

大アンサンブル台風予測資料から直接台風災害リスク を評価する際の課題について

中條 壮大¹⁾・島田 大輝²⁾

1) 大阪公立大学 大学院工学研究科都市系専攻 e-mail: nakajo@omu.ac.jp

2) 大阪公立大学 大学院工学研究科都市系専攻

観測資料の乏しい台風災害リスクを評価するのに地球シミュレータを用いた大アンサンブル気候予測データセットは有用である。しかし、その予測結果を使用する際には、適切な台風抽出法が必要となるため、事前の分析から適切な前処理が必要であることと、前処理を行っても台風特性の頻度分布には再現性バイアスが存在すること、60年15アンサンブルという膨大な予測結果を用いても、局所的な海域の台風災害リスク評価では、資料数が不足しているため不確実性が増すことが示された。

Key words : 台風, 気候変動, リスク評価, GCM モデルバイアス

1. はじめに

気候変動にともない台風のような極端気象現象の特性も変化すると予想されている。IPCC AR6によれば、気温や降水量の予測に比べると予測モデルの違いによって生じる不確実性の幅は大きい。台風（ここでは便宜上、ハリケーンのような熱帯低気圧も台風と称する）の総発生数はおおむね減少し、強い台風の存在比は相対的に増加する傾向にある¹⁾。弱い台風は減少する一方で、強い台風が増加するという傾向は、防災対策上は社会の災害経験が減るにもかかわらず、稀に経験する台風は強化されるということになり、脆弱性の高まった社会に増大したハザードが襲来するという、防災対策上は危険側への変化を予測しているといえる。

台風は毎年のように日本を襲来する。しかし、特定の海域に限定すれば、強度の強い台風が、近接した場所を、危険半円側を通過する、といった悪条件が揃うことはやはり稀であり、低頻度大災害の特徴を有している。そのため、日本沿岸の防護施設の設計に想定台風として使用されてきた伊勢湾台風や室戸台風といった強大な台風の経験は決して多くない。図-1は全球の熱帯低気圧観測資料データベース IBTrACS (NOAA)²⁾に記録されている台風のデータから、大阪周辺の Area 1 (E134-136°, N34-35°, 図-2 参照)を通過した1965~2020年の25事例を抽出し、通過時の最小中心気圧別に頻度分布を示したものである。975 hPa 付近にピーク値を有しているが、985 hPa 付近の資料は無いなど全体的に楕円の分布となっており、頻度評価をするには資料数不足が明らかである。60年近い観測資料があってもこうした資料数であるため、100年や200年に1度というような低頻度大災害の評価は非常に難しいのが現状である。

同じことは気候変動による将来の台風災害への影響評価でもいえる。スーパーコンピューターを用いた将来予測計算では、台風の再現性を十分に高めるためには最低でも20 km程度の格子サイズで大気循環モデル GCM を解く必要がある³⁾。しかし、20 km という解像度はスーパーコンピューターを用いても負荷が大きく、

