

2012年10月31日

レンズ風車設置場所選定調査業務委託に関する報告書

株式会社リアムコンパクト

キーワード: 複雑地形, 流体力学モデル, 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。

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。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)ユーラスエナジーホールディングス、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。本研究では、実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用い、レンズ風車の導入が予定されている佐賀県唐津市神集島の数値風況シミュレーションを実施した。

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, 大気が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)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

本報では, 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用い, 佐賀県唐津市神集島の風況の実態を詳細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を参照). 図2には, レンズ風車の仕様を示す.

図3には計算格子図を示す. 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0.5(x)×0.3(y)×0.3(z)kmの空間を有する. 地形標高データは, 地理情報システム(GIS)を用いて空間解像度10mの標高データを作成した.

計算格子数は, 各方向に251(x)×151(y)×101(z)点の合計約380万点である. x方向およびy方向の格子幅

は、等間隔(2m)に分布させた。z方向の格子幅においては不等間隔とし、地表面付近に滑らかに引き寄せた。鉛直方向の最小格子幅は0.18mである。

本計算において設定した風向は、気象GPVデータによる解析結果から北北西(NNW)を選定した(補遺を参照)。流入境界面には、べき指数7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。ここで、本計算における代表スケールの取扱いは図4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1 佐賀県唐津市神集島

1kW機、3kW機仕様書

スペック概況		
機種	1kW機	3kW機
定格出力	1kW	3kW
定格風速	11m/s	11m/s
ローター直径	1.38m	2.5m
集風レンズ外径	1.9m	3.4m
ナセル高さ	6m	11.7m
ポール	鋼管ポール・可倒なし	鋼管ポール・可倒式
ポール地上高	4.4m	8.5m
風車形式	集風体付き、水平軸、ダウンウィンド	集風体付き、水平軸、ダウンウィンド
出力係数	$C_p=0.88$ ($C_p^*=0.48$ レンズ外径基準)	$C_p=0.88$ ($C_p^*=0.48$ レンズ外径基準)
ブレード	3枚 (固定ピッチ)、CFRP	3枚 (固定ピッチ)、CFRP
発電機	同期発電機(定格回転数 610rpm)	多極同期発電機(定格回転数340rpm)
ヨー機構	バッシブヨー(フリーヨー)	バッシブヨー(フリーヨー)
ブレーキ	機械式ブレーキ・電氣的ストール・短絡ブレーキ	電氣的ストール・短絡ブレーキ
電気制御	コンバータ・インバータ	コンバータ・インバータ
カットイン風速	3m/s	3m/s
カットアウト風速	20m/s	16m/s
耐風速(年平均風速6m/s)	42m/s	42m/s
系統連系タイプ 出力電圧・周波数		単相3線200V (100V調り出し可能)、 50-60 Hz
独立タイプ 出力	バッテリー(オプション)、 AC機器運用インバータもオプション	バッテリー(オプション)、 AC機器運用インバータもオプション
風車本体重量(kg)	120	393
設置方式	3m深さ埋め込み	5m深さ埋め込み 耐地力によって基礎を検討(オプション)

年間予想発電量 kWh (実発電量・ロス分を除く)	平均風速		平均風速	
	3m/s	230kWh	3m/s	760kWh
	4m/s	580kWh	4m/s	1,900kWh
	5m/s	1,100kWh	5m/s	3,250kWh
	6m/s	1,650kWh	6m/s	4,450kWh

