

大気中の微小粒子状物質・ナノ粒子の物理・化学計測

世界中に大きな影響を与えた新型コロナウイルスは、大気汚染とも無縁ではない。著者は、大気中の微小粒子状物質 (PM_{2.5}) やナノ粒子の起源・環境動態・健康影響等に関する研究に、化学分析 (特に有機分析) の観点から取り組み、野焼きや調理など身近な発生源も PM_{2.5} に一定の影響を与えていること等を明らかにしてきた。本稿では、当分野での最近の研究の進展を概観し、今後必要な研究や物理・化学計測に期待されることを展望する。

伏見 暁 洋

1 はじめに

大気中の微小粒子状物質 (PM_{2.5}; 粒径 2.5 μm 以下の粒子) は 2013 年頃にメディアが連日報道したため、今では日本中の多くの方が知る用語になったと思われる。しかし、PM_{2.5} の起源や生成メカニズム、大気中での動態は複雑で、いまだに解明されていない点が多く残されている¹⁾²⁾。本稿では、大気中の PM_{2.5} やナノ粒子 (粒径 50 nm 以下の粒子) に関して、最近の研究の進展を概観しつつ、今後必要な研究課題などについて考えてみる。なお、PM_{2.5} の基本的な情報や身近な発生源、個人がとり得る対策などについては、既報¹⁾で解説したほか、講演動画³⁾が Web 配信されている。本誌の読者にとっては釈迦に説法かもしれないが、分野外の読者も想定されるため、PM_{2.5} の基本的な情報から解説をはじめ

る。PM_{2.5} とは、空気中に浮遊している直径 2.5 μm 以下の粒子 (particulate matter, PM) のことで、「微小粒子状物質」とも呼ばれる⁴⁾。PM_{2.5} は粒子の大きさだけで定義されているため、形や大きさは多様で、様々な発生源から排出され、種々の化学成分で構成される。では、なぜ PM_{2.5} が世界中で長年注目されてきたのだろうか。その最大の理由は、人への健康影響が明確で、かつ影響の程度が大きいためであろう。世界保健機関 (WHO) は、大気汚染と大気浮遊粒子をどちらも発がん物質 (Group 1) であるとしている。また、種々の環境汚染の中で、大気汚染による人への健康リスクが最も大きく、大気中の PM_{2.5} によって年間約 300 万人が死亡していると推計している⁵⁾。PM_{2.5} による人への健康影響には、発がんのように、数か月程度以上の長期間にわたる暴露によって生じるものと、数時間から数日程度の短期間の暴露によって生じるものがある^{6)~8)}。また、死亡や循環器影響のように、PM_{2.5} の濃度増加が健康に影響

Future Perspectives on Physical and Chemical Measurements of Atmospheric Fine Particles and Nanoparticles.

すること (因果関係) が明確なものもあるが、代謝影響など因果関係が示唆されるに留まっているものもある。

大気中および発生源の PM_{2.5} 及びナノ粒子の物理・化学計測に関する研究要素のうち、最近進展が著しいもの、または、今後発展が期待されるものを図 1 に挙げた。もちろん、すべての要素が網羅されているとは思えないが、一例としてお示ししたい。PM による環境影響には、大きく分けると健康影響と気候影響があるだろう。このいずれにも計測が大きく貢献してきたし、今後も貢献できるであろう。これらの研究要素のうち主なものを、健康影響にかかわる化学計測を中心に、以下で解説する。

2 化学計測に関する研究要素

2.1 従来型成分分析

大気中の PM_{2.5} による健康影響を低減するためには、当然、その濃度を下げる必要がある。そのためには、PM_{2.5} 濃度に寄与する発生源や生成メカニズム・環境動態を把握し、寄与の大きい発生源からの排出を減らすことが求められる。PM_{2.5} 濃度に対する発生源別寄与率を推定するには、排出量と気象のデータを用いてシミュレーションモデルによって計算する方法や、大気中と発生源の PM_{2.5} の化学組成データを用いてレセプターモデルによって統計的に算出する方法がある²⁾⁹⁾。レセプターモデルには、ケミカルマスバランス (CMB) 法と PMF (positive matrix factorization: 正値行列因子分解) 法が広く用いられてきた¹⁰⁾。特に日本においては、元素状炭素と Al, V, K など数~20 種類程度の元素等のデータを用いた CMB 法 (以下「元素 CMB」) が起源推定に長年用いられてきた²⁾⁹⁾。PM_{2.5} の主成分は炭素成分 (元素状炭素と有機炭素) と水溶性イオン (硫酸イオン、硝酸イオン、アンモニウムイオン等) であり、金属元素は含有量は少ないものの、発生源の特徴を明瞭に持つ元素があること、大気中での変質が無視できる点から発生源解析に利用される。

