

# モンテカルロシミュレーションと MCP 法を用いた混合気候における 極値風速の予測

Prediction of the extreme wind speed in mixed climate regions by using Monte Carlo simulation and Measure-Correlate-Predict method

石原 孟\*\*

山口 敦\*\*

老川 進\*\*

Takeshi ISHIHARA

Atsushi YAMAGUCHI

Susumu OIKAWA

## 1. はじめに

風力発電設備の設計風速を評価するためには、年最大風速の非超過確率分布を精度よく求める必要がある。強風の成因が温帯低気圧である地域においては、国際基準 IEC61400-1 Annex E<sup>1)</sup> に示されるように、MCP(Measure-Correlate-Predict)法を用いて、近隣の気象官署での最低 10 年の長期観測記録から対象地点における風速を推定し、ガンベル分布を仮定することにより年最大風速の 50 年再現期待値を求めることができる。一方、日本のように熱帯低気圧および温帯低気圧の両方が強風の支配要因となる混合気候では、強風の成因を考慮した年最大風速の確率分布を評価する必要がある<sup>2)</sup>。

熱帯低気圧に起因する強風の非超過確率を求めるために、モンテカルロシミュレーションによる手法<sup>3)</sup>が提案されている。年最大風速の観測データからガンベル分布などの分布関数を仮定して極値風速を求める従来手法に比べ、統計的に安定し予測の不確実性が小さいと言われている。しかし、これまでの研究では予測の不確実性について定量的に評価した例はほとんどない。

そこで、本研究では、まず MCP 法により、気象官署で観測された風速を対象地点に変換し、温帯低気圧に起因する強風についてはガンベル分布を、熱帯低気圧に起因する強風については、本研究で提案する修正ガンベル分布により成因別の極値風速を評価する。次に、モンテカルロシミュレーションにより年最大風速の確率分布を求め、風観測データの年最大風速の確率分布および年最大風速の観測値と比べ各推定手法の予測精度を評価する。また、ガンベル理論に基づき各推定手法による 50 年再現期待値の不確実性を評価するとともに、これらの不確実性を考慮した極値風速の評価手法を提案する。

## 2. 確率分布関数による成因別の極値風速の評価

### 2.1 MCP 法による観測データの変換

\* 平成 23 年 11 月 30 日第 33 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\* 会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

本研究で対象とした地点は、千葉県銚子市沖の北緯 35 度 40 分 41.87 秒、東経 140 度 49 分 35.91 秒(日本測地系)、海上高度 100m の洋上地点である。観測データは 1995 年～2007 年までの 13 年間の銚子地方気象台における観測データを用い、風速の時系列を MCP 法により洋上の対象地点に変換した<sup>4)</sup>。対象地点を中心に半径 500km の円内を熱帯低気圧が通過した時間の風速データを熱帯低気圧による風速データとし、それ以外のデータを温帯低気圧による風速データとした。

### 2.2 温帯低気圧による極値風速の評価

対象地点に変換された風速の時系列データから確率分布を求める際には、1 年ごとの年最大風速を抽出し、年最大風速を昇順に並び替えた。この年最大風速の非超過確率分布はガンベルの方法により次式で表される。

$$F(u_i) = i/(N+1) \quad (1)$$

観測データをプロットするために、縦軸に  $u_i$ 、横軸には  $F(u_i)$  のかわりに次式に示す基準化変数  $y_i$  を用いる。

$$y_i = -\ln(-\ln(F(u_i))) \quad (2)$$

温帯低気圧による年最大風速はガンベル分布に従うことがよく知られている。非超過確率  $F$  がガンベル分布に従う時、温帯低気圧による年最大風速  $u_E$  は、積率法により式(3)で表わせる<sup>5)</sup>。

$$u_E = V + \sigma_p(y - \gamma)/(\pi/\sqrt{6}) \quad (3)$$

ここで、 $V$  と  $\sigma_p$  は、それぞれ観測から得られる年最大風速の平均値と標準偏差を表し、 $\gamma$  はオイラー定数(0.57722)である。

