

「エアロゾル複合分析計」を用いた PM2.5 発生源推定ソリューション

Solution for Estimating Generation Source of PM 2.5 with “Aerosol Analyzer”

小泉 和裕 KOIZUMI, Kazuhiro

武田 直希 TAKEDA, Naoki

中村 裕介 NAKAMURA, Yusuke

近年、粒径 2.5 μm 以下の微粒子（PM2.5）による大気汚染が懸念されている。特に汚染が深刻なアジア地域では、今後、PM2.5 削減の取組みが本格化する見通しであり、効果的な削減策が求められている。富士電機の「エアロゾル複合分析計」は、この PM2.5 の主要成分を自動で分析できる。成分の測定データには発生源の情報が含まれるため、データ解析により主要な発生源を推定し、効果的な削減策につながることを期待できる。川崎市や中国での測定例において、発生源の大きな位置を推定できることが分かった。

In recent years, air pollution has become a concern due to fine particles (PM 2.5) that have a diameter of 2.5 μm or less. In particular, pollution has become a serious problem in Asia, and in the future, it is expected that effective measures to reduce PM 2.5 will be sought and adopted in earnest. Fuji Electric's “Aerosol Analyzer” is capable of automatically analyzing the main components of PM 2.5. Since the measured component data includes information concerning the sources of origin of the PM 2.5, it is expected that the estimation of the main sources of origin through data analysis will contribute to creating effective measures of mitigation. Measurement examples in Kawasaki City and in China showed that it is possible to estimate the approximate location of the sources of origin.

① まえがき

エアロゾル（大気中に浮遊する微小粒子）は、大気汚染に重大な影響を及ぼすため、その実態の解明と対策が進められている。エアロゾルの重要なパラメータは、粒径（粒子の直径）と成分である。エアロゾルの粒径は数 nm から 100 μm と広範囲である。このうち、粒径 2.5 μm 以下のエアロゾルは PM2.5 と呼ばれる。PM2.5 は、肺の奥深くまで到達するため健康への影響が懸念されており、日本では 2009 年に環境基準が告示された。

PM2.5 の成分は多種多様であるが、主な成分として、硫酸塩（主に硫酸イオン： SO_4^{2-} ）や硝酸塩（主に硝酸イオン： NO_3^- ）などの無機イオン成分、有機物、ブラックカーボン（元素状炭素）などがある。ブラックカーボンや一部の有機物は、ディーゼルエンジンなどの排ガスに含まれ、発生源から直接排出される一次生成エアロゾルである。一方、硫酸塩や硝酸塩などは、発生源から排出される SO_2 や NO_x などの前駆体物質が大気中で化学反応を起こすことなどによって生成されるため、二次生成エアロゾルと呼ばれる。PM2.5 の成分は発生源の解明につながる重要な情報であるため、地方公共団体においては、従来の PM2.5 の質量濃度測定に加え、成分分析を行うことが求められている⁽¹⁾。

PM2.5 の成分分析は、一般的に標準測定法であるフィルタ法によって行われている。フィルタ法では、フィルタに PM2.5 を採取した後、手作業で分析を行う。このため多くの時間と費用がかかり、測定期間を限定して実施されることが多い。そこで富士電機では、PM2.5 の主要な成分を測

定対象とし、サンプリングから測定まで自動で行うことができる「エアロゾル複合分析計」を製品化した。本稿では、エアロゾル複合分析計の特徴、測定原理、測定事例、およびこれを用いた PM2.5 発生源推定ソリューションについて述べる。

② 「エアロゾル複合分析計」

2.1 特徴

図 1 に、エアロゾル複合分析計の外観を示す。エアロゾル複合分析計は、PM2.5 の主要成分の定量分析をリアルタイムで行うことができる。

(1) 複合分析による 3 成分同時測定

光散乱法、レーザ誘起白熱法および質量分析法を組み合わせた複合分析法により、硫酸塩、硝酸塩およびブラックカーボンの同時測定が可能である。



図 1 「エアロゾル複合分析計」

〈注〉環境基準：1年平均値が $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であり、かつ 1日平均値が $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であること

(2) リアルタイム成分分析

フィルタ法で8時間以上かかっていた成分分析を測定周期15分で行うことができる。

(3) 成分の定量分析

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を適用した粒子トラップにより PM2.5 を高い効率で捕集し、これまで困難であった定量分析が可能になった。

