

Impact Assessment of Future Storm Surge due to Typhoon Vera as Revealed by Pseudo-global Warming Experiments

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-05-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00049529

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



伊勢湾台風 of 擬似温暖化実験による 将来高潮の予測

二宮順一¹・森 信人²・竹見哲也²・荒川 理³

¹正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: jnino@se.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-1192 京都府宇治市五ヶ庄)

³筑波大学 生命環境系 (〒 305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

水平解像度 20 km の MRI-AGCM3.2S による SST アンサンブル実験結果から海面温度, 気温, 気圧の将来変化量を見積り, JRA-55 に将来変化量を上乘せすることで擬似温暖化環境を作成し, JRA-55 と擬似温暖化環境を初期・境界値として伊勢湾台風を対象とした力学的ダウンスケーリングを行い台風と高潮の将来変化について検討した. その結果, 海面温度を考慮するだけでは過度に強い台風(中心気圧で約 40 hPa の低下)を推定し, 気温, 気圧を考慮することで台風の中心気圧が現在気候に比べて約 10 hPa 小さくなること, 台風経路が西へシフトすることを確認した. ダウンスケーリング結果から台風情報を抽出して経験的台風モデルによる高潮計算を行った結果, 将来気候下では平均して約 26 cm の高潮偏差の上昇が推定された.

Key Words: pseudo-global warming, dynamical downscaling, storm surge, Vera, WRF, SuWAT, JRA-55

1. はじめに

現在では, 気候変動に伴った地球環境の変化について多くの研究がなされており, IPCC 第 5 次報告書においては熱帯低気圧の数は減少傾向にあるが, 強度や最大風速, 降水強度増大の可能性が報告されている. これは, 台風の上陸, 接近に伴った高潮リスクの増大を意味しており, 高潮浸水被害の拡大が懸念される. 沿岸防災では長期的な防災施設計画とするため, より確実性の高い予測が必要とされている. 高潮の将来変化予測は沿岸部の被災リスク低減のための重要な課題である.

高潮リスクについて, 可能最大規模の予測や将来の強大な台風による高潮について検討されている. 安田ら¹⁾は, 5 km 解像度の気象モデルによる将来予測結果から高潮の再現確率が短くなることを指摘しており, 吉野ら²⁾は伊勢湾を対象として可能最大強度の台風による高潮の将来変化予測を行っている. また, 澁谷ら³⁾は伊勢湾台風の経路変化に着目した可能最大高潮に関する検討を行っている. 高潮将来予測の研究は, 全球モデルの選択や将来シナリオの設定など様々な条件設定を取りうる. これまでの研究では, 水平解像度が 60 km 以上の全球モデルをベースとした研究が多く, この解像度のモデルでは高強度の台風の再現は難しいことが指摘されている. 近年では, 20 km 解像度の全球モデルを用いた検討も行われており, 台風の将来変化をモデルの出力結果から直接的に利用することが可能にな

りつつある.

本研究では, 伊勢湾台風を対象として, 水平解像度 20 km の MRI-AGCM3.2S (Meteorological Research Institute Atmospheric General Circulation Model) による海面水温 (SST (Sea Surface Temperature)) アンサンブル実験結果に基づく, 海面水温以外の気候条件の将来変化も考慮した擬似温暖化実験を行い, 台風, 高潮の将来変化予測を行う. これにより, 擬似温暖化実験として海面水温の上昇だけを考慮した過度で非現実的な台風強化を抑制するとともに, 考慮するパラメータに依存する将来変化について検討する. また, 複数の海面水温分布下における予測結果を用いることで, 海面水温分布に依存した台風将来変化の不確実性を低減する試みである. 高潮将来変化予測では台風の力学的ダウンスケーリング結果を直接用いた計算によって, 擬似温暖化台風により引き起こされる高潮の詳細な推定を行うとともに, 経験的台風モデルを併用した計算により擬似温暖化による台風経路変化の影響を取り除いた将来変化の推定を行う.

