

非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTによる 野間ウィンドパークを対象にした年間発電電力量の推定精度検証

Verification of the Estimation Accuracy of Annual Energy Output at Noma Wind Park by the Non-Stationary and Non-Linear Wind Synopsis Simulator, RIAM-COMPACT

内田 孝紀*¹, 大屋 裕二*²

Takanori Uchida and Yuji Ohya

*¹ Assistant Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University

6-1 Kasuga-koen, Kasuga-city, Fukuoka, 816-8580, JAPAN

TEL: +81-92-583-7776, FAX: +81-92-583-7779

E-mail : takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

*² Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University

Abstract

In the present study, the hub-height wind speed ratios for 16 individual wind directional groups were estimated by the RIAM-COMPACT for Noma Wind Park, Kagoshima Prefecture. Next, the validity of the proposed estimation technique for the actual wind was examined. For this procedure, field observational data from the one year period between April, 2004 and March, 2005 were used. In this case, the mean error on the estimation accuracy was less than 10% and less than 5% for the monthly and annual average wind speeds, respectively. Similar to the results for the annual average wind speed, the difference in the selected reference points (Wind Turbines #4 and #6) had little difference in the mean error on the estimation accuracy of the annual energy output. For both reference points, the mean error was within 10%.

キーワード: RIAM-COMPACT, 複雑地形, 野間ウィンドパーク, 推定精度検証

Key words : RIAM-COMPACT, Complex terrain, Noma wind park, Estimation accuracy verification

1. はじめに

現在, 地球温暖化を防ぐため, CO₂の大幅な削減が緊急課題となっている。これに伴い, クリーンで環境に優しい風力エネルギーの有効利用に注目が集まっている。日本でも, 2010年度の300万KWの導入目標に向け, 風力発電施設は急速に増加している。風車の発電出力は風速の三乗に比例するため, 風況の良好な地点を的確に, かつピンポイントに選定することが重要である。日本の地形は欧米とは著しく異なり, 平坦な地形は少なく, 複雑地形がほとんどである。ゆえに, 流れの衝突, 剥離, 再付着, 逆流などの風に対する地形の効果を考慮することが極めて重要である。このような状況の中, 計算流体力学CFD(Computational Fluid

Dynamics)に基づいた日本独自のマイクロサイティンクソフトの開発が進められ, 現在では実用化されているものもある。例えば文献^{1, 2)}を参照していただきたい。

我々の研究グループにおいても, RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain;リアムコンパクト)と称する, 国内外を問わず世界中のあらゆる平坦地形および複雑地形に適用可能な非定常・非線形風況シミュレータの開発を行っている³⁾。リアムコンパクトは乱流モデルの一つであるLES(Large-Eddy Simulation)に基づいており, 数百m~数km程度の狭領域に的を絞っている。最大の特長は, 流れの剥離, それに伴う逆流領域の形成, 流れの局所的な増速, 剥離せん断層の再付着など, 風に対する地形効果の時間変化を詳細

*1 九州大学応用力学研究所 助教

(〒816-8580 春日市春日公園6-1)

E-mail : takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

*2 九州大学応用力学研究所 教授

に計算し、それらを視覚化できることである。

一般的に風車の建設予定地では、30m以上の風況観測塔を設置し、1年から数年にわたり風況観測を実施している。よって、得られた風況観測データとCFDの出力結果の双方を効率的に連携させることができれば^{4, 5)}、風車建設予定地内の任意地点の年間発電電力量や設備利用率などの経済的な試算がウインドファーム建設前に可能となる。

我々は既に、風況観測塔から得られた風況観測データとCFDの出力結果を用いて、風況観測データが取得された地点近傍における任意地点の実風速を推定する手法を提案している⁶⁾。つまり、コンピュータ上の架空の風速分布(無次元スケール)を実際の風況観測で得られた時系列風況データを用いて実スケールのスカラー風速値に変換する試みである。文献⁶⁾では、この手法で重要となる各風向における風車ハブ高さでの風速比の推定精度と、この風速に基づいて推定された実風速の検証期間に課題が残った。そこで本研究では、鹿児島県の野間ウインドパークを対象にして、各風向における風速比を風洞実験で検証するとともに、1年間の風況観測データを用いて、提案する実風速推定法の妥当性を再度、検証する。

2. 鹿児島県野間ウインドパークの概要

図1の実線で示すように、野間ウインドパークは鹿児島県南西部の南さつま市に位置する。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2を参照)。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1と表2

表1 野間ウインドパークの風車スペック

	第1～第5 発電所	第6～第10 発電所
出力	300kW/発電所	
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)

