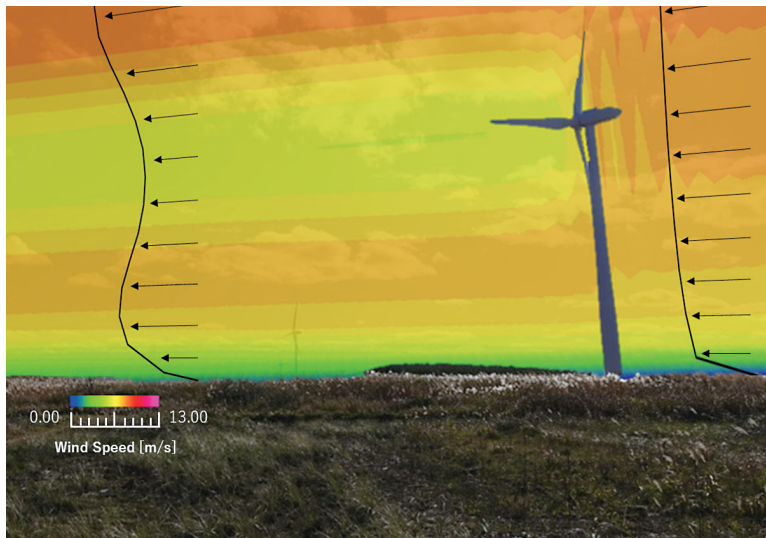


実サイトデータを用いた風車ウェイク影響の予測手法の開発



乾 真規 ①
 吉田 忠相 ②
 澁谷 光一郎 ②
 馬詰 佳亮 ②

要旨

風車ウェイクによる発電量や風車寿命への影響を正確に予測することは、ウィンドファームの事業性を評価する上で非常に重要な要素である。当社は九州大学応用力学研究所の内田孝紀准教授および東芝エネルギーシステムズ株式会社と共同研究を実施し、汎用性のある風車ウェイクモデルの開発に取り組んできた。雄物川風力発電所にて取り組んだ実機風車ウェイク観測では、ドップラーライダーを用いた観測により風速欠損の風速依存性や、商用的に広く使用されているウェイクモデルであるPark modelによる予測値と実測値との関係性を明らかにした。風車運転データ分析からは、観測結果と同様の傾向に加え、乱流強度や風向変動と風速欠損の関係性を確認した。共同研究にて開発したCFDポーラスディスク・ウェイクモデルを用いて雄物川風力発電所の再現計算を行い、風車ハブ高さの風速予測誤差±5%以内を達成した。

キーワード

風力発電, 風車ウェイク, 風況観測, ドップラーライダー, CFDポーラスディスク・ウェイクモデル

1. 緒言

近年、カーボンニュートラルの実現に向け風力発電の導入が加速しており、各地でウィンドファームが計画、建設されている。一方で、陸上風力発電では適地の減少、洋上風力発電では水深や航路、漁業協調のため、限られた範囲に多数の風力発電機（以降、風車と呼称）を設置することが求められている。風力発電では発電時に風のエネルギー（=風速）を電気エネルギーに変換するため、図1のように風車の下流側にはウェイクと呼ばれる周囲よりも風速が低下（欠損）し乱流強度が増加する領域が発生する。ウェイクが別の風車に作用した場合、その風車では発電量の低下や風車寿命の低下をもたらす。限られた範囲に多数の風車を設置すると風車間距離が短くなり、ウェイクによる影響は増大する。ウェイクによる発電量低下は売電収益の悪化、風車寿命の低下はO&Mコストの増加を招き、結果として均等化発電コスト（LCOE）の増加に繋がるため、ウェイクによる影響を正確に予測することはウィンドファームの事業性を評価する上で非常に重要な要素である。

