

流体力学CFDモデルを用いた連続的な風向変化の再現性について

Reproduction of the continuous wind direction changes by using the RIAM-COMPACT® CFD model

内田 孝紀*1, 丸山 敬*2, 大屋 裕二*3

Takanori UCHIDA, Takashi MARUYAMA and Yuji OHYA

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

*2 Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute (DPRI), Kyoto University, Gokasyo, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

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

ABSTRACT

It is highly important in Japan to choose a good site for wind turbines, because the spatial distribution of wind speed is quite complicated over steep complex terrain. We have been developing the unsteady numerical model called the RIAM-COMPACT® (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The RIAM-COMPACT® is based on the LES (Large-Eddy Simulation). The object domain of the RIAM-COMPACT® is from several m to several km, and can predict the airflow and gas diffusion over complex terrain with high precision.

In the present paper, the reproduction method of the continuous wind direction changes based on the RIAM-COMPACT® CFD model that was proposed. It was shown that 2.25×10^{-4} degrees are necessary a step.

キーワード : 複雑地形, 流体力学CFDモデル, 連続的な風向変化

Keywords : Complex Terrain, CFD Model, Continuous Wind Direction Changes

1. はじめに

平成19年6月に「改正建築基準法」が施行され、60mを超える工作物は建築確認申請だけではなく、指定機関による性能評価や国土交通省の大臣認定が必要となった。これに伴い、風車ハブ高さ位置で耐風設計用の基準風速を算定する際には、地形的要因を考慮した風速の割増係数を、何らかの形で評価しなければならなくなった。こうした状況を受け、2007年および2010年に土木学会から、「建築基準法」¹⁾、「建築学会荷重指針・同解説」²⁾に準じた「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」³⁾が発行された。そこでは、16方位別の数値風況シミュレーションにより、設計用風速の評価を行うことが記述されている。

一方、我々はより現実に近い強風性状を取り込み、かつ、安全性を確保して耐風設計用の基準風速を求める一手法を提案した⁴⁾。すなわち、対象地点を過去に襲来し、強風が発生した台風をメソスケール気象モデルにより再現し、強風発生が予想される風向を特定する。次に、特定された風向を対象にして、流

体力学CFDモデルRIAM-COMPACT®⁵⁾による数値風況予測を行う。その際、連続的な風向変化に伴う強風発生への影響は、メソスケール気象モデルを用いた解析により評価している。しかしながら、一般的に気象モデルでは積雲対流、降水など、種々の気象現象は、数百mから数km程度の空間解像度を有するモデル化(気象分野では、「パラメタリゼーション」と呼ぶ)が用いられている。よって、風車の耐風設計で必要とされる周囲の地形の影響を十分に取り込めるほどの空間解像度を有していないのが現状である。また、空間解像度が粗い計算格子を用いた場合には、風速変動も十分には再現できない。一方、空間解像度が高い計算格子を用いた場合でも、方位別の計算を行う限り、その方位で分割された以上に、周囲の地形の影響を受けた微妙な風向および風速の変化を再現することは困難である。

そこで、これらの欠点を解消する手法を提案した⁶⁾。この手法では、非定常な乱流場を再現できるRIAM-COMPACT®の利点を積極的に活かし、時間とともに風向を連続的に変化させた計算により、風車

*1, 3 九州大学応用力学研究所 准教授, 教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

*2 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

の耐風設計用風速評価を全方位的に行うものである。但し、この手法においては、連続的に風向を変化させる移動速度に関して幾つかの疑問が残った。そこで本研究では、この点について詳細な議論を行ったので、その結果を報告する。

2. 数値計算手法

2.1 流体工学CFDモデルの概要

本研究では、数値不安定を回避し、複雑地形上の地形風を高精度に予測するため、一般曲線座標系を用い、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コロケート格子に基づいた実地形版RIAM-COMPACT[®]ソフトウェア⁵⁾を用いる。数値計算法は(有限)差分法に基づき、乱流モデルとしてLES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成分の渦と、それよりも小さなSGS成分の渦に分離する。GS成分の大規模渦は、物理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と運動方程式である。本研究では、強風時の気流予測を対象にしているので、大気が一般的に有する鉛直方向の大気安定度の効果は省略した。

