

極値風速予測のための風速の平均化時間に関する研究

The effect of averaging time on the estimation of extreme wind speed

山口 敦**

Atsushi YAMAGUCHI

メルヴィン ブランコ ソロモン

Melvin Blanco SOLOMON

石原 孟**

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

風力発電設備の設計に際し、モンテカルロシミュレーション¹⁾やメソスケールモデルを用いて設計風速を推定する手法が提案されているが、これらの手法を用いて推定される風速は1時間から3時間平均の風速に相当すると言われており、設計に用いる10分平均風速を推定する際には平均化時間の違いを考慮した補正が必要である。また、洋上風力発電所の安全性に関する国際標準であるIEC61400-3²⁾においては波浪と強風の同時作用下で1時間の動解析を実施することが定められており、その際に10分平均風速の最大風速を1時間相当の風速に変換する必要がある。

Larsen and Mann³⁾はデンマークの5箇所とスエズ湾沿岸の3箇所の強風イベント時の観測データを用いて、10分平均風速の最大風速とより長い平均化時間に基づく最大風速との関係を明らかにし、補正を行うためのモデルを提案した。このモデルは洋上風力発電設備の安全基準を定めた国際標準IEC61400-3に採用されている。しかしながら、台風時は非台風時と比べて平均風速の時間変動が大きいと、この手法に基づいて10分平均風速の最大値を推定した場合に過小評価の恐れがある。

一方、安井ら⁴⁾は台風のモンテカルロシミュレーションにより求めた風速が3時間平均風速に相当することを示すとともに、台風時の東京の高層ビルの屋上における観測データを解析し、3時間平均風速と10分平均風速との差が正規分布で近似できることを示し、その標準偏差をモデル化した。しかしながら、このモデルに基づく3時間平均風速の最大値と10分平均風速の最大値の性質については議論されていないのに加え、3時間以外の平均化時間に対してはモデルが提案されていない。

そこで本研究では台風時と非台風時の両方の観測データを用いて、10分平均の最大風速と、より長い平均化時間の最大風速との関係を明らかにするとともに、両者の間の変換手法を提案する。

2. 平均化時間の違いのモデル化

平均化時間の違いが最大風速の違いに与える影響を

明らかにするために、平均化時間の違いによる平均風速の分布について検討する。非台風による強風の例として2004年～2005年に福島県いわき沖の天然ガス掘削プラットフォーム上にて計測した風速データを、⁵⁾台風による強風の例として2003年の9月11日の宮古島気象台における観測データを用い10分平均風速 $u_{10,i}$ から(1)～(4)式に示す移動平均を用いて M 分平均風速($M > 10$)の時系列データを作成した。移動平均操作は $M/10$ が偶数か奇数かによって異なり、 $M/10$ が偶数である場合は

$$u_{M,i} = \frac{1}{2}(u_{10,i-m} + u_{10,i+m}) + \frac{1}{2m-1} \sum_{k=i-m+1}^{i+m-1} u_{10,k} \quad (1)$$

$$m = \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{10} \quad (2)$$

であり、 $M/10$ が奇数である場合は

$$u_{M,i} = \frac{1}{2m+1} \sum_{k=i-m}^{i+m} u_{10,k} \quad (3)$$

$$m = \frac{1}{2} \left(\frac{M}{10} - 1 \right) \quad (4)$$

となる。次に、各時系列データに対して M 分平均風速 $u_{M,i}$ と10分平均風速 $u_{10,i}$ との差 $\Delta u_{M,i}$ を求める。

$$\Delta u_{M,i} = u_{M,i} - u_{10,i} \quad (5)$$

$\Delta u_{M,i}$ の大きさは風速に依存すると考えられるため、 $\Delta u_{M,i}$ を M 分平均風速の関数としてプロットしたのが図1である。 $\Delta u_{M,i}$ の平均値は風速に依存せずに常にほぼ0であるが、ばらつきは M 分平均風速が大きくなるに従って大きくなるのがわかる。またそのばらつきは台風時の方が非台風時より大きいことがわかる。

