

スパコン版リアムコンパクトによる風車ウエイクの相互干渉に関する大規模数値シミュレーション：洋上ウィンドファームへの適用

内田，孝紀
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/7385223>

出版情報：Journal of Wind Energy, JWEA. 49 (2), pp.10-17, 2025. 一般社団法人 日本風力エネルギー学会
バージョン：
権利関係：© 2025 Japan Wind Energy Association



スパコン版リアムコンパクトによる 風車ウエイクの相互干渉に関する大規模数値シミュレーション ー洋上ウィンドファームへの適用ー

Numerical Simulations of Wind Turbine Wake Interactions by Using the Supercomputer Version RIAM-COMPACT - An Application to Offshore Wind Farms -

内田 孝紀*
Takanori UCHIDA

* Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen,
Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

Abstract

In this paper, the supercomputer version of RIAM-COMPACT is applied to an offshore wind farm. In calculations using a virtual offshore wind farm model, we found that when the wind enters from an oblique direction (15 degrees), there is no significant decrease in the wind speed entering the downstream wind turbines. Furthermore, in the case of a full-scale offshore wind farm, it was clearly shown that the trends in the measured data could be reproduced by periodically varying the wind direction within a horizontal cross section.

キーワード: 風車ウエイク, 相互干渉, LES, 洋上ウィンドファーム

Key Words: Wind turbine wake, Interaction, Large-eddy simulation, Offshore wind farm

1. はじめに

著者は、非定常乱流モデルであるLES (Large-Eddy Simulation) に基づいたスパコン版RIAM-COMPACTの高速化チューニングと、それを用いた風車ウエイク解析を実施してきた¹⁾。前報¹⁾では、風洞スケールから実機スケールまでの風車ウエイク解析を行い、平均速度の欠損量の予測精度を明らかにした。

複数の風車群から構成される大規模洋上ウィンドファームでは、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の低下や、風車内外の故障などが生じる可能性がある。よって、風車ウエイクの相互干渉現象を正確に評価・把握することが極めて重要である。これまでの先行研究では、流入風は固定されており、風向変化の影響はほとんど議論されていない。本論文では、スパコン版RIAM-COMPACTで風向変化を考慮可能とした上で、実在する洋上ウィンドファームへ適用した際の計算結果を、実測データ (Scanning Lidar Data) と比較して報告する。

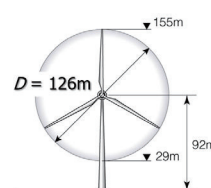
2. 工学ウエイクモデル(実機スケール風車)との比較

最初に、スパコン版RIAM-COMPACTの予測精度を検証するため、工学ウエイクモデル (engineering wake model / analytical wake model) との比較について示

す。Fig. 1には、本研究で対象としたNREL 5-MW風車(ブレード直径126m, ハブ高さ92m)の概要を示す。Fig. 2には、風車のパワー係数とスラスト係数を示す。なお、Fig. 2(b)には2.0, 8.0, 10.0-MW風車のスラスト係数も参考値として掲載した。

本研究では、風車3基が3D (D : 風車ブレード直径)の間隔で直線的に配置している状況を想定した(格子点数は約5,800万点)。計算領域は $15D$ (x) $\times$ $4D$ (y) $\times$ $3.5D$ (z)の空間を有する。なお、各風車の周速比は7.0で固定し、風車ブレードの回転効果はアクチュエータラインモデルにより再現した¹⁾。

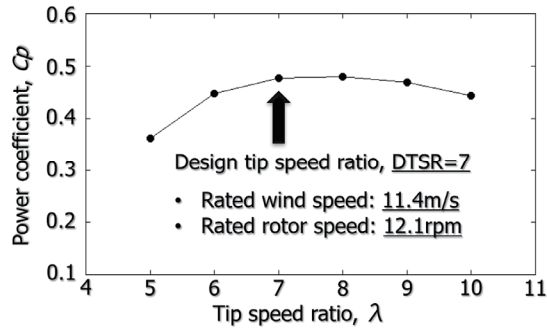
流入条件は、 $N = 10$ のべき乗則に従う平均速度分布を仮定し、簡易化したLundらの方法²⁾を用いて流入変動風(非定常な風速変動)を再現した(総格子点数は約2,900万点, Fig. 3を参照, U_m はハブ高の風速)。



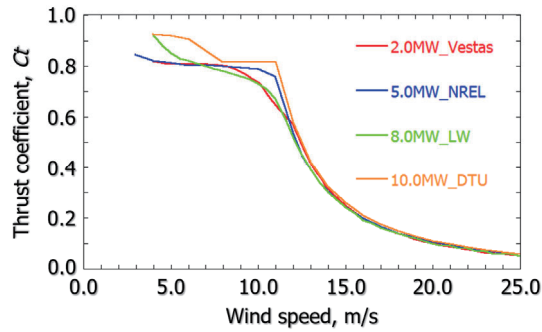
- Tip speed ratio, $\lambda = 7.0$
- Tip speed = 80m/s
- Rated wind speed = 11.4m/s
- Rated rotational speed = 12.1rpm

Fig.1 Outline of the utility-scale wind turbine (NREL 5-MW) targeted in the current study

* 会員, 九州大学応用力学研究所(〒816-8580 春日市春日公園6-1, 連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)
(原稿受付: 2025年2月5日)

