

東京における黄砂現象時のライダー、サンフォトメーター、  
地上での光学的測定の相互比較

Intercomparison of aerosol optical properties observed by lidar, Sun  
photometer, and surface in situ measurements during Asian dust event in Tokyo

村山利幸, 関口美保

Toshiyuki Murayama and Miho Sekiguchi

東京海洋大学海洋工学部

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

**Abstract:** We made simultaneous observations with Mie-Raman lidar, Sun/sky radiometers and *in situ* optical instruments, i.e., optical particle counter, integrating nephelometer at Etchujima campus, Tokyo University of Marine Science and Technology during a heavy Asian dust event occurred during April 17-19, 2006. We derived how vertical extension of Asian dust layer varies from over 32-hours continuous lidar observation, changing the operation mode with daytime polarization lidar or nighttime Raman lidar. Asian dust layer (ADL) settled down to ground level around the noon of April 18, which was well captured by the depolarization ratio and the optical particle counter. In that morning, the planetary boundary layer (PBL) was strongly suppressed (up to ~0.5 km) probably due to capping inversion between the PBL and the ADL, which confined local air pollutions in the shallow PBL. A reasonable agreement of quantitative and qualitative aerosol properties is obtained among all the observations though the dust episode.

## 1. はじめに

東京海洋大学越中島キャンパス (35.66°N, 139.80°E) では、近年、多波長ラマンライダーにより対流圏エアロゾルの定常的な観測を行ってきている[1, 2]。ここでは2006年4月18-19日に全国的に観測された顕著な黄砂現象時の偏光・ラマンライダー観測、スカイラジオメーター・サンフォトメーターによる放射観測、地上付近でのオプティカルパーティクルカウンター(OPC)・積分型ネフェロメーター(IN)・粒子吸収率測定器(PSAP)によるエアロゾルの光学特性の相互比較について述べる。同様な研究は今までも行っているが[3, 4]、一つの黄砂現象を昼夜間を通じての複数の計測手法によってより定量的に観測し、各測定に矛盾無くエピソードを記述しようとする試みは少ない[5]。特にこの黄砂現象では以下に述べるように4月18日の正午頃に黄砂が地表に降りてきており、上空を飛来する黄砂と大気境界層の間の強い逆転層(黄砂層内の大気加熱による)によって、黄砂が地表に降りてこなかった場合[6]と比較して興味深い。また、同様な黄砂の降下現象はつくば市でもほぼ同時刻にみられていおり[7]、広域で黄砂の降下があったと思われる。気象場としては、本州は広く移動性高気圧に覆われ、その背面に黄砂を伴うという一つの典型的な黄砂の輸送パターンであった。

## 2. 観測方法

東京海洋大学の偏光チャンネルを含む多波長ラマンライダーシステムについては既に記述しているので省くが[1, 2]、偏光ライダー(532 nm)については近距離用と遠距離用の2つの望遠鏡を利用し、夜間のラマンライダー観測のときのみ3波長(355, 532, 1064 nm)の観測を行っている。ラマンライダー観測は17日19:11JST~18日06:05JSTと18日18:55~21:42JSTに行っており、前者では雲が全く無かった。ライダーが設置された建物(8F)の屋上には、スカイラジオメーターPOM-01 (Prede)とグレーティングサンフォトメーターPGS-100 (Prede)が設置され運用していた。前者の解析には skyrad.pack ver.4.2 を使用した。後者の準器との比較検定は気象研究所にて2004年2月と2007年1-2月に行われ4%以内で装置定数が求められている。また同じ屋上から実験室に大気を吸引し、OPC KC-01D (Rion)、積分型ネフェロメーターM903 (Radiance Research, 動作波長 $\lambda=530$  nm)及びPSAP (Radiance Research,  $\lambda=565$  nm)を同時に動作させた。OPCは5段階(0.3, 0.5, 1, 2及び5  $\mu\text{m}$ 以上)に分けて10分毎に1Lの大気中の粒子数を記録した。M903の校正はCO<sub>2</sub>ガスにより春季観測前に行い、5分後毎に光散乱係数の平均値が記録される。PSAPは吸引速度を0.5L/min.とし、連続ないしは1時間

