

つくばにおける DIAL、ラマンライダー、ドローン、ラジオゾンデ による水蒸気と風の比較観測

酒井 哲¹、吉田 智¹、瀬古 弘¹、西橋政秀¹、及川栄治¹、永井智広¹、矢野謙也²、
原口英介²、今城勝治²、白石浩一³、清水慎吾⁴、前坂剛⁴、猪上淳⁵、佐藤和敏⁵

¹ 気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

² 三菱電機 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

³ 福岡大学 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 8-19-1)

⁴ 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

⁵ 国立極地研究所 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

Comparison of water vapor and wind vertical distributions measured with DIAL, Raman lidar, drone, and radiosonde at Tsukuba

Tetsu SAKAI¹, Satoru YOSHIDA¹, Hiromu SEKO¹, Masahide NISHIHASHI¹, Eiji OIKAWA,
Tomohiro NAGAI¹, Kenya YANO², Eisuke HARAGUCHI², Masaharu IMAKI², Koichi SHIRAI³,
Shingo SHIMIZU⁴, Takeshi MAESAKA⁴, Jun INOUE⁵, and Kazutoshi SATO⁵

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

² Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

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

⁴ National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006

⁵ National Institute of Polar Research, 10-3, Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518

Abstract: Vertical distributions of water vapor and horizontal wind in the lower troposphere were compared with coherent differential absorption lidar (DIAL), Raman lidar (RL), drone, and radiosonde at Tsukuba, Japan from 1 November 2023 to 23 July 2024. The water vapor mixing ratios obtained with these instruments mostly agreed within the measurement uncertainties under the cloud-free conditions in 20–21 April 2024. The root mean square differences (RMSDs) of the water mixing ratio between lidars and radiosonde for the period were 2.07 g/kg and 0.76 g/kg for DIAL and RL, respectively, suggesting that further quality control is necessary for the lidar data. We will show the result of the comparison of wind measurement data in the presentation.

Key Words: Water vapor, horizontal wind, coherent DIAL, Raman lidar, Drone, Radiosonde, Lower Atmosphere

1. はじめに

全国各地に甚大な被害をもたらす集中豪雨や局地的大雨の発生には、大気下層から大量に流入する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、大気下層の水蒸気と風の分布を精度良く観測することが不可欠である。これらの鉛直分布を観測する機器（測器）として、ラジオゾンデ、ライダー、ドローン等があるが、それぞれ観測高度や時間・高度分解能、精度、観測可能な条件が異なる。したがって、これらの測器を有効に使うためには、その特性を把握しておくことが望ましい。本発表では、2023 年 11 月～2024 年 7 月につくば市の気象研究所において、三菱電機社製コヒーレント差分吸収式ライダー¹⁻³⁾（以下 DIAL）、気象研究所のラマンライダー⁴⁾（以下 RL）、気象観測用ドローン（タイプエス社製 R-SWM PF2 等）、ラジオゾンデ（明星電気社製 iMS-100）を用いて大気下層水蒸気と風の比較観測を行った結果を報告する。

2. 観測装置

比較観測に用いた測器の写真を Fig. 1 に、それらの特徴を Table 1 に示す。DIAL (Fig. 1a) は波長 1531 nm 付近の半導体レーザーを使用し、送信光と後方散乱光の光路中の水蒸気吸収による減衰量の差から水蒸気濃度の鉛直分布を算出する。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の風速を算出する。観測データの時間分解能は 10 分、高度分解能は 100 m、高度範囲は高度 0.25 km～約 1.05 km である。RL (Fig. 1b) 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算出する。観測データの時間分解能は 20 分、高度分解能は 75–150 m、高度範囲は約 0.1～約 1 km（日中）もしくは約 5 km（夜間）である。ドローン (Fig. 1c) は機体に露点温度、風速、気温、気圧センサーを搭載しており、1 秒間隔で各要素を測定する。今回は上昇・下降速度 2.6

m/s で、高度 0.9 km までの鉛直観測を行った。ラジオゾンデ (Fig. 1d) は気象庁の現業観測で使用されているもので、気温、相対湿度センサーを吊り下げたゴム気球を飛揚して各要素の鉛直分布を測定する。また、水平風速と風向の鉛直分布を GPS の測位情報から算出する。

