

特集2

高機能複合分析計で PM2.5の正体をとらえろ!

大気中に浮遊する粒子状物質の全体像解明を目指して

この春、微小粒子状物質「PM2.5」による大気汚染の話題が日本人の耳目を集めた。ぜん息や肺がんなど、人体への影響のほか、気候変動にも大きな影響を及ぼすともいわれている。しかし、PM2.5の実態やその影響は未解明で、全体像の把握が求められている。その第一歩が、大気中の微粒子を詳しく測定できる機器の開発だ。東京大学先端科学技術研究センターの竹川暢之さんらは、微粒子を多面的かつリアルタイムに計測する新しい分析装置の開発に取り組んでいる。

気候変動への影響が 重大

今年3月に関東で発生した煙霧や、大都市でみられる大気汚染など、最近にわかに注目を集めた「粒子状物質」(PM: Particulate Matter)。大気中に浮遊する粒子を、大気汚染の原因の1つとして捉えた際の総称である。固体であれ、液体であれ、非常に細かい粒子は、いったん舞い上がると何時間も大気中に浮遊したままになり、吸い込んだ人の健康に影響を与えることもある。体内での粒子状物質の挙動は、主にその大きさに左右されると考えられている(p.9図)。例えば、花粉は大きさが30マイクロメートル前後あり、吸い込んだ場合には主に鼻やのどの粘膜で捕らえられる。これに対し、おおむね2.5マイクロメートル以下の粒子状物質である「PM2.5」は気管支や肺の奥まで入り込むとされ、健康への大きな影響が懸念されている。しかし、その小ささゆえに量の把握すら難しいのが現状だ。PM2.5の実態や健康への影響などの詳細は、まだよくわかっていない。

日本では、PM2.5よりも一回り大き

い粒子状物質について、1972年からその総量を監視してきた。2009年からはPM2.5についても1日平均で単位立方メートル当たり35マイクログラムという環境基準が設けられた。現在では、全国500カ所以上で1時間ごとにPM2.5などの浮遊量が測定され、環境省の広域監視システム「そらまめ君」のホームページなどで速報値が公表されている。

全国で監視されているのは粒子状物質の大きさや量だけだが、その成分は実にさまざまだ。PM2.5には、自動車や工場から出るすすをはじめ、大気汚染ガスが化学反応して生じる硫酸塩や硝酸塩、さらには海からの塩分や土ほこりなどがある。人の活動から出る汚染物質が注目されがちだが、グローバルに見れば自然起源の物質の方が多いかもかもしれない。

粒子の種類が異なれば、与える影響も異なる。例えば、硫酸塩などの白っぽい粒子は太陽光を散乱し、大気を冷やす効果を持つとされている。1991年のピナトゥボ火山(フィリピン・ルソン島)の大噴火の後には、微細な硫酸塩などが全球規模で何カ月にもわたって日射を遮り、北半球の平均気温が約0.5℃下

がった。

一方、すすの粒子は色が黒いため、太陽光を吸収して温暖化を促進するという。工場や自動車の排ガスなど日常的に出る人工的な粒子状物質も、気象に影響を与えていると考えられる。

このように組成によって粒子物質の影響はまるで違うことから、量だけでなく成分をきちんととらえていくことが必要となる。

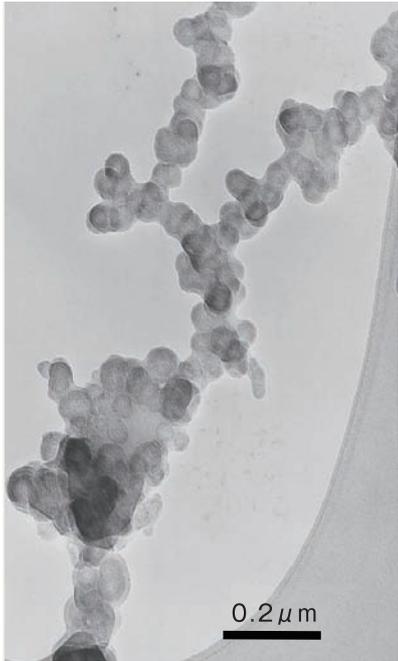
東京大学先端科学技術研究センター准教授の竹川暢之さんは、「都市部の大気汚染も心配ですが、実は気候変動への影響の方が重大ともいえます」と指摘する。

