

## 高スペクトル分解ライダーと Mie 散乱ライダーを用いた エアロゾル導出アルゴリズムの開発

Development of an aerosol retrieval algorithm using High spectral resolution lidar  
and Mie-scattering lidar data

西澤智明、杉本伸夫、松井一郎、清水厚、Boyan Tatarov、岡本創\*

T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov, and H. Okamoto

国立環境研究所、東北大学\*

National Institute for Environmental Studies, Tohoku university\*

### Abstract

We developed an algorithm to estimate the vertical profiles of extinction coefficients at 532nm for three aerosol types that are water-soluble, soot, and dust particles, using the aerosol extinction and backscattering coefficients at 532nm derived from High Spectral Resolution Lidar (HSRL) measurements and the receiving signal at 1064nm and total depolarization ratio at 532nm measured with a Mie Scattering lidar (MSL). In the algorithm, the mode radii, standard deviations, and refractive indexes for each aerosol type were prescribed by the Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC) database; the optical properties for each aerosol component were computed from Mie theory; the dust lidar ratio at 532 nm was assumed to be 50sr to consider the effect of nonsphericity of dust on the lidar ratio. We demonstrated the ability of the algorithm by applying to the HSRL+MSL data measured at Tsukuba, Japan. Plumes consisting of water-soluble aerosols, soot, dust, or their mixture were retrieved. These retrieval results were consistent with simulation with a global aerosol transport model.

### 1. はじめに

国立環境研究所 (NIES) では、エアロゾル・雲の動態把握および長期モニタリングのために、2 波長偏光 Mie 散乱ライダー (以下、2 波長偏光 MSL) による観測を実施してきた。また、NIES では波長 532nm での高スペクトル分解ライダー (以下 HSRL) の開発に成功し定常観測を実施している<sup>\*1,2</sup>。また、NIES では、2 波長偏光 MSL の測定値からエアロゾル種毎の消散係数を導出するアルゴリズムの開発も行ってきた<sup>\*3,4</sup>。

本研究では、NIES の 2 波長偏光 MSL と HSRL の測定値を同時活用して、水溶性粒子、煤粒子、ダストの波長 532nm での消散係数の鉛直分布を導出するアルゴリズムの開発を行った<sup>\*5</sup> (水溶性粒子は硫酸塩、硝酸塩、有機エアロゾルからなる外部混合の小粒子として定義する)。また、開発したアルゴリズムを 2005 年 3～4 月の観測データに適用した。本研究はアルゴリズムの特性 (特徴) を示すことを目的としているため、2005 年 4 月 8 日の適用結果についてのみ述べる。

### 2. 観測データ

NIES の 2 波長偏光 MSL は 2 波長 (532, 1064nm) での受光強度 ( $P_{532}$ ,  $P_{1064}$ ) と波長 532nm での偏光解消度 ( $\delta_{532}$ ) を測定する。また、NIES の HSRL 観測からは波長 532nm でのエアロゾ

ルの消散係数( $\sigma_{a,532}$ )と後方散乱係数( $\beta_{a,532}$ )が得られる。本アルゴリズムではMSLとHSRLから得られる $\sigma_{a,532}$ 、 $\beta_{a,532}$ 、 $P_{1064}$ 、 $\delta_{532}$ の4つの測定要素を用いる。データ解析では、ライダーデータの測定精度の観点から、高度1km~6kmのデータを用いた。

### 3. アルゴリズム

アルゴリズムでは、3種エアロゾルの粒径分布と複素屈折率を文献値\*6を用いて仮定し、エアロゾル種毎の光学特性値(例えばライダー比)をMie理論により計算し(Table 1)、それらを推定で用いる。但し、ダストの非球形性を考慮するために、ダストのライダー比として50sr(532nm)を用いた。3種エアロゾルの鉛直分布は以下の手順で推定される。(1)リファレンス層(以下、R層)を決定し、R層での波長1064nmでの全エアロゾルの消散係数・後方散乱係数を推定する。(2)R層から上層および下層へ向かって順次各層で3種類のエアロゾルの消散係数を推定する。

まず、手順(2)について述べる。予め計算した各エアロゾル種の光学特性値(Table 1)を用いて3つの測定値( $\sigma_{a,532}$ 、 $\beta_{a,532}$ 、 $P_{1064}$ )に対するLook-up-tableを作成し、各層でこのLook-up-tableを用いて3つの測定値を満足する3種類のエアロゾルの消散係数の組み合わせを求める。これを $P_{1064}$ の減衰補正を行いながら上層および下層へ向かって順次行い、3種エアロゾルの鉛直分布を推定する。

