

## 風車ウエイクの「ゆらぎ」に関するアクチュエータ ラインモデルを用いた高解像度LES

内田, 孝紀  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/1660830>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 150, pp.25-33, 2016-03. 九州大学応用力学研究所  
バージョン：  
権利関係：

# 風車ウエイクの「ゆらぎ」に関する アクチュエータラインモデルを用いた高解像度LES

内田 孝紀\*

(2016年1月29日受理)

## High-Resolution LES of Undulating Motions behind the Wind Turbine Using the Actuator Line Technique

Takanori UCHIDA

E-mail of corresponding author: [takanori@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

A high-resolution large-eddy simulation (LES) is conducted using an actuator line technique in the present study. This report investigates the undulating motion behind the wind turbine generator operated at the optimal tip speed ratio.

**Key words :** *High-resolution LES, Wind turbine wake, Actuator line technique, Undulating motion*

## 1. 緒言

日本のオンショア(陸上)風力発電では、複数台の大型風車を山岳地域に集中的に建設せざるを得ない状況になりつつある。そのため、風車相互の干渉でウインドファーム全体の発電電力量が低下しないよう、風車の離隔距離を適切に決定可能なウエイクモデルの開発が最重要な検討課題となっている。

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、風車の離隔距離の問題、すなわち、風車の最適配置問題は顕在化してくると考えられる。

上記のような状況を受けて、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<sup>1-5)</sup>。本報では、最適周速比(最大発電出力時の周速比)で稼動する風車単体を対象にし、アクチュエータラインモデルを用いた高解像度LESを行った。特に風車遠方におけるウエイクの「ゆらぎ」に注目した。

## 2. 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を採用する。圧力に関するポアソン方程式はSOR法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-桑原スキームの値は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。

回転する風車(ブレード)に関して、そのモデル化には翼素理論に基づいたアクチュエータラインモデル<sup>6)</sup>を用いた。アクチュエータラインモデルでは、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、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、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)での翼弦長、揚力係数、抗力係数、迎角のデータさえ入力すれば、任意の風車背後に形成されるウエイクを再現できる。使用した翼形状は、MEL翼をベースに翼根を厚翼に修正したものである。本風車の性能曲線を図1に示す。本研究では、最適周速比4.0を計算対象とした(図1の矢印)。

