

RIAM-COMPACT[®]によるウインドリスク(地形乱流)の 数値診断 : 愛知県渥美風力発電所を例として

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

川島, 泰史
西日本技術開発(株)

猿渡, 和明
西日本技術開発(株)

他

<https://hdl.handle.net/2324/7364803>

出版情報 : Wind Energy. 35 (3), pp.A_14-A_23, 2011. 日本風力エネルギー学会
バージョン :
権利関係 : © 2011 JWEA



RIAM-COMPACT[®]によるウインドリスク(地形乱流)の数値診断 —愛知県渥美風力発電所を例として—

Diagnosis of Airflow Characteristics in Wind Farm —Case of the Atsumi Wind Farm—

内田 孝紀^{*1}, 大屋 裕二^{*2}, 川島 泰史^{*3}, 猿渡 和明^{*4}, 西田 利彦^{*5}

Takanori UCHIDA, Yuji OHYA, Yasushi KAWASHIMA, Kazuaki SARUWATARI and Toshihiko NISHIDA

^{*1} Associate Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

^{*2} Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

^{*3} Chief, New Energy Development Dept., West Japan Engineering Consultants Inc., Space Cube Bldg. 3F, 1-7-11 Haruyoshi, Chuo-ku, Fukuoka, 810-0003, Japan

^{*4} Manager, New Energy Development Dept., West Japan Engineering Consultants Inc., Space Cube Bldg. 3F, 1-7-11 Haruyoshi, Chuo-ku, Fukuoka, 810-0003, Japan

^{*5} President, New Energy Planning Inc., 1-23-30 Nanokawa Minami-ku, Fukuoka, 815-0081, Japan

ABSTRACT

A detailed wind synopsis analysis was performed for the Atsumi wind farm. 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) 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.

キーワード: 複雑地形, 流体工学モデル, マイクロサイティング

Keywords : Complex Terrain, CFD Model, Micro-Siting

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, 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ウインドリスク(地形乱流)を特定できる数値風況予測技術を確立することである¹⁻³⁾。

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可能性を秘めている⁴⁾。RIAM-COMPACT[®](Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational (原稿受付: 2011 年 4 月 11 日)

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年に内田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RIAM-COMPACT[®]の商標と実用新案を取得)。現在では, 九州電力グループの西日本技術開発(株), (株)環境GIS研究所, (株)FSコンサルティングと開発コンソーシアムを作り, 「実地形版RIAM-COMPACT[®]ソフトウェア」と名付け, 業界標準モデルの一つとして広く普及に努めている。現在では, 国内の風力事業者最大手の(株)ユーラスエナジー・ジャパン, 電源開発(株), 日本風力開発(株), エコ・パワー(株)を含め, 多数の導入実績を有する。

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, 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(例えば, ヨーモーターやヨーギアの故障, 風車ブ

レードのクラックなど)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, そこから発生する風の乱れ(地形乱流)であると考えられる⁵⁻⁷⁾. 本報では, 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用いたウインドリスク(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, 平均風速6m/s以上の強風を対象にしているため, 大気有す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高解像度に再現することで取り入れた.

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

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

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

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

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

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

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

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

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)⁸⁾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⁹⁾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¹⁰⁾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ム¹¹⁾を用いる. 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®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ウインドファームにおいて, 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愛知県渥美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. 本報では, 実地形版RIAM-COMPACT®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.

3.1 愛知県渥美風力発電所の概要

株式会社九電工の協力の下, 渥美風力発電所(平



図1 愛知県渥美風力発電所周辺の地形
(Google Earthによる)



図2 現場の写真(著者の一人が北西側から撮影)

備考:2号機の背後に標高125mの
小地形が見られる.

表1 愛知県渥美風力発電所の概要

	1号機～4号機
風車メーカー, 出力	Vestas社 V80 2000kW
風車の高さ (地面～ハブ中心)	78m
翼(ブレード) の直径	80m

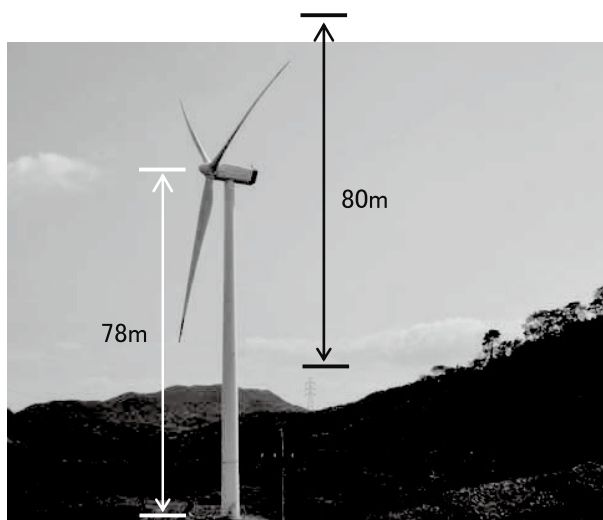


図3 風車のスペック, 1号機の写真

成19年3月より運転を開始)の風況解析を実施した(図1, 2, 3および表1を参照).