2. 研究概要

本研究では, 伊勢湾台風を対象として現在気候下, 将来気候下での気象モデルによるダウンスケーリングを行い, その結果を用いた高潮モデルによる高潮計算から高潮の将来変化について検討する. 気象モデルには MM5 (5th generation Mesoscale Model) の後継モデルである

WRF (Weather Research and Forecasting Model⁴⁾) を用いる。WRF は前処理であるグリッドや初期・境界値の作成が容易に行えることや、計算結果を netCDF 形式で出力することにより、気象分野以外の研究者にも積極的に用いられるようになってきている。また、高潮モデルには SuWAT (A coupled model of Surge, WAve and Tide⁵⁾) を用いる。SuWAT は高潮と波浪計算を結合して計算することが可能なモデルであるが、本研究では波浪計算を含めておらず、氾濫・遡上計算や河川流入の影響も含んでいない。以降では、現在気候実験、将来気候実験、高潮計算の方法について述べる。

(1) 現在気候下の台風ダウンスケーリング

現在気候実験 (以下、Pre 実験 (Present)) は、JRA-55 (Japanese 55-year reanalysis⁶⁾) を用いた WRF により行われる。JRA-55 は水平解像度 1.25 度の再解析値であり、その精度、ダウンスケーリングにおける信頼性は二宮ら⁷⁾にて確認済みである。WRF の計算条件は、表-1 に示すとおりで、Spectral Nudging を適用し、台風ポーガスを初期値に埋め込んでいる。計算ドメインは日本南沖からの第 1 ドメイン⁷⁾ と、伊勢湾周辺の第 2 ドメインを設定して 2-way nesting で接続されている。第 1 ドメインは伊勢湾台風の発達過程を解像して再現性を高めるため、第 2 ドメインは伊勢湾周辺における地形の影響を考慮するために設定している。しかし、計算条件によって台風経路が観測値である Best Track から大きく外れるため、第 2 ドメインの結果は本検討に用いていない。

(2) 将来気候下の台風ダウンスケーリング

将来気候実験 (以下、PGW 実験 (Pseudo-Global Warming: 擬似温暖化)) は、MRI-AGCM3.2S⁸⁾ (水平解像度 20 km) による SST アンサンブル実験結果から得られる将来変化量を、JRA-55 に上乗せした力学的ダウンスケーリングにより行われる。SST アンサンブル実験は現在気候及び RCP (Representative Concentration Pathways) 8.5 における CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Phase 5) データから得られる 4 種の SST 将来変化パターン⁹⁾ を境界条件としたタイムスライス実験である。この SST アンサンブル実験から得た将来変化量のうち、将来変化の小さい湿度と台風経路に直接的に影響を与える風速を除く、SST、気温 (T)、気圧 (P) の将来変化量を JRA-55 に上乗せ (Case C0 から C3。C0 はアンサンブル平均、C1 から C3 は代表的なクラスター 3 種による将来変化) する。日本周辺域における表面温度、地上気温、海面更正気圧の将来変化量を図-1 に示す。将来変化の分布パターンの違いを明確にするため C1 から C3 は C0 との差を示す。JRA-55 に将来変化を上乗せしたデータを初

表-1 気象モデル WRF の計算条件

項目	設定内容 (domain 1, 2)
計算期間	1959 年 9 月 22 日 0 時から 1959 年 9 月 27 日 0 時 (UTC)
水平解像度	5 km, 1 km
水平格子数	976x831, 401x401
鉛直層数	56
dt	20 s, 4 s
微物理	WSM 6-class
短波放射	RRTMG
長波放射	RRTMG
接地境界	Revised MM5 Monin-Obukhov
惑星境界	YSU
地表面	5-layer thermal diffusion
雲物理	Kain-Fritsch (domain 1 のみ)
都市	w/o
地形	USGS GTOPO30
土地利用	
Nudging	Spectral Nudging (domain 1 に波数 2, 約 700 hPa より上層のみ適用)
台風ポーガス	domain 1 の初期時刻に導入

表-2 実験ケース一覧 (SST: 海面温度, T: 気温, P: 気圧)

Case Name	与えた将来変化 パラメータ	最低中心気圧 [hPa]
Best Track	w/o	895
Pre	w/o	901.8
C0 SST	SST	859.7
C0 SST/T	SST, T	889.4
C0 SST/T/P or C0	SST, T, P	893.0
C1	SST, T, P	894.7
C2	SST, T, P	891.3
C3	SST, T, P	891.2

