

## 大規模洋上ウィンドファームの バンカビリティ（融資適格性）評価に資する 汎用的使用を目的とした 新しい風車ウエイクモデルの開発とその応用

九州大学 内田 孝紀

### はじめに

一般的に、風車ブレードの回転に伴い、その後流域には風速の欠損や時間・空間変動が形成される（図1）。これらの流動現象は風車ウエイクと呼ばれる。特に、複数の風車群から構成される洋上の大規模ウィンドファームにおいては、上流側に位置する風車ウエイクに起因して、下流側に位置する風車の発電量低下や風車内外の故障などが生じる可能性がある。そのため、上流側に位置する風車が形成する風車ウエイクの挙動を正しく評価することが不可欠である。風車ウエイクの評価で

は、野外計測や縮尺模型を用いた風洞実験が困難であることから、数値シミュレーションに基づく検討が一般的である。その中で最も予測精度が高い手法が、fully-resolved geometries combined with CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations<sup>(1)</sup>である。このアプローチでは、unsteady RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) modelingやLES (Large-Eddy Simulation) が採用され、回転する風車ブレード、ナセル、タワーなどの構造物が詳細にモデル化される。特に、風車ブレードの回転を忠実に再現するため、計算格子の高度な生成技術やスライディングメッシュなどの特殊機

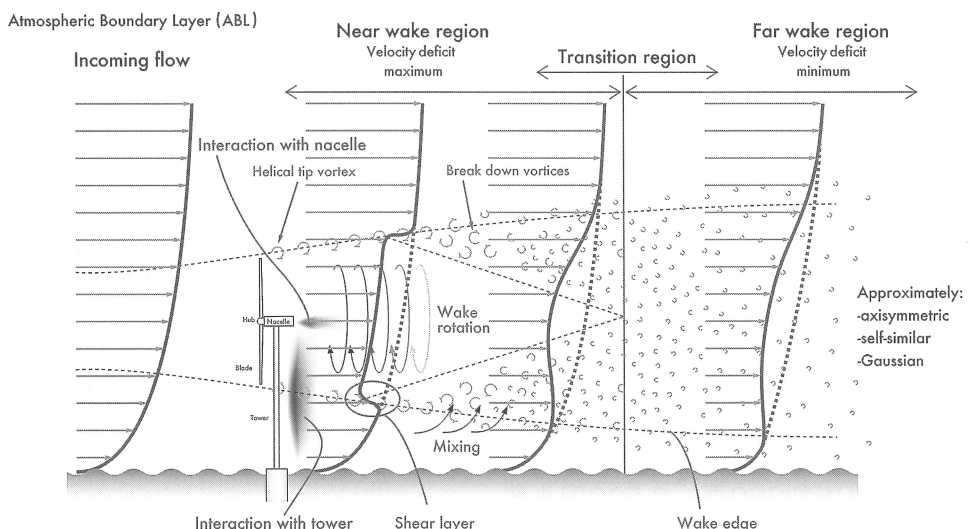


図1 風車ウエイク構造の模式図

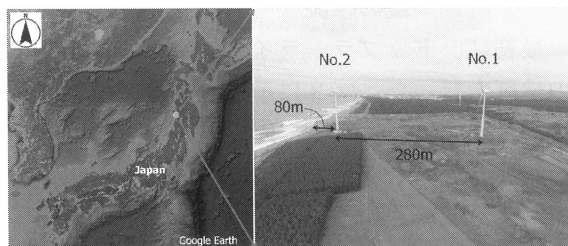
能が要求される。そのため、ANSYS Fluent/ANSYS CFX<sup>(2)</sup>やSimcenter STAR-CCM+<sup>(3)</sup>などのcommercial CFD softwareの利用が一般的である。これらの計算では膨大な計算コストや計算機リソースが必要となるため、多くの風向および風速階級に対するシミュレーションを必要とする事業性評価にはほとんど利用されていない。最近では、翼素理論に基づいて風車ブレードの回転をActuator Disk (AD) model、Actuator Disk model with Rotation (ADM-R)、Actuator Line (AL) model、Actuator Surface (AS) modelのいずれかによりモデル化し、これをLESに実装したCFD wake modelsによるアプローチが主流になりつつある<sup>(1)</sup>。しかしながら、これらのアプローチでは風車固有のブレードに関する幾つかのパラメータ（具体的には、風車ブレードの任意断面位置におけるコード長、ねじれ角度、抗力係数、揚力係数）が必要であり、これらはデベロッパー（風力発電事業者）にとっては入手困難な場合が多い。結果として、CFD wake modelsは利便性が悪いのが現状である。一方で、Jensen<sup>(4)</sup>/Katic<sup>(5)</sup>によるPark modelに代表されるengineering wake modelsは一連の計算が極めて簡単であり、利便性が良い。そのため、現在でも国内外の風力業界における事業性評価において広く利用されている。engineering wake modelsは運動量理論に基づいて風車ウエイクを予測する手法であるため、モデル化の前提条件としての流れ場が単純化されている。よって、複数の風車群から構成される大規模ウィンドファームでは、非線形流動現象である風車ウエイクの相互干渉を正確に予測することが困難である。

