

# 地上ラマンライダーを用いた水蒸気計測

白石 浩一<sup>1)</sup>\*・白石 凌也<sup>1)</sup>・吉田 智<sup>2)</sup>・酒井 哲<sup>2)</sup>・  
永井 智広<sup>2)</sup>・小司 禎教<sup>2)</sup>  
(令和 5 年 5 月 15 日受理)

## Measurement of water vapor using ground-based Raman lidar

Koichi SHIRAISHI<sup>1)</sup>\*, Ryoya SHIRAISHI<sup>1)</sup>, Satoru YOSHIDA<sup>2)</sup>, Tetsu SAKAI<sup>2)</sup>,  
Tomohiro NAGAI<sup>2)</sup> and Yoshinori SHOJI<sup>2)</sup>

(Received May 15, 2023)

### Abstract

We have developed a Raman lidar for the measurement of vertical distribution of water vapor with the aim of improving the accuracy of early prediction of linear precipitation zones. The lidar is employed the third harmonic wavelength of a Nd:YAG laser (355nm) as a light source. The Raman backscattering lights from water vapor and nitrogen molecules are detected by receiving instruments. The transmitting instruments and receiving instruments are stored in one container. The lidar can observe continuously day and night. We installed the lidar at Simokoshiki, Kagoshima in late August, 2020 and performed five simultaneous radiosonde measurements with lidar to verify the lidar system on September 8 and 9, 2020. A comparison of the vertical distributions of water vapor mixing ratios measured by the lidar and radiosonde showed very good agreement in the height range of 0.15 - 2.0 km with high correlation coefficient of 0.96. By the analysis with a temporal resolution of 20 minutes and a height resolution of 150 m, the uncertainty of vertical profiles of water vapor was lower than 30 % in the height range of 0.15 to 2.5 km during the day and 0.15 to 4.0 km at night under clear atmospheric condition on September 8 and 9, 2020. On September 2, 2020, a typhoon passed north over the East China Sea near the observation site. We observed the time variation of vertical profile of water vapor by the lidar on the day. From 6 JST on September 2, 2020, we observed an increase in the water vapor mixing ratio of 1 - 3 g/kg at heights below 0.15 km - 3 km. Furthermore, at the time of closest approach of the center of the typhoon at about 12:00 JST on September 2, we observed the maximum increase in water vapor mixing ratio up to 18 g/kg in the height range of 0.15 - 0.6 km.

**Keywords:** water vapor, Raman lidar

### 1. はじめに

大雨が数時間以上に渡って継続し、河川氾濫や土砂災害等の深刻な被害を引き起こす線状降水帯が近年多発している。こうした線状降水帯による災害を深刻化させている一因は、線状降水帯の予測が難しく、事前に十分なリードタイムが確保できないことがあげられる。

線状降水帯の発生条件として、6つの気象条件が報告されている [1]。その中で「高度 500 m における水蒸気フラックス量」と「500hPa と 700hPa での高い相

対湿度 (≧ 60%)」の 2 つで、水蒸気の高度分布の情報について重要性があげられている。近年の線状降水帯の発生・発達過程、予測モデルについての研究論文でも、大気下層の水蒸気の高度分布の計測の重要性が報告されている [2, 3, 4]。現在気象庁が実施している水蒸気の高度分布の観測は、気象台や洋上での高層気象ゾンデ観測が挙げられる。しかしながら洋上で実施される船上観測は離散的であることや、地上観測は九州本土で福岡と鹿児島島の 2ヶ所の気象台で 1日 2回の実施であることからわかるように、水蒸気の高度分布についての観測データは極めて少ない。

1) 福岡大学理学部地球圏科学科 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1

Department of Earth system science, Faculty of Science, Fukuoka University, Nanakuma 8-19-1, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan.