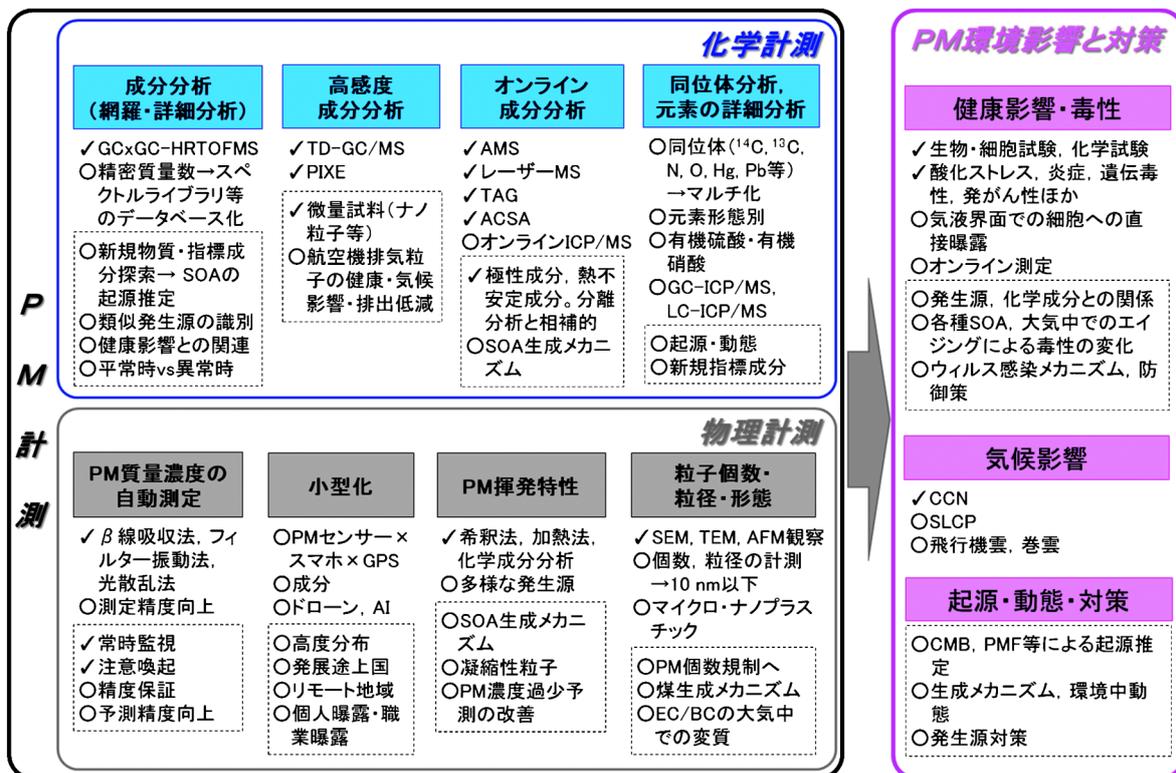


図1 大気中および発生源のPM_{2.5}・ナノ粒子の物理・化学計測に関する研究要素

各研究要素に関連する最近の測定法と貢献し得る内容・分野(囲み点線内)を示した。✓: おおむね確立済と思われるもの。○: さらなる発展が必要または期待されるもの。HRTOFMS: 高分解能飛行時間型質量分析計, SOA: 二次有機粒子, TD: 加熱脱着, AMS: エアロゾル質量分析計, TAG: 加熱脱着エアロゾルガスクロマトグラフィー, ACSA: 大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置, EC: 元素状炭素, BC: 黒色炭素, CCN: 雲凝結核, SLCP: 短寿命気候汚染物質, CMB: ケミカルマスバランス, PMF: 正値行列因子分解。