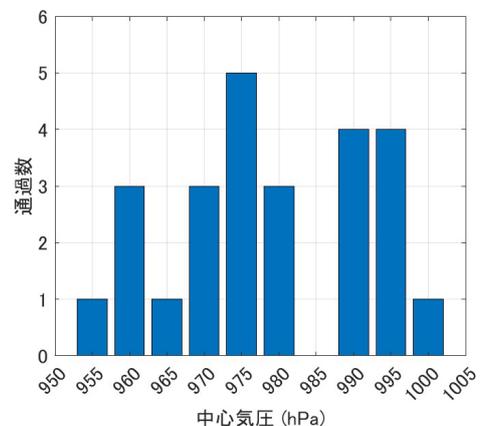


図-1 大阪周辺 (Area 1) における台風の中心気圧別の通過数

長期間の解析は難題である。2017年には文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムによって d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change) と呼ばれる大アンサンブル気候予測データセットが整備された⁴⁾。そのうち、1951年から2010年の気候場(非温暖化実験)は現在気候に相当するが、異なる初期条件と境界条件である海氷と海水温に摂動を与えた異なる100アンサンブルの解析結果であり、60年×100で資料数では6,000年相当と、これまでにない長期間のGCM解析結果となっている。さらにこのd4PDFは+4℃上昇した将来気候における60年についても、異なる海水温分布予測6ケースで各15アンサンブルの5,400年相当の予測結果がある。気候変動の具体的な適応策を考えるためには統計資料数の不足が大きな課題であり、それを解消するために取り組まれたd4PDFプロジェクトの影響は大きく、これを利用して豪雨や干ばつなど様々な気象災害に関する多数の研究成果が出されている。しかしながら、d4PDFは60km解像度のGCMの出力結果であり、台風の襲来頻度や強度の再現性は十分とはいえない部分がある。とはいえ、他に類を見ない膨大な台風資料であるため、課題を理解し結果の解釈に仮定を交えながらうまく活用することが望ましい。

現在進行中の気候変動予測先端研究プログラムではこのd4PDFデータの後継が公表される予定である。しかし、その前に本稿では改めて現在のd4PDFデータに含まれる台風資料の再現性や将来予測結果について、その特性を分析した結果を整理しておきたい。

2. 元データ

d4PDFは60km GCMの解析結果であり、降雨量や気圧、風速などの面的な分布を有する大規模データセットである。台風特性を分析するためには、まずこのデータから各時刻の台風の位置や中心気圧などの代表値を識別し、台風経路データを抽出する必要がある。その方法は幾つか提案されてそれぞれに特徴があるが^{5),6)}、ここではShimuraら⁷⁾の方法によって抽出された公開データセット⁸⁾を使用する。Shimuraらは(1)局所的な海面更正気圧MSLPが周囲400km圏内の平均値より閾値 P_{limi} を超えて低下していること、(2)最大地表面風速が閾値 U_{surf} 以上であること、(3)対象地が南緯45°から北緯45°であり、発生海域が南緯25°から北緯25°以内であることなどの条件から台風を識別している。この手法は上層大気の情報を使用しないため簡易な判定方法であるが、上層大気の条件も使用したMurakamiの方法⁶⁾で抽出した結果と台風の最大風速毎の頻度分布を比較しながら閾値を $P_{limi} = 2$ hPa, $U_{surf} = 11$ m/sと設定している。