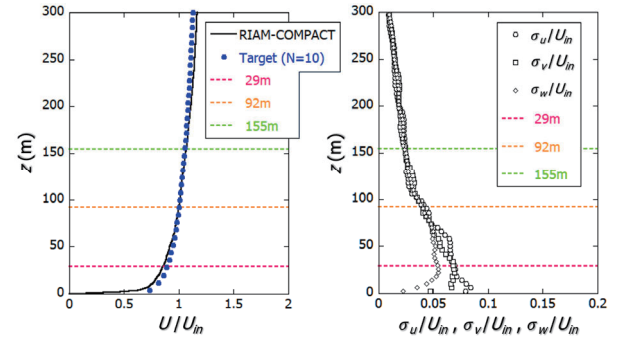


(a) Power coefficient curve



(b) Thrust coefficient curve

Fig.2 Performance for the NREL 5-MW wind turbine



(a) Mean velocity (b) Standard deviation

Fig.3 Inflow characteristics

at the measurement station A (see Fig.4)

Fig.4には、主流方向(x)における速度成分の空間分布(時間平均場, side view)を示す. 最も下流に位置する風車に注目する. 流れの可視化結果から、最も下流に位置する風車は、上流側に位置する2基の風車がそれぞれ形成するウエイクの影響(ウエイクの相互干渉現象)を直接的に受けている様子が明確に観察される.

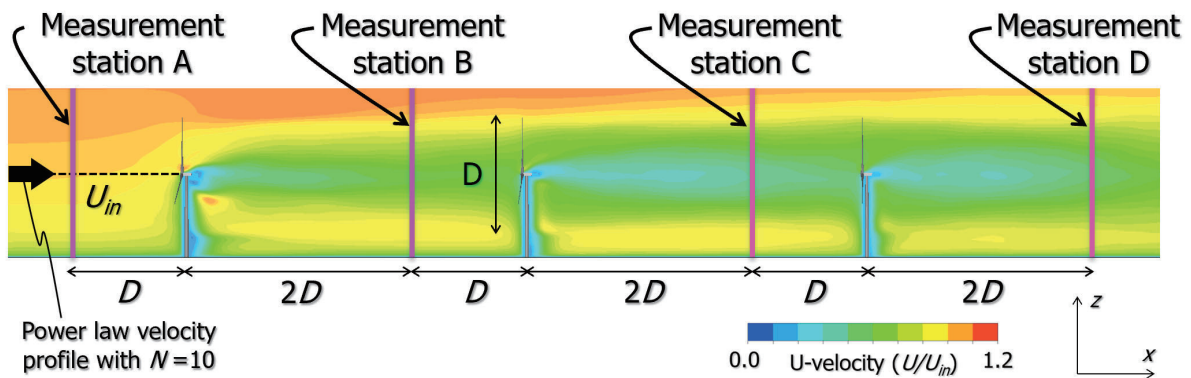
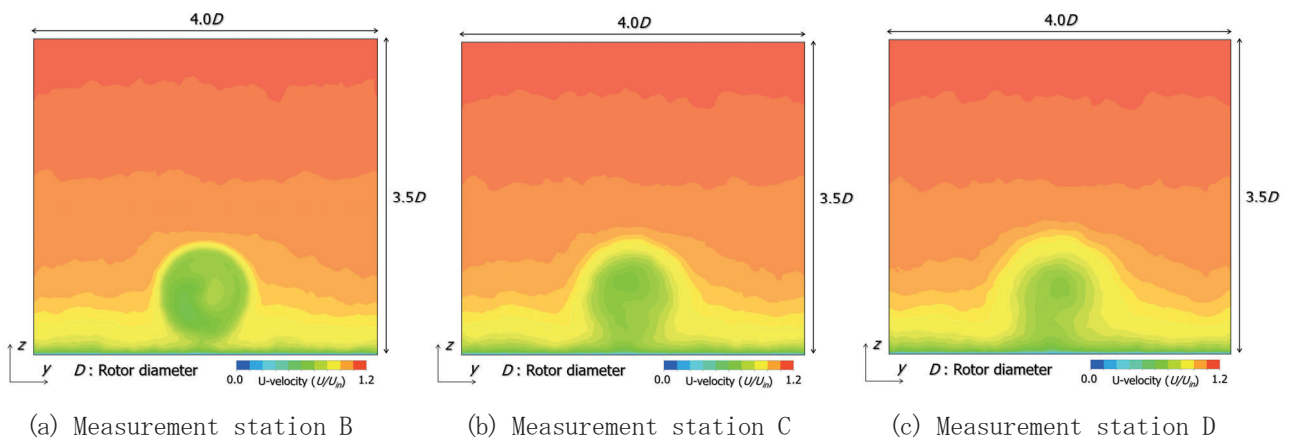


Fig.4 Side view of the streamwise(x) velocity component, time-averaged flow field



(a) Measurement station B

(b) Measurement station C

(c) Measurement station D

Fig.5 Rear view of the streamwise(x) velocity component, time-averaged flow field