次に、手順(1)について述べる。手順(2)で用いられるLook-up-tableの $P_{1064}$ は、R層での測定値 $P_{1064}(Z_R)$ を用いて以下の式で計算される

$$P_{1064}(Z) = P_{1064}(Z_R) \frac{\beta_{1064}(Z)}{\beta_{1064}(Z_R)} \exp\left[-2 \int_{Z_R}^Z \sigma(z) dz\right] \quad (1)$$

$\beta$ および $\sigma$ はエアロゾル+空気分子の後方散乱係数および消散係数、 $Z_R$ はR層の高度。(1)式はライダー方程式より導かれ、 $P_{1064}(Z_R)$ を用いることで装置定数を含まない表式となる。(1)式を用いて任意の層での $P_{1064}(Z)$ を計算するには、R層での波長1064nmでの全エアロゾルの消散係数・後方散乱係数が必要となる。そこで、R層では2種類のエアロゾルの消散係数(532nm)を2つの測定値( $\sigma_{a,532}$ と $\beta_{a,532}$ )から推定し、それらから全エアロゾルの消散・後方散乱係数(1064nm)を求める。R層では、波長532nmでのエアロゾル偏光解消度 $\delta_{a,532}$ (測定された $\delta_{532}$ と $\beta_{a,532}$ から導出)が0.1以下の場合、水溶性粒子と煤粒子の消散係数を推定し、 $\delta_{a,532}$ が0.1以上の場合、煤粒子とダストの消散係数を推定する。3種エアロゾル(水溶性、煤、ダスト粒子)が混在していない層をR層として選ぶために、 $\delta_{a,532}$ が最も小さい(ないしは大きい)層を、R層として採択する。

Table 1. Optical properties of water-soluble, soot and dust prescribed in the algorithm<sup>a</sup>

Property	Water-soluble	Soot	Dust
$R_m, S_d$	0.19, 2.2	0.05, 2.0	3.0, 2.2
$m_r, 532$	1.44	1.75	1.53
$m_i, 532$	$3 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-1}$	$6.3 \times 10^{-3}$
$S_a, 532$	58	101	50

<sup>a</sup>Mode radius ( $R_m$ ), standard deviation ( $S_d$ ), complex refractive index ( $m_r - i m_i$ ), and lidar ratio ( $S_a$ ) are shown. The units of  $R_m$  and  $S_a$  are  $\mu\text{m}$  and sr, respectively.

測定誤差や仮定に対するアルゴリズムの推定誤差の感度実験を行った。結果は、 $\pm 5\%$ の測定誤差に対して、水溶性、煤、ダスト粒子の消散係数の推定誤差は30%以下となることを示した。また、仮定したダストのライダー比(50sr)と現実大気中のダストのライダー比が $50 \pm 10$ sr異なった場合、水溶性、煤、ダスト粒子の消散係数の推定誤差は20%程度となる。水溶性粒子と煤粒子に対して仮定したモード半径が現実大気中のそれと異なった場合(各々、 $0.19 \pm 0.05 \mu\text{m}$ と $0.05 + 0.05 \mu\text{m}$ で誤差解析した)、10%程度の推定誤差となる。

#### 4. 観測データへの適用

Fig. 1 に 2005 年 4 月 8 日に測定されたライダーデータを示す。高度 1~3km の 0~3 UTC (破線) に消散係数およびライダー比の高い層( $\sigma_a \sim 0.2 \text{ km}^{-1}$ ,  $S_{532} \sim 80 \text{ sr}$ )、同高度の 3~5UTC (一点鎖線) に、 $S_{532} \sim 50 \text{ sr}$  程度で低い偏光解消度 ( $\delta_{532} < 10\%$ ) を持った層、そして 6~10UTC では高い偏光解消度 ( $\delta_{532} > 10\%$ ) を持った 2 つの層が見られる (点線)。

