

スラブ海洋結合全球大気大循環モデルを用いた月固定 EA 実験による  
気候変動の台風への影響評価

The Assessment of the Impact of Climate Change on Typhoons Using a Slab-Ocean Coupled  
Atmospheric Global Circulation Model with Month Fixed Event Attribution Experiments

岡田智晴<sup>\*1</sup>, 志村智也<sup>\*2</sup>, 森信人<sup>\*2</sup>, 宮下卓也<sup>\*2</sup>, Adrean WEBB<sup>\*3</sup>, 水田亮<sup>\*4</sup>

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

New climate experiment was proposed using a model that combines the Meteorological Research Institute's Atmospheric Global Circulation Model (MRI-AGCM) with a slab ocean model to evaluate the impact of warming on tropical cyclones. A month-fixed EA experiment was conducted under the present and future climate under ssp585 scenarios in the climate projection experiment. The statistical characteristics of typhoons passing near Japan were evaluated. The increases in the number of strong typhoons were obtained as a change in typhoon intensity characteristics caused by climate change. Comparison with the results of a typical scenario run, confirms the validity of fixed-month EA climate experiment.

## 1. 背景

気候変動に関する政府間パネル第6次評価報告書<sup>1)</sup>は、気候変動に伴う極端現象の変化の可能性を報告している。関西圏では、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(Tropical Cyclone: 以下TC)の強さが増す可能性が示唆されている<sup>2)</sup>。

我が国の気候変動予測研究及び気候変動に伴う高潮や高波等の沿岸災害への影響評価研究では、気象庁気象研究所の全球大気大循環モデル(Meteorological Research Institute Atmospheric Global Circulation Model: MRI-AGCM)による気候計算結果が広く用いられている。MRI-AGCMは高解像度に大気場を計算し極端現象の再現を得意とするが、気候変動予測においては大気場の変動に加えて、エルニーニョ・ラニーニャ現象を含んだ海洋内の変動を考慮した大気海洋結合モデルを用いることがスタンダードとなっている。3次元海洋モデルとの結合は、大気と海洋の相互作用を合理的に考

慮することができ、気候変動予測において非常に有効な手段である。一方で、多大な計算コストが必要な上、現状では気候予測のバイアスや、数値計算上で意図しない気候変化が生じるモデルのドリフトといった問題を要する。先行研究<sup>3,4)</sup>では気候実験上の短期的な海洋の影響を考慮しつつ計算コストを抑えるため、台風と海面での1週間程度の相互作用を簡易に考慮できるスラブ海洋モデルをMRI-AGCMと結合させたAGCM-Oslabを開発した。さらに大規模アンサンブル実験より低負荷に温暖化の台風への確率評価を可能とする疑似温暖化気候実験を提案した<sup>4)</sup>。

本研究ではAGCM-Oslabモデルを用いて、温暖化による日本付近の台風への環境場の評価を目的として、岡田ら<sup>4)</sup>の気候実験を発展させ、特定の環境場を与えた場合のアンサンブル実験であるEA(Event Attribution)実験を実施した。一般的な気候実験のシナリオ(タイムスライス)実験と比較し、気候変動による温暖化レベルに対応した台風

\*1 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 Mail: tomoharuokada1@gmail.com

Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

\*2 京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\*3 東京工業大学理学院

School of Science, Tokyo Institute of Technology

\*4 気象庁気象研究所 気候・環境研究部

Department of Climate and Geochemistry Research, Meteorological Research Institute

の強度及び頻度の定量的評価を行う。

## 2. 研究方法

### (1) モデルの概要

本研究では、岡田ら<sup>4)</sup>が行った単月条件固定気候実験と同様のモデルを用いた気候計算を実施している。本紙ではモデルの概説を行う。詳細については、Zarzycki<sup>5)</sup>及び岡田ら<sup>4)</sup>を参考にされたい。気候モデルの設定は解像度による計算コストを考慮し、大気大循環モデルは、水平解像度60 kmに相当するMRI-AGCM3.2H<sup>6)</sup>を用いた。

