

# 複雑地形上の風車ハブ高さ風速に与える流入気流性状と標高データの影響

## INFLUENCE OF INFLOW PROFILE AND ELEVATION DATA ON WIND SPEED OF HUB HEIGHT OVER COMPLEX TERRAIN

内田 孝紀<sup>1)</sup>, 丸山 敬<sup>2)</sup>, 竹見 哲也<sup>3)</sup>, 大屋 裕二<sup>4)</sup>, 道下 和明<sup>5)</sup>

Takanori UCHIDA<sup>1)</sup>, Takashi MARUYAMA<sup>2)</sup>, Tetsuya TAKEMI<sup>3)</sup>, Yuji OHYA<sup>4)</sup> and Kazutoshi MICHISHITA<sup>5)</sup>

### ABSTRACT

In the present study, an influence of an inflow profile and a spatial resolution of an elevation data on wind speed of a hub height over complex terrain were investigated. For this purpose, a large-eddy simulation (LES) based on a generalized curvilinear collocated grid was done. It was shown that a speed-up ratio at a position of a hub height increased, as a power law exponent became small. About an influence of a spatial resolution of an elevation data, it was shown that a spatial resolution decreased, and a speed-up ratio at a position of a hub height decreased, too. Furthermore, an influence of inflow turbulences was investigated.

**Key Words** : Complex terrain, LES, Inflow profile, Elevation data

### 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。我が国でも、2010年度の300万KWの導入目標に向け、数基の風車から、数十基の風車から構成される大型のウインドファームに至るまで、風力発電施設は急速に増加している。こうした状況の中、平成19年6月に改正建築基準法が施行され、60mを超える工作物はこれまでの建築確認申請だけでなく、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。風車の適地は海岸地区から山間部に移動しており、複雑地形上に風車を建設せざるを得ない状況にある。複雑地形上に複数の風車を建設することを考えた場合、数値シミュレーションを用いて上記の地形的要因を考慮した風速の割増係数を評価することが有効であると考えられる<sup>1)</sup>。但し、数値シミュレーションを用いた場合には条件設定に任意性があるため、パラメータ等の感度解析を十分に行い、その影響を把握しておかねばならない。

そこで本研究では、数値シミュレーションによって複雑地形上の強風性状を再現する際、流入気流プロファイルおよび標高データの空間解像度が風車ハブ高さ位置での割増係数にどの程度の影響を与えるかを調査した。この目的に対し、我々の研究グループで開発を進めている非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain:リアムコンパクト)を用いた<sup>2)</sup>。リアムコンパクトは、数(十)km以下の狭域空間を対象に、風力発電導入に適した地点をピンポイントに予測し、さらに観測データに基づいて年間発電電力量や設備利用率を試算可能な流体力学モデルである。乱流モデルには、LES(Large-Eddy Simulation)を採用している。最初に、風力発電の導入が具体的に計画されている地域を対象に、流入気流プロファイルの影響を調査した。具体的には、1)平成12年建設省告示1454号で与えられる速度プロファイル(粗度区分 I ~IV)、2)一般的に用いられるべき法則速度分布、3)気象モデルPSU/NCAR MM5(以後、“MM5”と略記する)で求めた速度プロファイルを入力条件として与え、風車位置における増速率の変化の程度を比較した。次に鹿児島県野間岬に建設されている野間ウインドパークを対象に、数値シミュレーションで使用する標高データの空間解像度と、流入気流が有する速度変動の影響が増速率に与える影響を調べた。

<sup>1), 4)</sup> 九州大学応用力学研究所 助教, 教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

<sup>2), 3)</sup> 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>5)</sup> (株)きんでん京都研究所 副長 (〒619-0223 京都府木津川市相楽台3-1-1)

## 2. 数値計算手法

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(有限)差分法に基づき、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とナビエ・ストークス方程式である。本研究では、強風時の気流予測を対象にしているため、大気が一般的に有する温度成層の効果は省略した。計算アルゴリズムは部分段階法<sup>3)</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>4)</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>5)</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>6)</sup>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. 流入気流プロファイルの影響

