

気温計測用回転ラマンライダーのための多波長分光検出器の開発

矢吹 正教¹、松木 一人²、内保 裕一²、竹内 栄治²、長谷川 壽一²

¹ 京大生圏研究所 (611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 英弘精機株式会社 (161-0072 新宿区東京都渋谷区幡ヶ谷 1-21-8)

Development of a Double-Grating Multi-channel Spectrometer for a Rotational Raman Lidar for Profiling the Atmospheric Temperature in the Lower Troposphere

Masanori YABUKI¹, Kazuto MATSUKI², Yuichi UCHIHO², Eiji TAKEUCHI²,
and Toshikazu HASEGAWA²

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011

² EKO Instruments Co., Ltd, Shibuya-ku, Tokyo 151-0072

E-mail: yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract: Information on thermodynamic profiles is essential to understand a fundamental mechanism of localized heavy rains and to improve weather forecasting. We have constructed a Raman lidar system for profiling temperature and water vapor in the lower troposphere using a laser at a wavelength of 266 nm. An ability to acquire continuous water vapor profiles observed by this Raman lidar has already been reported. Here, we introduce a newly developed multi-channel detector for the pure rotational Raman lidar based on a double-grating spectrometer to satisfy the sufficient blocking of the elastic backscatter signal in the rotational Raman channels.

Key Words: Temperature, rotational Raman lidar, double-grating spectrometer

1. はじめに

気象水災害の要因となる局所的で時間変動が激しい大気現象の理解のためは、高い時空間分解能での気温と水蒸気の定量計測が重要である。本グループでは、気温・水蒸気の昼夜連続計測を指向し、太陽放射の影響の少ない波長 266 nm のレーザーを光源とするラマンライダーを 2014 年より開発してきた¹⁾。うち水蒸気計測部については、森林域での通年観測や対流圏オゾン濃度の高い都市部での観測を通じて、長期運用の実証および精度検証を行ってきた^{2,3)}。気温計測部では、純回転ラマンスペクトルのストークスとアンチストークスの両方をアレイ検出器で取得する多波長検出方式を採用している。回転ラマンスペクトルの両サイドの信号を用いることで、レーザー波長精度や検出波長調整に起因する計測波長誤差に対するロバスト性が向上する。一方で、気温推定のためには回転ラマンスペクトルの中央に位置する強い弾性散乱光の除去が大きな課題となっていた。ここでは、回転ラマン散乱光に検出用に開発したダブルモノクロメータ方式の多波長検出器と計測例を中心に紹介する。

2. ラマンライダーおよび多波長分光検出器の概要

図 1 に、ラマンライダーの概要を示す。光源には波長 266 nm の Nd:YAG レーザー (Continuum, Surelite I-10; パルスエネルギー: 最大 60 mJ (運用は 20-30 mJ), 繰り返し周波数: 10 Hz) を使用して、口径 350 mm の望遠鏡でラマン散乱光を受光する。偏光で分岐した 2 成分の散乱光のうち、弾性散乱の少ない成分を回転ラマンスペクトル計測 (気温計測) に、多い成分を振動ラマン散乱計測 (水蒸気計測) に使用する。深紫外領域は対流圏オゾンによる影響を受けるため、波長 266 nm のラマンライダーは対流圏オゾン補正用に酸素分子の振動ラマン信号を同時に検出することが特徴である⁴⁻⁵⁾。

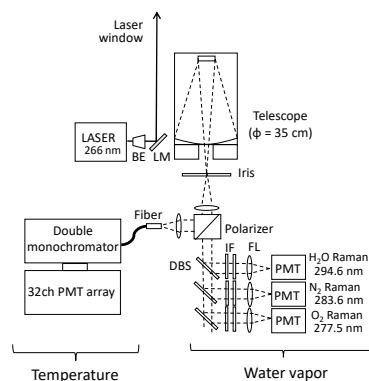


Fig.1 Schematic setup of Raman lidar. (BE: beam expander, LM: laser mirror, FL: focusing lens; ND: neutral density filter; DBS: dichroic beam splitter; IF: interference filter; PMT: photomultiplier tube).