竹川 暢之 たけがわ のぶゆき

東京大学 先端科学技術研究センター気候変動科学分野 准教授

1996年、東京大学理学部卒業。98年に東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。2000年より名古屋大学太陽地球環境研究所助手。02年に東京大学 博士(理学)。02年より東京大学先端科学技術研究センター助手、助教授を経て、07年より現職。08年から研究成果展開事業先端計測分析技術・機器開発プログラム「実時間型エアロゾル多成分複合分析計の開発」のチームリーダー。

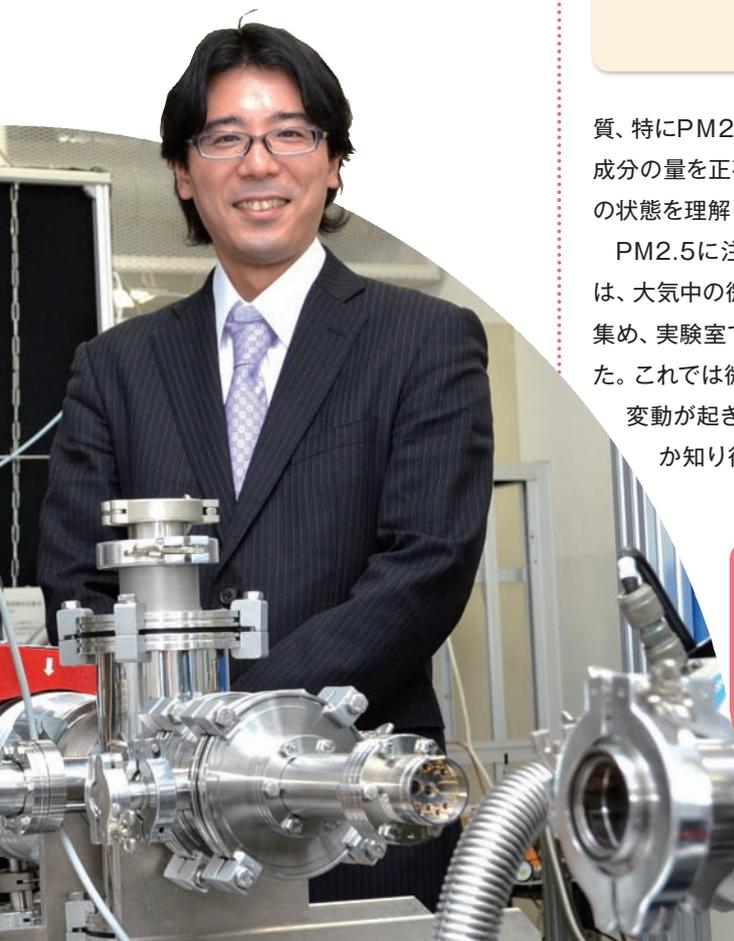




東京で採取されたディーゼル排気粒子の電子顕微鏡写真。粒子状物質の物理化学特性（サイズ、組成、形状）は多種多様で、短時間にその分布が大きく変動することもある。

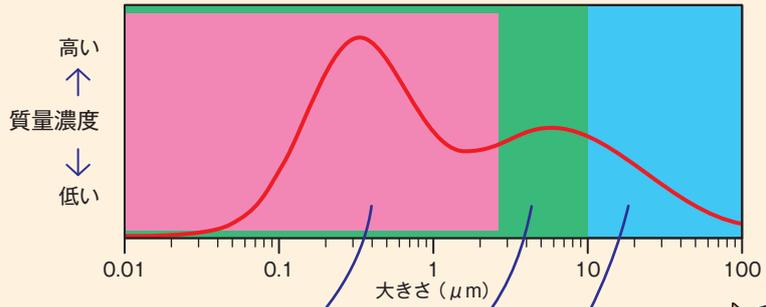
既存の分析計の限界を超えて

竹川さんは、約15年にわたって大気化学に関する研究に取り組んできた。その目的は、大気中の物質の生成・反応・輸送の過程を明らかにすることだ。なかでも全体像が解明されていない粒子状物