期・境界条件として、WRF による力学的ダウンスケールを行う。また、考慮するパラメータに対する依存性を検討するため、SST (Case C0 SST)、SST・T (Case C0 SST/T)、SST・T・P (Case C0 SST/T/P) を考慮した 3 種の PGW 実験を行う。Pre、PGW 実験の実験ケースを表-2 にまとめ、最低中心気圧を同時に示す。

(3) 高潮計算

Pre、PGW 実験により得られた気圧、風を外力として SuWAT による高潮計算を行う。SuWAT の計算条件は澁谷ら³⁾を参考に定めており、表-3 にまとめ、計算ドメインを図-2 に示す。地形データは中央防災会議地

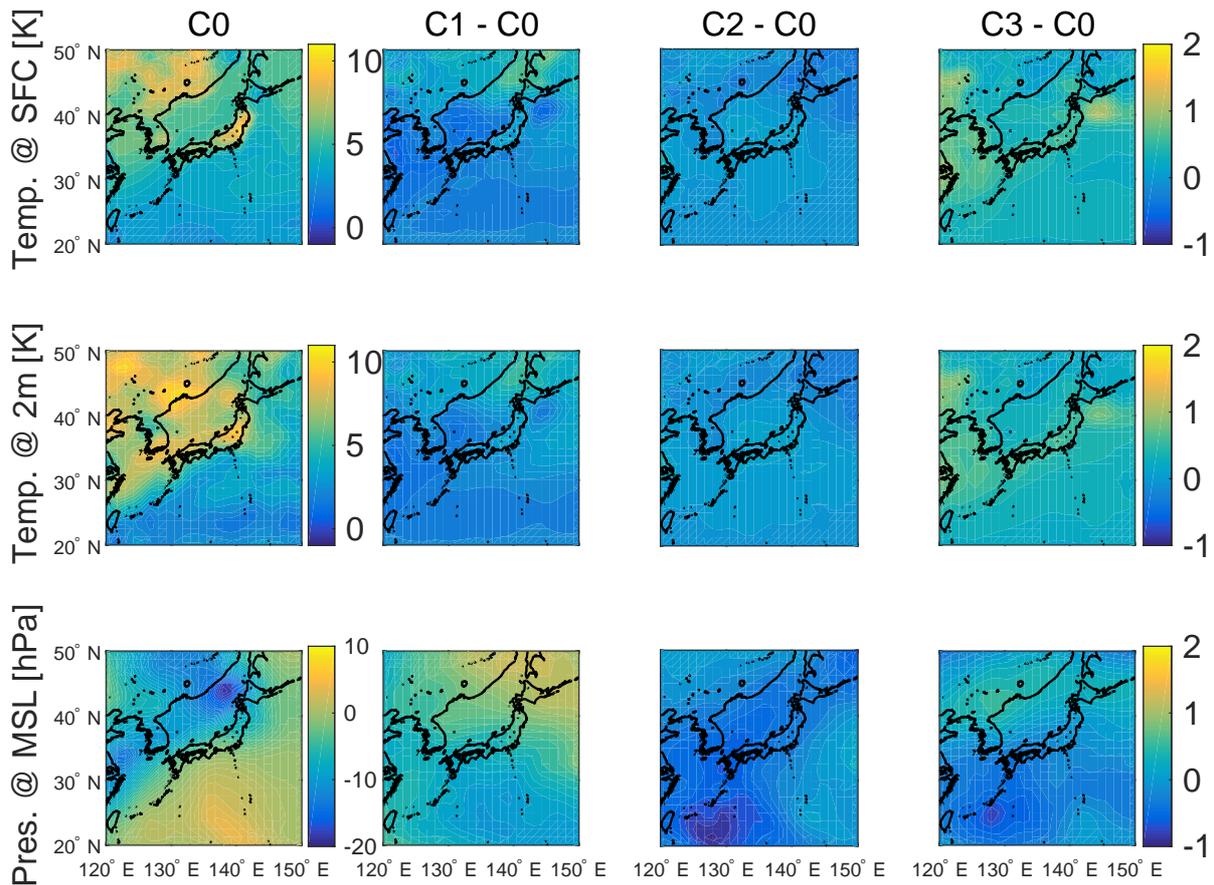


図-1 SST アンサンブル実験における表面温度 [K]，地上気温 [K]，海面更正気圧 [hPa] の将来変化量（左から C0，C1-C0，C2-C0，C3-C0，上段から表面温度，地上気温，海面更正気圧）

