

多波長・偏光ライダーによる対流圏エアロゾル観測 Mutiwavelength and polarization lidar measurements of tropospheric aerosol properties

酒井 哲、永井智広、小林隆久、山崎明宏、内山明博、真野裕三
T. Sakai, T. Nagai, T. Kobayashi, A. Yamazaki, A. Uchiyama, and Y. Mano

気象研究所
Meteorological Research Institute

Abstract:

Elastic and polarization lidar was used to measure the vertical profiles of aerosol backscattering coefficients at wavelengths of 355, 532, 735, and 1064 nm, and the depolarization ratio at 532 nm in order to study the aerosol properties in the free troposphere over Tsukuba, Japan, in 2006. The particle size distribution (mode radii), number (and volume) concentration, and optical thickness were estimated from the lidar-derived values and the theoretical computation. The mode radii estimated from the lidar were consistent with those obtained from the sky-radiometer measurements, although the sky-radiometer revealed another mode in the larger radius. The column volume concentration derived from the lidar was 16 or 48% lower than that derived from the sky-radiometer. The optical thickness derived from the lidar was 12% lower or 29% higher than that obtained from the sky-radiometer.

1. はじめに

対流圏エアロゾルは、太陽・地球放射を散乱・吸収し、放射収支に影響を及ぼす。また、雲核・氷晶核として作用し、雲生成・降水過程に影響を及ぼす。これらエアロゾルが気候に及ぼす影響を評価するためには、その光学特性と微物理特性（サイズ分布・形状・組成等）の分布を精度良く測定する必要がある。今回は、気象研究所の多波長・偏光ライダーを用いてエアロゾル光学特性を測定した結果を報告する。また、ライダー測定データとエアロゾル光学モデルを用いて、サイズ分布と光学的厚さを推定し、スカイラジオメーターデータとを比較した結果を報告する。

2. 多波長・偏光ライダー

観測に用いた多波長・偏光ライダーの諸元を Table 1 に示す。4つの送信レーザーと4つの受信望遠鏡を用いて、4波長（355, 532, 735, 1064 nm）の後方散乱光と、偏光成分（532 nm）を観測する。散乱光成分の検出は光電子増倍管を用い、計測はフォトンカウンティングとアナログ・デジタル変換の2つの方法でおこなう。測定の時間分解能は、1.5～3分、高度分解能は7.5 mである。測定の高度範囲は、地上約1.45 km（532 nmのみ80 m）～15 kmである。測定によって得られるエアロゾル光学パラメータは、4波長の後方散乱比(R_{λ} , 混合比に対応)と粒子後方散乱係数(β_{λ} , 濃度に対応)、波長依存性(k , サイズに依存)、偏光解消度(δ , 非球形性の指標)である。データ解析方法の詳細は Sakai et al. (2007) を参照されたい。解析データの高度分解能は150 m、時間分解能は約4時間である。

観測は、2006年の黄砂が飛来していたと考えられる春季の4月1日と、飛来が少ない秋季の10月19日の夜間、つくば市の気象研究所（36.1°N, 140.1°E）においておこなった。

Table 1. Specification of lidar used in this study

Lidar type	Multiwavelength lidar				Polarization lidar
Transmitter					
Wavelength (nm)	355	532	1064	735	532
Laser type	Nd:YAG		Nd:YAG	Nd:YAG-pumped	Nd:YAG
Repetition rate (Hz)	20		20	10	10
Energy/pulse (mJ)	80	40	550	16	200
Beam divergence (mrad)	0.125	0.125	0.125	0.4	0.2
Receiver					
Telescope type	Nasmyth		Schmidt-Cassegrain		Schmidt-Cassegrain
Diameter (m)	0.5		0.35		0.2, 0.4
Field of view (mrad)	3.0		2.2		3.0, 2.0
Detection wavelength (nm)	355	532	1064	735	532//, \perp
Filter bandwidth (nm)	0.50	0.57	0.46	3.00	0.50
Detection mode*	PC and A/D		PC and A/D		PC and A/D
Range resolution (m)	7.5		7.5		7.5
Temporal resolution	1.5		3		3

*PC: Photon counting. A/D: analog-to-digital conversion.

