

風車模型ウエイク内の気流性状に関する風洞実験および数値シミュレーション EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SMALL-SCALE WIND TURBINE WAKES

内田 孝紀¹⁾ 渡辺 康一²⁾ 大屋 裕二³⁾ 松島 啓二⁴⁾ 高田 青⁴⁾
Takanori UCHIDA¹⁾, Koichi WATANAE²⁾, Yuji OHAY³⁾, Keiji MATSUSHIMA⁴⁾ and Ao TAKADA⁴⁾

ABSTRACT

In this study, we conducted wind tunnel experiments using two types of wind turbine models (MEL blade: rotor diameter 1000 mm and Zephyr blade: rotor diameter 1160 mm) with different wind turbine blade shapes. In particular, we measured the wake velocity deficit distributions in the near and far wake regions behind a wind turbine at the optimum and stall tip speed ratios. Based on the obtained results, the airflow characteristics at each tip speed ratio were investigated. After that, we focused on the behavior of the wind turbine model of the MEL blade operating at the optimum tip speed ratio and conducted a large-eddy simulation using the actuator line model. The numerical results were compared with the wind tunnel experiment results. At the same time, based on these results, we examined in detail the three-dimensional structure of the wind turbine wake. As a result, it was shown that the generation and collapse of tip vortex strongly influences the airflow characteristics in the wind turbine wake region.

Key Words: Wind tunnel experiment, LES, Small-scale wind turbine wakes, Tip vortex

1. はじめに

現在、地球温暖化を防ぐため、CO₂の大幅な削減が緊急課題となっている。これに伴い、クリーンで環境に優しい風力エネルギーの有効利用に注目が集まっている。風車の発電出力は風速の三乗に比例するため、陸上および洋上を問わず、風況の良好な地点を的確に、かつピンポイントに選定することが極めて重要である。一般的に、風車の運転に伴い、その後流域には速度の欠損や速度の時間・空間変動が形成される(図1を参照)。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インドファームにおいては、風車ウエイクが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を引き起こす可能性がある。よって、上流側に位置する風車群が形成する風車ウエイクの影響を正しく評価し、風車間の離隔距離を適切に決定することが不可欠である¹⁾。

そこで本研究では、風車ブレード形状の異なる二種類の風車模型(MEL翼:ロータ径1000mmおよびゼファー翼:ロータ径1160mm)を用いて風洞実験を行った。特に最適周速比、失速周速比での風車ウエイク領域内の気流性状に注目した。その後、MEL翼に的を絞り、アクチュエータラインモデル²⁾を用いたラージエディシミュレーションを行い、風洞実験結果との比較を行うとともに、風洞実験では考察が難しかった風車ウエイクの3次元構造などを詳細に検討した。

^{1), 3), 4)} 九州大学応用力学研究所 准教授, 特任教授, 技術職員 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

²⁾ 九州大学エネルギー研究教育機構 准教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

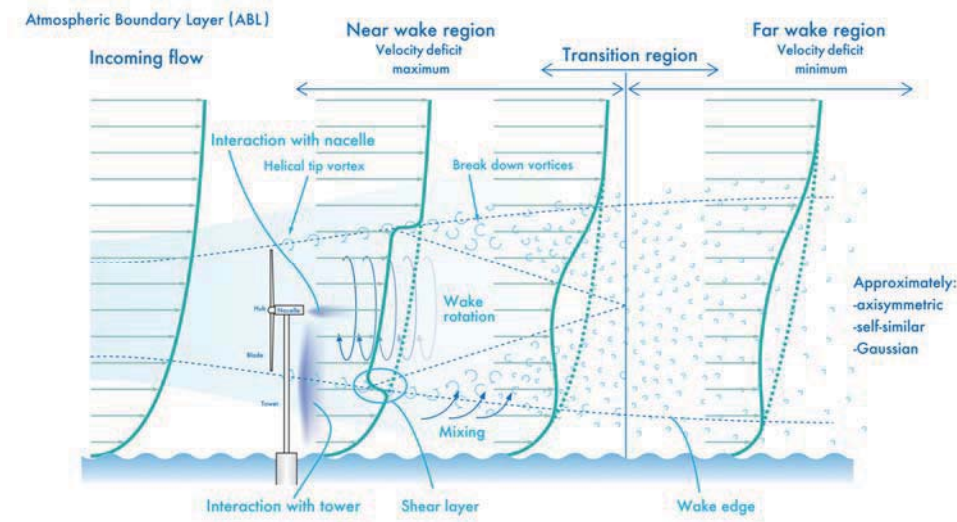


図 1. 風車ウエイク内の気流構造の概要 (内田作成)

