

日本型洋上風力発電を成功に導く 風車ウエイク現象の理解とその評価・予測技術 —大型風洞設備の重要性—

九州大学応用力学研究所／再生可能流体エネルギー研究センター 内田 孝紀

1. はじめに

一般的に、風車ブレードの回転に伴い、その下流側には「風車ウエイク」と呼ばれる風速欠損領域が形成される。複数の風車群から構成される大規模洋上ウインドファームでは、風車ウエイクが相互干渉し、下流側の風車群の発電量低下や風車内外の突発的な故障や事故に繋がる恐れがある(図1を参照)。よって、風車群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(強非線形流動現象)を事前に数値予測し、ウインドファーム全体の経済性と各風車の耐久性に関する最適設計をウインドファームの建設前に完了しておく必要がある。こうした社会的要請を受け、日本の気象(風況)・海象(波浪, 潮流)に調和した、日本版大規模洋上ウインドファームを早期に、かつ適切に実現するためには、融資適格性評価や低コスト化に直結する日本独自の風車ウエイクモデルの開発と、その予測精度の検証が最重要課題であった。内田研究室では、風車ウエイク現象の理解とその評価・予測技術の確立へ向けた研究開発を実施している。本稿では、大型風洞設備を活用した最新の研究成果を紹介する。



(a)風洞建屋の正面図



(b)風洞建屋の背面図

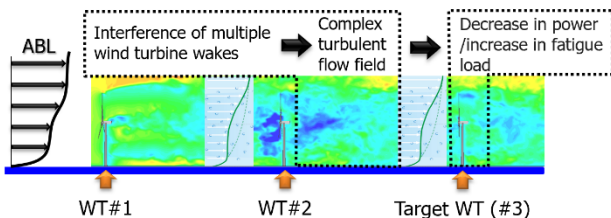
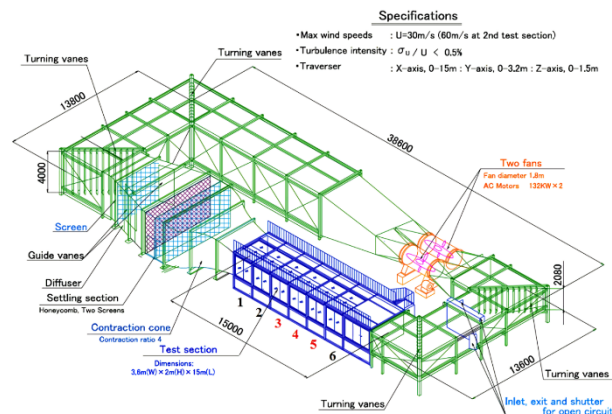


図1 研究開発のモチベーション(着床式)

2. 大型風洞設備の概要

内田研究室の地球大気動態シミュレーション装置(大型境界層風洞)は、強風による災害の防止や地球環境に関する研究に資するため、1998年3月に設置された(図2を参照)¹⁾。本風洞は回流式で2機の送風機で駆動されている。測定胴の大きさは縦2.0m、横3.6m、長さ15.0mである。最大風速は30.0m/sである。さらなる強風が必要な際は、測定胴内に第2の縮流胴・測定胴・拡散胴を設け、測定胴を1/2に縮流することで60.0m/sの最大風速を得ることが可能である。本風洞は巨大な建造物に対する風の影響や、高速に運動する車両や航空機などの運動物体に対する空力特性を調べるための主要な手段となっている。近年では、(陸上/洋上における)風力エネルギーの有効利用の研究開発に活用されている。



(c)大型境界層風洞の全体図

図2 地球大気動態シミュレーション装置(大型境界層風洞)

3. 洋上風力発電設備の形式

一般的に、洋上風力発電の設置方法は、「着床式」と「浮体式」に大別される(図3を参照)。着床式は水深60m未満の海域に適しているとされ、海底に固定した基礎に風車を設置する方式である。モノパイル型およびジャケット型が一般的である。一方、水深60mを超える際には浮体式にコスト優位性があると言われている。浮体式は浮体構造体に風車を設置する方式であり、主にセミサブ型、バarge型、スパー型の3種類に分類される。以降の章では、大型風洞設備を用いた着床式と浮体式における風車ウエイク研究(JSTやNEDOの大型プロジェクト)の研究成果を紹介する。

