

令和元年6月27日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05292

研究課題名(和文) 台風強度予測精度向上のための台風強化停止プロセスの解明

研究課題名(英文) Clarification of cessation mechanisms of tropical cyclone intensification for developing tropical cyclone intensity forecasts

研究代表者

和田 章義 (WADA, Akiyoshi)

気象庁気象研究所・台風研究部・主任研究官

研究者番号：20354475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：領域大気波浪海洋結合モデルによる2013年台風第30号(Haiyan)及び1990年台風第25号(Mike)の数値実験結果の比較から、台風の移動速度は大気環境場の影響が大きく、速いほど海面水温低下量が小さくなる。接地境界層では摩擦収束により台風中心域へ暖かく湿った大気が供給される。台風進行方向前面大気境界層において収束域が形成され、強い対流が生じる要因となる。この対流バースト活動の抑制により台風強化は停止することがわかった。一方で全球大気海洋結合モデルによる2016年台風第10号の数値実験結果から、台風進路・強度予測結果及び海面水温低下分布は積雲対流の影響を大きく受けていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

台風強度予測は進路予測と比べて目立った発展が見られなかった原因の1つとして、台風発達メカニズムを支配する大気力学及び海洋の効果を台風予測技術に十分反映させてこなかったことが挙げられる。本研究では非静力学大気波浪海洋結合モデル等を用いて、台風に関する様々な数値実験や数値シミュレーションを実施した。本研究にて発達期後の台風強化停止過程及び台風の衰退期における強度維持過程のメカニズムを解明したことは、台風強度変化メカニズムに新たな知見を与えた。また大気海洋相互作用と積雲・雲過程が数値モデルにより異なることによる台風強化停止過程の違いは今後の台風予測システムを発展する上で重要な知見となった。

研究成果の概要(英文)：By comparing the simulation results of tropical cyclones (TCs) Haiyan (2013) and Mike (1990) performed by the regional atmosphere-wave-ocean coupled model, we propose the following processes associated with the intensification and subsequent termination: (1) the moving speed of TC are largely influenced by atmospheric environments. The faster the moving speed, the smaller the TC-induced sea surface cooling (SSC). (2) Warm and moist air was supplied toward the TC center by surface frictional flow convergence in the atmospheric boundary layer. (3) The faster moving speed, the stronger a convergence area is formed ahead of the TC, causing strong convection. (4) When the convection burst is suppressed due to warming and stabilization of the atmosphere, intensification is less likely to occur. From the simulation results of Lionrock (2016) by global atmosphere-ocean coupled model, the TC track and intensity and TC-induced SSC was greatly affected by cumulus convection scheme.

研究分野：数物系科学

キーワード：大気海洋相互作用 台風 数値モデル 数値予測

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

1. 研究開始当初の背景

台風の進路予測は数値予報システムの発展により着実に発展してきた。一方で強度予測については数 10 年にわたり目立った進展は見られなかった。この台風強度予測の進展が滞っている状況を打開する研究課題として、台風強度変化と海洋変動との関係、特に台風急発達過程と大気力学・物理過程の関係解明が着目されてきた。台風急発達過程に関しては、海面摩擦の効果及び海洋から大気へ輸送される乱流熱輸送、大気境界層における動径風の強化、台風内部域における傾度風アンバランス、衝撃波のような台風の眼の壁雲域における強い上昇流、対流バーストといった物理量や現象が重要であることが、これまでの研究で示されてきた。しかし、力学・物理過程間のメカニズムや、その台風強度変化への定量的効果について未解明な点が多い。さらに台風急発達をもたらすメカニズムだけでなく、台風の発達が停止するメカニズムについても良く分かっていない。台風強化停止プロセスを台風と海洋の相互作用を含めた力学・物理過程を考慮した上で包括的に理解することが必要となる。

