

擬似温暖化実験で得られた地球温暖化時の 2018 年台風 21 号 (Jebi) の強度・構造変化 Intensity and Structure Changes of Typhoon Jebi (2018) Under the Global Warming

藤原圭太^{*1}、竹見哲也、森信人

Keita FUJIWARA, Tetsuya TAKEMI, Nobuhito MORI

This study examined the effect of global warming on the intensity and structures of Typhoon Jebi (2018), using regional atmospheric simulations with the current climate (CTL run) and pseudo-global 2 K and 4 K warmed climate (PGW2 and PGW4 runs). Both warmed climate conditions facilitated the typhoon intensification. As for the inner-core structures, there is a significant difference between the PGW2 and PGW4 runs. The inner-core structures in the PGW2 run were roughly similar to those in the CTL run, whereas the robust axisymmetric structures were sustained under the extremely warmed conditions until just before its landfall. The further enhanced rapid mid-latitude-warming in the PGW4 run contributed to a large CAPE in the boundary layer and a very humid environment in the middle troposphere around the south of Japan, creating the favorable conditions to maintain the robust inner-core structures in mid-latitude.

1. はじめに

2018 年台風 21 号 (Jebi; 以後、TC1821 と表記) は、8 月 28 日に北マリアナ諸島の東海上で発生し、発達しながら北西進し、31 日頃に猛烈な勢力に達した。その後、9 月 4 日 12JST 頃に徳島県に非常に強い勢力で上陸、14JST 頃に兵庫県に再上陸した後、日本海を北上し、5 日に北海道の西海上で温帯低気圧に変化した。TC1821 の影響により、大阪湾周辺の地域では、関西国際空港の冠水や暴風による家屋の倒壊などの甚大な人的・経済的被害が生じた。

地球温暖化に伴って激甚化する気象災害は、社会・経済活動における最も重大なリスクの一つである。台風は海面からの水蒸気供給を主なエネルギー源とする気象現象であるため、地球温暖化の進行に伴う海面水温の上昇が、海面から台風への水蒸気供給を増加させることで、台風による災害リスクが増大することが懸念される。そのため、日本に大きな被害をもたらした台風が、温暖化する大気・海洋環境場の中でどのように変容するのかを明らかにすることは、学術的興味のみならず防災・減災の観点からも重要な研究課題である。

そこで、本研究は、領域気象モデルを使用した

再現実験と擬似温暖化実験を通じて、TC1821 の強度と構造が地球温暖化によって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

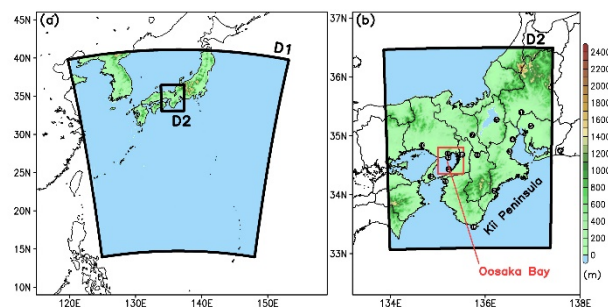


図 1. WRF における計算領域。陰影は、標高を表す。図 1b の丸印は、図 3 の各観測点の位置に対応する。

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

^{*1} 京都大学防災研究所 fujiwara.keita.7p@kyoto-u.ac.jp
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(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。

