

実サイトにおける風車後流の影響評価 —SCADA データを用いた流入風向の変動影響考察—

日立造船株式会社 澁谷 光一郎, 馬詰 佳亮
九州大学応用力学研究所 内田 孝紀
東芝エネルギーシステムズ株式会社 谷山 賀浩, 深谷 侑輝

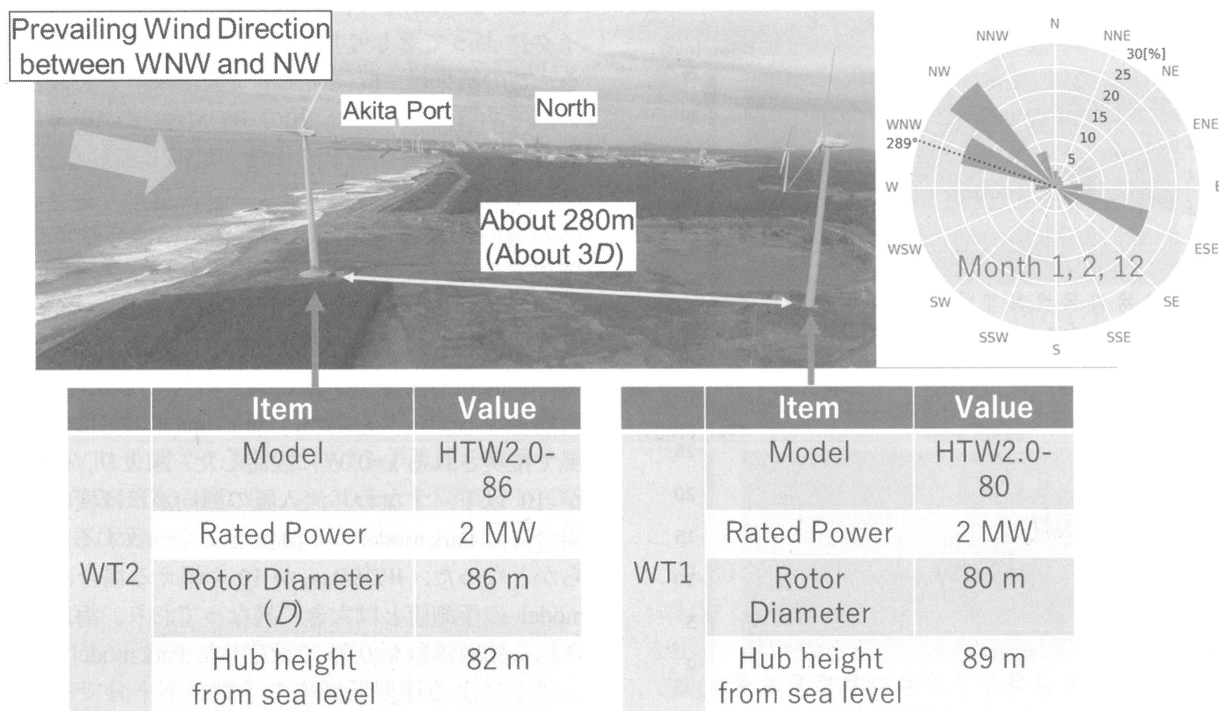


図 1 雄物川風力発電所の外観と風車情報

1. はじめに

クリーンエネルギーの利用が促進され、近年日本においては陸上洋上問わず大規模ウィンドファームの建設が計画されるようになった。ウィンドファームでは風車の背後に形成されるウェイクが他の風車に対して影響を及ぼし、発電量の低下や乱流による風車の疲労増大が問題となる。ウィンドファーム内の風車の離隔距離を広げることでウェイクの影響を小さくすることは可能であるが、風車設置場所の風況や地盤や海域の条件により風車建設位置が固定され、十分な離隔距離を確保するのが困難となっている。風力エネルギーを十分に活用するために、風車ウェイクの影響を正確に予測できる技術が求められる。

当社は 2018 年度より、九州大学応用力学研究所および東芝エネルギーシステムズ(株)と、汎用性のあるウェイクモデルの開発を行ってきた¹⁾²⁾。

本報告書では、図 1 に示す秋田県雄物川風力発電所

の運転状況を記録した SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) データの分析および数値流体シミュレーションによる、実風況下の風車ウェイクに関する研究成果を報告する。