3. d4PDF 台風経路データの観測値との比較とデータスクリーニング

図-3に観測値であるIBTrACSとd4PDF(現在気候)の台風経路図を比較したものを示す。d4PDFの解析結果は

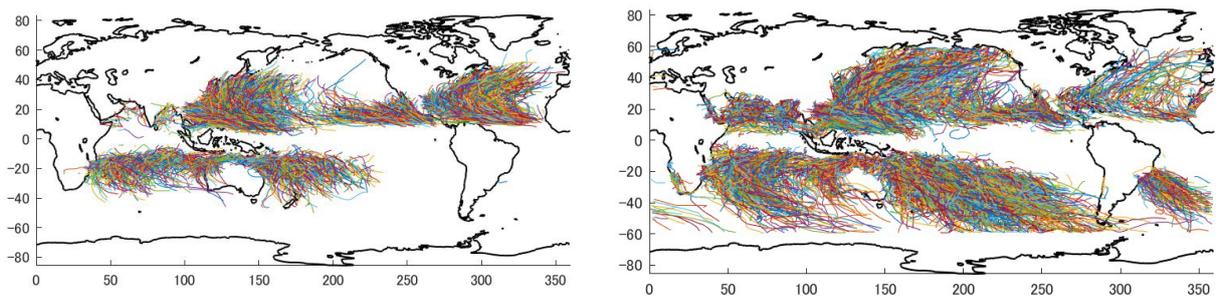


図-3 台風経路図の比較 (左) 観測資料 IBTrACS, (右) 60 km GCM データ d4PDF からの抽出結果

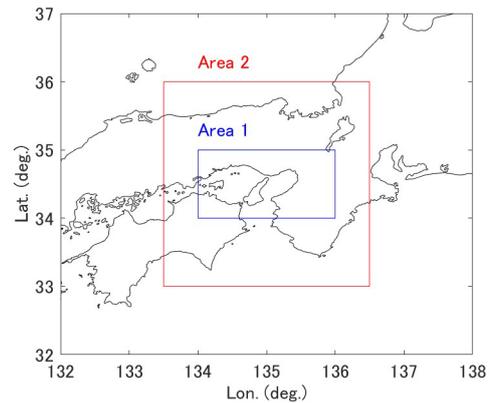


図-2 大阪周辺の検討領域

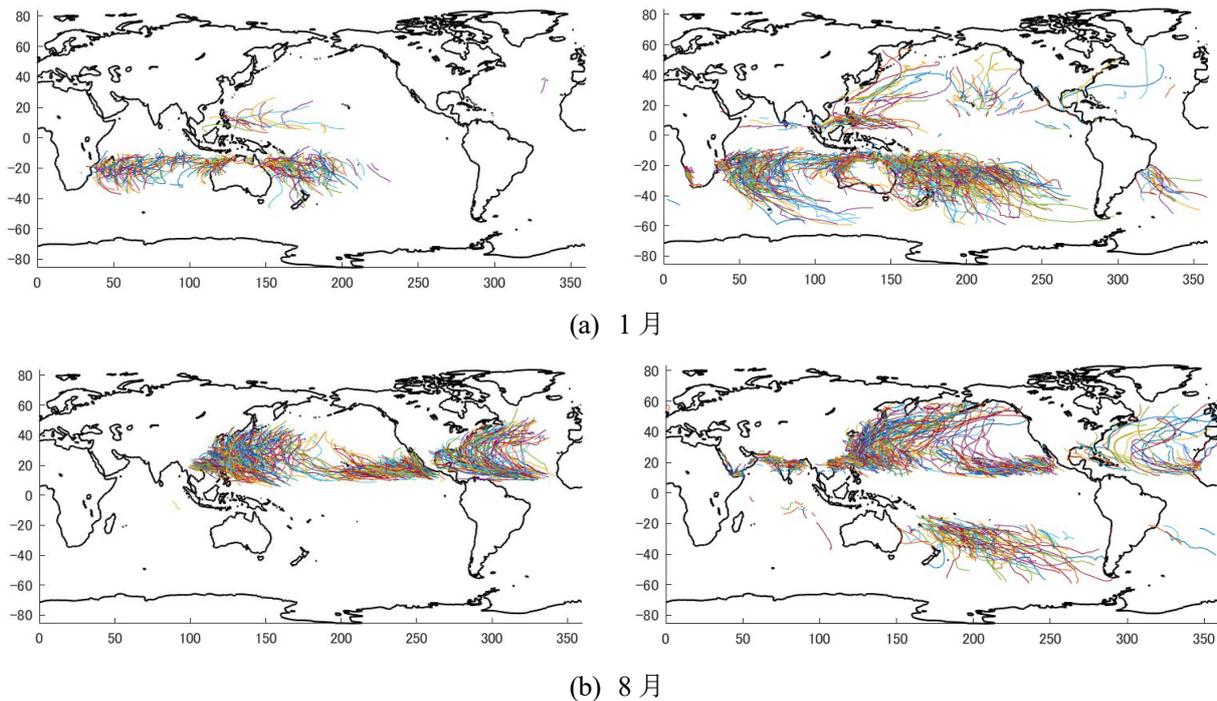


図-4 月別の台風経路図の比較例 (左) 観測資料 IBTrACS, (右) 60 km GCM データ d4PDF からの抽出結果

60年100アンサンブル存在するので、ここでは1アンサンブルの結果のみを一例として示している。気候モデルはいわゆる再解析値とは異なり、解析対象年が同じであっても、擾乱の影響で観測と同じ台風は発生しないことから、同じ台風を比較しているわけではないことに注意が必要である。また d4PDF は長期的な温暖化トレンドは除去された環境場の解析結果である⁴⁾。図のように、d4PDF の台風経路データは大西洋でのハリケーンの発生数は実際よりも少ない。その一方で観測資料は1件程度しかない南米で多数発生している。また、アフリカのナミビア付近や紅海付近でも多く発生している。こうした観測結果と異なる傾向は、上述した台風経路データの抽出方法に依存している可能性がある。すなわち、Shimura の方法では台風の有する暖気核などの鉛直構造を抽出要件としていないため、発生海域の緯度を限定していても、同様に嵐をもたらす温帯低気圧と完全に分離可能ではない可能性がある。そこで、季節毎に台風経路を分離し比較を行った。

