

GCM から得た大アンサンブルデータを用いた全球確率台風モデルの開発

Development of Global Stochastic Tropical Cyclone Model

by using large ensemble simulation data of GCM

河海工学分野 梅田 尋慈

River and Coastal Environmental Engineering Jinji UMEDA

熱帯低気圧 (TC) による災害の長期再現期間を考えた対策において TC の統計的特性の把握が必須である。現在では、全球確率台風モデル (GSTM) を用いた統計的特性の把握が試みられているが、TC の観測資料の不足により再現性の低下が懸念されている。本研究では GCM による大アンサンブルデータ (d4PDF) を GSTM に用いることによる再現性向上の検討を行った。その結果、観測資料が不足している地域において中心気圧や進行方位などの TC 特性値における頻度分布の再現性の向上が見られ、確率台風モデルに大アンサンブルデータを用いることの有用性を示した。

Statistical characteristics of tropical cyclone (TC) are analyzed using global stochastic tropical cyclone model (GSTM). However, since GSTM is simulated from the statistical characteristics of small number of observed TC data, degradation of reproducibility is a problem. In this research, we studied improvement of reproducibility by using GCM's large ensemble data (d4PDF) for GSTM. As a result reproducibility was improved for areas with a small number of TC data.

1 研究背景, 目的

沿岸域の水害対策の重要性は、人口・資産の集積により益々増大している。熱帯低気圧 (以下、TC) により生じる高潮もその水害の一つである。長期再現期間を考えた TC 対策においては各地域において襲来する TC 強度とその頻度といった TC の統計的特性の把握が必須である。また、林ら¹⁾は、高波・高潮の推算には、TC 強度に加えて TC の発生から消滅までの進行経路や進行速度といった情報が重要と示唆していることから全球スケールでの把握が必要である。しかし、全球スケールでの TC の観測資料は約 60 年程度しかなく、TC の統計的特性を観測資料から十分に把握することは困難である。近年では、TC の物理過程を模擬した全球大気モデル (GCM²⁾) から実施された大アンサンブル実験 (d4PDF³⁾) による大量の TC 資料 (6000 年程度) を用いて統計的特性の把握が試みられている。しかし、d4PDF には固有のモデルバイアスが含まれており、さらに d4PDF を用いた場合でも TC の統計的特性の把握には限界があるとされている (安田ら⁴⁾)。一方、Monte-Carlo 法 (以後、MC 法とする) を応用した確率台風モデルを利用した方法からも TC の統計的特性の把握が試みられている。

確率台風モデルは、TC の観測資料に対し、それらの発生・発達時の統計的特性については観測期間中に確率分布が変化しないと仮定し、その統計特性を満足するような確率分布から TC の発達過程を MC 法によって逐次計算する

方法である。MC 法により簡易的に TC の発達過程を模擬するため、例えば 10000 年程度の TC 資料を作成することが可能である。

確率台風モデルは幾つかの手法が提案されており、端野・桑田⁵⁾などの自己回帰モデルを利用した確率モデルが代表的な例である。また、中條ら⁶⁾は対象地点における TC 特性値 (中心気圧、進行方位、進行速度) の時間変化率が確率密度関数 (PDF) が前時刻値の関数となることを仮定した時系列相関モデルを全球スケールで適用した全球確率台風モデル (GSTM) を開発した。GSTM は、大量の TC 資料を全球において作成することが可能であり、TC 災害の長期再現期間の推定も可能となった。しかし、中條らは TC の観測資料を基礎資料としてモデル化するために観測資料が不足している地点については GSTM の再現性が低下することを示している。したがって、TC の観測資料の不足を補うことができれば全球において再現性のある大量の TC 資料を作成することができ、より現実的な TC の統計的特性を把握できると考えられる。

そこで、本研究では d4PDF を GSTM の基礎資料として利用することに着目した。さらに、d4PDF を GSTM の基礎資料として用いる前処理として TC の特性値 (中心気圧および進行方位) に対してモデルバイアス補正を行い、その資料から新たにモデルを構築することによる再現性の向上の検討を行った。

