

アクチュエータ・ディスク・モデルを用いた  
風車後流のラージ・エディ・シミュレーション  
(風車タワーが風速分布に与える影響)

Large-Eddy Simulation of a Wind Turbine Wake Using an Actuator Disk Model  
(On the Influence of the Wind Turbine Tower on the Wind Velocity Distribution)

河野 孝昭\*1  
Takaaki KONO

小垣 哲也\*2  
Tetsuya KOGAKI

\*1 Assistant Professor, Kanazawa University, Research Center for Sustainable Energy & Technology, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, 920-1192, Japan  
E-mail: t-kono@se.kanazawa-u.ac.jp

\*2 Research Scientist, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Energy Technology Research Institute, 1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, 305-8564, Japan

Abstract

This study investigated the influence of a wind turbine tower on the wind velocity distribution in the wake of a wind turbine. Large-eddy simulation (LES) of the wind flow around the wind turbine was performed using an actuator disk model for the rotor and by explicitly resolving the tower and nacelle. In addition, LES with no tower was performed. With regard to the streamwise component of the wind velocity in the wind turbine wake, the LES with tower reproduced the asymmetric distribution in the lateral direction, which was observed in a wind tunnel experiment, while the LES with no tower produced symmetric distribution. From the visualization of the LES results, it was considered that the enhanced turbulence and decreased velocity of wind flow behind the tower were attributable to the above-mentioned asymmetric wind velocity distribution predicted by the LES with tower.

キーワード：風車後流, アクチュエータ・ディスク・モデル, ラージ・エディ・シミュレーション  
Key Words: Wind turbine wake, Actuator disk model, Large-eddy simulation

1. はじめに

風力発電機の風車を近接して複数台導入する場合、風上側風車の後流の減衰した風速により、風下側風車は、発電量が大幅に低下したり、極端にアンバランスな分布の風荷重がかかって寿命が短くなる可能性が生じる<sup>1)</sup>。これらのリスクを極力低減した風車配置設計を行う上では、風車後流の詳細な風速分布を把握することが重要であり、その為の手法の一つとして数値流体力学(CFD)解析が挙げられる。

風車周りの流れのCFD解析は、風車のブレードを陽的に解像するものと、ブレードに作用する力をNavier-Stokes方程式の外力項で取り扱うものの2つに大別できる<sup>2)</sup>。前者は計算コストがかかる為、風車後流解析への適用事例は極めて限られている。一方、後者は、風車ロータの形状を円盤で近似したアクチュエータ・ディスク(AD)モデルや、ブレードの形状を線で近似したアクチュエータ・ライン(AL)モデル等の開

発が進められてきており、風車単体だけでなく、ウィンドファームを対象とした解析への適用事例も増えてきている。

ADモデルやALモデルを用いたCFD解析の風車後流風速の再現性について風洞実験結果と比較検討した既往の主な研究としては、Cabezon et al. (2011)<sup>3)</sup>、Porte-Agel et al. (2011)<sup>4)</sup>、Uchida et al. (2011)<sup>5)</sup>、Wu and Porte-Agel (2011)<sup>6)</sup>、Troldborg et al. (2010)<sup>7)</sup>が挙げられる。これらの研究は全て、アップウィンド型の水平軸風車を対象にしている。筆者らは、これらの文献に共通して、風洞実験結果のハブ高さにおける風車後流風速の主流直角方向分布に、大きな非対称性が存在していることに着目した。この非対称性については全く議論・言及されていないが、Uchida et al. (2011)<sup>5)</sup>のみはCFD解析で定性的な傾向を再現出来ている。Uchida et al. (2011)<sup>5)</sup>のCFD解析では、ハブ及びナセルと風車タワーを陽的に解像しているところに特徴がある。Porte-Agel et al. (2011)<sup>4)</sup>及びWu and Porte-Agel (2011)<sup>6)</sup>は、ナセルと風車タワーから受ける力をNavier-Stokes方程式の外力項に反映させているが、ナセルとタワーの影響を考慮していないその他の文献同様、上述の非

\*1 金沢大学助教 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: t-kono@se.kanazawa-u.ac.jp

\*2 産業技術総合研究所研究員  
(原稿受付: 2012年 1月 18日)

対称性を再現できていない。加えて、風洞実験との比較は行っていないが、内田ら(2010)<sup>8)</sup>の、ハブ(正確にはスピナ)のみを陽的に解像しナセル及びタワーの影響を無視したCFD解析でも、上述の非対称性を再現できていない。

以上より、風車後流風速の主流直角方向の非対称な分布は、タワーが存在することにより生じている可能性が考えられる。そこで本研究では、タワーを陽的に解像した場合とタワーの影響を無視した場合についてADモデルを用いたラーズ・エディ・シミュレーション(LES)を実施することにより、タワーが風車後流の風速分布に与える影響について実証する。

## 2. 計算手法

本論文では、 $z$ 方向を鉛直方向とする右手系直交座標系 $(x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$ を用い、中立の大気安定度状態における非圧縮性流体を対象とする。解析に用いたシミュレーション・コードは、流体解析ソフトウェアFrontFlow/red<sup>9)</sup>(ver. 3.1.004)を基に開発した。

### 2.1 支配方程式と離散化法

支配方程式は、フィルター操作された連続の式

$$\frac{\partial u_i^g}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

とフィルター操作されたNavier-Stokes方程式

$$\frac{\partial u_i^g}{\partial t} + \frac{\partial u_i^g u_j^g}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^g}{\partial x_i} + 2\nu \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i^g}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^g}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \{u_i u_j\}^g - u_i^g u_j^g \quad (4)$$

である。ここで、 $u_i$ は $x_i$ 方向の風速成分、 $p$ は圧力、 $\nu$ は分子動粘性係数、 $t$ は時間、 $\rho$ は空気密度、 $f_i$ は風車ロータから受ける力であり、上付き $g$ は計算格子スケールのフィルター操作が施された量であることを示す。サブグリッド・スケール(SGS)応力は、標準Smagorinskyモデル

$$\tau_{ij} = \{C_s f_v \Delta\}^2 \{2S_{ij} S_{ij}\}^{1/2} \quad (5)$$

を用いて算出する。ここで、 $C_s$ はSmagorinsky定数であり、本解析では0.1とする。また、 $f_v$ はVan Driestの減衰関数、 $\Delta$ は計算格子スケールである。

