

2次元版CFD Porous Disk Wake Modelの開発とGPUシミュレーション：ドイツAlpha Ventus洋上風力発電所の実測データの再現性について

内田，孝紀
九州大学応用力学研究所

澁谷，光一郎
九州大学大学院総合理工学府：社会人博士課程2年

<https://hdl.handle.net/2324/7432691>

出版情報：Proceedings of Japan Wind Energy Symposium. 45, pp.133-136, 2023. 日本風力エネルギー学会
バージョン：
権利関係：© 2023 JWEA



2次元版CFD Porous Disk Wake Modelの開発とGPUシミュレーション

ードイツAlpha Ventus洋上風力発電所の実測データの再現性についてー*

Development of 2D version CFD Porous Disk Wake Model and GPU simulation

ー Reproducibility of measured data at the Alpha Ventus offshore wind farm in Germanyー

内田 孝紀^{*2} 澁谷 光一郎^{*3}

Takanori UCHIDA and Koichiro SHIBUYA

1. はじめに

一般的に、風車ブレードの回転に伴い、その下流側には広範囲にわたって、風車ウエイクと呼ばれる風速の欠損領域が形成される。風車が1基(単基)の場合でさえ、風車ウエイク内の流動現象は非常に複雑な様相を呈する。現在、日本各地の沿岸域で検討が開始されている着床式の大規模洋上ウインドファームでは、風車ウエイクが相互に干渉し合い、下流側の風車群に直接的な影響を与えることを考慮しなければならない。具体的には、当初期待した発電量が得られないことや、風車内外の突発的な故障や事故である。そのため、各風車から形成される風車ウエイク現象とその相互干渉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評価や各風車の耐久性評価をウインドファームが建設される前に実行する必要がある。ここで要求される風車ウエイク現象の予測精度は、バンカビリティ評価に耐え得るものでなければならない。

本研究の最終目的は、大学主導の高信頼性・風車ウエイクモデル (Industrial Wake Model) を早急に開発し、日本特有の気象・海象条件に調和した①風車配置の最適化、②風車ウエイク制御による発電量の最大化／風荷重の最小化、③効率的な運用管理と保守点検

(O&M)を実現することである。すなわち、風車ウエイク研究は洋上風力分野における最重要課題であり、日本における大規模洋上風力発電の成功の鍵である。

本研究では、計算時間の大幅な短縮化を図るため、著者らが開発した3次元CFD Porous Disk Wake Model [1, 2]の2次元CFDへの適用と、GPUシミュレーション (Linux-OpenACC, Windows-CUDA)の導入を検討した。既存の工学ウエイクモデルの結果[3, 4]、ドイツで初めてのオフショア・ウインドファーム(大規模洋上風力発電所)であるAlpha Ventus Offshore Wind Farm (図1を参照)で取得された実測データ(Scanning Lidar Data)との比較を紹介する[5]。このサイトには、5MWの大型風車が12基設置されている。

2. CFD Porous Disk Wake Modelの定式化

本研究の支配方程式を以下に示す。CFD Porous Disk Wake Modelのアイデアは、気象分野において植生(キャノピー)をモデル化する手法(キャノピーモデルと呼ばれる)を、風車ウエイクのモデル化に応用した点にある(図2を参照)。すなわち、森林等のキャノピーを風が通過することで風速が減速される効果を、風車ブレードが回転することで風速が減速される効果に適用したも



<https://academic-accelerator.com/encyclopedia/jp/alpha-ventus-offshore-wind-farm>

図1 ドイツで初めてのオフショア・ウインドファームであるAlpha Ventus Offshore Wind Farm (5MW×12)

* 令和5年12月1日 第45回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

*2 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)