\* 九州大学応用力学研究所

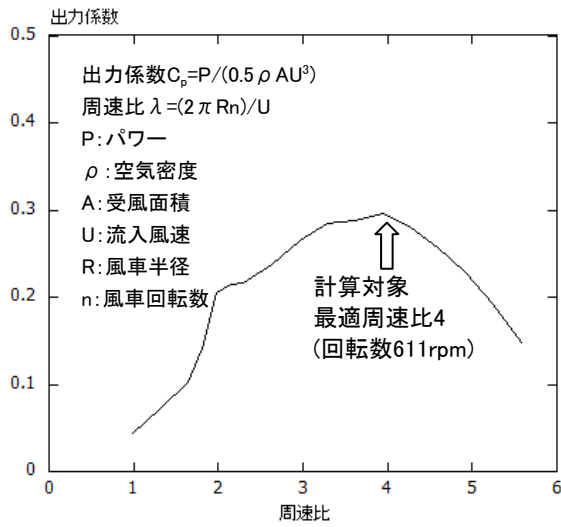


図1 本研究で対象にした風車の周速比と出力係数の関係, 風洞実験の結果

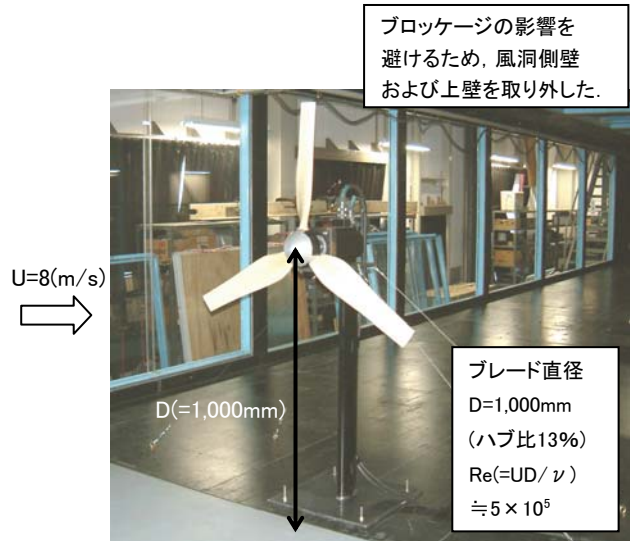


図2 本研究で使用した風車模型の概観図

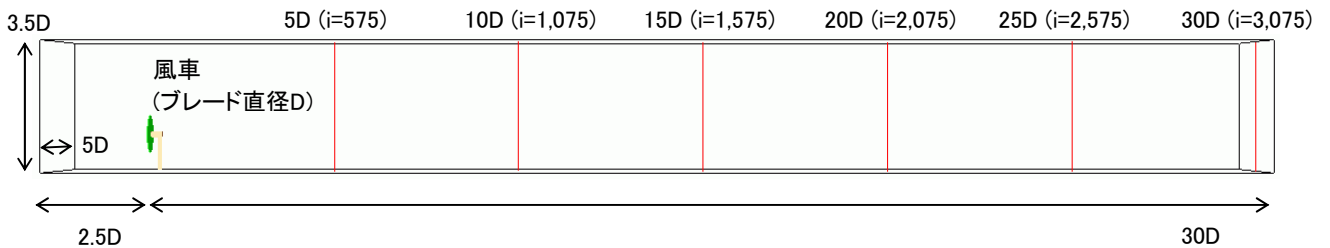


図3 本研究における計算領域

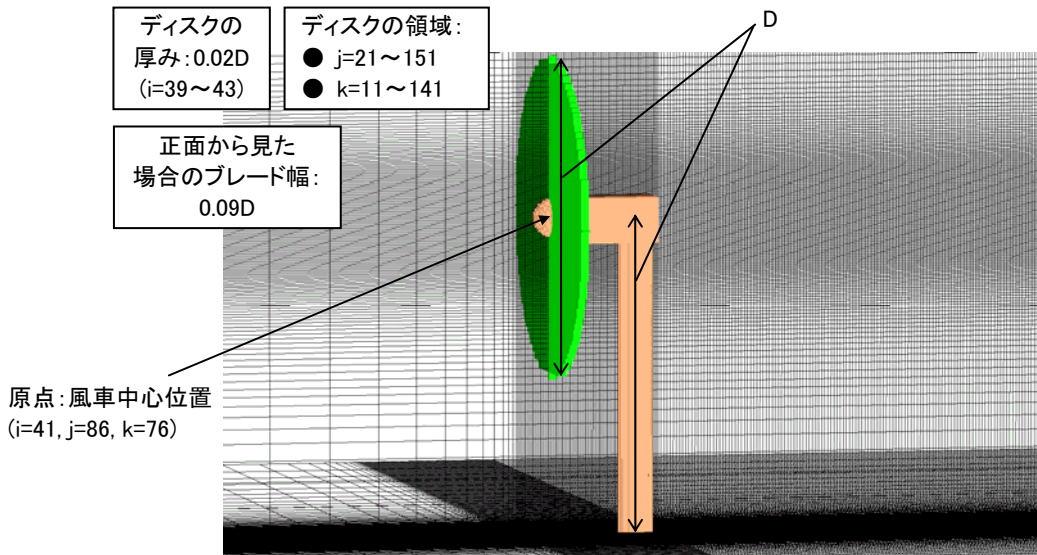


図4 風車近傍における計算格子の様子

図2には, 風洞実験で使用した風車模型の概観図を示す. 図3には, 本研究における計算領域を示す. 風車遠方におけるウエイクの「ゆらぎ」を再現するため, 風車の受風面から30D(但し, Dはブレード直径)の領

域を設定した. 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, 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た(図4参照). 風車近傍での格子解像度は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.005D$

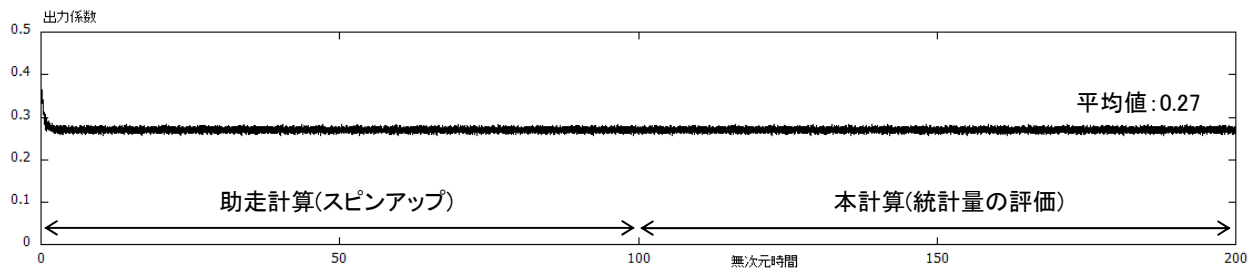


図5 出力係数の時間変化

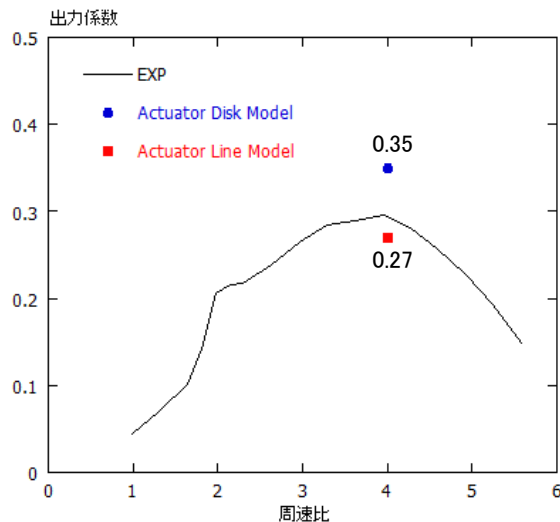


図6 出力係数の比較(ライン:実験, シンボル:計算)

