

台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案

A Mixed Probability Distribution Function and Modified Orthogonal Decomposition for Typhoon Simulation

石原 孟¹⁾ ホタイホン²⁾ チョンチーリョン³⁾ 藤野陽三⁴⁾

Takeshi ISHIHARA¹⁾, Ho Thai HUNG²⁾, CHEONG Chee Leong³⁾ and Yoza FUJINO⁴⁾

ABSTRACT

A mixed probability distribution function (MPDF) was proposed for typhoon simulation, which is applicable to any locations by changing a weighted parameter. A modified orthogonal decomposition (MOD) was also proposed to simultaneously reproduce probability-distributions of typhoon parameters and their correlations. The annual maximum wind speeds at the five typical sites in Japan simulated with the proposed methods showed favorable agreements with the observations, while the conventional methods overestimated those for the long-term return period.

Key Words: Typhoon Simulation, Mixed Probability Distribution Function, Typhoon Parameters, Modified Orthogonal Decomposition

1. はじめに

近年構造物の大型化に伴い、構造物の耐風安全性の向上や耐風設計の合理化のために長い再現期間の設計風速が必要となる。現在日本における風観測は最長 70 年間しかないため、長い再現期間（例えば、1000 年）に対する年最大風速の算定は外挿となってしまう問題がある。この問題を解決するために、台風シミュレーションによる設計風速の評価手法が提案されてきた^{1)~5)}。

台風シミュレーションにより設計風速を評価する際には台風パラメータの確率分布を精度よく近似することが重要である。しかし、従来の研究に用いられた確率分布関数は国によって異なる。日本^{1),2)}では台風の中心気圧低下量 ΔP を対数正規分布で近似しているのに対して、アメリカではワイブル分布が用いられている^{3),4)}。また本研究で示したようにある地点の台風パラメータをよく近似する確率分布を他の地点に適用すると、大きな誤差が生じてしまう。本来、台風パラメータの統計的な性質は場所によって異なる可能性があり、単一の確率分布ですべての地点の台風パラメータを近似することは困難である。

従来のシミュレーション手法では台風パラメータの間の相関を同時に再現できない問題もある。その結果、現在使用されている台風シミュレーション手法より求められた年最大風速は台風パラメータの実測データから直接求められた年最大風速に比べ、長い再現期間の風速値が過大に評価されてしまう。Vickery ら⁴⁾は2つの台風パラメータ間の相関関係を再現する手法を提案したが、すべての台風パラメータ間の相関を同時に再現することができない。一方、松井ら⁵⁾は直交変換法に基づき、台風進行方向、進行速度、中心気圧低下量と最大旋衡風速半径間の相関関係を同時に考慮する手法を提案したが、台風パラメータ間の相関とパラメータの確率分布を同時に精度良く再現することができないという問題もある。

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 助教授

(〒113-8656 文京区弥生)

^{2),3)} 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 大学院生

⁴⁾ 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

(〒113-8656 文京区本郷)

そこで、本研究ではまずどの国と地域にも適用できる普遍的な確率分布関数を提案し、そして台風パラメータ間の相関関係を正しく再現でき、かつ台風パラメータの確率分布の近似精度を損なわないシミュレーション手法を提案する。本研究で提案された新しい手法の有効性を示すために、地表面の影響を受けない上空風の年最大風速の確率分布と比較することとした。

2. 台風シミュレーションの概要

台風シミュレーションでは①まず過去の台風観測データにより、台風の年発生数 λ 、最接近距離 d_{min} 、進行方向 θ 、進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m の6つのパラメータの確率分布を求める。次に、②各パラメータの確率分布に従い、人工的に台風を発生させる。そして、③発生された台風の気圧場から上空風を求め、地表面の粗度や地形の効果を考慮して地上風に変換し、地上風の年最大風速を求める。最後に、④シミュレートした数千年～数万年間の年最大風速を大きい順に並べ、年最大風速の確率分布を求め、任意再現期間の風速を算出する。