2. 雄物川風力発電所の SCADA データ分析

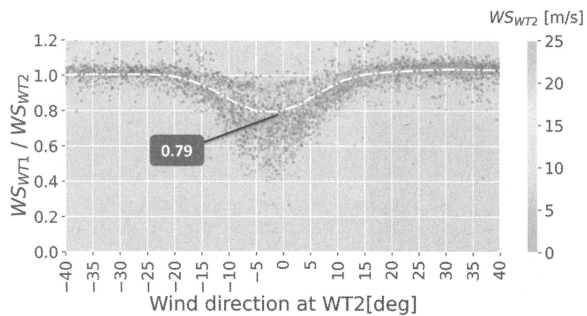
雄物川風力発電所には、図 1 に示すように平坦地形に 2MW 級のダウンウィンド風車が 2 基並んでいる。2 基の風車の離隔距離は 280m ほどしかなく、冬場には北西から海風が吹くため、WT1 は WT2 から発生するウェイクを頻繁に受ける状況下で運転される。

WT1 および WT2 の 10 分間平均された SCADA データを用いて、WT2 で形成されるウェイクの影響を分析した。10 分間平均のデータは、以下の条件を満たすものを使用した。

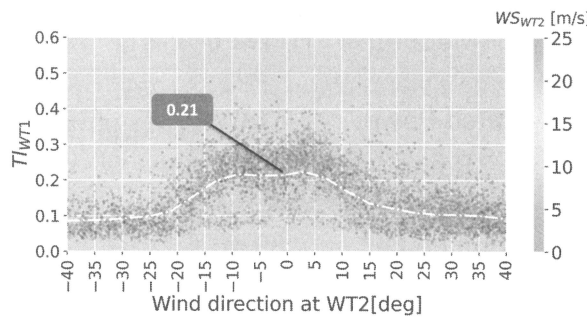
- 10 分間すべてにおいて WT2 が通常運転している
- WT2 のヨーミスアライメントが 8 度以内である

図 2 は、横軸に WT2 (流入側) における風向データの平均値をとり、縦軸に(a)WT1 (ウェイク中) の風速データの平均値 (WS_{WT1}) と WT2 の風速平均値 (WS_{WT2}) の比を、(b)WT1 位置における乱流強度 (TI_{WT1}) をプロットしたグラフである。乱流強度は、ある地点の 10 分区間の風速の標準偏差を、その地点の平均風速で除すことで求まる。

どちらのグラフでも、 WS_{WT2} をカラープロットで示した。



(a)



(b)

図 2 2号機ウェイクの影響範囲 (WT2 位置の風速をカラーマップ化) : (a)WT1 と WT2 位置の風速比, (b)WT1 における乱流強度

図 2 を見ると、WT1 では 2 基の風車が直列となる 289 度の風向において速度が大きく欠損し、また乱流強度が増大することが確認できる。流入風速が大きい場合 (赤いプロット) では速度欠損および乱流強度に変化が見られず、ウェイクの影響が小さい。これは、 WS_{WT2} が風車の定格風速 12m/s を超える範囲ではフェザリングにより風を逃がして運転するため、ウェイクが十分に形成されていないことを示している。

そこで、ウェイクの形成が活発となる流入風速 6~10m/s のデータのみを使用して同様の分析を実施した。また、場の乱れが大きい場合にウェイクの速度欠損が小さくなることが知られており³⁾、本研究では乱れに関するパラメータを用いてその影響も考慮した。

乱れのパラメータに関しては、WT2 位置での 10 分

間の乱流強度 (TI_{WT2}) および風向の標準偏差 (WSD_{WT2}) でウェイク速度欠損量への影響を比較したところ、図 3 のように乱流強度に比べて風向の標準偏差との相関が高いことが判明した。そのため本研究では WSD_{WT2} を風向変動と定義し、分析に用いることとした。なお、図中横軸は以下の式で定義している。

$$(\text{Wind Speed Deficit}^* \text{ at WT1}) = 1 - WS_{WT1} / WS_{WT2}$$

図 4 は、流入風速 6~10m/s のデータを使用しつつ、 $WSD_{WT2}=10\text{deg}$ を閾値として図 2 を分割したグラフである。図 4(a)より、 WSD_{WT2} が小さい場合にはウェイクによって著しく風速が低減していることが分かる。この結果は、既往の風洞実験結果⁴⁾とおおむね近い値であった。一方で (b)の WSD_{WT2} が 10 を超える場合には、(a)と比較して風速が低減していないほか、ウェイクの影響する風向範囲が広がっており、流入風の風向変動によってウェイクが拡散された様子が確認できる。

