

最適周速比における風車後流と静止円盤後流の比較

COMPARISON BETWEEN THE WAKE BEHIND WIND TURBINE GENERATOR UNDER OPTIMAL TIP SPEED RATIO AND THE WAKE BEHIND STATIONARY PLATE

内田 孝紀¹⁾, 大屋 裕二²⁾, 杉谷 賢一郎³⁾
Takanori UCHIDA¹⁾, Yuji OHYA²⁾ and Kenichiro SUGITANI³⁾

ABSTRACT

In the present study, the comparison between the wake generated behind the wind turbine generator under optimal tip speed ratio and the wake generated behind the stationary plate was performed. For this purpose, the large-eddy simulation (LES) based on the Cartesian non-uniform staggered grid was done. The numerical results obtained were compared with those from the wind tunnel experiment. As a result, the following matters were clarified. It was shown that, for the case of the wind turbine generator under optimal tip speed ratio, the speed loss of about 30-40 percent existed for the approaching flow in the far wake region (6D-10D), where D is a diameter of a rotor. Furthermore, it was indicated that the wake generated behind the stationary plate was obviously different from those of the wind turbine generator. A separated flow exists immediately behind the stationary plate ($\leq 2D$). However, the speed recovery is earlier than the wind turbine generator in the far wake region (6D-10D).

Key Words : Wind turbine generator, Stationary plate, Wake, LES, Wind tunnel experiment

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. 我が国でも, 2010年度の300万KWの導入目標に向け, 数基の風力発電機WTG(Wind Turbine Generator)から, 数十基のWTGから構成される大型のウインドファームWF(Wind Farm)に至るまで, 風力発電施設は急速に増加している.

我々は, 数(十)km以下の狭域空間を対象に, 風力発電導入に適した地点をピンポイントに予測し, さらに観測データに基づいて年間発電電力量や設備利用率を試算可能な非定常・非線形風況シミュレータを開発している¹⁾. これを, RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain:リアムコンパクト)と称する. 風況場のシミュレーションには, 乱流モデルLES(Large-Eddy Simulation)を採用している. 現在, RIAM-COMPACTの高精度化に向けた研究開発を進めている. その中でも特に, WTG間の相互干渉の影響を評価するための後流モデル(ウエイクモデル)の開発に重点を置いている. 平坦地が少ない日本で大型のWTGを複数台集中的に建設する場合, WTG相互の干渉でWF全体の発電電力量が低下しないよう, その間隔を決めるウエイクモデルの開発が重要になってきている. 本研究の最終目的は, 高精度なウエイクモデルを構築し, これを非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTに実装することである.

複数台のWTGを配置する際には, 経験値として, 主流方向にはWTGロータ直径の10倍, 主流直交方向にはロータ直径の3倍程度, WTGの間隔を離すことが適切であるとされている. 過去には, WTG後流に関する風洞実験および野外観測が幾つか報告されているものの²⁻⁷⁾, その気流性状は未だ十分に解明されていない. そこで本研究では, ウエイクモデル構築に向けて, 以下に示す二つの問題に着目した. 一つは, 最適周速比(最大発電出力時の周速比)で稼動するWTG単体に的を絞る, 上述したロータ直径の10倍下流の地点において, どの程度の平均速度欠損量が存在するのかを調べることである. もう一つは, 従来のウエイクモデルにおいて, モデル化の前提になっていた静止円盤後流と, 最適周速比で稼動するWTG単体後流の気流性状を比較することである. この目的に対し, デカルト座標系のスタガード格子に基づいたLESのプログラムを構築し, 得られた結果は風洞実験の気流計測結果と比較を行った⁸⁻¹¹⁾.

1), 2), 3) 九州大学応用力学研究所 助手, 教授, 技官 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

2. 数値計算手法と計算結果など

2.1 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。LESのSGS (Sub-Grid Scale)モデルには、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¹²⁾を採用する。陽的フィルタ操作にはシンプソン則を適用する。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、オイラーの1次陽解法を基礎とした部分段階法¹³⁾を採用する。圧力に関するポアソン方程式は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¹⁴⁾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次精度風上差分の河村-桑原スキーム¹⁵⁾の値は3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。