(4) タッチパネルによる表示・操作

エアロゾル複合分析計の本体前面に配置したタッチパネルにより、主要な操作を行うことができる。測定値の表示の他、運転状態の監視やアラームの表示も可能である。

2.2 仕様

表1に、エアロゾル複合分析計の主な仕様を示す。

2.3 測定原理

エアロゾル複合分析計は、白熱光検出部と質量分析部から構成される。図2に、測定原理を示す。

白熱光検出部では、PM2.5 とブラックカーボンの質量濃度を測定する。高出力赤外線レーザーを試料空気に照射したときの、試料空気に含まれるエアロゾルからの散乱光と白熱光を検出する。散乱光の強度と頻度から、粒径と粒子数を測定し、PM2.5 の質量濃度を求める。同時に、白熱光の強度と頻度から、PM2.5 に含まれるブラックカーボンの質量濃度を求める。

質量分析部では、PM2.5 に含まれるイオン成分の硫酸塩と硝酸塩の質量濃度を測定する。PM2.5 の成分の質量分析をオンラインで行う手法として、直接、レーザーでイオン化して質量分析を行うレーザーイオン化質量分析法と、いったん PM2.5 を捕集して加熱気化した後に電子イオン化して質量分析を行う加熱脱離電子イオン化質量分析法の2種類

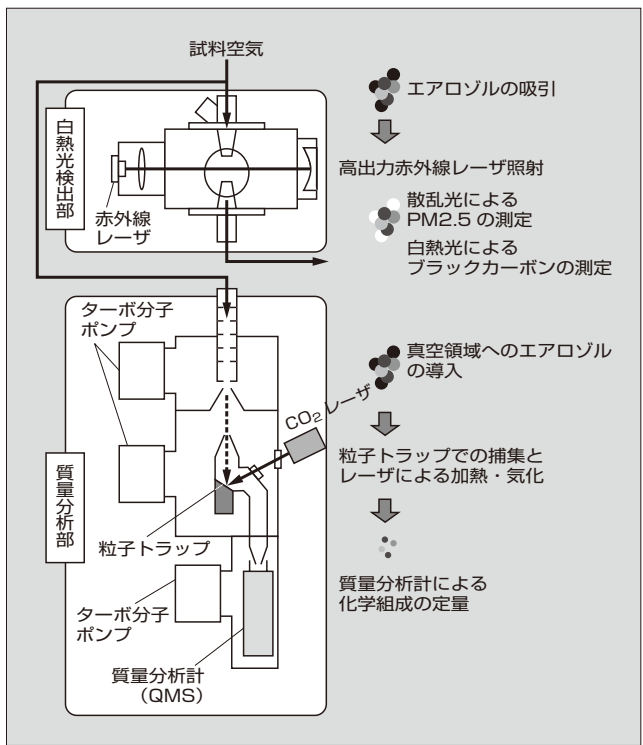


図2 「エアロゾル複合分析計」の測定原理

がある。レーザーイオン化質量分析法は高感度であるが、成分によりイオン化の効率が変わるため、定量分析が困難である。一方、加熱脱離電子イオン化質量分析法は、イオン化に選択性がなく良好な定量性を示す。エアロゾル複合分析計では、導入した試料空気に含まれる PM2.5 を定量的に分析するという観点から、加熱脱離電子イオン化質量分析法を採用している。

試料空気が質量分析部の真空チャンバに導入されると、試料空気中の気体が除去されて PM2.5 のみが粒子トラップに捕集される。この粒子トラップは、MEMS 技術により製作された独自の構造であり、90% 以上という高い捕集効率を実現している⁽²⁾。図3に、粒子トラップの外観を示す。粒子トラップの捕集部は100µm角の格子で構成されている。この格子状のプレートを複数枚重ねることによって、真空中を高速で進む PM2.5 を粒子トラップの内壁に何回も衝突させて運動エネルギーを奪い、捕集できるようになっている。この PM2.5 に高出力の赤外線レー