そこで本研究では、特に複数の風車群から構成される洋上の大規模ウィンドファームにおいて、非線形な流動現象である風車ウエイクの相互干渉を正確に予測することを目的とし、engineering wake modelsとCFD wake modelsの中間的な手法として、CFD porous disk wake

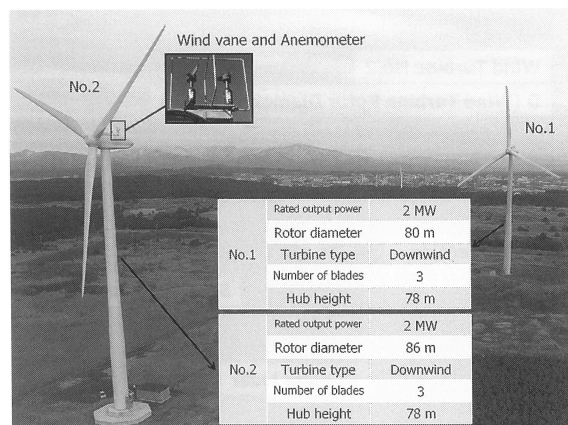
modelを新たに提案する<sup>(6)</sup>。本稿では、本手法の妥当性とその応用例を紹介する。

## 秋田県雄物川風力発電所の概要

日立造船株が所有する雄物川風力発電所は、秋田県秋田市の雄物川河口北側に位置し、図2に示すように、日立製作所製の定格出力2MWのダウンウィンド型風車2基が稼働している。風車1号機は2015年3月1日に運転が開始されており、風車2号機は2016年2月1日に運転が開始されている。図2(a)に示すように、風車1号機と2号機の離隔距離は約280mであり、風車2号機を基準として考えた場合、風車1号機は風車2号機の約3.3D（但し、Dは風車2号機のロータ直径である86m）下流に位置することになる。この地域の卓越風向は西北西であり、2基の風車はほぼ直線的に配置されているのが大きな特徴である。さらに、風車2号機は海岸



(a) 全体図



(b) 拡大図

図2 本研究で対象とした秋田県雄物川風力発電所

線から約80mに位置し、冬期の季節風（主風向：西北西～北西）が侵入する際には洋上に近い風環境下にあると言える。本研究では、この海から侵入する風況場（海風）を研究対象とした。

## ドップラーライダーによる 風車Near-Wakeの気流計測方法

### (1) ドップラーライダーの概要

本研究では、英国製のドップラーライダー「ZephIR」を使用した。「ZephIR」は高度39mから200mまでの任意の高度における風向、風速および乱流強度を合計10点計測することが可能である。本研究では、風車2号機のハブ高さ（78m）を基準高度として考え、39、50、71、81、91、101、111、121、131、200mを計測点として設定した。図3には、本研究における2基の風車およびドップラーライダーおよび50m観測マストによる気流計測の位置関係を示す。