2.2 WTGのモデル化

WTGに関して、ロータ回転のモデル化には翼素理論¹⁶⁾に基づいたアクチュエータディスク近似を用いた。アクチュエータディスク近似では、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および回転方向の反力として、ナビエ・ストークス方程式に外力項として付加する。すなわち、物体としての壁面境界条件は無い。本研究では、デカルト座標系を採用しているため、回転方向成分の力は、主流直交方向および鉛直方向に分解して用いた。このモデル化の最大の利点は、WTG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、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WTG背後に形成される後流を再現できる。使用した翼形状は、MEL翼¹⁷⁾をベースに翼根を厚翼に修正したものである。風洞実験で得られた、このWTGの性能曲線を図1に示す。本研究では、最適周速比4を計算対象とした(図1に矢印で表示)。図2には、風洞実験で使用したWTG模型の概観図を示す。風洞実験における条件を数値シミュレーションで忠実に再現するため、図4に示すように、スピナ、ナセル、タワーの形状を矩形格子近似法で再現し、WTG全体を過ぎる流れの数値シミュレーションを実施した。

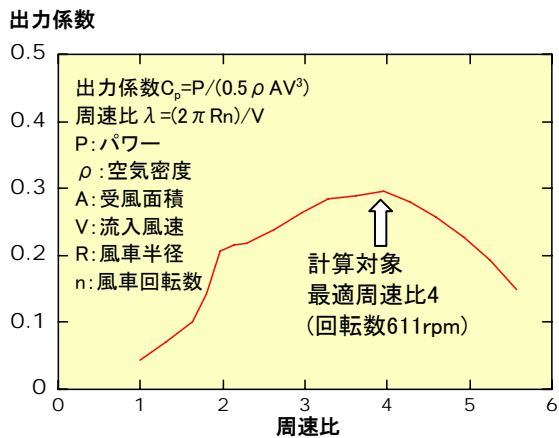


図1 本研究で対象にした風車(WTG)の周速比と出力係数の関係、風洞実験結果

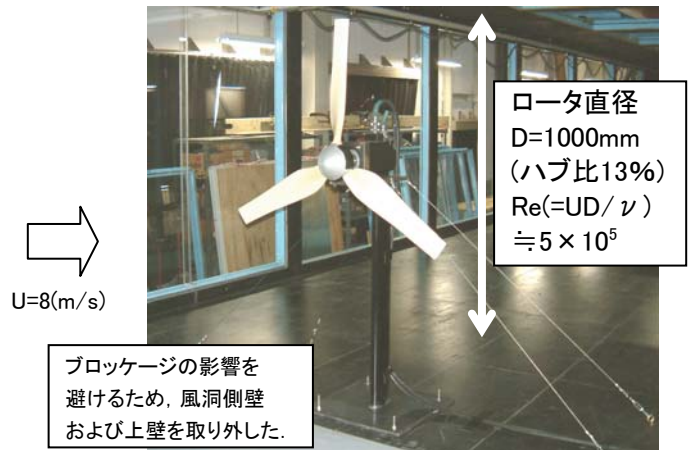


図2 風車(WTG)模型の概観図

2.3 計算対象領域と諸条件

図3に計算領域および境界条件などを示す。ロータ部の取扱いを除いては、以下に示す諸条件は最適周速比で稼働するWTG単体と、そのロータ直径と同じ面積を有する静止円盤を過ぎる流れの二ケースとも同じである。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12.5D × 5D × 3.5Dの空間を有する。格子点数はx, y, z方向に181 × 171 × 161点(約500万メッシュ)である。前節でも述べたが、本研究では、スピナ、ナセル、タワーを含んだWTG全体を過ぎる流れ場の解析を行うため、WTG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、スピナ、ナセル、タワーは、そこに含まれる格子点に流速ゼロの条件を与えた。なお、静止円盤を対象にした計算では、スピナ、ナセル、タワーに加えて、ロータ部にも流速ゼロの条件を課した。圧力の境界条件は全ての

境界面でノイマン条件とした。ロータ直径Dと一様流入風速Uに基づいたReynolds数は $Re(=UD/\nu)=2 \times 10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}D/U$ とした。

