

# 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 風車の耐風設計用風速評価手法の提案

## Proposal of Evaluation Technique for Design Wind Speed of WTG based on the Unsteady Flow Fields under Wind Direction Changes Reproduced by CFD Model

内田 孝紀\*<sup>1</sup>, 丸山 敬\*<sup>2</sup>, 大屋 裕二\*<sup>3</sup>

Takanori UCHIDA, Takashi MARUYAMA and Yuji OHYA

\*<sup>1</sup> Assistant Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

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

\*<sup>3</sup> 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 design wind speed evaluation technique in WTG (Wind-Turbine Generator) installation point by using the RIAM-COMPACT® CFD model that reproduces the continuous wind direction changes was proposed.

**キーワード** : 設計風速, 複雑地形, 流体力学CFDモデル, 連続的な風向変化

**Keywords** : Design Wind Speed, 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年に土木学会から、「建築基準法」<sup>1)</sup>、「建築学会荷重指針・同解説」<sup>2)</sup>に準じた「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」<sup>3)</sup>が発行された。ここでは、16方位別の流体計算を行って設計用風速の評価を行っている。

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<sup>4)</sup>。すなわち、対象地点を過去に襲来し、強風をもたら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、

我々が開発した流体力学CFDモデルRIAM-COMPACT®<sup>5)</sup>による解析を行う。その際、連続的な風向変化の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。

本報では、これらの欠点を解消する手法を提案する。すなわち、非定常な乱流場を再現できる流体力学CFDモデル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<sup>6)</sup>により、風車の耐

\*<sup>1, 3</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</sup> 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

風設計用風速評価を全方位的に行うものである。

## 2. 数値計算手法

### 2.1 流体工学CFDモデル

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<sup>®</sup>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、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>7)</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>8)</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>9)</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。

### 2.2 各種計算条件

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小さくして地形形状を詳細に再現する。計算領域に関しては、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。特に急峻な地形における解析では、計算領域の周囲におおよそ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。

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。側方境界面には

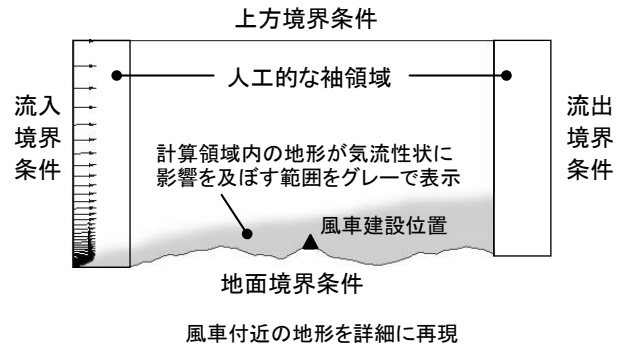


図1 計算領域と境界条件

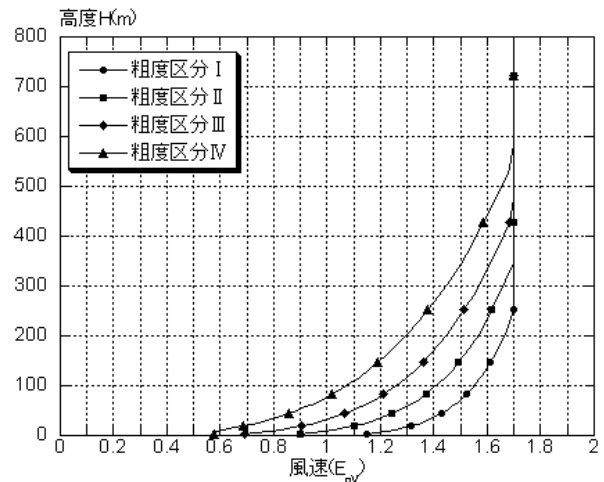


図2 粗度区分に応じた風速の鉛直分布

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)  $E_{pV}$

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

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

表中の各変数の値は下記を用いる。

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

水平風速成分( $\bar{u}$ )と鉛直風速成分( $\bar{w}$ )の主流直交方向勾配がゼロ、水平風速成分( $\bar{v}$ )をゼロとする滑り条件を課す。流入境界面としては、建設省告示1454号に示された粗度区分に応じた風速分布(図2, 表1)を与え、流出境界面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面条件を、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面条件を用いる。