2. 研究の目的

台風と海洋の相互作用を含む大気・海洋の力学・物理過程を考慮した包括的な視点から、台風強化停止プロセスを解明し、強度予測精度向上に貢献するため、以下の 5 つの個別課題に焦点を当て、その解明を通じて台風強化停止プロセスを包括的に理解することを研究目的とする。

海面摩擦の効果及び海洋から大気へ輸送される乱流熱輸送に関わる大気海洋間の交換係数が台風強化停止に与える影響を明らかにする。

台風境界層の動径風の構造及びその変化が台風強化停止に果たす役割等を明らかにする。

台風の眼の壁雲域における対流バーストの出現頻度と台風強化停止の関係を明らかにする。

台風域内の力学・熱力学的構造、特に慣性安定度と静的安定度分布と台風の高さ及び構造変化の関係を明らかにする。

海洋表層貯熱量と対流圏下層水蒸気フラックス及び対流バーストとの関係を解明する。

3. 研究の方法

研究代表者は、主に台風強度変化と海洋との相互作用について、非静力学大気モデルに波浪モデルと海洋層モデルを結合した大気波浪海洋結合モデルを既に構築していた。水平解像度 1 - 3 km 及び 7 km (台風シミュレーションの水平解像度依存性を調べるため) に設定したこのモデルを用いて、様々な台風事例について数値シミュレーションを実施した。なお水平解像度は事例及び研究課題に応じて、事例毎に設定した。また「複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験」プロジェクトで開発された 7 km メッシュ全球大気モデル及び全球大気海洋結合モデルを用いて、数値シミュレーションを実施した。

3 - 2. 研究方法

台風強化停止に対して重要な役割を果たすプロセスを明らかにするため、台風と海洋の相互作用を含む力学・物理過程に着目した解析及び、数値モデルによる感度実験を実施した。

海面における摩擦の効果及び海洋から大気へ輸送される乱流熱フラックスを決定する大気海洋間の交換係数が台風強化停止に与える影響を解明する。

大気境界層における動径風の構造及びその変化が台風強化停止に果たす役割及び台風域での降水が台風強度変化に与える影響を明らかにする。

台風の眼の壁雲域における対流バーストの出現頻度と台風強化停止の関係を明らかにする。

台風域内の力学・熱力学的構造、特に慣性安定度と静的安定度分布と台風の高さ及び構造変化の関係及び移動速度による違いを明らかにする。

海洋表層貯熱量と対流圏下層水蒸気フラックス及び対流バーストとの関係を解明する。

以上の結果から、台風強化停止プロセス及び台風過発達プロセスを包括的に示す。

4. 研究成果

大気海洋間の交換係数が台風強化停止に与える影響

海面摩擦の効果及び海洋から大気へ輸送される乱流熱輸送を調べる上で、台風域における大気海洋間の摩擦係数 (C_d) 分布は、海面摩擦そのものだけでなく、海上風速を通じて大気海洋間の潜熱・顕熱輸送量に影響を与える。Wada et al. (2018) では移動速度が速く、最低中心気圧 895hPa を記録した 2013 年台風第 30 号 (Haiyan) と、対称的に移動速度が遅く、最低中心気圧が 915hPa (中心気圧の値は気象庁ベストトラック解析確定値による) を記録した 1990 年台風第 25 号 (Mike) について、大気海洋間の摩擦係数 (C_d) 分布を調査した。使用したモデルは領域非静力学大気モデル (以下、大気モデル) 及び領域非静力学大気波浪海洋結合モデル (以下、結合モデル) である。

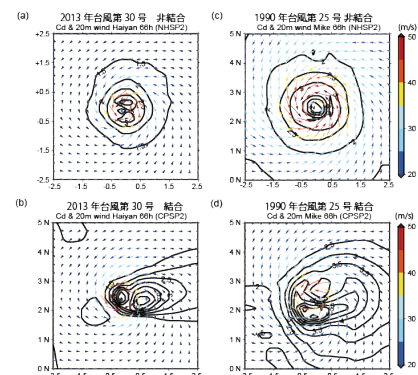


図 1 積分時間 66 時間における台風中心を領域中心とした摩擦係数 (等値線) と 20m 高度風速 (矢印) の水平分布。(a),(b) は非結合実験、(c),(d) は結合実験結果。(a),(c) は Haiyan、(b),(d) は Mike の事例。