2. 風洞実験の概要

2.1 風車模型と実験条件など

本研究で用いた風洞設備は、図2に示す九州大学応用力学研究所が所有する大型境界層風洞(15m long × 3.6m wide × 2.0m high)である。本研究で対象にした風車模型を図3に示す。一つは、機械技術研究所(Mechanical Engineering Laboratory, MEL)が開発したMEL翼である(図3(a)を参照)³⁾。もう一つは、ゼファー株式会社が提供するブレードである(図3(b)を参照)⁴⁾。便宜上、これ以降、後者はゼファー翼と称する。それぞれのロータ直径は図2に記載している通りであり、両者ともに約1mである。本実験では、ブロッカージュの影響を避けるため、風洞側壁および上壁を取り外した。ロータ直径Dに基づいたハブ比(=ハブ直径/D×100)は約13%であり、風洞実験の流入速度は8m/sとした。レイノルズ数 $Re(=UD/\nu)$ は 10^5 のオーダーである。風洞実験では、風車ブレードを複数の回転数にて強制的に回転させ、出力係数 C_p が最大値を示す最適周速比を推定した(図4を参照)。その後、最適周速比付近と C_p が低下している、すなわち、翼周辺の流れ場が失速している周速比にて風車ブレードを回転させ、風車後流で熱線流速計(カノマックス社製0251R-T5)を主流直交方向にトラバースし、風車模型後流の速度分布の計測を行った。気流計測のサンプリング周波数は500Hz、サンプリング時間は30sとし、主に主流方向の平均速度分布に注目した。

