

最適周速比における風車後流のラージ・エディ・シミュレーション -第2報 格子乱流により生成した流入変動風の影響-

LARGE-EDDY SIMULATION OF THE WAKE BEHIND WIND TURBINE GENERATOR UNDER OPTIMAL TIP SPEED RATIO

-2nd Report Influence of inflow turbulence generated by grid turbulence-

内田 孝紀¹⁾, 大屋 裕二²⁾
Takanori UCHIDA¹⁾ and Yuji OHYA²⁾

ABSTRACT

In the present numerical study, we carried out the large-eddy simulation (LES) of the wake generated behind the wind turbine generator under optimal tip speed ratio. Particular emphasis was placed on the effect of inflow turbulence on the wake region generated behind the wind turbine generator. Through comparisons between three cases with and without inflow turbulence, the speed loss of about 30-40 percent existed in the wake region (1D-5D) in all the cases, where D is a diameter of a rotor.

Key Words : Wind turbine generator, Wake, LES, Inflow turbulence

1. はじめに

現在, 世界では空前の勢いで風力発電産業が成長を遂げている. これは再生可能エネルギーの中で風力発電が最も脱化石燃料, CO₂削減に対してコストパフォーマンスが高いからである. 日本においても風力発電が最も有力な再生可能エネルギーであることは間違いなく, 風力発電をより一層普及させることが, 地球温暖化の克服「グリーン・イノベーション」に世界的な規模で貢献すると確信する. 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.

我々の研究グループでは, 数(十)km以下のマイクロスケールの空間を対象に, 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(kWh)や設備利用率(%)を試算可能な数値風況予測技術を開発している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)の開発を進めている. 日本のオンショア(陸上)風力発電では, 山岳地域に大型のWTGを複数台集中的に建設せざるを得ない状況になりつつあり, WTG相互の干渉でWF全体の電力量が低下しないよう, その離隔距離を決めるウエイクモデルの開発は最重要検討課題である. 一方, 今後ますます注目を集めることが予想されるオフショア(洋上)風力発電においても, WTGの離隔距離の問題は顕在化してくると考えられる. 本研究の最終目的は, 高精度なウエイクモデルを構築し, これを数値風況予測技術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. 前報⁸⁾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. 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

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

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。前報⁸⁾では、WTGに対する流入変動風の影響について疑問が残った。そこで本研究では、WTG単体の上流側に格子乱流を設置し、これが作り出す乱れがWTG後流の気流性状にどのような影響を与えるかを検討したので報告する。

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(有限)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⁹⁾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、オイラー陽解法を基礎とした部分段階法¹⁰⁾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、対流項は補間法¹¹⁾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した修正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¹²⁾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¹³⁾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。つまり、物体としての壁面境界条件は無い。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¹⁴⁾をベースに翼根を厚翼に修正したものである。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。

2.3 計算対象領域と諸条件

前報⁸⁾では、風洞実験の条件設定を数値シミュレーションで忠実に再現するため、図3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全て再現し、地面上に置かれたWTGを過ぎる流れの数値シミュレーションを実施した。本報では、ナセルおよびタワーは省略し、スピナおよびロータで構成される部分のみを計算対象とした(図4を参照)。図4に計算領域および境界条件などを示す。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)、

