

風車近傍後流に与えるナセルおよびタワーからの剥離流の影響

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所 : 教授

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3年

本田, 明弘
青森公立大学 : 教授

<https://hdl.handle.net/2324/7364806>

出版情報 : Wind Engineering Research. 28, pp.31-38, 2024. Japan Association for Wind Engineering
バージョン :
権利関係 : © 2024 Japan Association for Wind Engineering



風車近傍後流に与えるナセルおよびタワーからの剥離流の影響

INFLUENCE OF THE SEPARATED FLOW FROM THE NACELLE AND TOWER ON THE WIND TURBINE NEAR WAKES

内田 孝紀¹⁾ 澁谷 光一郎²⁾ 本田 明弘³⁾
Takanori UCHIDA ¹⁾, Koichiro SHIBUYA ²⁾ and Akihiro HONDA ³⁾

ABSTRACT

In this study, we performed a numerical study (LES) on the influence of separated flows from the wind turbine nacelle and tower on the wind turbine near wake region. As a result, when the tower part was made into a cylinder, a downward flow was induced behind the tower. It has become clear that as a result of this phenomenon, the wake region behind the wind turbine blades is also entrained toward the ground. In the future, we plan to change the size of the wind turbine tower and examine the above flow mechanism in detail.

Key Words: Wind turbine near wake region, LES, Wind tunnel experiment, PIV

1. はじめに

日本として取り組む具体的な数値目標を示した「洋上風力産業ビジョン(2020年12月15日)」では、2030年までに10GW、2040年までに浮体式を含む30GW～45GWの案件形成の数値目標が明確に示された。また、官民協議会・NEDOから示された洋上風力の産業競争力強化に向けた「技術開発ロードマップ(2021年4月1日)」では、「風車ウエイクおよび発電量予測モデルの高度化」が明記され、国の後押しが約束された。こうした状況を受け、著者らは風車ウエイク研究を推進している¹⁾。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速度欠損領域が形成される(図1)。特に風車近傍(風車のロータ直径の4倍以内)に形成されるウエイク領域はNear wake region、風車から離れたウエイク領域(風車のロータ直径の4倍以上)はFar wake regionと呼ばれる。図2に示すように、

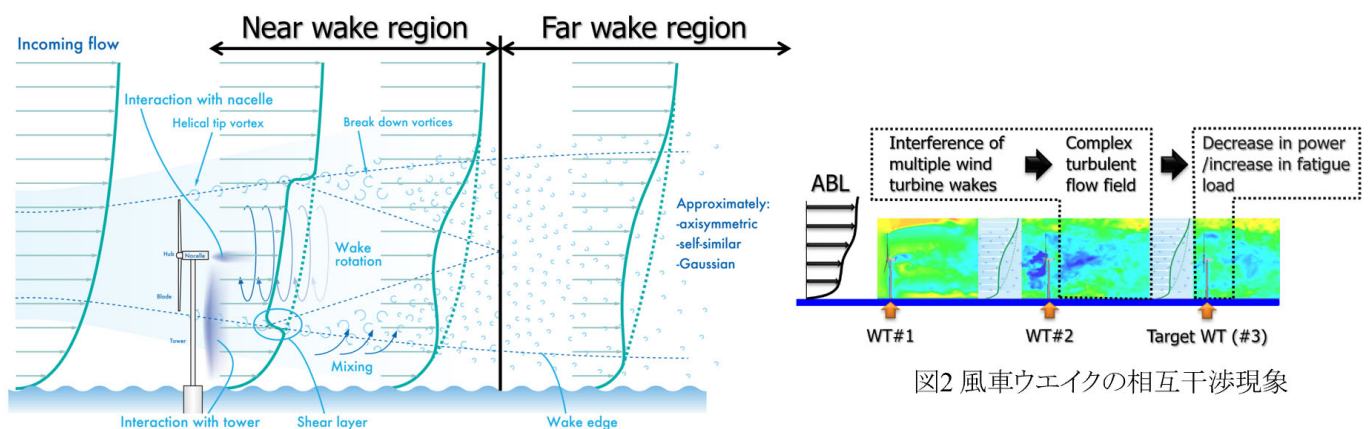


図1 風車ウエイク内の気流構造¹⁾

図2 風車ウエイクの相互干渉現象

¹⁾ 九州大学応用力学研究所 教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地)

²⁾ 九州大学大学院総合理工学府 社会人博士課程3年 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地)

³⁾ 青森公立大学 教授 (〒030-0196 青森市大字合子沢字山崎153番地4)

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(図中左側の点線)、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(図中右側の点線)。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。Near wake regionとFar wake regionは、遷移領域を介して連続的に接続しているため、Near wake regionにおける気流特性を正確に把握することは極めて重要である^{2, 3, 4)}。そこで本研究では、風車ナセルやタワーからの剥離流が風車の近傍後流(Near wake region)に与える影響について数値的検討(LES)を行った。最初に、LESの予測精度を検証するため、風車模型を用いた風洞実験(PIVおよび熱線流速計による気流計測)との比較を実施した。その後、風車のスピナー、ブレード、ナセル、タワーの有無を系統的に変化させ、その影響を明らかにした。

2. 風車模型を用いた風洞実験

風洞実験は、気流状態は中立として九州大学応用力学研究所が所有する温度成層風洞を用いて行った(図3)。図4には、本実験で用いた風車模型の寸法を示す。図4に示すように、風車ナセル部にはACサーボモータ(オリエンタルモータ製, NXM640A)が内蔵されており、風車ブレードの回転数制御が可能である。アルミ製の風車ブレードはMEL翼を基礎として製作した。詳細は文献¹⁾を参照して頂きたい。本研究では、粒子画像流速測定法(PIV, Particle