比較観測は、2023 年 11 月から 2024 年 7 月にかけて、気象研究所と高層気象台の敷地内で行った。観測データを比較する時に注意すべき点は、各測器が完全に同じ空気塊を観測していない点である。測器間の水平距離は、2 つのライダー間が 12 m、それらとドローン飛揚場所の間が 100 m 以内、ラジオゾンデ放球場所との間が約 300 m 離れている。さらに、ラジオゾンデは上昇中に風に流されながらその場の大気を観測するのに対し、ライダーとドローンは観測場所直上の大気を観測する。

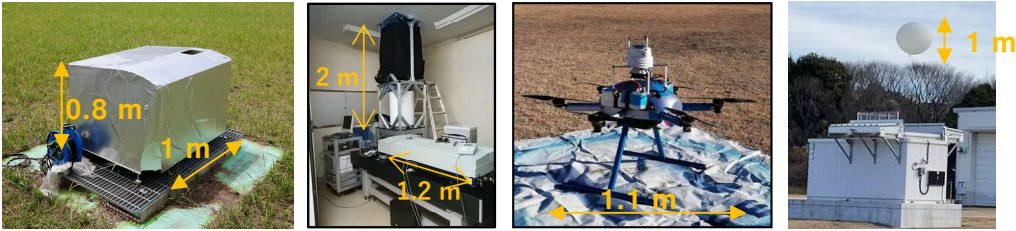


Figure 1 Photographs of measurement instruments used in this study (from left to right: DIAL, RL, drone, and radiosonde).

Table 1 Specifications of measurement instruments used in this study.

Instruments	DIAL	RL	Drone	Radiosonde
Measured quantities	・ Water vapor density ・ Wind	・ Water vapor mixing ratio	・ Relative humidity ・ Wind ・ Temperature ・ Pressure	・ Relative humidity ・ Wind ・ Temperature
Height range	0.2–1.1 km (Water vapor) 0.2–2 km (Wind)	0.1–1 km (Day) 0.1–5 km (Night)	0–0.9 km	0–~30 km
Vertical resolution	100 m	75–100 m	2–3 m	5–6 m
Temporal resolution for vertical profiling	10 min.	<20 min.	~5 min.	~2 hour (twice daily at 9 and 21JST)
Measurement condition	No thick cloud or rain (or below cloud base)	No thick cloud or rain (or below cloud base)	Horizontal wind speed < 12 m/s and no rain	–

3. 比較観測結果

3.1 2024 年 4 月 20~21 日の例

2024 年 4 月 20 日~2024 年 4 月 21 日の比較観測結果を Figure 2 に示す。この期間は低気圧が日本上空を東進し、暖湿流が南西海上から流入していた。この流入により、つくばでは、21 日 19:47JST 以降に弱い雨 (0.5 mm 以下) を観測した。Figure 2a に RL で観測した波長 355 nm の後方散乱強度の高度-時間断面図を示す。低気圧の接近にともない、4 月 20 日 15 時頃から散乱強度の大きい雲底高度が約 6 km から下がり始め、21 日の 19 時頃には高度 1 km となっていることが分かる。その後 20 時以降は、降水による減衰により信号強度が小さくなっている。

Figure 2b と 2c に 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。なお、DIAL の水蒸気濃度データは、ラジオゾンデの気温と気圧データを用いて水蒸気混合比に変換した。低気圧の接近にともない、20 日 15 時以降に高度 1 km 以下の水蒸気混合比が 5 g/kg 以上に増加する様子を、どちらのライダーも捉えている。2 つのライダー観測データを比べると、DIAL データは観測値のばらつきが若干大きいものの、RL で見られるような日中の観測高度の低下はない。RL データは太陽背景光ノイズのため日中の観測高度が最低 0.3 km まで下がっているが、観測値のばらつきは小さく、水蒸気の鉛直構造の時間変化 (例えば 20 日 21 時~翌 5 時頃の高度 0.3~0.8 km にある乾燥領域) を捉えていると思われる。