微小粒子状物質「PM2.5」とは

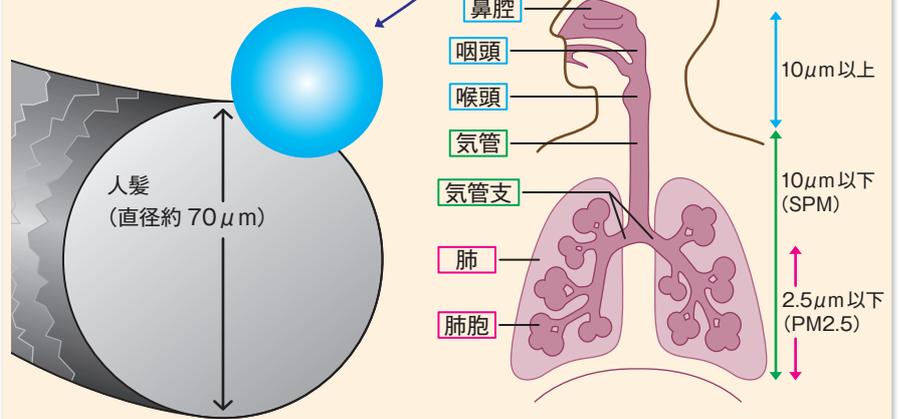
典型的な粒子状物質のサイズ分布



微小粒子状物質 (PM2.5)
(おおむね 2.5 μm 以下)

浮遊粒子状物質 (SPM)
(10 μm 以下)

スギ花粉 (粒径 30~40 μm)



典型的な粒子状物質のサイズ分布図（上）では、PM2.5を含む微小粒子群と粗大粒子群の2つの山ができていくことがわかる。黄砂や花粉などは粗大粒子に含まれる。右図は、ヒトの呼吸器系における粒子状物質の大きさによる沈着領域の違いを示した概念図。PM2.5は、さらに循環器系への影響も心配されている。

質、特にPM2.5に力点を置き、その主要成分の量を正確に測定し、包括的に大気の状態を理解しようと試みている。

PM2.5に注目して研究を始めたころは、大気中の微粒子を数時間以上かけて集め、実験室で分析するのが一般的だった。これでは微粒子を集める間に大気に変動が起きたとしても、その平均値しか知り得ない。より短時間の変化

を見るには、ほぼリアルタイムで正確に測定できる装置が必要になる。竹川さんは当初、リアルタイムで成分の分析が可能な、既存の米国製の質量分析計を使っていた。しかし、この装置では、組成を特定する手がかりが足りない上、成分ごとの量の測定も困難であったため、自ら試行錯誤しながら新たな分析装置の開発を始めた。