2.2. 再現性の検証

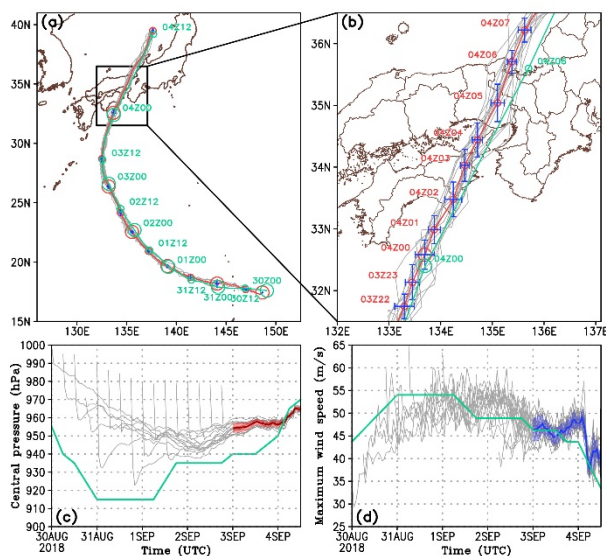


図 2. (a) WRF (灰線: 各アンサンブルメンバー、赤線: アンサンブル平均) と気象庁ベストトラックデータ (緑線) から得られた TC1821 の経路。各日 00 と 12 UTC の TC1821 の位置を丸印で示している。青十字は、メンバー間の経路のばらつき ($\pm 1\sigma$) を表す。(b) 図 2a と同様であるが、図 2a の黒枠内を拡大した図。(c) WRF (灰線: 各アンサンブルメンバー、赤線: アンサンブル平均) と気象庁ベストトラックデータ (緑線) から得られた TC1821 の中心気圧の時系列図。陰影は、メンバー間の中心気圧のばらつきを表す。(d) 図 2c と同様であるが、最大風速の時系列図。

図 2a と b は、ベストトラックデータとシミュレーションにおける TC1821 の経路を表す。台風経路のアンサンブル平均は、観測の特徴をよく再現している。ただし、TC1821 が近畿地方に接近・通過する際の経路は、観測に較べて、やや北西側に

シフトしている。図 2c と d は、TC1821 の中心気圧と最大風速の時系列図をそれぞれ表す。シミュレーションは、上陸直前における TC1821 の中心気圧をベストトラックデータよりもやや高めに表現している。しかし、数値実験の台風強度は、NCEP FNL の original の 6 時間値と較べると、ベストトラックデータに近い値を算出していた (図略)。また、最大風速に関しても、ベストトラックデータの推移を数値実験は概ね再現できている。

図 3 は、近畿地方の 16 地点の気象官署で観測された瞬間・平均風速とシミュレーションから得られた地上風速の比較図である。数値シミュレーションでは、TC1821 が近畿地方に接近・通過する際の各地で観測された強風の時間変化を概ね再現できている。地上風速のアンサンブル平均値は、観測された平均風速の時系列図を追従している。以上のことから、数値シミュレーションは、TC1821 の基本的な特徴と近畿地方の強風の詳細な特徴の双方を再現できていると考えられる。

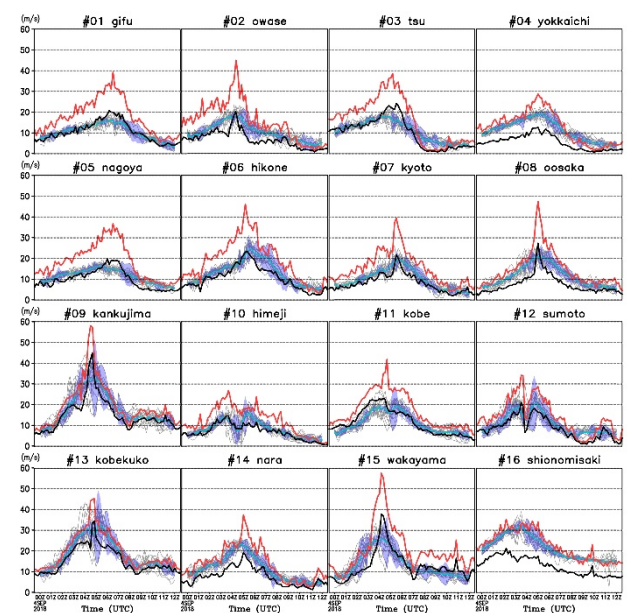


図 3. 観測された瞬間風速 (赤線) と平均風速 (黒線) の時系列図。WRF の結果 (灰線: 各アンサンブルメンバー、青線: メンバー平均) も併せて描いている。陰影は、メンバー間の地上風速のばらつきを表す。各図の数字は、図 1b の丸印に対応する。

