

大気海洋 3 次元温暖化差分を用いた台風 Haiyan の擬似温暖化実験 Pseudo-Global-Warming Experiments of Typhoon Haiyan using 3-dimensional Future Change of Atmosphere and Ocean

二宮順一*¹, 竹見哲也*², 森信人*²

Junichi NINOMIYA, Tetsuya TAKEMI, Nobuhito MORI

Pseudo-global-warming experiments were conducted for typhoon Haiyan using the 3-dimensional future changes of atmosphere and ocean estimated by CMIP5. The ocean future change in CMIP5 under RCP 8.5 showed that water temperature in the surface mixed layer increases of 2.6 – 2.9 °C, with little change in the current velocity. The series of experiments were conducted using the coupled atmosphere-ocean-wave model COAWST, and the typhoon in the historical climate reproduced the Best Track well. The central pressure of typhoons in the future climate developed about 844 hPa and the maximum wind speed increased about 12 m/s at the time of fully development, compared to the typhoon in the historical climate.

1. はじめに

IPCC 第 6 次評価報告書 (IPCC AR6) では, 過去においては強度の強い熱帯低気圧の増加傾向と, 強度ピークの北への遷移が中程度の確信度にあること, 将来予測においては非常に強い熱帯低気圧の割合の増加が高い確信度にあることが指摘された。これは, 台風による日本の風水害リスクの増大を意味し, 災害被害の拡大が懸念される。

高潮について, 国土交通省は高潮浸水想定区域図作成の手引きをとりまとめ, 既往最大台風を用いた高潮シミュレーションによってその想定浸水範囲を検討するよう求めている。また, この想定では擬似温暖化実験などの最新の知見を活用するように定められており, 防災施設の更新計画ではすでに 2100 年頃の将来環境を想定することが必要な時期となっている。

最大規模の台風予測のため, 領域気象モデルを用いた擬似温暖化実験が行われている。擬似温暖化実験は, 領域気象モデルに鉛直分布を含めた大気の 3 次元情報と海面水温に温暖化差分を加えた方法 (例えば, Nayak and Takemi, 2020 や Tsuboki et al., 2015) で一般的に行われている。海岸工学分野においても同様の検討が行われており, 単体の気

象モデルに大気温暖化差分と海面水温の温暖化差分を用いる方法 (例えば, 豊田ら, 2018), 大気海洋結合モデルに海面水温の温暖化差分を海洋混合層に与える方法 (例えば, Nakamura et al., 2020 や Kanada et al., 2021) が取られている。しかし, 台風の強風下における海洋の強混合状態においては, 水温の鉛直分布が大気への熱のフィードバックに影響するため, 海水温分布の変化が重要である。

そこで本研究では, CMIP5 データから 3 次元の大気および海洋の温暖化差分を抽出し, 海洋表層水温の将来変化を解析する。そして, 台風 Haiyan を対象にして大気・海洋に 3 次元の温暖化差分を加えた擬似温暖化実験を行う。この擬似温暖化実験により, 土木工学的に整合性の高い将来気候場における台風に関する知見を得ることを目的とする。

2. 研究手法

本研究で用いる大気海洋波浪結合モデル, 使用データ, 擬似温暖化実験手法について説明する。

2. 1. 大気海洋波浪結合モデル

*1 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 jnino@se.kanazawa-u.ac.jp

Faculty of Geosciences and Civil Engineering, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

*2 京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本研究では、大気海洋波浪結合モデル COAWST (Warner et al., 2010. Coupled – Ocean – Atmosphere – Wave – Sediment Transport) Revision 1318 をベースに、研究グループで独自に地球シミュレータでの最適化を施したモデルを用いる。高速化によって生じる誤差は微小であることを確認している。COAWST は大気海洋波浪間で双方向の結合が可能なモデルであり、大気モデルに WRF, 海洋モデルに ROMS, 波浪モデルに SWAN を使用している。

