

# LES 技術を用いたウインドファーム風況診断 —熊本県阿蘇車帰風力発電所を例として—

Diagnosis of Flow Characteristics in Wind Farm  
—Case of the Asokurumagaeri Wind Farm—

内田孝紀\*・大屋裕二\*\*  
Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

\* 工博 九州大学助教 応用力学研究所 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)  
\*\*工博 九州大学教授 応用力学研究所 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

A detailed wind synopsis analysis was performed for the Asokurumagaeri wind farm (operation of this wind farm was initiated in October, 2005) in cooperation with the Kumamoto Prefectural Enterprise Bureau. In this simulation, high-resolution terrain elevation data which included the latest land development information were utilized. The simulation results suggested that the effects of wind risks (terrain-induced turbulence), which have been reported in the media, were successfully reproduced. An appropriate wind direction and an inappropriate wind direction for locating a wind turbine generator were shown based on the numerical results obtained

**Key Words:** CFD, LES, Micro-Siting of Wind Turbines

## 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脱化石燃料, CO<sub>2</sub>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。

風力発電分野において, 今後解決すべき技術課題の一つは, 風車に対する局地的な風況を正確に把握し, 風車に対する局所的な地形乱流を特定できる数値風況予測技術確立することである<sup>1-3)</sup>。

我々の研究グループが開発を進める数値風況予測技術 RIAM-COMPACT®は, これらの諸問題を一挙に解決する潜在的な可能性を秘めている<sup>4)</sup>。RIAM-COMPACT®(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain; リアムコンパクト)に関して, そのコア技術は九州大学応用力学研究所で開発が続けられており, 2006年に著者らが起業した九州大学発ベンチャー企業の(株)リアムコンパクト (<http://www.riam-compact.com/>)が(株)産学連携機構九州(九大TLO)から独占的ライセンス使用許諾を受けている。2006年にはRIAM-COMPACT®の商標と実用新案を取得した。

最近になり, 複雑地形上に建設されたウインドファームにおいて, 風車の稼働率が当初の予想を下回る, すなわち, 発電出力が著しく悪い風車や, 風車内外の故障の問題が顕在化している。この主たる原因は, 風車直近の僅かな地形起伏の変化が起源となり, そこから機械的(直接的)に発生する風の乱れ(地形乱流)であると考えられる<sup>5-7)</sup>。本報では, 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用いた地形乱流診断の具体例を紹介する。

## 2. 実地形版 RIAM-COMPACT®ソフトウェアの概要

本研究では, 数値不安定を回避し, 複雑地形上の風の流れを高精度に数値予測するため, 一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用いた。ここでコロケート格子とは, 計算格子のセル中心に物理速度成分と圧力を定義し, セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は差分法(FDM; Finite-Difference Method)に基づき, 乱流モデルとしてLES(Large-Eddy Simulation)を採用する。LESでは流れ場に空間フィルタを施し, 大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなGS(Grid Scale)成分の渦と, それよりも小さなSGS(Sub-Grid Scale)成分の渦に分離する。GS成分の大規模渦はモデルに頼らず直接数値シミュレーション

ンを行う。一方で、SGS成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用はSGS応力を物理的考察に基づいてモデル化される。

流れの支配方程式は、フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式(式(1))とナビエ・ストークス方程式(式(2))である。本研究では、中立強風時を対象にしているので、大気がある高度方向の温度成層の効果は省略した。また、地表面粗度の影響は、地形表面の凹凸を10m以下の高解像度に再現することで取り入れた(水平空間解像度3m, 図-3も参照)。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} \approx \overline{u'_i u'_j} \approx \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (7)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (8)$$

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)<sup>9)</sup>に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化は式(2)の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし、対流項は3次精度風上差分とする。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分は、梶島による4点差分と4点補間に基づいた補間法<sup>9)</sup>を用いる。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは、通常使用される河村-桑原スキーム<sup>10)</sup>タイプの $\alpha=3$ に対して、 $\alpha=0.5$ とし、その影響は十分に小さくする。LESのサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデル<sup>11)</sup>を用いる(式(3)-式(8))。壁面減衰関数を併用し、モデル係数は0.1とした。

### 3. 実地形版 RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェアによる風況診断

先に記述したように、複雑地形上に建設されたwindファームにおいて、稼働率が当初の予想を下回る、すなわち、発電出力が著しく悪い風車や、風車内外の故障の問題が顕在化している。本研究で対象とした熊本県阿蘇車帰風力発電所も風の乱れ(地形乱流)による影響が指摘されている(図-1を参照)。本報では、実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェアを用い、その風況の実態を視覚的に再現することを主な目的として高解像度のLES乱流シミュレーションを実施した。