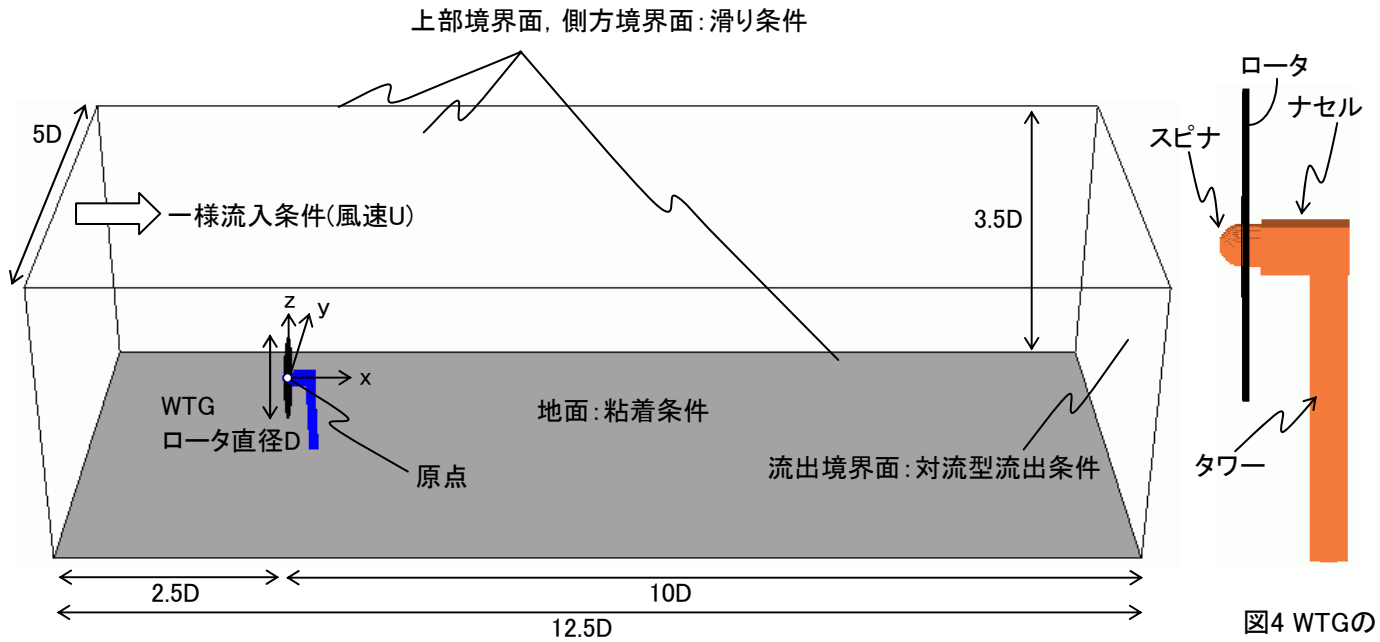
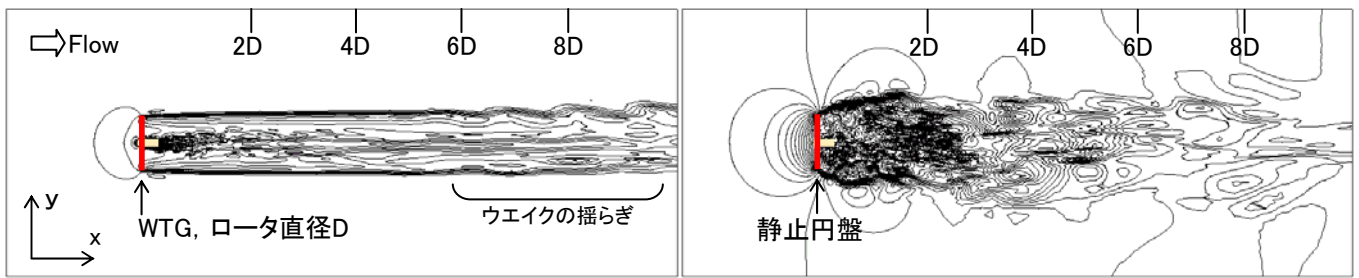