2.3. 擬似温暖化実験の設定

地球温暖化時の TC1821 の強度・構造変化を調査するために、擬似温暖化 (Pseudo-Global Warming) 実験 (以後、PGW run と表記) を実施する。ただし、計算資源の都合上、大阪湾周辺 (図 1b の赤枠内の標高 100 m 未満の陸地) における期間最大風

速の領域平均値の上位 3 メンバー（ここでは、初期時刻が 2018 年 8 月 31 日 00 UTC、31 日 18 UTC、9 月 1 日 00 UTC）のみを対象として PGW run を実施した。

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（e.g., Takemi et al., 2012）について作成した。また、PGW run における undesirable な台風の位置ずれを軽減するために、本研究は東西平均した温暖化差分を用いる。

温暖化差分の東西平均値を作成する際には、海盆スケールの温暖化特性を考慮する必要がある。図 4 は、北西太平洋域（東経 110–180 度）、北東太平洋域（東経 180–西経 110 度）、北大西洋域（西経 10–90 度）において東西平均した 9 月の SST の温暖化差分である。全球平均値も緑線で併せて示している。北西太平洋域では、北緯 30 度以北の SST の昇温が全球平均よりも顕著である（図 4a、d）。北東太平洋域の SST 昇温は、全球平均値をおおよそ追従している（図 4b、e）。北大西洋域は、北緯 10 度以北の SST 昇温量が全球平均値より小さいという特徴を持つ（図 4c、f）。そのため、各海域の諸現象に対する温暖化の影響を正しく評価するためには、海盆スケールでの温暖化差分を作成することが重要である。したがって、日本近海の台風に対する温暖化の影響を議論する本研究では、温暖化差分として全球平均ではなく北西太平洋域の東西平均値を使用する。

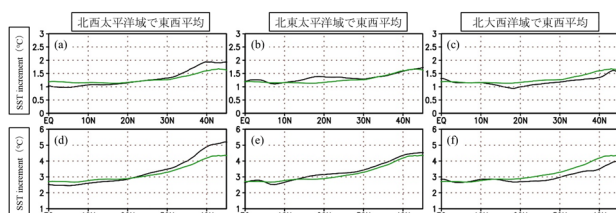


図 4. (a-c) d2PDF から得られた (a) 北西太平洋域、(b) 北東太平洋域、(c) 北大西洋域で東西平均した 9 月の SST increment（黒線）。SST increment の全球平均値も緑線で併せて描いている。(d-f) 図 4a-c と同様であるが、d4PDF における 9 月の SST increment。

本稿では、再現実験を CTL run、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. PGW run から得られた上陸直前の TC1821 の強度・構造変化

本章では、地球温暖化時の TC1821 の経路・強度変化（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 5a-c は、PGW run を実施した 3 メンバーの台風経路を表す。PGW run では、TC1821 の極端な位置ずれは生じていない。一方で、TC1821 が近畿地方に接近する 9 月 4 日 00 UTC の台風の位置は、温暖化が進行するほど南西方向にシフトしている。これは、温暖化による台風の移動速度の低下を反映しており、温暖化と台風の移動速度の関係を議論している先行研究（e.g., Yamaguchi et al., 2020）と矛盾しない結果である。