図-1 熊本県阿蘇車帰風力発電所に関する新聞報道

#### 3.1 熊本県阿蘇車帰風力発電所の概要

熊本県企業局工務課の協力の下、阿蘇車帰風力発電所(平成17年10月より運転を開始)の風況解析を実施した(図-2, 3, 4および表-1を参照)。

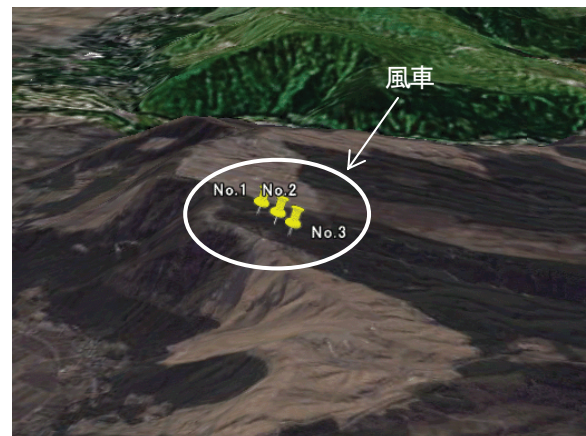
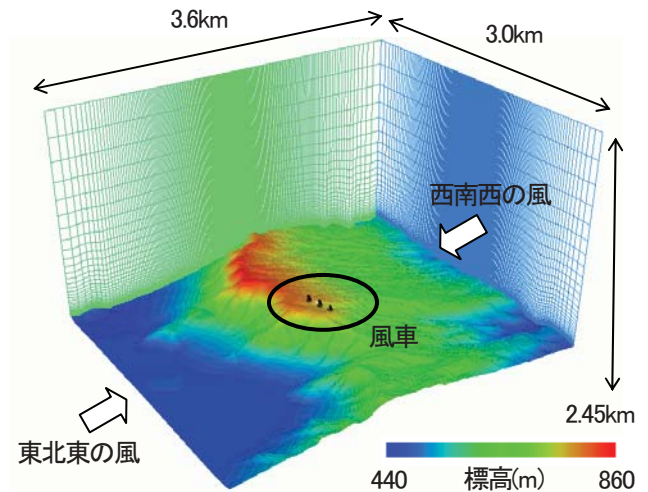


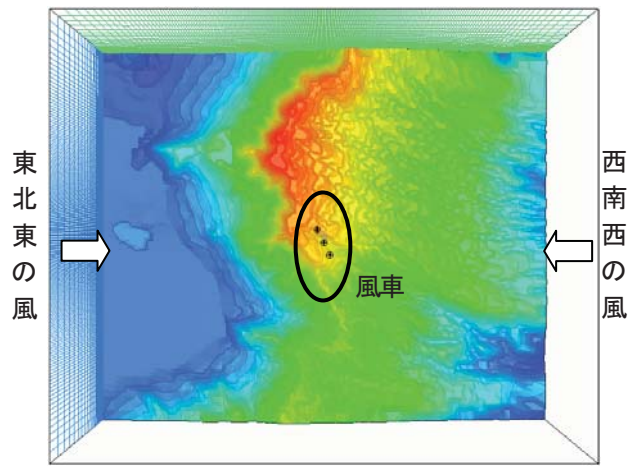
図-2 熊本県阿蘇車帰風力発電所の周辺地形 (Google Earthより)



図-3 現場の写真(著者が2008年7月4日に撮影)  
備考:風車ハブ高さの気流に対して、植生による地表面粗度の影響はほとんど無く、地形の凹凸の影響が支配的。



(a)鳥瞰図



(b)平面図

図-5 計算領域

表-1 熊本県阿蘇車帰風力発電所の概要

	1号機	2号機	3号機
最大出力	600kW		300kW
年間発生電力量	2,707,782kWh (約700世帯分の年間消費量)		
風車の高さ (地面～翼の先端)	59.05m		44.55m
翼(ブレード)直径	47m		29m

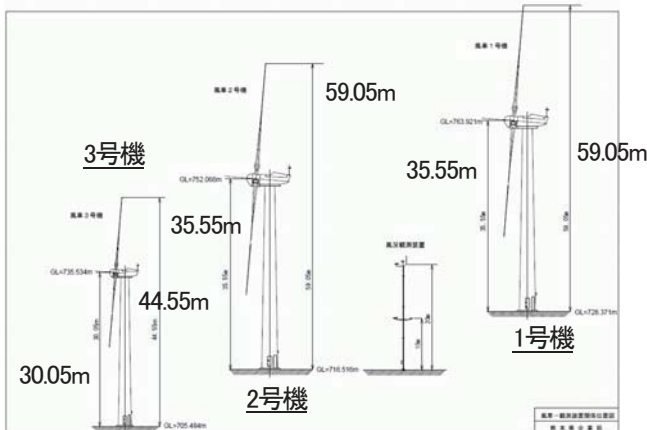


図-4 風車の仕様

### 3.2 計算条件など

図-5に示すように、本研究における計算領域は、主流方向( $x$ )、主流直交方向( $y$ )、鉛直方向( $z$ )方向に $3.6(x) \times 3.0(y) \times 2.45(z)$ kmの空間を有する。地形標高データは、最新の土地造成状況を反映し、空間解像度3mで作成した<sup>12)</sup>。

