

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03973

研究課題名（和文）台風等に対する航空機搭載フェーズドアレイ気象レーダによる観測システムの構築

研究課題名（英文）Development of an observation system for typhoons using airborne phased-array weather radar

研究代表者

高橋 暢宏（Takahashi, Nobuhiro）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：60425767

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：台風の発達メカニズム解明や予測性の向上が科学だけでなく防災の観点から求められている。本研究では、台風を立体的に観測しその構造を明らかにすることを最終の目標とし、台風の発達期における海上での航空機による観測の可能性を検討した。まず、最近のレーダ技術であるフェーズドアレイ気象レーダを航空機搭載に転用することを検討し、その利用可能性を示した。次に、航空機という移動体からのレーダ観測により実際にどの程度観測が実施できるかを示すために観測シミュレータを開発し、台風のシミュレーションデータをもとに観測シミュレーションを実施した。その結果、台風の眼の観測に限定した場合には十分立体観測が可能なが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

わが国における台風観測は、海洋上においてはほぼ人工衛星観測に依存しているの現状であるが、より高精度な予測を行うためには、海洋上での航空機観測が必須になる。その手段の1つはドロップゾンデによる大気構造の観測であり、もう1つが台風の発達に伴って形成される降水の観測であり、本研究は後者について、現在の最新の技術による観測の可能性について、ハードウェアのフィジビリティ研究およびシミュレーションによる観測可能性について示したものであり、実現すれば台風研究に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Understanding the development mechanism of typhoons and improving their predictability are required not only from the perspective of science but also from the perspective of disaster prevention. In this study, we investigated the possibility of using aircraft to observe typhoons over the ocean during their developmental stages, aiming to clarify the structure of typhoons by observing them from the viewpoint of three-dimensional structure. First, we studied the feasibility of using the phased-array weather radar, a state-of-the-art radar technology, for onboard aircraft, and demonstrated its applicability. Next, an observation simulator was developed to demonstrate the feasibility of radar observation from a moving platform (aircraft), and observation simulations were conducted based on simulated typhoon data. As a result, it was shown that three-dimensional observation was possible enough when limited to the observation around the eye of a typhoon.

研究分野：気象学

キーワード：台風 航空機観測 フェーズドアレイレーダ シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来、地球温暖化の進行により台風の強大化が懸念されている。防災の観点では台風予測精度の向上が課題となっている。気象庁のモデルでは進路予測は年々向上している一方で強度予測の進展が見られないのが現状である。その要因の1つとしては、強く発達した台風に見られる急発達現象のメカニズムが解明されていないことがある。その解決策としては、台風が急発達をおこす海洋上での観測を充実させることであり、有力な手段の1つが航空機観測である。近年、気象レーダにフェーズドアレイシステムを導入することにより、観測頻度や立体構造などの観測性が大幅に向上している。その技術は航空機搭載レーダにも原理的には転用可能である。

2. 研究の目的

日本に大きな災害をもたらす台風や線状降水帯などの降水システムに対して、観測が圧倒的に不足している遠隔地(海上)における航空機を用いた観測システムを構築することが最終的な目標である。

特に、ここ数年で目覚ましい進歩を遂げている、フェーズドアレイ気象レーダ(Phased Array Weather Radar, 以下、PAWR とよぶ)は、完全な立体観測が可能となっており、強い風速を持ち立体的な構造を持つ台風の観測に非常に適している。2017年には、地上設置のマルチパラメータ PAWR が開発され(MP-PAWR とよぶ)が開発され、降水粒子の特徴も含めた定量的かつ高速な3次元観測が可能になった。

これらのことから、MP-PAWR はその航空機への搭載性や3次元観測性能から、台風などの観測において大いにその威力を発揮することが考えられることから、MP-PAWR を中心とした台風等の航空機による観測システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

