

気温・水蒸気の昼夜連続計測のための UV-C ラマンライダーの開発

矢吹正教¹⁾、上杉拓磨¹⁾、吉川賢一¹⁾、塚本誠²⁾、長谷川壽一²⁾、津田敏隆¹⁾
M. Yabuki¹⁾, T. Uesugi¹⁾, K. Yoshikawa¹⁾, M. Tsukamoto²⁾, T. Hasegawa²⁾ and T. Tsuda¹⁾

- 1) 京都大学生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH),
Kyoto University
- 2) 英弘精機株式会社 EKO Instruments. Co., Ltd

Abstract

Temperature and water vapor profiling in the atmosphere are essential for studying atmospheric processes such as dynamics, thermodynamics, and cloud physics. In this study, a combination of the temperature lidar with a multispectral detector is proposed, in order to construct a system that is robust and easy to align for the detection of rotational Raman signals. Furthermore, we present a design of the UV-C Raman lidar system using a quadrupled Nd:YAG laser at a wavelength of 266 nm for continuous monitoring of temperature and water vapor. This wavelength is in the ultraviolet (UV) range known as the “solar-blind” region. It has the advantage of having no daytime solar background radiation in the system.

1. はじめに

局所的な豪雨などの大気現象や大気微量物質の変質過程の理解のためは、高い時空間分解能での気温と水蒸気の定量計測が欠かせない。本研究では、回転・振動ラマン散乱計測を基礎とした気温・水蒸気ライダーの開発を目的とする。気温は、分光器と光検知器アレイによる回転ラマンスペクトルの計測より導出する。純回転ラマン散乱光のストークス成分および反ストークス成分の両方を計測する本手法は、従来の狭帯域干渉フィルターを組み合わせる分光計測する方法と比較して、小型でありながらレーザーや受光系の波長安定性能に対する誤差を低減できることが期待できる。また、振動ラマン散乱信号を用いた水蒸気計測は、夜間は高精度の計測ができるものの、背景光雑音の影響が大きくなる日中は観測精度が悪くなるという課題があった。そこで、本研究グループでは、気温・水蒸気の昼夜連続計測を指向し、ソーラーブラインド領域となる波長 266 nm の UV-C レーザーを用いたラマンライダーの開発を進めている。ここでは、可視レーザーを用いて実施した回転ラマンスペクトル計測からの気温導出試験と、開発中の UV-C ラマンライダーの概要について報告する。

2. 分光器と光検知器アレイを用いた回転ラマンスペクトルの計測

回転ラマンスペクトルの計測試験は、京都大学生存圏研究所の信楽 MU 観測所 (34.9° N, 136.1° E) のレイリー・ラマンライダー¹⁾の波長 532 nm の射出システムと、口径 250 mm φ の望遠鏡を用いて実施した。ラマンスペクトルの計測には、Sharmrock SR-500i (Andor Technology) を分光器として使用した SP32-200 (Licel) を使用し、波長 532 nm における波長分解能は 0.5 nm とした。弾性散乱による影響を軽減するため、レーザー偏光と直行する散乱成分のみを用いた。さらに、また波長 532 nm の散乱光が検出器に入る前にブロックする機構を分光器内に設けた。図 1 に、2013 年 11 月 5 日 19:32~23:12 にかけて取得された各高度のラマン散乱スペクトルの形状

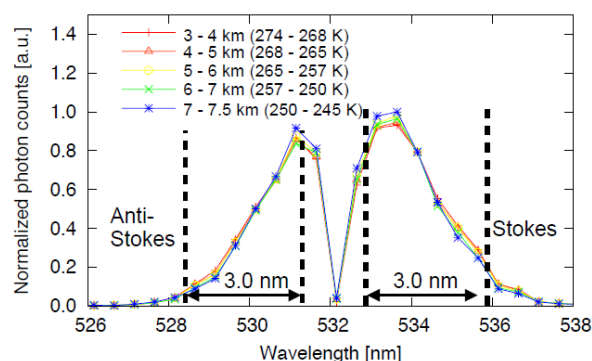


Figure.1 Height-resolved rotational Raman spectrum over Shigaraki at 19:32–23:12 JST on November 5, 2013.

