

CMIP6 実験にもとづく
スラブ海洋結合全球大気気候モデルを用いた気候変動の台風への影響評価
Development of Coupled Atmospheric-SLAB Ocean Model Global
Climate Model and Climate Change Impacts on Tropical Cyclones

岡田智晴^{*1}, 志村智也^{*2}, Adrean WEBB^{*2}, 宮下卓也^{*2}, 森信人^{*2}, 水田亮^{*3}

Tomoharu OKADA, Tomoya SHIMURA, Adrean WEBB, Takuya MIYASHITA, Nobuhito MORI, Ryo MIZUTA

In this study, the effects of global warming on tropical cyclones (TCs) were evaluated by using a slab-ocean model coupled with the Atmospheric Global Climate Model (MRI-AGCM). The warming conditions for the MRI-AGCM climate simulations were obtained from the latest climate models (CMIP6). We have conducted two types of global climate simulations, typical and newly proposed experiments. The former is time slice experiments and latter is the climate experiment fixed single month condition. Both experiments are conducted on present and future periods, to estimate the effects of climate change impacts on TC characteristics. The slab ocean model which considers sea surface cooling due to strong winds, significantly contributes to a reduction in TC intensity. Moreover, we have confirmed that climate change can reduce the TC frequency and enhance the TC intensity.

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) 第5次評価報告書¹⁾は、地球の温暖化による雪氷の減少や海面水位の上昇に加え、極端現象の変化の可能性を報告している。実際に起きた事例としては、2018年台風21号(Jebi)による甚大な被害が記憶に新しく、こうした熱帯低気圧（以下、台風を含み TC と表記）の高強度化の可能性が示唆されている²⁾。

我が国の気候変動予測および高潮や高波といった気候変動に伴う沿岸災害への影響評価研究には気象庁気象研究所の全球大気気候モデル (Meteorological Research Institute Atmospheric Global Climate Model: MRI-AGCM) による気候計算結果が多数使用されている³⁾。MRI-AGCM は大気の循環場を高解像度に計算するため、極端現象の再現には強みがあるが、海洋からのフィードバックは考慮されていないため、短期的な大気海洋相互作用

が重要な TC の再現精度向上に制限があり、影響評価への懸念がある。そこで、大気海洋相互作用を簡便に考慮できるスラブ海洋モデル (Oslab) を AGCM に結合したスラブ海洋結合全球大気気候モデル⁴⁾ (AGCM-Oslab) による気候予測実験を行い、海洋モデル結合の有無による気候計算への影響を評価する。また、最新の気候予測データセット CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 実験⁵⁾ にもとづく温暖化条件下の将来気候計算を実施することで、気候変動の TC への影響を評価する。

2. 解析手法

(1) モデルの概要

本研究では、大気気候モデルとして、気象庁気象研究所の MRI-AGCM を用いた。気候モデルの設定は解像度による計算コストを考慮し、MRI-AGCM3.2H⁶⁾ を用い、切断波数 319 (水平解像度 60 km に相当)、鉛直 60 層の解像度⁷⁾ で計算を実施し

*1 京都大学大学院工学研究科 okada.tomoharu.72m@st.kyoto-u.ac.jp
Graduate School of Engineering, Kyoto University

*2 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

*3 気象庁気象研究所
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

た.

スラブ海洋モデル内における海洋を表現する式として海上風 U_{10} に依存して海面水温 SST が下がる海水温低下式を以下に示す.

$$\frac{\partial SST}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 C_p d} F_{net} - X_{cool} R_{cool} \left(\frac{SST - T_{deep}}{\Delta T_0} \right) \left(\frac{d_0}{d} \right) + \frac{1}{\tau} (SST_{clim} - SST) \quad (1)$$

右辺第1項は海面熱フラックスによる温度変化、 ρ_0 は海水密度、 C_p は海水の熱容量、 d は混合層厚さの気候値、そして F_{net} は海洋方向を正に取った正味の熱フラックスである. 第2項以降はZarzycki⁸⁾により加えられた項で、右辺第2項はTC下での鉛直混合、および移流プロセスによって引き起こされたSST低下を経験的にパラメーター化して表したものである. 第3項は混合等により低下したSSTが、境界値として与えた SST_{clim} から長期的な乖離を防ぐ項であり、緩和時間(τ)で表される.

