

CALIOP-MODIS 複合解析によるエアロゾル組成の長期変動

工藤 玲¹, 日暮 明子², 及川 栄治¹, 藤川雅大³, 西澤 智明²

¹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宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

Long-term change in aerosol composition derived from CALIOP and MODIS observations

Rei KUDO¹, Akiko HIGURASHI², Eiji OIKAWA¹, Masahiro Fujikawa³, and Tomoaki NISHIZAWA²

¹Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

²National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

³Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

Abstract: Aerosols have a significant impact on the climate change. Since the sign of the radiative forcing of aerosols depends on the aerosol composition, it is important to observe the spatiotemporal changes in aerosol composition. We developed a synergistic method to retrieve aerosol composition from the CALIPSO-CALIOP and Aqua-MODIS observations. The method assumes that aerosols consist of four components: water-soluble, light-absorbing, dust, and sea-salt particles. The vertical profiles of the volume concentration of each particle, and the median radii of the fine and coarse particles are optimized to the CALIOP and MODIS observations. The extinction coefficients of each component are obtained from the optimized volume concentrations and median radii. The CALIOP and MODIS observations from 2007 to 2021 were analyzed to determine the linear trends of each component. The results showed the decrease trend for water-soluble particle in East Asia, and for dust particle in West Asia.

Key Words: Aerosol composition, Space-borne lidar

1. はじめに

エアロゾルは、太陽・地球放射を散乱・吸収することで、大気放射収支を変動させる。そして、気候変動に大きな影響を与える。地球温暖化におけるエアロゾルの影響評価では、ほとんどの種類のエアロゾルは、負の放射強制力を持つとされている。しかし、光吸収性が強い黒色炭素粒子は、正の放射強制力を持つとされている。このため、エアロゾル組成の時空間変動を観測することが、重要とされる。しかし、エアロゾルが大気中で滞留する時間は、1日~2週間程度であり、多種多様な排出源を持つため、時空間変動が大きい。このため、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難しい。これらのことから、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。

衛星リモートセンシングは、エアロゾルの全球規模の時空間変動を把握するための重要な観測手法である。Terra/Aqua 衛星に搭載された多波長分光イメージャの MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) から、エアロゾルの光学的厚さ (消散係数の鉛直積算値) の全球分布が得られる。光学的厚さの地上観測による検証では、概ね整合的な値が導出されている¹⁾。しかし、地表面反射の影響を強く受けるため、雪氷や砂漠の地表面反射率の高い場所では推定が困難になる。また、鉛直分布を観測することはできない。衛星搭載ライダーは、地表面反射の影響を受けず、エアロゾルの鉛直分布を観測することができる。CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 衛星に搭載された CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) は、2006年に打ち上げられ、現在に至るまで18年近く運用を続けられてきた。このデータを解析することで、エアロゾルの全球三次元分布の長期変動を調べることが可能である。しかし、CALIOP のデータは、雲や高濃度エアロゾルより下層ではノイズが大きくなり、解析が困難になる。このため、エアロゾルの光学的厚さ (消散係数の鉛直積算値) を過小評価する傾向にある²⁾。

MODIS と CALIOP のデータは、それぞれ一長一短あるが、短所を補い合うことが可能である。本研究では、MODIS と CALIOP のデータを複合的に扱い、エアロゾル組成の鉛直分布を導出するリモートセンシング手法を開発した³⁾。そして、CALIOP と Aqua-MODIS の 2007年から2021年のデータを解析し、エアロゾル組成の長期的な変動傾向を解析した。

2. データと解析手法

本研究では、CALIOP の 532nm と 1064nm の減衰付き後方散乱係数、532nm の偏光解消度を使用した。また、雲の影響を受けたデータを取り除くために、CALIPSO L2 プロダクトの Vertical Feature Mask を使用した。Aqua 搭載 MODIS は、バンド 1 (620~670nm) とバンド 2 (841~876nm) の放射輝度のデータ (MYD02SSH) を使用した。CALIOP とマッチアップのために、CALIPSO 衛星直下周囲 10km の範囲内で雲の影響を受けていないデータを選択した。雲の判別には、MODIS L2 プロダクトの雲プロダクト (MYD35_L2) を使用した。さらに、解析に必要な MODIS L2 プロダクトの地表面反射率のデータ (MCD43C3) を使用した。