### (2) ドップラーライダーによる

#### 計測精度の検証

最初に、ドップラーライダーによる計測精度の検証を行った。図3に示すように、風車2号機の3Dおよび4D下流にドップラーライダーを

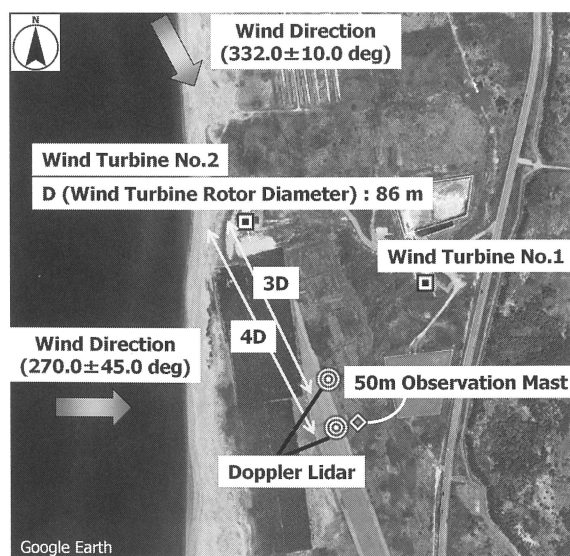


図3 本研究における風車および気流計測の位置関係

設置し、風車ウエイクの影響を受けない西風（ $270.0 \pm 45.0^\circ$ ）を対象とし、風車2号機のナセル風速および乱流強度（地上高78m、図2(b)を参照）と、50m観測マストの風速および乱流強度をそれぞれ比較した。なお、時間平均の間隔は10分である。図4(a)に示すナセル風速および乱流強度との比較に注目する。乱流強度についてはナセルの影響により、明確な相関は見られなかった。一方、平均風速に関しては良好な相関関係を確認することができ、風速値の計測については特段問題がないと判断した。これに対し、図4(b)に示す50m観測マストとの比較においては、平均風速および乱流強度ともに非常に高い相関性が存在することが確認できた。よって、本研究で使用した英国製のドップラーライダー「ZephIR」により、風車ウエイク内の気流計測は可能であると判断した。

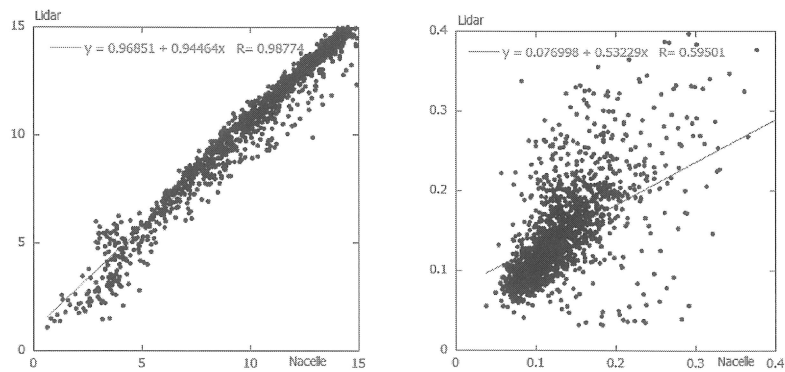
### (3) ドップラーライダーによる

#### 風車Near-Wakeの気流計測結果と考察

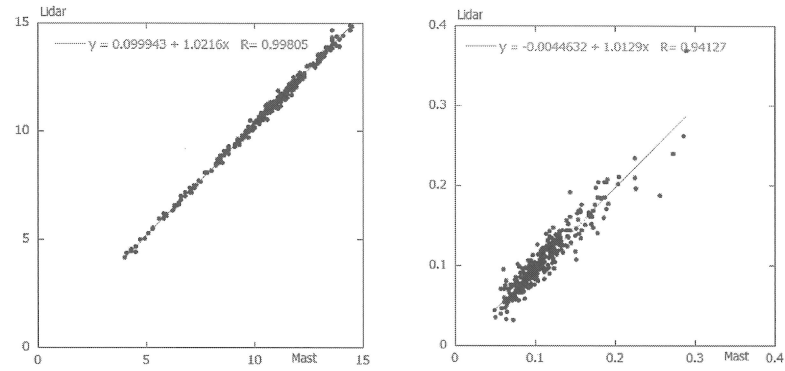
図2および図3に示すように、本研究では擬似洋上環境下における風車Near-Wakeの気流特性を把握することを主たる目的とし、冬期の季節風が海から侵入する時期（2016.11.28～2016.12.2および2017.11.17～2017.12.21）に風車2号機の3D（但し、Dは風車2号機のロータ直径である86m）下流にドップラーライダーを設置し、気流計測を実施した。本研究では、風車2号機に対して風向が $332 \pm 10^\circ$ であり、かつ異常値や欠測値を取り除いた実測データを解析対象とした。

