

特集 ライダーデータ利用 I (エアロゾル・雲)

衛星搭載ライダー・イメージャの複合解析による
エアロゾル組成の全球三次元分布工藤 玲*¹, 日暮 明子², 及川 栄治¹,
藤川 雅大³, 石元 裕史¹, 西澤 智明²¹ 気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)² 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)³ 九州大学大学院総合理工学府 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)Global 3-D distribution of aerosol composition
by synergistic analysis of space-borne lidar and imagerRei Kudo*¹, Akiko Higurashi², Eiji Oikawa¹,
Masahiro Fujikawa³, Hiroshi Ishimoto¹, and Tomoaki Nishizawa²¹ *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052*² *National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506*³ *Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyusyu University,
6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580*

(Received November 28, 2022; revised February 14, 2023; accepted February 27, 2023)

Aerosols have significant impacts on the climate changes by modifying the atmospheric radiative balance. It is essential to observe the spatial and temporal variations of the aerosol composition and optical properties. In this paper, we firstly show the global 3-D distribution of the aerosol composition and optical properties estimated from the space-borne lidar and imager. Furthermore, the shortwave direct radiative forcing of aerosols for the downward radiative flux density at the top of the atmosphere, and the aerosol impacts on the shortwave heating rate are investigated. In the last, the future satellite missions regarding to the lidar are introduced.

キーワード: エアロゾル, 光学特性, 組成, 放射強制力

Key Words: Aerosol, Optical property, Composition, Radiative forcing

1. はじめに

大気エアロゾル粒子¹⁾(以下エアロゾル)は、大気中を浮遊する液体または固体の微小な粒子で、1 nm~100 μm の幅広い範囲の粒径を持つ。エアロゾルは、大気汚染物質として環境問題や健康被害の要因となるだけでなく、大気の放射収支を変動させることで気候にも影響する。エアロゾルは、総じて大気を冷やす効果を持つため、地球温暖化問題においては温暖化を抑制する重要な要素として認識されている²⁾。しかし、大気中で滞留する時間が短く(1日~2週間程度)、多種多様な排出源(砂漠、森林火災、自動車等)と種類(ダスト、硫酸塩、黒色炭素等)を持つため、観測でその全容を把握することは難しく、数値モデルによる再現も今なお難しい。さらに、エアロゾル-放射相互作用(直接・準直接効果)、エアロゾル-雲相互作用

(間接効果)の物理過程は複雑で、さらなる研究が必要とされている。このため、地球温暖化問題におけるエアロゾルの影響評価には、大きな不確実性が残されており、喫緊の課題とされている。

エアロゾルは、太陽光を直接散乱・吸収することで、大気放射収支に影響を与える(直接効果)。この効果を定量化するためには、エアロゾルの消散係数、一次散乱アルベド、位相関数が必要になる。エアロゾルに入射する光のエネルギーは、散乱と吸収によって消散する。これを表すパラメータが消散係数(=散乱係数+吸収係数)であり、 $1/m$ の単位を持つ。消散係数を光路に沿って積分したものが光学的厚さである。鉛直方向に積分した場合には、光学的深さと呼ばれることもある。気象庁の長期観測によると、国内の光学的厚さは、概ね0.0~0.4の範囲で変動している³⁾。一次散乱アルベドは、消散係数に対する散乱係数の比を示すパラメータで、0.0~1.0の値を持ち、値が小さいほど光を吸収する割合が大きいことを示す。多くのエアロゾルは、0.90~1.0の値を持つが、光吸収性が強い黒色炭素は、0.2~0.3の値を持つとされている⁴⁾。エアロゾルに入射した光のエネルギーが散乱によってどの方向にどれだけ配分されるかを示すパラメータが位相関数となる。この位相関数の角度積分から算出される前方・後方散乱の度合いを示したパラメータが、非対称因子で、-1.0~1.0の値を取る。1.0(-1.0)に近いほど前方(後方)散乱が強く、0.0は等方散乱を示す。大気分子によるレイリー散乱は0.0の値を持つ。エアロゾルは0.6~0.8の値をもつことが多い。ダストや海塩のように粒径の大きいエアロゾルは0.8に近い値を持つ。これらのパラメータは、種類によって異なるため、エアロゾルの組成が重要になる。

