

擬似温暖化実験による台風強度に関する将来予測技術について

よし の 純[†]
吉 野

地球温暖化の進行は将来のハリケーンや台風といった熱帯低気圧の強さにまで影響すると懸念されている。我が国の長中期的な防災・減災対策を講じてゆく上で、将来気候下における台風強度の変化を高精度に定量化することが火急の課題となっている。本稿は、台風強度に関する将来予測技術として、台風の内部構造を効率的かつ高精度に表現可能な高解像度台風モデルを用いた台風強度に関する擬似温暖化実験の結果について紹介するものである。

キーワード：台風強度、将来変化、擬似温暖化実験、高解像度台風モデル、CMIP3、A1B シナリオ

1. はじめに

20 世紀後半の北大西洋や北西太平洋において、Saffir-Simpson スケールのカテゴリー 4 以上（最大風速 56 m/s 以上）の強い熱帯低気圧（ハリケーンや台風など）の数が増加傾向にあると指摘されている^{1),2)}。このような近年の台風の強大化傾向は地球温暖化による影響によるものではないかと懸念されているが、一方で、データ品質や自然変動の問題もあり不確実性が依然として大きく未だ論争は決着していない³⁾。2013 年に刊行された IPCC 第 5 次報告書⁴⁾でも、21 世紀末における強い熱帯低気圧の活動度の増加の可能性について、発生確率 50 ~ 100 % で「どちらかと言えば (more likely than not)」と明言を避けているのが現状である。今後更に進むであろう温暖化が日本列島に接近・上陸する台風の強度に及ぼす影響量をより高い信頼度の下で定量化することは、我が国における社会基盤構造物の設計外力を見直し、長中期的な防災・減災対策を講じてゆく上で極めて重要な課題となっている。

本稿では、自動移動ネスティング領域と多数の海面境界物理過程を加えた「高解像度台風モデル」を用いることで、2004 年に発生した全 29 個の台風を対象として、複数の温暖化シナリオ (B1, A1B, および、A2 シナリオ) の下で擬似温暖化実験を行った結果について紹介するものである。また、現在気候実験との対比から台風強度に対する温暖化影響についてシナリオ間で相互比較を行った結果についても紹介する。

2. 数値計算法

ここでは、数値計算に使用した高解像度台風モデルの概要 (2.1 節) について解説し、現在気候実験 (2.2 節) と擬似温暖化実験 (2.3 節) の計算設定について論じる。

2.1 高解像度台風モデル

本研究では吉野ら (2012) により開発された「高解像度台風モデル」を使用する⁵⁾。高解像度台風モデルはペンシルバニア州立大学 PSU と米国大気科学研究センター NCAR により開発された 3 次元領域気象モデル「MM5」をベースとしている⁶⁾。MM5 は、非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系プリミティブ方程式系モデルであり、台風内部の 3 次元構造の時間発展を複雑地形の影響も考慮しながら高精度に予測できる⁷⁾。著者らは、この MM5 に対して猛烈な勢力を持つ台風を表現する上で不可欠となる「海洋混合層過程」、「粘性散逸加熱過程」、および、「波飛沫蒸発過程」といった詳細な海面境界物理過程を組み込むことで独自の高解像度台風モデルを構築している。海洋混合層過程により、台風直下の海洋混合層内において生じる鉛直乱流混合とそれによる海面温度低下を表現することができる⁸⁾。粘性散逸加熱過程により、台風内の大気境界層下部において卓越する強風による粘性散逸の効果を加味できる⁹⁾。また、波飛沫蒸発過程により、台風直下の暴風と暴浪の環境下で飛散する波飛沫の蒸発と冷却の効果を表現できる¹⁰⁾。更に、この高解像度台風モデルに対して、台風の発生から消滅までその強度や内部構造を高解像度かつ高効率に計算できる「自動移動ネスティング領域」を導入する。これにより、図 1 に示すよう、1959 年 9 月の伊勢湾台風の発生から消