このことをもう少し詳しく見るために、 M 分平均風速を1m/sごとのビンに分解し、ビン内での $\Delta u_{M,i}$ の分布を調べる。非台風時において3時間平均風速が19m/s～20m/sのビン内の10分平均風速との差の累積頻度分布を例として図2に示す。

* 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

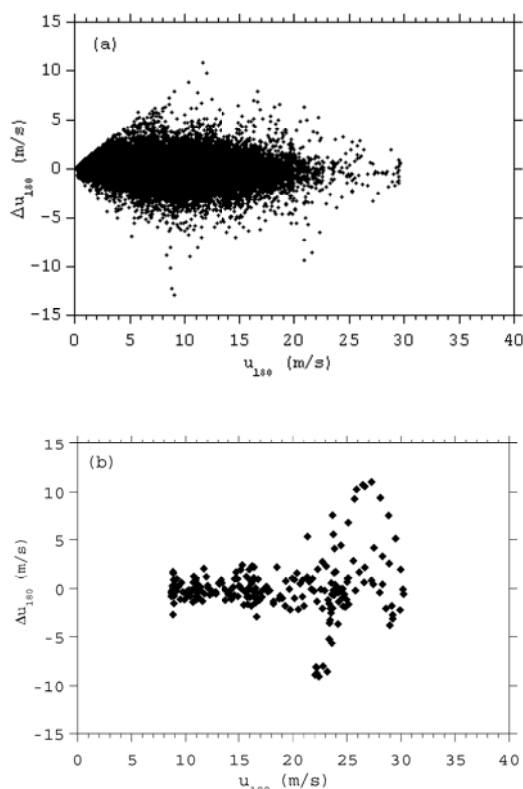


図1 3時間平均風速と10分平均風速の差 a) いわき沖における非台風時 b) 宮古島における台風時

この分布は対数正規分布によりモデル化できる. 図2には標準偏差が一致すると仮定して対数正規分布をあわせ

て示すが, 累積分布関数は対数正規分布によりモデル化できることがわかる.

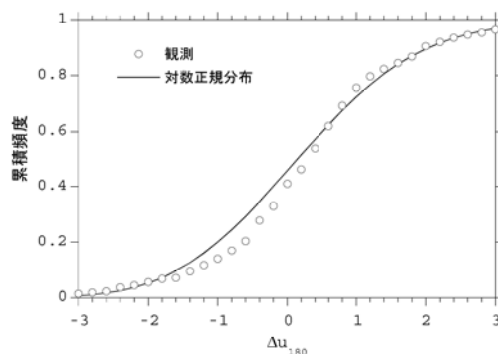


図2 非台風時の3時間平均風速が19m/sから20m/sの時の10分平均風速との差の累積頻度分布

対数正規分布は標準偏差によって特徴付けられるため, 台風時のデータと非台風時のデータそれぞれについて, Δu_M の標準偏差 σ_M を M 分平均風速 u_M の関数としてプロットしたものを図3に示す. なお, 台風時のデータについてはデータ数が少ないため 5m/s のビン幅を用いた. 平均化時間が長くなるにつれて Δu_M の標準偏差が大きくなる傾向があり, 特に平均化時間が3時間を越えると大きな値を示す. また, 風速が大きくなるにつれて標準偏差 σ_M が大きくなるが, その性質は台風時と非台風時で異なる.

