

# 高機能ライダーを用いたエアロゾルの5次元分布観測

Observation of five-dimensional distributions of aerosols using highly functional lidars

西澤 智明\*・神 慶孝・清水 厚・杉本 伸夫

Tomoaki NISHIZAWA\*, Yoshitaka JIN, Atsushi SHIMIZU and Nobuo SUGIMOTO

国立研究開発法人 国立環境研究所 環境計測研究センター

Center for Environmental Measurement and Analysis, National Institute for Environmental Studies

## 摘 要

ライダーによる大気計測データから、大気中の主要なエアロゾル種を識別し、それらの微物理・光学特性の高度・時間分布を抽出するエアロゾル種推定手法の開発を行ってきた。また、これらエアロゾルの3次元情報(高度, 時間, 種類)だけではなく、エアロゾル種ごとの地域性や移流等の水平分布(2次元分布)に関わる情報の獲得も企図し、開発したエアロゾル種推定手法の地上ライダーネットワーク観測データへの適用によるエアロゾルの5次元分布把握を行ってきた。さらに、高機能ライダーの開発・改良とその導入により、地上ライダーネットワークとエアロゾル5次元分布把握の高度化も進めてきた。本稿では、著者らが開発・改良を進めてきたエアロゾル種推定手法、高機能ライダー、そして地上ライダーネットワーク観測の概要について示すと共に、世界の動向を踏まえつつ、それらの課題や今後の展望について述べる。

キーワード：アルゴリズム, エアロゾル, 種類, ネットワーク観測, ライダー

Key words : algorithm, aerosol, component, network observation, lidar

## 1. はじめに

大気浮遊微粒子(エアロゾル)は、地球の放射収支に作用して気候変動に影響すると共に、大気環境を変質することで人体や植生等にも影響を与える。エアロゾルの気候・大気環境への影響評価の不確実性が今なお大きいことは公知であり(IPCC, 2013), その低減のためには、エアロゾルの発生・成長・移流・消失プロセスのより高度な理解と定式化が必要である。そして、この理解と定式化にとって、実大気中のエアロゾルの詳しく確かな観測事実の蓄積は今なお必要である。大気中には、様々な形状、大きさ、化学組成を持ったエアロゾルが混在している。地球上には様々なエアロゾルの発生源が存在し、その生成過程に沿って微物理的・化学的特徴が形成されると共に、大気中での他の物質との混合等による変質も発生するため、エアロゾルの微物理・化学特性は複雑化する。一方で、その化学組成や発生源に着目することでエアロゾルを分類する研究も進み、大気汚染粒子として名高い硫酸塩粒子や硝酸塩粒子、バイオマス燃焼等で発生する有機エアロゾル(OC)やブラックカーボン(BC)粒子、砂漠起源の鉱物ダスト、海水由来の海塩粒子など、幾つかの特徴的なカテゴリー(以下、エアロゾル種)が提唱され、

それらの形状、粒径分布、化学組成と共に光学特性(屈折率、光吸収・散乱特性など)も観測に基づき特徴付けられてきた(Hess *et al.*, 1998)。また、これらエアロゾル種ごとの発生プロセス等が組み込まれた数値モデル(エアロゾル輸送モデル等)によりエアロゾルの5次元分布(水平2次元+鉛直+時間+エアロゾル種)が再現され、全エアロゾルだけではなくエアロゾル種ごとに気候・大気環境への影響評価がなされている(IPCC, 2013)。

ライダーはレーザーを光源とした能動型の遠隔計測装置であり、実大気中のエアロゾルの高度分布を時間連続に計測できることから、大気監視や環境研究などで広く用いられている。エアロゾル計測ライダーの代表格であり、様々な地域で、地上、車載、船舶、航空機、衛星と様々なプラットフォームに実装されてきたミー散乱ライダーは、主にパルスレーザーを用いて、エアロゾルと大気分子によって後方散乱された送信レーザー光の全光強度(以下、全後方散乱光強度)を距離分解(時間分解)して測定する(Shimizu *et al.*, 2016)。大気要素(気圧、気温)を既知とすれば大気分子の光学特性は理論的に計算できるものの、ミー散乱ライダーの測定信号にはエアロゾルの重要な光学特性である消散係数( $\alpha_a$ )と後方散乱係数( $\beta_a$ )の二つの未知情報が内在しており、ミー

受付：2019年2月10日、受理：2019年5月14日

\* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, E-mail : nisizawa@nies.go.jp

散乱ライダーの測定値のみからは、 $\alpha_a$  ないし  $\beta_a$  を一意に決定することはできない。そこで、ミー散乱ライダーデータの解析では一般に、 $\alpha_a$  と  $\beta_a$  の比であるエアロゾルのライダー比  $S_a$  ( $S_a = \alpha_a / \beta_a$ ) を仮定し、 $\alpha_a$  と  $\beta_a$  を推定する。一方、実大気中の  $S_a$  はエアロゾルの種類、形状、粒径分布に依存して変化するため、 $S_a$  を仮定して抽出された  $\alpha_a$  と  $\beta_a$  には大きな不確かさが含まれる。そこで、 $S_a$  を仮定することなく  $\alpha_a$  と  $\beta_a$  を一意に決定できる高機能なライダーとして、ラマンライダーと高スペクトル分解ライダー (High Spectral Resolution Lidar : HSRL) が開発された。ラマンライダーでは、上記の全後方散乱光を測定すると共に、大気窒素分子による送信レーザーのラマン散乱光も測定する。大気要素を既知とすれば、測定したラマン散乱信号からは一意に  $\alpha_a$  を推定することができ、全後方散乱光からは推定された  $\alpha_a$  を用いることで  $\beta_a$  を決定することができる。現在、ラマンライダーは欧州を中心に世界中で利用されている (Ansmann *et al.*, 1992; Bösenberg *et al.*, 2003)。一方、HSRL では大気分子とエアロゾルの後方散乱光を分離して測定する。分離計測された大気分子の後方散乱信号からは  $\alpha_a$  が、エアロゾルの後方散乱信号からは推定した  $\alpha_a$  を用いることで  $\beta_a$  を決定することができる。HSRL はラマンライダーに比べ技術的な難易度は格段に高くはなるが、大気分子による後方散乱の効率はラマン散乱に比べ数桁高いことから、より高感度な手法である。よって、HSRL は地上観測への実装が進められると共に、高感度な測定が必要とされる航空機 (Burton *et al.*, 2014) や衛星等 (Illingworth *et al.*, 2015) への実装が米欧を中心に急速に進められている。また、エアロゾル計測ライダーでは  $\alpha_a$  と  $\beta_a$  の測定だけでなく、偏光測定も行なわれている。一般に直線偏光レーザーが用いられ、大気からの後方散乱光をレーザーの偏波面に対して水平な成分と垂直な成分に分けて測定する。それらの比は全偏光解消度 ( $\delta_t$ ) と定義される。ラマンライダーや HSRL により  $\beta_a$  が一意に決定されている場合、 $\delta_t$  から大気分子による偏光成分を除去することができ、エアロゾルの偏光解消度 ( $\delta_a$ ) も得られる。 $\delta_t$  や  $\delta_a$  はエアロゾルの形状に強い感度を持ち、エアロゾル種の識別において重要なパラメータとなる。上記した高機能ライダーの多波長化技術も向上し、多波長での  $\alpha_a$ 、 $\beta_a$ 、 $\delta_a$  を同時計測する多波長高機能ライダーの実装が世界中で進行している (Shimizu *et al.*, 2016; Bösenberg *et al.*, 2003; Burton *et al.*, 2014; Illingworth *et al.*, 2015)。