図 5d-f は、台風強度を CTL run と PGW run で比較したものである。図の横軸は時刻ではなく、緯度を表している。3 つのメンバー全てにおいて、温暖化の進行は台風を強める方向に作用しており、おおよそ気温スケーリングに沿った変化となっている。また、CTL run と PGW run に共通する特徴として、TC1821 の強度のピークが北緯 21-24 度付近に現れている（図 5d-f の red shading）。興味深いことに、PGW4 run の 3 メンバーから得られた TC1821 は、近畿地方に上陸する直前の北緯 30.5-33.5 度付近において再び強まる傾向を示している（図 5d-f の blue shading）。このような上陸直前の強度変化の特徴は、PGW2 run では不明瞭である。この結果は、温暖化が極端に進行すると、中緯度（上陸直前）においても TC1821 は勢力を回復することが出来るため、近畿地方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 6 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の半径高度断面図、1 時間降水量の動径分布を表している。CTL run では、

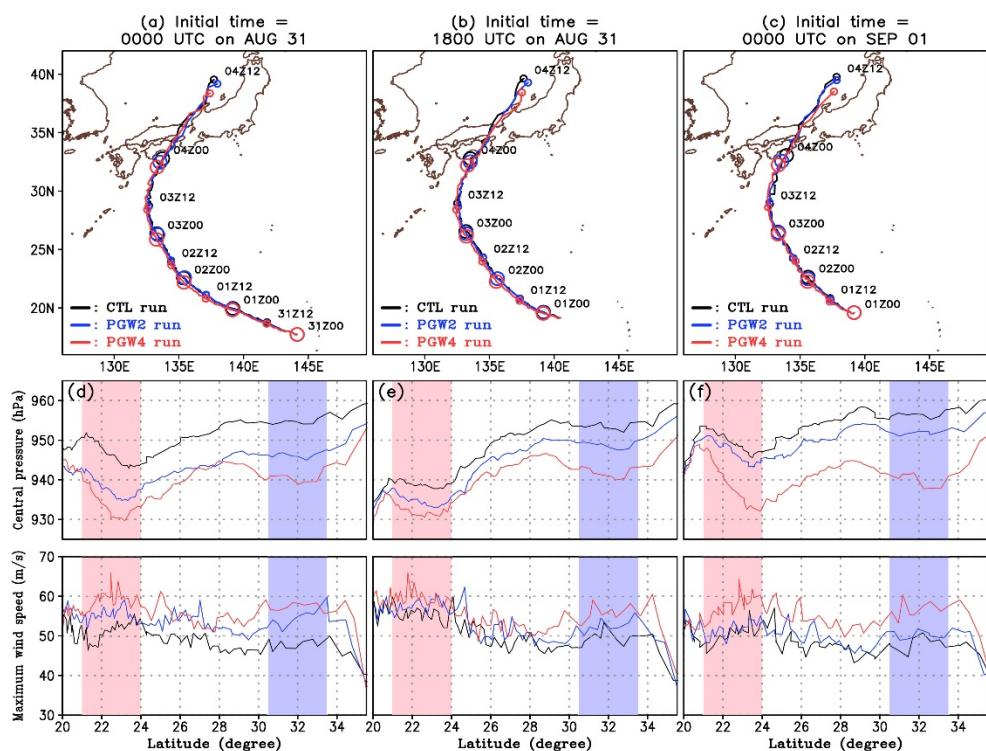


図5. (a-c) 初期時刻が (a) 2018 年 8 月 31 日 00 UTC、(b) 2018 年 8 月 31 日 18 UTC、(c) 2018 年 9 月 1 日 00 UTC における CTL run (黒線)、PGW2 run (青線)、PGW4 run (赤線) から得られた TC1821 の経路。各日 00 と 12 UTC の台風の位置を丸印で示している。(d-f) 各初期時刻の各数値実験から得られた TC1821 の中心気圧(上段)と最大風速(下段)の時系列図。横軸は緯度を表す。赤(青)の陰影は、最盛期(上陸直前)の緯度帯を表す。