大気大循環モデルに結合するスラブ海洋モデルでは、海上風 $U_{10}$ に依存して海面水温(SST)が下がる以下の海水温低下式を用いている<sup>5)</sup>。

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

右辺第1項は海面熱フラックスによる温度変化、第2項以降はZarzycki<sup>5)</sup>により加えられた項で、右辺第2項はTC下での鉛直混合、及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と、境界値として与えた  $SST_{clim}$  の長期的な乖離を防ぐ項であり。緩和時間( $\tau$ )で表される。各変数については表-1に示すとおりである。なお、風速は15分間の積分時間間隔のモデル出力をそのまま使用しており、台風の抽出には、海上風速及び海面更正気圧にもとづく Webb et al. <sup>8)</sup>による手法を用いた。

### (2) 月固定EA実験の概要

顕著なイベントが発生した特定の年月に着目し、温暖化条件下の気候実験結果と比較を行うEA実験をAGCM-Oslabを用いて実施した。岡田ら<sup>4)</sup>の先行研究では、2018年9月に関西国際空港を襲ったJebiを背景に、2018年9月のみを実験の対象として単月条件固定気候実験を実施した。実験の規格は、初期値を対象の9月の再解析値から与え、以後海面境界条件を固定し計算を続けることで計150か月分の気候計算を実施するものである。将来気候実験では、境界値に温暖化条件を付したものをを用いて計算を行い、境界条件の違いから気候変動による台風への影響評価を行っている。2018年9月のみを対象とした岡田ら<sup>4)</sup>の先行研究では、台風の強度特性の変化を提示するに留まり、他年月での

表-1 SST低下式のパラメータ（全球非一様のパラメータに関しては一部値を省略）

	概要	値
$\rho_0$	海水密度	1026 [kg m <sup>-3</sup> ]
$C_p$	海水の熱容量	3996 [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$d$	混合層厚さの気候値	-
$F_{net}$	熱フラックス	-
$X_{cool}$	風速 $U_{10}$ に依存して傾斜が与えられる冷却係数	浦野ら <sup>7)</sup> における最適化されたパラメータ値 (SLAB-3)
$R_{cool}$	正規化された冷却速度	4.7 [K day <sup>-1</sup> ]
$T_{deep}$	深層の一般的な水温	271 [K]
$\Delta T_0$	スケーリングされた表層と深層の海水温度の差	27 [K]
$d_0$	スケーリング混合層水深	30 [m]
$\tau$	緩和時間	最大 8 [days]
$SST_{clim}$	境界値の海面水温	-

実験結果と比較を通じた検証は行われていない。そのため、岡田ら<sup>4)</sup>の実験が2018年9月の境界条件に依存した結果であるか、あるいは長期連続計算という実験規格に依存した結果であるかは明らかでない。

そこで本研究では、ケース数（該当月）を増やし、アンサンブル化を行うことで、先行研究<sup>4)</sup>を拡張した月固定EA実験を実施した。月固定EA実験では、IBTrACS<sup>9)</sup>: WMOで取り扱われている1991-2018年の8-10月にかけて北西太平洋で発生した全storms（498個中、TCは457個）の発生数（図-3；赤線）が最も多い年(1992年条件)と少ない年(2014年条件)、その上位25%平均値の強度が最も強い年(2018年条件)と弱い年(1999年条件)（図-4；赤線）の4ケースにおいて、各年の9月を対象に気候計算を行った。実験が9月のみであるのに対し、8-10月の観測値を用いたのは、1か月だけでは発生したTCの数が非常に少なくなることで、前後の月に発生数が偏ることが想定されたためである。

岡田ら<sup>4)</sup>の先行研究ではスピニアップ期間を設けていないが、本実験では将来気候実験を160か月

間行い、最初の1か月（再解析値）を含んだ10か月間をスピンアップ期間とみなしている。また、比較対象として、岡田ら<sup>4)</sup>が同様の境界条件を元に行ったタイムスライス実験（現在気候実験；1991-2018年、温暖化差分を加えた同28年間）より9月条件値を得ることで月固定EA実験の結果とシナリオ（タイムスライス）実験を比較する。