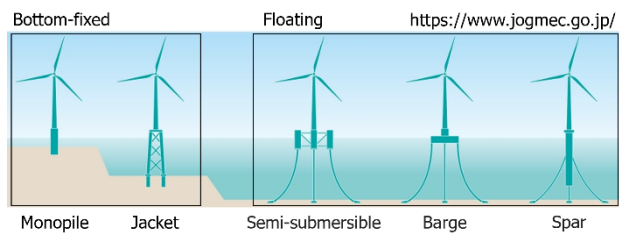


図3 洋上風力発電設備の形式

4. 着床式風車のウエイク研究(JSTプロジェクト)

当研究室は、科学技術振興機構(JST)の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の産学共同(本格型)に2期連続で採択された。本プロジェクトでは、ENEOSリニューアブル・エナジー株式会社、東京ガス株式会社とともに2022年～2024年度の計3年6か月の研究開発を実施した(①「洋上風力発電の採算性と耐久性の最適設計に資する日本型ウエイクモデルの開発と大型商用風車を活用した精度検証(JPMJTR211C)」/②「洋上ウインドファームの採算性と耐久性の最適設計に資する日本型ウエイクモデルの開発と社会実装(JPMJTR221C)」)。

本プロジェクトでは、福岡県北九州市響灘地区に位置する響灘ウインドエネルギーリサーチパークが研究対象であった。ここには、3.3MW級の大型商用風車が2基設置されている(図4を参照)。

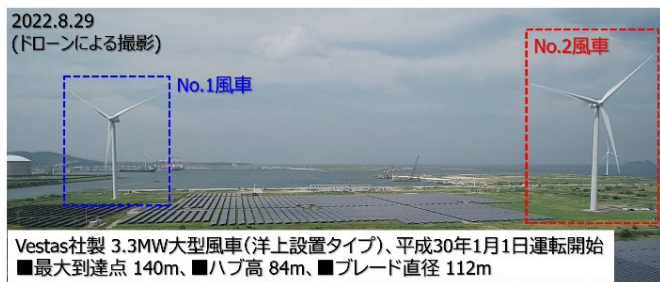


図4 本研究で対象とした風力発電設備(3.3MW×2基)

図5には、ナセル後方から放出した煙による風車ウエイク現象の可視化事例を示す。図6には、図5と同じ条件で実施した数値流体シミュレーションの結果を示す²⁻⁵⁾。数値流体シミュレーションは、風洞実験の結果を良好に再現している。

本プロジェクトでは、風車ブレードの回転数を制御可能な精密風車模型を複数台製作した。これらの風車模型を用いて、風洞内に洋上ウインドファームを模擬し、特に下流側に設置された風車の発電性能や風荷重などを系統的に計測し

た。さらに、風車ウエイクの制御手法(ウエイクステアリング)の検討も実施した(図7を参照)。

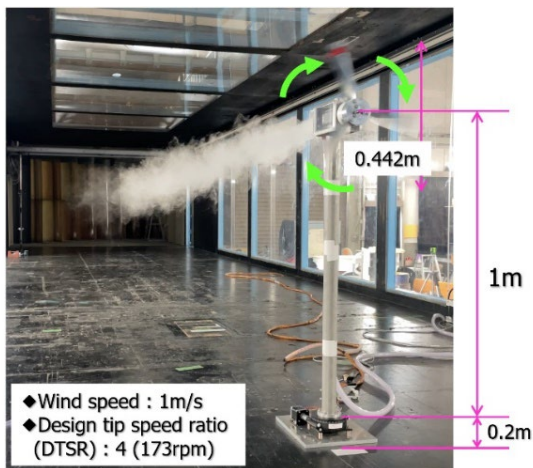


図5 ナセル後方から放出した煙による可視化(Front View)