支配方程式の空間離散化はコロケート格子上でセル接点法に基づく有限体積法により行う。移流項には、

数値安定性を確保する為に、ロータ近傍領域(ロータの風上側3格子、風下側1格子)で一次精度風上差分、その他の領域で90%の二次精度の中心差分法と10%の一次精度風上差分法の混合スキームを用い、その他の項は二次精度の中心差分法で離散化する。計算アルゴリズムにはSMAC法を用い、時間積分はEuler陰解法により行う。

### 2.2 アクチュエータ・ディスク・モデル

ロータから受ける力 $f_i$ は、以下に示す翼素理論<sup>10)</sup>に基づくADモデルにより算出する。

図1は、ロータ平面が主流方向 $x$ と正対する風車における、ロータ中心からブレードの半径方向に距離 $r$ の位置の翼素 $dr$ に作用する揚力 $dF_L$ 及び抗力 $dF_D$ と相対風速 $V$ の関係を表している。ここで、 $\theta$ はロータ回転方向、 $u_\theta$ は $\theta$ 方向風速、 $\omega$ は回転角速度、 $c$ は翼弦長、 $\alpha$ は迎角、 $\gamma$ は設定角であり、

$$V = \sqrt{u_1^2 + (r\omega - u_\theta)^2} \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{u_1}{r\omega - u_\theta} \right) - \gamma \quad (7)$$

の関係が成り立つ。

$dr$ に作用する $dF_L$ 及び $dF_D$ は、揚力係数 $C_L$ 及び抗力係数 $C_D$ を用いて

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 c dr \quad (8)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 c dr \quad (9)$$

と表せ、推力 $dF_x$ 及び接線力 $dF_\theta$ は

$$dF_x = dF_L \cos(\alpha + \gamma) + dF_D \sin(\alpha + \gamma) \quad (10)$$

$$dF_\theta = dF_L \sin(\alpha + \gamma) - dF_D \cos(\alpha + \gamma) \quad (11)$$

と表せる。

ブレード枚数 $B$ のロータを半径 $R$ 且つ $x$ 方向の計算

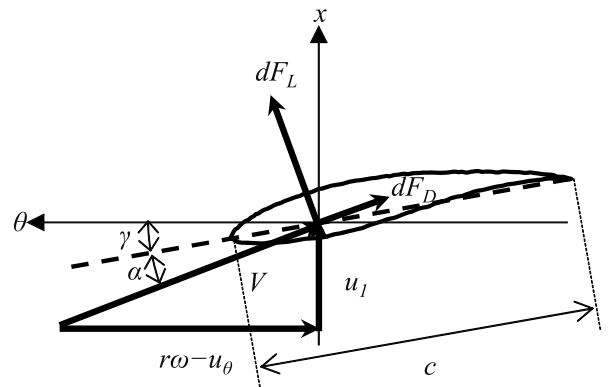


図1 翼素に作用する揚力 $dF_L$ 、抗力 $dF_D$ と相対風速 $V$ の関係

格子幅 $\Delta_x$ の厚さの円盤と仮定すると、原点に位置するロータ中心から半径方向に $r$ のポイントにおける流体がロータから受ける体積力の $x$ 方向成分 $f_x$ 及び $\theta$ 方向成分 $f_\theta$ は

$$f_x = \begin{cases} -\frac{B}{2\pi r} \frac{dF_x}{\Delta_x dr}, & -\frac{\Delta_x}{2} \leq x \leq \frac{\Delta_x}{2}, r \leq R \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (12)$$

$$f_\theta = \begin{cases} -\frac{B}{2\pi r} \frac{dF_\theta}{\Delta_x dr}, & -\frac{\Delta_x}{2} \leq x \leq \frac{\Delta_x}{2}, r \leq R \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (13)$$

と表すことが出来る。ここで、 $Bd\theta/2\pi$ は、 $r$ の位置にある微小体積  $rdrd\theta\Delta_x$  の空間に翼素が存在する確率である。 $f_i$ の $x$ 方向成分は $f_x$ であり、 $y, z$ 方向成分は $f_\theta$ をそれぞれの方向に分解して与える。

### 2.3 計算条件

計算対象は、Krogstad and Adaramola (2011)<sup>11)</sup>により実施された風洞実験の中で、後流風速の主流直角方向の分布に顕著な非対称性が現れている周速比 $\lambda = 5.79$ のケースである。

ハブ及びナセルとタワーを陽的に解像した計算ケース (Tower ケース) の計算領域を図2に、計算格子を図3に示す。ロータの直径は $D = 0.894$  mであり、計算領域の $y-z$ 断面及び風車の大きさは風洞実験での大きさと一致させている。ハブ及びナセルの形状は半楕円体2つと円柱から成る流線形をしており、タワーは直径の異なる円柱を4段重ねたものである<sup>11,12)</sup>。ハブ高さは $0.91D$ であり、ハブ、ナセル及びタワーの壁面から第一格子点までの距離は約 $0.001D$ である。ロータ周辺にはO型格子を用い、ロータは半径方向に50分割、 $\theta$ 方向に100分割し、 $\Delta_x$ は約 $0.006D$ である。O型格子の外側には、 $-0.62D \leq x \leq 0.84D$ 、 $-0.78D \leq y \leq$

$0.78D$ 、 $-0.91D \leq z \leq 0.82D$ の領域で非構造格子を用い、その外側の領域には直方体格子を用いている。総節点数は、約280万である。

タワーの影響を無視した計算ケース (No\_Tower ケース) の計算領域の大きさは Tower ケースと同じである。計算格子は、タワー近傍以外 Tower ケースと同じであり、タワー近傍においては、 $z = 0$ の $x-y$ 断面に対して床面近傍を除き $\pm z$ 側と対称になっている。総節点数は約260万である。