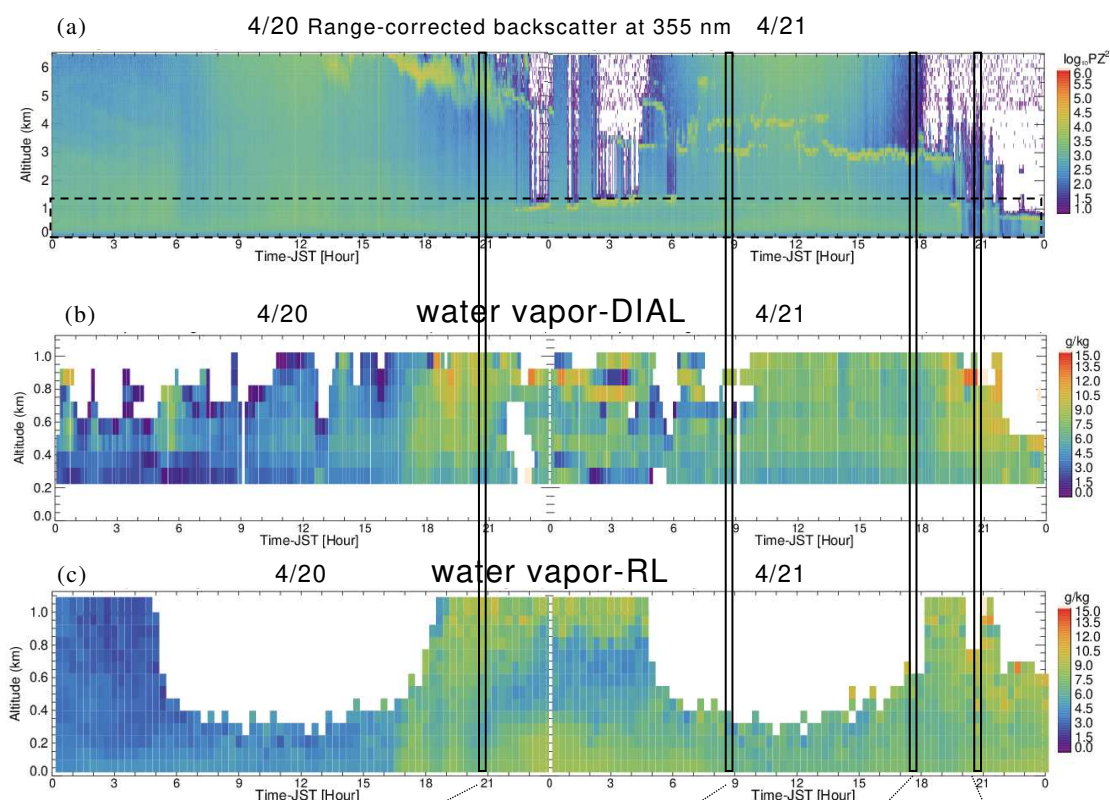


Figure 2 Time-altitude cross sections of (a) range-corrected backscatter signal at 355 nm obtained with RL and water vapor mixing ratios obtained with (b) coherent DIAL and (c) RL for 20–21 April 2024 at Tsukuba. For (b) and (c), the quality-controlled data are plotted. Solid rectangles over (a)–(c) show the time when radiosonde or drone measurements were made (Fig. 3). Dashed rectangle in (a) shows the height range of (b) and (c).