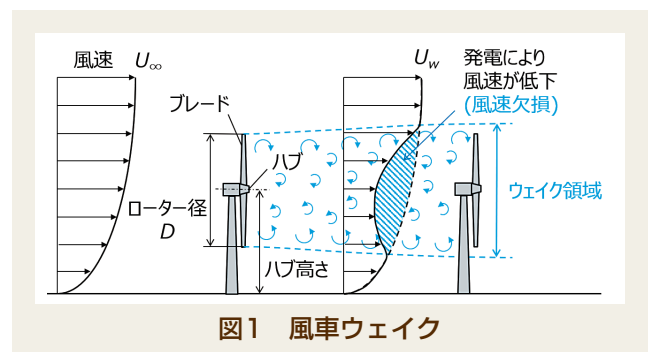


図1 風車ウェイク

風車ウェイクを予測するために、当社は2016年度より九州大学応用力学研究所の内田孝紀准教授と共同研究を実施し、秋田県雄物川風力発電所の2MW級風車を対象とした実機風車ウェイク観測にて実機ベースでのウェイクの解明に取り組んだ。2018年度からは東芝エネルギーシステムズ（株）も加わった3者共同研究が始まり、汎用性のあるウェイクモデルの開発に取り組んだ。

本報では、雄物川風力発電所での実機風車ウェイク観測および当該発電所の運転データの分析から得られた知見と、前述した3者共同研究の成果であるCFDポーラスディスク・ウェイクモデルについて紹介する。

① 脱炭素化事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部 技術士(機械部門)
 ② 脱炭素化事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部

2. 雄物川風力発電所

図2に示す雄物川風力発電所および第二雄物川風力発電所は、当社が事業計画、設計、調達、建設を実施し、運営を手掛けている風力発電所で、秋田県の雄物川河口付近の海岸沿いに立地している。雄物川風力発電所の風車（以降、1号機と呼称）および第二雄物川風力発電所の風車（以降、2号機と呼称）は、主風向に対して直列に離隔距離277 m（2号機のローター径（ $D = 86$ m）で計算すると約 $3.2D$ ）という短距離で建設されていることが国内の他の風力発電所には無い特徴である。図3に2016年から2020年の2号機の風配図を示す。ESEの風向では1号機から2号機へ、WNWの風向ではその逆方向にウェイクを作用させる状況となり、その頻度は年間で約30%である。WNW（日本海）からの風向の場合、発電所周囲の地形が平坦であることと海岸から80 mと近いことから、地形による乱れの少ない風が風車に流入し、疑似的な洋上環境とみなすことができる。1号機および2号機の風車諸元は図2中の表に示す通りであり、両者とも2 MW級の風車である。

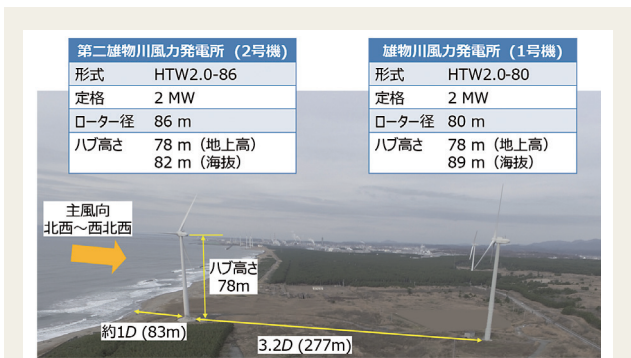


図2 雄物川風力発電所と第二雄物川風力発電所

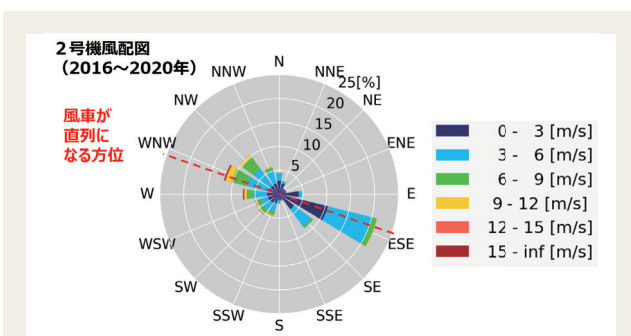


図3 第二雄物川風力発電所の風配図

3. 雄物川風力発電所での実機風車ウェイク観測

3.1 観測方法 実機ベースかつ自然環境下でのウェイクを把握するために、風車2号機を対象としたドップラーライダーによる実機ウェイク観測を実施した。ドップラーライダーとは、レーザーを上空に照射して上空のエアロゾルからの散乱光を受光し、散乱光のドップラー周