大気モデルにおいては2つの台風事例ともに海上風速分布に対応した Cd の分布が得られた (図 1 a, c)。一方で結合モデルにおいては、移動速度の速い Haiyan の事例において台風の経路、特に進行方向右側で Cd の値が大きくなった (図 1 b, d)。この分布の特徴は台風の発達期及び強化停止期において、大きな違いがみられなかった。

- 1 大気境界層における動径風の構造及びその変化が台風強化停止に果たす役割

で取り上げた Haiyan と Mike の事例について、後方流跡線解析を実施した (図 2)。台風中心域における強い対流 (対流バースト) が生じた場所での空気塊の起源は大気境界層における空気塊であった。この空気塊は台風の外側から摩擦の効果によりスパイラル状に台風中心で収束する。この摩擦収束により運ばれた空気塊は対流バーストの起源ともなる。大気境界層における暖かく湿った空気塊の流入は接地境界層から大気境界層に限定され、これは台風の発達期及び強化停止期において、大きな違いは見られなかった。しかし強化停止期において、大気成層は安定化し、対流バーストは生じにくくなり、大気境界層より上層で空気塊の流出が現れる。この流出、角運動量の外側への輸送に伴い、台風の眼の壁雲の傾斜はより傾く。結合モデルの結果により台風域内で海面水温が低下すると、移動速度の遅い Mike の事例では対流バーストはより生じにくくなり、角運動量の外側への輸送及び台風の眼の壁雲の傾斜はより明瞭となる。海面水温低下はまた台風内部域における2次循環 (境界層における台風中心への流入 眼の壁雲における強い上昇流 対流圏上層における台風外側への空気塊の流出) 及び、台風中心、対流圏上層での下降流に伴う断熱加熱量に影響を与えることが明らかになった。

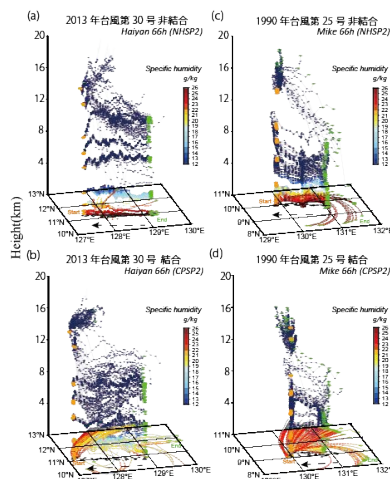


図 2 積分時間 66 時間から 6 時間の後方流跡線解析を実施した結果。カラーは比湿 (g/kg) を示す。オレンジの円は始点、緑の点は終点である。始点は台風中心とし、複数の高度 (250 m, 750 m, 1.5 km, 3 km, 6 km, 8 km, 10 km, 12 km, and 16 km) に 30 個の粒子を置いた。(a),(b)は非結合実験、(c),(d)は結合実験結果。(a),(c)は Haiyan、(b),(d)は Mike の事例。

- 2 台風域での降水が台風強度変化に与える影響

雲物理過程において雨、雪、あられの蒸発を抑制する効果を調整することにより、台風域での降水分布が変わり、強度変化に影響を与えることを、2015 年に最盛期の中心気圧 872hPa を記録したハリケーン Patricia の数値シミュレーションにより確認した。この強度を非静力学大気波浪海洋結合モデルで再現することは困難であったため、本研究は大気モデルのみの結果を解析に使用した。総雲水量の水平分布の比較 (図省略) から、雨、雪、あられの蒸発抑制効果を全く入れない場合は最も軸対称性が強く、眼の壁雲やレインバンドが明瞭である一方、雨、雪、あられの蒸発抑制効果を入れると、この明瞭さが失われる。台風中心気圧は、雨、雪、あられの蒸発抑制効果を全く入れない場合に最も深まり、積分時間 42 時間後での中心気圧差は完全に入れた場合と比較して 20hPa 程度となった。従って、台風域での降水分布は蒸発の効果を通じて台風強度や強度変化に影響を与えることが明らかとなった。

