



見えます！エアロゾル粒子

足立 光 司*

1. エアロゾル粒子は見える？

遠くの山を見たとき、昨日はきれいに見えていたのに今日はかすんで見えるな、といった経験はないでしょうか？ そのような視程が低下する原因の一つとして、空気中に漂った「エアロゾル」が考えられます。エアロゾルは数 μm （マイクロメートル： 10^{-6}m ）より小さな固体または液体の微粒子からなり、例えば砂漠の砂（黄砂）、海の塩、森林からの有機物、火山灰、炭素を含む物が燃えたときに発生するすす、硫黄を含むガスが空気中で酸化して粒子になった硫酸塩など、多くの自然起源や人為起源から発生します。このようなエアロゾル粒子は、非常に小さいために重力による影響を受けにくく、時には数週間以上も風に吹かれて大気中を漂います。黄砂、森林火災、また人口密集地からの大気汚染空気など、空気中に含まれるエアロゾル粒子濃度が高い時には衛星画像や肉眼でも、霞として雲のように漂うエアロゾルが見えます。しかし、実際に一つ一つのエアロゾル粒子がどのような形をしていて、どれぐらいの大きさなのか、また何を付着させているのか、などは肉眼では見ることはできません。光学顕微鏡を使った観察でも、エアロゾル粒子の多くは光で見ることができ理論上の大きさ（光の波長 550nm （ナノメートル： 10^{-9}m ）程度）より小さいため、その詳細な形についてはなかなか見ることはできません。

2. 電子顕微鏡でエアロゾル粒子を見る

目に見えない小さなエアロゾル粒子を「見る」手段として、電子顕微鏡の利用があります。電子顕微鏡は

微小な物質の形や組成を調べる道具として物質科学などの分野で広く用いられています。それらは大きく分けて、走査型電子顕微鏡と透過型電子顕微鏡の2種類があります。走査型電子顕微鏡は、細く絞った電子線を走査させて物体の表面を分析する手法です。透過型電子顕微鏡は、分析対象に合わせて広げた電子ビームを照射し、その透過した電子をカメラに映して撮影する手法になります。電子顕微鏡は光よりもずっと波長の短い電子線（例えば 100kV （キロボルト）の加速電圧で約 0.003nm ）を用いるため、大型の装置では原子（約 0.1nm ）を見ることもできます。第1図aは、透過型電子顕微鏡で撮影を行ったエアロゾル粒子の例です。厚いもの、結晶質のもの、密度が高いものなどは電子銃によって照射された電子線が試料中で吸収もしくは散乱され、カメラ（もしくはフィルムや蛍光板）に到達する電子が少なくなり、黒っぽい物質として写ります。このような電子線と対象物質の物理作用の結果、その物理化学状態に応じた濃淡が生じ、結果として種類の異なる物質が混ざったエアロゾル粒子の中身を「見る」ことができます。図では、結晶を持ち密度の高い硫酸塩、すす粒子、金属や鉱物粒子などが濃い黒で見えます。その周りには、結晶性を示さない密度が比較的小さな有機物が硫酸塩などを被覆していることが分かります。

3. 電子顕微鏡でエアロゾル粒子を調べる

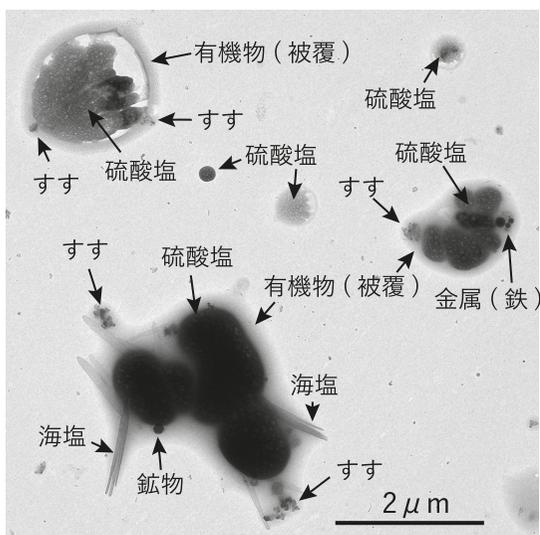
電子顕微鏡を用いた分析では、粒子の形態に加えてその化学組成を知ることができます。電子線がエアロゾル粒子を構成する原子にぶつかったとき、もしくは通過した際に、その原子や結合状態に応じた特有のエネルギースペクトルを生じます。そのエネルギーを電子顕微鏡内に配置した検出器でとらえることで、構成する元素や原子間の結合状態に関する情報を得ること