計算格子の妥当性については、No\_Tower ケースにおいてハブを考慮せず、ナセルを $x = -0.06D \sim 0.06D$ の範囲で再現した設定で、ロータ及びナセルの解像度を $x, r, \theta$ 方向にそれぞれ2倍にした場合に、後流の風速及び乱流エネルギーの分布がほとんど変化しないことを確認している。タワーの格子解像度は、大部分がナセルに用いた解像度と同程度で、接合部付近においては、その数倍細かな解像度を設定している。

ロータは、翼根から翼端に渡って断面がNREL S826翼形<sup>13)</sup> (図1)のブレード3枚で構成されている。図4に、ブレード半径方向の $c$ 及び $\gamma$ の分布<sup>12)</sup>を示す。翼根から翼端にかけて $V$ 及び $c$ が変化する為、翼形解析ソフトウェアXflr5<sup>14)</sup>を用いて、 $C_L$ 及び $C_D$ のデータセットを $V$ 及び $c$ に基づく Reynolds 数 ( $Re_{Vc}$ ) について $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$ 、 $\alpha$ について $-15^\circ \sim 35^\circ$ の範囲で作成した (図5)。ここで、 $Re_{Vc}$ は、 $1 \times 10^5$ まで $1 \times 10^4$ 刻み、それ以上は $1 \times 10^5$ 刻みでデータを作成したが、図5では見易さのため間引いて表示している。更に、

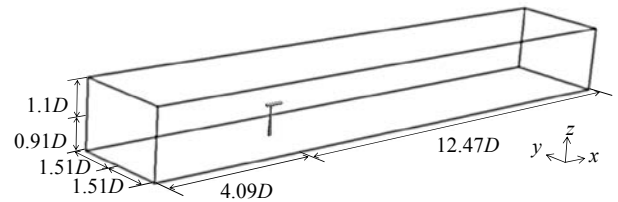
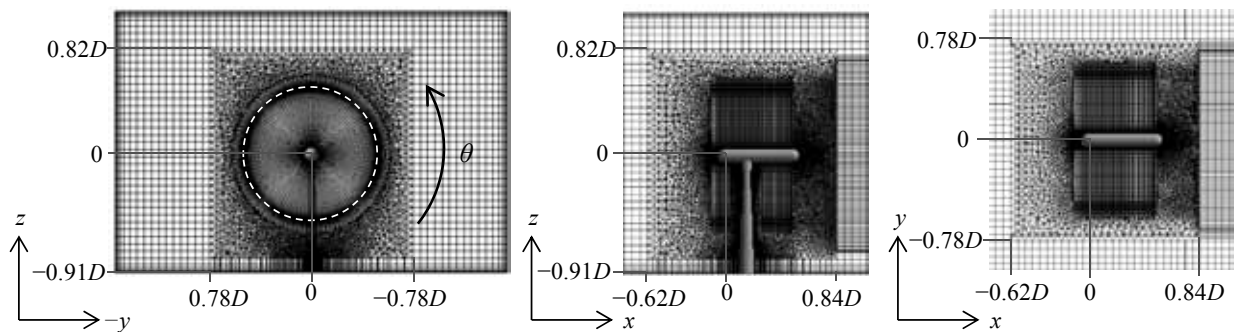


図2 計算領域 ( $D$ :ロータ直径 0.894 m)

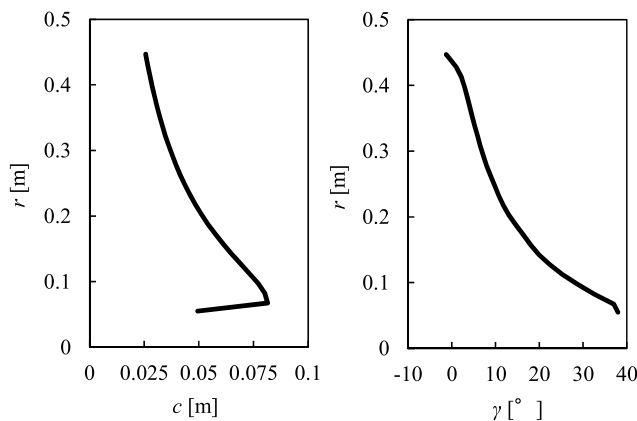


(a)  $x = 0$  における  $y-z$  断面  
(白点線はロータ外周の位置)

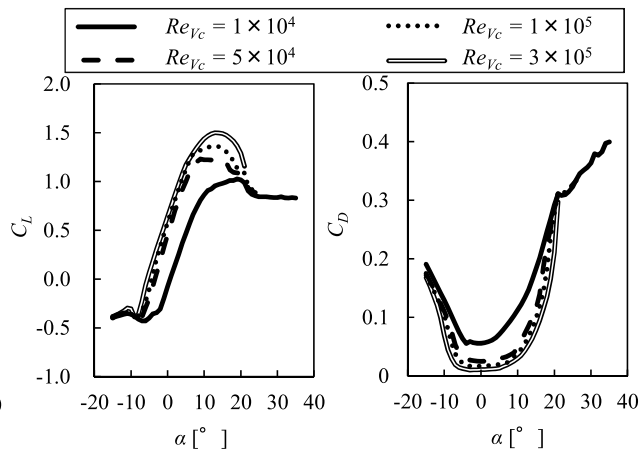
(b)  $y = 0$  における  $x-z$  断面

(c)  $z = 0$  における  $x-y$  断面

図3 風車近傍の計算格子 (原点:ロータ中心)



(a) 翼弦長 (b) 設定角  
図4 ブレードの翼弦長と設定角の半径方向分布



(a) 揚力係数 (b) 抗力係数  
図5 Xflr5<sup>14)</sup>により算出したブレードの空力係数

表1 計算領域の境界条件

境界面		境界条件
主流方向	流入 $x/D = -4.09$	変動流入風 (図7)
	流出 $x/D = 12.47$	自由流出
スパン方向	$y/D = \pm 1.51$	滑面上の対数則
鉛直方向	上面 $z/D = 1.1$	滑面上の対数則
	下面 $z/D = -0.91$	滑面上の対数則
ハブ, ナセル, タワー		滑面上の対数則