である。総格子点数は約8,500万点(3,075(x)×171(y)×161(z))である。風車下流におけるx方向の格子解像度は全て等しく $\Delta x=0.01D$ とした。

速度の境界条件に関して、流入境界断面には高度方向(z)に変化しない様な速度プロファイルを与えた。上方境界面と側方境界面には滑り条件、地面上には非滑り条件(粘着条件)、流出境界面には対流型流出条件を課した。スピナ、ナセル、タワーに関しては、そこに含まれる全ての格子点に速度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。ブレード直径Dと一様流入速度Uに基づいた Reynolds数は $Re(=UD/\nu)=2 \times 10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t=5 \times 10^{-4} (D/U)$ とした。なお、本計算では $t=0 \sim 200(D/U)$ の時間積分を実施した。

### 3. 計算結果および考察

図5には、出力係数の時間変化を示す。図6には、図5において $t=100 \sim 200(D/U)$ で評価した出力係数の平均値(0.27)と風洞実験の結果の比較を示す。また、参考のため、アクチュエータディスクモデルの結果(0.35)も併せて示す。LESによる数値シミュレーションと

風洞実験は良好な一致を得た。

図7～図9には、 $t=100(D/U)$ における主流方向速度成分の分布図を示す。特に図7および図8に注目すると、風車遠方( $x=10D$ より下流、Dはブレード直径)において、ウエイクの「ゆらぎ」が明確に観察される。これは、図13に示す時系列データからも見て取れる。このウエイクの「ゆらぎ」は、図14に示す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。

図10には、 $t=100 \sim 200(D/U)$ における時間平均場(フレーム平均場)に関して、風車中心( $z=0$ )における主流方向速度成分の分布を示す。このグラフを観察すると、 $x=30D$ においても流入風速 $\langle u \rangle / U=1$ に対して1割程度の速度欠損が存在している。

図11には、 $t=100 \sim 200(D/U)$ における時間平均場(フレーム平均場)に関して、風車下流( $x=5D, 10D, 15D, 20D, 25D, 30D$ , Dはブレード直径)における乱流諸量の鉛直分布を示す。図12には、風車下流( $x=5D, 30D$ , Dはブレード直径)の乱流諸量の鉛直分布を示す。特に図12では、各方向の標準偏差の値がほぼ同程度の大きさを有しているのは非常に興味深い。

## 4. 結言

本研究では、最適周速比(最大発電出力時の周速比)で稼動する風車単体を対象にし、アクチュエータラインモデルを用いた高解像度LESを行った。特に風車遠方におけるウエイクの「ゆらぎ」に注目した。

## 謝辞

本研究は、文部科学省『ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発』における重点課題(6)「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化(サブテーマ名:高効率風力発電システム構築のための大規模数値解析)」の支援を受けて実施されました。ここに記して、感謝の意を表します。

