

# 福島沖の風況の長期予測に関する研究\*

Long-term prediction of wind climate at Fukushima offshore site

石原 孟\*\*

Takeshi ISHIHARA

山口 敦\*\*

Atsushi YAMAGUCHI

荒川 洋\*\*\*

Hiroshi ARAKAWA

大森 政則\*\*\*

Masanori OHMORI

## 1. はじめに

風力発電設備における発電量や施工稼働率を評価するためには、平均風速の経年変化や月別変動を精度よく求める必要がある。また、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良く求める必要があるが、日本のように熱帯低気圧（台風）及び温帯低気圧（非台風）の両方が強風の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。

著者らはこれまで、数値シミュレーションを用いることにより、洋上風力発電設備の設計に必要な気象条件を評価する手法を提案してきた<sup>1)2)</sup>。しかし、長期変化や季節風の50年再現期間の極値を求めるには、高解像度且つ長期間の数値シミュレーションによる評価が必要となる。

本研究では、福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにおいて1年間の風速場の気象シミュレーションを実施し、同期間で得られた観測値と比較することにより気象予測の精度を評価する。さらに短期間の同一期間における低解像度と高解像度の数値シミュレーション結果の関係式を求め、長期間の低解像度の数値シミュレーション結果を補正することにより、平均風速の経年変化や月別変動、及び温帯低気圧等の季節風による極値風速を予測する手法を提案する。

## 2. 福島沖における洋上風況観測と風況予測

### 2.1 洋上風況観測の概要

本研究では、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業（Floating OffshoRe Wind fARm Demonstration project, FORWARD project）により観測が実施されている風況の観測データを用いた。Fig. 1に本事業の実施海域を示す。気象海象観測は、北緯37度18.6486分、東経141度14.4042分、離岸距離約20km、水深約120mの地点に設置されている浮体式サブステーションにおいて実施されている。

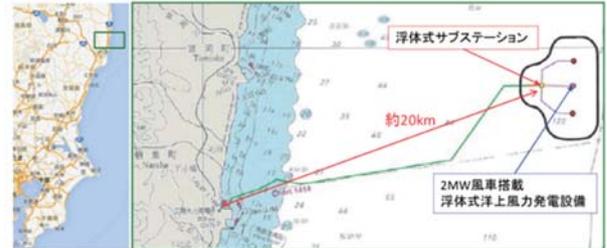


Fig. 1 本事業の実施海域

### 2.2 風況予測の概要

本研究では、洋上風況予測を行うために、アメリカ大気研究センターなどによって開発されたメソスケール気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) version 3.4.1<sup>3)</sup>を用いて、2014年7月から2015年6月までの1年間の数値シミュレーションを実施した。計算はスピニアップ期間を1日とし、1ヶ月単位で行った。気象モデルの計算条件の概要をTable 1に示す。

Table 1 WRFの計算条件

|         |   |
|---------|---|
| 水平解像度   | 18km, 6km, 2km                          |
| 水平格子数   | 100×100                                 |
| 鉛直層数    | 45層 (地上-50hPaまで, 200mまでに11層)            |
| タイムステップ | 72秒, 24秒, 8秒 (水平格子解像度の4倍)               |
| 気象データ   | NCEP-FNL 1°×1° 6-hourly                 |
| 海面水温データ | OSTIA 0.05°×0.05° 6-hourly              |
| 地形データ   | 標高: 国土地理院 50m メッシュ                      |
| 雲微物理    | Ferrier (new Eta) microphysics          |
| 長波放射    | rrtm scheme                             |
| 短波放射    | Dudhia scheme                           |
| 接地境界層   | Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme       |
| 地表面過程   | unified Noah land surface model         |
| 大気境界層   | Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE level2.5 |
| 積雲パラメタ  | Betts-Miller-Janjic scheme              |
| 4DDA    | グリッドナッジング                               |

