

第I部門

耐風・風工学(1)

[I-229] 数値流体解析とウェイクモデルを用いた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その2 実ウィンドファームにおける予測精度の検証

Prediction of Turbulent Flow Field and Power Production Prediction over Complex Terrain by Using Computational Fluid Dynamics and Wake Model Part 2 Validation of prediction accuracy in real wind farm

○鈴木 柚香<sup>1</sup>、銭 国偉<sup>1</sup>、宋 雲鵬<sup>1</sup>、石原 孟<sup>1</sup> (1.東京大学大学院工学系研究科)

○Yuka Suzuki<sup>1</sup>, Guo-Wei Qian<sup>1</sup>, Yunpeng Song<sup>1</sup>, Takeshi Ishihara<sup>1</sup> (1. Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

キーワード：数値流体解析、ウェイクモデル、複雑地形、ウィンドファーム、風速予測、発電量

CFD, Wake model, Complex terrain, Wind Farm, Wind speed prediction, Power production

本研究その2の目的は、実際の複雑地形上の発電所内の発電量を精度良く予測することである。日本の陸上発電所内では地形や建物・植生の影響を受けて風況が空間的に大きく変化する。加えて風車後流側では風車の影響を受けて風況が変化する。そこで、地形や建物・植生の影響を考慮することのできる数値流体解析と、風車後流の影響を考慮できる風車後流モデルを用いたハイブリッド手法を用いて実際の陸上発電所内の風況予測と発電量評価を行った。観測された風況と発電量と比較することで、実際の複雑地形上の発電所において高精度に発電量予測ができることを示した。

# 数値流体解析とウェイクモデルを用いた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 その2 実ウィンドファームにおける予測精度の検証

東京大学 学生会員 ○鈴木柚香  
東京大学 正会員 銭 国偉  
東京大学 学生会員 宋 雲鵬  
東京大学 正会員 石原 孟

## 1. はじめに

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り、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<sup>1)</sup>が提案されているが、実際の複雑地形上の風力発電所において検証されておらず、予測精度は不明である。

本研究その2では、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. 数値モデルと解析条件

本研究では、式(1)と式(2)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  $k-\varepsilon$  モデルを用いた。

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_j\bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{\bar{u},i} \quad (2)$$

ここで、 $f_{\bar{u},i}$ は流体力であり、榎木と石原<sup>2)</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。

$$f_{\bar{u},i} = -\frac{1}{2}\rho C_f \frac{\gamma_0}{l_0} |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (3)$$

本解析では、植生の抗力係数は $C_f=0.4$ とし、占有率

$\gamma_0=0.001$ 、代表長さ $l_0=0.01\text{m}$ を設定した。

ウィンドファーム内の気流解析を行う際には実際の地形、周辺の建物・植生データを入力する必要がある。本研究では、実ウィンドファーム内に設置されている12号機風車地点を中心として解析領域を設定した。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。図1には解析領域を示す。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2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。流入風は既往研究<sup>3)</sup>を参考に、LESで解析した平均風速と乱流の鉛直プロファイルを入入口に与えた。

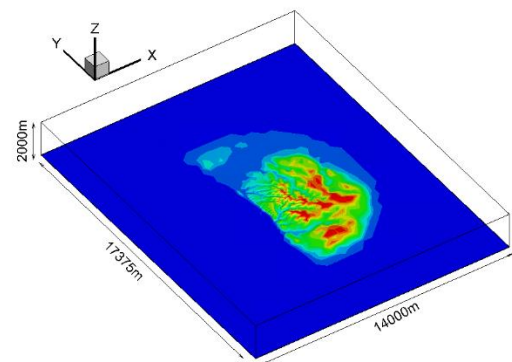


図1 解析領域

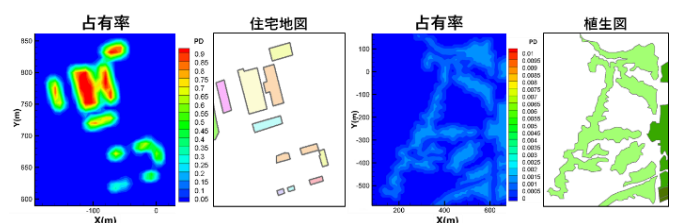


図2 建物と植生のキャノピーパラメータの空間分布

### 3. 予測手法と結果

まず、風車後流の影響を考慮せず、三須と石原<sup>4)</sup>と同様に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。

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>1)</sup>により平均風速欠損( $\Delta U$ )と乱流増分( $\Delta\sigma$ )を求め、式(4)と式(5)に示す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。

$$U_{pred}^{Target}(x,y,z) = U_{pred,0}^{Target}(x,y,z) - \Delta U(x,y,z) \quad (4)$$

$$I_{pred}^{Target}(x,y,z) = \frac{\sqrt{\sigma_{pred,0}^{Target}(x,y,z)^2 + \Delta\sigma(x,y,z)^2}}{U_{pred}^{Target}} \quad (5)$$

図4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3 風車と観測塔の位置関係

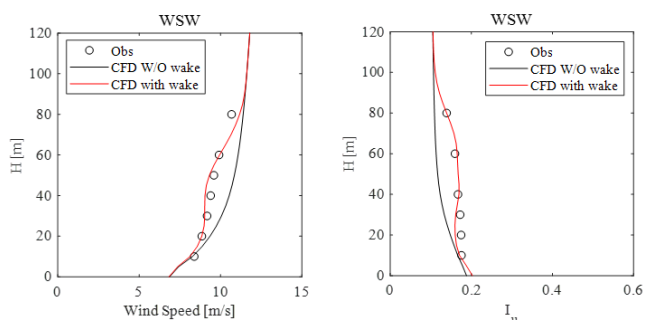


図4 観測塔位置における平均風速と乱流強度の鉛直分布(西南西方向)

図5と図6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。



図5 風車の配置

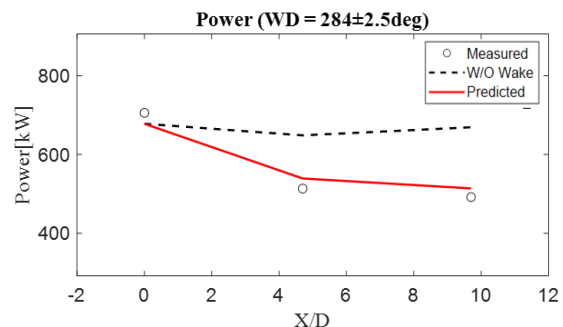


図6 1列風車(WT15-WT12-WT16)の発電量

### 4. まとめ

本研究では、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予測を実現した。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) 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.
- (2) 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.
- (3) 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
- (4) 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.