図-4 は月別の台風経路を比較したものであり、代表月として1月と8月の結果を示している。北半球と南半球で台風の活動期が異なるため、観測資料では北半球の冬季である1月には北半球で台風資料は少なく、中緯度まで進行する例も限定的である。南半球は台風の活動期にあたり、中緯度まで台風が到達している。一方で北半球の夏季である8月には南半球で台風資料が少なく、北半球では中緯度まで台風が到達する、という逆転が生じている。d4PDF の台風ではこうした季節変化が不明瞭であり、冬季に日本近海に進行する「台風」など不自然な資料を含んでいる。また細部を確認すると d4PDF 台風経路の中には明らかに陸上で発生しているものも一部含まれる。台風が温かい水面からの水蒸気供給を原動力として発達するメカニズムを考えれば、こうした資料を台風とすることも不自然であると考えられる。

以上の比較から、d4PDF 台風経路に含まれる不自然な台風をスクリーニングにより除去した後に、台風特性の比較をすべきと考えた。北半球と南半球で資料を区分し、それぞれで月毎に台風の(最北・最南)到達地点の緯度の平均値 μ と標準偏差 σ を算定した。この μ と σ の月変化を確認すると年間の周期性が明瞭であったことから、正弦関数で近似し、北半球では $\mu+3\sigma$ 、南半球では $\mu-3\sigma$ を到達緯度の閾値として設定した。統計的な予測から観測値に見られる経験的な到達緯度の変動のうち約99.7%相当は採用され、0.3%程度の例外経路が除去されることになる。

図-5 は台風経路のスクリーニングを行った結果であり、陸上で発生した経路を除いたもの(C1)、陸上発生に加えて上記の季節毎の到達緯度条件で除去したもの(C2)の結果を比較する。図-4の右図と見比べると、C1条件に