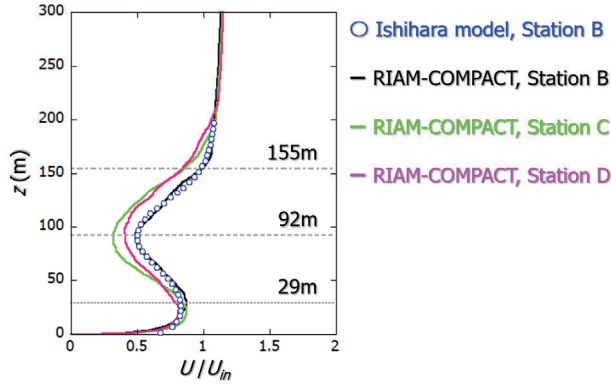


Fig.6 Comparison of streamwise(x) velocity component at measurement stations B, C, D

Fig.5には、Measurement station B, C, Dにおける主流方向(x)における速度成分の空間分布(時間平均場, rear view)を示す。ウエイク領域の大きさや速度欠損量に有意な差異が生じている。

Fig.6には、Measurement station B, C, Dにおける工学ウエイクモデル³⁾との比較を示す。Measurement station Bでは、両者の結果は良好な一致を示している。一方、Measurement station C, Dにおける計算結果は、Measurement station Bの計算結果と差異が生じている。これは、先に述べたように、風車ウエイクの相互干渉現象(非線形流動現象)に起因していると推測される。

なお、最近ではプログラミング言語の1つであるPython(パイソン)に基づき、種々の工学ウエイクモデルが公開・提供されている。例えば、デンマーク工科大学(DTU)のPyWake⁴⁾、アメリカの国立再生可能エネルギー研究所(NREL)のFLORIS⁵⁾、ドイツのフラウンホーファー・風力エネルギーシステム研究所(IWES)のFOXES⁶⁾がある。

3. 仮想洋上ウィンドファームを対象とした性能評価

次に、風車の離隔距離を一般的な洋上ウィンドファームよりも短くした仮想洋上ウィンドファームモデル(Fig. 7)を構築し、スパコン版RIAM-COMPACTを適用した。本章では得られた結果について議論する。

最初に1基、ランダムに配置された12基の風車を対象とした計算を行った。Fig. 8およびFig. 9には、風車ハブ高さ(92m)位置での主流方向(x)の速度成分と渦度の空間分布(瞬間場, top view)を示す。両ケースともに計算は正常に終了することを確認した。ここで、Fig. 9に示すランダムに配置された12基の風車を対象とした計算では興味深い現象が得られた。Fig. 9(a)に点線で囲んだ領域では、縦渦構造を有す

る翼先端渦(tip vortex)が形成されていることに起因し、局所的な増速域(gap flow)が出現した。

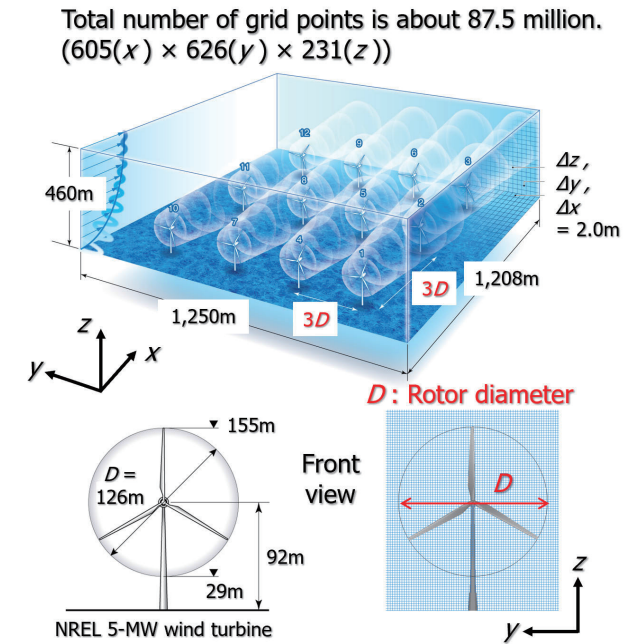
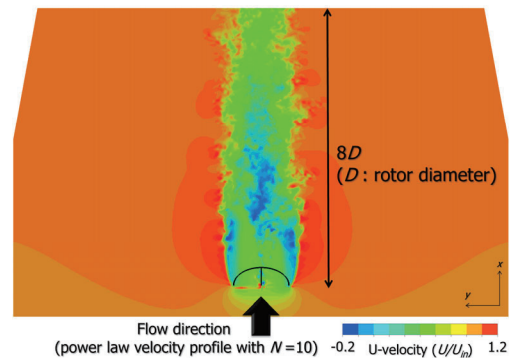
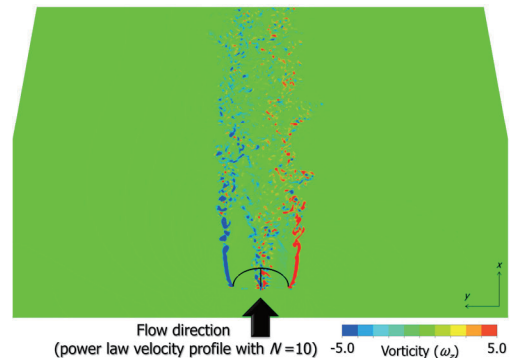


Fig.7 Computational domain, grid, and resolutions for a virtual offshore wind farm