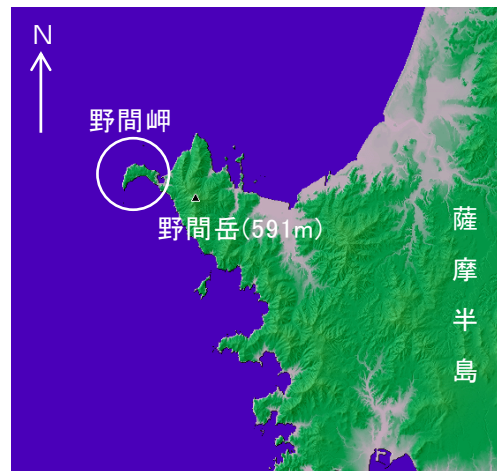


図1 野間岬と周辺の地勢

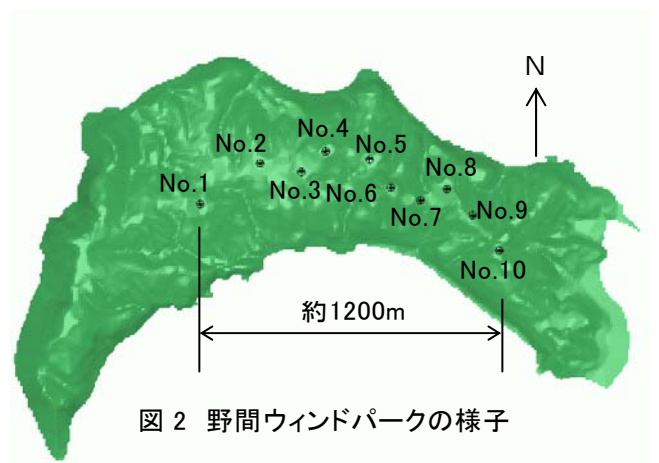
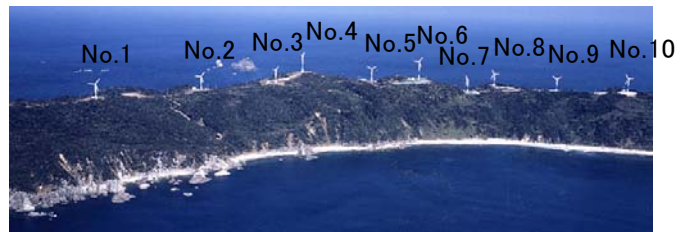


図2 野間ウインドパークの様子

には、野間ウインドパークの概要などを示す。野間ウインドパークに建設されている風車ナセル上には、

プロペラ型風向・風速計が設置されている(図3にAで表示). 本研究では, このナセルに搭載された風向・風速計による時系列風況データ(1分平均値)を利用した. 野間ウインドパークの2002年6月から2003年5月までの1年間における風況特性は文献⁷⁾に詳しく整理されている. これによると, このサイトの卓越風向は北であり(図4を参照), 月別平均風速の大きい季節は11月~3月であった. 図5には, 本研究で対象とした平成16年度(2004年4月から2005年3月までの1年間の風況特性を示す. 図4と比較すると, 平均風速の値は風向によって違いがあるものの, 風向頻度に関してはほぼ同様な傾向にあることが確認された.

表2 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

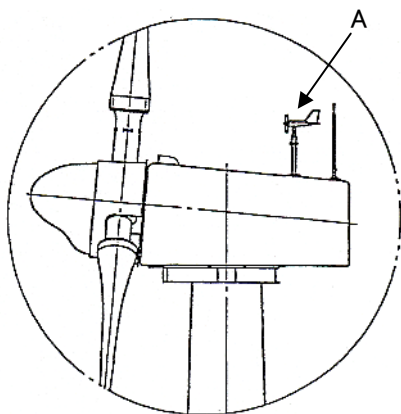
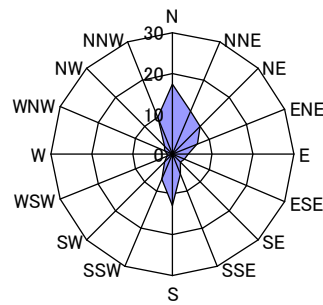
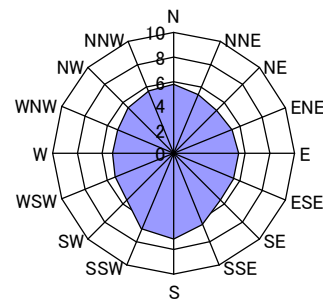