図2 レンズ風車の仕様, 1kWおよび3kW機

3kWレンズ風車の建設候補地

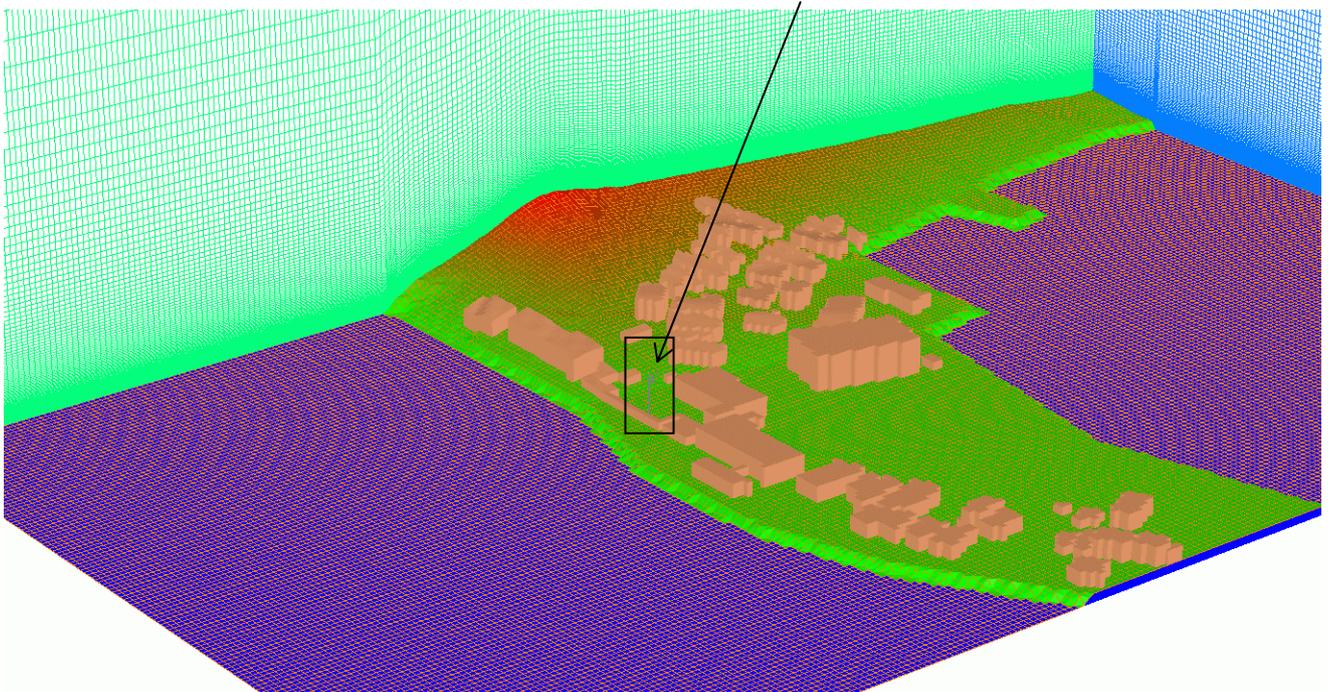


図3 計算格子図, 風向NNW

