

大気化学研究

Archives of Atmospheric Chemistry Research

第 50 号

日本大気化学会

Japan Society of Atmospheric Chemistry

目次

総説

Article No.

—トピックス:「ドローンを活用した大気環境計測」—

ドローンを活用した大気環境計測の新展開	猪上 淳	050A01
無人航空機(UAV)を用いた温室効果ガス観測の進展	井上 誠, 永吉 武志	050A02
産業用ドローンの開発と環境探査への展開	小野島 大介	050A03

第 19 回日本大気化学会奨励賞受賞記念論文

化学気候モデル CHASER を応用した大気微量成分とその変動の研究	関谷 高志	050A04
ペルオキシラジカルの速度論的研究およびその大気化学への応用	河野 七瀬	050A05

会員からのお知らせ

第 10 回酸性雨国際会議 ACID RAIN 2020 の開催報告		
..... 黒川 純一, 佐瀬 裕之, 佐藤 啓市		050N01
2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific の開催概要と運営所感		
..... 板橋 秀一, 大原 利真, 茶谷 聡, 櫻井 達也, 伊藤 美羽,		
..... 上田 佳代, 大島 長, 黒川 純一, 佐藤 啓市, 嶋寺 光, 菅田 誠治,		
..... 速水 洋, 森野 悠, 山地 一代, 山村 由貴, 山本 重一		050N02
2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific 参加報告		
..... 河野 なつ美, 永島 達也		050N03
書評『身近な気象のふしぎ』	関山 剛	050N04
書評『点発生源からのメソスケール拡散シミュレーション		
—福島第一原子力発電所事故をふまえて—』	滝川 雅之	050N05

学会からのお知らせ

第 28 回大気化学討論会開催報告		
..... 中山 智喜, 長濱 智生, 竹谷 文一, 入江 仁士, 藪下 彰啓,		
..... 江口 菜穂, 原 圭一郎, 石戸谷 重之, 江波 進一		050N06
日本地球惑星科学連合 2024 年大会(JpGU2024)での大気化学セッション開催のお知らせ		
..... 入江 仁士, 中山 智喜, 石戸谷 重之, 江波 進一		050N07
第 19 回日本大気化学会奨励賞の選考結果について	日本大気化学会 運営委員会	050N08
日本大気化学会会員集会プログラム	日本大気化学会 運営委員会	050N09
第 33, 34 回日本大気化学会運営委員会議事録	日本大気化学会 運営委員会	050N10

記事のご投稿について

論文や記事のご投稿をご検討されている方は、事前に本誌編集委員または日本大気化学会運営委員までご相談下さい。

大気化学研究編集委員：

大畑祥(共同編集長)，坂本陽介(共同編集長)，上田紗也子，佐伯田鶴，染谷有

日本大気化学会運営委員(第13期，2023年7月1日から)：

金谷有剛(海洋研究開発機構)，岩本洋子(広島大学)，石島健太郎(気象研究所)，
石戸谷重之(産業技術総合研究所)，入江仁士(千葉大学)，江口菜穂(九州大学)，
江波進一(筑波大学)，大畑祥(名古屋大学)，坂本陽介(国立環境研究所)，
竹谷文一(海洋研究開発機構)，中山智喜(長崎大学)，町田敏暢(国立環境研究所)，
宮崎雄三(北海道大学)

ドローンを活用した大気環境計測の新展開

New development of meteorological measurements using UAVs

猪上淳^{1,2*}

小型無人回転翼機(ドローン)の測量や物流分野での社会実装が進む中、大気環境研究分野においてはその活用が十分に普及していない状況である。研究者自らが機体の運用を行い、自由な発想の下で研究開発をすることが望まれる。機体の仕組み、法令遵守、安全対策を研究者自らが学ぶことで、実現可能な観測や必要な観測装置の開発アイデアが生まれ、産学連携のイノベーションに繋がる。本稿では筆者がここ数年携わってきたドローンの運用に関して、操縦技能と法令、室内・野外実験、搭載する気象センサーの自由度と限界などを紹介し、ドローンを大気環境計測の一手段として本格的に導入するための道筋を紹介する。

1. はじめに

一般にドローンは無人航空機の中でも、無人回転翼機(4枚回転翼や6枚回転翼)の部類に入る。市販のドローンは搭載電池の制限から1時間未満の航続時間のものが大半であり、無人固定翼機の利用形態(数時間から数十時間、数百 km の航続距離)とは大きく異なる。本稿では、研究者が通常獲得できる科学研究費で現実的に購入可能な100万円以下のドローンで、どこまで研究者自らの創意工夫によって必要な大気環境計測を実現できるかを、筆者の経験に基づいて解説する。これまでの開発に関する流れは猪上[2023]でも紹介しているので参照されたい。

2. ドローンを初めて手にする

筆者は数年前までドローンに関しては全くの素人であったが、2019年に海洋地球研究船「みらい」による北極海航海で海水の空撮を行う目的で色々な準備を始めた。最初は自宅で手軽に扱える1万円程度のカメラ付きホビードローン(Tello, Ryze 社)を練習用として準備した。位置制御がしっかりしており、操縦装置のタブレットから指を離しても流されずにホバリング

することに感動した。操縦アプリの完成度が高く、特別な技能の必要性を感じなかった。一方で、スティック操作で常に位置制御を微調整する必要のあるホビードローンの役割も重要である(例えば HS170, Holy Stone 社)。これは GPS 飛行ができなくなった事態の対処訓練になる。このような自宅や職場での屋内練習は、機体を壊してしまった時の予算的・精神的なダメージが小さいため、費用対効果の優れた練習法だと思われる。

3. ドローンスクールに通う

自宅や職場の屋内で練習を積み重ねると、次は屋外で実践的に使うドローンの購入を考えるだろう。DJI 社の各種ラインナップは数万円から数十万円の価格帯で性能も安定しているので、研究費で購入するものとしては現実的なものであろう。問題は、どこで飛ばせるのか、どのような飛行をしてはいけないのかなど、初心者がドローンの利用を躊躇するハードルがいくつかあることである。いずれにしても購入しようと思ったら、まず所属機関の事務に機体登録に関することを問い合わせる。操縦者や機体のシリアル番号、

改造の有無などを国土交通省に登録し、機体に必要な処置を施す(リモート ID 機器の搭載、登録番号の貼付など)。わずかな諸費用が発生するのでその点も注意が必要である。

それ以外のハードルは時間とお金を投じてリスクリソグするのが良いだろう。最も手っ取り早いのは、民間で行われている一日体験飛行で、ドローンの飛行メカニズム、航空法で定められた飛行方法、安全管理、航空局等への申請方法などを座学で大まかに半日学び、午後に体育館やグランドなどで基本的な操縦方法を実地で学ぶ(受講料:数万円程度)。さらに本格的に運用を検討している方は、いわゆるドローンスクールに数日間通い、筆記・実技試験を経て、民間団体のライセンス取得を行う(JUIDA, DPA, DJI Camp など)。筆者の場合は、JUIDA(日本 UAS 産業振興協議会)の無人航空機操縦技能証明証、安全運航管理者証明証、夜間・第三者物件飛行オプション、認定スクール講師証までを段階的に取得した。この類の証明書があると、航空局の飛行申請(例えば 150 m 以上の高度での飛行、夜間飛行、第三者・第三者物件 30 m 以内の飛行)で比較的容易に許可・承認を得られる(これは逆に、申請のための法令を熟知しているため申請内容に漏れが少なくなるからとも言える)。これらのライセンスは自動車免許と似た形の運用で、JUIDA の場合 2 年に一度、更新講習と更新費用が発生する。これは、頻繁に改定されるドローンに関する法令等を理解し、安全な運用を継続するために重要である。筆者の所属先の場合、その更新料は研究費から支払えた実績がある。

令和 4 年までは民間団体が独自のドローン操縦資格を導入していたが、令和 5 年からは国家資格として一等無人航空機操縦士、二等無人航空機操縦士の区分ができたが、従来の民間操縦資格とかなり類似した知識・技能を必要とする部分がある(筆者は複数のライセンスを保持するメリットを感じないため国家資格は現段階では取得していない)。

4. 屋外で飛ばしてみる

座学で学べばわかるが、ドローンは東京 23 区内では基本的に屋外で飛ばせない。飛ばすための場所探しに苦慮することが多い。郊外の人口密集地区ではないグランドや実験場などで経験値を積むのが効果的である。高度 150 m 未満の日中の一般的な空撮飛行であれば基本的には許可・承認の必要な飛行には当たらない(無改造・目視内飛行で、第三者や第三者物件が付近になく、吊り下げや物件投下なしの状態)。操縦中に機体を水平・鉛直方向に目で追うことが意外と難しく、安全に飛行させるには補助者が必要であることをここで改めて認識することになる。筆者は共同研究者のいた北見工業大学の野外研究施設「オホーツク地域創成研究パーク」を利用した。ここは北海道のばんえい競馬場跡で、広い敷地と掲示板、観客席、タワーや電線など、広さの割には若干の障害物があり、操縦の遠近感を養うのにとても役立った。この段階でようやくドローン使った気象観測の準備が整ったことになる。次は気象測器を乗せて観測を行えば、とりあえずのデータは取得できる。

5. 海外の動向を調べる

ドローンの最新動向を調べるには、海外の論文を調査するのが最も有効である。文献としては *Atmospheric Measurement Techniques* などしっかりとした査読がされた雑誌がある一方、*Drones* や *Sensors* など比較的出版サイクルの短い雑誌もある。ドローンと小型デバイスの技術開発が極めて速いテンポで進む状況において、イノベーションのヒントは後者の雑誌にも多数潜んでいることに留意したい。

海外ではドローンによる気温計測の評価にかなりの時間を割いている。それは、機体の排熱、日射、風向など高温バイアスの要因が複数あり、いきなり野外で観測しても、どの要因が主要なものなのかを切り分けることが困難だからである。高性能のセンサーを搭載

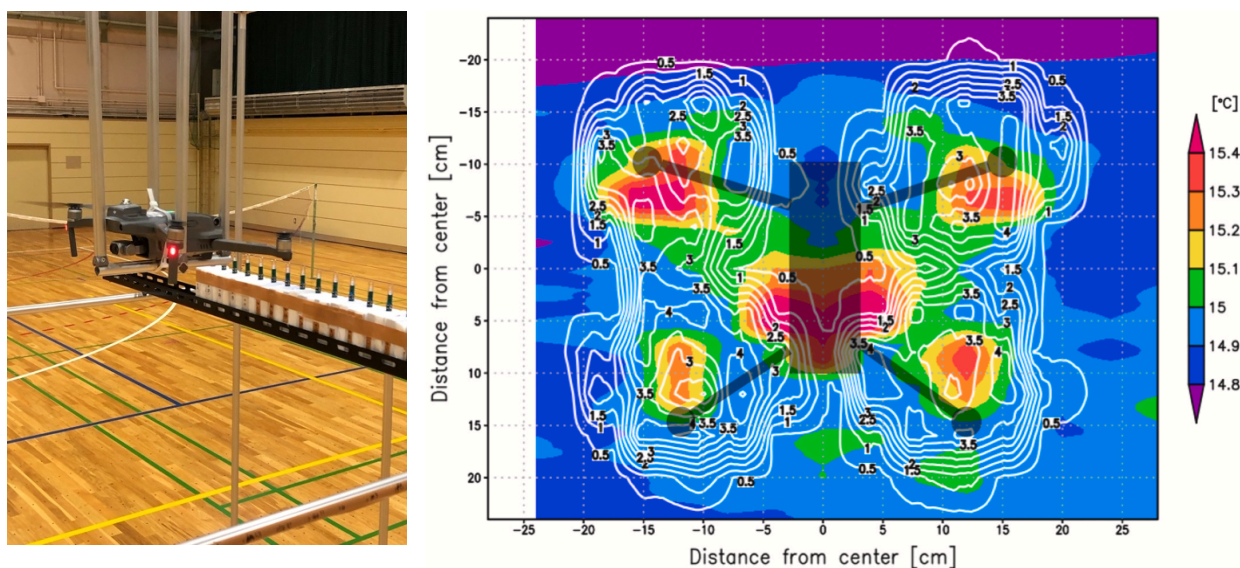


図1 (左)ドローン底部の温度環境の計測, (右)ドローン底部の気温(陰影)と風速(等値線)。Inoue & Sato [2022a]。

載しても、ドローンへの取り付け位置や計測環境によって、1℃以上の高温バイアスが簡単に生じてしまう。そこで、まず日射や風速の影響を受けない室内において、徹底的に機体周辺の熱環境を調べ、その上で野外における日射や主風向に対する相対的な位置を変えながら、高温バイアスの要因を分離する地道な作業を行なっている。

また、機体が生み出す気流は各センサーの取り付け位置を決定するのに非常に重要なため、室内実験による風環境の計測、数値流体実験、気流の可視化など、各種ツールの活用や業者と協働しながら高精度化を目指している。国内では「国際ドローン展」などドローンメーカーやその周辺機器メーカー、利用者が集う催事があり、最新の国際動向を得られる機会ともなっている。国内ドローンメーカーと直接対話できるのも魅力的である。

6. 室内実験を行う

筆者も先行研究にならい、北見工業大学の体育館を借りて、(1) 機体の排熱環境と気温バイアスの関係、(2) 風向と気温バイアスの関係、(3) 強制通風可能な放射シールドの開発、(4) 気流の可視化実験による風速計測の妥当性、など可能な限り誤差を追求した上で野外観測へ応用する下準備を行なった。

6.1 気温観測における排熱影響が及ぶ場所の特定

センサーの器差を予め調べておいた気温・湿度・気圧センサーロガー (iMet-XQ2, InterMet 社) を 15 個用意し、ラックマウントしたドローンをプロペラ起動させた状態で、機体下部の気温環境を調査した(図 1 左)。加えて熱線風速計で風速環境の計測を実施した。この実験の目的は、センサーの最適な配置場所を決めるため、通風が良くかつ機体の排熱が小さいところを探し出すことである。実験の結果、プロペラの全長の外側から1/3程度の場所が背景場に近い気温で通風も得られるということが分かった(図1右)。この結果を受けて、以後の観測では前部プロペラの当該位置にセンサープローブが来る配置にした。後部にも取り付けるという方法もあるが、iMet-XQ2 の重量が 60 g のため、2 個取り付けるとその他のセンサーの搭載が難しくなるため、当初は前部に 1 個とした。

6.2 風向による温度依存性

センサーの搭載位置が決まったとしても、風向によっては背景場の大気環境を計測できているとは限らない。例えば追い風での観測の場合、電池やローターからの排熱の影響は機体前方に流れてくるため、前部のセンサーでは正確な環境を観測できない可

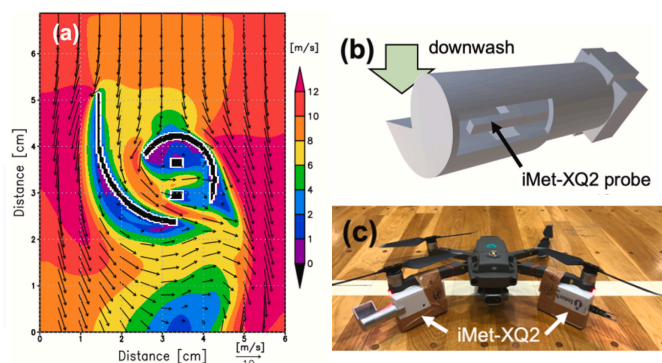


図 2 (a) センサーカバーの通風数値実験, (b) センサーカバーの 3D モデル, (c) センサーカバーの装着有無実験。Inoue & Sato [2022a]。

能性がある。それを実証するために、大型の扇風機を室内で駆動させ、ホバリングさせた機体を 90 度ずつ回転させながら、その気温値が参照値からどれだけずれるかを調査した。その結果追い風や横風時の風下側では 2 m/s の弱風においてでさえ高温バイアスとなることがわかった。これを受けて、4 枚回転翼の場合は対角線上に一对のセンサーを搭載すれば、前後のどちらかは風上の空気を捉えることが可能であることがわかった。

6.3 強制通風可能な放射シールドの作成

ラジオゾンデは緯度・経度・時刻情報から、日射補正が適用された出力データが作成されるが、ドローンに搭載する安価な気象センサーにはそのような機能がない。そのため、独自に日射の影響を軽減する方法が必要である。単にカバーを被せると、通風が悪化し高温バイアスとなる。一方で、通風を重視しすぎると、角度によっては日射の影響を受けるとともに、雲粒や雨滴が付着しやすくなり、計測精度がさらに悪化する。つまり、直射日光と雲粒・雨滴が当たらず、かつ通風を確保できるという都合の良い条件を満たすセンサーカバーの開発が必要になった。海外の気象ドローンの中には組み込み式のファンで吸気して気温を計測するものもあるが [Segales et al., 2020], 汎用性が低く、市販のドローンで一定精度の気象観測を行いたい大多数の研究者には向いていない。筆者は、安価な数値流体解析モデル (CFD :

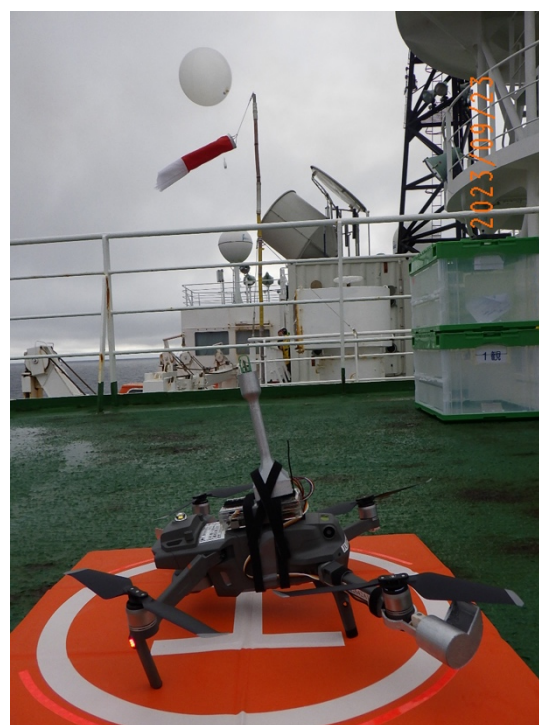


図 3 海洋地球研究船「みらい」船上でのラジオゾンデとドローンの同時観測。

Flowsquare+, NoraScientific 社)とアカデミック仕様の CAD (Fusion360, Autodesk 社)を使用し、センサーカバーの開発を実施した(図 2) [Inoue & Sato, 2021] (3D STL は公開済みでそれを印刷すれば誰でも iMet-XQ2 に装着できる)。外側と内側に市販のアルミ素材のリフレクターを塗布し、カバー自体が日射で加熱されない処理も施した。この効果を野外観測で実証するため、日射が強い状況下で気温観測におけるカバーの装着有無の違いを計測した結果、0.1 度の高バイアスを軽減できることが証明できた。この 0.1 度にこだわりを見せるのは、数値予報にデータ同化するには少なくとも大気領域モデルレベルでは 0.5 度以内にバイアスを抑える必要があるからである [Leuenberger et al., 2020]。

6.4 風速・風向の計測への挑戦

気温観測の精度に関して一定の成果が得られたので、次は他のセンサーを取り付けて多変数の観測を実現することを目指すことになる。とりわけ重要なのは風速・風向である。6.2 で示した通り、風向は気象

センサーが風上・風下に位置するかを判断するのに重要である割に、計測誤差も大きい。特に上昇中の風のプロファイルを取得する際、ドローンに超音波風速計を搭載する場合があるが、測器自体に相対的な下降流とその発散場が生じるため、測器の特徴と計測方法(ホバリング時か昇降時か)を見極めないと精度が上がらない。

筆者はできるだけ安価に計測することを念頭に、熱線式の風速計(HWS-19-ONE, ホルトプラン社)を2枚使用し、それを直角に配置することで、逆正接(arctangent)から風向を求める仕様にした。そのアイデアは業者からの提案でもあった。センサー価格は2枚で3万円以下である。熱線式風速計は雨には弱い。ドローンを運用する気象環境としては条件をほぼクリアしており(最大 20 m/s まで計測可能)、雲水量の低い水雲や降雪時であっても問題なく計測できることが南極観測船「しらせ」での観測から実証できている[Inoue & Sato, 2023]。逆に、雲水量が多い場合や降雨時に行った北極海での観測では、静穏な状況でも 15 m/s 以上になるなど異常値が出る不具合もあった。

この風速計もまずは室内でのリファレンスの風速計との比較、上昇中を想定したセンサー真上からの状況で生じるバイアス、風速計を設置する機体からの高さを検証するための気流の可視化実験などを実施した。観測値は上昇速度に比例した強風バイアスがあること、機体上部から約 15 cm の高さであれば、機体の作り出す気流の影響が小さいことなどを示した。2023 年 9 月の北極海での「みらい」船上観測によるラジオゾンデとの比較観測からも風速・風向がよく対応することが実証できている(図 3)。

7. 必要なセンサーを探し自作で実装

6.4 で紹介した風速計のように、この段階にくると研究者の計測対象によって搭載センサーをカスタマイズし、独自性・創造性の高い大気環境計測システムに進化させる楽しみが生まれてくる。

汎用ドローンの最大積載重量は DJI Mavic シリー

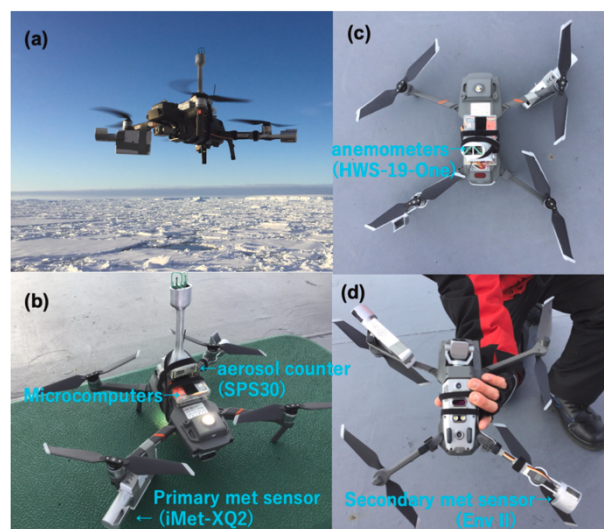


図 4 (a) 南極を観測するドローン, (b) 搭載センサーの配置, (c) 着氷状態, (d) 底面。Inoue & Sato [2023]。

ズでも 200 g 程度であるため、iMet-XQ2 (60 g)とその放射カバー(10 g)を除く 100 g 強で何をを目指すかである。筆者は後部にセカンダリー気象センサー(気温・相対湿度・気圧; Env II Unit, M5Stack 社)を2023年3月まで搭載していたが(図 4d), 2023年9月からはBME688 (Bosch 社)を導入することを試みている。これは気温・相対湿度・気圧のほかに揮発性有機物(VOC)のガススキャナー機能が搭載されたもので、森林火災や工場の排煙、あるいは海洋からの物質供給過程の研究に応用できるのではないかと期待しているところである。また、エアロゾルカウンターには当初 OPC-N3 (Alphasense 社: 105 g)を使用していたが、より軽量・低電力の SPS30 (Sensirion 社)を風速計のシリンダ下部に収納する形で計測を行なっている(図 4b)。南極域での多数の雲内観測事例から、雲粒にも反応することが実証され [Inoue & Sato, 2023], エアロゾル・雲研究の補完的な観測システムとしての活用が有望である。

