

地形、大気安定度および風車後流を考慮した ウィンドファーム内の風況予測*

Wind speed prediction in a wind farm considering the effect of topography, atmospheric stability
and turbine wakes

山口 敦** タヴァナ・アリレザ*** 石原 孟**
Atsushi YAMAGUCHI Alireza Tavana Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

風力発電所のリプレース時には、風力発電所近傍で計測された風速・風向を新設風車の建設地点のハブ高さにおける風速と風向に変換する必要がある。観測風速は、地形や粗度の影響、大気安定度の影響、既存風車の後流の影響を受けるため、これらの影響を考慮する必要がある。地形や粗度の影響を考慮するために、数値流体解析による気流解析が広く行われているが、いくつかの問題点が残されている。一つ目は、地形・粗度の影響、大気安定度の影響、風車後流の影響を考慮した評価手法の検証が十分に行われていないという問題がある。Qian and Ishihara¹⁾は風車後流を考慮したウィンドファーム内の風速予測精度の検証を行ったが、大気安定度は考慮していない。また、Corbett et al.²⁾は大気安定度を考慮した精度検証を行ったが、風車後流の影響は考慮していない。二番目として大気安定度を考慮する評価手法が確立されていないという問題がある。Duran et al.³⁾は風向別にモニン・オブコフ長の調和平均を取ることにより風向別の等価安定度を求めたが、安定度の影響はモニン・オブコフ長の非線形関数であり、単純な調和平均では等価安定度を正しく評価できない。三番目としてこれら地形・地表面粗度、大気安定度、風車後流が風速の鉛直分布に与える影響が明らかにされていないという問題がある。

そこで、本研究では、地形・地表面粗度、大気安定度、風車後流を考慮して鉛直ライダーの観測データから、ウィンドファーム内の任意地点の風速を予測する手法を提案するとともに、実測データにより、風速の鉛直分布の予測精度を検証し、従来手法の問題点を明らかにする。

2. 新しい風況予測手法の提案

本研究では、地形・地表面粗度、大気安定度、風車の後流の影響を考慮して、ウィンドファーム内における1点の観測データから、各風車位置における平均風速および乱流強度を推定する手法を提案した。観測地点の時刻 t における平均風速、変動風速(風速の標準偏差)および風向をそれぞれ $U_{\text{ref}}^{\text{obs}}(t)$ 、 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{obs}}(t)$ 、 $\theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}(t)$ をとすると、地形および地表面粗度の効果を考慮した、地点 $\mathbf{x}$ 、時刻 t における平均風速 $U_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t)$ 、変動風速および風向を次式により求めた。

$$U_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t) = U_{\text{ref}}^{\text{obs}}(t) \times C_U^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, \theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t) = \sigma_{\text{ref}}^{\text{obs}}(t) \times C_{\sigma}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, \theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}) \quad (2)$$

$$\theta_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t) = \theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}(t) + \Delta\theta^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, \theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}) \quad (3)$$

ここで、地形による平均風速の割増係数 C_U^{CFD} 、変動風速の割増係数 C_{σ}^{CFD} および風向偏角 $\Delta\theta^{\text{CFD}}$ は気流解析の結果を用いて次式のように算出する。

$$\tilde{C}_U^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, n_{\theta}) = \frac{U_{\text{target}}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, n_{\theta})}{U_{\text{ref}}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}_{\text{ref}}, n_{\theta})} \quad (4)$$

$$\tilde{C}_{\sigma}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, n_{\theta}) = \frac{\sigma_{\text{target}}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, n_{\theta})}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}_{\text{ref}}, n_{\theta})} \quad (5)$$

$$\widehat{\Delta\theta}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, n_{\theta}) = \theta_{\text{target}}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}, n_{\theta}) - \theta_{\text{ref}}^{\text{CFD}}(\mathbf{x}_{\text{ref}}, n_{\theta}) \quad (6)$$

ここで、 n_{θ} は気流解析を行う各風向のインデックスであり、 C_U^{CFD} および C_{σ}^{CFD} を式(1)～式(2)に適用する際には、実際の観測風向 $\theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}$ に線形内挿する。

