

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01983

研究課題名（和文）最先端の地上大気観測とデータ同化で、線状降水帯の予測精度はどこまで向上するのか？

研究課題名（英文）Improvement of local severe precipitation forecast using data assimilation of state-of-art observation systems

研究代表者

吉田 智 (Yoshida, Satoru)

気象庁気象研究所・気象観測研究部・主任研究官

研究者番号：00571564

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,630,000円

研究成果の概要（和文）：線状降水帯の多発する九州において3年間にわたり、水蒸気ライダー、ドップラーライダーを用いた観測を実施した。この観測により、6事例の線状降水帯に関連する大気下層の観測に成功した。どの事例でも線状降水帯発生前、および発生中には大気下層水蒸気量が大きく上昇することが明らかとなった。さらに観測できたうちの3事例では、大気下層水蒸気量のデータ同化により、線状降水帯に伴う大雨の予測精度向上を確認した。また、水蒸気ライダー観測データの長期間のデータ同化実験により、700hPa高度以下の大気下層で水蒸気場の推定精度が向上することを示し、水蒸気ライダー観測とデータ同化の有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、線状降水帯に関連する大気下層の水蒸気と風向風速の鉛直プロファイルの連続観測に成功した。線状降水帯に流入する潜熱供給量が本観測から初めて明らかとなり、気象学的に重要な未解決問題である線状降水帯の発生・維持メカニズムの解明につながる糸口を得た。さらに本研究では、大気下層の水蒸気量のデータ同化により、水蒸気場の改善に加え、事例は限られるものの線状降水帯に伴う大雨の予測精度が向上することを示した。近年、毎年のように線状降水帯の大雨による被害が発生しており、線状降水帯に伴う降水量の予測精度向上は国家的喫緊の課題である。本研究はこの社会的課題解決に資する。

研究成果の概要（英文）：Over a period of three years, observations were conducted using water vapor Raman lidars and Doppler lidars in Kyushu, where there are frequent occurrences of local heavy precipitations. These observations successfully captured the lower atmospheric conditions associated with six local severe precipitations. In all cases, it was observed that the lower atmospheric water vapor significantly increased both before and during the occurrence of the local severe precipitations. Furthermore, data assimilation of the observed vertical profiles of lower atmospheric water vapor in three of six events confirmed an improvement in the prediction accuracy of local heavy rainfall. Additionally, a month-long data assimilation experiment using water vapor lidar observations revealed an enhancement in the estimation accuracy of the water vapor field in the lower atmosphere below the 700 hPa level.

研究分野：電磁波リモートセンシング

キーワード：線状降水帯 ライダー観測 データ同化

1. 研究開始当初の背景

線状降水帯とは、「次々と発生する発達した積乱雲が列をなし、組織化した積乱雲群によって、数時間にわたってほぼ同じ場所に降水をもたらす気象システム」である。令和2年7月豪雨など、我が国では線状降水帯が毎年のように発生し、甚大な被害をもたらしている。線状降水帯に伴う降水量の予測精度向上は、自然災害科学分野における最も重要な研究テーマの一つであると同時に、国民の安心安全を保障する上で喫緊の課題でもある。

これまでの研究により、線状降水帯は、以下の～の過程を経て発生する(図1)。下層で湿潤な大気が流入、湿潤な大気の自由対流高度までの持ち上げと積乱雲発生、中層風による積乱雲の移流、である。線状降水帯のエネルギー源である水蒸気が多量、かつ、下層と中層の風(風向風速)が適切な値であった場合、線状降水帯が形成し維持される。～における重要な物理量は、下層水蒸気量・自由対流高度・風である。このうち、下層水蒸気量・自由対流高度は、水蒸気量・気温の鉛直プロファイルから算出できるので、水蒸気量・気温・風の3つの鉛直プロファイルを把握することが線状降水帯の形成維持プロセス理解のキモである。降水量予測精度向上のためには、線状降水帯の形成維持プロセスに最も大きな影響を与える線状降水帯風上側の水蒸気量・気温・風速の各鉛直プロファイルの観測と、そのデータの同化が非常に重要である。データ同化とは、実観測データを用いて予測を改善する技術である。しかしながら、計測技術上の問題から、水蒸気量・気温・風速の各鉛直プロファイルを同時に連続観測し、線状降水帯のデータ同化を実施した例はない。