に 15 分の測定を行った。

### 3. 観測結果

#### 3. 1 黄砂の光学的特性

Fig. 1 に偏光ライダー(532nm)による規格化されたライダー信号強度、偏光解消度、消散係数の時間高度断面図を示す。消散係数は後に述べる理由からライダー比を 35 sr として Fernald の方法で一様に計算した。黄砂層の変動は偏光解消度をみることでよく把握できるが、観測開始後 17 日 20 時頃、黄砂層の鉛直方向の厚みは最大となり 1.5-7.5 km に分布している。その後、徐々に高度を下げ、18 日 12 時頃に地上に達している。地上での黄砂の影響については次節で述べる。18 日 16 時頃から高度 10 km 付近に現れた巻雲の下部には薄い黄砂層と思われるエアロゾル層が約 6 km まで分布している。消散係数からは黄砂層の濃度のピークは 18 日 3-5 時に高度 3.5 km 付近に出現している。このときの消散係数は  $0.7 \text{ km}^{-1}$  に達している。同時に偏光解消度も同じ領域で極大値をとっている。Fig. 2 は黄砂濃度の高かった時間帯に近い 18 日 02:01-04:24JST におけるラマンライダー観測から求めたエアロゾルの光学特性と湿度の鉛直分布を示す。消散係数のピークは 3.7 km 付近で  $0.5 \text{ km}^{-1}$  を越えており、そこでの 355-532 nm 間のオングストローム指数は 0、後方散乱係数のオングストローム指数は負数となっている。粒子偏光解消度も消散係数のピーク付近で最大で約 30 % となっている。ライダー比は黄砂層領域の 1.1-4.7 km の平均で 355 nm 及び 532 nm について、各々  $46.0 \pm 3.2 \text{ sr}$ 、 $37.8 \pm 6.7 \text{ sr}$  となり紫外の方でライダー比が高くなっている。これは今までの観測の傾向と一致する[1, 2]。また、黄砂層のピーク付近で相対湿度は 70 % を越えており、夜間が進行するにつれてこの高度域の湿度が上昇しているのが認められた。Fig. 3(a)に 18 日日中のスカイラジオメーター、グレーティングサンフォトメーター及びライダー（地上から高度 8.5 km までの消散係数の高度積分）から求めたエアロゾルの光学的厚さの時系列を示す。また、スカイラジオメーターから求めたオングストローム指数も示している。最も信頼のおける値はサンフォトメーターであるが、光学的厚さとの比較においてもライダー比は 35-40 sr が妥当であることがわかる。また、オングストローム指数が最小となる 14 時頃が気柱全体で最も黄砂の寄与が大きかったと推定される。

#### 3. 2 黄砂の地上への降下現象と大気境界層

Fig. 1 及び Fig. 2 からわかるように 18 日 12 時頃に黄砂が地上に降りる前の時間帯に高度の低い大気境界層(<0.5 km)内で微小粒子の濃度が上がっている。これは混合層の発達する時間帯でもあるので、局所的に発生した大気汚染物質が黄砂層の下部の逆転層によって抑え込まれた状態を示していると考えられる[6, 7]。特にスカラジオメーターのデータで 11 時頃に光学的厚さとオングストローム指数が局所的に極大値をとっていることから気柱全体でも混合層内の微小粒子の寄与は大きかったことがわかる。Fig. 3(b)に高度 210 m における先の方法でライダーから求めた消散係数と地上での IN 及び PSAP から求めた消散係数と単散乱アルベドの時系列変化を示す。両者共に 11 時頃に消散係数は極大値をとり、 $0.4-0.5 \text{ km}^{-1}$  となっている。一方、単散乱アルベドは 0.7 に下がっており、黄砂が十分に降りてきた 14 時以降のほうが単散乱アルベドは 0.8 に上がっている。ライダーの解析ではライダー比の不定性、IN では相対湿度及び散乱角 truncation の補正、PSAP では波長の違いなどの誤差要因があるがおよその動態は一致する。また、近隣の一般環境大気測定局のデータからは 11 時に NO は極大値をとっており、SPM 濃度は徐々に増加し 19 時には  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を越えている。Fig. 4(a)には OPC から得られた微小粒子（直径  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ）及び大粒子（直径  $5 \mu\text{m}$  以上）の、Fig. 4(b)には高度 150 m での全偏光解消度と地上での相対湿度の各時系列変化を示す。黄砂が地上に降りてきた証拠はこの OPC による粒径  $5 \mu\text{m}$  以上の粒子数で判断することが多い[5]。黄砂が降りはじめた 12 時頃から微小粒子は減少している。また、やはり 11 時頃に微小粒子数の極大値がみられるのは先に述べてきた事柄と一致する。偏光解消度と OPC による粒径  $5 \mu\text{m}$  以上の粒子数の増加はよく対応している。また、相対湿度と偏光解消度が黄砂降下時に良い負の相関関係にあるのは[3]でみられたのと同じである。