次に、風向の関数としての大気安定度の効果の補正係数 $C_U^{\text{stability}}(\mathbf{x}, \theta_{\text{ref}}^{\text{obs}})$ を乗じることにより、大気安定度の効果を考慮した風速を求める。

$$U_{\text{target}}^{\text{initial}}(\mathbf{x}, t) = U_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t) \times C_U^{\text{stability}}(\mathbf{x}, \theta_{\text{ref}}^{\text{obs}}) \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{target}}^{\text{initial}}(\mathbf{x}, t) = \sigma_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t) \quad (8)$$

$$\theta_{\text{target}}^{\text{initial}}(\mathbf{x}, t) = \theta_{\text{target}}^{\text{terrain}}(\mathbf{x}, t) \quad (9)$$

*令和5年12月1日第45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

***非会員 同上

大気安定度の補正係数は，次式により風向の関数として求めた．

$$\tilde{C}_U^{stability}(\mathbf{x},n_{\theta})=\frac{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)-\psi_{eq}(\mathbf{x},n_{\theta})\right]}{\frac{\left[\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)-\psi_{eq}(x,y,z_{ref},n_{\theta})\right]}{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]}}\tag{10}$$

ここで， $\psi_{eq}(\mathbf{x},n_{\theta})$ は，次式のように風速の重みをつけた値として定義する．

$$\psi_{eq}(\mathbf{x},n_{\theta})=\frac{\sum U_{ref}^{obs}(t)\psi\left(\frac{z}{L(x,y,t)}\right)}{\sum U_{ref}^{obs}(t)}\tag{11}$$

また， $\psi(z/L)$ は，次式のようにモデル化した．
 $\psi\left(\frac{z}{L}\right)=$ (12)

$$\begin{cases} -15.14 & \left(7\leq\frac{z}{L}\right) \\ -0.7\left(\frac{z}{L}\right)-0.75\left(\frac{z}{L}-\frac{5}{0.35}\right)e^{-0.35\frac{z}{L}}-\frac{0.75\times 5}{0.35} & \left(0.5<\frac{z}{L}<7\right) \\ -5\left(\frac{z}{L}\right) & \left(0<\frac{z}{L}\leq 0.5\right) \\ 0 & \left(\frac{z}{L}=0\right) \\ 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right)+\ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right)-2\tan^{-1}(x)+\frac{\pi}{2} & \left(\frac{z}{L}<0\right) \\ x=\left[1-\left(16\frac{z}{L}\right)\right]^{1/4} \end{cases}$$

なお，式(11)で定義される ψ_{eq} を用いて，風向別に等価なモニン・オブコフ長 L_{eq} が次式により求めた．

$$\frac{1}{L_{eq}(x,y,n_{\theta})}=\frac{\psi^{-1}(\psi_{eq}(\mathbf{x},n_{\theta}))}{z}\tag{13}$$

また，モニン・オブコフ長 $L(x,y,t)$ は，メソスケールモデルによる気象解析により求めた観測地点における時刻歴データを用いる．

最後に，風車後流の影響を Ishihara and Qian (2018) 4) により提案された後流モデルを用いて評価した．

$$U_{target}^{pred}(\mathbf{x},t)=U_{target}^{initial}(\mathbf{x},t)-\Delta U(\mathbf{x},t)\tag{14}$$

$$I_{target}^{pred}(\mathbf{x},t)=\frac{\sqrt{\sigma_{target}^{initial^2}(\mathbf{x},t)+\Delta\sigma^2(\mathbf{x},t)}}{U_{target}^{pred}(\mathbf{x},t)}\tag{15}$$

$$\theta_{target}^{pred}(\mathbf{x},t)=\theta_{target}^{initial}(\mathbf{x},t)\tag{16}$$