図3 ナセルに搭載されたプロペラ型風向・風速計(図中のA)

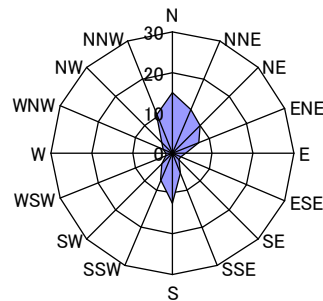


(a)風向頻度(%)

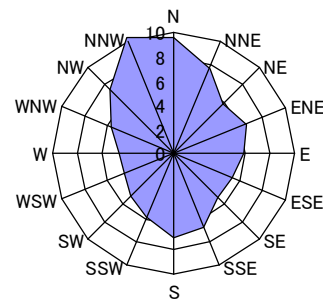


(b)平均風速(m/s)

図4 野間ウインドパークの風況特性, 4号基, 2002年6月から2003年5月までの1年間



(a)風向頻度(%)



(b)平均風速(m/s)

図5 野間ウインドパークの風況特性, 4号基, 2004年4月から2005年3月までの1年間

3. 鹿児島県野間ウインドパークを対象とした

風洞実験

3.1 風洞実験の概要

本研究の風洞実験は、九州大学応用力学研究所の温度成層風洞を用いて行った。但し、気流の安定度は中立状態に設定した。この風洞は開放型の吸い込み式で長さ13.5m×幅1.5m×高さ1.2mの測定胴を有する。風速の設定範囲は0.5～2.0m/sであり、主流風速を1.0m/sに設定した際の主流方向の乱れ強さの分布は0.4%程度である。模型への近寄り流れとして一様流入条件を課すため、以下に示す二つの工夫を施した。一つは、風洞の上流側床面に高さ11.5cmの台座を置き、この上に縮尺模型を設置した。これは風洞床面に発達する地面境界層の影響を受けないようにするためである。もう一つは、先端に僅かな傾斜を付けたアルミ板を模型前縁から設置し、そこからの流れの剥離を抑制した。

風車ハブ高さの気流計測は、I型熱線プローブ(日本カノマックス(株)0251R-T5)と熱線流速計(日本カノマックス(株)System7000:1011CTAユニット, 1013リニアライザ)を使用した。この熱線プローブは定温度方式であり、測定原理は以下に示す通りである。流体中の加熱された熱線を一辺にもつブリッジ回路を組み、風により奪われた熱エネルギー(不平衡出力電圧)から風速を検出する。センサー部には、直径5 μ mのタンゲステンワイヤーが張られている。

データ取得に関しては、電圧値の時系列データはオフセット電圧(シフト電圧)1.75V、アンプ(ゲイン)2倍、カットオフ周波数200Hzのローパスフィルターの処理を行い、A/D変換ボードを介してサンプリング周波数500Hzでパーソナルコンピュータに取り込んだ。

データ収集のソフトには、カノープス(株)のDSS for Windowsを用いた。本研究では、電圧値E(V)の平均値からスカラー平均風速U(m/s)のみを求めた。各測定点におけるデータ数は30,000個で60sのサンプリング時間(平均時間)である。プローブの校正時は30sのサンプリング時間とした。

一様流入風速はU=1.5m/sである。模型の最大高さ約h=6cmに基づいたレイノルズ数 $Re(=Uh/\nu)$ は約 6×10^3 である。ここで、気流のモニターや熱線プローブの校正に必要な風速の基準値の測定に

は、超音波流速計(カイジョーDA-600, TR-90AH型プローブ)を使用した。

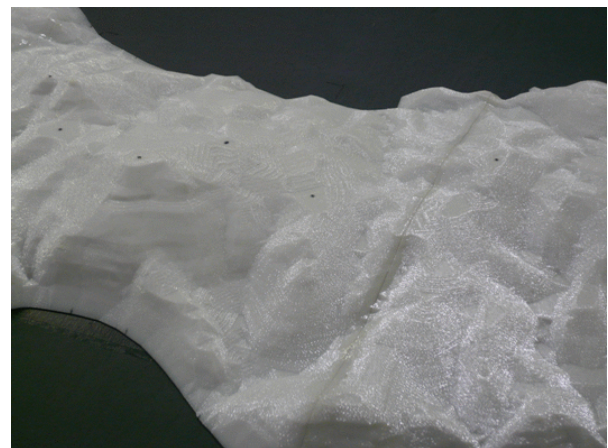
3.2 縮尺模型について

本研究では、風車ハブ高さの気流に対する地形表面の凹凸の影響を調査するため、二種類の縮尺模型を作成した。ここでは、それらについて記述する。一つは1mm厚のアクリル板をレーザで切り出し、それらを階段状に積み上げて作成したものである。この階段状の縮尺模型は、森林などの粗度が地形表面を一様に覆う状況を模擬したものである。もう一つは、ポリカーボネートを材料とした表面に凹凸が無い滑らかな形状を有する縮尺模型である。本研究では、便宜上、前者の模型を“凹凸あり縮尺模