を示す。また、20:29 に放球したラジオゾンデで取得した各高度の気温範囲をグラフの凡例に記載した。この実験では、望遠鏡で受光した光をファイバーに導入する部分で大幅な損失が生じたため、4 時間の積算時間を要したものの、高度（温度）に依存した回転ラマンスペクトルの変化を捉えることができた。高度 3500~7500 m の範囲において、積算高度を 800 m としたときのラジオゾンデ計測値とライダーからの推定値とのずれの最大は 2.3 K であった。この手法を、次節で述べる UV-C ラマンライダーに適用すべく、光学系の最適化を行っている。

3. UV-C ラマンライダーの特徴とシステムの概要

微弱なラマン散乱光を検出するラマンライダーでは、日中の太陽光が要因となる SN 比の低下が避けられない。そこで、本研究グループでは、ソーラーブラインド領域の波長 266 nm のレーザーを用いた UV-C ラマンライダーの開発を行っている。波長 355 nm と 266 nm を光源としたライダー観測に対する、統計誤差の距離分布の特徴を図 2 に示す。波長 355 nm のレーザーを用いた水蒸気ライダーから見積もられる統計誤差は、2013 年 10 月 11 日の 4:00 と 7:00 に信楽 MU 観測所で取得された水平観測データを基に計算した。この波長帯では、夜間（4:00）は距離 3000 m まで統計誤差 10% 以内に収まるが、日の出とともに信号の SN 比は低下し、7:00 の時点では、500 m 以上の距離において統計誤差は 50% を超えた。また、波長 355 nm の 4:00 の信号を基に理論的に計算した、波長 266 nm の 4:00、7:00、12:00 の統計誤差を図 2 に示す。ここで、オゾン濃度は 40 ppb で距離によらず一定とした。波長 355 nm を光源としたライダーと比べて、波長 266 nm ではレイリー散乱の増加やオゾンによる吸収の効果が大きくなる。そのため、4:00 に取得された波長 355 nm のライダーと比較すると、統計誤差は相対的に大きくなる。一方で、時間帯（太陽高度）に関わらず、十分な信号光強度が得られる距離 2000 m までの統計誤差の大きさはほとんど変化しない。遠方で差が増加したのは、窒素ラマン散乱波長（283.6 nm）と水蒸気ラマン散乱波長（294.6 nm）に含まれる微弱な背景光強度の時間変化が要因である。

図 3 に、開発中の UV-C ラマンライダーの概要を示す。本システムは、高度 1000~2000 m までの大気境界層内の気温と水蒸気の高精度観測を目的としている。光源には波長 266 nm の Nd:YAG レーザーを使用して、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。また、オゾン吸収による影響を取り除くため、窒素分子だけでなく酸素分子の振動ラマン散乱計測も行う。2014 年冬までにシステムを組み上げ、評価・実証観測を実施する予定である。

【参考文献】

- Behrendt, A., Nakamura, T., Onishi, M., Baumgart, R., and Tsuda, T., *Appl. Opt.*, **41**(36), 7657-7666, 2002.

【謝辞】 本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「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。

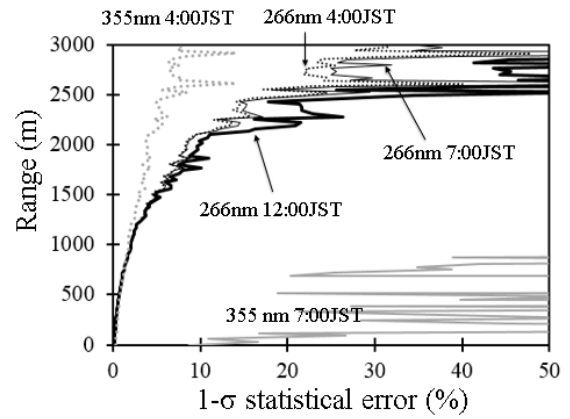


Figure.2 Profiles of statistical error for water vapor lidar for the incident laser wavelengths of 355 nm and 266 nm on October 11, 2013.

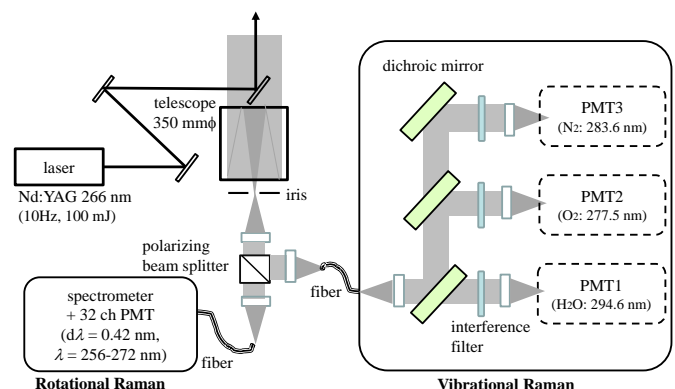


Figure.3 Schematic sketch of UV-C Raman lidar setup for continuous monitoring of water vapor and temperature.