*3 会員, 九州大学大学院総合理工学府 社会人博士課程2年

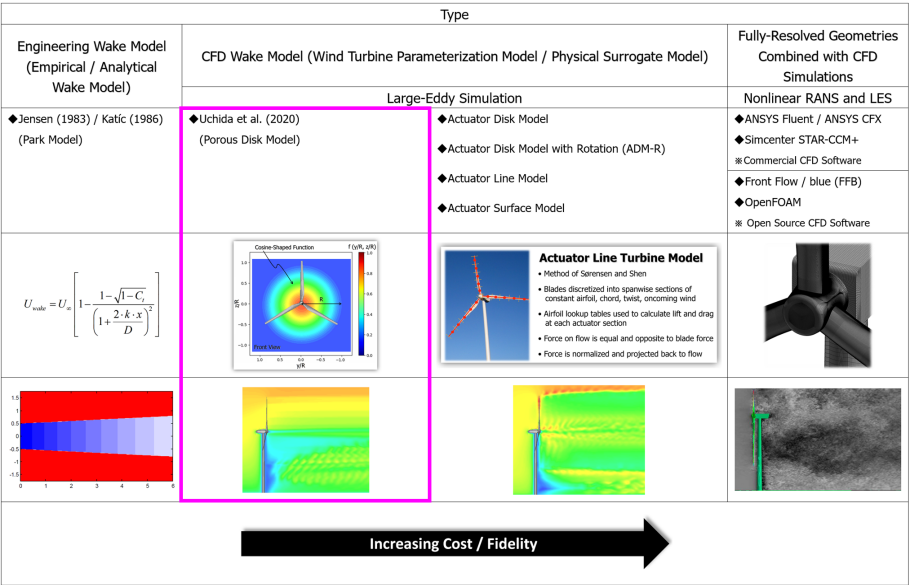


図2 風車ウエイクモデルの分類, 一番左が工学モデル, 紫色の実線がCFD Porous Disk Wake Model

のである(式(12)を参照). 式(12)のモデル係数 C_{RC} がCFD Porous Disk Wake Modelの唯一のモデルパラメータ(抵抗係数)であり, 空間補正関数を併用し, 風車受風面内に連続的に分布させる[1, 2].

数値計算手法は, デカルト座標系不等間隔スタガード格子に基づき, 数値計算手法には(有限)差分法を用いる. LESのSGS Modelには, 計算安定性に優れ, かつ壁面減衰関数を必要としない混合時間スケールモデルを採用する(式(3)~式(11)). 陽的フィルタ操作にはシン普森則を適用する. 速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには, 陽解法を基礎とした部分段階法を採用する. 圧力に関するポアソン方程式はSOR法により緩和計算する. 空間項の離散化に関して, 対流項は補間法による4次精度中心差分を基礎とし, 4階微分の数値粘性項を付加する(修正3次精度風上差分). ここで, 数値粘性項の重みは0.5とし, その影響は十分に小さくした. 一般的に使用される3次精度風上差分の河村-桑原スキームでは3.0である. 残りの空間項は2次精度中心差分で近似した. 本研究では, 上記で説明した3次元CFD Porous Disk Wake Modelの鉛直方向(z方向)の次元を省略した2次元CFDの適用を検討する. これに伴い, 式(3)~式(11)に示すLESのSGS Modelも省略した.

$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$	(1)
---	-----

$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i$	(2)
$\tau_{ij} \approx \overline{u'_i u'_j} \approx \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2 \nu_{SGS} \bar{S}_{ij}$	(3)
$\nu_{SGS} = C_{MTS} k_{es} T_S$	(4)
$T_S^{-1} = \left(\frac{\Delta}{\sqrt{k_{es}}} \right)^{-1} + \left(\frac{C_T}{ \bar{S}_{ij} } \right)^{-1}$	(5)
$k_{es} = (\bar{u}_k - \hat{\bar{u}}_k)^2$	(6)
$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$	(7)
$ \bar{S} = \left(2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \right)^{1/2}$	(8)
$\Delta = \left(\Delta_x \cdot \Delta_y \cdot \Delta_z \right)^{1/3}$	(9)
$C_{MTS} = 0.05$	(10)
$C_T = 10.0$	(11)
$F_i = -C_{RC} \cdot f(y/R, z/R) \cdot \bar{u}_i \cdot V$ R : Rotor radius	(12)
$V = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}$	(13)

