

縮尺模型を用いた風洞実験における幾つかの知見

Some Findings about Wind Tunnel Experiment by Using Scale Model

内田孝紀*・杉谷賢一郎**・大屋裕二***

Takanori UCHIDA, Kenichirou SUGITANI 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)

**九州大学技官 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)

In the present study, two doubts concerning the wind tunnel experiment by using the scale model were investigated. First, the comparison between an I-type hot wire probe and a split film probe was paid to attention in the eddy region. In the case using the I-type probe, a negative value is not reproduced for the mean velocity profile. Consequently, when the I-type probe was used, it became the result of overvaluing a true value. Next, the influence that the surface roughness of the scale model gives to the wind speed at the hub height was examined. The influence of the ruggedness did not appear remarkably when about 1/2800 scale models were used.

Keywords : Wind tunnel experiment, Scale model, I-type probe, SFP, Surface roughness

1. はじめに

現在, 地球温暖化を防ぐため, 二酸化炭素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自然エネルギーの一つ, 風力エネルギーの有効利用に注目が集まっている。日本国内においても, 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, 平坦地形は少なく, 複雑地形がほとんどである。最近では, 風車の建設地が海岸地区から山間部へ移行していることから, 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になってきている。このような状況の中, 最近では計算機性能の急速な発展に伴い, 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グソフトの開発が各方面で進められている^{1,2)}。

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^{3,4)}。リアムコンパクトは乱流モデルの一つであるLES(Large Eddy Simulation)に基づいている。解析領域は数百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

時間変化を高精度に予測し, それらを視覚化できることである。

一方, リアムコンパクトの予測精度を検証するため, 急峻な傾斜角度を有する縮尺模型を用いた風洞実験もこれまで幾つか実施してきた⁵⁻⁷⁾。これらの風洞実験では, 流入気流の乱れや地形表面の粗度の影響などは省略し, 一様流中に置かれた急峻な単純地形を過ぎる複雑乱流場を対象にしてきた。これらの縮尺模型を用いた風洞実験では, I型熱線プローブと, 順流および逆流を検知可能なスプリットフィルムプローブを用いた気流計測を行ってきた。一連の風洞実験において, 特に縮尺模型背後の逆流領域では, I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブの結果にどの程度の差異が生じるのかということに疑問が残った。加えて, 複雑地形を対象にした風洞実験において, 縮尺模型の表面が有する凹凸が風車ハブ高さ付近に与える影響についても疑問が残った。そこで本研究では, 上記二つの疑問を調査するための風洞実験を行い, 幾つかの知見を得たのでその結果を報告する。

2. 本研究で使用した風洞設備の概要

本研究の風洞実験は, 九州大学応用力学研究所が所有する温度成層風洞を用いて行った(図-1を参照)。この風洞の最大の特長は, 流入気流と風洞床面の温度を同時に制御(加熱および冷却)できることである。但し, 本研究では気流の安定度を中立状態とした。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。