台風時の上空風は、発生された台風の経路、進行速度、気圧場に依存するため、個々の台風パラメータの確率分布を正確に再現するだけではなく、台風パラメータ間の相関関係の再現も重要である。そこで、本研究では台風シミュレーション手法の再現精度を検証ために、最終的に台風パラメータにより算出される風速値を用いた比較検討を行った。本研究では、台風時の上空風の算定には石原ら⁹⁾により提案された解析モデルを用いた。また台風パラメータに関する観測データは文献7に示す台風データベースを用い、台風の発生は著者らが開発した台風シミュレーションプログラム MOST (MOnte-Carlo Simulation for Typhoon) を使用した。

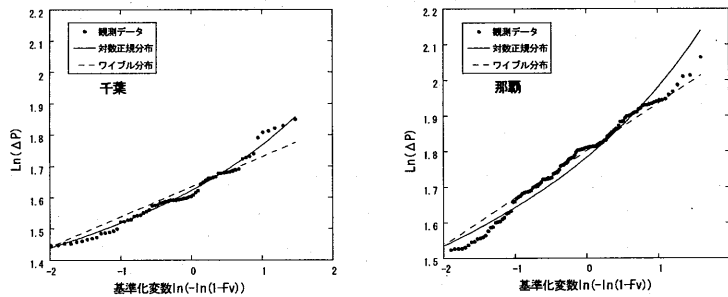


図1 気圧低下量の対数正規分布とワイブル分布による近似

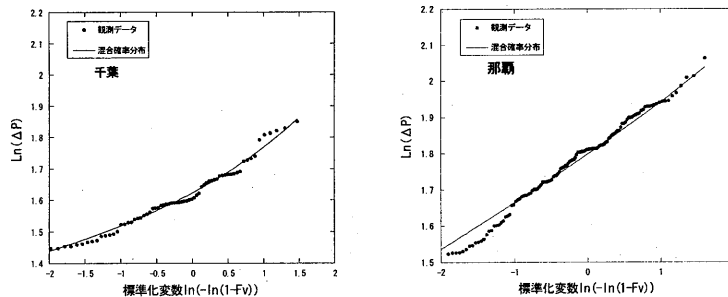


図2 気圧低下量の混合確率分布関数による近似

3. 混合確率分布関数の提案

従来日本で行われてきた台風シミュレーションでは年発生数 λ はポアソン分布、最接近距離 d_{min} は一様分布、進行方向 θ は正規分布、進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大風速半径 R_m は対数正規分布が使用されてきた。中心気圧低下量の確率分布の近似式としては日本では対数正規分布が用いられているのに対して、アメリカではワイ

ブル分布が推奨されている^{3), 4)}。中心気圧低下量の確率分布は風速の評価に最も大きな影響を与えることを考えると、まず気圧低下量に対して対数正規分布とワイブル分布の近似精度及びその適用可能性を明らかにする。

図1に千葉および那覇における気圧低下量の観測データと既存の確率分布によるフィッティング曲線との比較を示す。縦軸は気圧低下量を対数で表示し、横軸は基準化変数を表す。基準化変数が大きいほど再現期間が長いことに対応している。また図中の黒丸は観測データを示す。これらの図から分かるように、対数正規分布（実線）は千葉での観測データをよく近似できるが、那覇での観測データを精度よく近似できない。一方、ワイブル分布（点線）は那覇の観測データをよく近似できるのに対して、千葉での観測データをよく近似できないことが分かる。これは千葉と那覇における強い台風の襲来頻度の違いによるものである。千葉では強い台風がまれにしか来ないのに対して、那覇では強い台風がよく襲来する。このように気候的に異なる地域に対して、単一の確率分布による精度のよい近似は困難であり、普遍的な確率分布の提案が必要である。因みに Georgiou ら³⁾がワイブル分布の近似精度がよいとされた地点フロリダは緯度的に那覇に近い。

