

ライダーとゾンデを用いた線状降水帯風上側の観測

吉田 智¹, 酒井 哲¹, 永井 智広¹, 瀬古弘¹, 加藤輝之¹, 白石浩一², 清水慎吾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)

Observations of a moist low-level jet into mesoscale convective system using lidars and radiosondes

Satoru YOSHIDA¹, Tetsu SAKAI¹, Tomohiro NAGAI¹, Hiromu Seko¹, Teruyuki KATO¹,
Koichi Shiraishi², and Shingo SHIMIZU³

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 observation campaigns to reveal three-dimensional structure of moist low-level jets (MLLJ) during the rainy season using ground-based water vapor Raman lidars, Doppler lidars, and radiosondes. Previous numerical simulations indicated that MLLJs, which supply a large amount of moisture into Mesoscale Convective Systems, sometimes rise gently toward the downwind side in very moist environment. However, these characteristics have not been observed. Radiosonde data showed that a moist layer with over 90% in relative humidity rose from about 1 km to about 2 km above sea level with a tilt of about 0.5 degree over 100 km. Himawari satellite data confirmed a similar gentle slant in cloud top height. The Doppler lidar detected weak updrafts typically about 0.2 m s⁻¹ within the MLLJ. These updrafts are likely caused by lower sea surface temperatures on the downwind side and/or weak low-level convergence, relating to the MLLJ's unique slant structure.

Key Words: Water vapor lidar, Doppler lidar, mesoscale convective system, heavy precipitation

1. はじめに

多数の積乱雲で構成される線状降水帯は局地的な大雨を引き起こし、甚大な被害をもたらす。減災のために、線状降水帯発達過程の解明や予測精度向上が不可欠である。線状降水帯の風上側には、その大気下層に湿潤な強風域 (moist low-level jet; MLLJ) の存在が知られている¹⁾。MLLJ が下層収束等に持ち上げられ内部の水蒸気が凝結することにより積乱雲を生成し、下層からの水蒸気供給が継続するなどの条件を満たせば、線状降水帯が形成される。MLLJ が供給する潜熱は線状降水帯を構成する積乱雲の発達エネルギーであるため、線状降水帯発達過程の理解のためには、MLLJ の三次元的な水蒸気輸送構造を理解することが必須である。

我々の研究グループでは、線状降水帯の風上側の MLLJ の水蒸気構造の把握、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 年度まで九州において水蒸気ラマンライダー (RL) およびドップラーライダー (DL) による観測を実施した¹⁾。さらに 2022 年ではライダー観測に加えて、頻回のラジオゾンデ観測を実施した。本稿では、2022 年 7 月 14 日に鹿児島県で発生した線状降水帯について、線状降水帯の風上側で観測された MLLJ の詳細な水蒸気構造の観測結果を示す。

2. 観測

2022 年夏季では、RL と DL を長崎市野母崎 (以降、野母崎) と鹿児島県下甕島 (以降、甕) に設置し、継続的に観測を実施した (図 1 d)。両サイトに設置した RL は、Nd:YAG レーザの 3 倍波 (355nm) を鉛直方向に照射し、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²⁾。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 1.5km 程度である。各観測サイトにおいてゾンデ観測を実施し、RL で得られる水蒸気データの校正を行った。水蒸気混合比の精度は夜間で 1g/kg 以下である。野母崎には WindCube 200s、甕には StreamLinePro の DL をそれぞれ設置し、低層の風観測を行った。さらに、2022 年では 6 月 16 日から 1 月間にわたり、野母崎、甕に加え、長崎県福江島 (以降、福江) の 3 点地点でゾンデ観測を実施した (図 1 d)。