### (3) 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には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予測データの解析にはCMIP6<sup>10)</sup>データを用い、将来気候想定としてssp585シナリオの結果を解析した。岡田ら<sup>4)</sup>の実験と同様に、本研究ではESGF (The Earth System Grid Federation)<sup>11)</sup>にて公開されているCMIP6モデルを使用している。Mizuta et al.<sup>12)</sup>の手法を参考に、OISST13 (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)月平均値（観測値）にCMIP6の温暖化差分を空間的に加えることで境界値を作成した。温暖化差分は、9月の将来変化量のマルチモデルアンサンブル平均値を用いた。CMIP6データは水平空間解像度に着目し、経度方向に200以上のグリッド（解像度約200km）を持つモデルのみを対象とし、SSTの解析では34モデル、海氷密接度(SIC)の解析では31モデルを対象とした。なお、現在気候実験では、解析値であるOISSTの9月平均値を設定した。

## 3. 結果と考察

### (1) 月固定EA実験における陸上気温とSST

本気候実験では、海面状態の規定は行っているものの、陸域においては特別な処理を施していない。そのため、長期連続計算の実施にあたり、陸域での気温のドリフトが懸念される。そこで、月固定EA実験における陸上気温（地上2m気温）のドリフトの有無に関して解析を行う。2018年条件（将来気候実験）において、陸上気温の20°毎の緯度平均の推移を算出した。解析対象である150か月間に関して、月平均値の推移を線形近似で表したところ、高緯度帯(60-80°N)では実験を通して1°C近く上昇していることがわかった。将来気候実験では、いずれのケースにおいても同様の傾向が見られ、北極域においてドリフトが認められた。一方で、北極域以外ではドリフトの傾向は見られず、現在気候実験においては高緯度帯でもドリフトの傾向は見られなかった。将来気候実験では北

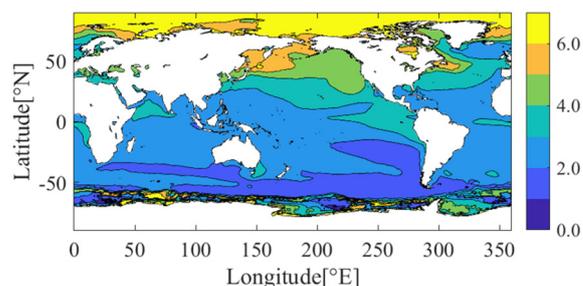
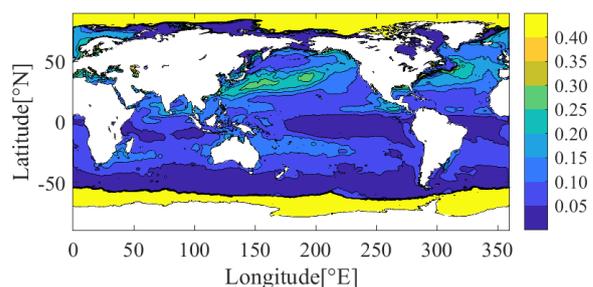
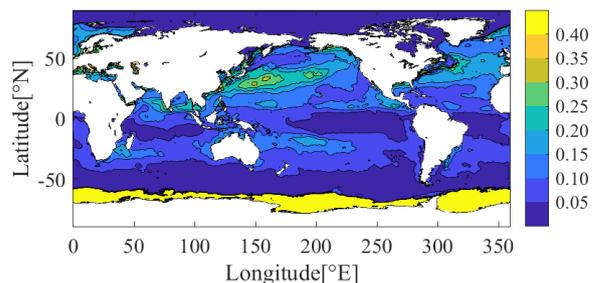


図-1：月固定EA実験におけるSST平均将来変化量[°C]の空間分布。2014年条件における将来気候実験の150か月平均値から現在気候実験の150か月平均値の差分を示す。



