

# 小型マルチモードレーザーを用いた 低コスト高スペクトル分解ライダーの開発 その2

神 慶孝<sup>1</sup>, 青木 誠<sup>2</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>情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

## Development of low-cost high-spectral-resolution lidar using compact multimode laser (Part 2)

Yoshitaka JIN<sup>1</sup>, Makoto AOKI<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

**Abstract:** A low-cost high-spectral-resolution lidar (HSRL) using a multi-longitudinal mode laser and a scanning Michelson interferometer is developed for long-term quantitative measurement of aerosol profiles. Using a newly developed multimode laser, which is suited for HSRL (i.e., the laser mode spacing is matched to the free spectral range of HSRL interferometer, spectral width of laser mode is narrow, and laser frequency variation is small), a prototype HSRL system is constructed. Measurement of aerosol backscatter and extinction profiles are demonstrated using the HSRL. Errors in extinction are comparable to the previous HSRL system, which employed a commercial multimode laser, even though the laser pulse energy is 1/400 smaller. Therefore the measurement efficiency is drastically improved for this system.

**Key Words:** High-spectral-resolution lidar, Aerosol, Laser

### 1. はじめに

大気エアロゾルの鉛直プロファイルを定量的且つ長期的にモニタリングするライダー観測網の展開を主眼として、マルチ縦モードレーザーと走査型干渉計を用いた安価で簡易な高スペクトル分解ライダー (High-spectral-resolution lidar: HSRL) の開発を推進している[1,2]。HSRL は、大気分子からのレイリー散乱をエアロゾルからのミー散乱と分離して測定することで、エアロゾルの消散係数を後方散乱係数とは独立して測定できるライダー手法である。レイリー散乱はミー散乱とほぼ同じ中心波長を持つが、レイリー散乱の方がドップラー拡がりが大きいため、スペクトル幅が異なる。HSRL では狭帯域レーザーと高分解能分光素子を用いることで両者を分離して測定する。マルチ縦モードレーザーを用いた HSRL では、複数の周波数ピークを持つレーザーのモード間隔と同じ周波数間隔を持つ干渉計を分光素子として用いることでレイリー散乱とミー散乱を分離する。さらに、干渉計を1フリンジ分だけ周期的にスキャンすることで、波長制御が不要な簡易システムを実現している。

過去の研究では市販のマルチ縦モードレーザーを用いたシステムを開発し、エアロゾルの消散係数の鉛直プロファイルの計測に成功している[1]。しかし、市販のレーザーは共振器長が長い (~60 cm)、受信部でも長い干渉計を必要とする。長い干渉計を使用することで干渉計のアライメントが不安定になるだけでなく、干渉縞のコントラスト(鮮明度)が通常の HSRL と比べて小さくなる。さらに、長い干渉計を使うことで受信視野が狭くなることから、測定効率が低いという課題があった。そこで、本研究では HSRL に適したマルチ縦モードレーザーを導入することで、より実用的な HSRL の実現を目指している。昨年度の発表では、新たに開発したレーザー(主発振器)のスペクトル性能を評価し、HSRL に最適な干渉計の自由スペクトル領域に一致するモード間隔を保持しつつ、各モードのスペクトル幅を狭くすることで単一モードレーザーシステムと同等の干渉コントラストが得られたことを報告した[2]。本稿では、上記レーザーを用いたプロトタイプのリダーシステムについて紹介し、同ライダーを用いた大気エアロゾル観測の結果について報告する。

### 2. マルチモードレーザーを用いたライダーシステム

Figure 1 にライダーシステムのブロック図を示す。送信レーザーには、Nd:YAG レーザーの第二高調波(532

nm)を使用した。レーザーは、HSRLに適した発振スペクトルを保持しつつ、高いパルスエネルギーを得るため、半導体レーザー励起の主発振器出力増幅器(Master Oscillator Power Amplifier: MOPA)方式を導入している(詳細は[3,4]を参照)。レーザーの繰り返し周波数は100 Hz、パルスエネルギーは500  $\mu\text{J}$ である。ビームエクパンダ後のレーザーの拡がり角(全角)は0.5 mradである。受信部には、HSRL用として口径200 mmのシュミットカセグレン式望遠鏡を、近距離測定用として口径50 mmの屈折式望遠鏡を使用した。望遠鏡の視野角はHSRL用と近距離測定用でそれぞれ0.5 mrad、1.0 mradとした。HSRL用の望遠鏡で集められた後方散乱光はマルチモードファイバー(コア径200  $\mu\text{m}$ 、0.22 NA)で走査型マイケルソン干渉計に送られた。干渉計で分光された大気散乱光をMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を用いて検出し、高速A/D変換器(サンプリング速度160 MSPS)でデジタル化したショット毎のライダー信号をPCに記録した。