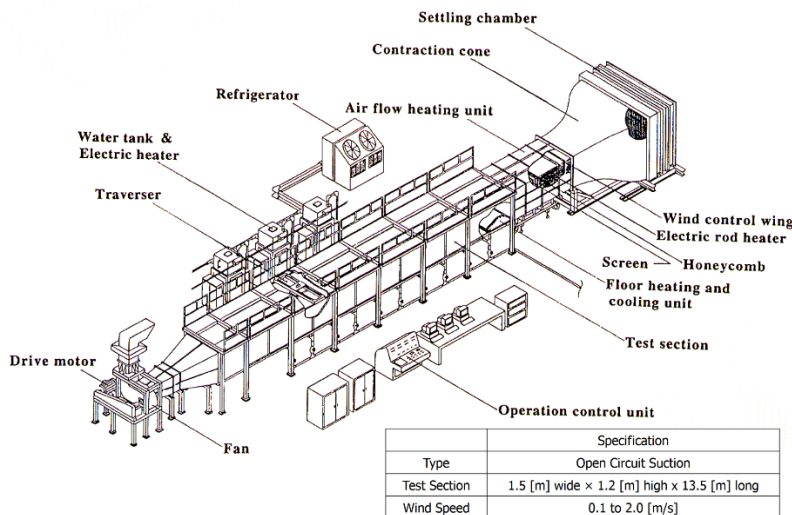


図3 温度成層風洞の概観図

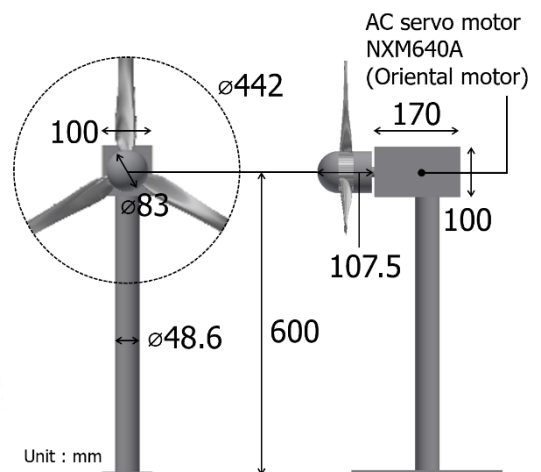


図4 風洞実験用の風車模型寸法

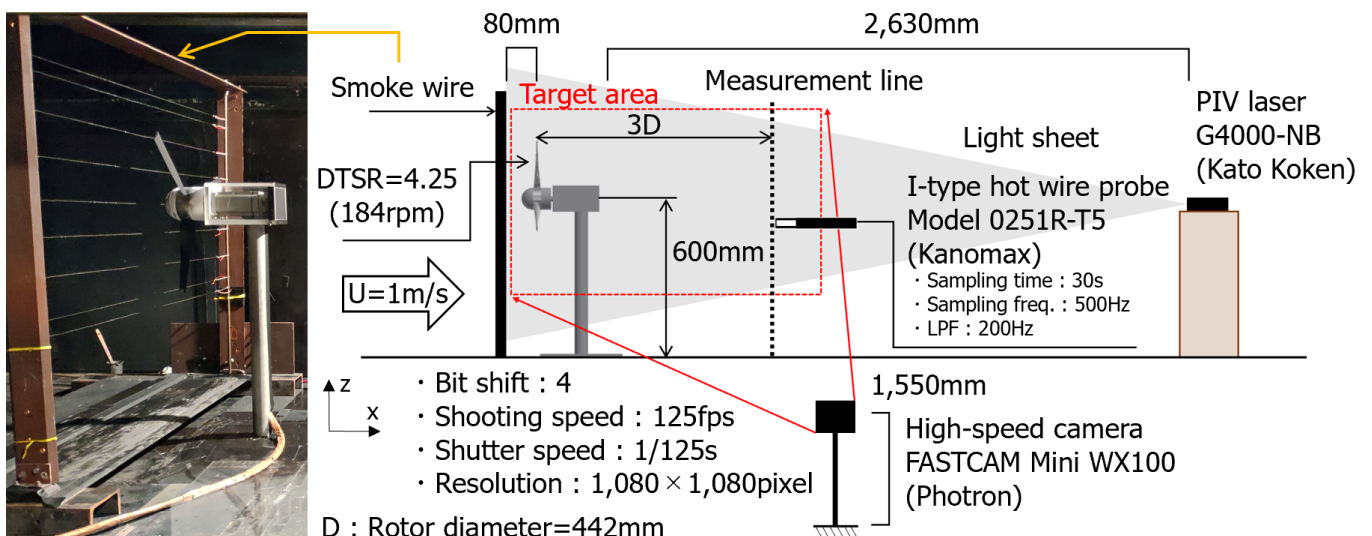


図5 風洞実験(PIVおよび熱線流速計による気流計測)の概略図

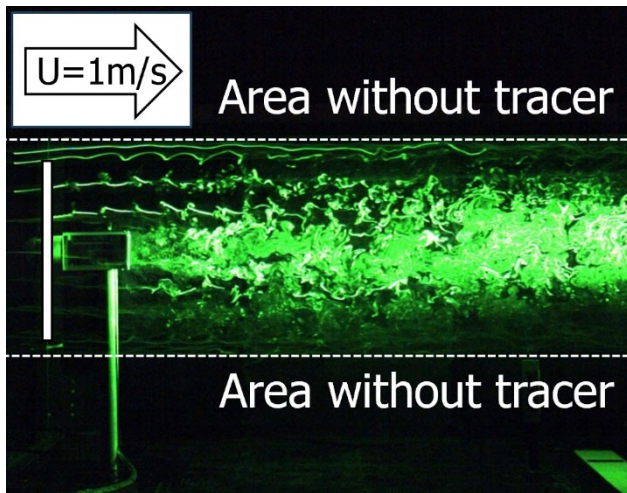


図6 本実験で取得した可視化画像(瞬間場)