(a)凹凸あり縮尺模型,

1mm厚のアクリル板を積み上げて作成



(b)凹凸なし縮尺模型,

ポリカーボネートより作成

図6 縮尺模型の比較, 拡大図

型”と呼び、後者を“凹凸なし縮尺模型”と呼ぶこととする。図6に両者の縮尺模型を拡大した様子を示す。ポリカーボネートを材料とした縮尺模型の作成手順の概要などを以下に示す。

ポリカーボネートを材料とした縮尺模型は、ラピッドプロトタイプング(Rapid Prototyping, 以下RP)装置を用いて作成される。RP装置とは、3次元CADで作成した形状データから、立体モデルを直接造形(3次元積層造形)することができる装置である。従来の切削加工や試作金型などによる方法に比べて、はるかに短時間に試作が行え、製品の開発期間を大幅に短縮することが可能である。RP装置には様々な方式があり、それぞれに特長があるが、本研究では米Stratasys社のFDM-TITANと呼ばれる「熱溶解積層方式」の機種を用いた。積層厚は0.25mmである。RP装置の外形寸法は、幅1400mm×奥行き876mm×高さ1830mm、質量は726kgである。電源は230Vである。

本研究で作成した二種類の模型の縮尺は、約1/2,800である。ゆえに、両者の模型ともに、風車のハブ高さ30mおよび45mは、風洞実験では約10mm、15mmの高さとなる。なお、16風向毎の10基の風車ハブ高さの平均風速を評価するにあたり、ステッピングモーターによって縮尺模型の回転をPCにより自動制御可能とした。

4. 鹿児島県野間ウィンドパークを対象とした

数値シミュレーション

4.1 数値計算手法の概要

数値不安定を回避し、複雑地形上の風の流れを詳細に数値計算するため、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたリアムコンパクトを用いた。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)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、大気の温度成層の効果は省略した(中立成層状態を仮定)。

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

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

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

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

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

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

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

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

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モデル¹¹⁾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。

4.2 高解像度標高データの構築と利用

最近では、国土地理院の50m標高データ(以下では、50m標高データと称する)では再現できない

風車近傍のわずかな地形起伏の凹凸が原因で、風の乱れ(地形乱流)が発生し、これが発電出力に重大な影響を与えているとの懸念が報告されている¹²⁾。50m標高データに基づいて10m以下の標高データを内挿して作成することも考えられるが、50m標高データの元データが1/25,000の地形図であるため、この方法で得られたデータは実際の地形形状とはかなり異なる。

上記のような空間解像度の問題を解決するため、我々は地理情報システム(GIS)と連携し、1/2,500~1/10,000程度の紙地図、あるいはDXF形式のCADデータから空間解像度10m以下の2~5mの詳細地形を構築する方法を提案している¹³⁾。図7に1/2,500の紙図面(2D)を大型スキャナで読み込み、3次元化した様子を示す。標高データの作成期間は図面1枚あたり数日程度である。図8に同一地形(鹿児島県野間岬、最大標高143m)を対象に空間解像度を変化させた場合の比較を示す。図8(a)はNEDOの風況マップで利用される500m解像度である。図8(b)は風力発電の適地選定で一般的に利用される50m解像度である。図8(c)は本研究で提案する手法で構築した5m解像度である。地形形状の再現性の違いは歴然である。図8(a)では、地形の輪郭すらほとんど再現されていない。これに対し、図8(c)では、より実在地形に近い数

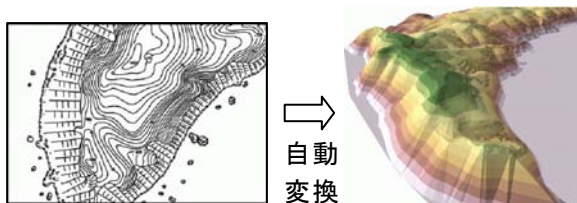


図7 紙図面(2D)のデジタル化(3D)