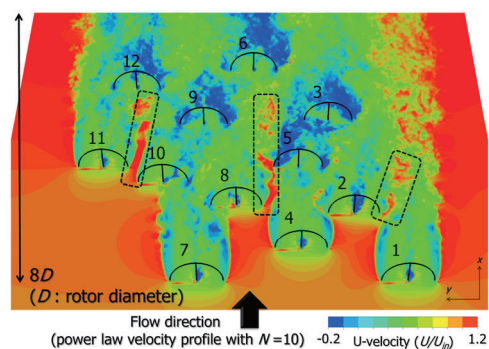


(a) Streamwise(x) velocity component

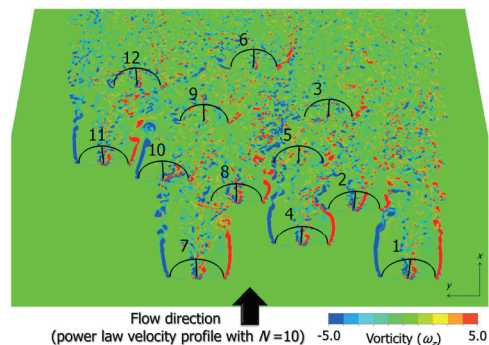


(b) Streamwise(x) vorticity component

Fig.8 Top view of the instantaneous flow field for one wind turbine at the hub height(92m)

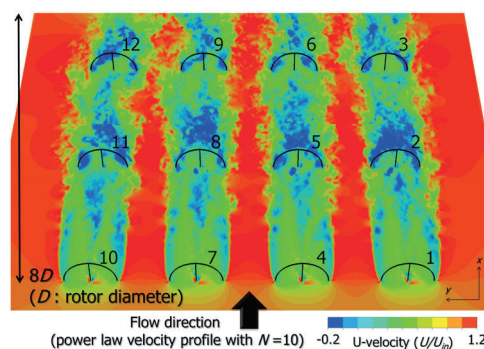


(a) Streamwise(x) velocity component

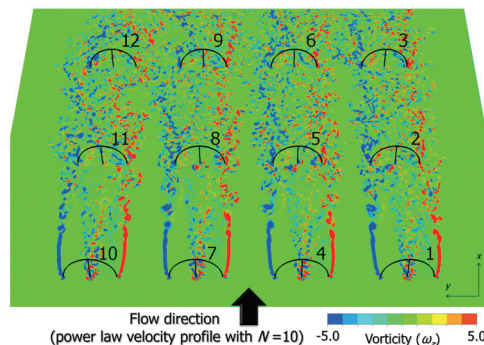


(b) Streamwise(x) vorticity component

Fig.9 Top view of the instantaneous flow field for 12 wind turbines at the hub height (92m)



(a) Streamwise(x) velocity component



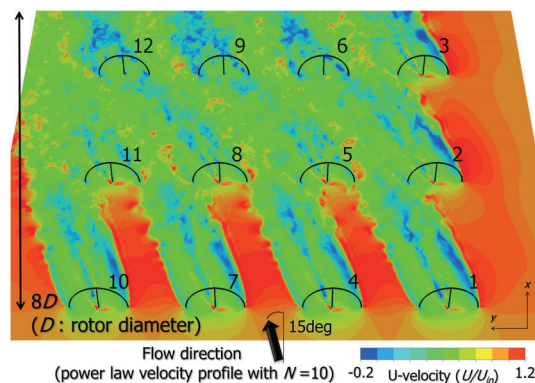
(b) Streamwise(x) vorticity component

Fig.10 Top view of the instantaneous flow field for 12 wind turbines at the hub height (92m)

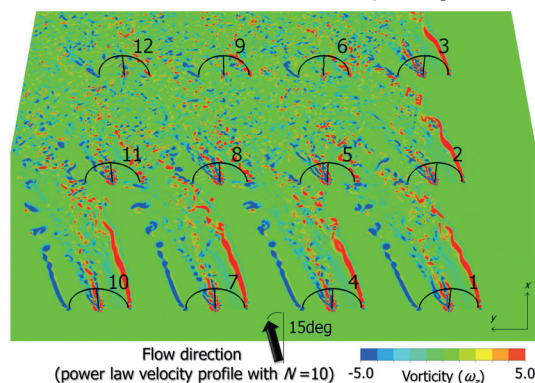
次に、Fig. 7に示す風車配置を対象とした計算を実施した。特に流入風向の影響に注目し、ウィンドファームに斜めから流入する風向($\alpha = 15.0\text{deg}$)の計算も実施した。得られた結果をFig. 10($\alpha = 0\text{deg}$)およびFig. 11($\alpha = 15.0\text{deg}$)に示す。両ケースにともに、各風車からウエイク領域が形成されている。2列目の風車群下流ではウエイク現象が相互に干渉し、3列目の風車群の周辺では非常に複雑な乱流場が形成されているのが明確に確認される。

流入風向の違いが風車ウエイクの相互干渉領域に与える影響を視覚的に検討するため、スカラー濃度場を用いた新しい可視化手法を適用した⁷⁾。本可視化手法⁷⁾は、注目する風車が形成するウエイクの影響範囲を正確に把握するのに極めて有効である。ここでは、スカラー濃度場の煙源をNo. 1風車背後に設定した。得られた結果をFig. 12に示し、これを詳細に考察する。Fig. 12(b)に示す $\alpha = 15.0\text{deg}$ の場合は、Fig. 12(a)に示す $\alpha = 0\text{deg}$ の場合と比較し、No. 1風車が形成するウエイク領域の影響範囲が拡大している(図中に点線で囲んだ領域)。