図 5 は、商用的によく用いられる Park model^{5) 6)} と SCADA データとの比較図である。図 5 では、2 基の風車が直列となる 289 度の向きに対して ± 5 度以内の風向となるデータを用い、Park model の拡散係数は海風で推奨される $k=0.05$ に設定した。図より、 WSD_{WT2} が 10 以下、すなわち流入風の風向がほぼ変動しない場合には Park model の予測値とよく一致することが明らかとなった。 WSD_{WT2} が 10 を超える場合には Park model の予測値とは大きく異なっており、海風で推奨される拡散係数 $k=0.05$ で設定した Park model では、ウェイクによる速度低減率の予測が不十分であることが分かった。

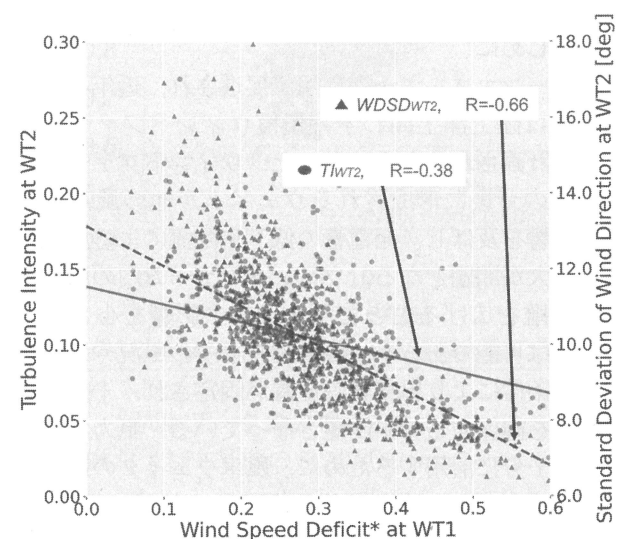


図 3 WT1 位置での速度欠損量と WT2 位置の乱流強度、風向標準偏差の相関図 (R は相関係数)

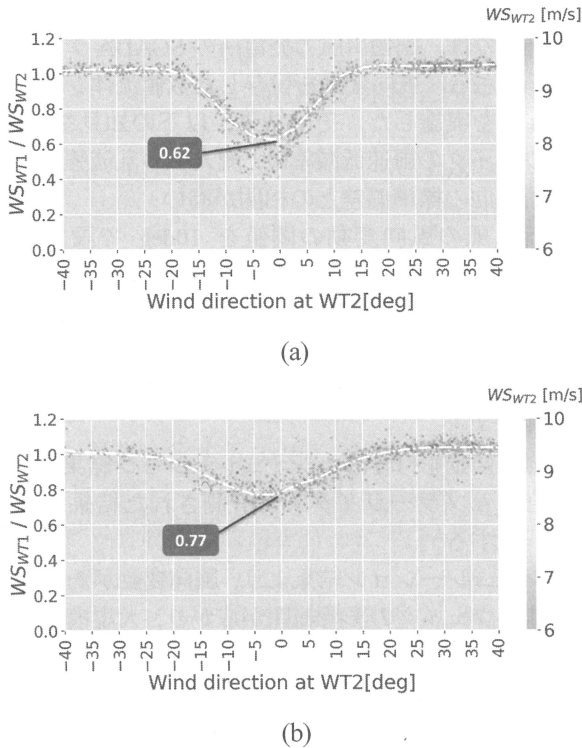


図 4 流入風の風速域を 6~10m/s に絞った場合の WT1 と WT2 位置での風速比 (WT2 の風速をカラーマップ化, 風向変動 $WDS_{D_{WT2}} = 10deg$ を閾値として分割) : (a) $WDS_{D_{WT2}} \leq 10deg$, (b) $WDS_{D_{WT2}} > 10deg$