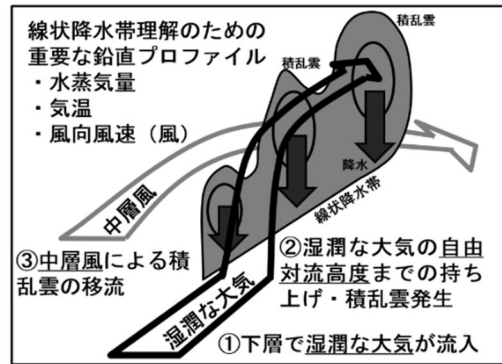


図1: 線状降水帯の維持形成プロセス

2. 研究の目的

本研究では、独自に開発した最先端の地上大気観測機器である、水蒸気ライダー、気温ライダー、ウィンドプロファイラーの観測を実施し、線状降水帯風上側での水蒸気量・気温・風速の各鉛直プロファイルを得る。観測結果を用いたデータ同化を行い、線状降水帯の降水量の予測精度向上を目指す。さらに、観測データの詳細解析を行い、線状降水帯を引き起こす大気下層の水蒸気の立体構造を把握する。加えて、将来的に水蒸気観測をより容易に、かつより精度よく実施できるようにするために、次世代型の水蒸気ライダーである水蒸気 Differential Absorption Lidar (DIAL)の開発を進める。

3. 研究の方法

応募者らはこれまで、適応信号処理等の最先端工学技術を駆使した地上大気観測器を開発してきた。即ち、水蒸気量鉛直プロファイルを得る「水蒸気ライダー」、気温の鉛直プロファイルを得る「気温ライダー」、風の鉛直プロファイルを得る「ウィンドプロファイラー」である。ライダー、ウィンドプロファイラーは共にリモートセンシング機器で、レーザー光又は電磁波を大気中に照射し、その後方散乱から物理量(水蒸気量、気温、3次元風向風速)を得る。これらの最先端観測器は前述の計測技術の問題を克服できる。

本研究では、これらの最先端大気観測器を用いて、水蒸気量・気温・風の鉛直プロファイルの連続同期観測を実施し、海洋から流入する湿潤な大気を観測する。観測ネットワークの風下側で線状降水帯が発生した事例を抽出し、線状降水帯のデータ同化実験を行う。データ同化を用いて、線状降水帯に伴う降水量の予測精度を向上する。さらに得られた観測データの解析により線状降水帯を引き起こすような大気下層の水蒸気の立体構造を把握し、線状降水帯メカニズム解明の糸口を得る。

4. 研究成果

観測に関する成果

・大気下層の観測の遂行: 研究初年度より関東近郊で予定通り水蒸気ライダー、気温ライダー、ウィンドプロファイラーの観測を実施した。なお、研究2年度および4年度においては、パイサラ社の水蒸気DIALのプロトタイプ機を用いた水蒸気観測も併せて実施した。しかしながら、観測期間中に関東近郊では線状降水帯と考えられるような事例は発生しなかったため、線状降水帯に関する研究は進められてはいない。