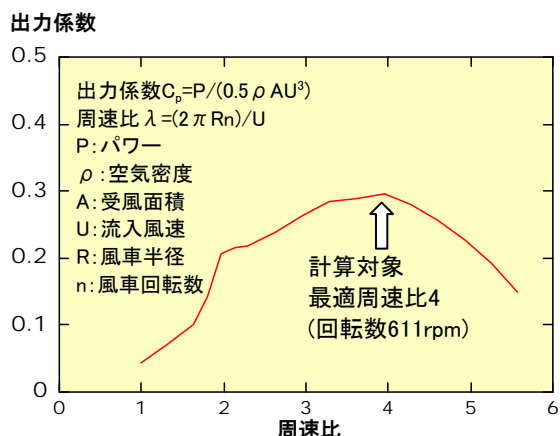


図1 本研究で対象にした風車(WTG)の周速比と出力係数の関係、風洞実験の結果

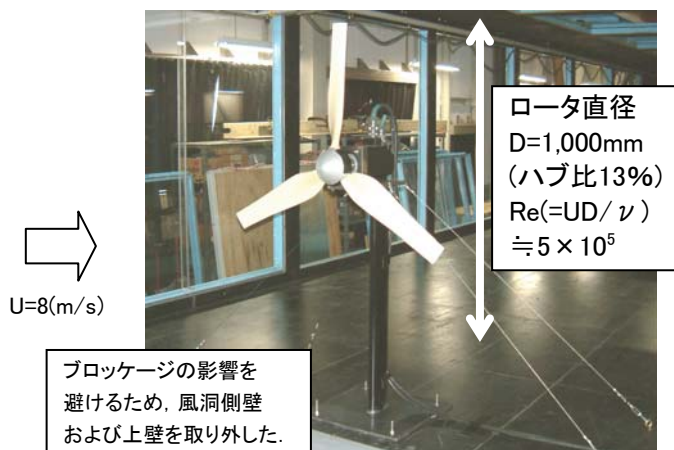


図2 風車(WTG)模型の概観図

鉛直方向(z)に $7.5D(x) \times 2D(y) \times 2D(z)$ の空間を有する。格子点数はx, y, z方向に $212 \times 171 \times 171$ 点(約620万メッシュ)である。本研究では、スピナ形状を再現するため、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、上方および下方境界面には水平風速成分(\bar{u} , \bar{v})の鉛直方向勾配がゼロ、鉛直風速成分(\bar{w})をゼロとする滑り条件、側方境界面には水平風速成分(\bar{u})と鉛直風速成分(\bar{w})の主流直交方向勾配がゼロ、水平風速成分(\bar{v})をゼロとする滑り条件、流出境界面には対流型流出条件を課す。流入境界断面には、一様流入条件を与える。スピナはそこに含まれる格子点に流速ゼロの条件を与えた。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。本研究では、WTGに対する流入変動風の影響を調べるため、三ケースの計算を実行した。ケース1は格子乱流を設置しない計算、ケース2は格子間隔が小さい計算、ケース3は格子間隔が大きい計算である(図5を参照)。便宜上、それぞれの計算を以後、ケース1(流入変動なし)、ケース2(格子間隔_小)、ケース3(格子間隔_大)と呼ぶこととする。WTGのすぐ前方の $x=-0.5D$ で評価したケース2およびケース3の主流方向(x)の標準偏差(σ_u/U)は0.12と0.14程度であった。