このように、ドローンとは異なる小型デバイスの業界にも目を配ることで、ラジオゾンデでは得られない計測を実現できる可能性が出てくる。ただし、センサーを購入しただけでは計測はできないことに注意が必要である。電子基盤の加工やそれを動かすためのプログラミングが必須で、いわゆる電子工作の世界に

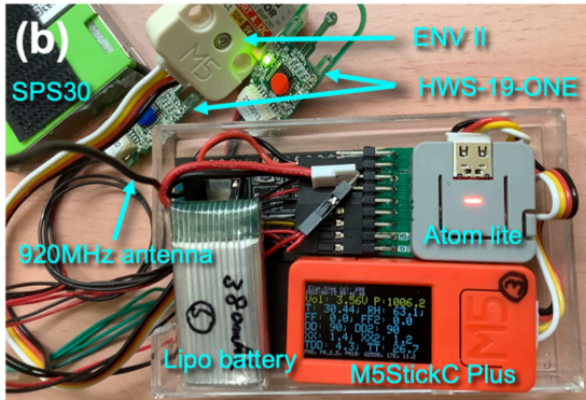


図 5 搭載センサーとマイコンの配線状況。Inoue & Sato [2022b]。

も踏み込む必要がある。筆者は、電子工作は全くの素人であったが、現在は多くの機能がパッケージ化されたマイコン(多数のピンが実装された処理系基板、電池、液晶、LED、ブザー、データ記録用メモリ、WiFi、BLE など)が安価に入手可能で(筆者は M5StickC Plus, M5Stack 社などを使用), Arduino IDE 環境でコーディングをしている(図 5)。検索すればたくさん利用事例があるので、導入が容易である。もちろん大容量の外付け電池が搭載可能なら Raspberry Pi などの活用も有望であろう。

8. 野外観測から新たな問題点を発掘

ドローン気象観測の醍醐味は、高度 150m 以上の観測を行う点である。DJI 製品であればアプリ上で高度 500 m までの飛行が可能である。接地境界層の時間発展など繰り返し観測にはオートパイロット機能もあるので、決められたルート・高度設定で均質な飛行が繰り返し行えるのは魅力である [Inoue & Sato, 2022a]。そのためにも、航空局の DIPS (Drone/UAS Information Platform System 2.0) への申請はできるようになっておきたい。類似の解説は猪上[2023]で紹介済みであるが、重要なのは申請前の事前調整である。飛行させたい場所が民間航空機に影響を与える場合、自衛隊の航空機の練習区域の場合、ドクターヘリなどの往来がある可能性がある場合などは、高度制限や時間制限が提示され、事前調整が必要となる。それは海上であっても同じである。この調整が済

ドローン野帳

フライト番号

022

St.33

年月日 (2023/9/24)		時間(UTC): 20:10:20		フライトプラン	
パイロット				MAX Alt.	1000 m
補助者1				RTH Alt.	50 m
補助者2				Heading	1.7 °
機体種別		DJI Mavic2 3 号機		SDカード	1.7
機体確認		気象確認		自由記述:	
プロペラ		✓		ベルト確認: ✓	
コンパス		✓		iMet GPS: ✓	
電波		✓		0.7 ✓	
GPS		1.4 ✓		火災の影響はなし	
バッテリー		100 %		20m 付近に移動	
風速(相対)		21.4 °C		970 m 付近に移動	
風向(相対)		✓		900 m 付近に移動	
ピーコン		E ✓ F ✓		2.4 GHz 帯の映像伝送に支障	
カメラ録画		✓		気候・天候と対応	
画面録画		✓		機体は乾燥	
気象センサー		✓			
観測機器		センサー番号		観測項目	
iMet (前)		2		気圧・気温・湿度・GPS	
M5		1		送信機	
BME 688		1		気圧・気温・湿度	
HWS-19-ONE		1		風速・簡易風向	
SPS30		4		エアロゾル数濃度	
飛行メモ		高度		風速	
		1200m		バッテリー残量	
		1100m		上昇時 下降時	
		1000m		気温	
		900m		風向	
		800m		湿度	
		700m			
		600m			
		500m			
		400m			
		300m			
		200m			
		100m			
		上昇開始			
気になったこと・前回の相違点:		エロゾル、上昇中に一定期間の記録		平面図	
				風速 3.1 m/s	
				風向 276° (相対 276°)	
ドローンの向き		270° 方向 (相対 270°)		断面図	
				左舷 右舷	

図 6 北極海の船上での観測野帳の記入例。

んでいないと、DIPS で申請しても、差し戻されてしまう(どこに問い合わせれば良いか情報提供がある場合もある)。

DJI 機で高度 500 m を超える飛行観測を行う場合は、DIPS で許可されたあと、アプリの 500 m 高度制限のカスタムロックを解除する申請を DJI 社に対して行う。この際、航空局等から発行された許可書類と、機体登録と機体シリアル番号を関連づける資料を用意する必要がある。つまり、この段階までくると、国内法を遵守した手続きを踏んでいないと高度な運用はできないことに注意したい。筆者らのチームは南極域では 4 ヶ月間に 172 回の気象観測飛行を行い、うち 108 回は高度 1000 m までの観測を実現した。2023 年 9 月の北極海では高度 1100 m まで到達した。

高い高度での観測では、目視外になり、一定の危険をともなう観測になる。機体底部に視認可能なライトが搭載されている場合は、筆者らの経験からは高度 1000 m でも視認可能である。ただし上空に雲が存在する場合は、ライトが見えづらくなる。早朝や日没前など日射が少ない状況の方が視認しやすいが、何かの拍子でライトが消えることも想定し、補助者による状況把握は必要不可欠である。搭載機器の重量が増えればそのトレードオフとして飛行時間が減少し、バッテリー管理が厳しくなる。操縦者はつい欲が出てしまい、帰投時および不測の事態の際の電池残量を客観的に判断できずに観測を続行してしまうことがある。その時に補助者が冷静に電池残量を考慮して帰投を促すことは極めて重要である。

そのためにもリアルタイムで機体周辺の風や気温、エアロゾルカウンターによる雲粒数濃度を把握し、危険の回避を判断する材料を取得することは重要である。筆者らは、920 MHz 帯のアンテナを風速センサー等の処理系に実装し、操縦中に風速・風向・気温・相対湿度・気圧・エアロゾル数濃度を地上局に送信し、補助者がそれをモニターできる工夫をした。風速が 10 m/s を越えるとブザーが、雲内の PM_{2.5} 値が 5000 個/L を超過したら着氷警報が出る仕様にし、可能な限り飛行中の機体の安全性をモニターするようにしている。また、航空法で新たに義務付けられた、飛行記録や飛行点検記録をすぐ書き起こせるような観測野帳を飛行前・飛行中・飛行後に記入して、次のフライトの反省材料としている(図 6)。これに関連して、スマートコントローラーの画面を毎回録画し、ヒヤリ・ハットはなかったかを操縦者以外の人でも振り返られるように保存している。このような工夫によって、チームとしてドローンを運用する「型」が形成される。

9. 今後の展開

創意工夫により安価にカスタマイズした測器を搭載した汎用ドローンは、これまで得られなかった大気環境データを新しいスタイルで収集できる可能性を

秘めている。係留気球よりも耐風速が高く、場合によっては有人ヘリコプターよりも高い高度を観測できるドローンは、今後どのような発展を見せるのだろうか？世界気象機関では、ドローンによる気象プロファイルが数値予報に活用できるかを検証するため、観測データの精度やリアルタイムデータ配信の実効性に関するデモンストレーションキャンペーンを 2024 年に世界各地で予定している [Pinto et al., 2021]。筆者らも国内対応としてその計画に参画予定である。大気計測におけるドローンの社会実装が進めば、関連分野の研究も発展するであろう。国産ドローンの活躍にも注目したい。積載重量に自由度がある中型のドローンも視野に入れるならば、エアロゾルのサンプリングや高度な光学センサーの活用も考えられる。メーカーが作った特殊製品を運用するだけではなく、研究者自らが実際に開発に関わり、手を動かすことも必要不可欠である。そのためにも、このような活動に興味を持ち、果敢に挑戦する若手研究者が増えることを期待する。本稿がその一助となれば幸いである。

謝辞

本研究に関する室内実験、野外実験、測器開発は北極域研究加速プロジェクト (ArCS II: MXD1420318865)、南極地域観測事業 (AJ1005)、科学研究費補助金 (23H00523) の助成を受けて実施した。

参考文献

- Inoue, J., & Sato, K. (2021), Blueprint of radiation shield for the iMet-XQ2 meteorological sensor, 1.00, Arctic Data archive System (ADS), Japan, <http://doi.org/10.17592/001.2021091701>.
- Inoue, J., & Sato, K. (2022a), Toward sustainable meteorological profiling in polar regions: Case studies using an inexpensive UAS on measuring lower boundary layers with quality of radiosondes, *Environ., Res.*, 205, 112468.
- Inoue, J., & Sato, K. (2022b), Wind speed measurement by an

inexpensive and lightweight thermal anemometer on a small UAV, *Drones*, 6, 289

Inoue, J., & Sato, K. (2023), Challenges in detecting clouds in polar regions using a drone with onboard low-cost particle counter, *Atmos. Environ.*, 314, 120085.

猪上淳 (2023), ドローンを用いた船上気象観測-室内実験から野外観測までの行程-, *月刊海洋*, 55, 361–367.

Leuenberger, D. et al. (2020), Improving high-impact numerical weather prediction with lidar and drone observations, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101(7), E1036–E1051.

Pinto, J.O. et al. (2021), The status and future of small uncrewed aircraft systems (UAS) in operational meteorology, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102, E2121–E2136.

Segales, A. R. et al. (2020), The CopterSonde: an insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research, *Atmos. Meas. Tech.*, 13(5), 2833–2848.

原稿受領日: 2023 年 11 月 9 日

掲載受理日: 2023 年 12 月 15 日

1. 国立極地研究所 先端研究推進系 気水圏研究グループ
2. 総合研究大学院大学 極域科学コース

* 責任著者:

Jun Inoue <inoue.jun@nipr.ac.jp>

無人航空機(UAV)を用いた温室効果ガス観測の進展

Progress in greenhouse gas measurements using unmanned aerial vehicle (UAV)

井上誠^{1*}, 永吉武志¹

大気中の温室効果ガス増加により、地球温暖化とそれに伴う環境・社会への影響が懸念されている。これまで、上空の温室効果ガスを観測する方法として、有人航空機やタワー、気球などのプラットフォームが利用され、最近 30~40 年間で多くの知見が得られてきた。しかし、21 世紀に入り、飛躍的に普及している無人航空機(UAV)を大気観測の新たな手段として用いる事例も増えている。本稿では、これまでに国内外で実施された UAV による温室効果ガス観測の研究例を紹介し、この分野の進展状況を報告する。

1. はじめに

18 世紀後半に起きた産業革命以降、地球大気中の温室効果ガス濃度の上昇により地球温暖化が進行し、気候や生態系に深刻な影響を与えている。将来の気候予測を高精度で行うには、地上付近だけでなく、上空の大気観測に基づく温室効果ガスの 3 次元分布の把握が重要である。上空の温室効果ガスを観測する手段として、これまでに有人航空機やタワー、気球などが用いられてきた。有人航空機による大気観測は、上空数百 m から 10 km 程度までの観測が可能であり、この高度の温室効果ガス濃度の鉛直分布が把握できる[Tanaka et al., 1987; Nakazawa et al., 1997; Ishijima et al., 2001; Machida et al., 2008; Wofsy et al., 2011; Tsuboi et al., 2013; Sweeney et al., 2015; Umezawa et al., 2018]。タワーによる観測は地上から上空数百 m までの対流圏下層の常時観測に大変適している[Inoue & Matsueda, 1996; Sasakawa et al., 2013; Andrews et al., 2014]。また、気球を用いた観測によっても、成層圏や対流圏における温室効果ガス濃度の鉛直分布を知ることができる[Nakazawa et al., 1995; Inai et al., 2018; Ouchi et al., 2019]。

このように様々なプラットフォームで上空の観測が

実施され、大気化学分野において多くの有用な知見が得られてきた。しかし最近、下部対流圏における様々な地点の大気層を比較的安価で手軽に観測できる手段として、無人航空機(UAV)が注目されるようになった。そこで、UAV による温室効果ガス観測の進展状況を詳しく報告する。

本稿の構成は以下の通りである。2 章で UAV とは何かを解説し、3 章で国内外の UAV を用いた温室効果ガス観測の進展状況について報告する。4 章で秋田県立大学における UAV 観測システムを紹介し、5 章で今後の展望を述べる。

2. UAV とは

UAV (Unmanned Aerial Vehicle)とは無人航空機のことであり、わが国の航空法では「航空の用に供することができるものであつて、構造上人が乗ることができない飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船などのうち、遠隔操作または自動操縦により飛行させることができるもの」と定義されている。屋外で UAV を飛行させる際には各種法律や都道府県条例などの規制が適用されるが、重量が 100 g 以上の機体と 100 g 未満の機体ではその規制の程度が大きく異なってい

る。UAV の歴史は古く、有人の軍事訓練用複葉機を基にして 1935 年にイギリスで開発された無線誘導航空機「Queen Bee」を標的無人機として活用した時代まで遡る。その後、1940 年代にアメリカ海軍によって無人標的機が開発された際、イギリスの標的機「Queen Bee」に対し敬意を表してオス蜂を意味する「Drone」の名称を採用したことから、ドローンと呼称されるようになったと言われている[日本 UAS 産業振興協議会編, 2018]。

UAV は用途別に大きく 6 種類(空撮用・産業用・競技用・ホビー用・軍事用・水中用)に分けられ、それぞれ目的とした用途に特化した性能を持っている。近年普及している小型の UAV は複数のプロペラ(ロータ) を利用した電動のマルチコプタ型であり、様々な分野での利用が始まっている。「ドローン」という言葉は、広義では遠隔操作および自律飛行が可能な重量 100 g 以上の UAV 全般を指す場合もあるが、一般的には遠隔操作および自律飛行が可能なマルチコプタ型の飛行体という意味で使われている。ドローンの持つ代表的な特性を主に 3 つ紹介する[関口・岩崎, 2017]。まず、目的地まで最短距離で飛行する、障害物を避けながら飛行する、ホバリングして空中で静止するなど様々な飛行が可能な点である。2 つ目は、ドローンにカメラやセンサを取り付けて飛行させることで、上空から対象物を撮影したり、人が立ち入ることができない地域のデータを収集できたりすることである。3 つ目の特性は、自動航行機能により飛行を自動化できることである。この機能によりあらかじめルートを設定しておけば、飛行観測の作業を自動化することが可能となる。

このようなドローンの特性を利用することで、上空の大気観測を効果的に行うことができる。

3. UAV による温室効果ガス観測の歴史

近年、UAV が飛躍的に普及しており、趣味や農薬散布などの産業を目的とするだけでなく、環境調査を

実施するための UAV も開発されている。市販の UAV を用いれば、重量が約 1~5 kg の観測機器を搭載し、10~20 分程度の飛行観測を実施することができる。

気象学分野では、2000 年代頃に、気温や気圧などの小型観測装置を取り付けた無人航空機システムが使われ始めた[e.g., Egger *et al.*, 2002]。UAV を用いた二酸化炭素(CO₂) 観測事例の端緒として、Watai *et al.* [2006]が挙げられる。この研究では無人航空機であるカイトプレーンに約 3.5 kg の CO₂ 観測システムを搭載し、上空約 2000 m の高さまでの飛行観測を行った。Berman *et al.* [2012]は、アメリカ航空宇宙局(NASA)が運用する中級クラスの UAV システムに搭載するための温室効果ガス観測アナライザを開発し、ノルウェー・スバルバル諸島の地上から 10 m の高さで CO₂, メタン(CH₄), 水蒸気(H₂O)濃度データを取得した。Roldán *et al.* [2015]は、温室内の CO₂ 濃度分布マップを作成することを目的として、小型 UAV を用いた観測システムを開発した。UAV には Parrot 社製の AR Drone 2.0 を使用し、搭載した CO₂ センサは Sandbox Electronics 社製の MG811 であった。Villa *et al.* [2016]は、DJI 社製の S800 を用いて、排出源からの大気汚染物質などの放出状況を調べるためのドローンシステムを開発した。その観測対象は一酸化炭素(CO), CO₂, 一酸化窒素(NO), 二酸化窒素(NO₂)であり、自動車の排気ガスを排出するパイプを地上からの高度約 3 m の位置に設置し、同じ高度で S800 をホバリングさせて濃度観測を行った。Reuter *et al.* [2021]は、排出源付近の CO₂ 放出量を定量化することを目的として、CO₂ 濃度と風速などを同時に観測できる UAV を開発した。DJI 社製の Matrice 210v2 に、Vaisala 社製の CO₂ センサー GMP343 と FT Technologies 社製の風速計 FT205 を搭載して、天然ガス処理施設近傍の高度 200 m までの観測から CO₂ 放出量を見積もった。

次に、UAV による大気サンプリングで温室効果ガスの観測を行った例を紹介する。マルチコプタ型の UAV は、取得したい高度でホバリングを行うことで、

容易に一定高度での大気のサンプリングができるという利点がある。*Chang et al.* [2018]は容積 2 L のステンレス缶を 8 ロータ式の自作大型ドローンに搭載し、台湾最北端の岬である富貴角の上空 300 m において大気サンプルを取得した。その結果、106 種類の揮発性有機化合物(VOCs)と CO, CH₄, CO₂ のデータが得られ、地表の大気サンプルの分析結果と比較した。また、*Andersen et al.* [2018]は、アメリカ海洋大気庁(NOAA)が開発した大気のサンプリングシステムである AirCore システム[Karion et al., 2010]をドローンに搭載し、上空 500m までの鉛直プロファイルを得ることに成功している。この手法もリアルタイムでデータを取得する観測ではなく、着陸後、Picarro 社製のキャビティリングダウンアナライザー(CRDS)である G2401 で分析を行っている。

この他にも、CO₂ や二酸化硫黄(SO₂)などの火山ガスを専門に観測する UAV[e.g., Rüdiger et al., 2018] や、CH₄ 濃度を専門に観測する UAV[e.g., Tuzson et al., 2020]の開発なども活発に行われている。

4. 秋田県立大学の CO₂ 観測用 UAV

秋田県立大学では、2016 年より、UAV を用いた温室効果ガス観測を実施することが計画された。DJI 社製の Matrice600 に、LI-COR 社製の LI-840A CO₂/H₂O アナライザを搭載した CO₂ 観測システムの開発を進め(図 1a), 2017 年に飛行観測を開始した[井上ら, 2017]。Matrice600 の機体重量は 9.1 kg (標準バッテリー装着時)で、ペイロードは 6.0 kg である。機体の下部に搭載した LI-840A は非分散型赤外線吸収(NDIR)方式の分析計である。LI-840A には外気を吸引するためのポンプが装備されていないため、市販のダイアフラム式ポンプを後付けパーツとして装着した。測定データの記録には、HIOKI 社製の電圧ロガー LR5042 を用いた。LI-840A の電源には純正バッテリーが提供されているが、その重量が約 1 kg もあるため、本研究では Matrice600 本体の電源を LI-840A と共用する方法を選択し、システム全体の軽量化を実現した。この他の詳細については、*Chiba et al.* [2019]と間所ら[2020]を参照されたい。

この UAV システムを導入するための初期経費は約

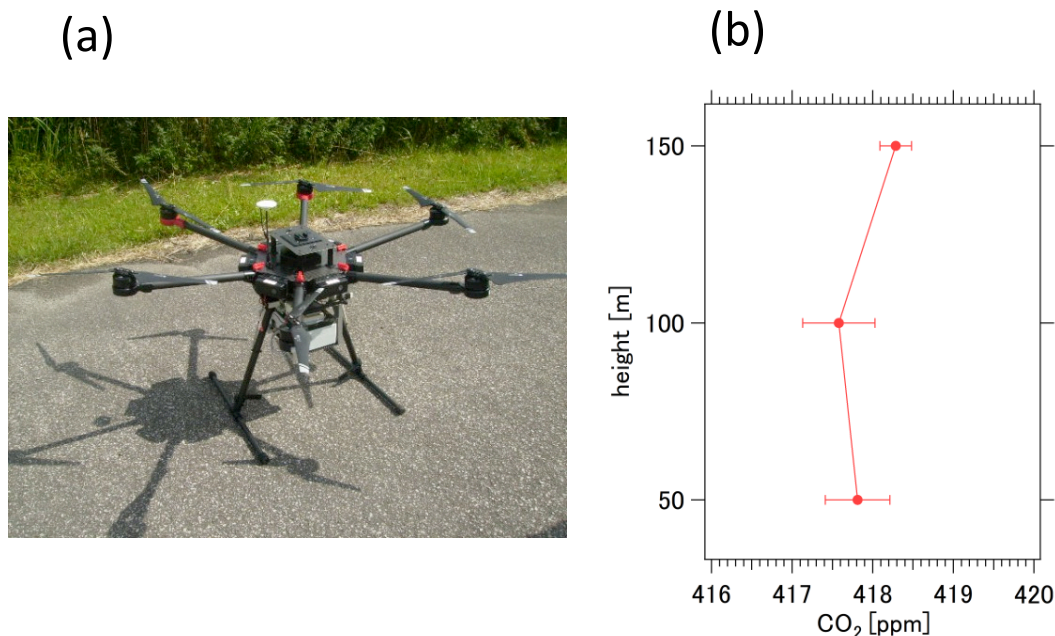


図 1 (a) 秋田県立大学の CO₂ 観測用 UAV システム, 及び (b) この UAV を用いて得られた秋田県大湯村上空の CO₂ 濃度分布(2021 年 11 月 25 日の事例)。