### 3. 設計風速の評価例

#### 3.1 ウインドファームの概要

以下では、本報で提案する手法を用いて国内某所のウインドファームにおける耐風設計用の風速評価を試みる。対象となるのは図3に示すような、発電出力1.3MW、ハブ高さ60m、ロータ直径62mの風車10基で構成されるウインドファームである。計算領域の詳細を表2に示す。

#### 3.2 連続的な風向変化の再現条件

流入プロフィールには、風車周辺の粗度状態を考慮し、文献<sup>3)</sup>に準じて粗度区分Ⅲの風速分布を用いる。風向変化はこの風速分布を固定したまま、360度連続的に変化させる(図4)。事前の幾つかの計算(360度回転させるステップ数を10倍にした計算結果との比較や、風向を固定した計算結果との比較)により、風向変化の速さの影響を調べ、10分程度の評価時間の統計量の値に風向変化がほとんど影響しないように設定した。本研究では、無次元時間刻み0.002(実時間換算で約0.1秒)で360度変化させるのに400,000ステップ( $9 \times 10^{-4}$ 度/1ステップ)とした。Intel Core 2 Extreme 6850 (3GHz, 4コア)、メモリ2GB、Intel Fortran v.10.1.025、Windows XP SP3の環境で並列計算を行った結果、360度の風向変化(400,000ステップ)の計算に、70,790s(約20時間)を要した。

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、最初の360度の風向変化(400,000ステップの計算)は、助走計算(スピナップ)と位置づけ、それに続く360度の風向変化時の計算結果を以下の設計風速の評価に用いた。

#### 3.3 計算結果

図5に、360度風向を変化させた後の各風車位置における速度ベクトル(瞬間値)の鉛直分布を示す。この図より、各風車のハブ高さ付近において、地形効果により風速が局所的に増速している様子が見取れる。また、風車のハブ高さ付近での風速の割増係数と乱れ強さ(%)は、図6に示すように、風向により大きく変化する。同図において、風車ハブ高さ位置での風速の割増係数は、下記に示す風車ハブ高さにおける水平風速(スカラー値)の10分間移動平均値を、風車ハブ高さにおいて地形の影響の無い流入風速の水平風速の値(2.2節図2、表1に示す高度補正係数 $E_{pV}$ )で割った値として描いている。

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

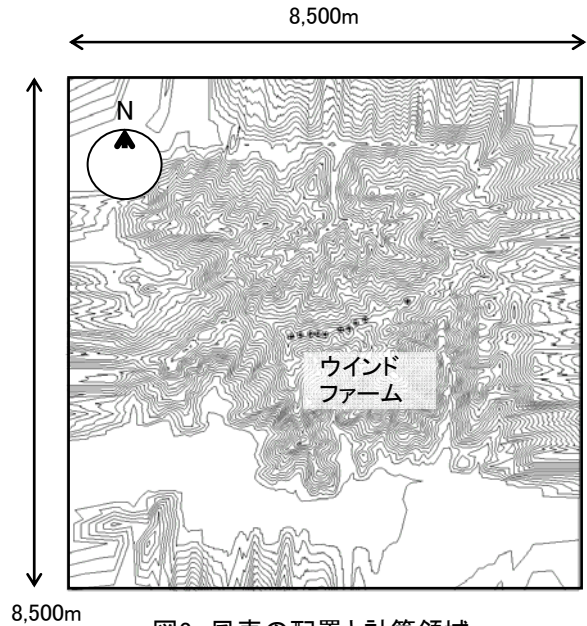
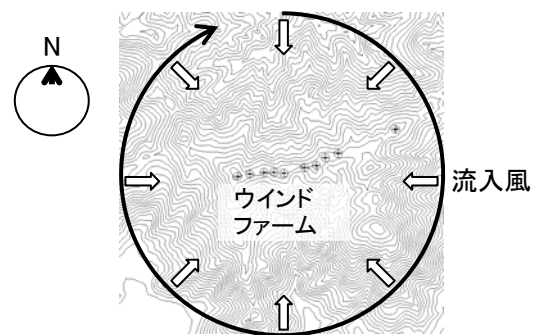