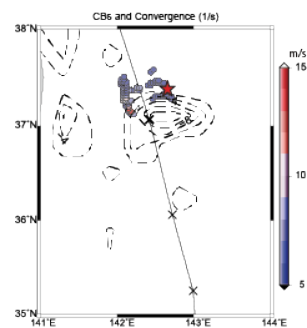


図 3 2016 年台風第 10 号 (Lionrock) の経路 (×と線)、20-m 高度における収束域 (コンター) 及び対流バースト () の位置。対流バーストの位置における色は上昇流速を示す。 は最大風速出現位置。

台風の眼の壁雲域における対流バーストの出現頻度と台風強化停止の関係

東日本太平洋側に初めて上陸した 2016 年台風第 10 号 (Lionrock) の数値シミュレーション結果を図 3 に示す。この海域では台風は移動速度を加速させ、強度も衰弱しつつあったものの、台風中心が北緯 37 度付近にあった時、中心気圧の上昇や最大風速の弱化は見られなかった。台風の眼の壁雲域付近において 20m 高度風は収束域を形成し、その北側で対流バースト域が出現した。また対流バーストが台風の眼の壁雲域の外側及び最大風速半径の外側に出現した。このような状況にて、台風は強化しなかったものの、一方で衰弱もしなかった。このことは対流バーストの出現頻度と台風強度変化を考える上で、台風の移動速度を考慮する必要があることを示唆する。台風の眼の壁雲域における対流バーストの表現は本研究で主に用いた非静力学大気波浪海洋結合モデルと、全球 7km メッシュ非静力学大気モデルで大きく異なっていた。また、この違いはモデルに組み込まれている雲物理過程及び積雲対流パラメタリゼーションに依存することが明らかとなった。

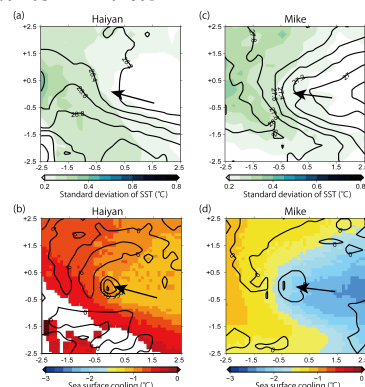


図 4 積分時間 66 時間における台風中心を領域中心とした (a),(b)Haiyan 及び (c),(d)Mike における (a)(c)海面水温分布及び (b)(d)非結合モデルとの海面水温差。

台風域内の力学・熱力学的構造及び移動速度による違い

大気海洋結合系において、移動速度の違いが台風の内部構造に及ぼす影響は未解明であった。

で事例として取り上げた Haiyan と同じような海域で同じような経路を移動した Mike の数値シミュレーションを比較することで、台風域内の力学・熱力学的構造及び移動速度による違いに対する理解を試みた。海面水温の分布及び台風による海面水温低下の再現結果から、海面水温低下量は移動速度が速い場合は小さく、遅い場合は大きいこと、また低下域の大きさについて、移動速度が遅い場合に大きく拡がることを再現することができた(図4)。Haiyan の事例に関しては、衛星海面水温解析で得られた分布と整合していた。

