

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03747

研究課題名（和文）新世代気象衛星のマルチバンド観測を用いた台風の暖気核発達プロセスの解明

研究課題名（英文）Elucidation of tropical cyclone warm core development processes using multi-band observations by new generation satellites

研究代表者

小山 亮（Oyama, Ryo）

気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・併任（第一研究室）

研究者番号：70613826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：台風の発達に伴って形成され台風の発達を特徴づける暖気核について解析を行うため、衛星の多波長観測、特にハイパースペクトル赤外サウンダ観測から気温・水蒸気量プロファイルを推定する手法を開発した。本研究で開発した手法で推定した大気プロファイルとそこから得られる暖気核構造は、航空機による台風の眼の中に投下されたドロップゾンデ観測と比較して良く整合していた。また、衛星観測によって得られた暖気核構造を利用して統計解析を行い、暖気核気温偏差とベストトラック台風強度との関係について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した多波長衛星観測による詳細な台風暖気核の推定手法は、観測の不足により十分に明らかにされてこなかった台風暖気核と台風発達の機構解明に貢献する。更に、本研究で得られた暖気核構造の観測や知見は、台風強度の実況監視や強度予測の改善を通じて台風災害の減災に資することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to analyze the warm core of a tropical cyclone that develops during in the intensification phase, we developed a method to estimate temperature and water vapor profiles from satellite multi-wavelength observations, especially hyperspectral infrared sounder observations. The atmospheric profiles estimated by the developed method and the warm core structure obtained from the profiles were in reasonable agreement with drop-sonde observations launched from the aircraft into the eye of the typhoon. Statistical analysis was also performed by using the warm core structure obtained by the above method, and the relationship between retrieved warm core temperature anomalies and typhoon intensities obtained from the best track data was clarified.

研究分野：衛星気象学

キーワード：衛星観測 1次元変分法を用いた客観解析 高解像数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

台風の発達に伴って形成される眼及び暖気核は、台風の発達を特徴づける構造変化であるが、その形成プロセスの詳細は、台風の内部構造を詳細に捉えられる観測の不足により十分に明らかにされていない。この解決のため、本研究では、従来主として利用されていた極軌道衛星のマイクロ波サウンダに加えて、最新の気象衛星によるマルチバンド(多波長)衛星観測を用いた気温・水蒸気プロファイル推定手法の開発を行なう。本手法により得られた詳細な気温・水蒸気プロファイルを用いて、台風の暖気核気温プロファイルの特徴を解析するとともに、台風の眼及び暖気核の発達をもたらす力学的・熱力学的機構の解明を行う。また、本プロファイルデータに基づく解析によって得られた台風の眼及び暖気核形成のプロセスは、高解像度数値シミュレーション結果と比較を行い、その妥当性に関して検証・議論を行なう。

2. 研究の目的

(1) 台風暖気核構造の解析のため、マルチバンド衛星観測を用いた台風中心部における気温・水蒸気プロファイル推定手法を開発する。
(2) マルチバンド衛星観測から得られた台風中心部の大気プロファイルを解析することで、暖気核と台風強度の関係性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 気象全球数値予報モデル(以下 GSM)を背景場として、次元変分法(Rodgers 2000; 以下 1D-Var)によりマルチバンド衛星観測から気温・水蒸気プロファイルを推定する手法の開発を行う。当初、想定する衛星観測としてマイクロ波サウンダおよびひまわり 8 号の水蒸気バンドを想定し開発を行っていたが、1000 を超える多波長観測が可能で上記の衛星観測よりも更に高い鉛直分解能を持ったハイパースペクトル赤外サウンダ(以下 HSS (Menzel et al. 2018))を用いることで、より詳細な暖気核構造の解析を行う。
(2) 上記で開発した 1D-Var を利用して実際に台風中心部における大気プロファイルの推定を行い暖気核構造・時間発展について調査を行う。推定された大気プロファイル精度の検証として、日本の航空機観測キャンペーンである T-PARCI (e.g., Ito et al. 2018) により台風の眼の中に投下されたドロップゾンデ観測と比較し、暖気核構造の再現性の検証を行う。また、気象庁ベストトラックデータを用いて暖気核の発達プロセスと台風強度の関係性について調査を行う。
(3) マイクロ波サウンダおよびひまわり 8 号の水蒸気バンドを想定し開発された 1D-Var を用いて推定した気温・水蒸気プロファイルを高解像度数値シミュレーション結果と比較し、暖気核形成メカニズムを考察する。

