

2019年夏季の熱帯低気圧の発生・発達への成層圏力学場の影響
Influence of stratospheric dynamics on the genesis and development of tropical cyclone
during the 2019 boreal summer

江口菜穂*1, 山田洋平*2, 那須野智江*2, 小寺邦彦*3:
Nawo EGUCHI, Yohei YAMADA, Tomoe Nasuno, Kunihiko KODERA

This study investigates the impacts of stratospheric dynamical change on the tropical convections and cyclones (TCs) by using a global nonhydrostatic global model (NICAM). Eight numerical experiments which were initialized from 0000 UTC on August 23 to 1200 UTC August 26 in 2019 at 12-hour intervals were conducted to examine possible impacts of a sudden stratospheric warming (SSW) event. In the experiments with later initial dates (25 and 26 Aug), the temperature at the upper troposphere and lower stratosphere in the tropics (Tropical Tropopause Layer; TTL) decreased larger than that in the experiments with earlier initial dates (23 and 24 Aug). In the former, the connection between the Hadley circulation and the stratospheric Brewer-Dobson circulation was clear when the TTL temperature dropped, and cumulus convection became active around 12°N. It was also suggested that the strengthening of the Hadley circulation strengthened the subtropical high, which affected the course of TCs.

1. はじめに

積乱雲の発達 (強度や到達高度) を決定する要因は一般に対流圏中・下層の湿度の鉛直分布や地表面気温、対流有効位置エネルギー (CAPE) 等にあり、対流圏上層からの影響は小さいと考えられている。しかし近年、熱帯域の上部対流圏および下部成層圏 (熱帯対流圏界面遷移層 Tropical Tropopause Layer (TTL); 高度 14~20 km) の気温変化が TC の強度に与える影響に関する議論や、台風強度の将来変化に関する議論が活発である [例えば、Vecchi et al., 2013; Emanuel et al., 2013; Wang et al., 2014; Knutson et al., 2020]。例えば、温暖化の影響により地表面付近の温度の上昇が熱帯低気圧 (Tropical cyclones; 以後 TC) の強度を変化させることが報告されている [Emanuel 2005; Elsner et al. 2008; Kossin et al. 2013; Yamada et al., 2017; IPCC AR6 Chap11 [Seneviratne et al., 2021]]。

台風強度を推定する一つの指標として、Maximum Potential Intensity (MPI) [Bister and

Emanuel, 1998] が広く使われている。MPI から導かれる最大風速は、台風の 2 次循環の下層収束域と上層発散域での気温差に比例しており、上層の発散域の気温も台風強度に影響を与えることを意味している。小林ら [台風研究会 2020; 熱帯気象研究会 2020] は、2次元軸対称海洋結合モデル [Ito et al., 2010] を用いて、上部対流圏・下部成層圏 (200~60hPa) を 5 度降温させた場合 (後述の成層圏突然昇温発生時の局所的な降温度合いと同等)、最大風速が MPI に基づく推定値よりも約 4 倍強まることを示した。この結果は、台風強度に上層の気温場が強く関係していること、気温差以外にも強度に影響を与える要因があることを示唆する。さらに、成層圏の寒冷化および対流圏の温暖化といった大気上下層の気温変化が加速すれば、上層大気の台風強度への影響に関する議論が必要となると推測される。

筆者らはこれまで、成層圏の突然昇温現象 (SSW) 時に TTL が降温し、積雲対流および TC 活

*1 九州大学応用力学研究所 nawo@riam.kyushu-u.ac.jp
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

*2 海洋開発研究機構
JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*3 気象研究所
Meteorological Research Institute