まず、台風観測を行うにあたり航空機搭載レーダに対して必要な要件をまとめることから始めた。1つには実際の航空機からのドロップゾンデ観測の経験を参考に、人工衛星搭載レーダによる台風の観測データから台風の立体構造の観測可能性を検討した。その結果、高く発達した台風に対して上空から立体的に観測することが有効であり、高度13 km程度飛行できるジェット機であれば観測可能であることが分かった。そのほかの制約条件として航空機の観測時間がフェリーフライトを含めて最大8時間程度であることから実際に観測できるのは1フライト2-3時間であることが分かった。

並行して、既存のフェーズドアレイ気象レーダ(図1)のデータ解析を行い、その観測の有効性および、解析手法の検討を行った。特に、降水システムの立体構造の表示方法や鉛直流速の推定方法などの検討を行った。それらをもとに航空機搭載レーダの諸元を決定した。

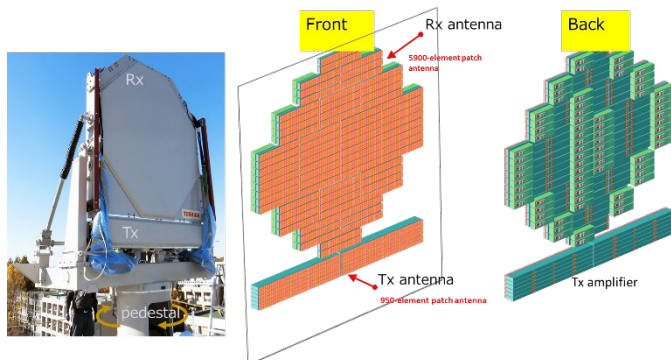


図1. マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ(MP-PAWR)の外観とアンテナ構造およびバックエンドの概念図

次に、観測シミュレーションの準備としてT-matrix (Mishchenko, 2002)を用いて、雨・雪・霰(密度と形状および空中姿勢が異なる)に対する後方散乱と前方散乱の散乱パラメータを計算し、テーブル化する。その際には、すべての粒径、全ての入射角(仰角)および空中姿勢について計算しておく。今回は、台風のシミュレーションのデータを準備して観測シミュレーションを実施した。また、レーダパラメータの計算のチェックを行うために、台風シミュレーションデータを直接的に仰角 0° の観測としての計算も実施した。なお、ここで作成したデータベースは同じ周波数の地上レーダでのシミュレーションに対しても利用可能である。図2に観測シミュレーションのフローを示す。入力は、台風の数値シミュレーションデータと上述の散乱データベースおよび航空機の飛行経路となる。観測位置とレーダの走査モードと諸元からレーダビームの位置決定を行い、そこでの雨・雪・霰の混合比および風速を参照する。また、その地点での仰角、方位、レーダからの距離からレーダが観測パラメータ(レーダ反射因子ZHH、レーダ反射因子差ZDR、偏波間の位相差変化率KDP、偏波間の相関係数 ρ_{HV} およびドップラー速度)を、散乱データベースを用いて計算する。また、粒子の落下速度は雨・雪・霰それぞれでの直径-落下速度の経験式を用いた。