地球温暖化への影響評価を考える上では、エアロゾルの三次元分布も重要な要素となる。下層雲の上空に滞留したエアロゾルは、下層雲によって反射される太陽光を吸収し、下層雲の冷却効果を抑制する。また、エアロゾルの鉛直分布は、大気の安定度にも関わる。上空に滞留したエアロゾルが、光吸収によって大気を直接温めることにより、大気の安定度が増し、大気境界層の発達を抑制される⁵⁾。逆に、光吸収性エアロゾルが、地表付近にあった場合、大気不安程度が増し、大気境界層の発達を強化する場合もある。

以上のことから、エアロゾル組成の三次元分布を観測によって把握し、これを活用して数値モデルの再現・予測の精度を向上することが、地球温暖化問題において重要となる。現行の観測システムにおいて、衛星リモートセンシングは、エアロゾルの全球分布を把握できる唯一の方法である。特に、鉛直分布の観測を可能とするためには、衛星搭載ライダーが不可欠となる。そこで本稿では、著者らが開発した衛星搭載ライダーとイメージャの複合解析手法によって得られたエアロゾル組成の全球三次元分布について紹介する(2章)。そして、全球三次元分布から見積もられた直接効果による放射強制力について述べる(3章)。最後に、今後の衛星搭載ライダーによるエアロゾルの観測計画を紹介する(4章)。

2. 衛星搭載ライダー・イメージャによるエアロゾル組成の全球三次元分布

イメージャによる散乱光の多波長分光観測からは、エアロゾルを微小粒子と粗大粒子に分別した上で、それぞれの光学的厚さを推定することができる⁶⁾。ただし、エアロゾルの鉛直分布や地表面反射率を仮定する必要があり、それが推定の誤差要因となる。一方、ライダーは、観測波長は限られるものの、鉛直分布を直接観測することができる⁷⁾。また、地表面反射を考慮する必要のないことも長所となる。このように、両者は相補的な関係にあり、複合的な解析アルゴリズムを構築することによって相乗効果が期待できる。

著者らは、CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 衛星に搭載された CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) と、Aqua 衛星に搭載された MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) を複合解析することで、エアロゾル組成の全球三次元分布を観測する手法を開発している⁸⁾。エアロゾルは多種多様ではあるが、本手法では、粒径と光吸収性の異なる4つの粒子モデル(水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子)を用いることで、大気中の主要なエアロゾル種を表現することを試みている。水溶性粒子は、硫酸塩、硝酸塩、有機物等の混合粒子である⁹⁾。粒径が小さく(半径0.1~0.2 μm)、光吸収性が弱い(一次散乱アルベド約0.96)、球形の粒子を仮定した。光吸収性粒子には、黒色炭素を核とし、その周囲を水溶性粒子と黒色炭素を均質混合させた膜で覆った内部混合粒子モデル(Core-grey shell model¹⁰⁾)を使用した。粒径は水溶性粒子と同程度であり、一次散乱アルベドは約0.44の値で光吸収性が強く、球形の粒子を仮定した。ダスト粒子は、複雑な形状を持った Voronoi aggregate model¹¹⁾を使用した。粒径は大きく(半径1~5 μm)、中程度の光吸収性(一次散乱アルベド約0.91)を持った、非球形の粒子とした。海塩粒子は、粒径が大きく(半径1~5 μm)、光吸収性の無い(一次散乱アルベド

1.00), 球形粒子とした. これらの粒子の鉛直分布と, 微小粒子(水溶性・光吸収性)と粗大粒子(ダスト)それぞれの粒径を CALIOP と MODIS の観測値から推定する. なお, 海塩粒子は海上のみに存在し, 陸上に海塩粒子はないとした. また, 海塩粒子の粒径は, 観測値から推定するのではなく, 海上風速によるパラメタリゼーションによって与えた¹²⁾. 推定には, CALIOP の全観測データである 532 nm と 1064 nm の減衰付き後方散乱係数と 532 nm の偏光解消度を使用した. MODIS の観測データは, バンド 1 (620–670 nm) とバ