図3 計算領域および境界条件など

図4 WTGの拡大図

2.4 計算結果と考察

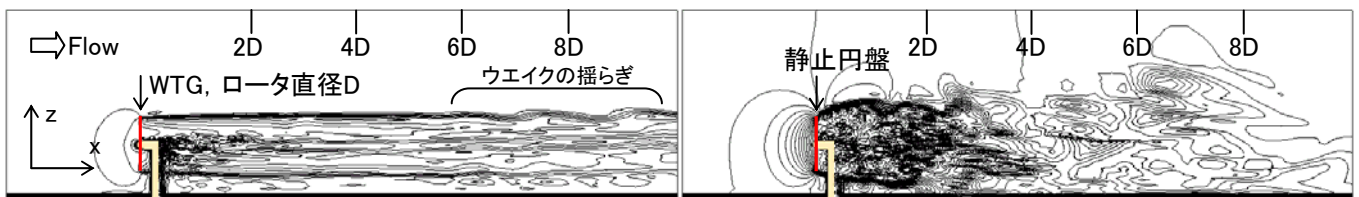
図5には、最適周速比で稼動するWTG単体と静止円盤に関して、主流方向(x)の速度成分のコンター図(Top View, $z=0$)を示す。ここで、コンターの範囲は、 $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割して表示している。図6には、Side View($y=0$)を示す。図5および図6ともに計算領域全体の様子である。この可視化結果を観察して言えることは、最適周速比で稼動するWTG単体と、そのロータ直径と同じ面積を有する静止円盤の後流は明らかに異なるということである。WTGの場合には、WTG下流に形成される後流幅はロータ直径とほぼ同程度である。ここで注目すべきは、WTG下流6D付近から後流に揺らぎが生じているということである(図5および図6に実線で表示)。最適周速比で稼動するWTGの場合、翼先端から非常に強いTip Vortexが形成されている。この存在が、WTG背後の後流と外部流の運動量の交換を抑制し、結果として後流幅がロータ直径程度になっていると推測される。WTG下流6D付近では、その影響が弱まり、シア不安定によ



(a)最適周速比で稼動するWTG

(b)静止円盤

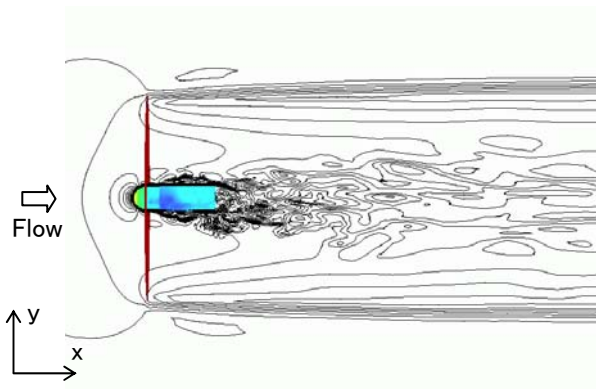
図5 主流方向(x)の速度成分のコンター図, $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割, 瞬間場, 領域全体図, Top View, $z=0$



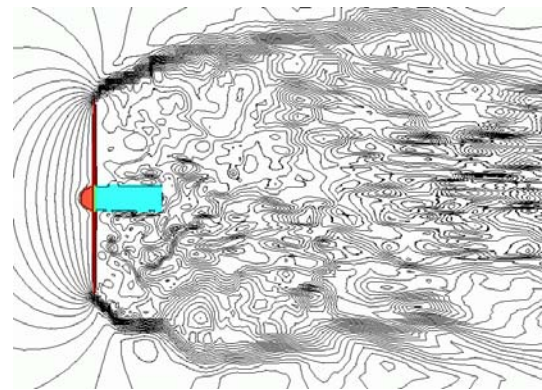
(a)最適周速比で稼動するWTG

(b)静止円盤

図6 主流方向(x)の速度成分のコンター図, $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割, 瞬間場, 領域全体図, Side View, $y=0$

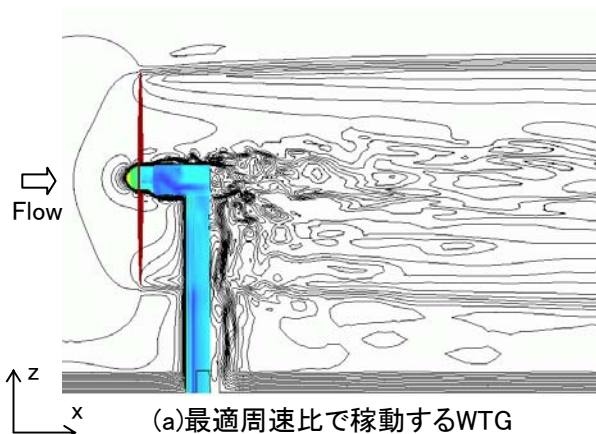


(a)最適周速比で稼動するWTG

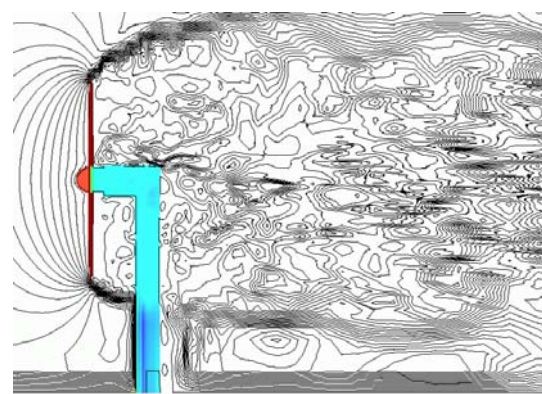


(b)静止円盤

図7 主流方向(x)の速度成分のコンター図, $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割, 瞬間場, 拡大図, Top View, $z=0$