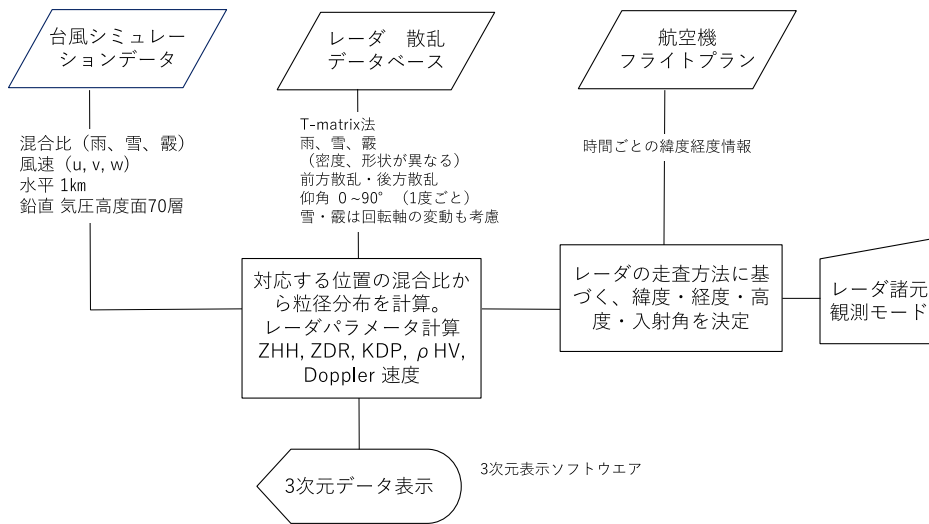


図 2. 観測シミュレーションのフローチャート

4. 研究成果

4.1 レーダシステムの検討

図 3 左にレーダのスキャンイメージを示している。水平風速場を得るためには前方視と後方視のレーダを組合わせて、それぞれのドップラー速度の合成により求めることが可能となるが、実現可能な航空機システムとしては航空機の胴体にポッドを取り付けて、そこにアンテナを収納することになるため (図 3 右)、現実的には前方・後方視の 2 つのビーム構成は難しく 1 つの横向きビームとなる。

表 1 にレーダの仕様の検討結果を主要諸元の形で示している。周波数は、フェーズドアレイ気象レーダで実績のある X 帯の二重偏波レーダを想定し、繰り返し周波数および送信出力の観点から最大探知距離を 100 km にしている。送信増幅器には半導体素子を用いることを想定しているため、低圧下での運用も問題ない。MP-PAWR では、パッチアンテナを 2 次元に配置してそれを 1 次元のフェーズドアレイアンテナとして用いているので、原理的には (前方視、後方視ができる) 2 次元のフェーズドアレイレーダも可能であるが、この場合偏波面の向きや直交性に技術課題がある (Zrníc et al., 2012)。走査角度は MP-PAWR の実績から $\pm 45^\circ$ は可能であるのでトータル 90° の走査 (仰角方向) が可能となる

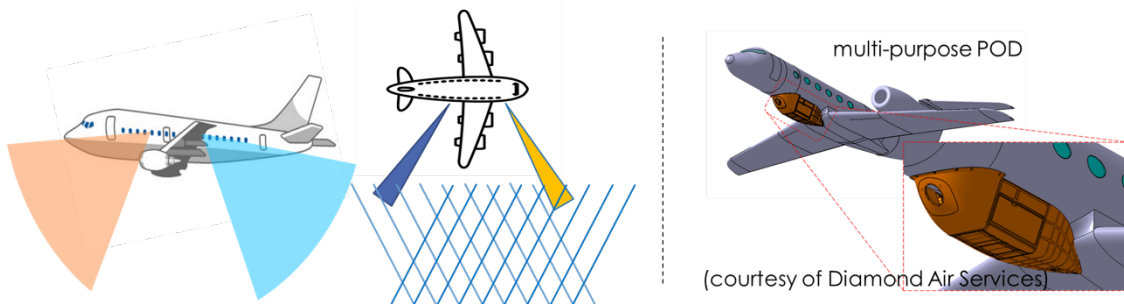


図 3. レーダのスキャンイメージ (左) と搭載可能な航空機ポッド

表 1 航空機搭載のレーダ仕様 (主要諸元) の検討結果

Parameter	Value	note
Frequency (band)	X (9400 MHz)	Based on the development experience X-band: patch antenna/waveguide slot array antenna
Observation range (km)	50~100 km	PRF : 2500~4000 Hz (PRF=1500Hz → 100km) Nyquist velocity : 60 m/s (X-band, PRF=4000Hz) or dual PRF
polarization	Dual pol. (H, V)	Need for hydrometeor classification
Tx power	400 W	Solid state power amplifier
Antenna type	1-D or 2-D phased array	1-D system is relatively easy 2-D antenna system is applied for MP-PAWR
Antenna size	1 (or 0.5) m	
Beam width	1.72 (or 3.44) deg.	Footprint size @100km : 3 km (or 6km)
Antenna scan	$\pm 30\text{-}45^\circ$ (RHI)	Need to mitigate the grating lobe