計算格子数は、各方向に $241(x) \times 201(y) \times 41(z)$ 点の合計約200万点である。 $x$ 方向および $y$ 方向の格子幅は、計算領域の中心で密になるように不等間隔に分布させた。 $z$ 方向の格子幅においても不等間隔とし、地表面付近に滑らかに引き寄せた。水平方向の最小格子幅は6.5m、鉛直方向の最小格子幅は1.25mである。

計算において設定した風向は、本サイトの卓越風向である東北東、西南西とした。流入境界面は $1/7$ 乗のベキ法則に従う速度プロファイルを与え、側方境界面と上部境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とした。地面には粘着条件を課した。式(2)の無次元パラメータ $Re$ はレイノルズ数( $=U_{ref}/\nu$ )であり、 $Re(=U_{ref}/\nu)=10^4$ とした<sup>13)</sup>。ここで、本計算における代表スケールの取扱いは図-6に示す通りである。 $h$ は

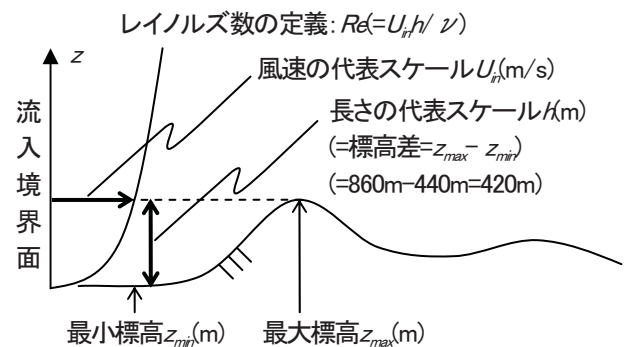


図-6 本計算における代表スケールの取扱い

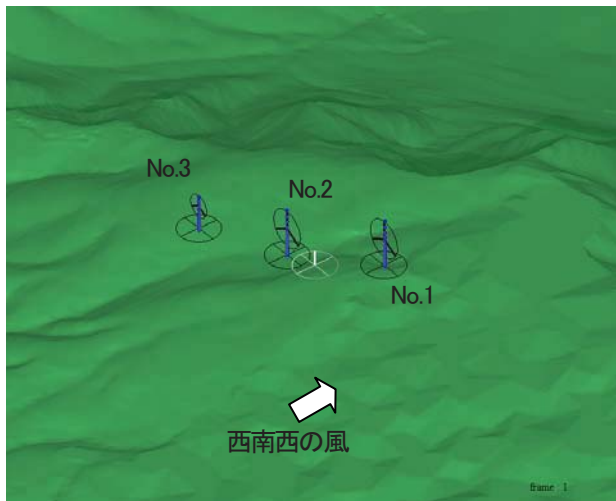
計算領域の標高差、 $U_{in}$ は流入境界面の最大標高における風速、 $\nu$ は動粘性係数である。時間刻みは $2 \times 10^{-3} h / U_{in}$ とした。

### 3.3 計算結果と考察

最初に、西南西の結果を示す。

図-7には、各々の風車を含む鉛直断面内の速度ベクトル図(瞬間場)を示す。図-8には、これに対応した風車位置の速度ベクトル図を示す。これらの図から、西南西の場合には、風車近傍において風の顕著な剥離などは観察されず、緩やかな傾斜上の上昇流が、すべての風車に進入しているのが見て取れる。

図-9には、各々の風車位置に配置した仮想粒子の軌跡を示す。すべての風車位置において、粒子は流下方向へ移動しているのが分かる。また、風車ブレードの上端位置から下端位置の間で大きな速度勾配などは見られない。これらの結果からも、西南西の場合