[†] 岐阜大学 工学部附属応用気象研究センター：〒 501-1193
岐阜県岐阜市柳戸 1-1
E-mail : jyoshino@gifu-u.ac.jp

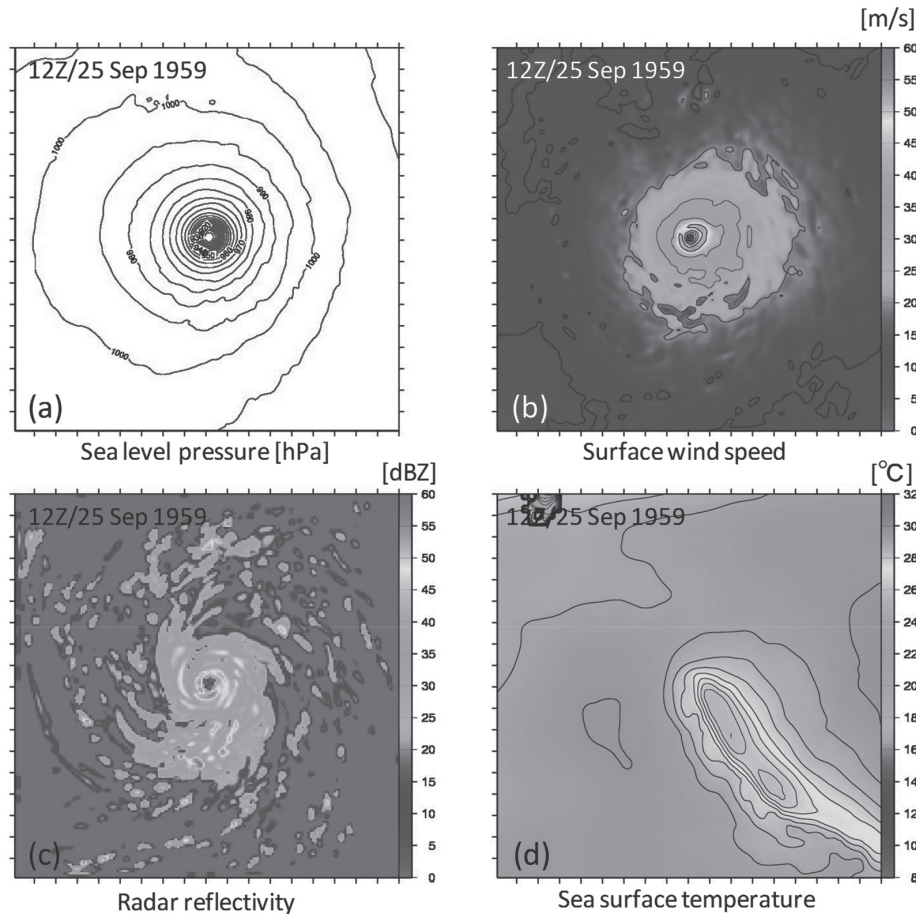


図1 高解像度台風モデルにより再現された伊勢湾台風（最盛期）の台風構造，（a）海面更正気圧，（b）10m 高度風速，（c）レーダー反射強度，（d）海水面温度

滅までの全生涯に対して台風の内部構造と台風強度を正確に再現できることを実証している⁵⁾。

本研究では、先行研究⁵⁾に倣い、主な計算設定を表1のように設定する。また、計算領域は、図3に示す範囲で設定する。台風環境場の変化や台風の移動を表現する親領域（D1）は27 km メッシュとし、台風強度や台風の内部構造を表現する自動移動ネスティング領域（D2）は9 km メッシュとする。現実的な台風進路および台風強度が再現できるように、ナッジングによる4次元データ同化をD1のみに適用する（ナッジング係数は、 1.0×10^{-5} ）。ただし初期条件に対して、最大風速17.2 m/sの弱いランキン渦を初期位置に投入している。

2.2 現在気候実験

まず、この高解像度台風モデルを用いて、2004年に発生した全29個の台風を対象とした現在気候実験を行う。2004年の台風は合計29個と、平年の27個に比べてやや多い程度であったが、日本列島に上陸した台風の数はいずれも10個と平年（2.6個）の約4倍に達した。

現在気候実験のための入力条件（初期条件・境界条件・同化条件）には、下端1000 hPaから上端70 hPaまでの $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュのNCEP 全球客観解析値データ Final Analyses（6時間毎）のうち、気温、相対湿度、ジオポテンシャル高度、地表面気圧、海水面温度を使用する。また、台風強度を高精度に表現する上で重要となる海洋混合層厚さの初期条件については、 $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュのNOAA/NODC 全球気候値データ（月平均値）を使用する。このような入力条件に基づいて表1の設定からなる高解像度台風モデルにより現在気候実験を実施する。現在気候実験により再現された台風強度に対して、気象庁ベストトラックの6時間毎の中心気圧と対比することにより精度検証を行う。

2.3 擬似温暖化実験

次に、同様に高解像度台風モデルを用いて、2004年に発生した全29個の台風を対象とした擬似温暖化実験を行う。擬似温暖化実験は、Satoら（2007）による擬似温暖化ダウンスケーリングの手法に従う¹¹⁾。擬似温暖化実験のための入力条件（初期条件・境界条件・同化条件）は、現在気候実験で使用された入力条

表 1 高解像度台風モデルの計算設定

計算領域	親領域 D1	自動移動ネスティング領域 D2
対象台風	2004 年の全台風 (計 29 個)	
対象時間	発生から消滅までの全生涯	
水平解像度	27 km	9 km
水平格子数	250 × 250	91 × 91
時間間隔	90 秒	30 秒
鉛直解像度	24 層 (1 000-70 hPa)	
初期・境界・同化条件	NCEP Final Analyses (1° × 1° 格子間隔; 6 時間間隔)	D1 (27 km)
自動移動ネスティング	Off	On (15 分毎)
台風ボーガス	風速 17.2 m/s ランキン渦	
ナッジング (4DDA)	On (ナッジング係数 1.0×10^{-5})	Off
積雲対流過程	Grell Cumulus	Off
雲微物理過程	Reisner graupel	
大気境界層過程	Mellor-Yamada Level 2.5 Eta PBL	
放射過程	Cloud radiation	
陸上表面過程	5-layer soil	
海洋混合層過程	Shade and Emanuel (1999)	
波飛沫蒸発過程	Fairall et al. (1994)	
粘性散逸加熱過程	Jin et al. (2007)	