干渉計の自由スペクトル領域はミー散乱とレイリー散乱を効率的に分離する観点から決定され、1.5 GHzとした。そのため、マルチモードレーザーのモード間隔も1.5 GHzになるようにレーザー共振器長を調節した。干渉計は1フリンジ分だけ周期的にスキャンし、1フリンジあたり12点のスキャン信号を取得した。スキャン信号を正弦関数でフィッティングし、振幅とオフセットの情報から干渉コントラストを計算した。また、レーザー光の一部を干渉計に入れることでリファレンスのスキャン信号を計測した。レーザーの周波数変動に伴うフリンジの位相変動やミー散乱の干渉コントラストをリファレンス信号から抽出し、データ解析に使用した。大気散乱光とリファレンス光は99:1ファイバーカップラを用いて結合させた。

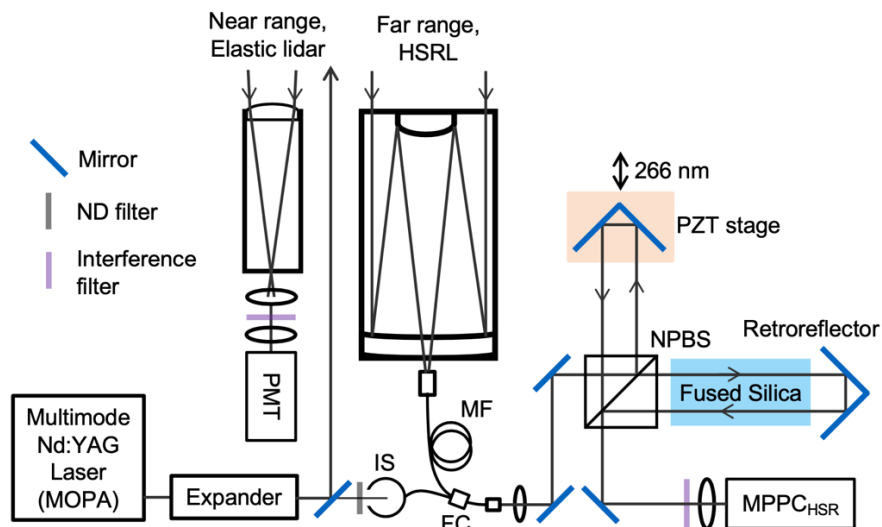
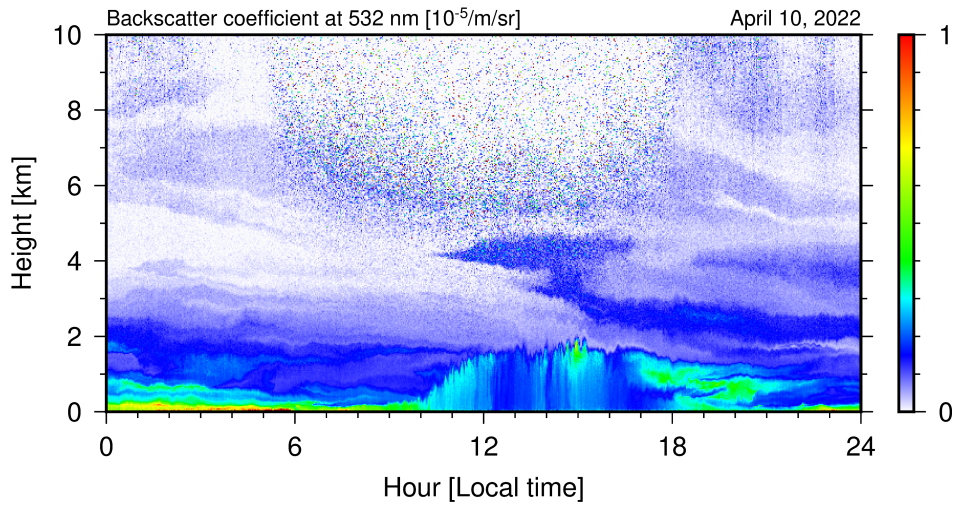


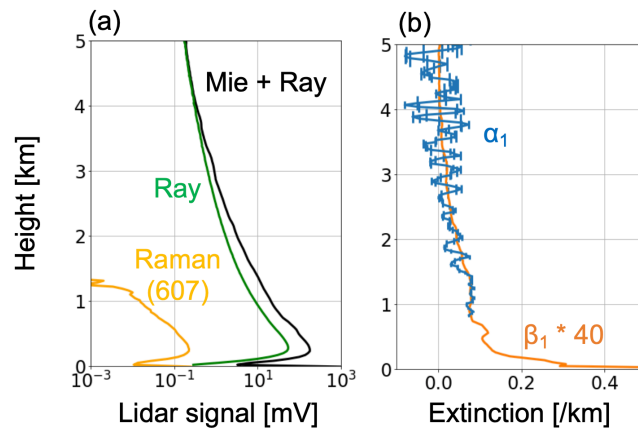
Fig. 1. Block diagram of high-spectral-resolution lidar using a multimode laser.

