

# CFDを用いた複雑地形上の実風速推定法の提案

Proposal of Real Wind Speed Prediction Method over Complex Terrain by Using CFD

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)

This paper proposes of real wind speed prediction method over complex terrain by using CFD. It is an attempt to convert the wind distribution on the computer into the scalar wind speed of a real scale in consideration of the correlation with the observed data. The reproducibility and the accuracy of the real wind speed were performed by using the high resolution elevation data with 5m resolution for the Noma cape wind power plant in Kagoshima prefecture. As for the monthly average wind speed, the error relative to the observed value was within 20%.

**Keywords :** CFD, LES, Complex terrain, Real wind speed

## 1. はじめに

現在, 地球温暖化を防ぐため, CO<sub>2</sub>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, 最近では計算流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)に基づいて日本独自のマイクロサイティンソフトの開発が進められている<sup>1,2)</sup>.

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, 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<sup>3)</sup>. RIAM-COMPACT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を高精度に予測し, それらをアニメーションで視覚化できることである.

一般的に風力発電の建設予定地では, 30m以上の観測ポールが設置され, 1年間にわたって風向・風速などの時

系列データが取得される. よって, それらの観測データをCFDに取り込み, 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, 対象サイト内の任意地点の年間発電量や設備利用率などの経済的な試算が高い精度で実現される.

そこで本研究では, 野外観測で取得された時系列データとCFDの出力結果を用いた複雑地形上の実風速推定法を提案する. 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)を実際の野外観測で得られた時系列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. 提案する推定法の妥当性を, 鹿児島県の野間ウィンドパークを対象とし, ナセル搭載の風向・風速計で測定された野外観測データを用いて検証する.

## 2. 鹿児島県野間ウィンドパークの概要など

図-1の実線で示すように, 野間ウィンドパークは鹿児島県南西部の笠沙町に位置する. 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

表-1 野間ウィ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

表-2 風車ハブ高さ(タワー高さ)と設置点標高

	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

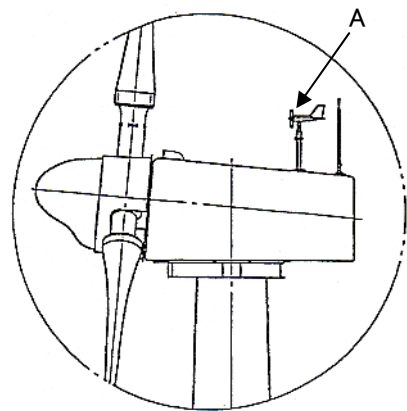


図-3 ナセルに搭載された風向・風速計(図中のA)

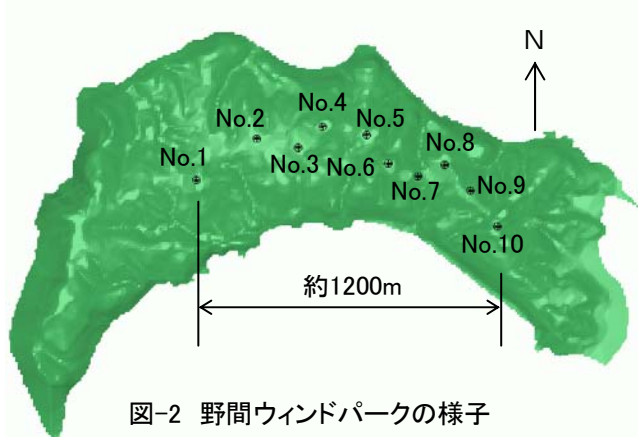
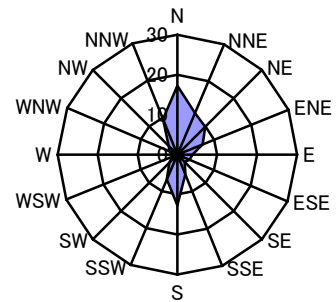
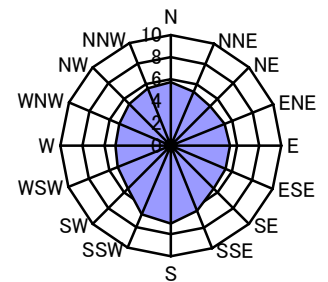