件に対して、全球気候モデルの将来予測データにより得られる月平均温暖化差分を加算することで作成される (図 2)。月平均温暖化差分には、英国気象局ハドレーセンターが開発した全球気候モデル HadCM3 の将来予測データ (CMIP3 提供) により計算される。B1 シナリオ (今世紀末の大気中の二酸化炭素濃度 600 ppm: 地上気温 + 3.7 °C /100 年), A1B シナリオ (同 850 ppm: 地上気温 + 5.5 °C /100 年), および, A2 シナリオ (同 1 250 ppm: 地上気温 + 6.6 °C /100 年) の各温暖化シナリオに対して, 2000 年 1 月 ~ 2099 年 12 月までの 100 年間の将来予測データが月平均値の形で公開されている。下端 1 000 hPa から上端 70 hPa までの $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ メッシュの将来予測データ

のうち, 気温, 相対湿度, ジオポテンシャル高度, 地表面気圧, 海水面温度, および, 海洋混合層厚さに対して, 2000 年 ~ 2009 年の各月の 10 年間平均値 $\overline{G_p}$ と 2090 年 ~ 2099 年の各月の 10 年間平均値 $\overline{G_f}$ を計算し, それぞれ,

$$\Delta \overline{G} = \overline{G_f} - \overline{G_p} \quad (1)$$

と差分をとることで, 各月の月平均温暖化差分 $\Delta \overline{G}$ を得る。それを現在気候実験の入力条件として用いられた解析値データ A_p に対して空間内挿して加算することで,

$$A_f^* = A_p + \Delta \overline{G} \quad (2)$$

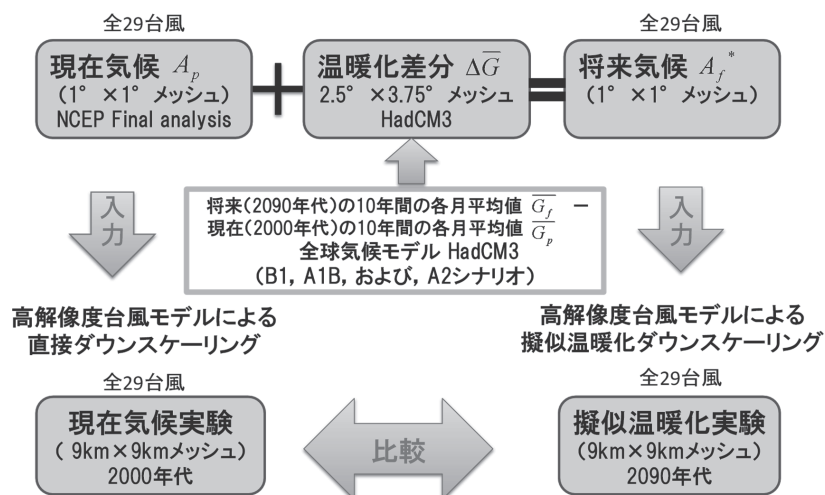


図 2 現在気候実験および擬似温暖化実験の計算フロー

のように擬似温暖化実験のための入力条件 A_f^* を得る。このように月平均温暖化差分 $\Delta\bar{G}$ のみを加算することによって、全球気候モデル HadCM3 が持つ固有のバイアス誤差を除去することができる。以上のようにして作成された入力条件に基づき、B1, A1B, および、A2 シナリオの3つの温暖化シナリオ毎に、表1の設定からなる高解像度台風モデルにより擬似温暖化実験を実施する。前述の現在気候実験により得られた台風強度を基準として、この擬似温暖化実験により得られた台風強度（中心気圧）と対比することにより、21世紀末における台風強度に対する温暖化影響量を評価することができる。

3. 結果と考察

3.1 現在気候実験の精度検証

まず、現在気候実験における台風進路の再現性について確認する（図3（b））。台風強度の再現性を議論する上で、まず台風進路の再現性が高いことが前提条件となる。気象庁ベストトラック（図3（a））と比較

して目立った誤差は見当たらず、高解像度台風モデルの親領域 D1 に対してのみナッジングを適用することにより、現実的な台風進路を再現できていると見なすことができる。

次に、現在気候実験により再現された台風強度について議論する。図4（a）と図4（b）は、2004年に発生した全29個の台風の観測された中心気圧（気象庁ベストトラック）と推定された中心気圧（高解像度台風モデル）の時系列をそれぞれ示す。高解像度台風モデルは、猛烈な台風から弱い台風まで現実的に見られた台風強度の時間発展を適切に再現できている。先行研究により指摘されているように⁵⁾、暴風・暴浪下における海面境界物理過程を詳細に考慮し、台風中心付近の内部構造を自動移動ネスティング領域により高分解能に表現することにより、高精度に台風強度を評価できると考えられる。

