

# 複雑地形上におけるウィンドファーム内の風速と発電量の予測 手法の提案と実測による検証\*

Prediction of wind field and power production over complex terrain and its validation by field measurement

銭 国偉\*\* 鈴木 柚香\*\* 宋 雲鵬\*\* 石原 孟\*\*  
Guo-Wei QIAN Yuka SUZUKI Yun-Peng SONG Takeshi ISHIHARA

## 1. はじめに

風車の回転数と発電量は通常平均風速の関数として仮定されているが、実際の観測では、同じ風速においても、風車の回転数と発電量の観測結果が大きく変動する。既往研究<sup>1)</sup>では、発電量の評価は風況と運転状況のについても考慮する必要があることが示されたが、どのように考慮するかについて明らかになっておらず、また、欧州における風力発電所は平坦地または洋上に建設されていることが多く、風速が空間的に一様であると仮定して、風車後流のみを考慮した発電量の予測が行われてきたが、日本の場合、風力発電所内の風況は地形や周辺の建物・植生の影響を受けて空間的に大きく変化する。風力発電所の発電量を予測するにはその周辺環境と風車後流の影響を同時に考慮する必要がある<sup>2)</sup>。

本研究では、苫前のウィンドファームを対象として風況及び風車運転状況を考慮した出力モデルを提案すると共に、実際の風車から得られた回転数と発電量のデータと比較することにより、その予測精度を明らかにする。また、数値流体解析と風車後流モデルを用いたハイブリッド手法を用いて複雑地形上の発電所内の風況予測を行うと共に、非一様風況と風車後流の影響を考慮した発電量予測を行い、観測と比較することにより予測精度の検証を行う。

## 2. 実風車発電量の観測と予測手法

### 2.1 風況と発電量の現地観測

本研究では、北海道苫前郡苫前町（図1）に位置する苫前グリーンヒルウィンドパークを対象とした。対象としたウィンドファーム内には20機の風車が建設されており、風車の発電量と回転数はSCADAにより計測され、ウィンドファーム内の風速と風向は観測塔1と2により計測されている。

またウィンドファームの代表風速と風向は2015年11月4日から2016年1月27日まで、鉛直ライダーにより計測されている。ライダーは、40m～260m高度を20m間隔(12高度)で風速・風向が計測されている。ウィンドファーム内の風車の諸元<sup>3)</sup>を表1に示す。11号基を除き1～20号風車（Bonus B54/1000）の定格出力は1000kWである。



図1 苫前ウィンドファームの位置

表1 風車諸元

|          |                |
|----------|----------------|
| 定格出力     | 1,000 kW       |
| 回転数      | 14 rpm/ 21 rpm |
| 定格風速     | 15 m/s         |
| カットイン風速  | 3 m/s          |
| カットアウト風速 | 25 m/s         |
| ロータ直径    | 54.2 m         |
| ハブ高さ     | 45 m           |
| 制御       | アクティブストール制御    |

### 2.2 実風車の出力モデルの提案

図2には、実風車（3号機）の回転数と発電量の観測結果を示した。同じ平均風速に対して、風車の回転数と発電量が大きく変化していることが分かる。本研究では、風車の回転数と発電量に影響する風況及び運転状況に基づき、新しい出力モデルを提案する。

\*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 7-3-1

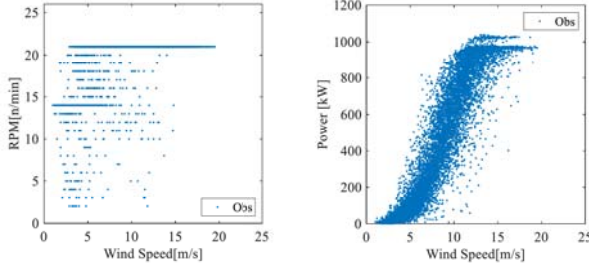


図2 実風車の回転数と発電量の観測例

### ① 変動風速の確率分布モデル

変動風速 $u$ は以下の式に示すように、風速の平均値 $U$ と標準偏差 $\sigma$ をもつ正規分布に従うと仮定した。

$$N(u; U, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(u-U)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

また、変動風速を考慮した発電量 $P$ は以下の式のように、性能曲線より求めた出力係数 $C_p$ に乗じて変動風速に対して積分することにより予測した。

$$P(U) = \int_{u_{in}}^{u_{out}} \frac{1}{2} \pi R^2 C_p(u) \cdot u^3 \cdot N(u; U, \sigma_u) du \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $R$ はロータ直径、 $u_{in}$ と $u_{out}$ は風速の積分範囲である。