### 2.3 風況予測の精度検証

Fig. 2には、WRFによる数値シミュレーションの予測結果と観測値の月平均風速の比較を示す。予測値は、

\*平成28年12月1日第38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

\*\*\* 株式会社水域ネットワーク

通年において観測値を精度良く再現していることが分かる。Fig. 3 には風速階級別出現頻度の予測値と観測値の比較を示し、風速階級によらず、出現頻度をよく再現されている。Fig. 4 に風向別出現頻度の予測値と観測値の比較を示す。観測値と比較してW方向周辺の出現頻度は若干過小評価し、NNW方向での出現頻度は若干過大評価となっているが、卓越風向のS方向における出現頻度はよく再現している。

Fig. 5 には、予測結果と観測値の風向別平均風速の比較を示す。観測値と比較してW方向周辺の平均風速は過小評価であるが、その他の風向の平均風速は概ね再現されている。Fig. 6 には、予測結果と観測値の年平均風速の鉛直分布の比較を示す。予測結果は、各高度における年平均風速を精度良く再現している。

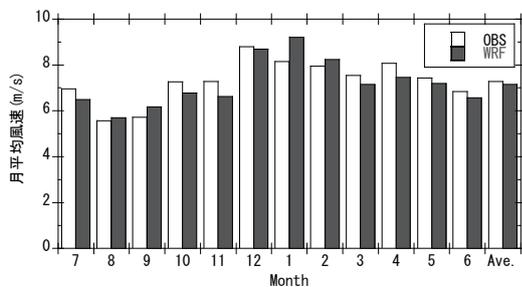


Fig. 2 月平均風速の比較

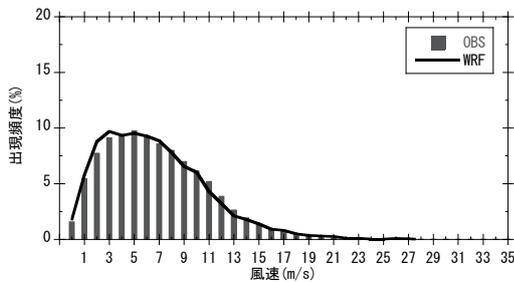


Fig. 3 風速階級別出現頻度の比較

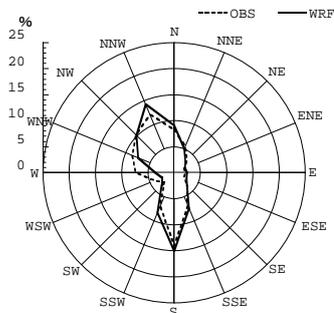


Fig. 4 風向別出現頻度の比較

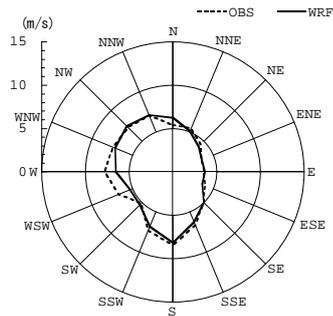


Fig. 5 風向別平均風速の比較

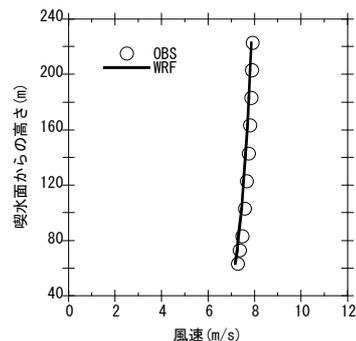


Fig. 6 年平均風速の鉛直分布の比較

### 3. 平均風速の長期変化と極値風速の予測

発電量の予測と施工稼働率の予測を行うためには、平均風速の経年変化や月別変動を精度良く予測する必要がある。また風力発電設備の設計風速の予測を行うためには、極値統計解析から季節風の50年再現期間の極値風速を精度良く予測する必要がある。これらの予測を行うためには、長期シミュレーションを実施する必要があるが、高解像度の長期シミュレーションを実施するには計算時間とコストが掛かる。本研究では、同一期間の低解像度と高解像度の数値シミュレーション結果の関係式を求め、補正係数を決定した上、低解像度シミュレーション結果を補正することにより、平均風速の長期変化及び季節風による極値風速を予測する手法を提案する。