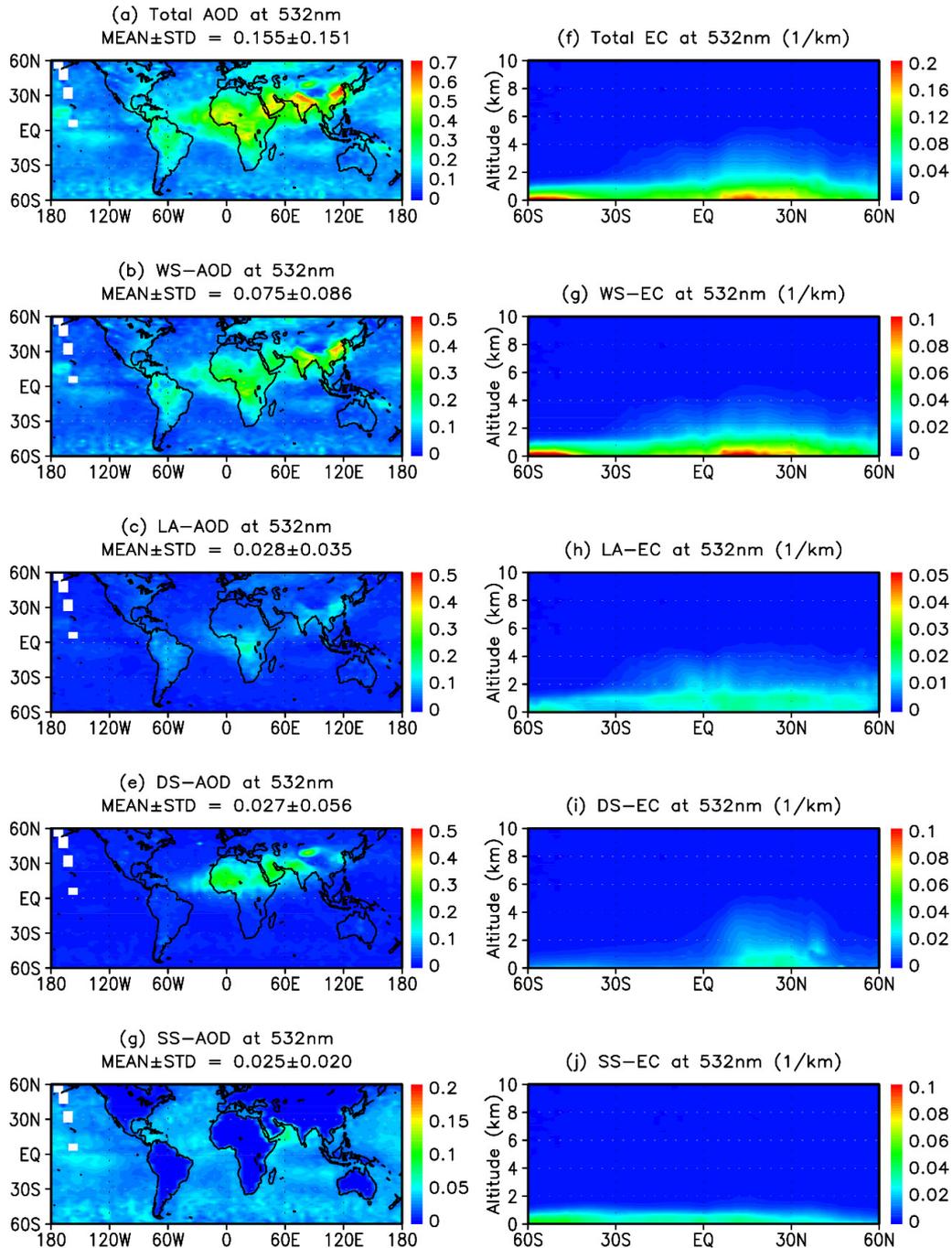


Fig. 1 Left panels are annual means of aerosol optical depth (AOD) for total aerosols (a), water-soluble (WS) (b), light-absorbing (LA) (c), dust (DS) (d), and sea salt (SS) (e) particles. Right panels are zonal means of extinction coefficients (EC) for total aerosols (f), WS (g), LA (h), DS (i), and SS (j) particles. “MEAN±STD” indicates global mean and standard deviation. Note that each panel has a different range of contour values.