計算アルゴリズムは部分段階法に準じ、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SOR法により解く。空間項の離散化は、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⁷⁾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⁸⁾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⁹⁾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。

2.2 地形形状の再現と境界条件の設定について

計算領域内の地形は、国土地理院の50m標高データなどに基づいて再現する。特に、風車付近の格子間隔は30m程度に小さくして地形形状を詳細に再現する。計算領域については、図1に示すように、風上側では風車位置の気流性状に地形が影響を及ぼす範囲を、風下側では流下する渦が滑らかに流出し、風車位置付近に流出境界面の影響が及ばないような範囲を設定する。特に、急峻な地形の解析では、計算領域の周囲に標高ゼロの平坦地形を設定し、滑らかに接続する人工的な袖領域を設ける。

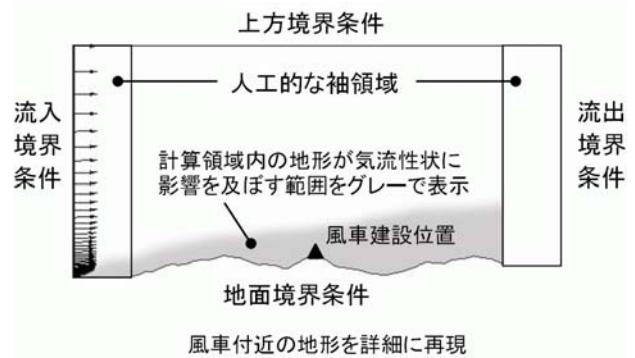


図1 計算領域と境界条件

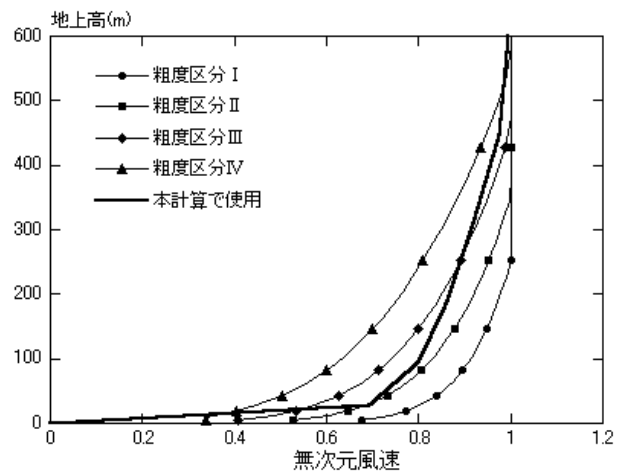


図2 本計算で使用した鉛直分布(図中太線)と告示(平成12年建設省告示1454号)との比較

表1 図2に対応する平均風速の高度方向分布を表す係数(あるいは平均風速の高度補正係数) E_{pV}

$$\begin{aligned} \text{高度 } H \text{ が } Z_b \text{ 以下の場合: } E_{pV} &= 1.7(Z_b / Z_G)^\alpha \\ \text{高度 } H \text{ が } Z_b \text{ 以上の場合: } E_{pV} &= 1.7(H / Z_G)^\alpha \end{aligned}$$

但し、上記の式中の各変数の値は下記を用いる。

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

境界条件に関しては、上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を用いる。流出境界条件には対流型流出条件、地面には粘着条件を課す。本手法では連続的な風向変化を伴う計算を行うので、流入風向が側方境界面に対して領域内に向かう場

合は流入境界条件を、流入風向が側方境界面に対して領域外に向かう場合は流出境界条件を用いる。本研究では、図2に示すように、流入条件としてメソスケール気象モデルから得られた鉛直分布(図中の実線)を用いた。同図では、比較のため平成12年建設省告示1454号で与えられる地表面粗度区分に応じた風速の鉛直分布も示す(表1を参照)。