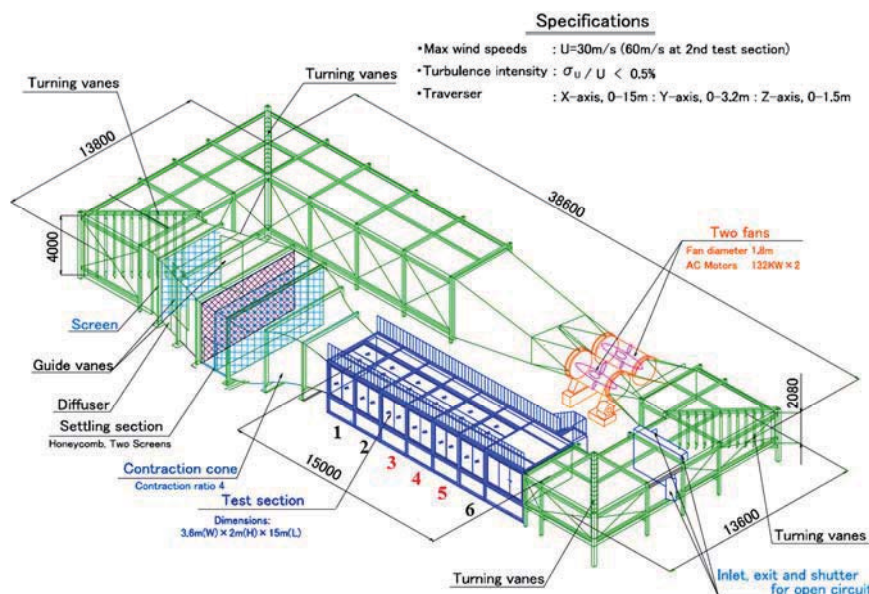


図 2. 本研究で使用した大型境界層風洞

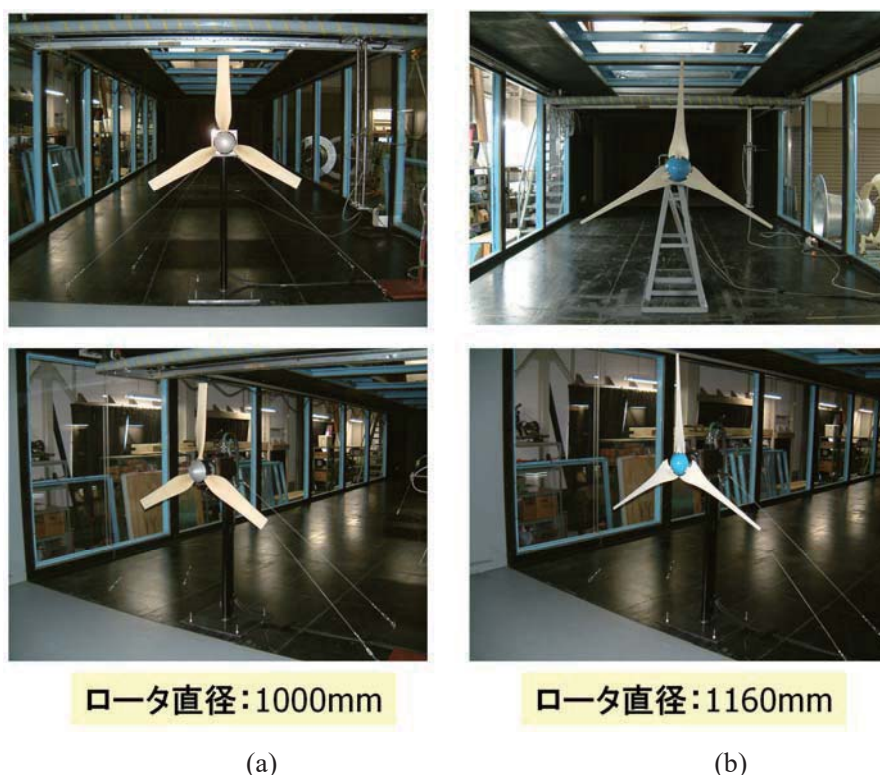


図 3. 本研究で使用した風車模型; (a) MEL翼, (b)ゼファー翼

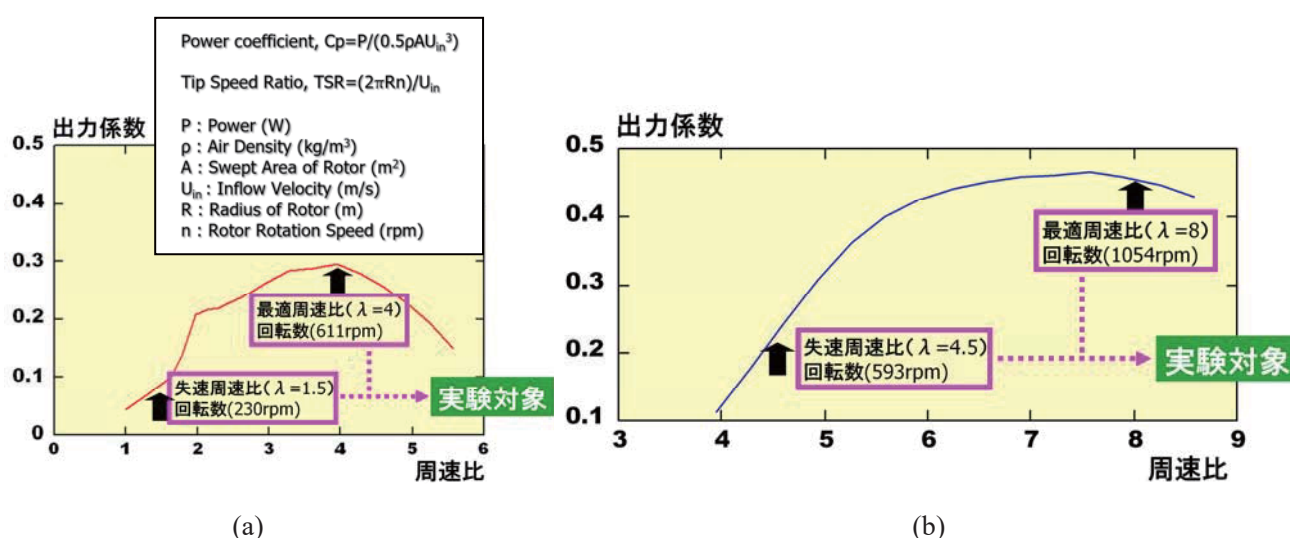


図 4. 本実験で得られた各周速比における出力係数; (a) MEL翼, (b)ゼファー翼

2.2 実験結果と考察

図5および図6には、図4に示した各風車模型における最適周速比および失速周速比における風車下流域での平均速度分布を示す。ここで、縦軸の U_{ref} は各測定位置の最も外側の速度である。最初に図5に示す最適周速比における結果に注目する。最適周速比では、翼先端渦(tip vortex)が形成されている(これについては後述する)。このtip vortexの形成に伴い、図5(a)に示すMEL翼および図5(b)に示すゼファー翼の両者ともに、翼先端付近($y/D = -0.5, 0.5$)において大きな速度シアが明確に存在している。ゼファー翼は、MEL翼と比較して風車受風面内における速度欠損量が非常に大きいことも示された。図5(a)に示すMEL翼の場合では、風車下流10Dのロータ中心においても、流入速度の3割程度の速度欠損が存在することが明らかになった。一方、図5(b)に示すゼファー翼の場合には、風車下流8Dのロータ中心において5割程度の速度欠損が存在する(図5(a)に示すゼファー翼では3割程度)。両者ともに、これはtip vortexの影響であり、風車下流域と外部流の運動量交換が強く抑制されるためである。