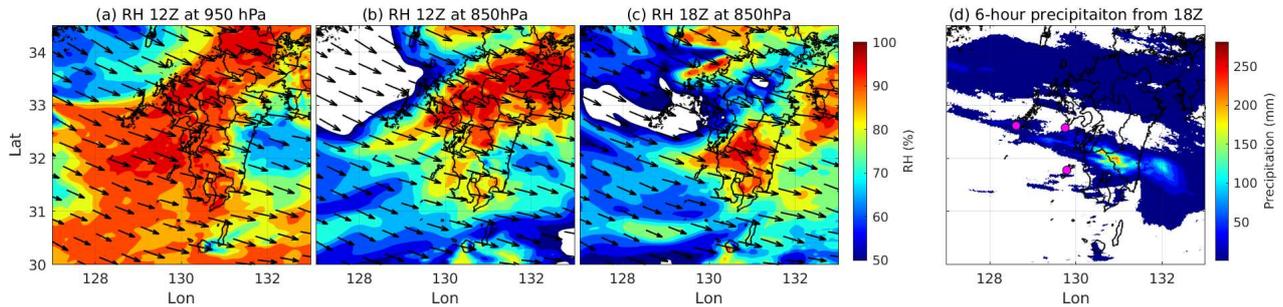


Fig1. RH and horizontal wind fields from LA, and six hour accumulated precipitation from radar observations at July 14 in 2022. (a) RH and horizontal wind at 12Z at 950hPa. (b) RH and horizontal wind at 12Z at 850 hPa. (c) RH and horizontal wind at 18Z at 850 hPa. (d) six hour accumulated precipitation from 18Z. In (d), magenta circles represent the locations of observation stations; (upper left) Fukue, (upper right) Nomozaki, and (lower) Koshiki stations

3. 観測結果

2022年7月15日00Z(UTC,以降同様)には中国から九州北部にかけて停滞前線が解析された. 気象庁の局地解析(Local analysis; LA)によると, 2022年7月14日は, 東シナ海から九州の西沿岸部全域に西よりの湿潤な風(MLLJ)が断続的に950hPa高度付近に流入しており, このうち九州の一部ではMLLJが850hPa高度に達していた(図1a-1c). 850hPa高度での湿潤な領域は12Zには九州北部に解析されていたが, 徐々に南下し18Zには鹿児島県に達していた. 850hPaの湿潤な大気層の南下に伴い, その風下側で発生した降水域も南下し, 18Z頃から鹿児島県から宮崎県にかけて線状降水帯が発生した(図1d).

図2に九州北部で湿潤な大気が850hPa高度以上に上昇した時間帯(11:30Z, 14:30Z)における, 福江と野母崎のゾンデの観測結果を示す. 同図に示す通り, 福江, 野母崎ともに大気下層が非常に湿潤であった. ここで, 相対湿度(RH)が90%を超える最大の高度をRH90高度と定義する. 11:30Zの放球では福江, 野母崎のRH90高度はそれぞれ, 1.2km, 2.2kmであった. また, 14:30Zの放球では福江, 野母崎それぞれで, 1.1km, 1.7kmであった. これらの時間帯では大気下層ではほぼ西よりの風であったこと(図1), および, 福江サイトは野母崎サイトのほぼ真西に位置していたことから, RH90高度が風下側に向けて斜めに上昇していたと考えられる. 福江と野母崎のゾンデの比較から, MLLJは11:30Zでおよそ 0.54° , 14:30Zで 0.36° 程度の角度で上昇していた. さらに図2で示す通りRH90高度以下では, Moist absolute unstable layer (MAUL)の条件³⁾を満たす層の厚さが野母崎では最大1.7kmあり, 1kmを超える厚みを持った湿潤な層が存在していた.

図3に飴での観測結果を示す. RLから得られた高度500mの下層の水蒸気分布は, 一日にわたり 18 g kg^{-1} を超え, 非常に湿潤であった. 高度500mの水蒸気フラックスは $200\text{ g m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ を超えており, 線状降水帯発生⁴⁾の6条件のうち, 大気下層の水蒸気フラックスの条件($\text{WVFL} > 150\text{ g m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)を満たす. 水平風の強まりにより06Z頃や18Z頃に水蒸気フラックスは大きくなり, $320\text{ g m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ を超えている. 06Zの水蒸気フラックスのピーク後には風下側で線状降水帯は発生しなかった一方で, 18Zのピーク頃から風下側の鹿児島県北部から宮崎県にかけて線状降水帯が発生した. 06Z頃には図3aで見られる通り06Z頃には高度1kmから1.5kmに非常に乾燥した大気が流入し, 対流が抑制され線状降水帯に至らなかったと考えられる. 一方, 線状降水帯が発生した数時間前の14:30Z以降からRH90高度は上昇し, 20:30Zでは1.9kmに達していた. 06Zと18Zの