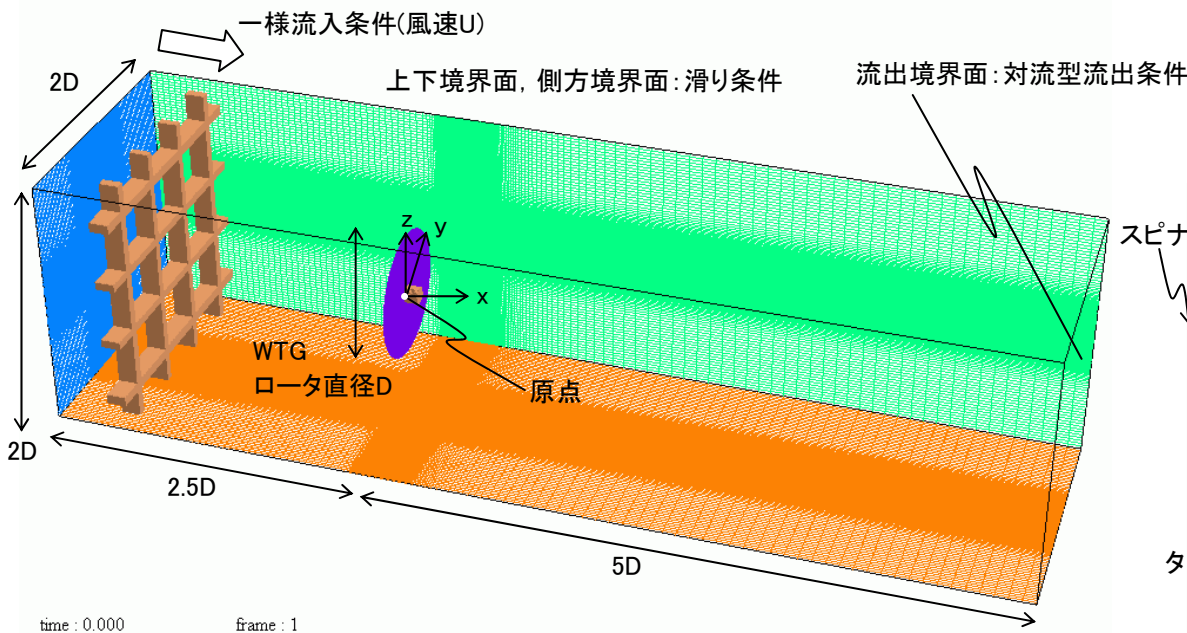


図4 計算領域および境界条件など, ケース3(格子間隔_大)

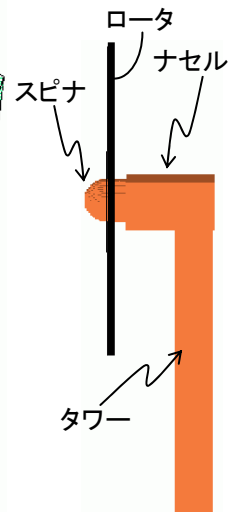
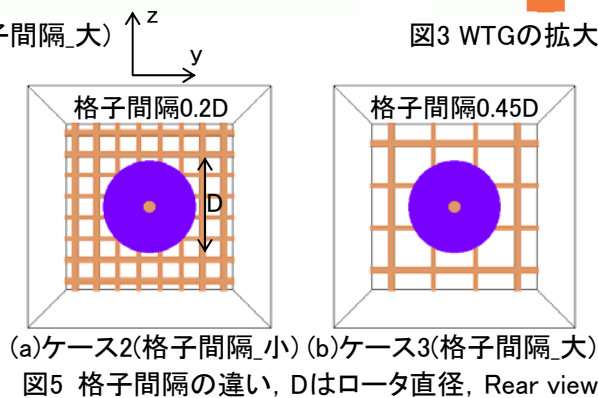