2) 気象庁気象研究所 〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1

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

\*Corresponding author: K. Shirishi (e-mail: siraisi@fukuoka-u.ac.jp)

ライダーは鉛直上空にレーザー光を射出し、大気中の気体や微粒子からの後方散乱光を望遠鏡で受光することにより、遠方にある物質の濃度の鉛直分布を得られる装置である。ラマンライダーは、水蒸気と窒素分子からのラマン後方散乱光を計測することで水蒸気の鉛直分布を高い時間・高度分解能で観測することができる装置である [5]。近年のレーザーの高出力化や連続運転の安定性、干渉フィルターの透過率の狭帯化などの装置の高度化により、昼夜の連続計測が可能になってきた [6]。

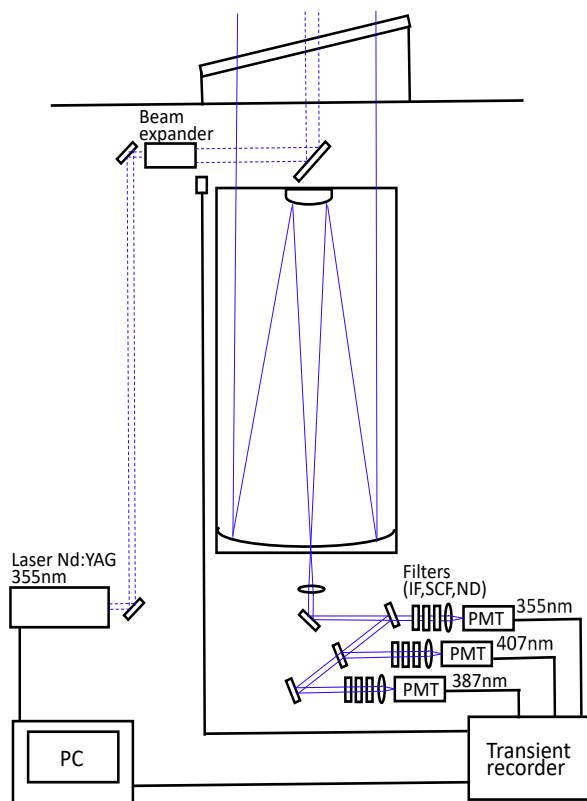


Fig. 1 Block diagram of water vapor Raman lidar.

福岡大学と気象研究所は合同で、2018年から戦略的イノベーション創造プログラム第2期「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」の「線状降水帯の早期発生及び発達予測情報の高度化と利活用」（以後 SIP2 と称す）において、線状降水帯の早期発生予測の精度向上を目的とした、水蒸気の鉛直分布計測用のラマンライダーの開発を行った。2020年から2022年の夏期に、鹿児島県下甕島と長崎県野母崎でラマンライダーを用いた水蒸気の鉛直分布観測を実施した。2021年7月には、鹿児島県北部で線状降水帯が発生し、風上側での下甕島で大気下層の水蒸気観測に成功した。本稿では、SIP2で開発し、下甕島での観測に使用した水蒸気ライダーについて、装置仕様や気象ゾンデを用いた検証実験の結果を踏まえて、性能について述べる。

## 2. 測定装置

気象研究所では、大雨に関連する水蒸気場の観測を目的とした可搬型水蒸気ライダーをすでに製作しており [6]、SIP2では気象研究所の可搬型ライダーをプロトタイプとして、新たに水蒸気ラマンライダーを開発した。装置の製作は、明星電気株式会社が行った。装置の仕様とブロック図を Table 1 と Fig. 1 に示す。

Table 1 Specifications of water vapor Raman lidar.

