

大気化学研究

Archives of Atmospheric Chemistry Research

第 53 号

日本大気化学会

Japan Society of Atmospheric Chemistry

目次

巻頭言 新会長より

Article No.

日本の大気化学を支える基盤として	持田 陸宏	053N01
------------------------	-------	--------

退任挨拶

日本大気化学会第 12・13 期を振り返って	金谷 有剛	053N02
------------------------------	-------	--------

総説

—トピックス:「個別粒子分析」—

エアロゾル粒子の透過型電子顕微鏡分析と大気観測への応用	足立 光司	053A01
高分解能質量顕微鏡の開発と個別エアロゾル粒子の成分イメージング	坂本 哲夫	053A02
先端的な顕微鏡技術の大気エアロゾル研究への応用		
.....松木 篤, 岩田 歩, 大野 耕平, 玄 正雄		053A03

会員からのお知らせ

The 2nd GEOS-Chem Asia Meeting (GCA2) 参加報告	服部 祥平	053N03
--	-------	--------

学会からのお知らせ

第 30 回大気化学討論会のお知らせ		
.....戸野倉 賢一, 今須 良一, 内田 里沙, 江波 進一, 大畑 祥,		
.....坂本 陽介, 秦 寛夫, 藤田 道也, 星野 翔麻		053N04
2025 年度日本大気化学会奨励賞	日本大気化学会 運営委員会	053N05
第 3 回日本大気化学会論文賞の選考結果について	日本大気化学会 運営委員会	053N06
JpGU 2025「大気化学」セッション開催報告		
.....江波 進一, 入江 仁士, 石戸谷 重之, 中山 智喜		053N07
第 14 期日本大気化学会役員選挙の結果について	日本大気化学会 運営委員会	053N08
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	053N09
会員種別「シニア終身会員制度」導入について	日本大気化学会 運営委員会	053N10
第 39-41 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	053N11

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(第13期, 2025年6月30日まで):

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, 2025年6月30日まで):

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)

大気化学研究編集委員(第14期, 2025年7月1日から, 準委員は2025年8月1日以降予定):

池田恒平(編集長), 河野七瀬, 上田紗也子, 佐伯田鶴, 染谷有

日本大気化学会運営委員(第14期, 2025年7月1日から):

持田陸宏(名古屋大学), 齋藤尚子(千葉大学), 石野咲子(金沢大学),
池田恒平(国立環境研究所), 梅澤拓(東北大学), 江口菜穂(九州大学),
江波進一(筑波大学), 大畑祥(名古屋大学), 河野七瀬(近畿大学),
関谷高志(海洋研究開発機構), 竹川暢之(東京都立大学), 中山智喜(長崎大学),
町田敏暢(国立環境研究所), 山地一代(神戸大学)

日本の大気化学を支える基盤として

持田陸宏^{1*}



日本大気化学会の会長として 2025 年 7 月に就任しました名古屋大学の持田陸宏です。これから 2 年間、皆様どうぞよろしくお願い申し上げます。

本学会は、大気化学研究会を前身として 2014 年に発足しました。それから 10 年余り、春秋 2 回の研究集会の開催、学会誌「大気化学研究」のオンライン発行などを通して、日本の大気化学分野の議論の場として中心的な役割を担っています。2022～2023 年には、本学会の多くの方々のご尽力により、「大気化学研究」誌の総説として「大気化学の将来構想 2022-32」が発行されました。また、前期の運営委員会の下で選挙制度の見直しが行われるなど運営面の整備も進み、本学会は日本の大気化学研究を支える「持続可能」な基盤として成熟しつつあります。GOSAT-GW の衛星観測プロジェクトや北極研究プロジェクトなどの、大気化学に関わる諸々の研究活動の今後の発展が期待される中、本学会は引き続き重要な役割を担うことが期待されます。

本学会は、前身である研究会の当時からの、基盤となる所属学会を各々が持つ研究者の交流の場としての役割に加え、独立した学会としての取り組みを通して、大気化学分野の研究者の活動の基盤となる役割を果たすようになりました。このように基盤学会としての機能を持つに至った今、異分野の交流・連携について改めて考え、垣根を越えた学際・融合的研究の足場としての原点を振り返ることが必要ではないかと考えています。研究者の学会ごとの分断をもたらすのではなく、関連分野との協同を生み育てる場として本学会が機能することを期待し、その実現に目を向けたいと思います。

もちろん、この点に限らず、本学会に期待される役割は様々です。将来構想として論じられた各課題に関して、研究集会や学会誌は実践の成果を共有し、また、当時の構想を超えて議論を深める場を提供することが期待されます。これにより、新たな研究プロジェクトの立案や、日本の大気化学研究のインフラの整備などの本分野の課題の検討・発信の場となることも考えられます。また、若手人材の育成や多様性の確保への支援は、学会として取り組むべき優先度の高い課題であり、これまでの取り組みの維持・発展に務める必要があります。そのほか、学術研究の継続において社会からの信頼と支持がますます必要となる世相の下、大気化学の看板を背負う学会として私達の研究活動の意義を社会でより広く知っていただく術を考えて実行することは、重要な残存課題だと言えます。

本学会のこれらの役割に関して、皆様が寄せる期待もまた様々かと思います。大気化学研究会の当時から現在まで、会員間の風通しの良さは習わしとして受け継がれてきました。この気風を活かして会員の皆様との対話を大切にしつつ、ほか 14 名の運営委員、そのほか準委員の方々とともに、学会の諸活動の継続と発展に努めてまいります。会員の皆様のお声を、これからは是非、忌憚なくお聞かせください。

著者所属:

1. 名古屋大学宇宙地球環境研究所

* 責任著者:

Michihiro Mochida <mochida@isee.nagoya-u.ac.jp>

日本大気化学会第 12・13 期を振り返って

金谷有剛^{1*}



2021 年 7 月から 2 期 4 年務めた会長職から、この 6 月末で退任いたします。第 12 期, 13 期の運営委員の皆さん、とくに岩本副会長、竹川前副会長、石島庶務幹事、関山前庶務幹事、竹谷現・前会計・会員幹事に支えられた 4 年間でした。また、会員の皆さんにはいつも温かく活動に協力していただき、また貴重なご意見を頂くことができました。厚くお礼申し上げます。

第 10・11 期の谷本会長の時代やそれ以前から引継がれた、本学会のアットホームな雰囲気を保ちつつ、また、2018 年高松での iCACGP (大気化学と地球汚染に関する委員会)・IGAC (地球大気化学国際協同研究計画) 合同会議の成功に続く国際的な貢献を意識して運営してきたつもりですが、いかがでしたでしょうか。

第 13 期では、千葉での二度の JpGU 大会に加え、長崎と神戸での大気化学討論会にて、学生を含む会員の皆さんから優れた発表と議論があり、海外からの招待講演者も含め交流が深まったことが思い出されます。この 4 年間では、会員数が増加を続け遂に 300 名を超えたこと、従来の奨励賞に加えて論文賞を立ち上げ定着してきたこと、「大気化学の将来構想 2022-32」の公表とその英語版配布物の作成があり、マンチェスターとクアラルンプールでの iCACGP-IGAC2022, 2024 会議などでの日本からの貢献の提示も大きな成果だったと感じています。

運営面では、今期、会長立候補制や運営委員増員を含む選挙制度の改定を行ったこと、シニア終身会員制度の導入を進めたこと、討論会や海外学会への学生・若手サポートを行ったこと、準委員を制度化

したことなどは大きなステップでした。一方で、研究活動委員会の制度化、JpGU 大気化学セッションの常時 E セッション化などは実現には至らず、道半ばとなりました。国内の観測データ等の国際レベルでの見える化、一般社会へ向けた地球温暖化の物質科学的な知識のわかりやすい解説などについても宿題となったままですが、今後日本学術会議の IGAC 小委員会の活動などで補って行けたらと思います。大気化学研究誌の J-stage 登録可能性の検討、運営委員選挙の投票率向上など、取り組むべき課題はまだ多くあります。

想像もしなかった国際社会の分断が進む時代となりましたが、だからこそ、日本の研究者が、世界の研究者を巻き込みつつ、大きな研究開発や国際協力を遂げて行くことの重要度は増しています。その際、GOSAT-GW/TANSO-3 や北極域研究船「みらい II」などは世界をリードするための大きな財産になることでしょう。これからも、大きな課題に挑戦することを意識しつつ、身の丈に合った適度な負荷のもとで学会が成長してゆくことを望みます。2026 年の iCACGP-IGAC 大会 (クレタ島) でも日本からの成果が多く発信されることを期待しています。日本大気化学会は皆で作る学会です。これからも運営へのご支援のほどをどうぞよろしくお願いいたします。

著者所属:

1. 海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター

* 責任著者:

Yugo Kanaya <yugo@jamstec.go.jp>

エアロゾル粒子の透過型電子顕微鏡分析と大気観測への応用

Transmission electron microscopy for aerosol particles and its application to atmospheric measurements

足立光司^{1*}

エアロゾル粒子の一粒一粒は、それぞれの発生源・輸送過程に応じて異なる組成、形態を持つ。そのため、それぞれの粒子は異なる光学特性、吸湿性、化学組成を持ち、その結果、それらの気候、気象、健康への影響も粒子ごとに異なる。その影響を正確に評価するためには、個別エアロゾル粒子の物理化学特性を理解する必要がある。本論文では、個別粒子分析の手法として、電子顕微鏡法を紹介する。特に、透過型電子顕微鏡法に焦点を当て、その分析原理、サンプリング手法、エアロゾル粒子への応用や分析上の問題点などについての解説を行う。

1. はじめに

エアロゾルは大気中に浮遊する固体または液体の微粒子で、時に数週間以上も大気中に漂い、地域の環境に影響を与え、また地球規模の大気現象に関わる。例えば、吸湿性エアロゾル粒子は大気中の水分を吸って成長することで雲粒になり、また、鉱物やバイオエアロゾルなどは水を成長させる氷晶核として雲の生成や降水過程に影響を与える[Kanji *et al.*, 2017]。加えて、エアロゾルは太陽光を散乱吸収することで、太陽光の地表への到達量や地球気温に影響を与える。また、粒子の組成によっては、健康への影響も懸念される[Pöschl, 2005]。

エアロゾルの気象、気候、または人の健康にかかわる影響は、粒子の大きさ、形態、組成、混合状態、大気中濃度、吸湿性、光学特性(光吸収や散乱)、酸化能など、様々な物理化学特性によって決定される。そのため、光学特性、組成、密度、空気力学径などの物理化学特性が様々な手法で測定されている[McMurry, 2000]。

透過型電子顕微鏡法は、電子線を対象試料に照

射することで、形態や物理化学特性を分析する手法である(図 1)[木本ら, 2020; Conny & Buseck, 2025]。可視光の波長(およそ 550 ナノメートル)を空間分解能の限界とする光学顕微鏡に比べ、電子線の波長はその 10 万分の 1 以下であり、理論的には原子レベルの大きさを分析することができる。そのため、総じて 1 マイクロメートル以下である小さなエアロゾル粒子の分析や、その表面構造、内包物といった極微小領域の分析が個別粒子単位で可能となる。照射された電子は、物質の状態(原子、密度、化学結合、結晶など)に応じて散乱、吸収、励起といった反応を引き起こす。電子顕微鏡分析では、その相互作用の信号を各種検出器で検出することで、物質の状態を調べる(図 1)。そのため、得られたシグナルを正確に理解するためには、関連する物理・光学過程を理解する必要がある。本論文では、エアロゾル粒子の個別粒子分析に有用な透過型電子顕微鏡分析に関わる技術及び、主に著者が関わったエアロゾル観測に関する応用例を紹介する。

2. 電子顕微鏡の原理

電子顕微鏡は大きく分けて、透過型電子顕微鏡 (Transmission electron microscopy: TEM) と走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscopy: SEM) がある。TEM は比較的高い加速電圧 (およそ 100-300 kV) を使って電子線を照射し、真空が保たれた鏡筒内で対象物質を透過した電子線を結像することで画像を得る (図 1)。また電子線と物質の相互作用で得られるシグナルを解析して、その物理化学特性を調べる。TEM は透過電子を使用するため、その情報は物質の内包物や被覆物を含み、またサブミクロンサイズのエアロゾル粒子の内部構造や内包物を見ることができる。一般に、TEM は SEM に比べて複雑な電子線制御機構を持ち、また、高い加速電圧発生や高真空維持のため、装置が大型化する。一般に TEM は SEM よりも空間分解能が高いが、TEM は電子線を対象物質に透過させる必要があるため、多くの場合非常に薄い物質 (厚さ約 100 ナノメートル以下) が分析対象となる。一方、SEM は TEM に比べて低い加速電圧 (およそ 1-30 kV) を用いて、収束させた電子線を走査しながら対象物表面に照射し、その電子線と対象物質の表面で起こる相互作用の結果生じる二次電子、反射電子、特性 X 線などのシグナルを使用する (図 1)。そのため、表面形状の観察などに適している。また試料室が TEM に比べて広く、サブミクロンから数センチ程度までの試料を観察することができ、例えば発生源に近い距離で採取された鉱物 (土壌) 粒子や海塩などの比較的大きなエアロゾル粒子 (数マイクロメートル以上) の分析にしばしば用いられる。大気中のエアロゾルの大部分は 1 マイクロメートル以下の粒子であるため、気候や気象に対する影響も微小エアロゾル粒子のものが大きく、本論文では主に TEM 分析に関する解説を行う。

TEM は、電子線の照射方法や得られたシグナルの検出手法によってさまざまな分析手法が利用できる。TEM の手法を大きく分類すると、結像法、回析法、分光法に分けることができ、それぞれ物質の形態、結

晶状態、組成の分析に用いられる [木本ら, 2020]。TEM 画像は、最も普遍的に用いられる TEM 像に加え、走査透過電子顕微鏡 (Scanning TEM; STEM) 像 (図 2)、元素分布を示すエネルギーフィルター透過電子顕微鏡 (Energy filter TEM; EFTEM) 像などがある。STEM 分析では、SEM と同様に細く収束させた電子線を試料に走査して組成分析や観察を行う。また、TEM、STEM 像ともに透過電子を直接結像する明視野像と、物質の結晶や原子番号などに依存した散乱電子を使って結像する暗視野像があり (図 2)、結像方法によってコントラストの情報が異なるため、注意が必要である。

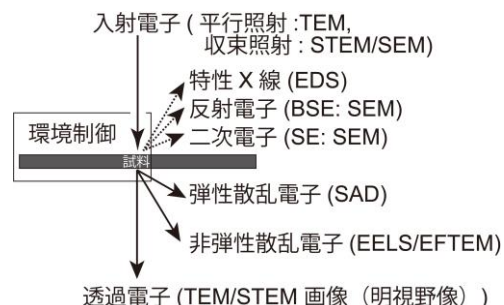


図 1 電子顕微鏡分析における電子線と物質の主な相互作用及び環境制御装置の例。

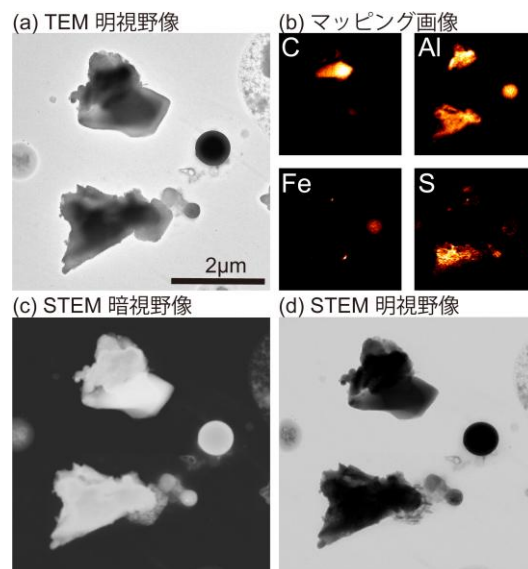


図 2 透過型電子顕微鏡を用いた様々な結像方法の例。試料は、ASIA-AQ2024 キャンペーンで採取したダスト、フライアッシュ粒子など。

分光法には、各元素に特有のエネルギースペクトルを分析するエネルギー分散型特性 X 線分光器 (Energy-dispersive X-ray spectrometer; EDS もしくは EDX) を用いた組成分析や、非弾性散乱電子の損失エネルギーを解析して化学結合状態を分析する電子エネルギー損失分光法 (Electron energy loss spectroscopy; EELS) などがある (図 1)。また、EDS や EELS を STEM 分析と組み合わせることで、粒子内における元素分布の可視化 (元素マッピング) ができる (図 2b)。回折法では、細く絞った平行電子線を、絞りを使って分析対象領域のみに照射し、そこで得られる弾性散乱電子から電子回折パターンを解析する制限視野電子回折 (Selected area diffraction; SAD) を用いた結晶構造分析がある (図 1)。SAD では、例えば鉱物ダストの鉱物種特定などができる。