2.2 網羅・詳細成分分析

一方, 米国などでは, 有機成分を用いたCMB法(以下「有機CMB」)が多用されてきた^{11)~13)}。有機CMBには, 発生源の指標となる10~30成分ほどの有機成分(*n*-アルカン, 多環芳香族炭化水素, ホパン, ステラン, レボグルコサン等)が用いられることが多い。CMB解析を実施するには, 主要な発生源から排出される粒子の化学成分データ「発生源プロフィール」が必要である。この発生源プロフィールは, 1990年代から2000年代頃に専ら米国において計測・作成された^{14)~16)}。有機成分は, 粒子試料を有機溶媒で抽出した後, 誘導体化し, ガスクロマトグラフィー/質量分析法(GC/MS)で測定されることが多い。誘導体化には, ジアゾメタンによるメチルエステル化やN,O-ビス(トリメチルシリル)トリフルオロアセトアミド(BSTFA)によるトリメチルシリル化などが使用され, 合計して数十から百以上の有機成分が測定・定量され, その中で特に発生源の特徴を強く有する成分がCMB解析に使用される。元素CMBは, 特徴的な元素が排出される発生源(自動車排ガス, 工場排ガス, 土壌, 道路粉じん等)の解析に適しているが, 有機物を主体とするPMの発生源(野焼きや調理等)の推定には向かない。逆に, 有機

CMBは有機物を主体とする発生源の推定に有効である。日本でも近年, 有機成分を含む発生源プロフィールの取得や大気PMへの有機CMBの適用が行われるようになってきた^{17)~19)}。そして, 有機CMBや, 指標成分と粒子質量の比率から起源を推定する方法(トレーサー法)などにより, 日本の郊外大気中の有機粒子に対して野焼きは8~19%程度, 調理は5%程度寄与していると推定されている¹⁷⁾²⁰⁾。

もう一つのレセプターモデル「PMF」は発生源プロフィールを必要としないという特徴があり, 国内外で大気粒子の起源や生成プロセスの解析に使用されてきた^{21)~24)}。しかし, どのレセプターモデルにおいても, 二次有機粒子(SOA), 特に人為(芳香族)起源SOAの由来や寄与濃度を精度よく推定するのは依然として難しい課題であり, 指標成分の選択や探索, 指標成分/SOA質量比の決定などは今後も研究すべきであろう。

このほか, これまであまり重要視されてこなかったPM_{2.5}の発生源として, 船舶, 航空機, 自動車のタイヤ摩耗粉やブレーキ摩耗粉²⁵⁾, 地下鉄²⁶⁾などが挙げられる。このうち, 船舶は燃料中硫黄分の規制強化が, 航空機は排気粒子の個数規制が世界中で2020年に始まったこともあり, 関心が高まっている。船舶の燃料にはA

重油やC重油などが用いられるが、同様の燃料は火力発電所など陸上の固定発生源でも使用され、かつ、大規模な固定発生源は概して臨海部にあるため、従来のレセプターモデルでは船舶と固定発生源を分離することは難しい。しかし、最新の分析技術による詳細な成分分析や同位体分析などによって、発生源によるわずかな組成や同位体比の違いを識別したり新たな指標成分を同定できれば、船舶と陸上固定発生源を分離・識別できる可能性があると思われる。また、自動車は化石燃料から電気への代替が今後ますます進むと予想されるが²⁷⁾、自動車が電動化してもタイヤやブレーキは無くならないので、今後、これらからのPM排出の相対的な重要性が増す可能性がある。

大気中のPM_{2.5}の構成成分のうち、有機成分が最も多種多様で、起源や動態が複雑である。包括的二次元GC(GC×GC)は、ガスクロマトグラフィーによる分離能を大幅に向上させた^{28)~30)}。そして、従来法では約1週間かかる前処理を省略可能にしたり、大気PM_{2.5}中から約15,000の成分を検出した例³¹⁾が報告された。精密質量分析を用いた環境中化学物質の網羅分析²⁹⁾は、健康影響や毒性にかかわる成分の特定のほか、平常時と異常時・事故時の識別にもつながると期待される。とはいえ、いまだにPM中の有機成分をすべて検出・同定できる測定法は存在せず(レビュー論文³²⁾のFig. 3参照)、今後もさらなる進歩が求められる。

2.3 高感度成分分析

成分分析の感度を高めることで、ナノ粒子など微量の試料への適用が可能になる²⁸⁾。1990年代前半頃から、超微小粒子(粒径100 nm以下、「UFP」)やナノ粒子が、より大きな粒子に比べ生体に強い悪影響を及ぼす可能性が指摘されはじめたため^{33,34)}、UFPやナノ粒子の毒性や起源・体内動態・環境動態などについて、世界中で研究が進められてきた²⁸⁾。著者らは、加熱脱着GC/MS法をベースに、いくつかの高感度な有機分析法を開発し、それによって大気中やディーゼル排気中のナノ粒子の有機組成や起源、大気中での動態を明らかにしてきた²⁸⁾。