そこで、本研究では対数正規分布とワイブル分布との組み合わせによる混合確率分布関数 MPDF (Mixed Probability Distribution Function) を提案する。この確率密度関数は次式により表させる。

$$MPDF = a \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] + (1-a) \times \frac{k}{C} \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right] \quad a \in (0, 1) \quad (1)$$

ここで、 a は混合パラメータであり、0 はワイブル分布、1 は対数正規分布を表す。このパラメータは最小二乗法により求められる。この混合確率分布を千葉と那覇気象台に適用すると、千葉では $a=1$ 、すなわち、対数正規分布となり、一方、那覇では $a=0.2$ 、ワイブル分布に近い分布となった。図2には混合確率分布を気圧低下量に適用した結果を示し、観測データをよくフィッティングしていることがわかる。

図3には日本全国をカバーする5地点（那覇、宮崎、大阪、千葉、仙台）に混合確率分布関数を適用し得られた混合パラメータの値を示す。南から北に行くにしたがって、混合パラメータ a の値は約0.2から単調に増加し、北緯34度を超えると1に漸近する。すなわち、気圧低下量 ΔP の分布はワイブル分布から対数正規分布に移行していることが分かる。これは強い台風の襲来頻度が南から北へ行くに従って減少していくことに対応している。混合確率分布は中心気圧低下量のみならず、最大旋衡風速半径と進行速度 C にも適用でき、よい近似精度が得られている。特に進行速度における混合パラメータは中心気圧低下量と反対な傾向を示し、南から北へ行くに従って、混合パラメータが減少することがわかる。これは台風の進行速度が北へ行くにしたがって速くなっていることに対応している。

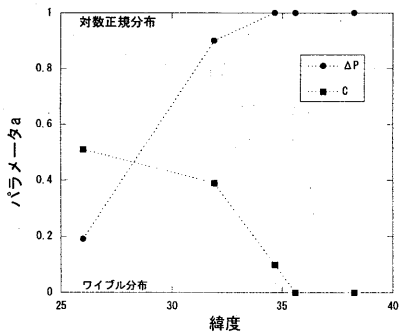


図3 混合パラメータ a の緯度による変化

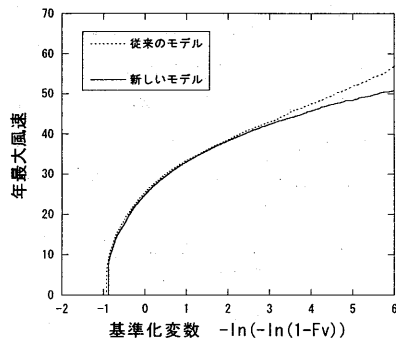


図4 千葉における上空風の年最大風速確率分布

新しく提案した混合確率分布の効果を確認するために、台風パラメータの観測値より算定された上空風の年最大風速と、観測値を近似した確率分布に従い発生した台風パラメータにより求められた上空風の年最大風速を比較した。図4には千葉における上空風の年最大風速の比較結果を示す。従来の手法（対数正規分布）による長い

再現期間の年最大風速の過大評価は本研究で提案した混合確率分布により大きく改善された。なお、千葉においては進行速度の確率分布における混合確率分布の適用が年最大風速の再現期待値に最も大きな影響を与えた。

4. 修正直交変換法の提案

表1 a)には千葉気象台を中心とし、半径500km以内に通過した台風のパラメータ間の相関係数を示す。パラメータによって0.3を超える相関係数が見られる。例えば、 ΔP と d_{min} との間に正の相関が見られた。これは千葉気象台に対して右側に通過する台風が強いことを示し、太平洋側に通過した台風と比べると、上陸側に通過した台風の方が上陸に伴い減衰していることに対応している。このような相関を無視すると陸側を通過した台風の強さが過大に評価され、年最大風速の過大評価につながる。従って、モンテカルロシミュレーションにより台風を作り出す時、台風パラメータの確率分布を正しく再現するだけでなく、パラメータの間の相関関係も忠実に再現する必要がある。