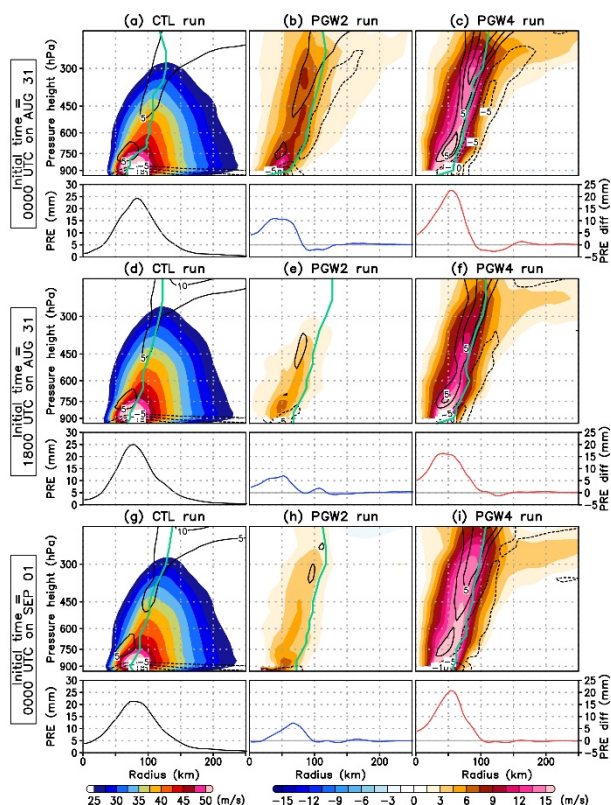


図6. (a-c) 初期時刻が 2018 年 8 月 31 日 00 UTC における (a) CTL run、(b) PGW2 run、(c) PGW4 run から得られた上陸直前の方位角した接線風速(陰影)と動径風速(等値線)の半径高度断面図。緑線は各高度の RMW を表す。下段のグラフは、1 時間降水量の動径分布を示す。PGW run は、RMW を除いて CTL run との差 (PGW minus CTL) として描画。(d-f) 図 6a-c と同様であるが、初期時刻が 2018 年 8 月 31 日 18 UTC の結果。(g-i) 図 6a-c と同様であるが、初期時刻が 2018 年 9 月 1 日 00 UTC の結果。

台風中心から半径 60 km 付近に風速 50 m/s を超える領域が出現しており、降水量も同領域で極大を示す(図 6a, d, g)。PGW run では、最大風速半径(RMW)付近で接線風速が強まっているが、その程度は PGW2 run と PGW4 run で大きく異なっている。PGW4 run の接線風速の強化は、RMW のやや内側の対流圏下層から上層の幅広い領域に生じており、その値は 10 m/s を超えている(図 6c, f, i)。一方で、PGW2 run の接線風速の変化は、PGW4 run に比べて非常に不明瞭である(図 6b, e, h)。PGW2 run と PGW4 run における台風の構造変化の程度の差異は、台風 2 次循環(動径風速や降水量)についても同様である。つまり、地球温暖化時の TC1821 の上陸直前の内部コア構造は、2 度上昇で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。

3.3. 環境場パラメータの変化

本節では、台風の内部構造に関して PGW2 run と PGW4 run との間に顕著な違いが生じた原因について、様々な環境場パラメータに注目して調査する。図 7 は、CTL run、PGW2 run、PGW4 run の最盛期および上陸直前の各種物理量を比較したものである。

CTL run や PGW2 run では、内部コア直下の海面水温(IC-SST)は、上陸直前の方が最盛期のよりも低い値を示す。反対に、PGW4 run では上陸直前

の方が高い値を示している。これは、北西太平洋域における中緯度の SST 昇温が、PGW4 run において一層顕著であることに起因する（図 4a、d）。実際、最盛期の緯度帯（北緯 21-24 度）と上陸直前の緯度帯（北緯 30.5-33 度）それぞれで平均した SST increment の差は、PGW2 run では 0.2 度、PGW4 run では 0.7 度となっており、単純な気温スケーリングよりも大きな差が生じている。