移動速度の速い Haiyan と遅い Mike の成熟期における気温偏差、動径風、接線風の軸対称平均構造を図5に示す。平均図作成において、水平解像度 7km のモデルによる、異なる海洋初期値 33 メンバーのアンサンブルシミュレーション結果を使って、アンサンブル平均及び標準偏差を算出した。移動速度が速い Haiyan の事例においては高度 12km、台風中心域に見られる温暖核の水平スケールは小さく、大気境界における動径風の台風中心への流入層は理想的に薄く、接線風も最大風速半径が小さい、コンパクトな台風となった。一方で Mike の場合、高度 12-14km における気温の正偏差領域が Haiyan と比べてはるかに大きく、動径風流入層も厚く、接線風で見た最大風速半径も大きくなった。海洋初期値を変えてもこの特徴は変わらず、図 5b,e に見られる 2 次循環(海面付近の流入 眼の壁雲域での上昇 対流圏上層での流出)の強弱を通じて、接線風分布及び温暖核気温偏差に影響を与えることが明らかとなった。

このような標準偏差の分布は、結合モデルと非結合モデルでの台風構造の差と整合していた。つまり海洋初期値や台風による海面水温低下が台風域内の力学・熱力学的構造に与える影響に関するメカニズムは 2 次循環を通じた定量的なものであり、最大風速半径や温暖核の大きさを本質的に変えるものではなかった。

最大風速半径や温暖核の大きさを本質的に変える可能性があるものとして大気環境場の状況が挙げられる。大気環境場はまた台風の移動に重要な指向流を決める。従って台風構造と移動速度の関係は、大気環境場と台風構造の関係に帰着するものと考えられる。

海洋表層貯熱量と対流圏下層水蒸気フラックス及び対流バーストとの関係

2016 年台風第 10 号 (Lionrock) 事例において、海洋場と対流圏下層水蒸気フラックス及び対流バーストとの関係を見ると、台風内部域では海洋から大気への潜熱輸送は大きいものの(図 6a)、比湿分布(図 6b)をみると、南側象限で比湿の高い領域が広がっていたことがわかる。水蒸気収支解析を行うと、大気境界層及び動径風流入層の上端では、台風内部域における水平水蒸気フラックスの量が非常に大きい(図 6c)一方、鉛直水蒸気フラックス(図 6d)は対流バースト域を除くと鉛直水蒸気フラックス量は負の値となっていた。

以上の - の結果から、台風強化停止プロセス及び台風過発達プロセスに関わる力学・物理過程として、[1]大気環境場及びそれに密接に関連する移動速度、[2]台風通過による海水温低下及び海洋環境場、[3]台風内部域の降水プロセスに関わる雲物理及び積雲対流過程を挙げることができる(図7)。本研究では、台風による海水温低下が台風の発達抑制に果たす役割を大気プロセスと相対的に評価することにより、海洋結合による台風予報への効果と限界を明確にすることができた。また海洋表層貯熱量プロダクトがどのようなメカニズムを通じて台風強度へ反映されるのかを示した。一方で力学フレーム及び物理過程が大きく異なる全球非静力学大気モデル等、他のモデルや同化システムに本研究成果を適用し、その普遍性を追求することは今後の課題である。

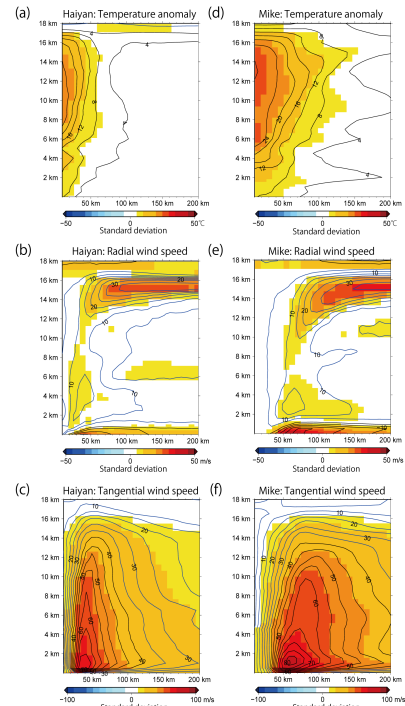


図5 積分時間 66 時間における(a-c) Haiyan 及び(d-f)Mike のアンサンブル平均を施した軸対称平均構造。(a)(d)は気温偏差、(b)(e)は動径風、(c)(f)は接線風分布を示す。カラーは標準偏差である。