図1には、ガンベル分布を仮定して求めた確率分布と年最大風速の観測データを示す。図中の横軸の再現期間  $R$  と非超過確率  $F(u)$  の関係は式(4)により表せる。また、50 年再現期間に対応する基準化変数  $y$  は 3.90 となり、この時の風速が 50 年再現期間の年最大風速の推定値となる。

$$F(u) = 1 - 1/R \quad (4)$$

図1より、13年間の観測値から求めたガンベル分布は、温帯低気圧による年最大風速をよく表していることが分かる。

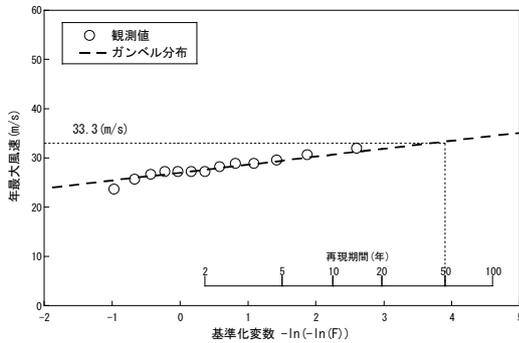


図1 温帯低気圧の年最大風速の確率分布

### 2.3 熱帯低気圧による極値風速の評価

温帯低気圧による年最大風速と異なり、熱帯低気圧に起因する年最大風速は0m/sとなる年があるためガンベル分布をそのまま用いることができない。そこで、本研究では、熱帯低気圧に起因する年最大風速が0m/sとなる年の確率分布を $F_{zero}$ 、それ以外の年の確率分布を $F_{nonzero}$ とし、式(5)に示す修正ガンベル分布を提案する。

$$F_{mod} = F_{zero} + F_{nonzero} \quad (5)$$

観測年数を $n$ 、そのうち熱帯低気圧による年最大風速が0m/sである年数を $n_0$ とすると、 $F_{zero}$ は次式により表すことができる。

$$F_{zero} = n_0/n \quad (6)$$

また、年最大風速が0m/sではない年の年最大風速はガンベル分布 $G(u)$ に従うとし、 $F_{nonzero}$ を次式により表した。

$$F_{nonzero}(u) = (n - n_0)/n \times G(u) \quad (7)$$

熱帯低気圧に起因する年最大風速 $u_T$ は、式(8)により表し、修正標準化変数 $y'$ は、式(9)により求める。

$$u_T = V + \sigma_p(y' - \gamma)/(\pi/\sqrt{6}) \quad (8)$$

$$y' = -\ln(-\ln((F_{nonzero}) \times n/(n - n_0))) \quad (9)$$

ここで、 $V$ 、 $\sigma_p$ はそれぞれ年最大風速0m/sを除いた年最大風速の平均値と標準偏差である。この修正ガンベル分布は $n_0 = 0$ の時にガンベル分布と一致する。

図2には、熱帯低気圧による年最大風速の確率分布を示す。図中の白丸は、13年間の熱帯低気圧による年最大風速から求めた確率分布を表し、破線は、本研究で提案した修正ガンベル分布により求めた確率分布を表す。修正ガンベル分布による推定値は、5年より短い再現期間で観測とよく一致し、それより長い再現期間は観測値を過小評価している。これは熱帯低気圧による極値風速を13年の観測データから求める場合に不確実性が高い

ことを示唆している。この極値風速の不確実性については4節に示す。

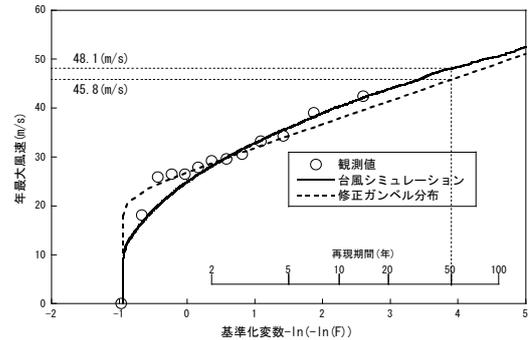


図2 熱帯低気圧の年最大風速の確率分布

### 3. 混合気候における極値風速の評価

#### 3.1 モンテカルロシミュレーションによる極値風速の評価

モンテカルロシミュレーションを用いて年最大風速の確率分布を評価する場合、長期間のシミュレーションができるため風観測に基づく評価に比べ、不確実性が低いと期待される。本研究では、Ishiharaら(2005)<sup>6)</sup>の研究に基づき1万年を解析期間としたモンテカルロシミュレーションを行った。