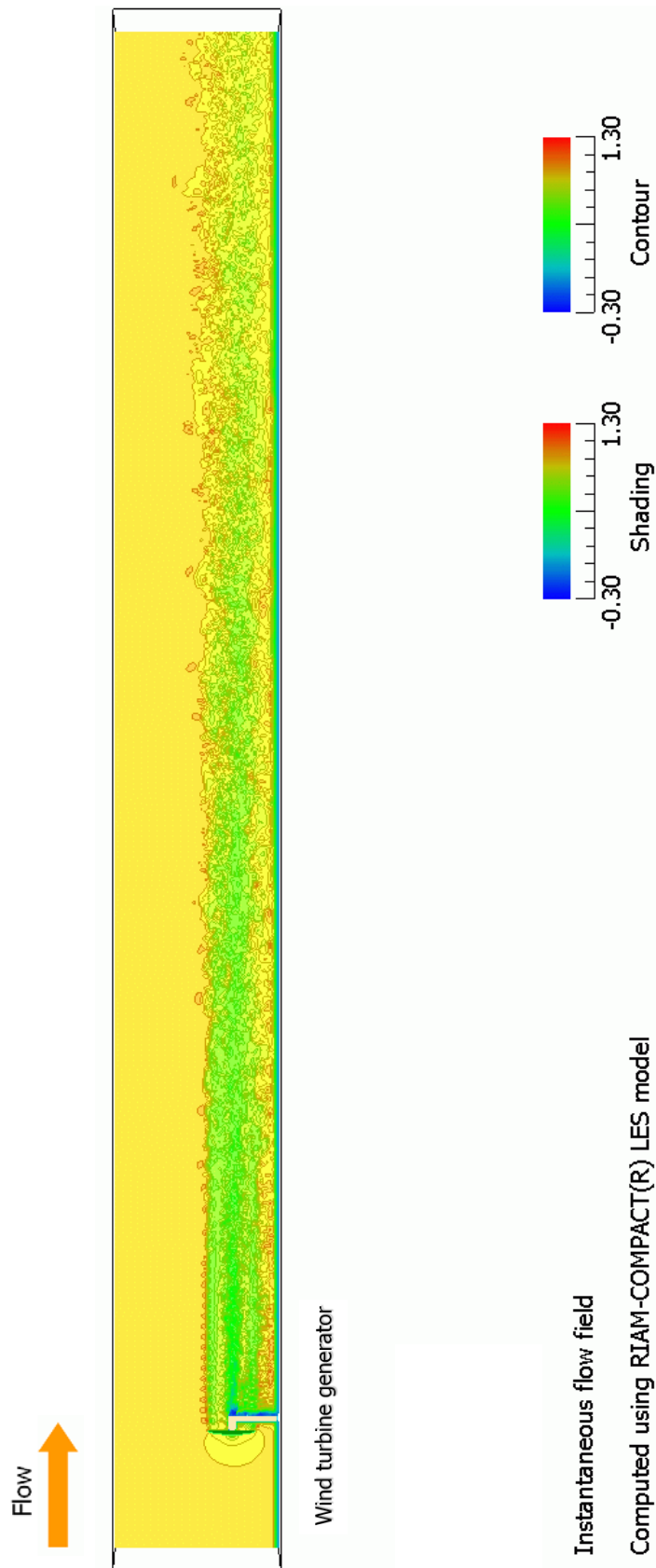


図7 風車中心( $y=0$ )における主流方向速度成分の分布, 計算領域全体, 瞬間場, 無次元時間 $t=100$ , Side view

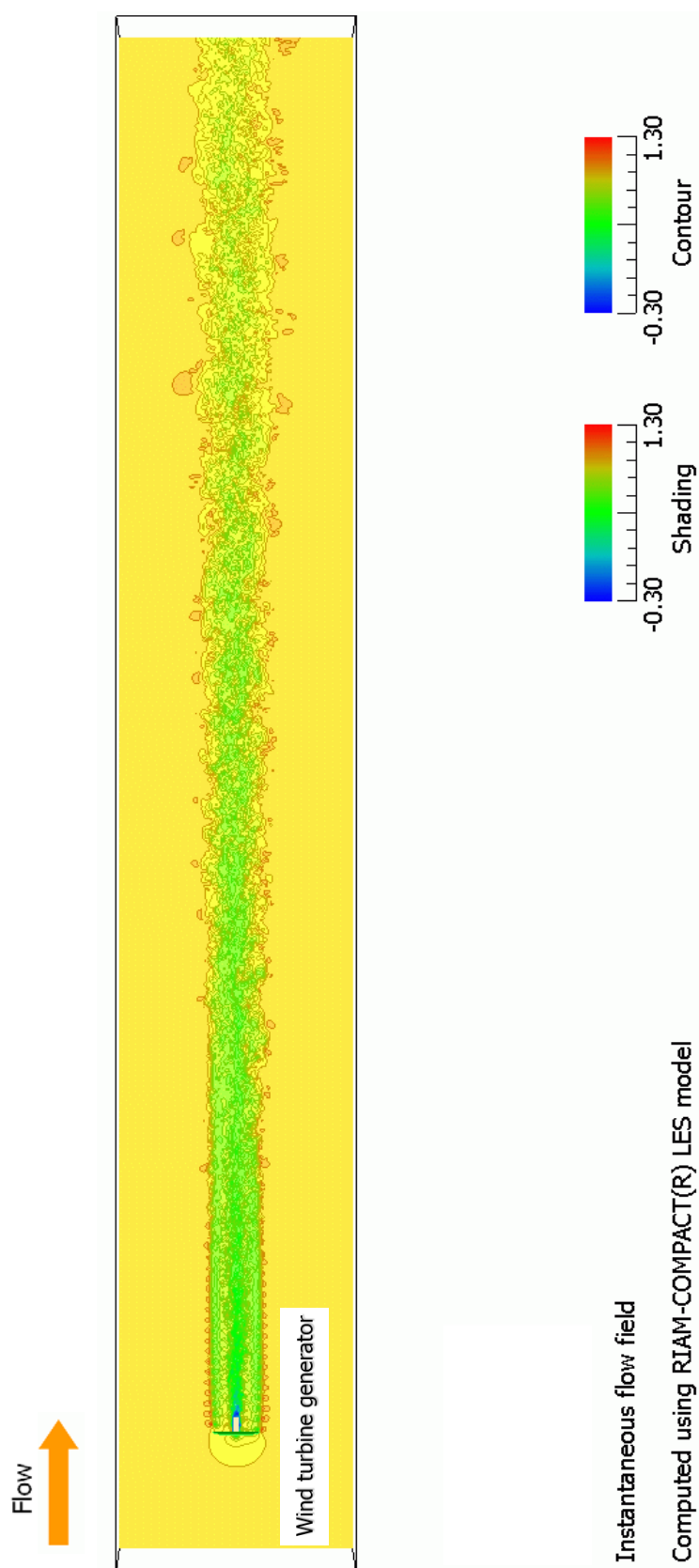


図8 風車中心( $z=0$ )における主流方向速度成分の分布, 計算領域全体, 瞬間場, 無次元時間 $t=100$ , Top view