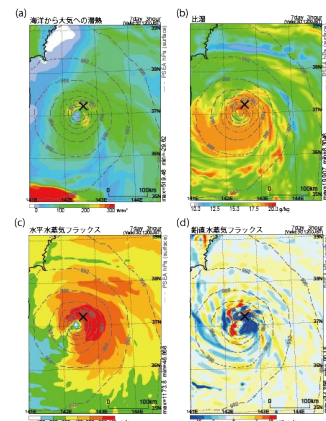


図6 2016年台風第10号(Lionrock)事例における(a)潜熱、(b)高度20m比湿、(c)高度1500mでの水平水蒸気フラックス、(d)高度1500mでの鉛直水蒸気フラックス。コンターは海面気圧を示す。

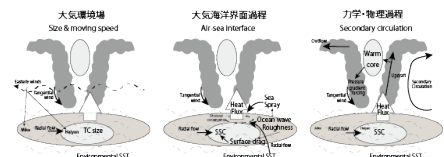


図7 台風の構造、強度変化(強化停止)を決定する大気海洋結合系における3つのプロセスをまとめた概念図。

5 . 主な発表論文等

〔主な雑誌論文〕(計 10 件)

Wada, A., and R. Oyama, Relation of convective bursts to changes in the intensity of Typhoon Lionrock (2016) during the decay phase simulated by an atmosphere-wave-ocean coupled model, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 査読有, 96, 2018, 489-509, doi:10.2151/jmsj.2018-052.

Wada, A., S. Kanada, and H. Yamada, Effect of air-sea environmental conditions and interfacial processes on extremely intense typhoon Haiyan (2013), *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 査読有, 123, 2018, 10379-10405, doi:10.1029/2017JD028139.

Wada, A., H. Yoshimura, and M. Nakagawa: Sensitivity of the prediction of Typhoon Lionrock (2016) to the parameter in the cloud scheme using the 7-km mesh nonhydrostatic global spectral atmospheric Double Fourier Series Model (DFSModel), *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 査読無, 48, 2018, 4-11.

Wada, A., H. Yoshimura, and M. Nakagawa: Sensitivity of the prediction of Typhoon Lionrock (2016) to the surface boundary scheme using the 7-km mesh nonhydrostatic global spectral atmospheric Double Fourier Series Model (DFSModel), *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 査読無, 48, 2018, 4-13.

Wada, A., and M. Kunii, The role of ocean-atmosphere interaction in Typhoon Sinlaku (2008) using a regional coupled data assimilation system, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 査読有, 122, 2017, 3675-3695, doi:10.1002/2017JC012750.

Nakano, M., Wada, A., Sawada, M., Yoshimura, H., Onishi, R., Kawahara, S., Sasaki, W., Nasuno, T., Yamaguchi, M., Iriguchi, T., Sugi, M., and Takeuchi, Y.: Global 7 km mesh nonhydrostatic Model Intercomparison Project for improving Typhoon forecast (TYMIP-G7): experimental design and preliminary results, *Geoscientific Model Development*, 査読有, 10, 2017, 1363-1381, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017.

Wada, A.: Sensitivity numerical simulations of Hurricane Patricia (2015) on lateral boundary conditions and inhibition rate of evaporation. *WGNE Blue Book: Research Activities in Atmospheric and Ocean Modelling*, 査読無, 47, 2017, 522-523.

Wada, A., Reexamination of tropical cyclone heat potential in the western North Pacific, *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 査読有, 121, 2016, 6723-6744, doi:10.1002/2015JD024688.