表1 千葉における台風パラメータの相関係数

千葉	a)観測値					b)直交変換法					c)修正直交変換法				
	$\ln(\Delta P)$	$\ln(R_m)$	$\ln(C)$	θ	d_{min}	$\ln(\Delta P)$	$\ln(R_m)$	$\ln(C)$	θ	d_{min}	$\ln(\Delta P)$	$\ln(R_m)$	$\ln(C)$	θ	d_{min}
$\ln(\Delta P)$	1.00					1.00					1.00				
$\ln(R_m)$	-0.28	1.00				-0.28	1.00				-0.28	1.00			
$\ln(C)$	0.01	0.37	1.00			0.02	0.35	1.00			0.02	0.35	1.00		
θ	-0.03	-0.03	-0.27	1.00		-0.04	-0.02	-0.25	1.00		-0.04	-0.02	-0.25	1.00	
d_{min}	0.33	-0.25	-0.37	-0.28	1.00	0.33	-0.24	-0.37	-0.29	1.00	0.33	-0.24	0.37	-0.28	1.00

表2 Vickeryの手法⁴⁾

パラメータ	分布	確率密度関数	相関関係
$\Delta P(\text{hPa})$	Weibull	$\frac{k}{C} \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right)$	$C = a_1 - b_1 \varphi$ $k = c_1$
$R_m(\text{km})$	LogNormal	$\frac{1}{R_m \sqrt{2\pi} \sigma_{\ln(R_m)}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_{\ln(R_m)}}{\sigma_{\ln(R_m)}}\right)^2\right]$	$\mu_{\ln(R_m)} = a_2 - b_2 \Delta P$ $\sigma_{\ln(R_m)} = c_2$
$C(\text{m/s})$	LogNormal	$\frac{1}{C \sqrt{2\pi} \sigma_{\ln(C)}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_{\ln(C)}}{\sigma_{\ln(C)}}\right)^2\right]$	$\mu_{\ln(C)} = a_3 - b_3 \varphi$ $\sigma_{\ln(C)} = c_3$

従来から台風パラメータ間の相関を考慮する手法は提案されてきた。表2にはVickery手法⁴⁾による各パラメータの確率分布と相関関係を示す。気圧低下量と進行速度は緯度 φ の関数、最大旋衡風速半径は気圧低下量の関数として表されている。例えば、 R_m と ΔP の間の相関関係は式(2)のように表されている。ここで、 $f(R_m)$ は確率密度関数を表し、 $\mu_{\ln(R_m)}$ と $\sigma_{\ln(R_m)}$ はそれぞれの $\ln(R_m)$ の平均値と標準偏差である。

$$f(R_m) = \frac{1}{R_m \sqrt{2\pi} \sigma_{\ln(R_m)}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(R_m) - \mu_{\ln(R_m)}}{\sigma_{\ln(R_m)}}\right)^2\right] \quad (2)$$

ここで、 $\mu_{\ln(R_m)}$ を ΔP の関数として式(3)で表す。この式により、 R_m と ΔP の相関関係を再現した。

$$\mu_{\ln(R_m)} = a \Delta P + b \quad (3)$$

a, bは係数である。式(2)と式(3)により発生した R_m と ΔP の相関係数は-0.26となり、観測値とほぼ一致することが分かる。

しかし、Vickery らの手法には幾つかの問題がある。図 5 には目標とした R_m の確率分布と Vickery 手法により求められた最大旋衡風速半径 R_m の確率分布を示す。シミュレートされた R_m の確率分布は目標とした確率分布と一致しないことが分かる。これは相関を考慮するために R_m の平均値を変化させたことによるものである。つまり、Vickery 手法は台風パラメータの確率分布と相関が同時に再現していないことがわかる。またこの手法では、二つの台風パラメータ間の相関しか再現できないという制約もある。