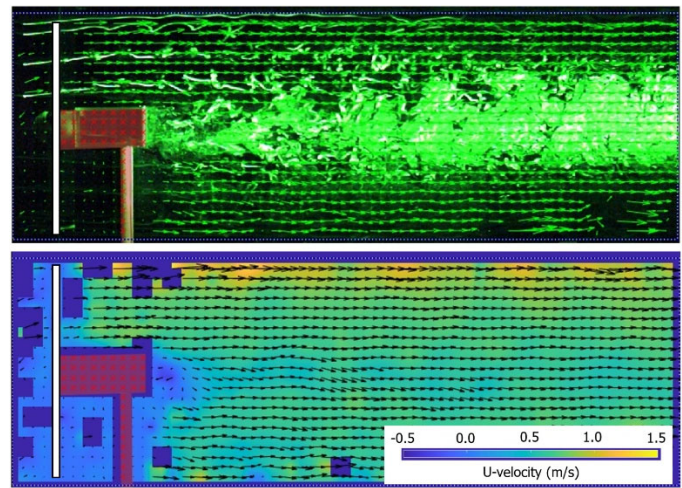


図7 PIV解析結果(上:速度ベクトル図, 下:速度ベクトル図と主流方向の速度成分の分布, 両者ともに瞬間場)

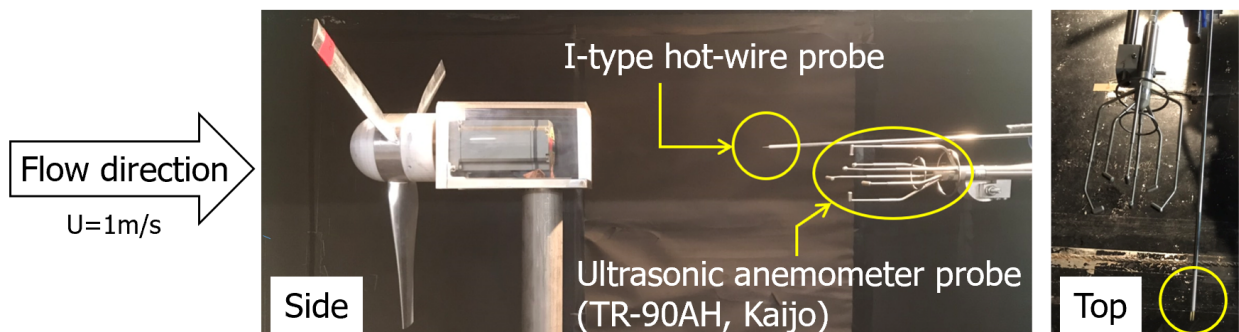


図8 熱線流速計(Hot-wire anemometer)を用いた気流計測の様子

Image Velocimetry)と、熱線流速計(Hot-wire anemometer)による気流計測を実施した。その概略図を図5に示す。PIVでは、平面内(2D)の速度2成分(2C), すなわち、速度の2D2Cを計測するシステムを構築した。本研究では、風車模型の上流側に設置したスモークワイヤから発生したトレーサに、レーザーライトシートを用いた面状の光源を照射する形式で視化を実施した。PIV解析ソフトウェアにはPIVlab 2.38を用いた。画像のプレ処理はCLAHE(Contrast-limited adaptive histogram equalization)を、アルゴリズムはFFTを選択し、相関範囲を64ピクセルとした。

図6には、本実験で取得した可視化画像(瞬間場)の一例を示す。同図に示すように、トレーサのない領域はPIVの対象領域からは除外した。また、ナセルとタワー部に関してもマスキング処理を行い、解析領域から除外した。画像解像度は1,080×1,080ピクセルである。図7(上図)から、トレーサが拡散して識別しにくい風車下流部においても、比較的確な速度ベクトルが得られていることが分かる。図7(下図)に示す速度ベクトル図と主流方向の速度成分の空間分布を観察する。風車ウエイク領域の外縁部では速度が局所的に増加している。一方、風車ウエイク領域の内側とナセル下流側では速度が減少しているものの、風車下流に向かって徐々に回復している。

図8には、熱線流速計(Hot-wire anemometer)を用いた気流計測の様子を示す。図5に示す風車下流の3D位置(Dはローター直径)において鉛直方向に気流計測を行い、PIV解析から抽出した数値データおよび数値シミュレーション(LES)の結果と比較した。これについては後述する。

3. LESによる風車ウエイクシミュレーション

3.1 数値計算手法

本研究では、デカルト座標系の不等間隔スタガード格子に基づき、数値計算手法には差分法を用いる。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、Eulerの1次陽解法を基礎とした部分段階法⁵⁾を採用する。圧力に関する