3. 対象ウィンドファームと数値解析の概要

本研究では青森県岩屋風力発電所を対象として提案した手法の検証を行った．岩屋風力発電所では，風況観測タワーで高度 68m の風速・風向・乱流強度を，鉛直ライダー(WIndCube V1)を用いて高度 40m から 220m までの風速・風向・乱流強度が計測されてい

る．本研究では風況観測タワーとライダーで同時に観測データが得られている 2018 年 11 月 23 日から 2019 年 6 月 23 日までの 7 か月間を対象として風況予測と精度検証を行った．

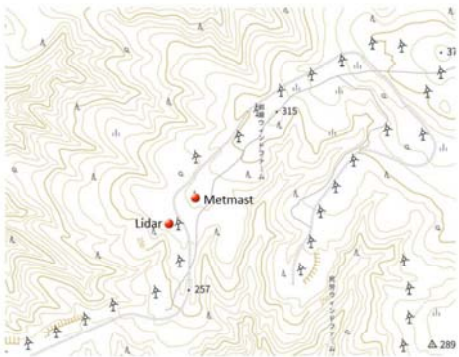


図 1 岩屋ウィンドファーム内の風車配置

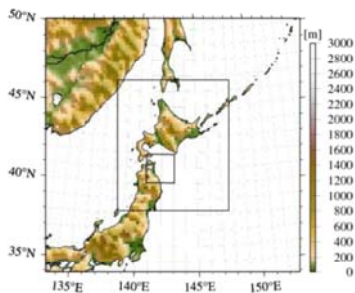


図 2 WRF の解析領域

表 1 WRF を利用した気象解析の条件設定

	領域 1	領域 2	領域 3
水平解像度	18km	6km	2km
グリッド数	100 x 100	130 x 154	100 x 100
鉛直層数	45 層		
境界条件	ERA5 再解析データ		
乱流モデル	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE level 2.5		

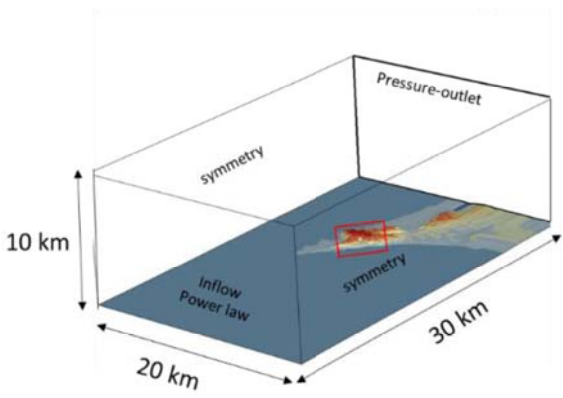


図 3 CFD を利用した気流解析の解析領域

第2章で説明したように、本研究では大気安定度の評価のためにメソスケールモデル WRF による気象シミュレーションを実施した。図2にメソスケールモデル WRF の解析領域を示し、主な条件設定を表1にまとめた。また、地形・粗度の影響の評価のため、数値流体解析を行った。解析領域を図3に示す。

4. 予測結果と考察

まず風車の後流の影響を受けないライダーの高度 160m の観測データを用いて風況観測タワーにおける風速と風向を予測し、観測データと比較した。図4には地形のみを考慮した場合、地形と大気安定度を考慮した場合、地形と大気安定度と風車後流を全て考慮した場合の風向別の平均風速を示す。

西北西の風(292.5 度)や東風(90 度)の場合には大気安定度の効果が小さく、風車の後流の影響もほとんど受けないため、気流解析により地形と粗度の効果だけを考慮した場合でも観測値と予測値はよく一致している。一方、南風(180 度)の場合には風車後流が無視できない。また、大気安定度が安定のため、安定度を考慮しない場合に風速を過大評価していることがわかる。