一方で、他の競争的資金を有効活用することにより、線状降水帯の多発する九州(長崎市野母崎および

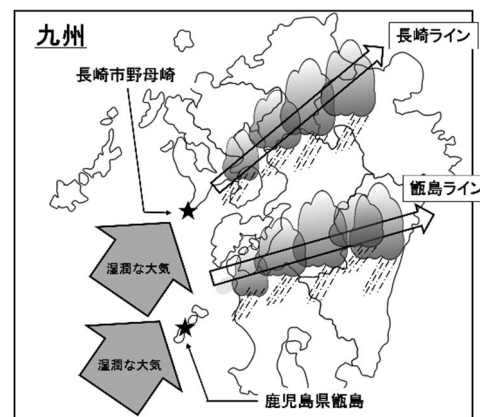


図2: 九州の観測サイトマップ。印で水蒸気ラマンライダー、ドップラーライダー観測を実施。

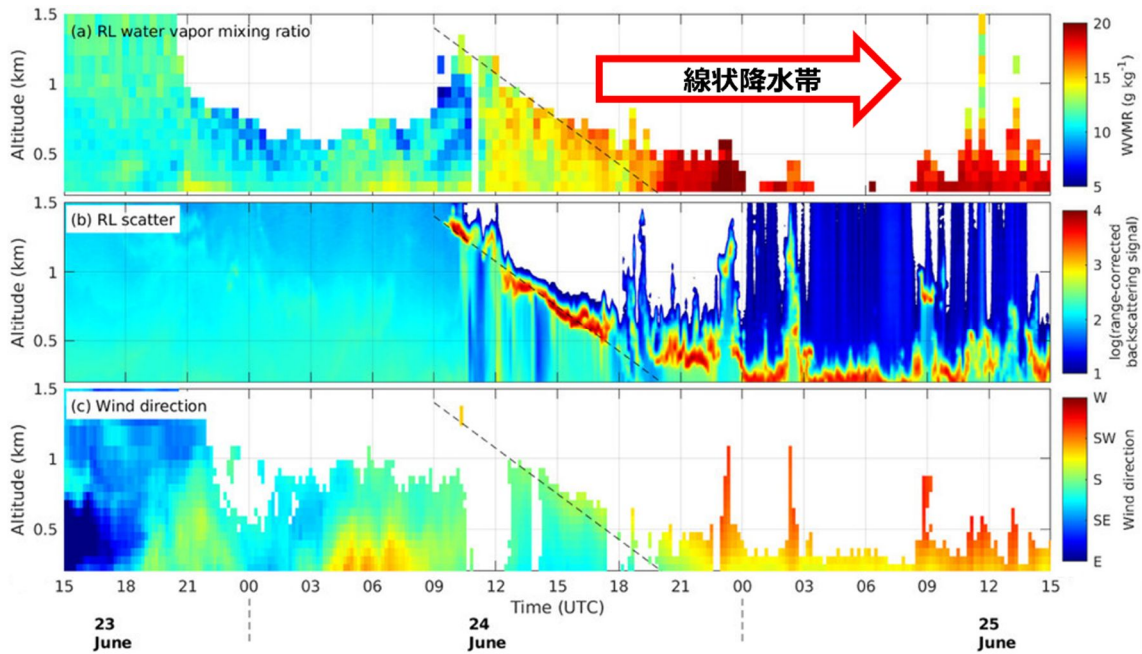


図 3: 2020 年 6 月 25 日に長崎県で発生した線状降水帯事例の水蒸気ライダーおよびドップラーライダーの観測結果。(a)水蒸気混合比、(b)後方散乱比、(c)風向。6 月 24 日 21 UTC 以降に線状降水帯に関連する大気下層の湿潤な大気をとらえている。

鹿児島県薩摩川内市)で研究 2 年度から最終年度までの 3 年間にわたり、水蒸気観測・風向風速観測を実施することができた(図 2)。この九州での観測では気温ライダー観測は実施できなかったが、水蒸気と風向風速の観測を実施することができた。この九州での 3 年間の観測期間内に、合計 6 事例の線状降水帯の風上側の水蒸気観測や風観測に成功した。線状降水帯発生前の大気下層の水蒸気および風の詳細な連続プロファイル観測の成功例はこれまでなく、本研究で始めて成功したものである。

・大気下層の水蒸気・風の解析： 図 3 に 2020 年 6 月 24 日に発生した線状降水帯に伴い観測された水蒸気ライダーとドップラーライダーの観測結果を示す。図 3a に示す通り 6 月 24 日 21UTC 以降に線状降水帯に関連した大気下層の水蒸気量増加を観測できている。なおこの事例では線状降水帯はライダー観測点の風下側ではなく、ライダー観測点の北側で発生したため、線状降水帯の発生よりも少し遅れて大気下層の水蒸気上昇が観測されている。図 4 に 2021 年 7 月 9 日に鹿児島県北西部で発生した線状降水帯事例を示す。7 月 9 日 15UTC 頃に線状降水帯が発生したが、そのおよそ 6 時間前から下甕島の水蒸気ライダーが大気下層の水蒸気上昇を観測しており、水蒸気ライダーを用いた線状降水帯の実況監視の可能性を示した。さらに長崎と下甕島の水蒸気ライダー観測結果を比較することにより、大気下層の湿潤な大気層の厚みがおおよそ 1.6km であることが分かった。この大気下層の湿潤な大気層の厚みは、線状降水帯に供給される潜熱を見積もるうえで非常に重要なパラメータであるが、これまで観測が非常に少ない。今回の観測データを線状降水帯の維持形成メカニズム研究に役立てていく。