230 万円であり、一度システムを構築すれば高頻度での飛行観測が可能となる。また、全重量は計 12 kg 程度と軽く、野外への持ち運びに便利である。日本の航空法では、UAV の飛行は地表または水面から 150 m 未満の空域に制限されているが、本学の研究グループではあらかじめ 150 m 以上の空域において UAV を飛行させる許可を国土交通省より受けている。

この UAV システムを用いて、2018 年 2 月～2019 年 2 月の 1 年間、月に 1～2 回程度の割合で本学大潟キャンパスの地上から高度 500 m までの CO₂ 観測を実施した。その結果、夏季に CO₂ 濃度が下層で低く上層で高い傾向となり、寒候期になるとその鉛直勾配が小さくなるという傾向がみられた[Chiba *et al.*, 2019]。この濃度の季節変化の要因には、植生分布の季節性が関わっている可能性が示唆された。また、この UAV による観測結果を気象庁のシミュレーション結果と比較したところ、夏季に CO₂ 濃度が低くなり寒候期に高くなるという季節的特徴が一致した。

さらに最近では、CO₂ 濃度の鉛直分布だけでなく、水平分布の観測も実施している。大潟キャンパス上空の 3 高度(50 m, 100 m, 149 m)における 500 m × 500 m の水平範囲内 9 地点でホバリングを実施し、CO₂ 濃度の水平分布の特徴を解析した。この方法では、1 つの高度の水平分布データを取得するのに最大 18 分程度の時間を要するため、高度ごとの観測終了時点で機体を一度着陸させなければならない。その後、バッテリーを交換してから次の対象高度の飛行観測を行う。このようにして得られた 2021 年 11 月 25 日の飛行観測結果を図 1b に示す。これは晩秋の事例であるが、高度 50 m よりも 100 m の方が CO₂ 濃度が低く、それより上空で濃度が高い傾向を示した。また、50 m, 100 m の高さでは 9 地点間のバラツキ(図中の横方向のエラーバー)が比較的大きかった。他の季節の水平分布の特徴も解析する予定である。

5. 今後の展望

このように、UAV を用いた温室効果ガス観測シス

テムの開発は様々な機関で進んでいるものの、広く普及しているとは言えない状況である。今後、UAV 観測データを科学的な研究に広く利用できるデータにするには、プロペラの回転によって発生する鉛直流の影響など、UAV に起因する濃度算出の不確かさを詳しく調べ、他の観測で得られた濃度データとの比較を行う必要がある。

謝辞

本研究は、秋田県立大学の特別研究費と 2018～2020 年度科研費(18K18180)の助成を受けて実施された。

参考文献

- Andersen, T., Scheeren, B., Peters, W., & Chen, H. (2018), A UAV-Based Active AirCore System for Measurements of Greenhouse Gases, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 2683-2699.
- Andrews, A.E. et al. (2014), CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 647-687.
- Berman, E.S.F., Fladland, M., Liem, J., Kolyer, R., & Gupta, M. (2012), Greenhouse gas analyzer for measurements of carbon dioxide, methane, and water vapor aboard an unmanned aerial vehicle, *Sens. Actuator B Chem.*, 169, 128-135.
- Chang, C.C. et al. (2018), A study of atmospheric mixing of trace gases by aerial sampling with a multi-rotor drone, *Atmos. Environ.*, 184, 254-261.
- Chiba, T. et al. (2019), Measuring regional atmospheric CO₂ concentrations in the lower troposphere with a non-dispersive infrared analyzer mounted on a UAV, Ogata Village, Akita, Japan, *Atmosphere*, 10.
- Egger, J. et al. (2002), Diurnal Winds in the Himalayan Kali Gandaki Valley. Part III: Remotely Piloted Aircraft

- Soundings, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2042-2058.
- Inai, Y. et al. (2018), Balloon-borne tropospheric CO₂ observations over the equatorial eastern and western Pacific, *Atmos. Environ.*, 184, 24-36.
- Inoue, H.Y., & Matsueda, H. (1996), Variations in atmospheric CO₂ at the Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan, *J. Atmos. Chem.*, 23, 137-161.
- 井上誠ら (2017), ドローン(UAV)を用いた秋田上空の温室効果ガス観測, 第23回大気化学討論会要旨集, 13.
- Ishijima, K., Nakazawa, T., Sugawara, S., Aoki, S., & Saeki, T. (2001), Concentration variations of tropospheric nitrous oxide over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 171-174.
- Karion, A., Sweeney, C., Tans, P., & Newberger, T. (2010), AirCore an innovative atmospheric sampling system, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 27, 1839-1853.
- Machida, T. et al. (2008), Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 25, 1744-1754.
- 間所洋和ら (2020), 二酸化炭素の鉛直プロファイルを現地観測するドローンシステムの試作開発と飛行試験, 計測自動制御学会論文集, 56, 37-44.
- Nakazawa, T. et al. (1995), Measurements of the stratospheric carbon dioxide concentration over Japan using a Balloon-borne cryogenic sampler, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1229-1232.
- Nakazawa, T. et al. (1997), Aircraft measurements of the concentrations of CO₂, CH₄, N₂O, and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO₂ in the troposphere over Russia, *J. Geophys. Res.*, 102, 3843-3859.
- 日本 UAS 産業振興協議会編 (2018), きちんと知りたい! ドローンメカニズムの基礎知識, 鈴木真二監修, 日刊工業新聞社, 184p.
- Ouchi, M. et al. (2019), Development of a balloon-borne instrument for CO₂ vertical profile observations in the troposphere, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5639-5653.
- Reuter, M. et al. (2021), Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 153-172.
- Roldán, J.J., Joossen, G., Sanz, D., del Cerro, J., & Barrientos, A. (2015), Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses, *Sensors*, 15, 3334-3350.
- Rüdiger, J. et al. (2018), Implementation of electrochemical, optical and denuder-based sensors and sampling techniques on UAV for volcanic gas measurements: examples from Masaya, Turrialba and Stromboli volcanoes, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 2441-2457.
- Sasakawa, M. et al. (2013), Aircraft and tower measurement of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 9489-9498.
- 関口大介, 岩崎寛史 (2017), ドローンビジネス参入ガイド, 翔泳社, 303p.
- Sweeney, C. et al. (2015), Seasonal climatology of CO₂ across North America from aircraft measurements in the NOAA/ESRL Global Greenhouse Gas Reference Network, *J. Geophys. Res.*, 120, 5155-5190.
- Tanaka, M., Nakazawa, T., & Aoki, S. (1987), Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan, *Tellus*, 39B, 3-12.
- Tsuboi, K. et al. (2013), Evaluation of a new JMA aircraft flask sampling system and laboratory trace gas analysis system, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1257-1270.
- Tuzson, B. et al. (2020), A compact QCL spectrometer for mobile, high-precision methane sensing aboard drones, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4715-4726.
- Umezawa, T. et al. (2018), Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14851-14866.
- Villa, T.F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L., & Gonzalez, F. (2016), Development and Validation of a UAV Based

System for Air Pollution Measurements, *Sensors*, 16, 2202.

Watai, T., Machida, T., Ishizaki, N., & Inoue, G. (2006), A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 23, 700-710.

Wofsy, S.C., & the HIPPO Science Team and Cooperating Modellers and Satellite Teams (2011), HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO): fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols, *Philos. T. Roy. Soc. A*, 369, 2073-2086.

原稿受領日: 2023 年 11 月 27 日

掲載受理日: 2023 年 12 月 19 日

著者所属:

1. 秋田県立大学 生物資源科学部

*** 責任著者:**

Makoto Inoue <makoto@akita-pu.ac.jp>

産業用ドローンの開発と環境探査への展開

Development of industrial drones and deployment in environmental exploration

小野島大介^{1*}

無人航空機(ドローン)は産業点検に有用な開発余地のある調査ツールである。ドローンに搭載される GPS やカメラは屋外調査における遠隔化と省人化を実現してきたが、工場などの建造環境には GPS 不可の狭小空間も多く、屋内調査用の小型ドローンが必要となる。筆者は Liberaware 社と連携して、小型ドローンによる建造環境の内部構造の画像検査と合わせて、狭小空間に滞留する環境物質から建造環境の特性解析を行う探査技術を研究してきた。これまで表面に環境試料のサンプリング機能を付与したプロペラデバイスで粒子状物質の採取と組成分析に成功しており、今後は環境微生物の探査計測と微量分析のための技術確立を目指している。

1. はじめに

産業施設のインフラ設備は、定期的かつ広範な点検を必要とする。点検結果は必要なメンテナンスの判断材料として有用なデータを提供し、建造物の健全性や従業員の安全性の確保に役立つ。しかし、施設が広範であることや、高所・狭所へのアクセスが容易でないこと、健康上のリスクがあることなどにより、点検作業は困難を伴う場合が多い。

これらの課題の克服に向けて、産業施設のインフラ設備の点検のために無人点検技術を利用する関心が高まっており、多くの産業分野においてドローンが期待されている[Nooralishahi et al., 2021]。ドローンの活用は、点検に必要な人員を減らすことができるため、検査時間とコストの削減に役立つ。また、人の手の届かない場所や危険な場所に対して、安全で信頼性の高い調査結果を提供する。

本稿では、建造物の屋外点検で利用が進む産業用ドローンの開発事例とともに、産業活動による大気汚染の検査技術にドローンを利用した事例を紹介する。さらに、建造環境の探査計測に小型ドローンを利

用した研究事例も紹介する。「建造環境」とはビル、工場、下水道などの都市空間における構造的環境を意味する用語であり、地形、植生、気象などの「自然環境」との対比として使用される。

2. 非破壊検査を用いた建造物の屋外点検

過去 10 年間に、多くの研究が建造物の屋外点検へのドローンの使用事例を報告している。例えば、産業用ボイラーチューブ[Jalal et al., 2017]、橋梁[Khaloo et al., 2018]、風力発電機[Shihavuddin et al., 2019]などでは、点検員が現場に立ち入ることなく遠隔で画像データを取得する RVI (Remote Visual Inspection) がドローンによって実用化されている。これらは、従来カメラや目視で行っていた非破壊検査をドローンを用いて実施できる方法に置き換えたものである。

さらに、ドローンの通信の遠隔性、操縦の柔軟性、機能の拡張性などの利点に着目し、RVI 以外の非破壊検査に焦点を当てた研究も行われている。例えば、Matter & Kalai[2018]は金属構造物を検査する超音



図1 屋内調査用の小型ドローン(外形寸法 191x179x54 mm, 重量 185 g)の写真(左)と天井裏飛行の様子(右)。(Liberaware 社プレスリリースより)

波プローブを搭載した独自の壁張り付け型ドローンを報告した。彼らは電磁石ユニットと推力を組み合わせることで、巨大で高さのある製油所の生産設備における超音波探傷試験を実現した。ひび割れは基礎構造物への腐食性化学物質の侵入経路を開く可能性があるため、コンクリート構造物のひび割れの検査は構造物の健全性を確保するために不可欠な点検項目の一つである。

3. 大気汚染物質の測定とサンプリング

大気汚染物質の 3 次元的分布を機動的に測定するために、台湾北部の桃園市の環境保護局はドローンに各種センサーを搭載して大気測定を行っている。温度、湿度、PM₁₀、PM_{2.5}、揮発性有機化合物(VOC)濃度を測定するマイクロセンサーが大気汚染ホットゾーンにおける大気汚染物質の排出を監視し、産業に対する排出制限の実施を支援している。

さらに、ドローンで揮発性ガスを採取して実験室に持ち帰り個々の化学成分を分析するため、ドローン向けのエアサンプラーも開発されている[Chang et al., 2016]。サンプラーの多くはドローンの下部に搭載され、飛行の安定性を保ちつつ空気を吸引する。これらは工業地帯における大気汚染物質の検出や発生源の特定に役立つと期待される。

マイクロニードルトラップサンプラーは、ドローンに搭載して VOC 分析用の大気サンプルを採取する代表的な手段の一つである。ステンレス針に粉末ジビニルベンゼン吸着剤が充填されており、ミニ・エア・ポンプでサンプリングを行う。マイクロニードルトラップサ

ンプラーを搭載したドローンを使用し、工業地帯周辺で排出された VOC を検出した例が報告されている[Cheng & Yuan, 2022]。鉄鋼加工工場周辺で採取されたサンプルからは芳香族炭化水素が、半導体加工工場周辺で採取されたサンプルからはメタノール、アセトン、トルエンが、ガスクロマトグラフィー質量分析により同定された。

4. 小型ドローンを用いた狭所探査

産業用ドローンは全長 1 m を超える重量 10 kg 以上の大型モデルが少なくないが、Liberaware 社はフライトコントローラ基板にフレームが一体化した軽量モデルの小型ドローン(意匠登録済み)を開発した(図 1)。レーザーを用いて自己位置を推定しながら屋内自律飛行を行えるため、ビル天井裏、下水道、地下洞道などの狭小空間でも動画を撮影することができる。撮影した動画は 3D モデル化、点群化、オルソ化(パノラマ画像化)して解析できる。操縦コントローラと映像モニタのアンテナ長を約 10 m 延伸するエクステンションアンテナを併用すれば、煙突内やエレベータ内など電波不良が起きやすい管路内での操作性も向上する。

近年は環境物質の計測技術を小型ドローンに組み込んだ探査機の開発も展開されている。例えば、調査対象となる建造環境の安全性を事前に検証するスクリーニング計測として、有毒ガス検知器を搭載した実験が行われた。この実験では、小型ドローンが飛行中に撮影する動画に一酸化炭素(CO)と硫化水素(H₂S)の濃度をリアルタイム表示させることに加え



図 2 CO 検知実験のデモンストレーションの様子(左)と濃度表示を操縦者画面に重ねたディスプレイの例(右)。(Liberaware 社プレスリリースより)

て、小型ドローンの離陸から着陸までの間の濃度推移をログデータとして保存できることが確認された(図 2)。

5. プロペラを利用したエアロゾル粒子のサンプリング

小型ドローンは機器搭載量と電力消費量がトレードオフの関係にあるため、粉じん計やポンプなどの大型の機器の搭載は困難である。そこで、筆者と Liberaware 社は共同研究を通じて、小型ドローンによるサンプリングに向けたプロペラ研究(プロペラエアフィルタ)に着手した。プロペラエアフィルタはプロペラ表面に慣性衝突により微粒子が捕集される構造をもつプロペラデバイス(特許登録済み)である。小型ドローンの飛行時に発生する誘導気流により、プロペラ表面に張り付けたフィルタが空気中の粒子状物質を捕集する。

プロペラ回転の粒子捕集に対する有効性は飛行時相当回転数と周囲の気流発生から明らかにすることができる。プロペラデバイスの試作品を搭載したドローンを飛行時と同等の 17,000 rpm 以上の回転条件で動作させた。また、気流状態は粒子画像流速測定法(PIV)による撮影が可能であり、プロペラ周辺の空気を巻き込む気流が確認された(図 3)。

粒子状物質のサンプリングを行う場合、エアフィルタの重量評価適性と成分分析適性が求められる。プロペラデバイスの開発では、吸湿性が低く重量変化しにくいポリテトラフルオロエチレン(PTFE)に着目し、プロペラ表面に貼付するフィルタとしての適性評価を、

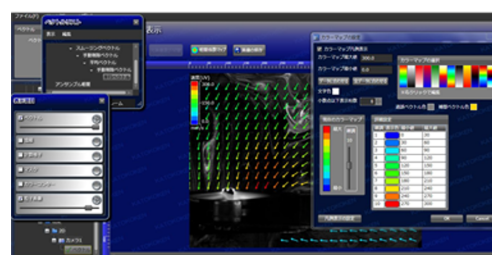
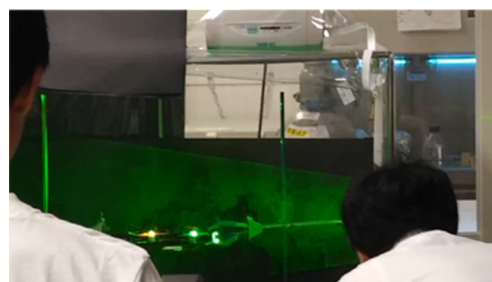


図 3 ハイスピードカメラとシート光源による PIV 撮影(測定時間 1 秒、フレームレート 2,000 fps、観測点距離 5 mm)の実験の様子(上)と解析画面の例(下)。

セミマイクロ天秤を用いた重量測定と電子顕微鏡エネルギー分散型 X 線分光装置(SEM-EDS)を用いた表面観察によって進めてきた。PTFE が持つ表面特性は空気中の水分吸着を少なく抑え、ポリスチレンラテックス(PSL)標準粒子の曝露実験では重量分析の再現性が高かった。また、電子線照射に伴って発生する特性 X 線から微量な金属成分などの分析が可能だった(図 4)。

プロペラデバイスの試作品を小型ドローンに搭載した飛行試験とともに、捕集物の個別粒子解析を実施したフィールドワークの報告がある[Onoshima et al., 2023]。製鉄所炉内と原油蒸留工場煙突内では、主要元素と金属元素の分析により、金属粒子などから採取場所の周辺環境と粒子成分の関係が示唆された。

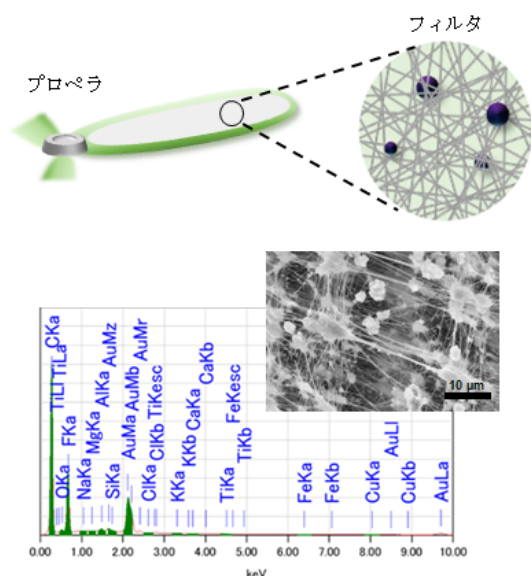


図 4 プロベラデバイスの模式図(上)とSEM-EDSの測定結果の例(下)。

6. バイオエアロゾル分析への展望

粒子状物質は化学分析に加えて生物分析の必要性が指摘されており、喘息やアレルギーの増加を説明する環境仮説では、空気中の粒子状物質と環境微生物との相互作用が報告されている[Peccia *et al.*, 2008]。この相互作用はアレルギーの効力や病原体の感染性を高める可能性がある。

例えば、粒子状物質への微生物毒素や病原体の収着は生物質量を濃縮し、肺沈着特性にも影響を与える[Pandya *et al.*, 2002]。さらに、有機物、金属、エンドトキシンへの同時曝露はアジュバント効果をもたらし、吸入アレルギーの効力を増強して感染に対する感受性を増加させる[Ormstad, 2000]。特に呼吸器系の健康影響と強く相関するのが建物内の湿気である[Bornehag *et al.*, 2005]。湿気は環境微生物の増殖や生存に重要な要因であり、世界保健機関のガイドラインにも記載がある[Heseltine & Rosen *eds.*, 2009]。建造環境の狭小空間は湿気や粒子状物質が多く、人流がないため微生物の特徴が保存されやすいことから、リスク評価管理に向けた調査モニタリングと環境分析技術が求められている。

7. おわりに

生活環境の維持に向けた環境物質の計測は屋外での定点観測が主流であり、単位時間当たりの大気汚染物質の濃度や成分の測定が行われてきた。今後はコロナ禍後の社会変化を踏まえ、大気汚染や感染拡大に起因する幅広い健康被害から身を守るために、屋内の環境物質の計測も重要になると考えられる。また、有効なデータソースを集めるための計測デバイスの技術開発が加速し、マーケットを拡張する事業開発の取り組みも加速することが期待される。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20004)の結果得られたものである。

参考文献

- Bornehag, C. G. *et al.* (2005), 'Dampness' at home and its association with airway, nose, and skin symptoms among 10,851 preschool children in Sweden: a cross-sectional study, *Indoor Air*, 15, 48-55.
- Chang, C.-C., Wang, J.-L., Chang, C.-Y., Liang, M.-C. & Lin, M.-R. (2016), Development of a multicopter-carried whole air sampling apparatus and its applications in environmental studies, *Chemosphere*, 144, 484-492.
- Cheng, W.-H., & Yuan, C.-S. (2022), Identification of emission source using a micro sampler carried by a drone, *Drones*, 6, 116.
- Heseltine, E., & Rosen, J. *eds.* (2009), WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould, Executive Summary, pp. xii-xvi.
- Jalal, M. F. A. *et al.* (2017), Design and development of robotic system for visual inspection of boiler tube inner surface, *Procedia Comput. Sci.*, 105, 304-309.
- Khaloo, A., Lattanzi, D., Cunningham, K., Dell'Andrea, R. & Riley, M. (2017), Unmanned aerial vehicle inspection of the

- Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling, *Struct. Infrastruct. Eng.*, 14, 124-136.
- Matter R. A., & Kalai R. (2018), Development of a wall-sticking drone for non-destructive ultrasonic and corrosion testing, *Drones*, 2, 8.
- Nooralishahi, P. et al. (2021), Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies, *Drones*, 5, 106.
- Onoshima, D. et al. (2023), Development of sampling and measurement technology for indoor particulate matter using a small drone, *Eerozoru Kenkyu*, 38, 30-32.
- Ormstad, H. (2000), Suspended particulate matter in indoor air: adjuvants and allergen carriers, *Toxicology*, 152, 53-68.
- Pandya, R. J., Solomon, G., Kinner, A., & Balmes, J. R. (2002), Diesel exhaust and asthma: hypotheses and molecular mechanisms of action, *Environ. Health Perspect.*, 110, 103-112.
- Peccia, J., Milton, D. K., Reponen, T., & Hill, J. (2008), A role for environmental engineering and science in preventing bioaerosol-related disease, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 4631-4637.
- Shihavuddin, A. et al. (2019), Wind turbine surface damage detection by deep learning aided drone inspection analysis, *Energies*, 12, 676.
-

原稿受領日: 2023 年 11 月 9 日

掲載受理日: 2023 年 12 月 4 日

著者所属:

1. 名古屋大学未来社会創造機構

*** 責任著者:**

Daisuke Onoshima <onoshima-d@nanobio.nagoya-u.ac.jp>

化学気候モデル CHASER を応用した大気微量成分とその変動の研究

Studies of atmospheric trace components and their variability by extending the chemistry-climate model CHASER