本研究で対象にした風車と周辺の地形起伏の様子を図1に示す。この地域にはハブ高さ85m、ロータ直径88mの風車20基からなるウィンドファームが計画されている。計算格子は国土地理院の50m標高データに基づいて生成した。計算領域は9km四方とし、鉛直方向は約3kmの高さを有する(図3を参照)。計算格子数は101(x)×101(y)×51(z)点、水平方向メッシュ幅は約30m～約830m、鉛直方向メッシュ幅は約2m～約400mに変動している。境界条件は、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。計算に用いるレイノルズ数( $=U_{in}h/\nu$ )は、 $Re(=U_{in}h/\nu)=10^4$ とした<sup>7)</sup>。ここで、 $U_{in}$ は流入境界面の上空風速、 $h$ は計算領域の標高差、 $\nu$ 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。

以下では、流入条件に用いた速度プロファイルを説明する。平成12年建設省告示1454号で与えられる速度プロファイル(平均風速の高さ方向の分布を表す係数) $E_r$ は以下の式で記述され、それぞれのパラメータは粗度区分に応じて表1のように決まっている<sup>1)</sup>。

◆高度  $H$  が  $Z_b$  以下の場合(単位 m)

$$E_r = 1.7 \left( \frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha \quad \text{式(1)}$$

◆高度  $H$  が  $Z_b$  を超える場合(単位 m)

$$E_r = 1.7 \left( \frac{H}{Z_G} \right)^\alpha \quad \text{式(2)}$$

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

表1 各種パラメータ

式(1)および式(2)の $\alpha$ 、 $Z_b$ 、 $Z_G$ 、 $H$ (単位m)の値を告示1454号により与え、高さ方向に求めたものを図2に示す。ここで、流入プロファイルを作成した位置は、図3に矢印で示す流入断面内のラインAである。図中に

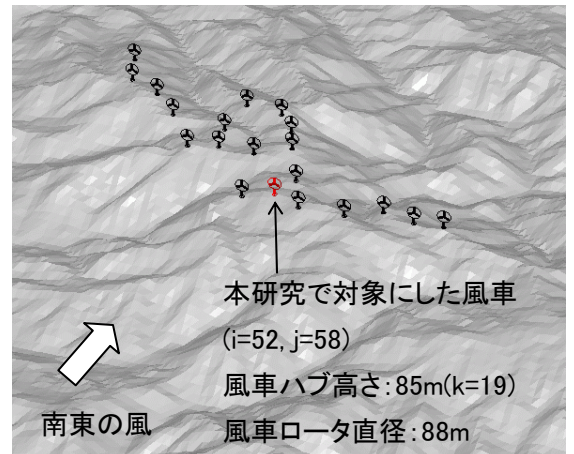


図1 本研究で対象にした風車と地形の起伏

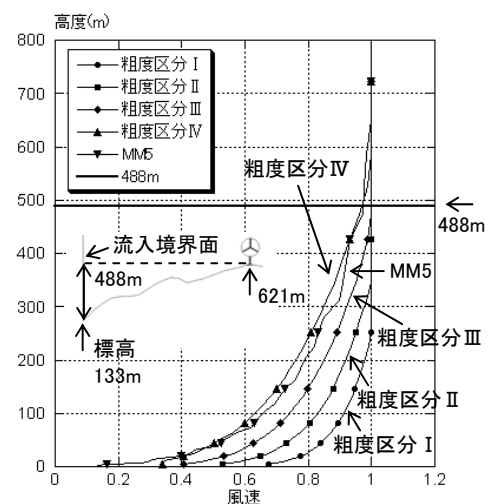


図2 流入プロファイルの比較、  
風車位置標高と流入断面標高の  
標高差は488mである。

は、図3のラインAにおけるMM5の結果も併せて表示している。これは後述する。全てのケースともに上空風速が“1”になるように正規化している。図2には、本研究で対象にした風車立地点と流入断面位置での標高差(地上高488m)も表示している。