動が活発になることを報告してきた [e.g., Eguchi and Kodera, 2010; Kodera et al., 2015; Eguchi et al., 2015]。最近では、2019年9月に南半球極域で2002年以来の大規模な成層圏突然昇温 (Stratospheric Sudden Warming; SSW) が発生し、同時に熱帯域で台風13、14、15号が相次いで発生した。Noguchi et al. [2020]では、2019年9月のSSW発生時の熱帯域の積雲対流活動の変化について、気象研究所の大循環モデル (MRI-AGCM) [Mizuta et al., 2012] を用いた数値実験を行い、成層圏場(40hPa以上)を客観解析データにナッジングした実験としない場合実験の結果から、下部成層圏・上部対流圏の気温の降下により、積雲対流活動が活発化したことを示した。同時に、積雲対流活動は積雲対流パラメタリゼーションの種類によって、その応答が異なることも指摘した。

本研究では、2019年9月の南半球SSW期間に着目し、積雲対流パラメタリゼーションを用いない全球非静力学(雲解像)モデル Non-hydrostatic global model (NICAM) [Satoh et al., 2014] を用いて、SSW発生時の熱帯域積雲対流活動、特にTCの発生環境場について調査した結果を報告する。NICAMを用いることで、積雲対流パラメタリゼーションに依存しない積雲活動の変化を捉えることができ、また衛星観測および客観解析データでは得られないTTL内の鉛直方向の微細な構造を有する気温、鉛直流等の各物理量の変動を議論できる。さらに数値モデルの初期値依存性を利用したアンサンブル実験を実施することで、統計的に有意な結果を得ることを目的とする。

2. 解析手法

2019年9月に南半球極域で2002年以来の大規模なSSWが発生し、同時期(8月下旬から9月中旬)に熱帯域で台風が相次いで発生した。このSSWは極域成層圏の気温昇温幅は観測史上最高であったが、極域での東西風速の減衰が弱かったため、“minor SSW 小規模昇温”と定義されている。本研究ではNICAM.16を用いて、初期時刻を8月23日0000UTCから8月26日1200UTCまで12時間ごとに取った8メンバーのアンサンブル実験(30日積分)を実施した。水平解像度は14km、鉛直層数は78層、モデルトップは約50kmである。TTL領域では、約380mの鉛直分解能となっている。積雲対流パラメタリゼーションは使用しない。初期値データは気象庁55年長期再解析データ

JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis) [Kobayashi et al., 2015]から内挿し、境界条件として海面水温にはNOAA daily OISST、オゾンにはCMIP6 monthly 3D fieldを用いた。

3. 結果

SSW発生時、極域成層圏は気温が40度以上昇温するが、TTL領域では熱帯平均で約1.5度降温する[Eguchi and Kodera, 2010]。これは成層圏内の南北循環 (Brewer-Dobson 循環) が下方から伝播してくる惑星波の砕波によって強化され、極域では圧縮昇温、低緯度では膨張降温するためである。気温変化度合いは面積によるため、極域は温度変化が大きくなる。

図1に、各初期日時における熱帯域東西平均した70hPaの気温変化を示す。9月7日以降、初期時刻によって気温の時間変化に違いが生じており、初期時刻が早い(遅い)程、気温降下が小さい(大きい)傾向であった。一番気温の高いグループは初期日時が8/23 00, 12UTC、一番気温が低いグループは8/25 00, 12UTCと8/26 12 UTCであった。両グループ間の気温差は約1度である。以後の解析では、8/23(-8/24)と8/25(-8/26)のメンバー平均およびその偏差を示す(それぞれのメンバー数は4ずつ)。JRA55のデータとの比較から(図省略)、NICAMの方が最低気温となる日が約1週間早く、約1度の高温バイアスがあった。

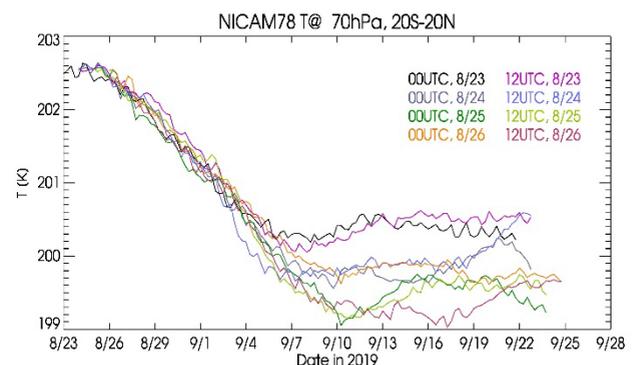


図1: 熱帯(20S-20N)東西平均した70hPaの気温 [K]の時系列。初期時刻2020年8月23日0000UTCから26日1200UTC(12時間間隔; 8メンバー)。各色は図中の表記を参照。