図-2 野間ウインドパークの様子



(a)発生頻度(%)

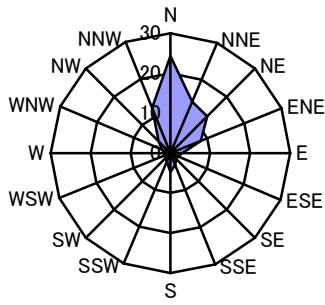


(b)平均風速(m/s)

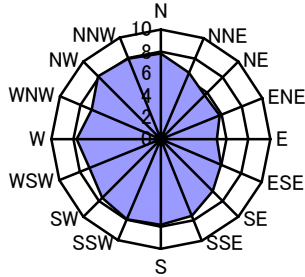
図-4 野間ウインドパークの風況特性, 4号基, 2002年6月から2003年5月までの1年間

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、このナセル搭載の風向・風速計による



(a)発生頻度(%)



(b)平均風速(m/s)

図-5 野間ウィンドパークの風況特性, 4号基,  
2003年2月の1ヶ月間

時系列観測データを利用した。その記録間隔は1分である。野間ウィンドパークの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<sup>4)</sup>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、月別平均風速の大きい季節は11月～3月である(図-4, 図-5を参照)。そこで本研究では、風車10基の野外観測データの欠損が最も少なく、かつ月別平均風速が大きい2003年2月を対象に我々の提案する実風速推定法の検証を行なった。2003年2月の1ヶ月間における総データ数は40,047個である。欠損データは273個であった(データ取得率は99%)。

### 3. 数値計算手法など

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RIAM-COMPACT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)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ので、大気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(水平解像度5m)。

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

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

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

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

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

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

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

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

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)<sup>5)</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>6)</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>7)</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>8)</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。

### 4. 実風速推定法の手順

野外観測で取得された時系列データと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時系列データ(スカラー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。

1. 図-6に示すように、RIAM-COMPACTを用いて対象サ

イトを対象に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。

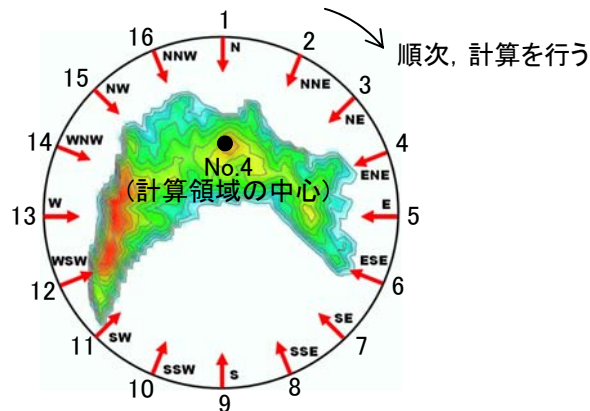


図-6 野間ウィンドパークの16風向別の風況シミュレーションのイメージ

図-6に示すように、計算領域は4号基を中心として5km四方とした。上空の計算領域は700mとした。地形形状は空間解像度5mの高解像度標高データ<sup>9)</sup>を用いて再現した。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とした。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。地表第一セル、すなわち、最小メッシュ幅は約2.5mである。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 $Re_l$ はレイノルズ数( $=U_{in}h/\nu$ )であり、 $Re_l(=U_{in}h/\nu)=10^4$ とした<sup>10)</sup>。ここで、本計算における代表スケールの取扱いは図-7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、 $\nu$ 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。