関谷高志^{1*}

オゾンやエアロゾル、メタンなどの大気微量成分は、地球温暖化や成層圏オゾン層、越境大気汚染などの全球から領域規模の環境問題を引き起こす原因物質として重要です。このような物質の全球的な変動要因の解明や環境問題への影響評価には、化学気候モデルの活用が有効なアプローチの一つとなります。しかしながら、化学気候モデルには、モデル内のプロセス表現の不足や境界条件に用いる排出量推定に起因する大きな不確実性が未だ多く残されています。本稿では、このような課題に貢献するために、化学気候モデル CHASER を土台として行ってきた新規モデル要素の開発や観測とモデルを融合するデータ同化を通じた、大気微量成分の全球分布とその変動に関する研究をご紹介します。

1. はじめに

この度は、日本大気化学会奨励賞を授与いただき、誠にありがとうございます。これまでの研究成果をこのような形で評価いただけたことを大変光栄に思うとともに、今回の受賞を励みに今後ますます力を入れて研究に取り組むべく、身の引き締まる思いです。

受賞対象となった研究課題は、いずれも化学気候モデル CHASER (Chemical AGCM for Studies for atmospheric Environment and Radiative forcing) [Sudo *et al.*, 2002]を土台とした研究です。大きく分けて、(1) モデルを用いたプロセスの広域的な影響評価に関する研究、(2) 大気組成衛星観測のデータ同化に関する研究が含まれています。本稿では、まず、化学気候モデル CHASER についての概要を述べ、受賞対象となったこれらの研究についてご紹介させていただきます。

2. 化学気候モデル CHASER

人間活動から排出される様々な大気微量成分は、地球温暖化や成層圏オゾン層、越境大気汚染といった全球から領域規模の環境問題を引き起こす原因となっています。特に、近年ではメタン・オゾン・エアロゾルとそれらの前駆体が短寿命気候強制因子 (Short-Lived Climate Forcers; SLCFs)として、ますます注目されるようになってきました [IPCC, 2021]。化学気候モデルは、そのような物質を対象に、大気質、成層圏・対流圏オゾン、気候変動およびそれらの相互作用を再現・予測するために開発されている数値モデルです[Morgenstern *et al.*, 2017]。

CHASER は、東京大学/国立環境研究所/海洋研究開発機構を中心として開発されている MIROC 気候モデル[e.g., Tatebe *et al.*, 2019]を土台とした化学気候モデルです。当初は対流圏光化学過程を主眼に置いたモデルでしたが、後にエアロゾル・成層圏化

学も導入され、炭素・窒素循環に関する生物地球化学過程を含む地球システムモデルとして開発が進められてきました[Watanabe *et al.*, 2011; Kawamiya *et al.*, 2020]。モデルの詳細については、例えば須藤 [2016] に詳しく記述されています。それ以降も、CHASER は、亜硝酸(HONO)[Ha *et al.*, 2023]や雷NO_x[He *et al.*, 2022]などについて、継続的にモデル要素の新規開発・改良が進められてきました。本章では、そのような研究のうち、成層圏エアロゾル微物理過程および対流圏ハロゲン化学過程をシミュレート可能なモデルを開発し、全球規模の影響を評価した研究について紹介いたします。

2.1 大規模火山噴火後の成層圏エアロゾル変動における微物理過程の役割

ピナツボ火山噴火のような大規模な火山噴火は、成層圏に多量の二酸化硫黄(SO₂)を放出します。SO₂ から生成される硫酸エアロゾルは短波放射を散乱することで、数年スケールの気候変動に大きな影響を与えることが知られています[Robock, 2000]。気球観測から報告されるような火山噴火後の粒径分布の大粒径方向へのシフト[Deshler, 2008]は、エアロゾルの成層圏における滞留時間、放射を介した気候影響、成層圏オゾン層への影響を考える上で、大きな不確実性要因のひとつとなっています。また、それまでの CHASER では硫酸エアロゾルの粒径を一定であると仮定していたこともあり、噴火後の硫酸エアロゾル変動の再現性に問題を抱えていました。

そこで、筆者らは、CHASER の硫酸エアロゾルの微物理過程(新粒子生成、凝結・蒸発、凝集過程など)を新たに導入し、粒径分布の変化を表現可能にしました。これにより、衛星観測による成層圏エアロゾル光学的深さ、つくばにおける地上設置ライダーの後方散乱係数、前述の気球観測におけるエアロゾル有効半径の1991年6月のピナツボ火山噴火後の変動をよく再現することができました。さらに、エアロゾル微物理過程がどのような影響を与えるか詳細に評

価した結果、蒸発過程や凝集過程における分子間力が、粒径分布や硫酸エアロゾル濃度に見逃されなかった影響(15~30%)を与えることを示唆する結果が得られました[Sekiya *et al.*, 2016]。

ここで筆者らが開発したモデルは、その後も成層圏エアロゾル注入による気候介入の評価に関するモデル間相互比較プロジェクト(GeoMIP)[Kashimura *et al.*, 2017] や静穏期(火山噴火の影響が少ない時期)における成層圏エアロゾルモデル間相互比較プロジェクト(ISAMIP)にも参画・貢献しています[Brodowsky *et al.*, in revision]。

2.2 海洋大気オゾンに対するハロゲン化学の影響

対流圏ハロゲン(Cl, Br, I)が触媒反応を通じてオゾンを破壊することは以前からよく知られています[Saiz-Lopez & von Glasow, 2012]。しかしながら、IPCC 評価報告書で対流圏オゾンの気候影響評価に使用されるほとんどの化学気候モデルには、対流圏ハロゲン化学過程が考慮されておらず、対流圏オゾンの放射強制力の推定値にはバイアスが含まれる可能性があります[Saiz-Lopez *et al.*, 2023]。また、対流圏ハロゲンの主要な発生源である海洋上では、長期的な現場観測が困難であり、陸上と比較して観測データが不足しているため、モデル検証も十分にされていないのが現状でした。

海洋研究開発機構では研究船「みらい」による長年にわたる洋上大気の観測データが蓄積されていました[Kanaya *et al.*, 2019]。そこで筆者らは、CHASER にトップダウン手法による有機ハロゲン化合物の放出量[Sekiya *et al.*, 2020]、無機ハロゲン化合物の放出パラメタリゼーション[Carpenter *et al.*, 2013]、ヨウ素化学反応過程を導入しました。そして、洋上大気の観測データを CHASER の評価・検証に活用しました。対流圏ハロゲン放出・化学過程の導入により、洋上観測に対する熱帯・亜熱帯域のオゾン濃度の正バイアスが67%低減しました。また、ハロゲン放出・化学過程を導入した CHASER に基づく推定から、臭素・

ヨウ素に起因する大気中における気相反応および大気-海洋境界における不均一反応によるオゾン破壊は、全オゾン総消失量の 22%に達すると推定されました [Sekiya *et al.*, 2020]。ただし、海洋・海氷からのハロゲン放出過程やエアロゾル上における不均一反応過程には未だ大きな不確実性が伴っています。今後は洋上におけるハロゲン化学種の観測[Takashima *et al.*, 2022]を利用したモデルの改良が重要だと考えています。

3. CHASER を土台とした大気組成衛星観測のデータ同化に関する研究

データ同化は、観測値とシミュレーションから、双方の誤差を考慮し、尤もらしい値を推定する技術です。前章で述べたような観測データによる比較・検証を行うだけでなく、大気化学分野においても、気象再解析と同様に、観測データと数値シミュレーションとを統合し、長期的な再解析データを構築する研究が展開されるようになってきました[e.g., Inness *et al.*, 2019]。国内においても、CHASER を土台とした大気組成データ同化システムとそれを用いた対流圏化学再解析データセット (Tropospheric Chemistry Reanalysis version 2, TCR-2) が構築されています[Miyazaki *et al.*, 2020]。本データセットでは、先進的なデータ同化手法のひとつであるアンサンブル・カルマンフィルタを用いているため、異なる場所・時間の異なる物理量の状態を最適化できる利点を活かし、複数化学種の観測データを用いたオゾン前駆物質の排出量逆推定を世界に先駆けて行っています。本章では、TCR-2 を応用した研究について、紹介いたします。

3.1 メガシティから全球スケールのシームレスな窒素酸化物の排出量解析

窒素酸化物 (NO_x) は対流圏オゾンや硝酸塩エアロゾルの主要な前駆物質であり、メタンの大気寿命を決定する大気酸化能に対し重要な役割を果たします。NO_x のモデル再現性能は非線形な大気輸送・化学

過程に大きく影響されるため、モデルの水平解像度に依存することが知られています[Valin *et al.*, 2011; Yamaji *et al.*, 2014]。しかしながら、従来の対流圏化学再解析[Miyazaki *et al.*, 2015]は、約 300 km の粗い水平解像度を採用していたため、NO_x 排出量逆推定に対するモデルバイアスの影響が懸念されていました。

そこで、モデル解像度に起因するバイアスを調査するために、まず、水平約 60 km まで高解像度化した CHASER を構築し、Aura 衛星に搭載されている Ozone Monitoring Instrument (OMI) による対流圏 NO₂ 気柱量の観測データを用いて詳細な評価を行いました。その結果、約 300 km から 60 km まで高解像度化することにより、小規模な大気輸送・化学プロセスの解像 (例えば、VOC-limited の化学レジームの解像) を通じて、特にメガシティにおけるモデルの過小評価が大きく改善されることを確認しました (例えば、北京では 67%、サンフランシスコでは 73% のバイアス低減) [Sekiya *et al.*, 2018]。

さらに、高解像度版の CHASER を土台としたデータ同化システムを構築し、水平解像度に伴うモデル不確実性が NO_x 排出量逆推定に与える影響を評価しました。高解像度システムによる NO_x 排出量逆推定から、上記で述べた小規模なプロセスの解像に起因するモデル誤差により、従来の水平解像度 (約 300 km) のデータ同化は、メガシティでは最大 40%、中程度までの汚染域においても平均 15% 過大評価であったことが示唆されました[Sekiya *et al.*, 2021]。

3.2 TROPOMI および OMI 対流圏 NO₂ 衛星観測による対流圏化学システム制約の評価

Aura/OMI などの衛星観測は対流圏 NO₂ 気柱量の全球分布を把握する上で、貴重な情報を提供してきました。2017 年 11 月に OMI の後継センサにあたる Sentinel-5 Precursor 衛星搭載の Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) が打ち上げられました。水平分解能や S/N 比のスペック上では、

TROPOMI は OMI より優れていることはわかっていますが [Veeffkind *et al.*, 2012], 分解能や導出アルゴリズムに伴う観測誤差, 観測の空間被覆率を勘案した TROPOMI と OMI の対流圏化学システム制約に対する寄与の系統的な評価はなされていませんでした。

そこで筆者らは, TROPOMI の対流圏 NO₂ 気柱量プロダクトの開発機関であるオランダ王立気象研究所 (KNMI) との共同研究により, CHASER データ同化システムを用いた OMI NO₂ と TROPOMI NO₂ プロダクトが対流圏化学システムの制約に与える影響の系統的比較を行いました。データ同化に用いていない地上観測・航空機観測を真値とした場合の NO₂ とオゾン濃度の平均二乗誤差の TROPOMI NO₂ のデータ同化による減少 (NO₂: 12~84%, オゾン: 7~40%) は, OMI NO₂ のデータ同化 (NO₂: 2~70%, オゾン: 1~22%) と比較して, 大きいことが示されました。さらに, これらの改善は水平分解能の向上と汚染域では測定誤差 (主に傾斜気柱量の導出に関わる誤差) の改善に起因することを明らかにしました [Sekiya *et al.*, 2022]。

3.3 COVID-19 パンデミックに伴うロックダウンが二次生成無機エアロゾルと放射収支に与えた影響

新型コロナウイルス (COVID-19) 感染の拡大を抑制するために, 世界各国で実施されたロックダウン (都市封鎖) 中には, 大気汚染の急速な変化が報告されました [e.g., Gkatzelis *et al.*, 2021]。大気汚染・気候緩和策の効果の評価する場合には, 中長期的な気候変動の影響を受けるため, 人間活動と大気汚染状況・気候影響との関係は必ずしも明らかではありません。しかし, 本事例では急速な変化が発生したため, 人間活動以外の要因の影響が小さく, 人間活動と大気汚染状況・気候影響との関係に関する知見を得ることが期待できます。微量気体成分やエアロゾル全体の濃度については観測データに基づくロックダウンの影響評価が多くなされた一方で [e.g., Miyazaki *et al.*, 2021; Hammer *et al.*, 2021], 大気中で

二次的に生成されるエアロゾルに関しては評価されていませんでした。

筆者らは, これまでに構築した CHASER を土台とした TROPOMI NO₂/SO₂ 観測のデータ同化システムを活用し, まず, エアロゾル前駆物質である NO_x および SO₂ 排出量のロックダウンによる変化量を逆推定しました。そして, CHASER による数値シミュレーションから, 硫酸塩・硝酸塩・アンモニウム塩エアロゾルが主要汚染領域において, 8~21% 減少すると推定しました。さらに, これらのエアロゾルの減少幅が放射収支に与える影響も評価し, +0.14 W·m⁻² の強い正の放射強制力をもたらすと推定しました [Sekiya *et al.*, 2023]。これは, 同期間の CO₂ 排出量の減少による冷却効果 (-0.025 W·m⁻²) [Forster *et al.*, 2020] がエアロゾル量の減少による加熱効果によって打ち消されていたことを, 衛星観測データに基づいて明らかにしたもので, 気候変動緩和策の効果の実証に対して重要な示唆を与える結果だと考えています。

4. おわりに

近年, 産業革命以前からの気温上昇幅が 1.5°C に迫る中, 緩和策に即効性のある SLCFs の重要性も高まってきていると感じています。その一方で, SLCFs の気候影響評価に利用される数値モデル, データ同化を用いた再解析データセットには, 様々な制限によって多くの解決すべき課題が残されているのが現状です。また, 個々の観測研究から得られる知見をモデル改善に反映させることも容易ではありません。データ同化は観測とモデルをつなぐ架け橋となる手法のひとつですが, 今後は衛星観測のみならず, より精度の高い現場観測とモデルの融合を進め, 現象・プロセス解明に資する研究を展開していきたいと思っています。さらに, 最近では地球システムモデルの開発・応用研究にも関わるようになっていますが, 観測とモデルの融合により得られた知見を将来予測にも反映させることを通じて, 大気化学分野が社会的に求められる役割を果たすことに貢献できればと考えて

います。

謝辞

本稿でご紹介した研究は多くの方々のご指導・ご支援により実施することができました。学部・修士・博士課程の指導教員である名古屋大学の須藤健悟先生には、モデル研究者としてのイロハをご指導いただき、深く感謝しております。NASA ジェット推進研究所の宮崎和幸さんにはデータ同化研究だけでなく、研究者として大事なことを多く教えていただきました。オランダ王立気象研究所の Henk Eskes さんにも TROPOMI NO₂ プロダクトの活用の際に多大なご支援をいただきました。また、日頃よりお世話になっている海洋研究開発機構の金谷有剛さん、滝川雅之さんをはじめ、関連グループの皆様、名古屋大学の学生・博士研究員時代にお世話になった皆様に御礼申し上げます。今回の受賞を励みに、大気化学研究コミュニティの発展に貢献できるよう、より一層力を入れて研究に取り組んでいく所存です。今後ともご指導・ご鞭撻のほど、どうぞよろしくお願い申し上げます。

参考文献

- Brodowsky, C. V. et al. (2023), Analysis of the global atmospheric background sulfur budget in a multi-model framework, *EGUsphere* [preprint].
- Carpenter, L. et al. (2013), Atmospheric iodine levels influenced by sea surface emissions of inorganic iodine, *Nature Geosci.*, 6, 108–111.
- Deshler, T. (2008). A review of global stratospheric aerosol: Measurements, importance, life cycle, and local stratospheric aerosol. *Atmos. Res.*, 90(2-4), 223-232.
- Forster, P. M. et al. (2020), Current and future global climate impacts resulting from COVID-19, *Nat. Clim. Chang.*, 10, 913–919.
- Gkatzelis, G. I. et al. (2021), The global impacts of COVID-19 lockdowns on urban air pollution: A critical review and recommendations, *Elem. Sci. Anth.*, 9 (1), 00176.
- Ha, P. T. M. et al. (2023), Implementation of HONO into the chemistry–climate model CHASER (V4.0): roles in tropospheric chemistry, *Geosci. Model Dev.*, 16, 927–960.
- Hammer, M. S. et al. (2021), Effects of COVID-19 lockdowns on fine particulate matter concentrations, *Sci. Adv.*, 7, eabg7670.
- He, Y., Hoque, H. M. S., & Sudo, K. (2022), Introducing new lightning schemes into the CHASER (MIROC) chemistry–climate model, *Geosci. Model Dev.*, 15, 5627–5650.
- Inness, A. et al. (2019), The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3515–3556.
- IPCC (2021), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, doi:10.1017/9781009157896.
- Kanaya, Y. et al. (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, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 7233–7254.
- Kashimura, H. et al. (2017), Shortwave radiative forcing, rapid adjustment, and feedback to the surface by sulfate geoengineering: analysis of the Geoengineering Model Intercomparison Project G4 scenario, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 3339–3356.
- Kawamiya, M. et al. (2020), Two decades of Earth system modeling with an emphasis on Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, 64.
- Miyazaki, K. et al. (2020), Updated tropospheric chemistry reanalysis and emission estimates, TCR-2, for 2005–2018, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2223–2259.
- Miyazaki, K. et al. (2021), Global tropospheric ozone responses to reduced NO_x emissions linked to the COVID-19 worldwide lockdowns, *Sci. Adv.*, 7, eabf7460.
- Miyazaki, K., Eskes, H. J., & Sudo, K. (2015), A tropospheric

- chemistry reanalysis for the years 2005–2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8315–8348.
- Morgenstern, O. et al. (2017), Review of the global models used within phase 1 of the Chemistry–Climate Model Initiative (CCMI), *Geosci. Model Dev.*, 10, 639–671.
- Robock, A. (2000), Volcanic eruptions and climate, *Rev. Geophys.*, 38(2), 191–219.
- Saiz-Lopez, A. et al. (2023), Natural short-lived halogens exert an indirect cooling effect on climate, *Nature*, 618, 967–973.
- Saiz-Lopez, A., & von Glasow, R. (2012), Reactive halogen chemistry in the troposphere, *Chem. Soc. Rev.*, 41(19), 6448–6472.
- Sekiya, T. et al. (2020), Global Bromine- and Iodine-Mediated Tropospheric Ozone Loss Estimated Using the CHASER Chemical Transport Model, *SOLA*, 16, 220–227.
- Sekiya, T. et al. (2023), The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative budget, *Sci. Adv.*, 9, eadh2688.
- Sekiya, T. et al. (2022), A comparison of the impact of TROPOMI and OMI tropospheric NO₂ on global chemical data assimilation, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 1703–1728.
- Sekiya, T., Miyazaki, K., Ogochi, K., Sudo, K., & Takigawa, M. (2018), Global high-resolution simulations of tropospheric nitrogen dioxide using CHASER V4.0, *Geosci. Model Dev.*, 11, 959–988.
- Sekiya, T. et al. (2021), Impacts of horizontal resolution on global data assimilation of satellite measurements for tropospheric chemistry analysis. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 13, e2020MS002180.
- Sekiya, T., Sudo, K., & Nagai, T. (2016), Evolution of stratospheric sulfate aerosol from the 1991 Pinatubo eruption: Roles of aerosol microphysical processes, *J. Geophys. Res.*, 121, 2911–2938.
- 須藤健悟 (2016), 化学気候モデルで探る大気微量成分の全球変動, *大気化学研究*, 36, 036A03.
- Sudo, K., Takahashi, M., Kurokawa, J., & Akimoto, H. (2002), CHASER: A global chemical model of the troposphere, 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, 107(D17), 4339.
- Takashima, H. et al. (2022), Full latitudinal marine atmospheric measurements of iodine monoxide, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4005–4018.
- Tatebe, H. et al. (2019), Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727–2765.
- Valin, L. C., Russell, A. R., Hudman, R. C., & Cohen, R. C. (2011), Effects of model resolution on the interpretation of satellite NO₂ observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 11647–11655.
- Veefkind, J. P. et al (2012), TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens. Environ.*, 120, 70–83.
- Watanabe, S. et al. (2011), MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, *Geosci. Model Dev.*, 4, 845–872.
- Yamaji, K., Ikeda, K., Irie, H., Kurokawa, J. & Ohara, T. (2014) Influence of model grid resolution on NO₂ vertical column densities over East Asia, *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, 64(4), 436–444.