電子顕微鏡分析は通常真空下で行うが、特殊ホルダやガスが導入できる環境制御チャンバーなどを用いて試料周辺の環境を制御しながら TEM 観察を行うと、粒子の形態や構造変化をその場観察することができる (環境制御 TEM など, 図 1) [Conny & Buseck, 2025]。この手法では、試料付近の相対湿度や温度を制御して、粒子の潮解・吸湿・揮発などの変化を直接電子顕微鏡観察する [Adachi et al., 2011, 2017]。また、試料を傾斜できるホルダを使った電子線トモグラフィ法では、例えばすす粒子の三次元的な構造を可視化することができる [Adachi et al., 2007, 2010]。加えて、試料採取前後に支持膜に処理を加えて、エアロゾル粒子と支持膜の反応を利用した粒子特定手法がある [岡田, 2004]。例えば、試料捕集前の支持膜に Ca を蒸着し、CaSO₄ の結晶を成長させることで硫酸を検出する方法 [Kojima et al., 2006]、ニトロン試薬を蒸着した支持膜を用いて硝酸エアロゾルを検出する方法 [Isawa & Ono, 1979]、試料観察後に水による透析を行って、非水溶性成分を分析する水透析法 [Okada, 1983; Ueda et al., 2023]、角度をつけた金属蒸着を行い、粒子の厚さを推定する手法 [Ueda et al., 2014] などがある。

3. サンプリング

TEM は、支持膜を張った直径 3 mm のメッシュ状の薄い金属製円盤 (グリッド) にエアロゾル粒子を捕集して分析に用いる。グリッドの素材は Cu が多く用いられるが、例えば加熱分析に融点の高い Mo 素材を使用することもある [Adachi et al., 2017]。支持膜も目的に応じた素材を用い、例えばエアロゾルの捕集には、比較的丈夫なフォルムバル支持膜などが利用される。

エアロゾルの捕集には、エアロゾルを含む空気を細いノズルを通して高速の気流にし、グリッドに直接吹き付けるインパクトサンプラが広く用いられている。インパクトサンプラは、流量やノズル径に応じた慣性力で、捕集粒子の空気力学径を制御して、数十ナノメートルから数ミクロンの大きさの粒子を捕集する。また、複数のグリッドを用いてプログラムを使った連続的な自動捕集も可能である。インパクトサンプラは、構造が比較的簡単で小型化が可能であり、航空機や船舶を用いた観測、山岳での観測などにも用いられている [Adachi et al., 2024]。TEM 分析は比較的少量の試料で分析ができるため、通常数時間から数日かかるエアロゾルのフィルタ捕集に比べ、数分から数十分の捕集時間で十分な試料が採取できる [Adachi et al., 2016]。静電気力を利用した静電式サンプラでは、インパクトサンプラに比べてナノ粒子の捕集や粒子の形状を保ったまま捕集できるなどの利点がある一方、捕集時間が数時間以上かかるなどのデメリットもある。

4. エアロゾルの個別粒子分析

この章では、エアロゾル粒子の TEM 分析に焦点を当てる。TEM を用いた画像分析では、粒子の形態、結晶状態、捕集時の状態 (固体・液体)、また複数成分の混合状態など、多くの情報を読み解くことができる。一例を挙げると、大気エアロゾルがインパクトサンプラによって TEM グリッド上に捕集される際、固体粒子はオリジナルに近い形のまま捕集されるのに対し、

液滴は支持膜上で丸く薄く水滴のように広がる。また、ブラックカーボンの形態解析では、構成粒子が隙間なく凝集しているか、開いた状態か、などの形態情報をもとに、粒子のエイジング推定や光学特性評価に必要な情報を得ることができる[Adachi *et al.*, 2010]。加えて、有機エアロゾル成分の混合状態を観察することで、一次有機エアロゾル(固体粒子)か、二次有機エアロゾル成分(他の粒子への被覆)かどうかを推定することもできる(図 3)。さらに、支持膜上での変形の程度によって粘性の定性的な推定も可能となる[Adachi *et al.*, 2019]。また TEM 画像をもとに AI 画像解析を用いることで、特定粒子を検出する手法なども報告されている[Adachi *et al.*, 2024]。

STEM-EDS を使った分析では、一つ一つの粒子(個別粒子)の組成を分析することで、粒子の主成分や混合状態などの解析ができる。元素マッピング分析では、例えばダストと有機物の混合やダストと硫酸塩の混合など一粒子中に複数の成分が混在した粒子を可視化する(図 2)。また、例えば Na を指標とした海塩推定や、P を指標としたバイオエアロゾル推定など、指標元素を用いた粒子種の分類もできる[Adachi *et al.*, 2020]。

STEM-EELS 分析では、例えば炭素の二重結合の存在からグラファイト様のブラックカーボンとアモルファス構造を持つ有機物質の区分や[Adachi *et al.*, 2019]、二価と三価の鉄(Fe^{2+} , Fe^{3+})の区分などが可能である[Moteki *et al.*, 2017]。また、電子線のエネルギーを単色化するモノクロメータを備えた STEM-EELS を用いると、ブラウンカーボンの屈折率推定もできる[Alexander *et al.*, 2008]。

5. TEM 分析の注意点

これまで、TEM 分析の特徴や利点について述べてきたが、この章では TEM を用いたエアロゾル分析の注意点や問題点を議論する。

TEM を用いたエアロゾル分析でよく指摘される問題の一つに、揮発性のエアロゾル成分が分析できな

いことがある。特に、硝酸エアロゾルや有機エアロゾルの一部はガス相とエアロゾル相を行き交うため、捕集時にエアロゾルとして捕集された成分も、捕集後、分析までの保管期間や、電子顕微鏡の真空下においてガス相に戻り、グリッドから失われる可能性がある。一般的なフィルタサンプリングでは、このような捕集後の揮発を抑えるため試料の冷凍保管が行われるが、TEM グリッドでは冷凍保管を行うと、試料の潮解や氷晶の成長により形態が変化する可能性があるため、冷凍保管は推奨しない。例えば硝酸エアロゾルの分析は、前述のエトロン蒸着法などによる分析が対応として考えられる。

また、グリッド上に捕集したエアロゾル粒子が、大気中の形態や混合状態から変化することもある。例えば、大気中で液滴として存在する無機塩などの粒子は、支持膜上でインパクトの衝撃で拡散し、その後水分を失うとともに再結晶化する。そのため、フィルタ上での再結晶化などを考慮した解析が求められる。

EDS を使った組成分析時の注意点として、その定量性があげられる。EDS 分析では、粒子組成の絶対定量の代わりに、選択した元素中で 100%になるように規格化された定量値が用いられることが多い。理論的にはスタンダード試料を用いた絶対定量は可能であるが、EDS のシグナルは、1) 粒子の厚さ、2) 電子線の強度、3) 試料密度、などに依存するため、それらの条件をスタンダード試料に合わせる必要がある。しかしながら、野外で採取された粒子をスタンダード試料と合わせることはほぼ不可能である。特に、粒子の厚さは特性 X 線の吸収補正計算に関わるが、エアロゾル粒子の厚さは粒径に依存するため、一定ではない。また、支持膜からの炭素の寄与や散乱電子線がグリッド金属に照射されて生じる二次的な特性 X 線など、定量には多くの攪乱要素がある。そのため、EDS で得られた定量値は粒子分類や元素間の比率の解析に用いるなど、エアロゾルの EDS 分析の特徴を理解したうえでの取り扱いが必要となる。

硫酸塩などのエアロゾル成分は、一定の電子線照

射によって支持膜上から失われることがある(図 3)。この主な原因は、電子線のエネルギーによって硫酸塩中の元素結合が切れ低分子化することで固体からガス成分になり、真空中に揮散するためと考えられる。一方で、硫酸塩に内包された粒子は、長時間の電子線照射後にはっきりと見えるようになるため、内部混合粒子の分析に硫酸塩の損失を利用することもある(図 3) [Adachi et al., 2014]。

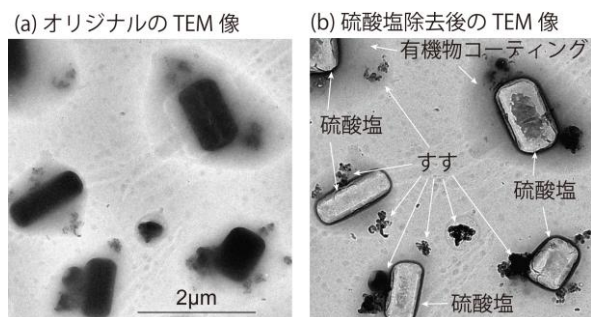


図 3 内部混合が進んだエアロゾル粒子の例。(a) がオリジナル画像で、(b) が電子線照射によって硫酸塩を除去した粒子の画像。(b) は内部混合するすす粒子が明瞭に見える。試料はタイの観測で採取された [Adachi et al., 2025]。

6. おわりに

TEM を用いたエアロゾル分析は、個別粒子に対して多くの情報が得られる一方で、その解釈には十分な知識が必要である。特に、TEM 分析はその利点と欠点を理解したうえで、可能であれば他のオンライン分析(例えば、エアロゾル質量分析装置(AMS)、Single particle soot photometer (SP2)、Wideband Integrated Bioaerosol Sensor (WIBS))と並行させて試料採取を行い、オンライン分析で推定された粒子群の特定や、混合状態の情報提供など、他の測器と組み合わせた解析が効果的である [Adachi et al., 2016; Freitas et al., 2023]。また、TEM 分析の大きな利点として、例えば、ブラックカーボンの混合プロセス [Adachi et al., 2010]、海塩と森林火災由来粒子の混合 [Adachi et al., 2025]、ナノ金属の検出 [Adachi & Buseck, 2010]、ターボールの生成プロセス [Adachi et al., 2019] などの新たなエアロゾルプロセスの発見が

ある。また、セシウムを含む放射性粒子 [Adachi et al., 2013]、隕石成分を含む粒子 [Adachi et al., 2022a]、森林火災からのサブミクロンサイズの灰エアロゾル粒子 [Adachi et al., 2022b] など、新たなエアロゾル粒子種の認識といった他の装置ではできない発見がある。大気エアロゾル観測ではまだ解明すべきナノレベルのプロセス解明や未特定粒子種が存在すると予想され、今後のさらなる電子顕微鏡分析の成果が期待される。

参考文献

- Adachi, K., Chung, S. H., Friedrich, H., & Buseck, P. R. (2007), Fractal parameters of individual soot particles determined using electron tomography: Implications for optical properties, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D14202.
- Adachi, K., Chung, S. H., & Buseck, P. R. (2010), Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D15206.
- Adachi, K., & Buseck, P. R. (2010), Hosted and Free-Floating Metal-Bearing Atmospheric Nanoparticles in Mexico City, *Environ. Sci. Technol.*, 44(7), 2299-2304.
- Adachi, K., Freney, E. J., & Buseck, P. R. (2011), Shapes of internally mixed hygroscopic aerosol particles after deliquescence, and their effect on light scattering, *Geophys. Res. Lett.*, 38(13), L13804.
- Adachi, K., Kajino, M., Zaizen, Y., & Igarashi, Y. (2013), Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident, *Sci. Rep.*, 3, 2554.
- Adachi, K., Zaizen, Y., Kajino, M., & Igarashi, Y. (2014), Mixing state of regionally transported soot particles and the coating effect on their size and shape at a mountain site in Japan, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(9), 5386-5396.
- Adachi, K., Moteki, N., Kondo, Y., & Igarashi, Y. (2016), Mixing states of light absorbing particles measured using a transmission electron microscope and a single particle soot photometer in Tokyo, Japan, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121(15), 9153-9164.

- Adachi, K., et al. (2017), Volume changes upon heating of aerosol particles from biomass burning using transmission electron microscopy, *Aerosol Sci. Technol.*, 52(1), 46-56.
- Adachi, K., et al. (2019), Spherical tarball particles form through rapid chemical and physical changes of organic matter in biomass-burning smoke, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 116(39), 19336-19341.
- Adachi, K., et al. (2020), Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy, *Atmos. Chem. Phys.*, 20(20), 11923-11939.
- Adachi, K., Oshima, N., Takegawa, N., Moteki, N., & Koike, M. (2022a), Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy, *Commun. Earth Environ.*, 3(1), 134.
- Adachi, K., et al. (2022b), Fine ash-bearing particles as a major aerosol component in biomass burning smoke. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127, e2021JD035657.
- Adachi, K., et al. (2024), Occurrence, abundance, and formation of atmospheric tarballs from a wide range of wildfires in the western US, *Atmos. Chem. Phys.*, 24(19), 10985-11004.
- Adachi, K., Sun, C., Onchang, R., & Takegawa, N. (2025), Homogeneous mixing of sea spray and biomass burning tracer elements within single particles observed over Southeast Asia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 130(1), e2024JD042328.
- Alexander, D. T. L., Crozier, P. A., & Anderson, J. R. (2008), Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties, *Science*, 321(5890), 833-836.
- Conny, J. M., & Buseck, P. R. (2025), Microanalysis of Atmospheric Particles: Techniques and Applications, American Geophysical Union. doi:10.1002/9781119554318
- Freitas, P. G., et al. (2023), Regionally sourced bioaerosols drive high-temperature ice nucleating particles in the Arctic, *Nat. Commun.*, 14(1), 5997.
- Isawa, Y., & Ono, A. (1979), Nitron thin film method for detection of submicron nitrate particles and its application to atmospheric aerosols, *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 57(6), 599-606.
- Kanji, Z. A., et al. (2017), Overview of ice nucleating particles, *Meteorol. Monogr.*, 58, 1.1-1.33.
- 木本 浩司, 三石 和貴, 三留 正則, 原 徹, 長井 拓郎 (2020), 物質・材料研究のための透過電子顕微鏡, 389p., 講談社.
- Kojima, T., Buseck, P. R., Iwasaka, Y., Matsuki, A., & Trochline, D. (2006), Sulfate-coated dust particles in the free troposphere over Japan, *Atmos. Res.*, 82(3-4), 698-708.
- McMurry, P. H. (2000), A review of atmospheric aerosol measurements, *Atmos. Environ.*, 34(12), 1959-1999.
- Moteki, N., et al. (2017), Anthropogenic iron oxide aerosols enhance atmospheric heating, *Nat. Commun.*, 8, 15329.
- Okada, K. (1983), Nature of individual hygroscopic particles in the urban atmosphere, *J. Meteor. Soc. Jpn.* 61, 727-735.
- 岡田 菊夫 (2004), 電子顕微鏡による大気エアロゾル粒子の組成と混合状態の分析法について, *エアロゾル研究*, 19(1), 21-27.
- Pöschl, U. (2005), Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 44(46), 7520-7540.
- Ueda, S., Hirose, Y., Miura, K., & Okochi, H. (2014), Individual aerosol particles in and below clouds along a Mt. Fuji slope: Modification of sea-salt-containing particles by in-cloud processing, *Atmos. Res.*, 137, 216-227.
- Ueda, S., Iwamoto, Y., Taketani, F., Liu, M., & Matsui, H. (2023), Morphological features and water solubility of iron in aged fine aerosol particles over the Indian Ocean, *Atmos. Chem. Phys.*, 23(17), 10117-10135.