著者らは、発展したエアロゾル種毎の微物理・光学特性モデルと、ライダーによる多波長多パラメータ計測を組み合わせることで、エアロゾル種を識別しそれらの微物理・光学特性の高度分布を推定する革新的なエアロゾル観測の道を開くことを想起し、多波長高機能ライダーの開発とその観測データを用い

たエアロゾル種推定手法の開発を行ってきた。また、エアロゾル種毎の時間・高度分布だけではなく、エアロゾル種毎の地域性や移流等の水平分布に関わる情報の獲得も企図し、開発した多波長高機能ライダーの多地点展開 (地上ネットワーク観測) によるエアロゾルの5次元分布観測を進めてきた。そこで本稿では、著者らが開発を進めてきたエアロゾル種推定手法、多波長高機能ライダー、そして地上ライダーネットワーク観測について紹介する。

## 2. ライダーデータを用いたエアロゾル種推定

エアロゾル種推定では、高機能ライダー (ラマンライダーや HSRL) から得られる波長  $\lambda$  でのエアロゾルの消散係数  $\alpha_{a,\lambda}$  や後方散乱係数  $\beta_{a,\lambda}$ 、偏光測定から得られる全偏光解消度  $\delta_{t,\lambda}$  やエアロゾルの偏光解消度  $\delta_{a,\lambda}$ 、そして、ミー散乱ライダーで計測される全後方散乱光強度が用いられる。ただし、全後方散乱光強度は、信号校正により減衰付き後方散乱係数 ( $\beta_{abc}$ ) と呼ばれる物理定数へ変換された後に用いられる。エアロゾル種推定では、各高度において幾つかのエアロゾル種が外部混合していることを仮定し、エアロゾル種毎の消散係数を各高度で推定する。そこで、エアロゾル種推定手法について述べる前に、測定値と推定値との関係について記述する。波長 532 nm でのエアロゾル種  $i$  の消散係数 ( $\alpha_{i,532}$ ) を推定値とした場合、測定値  $\alpha_{a,\lambda}$  および  $\beta_{a,\lambda}$  との関係は以下の式で表現される。

$$\alpha_{a,\lambda}(z) = \sum_{i=1}^n E_{i,\lambda} \alpha_{i,532}(z) \quad (2a)$$

$$\beta_{a,\lambda}(z) = \sum_{i=1}^n \frac{B_{i,\lambda}}{S_{i,532}} \alpha_{i,532}(z) \quad (2b)$$

$E_{i,\lambda}$  はエアロゾル種  $i$  の消散係数の波長比 ( $E_{i,\lambda} = \alpha_{i,\lambda} / \alpha_{i,532}$ )、 $B_{i,\lambda}$  はエアロゾル種  $i$  の後方散乱係数の波長比 ( $B_{i,\lambda} = \beta_{i,\lambda} / \beta_{i,532}$ )、 $S_{i,532}$  は波長 532 nm でのエアロゾル種  $i$  のライダー比、 $n$  は推定するエアロゾル種の総数である。偏光測定から得られる  $\delta_{a,\lambda}$  は、エアロゾルの後方散乱係数の水平成分 ( $\beta_{a,\lambda,co}$ ) と垂直成分 ( $\beta_{a,\lambda,cr}$ ) の比で表され ( $\delta_{a,\lambda} = \beta_{a,\lambda,cr} / \beta_{a,\lambda,co}$ )、 $\beta_{a,\lambda}$  はこれら水平成分と垂直成分の和である ( $\beta_{a,\lambda} = \beta_{a,\lambda,co} + \beta_{a,\lambda,cr}$ )。後述するエアロゾル種推定手法では、測定値として  $\delta_{a,\lambda}$  を用いるよりも、 $\beta_{a,\lambda,cr}$  を用いた方が理解に易い。そこでここでは、 $\beta_{a,\lambda,cr}$  と  $\alpha_{i,532}$  の関係式を示す。

$$\begin{aligned} & \beta_{a,\lambda,cr}(z) \\ &= \frac{\delta_{a,\lambda}(z) \beta_{a,\lambda}(z)}{1 + \delta_{a,\lambda}(z)} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{B_{i,\lambda} \delta_{i,532} D_{i,\lambda}}{S_{i,532} (1 + \delta_{i,532} D_{i,\lambda})} \alpha_{i,532}(z) \end{aligned} \quad (2c)$$

$\delta_{i,532}$  は波長 532 でのエアロゾル種  $i$  の偏光解消度、 $D_{i,\lambda}$  はエアロゾル種  $i$  の偏光解消度の波長比 ( $D_{i,\lambda} = \delta_{i,\lambda}/\delta_{i,532}$ ) である。先述したように、 $\beta_{abc,\lambda}$  にはエアロゾルおよび大気分子の後方散乱係数と消散係数が含まれる。

$$\beta_{abc,\lambda}(z) = (\beta_{a,\lambda}(z) + \beta_{m,\lambda}(z)) \exp\{-2\int_0^z (\alpha_{a,\lambda}(z') + \alpha_{m,\lambda}(z')) dz'\} \quad (2d)$$

添字  $m$  は大気分子を意味し、 $z$  は高度である。ここでは、ライダーは地上 ( $z=0$ ) に設置されているとする。指数関数項は地上から高度  $z$  までのエアロゾルと大気分子による信号減衰を表している。エアロゾル(及び大気分子)による信号減衰が小さく(すなわち、指数関数項  $\sim 1$ )、 $\beta_{a,\lambda} \gg \beta_{m,\lambda}$  となる場合には、 $\beta_{abc,\lambda}$  は近似的に  $\beta_{abc,\lambda} \sim \beta_{a,\lambda}$  となる(この条件は、短波長に比べ長波長での計測で成立し易い)。実際の推定では、 $\beta_{abc}$  は(2d)式に則って厳密に取り扱われなくてはならないが、エアロゾル種推定手法のアイデアの理解を容易にすると共に記述の複雑化も避けるため、以降では  $\beta_{abc,\lambda} \sim \beta_{a,\lambda}$  として取り扱い、関係式としては式(2b)を用いる。 $\delta_{t,\lambda}$  は  $\beta_{abc,\lambda}$  の水平成分 ( $\beta_{abc,\lambda,co}$ ) と垂直成分 ( $\beta_{abc,\lambda,cr}$ ) の比であり ( $\delta_{t,\lambda} = \beta_{abc,\lambda,cr}/\beta_{abc,\lambda,co}$ )、 $\beta_{abc,\lambda}$  はそれら水平・垂直成分の和となる。 $\beta_{abc,\lambda,cr}$  は以下となる。

$$\beta_{abc,\lambda,cr}(z) = \frac{\delta_{t,\lambda}(z) \beta_{abc,\lambda}(z)}{1 + \delta_{t,\lambda}(z)} = (\beta_{a,\lambda,cr}(z) + \beta_{m,\lambda,cr}(z)) \exp\{-2\int_0^z (\alpha_{a,\lambda}(z') + \alpha_{m,\lambda}(z')) dz'\} \quad (2e)$$

$\beta_{abc,\lambda}$  と同様に、 $\beta_{abc,\lambda,cr}$  に対しても  $\beta_{abc,\lambda,cr} \sim \beta_{a,\lambda,cr}$  として以降では取り扱い、関係式として式(2c)を用いる。