3.2 計算条件など

図4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 $3.5(x) \times 1.5(y) \times 0.6(z)$ kmの空間を有する.

地形標高データ¹²⁾は, 国土地理院の基盤地図情報(縮尺レベル25000)の等値線から, 空間解像度5m

の標高データを作成した.

計算格子数は, 各方向に201(x)×151(y)×41(z)点の合計約124万点である. x方向およびy方向の格子幅は, 風車周辺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3m, 鉛直方向の最小格子幅は0.6mである.

本計算において設定した風向は, 風車の異常が確認された南東とした. 流入境界面には, 図6に示す地表面粗度区分Ⅲに従う速度プロファイルを与えた. 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($=U_{in}h/\nu$)であり, $Re(=U_{in}h/\nu)=10^4$ とした¹³⁾. ここで, 本計算における代表スケールの取扱いを図7に示す通りである. h は計算領域の標高差 h , U_{in} は流入境界面の最大標高における風速, ν は動粘性係数である. 時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U_{in}$ とした.

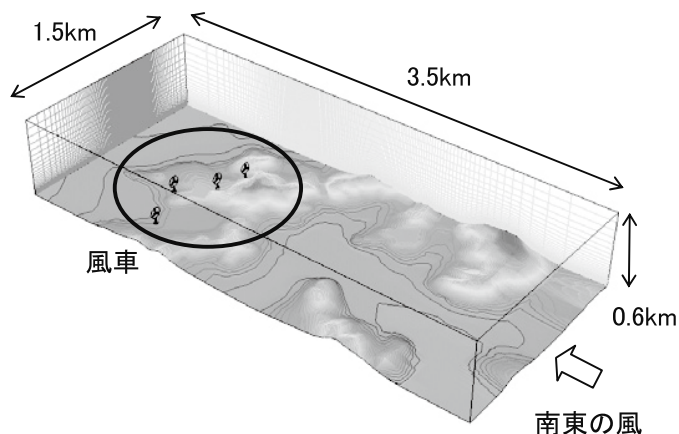


図4 計算領域, 鳥瞰図,
カラーは標高(最大:130m, 最小:10m)を意味する.

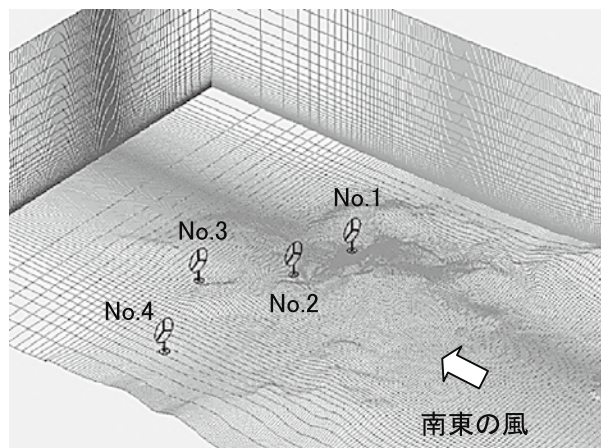
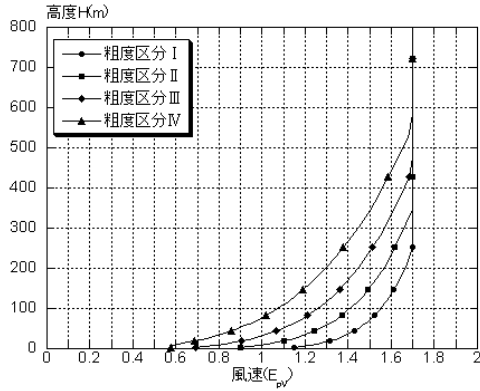


図5 風車周辺の計算格子図



◆ 高度 H が Z_b 以下の場合

$$E_{pV} = 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha \quad - (9)$$

◆ 高度 H が Z_b を超える場合

$$E_{pV} = 1.7 \left(\frac{H}{Z_G} \right)^\alpha \quad - (10)$$

粗度区分	Z_b (m)	Z_G (m)	α
I	5	250	0.10
II	5	350	0.15
III	5	450	0.20
IV	10	550	0.27

図6 平成12年建設省告示1454号で与えられる E_{pV}
(速度プロファイル)

