

三菱電機社製 DIAL と気象研究所ラマンライダー、ラジオゾンデによる水蒸気鉛直分布の比較観測

酒井 哲¹、吉田 智¹、永井智広¹、西橋政秀¹、及川栄治¹、清水慎吾²、前坂剛²、白石浩一³、原口英介⁴、矢野謙也⁴、辻秀伸⁴、今城勝治⁴

¹気象研究所 (〒355-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

²防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

³福岡大学 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 8-19-1)

⁴三菱電機 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

Comparison of water vapor vertical distributions obtained with Mitsubishi coherent DIAL, Meteorological Research Institute Raman lidar, and radiosonde

Tetsu SAKAI¹, Satoru YOSHIDA¹, Tomohiro NAGAI¹, Masahide NISHIHASHI, Eiji OIKAWA, Shingo SHIMIZU², Takeshi MAESAKA², Koichi SHIRAIISHI³, Eisuke Haraguchi⁴, Kenya YANO⁴, Hidenobu TSUJI⁴, and Masaharu Imaki⁴

¹Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

²National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006

³Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180

⁴Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

Abstract: Vertical distributions of water vapor concentration measured with coherent differential absorption lidar (DIAL) developed by Mitsubishi Electric Corporation, Raman lidar (RL) at Meteorological Research Institute, and radiosonde were compared at Tsukuba, Japan in April-July 2023.

The mean absolute differences (MAD) of DIAL-derived water vapor mixing ratios from those derived with radiosondes at altitudes between 0.2 and 1.1 km were +0.50~-1.36g/kg and the root mean square difference (RMSD) was 1.58 g/kg, and those of the RL-derived data were +0.38 g/kg~-0.43g/kg and the RMSD was 1.20 g/kg.

Key Words: Water vapor, Coherent DIAL, Raman lidar, Radiosonde, Lower Atmosphere

1. はじめに

集中豪雨や局地的大雨の発生・発達には、大気下層の水蒸気が大きな影響を与えていると考えられているが、その詳細なメカニズムはよく分かっていない。これを解明し、大雨の予測精度向上につなげるためには、水蒸気の鉛直分布を正確に観測することが不可欠である。ライダーは水蒸気鉛直分布を連続的に測定できるため、豪雨のメカニズム解明、数値予報精度向上、実況監視への利用が期待されている。

本発表では、2023年4-7月につくば市の気象研究所において、三菱電機が開発したコヒーレント差分吸収式ライダー¹⁻³⁾ (以下 DIAL) の水蒸気濃度鉛直分布データを、気象研究所が開発したラマンライダー⁴⁾ (以下 RL)、高層気象台のラジオゾンデ観測データと比較し、検証を行った結果を報告する。

2. 三菱電機社製コヒーレント差分吸収式ライダー (DIAL) と気象研ラマンライダー (RL)

Table 1 に DIAL と RL の諸元を示す。DIAL は半導体レーザー (波長 1531 nm 付近) を使用し、送信光と後方散乱光の光路中での水蒸気吸収量の差と吸収断面積から水蒸気濃度を求める。また同時にドップラーシフトを観測することにより視線方向 (4 方向) の風速を得る。水蒸気観測の時間分解能は 10 分、高度分解能は 200 m、高度範囲は高度 0.25 km~約 1.05 km (昼夜問わず) である。RL は Nd: YAG レーザー (波長 355 nm) を使用し、大気中の水蒸気と窒素分子によるラマン後方散乱光の強度比から水蒸気混合比を求める。観測の時間分解能は 20 分、高度分解能は 75-150 m、高度範囲は約 0.1~約 0.8 km (日中) もしくは約 5 km (夜間) である。RL の観測精度については、ラジオゾンデ観測値との比較から誤差 10% 以内 (平均二乗偏差 (RMSD) 1.05 g/kg 以下) と評価されている³⁾。

DIAL の特徴は、1) 屋外観測が可能な小型シェルター (W110×D90×H80 cm) に収納されていること、2) 重さ 150kg と軽量であるために輸送が容易であること、3) 半導体レーザーを使用するためメンテナンス頻度が RL に比べて少ないこと、4) 水蒸気観測値の校正が不要なこと等がある。これらの特徴は DIAL が豪雨のメカニズム解明や予報精度向上、実況監視への利用に適していることを示す。

Table 1 Specifications of DIAL and RL used in this study.