### 3. エアロゾルの後方散乱係数と消散係数の観測

エアロゾルの後方散乱係数は干渉計のスキャン信号から得られる干渉コントラストを用いて計算される。各高度での干渉コントラストをリファレンス信号で正規化することで、エアロゾル後方散乱係数の鉛直プロフィールが得られる。Figure 2にHSRLで測定されたエアロゾル後方散乱係数の時間高度断面図を示す。大気境界層と高度10 kmまでの自由対流圏におけるエアロゾル層について後方散乱係数が測定された(日中は背景光の影響により高度5 kmまで測定可能)。エアロゾルの消散係数はレイリー散乱信号の高度方向のスロープから計算される。レイリー散乱信号は全散乱信号(ミー散乱+レイリー散乱信号)を後方散乱比で割ることによって計算される。Figure 3に全散乱信号とレイリー散乱信号のプロファイルを示す。また、レイリー散乱信号から計算された消散係数のプロフィールも示す。この時の消散係数は、後方散乱係数にライダー比40 srをかけた場合とよく一致していた。HSRLの性能評価のため、同システムで計測した窒素ラマン散乱信号をFig. 3(a)に示す。ラマン散乱信号はレイリー散乱信号と比べて2桁以上小さいことから、本研究のHSRLがラマン散乱ライダーと比べて高感度で計測可能であることを示した。なお、本システムのレーザー出力は先行研究と比べて約400の1であったにもかかわらず、消散係数の測定誤差は同程度であった。よって、HSRLに適したレーザーを用いることによって、測定効率が格段に向上したと言える。



**Fig. 2.** Aerosol backscatter coefficient at 532 nm measured on April 10, 2022 at Tsukuba, Japan. Time and height resolutions are 2 minutes and 30 meters, respectively.



**Fig. 3.** (a) Total (Mie + Rayleigh) scattering signal (black), Rayleigh scattering signal (green), and Nitrogen Raman scattering signal (yellow). (b) Aerosol extinction coefficient profiles at 532 nm calculated from Rayleigh signal (blue) and from aerosol backscatter with the lidar ratio of 40 sr (orange). Both signals and extinction coefficients were averaged over 2 hours (02:00–04:00) on April 10, 2022 shown in Fig. 2.

#### 4. 結論

HSRLに適したマルチ縦モードレーザーと走査型干渉計を用いたHSRLシステムを開発した。また、エアロゾル後方散乱係数と消散係数の鉛直プロファイルの観測例を示した。先行研究と比べて出力が2桁以上小さいレーザーを使用したにも関わらず、消散係数の測定誤差は同程度であったことから、測定効率が格段に向上した。さらに先行研究と比べて短い干渉計を用いることでシステムの安定性が大幅に改善し、連続的な観測も可能となった。レーザーは半導体レーザー励起のため寿命が長く、且つ空冷式であることからメンテナンスフリーのシステムとなった。今後は1ヶ月以上の長期的な連続観測を実施し、エアロゾルモニタリングへの有用性を示していく。また、第三高調波(355 nm)を追加することで多波長化にも取り組む予定である。

#### 謝辞

本研究は、環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20205R01)により実施した。本研究の実施にあたり、ご支援及びご助言をいただいた同研究課題のプログラムオフィサーである環境再生保全機構の西川雅高氏、アドバイザーである東京都立大学の阿保真氏、東北工業大学の佐藤篤氏、気象研究所の酒井 哲

氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Y. Jin et al.: Appl. Opt. (2017) p. 5990.
- 2) 神 慶孝, 青木 誠 : 第 39 回 レーザ センシング シンポジウム 予稿集 (2021) p. 25.
- 3) 青木 誠, 神 慶孝 : 第 39 回 レーザ センシング シンポジウム 予稿集 (2021) p. 29.
- 4) 青木 誠, 神 慶孝 : 第 40 回 レーザ センシング シンポジウム 予稿集 (2022).