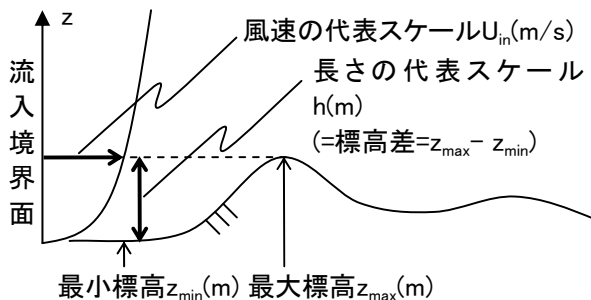


図7 本計算における代表スケールの取扱い

3.3 計算結果と考察

本研究では、運転成績の最も良い4号機と、南東の風の場合に地形乱流の影響が大きいと推測される2号機の比較に主眼を置いて議論を進める。

図8には、時間平均風況場に関して、風車ハブ高さ(地上高78m)における速度ベクトル図を示す。平均化時間は、図10に示す無次元時間100～200である。図9には、これに対応した各風車立地点における速度ベクトル図を示す。図8および図9に示す結果は、時間平均型乱流モデルRANSの計算結果と見ても出来る。両者の結果を観察すると、風車周辺には地形乱流を示す大きな速度変動や、速度プロファイルの極端な欠損などは一切存在しない。すなわち、これらの結果から風車周辺の風況場を評価すると、