次に、気象庁ベストトラックに基づいて、現在気候実験による台風強度の精度検証を行った。図5は、全29個台風の全期間の中心気圧の推定値と観測値の

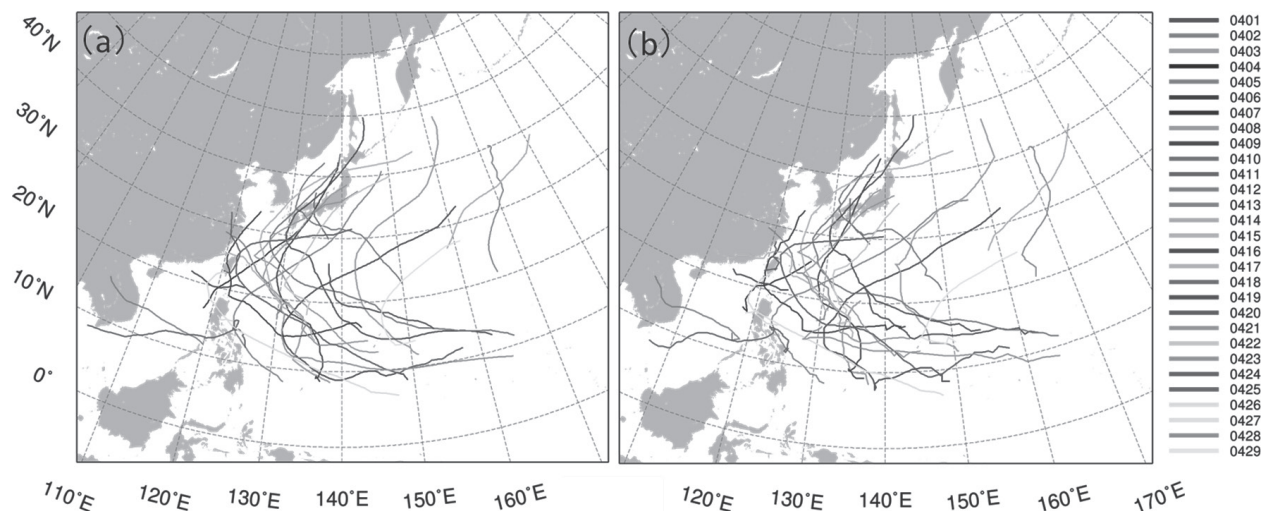


図3 2004 年全 29 個の台風進路. (a) 気象庁ベストトラック, および, (b) 現在気候実験

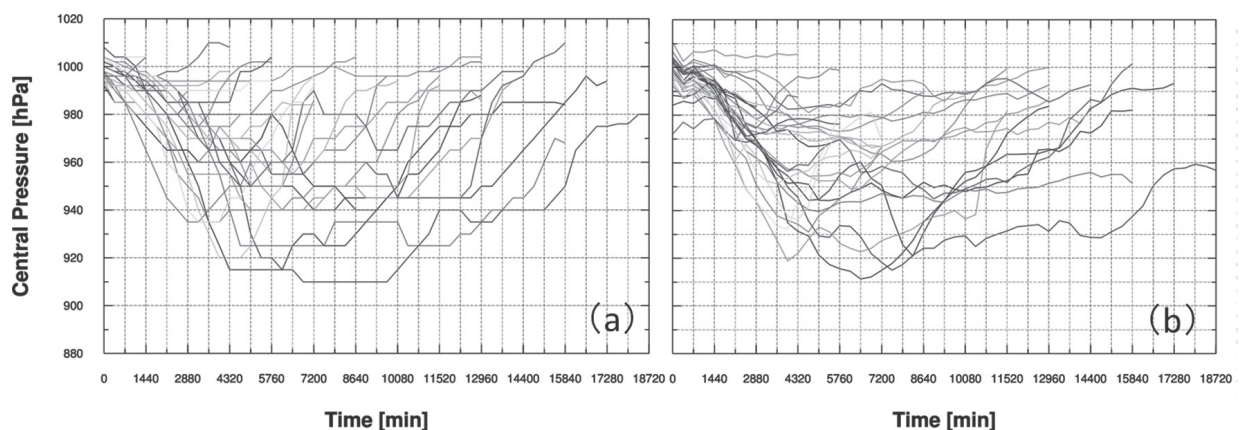


図4 2004 年全 29 個の台風の中心気圧の時系列. (a) 気象庁ベストトラック, および, (b) 現在気候実験 (凡例は図3と同じ)