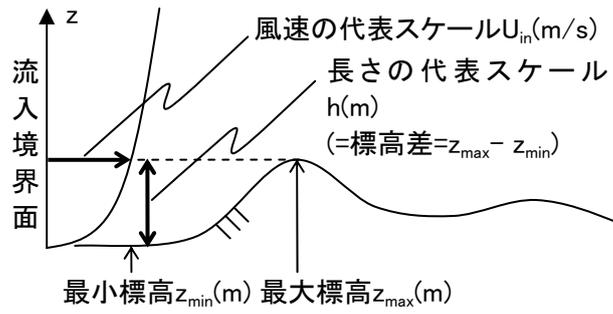
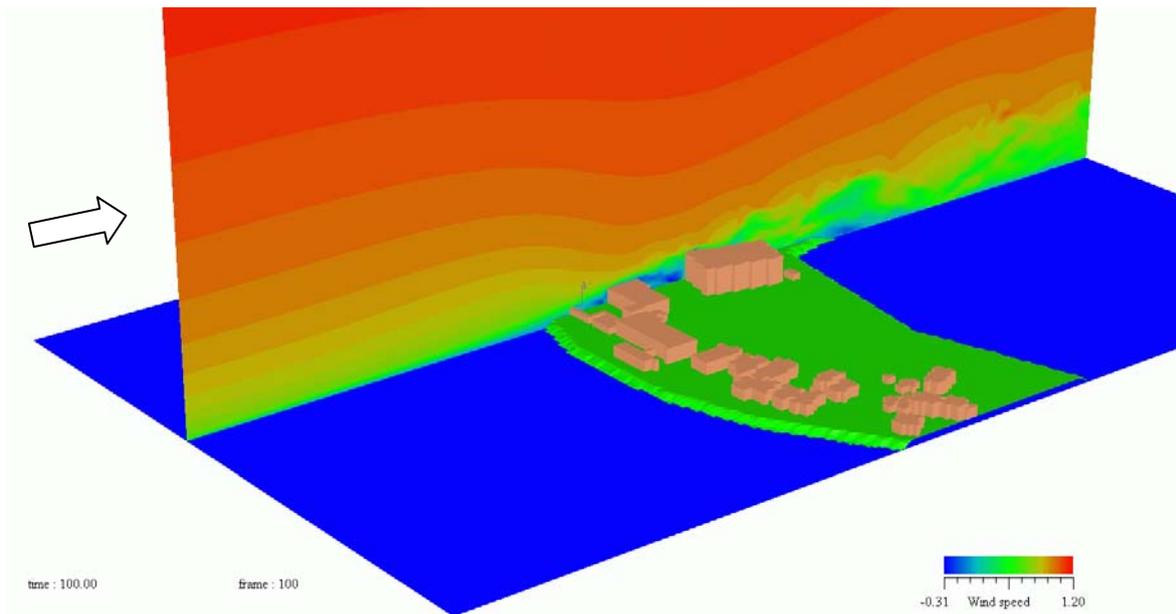
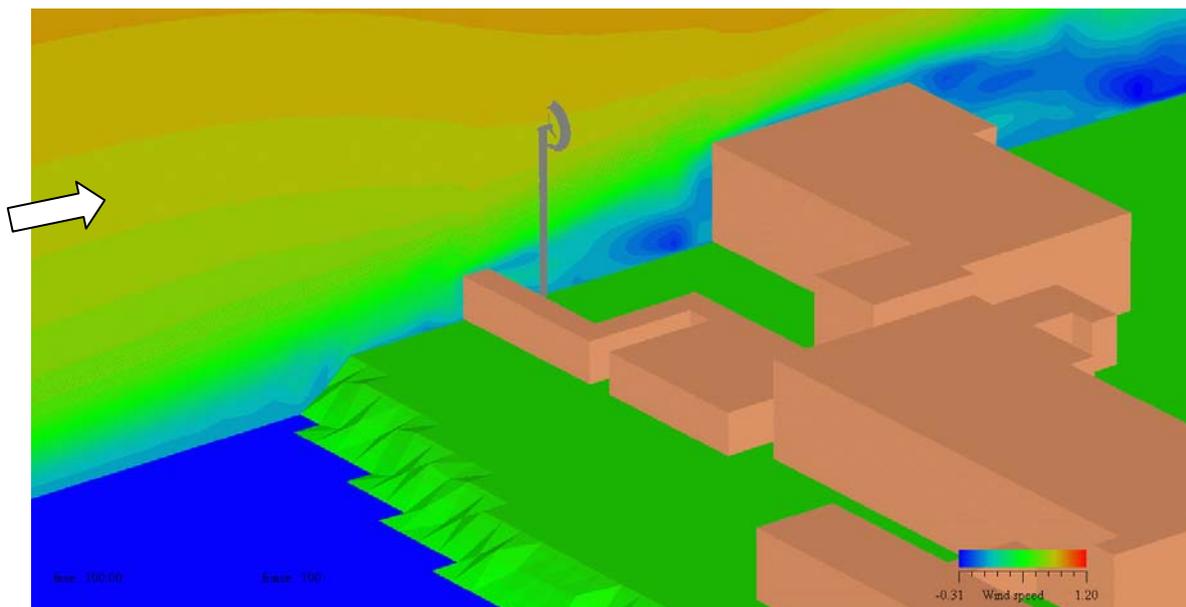