### ② 空気密度を考慮した発電量の予測モデル

WRF による気象解析を行い、各風車位置の気圧  $P$  (hPa)・気温  $t$  (°C) を予測し、空気密度 $\rho$ を以下の式により算出した。

$$\rho = \frac{P}{R(t+273.15)} \quad (3)$$

ここで、 $R$ は乾燥空気の気体定数(2.87)。発電量予測モデルでは、空気密度を考慮するため、出力係数 $C_p$ を用いた。また、IEC61400-12 に従い、実際の空気密度と標準空気密度の比により、風速は次式により補正した。

$$U_n = U \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 $\rho_0$ は標準空気密度(1.225[kg/m<sup>3</sup>])、 $U_n$ は空気密度の影響を考慮した風速である。本研究では、空気密度の影響を考慮した風速を用いて、アクティブストール制御風車の発電量は以下のように求めた。

$$P(U) = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho_0 C_p(U_n) U_n^3 = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho C_p(U_n) U^3 \quad (5)$$

### ③ ローター回転数のモデル

本研究で対象とする風車は、大小発電機の2回転数、 $\Omega_{low}$ と $\Omega_{high}$ を持っており、その切り替え風速 $U_t$ と変動風速の影響を考慮して、 $\Omega_{low}$ と $\Omega_{high}$ に基づく二項分布に従うと仮定して次式によりモデル化した。

$$\Omega(U) = \begin{cases} \Omega_{low}(U) & \text{if } \text{binornd}(1, p_{high}(U)) = 0 \\ \Omega_{high}(U) & \text{if } \text{binornd}(1, p_{high}(U)) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、出現頻度 $p_{high}(U)$ は以下に示す誤差関数により表した。

$$p_{high}(U; U_t, \sigma) = \frac{1}{2} \left(1 + \text{erf}\left(\frac{U-U_t}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \quad (7)$$

また、出力係数 $C_p$ は大小発電機の出力曲線により以下のように表した。

$$C_p(U, \Omega) = \begin{cases} C_p^{\Omega_{low}}(U) & \text{if } \Omega = \Omega_{low} \\ C_p^{\Omega_{high}}(U) & \text{if } \Omega = \Omega_{high} \end{cases} \quad (8)$$

### ④ ヨーエラーの影響のモデル化

アクティブストール制御風車は定格風速より高い風速域において、出力が一定になるようにピッチ角度の調整が行われている。この制御では、ヨーエラーが発生すると、ストールが起き、出力が低下する。そのため、高風速域における $C_p$ に対し以下の式により補正した。

$$C_p' = C_p \cdot (1 - \epsilon \cdot f) \quad (9)$$

ここで、 $\epsilon$ は低減係数であり、本研究では出力の結果に基づき 4%と設定した。 $f$ はsigmoid 関数であり、定格風速以下の風速域に滑らかにつなげるために用いた。

$$f(U) = 1 - \frac{1}{1 + e^{2(U-U_r)}} \quad (10)$$

ここで、 $U_r$ は定格風速である。

本研究で提案する風速変動、空気密度、回転数、ヨーエラーの各要因を考慮した出力モデルは以下の式により表した。

$$P(U) = \int_{u_{in}}^{u_{out}} \frac{1}{2} \pi R^2 \rho \cdot C_p \left( \frac{u}{\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1/3}}, \Omega \right) \cdot (1 - \epsilon \cdot f) \cdot u^3 \cdot N(u; U, \sigma_u) du \quad (11)$$

## 2.3 地形と風車後流を考慮した風況予測

まず、風車後流の影響を考慮せず、16 方位に対して数値流体解析を行い、各方位の平均風速と標準偏差を求めた。本研究では、式(12)と式(13)に示す質量保存則及び運動量保存則に関する基礎方程式に流体力を取り入れることにより建物と植生の影響を考慮した。乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた。

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{\bar{u},i} \quad (13)$$

ここで、 $f_{\bar{u},i}$ は流体力であり、榎木と石原<sup>4)</sup>が提案した一般化キャノピーモデルにより建物や植生が気流に与える影響を考慮した。

$$f_{\bar{u},i} = -\frac{1}{2}\rho C_f \frac{Y_0}{l_0} |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (14)$$