形データをもとに作成した．高潮偏差は，名古屋港地点での観測値及び赤塗り白丸で示す domain 3 の計算値と比較する．高潮計算では台風経路が大きく影響し，後述するように PGW 実験では台風経路が西にシフトするため，ダウンスケーリング結果を直接用いた場合には伊勢湾でほとんど高潮が発生しない．そこで，1) 力学的ダウンスケーリング結果を直接用いる場合，2) 力学的ダウンスケーリング結果から台風中心位置を求めて，同緯度の Best Track 位置に一致するように東へシフトさせた場合，3) 力学的ダウンスケーリング結果から台風の位置，強度を求めて，同緯度の Best Track 位置で経験的台風モデル¹⁰⁾を用いた気圧・風場を定義した場合について検討する．

3. 結果

(1) 擬似温暖化実験における台風の変化

将来変化パラメータの違いによる台風中心気圧，最大風速，最大風速半径の比較を図-3 に示す．Pre 実験では経路同様に中心気圧が良く再現できている．PGW 実験では，SST の将来変化だけを考慮した Case C0 SST では最低中心気圧は約 865 hPa まで発達し，極端に強い台風を想定していることが確認できる．Case C0 SST/T，

表-3 高潮モデル SuWAT の計算条件

項目	設定内容 (domain 1, 2, 3)
計算期間	1959 年 9 月 24 日 18 時から 1959 年 9 月 27 日 0 時 (UTC)
水平解像度	7290 m, 2430 m, 810 m
格子数	240x180, 228x213, 201x180
潮汐	w/o
海面抵抗	Mitsuyasu and Honda ¹¹⁾ ただし， $U_{10} \geq 30$ m/s では一定

SST/T/P では最低中心気圧は約 890 hPa となっており，T 及び P を考慮した PGW 実験においても Pre 実験の約 902 hPa と比較して温暖化により台風が強化されている．また，最低中心気圧には気圧の将来変化を考慮する影響は小さい．Case C0 SST/T，SST/T/P の中心気圧の時間変化にあまり違いはないが，台風が上陸して数時間経過した 26 日 12 時以降で強度に差が生じる．この傾向は他の C1 から C3 の実験でも同様の結果が得られており，P を考慮した将来気候下では高緯度における台風の衰退が緩やかになることが示唆される．台風の衰退が緩やかになる傾向は高潮偏差にも影響を与えることが予想され，伊勢湾台風であれば，現在気候に比

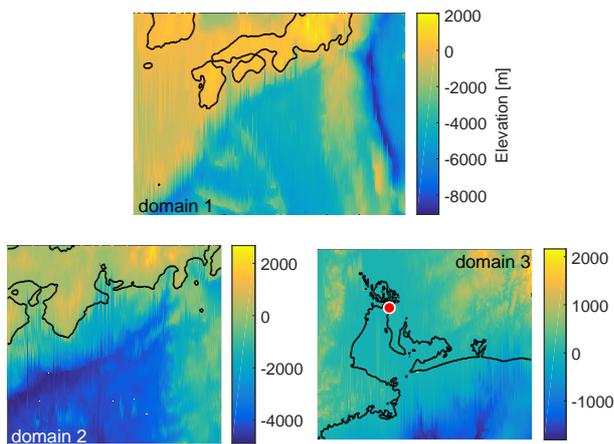


図-2 SuWAT の計算ドメイン

べて紀伊半島上陸後に強度を維持したまま伊勢湾に最接近することが考えられる。

最大風速は中心気圧と同様の強度変化があり、中心気圧が小さい程、最大風速が大きくなる。しかし、先ほど中心気圧であったような高緯度における Case C0 SST/T/P の強度を維持する傾向は最大風速にはあまり見られない。最大風速半径は時々刻々のバラつきが大きく、考慮するパラメータによる影響は確認できない。

