

多波長ラマンライダーとスカイラジオメーター観測に基づく エアロゾルの微物理量と放射強制力—シベリア森林火災起源の事例—

Microphysical properties and radiative forcing of aerosol based on observations by
multi-wavelength Raman lidar and skyradiometer - Case of Siberian forest-fire smoke -

村山 利幸¹, 関口 美保¹, Detelf Müller², 齋藤 泰治¹, 和田 勝也¹

Toshiyuki Murayama, Miho Sekiguchi, Detelf Müller², Yasuharu Saito, Katsuya Wada

¹東京海洋大学・海洋工学部, ²Institute for Tropospheric Research

¹ Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract: We observed a huge smoke event originated from Siberian forest fires with multi-wavelength Raman lidar and skyradiometer in Tokyo on May 21-22, 2003. We found that the lidar ratio at 355nm is considerably smaller than that at 532nm for the elevated aerosol layer. We applied an inversion method to the obtained lidar dataset (3 backscatter and 2 extinction coefficients) and derived height-resolved aerosol micro-physical properties. The results indicate accumulation-mode dominant size distribution and low absorption: the effective radius and the single scattering albedo are 0.2 μ m and 0.95, respectively. These are almost consistent with those obtained by the collocated skyradiometer. Using these results, we simulated the aerosol direct radiative forcing and the heating rate.

1. はじめに

東アジア域では大陸からの大量・多様な人為起源及び自然起源エアロゾルが排出され、地球環境の将来に大きな影響を与えると考えられている。エアロゾルはその発生源と気象条件などによって輸送高度が異なり、層毎にエアロゾルの種類・性質が異なっていることが多い。我々は、エアロゾル層毎のより詳細な光学的特性や水蒸気による影響を観測する目的で多波長ラマンライダーを開発し、東京海洋大学越中島キャンパス (35.66°N, 139.80°E) において、定常的に対流圏エアロゾル及び水蒸気の観測を行っている[1]。(ラマンライダー以外に高スペクトル分解ライダーを用いる方法もあるが、技術的に難しくかつ多波長化が困難、水蒸気の同時観測が必要であるなど feasibility を考慮してラマンライダー手法を選択した。) ライダーシステムは Nd:YAG レーザーを2台用い、532/1064nm と 355nm のそれぞれのビームを用いた2系統のシステムから構成される[2]。このシステムにより、355, 532, 1064nm での後方散乱係数、355, 532nm での消散係数、532nm での偏光解消度、水蒸気混合比の鉛直分布の同時計測が可能である(2波長でのラマンライダーの設置・観測はアジア域で我々が最初である)。今までに2003年の春季に観測された黄砂及びロシア北東部森林火災からのスモークの観測結果を中心に報告してきた[3, 4]。ここでは、シベリア森林火災時の3波長での後方散乱係数と2波長での消散係数から正規化法を用いたインバージョン[5]によって得られたエアロゾルの微物理量とスカイラジオメーターから得られる気柱積算としての微物理量との比較、及びそれらに基づく放射強制力の試算について報告する。

2. シベリア森林火災起源エアロゾルの観測結果

2003年5月22日に、東北以北でシベリア森林火災起源と思われるエアロゾルにより日照が減少する状況が生じた(気象庁)。東京では21日から22日にかけて高度4km以下に濃度の濃いエアロゾルが観測された。高度2.5km以上で数%以上の偏光解消度を持つ顕著な層が見られた[4]。Fig. 1に約3時間積算したデータから得られた後方散乱係数、消散係数、粒子偏光解消度、オングストローム指数、ライダー比(消散-後方散乱係数比)、水蒸気混合比、相対湿度の各鉛直分布を示す(解析方法については[2-4]を参照)。高度1.8-4kmのエアロゾル層の光学的厚さは355nmと532nmでそれぞれ1.0及び0.7であり、オングストローム指数は約0.9である。また、平均の

ライダー比は 355nm と 532nm でそれぞれ 36 及び 51sr である。このライダー比の波長依存性は後でみるようにこの種のエアロゾルの特徴である蓄積(微小)モードが卓越していることと関連している。また、このエアロゾル層の相対湿度は 70%以上になっており、湿度も粒径や光学的性質に影響を及ぼしていると考えられる。