図5には、本研究で対象とした定格出力2MWのダウンwind型風車の諸量を示す。パワー係数が最大値（約0.48）を示す風速は約8m/s付近であり、これに対応したスラスト係数は約0.8である。本研究では、パワー係数が最大値を示す風速約8m/sにおける風車ウエイクの気流特性に注目し、データ解析を行った。

図6には、風車2号機の3D下流における平均風速の鉛直分布に関して、各風速階級ごとに

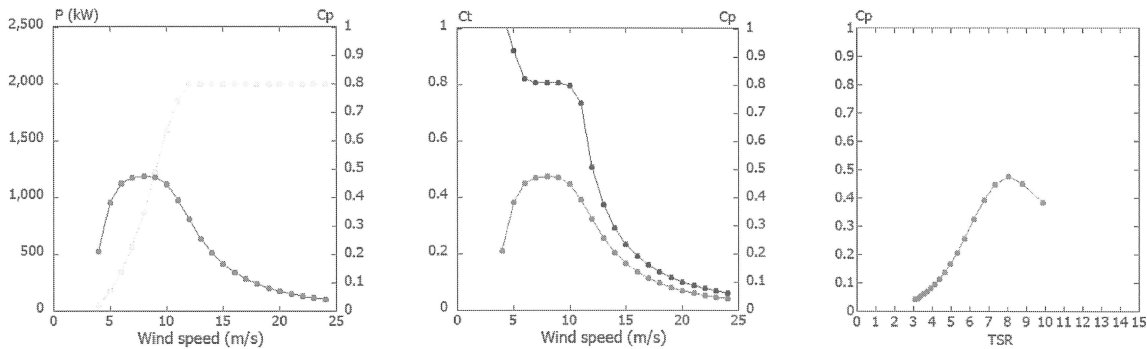


(a) ナセル（地上高78m）とドップラーライダーの比較、散布図（計測期間：2017年11月17日～12月21日）



(b) 観測マスト（地上高50m）とドップラーライダーの比較、散布図（計測期間：2016年11月17日～11月28日）

図4 ドップラーライダーによる計測精度の検証（左：風速、右：乱流強度）



(a) 風速vs発電量、パワー係数 (b) 風速vsスラスト係数、パワー係数 (c) 周速比vsパワー係数

図5 本研究で対象とした定格出力2MWのダウンウィンド型風車の諸量

整理した結果を示す。ここで、図中のデータは各高度において平均操作を施している。表1には各風速階級における平均操作を行ったデータ個数を示す。図6を詳細に観察すると、各風速階級において風車ウエイクの形成の様子、すなわち、速度欠損量に明確な差異があることが見

表 1 各風速階級におけるデータ個数、風車 2 号機の3D下流

|                 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Wind Speed(m/s) | 4 | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Number          | 5 | 13 | 28 | 36 | 25 | 31 | 43 | 36 | 31 | 31 | 22 | 11 | 6  |