データ同化に関する成果

・観測システムシミュレーション実験(OSSE)： OSSE とは実在しない観測システムを計算機上に構築し、データ同化において観測システムの効果を評価する手法である。即ち、OSSE を用いれ

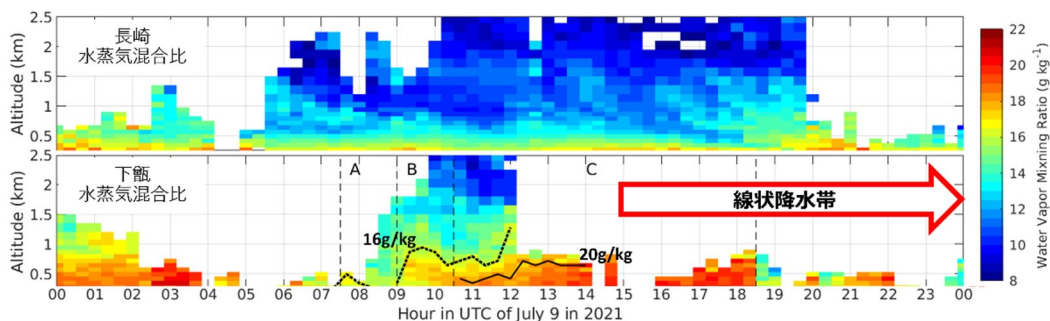


図 4: 2021 年 7 月 9 日に鹿児島県で発生した線状降水帯事例の水蒸気ライダーの観測結果。(a)水蒸気混合比(長崎) (b)水蒸気混合比(下甕島)

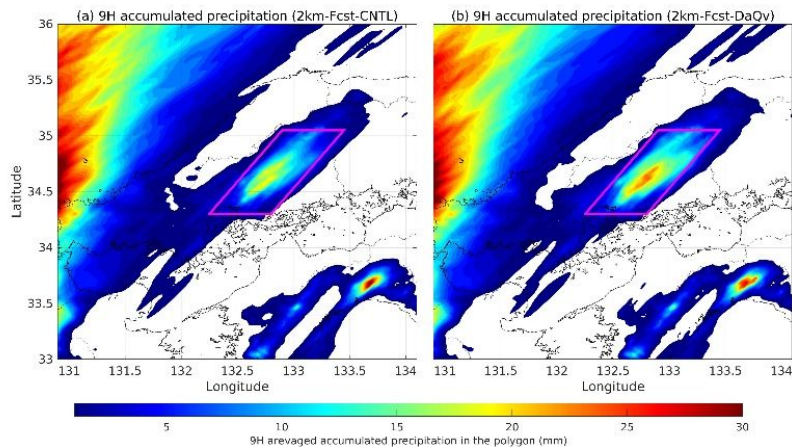


図 5：2014 年 8 月 20 日に広島県で発生した線状降水帯事例の OSSE。(a)水蒸気ライダーデータ同化なし。(b)水蒸気ライダーのデータ同化あり。なお、ライダー観測点は佐田岬としている。

ば、過去の事例に対し、もし観測があればどのような予測が出せたのか、という模擬実験が可能となる。2014 年 8 月に広島県で発生した線状降水帯事例において、線状降水帯の風上側である佐田岬（愛媛県）に水蒸気ライダーの観測を仮定した OSSE を実施した。水蒸気ライダー観測データを同化した場合には、同化しない場合よりも、積算降水量の予測値が約 28% 上昇し、現実の降水量に近づくことを確認した（図 5）。この OSSE の結果は、水蒸気ライダー観測のデータ同化により、線状降水帯の予測精度向上の可能性を示すことができた。

・水蒸気ライダーの実観測データのデータ同化： 図 3 で示めた 2020 年 6 月 24 日の観測事例について長崎市野母崎の水蒸気データの同化し、6 時間の降水予測を実施した。水蒸気ライダーデータの同化により、水蒸気場だけでなく、水平風場も大きく変化することが分かった。さらに初期値から得た線状降水帯の降水量予測結果を示す（図 6）。同図に示す通り、降水量は大きく改善することはないものの、降水域に改善が見られた。また、図 4 で示した 2021 年 7 月 9 日の観測事例について、その風上側に位置する下甕島の水蒸気ライダー観測のデータ同化を行ない、9 時間の降水予測を実施した（図 7）。この事例でも 2020 年の事例（図 3、図 6）と同様、水蒸気ライダーデータの同化により、大気下層の水蒸気場および水平風場が大きく変化した。さらにこの事例では、データ同化により下層収束の位置が大きく改善し、降水域もそれに伴い大きく変化し、結果として観測値に近づくこと、即ち、水蒸気ライダーのデータ同化により線状降水帯に伴う降水量の予測精度が向上することを確認した。ここで挙げた 2 事例以外にも水蒸気ライダーデータの同化により、線状降水帯の予測精度が向上する事例があった。しかしながら、水蒸気ライダーのデータ同化により改善がほとんど見られない事例もあったことから、今後は改善が見られた事例と改善しない事例でその原因を究明し、水蒸気ライダーデータの効率的なデータ同化手法の開発に取り組む。