原稿受領日: 2023 年 12 月 4 日

掲載受理日: 2024 年 1 月 9 日

著者所属:

1. 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

* 責任著者:

Takashi Sekiya <tsekiya@jamstec.go.jp>

ペルオキシラジカルの速度論的研究およびその大気化学への応用

Kinetic study of peroxy radicals and its application to atmospheric chemistry

河野七瀬^{1*}

HO_x サイクルを構成するペルオキシ(HO₂, RO₂)ラジカルは、対流圏オゾンの生成に深く関与する重要な化学種であり、これらの気相・不均一反応の正確な情報を得ることは、対流圏オゾン濃度変動の要因理解や、大気モデル計算の精度向上に繋がる重要な課題である。本稿では、これまで検出効率の低かった有機ペルオキシラジカルを FAGE-LIF システムの改良により高効率に検出し、NO₂ との化学反応速度定数を逆反応も含めて決定したので、報告する。さらに、HO₂ ラジカルと実大気エアロゾルの不均一反応が、対流圏オゾン生成への程度影響を与えるのか、エアロゾルへのリアルタイム取り込み係数測定結果から評価を行ったので紹介する。

1. はじめに

この度は日本大気化学会奨励賞という素晴らしい賞を頂きまして、大変ありがとうございます。昨年度より、近畿大学で研究室を立ち上げ、学生とともにスローペースながらも何とか研究を進めよう、としているタイミングでの受賞となり、私自身大きな心の励みになりました。また、しっかりと、一研究者として日本の大気化学、学術研究に貢献できるよう、引き続き努力していかなければならない、と身の引き締まる思いです。私自身は、学部時代より気相反応の kinetics, dynamics を研究中心とした研究室に入り、博士課程まで過ごしました。大気化学や燃焼化学で重要な素反応を対象とし、レーザー分光法を用いて、特に振動準位選択的なラジカル反応の観測を行って参りました。高い振動励起状態のラジカルは上層大気や燃焼中に存在し、そのような環境下でどのように原子分子が振る舞い、化学反応が進行するかを実験結果からイメージすることは、非常に魅力的なものでした。現

在も、実験結果を通じ、大気中でどのような化学・物理現象が起こっているのかを考察出来ていることを大変ありがたく感じております。本稿では、受賞テーマとなりましたペルオキシラジカルの検出、また、その化学反応の大気化学における意味合い、さらに、実大気観測から得られた結果についても紹介させていただきます。

2. ペルオキシラジカルの対流圏における化学反応

ペルオキシラジカルと呼ばれる HO₂, RO₂ ラジカルは、大気の酸化プロセスの中で形成され、対流圏オゾンや二次有機エアロゾルの生成にも関与する対流圏化学において最も重要な化学種のひとつです [Lightfoot et al., 1992; Orlando & Tyndall, 2012]。例えば、最もシンプルな有機ペルオキシ(RO₂)ラジカルである CH₃O₂ は主にメタン(CH₄)の OH ラジカルによる酸化反応によって生成します。



非常に高い酸化力をもつ OH ラジカルは、反応 (R1) のような H 引き抜き[Atkinson, 2003]や、多重結合をもつ炭化水素への付加反応によって、大気中の様々な VOC をアルキルラジカルに変化させ、引き続く O₂ との反応により、RO₂ ラジカルを生成します (R2)。つまり、植物や人間活動から放出される様々な VOC により、対流圏には多種多様な RO₂ ラジカルが存在することになります。

RO₂ ラジカルの消失過程に関しては、その大気質に依存することが知られています。清浄大気中では、主に HO₂ や RO₂ ラジカル同士の自己反応により消失し、その大気寿命は比較的長いことが報告されています[Peeters et al., 2009]。一方、NO_x 濃度の高い都市域を中心とした汚染大気においては、RO₂ は主に NO との反応により消失し、RO ラジカルおよび NO₂ を生成します。RO ラジカルは引き続く反応により HO₂ ラジカルを放出し、HO₂ ラジカルも NO と反応することで NO₂ および OH ラジカルを生成します。OH ラジカルの VOC 酸化から始まるこの一連の反応 (HO_x サイクル) から放出される NO₂ は、光化学反応により O₃ を生成するため、対流圏オゾンの主な発生プロセスになっています。つまり、サイクルを構成する OH、HO₂ そして RO₂ ラジカルの動態を調査することは対流圏オゾンの生成機構解明に繋がる重要な研究課題です。

3. RO₂ ラジカル検出手法の構築

RO₂ は対流圏オゾンの生成に深く関与するにもかかわらず、その検出効率の低さから、大気条件下での化学反応速度やメカニズム調査は多くないのが現状です。一方、HO_x サイクルの開始剤である OH ラジカルに関しては、その蛍光特性を利用し、1980 年代頃よりレーザー誘起蛍光 (LIF: Laser-Induced Fluorescence) を用いた高感度な検出法により、様々

な化学種との反応速度定数が決定されてきました。しかし、OH ラジカルの蛍光検出に関し、大気圧条件下では衝突による消光速度が非常に速いため、低圧条件下以外での蛍光検出は難しいという欠点がありました。そこで近年、Fluorescence assay by gas expansion (FAGE) システムと LIF 法を組み合わせた手法 (FAGE-LIF システム) が大気化学分野で構築されました。これは大気圧条件下にある反応セルから一部のサンプルガスを小さなピンホールを通して低圧の検出セルに導入し、検出セルに probe レーザー光を照射することで LIF を検出する手法です [Sadanaga et al., 2004]。この手法により、OH ラジカルの実大気中における反応性が様々な国や地域で測定されました [Fuchs et al., 2017; Li et al., 2020; Ramasamy et al., 2016; Whalley et al., 2016; Yoshino et al., 2006]。さらに、非蛍光分子である HO₂ ラジカルに関しても、ピンホールから検出セルに導入する間に NO を添加することで、化学反応により OH ラジカルに変換し、HO₂ ラジカルを OH ラジカルとして高感度で観測することが可能となりました [Miyazaki et al., 2013]。同様の手法により RO₂ ラジカルに関しても反応性測定が試みられてきましたが、特定の RO₂ ラジカルに限定され、特にアルカンや比較的小さな VOC 由来の RO₂ ラジカルに関しては化学変換後の OH ラジカルの検出効率が低いことが報告されていました [Fuchs et al., 2011; Hard et al., 1984; Hard et al., 1979; Onel et al., 2017; Whalley et al., 2013]。この原因としては、HO₂ ラジカルは NO 反応により一段階で OH ラジカルを生成しますが、RO₂ ラジカルは OH ラジカルへと多段階の反応を進める必要があり、また、RO + O₂ 反応が非常に遅いためでした [Atkinson et al., 1997; Orlando et al., 2003]。そこで、本研究では、反応セルと検出セルの間の化学変換領域を拡張し、大過剰の O₂ を添加できるよう、FAGE-LIF システムを改良しました。これにより、RO₂ ラジカルから OH ラジカルへの変換効率を劇的に向上させ、OH ラジカルの LIF を用いてこれまで検出効率の低かった RO₂ ラジ

カルを高効率に検出することに成功しました。RO₂ ラジカルは、反応セル内に対象とするラジカルの前駆物質である VOC を添加し、OH ラジカルによる酸化反応により生成しました。また、OH ラジカルは、O₃、H₂O をゼロガスとともに反応セル内へ添加し、そこに解離レーザー光を照射することで O₃ の光解離、また H₂O との後続反応を利用し生成しました。このシステムを用いることにより、1つの実験装置で様々な RO₂ ラジカルの反応性測定が可能となります。また、フィールドワークでの使用により、RO₂ ラジカルの実大気中における HO_x サイクルへの寄与や、エアロゾルとの不均一反応による消失過程を高効率に観測することが可能となり、大気化学分野における新しい知見の発見に繋がる可能性があると考えています。

4. RO₂ + NO₂ 反応速度の測定

化学変換法と FAGE-LIF システムを組み合わせた手法により、RO₂ ラジカルの高感度な検出が可能となったため、RO₂ の化学反応の中でも代表的な NO₂ との反応速度測定を行いました (RO₂ + NO₂ + M ⇌ RO₂NO₂ + M)。NO₂ との反応により生成する錯合体 RO₂NO₂ の一部は、その安定性から、長距離輸送された後に熱分解し、再び NO₂ を放出するという NO_x リザーバーとして働くことが知られています [Murphy *et al.*, 2004]。特に R 部分がアシル基 (R'CO-) であるペルオキシアシルナイトレイト (PANs: R'C(O)O₂NO₂) の寿命は低温の上層大気で数カ月と長く、また、HO₂NO₂ と CH₃O₂NO₂ に関しても、合わせて上層大気の NO_y の約 30%を占めると報告されており、RO₂ 反応の中でも NO₂ との反応は重要な反応のひとつです [Atkinson *et al.*, 2007]。

まず初めに、最もシンプルな CH₃O₂ ラジカルと NO₂ の反応実験を実施しました。様々な NO₂ 濃度条件下での RO₂ 濃度時間変化を測定した結果、NO₂ 濃度が低い条件下では、一次指数関数に従い消失しているのが観測されましたが、NO₂ 濃度が高くなるにつれて、速い濃度減衰(図 1 最下段、0–0.2 s 辺り)と、遅い濃度減衰(図 1 最下段、およそ 0.4 s 以降)が観測されました。

これは、生成した CH₃O₂NO₂ の熱分解のプロセスにより、CH₃O₂ ラジカルの濃度変化が、一次指数関数的な減衰のみでは記述出来ないことを示しています。そこで本研究では、正反応と逆反応の両過程を考慮した RO₂ の濃度時間変化の式を立てました(式 1, 2)。

$$[\text{RO}_2] = [\text{RO}_2]_0 \times (k_1 + k_d + A)/(A - B) \times \exp(Bt) - [\text{RO}_2]_0 \times (k_1 + k_d + B)/(A - B) \times \exp(At) \quad (1)$$

A および B はそれぞれ

$$A, B = [-(k_1 + k_2 + k_d + k_d') \pm \{(k_1 + k_2 + k_d + k_d')^2 - 4(k_2k_d + k_1k_d' + k_dk_d')\}^{1/2}] \div 2 \quad (2)$$

ここで、 k_1 , k_2 はそれぞれ RO₂ と RO₂NO₂ の消失速度、また、 k_d , k_d' はそれぞれ RO₂ と RO₂NO₂ の拡散速度です。 k_d は NO₂ を添加していない条件下での RO₂ 濃度時間変化の一次指数関数フィッティング解析から決定することが出来ますが、RO₂NO₂ の拡散速度 k_d' は RO₂ ラジカルの拡散速度と分子量比から見積もりました。また、このフィッティング解析はパラメーターが多いため、本研究では、グローバルフィッティング

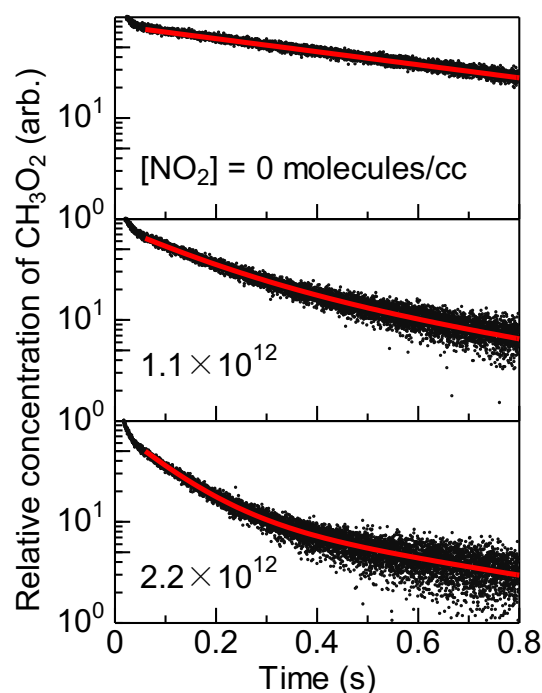


図 1 各 NO₂ 濃度条件下における CH₃O₂ ラジカルの濃度時間変化。赤線は式(1)を用いて行ったフィッティング結果。

解析法を用い、 RO_2 の消失速度 k_1 は NO_2 濃度に依存、 RO_2NO_2 の消失速度 k_2 は NO_2 濃度に依存しないようにフィッティング解析を行いました。その結果、 $\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{NO}_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{O}_2\text{NO}_2 + \text{M}$ の正反応と逆反応の速度定数を $(3.9 \pm 0.3) \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $2.0 \pm 0.6 \text{ s}^{-1}$ とそれぞれ決定することに成功しました。正反応に関しては、大気圧条件下でのこれまでの報告値と非常に良い一致を示し、 RO_2 の反応を正確に観測出来ていることを証明することが出来ました [Bacak *et al.*, 2006; Bridier *et al.*, 1992; Ravishankara *et al.*, 1980; Sander & Watson, 1980; Wallington *et al.*, 1999]。また、同時に決定した $\text{CH}_3\text{O}_2\text{NO}_2$ の熱分解速度に関しては、室温大気圧条件下での初めての計測となりましたが、高温および低温実験からの予測値と近い値となりました [Bahta *et al.*, 1982; Bridier *et al.*, 1992; McKee *et al.*, 2016; Zabel *et al.*, 1989]。

観測および解析手法が確立したため、エタン由来の $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ ラジカルと NO_2 の化学反応に対しても実験を行い、それぞれ正反応と逆反応の反応速度定数を決定しました [Kohno *et al.*, 2020]。これらの反応速度に関する実験報告は数例しかなく、大気圧室温条件下での測定は最初の報告でした [Elfers *et al.*, 1990; Ranschaert *et al.*, 2000; Zabel *et al.*, 1989]。また、プロパン (C_3H_8)、プロペン (C_3H_6) 由来の RO_2 に関しても実験を行い、それぞれの速度定数を決定しました。その結果、炭素数が 3 つまでは、 R の炭素数が増えるにつれ平衡定数は小さく、つまり、逆反応の速度が速くなり、大気中における錯合体の寄与は小さくなりました。しかしながら、Zabel らは低温 (253 K, 800 mbar) では、炭素数 4 をピークに再び RO_2NO_2 の分解速度が遅くなると報告しており、室温大気圧条件下でも、 R 依存性が同様に表れるのかを明らかにする必要がありますと考えております [Zabel *et al.*, 1989]。また、本手法を用いて様々な RO_2 反応を観測することは、複雑な RO_2 ケミストリーの定量的、定性的理解への貢献に繋がると考えております。

5. HO_2 ラジカル不均一反応が及ぼす対流圏 O_3 生成への影響評価

これまでに述べた化学変換法と FAGE-LIF システムを組み合わせた手法は、前述の通り、 HO_2 ラジカルの反応性観測にも応用され、実大気中における消失速度が測定可能となってきました [Miyazaki *et al.*, 2013]。中でも、 HO_2 ラジカルのエアロゾル等による不均一反応は、 HO_x サイクルを停止させる、つまり、対流圏オゾン生成を抑制させる可能性があるため、 HO_2 ラジカルの消失過程全体に対してどの程度寄与しているのか、重要な論点でした。共同研究者である Zhou らは、粒子濃度濃縮装置を構築し、さらに、FAGE-LIF システムと組み合わせることで、京都市内の実大気エアロゾルへの HO_2 ラジカルの取り込み係数をリアルタイムに計測する事に成功しました [Zhou *et al.*, 2020]。私は、さらに、上記の取り込み係数を用いて、 HO_2 ラジカルの不均一反応が対流圏 O_3 生成にどの程度寄与するのか解析致しました [Kohno *et al.*, 2022]。その結果、京都市内のような NO_x 濃度が比較的低い地域では、 HO_x サイクルを回転させる $\text{HO}_2 + \text{NO}$ 反応速度に対し、不均一反応による消失速度が 10 分の 1 であつても O_3 生成能に影響を与え得ることを明らかにしました。これは、 O_3 が連鎖反応により生成されるため、たとえ不均一反応による消失の速度が遅い場合でも、 NO_x 濃度が低い地域では十分に

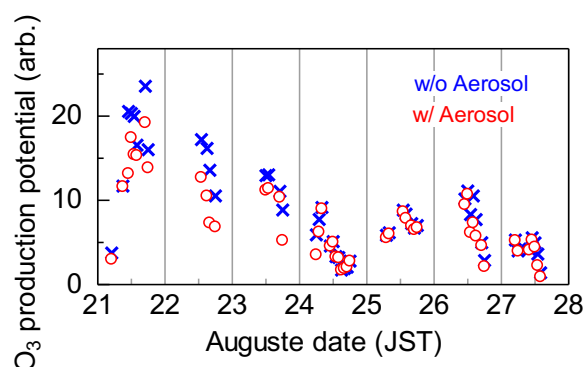


図 2 O_3 生成ポテンシャルの変動 (2018/8/21 - 8/27)。青 $\times$ 印は HO_2 ラジカルのエアロゾルへの取り込みを考慮しない場合、赤丸は考慮した場合。 NO 平均濃度は、8/20 - 8/23 までが $0.5 \pm 0.5 \text{ ppb}$, 8/24 - 8/30 が $1.4 \pm 1.7 \text{ ppb}$ 。

HO_x サイクルが回転しており(5 ~ 10 回), 影響が大きくなり得るということです。本研究では 2018 年京都夏季における HO₂ ラジカルのエアロゾルへの取り込み(観測期間における平均消失速度 $k'_{\text{HO}_2} = 0.0017 \pm 0.0015 \text{ s}^{-1}$)が, O₃ 生成ポテンシャルをおよそ 17% 減少させることを明らかにしました(図 2)。現在, 対流圏オゾン濃度が増加している都市域では基本的に NO_x 濃度が高く, HO_x サイクルはほとんど回転しません。このような場合, 直接 HO₂ ラジカルのエアロゾル取り込みが対流圏オゾンへ大きな影響を与える可能性は低いと考えられます。これは, NO_x 濃度が非常に低い(< 0.3 ppb)場合のみエアロゾルの HO₂ ラジカル取り込みが大気組成へ影響を与え得るという先行研究とも良い一致をしています[Whalley *et al.*, 2021]。今後, より大気汚染が改善されることで, NO_x 濃度が都市域でも減少した際, 粒子濃度に依存して HO₂ ラジカルの不均一消失の影響が表れる可能性を示唆しており, 引き続き研究を進めていく必要があります。また, HO_x サイクルは HO₂ だけでなく, RO₂ ラジカルも同様の働きをすることから, RO₂ ラジカルのエアロゾルへの取り込み過程も評価することは, HO_x サイクルの完全理解に繋がると考えています。

6. おわりに

現在は, 博士課程を卒業し 10 年近くになりますが, 卒業後も好きな研究が続けられている状況を大変ありがたく感じております。ただ, 続けられるところまで, と思いながら必死に続けて参りましたが, 私個人だけの力では研究生活を維持することは不可能でした。これまでも多くの方の励ましや助けを頂くことで困難を乗り越えることが出来たと思います。広島大学 山崎勝義教授には純粋な研究の面白さや, 実験を緻密におこなうことの大切さを教えて頂きました。学生時代には無茶苦茶な時間管理でありましたが, 思う存分に, 実験, 解析, ディスカッションをさせて頂いた事が今に繋がっていると感じております。また, 京都大学 梶井克純教授には, 研究者として, また, 個人

としても沢山助けて頂きました。私はつい目前の実験テーマのみ考えてしまいがちなのですが, 研究を大きな枠組みで考えることの大切さや, 他の研究者と協力し補い合いながら物事を進めることのパワフルさを教えて頂きました。また, 二回の出産を経て, 育休明けも子供の体調不良や予防接種などで時間を奪われがちだったにもかかわらず, 研究者を続けられているのも梶井教授のお陰です。子育てをしながら研究者として働くことはまだ始まったばかりですが, 1 つの大きなチャレンジだと思い, 今後も引き続き頑張っていこうと考えています。また, このチャレンジがいつか下の世代へも何かの形で活きたら, とも思います。他にも日々お世話になっている方々のお名前を挙げるとキリがありませんが, 特に京大梶井研でお世話になりました方々には, 妊娠中や子育てで大変な際にも多くのサポートをして頂き, 大変感謝しております。これまで頂いた励ましや助けに応えられるよう, 引き続き研究を発展させていけたら, と思います。また, 一研究者として, 大変僅かな力ではありますが, 我が国の大気化学, そして学術研究に少しでも貢献出来るよう, 尽力していく所存です。今後ともご指導ご鞭撻のほど, どうぞよろしくお願いいたします。

参考文献

- Atkinson, R. (2003), Kinetics of the gas-phase reactions of OH radicals with alkanes and cycloalkanes, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 2233.
- Atkinson, R. et al. (1997), Evaluated kinetic, photochemical and heterogeneous data for atmospheric chemistry .5. IUPAC Subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 26(3), 521-1011.
- Bacak, A. et al. (2006), Kinetics of the CH₃O₂ + NO₂ reaction: A temperature and pressure dependence study using chemical ionisation mass spectrometry, *Chem. Phys. Lett.*, 419(1-3), 125-129.
- Bahta, A., Simonaitis, R., & Heicklen, J. (1982), THERMAL-

- DECOMPOSITION KINETICS OF $\text{CH}_3\text{O}_2\text{NO}_2$, *J. Phys. Chem.*, 86, 1849-1853.
- Bridier, I., Lesclaux, R., & Veyret, B. (1992), Flash photolysis kinetic study of the equilibrium $\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{O}_2\text{NO}_2$, *Chem. Phys. Lett.*, 191(3), 259-263.
- Elfers, G., Zabel, F., & Becker, K. H. (1990), Determination of the Rate-Constant Ratio for the Reactions of the Ethylperoxy Radical with NO and NO_2 , *Chem. Phys. Lett.*, 168(1), 14-19.
- Fuchs, H. et al. (2011), Detection of HO_2 by laser-induced fluorescence: calibration and interferences from RO_2 radicals, *Atmos. Meas. Tech.*, 4(6), 1209-1225.
- Fuchs, H. et al. (2017), OH reactivity at a rural site (Wangdu) in the North China Plain: contributions from OH reactants and experimental OH budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 17(1), 645-661.
- Hard, T. M., O'Brien, R. J., Chan, C. Y., & Mehrabzadeh, A. A. (1984), Tropospheric Free Radical Determination by FAGE, *Environ. Sci. Technol.*, 18, 768-777.
- Hard, T. M., Obrien, R. J., Cook, T. B., & Tsongas, G. A. (1979), Interference suppression in OH fluorescence detection, *Appl. Opt.*, 18, 3216-3217.
- Kohno, N., Li, J., Sakamoto, Y., & Kajii, Y. (2020), Rate constants of $\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{O}_2\text{NO}_2$ and $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{NO}_2$ reactions under atmospheric conditions, *Int. J. Chem. Kinet.*, 53(5), 571-582.
- Kohno, N. et al. (2022), Impacts of missing OH reactivity and aerosol uptake of HO_2 radicals on tropospheric O_3 production during the AQUAS-Kyoto summer campaign in 2018, *Atmos. Environ.*, 281, 119130.
- Li, J. et al. (2020), Total hydroxyl radical reactivity measurements in a suburban area during AQUAS-Tsukuba campaign in summer 2017, *Sci. Total Environ.*, 740, 139897.
- Lightfoot, P. D. et al. (1992), Organic Peroxy-Radicals - Kinetics, Spectroscopy and Tropospheric Chemistry, *Atmospheric Environment Part a-General Topics*, 26(10), 1805-1961.
- McKee, K., Blitz, M. A., & Pilling, M. J. (2016), Temperature and Pressure Studies of the Reactions of CH_3O_2 , HO_2 , and 1,2- $\text{C}_4\text{H}_9\text{O}_2$ with NO_2 , *J. Phys. Chem. A*, 120(9), 1408-1420.
- Miyazaki, K., Nakashima, Y., Schoemaeker, C., Fittschen, C., & Kajii, Y. (2013), Note: A laser-flash photolysis and laser-induced fluorescence detection technique for measuring total HO_2 reactivity in ambient air, *Rev. Sci. Instrum.*, 84(7).
- Murphy, J. G. et al. (2004), Measurements of the sum of HO_2NO_2 and $\text{CH}_3\text{O}_2\text{NO}_2$ in the remote troposphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 377-384.
- Onel, L., Brennan, A., Seakins, P. W., Whalley, L., & Heard, D. E. (2017), A new method for atmospheric detection of the CH_3O_2 radical, *Atmos. Meas. Tech.*, 10(10), 3985-4000.
- Orlando, J. J., & Tyndall, G. S. (2012), Laboratory studies of organic peroxy radical chemistry: an overview with emphasis on recent issues of atmospheric significance, *Chem. Soc. Rev.*, 41(19), 6294-6317.
- Orlando, J. J., Tyndall, G. S., & Wallington, T. J. (2003), The atmospheric chemistry of alkoxy radicals, *Chem. Rev.*, 103(12), 4657-4689.
- Peeters, J., Nguyen, T. L., & Vereecken, L. (2009), HO_x radical regeneration in the oxidation of isoprene, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 11(28), 5935-5939.
- Atkinson, R. et al. (2007), Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Volume III – gas phase reactions of inorganic halogens, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 981.
- Ramasamy, S. et al. (2016), Total OH reactivity measurement in a BVOC dominated temperate forest during a summer campaign, 2014, *Atmos. Environ.*, 131, 41-54.
- Ranschaert, D. L., Schneider, N. J., & Elrod, M. J. (2000), Kinetics of the $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 + \text{NO}_x$ reactions: Temperature dependence of the overall rate constant and the $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONO}_2$ branching channel of $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 + \text{NO}$, *J. Phys. Chem. A*, 104(24), 5758-5765.
- Ravishankara, A. R., Eisele, F. L. & Wine, P. H. (1980), Pulsed laser photolysis–long path laser absorption kinetics study of the reaction of methylperoxy radicals with NO_2 , *J. Chem.*

Phys., 73(8), 3743-3749.