近年、航空機が排出するナノ粒子が人の健康に影響を与える可能性があることが報告され始めており³⁵⁾³⁶⁾、世界中で関心が寄せられている³⁷⁾。著者らは、成田国際空港の滑走路直近で大気粒子を粒径別に採取し、加熱脱着GC/MSによる有機成分分析、粒子励起X線放出分析法(PIXE)による元素分析、熱分離光学補正法による炭素分析、イオンクロマトグラフィーによるイオン成分分析を行った³⁸⁾。そして、航空機排気の影響を強く受けていると思われる昼間のナノ粒子試料(粒径10~30 nm)に、航空機ジェットエンジンに用いられる合成エステル潤滑油(エンジンオイル)が高濃度に含まれ

ることを初めて明らかにした。定量的な解析の結果、ナノ粒子の質量の半分以上を有機物が占め、その半分程度を未燃潤滑油が占めることがわかった。この成果は、加熱脱着GC/MSやPIXEなどの高感度成分分析技術がなければ、成し遂げられなかったものである。さらに、この観測結果によると、航空機が排出する粒子のモード粒径は、10 nm以下の極めて小さいナノ粒子であり、従来考えられていたよりもサイズが小さい可能性があり、興味深い^{38,39)}。

航空機は空港周辺の大気に影響を及ぼすだけでなく、巡行状態で上部対流圏大気にも定期的にUFPを排出するため、気候影響についても関心がもたれている。このUFPはある条件下で飛行機雲(Contrail)を形成し、それがさらに巻雲を形成し、温室効果をもたらすと考えられている。この効果はIPCCの報告書⁴⁰⁾でも考慮されているが、推定の不確実性は高いと指摘されている⁴¹⁾。現在、航空機が排出する粒子中の黒色炭素が飛行機雲や巻雲の形成に支配的に関与していると言われていたが、粒子の排出係数や化学組成が適切に考慮されているか、やや不透明である。今後、上述した化学組成に関する新たな知見や、潤滑油を起源とするナノ粒子の排出係数、排出箇所、生成プロセスなどを明らかにし、気候影響や健康影響の適切な評価や排出低減につなげていくことが重要だと思われる。

2.4 オンライン成分分析

PMの成分分析の感度を高めることは、測定の時空間的な分解能を高めることにもつながり得る。時間分解能を高めたオンライン成分分析の概要や最近の進展については、既報⁴²⁾で解説したので、簡単に触れるだけにす。オンラインPM成分分析は、PMの組成が時間とともに変化するプロセス(排出・輸送・反応・沈着など)に関する研究、特にSOAの生成や動態のメカニズムの理解に大きく貢献できる。また、寿命の短い成分、極性が高くそのままではGCで測定できない成分、熱的に不安定な成分などの計測にも適用できるケースがある³²⁾。当然、GCや液体クロマトグラフィー(LC)等を用いたオフライン分析の方が成分同士のマトリクスとの分離能は高いが、オンライン分析とオフライン分析は一長一短があるため、相補的な関係にあるといえるだろう。また、近年、大気中のPMを浮遊したままガス交換器に通し、そのまま誘導結合プラズマ(ICP)/MSに導入し元素分析を行う方法が開発された⁴³⁾。

2.5 健康影響・毒性

大気粒子の健康影響を簡易的に評価するため、酸化ストレス・酸化能などの健康影響や毒性の指標を、細胞を用いた生物学的手法やジチオトレイトール(DTT)等の試薬を用いた化学的手法で評価することが近年盛んに

行われている⁴⁴⁾。これまでこの種の毒性評価は、専ら、粒子試料を水や有機溶媒に抽出して行われてきたが、前処理過程での分解や変質、抽出効率の低さなどへの懸念が残る。この問題を解決し得る方法として、発生源や大気中の粒子を浮遊したまま細胞に暴露する方法や、その細胞への暴露効率を高める方法が開発され、毒性評価が行われるようになってきた⁴⁵⁾⁴⁶⁾。また、空気中のPMを水で抽出し、酸化能を約1時間ごとに計測する方法も最近開発された⁴⁷⁾。こういった高い時間分解能での毒性・健康影響評価とオンラインPM成分分析を併用することで、粒子の成分と毒性に関する膨大な情報が得られることになり、両者の関係性についての理解が深まることが期待される。