図2の実線は、モンテカルロシミュレーションによる年最大風速の確率分布を示す。シミュレーションの結果は、2年以上の再現期間において観測データ(白丸)と一致していることが分かる。

#### 3.2 混合気候帯における極値風速の評価

日本のような混合気候では、熱帯低気圧と温帯低気圧による強風に分けて成因別の確率分布を評価した後、確率分布を合成する必要がある。温帯低気圧に起因する年最大風速 $u_E$ と熱帯低気圧に起因する年最大風速 $u_T$ は独立の事象であると仮定すると、温帯低気圧に起因する年最大風速の非超過確率 $F_E(u_E)$ と熱帯低気圧に起因する年最大風速の非超過確率 $F_T(u_T)$ とを合成した合成確率分布 $F_c(u_c)$ は次式より評価できる。

$$F_c(u_c) = F_E(u_E) \times F_T(u_T) \quad (10)$$

図3には、温帯低気圧による年最大風速の非超過確率と台風シミュレーションによる年最大風速の非超過確率を合成した合成確率分布を実線で示す。合成確率分布は、広い範囲の再現期間において観測値(白丸)をよく表している。合成した50年再現期待値は、48.1m/sであり、合成前(図2)と同じ値であることから、温帯低気圧より熱帯低気圧の方が極値風速への寄与が大きいことが分かる。図中には、温帯低気圧によるガンベル分布と熱帯低気圧に

よる修正ガンベル分布から求めた合成確率分布の合成値を破線で示す。この合成確率分布関数から求めた 50 年再現期待値 45.8m/s は台風シミュレーションから求めた値 48.1m/s より小さい。このことから混合気候では、台風シミュレーションの結果を用いた合成確率分布を求め、極値風速を評価する必要があることが分かる。

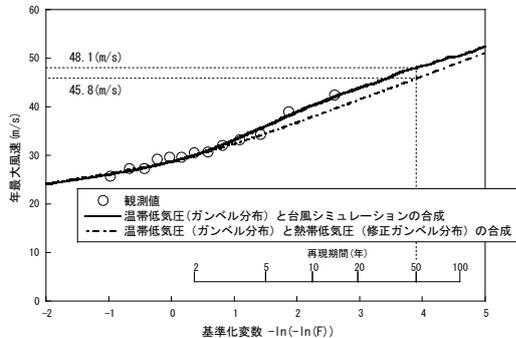


図3 熱帯低気圧と温帯低気圧による年最大風速の非超過確率の合成

#### 4. 不確実性を考慮した極値風速の評価

##### 4.1 不確実性の評価

有限の観測データから年最大風速の非超過確率を推定する際の不確実性はガンベルの理論により推定することが可能であり、ある再現期間に対応する年最大風速の分散  $\sigma^2$  は、次式により表される。

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_p^2}{L} \left[ 1 + 0.885(y - \gamma) + 0.6687(y - \gamma)^2 \right] \quad (11)$$

ここで、 $L$  は推定に用いた母集団のデータ数を、 $\sigma_p$  は母集団の標準偏差、 $y$  は求めたい再現期間に対応する基準化変数である。

式(11)により求めた温帯低気圧と熱帯低気圧に起因する年最大風速の 50 年再現期待値の標準偏差をそれぞれ図 4 の黒色の棒グラフで示す。両者とも 13 年の観測データからの値であるが、母集団の標準偏差  $\sigma_p$  が異なるため、推定値の標準偏差が大きく異なる。温帯低気圧の場合には 50 年再現期待値の標準偏差は 1.9m/s(推定値の 5.7%) であるのに対し、熱帯低気圧の場合には 5.7m/s(推定値の 12.5%) に達する。このことから、温帯低気圧に起因する強風の場合にはガンベルの理論に基づき 50 年再現期待値を外挿することが妥当であるが、熱帯低気圧に起因する強風に適用する場合には不確実性が大きいことがわかる。

