

GNSS 可降水量とメソ数値予報モデルを用いた 水蒸気ラマンライダーの校正手法の研究

柿原 逸人¹, 矢吹 正教¹, 津田 敏隆¹, 塚本 誠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 study on calibration techniques for water vapor Raman lidar using GNSS-PWV and meso-scale model

Hayato KAKIHARA¹, Masanori YABUKI¹, Toshitaka TSUDA¹,
Makoto TSUKAMOTO², and Toshikazu HASEGAWA²

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

²EKO INSTRUMENTS CO., LTD, 1-21-8 Hatagaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-0072

Water vapor is an important component in atmospheric processes such as the atmospheric energy budget and global water cycle. Raman lidar techniques are useful for observing water vapor profiles. However, the calibration factor must be determined before estimating water vapor mixing ratio from Raman signals. Because calibration factor is typically evaluated by comparing with the result of radiosonde observations, it is difficult to apply lidar observations at sites where radiosonde observations cannot be carried out. In this study, we propose a new calibration technique for water vapor Raman lidar using global navigation satellite system (GNSS)-derived precipitable water vapor (PWV) and Japan Meteorological Agency meso-scale model (MSM). The analysis was accomplished by fitting the GNSS-PWV to integrated water vapor profiles combined with the MSM and the results of the Raman lidar observation. This technique can be applied to lidar signals under a limited height range due to weather conditions and lidar specifications.

Key Words: water vapor, Raman lidar, GNSS-PWV, meso-scale model

1. はじめに

豪雨などの局所的な大気現象の理解や、気象予報精度の向上のためには、高い時空間分解能での水蒸気の定量観測が重要である。空気分子のラマン散乱光の計測を基礎としたライダー手法は、水蒸気の鉛直分布計測に適している。ラマン散乱信号から水蒸気混合比を推定するためには、各検出波長の受光効率等を考慮した校正係数を定める必要がある。一般的にはラジオゾンデによる水蒸気観測の結果との比較より、校正係数の推定が行われている。このため、ラジオゾンデ観測ができない場所においては、ラマンライダーによる精度の高い水蒸気推定が難しいという課題があった。

本研究では、全地球航法衛星システム(GNSS)を用いて推定される可降水量(PWV)と気象庁のメソ数値予報モデル(MSM)を利用した、ラジオゾンデ観測を必要としない水蒸気ラマンライダーの校正手法を提案する。この手法では、低層雲の存在やライダーの仕様により、限られた高度範囲のデータしか取得できない場合でも、原理上は校正係数を決定することができる。光源にソーラーブラインド波長である紫外C領域波長のレーザーを使うと、日中の背景光雑音の影響を無視できる利点がある一方で、強いオゾン吸収により対流圏全層の計測は困難となる。ここでは、大気境界層の水蒸気プロファイルの昼夜連続計測を指向し、本グループで構築した小型 UV-C ラマンライダー¹⁾の信号に、提案手法を適用した初期解析結果について報告する。

2. UV-C ラマンライダー

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: 60 mJ, 繰返し周波数: 10 Hz) を使用して、口径 200 mm の

望遠鏡 (Raymetrics) でラマン散乱光を受光する。UV-C ラマンライダーの場合は、オゾン補正のため窒素・水蒸気・酸素に対応する 3 波長のラマン信号を利用する。水蒸気混合比は、分光した各ラマン信号の強度 P_{λ_x} を用いて、次式により求められる²⁾。

$$m_{\text{lidar}}(z) = KF(z)$$
$$F(z) = \left(\frac{P_{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}}(z)}{P_{\lambda_{\text{N}_2}}(z)} \right) \left(\frac{P_{\lambda_{\text{O}_2}}(z)}{P_{\lambda_{\text{N}_2}}(z)} \right)^{\Delta\text{O}_3} \Delta T \quad (1)$$

K : 校正係数 (g/kg)

P_{λ_x} : H_2O , N_2 , O_2 のラマン散乱信号

ΔO_3 : オゾン光吸収の波長依存性の補正項

ΔT : 光路中における光減衰の波長依存性の補正項

3. GNSS 可降水量と MSM を用いた手法

MSM とラマンライダー観測を統合して得られる水蒸気混合比の鉛直分布積算量が、GNSS 可降水量と一致するように (図 1 参照)、次式を用いて校正係数 $K_{\text{M+G}}$ を求めた。

$$\int_{p_0}^{p_1} K_{\text{M+G}} F(z(p)) dp + \int_{p_1}^{p_2} m_{\text{MSM}}(z(p)) dp = \text{PWV}_{\text{GNSS}} \quad (2)$$