上述したように、有効な発生源対策を立案するためには、大気中のPM_{2.5}の質量濃度に対する各発生源の寄与を把握することが大切である。一方、発生源の種類や大気PMの採取地点によって粒子質量あたりの毒性強度が大きく異なることが報告されている⁴⁴⁾⁴⁸⁾。そのため、人の健康影響の観点からは、PM_{2.5}の質量だけでなく毒性に対する各発生源の寄与も明らかにすることが望ましい。そこで、著者らは、近年、大気中の有機粒子の「毒性」に対する発生源別の寄与率を推定する方法を提案した⁴⁹⁾。そして、有機粒子質量あたりの酸化能は、自動車や野焼きによる排気粒子よりもナフタレン起源SOAのほうが強いことなどを明らかにした。今後は、SOAの前駆物質（揮発性有機化合物）や反応・生成条件、燃焼排出粒子の大気中でのエイジング（酸化反応）に伴う毒性の変化などをより詳細に検討する必要があるだろう。

ところで、新型コロナウイルス（COVID-19）に関連した研究が各種分野で急速に進んでいるようである。大気環境分野においては、新型コロナウイルスの感染防止対策として実施されたロックダウンによって人間の活動を大幅に制限したことで、世界各地の大気汚染が改善したことが既に複数報告されている⁵⁰⁾。また、メディアでは「エアロゾル感染」という用語も聞かれるようになったが、ウイルスの感染経路・メカニズム⁵¹⁾は100%理解されているわけではないようだ。そのため、感染メカニズムを明らかにし、感染を防ぐ方法を構築することは重要な課題だと思われ、これには、大気や室内空気、エアロゾル、分析化学等の研究者の関与も求められるであろう。

3 物理計測に関する研究要素

3.1 粒子質量濃度の常時観測

環境基準は「人の健康の適切な保護を図るために維持されることが望ましい水準」として定められている。大気中のPM_{2.5}に関しては、他の大気汚染物質と同様、その質量濃度が全国千箇所以上の監視局で常時測定さ

れ、その結果がホームページ上でリアルタイムに公開されている⁵²⁾。これによって、現状が環境基準と比較してどの水準にあるのかを知ることができる。国立環境研究所の大気観測・実験施設は、全国の常時監視局のモデル的施設になることを目指して約40年前に設立された。現在は著者が管理責任者を務めており、大気質と気象の常時監視と独自サイトでのリアルタイムデータ公開のほか、精度評価・管理のための並行試験、所内外の研究者による大気観測等に協力している⁵³⁾⁵⁴⁾。

2013年頃以降、PM_{2.5}の高濃度が予想される日に出されるようになった「注意喚起」は、PM_{2.5}自動測定機による1時間測定値に基づき判断されるが、当時、測定値が検証されていたのは24時間値のみで、1時間値については必ずしも十分な検証が行われていなかった。そして、1時間値は地点や機種によって大きな負値が出たり不自然な時系列トレンドを示したりしていた。こういった状況をうけ、環境省は「微小粒子状物質（PM_{2.5}）質量自動測定機の1時間値測定精度検討会」の中で、市販機器の特徴や測定精度の評価などを行い、著者らはこの検討会の協力のもと、より正確な測定手法の開発を進めてきた⁵⁵⁾。検討の結果、大気中の気温や湿度の急激な変化がPM_{2.5}の測定値の誤差要因の一つであることが示唆されており、今後もさらなる検討・改良が必要と思われる。

3.2 小型化

近年、大気中のPM_{2.5}やガス成分等を数秒ごとに測定できる手のひらサイズのセンサーの開発と実用化が急速に進んだ。日本では、2013年頃にPM_{2.5}が社会問題化し、一般市民が強く関心を持つようになったことが大きく貢献したと思われる。現在、各種のPM_{2.5}センサーが市販されており、約1万円以下で購入できる製品や、スマホに接続し、GPSと連携してPM_{2.5}測定結果を地図上にプロットできる製品もある。さらに、複数のPM_{2.5}センサーについて、常時監視で用いられるβ線型PM_{2.5}自動測定機とよい関係性があることが確認されている⁵⁶⁾⁵⁷⁾。常時監視で用いられる大型で高価な測定機同士でも一致度の低さが問題となってきたことをふまえると、小型・安価で、しかも数秒ごとに測定値が得られるセンサーによって、これだけ良好な値が得られることには正直驚いた。人工知能（AI）やドローン、自動運転車などの開発のスピードは凄まじく、恐らく当面、この動きは加速していこう。この流れの中で、計測装置の小型化は必然的に求められるだろうから、この分野もさらに発展していくのではないかと。実際、ドローンを用いた大気中成分の高度分布測定は既に行われ始めている⁵⁸⁾。センサーは、大気の常時観測網が発達していない途上国⁵⁹⁾や電源が利用できないリモート地域での観測などにも活用し得る。個々人の通勤途中の道