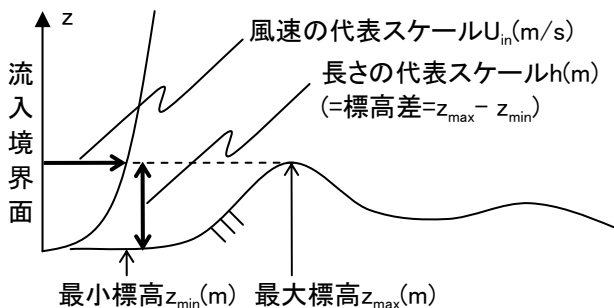


図-7 本計算における代表スケールの取扱い

2. 図-6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。

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

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(事前に求めていた)風速比を時系列データに乗じる。こうして、参照点の時系列観測データが、評価点での時系列データ(スカラー風速値)に変換される。この操作を1年間ないし、ある期間の時系列観測データに適用し、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. 結果および考察

図-8には、北風を対象にした場合のパッシブ粒子追跡法の結果(瞬間場)を示す。野間岬上の風は地形の凹凸の影響を受けて3次的に複雑に変化している様子が示されている。本研究で提案する実風速推定法では、図-8に示されている十分に発達した状態からさらに計算を進め、時間平均風況場を求めてこれを用いる。

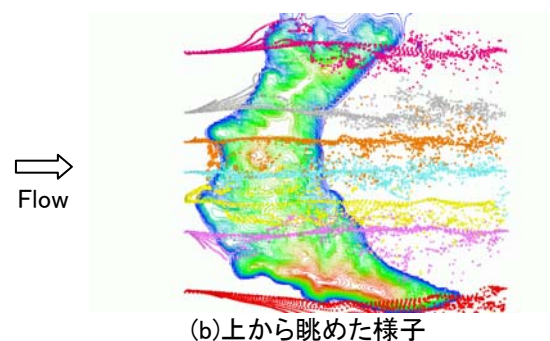
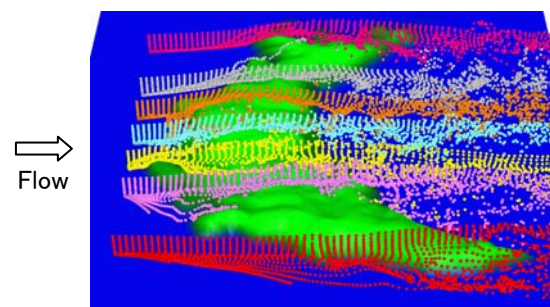


図-8 パッシブ粒子追跡法による可視化例、北風の場合

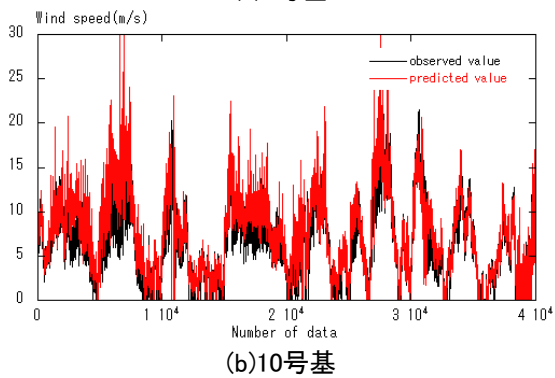
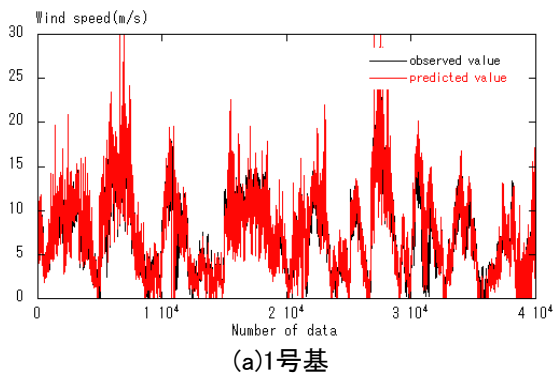