原稿受領日: 2025 年 5 月 7 日

掲載受理日: 2025 年 6 月 13 日

著者所属:

1. 気象研究所

* 責任著者:

Kouji Adachi <adachik@mri-jma.go.jp>

高分解能質量顕微鏡の開発と個別エアロゾル粒子の成分イメージング

Development of a high-resolution mass imaging apparatus and application to compositional imaging of individual particles

坂本哲夫^{1*}

エアロゾルは様々な発生源をもつ粒子の集合体である。伝統的バルク分析ではエアロゾル集団としての成分比や特定の成分の増減を高い確度で知ることができるが、個別粒子の情報を得ることは難しい。一方で、個別粒子分析は電子顕微鏡などを用いた研究例があるが、形状観察は得意なものの、元素分析に留まり、化合物に関する情報を得ることは難しい。そこで筆者は $\text{PM}_{2.5}$ 粒子に対応した空間分解能をもつ二次イオン質量分析装置(高分解能質量顕微鏡)を開発し、エアロゾルを個別に見ることで何が分かるのかを研究してきた。本稿では装置の原理・特長をなるべく分かりやすく解説し、越境エアロゾルの分析に応用した例を紹介する。

1. はじめに

厳密な定義はさておき、大気エアロゾルのなかでも $\text{PM}_{2.5}$ とは大きさが概ね $2.5\ \mu\text{m}$ 以下の粒子の総称であり、成分は問わない。図 1 に長崎県福江島で筆者が採取した $\text{PM}_{2.5}$ を含むエアロゾル粒子の走査電子顕微鏡(SEM)写真を示す。様々な大きさ、形状、コントラストの粒子が混在していることが判る。それにも拘わらず、 $\text{PM}_{2.5}$ の環境基準はこれらの粒子の大気中での質量濃度で決められている。このことは多少問題があり、例えば図 2 に示すように、測定上、同じ質量濃度であっても、その内訳は様々であり、濃度と健康影響は必ずしも直結はせず、一つの目安に過ぎない可能性もある。無論、種々の方法で成分分析も行われている。粒子捕集を粒径選別して行えば、粒径ごとの成分の違いを把握でき、図 2 のどちらのケースなのかを知ることはできる。しかしながら、こうした所謂バルク分析では多数粒子の平均組成しか判らないため、粒子の発生源の特定や健康影響メカニズム

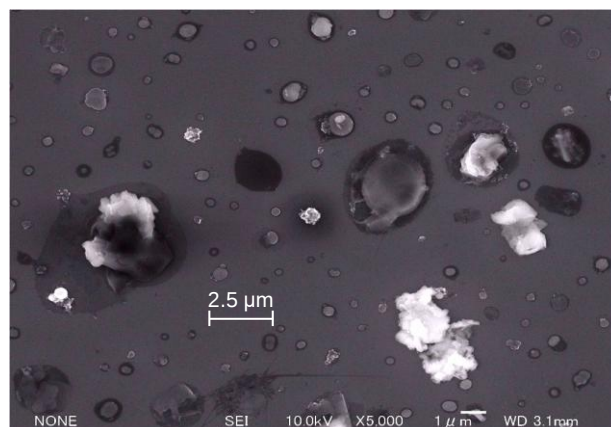


図 1 長崎県福江島で捕集したエアロゾルの走査電子顕微鏡写真の例。

の研究には情報が不足している。図 3 に示すように、成分 A、B から成る粒子があり、排出源ごとに成分比が異なる場合、大気中でこれらが混在してしまえばバルク分析では排出源を特定できない。また、粒子一つの構造についても、人体(肺)に取り込まれたあとの挙動は粒子表面の物質に大きく左右されると思わ

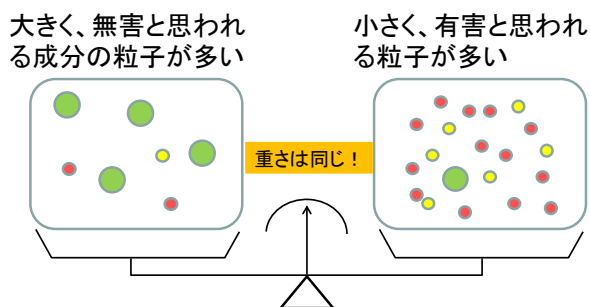
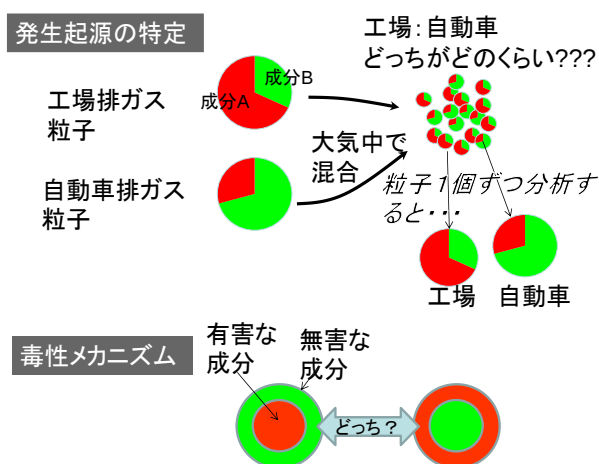
図 2 $\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度基準の問題点

図 3 個別粒子分析の意義。粒子の混合状態が判ると発生起源の特定や健康影響の議論に役立つ。

れるが、バルク分析では粒子を溶解させて分析するため、こうした構造情報も得られないことになる。このように、従来のバルク分析は $\text{PM}_{2.5}$ の平均成分を高い信頼性で知ることができるという特長はあるものの、それとは別に「木を見て森を見ず」でいえば、個々の木を見る分析技術が必要なのである。

2. 従来の個別粒子分析方法

このような観点から、表面分析が $\text{PM}_{2.5}$ を含むエアロゾル粒子に活用された例は多くはないが存在する。もっとも多いのは SEM や透過電子顕微鏡(TEM)による画像観察[Adachi et al., 2010], 次いで電子プローブマイクロアナリシス(EPMA)法による元素分析である。EPMA では個別粒子のスペクトル分析を行い、多数粒子のデータを統計的手法によって処理し、僅かな試料から環境場のエアロゾルの素性を明らかにす

る方法論が確立している[尾張ら, 1985; Kim et al., 2001]。しかしながら、電子線励起の手法では、元素分析に留まり、化合物の同定や有機物の分析は一般に困難である。例えば、同じ炭素でも、「スス」のような無機炭素なのか、有機物なのかは $\text{PM}_{2.5}$ 分析にとって大変重要である。化学状態分析として有用なのは X 線光電子分光法(XPS)であるが、 $\text{PM}_{2.5}$ のサイズになるとイメージングは難しく、バルク分析と比較した場合の利点は見えてこない。イオンビームを用いた方法では、粒子線励起 X 線分析法(PIXE)[斉藤, 2011]や二次イオン質量分析法(SIMS)[坂本ら, 1996]がある程度の実績をもっている。PIXE は高エネルギーイオンビーム照射による特性 X 線を検出するが、定量性には優れるものの、得られる情報は元素情報であり、また、イオンビームの集束が難しいため、個別 $\text{PM}_{2.5}$ のイメージングには至っていない。

3. 高分解能質量顕微鏡の開発

3.1 装置の原理

以上のような分析ニーズに対し、筆者はSIMSをベースとした $\text{PM}_{2.5}$ の個別粒子分析装置(高分解能質量顕微鏡)を開発した。

図4に本装置の外観を示す。装置の基本原理は飛行時間型二次イオン質量分析(TOF-SIMS)装置と基本的には同じものである。但し、一次イオンビームとして細く絞ることのできる集束イオンビーム(FIB)を

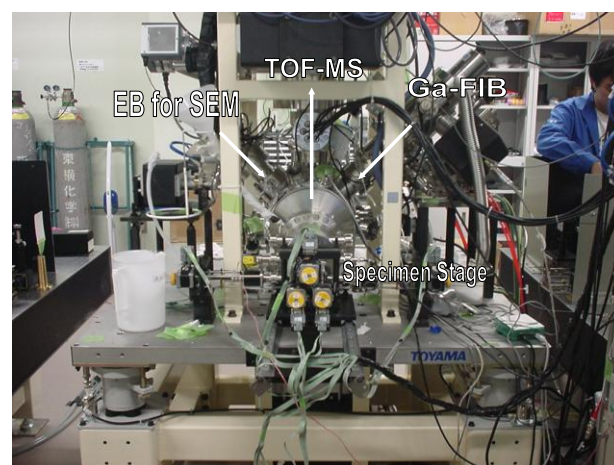


図 4 高分解能 TOF-SIMS 装置の外観

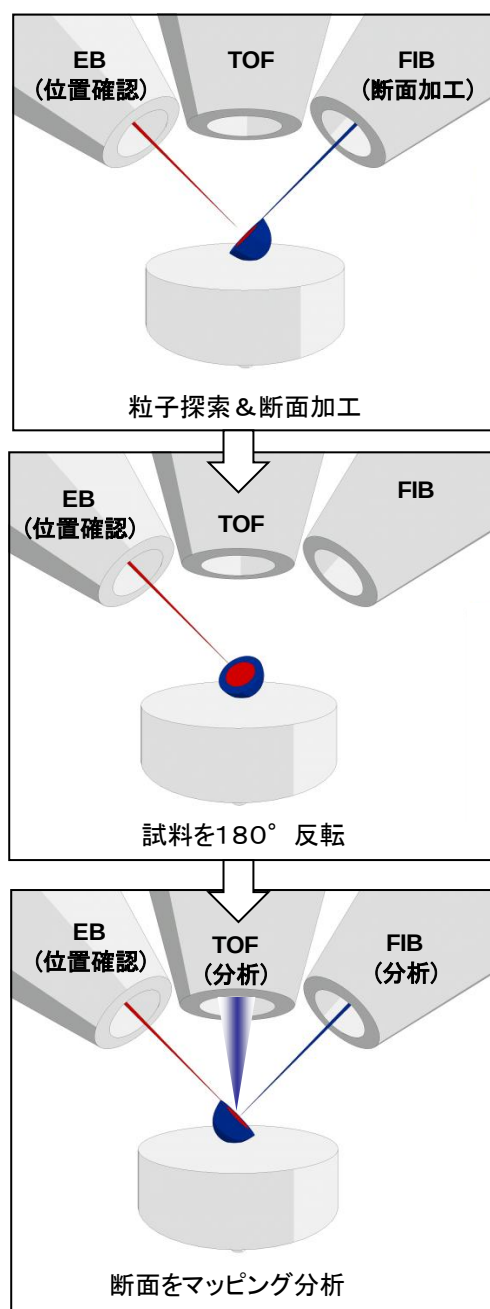


図 5 微粒子内部の分析手順

専用に設計し、イメージング性能を重視した。微小なエアロゾル粒子を分析するために、分析手順も工夫した。典型的な微粒子分析手順を図 5 に示す。微粒子は平滑な基板上に載っているものとする。分析対象の粒子を選定するためには FIB 励起二次電子像による観察が必要であり、その際のスパッタリングによる試料損耗が避けられない。また、大気側からの光学的な観察では PM_{2.5} 粒子一つに狙いを定めるこ

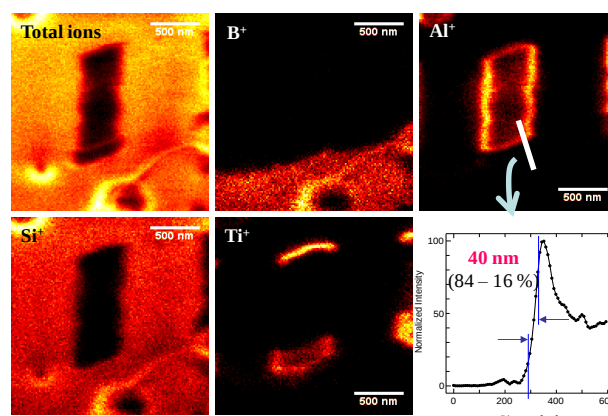


図 6 面分解能の評価結果 (試料: IC の断面)

とは難しい。

そこで、FIBと同一箇所が観察可能なSEM用電子銃(EB)を搭載し、非破壊での分析位置決めができるよう工夫した。単一粒子の断面分析を行う場合、具体的な流れは以下ようになる。1) SEM による粒子探索を行い、FIB によって粒子を断面加工する。2) FIB 加工断面は FIB と平行な面であるため、断面が FIB 側を向くように試料台を 180° 回転させる。この際、粒子を見失わないようにユーセントリック回転をさせながら SEM による観察を続ける。3) FIB をパルス照射とし、放出された二次イオンを TOF 型質量分析計で分析する。

3.2 高分解能質量顕微鏡の特徴

一次イオン一つが固体表面に入射した際、スパッタ原子・分子が放出される領域のサイズは大きくても数 nm と考えられるため、SIMS 分析における面方向分解能は実質的に一次イオンビームのスポット径で決まると考えてよい。この装置の FIB はガリウム液体金属イオン源を用いているため、イオン源としての輝度が高く、加工や二次電子像観察として用いる場合は数 nm の分解能が得られる。但し、これはビーム電流を低く(1 pA 以下)抑えた結果であり、TOF-SIMS ではより高い照射電流としなければ、現実的な時間内での分析は難しい。そこで、本装置の FIB は、TOF-SIMS 用として多用されるであろう数 10 pA~1

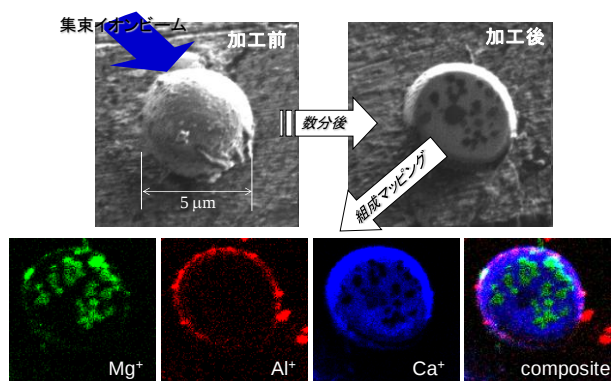


図 7 石炭フライアッシュ粒子の断面分析の例

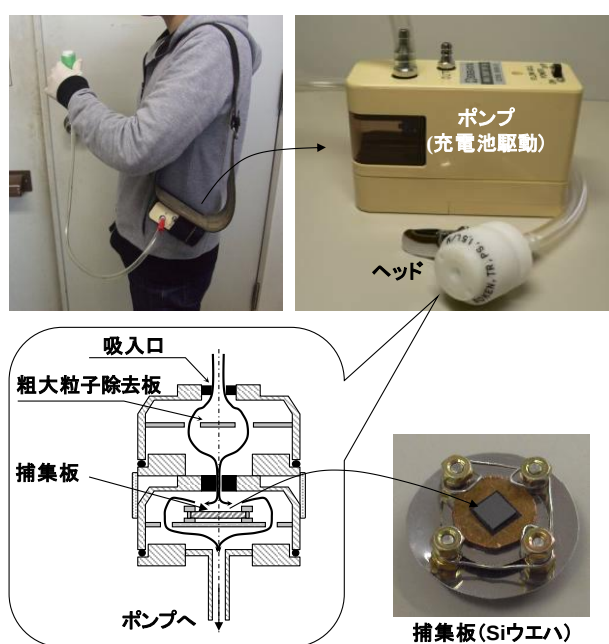
nA 程度の照射電流で最も電流密度が高くなるように設計した。

図 6 に元素マッピングにおける面分解能の評価結果[Sakamoto *et al.*, 2008]を示す。試料は古いパソコンから取り出した D-RAM を用いた。予め FIB で 10 μm 幅の断面を切り出し、その断面を視野幅 2 μm でマッピングした。視野内には紙面前後方向に伸びる Al 配線の断面が見えており、Al 配線およびその上下にある薄い Ti 層も見られた。Al 配線端における強度のラインプロファイルから、分解能 40 nm と算出された。これは世界最高分解能である。なお、本装置

開発の後、やはり FIB を用いた TOF-SIMS 装置で同等の面分解能が得られる装置が国内で開発されている[江端ら, 2010]。本測定ではビーム電流 26 pA の条件でマッピング時間 751 s であった。ビーム電流をさらに抑えれば分解能の向上も見込まれるが、マッピング時間を考えると筆者が開発した装置を用いた実用分析における最高分解能は 40 nm であるといえる。

FIB を用いて試料を断面加工し、その断面を同一の FIB で分析する手法は二瓶、尾張らにより磁場型の質量分析計を用いた SIMS 装置を用い 1980 年代に実現されている[Nihei *et al.*, 1987; Satoh *et al.*, 1988]。その意味では本装置における試料断面加工に新規性はないが、本装置の高い面方向分解能や有機物検出といった機能と融合させることにより、新たな応用が期待できる。また、FIB と同一点を望む SEM 機能により、FIB 加工中の SEM 観察が可能である。したがって、粒子内部の特定の分析箇所を逃さず加工を止めることができる。このことは「二つとして同じ粒子はない」というエアロゾルを扱う分析において重要な機能である。図 7 に大きさ 5 μm ほどの球形エアロゾル粒子を断面加工し、次いで断面をマッピングした例を示す。Mg と Ca が相補的に分布しており、Al は表面のみに存在していることが判る。このように表面または粒子全体の平均組成では判らないことが手に取るように見えることを示している。

PM_{2.5} の個別分析では粒子の捕集方法も重要である。バルク分析ではフィルターが用いられるが、これは表面分析には適さない。平板上に粒子が捕集できるインパクター型が適しているのであるが、個別粒子分析用としてはほんの少しの捕集量で済む。そこで、労研 TR 個人サンプラー (PS-43 型) を改造し、Si ウエハ上にインパクターの原理で捕集可能なサンプラーを製作した[Yamaguchi *et al.*, 2008; 大塚ら, 2014]。図 8 にサンプラーの構造等を示す。電池で 1.5 L/min の吸引流量にて駆動する。吸入された空気と微粒子は細い管を通るときに線速度が上がり、捕集板 (4 mm $\times$ 4 mm の Si ウエハ) 上に粒子が慣性衝突して捕集