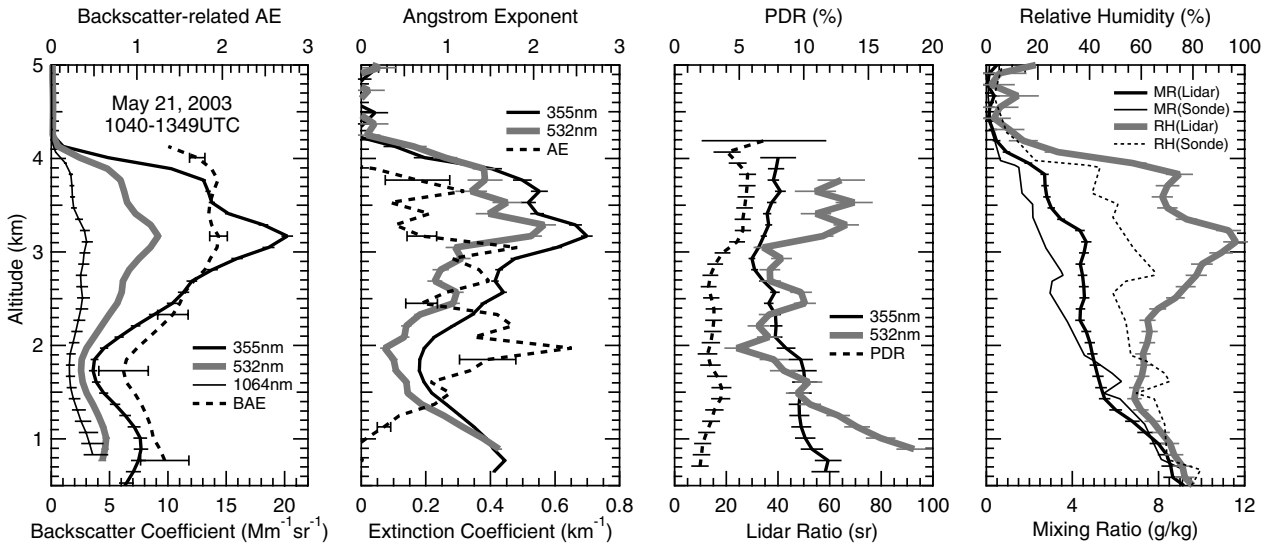


Fig. 1. Mean profiles of the aerosol optical properties, water-vapor mixing ratio and relative humidity during 1940 to 2149JST on May 21, 2003. Humidity data obtained by radiosonde at Tateno at 21JST are also indicated.

3. 多波長ラマンライダーから得られたエアロゾル微物理特性

Fig. 1 に示した後方散乱係数と消散係数にインバージョンを適用し、エアロゾルの粒径分布、屈折率を高度域毎に求め、有効半径 (r_{eff})、単位体積当りの表面積 (s) 及び体積濃度 (v)、単散乱アルベド (ssa) を求めた。例えば、高度 3-3.4km において $r_{\text{eff}}=0.22(\pm 0.04)\mu\text{m}$, $s=670(\pm 69)\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $v=49(\pm 10)\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, $ssa(532\text{nm})=0.95(\pm 0.06)$ という値が得られている。得られた有効半径と単散乱アルベドの鉛直分布を Fig. 2 に示す。また、高度 3-3.4km で得られた粒径分布を Fig. 3 に示す。ライダーと併設されたスカラジオメーター (Prede, POM-01) によって得られた日中の 1636JST の粒径分布を Fig. 3 に比較して示す。スカイラジオメーターの解析は skyrad.pack ver.4 を用いて行なった [6]。このときのスカイラジオメーターによる 500nm での単散乱アルベドは 0.95 である。どちらの観測でも蓄積モードが卓越しており、吸収が少ないことを示している。

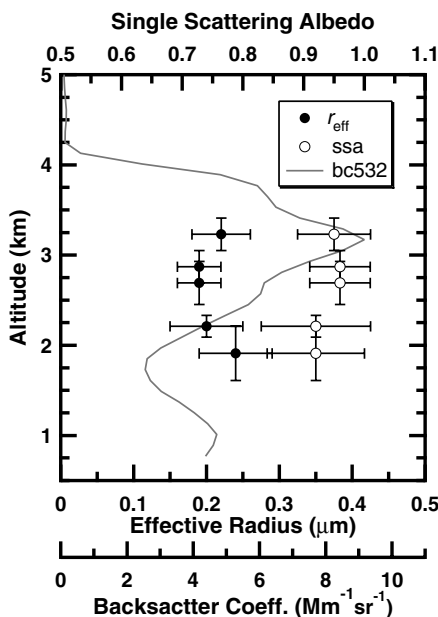


Fig. 2. Vertical variation of microphysical properties of aerosol retrieved from the Raman lidar data shown in Fig. 1.