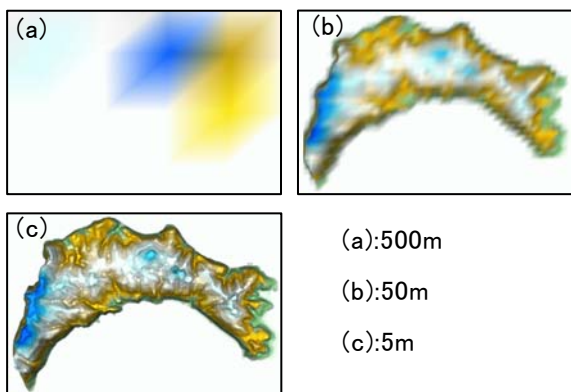


図8 野間岬における空間解像度の比較

値地形が再現されている。風力発電の適地をピンポイントに選定するには、実際の複雑地形をどれだけ忠実にコンピュータ内に再現することができるか、すなわち、地面境界条件としてどれだけ精緻に設定できるかに依るところが大きい。この条件が満足されれば、リアムコンパクトにより、わずかな地形起伏を考慮した風況場がより高解像度で再現できる。

4.3 計算条件など

本研究の計算領域は、図2に示す4号基の風車を中心として5km四方とした。上空の計算領域は700mとした。標高データは、先に記述した空間解像度5mの高解像度データを利用した。各方向の格子点数は主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)方向に51×51×41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(最小格子幅25m~最大格子幅1000m)とした。z方向の格子幅も不等間隔(最小格子幅0.4m~最大格子幅44m)とし、地表面付近に滑らかに引き寄せた。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)に示される無次元パラメータReはレイノルズ数(=U_{in}h/ν)であり、Re(=U_{in}h/ν)=10⁴とした¹⁴⁾。ここで、本計算における代表スケールの取扱いは図9に示す通りである。hは計算領域の標高差(h=143m)、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Δt=2×10⁻³h/U_{in}とした。

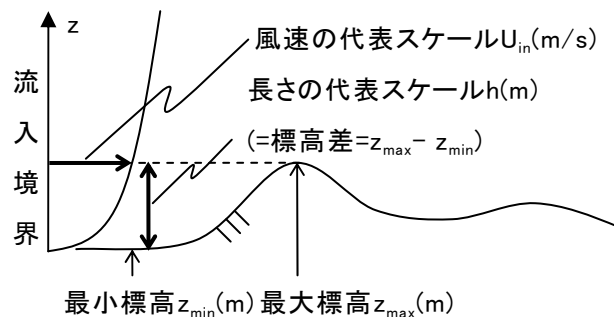


図9 本計算における代表スケールの取扱い

4.4 風車ハブ高さにおける風速比の比較と考察

図10には、北風に関して、1号基と4号基の風車を通る鉛直断面内の速度ベクトル図を示す。この図から、風車ハブ高さでは気流が局所的に増速している様子が見て取れる。

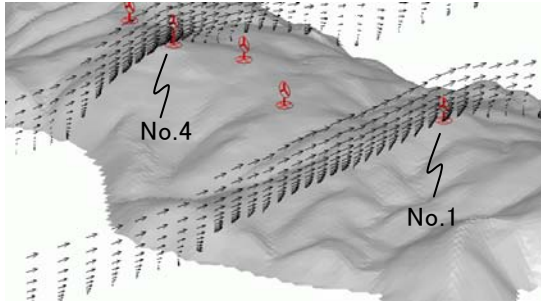
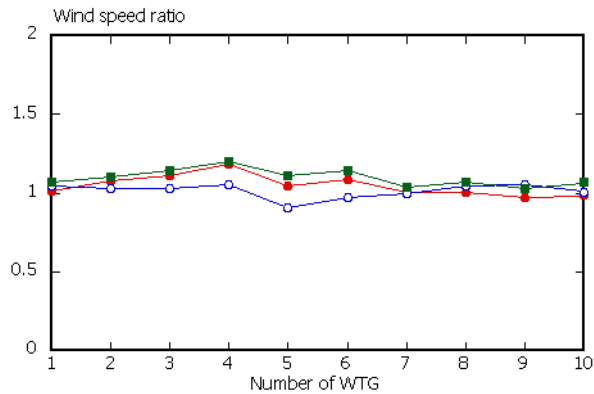
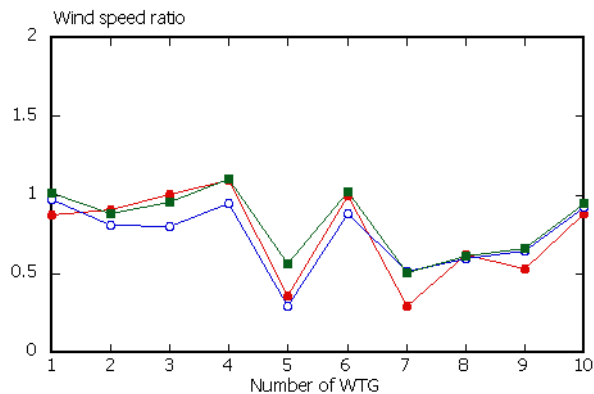