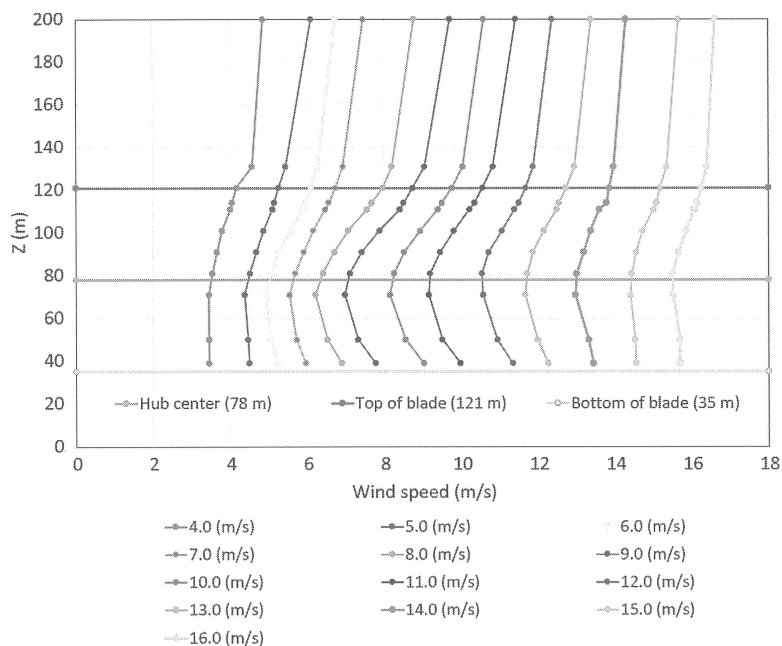


図 6 各風速階級における主流方向の平均風速の鉛直分布、風車 2 号機の3D下流位置  
※各高度において平均操作を施した。

て取れる。図 5 と合わせて考察すると、パワー係数が最大値を示す風速約 8 ～ 9 m/s では、風車ハブ中心（地上高 78 m）付近における速度欠損量は、他の風速階級と比較して非常に大きいことが分かる。この理由は次の通りである。すなわち、風速約 8 ～ 9 m/s では、風車は最も効率良く運転して風力エネルギーを取得している。その結果として、速度欠損量が大きくなっていると考えられる。風速が約 10 m/s 以上の風速階級では、風速が増加するに従い、風車ハブ中心（地上高 78 m）付近における速度欠損量は徐々に小さくなっている。これは風車ブレードのピッチ角が風車への風を逃がすように制御されていること（ピッチ制御）に起因していると考えられる。

### CFD porous disk wake modelによる 風車Near-Wakeの 気流再現シミュレーションと考察

ここでは、本研究で新たに開発したCFD porous disk wake model<sup>(6)</sup>による計算結果を示すとともに、野外計測データとの比較について説明する。計算手法の詳細は文献(6)を参照して頂きたい。図 7 には、座標系および計算領域などを示す。特に注目すべきは、各方向の格子解像度を 2 m の等間隔に設定した点である。その結果、総格子点数は約 4,100 万点となった。本研究では、九州大学応用力学研究所が所有するスーパーコンピュータ SX-Aurora TSUBASA による並列計算を実施した。

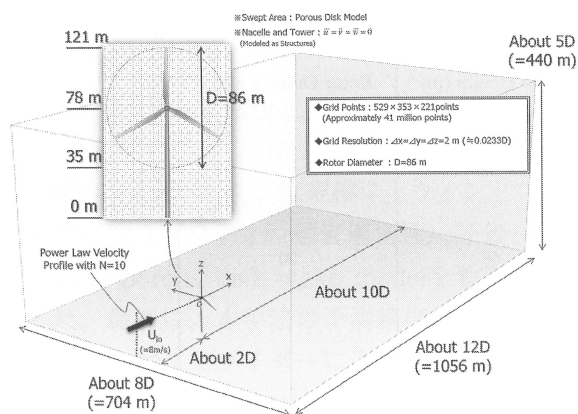


図7 座標系および計算領域など

図8には、流入風速8m/sを対象にした場合のCFD porous disk wake modelを用いた計算結果を、Google Earthに投影した結果を示す。風車下流域に速度欠損領域が明確に形成されており、その影響はドップラーライダーの計測点まで及んでいることが分かる。

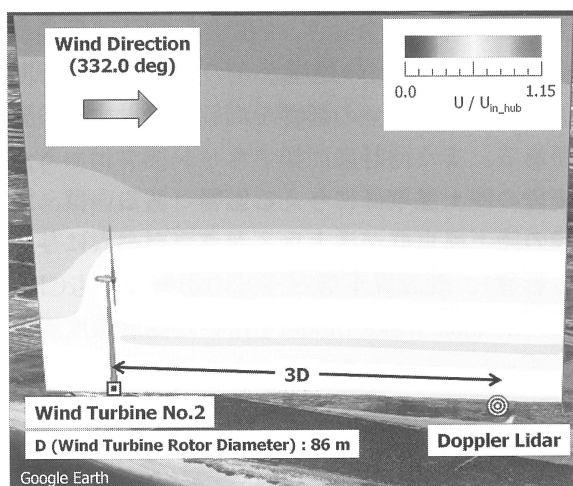


図8 流入風速8m/sを対象にした場合のCFD porous disk wake modelを用いた計算結果

図9では、図8に示す計算結果から風車下流の3D地点における主流方向風速（時間平均値）の鉛直分布を抽出し、これをドップラーライダーによる計測結果と比較した。ここで、黒色の実線は数値シミュレーションにおける流入条件を示す。青色の実線が計算結果である。この青