第2項について説明する. X_{cool} は風速 U_{10} に依存して傾斜が与えられる冷却係数、 R_{cool} は正規化された冷却速度、 T_{deep} は深層の一般的な水温、 ΔT_0 はスケーリングされた表層と深層の海水温度の差である. d_0 はスケーリング混合層水深、 d は混合層厚さの気候値であり、1年の時間スケールで深さが変動する季節混合層を用いている.

浦野らの既往研究⁴⁾では緩和時間 τ は全球一様に8日間で与えた. しかし、大気海洋相互作用によって引き起こされるSSTの変動は全球で一様に評価できるものではない. そのため本研究では全球では一様でない緩和時間を導入する. まず、緩和時間を8日としたスラブ海洋モデルを結合したMRI-AGCMを用いて2000年から2009年の10年間で気候計算を実施した. 入力する境界値にはOISST⁹⁾ (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)月平均値を用いた. 計算された10年間のSST平均値と入力値との乖離が大きい地点ほど緩和時間を短く設定することで気候計算の境界値からの乖離を抑制した. 以下は緩和時間を計算されたSST平均値と入力値の差(D_{SST})の関数として定義したものである.

$$\tau = 4.5 - 4.9 \tan^{-1} \left[\frac{\text{abs}(D_{SST}) - 0.4}{0.2} \right] \times \left(\frac{2}{\pi} \right) \quad (2)$$

以下では、スラブ海洋モデルを結合した気候計算結果をAGCM-Oslab、AGCM単体での気候計算結果をAGCMと表記する.

TCの抽出には、海上風速および海面更正気圧に

もとづくWebb et al.¹⁰⁾による手法を用いた.

(2) ssp585シナリオ気候実験における海面境界値

大気モデルを用いた気候変動予測実験を行う上で海面境界値が必要となる. 気候変動条件下の将来海面水温データの解析にはCMIP6データを用いた. 本研究では将来気候想定としてssp585シナリオを使用した.

AGCMの海面境界データとしてCMIP6のマルチモデルアンサンブル平均値(Multi Model Ensemble Mean: MMEM)を用いた. MMEMを作成するにあたり、本研究ではESGF (The Earth System Grid Federation)¹¹⁾において公開されているCMIP6モデルを使用した. 解像度の観点から、経度方向に200以上のグリッドを持つモデルのみを対象とし、SSTでは34モデル、海氷密接度(SIC)では31モデルを取り扱った. 使用したモデルは後述の図-2に示しているものがSSTで34モデルであり、そのうちAWI-CM-1-1-MR, CNRM-ESM2-1, KACE-1-0-Gの3モデルを除いたものがSICの31モデルである. 現在気候(1990-2014)の25年間とssp585シナリオ下の将来気候(2076-2100)の25年間で毎月それぞれの期間平均値を算出した. その後、将来変化量をモデルごとに算出し、各モデルの将来変化量を、MRI-AGCMの解像度である格子間隔約60 km(0.5625度)へと二次元内挿を行った上でモデル間平均を取ることでMMEM値を得た.

将来気候計算では、Mizuta et al.¹²⁾の手法を参考に、OISST観測値に将来変化量MMEMを差分として空間的に与えることで境界値作成を行った. なお、現在気候の気候実験にはOISST観測値を設定している.

(3) タイムスライス実験の概要

本研究では前章までに作成した境界値を将来気候の計算に、OISST観測値を現在気候の計算に使用している. 本研究では現在気候を1990年-2018年、将来気候を2075年-2103年と設定し、AGCM単体とAGCM-Oslabの両ケースで気候実験を行った(タイムスライス実験). いずれも最初の一年間をスピンアップのため使用し、解析には2年目以降のデータを用いている.