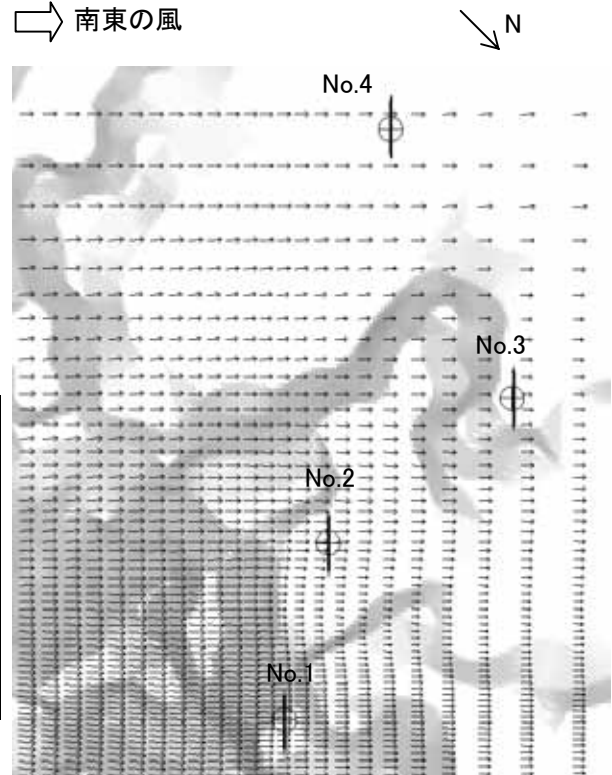


図8 風車ハブ高さ(78m)における
速度ベクトル図，時間平均場，
平均化時間は図10の無次元時間100～200

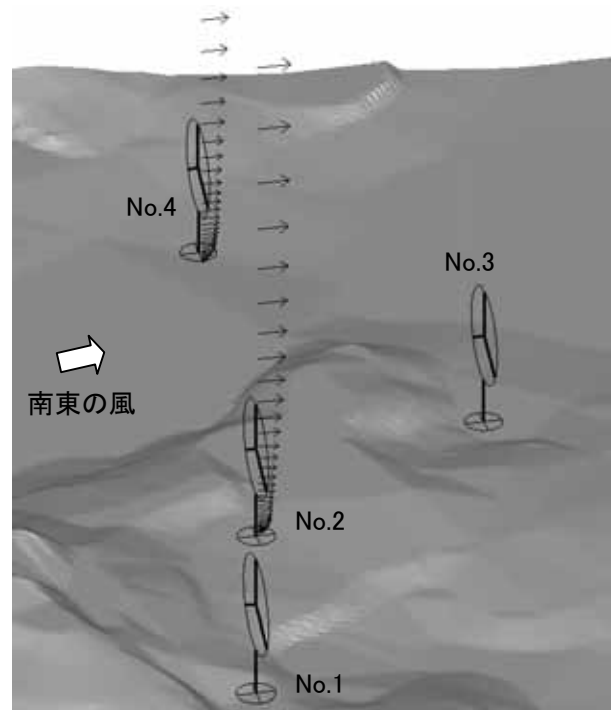


図9 風車立地点における
速度ベクトル図，時間平均場，
平均化時間は図10の無次元時間100～200

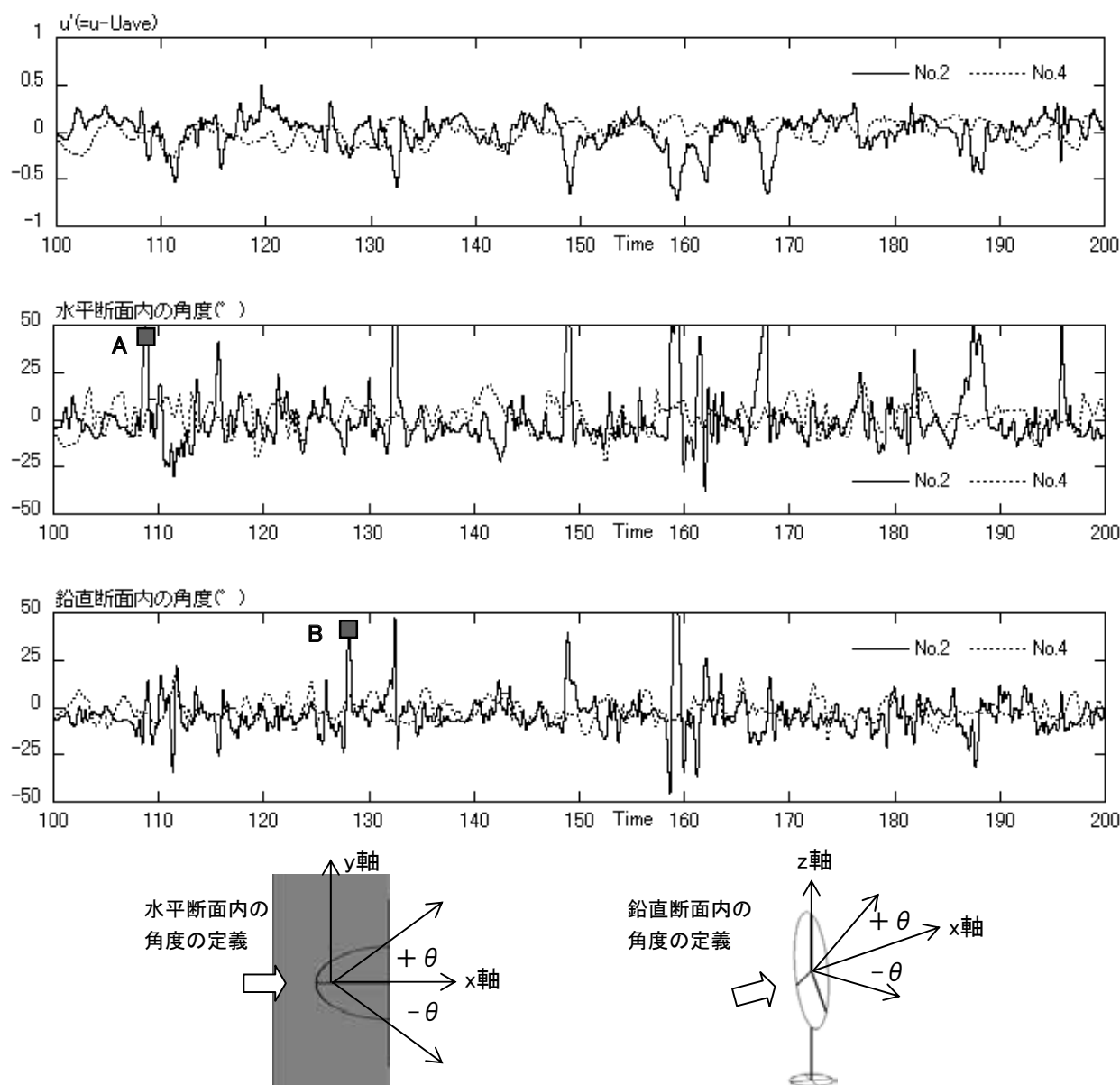


図10 風車ハブ高さにおける主流方向(x)の変動成分, 水平および鉛直断面内の角度の時間変化, 実風速 $U_{in}=5\text{m/s}$ と仮定すると, 約40分間に相当

風力発電に適切な風況場である, と結論付けられる。しかしながら, 2号機においてはヨーモーターやヨーギアの故障が生じている。今回のような地形乱流の挙動を忠実に再現するためには, 非定常乱流モデルLESを採用しているRIAM-COMPACT®が極めて有効である。RIAM-COMPACT®では, 各種物理量の時間挙動を出力することが可能である。

図10には, 風車ハブ高さにおける主流方向(x)速度の変動成分(平均値からのずれ), 水平および鉛直断面内の角度の時間変化を示す。ここで横軸は無次元時間を示すが, 実風速 $U_{in}=5\text{m/s}$ と仮定すると, 約40分間に相当する。また, 図10には, 水平および鉛直断面内の角度の定義を併せて示す。図10に示す時刻歴波形を観察することで, 風車周辺に生じてい

る非定常な風況変化が明確に理解できる。

主流方向(x)速度の変動成分(平均値からのずれ)に注目する(図10の一番上のグラフ)。4号機の時間変化は非常に小さいのに対して, 2号機ではスパイク状の変動が存在しているのが分かる。ここでは割愛したが, ブレードの上下端および左右端での風速変化をさらに吟味することでどのようなモーメントが発生しているかを調べることも可能である。