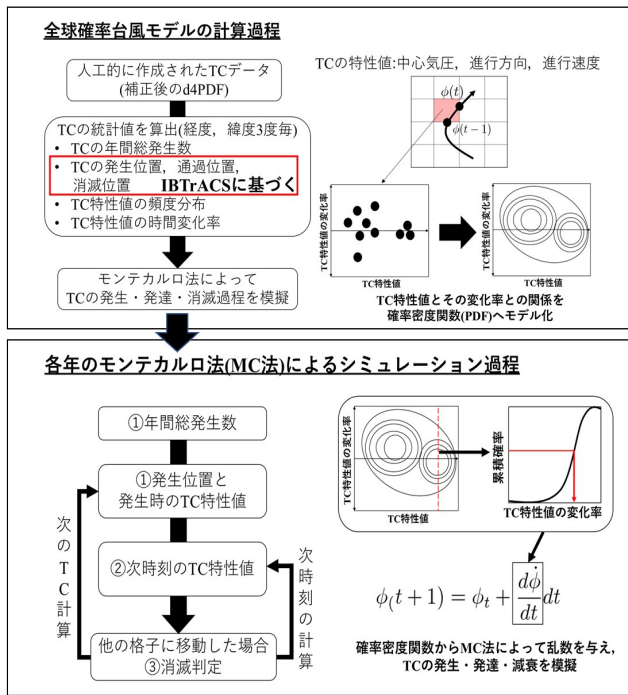


図-1 GSTM の解析フロー

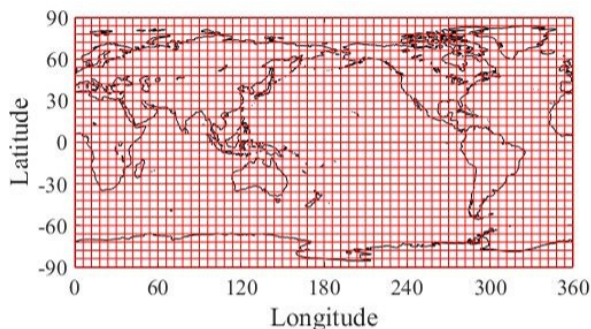


図-2 全球の計算領域

2 モデルおよび使用するデータの概要

2.1 全球確率台風モデル

本研究で用いる全球確率台風モデル (GSTM) は中條らの GSTM に基づいている。そのため、モデル化した TC 特性値は進行方位、進行速度、中心気圧であり、進行方位および進行速度については GSTM を構築する基礎資料の TC の緯度・経度情報から別途算定した。

GSTM の解析フローを図-1 に示す。はじめに、全球を図-2 に示すように緯度、経度 3 度毎の小領域に分割し、基礎資料から各小領域に進入する TC からモデル内の各係数を決定する際に必要な統計量を算出する。統計量を算出する項目としては TC の年間総発生数、年平均発生数、年平均通過数、年平均消滅数、特性値とその変化率である。

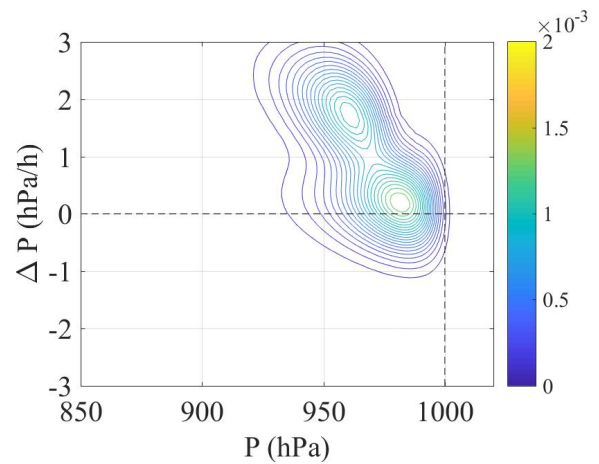


図-3 TC 特性値とその時間変化率における結合 PDF

GSTM ではそれらの算出した統計量を用いて MC 法によるシミュレーションを行う。MC 法によるシミュレーションを行う際には緯度、経度 1 度に補間したものを利用した。また、MC 法によるシミュレーションは大きく分けて生成・発達・消滅の 3 過程に分かれる。1 つめの生成過程では、年間総発生数、発生位置、発生時の特性値の統計量から確率密度関数 (PDF) を作成し、その PDF から MC 法によってそれぞれの値を決定していく。年間総発生数の PDF については対数正規分布を用いて決定し、その後個々の TC の発生地点について年平均発生数の統計量から求めた 2 次元 PDF で決定した。発生時の TC 特性については、各特性毎に発生時の PDF を基に決定した。

