

地球温暖化による高潮・高波推算に対応可能な確率台風モデル

A Stochastic Typhoon Model Applicable to Storm Surge and Wave Simulations for Climate Change Projection

安田誠宏¹・林 祐太²・森 信人³・間瀬 肇⁴

Tomohiro YASUDA, Yuta HAYASHI, Nobuhito MORI and Hajime MASE

A radius of maximum cyclospheric wind speed is necessary to estimate a wind field by an empirical typhoon model for storm surge and wave simulations. In the present study, a stochastic typhoon model was established which has high reproducibility for mean distribution of passage number and central pressure of typhoons in the northwest Pacific. The relationship between radius of maximum cyclospheric wind speed and central atmospheric pressure was analyzed and parameterized to represent the probability distribution. Then, two different methods to project future typhoons were examined to apply for stochastic typhoon model under climate change scenario. Finally, the stochastic typhoon model which employs the presumed future typhoon tracks as input data was applied to evaluate climate change impact on typhoon characteristics.

1. 緒論

地球温暖化に伴い気象が極端化し、将来甚大な自然災害がもたらされる恐れがある。極端気象の1つに台風があるが、日本に來襲する台風の頻度や規模の気候変動に伴う変化を、できる限り正確かつ定量的に評価する必要がある。特に、台風に伴う高潮・高波の将来変化を統計的に推定するためには、確率台風モデルが必要となる。

確率台風データに基づく高潮・高波推算では、気圧場および海上風の推算に2次元（経験的）台風モデルが一般に用いられる。台風モデルは陸上地形の影響を考慮できないため、メソ気象モデルに、台風ボーガス（例えば、大澤ら、2001）、4次元データ同化（中野ら、2006；安田ら、2009a）、渦位逆変換法（吉野ら、2008）などを適用して、気象場の再現精度を高める研究がなされてきたが、いずれの方法も計算コストが高いので、確率台風モデルで作成された大量の台風データを対象とした計算には不向きである。

台風モデルとしては、Myersモデル、藤田モデル、藤井・光田モデル等がある（河合ら、2007）が、いずれのモデルも入力条件として、台風の中心気圧と移動速度および最大旋衡風速半径（以後、台風半径と称する）が必要である。中心気圧と移動速度は気象庁によるベストトラックデータで得られるが、台風半径は直接得ることができない。そのため、海上風を推算する場合には、天気

図や気象官署での気圧の観測値を理論式に当てはめて、決定論的に台風半径を算定する方法が採られるが、全球気候モデルGCMによる温暖化実験結果を用いる場合には、こうした方法を適用することができない。

加藤（2005）は、中心気圧と台風半径との関係について統計資料を用いて調べ、950hPaを境に変化する中心気圧と台風半径が一对一の関係を持つとして経験式を導き、台風の発達期と減衰期のそれぞれに対して用いることを提案している。この経験式は、ある台風を対象とした高潮推算には非常に有用（Nobuoka, 2009）だが、同じ中心気圧であっても、台風によって台風半径の大きさは異なるため（河合ら、2005）、加藤の経験式ではランダム性を考慮することは難しい。

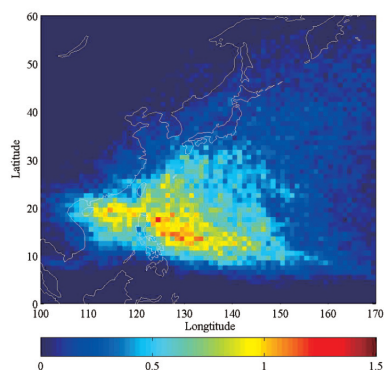
本研究の目的は、まず、現在気候における北西太平洋全域での平均台風中心気圧分布や平均通過個数分布の再現に関して、推定精度の高い確率台風モデルを構築することである。次に、風場の将来変化の算定に必要な、台風半径のパラメタリゼーションを行う。最後に、地球温暖化シナリオ下における将来台風の変化特性を予測するために、気候変動を考慮した2通りの想定将来台風経路の作成方法について検討し、それらの台風経路データを用いて確率台風モデルを構築し、台風特性に対する温暖化影響評価をする。