図2に、熱帯東西平均した気温の時間変化(dT/dt)および鉛直流の8/25-26平均と8/23-24平均の差の時間高度断面を示す。9月3日頃から下部成層圏で気温の降下が始まり、9月6日頃に上部対流圏

に低温偏差がみられ、この時期に上部対流圏の鉛直流が強化されている。その後、9月11日頃まで鉛直流が持続し、Noguchi et al. [2020]では確認されなかった、積雲対流活動による中部対流圏の昇温が対流圏内に確認できる。9月8日以降の下部成層圏の降温は対流圏内の積雲対流活動によって励起された Kelvin 応答の効果も加わっていると考えられる。

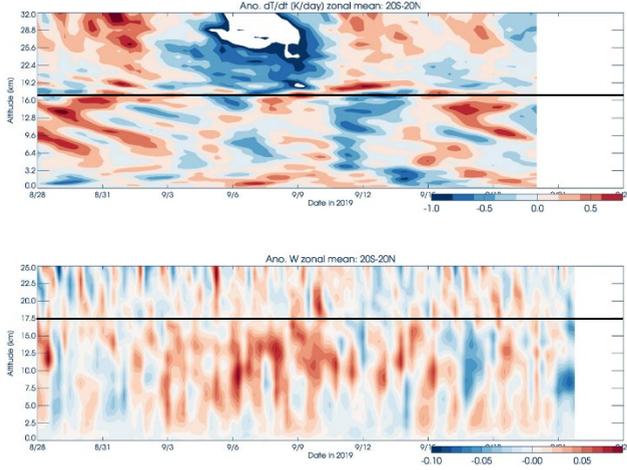


図 2：熱帯(20S-20N)東西平均した気温の時間変化 (dT/dt) (上段) [K/day] と鉛直流 (下段) [m/s] の 8/25-26 平均から 8/23-24 平均を引いた差の時間高度断面。横黒線は高度 17.5km を示す。

次に、熱帯域で降温が開始した前後における積雲対流活動の変化を示す。SSW による降温前の期間を期間 A：8/29-9/2、降温中を期間 B：9/4~9/8 とした。図 3 は低緯度で積雲対流活動の指標として用いられる外向き赤外放射量 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) の期間 A、B とその偏差をそれぞれ初期日 8/23-24 (左側)、8/25-26 (右側)平均で示す。初期日 8/25-26 では初期日 8/23-24 よりも積雲対流活動が北緯 12 度付近に集中して発達していることが分かる。

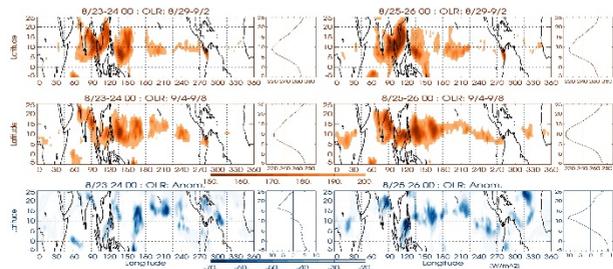


図 3：外向き赤外放射量 OLR[W/m²]の水平マップ。左パネル：初期日 8/23-24 平均、右パネル：初期日 8/25-26 平均、上段：8/29-9/2 期間 A 平均、中段：

9/4-9/8 期間 B 平均、下段：期間 B-A 偏差。各パネルの右側は東西平均値。

図 4 に 9/2 と 9/8 の鉛直流の初期日 8/25-26 と 8/23-24 の差の緯度高度断面を示す。熱帯域降温時には対流圏下部からの上昇流偏差が成層圏の上昇流偏差と緯度 12 度付近で結合している様子が見られ、その南北で下降流が卓越していることが分かる。特に北側の 22 度付近では亜熱帯高気圧の強化が示唆される。