2 つめの発達過程では、各小領域において TC 特性値の主成分分析 (PCA) を基に推定した図-3 に示す TC 特性値 (中心気圧) とその時間変化率との同時確率密度関数 (JPDF) を用いて、現時刻値の特性値 ϕ_t に対応した特性値の時間変化率 $d\phi/dt$ に関する 1 次元 PDF を得る。この PDF に対して MC 法を用いて式 (1) における $d\phi/dt$ を求め、刻み時間 dt を乗じて次時刻の特性値 ϕ_{t+1} が得られる。

$$\phi_{t+1} = \phi_t + \frac{d\phi}{dt} dt \quad (1)$$

TC が隣接する小領域を越えてしまった場合、 dt を小さくし再計算を行った。また、移動先の小領域において、移動方位が $\mu \pm 2\sigma$ (μ : 平均値, σ : 標準偏差) から外れた場合も再帰計算を行った。

3 つめの消滅過程では、隣接する小領域へ移動する度に TC の消滅判定を行った。消滅判定の結果、消滅と判定されれば次の TC の計算に、消滅しなければ次の時刻の計算へと進む。消滅判定は、(1) 基礎資料のトラックデータが存在しない地点に進入した場合、(2) 計算された TC が環境場の気圧に相当する 1015hPa 以上となった場合、(3) はじ

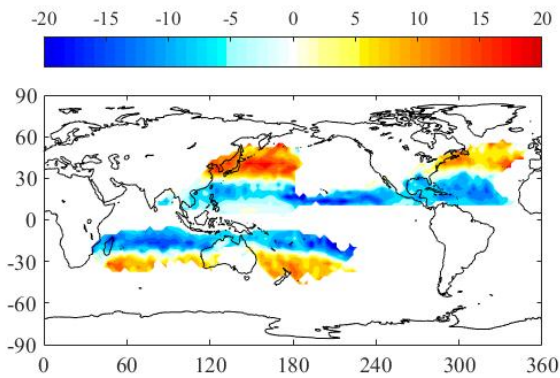


図-4 平均中心気圧の差 (観測値 - d4PDF)

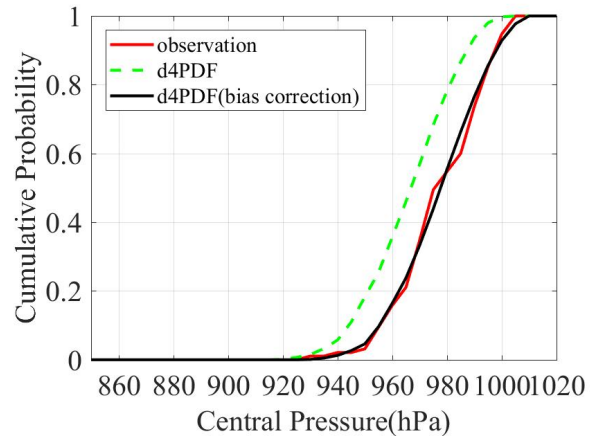


図-5 d4PDF および観測値の中心気圧の累積確率

めに求めた通過数および消滅数の統計量を用いて消滅確率 (通過数/消滅数) を算出し、MC 法による確率判定の結果、消滅と判定された場合の 3 条件とした。

2.2 使用するデータ

d4PDF は気象研究所の GCM (MRI-AGCM3.2) で計算された水平解像度約 60 km の気象予測データである。このデータには 1951 ~ 2011 年の過去実験と RCP8.5 シナリオが想定された 2051 ~ 2111 年の 4 上昇実験があり、各々 100 および 90 メンバーのアンサンブルのシミュレーション結果が提供されている。本研究では、過去実験から Murakami ら²⁾ に従って抽出した TC のトラックデータから 6 時間毎の中心座標 (緯度、経度) および中心気圧の情報を用いた。ただし、梅田・中條⁷⁾ により d4PDF における TC の発生位置、消滅位置および TC 特性値 (中心気圧・進行方位) にはモデルバイアスが含まれていることが確認されている。そのため、本研究では、モデル内の TC の特性値を決定する基礎資料には次章で説明する d4PDF の補正後を用いた。また、TC の発生位置および消滅位置を決定する基礎資料には TC の観測資料を用いた。観測資料には IBTrACS.v02r01⁸⁾ のデータを使用した。