3. 既存の工学ウエイクモデルとの比較

ここでは、既存の工学ウエイクモデル (Analytical Wake Model) の結果 [3, 4] と、CFD Porous Disk Wake Model の2次元計算の結果 (以後、2D CFDモデルと略記する) との比較を示す。本研究で設定した計算条件は、風速10m/s、スラスト係数0.8、乱流強度0.12である。こ

で、ロータ直径はDで表現する。図3と図4には、風車1基の場合の比較を示し、図5には風車25基の場合の比較を示す。いずれの場合においても、本研究で提案する2D CFDモデルは、工学ウエイクモデルとほぼ類似な挙動を再現可能であることが示された。

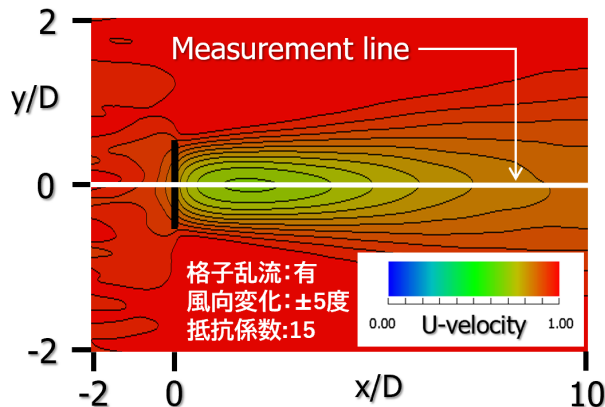
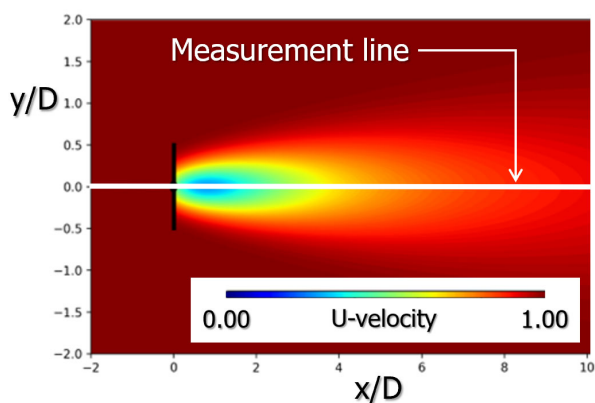


図3 主流方向風速の可視化, (左)Ishihara-Qian analytical model, (右)2D CFD porous disk wake model, 風車1基