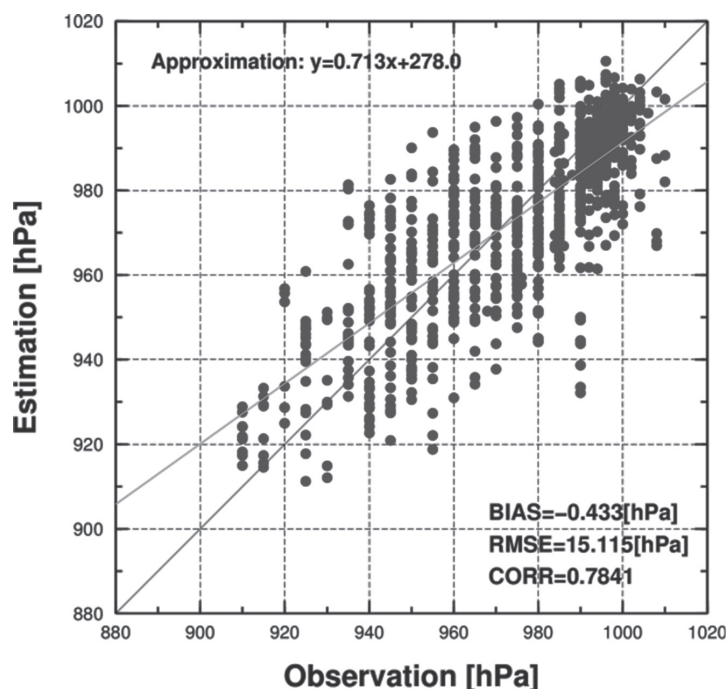


図5 現在気候実験の全台風の全期間における中心気圧の観測値と推定値の散布図

散布図と回帰直線を示す。中心気圧の推定値と観測値との間には強い正の相関があり、相関係数 0.78、バイアス誤差 -0.43 hPa, RMS 誤差 15.12 hPa となった。また、最大風速については (図省略), 相関係数 0.67, バイアス誤差 $+0.86$ m/s, RMS 誤差 7.78 m/s となった。よって, 本研究で使用した高解像度台風モデルは, 極めて高精度に現在気候下の台風強度を表現できると見なすことができ, 次節の擬似温暖化実験により得られる結果の信頼性もまた高いものと期待される。

3.2 擬似温暖化実験によるシナリオ間相互比較

本題である台風強度の議論の前に, まず, 擬似温暖化実験により計算された台風進路について確認したところ (図省略), どの温暖化シナリオであっても現在気候実験により得られた台風進路 (図3 (b)) とほぼ一致していた。このことは, 風速に関する月平均温暖化差分 $\Delta \bar{G}$ については, 台風進路を大きく変えるほどの大きさを有していないことを意味している。しかしながら, A2 シナリオの中のごく一部の弱い台風については計算開始直後に消滅してしまい, 台風中心を上手く検出することができない事例が存在した。このことは, 既往研究でも指摘されているように³⁾, 温暖化の進行に伴って現在気候と比較して台風の発生数が減少することと関係しているものと推察される。

次に, 温暖化シナリオ毎に温暖化が台風強度に及ぼす影響について議論する。図6は, 各温暖化シナリオにおける全29個の台風の中心気圧の時系列を示す。いずれの温暖化シナリオであっても現在気候実験に比

べて全体的に中心気圧はより低下している (台風強度は増大している)。ここで, 期間平均中心気圧 (期間平均最大風速) を台風の発生から消滅までの全期間中の平均中心気圧 (平均最大風速) と定義し, また, 期間最低中心気圧 (期間最高最大風速) を台風の発生から消滅までの全期間中の最低中心気圧 (最高最大風速) と定義し, それらの温暖化影響量について議論する。全台風平均の期間平均中心気圧 (期間平均最大風速) は, 現在気候実験は 975 hPa (30.9 m/s) となるのに対して, B1 シナリオは 972 hPa (33.4 m/s), A1B シナリオは 971 hPa (33.8 m/s), および, A2 シナリオは 970 hPa (34.9 m/s) となった。いずれの温暖化シナリオであっても, 平均的な台風強度は増大していることが分かる。一方, 全台風平均の期間最低中心気圧 (期間最高最大風速) は, 現在気候実験は 957 hPa (40.1 m/s) となるのに対して, B1 シナリオは 948 hPa (44.8 m/s), A1B シナリオは 948 hPa (44.9 m/s), および, A2 シナリオは 944 hPa (46.9 m/s) となった。いずれの温暖化シナリオであっても, 最盛期の台風強度は大幅に強化されることが明らかとなった。また, 日本列島に上陸した全10個の台風の上陸時平均中心気圧 (上陸時平均最大風速) については, 現在気候実験は 966 hPa (35.1 m/s) となるのに対して, B1 シナリオは 964 hPa (34.9 m/s), A1B シナリオは 960 hPa (36.8 m/s), および, A2 シナリオは 958 hPa (39.2 m/s) となった。つまり, 温暖化がより急速に進行するシナリオにおいて, より台風強度は