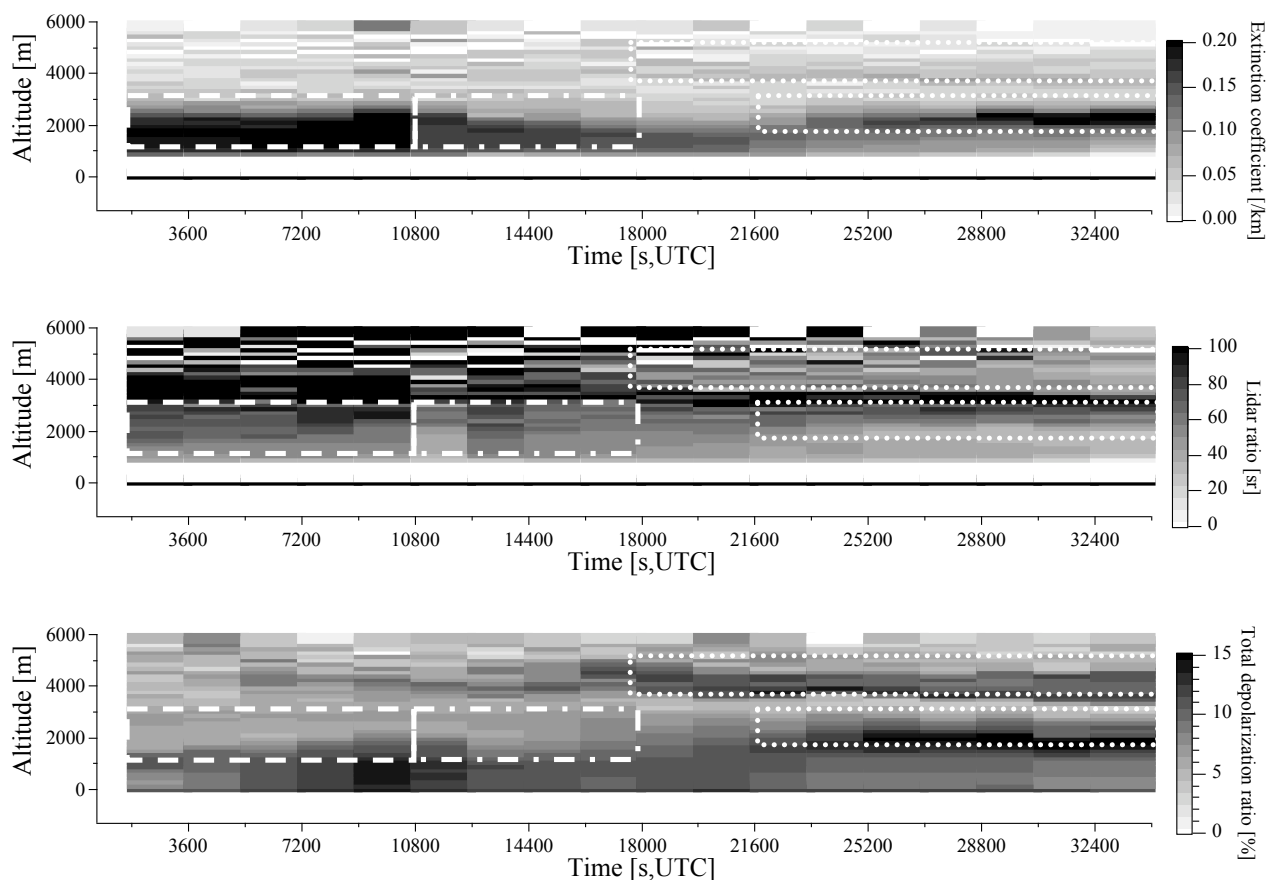


Fig. 1. Time-height cross-sections of  $\sigma_{a,532}$  (upper),  $S_{532}$  (middle), and  $\delta_{532}$  (lower) measured on April 8, 2005.

推定結果は (Fig. 2)、破線部では煤粒子とダストが混在し、一点鎖線部では水溶性粒子とダストが混在し、そして点線部ではダストが卓越していたことを示した。全球エアロゾル輸送モデル SPRINTARS<sup>\*7</sup> によるシミュレーション結果は、ゴビ起源のダスト、中国沿岸部起源の水溶性粒子、インドシナ半島起源の煤粒子が日本へ輸送されてきたことを示し、推定結果と整合した。

#### 5. 今後の展開

現在 NIES ではダストの非球形性を考慮するために、形状として回転楕円体を仮定して非球形ダストの波長および偏光特性を考慮した光学特性モデルを作成し、これを用いた 2 波長偏光 MSL 用のエアロゾル導出アルゴリズムの開発を行っている<sup>\*8</sup> (本研究で開発したアルゴリズムではダストの非球形性を組み込むためにライダー比のみが考慮された)。今後、この非球形ダスト光学モデルを導入して本アルゴリズムの改良を行う。

また、NIES では黄砂や大気汚染粒子の微物理特性 (種類やサイズ等) を評価できる次世代のライダーネットワークの構築を主眼として、多波長高スペクトル分解ライダー ( $2\alpha+3\beta+2\delta$ ) の開発を環境省環境技術開発等推進費の助成のもと今年 6 月より開始した。この多波長 HSRL 用エアロゾル導出アルゴリズムの開発を、本研究のアルゴリズムと共に現在開発中の 2 波長偏光 MSL 用アルゴリズムを統合することで行う<sup>\*8</sup>。

HSRL ( $1\alpha+1\beta+1\delta$  at 355nm) 搭載衛星 EARTHCARE (JAXA/ESA) が 2013 年に打ち上げられる\*<sup>9</sup>。NIES では、本研究で開発したアルゴリズムに非球形ダスト光学モデル (回転楕円体モデル) を導入し、EARTHCARE 用エアロゾル導出アルゴリズムを開発する。このアルゴリズムを用いたデータ解析を通して、水溶性、ダスト、煤粒子の全球分布や動態の把握を実施する。