本研究では、台風パラメータ間の相関関係と確率分布を同時に満足するために、修正直交変換法 MOD(Modified Orthogonal Decomposition)を提案する。この手法は以下の三つのステップからなる。

1) 独立パラメータへの直交変換

台風を記述するパラメータとしては気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m 、進行速度 C 、進行方向 θ 、最接近距離 d_{min} がある。これらの台風パラメータから構成されるベクトルは次式により表す。

$$\{x_i\}^T = \{\ln(\Delta P), \ln(R_m), \ln(C), \theta, d_{min}\} \quad (4)$$

台風パラメータ間の相関行列を S とし、固有値 λ_k と固有ベクトル ϕ_k の関係は以下ようになる。

$$[S - \lambda_k E] \{\phi\}_k = 0 \quad (5)$$

相関をもつ台風パラメータの観測データ x_i から無相関の独立パラメータ z_i に式(6)のように変換することができる。

$$\{z_i\} = [\phi] \{x_i\} \quad (6)$$

このように得られた独立パラメータ z_i は正規分布と一様分布からなる混合確率分布関数により近似する。

2) 相関を持つ台風パラメータへの逆変換

次に、推定された確率分布に従って、所定年数分の台風に関する独立パラメータ z_i' を発生し、固有ベクトルの逆行列をかけて相関を持つ台風パラメータに逆変換する。

$$\{x_i\} = [\phi]^{-1} \{z_i\} \quad (7)$$

このように再現した台風パラメータから求められた相関係数(表 1b)は観測データから求められた相関係数(表 1a)と良く一致していることがわかる。ただし、このように発生した台風パラメータの確率分布は図 6 のように目標とした確率分布と完全に一致していない。

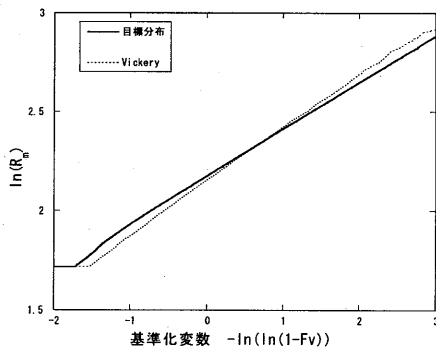


図 5 Vickery 手法による $\ln(R_m)$ の確率分布

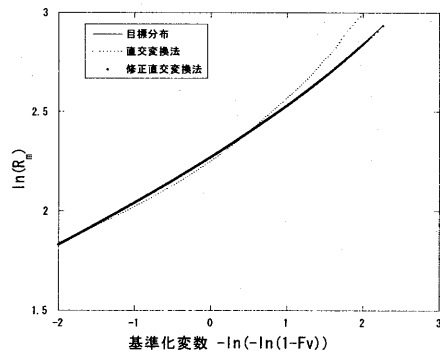


図 6 修正直交変換法による $\ln(R_m)$ の確率分布

3) 目標とした確率分布への修正

この問題を解決するために、逆変換された台風パラメータに微小修正を加えることにした。逆変換された台風パラメータと目標とした確率モデルにより発生した値を同時に昇順で並べ、逆変換された台風パラメータは目標とする確率モデルにより発生した値に合うように修正する。この補正は相関関係を考慮して決定されたパラメータに対して微小修正を加えるが、パラメータの組みを変えずに覚えておくことが鍵である。このように修正されたパラメータ間の相関係数(表 1c)にはほとんど影響を与えない。修正された $\ln(R_m)$ の確率分布は図 6 に示す。