(a) present



(b) future

図-2：月固定EA実験における150か月間の月平均SSTの標準偏差[°C]の空間分布。(a)2014年条件の現在気候実験。(b)2014年条件の将来気候実験。

極域での海氷が概ね消失している境界条件を使用しており、極域の海氷の取扱い（境界条件の設定及びモデル上の処理）に課題が残ると考えられる。大気大循環を考慮すれば、極域のドリフトは看過できる問題ではないが、台風の発生・通過域である低中緯度帯では現在気候実験、将来気候実験のいずれにおいても、ドリフトの傾向はないことが確認された。

以下では海氷の処理に課題が残った、北極域のSSTに関して解析を行う。本研究ではAGCM-Oslabを用いて海洋の表現を行っているため、海面水温は一定ではない。図-1に2014年条件における、SSTの将来変化量の空間分布を示す。現在気

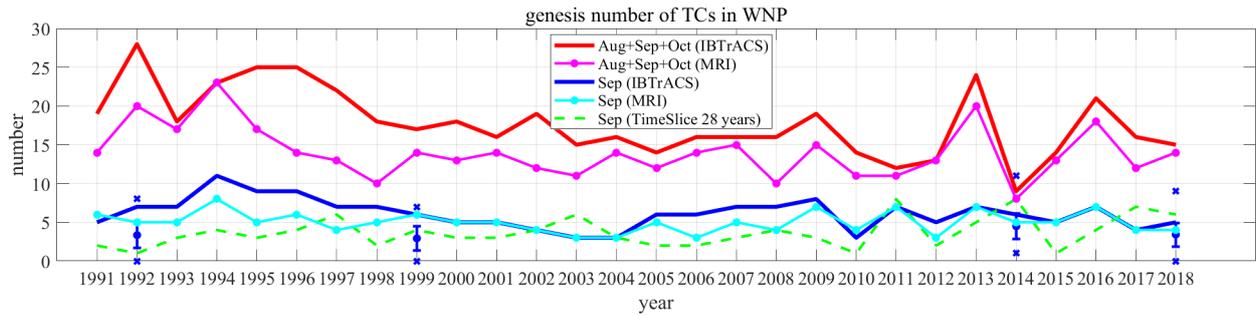


図-3：北西太平洋における月固定 EA 実験の月平均 TC 発生数(青；エラーバー)と月毎の発生数の最大値・最小値（青；×），及び観測値. 実線；観測値から得られた各年の storms 発生数<sup>9)</sup>（赤；8-10月，青；9月）と台風発生数<sup>14)</sup>（マゼンタ；8-10月，シアン；9月），緑破線；タイムスライス実験<sup>4)</sup>における各年の9月の TC 発生数.