図-9 4号基を参照点とした場合の時系列データ

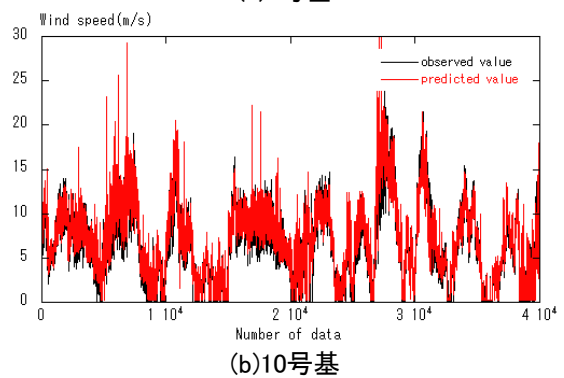
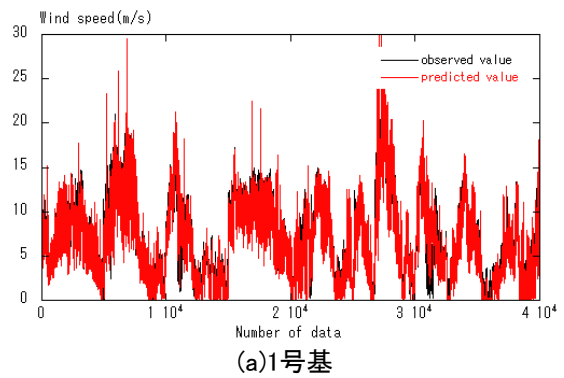


図-11 6号基を参照点とした場合の時系列データ

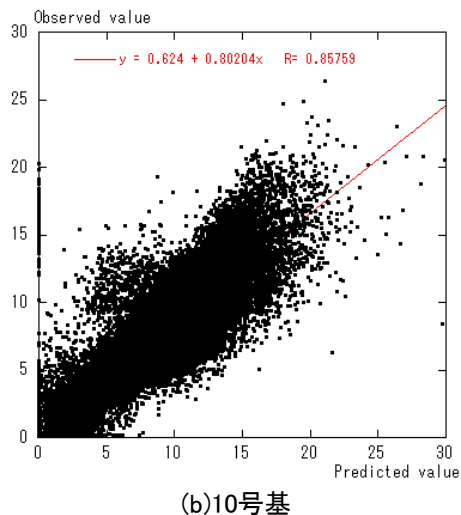
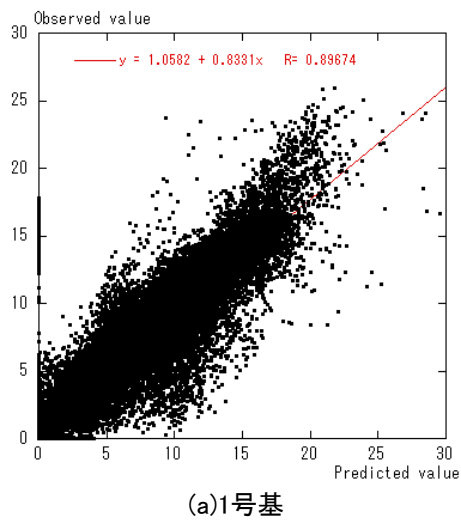