2. 2. 使用データ

陸上および海底地形は GEBCO を線形補間して作成する。ROMS の σ 座標では水深が大きくなるほど表層の解像度が低下すること、本研究の短期積分では深海の影響は小さいことから、水深を 2000 m までに制限する。初期値・境界値には、大気に NCEP FNL (1 度メッシュ, 6 時間間隔) を、海洋に SODA v3.4.2 (Carton et al., 2018. Simple Ocean Data Assimilation ocean/sea ice reanalysis. 1/4 メッシュ, 5 日間隔) を与える。NCEP FNL は WRF の Spectral Nudging の背景場としても使用する。温暖化差分は CMIP5 のうち Historical と高位参照シナリオの RCP8.5 の両実験が実施され、大気の大気圧、ジオポテンシャルハイト、気温、東西・南北

表 1: 大気・海洋・波浪モデルの設定

	ROMS	SWAN	WRF D1	WRF D2
H. Res.	3 km	3 km	3 km	1 km
H. Grids	1334 x 667	1334 x 667	1334 x 667	2002 x 703
V. Grids	40	—	56	56
Frequency	—	0.05-0.5 Hz 24 bin	—	—
Wave Dir.	—	36	—	—

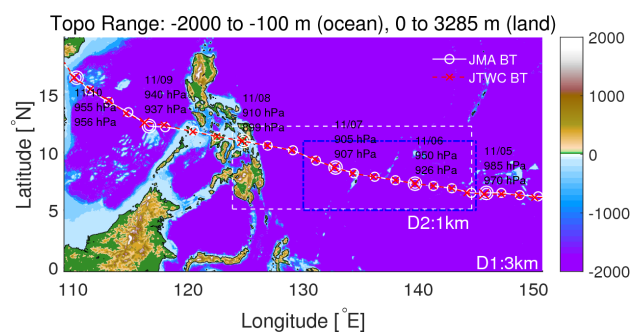


図 1: 大気海洋波浪結合モデルのドメイン (表示領域: D1 (3 km 解像度), 白破線: D2 (1 km 解像度), 青破線: 温暖化差分の解析領域, ○付き白線: JMA BT, ×付き赤破線: JTWC BT, 数値は日付, 0 時における JMA BT, JTWC BT の中心気圧)

風および海洋の水温、塩分、東西・南北流速にアクセス可能な全 28 モデルの予測結果を用いる。

台風の解析値として、気象庁 Best Track (以下, JMA BT) と Joint Typhoon Warning Center による Best Track (以下, JTWC BT) を用いる。これらの最大風速は、JMA BT が 10 分平均風速, JTWC BT が 1 分平均風速を示している。

2. 3. 過去再現実験 (Historical)

大気・海洋・波浪の各モデルの計算条件を表 1 に、計算ドメインを図 1 に示す。WRF のみ、台風急発達域を対象にしたドメインを設定し、two-way ネスティングを適用する。計算期間は 2013 年 11 月 5 日 0 時 (本論文での時刻は全て UTC) からフィリピン通過後の 10 日 0 時までとし、モデル間の物理量の交換は 10 分毎とする。WRF の物理モデルは、雲微物理に WSM 6-class graupel, 長波放射に RRTM, 短波放射に Dudhia, 接地境界層に Revised MM5 Monin-Obukhov, 地表面に Thermal diffusion, 惑星境界層に YSU を適用する。積雲、都市キャノピーモデルは使用していない。初期値に台風ボーガスを含め、Spectral Nudging を D1 の高層にのみ適用する。また、海面抵抗係数の推定には波形勾配の関数である Taylor and Yelland (2001) の式を用いる。

2. 4. 擬似温暖化実験 (Future)