図10 1号基と4号基の風車を通る鉛直断面内の速度ベクトル図



(a)北風の場合



(b)西北西の場合

図11 風車のハブ高さにおける風速比の比較、赤色のシンボル:“凹凸あり縮尺模型”の風洞実験結果、青色のシンボル:“凹凸なし縮尺模型”の風洞実験結果、緑色:リアムコンパクトによる数値シミュレーションの結果

16風向毎の10基の風車ハブ高さ風速比の中から、図11には代表して北の場合と、西北西の場合の結果を示す。ここで、風洞実験における風車ハブ高さ風速比は次のように定義した。(風速比)=(各風車ハブ高さの平均風速)/(ターンテーブル中心位置の $z=50(\text{mm})$ での流入気流風速)。数値シミュレーションにおいては、風洞実験と同一条件で計算を行い、風洞実験に対応する各位置での風速値から風速比を算出した。縦軸が風速比、横軸は各風車を表す。赤色のシンボルが“凹凸あり縮尺模型”の風洞実験結果、青色のシンボルが“凹凸なし縮尺模型”の風洞実験結果、緑色がリアムコンパクトによる数値シミュレーションの結果である。図11(b)では、同じ風向においても風車位置で風速比が大きく変化している場合がある。北、西北西の両者ともに、風洞実験の結果とリアムコンパクトを用いた数値シミュレーションの結果は、図に示される程度的一致を得た。北、西北西以外の風向においても、風洞実験の結果とリアムコンパクトを用いた数値シミュレーションの結果は、類似な傾向を示すことが確認された。この結果は、風洞実験およびリアムコンパクトを用いた数値シミュレーションの両者が同じ程度の誤差範囲で実施されていることを示すものである。同時に、リアムコンパクトを用いた数値シミュレーションが風洞実験の代替ツールとして有効であることを示唆するものである。なお、約 $1/2,800$ の縮尺模型を使用した今回の風洞実験では、風車のハブ高さの気流の推定に関しては、地形表面が有する凹凸の影響はそれほど顕著には現れないことも示された。

5. 鹿児島県野間ウィンドパークを対象とした

実風速推定法

5.1 手順の概要

風況観測で取得された時系列風況データとCFDの出力結果(時間平均風況場)を用いて、複雑地形上の任意地点における実風速の時系列データ(スカラー実風速値の時系列データ)を推定する手順は以下の通りである。

手順1.

図12に示すように、リアムコンパクトを用いて対象サイトに対して16風向別の風況シミュレーションを実施する。十分に流れ場を発達させた後、引き

続き計算を行い、時間平均風況場を取得する。

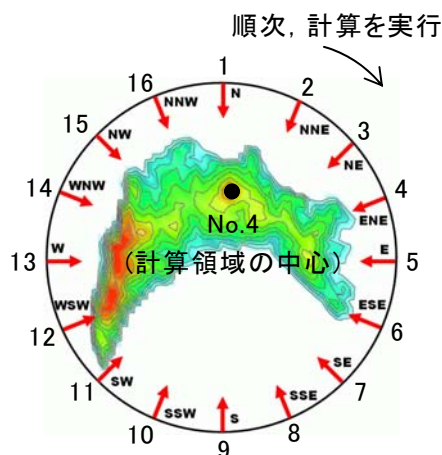


図12 野間ウィンドパークの16風向別の風況シミュレーションのイメージ

手順2.

図12に示すように、それぞれの流入風向毎に参照点、すなわち、観測ポール高さにおける風速値と評価点位置におけるハブ高さ風速値との比を16セット求める。参照点の風速値は“1”と正規化しておく。ここで、流入境界面で設定した風向と参照点における風向は一致するという仮定している。本研究では、参照点として4号基および6号基を想定した。よって、1号基/4号基、2号基/4号基、3号基/4号基、5号基/4号基・・・10号基/4号基の風速比と、1号基/6号基、2号基/6号基、3号基/6号基、4号基/6号基、5号基/6号基、7号基/6号基・・・10号基/6号基の風速比をそれぞれ求めることになる。なお、スカラー風速値VELはx方向、y方向の時間平均された風速成分を用いて以下の式で算出した。

$$VEL = \sqrt{(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)} \quad (9)$$

手順3.