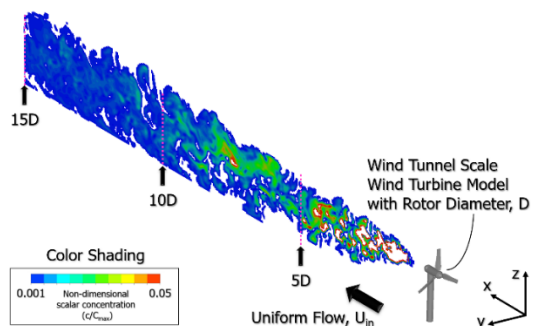


図6 風洞実験を再現した数値シミュレーションの結果

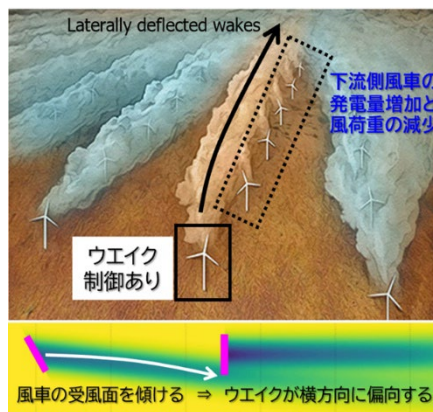


図7 ウエイクステアリングの事例(Front View)

先にも述べたように、本研究では5本の熱線流速計を固定する治具を製作し、これを移動させて膨大な気流計測データを取得した。図11に示すように、計測時刻が異なる膨大なデータに対し、独自開発したデータ処理手法を適用し、全計測データを同時刻に計測されたようなデータに補正した。事前検討により、風車模型のトルクの時間変化が周期性を有することに着目し、トルク(発電性能)と気流計測を同時収録した。その後、ピッチ動揺の1周期(=0.9sec)に対応する風速の時刻歴波形を複数個抽出し、位相平均を施した。抽出する風速の時刻歴波形の個数についても事前検討を行い、約20個であれば流れ場は準定常状態であること、統計処理の結果に有意な差異が生じないことを確認した。

本研究では、高解像度($\Delta y = \Delta z = 0.05D$, D は風車直径)の気流計測データの取得と、独自開発したデータ分析手法により、ピッチ動揺に起因した風車ウエイク現象の解明に成功した。その結果を図12に示す。ピッチ動揺の1周期(=0.9sec)を9分割し、その代表的な時刻の可視化結果を示している。時間の経過とともに、ウエイク領域が下方に移動し、最初の位置に戻ってくる様子が見て取れる。アニメーションを作成し、これを注意深く観察すると、風車ウエイク領域が上下方向に周期的に変化する様子が確認された。今回得られた結果から、図13に示すように、ピッチ動揺に起因して風車ウエイクの鉛直方向蛇行(Vertical meandering)が出現していることが明確に示唆された。