図-10 4号基を参照点とした場合の散布図

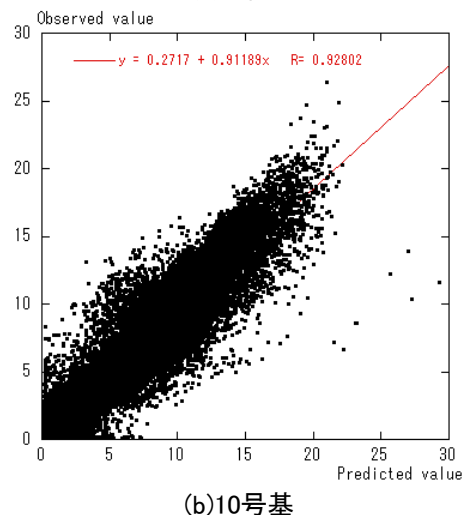
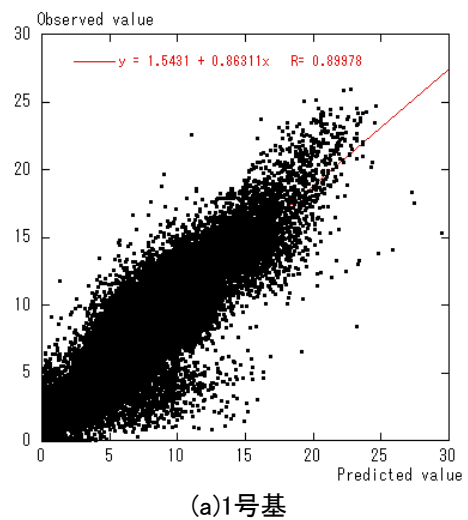


図-12 6号基を参照点とした場合の散布図

図-9には、4号基を参照点とした場合に関して、1号基と10号基のハブ高さスカラ風速値の時系列の比較を示す。図-10には、その散布図を示す。図-11には、6号基を参照点とした場合に関して、同じく1号基と10号基のハブ高さスカラ風速値の時系列を予測した結果を示す。図-12には、その散布図を示す。参照点を4号基にした場合、6号基にした場合の両ケースともに、我々の提案する実風速推定法による予測値は観測値を良好に再現している。

表-3には、参照点を4号基にした場合、6号基にした場合の予測値と観測値の比較一覧を示す。

表-3 予測値と観測値の比較一覧  
(a)4号基を参照点とした場合

2003年2月	観測値 平均風速 (m/s)	予測値 平均風速 (m/s)	相対誤差 (%)	相関係数
1号基	7.27	7.45	2.56	0.90
2号基	7.07	7.24	2.31	0.89
3号基	7.91	7.60	3.92	0.93
5号基	7.11	7.45	4.84	0.91
6号基	7.39	7.83	5.90	0.92
7号基	6.35	7.06	11.28	0.83
8号基	6.78	7.40	9.09	0.90
9号基	6.17	7.20	16.62	0.84
10号基	6.57	7.41	12.84	0.86
平均値	6.96	7.40	6.42	0.89

(b)6号基を参照点とした場合

2003年2月	観測値 平均風速 (m/s)	予測値 平均風速 (m/s)	相対誤差 (%)	相関係数
1号基	7.27	6.63	8.74	0.90
2号基	7.07	6.32	10.71	0.87
3号基	7.91	6.48	18.09	0.92
4号基	7.11	7.73	6.80	0.92
5号基	7.39	7.07	0.54	0.92
7号基	6.35	6.80	7.10	0.92
8号基	6.78	7.02	3.58	0.96
9号基	6.17	6.80	10.22	0.92
10号基	6.57	6.90	5.13	0.93
平均値	6.96	6.86	2.73	0.92

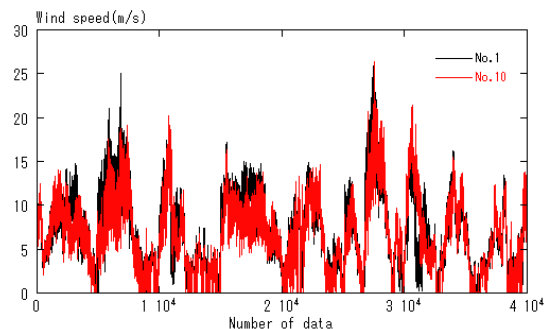
表-4には、参照点として用いた4号基と6号基から各風車までの水平距離の一覧を示す。表-5には、同じく参照点として用いた4号基と6号基と各風車の高度距離の一覧を示す。表-3から表-5を吟味すると、参照点と評価点の水平距離が約800m以内で、高度距離が50m以内であれば我々の提案する実風速推定法による予測値の相対誤差は概ね20%以内に収まることが示された。当然ながら、今回使用した観測データは風車ナセル上に設置されているプロペラ式の風向・風速計で取得されたものであるため、ブレードの回

