

藤原圭太、竹見哲也、森信人 (京都大学・防災研究所)

1. はじめに

地球温暖化が台風に与える影響の解明は、学術的興味のみならず災害のリスク評価の観点からも重要な研究課題である。近年、2018 年台風 21 号 (Jebi ; 以後、TC1821 と表記) に伴う高潮や暴風の影響により、過去の顕著台風 (1934 年の室戸台風や 1961 年の第二室戸台風) に匹敵する甚大な被害が西日本を中心に発生した。さらに TC1821 は、過去 25 年間 (1994-2018 年) において最も強い勢力で西日本の太平洋側に上陸した。地球温暖化は中緯度における台風強度を増大させると予測されている (e.g., Kanda et al., 2020; Tsuboki et al., 2015)。そのため、将来の温暖化が TC1821 にどのような影響を与えるのか調査することは、将来想定される最悪クラスの自然災害に関する有用な知見を提供することが期待される。

そこで、本研究は、領域気象モデルを使用した再現実験 (以後、CTL run と表記) と擬似温暖化 (Pseudo-Global Warming) 実験 (以後、PGW run と表記) を通じて、将来気候下において TC1821 がどのように変化するのかを調査した。

2. 実験設定と再現性の検証

2.1. 数値実験の設定

本研究では、TC1821 に対して Weather Research & Forecasting Model (WRF) version 3.9.1.1 (Skamarock et al. 2008) を用いた初期値アンサンブル実験を実施した。初期時刻は、2018 年 8 月 30 日から 9 月 2 日までの各日 00、06、12、18 UTC (16 メンバー) に設定した。下記のモデル設定は、16 メンバー全てで共通である。水平解像度 5 km (D1) と 1 km (D2) の計算領域 (図 1) は、双方向ネスティングである。鉛直層数は 56 層とし、モデルトップは 20 hPa に設定した。大気の初期

値・境界値および海面水温には、水平解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ の National Center for Environmental Prediction (NCEP) Final Operational Global Analysis (FNL) の 6 時間値を使用した。積雲対流パラメタリゼーションは D1 と D2 ともに使用していない。雲微物理スキームは WRF Single-Moment 6-Class Scheme、境界層スキームは Yonsei University Scheme、短波・長波放射スキームは Rapid Radiative Transfer Model Scheme を採用した。また、台風経路を高精度で予報するために、東西・南北方向の波数 2 成分に対してスペクトルナッジング (nudging time coefficients は 2.8×10^{-4}) を D1 のみに適用した。

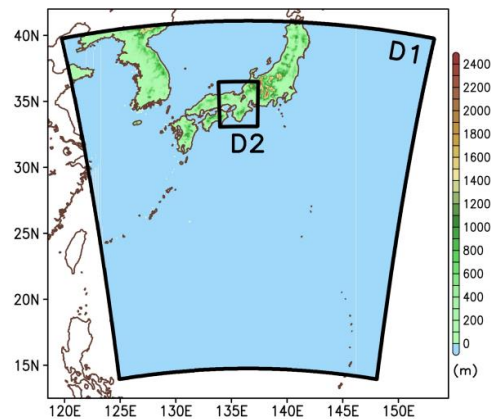


図 1. WRF における計算領域。

2.2. 擬似温暖化実験の設定

PGW run で使用する温暖化差分の作成にあたり、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF と d2PDF) に収録されている月平均値のアンサンブル平均 (d4PDF は 90 メンバー平均値、d2PDF は 54 メンバー平均値) を利用する。本研究では、将来気候の 30 年平均値 (2051-2080 年) から現在気候の 30 年平均値 (1981-2010 年)

を引いた値を、温暖化差分として定義する。温暖化差分は、将来気候において有意な変化がみられる気温・地上気温・海面水温の3要素 (Takemi et al., 2012) について作成し、その東西平均値を CTL run の初期値・境界値に加算する。北西太平洋の温暖化は全球平均よりも顕著であるため、温暖化差分の東西平均値は北西太平洋域 (東経 110–180 度) の海盆スケールで平均を取った。本稿では、d2PDF に基づく温暖化差分を用いた PGW run を PGW2 run、d4PDF に基づく温暖化差分を用いた PGW run を PGW4 run として、以後表記する。

