

つくばにおける ラマンライダーとドローンによる水蒸気鉛直分布の比較観測

酒井 哲¹, 瀬古 弘¹, 山内 洋¹, 佐藤 英一¹, 足立 アホロ¹, 吉田 智¹,
永井 智広¹, 小司 教禎¹

¹気象研究所 (〒355-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

Comparison of water vapor vertical distributions obtained by Raman lidar and drone at Tsukuba

Tetsu SAKAI¹, Hiromu, SEKO¹, Hiroshi YAMAUCHI¹, Eichi SATO¹, Ahoro ADACHI¹,
Satoru YOSHIDA¹, Tomohiro NAGAI¹, Yoshinori SHOJI¹

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

Abstract: Vertical distributions of water vapor mixing ratio (w) at an altitude below 500 m were observed with a Raman lidar (RL) and a drone equipped with meteorological sensors at Tsukuba on 4 and 28 March 2022. The observed data were compared with those obtained with collocated radiosonde. The result of the comparison showed that the mean absolute difference of w obtained with RL and drone from radiosonde was 0.4 g/kg and 0.1–0.2 g/kg, respectively. The agreement with the radiosonde data is better for the drone data than the RL data because of the decrease in signal-to-noise ratio during day. The result suggests also that correction should be applied for the drone data when the speed of sensor's response and ventilation were slower than the ascent/descent speed.

Key Words: Water vapor, vertical distribution, lowermost atmosphere, Raman lidar, drone

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、大気下層の水蒸気量の鉛直分布を正確に観測することが不可欠である。ライダーは水蒸気量の鉛直分布を連続的に測定できるため、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。また一方で、新しい観測手法として小型無人航空機（ドローン）を用いた観測手法も注目されている。本発表では、2022年3月につくば市の気象研究所においてラマンライダー（以下 RL）と気象センサーを搭載したドローンを用いて水蒸気鉛直分布の比較観測を行った結果を報告する。

2. 観測装置：ラマンライダー（RL）とドローン

2.1 RL

Fig.1 と Table 1 に RL の写真と諸元を示す。RL は気象研の大型 RL¹⁾を改造したもので、送信レーザーとして Nd: YAG レーザー（波長 355 nm）を使用し、大気中の後方散乱光を口径 40 cm の望遠鏡で受光する。大気中の水蒸気と窒素分子によるラマン散乱光（波長 407.5 nm, 386.7 nm）を分光して検出し、その強度比から水蒸気混合比を求める。観測高度範囲は日中 0.1–1.5 km、夜間 0.1–5 km である。

Table 1 Specifications of RL



Laser Transmitter	Nd:YAG
Wavelength	355 nm
Average power	~300 mJ/pulse
Repetition rate	30 Hz
Receiving telescope	Cassegrain
Diameter	40 cm
Detection wavelength	355, 386.7, 407.5 nm
Data quantity	Water vapor mixing ratio, backscattering ratio
Altitude range	0.1–1.5 km(day) 0.1–5 km(night)

Fig. 1 Photograph of RL.

2.2 ドローン

ドローンはタイプエス社の R-SWM を用いた (Fig. 2)。Table 2 にドローンの機体と搭載センサーの諸元を示す。ドローンの機体の大きさは約 1 m で重量は 7 kg である。2.75 kg までの荷物を載せることができる。最高到達高度は 1500 m である。搭載センサーの応答時間と精度の公表値は、温度計が 2~3 秒以内で ± 0.5 度、露点計が 20~40 秒以内で $\pm 3\%$ 、気圧計が 1 秒以内で ± 0.5 hPa である。なお、ドローンのオペレーションはタイプエス社のスタッフが行った。離着陸時のみマニュアルで操縦し、それ以外は GPS ナビゲーションにより自律フライトを行った。



Fig. 2 Photograph of the drone. Air temperature, pressure, and wind sensors are on the top, and the dewpoint sensor is beneath the drone.