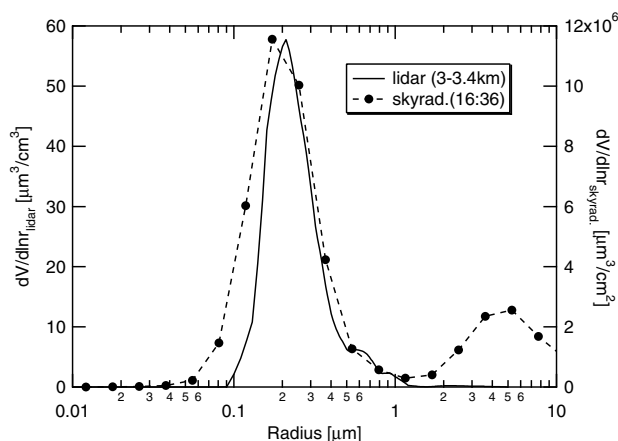


Fig. 3. Examples of volume size distribution retrieved from the Raman lidar data and the skyradiometer on May 21, 2003.

4. エアロゾル放射強制力の試算

ライダーによるエアロゾルの鉛直分布や微物理量を取り入れて放射強制力の計算をした例は少ない[7-9]。我々はラマンライダーの観測が夜間であることから、ミー散乱ライダーへの応用も考慮して、ライダーとスカイラジオメーターから得られた光学特性・微物理量を用い、放射強制力の計算を行った。放射伝達計算には東京大学気候システム研究センターで開発されたFSTAR5Cを用い、大気プロファイルは館野におけるゾンデデータ(21JST)を用いた。また、エアロゾルの光学的厚さ及び消散係数の鉛直分布はラマンライダーから得られた値(532nm, Fig. 2)を共通に用いたが、複素屈折率と粒径分布については次の2通りを考慮した。即ち、ライダーのインバージョンから得られた複素屈折率・粒径分布を用い高度依存性を与えるが(Fig. 2)、複素屈折率の波長依存性はないとした場合(以下 lidar と呼ぶ)と、粒径分布と複素屈折率はスカイラジオメーターから得られた日平均値を用い、高度依存性はないが複素屈折率の波長依存性を持つとした場合(skyrad と呼ぶ)である。ここでは、これらの時間依存性は考慮せずに計算を行なった。

Fig. 4 は大気上端と地表面での短波領域(0.2~4.0μm)における放射強制力の時間変化である。光路長が長く入射光が強まってきた朝と夕方にピークを持つ。lidar と skyrad において、大気上端、地表面において 2 W/m² 程度の差が見られた。一日平均の放射強制力は大気上端(TOA)で lidar, skyrad のそれぞれで、-35.89W/m²、-37.42W/m²、地表面では-47.12W/m²、-46.55 W/m² となった。Fig. 5 は一日平均の加熱率の高度分布(左図)とエアロゾルが無い場合との差(右図)である。右図で、基にしたエアロゾルの消散係数の鉛直分布と比較すると、消散係数の大きい3.2km付近の直上に加熱率の差のピークが存在し、多重散乱・吸収によってその付近の大気層を暖めていることがわかる。また、複素屈折率の仮定の違いをみると、高度依存性を与えた lidar の方が加熱率の差の変化が大きく、大気各層に与える影響を詳細に示していると考えられる。

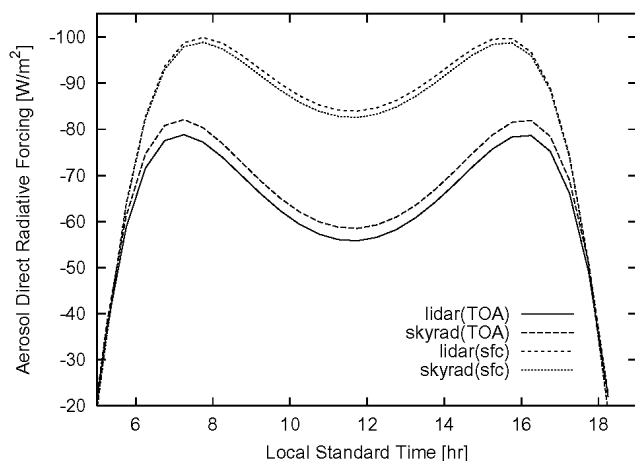


Fig. 4. The instantaneous aerosol radiative forcing at the top of the atmosphere (TOA) and surface on different aerosol optical properties (refractive indices and volume spectrums derived from the analysis of lidar observation and that of skyradiometer). For the calculation, optical properties and atmospheric conditions are fixed during the day.