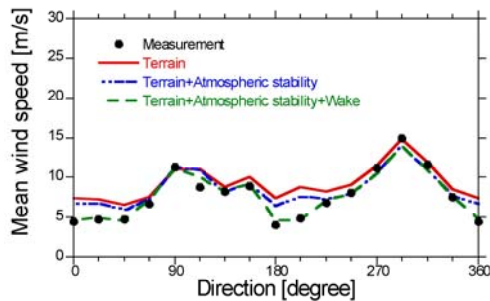


図4 風況観測タワー高度 68m における風向別平均風速

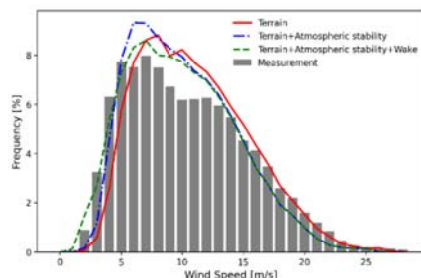


図5 風況観測タワー高度 68m における風速階級別出現頻度

また、図5には風況観測タワーにおける風速階級別の出現頻度図を示す。地形と粗度のみを考慮した

場合および地形・粗度と大気安定度を考慮した場合には風速を過大評価するのに対し、風車の後流まで考慮することにより、観測値に近づくことがわかる。さらに風況観測タワーで観測されたすべての 10 分平均風速・風向と、予測値を比較したものを図6に示す。観測値と予測値が一致していることがわかる。

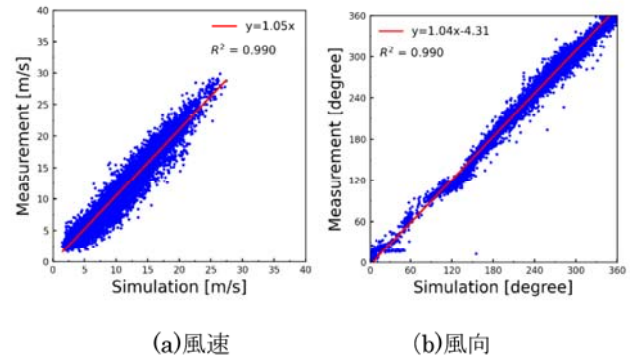


図6 風況観測タワーの高度 85m における風速と風向

次に、メソスケール気象モデルを用いて計算されたモニン・オブコフ長を用いて大気安定度の評価を行った。図7に岩屋ウィンドファームにおける風向別の安定度の出現頻度を示す。南風から南西の風にかけて、安定の出現頻度が高く、不安定の出現頻度が低いことがわかる。このように風向によって大気安定度が大きく変わるため、風向別に安定度の補正係数を考慮することが合理的である。

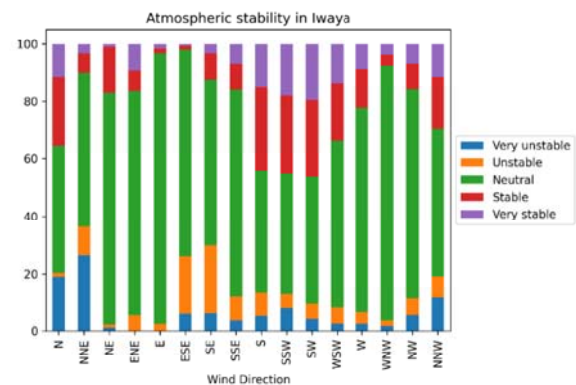
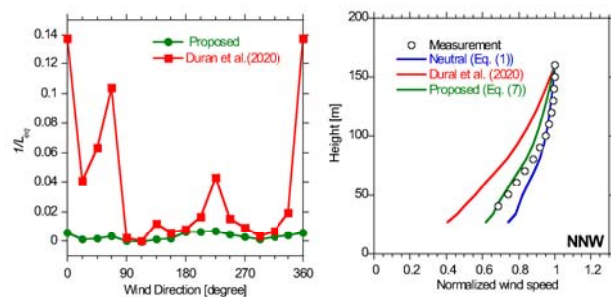


図7 岩屋ウィンドファームにおける風向別大気安定度

提案した手法(式(13))により風向別の等価なモニン・オブコフ長を評価したものを図8(a)に示す。また、Duran et al.³⁾により提案された風向別のモニン・オブコフ長の調和平均の値も併せて示す。調和平均を利用した場合には、安定度の効果が協調される結果となる。このようにして求めた風向別のモニン・オブコフ長を用い、ライダーの高度 160m の観測値