Sadanaga, Y. et al. (2004), Development of a measurement system of OH reactivity in the atmosphere by using a laser-induced pump and probe technique, *Rev. Sci. Instrum.*, 75(8), 2648-2655.

Sander, S. P., & Watson, R. T. (1980), Kinetics Studies of the Reactions of CH₃O₂ with NO, NO₂, and CH₃O₂ at 298 K, *J. Phys. Chem.*, 84, 1664-1674.

Wallington, T. J., Nielsen, O. J., & Sehested, K. (1999), Kinetics of the reaction of CH₃O₂ radicals with NO₂, *Chem. Phys. Lett.*, 313, 456-460.

Whalley, L. K., Blitz, M. A., Desservettaz, M., Seakins, P. W., & Heard, D. E. (2013), Reporting the sensitivity of laser-induced fluorescence instruments used for HO₂ detection to an interference from RO₂ radicals and introducing a novel approach that enables HO₂ and certain RO₂ types to be selectively measured, *Atmos. Meas. Tech.*, 6(12), 3425-3440.

Whalley, L. K. et al. (2021), Evaluating the sensitivity of radical chemistry and ozone formation to ambient VOCs and NO_x in Beijing, *Atmos. Chem. Phys.*, 21(3), 2125-2147.

Whalley, L. K. et al. (2016), Atmospheric OH reactivity in central London: observations, model predictions and estimates of in situ ozone production, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(4), 2109-2122.

Yoshino, A. et al. (2006), Measurement of total OH reactivity by laser-induced pump and probe technique—comprehensive observations in the urban atmosphere of Tokyo, *Atmos. Environ.*, 40(40), 7869-7881.

Zabel, F., Reimer, A., Becker, K. H., & Fink, E. H. (1989), Thermal-Decomposition of Alkyl Peroxynitrates, *J. Phys. Chem.*, 93(14), 5500-5507.

Zhou, J., Murano, K., Kohno, N., Sakamoto, Y., & Kajii, Y. (2020), Real-time quantification of the total HO₂ reactivity of ambient air and HO₂ uptake kinetics onto ambient aerosols in Kyoto (Japan), *Atmos. Environ.*, 223, 117189.

原稿受領日: 2023 年 12 月 19 日

掲載受理日: 2024 年 1 月 11 日

著者所属:

1. 近畿大学 理工学部

* 責任著者:

Nanase Kohno < kohno@chem.kindai.ac.jp >

第 10 回酸性雨国際会議 ACID RAIN 2020 の開催報告

黒川純一^{1*}, 佐瀬裕之¹, 佐藤啓市¹

2023 年 4 月 18 日 (火) から 21 日 (金) までの日程で、第 10 回酸性雨国際会議 (The 10th International Conference on Acid Deposition, ACID RAIN 2020 — The Future Environment and Role of Multiple Air Pollutants —) が朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟市中央区万代島) で開催された。ACID RAIN “2020” から察せられる通り、本国際会議は 2020 年に開催の予定であったが、新型コロナウイルス感染症 (以降 COVID-19) の影響のため、数度の延期及び開催方式の見直しを余儀なくされ、最終的に現地・オンラインを組み合わせたハイブリッド形式で実施することとなった。当初予定より約 3 年近く遅れての開催となったが、同じく COVID-19 により延期となった東京オリンピックと同様に、名称に 2020 を残すこととした (過去の開催史は表 1 参照)。

本会議は、共催機関として、国内から日本大気化学会、大気環境学会、生物地球化学研究会、日本陸水学会、日本土壌肥料学会、国際から IUFRO (International Union of Forest Research Organizations, Unit 8.04.00: Impacts of Air Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems), 後援機関として、日本生態学会、日本地球化学会、日本地球惑星科学連合、日本森林学会、森林立地学会、水文・水資源学会、日本水環境学会、環境経済・政策学会、及び、多くの会議スポンサーからの支援を受けて実施された (<https://www.acidrain2020.org> 参照)。実施主体となった科学運営委員会 (Scientific Steering Committee) には日本国内の研究者が約 40 名、また、それを支援する国際科学諮問委員会 (International Scientific Advisory Board) には海外の研究者が約 30 名参画し、会議テーマの設定、セッション・トピックの提案、投稿された要旨の査読、プログラムの作成、会議当日の

セッションの座長や会場運営などを担った。組織委員会 (Organizing Committee) 事務局は、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) のネットワークセンターでもあり、新潟市西区に所在するアジア大気汚染研究センター (ACAP) が担い、会場手配、参加登録・会計管理等を含む全ての事務処理を行い、期間中は職員の総力を挙げて会議の運営に当たった。

本会議の午前中は、総会形式 (Plenary session) で国際的に活躍する研究者による基調講演 (表 2 参照) が行われ、続いてポスターセッションが行われた。午後は、分科会形式 (Breakout sessions) を採り、三つの会場に分かれて 20 のセッション (表 3 参照) に対する口頭発表が行われた。総会と同じ最も広い会場における分科会では、ハイブリッドセッションとしてオンラインによる発表も行われた。通信トラブルによる進行の遅延は何度か生じたものの、当日予定されていた発表は全て無事に行われた。また、会合間際に発表キャンセルの連絡が入るケースもあったが、個々の発表の質疑時間の延長、セッションテーマに対する総合討論の時間を設けるなどの工夫をして、会合が有意義になるように努めた。

表 1 酸性雨国際会議 ACID RAIN の開催史

Year	Place
2023	Niigata, Japan
2015	Rochester, USA
2011	Beijing, China
2005	Prague, Czech Republic
2000	Tsukuba, Japan
1995	Göteborg, Sweden
1990	Glasgow, Scotland, UK
1985	Muskoka, Ontario, Canada
1980	Sandefjord, Norway
1975	Columbus, Ohio, USA

表 2 基調講演の講演者及び講演タイトル

講演者	講演タイトル
Prof. Charles T. Driscoll: Syracuse University, USA	Recovery of terrestrial and aquatic ecosystems in the U.S. from declining acidic deposition
Prof. Joshua S. Fu: The University of Tennessee, USA	Improving global estimates of atmospheric deposition through model-measurement fusion approaches
Prof. Lingli Liu: Institute of Botany, Chinese Academy of Science, China	Anthropogenic aerosol alters plant photosynthesis, transpiration and growth
Prof. Madhoolika Agrawal: Banaras Hindu University, India	Tropospheric ozone variability and its effects on vegetation and crop plants in the Indo Gangetic Plain region of India
Prof. Kentaro Hayashi: Research Institute for Humanity and Nature, Japan	Atmosphere-land interaction aspects of the nitrogen issue
Prof. Shuxiao Wang: Tsinghua University, China	Development and applications of air benefit, cost and attainment assessment system

表 3 分科会セッション

セッションタイトル	備考
S1A Emissions and their Evaluation by Monitoring and Modeling	
S1B Atmospheric chemical and physical processes	
S2A Long-range Transport and Modeling	
S2B Long-range Transport and Modeling	
S3A Urban and regional air pollution by multiple pollutants in Asia	
S3B Air pollution and climate change by multiple pollutants	Hybrid
S3C Observation and assessment studies of multiple pollutants	
S4A Wet, Dry, and Occult Deposition	Hybrid
S4B Wet, Dry, and Occult Deposition	
S4C Wet, Dry, and Occult Deposition	
S5A Effects of Atmospheric Deposition and Multiple Pollutants on Terrestrial Ecosystems	
S5B Effects of Atmospheric Deposition and Multiple Pollutants on Terrestrial Ecosystems	Hybrid
S6A Long-term trends of deposition, soil and water recovery	Hybrid
S6B Long-term trends of deposition, soil and water recovery	
S7A Atmospheric deposition and biogeochemical cycling	
S7B Atmospheric deposition and biogeochemical cycling	
S7C Atmospheric deposition and biogeochemical cycling	Hybrid
S8 Effects of Air Pollutants on Climate Change	Hybrid
S9A Critical load mapping and health effects index	Hybrid
S9B Atmospheric environment management with science and policy	

第1回酸性雨国際会議 ACID RAIN が米国コロンバスで開催されたのは 1975 年であった。それから半世紀近くの時が過ぎ、当時は重要性の高い環境問題であった「酸性雨/ACID RAIN」も、地域によって状況は異なるものの、発生源対策の進んだ地域では環境問題としての緊急性は薄れ、キーフレーズから外れてきていることは事実であろう。実際、ACID RAIN という名称を見て参加が控えられる可能性を危惧し、会議名称変更の議論もあったが、名称は変更せず、「The Future Environment and Role of Multiple Air Pollutants」という副題をつけることとなった。これは、歴史ある国際会議の継続性の観点も勿論あるが、酸性雨問題に端を発した研究が、現在の大気環境・生態影響評価に関わる研究につながっていること、更に、気候変動などの新たな問題とも相互に関連し合うものであることを示すメッセージと認識している。例えば、表 2 で示されている参加者による発表のセッションのタイトルでも、acid rain のみならず、acid deposition という表現も使用されていない。これは、沈着という現象について、過去において重視されていた酸性沈着のみでなく、物質循環における大気沈着として着目する現在の流れを反映している。また、大気汚染・気候変動の問題とも共通する、排出、輸送、反応、影響評価、科学と政策の関係に関連するセッションも用意された。ここでは、いくつかのセッションから得られた所感を示したい。

S1A: Emissions and their Evaluation by Monitoring and Modeling においては、オーソドックスな排出インベントリを対象としたものは、アジア域排出インベントリ REAS に基づく短寿命気候強制因子 (SLCFs) 排出量の長期トレンドのレビューのみであったが、観測とモデルを用いた、既存排出インベントリにおける近年の中国ブラックカーボン排出量の課題点の提示、新潟巻における観測に基づく $\text{PM}_{2.5}$ の発生源解析、温室効果ガス・水循環観測技術衛星 GOSAT-GW による排出インベントリ定量評価の可能性、高分解能衛星観測データによるエアロゾル光学的厚さ AOD マッ

プの作成、多様なデータに基づく高分解能 NO_2 濃度マップの作成と、様々な側面からの発表がなされた。質疑においては、排出インベントリの不確実性について総合的な議論がなされた。排出インベントリの不確実性定量評価については、ボトムアップ排出インベントリの開発過程として実施することも重要であるが、本セッションでも発表のあった、観測データ(とりわけ衛星観測データ)やモデルを用いた評価も重要であり、関連研究者の連携の必要性が確認された。

S3B: Air pollution and climate change by multiple pollutants においては、中国、タイ、香港、インドの研究者に気候変動と多種な大気汚染物質の関係に関する発表及び討議が行われた。植物起源の揮発性有機化合物 (BVOC) の放出量は、気象要因によって影響され、BVOC は SLCF の 1 つである O_3 の前駆物質となる。また、大気汚染物質はウォッシュアウトによって除去されるため、それらの濃度は降水量に大きく影響される。気候変動と大気汚染物質濃度変動を複合的に考察する重要性が本セッションで確認された。

S3C: Observation and assessment studies of multiple pollutants においては、大気モデリング、衛星観測、先駆的な観測手法、室内実験、健康影響評価など様々な観点で、多種な大気汚染物質の評価に関する発表及び討議が行われた。本セッションの発表数は限定的であったが、アジア地域で行われている大気汚染物質の評価に関する最新の知見を拝聴することができた。大気中マイクロプラスチックの研究は、日本でも近年研究が進められているが、プラスチック材料を含む廃棄物管理が不十分な途上国においても重視されていることが判った。

S6B: Long-term trends of deposition, soil and water recovery においては、大気、土壌、陸水のそれぞれの媒体での酸性化からの回復に関して、米国からは 30 年間の降水化学の長期トレンドと大気浄化法の効果、インドネシアからは森林火災の降水化学特性への影響、チェコからは土壌酸性化よりも大きな大気汚

染の森林成長への影響, ドイツと日本からは欧州や東アジアでの沈着量減少による森林生態系での硫黄動態の変化, 中国からは陸水化学の酸性化からの回復の遅れについて報告があった。回復過程とそのメカニズムの解明, 更には気候変動による回復遅延が議論されるなど, 酸性雨研究は新たなフェーズに入ったと考えられた。

S8: Effects of Air Pollutants on Climate Change においては, 脱炭素に関連する様々なアクションが与える SLCFs 及び大気汚染物質削減のコベネフィット効果について, 一連のケーススタディの発表があった。中国・インドにおける早急かつ劇的なエネルギー対策, タイ・インドネシアにおける革新的な脱炭素技術の導入, 及び, ベトナムにおけるカーボンニュートラル政策をターゲットとしたシナリオ解析の結果が報告された。このセッションでは, 会議直前に発生した発表キャンセルの時間を活用し, 上記三件の発表を対象とした総合討論の時間が設けられ, 該当国の参加者などを含め, 活発な議論が行われた。

酸性雨国際会議 ACID RAIN は, 原則 5 年毎に開催されてきた(表 1)。今回の会合は, 度々の延期がなされたこと, 登録時期はまだ COVID-19 問題の先行きが不透明だったことに加え, 開催時期が年度明け早々だったこともあり, 日本の研究者にとっては参加しづらい状況ではあったと思う。しかしながら, 特に大気系の研究者にもう少しご参加いただきたかった, というのが運営主催者側の本音として感じたことであった。次回の開催場所・時期は未定であるが, 日本大気化学会会員の皆様, 本報告から酸性雨国際会議によりご興味をお持ちいただき, 参加を検討いただければ幸いである。



写真 1 基調講演会場の様子



写真 2 会議での質疑応答

謝辞

本国際会議の開催においては, 日本大気化学会から, 後援機関としてのサポートとともに, 会議スポンサーとしてのご支援もいただいた。また, 本国際会議の科学運営委員会にご参画いただいた方を始め, 会議の準備・当日の運営等において, 日本大気化学会の会員の皆様からご協力をいただいた。ここに改めて感謝申し上げます。

著者所属:

1. 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

* 責任著者

Jun-ichi Kurokawa <kurokawa@acap.asia>

2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific の開催概要と運営所感

板橋秀一^{1*}, 大原利真², 茶谷聡³, 櫻井達也⁴, 伊藤美羽⁵, 上田佳代⁶, 大島長⁷, 黒川純一⁸, 佐藤啓市⁸, 嶋寺光⁹, 菅田誠治³, 速水洋¹⁰, 森野悠³, 山地一代¹¹, 山村由貴¹², 山本重一¹²

2023 年 7 月 17～21 日の 5 日間にわたって 2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific (<https://confit.atlas.jp/guide/event/cmas2023/top>) を埼玉県さいたま市において開催した。CMAS (Community Modeling and Analysis System) は、モデル研究に関わるコミュニティであり、ノースカロライナ大学(UNC; University of North Carolina)にセンターが設置されている。例えば、日本でも多くの研究実績を有する化学輸送モデル CMAQ (Community Multiscale Air Quality modeling system) の配布・管理やトレーニング、ウェビナーなどを行っている。毎年 10 月に UNC にて開催される国際会議には 200 名以上が参加し、さらに、近年のモデル研究の進展や適用地域の広がりに伴ってアジアと南米でも隔年で開催するに至っている。2018 年 5 月に北京で第 1 回

CMAS-Asia-Pacific が開催され、その後の関係者間の調整を経て 2020 年の次期開催国に日本が候補となっていたが、新型コロナウイルス感染症の拡大のために延期され、この度の開催となった。

7 月 17～18 日にさいたま会館でトレーニングを、19～21 日に大宮ソニックシティで本会議を実施した。この会議ではテーマとして「One atmosphere in Asia-Pacific region – multi-scales, multi-interactions, and multi-effects-」を掲げ、以下の 6 セッションを設けた。

- Ozone and PM_{2.5} pollution in Asia-Pacific region
- Updating of air quality modeling
- Multi-scale modeling applications and evaluation
- Emission inventory
- Linkage between air quality and climate
- Multi-effects and policy making



写真 1 本会議初日に撮影された集合写真

また、以下の 3 つの特別セッションを構成した。

- Special Session: AQNEA
(<https://iiasa.ac.at/projects/aqnea>)
- Special Session: Aakash project
(<https://aakash-rihn.org/en/about-project/>)
- Special Session: Street-in-Grid (SinG) modeling
(https://zenodo.org/record/1025629#.Y7e_AS_3JMA)

本会議初日午前には Plenary Session として、Jiming Hao 先生(清華大学), Sarav Arunachalam 先生(UNC), 中島映至先生(東京大学), Gregory Carmichael 先生(University of Iowa)の 4 名から特別講演を行っていただいた。以降、全 9 セッションは 2 会場でのパラレルセッションとして、セッションキートン(12 件)、口頭発表(63 件、うちオンライン発表 5 件)、また、ポスター発表(21 件)があった。16 の国・地域から 121 名が参加し、最新の研究成果の発表と活発な議論が行われた。また、本会議前のトレーニングでは、CMAQ の基礎知識から活用法・応用例などまで広く紹介され、国内外の学生や若手研究者など 57 名が参加した。

以上が国際会議の概要であるが、以下では国際会議の運営側の立場に携わった所感をまとめておきたい。まず、対面開催の方向で具体的に計画を立て始めた 2022 年夏段階では、新型コロナウイルス感染症の状況もはっきりとせず、はたして本当に参加者が集まるのかどうか、極めて難しい状況であった。状況次第ではハイブリッド形式あるいは完全オンラインということも含みつつ準備を進めたが、2023 年 5 月の新型コロナウイルス感染症の 5 類感染症への移行とそれに伴う入国時の水際対策の緩和の動向もあり、対面開催は確固たるものとなった。結果としては久しぶりの対面の国際会議ということで、多くの議論や(オンラインでは依然として難しい)休憩時間の談話などが多く見られ、本国際会議を対面での開催として良かったと感じている。国外からの参加者にとっては、円安の状況も追い風となったのかもしれないが、本国

際会議に参加いただいた国内外のみなさまに改めてお礼申し上げたい。

国内の実行委員間ではメールでのやりとりを中心に、2 ヶ月に 1 度程度のオンライン会議を通じて進捗状況等の確認を行った。トレーニング会場となったさいたま会館には 1 回、本会議の会場である大宮ソニックシティには 3 回、実際に足を運ぶことで駅から会場までの経路・距離感や会場の規模、設備・備品等の確認を行い、会場レイアウトや予算面について担当者と打ち合わせを行った。このほか、会場準備については、昼食および懇親会会場の検討、そして廃棄物処理などにおいて、入念に事前検討や現地踏査を行うことが重要と感じた。その進捗状況については、日米の関係者間でも適宜メールするとともに、米国側の午前中・日本側の夜間に 3 回のオンライン会議の場を設けて意見交換を進めた。

国内外の招聘者については早々に決定したものの、2023 年に入ってからやりとりを進めていく中で、国外の招聘者からなかなか返事がもらえないなど心労も多かった。どのタイミングでリマインドを送るのが適切なのか難しい判断であったが、例えば、連絡のつきやすい招聘者の知人などを通じて確認をとるような工夫も必要かもしれない。また、招聘者の方は写真・履歴とともに、所属先や研究室のウェブサイト等の情報も合わせて公開していたが、数名の方宛てに本国際会議の正式な請負先を装ったかのような宿泊施設の予約に関わるメールがよせられた。招聘者の方から事務局側にこのようなメールを受けたと連絡が入ったためにトラブルには至らなかったが、ウェブサイト上の個人情報の扱いの難しさを感じるとともに、今後、国際会議への参加もまた従来通りに戻っていくと考えられる中で、このような手口もあることを十分に気をつけなければならない(みなさんにも注意していただきたい)と感じた。

一般発表の方では、概ね問題はなかったが、中国の参加者からクレジットカード決済ができないとの問い合わせがあり、当日現地で対応せざるを得なかつ

た。現地では問題なく決済できたため、中国国内のセキュリティの問題だったように思われる。また、明らかに日本入国のためのビザの取得だけが目的と思われる申込が数件見られ、取り扱いに苦労した。登録情報や要旨によるスクリーニングが必要となるであろう。加えて、一般口頭・ポスター発表については、UNC での国際会議に倣って指定テンプレートを用意したが、フォントやダブルカラム、ページ上限などの体裁が守られていないものが 10 件ほどあったのは残念であった。

当日の運営においては、申込登録時に申請をいただいたハラル弁当の調達が苦労した。今回は国内外の主要関係者間の日程調整から初日の 7/17 が祝日(海の日)となってしまうが、祝祭日も配達可能なハラル弁当をなかなか見つけることができず、最終的にはクール便で調達することとなった。また、会場の Wi-Fi 環境がないことについて問い合わせが一定数あった。UNC の国際会議の際には環境が整っていないこともあって、それほど大きな問題と認識していない点であったが、予算の見通しがあればやはり Wi-Fi 環境の整備は必要だっただろう。このほか反省点として、中国・韓国から比較的若手の研究者が多く参加したこともあり、参加登録者リストの中から座長に適切な候補を見つけることが難しかった。今回は実行委員あるいは日本人参加者ですべての座長を担ったが、そのために内輪感がやや出てしまったかもしれない。ポスドクや若手研究者の経験の場として座長を依頼するのも一案と考えられる。

何よりも大きな問題なく 5 日間にわたって国際会議を運営できたことに一安心している。閉会後には、多くの参加者から労いの言葉をかけていただき、今回の開催を通じて日本のモデル・コミュニティの存在感を示すことができたのではないかと思う。なお、本国際会議については開催者の立場から報告したが、参加者の視点による報告については、本記事に続く河野ら[2024]を参照いただきたい。

謝辞

本国際会議は国立環境研究所の主催のもと、4 つの研究機関・大学等の共催、8 団体の後援、9 民間機関の協賛を得て開催されました。トレーニング会場のさいたま会館、本会議会場の大宮ソニックシティの関係者のみなさまにもこの場をお借りしてお礼申し上げます。また、さいたま観光国際協会等より支援いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