Table 2 Specification of drone and equipped meteorological sensors

Drone	
Model name	ASCL-PF2
Dimension	W1173×L1067×H526 mm
Weight	7.07 kg
Payload	2.75 kg
Maximum flight speed	horizontal:10 ms ⁻¹ , ascent:3 ms ⁻¹ , descend:2 m/s
Maximum height	1500 m
Meteorological Sensors	
Temperature	NFR-CF3-0508-30 (Netsushin)
Dewpoint temperature	HMP155 (Vaisala)
Pressure	PTB210 (Vaisala)
Wind	WXT532 (Vaisala)

3. 観測の概要

RL とドローンによる比較観測は 2022 年 3 月 4 日と 28 日の 8~21 時 (JST) につくば市の気象研究所構内で行った。

RL はこの間水蒸気混合比の鉛直分布を連続観測した。水蒸気混合比データの高度分解能は 75 m、時間分解能は 30 分である。

ドローンは RL から約 50 m 離れた場所で観測を行い、8:30~20:30 の間に 30 分間隔で合計 25 回のフライトを行った。各フライトでは、地上から上昇速度 3 m/s で高度 500 m に達した後、高度 50 m 間隔に各 60 秒間のホバリングを行いながら 2 m/s の下降速度で地上まで観測を行った。観測要素は気温、露点温度、気圧、風向風速である。観測データの時間分解能は 1 秒である。

RL、ドローンの観測データを検証するために、気象庁が現業観測を行っているラジオゾンデの観測データとの比較を行った。ラジオゾンデは明星電気社製の iMS-100 で、8:30 と 20:30 に RL から約 300 m 離れた高層気象台から放球された。観測要素は気温、気圧、相対湿度、風向風速である。観測データの時間分解能は 1 秒 (高度分解能約 6 m) である。

4. 観測結果

Fig. 3 に 2022 年 3 月 28 日 8 時~21 時に RL とドローンで観測した水蒸気混合比の時間-高度断面図を示す。RL データについては品質管理のため、受信信号の S/N 比から見積もった測定の不確かさが 30% 以下のもののみを使用した。どちらのデータも、高度 500 m 以下の水蒸気混合比が 10 時半頃に 8 g/kg から 5 g/kg に減少し、さらに 17 時頃以降は 3 g/kg 以下に減少する時間変化が捉えられている。

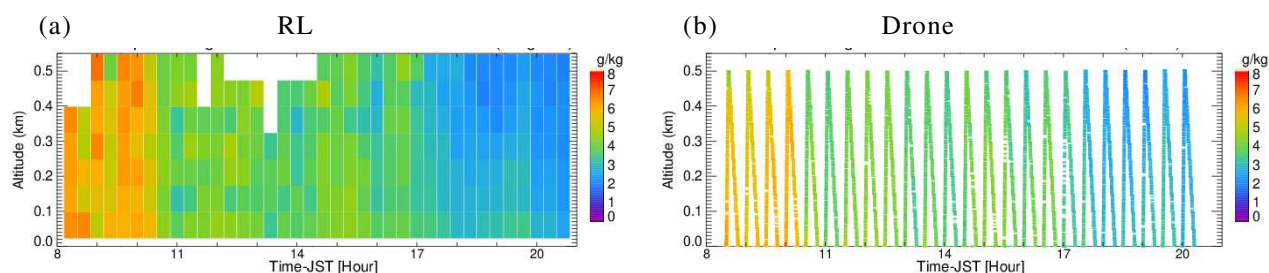


Fig. 3 Time-altitude cross section of water vapor mixing ratio obtained with RL (a) and drone (b) at Tsukuba from 8 JST to 21 JST on 28 March 2022. For RL, the data with an uncertainty of less than 30% are plotted.

