

# 空気密度の影響を考慮した設計風速の評価手法の提案\*

A study of design wind speed considering the effect of air density

石原 孟\*\*

荒川 洋\*\*\*

川竹 拓也\*\*\*

山口 敦\*\*

Takeshi ISHIHARA

Hiroshi ARAKAWA

Takuya KAWATAKE

Atsushi YAMAGUCHI

## 1 はじめに

洋上風力発電設備における強風時の風荷重は、風速に加え、空気密度の影響を受ける。IEC61400-1<sup>1)</sup>では標準大気の空気密度として  $1.225\text{kg/m}^3$  が用いられている。しかし、強風時の空気密度は、季節による変動に加え、日変化も生じており、強風時の気温と気圧を考慮して空気密度を評価する必要がある。特に、台風時の気圧低下と気温上昇により、台風時の空気密度は標準大気の空気密度より低くなる可能性がある。また、IEC61400-1 では 1 年再現風速は 50 年再現期待風速  $0.8 \cdot V_{ref}$  で評価しているが、日本は欧州と異なり、台風の影響を強く受けるため、IEC61400-1 の評価式により、1 年再現期待風速を過大評価する可能性がある。

本研究では、1 年再現期待風速は長期観測データより求め、IEC61400-1 により求めた 1 年再現期待風速と比較する。また、台風時の気温モデルを作成し、台風シミュレーションに取り入れることにより、空気密度の影響を考慮した設計風速の評価手法を提案する。

## 2 気象観測の概要

### 2.1 気象台と洋上観測タワーの概要

本研究で用いた気象観測サイトを図 1 に示す。対象とした地点は、千葉県銚子沖の北緯 35 度 40 分 54 秒、東経 140 度 49 分 24 秒の洋上観測タワーの海上高度 100m 地点である。気象観測データは、1991 年～2016 年までの 26 年間の銚子気象台のデータを用いた。

### 2.2 CFD と MCP 法を利用した観測データ変換

本研究では、銚子気象台で観測された長期観測データを CFD(Computational Fluid Dynamics)および MCP 法(Measurement-Correlate-Predict)を用いて、対象地点に変換する。対象地点である洋上観測タワーでは 2013 年 2 月～2014 年 1 月について気圧、気温を計測しているため、同期間の銚子気象台データと比較することで、変



図 1 銚子気象台と洋上観測タワーの位置図

換に用いる係数を算定した。

風速は、CFD 解析結果<sup>1)</sup>から得られた風速比を用いて、銚子地方気象台の風向・風速の時系列データを式(1)と式(2)により洋上地点の風速・風向の時系列データに変換した<sup>2)</sup>。

$$u_p(t) = C_u \times u_r(t) \quad (1)$$

$$\theta_p(t) = C_\theta + \theta_r(t) \quad (2)$$

ここで、 $u$ 、 $\theta$ は各々の風速および風向であり、 $C_u$ 、 $C_\theta$ は参照地点 $r$ と対象地点 $p$ との風速比および風向偏角である。なお、 $t$ は観測時刻を表す。本研究では、参照地点 $r$ を銚子気象台、対象地点 $p$ を洋上観測タワーとし、図 2 には風向別風速比を示す。

気象台と洋上観測タワーの気圧の関係を図 3 に示す。横軸は銚子気象台の気圧、縦軸は銚子気象台と洋上観測タワーの気圧比である。なお、ここで用いた気圧は海面更正気圧に変換したものである。図 3 から、気圧比 $C_p$ は気圧値に依存せず一定である。気象台の気圧から洋上観測タワーの気圧への変換は次式を用いた。

$$p_p(t) = C_p \times p_r(t), \quad C_p = 1.00 \quad (3)$$

ここで、 $p_p$ は対象地点 $p$ における海面更正気圧、 $p_r$ は参照地点 $r$ における海面更正気圧、 $C_p$ は海面更正気圧の変換係数であり、1.0 とした。