2. 台風半径を導入する確率台風モデル

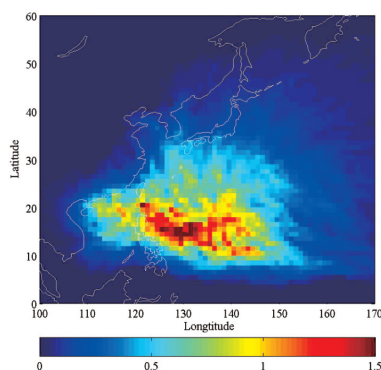
(1) 確率台風モデル

気象庁のベストトラックデータ（以後、BTデータ）を基礎資料として確率台風モデルを構築した。モデルは國富ら（2005）のものを基本とし、確率変量の空間分布を見直した。モンテカルロ法により1万年間の台風をシ

1 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
2 学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻
3 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
4 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所



(a) 気象庁ベストトラック (1951~2005 年)



(b) BT データに基づく確率台風モデル (現在再現 10,000 年)

図-1 北西太平洋域における台風の年平均通過個数 (unit: 個)

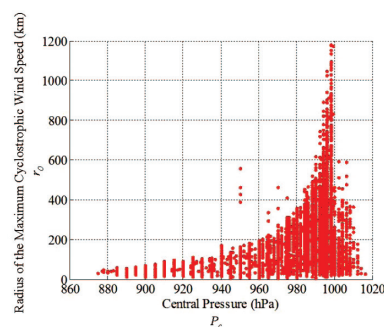


図-2 台風中心気圧と台風半径 (BT データ, 1951~2000 年)

ミュレートし、北西太平洋域における台風経路、通過個数、中心気圧を求めて、BT データとの比較・検討を行った。BT データは 1951~2005 年の観測値を用い、その数は 1468 個であった。

図-1 に、BT データと確率台風モデルによる年平均台風通過個数を示す。図示しないが、その他の諸量についても同様な比較を行った。グリッド毎の通過個数および気圧に関する観測値に対するバイアスは、全グリッド平均で +0.13 個および +12.2 hPa で、満足できる算定結果となった。

(2) 中心気圧と最大風速の関係

風場の算定には台風半径が必要であるが、BT データでは与えられていない。そこで、確率台風モデルにおける台風半径を中心気圧から確率的に求めるパラメタリゼーション法を提案する。

1951~2000 年の気象庁 BT データと天気図より、時間毎の台風の中心気圧と Myers の式を用いて台風半径を求めたデータ (橋本ら, 2003) を基に、中心気圧と台風半径の関係を調べた。図-2 は台風の中心気圧と台風半径についての分布図である。横軸は台風中心気圧 P_c [hPa]、縦軸は台風半径 r_0 [km] である。中心気圧 10 hPa 毎の台風

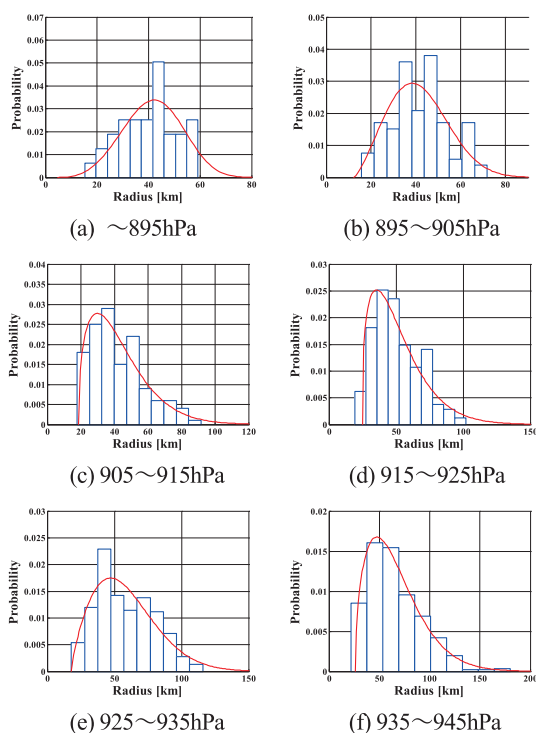


図-3 中心気圧に対する台風半径の出現確率分布

半径の出現確率と、その出現確率にワイブル分布を最尤法によってあてはめた結果を図-3 に示す。あてはめたワイブル分布の確率密度関数 $f(x)$ は、以下の式で表される。