3. 計算対象とした野間岬ウィンドパークの概要

ここでは、本研究で計算対象とした野間岬ウィンドパーク発電所の概要を示す。野間岬ウィンドパーク発電所は、鹿児島県南西部の南さつま市笠沙町に位置する(図3)。周辺は海で囲まれているものの、岬の西側には傾斜角度30度を越える急峻な崖状地形が広がる典型的な複雑地形である(図4)。最大標高は143mである。ここには、九州電力(株)の風車が10基設置され、実証試験が行われている。各風車は定格300kWで、総出力は3000kWである。表2と表3には、野間岬ウィンドパーク発電所の概要などを示す。

表2 野間岬ウィンドパーク発電所の風車仕様

	第1～第5 発電所	第6～第10 発電所
風車出力	300kW	
発電機型式	誘導発電機	同期発電機
カットイン風速	3.5m/s	2.5m/s
定格風速	14.4m/s	14.0m/s
カットアウト風速	24.0m/s	25.0m/s
ロータ直径	29m	30m
タワー高さ	30m (第4:45m)	30m (第6:45m)



図3 野間岬と周辺の地勢

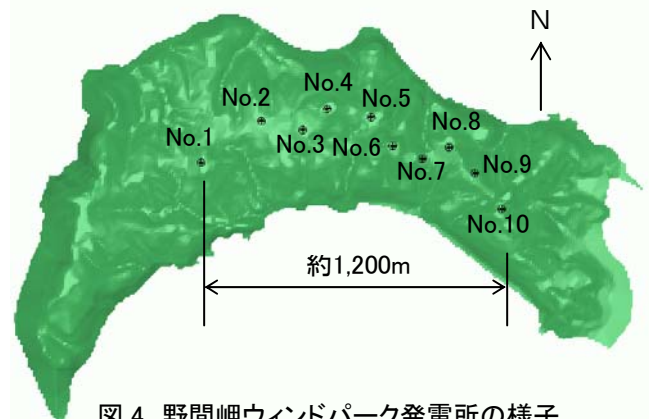
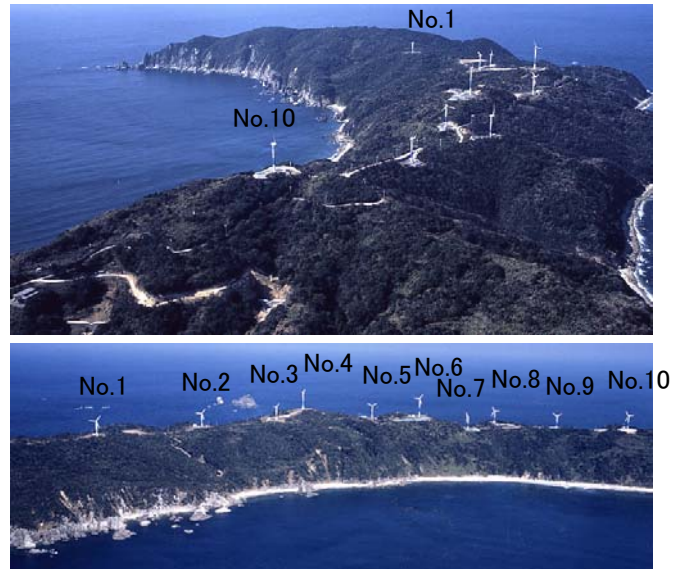