The transmitting system	
Laser	Nd:YAG
Wavelength	355nm
Pulse energy	300mJ
Pulse repetition rate	10Hz
The receiving system	
Telescope type	Cassegrain
Telescope diameter	40cm
Field of view	0.3mrad
Detection	Photomultiplier tubes
	355nm, 387nm (N <sub>2</sub> Raman), 407nm (H <sub>2</sub> O Raman)
Signal detection	Transient recorder (Analog, Photon count)

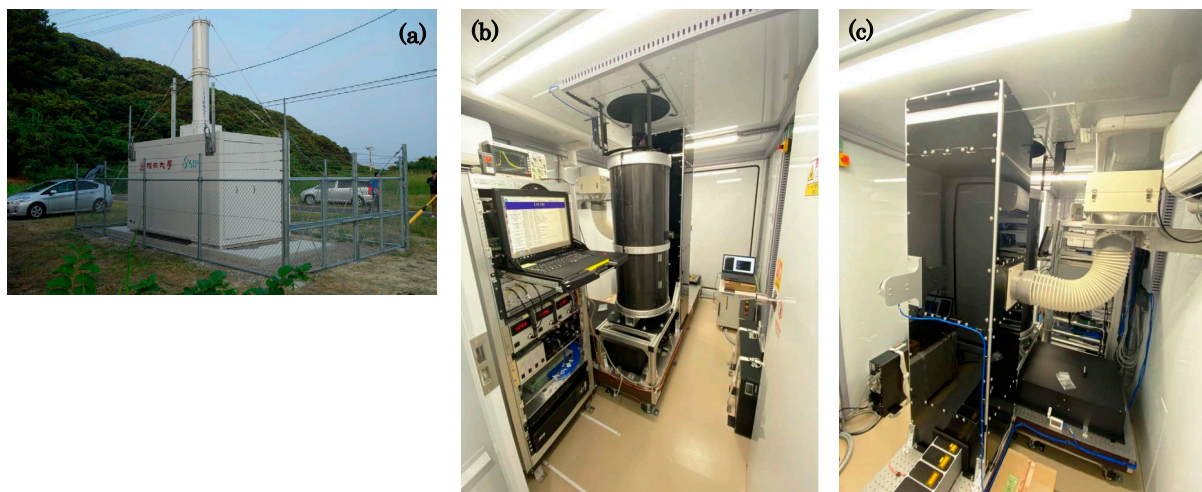


Fig. 2 Photographs of the lidar container (a) and its interior (b) and (c).

光源に Nd:YAG レーザーの第 3 高調波 (355nm) を使用した。射出したレーザー光は、ミラーにより反射し、上空に打ち上げられる。大気中の水蒸気や窒素分子からの後方ラマン散乱光を口径 40cm の受信望遠鏡により集光し、355nm のエアロゾルと空気分子からの後方散乱光、水蒸気と窒素分子からの後方ラマン散乱光 (387nm, 407nm) をそれぞれ分光して、干渉フィルター、ブロッキングフィルター、ND フィルターなどを通過して、光電子増倍管で電気信号に変換される。その後、トランジェントレコーダを用いて、アナログ計測とフォトンカウント計測を同時に行う。1 プロファイルの計測は、高度分解能 3.75m, 時間積算 1 分で行われる。装置一式は、コンテナに格納し、天窓を通して、送受信を行う。Fig. 2 にライダーが格納されたコンテナ、コンテナ内部の様子の写真を示す。屋根部に煙突のような遮光筒があり、その下部に取り付けられた天窓を通して、送受信を行う。また、コンテナ内部には、レーザーと受信装置用 UPS を設置し、30 分程度の停電であれば、観測を継続できる。停電状態が継続すれば、自動で装置のシャットダウンを行うようにしている。観測の監視・制御は、インターネットを通じて、外部から遠隔で可能である。

### 3. 解析理論

水蒸気混合比  $\omega(z)$  は、ライダーにより得られた水蒸気分子と窒素分子による後方ラマン散乱の信号  $S_{H_2O}(z)$ ,  $S_{N_2}(z)$  を用いて次式で表される [6, 7].

$$\omega(z) = C\Gamma(z) \frac{S_{H_2O}(z)}{S_{N_2}(z)} = C\Gamma(z)R(z)$$

ここで、 $C$  は高度に依存しない定数をまとめた校正係数を示す。 $S_{H_2O}(z)$ ,  $S_{N_2}(z)$  は水蒸気と窒素分子チャンネルで測定されるラマン散乱信号を示し、 $R(z)$  はそれら信号の比を示す。 $\Gamma(z)$  は次式で示される透過関数の比で表される。

$$\Gamma(z) = \frac{\exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha(\lambda_{N_2}, z') dz'\right]}{\exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha(\lambda_{H_2O}, z') dz'\right]}$$