図 8 PM_{2.5} 捕集用の小型インパクター

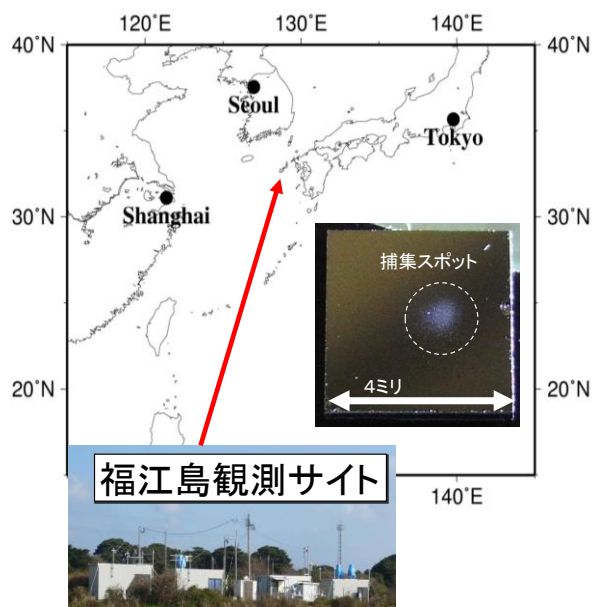


図 9 越境粒子の捕集場所

される。捕集効率やカットオフ粒径といった仕様の評価は行っていないが、50 nm 程度の粒子まで捕集可能である。捕集時間は概ね 10 分程度で充分である。

4. 越境 PM_{2.5} の分析

4.1 背景

幾ら優れた個別粒子分析装置ができて、粒子一つを分析しただけでは判らないことが多い。そこで、バルク分析や大気化学の専門家との共同研究として、越境微粒子の分析を行った。越境微粒子とは、中国大陸からやってくる PM_{2.5} や黄砂のことである。日本国内の発生源の影響を受けにくく、粒子捕集に最適な場所として長崎県五島列島の福江島に国立環境研究所等の観測サイトがある。AMS (Aerosol Mass Spectrometer) による常時観測や、フィルターサンプリングによるバルク分析等が行われ、越境微粒子について数々の成果を上げている。その観測に同行し、単一微粒子分析用の試料を捕集した。図 9 に福江島の位置と Si ウエハに捕集した PM_{2.5} 粒子の様子を示す。

4.2 PM_{2.5} の反応解析

ある日時、ある場所で捕集した粒子がどこから来た

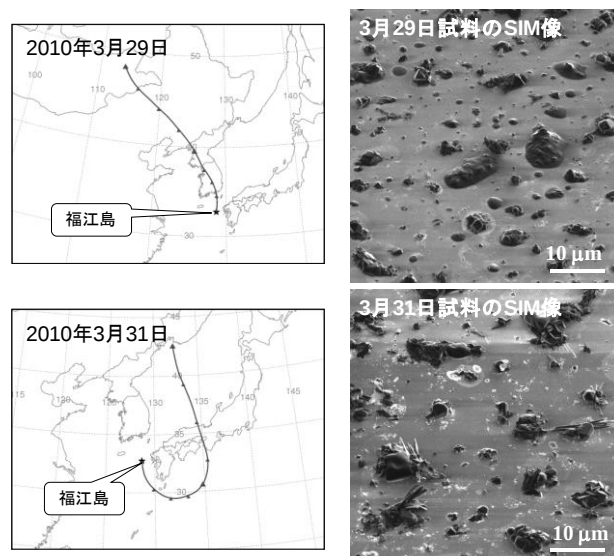
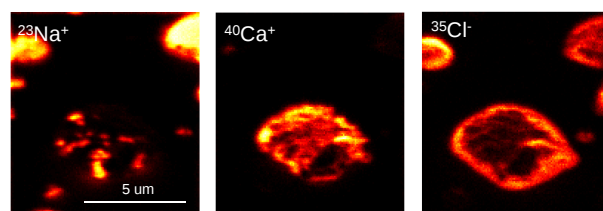


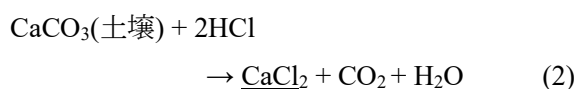
図 10 大陸由来のエアロゾル（上段）と日本海・太平洋を經由したエアロゾル（下段）の SIM 画像

大気(気塊)に乗ってきたのかは、後方流跡線解析によって凡そ把握できる。図 10 左に 2010 年 3 月 29 日および 31 日の流跡線を示す。29 日は大陸から朝鮮半島を通り福江島に至り、31 日は日本海から太平洋を回って福江島に北上している。このように浮遊経路がまったく異なる場合の粒子について比較した。図 10 右に捕集した粒子の二次電子像を示す。3 月 29 日は全体的に溶けたような粒子が多く、それとは別にサイコロ状の結晶粒子が幾つか見られた。一方、31 日は溶けたような粒子はなく、またサイコロ状の結晶粒子も見られなかった。

3 月 29 日の粒子のうち、多く見られた液滴状に広がった粒子について成分マッピングを行った結果を図 11 に示す。主成分は Ca と Cl であり、Na が斑に存在した。また、図 12 に示すように、同じく多く存在したサイコロ状の粒子は、断面の Na⁺, NO₂⁻, O⁻ の画像

図 11 大陸由来粒子に多く見られた CaCl₂ 粒子の成分マップ

から、粒子最表面は Na_2O であり、粒子内部は NaNO_3 であることが判った(註:SIMS では硝酸塩の場合、 NO_3^- が検出されるが、そのフラグメントイオンである NO_2^- が強く検出されるため、画像は NO_2^- を使用した)。3月29日は中国の工業地帯上空を通り、朝鮮半島を抜けてきた粒子である。このことと、図11および12に示した特徴的2タイプの粒子分析から、式(1)(2)の反応が大気中で起こっているものと考えられた。



つまり、図11に示した CaCl_2 粒子は土壌中の Ca が塩酸と反応したものであり、その塩酸は海塩と硝酸ガスの反応によって生成されたものと解釈できる。このことから、黄砂を含め、大陸からの土壌粒子は工業地帯などの汚染を受け、海を越えると塩化カルシウムとなって日本に飛来するといえる。また、塩化カルシウムは吸湿性であることから水分を多く含む液滴状の粒子であったと思われる。一方、日本海・太平洋経由で福江島に飛来した3月31日の粒子には図11, 12のような粒子は殆ど見られなかった。

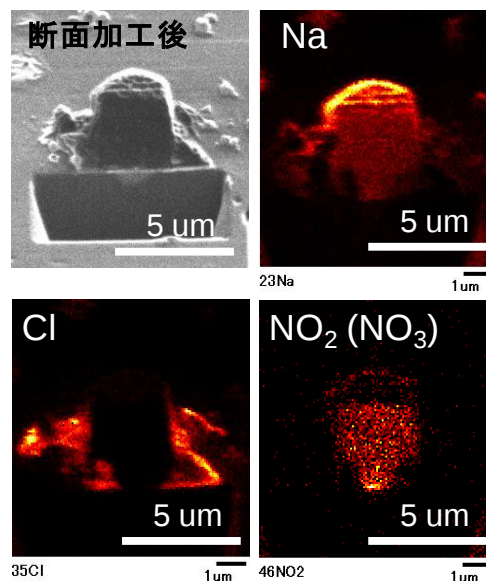


図12 大陸由来粒子に見られた硝酸塩粒子の断面成分マップ

以上の結果から、粗大粒子である黄砂などの土壌粒子は大気汚染地域を通過した際に海塩との反応が進むという特徴的な点を見出すことができた。

4.2 $\text{PM}_{2.5}$ の内部構造分析

福江島で観測をすると、時として $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が上昇する日がある。現地で行っている常時観測では硫酸塩成分の上昇がみられることから、典型的な排ガス粒子と思われるが、粒子の詳細はわかっていない。そこ

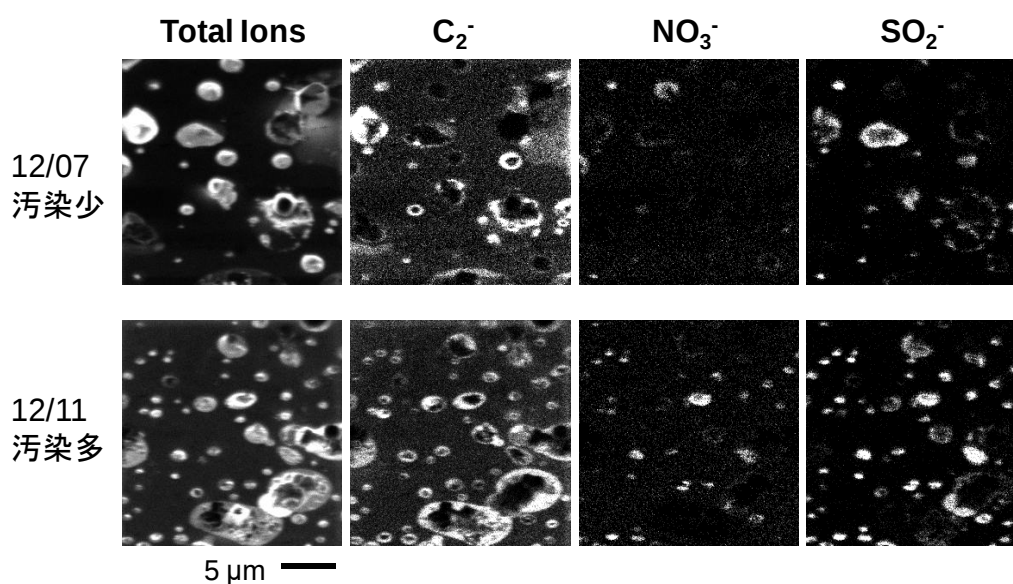


図13 福江島で捕集したエアロゾルの成分別画像

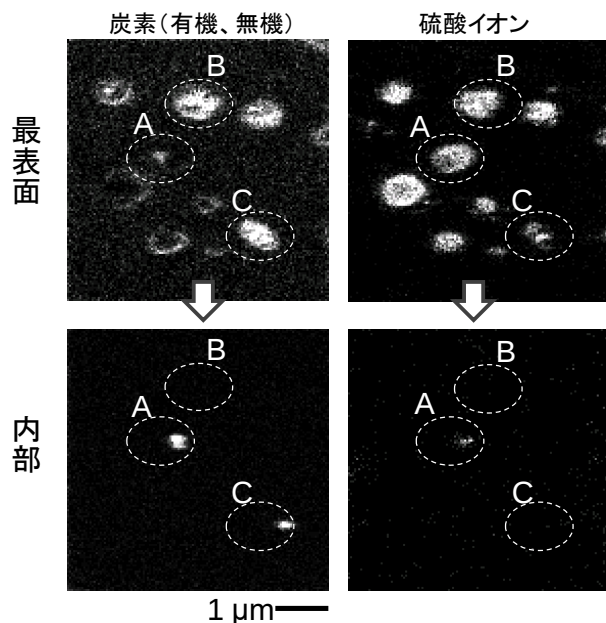


図 14 硫酸塩エアロゾルの成分マップ。(上段：粒子最表面、下段：粒子内部)

で、濃度が低い日(12月7日)と高い日(12月11日)の試料を比較分析した[Takami *et al.*, 2013; Mayama *et al.*, 2013]。

図 13 に両日のエアロゾルの成分画像を示す。明らかに濃度が高い日には炭素成分、硝酸イオン、硫酸イオンを含む粒子の数が増えていることが判る。これらは殆どが $1\ \mu\text{m}$ を下回る微小粒子であり、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が高くなる場合にはこのタイプの粒子(以下、硫酸塩エアロゾルと呼ぶ)が増えていることを示している。

硫酸塩エアロゾルは粒子がどのような構造をしているのかは分かっていない。本装置を用い、典型的な硫酸塩粒子をマッピング分析した。図 14 に成分のマップを示す。硫酸塩粒子は基板上で液滴状に広がっており、大気中では水分を多く含んでいたと考えられる。上段は粒子最表面のマップであるが、どの粒子にも炭素成分と硫酸イオンが見られた。一方、同一視野で FIB を照射し、表面を剥ぎ取った後のマップを下段に示す。すると、粒子 A や C には炭素の粒が残った。即ち、硫酸塩エアロゾルには幾らかの割合で内部に炭素粒子が含まれていることを示している。表面の炭素分と内部の炭素との違いを質量スペクトル(図 15)から判別したところ、表面の炭素は炭化水

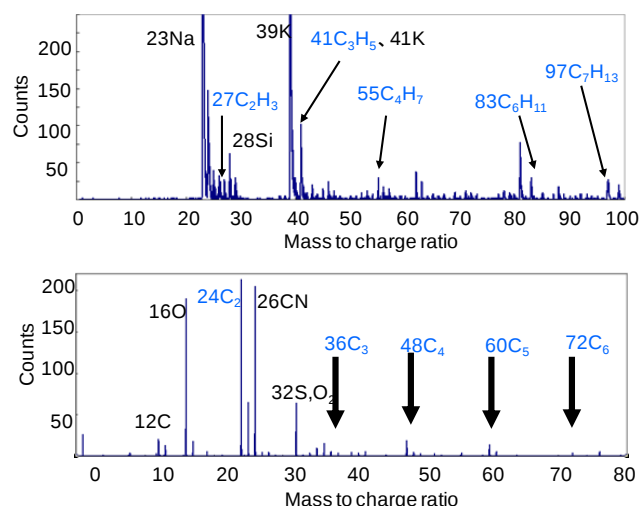


図 15 硫酸塩エアロゾルの質量スペクトル。(上段：粒子最表面の油分、下段：粒子内部のスス)

素類(油分)であり、内部の炭素粒子は無機炭素、つまりススであることがわかった。従来、硫酸塩エアロゾルにはスス(ブラックカーボン=BC)が含まれていることは示唆されていたが、成分画像として確認したのはこれが初めてである。この BC は、温暖化や気象(雲形成)の観点から注目されている粒子であり、BC が硫酸塩にどのように被覆されているのかによって、その効果が異なるとされており、そうした方面での研究に役立つ情報である。さらに、排出要因に応じた BC や有機物の成分の詳細な違いが、排出源の判別に利用されることが期待できる。

5. さいごに

$\text{PM}_{2.5}$ をはじめとするエアロゾル粒子の分析は難しい。なぜならば、粒子が小さいこともそうであるが、多様な粒子が存在し、多くの場合複雑な混合物であるためである。SIMS は質量分析であるため、得られる情報量は多く、これに高空間分解能という特長を併せ持てば、詳細な粒子分析ができることが判った。従来法であるバルク分析、そして粒別分析それぞれの特長を活かした総合的な分析に発展するべきであると考え。また、SIMS 以外の表面分析については、 $\text{PM}_{2.5}$ 分析を念頭に開発された装置は筆者の知る限り存在しない。先に述べたようにエアロゾル分析は難

しいので, そうした目的で開発する装置は工業材料やデバイスなど, 他の分析にも強みを発揮する可能性があり, 今後の装置メーカー等の開発にも期待したい。

謝辞

装置開発には筆者だけではなく, 多くの方が携わった。また, 幾つかのプロジェクトを通じて応用分析も行うことができた。以下に列挙し, 感謝申し上げる。

1. JST・先端計測分析技術機器開発事業(機器開発型), 代表・藤井正明(東工大), 林俊一(新日鐵住金), 石内俊一(東工大), 平等拓範(分子科学研究所)
2. JST・先端計測分析技術機器開発事業(プロトタイプ化), 代表・遠藤克己(トヤマ), 藤井正明(東工大), 林俊一(新日鐵住金), 井戸 豊((株)島津製作所)
3. JST・先端計測分析技術機器開発事業(放射線領域), 奥村丈夫(日本中性子光学), 川上 勇(阿藤工務店)(代表は坂本)
4. 環境省・環境研究総合推進費(課題番号:B-1006) 代表・藤井正明(東工大), 高見昭憲(国環研), 畠山史郎(農工大), 坂東 博(大阪府立大), 村野健太郎(法政大)
5. 環境省・環境研究総合推進費(課題番号:C-1002) 代表・藤谷雄二(国環研), 三澤健太郎(東工大)

参考文献

- Adachi, K., Chung, S. H. & Buseck, P. R. (2010), Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate, *J. Geophys. Res.*, 115, D15206, doi:10.1029/2009JD012868.
- 江端新吾, 石原盛男, 公文代康介, 身深亮, 内野喜一郎, 坂本尚義 (2010), 局所分析法の最先端—超高感度極微量質量分析システムの開発—, 日本惑星科学会誌 19, 295-304.
- Kim, B. A., Tomiyasu, B., Owari, M. & Nihei, Y. (2001), Individual particle analysis for source apportionment of

suspended particulate matter using electron probe microanalysis, *Surf. Interface Anal.*, 31, 106-113.