波数変化から風速・風向を観測するリモートセンシング機器である。当社はZX Lidars社のZX300¹⁾を使用して観測した。ZX300はIEC 61400-12-1: 2017規格に完全準拠し、DNV社によってStage 3（融資適合データ品質）認定を受けていることから風況観測機器として十分な精度を有している。図4にドップラーライダーの設置位置および図5に観測機器の写真を示す。2号機によるウェイクを、図4中の表に示すスケジュールで、3~5Dにドップラーライダーを移設して観測した。3~5D位置は旧秋田空港の滑走路沿いであり平坦地形となっている。4D位置では当社が設置した風況観測マストの横にドップラーライダーを設置した。3D位置は1号機と2号機の風車間距離に近く運転データとの比較に使用できること、主風向に直交する方向の最低離隔距離として一般的に認知されている^{2) 3)}ことから、複数回の観測を実施した。ドップラーライダー設置位置の標高を基準とした観測高度を図6に示す。風車ハブ高さを中心として、その上方を約10 m間隔で観測した。

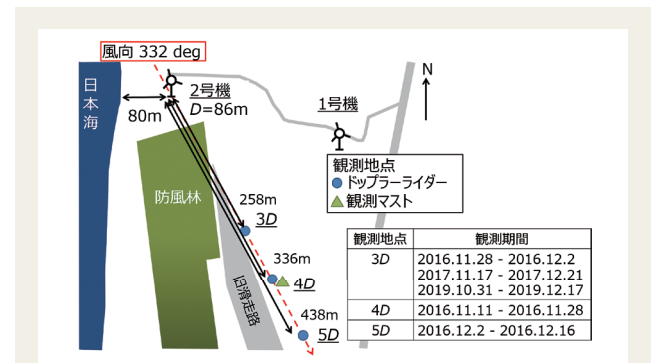


図4 観測地点

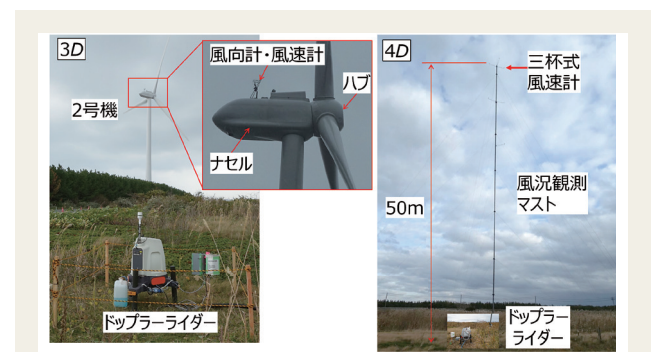


図5 観測機器

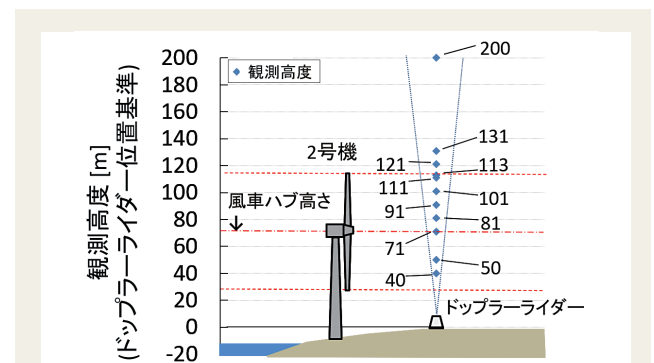


図6 観測高度（ドップラーライダー位置基準）

3.2 データ処理方法 ドップラーライダーで観測した風況データについて、以下の手法でデータ処理を行い、ウェイクのあるデータを抽出・評価した。

3.2.1 前処理 2号機の運転データより、ナセル上の風向計がドップラーライダーへ向かう風向である $332^\circ \pm 10^\circ$ を示し、かつ2号機が発電中の時間帯を抽出した。その後、同時帯のドップラーライダー観測データを抽出し、エラーデータを除去した。