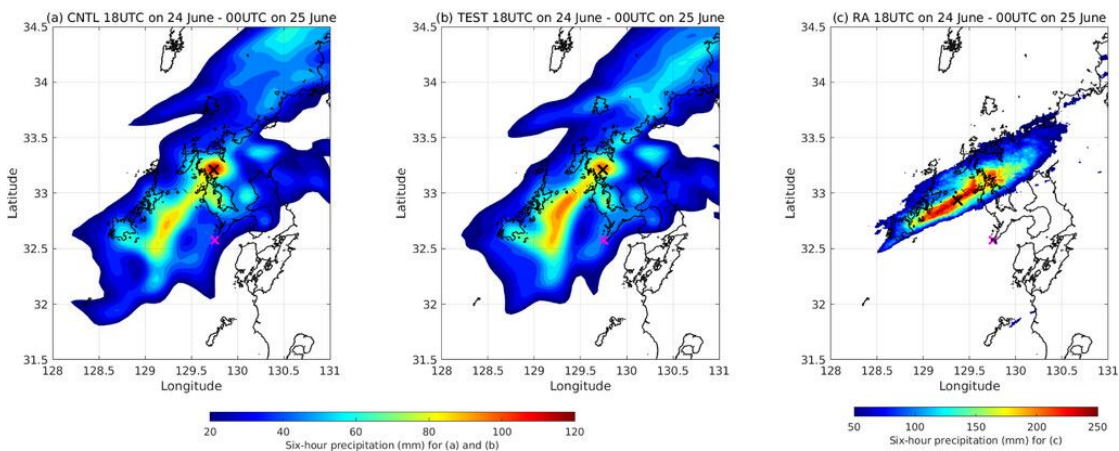


図 6：2020 年 6 月 24 日に長崎県で発生した線状降水帯の 6 時間の降水量予測結果と観測結果（解析雨量）。(a)水蒸気ライダーデータ同化なし。(b)水蒸気ライダーデータ同化あり(c)観測された降水量。

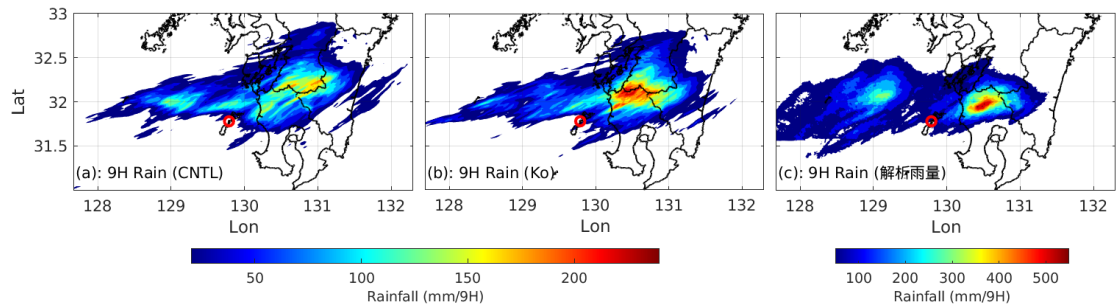


図 7：2021 年 7 月 9 日に鹿児島県で発生した線状降水帯の 9 時間の降水量予測結果と観測結果（解析雨量）。(a)水蒸気ライダーデータ同化なし。(b)水蒸気ライダーデータ同化あり(c)観測された降水量。○は下甕島の水蒸気ライダー観測点。