$\alpha_{i,532}$  の推定は、測定値に応じて式(2a-2c)を用い、それらの連立方程式を解くことに帰結する。そしてそこでは、測定値に対して感度のあるエアロゾル種を想定し、各エアロゾル種に対して  $E_{i,\lambda}$ 、 $B_{i,\lambda}$ 、 $D_{i,\lambda}$ 、 $S_{i,532}$ 、 $\delta_{i,532}$  を適切にモデル化することが肝要となる。以下、開発した代表的なエアロゾル種推定手法について順次述べていく。Sugimoto *et al.* (2003) では、粒子の形状による偏光解消度への感度の違いを利用して、鉱物ダストと球形粒子(主に大気汚染粒子)の2種類のエアロゾルの波長 532 nm での消散係数の鉛直分布を推定する手法を開発した(1 $\beta$ +1 $\beta$ 法)。ここでは、偏光ミー散乱ライダーの波長 532 nm でのデータが用いられ、測定値は  $\beta_{abc,532}$  と  $\delta_{t,532}$  となる。よって、推定における基礎方程式は、式(2b)と(2c)を用いて以下となる。

$$\begin{aligned} \beta_{abc,532} &= \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha_{i,532}}{S_{i,532}}, \beta_{abc,532,cr} \\ &= \sum_{i=1}^2 \frac{\delta_{i,532}}{S_{i,532}(1 + \delta_{i,532})} \alpha_{i,532} \end{aligned} \quad (3)$$

球形粒子の偏光解消度は理論的にはゼロであり、鉱物ダストの様な非球形粒子は正の値となる。よって、 $\beta_{abc,532,cr}$  から非球形粒子の消散係数が優位に決まり、 $\beta_{abc,532}$  の残差から球形粒子の消散係数が決まる。一方、Nishizawa *et al.* (2007, 2008a) では、エアロゾルの粒径による後方散乱係数の波長比への感度の違いを利用して、小粒子からなるエアロゾル種(主に大気汚染粒子)と大粒子からなるエアロゾル種(主に海塩粒子)の波長 532 nm での消散係数を推定している(2 $\beta$ 法)。ここではミー散乱ライダーの波長 532 nm と 1,064 nm の測定値 ( $\beta_{abc,532}$  と  $\beta_{abc,1064}$ ) が用いられ、式(2b)から基礎方程式は以下となる。

$$\begin{aligned} \beta_{abc,532} &= \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha_{i,532}}{S_{i,532}}, \beta_{abc,1064} \\ &= \sum_{i=1}^2 \frac{B_{i,1064}}{S_{i,532}} \alpha_{i,532} \end{aligned} \quad (4)$$

この研究では、リモートセンシング等による他のエアロゾル観測・解析研究(例えば、Hess *et al.*, 1998, Smirnov *et al.*, 2002)を参照して大気汚染粒子と海塩粒子の粒径分布、屈折率、形状(球形)をモデル化し、それらの光学特性をミー理論によって算出し、エアロゾル種推定で用いている。その過程において、海塩粒子の波長 532 nm に対する波長 1,064 nm での後方散乱係数の波長比 ( $B_{i,1064}$ ) が大気汚染粒子に比べ2倍程度大きいことを見出したことが、上記アルゴリズムの開発へと繋がっている。Nishizawa *et al.* (2008b) では、HSRL データを用いたエアロゾル種推定手法が開発された。ここでは波長 532 nm での HSRL 測定から得られた  $\alpha_{a,532}$  と  $\beta_{a,532}$  に加えて、ミー散乱ライダーから得られた波長 1,064 nm での  $\beta_{abc}$  が用いて、鉱物ダスト、BC、そして BC を含まない大気汚染粒子(硫酸塩、硝酸塩、OC等)の3種エアロゾルの波長 532 nm での消散係数を推定している(1 $\alpha$ +2 $\beta$ 法)。式(2a)と(2b)から基礎方程式は以下となる。

$$\begin{aligned} \alpha_{a,532} &= \sum_{i=1}^3 \alpha_{i,532}, \beta_{a,532} = \sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_{i,532}}{S_{i,532}}, \beta_{abc,1064} \\ &= \sum_{i=1}^3 \frac{B_{i,1064}}{S_{i,532}} \alpha_{i,532} \end{aligned} \quad (5)$$

エアロゾルの光吸収性によるライダー比への感度の違いを利用して、強い光吸収性を持つ粒子である BC 粒子を推定している。この研究でも2 $\beta$ 法の開発で行われた様に、各エアロゾル種の光学特性をモ

デル化し、推定で用いた。その過程で、BCのライダー比が鉍物ダストそしてBCを含まない大気汚染粒子に比して極めて大きい(2倍以上)ことを見出したことが、本手法開発への動機となっている。また本手法では、 $2\beta$ 法のアイデアも統合利用することで、鉍物ダスト(大粒子)とBCを含まない大気汚染粒子(小粒子)もBCと共に推定している。

多波長多パラメータ計測ライダーへの応用として、上記の3手法( $1\beta+1\delta$ 法,  $2\beta$ 法,  $1\alpha+2\beta$ 法)をベースにした統合手法も開発された。例えば、 $1\beta+1\delta$ 法と $2\beta$ 法を統合した手法( $2\beta+1\delta$ 法)では、波長532 nmでの $\beta_{abc}$ と $\delta_{abc}$ と波長1064 nmでの $\beta_{abc}$ を用いて、鉍物ダスト、海塩粒子、大気汚染粒子の3種エアロゾルを推定する(Nishizawa *et al.*, 2011)。さらにこの研究では、より現実的な鉍物ダストの光学モデルの構築を狙い、その形状として回転楕円体を導入した。これまではその形状として球形を仮定してきたが、モデル化された偏光消度やライダー比が実測値に整合しないという問題があった。しかし、回転楕円体モデルの導入により、この問題は劇的に改善され、推定確度の向上へと繋がった。また、上記3手法を統合した $1\alpha+2\beta+1\delta$ 法では、回転楕円体モデルも用いて、波長532 nmでの $\alpha_a$ ,  $\beta_a$ と $\delta_a$ と波長1,064 nmでの $\beta_{abc}$ から、4種エアロゾル(BC, 鉍物ダスト, 海塩粒子, BCを除く大気汚染粒子)を同時に推定する(Nishizawa *et al.*, 2017)。

上記したエアロゾル種推定手法( $1\beta+1\delta$ 法,  $2\beta$ 法,  $1\alpha+2\beta$ 法,  $2\beta+1\delta$ 法,  $1\alpha+2\beta+1\delta$ 法)は、国立環境研究所で実施している地上ライダーネットワ

ーク(3章参照)への適用を主目的として開発され、実際の適用例については3章で示される。本手法の今後の発展としては、より多くのチャンネル数を持った多波長多パラメータ計測ライダーへの応用が考えられる。上記手法では4種エアロゾルが推定されているが、推定するエアロゾル種の増加(OCなど)、内部混合の推定(BC成分と大気汚染質成分の内部混合比率など)、そしてエアロゾル種毎の粒径情報の抽出といった手法の高度化が期待される。また、エアロゾル種ごとの光学的濃度(消散係数)と共に重量濃度(PM2.5など)も推定できれば、エアロゾル化学輸送モデルや地上サンプリング計測(環境省大気汚染質広域監視システム(そらまめ君)など)との親和性も高まり、応用範囲の拡大や相互利用の幅も広がると期待される。

