# 多波長分光計を用いた気温計測用ラマンライダーの地上校正手法

藤田　陽一郎[1], 矢吹　正教[1], 竹内 栄治[2], 長谷川 壽一[2]
[1]京都大学生存圏研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
[2]英弘精機株式会社（〒151-0072 東京都渋谷区幡ヶ谷 1-21-8）

# A ground-based calibration technique for temperature Raman lidar with a multispectral detector

Yoichiro FUJITA[1], Masanori YABUKI[1], Eiji TAKEUCHI[2], and Toshikazu HASEGAWA[2]
[1]*Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011*
[2] *EKO Instruments Co., Ltd., 1-21-8 Hatagaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-0072*

Abstract: Rotational Raman Lidar (RRL) has been developed to obtain temperature profiles with high spatiotemporal resolutions. However, we must obtain its associated calibration factors to estimate the temperature during the observations and this is the main cause limiting the multipoint deployment and long-term operation of RRL. In this study, to establish a versatile calibration method for Raman lidar with in situ observations, we propose a system to obtain the rotational Raman spectrum in the laser irradiation area on the ground without combined measurements from other instruments before emitting into the atmosphere. We constructed a prototype unit of the ground-based compact calibration system and demonstrated its capability to obtain reference spectrum corresponding to each temperature.

**Key Words**: Raman lidar, temperature profiling, multispectral lidar detector

## 1. はじめに

気温の鉛直分布は、深刻な水災害をもたらす局地豪雨およびヒートアイランドに代表される都市気候の理解のために重要なパラメータである。Wulfmeyer et al.(2015)[1]の報告によると、気象予測のためのデータ同化に必要な大気境界層における気温計測条件は、鉛直分解能が 100-300m、時間分解能が 5-15 分、また気温の精度が 1K 以内、バイアスが 0.2-0.5K である。

これら要件を満足する気温分布測定が可能な装置の一つとして、回転ラマンライダーの開発が進められてきた。ラマンライダーでは空間分解能の高い計測が期待されるが、ラジオゾンデ等との比較による定期校正を必要とする点が多点展開や長期運用の際の課題となっていた。本研究では、天候、立地等の環境条件によらずに運用可能で現業観測に適した地上校正手法を開発し、実証実験を通じてその性能を評価することを目的とする。

## 2. 気温ラマンライダーの原理

気温計測ライダーは純回転ラマンスペクトルの気温依存性を利用する。広く使われている２波長法(図 1(a))(例えば、Radlach et al. 2005)[2]では透過波長の異なる二枚の干渉フィルタと二台の光検出器を組み合わせて使用し、気温依存性が相反した２波長域の信号強度比から気温を求める。一方、多波長法（図１（b））は多波長分光計を用い、広い帯域で微小波長帯ごとの信号強度を計測する。スペクトル全体の形状を利用することで、レーザー波長や検出波長のズレに対しロバスト性の向上が期待できる。

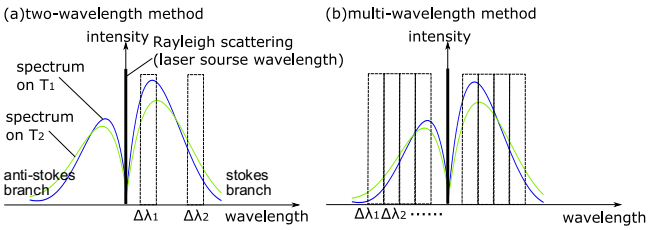


Figure 1. Schematics of the rotational Raman lidar techniques: a) two-wavelength method, (b)multi-wavelength method.

## 3. 地上校正手法

本研究では、上空へ射出前のレーザーの照射領域から散乱光を検出し、校正値を連続的に得る手法を提案する。図 2 に示す装置はレーザー照射領域の周りにコイル状の管を巻いて受光系を取り付けたものであり、管の中の液温を変化させ照射領域の気温を制御することにより、複数の気温についてラジオゾンデによる校正と同等の参照スペクトルを得る。

この系は、天候や立地に依存せず制御された理想的な環境条件に対して校正値を求められるため、ラジオゾンデによる観測が難しい都市域にて多点展開を行うのに適している。またライダー受光系と参照スペクトルを得る受光系を分離しているためにライダー観測と併行して連続的な校正が行えるので、高精度な気温推定が期待できるリアルタイム校正へ応用が可能である。

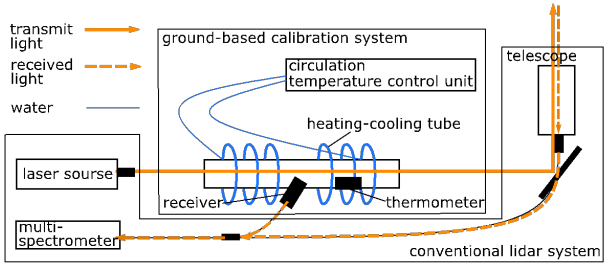


Figure 2. Proposed ground-based calibration system

## 4. 地上校正装置の検証実験

図 3 に示す地上校正系を試作し、レーザー照射領域の気温制御や気温に応じた基準スペクトルの取得が可能であるかを検証した。光源を波長 266nm の Nd:YAG レーザーとし、スペクトルの計測には 32ch の光検出器アレイを用いた。また照射領域の気温が空間的に一様であるか確認するため、光路を囲む対角線上に 4 つの気温計を設置した。