(a)最適周速比で稼動するWTG



(b)静止円盤

図8 主流方向(x)の速度成分のコンター図, $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割, 瞬間場, 拡大図, Side View, $y=0$

り後流が揺らいでいるものと考えられる。言い換えると、最適周速比の状態で作成されるTip Vortexの影響はWTG下流の6D付近にまで及んでいるとも言える。これに対して、静止円盤の後流は非常に複雑な様相を呈している。円盤のすぐ背後には大きな逆流域が形成されている。その主流直交(y)方向の大きさは、円盤を回り込む流れに伴い、WTGの場合よりもかなり大きい。ここから周期的に大規模渦が放出されている。静止円盤における渦放出周期(St数)や渦構造は、流体力学的に非常に興味深い問題を含んでおり、これらは引き続き別途調査を進める予定である。図7および図8には、図5および図6の拡大図を示す。図7および図8の両者ともに、先に述べた後流の違いがより明確に理解される。同時に、スピナ、ナセル、タワーの個々の部位から渦放出とそれに伴う剥離流が形成されている様子が観察される。図7および図8には、スピナ、ナセル、タワーの表面圧力分布も図示している。紙面の都合上、ここでは省略したが、タワー下流にはカルマン渦列の出現も確認された。将来、WTGの耐風安定性や振動問題などの議論では、上記の個々の部位を個別に解析するのではなく、WTG全体として再現することが必要になると予想される。今回提案したデカルト座標系の数値計算手法は非常に簡易であり、これらの問題を検討する際の有用なツールになると期待できる。

図9には、最適周速比で稼動するWTG単体と静止円盤に関して、後流域を流線図によって可視化した結果を示す。ここで、流線図は仮想粒子を配置し、これの軌跡として描いた。図9(a)に示すWTGの場合には、ブレードの回転に伴う旋回流が形成されているのが分かる。一方、円盤の場合には、流線は3次元的に複雑に表示されている。この結果からも、図5～図8で述べたように、円盤後流は複雑乱流場を呈していることが容易に理解される。

図10および図11には、時間平均場に対して描いた主流方向(x)の速度成分のコンター図(Top View, Side View)を示す。この図からも、最適周速比で稼動するWTG単体と、そのロータ直径と同じ面積を有する静止円盤の後流が明らかに異なるということが見て取れる。特筆すべきは、静止円盤のすぐ背後では、大きな逆流域が存在するが、下流10D付近ではWTGと比較して速度回復が早いということである。以下では、この点についてより定量的に議論を進める。

図12および図13には、ロータ中心断面内(x-y断面, x-z断面)の時間平均速度分布を示す。図12に示すx-y断面の結果において、数値計算は一つの実線で示す。また、1型熱線プローブで測定した風洞実験結果も併せて示す。図12

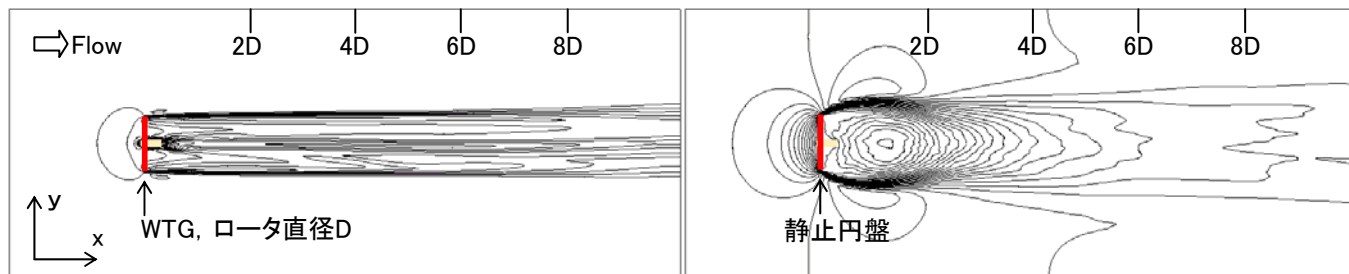
および図13の両者ともに、横軸は一様流入 U で、縦軸はロータ直径 D で正規化している。同図には、ロータ直径 D の範囲を矢印で図示している。図12に示す x - y 断面の結果では、静止円盤の $2D$ を除いて、数値計算の結果(実線)と風洞実験