Fig. 4a, b に 8:30 と 20:30 の 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。3つの測器で得られた観測値は概ね一致していることが分かる。ただ、RLデータについて見ると8:30のエラーバー（不確かさ）が大きい。これは太陽背景光ノイズの影響でSN比が低下しているためである。ドローン観測データについて見ると、上昇時（青実線）と下降時（青点線）で観測値の差がある（特に8:30）、またホバリング時（Fig. 4aの高度0.47 kmや0.42 km等）には観測値が時間とともに増加していることが分かる。この原因は、気温・露点センサーの応答がドローンの上昇・下降に伴う変化に追いついていないこと、センサー部の換気が遅いこと、水蒸気混合比が時間変化していることの3つが考えられる。これらの点については、フライト方法の改善（例えばホバリング時間を適切に取る）や、観測値をセンサーの応答時間に応じて補正する方法を開発する必要がある。Fig. 4cにRL、ドローン観測値（上昇・下降平均値）とラジオゾンデ観測値を比較した散布図を示す。どちらの観測データも、ゾンデ観測値との相関係数は0.9以上であるが、平均絶対誤差はRLが0.4 g/kg、ドローンが0.1–0.2 g/kgであり、RLデータの一貫度の方が低かった。RLの一貫度が低い理由の一つとして、日中の観測データの不確かさが大きいこと（Fig. 4a）が考えられるが、より正確な評価のためには比較事例を増やす必要がある。

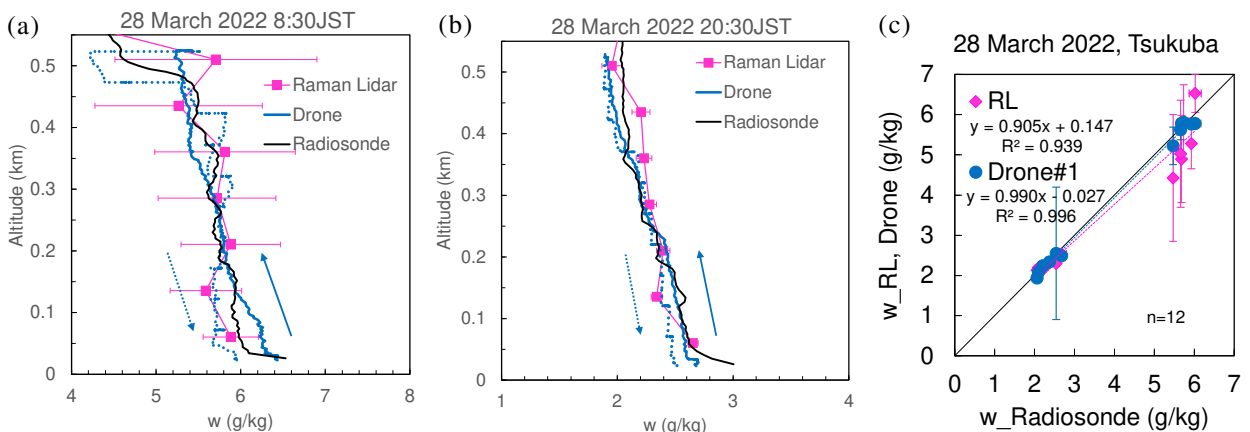


Fig. 4 Vertical distributions of water vapor mixing ratio obtained with RL (magenta squares), drone (solid blue is ascent and dotted is descent), and radiosonde (black line) at (a) 8:30JST and (b) 20:30JST on 28 March 2022 at Tsukuba. The magenta error bars indicate the measurement uncertainties of RL. (c) Scatter plot of water vapor mixing ratio obtained with RL (magenta diamonds) and drone (blue circle) as a function of that obtained with radiosonde shown in Fig. 4a and 3b. In Fig. 4c, range resolution of drone and radiosonde data was adjusted to RL data (75 m) by taking average in the altitude range during the ascent and descent. The error bar for the drone data is the standard deviation in the range.