4. 研究成果

(1) 1D-Var の開発と検証

本研究では、極軌道衛星に搭載された HSS として、MetOp 衛星に搭載された IASI、S-NPP 衛星に搭載された CrIS、Aqua 衛星に搭載された AIRS を用いた 1D-Var の手法を開発した。また、開発した 1D-Var の性能を検証するため、欧州中期予報センターの全球再解析データである ERA5 (Hersbach et al., 2020) を疑似真値場とし、ひまわり衛星の静止位置(経度 140.7 度)から 1 時間毎に HSS 観測を行うことを想定した理想実験を行った(林ほか 2021; 日本気象学会春季大会)。HSS として静止気象衛星 METEOSAT 第 3 世代に搭載が予定されている Infrared Sounder (IRS) (Holmlund et al. 2021) を想定し、ERA5 の気温・水蒸気プロファイルから放射伝達計算を行って得られた輝度温度を疑似観測として 1D-Var 処理を行い、気温・水蒸気プロファイルを推定した。図 1 に、1D-Var 解析の初期値として利用した GSM から推定値がどの程度修正されるかを調査した結果を示す。GSM と比較すると、1D-Var により推定された気温・水蒸気プロファイルは ERA5 に対するバイアスが全高度で 0 に近づいており、標準偏差に関しては主に成層圏下層・対流圏を中心に改善が確認できる。なお、本データを用いてひまわり後継衛星に HSS を搭載した場合を想定した気象庁領域数値予報モデルへのインパクト調査が行われた(Fujita et al. 2023)

(2) 1D-Var の台風観測への適用および暖気核構造特性の調査

台風の眼の中における HSS 観測を用いた 1D-Var の性能を確認するため、T-PARCI によるドロップゾンデ観測が行われた 2018 年台風第 24 号の事例で検証を行った(林ほか, 2022)。図 2 は、2018 年 9 月 25 日 05UTC 付近に台風中心部へ投下されたドロップゾンデが観測した気温プロファイル(図 2a)および水蒸気プロファイル(図 2b)と、1D-Var およびその初期値である GSM の大気プロファイルを比較したものである。ここで、図 2a の台風環境場からの気温偏差は台風中心から 600km ~ 700km にある GSM 格子点の気温平均を台風中心部の気温から引いたものとして定義した。気温偏差について CrIS (05UTC 付近を観測) および IASI (01UTC 付近の観測) を用いた 1D-Var の結果を見ると、300hPa 付近に存在する 10K 以上の気温偏差ピークを持つ発達した対流圏上層暖気核が再現されていることが確認できる。一方、対流圏下層では 1D-Var 推定値がドロップゾンデ観測と比較してずれが大きい。これは台風の眼の中に存在する下層雲からの放射の影響が一因として考えられる。図 2b の水蒸気プロファイルについても 800hPa 付近に存在する下層雲雲頂から上空ではドロップゾンデ観測と近い値が 1D-Var により推定されている。次に、図 3 に、

台風第 24 号の眼が現れていた 9 月 24 日～30 日について、HSS 観測から推定した暖気核最大気温偏差と気象庁ベストトラック中心気圧との関係を示す。暖気核最大気温偏差と台風中心気圧の時系列を確認すると、25 日中に見られる暖気核の急速な弱まりに伴う中心気圧の上昇(台風強度の低下)およびその後 26 日～30 日における中心気圧の維持について再現されていることが確認できる。