3. 観測結果

3.1 2006年4月1日(黄砂エアロゾル層)

Figure 1a に4月1日に観測した後方散乱比、粒子偏光解消度、波長依存性の鉛直プロファイルを示す。高度3–8.5 kmの領域で後方散乱比(R_{532})は1.5を超える値を示し(Fig. 1a 左)、この領域に高濃度のエアロゾルが分布していたことが分かる。この領域の後方散乱係数の波長依存性は、 $-0.1 \sim 0.5$ と小さく(Fig. 1a 右の細線)、レーザ波長に比べてサイズの大きい粒子が卓越していたと推測される。また、偏光解消度は約25%と高く、非球形粒子が卓越したことが分かる。また、ここで注目すべき点は、波長依存性と偏光解消度の高度分布が逆相関している点である(Fig. 1a 右)。これは、非球形でサイズの大きい粒子(黄砂と推測される)と微小粒子(硫酸塩と推測される)の割合が、高度方向に変化していることを示唆している。この領域では、下方ほどサイズの大きい非球形粒子の割合が大きかったと考えられる。

3.2 2006年10月19日(硫酸塩エアロゾル層)

Figure 1b に10月19日に観測したエアロゾル光学特性の鉛直プロファイルを示す。後方散乱比(R_{532})は、高度4 km付近で1.3のピークと、2 km以下で2~8の値を示した(Fig. 1b 左)。この領域の後方散乱係数の波長依存性は1.0~1.6、偏光解消度は1~13%と小さい値を示し、微小粒子(硫酸塩と推測される)が卓越していたと推測される(Fig. 1b 右)。この場合も、波長依存性と偏光解消度の高度分布が逆相関していた。