次に, 水平断面内の角度の時間変化に注目する(図10の真中のグラフ)。4号機の場合には, 速度変化と同様, 変動の幅は非常に小さい。これに対し, 2号機の場合には25度を超える風向の変化が数多く観察される(図11も参照)。また, 正の向きへの変化が多いことから, 瞬間的には地形効果により東寄りの風が

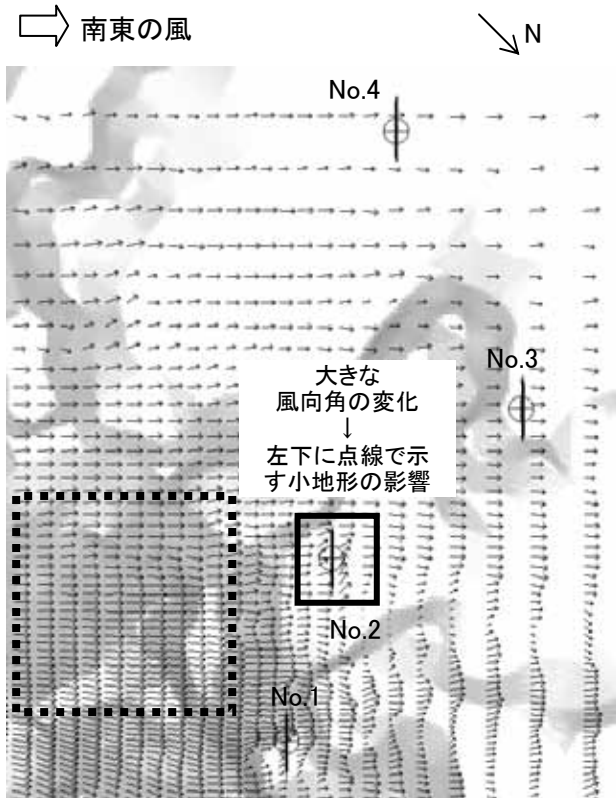


図11 風車ハブ高さ(78m)における
速度ベクトル図, 瞬間場,
時間は図10にAで示す

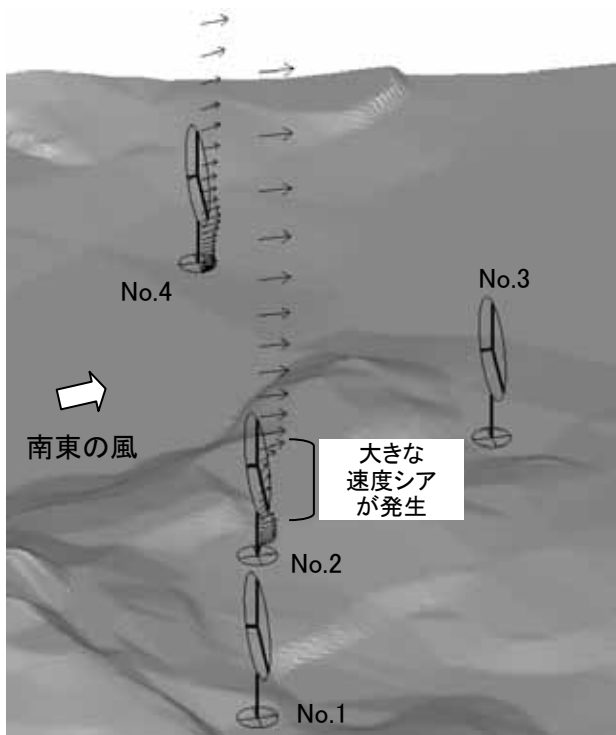


図12 風車立地点における
速度ベクトル図, 瞬間場,
時間は図10にBで示す

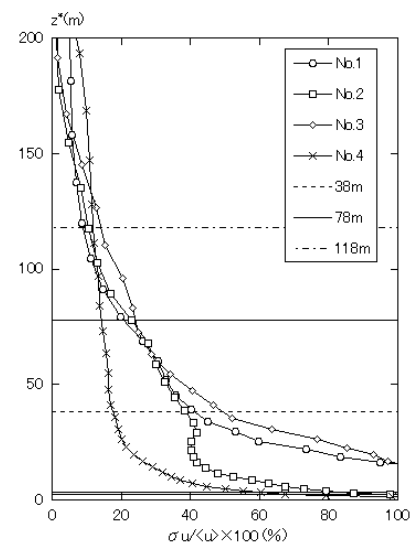
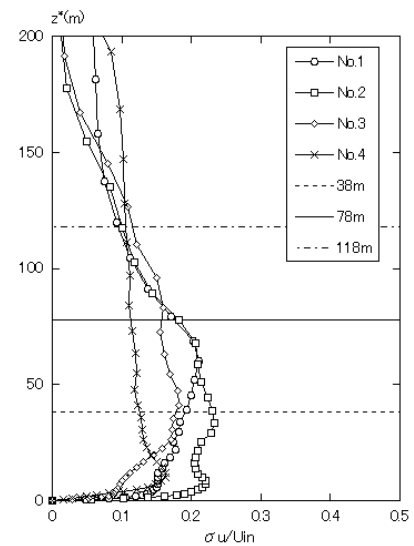
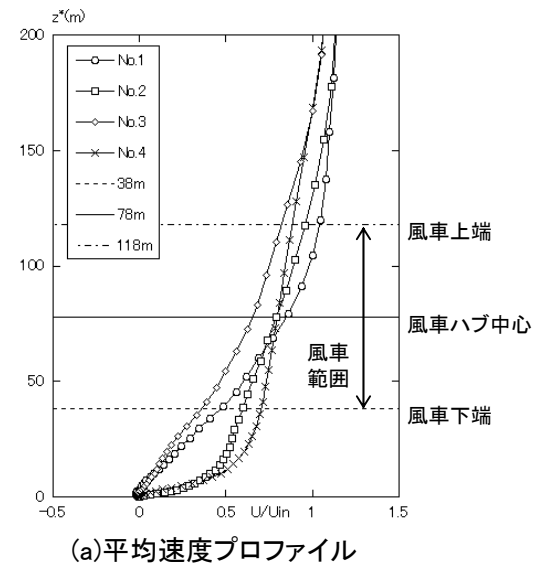
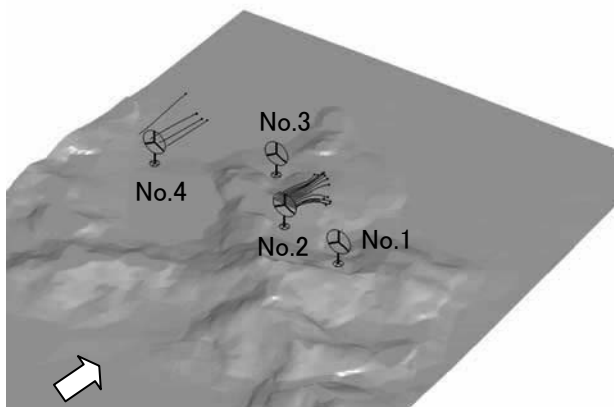
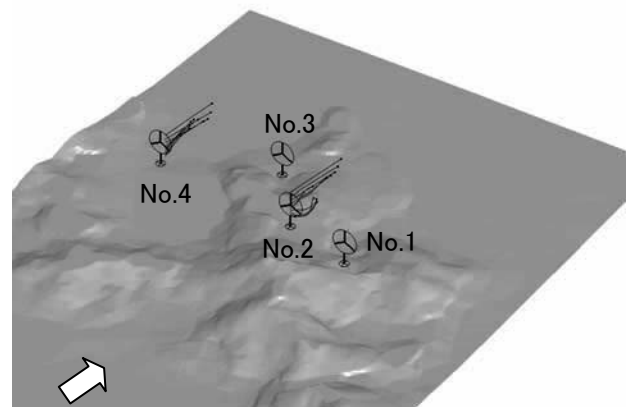