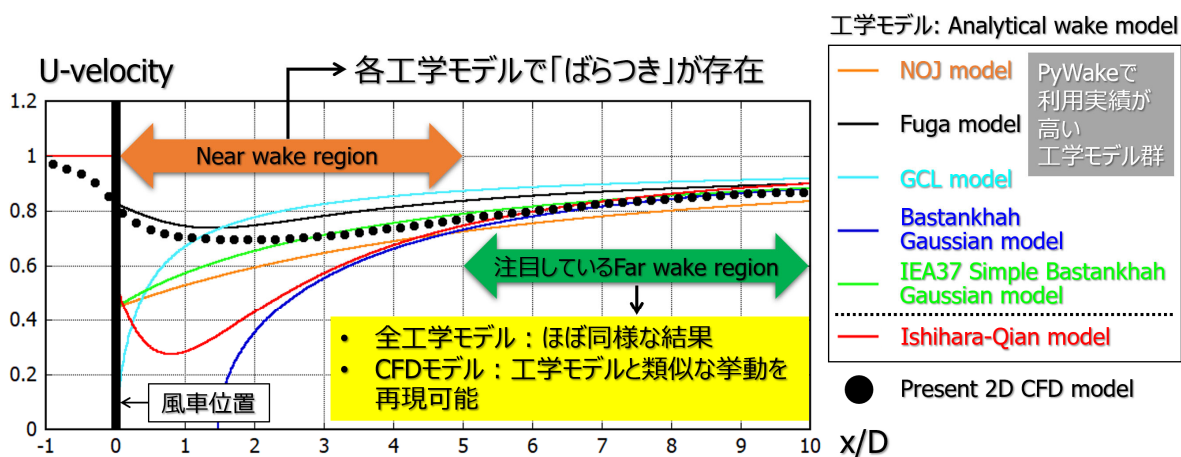


図4 Measurement line上の主流方向風速の比較, (実線)工学ウエイクモデル, (シンボル)2D CFDモデル, 風車1基

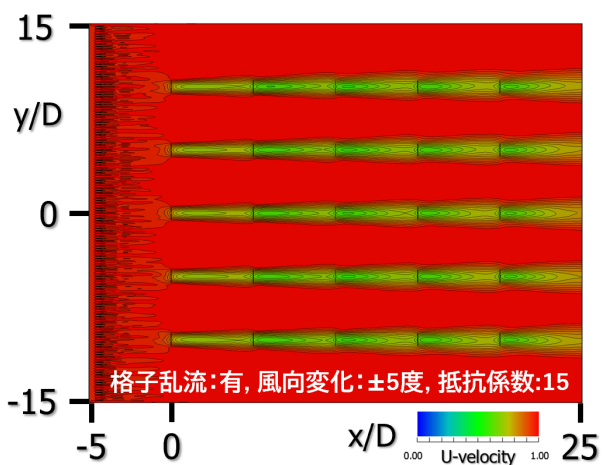
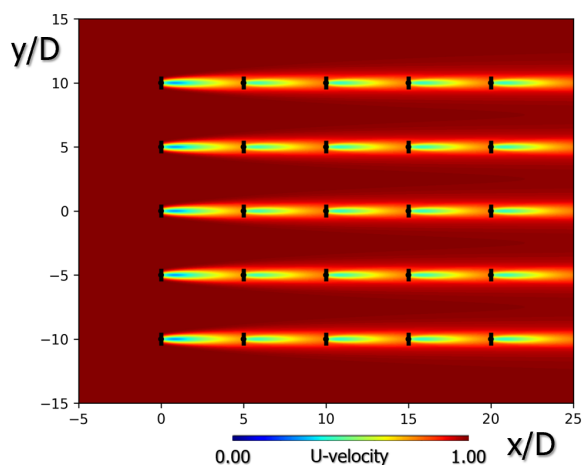


図5 主流方向風速の可視化, (左)Ishihara-Qian analytical model, (右)2D CFD porous disk wake model, 風車25基

4. シングルGPUによる計算時間の短縮化(風車単基)

本研究では、本2D CFDモデルの実務利用を想定し、計算時間の劇的な短縮化を図るため、シングルGPUによる高速化を検討した。ここで、図3に示す風車1基の計算を対象とした。得られた結果を図6に示す。12コアのCPUの結果と比較し、Windows-CUDAでは約5倍、Linux-OpenACCでは約7倍の計算時間の短縮に成功した。シングルGPUに要する実時間は数分程度である。

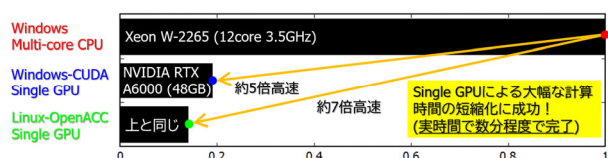


図6 シングルGPUとマルチコアCPUの比較, 風車1基

5. Alpha Ventus Offshore Wind Farmで取得された実測データ(Scanning Lidar Data)の再現性

ここでは、図1に示したAlpha Ventus Offshore Wind Farmを対象にした実測データ(Scanning Lidar Data)との比較を示す[5]。本実測データは、7号機風車に設置されたGalion G4000 Scanning Lidarにより取得されている。図7と図8の比較を通して、本研究で提案する2D CFDモデルは洋上ウインドファームの実測データの挙動を定性的にかつ定量的に再現可能であることが示された。