式(1)、式(2)で規定される風速分布は、地表面粗度が風上側に十分な長い距離で一様に分布していると仮定し、風洞実験や観測結果から求めた値を適用することに相当する。大気は強風中立な条件とし、風向・風速は定常と仮定している。すなわち、気象条件が風速分布に与える影響は考慮していないため、自然風に見られる風向・風速分布の時間変化の影響、大気安定度の影響、強風の気象学的な発生原因の影響、風上側の地表面粗度の変化の影響、風上側の地形・地勢の変化の影響などは一切考慮されていない。また、高高度における風速は各粗度区分において高度  $Z_G$  (粗度区分IVで最高550m)以上で一定と仮定し、その値は粗度区分IIにおける地上10mの風速の1.7倍としている。これに対して、本研究では気象モデルMM5を用いて台風シミュレーションを行い、流入断面のより現実的な速度分布を求め、これを比較のために用いた。MM5の詳細な内容は文献<sup>8)</sup>を参照していただきたい。

複雑地形を対象とした風況シミュレーションでは、流入断面内において計算領域の最大標高位置(本研究の場合には地上高678m)で流入気流風速が“1”になるように設定することも多い。そこで、上記のように設定したべき法則分布も検討した。べき指数は  $n=4\sim 9$  とした。

本研究では、図2および図4に示す流入プロファイルを用い、風車ハブ高さ位置での増速率(割増係数)を調べた。ここで、図3に示す流入断面内のラインAの格子上の風速値はそのまま変化させずに用いた。つまり、ラインA以外の場所では流入プロファイルの形状が高さ方向に若干伸縮している。但し、式(1)および式(2)で示す粗度区分 I ~ IV に関しては、ラインAのみで代表させるのではなく、流入断面内のそれぞれの地上高に基づいて速度プロファイルを作成し、これらを与える場合も検討した。

時間平均風況場(無次元時間100~200)に関して、風車ハブ高さ位置(地上高85m)における水平スカラー風速VELの分布図を図5に示す。ここで、VELは以下の式(3)で定義される。

$$VEL = \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \quad \text{式(3)}$$

図5を観察すると、風車ハブ高さ位置の水平スカラー風速は地形の凹凸(図1を参照)に伴い、空間的に著しく変化している。本研究で対象にした風車(図中に矢印で表示)近傍では、風速が局所的に増速しているのが見て取れる。

表2~表5には、上述した図2および図4に示す種々の流入プロファイルを設定した際の風車ハブ高さ位置(地上高85m)での増速率を示す。但し、これらの数値は無次元時間100の時間平均風況場から求めており、上空風速“1”に対する比である。粗度区分 I ~ IV に従う風速分布

