

富士山体を利用したスカイラジオメータによるエアロゾルの鉛直分布観測

桃井裕広¹, 新沼拓², 青木一真³, 森樹大², 鴨川仁⁴, 大河内博⁵, 入江仁士¹, 三浦和彦², 中島映至⁶
1.千葉大学, 2.東京理科大学, 3.富山大学, 4.静岡県立大学, 5.早稲田大学, 6.宇宙開発研究機構

1. はじめに

エアロゾルには太陽光を直接散乱・吸収する直接効果と雲凝結核として放射特性を変化させる間接効果があり、地球の放射バランスに影響を与えている。しかしこれらの影響力は不確実性が大きく、化学組成や生成過程が多様であること、時間および空間依存性が大きいことなどに起因している(IPCC 2013, e.g. 直接効果の放射強制力: $-0.23 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$)。空間依存性を調べるためには多地点での観測が必要であり、富士山麓でもスカイラジオメータを用いた観測が行われた¹⁻⁵⁾。富士山は山頂が自由対流圏に位置しており、山麓と山頂(夏季のみ)の両地点でその場観測が行われている。本研究では、従来の両地点におけるその場観測に加えて、夏季に富士山頂および山麓でリモートセンシング装置による同時観測を実施した。

2. 観測

静岡県御殿場市に位置する富士山麓太郎坊(35.33N, 138.80E, 1290 m a.s.l.)においてスカイラジオメータ(POM-02, Prede Co., Ltd.)による放射観測を2014年7月から2019年8月に行った。富士山麓は御殿場の市街地から離れており局地的な汚染を受けにくい。また、富士山麓ではスカイラジオメータによる放射観測に加えて、光散乱式粒子計数器(OPC, KC01E, RION Co., Ltd.)によりその場のエアロゾル粒径分布を測定した。エアロゾルの吸湿成長による粒径分布のシフトを避けるために拡散ドライヤーを用いて相対湿度を35%以下に保持した。また、2019年は夏季(7月25日から8月22日)に限り富士山頂(35.21N, 138.43E, 3776 m a.s.l.)でもOPCとスカイラジオメータによる観測を実施した。

スカイラジオメータの観測は、340, 380, 400, 500, 675, 870, 1020 nmの波長について太陽直達光照射度(DSI, F)および天空輝度(DR, L)分布を測定している。地球に散乱体がない場合の直達光照射度(CC, F_0)を決定し、エアロゾル以外の空気分子によるRayleigh散乱、オゾンなどの吸収体による光吸収(τ_{Rayleigh} , τ_{Ozone})を差し引くことで、DSIからエアロゾルの光学的厚さ(AOT, τ)；

$$\tau = \ln(F/F_0)/m_0 - \tau_{\text{Rayleigh}} - \tau_{\text{Ozone}} \quad (1)$$

を求めた。また、AOTの波長依存性；

$$\ln(\tau) = -\alpha \times \ln(\lambda) + \beta \quad (2)$$

からオングストローム指数(AE, α)を算出した。AEは1を指標にして値が大きいほど微小粒子が卓越し、小さいほど粗大粒子が卓越することを表している。

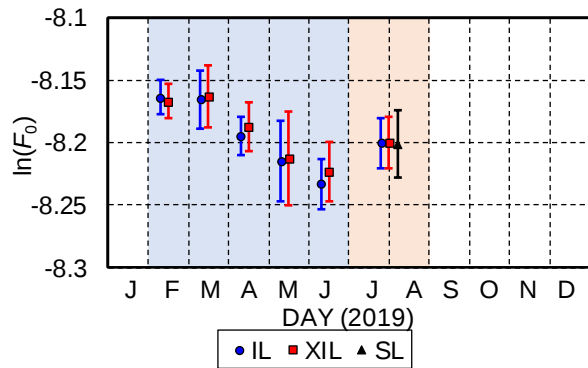


図1：PS2501401の500 nmの F_0 の季節変化。
2月～6月：東京神楽坂，7月～8月：富士山頂。

一方、DRを用いて逆問題を解くことで、エアロゾルの複素屈折率(CR)とエアロゾルの粒径分布(VSD)を決定した。本研究ではDSIの解析にはDSRAD⁶⁾を、DRを用いた逆問題の解析にはSKYRAD.packシリーズ⁷⁾を用いた。

3. 結果・考察

本研究は富士山麓・山頂におけるリモートセンシング観測を実施することで富士山体のエアロゾルの鉛直分布を観測することを試みた。そのため、はじめに富士山頂での装置のキャリブレーションを実施してCCを決定した(3.1節)。次に、富士山頂におけるDSIによる解析、DRを用いた逆問題の解析を実施した(3.2節)。最後に富士山麓および富士山頂における鉛直分布観測を解析した(3.3節)。

3.1. 富士山頂における F_0 の決定

通常、太陽を光源とした分光放射計は式1を用いて、AOTが小さく、一定であるような状況下でキャリブレーションが行われる(標準ラングレー法, SL法)。スカイラジオメータはDSI・DR比(NR, R)；

$$R = L/F/m \quad (3)$$

を用いることでセンサー感度に依存せず、大気の大気物理量のみで決まる値に規格化することができる⁷⁾。また、太陽近傍のNRはVSDの情報が支配的であるため、VSDについて逆問題の解析をすることでエアロゾルの光学特性が変化するような大気下でも装置のキャリブレーションを行うことができる改良ラングレー法(IL法)やクロス改良ラングレー法(XIL法)が開発されている⁷⁻⁹⁾。