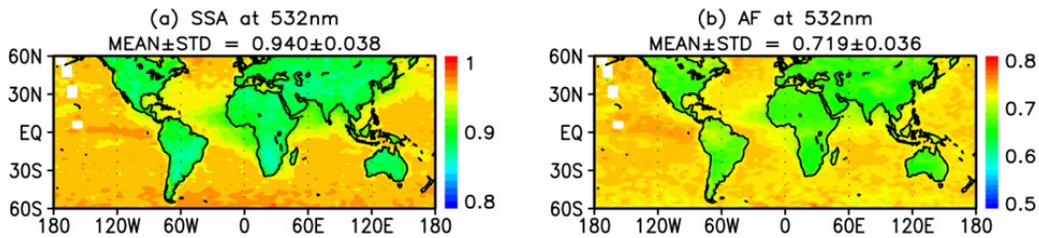


Fig. 2 Annual means of single-scattering albedo (SSA) at 532 nm (a), and asymmetry factor (AF) at 532 nm (b). “MEAN±STD” indicates global mean and standard deviation.

ンド2 (841–876 nm) の散乱輝度データを使用した。CALIOP の2波長の減衰付き後方散乱係数によって、微小粒子（水溶性・光吸収性粒子）と粗大粒子（ダスト・海塩粒子）の鉛直分布を区別して推定することができる。また、偏光解消度のデータによって、非球形粒子（ダスト粒子）と球形粒子（海塩粒子）を分別することができる。一方で、水溶性粒子と光吸収性粒子を分別する独立したライダーの観測データはない。このため、光吸収性粒子の光学的厚さは水溶性粒子よりも小さい、等の先見的な知識を元にした拘束条件を設けることで、光吸収性粒子が取り得る範囲を制限した上で推定した。CALIOP と MODIS の4波長の波長依存性によって、微小粒子（水溶性・光吸収性）と粗大粒子（ダスト）の粒径を推定することができる¹³⁾。

Fig. 1 に、推定された各粒子の光学的厚さと消散係数の2010年の年平均値を示す。Fig. 1の等値線の色に対する値の範囲は、図によって異なるので注意してほしい。太陽を光源としたMODISの観測では、極夜のある極域付近での通年観測は望めない。このため、解析範囲を南緯60度から北緯60度に限定している。この領域内での全エアロゾルの光学的厚さの年平均値は0.155となり、その内、水溶性粒子が0.075で約半分を占めた。光吸収性、ダスト、海塩粒子は同程度で0.025から0.028となった。水溶性粒子の光学的厚さの水平分布は、アフリカ大陸から東アジアにかけて大きな値を持っていた。特に、南アジアと東アジアでは、0.5に上がった。光吸収性粒子は、アフリカの中南部、南アジア～東アジアで大きかった。これらの水溶性粒子と光吸収性粒子の分布は、人為起源エアロゾルの排出源や森林火災が頻発する地域と概ね一致する。ダスト粒子は、北アフリカ、西アジア、南アジア、東アジアの砂漠域を中心に広がっていた。海塩粒子は、海上全体に概ね様に分布していた。消散係数の鉛直分布は、最大高度が約4kmで、高度1km以下の大気境界層内で大きな値を示していた。緯度毎に見ていくと、水溶性・光吸収性粒子は、全緯度帯に分布しているが、特に、赤道から北緯30度の緯度帯で大きかった。水溶性粒子は、南緯60度から40度の緯度帯でも比較的大きな値となった。これは海上の観測データからの推定値を主に反映しており、海洋由来の硫酸塩や有機物、小さい粒径の海塩を捉えたものと考えられる。ダスト粒子は、北緯10度から40度あたりに集中して分布していた。海塩粒子は、全ての緯度帯で高度1km以下に集中していた。

