>

Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Oshima, N., et al. (2017) JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0. *Geoscience Model Development*, 10, 3225–3253. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3225-2017>



佐藤 啓市 / Keiichi SATO

一般財団法人日本環境衛生センターアジア大気汚染研究センター大気圏研究部部长。1995年大阪府立大学工学部卒業。2003年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了，博士(工学)。2003年国立環境研究所 NIES ポスドクフェロー。

2005年中央大学理工学部助手・助教。2008年アジア大気汚染研究センター入所。2021年より現職。専門は大気環境化学で，東アジア地域におけるオゾン，微小粒子状物質，酸性物質の時空間変動解析や大気沈着量推計についての研究を行っている。(本稿2章を執筆)



池田 恒平 / Kohei IKEDA

国立環境研究所地球システム領域・主任研究員。2005年神戸大学理学部卒業。2011年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了，理学(博士)。2011年海洋研究開発機構ポスドクドクトラル研究員。2014年国立環境研究所特別研究員。同研究所

研究員を経て2020年より現職。専門は大気化学で，アジアや北極域における大気汚染物質の発生源推定や長距離輸送過程，大気質と気候変動の相互作用についてモデル研究を行っている。(本稿3章を執筆)



寺尾 有希夫 / Yukio TERAO

1997年筑波大学第一学群自然科学類卒業。2003年同大学院博士課程地球科学研究科修了。博士(理学)。2003年国立環境研究所 NIES ポスドクフェロー，2004–2007年ハーバード大学理工学部ポスドクフェロー，2007年から国立環境研究所

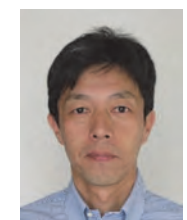
NIES 特別研究員，現在主任研究員。専門は大気科学で，温室効果ガス濃度及び炭素同位体比の地上観測を国内外で実施している。(本稿4章を執筆)



山下 陽介 / Yousuke YAMASHITA

2004年筑波大学自然科学類卒業。2009年東京大学理学系研究科博士課程修了。2009年同研究科より博士(理学)号授与。日本学術振興会特別研究員や海外特別研究員，国立環境研究所の特別研究員，海洋研究開発機構の特任研究員などを

経て，2020年より国立環境研究所の特別研究員。専門は気象学，大気化学，計算科学など広い意味での大気科学で，モデリングや観測データ解析を中心に研究を行っている。(本稿5章を執筆)



町田 敏暢 / Toshinobu MACHIDA

国立環境研究所地球システム領域大気・海洋モニタリング推進室長。1988年東北大学理学部卒業。1993年東北大学大学院理学研究科博士課程(地球物理学専攻)修了。博士(理学)。1993年国立環境研究所入所。2006年より現職。東北大学

大学院環境科学研究科客員教授併任。専門は大気中の温室効果ガスの観測を通じたグローバルな循環解明研究。特に航空機を利用した上空における観測を推進している。



谷本 浩志 / Hiroshi TANIMOTO

1996年東京大学理学部卒業。2001年同大学院理学系研究科博士課程修了。2001年同研究科より博士(理学)号授与。2001年国立環境研究所研究員，主任研究員を経て，2010年より室長，2021年より気候変動・大気質研究プログラムの総括

を務める。専門は大気化学で，地球規模の大気質について地上観測・モデル・衛星観測を統合的に利用した研究を行うとともに，IGACやCEOS等の国際プロジェクトの共同代表を務め，国際連携を推進している。(本稿1章を執筆)