3 大アンサンブルデータのモデルバイアス補正

図-4 は全球における 1961 年 ~ 2008 年の観測値の平均中心気圧から d4PDF の平均中心気圧を差し引いたものである。図-4 より北半球および南半球における緯度 0 ~ 30 度付近までは負の値を示しており、観測値よりも d4PDF の平均中心気圧の方が高い値、つまり d4PDF の方が平均的に中心気圧が弱くなることを示している。さらにそれよりも高緯度では正の値を示しており、観測値よりも d4PDF の方が平均的に中心気圧が強くなる傾向を示している。このように、d4PDF は観測値よりも中心気圧を過小評価および過大

評価するバイアスがあり、その程度は緯度毎および海域別によって異なる。そのため、全球を緯度経度 3 度の小領域に分割し、小領域毎にモデルバイアスによる影響を考慮したバイアス補正を行った。また、バイアス補正には d4PDF と観測値の平均値および標準偏差を一致させるように補正を行う正規分布型バイアス補正法を適用した。以下にその補正式を示す。

$$\phi'_{d4PDF} = \frac{\sigma_{ob}}{\sigma_{d4PDF}} (\phi_{d4PDF} - \overline{\phi_{d4PDF}}) + \overline{\phi_{ob}} \quad (2)$$

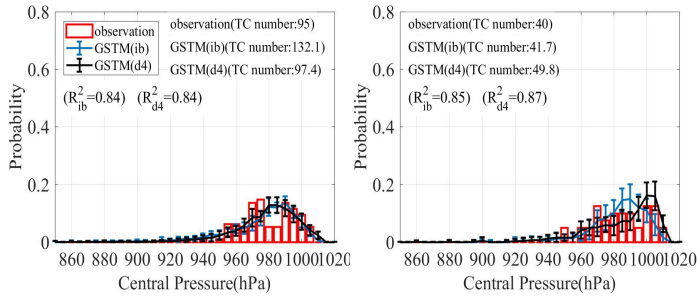
ここで ϕ_{d4PDF} は補正前の d4PDF の中心気圧、進行方位の値、 ϕ'_{d4PDF} は補正後の値、 $\overline{\phi_{d4PDF}}$ 、 $\overline{\phi_{ob}}$ は d4PDF、観測値の中心気圧、進行方位の平均値、 σ_{d4PDF} 、 σ_{ob} はそれぞれの標準偏差である。

図-5 は東経 135 度 ~ 138 度、北緯 33 度 ~ 36 度の領域における中心気圧の累積確率である。赤実線は観測値であり、点線は補正前の d4PDF の 100 アンサンブル平均である。さらに黒実線は補正後を示している。補正前と比較すると補正後は観測値と比較的良好に一致していることが確認できる。図-5 は一例であるが、全球において比較的良好に観測値と一致することを確認している。また、進行方位についても同様の補正法を用いて補正しており、補正後は観測値と概ね一致した頻度分布となった。

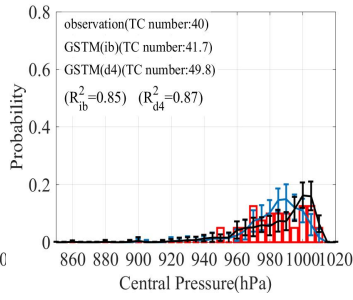
4 大アンサンブルデータを用いた全球確率台風モデルの精度検証

バイアス補正を行った d4PDF の TC 特性値を用いて GSTM を新たに構築し、観測値 (IBTrACS) から構築した既往の GSTM よりも精度が向上したかを確認するために比較検証を行った。ここで既往の GSTM の計算結果を GSTM(ib) とし、d4PDF から新たに構築した GSTM の計算結果は GSTM(d4) とした。