図2に、開発した多波長分光検出器の概要を示す。分光部は焦点距離 500 mm のブルモノクロメータで構成され、受光面にアレイ検出器 (SP32-HR, Licel) を配している。望遠鏡で受光した後方散乱光は、刻線密度の異なる2つの回折格子で分光される。また純回転ラマンスペクトル中央の強い弾性散乱光は偏光子と分光器内に設置した空間フィルターにより取り除くことで、弾性散乱光に起因した迷光の影響を 10^{-7} 以下にまで減衰させることができた。

スペクトルからの気温推定は、ラジオゾンデとの比較から求めた気温依存関数を用いる。この手法では、回転ラマンスペクトルの理論値との比較から求める手法に比べて、計測波長分解能などの計測設定に起因した誤差による影響を低減できる利点がある。一方で、ラジオゾンデとの比較から校正値を求めて回転ラマンスペクトルから気温を推定する場合、計測レンジが異なるために気温以外の効果（減衰項の波長依存性など）が誤差要因となる可能性がある。そこで、レーザーを射出した直後のレーザー照射空間を精密に温調できる地上校正装置を開発し、大気および地上校正装置で計測したスペクトルからの気温推定で整合する結果が得られることを確かめた⁶⁾。この校正装置で得られる信号は、ライダー方程式における減衰光の波長依存性の影響が無視できるため、今後のラジオゾンデとの校正値変動の評価に有効となる。

図3にライダーとゾンデの観測例を示す。高度 150 m から約 1000 m まで整合する結果が得られた。純回転ラマンスペクトルの波長 266 nm 前後は、振動ラマンスペクトル波長に比べてオゾン吸収による影響を受けやすいため、オゾン濃度の高い都市域での評価が必要となる。

謝 辞

本稿で引用している気温ライダー地上校正装置の一部は、元京都大学生存圏研究所・藤田陽一郎氏が開発に携わりました。本研究の一部は、公益財団法人東京都中小企業振興公社「平成 30 年度 新製品・技術開発助成事業」、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「平成 25 年度 イノベーション実用化ベンチャー支援事業」の一環として行われた。

参考文献

- 1) 矢吹ら, 第 32 回レーザーセンシングシンポジウム (飛騨高山) (2014.9.4-5) P-16.
- 2) Yabuki, M. et. al., EPJ Web of Conferences 237 (2020) 03001.
- 3) Uchiho, Y. et al., 30th International Laser Radar Conference (ILRC 30, online) (2022.6.26-7.1).
- 4) Renaut, D. et. al., Opt. Lett., 5, 232 (1980).
- 5) Lazzarotto, B. et. al., Appl. Optics, 40, 2985 (2001).
- 6) Fujita et al., AGU fall meeting 2020 (2020.12.1-12.17).

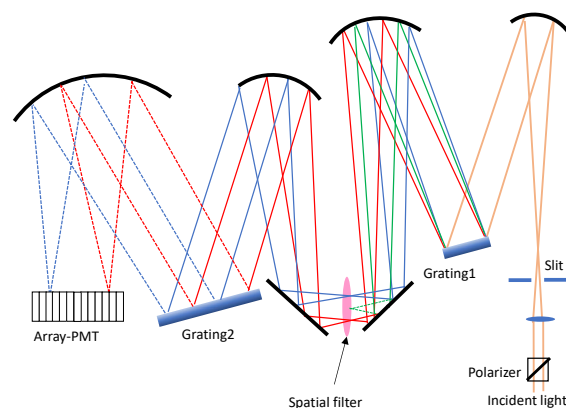


Fig.2 optical design of the double-grating spectrometer for the rotational Raman lidar.

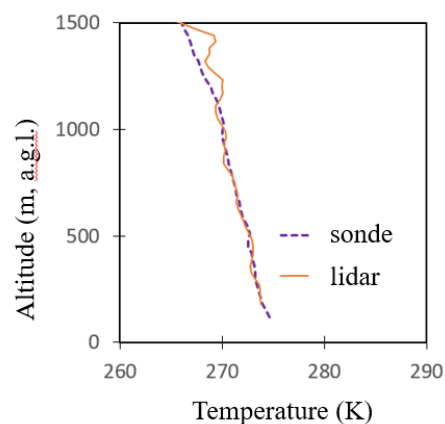


Fig.3 Example of the temperature profiles observed by radiosonde and lidar (8:00 – 8:15JST on Dec. 5, 2019, Shigaraki).