

台風急発達環境場の多様性
Variability of Environmental Conditions for Tropical Cyclone Rapid Intensification
in the Western North Pacific

嶋田宇大
Udai SHIMADA

ABSTRACT

The environmental variability of tropical cyclone (TC) rapid intensification (RI) was examined. Six clusters were identified from the morphologies of TC cloud patterns at the onset of RI. Each cluster had a distinct set of environmental conditions. Three clusters (Clusters 1, 3, and 5) had some conditions unfavorable for RI. Cluster 3 TCs were characterized by moderate vertical shear. Their large size and a moist environment are possible factors for vortex resiliency against shear. Cluster 5 TCs were located in a very dry environment. Weak vertical shear and their small size are factors that may offset the negative effects of dry air and ocean cooling. The results suggest that suitable combinations of environmental conditions and TC structural features are important for RI.

1. はじめに

熱帯低気圧の急発達に好都合な環境場—高い海面水温や海洋貯熱量、弱い鉛直シア、湿潤環境など—についてはこれまでよく調査されてきた。例えば、Kaplan and DeMaria (2003)や Kaplan et al. (2010)では急発達事例を抽出し、非急発達事例の環境場と比較することで、急発達に好都合な環境場条件を見出した。この知見を用いることで、急発達を確率的に予測することができるようになった。

一方で、急発達事例によってどのように環境場条件が異なるのか—急発達環境場の多様性—についてはこれまであまり注目されてこなかった。Hendricks et al. (2010) は、環境場条件が急発達事例と普通の発達事例でほとんど差異ないことを見出した。様々な研究によって、一見不都合な環境場条件（強い鉛直シアや乾燥した環境場など）でも急発達が起きていることが明らかになってきた(例えば、Molinari and Vollaro 2010; Shimada and Horinouchi 2018)。これらの事実は、急発達の発生条件が何か一つの典型的な環境場だけではないことを示唆する。Hendricks et al. (2010) は急発達条

件の多様性についても調査を行った。例えば、鉛直シアが強い事例は上層発散が強い傾向があり、鉛直シアが強いという負の条件があれば、上層発散という発達に好都合な正の条件があると述べた。しかし、いくつかの代表的な環境場パラメータから二つを取り出し、それぞれ相関を調査した結果では、必ずしも「負の条件があれば、別の正の条件が存在する」が明瞭ではなかった。Rios-Berrios and Torn (2017) は、中程度の鉛直シアが存在する事例を抽出し、発達事例は定常事例に比べ、強度が強く、サイズが大きく、さらに進行方向前面で海面水温 (SST) が高く中層まで湿った環境場がある傾向を示した。この研究は急発達には環境場条件だけでなく、熱帯低気圧の構造やサイズも重要であることを示唆している。

このように急発達が起こる環境場条件は何か一つのセットではないこと、熱帯低気圧の構造やサイズにも関係があることがわかってきた。では、「急発達環境場にはどのような多様性があるのか?」、「どのような条件とシナリオがあるのか?」、についてはわかっていない。そこで本研究では先行研究の知見から、「台風の構造的な特徴に応じて、

急発達に最適な環境場条件の組合せがあるのではないか」という仮説を立てた。環境場条件や内部力学プロセスの違いから構造に違いが生じるため、構造的特徴で急発達事例を分類すれば、似た環境場条件の組合せグループが抽出できるのではないかと考えた。

本研究は、「台風の急発達環境場にはどのような多様性があるのか?」、「負の条件 (例えば、鉛直シアー、乾燥空気) がある場合、どのようなファクターが負の影響を補っているのか?」を明らかにすることを目的とする。具体的には、急発達開始時における台風の雲パターンをクラスター解析で分類し、クラスター毎の環境場を調査する。

2. 使用データと手法

本研究は 1995 年以降の事例を対象とし、使用データは次の通りである。

- 気象庁ドボラック解析 (現業解析版、1995 - 2020)
- 気象庁ベストトラック (1995 - 2020)
- TIFS 学習用データ (1995 - 2020)
- 歴代静止衛星データ (赤外及び水蒸気バンド、1995 - 2020)
- JRA-55 (1995 - 2020, Kobayashi et al. 2015)
- 海洋貯熱量 (OHC) データ (1995 - 2020)