3.2.2 ウェイクの鉛直方向分布の評価 前処理で抽出した10分平均風速データを1 m/sの風速ビンで整理し、高度毎に平均した。風速ビンは、例えば5 m/sの場合は5 m/s以上6 m/s未満で定義した。

3.2.3 風速減衰率の評価 前処理で抽出したドップラーライダーの10分平均風速 U_{lidar} と同一時刻の2号機ナセル上の風速計の10分平均風速 U_{hub} を運転データから抽出し、その比 (U_{lidar} / U_{hub}) より風速減衰率を評価した。なお、 U_{hub} は風車本体によるブロッケージの影響を受けている。このため、図7に示す3D位置でウェイクの影響を受けない西風 (風向 $270 \pm 11.25^\circ$) における2号機ハブ高さでの U_{hub} と U_{lidar} の相関式を用いて U_{hub} を補正した。

3.3 観測結果

3.3.1 風況観測マストとの相関確認 図8に10分平均風速および乱流強度に対する風車2号機から4D位置にある風況観測マストの観測値 (横軸) と同位置でのドップラーライダー観測値 (縦軸) との相関を示す。検

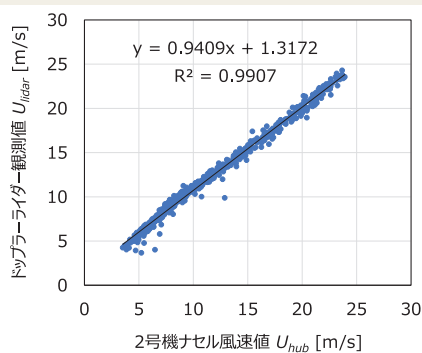


図7 2号機ハブ高さにおける U_{hub} と U_{lidar} の相関 (風向 $270 \pm 11.25^\circ$)

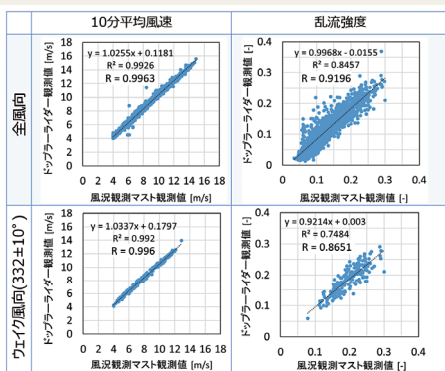


図8 風況マスト観測値とライダー観測値の相関

証期間は2週間で、地上高50 mの観測値を使用した。図8中、上段のグラフは全風向、下段のグラフはウェイクが作用する風向 ($332^\circ \pm 10^\circ$) に絞ったデータをプロットしている。図8より各グラフに示す相関係数 R は0.8以上と高く、10分平均風速、乱流強度ともに全風向およびウェイクが作用する風向問わず両観測機器の間に良い相関があると言える。よって、ドップラーライダーを用いたウェイク観測は問題無いと判断した。

3.3.2 観測結果 図9にドップラーライダーで観測したウェイクの鉛直方向風速分布を示す。3D位置では、風速9 m/sに近づくと風車ローターが位置する高度内での速度シア (速度勾配)、および図1中の水色ハッチングで説明した風速欠損が大きくなった。また、それ以上の風速では速度シア、風速欠損ともに徐々に小さくなる傾向が確認された。図10に風車の性能曲線を示す。パワー係数は風のエネルギーを機械エネルギー (風車の回転力) に変換する効率を表す無次元数、スラスト係数は風車ローターに作用するスラスト力 (風車軸方向の力) とローター面積の比を表す無次元数である。6~10 m/sの風速域では他の風速域よりもパワー係数やスラスト係数が高く、流入風からより多くのエネルギーが風車の回転力やスラスト力に変換されるため速度シアや風速欠損が大きくなったと推察される。また、風速10 m/s以上では、定格出力へ制御するためにブレードのピッチ制御で風を逃がすため速度シアや風速欠損が小さくなったと考えられる。図11に2号機ハブ高さ風速 U_{hub} と風速減衰率 U_{lidar} / U_{hub} の関係を示す。図中の橙色プロットは各風速ビンにおける風速減衰率の平均値を、黒点線は商業的に広く使用されているPark model^{4) 5)}にて海風に対応する拡散係数 $k = 0.05$ を適用した予測値を示す。3D、5Dの結果において、青色プロットで示す実測値は殆どの点