高  $Re_{vc}$  且つ高  $\alpha$  においては、解が発散した為  $C_L$  及び  $C_D$  が求まらなかったが、 $Re_{vc}$  が最大となる翼端でも  $Re_{vc}$  は高々  $1 \times 10^5$ 、 $\alpha$  は高々  $10^\circ$  であり問題にはならない。

表1に計算領域の境界条件を示す。流入境界で与える変動流入風のデータは、風洞実験の乱れ強度 ( $\sigma_w/U_\infty = 0.003$ ) に合わせる為、一様流 (風速  $U_\infty = 10$  m/s) を図6の様に格子を用いて乱流化し、その後約  $650D$  吹走させて作成した。図7には、流入境界におけるハブ高さの平均風速分布及び乱れ強度分布とともに、No\_Tower ケースの設定で  $f_i = 0$  とした No\_Tower\_No\_Rotor ケースにおける  $x/D = 1$  の位置のハブ高さの乱れ強度分布を示している。ナセル後流を除き  $x/D = 1$  の乱れ強度と流入境界の乱れ強度の差が非常に小さいことから、ロータ近傍に付与した一次精度風上差分の数値粘性が流入風の乱れに与える影響は非常に小さいものと考えられる。ハブ、タワー、ナセルの壁面上の風速分布は、流れの衝突・剥離・循環が生じる為、対数則に従うという仮定には無理がある。しかし、粘性底層まで解像して No-slip 条件を課す方法では計算量が膨大となる為、実用上の便宜として、表1のような壁関数がよく用いられる<sup>15)</sup>。本設定でのハブ、ナセル、タワーの壁面上第一格子点における摩擦速度に基づく壁座標は、風上側の増速域でも高々65と、一般的な推奨値の上限範囲内にある。

$\nu$  と  $\rho$  の値は、 $25^\circ\text{C}$ における空気の値で、それぞれ

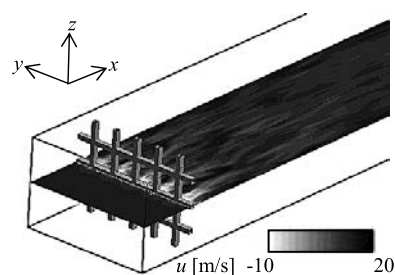
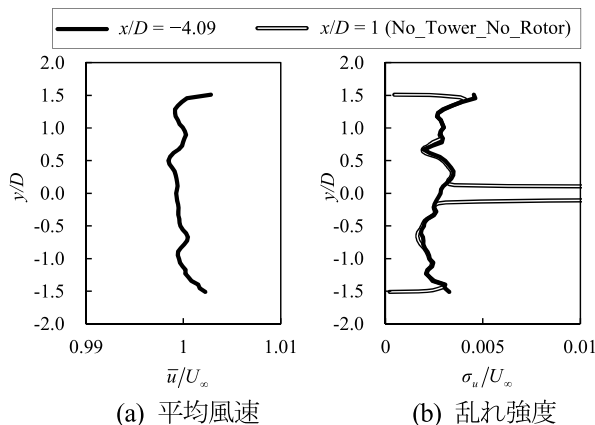


図6 格子乱流の作成



(a) 平均風速 (b) 乱れ強度  
図7 変動流入風のハブ高平均風速と乱れ強度

$1.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $1.184 \text{ kg}/\text{m}^3$ であり、 $U_\infty$ 及び $D$ に基づく Reynolds 数は約  $5.8 \times 10^5$ である。時間刻み幅は  $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ であり、統計量の算出は  $t = 5 \sim 25 \text{ s}$ において行う。任意の物理量  $\varphi$  の時間平均値は  $\bar{\varphi}$  と表示する。

### 3. 計算結果と考察

#### 3.1 計算結果と実験結果の比較

表2に計算により得られたパワー係数

$$C_P = \frac{-\omega \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \int_{R_N}^R \int_0^{2\pi} f_\theta r^2 dx dr d\theta}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (14)$$

及び推力係数

$$C_T = \frac{-\int_{-\frac{R_N}{2}}^{\frac{R_N}{2}} \int_{R_N}^R \int_0^{2\pi} f_x r dx dr d\theta}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi R^2} \quad (15)$$

と風洞実験結果との比較を示す。ここで、 $R_N$ はナセルの半径である。Tower ケースは、 $C_p$  及び  $C_T$  の風洞実験結果に対する誤差がそれぞれ 3% 及び 3.7% であり、精度良く風車の性能を再現出来ている。No\_Tower ケースでは、 $C_p$  及び  $C_T$  が Tower ケースに比べて若干大きい、これはタワーが存在しないことにより、ロータを通過する風量が増えたことが原因であると推察され、定性的に妥当であると考えられる。

風車後流におけるハブ高さの  $\bar{u}$  の  $y$  方向分布について、計算結果と風洞実験結果<sup>11)</sup>の比較を図8に示す。 $x/D = 1 \sim 4$ において、 $y = 0$ を中心とする  $y$  方向の対称性は、No\_Tower ケースではほぼ保たれているのに対し、Tower ケースと風洞実験では明確に崩れているのが確認できる。No\_Tower ケースの対称な分布と比較して、Tower ケースの分布の非対称性が顕著に現れているのは、 $x/D = 1$ における  $y/D = 0.1$  近傍、 $x/D = 2$ における  $y/D = 0.2$  近傍及び  $x/D = 3$ における  $y/D = 0.25$  近傍にピークを有する速度欠損 (差異①と称す。ER = 24% ( $x/D = 1$ ), 20% ( $x/D = 2$ ), 14% ( $x/D = 3$ )) と、 $x/D = 4$ における  $y/D = 0.5$  近傍の速度回復 (差異②と称す。ER = 28%) である。ここで ER は、注目している箇所での差異 (Tower ケースの値 - No\_Tower ケースの値) の風洞実験値に対する比率 (即ち、差異/風洞実験値  $\times 100$