Poisson方程式については、SOR法(Successive Over Relaxation method)により緩和計算を行う。空間項の離散化に関して、対流項には補間法⁶⁾による4次精度中心差分に4階微分の数値粘性項を付加した3次精度風上差分を用いる。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。一般に使用される3次精度風上差分のKawamura-Kuwaharaスキーム⁷⁾では3.0である。残りの全ての空間項には、2次精度中心差分を適用した。本研究では、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SGSモデル⁸⁾を採用した。SGSモデルにおける3方向の陽的フィルタ操作には、Simpson則を適用した。

3.2 風車ブレード回転のモデル化および計算条件など

本研究では、MEL翼⁹⁾の風車模型を対象とし、アクチュエータラインモデル¹⁰⁾を実装したLESを実施した。本モデルでは、風車ブレードが回転することで発生する接線力とスラスト力を、流体が受ける主流方向(x)と回転方向(θ)の反力としてNavier-Stokes方程式に外力項として付加する。本研究では、デカルト座標系を採用しているので、 θ 成分の力は、主流直交方向(y)と鉛直方向(z)に分解して与えた。本モデル化の最大の利点は、単なる抵抗体としての速度の減速効果だけではなく、風車ブレードの回転に起因した旋回効果を考慮できる点にある。また、任意の半径位置(翼根からの距離)における翼弦長、揚力係数、抗力係数、迎角のデータさえ入力すれば、任意の風車ブレード背後に形成されるウエイクを再現可能である。本研究では、最適周速比4.25とした。図9には、MEL翼の風車模型を対象にした計算領域と座標系などを示す。計算領域はロータ直径Dを基準として、主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に $8.09D \times 3.4D \times 2.7D$ の空間を有する。格子点数はx, y, z方向に $761 \times 341 \times 265$ 点(約6900万点)である。

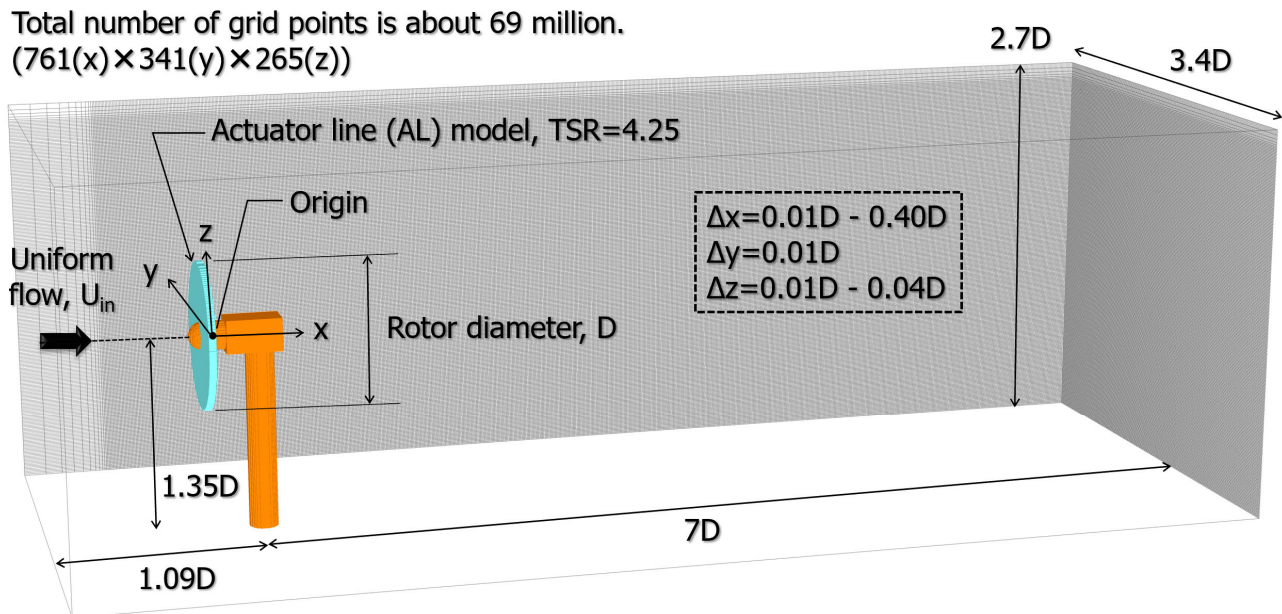


図9 本研究で設定した計算領域、座標系、格子解像度など

表1 本研究で実施した計算ケース

	Spinner	Blade (Rotor hub)	Nacelle	Tower (Cylindrical shape)	Tower (Oval shape)
Case1	○	○	×	×	×
Case2	○	○	○	×	×
Case3 (Baseline)	○	○	○	○	×
Case4	○	○	○	×	○
Case5	○	×	○	○	×
Case6	×	×	×	○	×
Case7	×	×	×	×	○

本研究ではスピナー、ナセル、タワーを全て含んだ風車全体解析を行うため、風車周辺には十分な格子解像度を確保した。速度の境界条件に関して、流入境界面では全ての高度で一樣流入速度を与え、側方境界面と上部境界面は滑り条件、流出境界面には対流型流出条件を与えた。スピナー、ナセル、タワーは矩形格子近似法で再現し、そこに含まれる格子点に流速ゼロの条件を与えた。表1には、本研究で実施した計算ケースを示す。風車の各部位(スピナー、ブレード、ナセル、タワー)の有無を系統的に変化させた計算を実施し、その影響を詳細に検討した。ここで、比較のための基準(Baseline)はCase3である。