表1 「エアロゾル複合分析計」の主な仕様

項目	仕様
測定対象	<ul style="list-style-type: none"> PM2.5 の質量濃度 PM2.5 に含まれるブラックカーボンの質量濃度 PM2.5 に含まれる硫酸塩の質量濃度 PM2.5 に含まれる硝酸塩の質量濃度
測定方式	<ul style="list-style-type: none"> 光散乱法：PM2.5 の質量濃度 レーザー誘起白熱法：ブラックカーボンの質量濃度 質量分析法：硫酸塩、硝酸塩の質量濃度
測定レンジ*	<ul style="list-style-type: none"> PM2.5：0~100 µg/m³ または 0~1,000 µg/m³ ブラックカーボン：0~30 µg/m³ または 0~300 µg/m³ 硫酸塩：0~30 µg/m³ または 0~300 µg/m³ 硝酸塩：0~30 µg/m³ または 0~300 µg/m³
サンプル採取量	約 2.0 L/min
電源電圧*	AC100V ±10%, 50 Hz/60 Hz ±5% または AC220V ±10%, 50 Hz ±5%
消費電力	約 1 kVA (最大 1.5 kVA)
外形寸法	装置本体：W640 × H1,740 × D828 (mm)
質量	装置本体：約 320 kg
付属品	スクロールポンプ, UPS, チラーほか

* 測定レンジ、電源電圧：購入時に選択

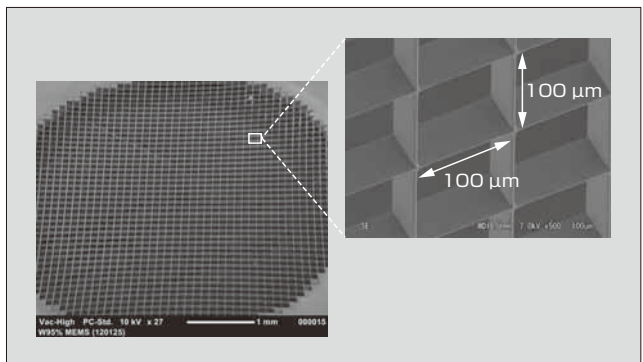


図3 粒子トラップの外観

ザ（CO₂ レーザ）を照射して加熱・気化し、電子イオン源によってイオン化した後に、四重極質量分析計（QMS：Quadrupole Mass Spectrometer）によって硫酸塩と硝酸塩の定量分析を行う。

2.4 測定事例

地方公共団体の協力を得て、フィールド評価を実施している。2013～2015年度に実施した川崎市との共同研究（川崎市環境技術産学公民連携共同研究事業）において、一般環境大気測定局にエアロゾル複合分析計を設置し、測定性能や保守・メンテナンス性を検証した。図4に、硫酸

塩と硝酸塩についてフィルタ法との比較評価を行った結果を示す。エアロゾル複合分析計とフィルタ法の分析における決定係数R²が、それぞれ0.9以上という高い相関があることを実証した。

また、日本国内だけでなく、海外でもフィールド評価を行っている。図5に、中国で連続測定を行った事例を示す。PM2.5の質量濃度が100 μg/m³を超えるような高濃度環境においても、問題なくリアルタイム連続測定が可能であることを確認している。

3 PM2.5発生源推定ソリューション

3.1 発生源推定の必要性

深刻な汚染が問題視されている中国では、PM2.5削減の取組みが本格化し、大気汚染防止行動計画（中国国務院2013年9月発表）では、北京・天津・河北、長江デルタ、珠江デルタの各地域におけるPM2.5の年平均濃度を2017年までに、2012年に比べて15～25%程度低減させる目標を掲げている。北京市環境保護局の北京市PM2.5来源解析（2014年4月発表）によると、PM2.5の主な発生源は、自動車31%、石炭燃焼22%、工業生産18%、揚じん14%、その他14%である。また、重要な国際会議やスポーツイベントが開催される際に、自動車の交通規制や工場の操業停止を実施すると、大気汚染が大幅に改善することが示されている。しかし、このような規制は経済活動を妨げるため長期間の実施は困難である。

環境問題の解決と持続的な経済発展を両立させるためには、発生の実態を把握して効率的な発生源対策を行うことが必要である。そのため計測機器には、PM2.5の測定だけでなく、削減対策につながる発生源解析の要求が急速に高まっている。そこで、エアロゾル複合分析計の測定データと前駆体物質や気象の情報を組み合わせて解析し、発生源を推定するPM2.5発生源推定システムの開発に取り組んでいる。図6に、システムの構成を示す。