(a)最適周速比で移動するWTG

(b)静止円盤

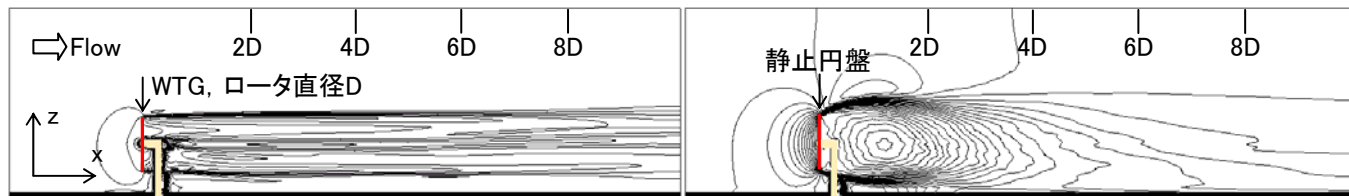
図9 後流域における渦構造の可視化, 流線図, 瞬間場, Rear View



(a)最適周速比で移動するWTG

(b)静止円盤

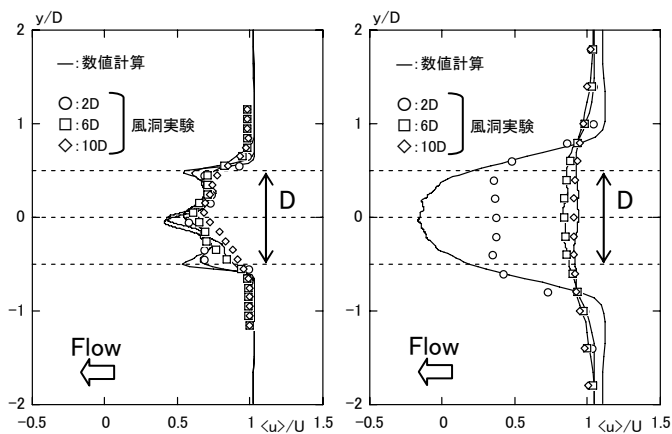
図10 主流方向(x)の速度成分のコンター図, $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割, 時間平均場, 領域全体図, Top View, $z=0$



(a)最適周速比で移動するWTG

(b)静止円盤

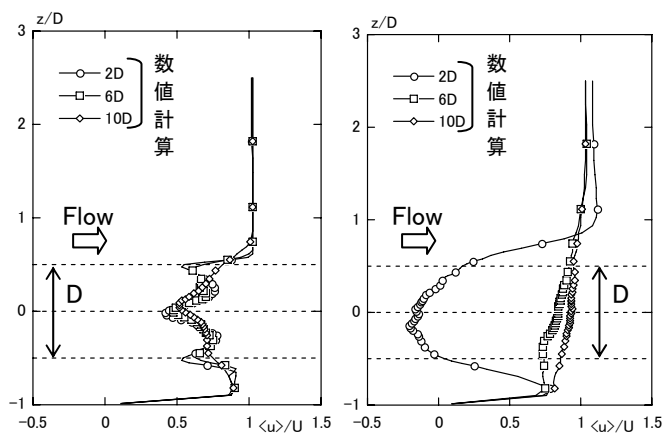
図11 主流方向(x)の速度成分のコンター図, $-0.7 \leq (u/U) \leq 1.4$ を30分割, 時間平均場, 領域全体図, Side View, $y=0$



(a)最適周速比で移動するWTG

(b)静止円盤

図12 主流方向(x)の平均速度分布, x - y 断面, $z=0$



(a)最適周速比で移動するWTG

(b)静止円盤

図13 主流方向(x)の平均速度分布, x - z 断面, $y=0$

験の結果(シンボル)は、WTGおよび静止円盤ともに良く一致している。静止円盤の2Dにおける乖離は、気流計測結果がI型プローブを使用したものであることに起因している。WTGの場合には、WTG中心と外縁付近で数値計算の方が風洞実験に比べて風速の減衰が大きい。これはWTGのモデル化を含めて今後の課題としたい。先に述べたように、6D、10D付近では、静止円盤の方がWTGと比較して速度回復が早いということが示された。WTGの場合には、下流10Dのロータ中心においても流入風速の3~4割程度の速度欠損が存在する。