(a)無次元時刻 $t=0$



(b)無次元時刻 $t=\Delta t$ 後

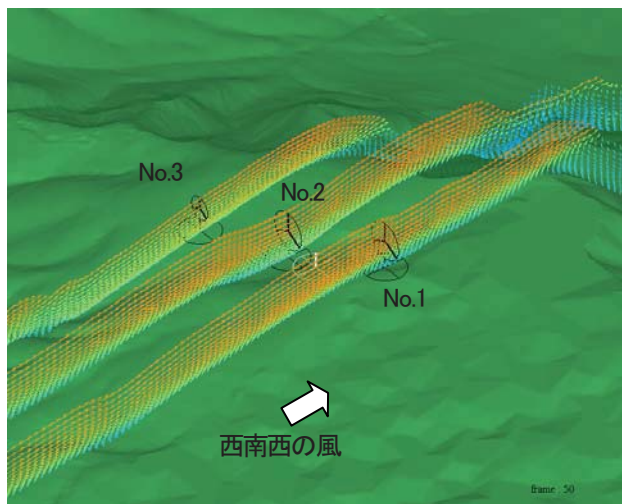


図-7 各々の風車を含む鉛直断面内の速度ベクトル図, 瞬間場



図-8 各々の風車位置での速度ベクトル図, 瞬間場

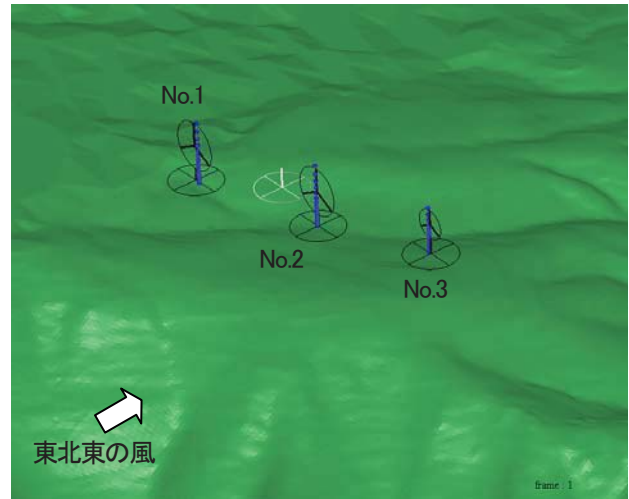


(c)無次元時刻 $t=2 \times \Delta t$ 後  
図-9 各々の風車位置から放した仮想粒子の軌跡(時間経過の様子)

には、風車に悪影響を及ぼす局所的な地形乱流の発生はほとんど無いものと推測される。

次に、東北東の結果を示す。

図-7から図-9に対応する結果を、図-10から図-12に示す。図-10に示す各々の風車を含む鉛直断面内の速度ベクトル図を見ると、図中に示すように3台の風車ともに前方の地形からの剥離流(地形乱流)の影響を大きく受けているのが分かる。つまり、風車が地形乱流の中に完全に埋没した状況であることが分かる。図-11に示す風車位置での速度ベクトル図では、高さ方向に大きな速度差(速度勾配)が生じているのが見て取れる。図-10および図-11のアニメーションを作成し、これを吟味すると、風車上流から周期的に放出される局所的な乱流渦の影響を受け、流れの向きとは逆向きの流れも観察された。このような想定外の世界速度差は風車の振動を引き起こすとともに、風車内故障に繋がる危険性が



(a)無次元時刻 $t=0$

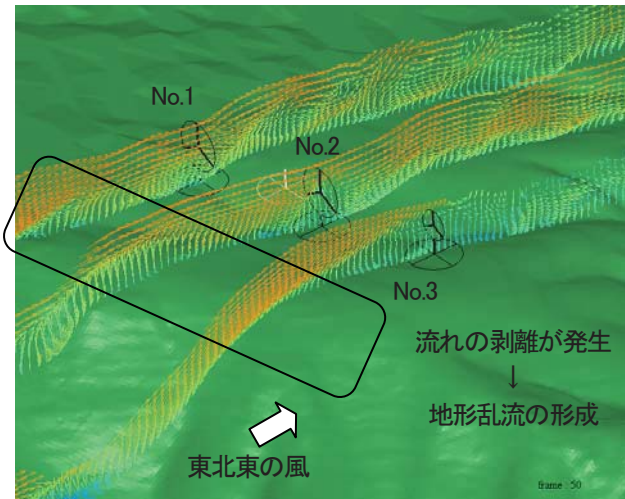
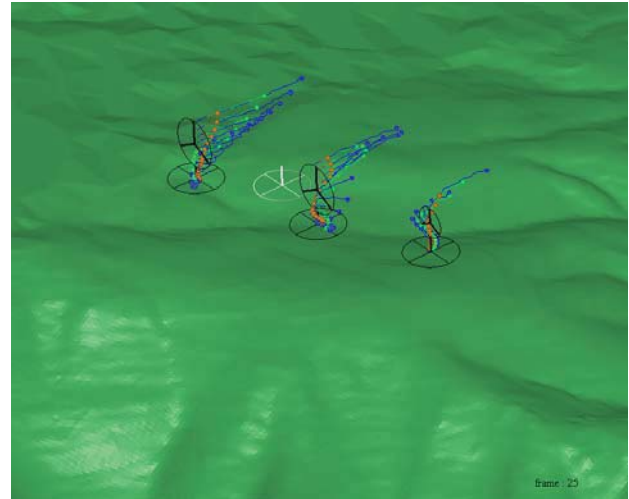