#### 3.1 平均風速の経年変化及び月別変動の予測

平均風速の長期変化の予測では、低解像度及び高解像度のシミュレーション結果として、WRFによる気象シミュレーションの水平解像度18km及び2kmの結果（共に時間解像度は1時間）を用いて、これらの結果の年平均風速の比を補正係数とし、低解像度の長期データを補正することにより、平均風速の長期変化を予測した。具体的には、式(1)による補正係数を用いて、式(2)により各年の平均風速、式(3)により各月の平均風速、式(4)により各月の標準偏差を求める。

$$C = \bar{U}_H / \bar{U}_L \quad (1)$$

$$\hat{U}_{H,i} = C U_{L,i} \quad (2)$$

$$\hat{U}_{H,j} = C U_{L,j} \quad (3)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{U}_{H,i,j} - \mu_j)^2} \quad (4)$$

ここで、 $C$ は低解像度のシミュレーション結果を高解像度のシミュレーション結果に変換する補正係数、 $\bar{U}_H$ 及び $\bar{U}_L$ はそれぞれ、同一期間の高解像度及び低解像度シミュレーション結果による年平均風速であり、本研究では3年間とした。 $U_{L,i} \cdot U_{L,j}$ 及び $\hat{U}_{H,i} \cdot \hat{U}_{H,j}$ は、補正前後の低解像度シミュレーション結果による各年・各月の平均風速、 $\mu$ および $\sigma$ は、10年間 ( $N=10$ )の各月における平均風速および標準偏差である。下付きの*i*は、年を意味し、*j*は月を表す。本研究では2006年から2015年までの10年間 ( $i=1,2,\dots,10$ )の年平均風速、1月から12月までの12ヶ月 ( $j=1,2,\dots,12$ )の月平均風速を算出する。

Fig. 7には、補正した10年間の低解像度シミュレーション結果 $\hat{U}_{H,i}$ と、真値とする高解像度シミュレーション結果 $U_H$ の平均風速の経年変化との比較、Table 2にその値と補正係数を示す。年平均風速は7.0~7.5m/sと概ね一定の値を示している。本提案手法により補正した低解像度シミュレーション結果は、任意の3期間(2006~2008年, 2009~2011年, 2013~2015年)の何れの補正係数を用いても、真値である高解像度シミュレーション結果を精度良く再現していることが分かる。

Fig. 8には、補正した10年間の低解像度シミュレーション結果 $\hat{U}_{H,j}$ と、高解像度シミュレーション結果 $U_H$ の平均風速、標準偏差の月別変動の比較、Table 3及びTable 4にその値を示す。福島沖における月平均風速は、6.0~8.0m/s前後であり、6月から8月の夏季は低く、12月から2月の冬季は高い傾向にある。標準偏差も、0.4~0.8m/s前後と、対象年によってばらつきのある年があることが分かる。本提案手法により補正した低解像度シミュレーション結果は、年平均風速の補正と同様に、任意の3期間のどの補正係数を用いても月平均風速およびその標準偏差を真値である高解像度シミュレーション結果とほぼ同じ精度で再現できることが分かった。