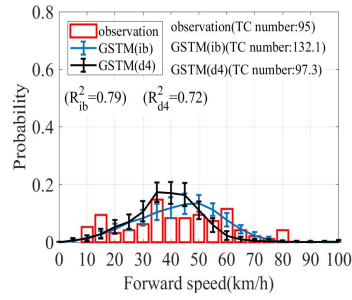
図-6 ~ 図-8 は一例として各海域における TC 特性値の確



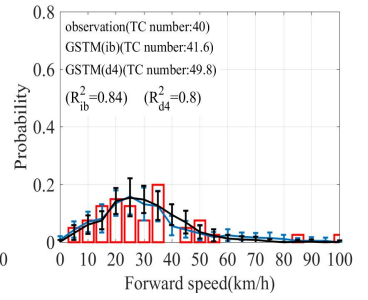
経度 135 ~ 138 度
緯度 33 ~ 36 度



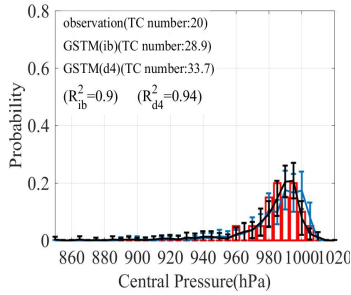
経度 300 ~ 303 度
緯度 33 ~ 36 度



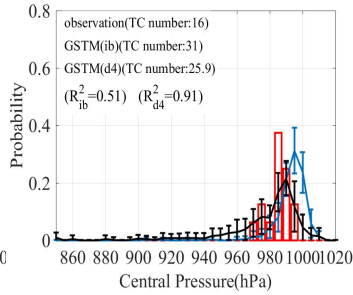
経度 135 ~ 138 度
緯度 33 ~ 36 度



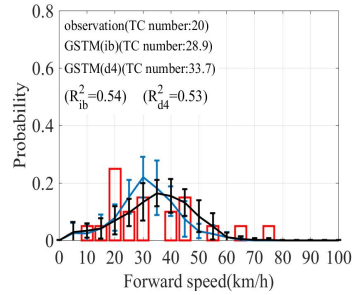
経度 300 ~ 303 度
緯度 33 ~ 36 度



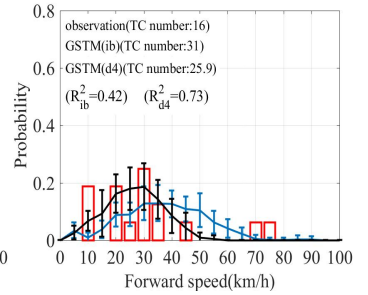
経度 60 ~ 63 度
緯度 -33 ~ -36 度



経度 159 ~ 162 度
緯度 -33 ~ -36 度



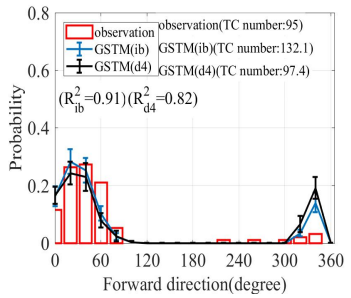
経度 60 ~ 63 度
緯度 33 ~ 36 度



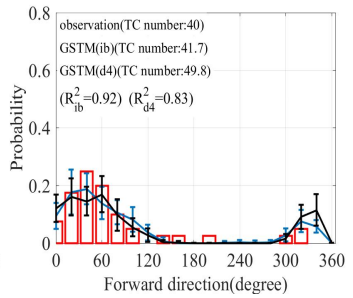
経度 159 ~ 162 度
緯度 33 ~ 36 度

図-6 各海域における中心気圧の頻度分布比較

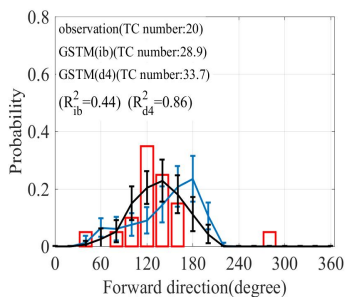
図-8 各海域における進行速度の頻度分布比較



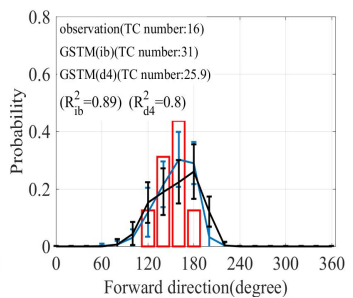
経度 135 ~ 138 度
緯度 33 ~ 36 度



経度 300 ~ 303 度
緯度 33 ~ 36 度



経度 60 ~ 63 度
緯度 -33 ~ -36 度



経度 159 ~ 162 度
緯度 -33 ~ -36 度

図-7 各海域における進行方位の頻度分布比較

年単位で分割し、20組の資料を作成した後に、アンサンブル平均を求めたものである。エラーバーはその標準偏差である。図中には座標の領域内を通過するTCの個数を示しており、 R_{ib}^2 、 R_{d4}^2 はそれぞれの計算結果の相対度数と観測値の相対度数から求めた相関係数を示している。