3.2 発生源解析技術の概要

発生源の解析では、二次生成エアロゾル（硫酸塩、硝酸

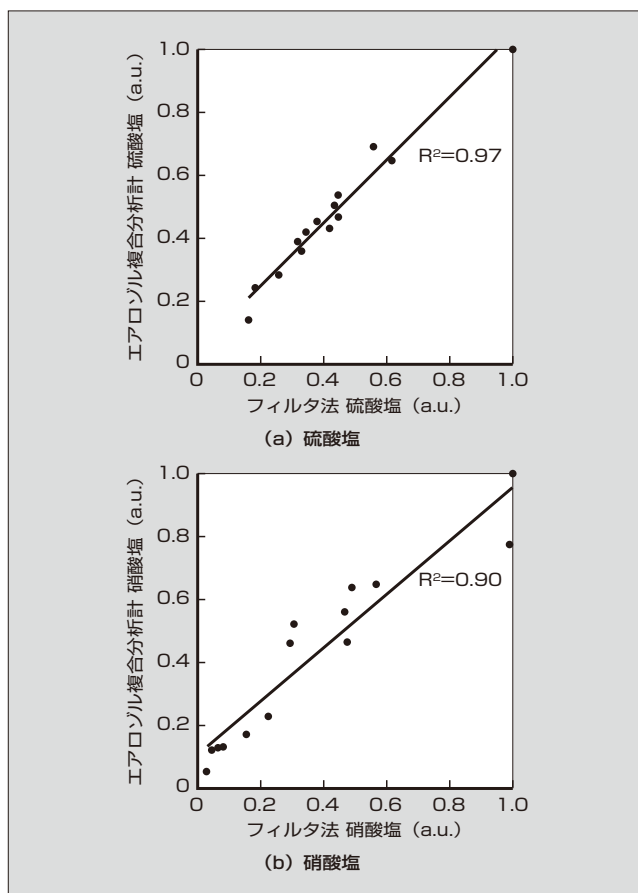


図4 フィルタ法との比較評価結果

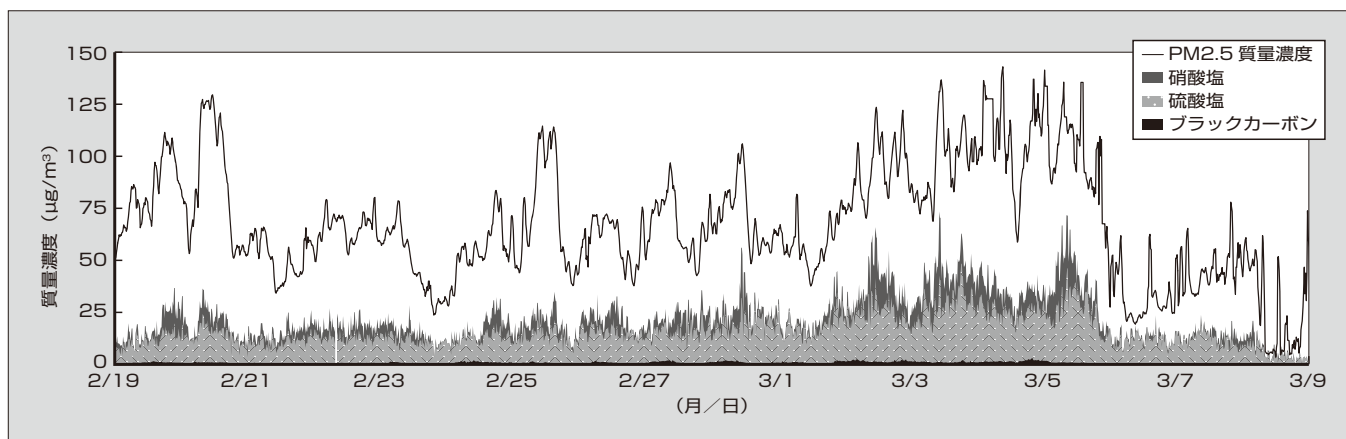


図5 中国における測定事例

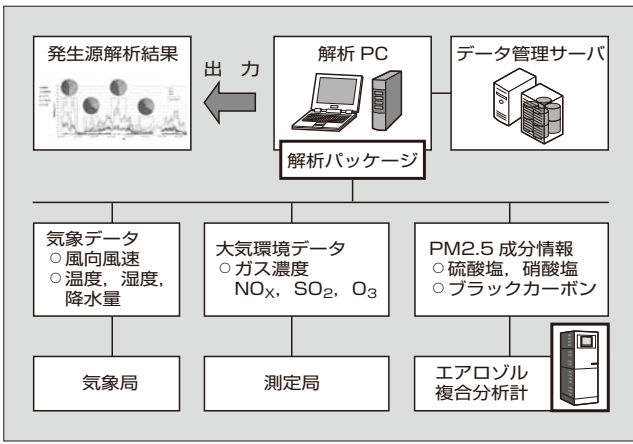


図6 PM2.5 発生源推定システムの構成

塩)の生成過程に注目し、二次生成エアロゾルとその前駆体物質の大気における寿命や拡散過程の違いから発生源の推定を行う。ガス状の前駆体物質は、大気の循環により発生源の場所にかかわらず、排出後、直ちに拡散し、周りの空気との混合によりその濃度は次第に低下していく。一方、PM2.5は、雨や雪などの降水が主な除去過程となるため、降水がないなどの環境条件によっては1週間以上も大気中に滞留し、長距離にわたって輸送されることがある。そこで、二次生成エアロゾルの濃度と前駆体物質のガス濃度について相関を解析し、これらの濃度変化に相関が