(4) 単月条件固定気候実験の概要

タイムスライス実験は数十年間のTCの統計量を取り扱うため、気候変動の影響の統計的な評価

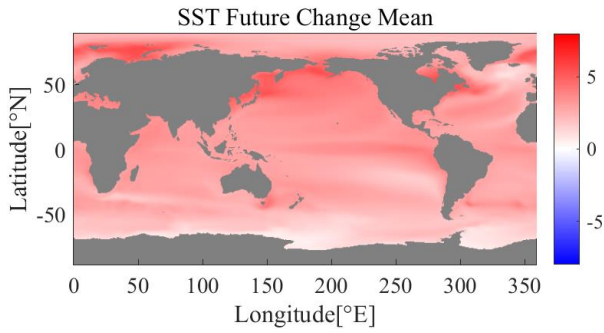


図-1 ssp585 シナリオにおける CMIP6 の複数モデルアンサンブル平均 SST 昇温の空間分布

が可能となる一方で、海面境界条件の自然変動と大気の内変動の大きさが問題となる。理想的には、確率評価の安定性のために初期及び境界条件に摂動を加えた多数アンサンブルの実施が望ましいが膨大な計算コストを要する。そこで本実験では顕著な災害をもたらしたTCが発生した月など、ある特定年月を対象に連続気候計算を実施する単月条件固定気候実験を独自に提案する。ここでは、甚大な被害をもたらした2018年台風21号(以下Jebiと表記)が発生した9月の気候条件に着目する。実際の気候条件を初期条件に与え、海面境界条件を2018年9月と、(1)で作成した9月の温暖化差分を加えた仮想的な2103年9月で、150か月の連続計算をAGCM-Oslabで実施した。内訳として1月目がERA5再解析値を用いた初期値条件、それ以降は海面水温の境界値条件のみを固定し、連続計算を実施した。本研究ではこれら2つの実験を組み合わせることで、TCを対象とした気候変動の統計的な評価を行う。

3. 結果

(1) 気候条件の設定

CMIP6 の ssp585 シナリオの SST の特性について解析を行う。SST の将来変化量の全球昇温平均値は 2.85°Cであり、図-1 にその空間分布を示す。いずれのモデルにおいてもエルニーニョ海域での昇温の傾向が認められ、またグリーンランド南方の昇温が小さいことが特徴として挙げられる。これは使用した 34 モデルのうち 8 モデルでグリーンランド南方における負の昇温が予測されていることに起因しており、他にも南極海域における負の昇温を予測するものが 2 モデルあるなど、モデルごとに SST 将来変化パターンにばらつきがある。

CMIP6 モデルの現在気候 MMEM について解析を行うことでデータとしての信頼性を評価した。

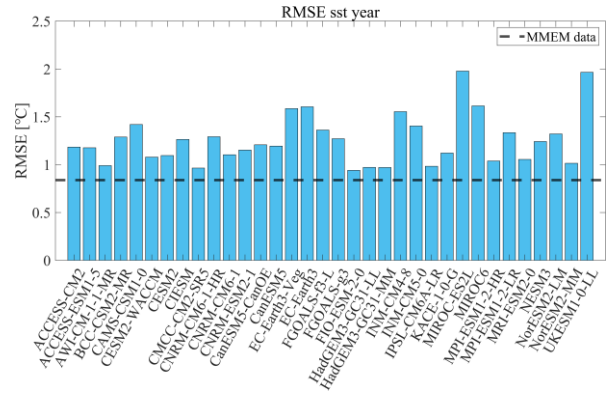


図-2 CMIP6 現在気候 34 モデルの SST と観測値(OISST)との通年平均 RMSE の関係(黒破線;MMEM)

OISST 観測値に対して現在気候 MMEM の RMSE は平均で 0.84°Cであり、図-2 に各モデルの通年での SST 平均値の RMSE と併せて示す。MMEM は最も観測値に近い結果を示しており、また月ごとの平均でも同様の結果となる。紙面には示さないが、同様の RMSE による評価を緯度帯に分けて行った結果、緯度帯・季節性によって各モデル種々の値を示した。このことは各モデルの予測精度には時空間的な因子が複雑に絡んでいることを意味しており、クラスター分析などのより詳細な解析、及び解析に準じた複数の MMEM データセット作成が気候計算結果に及ぼす影響について評価を行う必要がある、今後の課題とする。