Lidar	DIAL	RL
Laser Transmitter	DFB-LD and fiber amplifier	Nd:YAG
Wavelength	1531.3828 nm (on) 1531.5550 nm (off)	355 nm
Average power	~40 μ J/pulse	~200 mJ/pulse
Repetition rate	32 kHz	10 Hz
Telescope diameter	7 cm	40 cm
Detection method	Coherent	Direct
Data quantities	Water vapor density and wind speed	Water vapor mixing ratio
Temporal resolution	10 minutes (water vapor) 1 minute (wind)	20 minutes
Vertical resolution	200 m (water vapor) 100 m (wind)	75m (below 1km)/ 150 m (above 1km)

3. 比較観測結果

3.1 2023年5月25-26日の比較観測

Figure 1 に 2023 年 5 月 25~26 日につくば市の気象研究所において DIAL と RL で観測した水蒸気混合比の高度-時間断面図を示す。DIAL と RL の距離は約 10 m である。なお、DIAL の水蒸気濃度データについては、ライダーから約 300 m 離れた館野の直近のラジオゾンデの気温、気圧観測データを用いて水蒸気混合比に変換した。この期間つくば市はほぼ晴天で、26 日 2 時から 5 時頃にかけては地上で霧が観測された。RL の観測結果 (Fig.1b) を見ると、高度約 0.6 km 以下の水蒸気混合比は 6~10 g/kg の範囲内であったことが分かる。DIAL の観測結果 (Fig.1a) を見ると、水蒸気混合比の範囲は RL とほぼ同じであるものの、26 日 1~6 時で値の変動が大きい。また、高度 0.88 km では継続して 10 g/kg 以上の高い値を示している。このような特徴は RL データには見られない。

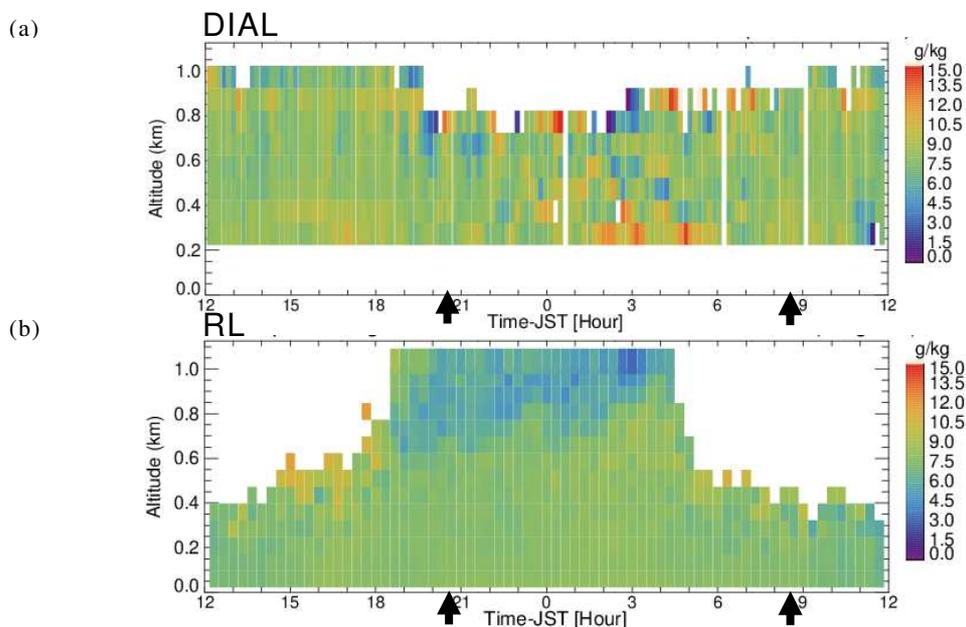


Figure 1 Time-altitude cross section of water vapor mixing ratio obtained with (a) Mitsubishi DIAL and (b) MRI RL on 25–26 May 2023 at Tsukuba. The data after quality control are plotted. Arrows in the bottom show the time when collocated radiosondes were launched shown in Fig. 2.