図3 WTGの拡大図

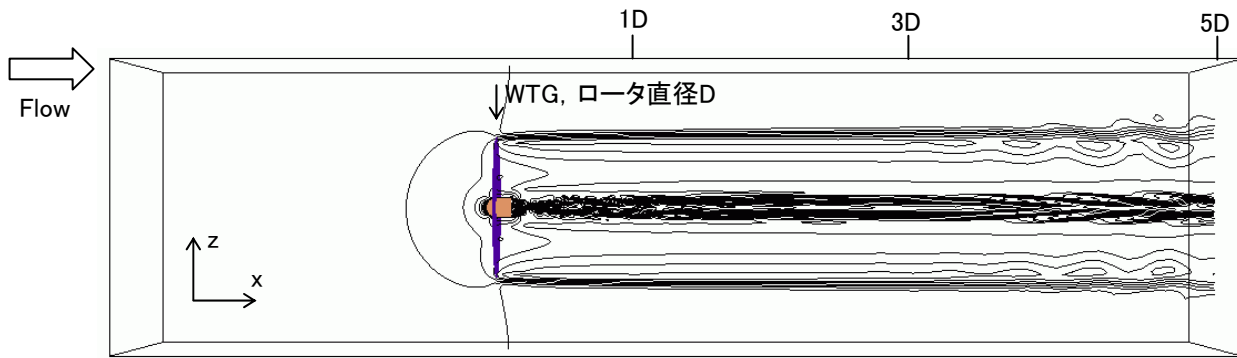
2.4 計算結果と考察

図6には、最適周速比で稼動するWTG単体に関して、主流方向(x)の速度成分(\bar{u})のコンター図(Side View, $y=0$)を示す。ここで、コンターの範囲は、 $-0.7 \leq (\bar{u}/U) \leq 1.4$ を30分割して表示している。図6(a)に示すケース1(流入変動なし)では、前報⁸⁾で議論したように、WTG下流の5Dまでロータ直径とほぼ同じ幅で後流域が形成されているのが観察される。図6(b), (c)に示すケース2(格子間隔_小)、ケース3(格子間隔_大)では、WTGの上流側に設置した格子の背後に乱流場が形成されおり、これがWTGの流入気流として流下しているのが分かる。図6(b)に示すケース2(格子間隔_小)では、図6(c)に示すケース3(格子間隔_大)と比較して、より細かな変動が格子背後に形成されている。両ケースともに、流入変動気流がWTG背後に形成されている後流域と相互に干渉している様子が見て取れる。ここで特筆すべきは、両ケースともに、図6(a)に示すケース1(流入変動なし)と同様、WTGが形成する後流域が明確に存在することである。

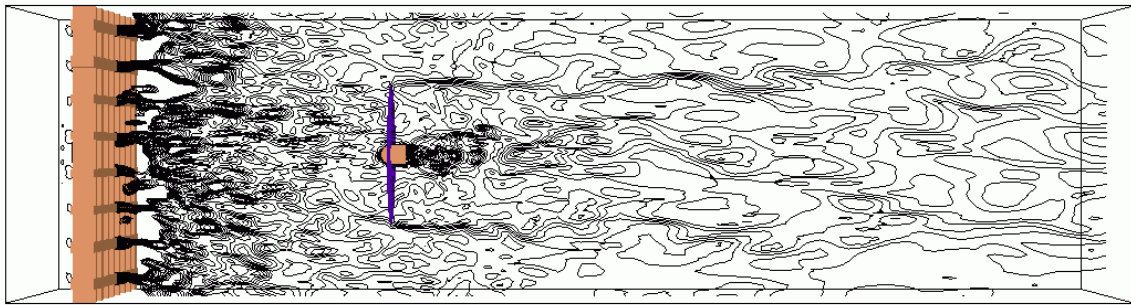
図7には、図6と同じ時刻における主流方向(x)の速度成分(\bar{u})のコンター図(Rear View, $x=1D, 3D, 5D$, Dはロータ直径)を示す。コンターの範囲はこれまでと同様、 $-0.7 \leq (\bar{u}/U) \leq 1.4$ を30分割して表示している。図7(a)に示すケース1(流入変動なし)では、図6(a)で既に説明したように、WTG下流の5D付近までロータ直径とほぼ同じ幅を有し、円状の後流域が形成されているのが観察される。前報⁸⁾で議論したように、これは翼先端から形成されるTip Vortexの影響で、



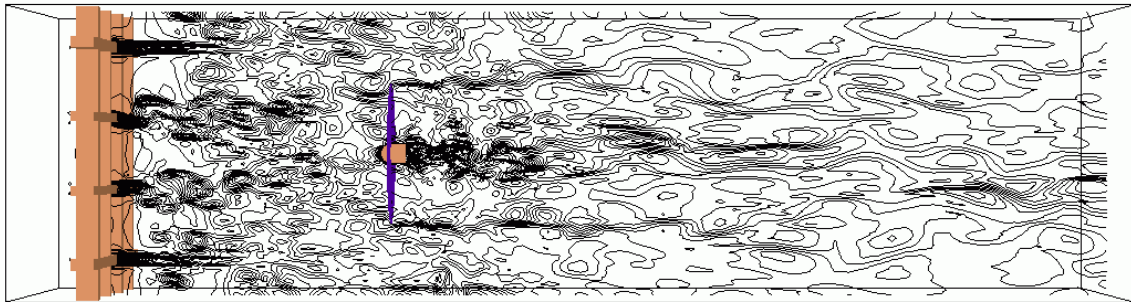
(a)ケース2(格子間隔_小) (b)ケース3(格子間隔_大)
図5 格子間隔の違い, Dはロータ直径, Rear view