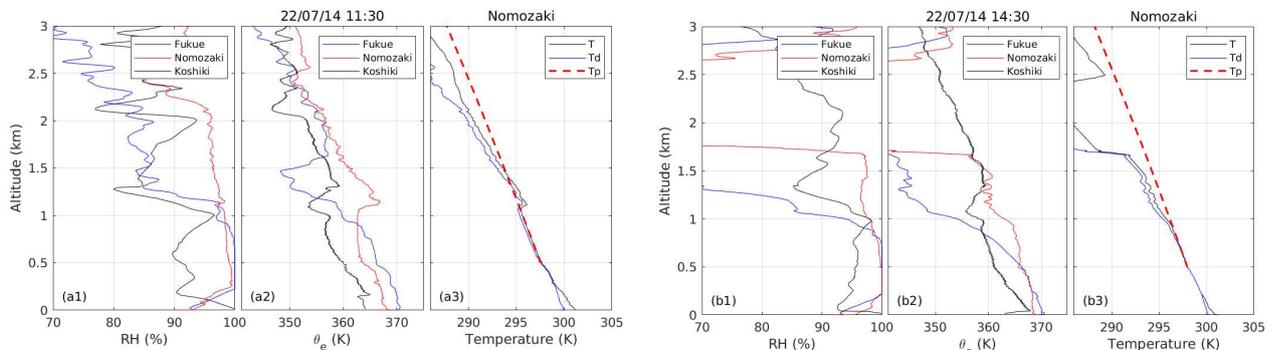


Figure 2. Observation results of radiosondes at the Fukue, Nomozaki, and Koshiki stations. (a) vertical profiles at 11:30Z. (a1) relative humidity (RH) at Fukue, Nomozaki, and Koshiki stations. (a2) Equivalent potential temperature (θ_e) at Fukue, Nomozaki, and Koshiki stations. (a3) Temperature (T), dewpoint (Td), temperature at a parcel raised from 500 m asl (Tp) at the Nomozaki station. (b) The same as (a) but for at 14:30Z.

比較から、線状降水帯が発生するには大気下層の水蒸気フラックスに加えて、自由対流圏下層も湿潤である必要があると考えられる。

甌のドップラーライダー観測によると、7月14日の下層の風向はほぼ西よりで一定しており（図略）、風速は12Zから20Zにかけて強まった。RH90高度の上昇中にドップラーライダーはおよそ高度500mから1kmまでの弱い上昇気流（平均上昇速度： 0.2 m s^{-1} ）を観測した（図3c）。図4に気象衛星ひまわりで観測した輝度温度を示す。同図より甌島の付近では雲域があり、輝度温度は東側ほど低温であった。128.7E°から130.2E°の輝度温度の回帰直線からこの領域において、輝度高度から推定される雲頂高度はおよそ風上側に向けて650m上昇している。雲頂高度は風下に向けておよそ 0.26° の角度で上昇しており、同時刻に観測された福江と野母崎のゾンデ観測から得られたRH90高度の傾きと同程度であることが分かる。

4. 考察

非常に湿潤な環境下で発生するMLLJでは、水平にある程度広がった湿潤な層が風下側に向かって少しずつ厚みを増すことが指摘されている。このような対流構造を **slab convection** と呼ばれている（Brain and Fitch³⁾。以下、BF)。BFによると、slab convection では非常に湿潤な空気が水平方向にある程度広い範囲にわたり大気下層に存在しているため、下層で発生する上昇気流が上空を広い範囲で加温する。このため上昇気流と環境場の気温差が小さくなり、上昇気流が周囲から得る浮力が小さくなる。そのためMLLJ内では上昇気流が強まらない可能性を指摘している。slab convection でのMLLJ内では上昇気流が弱く、結果的に流入側の湿潤な層は緩やかに上昇すると考えられる。このslab convection はアメリカ中西部のMCS発生時にはあまり見られず、東アジアの梅雨期に発生することが知られている⁵⁾。