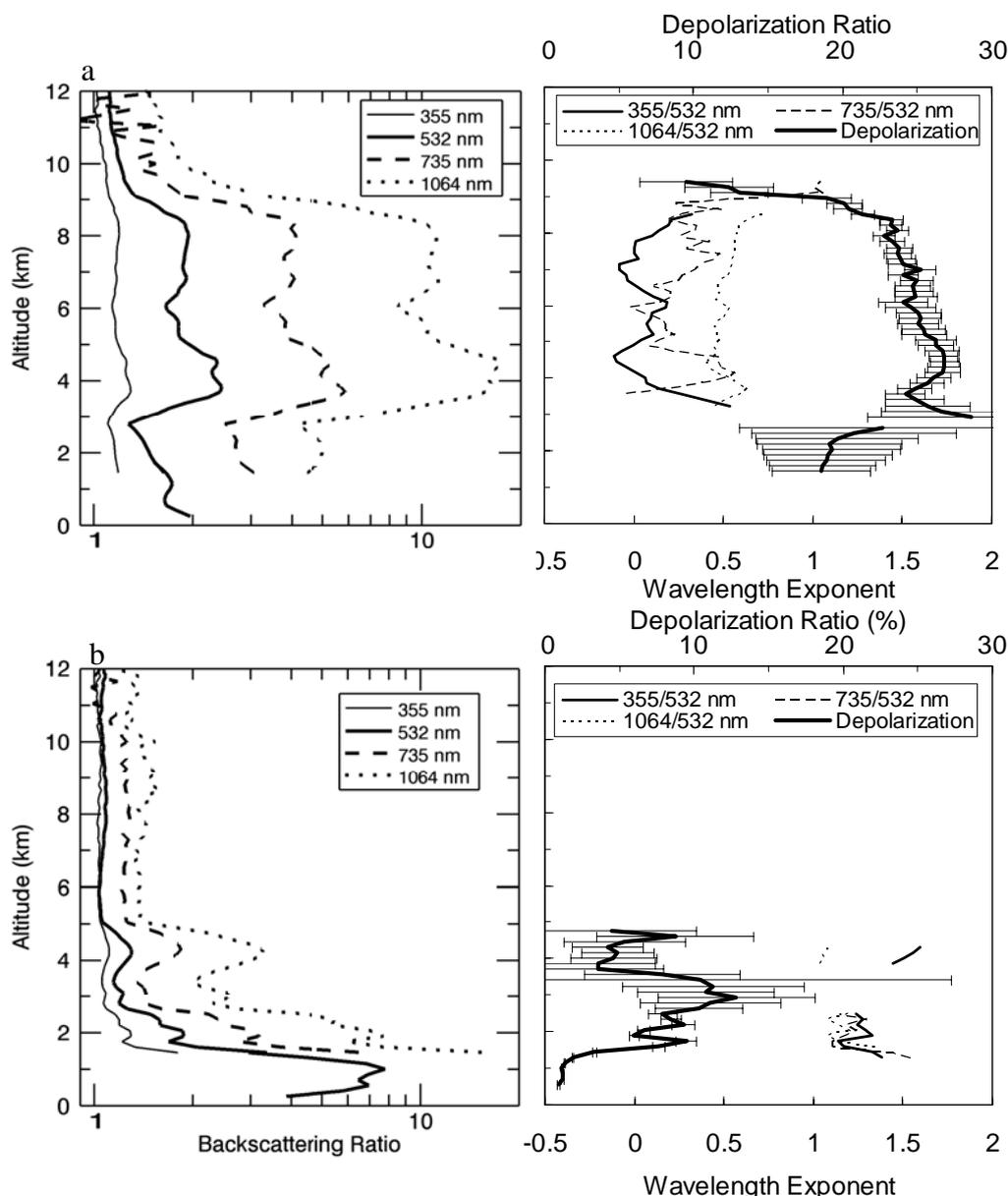


Fig. 1: Vertical distribution of the particle optical properties that were obtained with the lidar for the period 00:01–05:03 JST on 1 April (a) and 02:01–06:45 JST on 19 October (b) 2006 over Tsukuba.

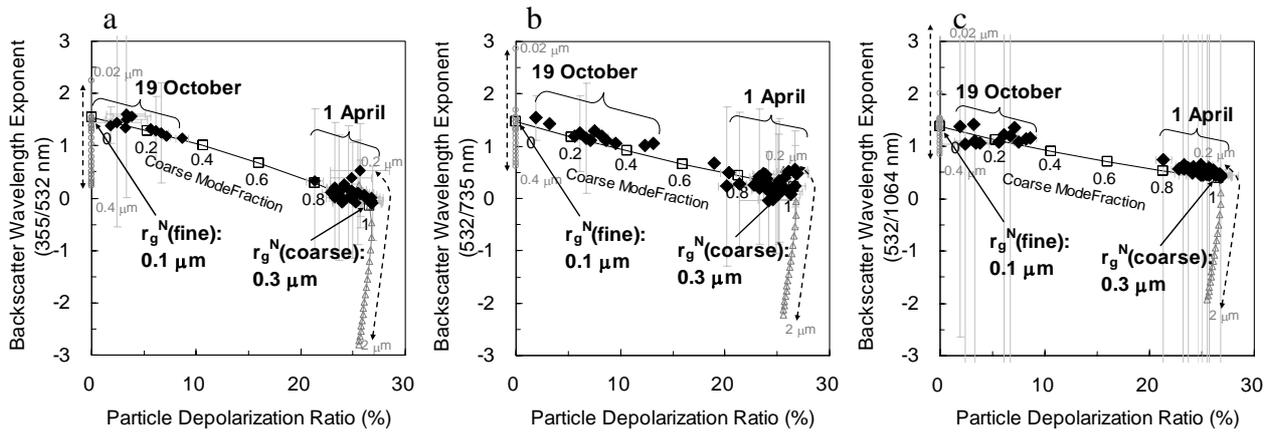


Fig. 2. Scatter diagrams of wavelength exponent of aerosol backscattering coefficient as a function of depolarization ratio. The wavelength exponents were between 355 and 532 nm (a), 532 and 735 nm (b), and 532 and 1064 nm (c). Solid diamonds indicate the measured values. Open symbols (circles for the fine mode and triangles for the coarse mode) denote the computed values for which the mode radii varied from 0.02 to 0.4 μm and 0.2 to 2.0 μm . Numbers (0 to 1) on a solid line with open squares represent the ratio of coarse to total particles; the mode radii was 0.3 μm for the coarse mode and 0.1 μm for the fine mode.