$$f(x) = \alpha \beta (x - \lambda)^{\beta-1} \cdot \exp\{-\alpha(x - \lambda)^\beta\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α は尺度母数、 β は形状母数、 λ は位置母数である。中心気圧の大小によって、確率分布形状に相違がみられるが、すべての条件に対してワイブル分布をフィットさせることができた。推定されたワイブル分布の尺度母数、形状母数および位置母数と中心気圧の関係を検討

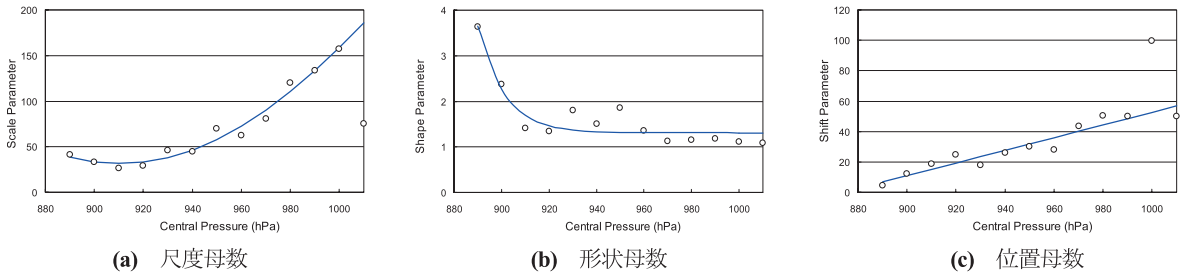


図-4 台風半径の分布にあてはめたWeibull分布の3母数と中心気圧の関係

した結果、図-4に示すような関係がみられた。そこで、中心気圧に対する3母数の変化に対して、次式で表される近似曲線をあてはめた。

$$\alpha(P_c) = 1002.56 - 970.92 \exp\left\{-\left(\frac{P_c - 2.0406}{23.9381}\right)^2\right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta(P_c) = 1.3082 + 2.3351 \exp(-0.8988 P_c) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda(P_c) = 6.7675 + 4.1728 P_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $P_c = (P_c - 880)/10$ である。

式(2)～(4)および式(1)を用いることにより、中心気圧から台風半径の確率密度関数を決めることができる。

(3) 連続性の導入

台風の諸元は、時系列的に連続していることを考慮する必要がある。そのため、中心気圧値 P_c が ΔP_c だけ変化する場合の台風半径の変化範囲を設定できるような確率モデルを作成する。

中心気圧の変動量 ΔP_c と台風半径の変動量 Δr_0 のデータを作成した後、中心気圧 P_c を20hPa毎に分け、それぞれの中心気圧毎に、中心気圧変動量と台風半径変動量の関係を求めることとする。すなわち、図-3にみられるように、台風半径は中心気圧によって規定されるため、台風半径の変動量は、中心気圧と移動に伴って生じる中心気圧変動量の両者に依存して変化するというモデルである。

台風半径の変動量範囲の設定方法は、図-5に示すように、まず、台風半径変動量 Δr_0 と中心気圧の変動量 ΔP_c の関係についての回帰式を求め、次に、回帰式の標準偏差 σ [km]を a 倍した値だけ上下に平行移動させた2つの直線で挟まれた範囲とした。

係数 a に関しては任意性があり、中心気圧5hPa毎に、BTと計算結果の台風半径の平均値と標準偏差を比較し、かつ時系列変化を調べた結果、以下の式を得た。

$$a = (P_{cn} - 900)/10 + 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 P_{cn} は台風中心が次の位置に移動していく時の進入時中心気圧である。