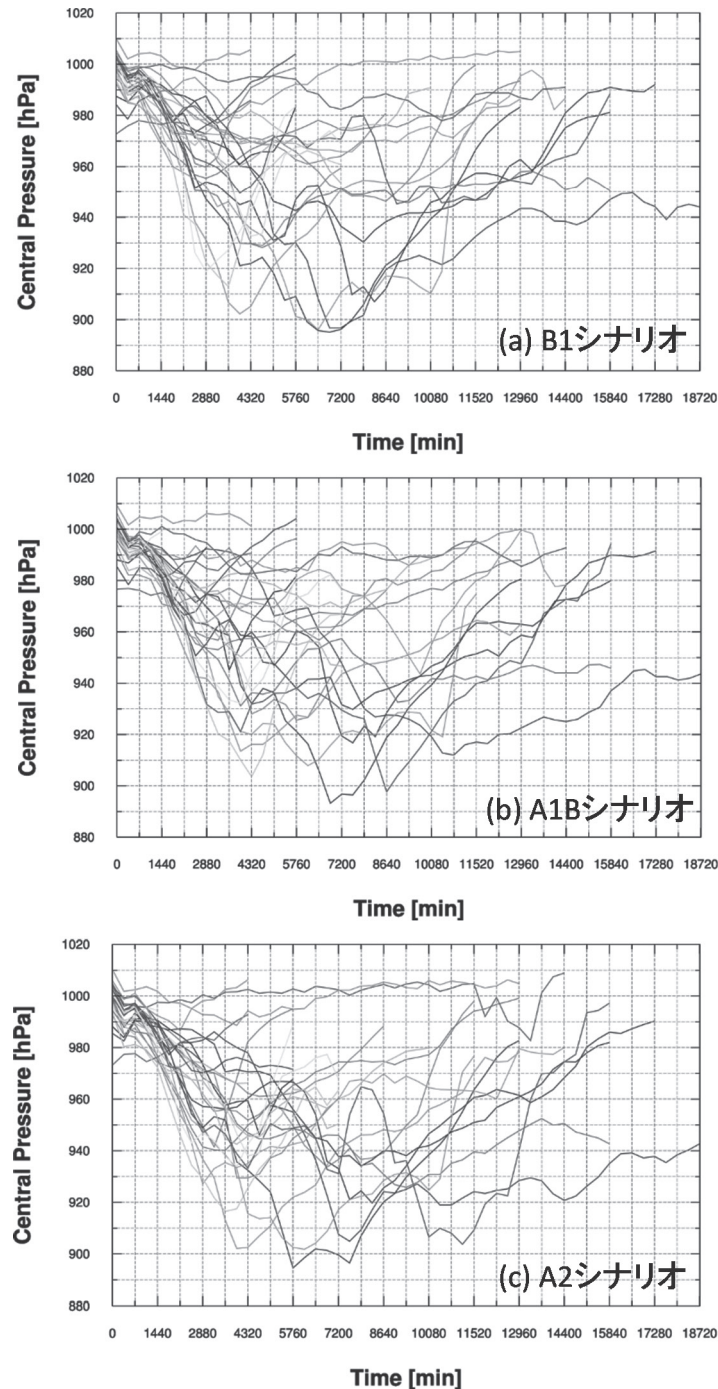


図 6 擬似温暖化実験（2090 年代）による全 29 個の台風の中心気圧の時系列（凡例は図 3 と同じ）

増大する傾向にある（ $B1 < A1B < A2$ ）と言い換えられる。

また、現在気候実験における全 29 個の台風を「猛烈な台風（期間最低中心気圧 930 hPa 未満）」「強い台風（期間最低中心気圧 930 hPa 以上 960 hPa 未満）」「弱い台風（期間最低中心気圧 960 hPa 以上）」の 3 種類の勢力別に分類し、それぞれの台風強度に対する平均的な温暖化影響量を評価した。図 7 は、勢力別の全台風平均の期間平均中心気圧および期間平均最大風速の将来変化量を、図 8 は、勢力別の全台風平均の

期間最低中心気圧および期間最高最大風速の将来変化量をそれぞれ示す。「弱い台風」や「強い台風」に関しては、温暖化がより急速に進むシナリオにおいてより強化される傾向（ $B1 < A2$ ）にあると言える。しかしながら、「猛烈な台風」に関しては、温暖化の進行がより緩やかなシナリオの方がより強化される傾向（ $B1 > A2$ ）にあり、温暖化がより急速に進む A2 シナリオでは最盛期の強度発達が他のシナリオに比べて抑えられることが明らかとなった。