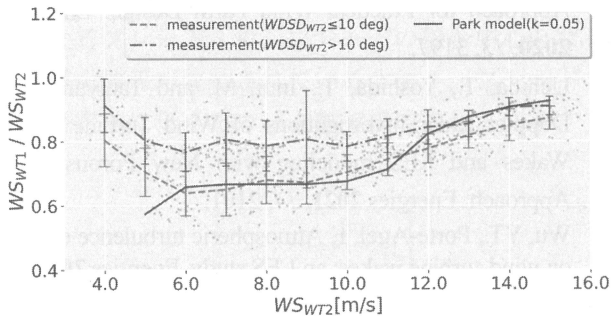


図 5 $k=0.05$ とした Park model と実測値の風速比比較 (風向変動 $WDS_{D_{WT2}} = 10deg$ を閾値として分割)

3. 風向変動を適用した風車ウェイクの数値シミュレーション

風向変動がある状況下での風車ウェイクを詳細に理解するため, 風向変動を加味した数値流体シミュレーションを実施した. 直交スタガード格子で構成される計算領域を設定し, 図 6 のように領域の流入面に対して, 図 7 に示す時間的に線形変化をする流れを設定することで風向の変動を表現した. 本シミュレーションでは最大角を 0 (風向変動なし), 2.5, 5, 7.5, 10deg の 5 パターンで計算を実施した. 計算手法には有限差分法を用い, 乱流モデルには Large-Eddy Simulation を,

風車モデルには翼素理論に基づく Actuator Line model⁷⁾を採用した.

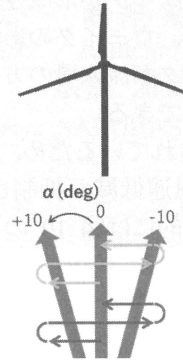


図 6 シミュレーションにおける風向変動の付与

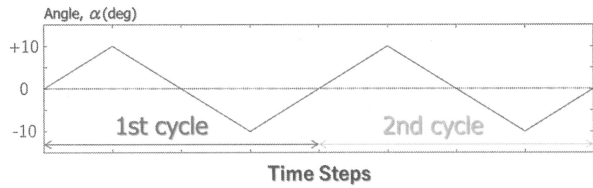


図 7 流入風向角度の時間変化

図 8 に, 風車背後 3D 位置 (D は風車ロータ直径) におけるシミュレーション結果の鉛直プロファイルを示す. ピンクのプロットは鉛直ドップラーライダーで観測された実測値²⁾を示している. 縦軸は地表高さ, 横軸は流入風に対するウェイク風速を表しており, シミュレーションにおける流入風向の最大角を大きくするほど, 鉛直ライダーによる実測値に漸近した.

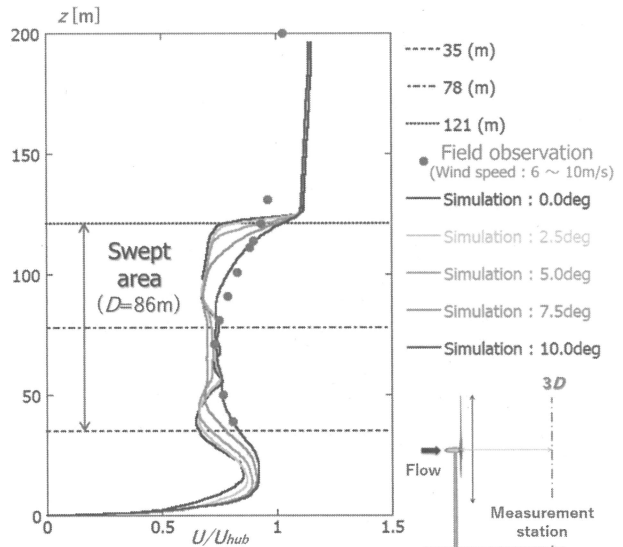


図 8 風車背後 3D 位置での鉛直プロファイル比較

図 9 は、流入風の最大角度が(a)0deg と(b)10deg のときのハブ高さの水平断面における時間平均された風速場を、図 10 は流入風最大角 10deg の場合の瞬時的な渦度場を示している。図 9 で、風向変化がない場合には風車直後のみウェイクが形成されており、一方で風向変化がある場合、ウェイクの影響範囲が広がった。図 10 では、ウェイクが流入風の方向に沿って形成されていることが確認できる。

図 9 は時間平均されているため、風向変化がある際にはウェイク中の風速低減が抑制されているように見えるものの、瞬時的には図 10 のようにウェイクが流入風の方向に流下する。そのため大規模なウィンドファームでは、風下に位置する多くの風車が瞬間的に強烈なウェイクの影響を受けてしまうことが予想される。