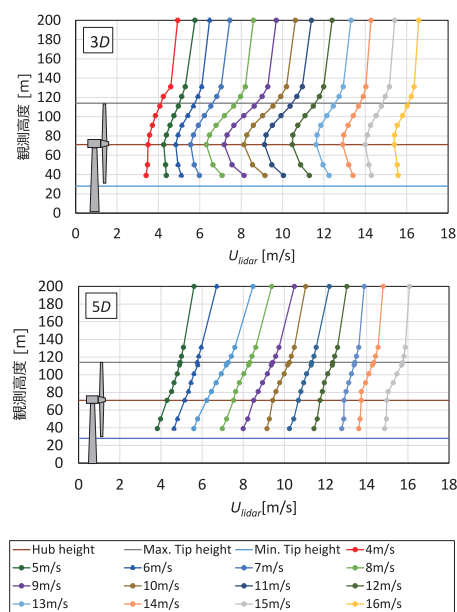


図9 ドップラーライダーで観測したウェイクの鉛直方向風速分布

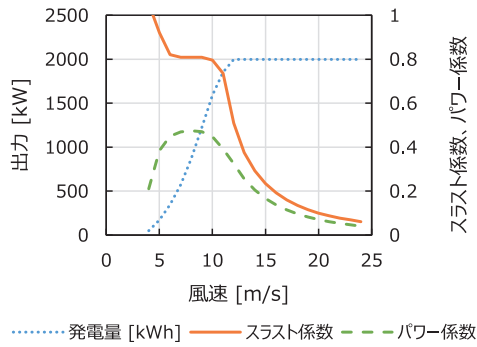


図10 風車2号機の性能曲線

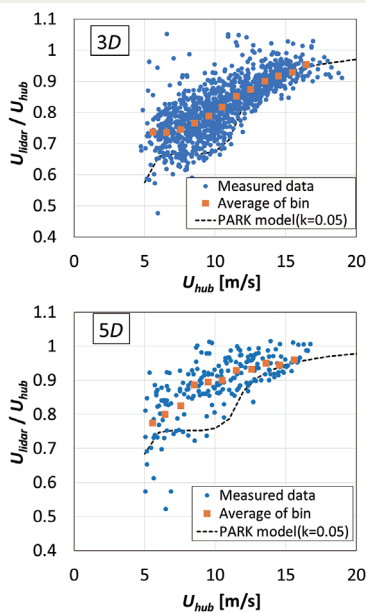


図11 2号機ハブ高さ風速 U_{hub} と風速減衰率 U_{lidar}

がPark modelの予測値より上回っている。このことからPark modelはウェイクによる風速欠損が最も発現する状況を精度よく予測できていると言える。一方で、風速ビン毎に見ると風速減衰率はばらつきが大きく、平均値はPark modelの予測値と乖離している。このばらつきの原因として大気安定度や風向変動の影響が考えられる。大気安定度の影響については文献⁶⁾を参照頂きたい。風向変動の影響については次章で説明する。

4. 風車運転データを用いたウェイクの分析

第2章で説明した通り、1号機と2号機は主風向に対して直列に並んでおり、お互いに風車ウェイクを作用させている状況である。そこで、各風車の運転データを分析することにより、実機運転データ上でのウェイクを評価した。

4.1 データ処理方法 本報では2018年1月1日から1年間において、海風（風向289度）での分析結果について紹介する。各風車の運転データは以下の条件でフィルタリングを行い、両風車のデータが存在する時間