Future 実験における結合モデルの計算は Historical 実験と同様の計算条件で行い、初期値・境界値の入力データは、CMIP5 の 28 モデルから求められる温暖化差分を上乗せして作成する。温暖化差分は、CMIP5 の Historical 実験のうち 1979 - 2003 年, RCP 8.5 実験のうち 2075 - 2099 年の各 25 年間の月別平均値の差とする。全 28 モデルのアンサンブル平均を C0 (Future C0), 海面水温分布に基づく CMIP5 モデルのクラスター解析結果 (Mizuta et al., 2014) から得た C1 から C3 の 3 ケース (Future C1 - C3) を含めた全 4 種の温暖化差分データを作成する。アンサンブル平均時にモデルによって空間解像度が異なるため、本研究では水平解像度 1.125 度に内挿したデータを用いる。

図 1 青破線内で領域平均した大気と海洋の温暖化差分の鉛直分布を図 2, 3 に示す。気温、水温の将来変化が大きい一方で、風速や流速の変化は小さいことを示している。海面付近の気温上昇は約 3°C から 8°C の幅を持つ。地表付近で相対的に弱い

気温上昇傾向を示す C1 および C3 と、強い気温上昇傾向を示す C2，さらにそれらの中央に位置する C0 は、高度約 200 hPa でその順序が入れ替わる分布を示す。東西風・南北風には大きな将来変化は見られなかった。

海水表層では気温ほどの上昇はなく、表層から混合層厚に相当する水深約 40 m まで一様に 2.6 から 2.9°C の水温上昇を示し、混合層内では CMIP5 の全モデルで上昇傾向を示している。海面水温温暖化差分の分布はどのケースも北でやや大きくなる傾向があるが、東西方向の変化は小さい。台風発達に寄与する 26°C 以上の熱エネルギー-Tropical Cyclone Heat Potential (TCHP) は CMIP5 Historical で SODA より約 10 % 小さく評価されているが、おおよそ妥当な結果を得た。TCHP の温暖化差分は混合層全体の水温が上昇していること、26°C に到達する水深が大きくなっていることから Future において +132% と大きく増大し、台風がより発達しやすい環境であることがわかる。混合層下部の水深 100 m から 300 m でケース間の分布に大きな差が生じており、特に C2 では水深約 200 m で水温低下に転じている。当該の水深帯では標準偏差が大きく、混合層からの水温低下傾向を含めてモデル間のばらつきが大きい領域となっており、不確実性が高い。塩分は表層で低下傾向にあることが確認できた。

3. 結果

Historical, Future 実験で推定された台風経路を図-6 に示す。黒線で示される BT には大きな差はなく、全実験結果においても経路のばらつきは小さいことが確認できる。これは台風の移動に影響しうる対流圏（約 200 hPa より下の領域）では、東西風および南北風の温暖化差分が小さいことによる。一方で、台風の中心気圧の時間変化（図-7 上段）は、Historical で 11 月 5 日 6 時から 7 日 0 時までの急発達をよく再現している。Historical では 7 日 6 時頃まで発達を続けて最発達時には 878 hPa に達し、BT（最発達時 895 hPa）に比べてやや過剰に発達している。その後、8 日 0 時から陸地の影響を受けて急速に衰退していく過程も BT と