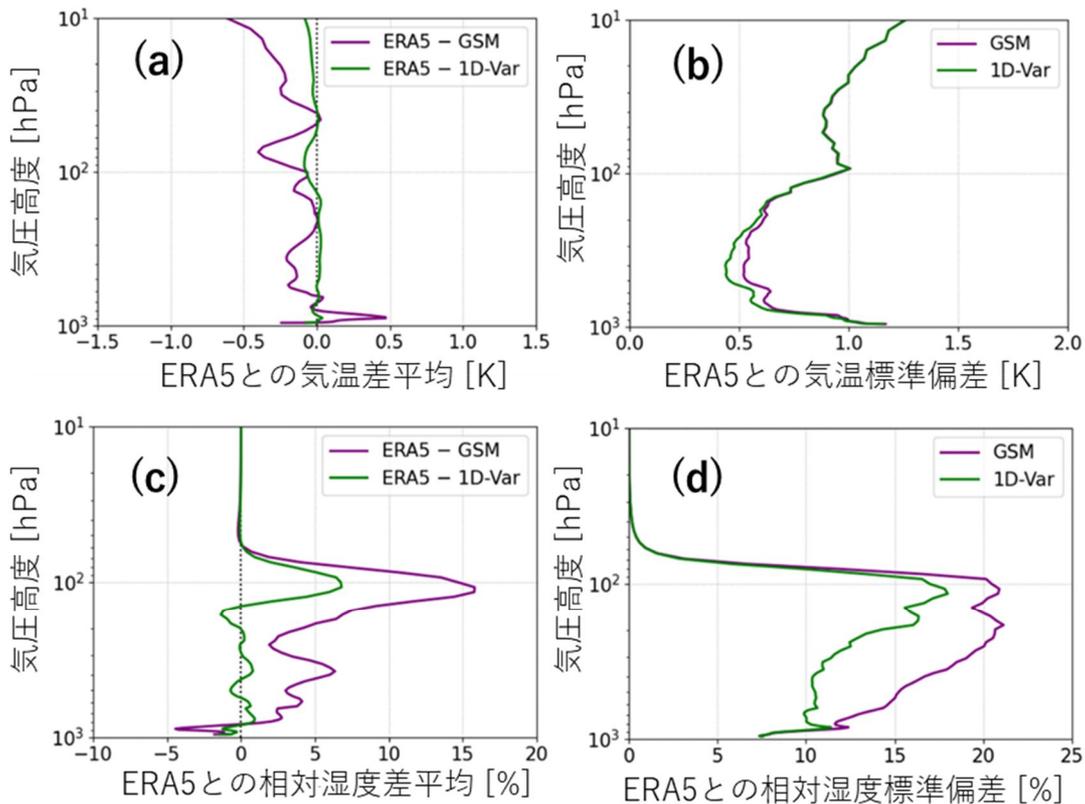


図 1 ERA5 と GSM(緑)、1D-Var (緑) の気温・相対湿度の統計的比較 (2018 年 7 月 1 日～7 月 8 日)。(a)気温の差、(b)気温標準偏差、(c)相対湿度の差、(d)相対湿度の標準偏差