・水蒸気ライダーデータ同化のインパクトの統計解析： 水蒸気ライダー観測により得られた水蒸気鉛直プロファイルの同化インパクトを確認するために、2022 年 6 月 15 日から 1 か月間のデータ同化実験を行った。長崎と下甕島の水蒸気ライダー観測データを同化した結果と同化しない結果をそれぞれ、ラジオゾンデによる直接観測結果（野母崎、下甕島、福江）と比較を行った。その結果、700hPa 以下の大気下層において、水蒸気ライダーのデータ同化による水蒸気場の改善を確認した。

水蒸気ライダー(DIAL)開発に関する成果

・水蒸気 DIAL プロトタイプの開発： 将来的な水蒸気観測の重要性の高まりを見越して、現状の水蒸気ラマンライダーよりも小型かつ高精度で水蒸気プロファイルを計測できる、水蒸気 DIAL の開発に着手した。本研究終了時点で、装置全体の組み立てが終了し、送信系および受信系のそれぞれで調整を概ね完了した（図 8）。引き続き別予算等を用いて水蒸気 DIAL 開発を進め完成を急ぎたい。

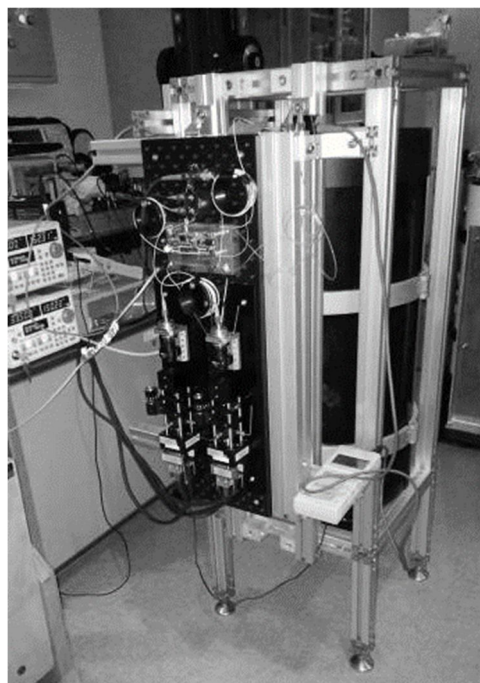


図 8：開発中の水蒸気 DIAL の外観

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Ikuta, Y. Shoji, H. Seko, and K. Shiraishi	4. 巻 150, 7
2. 論文標題 Lidar observations and data assimilation of low-level moist inflows causing severe local rainfall associated with a mesoscale convective system,	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 1781-1798
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/MWR-D-21-0213.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Yoshida, S. Yokota, H. Seko, T. Sakai, and T. Nagai	4. 巻 16
2. 論文標題 Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar Using LETKF System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 43～50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2020-008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 A. Takahashi, T. Sakai, T. Kawabata, S. Yoshida, and N. Ueda	4. 巻 3
2. 論文標題 Balance plot for visualizing and examining tradeoff between accuracy and data quantity of lidar water vapor measurement data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Laser Radar Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124-135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 吉田智	4. 巻 61, 5
2. 論文標題 水蒸気ライダー観測とデータ同化による線状降水帯に伴う降水量予測精度の向上	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 372-376
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.61.372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 酒井哲	4. 巻 61, 5
2. 論文標題 ライダーによる地上からの水蒸気鉛直分布計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 366-371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.61.366	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計23件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Ikuta, Y. Shoji, H. Seko, and K. Shiraishi
2. 発表標題 Observation and assimilation of vertical profiles of water vapor mixing ratio of low-level inflow associated with MCS
3. 学会等名 The 14th International Conference on Mesoscale Convective System and High Impact Weather in East Asia (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sakai, T., S. Yoshida, T. Nagai, K. Shiraishi, Y. Shoji, Y. Ikuta, and H. Seko
2. 発表標題 Compact Mobile Water Vapor Raman Lidar Observations for Heavy Rainfall Prediction in Japan
3. 学会等名 The Optical Society Optical Sensors and Sensing Congress The Optical Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Shoji, and H. Seko
2. 発表標題 Impact of low-level moisture and convergence on initiation and development of cumulonimbus
3. 学会等名 AGU fall meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田智、白石浩一、酒井哲、永井智広、幾田泰醇、小司禎教、瀬古弘、清水慎吾
2. 発表標題 九州での水蒸気ライダー観測の初期結果
3. 学会等名 第24回大気ライダー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井哲、吉田智、永井智広、小司禎教
2. 発表標題 気象研ラマンライダーとVaisala差分吸収式ライダーによる大気下層の水蒸気分布比較観測