(2) タイムスライス実験

図-3 は AGCM-Oslab での風速 U_{10} の将来変化量の空間分布を示したものであり、北極域での増加、北太平洋での減少、60°S 帯での増加といった空間分布が見られる。これらの特徴は同じく MRI-AGCM3.2 で将来変化予測した Shimura et al.¹³⁾ (2015, Journal of Climate, 図 5(a))とも類似しており、既往研究と統合的な気候計算となっている。

本研究において Oslab は海上風速に依存して

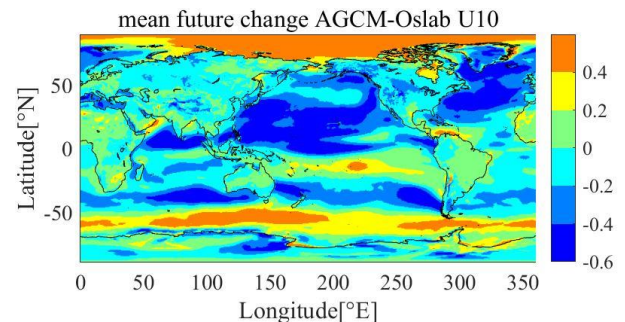


図-3 AGCM-Oslab の U_{10} の将来変化量の空間分布[m/s]

SST 低下を表現することによって極端に強い TC が過剰に発生することを防ぐ狙いがある。表-1 に本実験での年平均 TC 発生数について示す。また参考のため観測値(IBTrACS)の 1991 年-2018 年の間に観測された TC についても併せて示す。これより 1991-2018 年での最大風速 17 m/s 以上の TC の年平均数は AGCM : 106 個, AGCM-Oslab : 104 個, 49 m/s 以上の強い TC の年平均数は AGCM : 4.96 個, AGCMOslab : 3.29 個である。Oslab の結合により TC の年平均数が抑えられており, この傾向はssp585 シナリオ下での将来気候でも同様である。また, 将来変化量では, 例えば AGCM-Oslab で風速 17 m/s 以上は-10.3%, 風速 49 m/s 以上は+6.5%と, TC 全体の年平均数は減るものの高強度の TC の発生数が増加する結果が得られ, この結果は既存の研究結果²⁾とも一致するものである。図-4 は TC の通過平均個数の将来変化量を示したものであり, 日本付近では年平均で約 2 個の減少が見られる。しかしインド西部など, 増加の傾向がある地域もあり, 局所的な増減が認められる。

図-5 はタイムスライス実験において発生した TC の最低中心気圧に関して, 非超過の累積確率分布関数を示したものである。また表-1 同様, IBTrACS による観測データを併せて図示する。AGCM (破線) に対して, AGCM-Oslab (実線) が現在気候および将来気候のいずれにおいても下方に位置している。この結果は, Oslab の結合により, 強い TC の発生割合が抑制されていることを意味している。しかし, 黒破線の IBTrACS の結果と比較すると, 現在気候の曲線は常に下方に位置しており, 更に AGCM の結果は低い気圧になるにつれて漸近している。本研究に使用した 3.2H (60 km) モデルは TC の強度特性を十分に表現できるほど高い解像度ではない。そのため TC の発生割合が AGCM の気候計算において過少に評価されていると考えられる。しかしながら, その中で AGCM の曲線が観測値に高強度で漸近する原因

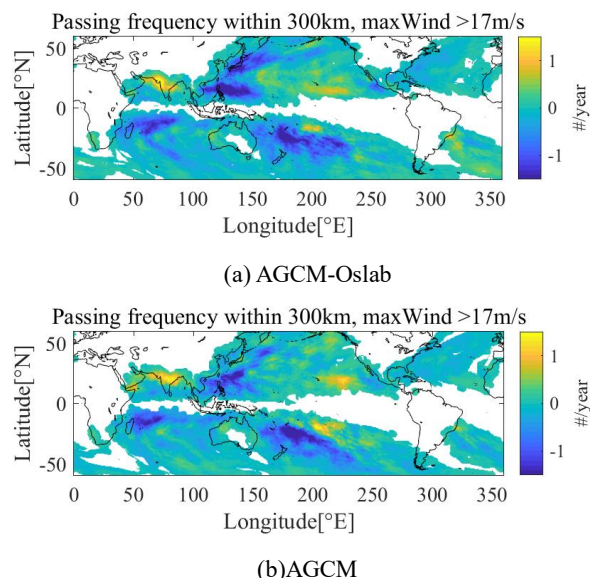


図-4 TC の通過年平均個数の将来変化量 (個/年, 対象格子; 通過半径 300 km)