Figure 2 に 25 日 20:30JST と 26 日 8:30JST におけるライダーとラジオゾンデ観測値との比較結果を示す。DIAL データ (◆) は、25 日 20:30JST の高度 0.77 km でラジオゾンデ観測値より高い値を示している (Fig. 2a)。RL データ (▲) を見ると 8:30JST の高度 0.28 km 以上でラジオゾンデ観測値 (□) からやや外れているが (Fig.2b)、それ以外ではほぼ対応していることが分かる。DIAL データの誤差要因として考えられるのは、1) 光周波数雑音による受信信号のスペクトラム形状変化、2) 吸収 (on) 波長レーザーの波長ロックずれである。三菱電機ではこれらの問題を改善すべく現在改良を進めている。

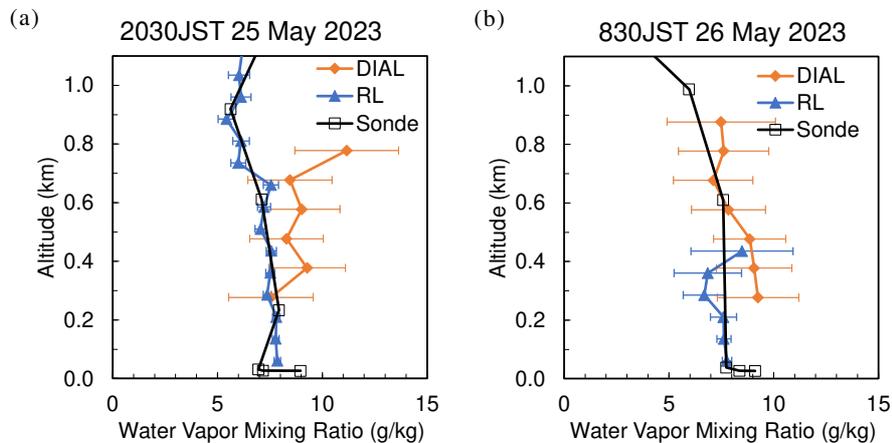


Figure 2 Vertical distributions of water mixing ratio obtained with Mitsubishi DIAL (Orange diamond), MRI RL (blue triangle), and radiosonde (open black square) at (a) 20:30JST on 25 May and (b) 8:30JST on 26 in 2023 at Tsukuba.

3.2 長期間（40日間）のラジオゾンデ観測との比較結果

ライダー観測の長期安定性を調べるため、40日間のライダー連続観測データをラジオゾンデ観測データと比較した結果を Figure 3 に示す。比較期間は DIAL が 4 月 6 日～5 月 15 日、RL が 5 月 23 日～7 月 8 日（停電等による停止期間 6 月 1 日～6 月 7 日を除く）の 40 日間である。比較時刻はラジオゾンデ放球時間の毎日 8:30JST と 20:30JST である。2 つの図で比較点数が異なる（DIAL は 336、RL は 1036）理由は、主に観測高度範囲の違いによるものである（DIAL は 0.27–1.07 km、RL は 0.14–3.7 km）。DIAL とラジオゾンデの比較結果（Fig.3a）を見ると、2 つの観測値の回帰直線の傾きは約 1.007、切片 0.003 g/kg、相関係数 0.984、平均二乗偏差（RMSD）は 1.58 g/kg であった。RL とラジオゾンデの比較結果（Fig. 3b）では回帰直線の傾き 1.015、切片 -0.011 g/kg、相関係数 0.997、RMSD=1.20 g/kg であった。

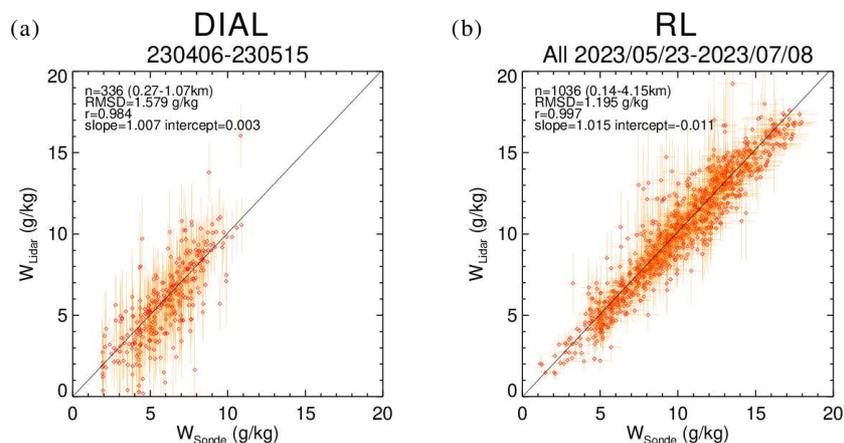


Figure 3 Scatter plots of water vapor mixing ratios obtained with (a) Mitsubishi DIAL and (b) MRI RL versus those obtained with radiosonde at 8:30JST and 20:30JST for 40 days. The periods are between 6 April and 15 May 2023 for (a) and between 23 May and 8 July 2023 for (b).