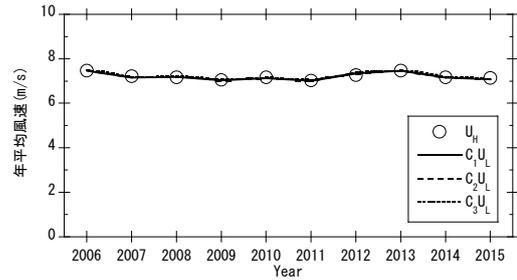


Fig. 7 年平均風速の経年変化の比較

Table 2 10年間の年平均風速の値と補正係数

| Year                              | $U_H$ (m/s) | $C_1 U_L$ (m/s) | $C_2 U_L$ (m/s) | $C_3 U_L$ (m/s) |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2006                              | 7.48        | 7.48            | 7.49            | 7.51            |
| 2007                              | 7.22        | 7.18            | 7.19            | 7.21            |
| 2008                              | 7.18        | 7.21            | 7.21            | 7.24            |
| 2009                              | 7.06        | 7.07            | 7.07            | 7.09            |
| 2010                              | 7.16        | 7.13            | 7.14            | 7.16            |
| 2011                              | 7.02        | 7.02            | 7.03            | 7.05            |
| 2012                              | 7.29        | 7.36            | 7.37            | 7.39            |
| 2013                              | 7.48        | 7.46            | 7.47            | 7.49            |
| 2014                              | 7.18        | 7.18            | 7.18            | 7.21            |
| 2015                              | 7.15        | 7.09            | 7.1             | 7.12            |
| $C_1=1.033, C_2=1.034, C_3=1.037$ |             |                 |                 |                 |

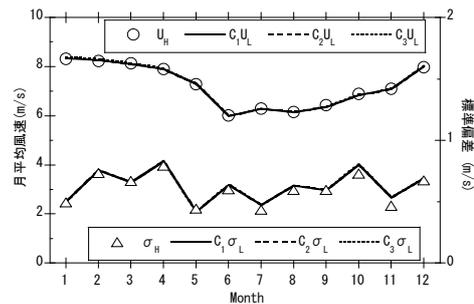


Fig. 8 月平均風速及びその標準偏差の比較

Table 3 10年間の月別平均風速の比較

| Month | $U_H$ (m/s) | $C_1 U_L$ (m/s) | $C_2 U_L$ (m/s) | $C_3 U_L$ (m/s) |
|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1     | 8.32        | 8.35            | 8.36            | 8.38            |
| 2     | 8.23        | 8.28            | 8.28            | 8.31            |
| 3     | 8.13        | 8.11            | 8.11            | 8.14            |
| 4     | 7.91        | 7.90            | 7.91            | 7.93            |
| 5     | 7.29        | 7.30            | 7.31            | 7.33            |
| 6     | 6.02        | 5.99            | 5.99            | 6.01            |
| 7     | 6.29        | 6.28            | 6.29            | 6.31            |
| 8     | 6.16        | 6.15            | 6.15            | 6.17            |
| 9     | 6.42        | 6.36            | 6.37            | 6.39            |
| 10    | 6.88        | 6.85            | 6.85            | 6.87            |
| 11    | 7.09        | 7.09            | 7.10            | 7.12            |
| 12    | 7.98        | 8.02            | 8.02            | 8.05            |

Table 4 10年間の月別標準偏差の比較

| Month | $U_H$ (m/s) | $C_1 U_L$ (m/s) | $C_2 U_L$ (m/s) | $C_3 U_L$ (m/s) |
|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1     | 0.49        | 0.50            | 0.50            | 0.50            |
| 2     | 0.73        | 0.76            | 0.76            | 0.76            |
| 3     | 0.67        | 0.66            | 0.66            | 0.66            |
| 4     | 0.79        | 0.83            | 0.83            | 0.83            |
| 5     | 0.44        | 0.42            | 0.42            | 0.42            |
| 6     | 0.60        | 0.64            | 0.64            | 0.64            |
| 7     | 0.44        | 0.48            | 0.48            | 0.48            |
| 8     | 0.60        | 0.63            | 0.63            | 0.63            |
| 9     | 0.60        | 0.60            | 0.60            | 0.60            |
| 10    | 0.73        | 0.80            | 0.80            | 0.81            |
| 11    | 0.47        | 0.54            | 0.54            | 0.54            |
| 12    | 0.67        | 0.69            | 0.69            | 0.69            |