3. おわりに

本研究では、以下に示す二つの問題を調査した。一つは、最適周速比で稼動するWTG単体に的を絞り、ロータ直径Dの10倍下流の地点において、どの程度の平均速度欠損量が存在するのかを調べた。もう一つは、従来のウエイクモデルの前提になっていた静止円盤後流と、最適周速比で稼動する実際のWTG単体後流の気流性状を比較した。その結果、WTG単体の場合、下流10Dのロータ中心においても、流入風速の3~4割程度の速度欠損が存在することが明らかになった。これは翼先端から形成されるTip Vortexの影響で、WTG後流と外部流の運動量交換が抑制されるためである。また、WTGのロータ直径と同じ面積を有する静止円盤の後流は、WTGの後流とは明らかに異なることが示された。静止円盤の場合には、円盤のすぐ背後において大きな逆流域が存在する。しかしながら、下流10D付近ではWTGと比較して速度回復が非常に早い。引き続き、WTGに対する流入変動風、WTG後流域の乱れの分布の調査や、複数台のWTGを想定した数値シミュレーションを行う予定である。

謝辞

本研究は、財団法人九州産業技術センター(KITEC)による平成17年度「研究開発委託事業」(プロジェクトタイトル:風力タービン候補地選定のためのPC1台によるマイクロサイティング技術の高精度化に関する研究開発、代表:内田孝紀)により多大な支援を頂いた。風洞実験に関しては、九州大学院工学府航空宇宙工学専攻修士課程(研究当時)の永尾公一君に多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内田孝紀, 大屋裕二, 風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの開発—風況精査とリアルタイムシミュレーション—, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, pp.417-428, 2003
- 2) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生, 村上周三, M.F.Yassin, 風車模型後流の流れ性状に関する風洞模型実験, 第17回風工学シンポジウム, pp.149-154, 2002
- 3) 平井滋登, 柴田昌明, 有永真司, 七原俊也, 佐藤隆光, 山口浩司, 実測による大型風車後流の検討, 第25回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.157-160, 2003
- 4) 清水幸丸, 横田健, 前田太佳夫, 安立和弘, 本間秀一郎, 中野美和, 風洞実験による風車相互干渉の基礎的研究, 日本機学会論文集(B編), Vol.70, pp.140-146, 2004
- 5) 服部康男, 山本学, 江口譲, 近藤宏二, 須藤仁, 田中信和, 吉田正邦, 眞田早敏, 風車後流部の乱流挙動, 第18回風工学シンポジウム, pp.157-162, 2004
- 6) 山本学, 近藤宏二, 吉田正邦, 眞田早敏, 風力発電用風車に作用する風力特性, 第18回風工学シンポジウム, pp.163-168, 2004
- 7) 石原孟, 高橋孝介, 山口敦, 藤野陽三, 風洞実験による風車後流の計測及びそのモデル化に関する研究, 日本流体力学会年会2005講演論文集(CD-ROM), 2005
- 8) 内田孝紀, 大屋裕二, 風車単体後流の渦構造解明に向けた基礎的研究, 日本流体力学会年会2005講演論文集(CD-ROM), 2005
- 9) 内田孝紀, 大屋裕二, 風車単体後流の渦構造解明に向けた基礎的研究, 九州大学応用力学研究所所報, 第129号, pp.123-128, 2005
- 10) 内田孝紀, 大屋裕二, 風車後流における渦構造の数値シミュレーション, 平成17年度日本風工学会年次研究発表会梗概集, pp.249-250, 2005
- 11) 永尾公一, 内田孝紀, 大屋裕二, 杉谷賢一郎, 渡辺公彦, 風車後流の気流性状の解明に向けた研究—風洞実験と数値解析—第27回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.125-128, 2005
- 12) 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, 日本機学会論文集(B編), Vol.68, pp.122-129, 2002
- 13) 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
- 14) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂
- 15) 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
- 16) 松宮輝 編著, 図解風力発電のすべて, 工業調査会
- 17) <http://www.aist.go.jp/RIODB/db060/>