

2021 年度日本気象学会賞の受賞者決まる

受賞者：茂木信宏（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻）

業績：単一粒子測定技術の開発に基づく大気エアロゾルの動態と放射影響の研究

選定理由：

大気中のエアロゾルは、太陽放射を散乱・吸収し、あるいは雲の放射特性や雲量などを変えることにより、地球の放射収支に影響を及ぼしている。中でも、太陽放射を強く吸収する黒色炭素 (Black Carbon, BC) は、全球平均で二酸化炭素、メタンに次いで 3 番目に大きな正の放射強制力をもつとされ、北極域では BC の雪氷面への沈着によるアルベド低下が温暖化を増幅させている可能性がある。しかし、大気中の BC は他の成分により被覆されていることなどにより、その各種測定法には不確定性が存在し、観測値の間には大きな不整合があった。このため、BC の影響評価に用いる数値モデル計算の検証にも支障をきたしてきた。さらに、BC の気候影響理解と数値モデル高度化のためには、従来の総量測定法では測定できない BC の光学特性や除去過程に強く影響する粒径や混合状態などの微細な物理特性に関する観測的知見が不可欠であることが明らかになってきた。

茂木信宏氏は、BC 測定手法であるレーザー誘起白熱法に基づく single particle soot photometer (SP2) 測定器の改良と、粒子からの散乱および白熱光強度から様々な物理量を定量する理論・解析手法の開発において先駆的な貢献をし、他の成分に被覆されていても個々の BC 粒子質量を高精度に測定することを可能にした (Moteki and Kondo 2007, 2010, Moteki *et al.* 2011)。SP2 は各種の BC 測定手法の中でも最も信頼性が高い技術として広く認められつつあり、長年の BC 測定の混乱を収束させる方向性を示すものとして国際的にも高く評価されている。実際、SP2 を使った BC 観測は全球エアロゾルモデルの検証に広く利用されており、世界に多数設置されている長期連続 BC 測定装置の校正基準としても利用されている。茂木氏はさらに、BC と他成分との内部混合状態の形態 (被覆か付着形態かの区別) や被覆成分の厚さを判別・定量する技術を確立し、発生源から大気中を輸送されている間に被覆量が増加している実態を初めて明らかにした (Moteki *et al.* 2014)。

湿性除去過程はエアロゾル数値モデルの大きな不確定要因であるが、茂木氏は、大気と降水中の BC 粒径分布の同時観測にもとづき、湿潤対流による上方輸送過程での湿性除去効率を支配するパラメータである「エアロゾル群が経験した代表的な最大過飽和度」を推定する手法を考案した (Moteki *et al.* 2012, Moteki and Kondo 2013)。そして、この手法を用いて初めて定量的に推定された実効的な最大過飽和度を全球エアロゾルモデルに適用することにより、中緯度から極域等への長距離輸送効率の予測不確実性が大きく低減する可能性を示した (Moteki *et al.* 2019, Matsui and Moteki 2020)。これらの成果は、エアロゾル空間分布と気候影響の不確実性を低減するため

に必要な観測・モデル研究の今後の方向性に新たな示唆を与えるものである。

茂木氏は、SP2 による BC 検出法の開発で培った知見をさらに発展させ、大気エアロゾル中の酸化鉄 (FeOx) 粒子の高精度・高速なオンライン測定法を世界で初めて開発した (Yoshida *et al.* 2016, Moteki *et al.* 2017)。この手法を用いることで、同じ気塊に含まれる他成分の揮発性の情報から、同粒子が自動車等に由来する人為起源であるのか、砂漠からの鉱物粒子に由来する自然起源であるのかが判別可能となる。これを活用した地上・航空機観測の結果、都市域・アジア大陸下流域・北極域のいずれの場所においても人為起源 FeOx の質量濃度は BC の 20~60% にものぼり、アジア域等の発生源近傍では FeOx による大気加熱効果が BC の数% になることを明らかにした (Moteki *et al.* 2017)。この効果は、続く他の研究では最大 30% におよぶことが示唆されており、これまで見過ごされてきた人為起源の放射強制因子を最初に指摘した研究として国際的にも注目されている。また、茂木氏らによる観測・モデル研究により、海洋への二酸化炭素吸収量に影響する海洋微生物への鉄供給源として、人為起源 FeOx の寄与が従来推定より 7 倍も大きいことが示唆され、大気科学だけでなく地球化学の分野からも注目を浴びている。