### 3.2 季節風の極値風速の予測

極値統計解析においては、年最大値を用いるのが一般的であり、風速に関しては風力発電設備の設計に関する国際基準 IEC61400-1<sup>4)</sup>では、10年以上の年最大風速を用いることが推奨されている。本項では、2006年から2015年までの10年間の高解像度シミュレーション結果における年最大風速から、Gumbel分布により推定した極値風速の50年再現期待値を真値と仮定する。そして、平均風速の長期変化と同様に、短期間且つ同一期間の低解像度シミュレーション結果と高解像度シミュレーション結果の関係式を求め、補正係数を決定した上、低解像度シミュレーション結果を補正することにより、極値風速を予測する手法を提案する。なお、本項での補正係数の算出には、日最大風速の平均風速を用いるものとし、対象年数は平均風速の長期変化の予測と同様に3年間とした。また、本研究では季節風による極値風速を求めため、各年の低解像度及び高解像度のシミュレーション結果から、台風に起因する風速（半径500km以内、且つ985hPa以下の台風発生時に得られた風速）を除去した結果を用いた。

Fig. 9には、季節風の年最大風速における極値風速分布、Table 5に、補正前後の50年再現期待値 $U_{H50}$ 、 $\hat{U}_{H50}$ 及び両者のBIAS値と補正係数を示す。なお、極値分布の評価に用いたGumbel分布のパラメータは積率法により求めた。補正した低解像度シミュレーション結果から得られた極値風速は、任意の3期間の何れの補正係数を用いても高解像度シミュレーション結果から得られた極値風速を若干過大評価しているが、補正後の低解像度シミュレーション結果の50年再現期待値は、真値と最大で+1.57m/s(+4.0%)程度の誤差であることから、本章にて実施した季節風に起因する極値風速の補正は、精度良く行われていることが分かる。

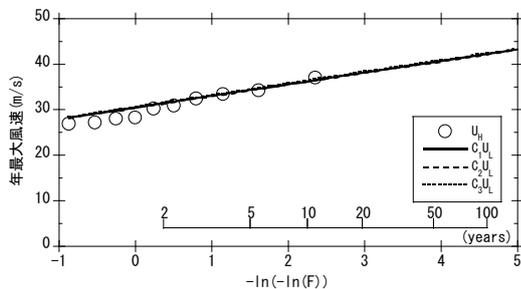


Fig. 9 季節風の年最大風速における極値分布

Table 5 補正前後の50年再現期待値・BIASと補正係数

|                                   |       |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| $U_{H50}$ (m/s)                   | 39.29 |       |       |
| $C_{1,2,3}U_{L50}$ (m/s)          | 40.57 | 40.49 | 40.86 |
| BIAS(m/s)                         | 1.28  | 1.20  | 1.57  |
| $C_1=1.092, C_2=1.090, C_3=1.100$ |       |       |       |

### 4. まとめ

本研究では、福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業サイトにおいて、気象シミュレーションによる通年の風況予測、平均風速の経年変化と月別変動及び季節風の極値風速の予測を実施し、以下の結論を得た。

1. 実証検証サイトにおいて、1年間の気象シミュレーションを実施し、同時期の観測値と比較した。気象シミュレーションによる予測風速は、観測値の月平均風速、風速階級別発生頻度、風向別出現率、風向別及び鉛直方向の年平均風速の特徴をよく再現した。
2. 3年間の同一期間における低解像度（水平解像度18km）と高解像度（水平解像度2km）のシミュレーション結果における平均風速から求めた補正係数を用いて、低解像度の結果を補正することにより、高解像度で求めた平均風速の経年変化及び月別変動を精度良く再現した。
3. 台風起因の風速を除去した日最大風速から求めた補正係数を用いて、低解像度の結果を補正することにより、高解像度で求めた季節風に起因する極値風速分布を精度良く再現した。

### 謝辞

本研究は、経済産業省の委託業務「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」で得られた研究成果である。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 福島雅人・山口敦・石原孟, メソスケールモデルを用いた洋上風況予測と不確かさの評価, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014, pp.333-336.
- 2) 石原孟・山口敦, 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, 日本風工学会論文集, Vol.37, No.3, 2012, pp.105-116.
- 3) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, 2008.
- 4) IEC 61400-1: Wind turbines - part 1: design requirements. Ed. 3, 2005.