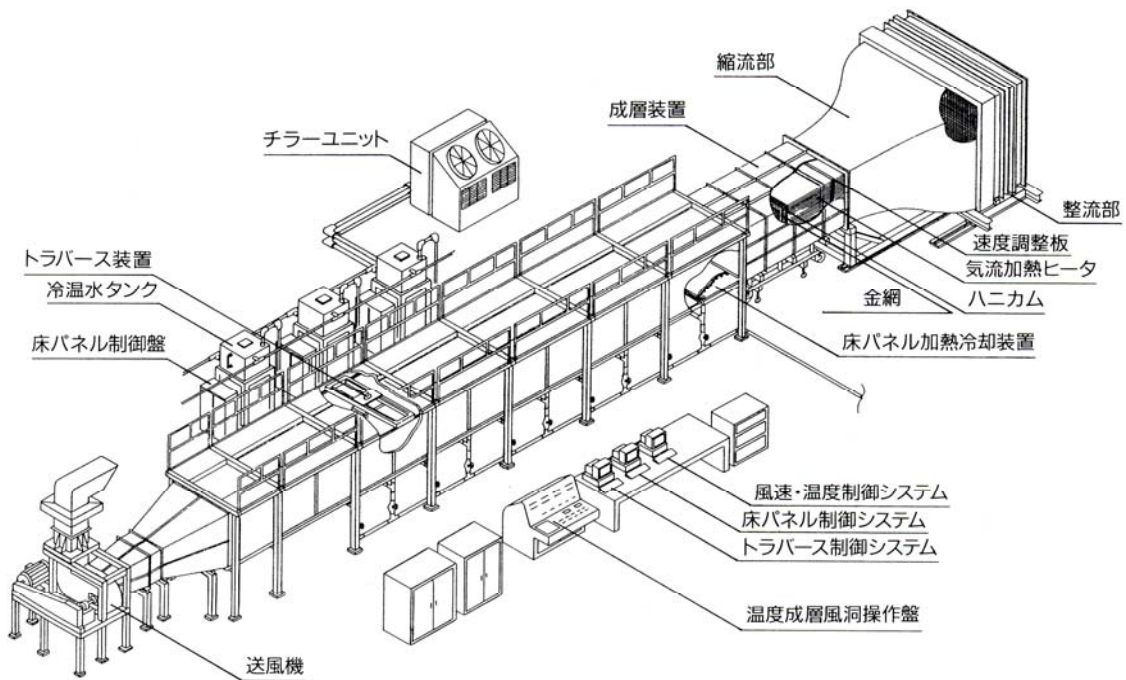


図-1 温度成層風洞の概観図

3. 2次元尾根モデルを対象にした場合

3.1 縮尺模型

一般的には、I型熱線プローブを用いた場合、この方式ではセンサープローブに対する流れの方向が判別できないため、逆流を含んだ流れ場の計測には不適切であると言われている。これに対し、我々の過去の研究⁵⁻⁷⁾でも示されているように、センサープローブに対する流れの方向と大きさを同時に計測可能なスプリットフィルムプローブを用いることで、複雑乱流場の計測にも十分対応が可能となる。そこで本研究では、急峻な傾斜角度を有する2次元尾根モデルの周辺に形成される複雑乱流場を対象に、I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブで得られた平均速度プロファイルと標準偏差の鉛直プロファイルに、具体的にどの程度の差異が生じるのかを調査することとした。

2次元尾根モデルは、風洞床面に発達する地面境界層の影響を排除し、近寄り流れを一樣流とするため、高さ11.5cmの台座の上に設置した。台座先端には僅かな傾斜を付けたアルミ板を設置し、近寄り流れが前縁から剥離するのを抑制した。また、主流直交方向の2次元な流れ場を再現するため、モデル両端に端板(高さ60cm、主流方向の長さ160cm)を設置した。本研究で使用した2次元尾根モデルの断面形状は以下の式で記述されるコサイン関数である。

$$z(x)=0.5h \times \{1+\cos(\pi x/a)\} \quad (1)$$

2次元尾根モデルは厚さ0.2、0.35mmのプラスチック板とダウ化工(株)のウッドラックを用いて自主制作した。モデル高さhは10cmで、実大気スケールの約1/2000を想定してい

る。式(1)における地形形状パラメータaは $2h(=20\text{cm})$ とし、急峻な傾斜角度を有する2次元尾根モデルを対象とした。モデルの主流方向にx軸を、主流直交方向にy軸を、鉛直方向にz軸を設定する。主流直交方向には、同じ断面形状を有し、その長さは $L \approx 9h(=91\text{cm})$ である。モデル高さhと風洞高さH=1.2mとのブロックage比は $H/h=12$ であり、対応する閉塞率($=h/H \times 100$)は8.3%である。図-2には風洞内に2次元尾根モデルを設置した様子を示す。

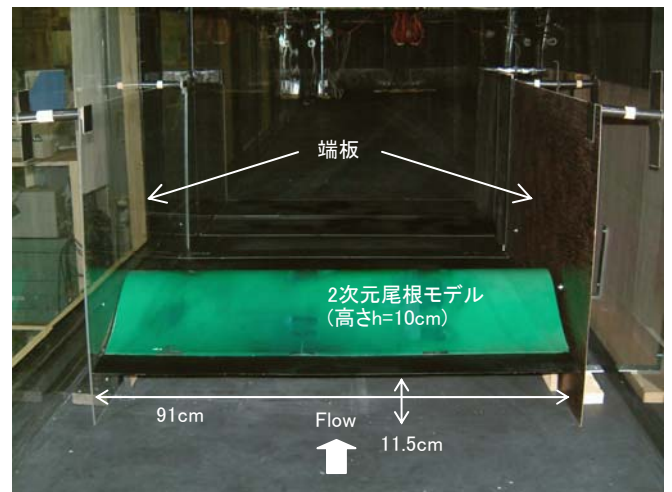


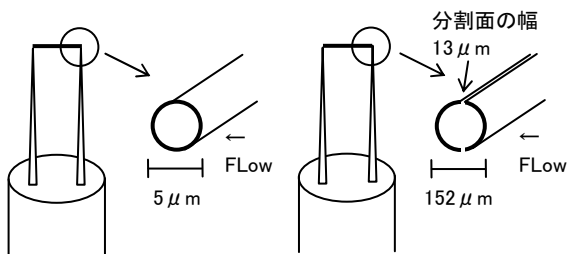
図-2 2次元尾根モデルを風洞内に設置した様子

3.2 I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブによる気流計測

I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブの模式図を図-3に示す。図-3(a)に示すように、I型熱線プローブ先端のセンサー部には $5 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーが装着さ