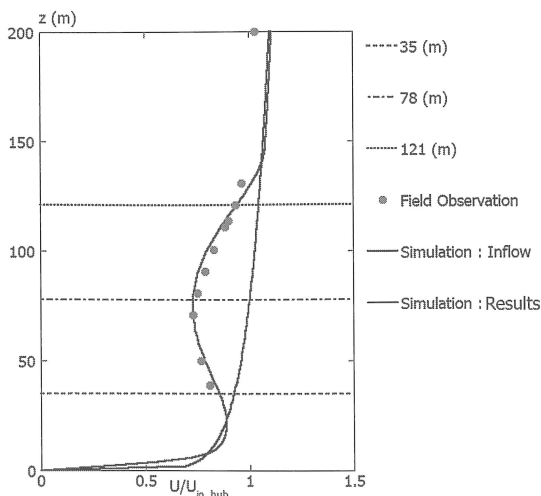


図9 流入風速8m/sを対象にした場合の主流方向の平均風速（時間平均値）の鉛直分布、風車2号機の3D下流位置

色の実線で示す計算結果は、風車受風面（ $z=35\sim 121\text{m}$ ）の全域において、ピンク色で示すドップラーライダーによる計測結果を良好に再現していることが示された。

最後に、本研究で開発したCFD porous disk wake modelを北九州響灘地区に適用した結果について紹介する。北九州市響灘地区は、「風力発電関連産業の総合拠点」の形成などを目指した「グリーンエネルギーポートひびき」事業を推進している<sup>(7)</sup>。2020年9月2日には国土交通省より、秋田港・能代港・鹿島港とともに港湾法に基づき、海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾（基地港湾）として初めて指定された。この地区には、表2に示すように種々のサイズの陸上風車が既に設置・運営されている。また、同地区の洋上には九州電力㈱の子会社である九電みらいエナジー㈱を代表会社とし、西部ガス㈱や電源開発㈱など計5社が出資するひびきウインドエナジー㈱が着床式の「北九州響灘洋上ウィンドファーム（仮称）」の計画を進めている。ここでは、三菱重工業グループの「MHIヴェスタス」（デンマーク）のV164 9.5MWアップウィンド型風車（ロータ直径174m、ハブ高さ約110m、最高到達点約200m、

表2 各風車の主な仕様

| Wind Turbine Number | Capacity (MW) | Hub Height (m) | Rotor Diameter (m) |
|---------------------|---------------|----------------|--------------------|
| 1                   | 1.5           | 65             | 70                 |
| 2                   |               |                |                    |
| 3                   |               |                |                    |
| 4                   |               |                |                    |
| 5                   |               |                |                    |
| 6                   |               |                |                    |
| 7                   |               |                |                    |
| 8                   |               |                |                    |
| 9                   |               |                |                    |
| 10                  |               |                |                    |
| 11                  | 3.3           | 84             | 112                |
| 12                  | 2.0           | 65             | 86                 |
| 13                  |               |                |                    |
| 14                  | 1.99          | 67             | 80                 |
| 15                  | 2.7           | 80             | 103                |
| 16                  | 5.0           | 89.4           | 136                |
| 17                  | 2.0           | 80             | 83                 |
| 18                  |               |                |                    |

IEC-ClassT）が採用されることが正式に発表されている（2019年10月30日）。2022年度に設置工事が開始予定である。さらに、北九州市沖約15km、水深約50mの海域においては、日本初のバージ型浮体式洋上風力発電システム（2枚翼アップウィンド型3MW風車、ロータ直径100m、ハブ高さ72m、最高到達点122m）の実証運転が、2019年5月21日より日立造船(株)などにより開始されている。