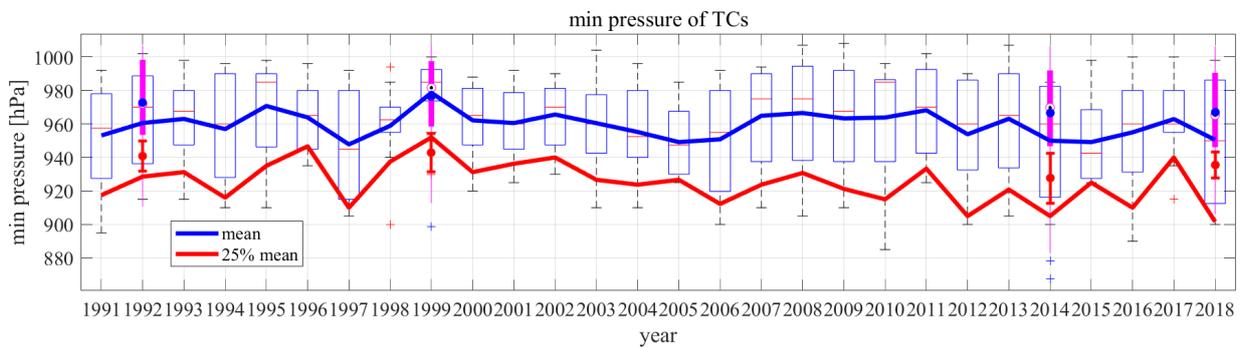


図-4：北西太平洋において発生した月固定 EA 実験の TC の最低中心気圧と観測値 [hPa]. 桃色の箱ひげ図は月固定 EA 実験（1992年，1999年，2014年，2018年）における各月の TC の最低中心気圧のばらつきを表し，桃色の外枠と小さい青点で構成された二重丸は中央値を示す. また，平均値を青点で示すとともに，上位 25%の平均値±標準偏差を赤色のエラーバーで示す. 最背面の箱ひげ図は 28年間で観測された 8-10月における storms の最低中心気圧に基づくもので，上位 25%平均値を赤線，平均値を青線で示す.

候実験と比較し，将来気候実験では北極域において 6°C以上高い状態で気候実験が行われていることが確認される. 図-2は SSTの現在・将来気候実験の 150か月間の標準偏差を示したもので，海氷の有無に付随して北極域の標準偏差が大きく異なっている. 月固定 EA 実験を実施する上で，海氷の消失を通じて，極域の SSTの標準偏差が小さくなることと，陸上気温のドリフトの関係性については，今後詳細な解析が必要である. また，TCの通過域では SSTの標準偏差が周囲に比べて高く出ている. これは本気候実験でスラブ海洋モデルにより表現される，TCの SST低下に依るものである.

## (2) GCMによる台風と観測値の比較

月固定 EA 実験は，北西太平洋で観測された storms の発生数と強度に基づいて実験条件を決定した.

本節では月固定 EA 実験の各条件下で計算された，台風を含む TC の発生数，及びその強度について観測値との比較を行い，本気候実験での実験条件の再現性を評価する. 図-3及び図-4は北西太平洋での TC の発生数とその強度について，IBTrACS<sup>9)</sup>による観測値と月固定 EA 実験の結果を比較したものである. 図-3には，気象庁が公表している観測された台風の発生数<sup>14)</sup>や，9月の IBTrACSでの storms 発生数，タイムスライス実験<sup>4)</sup>（9月に発生した台風を抽出）の結果を併記している. 気象庁では熱帯の海上で発生した TCのうち，約 17 m/s以上の最大風速を記録するものを台風と定義している. 一方で，今回使用した IBTrACSの storms データは，強度に関する下限値は設定しておらず，未判別の低気圧(Not reported)を含んでいる. そのため，8-10月の気象庁の台風の発生数は IBTrACSの storms 数と比べ少ないが，1992年の

台風発生数は 1991-2018 年の間で二番目に多く、また 2014 年は最も台風の発生数が少ないため、IBTrACS の storms 数と気象庁の台風観測数の間に、定性的な大きな乖離はない。9 月の観測数については、青実線で示した IBTrACS のデータ及びシアンで示した気象庁の台風発生数が、いずれも月固定 EA 実験の月平均発生数のエラーバーにかかることがあるものの、全体として過大である。しかし、タイムスライス実験による 9 月発生数と比較すると、月固定 EA 実験での月平均発生数は遜色ない。そのため、TC の発生数の観測との差は、モデルに起因すると考えられる。本研究で使用しているモデルの水平解像度は 60 km であり、風速・気圧はその解像度の下で均される。そのため、局地的な低気圧の表現はモデル内で十分に行えず、強度が弱く出るなど、検出される台風が少なくなっていることが想定される。

上記のように発生数について検討した結果、月固定 EA 実験における月平均発生数は 1992 年条件：約 3.3 個、1999 年条件：約 2.9 個、2014 年条件：約 4.5 個、2018 年条件：約 3.4 個であった。2014 年条件は比較的発生数が大きな値となり、標準偏差は 4 ケースいずれも 1.5-1.7 程度であった。図-4 では最低中心気圧の箱ひげ図（平均値；青・上位 25% 平均値；赤）を示している。ケースの選定には上位 25% 平均値（観測値）を使用した。月固定 EA 実験において、それらの値は 1992 年条件：約 940.8 hPa、1999 年条件：約 942.9 hPa、2014 年条件：約 927.7 hPa、2018 年条件：約 935.5 hPa であった。以上の結果より、相対的に 1999 年条件は台風の発生数が少なく強度も弱いのにに対し、2014 年条件は発生数が多く強度も強いという結果になった。また、月固定 EA 実験の平均値及び上位 25% 平均値と観測値の比較では、観測値は月固定 EA 実験の統計的変動の範囲に入る。