Figure 4 に各ライダーとラジオゾンデ観測値の差の平均値と標準偏差を高度別にプロットした結果を示す。この結果を見ると DIAL データとラジオゾンデデータとの平均差は高度 0.27～1.08 km の範囲で +0.5 g/kg～-1.36 g/kg（+8%～-40%）の差であった（Fig.4a）。一方 RL データは高度 0.13～1.14 km の範囲で +0.38 g/kg～-0.43 g/kg（+3.4%～-5.4%）の差であった（Fig. 4b）。ライダーとラジオゾンデ観測値の差として考えられる原因は、1）ライダーとラジオゾンデが観測する空気塊の違い（ライダーは直上の空気を観測するのに対し、ラジオゾンデは風に流されながらその場の空気を観測する）、2）DIAL については、各高度ごとに差し引く補正值（波長制御をかけている on 波長光と制御をかけていない off 波長光の光周波数雑音が異なるため、各高度で算出される水蒸気量にオフセットが生じることを補正する値）の誤差、3）RL については校正係数の誤差や光電面感度分布の不均一さによる誤差、4）ラジオゾンデ観測値の誤差（日射補正誤差等）が考えられる。

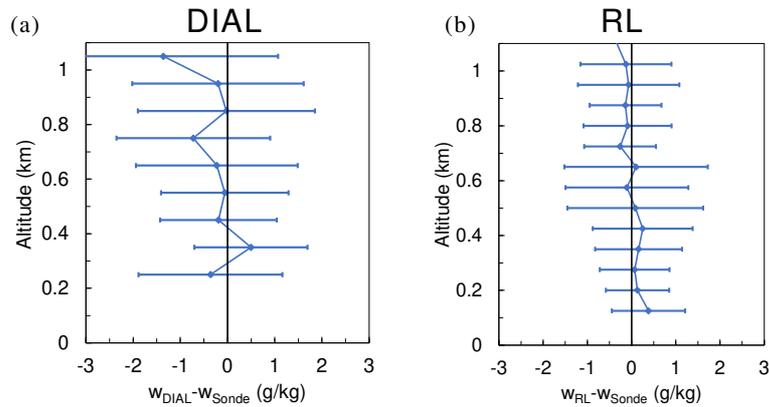


Figure 4 Vertical variation of mean absolute difference of water vapor mixing ratio obtained with (a) Mitsubishi DIAL and (b) MRI RL from that obtained with radiosonde at 8:30 JST and 20:30 JST. Symbols and error bars show the mean and standard deviation. The periods of the comparisons are the same as Fig. 3.

4. まとめ

三菱電機社製 DIAL の水蒸気観測データを、気象研究所 RL、ラジオゾンデ観測データと比較し検証を行った。ラジオゾンデ観測データとの比較では、平均二乗偏差は DIAL が 1.58 g/kg で RL が 1.1 g/kg、ライダー観測高度点 (0.1~1.1 km) ごとの平均差は DIAL が +0.5 g/kg ~ -1.36 (+8% ~ -40%)、RL が +0.38 g/kg ~ -0.43 g/kg (-5.4% ~ +3.4%) であった。DIAL は可搬性や取り扱い、メンテナンス性の点で RL より優れていることから、今後は水蒸気観測データの誤差要因に関する改善が望まれる。

謝 辞：本研究は JSPS 科研費 (22H00250、代表：酒井) の助成を受けたものです。

5. 参考文献

- 1) M. Imaki, H. Tanaka, K. Hirose, T. Yanagisawa, and S. Kameyama: Opt. Express, **28** (2020) 27078-27096.
- 2) M. Imaki, K. Hirose, T. Yanagisawa, S. Kameyama, and H. Kuze: Appl. Opt., **59** (2020) 2238-2247.
- 3) 原口英介、矢野謙也、辻秀伸、今城勝治: 第 41 回レーザーセンシングシンポジウム予稿 (2023) .
- 4) T. Sakai, T. Nagai, T. Izumi, S. Yoshida, and Y. Shoji: Atmos. Meas. Tech., **12** (2019) 313-326.