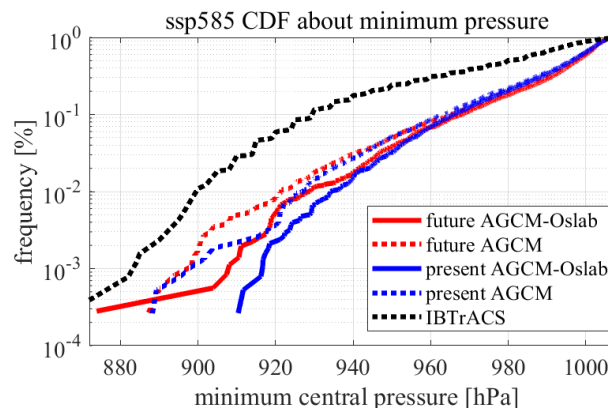


図-5 TC の最低中心気圧に関する非超過確率分布の比較。(青線: AGCM-Oslab, 赤線: AGCM, 実線: 将来気候, 点線: 現在気候, 黒線: 観測値)

を大気海洋相互作用のみに求めることは極めて強引である。超高解像度モデル 3.2S (20 km) での気候計算の実施など, 解像度を比較対象に加えた検討が必要であり, 今後の課題とする。

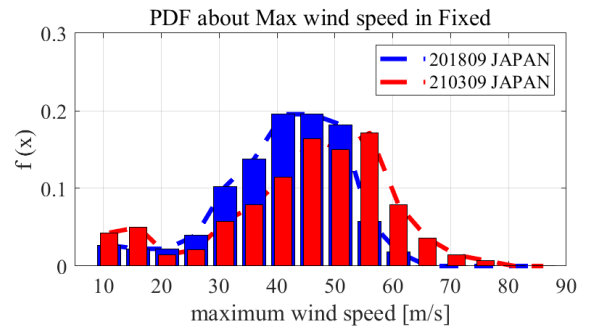
(3) 単月条件固定気候実験

表-1 サファシンプソンハリケーンウインドスケール¹⁴⁾に基づく TC の年間平均発生数[個/年]と将来変化量[%]

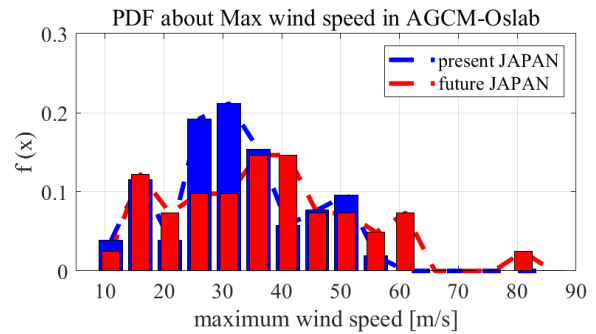
S-S カテゴリー	AGCM		AGCM-Oslab		IBTrACS	
	TS 以上	Cat.3-5	TS 以上	Cat.3-5	TS 以上	Cat.3-5
present(1991-2018)	106.11	4.96	104.36	3.29	92.82	14.43
ssp585(2076-2103)	98.43	5.54	93.61	3.50	-	-
future change	-7.24%	+11.51%	-10.30%	+6.52%	-	-