図-4 に Pre 実験及び PGW 実験での伊勢湾台風経路の比較を示す。Pre 実験における台風経路はほぼ Best Track と一致しているが、台風の移動にはやや遅れがある。一方で、PGW 実験では約 100 から 150 km 西へシフトしており、これは Ito et al.¹²⁾ による同様の手法を用いた異なる台風での実験結果と一致する結果である。

図-5 に SST 将来変化パターンの違いによる台風中心気圧、最大風速、最大風速半径の緯度に対する変化を示す。黒丸が Best Track、青実線が Pre 実験結果、他の 4 色の実線が PGW 実験結果を示している。Pre 実験では北緯 20 度以上の範囲で良好に再現できている。表-2 から、Pre 実験と PGW 実験の最低中心気圧の差は約 9 hPa とそれほどの強拡大は確認できず、また、台風の最発達期が約 5 度北へ移動していることが確認できる。一方で、C0 から C3 のどのケースにおいても北緯 25 度以上の領域で約 20 hPa 強い台風が推定されており、日本上陸付近での台風強度変化は最発達期の強度変化に比べて大きく変化することがわかる。この台風強度の変化は日本沿岸域の災害リスクの増大を示唆している。

最大風速でも同様に北緯 25 度以上の領域で約 10 m/s 大きく推定されている。北緯 33 から 35 度で Pre 実験結果と PGW 実験結果の台風強度が接近しているが、これは台風経路の違いによる上陸緯度が異なることが要因である。最大風速半径には将来変化傾向は見られない。