ちなみに、10000 年の熱帯低気圧のモンテカルロシミュレーションによる 50 年再現期待値の標準偏差を、斜線の棒グラフで図 4 にあわせて示した。標準偏差の値は 0.29m/s(推定値の 0.6%) であり、観測から推定される極値

風速の不確実性よりもかなり小さいことがわかる。

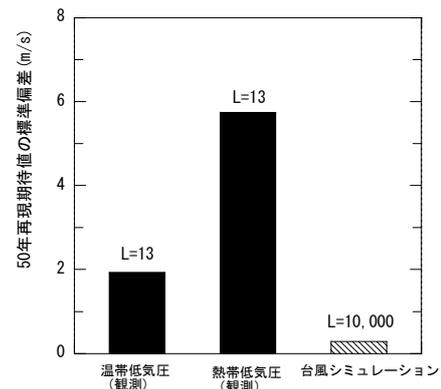


図4 50年再現期待値の標準偏差の比較

最後に、不確実性評価におけるガンベル理論の有効性を、モンテカルロシミュレーションの結果を用いて検証した。図 5 には、解析期間  $L$  を 10~1 万年の範囲で変化させ式(11)により算定した 50 年再現期待値の標準偏差を点線で示した。図には、あわせてモンテカルロシミュレーションにより求めた 50 年再現期待値の標準偏差を黒丸で示した。シミュレーションによる標準偏差は、1 万年のシミュレーションによる年最大風速のデータから 100, 200, 500, 1000, 2000 年の 100 個のデータセットを各々作り、50 年再現期間における平均値と標準偏差を求め、図中に標準偏差の値を示した。

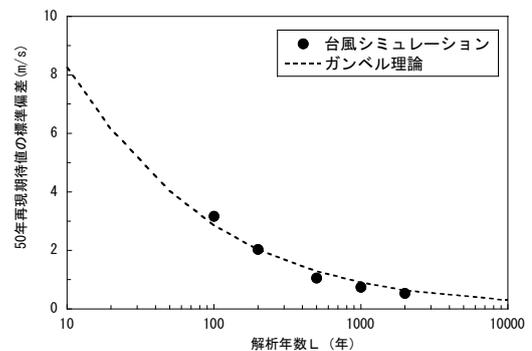


図5 ガンベル理論とモンテカルロシミュレーションにより求めた 50 年再現期待値の標準偏差の比較

図 5 から、ガンベル理論により求めた標準偏差は、解析年数  $L$  が短い場合に大きく、解析年数が長くなるに従い小さくなることが分かる。また、ガンベル理論の標準偏差(点線)は、モンテカルロシミュレーションから求めた標準偏差(黒丸)とよく一致している。ガンベル理論から算出された標準偏差は、十分な精度をもつことが検証された。

##### 4.2 不確実性を考慮した極値風速の評価

前節で説明したように観測値から推定された値には不

確実性が内在している。本研究では、この不確実性を評価し、式(12)に示すように、温帯低気圧と熱帯低気圧双方の不確実性を考慮した極値風速  $\hat{u}_C$  の評価式を提案した。

$$\hat{u}_C = u_C + \sigma_C \quad (12)$$

ここで、標準偏差  $\sigma_C$  は、(13)式により表す。

$$\sigma_C = \alpha \sigma_E + (1 - \alpha) \sigma_T \quad (13)$$

ここで、 $\sigma_E, \sigma_T$  は各々式(11)により算定される温帯低気圧と熱帯低気圧による年最大風速の標準偏差である。また、重み  $\alpha$  は次式により求める。

$$\alpha = (u_C - u_T) / [(u_C - u_T) + (u_C - u_E)] \quad (14)$$

熱帯低気圧に支配される時は  $u_C = u_T$  となり式(14)の分子は0となり重み  $\alpha$  は0である。一方、温帯低気圧に支配される時は、 $u_C = u_E$  となり重み  $\alpha$  は1である。図6には、ある再現期間  $R$  に対応する基準化変数  $y$  における重み  $\alpha$  の変化を示した。図に示されるように基準化変数  $y$  が大きい場合は、熱帯低気圧が支配し重み  $\alpha$  は0に漸近し、 $y$  が小さい場合は温帯低気圧が支配することになり、重み  $\alpha$  は1に漸近する。