3. 温暖化時の TC1821 の強度・構造変化

本章では、地球温暖化時の TC1821 の経路と強度の変化 (3.1 節)、内部コア構造の変化 (3.2 節)、温暖化時の環境場パラメータの変化 (3.3 節) について紹介する。

3.1. TC1821 の経路と強度の変化

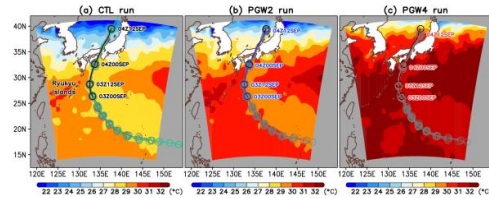


図 2. (a) 気象庁ベストトラック (緑線) と CTL run の各メンバー (灰線) から得られた台風経路。アンサンブル平均の経路 (黒線) は、9 月 3 日 00 UTC から 4 日 12 UTC まで描いている。陰影は、9 月 3 日における SST 分布を表す。(b) 図 2a と同様であるが、PGW2 run の結果。CTL run と PGW2 run のアンサンブル平均の経路は、それぞれ黒線と青線で描いている。(c) 図 2a と同様であるが、PGW4 run の結果。CTL run と PGW4 run のアンサンブル平均の経路は、それぞれ黒線と赤線で描いている。

図 2 は、気象庁ベストトラックデータと WRF シミュレーションから得られた台風の経路を表す。現在気候では、TC1821 は琉球

諸島東海上の SST が約 29 度の海域を通過して、西日本に上陸している。PGW run では、CTL run と似たような経路を移動しているが、上陸直前の移動速度が、気温上昇が顕著になるほど遅くなる傾向にある。2 (4) 度上昇の気候下では、TC1821 の経路周辺の SST は、30 (32) °C まで上昇している。

図 3 は、台風の最大風速の時間変化を CTL run と PGW run で比較したものである。CTL run では、上陸直前に台風が再発達する傾向にある。興味深いことに、温暖化の進行が顕著であるほど、日本南海上における TC1821 の再発達は明瞭である。上陸直前の最大風速のアンサンブル平均値は、CTL run に対して、PGW2 run では約 8%、PGW4 run では約 20% 増加していた。この結果は、温暖化が極端に進行すると、中緯度においても TC1821 は強度を回復することが出来るため、西日本における台風の脅威が急激に増大する可能性を示唆する。

3.2. 内部コアの構造変化

本節では、CTL run と PGW run における TC1821 の上陸直前の構造を比較する。図 4 は、TC1821 が北緯 30.5–33.5 度に位置していた時の方位角平均した接線風速と動径風速、鉛直風速の半径高度断面図 (上段)、大気境界層内 (800–1000hPa で平均) の絶対角運動量の動径移流 (中段) を表している。

CTL run は、外側にやや傾斜する単一の壁雲の構造を有しており、接線風速の極大は台風中心から半径 75 km 付近に現れている。PGW4 run は、CTL run よりも、コンパクトかつ背の高い壁雲の構造が出現している。一方で、PGW2 run では、内部コアの構造変化としてはやや不明瞭である。つまり、温暖化に伴う TC1821 の上陸直前の内部コア構造の変化は、2 度上昇時には現在気候との差が小さい一方で、4 度上昇時には強固な軸対称構造を有することを示している。

さらに、PGW2 run と PGW4 run との間の大きな違いは、大気境界層内の絶対角運動量

の動径移流にも確認できる。PGW4 run では、壁雲の活発な対流活動に伴う台風2次循環の顕著な強化が、壁雲周辺の内向きの絶対角運動量移流を大幅な増加に寄与している。PGW2 run では、壁雲の上昇流の強化が相対的に不明瞭であるため、内向きの運動量移流

量にも大きな変化はみられていない。このことから、PGW2 run と PGW4 run との間の内部コア構造の大きな差は、2度上昇と4度上昇の気候下における台風壁雲の対流活動の活発化に起因する絶対角運動量の動径移流の変化と強く関連していると考えられる。