れており、気流計測時には250℃程度の温度を有する。流れの中に置けばワイヤー温度は変化し、これを一定温度にするための電圧が流速計の出力となる。I型熱線プローブでは、流れの大きさ(スカラー風速)は測定できるが、流れの方向は判別できない。本研究では、I型熱線プローブに日本カノマックス(株)のモデル0251R-T5、熱線流速計には同社のモデル1011を用いた。流速計の出力電圧は同社のリニアライザ(モデル1013)、フィルタを介した後、A/D変換を行いデータ収録用パソコンに取り込んだ(図-4を参照)。流速計の出力電圧Eはリニアライザで直線化し、同時に、風速 $U_N=0$ の出力電圧をゼロとした。よって、風速 U_N と出力電圧Eの関係は以下ようになる。収録データの解析では、計測した電圧値Eから式(2)を逆算して風速 U_N を求めた。

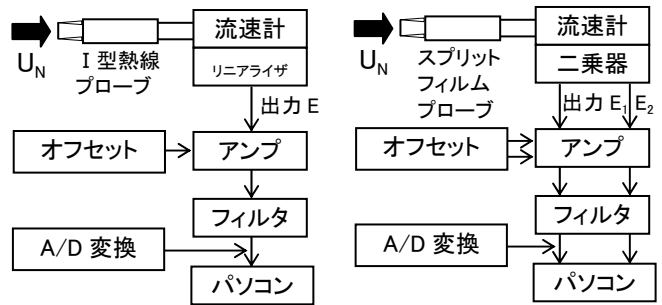
$$E = aU_N \quad a: \text{定数} \quad (2)$$



(a) I型熱線プローブ (b)スプリットフィルムプローブ
図-3 プローブ形状の比較

一方、スプリットフィルムプローブでは、図-3(b)に示すように、細い石英ロッドの表面に蒸着させた白金フィルムに2本のスプリット(分割線)をひき、2枚の半円筒形熱膜が形成されている。センサー部は直径152 μm、有効受感部長さ2mm、分割線の幅約13 μmである。本研究では、このスプリットフィルムプローブを2チャンネルの流速計、および二乗器と組み合わせた。上記のI型熱線プローブと同様、出力電圧はオフセット、アンプ、フィルタ処理を行った後、A/D変換を行いデータ収録用パソコンに取り込んだ(図-4を参照)。スプリットフィルムプローブには日本カノマックス(株)のモデル1288、流速計には同社のモデル1010を使用した。本研究では、スプリットフィルムプローブの分割面が鉛直軸(z軸)と平行になるようにモデルの上方から挿入し、z軸方向にトラバースしながら主流方向(x)の速度成分(U)のみを測定した。スプリットフィルムプローブでは、スカラー風速 U_N と風向角度 θ の較正が必要になる。 U_N はそれぞれのフィルムセンサー1, 2の出力電圧 E_1, E_2 の和から、 θ は出力電圧 E_1, E_2 の差から求める。 U_N と θ が分かれば、uは式(3)から求めることができる。校正定数の算出にはstattソフトジャパン(株)の統計解析ソフトSTATISTICAを用いた。スプリットフィルムプローブの原理などの詳細は、文献⁶⁾を参照していただきたい。

$$U = U_N \cdot \cos \theta \quad (3)$$



(a) I型熱線プローブ (b)スプリットフィルムプローブ
図-4 気流計測システムの比較

3.3 気流計測の諸条件など

I型熱線プローブを用いた場合には、電圧値の時系列データはオフセット電圧1.75V、アンプ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った。サンプリング周波数は500Hzである。一方、スプリットフィルムプローブを用いた場合には、オフセット電圧2.5V、アンプ1倍とし、その他の条件はI型熱線プローブを用いた場合と同じである。一連のデータ収集には、カノプス(株)のDSS for Windowsを用いた。これはカノプス製のA/D変換ボード「ADXM-98シリーズ」を利用し、Windows上でアナログ信号をデジタル信号として取り込むためのアプリケーションソフトウェアである。電圧値の時系列データは学内LANでワークステーションに転送し、そこで速度成分に変換して平均速度と標準偏差の鉛直分布を求める。I型熱線プローブを用いた場合およびスプリットフィルムプローブを用いた場合ともに、各測定点におけるデータ数は50,000個で100sのサンプリング時間(平均時間)である。一様流入風速は $U=1.5\text{m/s}$ とし、モデルへの風向角度はゼロ度である。モデル高さ $h=10\text{cm}$ に基づいたレイノルズ数 $Re(=Uh/\nu)$ は約 10^4 である⁸⁾。なお、気流のモニターやセンサープローブの較正に必要な風速基準値の測定には、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。