表-4 参照点と各風車の水平距離

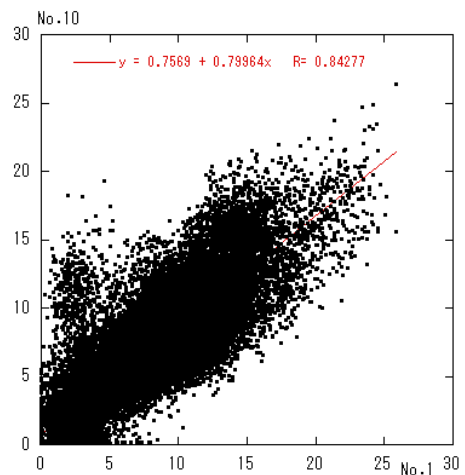
4号基を参照点とした場合	水平距離(m)	6号基を参照点とした場合	水平距離(m)
1号基-4号基	約560	1号基-6号基	約760
2号基-4号基	約280	2号基-6号基	約530
3号基-4号基	約140	3号基-6号基	約350
5号基-4号基	約180	4号基-6号基	約300
6号基-4号基	約300	5号基-6号基	約140
7号基-4号基	約420	7号基-6号基	約140
8号基-4号基	約430	8号基-6号基	約240
9号基-4号基	約630	9号基-6号基	約350
10号基-4号基	約800	10号基-6号基	約500

表-5 参照点と各風車の高度距離

4号基を参照点とした場合	高度距離(m)	6号基を参照点とした場合	高度距離(m)
1号基-4号基	37	1号基-6号基	32
2号基-4号基	45	2号基-6号基	40
3号基-4号基	28	3号基-6号基	23
5号基-4号基	35	4号基-6号基	5
6号基-4号基	5	5号基-6号基	30
7号基-4号基	49	7号基-6号基	44
8号基-4号基	42	8号基-6号基	37
9号基-4号基	45	9号基-6号基	40
10号基-4号基	28	10号基-6号基	23



(a)時系列データ



(b)散布図

図-13 1号基と10号基のハブ高さ風速の比較、観測データ

転の影響を受けている。但し、1号基から10号基まで同様の条件下にある。

我々の提案する実風速推定法の適用範囲を示したが、その裏づけとなる複雑地形上の気流特性について観測データに基づいて考察を行なう。図-13には、1号基と10号基の2003年2月の時系列データの比較と散布図を示す。1号基と10号基は水平距離にして約1200mも離れており、高度距離では9mの差がある(図-2を参照)。特に注目して頂きたいのは水平距離である。1号基と10号基は1000m以上も離れているにも関わらず、1ヶ月間の風速値の時間的な変化は極めて類似しているのが見て取れる。図-13(b)に示す散布図では、両ケースの相関係数は0.84であった。

2003年2月の40,047個のデータの中から北風に該当する9,501個のデータ(全体の約24%)を抽出し、1号基(評価点)と4号基(参照点)の風速比の時間変化を調べた。本研究では、風向は以下のように定義した。例えば、北風の場合は北をゼロ度として、風向の値が348.75度以上でかつ11.25度以下に該当するものを北風と定義した。図-14には、風速比の時間変化を示す。図-15には、その度数分布を示す。これらの結果から、CFDによる風速比と観測データによる風