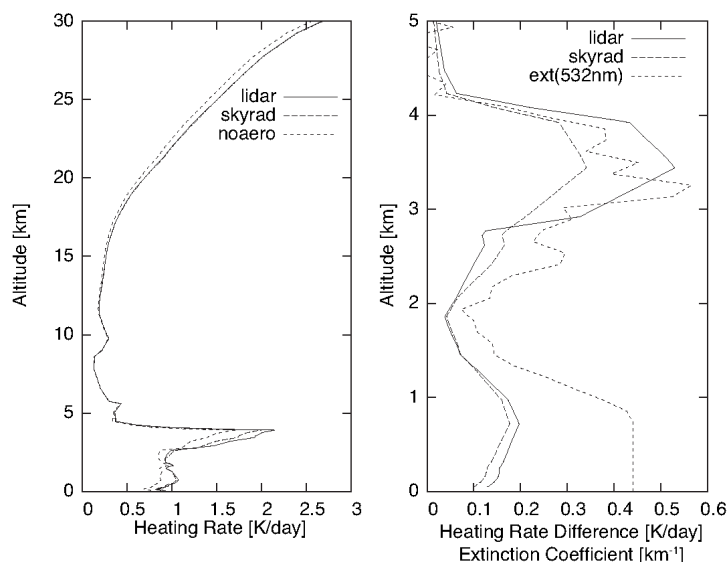


Fig. 5. (left) The profiles of heating rate with/without aerosols. (right) The profiles of heating rate difference between with and without aerosols, and that of extinction coefficients at 532nm.

5. まとめ

2003 年春季に観測されたシベリア森林火災起源エアロゾルの光学的特性を多波長ラマンライダーにより詳細を得ることができ、その放射強制力の算出を試みた。今後、観測・解析の効率化を図りながら計測を継続し、大気汚染エアロゾルや黄砂など種類毎の光学特性・微物理量を得ると共に放射強制力の比較などを行なっていきたい。本研究は科学研究費・特定領域研究「東アジアにおけるエアロゾルの大気環境インパクト」の計画研究(No. 14048232)や科学技術振興機構/CRESTの研究課題「アジア域の広域大気汚染による大気粒子環境の変調について」(APEX)などの援助を受けて行なわれた。

参考文献

- [1] 村山利幸, 多波長ラマンライダーによる対流圏エアロゾルの観測, 第22回レーザセンシングシンポジウム予稿集, pp.91-94, 2003.
- [2] T. Murayama and K. Wada, Observation of dust, smoke, and urban aerosols with multi-wavelength Raman lidar in Tokyo, in *Proc. of the CERE International Symposium on Remote Sensing*, pp.169-174, Chiba University, 2003.
- [3] T. Murayama et al., Optical Characteristics of dust and smoke aerosols observed with multi-wavelength Raman lidar in Tokyo, in *Proc. of the 22nd International Laser Radar Conference (ILRC22)*, pp.365-368, Matera, Italy, 2004.
- [4] T. Murayama et al., Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 2004.
- [5] D. Müller et al., Comprehensive particle characterization from three-wavelength Raman-lidar observations: case study, *Appl. Opt.*, 40, 4863-4869, 2001.
- [6] T. Nakajima et al., Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Appl. Opt.*, 35, 2672-2686, 1996.
- [7] J. Redemann et al., Case studies of the vertical structure of the direct shortwave aerosol radiative forcing during TARFOX, *J. Geophys. Res.*, 105(D8), 9971-9979, 2000.
- [8] M. Fiebig et al., Optical closure for an aerosol column: Method, accuracy, and inferable properties applied to a biomass-burning aerosol and its radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, 107 (D21), 8130, doi:10.1029/2000JD000192, 2002.
- [9] J.-G. Won et al., Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with Sun/sky radiometer and lidar measurements at Gosan, Korea, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 82, 1, 115-130, 2004.