高い場合は、発生源が測定場所の近傍にあると推定する(おおむね100km未満を想定)。一方、相関が低い場合には、発生源が測定場所から離れた位置にあり(おおむね100km以上を想定)、地域外からの移流の可能性が高いと推定する。前述のとおり、天候の影響が大きいので、気象情報も合わせて解析する必要がある。

3.3 解析事例

図7に、硫酸塩とその前駆体物質のSO₂の解析事例を示す。図7(a)と図7(b)は異なる地域で測定したデータである。硫酸塩はエアロゾル複合分析計による測定データであるが、SO₂は別置きのガス分析計による測定データである。

図7(a)では、硫酸塩とSO₂の濃度変化に相関が見られない。このような場合、硫酸塩の発生源は測定場所から遠方にあると推定できる。この期間の天候はおおむね晴れて、天気図では移動性高気圧が西から東へ移動しており、エアロゾルの多くは偏西風の影響により西から移流してきたと推定できる。

図7(b)では、SO₂の濃度に対して硫酸塩の濃度が追従する動きを示しており、硫酸塩とSO₂の濃度変化に相関が見られる。このような場合は、硫酸塩の発生源が測定場所の近傍に存在すると推定できる。この期間の天候は晴れもしくは曇りであり風向はほぼ常時北西であったことから、主な発生源として、測定箇所から北西の方向に数10km