* 気象研究所全球大気海洋研究部。

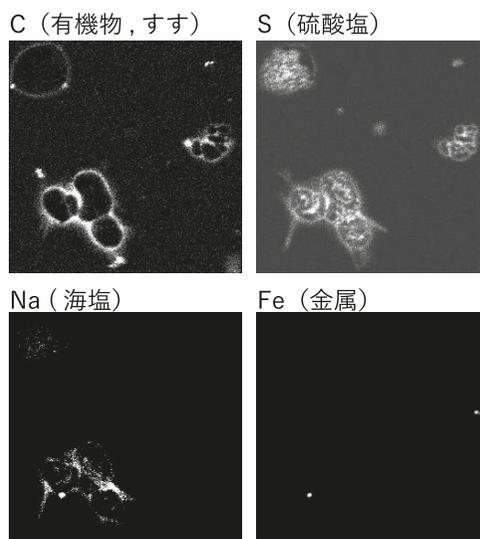
adachik@mri-jma.go.jp

© 2023 日本気象学会

(a) エアロゾル粒子の電子顕微鏡像



(b) 元素分布図



第1図 透過型電子顕微鏡を使った複雑に混合する都市大気エアロゾル粒子分析の例。(a) 一つ一つの粒子の中でも複数の成分が複雑に混合している。(b) 電子顕微鏡で撮影した同じ領域をエネルギー分散型X線分析装置で元素分布を分析した例。2022年7月15日に航空機観測により名古屋上空で炭素支持膜の上に採取された試料を用いた。

ができるのです。第1図bの例では、エネルギー分散型X線分析装置を用いて分析したエアロゾル粒子を構成する元素の分布を示します。炭素(C)の分布は有機物被覆とすす粒子に対応し、硫黄(S)の分布は比較的大きな硫酸塩を示します。また、ナトリウム(Na)は主に海塩に由来し、鉄(Fe)は凝集粒子と鉱物(Na-Fe)を示しています。

4. エアロゾル粒子を見て分かること

様々な発生源から生じたエアロゾル粒子やその前駆体となるガスは、大気中を漂いながらぶつかり(凝集)、エアロゾル粒子の表面でガス成分が液滴となり(凝結)、また雲粒に取り込まれたのちに水滴中で混ざり合うなどして、第1図に見られる粒子のように、複数のエアロゾル成分が1粒子に混ざった状態になります。電子顕微鏡でそのような混合した粒子を正確に観察することで、これらの混合粒子がどこからどのようにして生じたか、混合粒子が雲の核になりやすいか、また混合粒子がどの程度太陽の光を吸収・散乱させるか、などの知見が得られます。例えば、第1図に示されている硫酸塩や有機物に覆われたすす粒子は、元のすす粒子に比べておよそ数十%程度光吸収効率を上げ、より気候変動(気温上昇)に貢献することが知ら

れています(Bond *et al.* 2006; Adachi *et al.* 2010)。そのため、電子顕微鏡でこれらの粒子がどのように混ざりあっているかを正確に知ることは、気候変動の理解にとっても重要になってきます。また、 $2.5\mu\text{m}$ 以下の大きさのエアロゾル粒子はPM_{2.5}とも定義され、体内に吸い込まれ人の健康に悪影響を及ぼす危険性も指摘されています(WHO 2013)。このようなエアロゾル粒子の健康影響においても、例えば金属微粒子との混合(第1図の右中央にある粒子)などの電子顕微鏡で得られる情報が必要になります(Li *et al.* 2016; Adachi and Buseck 2010)。

5. 終わりに

大気中に漂うエアロゾル粒子を「見る」ことによって、これらの気候・気象・視程・健康影響などに関する様々な情報を得ることができます。電子顕微鏡で「見る」分析は、定性的な情報としてケーススタディでとどまることがある一方で、新たな粒子の発見やこれまでに知りえなかった大気素過程への重要なヒントをもたらす研究に結びつくこともあります。今後の電子顕微鏡を使ったエアロゾル粒子の研究では、例えば北極や南極といった地球の気候を理解するうえでカギとなる極地や、雲が発生する高度(航空機観測や山岳観

測) で得られた試料の分析などが必要とされるでしょう。また、連続分析機器などを用いて得られたデータの解釈に必要な粒子の形態や種類判定を行うなど、電子顕微鏡分析の特性をうまく生かした研究が求められています。

参 考 文 献

- Adachi, K. and P. R. Buseck, 2010: Hosted and free-floating metal-bearing atmospheric nanoparticles in Mexico City. *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 2299-2304.
- Adachi, K., S. H. Chung and P. R. Buseck, 2010: Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D15206, doi:10.1029/2009JD012868.
- Bond, T. C., G. Habib and R. W. Bergstrom, 2006: Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, D20211, doi:10.1029/2006JD007315.
- Li, W., L. Shao, D. Zhang, C.-U. Ro, M. Hu, X. Bi, H. Geng, A. Matsuki, H. Niu and J. Chen, 2016: A review of single aerosol particle studies in the atmosphere of East Asia: morphology, mixing state, source, and heterogeneous reactions. *J. Clean. Prod.*, **112**, 1330-1349.
- WHO, 2013: Health Effects of Particulate Matter: Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 15pp.

足立光司

気象研究所全球大気海洋研究部主任研究官

神戸大学大学院自然科学研究科修了 博士 (理学)

博士号を取得後、米国アリゾナ州立大学でポスドクやファカリティ研究員として過ごしたのち、現在、気象研究所でエアロゾルに関わる研究を行っています。これまで一貫して電子顕微鏡を用いた研究を行い、世界各地で採取した微粒子やエアロゾル粒子の解析を進めています。また、エアロゾルハンターとして気候・気象・環境などに関わる新たなエアロゾル粒子の発見を行っています。