Kanada, S., and A. Wada, Numerical study on the extremely rapid intensification of an intense tropical cyclone: Typhoon Ida (1958), *Journal of the Atmospheric Sciences*, 査読有, 72, 2015, 4194-4217, doi:10.1175/JAS-D-14-0247.1.

Wada, A., Verification of tropical cyclone heat potential for tropical cyclone intensity forecasting in the Western North Pacific. *Journal of Oceanography*, 査読有, 71, 2015, 373-387, doi:10.1007/s10872-015-0298-0.

(他 16 件、計 26 件)

〔主な学会発表〕(計 14 件)

Wada, A., Relation of convective bursts to changes in the intensity of typhoon Lionrock (2016) simulated by an atmosphere-wave-ocean coupled model, *JpGU meeting 2018*, 2018.

和田章義, 全球 7km 非静力学大気モデルによる 2016 年台風第 10 号の数値シミュレーション, 日本気象学会 2018 年度秋季大会, 2018.

Wada, A., Development of a regional coupled atmosphere-ocean assimilation system based on NHM-LETKF, *Asia Oceania Geosciences Society 14th Annual Meeting (AOGS2017)*, 2017.

Wada, A., Simulations of analogous Typhoons Haiyan (2013) and Mike (1990) simulated by a coupled atmosphere-wave-ocean model, *Asia Oceania Geosciences Society 14th Annual Meeting (AOGS2017)*, 2017.

Wada, A., Tropical cyclone-ocean interactions on Typhoon Haiyan (2013) simulated by a coupled atmosphere-wave-ocean model, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, 2017.

和田章義, 台風 1610 号(Lionrock)の数値シミュレーションにおける海洋の役割, 第 19 回非静力学モデルに関するワークショップ, 2017.

和田章義, 2016 年台風第 10 号衰退期に見られた対流バーストと海洋の影響, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017.

Wada, A., Regional coupled atmosphere-ocean assimilation system based on NHM-LETKF, 97th American Meteorological Society Annual Meeting, 2017.

Wada, A., and M. Sawada, Numerical simulations of Typhoon Haiyan in 2013, JpGU meeting 2016, 2016.

和田章義, NHM-LETKF 大気波浪海洋結合システムにおける海面水温の制御変数化, 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 2016.

和田章義, 海洋環境場が台風数値シミュレーションに与える影響, 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 2016.

Wada, A, The relation of tropical cyclone heat potential to tropical cyclone intensity in the western North Pacific and the simulations by an atmosphere-wave-ocean coupled model, 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016.

Wada, A, Unusually Rapid Intensification of Typhoon Man-Yi in 2013 Under Pre-Existing Warm-Water Conditions Near the Kuroshio Front, Asia Oceania Geosciences Society 12th Annual Meeting (AOGS2015), 2015.

(他 6 件、計 20 件)

〔図書〕(計 2 件)

和田章義他, ベレ出版, 天気と海の関係についてわかっていること知らないこと, 2016, 327

和田章義他, (財)気象業務支援センター, 台風強度予報作業における海洋貯熱量情報の利用. 量的予報技術資料 (予報技術研修テキスト), 2016, 137-159.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ty/IND/IND_wada/2015-18Kaken-C.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者 無

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 碓氷 典久

ローマ字氏名: (USUI Norihisa)

研究協力者氏名: Pinaki Chakraborty

ローマ字氏名: (Pinaki Chakraborty)

研究協力者氏名: 金田 幸恵

ローマ字氏名: (KANADA Sachie)

(2015-2017.03)

研究協力者氏名: 国井 勝

ローマ字氏名: (KUNII Masaru)

(2015-2017.09)

研究協力者氏名: 沢田 雅洋

ローマ字氏名: (SAWADA Masahiro)

(2018.04-2019.3)

研究協力者氏名: 高村 奈央

ローマ字氏名: (TAKAMURA Nao)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。