# 地形と大気安定度の影響を考慮した洋上風況予測\*

Offshore wind climate assessment considering effects of terrain and atmospheric stability

山口 敦**	大森 政則***	荒川 洋***	石原 孟**
Atsushi YAMAGUCHI	Masanori OHMORI	Hiroshi ARAKAWA	Takeshi ISHIHARA

## 1. はじめに

風力発電所の建設に際しては,現地の風況を精度良 く予測することが必要となる.陸上風力発電所の建設 に際しては,数値流体解析と現地観測を利用した風況 予測手法 <sup>1)</sup>が提案されてきたが、洋上においては大気 安定度が風速の鉛直分布に与える影響が大きいため, 中立と仮定した数値流体解析を利用した風況予測手 法には誤差が生じる.大気安定度を考慮する風況予測 手法としてメソスケール気象モデルを利用する方法 がある。大澤ら<sup>2)</sup>は低高度の観測データとメソスケー ル気象モデルから求めた鉛直プロファイルを用いて ハブ高さの風況を予測する手法を提案したが、この手 法では水平解像度の制約から細かい地形の影響が考 慮されないという問題や,気象シミュレーションで再 現される現象と実現象の位相誤差により実際とは異 なる鉛直プロファイルが使われる可能性があるとい う問題点がある.

本研究では、この問題を解決するために数値流体解 析とモニンオブコフの相似則を利用して地形と大気 安定度を同時に考慮した風況の予測手法を提案し、ド ップラーライダーにより得られた風観測データと比 較することにより、高さ方向の風況予測精度の検証を 行う.

# 2. 銚子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、千葉県銚子沖約 3.1km における風況観 測タワーで観測された風況データを用いた.Fig.1 に観 測地点の位置を示す.風況観測タワーは北緯 35.6816°, 東経 140.8233°,水深約 11.9m に設置されている.こ の風況観測タワーでは、風速・風向データを三杯式風 速計・矢羽式風向計・超音波式風速計・ドップラーラ イダーの4機種で計測を行っているが、本研究では 200m までの高高度での観測データが計測されている ドップラーライダーの 2013 年 2 月から 2014 年 1 月ま

での1年間の観測テ	ータ	を検証デー	タ	と	して用い	いた
-----------	----	-------	---	---	------	----

# 2.2 使用したシミュレーションモデル

## (a) メソスケール気象シミュレーション(WRF)

本研究では大気安定度の影響を考慮するためのモ ニンオブコフ長 L を算定するために、メソスケール気 象モデル WRF(Weather Research and Forecasting) version 3.4.1<sup>3)</sup>による解析を行った.解析条件の詳細は 文献<sup>4)</sup>を参照されたい.モニンオブコフ長 L は大気温 度と海水面温度の関係で決まるため、風速の鉛直プロ ファイルと異なりメソスケール気象モデルの水平解 像度でも実現象との差が小さいのに加え、実現象との 位相誤差も小さいと考えられる.

#### (b) 数值流体解析(MASCOT)

数値流体解析には MASCOT(Microclimate Analysis System for COmplex Terrain)を用いた. MASCOT による 風況予測では、大気安定度は中立であることを仮定し ているため、大気安定度の影響を厳密に考慮すること ができないが、細かい地形の影響を考慮した予測が可 能である。



Fig.1 銚子沖観測タワーの位置

#### 2.3 地形と大気安定度を考慮した風況予測手法

WRFとMASCOTによる風況予測手法の問題点を解決するために、本研究では平均風速、風速の標準偏差及び最大瞬間風速の予測に関して、以下のような仮定の基に、数値流体解析とメソスケール気象シミュレー

<sup>\*</sup>第41回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

<sup>\*\*</sup>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

<sup>\*\*\*</sup> 株式会社水域ネットワーク

ションの結果を用いた新しい風況予測手法を提案する.

- ①地形と安定度の影響を受ける風速を地形の影響の み受ける成分と安定度の影響のみを受ける成分に 分解できると仮定する。
- ②モニンオブコフ長Lはウィンドファーム内において 一定とし、WRFから求める。
- ③安定の影響を考慮した平坦地形における鉛直分布 はモニンオブコフ則により表せるものとする.
- ④地形の影響は中立時の風速場により表せるものとし、MASCOTから求める.
- ⑤中立時と大気安定度を考慮した標準偏差の比は,平 均風速のそれに比例する.
- ⑥ピークファクターgは、場所・高度に依存せずウィ ンドファーム内において一定とする.