### 3. 多波長高機能ライダーの開発と地上ネットワーク観測

#### 3.1 ラマンライダーを用いた東アジアでの地上ネットワーク観測

国立環境研究所では、東アジアにおける黄砂(鉍物ダスト)や大気汚染粒子の鉛直構造や動態の把握・監視等を目的として、ライダーによる多地点エアロゾル観測を2001年より行ってきた。そして、国内・外の大学や研究機関の協力のもと、20地点を超える地上ライダーネットワーク(AD-Net)へと成長した(Shimizu *et al.*, 2016)。(図1)。AD-Netは、2波長(532 nm, 1,064 nm)での $\beta_{abc}$ と1波長(532 nm)

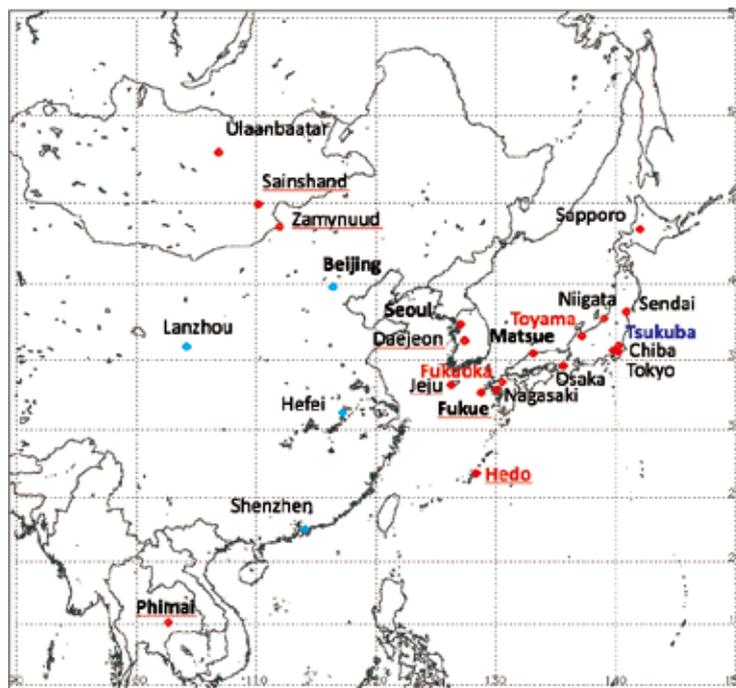


図1 AD-Net 観測サイト。2波長偏光ミー散乱ライダー(黒細), 2波長偏光ミー・ラマンライダー(黒太), 多波長ラマンライダー(赤), HSRL(青)が配備されている。

つくばでは、HSRLと共に2波長偏光ミー・ラマンライダーによる連続観測も実施されている。富山では、多波長ラマンライダー(富山大学)及び2波長偏光ミー散乱ライダー(富山県環境科学センター)による連続観測が実施されている。中国には4地点の協力観測サイトがある。

での  $\delta_{abc}$  を測定する 2 波長偏光ミー散乱ライダー ( $2\beta+1\delta$  ライダー) を主力装置として発展してきたが、エアロゾルの光学特性の精緻測定とエアロゾル種推定の高度化を目指し、AD-Net ライダーの多波長・多パラメータ計測化も進められた。2009 年より、顕著なエアロゾルイベント(超境大気汚染や黄砂飛来など)の発生が見込まれる観測地点の 2 波長偏光ミー散乱ライダーに、大気窒素分子のラマン散乱光(波長 607 nm)を計測する機能が付加された(Nishizawa *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2008)。この改良された 2 波長偏光ミー・ラマンライダーからは、背景光の低い夜間のみではあるが、波長 532 nm での  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$  と  $\delta_a$  も抽出される ( $1\alpha+2\beta+1\delta$  ライダー)。また、エアロゾル化学輸送モデルを用いたライダーデータの同化による東アジア域でのエアロゾル再解析データの構築を目標の一つとして、2 波長(387 nm, 607 nm)での大気窒素分子のラマン散乱光測定機能を有した多波長ラマンライダーが、2013 年より福

岡、沖縄、富山に順次構築された(Nishizawa *et al.*, 2017) (図 2)。この多波長ラマンライダーからは、2 波長(355 nm, 532 nm)での  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$  と  $\delta_a$ , そして波長 1,064 nm での  $\beta_{abc}$  が計測される ( $2\alpha+3\beta+2\delta$  ライダー)。ただし、2 波長での  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$  と  $\delta_a$  の抽出は背景光の低い夜間のみとなる。

図 3 に、多波長ラマンライダーで測定された波長 532 nm での  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$ ,  $\delta_a$  と波長 1,064 nm での  $\beta_{abc}$ , そして  $1\alpha+2\beta+1\delta$  法により推定された 4 種エアロゾルの消散係数の例を示す。上述したように  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$ ,  $\delta_a$  の抽出は夜間のみであり、その結果として、エアロゾル種の推定も夜間のみとなっている。計測された  $\alpha_{a, 532}$  から、エアロゾルは地上から高度 1 km の層内(境界層内)に多く存在していたことが分かる ( $\alpha_{a, 532} \sim 0.3 \text{ km}^{-1}$ ) (図 3a)。また、上層部(高度 1 km ~ 3 km)にも少なくはないエアロゾルが存在していたことが示されている ( $\alpha_{a, 532} \sim 0.1 \text{ km}^{-1}$ )。計測された  $\delta_{a, 532}$  の値が比較的高いことから(0.1 以