4.2 観測シミュレーション結果

観測シミュレーションに用いたデータは CReSS-NOHES (Tsuboki and Sakakibara, 2002, Aiki et al., 2006, 2011, 2016) による 2018 年 9 月に観測された台風 Trami のシミュレーションの出力である。図 4 にシミュレーションの結果(雨・雪・霰の混合比の和と風速場)を 3 次元的に示している。このケースは比較的台風の眼の領域が広がったことが実際の観測から知られており、シミュレーションは適切に再現していると考えられる。このデータをもとに観測シミュレーションを実施した。

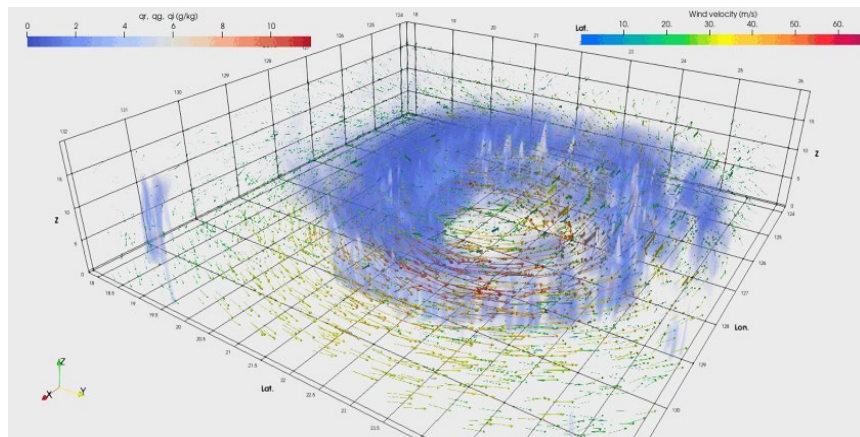


図 4. 台風 Trami のシミュレーションの例。ここでは、雨・雪・霰の混合比の和をカラーで示し、風速場をベクトルで立体的に示している。

観測シミュレーションを行った結果を図 5 に示す。ここでは、飛行経路を用いずに理想的な観測条件(台風中心にレーダがあり、すべての高度を仰角 0 度で観測できる)で実施したものである。この結果から ZHH や KDP が混合比の分布パターンと良く一致していることを確認した一方で、ZDR は降雪粒子でやや大きめの値を示しており、粒子の姿勢の分布の与え方に改良の余地があることが分かった。

このシミュレーション結果をもとに、飛行経路の情報も付加した観測シミュレーションを行った(図 6 と図 7)。飛行経路については、それぞれの図において青四角で航空機の旋回ポイントを示し、青四角間を直線飛行するとした。ジグザグ飛行を行った場合、ZHH の観測領域の割合は非常に高いことがわかるが、理想的な観測に比べて台風の辺縁部の観測は失われる。また、ZDR は直下方向に近いビームは原理的にゼロになるため、特に、横から見た図では飛行経路に沿った部分で ZDR が小さい領域が存在することになる。さらにドップラー速度観測では、視線方向の速度情報を得ることになるので、飛行経路上の観測では鉛直流+落下速度が観測されることになるほか、進行方向が逆になるとドップラー速度も反転する現象も見られことになる。これらの基本的な特徴はジグザグ飛行の結果に良く現れている。この飛行経路では観測を完了するのに 6 時間以上かかるため現実的には難しい。そこで、台風の眼の付近の壁雲に注目した観測として、台風中心の周りを円周状に飛行するパターンでの観測シミュレーションを行った(図 7)。その結果、観測は約 2.5 時間で完了でき、眼の周辺部の観測も十分にできることが分かった。観測はおよそ眼の中心部に視線方向が向くため、いわゆる台風の風速(接線方向の風)はほとんど得られない一方で、二次循環となる台風中心へ向かう風の成分は得られるので、意味ある観測になる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、台風の航空機搭載レーダによる観測を想定した観測シミュレーションを実施した。既存のレーダ技術により航空機搭載のフェーズドアレイレーダの実現可能性があることを確認した。また、降水粒子の散乱データをテーブル化し、航空経路をパラメータとして与えることによる観測シミュレーションシステムを構築した。観測シミュレーションの結果は良好であり、このシステムがシミュレーターとして利用できることを示した。今後は観測データから物理量を再現するアルゴリズムの開発が必要になる。