(a)ケース1(流入変動なし)

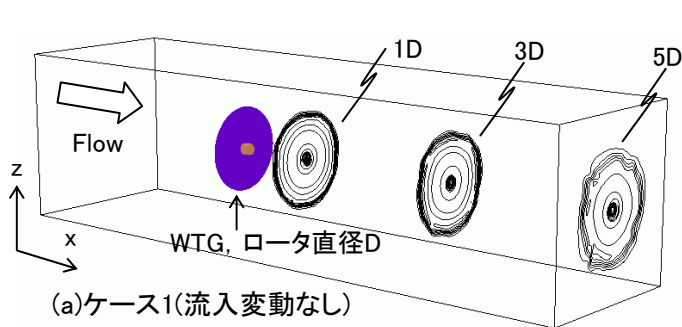


(b)ケース2(格子間隔_小)

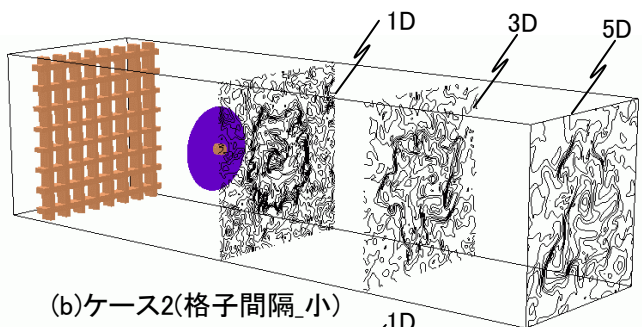


(c)ケース3(格子間隔_大)

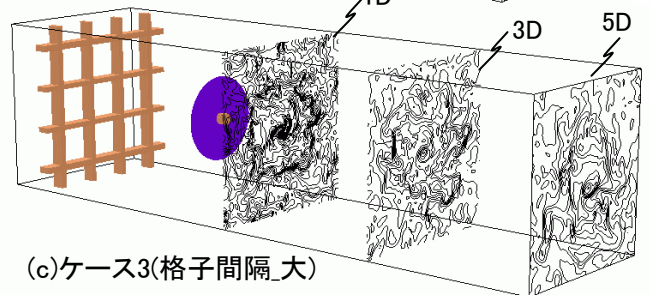
図6 主流方向(x)の速度成分(\bar{u})のコンター図, $-0.7 \leq (\bar{u}/U) \leq 1.4$ を30分割, 瞬間場, 領域全体, Side View, $y=0$



(a)ケース1(流入変動なし)



(b)ケース2(格子間隔_小)



(c)ケース3(格子間隔_大)

図7 主流方向(x)の速度成分(\bar{u})のコンター図, $-0.7 \leq (\bar{u}/U) \leq 1.4$ を30分割, 瞬間場, 領域全体図, Rear View

WTG後流と外部流の運動量交換が抑制されるためであると考えられる。図7(b), (c)に示すケース2(格子間隔_小), ケース3(格子間隔_大)では, 設置した格子背後に形成された乱流場がWTGの流入気流として流下し, WTG背後に形成されている後流域と相互に干渉しているのが分かる。特に, 外部流と円状のWTG後流の境界付近でその傾向が強い。図7(b), (c)の両ケースとも $x=5D$ の位置でもWTGが形成する後流の影響が明確に存在している点は興味深い。

図6に示す瞬間場に関して, 無次元スケールで100時間の平均を施した気流場に対して描いた主流方向(x)の速度成分($\langle \bar{u} \rangle$)のコンター図(Side View, $y=0$)を図8に示す。この図から, 図8(a)に示すケース1(流入変動なし)と, 図8(b), (c)に示すケース2(格子間隔_小), ケース3(格子間隔_大)で