帯の10分平均データを抽出した。

- ・10分区間発電量が0 kWhでない
- ・10分区間運転時間が10分である
- ・出力抑制を実施していない

4.2 分析結果 図12に2号機のウェイクによる風速欠損と影響範囲を示す。図12中の横軸は2号機と1号機が直列に並ぶ風向289度を基準とした相対風向を示し、+側は北側、-側は南側に風向がずれることを意味する。相対風向は2号機ナセル風向計の観測値を用いて算出している。また、図12中の縦軸は1号機の10分平均風速 WS_{WT1} と2号機の10分平均風速 WS_{WT2} の比、カラーマップは2号機のナセル風速計による10分平均風速値を表している。図12より、相対風向0度を中心に ± 20 度の範囲まで WS_{WT1} が WS_{WT2} よりも小さくなっており、風速欠損が発生していることがわかる。また、 WS_{WT2} が速いほど風速欠損も小さくなる傾向がある。これらは図9で示したドップラーライダーによる観測結果と同様の傾向である。図13に2号機ウェイクによる乱流強度と影響範囲を示す。図13中の横軸は図12で用いた相対風向、縦軸は1号機ナセル風速計の乱流強度の値を示し、カラーマップは2号機ナセル風速計による10分平均風速値を表している。風速欠損と同様に、乱流強度も相対風向0度を中心に ± 20 度の範囲内で増加する傾向を確認した。また、 WS_{WT2} の値が速いほど乱流強度の増分が小さくなる傾向が得られた。これは、フェザリングによりブレードのピッチ角が風向きと平行に近づき、乱れが発生し難くなるからである。

図14に2号機に流入する風速 WS_{WT2} と風速欠損 WS_{WT1}/WS_{WT2} の関係を示す。黄色色のプロットが運転データの分析値を表し、2号機ナセル風向計の観測値が 289 ± 5 度を示すデータを抽出したものである。そして、そのデータを2号機ナセル風向計計測値の標準偏差10度を閾値として風速ビンごとに平均化した結果を赤色破線（風向標準偏差10度以下）および青色鎖線（同10度超）で示した。また、

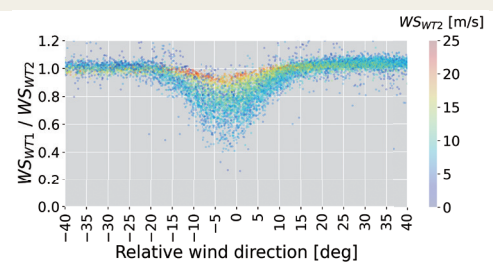


図12 2号機ウェイクによる風速欠損と影響範囲

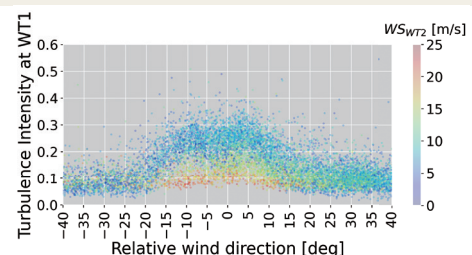


図13 2号機ウェイクによる乱流強度と影響範囲

図11と同様に拡散係数 $k = 0.05$ を適用したPark modelの結果を黒実線で表示している。図14より流入風向の標準偏差が10度以下の場合にはPark modelの結果と類似する傾向が得られたが、10度を超える場合はPark modelの結果よりも風速欠損が小さくなる傾向が得られた。これは、流入風向の変動によりウエイク内外での運動量交換が促進され風速が回復したためと推察される。図15に乱流強度および風向の標準偏差による風速欠損量の変化を示す。図15においても2号機ナセル風向計の観測値が 289 ± 5 度での分析結果をプロットしている。図中凡例に示す相関係数 R は十分大きいわけではないが、乱流強度および風向の標準偏差と風速欠損量には負の相関傾向が確認できた。乱流強度は主流方向の値であるが主流方向乱流強度は他方向の乱流強度とも相関あるため、ウエイク内外の運動量交換と相関があったものと考えられる。以上より、風車ウエイク中の風速予測について流入風向の変動や乱流強度が重要な因子であることが判明した。

