

九州での水蒸気ライダー観測と線状降水帯の予測精度向上

吉田 智¹, 酒井哲¹, 永井智広¹, 幾田泰醇¹, 加藤輝之¹, 白石浩一², 加藤亮平³

¹気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

²福岡大学 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

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

Water vapor Raman lidar observations in Kyushu and improvement of heavy precipitation forecasts associated with meso-scale convective systems

Satoru Yoshida¹, Tetsu Sakai¹, Tomohiro Nagai¹, Yasutaka Ikuta¹, Teruyuki Kato¹,
Koichi Shiraishi², and Ryohei Kato^{1,3}

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

²Fukuoka Univ., 8-19-1 Jonanku Nanakuma, Fukuoka, Fukuoka 814-0180

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

Abstract: We conducted field observations using two water vapor Raman lidars (RLs) at the Koshiki and Nagasaki sites in Kyushu, to clarify the detailed structure of a moist low-level jet (MLLJ), which plays a fundamental role in the formation and maintenance of mesoscale convective systems (MCSs). The two RLs observed the inside and outside of an MLLJ, which was providing moisture to an MCS with local heavy precipitation on 9 July 2021. Comparing the inside and outside vertical moisture profiles revealed that most of the water vapor in the MLLJ was concentrated below the convective mixing layer height of 1.6 km. We conducted data assimilation experiments, showing that assimilation experiments ingesting the RL data produced better nine-hour precipitation forecasts than the experiment that did not assimilate the RL data. This result implies that the assimilation of vertical moisture profiles could be well suited for numerical weather prediction of local heavy precipitations.

Key Words: Raman lidar, water vapor, data assimilation

1. はじめに

積乱雲が連続的に発生し数時間にわたり降雨をもたらす降水（線状降水帯）が、近年多発している。線状降水帯は局地的な大雨をもたらす、場合によっては甚大な被害が発生する。過去の研究によると線状降水帯は九州で多発している¹⁾。さらに九州で発生する事例の多くは南西の海上から湿潤な下層大気（下層インフロー）が流入し、水蒸気が線状降水帯の発生・発達に寄与している²⁾。このため、南西からの湿潤な下層インフローの水蒸気量を線状降水帯の風上側で観測し、その観測データを同化することにより、線状降水帯に伴う降水の予測雨量の精度向上が期待されている³⁾。

我々の研究グループでは、線状降水帯の下層インフローの水蒸気の鉛直プロファイルの実態把握、およびデータ同化を用いた降水量予測精度の向上を目的として、2020年度から2022年度まで長崎市野母崎および鹿児島県薩摩川内市下甕島において水蒸気ラマンライダー(RL)による観測を実施した⁴⁾。本稿では2021年7月に観測された事例について、下層インフロー周辺の水蒸気プロファイルやデータ同化実験結果を示す。

2. 観測手法

長崎市（長崎サイト）および下甕島（甕サイト）に設置したRLは、Nd:YAGレーザーの3倍波(355nm)を鉛直直上に照射し、大気による後方散乱光を望遠鏡で受光したのち水蒸気ラマン散乱（波長408nm）、窒素ラマン散乱(387nm)、弾性散乱(355nm)の受光強度をそれぞれ計測する⁵⁾。水蒸気ラマン散乱と窒素ラマン散乱の強度比から水蒸気混合比の鉛直プロファイルを得る。時間分解能は20分、鉛直分解能は高度1km以下で75m、1km以上では150mである。観測レンジは、夜間では高度5km程度に達する一方で、日中は太陽光のノイズのため、概ね高度1kmから2kmである。各観測サイトにおいてゾンデ観測を複数回実施し、RLで得られる水蒸気データの校正を行っている。