これらの各粒子の推定値を用いて、全エアロゾルの一次散乱アルベドと非対称因子を計算することができる (Fig. 2)。一次散乱アルベドは、全球平均で0.94であった。海上の一次散乱アルベドは、海塩粒子と水溶性粒子が多く存在するため、0.90～1.00となった。陸上では、光吸収性粒子とダストによって値が下がり、0.85～0.95となっていた。海上の非対称因子は、大きい粒径を持つ海塩粒子によって0.7を超える値を持っていた。一方、陸上では、微小粒子と粗大粒子の両方があるため、0.6から0.7の値を取っていた。

3. エアロゾル—放射相互作用による放射強制力

解析結果のエアロゾルの光学的厚さ、一次散乱アルベド、非対称因子（位相関数）を大気放射伝達モデルに入力することで、太陽波長帯における放射収支を計算することができる。エアロゾルの放射影響を評価する際には、放射強制力という物理量が用いられる。放射強制力とは、気候に影響を与える因子が存在する場合と存在しない場合の正味の放射フラックスの差で表される。ここでは、エアロゾルの各粒子が存在する場合と存在しない場合の放射計算を行い、その差によって直接効果による放射強制力を見積もった。なお、IPCC等で参照される放射強制力は現在気候と産業革命以前の状態の差から見積もった人為起源エアロゾルによる放射強制力であり、本稿の定義とは異なることに注意されたい。Fig. 3の左列は、大気上端での放射強制力を示しており、負の値はエアロゾルが気温を下げる影響を持つことを意味する。Fig. 3の等値線の色