TIFS とは台風の強度を統計的に予測する重線形回帰モデルのことである (Yamaguchi et al. 2018; 嶋田・大和田 2019; Ono et al. 2019)。TIFS 学習用データとは、モデルの学習向けに作成された台風周辺環境場パラメータの長期間データのことである。それらのパラメータは、JRA-55、気象庁海洋貯熱量 (OHC) データ (JMA MOVE/MRI.COM, Usui et al. 2006)、SST (COBE-SST, Ishii et al. 2005) から算出されたものである。1995 年以降とするのは、ひまわり 5 号以降に搭載された水蒸気バンドを利用するためである。

本研究では、急発達の定義をドボラック解析の強度から定める。通常はベストトラックの最大風速強度を使う。しかし Shimada et al. (2020) はベストトラックデータを調査した結果、強度推定に使用される観測データの経年変化から、ベストトラックの強度変化の性質が変わり、急発達の頻度が近年増加している可能性を指摘した。そこで本研究では、手法を変えずに歴代行われてきたドボラック解析の強度を使うことで、強度変化の人工的な性質変化が急発達事例の抽出に影響しないよう

にした。急発達の定義は、ドボラック強度の T ナンバーが 24 時間内に 2 以上増加した場合とした。2 以上の増加は、T ナンバーと最大風速の変換テーブル (Shimada et al. 2020 の表 1 を参照) によると、ちょうど 28kt から 30kt に相当し、よくある定義 (30kt/24 時間) にマッチする。全部で 238 事例を抽出した。

その事例に対して k-means 法で台風の雲パターンのクラスター解析を行う。急発達開始時から 6 時間先までの平均雲画像を利用し、一過性の対流雲の影響が入らないようにした。クラスターの数は 6 つとした。ここでは 1) 238 事例が概ね均等に分類され、2) クラスター間で同じような雲パターンが存在せず、3) クラスター内で全く異なった雲パターンがないと判断できるという 3 つ基準でクラスター数を決定した。

本研究では、それぞれのクラスターで環境場条件がどのように異なるのか調査するとともに、いくつかの特徴のあるクラスターについて、環境場のコンポジット解析を行う。

3. クラスター解析と環境場条件

図 1 にクラスター別の衛星画像のコンポジットを示す。急発達開始時の雲パターンである。青線は平均した鉛直シアーを示す。ダウンシアー側で雲が広がっており、鉛直シアーが強いクラスターほど非対称構造となっている。クラスター 5 はシアーが最も弱く軸対称構造となっている。クラスター別にベストトラックの平均最大風速を調べると、クラスター間で大きな差はなかった (図略)。

次に図 2 にクラスター別の主な環境場条件を示す。ここで、他の急発達事例と比べて統計的に有意に差異がある場合、青字はより負の条件、赤字はより正の条件を意味させている。クラスター 1 は高い SST と湿潤な中層であることが発達に好条件な一方、鉛直シアーが大きい。クラスター 2 は負の条件がなく全体として急発達に好条件な状況になっている。具体的には鉛直シアーが弱く、中層も湿潤で上層発散が大きい。クラスター 3 は 30kt 半径の範囲が広く大型サイズで、中層が湿潤で上層発散が大きい特徴を持つ。一方鉛直シアーが大きい。クラスター 4 は正の条件がなく、SST がやや低めで、中層もやや乾燥している。しかし、衰弱事例を含む TIFS のサンプル平均と比べると、SST はそれほど低いとは言えない。クラスター 5 は小型サイズであり、鉛直シアーが非常に小さい。

一方、中層は乾燥しており、上層発散も極めて小さい。クラスター6 は中層がやや乾燥傾向で上層発散がやや弱い。

これらの特徴から、急発達事例の環境場条件には、構造的特徴に応じた、様々な環境場条件の組合せがあることが示唆される。特にクラスター3 と 5 は、鉛直シアアと中層湿度で正反対の条件を持つ点が興味深い。