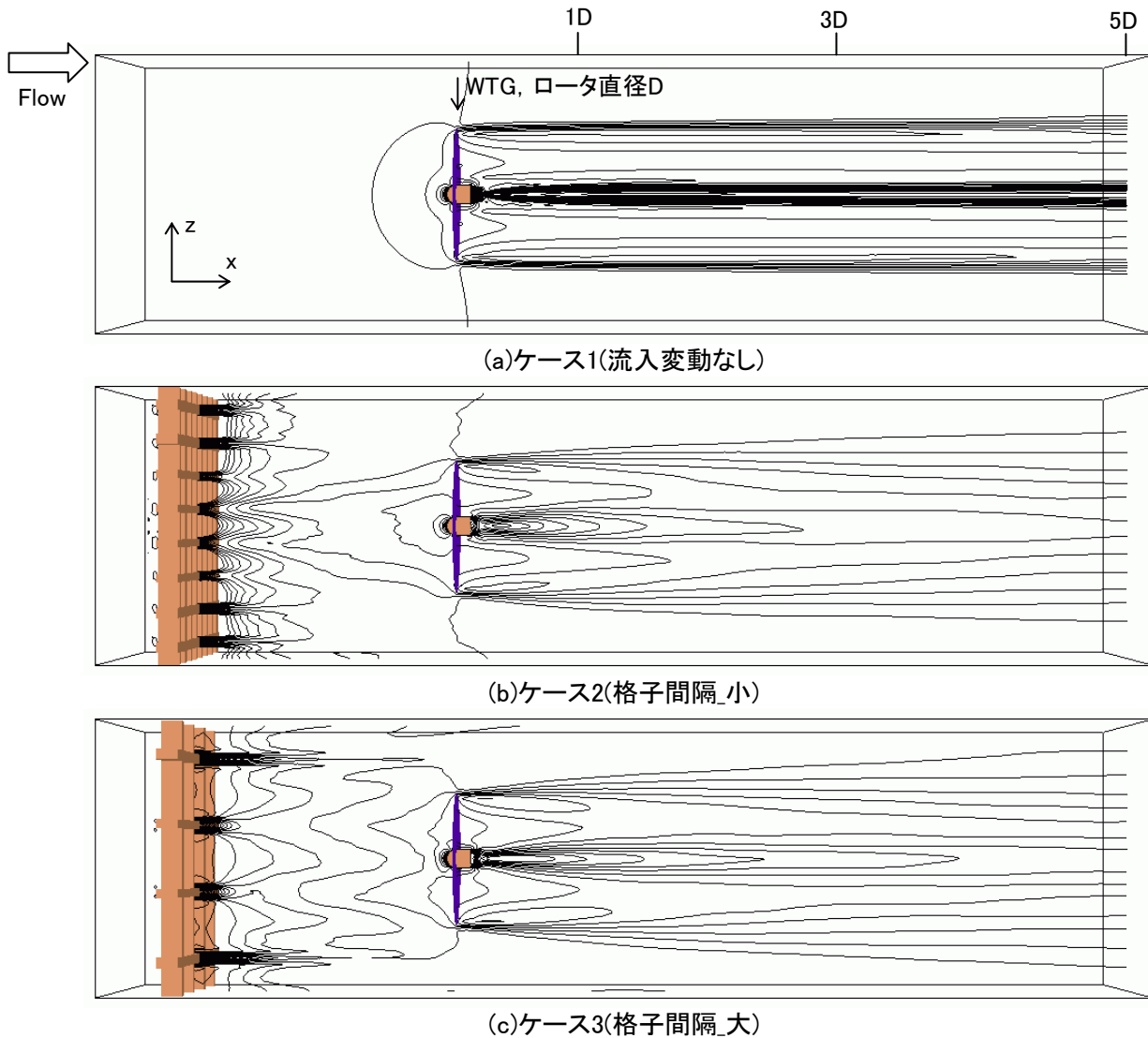


図8 主流方向(x)の速度成分 $\langle \bar{u} \rangle$ のコンター図, $-0.7 \leq \langle \bar{u} \rangle / U \leq 1.4$ を30分割, 時間平均場, 領域全体, Side View, $y=0$

は, 後流域の主流直交方向(z)の幅に有意な差異が生じているのが分かる. つまり, ケース2(格子間隔_小), ケース3(格子間隔_大)では, ケース1(流入変動なし)と比較して後流幅が流下方向に徐々に広がっている. 格子間隔の違いがあるにも関わらず, その傾向は両ケースではほぼ同じである. 以下では, それぞれのケースにおける後流域の気流性状を定量的に議論する.