本研究では、各風車周辺に形成される風況特性を定量的に評価するため、No. 1～No. 3の風車に注目し、風車に流入するスカラー水平風速の時間変化を考察



(a) Streamwise(x) velocity component



(b) Streamwise(x) vorticity component

 Fig.11 Top view of the instantaneous flow field at the hub height (92m) in the case of $\alpha = 15.0\text{deg}$

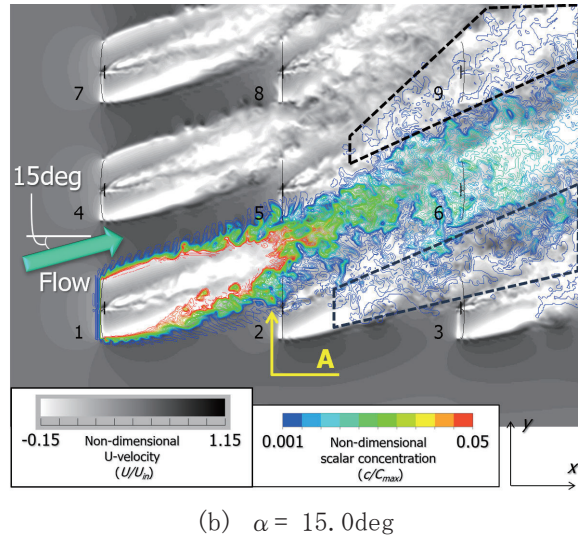
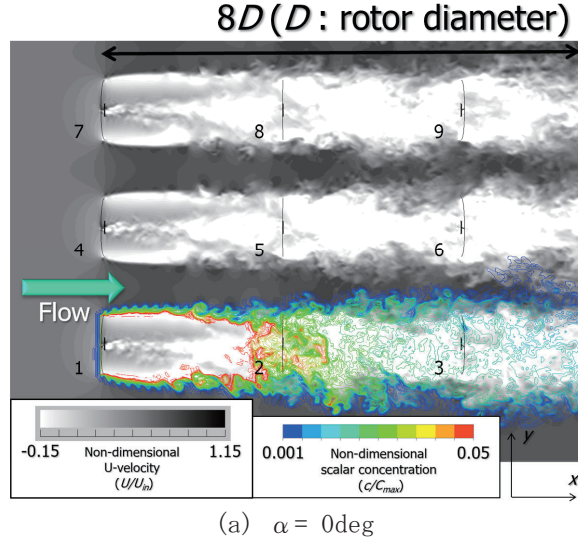


Fig.12 Top view of the stream-wise(x) velocity component and passive scalar fields, instantaneous flow field

した (Fig. 13). 評価した無次元時間 $T^* (=T/(D/U_{in}))$ は25までとした. 本研究では, 計算開始直後の挙動に非物理的な数値振動がないこと示すため, $T^* = 0$ からグラフ化した. 予想されるように, 上流に位置するNo. 1風車 (Fig. 13(a)) では, 流入風向の違いによらず両ケースの結果はほぼ同じ傾向を示す. これに対し, No. 1風車の下流に位置するNo. 2およびNo. 3風車では, 興味深い結果を得た (Fig. 13(b), (c)). 図中に赤色で示す $\alpha = 0\text{deg}$ の場合には, No. 2風車はNo. 1風車が形成するウエイク影響を, No. 3風車はNo. 1およびNo. 2風車が形成する相互干渉したウエイク影響を直接的に受けている. これに起因して大きな速度欠損が生じている. 一方, $\alpha = 15.0\text{deg}$ の場合には, No. 2およびNo. 3の2基の風車ともにスカラー水平風速の時間変化に大幅な低下は出現せず, No. 1風車よりも

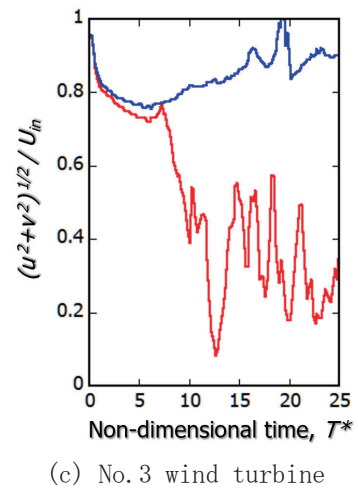
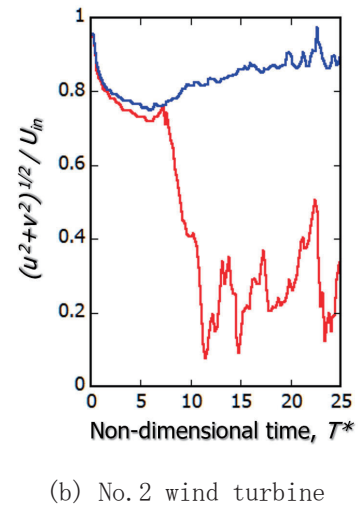
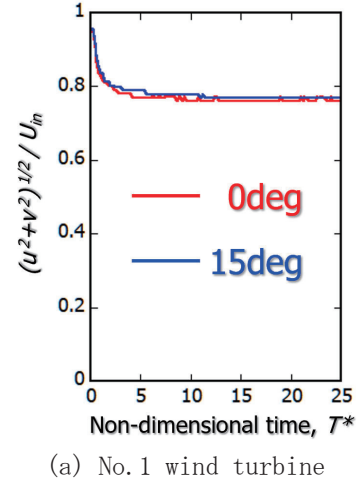