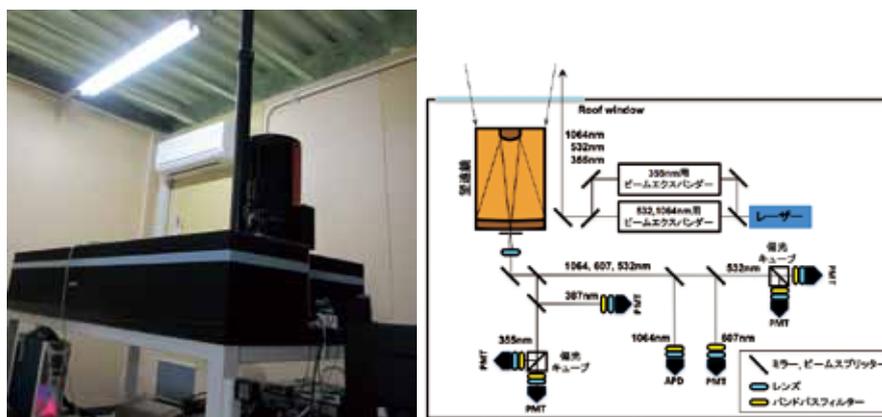


図 2 富山大学(富山県富山市)に設置されている多波長ラマンライダーの外観(左)とそのシステム構成(右)。

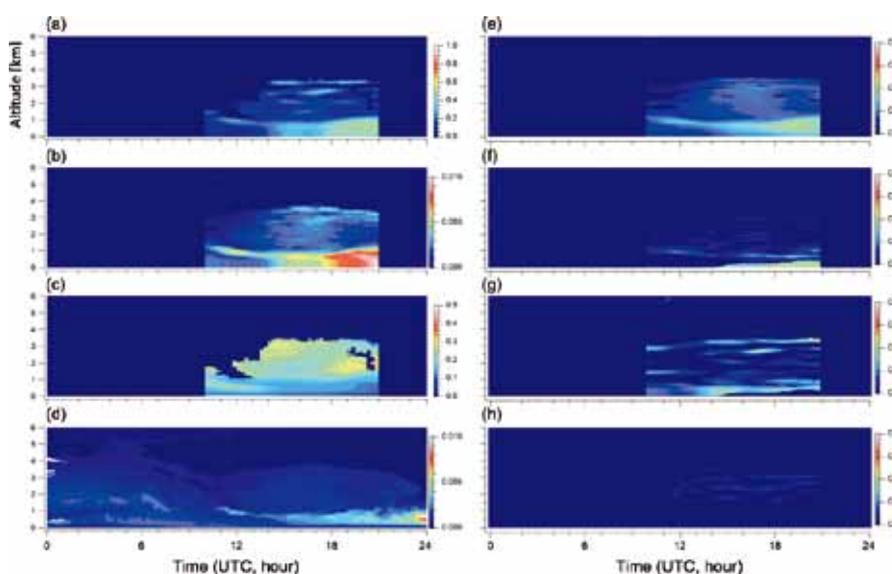


図 3 福岡に設置された多波長ラマンライダーによって 2015 年 3 月 21 日に測定されたデータから抽出された波長 532 nm でのエアロゾルの消散係数 [ $\text{km}^{-1}$ ] (a), 後方散乱係数 [ $\text{sr}^{-1}\text{km}^{-1}$ ] (b), 偏光解消度 (c) 及び波長 1,064 nm での減衰付き後方散乱係数 [ $\text{sr}^{-1}\text{km}^{-1}$ ] (d) の時間・高度分布。また、これらのデータを用いて  $1\alpha+2\beta+1\delta$  法で推定された、鉱物ダスト (e), BC を含まない大気汚染粒子 (f), BC 粒子 (g), 海塩粒子 (h) の波長 532 nm での消散係数 [ $\text{km}^{-1}$ ] の時間・高度分布。

上), 非球形粒子が混在していたことが示唆される(図 3c)。エアロゾル種推定の結果は, 境界層内では鉱物ダストと BC 等の大気汚染粒子が混在し, 上層部には主に鉱物ダストが存在していたことを示している(図 3e, f, g)。また, 海塩粒子は存在していなかったことも示している(図 3h)。(本稿では示さないが)地上でのサンプリング計測も同様な結果を示したことから, 上記したライダー観測の妥当性が窺える。また, エアロゾル化学輸送モデルによるシミュレーション結果も大陸からの黄沙粒子の輸送を示しており, 上記のライダー観測の結果と整合している。多波長ラマンライダーによる計測は現在も継続して行われ, 測定データの蓄積が進行している。例として, 福岡に設置した多波長ラマンライダーにより計測された 2014 年から 2017 年までの観測結果を図 4 に示す。装置の故障等による欠損(例えば, 2016 年 11~12 月など)はあるが, 消散係数等のエアロゾル光学特性の長期連続データの取得に成功していることが示されている。また, 本稿では示さないが,  $1\alpha + 2\beta + 1\delta$  法の適用により推定されたエアロゾル種ごとの消散係数データの蓄積も合わせて実施されている。これらの観測データはデータ同化と共に, アジア域におけるエアロゾル特性の解析(エアロゾルタイプのキャラクタリゼーション等)(Hara *et al.*, 2017)や中長期変動解析(Shimizu *et al.*, 2017)にも重要な基礎データとなる。また, エアロゾル種推定の結果を用いたエアロゾル種毎の重量濃度推定や, それらの積算としての PM2.5 等の算出も試験的に行われ, 地上でのサンプリングデータとの比較も進められている(Hara *et al.*, 2018)。

### 3.2 多波長 HSRL の開発と HSRL を用いた地上観測

ラマンライダーに比してより高感度な高機能ライダーである HSRL は, 昼夜連続測定が可能であり, 地上・航空機・衛星とその実装も世界中で進められ, ライダーによるエアロゾル観測の主力装置となりつつある。国立環境研究所でもその技術開発にいち早く取り組み, ヨウ素ガス吸収セルを用いた波長 532 nm での HSRL の開発・運用を行ってきた(Liu *et al.*, 1999; Tatarov *et al.*, 2006)。そして, エアロゾルの光学特性の精緻測定とエアロゾル種推定の高度化を目指し, HSRL の多波長化も進めてきた。

HSRL では, エアロゾル(粒子)による後方散乱光に比して, 大気分子の後方散乱光がドップラーシフトによってスペクトル幅がより広がることを利用して双方を分離測定する(大気分子に対しては波長 532 nm で 1.3 GHz(半値半幅)程度の広がり, エアロゾルに対してはレーザーのスペクトル幅とほぼ同程度の広がり)。そこで一般に, 送信レーザーとしては, ミー散乱ライダーやラマンライダーでよく用いられるマルチモードレーザーではなく, 大気分子のスペクトル幅に比して十分に狭いスペクトル幅となる単一縦モードレーザーが用いられる。ま

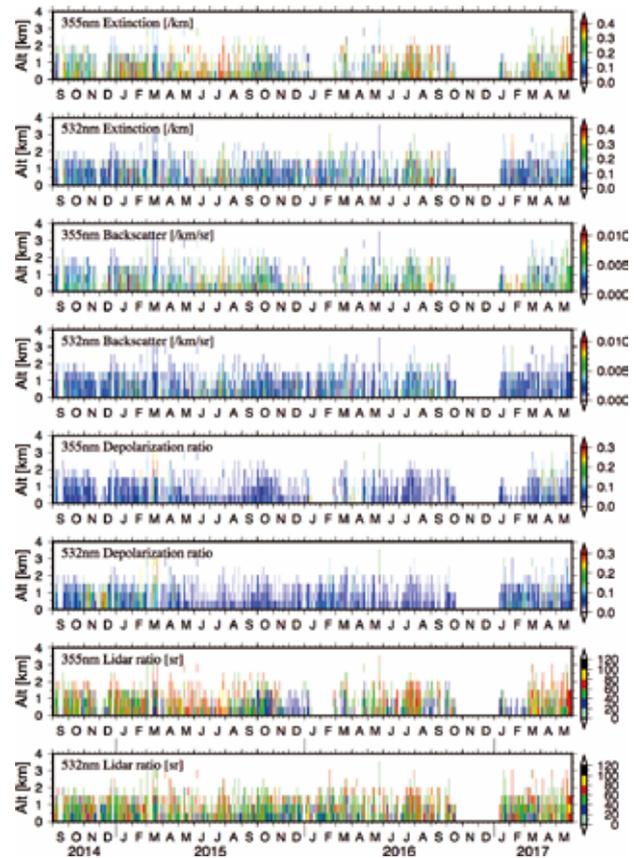


図 4 福岡に設置された多波長ラマンライダーによる 2014 年から 2017 年までの測定値から抽出された波長 355 nm と 532 nm でのエアロゾルの消散係数(Extinction)  $[\text{km}^{-1}]$ , 後方散乱係数(Backscatter)  $[\text{sr}^{-1}\text{km}^{-1}]$ , 偏光解消度(Depolarization ratio), ライダー比(Lidar ratio)  $[\text{sr}]$ の高度・時間分布。各日の夜間データの平均値がプロットされている。