PGW4 run の中緯度 SST の顕著な昇温により、TC1821 の最盛期から上陸直前までの長期間にわたって、海洋から台風への活発な水蒸気供給（IC-LHF）が維持される。その結果、PGW4 run の上陸直前の内部コア領域の対流圏下層の水蒸気量（IC-QV900）は、単純な気温スケーリングを凌ぐほど増加している。その湿潤な環境は、中緯度に位置する TC1821 の内部コア領域の対流有効位置エネルギー（IC-CAPE）の高い値の維持に寄与している。さらに、PGW4 run では、中緯度の TC1821 周辺の対流圏中層において顕著な湿潤状態（ENV-QV500）が形成されている。この結果は、PGW4 run では、CTL run や PGW2 run と比べて対流抑制効果が相対的に小さいことを示唆しており、中緯度においても台風の発達に非常に有利な環境場が形成されていたと考えられる。したがって、中緯度の急激な昇温という北西太平洋における特有の温暖化特性（図 4）が、PGW4 run でより顕著に表れた結果、PGW4 run と PGW2 run との間に TC1821 の上陸直前の強固な構造の形成に関して非常に大きな違いが生じたと思われる。

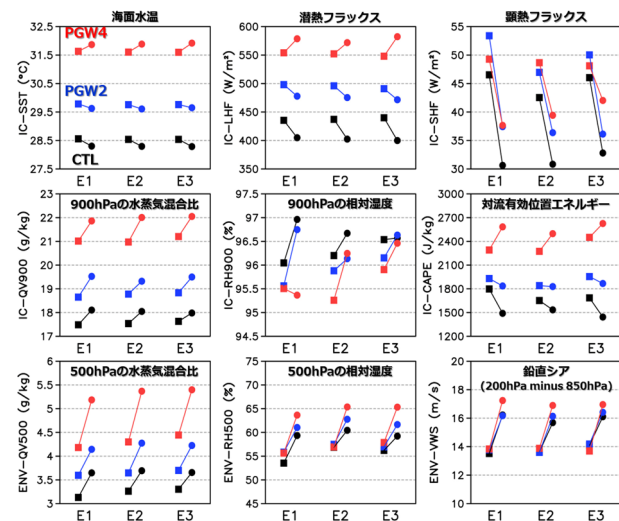


図 7. 最盛期（丸印）と上陸直前（四角印）における環境場パラメータ。黒色は CTL run、青色は PGW2 run、赤色は PGW4 run を表す。IC-（ENV-）は、台風中心から半径 200（600）km 以内で領域

平均している。E1、E2、E3 は初期時刻がそれぞれ 2018 年 8 月 31 日 00 UTC、2018 年 8 月 31 日 18 UTC、2018 年 9 月 1 日 00 UTC の結果である。