図-10 各々の風車を含む鉛直断面内の速度ベクトル図, 瞬間場



(b)無次元時刻 $t=\Delta t$ 後

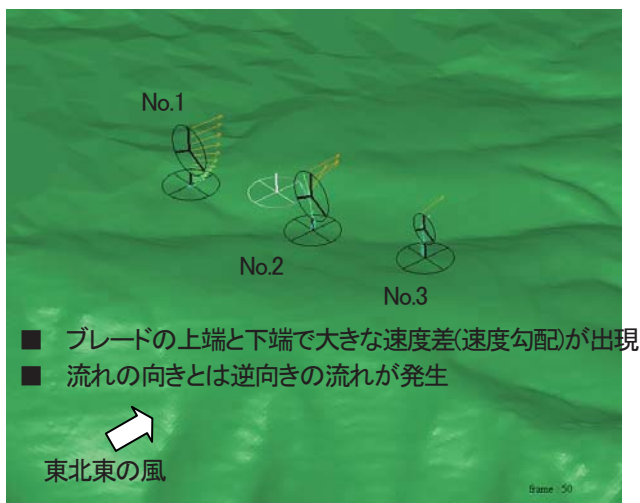
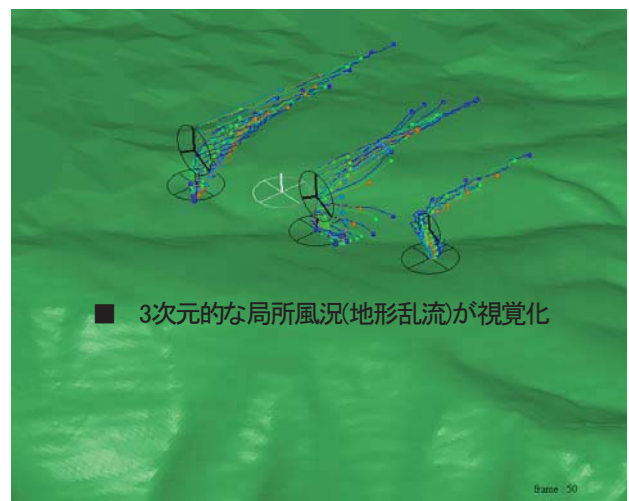


図-11 各々の風車位置での速度ベクトル図, 瞬間場



(c)無次元時刻 $t=2 \times \Delta t$ 後

図-12 各々の風車位置から放出した仮想粒子の軌跡(時間経過の様子)

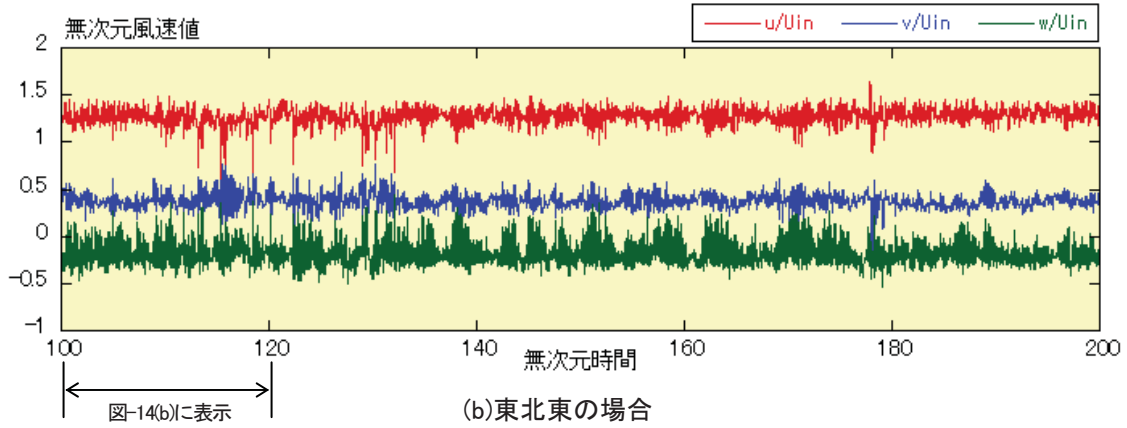
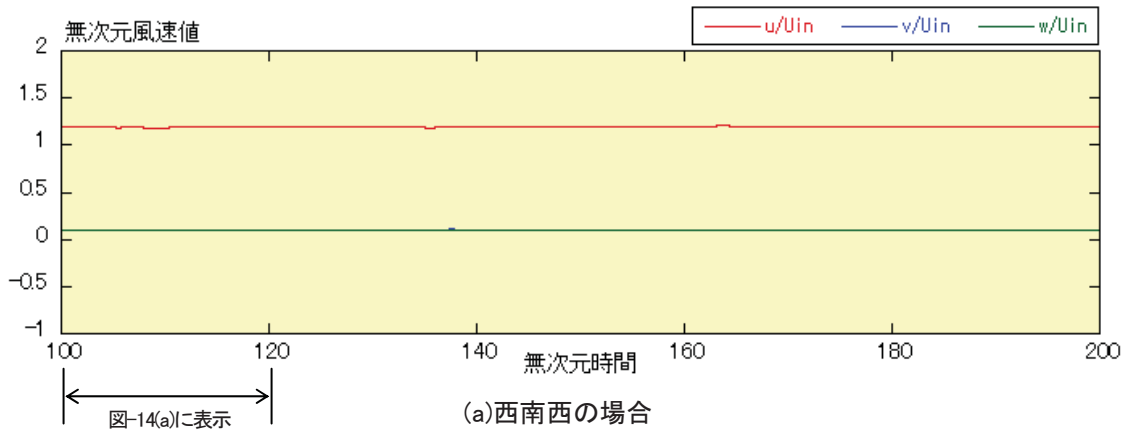