図4 野間岬ウィンドパーク発電所の様子

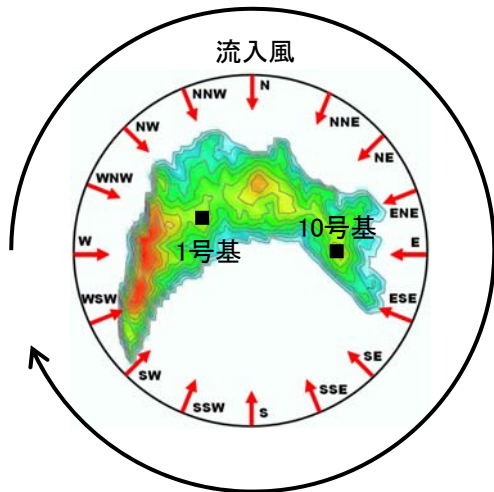
表3 風車ハブ高さとして設置点標高

	ハブ高さ (タワー高さ)	設置点 標高
1号基	30m	100m
2号基		92m
3号基		109m
4号基	45m	122m
5号基	30m	102m
6号基	45m	117m
7号基	30m	88m
8号基		95m
9号基		92m
10号基		109m

4. 計算結果と考察

4.1 連続的な風向変化の再現条件など

先に記述したように、流入プロファイルには、メソスケール気象モデルから得られた鉛直分布(図2の実線)を用いた。風向変化はこの鉛直分布を固定したま



風向を分割せずに、一度の計算で360度連続的に風向を変化させる(本研究では、西→北→東→南→西に変化)。

図5 風向の連続的な変化のイメージ

表4 本研究で検討したケース

	360度風向を連続的に変化させるステップ数	1ステップあたりに移動する風向角度(度)
ケース1	400,000 (基準)	9.0×10^{-4}
ケース2	800,000 (2倍)	4.5×10^{-4}
ケース3	1600,000 (4倍)	2.25×10^{-4}
ケース4	2400,000 (6倍)	1.50×10^{-4}
ケース5	3200,000 (8倍)	1.125×10^{-4}
ケース6	4000,000 (10倍)	9.0×10^{-5}

ま、360度連続的に変化させる(図5)。本研究では、連続的に風向を変化させる速度、すなわち、360度風向を回転させるステップ数の影響を調査することが主たる目的である。そこで、表4に示す6ケースの計算を実施した。

実際の計算では、計算開始直後に風況場が多少変動する。この現象は、風況場が計算領域になじみ、圧力場も収束するまでに多少の時間を要することを意味し、非定常な数値風況予測では避けることが難しい。この影響を回避し、正確な風速評価を行うため、風向を西に固定した計算を50,000ステップ(無次元時間100)行い、これを助走計算(スピナップ)と位置づけた。この結果を初期値として、それに続く360度の風向変化時の計算結果について、6ケースの比較を行った。表5には、計算領域などのパラメータ設定を示す。

本研究では、九州大学応用力学研究所の高速演算サーバNEC製SX-9Fを用いて計算を行った(図6)。表6に、各ケースの計算時間の比較を示す。

表5 計算領域などの詳細

計算領域	・ウインドファームの中心にある4号基を中心に15km四方、 ・鉛直方向高さは約2km
標高データ (計算上の)	空間解像度5mのGISデータより作成
最大標高	140m
(計算上の) 最小標高	0m
計算格子数	101 × 101 × 41点
格子幅	・水平方向格子幅は30m~1,691m ・鉛直方向格子幅は0.42m~125m
時間刻み	$2 \times 10^{-3} h / U_{in}$ 但し、hは標高差、 U_{in} は上空風速
レイノルズ数	標高差と上空風速で $Re=10^4$



主な仕様

CPU: 6CPU (552.96GFLOPS)	MEM: 256GB
外付けディスク装置: iStorage D3-10 4TB (RAID5)	

図6 本計算に使用したNEC製SX-9F

表6 計算時間の比較

	計算時間	ケース1を基準とした場合の比較
ケース1	約58分	1.00 (基準)
ケース2	約1.6時間	1.70
ケース3	約3.1時間	3.22
ケース4	約4.8時間	4.97
ケース5	約7時間	7.36
ケース6	約7.8時間	8.05

4.2 連続的に風向を変化させる速度に関して

最初に、各ケースの初期値に用いた西風の風況場(瞬間値、無次元時間100における速度ベクトル図)の様子を示す(図7および図8)。ここでは、1号基および10号基に注目して議論を進める。