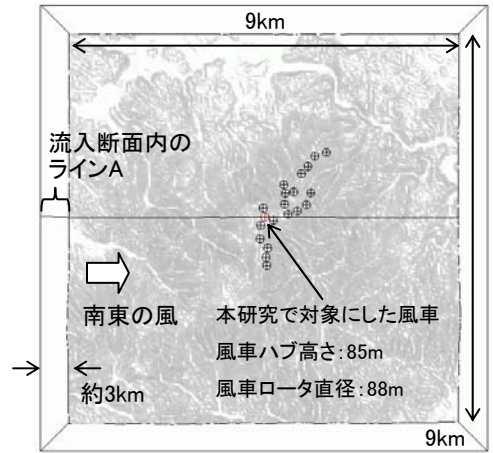


図3 流入プロファイルの設定位置

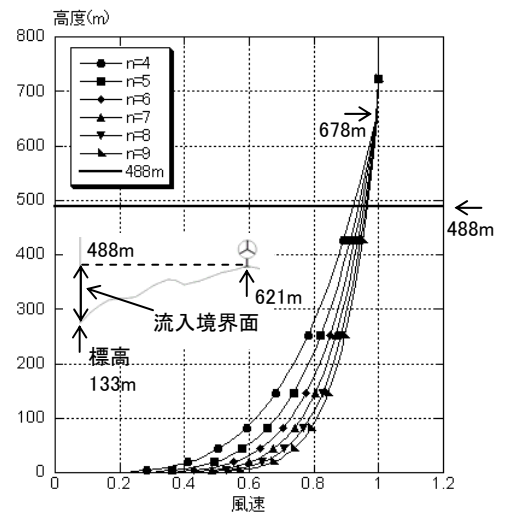


図4 流入プロファイルの比較、風車位置標高と流入断面標高の標高差は488mである。

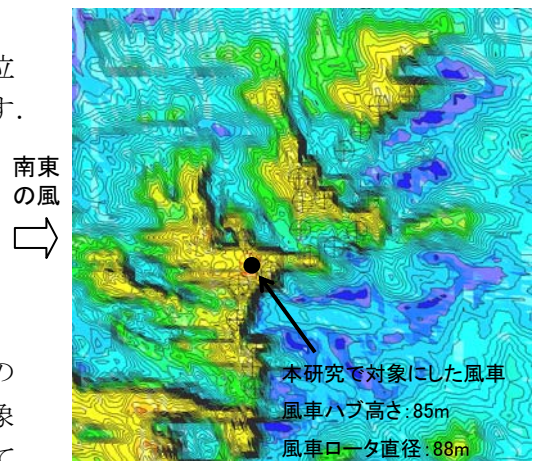


図5 風車ハブ高さ85mにおける水平スカラー風速の分布図、流入条件は粗度区分IIIの風速分布をそれぞれの地上高に基づいて与えた場合、風速の表示範囲:0~1.3

	粗度区分			
	I	II	III	IV
風速比	1.21	1.19	1.14	1.08

表2 図2に示す速度プロファイルを与えた場合の結果、図3に示すラインAの格子上の風速値をそのまま流入断面全体に一樣に設定。

	ケース1	ケース2
風速比	1.09	1.07

表4 図2に示す気象モデルMM5の結果を与えた場合、ケース1の上空領域は約3km、ケース2はケース1の上空領域を拡大し、約7kmとした場合。図3に示すラインAの格子上の風速値をそのまま流入断面全体に一樣に設定。

	粗度区分			
	I	II	III	IV
風速比	1.20	1.19	1.13	1.07

表3 図2に示す速度プロファイルを与えた場合の結果、図3に示すラインAのみで代表させるのではなく、流入断面内のそれぞれの地上高に基づいて速度プロファイルを作成し、これらを与えた場合。

	べき指数n					
	9 (0.11)	8 (0.125)	7 (0.14)	6 (0.17)	5 (0.2)	4 (0.25)
風速比	1.15	1.14	1.13	1.10	1.07	1.05

表5 図4に示す速度プロファイルを与えた場合の結果、図3に示すラインAの格子上の風速値をそのまま流入断面全体に一樣に設定。括弧の数値は1/nの値。

を与えた結果である表2および表3に注目する。両者を比較すると、図3に示すラインAの格子上の風速値をそのまま流入断面全体に一樣に設定した表2の結果と、ラインAのみで代表させるのではなく、流入断面内のそれぞれの地上高に基づいて速度プロファイルを作成し、これらを与えた結果の表3では、粗度区分 I ~ IV ともにほぼ同程度の値を示している。今回の検討の範囲では両者の有意な差異は見られなかった。両ケースともに粗度区分 I → IV へと速度欠損が大きくなるにつれて、風車ハブ高さ位置での風速比は小さくなる傾向にあることが示された。次に、気象モデルMM5の結果を与えた結果である表4を考察する。表2と同様、これも図3に示すラインAの格子上の風速値をそのまま流入断面全体に一樣に課した結果である。このケースでは、鉛直方向の計算領域の影響(ブロックージ比の影響)を調べるため、上空領域を約3kmに設定した場合(ケース1)と、ケース1の上空領域を拡大し、約7kmにした場合(ケース2)を比較した。上空領域の影響は顕著には見られず、両ケースともに同程度の値となった。図2に示すように、MM5のプロファイル形状は、粗度区分IVに近く、結果として風速比も粗度区分IVに近い値となった(表2および表3を参照)。最後に、図4に示す流入条件を課した場合の結果である表5に注目する。これも図3に示すラインAの格子上の風速値をそのまま流入断面に一樣に与えた結果である。表2および表3で既に述べたように、べき指数nが小さくなるにつれて、すなわち、速度欠損が大きくなるにつれて風車ハブ高さ位置での風速比は小さくなる傾向を示した。