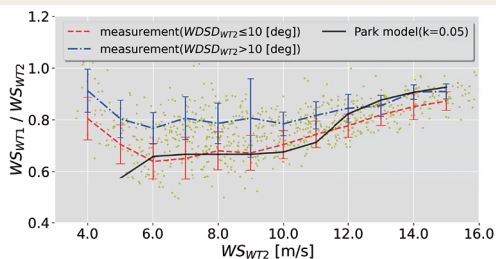


図14 風向の標準偏差 10° を閾値とした場合のウエイク速度とPark modelの比較

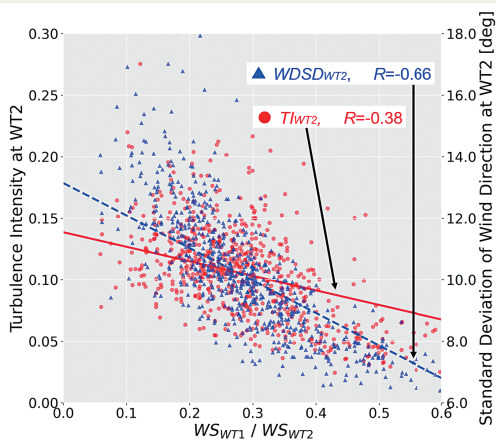


図15 乱流強度および風向の標準偏差による風速欠損量の変化

5. 風況シミュレーターのための風車ウエイクモデルの開発

3者共同研究の成果として、CFDポーラスディスク・ウエイクモデルを開発した。本モデルは風車のローター面を透過性の円盤で表現し、円盤を通過する風速に抵抗を与えることによりウエイクを再現する。アクチュエータラインモデル⁷⁾等のCFDウエイクモデルでは風車ブレード

の性能係数や風車形状データが必要で、事業者はこれらデータを入手できないことが難点であったが、本モデルは実測値に基づいたチューニング結果のみを使用するため事業者でも容易に利用することができる。また他のCFDウエイクモデルよりもシンプルなモデルのため計算負荷も小さく、ワークステーションでもウィンドファームの再現計算が可能である。本モデルのコア技術は内田准教授の発案によるが、前章までで説明した当社の実機風車での実測結果や、東芝エネルギーシステムズ(株)が実施した追加観測結果および風車の詳細CFD解析結果によりブラッシュアップを行い、その結果、3者共同で特許出願(特願2020-1603)に至った。本モデルの詳細な内容については、文献^{8) 9)}を参照頂きたい。

本モデルは(株)リアムコンパクトが販売している実地形版RIAM-COMPACT[®]に実装し、利用可能な状態としている。当社では本モデルを用いて雄物川風力発電所の再現計算を実施し、本モデルのキーパラメーターである抵抗係数 C_{RC} のパラメータスタディを実施した。その結果の一部を図16に示す。図16中には第3章で紹介したドップラーライダーによる観測値において風速 $6 \sim 10$ m/sのデータを平均化したものを観測結果としてプロットしている。パラメータスタディの結果、図中水色実線で示す通り、風車ハブ高さにおいて風速の予測誤差 $\pm 5\%$ 以内を再現できる C_{RC} およびウエイクの鉛直方向分布を再現するメッシュ条件等を確立している。また、本報では紹介しないが図9で紹介した各風速ビンの実測結果を再現する C_{RC} および誤差についてもデータベース化を行っている。一方、風車ハブ高さから離れるにつれ、実測値との誤差が大きくなる点が課題である。今後、モデル改良も進めながら、順次、実案件へ本モデルを適応していく。また、本モデルは複雑地形でのウエイク航跡を評価できることから、風況観測マストへの既存風車によるウエイク影響の有無の判断にも活用を進めている。

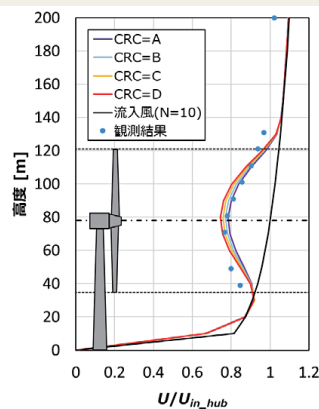


図16 抵抗係数 C_{RC} のパラメータスタディ結果

6. 結言

本報では、雄物川風力発電所にて取り組んだ実機風車ウエイク観測の結果および風車運転データ分析結果、CFDポーラスディスク・ウエイクモデルについて紹介した。

実機風車ウェイク観測結果より、風速欠損の風速依存性や実測値とPark modelの関係性を明らかにした。風車運転データ分析からは、観測結果と同様の傾向を確認するとともに、乱流強度や風向変動と風速欠損の関係性を明らかにした。CFDポーラスディスク・ウェイクモデルを用いて雄物川風力発電所の再現計算を行い、風車ハブ高さの風速誤差±5%以内を達成した。当社は今後も引き続き自社および産学連携活動を通じて風車ウェイク影響の予測精度向上、およびウィンドファームの発電量向上や風車故障リスクの低減に貢献する。