図13 風車立地点における各物理量の鉛直分布



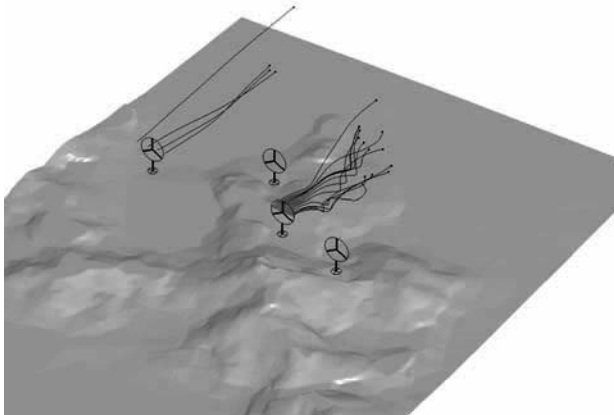
南東の風

(a)無次元時刻 t

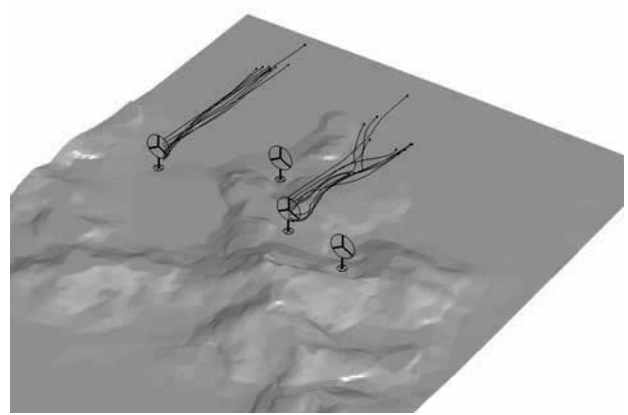


南東の風

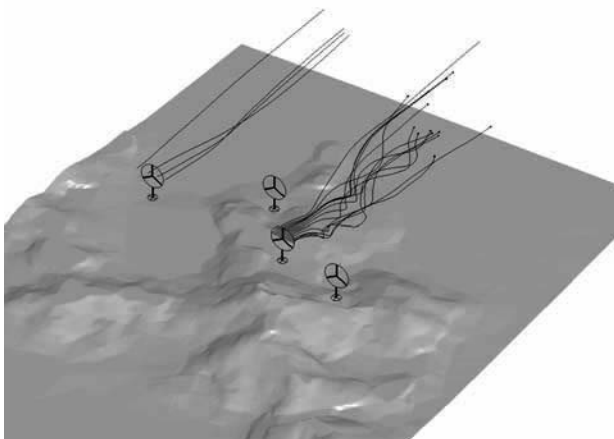
(a)無次元時刻 t



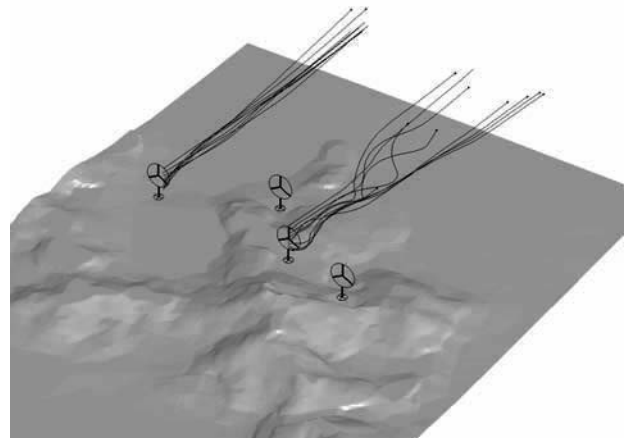
(b)無次元時刻 $t + \Delta t$



(b)無次元時刻 $t + \Delta t$



(c)無次元時刻 $t + 2\Delta t$



(c)無次元時刻 $t + 2\Delta t$

図14 2号機および4号機の風車位置から
放出した仮想粒子の軌跡(流跡線),
風車ハブ中心高さでブレードの右端から左端まで
仮想粒子を配置

図15 2号機および4号機の風車位置から
放出した仮想粒子の軌跡(流跡線),
風車ハブ中心位置でブレードの下端から上端まで
仮想粒子を配置

発生していることが読み取れる。

最後に、鉛直断面内の角度の時間変化に注目する(図10の一番下のグラフ)。この図からも、2号機では、25度を超える吹き上げの風や、吹き下げの風が発生していることが分かる。これらの局所的な風向の変化は、風車の上流に存在する小地形が影響していると推測される。

図11および図12には、図10において大きな風向の変化が示された時刻の風況場(速度ベクトル図)を示す。図11を観察すると、2号機において上側に大きく傾いた流れ(東寄りの風)が発生しているのが分かる。また、別の時刻である図12を観察すると、同じく2号機の風車ハブ中心付近において、大きな吹き上げの風が発生している。さらにこの図では、いわゆる、ベキ指数などに従う速度プロファイルではなく、風車のハブ中心からブレード下端の間で、大きな速度欠損が確認される。

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と関連して今後ますます重要になると考えられる。

図13には、各風車立地点における物理量の鉛直分布を示す。図13(a)には平均速度の鉛直分布、図13(b)には標準偏差の鉛直分布(横軸は、標準偏差を上流の流入風速 U_{in} で正規化)、図13(c)には図13(b)に示す標準偏差を各位置における平均風速 $\langle u \rangle$ で除した乱流強度(%)を示す。なお、全てのグラフにおいて縦軸は地上高(m)を示す。図中には風車範囲(ブレード直径)を示す。図13(a)の平均速度の鉛直分布では、各風車ともに極端な速度欠損などは見られない。図13(b)および図13(c)に関して、風車範囲に注目すると、1号機から3号機では風車の上流の小地形の影響を受けて同程度の地形乱流の影響が観察される。4号機では、他の3機と比較して地形乱流の影響は非常に小さい。

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(流跡線)を観察する手法が有効である。図14および図15にはその結果を示す。図14では、風車ハブ中心高さでブレードの右端から左端まで仮想粒子を配置した。一方、図15では、風車ハブ中心位置でブレードの下端から上端まで仮想粒子を配置した。これらを吟味すると、これまで議論してきた

ように、4号機の周辺では地形による気流の大きな変化は無く、粒子は風車の下流にスムーズに移動している。しかしながら、2号機の周辺では、その上流に位置する小地形の影響を受けて、気流は左右方向やあるいは上下方向に3次元的に大きく蛇行している様子が見て取れる。