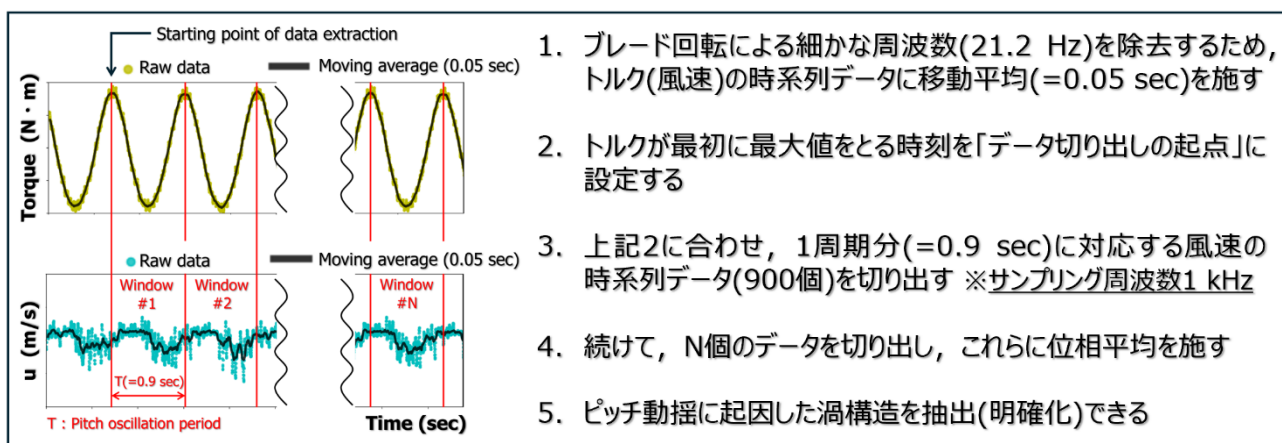


図11 ピッチ動揺に起因した風車ウエイク現象を解明するために独自開発したデータ処理手法

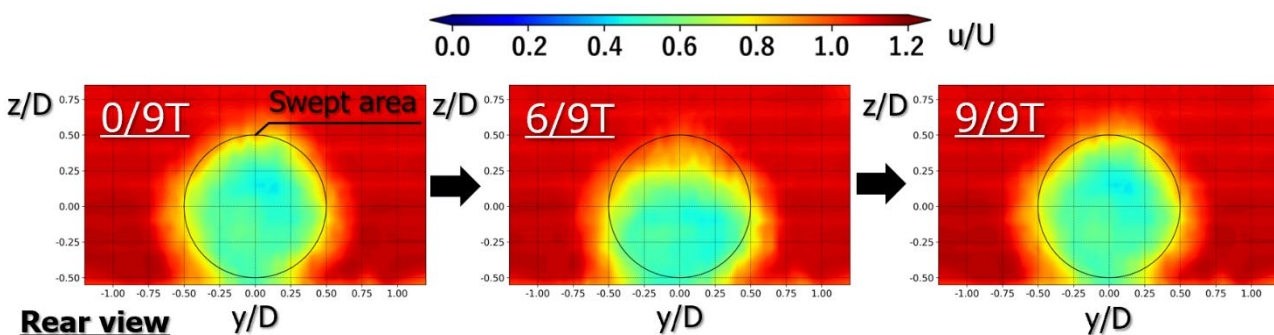


図12 風車模型背後(5D, Dは風車直径)におけるデータ切り出し・位相平均等を施した気流計測データの可視化

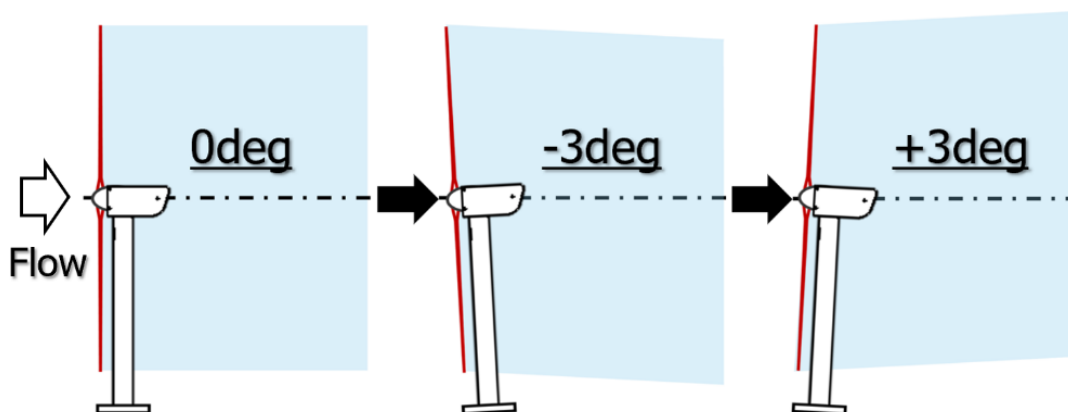
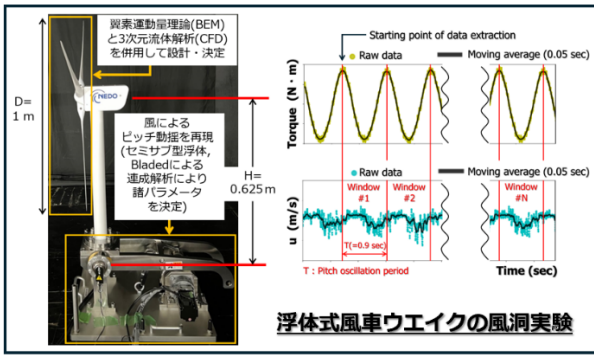
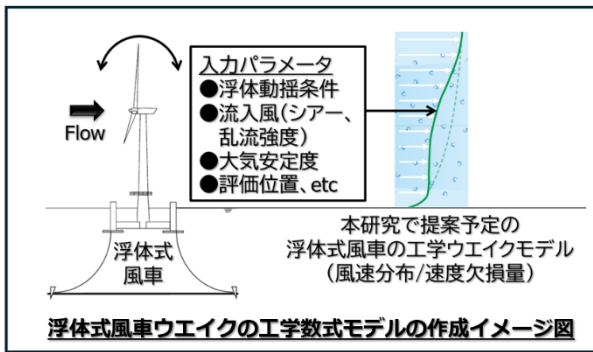