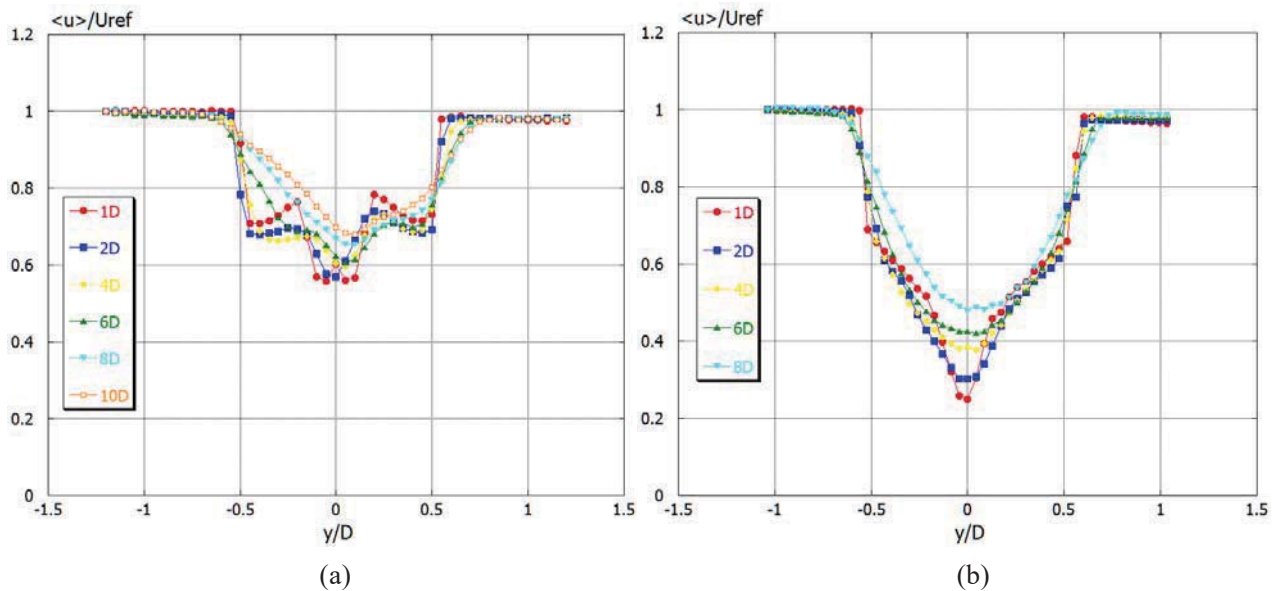


図 5. 本実験で得られた風車下流の平均速度分布, 水平断面, 最適周速比; (a) MEL翼, (b)ゼファー翼

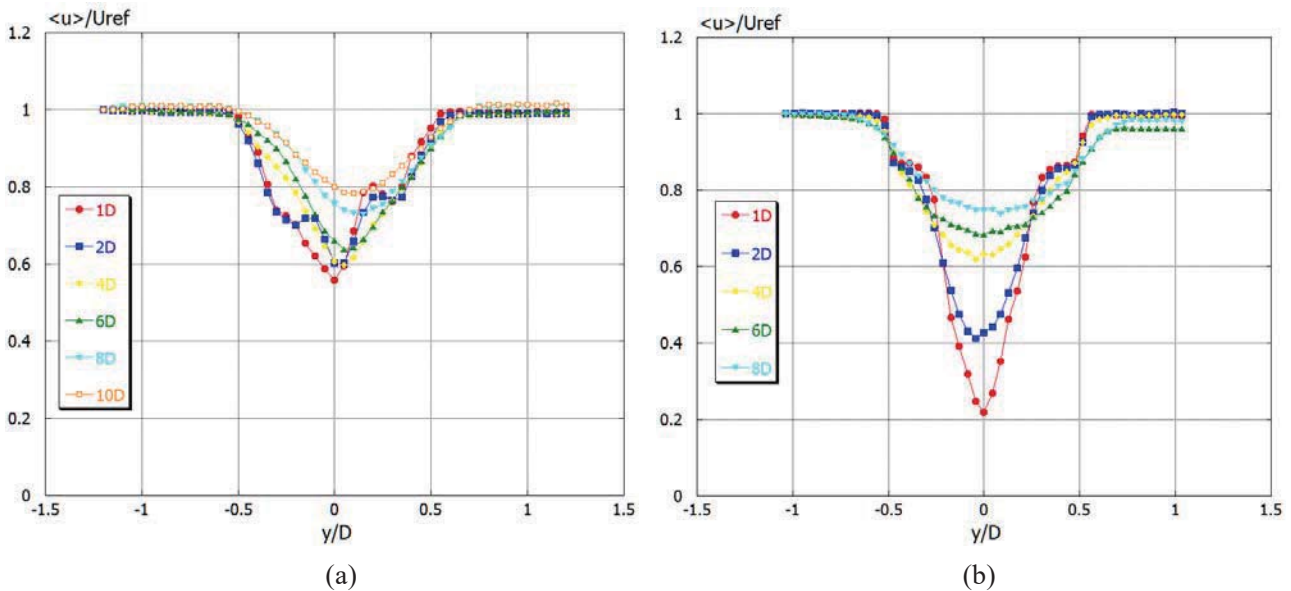


図 6. 本実験で得られた風車下流の平均速度分布, 水平断面, 失速周速比; (a) MEL翼, (b)ゼファー翼

次に図6に示す失速周速比における実験結果に注目する. 図6(a)に示すMEL翼および図6(b)に示すゼファー翼の両者ともに, 図5で観察されたような翼先端付近($y/D = -0.5, 0.5$)における大きな速度シアは出現していない. MEL翼と比較して図6(b)に示すゼファー翼の場合では, 風車下流の1Dおよび2Dにおいて特に速度欠損が大きい. 図6(a)に示すMEL翼, および図6(b)に示すゼファー翼の両者ともに, 風車下流8Dのロータ中心において3割程度の速度欠損が存在する. 気流計測が可能であった図6(a)では, 風車下流10Dのロータ中心において, 2割程度の速度欠損が存在する. 図5および図6の両者ともに, 風車下流域の平均速度分布に偏りが見られたが, これは風車ウエイクの「ゆらぎ(蛇行運動)」(meandering motion)と風洞側壁および上壁を取り外したことが影響していると考えられる.