図3には解析領域を示す。地形については国土地理院の基盤地図情報から作成した。半径は4000mとし、外側1000mはスムージングを行った。そこで、幅2000mの対象領域では水平間隔8mの構造格子を用い、全格子数は、約508万である。建物は、国土地理院の基盤地図情報、植生は、環境省の自然環境調査Web-GISにより電子地図を作成した。建物と植生の高さはGoogleストリートビューにより求めた。図4には建物と植生のキャノピーパラメータの空間分布を示す。流入風は、平均風速と乱流強度の鉛直プロファイルを流入口に与えた。

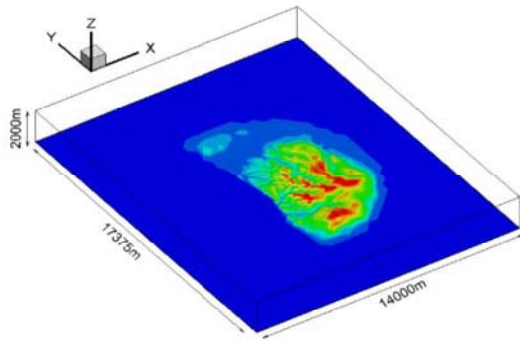


図3 対象地形を導入した数値流体解析領域

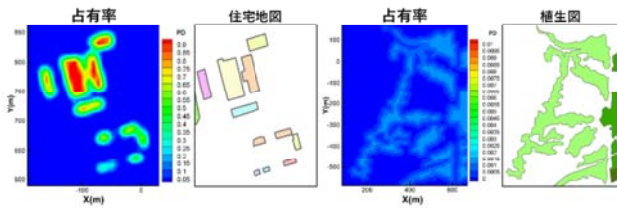


図4 建物と植生のキャノピーパラメータの空間分布

次に、予測対象地点における風車後流の効果について、ウェイクモデル<sup>5)</sup>により平均風速欠損 ( $\Delta U$ ) と乱流増分 ( $\Delta \sigma$ ) を求め、以下の式のように予測対象地点における風速  $U_{pred,0}^{Target}$  と標準偏差  $\sigma_{pred,0}^{Target}$  に風車後流効果を加えることにより、風車後流の影響を考慮した。

$$U_{pred}^{Target}(x, y, z) = U_{pred,0}^{Target}(x, y, z) - \Delta U(x, y, z) \quad (15)$$

$$I_{pred}^{Target}(x, y, z) = \frac{\sqrt{\sigma_{pred,0}^{Target}(x, y, z)^2 + \Delta \sigma(x, y, z)^2}}{U_{pred}^{Target}} \quad (16)$$

### 3. 予測モデルの検証

#### 3.1 実風車の回転数と発電量の予測結果

本研究では実ウィンドファーム内の3号機風車を代表例として回転数と発電量の予測を行った。風車では平均風速のデータのみが計測されているため、3号機風車付近に位置した観測塔1により観測された10分間の平均風速と標準偏差のデータ(観測期間2015/11/04～2016/01/27)を用いて予測を行った。予測方法としては、まず各10分の  $U$ ,  $\sigma$  を用いて、式(1)に示す確率密度関数に従い、回転数は式(2)、発電量は式(3)を用いて回転数  $\Omega(U)$  と発電量  $P(U)$  の時刻歴データ(10分間平均値)を求めた。最後に予測された回転数と発電量について風速1m/s毎のビン平均値を求め、各風速における回転数と発電量とした。