ここで  $\alpha(\lambda_{N_2}, z')$  と  $\alpha(\lambda_{H_2O}, z')$  は、波長依存性を考慮した大気 (エアロゾル + 空気分子) の消散係数を示す [7]。ここではエアロゾルによる消散は考慮せず、空気分子の消散係数を、標準モデル大気を利用して導出する [8]。校正係数は、ライダー観測基地の近くでゾンデによる水蒸気観測を行い、高度 450m から 1.5km の高度域で一致するように最小自乗法により決定する。

水蒸気混合比の不確定さ  $\delta\omega(z)$  は、次式から導出される [9].

$$\left(\frac{\delta\omega(z)}{\omega(z)}\right)^2 = \left(\frac{\delta C(z)}{C(z)}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Gamma(z)}{\Gamma(z)}\right)^2 + \left(\frac{\delta R(z)}{R(z)}\right)^2$$

右辺の項は、それぞれ、校正係数、透過関数比、信号比の不確定さを表す。それらは、独立で関係がないことを仮定し、それらの和として、 $\omega$  の不確定さを導出する。信号比の誤差は、信号の不確定さがポアソン統計に依存すると仮定し、導出を行う。校正係数の不確定さは、校正係数の標準偏差から導出される。

## 4. 観測結果と議論

### 4.1 ゾンデを用いた水蒸気ライダーの検証実験

SIP2 の一環として、2020 年 8 月に水蒸気ライダーを福岡大学から鹿児島県薩摩川内市鹿島地区 (下甕島) に移設した。装置の調整を行い、装置の校正係数の導出と測定データ検証のため、2020 年 9 月 8 日と 9 日に、ライダーとゾンデによる水蒸気鉛直分布同時観測を行った。ゾンデ観測には、iMS-100 (明星電気) を使用した。ゾンデの放球は、ライダーコンテナから南に 50 m ほど離れた鹿島中学校の運動場で実施された。ゾンデ観測は、計 5 回行われた。Fig. 3 に 2020 年 9 月 8 日 21 時 (JST, 以後時刻はすべて日本時刻表記) と 9 月 9 日 21 時の地上天気図 (日本気象協会の実況天気図, <https://www.tenki.jp/past/>) を示す。9 月 8 日は、下甕島は高気圧下に位置し非常に安定な大気状態と考えられたが、9 月 9 日は、鹿児島県本土の南沿岸域に前線があり、大気が不安定な状態であり、4 時から 8 時の間に、弱い降水が観測された (現地報告)。