図-13 No.2の風車ハブ高さ(地上高35.55m)における風速値の時系列, 実風速 $U_m=5\text{m/s}$ と仮定すると, 約2hに相当

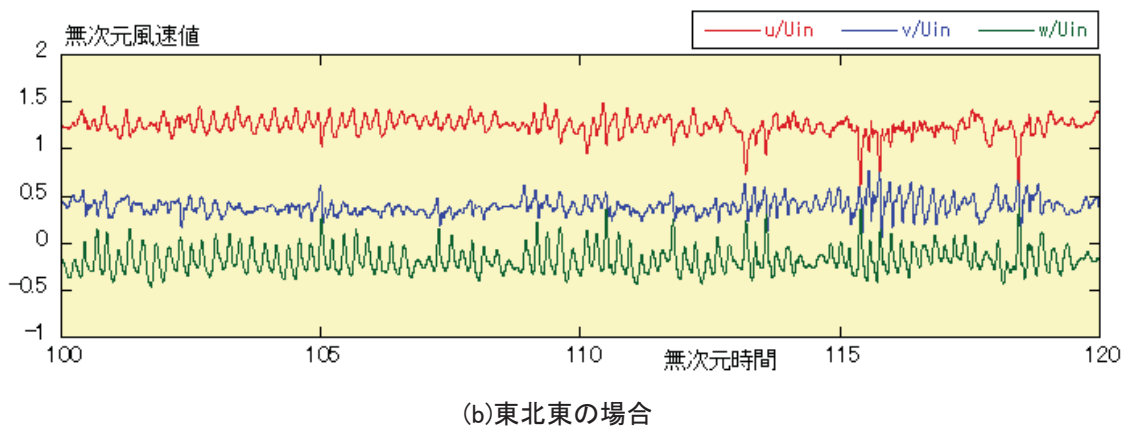
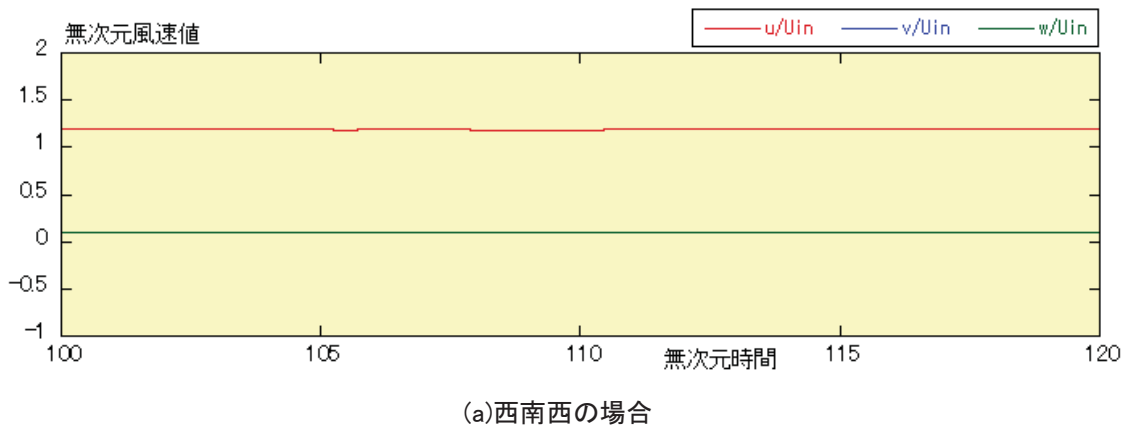


図-14 No.2の風車ハブ高さ(地上高35.55m)における風速値の時系列, 図-13の無次元時間100~120を拡大表示, 実風速 $U_m=5\text{m/s}$ と仮定すると, 28minに相当