路や地下鉄近傍でのPMの高濃度暴露などや空港関係者などの職業暴露の実態把握にも、小型センサーは有効であろう。

4 おわりに

紙面の都合上、著者がかかわってきた分野周辺の計測法を中心に、発展の方向性や可能性を簡単に紹介する形とした。図1に示した計測・研究要素のうち、同位体分析や元素の詳細分析、PM揮発特性、粒子個数・粒径・形態、および気候影響に関する説明は省いたが、今後、機会があれば紹介したい。

文 献

- 1) 日本環境化学会編著：“地球をめぐる不都合な物質 拡散する化学物質がもたらすもの”，p. 140 (2019)，(講談社ブルーバックス)。
- 2) 伏見暁洋，森野 悠，高見昭憲，大原利眞，田邊 潔：大気環境学会誌，**46**，84 (2011)。
- 3) 伏見暁洋：“意外と知らないPM_{2.5} (大気微小粒子) —その基本と身近な発生源—”，国立環境研究所公開シンポジウム2020 “あなたの都市の環境問題—いま何が起きているか—”，<https://www.youtube.com/watch?v=90XVqa1V0Ik&t=412s> (2020年8月15日最終確認)。
- 4) 環境省：環境大気常時監視マニュアル第6版 (2010)。
- 5) World Health Organization：Global Air Quality Database App：App for exploring air quality in countries. WHO Global Air Quality Database (update 2018) edition. Version 1.0 (2018)。
- 6) U. S. Environmental Protection Agency：Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, 2019)，EPA/600/R-19/188 (2019)。
- 7) 上田佳代：大気環境学会誌，**46**，A7 (2011)。
- 8) D. W. Dockery, C. A. Pope, 3rd, X. Xu, J. D. Spengler, J. H. Ware, M. E. Fay, B. G. Ferris, Jr., F. E. Speizer：*N. Engl. J. Med.*，**329**，1753 (1993)。
- 9) 浮遊粒子状物質対策検討会 (環境庁)：浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル (1997) (東洋館出版社)。
- 10) 飯島明宏：大気環境学会誌，**46**，A53 (2011)。
- 11) J. J. Schauer, W. F. Rogge, L. M. Hildemann, M. A. Mazurek, G. R. Cass, B. R. T. Simoneit：*Atmos. Environ.*，**30**，3837 (1996)。
- 12) J. Heo, M. Dulger, M. R. Olson, J. E. McGinnis, B. R. Shelton, A. Matsunaga, C. Sioutas, J. J. Schauer：*Atmos. Environ.*，**73**，51 (2013)。
- 13) U. S. Environmental Protection Agency：EPA-CMB8.2 Users Manual，<https://www3.epa.gov/scram001/models/receptor/EPA-CMB82Manual.pdf> (2004) (2020年6月29日最終確認)。
- 14) L. M. Hildemann, G. R. Markowski, G. R. Cass：*Environ. Sci. Technol.*，**25**，744 (1991)。
- 15) J. J. Schauer, M. J. Kleeman, G. R. Cass, B. R. T. Simoneit：*Environ. Sci. Technol.*，**33**，1566 (1999)。
- 16) C. G. Nolte, J. J. Schauer, G. R. Cass, B. R. T. Simoneit：*Environ. Sci. Technol.*，**36**，4273 (2002)。
- 17) A. Fushimi, A. M. Villalobos, A. Takami, K. Tanabe, J. J. Schauer：36th American Association for Aerosol Research Annual Conference, Raleigh, NC, USA, 8OP.12 (2017)。
- 18) A. Fushimi, K. Saitoh, K. Hayashi, K. Ono, Y. Fujitani, A. M. Villalobos, B. R. Shelton, A. Takami, K. Tanabe, J. J. Schauer：*Atmos. Environ.*，**163**，118 (2017)。
- 19) 市川有二郎，内藤季和：大気環境学会誌，**54**，161 (2019)。
- 20) 国立環境研究所：未規制燃焼由来粒子状物質の動態解明と毒性評価，プロジェクト報告 第133号 (2018)。
- 21) K. Kumagai, A. Iijima：*Global Environ. Res.*，**22**，13 (2018)。
- 22) V. A. Lanz, M. R. Alfarra, U. Baltensperger, B. Buchmann, C. Hueglin, A. S. H. Prevot：*Atmos. Chem. Phys.*，**7**，1503 (2007)。
- 23) 萩野浩之，高田智至，國見 均，坂本和彦：大気環境学会誌，**43**，161 (2008)。
- 24) Y. Fujitani, K. Takahashi, A. Fushimi, S. Hasegawa, Y. Kondo, K. Tanabe, S. Kobayashi：*Atmos. Environ. X*，**5**，100055 (2020)。
- 25) 萩野浩之：大気環境学会誌，**55**，A18 (2020)。
- 26) 奥田知明，坂出壮伸，藤岡謙太郎，田端凌也，黒澤景一，野村優貴，岩田 歩，藤原基：大気環境学会誌，**54**，28 (2019)。
- 27) 大聖泰弘：*Denso Technical Review*，**22**，3 (2017)。
- 28) 伏見暁洋：大気環境学会誌，**50**，85 (2015)。
- 29) 橋本俊次：地球環境，**24**，3 (2019)。
- 30) J. A. Murray：*J. Chromatogr. A*，**1261**，58 (2012)。
- 31) W. Welthagen, J. Schnelle-Kreis, R. Zimmermann：*J. Chromatogr. A*，**1019**，233 (2003)。
- 32) B. Nozieère, M. Kalberer, M. Claeys, J. Allan, B. D’Anna, S. Decesari, E. Finessi, M. Glasius, I. Grgic, J. F. Hamilton, T. Hoffmann, Y. Iinuma, M. Jaoui, A. Kahnt, C. J. Kampf, I. Kourtschev, W. Maenhaut, N. Marsden, S. Saarikoski, J. Schnelle-Kreis, J. D. Surratt, S. Szidat, R. Szmigielski, A. Wisthaler：*Chem. Rev.*，**115**，3919 (2015)。
- 33) P. Biswas, C. Y. Wu：*J. Air Waste Manag. Assoc.*，**55**，708 (2005)。
- 34) G. Oberdorster, J. N. Finkelstein, C. Johnston, R. Gelein, C. Cox, R. Baggs, A. C. Elder：Acute pulmonary effects of ultrafine particles in rats and mice, Resarch Report No. 96, (2000)，(Health Effects Institute)。
- 35) R. Habre, H. Zhou, S. P. Eckel, T. Enebish, S. Fruin, T. Bastain, E. Rappaport, F. Gilliland：*Environ. Int.*，**118**，48 (2018)。
- 36) H. R. Jonsdottir, M. Delaval, Z. Leni, A. Keller, B. T. Brem, F. Siegerist, D. Schonenberger, L. Durdina, M. Elser, H. Burtscher, A. Liati, M. Geiser：*Commun. Biol.*，**2**，1 (2019)。
- 37) M. Masiol, R. M. Harrison：*Atmos. Environ.*，**95**，409 (2014)。
- 38) A. Fushimi, K. Saitoh, Y. Fujitani, N. Takegawa：*Atmos. Chem. Phys.*，**19**，6389 (2019)。
- 39) N. Takegawa, Y. Murashima, A. Fushimi, K. Misawa, Y. Fujitani, K. Saitoh, H. Sakurai：*Atmos. Chem. Phys. Discuss.*，<https://doi.org/10.5194/acp-2020-395> (2020)。
- 40) G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, H. Zhang：“Anthropogenic and Natural Radiative Forcing”，In “Climate Change 2013：The Physical Science Basis”，Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M.