図4 本計算における代表スケールの取扱い



(a)全体図



(b)拡大図

図5 風向NNWを対象にした計算結果、主流方向(x)の風速分布、3kWレンズ風車の場合
 赤色ほど風速が大きいことを意味する。

図5に風向NNWを対象にした計算結果を示す。なお、図中には3kWのレンズ風車位置を示すとともに、その断面における主流方向(x)の風速分布を示す。図5(a)は全体図、図5(b)は拡大図である。建物周辺には複雑な気流の乱れが確認される。しかしながら、風車の建設予定地、特に、ハブ高さ(地面から風車の中心まで高さ、3kWのレンズ風車の場合には11.7m)では気流の大きな変化は確認されない。よって、海上から吹いてきた風は、地形や建物の影響を受けることなく、風車に安定に進入することが期待される。今回検討している地点はレンズ風車の建設には最適な地点であると考えられる。

4. おわりに

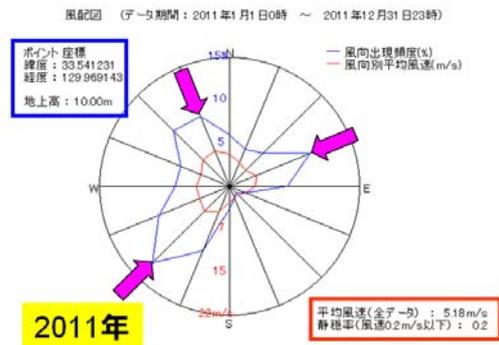
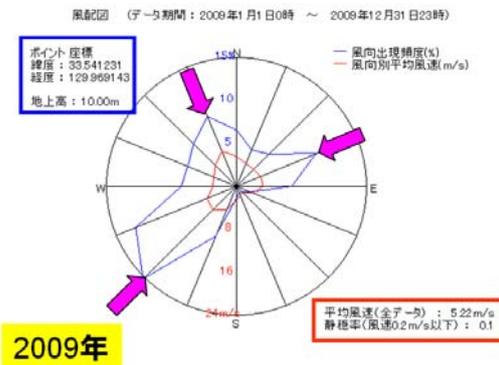
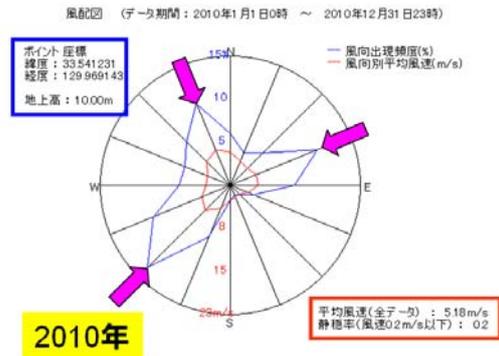
佐賀県唐津市の神集島を対象に、数値風況予測モデルRIAM-COMPACT®を用いた高解像度数値シミュレーションを実施し、レンズ風車の建設予定地周辺の気流性状を調査した。その結果、最も平均風速の大きい風向NNWにおいて、地形や建物に起因した気流の乱れ(地形乱流)の影響は少ないことが明らかになった。海上から吹いてきた風は、風車に安定に進入することが期待され、今回検討している地点はレンズ風車の建設には最適な地点であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.34, 通巻96, pp.129-133, 2011.
- 7) 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.
- 8) 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.

補遺

—気象GPVデータによる風況調査—



2009, 2010, 2011年の3年間の気象GPVデータを使って、神集島の年間風況を調査した。その結果、地上高10mでの年間平均風速は約5(m/s)であり、レンズ風車を導入する上では非常に風況の良い地点であることが示された。また、卓越風向は北北西、東南東、南西であることも示された。