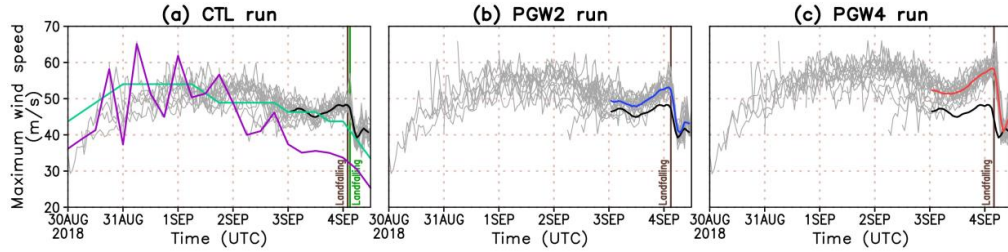


図 3. (a) 気象庁ベストトラックデータ (緑線)、NCEP FNL (紫線)、CTL run の各メンバー (灰線) から得られた台風の最大風速。9月3日00 UTC から9月4日12 UTC までのアンサンブル平均値は黒線で描かれている。縦棒はベストトラックデータ (緑線) と CTL run のアンサンブル平均の台風経路 (茶線) に基づく上陸時刻を示す。(b) 図 3a と同様であるが、PGW2 run の結果。青 (灰) 線は PGW2 run のアンサンブル平均値 (各メンバーの値) を示す。(c) 図 3a と同様であるが、PGW4 run の結果。赤 (灰) 線は PGW4 run のアンサンブル平均値 (各メンバーの値) を示す。

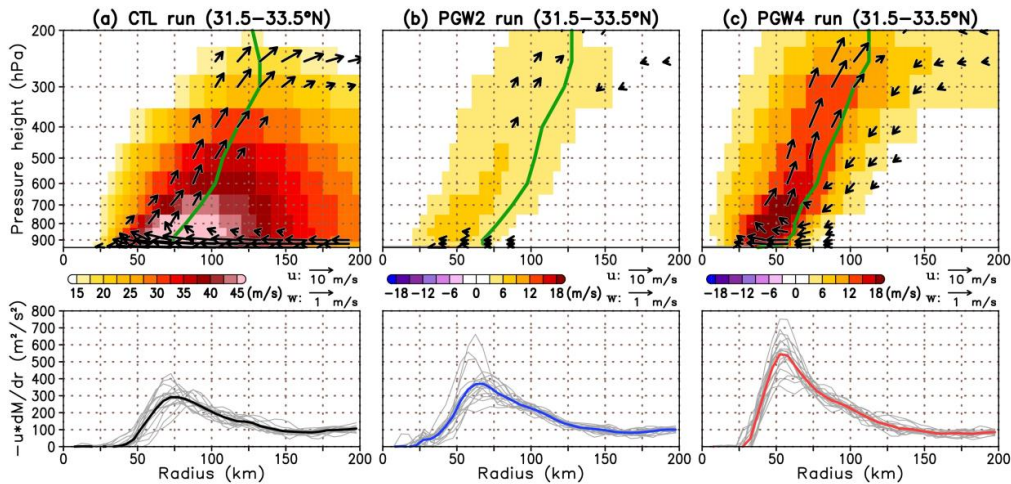


図 4. (上段) (a) CTL run、(b) PGW2 run、(c) PGW 4 run における方位角平均した接線風速 (陰影)、動径風速 (青等値線)、鉛直風速 (黒等値線) の半径高度断面図。断面図は、TC1821 が北緯 30.5-33.5 度に位置している時刻で平均している。ただし、PGW run の結果は CTL run からの差 (PGW minus CTL) として描画している。緑線は、各高度の最大風速半径を表す。(下段) 大気境界層内 (800-1000 hPa) で平均した絶対角運動量の動径移流の分布図。灰色の線は個々のメンバー、太線はアンサンブル平均値を表す。