以下の解析においては日本付近 (JPN: 125°E-150°E, 25°N-50°N) を通過した TC を対象に行う。また、タイムスライス実験(AGCM-Oslab)による気候計算結果から、9月に最発達し、かつ日本付近を通過した TC を抽出することで、2018年9月が例年の9月に比べ TC の発達に関して有利な環境であったかどうか検証する。図-6は以上のような TC に関して発生確率を示したものである。グラフの概形より、(a)では十分に TC のサンプル数が確保できているが、(b)では 28 年間の期間に加え、前述のような抽出条件をかけていることからサンプル数が十分とは言えない。しかしながら現在気候(青)を比較すると明らかにピーク値は(a)のほうが高強度にあり、2018年9月という環境が例年に比べ TC の発達に有利な環境であったことが示唆される。また(a)では将来変化としてピーク値が高強度に移動することから、高強度な TC の割合が増加していることがわかる。更にここで実際の気候条件を初期条件としたことで、単月条件固定気候実験内における最初の 1 か月を Jebi の再現実験期間とみなして解析を行う。この期間においては Jebi と類似する、最大風速 47 m/s の TC が確認された。また実際の Jebi の観測値では最大風速が 54 m/s であり、この 2 つの最大風速値を基準に、Jebi と同等以上の強い TC の発生確率を評価する。最大風速 47 (54) m/s を超過する確率は単月条件固定気候実験では 42.2 (15.5) % であり、タイムスライス実験 (1991-2018 年) の平均的 9 月では超過確率は 19.3 (10.3) % であった。また、単月条件固定気候実験における温暖化条件下では、この超過確率が 58.3(36.4) % まで上昇する。更に、同様の解析を対象範囲を日本付近から北西太平洋 (WNP: 100°E-180°E, 0°N-60°N) に広げて行った結果、Jebi の最大風速 47 (54) m/s を超過する確率は単月条件固定気候実験では 31.5 (11.0) % であり、タイムスライス実験(1991-2018 年) の平均的 9 月の超過確率は 12.6 (4.8) % である。この結果を加味すると、北西太平洋で発生した TC の中でも、Jebi と同等以上の強い TC が特に日本付近を通過する割合が高いことがわかる。

最大風速 47 (54) m/s を超過する TC の個数について 150 カ月で除すことで得られる月平均数は 2018 年 9 月実験で 0.63 (0.23) 個/月、2103 年 9 月実験で 0.54 (0.34) 個/月である。これは逆数を取ると 2018 年 9 月実験では 1.58 (4.32) か月に 1 個、2103 年 9 月実験では 1.83 (2.95) か月に 1 個、それ



(a) 単月条件固定気候実験



(b) タイムスライス実験

図-6 日本付近を通過した TC における最大風速に対する発生割合。(a) 単月条件固定気候実験における確率密度関数、(b) タイムスライス実験内にて 9 月に最発達し、かつ日本付近を通過した TC を対象とした確率密度関数 (青; 現在気候, 赤; 将来気候)

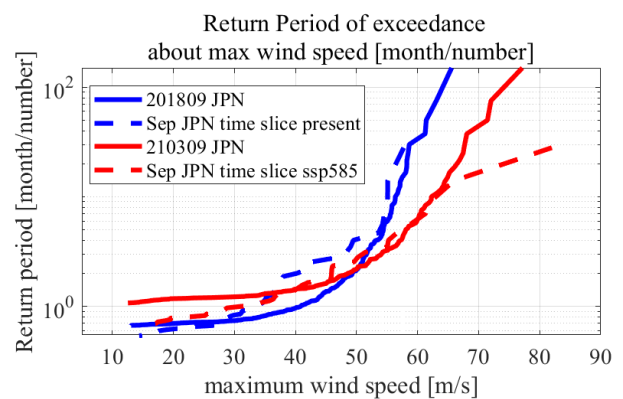


図-7 日本付近を通過する TC の最大風速が超過するまでの再現期間[月/個] (実線; 単月条件固定気候実験, 破線; タイムスライス実験, 青; 現在気候, 赤; 将来気候)

ぞれの最大風速以上の TC が通過する可能性があるということである。図-7は再現期間の曲線を示したものであり、最大風速 50 m/s 近傍を境に、現在気候と将来気候が入れ替わっている。前述のように、TC 発生数に対する割合では、いずれの最大風速でも将来気候で強い TC が増加することが分かるが、期間に対する発生確率をみると、50 m/s 以下では頻度が減少し、50 m/s 以上では増加して

いる。これは、低-中強度の TC の発生数の減少に起因する結果であり、日本付近を通過する 50 m/s 以上の TC については、発生割合と発生頻度の双方が増加する可能性を示唆している。このように、TC 変化の評価には、発生数の変化の寄与と強度変化の寄与のバランス的な評価が重要である。