3.3 数値シミュレーションの予測精度の検証

(Case3と風洞実験との比較)

最初に、風洞実験の状況を模擬したLESの結果(表1に示すCase3)と、風洞実験の結果(PIVおよび熱線流速計による気流計測)の比較を図10に示す。図10は風車下流3D位置(Dはロータ直径)における主流方向の速度成分の比較である。LESと風洞実験(PIVおよび熱線流速計による気流計測)の結果は風車受風面内において良好な一致を示しており、本ウエイクシミュレーションの妥当性が確認された。以下では、Case3(Baseline)で得られた流れ場について詳細な議論を行う。

図11には、Case3における流れ場の可視化を示す。図11(a)では、風車ブレードの上部先端から翼先端渦(tip vortex)が周期的に風車下流へ放出されている様子が観察される。これらの翼先端渦は風車下流の4Dを過ぎた辺りから急速に崩壊している。また、ナセルとタワー背後には逆流領域が形成されているのが観察される。図11(b)から、ナセルとタワー背後の逆流領域の存在はより明確に確認できる。図11(c)の観察を通じて、速度変動の大きな領域が風車ブレードの上端付近、ナセルとタワー背後に確認される。特にタワー背後ではその傾向が顕著である。以降では、風車の各部位の有無を系統的に変化させた計算結果を示し、風車ウエイク形成に対する影響を詳細に議論する。

3.4 風車スピナーおよびナセルの影響

(Case1とCase2の比較)

図12には、主流方向の速度成分の比較を示す。図13には、これに対応した主流方向の標準偏差の比較を示す。図12(a)に示すCase1および図12(b)に示すCase2の両ケースともに、風車ブレードの先端(上部および下部)から翼先端渦(tip vortex)が形成され、風車下流の4Dを過ぎたあたりから急速に崩壊している。一方、両ケースともにスピナーとナセル背後に逆流領域が形成されている。しかしながら、図13を観察するとそれらの形成範囲や速度変動の大きさに有意な差異が見られないことが分かる。

図14には、風車下流3D位置での主流方向の速度成分の比較を示す。同図にはCase3の結果も示す。

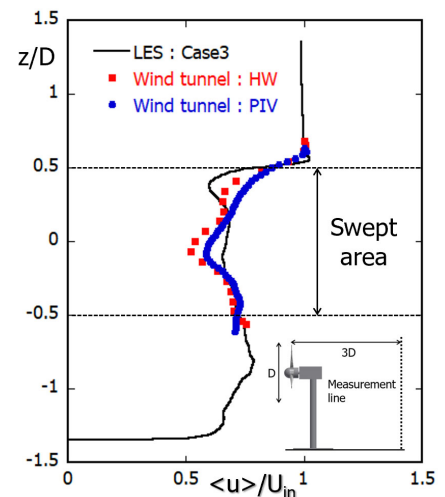
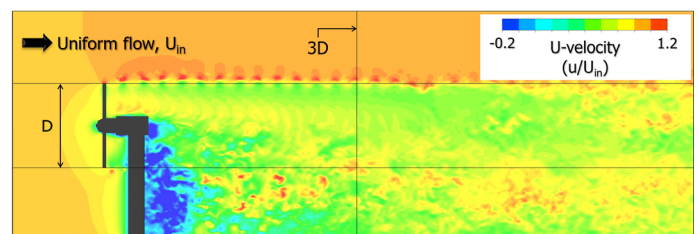
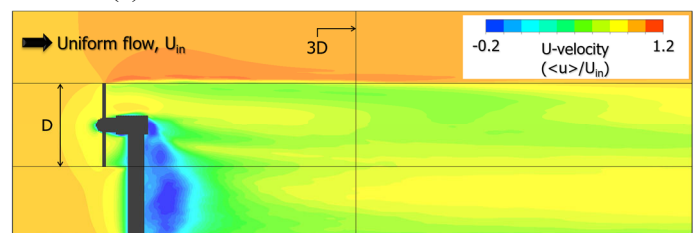