本研究の現在気候実験においては、初期条件として最初の 1 か月を再解析値、境界条件として OISST 月平均値を用いて実験を行ったため、そこで発生した台風の数・強度は相対的に観測に近い特性を示す可能性を期待していた。しかしながら、年月の選定における基準の特性（発生数の大小と上位 25% の強度）は気候実験の結果に相対的に反映されるものではなかった。8-10 月で観測された storms の傾向は、9 月の海面境界条件に規定された月固定 EA 実験によって必ずしも表現されず、月固定 EA 実験で計算される台風と環境場の因子

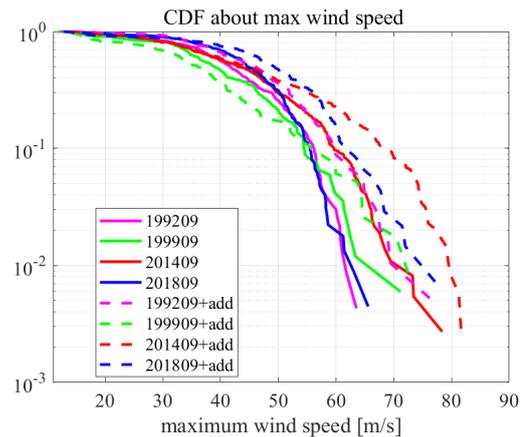


図-5 月固定 EA 実験における日本付近を通過した台風の最大風速に基づく CDF. (実線；現在気候実験、破線；将来気候実験)

の関係については、今後検討が必要である。一方で、桃色で示した月固定 EA 実験の箱ひげ図については、第一四分位数から下の強度上位 25% のひげが観測値のひげよりも長く、観測では考慮することが難しい高強度の台風については、本気候実験を通じて検討することができる。

### (3) 温暖化による台風の変化

上記では北西太平洋で発生した TC に関して、発生数とその強度を観測値と比較したが、以下では日本付近(25°N-50°N, 125°E-150°E)を通過した台風に焦点を当て、気候変動を考慮した解析を行う。図-5 に日本付近を通過した台風を対象とした、最大風速に基づく累積分布関数を示す。横軸の最大風速の増加に従って、破線（将来気候実験）が一部逆転を伴い、実線（現在気候実験）の上方に分布している。1999 年条件では最大風速 54.4 m/s で曲線の逆転が生じ、いずれのケースでも曲線の逆転はこの値以上で起きていないため、温暖化シナリオ下で高強度の台風の通過割合が増加していることが確認できる。ただし、150 か月間の連続計算で得られた台風の強度別発生割合の分布はケースごとに大きく異なる。将来変化量として加えられた海面水温の温暖化差分は今回の実験では共通であり、ケースごとに異なるのは、各々の年条件での海面水温分布の OISST 月平均値である。よって、ケース間を通じて一律に温暖化差分を加えたとしても、台風の強度特性の変化が、SST の空間分布に影響される。SST の空間分布は自然変動を伴って変化するため、気候変動による台風の強