台風観測では、ドロップゾンデ観測とレーダ観測を併用することが理想的である。ドロップゾンデ観測では、一般にバタフライパターンと言われる台風中心を様々な方位角から横切ること実施しているため、そのような観測と共存するような飛行パターンをさらに検討する必要がある。また、観測範囲を広げるためにレーダを左右両方向で観測する方式なども検討する必要がある。

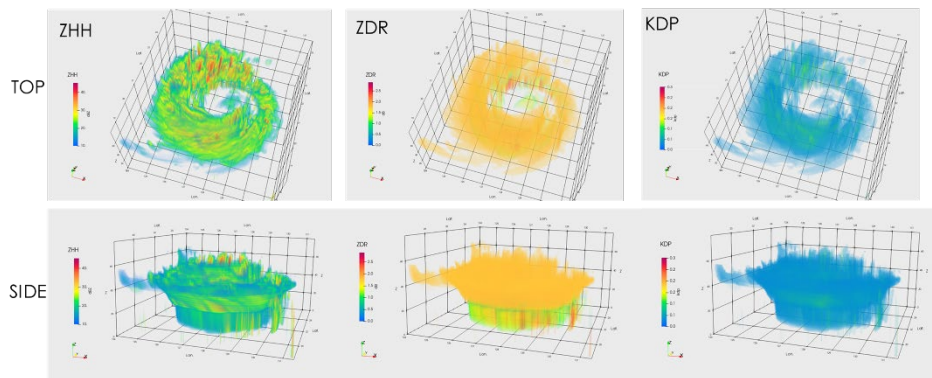


図5. 台風 Trami のシミュレーションに基づき観測シミュレーションを実施した例。ここでは、レーダを理想的に台風中心に置き、すべての高度で仰角0度とした。

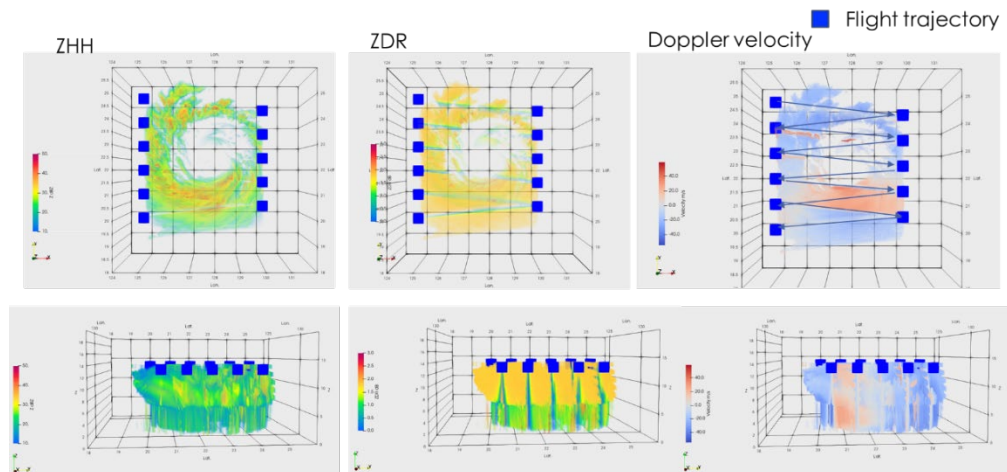


図6 ジグザグ飛行時の観測データのシミュレーション結果（左から ZHH、ZDR、ドップラ一速度）。上段は上方から見た図、下段は東側から見た図。

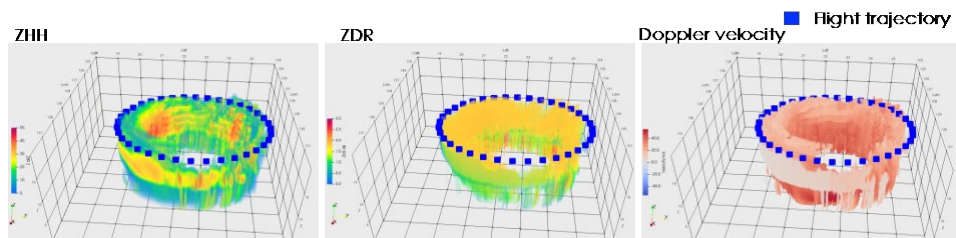


図7 図6と同様であるが、円周飛行した時の観測データのシミュレーション結果

参考文献

Aiki, H., K. Takahashi, and T. Yamagata, 2006: Cont. Shelf Res., 26, 1448–1468.
 Aiki, H., J. P. Matthews, and K. G. Lamb, 2011: J. Geophys. Res., 116, C03023,
 doi:10.1029/2010JC006589.
 Aiki, H., M. Yoshioka, M. Kato, A. Morimoto, T. Shinoda, and K. Tsuboki, 2015: Bull. Coastal
 Oceanogr., 52, 139–148.
 Mishchenko, M. I., 2002: Cambridge University Press, Cambridge (2002).
 Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2002: pp. 243-259, Springer, New York.
 Zrnica, D. S., Melnikov, V. M., Doviak, R. J., 2012 NOAA/NSSL report [online], 2012. Available from
https://www.nssl.noaa.gov/publications/par_reports/.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takahisa KOBAYASHI, Mitsuharu NOMURA, Ahoro ADACHI, Soichiro SUGIMOTO, Nobuhiro TAKAHASHI, Hiromaru HIRAKUCHI	4. 巻 -
2. 論文標題 Retrieval of Attenuation Profiles from the GPM Dual-frequency Radar Observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/jmsj.2021-030	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 Nobuhiro Takahashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis of a Precipitation System that Exists above Freezing Level Using a Multi-Parameter Phased Array Weather Radar	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/atmos10120755	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13件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 高橋暢宏、小池真
2. 発表標題 大型研究「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」について
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiro Takahashi
2. 発表標題 Precipitation observation by phased array weather radar