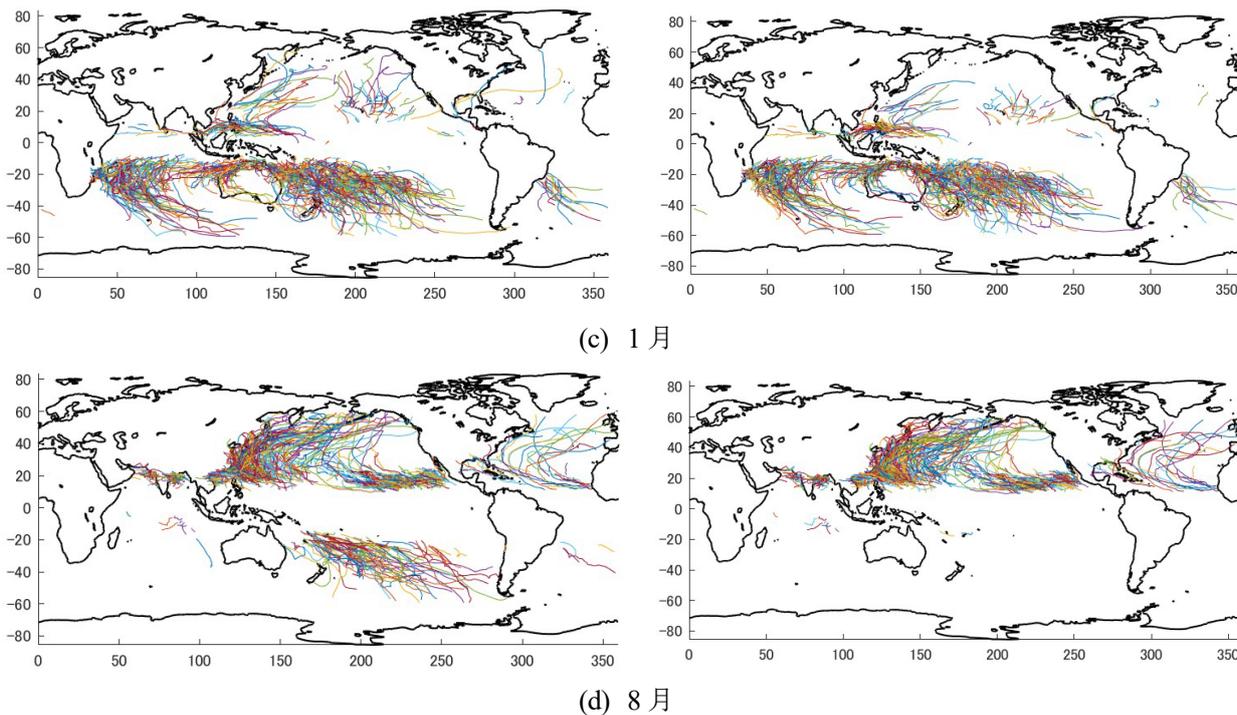


図-5 月別の台風経路図の比較例 (左) 陸上発生を除いた C1, (右) 陸上発生+季節毎の到達緯度条件で除いた C2

より観測資料には見られなかった「台風」が除去されていることがわかる。またブラジル付近で発生していた「台風」もいくらか減少している。C2 条件では北半球および南半球における活動期外の台風経路が減少している。特に南半球においてはその変化が著しいが、観測値から分析された到達緯度の平均(絶対値)が北半球に比べて小さいことが影響していると考えられる。一方で1月に日本列島を通過する「台風」は除去できたが、ハワイ付近で発生し北上する「台風」は残存している。こうした台風情報を正しいと判断するかどうかは、台風発達メカニズムやそれに関連した台風抽出法の研究の進展が必要である。

図-6 に北西太平洋域の各緯度を通過する台風数について観測値と比較した結果を示す。d4PDF の結果については 60 年 100 アンサンブル全ての結果の平均値である。今回のデータスクリーニングによって北西太平洋の台風資料数はそれほど大きく変化していない (C1 と C2)。また、北緯 35 度付近までは観測値の通過数を概ね再現できていると考えられる。これは Shimura の方法が抽出パラメータを観測値に整合するように調整した結果によると推測される。ただし、北緯 35 度以北になると観測値よりも多く通過している。図中に参考として示した C3 は台風の定義である最大風速が 17.2 m/s という条件を C2 の条件に追加した結果である。この条件を加えると台風通過数は低緯度ほど観測値よりも減少する。これは GCM の風速精度が格子解像度に依存するため、観測値の定義をそのまま当てはめて比較することが容易ではないことを示している。

北西太平洋の通過数は今回のデータスクリーニングでそれほど影響を受けていないことが確認できたが、図-5 で見たように全球としては大きく変化している。d4PDF の元データは年平均で 144.8 個、スクリーニング C1 により 111.7 個、C2 により 98.4 個、C3 により 70.1 個となる。1980 年以降の台風の年間発生数の平均値は 78.4 個で標準偏差は 8.4 個である。すなわち、台風発生数という観点からもスクリーニングの必要性は示され、数値だけから判断すると C2 と C3 の間くらいに

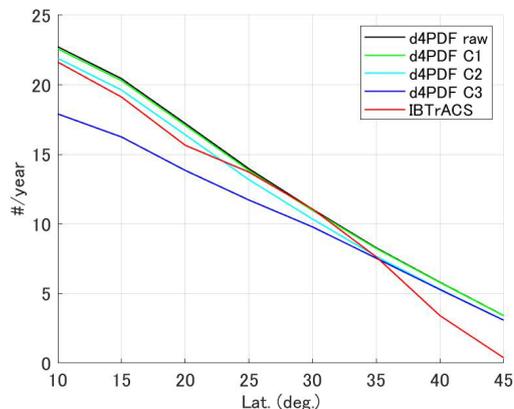


図-6 北西太平洋域 (E120-180°) の各緯度を通過する台風数の変化比較

最適条件があると思われるが、経路データのみでさらに適正なスクリーニングができるかという限界があると考えている。このように GCM 結果から台風を評価しようとする際には、GCM の再現性という課題に加えて、適切な台風抽出という課題があり、その結果から台風災害のリスク評価をしようとする頻度評価に不確実性が含まれることになる。