- Mayama, N., Miura, Y., Misawa, K., Takami, A., Sakamoto, T. & Fujii, M. (2013), Characterization of black carbon in fine aerosol particles using high lateral resolution TOF-SIMS, *Analytical Sciences*, 29(4) 479-482.

- Nihei, Y., Satoh, H., Tatsuzawa, S., Owari M., Aihara, R., Azuma, K. & Kammei, Y. (1987), High spatial resolution secondary ion mass spectrometry with parallel detection system, *J. Vac. Sci. & Technol.*, A5, 1254-1257.

大塚 紀一郎, 江坂 将, 三浦 祐哉, 坂本 哲夫(2014), エアロゾル粒子の分散捕集のための可動ステージイオンパクターの開発, 分析化学, 63, 317-322.

尾張真則, 後藤誠, 大岩直登, 福田昭浩, 武藤義一, 二瓶好正 (1985), 石炭フライアッシュの粒別組成の分布解析, 分析化学, 34, 523-528.

斉藤勝美 (2011), PIXE 法による大気微小粒子(PM2.5)の元素分析の現状と展望, 環境と測定技術 38, 11-16.

坂本哲夫, 富安文武乃進, 神宮信康, 尾張真則, 二瓶好正 (1996), 電子プローブマイクロアナリシス法及び二次イオン質量分析法による大気浮遊粒子状物質の同一粒子分析, 分析化学, 45, 479-484.

Sakamoto, T., Koizumi, M., Kawasaki, J. & Yamaguchi, J. (2008), Development of a high lateral resolution TOF-SIMS apparatus for single particle analysis, *Applied Surface Science*, 255, 1617-1620.

Satoh, H., Owari, M., & Nihei, Y. (1988), Quantitative analysis by submicron secondary ion mass spectrometry, *J. Vac. Sci. & Technol.*, B6, 915-918.

Takami, A., Miyoshi, T., Shimono, A., Kaneyasu, N., Kato, S., Kajii & Y., Hatakeyama, S. (2010), Transport of anthropogenic aerosols from Asia and subsequent chemical transformation *Geophys. Res.*, 112 D22S31 doi:10.1029/2006JD008120

Takami, A., Mayama, N., Sakamoto, T., Ohishi, K., Irei, S., Yoshino, A., Hatakeyama, S., Murano, K., Sadanaga, Y., Bandow, H., Misawa, K. & Fujii, M. (2013), Structural

analysis of aerosol particles by microscopic observation
using a time-of-flight secondary ion mass spectrometer,
Journal of Geophysical Research, 118, 6726-6737.

山田 丸, 岩坂泰信, 小林史尚, 張 代洲 (2010), 黄砂発生
源地域におけるバイオエアロゾル観測の試み: 係留気
球観測と個別粒子分析, エアロゾル研究, 25(1), 13-22.

Yamaguchi, J. & Sakamoto, T. (2008), A portable aerosol
sampler for individual particle analysis by means of TOF-
SIMS, *Applied Surface Science*, 255(4), 1505-1508.

原稿受領日: 2025 年 6 月 12 日

掲載受理日: 2025 年 7 月 10 日

著者所属:

1. 工学院大学先進工学部応用物理学科

*** 責任著者:**

Tetsuo Sakamoto <ct13087@ns.kogakuin.ac.jp>

先端的な顕微鏡技術の大気エアロゾル研究への応用

Application of advanced microscopic techniques to atmospheric aerosol research

松木篤^{1,*}, 岩田歩², 大野耕平³, 玄正雄⁴

本稿では、大気エアロゾルの個別粒子分析において注目されている原子間力顕微鏡 (AFM) および顕微ラマン分光法とその派生技術の応用について概観する。AFM はナノスケールの粒子の混合状態のみならず、吸湿性、表面張力、付着力、粘性といったさまざまな物性を直接計測する手法として応用されている。一方、ラマン分光法は有機物の定性・定量に優れ、表面増強ラマン (SERS) やその他の先端的分光法との組み合わせにより、さらに微細な粒子へと対象を拡大しつつある。これらの手法の進展は、エアロゾル研究における粒子の物理的、化学的特性のさらなる理解に貢献するものと期待される。

1. はじめに

英語の observation という言葉は、大気化学の研究分野では広い意味での「観測」を表すことが多いが、その語源を調べてみると、ラテン語の ob- (～の前) + servare (見守る) からなり、元々は注意深く見守る、注視する、気付くといった意味から派生した言葉らしい。その点では、エアロゾルの粒子一粒を捕まえてつぶさに観察する個別粒子分析は、本来の意味に最も近い古典的な observation と言えるかもしれない。それだけに、ともすると「木を見て森を見ず」を地で行くような、特徴的な粒子ばかりに観察者の目が囚われてしまい、近視眼的で主観的な観察に終始し、エアロゾルの集団としての特性を定量的、俯瞰的に捉えられないきらいがあるのも事実である。その一方で、ごくまれに「百聞は一見に如かず」を体現するような、従来の想像や概念からかけ離れた形態や混合状態の粒子の存在を、決定的な証拠と共に示してくれることがある。オンラインでのエアロゾル質量分析や衛星観測などが当たり前の現代に至ってもなお、この古典的で一見非効率な observation が必要とされる所以で

あろう。

大気エアロゾル研究の発展において、その汎用性の高さから電子顕微鏡 (SEM, TEM) とエネルギー分散型 X 線分析器 (EDX) のタッグが果たしてきた貢献は言わずもがなであるが、その詳細は他稿に譲るとして、ここではあえて「じゃない方」の顕微鏡を用いた個別粒子分析のアプローチにスポットを当ててみたい。

2. 原子間力顕微鏡 (AFM)

個別粒子分析をしていて、風変りな粒子を見つけると、形を見るだけでは飽き足らず、どんな感触なのか触ってみたいのが電顕屋のサガである。ツルツル、ザラザラ、ベトベト、サラサラ、ドロドロ、こうした日常的に使われる感触の概念は、科学的には表面粗さ、付着力、粘度、弾性 (ヤング率) のような物理的・化学的な性質 (物性) によって定量的に表現、定義される。ところがナノ、マイクロスケールの個別粒子を触ろうにも我々の指先 (探針) では粒子の大きさに対して太すぎるし、感度にも個人差がある。そこで原子間力顕微鏡 (AFM) の出番である。

AFM には、光や電子線の代わりに物理的な探針が使われる。通常、シリコン製の尖った探針が片持ち梁(カンチレバー)と呼ばれる板バネの先から生えており、試料と探針間距離が一定になるように試料側をピエゾ素子のスキャナーで XYZ 方向に走査することで、表面の 3 次元的な凹凸構造を写し取ることができる。その際、試料と探針先端の間に働く微弱な原子間力(静電気力、ファンデルワールス力など)の作用によって板バネのたわみ量や振動が変化するため、その変位をレーザーで検出してスキャナーのフィードバック制御に利用している。

AFM の空間分解能は探針先端の曲率によって決まるため、市販されている一般的なものでも通常ナノメートルオーダーの分解能で 3 次元的な画像が得られる。また、大気雰囲気下、溶液中でも測定が可能であり、試料に導電性を問わないなど測定環境の自由度の高さが一般的な SEM, TEM とは大きく異なる点である(しかし、試料や探針が静電気を帯びると斥力によってうまく測れないことも)。通常、表面の形状や凹凸の観察のみが目的であれば、探針や試料の損傷回避のためにノンコンタクトやタッピングという探針との接触を極力抑えた観察モードが使用される。これらのモードでも、凹凸像のみならず表面の傾斜や形状を見るのに便利な振幅像、表面物性の違いをある程度反映した(物質の分布がわかる)位相像などが得られる。AFM の性質上、高さ方向の凹凸に非常に敏感なため、傾斜や凹凸の少ない平滑な Si-ウェハなどが基板として選ばれることが多い。

一方、あえて探針を物理的に試料に接触させるコンタクトモードを使うことで、AFM はその感触を数値として返してくれるので、上述のような様々な物性を定量的に測ることも可能になる。物性を測りたい点でスキャナーを Z 軸方向に上下させると、探針は次第に試料表面に近づき、先端が触れてから押し込まれ、最終的には引き抜かれる。この探針が試料を一回「突つつく」過程で、カンチレバーに発生するたわみ量の変化を、試料=探針間距離の関数として表した

のがフォースカーブである。このフォースカーブには様々な物性の情報が含まれており、個々の粒子の物性を直接評価できる手法として、近年、エアロゾルの研究においても応用が進んでいる。

2.1 エアロゾルの混合状態と吸湿性

AFM の画像から、海洋飛沫エアロゾル(SSA)が示すコア=シェル構造(図1)を可視化する試みなども行われている[*Lee et al.*, 2019, 2020a; *Ono et al.*, 2023]。AFM の測定から見積もられた個々の SSA 粒子中の有機物の体積割合はバルク分析結果とも良い一致を見せるなど、AFM の非破壊かつ立体的な画像解析が単一粒子レベルの混合状態評価に有効であることを示している。

大気エアロゾルの吸湿性は、粒子の吸湿成長によるサイズ変化や雲凝結核活性を決定づける重要な性質である。*Morris et al.* [2016] は、環境制御型の AFM を用いて個々の粒子サイズを異なる湿度条件下で比較し、成長因子(GF: growth factor)を導出した。NaCl とノナン酸の混合粒子を用いた実験では、AFM によって見積もられた GF が従来の HTDMA (Hygroscopic Tandem Differential Mobility Analyzer)

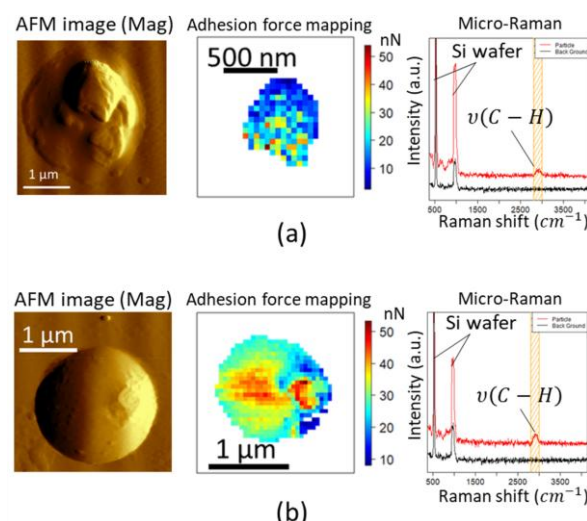


図 1 波の花成分から発生させた有機物に富む SSA 粒子の原子間力顕微鏡像、付着力分布ならびに C-H 伸縮振動に対応する(2800–3000 cm^{-1}) ラマンスペクトル。(a) 結晶性のコア部と(b) 非晶質なシェル部の比較 [Ono et al., 2023]。

による測定結果とよく一致する一方で、粒子ごとのばらつきも確認された。

2.2 エアロゾルの表面張力

表面張力もまた、大気エアロゾルの雲凝結核活性を左右する重要な物性である。従来、雲凝結核活性を定式化した κ -ケーラー理論においても表面張力は純水の値を仮定することが一般的であった。しかし実際のエアロゾルは界面活性物質を多く含み、その表面張力は大きく低下することが知られている。*Morris et al.* [2015]および*Lee et al.* [2017]は、特殊なナノニードル(一定の半径をもつ極めて細い円柱状の探針)を用いて得られた AFM のフォースカーブから、粒子と探針との間に形成されるメニスカス(液体ブリッジ(液架橋)の湾曲部)が崩壊する最大保持力を求め、個々の粒子の表面張力を算出した。この手法は溶質濃度や粘性の影響を受けるものの、バルク測定との整合性が高く、直径が数百ナノメートル程度の粒子に対しても適用できる。こうした AFM による吸湿性や表面張力の測定法を天然の SSA に適用した例では、植物プランクトンの生物活性に伴う有機物の存在割合との間に良い対応が見られている[Cochran et al., 2017, Lee et al., 2020a, b]。

2.3 エアロゾルの付着力

大気エアロゾルの付着力は、ファンデルワールス力、液架橋力(液体ブリッジ形成により生じる引力)、静電気力によって構成され、その強弱は粒子同士の凝集や、粒子が表面に沈着した際、そこに留まるか、再飛散するかを決定づけるため、エアロゾルが大気から取り除かれる過程と、毒性、腐食性や放射性を持つエアロゾルの人体、インフラ、環境に及ぼす影響の正確な評価につながる。例えば、*De Falco et al.* [2015]は、燃焼課程で生成されるカーボンナノ粒子の形態および付着力を AFM によって測定し、空燃比の違いによるハマーカー定数(ファンデルワールス力)の変化を通じてスス粒子の凝集傾向を明らかにし

た。また、*Shi et al.* [2015]は北京で採集された PM2.5 の AFM 観察から、スス粒子が特に高い付着力と凝集性を示すことを報告している。

このほか、探針の代わりに単体の粒子そのものを用いたカンチレバー先端に取り付けたコロイダルプローブを使用し、粒子と基板との間に作用する力を計測する試みも行われている。屋内環境における粒子の付着挙動の研究では、*Tan et al.* [2014]がハウスダストの付着力を評価し、湿度の違いに応じた家庭内の代表的な表面(塩ビ、ガラス、金属)に対する粒子挙動の変化を示した。一方、*Moutinho et al.* [2017]はダスト粒子の沈着による太陽電池パネルの発電効率低下を念頭に、湿度、表面粗さ、粒子形状が付着力に及ぼす影響を検討し、湿度の上昇により液架橋力が支配的になることを明らかにした。

近年では、放射性核種を含む粒子[*Peillon et al.*, 2022]や黄砂、海塩[*Ono et al.*, 2020, 2023]といった特定の成分に注目した研究も行われている。前者では、AFM と空気動力学的な手法による付着力測定結果を比較し、放射性エアロゾルの再飛散を予測する理論モデルの妥当性を検証している。後者では、形状や化学組成が異なる個々の粒子の付着力を AFM により系統的に測定し、変質した一部の黄砂や、海洋表層マイクロ層由来の有機物を多く含む SSA が強い付着力を示すことを報告した(図1)。これらの知見は、粒子の沈着挙動や除去効率の定量的理解、さらには表面改質による付着防止技術の開発にも応用可能である。

2.4 エアロゾルの粘性

大気エアロゾルは粒子そのものの吸湿性や温度や湿度条件といった環境条件に応じて固体・半固体・液体などの相状態を取りうるが、相状態の変化は水分の取り込み、不均一反応や粒子内部での分子拡散、氷晶核活性といった様々なプロセスに影響を与える[*Berkemeier et al.*, 2014]。*Ray et al.* [2019]は、AFM のフォースカーブから、粒子の粘弾応答距離

(VRD)と相対変形深(RID)を定義し、粒子に加える力と変形の関係を定量化した。これにより、固体($\text{VRD} < 0.5 \text{ nm}$, $\text{RID} \ll 1$), 半固体($\text{VRD} > 0.5 \text{ nm}$, $\text{RID} < 1$), 液体($\text{RID} \approx 1$)といった相状態の識別が可能になった。同様の測定を相対湿度の制御下で行うことで、コア=シェル構造を示す SSA のシェル部(有機物)が低湿度条件でも半固体相を保持していることが報告された[*Lee et al.*, 2020b]。また、より迅速な手法として、粒子のアスペクト比(高さ/面積相当径)のみを用いた相状態の半定量的判別も提案されている。

3. 顕微ラマン分光法

顕微ラマン分光法(Raman microspectroscopy)では、分子の振動状態に由来するラマン散乱光を検出することにより、化学結合や官能基の情報を得ることができる。SEM や TEM と組み合わせられる EDX が元素分析であるのに対して、顕微ラマン分光法はそれら元素同士がどのように結合しているのかに特化している点で、相互補完的である。ほかにも、大気圧下での測定が可能な点や、走査型透過 X 線顕微鏡(STXM)のように大がかりな放射光ビームラインを必要としないなど、他の分光法にはない利点も多い。とりわけ、EDX が苦手としてきた有機物の特定に有効なツールとして期待されている。

顕微ラマン分光法では、基板上の試料に共焦点顕微鏡を通じて可視～近赤外レーザーを照射し、元の励起光からの波長のずれを(ラマン散乱光)を検出する。分光によって得られたラマンスペクトルは、 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ の範囲で、官能基ごとに特有の振動モードに対応したピークを示す。ピークの強度は対応する化学種の濃度に比例するため、粒子中の有機成分の定性・半定量評価が可能である。