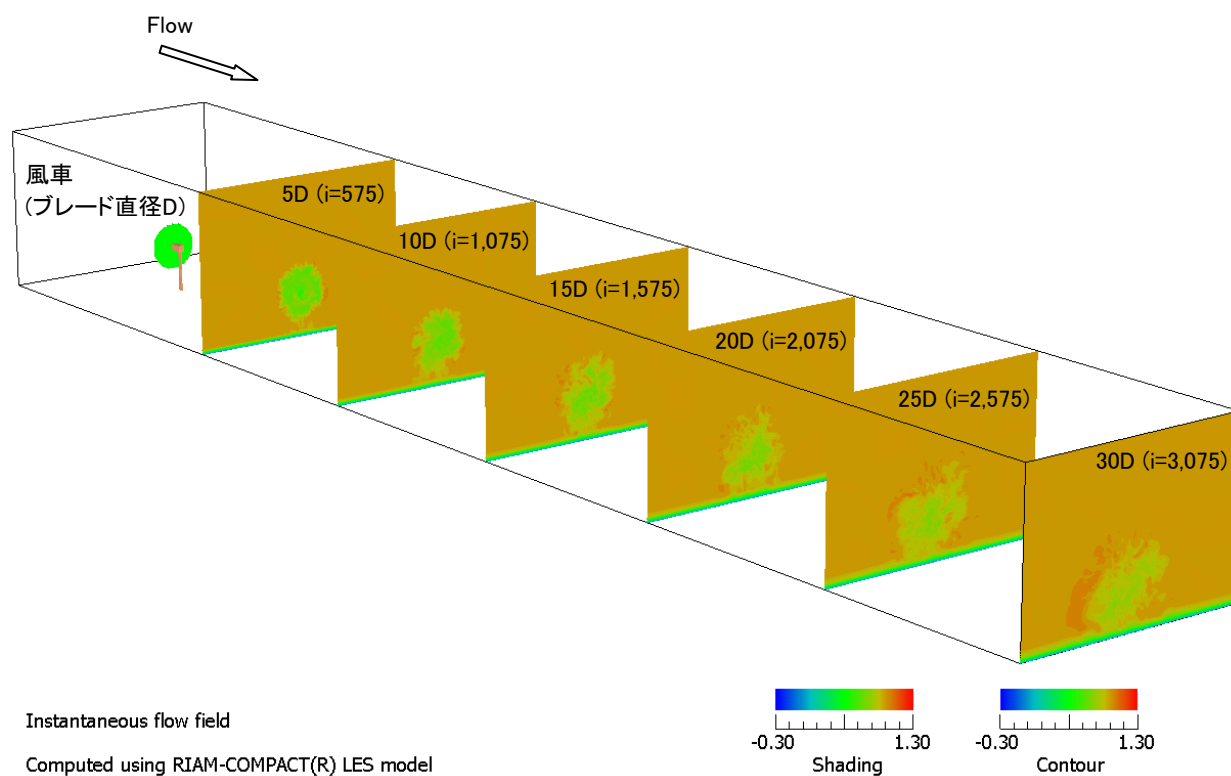


図9 風車下流における主流方向速度成分の分布, 計算領域全体, 瞬間場, 無次元時間 $t=100$ , Rear view

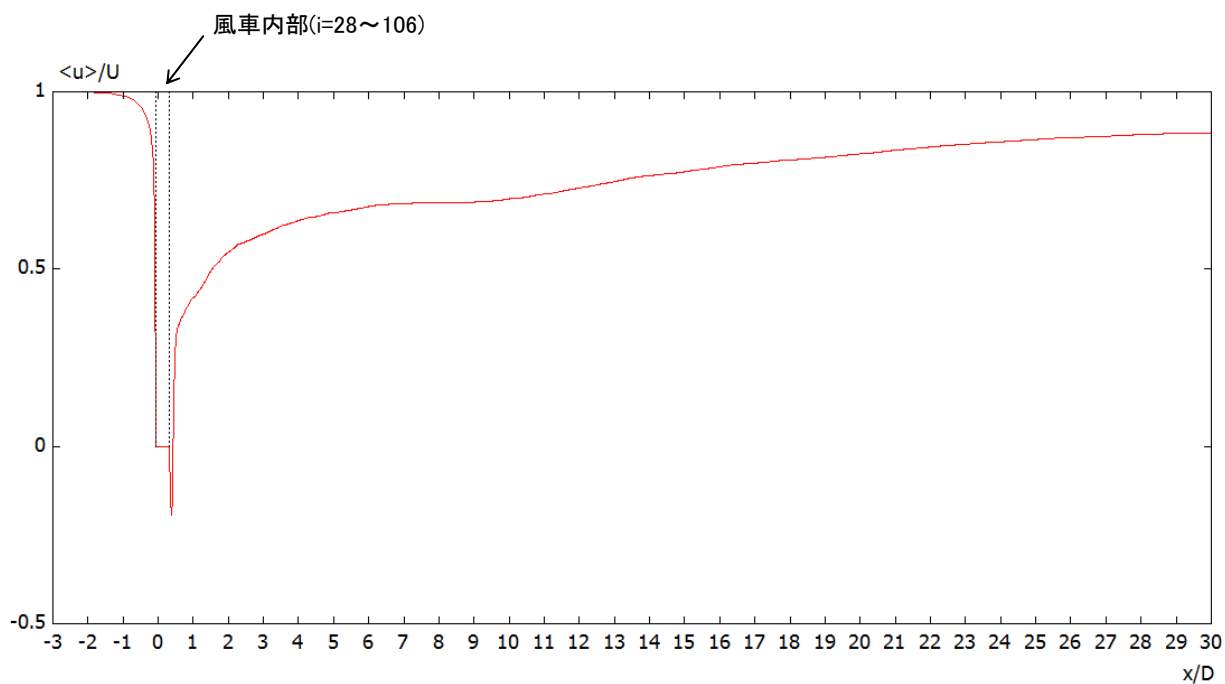


図10 風車中心( $z=0$ )における主流方向速度成分の分布, 無次元時間 $t=100 \sim 200$ における時間平均場(フレーム平均場)