#### 4. 標高データが有する空間解像度の影響

標高データの空間解像度が風車ハブ高さ位置での増速率に与える影響について述べる。この目的に対し、鹿児島県野間ウインドパークを対象に数値シミュレーションを行った。野間ウインドパークは鹿児島県南西部の南さつま市笠沙町に位置する(図6を参照)。ここは急峻な崖状地形が広がる典型的な複雑地形である。最大標高は約140mである。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。北風を対象にし、No.4号基の増速率に注目した。

本研究で対象にした風車(No.4)  
風車ハブ高さ:45m(k=28), 風車ロータ直径:29m



図6 野間ウインドパークの写真

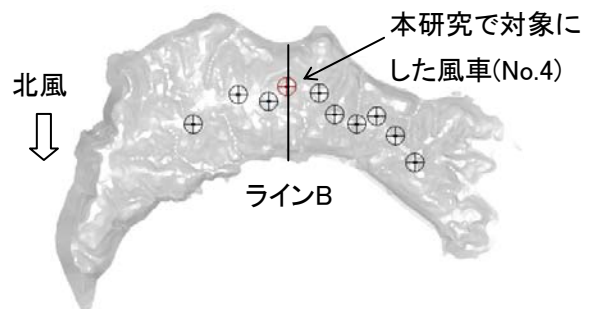


図7 野間ウインドパークの平面図

図7には、野間ウィンドパークの平面図を示す。計算に用いた標高データは、最初に紙地図から空間解像度3mの標高データを作成し<sup>9)</sup>、これに基づいて約8m, 約15m, 50m, 100mと水平断面内の空間解像度が異なる計算格子を生成した。数値シミュレーションの中で地面境界条件として再現される地形形状の違いを明らかにするため、図7に示すラインBのz座標を抽出し、空間解像度約8mと100mの場合を図8に示す。計算領域はNo.4号基の風車を中心に5km四方とし、鉛直方向は700mである。それぞれの計算格子数は以下の通りである。空間解像度が約8mの場合には、 $201(x) \times 201(y) \times 51(z)$ 点とし、水平断面内の格子は計算領域中心で密になるように不等間隔に分割した。約15mの場合には、 $101(x) \times 101(y) \times 51(z)$ 点とし、水平断面内の格子は計算領域中心で密になるように不等間隔に分割した。空間解像度50mの場合には、 $101(x) \times 101(y) \times 51(z)$ 点とし、水平断面内は等間隔分割とした。空間解像度100mの場合には、 $51(x) \times 51(y) \times 51(z)$ 点とし、水平断面内は等間隔分割とした。加えて、50m解像度の場合には、流入気流が有する乱れの影響を考慮するため、上流側に計算領域を5km拡大し、流入断面付近の地面上にラフネスブロック(高さ140m)を5個配置して乱流境界層を生成させた(図10を参照)<sup>10)</sup>。鉛直方向(z方向)の格子分割は全ての場合で同じとし、最小格子幅は0.42mである。流入条件は、乱流境界層に埋没させた場合の結果に基づき、対象とした風車上流2.5km位置における時間平均風況場(無次元時間100)から主流方向速度成分の鉛直プロファイルを取り出し、これを与えた(図9および図10を参照)。その他の境界条件などの設定は2章と同じである。

図10には、ラフネスブロックを用いて乱流境界層を生成した場合に関して、風車ハブ高さ位置(地上高45m)における主流方向速度成分の分布図(瞬間場)を示す。ラフネスブロックからの渦放出に伴い、その下流には変動流が形成されているのが確認される。風車立地点近傍では風速が局所的に増速している様子も明確に観察される。