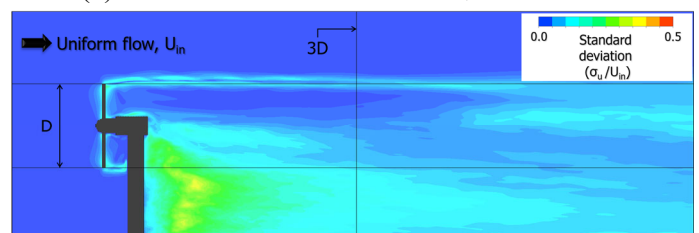
図10 風車下流3D位置における主流方向の速度成分の比較



(a) 主流方向の速度成分の分布, 瞬間場



(b) 主流方向の速度成分の分布, 時間平均場



(c) 主流方向の標準偏差の分布, 時間平均場

図11 Case3における流れ場の可視化, Side view

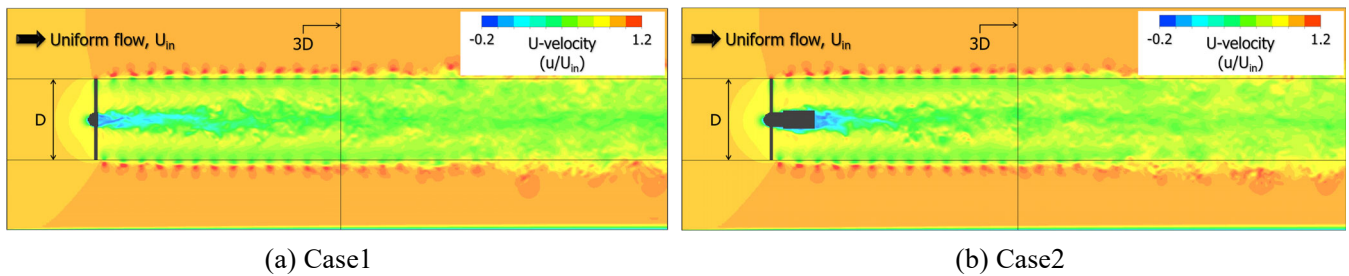


図12 主流方向の速度成分の比較, Side view

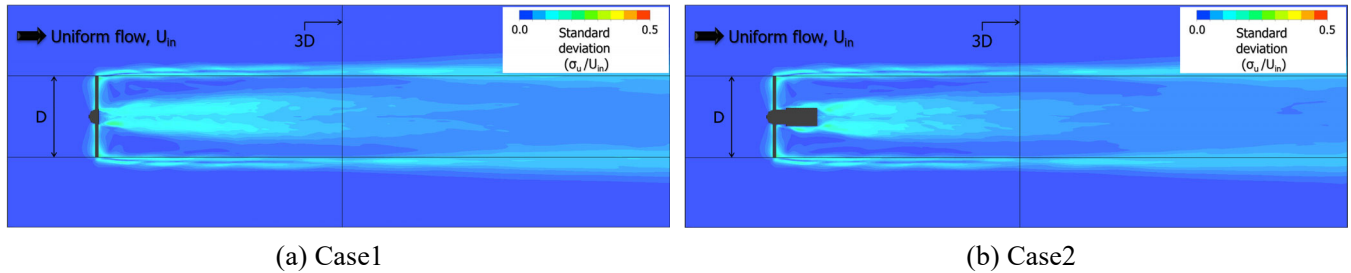


図13 主流方向の標準偏差の比較, Side view

先に述べたように, Case1とCase2に有意な差異はなく, 両ケースの結果はほぼ一致している. ここで興味深い結果が得られた. 図中に矢印で示すように, Case3の結果はCase1とCase2の結果と比べて速度分布が明らかに下方に移動している. この原因を考察するため, 以下ではタワーの影響をさらに詳細に検討することとした.

3.5 風車タワーの影響(Case3とCase4の比較)

最初に, タワー形状の違いが風車ウエイク形成に与える影響を検討した. 図15(a)に示すように, Case3(Baseline)におけるタワー形状は円柱である. 一方, 図15(b)に示すCase4では楕円柱とした.

図11に示すCase3(Baseline, タワー形状:円柱)における流れ場の可視化と比較するため, 図16にCase4(タワー形状:楕円柱)における流れ場の可視化を示す. 図11と図16を比較すると, タワーのすぐ背後と下流側で有意な差異が確認される. 予想されるように, Case4ではタワー背後の逆流領域の大きさはCase3と比較して明らかに小さい. これは図16(b)および図16(c)からも同様に確認される. ここで特筆すべきは, Case4ではタワー下流の地面付近で局所的な増速流が形成されていることである(図中に点線で表示). これはCase4では, タワー形状を楕円柱としたことでタワー下流側への渦放出が抑制されたことに起因していると推測される.

図17には, 風車下流3D位置での主流方向の速度成分の比較を示す. 同図にはCase2の結果も表記する. 先に述べたように, タワー形状を円柱としたCase3では, タワーを考慮していないCase2と比較して $z/D=0.5$ 付近のピーク位置がやや下方に移動していたが, タワー形状を楕円柱としたCase4はCase2の結果とほぼ一致している.

以上これまでに示した計算結果の比較を通じて, 本研究で用いた風車模型では, 風車タワー形状が円柱の場合には風車ウエイク形成に有意な影響を与えていることが示唆された. そこでこれ以降は, さらに追加の計算(Case5, Case6, Case7)を実行し, 風車タワー形状が円柱の場合についての考察を進めることとする.