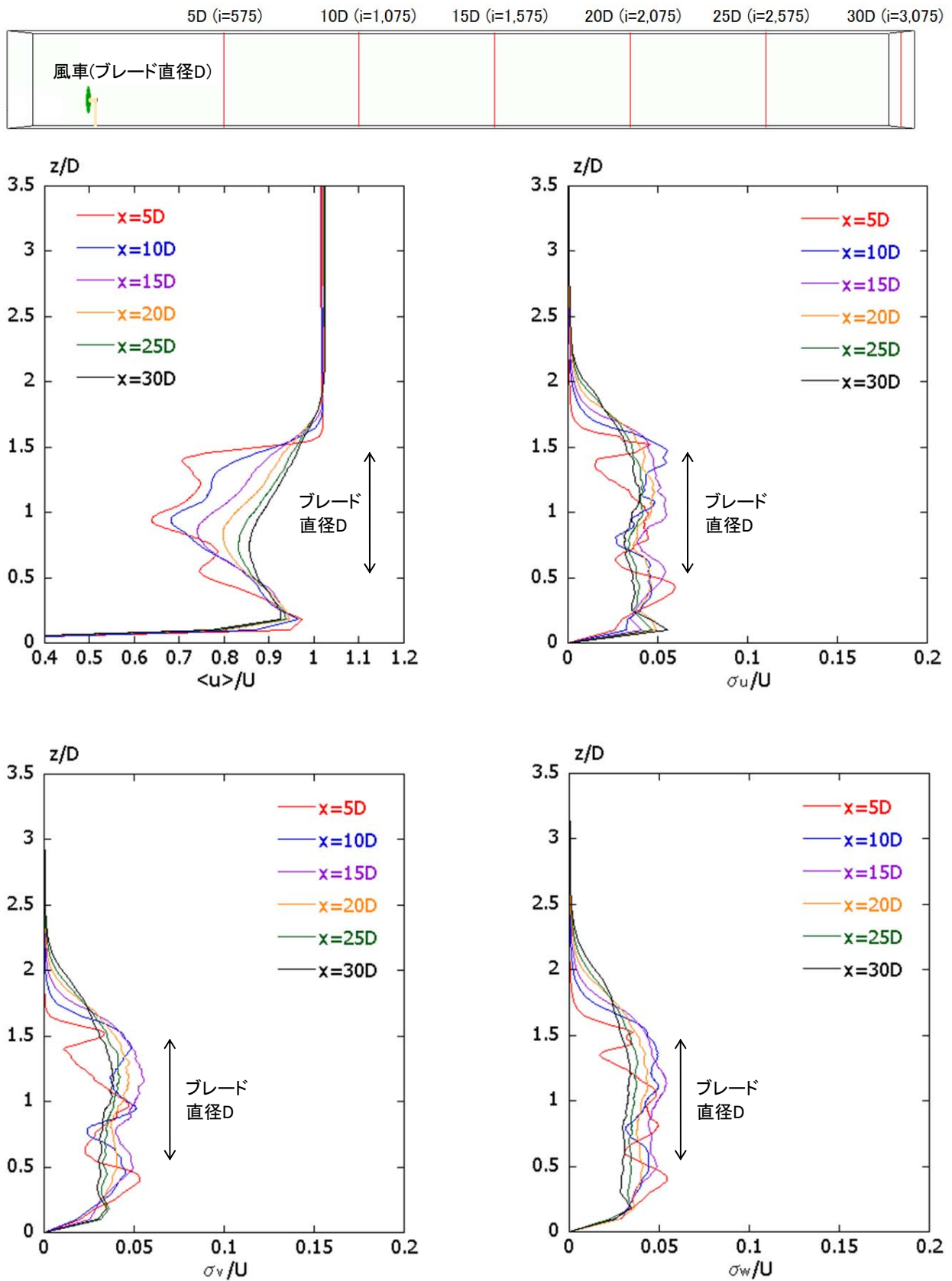


図11 風車下流における乱流諸量の鉛直分布, Dはブレード直径,  
無次元時間 $t=100\sim 200$ における時間平均場(フレーム平均場)