図1はSL法、IL法およびXIL法を用いて月ごとに決定

した 500 nm の CC の値を示す。IL 法および XIL 法によって CC を計算するにあたり、VSD の推定には SKYRAD.pack Version 4.2 (V42) ⁷⁾ を用いた。富士山頂では 7 月と 8 月のデータを用いて検定した。富士山頂で使用した装置 (S/N PS2501401) は 2019 年 2 月から 6 月まで東京神楽坂 (35.70N, 139.74E) で大気観測を行っていた。東京神楽坂における CC の季節変動は受光部の温度特性などによるものであると考えられる。また、IL 法によって決まる CC は XIL 法によって決まる CC よりも値が小さくなった。これは IL 法における統計的な手法の誤りによるものであると考えられる ⁸⁾。2019 年 6 月の CC と 7, 8 月の CC は顕著に異なっており、2019 年 6 月の CC の方が小さい。これは、装置の運搬による光学系の変化や、設置環境 (周辺気温や気圧) の違いが原因として考えられる。そのため、スカイラジオメータを用いた観測は装置のその場校正が必要であることを示唆しており、自己校正手法の重要性を裏付けるものである。富士山頂では、大気が安定していた日に DSI を用いて SL 法による検定を実施した。それぞれの手法で決定した CC は SL 法では $\ln(F_0) = -8.201 \pm 0.027$, IL 法では $\ln(F_0) = -8.200 \pm 0.020$, XIL 法では $\ln(F_0) = -8.200 \pm 0.021$ であり、どの手法においても近い値が得られた。これにより、自己校正法である IL 法と XIL 法の精度が高いことが富士山頂においても確認された。

3. 2. 富士山頂の光学特性の観測

3. 1 節で XIL 法によって決定した CC を用いて DSI から 500 nm における AOT を算出した ¹⁰⁾。次に、NR から富士山頂における CR と VSD の解析を試みた。SKYRAD.pack シリーズは放射伝達モデルに平行平板大気モデルを用いているため、 $m_0 < 3$ のデータを用いた。V42 による逆問題の解析を行い、NR と DSI の再現度を表す平均平方二乗誤差率 (RMSPE) を用いて解析精度を評価した (図 2)。太陽近傍の NR のみを用いた VSD のみの逆問題の解析 (L0 解析) では、RMSPE は 0.056 ± 0.028 であったが、全散乱角の NR と DSI を用いた CR と VSD の逆問題の解析 (L1 解析)

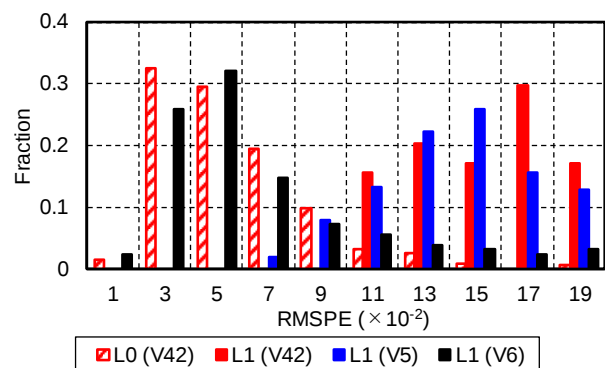


図 2：富士山頂の観測データについて SKYRAD.pack で解析したときの RMSPE.

では、RMSPE が 0.152 ± 0.027 と NR の再現度が悪くなった。また、SKYRAD.pack Version 5 (V5) ⁹⁾ でも L1 解析では RMSPE は 0.142 ± 0.030 であった。これは、V42 と V5 の L1 解析は CC と DSI から得られる AOT について最適化を行い、AOT が低い大気において誤差の扱いが不十分であったことが原因であると考えた。そこで、CC の決定誤差を考慮した逆問題の解析手法 SKYRAD.pack Version 6 beta 版 (V6) を開発して解析したところ、L1 解析において RMSPE は 0.066 ± 0.042 となり大幅に改善した。

3. 3. 富士山体を用いた鉛直分布観測

富士山麓および山頂における同時観測を実施した (新沼ら ¹⁰⁾ 参照)。

4. まとめ

本研究では高高度に存在するエアロゾルの光学特性への理解を深めるために、富士山頂においてスカイラジオメータによる観測に挑戦した。まず、装置のその場校正を実施して標準的な方法 (SL 法) とスカイラジオメータ独自の方法 (IL 法, XIL 法) とを比較することで IL, XIL 法の有用性を確認した。次に、富士山頂でのエアロゾルの光学特性を解析し、従来の解析手法 (V42, V5) では富士山頂の大気状態を再現できないことがわかった。また、観測誤差の扱いを変更した V6 では再現率が向上し、エアロゾルの少ない富士山頂でのエアロゾルの光学特性の解析を可能にした。今後 V6 を用いて富士山頂におけるエアロゾルの光学特性を調べる。

謝辞

本研究の一部は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれた。また、本研究の一部は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」の学生公募 (S02, 2019 年度) の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 中原ら (2014). 第 7 回成果報告会講演予稿集, 36-37.
- 2) 中原ら (2015). 第 8 回成果報告会講演予稿集, 35-36.
- 3) 橋口ら (2016). 第 9 回成果報告会講演予稿集, 50-51.
- 4) 桃井ら (2017). 第 10 回成果報告会講演予稿集, 51-52.
- 5) 桃井ら (2018). 第 11 回成果報告会講演予稿集, 50-51.
- 6) Momoi et al. (2019). *AMTD*, in review.
- 7) Nakajima et al. (1996). *Appl. Opt.*, **35**, 2672-2686.
- 8) Nakajima et al. (2020). *AMTD*, to be submitted.
- 9) Hashimoto et al. (2012). *AMT*, **5**, 2723-2737.
- 10) 新沼ら (2020). 第 13 回成果報告会講演予稿集.