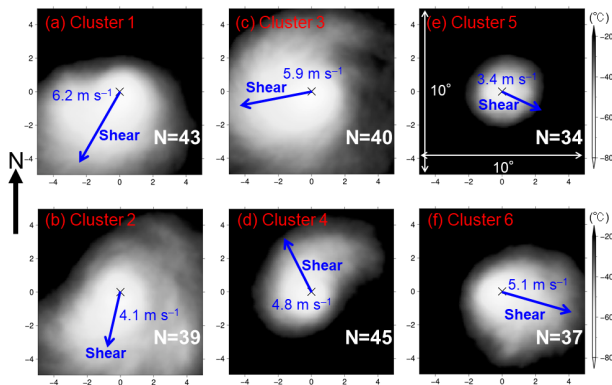


図 1: 6 つのクラスターそれぞれの赤外衛星コンポジット。領域は東西南北 10°×10°で、各スラスターのメンバー数を N で示す。青矢印は平均の鉛直シアアベクトルを示し、数値で値を示す。

	Cluster 1 (N=43)	Cluster 2 (N=39)	Cluster 3 (N=40)	Cluster 4 (N=45)	Cluster 5 (N=34)	Cluster 6 (N=37)	TIFS平均 (FT24)
コンポジット衛星画像							
特徴	・高SST、湿潤 ・やや強めの鉛直シアア	・弱いシアア ・湿潤、強い上層発散	・湿潤、強い上層発散	・低SST ・やや強めの鉛直シアア	・弱いシアア ・ドライ、低SST、弱い上層発散	・ややドライ ・やや弱い上層発散	
Size (R30) (km)	285.3 ± 106.4	318.4 ± 147.6	335.5 ± 158.2	242.7 ± 76.5	201.3 ± 63.1	242.5 ± 90.9	-
SST (°C)	29.7 ± 0.4	29.5 ± 0.5	29.4 ± 0.5	29.1 ± 0.7	29.2 ± 0.7	29.5 ± 0.6	28.3 (+)
OHC (kJ cm ⁻²)	97.2 ± 36.5	101.1 ± 36.1	91.7 ± 39.5	86.4 ± 23.6	73.7 ± 42.3	91.7 ± 37.1	56.9 (+)
Shear (m s ⁻¹)	6.2 ± 2.3	4.1 ± 2.6	5.9 ± 1.9	4.8 ± 2.3	3.4 ± 1.9	5.1 ± 2.5	6.6 (-)
Shear (m s ⁻¹)	2.7 ± 1.3	2.0 ± 1.0	2.6 ± 1.3	1.9 ± 1.3	1.9 ± 1.2	1.9 ± 1.0	3.1 (-)
700-500 RH (%)	60.5 ± 4.6	62.1 ± 4.1	61.6 ± 5.3	54.2 ± 6.2	48.7 ± 7.8	55.0 ± 4.6	55.8 (+)
200 DIV (×10 ⁻⁷ s ⁻¹)	70.3 ± 32.8	84.6 ± 30.8	91.6 ± 33.1	60.9 ± 24.9	16.6 ± 20.0	47.2 ± 31.7	54.4 (+)

図 2: クラスター別の主な環境場条件を示す。他の急発達事例と比べて統計的に有意に異なる場合、負の条件を意味する青字で、正の条件を意味する赤字で示す。

4. コンポジット解析

ここでは、正反対の特徴が見られたクラスター3 (以下、「大型事例」と呼ぶ。) とクラスター5 (以下、「小型事例」と呼ぶ。) のコンポジット解析を行い、それぞれどのような総観場に位置し、鉛直シアアまたは乾燥空気の負の要素がどのように克服された可能性があるのか明らかにする。

図 3 は大型事例の 850-200hPa の鉛直シアア場、

地上の発散場、500hPa の湿度のコンポジット図を示す。コンポジットでは、クラスター平均の中心位置を図の中心にしてプロットしている。鉛直シアアと発散は、小規模擾乱をフィルタリング (Kurihara et al. 1993; Wang et al. 2015) した大規模場のコンポジットにしている。大型事例は、南側と北側に強い鉛直シアアゾーンが存在し、それらに挟まれたところに位置する傾向にある。また大規模場の強い下層収束の環境場に存在している。中層まで十分に湿った環境場にある。