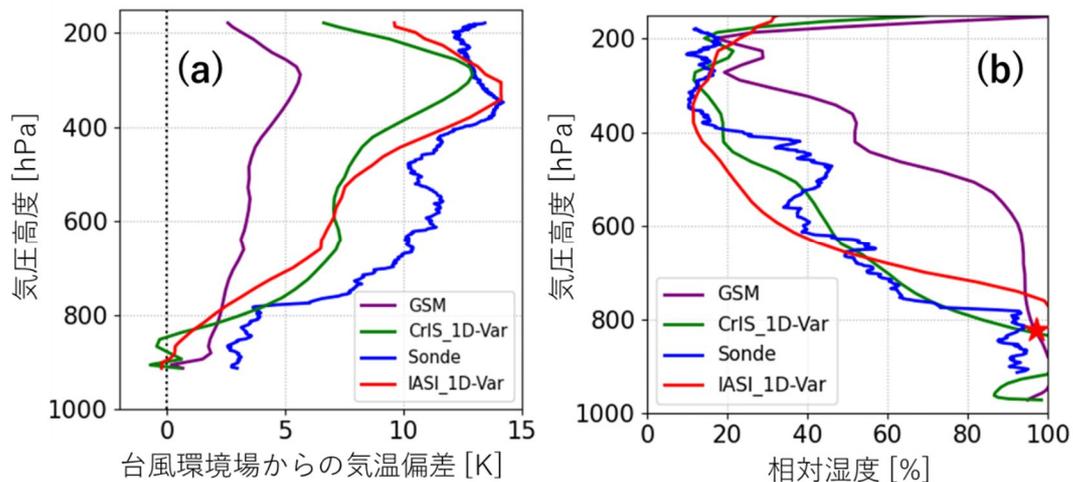


図 2 2018 年台風第 24 号の台風中心部に投下されたドロップゾンデ観測との比較。(a)台風環境場からの気温偏差の鉛直プロファイルの比較 (b)相対湿度の比較。青色の実線がドロップゾンデ観測、紫色の実線が GSM、緑色の実線が CrIS 観測を用いた 1D-Var、赤色の実線が IASI 観測を用いた 1D-Var。(b)の 印は CrIS 観測によって推定された雲頂高度を表す

次に、1D-Var により再現された暖気核最大気温偏差と気象庁ベストトラックデータの台風中心気圧との統計的な関係を調査した。利用したデータは 2016 年から 2020 年の 5 年間で、IASI、CrIS、AIRS が台風の眼を観測した 136 事例を抽出して統計解析を行った。図 4a に、台風中心気圧と暖気核最大気温偏差との散布図を示す。1D-Var の初期値である GSM では暖気核最大気温偏差と台風中心気圧の間に明確な関係が見られないが ($r=-0.19$)、1D-Var により再現された暖気核最大気温偏差は台風中心気圧と強い負相関があり ($r=-0.85$)、台風強度の強まりとともに暖気

核が強まる関係が明確に確認できる。図 4 b は暖気核最大気温偏差高度と台風強度の関係を示しており、1D-Var と気象庁ベストトラックではやや弱い相関が見られる。これは台風強度が深まるほど暖気核の高度がより上層に持ち上がることを示し、Wang et al. (2019) 等の一部の先行研究の結果とも整合するが、台風研究者の間で議論が分かれるところであり、今回開発した 1D-Var による詳細な暖気核観測を用いた更なる調査・解析を行っていく予定である。

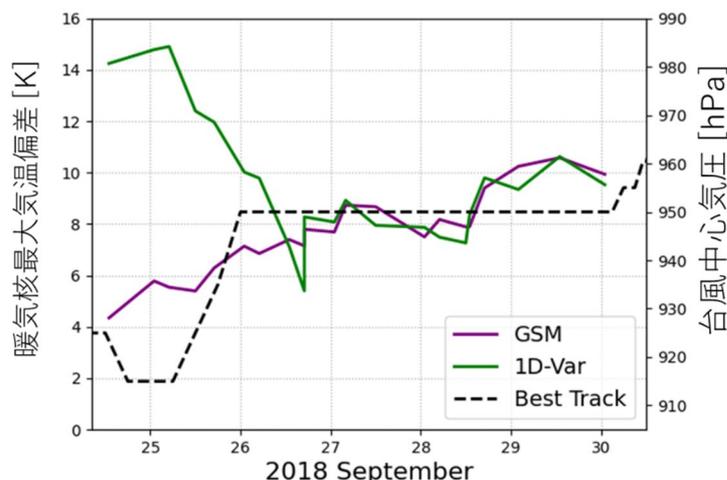


図 3 2018 年台風第 24 号の暖気核の最大気温偏差と台風中心気圧の時系列図(9月 24 日～30 日)。紫色の実線が GSM の最大気温偏差、緑色の実線が 1D-Var で推定した気温偏差、黒色の破線が気象庁ベストトラックによる台風中心気圧である。