Fig.13 Comparison of the scalar horizontal wind speeds immediately upstream of the wind turbines

風速が局所的に増加する結果を得た. この現象は $T^* = 25$ 以降においても維持された. ここでは, No. 2風車に着目し, そのメカニズムを考察する. 改めて,



Fig.14 Alpha Ventus Offshore Wind Farm (5-MW×12), Germany's first offshore wind farm

Fig. 12(b)中に黄色の矢印「A」で示すNo.2風車の上流側領域に注目頂きたい。この領域では、No.1風車から形成された翼先端渦(tip vortex)に伴う局所的な増速流が通過している。本流動現象に起因してNo.2風車に流入するスカラー水平風速が局所的に増速していると推測される。これらの知見は、現在我々の研究グループで推進している静的な風車ウエイク制御(ヨーステアリング)の研究開発にも繋がる。

4. 実スケール洋上ウインドファームにおける精度検証

スパコン版RIAM-COMPACTをFig. 14に示すAlpha Ventus Offshore Wind Farm (Germany)に適用した。本研究では、No.7風車のウエイク領域内の風速分布(風車ハブ高さ(91.5m))に関して、実測データ(Scanning Lidar Data)と比較を行った。実測データは、Fig. 15に赤色の点線で示す領域内において、Galion G4000 Scanning Lidarを用いて取得された⁸⁾。

一方、数値シミュレーション(空間解像度は各方向1m、格子点数は約1億8,300万点)では、風向を固定した場合と、水平断面内において風向を周期的に変化させた場合を実施した($\alpha = 0, 2.5, 5.0, 6.25, 7.5,$

10.0deg の計6ケース)⁹⁾。Fig. 16には、 $\alpha = 6.25\text{deg}$ における計算結果(風車ハブ高さにおけるスカラー水平風速の可視化)を示す。Fig. 16(a)に示す瞬間場に注目する。風車下流に形成されたウエイクはx-y断面内を水平的に大きく蛇行して揺らいでいる様子が見て取れる。このようなウエイクの非定常流動現象を反映して、Fig. 16(b)に示す時間平均場の結果では、風車下流に向かってウエイク領域が水平方向に徐々に拡大する結果が得られた。Fig. 17には、Fig. 16(b)に点線で示す風車ハブ高さにおけるスカラー水平風速の比較を示す。風向角度を徐々に変化させることにより、丸印で示す実測データの傾向をほぼ再現できる数値計算上の設定が得られることが示された。本研究では、風向角度 $\alpha = 6.25\text{deg}$ の計算結果が実測データと最も良好な一致を示した。今後は、別のサイトでも同様な検証を行い、 α の最適値を見出すことが課題である。

風車ウエイクの相互干渉現象を議論するため、Fig. 14に示す風車3基(No.7, No.8, No.9)を対象とした計算を実施した。 $\alpha = 6.25\text{deg}$ の風向変化を適用するとともに、より現実的な状況を模擬するため、流入断面付近に乱流格子¹⁰⁾を配置し、流入変動風も同時に考慮した。各風車の周速比は7.0で固定した。Fig. 18(a)には、風車ハブ高さにおけるスカラー水平風速の可視化結果(瞬間場)を、Fig. 18(b)にはこれに対応した時間平均場の結果を示す。Fig. 18(a)の瞬間場に注目する。各風車の下流に形成されたウエイクは大きく蛇行しながら流下し、かつそれらは相互に干渉している。Fig. 19には、Fig. 18(b)に点線で示すスカラー水平風速(時間平均値)を示す。先頭のNo.7風車とは異なり、No.8とNo.9の風車背後では、より大きな速度欠損領域が発生する結果を得た。さらに、速度欠損のピーク位置が風車に近づき、そこからの速度回復も上流風車(No.7風車)よりも早い結果とな

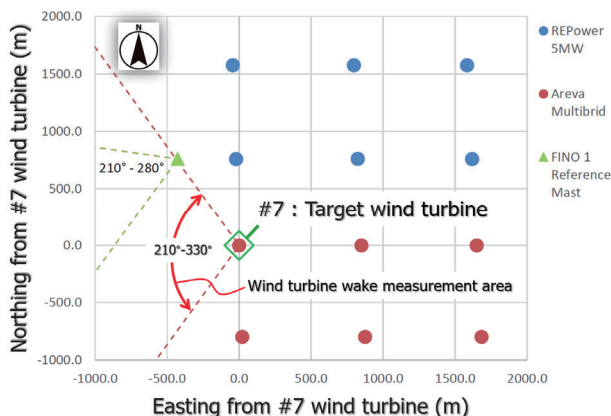
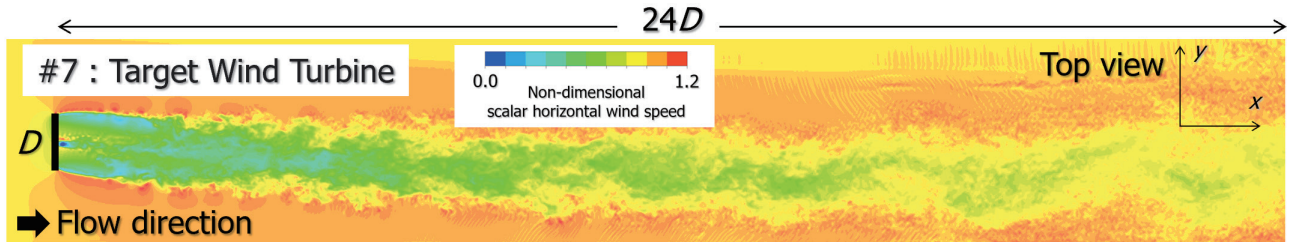
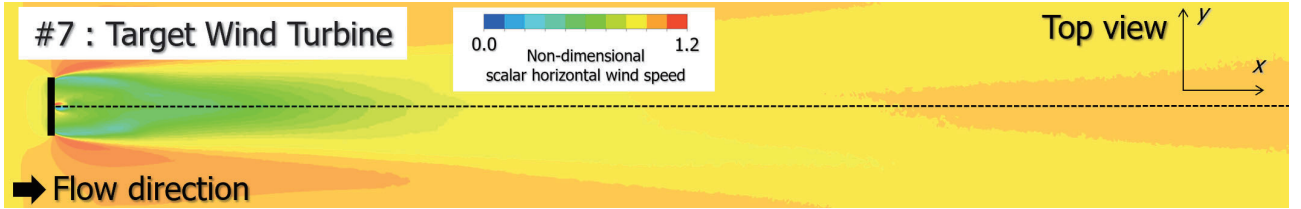