図 4 は大型事例の地上相当温位のコンポジット図と OHC の中央値分布を示す。大型事例は、下層に高相当温位があり、地上の対流有効位置エネルギー (CAPE) も大きく (図略)、OHC が 100 kJ cm⁻² 以上の海域に位置している。非常に湿潤な環境場と言える。鉛直シアアの影響として、鉛直シアアが渦を傾かせるという力学的な影響 (Jones 1996; Reasor et al. 2004) の他に、低相当温位を内部コアにもたらず熱力学的な影響が提唱されている (Riemer et al. 2010)。これは、鉛直シアアに伴う波数 1 の対流分布卓越に伴い、波数 1 の低相当温位空気塊が境界層を通じ眼の壁雲に入ることによって対流抑制となるプロセスである。この時、環境場が十分湿潤で海洋も暖かければ低相当温位の空気塊のリカバリーが期待できる。この大型事例の場合、多少鉛直シアアが強くても、熱力学的にリカバリー可能な好条件がそろっていたと考えられる。

図 5 は小型事例の 200hPa 高度場、850-200hPa の鉛直シアア場、500hPa の湿度のコンポジット図を示す。小型事例は、東に張り出した大規模な上層チベット高気圧の真下に位置しているのが特徴だった。そのため、鉛直シアアが非常に小さい領域に位置していた。上層高気圧の影響で非常に乾燥した空気に取り囲まれているものの、鉛直シアアが小さいため乾燥空気が内部コアに入りにくい配置となっていたと考えられる。そのため乾燥空気で台風が弱まることなく、むしろ急発達できたと考えられる。

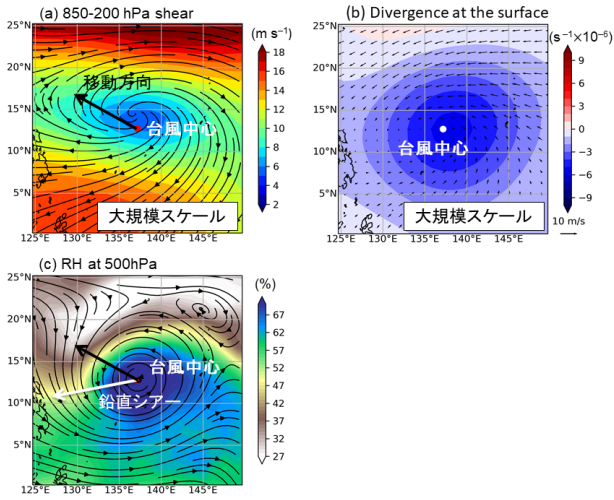


図 3: 大型事例 (クラスター3) の(a) 850-200hPa の鉛直シア場、(b) 地上の発散場、(c) 500hPa の湿度のコンポジット図。クラスター平均の中心位置が図の中心に対応する。黒矢印は移動ベクトル、白矢印は鉛直シアベクトルを示す。