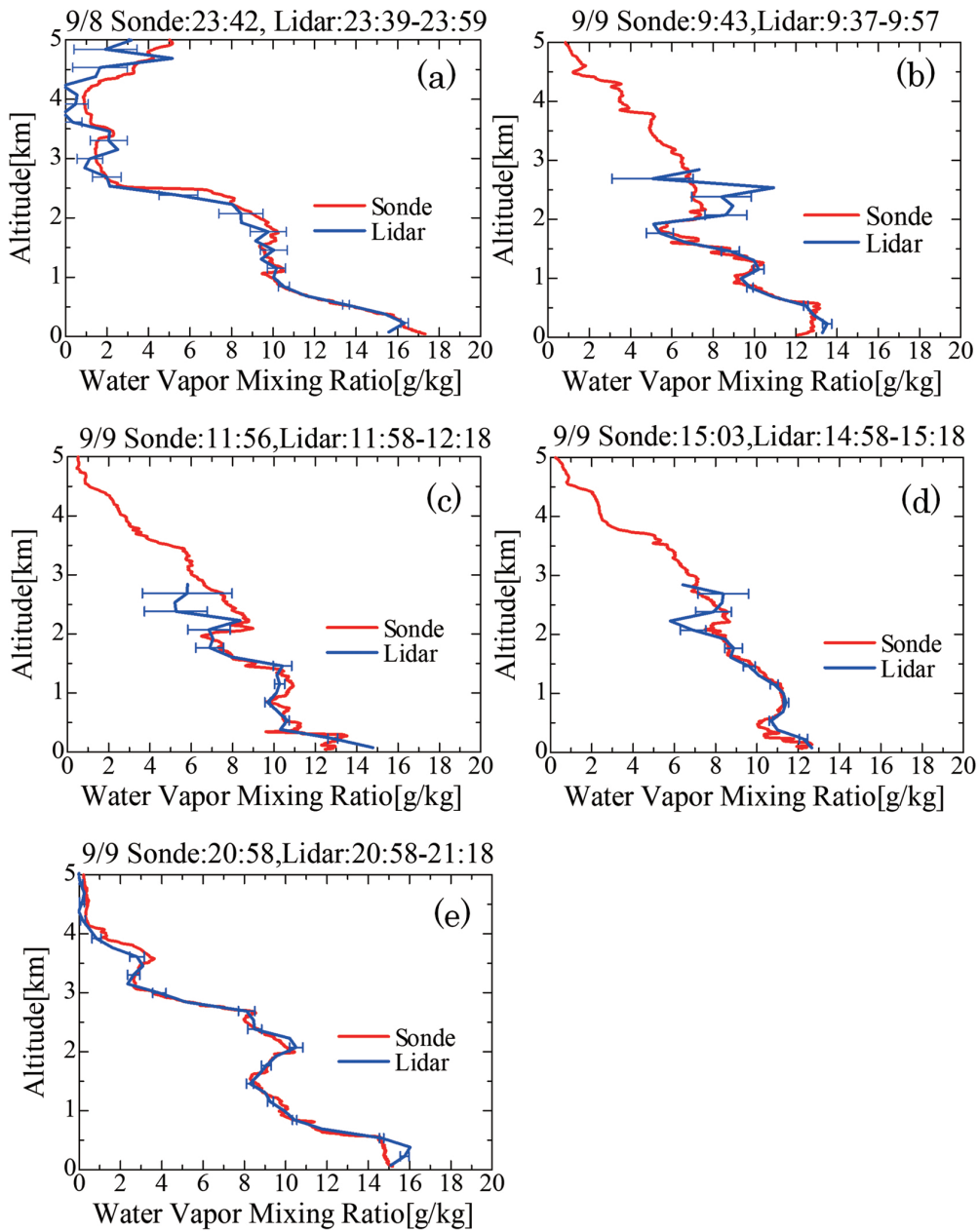
Fig. 4 に 5 回のゾンデ観測で得られた水蒸気混合比の鉛直分布と、同時間帯のライダーで計測された水蒸気混合比の鉛直分布を示す。Table 2 に、5 回の比較観測について、ゾンデ放球時刻、ライダー観測時刻、導出した校正係数を示す。355nm の弾性散乱信号の解析から、9 月 8 日 23 時 39 分 ~ 23 時 59 分のライダー計測では、高度 4.65km ~ 5.3km の高度域で、雲を検出したことが分かった。それ以外のライダー観測のデータでは、雲を検出していなかった。比較に使用したゾンデの計測データは、気球の上昇時に計測されたデータを使用した。気球が上空に行くほど、風で流されてライダー観測基地から離れる。ライダーとゾンデ観測で得られた水蒸気混合比の比較は、非常に良い一致がみられた。ライダーで測定された水蒸気混合比の不確定さ 30% 未満の高度域は、夜間では高度 0.15km ~ 4.0km, 日中では高度 0.15km ~ 2.5km であった。日中は太陽光などの背景光が強いため、精度よく観測できる高度範囲が夜間よりも低い高度域に制限されたと考えられた。高度 2km よりも高い高度では、ライダーとゾンデで水蒸気混合比に少し違いが見られるプロ



**Table 2** Time table of data set of sonde launch time and lidar measurement period, and estimated calibration coefficient for the comparison of water vapor mass mixing ratio obtained by lidar and sonde shown in Fig. 4.