3. 観測結果および解析

2021年7月10日未明に鹿児島県北西部に線状降水帯が発生した。この線状降水帯により9時間積算雨

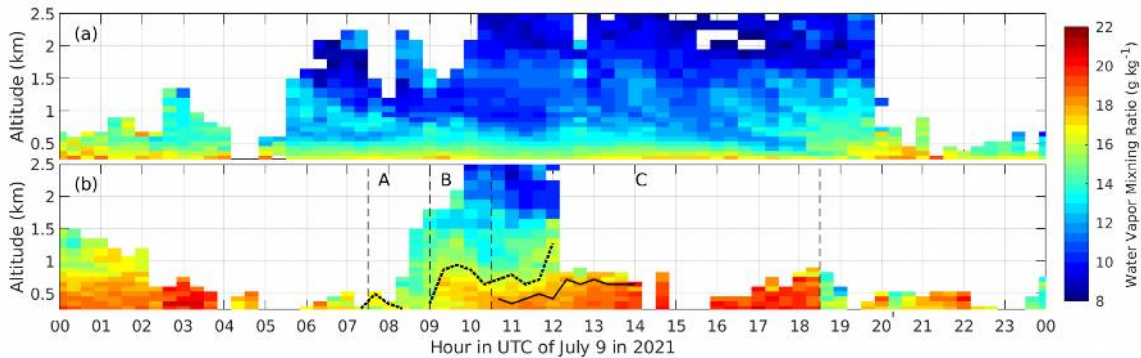


Figure 1 : Vertical profiles of water vapor mixing ratios at (a) Nagasaki and (b) Koshiki on July 9, 2021. The periods A, B, and C correspond to outside of the MLLJ, northern edge of the MLLJ, and inside of MLLJ.

量が最大 589mm に達した。図 1 に RL により観測された水蒸気混合比の鉛直プロファイルを示す。線状降水帯は 7 月 9 日の 15UTC 頃より発生している。図 1 より、甕では線状降水帯発生のおよそ 6 時間前 (09UTC) より、大気下層の水蒸気上昇を捉えている。その一方で、長崎では線状降水帯発生前に大気下層での水蒸気量の顕著な上昇は確認できなかった。気象庁の局地解析結果によると、この事例では線状降水帯へ流入する下層の湿潤なインフローは甕サイト上空を通過し鹿児島北西部へ流れ込んでおり (図省略)、水蒸気ライダーの観測結果と整合的である。

図 2 に 7 月 9 日 12UTC における RL による水蒸気鉛直プロファイル、および同時刻のラジオゾンデ観測 (鹿児島地方気象台: 甕サイトからおおよそ東へ 80km) を示す。図 2a の通り、水蒸気混合比は高度 200m から 1.6km では、長崎よりも甕で明らかに大きい。その一方で、高度 1.6km 以上では両者の顕著な差は見られない。長崎と甕サイトの水蒸気混合比の鉛直プロファイルの比較から、鹿児島県に流入した下層インフローの湿潤な層の高さは概ね 1.6km 程度であると考えられる。ラジオゾンデ観測では約 1.9km に仮温位の急上昇が見られることから (図 2b)、ラジオゾンデ観測地点での対流混合層高度は 1.9km であると考えられる。図 2a より甕サイトの水蒸気鉛直プロファイルは、高度 1.6km で急減している。ラジオゾンデ観測地点で対流混合層高度が 1.9km であることから、甕では高度 1.6km まで対流混合層が発達していたと考えられる。今