参照点において、観測データの各時刻における風向に従い、それに対応した(事前求めていた)風速比を時系列風況データに乗じる。こうして、参照点の時系列風況データが、評価点での時系列風況データ(スカラー風速値)に変換される。この操作を1年間ないし、ある期間の時系列風況データ

に適用し、統計処理を施せば任意評価点の月別平均風速や年間平均風速が取得できる。

5.2 計算結果と考察

16方向別の風況シミュレーションを行い、月別平均風速および年平均風速の検証を行った。検証は4号基(標高122m, ハブ高さ45m)のナセル風向・風速データを参照点として1～10号基の風速値を推定した場合と、6号基(標高117m, ハブ高さ45m)のナセル風向・風速データを参照点として1～10号機の風速値を推定した2ケースを実施した。それらの結果を表3に示す。ここで、表3に示す最下段の値は、各風車の値を野間ウィンドパーク全体の値として集計した結果である。なお、本研究では、参照風速および検証用の風速としてナセル風向・風速データを使用した。これらのデータは、風車回転の影響を受けていると考えられるが、平均風速の評価には有効であると考えられる¹⁵⁾。また、参照点とした風車の観測データ(風速, 風向, 発電出力)が欠測している場合には、評価点における風車の風速, 発電出力の推定は行っていない。同様に、評価点の風車の観測データが欠測している場合についても、参照点から対応する部分を省略した。すなわち、参照点および評価点の風車の観測データは欠測なく共通する期間のみを利用した。

観測風速値と推定風速値の比較による検証の結果、参照点(4号基・6号基)の取り方による結果の相違はほとんど見られず、水平距離が約1km以内で、高度差が50m以内の今回のケースであれば、推定精度の平均誤差は月別平均風速で概ね10%以内、年平均風速で5%以内に収まる結果が得られた。

加えて、年間発電電力量の検証も行った。これは、風車性能曲線(パワーカーブ)を参照し、リアムコンパクトで推定された風車ハブ高さ風速値を発電量に変換して積算したものである。なお、本研究で対象とした野間ウィンドパークの場合には、風車が相互干渉する風向の発生頻度が少なかったため、風車ウエイクの影響は考慮しなかった。これらの結果も表3に示す。観測された発電電力量の値とリアムコンパクトで推定された発電電力量の値を比較すると、年間平均風速と同様、参照点(4号基・6号基)の取り方による相違は見られず、両者

表3 年間平均風速および年間発電電力量の推定結果, 表の最下層の値は野間ウィンドパーク全体の値を示す,
2004年4月から2005年3月までの1年間

	4号基を基準とした場合						6号基を基準とした場合					
	年間平均風速 (m/s)			年間発電電力量 (kWh)			年間平均風速 (m/s)			年間発電電力量 (kWh)		
	観測値	推定値	平均誤差(%)	観測値	推定値	平均誤差(%)	観測値	推定値	平均誤差(%)	観測値	推定値	平均誤差(%)
2005年1月	8.6	8.8	2.3	829,314	789,416	4.8	8.6	8.7	1.2	804,707	765,338	4.9
2月	8.4	8.5	1.2	629,857	602,927	4.3	8.4	8.6	2.4	641,344	625,842	2.4
3月	7.4	7.8	5.4	593,338	600,989	1.3	7.4	7.8	5.4	620,940	623,478	0.4
2004年4月	5.7	6.0	5.3	426,880	395,223	7.4	5.8	5.8	0.0	422,092	380,317	9.9
5月	5.3	5.8	9.4	389,130	373,972	3.9	5.4	5.5	1.9	380,793	360,903	5.2
6月	4.9	5.1	4.1	294,355	260,822	11.4	4.9	5.1	4.1	286,042	285,807	0.1
7月	4.5	4.7	4.4	194,153	174,561	10.1	4.5	4.4	5.9	187,834	157,923	15.9
8月	4.5	4.8	6.7	229,636	215,607	6.1	4.5	4.7	4.4	223,184	217,204	2.7
9月	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10月	7.7	8.4	9.1	229,936	235,981	2.6	7.9	7.7	2.5	202,660	184,202	9.1
11月	6.1	6.3	3.3	385,875	384,512	0.4	6.2	5.9	4.8	369,633	325,222	12.0
12月	6.1	6.2	1.6	410,712	372,127	9.4	6.2	6	3.2	402,237	346,704	13.8
年間	5.8	6.0	3.4	4,613,187	4,406,138	4.5	5.8	5.9	1.7	4,541,465	4,272,940	5.9