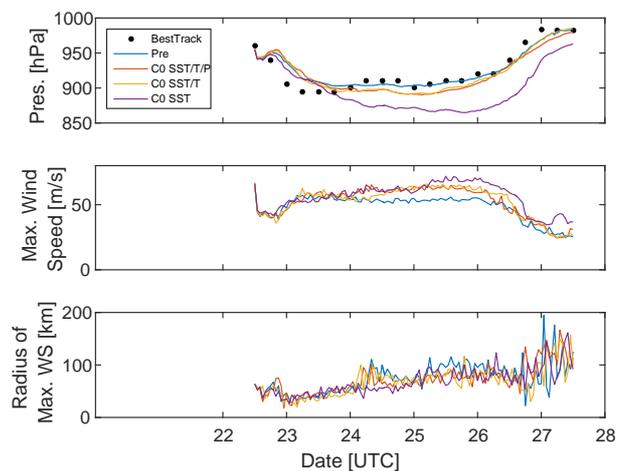


図-3 考慮する将来変化パラメータの違いによる台風の中心気圧、最大風速、最大風速半径の時間変化

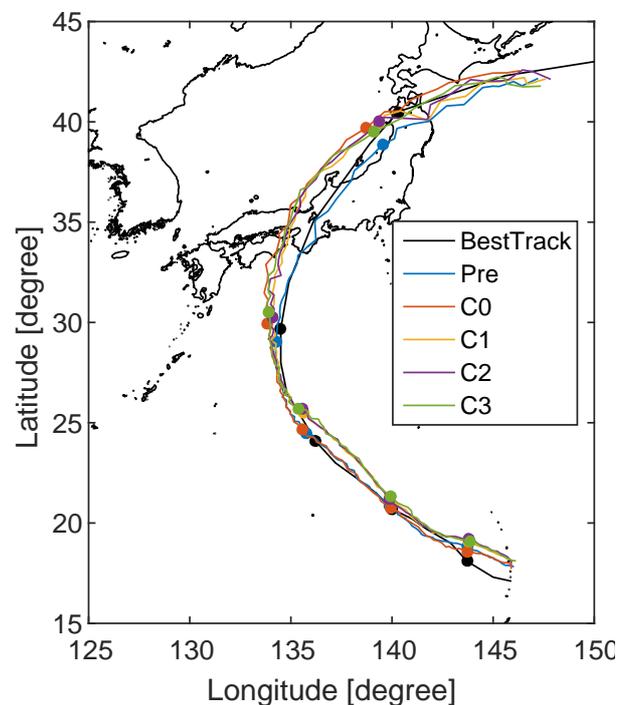


図-4 Best Track, Pre 実験および PGW 実験における台風経路の比較

(2) 将来気候下の台風による高潮

名古屋港地点における高潮偏差の観測値及び Pre・PGW 実験の第 1 ドメインの結果を用いた高潮計算結果の時間変化を図-6 に示す。Pre 実験結果から、Best Track に比べて台風移動の遅れの影響と、解像度の粗さに起因する高潮偏差の過小評価が確認できる。一方、PGW 実験結果では台風が伊勢湾を直撃する経路から西へシフトしているため、台風自体の強化は確認されたが、名古屋港での高潮偏差は小さくなることわかる。

次に、台風経路を Best Track と一致させた場合の高潮を評価する。力学的ダウンスケーリングによる台風位置が Best Track と一致するように東方向にシフトさ

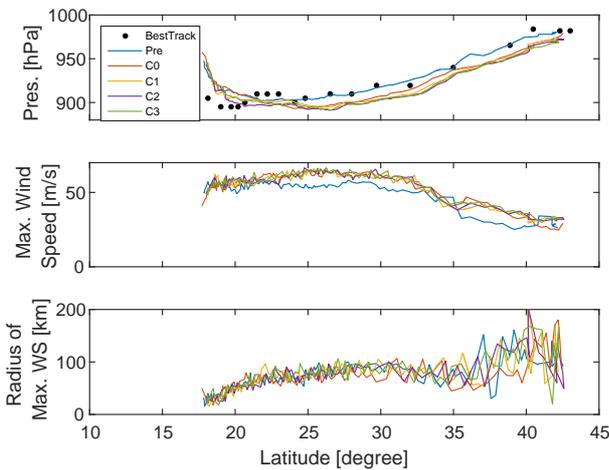


図-5 SST 将来変化パターンの違いによる台風の中心気圧，最大風速，最大風速半径の緯度変化

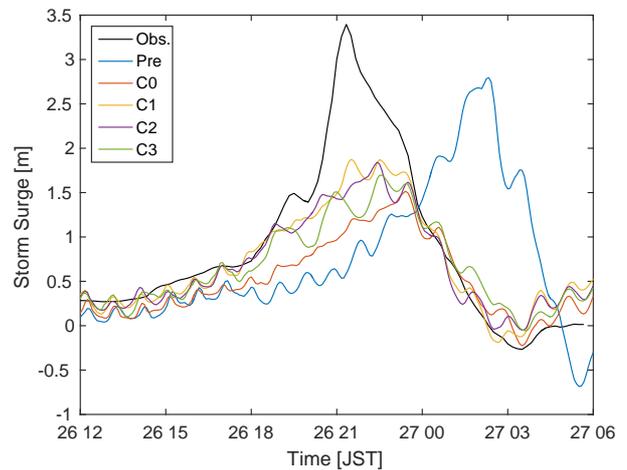


図-6 名古屋港地点における高潮偏差の観測値及びPre・PGW 実験結果に基づく高潮計算結果の比較

せた気圧・風場による名古屋港における高潮偏差の時間変化を図-7 に示す．Pre 実験での再現性向上が認められる．PGW 実験を直接用いた高潮計算からは将来高潮偏差が小さくなるように推定されているが，台風経路の違いに起因する台風周りの風速場の変化が大きく影響していることが考えられる．具体的には，PGW 実験では台風経路が西へシフトしたために同緯度での計算結果を東へシフトさせたが，結果として山間部での地上風を伊勢湾周辺域に与える結果となった．地上部は海上部に比べて粗度が大きく，地上風速を小さく見積もるためにこのような結果になったと考えられる．