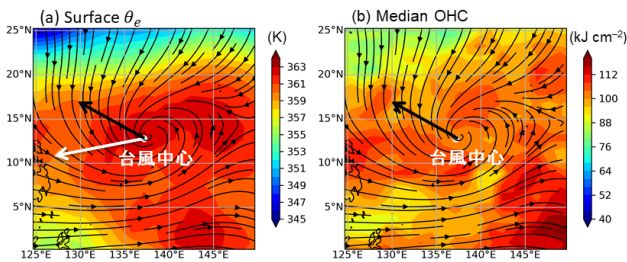


図 4: 大型事例 (クラスター3) の(a) 地上相当温位のコンポジット図と(b) OHC の中央値分布。

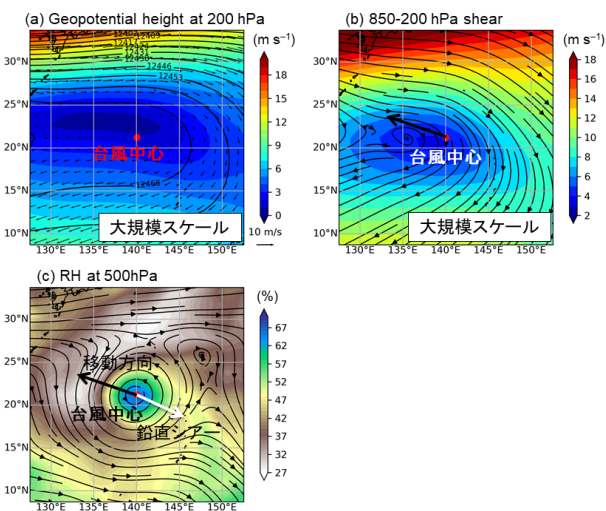


図 5: 小型事例 (クラスター5) の(a) 200hPa 高度場、(b) 850-200hPa の鉛直シア場、(c) 500hPa の湿度のコンポジット図。

5. 考察

台風のサイズと海洋条件、鉛直シアの関係について議論する。小型事例は OHC が必ずしも高くない事例が 3 割も存在した (図 6a)。OHC の値が 50 kJ cm^{-2} 以下というのは、TIFS で言えば負の環境条件に相当する。それでも急発達できたのは SST が他の急発達事例並ということと、小型サイズのため SST を冷却させる効果が小さい (Knaff et al. 2013; Pun et al. 2018) ことが考えられる。逆に大型サイズは SST の冷却効果が大きいため、ある程度高い OHC が必要と考えられる。鉛直シアについては、小型サイズは鉛直シアに対して力学的に弱いことが理論的に言われている (Reasor and Montgomery 2015)。大型サイズは前節で述べた熱力学的な条件に加え、力学的にも中程度の鉛直シアに耐えて発達できたと解釈できる。

すなわち、表 1 に示すように、ドライな環境の小型事例は、並みの SST であれば OHC は必ずしも大きくなくてよいが、弱い鉛直シアが必要と解釈できる。一方、湿潤環境にある大型事例は、中程度の鉛直シアに潜在的に打ち勝てるが、ある程度の OHC は必要と解釈される。

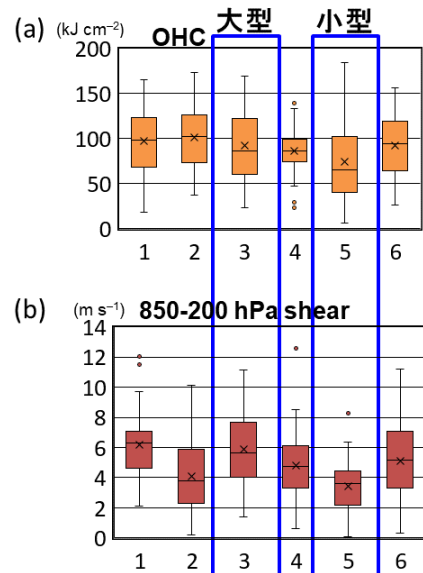


図 6: クラスター別 (x 軸) の(a) OHC 及び(b) 850-200hPa 鉛直シアのボックスプロット。

表 1: 小型事例と大型事例の特徴のまとめ

	小型事例	大型事例
OHC	29%が 50 kJ cm ⁻² 未満の領域	他の RI 事例並
SST cooling		
※両者の移動速度に有意な差なし	小	大
鉛直シアー	弱	中
シアーへの抵抗力	小	大

6. まとめ

急発達環境条件の多様性と、負の条件が存在する場合にどのようなファクターが負の影響を補っているのか、急発達 238 事例を対象に調査した。台風の雲パターンをクラスター解析で 6 つに分類すると、構造的特徴に応じて、環境場条件の組合せが大きく異なっていた。そのうち大型事例と小型事例について詳しく調査した。概要図を図 7 に示す。大型事例は鉛直シアーが大きいものの、湿潤環境でシアーに対する潜在的な抵抗力が大きい。小型事例は乾燥した環境場だが、鉛直シアーが弱く、乾燥空気の影響を受けにくい。構造的特徴と環境場条件の最適な組合せが急発達発生に重要であることが示唆される。統計的な急発達予測モデル (e.g., 急発達インデックス) の精度向上には環境場条件だけでなく、構造的特徴を考慮することが必須である。

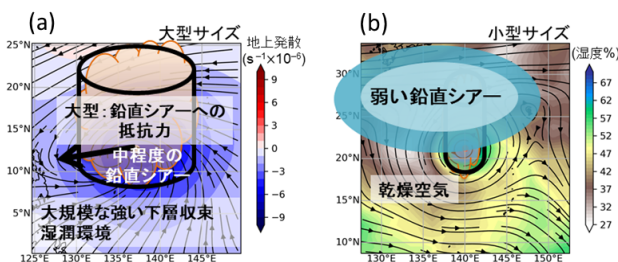


図 7: (a) 大型事例の概要図. (b) 小型事例の概要図.