本研究の手法³⁾では、まず、大気中のエアロゾルが、粒径と光吸収性の異なる 4 種類のエアロゾル (水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子) から成ると仮定する。水溶性粒子は、水溶性の硫酸塩、硝酸塩、有機物などの外部混合粒子を仮定した OPAC⁴⁾ の粒子モデルを引用した。光吸収性粒子は、黒色炭素の周囲に水溶性粒子を被覆させた Core gray-shell モデルの内部混合粒子を仮定する。ダスト粒子は、唯一非球形性の粒子モデルとして Voronoi aggregate モデル⁵⁾ を使用した。海塩粒子は、OPAC の粒子モデルを引用した。各粒子の複素屈折率は、OPAC などの文献から引用した。水溶性粒子と海塩粒子は光吸収性が弱く、光吸収性粒子とダストは光吸収性が強い。各粒子の粒径分布は、対数正規分布を仮定する。水溶性粒子と光吸収性粒子は微小粒子 (半径 0.1 μm オーダー) で、ダストと海塩粒子は粗大粒子 (半径 1 μm オーダー) である。

これらの粒子の体積濃度の鉛直分布と微小粒子 (水溶性粒子と光吸収性粒子) のモード半径と粗大粒子 (ダスト) のモード半径を、CALIOP と MODIS の観測値に同時に最適化することで、各組成の鉛直分布を導出する。モード半径の鉛直分布は考慮しない。海塩粒子のモード半径は、海上風速によるパラメタリゼーション⁶⁾ によって決定する。また、海塩粒子は海上のみに存在すると仮定し、陸上では他の 3 種類のみを推定する。最適化された各粒子の体積濃度の鉛直分布とモード半径から、各粒子の消散係数の鉛直分布が得られる。

CALIOP-MODIS 複合解析によって得られた 4 種類の粒子の消散係数と光学的厚さの結果から、経度 5 度、緯度 2 度、鉛直 120m の解像度で、全球分布の年平均値のデータセットを作成した。そして、各グリッドにおける 4 種類の粒子それぞれの消散係数と光学的厚さの 2007 年から 2021 年の線形トレンドを解析した。

3. 結果

Figure 1 は、全粒子と各粒子の光学的厚さの 2007 年から 2021 年の平均値を示している。532nm の光学的厚さの全球平均値は 0.144。この値は、CALIOP と MODIS の NASA の公式プロダクトの間にあり、MODIS の結果に近い値になる。また、全球三次元分布も概ね整合的である。各組成は、水溶性粒子が最も大きく、全粒子の半分ほどを占めている。残りの 3 種類は概ね同程度の値になっている。各粒子の光学的厚さの全球分布を、MERRA-2 再解析データ⁷⁾などの先行研究と比較すると、概ね整合的な分布を示していた。

Figure 2 は、全粒子と各粒子の光学的厚さの線形トレンドを示している。全粒子の光学的厚さは、全球規模では 10 年で 0.0053 の減少傾向にあるが、顕著な傾向とは言えない。しかし、領域スケールで調べると、東アジア、西アジアで原著な減少傾向にある。その内訳をみると、東アジアでは水溶性粒子が、西アジアではダスト粒子の減少が原因であることが分かった。これらの領域の時系列と様々な先行研究を調べたところ、中国では 2013 年と 2017 年に硫酸塩や PM に対する規制が強化されており⁸⁾、それと整合的な変動を示していた。西アジアでは、解析期間の前半の 2007 年から 2012 年頃に、干ばつが原因で大幅にダストが増えた時期があった⁹⁾。このため、ダストの減少傾向が現れていたことが分かった。

4. まとめ

CALIOP と MODIS のデータから、エアロゾル組成を導出する複合解析手法を開発した。2007 年から 2021 年のデータを解析して得られた水溶性、光吸収性、ダスト、海塩粒子の全球三次元分布は、先行研究と整合的な結果を示した。同期間のグリッド毎の線形トレンドを解析したところ、全球規模では顕著なトレンドは見られなかったが、東アジアでは水溶性粒子、西アジアではダスト粒子の顕著な減少傾向が見られた。これらの結果は、中国の環境規制や、西アジアの干ばつと整合的な結果であることが分かった。以上のことから、本研究の解析手法は、全球エアロゾルのモニタリングに有効な手法であることが示された。

参考文献

- 1) Shi, H., Xiao, Z., Zhan, X., Ma, H., and Tian, X.: Evaluation of MODIS and two reanalysis aerosol optical depth products over AERONET sites, *Atmos. Res.*, 220, 75-80, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.009> (2019).
- 2) Kim, M.-H., Omar, A. H., Tackett, J. L., Vaughan, M. A., Winker, D. M., Trepte, C. R., Hu, Y., Liu, Z., Poole, L. R., Pitts, M. C., Kar, J., and Magill, B. E.: The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 6107-6135, <https://doi.org/10.5194/amt-11-6107-2018> (2018).