- Midgley (eds.)], (2013), (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA).
- 41) B. Karcher : *Nat. Commun.*, **9**, 1 (2018).
- 42) 伏見暁洋, 中山智喜, 佐藤 圭, 高橋克行 : エアロゾル研究, **33**, 183 (2018).
- 43) 萩野浩之 : エアロゾル研究, **33**, 40 (2018).
- 44) M. Shiraiwa, K. Ueda, A. Pozzer, G. Lammel, C. J. Kampf, A. Fushimi, S. Enami, A. M. Arangio, J. Frohlich-Nowoisky, Y. Fujitani, A. Furuyama, P. S. J. Lakey, J. Lelieveld, K. Lucas, Y. Morino, U. Poschl, S. Takahama, A. Takami, H. Tong, B. Weber, A. Yoshino, K. Sato : *Environ. Sci. Technol.*, **51**, 13545 (2017).
- 45) T. B. Tilly, R. X. Ward, J. K. Luthra, S. E. Robinson, A. Eiguren-Fernandez, G. S. Lewis, R. L. Salisbury, J. A. Lednický, T. L. Sabo-Attwood, S. M. Hussain, C.-Y. Wu : *Aerosol Sci. Technol.*, **53**, 1415 (2019).
- 46) N. Jeannet, M. Fierz, M. Kalberer, H. Burtscher, M. Geiser : *Nanotoxicology*, **9**, 34 (2015).
- 47) J. V. Puthussery, A. Singh, P. Rai, D. Bhattu, V. Kumar, P. Vats, M. Furger, N. Rastogi, J. G. Slowik, D. Ganguly, A. S. H. Prevot, S. N. Tripathi, V. Verma : *Environ. Sci. Technol. Let.*, (2020).
- 48) A. Saffari, N. Daher, M. M. Shafer, J. J. Schauer, C. Sioutas : *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 7576 (2014).
- 49) A. Fushimi, D. Nakajima, A. Furuyama, G. Suzuki, T. Ito, K. Sato, Y. Fujitani, Y. Kondo, A. Takami : 37th American Association for Aerosol Research Annual Conference, Portland, Oregon, USA, 2AD.5 (2019).
- 50) M. Bauwens, S. Compernelle, T. Stavrou, J. F. Muller, J. Gent, H. Eskes, P. F. Levelt, R. A. J. P. Veeffkind, J. Vlietinck, H. Yu, C. Zehner : *Geophys. Res. Let.*, **47**, 1 (2020).
- 51) S. Asadi, N. Bouvier, A. S. Wexler, W. D. Ristenpart : *Aerosol Sci. Technol.*, **54**, 635 (2020).
- 52) 環境省 : “大気汚染物質広域監視システム「そらまめくん」”, <http://soramame.taiki.go.jp/> (2020年6月29日最終確認).
- 53) 伏見暁洋 : 大気環境学会誌, **55**, 1 (2020).
- 54) 国立環境研究所 : “つくば大気質モニタリングデータリアルタイム測定結果 (速報値)”, <http://www.nies.go.jp/aqrs/realtime.html> (2020年6月29日最終確認).
- 55) 伏見暁洋, 田邊 潔, 高橋克行, 高見昭憲 : 第59回大気環境学会年会, **493**, 福岡 (2018).
- 56) E. E. P. N. Yi, N. C. Nway, W. Y. Aung, Z. Thant, T. H. Wai, K. K. Hlaing, C. Maung, M. Yagishita, Y. Ishigaki, T. -T. Win-Shwe, D. Nakajima, O. Mar : *Environ. Health Prev. Med.*, **23**, 1 (2018).
- 57) T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Kawahito, Y. Watabe : *Aerosol Sci. Technol.*, **52**, 2 (2017).
- 58) 池本久利, 植田洋匡, 鹿島勇治, 堀内 泰, 渡邊明日美 : “ドローンによる大気環境調査の有用性と課題の検討”, (2019), <https://www.jesc.or.jp/Portals/0/center/library/2019ikemoto.pdf> (2020年6月29日最終確認).