#### (a) 平均風速の予測

大気安定度を考慮した大気境界層内の鉛直分布を 表す手法として,モニンオブコフの相似則が広く使わ れている.モニンオブコフの相似則では高さz,平坦 且つ粗度長均一の地形上の風速u(z)は,モニンオブコ フの長さスケールLを用いて(1)式のように記述するこ とができる<sup>5</sup>.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left\{ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right\}$$
(1)

ここで、 $u_*$ は摩擦速度、 $\kappa$ はカルマン定数であり、右 辺の第一項は対数則で示される中立である場合の風 速、第二項は安定度を考慮した補正項である.また、 安定度の補正関数 $\varphi_m$ は(2)式で表されるものを用いた.  $\psi(\frac{z_1}{r}) =$ 

$$\begin{cases} 2ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} , & \frac{z_1}{L} < 0 \\ 0 , & \frac{z_1}{L} = 0 \\ -5\frac{z_1}{L} , & 0 < \frac{z_1}{L} \le 0.5 \\ -0.7\frac{z_1}{L} - 0.75\left(\frac{z_1}{L} - \frac{5}{0.35}\right)e^{-0.35\frac{z_1}{L}} - \frac{0.75 \times 5}{0.35}, 0.5 < \frac{z_1}{L} < 7 \\ -15.14 , & \frac{z_1}{L} \ge 7 \end{cases}$$
(2)

 $x = \left(1 - 16\frac{z_1}{L}\right)^{1/4}$ 

本研究ではこの関係を利用して、安定度と地形の効 果を考慮した風速分布を求める手法を提案した.まず、 観測高度 $z_1$ での観測風速 $u_{obs}(z_1)$ を安定度の影響を排 除して中立に補正する.中立時の風速 $u_{neu}(z_1)$ は(3)式 で表すことができる.

$$u_{neu}(z_1) = \left(u_{obs}(z_1) + \frac{u_*}{\kappa}\varphi_m\left(\frac{z_1}{L}\right)\right) / C_u \tag{3}$$

次に数値流体解析により地形の影響を考慮して,風速 を異なる変換高度 z に変換する.

$$u_{neu}(z) = u_{neu}(z_1) \cdot \frac{\tilde{u}_{CFD\_Fine}(z)}{\tilde{u}_{CFD\_Flat}(z_1)}$$
(4)

最後に再度安定度の効果を考慮して,風速を実際の安 定度に補正する.

$$u_{pred}(z) = u_{neu}(z) - \frac{u_*}{\kappa} \varphi_m\left(\frac{z}{L}\right)$$
(5)

なお,摩擦速度u<sub>\*</sub>は基準高度 80m の観測データから, 地形及び大気安定度の影響を考慮して(6)式より求め る.

$$u_{Obs}(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \left\{ \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \cdot C_u - \varphi_m\left(\frac{z_1}{L}\right) \right\}$$

$$C_u = \frac{\tilde{u}_{CFD\_Fine}(z_1)}{\tilde{u}_{CFD\_Flat}(z_1)}$$
(6)

#### (b) 風速の標準偏差の予測

観測高度 $z_1$ における中立時の標準偏差 $\sigma_{neu}(z_1)$ は, 観 測データの標準偏差 $\sigma_{obs}(z_1)$ に中立風速と大気安定度 を考慮した風速との比を乗じて求め, (7)式で表すこと ができる.

$$\sigma_{\text{neu}}(z_1) = \sigma_{\text{Obs}}(z_1) \cdot \frac{u_{\text{neu}}(z_1)}{u_{\text{Obs}}(z_1)}$$
(7)

CFD を用いて観測高さz<sub>1</sub>の中立時の標準偏差から、変換高度zにおける中立時の標準偏差σ<sub>neu</sub>(z)を求める.

$$\sigma_{\text{neu}}(z) = \sigma_{\text{neu}}(z_1) \cdot \frac{\tilde{\sigma}_{\text{CFD\_Fine}}(z)}{\tilde{\sigma}_{\text{CFD\_Fine}}(z_1)}$$
(8)

最後に安定度を考慮した標準偏差σ(z)は,変換高度zの 中立時の標準偏差に大気安定度を考慮した風速と中 立風速の比を乗じたことにより(9)式より求める.

$$\sigma_{\rm pred}(z) = \sigma_{\rm neu}(z) \cdot \frac{u_{\rm pred}(z)}{u_{\rm neu}(z)} \tag{9}$$

#### (c) 最大瞬間風速の予測

Fig.2 に対象年の 2013 年 2 月から 2014 年 1 月までの 1 年間の年平均ピークファクターの鉛直分布を示す. 高度方向でピークファクターの値は概ね一様である ことが分かる.よって最大瞬間風速は,観測から得ら れたピークファクターg(z)が場所と高度に依存しない と仮定し(10)式から求める.