3.3. 環境場パラメータの変化

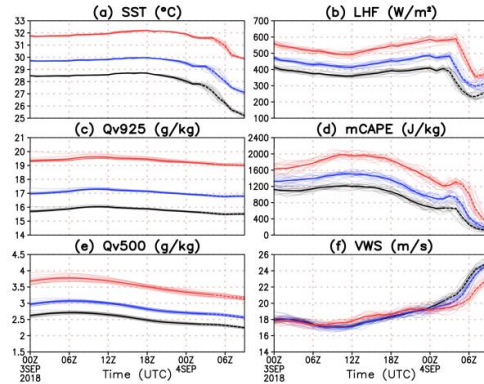


図 5. (a) CTL (黒線)、PGW2 (青線)、PGW4 (赤線) run の台風中心から半径 200 km 以内で領域平均された SST の時系列図。細線 (太線) は各メンバーの値 (アンサンブル平均)。(b-d) 図 5a と同じだが、(b) LHF、(c) QV925、(d) mCAPE の結果。(e、f) 図 5a と同様であるが、(e) Qv500、(f) VWS は台風中心から半径 600 km 以内の範囲で領域平均したものである。

PGW4 run において、台風壁雲の対流活動が顕著に活発化した要因について、様々な環境場パラメータに注目して調査する。図 5 は、海面水温 (SST)、海面潜熱フラックス (LHF)、925 hPa の水蒸気混合比 (Qv925)、対流有効位置エネルギー (mCAPE) は台風内部コア領域 (半径 200 km 以内)、500 hPa の水蒸気混合比 (Qv500)、200 hPa と 850 hPa の間の鉛直シア (VWS) は台風周辺 (半径 600 km 以内) で領域平均した時系列図である。

全ての環境場パラメータにおいて、PGW2 run と PGW4 run との差は、CTL run と PGW2 run との差よりも顕著である。上陸 12 時間前の期間で時間平均した台風直下の SST のアンサンブル平均値 (図 5a) は、CTL run が 28.4°C、PGW2 run が 29.7°C、PGW4 run が 31.9°C であり、4 度上昇した将来気候では中緯度 SST の昇温が急激に進行していることを示している。この SST の急激な昇温に対応して、PGW4 run では、台風直下の中緯度海洋から内部コアへの水蒸気供給も非常に活

発である (図 5b)。その結果、内部コアの対流圏下層には、顕著な湿潤層 (図 5c) と CAPE の高い領域 (図 5d) が形成されている。CAPE のアンサンブル平均の上陸 12 時間前の時間平均値は、CTL run が 908 J/kg、PGW2 run が 1134 J/kg、PGW4 run が 1531 J/kg であった。対流圏中層の水蒸気量も PGW4 run において顕著に増大している (図 5e)。このような対流圏中・下層の熱力学的環境は、壁雲の対流活動の活発化に有利に作用する。また、PGW4 run の台風周辺の VWS も減少しており (図 5f)、内部コアの強い対流活動の維持に寄与していたと思われる。そのため、PGW4 run でみられた上陸直前の顕著な再発達や強固な軸対称構造の出現は、4 度上昇の将来気候における中緯度の熱力学的環境場の急激な変化と VWS の減少に起因すると考えられる。

5. まとめ

本研究は、WRF による 2 度上昇、4 度上昇の擬似温暖化実験を通じて、温暖化が 2018 年台風 21 号 (Jebi) に与える影響を調査した。擬似温暖化実験は、気温の上昇に伴い、Jebi の発達が促進されることを示した。2 度 (4 度) 温暖化した気候では、日本南海上の Jebi の最大風速が、現在気候に対して、8% (20%) 増加した。4 度上昇実験の Jebi は、2 度上昇実験とは異なり、上陸直前まで強固な軸対称構造を維持していた。このような気温上昇に対する Jebi の強度や内部コア構造の非線形応答は、2 度から 4 度へと温暖化が進むことにより、中緯度の熱力学的・力学的環境場が大きく変化することに起因すると考えられる。

謝辞

本研究は、AON との共同研究として実施された。

参考文献

- Skamarock, et al., 2008. NCAR Tech. Note, National Center for Atmospheric Research, USA, 113 pp.
- Takemi, et al., 2012. *JMSJ*, 90A, 189–212.
- Tsuboki, et al., 2015. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 646–652.
- Kanada, et al., 2020. *SOLA*, **16**, 57–63.