照射領域の周りを循環させる液体の温度を 5～35℃まで 6 ℃おきに各液温で 1 時間安定するよう設定し、その間の照射領域気温、スペクトルの記録を行なった。

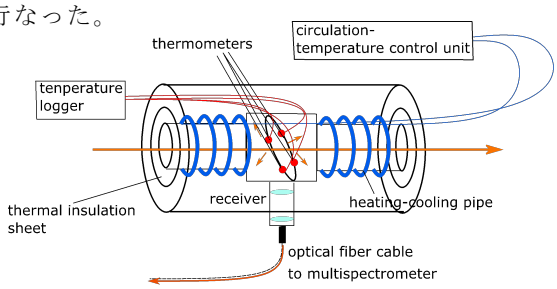


Figure 3. Experimental setup of ground-based calibration system

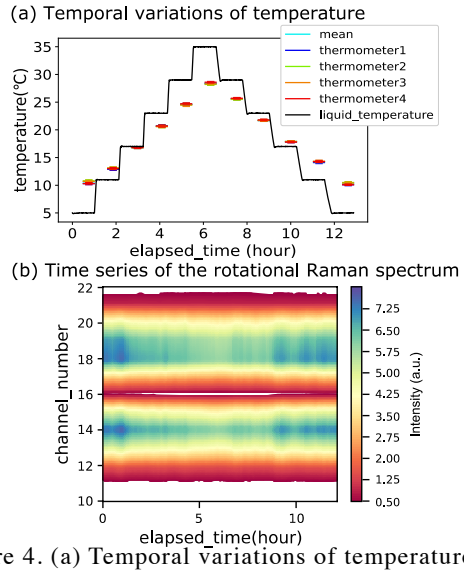


Figure 4. (a) Temporal variations of temperature of a circulating constant-temperature water (black line) and in a small detection area installed in the neighborhood of the laser beam path (other color lines). (b) Time series of the rotational Raman spectrum in a detection area observed by the multispectral lidar detector.

校正用空間（レーザー照射領域）気温の液温に対する応答性が悪く、気温推定に用いた 30 分の信号積算時間における校正用空間の気温の標準偏差は最大で 0.2K であったが、気温変化（図 4(a)）に対応して回転ラマンスペクトルが変化する様子を捉えられた（図 4(b)）。

図 5 に、照射領域の各温度ステップに対するスペクトルを示す。各チャンネルでの信号強度は ch10、21 の信号強度の和で正規化しており、チャンネルごとに相対信号強度と気温の関係を求めて気温推定を行うと 2 波長法に対応した解析手法となる。この手法において ch14,15,17,18 を用いた場合の気温推定精度を見積もったところ、0.8K-1.4K であった。この誤差は、図 4 (a)に示す校正用空間の気温変動による影響を含むため、校正システムの気温の応答性・安定性を改善することで、気温推定精度を高めることが可能と考えられる。

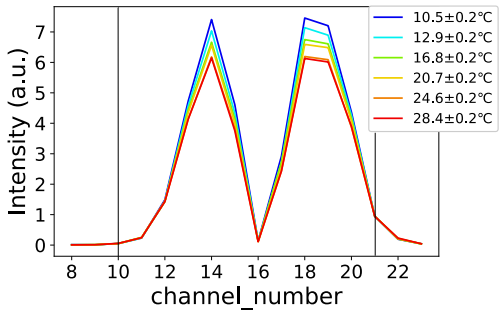


Figure 5 Temperature dependence of rotational Raman spectrum normalized by the sum of the values in ch10 and ch21.

## 5. まとめと今後の課題

本稿では射出前のレーザー照射領域における回転ラマンスペクトルを計測し、スペクトル形状の温度依存性から校正値を見積もる手法を提案した。また地上校正系を試作し、照射領域の気温制御や気温に応じたスペクトルの取得が可能であることを確認した上で、２波長法に相当する手法にて気温推定精度について検討した。

今後はロバスト性の高い複数波長を利用した解析法の確立と評価、および本手法をリアルタイム校正に応用する際の課題抽出を行う。

## 参考文献

1） Wulfmeyer V. et. al. (2015) A review of the remotesensing of lower tropospheric thermodynamic profilesand its indispensable role for the understandingand the simulation of water and energy cycles.Rev Geophys 53:819-895.

2） Radlach, M. et al (2005), Scanning rotational Raman lidar at 355nm for the measurement of tropospheric temperaturefields, Atmos. Chem. Phys., Vol. 8, 159-169.