表6には、風車ハブ高さ位置(地上高45m)における増速率を示す。ここで、増速率の値は流入断面の風車ハブ高さ高度の風速値に対する比として表示している。本研究で対象にした地形の場合には、図8に示したように、空間解像度が約8mと100mの場合においても、地形形状の劇的な違いは見られなかった。そのため、空間解像度の違いによる増速率の大きな差は確認できなかった。しかし、空間解像度が減少するにつれて風車ハブ高さ位置での増速率は減少する傾向にあることが示された。50m解像度の標高デ

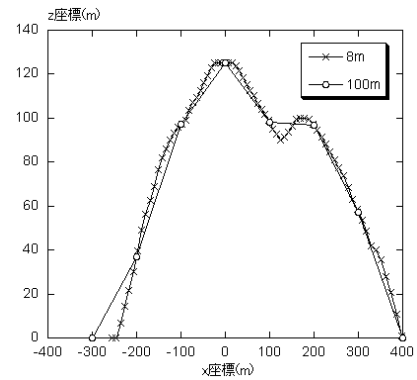


図8 図7に示すラインB(No.4号基)を通る地形断面形状の比較

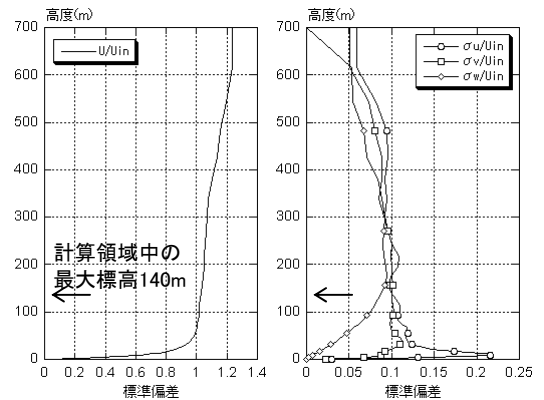


図9 計算に用いた流入気流プロファイル(左)と、標準偏差の鉛直プロファイル(右)

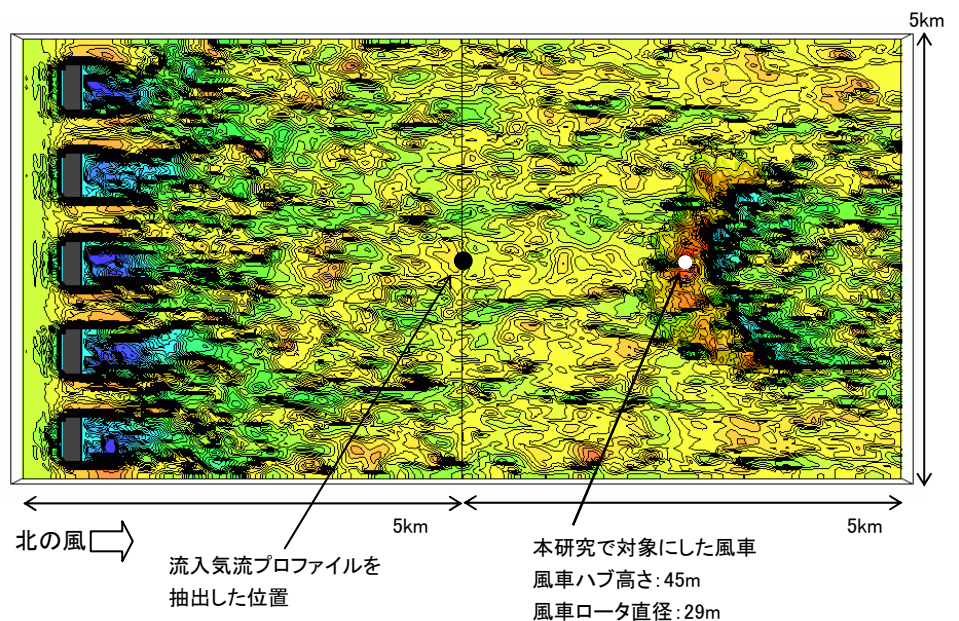


図10 風車ハブ高さ45mにおける主流方向速度成分の分布図, 瞬間場, 風速の表示範囲:-0.5~1.5

ータを用いた場合では、平均風速の増速率に対して流入変動風の影響はほとんど現れなかった。

### 5. おわりに

本研究では、数値シミュレーションによって複雑地形上の強風性状を再現する際、流入気流プロファイルおよび標高データの空間解像度が風車ハブ高さ位置での割増係数(増速率)にどの程度の影響を与えるかを調査した。流入プロファイルの形状に関しては、上空風速を“1”とした場合、ベキ指数の値が小さくなるにつれて風車ハブ高さ位置での風速比は小さくなる傾向を示した。標高データの空間解像度の影響については、空間解像度が減少するにつれて風車ハブ高さ位置での増速率は減少する傾向にあることが示された。