3. 数値シミュレーションの概要

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)により緩和計算して算出する。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翼の風車模型を対象にアクチュエータラインモデル²⁾を用いたラージエディシミュレーションを実施した。アクチュエータラインモデルでは、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)および回転方向(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ため、 θ 成分の力は、主流直交方向(y)および鉛直方向(z)に分解して与えた。このモデル化の最大の利点は、風車が存在することによる単なる抵抗体として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、種々の種類の風車背後に形成されるウエイクを再現できる。本研究では、失速周速比1.5および最適周速比4.0を計算対象とした(図4(a)に矢印で表示)。図7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 $30.0D \times 5.0D \times 3.5D$ の空間を有する。格子点数はx, y, z方向に $3075 \times 171 \times 161$ 点(約8500万点)である。先に述べたように、本研究ではハブ、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様流入速度を与え、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。風車のハブ、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。

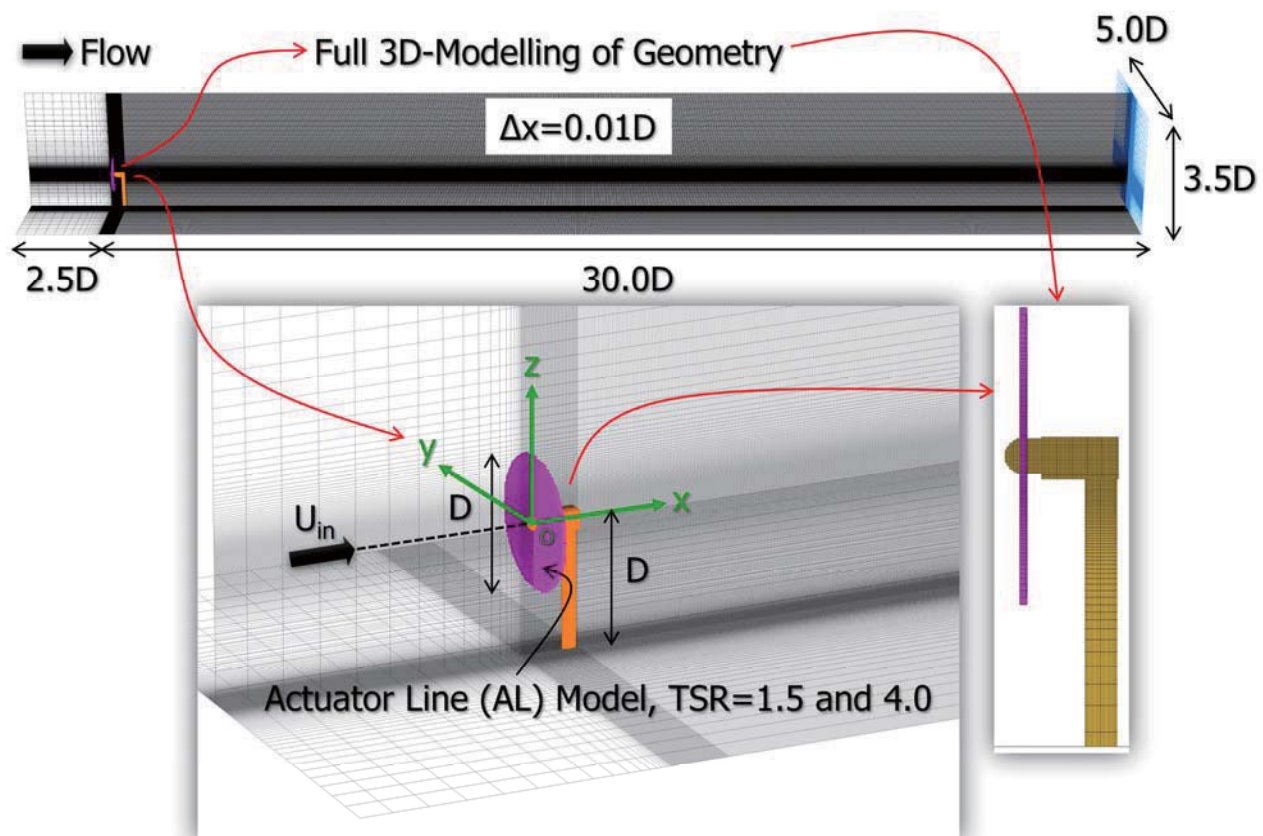


図 7. MEL翼の風車模型を対象にした計算領域と座標系など

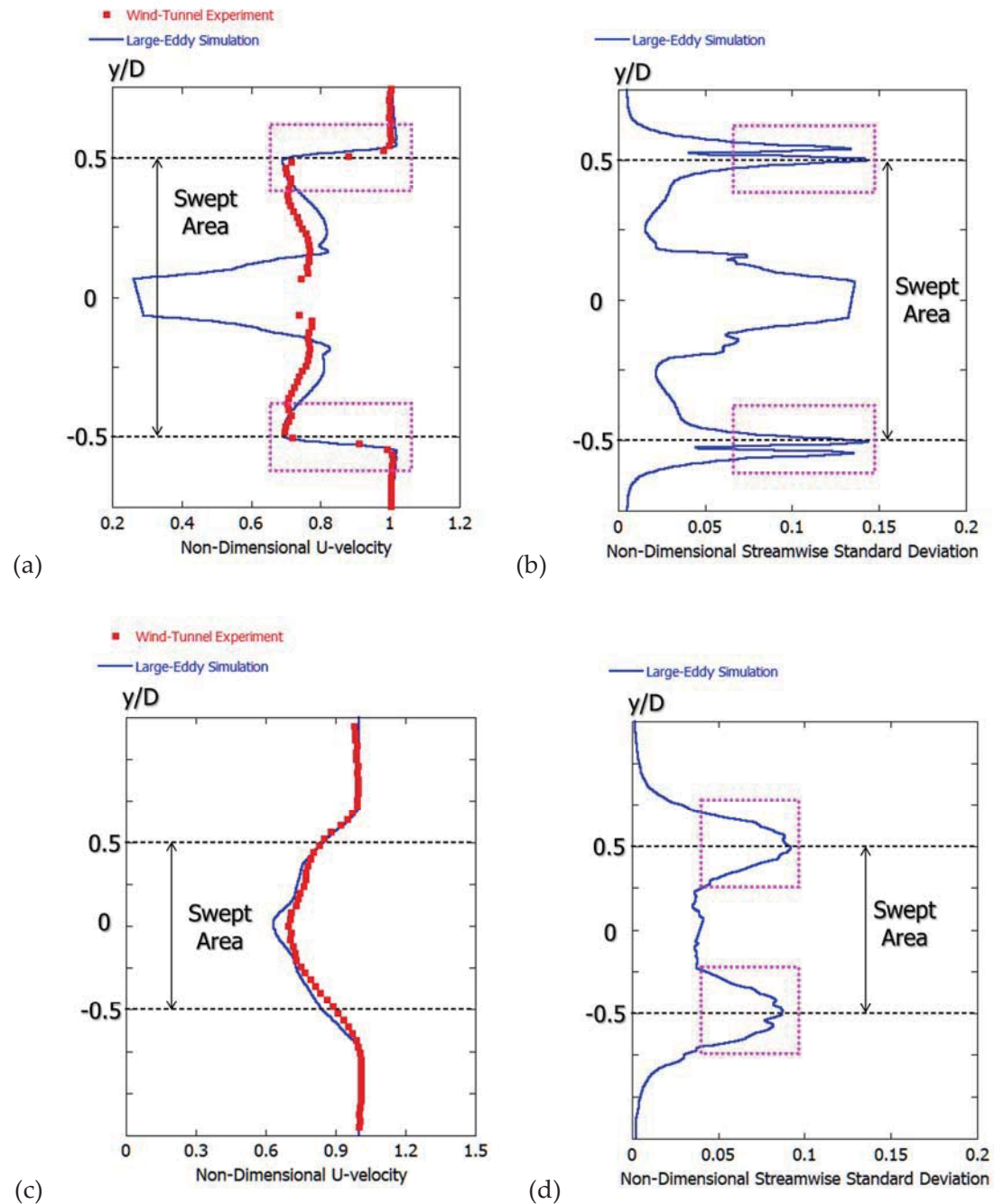


図 8. MEL翼の風車模型を対象にした風洞実験と数値シミュレーションの比較, 最適周速比;
(a) $x = 0.5D$ における主流方向(x)の平均速度分布, (b) $x = 0.5D$ における主流方向(x)の標準偏差分布,
(c) $x = 8D$ における主流方向(x)の平均速度分布, (d) $x = 8D$ における主流方向(x)の標準偏差分布

3.3 計算結果と考察

図8には、最適周速比で風車ブレードが回転しているMEL翼の風車模型を対象にした風洞実験と数値計算の比較を示す。風洞実験と同様、各測定位置の最も外側の速度で無次元化した。最初に、図8(a)および図8(b)に示す $x=0.5D$ におけるnear wake領域の結果に注目する。図8(a)に点線で囲んだ領域では、風洞実験および数値計算ともに、tip vortexの生成とその通過に伴って非常に大きな速度シアが再現されているのが分かる。図8(b)に示す数値計算結果から算出した主流方向(x)の標準偏差分布では、平均速度分布の大きな速度シアの形成に伴い、極大値が出現している。図8(c)および図8(d)に示す $x=8D$ におけるfar wake領域においても、風洞実験および数値計算の両者は非常に良い一致を示しており、両者の妥当性が改めて確認された。 $x=8D$ におけるfar wake領域では、ウェイ