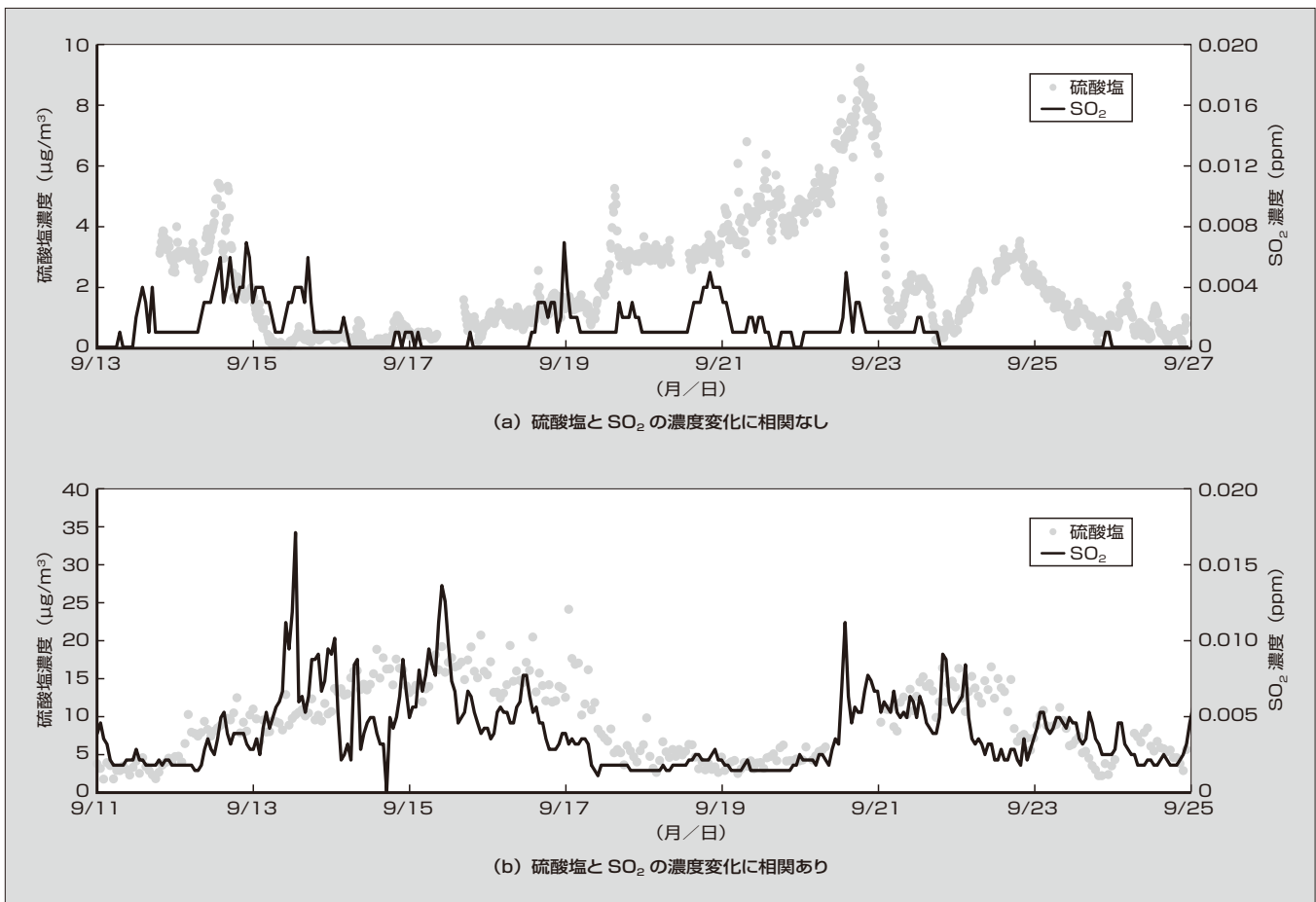


図7 硫酸塩とSO₂の解析事例

離れた場所に位置する石炭火力発電所が推定できる。

3.4 今後の展開

このように、二次生成エアロゾルと前駆体物質の相関を解析することにより、発生源を推定することが可能となる。現状の解析では大まかな推定にとどまるが、該当地域にエアロゾル複合分析計を複数台設置して測定箇所を増やすとともに、主な工場や発電所の操業情報、交通量情報、地形の情報なども含めて解析することにより、詳細な発生源の推定が可能になると考えている。また、PM2.5発生源推定システムの実証プロジェクトを地方公共団体と共同で実施する予定である。

4 あとがき

本稿では、PM2.5の主要成分の定量分析をリアルタイムで行うことができる「エアロゾル複合分析計」と、これを用いたPM2.5発生源推定ソリューションについて述べた。PM2.5は、大気汚染だけでなく地球温暖化などの気候変動にも大きな影響を与えるため、地球規模で取り組むべき課題である。今後も、微粒子を精度よく計測する技術を基盤として計測ソリューションを提供し、地球環境の保全と社会の持続可能な発展に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) “微小粒子状物質 (PM2.5) の成分分析ガイドライン”。

環境省. https://www.env.go.jp/air/osen/pm/ca/110729/no_110729001b.pdf. (参照 2016-06-23).

- (2) Takegawa, N. et al. “Evaluation of a New Particle Trap in a Laser Desorption Mass Spectrometer for Online Measurement of Aerosol Composition.” *Aerosol Science and Technology*, 46.4 (2012) : p.428-443.



小泉 和裕

環境計測機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部コア技術研究所計測技術開発センター計測ソリューション開発部マネージャー。日本エアロゾル学会会員。



武田 直希

粒子計測機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部コア技術研究所計測技術開発センター計測ソリューション開発部。日本エアロゾル学会会員。



中村 裕介

計測機器の設計開発、事業運営に従事。現在、富士電機株式会社産業インフラ事業本部産業計測機器事業部計測機器技術部主席。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。