

# 大気粒子・気温・風の鉛直プロファイル計測ライダーの開発 その1

神 慶孝<sup>1</sup>, 西澤 智明<sup>1</sup>, 杉本 伸夫<sup>1</sup>, 石井 昌憲<sup>2</sup>, 岡本 創<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>2</sup>東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

<sup>3</sup>九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

## Development of atmospheric particle, air temperature, and wind profiling lidar (Part 1)

Yoshitaka JIN<sup>1</sup>, Tomoaki NISHIZAWA<sup>1</sup>, Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup>, Shoken ISHII<sup>2</sup>, Hajime OKAMOTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

<sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

<sup>3</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580

**Abstract:** Aiming at simultaneous measurement of atmospheric particle, air temperature, and wind velocity profiles for dense aerosol or cloud layers, we design a direct-detection lidar combining with a high-spectral-resolution lidar method. Using an iodine vapor filter, Mie-scattering from aerosols and clouds can be mostly removed and Rayleigh scattering from atmospheric molecules can be transmitted. The transmitted Rayleigh scattering is further resolved with an imaging Michelson interferometer. Air temperature and line-of-sight wind velocity are obtained from the interference contrast and interference phase shift, respectively. Particulate extinction and backscatter coefficients are retrieved from total (Mie plus Rayleigh) scattering and Rayleigh scattering signals, where Rayleigh scattering signals can be obtained from the summation of interference fringe signals. The optical path difference of interferometer suitable for temperature and wind measurement is also discussed in this paper.

**Key Words:** High-spectral-resolution lidar, Direct-detection lidar, Aerosols and clouds, Wind, Air temperature

## 1. はじめに

大気粒子（雲・エアロゾル）は太陽光の散乱や吸収を通じて地球の放射収支に影響を与えている。第6次 IPCC 報告書においても大気粒子は気候変動予測における大きな不確定要素となっている[1]。大気粒子の分布変動や気温応答を理解するためには、大気粒子の空間分布や物理的・光学的特性に加えて鉛直方向や気温などの気象要素を同時に計測することが重要である。大気粒子・気温・風の鉛直分布を個別に測定するライダー手法は多くあるが、これらのパラメータを同時に計測できるシステムはほとんどない。気温や風を計測するライダーでは、干渉計等を用いて大気分子散乱（レイリー散乱）のスペクトル拡がりや波長シフトを検出する直接検波方式を導入する[2,3]。しかし、濃いエアロゾルや雲が存在する場合、大気粒子散乱（ミー散乱）の影響を大きく受けるため気温・風の計測が難しくなる。

本研究は、大気粒子・気温・風の鉛直プロファイルを同時に計測するライダー手法を開発することを目的とする。新規開発の要素として、高濃度エアロゾルや雲などのミー散乱が卓越する環境においても計測できるシステムとする。ミー散乱の影響を除去する方法として、ヨウ素吸収フィルターや干渉計を用いてミー散乱とレイリー散乱を分離して測定する高スペクトル分解ライダー（HSRL）手法がある。とりわけ、ヨウ素吸収フィルターはミー散乱に対する透過率が  $10^{-4}$  程度であり[4]、光学的に厚い雲でも大部分のミー散乱成分をブロックすることができる。よって、ヨウ素吸収フィルターを用いた HSRL 手法と干渉計を用いた直接検波方式を組み合わせることで上記3要素を計測することが可能となる。本稿では、ライダーシステムとパラメータ導出方法について説明する。

## 2. ライダーシステム

図1にライダーシステムのブロック図を示す。光源には単一縦モード Nd:YAG レーザーの第二高調波（波長 532 nm）を使用する。大気からの後方散乱光を望遠鏡で集光し、マルチモードファイバーを使って分光部に送る。分光部では、まず受信光の一部をビームスプリッターを用いて分離し、全散乱（ミー散乱+レイリー散乱）の信号を測定する。その後、ヨウ素吸収フィルターを用いてミー散乱（+レイリー散乱の一部）

を除去し、レイリー散乱成分のみを透過させる。さらに、マイケルソン干渉計を用いてレイリー散乱成分を分光し、干渉縞のイメージを PMT array で測定する。この時、レーザー光の一部を積分球に取り込み、リファレンス光として受信部に送る（ヨウ素フィルターの後で合流させる）。レーザー波長はヨウ素の吸収線に合わせるため、シーダー光の一部（を波長 532 nm に変換した光）をヨウ素フィルターに通すことで波長をモニターして制御する。この時に使用するヨウ素フィルターは受信部とは別に用意する。

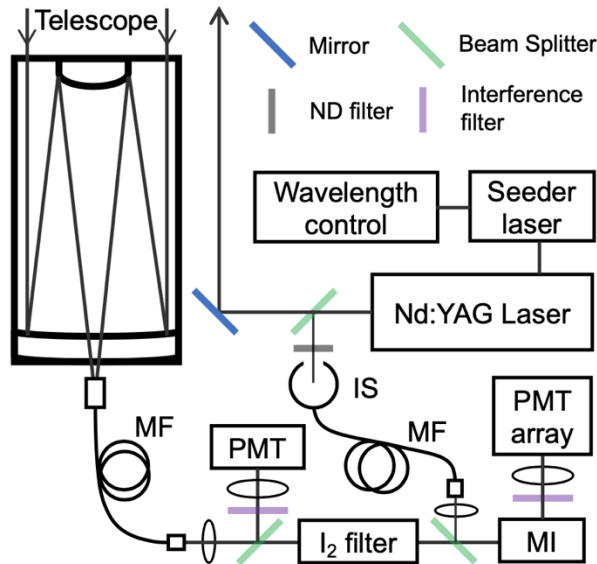


Fig. 1. Block diagram of atmospheric particle, air temperature, and wind profiling lidar.