この A2 シナリオの「猛烈な台風」に見られた強度

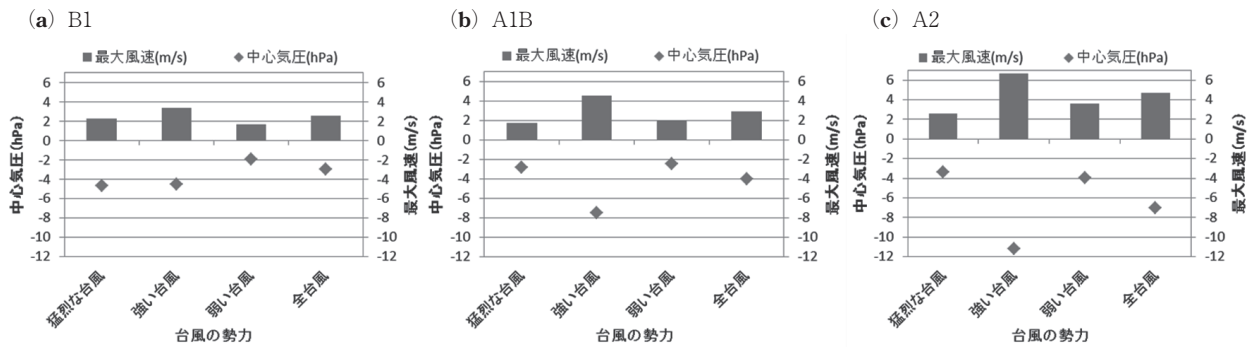


図7 勢力別の全台風平均の期間平均中心気圧および期間平均最大風速の温暖化影響量：(a) B1, (b) A1B, (c) A2 シナリオ

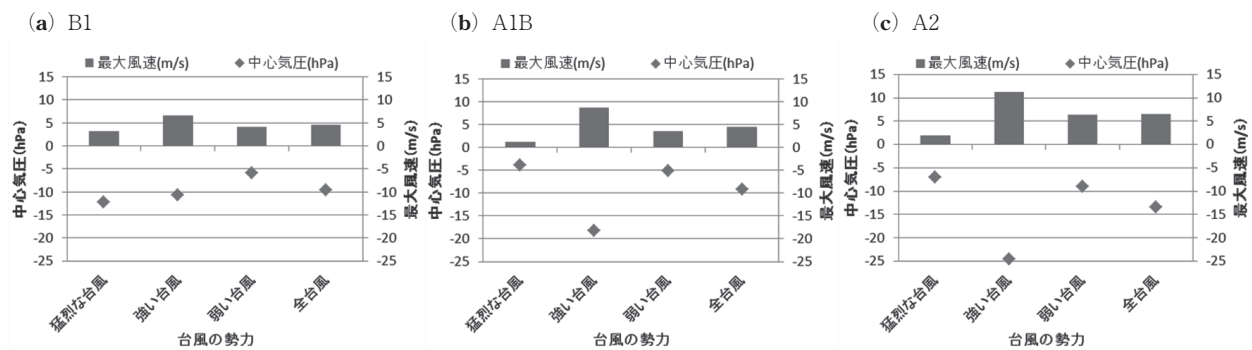


図8 勢力別の全台風平均の期間最低中心気圧および期間最高最大風速の温暖化影響量：(a) B1, (b) A1B, (c) A2 シナリオ

発達抑制傾向については、可能最大強度（Maximum Potential Intensity）理論により説明可能である¹²⁾。十分に発達した台風は、暖かい海面（海面温度 T_s ）にて加熱され、冷たい対流圏界面（対流圏界面温度 T_0 ）で冷却されるカルノーサイクルエンジンと等価であるものとみなし、熱力学第一法則により、最大風速半径での最大風速（傾度風速 V_m ）を、

$$|V_m|^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s}{T_0} [CAPE^* - CAPE] \quad (3)$$

によって評価できる。ここで、 C_k は海面における熱交換係数、 C_D は海面における運動量交換係数、 $CAPE^*$ は海面における飽和空気を持ち上げた時の潜在有効位置エネルギー、 $CAPE$ は境界層内の湿潤空気を持ち上げた時の潜在有効位置エネルギーを示す。この式(3)より、台風の最大風速 V_m の2乗は、平均海面温度 T_s に比例する一方で、平均対流圏界面温度 T_0 に反比例していることが分かる。図9が示すように、全球気候モデル HadCM3 が予測する日本列島南海上で平均海面温度 T_s は、21世紀の間に、B1シナリオは $+2.0^\circ\text{C}/100$ 年、A1Bシナリオは $+2.5^\circ\text{C}/100$ 年、および、A2シナリオは $+2.8^\circ\text{C}/100$ 年と上昇する一方で、平均対流圏界面温度 T_0 は、B1シナリオは $+4.0^\circ\text{C}/100$ 年、A1Bシナリオは $+6.4^\circ\text{C}/100$ 年、および、A2シナリオは $+7.4^\circ\text{C}/100$ 年

とより大幅に上昇する。A2シナリオ下の21世紀末においては、確かに海面温度は他のシナリオに比べてより大きく上昇するが、一方で対流圏界面温度もまたより一層大きく上昇することから、可能最大強度に達