(4) 中心気圧と台風半径のシミュレーション結果

中心気圧 P_c を横軸に、台風半径 r_0 を縦軸にプロットし

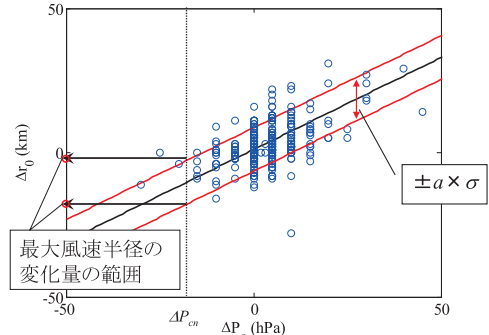


図-5 ある中心気圧に対する気圧変動量と台風半径変動量の関係および変動量範囲の設定方法

たものを図-6に示す。(a)図がBTデータ、(b)図が確率台風モデルによる1万年分の計算結果である。BTデータと比較すると、計算された中心気圧と台風半径の関係は、特に P_c が930hPa以上1000hPa未満の範囲で良く合っている。中心気圧1000hPa以上では、計算結果は小さい値を示す傾向があるが、1000hPa以上の弱い台風はここでは重要でないので問題としない。

3. 確率台風モデルによる台風予測実験

(1) 全球気候モデルおよび熱帯低気圧経路データ

一般に、GCMで計算される台風には発生数や強度に大きなバイアスがあるため、BT等と直接比べることは難しい。安田ら(2009b)は、気象庁・気象研究所の超高解像度全球気候モデルAGCM20(TL959L60)による温暖化予測実験結果を解析し、北西太平洋域での熱帯低気圧の発生数が少なく、日本へ来襲する個数も少ないというバイアスがあったため、台風特性の統計量の変化のみを考慮し、BTデータの台風発生位置と消滅位置をAGCMの結果に合わせて変形させた将来気候(今世紀末)の台風経路データを作成している(以下、想定将来台風経路データ)。一方、Murakamiら(2010)は、AGCMの熱帯低気圧を抽出する方法を改良し、北西太平洋での発生数バイアスを補正し、AGCMから直接台風経路データを作成している(以下、GCM現在/将来台風経路データ)。