4. 結論

大気 GCM にスラブ海洋モデル AGCM-Oslab を結合し全球での気候計算を行った。気候計算はタイムスライス実験と単月条件固定気候実験の 2 通りで行い、単月条件固定気候実験では Jebi が甚大な被害をもたらした 2018 年 9 月に着目した。GCM 気候予測の気候条件は、CMIP6 実験に基づく SST のマルチモデル平均から設定した。計算結果をもとに、大気 GCM 単独計算と比較することで、スラブ海洋モデルの結合による TC 全体への影響を評価した。

タイムスライス実験ではスラブ海洋モデルの結合による TC 数の抑制、及び高強度の TC の発生割合の抑制がみられた。更に既存の研究とも一致する「TC 全体の総数は減るものの高強度の TC の数は増加する」という結論が得られた。単月条件固定気候実験では、再現実験において発生した仮想的な Jebi を基準に解析を行い、その最大風速 47 m/s を超える超過確率はタイムスライス実験での 9 月条件に比べ日本付近では 22.9% 高く、2018 年が例年に比べ高強度の TC の発生確率が高い環境であったことが示唆された。将来気候条件で、Jebi 以上の高強度な TC の全発生数に対する割合は上昇した(42.2 から 58.3%)。ただし、発生数が減少するため頻度は減少する(0.63 から 0.54 個/月)。

今回使用した大気モデルの解像度は、計算コストを考慮したものだが、TC の強度特性を十全に表現するには粗く、より高解像度モデルでの気候計算が望まれる。更にはアンサンブル数の増加、並びに計算データセットの多様性が気候変動の影響を評価するうえで不可欠であり、今後の課題とする。

謝 辞

本研究は、気象研究所および京都大学防災研究所の共同研究の一環として行われ、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム(JPMXD0717935498)および科学研究費補助金(19H00782, 19K15099)のサポートによる成果である。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p., 2013
- 2) Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J.C. L., Emanuel, K., Ho, C., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., and Wu, L.: Tropical cyclones and climate change assessment: Part I: Detection and attribution., *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.100., No.10, pp.1987-2007., 2019.
- 3) 佐々木秀孝, 村田昭彦, 川瀬宏明, 花房瑞樹, 野坂真也, 大泉三津夫, 水田亮, 青柳暁典, 志藤文武, 石原幸司: 気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について, 気象研究所技術報告, 第 73 号, 95p., 2015.
- 4) 浦野大介, 志村智也, 森信人, 水田亮: 大気気候・スラブ海洋・波浪結合モデルにおける海水温低下バルク式を用いた台風強度特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_1375-I_1380, 2018.
- 5) Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development*, Vol.9, No.5, pp1937-1958, 2016.
- 6) 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, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser.II*, Vol.90A, pp.233-258, 2012.
- 7) 気象庁予報部: 全球モデルの改良と展望, 数値予報課報告, 別冊第 65 号, 164p., 2019.
- 8) Zarzycki, C. M.: Tropical Cyclone Intensity Errors Associated with Lack of Two-Way Ocean Coupling in High-Resolution Global Simulations, *Journal of Climate*, Vol.29, No.23, pp.8589-8610, 2016.
- 9) NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>, 2021 年 1 月アクセス.
- 10) Webb, A., Shimura, T., Mori, N.: Global Tropical Cyclone Track Detection and Analysis of the d4PDF Mega-ensemble Projection, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.75, No. 2, pp.I-1207-I-1212, 2019.
- 11) WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6) powered by ESGF, <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>, 2021 年 1 月アクセス.
- 12) Mizuta, R., Adachi, Y., Yukimoto, S., and Kusunoki, S.: Estimation of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3

Multi-model Ensemble Mean , Technical Reports of the Meteorological Reseach Institute, No.56, 28p., 2008.

- 13) Shimura, T., Mori, N., and Mase, H.: Future projection of ocean wave climate: Analysis of SST impacts on wave climate changes in the western North Pacific., *Journal of Climate*, Vol.28, No.8, pp.3171-3190, 2015.
- 14) Simpson, R. H., and Saffir, H.: The hurricane disaster potential scale, *Weatherwise*, Vol.27, No.8, pp.169-186, 1974