た, 受信側ではエアロゾルによる後方散乱光のみを吸収・反射するために(ないしは, 透過するために), ガス吸収セルや干渉計などの狭帯域の分光素子が用いられる。そこで著者らは, 波長 532 nm に吸収線を持つヨウ素ガス吸収セルを用いた波長 532 nm での HSRL 技術と, ファブリ・ペロー干渉計を用いた波長 355nm での HSRL 技術(Imaki *et al.*, 2005)を融合することで HSRL の多波長化を行った(Nishizawa *et al.*, 2010)。また, この多波長 HSRL に偏光と 1,064 nm での測定機能も付加し, 前述の多波長ラマンライダーと同様の  $2\alpha + 3\beta + 2\delta$  データの抽出を可能とする設計とした。この研究では, 開発した多波長 HSRL の地上ネットワーク展開を念頭におき, コストダウンの観点から使用するレーザーは一台とし, 市販のインジェクションシーダー付き Nd:YAG レーザーを用いた。そして, レーザー波長をヨウ素の吸収線に固定し, 固定されたレーザー波長に干渉計の透過波長を合わせることで多波長化を実現した。さらにこの多波長 HSRL の開発では, 長期自動無人測定の実現も目標の一つとした。そこで, 上記のレーザー波長固定とレーザー波長へ

の干渉計の調整に対し、レーザーの漏れ光等を用いてヨウ素吸収セルや干渉計の透過光を常時監視するシステムを構築し、その測定信号に応じてレーザー波長やエタロン透過波長を自動調整するとした、レーザー・干渉計自動調整システムの実装も行った。

上記の多波長 HSRL システムでは、レーザーや干渉計の波長制御が必須であり、システムとしては複雑かつ高価なものとなる。また、ファブリ・ペロ干渉計の波長調整では高精度な気圧・温度制御が必要であり、長期安定なシステムを構築する難さがある。そこで、これらの課題の克服を狙い、レーザーや干渉計の波長制御が不要な新しい HSRL システムの開発も行った(Jin *et al.*, 2017)。この研究では、マッハツェンダー干渉計を用いて、干渉計を1フリンジ分周期的にスキャンし、これを常時繰り返すという新しい HSRL 手法を開発した(干渉計スキャン方式)。1フリンジ分のスキャン時に計測される信号強度は、干渉計の透過がピークとなる波長とレーザー波長が一致した場合に最大となり、その逆位相の際には測定信号は最小となる。最大強度の信号には主としてエアロゾルの後方散乱光成分が寄与し、最小強度の信号には主にドップラーシフトした大気分子からの後方散乱光成分が寄与する。よって、干渉計透過信号の最大値と最小値を用いることで、エアロゾル散乱成分と大気分子散乱成分を分離することは可能だが、それらを含めた全ての信号を用いたフィッティング解析により、ノイズ低減されたエアロゾル散乱成分信号と大気分子散乱成分信号を抽出している。また、レーザー光の一部をリファレンス光として用いることで、干渉計の透過特性の評価やレーザー波長のシフト補正等を行い、確度の高い計測を実現している。また、この研究では、単一縦モードレーザーを用いるのではなく、マルチモードレーザーを用いた HSRL 開発を行っており、これも新規性の一つとなっている。マルチモードレーザーを用いた HSRL では、レーザーの縦モード間隔と同じ自由スペクトル領域を持つ干渉計を使用することでエアロゾル散乱成分と大気分子散乱成分を分離する。そのため干渉計の長さはレーザーの共振器長で決定されるが、市販のマルチモードレーザーを使う場合は長い干渉計が必要となる。単一縦モードレーザーを用いた場合、レーザーの共振器長に関係なく短い干渉計を使用できるため、より高感度な測定が可能である。マルチモードレーザーを用いた HSRL の高感度測定を実現するためには、レーザーの共振器長と各モードのスペクトル幅を最適化が課題となる。マルチモードレーザーは安価で取り扱いも容易であり多地点展開に適しており、HSRL による地上ネットワーク観測の基幹技術となるポテンシャルを有している。図5にマルチモードレーザーを用いた干渉計スキャン方式の波長 532 nm での HSRL による実測例を示す。計測は正午頃に行わ

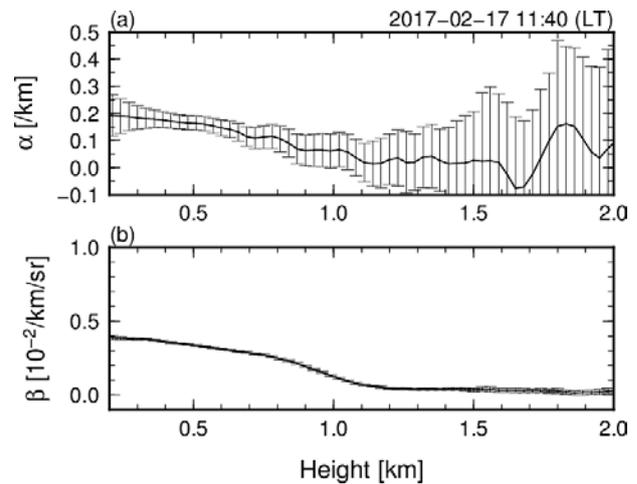


図5 マルチモードレーザーを用いた干渉計スキャン方式による HSRL で測定された信号から抽出された波長 532 nm でのエアロゾルの消散係数(a)とエアロゾルの後方散乱係数(b)の鉛直プロファイル。測定は国立環境研究所敷地内(茨城県つくば市)で行われた。エラーバーは測定誤差を示している。

れ、抽出されたエアロゾルの消散係数と後方散乱係数の高度分布は境界層内(高度 1 km 以下)にエアロゾルが多く存在していたことを示している。境界層内のエアロゾル消散係数の測定誤差は  $0.05 \text{ km}^{-1}$  程度と算出された。夜間での計測も別途実施しており、その際の境界層内エアロゾルの消散係数の測定誤差は背景光ノイズの低下により  $0.01 \text{ km}^{-1}$  程度と算出された。これらの結果は、開発したスキャン方式の HSRL も夜間のみならず日中も計測が可能であることを示している。

HSRL を用いた地上観測として、単一縦モードレーザーとヨウ素ガス吸収セルを用いた波長 532 nm での HSRL 観測を国立環境研究所敷地内(茨城県つくば市)にて昼夜連続して継続的に実施している。この連続観測の実例として、図6に2016年9月の計測結果を示す。抽出された波長 532 nm の後方散乱係数(図6a)や消散係数(図6c)から、エアロゾルの多くは低高度域(高度 2 km 以下)に存在していたことが分かる。9月2日の高度 2 km 付近や9月11日の高度 3 km 付近には、上空に浮かぶエアロゾルの層が見て取れ、エアロゾルの移流が示唆される。これらのエアロゾル層の偏光解消度は低く(0.05 以下、図6b)、ライダー比も 50sr 程度(図6d)であることから、大気汚染粒子を多く含んだエアロゾル層と考えられる。また、消散係数が非常に高いもの( $0.5 \text{ km}^{-1}$  以上)が低高度域だけではなく高高度域にも時折見られる。これらは主に雲粒(や雨粒)であり、エアロゾルだけではなく雲の計測にもライダーは利用できる(図3や図4では、雲層(や雨)は除去し、エアロゾルのみを示した)。この HSRL には、2波長での偏光測定(355 nm, 532 nm)、紫外波長でのラマン散乱光測定(387 nm)、そして波長 1,064 nm での測定機能も付加されており、多波長