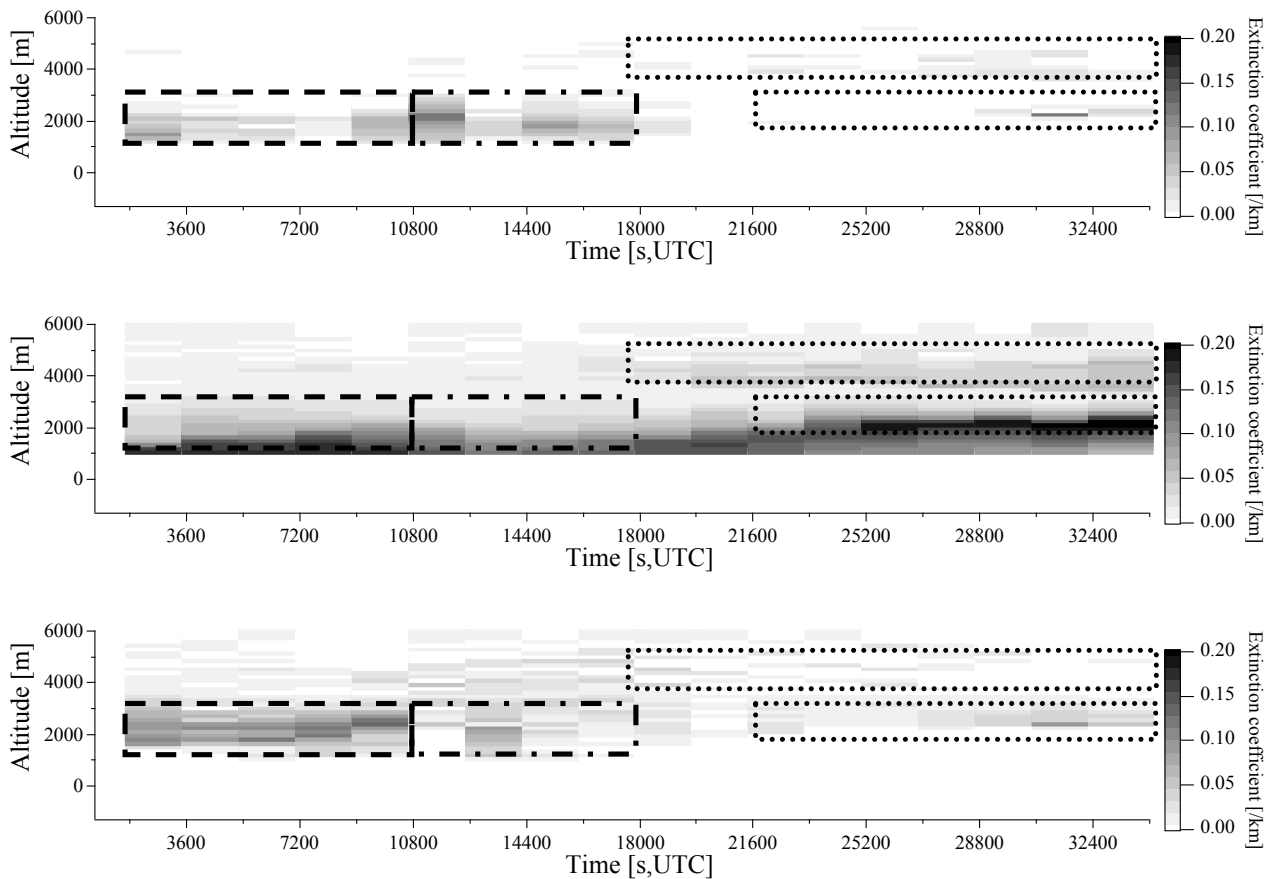


Fig. 2. Time-height cross-sections of extinction coefficients for water-soluble particles (upper), dust (middle), and soot (lower) retrieved from data measured on April 8, 2005.

## 参考文献

1. Liu et al., *Optical Engineering*, **38**, 1661-1670, 1999.
2. Tatarov et al., *Proc. 23rd ILRC*, 451-454, 2006.
3. Sugimoto et al., *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1640, doi:10.1029/2002GL016349, 2003.
4. Nishizawa et al., *J. Geophys. Res.*, **112**, D06212, doi:10.1029/2006JD007435, 2007.
5. Nishizawa et al., accepted to *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, 2008.
6. Hess et al., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 831-844, 1998.
7. Takemura et al., *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029, 2005.
8. Nishizawa et al., *Proc. 24th ILRC*, 361-364, 2008.
9. <http://www.esa.int/esaLP/LPearthcare.html>