図3 風車の配置と計算領域

表2 計算領域の詳細

- ・計算領域: ウインドファームの中心にある観測マストを中心に8,500m四方鉛直方向高さは約2,900m
- ・最大標高: 537m
- ・最小標高: 0m
- ・計算格子数: 101 × 101 × 51点
- ・袖領域まで含めた計算格子数: 121 × 121 × 51点
- ・格子幅: 水平方向格子幅は32m~769m  
鉛直方向格子幅は1.7m~347m
- ・レイノルズ数: 標高差とそこでの風速で $Re=10^4$



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。

図4 風向の連続的な変化のイメージ

#### 3.4 設計風速の評価

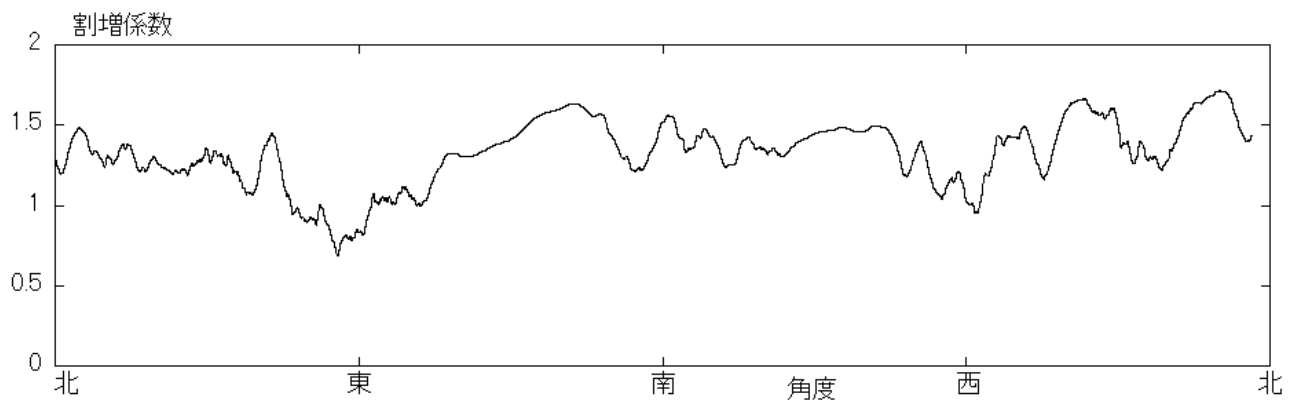
以下では、得られた計算結果に基づいて風車ハブ高さの風速比を求め、設計風速を評価する。ハブ高さの設計風速を $U_h$ とすると、文献<sup>3)</sup>の式(3.1)より $U_h$ は、平均風速の割増係数 $E_{pV}$ 、2.2節図2、表1で与えられる高度補正係数 $E_{pV}$ 、および建築基準法施行令第87条で与えられる設計基準風速 $V_0$ (対象