本研究では, 台風時の標準偏差 σ_M^T は, M 分平均風

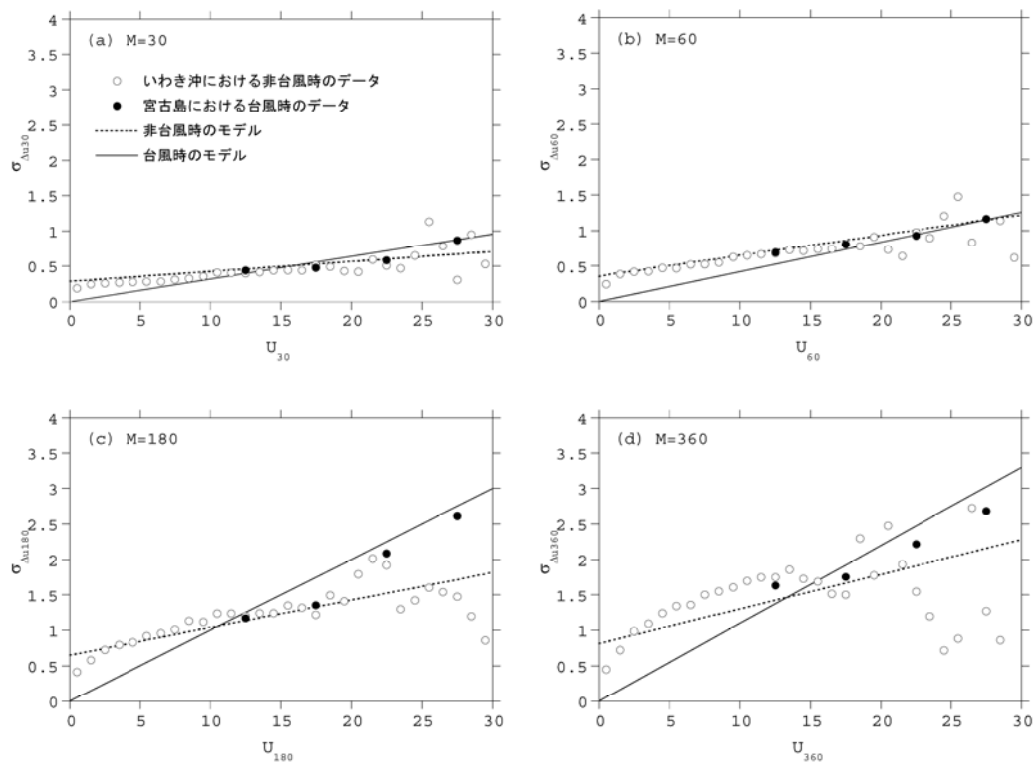


図4 M 分平均風速と10分平均風速の差 Δu_M の標準偏差 (a) $M=30$ 分, (b) $M=60$ 分, (c) $M=180$ 分, (d) $M=360$ 分

速に比例する形で(6)式のようにモデル化した.

$$\sigma_M^T(u_M) = a(M) \cdot u_M \quad (6)$$

ただし, 比例係数 $a(M)$ は平均化時間の関数である. 一方, 非台風時の強風については(7)式に示すように 1 次関数でモデル化した.

$$\sigma_M^E(u_M) = b(M)u_M + c(M) \quad (7)$$

この場合も比例係数 $b(M)$ と切片 $c(M)$ は平均化時間の関数である. 本研究ではこれらのパラメータ $a(M)$, $b(M)$, $c(M)$ をデータ数の重みをつけた最小二乗法により同定した. 同定したパラメータを表 1 に示すとともに, このパラメータを用いたモデルを図 3 にあわせて示す. このモデルにより, 観測値がよく再現されていることがわかる.

なお, 同定したパラメータを用いると, 台風時の 3 時間平均風速と 10 分平均風速との差 Δ_{180} の標準偏差 σ_{180}^T は

$$\sigma_{180}^T(u_{180}) = 0.1 \times u_{180} \quad (8)$$

となり, 安井らが提案した結果と一致する.

表 1 平均化時間の差のモデルパラメータ

平均化時間 M (分)	$a(M)$	$b(M)$	$c(M)$
30	0.032	0.014	0.29
60 (1 時間)	0.042	0.029	0.35
180 (3 時間)	0.10	0.039	0.65
360 (6 時間)	0.11	0.049	0.81