3. 学会等名 "Technology for Next Generation Space-Earth Environmental Radio Science", a workshop by ISEE（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口航平、高橋暢宏
2. 発表標題 マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ(MP-PAWR)による積乱雲観測 - 2018年8月2日の孤立積乱雲の事例 その2 -
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 瀧川丈晴、高橋暢宏
2. 発表標題 MP-PAWRで観測された関東における冬季の雷雲(その2)
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 岩田和樹、高橋暢宏
2. 発表標題 2018年8月27日に関東地方周辺に発生した雷雲の観測(その2)
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 高橋暢宏
2. 発表標題 航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進
3. 学会等名 Weather-Eyeオープンフォーラム(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋暢宏
2. 発表標題 台風観測を想定した航空機搭載レーダのサンプリング検討
3. 学会等名 「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口航平、額織丈晴、高橋暢宏
2. 発表標題 マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダデータに基づく孤立積乱雲の内部構造の時間変化
3. 学会等名 日本気象学会中部支部研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩田和樹、額織丈晴、高橋暢宏
2. 発表標題 マルチパラメータ気象レーダデータを用いて解析した雷をもたらす積乱雲の特徴
3. 学会等名 日本気象学会中部支部研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Takahashi
2. 発表標題 Estimation of the top of the liquid layer from GPM/DPR
3. 学会等名 39th international Conference on Radar Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Takahashi and Hiroshi Hanado
2. 発表標題 Analysis of isolated convective systems by using multi-parameter phased array weather radar
3. 学会等名 39th international Conference on Radar Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋暢宏・花土弘
2. 発表標題 MP-PAWRとタイムラプスカメラによる降水コア落下の比較
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋暢宏
2. 発表標題 雲と雨のマルチプラットフォーム観測
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019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	山田 広幸 (Yamada Hiroyuki) (30421879)	琉球大学・理学部・教授 (18001)	

6. 研究組織（つづき）

	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	牛尾 知雄 (Ushio Tomoo) (50332961)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	金田 幸恵 (Kanada Sachie) (80727628)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教 (13901)	

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