【共催】The State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex in China, Center for Community Modeling and Analyses (CMAS), Northeastern University, World Meteorological Organization (WMO) Global Atmosphere Watch Programme (GAW)

【後援】公益社団法人大気環境学会、埼玉県環境科学国際センター、アジア大気汚染研究センター、U.S. Environmental Protection Agency, Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE), Integrated Research on Disaster Risk (IRDR), Monitoring, Analysis and Prediction of Air Quality (MAP-AQ), 株式会社エックス都市研究所

【協賛】日本気象株式会社、日本エヌ・ユー・エス株式会社、株式会社 KANSO テクノス、一般財団法人日本気象協会、株式会社エックス都市研究所、一般財団法人日本環境衛生センター、株式会社堀場製作所、株式会社ニューテック、株式会社数理計画

【支援】環境省・(独)環境再生保全機構環境研究総合推進費(JPMEERF20215005)、JSPS 科研費(JP22H03757)、さいたま観光国際協会

著者所属

1. 電力中央研究所
2. 埼玉県環境科学国際センター
3. 国立環境研究所
4. 明星大学 理工学部総合理工学科

5. 株式会社エックス都市研究所
6. 北海道大学 医学研究院社会医学系部門
7. 気象庁気象研究所
8. アジア大気汚染研究センター
9. 大阪大学 大学院工学研究科
10. 早稲田大学 理工学術院国際理工学センター
11. 神戸大学 大学院海事科学研究科
12. 福岡県保健環境研究所

*** 責任著者**

Syuichi Itahashi <isyuichi@criepi.denken.or.jp>

2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific 参加報告

河野なつ美^{1*}, 永島達也²

2023年7月17日から21日まで、2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific が埼玉県さいたま市で対面にて開催されました。会議日程の内、17日から18日の2日間は若手研究者や学生を対象としたトレーニングセッションが埼玉会館で、その後、19日から21日までの3日間は開場を大宮ソニックシティに移し、本学会が開催されました。以下に、著者が参加したトレーニングセッションと本会議について報告します。

トレーニングセッションは、CMAQ Basics, CMAQ applications, Street-in-Grid の全3セッションによって構成されていました。第1セッションでは領域大気輸送モデル CMAQ の概要や最新版の特徴から、インストールや実行方法についての基礎的な講義が実施されました。続く第2セッションでは、実際に CMAQ を活用した研究事例である、気象モデルとのカップリング、リアルタイムの領域大気質予報、大気汚染物質とその排出源による感度実験などが紹介され、見識を深めるきっかけとなりました。最終日には、第3セッションとして、都市街区スケールを対象とした大気汚染物質のマルチスケールモデリングが可能な Street-in-Grid モデルを対象に、モデル概要の説明から、実際に手を動かして実行するまでの実践的な講義が行われました。

Street-in-Grid は事前準備として自身の PC に必要な計算環境を予め構築しておく必要がありました。後々、他の参加者との会話の中で、モデリング未経験者の参加が少なくないことを知りました。そのため、計算環境の整備は非常に難易度が高かったことは想像に難くありません。もちろん筆者自身も例に漏れ

ず、コンパイル途中で発生したエラーを解決できないまま当日を迎えることとなりました。さらに、トレーニング期間中は、埼玉県内でも 37℃以上の気温が観測された猛暑日でした。浦和駅から埼玉会館までのたった10分弱の道のりも、日陰を歩いているにもかかわらず体から汗が吹き出すほどでした。堪らず、トレーニングセッションの帰り道に駅前の PARCO に駆け込み、注文したミルクティーかき氷の味が昨日のこのように思い出されます。

3日目からの本会議は2部屋の会議室を利用して、特別セッション(AQNEA, Aakash, Street-in-Grid)と通常セッション(Ozone and PM_{2.5} pollution in Asia-Pacific region, Updating of air quality modeling, Multi-scale modeling applications and evaluation, Emission inventory, Linkage between air quality and climate, Multi-effects and policy making)の計9セッションが3日間に渡ってパラレルにて行われました。初日の午前中には日米中の著名な研究者4名から Plenary Talk があり、CMAQ の最新の開発状況や大気汚染研究の最前線に関して、実に幅広い話題が提供されました。各セッションは、1~2名の Keynote Speaker による発表と一般の発表で構成され、広くアジア各国の参加者から全セッション合計で63件の口頭発表と21件のポスター発表がありました。このように、毎年米国で開催される本家の CMAS 会議にはなかなか参加できないアジアの研究者が参加できるというところが、CMAS-Asia-Pacific 会議の一つの大きな意義と言えます。筆者は、気候変動が日本域の地表面オゾン濃度に与える影響に関する口頭発表を行いました。久々の英語発表で緊張しましたが、将来計算で

用いる気候データに関する質問もいただき、セッション終了後の休憩中に、改めて質問者と研究について議論することができました。質問はどのセッションでも多く出ており、全体を通じて活発な議論が行われたと思われます。また、夕方からポスターセッションが開催され、会場では軽食やアルコールが振る舞われました。海外の学会さながらの雰囲気にも包まれながら、ビールを片手に持ちつつ研究内容に対して発表者と意見を交わす方が多く見受けられました。

本会議の 2 日目夜にはソーシャルイベントが大宮ソニックシティ付近で開催されました。会場であるお洒落なビーチリゾートコンセプトのレストランで食べ物やアルコールに舌鼓を打ちながら、COVID-19 以降の久しぶりの再会を喜びつつ共に歓談に花を咲かせていました。途中、CMAQ の開発 25 周年を記念したケーキが登場し、初期から開発に携わっている米国の研究者と共に祝いする一幕もありました。改めて CMAQ が歩んできた長い歴史と、その発展に貢献してくださった様々な研究者のご尽力を感じることができました。

本会議最終日においても、参加者数はあまり変化することなく、最後まで盛んな討論が行われていました。Closing Session では、本会議が無事に開催できたことへの感謝を主催者が述べられていました。さ

らに Young scientist award も発表され、本大会では 2 名の若手研究者が受賞しました。最後に、次の大会ホスト候補も発表され、次の International Conference on CMAS-Asia Pacific に思いを馳せつつ、会場を後にしました。

最後に、とても有意義で新たな知見を得ることのできた International Conference on CMAS-Asia Pacific を開催してくださったこと、またご多忙の中、大会参加費用の支払い手続きに別途ご対応してくださったことを開催ホストの方々に感謝致します。

著者所属:

1. 埼玉県環境科学国際センター 温暖化対策担当
2. 国立環境研究所 地域環境保全領域

* 責任著者:

Natsumi Kawano

<kawano.natsumi@pref.saitama.lg.jp>



写真 1 CMAQ の開発 25 周年を記念したケーキ。

書評『身近な気象のふしぎ』

関山 剛^{1*}

【書籍名】

身近な気象のふしぎ

近藤 純正 著

ISBN978-4-13-063719-0

東京大学出版会（定価 3,100 円）

この本の著者を最初に紹介しておく。近藤純正先生は 1979 年から 1997 年まで東北大学理学部の教授をされていた気象学者であり、大気境界層研究の大家である。先生の書かれた数々の著書は大気境界層、特に熱収支・水収支を学ぶための教科書として長く読み継がれてきた。それら専門的な書籍と異なり、本書は一見すると一般向け啓蒙書のような書籍タイトルである。

ところが然にあらず、内容は学部 3,4 年生を対象とした骨太な大気科学（気象学だけでなく大気化学も含めた広い学問領域）の教科書だというのが読了後の私の感想である。しかし「化学系の会員読者には難解ではないだろうか」という心配は要らない。高校および大学1年程度の物理学と数学の知識があれば、十分に論理が理解できるように書かれている（もちろん小倉義光著『一般気象学』を一度読み終えているくらいだとさらに理解しやすいことは間違いない）。

なにより本書はまるで近藤純正先生が読者に語りかけてくるような文体で興味深いストーリーが次々に連なっていく。私は残念ながら大学で近藤純正先生の講義を拝聴する機会にはなかったが、本書を読んでいるとまるで先生の授業を直接受けているかのような気分に入ることができた。本書は 14 の章に分かれており、各章は 10～20 頁程度でちょうど大学の授業一コマ程度の分量であるのも良い。

各章の内容は比較的独立しており、大気化学者に

お薦めのトピックだけを摘み食いすることも可能である。例えば、大気化学において温室効果物質は重要な研究ターゲットであるが、本書で詳述されているような地球温暖化の物理を深く考える機会は普段あまりないはずである。また、森林や都市などの大気境界層の挙動は大気微量成分の分布に大きな影響を与えるため、大気化学者にとってはまさに必須の知識といえよう。さらに、本書では火山噴火や砂漠化が大気に与える影響も議論の俎上に載せられており、大気化学者には一読の価値がある。参考に各章のタイトルを以下に記す。

- 1 地球温暖化
 - 2 温暖化は降水量を増やすか？
 - 3 都市の気候と日だまり効果
 - 4 晴天日の夜が寒くなる理由
 - 5 昼夜と場所によって変わる風速と突風率
 - 6 河川改修と養殖魚の大量死事件
 - 7 火山噴火と冷夏
 - 8 蒸発・蒸散量と気温の関係
 - 9 森林の水収支・熱収支と林内の気温
 - 10 砂時計に学ぶ砂漠の気候
 - 11 湧水の温度と環境変化
 - 12 空間の大きさと温度変化の時間
 - 13 大気・海洋の熱エネルギー移動と地球の気候
- 付録 大気境界層・熱収支水収支論の発展史

ちなみに、私は個人的には（大気化学とはあまり関係がないが・・・）河川改修と湧水の温度変化の話が目から鱗に感じられ面白かった。また、本書の終わりの部分の 13 章や付録章は科学史の勉強が好きな方には大変興味深い内容である。

ところで近藤純正先生はご自身のホームページ
<https://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/index.html>
で気象学に関する解説や考察を大量に公開している
(本当に物凄い量なのでぜひ皆さんもアクセスして確
認してほしい)。特に大気境界層や地上気象観測に
ついて日本語で検索すると、必ずといってよいほど先
生のホームページがヒットするため、私も日々大変お
世話になっている。実は本書はこのホームページ上
の記事の一部がベースになっている(本書あとがきに
もそのように記載あり;もちろん本書執筆にあたり推敲
の上、各方面に原稿の査読をお願いされたとのこと)。
本書を読んで気象学に興味を覚えた読者はぜひ先
生のホームページも訪ねてほしい。

本書は小倉義光著『一般気象学』のように体系立
てて気象学を広く浅く概説している教科書ではない。
書籍タイトルにあるとおり、身近な気象現象のあれこ
れを(トピックごとに)物理学的に考察した本である。
それがむしろ身近な環境問題に取り組む大気化学
者には豊かな知見を与えてくれるだろう。気象学を広
く学ぶ暇などないという大気化学者も本書をかい摘
むことで、自らの研究に関連の深い気象学トピックに
限定して知識を広げることが可能だと思う。

1. 気象庁気象研究所

* Tsuyoshi T. Sekiyama <tsekiyam@mri-jma.go.jp>

書評『点発生源からのメソスケール拡散シミュレーション —福島第一原子力発電所事故をふまえて—』

滝川 雅之^{1*}

【書籍名】

点発生源からのメソスケール拡散シミュレーション

—福島第一原子力発電所事故をふまえて—

近藤裕昭, 佐藤陽祐, 永井晴康, 山澤弘実 編集

ISBN978-4-904129-31-9

気象研究ノート 第 248 号

日本気象学会 (定価 7,800 円)

本書は ^{137}Cs (セシウム 137) などの放射性核種を主な対象とした, 点源から放出された化学物質が大気中をどのように輸送されるのか, 大気拡散モデルを用いて推定する手法およびその推定誤差の要因などについて, その背景も含めて詳細にまとめたものになります。天然放射線核種の一つである ^{222}Rn (ラドン 222) が大気拡散モデルの輸送過程等の検証に広く用いられているように, 放射線核種は「発生源がよく分かっており, 比較的高精度で測定可能なトレーサー」と言えます。福島第一原子力発電所事故においては, 東日本を中心に広域的に甚大な環境影響を及ぼしつつも各地の大気汚染測定局においてテープ濾紙に捕集された浮遊粒子状物質 (SPM: Suspended Particle Matters) の分析により時空間的に稠密な ^{137}Cs 観測データが残されているため, 大気拡散モデルを用いた健康・環境影響等の把握や大気拡散モデルの輸送過程等の検証等も広く行われてきました。「点源放出からの物質輸送」そのものについては火山噴火や小規模林野火災, 火力発電所等のポイントソースからの大気汚染物質の排出など大気化学的にも様々な研究対象があるため, モデル開発者等の手により大気拡散モデルの理論的背景や除

去過程, 輸送過程等の不確定性, 排出源推定の手法説明等について包括的に日本語で書かれている本書は, たとえば学生の方が大気拡散モデルの勉強を始める際に非常に有益ではないかと思われます。

構成等も含め本書についてもう少し詳細に説明すると, 大きく三つのパートに分けられており, 第 I 部に緊急時放射能影響予測システム (SPEEDI, WSPEEDI) の詳細な解説が, 第 II 部に SPEEDI を含めたメソスケール大気拡散モデルの相互比較が, 第 III 部にメソスケール大気拡散モデルの検証や品質管理, 現時点で考えられるモデルの不確実性やそれを踏まえたモデルの使い方の提言などがそれぞれまとめられています。

第 I 部では, まず第 1 章で SPEEDI およびその発展型である WSPEEDI について開発の歴史や支配方程式などを含めて詳しく説明されています。ラグランジュ型モデルの技術的背景がよく整理されており, 同じようなラグランジュ型モデルである FLEXPART, HYSPLIT などを利用する方にとっても有益ではないかと思われます。第 2 章, 第 3 章は SPEEDI/WSPEEDI モデルシステムの検証およびその実事例への応用について詳しく説明されており, モデルの検証や輸送イベントの数値モデルを用いた解釈について, 多様な時空間スケールの実例を踏まえた説明がなされています。とくに 3.2.1 節では三宅島の火山性ガスに由来する関東域での SO_2 濃度上昇の事例が紹介されており, 2020 年の西之島噴火など, 他の大気化学研究にも応用可能な内容かと思われます。

第 II 部では国際的なモデル相互比較や, 観測デ

ータを用いたモデルおよび放出量推定の精緻化に関する取り組みが詳しく紹介されています。第 4 章、第 5 章はそれぞれ欧州大気拡散実験 (ETEX)、福島第一原子力発電所事故に関するモデル間相互比較プロジェクト (FDNPP-MIP) に関する事例紹介となります。ETEX では実際に人工トレーサ (フッ素化合物) 放出および大気中濃度測定を行った上で 24 機関の 28 種類の大気拡散モデルによる計算を行っており、パッシブトレーサを用いた大気輸送過程の検証手法 (どういったメトリックを用いるのか、どういった理由で差異が生じるのか) が詳しく説明されています。第 5 章が福島第一原子力発電所事故の事例で、第 4 章と合わせて読むことにより、1990 年代に行われた ETEX からのモデルの進化と依然として残る課題点 (降雨による除去、拡散過程) 等を感じることができるのではないかと思います。これらを踏まえた上で、第 6 章で気象場や沈着パラメータ等、現時点でのモデルの精度向上に必要な要素の精緻化に向けた成果が、第 7 章にその基礎となる観測データおよび放出量推定に関する情報がまとめられています。たとえば 6.1.1 節および 6.1.3 節の水平解像度に関する議論などは、今後の計算機能力向上および高分解能な衛星観測データの整備に伴い、大気化学分野でも関連する事例は多くあるものと思われます。

第Ⅲ部はより一般的な、メソスケール拡散モデルを用いた計算を行う際、どうやって一定の品質・信頼性を確保するのか、あるいはどういった使われ方が考えられるのか、といった内容がまとめられています。本書は 2016 年に原子力規制委員会が防護措置の判断に SPEEDI は用いずにモニタリングデータに基づいて避難の判断を行うように決定したことにその端を発しており、拡散予報による予測情報の社会一般への理解を高めることを意図してまとめられています。「拡散予報による予測情報」そのものについては大気化学関連の観測等の際にも日常的に行われているものかと思いますが、一研究者として、観測とモデルの融合的な研究を行う上でも「どういうふうに検証す

ればいいのか」を知っておくことは有益ではないかと思われます。

「放射性核種」や「福島第一原子力発電所事故」と聞くと忌避感を持たれる方もいるかもしれませんが、各章の説明等で触れた通り、内容としては大気化学に関連するものがほとんどであり、とくに「数値モデルのプロセスの各々を理解した上で精緻化していきたい」と思っている方にとってはうってつけの本ではないかと思います。残念ながら学生が気楽に手を出せる価格ではありませんが、何かの折に見かけた際には虚心坦懐にお手に取っていただければ幸いです。

著者所属:

1. 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター

* 滝川 雅之:

Masayuki Takigawa <takigawa@jamstec.go.jp>

第 28 回大気化学討論会開催報告

中山智喜^{1*}, 長濱智生², 竹谷文一³, 入江仁士⁴, 薮下彰啓⁵, 江口菜穂⁶, 原圭一郎⁷, 石戸谷重之⁸, 江波進一⁹

第 28 回大気化学討論会は 2023 年 11 月 20 日 (月) 午後から 22 日 (水) 午後にかけて長崎県長崎市のチトセピアホールで開催されました。今回は 4 年ぶりに口頭発表およびポスター発表の両方を対面形式で行いました。また、やむを得ない事情で現地参加ができない方のために、口頭発表のみのリアルタイム映像配信を行いました。

参加登録者は、一般 89 名、学生 35 名、映像視聴 6 名で、特別講演者および長崎大学の運営協力教員・学生を含め、合計 145 名の方にご参加頂きました (写真 1)。多くの参加者にとり遠方での開催であったにもかかわらず、事前の予想を大きく上回る多くの皆様にご参加頂き、厚く御礼申し上げます。

発表申込件数は過去 10 年間では最多となり、口頭発表 40 件 (うち、学生 14 件)、ポスター発表 66 件 (うち、学生 20 件)、特別講演 3 件、奨励賞記念講演 2 件の合計 111 件の発表が行われました。

11 月 20 日には特別セッションとして、長崎大学に所属されている 3 名の関連分野の先生方に特別講演を行って頂きました。渡辺知保先生には「人新世と

プラネタリーヘルス: 大気化学研究者への期待」、近藤能子先生には「北太平洋表層水中の鉄の光化学反応による形態変化」、山口真弘先生には「植物に対するオゾンの影響」について講演頂きました。参加者の皆様からは、プラネタリーヘルスにおける大気化学の役割や、大気中の化学物質が海洋生態系や植物に及ぼす影響などについて考えるよい機会になったとの声を頂きました。

口頭発表では、新たな試みとして、座長を 2 名体制としてタイムキーパーの役割も担って頂くようにしました。若手研究者や学生の方が積極的に質問をされるなど、いずれの発表に対しても活発な質疑応答が行われました。ポスター発表は、ホールの後ろ半分を使用して、11 月 20 日の夕方に実施しました。ポスターを初日から 3 日目の昼まで掲示できるようにしたこともあり、休憩時間を含め、活発な議論が行われました。口頭およびポスター発表を行った学生のうち 6 名に学生優秀発表賞が授与されました (写真 2)。また、11 月 21 日の午後には、日本大気化学会の会員集会が開催され、奨励賞の授賞式および記念講演が行われました。



写真 1 討論会会場での集合写真



写真 2 学生優秀発表賞の受賞者と記念品 (長崎大学の刻印入り波佐見焼: より高みを目指してほしいという願いを込めて金ではなく銀にしました)



写真 3 出島ワフでの懇親会の様子



写真 4 雲仙巡検での集合写真

11 月 21 日の夕方には、長崎湾に面した出島ワフにおいて懇親会を実施しました。天候にも恵まれ、長崎港の夜景や稲佐山を眺めつつ、「長崎クイズ大会」などを通じて親睦を深めました(写真 3)。さらに、11 月 19 日には、オプション企画として雲仙巡検を実施しました。雲仙岳および雲仙地獄を訪問し、長崎大学が実施している大気観測の様子などを見学頂きました(写真 4)。

討論会期間中には、日本大気化学会の男女共同参画・人材育成委員会と協力して保育支援を実施しました。また同委員会により、11 月 20 日夜に「大気化学若手交流会」、11 月 21 日昼食時に「女性会員のつどい」が近隣の飲食店で行われました。

アンケート結果について

大会終了後に実施したアンケート調査では、109 名(うち、発表者 76 名、発表者以外の参加者 18 名)の方からご回答を頂きました。今回の討論会について大部分の参加者に満足いただけたようで、近年の

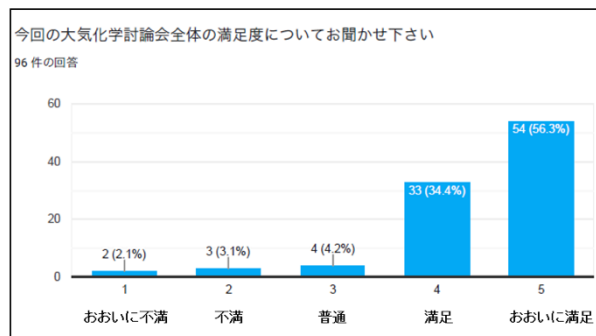


図 1 今回の大気化学討論会の満足度

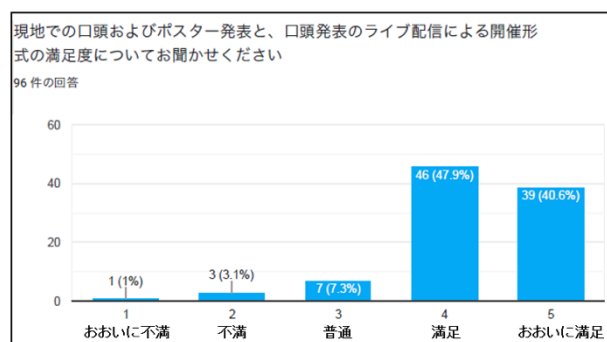


図 2 今回の開催形式の満足度

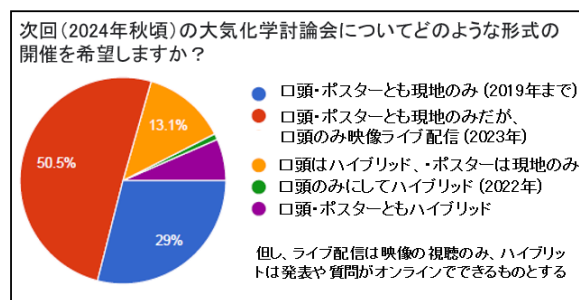


図 3 次回の開催形式の希望

コロナ禍での開催時に比べて、「おおいに満足」の割合が増加しました(図 1)。また、開催形式についても「満足」「おおいに満足」の回答が多く、次回の討論会の希望開催形式についても、今回同様の形式が 50%程度と最も多い結果でした(図 2, 3)。自由記述欄にも多くのご意見や LOC に対する温かいお言葉を頂き、ありがとうございました。次回討論会の LOC への引継ぎを行い、今後の討論会開催において生かしていければと考えています。