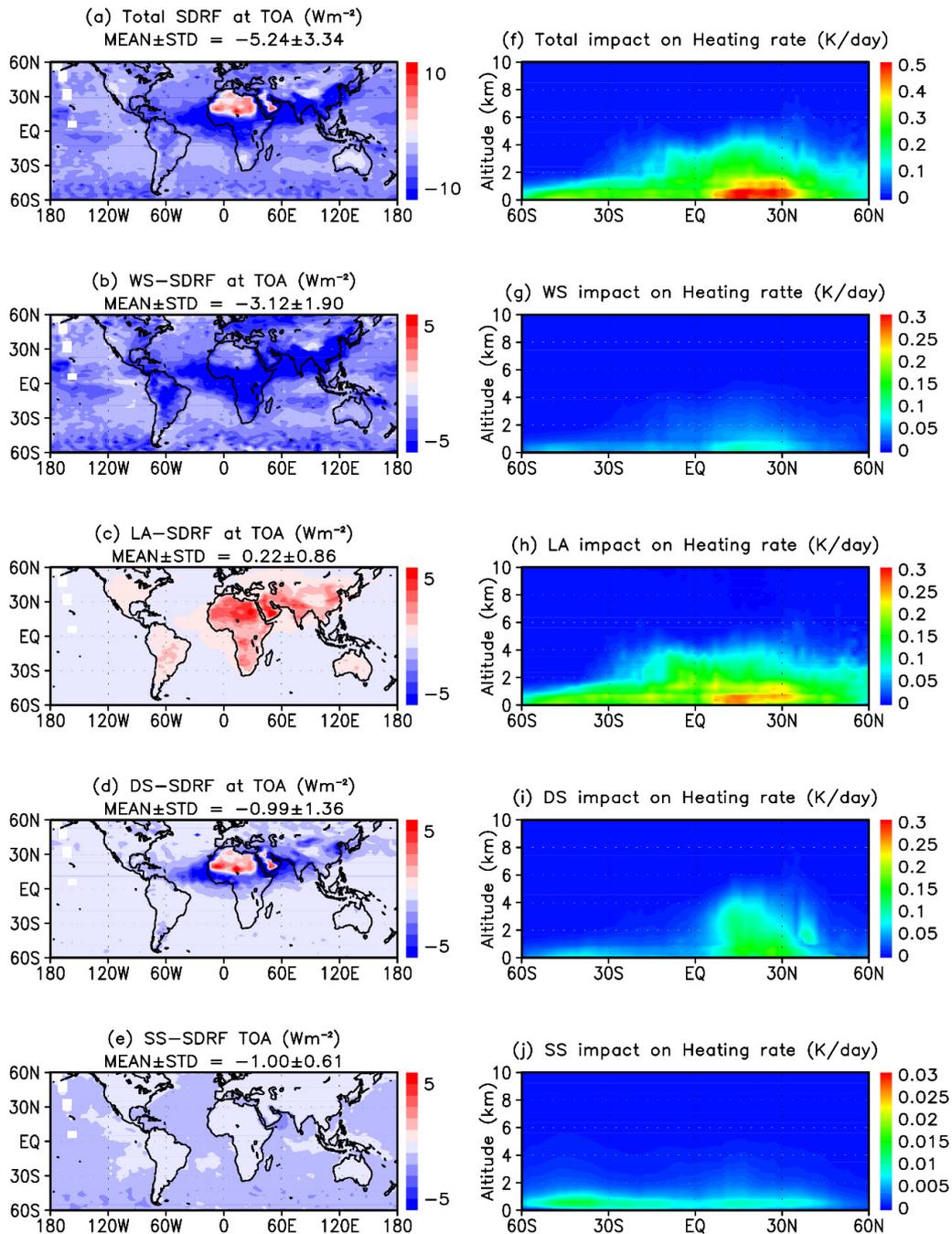


Fig. 3 Left panels are annual means of shortwave direct radiative forcing (SDRF) of total aerosols (a), water-soluble (WS) (b), light-absorbing (LA) (c), dust (DS) (d), and sea salt (SS) (e) particles for the net downward radiative flux density at the top of the atmosphere (TOA). Right panels are zonal means of impacts of total aerosols (f), WS (g), LA (h), DS (i), and SS (j) particles on the shortwave heating rate. "MEAN \pm STD" indicates global mean and standard deviation. Note that each panel has a different range of contour values.

に対する値の範囲は、図によって異なるため注意してほしい。粒子ごとに見ていくと、水溶性粒子は、全域で負の放射強制力を持ち、全球平均値は $-3.12 W/m^2$ であった。海塩粒子も全海上で負の値を持ち、平均値は $-1.00 W/m^2$ であった。光吸収性粒子は、ほぼ全域で正の放射強制力を示し、平均で $+0.22 W/m^2$ であった。ダスト粒子は、概ね負の放射強制力を持っており、平均値は $-0.99 W/m^2$ であった。しかし、北アフリカや西アジアの砂漠域では正の放射強制力を持っていた。これは、高い反射率を持つ砂漠域の上空にダスト

が滞留し、地表面からの反射光を吸収したためである。これらの結果、全エアロゾルの全球平均は -5.24 W/m^2 、ほぼ全域で負の値を持っていたが、北アフリカの砂漠域では光吸収性粒子とダスト粒子の影響により、正の値となっていた。Fig. 3の右列は、各粒子が散乱・吸収によって短波(300~3000 nm)放射の加熱率に与える影響を示している。エアロゾルが吸収する光のエネルギーはそのまま大気の加熱に使われる。このため、光吸収性粒子の消散係数は最も小さかったが(Fig. 1h)、加熱率への影響は最も大きく、 0.25 K/day に達していた。このように、光吸収性エアロゾルは、他の要素と比べて特異な影響を放射収支、そして、気象場へ与えるため、重要な研究対象となる。

4. 今後の衛星搭載ライダー計画

上述のような解析手法で数十年規模の長期データを解析することができれば、地球温暖化問題におけるエアロゾルの影響に関して理解を深めることが期待できる。CALIPSO衛星は、2006年に打ち上げられ、現在まで16年以上運用を続けられてきた。その後継として、2023年にEarthCARE衛星¹⁴⁾の打ち上げが予定されている。EarthCARE衛星には、高波長分解能ライダー(ATLID)、ミリ波ドップラーレーダー(CPR)、多波長イメージャ(MSI)、3方向広波長帯放射計(BBR)が搭載される。ATLIDは、355 nmの消散係数とライダー比を分離して測定することができるため、より正確にエアロゾルを定量化できると期待されている。EarthCARE衛星の後には、NASA主導のAOS(Atmospheric Observing System)ミッション¹⁵⁾による衛星群の計画が進められている。このミッションでは、エアロゾル、雲、対流、降水プロセスを解明することが目的とされ、エアロゾルと雲を観測するためのライダーが搭載される予定である。