3.1 従来の顕微ラマン分光法の応用事例

大気エアロゾルへの応用では一般的な TEM グリッド以外にガラスや石英スライド、Si-ウェハなどに粒子を衝突捕集したものが使われることが多いが、バック

グラウンドのピークを嫌ってラマン活性を持たない Al-や Ag-ホイルが使われることもある。従来の顕微ラマン分光法(いわゆるノーマル・ラマン)のエアロゾル研究への応用事例については過去の記事なども参考にされたい[*松木*, 2013]。顕微ラマン分光法の応用例として、*Baustian et al.* [2012]は、コロラド州の山岳域で採集された氷晶核として働く粒子に対してラマン分光法による分析を行い、有機物の有無やコーティングの存在を示した。*Ault et al.* [2013]は SSA から生物由来と考えられるメチレン基の対称・非対称 C-H 伸縮振動($2850, 2930 \text{ cm}^{-1}$)を検出し、そのピーク強度が粒径が小さいほど高くなる傾向を示した。また、*Kirpes et al.* [2019]は、ラマンスペクトルから SSA 粒子中の糖類、脂肪酸、アミノ酸などの生物由来成分を特定し、冬季の海氷域における有機エアロゾルの生成に対する微生物活動の重要性を指摘した。黄砂に代表される鉱物ダストのエイジングの研究にも顕微ラマン分光法は活用されており、鉱物ダストに含まれるカルシウム炭酸塩がシュウ酸、酢酸や硝酸塩に置き換わっている様子などが室内実験や観測から捉えられている[*Laskina et al.*, 2013; *Iwata et al.*, 2018]。こうした軽元素が関わる有機酸も含めたカルシウム塩の結合状態がわかるのも、顕微ラマン分光ならではの利点と言えるだろう。

ここまでは顕微ラマン分光法の利点や応用の成功例を中心に述べてきたが、ラマン散乱が元来極めて微弱な信号であることや、励起光の回折限界によって規定されてしまう空間分解能の粗さ、蛍光によるスペクトルへの干渉などの影響を受けるため、必ずしもすべての個別粒子から綺麗なスペクトルが得られるわけではない点に注意が必要である。特にサブミクロン領域の粒子に適用するにあたってクリアしなければならない課題も少なくない。そこで、近年は派生的な技術によりラマン散乱強度を増幅したり、空間分解能を高める試みが行われている。

3.2 表面増強ラマン分光法

金や銀のナノ粒子で構成される金属ナノ構造表面では、局所的な表面プラズモン共鳴(金属表面の自由電子が入射する光と同じ振動数で共鳴して集団振動を起こす現象)が発生する。このホットスポットと呼ばれる領域に分析対象の分子が存在するとラマン信号がケタ違いに増幅される効果が知られており、この増強効果を活用したものが表面増強ラマン分光法(SERS: Surface-Enhanced Raman Spectroscopy)である。

大気エアロゾル研究に応用した例では、*Craig et al.* [2015]が、この技術により従来法では困難であった二次有機エアロゾル中の官能基グループが検出でき、かつそれらが 0.5 μm 以下の空間分解能で不均質に混ざっている様子を報告している。さらに *Kunihisa et al.* [2020]は、水ベースの凝結核カウンター(WCPC)にも利用されている凝結成長管によりナノ粒子を成長させ、SERS 活性をもつ基板に直接捕集することで(図 2)、直径わずか 20 nm の単一粒子からラマンスペクトルを得ることに成功している。これらの研究は、基板側に SERS 活性を持たせた事例であるが、ホット

スポットが基板側にあると粒子本体に隠されてしまい、薄いコーティングの検出には必ずしも適さない場合がある。*Gen et al.* [2017, 2019]は、エレクトロスプレー法により銀ナノ粒子を発生させ、目的の粒子にふりかけることで、粒子の最表面にホットスポットを形成し、ノーマル・ラマンでは検出不可能だった最表面の分子の検出を可能にしている。

3.3 その他の先端的分光法

近年では、前半で紹介した AFM と顕微ラマンや赤外分光などの組み合わせによって、それぞれの手法の良いところ取りを目指すような取り組みも行われている。TERS (Tip-enhanced Raman Spectroscopy) は SERS の発展形であり、AFM の探針の先端に金属ナノ粒子によるホットスポットを形成し、試料を走査しながら探針の先端めがけて励起光レーザーを集光することで、AFM の空間分解能で、かつ増幅されたラマン信号を得ようとする試みである[Ofner et al., 2016]。これと似たような発想で、赤外波長可変パルスレーザーを AFM の探針と同じ位置に照射することで、試料の分子振動と光の波数が共鳴した際に、赤外吸収により生じる光熱膨張を AFM で検出するのが AFM-IR である[Bondy et al., 2017]。しかし、SERS 関連技術と同様に、TERS や AFM-IR はその技術的なハードルの高さや再現性の難しさから、多くの場合概念実証の域を出なかったり、既知の物質を対象としたシンプルな系での実験に留まるケースが多く、実大気の未知試料に溢れる様々な化合物の同定や定量に汎用的に適用されるには分析コストの問題も含め、まだ多くの課題が残されている。このほか、AFM-IR に似た原理で、光熱膨張を AFM の探針ではなく可視光レーザープローブによって検出する O-PTIR (Optical Photothermal Infrared Spectroscopy) も登場している。蛍光による干渉を受けずに顕微ラマンの空間分解能で赤外分光が行えると謳う新しい顕微鏡で、大気エアロゾル研究への応用もはじまっている[Olson et al., 2020]。

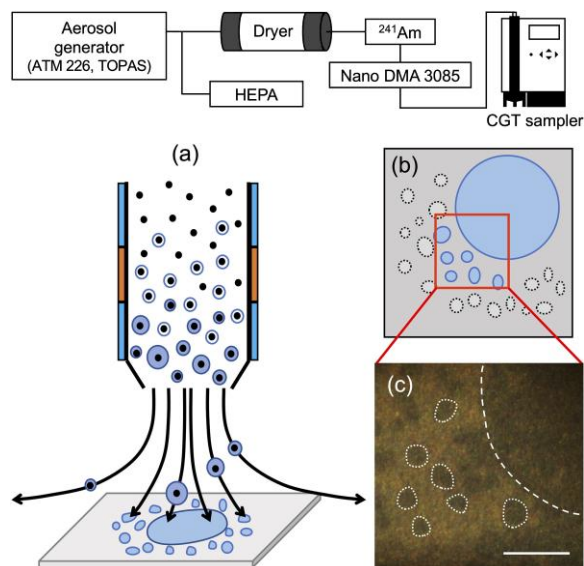


図 2 ナノ粒子の凝結成長を利用した SERS 法概念図。微分型静電分級器 DMA で分級したナノ粒子を凝結成長させた後(a)、SERS 基板に直接捕集(b)することで、単一粒子に対応するホットスポット(c)を顕微ラマン分光により分析する[Kunihisa et al., 2020]。(c)のスケールバーは 10 μm 。

4. おわりに

ここでは、エアロゾルの個別粒子分析において、従来中心的な役割を担ってきた電子顕微鏡「じゃない方」の研究アプローチをピックアップした。振り返ってみると、それぞれ一長一短があるが、有機物の検出、大気環境下での分析や、物性計測など、従来電子顕微鏡が不得意としてきた項目をある程度カバーできる技術が実現しつつある。今後、こうした様々な顕微鏡技術がさらに発展し、互いに補い合うことで、より多角的な observation が可能となり、まだ誰も見たことのないエアロゾルの未知の側面が垣間見られるものと期待される。

参考文献

- Ault, A. P. et al. (2013), Raman microspectroscopy and vibrational sum frequency generation spectroscopy as probes of the bulk and surface compositions of size resolved sea spray aerosol particles, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 6206-6214.
- Baustian, K. J. et al. (2012), Importance of aerosol composition, mixing state, and morphology for heterogeneous ice nucleation: A combined field and laboratory approach, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, D06217.
- Berkemeier, T. et al. (2014), Competition between water uptake and ice nucleation by glassy organic aerosol particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 14(22), 12513-12531.
- Bondy, A. L. et al. (2017), Atomic force microscopy infrared spectroscopy of individual atmospheric aerosol particles: Subdiffraction limit vibrational spectroscopy and morphological analysis, *Anal. Chem.*, 89(17), 8594-8598.
- Cochran, R. E. et al. (2017), Molecular diversity of sea spray aerosol particles: Impact of ocean biology on particle composition and Hygroscopicity, *Chem*, 2(5), 655-667.
- Craig, R. L. et al. (2015), Surface enhanced Raman spectroscopy enables observations of previously undetectable secondary organic aerosol components at the individual particle level, *Anal. Chem.*, 87(15), 7510-7514.
- De Falco, G. et al. (2015), Flame-formed carbon nanoparticles: Morphology, interaction forces, and hamaker constant from AFM, *Aerosol Sci. Technol.*, 49, 281-289.
- Gen, M., & Chan, C. K. (2017), Electrospray surface-enhanced Raman spectroscopy (ES-SERS) for probing surface chemical compositions of atmospherically relevant particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 17(22), 14025-14037.
- Gen, M. et al (2019), Electrospray surface-enhanced Raman spectroscopy (ES-SERS) for studying organic coatings of atmospheric aerosol particles, *Aerosol Sci. Tech.*, 53(7), 760-770.
- Iwata, A., & Matsuki, A. (2018), Characterization of individual ice residual particles by the single droplet freezing method: A case study in the Asian dust outflow region, *Atmos. Chem. Phys.*, 18(3), 1785-1804.
- Kirpes, R. M. et al. (2019), Wintertime arctic sea spray aerosol composition controlled by sea ice lead microbiology, *ACS Central Science*, 5(11), 1760-1767.
- Kunihisa, R. et al. (2020), Application of SERS on the chemical speciation of individual Aitken mode particles after condensational growth, *Aerosol Sci. Tech.*, 54(7), 826-836.
- Laskina, O. et al. (2013), Infrared extinction spectroscopy and micro Raman spectroscopy of select components of mineral dust mixed with organic compounds, *J. Geophys. Res., Atmos.*, 118(12), 6593-6606.
- Lee, H. D. et al. (2017), Direct surface tension measurements of individual submicrometer particles using atomic force microscopy, *J. Phys. Chem.*, 121(43), 8296-8305.
- Lee, H. D. et al. (2019), Effect of dry or wet substrate deposition on the organic volume fraction of core-shell aerosol particles, *Atmos. Meas. Tech.*, 12(3), 2033-2042.
- Lee, H. D. et al. (2020a), Physicochemical mixing state of sea spray aerosols: Morphologies exhibit size dependence. *ACS Earth Space Chem.*, 4(9), 1604-1611.
- Lee, H. D. et al. (2020b), Organic enrichment, physical phase state, and surface tension depression of nascent Core-Shell Sea spray aerosols during two phytoplankton blooms, *ACS*

Earth Space Chem., 4, 4, 650–660.

松本篤 (2013), ラマン顕微鏡を用いた大気エアロゾル研究, *エアロゾル研究*, 28(3), 208-213.

Morris, H. S. et al. (2015), Humidity dependent surface tension measurements of individual inorganic and organic submicrometre liquid particles, *Chem. Sci.*, 6(5), 3242-3247.

Morris, H. S. et al. (2016), Quantifying the hygroscopic growth of individual submicrometer particles with atomic force microscopy, *Anal. Chem.*, 88(7), 3647-3654.

Moutinho, H. R. et al. (2017), Adhesion mechanisms on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness, and particle shape and size, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 172, 145-153.

Ofner, J. et al. (2016), Tip enhanced Raman spectroscopy of atmospherically relevant aerosol nanoparticles, *Anal. Chem.*, 88(19), 9766-9772.

Olson, N. E. et al. (2020), Simultaneous optical photothermal infrared (O-PTIR) and Raman spectroscopy of submicrometer atmospheric particles, *Anal. Chem.*, 92(14), 9932-9939.

Ono, K. et al. (2020), Direct measurement of adhesion force of individual aerosol particles by atomic force microscopy, *Atmosphere*, 11, 489.

Ono, K. et al. (2023), Characterization of adhesivity of organic enriched sea spray aerosols by atomic force microscopy, *Atmos. Environ.*, 294, 119468.

Peillon, S. et al. (2022), Adhesion forces of radioactive particles measured by the aerodynamic method—validation with atomic force microscopy and comparison with adhesion models, *J. Aerosol Sci.*, 165, 106037.

Ray, K. K. et al. (2019), Correlating 3D morphology, phase state and viscoelastic properties of individual substrate deposited particles, *Anal. Chem.*, 91(12).

Shi, Y. et al. (2015), Nanoscale characterization of PM2.5 airborne pollutants reveals high adhesiveness and aggregation capability of soot particles, *Sci. Rep.*, 5, 11232.

Tan, C. L. C. et al. (2014), Adhesion of dust particles to common indoor surfaces in an air-conditioned environment, *Aerosol Sci. Tech.*, 48(5), 541–551.

原稿受領日: 2025 年 6 月 14 日

掲載受理日: 2025 年 6 月 29 日

著者所属

1. 金沢大学 環日本海域環境研究センター
2. 気象研究所 気象予報研究部 第四研究室
3. 大阪府立環境農林水産総合研究所 環境研究部
4. 中央大学 理工学部 応用化学科

* 責任著者:

Atsushi Matsuki <matsuki@staff.kanazawa-u.ac.jp>

The 2nd GEOS-Chem Asia Meeting (GCA2) 参加報告

服部祥平^{1*}

2024 年 5 月 19 日(月)から 21 日(水)にかけて、中国江蘇省南京市の南京信息大学 (Nanjing University of Information Science and Technology, NUIST) で The 2nd GEOS-Chem Asia meeting (GCA2) (<https://geoschem.github.io/gca2.html>) が開催されました。私は 2022 年 1 月から南京大学に転職し同市に住んでおり、特に出張申請なく日帰りで参加できる手軽さもあって参加してきました。

この会議は、3 次元大気化学輸送モデル GEOS-Chem (<https://geoschem.github.io/>) を軸に展開されており、2003 年以降ほぼ隔年でサイエンスおよびユーザー会議が行われてきました。コミュニティの拡大とともに、2018 年には第一回の地域会議である The 1st GEOS-Chem Asia meeting (GCA1) が開催され、以降は International (アメリカ開催)、Europe (ヨーロッパ開催)、Asia (中国開催) の 3 つの地域でユーザー会議が継続的に開かれています。GCA としては今回が 2 回目ですが、前回は COVID-19 以前だったことを思えば、雰囲気も規模も、前回とは大きく異なるものと参加したみなさんがおっしゃっていました。

ユーザーが多いとはいえ、ひとつの大気化学輸送モデルに特化した地域ユーザー会議に過ぎないかと思いきや、8 カ国 55 の大学・研究機関から参加者が集まり、合計 263 名が参加しました。これは 2024 年 4

月にアメリカで開催された The 11th International GEOS-Chem Meeting (IGC11, アメリカ開催) の 278 名 (96 大学・研究機関, 22 カ国) にほぼ匹敵する規模です。なお、日本大気化学会の正会員、学生会員、賛助会員の合計が 288 人だそうなので (令和 7 年 5 月現在)、それと同レベルの人数が集っていたと考え、その大きさが伝わるのではないのでしょうか。

会議初日のキーノートでは、ハーバード大学の Daniel Jacob さんが“GEOS-Chem model overview”として近年の GEOS-Chem の特徴とアップデートを紹介されましたが、とにかく「あれもこれも GEOS-Chem でやってるの?」という研究が多く、情報量に圧倒されました。その後も、セッションは以下の通りで、Chemistry-climate-ecosystems interactions, Emissions and mitigations, Chemistry, Aerosols, Model tutorials, Air quality という多様なテーマが設定され、どれも興味深い内容でした。キーノートを除く通常の口頭発表は発表 8 分、質疑 2 分でテンポよく進み、次から次へと襲いかかってくる濃密な研究内容に、聴講側としては息継ぎすら忘れるほどでした。

ポスターセッション前に各発表に 1 分間の口頭紹介があり、パワーポイントが 1 分ごとに自動で切り替わっていく方式で、発表者は列になり矢継ぎ早に紹介される仕組みでした。個人的にはこのスタイルが非常



写真 1 集合写真



写真 2 ポスターセッションの様子

に良く、全体の概要を効率的に把握できると感じました。ポスターセッションは極めて熱気に満ちていて、さながら AGU のポスターセッションのようでした。2 日目のポスターセッションでは食事とアルコール含む飲み物も提供され、リラックスした雰囲気です。活発に議論されていました。学生発表賞もあることから、多くの学生が熱意を持って説明しているのが印象的でした。これまで中国の学会（というか中国の研究者たち）は口頭発表に重点を置きがちな印象がありましたが、このやり方には良い意味で裏切られました。あと、中国の学生さん、みんな本当に英語が上手です。