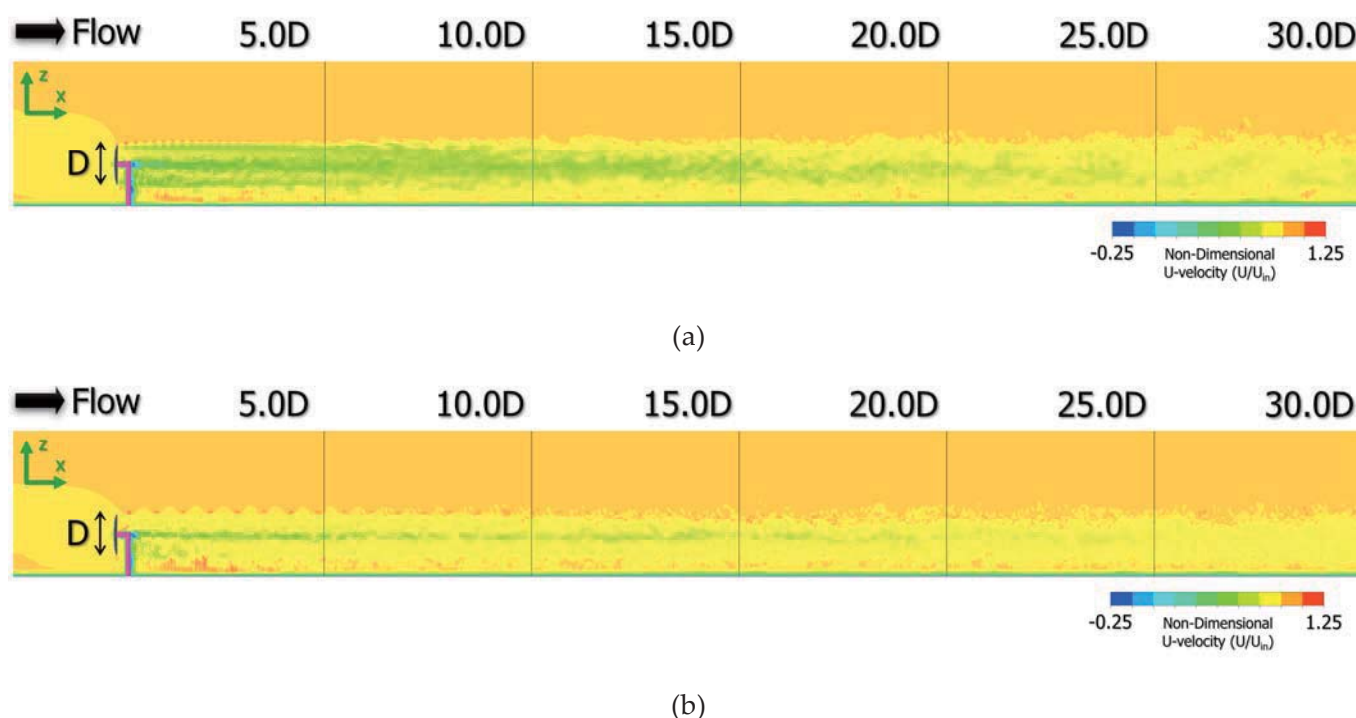


図 9. MEL翼の風車模型を対象にした数値シミュレーション結果,
スパン中央断面における主流方向(x)の速度分布, 瞬間場; (a)最適周速比; (b)失速周速比

ク幅がやや広がっていることも確認される。ロータ中心では、風車下流8Dにおいても、流入速度の3割程度の速度欠損が明確に存在している。x=0.5Dにおけるnear wake領域と同様、風車ブレード付近では主流方向(x)の標準偏差分布に極大値が存在する。

図9には、MEL翼の風車模型を対象にした数値計算結果(スパン中央断面における主流方向(x)の速度分布の瞬間場)を示す。ここでは、比較のため、図9(b)に失速周速比の結果も合わせて示す。図9(a)に示す最適周速比の結果では、near wake領域のx=5D付近までtip vortexの存在が明確に観察される。ここで興味深い点は以下である。x=5Dよりも下流のfar wake領域では、tip vortexは崩壊し、風車ウエイクの「ゆらぎ(meandering motion)」が明確に観察される。この風車ウエイクのmeandering motionは、カルマン渦列の再配置問題と同様、風車遠方における速度シアの不安定性に起因して発生していると推測される。また、x=20D~30Dの風車から十分に遠方におけるfar wake領域においても、風車ウエイクに起因した速度欠損領域は存在している。この領域内の定量的な数値情報は後述する。一方、図9(b)に示す失速周速比の計算結果に注目する。この周速比においてtip vortexの存在は確認される。当然ながら、図9(a)に示す最適周速比の場合と比べてtip vortexの放出周期が長いことに対応して、tip vortexの主流方向(x)の間隔は長