Fig. 15 Wake measurement area of No.7 wind turbine



(a) Instantaneous flow field



(b) Time-averaged flow field

Fig.16 Top view of the scalar horizontal wind speed at the hub height(91.5m)

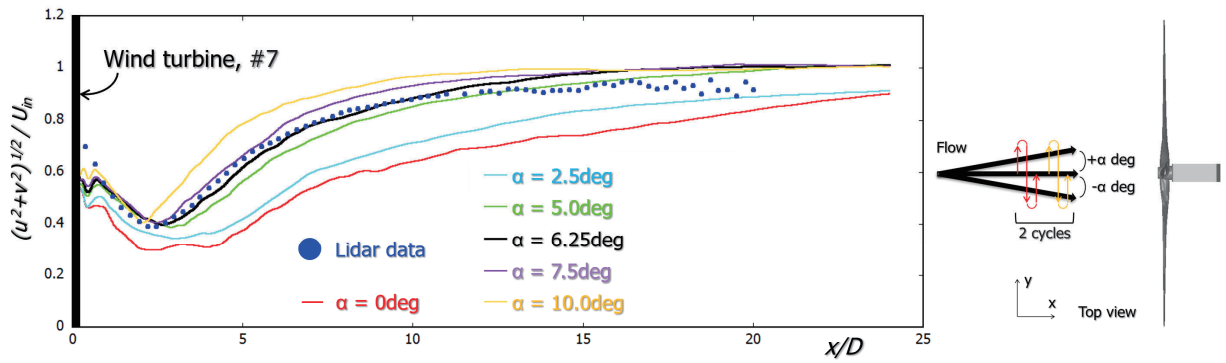
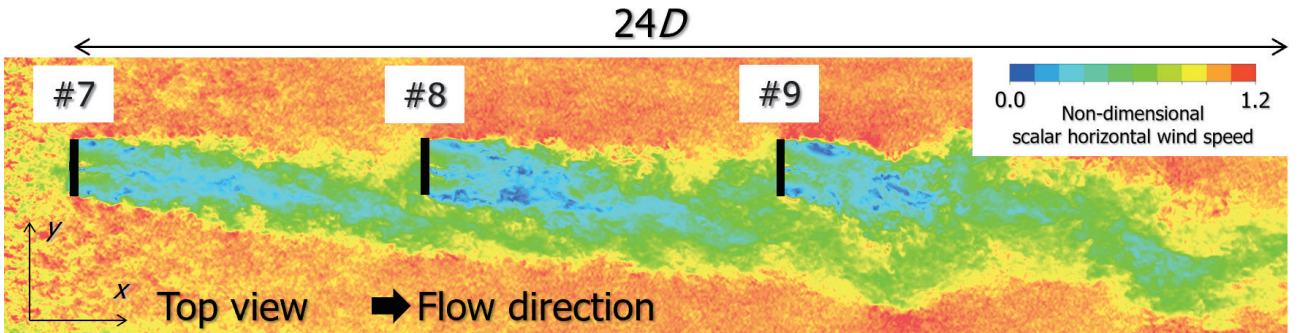
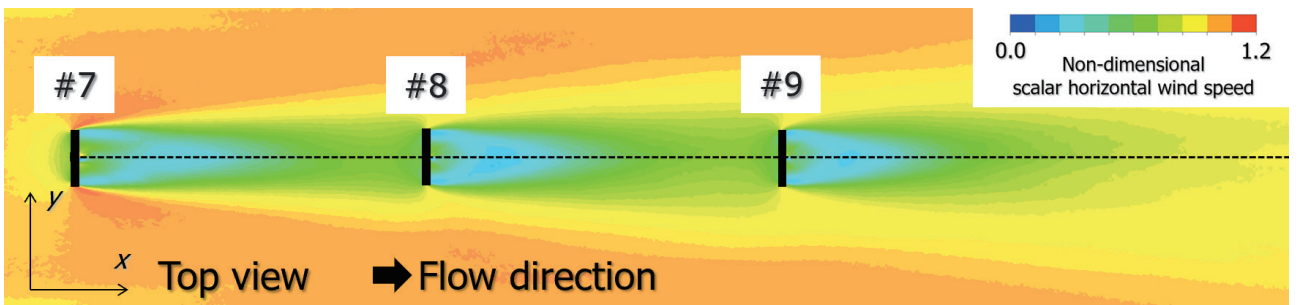