図13 ピッチ動揺に起因して出現するウエイクの鉛直方向蛇行(Vertical meandering)の模式図

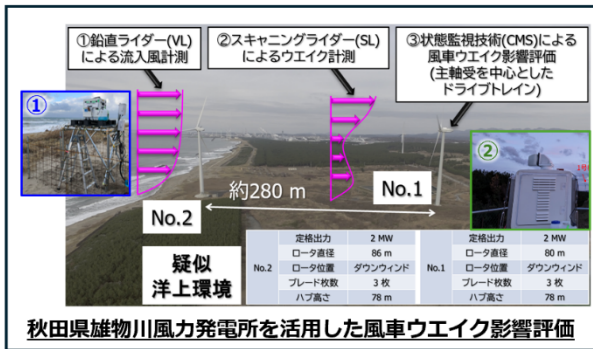
開発項目A, B, C : 風洞スケール



開発項目D : サロゲートモデル



開発項目E : 実機スケール



- A : 浮体式風車ウエイクの風洞実験技術の開発
- B : 大型風車のラボスケール風車模型の開発
- C : セミサブ型に対応可能なラボスケール浮体動揺加振装置の開発
- D : 浮体式風車ウエイクの工学数式モデルの開発
- E : 状態監視技術を活用した風車ウエイク影響評価法の開発

図14 各研究開発項目の連携イメージ

図14には、本プロジェクトで実施している全研究開発項目(A～E)を示す。各研究開発項目は、同図に示すように密接に連携している。また、本プロジェクトでは研究開発推進委員会を設置し、各分野の専門家からのコメント等を反映しながら進めている。本研究を遂行することで、大規模浮体式洋上ウインドファームの技術的課題が順次解決され、その導入拡大に多大な貢献を果たすことが

期待される。

6. おわりに

内田研究室が推進している風車ウエイク研究は、風力エネルギー利用(再エネ分野)に留まらず、気象防災・減災分野への展開も開始されている。

一つは、科学技術振興機構(JST)のムーンショット型研究開発事業である。本プロジェクトでは、大規模洋上ウインドファームからの風車ウエイク現象(クラスタウエイク現象)を活用して、線状対流系豪雨の抑制可能性をスーパーコンピュータによる大規模ウエイクシミュレーションにより検討している。

もう一つは、国土交通省(MLIT)の「交通運輸技術開発推進制度(短期実証型)」である。本プロジェクトでは、北海道の稚内空港を研究対象とし、風車ウエイク現象を活用した滑走路の横風低減・制御に関する調査・研究を実施している。

風車ウエイク研究には、大型風洞設備が不可欠であり、我々は今後も精力的にその活用を進めていく。

謝辞

本紙に掲載した研究成果は、科学技術振興機構(JST)による支援(JPMJTR211C, JPMJTR221C), 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による支援(JPNP14004)によるものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内田 孝紀, 九州大学応用力学研究所の地球大気動態シミュレーション装置(大型境界層風洞), 日本風力エネルギー学会誌, 第48巻, 第1号, pp.57-59, 2024.
- 2) Takanori UCHIDA, Susumu TAKAKUWA, Keiichiro WATANABE, Seiya HASEGAWA, Yoshitaka BABA, Reo MURAKAMI, Masahide YAMAZAKI, and Kunihiko HIDAKA, Numerical visualization of wind turbine wakes using passive scalar advection-diffusion equation and its application for wake management, Wind Engineering, 2022; 46(6): 1870-1887.
- 3) 内田 孝紀, 最新の数値風況シミュレーション技術リアムコンパクトが実現するバーチャルウインドファーム一開発の歴史と将来展望一, 日本風力エネルギー学会誌, 第44巻 第4号, pp.666-671, 2021.
- 4) 内田 孝紀, 最新版リアムコンパクトソフトウェアの紹介と将来展望, 日本風力エネルギー学会誌, 第47巻, 第3号, pp.465-470, 2023.
- 5) 内田 孝紀, 谷山 賀浩, 吉田 忠相, 乾 真規, [技術賞受賞記念解説] 洋上ウインドファームの採算性と耐久性の評価に資する風車ウエイクモデルの研究開発と社会実装, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第43巻, 第2号,

pp.115-120, 2024.

- 6) 内田 孝紀, NEDO先導研究プログラムによる大型風洞設備を用いた浮体式風車ウエイク現象の研究開発, 日本風力エネルギー学会誌, 第48巻, 第3号, pp.407-410, 2024.