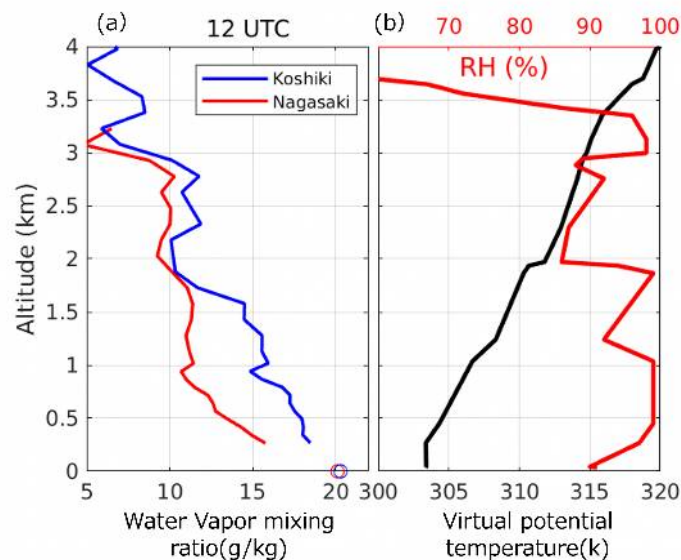


Figure 2: (a) shows the vertical profiles of moisture observed with RLs at Nagasaki and Koshiki at 1200 UTC on July 9, 2021. The vertical moisture profiles for Nagasaki (red) and Koshiki (blue) are based on one-hour averaged data. (b) shows the vertical profiles for virtual potential temperature, and relative humidity (RH) observed with radiosonde released from Kagoshima Meteorological office at 1130 UTC on the same day. Blue and red circles in (a) indicate the water vapor mixing ratios measured on the ground at Koshiki and Nagasaki, respectively.

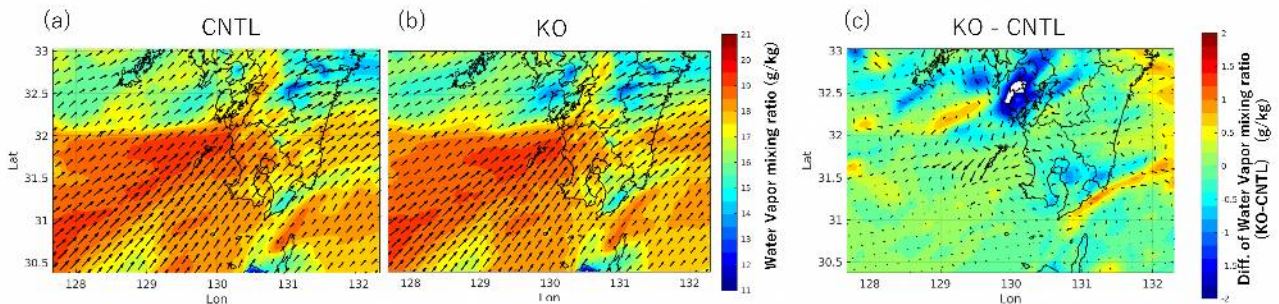


Figure 3: The horizontal distributions of water vapor mixing ratios and horizontal wind fields in data assimilation experiments at 539 m asl at 1500 UTC on 9 July. (a) CNTL, (b) KO, and (c) KO minus CNTL.

回観測した大気下層の湿潤なインフローは、主に対流混合層内に大量の水蒸気を含んでいたと考えられる。この解析結果は、線状降水帯の予測精度向上において、対流混合層高度（概ね 2km 以下）までの水蒸気観測の重要性を示している。

4. データ同化

本事例において、気象庁の現業で利用されているメソ数値予報システムを用いて、データ同化実験を行った。2021年7月8日00UTCから7月9日15UTCまでRLデータの同化を行い、その後9時間予報を実施した。さらに非静力学メソスケールモデルを用いて水平解像度1kmにダウンスケールした実験を実施した。データ同化実験では、気象庁の現業観測データのみを同化した実験（CNTL）、および現業観測データに加え、観測サイトのRLデータを同化した実験(KO)を実施した。図3に7月9日15UTCでの大気下層（高度539m）の水蒸気混合比の解析値を示す。同図よりCNTL、KOともに東シナ海から流入する湿潤な下層インフローを再現している。図3cによると、RLデータの同化により、下層インフローの風下側の長崎県でデータ同化による水蒸気混合比の低下がみられる。一方で、観測付近やその南西側で若干の水蒸気混合比の上昇が確認できる。この事例ではRLデータの同化により、下層インフローの水平風が弱まった。これによりRL観測点の北側で下層インフローによる水蒸気供給が弱まり、風下側の長崎付近の水蒸気混合比の低下につながった。さらに、観測付近の水平風が弱まることで、下層インフロー北側の収束が30kmほど南側で発生することになった。