1号基周辺の気流性状に注目する。西風の場合には、1号基は風上側に位置する地形の影響を強く受けているのが分かる。すなわち、風上側の地形からの剥離流(ウエイク)の中に風車が埋没したような状況が発生している。これに対し、10号基の場合には、1号基のような状況には無く、風車周辺には大きな減速域などは確認されない。

このように、複雑地形上のウインドファームでは、風向と風車立地点によって風車周辺に形成される気流性状は大きく変化する。

以下では、1号基および10号基の風車位置におけるハブ高さ(地上高30m)での水平風速(無次元スカラ一値)の風向による変化を示し、これを議論する(図9および図10)。ここで、水平風速(無次元値)は下記の水平断面内の各速度成分で定義される。

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

各ケースともに西→北→東→南→西の間で50,000個の水平風速値を出力した。その後、各ケースの違いを明確に表示するため、50,000個のデータに対して移動平均(サンプル数500)を行い、図9および図10を

作成した。なお、移動平均を行っているため、グラフ両端の数値は一致していないことに注意頂きたい。

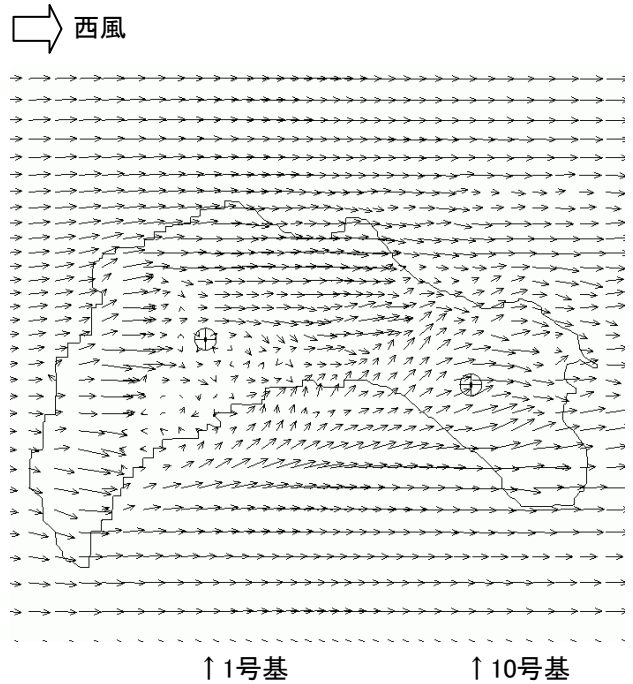


図8 図7に対応した風車ハブ高さ(地上高30m)における速度ベクトル図

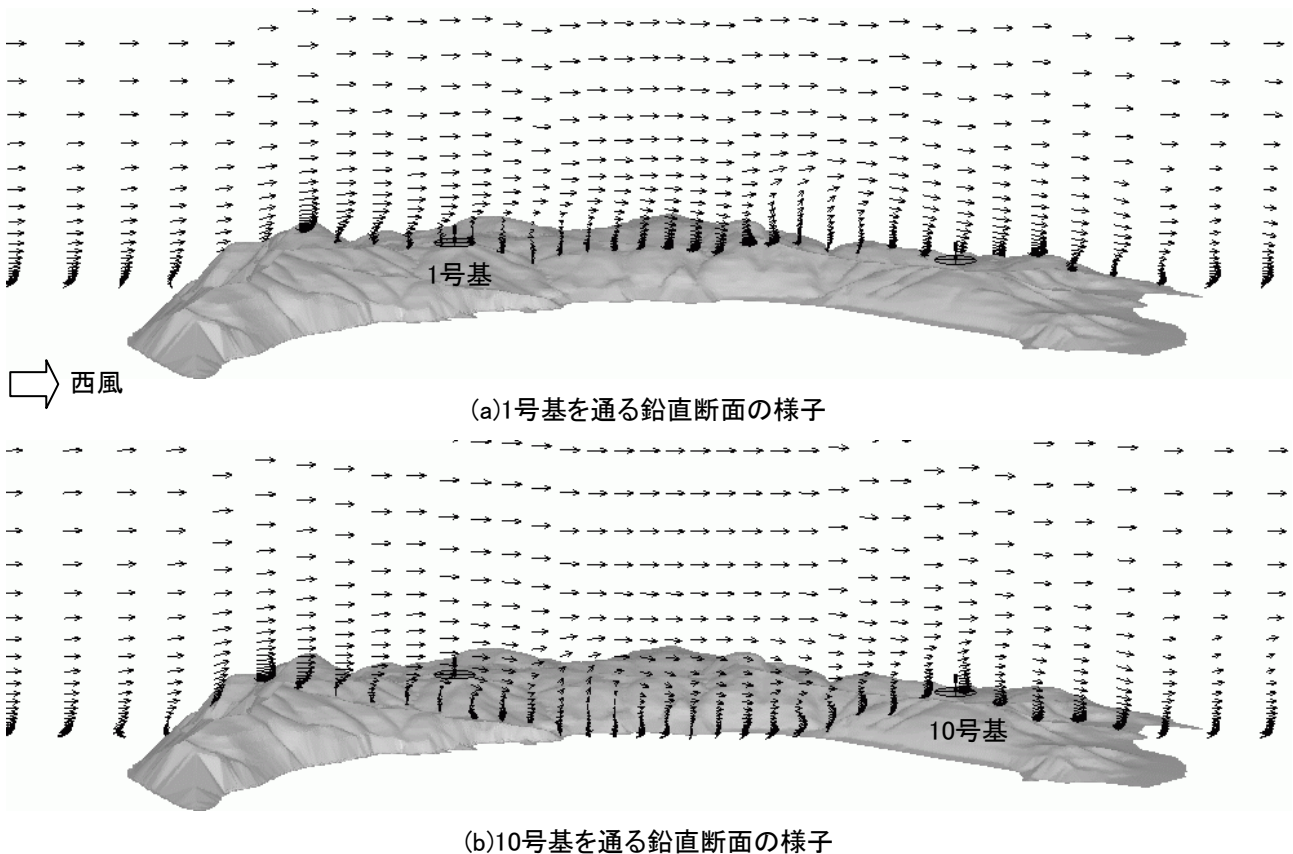
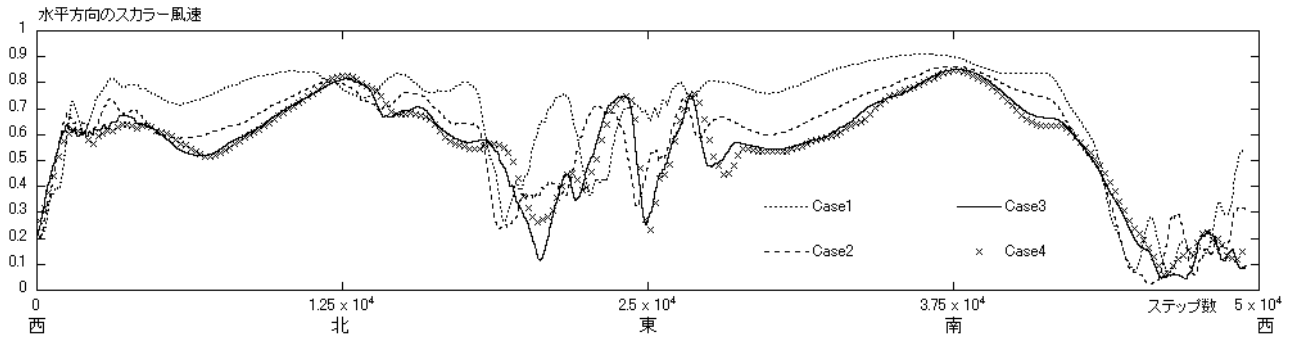
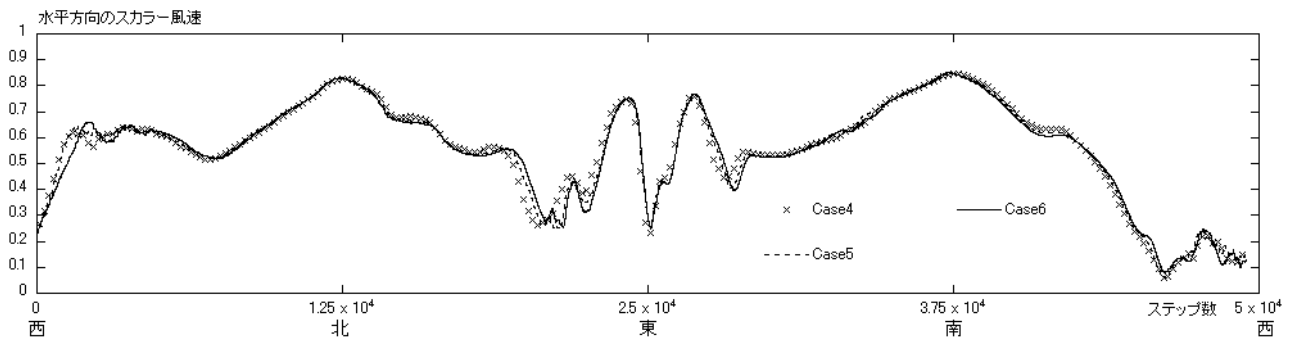