速比の平均値は概ね一致しているのが分かる。また、その頻度も平均値を中心に分布しているのが分かる。よってCFDでは、風に対する地形の凹凸の影響を忠実に再現し、参照点と任意評価点の風速比を高い精度で予測できれば、参照点の時系列データに基づいて任意地点のスカラー風速値の時系列データを得ることが可能であると言える。

## 6. おわりに

本研究では、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RIAM-COMPACTを用い、野外観測で取得された時系列データとCFDの出力結果を用いて複雑地形上の実風速推定法を提案した。すなわち、コンピュータ上の架空の風速分布(無次元スケール)を実際の野外観測で得られた時系列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。提案する推定法の妥当性を、鹿児島県の野間ウィンドパークを対象とし、ナセル搭載の風向・風速計で測定された野外観測データを用いて検証した。その結果、本研究で対象にした野間ウィンドパークに関して以下の知見が得られた。参照点と評価点の水平距離が約800m以内で、高度距離が50m以内であれば我々の提案する実風速推定法による予測値の相対誤差は概ね20%以内に収まることが示された。但し、参照点の取り方、参照点における観測機器の種類、さらに異なる他のサイトでの検証が必要であり、これらは今後の課題としたい。また、本手法をさらに拡張し、野外観測データの代わりに気象モデルの出力結果を活用すれば、数時間から数日先の風況場を予測する、いわゆる、リアルタイムシミュレーションも可能になると考えられる。

## 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)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: 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) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況予測シミュレータ

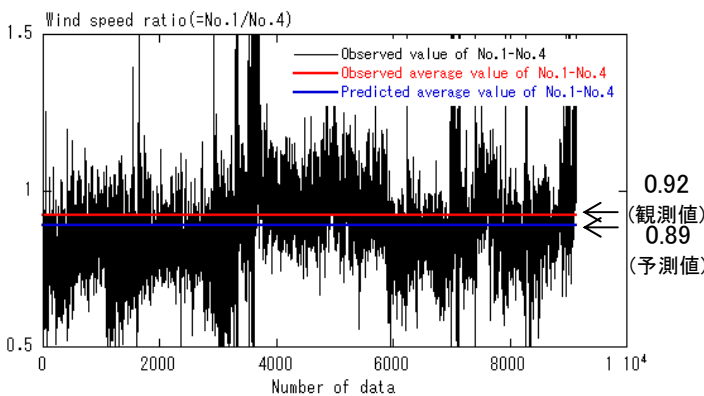


図-14 1号基と4号基のハブ高さ風速比の時間変化, 観測データ, 2003年2月の北風のみを抽出

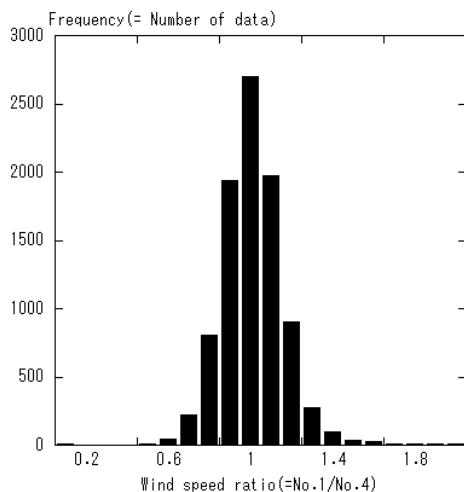


図-15 1号基と4号基のハブ高さ風速比の度数分布, 観測データ, 2003年2月の北風のみを抽出

- RIAM-COMPACTの開発—風況精査とリアルタイムシミュレーション—, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.417-428, 2003.
- 4) 内田孝紀, 大屋裕二: ナセル搭載の風向・風速計で測定された複雑地形上の風況特性—岬の場合—, 九州大学応用力学研究所所報, 第130号, pp.35-52, 2006.
  - 5) 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.
  - 6) 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.
  - 7) 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.
  - 8) Smagorinsky, J. : General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963.
  - 9) 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.
  - 10) 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.
- (2007年4月12日 受付)