図-6は、各座標の領域内を通過するTCの中心気圧の再現性を比較したものである。北西太平洋(経度135~138度)、北大西洋(経度300~303度)、南インド洋(経度60~63度)の海域ではGSTM(ib)とGSTM(d4)における確率分布や相関係数に大きな差は見られない。しかし、南太平洋(経度159~162度)では、GSTM(ib)はGSTM(d4)よりも分布が右側に寄っており、観測値より強い強度を持つTCを過小評価している。領域内に進入するTCは観測で16個と非常に少ないことから中心気圧の発達過程をモデル上で再現することができなかつたと考えられる。一方でGSTM(d4)の分布は観測値と概ね一致していることから中心気圧については大アンサンブルデータを用いることによる精度向上を確認することができる。

図-7は、各座標の領域内を通過するTCの進行方位の再現性を比較したものである。北緯30度付近の北西太平洋、北大西洋において観測値の進行方位では北東(20~60度)の頻度が多くなる傾向にある。その傾向はGSTM(ib)およびGSTM(d4)でも見られる。また、相関係数においても1割程度、GSTM(ib)の方が高い値を示しているが、どちらとも高い相関を示していることから観測でのTCがフィリピン海

率分布について精度を検証した結果である。ヒストグラムは観測値を、青線および黒線はGSTM(ib)およびGSTM(d4)の計算結果を示している。観測値は1961~2008年の48年間のデータ、GSTMの計算結果は960年間の計算結果を48

沖で経路を「くの字型」に方向転移する TC などを再現できていると考えられる。さらに南太平洋においても GSTM(ib) および GSTM(d4) の相関係数はほぼ同じである。しかし、南インド洋で GSTM(ib) と GSTM(d4) とで進行方位の分布は異なり、相関係数においても倍程度異なる。GSTM(ib) は観測値よりも南西 (180~200°) に進行する TC が多い傾向にある。これは基礎資料として用いている観測データがその領域内で少ない上に、データの外れ値が GSTM(ib) の結果に大きく影響していると考えられる。一方で GSTM(d4) では観測値の分布と概ね一致しており、相関係数においても 0.86 と高い相関を示している。したがって、アンサンブルデータを用いることでそのようなデータの外れ値による影響も軽減できると考えられる。

図-8 は、各座標の領域内を通過する TC の進行速度の再現性を比較したものである。北西太平洋、北大西洋においては GSTM(ib) および GSTM(d4) の分布および相関係数に大きな差は見られない。一方で南インド洋、南太平洋においては、進行方位と同様にデータのばらつきによって GSTM(ib) の相関係数が低い値となっている。特に南太平洋においては高速度で進行する TC を過大に評価している。GSTM(d4) での南インド洋では GSTM(ib) と同様に観測データにばらつきがあることから相関係数が他の領域よりも低い相関となっている。しかし、南太平洋においては低速度で進行する観測の TC の分布と概ね一致しており、相関係数は GSTM(ib) よりも 0.3 程度高い値を示している。

以上のように d4PDF を用いた GSTM(d4) の場合、各領域内の中心気圧の頻度分布からでは観測資料が不足している領域においてその再現性は向上することがわかった。さらに進行方位および進行速度の頻度分布からでは観測資料の不足、さらにはその分布に外れ値などのばらつきがある場合において再現性が向上することがわかった。ただし、観測資料が十分に存在する領域については既往の GSTM と精度の差はあまり見られなかった。

次に防災計画上で必要となる TC の通過頻度の再現性について検証する。図-9 は全球における TC の年平均通過数についての観測値と GSTM(ib), GSTM(d4) の計算結果である。観測では TC の通過数は北西太平洋において最も多くなる傾向にあり、その他にも北東太平洋のメキシコ西部沿岸、北西大西洋のフロリダ北東沿岸、南インド洋の南緯 15 度付近、南太平洋のオーストラリア付近にも通過数が多い傾向にある。その傾向は 2 つの計算結果にも見られる。しかし、北西太平洋の北緯 30° 以上の高緯度帯を比較すると観測では徐々に通過数は減少していく傾向にあるが、GSTM(ib) ではより高緯度まで通過数が多くなる傾向にあ