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 19K14797 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

Hendricks, E. A., M. S. Peng, B. Fu, and T. Li, 2010:

Quantifying environmental control on tropical cyclone intensity change. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 3243–3271, doi:10.1175/2010MWR3185.1.

Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865–879, doi:10.1002/joc.1169.

Jones, S. C., 1995: The evolution of vortices in vertical shear. I: Initially barotropic vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 821–851, doi:10.1002/qj.49712152406.

Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, 18, 1093–1108, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2.

Kaplan, J., M. DeMaria, and J. A. Knaff, 2010: A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, 25, 220–241, doi:10.1175/2009WAF2222280.1.

Knaff, J. A., M. DeMaria, C. R. Sampson, J. E. Peak, J. Cummings, and W. H. Schubert, 2013: Upper Oceanic Energy Response to Tropical Cyclone Passage. *J. Climate*, 26, 2631–2650, doi:10.1175/JCLI-D-12-00038.1.

Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.

Kurihara, Y., M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2030–2045, doi:10.1175/1520-0493(1993)121,2030:AISOHM.2.0.CO;2.

Molinari, J., and D. Vollaro, 2010: Rapid intensification of a sheared tropical storm. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 3869–3885, https://doi.org/10.1175/2010MWR3378.1.

Ono, M., S. Notsuhara, J. Fukada, Y. Igarashi, and K. Bessho, 2019: Operational Use of the Typhoon Intensity Forecasting Scheme Based on SHIPS

- (TIFS) and Commencement of Fiveday Tropical Cyclone Intensity Forecasts. Technical Review No. 21. RSMC Tokyo Typhoon Center.
- Pun, I. F., I. I. Lin, C. C. Lien, C. C. Wu, 2018: Influence of the Size of Supertyphoon Megi (2010) on SST Cooling. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 661–677, doi:10.1175/MWR-D-17-0044.1.
- Reasor, P. D., and M. T. Montgomery, 2015: Evaluation of a heuristic model for tropical cyclone resilience. *J. Atmos. Sci.*, 72, 1765–1782, doi:10.1175/JAS-D-14-0318.1.
- Reasor, P. D., M. T. Montgomery, and L. D. Grasso, 2004: A new look at the problem of tropical cyclones in vertical shear flow: Vortex resiliency. *J. Atmos. Sci.*, 61, 3–22, doi:10.1175/1520-0469(2004)061<0003:ANLATP>2.0.CO;2.
- Riemer, M., M. T. Montgomery, and M. E. Nicholls, 2010: A new paradigm for intensity modification of tropical cyclones: Thermodynamic impact of vertical wind shear on the inflow layer. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3163–3188, doi:10.5194/acp-10-3163-2010.
- Rios-Berrios, R., and R. D. Torn, 2017: Climatological analysis of tropical cyclone intensity changes under moderate vertical wind shear. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 1717–1738, doi: 10.1175/MWR-D-16-0350.1.
- Shimada, U., and T. Horinouchi, 2018: Reintensification and eyewall formation in strong shear: A case study of Typhoon Noul (2015). *Mon. Wea. Rev.*, 146, 2799–2817, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0035.1>.
- Shimada, U., Yamaguchi, M., and Nishimura, S. 2020: Is the number of tropical cyclone rapid intensification events in the western North Pacific increasing? *SOLA*, 16, 1–5, doi:10.2151/sola.2020-001.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi, 2006: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Adv. Space Res.*, 37, 806–822, doi:10.1016/j.asr.2005.09.022.
- Wang, Y., Y. Rao, Z.-M. Tan, and D. Schnemann, 2015: A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 3434–3453, doi:10.1175/MWR-D-15-0049.1.
- Yamaguchi, M., H. Owada, U. Shimada, M. Sawada, T. Iriguchi, K. D. Musgrave, and M. DeMaria, 2018: Tropical Cyclone Intensity Prediction in the Western North Pacific Basin using SHIPS and JMA/GSM. *SOLA*, 14, 138-143.
- 嶋田宇大, 大和田浩美, 2019: SHIPS. 気象研究所技術報告, 82, 4-19.