表2 パワー係数と推力係数

	$C_p$	$C_T$
Tower ケース ( $\lambda = 5.79$ )	0.450	0.828
NoTower ケース ( $\lambda = 5.79$ )	0.454	0.832
風洞実験 <sup>12)</sup> ( $\lambda = 5.6, 6.1$ の線形補間値)	0.437	0.860

[%]) の最大値である。差異①②の非対称性の他に、Tower ケースと No\_Tower ケースの分布で顕著な差異が認められるのは、 $x/D = 1 \sim 4$ における  $y/D = 0$  近傍の Tower ケースの大きな速度回復 (差異③と称す。ER = 31% ( $x/D = 1$ ), 37% ( $x/D = 2$ ), 28% ( $x/D = 3$ ), 20% ( $x/D = 4$ )) と、 $x/D = 3 \sim 4$ における  $y/D = \pm 0.1$  近傍の Tower ケースの大きな速度欠損 (差異④と称す。ER = 18% ( $x/D = 3, y/D \approx -0.1$ ), 11% ( $x/D = 3, y/D \approx 0.1$ ), 20% ( $x/D = 4, y/D \approx -0.1$ ), 14% ( $x/D = 4, y/D \approx 0.1$ )) である。これらの顕著な差異①~④が存在することにより、Tower ケースと風洞実験との一致性は、 $x/D = 4$ における  $y/D = 0$  近傍のごく一部を除いて、No\_Tower ケースと風洞実験との一致性よりも高くなっているのが確認できる。AD モデルでは考慮していない翼端渦や翼列干渉の影響を考慮した計算を行った場合には、差異①~④の現れ方が変化する可能性があるが、少なくとも風車後流風速の  $y$  方向分布に対して風車タワーが大きな影響を与えている場合があるということ、そして計算の再現精度を確保・向上させる上で風車タワーの取り扱いが重要であるとは言えるものと考えられる。

### 3.2 計算結果の可視化に基づく考察

本節では、風車後流風速の  $y$  方向分布の計算結果に Tower ケースと No\_Tower ケースの間で顕著な差異①~④が生じた原因について、計算結果の可視化を行い考察する。

計算により得られた  $u$ ,  $\bar{u}$  及び乱流エネルギー  $k$  について、ロータ中心を通る水平断面と鉛直断面のコンター図を図9、図10及び図11にそれぞれ示す。これらの図より、No\_Tower ケースでは、風車後流域の広範囲に渡って、時間平均場のみならず瞬間場においても  $u$  の  $x$  軸を中心とした対称性がほぼ保たれており、 $k$  の大きさが Tower ケースに比べて非常に小さいことが確認できる。一方、Tower ケースでは、タワー及びナ