気象台と洋上観測タワーの気温の関係を図 4 に示す。横軸は銚子気象台の気温、縦軸は銚子気象台と洋上観測タワーの絶対温度比であり、式(6)により高度補正

\*第 42 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

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

\*\*\*団体会員 株式会社水城ネットワーク

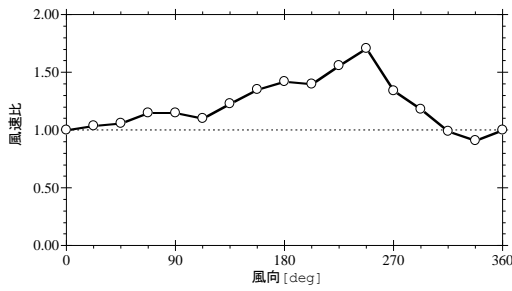


図2 銚子気象台と洋上観測タワーとの風向別風速比

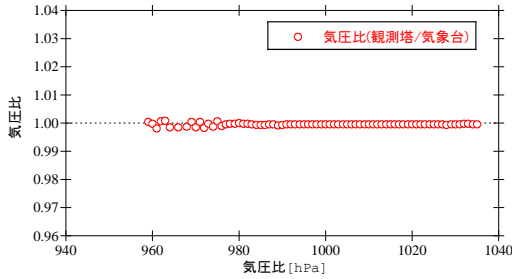


図3 銚子気象台と洋上観測タワーの海面更正気圧比

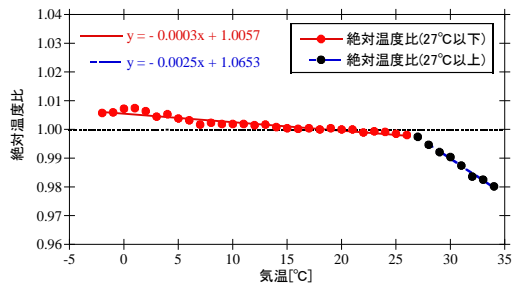


図4 銚子気象台と洋上観測タワーの絶対気温比

を行い、海拔 0m 高度の温度に換算し、絶対温度比を算出した。図4から、絶対温度比は温度値に依存している。-3~27°Cまでは絶対温度比は緩やかな減少傾向を示すが、27°C以上ではさらに傾きが増加していることが分かる。そのため、27°Cを境に直線近似により以下のように変換係数 $C_T$ を算定し、変換した。

$$T_p(t) = C_T(T_r) \times T_r(t) \quad (4)$$

$$C_T(T_r) = \begin{cases} -0.0003T_r + 1.0057 & T_r \leq 27 \\ -0.0025T_r + 1.0653 & T_r \geq 27 \end{cases}$$

ここで、 $T_p$ は対象地点pにおける気温、 $T_r$ は参照地点rにおける気温である。

MCP 法により求めた対象における気圧、気温は海拔 0m における値であり、高度zにおける気圧、気温を求めるため、次式を用いた。

$$p_z(t) = p_0 \left( 1 - \frac{0.0065z}{(T_0 + 273.15)} \right)^{5.257} \quad (5)$$

$$T_z = T_0 - 0.0065z \quad (6)$$

ここで、 $p_z, T_z$ は高度zにおける気圧および気温、 $p_0, T_0$ は海拔 0m 高度の気圧および気温である。高度zの空気密度 $\rho$ は次式により算出した。

$$\rho = \frac{p_z}{R(T_z + 273.15)} \quad (7)$$

ここで、 $R$ は気体定数である。

### 3 設計風速の評価

#### 3.1 1年と50年再現期待風速の評価

1年再現期待風速は、長期風観測データが得られている場合、月最大値をガンベル分布により評価することができる。図5には、台風と季節風に起因する月最大風速の非超過確率分布を示す。混合気候における1年再現期待風速は28.2m/sと推定された。