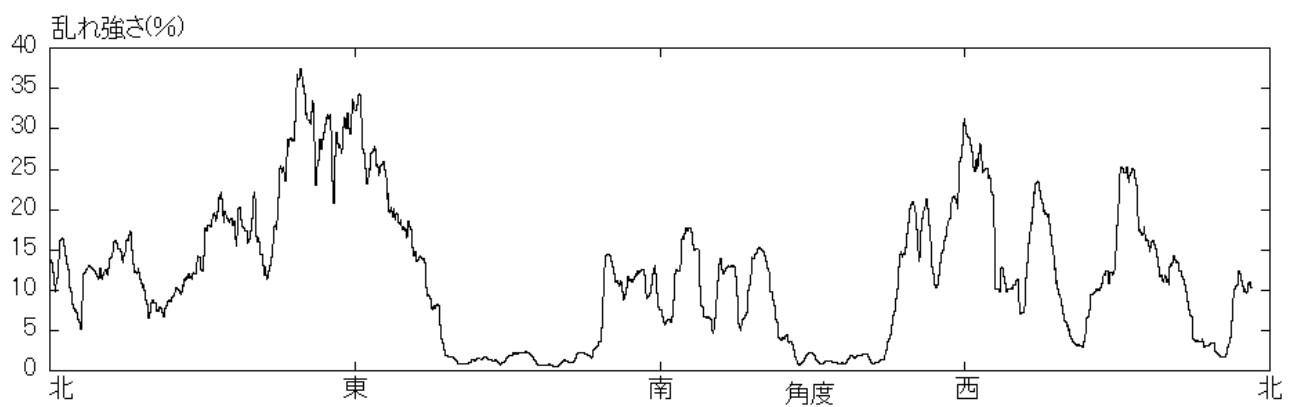


図5 各風車位置における速度ベクトルの鉛直分布, 北風の場合, 瞬間値

No.1



a. 割増係数



b. 乱れ強さ(%)

図6 風車ハブ高さ位置における割増係数の10分間移動平均値, および, これに対応した乱れ強さの風向変化 (No.1の風車を例として)

地域では $V_0=34\text{m/s}$ )により、次のように求められる。

$$U_h = E_{tV} E_{pV} V_0 \quad (2)$$

ここで、 $E_{tV}$ は図6aに示した割増係数の最大値を用いる。 $E_{tV}=(\text{風車ハブ高さにおける水平風速})/(\text{図2, 表1に示す風車ハブ高さ風速})$ と定義する。図6aより $E_{tV}$ の値は1.70と求められ、 $E_{pV}$ は粗度区分Ⅲの値を用いて、風車ハブ高さ60mでは

$$E_{pV} = 1.7(60/450)^{0.2} = 1.14$$

と求められる。

以上より、本研究で取り上げた風車ハブ高さにおける設計風速 $U_h$ は下記に示す値となる。但し、設計者は安全率や低減率などを考慮し、最終的な風車ハブ高さ設計風速とする必要がある。

$$U_h = E_{tV} E_{pV} V_0 = 1.70 \times 1.14 \times 34 = 65.89 \text{ (m/s)}$$

#### 4. 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ことにより、周囲の地形の影響を受けた風向および風速の変化を忠実に再現し、その結果を用いて風車ハブ高さの設計風速を評価する以下の手法を提案した。

##### 提案する評価手法の実行手順

1. 国土地理院の50m標高データなどに基づいて複雑地形を再現する。特に、風車付近の格子間隔は小さくし、地形形状を詳細に再現する。複雑地形を切り出した場合には、計算領域の周囲に人工的な袖領域を設け、標高をおおよそ標高ゼロの平坦地形まで滑らかに接続させる。
2. 文献<sup>3)</sup>に従い、解析領域周辺の地表面粗度の状況から流入風速の鉛直分布を決定する。
3. 上記2で設定した風速の鉛直分布を用いて、360度連続的に風向を変化させた計算を行う。
4. 文献<sup>3)</sup>に従い、風車ハブ高さの風速比(割増係数)を求め、設計風速を評価する。

提案した設計風速評価手法は、国内某所のウインドファームに適用され、設計風速を求める手順を具体的に示し、風車ハブ高さ位置での設計風速を求め

た。提案した手法の特徴としては、

- ・16方位あるいは8方位などの方位別の計算結果に比べて、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忠実に再現することが可能である。
- ・計算を行うのに必要な計算格子の生成、風況場がなじむまでのスピニアップの計算を、方位別に行わなくても済むので、計算時間を大幅に短縮できる。

などが挙げられる。さらに、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、

- ・数値サイトキャリブレーション(NSC)<sup>10)</sup>
- ・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)、2010年度(財)中部電力基礎技術研究所 第21期研究助成、「風力発電普及のための高精度マイクロサイティング手法の開発」(研究代表者:内田孝紀)、(財)崑山文化財団 2010年度研究助成、「風力発電の適切な導入に資する風車マイクロサイティング手法の開発」(研究代表者:内田孝紀)の援助を受けました。また、(株)ユーラスエナジージャパンの李貫行氏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]
- 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) 丸山敬, 石川裕彦, 内田孝紀, 出口啓, メソスケールモデルとLESによる複雑地形上の気流解析, 日本流体力学会年会2010講演要旨集, 2010
- 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

**Appendix**

**-孤立地形の増速率(地形形状は文献<sup>5)</sup>を参照)-**

ここでは, 孤立地形を対象にし, 地形頂部において一般的な風車ハブ高さ(地上高45m)における風速比(増速率)を示す. ここで, 流入気流プロファイルには本文中の2.2節図2, 表1で記述される鉛直分布を与えた(図8に再掲する).