3.4 結果および考察

最初に、2次元尾根モデル周辺に形成される複雑乱流場を説明する(図-5を参照)。流れ場はスモークワイヤー法によって可視化した。この方法では、モデルのすぐ上流に高さを変えて数本のワイヤー(0.3mmのニクロム線)を平行に設置し、これに油(流動パラフィンに金属粉を混ぜたもの)を塗り、ワイヤーに通電して過熱する。この気化した煙で流れ場を観察する。風洞上部からスリットを付けた1kWプロジェクターにより照明してモデルの中央断面を可視化し

た。風速は1.5m/sで、気流計測と同じ条件である。特にモデルの頂部付近で剥離した境界層(剥離せん断層)の挙動に注目するため、煙がモデルの表面近くを流れるようにワイヤー高さを調節した。モデルを過ぎる流れは、モデルの頂部付近で剥離する。剥離したせん断層は幾つもの孤立した渦に巻き上がっている。これらの孤立した渦は次々に合体し、モデル背後で剥離バブルを形成する。ここから大規模渦(横渦)が放出されて流下している。以上のように、2次元尾根モデル周辺は逆流を含む複雑乱流状態を呈している。

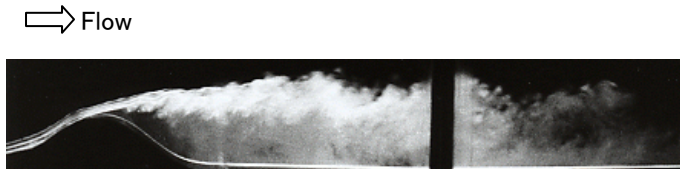


図-5 2次元尾根モデルを過ぎる流れの可視化、スモークワイヤー法、風速1.5m/s

I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブの二種類のセンサープローブを用い、2次元尾根モデルの頂部および下流部の計9点で主流方向(x)の平均速度プロファイル($U=\langle u \rangle$)と標準偏差($\sigma_u=\langle u'^2 \rangle^{1/2}$)を評価し、これらの結果を比較した。但し、I型熱線プローブの場合には、プローブの性質上、スカラー風速値しか捉えられないが、これを主流方向速度成分として取り扱った。その結果を図-6および図-7に示す。グラフの横軸は各地点における上空風速 U_{ref} で、縦軸はモデルの高さhで正規化した。なお、縦軸の z^* はモデル表面からの高さを示す。図中にはリアムコンパクトによる数値シミュレーションで得られた時間平均流れ場(流線図)と気流計測を実施した場所を示す。

図-6に示す平均速度プロファイルに注目する。モデル頂部のc点では、流れの剥離が生じていないため、I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブの結果はほぼ一致している。モデルのすぐ背後のd点では、逆流域がそれほど大きくないためにI型熱線プローブとスプリットフィルムプローブの結果の差異は比較的小さい。ところが、モデル下流のe点~k点の $z^*/h < 2$ では両者の違いは顕著である。スプリットフィルムプローブでは、モデル背後に形成される逆流域(負値)を正確に捉えている。これに対し、I型熱線プローブでは、モデル背後の渦領域に伴う速度の負値は再現されていない。その結果として、 $z^*/h < 2$ ではI型熱線プローブの結果はスプリットフィルムプローブの結果よりかなり過大評価となっている。 $z^*/h \geq 2$ では、両者の結果はほぼ一致している。これらの結果から、逆流域での二種類のセンサープローブの傾向と、同時に2次元尾根モデルを過ぎる流れ場の特徴が明らかになった。流れ場は $z^*/h=2$ を境にしてその挙動が大きく異なっている。すなわち、 $z^*/h < 2$ では、モデルを過ぎる剥離流の影響を強く受ける領域である。こ

れに対して、 $z^*/h \geq 2$ では逆流のない順流が支配的な領域である。なお、スプリットフィルムプローブを用いた風洞実験結果と、リアムコンパクトによる数値シミュレーションの結果はすべての地点、すべての高さレベルでほぼ一致する結果を得ている⁶⁾。