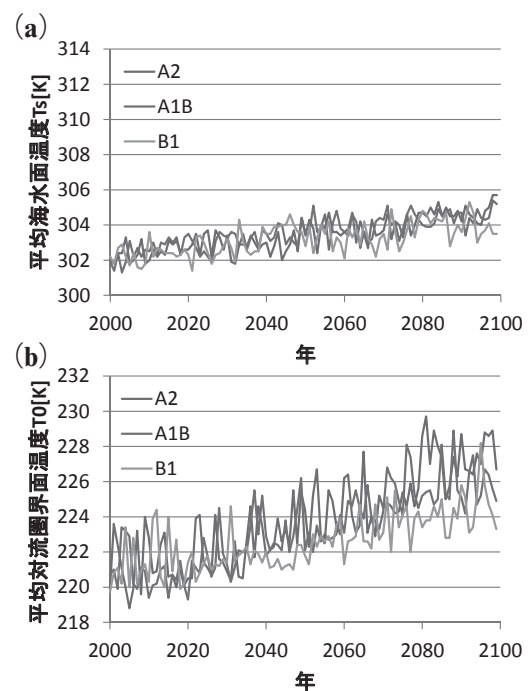


図9 B1, A1B, および、A2シナリオにおける、2000～2099年までの南海上の (a) 平均海面温度および (b) 平均対流圏界面温度の時系列

するような「猛烈な台風」のピーク時の強度発達が抑制されたものと考察される。

4. 結 語

本稿では、高精度な高解像度台風モデルを用いた台風強度に関する擬似温暖化実験の結果について紹介し、台風強度に関する 21 世紀末の温暖化影響のシナリオ間 (B1, A1B, および, A2 シナリオ) の相互比較の結果についても議論した。

いずれの温暖化シナリオであっても現在気候に比べて全体的に最盛期の中心気圧はより低下し、平均的に見れば温暖化がより加速的に進行するシナリオ (B1 シナリオより A2 シナリオ) でより台風強度は増大することが明らかとなった。また、現在気候実験の全 29 個の台風を「猛烈な台風」「強い台風」「弱い台風」の 3 種類に分類し、それぞれ平均的な温暖化影響量を評価したところ、「弱い台風」や「強い台風」に関しては、B1 シナリオより A2 シナリオの方がより強化される傾向にあったが、「猛烈な台風」に関しては、B1 シナリオより A2 シナリオの方において強度発達がより抑制される傾向にあることが明らかとなった。21 世紀末までに、海水面温度については A2 シナリオでより上昇する一方、対流圏界面温度についても A2 シナリオでより一層大きく上昇することから、MPI 理論により、B1 シナリオより A2 シナリオで可能最大強度の発達が抑制されることになると結論づけることができる。

ただし、温暖化が進行するほど台風強度が「弱まる」と誤解してはいけない。猛烈な台風のピーク時の強度発達が他のシナリオのそれと比べて若干抑制されるだけのことであり、全体的には台風強度は増す傾向にあると言える。つまり、現在気候において「弱い台風」「強い台風」であった台風の大半が、将来気候では「猛烈な台風」となる可能性がある点に注意しなくてはならない。そして、いずれの温暖化シナリオになったとしても、日本列島に上陸する台風の強度は人為的な温暖化の影響により強まる可能性が高いと考えられることから、今後、我が国の長・中期的防災対策の適切な見直しを進めていくことが不可欠となるだろう。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究 A (24686058) および基盤研究 B (24360199) による成果であること

をここに付記する。なお本稿は、吉野ら (2012)⁵⁾、吉野ら (2013)¹³⁾、吉野ら (2014)¹⁴⁾、および、吉野ら (2015)¹⁵⁾ の研究成果を整理して、議論しなおしたものである。

参 考 文 献

- 1) Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry and H.-R. Chang, Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, Vol.309, pp.1844-1846 (2005)
- 2) Emanuel, K. A., Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature*, Vol.436, pp.686-688 (2005)
- 3) 吉村純, 杉正人, 村上裕之, 台風と地球温暖化, 気象研究ノート, 第 227 巻, pp.91-128 (2013)
- 4) IPCC: Climate Change 2013 -The Physical Science Basis-, Cambridge University Press, p.1535 (2013)
- 5) 吉野純, J. Strachan, P. L. Vidale, 猛烈な勢力の台風の全生涯に対する高解像度・高効率予測技術の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. I_1211-I_1215 (2012)
- 6) Dudhia, J.: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model, Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.121, pp.1493-1513 (1993)
- 7) 吉野純, 村上智一, 林雅典, 安田孝志, 高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.1266-1280 (2006)
- 8) Shade, L. R. and K. A. Emanuel, The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere-ocean model, *J. Atmos. Sci.*, Vol.56, pp.642-651 (1999)
- 9) Zhang, D.-L. and E. Altshuler, The effects of dissipative heating on hurricane intensity, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.127, pp.3032-3038 (1999)
- 10) Fairall, C. W., J. D. Kepert and G. J. Holland, The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean, *Global Atmos. Ocean Syst.*, Vol.2, pp.121-142 (1994)
- 11) Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A., Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model, *J. Hydrology*, Vol.333, pp.144-154 (2007)
- 12) Emanuel, K. A., The behavior of a simple hurricane model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium, *J. Atmos. Sci.*, Vol.52, pp.3959-3968 (1995)
- 13) 吉野純, 荒川悟, 嶋田進, 小林智尚, 軸対称 2 次元および領域 3 次元台風モデルによる 2004 年全台風の強度解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1256-I_1260 (2013)
- 14) 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.I_1251-I_1255 (2014)
- 15) 吉野純, 荒川悟, 豊田将也, 小林智尚, 高解像度台風モデルによる台風強度に対する温暖化影響のシナリオ間相互比較, 土木学会論文集 (海岸工学), Vol.71, No. 2, pp. I_1519-I_1524 (2015)