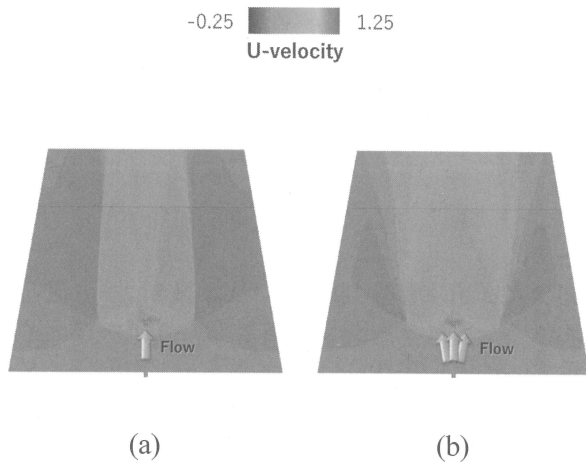


図 9 ハブ高さ水平断面における風速 : (a)流入風向最大角 0deg, (b) 流入風向最大角 10deg

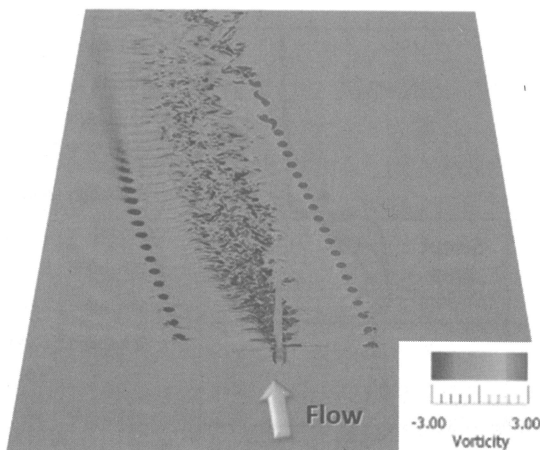


図 10 風向最大角 10deg のシミュレーション結果(風向角 10deg のときの瞬時場、ハブ高さ水平断面における渦度を表示)

4. まとめ

本研究では、雄物川風力発電所の SCADA データを解析し、さらに風向変動を付与した数値流体シミュレーションを実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ウェイクの風速低減率は、流入風の乱流強度よりも風向の標準偏差との相関が高い
- 流入風の風向変動の閾値を 10deg で設定して SCADA データを 2 つに分割したところ、風向変動が 10 以下のときには風洞実験の結果や=0.05 とした Park model の予測値とよく一致するものの、風向変動が 10 を超える場合にはそれらと大きく乖離する
- 風向変動を付与したシミュレーション結果は、鉛直ドップラーライダーで計測された結果と概ね一致する
- シミュレーション結果より、風向変動がある場合にはウェイクの影響範囲が広がり、大規模なウィンドファームでは、風下に位置する多くの風車が瞬間的に強烈なウェイクの影響を受けてしまうことが予想される

参考文献

- 1) Uchida, T., Taniyama, Y., Fukatani, Y., Nakano, M., Bai, Z.R., Yoshida, T. and Inui, M. A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design. *Energies* **2020**, *13*, 3197.
- 2) Uchida, T., Yoshida, T., Inui, M. and Taniyama, Y. Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES modeling with New Porous Disc Approach. *Energies* **2021**, *14*, 2101.
- 3) Wu, Y.T., Porté-Agel, F. Atmospheric turbulence effects on wind-turbine wakes: an LES study. *Energies* **2012**, *5*, 5340-5362.
- 4) L. P. Chamorro and F. Porté-Agel., Effects of Thermal Stability and Incoming Boundary-Layer Flow Characteristics on Wind-Turbine Wakes : A Wind-Tunnel Study. *Boundary-Layer Meteorology*, **2010**, *136*, 515-533.
- 5) Jensen, N.O. A Note on Wind Generator Interaction. Technical Report, Risø National Laboratory: Roskilde, Denmark, **1983**, Risø-M No. 2411.
- 6) Katic, I., Højstrup, J., Jensen, N. O. A simple model for cluster efficiency. *EWEC'86. Proceedings*, **1986**, *1*, 407-410.
- 7) Sørensen, J. N. and Shen, W. Z. Numerical modeling of wind turbine wakes. *JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME* **2002**, *124*, 393-399.