力学的ダウンスケーリング結果から台風強度等の情報を抽出して，Best Track 位置に経験的台風モデルから与えられる気圧・風場を用いて高潮計算した結果とこれまでの結果を合わせて最高高潮偏差及びその時刻の偏差を図-8 に示す．四角は力学的ダウンスケーリングを直接用いた場合，三角は Best Track に合うように力学的ダウンスケーリングを東西方向にシフトさせた場合，アスタリスクは経験的台風モデルで気圧・風を与えた場合を示し，青，赤，黄，紫，緑は Pre，C0 から C3 の結果をそれぞれ示す．経験的台風モデルを用いた結果に注目すると，擬似温暖化による台風強度の増大によって高潮偏差は大きくなるのがわかる．Pre 実験でも PGW 実験でも最大風速半径にほとんど違いがないため，同じ時刻にピークを迎えている．力学的ダウンスケーリング結果を用いた結果から，再現性の高い現在気候下台風ダウンスケーリングを行ったが，少しの経路のズレから高潮偏差が大きく変わることがわかる．PGW 実験では台風経路が約 1.5 度西へシフトしたため，経路シフトが大きくなるほど高潮偏差が小さくなる結果となった．

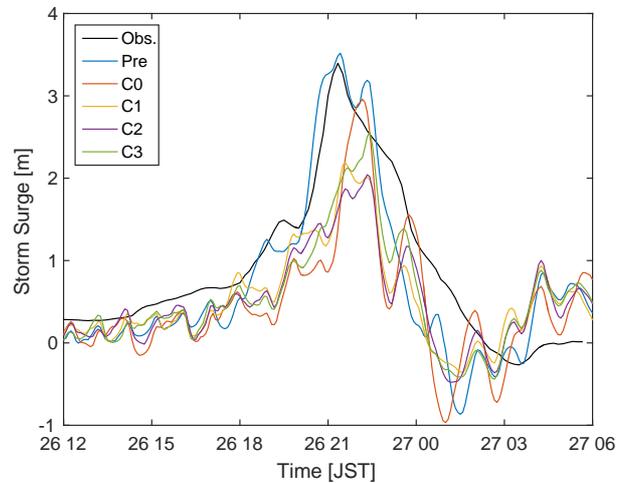


図-7 力学的ダウンスケーリングによる台風位置を Best Track と一致するように東方向にシフトさせた気圧・風場による高潮偏差の時間変化

4. 結論

伊勢湾台風ダウンスケーリングを行い，Ito et al.¹²⁾ と同様に MRI-AGCM3.2S による SST アンサンブル実験から将来変化を与えて，現在気候下，将来気候下における伊勢湾台風の力学的ダウンスケーリングを行った．ダウンスケーリング結果及び経験的台風モデルから気圧・風場を与えて SuWAT による高潮計算を行った．その結果，PGW 実験では SST だけを考慮する実験では過剰に強い台風を想定することを，SST と T を考慮することで過剰な発達を抑制することを，SST と T と P を考慮することで高緯度においても台風強度が維持されることを示した．また，台風経路は 4 種の SST パターン全てで西にシフトすることが確認された．Pre 実験では台風移動の遅れの影響を取り除いて高潮モデルに与えると，精度良く高潮偏差を計算できることを確認した．PGW 実験の力学的ダウンスケーリングを用いた高潮計算では経路シフトの影響が大きく，適切な評価は

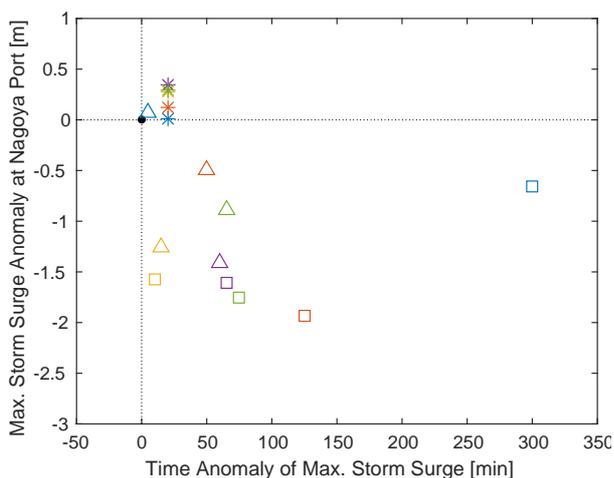


図-8 観測値に対する高潮計算結果の最大高潮偏差及びその時刻の偏差（四角：直接ダウンスケーリング結果，三角：東へシフトさせたダウンスケーリング結果，アスタリスク：経験的台風モデル，青：Pre 実験，赤，黄，紫，緑：それぞれ C0，C1，C2，C3）