図2に示すゾンデ観測結果の通り、11:30Z、14:30Zに野母崎および福江で観測されたMLLJの湿潤な層は、風下側に向けて緩やかに上昇している。また甌周辺でも雲頂高度が風上から風下に向かって同様に上昇していることから、甌サイト付近でもRH90高度が風上から風下に向けて緩やかに上昇していたと考えられる。これらの観測結果から、今回の事例はslab convectionの構造を有していたと考えられる。Tsuji et al.⁶⁾は九州南部で発生した線状降水帯事例に対して、モデル解析値を用いた研究を行った。その結果MCSに流入するMLLJでは、下層に存在する湿潤な高い相当温位層が緩やかに上昇していることを示した。またYoshida et

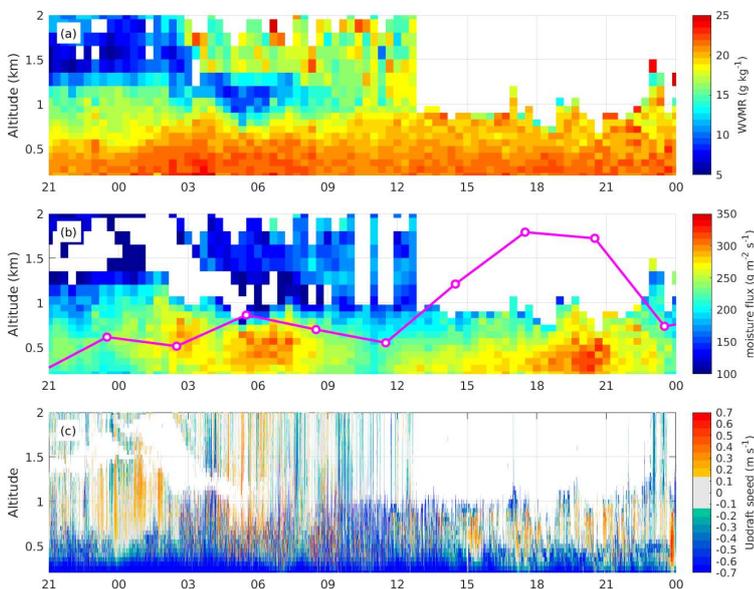


Fig 3: Observation results at Koshiki station. (a) Time-height plot of water vapor mixing ratio obtained with the RL. (b) Moisture flux retrieved from the RL, DL, and radiosonde observations. (c) Vertical Doppler velocity obtained with the DL. In (b), the magenta line indicates the altitude where RH exceeded 90% from radiosonde observations.

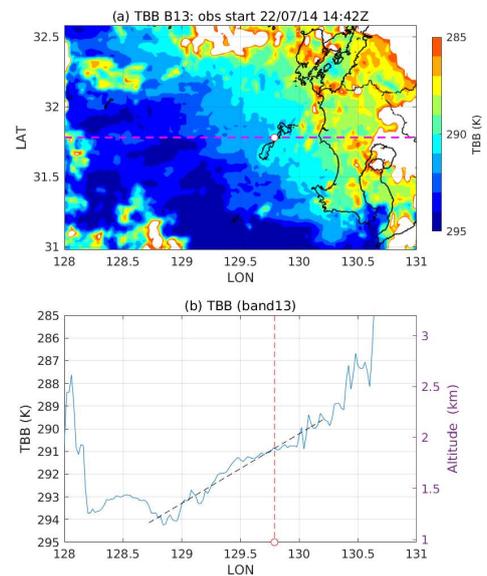


Fig. 4: (a) Brightness temperature (band 13) from Himawari satellite at 14:42Z. (b) Brightness temperature along the dashed magenta line in (a), passing the Koshiki station. The right axes indicate the altitude corresponding to brightness temperature, estimated from radiosonde observations. Red circles represent the Koshiki station. Black dashed lines indicate the regression line of brightness temperature.

al.¹⁾は、2021年に発生した線状降水帯事例に対して、その風上側の MLLJ を水蒸気ライダー観測し、MLLJ はその外側よりも高高度 (1.6km) まで達していることを示した。このようにモデル解析値により線状降水帯事例では slab convection が発生することや、一点の水蒸気プロファイル観測により MLLJ の厚みが増加することは示されてきたが、本観測のように風上と風下の水蒸気プロファイルの 2 地点同時観測し、slab convection を明確に示した例は今回が初めてである。