度特性の変化を論ずるにあたっては、SST 分布は重要な要素であり、より詳細な検討が必要である。さらに極端な値を評価するため、最大風速の再現期間について検討を行った。本実験の4ケースについては、風速 40 m/s から 60 m/s の間で現在と将来の再現期間が逆転し、高強度の台風については通過頻度が上昇する結果を得た。比較対象であるタイムスライス実験における9月の結果は、28年間の9月平均場の結果と見なせ、風速 30 m/s 強で同様の逆転が生じた。本研究での風速は10分間平均値ではないものの、猛烈な台風とされる最大風速 54 m/s 以上の台風について、表-2 にタイムスライス実験を含めた全ケースでの再現期間を示す。タイムスライス実験が 28 か月分を対象としているのに対し、月固定 EA 実験では 150 か月間の長期連続計算を行っているため、全ての風速に通じるわけではないが、タイムスライス実験の再現期間値が、月固定 EA 実験 4 ケースの間に収まり、各ケースが平均場からの差分を伴い分布していることがわかる。このことは平均場から自然変動を伴い変化する環境場のうち、抜粋した4ケースの実験結果が台風の挙動についても平均場を包含した自然変動を総合的に表現できたことを意味しており、本研究の月固定 EA 実験の妥当性が示せた。

#### 4. 結論

気象庁気象研究所の MRI-AGCM にスラブ海洋モデルを結合した AGCM-Oslab を用いて独自の気候実験を実施した。IBTrACS の観測値に基づいて対象の年月を選定し、150 か月間の長期連続計算を4ケースで現在・将来気候実験ともに行った月固定 EA 実験を通じ、計算された台風の個数・強度に関して解析を行った。

一定の境界条件の下で長期連続計算を行うことで、陸上気温のドリフトが懸念されるが、台風の発生・通過域においてそうした傾向は見られなかった。

月固定EA実験で発生した台風の月平均数は観測値と比較すると過少ではあったが、同様の境界条件を用いて実施したシナリオランの9月の結果と整合し、解像度等に起因した性質の課題であると考えられる。また、日本付近を通過した台風の強度特性に関しては、いずれのケースにおいても高強度（最大風速54.4 m/s以上）の台風の発生割合が将来で増加するという結果が得られた。最大風速40-60 m/s以上の間では、現在と将来の再現期

表-2：最大風速 54 m/s 以上の台風の再現期間 [month]

現在気候実験		将来気候実験	
1992年	4.1993	1992年	3.4549
1999年	7.0091	1999年	11.1765
2014年	1.8493	2014年	1.3391
2018年	4.3447	2018年	3.0737
Time-Slice	5.4396	Time-Slice	3.5072

間が逆転しており、高強度の台風については通過頻度が上昇する結果となった。また、月固定 EA 実験における台風の強度別発生頻度はタイムスライス実験の結果を包含した分布となり、本実験規格の妥当性が示された。

#### 謝辞

本研究は、気象庁気象研究所及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)、および気候変動予測先端研究プログラム (JPMXD0722678534)、創発的研究支援事業 (JPMJFR205R)、科学研究費補助金 (19H00782, 19K15099, 22K14329) のサポートによる成果である。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- 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) 浦野大介, 志村 智也, 森 信人, 水田 亮 : 海洋表層混合を考慮した全球大気・波浪・海洋結合モデルによる台風強度特性の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I\_1117-I\_1122, 2020.
- 4) 岡田 智晴, 志村 智也, Adrean WEBB, 宮下卓也, 森 信人, 水田 亮 : 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I\_961-I\_966, 2021.
- 5) 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.
- 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 Sim-ulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser.II*, Vol.90A, pp.233-258, 2012.
- 7) 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.
- 8) Webb, A., Shimura, T., Mori, N.: Global Tropical Cy-clone 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.
- 9) NOAA, National Centers For Environmental Information, International Best Track Archive for Climate Steward-ship (IBTrACS), <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>, 2020 年 12 月アクセス
- 10) 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, *Geosci-entific Model Development*, Vol.9, No.5, pp1937–1958, 2016.
- 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.: Estima-tion of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3 Multi-model Ensemble Mean , *Technical Re-ports of the Meteorological Research Institute*, No.56, 28p., 2008.
- 13) NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst> , 2021 年 1 月アクセス.
- 14) 気象庁, 台風の発生数[日本標準時基準], [https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/generation/generation\\_j.html](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/generation/generation_j.html), 2022 年 5 月アクセス