さらに注目すべきは、GEOS-Chem working group breakouts という各ワーキンググループに分かれて Break out session が行われている点です。Chemistry-Climate WG (Chair: Lee Murray), Inverse Modeling & Data Assimilation WG (Chair: Jun Wang), Chemistry WG (Chair: Lu Hu), Aerosols WG (Chair: Qi Chen), Emissions WG (Chair: Jintai Lin), Carbon Cycle WG (Chair: Zichong Chen), Surface-Atmosphere Exchange WG (Chair: Amos Tai) が 2 コマの時間帯で行われ、各人 2 つの WG に参加することができました。それぞれのグループでは、最近のモデルアップデート情報や各々の取り組みの共有 (+ conflict がないようにする話し合いや調整)、GEOS-Chem 本体へのデフォルト実装の希望取りまとめ、今

後の研究計画や要望事項 (いわゆる Wish List) が積極的に意見交換されていました。ベテランだけでなく、新規ユーザーからの意見も歓迎されており、GEOS-Chem を“みんなで育てていく”空気が感じられました。モデルの民主化とでも言うべきこの雰囲気は、個人的にも大変刺激的でした。

さて、筆者自身は“大気化学者”を自認しているものの、“モデルの専門家”というわけではありません。ただ、2017 年から GEOS-Chem を活用した研究は継続しており、少なくとも自分の研究の主軸の一部になりつつあると思っています。今回はちょうど 1 日目の 5 月 19 日に発表となった論文 [Iizuka et al., 2025] の内容を紹介しました。発表の冒頭では、内容が前日にウェブ公開された“できたて”であることを強調し、なんとか聴衆の注意を引こうと試みました。発表内容は、グリーンランドアイスコアの硝酸濃度の長期変遷を GEOS-Chem で再現し、大気酸性度の変化によって駆動されるガス-粒子分配の変化が、硝酸の寿命および極域への輸送効率を大きく左右するというものです。反応は上々で、これをきっかけに新しいつながりや共同研究の糸口がいくつか得られました。特に、将来の排出シナリオや気候変動シナリオとの連携による予測研究への展開について、関心を寄せていただけたのは印象的でした。

とてもアクティブで、何よりその“人口密度”に驚かされた会議ではありましたが、会場のいたるところで

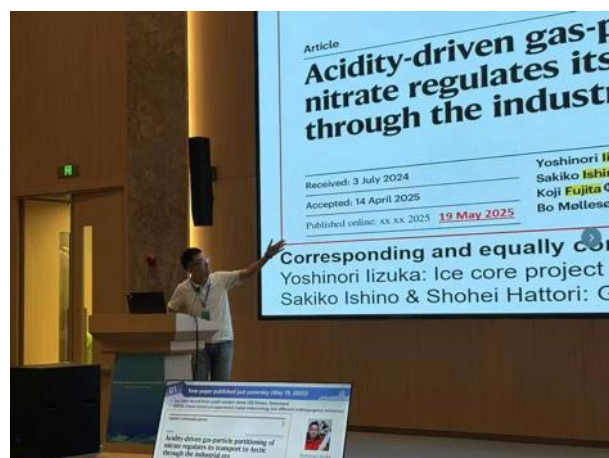


写真 3 筆者の発表の様子

「GEOS-Chem って日本人使ってるの？」と何度も尋ねられました。それもそのはず、参加者 263 人のうち、日本人は私一人。アジア会議とはいえ、参加者の大半は中国国内からであり、日本の存在感はほぼ皆無でした。

もちろん、GEOS-Chem が唯一無二のモデルというつもりはありません。しかし、非常に多様で広がりのある研究がこのモデルを基盤に展開されており、その進展スピードには目を見張るものがあります。しかも、参加者全員が GEOS-Chem ユーザーというわけでもなく、他モデルのユーザーもいれば、観測データの導入方法を提案する“観測屋”も数多くいました。つまり、会議名を伏せて内容だけを見れば、総合的な大気化学の国際会議と遜色ないクオリティでした。

そしてここからが、少し真面目な話です。

中国では、気候変動や大気汚染といった課題が、国の成長戦略や国民の健康問題と直結しており、それを支える科学研究には明確なニーズと資金が伴っています。結果として、研究の量もスピードも桁違いに速い。対して日本では、研究予算の縮小、若手研究者の疲弊、国際会議参加への心理的・経済的ハードルの高さなど、元気がない要素が目立ちます。

GEOS-Chem を使え、と言いたいわけではありません。しかし、このモデルが中心となって進行している現在の研究動向、その議論のスピードと規模には、耳と目を傾けておくべきです。知らぬ間に、地球の大気化学研究の中心が“海の向こう”に完全に移っていた、という未来が来ないとも限りません。次回は、どなたかもう一人くらい、日本から一緒に参加してみませんか？

参考文献

Iizuka, Y., Matsumoto, M., Kawakami, K., Sasage, M., Ishino, S., Hattori, S., et al. (2025), Acidity-driven gas-particle partitioning of nitrate regulates its transport to Arctic through the industrial era, *Nature Communications*, 16(1), 1–10, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59208-0>

著者所属:

1. 南京大学 国際同位体効果研究センター/地球科学与工程学院

* 責任著者:

Shohei Hattori <hattori@nju.edu.cn>

第 30 回大気化学討論会のお知らせ

戸野倉賢一^{1*}, 今須良一¹, 内田里沙², 江波進一³, 大畑祥⁴, 坂本陽介⁵,
秦寛夫⁶, 藤田道也¹, 星野翔麻⁷

第 30 回大気化学討論会を 2025 年 10 月 8 日～10 日に千葉県柏市で開催いたします。対面での口頭発表およびポスター発表を実施予定です。また、10 月 9 日午後には、懇親会などを計画中です。「柏の葉スマートシティ」(<https://www.kashiwanoha-smartcity.com/facility/>)にて、日頃の研究成果のご発表や活発な議論を行って頂けますよう、準備を進めています。皆様のご参加をお待ちしております。

主催：日本大気化学会、名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)

後援：東京大学大学院新領域創成科学研究科(予定)

会場：東京大学 柏キャンパス環境棟 FS ホール等

日程：2024 年 10 月 8 日(水)午前(10:00 頃)*もしくは午後(13:00 頃)*から 10 日(金)午後(16:00 頃)までの予定

*発表件数が多い場合は、午前から行います。

開催形式：対面開催の予定(対面で活発な議論を行っていただくために原則現地のみの開催を予定しています)。

懇親会：10 月 9 日(木)夕方に柏の葉キャンパス駅付近にて開催予定です。

保育支援：討論会開催期間中に保育支援を実施します。

宿泊・交通：各自で手配頂けますよう、お願いします。
お早めの宿泊・交通(航空券等)の確保をご検討下さい。

詳細は以下の第 30 回大気化学討論会 Web サイトでご確認ください。

https://jpsac.org/symposium/30th_touronkai_2025/



暮らし、研究、ビジネスが一体となった「柏の葉スマートシティ」を感じながら、熱い議論や自由な研究交流ができる機会となればと考えています。

開催までのスケジュール予定

講演・参加申込受付開始：7 月 11 日

講演申込および予稿原稿送付〆切：8 月 22 日

参加申込・参加費振込〆切：9 月 12 日

講演プログラム公開：9 月中旬

講演および参加の申込は第 30 回大気化学討論会 Web サイトで受け付ける予定です。7 月以降に Web サイトで内容をご確認の上、講演申込、参加登録および振込をお願いします。

*1 講演発表は会員のみ可能です。

*2 当日参加の申し込みはございません。期日までに参加申込・振込をよろしくお願いします。

問合せ先：〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学大学院新領域創成科学研究科 第 30 回大気化学討論会事務局 <meeting2025-jpsac@jpsac.org>

大会実行委員会(LOC)：戸野倉賢一(代表、東京大学)・今須良一(東京大学)・内田里沙(日本自動車研究所)・大畑祥(名古屋大学)・江波進一(筑波大学)・坂本陽介(国立環境研究所)・秦寛夫(産業技

術総合研究所)・藤田道也(東京大学)・星野翔麻(北里大学)

プログラム委員：山地一代(神戸大学)・石野咲子(金沢大学)・梅澤拓(東北大学)・江波進一(筑波大学)

著者所属：

1. 東京大学
2. 日本自動車研究所
3. 筑波大学
4. 名古屋大学
5. 国立環境研究所
6. 産業技術総合研究所
7. 北里大学

*** 責任著者：**

Kenichi Tonokura <tonokura@k.u-tokyo.ac.jp>

2025 年度日本大気化学会奨励賞

日本大気化学会では日本の大気化学分野の発展を担う若手研究者を奨励するため、奨励賞を授与しています。第21回(2025年度)奨励賞は2025年5月26日より受賞候補者の募集を行い、7月18日に募集を締め切りました。

ただいま選考作業が進められておりますが、8月中旬に受賞者を決定し、10月8日より東京大学柏キャンパスで開催される第30回大気化学討論会において授与式ならびに記念講演を行う予定です。

過去の受賞者および大気化学会奨励賞に関する細則については、日本大気化学会HP:

<https://jpsac.org/activity/prize/jpsac-incentive-award/>

<https://jpsac.org/about/rule/>

をご参照ください。

日本大気化学会
表彰推薦委員会

(日本大気化学会運営委員会)

第3回日本大気化学会論文賞の選考結果について

受賞論文: Impurity contribution to ultraviolet absorption of saturated fatty acids, *Science Advances*, **9**, eadj6438, DOI: 10.1126/sciadv.adj6438, 2023.

著者: Saito, S., Numadate, N., Teraoka, H., Enami, S., Kobayashi, H., and Hama, T.

受賞理由: 海洋エアロゾルは地球の放射収支に大きな影響を与えている重要因子である。近年海洋エアロゾルに含まれるノナン酸などの飽和脂肪酸(SFA)が長波長の太陽光を吸収することで光化学反応を起こし、大気中に揮発性有機化合物を放出するプロセスが注目されている。しかし海洋エアロゾルで起こる物理・化学現象については未解明の部分が多く、特にSFAの光吸収メカニズムの解明が喫緊の課題として残されている。本論文では代表的なSFAの一種であるノナン酸の光吸収を正確に定量するために、嫌気雰囲気のもと -28°C でノナン酸を再結晶させるための独自の再結晶装置を新規に作製し、15回にわたり再結晶を繰り返すことで超高純度のノナン酸を精製した。得られた超高純度ノナン酸について波長領域(190 nm から310 nm)での吸収断面積を得るために、いくつかの光路長を用いて吸収スペクトルを測定した。その結果、最大 $2.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ (205 nm)から最小 $6.2 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ (310 nm)と6桁にわたり吸収断面積を定量することに成功した。

この結果は従来報告されていた吸収断面積が大幅に過大評価されていたことを明らかにしたものであり、海洋エアロゾルに含まれるSFAが太陽光を吸収し、大気中に有機化合物を放出するという従来の定説が誤りであったことを示している。これは90年以上問題となってきたSFAのUV吸収について極めて注意深い

実験を通して決着をつけた点において画期的である。また、本研究ではこれまでの過大評価の原因が、試料に含まれるわずか0.1%程度の不純物質であったことを核磁気共鳴分光法を用いて特定したことも高く評価できる。

ノナン酸を含むSFAは海洋表層や飛沫起源エアロゾルに含まれる物質であり、本研究は海洋大気中の光化学反応を理解する上で重要な知見である。さらに本研究で示した吸収断面積の絶対値は大気化学モデルに組み込むことが可能な物理量であるため、より精度の高いモデル研究を通して大気化学研究の発展に寄与するものと認められる。また、本研究で報告されたノナン酸の光吸収断面積は、大気化学分野にとどまらず、ノナン酸を用いた他分野での研究に対してもインパクトを与えている。以上の理由により、日本大気化学会は本論文に同賞を授与する。

(日本大気化学会運営委員会)

JpGU 2025 「大気化学」セッション開催報告

江波進一^{1*}, 入江仁士², 石戸谷重之³, 中山智喜⁴

日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025 年大会 (JpGU-Meeting 2025) は, 2025 年 5 月 25 日から 5 月 30 日に昨年と同じくハイブリッド形式 (幕張メッセ会場 + オンライン) での開催となりました。大気化学セッションでは, 60 件の発表 (口頭 29 件, うち招待講演 1 件, ポスター 31 件) があり, 5 月 25, 26 日に口頭セッション 5 コマ (1 コマ 90 分) とポスターセッションを 1 コマ実施しました。

口頭発表セッションの現地会場では 40~50 名, オンライン会場には 20 名以上の参加があり, 大変活発な議論が繰り広げられました。大気化学セッションでは, 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設けています。今回は, 精力的に研究を進められている 1 名の研究者による招待講演を実施し, 西澤 智明博士 (国立環境研究所) に「Observation of atmospheric aerosols using lidar」というタイトルでご講演頂きました。

5 月 26 日の口頭発表セッション終了後には別会場でポスター発表が行われ, こちらも参加者が多く, 非常に活発な議論が繰り広げられました。

今回の JpGU2025 大気化学セッションは, 60 件の発表ということで, 過去 5 年間で最高の件数となりました。当セッションにご参加頂いた皆様, 開催にご協力頂いた皆様に深く感謝申し上げます。来年度の JpGU2026 は, AGU との共催になります。今後も大気化学セッションに是非ご投稿頂き, 一層盛り上げていただけますよう, よろしく願い申し上げます。



図 1 現地での口頭発表の様子

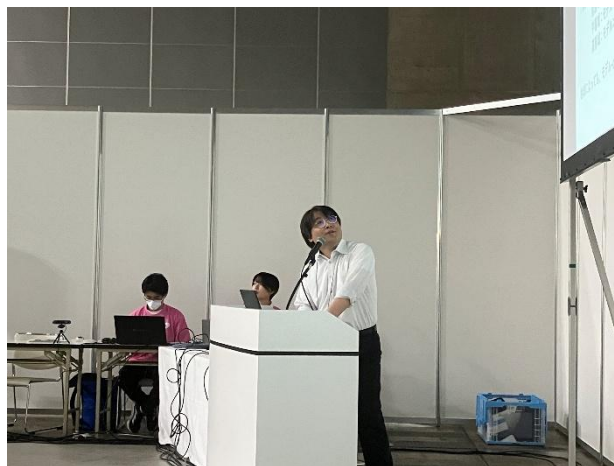


図 2 西澤博士による招待講演の様子

著者所属:

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

* 責任著者:

Shinichi Enami

<enami.shinichi.ka@u.tsukuba.ac.jp>

第 14 期日本大気化学会役員選挙の結果について

1. 役員選挙について

日本大気化学会の選挙細則に基づき、第 14 期（大気化学研究会時代からの通算）運営委員会役員選挙を以下の日程・内容でインターネット投票により実施した。なお、今回の会長選挙から、従来の正会員被選挙人を対象にした互選に加え、立候補制を導入した。

2025 年 1 月 8 日

～1 月 17 日 会長立候補受付

2025 年 1 月 29 日 選挙告示

2025 年 2 月 17 日

～2 月 26 日 会長選挙投票

2025 年 3 月 7 日 会長当選者公表

2025 年 3 月 17 日

～3 月 27 日 会長以外役員選挙投票

2025 年 4 月 10 日 役員当選者公表

立会人：

選挙管理委員：坂本陽介，宮崎雄三，竹谷文一

立会方法：

オンライン（web 会議）にて投票サイトでの立会人全員による集計結果確認をもって立会いとした。

2. 会長選挙

立候補者：

1 持田 陸宏 （名古屋大学）

推薦人：

金谷 有剛（海洋研究開発機構）

岩本 洋子（広島大学）

会長選挙開票の立会日時：

2025 年 2 月 27 日 9:00

会長選挙投票内訳：

有権者数：249 人

投票者数：137 人（投票率 55%）

白票： 3 票

開票結果（得票順，○：選出者）：

* 同票の場合はあいうえお順、所属は選挙時点

	氏名	得票数
1	○持田 陸宏（名古屋大学）	123
次点	岩本 洋子（広島大学）	2
次点	竹川 暢之（東京都立大学）	2
次点	町田 敏暢（国立環境研究所）	2