4. 大阪周辺における台風強さの比較

図-7 に観測値である IBTrACS データと d4PDF データの中心気圧分布を比較した結果を示す。ここでも d4PDF の結果は 60 年 100 アンサンブルの平均値である。頻度分布の比較精度を高めるため、図-1 に示した結果よりもやや広域の Area 2 (図-2) を通過した台風で比較している。ここでは C2 のデータスクリーニング結果を評価するが、元の d4PDF 台風経路データから求めた結果も合わせて示している。

まず観測値と d4PDF の頻度分布の概形はやや異なり、d4PDF の分布の方が分布の裾野は広いが、弱い台風側に分布が偏った形状をしている。すなわち 960 hPa 以下の比較的強い台風の頻度を過小評価している可能性がある。また元の d4PDF データとデータスクリーニング後の結果には大きな差が生じていない。これは図-6 で見たように通過数に大きな差が生じていなかったことと整合的である。平均値で比較すると、観測値は 976.1 hPa、元の d4PDF データは 984.7 hPa、C2 スクリーニング後は 984.3 hPa と観測と d4PDF の結果には約 6-7 hPa 程度の過小評価が生じており、災害影響評価においては無視できない差である。こうした中心気圧の再現性バイアスは海域によって異なる。台風の強まる過程だけではなく、どこで発生した台風がどのような経路を辿って到達するかという経路の再現性も影響していると思われるため、単純に対象地の台風特性を観測値に合うように補正して解釈すればよいか、という難しい問題である。

5. 台風特性の将来変化について

図-8 に図-6 と同様に北西太平洋域の各緯度を通過する台風数について現在と 4°C 上昇の将来とで比較した結果を示す。台風資料に C2 のスクリーニングをした結果である。CC や GF などの違いは海面温度の異なる予測結果の違いであり、モデルアンサンブルに相当する。現在気候は 60 年 100 アンサンブルの平均値、将来気候は各々 60 年 15 アンサンブルの結果である。北西太平洋では台風の通過数は減少する傾向にある。これは全球での台風発生数が減少するという既往の知見と対応している。予測モデルの違いは MI を除いて低緯度では大きな差が見られないが、日本列島の位置する北緯 30 度以北になると差がやや大きくなっており、予測の不確実性は高いと考えられる。しかし、大まかに見積もれば N30° で観測値が 10 個/年に対し、将来は 7~8 個/年に変化し、5 個/年という予測もあると評価できる。沖縄の位置する N25° では将来には本州で経