図9には, $x=1D, 3D, 5D$ におけるロータ中心断面内(x-z断面)の時間平均速度分布 $\langle \bar{u} \rangle / U$ を示す. ここで示すUは一樣流入風速ではなく, それぞれの位置における $z/D=1$ の風速を意味する. 実線がケース1(流入変動なし), ○がケース2(格子間隔_小), ×がケース3(格子間隔_大)である. 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. ケース1に関して, 図中実線で示す部分は, スピナ後流の影響である. ケース1では, $x=1D, 3D, 5D$ の全ての位置において $z/D=\pm 0.5$ 付近に大きな速度シアーが存在する. ケース2およびケース3では, 流入変動風の影響により, $z/D=\pm 0.5$ 付近の大きな速度シアーは存在しない. 流入気流が有する乱れの有無に関係なく, 全てのケースともにロータ中心位置では, 3~4割程度の速度欠損が明確に存在する.

図10には, 図9に対応したロータ中心断面内(x-z断面)における標準偏差分布 (σ_u / U) を示す. 図中実線で示す部分は, スピナ後流の影響である. 予想されるように, ケース2およびケース3では, ケース1と比較して全ての地点でその値が大きい. 但し, スピナ後流域を除いてケース2およびケース3はほぼ同じ傾向を示した. $z/D=\pm 0.5$ 付近には極大値が存在する.

3. おわりに

本研究では, WTG単体の上流側に格子乱流を設置し, これが作り出す乱れがWTG後流の気流性状にどのような影響を与えるかを検討した. その結果, 流入気流が有する乱れの有無に関係なく, 全てのケースともにロータ中心位置で