日本大気化学会細則に基づき、持田 陸宏 会員が第 14 期（任期：2025 年 7 月～2027 年 6 月）の日本大気化学会会長として選出された。

3. 会長以外役員選挙

運営委員選挙の立会日時：

2025 年 3 月 28 日 14:00

運営委員選挙の投票内訳：

有権者数 249 人

投票者数 89 人（投票率 36%）

投票総数 534 票

開票結果（得票順，○：選出者（定員 11 名））：

* 同票の場合はあいうえお順、所属は選挙時点

	氏名	得票数
1	○中山 智喜 (長崎大学)	29
2	○江波 進一 (筑波大学)	25
3	石島 健太郎 (気象研究所)	24
4	○大畑 祥 (名古屋大学)	22
5	○江口 菜穂 (九州大学)	21
6	○池田 恒平 (国立環境研究所)	17
7	○町田 敏暢 (国立環境研究所)	16
8	○竹川 暢之 (東京都立大学)	15
9	○齋藤 尚子 (千葉大学)	14
10	○関谷 高志 (海洋研究開発機構)	13
10	○山地 一代 (神戸大学)	13
次点	石野 咲子 (金沢大学)	12
次点	梅澤 拓 (国立環境研究所)	12
次点○	河野 七瀬 (近畿大学)	12

石島 健太郎 会員が諸事情により選出を辞退されたため、日本大気化学会細則 3. 役員の選出に関する細則第 8 条に則り、選挙管理委員立ち合いの下、次点の同票数獲得者 3 名からの抽選 (2025 年 4 月 3 日実施) により、河野 七瀬 会員が繰上げで選出された。

以上から、日本大気化学会細則に基づき、○で示された 11 名の会員が第 14 期 (任期：2025 年 7 月～2027 年 6 月) の日本大気化学会運営委員として選出された。

日本大気化学会 選挙管理委員会

坂本陽介 (委員長), 宮崎雄三, 竹谷文一

日本大気化学学会会員集会プログラム

日時:2025 年 6 月 26 日(月) 12:30-13:00

場所:幕張メッセ国際会議場 105

- 1) 会長挨拶
- 2) 会計・会員報告
- 3) 賛助会員のご紹介
- 4) シニア終身会員について
- 5) JpGU2025 での大気化学セッションの開催状況
- 6) 日本大気化学学会奨励賞の募集
- 7) 学会誌「大気化学研究」について
- 8) 男女共同参画・人材育成の活動
- 9) 2025 年度大気化学討論会の準備状況
- 10) 学会役員選挙報告
- 11) その他

日本大気化学学会論文賞授与式

(日本大気化学学会運営委員会)

会員種別「シニア終身会員制度」導入について

日本大気化学会の会員種別は「正会員」、「学生会員」、「賛助会員」にて運用されてきました。2026年度から、「シニア終身会員」の会員種別を追加することになりましたので、お知らせいたします。

近年、定年退職を機に本学会を退会される方が増加する傾向にあり、経験豊富なシニアの方からの当該分野への有益な意見をいただく機会が少なくなる可能性があります。そこで、新たに会員種別「シニア終身会員」を設けました。資格がある“希望者”へ会員種別変更の制度となります。

対象者は以下の通りとなります。

- 日本大気化学会 正会員資格を、申請年度を含め5年間以上持った65歳以上の方で、希望する者(正会員からの会員種別変更)。
- 運営委員会で承認後、一括で1万円を納付した者。

希望する方のアクションは下記となります。

- 11月頃の学会からのアナウンスに対し、種別変更希望のメールを事務局に出す(種別変更のタイミングは年に一回の年度区切りでの運用となります)。
- 運営委員会で希望者の審議を行い、承認された方は事務局から連絡をとり、所定の金額(1万円)を納付する。以降の会費納入は不要。
- ただし、年に一回(主に年明け)、事務局からの資格継続の確認メールへの応答を必要とする。

シニア終身会員での会員サービスは以下となります。

- 本学会役員選挙への選挙権は有するが、被選挙権はナシ。ただし、会長指名による運営委員への

選出は可能とします。そのほかは正会員と同様となります。

・申請に対する年齢の考え方(例)

2026年度(2026.4.1)からのシニア終身会員への種別変更申請可能な方は条件を満たした1962.4.1(含)までに誕生日を迎える(た)方となります。

シニア終身会員 開始	申請期間	申請可能な生年月日 の方
2026年度	2025.11-12	～S37(1962). 4.1 生
2027年度	2026.11-12	～S38(1963). 4.1 生
2028年度	2028.11-12	～S39(1964). 4.1 生
:	:	:

日本大気化学会
会計会員幹事

(日本大気化学会運営委員会)

第 39-41 回日本大気化学会運営委員会議事録

第 39 回日本大気化学会運営委員会

日時: 2025 年 1 月 27 日 (木) 09:30-12:35

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, 金谷有剛, 坂本陽介, 竹谷文一, 中山智喜, 町田敏暢, 宮崎雄三

欠席者: 大畑祥

(敬称略, 50 音順)

1) 議事録確認

第 38 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および会費未納者の状況について報告がなされた。

会員入会申込フォームの更新を進めており, R7 年 2 月から運用する。

終身会員制度の提案があり意見交換がなされた。引き続きメールで意見交換を行い, 制度設計していくことが認められた。

3) JpGU2025 大気化学セッション準備状況

大気化学セッションの主担当である江波委員より報告がなされた。JpGU セッションで用いる言語について, 会員アンケートの結果を踏まえ, 従来通り J(スライド, ポスター表記, 口頭発表言語は英語または日本語)とした。運営委員会では一旦 E 化を提案した経緯があり, ML で周知する際には英語の発表を歓迎する旨を付記することが了承された。招待講演者の選定はプログラム委員会を中心に行う。

4) 大気化学研究誌の編集状況

編集担当の坂本委員より, 「大気化学研究」第 52 号は 2 月上旬に発行予定であることが報告された。

5) 第 3 回論文賞の選定について

表彰担当の町田委員より, 論文賞の選考結果に

ついて報告がなされた。運営委員会で諮った結果, 選考委員会で選ばれた論文に論文賞を授与することが決定した。

6) 男女共同参画・人材育成委員会の活動について

男女共同参画人材育成担当の江口委員より, 討論会における各種支援について報告がなされた。討論会参加のための若手旅費支援の選考方針や支援に関するアンケート結果について共有された。討論会期間中の女性会員の集いには 16 名の参加があった。保育支援への申請は無かった。

複数の学術組織によって企画された「雇い止め問題」に関する緊急アンケートの集計結果については 10 月 17 日に ML で配信済であることが報告された。

本学会は, 男女共同参画学協会連絡会にオブザーバー学協会会員として入会しており, 2025 年 11 月で入会日より 3 年が経過する。3 年経過後は自動的に正式加盟学協会会員となる予定である。学協会間のネットワーキングや情報交換の利点があり, 入会を継続することが認められた。

7) 学会役員選挙に向けた準備状況

選挙管理担当の坂本委員より, 次期会長・運営委員選挙に向けた準備状況について報告がなされた。引き続きオンライン投票システムの準備を進めている。役員選挙の告示案について確認がなされた。メール, ウェブサイト, 学会誌の 3 つのメディアで告知する予定である。

8) 2025 年度第 30 回大気化学討論会について

金谷会長より, 第 30 回大気化学討論会について東京大学柏キャンパスでの開催を予定している旨が共有された。他の主要な研究集会を避けて日程を決定する。要旨集作成には, 名古屋大学 ISEE 共同利用の支援を申請することが提案・了承された。開催方

式、ポスター発表の形式について議論があった。

9) その他

金谷会長より、本学会が科研費増額要望に賛同しており、結果として増額要望が受け入れられたことが報告された。

現在、委員会として衛星検討委員会のみが存在するが、委員会活動に関する内規等は存在しない。学会として「研究活動委員会」を公式に持つことは有意義と考えられるため、設立および運営方法、定期的な報告についてルールを設ける提案があった。次回運営委員会での継続審議とする。

以上

第 40 回日本大気化学会運営委員会

日時:2025 年 5 月 14 日(木)09:30-12:10

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 (以上, 運営委員),

戸野倉賢一(第 30 回討論会 LOC, 運営委員外)

欠席者:なし

(敬称略, 50 音順)

1) 議事録確認

第 39 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および会費未納者の状況について報告がなされた。

4 月末に会計監査が行われ、学会の会計処理が適正と評価された旨が報告された。

3) 終身会員に関して

新たな会員区分としてシニア終身会員を設置することが認められた。

対象は、65 歳以上で正会員資格を 5 年間以上持

った方のうち希望する者とし、会費として 1 万円を一括納付する。

4) JpGU2025 大気化学セッション準備状況

大気化学セッションの主担当である江波委員より報告がなされた。5 コマの口頭セッション(29 件)とポスターセッション(31 件)を予定している。招待講演者の選択肢を広げるために、招待講演者を非会員に限定しないことや、旅費の支給をすること、といった提案があった。

5) 大気化学研究誌の編集状況

編集担当の大畑委員より、「大気化学研究」第 53 号の編集状況について報告された。「学会からのお知らせ」として、シニア終身会員の記事を掲載することが提案・了承された。

6) 育志賞候補者の推薦 および 大気化学奨励賞の募集について

表彰担当の町田委員より、育志賞の応募・推薦希望者が無かったことが報告された。奨励賞の募集スケジュールについて確認がなされた。

7) 男女共同参画・人材育成委員会の活動について

男女共同参画人材育成担当の江口委員より、委員会の活動報告がなされた。JpGU2025 大気化学セッション 2 日目終了後に懇親会を開催予定である。オブザーバー学協会会員として入会している男女共同参画学協会連絡会に関して、本年 11 月に正式加盟学協会会員となる。学会ウェブサイト「大気化学の研究室」の年度更新については、JpGU 期間中の会員集会で再度周知することとした。

8) 第 14 期会長および運営委員選挙に関する報告

選挙管理担当の坂本委員より、第 14 期会長および運営委員選挙について報告がなされた。日本大気化学会細則に基づき、名古屋大学 持田陸宏 会員が第 14 期(2025.7-2027.6)日本大気化学会会長として選出された。また、中山智喜 会員、江波進一 会員、大畑祥 会員、江口菜穂 会員、池田恒平 会員、町田敏暢 会員、竹川暢之 会員、齋藤尚子

会員, 関谷高志 会員, 山地一代 会員, 河野七瀬 会員の全 11 名が運営委員として選出された。会長選挙と運営委員選挙の間が空いたことや投票システムの複雑化が運営委員選挙の投票率低下に繋がった可能性があり, 今後の検討事項とする。

9) 2025 年度第 30 回大気化学討論会について

討論会 LOC の戸野倉会員より, 第 30 回大気化学討論会を 10/8-10 に東京大学柏キャンパスで開催することが報告された。ポスター数が多い場合に, 日毎の貼り替え制になる可能性がある。討論会ウェブサイトの準備の段取りについて確認がなされた。

10) 会員集会の資料案

副会長の岩本委員より, JpGU2025 会期中の会員集会および論文賞表彰式で用いるスライド資料について, 各委員会より資料を提出して欲しい旨が伝えられた。会員集会のオンライン配信はせず, 後日資料の PDF 版をパスワード付きで会員に配布する。

11) その他

金谷会長より, 「研究活動委員会」の設置に関して, 設立および運営方法, 定期的な報告のルール等について具体的な提案があった。研究活動委員会の設置に関して反対意見は無く, 具体的なルールについては継続審議とした。

以上

第 41 回日本大気化学会運営委員会

日時 : 2025 年 7 月 3 日 (木) 09:30-12:10

場所 : WEB 会議による開催

出席者 : (第 13 期) 石島健太郎, 石戸谷重之, 入江仁士, 岩本洋子, 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

(第 14 期) 池田恒平, 石野咲子, 梅澤拓, 江波進一, 大畑祥, 河野七瀬, 齋藤尚子, 関谷高志, 竹川暢之, 中山智喜, 町田敏暢, 持田陸宏, 山地一代 (以上 運営委員)
戸野倉賢一 (第 30 回討論会 LOC, 運営委員外)

欠席者 : (第 13・14 期) 江口菜穂, (第 14 期) 大島長 (敬称略, 50 音順)

1) 議事録確認

第 40 回運営委員会の議事録について確認がなされた。

2) 会計・会員報告

会計・会員担当の竹谷委員より, 6 月末時点での会員数および会費納入状況について報告がなされた。会費未納の会員を除名とすることが承認された。

3) シニア終身会員の運用について

会計・会員担当の竹谷委員よりシニア終身会員について説明がなされた。2026 年度から運用を開始する。前年度の 11~12 月に事務局経由で申請を受け付け, 運営委員会に諮る。シニア終身会員へは登録メールアドレス宛に定期的に連絡し, 会員継続の意思を確認する。

4) 2025 年度第 30 回大気化学討論会の準備状況

LOC 代表の戸野倉委員より, 東京大学柏キャンパスで開催予定の討論会の準備状況について報告がなされた。討論会ウェブサイト, 各種メーリングリストの準備は完了した。討論会ウェブサイトは 7/11 の討論会申込開始にあわせて公開予定である。招待講演を予定している。参加費は例年通りとした。懇親会は学外の会場を検討中である。

会計担当者, プログラム編成・要旨集の作成の各担当者, 会場の通信環境, 託児所の状況, 大会開催に必要な物品の引継について確認がなされた。要旨集作成には名古屋大学宇宙地球環境研究所の助成を受ける。

5) 研究活動委員会について

金谷会長より, 「研究活動委員会」の設置について説明がなされた。他学会との共同提案や大型プロジェクト申請の際に, 学会名を利用する公式な仕組みとして機能することを想定してい

る。14 期で継続審議とし、細則改訂、活動申請・報告様式作成を進めることとなった。

6) JpGU2026 AGU との共催、E 化について

プログラム担当の江波委員より JpGU での使用言語について説明がなされた。背景として、JpGU が国際化を推進し、セッション言語の E (使用言語は英語のみ) 化を推奨していることがある。13 期では、セッション言語の E 化について、会員アンケートの結果から時期尚早と判断し、JpGU2025 大気化学セッションは従来通り J (使用言語は日本語または英語) として開催された。JpGU2026 は AGU との共催のため、セッション言語は E となる予定である。同じく AGU との共催であった JpGU2020 において英語セッションを開催した実績がある。運営上の意見として、コマ内で言語が混在すると煩雑であることが挙げられた。

7) 選挙制度改善と 14 期選挙について

選挙制度担当の宮崎委員より、13 期で行った選挙制度変更について背景と変更点が説明された。会員数増加や、会員向けサービスの向上等に伴う業務内容の拡大、準委員の増加という傾向をふまえ、学会として現状により適した選挙制度への変更が必要との判断に至った。また変更内容は第 14 期役員選挙に適用された。

第 14 期役員選挙での課題として、委員選挙の投票率が 30% 台と低調であったことがある。要因として、2 回目の投票 (委員選挙) の周知不足や、新規会員の投票率が低いことが挙げられた。

8) 各委員会での個別引継

Zoom のブレイクアウトルーム機能を利用して各委員で個別に引継が行われた。7 月末までは引継期間として、13 期メンバーのポータルサイトへのアクセス権、運営委員会 ML への参加を継続する。

以上

第 41 回日本大気化学会運営委員会(14 期のみ)

日時:2025 年 7 月 3 日(木)12:10-12:30

場所:WEB 会議による開催

出席者:池田恒平, 石野咲子, 梅澤拓, 江波進一, 大畑祥, 河野七瀬, 齋藤尚子, 関谷高志, 竹川暢之, 中山智喜, 町田敏暢, 持田陸宏, 山地一代

欠席者:江口菜穂, 大島長

(敬称略, 50 音順)

10) 副会長・監事・準委員の選出について

会長より、副会長・監事・準委員の提案があり、提案通り承認された。

11) 第 14 期運営委員会の取り組みについて

会長より、第 14 期運営委員会の取り組みとして、社会との連携および発信において学会としてアピールしていきたい旨の方針が委員に共有された。

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「個別粒子分析」をテーマに、透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡、および原子間力顕微鏡と顕微ラマン分光法について、3編の総説記事を掲載しました。大気エアロゾル研究では長く使われ続けている顕微鏡技術ですが、本特集では基礎的な解説から近年の進化、注意点にいたるまで、広い視点で大気化学研究との関連性をご解説いただきました。著者の皆様、ならびに査読を快くお引き受けいただいた皆様に、心より感謝申し上げます。複数の著者が、「木を見て森を見ず」で言う木を見る技術だ、と述べられていることについて笑みがこぼれました。木々をよく知ることは、森全体の理解をより深いもの、新しいものに導く可能性があるということと捉えました。本特集が広域の大気化学研究を繋ぐ一つのきっかけになりましたら嬉しく存じます。

本誌は、自身の研究や活動内容を会員と共有する有用な場としてご活用いただけます。引き続き、積極的なご投稿とご意見をお寄せください。(SU)

大気化学研究 第53号 (2025年7月28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。