図10には、表2に示す18基の風車にCFD porous disk wake modelを適用した結果（南風、すなわち、夜間に出現する頻度が高い陸風）を示す。

各風車から形成された風車ウエイクが複雑に干渉しながら沖合に流下している様子が再現されている。今後、洋上に点在する白島（男島・女島）、工場などの建屋からの乱流（風の時間的・空間的変動）の影響を詳細に検討する必要がある。また同時に、洋上windファームが既設の陸上風車群に与える影響（あるいは、既設の陸上風車群が洋上windファームに与える影響）、既設風車群どうしの影響などもCFD porous disk wake modelを用いた高解像度風況シミュレーションを行い、きめ細やかな議論が必要であると考えている。

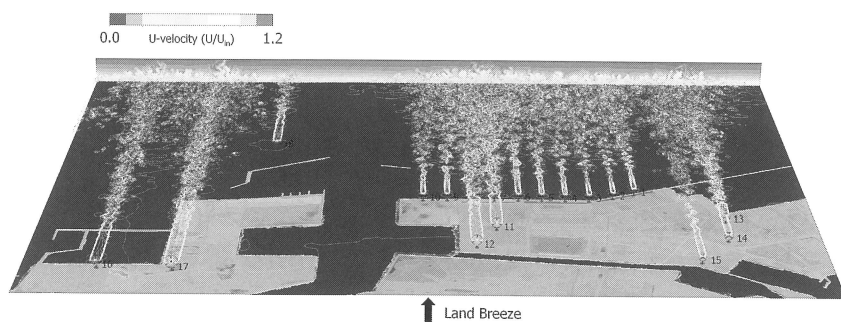


図10 北九州響灘地区にCFD porous disk wake modelを適用した計算結果、流入風速は8m/sに設定

## おわりに

本研究では、engineering wake modelsとActuator Disk (AD) modelなどによるCFD wake modelsの中間的な手法として、大規模洋上ウィンドファームのパンカビリティ（融資適格性）評価に資するCFD porous disk wake modelを新たに開発した。最初に、本手法の予測精度を検証するため、ドップラーライダーによる実測データとの検証を行った。次に、北九州市響灘地区への適用例を紹介した。CFD porous disk wake modelを用いることで、各風車から形成される風車ウエイクの挙動とその相互干渉現象を事前に数値予測し、各風車の耐久性評価およびウィンドファーム全体の経済性評価をウィンドファームが建設される前に実行することが可能になる。また同時に、新規の洋上ウィンドファームが既設の陸上風車に与える影響、あるいは既設の陸上風車が洋上ウィンドファームに与える影響などを評価することも可能である。現在、沿岸域における洋上ウィンドファーム（nearshore wind farms）が日本各地で検討されている。我々は研究開発をさらに加速し、シミュレーション技術に基づいたバーチャル洋上ウィンドファーム構築技術を確認するとともに、これらのプロジェクトへの技術支援を目指す。

## 謝辞

本研究は、東芝エネルギーシステムズ(株)と日立造船(株)との共同研究（研究代表者：内田孝紀）により実施されたものである。ここに記して、関係者に感謝の意を表します。

## <参考文献>

- (1) Porte-Agel, F., Bastankhah, M. & Shamsoddin, S., Wind-Turbine and Wind-Farm Flows : A Review. Boundary-Layer Meteorol 174, 1-59 (2020)
- (2) <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
- (3) <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/simcenter/STAR-CCM.html>
- (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., Hojstrup, J., Jensen, N.O., A simple model for cluster efficiency. In Proceedings of the European Wind Energy Association Conference & Exhibition (EWEC'86) 1, 407-410 (1987)
- (6) Takanori UCHIDA, Yoshihiro TANIYAMA, Yuki FUKATANI, Michiko NAKANO, Zhiren BAI, Tadasuke YOSHIDA and Masaki INUL, A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, Energies, 13 (12), 3197, (2020)
- (7) グリーンエネルギーポートひびき (Full)  
<https://www.youtube.com/watch?v=R1f3XLO0YpU>

## 【筆者紹介】

内田 孝紀

九州大学 応用力学研究所 風工学分野  
准教授

## ● 優良技術図書案内

# ステンレス鋼の基礎と上手な使い方

根本力男 著 B5判128頁 2,500円＋税

フリーコール 0120-974-250 <https://www.nikko-pb.co.jp/> [netsale@nikko-pb.co.jp](mailto:netsale@nikko-pb.co.jp)