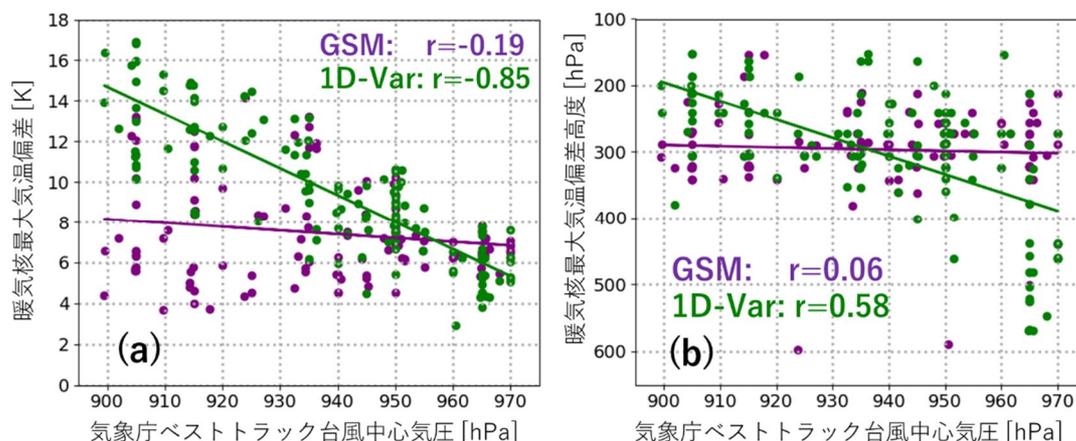


図 4 気象庁ベストトラック台風中心気圧と(a)暖気核最大気温偏差、(b)暖気核最大気温偏差高度との散布図。紫色の丸印が GSM、緑色の丸印が 1D-Var を表し、直線はそれぞれ回帰直線である。図中の r は相関係数を表す。

(3) 航空機観測が実施された 2018 年台風第 24 号について、マイクロ波サウンダ(ATMS)を使った 1D-Var から推定された気温・水蒸気プロファイルを高解像度大気波浪海洋結合モデルによる数値シミュレーション結果と比較した。1D-Var によるプロファイルと比較して、数値シミュレーションによる暖気核は強めに表現されていた。現実に見られた冷水渦を模した人工渦を海洋初期値に加えた実験を実施した結果、台風強度変化はより現実的となり、気温・水蒸気プロファイルはドロップゾンデ観測結果に近づいた。従って暖気核形成において海水温及び大気海洋間の乱流熱フラックスが重要であることが明らかになった。しかし、1D-Var によるプロファイルは相対的に改善が小さく、より空間解像度が高く多くの観測波長をもつ HSS を用いた 1D-Var の開発を目指すこととなった。

2019 年台風第 19 号強化期の台風中心域におけるひまわり 8 号輝度温度データと水平解像度 1km 大気波浪海洋結合モデルによるアンサンブルシミュレーション結果に本課題で用いた放射伝達モデルにより得られた輝度温度データを経験的直交関数 (EOF) 解析により代表的な 4 つの EOF モードに分類した。EOF モードはドボラック法の分類パターンであるカーブバンド、中心の濃密域 (CDO) パターン、眼 (Eye) パターンといった対称・対称パターンに対応しており、高解像度数値モデルは気象衛星ひまわり 8 号の雲パターンを良好に再現していたことを明らかにした。

< 引用文献 (本研究課題の成果以外) >

Ito, K., M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K., Shimizu, T. Ohigashi, 2018:

- Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of tropical cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCI. SOLA, 14, 105-110.
- Fujita, T., K. Okamoto, H. Seko, M. Otsuka, H. Owada and M. Hayashi, 2023: Mesoscale observing system simulation experiment (OSSE) to evaluate the potential impact from a geostationary hyperspectral infrared sounder. *J. Meteor. Soc. Japan*, 101. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-022>
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. D. Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. D. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1999-2049
- Holmlund, K., et al., 2021: Meteosat third generation (MTG): Continuation and innovation of observations from geostationary orbit. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 102, E990-E1015
- Menzel, W. P., T. J. Schmit, P. Zhang, and J. Li, 2018: Satellite-based atmospheric infrared sounder development and applications. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99, 583-60
- Rodgers, C. D., 2000: *Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and Practice*, World Scientific, Singapore, 238 pp.
- Wang, X., H. A. Jiang, 2019: 13-year global climatology of tropical cyclone warm-core structures from AIRS data. *Mon. Wea. Rev.*, 147, 773-790