図-7に示す標準偏差の鉛直プロファイルに注目する。図-6に示した平均速度プロファイルでは、I型熱線プローブとスプリットフィルムプローブの結果は、逆流域を含む領域では大きく異なっていた。しかし、標準偏差に関してはすべての地点、すべての高さレベルで両者の結果は同程度の値を示した。標準偏差は平均値からのずれ(変動成分)の振幅を示す量であることから、これらの結果は容易に想像される。

以上の結果から、逆流を含む複雑流場にI型熱線プローブを挿入して気流計測を行った場合の傾向が明らかになった。

4. 鹿児島県野間ウインドパークを対象にした場合

4.1 鹿児島県野間ウインドパークの概要など

図-8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

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
ロータ径	29m	30m
タワー高さ	30m (第4:45m)	30m (第6:45m)



図-8 野間岬と周辺の地勢

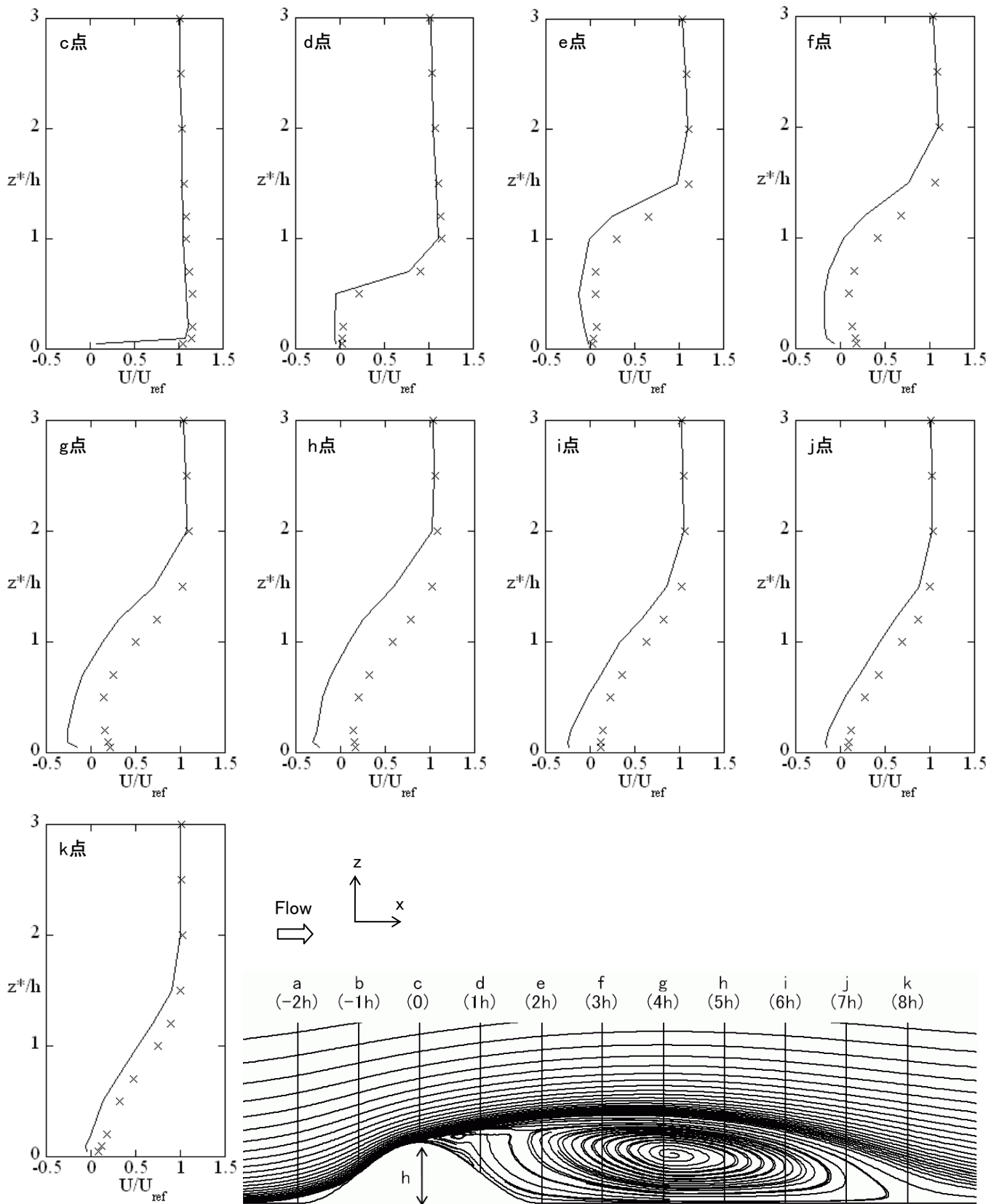


図-6 平均速度プロファイルの比較, 風洞実験結果,
 実線: スプリットフィルムプローブの結果, シンボル: I型熱線プローブの結果,
 図中の流れ場は数値シミュレーション(リアムコンパクト)による時間平均場