### 4. まとめ

2007 年 4 月 17-18 日に東京で行った黄砂現象のライダー、サンフォトメーター、地上での光学測器による観測から黄砂エアロゾルの光学特性及び大気境界層を含むエアロゾルの挙動について精査した。相互にはば矛盾の無い結果が得られた。偏光ライダーは連続運転すると黄砂の動態把握に非常に有効であるが[5, 7]、誤差範囲を知る上でも今回行ったような他の測器との比較は有用と思われる。また、どのような黄砂イベン

トで黄砂が降りるのは、そのときの温位面の傾きや黄砂層下部の温位逆転の強さによると思われるが環境影響が大きく異なるのでその機構は興味深い。この期間中の館野でのラジオゾンデのデータから 1.2 km ASL で 11 K/day の温位上昇が認められ、黄砂が吸収性エアロゾルであることを示している[6]。

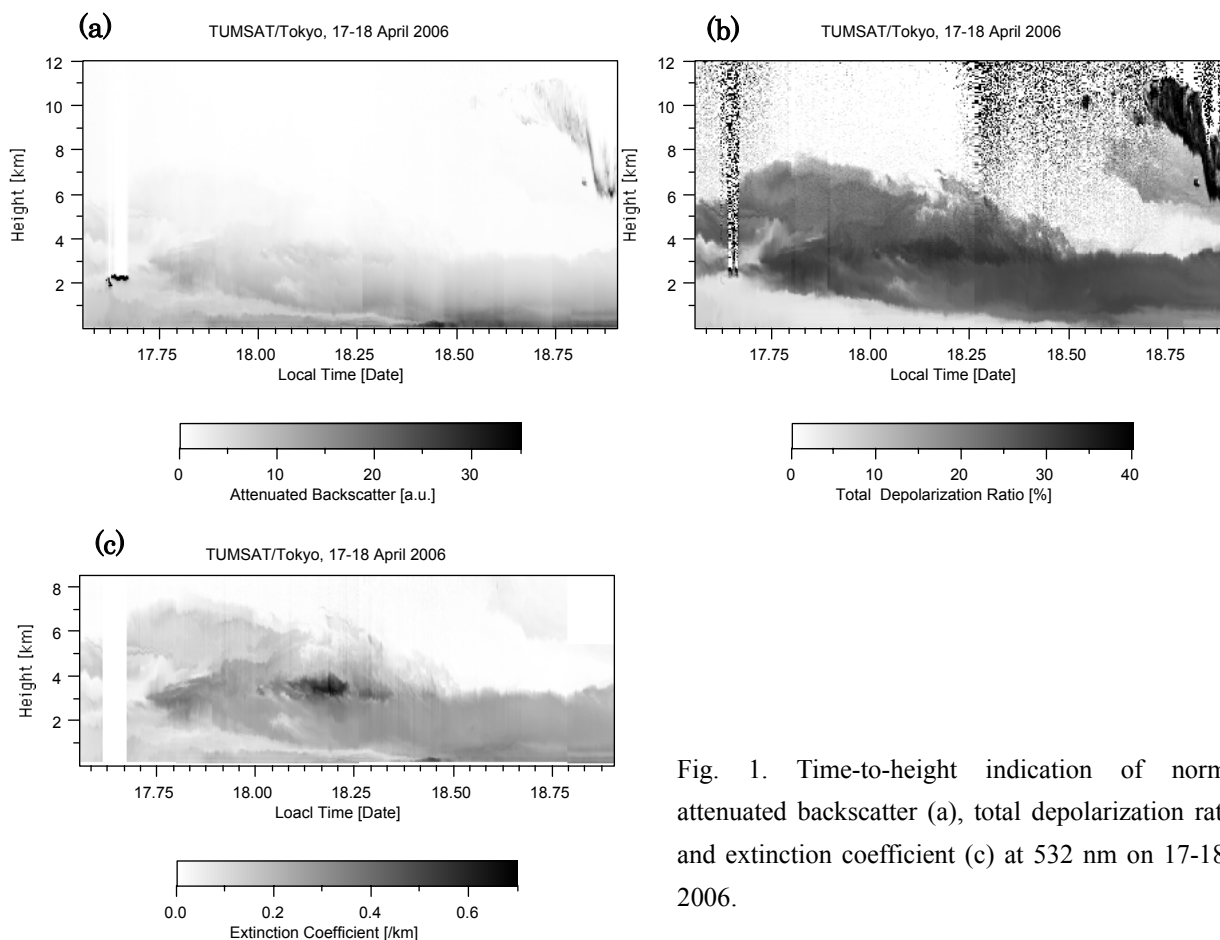


Fig. 1. Time-to-height indication of normalized attenuated backscatter (a), total depolarization ratio (b), and extinction coefficient (c) at 532 nm on 17-18 April 2006.

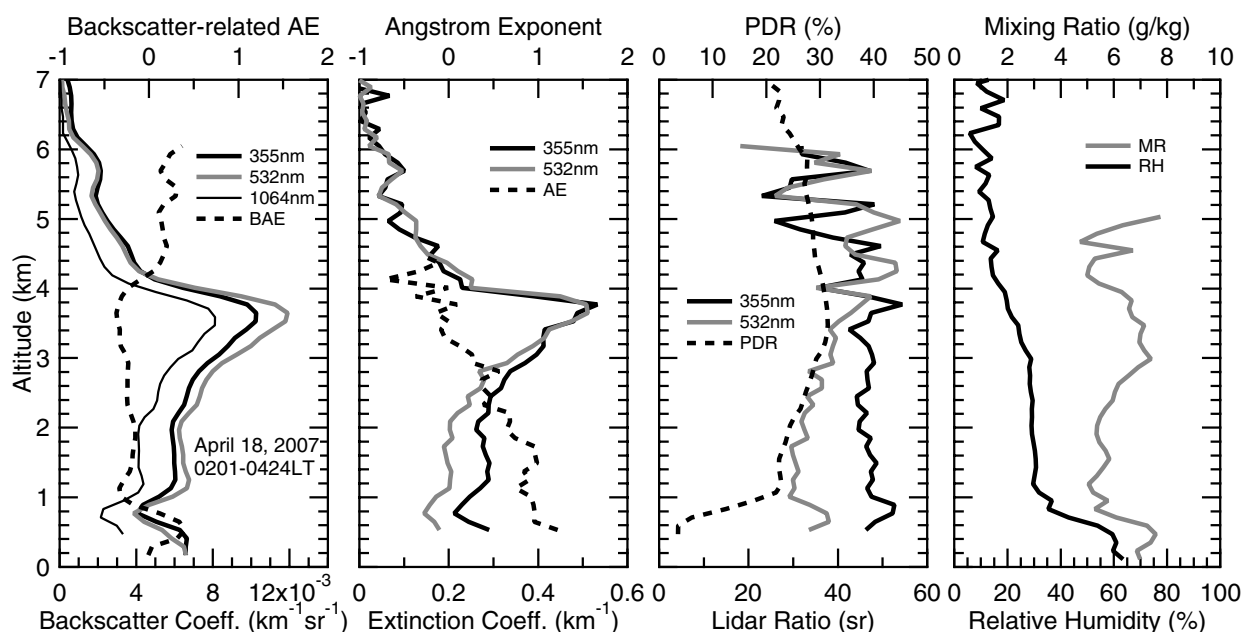


Fig. 2. Vertical Profiles of the mean aerosol optical properties derive from Raman lidar measurement of 02:01-04:24JST on 18 April 2006.