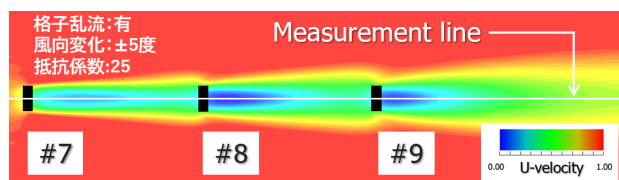


図7 主流方向風速の可視化,
2D CFD porous disk wake model, 時間平均場

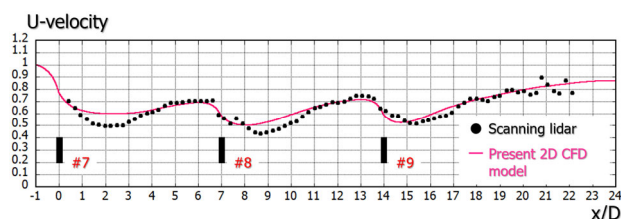


図8 Measurement line上の主流方向風速の比較,
(実線)2D CFDモデル,
(シンボル) Scanning lidar data(実測データ)

6. おわりに

2D CFD porous disk wake modelとGPUシミュレーションを組み合わせた本手法は、日本独自のIndustrial wake modelとして、大規模洋上ウインドファームの最適設計に活用可能である。本提案手法の最大の利点は、

図9に示すように、大規模洋上ウインドファームへの適用が極めて容易であることと、複数の風車群に起因した複雑な風車ウエイクの非定常・相互干渉現象を再現できる点にある。今後は、ヨーステアリングなどの風車ウエイクの制御手法への適用を検討する予定である。

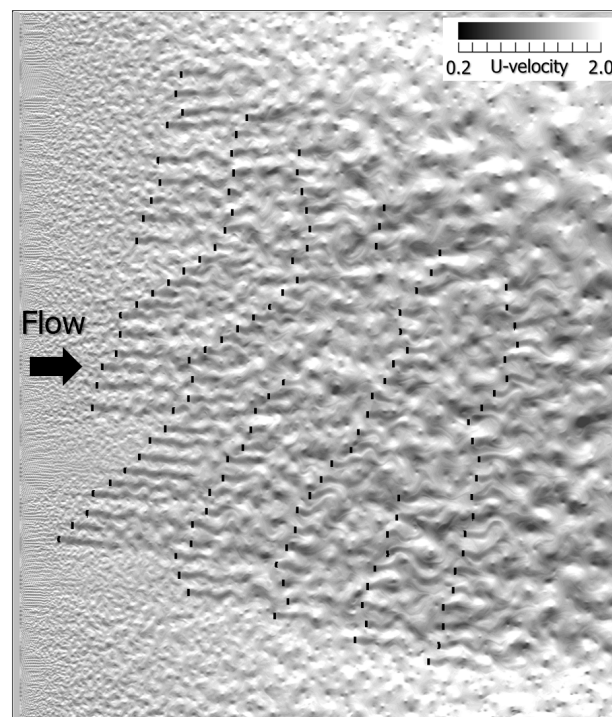


図9 大規模洋上ウインドファーム(風車125基)への応用例

謝 辞

本研究は、JST A-STEP JPMJTR221C, JSPS科研費 21H01574, (株)ユーラスエナジーホールディングスとの産学共同研究の支援を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Takanori Uchida et al., Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES Modeling with New Porous Disk Approach, *Energies* 2021, 14(8), 2101
- [2] Takanori Uchida et al., A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, *Energies* 2020, 13(12), 3197
- [3] PyWake HP : <https://topfarm.pages.windenergy.dtu.dk/PyWake/>
- [4] John K. Kaldellis et al., Critical evaluation of Wind Turbines' analytical wake models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 144, 2021
- [5] 内田孝紀ら, 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一, *JWEA論文集*, Vol.45, No.4, pp.71-82, 2022