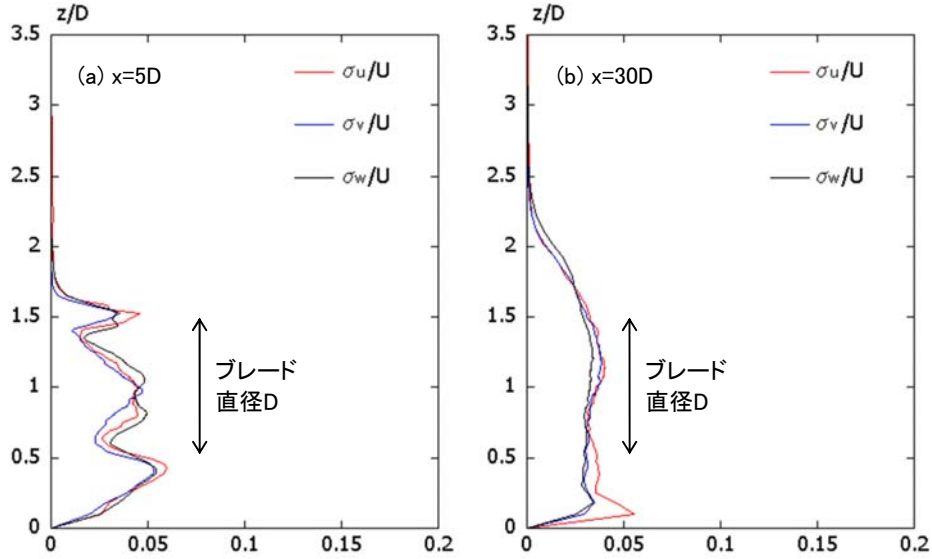


図12 風車下流(x=5Dおよび30D)における乱流諸量の鉛直分布

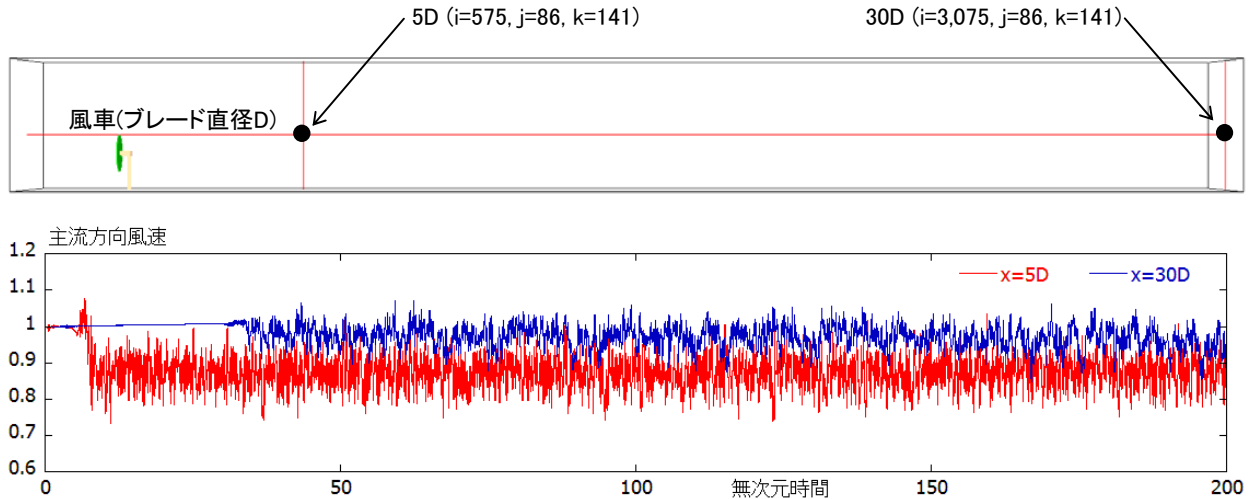
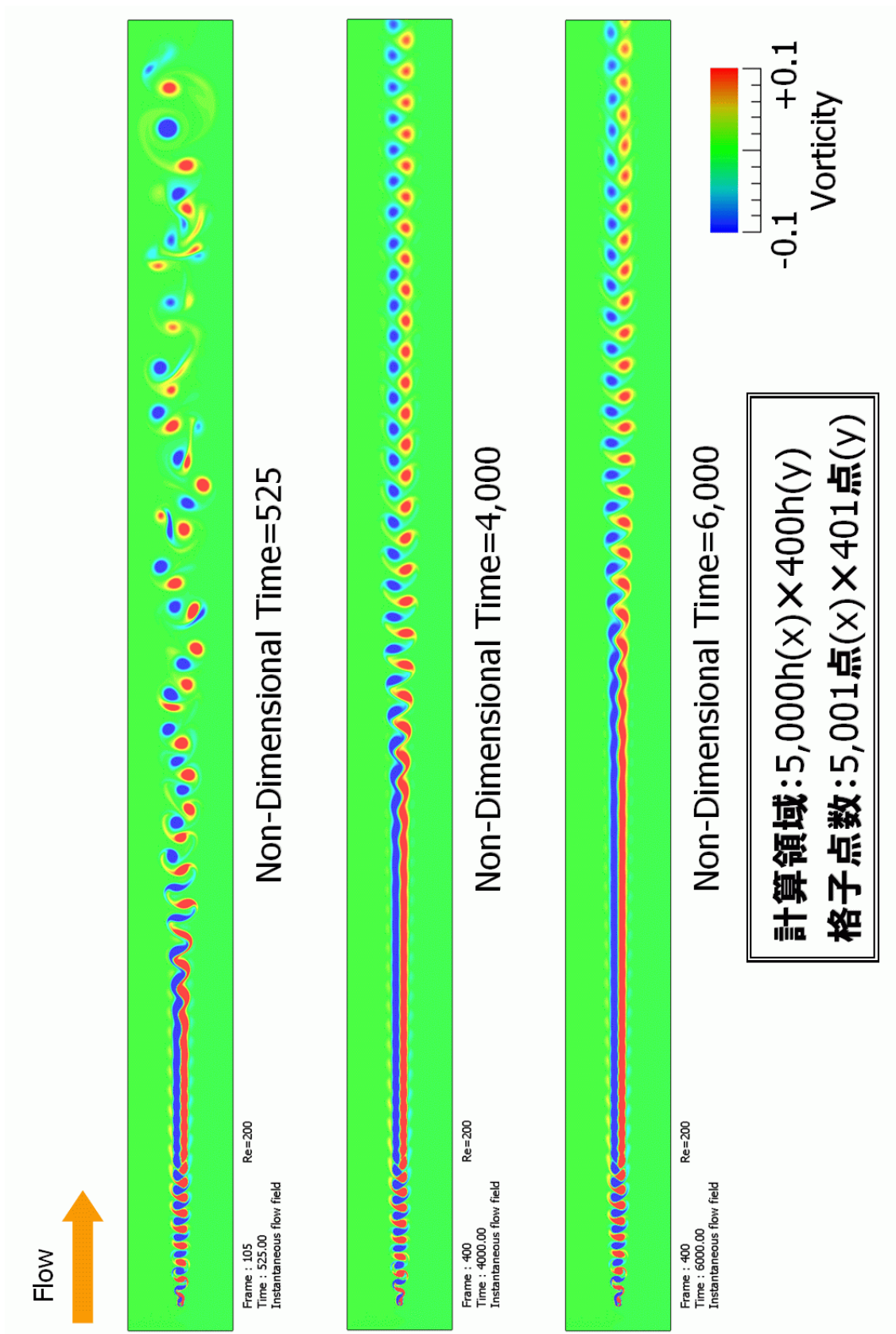


図13 風車下流(x=5Dおよび30D)における主流方向速度成分の時間変化, 但し, 高度方向はブレード先端位置

## 参考文献

- 1) 内田 孝紀, 風車および小規模地形の周辺流れに対する温度成層の効果—その1:流れ場の可視化—, 九州大学応用力学研究所所報, 第149号, pp.85-90, 2015
- 2) Takanori Uchida, Yuji Ohya and Kenichiro Sugitani, 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, Volume 2011, <http://dx.doi.org/10.1155/2011/749421>
- 3) 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
- 4) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 杉谷 賢一郎, 最適周速比における風車後流と静止円盤後流の比較, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.187-192, 2006
- 5) 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
- 6) Sumner, J et al., Review: CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel, Energies, Vol.3, pp.989-1013, 2010

図14 カルマン渦列の再配置問題, 正方形角柱,  $Re=200$