$K_{\text{M+G}}$: 本手法で求める校正係数

$m_{\text{MSM}}(z(p))$: MSM から導出した水蒸気混合比

PWV_{GNSS} : GNSS から導出した可降水量

p : 気圧

ライダー信号を用いる上限高度 $z(p_1)$ は、大気条件を考慮して時間毎に異なる値を用いた。

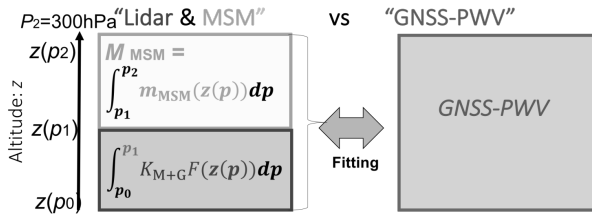


Figure 1. Schematic of the new Raman-lidar calibration method using GNSS-PWV and MSM. K_{M+G} is estimated by fitting the GNSS-PWV to integrated water vapor profiles combined with the MSM (M_{MSM}) and the results of the Raman lidar observation. This method can be applied to lidar signals under a limited height range due to weather conditions and lidar specifications.

4. 結果

校正手法の決定精度の検証のため、①ラジオゾンデを用いた手法(校正係数: K_S)、②MSMを用いた手法(校正係数: K_M)、③GNSS可降水量とMSMを用いた手法(提案手法; 校正係数: K_{M+G})の3通りについて調べた。検証は、信楽MU観測所にて2016年6月に行われた、UV-C水蒸気ラマンライダー観測、GNSS可降水量観測、ラジオゾンデ観測(6月13日13:30 JST放球)の結果を用いた。GNSSデータからの可降水量の推定には、RTNet ver 3.3.0(日立造船)を用いた。観測所上空のMSMの値は、信楽MU観測所に隣接するMSM格子点(5 kmメッシュ)のデータを補間して算出した。

それぞれの手法で求めた校正係数(K_S, K_M, K_{M+G})の時間変化を図2に示す。また、解析に使用するライダー信号の高度 $z(p_1)$ は、上限高度を2 kmとし、それよりも下に雲が出現した場合は雲底高度に設定した。表1に、 $z(p_1)$ が2 kmであった期間A・Bと、それ以外の低層雲が出現した期間Cに分けて導出した校正係数をまとめた。まず、ラジオゾンデを使った校正係数 K_S は1.36(標準偏差: 0.041)であり、この値を基準に各手法の導出精度を比較した。MSMのみを使った校正係数 K_M は、期間A・Bでは過小評価となり、期間Cでは過大評価となった。一方、提案手法で求めた校正係数 K_{M+G} と K_S の差は、期間A・Bでは1.5%以下、期間Cでは3.0%となった。1プロファイルごとの校正係数の決定精度は必ずしも高くはないが、平均値が十分に収束する量のデータが得られれば、誤差の少ない校正係数の推定が可能であると考えられる。

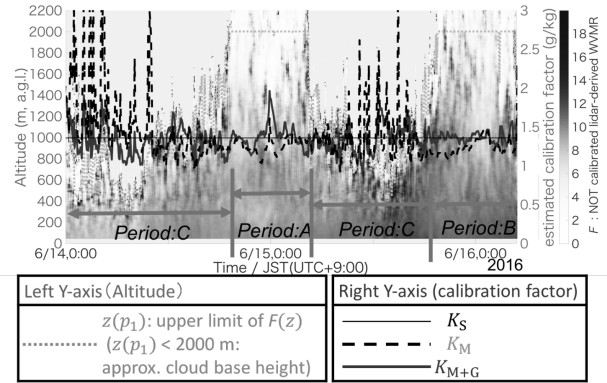


Figure 2. Time series of the vertical distribution of $F(z)$ derived from the Raman lidar signals. A dotted line indicates the upper limit of $F(z)$. Thin-solid, dashed, and thick-solid lines are the calibration factors estimate by three procedures as described in Sec. 3. The value of K_S is estimated by the water vapor profiles of radiosonde launched at 13:30 JST on June 13, 2016.

Table 1. Mean values of the estimated calibration factors for each case. Values in parentheses are the standard deviations.

Calibration factor			
K_S	1.36		
	Period: A	Period: B	Period: C
K_M	1.25 (0.091)	1.24 (0.092)	1.45 (0.49)
K_{M+G}	1.38 (0.16)	1.37 (0.071)	1.32 (0.18)

参考文献

- 1) 矢吹正教、上杉拓磨、塚本誠、長谷川壽一、岡谷 良和、津田敏隆、UV-C ラマンライダーによる水蒸気の昼夜連続計測、第 33 回レーザーセンシングシンポジウム (2015).
- 2) Renault, D., Pournay, J.C., Capitini, R., Daytime Raman-lidar measurements of water vapor. Optics Letters 5, 233-235 (1980).