茂木氏は、長年 SP2 を主軸としたエアロゾル測定手法の確立と気候影響に関わる研究を展開してきたが、近年では SP2 やその他多くのオンライン粒子観測手法よりも分析対象の化学種がはるかに広い次世代の微粒子検出技術 (SPES 法, single particle extinction and scattering method) の開発を世界に先駆けて行っている。SPES 法では、個々の粒子の光散乱波の振幅とともに位相を高精度に検出することにより、空気中・水試料中の粒子の複素屈折率と粒径分布を測定できる (Moteki 2020)。この技術は、茂木氏自身による微粒子の光散乱の高度な理論の構築や、光信号検出・電気信号処理手法の開発の上で実現したものである。SPES 法は海洋やアイスコア中の微粒子などの計測に幅広く応用可能であり、鉱物・有機物・マイクロプラスチック粒子の動態把握など、今後の研究発展が期待される。

以上のように、茂木氏はエアロゾルを中心とした大気物質科学研究を発展させる新しい観測技術および、その特性を最大限に活かした新しい研究手法を開発し、さらに気候に関わる数値モデルの検証・精密化にも重要な貢献をしてきた。これらの業績により、茂木信宏氏に 2021 年度日本気象学会賞を贈呈するものである。

主な関連論文

1. Moteki, N., 2020: Capabilities and limitations of the single-particle extinction and scattering method for estimating the complex refractive index and size-distribution of spherical and non-spherical submicron particles. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **243**, 106811.
2. Matsui, H. and N. Moteki, 2020: High sensitivity of Arctic black carbon radiative effects to subgrid vertical velocity in aerosol activation. *Geophys. Res. Lett.*, **47**,

e2020GL088978.

3. Moteki, N., T. Mori, H. Matsui and S. Ohata, 2019: Observational constraint of in-cloud supersaturation for simulations of aerosol rainout in atmospheric models. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **2**, 6.
4. Yoshida, A., N. Moteki, S. Ohata, T. Mori, R. Tada, P. Dagsson-Waldhauserova and Y. Kondo, 2016: Detection of light-absorbing iron oxide particles using a modified single-particle soot photometer. *Aerosol Science and Technology*, **50**, 3.
5. Moteki, N., K. Adachi, S. Ohata, A. Yoshida, T. Harigaya, M. Koike and Y. Kondo, 2017: Anthropogenic iron oxide aerosols enhance atmospheric heating. *Nature Comm.*, **8**, 15329.
6. Moteki, N., Y. Kondo and K. Adachi, 2014: Identification by single-particle soot photometer of black carbon particles attached to other particles: Laboratory experiments and ground observations in Tokyo. *J. Geophys. Res.*, **119**, 1031-1043.
7. Moteki, N. and Y. Kondo, 2013: A new theoretical method for calculating temperature and water vapor saturation ratio in an expansion cloud chamber. *J. Geophys. Res.*, **118**, 6633-6642.
8. Moteki, N., Y. Kondo, N. Oshima, N. Takegawa, M. Koike, K. Kita, H. Matsui and M. Kajino, 2012: Size dependence of wet removal of black carbon aerosols during transport from the boundary layer to the free troposphere. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, 13, L13802.
9. Moteki, N., N. Takegawa, K. Koizumi, T. Nakamura and Y. Kondo, 2011: Multiangle polarimetry of thermal emission and light scattering by individual particles in airflow. *Aerosol Science and Technology*, **45**, 1184-1198.
10. Moteki, N. and Y. Kondo, 2010: Dependence of laser-induced incandescence on physical properties of black carbon aerosols: Measurements and theoretical interpretation. *Aerosol Science and Technology*, **44**, 663-675.
11. Moteki, N. and Y. Kondo, 2007: Effects of mixing state on black carbon measurements by laser-induced incandescence. *Aerosol Science and Technology*, **41**, 398-417.