3.3 サイズ分布の推定

上記2ケースについて、エアロゾル後方散乱係数の波長依存性と偏光解消度が逆相関していることが分かった。この結果に基づいて、観測値とモデル計算とを用いてエアロゾルのサイズ分布（モード半径と濃度）を推定した。以下にその方法を述べる。

1) ライダー信号に寄与するエアロゾルの成分を、過去の航空機観測結果に基づいて、黄砂と硫酸塩の2種類（外部混合）と仮定する。

2) サイズ分布を2山の対数正規分布で表し、サイズの大きい方を黄砂、小さい方を硫酸塩とする。黄砂の屈折率は $1.5+0.001i$ 、粒子形状は三軸楕円体（長軸/短軸比 1.4、高さ/短軸比 0.2~0.9, Okada et al., 2001）、サイズ分布の標準偏差は 2.0 と仮定する。硫酸塩の屈折率は $1.46+0i$ 、形状は球形、サイズ分布の標準偏差は 1.66 と仮定する。エアロゾルの光散乱特性は、CFIE 法 (Mano, 2000) もしくは Mie 散乱理論で計算する。

3) 2種類のエアロゾル（黄砂と硫酸塩）のサイズ分布の幾何中心半径（モード半径）と、それらの混合割合を変化させて、波長依存性と偏光解消度を計算する。計算値が観測値と最も合うように2つのモード半径を求める (Fig. 2 参照)。モード半径の変化範囲は、黄砂が 0.2~2.0 μm (0.1 μm 間隔、Fig. 2 左端の)、硫酸塩が 0.02~0.4 μm (0.02 μm 間隔、Fig. 2 右端の) とした。

4) 偏光解消度の観測値とモデル計算値（黄砂 26%、硫酸塩 0）から、2つのエアロゾルの後方散乱係数の寄与率を求める。観測された全後方散乱係数に寄与率を掛け、モデル計算で得られたエアロゾル一個あたりの後方散乱断面積を割ることによって、各成分の粒子数濃度を求める。

以上の方法で推定したエアロゾルのサイズ分布を Fig. 3（実線）に示す。推定した粒子数モード半径 (r_g^N) は、黄砂が 0.3 μm 、硫酸塩が 0.1 μm であった。比較のために、スカイラジオメーター観測（ライダーから 180 m 東に設置）によって得られたサイズ分布（点線）も示す。スカイラジオメーターデータは3山のサイズ分布を示しており、その体積モード半径は 0.25 μm と 1.16–1.69 μm 、3.62 μm であった (Table 2)。ライダーデータから求めた体積モード半径 ($\ln r_g^V = \ln r_g^N + \ln 2\sigma$) は、0.2 μm と 1.3 μm であり、これらはスカイラジオメーターの小モードと中間モードとほぼ対応する。ただし、ライダーデータの解析では、2山分布を仮定したため、大モード (3.62 μm) に対応するピークは得られなかった。ライダーデータから求めた気柱濃度は、4月1日で $0.19 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ 、10月19日で $0.12 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ であり、スカイラジオメーターデータに比べて4月1日で 48%、10月19日で 16% 小さかった。また、ライダーデータから求めた光学的厚さは、4月1日で 0.44、10月19日で 0.67 であり、スカイラジオメーターデータ（4月1日で 0.50、10月19日で 0.52）との間に 10~30% の差があった。これらの差の主な原因として、2つの測器による観測時間と場所の違い、測定高度範囲の違い、ライダーデータ解析に使用したエアロゾルモデルが実際のエアロゾル特性を再現していないことが考えられる。