ここでは、BTデータおよび想定将来台風経路データと、

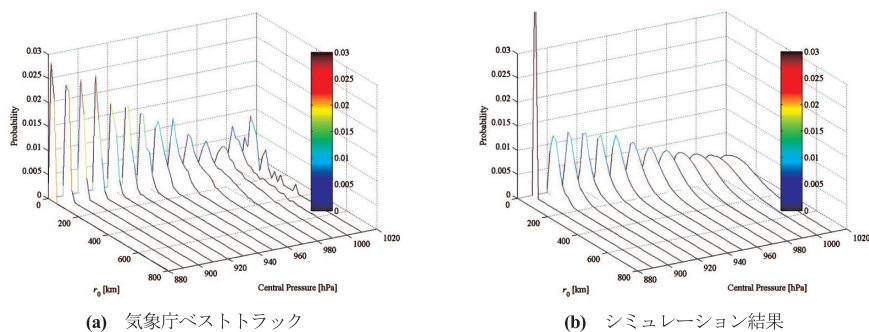


図-6 中心気圧に応じた台風半径の確率密度分布

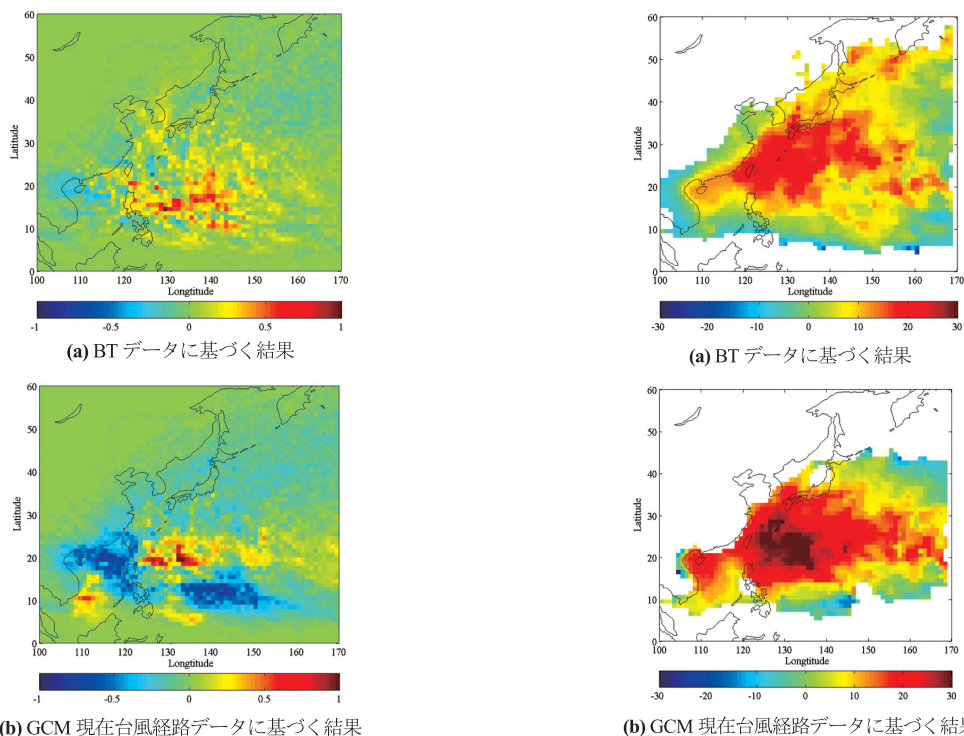


図-7 確率台風モデルによる年平均通過個数計算結果のBTデータに対するバイアス (unit: 個)

GCM現在/将来台風経路データの2通りのデータを、確率台風モデルの入力データとして用い、台風の将来変化予測のための確率台風モデル構築のアプローチとして、どのような方法が妥当であるのかを検討する。

(2) 現在気候下における確率台風モデリング

まず、BTデータを基礎資料とした場合と、GCM現在気候実験結果から抽出された台風経路データを基にした場合の、確率台風モデル計算結果を比較することで、2つの手法の再現性の違いをみる。

図-7および図-8は、北西太平洋域における年平均通過個数および平均中心気圧のBTデータに対するバイアスであり、それぞれ、(a) 図はBTデータに基づく結果、(b) 図はGCM現在台風経路データに基づく結果である。

図-7(a)によると、BTデータを基にした場合には、年平均通過個数は、 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ で若干正のバイアス傾向があるが、全体的な再現性はよい。一方、図-7(b)のGCMデータに基づく結果では、 15°N 以下の低緯度域で少なく、台風発生域の再現性が低い。南シナ海を通過する個数もかなり少ない。沖縄南方から東側一帯で通過個数が多いことと、日本周辺での減少を考えると、GCMからバイアス補正して抽出する際に含められた強度の弱い台風が、日本に上陸する前に消滅してしまったものと考えられる。

図-8(a)のBTデータを用いた場合の平均気圧は、台湾から日本南岸に掛けて $15 \sim 20 \text{hPa}$ 大きい(強度が弱い)バイアス傾向がある。上陸および通過後のバイアスは小

図-8 確率台風モデルによる平均中心気圧計算結果のBTデータに対するバイアス (unit: hPa)

さい。図-8(b)のGCMの場合には、全体的に気圧が弱いバイアス傾向が顕著で、30hPa以上も大きい領域がある。

以上より、BTデータを用いる方法は、通過個数の再現性は良いが、気圧の変動特性については改良の余地があるといえる。GCM現在台風経路データを用いた場合には、個数、気圧のいずれについても再現性が低かった。

(3) 将来気候下における確率台風モデリング

次に、将来気候下における2通りの台風経路データを用いて確率台風モデル計算を行い、温暖化の影響による台風特性の変化傾向を調べた。

図-9は、年平均通過個数の将来変化を示したものである。いずれの将来台風経路データを用いた場合も、平均通過個数は、フィリピンの東側海域で減少し、九州西方で少し減少する。また、(b)図のGCM将来台風経路データを用いた場合には、台風の通過個数が増減する領域が顕著に現れている。これは、海面水温SSTの将来変化により、GCMにおいて台風発生域とコースがシフトしたためと考えられる。