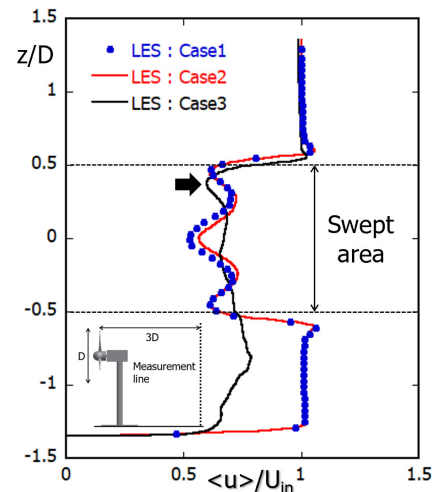


図14 風車下流3D位置における主流方向の速度成分の比較

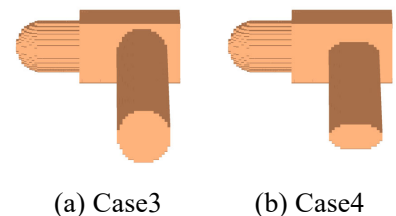
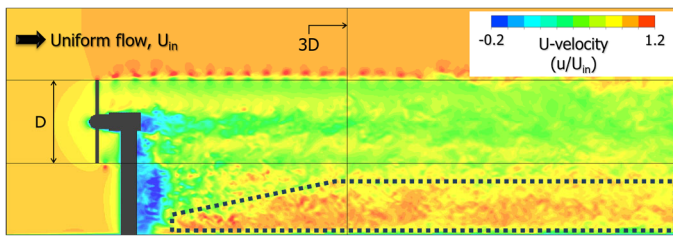
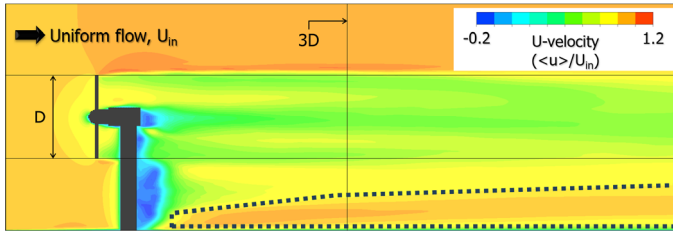


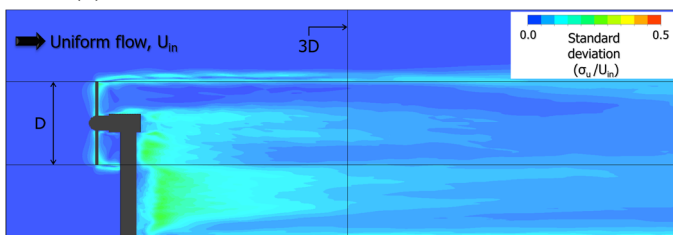
図15 タワー形状の比較



(a) 主流方向の速度成分の分布, 瞬間場

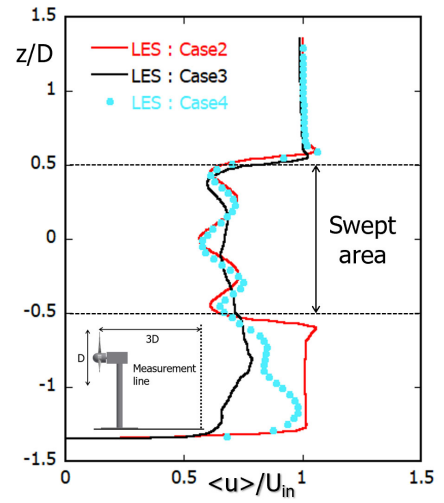
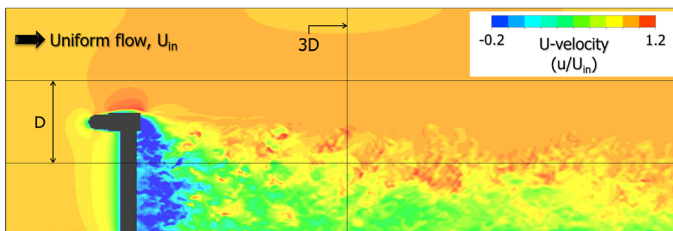