Date	Sonde launch time (JST)	Lidar observation time (JST)	calibration coefficient
Sep/8/2020	23:42	23:39 - 23:59	61.50
Sep/9/2020	9:43	9:37 - 9:57	57.33
	11:56	11:58 - 12:18	56.44
	15:03	14:58 - 15:18	59.94
	20:58	20:58 - 21:18	65.80

ファイルが計測されているが、計測誤差の影響、もしくは、水平方向の水蒸気混合比の空間的な不均一性を反映している可能性も考えられる。高度 150m より下の地表付近では、ゾンデデータと合っていない傾向がいくつかのプロファイルで示された。今回ライダーで測定された水蒸気混合比の導出では、送信ビームと受信望遠鏡の視野の重なり関数（オーバーラップ関数）を、水蒸気と窒素分子のラマン散乱光の検出チャンネルで同一であると仮定し、計算を行った。地表近くでは、望遠鏡視野のほんの一部のところで、レーザー寄



**Fig. 4** Vertical distributions of water vapor mass mixing ratio observed by lidar (blue) and sonde (red) on September 8 and 9, 2020. The lidar measurement period were (a) 23:39 – 23:59 JST on September 8, 2020, (b) 9:37-9:57 JST on September 9, 2020, (c) 11:58-12:18 JST on September 9, 2020, (d) 14:58 -15:18 JST on September 9, 2020, (e) 20:58 -21:18 JST on September 9, 2020. Radiosonde launch time were (a) 23:42 JST on September 8, 2020, (b) 9:43 JST on September 9, 2020, (c) 11:56 JST on September 9, 2020, (d) 15:03 JST on September 9, 2020, (e) 20:58 JST on September 9, 2020.

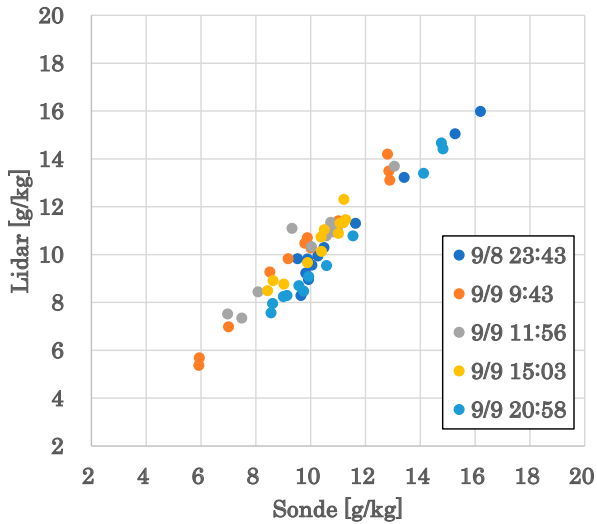


Fig. 5 Scatter plots of water vapor mass mixing ratio observed by lidar and sonde in the height range of 0.15-2km on September 8 and 9, 2020.

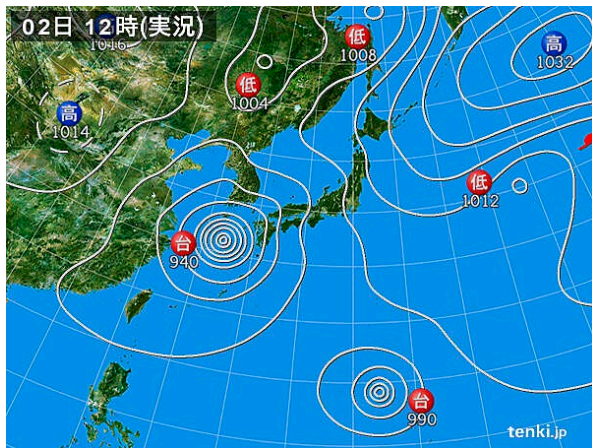


Fig. 6 Commentary weather map at (a) 21 JST on September 2, 2020 (<http://www.tenki.jp/past/>).