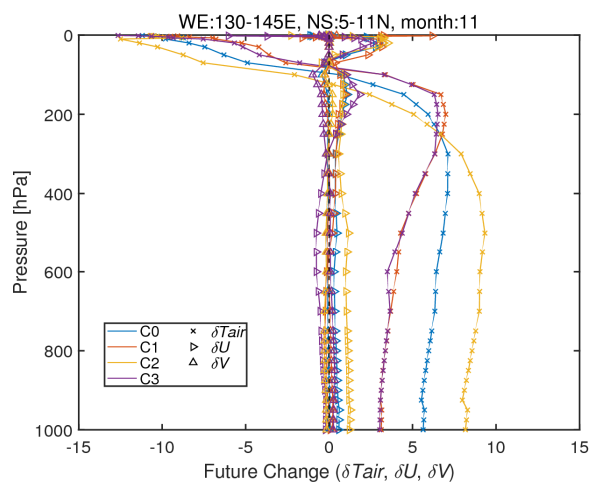


図 2：大気の温暖化差分鉛直分布（色：クラスター別，×付き：気温 [K]，□付き：東西風 [m/s]，△付き：南北風 [m/s]）

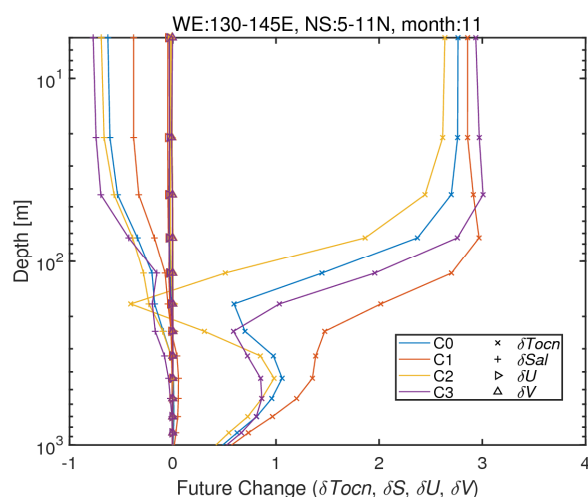


図 3：海洋の温暖化差分鉛直分布（色：クラスター別，×付き：水温 [K]，+付き：塩分 [PSU]，□付き：東西流 [m/s]，△：南北流 [m/s]）

よく一致しており、全体として再現性は高いと判断できる。これに対して Future C1 と C2 では 5 日 18 時から、C0 と C3 では 6 日 12 時から Historical を上回る早さで発達していき、最発達時は平均で 844 hPa に達した。4 ケースという少ないサンプル数では、急発達のタイミングや最発達時の中心気圧と温暖化差分には線形な関係性は見られなかった。