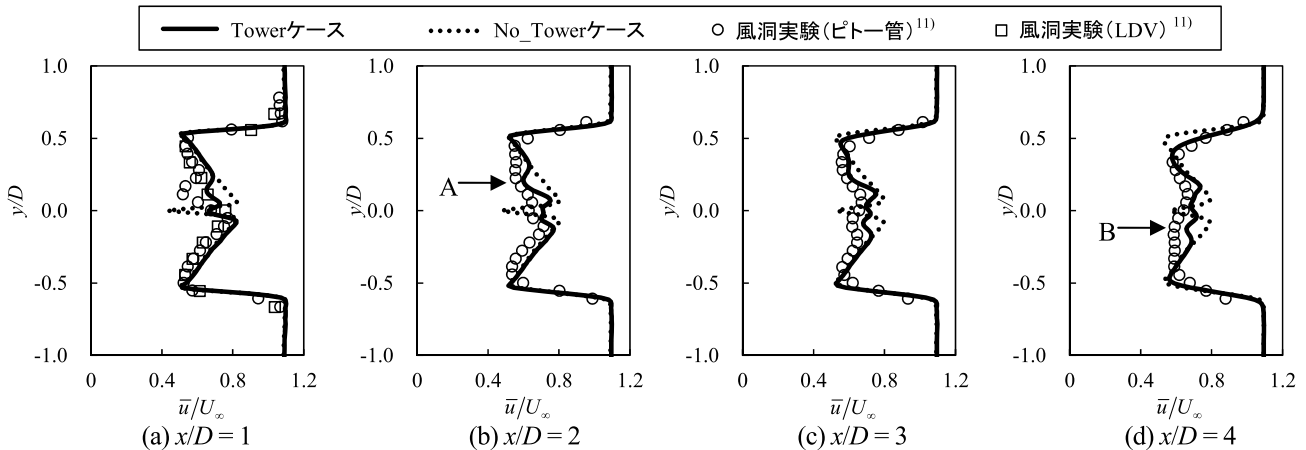


図8 風車後流におけるハブ高さの主流方向風速の主流直角方向分布

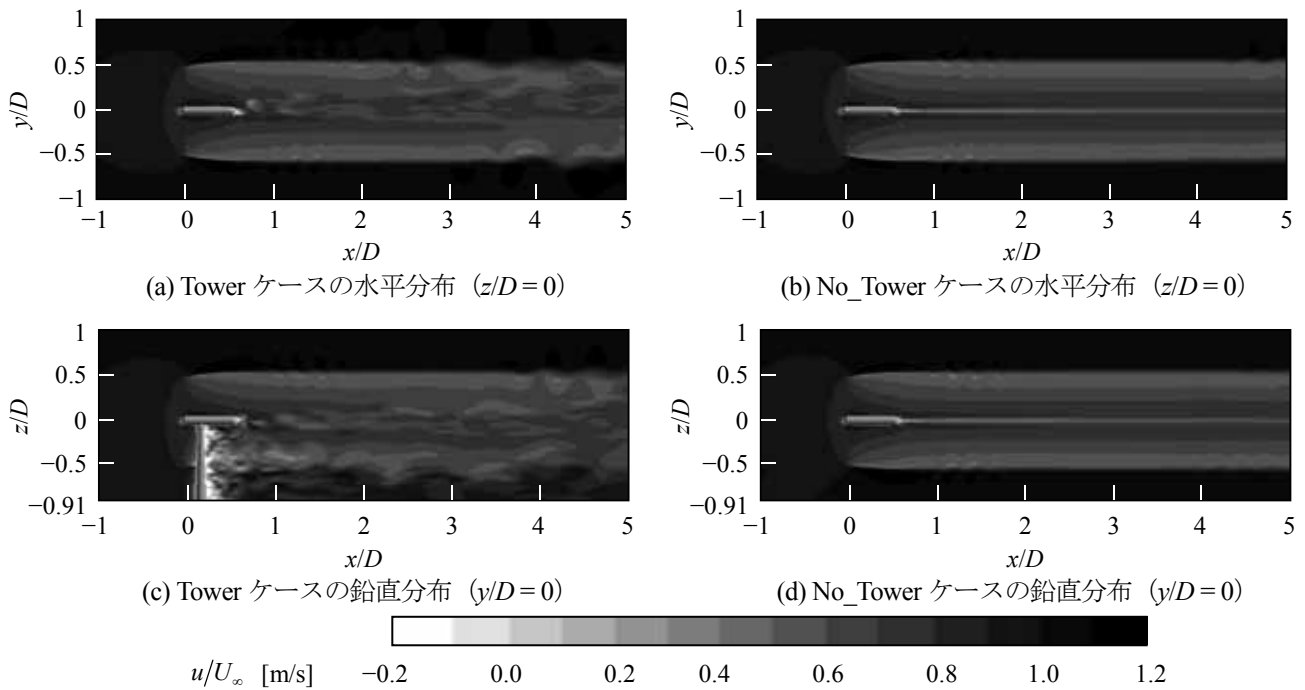


図9 瞬間場の主流方向風速コンター図 (ロータ中心を通る水平・鉛直断面)

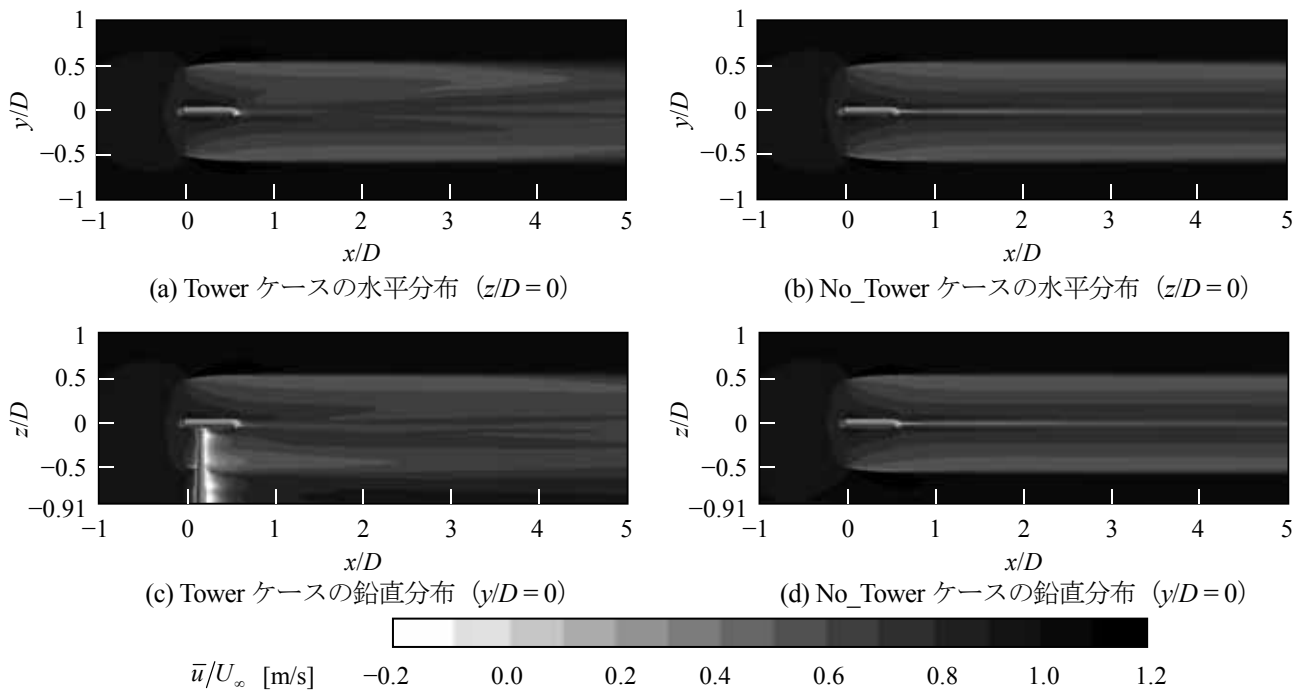


図10 時間平均場の主流方向風速コンター図 (ロータ中心を通る水平・鉛直断面)

セルの後流の乱れが特に大きいことに加えて、+y側のロータ後流域の乱れも比較的大きい。これらの図のTowerケースとNo\_Towerケースの比較から、差異①～④の発生には、Towerケースの大きな乱れによって運動量の拡散が促進されたことが大きく寄与しているものと推察できる。

続いて、Towerケースの風車後流の乱れがNo\_Towerケースのものよりも著しく大きい原因について考察する。まず、タワーの後流で乱れが大きくなっている現象については、基本的に円柱周りの流れと同じであり

疑問の余地は無い。次に、No\_Towerケースでは非常に小さかったナセルの後流の乱れがTowerケースで大きくなっている現象については、タワーの存在により、ナセルの-z側表面上の流れが剥れるなどしてz方向の対称性が崩れ、ナセルの風下端から剥離渦が放出されていることが原因であると考えられる。最後に、+y側のロータ後流域の乱れが大きくなっている現象については、ブレードの回転と逆方向に発生するロータ後流の $-\theta$ 方向回転成分により、タワー後流に発生した強い乱れが移流されたことが原因であると考えられる。図

