

# 高スペクトル分解能ライダーの製作とライダー比の導出

末永 義樹, 恒吉 智明, 眞子 直弘, 竹内 延夫, 久世 宏明  
千葉大学 環境リモートセンシング研究センター (〒260-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

## Constructing High-Spectral-Resolution Lidar and Derivation of Aerosol Lidar Ratio

Yoshiki SUENAGA, Tomoaki TSUNEYOSHI, Naohiro MANAGO,  
Nobuo TAKEUCHI and Hiroaki KUZE  
CEReS Chiba Univ., 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba 260-8522

### Abstract

Lidar ratio,  $S_1$ , is a parameter giving the ratio between the extinction and backscattering coefficients of aerosol. Although the parameter is indispensable for solving the lidar equation, its value changes drastically in accordance with changes in aerosol parameters such as size distribution and complex refractive index. The technique of high-spectral resolution lidar (HSRL) has been developed to monitor the value of  $S_1$  by achieving the separation between the molecular and aerosol backscattering signals. In this work, we report on the progress of construction of an HSRL setup for the purpose of obtaining  $S_1$  and comparing the value with those from both Raman lidar observation and Mie scattering calculation based on the data from ground sampling instruments.

**Key Words:** Lidar, HSRL, Lidar ratio, Iodine

### 1. はじめに

エアロゾルの種類や粒径、物理的特徴は多様であり、エアロゾル種の特定は容易ではない。一般的なライダー信号解析では、エアロゾルのライダー比  $S_1$  (消散係数/後方散乱係数) を仮定してライダー方程式を解く必要がある。 $S_1$  は約 10~100sr と大きく変化し、例えば海洋性のエアロゾルでは約 25 sr<sup>1)</sup>、黄砂やダストなど大陸性の中では約 50 sr という値を取る<sup>2)</sup>。千葉大学 CEReS では現在、地上サンプリング測器データから求めたライダー比を、波長 355 nm のラマンライダーを用いて、波長 387 nm の窒素ラマン信号から導出したライダー比との比較を行っている<sup>3)</sup>。また、先行研究として国立環境研究所ではつくばでの HSRL と東京でのラマンライダーによる黄砂のライダー比同時観測も行われている<sup>4)</sup>。

本研究では、ライダー信号解析のためのライダー比を実測から求めることが可能である高スペクトル分解能ライダー HSRL (High-Spectral-Resolution Lidar) を用いて、地上サンプリング測器データ及びラマン散乱ライダーから得られるライダー比との比較検証を行うため、波長 532 nm レーザーと超狭帯域ヨウ素分子フィルターを使った HSRL の設計と構築、並びに大気・エアロゾル後方散乱係数を分離するヨウ素フィルターの吸収スペクトル測定を行い、発振レーザーシステムの波長誤差を測定した。

### 2. 高スペクトル分解能ライダー HSRL

ミー散乱ライダーから消散係数及び後方散乱係数を定量的に導出するためには、ライダー比  $S_1$  の仮定のもとにインバージョン法を適用する必要がある<sup>5)</sup>。ライダー比を仮定して解析を行う場合には、高度に依存しない一定値を用いることになるが、高スペクトル分解ライダーでは大気分子とエアロゾルによる後方散乱信号の広がり幅の差を利用し、超狭帯域ヨウ素分子フィルターを用いることで式(1)、式(2)からエアロゾル消散係数と後方散乱係数を独立に推定でき、高度毎のエアロゾルライダー比を求めることが可能となる。

$$P_t = P_0 G(r) \frac{ct_0}{2r^2} A \{ \beta_{\text{mol}}(r) + \beta_{\text{aer}}(r) \} \quad (1)$$

$$\times \exp \left[ -2 \int_0^r \{ \alpha_{\text{mol}}(r') + \alpha_{\text{aer}}(r') \} dr' \right]$$

$$P_{\text{mol}} = P_0 G(r) \frac{ct_0}{2r^2} A \beta_{\text{mol}}(r) \quad (2)$$

$$\times \exp \left[ -2 \int_0^r \{ \alpha_{\text{mol}}(r') + \alpha_{\text{aer}}(r') \} dr' \right]$$

高スペクトル分解能ライダーの重要な構成の1つとして、ヨウ素分子による 532 nm 周辺の光吸収を利用した超狭帯域フィルターを採用していることが挙げられる。通常、大気分子は非常に微小 (数Å = 10<sup>-10</sup> m 程度) であるため、平均速度が約~300 m/s で熱運動しており、これに由来するスペクトル線のドップラー広がり幅は可視光領域で 3 GHz程度である。それに対してエアロゾルは大気分子よりも相対的に大きい (1 nm~100 μm) 粒子であるため、風速程度 (~10 m/s 程度) の速度しかもたない。その周波数広がり幅は数 100 MHz 程度であり、散乱スペクトル幅に大きな差をもたらす。一方、ヨウ素分子は可視光領域に半値全幅 2 GHz 程度の鋭い吸収線を持つため、これをバンドストップフィルタとして大気後方散乱信号の中のエアロゾルに起因する信号を除くことができる。

### 3. 装置

今回製作した高スペクトル分解能ライダーの概要図を Fig. 1 に、受信系の写真を Fig. 2 に示す。送信レーザーには波長 532 nm、パルスエネルギー125 mJ、パルス繰り返し周波数 20 Hz の Injection-Seeded Nd:YAG レーザー (Surelite I-20, Continuum) を採用し、レーザー光の一部を送