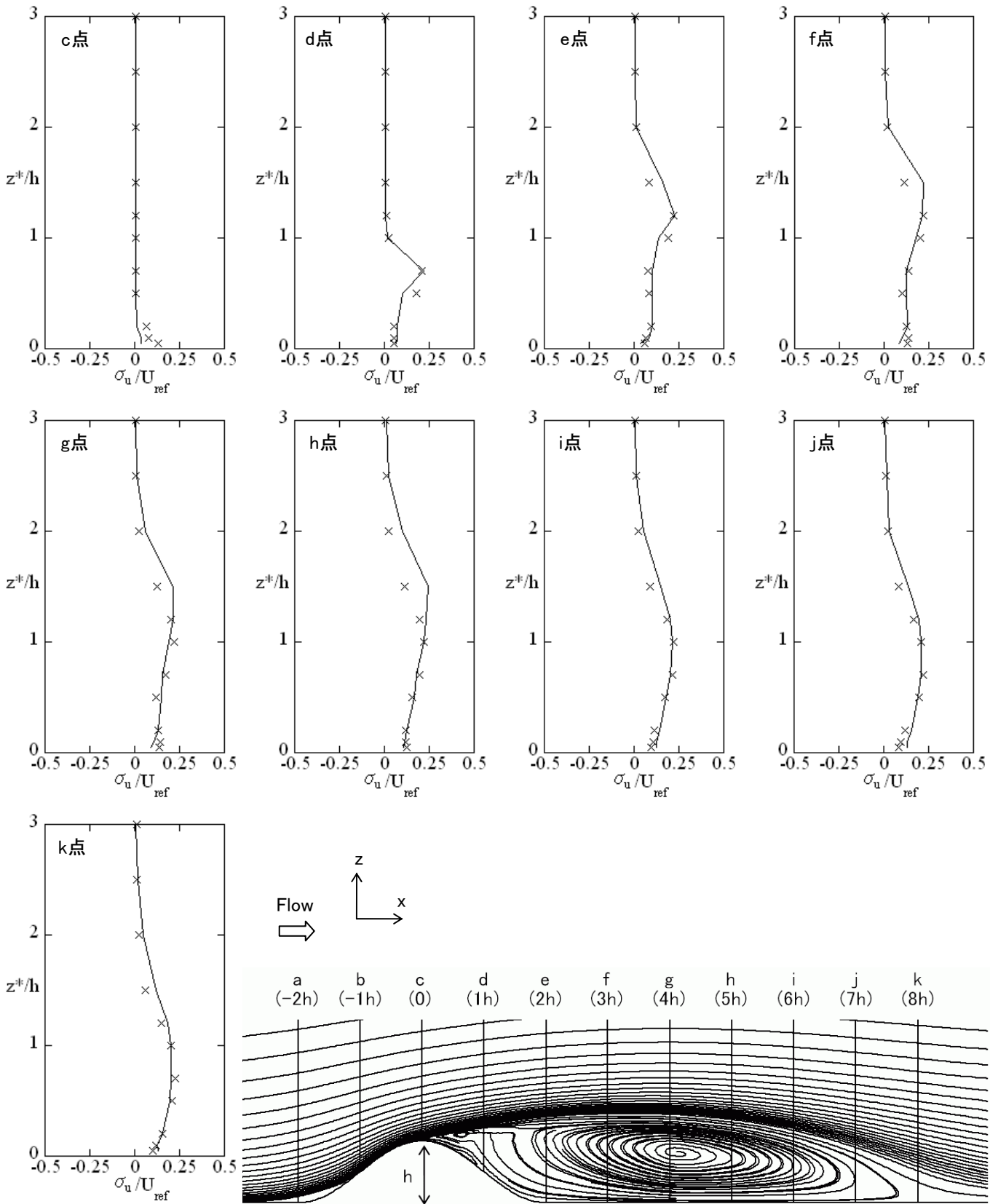


図-7 標準偏差の鉛直プロファイルの比較, 風洞実験結果,
 実線: スプリットフィルムプローブの結果, シンボル: I 型熱線プローブの結果,
 図中の流れ場は数値シミュレーション(リアムコンパクト)による時間平均場