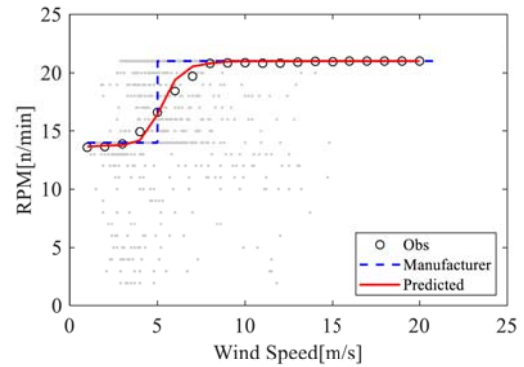


図5 回転数の予測値と観測値の比較

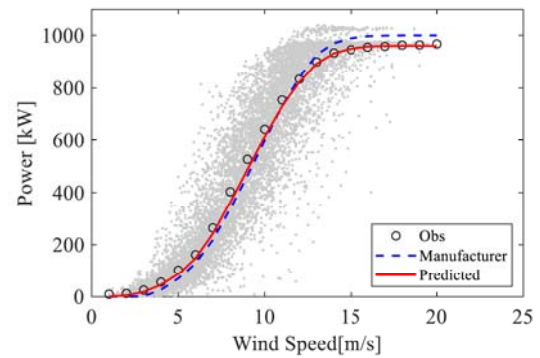


図6 発電量の予測値と観測値の比較

図5には二項分布モデルを用いた回転数の予測結果を示す。メーカーにより示されている二段階の回転数(Manufacture)に比べ、二項分布に従う乱数を発生すること(Predicted)により切り替え風速付近での回転数が滑らかに変化するようになり、回転数の平均値を精度良く再現することができた。図6には風況と運転状況の各要因を考慮した発電量の予測結果を示す。メーカーパワーカーブ(Manufacture)に比べ、変動風速、空気



密度、ローター回転数とヨーエラーの影響を考慮すること(Predicted)により、カットイン風速付近では発電量が増えること及び定格風速付近と以上の領域では発電量が低下することを精度よく再現できた。

### 3.2 ウィンドファーム内風況と発電量の予測結果

図7と図8には、ウィンドファーム内に設置されている観測塔2地点における風向が西南西の時に、風車後流を考慮しない場合と考慮した場合の予測結果を示す。風車後流の影響を考慮することにより、平均風速



図7 風車と観測塔の位置関係

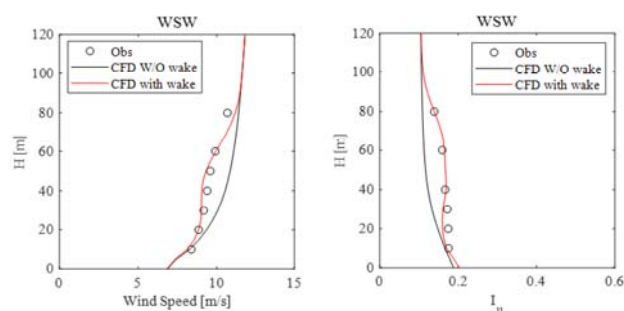


図8 観測塔位置における平均風速と乱流強度の鉛直分布



図9 風車の配置

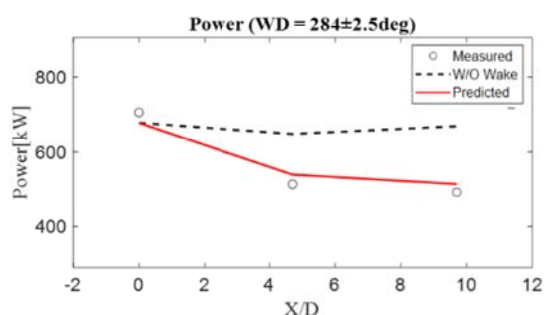


図10 1列風車(WT15-WT12-WT16)の発電量

と乱流強度の鉛直プロファイルは観測値とよく一致することが分かる。

図9と図10には、風車が1列(15,12,16号機風車)になった時の発電量の予測結果を示す。風車後流の影響を考慮することにより、各風車地点の発電量の予測値は観測値と一致した。

### 4. まとめ

本研究では、風況と運転状況の各要因による影響を考慮した風車出力モデルを提案し、実際のウィンドファームにおいてハイブリッド手法を用いて高速かつ高精度で発電量を予測し、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. 風車発電量に影響を与える風況及び運転状況の各要因にを解明し、新しい出力モデルを提案した。その結果、変動風速、空気密度、ローター回転数とヨーエラーを考慮することにより、カットイン風速付近では発電量が増えること及び定格風速付近と以上の領域では発電量が低下することを精度よく再現できた。
2. 16方位の数値流体解析により地形や建物・植生の影響を考慮し、ウェイクモデルを用いて風車後流の影響を考慮することにより、鉛直方向の平均風速・乱流強度の観測値を精度良く再現できることを示し、風車後流の影響を受けている1列風車の発電量も精度良く再現できることを示した。

### 参考文献

- (1) M. V. a. C. D. Markfort, Modified Power Curves for Prediction of Power Output of Wind Farms, Energies, 12, 1805, 2019
- (2) Qian, G.-W., Ishihara, T.: Numerical study of wind turbine wakes over escarpments by a modified delayed detached eddy simulation, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Vol.191, pp.41-53, 2019
- (3) wind-turbine-models.com Bonus B54/1000  
<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/697-bonus-b54-1000>
- (4) 榎木康太, 石原孟: 一般化キャノピーモデルの提案と都市域における風況予測への応用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 1, pp.28-47, 2012.
- (5) 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, pp.275-292, 2018.