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

愛知県渥美風力発電所(平成19年3月より運転を開始)を対象に、実地形版RIAM-COMPACT[®]ソフトウェアによる数値風況予測を実施した。その結果、南東の風の場合において、2号機の風車の上流に位置する小地形が起源となり、そこから風の乱れ(地形乱流)が発生し、2号機はその影響を強く受けていることが示された。

風車周辺に点在する小地形や地形の僅かな起伏に起因する局所的な地形乱流の影響は、時間平均型の乱流モデルRANSでは再現が難しく、かつ見落としがちであるため、RIAM-COMPACT[®]のような非定常乱流モデル(LES)によるアプローチが有効である。

さらに、実際の詳細な気象データなどを一切用いなくても、現地の土地造成の状況を忠実に再現した詳細地形データを利用するのみで、本報で示したような各風車間の地形乱流の相対比較は十分に可能である。これらの結果をさらに有効活用し、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内外の故障や事故は劇的に減少し、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(つまり、このような気象条件が発生する特定の風向)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とることなどが考えられる(図16を参照)。

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、乱流強度の時刻歴波形など)を正確に把握する必要がある¹⁴⁾。

付 録

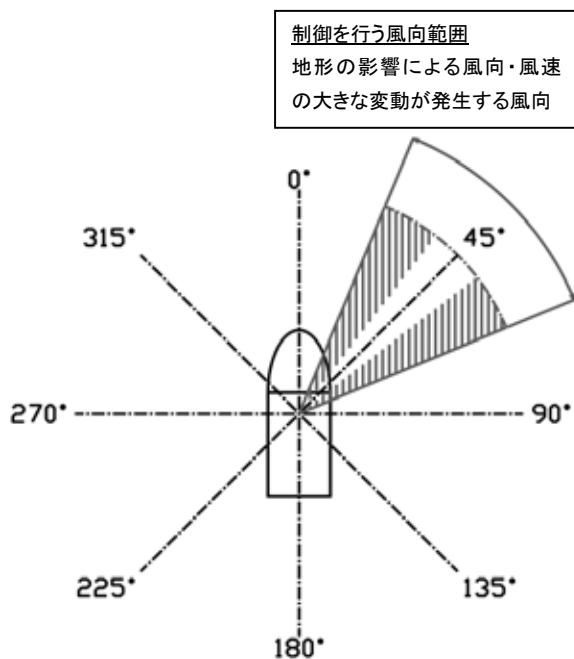


図16 運転制御の概念図

非定常乱流解析に主眼を置いた RIAM-COMPACT®ソフトウェアでは、計算時間の問題が懸念される。しかし、流体計算のソルバーはIntel Core i7などのマルチコアCPUに対応しており、計算時間は劇的に短縮され、実用面での利用において特段問題は無い¹⁵⁾。実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアのユーザは、数十万点規模の年間発電電力量などの経済性の評価から、数百万点規模の地形乱流解析まで多岐にわたる。

著者らの最新の研究成果では、汎用的な64ビットWindows PC1台の環境で、数千万点規模の大規模計算が1～2週間程度で完了することを確認した¹⁶⁾。さらに、流体ソルバーはGPGPUコンピューティングへの対応にも成功した。GPGPUのコンセプトとは、グラフィック・レンダリングのみならず、GPUが有する浮動小数点演算能力を他の数値演算にも利用することである。著者らの最近の研究では、PGI社とNVIDIA社が共同開発したGPGPU専用の統合開発環境「CUDA」に対応した PGI Fortran コンパイラおよび「NVIDIA® Tesla™ C2050 3GB」を利用し、流体ソルバー全体にCUDA対応のチューニングを行うことで、シングルGPUでは800万点規模の計算が実行可能で、その演算速度はシングルCPUの場合と比較して約8～10倍に達することを確認した。なお、大規模計算向けマルチコアCPU用の実行モジュール(流体ソルバー)、およびシングルGPU用の流体ソルバーは既に提供が開始されている。

世界レベルで著者らが推奨する数値風況解析を展開するためには、海外の地形標高データの入手が極めて重要である。この目的に対し、我々はMETI(経済産業省)とNASA(米国航空宇宙局)が共同で作成した空間解像度30mの全球3次元標高データ(ASTER)と、JAXA(宇宙航空研究開発機構)とNASAが共同で作成した空間解像度2.5m, 5m, 10mの三種類の空間解像度から構成される全球3次元標高データ(ALOSデータ)に注目し、これをRIAM-COMPACT®の入力データに自動変換する技術を開発している。これに伴い、世界中のあらゆる地域に対して数値風況予測が可能になり、その前処理の作業時間は、数日から1時間程度へと大幅に短縮されることを確認した。

謝 辞

標高データの製作において、株式会社環境GIS研究所の荒屋亮氏から協力を受けました。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産業技術助成事業, 若手研究グラント成果実例集2009西日本編, pp.63, 2009.
 - 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.