- 3) Kudo, R., Higurashi, A., Oikawa, E., Fujikawa, M., Ishimoto, H., and Nishizawa, T.: Global 3-D distribution of aerosol composition by synergistic use of CALIOP and MODIS observations, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/amt-2023-59>, in review (2023).
- 4) Hess, M., Koepke, P., and Schult, I.: Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 831–844 (1998).
- 5) Ishimoto, H., Zaizen, Y., Uchiyama, A., Masuda, K., and Mano, Y.: 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, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.06.018> (2010).
- 6) Erickson III, D. J., and Duce, R. A.: On the global flux of atmosphere sea salt, *J. Geophys. Res.* 93, 14079–14088, <https://doi.org/10.1029/JC093iC11p14079> (1988).
- 7) Korras-Carraca, M-B., Gkikas, A., Matsoukas, C., and Hatzianastassiou, N.: Global clear-sky aerosol speciated direct radiative effects over 40 years (1980–2019), *Atmosphere*, 12, 1254, <https://doi.org/10.3390/atmos12101254> (2021).
- 8) Li, W., Shao, L., Wang, W., Li, H., Wang, X., Li, Y., Li, W., Jones, T., and Zhang, D.: Air quality improvement in response to intensified control strategies in Beijing during 2013–2019, *Sci. Total Environ.*, 744, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140776> (2020).
- 9) Hamzeh, N.H., Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., and Mohammadpour, K.: Long-term variability of dust events in southwestern Iran and its relationship with the drought, *Atmosphere*, 12, 1350, <https://doi.org/10.3390/atmos12101350> (2021).

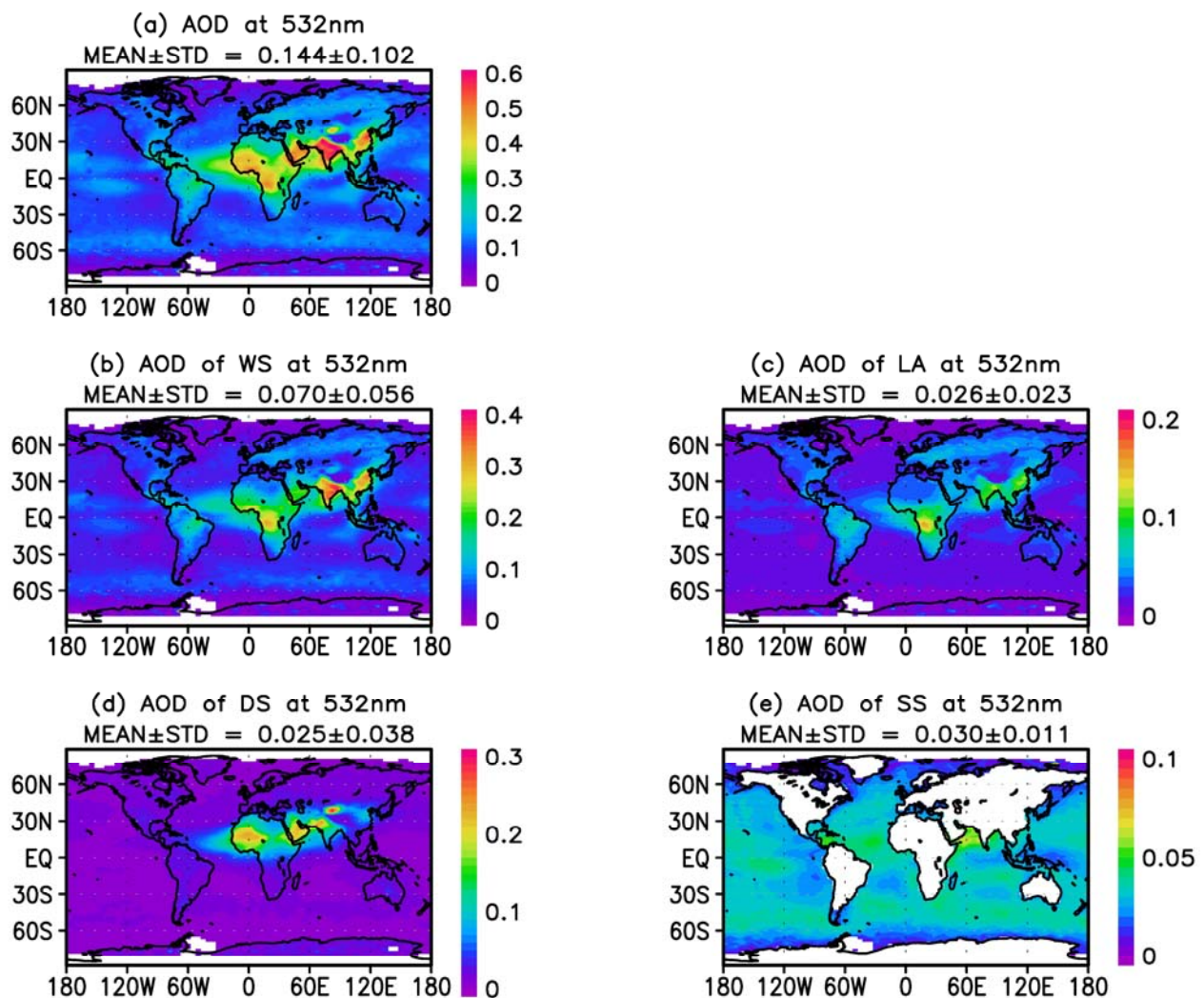


Figure 1. Means of AOD in the period from 2007 to 2021 for (a) total, (b) water-soluble, (c) light-absorbing, (d) dust, and (e) sea-salt particles. “MEAN±STD” indicates the global mean and standard deviation.