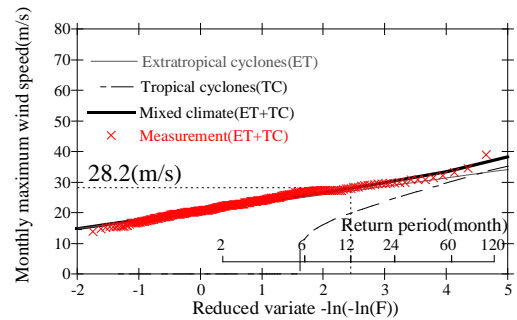


図5 台風と季節風による月最大風速の非超過確率分布

一方、50年再現期待風速は、図6に示すように、台風と季節風に起因する年最大風速の非超過確率分布から求めた。1年再現期待風速と同じように、台風と季節風に起因する強風について、成因別確率分布を評価した後、混合確率分布を求めた。混合気候における50年再現期待風速は48.1m/sと推定された。

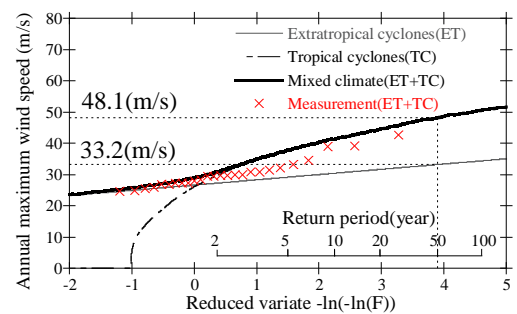


図6 台風と季節風による年最大風速の非超過確率分布

#### 3.2 1年再現期待風速の評価式の提案

台風と季節風に起因する強風の非超過確率分布を示す図6から、再現期間が2年以下の場合には、季節風が支配的であり、再現期間が2年以上の場合には、台風が支配的である。年最大風速による非超過確率分

布より、1年再現期間の風速を求めることができないため、1.1年再現期間の風速から推定すると、26.1m/sとなること分かる。一方、IEC61400-1では、1年再現期待風速は50年再現期待風速の0.8倍で評価される。IEC61400-1に基づき評価した1年再現期待風速は38.5m/sであり、観測値を37%過大評価している。これは、銚子における50年再現期待風速の成因は台風であることが原因である。

本研究では1年再現期待風速の評価は、季節風の50年再現期待値の0.8倍で求めることを提案した。表1には、IEC61400-1に基づき評価した1年再現期待風速と観測値の比較を示す。季節風の50年再現期待値の0.8倍で求めた1年再現期待風速は26.6m/sであり、長期観測データから求めた1年再現期待風速28.2m/sとほぼ同じであることが分かる。

表1 1年再現期待風速の比較

	IEC61400-1	本研究	観測値
評価式	$0.8 \times V_{ref}$	$0.8 \times V_{50,ET}$	—
$V_1$ [m/s]	38.5	26.6	28.2

#### 4 設計風速に対応する等価空気密度の評価

##### 4.1 1年再現期待風速に対応する等価空気密度の評価

風荷重は速度圧に比例するため、1年再現期待風速に対応する等価空気密度は、1年再現期待速度圧と1年再現期待風速を用いて次式に求めることができる。

$$\hat{\rho}_1 = \frac{2 \cdot q_1}{V_1^2} \quad (8)$$

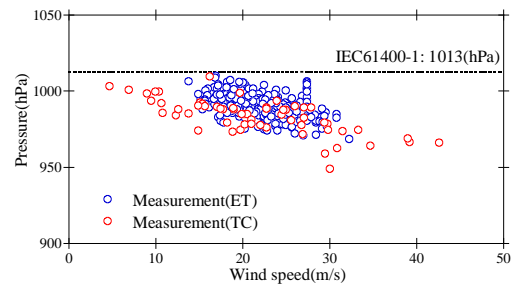
ここで、 $V_1$ は1年再現期待風速、 $q_1$ は1年再現期待速度圧、 $\hat{\rho}_1$ は等価空気密度である。

図7には、月最大風速に対応する気圧と気温を示す。台風と季節風時の気圧は両者とも風速の増大に伴い、低下している。一方、気温に関しては風速によらず、大きく変動する。台風時の平均気温は季節風時の平均気温より高く、標準大気の空気密度に対応する気温より高いことが分かる。