平山 紀友 ひらやま・のりとも

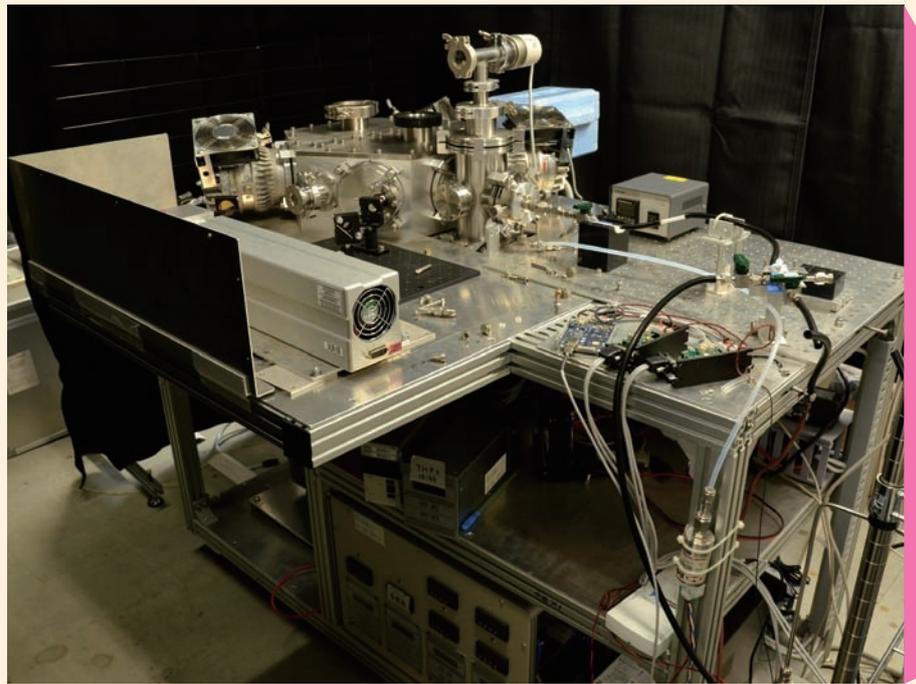
富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所
計測技術開発センター 計測機器開発部長

1992年に株式会社富士電機総合研究所に入社。工業用計測機器、光応用機器の研究開発に従事し、2009年より現職。
同プログラム「実時間型エアロゾル多成分複合分析計の開発」サプリーダー。

「モノを作るのは昔から好きでしたが、なかなか思うようにはいきませんでした」と竹川さんは苦笑いする。ちょうどそのころ、東京大学先端科学技術研究センターと組織連携していた富士電機株式会社と共同研究を開始した。さらに装置開発を加速するため、独自の測定技術を持つ海洋研究開発機構も加えた開発チームで、JST先端計測分析技術・機器開発プログラムに応募した。質量分析計で見分けられない成分を明らかにするため、すずい代表される黒い粒子を見分ける「白熱光検出法」と、生物起源の有機物を検出する「レーザー誘起蛍光法」を組み合わせることにしたのだ。竹川さんらの課題は2008年度に採択され、粒子状物質の構成成分を判別し、それらの量をリアルタイムで測定できる、まったく新しい計測機器の開発が始まった。

技術とアイデアで 正確さを向上

竹川さんは、主に質量分析計部分の改善に取り組んだ。鍵となったのは、質量



竹川さんが独自に開発した1号機の質量分析部分。さまざまな機能をのせたため、非常に大きくなった。

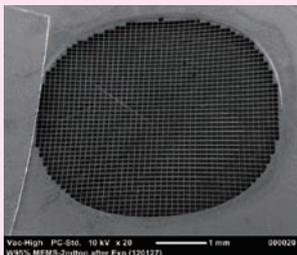
再設計

分析計内部で粒子状物質を捕らえる「粒子トラップ」だ。通常、大気中の粒子は微量であるため、質量分析法でリアルタイムに測るためには、粒子をスポット状に

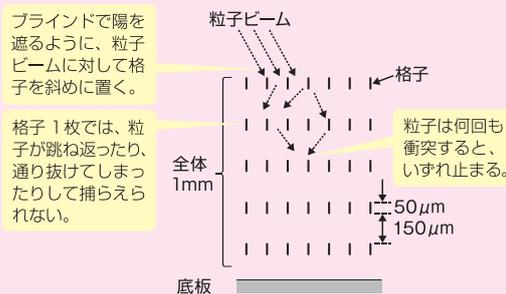
集めてから分析する必要がある。しかしながら、従来法では取りこぼしが多く、全量は測れていなかった。そこで竹川さんらは、粒子状物質を効率よく集める「粒子トラップ」を開発することにした。