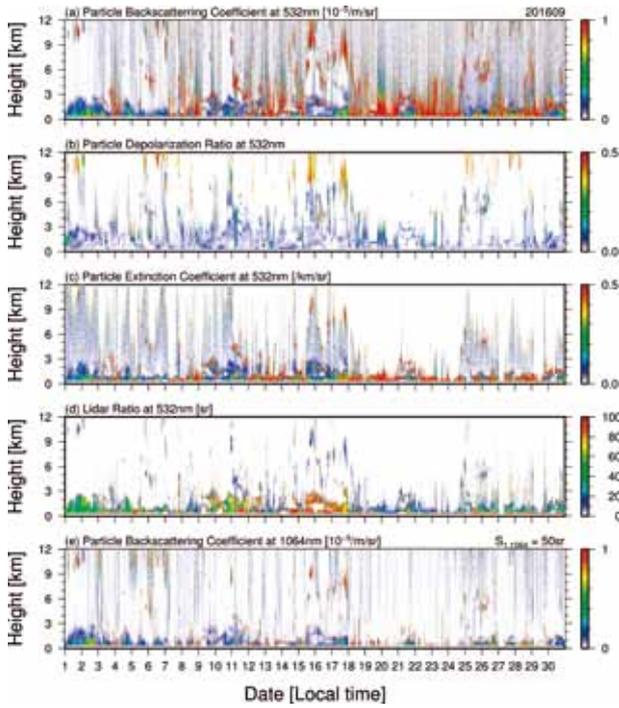


図6 国立環境研究所敷地内(茨城県つくば市)に設置されたヨウ素ガス吸収セルを用いた波長532 nmでのHSRLによる測定例(2016年9月)。抽出されたエアロゾル及び雲粒子の波長532 nmでの後方散乱係数 $[10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}]$  (a), 偏光解消度 (b), 消散係数 $[\text{km}^{-1}]$  (c), ライダー比 $[\text{sr}]$  (d), そして波長1,064 nmでの後方散乱係数 $[10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}]$  (e)。図(e)ではライダー比を仮定して( $S_a = 50 \text{ sr}$ ) 推定されたエアロゾル及び雲粒子の後方散乱係数がプロットされている。

多パラメータ測定が実現されている(図6eに、計測された波長1,064 nmでの $\beta_{\text{abc}}$ が示されている)。地上での昼夜連続でのエアロゾルおよび雲の精緻計測を目指し、単一縦モードレーザーを用いた干渉計スキャン方式の多波長HSRLシステムの開発が、九州大学および情報通信研究機構との共同研究のもと進められている(神ほか, 2017)。この多波長HSRLでは、2波長(532 nmと355 nm)で干渉計(マイケルソン干渉計)が用いられ、 $2\alpha + 3\beta + 2\delta$ システムとなる。情報通信研究機構(東京都小金井市)に構築し、定常観測を2019年より実施する予定である。

#### 4. おわりに

本稿では、著者らが開発を進めてきたエアロゾル種推定手法や多波長高機能ライダー、そしてそれらを用いた地上ライダーネットワークAD-Netによるエアロゾル観測について紹介した。AD-Netへのエアロゾル種推定手法の適用により、東アジア域でのエアロゾルの5次元分布(水平+高度+時間+種別)の把握が進められると共に、高機能ライダーの開発・導入による高度化も進められた。

エアロゾル計測用ライダーの多くは、Nd:YAG

レーザーの3波長(1,064 nm, 532 nm, 355 nm)を用いている。よって、本稿で示したエアロゾル種推定手法は、AD-Netと同様にNd:YAGレーザーを用いた世界中のプラットフォームでのライダー観測データへの適用が期待できる。具体的には、欧州の多波長ラマンライダーネットワークEALINET(Bösenberg *et al.*, 2003)等の地上観測、欧米で実施されている多波長HSRLによる航空機観測(Burton *et al.*, 2014)、そしてNASAの宇宙からのライダー観測(Cloud-Aerosol Transport System(CATS), <https://cats.gsfc.nasa.gov>)への活用が期待できる。実際に、地球観測衛星EarthCARE(Illingworth *et al.*, 2015)に搭載される波長355 nm HSRLデータ( $1\alpha + 1\beta + 1\delta$ )を用いたエアロゾル種推定手法の開発が $1\alpha + 2\beta + 1\delta$ 法を応用して進められている(西澤ほか, 2013)。また、CALIPSO衛星搭載の2波長偏光ミー散乱ライダー(Winker *et al.*, 2009)への $2\beta + 1\delta$ 法の適用や、JICA/JSTのSATREPSプログラムで実施されたSAVER-Netプロジェクトで南米に新規展開されたHSRLとラマンライダーの複合ネットワークへの $1\alpha + 2\beta + 1\delta$ 法の適用が進められている。様々な既存データへ適用することで、広範囲のエアロゾル5次元分布データセットを構築することができる。そして、このデータセットはエアロゾルの気候・大気環境への影響評価の重要な基礎データとなる。ライダー観測データから創出されたエアロゾル種データは、環境省の黄砂飛来情報(<http://www2.env.go.jp/dss/kosa/>)や疫学研究(Kanatani *et al.*, 2014)など、行政・社会分野でも活用されるようになった。また、AD-NetやSAVER-Net、そして情報通信研究機構に構築予定の多波長HSRLからのエアロゾル種解析データ(および観測データ)はEarthCARE衛星観測の地上検証や解析手法開発での利用が進められているなど、衛星観測への利活用も為されている。

一方、現存の様々なプラットフォームにおけるライダー観測データにエアロゾル種推定手法の適用が為されたとしても、時空間を十分に網羅したエアロゾル広域分布マップを構築することは難しい。ライダーの解析結果や観測データを用いたエアロゾル化学輸送モデル等への同化はこの課題を克服する重要な技術であり、研究開発が精力的に進められている(Yumimoto *et al.*, 2012; 弓本ほか, 2018)。多波長高機能ライダーの実装により高度化された地上ライダーネットワーク等の観測・解析データの同化により構築されたエアロゾル5次元分布データは、エアロゾルの気候・大気環境への影響評価に多大な貢献を果たすと期待できる。

#### 謝 辞

本研究は、科研費基盤研究(課題番号JP17H06139,

JPS25220101, JP15H01728, JP15H02808), 科研費新学術領域研究(課題番号 JP20120006), 環境研究総合推進費(5-1502, B-1202, B-0803), JAXA 受託研究の助成のもとで実施された。