最後に台風パラメータの観測値を用いて本手法の有効性を検証した。図7には千葉気象台における再現期間と上空風の関係を示す。従来の手法に比べ、本研究に提案した手法により求められた年最大風速は観測データをよく再現していることが分かる。また図8に示すように本手法による求めた那覇、宮崎、大阪、千葉、仙台の上空風の年最大風速の50年再現期待値は北へ行くにつれ単調に減少する結果を得た。この結果は台風が北上するにつれ、弱くなっていくことに対応している。それに対して、台風パラメータの確率分布並びにパラメータ間の相関関係を同時に再現していない従来の手法により求められた年最大風速の50年再現期待値は、北緯34度を超えると、再び大きくなるような不自然の結果となった。

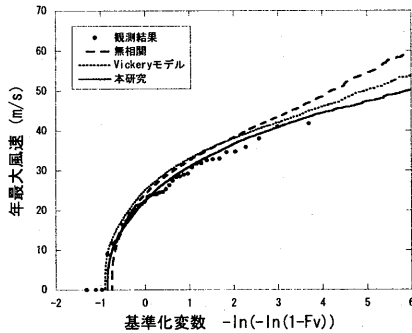


図7 千葉における上空風の年最大風速

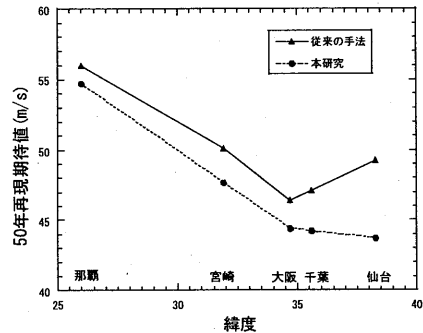


図8 年最大風速の50年再現期待値

5. まとめ

本研究では任意地点における台風パラメータを近似できる混合確率分布関数(MPDF)並びに台風パラメータ間の相関関係と確率分布を同時に再現できる修正直交変換法(MOD)を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 対数正規分布とワイブル分布を組み合わせることにより、任意地点に適用できる混合確率分布関数を提案し、台風パラメータの観測データにおけるフィッティング精度を向上させた。
- 2) 直交変換法により発生した台風パラメータを修正し、目標確率分布と完全に一致する修正直交変換法を提案した。本変換法により発生した台風パラメータは、パラメータ間の相関関係と各個々のパラメータの確率分布を同時に満たすことができた。
- 3) 本手法により計算された上空風の年最大風速の確率分布は、観測値とよく一致し、従来の手法により年最大風速の過大評価を改善した。

謝辞：本研究は、平成13～14年度において文部科学省科学研究費補助金（課題番号1355125，研究代表者 石原孟）を受けた。また本研究にあたり、ご助言、ご指導を頂いた東京工芸大学工学部建築学科の松井正宏先生に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 光田寧，藤井健：日本南方洋上における台風の確率モデルの作成，京大防災研究年報，No.32B-1, pp.335-348, 1989.
- 2) 松井正宏，石原孟，日比一喜：実測と台風モデルの平均化時間の違いを考慮した台風シミュレーションによる年最大風速の予測法，日本建築学会構造系論文集，No. 506, pp.67-74, 1998.
- 3) P.N.Georgiou, A.G.Davenport, B.J.Vickery: Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones, J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 13(1-3), pp.139-152, 1983.
- 4) J.Vickery, L.A.Twisdale: Prediction of hurricane wind speeds in the United States, J. Struct. Div. ASCE, 121(11), pp.1691-1699, 1995.
- 5) 松井正宏，田村幸雄，田中俊輔：風向特性を考慮した矩形高層建物の風荷重評価，第17回風工学シンポジウム論文集，2002, pp.499-504.
- 6) 石原孟，松井正宏，日比一喜：台風に伴う強風場を求めるための解析モデルの提案，日本風工学学会誌，No. 57, pp.1-12, 1993.
- 7) ホタイホーム：台風における新しい確率モデルの提案と実測による検証，東京大学修士論文，2004.