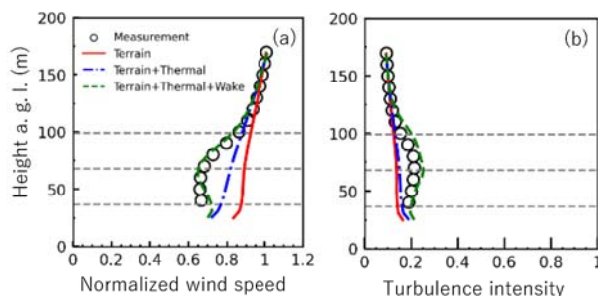
を用い、ライダー地点における風向別の平均鉛直分布を式(7)により求めた。

図 8(b)には、その一例として高度 160m の風速で無次元化した北北西の風の鉛直分布を示す。中立を仮定した場合(式(1))、風速の鉛直シアを過小評価し、低高度における風速を過大評価するが、本研究で提案した手法で予測した風速の鉛直分布は観測とよく一致していることがわかる。一方、モニン・オブコフ長の調和平均を利用した場合には安定度の効果が過大に評価され、低高度の風速を大幅に過小評価することがわかる。



(a)等価モニン・オブコフ長 (b) 平均風速の鉛直分布

図 8 風向別等価モニン・オブコフ長とライダー地点における北北西風向の無次元化平均風速の鉛直分布



(a)無次元平均風速 (b)乱流強度

図 9 ライダー地点の南南東風向の無次元平均風速と乱流強度の鉛直分布

最後に、各モデルによる風況予測がライダー地点における風速の鉛直分布に与える影響を明らかにした。図 9 には高度 160m の風速で無次元化したライダー地点における南南東の風の平均鉛直分布を示す。地形・粗度の効果のみを考慮した場合には低高度の風速を過大評価し、乱流強度を過小評価するのに対し、大気安定度を考慮した場合には風速の過大評価は一部改善される。さらに風車の後流を考慮した場合には平均風速・乱流強度とも観測値と予測値はよ

く一致することがわかる。

5. まとめ

本研究では、地形・粗度の効果に加え、大気安定度および風車後流の効果を考慮した風速予測手法を構築し、青森県岩屋ウィンドファームにおける実測データを用いて精度検証を行い、以下の結論を得た。

1. 地形および粗度の効果のみを考慮した場合、大気安定度と風車後流の影響を受ける風向における風速を精度よく予測できないが、風向別等価大気安定度および風車後流の影響を考慮することにより高精度で風速の予測が可能となった。
2. 風速の影響を考慮した風向別等価なモニン・オブコフ長を求める手法を提案した。提案した手法を用いることにより、風速の影響を考慮しない従来の手法に比べて、風向別の風速の鉛直分布を精度よく予測することを可能にした。
3. 地形・粗度の効果、大気安定度の効果、風車後流の影響が風速の鉛直分布に与える影響を明らかにし、風速の鉛直分布を高精度に予測するためには全ての効果を考量する必要があることを示した。

謝辞

本研究における観測データは(株)ユーラスエナジーホールディングスから提供頂いた。ここに記して関係者の皆様へ感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Qian, G.W.; Ishihara, T. A Novel Probabilistic Power Curve Model to Predict the Power Production and Its Uncertainty for a Wind Farm over Complex Terrain. *Energy*, 261, 125171, 2022
- 2) Corbett, J.-F.; Poenariu, A.; Horn, U.; Leask, P. An Extensive Validation of CFD Flow Modelling. In *Proceedings of the DEWEK*; 2015.
- 3) Durán, P.; Meißner, C.; Casso, P. A New Meso-Microscale Coupled Modelling Framework for Wind Resource Assessment: A Validation Study. *Renew Energy*, 160, 538–554, 2020
- 4) Ishihara, T.; Qian, G.W. A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 177, 275-292, 2018.