2008年4月2日の朝日新聞では、建築基準法の改正に伴う耐震基準の厳格化により、風力発電の新設計画の6割以上が大幅に遅れたり、あるいは、中止に追い込まれたりしているとの報道がなされた。このような状況から、今後数値シミュレーションを用いた事前評価が強く望まれるのは自明である。今回の結果が客観的、かつ適正な設計風速評価の一助になれば幸いである。

### 謝 辞

本研究の一部は、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。ここに記して感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2007年版], 土木学会
- 2) 内田孝紀, 大屋裕二, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, pp.417-428, 2003
- 3) J. Kim and P. Moin, J. Comput. Phys., Vol.59, pp.308-323, 1985
- 4) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂
- 5) T. Kawamura, H. Takami and K. Kuwahara, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986
- 6) J. Smagorinsky, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963
- 7) 加藤真規子, 日本風工学会誌, 第59号, pp.89-92, 1994
- 8) 丸山敬, 石川裕彦, 内田孝紀, 河井宏允, 大屋裕二, 日本風工学会論文集, Vol.31, No.3, pp.95-104, 2006
- 9) 内田孝紀, 大屋裕二, 他3名, 九州大学応用力学研究所所報, 第129号, pp.135-141, 2005
- 10) T. Uchida and Y. Ohya, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.91, pp.219-229, 2003

### Appendix-孤立地形の場合(形状は文献<sup>2)</sup>を参照)-

孤立地形を対象にして地形頂部における風速比を求めた。ここで、流入気流プロファイルには式(1)および式(2)で記述される鉛直分布を与えた(図11)。図12は孤立地形の頂部での

	空間解像度				
	約8m	約15m	50m (変動風)	50m	100m
風速比	1.32	1.30	1.30	1.29	1.28

表6 風車ハブ高さ位置での増速率, 流入断面の風車ハブ高さ高度における風速値に対する比として表示。

式(3)の鉛直分布である。特に、基準風速を上空風速にした場合と風車位置にした場合の表示で、風速比にどの程度の変化があるかに注目した。得られた結果を表7, 表8に示す。

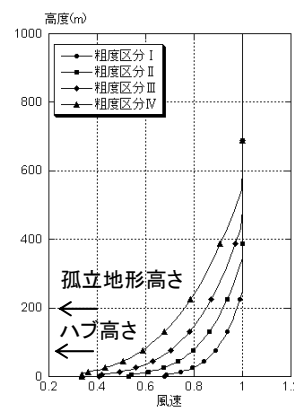


図11 式(1), 式(2)の分布, 流入断面位置

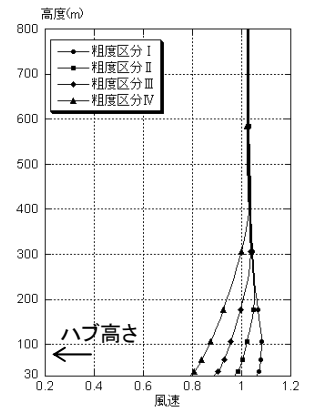


図12 式(3)の分布, 孤立地形の頂部位置

	粗度区分			
	I	II	III	IV
風速比	1.08	1.01	0.95	0.86

表7 風車ハブ高さを45mとした場合の増速率, 増速率=(図12の45m位置風速)/(図11の上空風速)

	粗度区分			
	I	II	III	IV
風速比	1.28	1.35	1.44	1.60

表8 風車ハブ高さを45mとした場合の増速率, 増速率=(図12の45m位置風速)/(図11の45m位置風速)