与の散乱光を受光している。そのため、光電子増倍管の光電面のごくわずかな部分で計測しているため、それぞれの測定チャンネルの受光部分の効率の違いなど、器差の問題が生じている可能性が考えられる。また、観測場所の局所的な水蒸気場の不均一性を観測している可能性も考えられる。そのため、今後さらなる調査が必要である。

導出した校正係数は、56.44 ~ 65.80 の値を示した。それらの平均をとり、60.20 の値を解析時の校正係数として使用した。ゾンデとの比較で用いたライダー計測データの再解析を行い、ゾンデにより得られた水蒸気混合比をライダーの計測高度で内挿し比較を行った (Fig. 5)。高度 0.15km から高度 1.92km の範囲で計測されたデータをプロットしている。ライダーとゾンデで得られた水蒸気混合比の相関係数は 0.96 の高い値を示した。

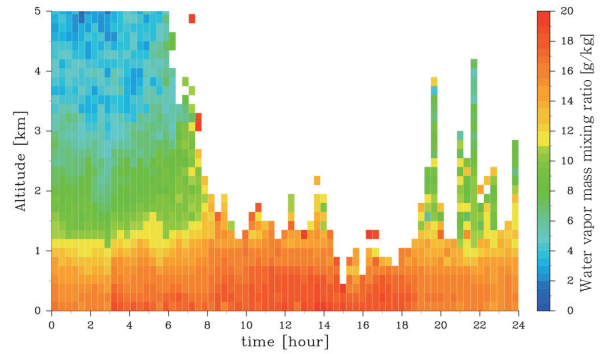


Fig. 7 Height-time cross section of water vapor mass mixing ratio observed by lidar at Shimokoshiki on September 2, 2020.

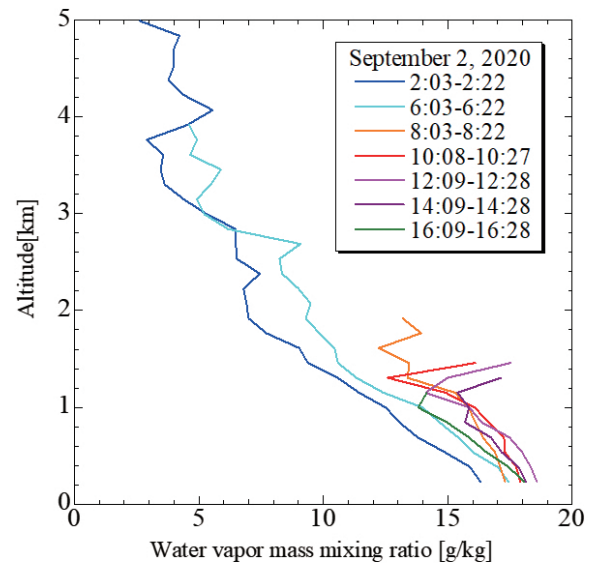


Fig. 8 Time variation of vertical distribution of water vapor mass mixing ratio observed by lidar on September 2, 2020.

#### 4.2 台風通過時に観測された水蒸気混合比の事例解析

2020年9月2日に台風9号が、東シナ海上空を北上し、ライダー観測サイトのある下甕島近く西方約200kmの位置を北上した。Fig. 6に2020年9月2日12時の地上天気図を示す。台風は、下甕島近くを12時近くに通過した。台風が通過中に下甕島のライダーで水蒸気の鉛直分布の連続観測を行うことができた。