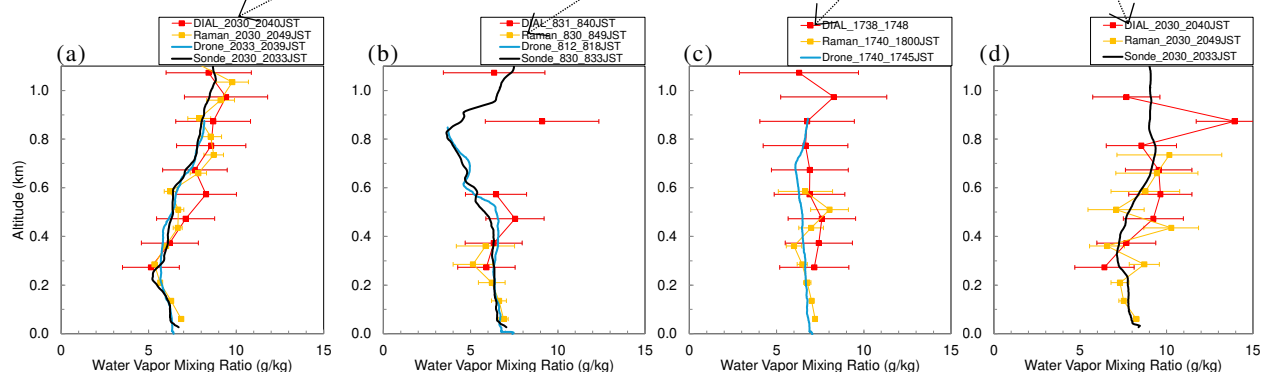


Figure 3 Vertical distributions of water vapor mixing ratio obtained with DIAL (red squares), RL (orange squares), drone (blue line), and radiosonde (black line) at (a) 20:30JST on 20 April, (b) 8:30JST, (c) 17:40JST, and (d) 20:30JST on 21 April 2024 at Tsukuba.

Figure 3に期間中のほぼ同時刻に DIAL、RL、ドローン、ラジオゾンデで観測した水蒸気混合比の鉛直分布を示す。この図を見ると、4 測器の観測データが一部を除いて不確かさの範囲内で一致していることが分かる。雲の無い夜間は4つの測器とも高度 1 km まで観測できている (Fig. 3a)。日中は、先にも述べたように RL の観測高度が低下する (Figs. 3b, c)。弱い降水時 (Fig. 3d) はライダーとラジオゾンデ観測値の差が大きくなる。これは雲粒や降水粒子により信号が減衰したためと考えられる。

3.2 ライダーとラジオゾンデとの長期間観測データの比較結果

ライダーの長期安定性を調べるため、約 9 月間 (2023 年 11 月 1 日～2024 年 7 月 23 日) の DIAL と RL データをラジオゾンデデータと比較した結果をそれぞれ Figures 4 と 5 に示す。比較時刻は、ラジオゾンデ放球時間の 8:30JST と 20:30JST である。2つの図で比較点数が異なる理由は、主にライダーの観測高度範囲の違いによるものである (DIAL は高度 0.27～1.07 km の 1436 点、RL は高度 0.14～5.2 km の 7103 点)。

DIAL とラジオゾンデの比較結果 (Fig. 4a) は、2つの観測値の回帰直線の傾きが約 1.011、切片が -0.004 g/kg、相関係数が 0.977、平均二乗偏差 (RMSD) が 2.07 g/kg であった。また、水蒸気混合比が 5 g/kg 以下

の場合に DIAL データがラジオゾンデデータより若干低いことが多かった。この原因については現在調査中である。高度別の平均差 (Fig. 4b) を見ると、全高度で $0.2 \sim 1 \text{ g/kg}$ の範囲内で一致していた。