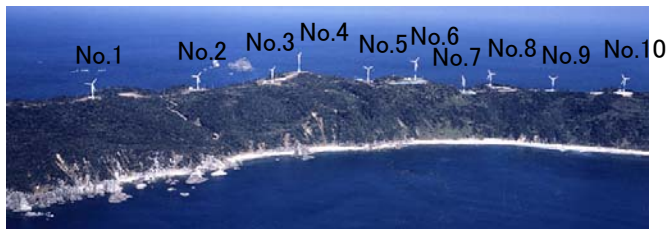
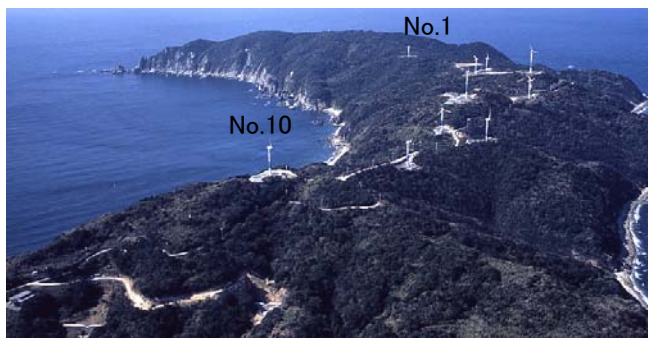


図-9 野間ウインドパークの写真

表-2 風車ハブ高さ(タワー高さ)と設置点標高

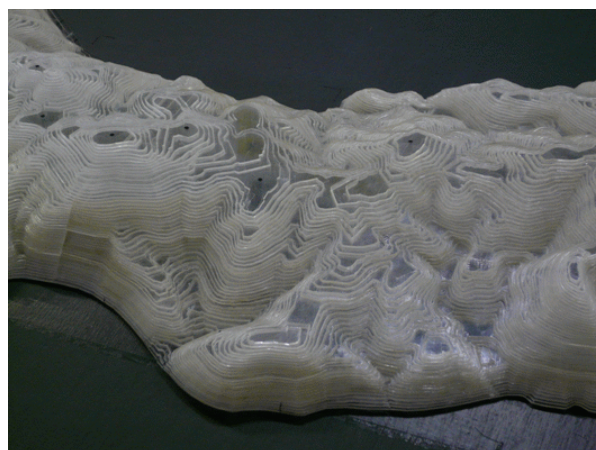
	ハブ高さ(タワー高さ)	設置点標高
1号基	30m	100m
2号基		92m
3号基		109m
4号基	45m	122m
5号基	30m	102m
6号基	45m	117m
7号基	30m	88m
8号基		95m
9号基		92m
10号基		109m

峻な崖状地形が広がる典型的な複雑地形である(図-9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⁹⁾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。

4.2 縮尺模型

本研究では、風車ハブ高さ位置の気流に対する地形表面が有する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厚の亚克力板をレーザーで切り出し、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、図-9の写真で示すように、地形表面を一様に覆う粗度(樹木)を模擬した状況であると期待できる。この縮尺模型は風

洞実験で一般的に利用されるものである。もう一つは、ポリカーボネートを材料とした縮尺模型の表面に凹凸が無い滑らかな形状を有するものである。本研究では、便宜上、前者の模型を“凹凸あり縮尺模型”と呼び、後者を“凹凸なし縮尺模型”と呼ぶこととする。両者の縮尺模型を拡大し、地形表面の形状の違いを比較した様子を図-10に示す。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ピング(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(3相20A、可動



(a)凹凸あり縮尺模型,
1mm厚の亚克力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-10 縮尺模型の比較, 拡大図

時16A)である。

本研究で作成した二種類の模型の縮尺は、約1/2800である。ゆえに、両者の模型ともに、表-2に示す風車のハブ高さ30mおよび45mは、風洞実験では約10mm、15mmの高さとなる。本研究では、地形模型に対して22.5度おきに16風向の流入気流を設定し、10基すべての風車ハブ高さ位置での平均風速を評価した。そのため、ステップ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。図-11に凹凸なし縮尺模型を風洞内に設置した様子を示す。先に述べた2次元尾根モデルと同様、風に対する地形表面が有する凹凸の影響にのみに注目するため、縮尺模型は風洞床面に直接設置せず、床面から11.5cm上方の台座に設置した。よって、縮尺模型への近寄り流れは、高さ方向に速度シアのない一様な分布である。