図4に7月9日15UTCからの9時間予報雨量と解析雨量を示す。図4cに示す通り、解析雨量は鹿児島県北西部を中心に降水が発生し、鹿児島県北西部で最大雨量を記録している。CNTL実験では、強い降水帯が鹿児島県北部から熊本県南部に広がっている。その一方で、観測のRLデータを同化した結果(KO)では、強い降水が主に鹿児島県北西部で確認できる。KOの降水帯がCNTLよりも解析雨量の結果に近いことから、RLのデータ同化により線状降水帯に伴う降雨の予測精度の向上が確認できる。

5. まとめ

線状降水帯に伴う降水量の予測精度向上には、大気下層の水蒸気量の観測とそのデータ同化が重要である。本研究では、水蒸気ラマンライダーを長崎市野母崎および鹿児島県下観測所に設置し、2020年から2022

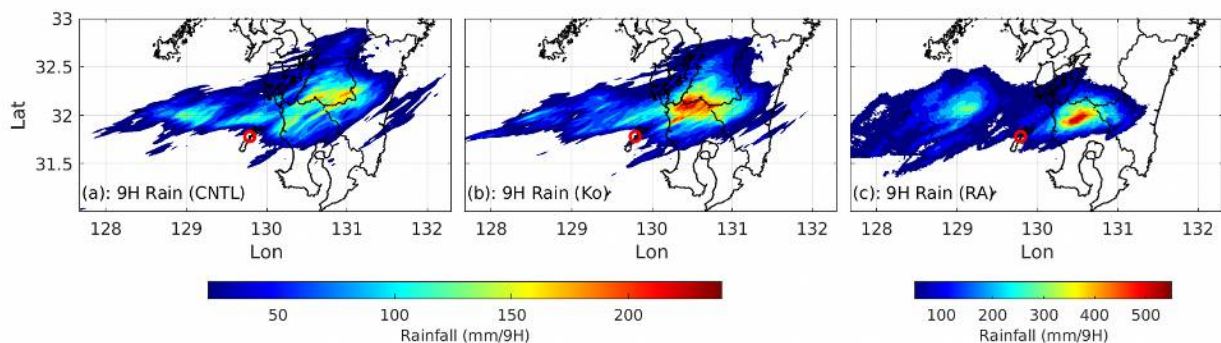


Figure 4: (a) and (b) show distributions of forecasted nine-hour precipitation in data assimilation experiments from 1500 UTC 9 July in CNTL and KO experiments, respectively. (c) shows nine-hour precipitation from 1500 UTC 9 July estimated in Radar/rain gage-analyzed precipitation (RA). The red circle represents the locations of Koshiki site.

年までの観測を行った。2021年7月10日未明に鹿児島県北西部で発生した線状降水帯について、その風上側である下甕島で線状降水帯に関連した湿潤な下層インフローの観測に成功した。長崎サイトと甕サイトの水蒸気ライダーデータの比較により、下層インフローでは、対流混合層が1.6kmまで成長し、対流混合層内で湿潤であることが分かった。

さらに甕島の水蒸気ライダーデータの同化により、下層インフロー周辺の水蒸気分布だけでなく、水平風分布も変化した。この変化により収束域が変化し、結果的に線状降水帯に伴う降水域の予測精度向上につながった。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (19H01983) およびの内閣府総合科学技術・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 (SIP)「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」によって実施された。

参考文献

- 1) Y. Hirockawa, T. Kato, H. Tsuguti, and N. Seino: Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 835-857 (2020).
- 2) K. Araki, T. Kato, Y. Hirockawa, and W. Mashiko: Characteristics of Atmospheric Environments of Quasi-Stationary Convective Bands in Kyushu, Japan during the July 2020 Heavy Rainfall Event, *SOLA*, **17**, 8-15 (2021).
- 3) S. Yoshida, S. Yokota, H. Seko, T. Sakai, and T. Nagai: Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar using LETKF System, *SOLA*, **16**, 43-50 (2020).
- 4) S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Ikuta, Y. Shoji, H. Seko, and 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**, 7, 1781-1798 (2022).
- 5) T. Sakai, T. Nagai, T. Izumi, S. Yoshida, and 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).