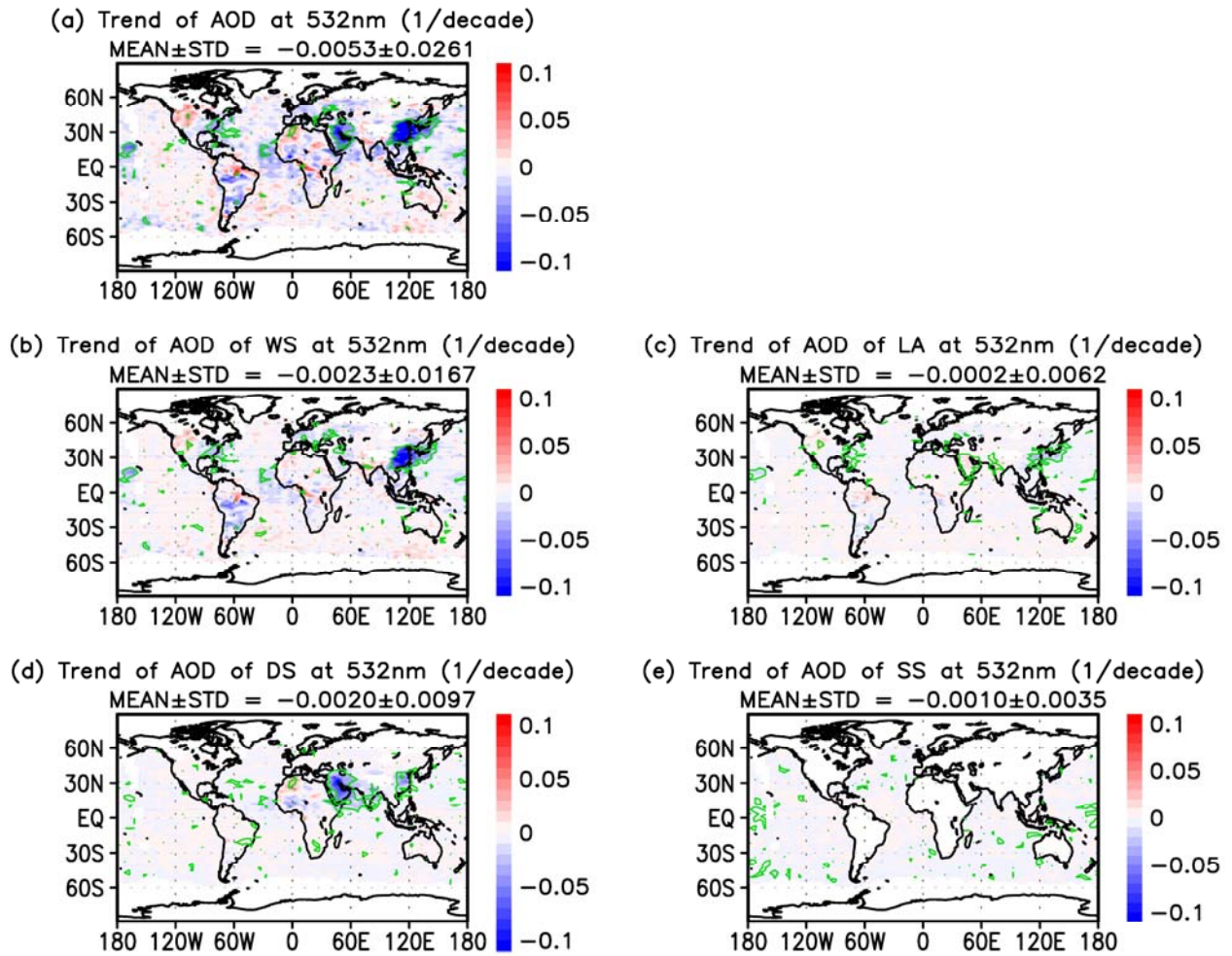


Figure 2. Linear trends of AOD in the period from 2007 to 2021 for (a) total, (b) water-soluble, (c) light-absorbing, (d) dust, and (e) sea-salt particles. “MEAN±STD” indicates the global mean and standard deviation of trends. Green contour indicates the significance level of 95 % by *t*-test.