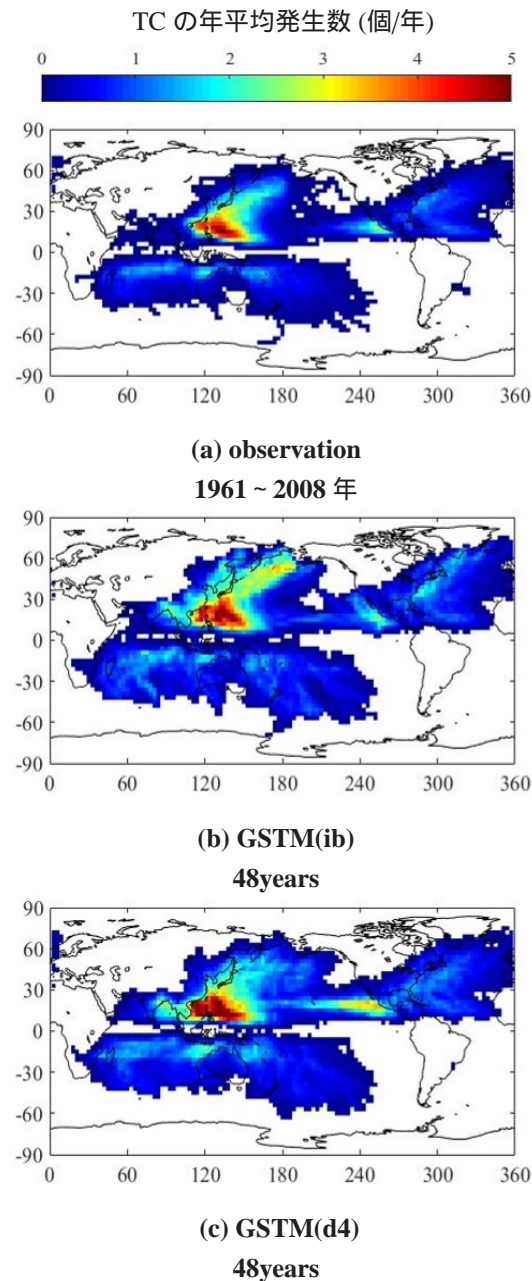


図-9 GSTM による年平均発生数の分布

る。GSTM(ib) は平均的に観測値よりも中心気圧が低くなる傾向にあることを確認している。そのため、強い TC は消滅しにくくなり、通過数が多くなったと考えられる。一方で GSTM(d4) では、メキシコ西部沿岸地域から来襲する TC は観測値よりも多くなる傾向にあるが、観測と同様の傾向を示しており、ほぼ再現できているといえる。以上より d4PDF を用いた GSTM は TC の来襲頻度についても既往の GSTM よりも精度が向上したことを確認できる。

5 大阪湾における熱帯低気圧の来襲頻度

最後に GSTM の応用例として d4PDF を用いた GSTM を用いて 10000 年計算を行い、大阪湾付近 (東経 134.5 度から 135.5 度、北緯 34 度から 35 度の範囲) を通過する TC の再

表-1 中心気圧の再現期間

中心気圧	個数	再現期間
880hPa 以下	22	450 年
880～900hPa	18	555 年
900～920hPa	38	260 年
920～940hPa	153	65 年
940～960hPa	465	21 年
960～980hPa	1492	6.7 年
980～1000hPa	3106	3.2 年
1020hPa 以上	801	12.5 年
合計	6095	1.6 年

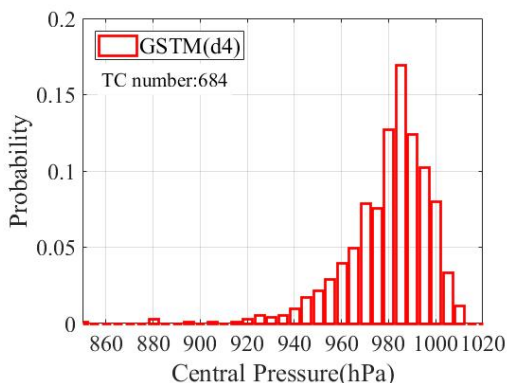


図-10 大阪湾最接近時中心気圧の頻度分布

可能性があると考えられる。

6 結論

本研究では、大アンサンブルデータ (d4PDF) を GSTM の基礎資料として新たにモデルを構築することによって再現性の向上の検討を行った。まず、d4PDF は固有のモデルバイアスが含まれているため、GSTM に用いる前に処理が必要であり、正規分布型バイアス補正法を用いることでバイアスを補正できることを明らかにした。さらに補正した d4PDF を GSTM に用いることで TC 災害を推定するために必要な情報である TC 特性値や TC の通過頻度が既往の GSTM よりも再現性が向上することを明らかにした。特に中心気圧については観測資料が不足している地域、進行方位、進行速度については、観測資料が不足している地域およびデータに外れ値などのばらつきがある地域において d4PDF を用いたことによる再現性の向上がみられた。