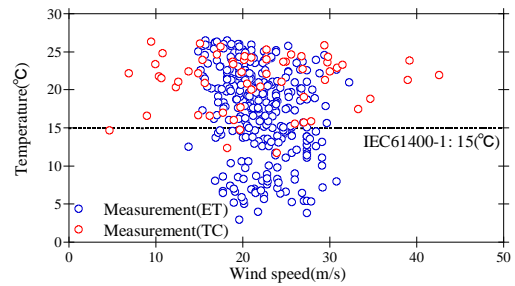
図8に月最大速度圧の非超過確率分布を示す。1年再現期待速度圧は461.0N/m<sup>2</sup>であり、式(8)により求めた1年再現期待風速に対応する等価空気密度は1.159kg/m<sup>3</sup>である。IEC61400-1で定められた空気密度1.225kg/m<sup>3</sup>より、約5.4%低下していることが分かる。

##### 4.2 50年再現期待風速に対応する等価空気密度の評価

耐風設計に用いられる50年再現期待風速を、観測値を用いて評価するには50年以上の長期の観測デー



(a)気圧



(b)気温

図7 台風と季節風による月最大風速と気圧・気温の関係

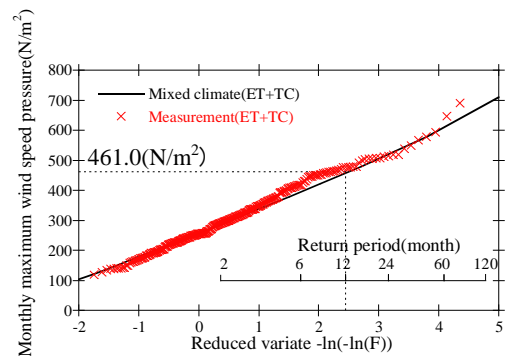
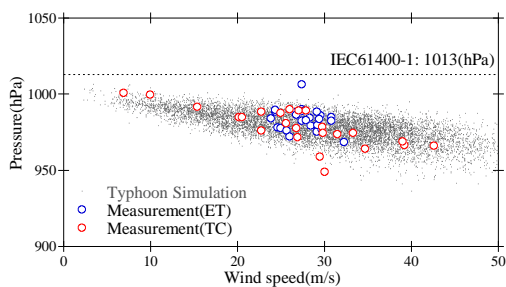


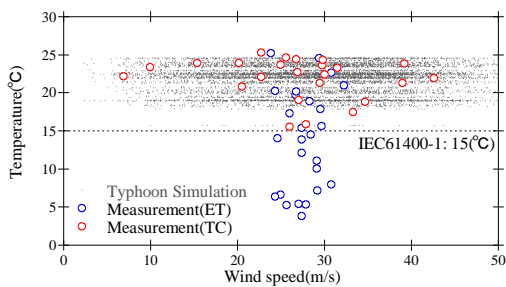
図8 台風と季節風による月最大速度圧の非超過確率分布

タが必要である。そこで、本研究では、台風の発生頻度と気温の統計的特性を台風シミュレーションに取り入れることにより、台風時の空気密度の影響を考慮した台風シミュレーション手法を提案する。

台風の発生頻度は、対象地点の半径500kmを通過し中心気圧が985hPa以下となった過去の台風を気象庁のベストトラックデータから抽出し、台風の最接近時刻を台風の発生時刻として月別に集計した。5月～12月にかけて台風は襲来しているが、5月、11月、12月の発生回数は、それぞれ2回、4回、1回と少ない。また、これらの時期に発生する台風は規模が小さく設計風速となりうる強風をもたらさないと考えられるため、5月の発生回数を6月に、11月、12月の発生回数を10月に合算しモデル化した。台風シミュレーションでは、6月～10月の発生頻度分布に従い、ランダム