質量分析と粒子トラップ

質量分析では、通常の大気中の微粒子は希薄すぎて測ることが難しい。このため、従来法では、粒子を一度小さな板にぶつけて集め、それを蒸発させて分析する。しかし実際には、真空の測定装置に引き込む際に粒子は秒速100メートルにもなるため、跳ね返って板に付かない粒子が多く、正確に測定するのが困難だった。そこで、竹川さんは平らな板の代わりに粒子を捕らえる隙間がある「粒子トラップ」を考案した。



微細な格子の制作に使われたのは、半導体集積回路の製造技術に応用したシリコン加工技術で、通常はマイクロサイズのセンサーや微小機械の製造に使われているものだ。

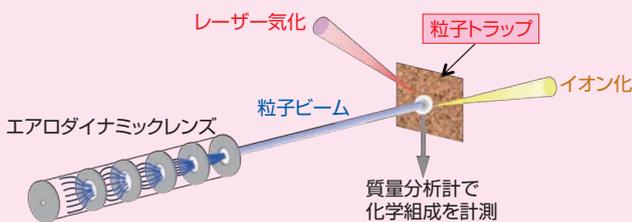


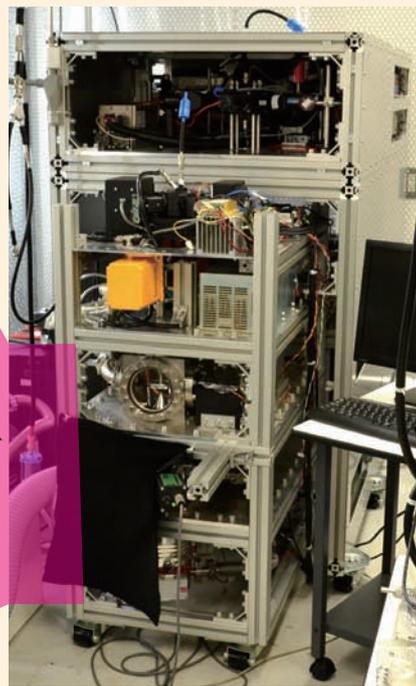
格子を5層重ねることで、ほぼすべての粒子を数ミリメートルの範囲に捕まえる3次元トラップが完成した。

「私が最初に作った粒子トラップは、細いワイヤーを巻いたものでしたが、全然使いものになりませんでした。しかし、富士電機の技術者と毎日議論しながら研究することで、効率よく改善できました」と竹川さんは振り返る。企業の技術者が研究室にほぼ常駐するという緊密な産学連携の開発体制が功を奏していた。

試行錯誤するうちに思いついたのは、格子を何層も重ねた粒子トラップだ(左図)。この立体的なトラップで実際に粒子を捕まえるには、微細で規則正しい格子を作る技術が必要だった。ここで、富士電機の加工技術が力を発揮した。「今回の装置に微細加工は必要ないだろうと思っていましたが、思わぬところで私たちの技術力が生かされました」と開発チームのサブリーダーを務めた富士電機の平山紀友さんは言う。

こうして生まれた粒子トラップは、粒子のほぼ100%を捕らえることに成功。これまでより格段に正確に測れるようになった。





蛍光検出ブロック
生物起源粒子の特定・分類

白熱光検出ブロック
粒子状物質の濃度・粒径分布とすすの質
量濃度や混合状態を分析

質量分析ブロック
硫酸塩、硝酸塩、有機物総量などの
主要な成分を計測

実用化に向けて富士電機とともに開発した2号機。1号機のおよそ5分の1にまで小さくできた。複数の分析法を組み合わせ、粒子状物質を多角的にリアルタイムで計測できるのが最大の特徴。