### 引用文献

- Ansmann, A., Riebesell, M., Wandinger, U., Weitkamp, C. and Michaelis, W. (1992) Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiles of moisture, particle extinction, backscatter and LIDAR ratio. *Journal of Applied Physics*, 55, 18-28.
- Bösenberg, J, *et al.* (2003) EARLINET: a european aerosol research lidar network to establish an aerosol climatology. *Technical Report*, 348, Max-Planck-Institution for Meteorologie, Hamburg, Germany.
- Burton, S. P., Vaughan, M. A., Ferrare, R. A. and Hostetler, C. A. (2014) Separating mixtures of aerosol types in airborne High Spectral Resolution Lidar data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 419-436.
- Hara, Y., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Matsui, I., Pan, X., Kobayashi, H., Osada, K. and Uno, I. (2017) Optical properties of mixed aerosol layers over Japan derived with multi-wavelength Mie-Raman lidar system. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 188, 20-27.
- Hara, Y., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Osada, K., Yumimoto, K., Uno, I., Kudo, R. and Ishimoto, H. (2018) Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman lidar and comparison with ground aerosol sampling. *Remote Sensing*, 10 (6), 937. <http://dx.doi.org/10.3990/rs10060937>
- Hess, M., Koepke, P. and Schult, I. (1998) Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 831-844.
- Illingworth, A. J., Barker, H. W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Cler baux, N., ... and Zadelhoff G.-J. van. (2015) The EarthCARE satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 1311-1332.
- Imaki, M., Takegoshi, T. and Kobayashi, T. (2005) Ultraviolet high-spectral-resolution lidar using Fabry-Perot filter for the accurate measurement of extinction and lidar ratio. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44, 3063-3067.
- IPCC (2013) Climate change 2013: the physical science basis. *In*: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.) *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 神 慶孝・西澤智明・杉本伸夫・岡本 創(2017)走査型干渉計を用いた二波長高スペクトル分解ライダーの開発, 第35回レーザーセンシングシンポジウム, D-7.
- Jin, Y., Sugimoto, N., Ristori, P., Nishizawa, T., Otero L. and Quel, E. (2017) Measurement method of high spectral resolution lidar with a multimode laser and a scanning Mach-Zehnder interferometer. *Applied Optics*, 56 (21), 5990-5995.
- Kanatani, K., Adachi, Y., Sugimoto, N., Noma, H., Onishi, K., Hamazaki, K., Takahashi, Y., Ito, I., Egawa, M., Sato, K., Go, T., Kurozawa, Y., Inadera, H., Konishi, I. and Nakayama, T. (2014) Japan Environment & Children's Study Group, Birth cohort study on the effects of desert dust exposure on children's health: protocol of an adjunct study of the Japan Environment & Children's Study. *British Medical Journal Open*, 4(6), e004863. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2014-004863>
- Liu Z., Matsui, I. and Sugimoto, N. (1999) High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements. *Optical Engineering*, 38 (10), 1661-1670.
- Nishizawa, T., Okamoto, H., Sugimoto, N., Matsui, I., Shimizu, A. and Aoki, K. (2007) An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarization lidar measurements. *Journal of Geophysical Research*, 112 (D6), D06212. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JD007435>
- Nishizawa, T., Okamoto, H., Takemura, T., Sugimoto, N., Matsui, I. and Shimizu, A. (2008a) Aerosol retrieval from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurement taken during the MR01K02 cruise of the R/V Mirai and evaluation of a global aerosol transport model. *Journal of Geophysical Research*, 113, D21201. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD009640>
- Nishizawa, T., Sugimoto, N., Matsui, I., Shimizu, A., Tatarov, B. and Okamoto, H. (2008b) Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral-resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 4094-4103.
- Nishizawa T., Sugimoto, N. and Matsui, I. (2010) Development of a dual-wavelength high-spectral-

- resolution lidar. *Proceedings 7860, Lidar remote sensing for environmental monitoring XI; 78600D*, <http://doi.org/10.1117/12.870068>
- Nishizawa, T., Sugimoto, N., Matsui, I., Shimizu, A. and Okamoto, H. (2011) Algorithm to retrieve aerosol optical properties from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar considering nonsphericity of dust. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112, 254–267.
- 西澤智明・杉本伸夫・松井一郎・清水 厚・岡本 創 (2013) EarthCARE 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル種推定アルゴリズムの開発. リモートセンシング学会誌, 33(5), 367–376.
- Nishizawa, T., Sugimoto, N., Matsui, I., Shimizu, A., Hara, Y., Uno, I., Yasunaga, K., Kudo, R. and Kim, S.-W. (2017) Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 188, 79–93.
- Shimizu, A., Nishizawa, T., Jin, Y., Kim, S.-W., Wang, Z., Batdorj, D. and Sugimoto, N. (2016) Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia. *Optical Engineering*, 56 (3), 031219.
- Shimizu, A., Sugimoto, N., Nishizawa, T., Jin, Y. and Batdorj, D. (2017) Variations of dust extinction coefficient estimated by lidar observations over Japan, 2007–2016. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 13, 205–208.
- Smirnov, A., Holben, B. N., Kaufman, Y. J., Dubovik, O., Eck, T. F., Slutsker, I., Pietras, C. and Halthore, R. N. (2002) Optical properties of atmospheric aerosol in maritime environments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59, 501–523.
- Sugimoto, N., Uno, I., Nishikawa, M., Shimizu, A., Matsui, I., Dong, X., Chen, Y. and Quan, H. (2003) Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: Observations and model analysis of recent events. *Geophysical Research Letters*, 30, 1640.
- Tatarov, B., Sugimoto, N., Matsui, I., Shimizu, A. (2006) Two-year-observations of optical properties of the tropospheric aerosol and clouds by a high-spectral-resolution lidar over Tsukuba, Japan. *Reviewed and revised papers presented at the 23rd international laser radar conference*, 451–454.
- Winker, M. D., Vaughan, M., Omar, A., Hu, Y., Powell, K. A., Liu, Z., Hunt, W. H. and Young, S. A. (2009) Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP data processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 2310–2323.
- Xie, C., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Matsui, I. and Wang, Z. (2008) Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China. *Applied Optics*, 47, 4945–4951.
- Yumimoto, K., Uno, I., Sugimoto, N., Shimizu, A., Hara, Y. and Takemura, T. (2012) Size-resolved adjoint inversion of Asian dust. *Geophysical Research Letters*, 39, L24807. <http://dx.doi.org/10.1029/2012GL053890>
- 弓本桂也・鶴野伊津志・西澤智明・王 哲・原 由香里・清水 厚・杉本伸夫・松井一郎(2018)多波長ミー・ラマンライダー観測システムを用いた大気汚染排出量の最適化. 九州大学応用力学研究所所報, 154, 18–25.

## 西澤 智明/Tomoaki NISHIZAWA



2001年に東北大学大学院理学研究科修士課程を修了し、2004年に同科にて博士課程を修了した。博士(理学)。日本学術振興会PD(気象庁気象研究所)を経て、2007年よりNIES特別研究員として国立環境研究所にて勤務。現在は、同研究所の環境計測研究センター・遠隔計測研究室室長。地上、船舶、衛星ライダーデータを用いたエアロゾル・雲の観測研究やライダーの開発・改良に従事している。現在、EarthCARE衛星サイエンスチームに参加し、アルゴリズム開発を行っている。

## 杉本 伸夫/Nobuo SUGIMOTO



大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒、同大学院修士終了。1979年に国立環境研究所(当時国立公害研究所)に入所。NO<sub>2</sub>のレーザー分光の研究で1985年に理学博士(東京大学)を取得。差分吸収ライダーやレーザー長光路吸収法の研究に従事。ADEOS衛星搭載RISによる地上衛星間レーザー長光路吸収実験や衛星搭載ライダーELISEのデータ利用手法研究の課題代表を務めた。また、東アジアのエアロゾルの地上ライダー観測ネットワーク(AD-Net)を構築し、黄砂や大気汚染エアロゾルの観測研究を推進した。現在は、国立環境研究所を定年退職し、客員研究員として研究を続けている。

## 清水 厚/Atsushi SHIMIZU



京都大学理学部卒業、同大学院理学研究科修士・博士課程修了。博士(理学)。国立環境研究所・地域環境研究センター・広域大気環境研究室主任研究員(気候変動適応センター兼務)。地上ライダーネットワークのリアルタイムデータ処理・提供を担当すると共に、大気汚染常時監視測定局データ等を活用してエアロゾルの動態把握に取り組んでいる。

## 神 慶孝/Yoshitaka JIN



名城大学理工学部卒、名古屋大学大学院環境学研究科修士、博士課程修了。博士(理学)。国立環境研究所環境計測研究センター・遠隔計測研究室任期付研究員。干渉計を用いた次世代高機能ライダーの開発や地上ライダーデータを用いたエアロゾル・雲の観測研究に従事している。