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4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 Akiyoshi Wada, Masahiro Hayashi, and Wataru Yanase	4. 巻 13
2. 論文標題 Application of Empirical Orthogonal Function Analysis to 1 km Ensemble Simulations and Himawari-8 Observation in the Intensification Phase of Typhoon Hagibis (2019)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 1159 ~ 1159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos13101559	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 Akiyoshi Wada	4. 巻 99
2. 論文標題 Roles of Oceanic Mesoscale Eddy in Rapid Weakening of Typhoons Trami and Kong-Rey in 2018 Simulated with a 2-km-Mesh Atmosphere-Wave-Ocean Coupled Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 1453 ~ 1482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2021-071	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 林昌宏, 和田章義, 小山亮	4. 巻 2021K-06
2. 論文標題 ハイパースベクトル赤外サウンダを用いた台風中心部の大気プロファイル解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 台風研究会「台風予報と防災情報に関する研究集会」	6. 最初と最後の頁 5 ~ 17
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 無
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 Michiko Otsuka, Hiromu Seko, Masahiro Hayashi, and Ko Koizumi	4. 巻 38
2. 論文標題 Data Validation and Mesoscale Assimilation of Himawari-8 Optimal Cloud Analysis Products	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	6. 最初と最後の頁 223-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JTECH-D-20-0015.1	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 Ryo Oyama and Akiyoshi Wada	4. 巻 147
2. 論文標題 The Relationship between Convective Bursts and Warm-Core Intensification in a Nonhydrostatic Simulation of Typhoon Lionrock (2016)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 1557-1579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-18-0457.1	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 林昌宏
2. 発表標題 衛星搭載ライダー・レーダー観測を用いたひまわり巻雲物理量推定値の検証
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林昌宏, 和田章義, 小山亮
2. 発表標題 ハイパースペクトル赤外サウンダを用いた台風中心部の大気プロファイル解析
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林昌宏, 和田章義, 小山亮
2. 発表標題 ハイパースペクトル赤外サウンダを用いた台風中心部の大気プロファイル解析
3. 学会等名 台風研究会「台風予報と防災情報に関する研究集会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林昌宏, 岡本幸三, 大和田浩美, 小山亮
2. 発表標題 静止衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダを想定した気温・水蒸気鉛直プロファイル推定手法の開発
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田章義, 碓氷典久, 広瀬成章, 林昌宏
2. 発表標題 海洋貯熱量が台風強度予測に与える影響について
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田章義
2. 発表標題 台風強度・構造変化における台風海洋相互作用の役割
3. 学会等名 台風研究会「台風予報と防災情報に関する研究集会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林昌宏, 岡本幸三
2. 発表標題 DARDAR プロダクトとひまわり 8 号観測を用いた RTTOV 氷雲放射スキームの評価
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 Oyama, R., K. Okamoto, T. Iriguchi, H. Murata, H. Fudeyasu, K. Cheung, and K. Tsuboki
2. 発表標題 Analysis of atmospheric profiles within tropical cyclones using the new-generation satellite observations
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小山亮, 岡本幸三, 入口武史, 村田英彦
2. 発表標題 1D-Varを用いた台風内部の大気プロファイル解析
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wada, A., H. Tomita, M. Hayashi, and R. Oyama
2. 発表標題 Tropical cyclone-ocean interactions and predictions around the southern area of Okinawa with numerical simulations and a sea surface flux data set
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Murata, H., and N. Kamekawa
2. 発表標題 Operational use of NOAA-20 ATMS and CrIS Radiance Data in JMA's Global NWP System
3. 学会等名 The 22nd International TOVS study conference (ITSC-22) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Toshiro Inoue, Hiroshi Ishimoto, Masahiro Hayashi, and Johannes Schmetz	4. 発行年 2022年
2. 出版社 WORLD SCIENTIFIC	5. 総ページ数 332
3. 書名 Lectures in Climate Change, Studies of Cloud, Convection and Precipitation Processes Using Satellite Observations (LECTURE 10: Cirrus Clouds Observed From Himawari-8)	

〔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	林 昌宏 (Hayashi Masahiro) (00830473)	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	和田 章義 (Wada Akiyoshi) (20354475)	気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・室長 (82109)	

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
---------	---------