Fig.17 Comparison of the scalar horizontal wind speeds at the hub height(91.5m), No.7 wind turbine



(a) Instantaneous flow field



(b) Time-averaged flow field

Fig.18 Top view of the scalar horizontal wind speeds at the hub height(91.5m)

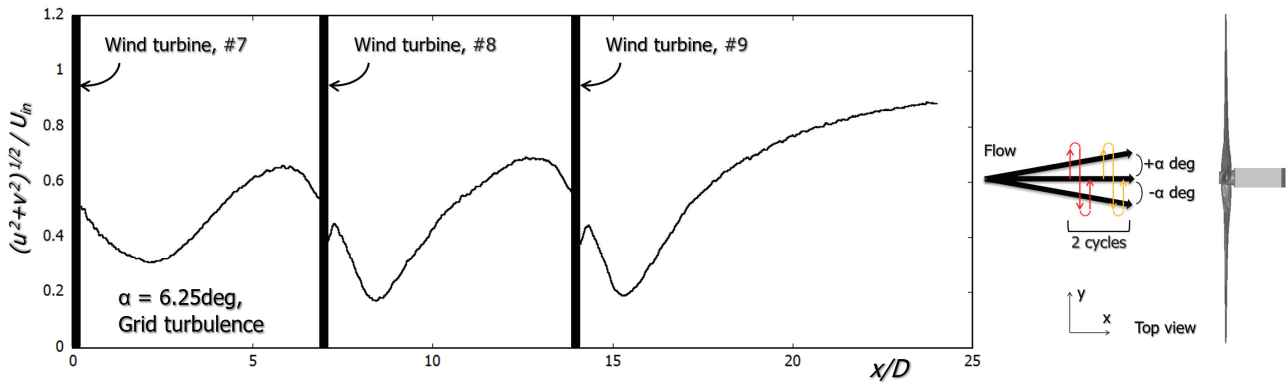


Fig.19 Distribution of the scalar horizontal wind speeds on the center line of No.7, No.8, and No.9 wind turbines, hub height (91.5m)

った。一連の流動現象は、風車ウエイクの相互干渉とそれに伴う乱流混合に起因していると推測される。

5. おわりに

本論文では、著者が開発を進めているスパコン版RIAM-COMPACTを洋上ウィンドファームへ適用した。仮想洋上ウィンドファームモデルの計算では、ウィンドファームに斜めから流入する風向 ($\alpha = 15.0\text{deg}$) の場合では、下流側風車群へ流入する風速に大きな速度低下が発生しないという興味深い結果を得た。さらに、実スケール洋上ウィンドファームを対象にした場合では、水平断面内における風向角度を徐々に変化させることにより、実測データの傾向をほぼ再現できる数値計算上の設定が得られることが明確に示された。

今回の知見を踏まえ、スパコン版RIAM-COMPACTの実務利用も視野に入れ、より一層の研究開発を推進する。

謝 辞

本研究は、文科省の「富岳」成果創出加速プログラム「スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」に加え、JST の委託業務 (JPMJTR221C, JPMJTR211C), JSPS科研費21H01574, NEDOの委託業務 (JPNP14004) の支援を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 内田 孝紀, 小野 謙二, 飯田 明由, 吉村 忍, 加藤 千幸, 山出 吉伸, 今村 博, 植田 祐子, スパコン版リアムコンパクトによる風車ウエイクの相互干渉に関する大規模数値シミュレーション—ウエイク領域内の平均風速欠損量の予測精度検証—, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 45, No. 4, pp. 71-82, 2022.
- [2] Lund, T. S., Wu, X. and Squires, K. D., Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulations, *Journal of Computational Physics*, Volume 140, Issue 2, 1998, pp.233-258.
- [3] 石原 孟, 銭 国偉, 風車後流の数値予測と解析モデルの提案, 第24回風工学シンポジウム論文集, 151-156, 2016.
- [4] <https://topfarm.pages.windenergy.dtu.dk/PyWake/>, Access on April 25, 2025.
- [5] <https://www.nrel.gov/wind/floris.html>, Access on April 25, 2025.
- [6] <https://github.com/FraunhoferIWES/foxes>, Access on April 25, 2025.
- [7] Uchida, T., Takakuwa, S., Watanabe, K., Hasegawa, S., Baba, Y., Murakami, R., Yamazaki, M. and Hidaka, K., Numerical visualization of wind turbine wakes using passive scalar advection-diffusion equation and its application for wake management, *Wind Engineering*, July, 2022.
- [8] Gallacher, D. and More, G., Lidar measurements and visualisation of turbulence and wake decay length, *European Wind Energy Association Conference and Exhibition 2014*, EWEA 2014.
- [9] Uchida, T. and Gagnon, Y., Effects of continuously changing inlet wind direction on near-to-far wake characteristics behind wind turbines over flat terrain, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Volume 220, January 2022.
- [10] 大屋 裕二, 中村 泰治, 渡辺 公彦, 格子乱流の特性 : 自己回帰法を用いたスペクトル計算について, 応用力学研究所所報, 57, pp. 207-216, 1982.