4. 議論：大阪湾周辺における暴風の変化

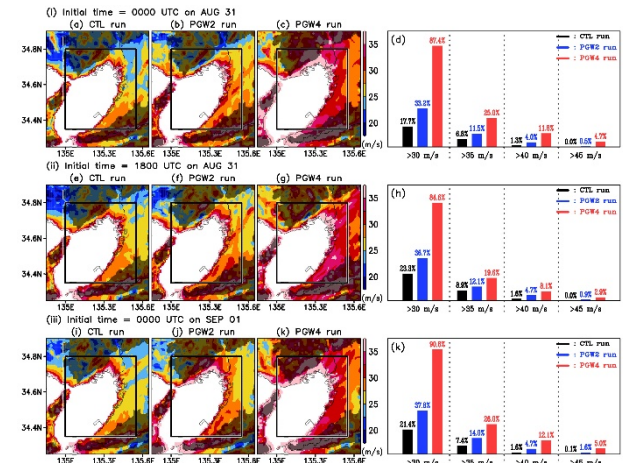


図 8. (a-c) 初期時刻が 2018 年 8 月 31 日 00 UTC の (a) CTL run、(b) PGW2 run、(c) PGW4 run から得られた期間最大風速の空間分布図。ただし、陸上のみを描画している。灰色の陰影は、標高が 100 m を超える地域を表す。(d) 大阪湾周辺（図 8a-c の黒枠内）の標高 100 m 未満の平野部で領域平均した期間最大風速がある閾値（30、35、40、45 m/s）を超える領域が、注目している平野部全体に占める割合。黒、青、赤色の棒グラフは、それぞれ CTL run、PGW2 run、PGW4 run の結果を表す。(e-h) 図 8a-d と同様であるが、初期時刻が 2018 年 8 月 31 日 18 UTC の結果。(i-k) 図 8a-d と同様であるが、初期時刻が 2018 年 9 月 1 日 00 UTC の結果。

前章の結果から、TC1821 の上陸直前の強固な構造の形成の有無が、大阪湾周辺の強風イベントに大きな違いをもたらすことが予想される。そこで、本章では、TC1821 通過時の大阪湾周辺の期間最大風速が、温暖化によってどのように変化するかについて調査した。図 8 は、各数値実験から得られた陸上の期間最大風速の分布図と平野部における期間最大風速がある閾値（ここでは、30、35、40、45 m/s）を超える領域が平野部全体に対して占める割合を比較したものである。

上陸直前の TC1821 の構造変化に対応して、大阪湾周辺の平野部の暴風リスクは、PGW4 run で急激に増大する。期間最大風速が 30 m/s を超える領域は、CTL run では沿岸部の一部地域に限られている。PGW2 run における期間最大風速の増大は、沿岸部を除いて顕著ではない。一方で、PGW4 run では、期間最大風速が 30 m/s を超える領域が大阪湾周辺の平野部に広く出現している。実際、平野部における期間最大風速が 30 m/s を超える領域の

割合は、CTL run に対して PGW2 run が 15%増加、PGW4 run が 60-70%増加と大きな差が生じている。さらに、顕著な暴風（期間最大風速が 45 m/s を上回る）は CTL run ではほとんど確認されなかった一方で、PGW4 run では平野部全体の約 4%の領域において現在気候では経験しなかった暴風が生じている。この結果は、温暖化の進行に伴って、台風が上陸直前にどのような構造を有するのかが、台風通過に伴うローカルな暴風イベントの発現や風速増大を評価する上で重要な情報となり得ることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、WRF を用いた再現実験 (CTL run) と擬似温暖化実験 (PGW2 run と PGW4 run) を実施することで、温暖化が進行した際の 2018 年台風 21 号の強度や構造の変化を調査した。台風強度（中心気圧や最大風速）は、温暖化の進行に伴って、おおよそ気温スケーリングに従って強まる傾向が確認された。一方で、上陸直前の台風の強固な構造の形成に関して、PGW2 run と PGW4 run との間に大きな違いがみられた。PGW2 run の台風構造は CTL run との差が小さい一方で、PGW 4 run は強固な軸対称構造を上陸直前まで維持していた。この原因の一つとして、中緯度の急激な昇温という北西太平洋の温暖化特性が、PGW4 run において一層強調されることで、台風の強固な構造の獲得に有利な環境場（下層湿潤で CAPE 大、中層湿潤で対流抑制小）が中緯度でも出現していたことが考えられる。さらに、上陸直前の台風構造の違いが、両擬似温暖化実験間における大阪湾周辺の台風に伴う暴風リスクに大きな差を生み出す要因になっていると示唆される。

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: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note, National Center for Atmospheric Research, USA, 113 pp.
- Takemi, et al., 2012: A region-al-scale evaluation of changes in environmental stability for summertime afternoon precipitation under global warming from super-high-resolution GCM simulations: A study for

the case in the Kanto Plain. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 189–212.

Yamaguchi et al., 2020: Global warming changes tropical cyclone translation speed. *Nature Communications*, 11, 47.