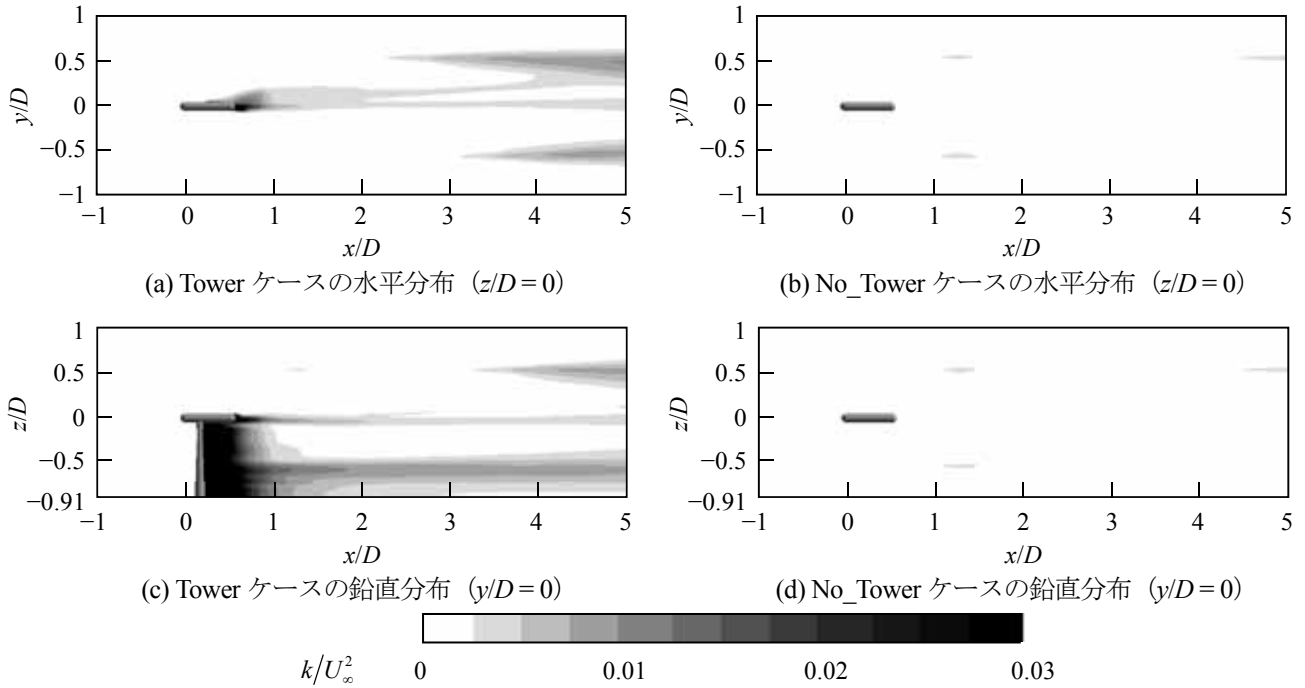


図 1 1 乱流エネルギーのコンター図 (ロータ中心を通る水平・鉛直断面)

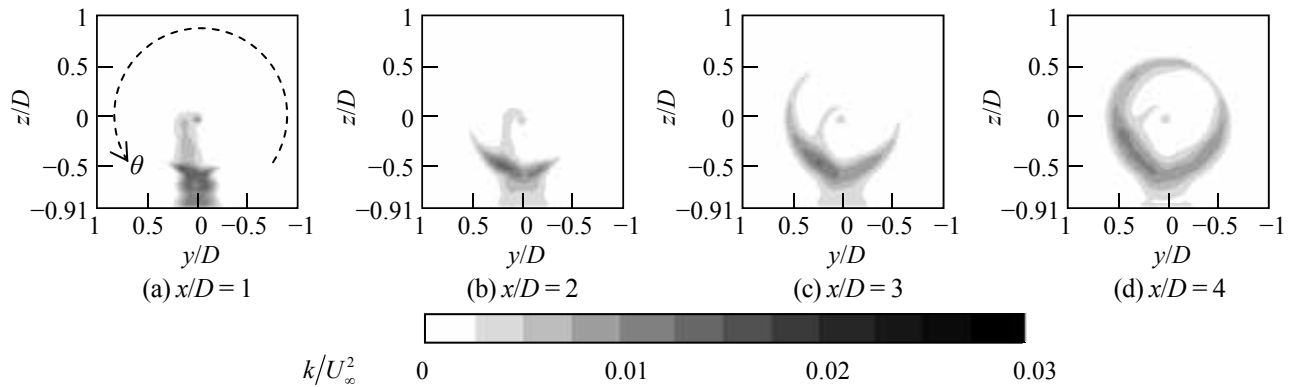


図 1 2 乱流エネルギーのコンター図 (Tower ケースの  $x/D = 1 \sim 4$  における  $y-z$  断面)

1 2には Tower ケースの  $x/D = 1 \sim 4$  における  $k$  の  $y-z$  断面コンター図を示しているが,  $x/D = 1$  のタワー後流に形成された大きな  $k$  が  $x$  の増加とともに  $-\theta$  方向に移流されていく様子が確認できる.

差異①と④に関しては, 強い乱れによって運動量の拡散が促進されたというだけでは, Tower ケースの  $\bar{u}$  の分布 (図 8) に減速のピークが現れている為, その発生原因としての説明がつかない. そこで, 図 8 の  $x/D = 2$  における  $\bar{u}$  の減速ピーク A と  $x/D = 4$  における  $\bar{u}$  の減速ピーク B の近傍を通る時間平均場の流線図を図 1 3 の様に描画した. 図 1 3 では,  $\bar{u}$  の減速ピーク A 及び B の近傍を通る流線が, その風上において, タワーの近傍を通過しているのが確認できる. このことより, 差異①と④の発生には, Tower ケースにおいて, タワー近傍の後流域の大きく減衰した  $\bar{u}$  が, ロータ後流の  $-\theta$  方向回転成分によって移流されたことが大きく寄与しているものと考えられる.