は概ね10%以内に収まる結果を得た。本研究では、月別、年間平均風速値の平均誤差は観測値に比べて、推定値の方が概ね高い、つまり、正のバイアを示した。これに対して、月別、年間総発電量は観測値の方が、推定値に比べ低い値を示した。これは風車発電量の観測データに、定格出力を上回るデータが数多く記録されていたことが主な原因と考えられる。

文献⁶⁾で既に議論しているように、我々の提案する実風速推定法の裏づけとなる複雑地形上の気流特性について再掲する。2003年2月の1号基と10号基の時系列風況データ(1分平均値)を比較した結果、1号基と10号基は水平距離にして約1.2kmも離れており、高度距離では9mの差があるにも関わらず(図2および表2を参照)、1ヶ月間の風速値の時間的变化は極めて類似していた。1分平均値に基づいた風速値の散布図では、両ケースの相関係数は0.84であった。同様の傾向が今回の1年間の風況観測データにも見られた。また、CFDから求めた風向別のハブ高さ風速比と風況観測データから求めた風速比の値も、CFDでは風車のウエイクロスの影響は省略したが、両者は年間を通じて概ね一致していた。これらの結果から、表3に示した結果が得られたものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、鹿児島県の野間ウィンドパークを対象にして、一般曲線座標系のコロケート格子に

基づいた非定常・非線形風況シミュレータリアムコンパクトを用い、16風向別の各風車ハブ高さ風速比を風洞実験の結果を用いて検証した。本研究では、風車ハブ高さの気流に対する地形表面の凹凸の影響を調査するため、二種類の縮尺模型を作成した。

風洞実験の結果とリアムコンパクトを用いた数値シミュレーションの結果は、概ね良好な一致が得られた。また、同一風向においても、風車位置で風速比が大きく変化している場合があることが示された。約1/2,800の縮尺模型を使用した今回の風洞実験では、風車のハブ高さの気流に対して、地形表面が有する凹凸の影響はそれほど顕著には現れなかった。

2004年4月から2005年3月までの1年間の風況観測データ(ナセル風速)を用いて、提案する実風速推定法の妥当性を検証した。その結果、各風車で得られた値を野間ウィンドパーク全体の値として集計した場合、参照点(4号基・6号基)の取り方による結果の相違はほとんど見られず、水平距離が約1km以内で、高度差が50m以内の今回のケースであれば、推定精度の平均誤差は月別平均風速で概ね10%以内、年平均風速で5%以内に収まる結果が得られた。

年間発電電力量に関しても、年間平均風速と同様、参照点(4号基・6号基)の取り方による相違は見られず、両者は概ね10%以内に収まる結果を得た。なお、本研究で対象とした野間ウィンドパーク

の場合には、風車が相互干渉する風向の発生頻度が少なかったため、風車ウエイクの影響は考慮しなかった。

今後はさらに種々のサイトへの適用を行い、本提案手法の有効性や誤差範囲を把握することが課題である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成17年度産業技術研究助成事業(2006年1月-2008年12月)、「空間解像度10m以下の詳細地形構築技術の開発とそれを用いた風力タービンハブ高さ周辺の風の乱れの視覚的評価」プロジェクト(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)と西日本技術開発(株)には野間ウィンドパークの観測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) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.375-386, 2003
- 2) 石原孟, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.387-396, 2003
- 3) 内田孝紀, 大屋裕二, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.417-428, 2003
- 4) 大塚清敏, 他5名, 第26回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.227-230, 2004
- 5) 橋本篤, 他6名, 第29回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.275-278, 2007
- 6) 内田孝紀, 大屋裕二, 応用力学論文集, Vol.10, pp.733-740, 2007
- 7) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学応用力学研究所所報, 第130号, pp.35-52, 2006
- 8) Kim, J. and Moin, P., 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, 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., Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986
- 11) Smagorinsky, J., Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963
- 12) 内田孝紀, 大屋裕二, 諏訪部哲也, 李貫行, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.30, No.2, 通巻78, pp.101-108, 2006
- 13) 内田孝紀, 大屋裕二, 荒屋亮, 田辺正孝, 川島泰史, 九州大学応用力学研究所所報, 第129号, pp.135-141, 2005
- 14) 加藤真規子, 日本風工学会誌, 第59号, pp.89-92, 1994
- 15) Junho KURODA, Makoto IIDA, Chuichi Arakawa : NACELLE ANEMOMETRY FOR THE ELECTRIC POWER PREDICTION SYSTEM, 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, FEDSM2007-37551, (2007.7), San Diego