最後に、本討論会の開催にあたり、名古屋大学宇

宙地球環境研究所, 長崎大学環境科学部, 長崎国際観光コンベンション協会にご支援いただきました。また, 開催準備や当日の運営において, 多くの皆様にご協力頂きました。この場をお借りしまして, 深く感謝申し上げます。

著者所属:

1. 長崎大学
2. 名古屋大学
3. 海洋研究開発機構
4. 千葉大学
5. 愛知工科大学
6. 九州大学
7. 福岡大学
8. 産業技術総合研究所
9. 筑波大学

*** 責任著者:**

Tomoki Nakayama <t-nakayama@nagasaki-u.ac.jp>

日本地球惑星科学連合 2024 年大会 (JpGU2024) での 大気化学セッション開催のお知らせ

入江仁士^{1*}, 中山智喜², 石戸谷重之³, 江波進一⁴

1. JpGU2024「大気化学セッション」

日本大気化学会では、1) 地球惑星科学分野全体に開かれた形で研究集会を実施すること、2) 他分野との交流を促進することを目的として、日本地球惑星科学連合大会において 2007 年から大気化学セッションを毎年開催してきました。これまで当該セッションには口頭・ポスター発表合わせて平均 50 件程度の申し込みがあり活発な議論が行われてきました。

日本地球惑星科学連合 2024 年大会 (JpGU2024) においても大気化学セッションが採択され、従来通り開催されることとなりました。以下、重要な点を抜粋してお知らせします。

2. 日程および予稿投稿

JpGU2024 は、現地開催およびオンライン開催のハイブリッド方式での開催が予定されています。口頭発表は、現地会場・オンラインの両方で、ポスター発表は現地のみで実施される予定です。また、口頭発表の時間帯にはポスター発表のフラッシュトークを行います。ハイブリッド開催のメリットを最大限活かした活発な議論と意見交換の場となることが期待されます。

「大気化学セッション」は口頭およびポスター発表を実施する予定です。各セッションの口頭コマ数は前年の投稿数を元に仮配分され、その後、実際の投稿数により微調整されます。2023 年 12 月に開催セッションおよびコマ割が公開され、大気化学セッションとして、5 月 27 日 (月) に 4 コマ、および 28 日 (火) に 1 コマ、合計 5 コマの口頭セッションが仮配分されました。現地ポスターセッションは 27 日の口頭セッション終了後に引き続いて行われます。

記

名称: 日本地球惑星科学連合 2024 年大会
会期: 2024 年 5 月 26 日 (日) ~ 5 月 31 日 (金)
開催方式: ハイブリッド方式 (現地 + オンライン)
現地会場: 幕張メッセ
予稿投稿: 2024 年 1 月 11 日 (木) ~ 2 月 15 日 (木)
(早期投稿締切: 2 月 1 日 (木))

大会 WEB サイト:
https://www.jpogu.org/meeting_j2024/

3. 発表言語および招待講演

大気化学セッションにおける発表言語については、「J」区分、すなわち、スライド・ポスター表記および口頭発表の言語は英語または日本語を発表者が選択可としております。しかしながら、大気化学セッションでは、外国人研究者を含めた多様な参加者が発表内容を理解できるよう、スライドおよびポスターは英語で作成いただきますよう、よろしくお願いいたします。

JpGU2024 においても、昨年度に引き続き、大気化学の周辺・境界領域や、近年特に注目されている分野の研究者による招待講演を実施する予定です。皆様の新たな研究の展開にご活用いただけますと幸いです。

本記事が公開される頃には、予稿原稿投稿受付が開始されていることと思います。日本大気化学会として、大気化学に関連する研究を盛り上げるためにも、皆様からの積極的な発表申込みをお願い申し上げます。(日本大気化学会 運営委員会 (プログラム担当: 入江仁士・中山智喜・石戸谷重之・江波進

一))

著者所属:

1. 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
2. 長崎大学 環境科学部
3. 産業技術総合研究所 環境創生研究部門
4. 筑波大学 数理物質系化学域

*** 責任著者:**

Hitoshi Irie

<hitoshi.irie@chiba-u.jp>

第19回日本大気化学会奨励賞の選考結果について

受賞者氏名：関谷 高志（海洋研究開発機構）

受賞研究課題名：化学気候モデルCHASERを応用した大気微量成分とその変動の研究

受賞理由：関谷高志氏は、これまで化学気候モデルCHASERを土台とした応用的研究を行い、大気微量成分の全球分布および変動の高精度な評価・推定へと発展させてきた。まず、同氏はCHASERに成層圏での硫酸塩エアロゾル微物理過程を組み込み、1991年ピナツボ火山噴火を対象とした独自の再現実験を実施した。これにより、エアロゾルの微物理過程だけでなくエアロゾルが及ぼす放射加熱が相互作用的に影響し、火山性エアロゾルの成層圏における滞留時間を大きく左右することを明らかにした。このような研究結果は、ジオエンジニアリング・モデル相互比較プロジェクト(GeoMIP)やインタラクティブ成層圏エアロゾルモデル相互比較プロジェクト(ISAMIP)にも現在進行形で大きく貢献している。

関谷氏は同モデルの枠組みにおいて、対流圏のオゾンを中心とした化学過程の高精度な評価にも意欲的に挑戦してきた。このなかで、同氏はCHASERにハロゲン種(ヨウ素・臭素)の化学反応過程・放出過程を組み込み、洋上オゾン観測データと融合することで、ハロゲン種が全球対流圏オゾン収支に与える影響を評価した。その結果、とくにヨウ素によるオゾン破壊は対流圏オゾン消失源の約20%にも及ぶことを示した。これは、化学気候モデルの対流圏オゾンシミュレーションにおける不確定性を大きく低減させる重要な結果であり、今後の大気環境・気候変動予測の精度向上も期待できる。

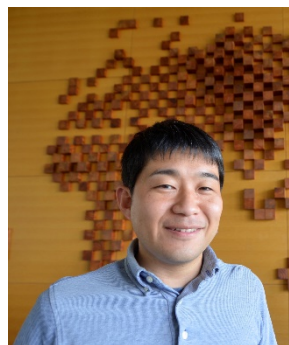
関谷氏は、CHASERを土台とした多成分微量気体データ同化システムを基礎として、全球のメガシティ規模の大気汚染を一貫して捕捉可能な高解像度データ同化システムの開発も手がけた。このシステムと

欧州宇宙機関の最新衛星TROPOMIの組み合わせにより、メガシティ周辺におけるO₃-NO_x-HO_x化学レジームの空間的な解像、およびNO_x排出量逆推定の大幅な精度向上に成功した。さらに、同氏がこれまでに開発してきたシステムを2020年の新型コロナウイルス蔓延期間の世界的ロックダウン事例に応用し、社会経済活動の変容による排出量変化を衛星観測に基づき高精度に推定した。この結果、2020年前半の世界的なNO_x・SO₂排出量減少が無機エアロゾルの減少につながり、全球平均でも0.1 W m⁻²以上の強い加熱効果を及ぼしている可能性を世界に先駆けて示した。これは、短寿命成分の削減による気候緩和策を実証するうえでも極めて重要な成果である。

さらに関谷氏は日本大気化学会の情報・広報委員会準委員として学会Webページ等の管理を担っており、日本大気化学会の発展にも大きく貢献している。

以上のように、関谷氏は一貫して化学気候モデルを軸とした研究を展開し、成層圏・対流圏の微量成分の実態に迫る研究を推進してきた。これらをまとめた発表論文は被引用数も多く、日本の大気化学研究の発展の一躍を担ってきたと言える上に、学会活動への貢献も高く評価できる。日本大気化学会奨励賞選考委員会は、関谷高志氏が同賞にふさわしい実績と将来性を有するものと認める。

(日本大気化学会運営委員会)



関谷高志氏

受賞者氏名：河野 七瀬（近畿大学）

受賞研究課題名：ペルオキシラジカルの速度論的研究およびその大気化学への応用

受賞理由：ペルオキシ (HO_2 , RO_2) ラジカルは大気中の様々な揮発性有機化合物 (VOC) の酸化反応で生成し、対流圏オゾンの生成にも深く関与する、大気化学で最も重要な化学種のひとつである。しかしその検出効率の低さから、大気中における反応メカニズムの完全解明には至っていない。河野七瀬氏は、化学変換法やレーザー誘起蛍光 (LIF) 法を用いてペルオキシラジカルの反応速度測定、およびその大気質への影響評価を行い、その成果を報告してきた。

炭素鎖をもつ RO_2 ラジカルの大気圧室温条件下での直接検出は困難であるため、 NO との化学反応により OH ラジカルへ変換し、 OH ラジカルの LIF を介して検出する化学変換法が知られている。しかし、この手法は変換効率が低いことが問題であった。河野氏は、既存のラジカル検出装置を改良し、過剰の O_2 を添加することで OH ラジカルへの変換効率を劇的に向上させることに成功した。本システムを用いることで、実験室実験だけでなく様々な RO_2 ラジカルの実大気における反応性や、エアロゾルへの取込速度が高効率に測定可能となることから、本研究は、より定量的な HO_x サイクル反応の評価そして対流圏オゾンの生成メカニズム解明に繋がる、非常に意義のある成果である。

また、河野氏は RO_2 ラジカルが引き起こす代表的な NO_2 との錯合体形成過程 ($\text{RO}_2 + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{RO}_2\text{NO}_2$) の包括的理解を進めるため、独自の解析手法を構築した。これまで、錯合体の速い熱分解により、反応速度測定は大きな誤差を含む懸念があったが、様々な NO_2 濃度条件下での RO_2 濃度時間変化を非線形回帰モデルを用いてフィッティングすることで正反応および逆反応速度を同時に決定する事に成功した。いくつかの RO_2NO_2 は NO_x リザーバーとして大気中で働くことが知られており、その熱分解速度や平衡定数の決定は大気シミュレーションモデルの精度向上に大

きく貢献することが期待される。

さらに、河野氏は、ペルオキシラジカルの不均一反応が大気質に及ぼす影響を調査するため、大気エアロゾルへの HO_2 ラジカル取込速度測定結果から、オゾン生成効率がおよそ 20% 弱減少することを明らかにするなど、大気化学におけるラジカル反応研究に対し非常に精力的に取り組んでいる。上記の結果は、都市域におけるオゾン濃度増加問題を解決するための新たな知見を与え得る成果である。

河野氏は、研究キャリア中に研究を中断する期間がありながらも、大気化学における反応研究において多くの成果を発表してきた。さらに日本大気化学会においては人材育成活動で精力的な貢献をしている。河野氏は 2022 年より近畿大学において自身の研究室を立ち上げており、将来の人材の育成拠点を新たに構築した点でも日本の大気化学分野における貢献は多大である。以上より、日本大気化学会奨励賞選考委員会は、河野七瀬氏が同賞にふさわしい実績と将来性を有するものと認める。

（日本大気化学会運営委員会）



河野七瀬氏

日本大気化学会会員集会プログラム

日時：2023 年 11 月 21 日（火）13:15–13:40

場所：チトセピアホール（長崎市千歳町）

冒頭：金谷会長より挨拶

- 1) 日本大気化学会について
- 2) 会員報告
- 3) 賛助会員のご紹介
- 4) JpGU2024 での大気化学セッション
- 5) 男女共同参画・人材育成の活動について
- 6) 表彰委員会の活動について
- 7) 学会誌「大気化学研究」について
- 8) その他

日本大気化学会奨励賞授与式

（日本大気化学会 運営委員会）

第 33, 34 回日本大気化学会運営委員会議事録

第 33 回日本大気化学会運営委員会

(大気化学研究会より通算 64 回)

日時: 2023 年 9 月 19 日 (火) 09:30–12:30

場所: Web 会議による開催

出席者: 石島健太郎, 石戸谷重之, 入江仁士, 岩本洋子, 江口菜穂, 大畑祥, 金谷有剛,

竹谷文一, 中山智喜, 町田敏暢, 宮崎雄三

欠席者: 江波進一, 坂本陽介

(敬称略, 五十音順)

1) 議事録確認

第 32 回運営委員会の議事録について確認がなされた。

2) 会計・会員の状況

会計・会員幹事の竹谷委員より会員の入退会状況について報告がなされた。学生を中心に新規入会者が多くあり、会員数が 300 人に迫る。会費納入状況が良好である一方で、コロナ禍等により、繰越・残額が増えており、予算使途の検討が必要である。会員規模は発足当時のおよそ倍となっており、学会の在り方を考え直すべき場面があり得るという意見があった。運営委員会 ML を利用した入会の承認手続きについて質問があり、申請から入会に至る手続きについて確認された。

3) 2023 年度第 28 回大気化学討論会の準備状況

討論会 LOC より準備状況について報告がなされた。多くの発表申し込み件数があった。要旨集は現地参加者には当日配布予定、映像視聴のみの参加者には郵送予定である。会計・会員幹事より、賛助会員一覧の要旨集掲載と賛助会員への要旨集送付に関して確認がなされた。保育支援の利用申し込み状況、討論会前日の雲仙巡検の申し込み状況、若手会員の集会(1日目夜)、女性会員の集会(2日目昼)について確認がなされた。

4) 日本大気化学会第 19 回奨励賞の選考について

表彰委員会より受賞者 2 名を選出したことが報告された。受賞条件について議論され、応募要項で、討論会・JpGU 大気化学セッションにおける発表や学会誌寄稿等の学会活動への貢献について記述を求めることが提案された。

5) 事務局に送付される機関誌・献本等の取扱について

現在までに届いた献本については、適任と思われる会員に書評を打診し、書評を書いた会員に本を差し上げることが了承された。機関誌については、送付元に連絡し、定期送付の停止を求める。また、すでに事務局に届いた機関誌については廃棄を依頼することとした。

6) 各委員会報告

庶務幹事

奨励賞受賞者のアナウンスについて、討論会申し込み期限に間に合うように、早めが良いという意見があった。学会の公式情報をアーカイブできるように、学会ポータルを活用・整理をお願いしたい。

学会誌編集

学会ウェブサイトに掲載されている PDF の目次から、各ページにリンクが張られると良いという意見があった。将来的に J-Stage 等の DOI 付雑誌に掲載できるか可能性を探ってほしいという意見があった。

プログラム

JpGU セッション提案の期間に先立って、JpGU 事務局から学協会プログラム委員選出の連絡が会長宛にあるはずなので、メールを注視する。

情報・広報

金谷会長より、学会ウェブサイトの会長挨拶および運営委員情報の更新について報告があった。各委員会よりウェブサイト改善について、次回または次々回の運営委員会までに提案する。男女共同参画・人

材育成のページ作成について提案があった。ウェブサイト英語版については、Google 翻訳などが利用できるため準備しない方針としたが、現存の英文ページについては維持更新するべきとの意見があった。

表彰推薦

論文賞の募集を開始し選考を進める。JpGU 大気化学セッションで表彰する予定である。

男女共同参画・人材育成

男女共同参画学協会連絡会 ML から多数のメールが届いている状況だが、取捨選択しながら連絡会の活動に関わる。第 21 回男女共同参画学協会連絡会シンポジウムにおいて誌上発表を予定している。投稿料は無料である。学会の女性比率等が公表されるため、大気化学会として意識を高めて欲しいという意見があった。同時に、少ない女性会員に負荷が偏らないように配慮すべきとの意見があった。

選挙制度

被選挙人名簿の作成方法を含めて、複雑化を避ける方向で議論を進める。

7) その他

- ・2024 年 9 月 9 日-13 日にマレーシア・クアラルンプールで開催される IGAC 国際会議への積極的な参加について依頼があった。討論会中の会員集会で改めて案内する。
- ・2024 年度は秋季に複数の国際会議がアジアで開催されることもあり、2024 年度の討論会の時期・場所の検討について意見があり、幹事会を中心に検討を開始することとなった。
- ・若手会員や学部生向けの旅費・参加費支援を再開してはどうかという意見があった。若手支援を含め、各委員会で会員サービスにつながる活動を検討する。
- ・28 回討論会のオンライン配信について質問があった。討論会 LOC より、携帯回線を利用し、映像視聴のみのオンライン配信を実施予定であることが報告された。

以上

第 34 回日本大気化学会運営委員会議事録

(大気化学研究会より通算 65 回)

日時:2023 年 11 月 16 日(木)09:30~13:10

場所:WEB 会議による開催

出席者:石島健太郎, 石戸谷重之, 入江仁士, 岩本洋子, 江口菜穂, 江波進一, 大畑祥, 金谷有剛, 坂本陽介, 竹谷文一, 中山智喜, 町田敏暢, 宮崎雄三

(敬称略, 五十音順)

欠席者:なし

1) 議事録確認

第 33 回運営委員会の議事録について確認がなされた。

2) 会計・会員の状況

会計・会員幹事の竹谷委員より会員の入退会状況について報告がなされた。10 月末に会員数が 300 人を超えた。正会員の退会申請 1 件が承認された。

3) 庶務報告

庶務幹事の石島委員より、討論会期中の表彰式の準備状況について確認がなされた。

4) 2023 年度第 28 回大気化学討論会の準備状況

討論会 LOC より準備状況について報告がなされた。インボイス制度について、現在は学会事務局および討論会事務局はインボイス制度に対応していないが、対応の必要性について引き続き検討を続けることとなった。プログラム委員より、学生優秀発表賞の件数や審査方法について確認がなされた。

5) プログラム編成申し送り事項

プログラム担当の石戸谷委員より、第 28 回大気化学討論会の発表プログラム編成について報告がなされた。議論の活発化のため、座長を 2 名とした。討論会 LOC より、円滑なプログラム進行のため会場内に設けた議論スペースの活用について案内があった。

6) JpGU2024 準備状況

プログラム担当の入江委員より、JpGU2024 における大気化学セッションが採択され、5 コマが仮配分さ

れた旨の報告がなされた。追加希望について、日曜開催不可、共催する 3 つのセッション(成層(大気)圏過程と気候セッション、海洋-大気間生物地球化学セッション、農業残渣焼却の環境影響セッション)の重複回避を申請することが承諾された。なお、成層圏セッションの核となるプログラム SPARC の名称は、2024 年 1 月 1 日に APARC (Atmospheric Processes and their Role in Climate; 大気圏の諸過程とその気候影響)に変更される。一般向けセッション紹介文の文案について了承が得られた。開催曜日によっては保育施設の確保が課題となるため、JpGU の保育支援と併せて検討する。招待講演について、プログラム委員会から方針や研究分野の希望を運営委員会に伝えた上で候補者の検討を進めることとなった。

7) 論文賞について

表彰担当の町田委員より、論文賞選考の進捗状況について報告がなされた。男女共同参画・人材育成担当の江口委員より、男女共同参画学協会連絡会において、学会賞の受賞者の男女比率を調査している旨の情報共有があった。調査においては、論文賞の場合は筆頭著者または責任著者が考慮される。

8) 大気化学研究誌について

編集担当の大畑委員より、「大気化学研究」第 50 号の編集状況について報告がなされた。学会ウェブサイトに掲載されている PDF の目次から、各記事にリンクを張る予定である。学会ウェブサイト上に論文タイトルを掲載し、インターネット検索で表示されるようにしてはどうかという意見があった。学会宛に献本があった 2 冊のそれぞれについて、書評を書いていただける会員が決定した。本は書評を執筆した会員の所有となる。会員からのお知らせの各記事について、今後はメーリングリストで広く募集をかけることを検討する。

9) 男女共同参画・人材育成委員会の報告

学会ウェブサイトに掲載されている「大気化学の研究室」ページの更新について、人材育成委員会と情報広報委員会から各 1 名の 2 人体制で担当すること

が確認された。男女共同参画・人材育成の江口会員より、討論会期間中に開催する若手交流会へのサポートについて提案があった。持続的にサポートできる仕組みを引き続き検討することとなった。討論会期間中の保育利用申請、女性会員の集いの状況について報告がなされた。大気化学会の女性比率について情報共有があり、研究集会コンビーナーにおける比率(27%)が学会全体の比率(14%)と比べて高いことが示された。国が目指す女性比率(30%)を考慮しつつ、女性会員に過度な負荷がかからないような運営を検討する。

10) 2024 年度第 29 回大気化学討論会について

金谷会長より、幹事会での開催候補地の検討状況が報告された。候補となる会場の予約状況や運営委員のスケジュールを基に、会場を仮予約することが提案され、進めることとなった。

11) 会員集会の資料案確認

第 28 回大気化学討論会 2 日目に開催する会員集会の資料案について確認がなされた。集会資料は会員集会後に会員に共有することが了承された。奨励賞授与式の段取りについて確認がなされた。2024 年度の大気化学討論会についてのアナウンスは、日程確定後に行うこととした。

12) その他

金谷会長より、将来構想の製本版 12 部が完成したことが報告された。

以上
(日本大気化学会運営委員会)

編集後記

今号では、トピックスとして「ドローンを活用した大気環境計測」をテーマに 3 編の総説記事を掲載しました。大気環境の新しい観測手段として益々の活用が期待されるドローンについて、どのような開発・運用が行われているか、今後の展望も含めてそれぞれの著者の方々に分かりやすく解説していただきました。その他の記事を含むすべての著者の皆様と、ご多忙の中査読をお引き受けいただいた皆様に、心より感謝申し上げます。

今号から新しいメンバーで本誌の編集を行っております。これまでの本誌の伝統を引き継いで多様な分野の記事を収録し、学会員の皆様の情報発信・情報交換の場として本誌をご活用いただけるよう努めて参ります。引き続きご支援賜りますようお願い申し上げます。(SO)

大気化学研究 第50号 (2024年1月31日 発行)

編集兼発行：日本大気化学会

編集委員：大畑祥(共同編集長), 坂本陽介(共同編集長), 上田紗也子, 佐伯田鶴, 染谷有

連絡先：〒162-0801 東京都新宿区山吹町358-5 アカデミーセンター 日本大気化学会事務局

電話：03-5389-6237

FAX：03-3368-2822

電子メール：jpsac-post@as.bunken.co.jp

ホームページ：<https://jpsac.org/publications/aacr/>

《本誌掲載著作物の転載を希望される方へ》

本誌に掲載された著作物を転載される場合は、上記までご連絡ください。無断での二次使用や勝手な加工はお控えください。