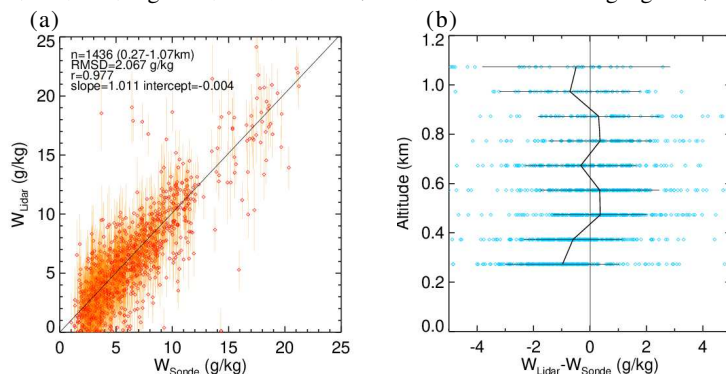


Figure 4 Scatter plot of the water vapor mixing ratios obtained with DIAL versus radiosonde (a) and vertical distribution of the difference in water vapor mixing ratio obtained with DIAL from radiosonde (b) for the period from 1 November 2023 to 23 July 2024 at Tsukuba. The vertical orange bars in Fig. 4a are the 2σ -uncertainty of DIAL data. The solid black lines with horizontal bars in Fig. 4b are the mean and the standard deviation for each altitude of the measurement.

RL とラジオゾンデの比較結果 (Fig. 5a) は、回帰直線の傾き 0.995、切片 0.004 g/kg、相関係数 0.997、RMSD=0.76 g/kg であった。高度別の比較結果 (Fig. 6b) を見ると、高度 3 km 以下では平均差 0.5 g/kg 以下であったが、高度 3 km 以上では高度とともに差が大きくなる (RL の方が高くなる) 傾向があった。この原因は、統計的な不確かさを持つ 2 つの受信信号 (水蒸気と窒素ラマン散乱光成分の光子カウント) の比を取ることに由来するものと考えている。

どちらのライダーも、ラジオゾンデ観測値と大きく異なる (3 g/kg 以上) 点がある。この主な原因は、1) ライダーデータの品質管理が十分でないこと、2) 比較観測中の水蒸気分布の変動が大きかったことが考えられる。ライダーデータのより厳密な品質管理が必要である。

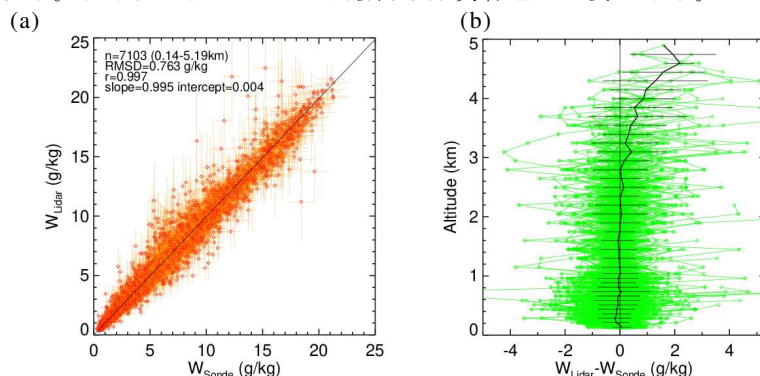


Figure 5 Same as Fig. 4 but for RL. The vertical and horizontal orange bars in Fig. 5a are the 1σ -uncertainty of RL and radiosonde data. The solid black lines with horizontal bars in Fig. 5b are the mean and the standard deviation for each altitude of the measurement.

4. まとめ

DIAL、RL、ドローン、ラジオゾンデによる水蒸気と風の鉛直分布の比較観測を行った。水蒸気についてはおおむね良好な一致が見られたが、ライダーデータについてはより厳密な品質管理が必要である。発表では、DIAL、ドローン、ラジオゾンデによる風観測データの比較結果についても報告する予定である。

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。ドローン観測は ArCS II プロジェクトの一環として実施し、その運用は (有) タイプエスと日本海洋事業 (株) が行いました。

5. 参考文献

- 1) M. Imaki, H. Tanaka, K. Hirosawa, T. Yanagisawa, and S. Kameyama: Opt. Express, **28** (2020) 27078-27096.
- 2) M. Imaki, K. Hirosawa, 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.