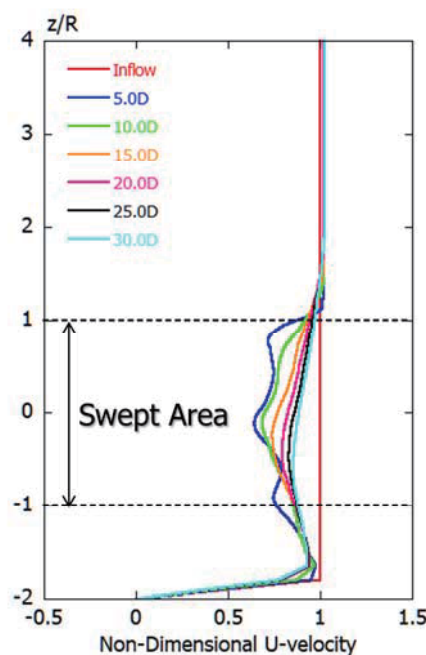


図 10. MEL翼の風車模型を対象にした
数値シミュレーション計算結果, スパン中央断面における
主流方向(x)の平均速度分布, 時間平均場, 最適周速比

い。また、図9(a)に示す最適周速比の場合と同様、 $x=5D$ よりも下流のfar wake領域では、tip vortexは急速に崩壊していることも見て取れる。

図10には、最適周速比で風車ブレードが回転する場合に関して、時間平均場から算出した $x=5\sim 30D$ における平均速度の鉛直分布を示す。 $x=5D$ では風車のブレードの回転の影響が現れている。一方、 $x=10D$ 以降では、風車受風面内における鉛直方向の分布は平滑化され、滑らかな挙動を示している。

図11には、風車のロータ中心における主流方向(x)の平均速度分布(時間平均場)を示す。同図には、(流入気流が有する乱れを考慮していない)べき指数 $N=4$ および 10 の結果も示す。全ての結果はほぼ同じ挙動を示しており、 $x=12D$ 以降では速度回復の傾きに変化が見られる(図中に点線で表示)。また、 $x=30D$ の風車から十分に遠方のfar wake領域においても、流入速度に対して約1割の速度欠損が明確に存在している。

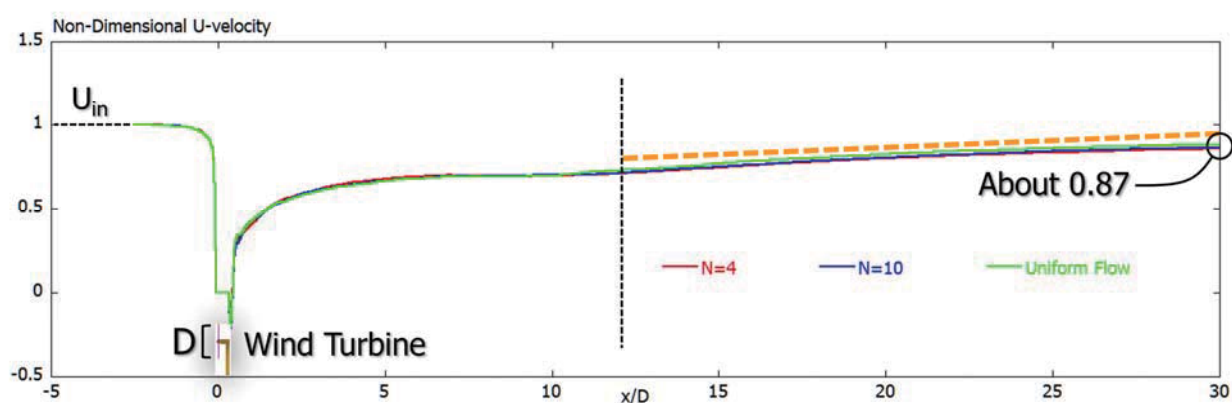


図 11. MEL翼の風車模型を対象にした数値シミュレーション結果，ロータ中心における主流方向(x)の速度分布，時間平均場，最適周速比

4. おわりに

本研究では、風車ブレード形状の異なる二種類の風車模型(MEL翼:ロータ径1000mmおよびゼファー翼:ロータ径1160mm)を用いて風洞実験を行った。特に最適周速比、失速周速比における風車ウエイク領域内の気流計測を行い、それぞれの周速比における気流性状の特徴を明らかにした。その後、最適周速比で運転するMEL翼の挙動に的を絞り、アクチュエータラインモデルを用いたラージエディシミュレーションを行った。風洞実験結果との比較を行うとともに、風車ウエイクの3次元構造などを詳細に検討した。その結果、tip vortexの生成と崩壊が風車ウエイク領域内における気流性状に強く関連していることが示された。

参考文献

- 1) Porté-Agel, F., Bastankhah, M. & Shamsoddin, S. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. Boundary-Layer Meteorol 174, pp.1–59, 2020
- 2) 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
- 3) 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
- 4) <http://zephyreco.co.jp/jp/>
- 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, 日本機械学会論文集, B編, 68巻, 673号, pp.122-129, 2002