応用例として d4PDF を用いた GSTM から大阪湾を通過する TC の再現期間の推定を行った。第二室戸台風と類似した経路の再現期間は 15 年と短いですが、第二室戸台風よりも強い TC の再現期間は約 500 年と比較的長く、海岸構造物などは安全側に過大設計している可能性があることを明らかにした。

以上のように確率台風モデルに人工的な TC 資料を用いることは本研究の特徴である。さらに、d4PDF には将来気候場における TC 資料があることからそのデータを GSTM に用いることで将来を踏まえた TC 災害の長期再現期間を推定することも可能である。そのため、長期の防災計画を考える上で GSTM に d4PDF を用いることの有用性は高いと考えられる。

参考文献

- 1) 林裕太, 安田誠宏, 森信人, 中條壯大, 間瀬肇, 奥勇一郎: 気候変動を伴う将来高潮予測の不確実性-東京湾をケーススタディとして-, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, I1181 - I1185, 2011.
- 2) Murakami, H., Wang, Y., Yoshimura, H., Mizuta, R., Sugi, M., Shindo, E. and Ose, T.: Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by the New High-Resolution MRI-AGCM, Journal of Climate, 25(9), pp. 3237-3260, 2012.
- 3) d4PDF: 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース, <http://www.miroc-gcm.jp/pub/d4PDF/>(アクセス 2019/01/30), 2015
- 4) 安田誠宏, 片平成明, 森信人, 間瀬肇, 澁谷容子: 気候モデル台風のバイアス補正手法の開発と高潮の将来変化のアンサンブル予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, I1507 - I1512, 2015.
- 5) 端野道夫, 桑田康雄: 確率的台風モデルによる降雨・高潮の同時生起性評価, 土木学会論文集, Vol.387/ -8pp.237-246, 1987
- 6) 中條壯大, 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇: 時系列相関型の全球確率台風モデルの開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.1, 64-76, 2013.
- 7) 梅田尋慈, 中條壯大: 全球気象モデルにより得た大アンサンブル熱帯低気圧データの海域別統計的特性について, 混相流シンポジウム, 2018.
- 8) IBTrACS.v02r01: NOAA, National Centers For Environmental Information (National Oceanic And Atmospheric Administration), URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>(アクセス 2019/02/12)

再現期間を求めた。大阪湾最接近時の中心気圧の再現期間についてまとめたものを表-1 に示す。大阪湾に襲撃する TC は 6095 個であった。また、強い TC (940hPa 以下) は 261 個もあり、その再現期間は約 40 年と比較的高い頻度である。次に大阪湾にとって甚大な高潮被害を引き起こした第二室戸台風の経路を参考に 1. 東経 134.3 度から 134.7 度, 北緯 33.8 度から 34.2 度までの範囲を通過する, 2. その後, 東経 134.8 度から 135.2 度, 北緯 34.3 度から 34.7 度の領域を通過する, 3. 北東方向 (30 ~ 60 度) に進行する, 3 つの条件を設定し, 条件を満たしたものを第二室戸台風の類似経路として GSTM から作成された TC 資料から抽出した。図-10 は, 抽出した TC の大阪湾最接近時の中心気圧の頻度分布である。第二室戸台風と経路が類似した TC は 684 個あり, 経路のみの再現期間は約 15 年である。しかし, ほとんどの TC が 980 ~ 1000hPa 程度の比較的弱い勢力であり, 強い TC (940hPa 以下) の頻度は少なく再現期間としては約 500 年であった。したがって大阪湾全体でみると強い TC の来襲頻度は比較的高いが, 大阪湾にとって危険な経路を進行し, かつ強い TC の来襲頻度は低いことがわかった。

一般に大阪湾付近の沿岸地域の構造物においては, 第二室戸台風などの経路に過去最大の伊勢湾台風規模の TC が来襲した場合を想定して設計されている。得られた結果を踏まえるとそれらの設計はやや安全側に過大設計している