# 3.予測結果と考察

先に示した予測手法を用いて,基準高度 80m の観測

データから高高度の風速の予測を行った.比較のため, WRF の鉛直プロファイルを用いた予測した結果と, CFD を用いて予測した結果も併せて示した.

Fig.3に、対象年(2013年2月~2014年1月)1年間の 観測データを対象に、陸風(N方向)と海風(SSW方向) における高度 80mの観測値から高度 120mの観測値を 推定した結果と観測値との比較結果を示す.WRFの結 果は海風では大気安定度の影響が考慮されているた めバイアスが低いが、陸風では詳細な地形の影響が考 慮されていないためバイアスが高くなる.なお、両者 ともばらつきが大きいが、これは実現象とWRFで計 算した現象の位相誤差が存在するためである.これに 対し、CFD 及び提案手法の結果は、ばらつきが小さく なっていることがわかる.また CFD を用いた場合には 安定度の影響を受ける海風時のバイアスが改善されてい ることがわかる.



Fig. 4 平均風速の予測値と観測値との比較

Fig.4 に,対象年1年間における全方位での高度 80m の観測値から高度 120m の風速を予測した結果と観測 値との比較結果を示す.WRF の鉛直分布を用いた場合 にはばらつきが大きいが,CFD や提案した手法ではば らつきが小さくなっている.また CFD では系統的な過 小評価が見られるが,提案手法では改善されている.

Fig. 5 には、陸風と海風の際の対象年1年間の平均 風速の鉛直分布の比較結果を示す.図に示した3高度 (120m・160m・200m)の予測値のうち、陸風では地 形の影響が考慮されていない WRF の結果は観測値よ り過小評価となり,海風では大気安定度の影響が考慮 されていない CFD の結果が観測値より過小評価とな る.これに対し,地形及び大気安定度の両方の影響を 取り入れた提案手法では,陸風時と海風時のどちらの 風速の鉛直方向における平均風速も精度良く再現で きることが分かる.



Fig. 6 には,提案手法を用いた際の対象年(2013 年 2 月~2014 年 1 月) における高度 80m の標準偏差の観測 値から高度 120m の標準偏差を予測した結果と観測値 との比較結果を示す.本提案手法により,基準高度の 標準偏差を用いて高高度の標準偏差を精度良く予測





Fig. 6 標準偏差の予測値と観測値と比較



Fig. 7 最大瞬間風速の予測値と観測値の比較

Fig.7に,提案手法を用いた際の対象年(2013年2月~2014年1月)における高度80mの最大瞬間風速の観測値から高度120mの最大瞬間風速を予測した結果と観測値との比較結果を示す.本提案手法により最大瞬間風速の高精度な予測結果が得られていることが分かる.

#### 4. まとめ

本研究では、数値流体解析、メソスケールモデルと モニンオブコフの相似則を組み合わせることにより、 地形と大気安定度を考慮し、低高度の風況観測値から 高高度の風況を予測する手法を提案し、2013年2月か ら2014年1月までの1年間の実観測データを用いて 提案した手法の検証を行い、以下の結論を得た.

- 銚子沖においては、陸風(北風)のときに地形の 影響が大きく、海風(南風)のときに大気安定度 影響が大きくなるため、数値流体解析やメソスケ ールモデルを用いる従来の手法による風況予測に 誤差が発生するが、本提案手法により陸風時およ び海風時の予測精度が向上した。
- 本提案手法により、平均風速とともに、標準偏差 および最大瞬間風速も精度良く予測することが可 能であることを示した.

#### 参考文献

- 三須弥生,石原孟:風観測と数値流体解析を利用した運転規制区間内の強風発生頻度の予測,日本風工学会論文集,Vol.37,No.1,pp.11-24,2012.
- 2) 大澤輝夫,嶋田進,中里廉,伊藤芳樹,平井重雄, 山田高史,中村聡志,小垣哲也,古川正樹:洋上 WF 開発候補域における風況精査手法の検討 そ の2) ブイ観測-WRF 計算併用手法,第40回風力 エネルギー利用シンポジウム,pp187-190,2018.
- 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) 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 カエネルギー利用シンポジウム、pp.333-336、2014.
- マティアス・ランゲ、ウルリッヒ・フォッケン:風 力発電出力の短期予測 電力の安定供給に向けて、 オーム社、237p、2012.