図7には, 孤立地形周辺の流れパターンを粒子追跡法により可視化した結果を示す. また併せて, 風洞実験によるスモークワイヤー法による可視化画像も示す. 両者は定性的に良好な一致を示している. また, 孤立地形周辺は複雑乱流場を形成している様子が見て取れる.

図9は孤立地形の頂部(図7に黒線で表示)における本文中の式(1)に示す値の鉛直分布である. 表3には, その数値を示す. 表3から, 粗度区分が I → IV に変化するに伴い, 風速比(増速率)は徐々に増加する傾向にあることが示された.

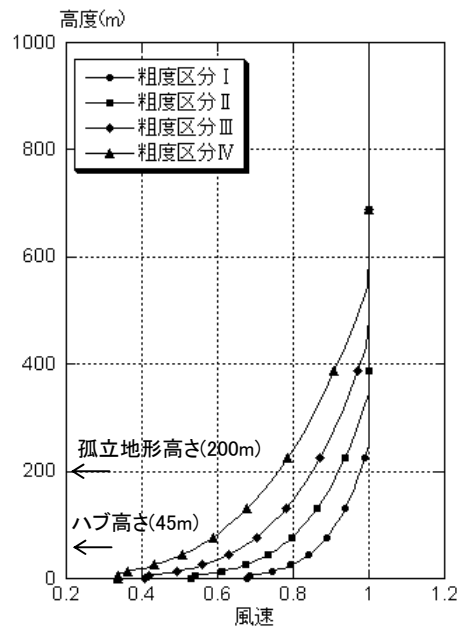


図8 流入風速の鉛直分布

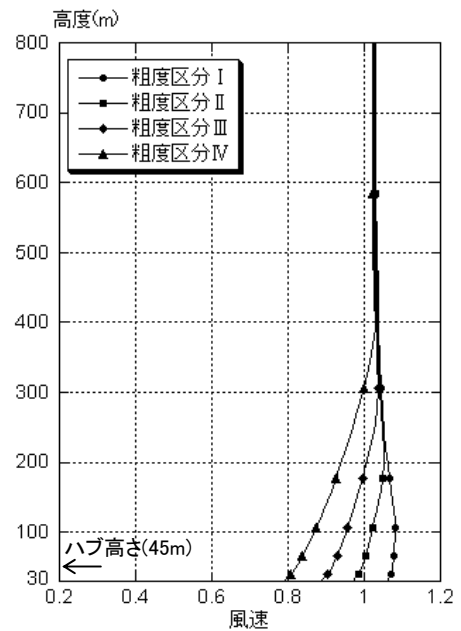


図9 孤立地形の頂部位置における風速の鉛直分布

	粗度区分			
	I	II	III	IV
風速比 (増速率)	1.28	1.35	1.44	1.60

表3 風車ハブ高さを45mとした場合の風速比(増速率),

増速率=(図9の45m位置風速)/(図8の45m位置風速)

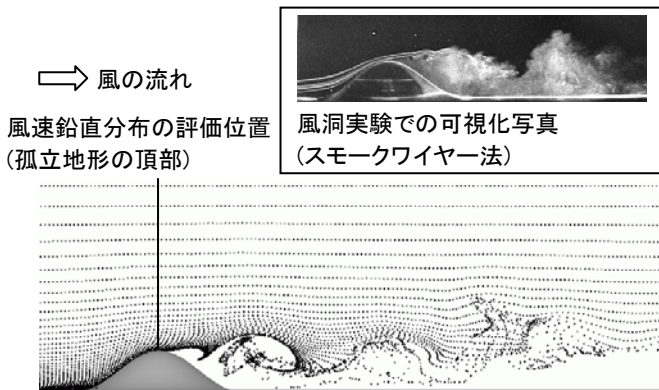


図7 粒子追跡法による孤立地形周辺の流れ場の可視化