再設計がもたらす 実用化への道

「大学の研究者が実験装置を自作すると、あれもこれもと機能満載で、複雑な構造になりがちです。私が作った試作機もまさにそうでした」と竹川さんは振り返る。作りやすさを優先し、さらに実験を進めながら次々と機能を追加するため、サイズも部品点数も過大になる。その研究室では使えても、そのままでは実用機とは言い難い。しかし今回は、企業である富士電機が大きな力を発揮した。

平山さんは「なぜこの部品を付けたのかは、最初に開発した人にしかわからないケースがあります。製品化を目指すには、それを聞き出して整理し、機能も必要最小限に絞って再設計する必要があります」と言う。竹川さんも「最終的な装置のサイズは、私が開発した試作機の約5分の1になりました。共同開発を始めた当初、装置の構造を問い直すことの重要性をあまり認識していませんでした。開発チーム内で文化の違いを理解し合うのは大変でしたが、かなり早い段階で装置を再設計したことで、大学人としても大変勉強になりました」と話す。

今回開発した多成分複合分析装置は、

大きく分けて3つの測定ブロックからなる(上図)。この装置では測定に用いる機能の組み合わせにより、ユーザーのニーズに沿った多様な分析を行うことができる。竹川さんのように粒子状物質の動態を解明したい研究者にとっては、粒子のサイズやその組成、さらに主要成分の定量的分析などの詳細な情報が必要だ。しかし、特定の大気汚染物質を監視する場合、フル装備の分析装置は必要ない。そこで、目的に応じて必要な分析技術だけで使うことも、後から追加することもできるように設計した(ブロックビルド方式)。複数のブロックの整合性を図りながら、全体を適切に制御する技術も確立済みだ。これが、富士電機のノウハウを生かしたもうひとつの大きな特長といえる。

リアルタイム計測、組成分析、成分ごとの測定、ブロックビルド方式などを盛り込んだ、これまでにない高性能複合分析計の試作機が完成した。今後は、フィールドテストによる性能評価などの課題に取り組んでいく予定だ。

複合分析計の普及に 向けて

大気の状態を測る分析計の開発では、これまで欧米がずっと優位を保ってきた。

しかし、今後は日本発の新たな分析計が世界中で使われていくことを竹川さんは願っている。「この複合分析機が実用化されて第一線の研究者に活用されることで、さらに新しい研究アイデアの源になればいいですね。学会やセミナーでも紹介し、世界中の研究者に伝えていきたいと思っています」と意気込む。

地球温暖化は、海面上昇や異常気象の発生など、人類の未来を揺るがす深刻な問題になると予想されている。その重要性が広く知られるようになったのは、1980年代以降のことだ。しかし、大気中のCO₂が長期的に増加していることを初めて明らかにした米国のチャールズ・デービッド・キーリング博士が、CO₂濃度の測定機を超高精度に改良し、他からの影響を受けにくいハワイのマウナロア観測所で計測を開始したのは1958年だった。当時はまったく注目されなかったが、30年以上にわたる長期データが蓄積されていたことから、1990年代以降高い評価を受けている。今年6月には、同観測所で測定したCO₂の平均濃度が、観測開始から初めて400ppmの大台を超えたことも記憶に新しい。

「粒子状物質の分野でも、CO₂のように地道に精密な計測を継続することから、何か重要な発見が生まれるのではないかと考えています。そのためにこの分析装置が貢献できれば、それに勝る喜びはありません」と竹川さんは話す。今後は、新しい測定装置での長期的なリアルタイム観測と、そのデータの解釈により多くの時間を割いていく予定だ。「偏見を持たないことも大切です」と多角的に測定し、柔軟に読み解くことの大切さも説く。

「例えば東京では、南風が吹くときに硫酸塩の浮遊濃度が急増することがあります。原因は何だと思いませんか? 排気ガスではありません。三宅島からの噴煙なのです」。

大気中に漂うさまざまな微粒子が地球全体に与える影響は、未だ明らかになっていない。気候変動の全体像把握に向けて、竹川さんは真摯に研究を続けている。