

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**

Atsushi YAMAGUCHI

大森 政則***

Masanori OHMORI

荒川 洋***

Hiroshi ARAKAWA

石原 孟**

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¹⁾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²⁾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 年間の観測データを検証データとして用いた。

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 3.4.1³⁾による解析を行った。解析条件の詳細は文献⁴⁾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) 数値流体解析(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

*第 41 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

*** 株式会社水城ネットワーク

シヨ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⁵⁾。

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

ここで、 u_* は摩擦速度、 κ 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 φ_m は(2)式で表されるものを用いた。 $\psi\left(\frac{z_1}{L}\right) =$

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

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

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。

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

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。

$$u_{neu}(z) = u_{neu}(z_1) \cdot \frac{\tilde{u}_{CFD_Fine}(z)}{\tilde{u}_{CFD_Flat}(z_1)} \quad (4)$$

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。

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

なお、摩擦速度 u_* 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。

$$u_{obs}(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \left\{ \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \cdot C_u - \varphi_m\left(\frac{z_1}{L}\right) \right\} \quad (6)$$

$$C_u = \frac{\tilde{u}_{CFD_Fine}(z_1)}{\tilde{u}_{CFD_Flat}(z_1)}$$

(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。

$$\sigma_{neu}(z_1) = \sigma_{obs}(z_1) \cdot \frac{u_{neu}(z_1)}{u_{obs}(z_1)} \quad (7)$$

CFDを用いて観測高さ z_1 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 $\sigma_{neu}(z)$ を求める。

$$\sigma_{neu}(z) = \sigma_{neu}(z_1) \cdot \frac{\tilde{\sigma}_{CFD_Fine}(z)}{\tilde{\sigma}_{CFD_Fine}(z_1)} \quad (8)$$

最後に安定度を考慮した標準偏差 $\sigma(z)$ 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。

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

(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。

$$u_{max}(z) = g(z) \times \sigma(z) + u(z)$$

$$g(z) = \frac{u_{Obs_max}(z_1) - u_{Obs}(z_1)}{\sigma_{Obs}(z_1)} \quad (10)$$

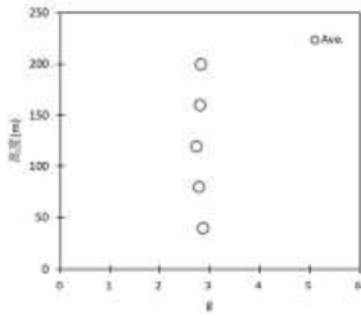
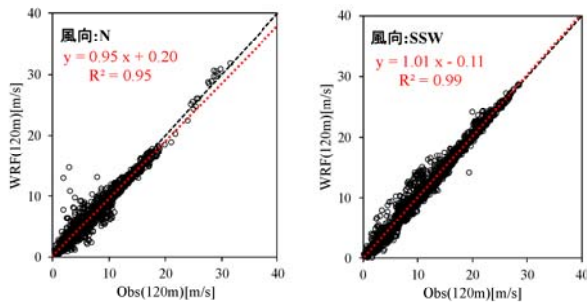
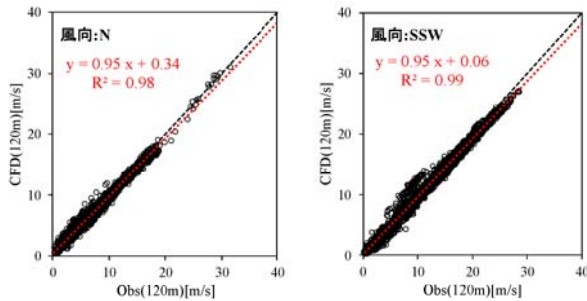