困難であった。経験的台風モデルを用いた評価により，PGW 実験のアンサンブル平均から約 26 cm の高潮偏差の上昇が推定された。

擬似温暖化による台風経路のシフトとこれに関連する高潮偏差の鋭敏性は，力学的ダウンスケーリングによる高潮リスク評価の難しさを示している。将来発生する可能性のある強大な台風による高潮を湾スケールで評価するには，台風渦位ポアガスと組み合わせた総当りの手法¹³⁾ や確率台風モデルと力学的ダウンスケーリングを組み合わせた新たな手法が有効だと考えられる。

謝辞： 本研究の一部は，文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム及び科研費補助金による成果である。

参考文献

- 1) 安田誠宏，片平成明，森信人，澁谷容子，間瀬肇：非静力学領域気候モデルによる気候変動予測結果を用いた日本沿岸における高潮の将来変化予測，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.L1261-L1265，2013。

- 2) 吉野純，高島利紗，小林智尚：気候変動を考慮した可能最大高潮の長期変動予測技術の開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.2，pp.L1251-L1255，2014。
- 3) 澁谷容子，中條壮大，森信人，金洙列，間瀬肇：気候変動に伴う最大クラス台風経路と高潮偏差および再現期間の推定 -伊勢湾台風における検討-，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71，No.2，pp.L1513-L1518，2015。
- 4) Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J.G.: A description of the advanced research WRF version 3, *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-475+STR, 125p., 2008.
- 5) Kim, S.Y., Mori, N., Mase, H. and Yasuda T.: The role of sea surface drag in a coupled surge and wave model for typhoon Haiyan 2013, *Ocean Modelling*, Vol.96, Part 1, pp.65-84, 2015.
- 6) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K.: The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics, *J. Met. Soc. Japan. Ser. II*, Vol.93, No.1, pp.5-48, 2015.
- 7) 二宮順一，竹見哲也，森信人：伊勢湾台風を対象とした高潮追算のための JRA55 再解析データの力学的ダウンスケーリング，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71，No.2，pp.L1699-L1704，2015。
- 8) Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi, M., Yukimoto, S., Kusunoki, S. and Kitoh, A.: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid, *J. Met. Soc. Japan*, Vol.90A, pp.233-258, 2012.
- 9) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes, *SOLA*, Vol.10, pp.167-171, 2014.
- 10) Fujita, T.: Pressure distribution within typhoon, *Geophys. Mag.*, 23, pp.437-451, 1952.
- 11) Mitsuyasu, H. and Honda, T.: Wind-induced growth of water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.123, pp.425-442, 1982.
- 12) Ito, R., Takemi, T. and Arakawa, O.: A possible reduction in the severity of typhoon wind in the northern part of Japan under global warming: a case study, *SOLA*, Vol.12, pp.100-105, 2016.
- 13) Oku, Y., Yoshino, J., Takemi, T. and Ishikawa, H.: Assessment of heavy rainfall-induced disaster potential based on an ensemble simulation of typhoon Talas (2011) with controlled track and intensity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol.14, pp.2699-2709, 2014.

(2016. 3. 16 受付)

IMPACT ASSESSMENT OF FUTURE STORM SURGE DUE TO TYPHOON VERA AS REVEALED BY PSEUDO-GLOBAL WARMING EXPERIMENTS

Junichi NINOMIYA, Nobuhito MORI, Tetsuya TAKEMI, Osamu ARAKAWA

Dynamical downscaling targeted typhoon Vera under pseudo-global warming (PGW) that was based on JRA-55 and SST ensemble experiments using MRI-AGCM3.2S was carried out. Future change parameter sensitivity analysis of SST, air temperature and air pressure gave results that PGW experiment by only SST made typhoon to strengthen excessively (decrease 40 hPa in minimum pressure) and taking air temperature and pressure in account made typhoon minimum pressure to decrease 10 hPa. Every PGW experiment made typhoon route to shift to west. Storm surge simulation using empirical typhoon model estimated surge level raise of 26 cm on ensemble average.