Fig. 7に2020年9月2日にライダーで観測された水蒸気混合比の時間高度断面図を示す。9時以降は雲の出現により、雲底高度以下の高度域での水蒸気混合比の鉛直分布しか得られていない。高度1~1.5km以下の高度で、10g/kgよりも高い水蒸気混合比が観測されていた。Fig. 8に抽出した水蒸気混合比の鉛直分布の時間変化を示す。0時から4時にかけて観測された水蒸気混合比は、高度1km以下で10~16g/kgと高い値を示し、1kmよりも高い高度では、高度とともに

減少する高度分布が観測された。6時くらいからは、高度3km以下の全高度域で水蒸気混合比が2~3g/kg増加した。日中の台風接近時12時付近では、0.15kmから0.6kmの高度域で、17.5~18g/kgの非常に高い水蒸気混合比を観測した。得られた水蒸気混合比の鉛直分布の一連の時間変動は、ライダー観測基地上空を流れる空気塊に含まれる水蒸気の変動を示しており、水蒸気場が詳細な時空間構造を示していることが示唆された。

## 5. まとめ

我々は、SIP2において、線状降水帯の早期発生予測の精度向上を目的とした水蒸気観測用ラマンライダーを開発した。2020年9月8-9日に、鹿児島県下甕島において、ゾンデを用いた水蒸気ライダーの検証実験を行った。ライダーとゾンデで測定された水蒸気混合比の鉛直分布の比較は、高度0.15~2.0kmで非常に良い対応を示した。相関係数は0.96の高い値を示した。時間分解能20分、高度分解能150mで解析を行った結果、夜間では高度0.15~4.0km、日中では高度0.15~2.5kmの高度域で不確定さが30%未満で計測できることが分かった。

2020年9月2日の台風9号の接近時に、水蒸気ライダーにより水蒸気の連続観測を行うことができた。台風接近の6時間前から0.15~3kmの高度域で、1~3g/kgの水蒸気混合比の増大を観測した。さらに、最接近時の9月2日12時に高度0.15~0.6kmの高度域で、最大18g/kgまでの水蒸気混合比の増大を観測した。

## 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム「線状降水帯の早期発生及び発達予測の高度化と利活用に関する研究」により実施された。また、本研究に使用した天気図は、日本気象協会 [tenki.jp](http://tenki.jp) から使用した。

## 引用文献

- [1] T. Kato, Quasi-stationary Band-Shaped Precipitation Systems, Named “Senjo-Kousuitai”, Causing Localized Heavy Rainfall in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, 98 (3), 485 – 509 (2020).
- [2] S. Yoshida, S. Yokota, H. Seko, T. Sakai, T. Nagai,, Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar using LETKF System, SOLA, DOI: 10.2151/sola.2020-008 (2020).
- [3] S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Ikuta, Y. Shoji, H. Seko, K. Shiraishi, Lidar observations and data

assimilation of low-level moist inflows causing severe local rainfall associated with a mesoscale convective system, *Mon. Wea. Rev.*, 150, 1781–1798 (2022).

- [4] R. S. Schumacher, Sensitivity of Precipitation Accumulation in Elevated Convective Systems to Small Changes in Low-Level Moisture, *J. Atmos. Sci.*, 72 (6), 2507-2524 (2015).
- [5] S. H. Melfi, D. Whiteman, “Observation of lower-atmospheric moisture structure and its evolution using a Raman lidar”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 66, 1288-1292 (1985).
- [6] T. Sakai, T. Nagai, T. Izumi, S. Yoshida, Y. Shoji, Automated compact mobile Raman lidar for water vapor measurement: instrument description and validation by comparison with radiosonde, GNSS, and high-resolution objective analysis, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 313–326 (2019).
- [7] D. N. Whiteman, Examination of the traditional Raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols, *Appl. Opt.*, 42, 2593–2608 (2003).
- [8] D. N. Whiteman, S. H. Melfi, R. A. Ferrare, Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere, *Appl. Opt.*, **31 (16)**, 3068-3082 (1992).
- [9] P. B. Russell, T. J. Swissler, M. P. McCormick, Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements, *Appl. Opt.*, **18 (22)**, 3783-3797 (1979).