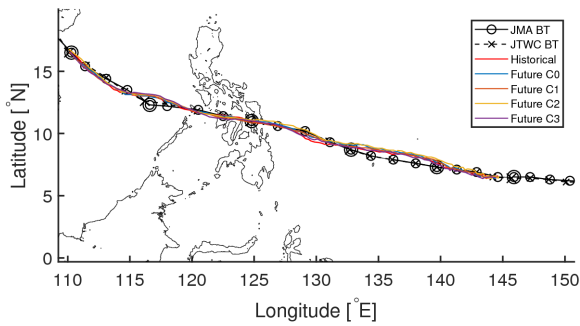


図 6：大気海洋波浪結合モデルによって推定された台風経路（黒線：BT，赤線：Historical，他実線：Future）

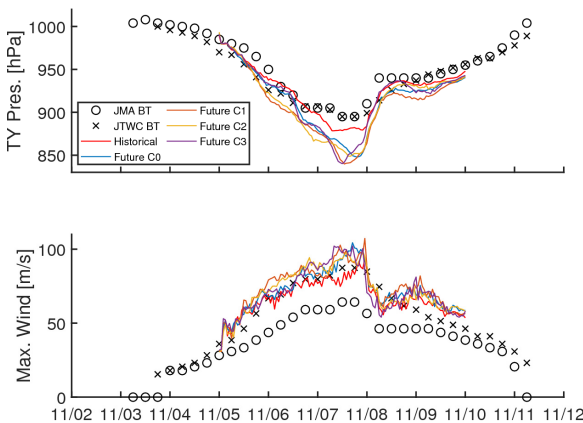


図 7：推定された台風の中心気圧（上段）と最大風速（下段）の時間変化（記号および色は図 6 と同じ）

台風の最大風速の時間変化（図-7 下段）は、Historical で JTWC BT をよく再現した（図-8）。JTWC BT と Historical の対応関係は相関係数が 0.91 と先行研究（例えば、豊田ら、2016、Nakamura et al., 2016）と同等もしくはそれ以上によく一致している。台風上陸上陸以降の変動には大きな差異が見られるが、台風中心および周辺部での雲パターンが乱れることから BT にも誤差を含むものと考えられる。JMA BT に対して Historical は 20 m/s 程度過大評価となっているが、相関係数は 0.90 と良い結果を得ている。誤差評価では BT ごとに大きく異なった結果となったが、両者ともドボラック法による推定値であるため統計量の差によるものと考えられる。Future では中心気圧が低くなり台風が強くなったことから、発達期には約 8 m/s、最発達時には約 12 m/s、衰退期には約 4 m/s 大きく推定された。強風ハザードが強化される結果を得た。台風を対象にした既往の擬似温暖化研究では、現在気候と同程度もしくは強化される結果が多く報告されており、本検討もそれらと一致する

ものであった。

4. まとめ

本研究では、CMIP5 海洋データから 3 次元の現在・将来気候データを抽出し、全体のアンサンブル平均および海面水温分布に基づく 3 つのクラスター平均の温暖化差分データセットを作成した。台風 Haiyan 発達域における発生月の温暖化差分データを解析し、台風 Haiyan の過去再現実験および 4 種の温暖化差分を上乗せした擬似温暖化実験を実施した。再現実験では台風中心気圧の急発達をよく再現し、最発達時においてもおおよそ妥当な結果を得た。最大風速は JTWC の BT データとよく一致した。擬似温暖化実験では、再現実験に比べて最発達時で約 34 hPa 中心気圧が低下し、最大風速は約 12 m/s 上昇した。温暖化差分と台風強度の対応は不明瞭であったが、台風ハザードの強化が示された。

謝 辞

本研究は文部科学省の統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ D「統合的ハザード予測」JPMXD0717935498 及び（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費 2-1712、JSPS 科研費、地球シミュレータ公募課題の助成を受けて実施されました。ここに記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- Nayak, S. and Takemi, T., 2020: Robust responses of typhoon hazards in northern Japan to global warming climate: cases of landfalling typhoons in 2016: Meteorol Appl., 27:e1954.
- Tsuboki, K., Yoshioka, M. K., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., and Kitoh, A., 2015: Future increase of super-typhoon intensity associated with climate change, Geophys. Res. Lett., 42, 646–652.
- 豊田将也, 吉野純, 小林智尚, 2018: 日本に上陸する台風の強度に関する将来変化の統計的特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 74 巻, 2 号, pp. I_1339-I_1344.
- Nakamura, R., Shibayama, T., Esteban, M., Iwamoto, T. and Nishizaki, S., 2020: Simulations of future typhoons and storm surges around Tokyo Bay using IPCC AR5 RCP 8.5 scenario in multi global climate models, Coastal Engineering Journal, 62:1, 101-127.

- Kanada, S., Aiki, H., Tsuboki, K. and Takayabu, I. , 2021: Future Changes of a Slow-Moving Intense Typhoon with Global Warming: A Case Study Using a Regional 1-km-mesh Atmosphere–Ocean Coupled Model, SOLA, 2021, 17A, Special Edition, pp. 14-20.
- Warner, J.C., Armstrong, B., He, R., and Zambon, J.B. , 2010: Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system: Ocean Modeling, v. 35, no. 3, pp.230-244.
- Carton, J.A., Chepurin, A.G. and Chen, L. , 2018: SODA3: a new ocean climate reanalysis, J. Climate, 31, pp.6967-6983.
- Taylor, P.K. and Yelland, M.J. , 2001: The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, J. Phys. Oceanography, Vol.31, No.2, pp.572-590.
- Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A. , 2014: Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes, SOLA, Vol.10, pp. 167-171.
- 豊田将也, 吉野 純, 小林智尚, 2016: タイフーン・ハイエンの最大風速に関する再現実験と擬似温暖化実験, 風工学シンポジウム論文集, 24 巻, p. 103-108.
- Nakamura, R., Shibayama, T., Esteban, M. and Iwamoto, T. , 2016: Future typhoon and storm surges under different global warming scenarios: case study of typhoon Haiyan (2013), Natural Hazards, 82, pp.1645–1681.