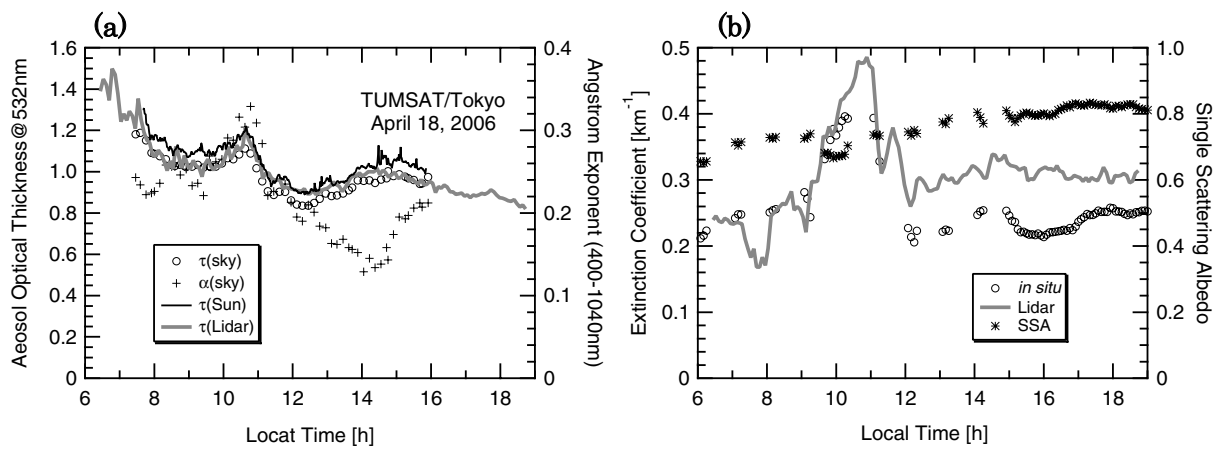


Fig. 3. (a) Comparison of aerosol optical depths derived from lidar, skyradiometer and grating Sun photometer, (b) Comparison of surface extinction coefficients derived from lidar and *in situ* optical measurements.

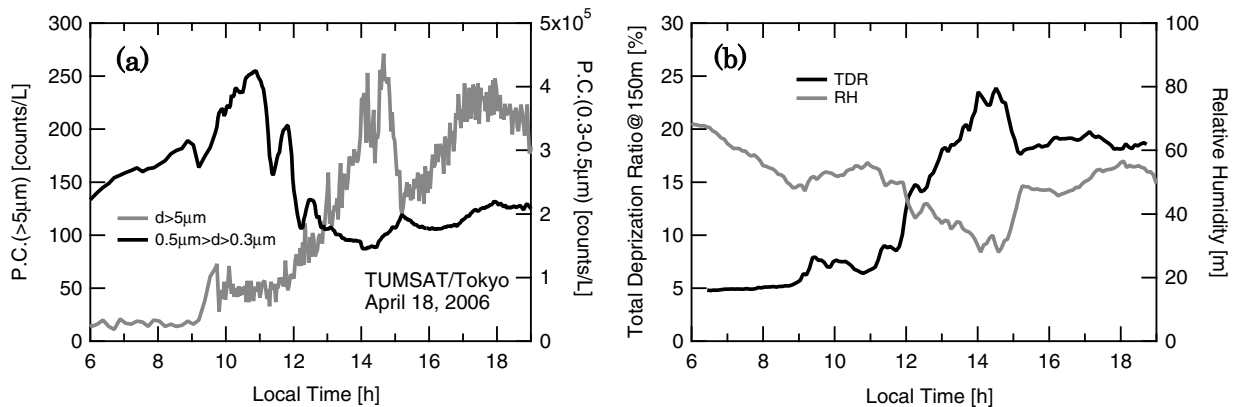


Fig. 4. (a) Time series of concentration of fine and large particles measured by OPC, (b) Time series of total depolarization ratio and relative humidity near ground.

## 参考文献

- [1] T. Murayama et al., Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003, *Geophys. Res. Lett.*, *31*, L23103, doi:10.1029/2004GL021105.
- [2] T. Murayama and M. Sekiguchi, Large wavelength dependence of the lidar ratio in Asian dust layers observed by dual-wavelength Raman lidar, in *Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference*, edited by C. Nagasawa and N. Sugimoto, pp.447-448, 2006.
- [3] T. Murayama et al., Lidar network observation of Asian dust, in *Advances in Laser Remote Sensing*, edited by J. Plelon, C. Loth and A. Dabas, pp.169-172, 2001.
- [4] T. Murayama et al., An intercomparison of lidar-derived aerosol optical properties with airborne measurements near Tokyo during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, *108*(D23), 8651, doi:10.1029/2002JD003259, 2003.
- [5] K. Arai et al., Yellow sand dust event on 13 April 2003 over western Kyushu, Japan, *SOLA*, *2*, 100-103, doi:10.2151/sola.2006-026, 2006.
- [6] N. Tsunematsu, T. Sakai, and T. Nagai, Strong capping inversion over Tokyo metropolitan area associated with airborne Asian dust, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, L19806, doi:10.1029/2006GL026645, 2006.
- [7] 清水 厚, レーザーで大気環境を監視するーライダーによるエアロゾル観測, 国立環境研究所ニュース, Vol. 25, No.6, pp.7-9, 2007.