本事例の MLLJ 内は MAUL か、または非常に MAUL に近い非常に湿潤な状態であった。また、高度 500 m から持ち上げた気塊はすぐに持ち上げ凝結高度に達し、その RH90 高度以下では周囲の気温と持ち上げた気塊の気温差は小さい (図 2a3, 2b3)。BF で指摘された通り、下層からの湿潤大気を持ち上げにより上層を加熱の効果により安定層をなすため、本事例でも持ち上げられた気塊が周りから受け取る浮力は小さく、上昇気流を強める効果は限定的であると考えられる。加えて、本事例では RH90 高度以上で RH が急減することから (図 2b1)、RH90 高度を超える下層大気の上昇が抑えられる。このため MLLJ 内の上昇気流は浮力による強化は限定的であったと考えられる。甌で観測された上昇気流は平均 0.2 m s^{-1} 程度であり、この上昇速度は通常の対流混合層での上昇気流と比較すると非常に弱い上昇気流である。本事例では、14:30Z には 3 つのゾンデ観測点全てで大気下層に非常に湿潤な MAUL に近い層が観測されており、MLLJ 内の非常に湿潤な層は少なくとも水平スケール 80km 程度 (観測サイト間の距離) には達していたと考えられる。MLLJ 内で広い水平スケールで非常に湿潤になり、MLLJ が slab convection に至ったと考えられる。

本事例では、MLLJ の上昇がみられた東シナ海の九州沿岸では低気圧による擾乱はなく、海上で発生しているため山岳による滑昇の影響もない。また、前述の通り slab convection の構造を有する MLLJ では、浮力による上昇気流強化への寄与は限定的である。MLLJ 内で観測された弱い上昇気流を引き起こした要因は、2 つ考えられる。一つは、風下での海面水温度 (SST) の低下による (図略)、風上から風下にかけて等温位面上昇である。LA によると、東西鉛直断面の等温位面は風下側に向けて緩やかに上昇していることが分かっている (図略)。MLLJ 内の湿潤な大気層はこの等温位面に沿って上昇するため、風上へ移流するに伴い弱い上昇気流を伴ったと考えられる。もう一点は大気下層での収束である。甌の DL 観測によると 12Z から 20Z の 8 時間で高度 600 m において、水平風速は 9 m s^{-1} から 13 m s^{-1} にまでほぼ単調に強まっている (図略)。このような水平風速の強化は大気下層に弱い収束をもたらす。この水平風によりもたらされた下層収束は、DL の観測結果から平均で $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ である。LA でも同様にして九州の西海上において、同程度の弱い収束が解析されている。これらの水平風の変化による弱い収束が上昇気流の強化にも寄与していたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、九州西岸で RL, DL およびゾンデを用いた観測を実施し、2022年7月14日に九州南部で発生した線状降水帯風上側の MLLJ の観測に成功した。今回の観測した MLLJ 内に大気下層に最大 1.7km の厚みを持つ MAUL の層が存在し、MLLJ は風下側に向かって緩やかに上昇する slab convection の構造を持っていたことが分かった。また BF で指摘されていたように、今回観測された MLLJ は、非常に湿潤なため浮力による上昇気流の強化は非常に限定的であることが分かった。MLLJ の上昇流を生じさせたメカニズムとして、風下側における海面気温の低下に伴う等温位面に沿った気塊の上昇や、大気下層の収束が考えられる。

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。気象研究所岡部いづみ主任研究官より気象衛星データ解析についてご教授いただいた。この場を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) S. Yoshida et al.: Water vapor lidar observation and data assimilation for a moist low-level jet triggering a mesoscale convective system, *Mon. Wea. Rev.*, **152**, 1119–1137, 2024.
- 2) T. Sakai et al.: 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.
- 3) G. H. Bryan and J. M. Fritsch: Moist Absolute Instability: The Sixth Static Stability State. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1207–1230, 2000.
- 4) T. Kato: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 485–509, 2020.
- 5) S.-Y. Hong: Comparison of heavy rainfall mechanisms in Korea and the Central US, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **82**(5), 1469–1479, 2004.
- 6) H. Tsuji et al.: The role of free-tropospheric moisture convergence for summertime heavy rainfall in western Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL095030, 2021.