### 3. 大気粒子・気温・風の導出方法

ライダー測定信号から、雲・エアロゾルの消散係数を後方散乱係数と独立して導出する。ミー散乱+レイリー散乱の信号とレイリー散乱信号の比を計算することにより後方散乱係数を、レイリー散乱信号の高度方向の傾きを計算することにより消散係数を抽出する。この時、レイリー散乱は PMT array で測定した信号を全て足し合わせることで得られる。気温の鉛直プロファイルは、レイリー散乱のスペクトル幅の大きさから推定される。スペクトル幅は、干渉縞のコントラストを測定することで決定される。また、風の測定については、干渉縞の位相情報を抽出し、リファレンスからのシフト量を計算することで視線方向の風速が決定される。干渉縞のコントラストと位相は、PMT array の測定信号について正弦関数でフィッティングすることにより得られる。

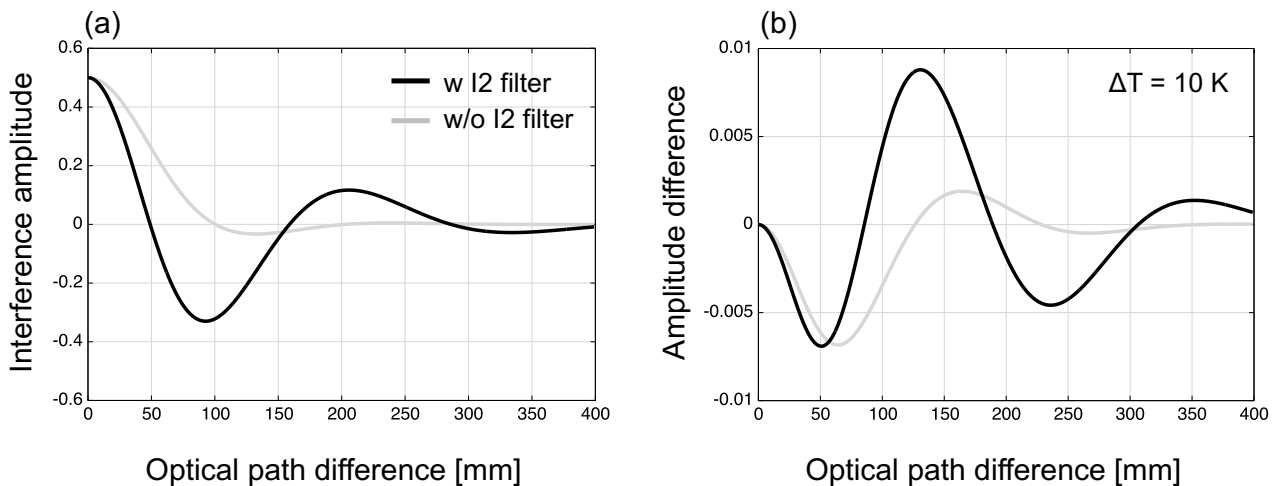


Fig. 2. (a) Interference amplitude versus optical path difference of interferometer for with (black) and without (gray) iodine vapor filter. (b) Interference amplitude difference with temperature change of 10 K.

干渉計の光路差は、レイリー散乱のスペクトル幅に感度を持たせるように設定する。すなわち、気温変化に伴う干渉コントラストの変化が最大になるようにする。干渉コントラストの振幅は、光路差に依存し、ヨウ素フィルターの有無によっても異なる (Fig. 2(a))。振幅の符号が変わるところでは干渉縞の位相が反転する。位相が反転するところ (振幅が 0 付近) では関数フィッティングが難しいため、ヨウ素フィルター有りの場合は光路差が 50, 160, 275, 400 mm 付近は適さない。Figure 2(b)は気温が 10 K だけ高い時の振幅の差を示す。ヨウ素フィルター有りの場合は光路差が 130 mm の時に振幅差の絶対値が最大となる。また、ヨウ素フィルターを使用した場合の方がヨウ素フィルター無しと比べて最大値が約 30 %大きく、より測定感度が高いといえる。

#### 4. おわりに

本稿では、大気粒子・気温・風の鉛直プロファイルを同時に計測するライダー手法について、システム構成とパラメータ導出方法を簡単に記述した。また、干渉計の光路差について検討し、光路差が約 130 mm の時に気温に対する測定感度が高いことがわかった。本システムでは、ヨウ素フィルターを用いることで大気粒子成分を完全に除去し、大気分子成分のみを選択して測定できるため、エアロゾル層や雲の内部でも気温・風の情報を抽出できるのが大きな利点である。

#### 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 22K03723 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 1) Forster et al.: IPCC AR6 report, Chapter 7 (2021).
- 2) Gentry et al.: Opt. Letters (2000) p. 1231.
- 3) Cezard et al.: Appl. Opt. (2009) p. 2321.
- 4) Pirronen and Eloranta: Opt. Letters (1994) p. 234.