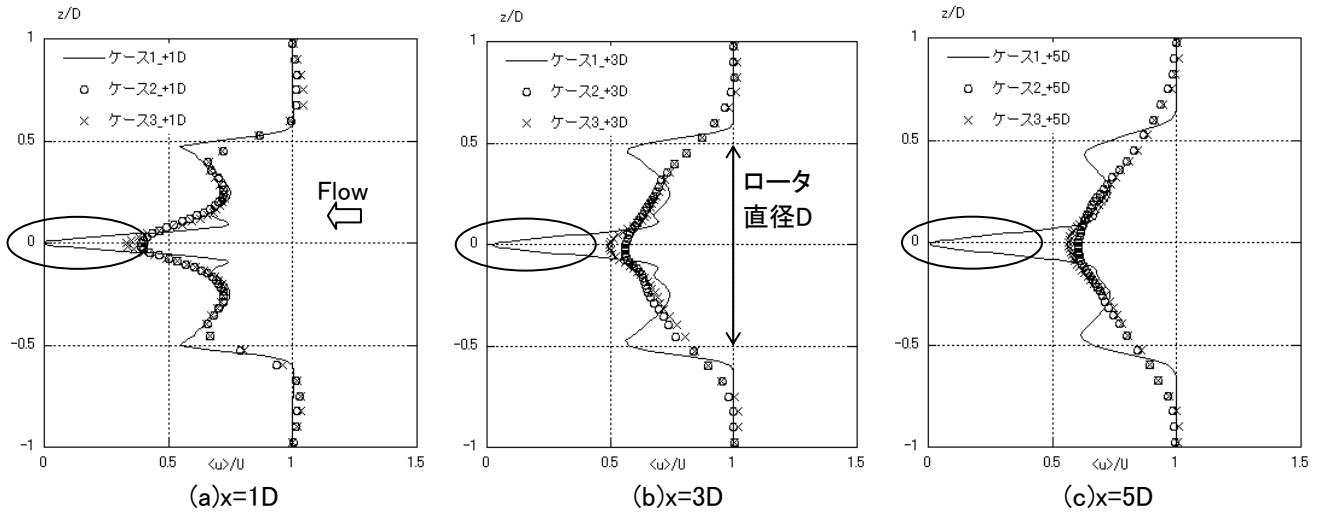


図9 主流方向(x)の平均速度分布($\langle \bar{u} \rangle / U$), x-z断面, y=0

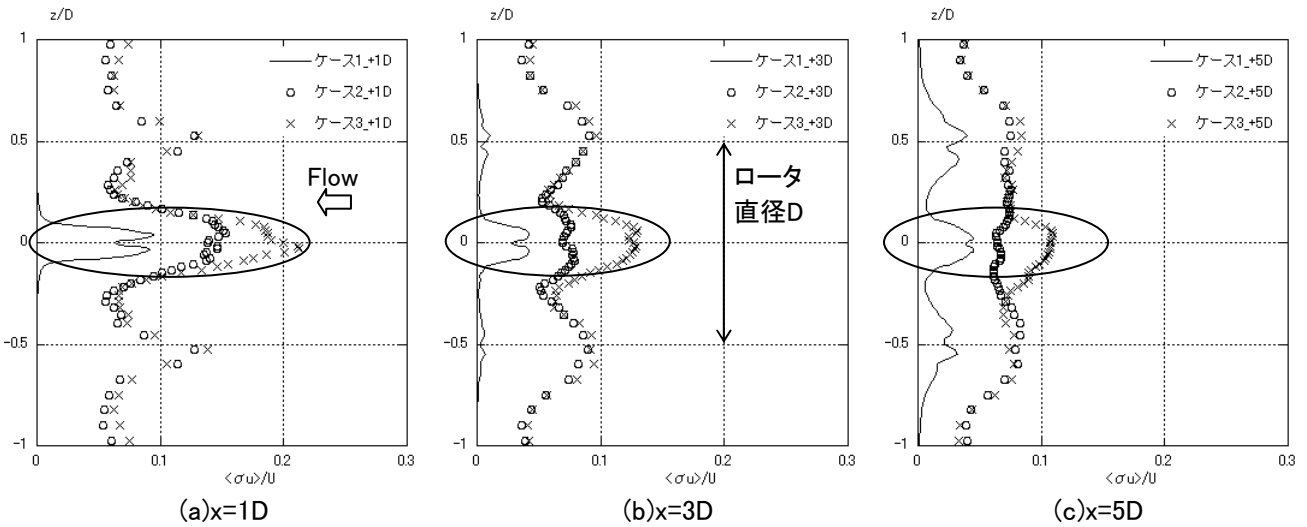


図10 主流方向(x)の標準偏差分布($\langle \sigma_u \rangle / U$), x-z断面, y=0

は、3～4割程度の速度欠損が明確に存在することが示された。

謝辞

本研究の一部は、2010年度～2011年度、科学研究補助金若手研究(A)、(研究代表者:内田孝紀)、2010年度(財)中部電力基礎技術研究所 第21期研究助成、(研究代表者:内田孝紀)の援助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) T.Uchida and Y.Ohya, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008
- 2) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生, 村上周三, M.F.Yassin, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 杉谷賢一郎, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.187-192, 2006
- 9) 稲垣昌英, 近藤継男, 長野靖尚, 日本機学会論文集(B編), Vol.68, pp.122-129, 2002
- 10) J.Kim and P.Moin, J. Comput. Phys., Vol.59, pp.308-323, 1985
- 11) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂
- 12) T. Kawamura, H. Takami and K. Kuwahara, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986
- 13) 松宮輝 編著, 図解風力発電のすべて, 工業調査会
- 14) <http://riodb.ibase.aist.go.jp/db060/>