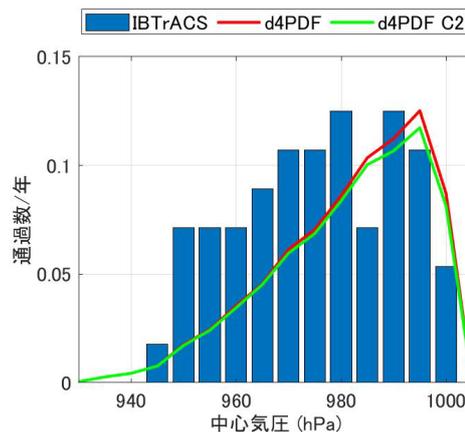


図-7 大阪周辺 (Area 2) における台風の中心気圧別の通過数比較

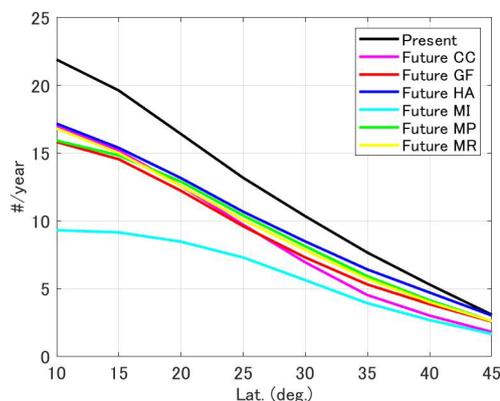


図-8 北西太平洋域 (E120-180°) の各緯度を通過する台風数の変化比較

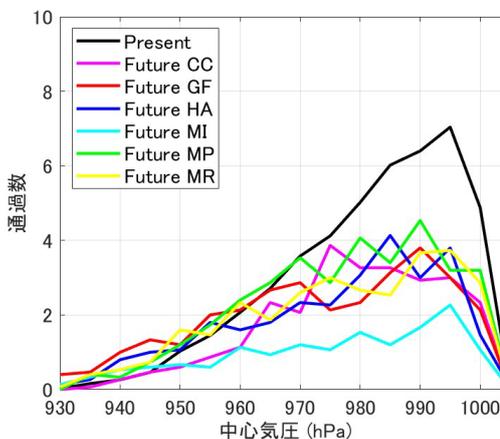


図-9 大阪周辺 (Area 2) における台風の中心気圧別の通過数の将来変化

験している程度の台風数になる可能性がある。

図-9に図-7と同様に大阪付近のArea 2を通過する台風の中心気圧別通過数を示す。現在気候は60年100アンサンブルの平均値、将来気候は各々60年15アンサンブルの結果である。現在と比較し、将来の通過数が減少するのにもない、弱い台風の通過数が顕著に減少している。一方で970 hPa付近より将来の台風と通過数が変わらなくなり、960 hPa以下の比較的強い台風では将来の通過数が増える予想も見られる。このように冒頭で述べたような将来の台風リスク変化が大阪付近でも確認されるが、将来予測結果はモデル間で比較的ばらつきが大きい。またArea 2のような比較的大きな領域で、d4PDFの大アンサンブル資料であったとしても、局所的なリスク評価をする場合には頻度分布は滑らかではなく正確な評価が難しいことがわかる。加えて図-7で見たように中心気圧などにはGCM固有のモデルバイアスが存在する。上記の課題はあるものの、本結果から平均値で将来変化を評価するならば、現在気候で984.3 hPaに対し、CC : 982.3 hPa, GF : 976.2 hPa, HA : 978.7 hPa, MI : 977.5 hPa, MP : 980.0 hPa, MR : 979.1 hPa とばらつきはあるものの2~8 hPa程度将来の台風は強くなる傾向にある。

6. まとめ

公開されている60 km GCMの大アンサンブル将来予測資料であるd4PDFの台風経路データを分析し、台風経路抽出における課題と抽出結果に含まれる不自然な「台風」資料をスクリーニングによって除去する前処理の影響を分析した。提案するスクリーニングにより不自然な資料は一定取り除かれ、全球の台風数は観測数に近づくが、経路データから判定するには限界もある。また今回の前処理によって北西太平洋の結果はそれほど影響を受けなかった。上記のような前処理をしても、日本にやってくる台風の中心気圧の再現性バイアスは依然として残り、頻度分布の差や平均値では6-7 hPa程度観測値よりも弱い結果を示している。北西太平洋の台風の通過数は将来に減少し、その変化予測は北緯30度以北でモデル間の差が大きくなった。将来の通過数減少にともない、弱い台風の通過数が顕著に減少するが、予測結果はモデル間で比較的ばらつきが大きい。比較的大きな領域でも、直接d4PDFの台風資料からリスク評価をするのは容易ではないことが示された。

参考文献

- 1) IPCC AR6 WGI (2021), AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Chap. 11. Weather and climate extreme events in a changing climate, 3849p.
- 2) Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann (2010): The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 363–376, doi:10.1175/2009BAMS2755.1.
- 3) Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki, and A. Noda (2006): Tropical cyclone climatology in a global warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 259–276, doi:10.2151/jmsj.84.259.
- 4) Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, M. Kimoto (2017) Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, July, pp.1383-1398.
- 5) Horn M, Walsh K, Zhao M, Camargo SJ, Scoccimarro E, Murakami H, Wang H, Ballinger A, Kumar A, Shaevitz DA et al (2014) Tracking scheme dependence of simulated tropical cyclone response to idealized climate simulations. *J Clim* 27(24):9197–9213
- 6) Murakami H (2014) Tropical cyclones in reanalysis data sets. *Geophys Res Lett* 41(6):2133–2141.
- 7) Shimura, T., N. Mori and M. A. Hemer (2016), Projection of tropical cyclone-generated extreme wave climate based on CMIP5 multi-model ensemble in the Western North Pacific, *Climate Dynamics*, Vol.49(4), pp.1449-1462.
- 8) 気候変動予測・影響評価に関するデータ, 京都大学防災研究所, 気候変動適応研究センター沿岸リスク研究領域, https://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/japanese/?page_id=5004, 2024/9/17 参照.