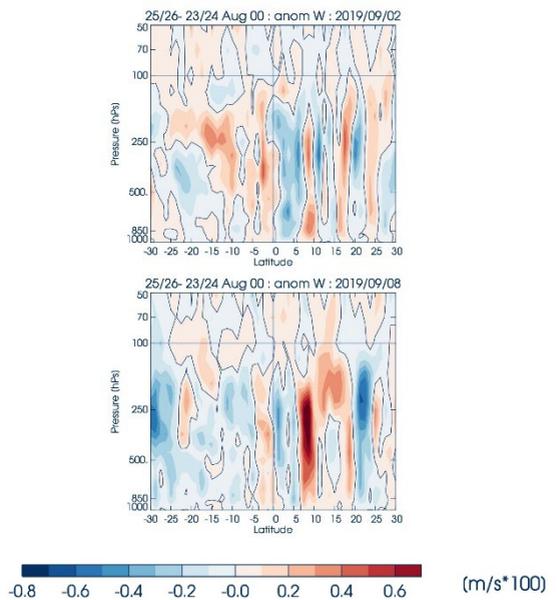


図 4：初期日 8/25-26 から 8/23-24 を引いた差の鉛直流偏差 [100×m/s] の緯度気圧断面。(上段)9/2、(下段)9/8。

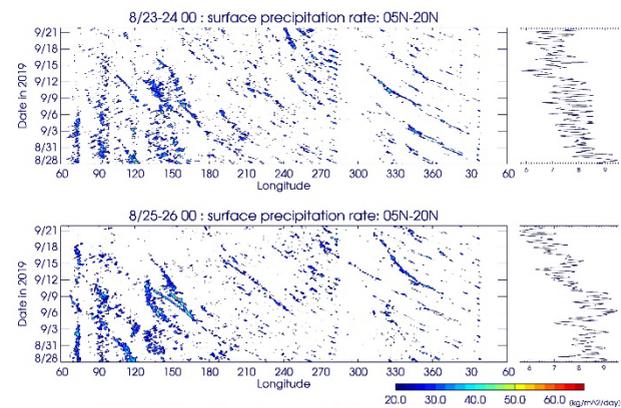


図 5：地上降水量 [kg/m²/day] の経度時間断面。初期日 8/23-24(上段)、8/25-26(下段)。右側パネルは東西平均の時系列。

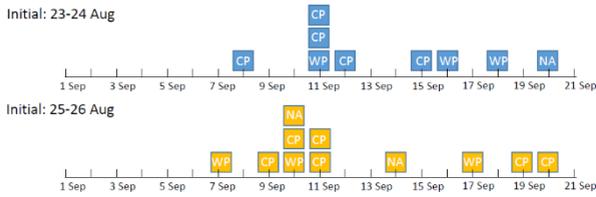


図 6：初期日 8/23-24 (上段)、8/25-26 (下段)における、熱帯低気圧 (TC) の発生時系列を示す。WP:西部太平洋、CP：中部太平洋、AI：大西洋。

表 1：台風の発生状況

発生日	最盛日	発生緯度 deg	最大風速 m/s	最低気圧 hPa
8/23 0000 UTC 初期値				
9/10	9/14	18	60.0	920
8/25 0000 UTC 初期値				
8/29	8/31	18	45.0	955
9/5	9/7	17	40.0	955
9/7	9/10	18	47.5	960
9/14	9/16	25	50	955