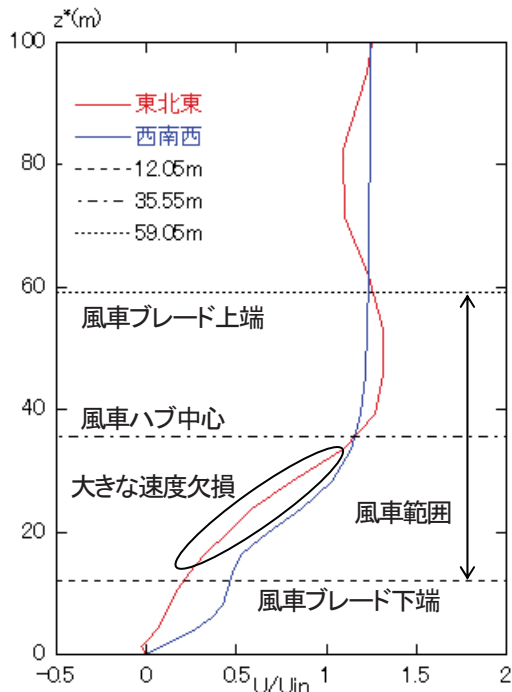


図-15 No.2の風車ハブ高さ位置における主流方向速度の鉛直プロファイル、横軸は無次元値

ある。3次元的な風況を把握するためには、仮想粒子を配置し、この軌跡を観察する手法が有効である。図-12にその結果を示す。図-8とは対照的に、時間の経過とともに、粒子は風車の下流にスムーズに移動せず、風車の左右方向やあるいは上下方向に3次元的に大きく移動しているのが分かる。

以下では、より定量的な評価を行う。No.2の風車ハブ中心高さ35.55mにおける各速度成分の時系列データを図-13に示す。ここで、各速度成分は無次元値で表記している。仮に実風速  $U_{in}=5\text{m/s}$  と仮定すると、無次元時間100は、実スケールで8400s(約2h)に相当する。また、無次元時間100~120(上記の仮定では、28min)の範囲を拡大したものを図-14に示す。

図-13(a)および図-14(a)に示す西南西の場合では、各速度成分ともに速度変動成分はほとんどゼロである。すなわち、乱れの影響は極めて小さい。一方、図-13(b)および図-14(b)に示す東北東の場合では、各速度成分に非常に大きな変動振幅が観察される。これは、図-10から図-12で述べた周期的な渦放出に伴う速度変動(地形乱流)に対応している。

No.2の風車立地点における平均速度の鉛直プロファイルを図15に示す。縦軸は実スケールでの地上高さ $z^*$ mであり、横軸は流入風速 $U_{in}$ で正規化された無次元値である。また、図中には風車範囲(ロータ直径)を示す。西南西の場合には、風車の受風面内において大きな速度欠損は見られない、一方、東北東の場合には、風車上流の地形からの剥離流の影響を強く受けて、風車ハブ中心高さから風車ブレード下端の範囲に大きな速度欠損が形成されている。

一般的に、風車のパワーカーブ(カタログ値)は、風車の存在は仮定せずに、平坦地の下で風車ハブ中心へ流入する

風速値で規定されている。また、速度シアも5~7程度のベキ法則に従う分布が前提になっている。よって、ベキ法則から大きく逸脱した速度シアの下では、発電電力量の大幅な低下が予想される。また同時に、この非常識的な大きな速度シアは、風車タワーの振動問題、あるいは、ヨーギアの疲労強度の問題などに関連して今後ますます重要になると考えられる。

なお、本研究では、風の息に伴う乱れの影響は考慮しておらず、地形の凹凸により機械的、あるいは、直接的に形成される乱れ成分のみを検討していることを再掲しておく。

#### 4. おわりに

熊本県企業局工務課の協力の下、阿蘇車帰風力発電所(平成17年10月より運転を開始)を対象に、最新の土地造成状況を反映した高解像標高データに基づいた詳細風況解析を実施した。その結果、新聞などで報道されている地形乱流の影響を再現することに成功した。

その結果、東北東の風の場合において、地形起伏の僅かな変化が起源となり、そこから機械的(直接的)に風の乱れ(地形乱流)が発生し、3台の風車ともにその影響を強く受けていることが示された。すなわち、地形乱流が形成する剥離流の中に、風車が完全に埋没している状況が明らかになった。

どの程度以上の風速変動が風車に悪影響を及ぼすのかの定量的な検討は、今後の大きな課題である。

今後は、平坦地形や複雑地形を問わず、本報で示したような詳細な風況診断を風車の全風向に対して実施し、各風車立地点の3次元局所風況(風車立地点の鉛直速度プロファイルの時間変化、風車ブレードの上下端、左右端での風速、