信側ヨウ素セル (直径 35 mm、セル長 400 mm) に通過させて光強度を検出し、設定値と実際の発振波長とのズレを pm オーダーで確認している。受信系にも送信系と同様のヨウ素セルを設け、ヨウ素セルに受信光を通過させない Total channel ( $P_t$ ) と通過させる Molecular channel ( $P_{mol}$ ) の 2 つのチャンネルで受信光強度を測定する。望遠鏡直径は 305mm であり、SM ファイバーで受信光を伝送している。

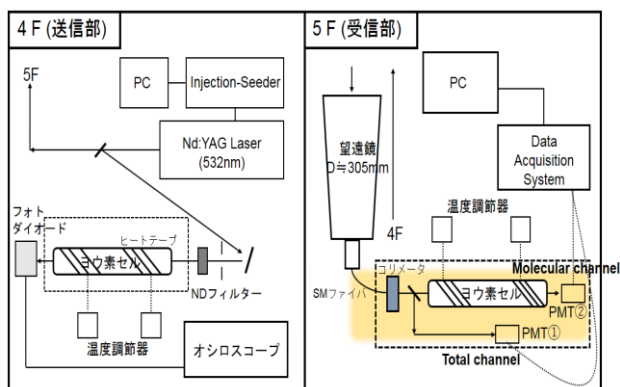


Fig.1 Design of HSRL

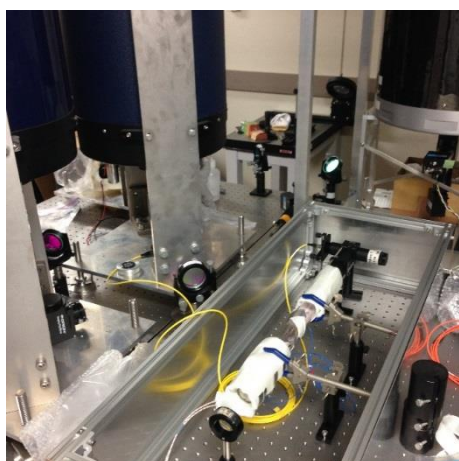


Fig. 2 Receiving system of HSRL

#### 4. 吸収スペクトルの測定

Fig.4 にセル温度 50°C、室温 22°C の場合の 532 nm 付近のヨウ素吸収線スペクトルを示す。*Atlas du spectre d'absorption de la molecule d'iode, 14800 - 20000 cm<sup>-1</sup>*, [S.Gerstenkorn and P.Luc, 1978]<sup>6)</sup> を吸収波数の基準とし、標準大気の屈折率を 1.000273 とすると、吸収線 No.1111 ~ 1109 (文献値: 532.091 ~ 532.109nm) の波長帯では全て約 7 pm の表示誤差があることが確認された。

フィルターとして用いる吸収線の候補として、吸収が強い他の吸収線の影響が比較的小さいと思われる No.1109 を利用する予定であるが、今回までに行った実験では完全な吸収は見られず以前透過率が高いことが問題として挙げられる。これはヨウ素セルを覆う遮光箱内での光の反射や迷光が原因だと考えられる。また、現在の測定条件下では吸収線幅にはドップラー幅の寄与が大きいが、狭帯域フィルターとして理想的な線幅 (~2GHz) よりも広がっており、この点についても今後の検討が必要である。

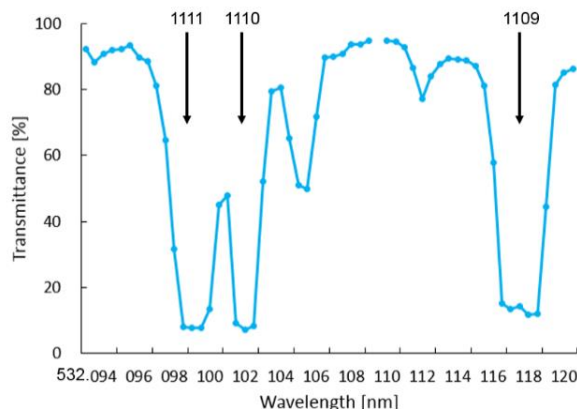


Fig.4 Iodine absorption line in No.1111, 1110, 1109

#### 5. まとめ

高スペクトル分解能ライダーの製作を進めており、送信系については基本的な形は完成した。受信系部分については、今後、送信レーザー光軸と望遠鏡の平行化を進める必要がある。また、計算機上で Injection-Seeder 用のソフトウェアを使用して波長の確認を行っており、そのソフト上での表示と実際に発振されている波長のズレを確認することは可能であるが、自動校正システムにはなっていない。HSRL では pm オーダーでの波長管理が必要であるため、レーザー波長校正の自動修正に関する取り組みも行っていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) K.W.Dawson, N.Meskhidze, et al.: Space observations of the lidar ratio of marine aerosols (2015) *Atmos.Chem.Phys*, pp.3241-3255
- 2) 杉本 伸夫, 松井 一郎, 清水 厚, 小林 喬郎: 能動型と受動型リモートセンサーの複合利用による大気汚染エアロゾルと雲の気候影響研究 (2006) 環境省地球環境研究総合推進費 平成 18 年度研究成果報告, (2), pp.24-42
- 3) 恒吉智明, 眞子直弘, 斎藤隼人, Nofel Lagrosas, 久世宏明: ラマンライダーと地上サンプリングデータによるライダー比の比較 (2015) 33LSS 予稿集, pp. 30-31
- 4) Z.Liu, N.Sugimoto, and T.Murayama: *Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral resolution lidar and Raman lidar* (2002), *APPLIED OPTICS*, Vol. 41, No. 15
- 5) 笠原三紀夫, 東野達: エアロゾルの大気環境影響 (2015) 4.3.4, pp. 161
- 6) S.Gerstenkorn, P.Luc: *Atlas du spectre d'absorption de la molecule d'iode, 14800 - 20000cm<sup>-1</sup>* (1978)