SDGsに貢献する技術

本技術は再生可能エネルギーである風力発電の発電量向上に貢献でき、SDGs目標7「エネルギーをみんなに、そしてクリーンに」の達成に貢献します。

謝 辞

本論文の執筆にあたり共同研究者として多大なるご協力を賜りました九州大学応用力学研究所内田孝紀准教授および東芝エネルギーシステムズ(株)関係者の皆様、また、雄物川風力発電所での観測にご協力頂きました(株)ユアテック秋田支社およびインタードメイン(株)の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) ZX Lidars : ZX 300 onshore wind Lidar, **2022-07-19**, <https://www.zxlidars.com/wind-lidars/zx-300/>
- 2) 国土交通省港湾局・環境省地球環境局, 港湾における風力発電について-港湾の管理運営との共生のためのマニュアル-ver.1, **2012年6月**, 12. <https://www.mlit.go.jp/common/000216101.pdf>
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構: 着床式洋上風力発電導入ガイドブック(最終版), **2018年3月**, 174-175. <https://www.nedo.go.jp/content/100890000.pdf>
- 4) Jensen, N.O.: A Note on Wind Generator Interaction, Technical Report Risoe-M-2411 (EN), Risø National Laboratory: Roskilde, Denmark, **1983**.
- 5) Katic, I.; Højstrup, J.; Jensen, N. O.: A simple model for cluster efficiency, EWEC'86. Proceedings, **1986**, 1.
- 6) 深谷侑輝, 内田孝紀, 谷山賀浩ほか: 実サイトにおける風車後流の影響評価 その7: 大気安定度を考慮したウェイク性状の評価, 第43回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, **2021**, 52-55.
- 7) Sørensen, J. N. ; Shen, W. Z. : Numerical modeling of wind turbine wakes, JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME **2002**, 124, 393-399.
- 8) Uchida, T. ; Taniyama, Y. ; Fukatani, Y. et al. : A New Wind Turbine CFD Modeling Method based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, Energies, **2020**, 13, 3197.
- 9) Uchida, T. ; Yoshida, T. ; Inui, M. et al. : Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES Modeling with New Porous Disc Approach, Energies, **2021**, 14, 2101.

文責者

日立造船株式会社 脱炭素化事業本部
風力発電事業統括部 技術・開発部 機械・電気グループ
乾 真規
E-mail : hitzgiho001@hitachizosen.co.jp

Development of a Method for Predicting the Effects of Wind Turbine Wakes Using Field Measurement and Operation Data

Abstract

Accurate prediction of the impact of wind turbine wake on power generation and wind turbine life is a very important factor in assessing the business feasibility of wind farms. Hitachi Zosen has conducted joint research with Associate Professor Takanori Uchida of the Research Institute of Applied Mechanics at Kyushu University and Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, and worked on the development of a versatile wind turbine wake model. In the observation of actual wind turbine wakes conducted at Omonogawa Wind Power Plant, we clarified the wind speed dependence of wind speed deficits and the relationship between the measured values and values predicted from the Park wake model widely used in commercial applications through observation using a vertical profiling Doppler lidar. From an analysis of the wind turbine operation data, we confirmed the same tendency as the observation results as well as the relationship between turbulent flow intensity and wind direction fluctuations and the wind speed loss. With the CFD porous disc wake model developed through the joint research, we reproduced the Omonogawa Wind Power Plant calculations and achieved a wind speed prediction error of the wind turbine hub height of within ±5%.

Authors

Masaki Inui (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : hitzgiho001@hitachizosen.co.jp)
Tadasuke Yoshida Koichiro Shibuya Keisuke Umazume