図 5 に地上の降水量の時間経度変化を示す。8/25-26 初期日実験では、期間 B で全球的に降水量が増えており、西進する降雨域が多くみられる。特に経度 90~180 度のインド洋東部から中部太平洋域にかけて、降水量が多い。図には示さないが、この降水帯から発生した赤道波 (ケルビン波、ロスビー波) が顕著にみられ、これらの波が解析期間後半の上層の気温低下維持の一因と考えられる。図 6 に初期日 8/23-24 と 8/25-26 で発生した TC の発生日の時系列を示す。TC 発生数に顕著な違いは見られないが、8/25-26 の方が 9 月 9~11 日の中部太平洋域に集中して TC が発生している。表 1 に太平洋域の台風の概況を示す。初期時刻 8/23 0000 UTC 実験では、発生数が 1 個であったが、8/25 0000 UTC 実験に比べて最大風速と海面気圧の最低値は強かった。また、初期時刻 8/25 0000 UTC 実験の方が発生日から最盛日までの期間が短く、より低緯度で最盛期を迎える傾向があった。最後に亜熱帯高圧の特徴の違いについて記述する。図 7 は TC が発生していない時期の 850 hPa における GPH を示す。北西太平洋域では台風に加え積雲対流活動が全般的に強化するので、P-J パターンとして知られるように日本東南方の亜熱帯高気圧がつよまる。このため、初期日 8/25 実験の方が、特に中部太平洋域で高気圧となっており、TC がよ

り西向きの経路を取りやすい環境になっていることがわかる。

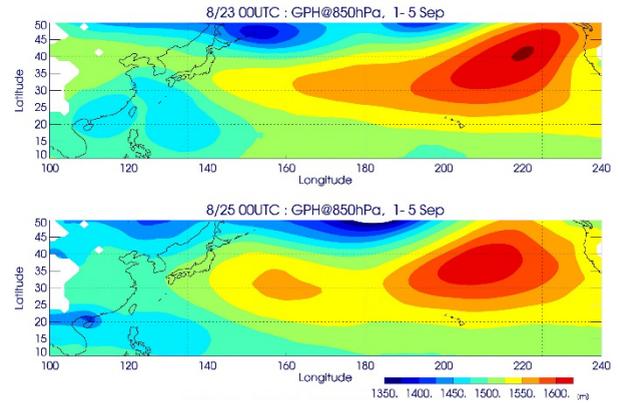


図 7：850hPa における 2019 年 9 月 1~5 日平均した GPH の水平マップ。初期時刻 8/23 0000 UTC (上段)、8/25 0000 UTC (下段)。

4. まとめ

全球非静力学モデル NICAM (水平格子間隔 14km、鉛直 78 層) を用いて、2019 年 9 月に発生した SSW 時の TTL 気温降下に伴う、熱帯域積雲対流活動および TC の発生およびその環境場について記述した。初期時刻を 8 月 23 日 0000 UTC から 8 月 26 日 1200 UTC まで 12 時間毎にずらした 8 メンバーのアンサンブル実験を実施した。数値実験における TTL の気温降下度合いのメンバー間の違いを利用して、その違いが熱帯域積雲対流活動に及ぼす影響を議論した。

初期日が後のメンバー (8/25-26) では、TTL の降温が大きく、特に気温低下が顕著な時期 (9/4-10) に対流圏内の上昇流が卓越し、同時期に成層圏循環場と対流圏のハドレー循環の結合が明瞭にみられ(北緯 12 度付近)、その緯度帯に積雲対流が集中して発生していた。また、初期日 8/25-26 のメンバーでは、西進する降水パターンが多く、気温低下が顕著な時期に TC が多く発生していた。発生した TC は初期日 8/25 実験の方が多かったが (4 個)、その強度は初期日 8/23 実験の方が強かった。また、前者では発生から最盛期までの期間は短く、より低緯度で最盛期を迎える特徴がみられた。

初期日 8/25-26 実験では、ハドレー循環が卓越し、その南北の下降流も強化されていた。特に北側の亜熱帯高気圧帯が、初期日 8/23-24 実験よりも西側に張り出す分布となり、TC の経路にも影響を与えていた可能性が示唆された。