Fig. 5a, b に高度範囲 23–98 m と 320–398 m で平均した水蒸気混合比の時系列を示す。2つの観測データの時間変化はほぼ対応していることが分かる。ただ前でも述べたように、RL観測データの不確かさは、日中の特に高い高度で大きい（Fig. 5aの8:00~16:00）。Fig. 5cにRLとドローン観測データを比較した散布図を示す。2つの観測データを比較すると、相関係数は0.89、平均絶対差は0.24 g/kgであった。

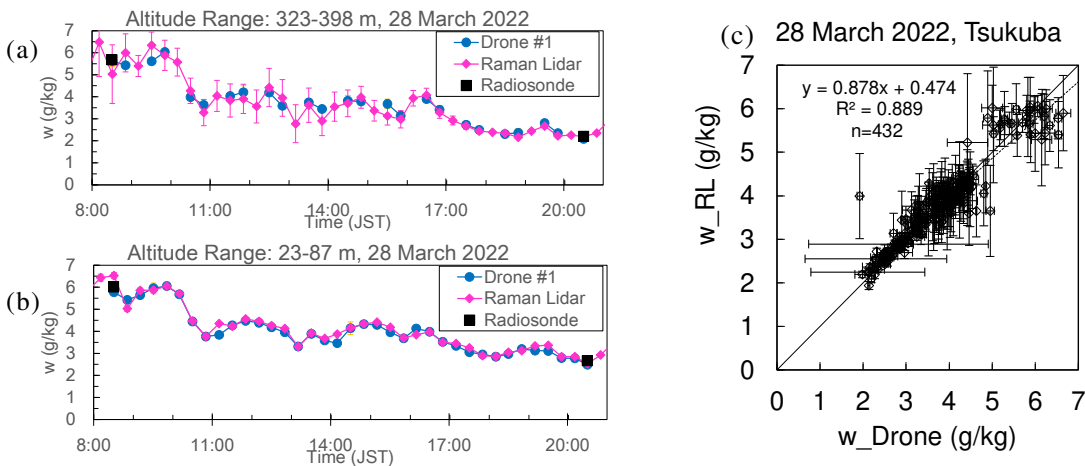


Fig. 5 Temporal variation of water vapor mixing ratio obtained with RL (magenta diamonds), drone (blue circles), and radiosonde (black squares) at altitude ranges of 23–98 m (a) and 323–398 m (b) over Tsukuba from 8:00 JST

and 21:30 JST on 28 March 2022. (c) Scatter plot of water vapor mixing ratios obtained with RL versus drone between 23 and 475 m in altitude. The range resolution of drone data was adjusted to RL data (75 m) by taking an average in the altitude range during the ascent and descent. The error bar for the drone data is the standard deviation in the range.

5. まとめと今後の課題

ラマンライダーとドローンによる大気下層の水蒸気混合比鉛直分布の比較を行った。2つの測器による観測値は概ね対応していたが、ラジオゾンデ観測値と比較するとドローン観測値の一致度が高かった。この主な原因は、ラマンライダーの観測精度が日中に低下するためと考えられる。またドローン観測では、ホバリング中に観測値が変化していたことから、センサーの応答速度に見合った時間ホバリングして観測を行う必要があると考えられる。

今後の課題は、1) ライダー、ドローンの観測精度を改善すること、2) これらの測器や他の観測手法をどのように組み合わせれば大雨の発生・維持メカニズムの解明や予測精度を向上できるかを考えて、観測実験を行うことである。

謝 辞

ラジオゾンデ観測データの1秒値を高層気象台から提供頂いた。ドローン観測はタイプエス社のR-SWMを用いた。ここに記して感謝する。本研究の一部は気象研究所緊急研究「集中観測等による線状降水帯の機構解明」による。

6. 参考文献

1) T. Sakai, T. Nagai, M. Nakazato, T. Matsumura, N. Oriksa, and Y. Shoji: J. Atmos. Ocean. Tech., **24**, 1407-1423.