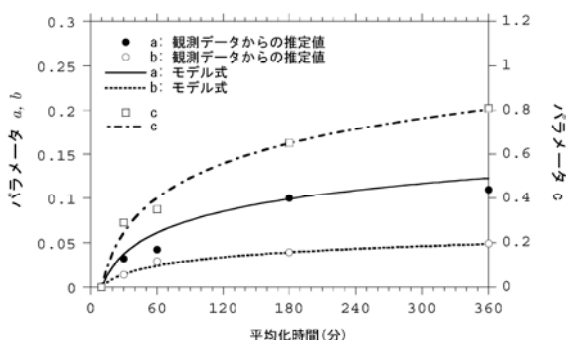


図 4 10 分平均風速と M 分平均風速との差の標準偏差

次に, これらのパラメータを任意の平均化時間に拡張する. 表 1 に示した, パラメータを平均化時間 M の関数としてプロットしたのが図 4 である. 全てのパラメータは平均化時間が長くなるにしたがって大きくなっていることがわかる. そこで, 本研究ではこれらのパラメータを(9)~(11)式に示す対数関数を用いて一般化した.

$$a = -0.03460 \ln\left(\frac{60}{M}\right) + 0.06120 \quad (9)$$

$$b = -0.01353 \ln\left(\frac{60}{M}\right) + 0.02424 \quad (10)$$

$$c = -0.22437 \ln\left(\frac{60}{M}\right) + 0.40201 \quad (11)$$

これらのモデル式により平均化時間 M の関数として推定したパラメータ a , b , c の値を図 4 にあわせて示す. このモデルを用いると, 観測データから推定した値を再現することができ, 任意の平均化時間に適用できることがわかる.

3. 最大風速の推定

次に, これらの関係を用いて M 分平均風速の最大値を求める. 前節で見たように, M 分平均風速と 10 分平均風速の差は対数正規分布に従い, その平均値は 0 であり, 標準偏差は(6)式, (7)式で与えられることから, その性質を満たす対数正規分布に従う乱数 $\Delta \tilde{u}_{M,i}$ を発生させ, (12)式に示すように, M 分平均風速に加えることにより, 10 分平均風速の時系列データを擬似的に生成することが可能である.

$$\hat{u}_{10,i} = u_{M,i} + \Delta \tilde{u}_{M,i} \quad (12)$$

このようにして 3 時間平均風速から発生させた時系列データの一例を図 5 に示す. また, あわせて本来の 10 分平均風速と移動平均により求めた 3 時間平均風速の時系列を示す. 3 時間平均風速の最大値は 10 分平均風速の最大値より小さくなっているが, 本手法により擬似的に発生させた 10 分平均風速の最大値は, 10 分平均風速の最大値に近くなっていることがわかる.

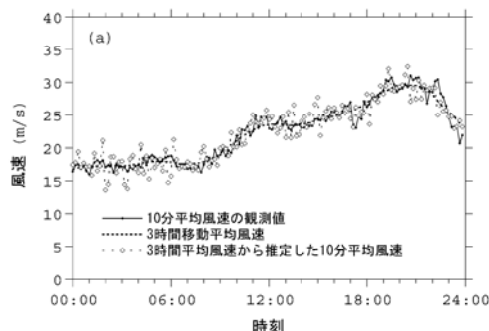


図 5 強風時の 10 分平均風速の観測値, 3 時間移動平均風速値と 3 時間平均風速から推定した 10 分平均風速

以上述べた方法により, M 分平均風速の時系列から 10 分平均風速の時系列を推定し, 最大値を求めることにより 10 分平均風速の最大値を推定することは可能であるが, 10 分平均風速の最大値と M 分平均風速の最大値と

の間関係を直接モデル化できれば、より簡単に 10 分平均風の最大値を推定することができる。以下、その手法について述べる。

まず、乱数による影響を最小限にするために、乱数のシーードを 100 通りに変化させ、上記の方法により年間の 10 分平均風速の時系列を発生させ、10 分平均相当の年最大風速を 100 通り求めた。次にこの 100 通りの 10 分平均年最大風速の平均を求め、 M 分平均風速との比を求め、その結果を図 6 に示す。

台風時と非台風時で σ_M のモデルが異なるため、得られた比も異なり、台風時の方が比が小さく 10 分平均風速と M 分平均風速の差が大きいことがわかる。また、平均化時間が長くなるほど最大風速の比が低減していることもわかる。

Larsen and Mann はこの比として、(13)式に示すモデルを提案した。

$$\frac{u_M^{\max}}{u_{10}^{\max}} = 1 - 0.0562 \left(\frac{M - 10}{60} \right)^{0.5457} \quad (13)$$