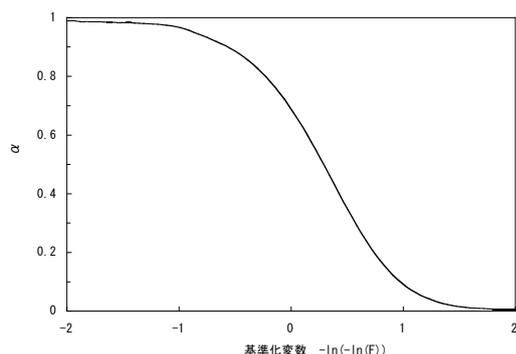


図6 重み  $\alpha$  の基準化変数による変化

表1に不確実性を考慮しない場合と考慮した場合の50年再現期待値の評価結果を示す。ここで台風シミュレーションにおける母集団のデータ数  $L$  は100年と仮定した。これは、台風シミュレーションに用いられた気圧の観測年数を考慮したためである。不確実性を考慮しない場合の台風シミュレーションによる年最大風速の50年再現期待値は48.1m/sであるのに対し、13年間の観測データにより推定された50年再現期待値は45.8m/sであり、その差が大きい。一方、13年間の観測データによる極値風速は51.5 m/sとなり、台風シミュレーションからの推定値の51.1 m/sと概ね同じ値となる。

表1 50年再現期待値の評価結果

不確実性	観測データ	モンテカルロシミュレーション
考慮せず	45.8 m/s	48.1 m/s
考慮あり	51.5 m/s	51.1 m/s

## 5. まとめ

モンテカルロシミュレーションとMCP法を用いて銚子沖における極値風速の予測を行い、以下の結論を得た。

- 1) 熱帯低気圧に起因する強風の非超過確率を表す修正ガンベル分布を提案し、観測データとの比較を行った。熱帯低気圧の極値風速は温帯低気圧の極値風速に比べ不確実性が高い。
- 2) ガンベル理論より求めた温帯低気圧の50年再現期待値の標準偏差は1.9m/sであり、熱帯低気圧の50年再現期待値の標準偏差5.7m/sに比べ不確実性が小さい。モンテカルロシミュレーションから求めた標準偏差の値は0.29m/sであり、さらに不確実性が小さい。
- 3) 不確実性を考慮した設計風速を推定する手法を提案した。50年再現期待値の標準偏差を考慮した極値風速は、観測による極値風速と台風シミュレーションによる推定値との差が小さくなり、観測データをほぼカバーできるようになる。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務で得られた研究成果である。ここに関係者の皆様に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) IEC 61400-1: Wind turbines-Part 1 Design requirements, Ed.3, 2005.
- 2) Gomes, L. and Vickery, B. J.: Extreme wind speeds in mixed climates, J. Wind Eng. Indust. Aerodyn., 2, 331-334, 1978.
- 3) Georgiou, P. N., Davenport, A. G. and Vickery, B. J.: Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones, J. Wind Eng. Indust. Aerodyn., 13, 139-152, 1983.
- 4) 石原孟, 榎木康太, 高原景滋, 荒川洋: 気流解析と台風シミュレーションに基づく配電設備のリスクマネジメント, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.360-373, 2011.
- 5) Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Ed., DNV/Risø, 2002.
- 6) Ishihara, T., Siang, K. K., Leong, C. C. and Fujino, Y.: Wind field model and mixed probability distribution function for typhoon simulation, The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 412-426, 2005.