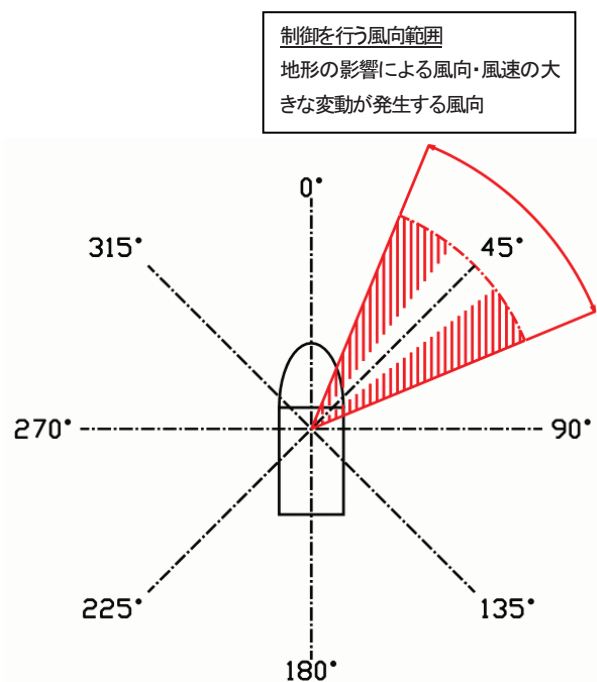


図-16 運転制御の概念図

乱流強度の時系列などを正確に把握する必要がある<sup>14)</sup>。得られた風況診断結果に基づいて風車に対して地形乱流の影響の大きい風向をあらかじめ特定するとともに、一連の風況診断結果の知見を適切な風車制御に活用することが出来れば、地形乱流に起因した風車トラブルは劇的に減少し、風車稼働率を大幅に向上させることが可能になると考えられる。例えば、風車ブレードのピッチ角制御が、風向・風速の変化に追従できなくなるような急激で、かつ大きな風向・風速の変化が生じるような気象条件を各ナセル位置で事前に予測しておく。そのような気流条件を満たす場合には、発電を中止するなどの対応を取るなどが考えられる(図-16を参照)。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、熊本県企業局工務課、九州電力グループの西日本技術開発(株)、(株)環境GIS研究所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) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子: 局所風況予測システムLAWEPSの開発と検証, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.375-386, 2003.
- 2) 石原孟: 非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその実用化, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.387-396, 2003.
- 3) Sumner, J., Watters, C.S. and Masson, C. : Review : CFD in Wind Energy : The Virtual, Multiscale Wind Tunnel, Energies, Vol.3 , pp.989-1013, 2010.
- 4) Uchida, T. and Ohya, Y. : Micro-siting Technique for Wind Turbine Generators by Using Large-Eddy Simulation, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008.
- 5) Uchida, T. and Ohya, Y. : Application of LES Technique to Diagnosis of Wind Farm by Using High Resolution Elevation Data, JSME International Journal, 「Environmental Flows」, Series B, Vol.49, No.3, pp.567-575, 2006.
- 6) 内田孝紀, 大屋裕二, 諏訪部哲也, 李貫行: 非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTによるウインドファーム風況診断の提案, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.30, pp.101-108, 2006.
- 7) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 李 貫行: 風車立地点近傍に発生する地形乱流の高解像度LES, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.34, 通巻93, pp.121-126, 2010.
- 8) Kim, J. and Moin, P. : Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, J. Comput. Phys., Vol.59, pp.308-323, 1985.
- 9) 梶島岳夫, 太田貴士, 岡崎和彦, 三宅裕: コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析, 日本機械学会論文集, (B編), 63巻, 614号, pp.3247-3254, 1997.
- 10) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K. : Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986.
- 11) Smagorinsky, J. : General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963.
- 12) 内田孝紀, 大屋裕二, 荒屋亮, 田辺正孝, 川島泰史: 風況シミュレーションのための紙地図からの高解像度地形データの構築, 九州大学応用力学研究所所報, 第129号, pp.135-141, 2005.
- 13) 加藤真規子: 複雑地形上の乱れの構造の風洞内再現, 日本風工学会誌, 第59号, pp.89-92, 1994.
- 14) 内田 孝紀, 丸山 敬, 大屋 裕二: 連続的な風向変化を考慮した非定常数値風況予測による風車設置地点における設計風速評価手法の提案, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.34, 通巻96, pp.129-133, 2011.
- 15) NEDO若手グラント成果実例集Vol.2, 2010.
- 16) Uchida, T. and Ohya, Y. : Challenge to Huge Computation of Airflow around Urban Area by using RIAM-COMPACT® CFD Model, Proceedings of EAEP2010/The 4th International Symposium on the Asian Environmental Problems, pp.191-194, 2010.

(2011年3月8日 受付)