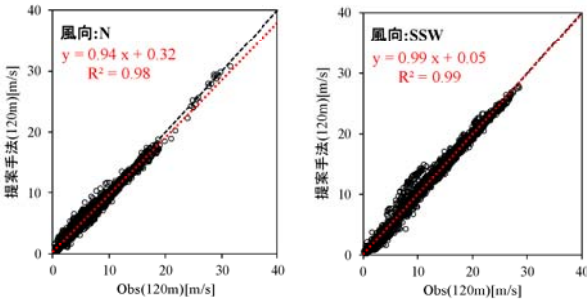
Fig. 2 年平均ピークファクターの鉛直分布



(a) WRF の予測値と観測値の比較



(b) MASCOT の予測値と観測値の比較



(c) 本提案手法の予測値と観測値の比較

Fig. 3 陸風と海風の平均風速の予測値と観測値の比較

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、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大きい、提案した手法では海風時のバイアスが改善されていることがわかる。

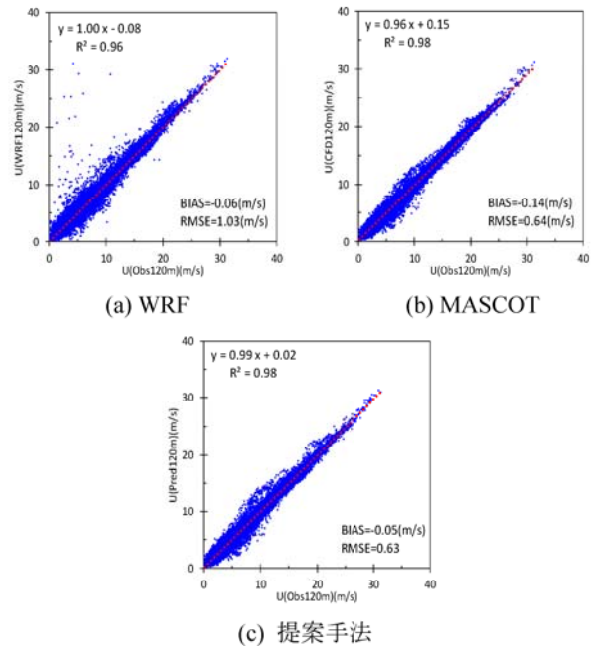


Fig. 4 平均風速の予測値と観測値との比較

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、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。

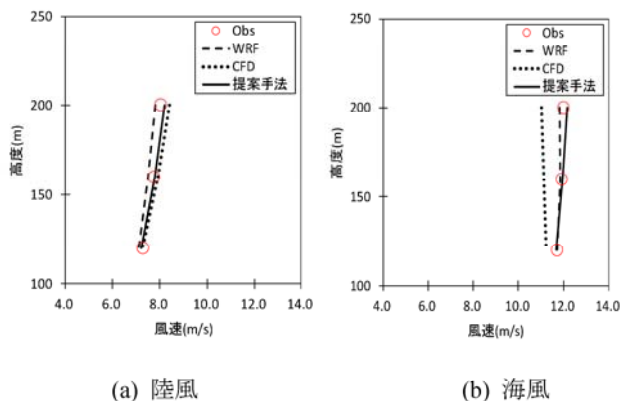


Fig. 5 陸風と海風の年平均風速の鉛直分布の比較

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することが可能であることが分かる。

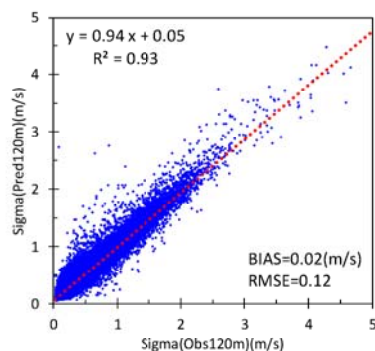


Fig. 6 標準偏差の予測値と観測値と比較

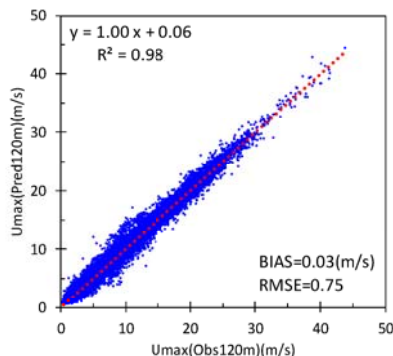


Fig. 7 最大瞬間風速の予測値と観測値の比較

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。

1. 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。
2. 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

- 1) 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 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.333-336, 2014.
- 5) 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.