図7 各ケースの初期値に用いた西風の風況場、瞬間値、無次元時間100における速度ベクトル図

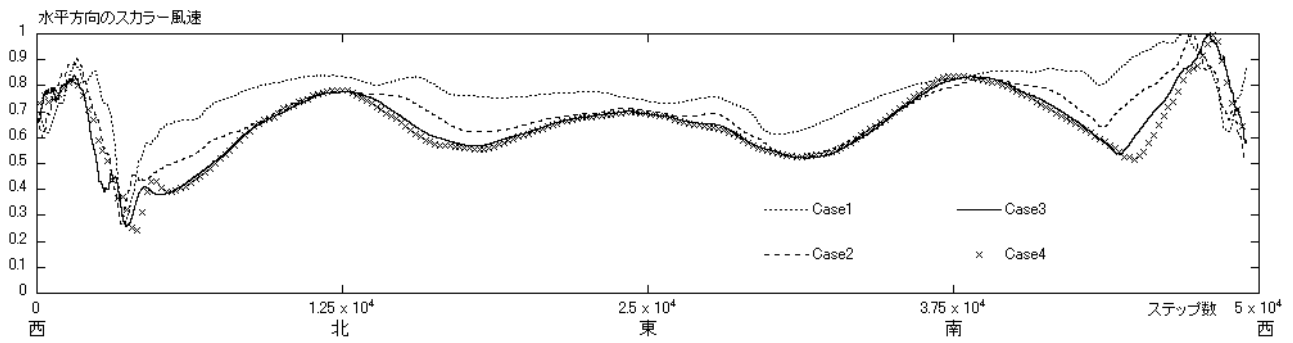


(a)ケース1からケース4までを表示

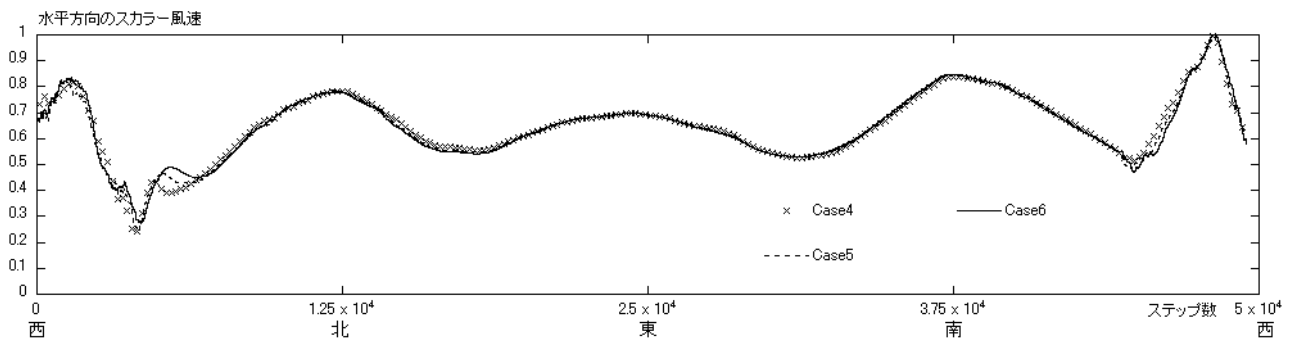


(b)ケース4からケース6までを表示

図9 水平風速(無次元スカラー値)の比較, 1号基の場合



(a)ケース1からケース4までを表示



(b)ケース4からケース6までを表示

図10 水平風速(無次元スカラー値)の比較, 10号基の場合

図9および図10のグラフを吟味すると、1号基および10号基ともに同じ傾向を示していることが分かる。すなわち、ケース1およびケース2以外のケースでは、有意な違いは見られず、ほぼ同じ挙動を示している。これは、連続的に風向を変化させる数値風況シミュレーションを正確に実行するためには、少なくとも1ステップあたりに移動する風向角度(度)は、 2.25×10^{-4} 、あるいはそれ以下の移動角度を設定することが必要であることを意味している。

5. おわりに

本研究では、非定常乱流場の解析が可能な流体工学CFDモデルRIAM-COMPACT®を用いて、風向変化を連続的に再現する手法を提案した。特に、連続的に風向を変化させる移動速度に関してケーススタディを実施し、少なくとも1ステップあたりに移動する風向角度(度)は、 2.25×10^{-4} 、あるいはそれ以下の移動角度を設定することが必要であることを示した。なお、今回得られた数値を他のサイトに適用し、本研究と同様な結果が得られたことを確認した。実際の風向変化との対応や、強風時における風向変化と風速変化が同時に生じる場合の検討は、今後の課題とした。

今回示した連続的な風向変化を再現可能な非定常数値風況予測手法は、

- ・風車ハブ高さの設計風速を評価⁶⁾
- ・数値サイトキャリブレーション(NSC)¹⁰⁾
- ・複雑地形上の乱れ強さ(%)の予測
- ・メソスケール気象モデルによる計算結果との積極的な接続

などへの応用が期待できる。

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)、「アジア巨大都市の大気環境改善と風力エネルギー有効利用のための局所風況予測技術開発」(研究代表者:内田孝紀)、および、2011年度～2012年度、科学研究補助金・挑戦的萌

芽研究、「リアムコンパクト数値風況技術を核とした風車に対するウィンドリスクの力学機構の解明」(研究代表者:内田孝紀)の援助を受けました。

また、九州電力(株)、西日本技術開発(株)、(株)環境GIS研究所には、種々のデータを提供していただきました。

ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建築基準法, 2000
- 2) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, 2004
- 3) 土木学会:風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2007年版, 2010年版]
- 4) 内田孝紀 他5名, 気象モデルと流体工学モデルを用いた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94号, pp.118-124, 2010
- 5) T. Uchida and Y. Ohya, Micro-siting Technique for Wind Turbine Generators by Using Large-Eddy Simulation, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008
- 6) 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, 風力エネルギー, Vol.34, 通巻96, pp.129-134, 2011.
- 7) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂
- 8) T. Kawamura, H. Takami and K. Kuwahara, Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986
- 9) J. Smagorinsky, General Circulation Experiments with the Primitive. Equations, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963
- 10) 内田孝紀, 大屋裕二, 風力発電の数値サイトキャリブレーションに与える諸パラメータの影響, 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, 2009