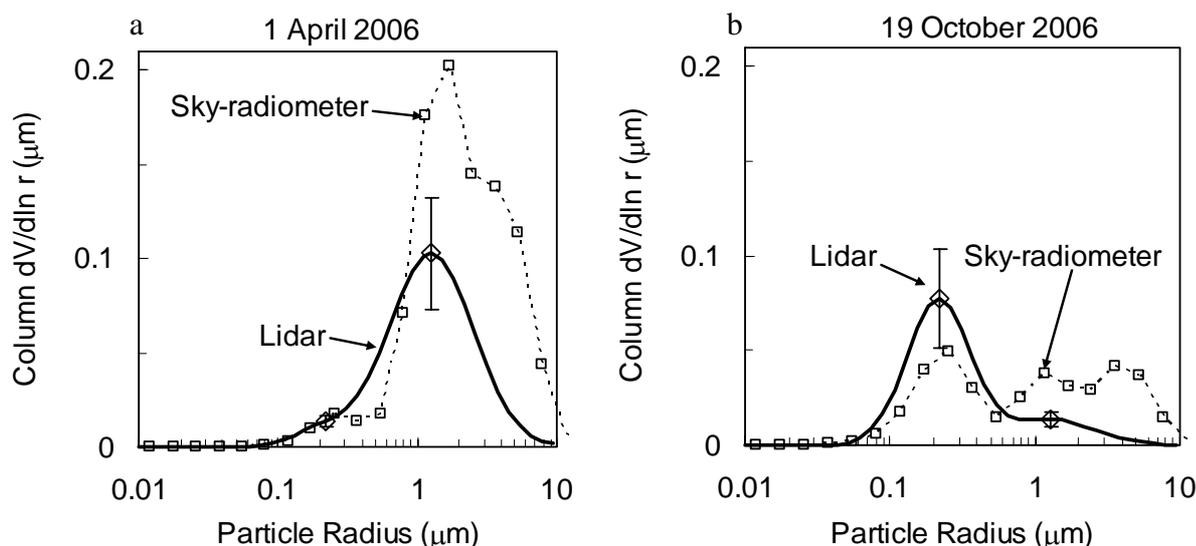


Fig. 3. Column particle volume size distributions estimated from the lidar measurements (solid line with diamonds) and those derived from sky-radiometer measurement (dotted line with squares) over Tsukuba on 1 April (a) and 19 October (b) in 2006. The error bars denote the uncertainties estimated from the lidar signal.

Table 2. Result of the comparison of the aerosol properties derived from the lidar and sky-radiometer measurements

Measurement	Estimated aerosol properties		
	Volume mode radius (μm)	Column volume concentration ($\mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$)	Optical thickness (532 nm)
Lidar	0.2, 1.3	0.19 ^a , 0.12 ^b	0.44 ^a , 0.67 ^b
Sky-radiometer	0.25, 1.69 ^a –1.16 ^b , 3.62	0.37 ^a , 0.14 ^b	0.50 ^a , 0.52 ^b

a: 1 April 2006, b: 19 October 2006

4. まとめと今後の課題

4 波長・偏光ミレーリライダーを用いて対流圏エアロゾルの光学特性を観測し、サイズ分布と光学的厚さを推定した。2006 年 4 月 1 日に高度 3~8.5 km で観測された黄砂層は、波長依存性 0.1~0.5、偏光解消度約 25%を示した。2006 年 10 月 19 日に高度 1.5~5 km で観測されたエアロゾル層は、波長依存性が 1.0~1.6、偏光解消度 1~13%を示した。これらの層内で、波長依存性と偏光解消度は逆相関を示した。これは、大粒径の非球形粒子と微小粒子の割合が、高度方向に変化したことを示唆する。ライダーデータから推定したエアロゾルのモード半径は、0.1 μm と 0.3 μm で、スカイラジオメーターデータから推定したモード半径の小モードと中間モード半径とほぼ対応した。ライダーデータから推定したエアロゾルの気柱体積濃度は、スカイラジオメーターから推定した値に比べて 48%~16%小さかった。ライダーデータから推定した光学的厚さは、スカイラジオメーターデータと比べて、10%小さいか、もしくは 30%大きかった。これら差の主な原因は、2 測器の観測場所と時間の違い、ライダーデータ解析に使用したエアロゾルモデルが実際のエアロゾルの光学特性を再現していないことが考えられる。今後の課題は、ライダーデータとスカイラジオメーターデータの比較事例を増やし、サイズ分布推定方法の妥当性を検証すること、エアロゾル直接観測（サンプリング等）データとライダーデータの比較をおこない、エアロゾル光学特性と微物理特性の対応を定量的に調べることである。

参考文献

- 1) Y. Mano, *Appl. Opt.* **39**, 5541–5546 (2000).
- 2) K. Okada et al., *Geophys. Res. Lett.* **28**, 3123–3126 (2001).
- 3) T. Sakai et al., *Atmos. Chem. Phys. Disc.* **7**, 10179–10203 (2007).