引用文献

- 1) 岩坂泰信, “気象のABC: エアロゾル,” 日本気象学会機関誌天気, **59** (12), 29–32 (2012).
- 2) IPCC 6th Report. P. A. Arias, N. Bellouin, E. Coppola, R. G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M. D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, et al., “Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. I., et al. (ed.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144 (2021), doi:10.1017/9781009157896.002.
- 3) 気象庁, “エアロゾル: 大気混濁係数とエアロゾル光学的厚さの経年変化,” https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol_shindan.html (Accessed 2022.10.11).
- 4) T. C. Bond and R. W. Bergstrom, “Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review,” *Aerosol Science and Technology*, **40** (1), 27–67 (2006), <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>.
- 5) R. Kudo, T. Aoyagi, and T. Nishizawa, “Characteristics of aerosol vertical profiles in Tsukuba, Japan, and their impacts on the evolution of the atmospheric boundary layer,” *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 3031–3046 (2018), <https://doi.org/10.5194/amt-11-3031-2018>.
- 6) A. Higurashi and T. Hakajima, “Development of a two-channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAA AVHRR,” *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924–941 (1999).
- 7) A. H. Omar, D. M. Winker, C. Kittaka, M. A. Vaughan, Z. Liu, Y. Hu, C. R. Trepte, R. R. Rogers, R. A. Ferrare, K.-P. Lee, R. E. Kuehn, and C. A. Hostetler, “The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm,” *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**, 1994–2014 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>.
- 8) R. Kudo, T. Nishizawa, A. Higurashi, and E. Oikawa, “Remote sensing of aerosols by synergy of CALIOP and MODIS,” *Proc. 28th International Laser Radar Conference*, **176**, 950–953 (2018), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817608012>.
- 9) M. Hess, P. Koepke, and I. Schult, “Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **79**, 831–844 (1998).
- 10) M. Kahnert, T. Nousiainen, and H. Lindqvist, “Models for integrated and differential scattering optical properties of encapsulated light absorbing carbon aggregates,” *Opt. Express*, **21**, 7974–7933 (2013), <https://doi.org/10.1364/OE.21.007974>.
- 11) H. Ishimoto, Y. Zaizen, A. Uchiyama, K. Masuda, and Y. Mano, “Shape modeling of mineral dust particles for light-scattering calculations using the spatial Poisson-Voronoi tessellation,” *J. Quant. Spectroscop. Radiat. Transfer*, **111** (16), 2434–2443 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.06.018>.
- 12) D. J. Erickson III and R. A. Duce, “On the global flux of atmosphere sea salt,” *J. Geophys. Res.*, **93**, 14079–14088 (1988), <https://doi.org/10.1029/JC093iC11p14079>.
- 13) Y. J. Kaufman, D. Tanré, J.-F. Léon, and J. Pelon, “Retrievals of profiles of fine and coarse aerosols using lidar and radiometric space measurements,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41** (8), 1743–1754 (2003), doi:10.1109/

TGRS.2003.814138.

- 14) A. J. Illingworth, H. W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux, J. Cole, J. Delanoë, C. Domenech, D. P. Donovan, et al., "The EarthCARE satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation," *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **96**, 1311–1332 (2015), <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1>.
- 15) NASA, "Atmosphere Observing System," <https://aos.gsfc.nasa.gov/home.htm> (Accessed 2022.10.11)

工藤 玲

2001年3月北海道大学理学部地球物理学科卒業，2003年3月同大学大学院地球環境科学研究所大気海洋圏環境科学専攻中退，2011年3月同大学大学院地球環境科学院にて博士号（環境科学）取得．2003年4月気象庁新潟地方気象台，2005年4月同庁気象研究所，現在に至る．大気放射学を専門にし，エアロゾル・雲の地上・衛星リモートセンシング手法の開発と，大気放射収支への影響に関する研究に従事する．日本気象学会，米国地球惑星科学連合に所属．