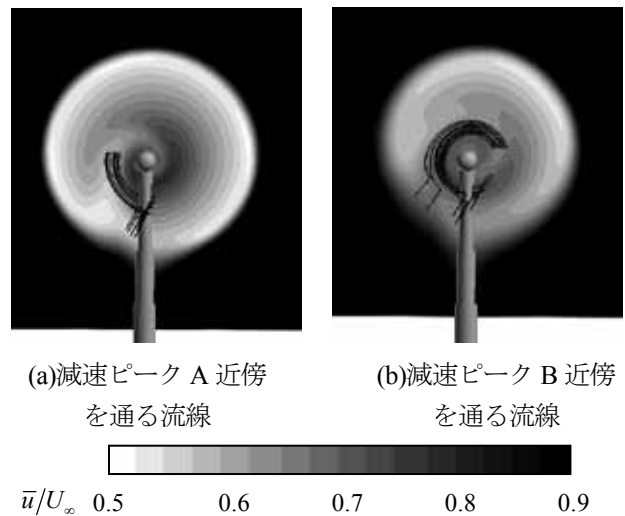


図 1 3 時間平均場の流線図 (a と b における  $\bar{u}$  の  $y-z$  断面はそれぞれ  $x/D = 2$  と 4 の位置のものである. 見易さの為に風上側から少し傾けて描画している)

#### 4. おわりに

本研究では、風車タワーを陽的に解像した場合 (Tower ケース) とタワーの影響を無視した場合 (No\_Tower ケース) についてアクチュエータ・ディスク (AD) モデルを用いたラージ・エディ・シミュレーションを実施し、タワーが風車後流の風速分布に与える影響について調べた。その結果得られた知見を以下に示す。

- 1) Tower ケースでは、風車後流におけるハブ高さの時間平均主流方向風速の主流直角方向分布に風洞実験結果<sup>11)</sup>と同様の顕著な非対称性が生じる。これに伴い、ほぼ対称な分布を持つ No\_Tower ケースよりも、風洞実験結果に対する誤差が最大で 28% 低減する。更に、ほぼ対称な分布となるロータ中心付近の後流においても、Tower ケースは、No\_Tower ケースよりも、時間平均主流方向風速の風洞実験結果に対する誤差が概ね低減する為、Tower ケースは、No\_Tower ケースよりも風洞実験結果との一致性が全体的に高くなる。
- 2) Tower ケースと No\_Tower ケース間での風車後流域における主流方向風速の主流直角方向分布の差異の発生は、タワーの存在によってタワー及びナセルの後流に形成される強い乱れによる運動量拡散の促進と、ロータ後流のブレード回転と逆方向の回転成分によってタワー後流の減衰した風速及び高い乱流エネルギーが移流されることが主な原因であると考えられる。

以上より、風車後流のシミュレーションの精度を向上させる上で、タワーの取り扱いが重要であるということが確認された。タワーの形状を陽的に解像することが計算精度を向上させる上では理想であるが、計算コストを抑える為に、Porte-Agel et al. (2011)<sup>4)</sup>のようにタワーの影響を抗力モデル等で取り扱うことが必要となる場合も生じる。その様な場合には、上記の知見 2) に示したタワーの影響を考慮できるように改良することが、計算精度の向上を図る上で重要になるものと考えられる。尚、今回用いた AD モデルでは、翼端渦や翼列干渉の影響を考慮していない。その為、これらの影響を考慮したシミュレーションでは、タワーの風車後流分布に与える影響が、今回得られた結果とは異なる箇所が出てくる可能性が考えられる。今後、アクチュエータ・ライン・モデルを用いて、翼端渦や翼列干渉が風車後流特性に与える影響を検討していく予定である。

謝辞

本研究は、NEDO 次世代風力発電技術研究開発 (基礎・応用技術研究開発) 事業の一環として実施しました。シミュレーションには九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用しました。ここに、記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Manwell J.F. and Mcgowan J.G., Rogers A.L., *Wind energy explained theory, design and application*, John Wiley & Sons Ltd., Second edition, p. 422, 2009
- 2) Sanderse B., van der Pijl S.P. and Koren B., Review of computational fluid dynamics of wind turbine wake aerodynamics, *Wind Energy*, Vol. 14, pp.799-819, 2011
- 3) Cabezon D., Migoya E. and Crespo A., Comparison of turbulence models for the computational fluid dynamics simulation of wind turbine wakes in the atmospheric boundary layer, *Wind Energy*, Vol. 14, pp. 909-921, 2011
- 4) Porte-Agel F., Wu Y.T., Lu H. and Conzemius R.J., Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, pp. 154-168, 2011
- 5) Uchida T., Ohya Y. and Sugitani K., Comparisons between the wake of a wind turbine generator operated at optimal tip speed ratio and the wake of a stationary disk, *Modelling and Simulation in Engineering*, Vol. 2011, ID 749421, 2011
- 6) Wu Y.T. and Porte-Agel F., Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: evaluation of turbine parametrisations, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 138, pp. 345-366, 2011
- 7) Troldborg N., Sorensen J.N. and Mikkelsen R., Numerical simulations of wake characteristics of a wind turbine in uniform inflow, *Wind Energy*, Vol. 13, pp. 86-99, 2010
- 8) 内田孝紀, 大屋裕二, 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-, 第21回風工学シンポジウム論文集, pp.233-238, 2010
- 9) 畝村毅, 張会来, 谷口伸行, 次世代流体解析ソフトウェア FrontFlow/Red の開発, *生産研究*, Vol. 59, No. 1, pp. 40-43, 2004
- 10) 牛山泉, *風車工学入門 基礎理論から風力発電技術まで*, 森北出版株式会社, pp. 93-94, 2002
- 11) Krogstad P.A. and Adaramola M.S., Performance and near wake measurements of a model horizontal axis wind turbine, *Wind Energy*, doi: 10.1002/we.502
- 12) Krogstad P.A. and Lund J.A., An experimental and numerical study of the performance of a model turbine, *Wind Energy*, doi: 10.1002/we.482
- 13) Somers D.M., *The S825 and S826 Airfoils*, National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-500-36344, 2005
- 14) Deperrois A., Xflr5 v6.05 beta, 2011  
<http://xflr5.sourceforge.net/xflr5.htm>
- 15) 日本建築学会, 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックガイドラインと検証用データベース, 日本建築学会, pp. 37-40, 2007