3. 学会等名 第24回大気ライダー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田智、酒井哲、永井智広、小司禎教、瀬古弘、白石浩一、清水慎吾
2. 発表標題 長崎におけるライダーによる水蒸気鉛直分布の初期観測
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川畑拓矢、上里達実、横矢直人、酒井哲、吉田智、高橋温志、上田修功
2. 発表標題 教師なし機械学習によるラマンライダーデータのノイズ除去
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 智、酒井 哲、永井智広、小司 禎教、瀬古 弘
2. 発表標題 下層水蒸気量と海風前線の対流発生への寄与 -羽田空港周辺2018年9月2日の事例-
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田智,瀬古弘,酒井哲,永井智広,小司禎教, 国井勝
2. 発表標題 観測システムシミュレーション実験を用いた水蒸気観測の影響評価
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小 司 禎 教 , 酒 井 哲 , 永 井 智 広 , 吉 田 智
2. 発表標題 首都圏短時間強雨の環境場 - 東風の特徴 -
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本真之、西村耕司、川村誠治、吉田智
2. 発表標題 1.3GHz帯ウィンドプロファイラの高度化
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田泰邦、阿保 真、長澤親生
2. 発表標題 ライダーによる大気境界層の気温鉛直分布の連続観測
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿保 真、長澤親生、柴田泰邦、内野 修、酒井 哲、柴田 隆、勝俣昌己
2. 発表標題 衛星搭載ライダーによるグローバルな水蒸気分布観測の提案
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿保 真、長澤親生、柴田泰邦、内野 修、酒井 哲、柴田 隆
2. 発表標題 衛星搭載水蒸気観測用差分吸収ライダー(DIAL)の技術実証
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田泰邦、長澤親生、阿保 真
2. 発表標題 CO2-DIALによる大気境界層内での気温分布測定法
3. 学会等名 第38回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿保 真、長澤親生、柴田泰邦、内野 修、酒井 哲、柴田 隆、勝俣昌己
2. 発表標題 衛星搭載 DIAL によるグローバルな水蒸気分布観測の提案
3. 学会等名 第38回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田泰邦、長澤親生、阿保真、吉田智
2. 発表標題 DIALによる大気境界層気温鉛直分布の連続観測
3. 学会等名 第24回大気ライダー研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sakai, T., T. Nagai, S. Yoshida, T. Kawabata, Y. Shoji, and K. Shirais
2. 発表標題 Sea breeze front observation with water vapor lidar and Doppler lidar at Tokyo Bay -Case of localized heavy rainfall on 19 August 2017-
3. 学会等名 AMS 100th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, S. Yokota, H. Seko, Y. Shoji, and K. Shiraishi
2. 発表標題 Development of a mobile water vapor Raman lidar and its application for data assimilation
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本真之, 西村耕司, 川村誠治, 山口弘誠, 中北英一, 吉田智
2. 発表標題 次世代ウィンドプロファイラの研究開発
3. 学会等名 日本大気電気学会第98回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本真之, 西村耕司, 川村誠治, 山口弘誠, 中北英一, 吉田智
2. 発表標題 次世代ウィンドプロファイラの研究開発
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田智、酒井哲
2. 発表標題 大気ライダ観測技術とその応用
3. 学会等名 フォトニック研究会4月研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Comparison of lower tropospheric water vapor vertical distribution measured with Raman lidar and DIAL and their impact of data assimilation in numerical weather prediction model
2. 発表標題 Tetsu Sakai, Satoru Yoshida, Tomohiro Nagai, Yasutaka Ikuta, Yoshinori Shoji
3. 学会等名 第30回国際レーザーレーダ会議（国際学会）
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	酒井 哲 (Sakai Tetsu) (00377988)	気象庁気象研究所・気象観測研究部・室長 (82109)	
研究分担者	柴田 泰邦 (Shibata Ysukuni) (10305419)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	
研究分担者	瀬古 弘 (Seko Hiromu) (60354445)	気象庁気象研究所・気象観測研究部・部長 (82109)	
研究分担者	永井 智広 (Nagai Tomohiro) (30343891)	気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・研究官 (82109)	
研究分担者	山本 真之 (Yamamoto Masayuki) (90346073)	国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波伝搬研究センター・主任研究員 (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------