今回の実験ではアンサンブル数が4例ずつと少ないため、定性的な議論にとどまっている。より統計的に有意な議論をするため、現在、アンサンブル数を増やした実験を準備中である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、科研費基盤 C (課題番号:JP18K03743)、科研費基盤 B (課題番号:21H01156)の支援を受けています。また本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気観測予測」の一環として実施されたものです。さらに、本研究の一部は、海洋研究開発機構の地球シミュレータ、および東北大学が提供するスーパーコンピュータ SXACE の計算資源の提供を受け、実施しました。

地球シミュレータの課題名「全球非静力学モデルを用いた高解像度計算による気象擾乱の発生・発達メカニズムとその予測可能性に関する研究」

韓国ソウル大学 (Hyeong-Oh Cho と Prof. Seok-Woo Son) との共同研究の結果も含まれています。

参 考 文 献

- Bister, M. and Emanuel, K.A. 1998 : Dissipative heating and hurricane intensity. *Meteor. Atmos. Phys.* 65, 233–240.
- Ito, K., Y. Ishikawa, and T. Awaji, 2010 : Specifying air-sea exchange coefficients in the high-wind regime of a mature tropical cyclone by an adjoint data assimilation method, *SOLA*, 6, 13–16, doi:10.2151/sola.2010-004.
- Eguchi, N. and Kodera, K., 2010 : Impacts of stratospheric sudden warming event on tropical clouds and moisture fields in the TTL: a case study, *SOLA*, 6, 137–140, doi:10.2151/sola.2010-035.
- Eguchi, N., K. Kodera, and T. Nasuno, 2015 : A global non-hydrostatic model study of a downward coupling through the tropical tropopause layer during a stratospheric. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 297–304, doi:10.5194/acp-15-297-2015.
- Elsner, J. B., Kossin, J. P., & Jagger, T. H., 2008 : The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455(7209), 92–95.
- Emanuel, K. A., 2005 : Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686–688.
- Emanuel, K., S. Solomon, D. Folini, S. Davis, and C. Cagnazzo, 2013 : Influence of tropical tropopause layer cooling on Atlantic hurricane activity. *J. Climate*, 26, 2288–2301, doi:10.1175/JCLI-D-12-00242.1.
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C. H., Kossin, J., ... & Wu, L., 2020 : Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303–E322.
- Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y.; Ebata, A.; Moriya, M.; Onoda, H.; Onogi, K.; Kamahori, H.; Kobayashi, C.; 2015 : Endo, H.; et al. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 93, 5–48.
- Kodera, K., B. M. Funatsu, C. Claud and N. Eguchi, 2015 : The role of convective overshooting clouds in tropical stratosphere–troposphere dynamical coupling, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.15, p.6767–6774, doi:10.5194/acp-15-6767-2015.
- Kossin, J. P., T. L. Olander, and K. R. Knapp, 2013 : Trend analysis with a new global record of tropical cyclone intensity. *J. Climate*, 26, 9960–9976, doi:10.1175/JCLI-D-13-00262.1.
- Noguchi, S., Y. Kuroda, K. Kodera, and S. Watanabe, 2020 : Robust Enhancement of Tropical Convective Activity by the 2019 Antarctic Sudden Stratospheric Warming, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088743, <https://doi.org/10.1029/2020GL088743>.
- Mizuta R, H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, A. Kitoh, 2012 : climate simulations using the improved MRI-AGCM with 20-km grid. *J Meteorol Soc Jpn* 90A:235–236
- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, T., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H., 2014 : The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M.

- Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change, 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. In Press.
- Wang, S., Camargo, S. J., Sobel, A. H., & Polvani, L. M., 2014 : Impact of the tropopause temperature on the intensity of tropical cyclones: An idealized study using a mesoscale model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 71(11), 4333-4348.
- Yamada, Y., Satoh, M., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A. T., Nakano, M., Nasuno , T., 2017 : Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model. *J. Climate*, 30, 9703-9724, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0068.1>
- Vecchi, G., S. Fueglistaler, I. M. Held, T. R. Knutson, and M. Zhao, 2013 : Impacts of atmospheric temperature trends on tropical cyclone activity. *J. Climate*, 26, 3877–3891, doi:10.1175/JCLI-D-12-00503.1.