(a)気圧



(b)気温

図9 台風と季節風による年最大風速と気圧・気温の関係

に乱数を発生させ台風の発生時期として求めた。

気温は月別時間別に平均気温を算出し、月別に気温の日変化をモデル化し、発生確率は一様として乱数を発生させ、台風時の気温として求めた。

提案した気圧と気温のモデルを検証するため、本研究では、Ishihara and Yamaguchi<sup>3)</sup>の研究に基づき、1万年を解析期間とした空気密度の影響を考慮した台風モンテカルロシミュレーションを実施した。図9に観測と予測された気圧と気温の風速による変化を示す。気圧に関しては台風と季節風によらず、風速の増大に伴い、低下している。一方、気温に関しては風速によらず、大きく変動する。台風時の平均気温は季節風時の平均気温より高く、標準大気の空気密度に対応する気温より高いことが分かる。

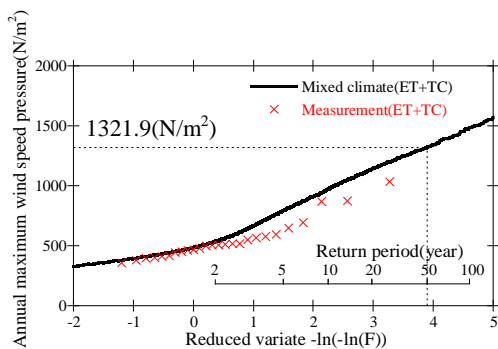


図10 台風と季節風による年最大速度圧の非超過確率分布

図10には年最大速度圧による非超過確率分布を示

す、表2にIEC61400-1に示す標準大気の空気密度と式(8)により求めた50年再現期待風速に対応する等価空気密度を示す。等価空気密度は $1.143\text{kg/m}^3$ であり、IEC61400-1で定められた空気密度 $1.225\text{kg/m}^3$ と比較して、6.7%低減していることが分かる。表中に示す気圧 $p_{50}$ と気温 $T_{50}$ は図9に示す風速の50年再現期待値 $V_{50}$ に対応する台風時の平均値を示し、気圧低下および気温上昇を示していることが分かる。

表2 空気密度の50年再現期待値の比較

	$V_{50}$ [m/s]	$\rho_{50}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$p_{50}$ [hPa]	$T_{50}$ [°C]
IEC 61400-1		1.225	1013	15
本研究	48.1	1.143	965	22

## 5 まとめ

本研究では、1年再現期待風速におけるIEC61400-1の評価式について、長期観測より求めた1年再現期待風速と比較することにより評価した。また、台風の発生頻度の季節変動と気温の月別時間別の統計モデルを台風シミュレーションに取り入れることにより、強風時の空気密度を考慮した設計風速の評価手法を提案し、以下の結論を得た。

1. IEC61400-1の評価式に基づき、50年再現期待風速から求めた1年再現期待風速は、月最大風速の長期観測データから求めた1年再現期待風速を過大評価している。一方、季節風の50年再現期待値の0.8倍として求めた1年再現期待風速は観測値に近いことが分かった。
2. 50年再現期待速度圧と50年再現期待風速から、50年再現期待風速に対応する等価空気密度を求める手法を提案した。台風時の気圧低下および気温上昇を考慮した本提案手法により求めた等価空気密度は、IEC61400-1に示す標準大気の空気密度より6.7%低下した。

## 参考文献

- 1) Takeshi ISHIHARA, Atsushi YAMAGUCHI. Prediction of the extreme wind speed in the mixed climate region by using Monte Carlo simulation and Measure-Correlate-Predict method [J]. Wind Energy, 18(1): 171-186, 2015.
- 2) Y. Misu, T. Ishihara : Prediction of frequency distribution of strong crosswind in a control section for train operations by using onsite measurement and numerical simulation, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 174, pp. 69-79, 2018
- 3) T. Ishihara, K. S. Khoo, C. L. Cheong and Y. Fujino : Wind Field Model and Mixed Probability Distribution Function for Typhoon Simulation, Proc. of APCWE VI, pp.412-426, 2005.