このモデルを図 6 内に実線で示すが、非台風時の比とよく一致しており、このモデルは非台風時に適用可能であることがわかる。また、台風時には 10 分平均風速と M 分平均風速の差は非台風と比較して大きいことがわかる。

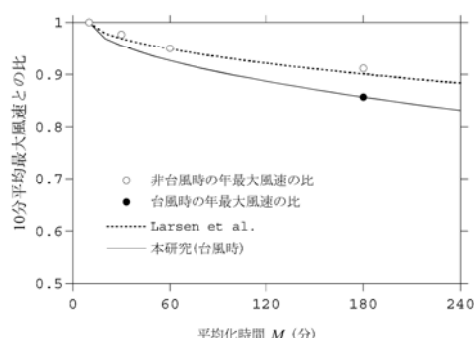


図 7 M 分平均最大風速と 10 分平均最大風速の比

本研究では、台風時の 10 分平均風速と M 分平均風速との比のモデルとして、(14)式に示すモデルを提案した。

$$\frac{u_M^{\max}}{u_{10}^{\max}} = 1 - 0.0810 \left(\frac{M - 10}{60} \right)^{0.5457} \quad (14)$$

このモデルにより、台風時においても M 分平均風速の最大値から、10 分平均風速の最大値を推定することが可能となった。

最後に、台風シミュレーションによって推定した風速が 3 時間平均値であるとして、(14)式から求めた係数を乗じ、10 分間平均値を推定した結果を図 7 に示す。台風シミュレーションでは観測の最大値を捕らえることができないが、本研究で提案した係数を乗じることにより 10 分平均風速の最大値を捕らえることができることがわかる。

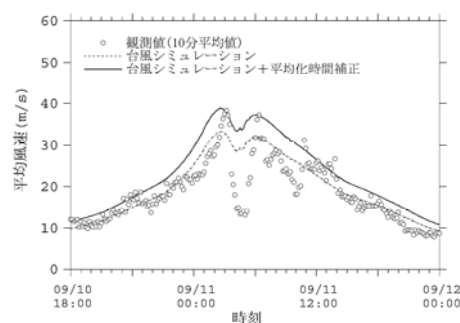


図 8 台風時の 10 分平均風速

4. まとめ

本研究では、台風時と非台風時の観測データを解析することにより、 M 分平均風速から 10 分平均風速の最大値を推定する手法を提案し、以下の結論が得られた。

- 1) 10 分平均風速と M 分平均風速との差 Δu_M の標準偏差 $\sigma_{\Delta u_M}$ を台風時、非台風時それぞれの場合に対してモデル化した。提案したモデルにより、任意の平均化時間 M に対して $\sigma_{\Delta u_M}$ を推定することが可能となった。
- 2) モデル化した 10 分平均風速と M 分平均風速との差 Δu_M の標準偏差 $\sigma_{\Delta u_M}$ を利用して、 M 分平均風速の時系列データから 10 分平均風速の時系列データおよび最大風速を推定する手法を提案した。この手法により推定した 10 分平均風速の最大値は観測値と一致した。
- 3) 台風時、非台風時に対して 10 分平均風速の最大値と M 分平均風速の最大値との比を求めた。非台風時には、Larsen らによって提案されたモデルが適用可能であることを示すと同時に、台風時に適用可能な新たなモデルを提案した。

参考文献

- 1) 石原孟, 山口敦, 老川進: 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, 第 33 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2011.
- 2) IEC61400-3, Wind Turbine – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- 3) Larsen, X. G. and Mann, J.: The effect of disjunct sampling and averaging time on maximum mean wind speeds, *J. Wind Eng. Indist. Aerodyn.*, Vol.94, pp.581-602, 2006.
- 4) 安井八紀, 大熊武司, 吉江慶祐, 片桐純治, 廣川雅一: モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究, 第 16 回風工学シンポジウム, PP.65-70, 2000.
- 5) 福本幸成, 石原孟, 土谷学: 福島県沖 37km における風況観測, 第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.235-238, 2005.