伏見暁洋 (Akihiro FUSHIMI)

国立環境研究所環境計測研究センター反応化学計測研究室 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)。横浜国立大学大学院工学研究科博士課程修了。博士 (工学)。《現在の研究テーマ》発生源・大気中の微小粒子・ナノ粒子の有機分析と起源・動態解析。《主な著書》“地球をめぐる不都合な物質” (講談社ブルーバックス) (2019) (分担執筆)。《趣味》テニス, ビール, スーパーマリオ。
E-mail : fushimi.akihiro@nies.go.jp

原稿募集

話題欄の原稿を募集しています

内容 : 読者に分析化学・分析技術及びその関連分野の話題を提供するもので, 分析に関係ある技術, 化合物, 装置, 公的な基準や標準に関すること, 又それらに関連する提案, 時評的な記事などを分かりやすく述べたもの。

但し, 他誌に未発表のものに限ります。

執筆上の注意 : 1) 広い読者層を対象とするので, 用語, 略語などは分かりやすく記述すること。2) 啓蒙的であること。3) 図表は適宜用いてもよい。4) 図表を含めて4000字以内 (原則として

図・表は1枚500字に換算) とする。

なお, 執筆者自身の研究紹介の場とすることのないよう御留意ください。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。原稿の送付および問い合わせは下記へお願いします。

〒141-0031 東京都品川区西五反田1-26-2

五反田サンハイツ 304号

(公社)日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会

[E-mail : bunseki@jsac.or.jp]