(b) 主流方向の速度成分の分布, 時間平均場

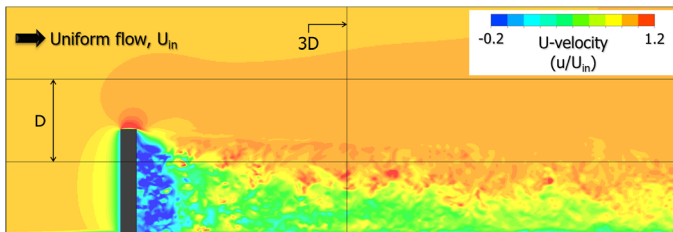


(c) 主流方向の標準偏差の分布, 時間平均場

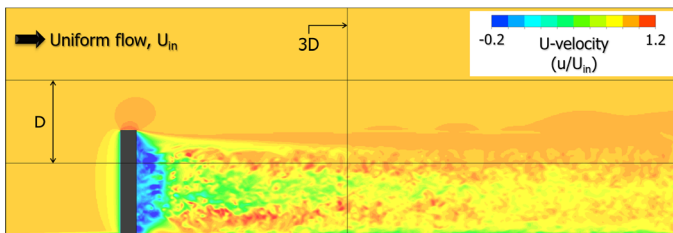
図16 Case4における流れ場の可視化, Side view


図17 風車下流3D位置における
主流方向の速度成分の比較


(a) Case5

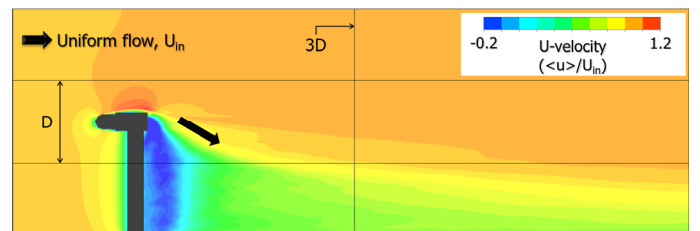


(b) Case6

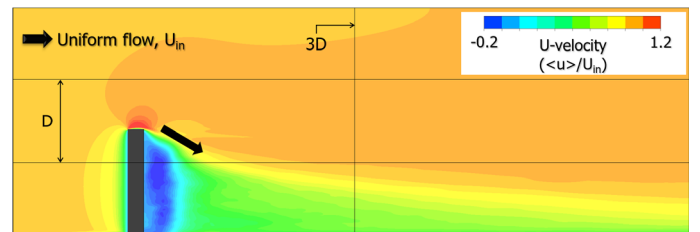


(c) Case7

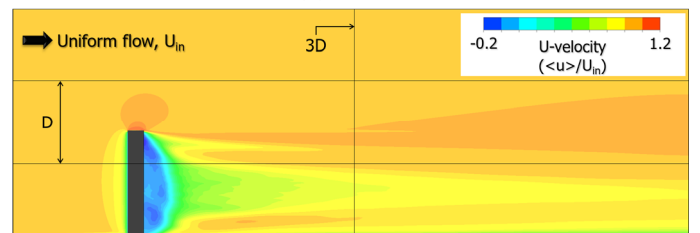
図18 主流方向の速度分布の可視化, 瞬間場, Side view



(a) Case5



(b) Case6



(c) Case7

図19 主流方向の速度分布の可視化, 時間平均場,
Side view

図18には、瞬間場に対する主流方向の速度分布の可視化を示す。図19には、これに対応した時間平均場の可視化結果を示す。最初にCase6とCase7を比較する。タワー形状が円柱であるCase6では、タワー形状が楕円柱であるCase7と比較して、タワー背後の逆流領域が大きく、かつ速度低下も大きい。これにより、Case6ではタワー背後に大規模な渦放出が生じていることが明らかになった。加えて、図19(b)に矢印で示すように、タワー背後の上部付近では下向きの流れが誘起されている。これは、Case6では、タワー上部付近においてタワーを越える流れと回り込む流れが相互に強く干渉したことに起因していると推測される。次に、Case5とCase6を比較すると、スピナーとナセルの有無に関係なく、タワー形状が円柱の場合にはその背後に下向きの流れが誘起されていることが確認された。

最後に、タワー形状を円柱としたCase3(Baseline)は、Case2とCase6が複合した状況と考えることができる(図20を参照)。図20を詳細に観察すると、風車の近傍後流(Near wake region)の3D位置付近では、風車受風面($z/D \leq |0.5|$)を含む $z/D = -0.8 \sim 0.5$ の広範囲において、タワーからの剥離流が強く影響していることが明らかになった。

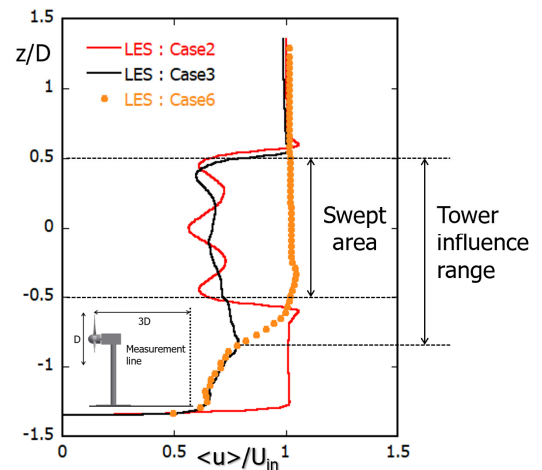


図20 風車下流3D位置における主流方向の速度成分の比較

4. おわりに

本研究では、風車ナセルやタワーからの剥離流が風車の近傍後流(Near wake region)に与える影響について数値的検討(LES)を行った。その結果、本研究で使用した風車模型のタワー部が円柱の場合には、タワー背後に下降流が誘起され、その結果として風車ブレード(風車受風面)背後のウエイク領域も地面方向に連行されることが明らかになった。今後は、風車タワー部のサイズ等を変更させ、上記の流動メカニズムを詳細に検討する予定である。

謝辞

本研究を進めるに際し、九州大学応用力学研究所の技術職員である高田 青氏、浜崎 真洋氏に多大な協力を頂いた。また、本研究の一部は九州大学応用力学研究所の共同利用研究(2019 ME-14, 2020 ME-6, 2021 ME-25)の支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Koichiro Shibuya and Takanori Uchida, Wake asymmetry of yaw state wind turbines induced by interference with wind towers, *Energy* 2023, 128091, ISSN 0360-5442
- 2) 本田 明弘, 久保田 健, 笹沼 菜々子, 大槻 映玲永, 風車後流に及ぼす諸因子に関する検討, 第45回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 2023.12
- 3) Akihiro Honda, Takeshi Kubota, Nanako Sasanuma, Ellena Otsuki, Flow visualization around an actual wind turbine using snow, *Proceedings of Grand Renewable Energy 2022 International Conference*, 71-74, 2022.12
- 4) Hong, J., Toloui, M., Chamorro, L. et al., Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2.5-MW wind turbine. *Nat Commun* 5, 4216, 2014
- 5) J.Kim and P.Moin, Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, *J. Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323, 1985
- 6) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂
- 7) T. Kawamura, H. Takami and K. Kuwahara: Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, *Fluid Dyn. Res.*, Vol.1, pp.145-162, 1986
- 8) 稲垣昌英, 近藤継男, 長野靖尚, 実用的なLESのための混合時間スケールSGSモデル, 日本機学会論文誌, B編, 68巻, 673号, pp.122-129, 2002
- 9) 松宮 輝, 小垣 哲也, 高橋 則之, 飯田 誠, 早稲田 一嘉, 風車用新MEL翼型の開発と実験的検証, 風力エネルギー利用シンポジウム, 22巻, pp.92-95, 2000
- 10) Stevens, R. J. A. M., Martínez-Tossas, L. A., & Meneveau, C. Comparison of wind farm large eddy simulations using actuator disk and actuator line models with wind tunnel experiments. *Renewable energy*, 116(Part A), 470, 2018