5. 結論

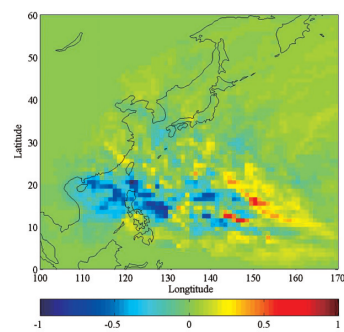
本研究で得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 現在気候の再現精度を向上させた確率台風モデルによる、年通過個数および中心気圧の観測値に対するバイアスは、全グリッド平均で+0.1個および+12hPaで、満足できる算定結果となった。
- 2) 台風中心気圧に対する最大旋衡風速半径（台風半径）の出現確率分布を、Weibull分布でフィットさせることができた。さらに、中心気圧変動量と台風半径変動量の関係性を考慮して、台風半径の変動を確率的に決定できるようになった。
- 3) 台風特性の将来変化を予測するため、2つの異なる台風経路データを用いて計算した結果、GCMの出力を直接用いると現在気候の再現性の誤差が大きく、問題があり、GCMから変化特性を抽出して、これを反映させた台風経路データを用いた方がよいことがわかった。気圧変化については今後改良の余地がある。

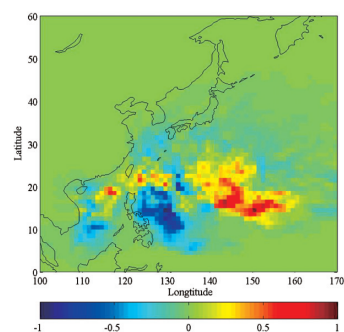
最後に、本研究は、文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムおよび科学研究費補助金のサポートによる成果であり、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志（2001）：メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション，海岸工学論文集，第48巻，pp.281-285。
 加藤史訓（2005）：高潮危険度評価に関する研究，国総研資料，第275号，10p。
 河合弘泰・本多和彦・富田孝史・柿沼太郎（2005）：2004年に発生した台風の特徴と高潮の予測・再現計算，港湾空港



(a) 想定将来台風経路データに基づく結果



(b) GCM 将来台風経路データに基づく結果

図-9 異なる台風経路データを用いた場合の確率台風モデルによる現在と将来気候の年平均通過個数の差 (unit: 個)

技術研究所資料，No.1103，34p.

- 河合弘泰・川口浩二・大釜達夫・友田伸明・萩元幸将・中野俊夫（2007）：経験的台風モデルと局地気象モデルの風を用いた瀬戸内海の高潮推算精度，海岸工学論文集，第54巻，pp.286-290。
 國富將嗣・高山知司（2005）：大阪湾における高潮と高波の同時生起確率特性，海岸工学論文集，第52巻，pp.216-220。
 中野俊夫・大澤輝夫・吉野 純・益子 渉・河合弘泰・松浦邦明（2006）：台風ボーガスの高度化による数値予報モデルを用いた海上風推算手法の精度向上，海岸工学論文集，第53巻，pp.1286-1290。
 橋本典明・川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史（2003）：港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検証，海岸工学論文集，第50巻，pp.176-180。
 安田誠宏・山口達也・金 洙列・森 信人・間瀬 肇（2009a）：気象モデルにおける4次元データ同化およびネステイングが高潮推算精度に及ぼす影響に関する研究，海岸工学論文集，第56巻，pp.381-385。
 安田誠宏・安藤 圭・森 信人・間瀬 肇（2009b）：地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング，海岸工学論文集，第56巻，pp.1281-1285。
 吉野 純・児島弘展・安田孝志（2008）：台風予測精度向上のための渦位に基づく新しい台風ボーガス手法の構築，海岸工学論文集，第55巻，pp.436-440。
 Murakami, H., Sugi, M. (2010): Effect of Model Resolution on Tropical Cyclone Climate Projections, SOLA, Vol.6; pp.73-76.
 Nobuoka, H. (2009): Uncertainty of Numerical Simulation on Storm Surge by Use of Best Track Data of Tropical Cyclone, Proc. of Coastal Dynamics 2009, No.20, 12p.