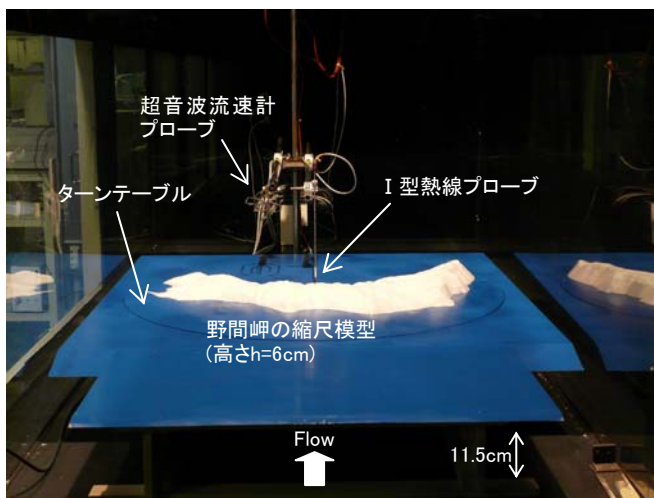


図-11 凹凸なし縮尺模型を風洞内に設置した様子

4.3 I型熱線プローブによる

風車ハブ高さ位置での気流計測

事前に実施したリアムコンパクトによる数値シミュレーションの結果から、各風車ハブ高さ位置では逆流域は観察されなかったため、気流計測は先に述べた日本カノマックス(株)のI型熱線プローブ(0251R-T5)と熱線流速計(System7000:1011CTAユニット, 1013リニアライザ)を使用した。電圧値の時系列データ取得のためのオフセット電圧、アンプ、カットオフ周波数、サンプリング周波数の設定などは2次元尾根モデルの場合と同じである。但し、風車ハブ高さ位置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。流入風速は1.5m/s(1190rpm)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⁸⁾。

4.4 結果および考察

図-12には、縮尺模型に対して16風向の流入気流を設定し、10基すべての風車ハブ高さ位置で評価した風速比の結果を示す。ここで、風車ハブ高さ位置における風速比

は次のように定義した。

$$\begin{aligned} (\text{風速比}) &= (\text{各風車ハブ高さの平均風速}) / \\ & (\text{縮尺模型を設置していない場合の} \\ & \text{ターンテーブル中心位置} z=50\text{mm} \text{での流入気流風速}) \end{aligned} \quad (4)$$

グラフの横軸は風車ナンバー、縦軸は式(4)で定義した風速比である。また、塗りつぶしのシンボルが“凹凸あり縮尺模型”の風洞実験結果、塗りつぶしなしのシンボルが“凹凸なし縮尺模型”の風洞実験結果である。図-12を吟味すると、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。これは平坦地と異なり、複雑地形上では、風向によって風車ハブ高さ位置の風速が減速し、あるいは地形効果で局所的に増速していることを示している。“凹凸あり縮尺模型”と“凹凸なし縮尺模型”の結果は、すべての風向において、定量的にも定性的にも概ね類似した傾向を示しているのが見て取れる。よって、1/2800程度の縮尺模型を使用した今回の風洞実験では、風車のハブ高さ位置の気流に対しては、地形表面が有する人為的凹凸の影響は顕著に現れないことが示された。但し、条件によっては“凹凸あり縮尺模型”と“凹凸なし縮尺模型”の結果に無視できない誤差も一部確認できる。この原因は、プローブの計測位置の僅かなずれなどの測定誤差ではないかと考えられる。これは、今後さらに検討を行いたい。

5. おわりに

本研究では、急峻な傾斜角度を有する縮尺模型を用いた風洞実験において二つの疑問を調査するために風洞実験を実施した。

一つは、モデル背後に形成される逆流領域にI型熱線プローブが挿入された場合に、スプリットフィルムプローブの結果と比較してどの程度の差異が生じるのかに注目した。その結果、I型熱線プローブを用いた場合、平均速度プロファイルは、モデル背後の渦領域に伴う速度の負値は再現されない。結果として、逆流領域ではI型熱線プローブの結果はスプリットフィルムプローブの結果よりかなり過大評価となる。一方、標準偏差の鉛直プロファイルに関しては、すべての地点、すべての高さレベルでI型熱線プローブの結果とスプリットフィルムプローブの結果は同程度の値を示した。加えて、2次元尾根モデルを過ぎる流れ場の特徴も明らかになった。2次元尾根モデルの周辺流は、 $z^*/h=2$ を境にしてその挙動が大きく異なる。すなわち、 $z^*/h < 2$ の領域は、モデルを過ぎる剥離流の影響を強く受ける。これに対して、 $z^*/h \geq 2$ の領域では逆流のない順流が支配的である。

二つ目は、複雑地形を対象にした風洞実験において、縮尺模型の表面が有する人為的凹凸が風車ハブ高さ付近

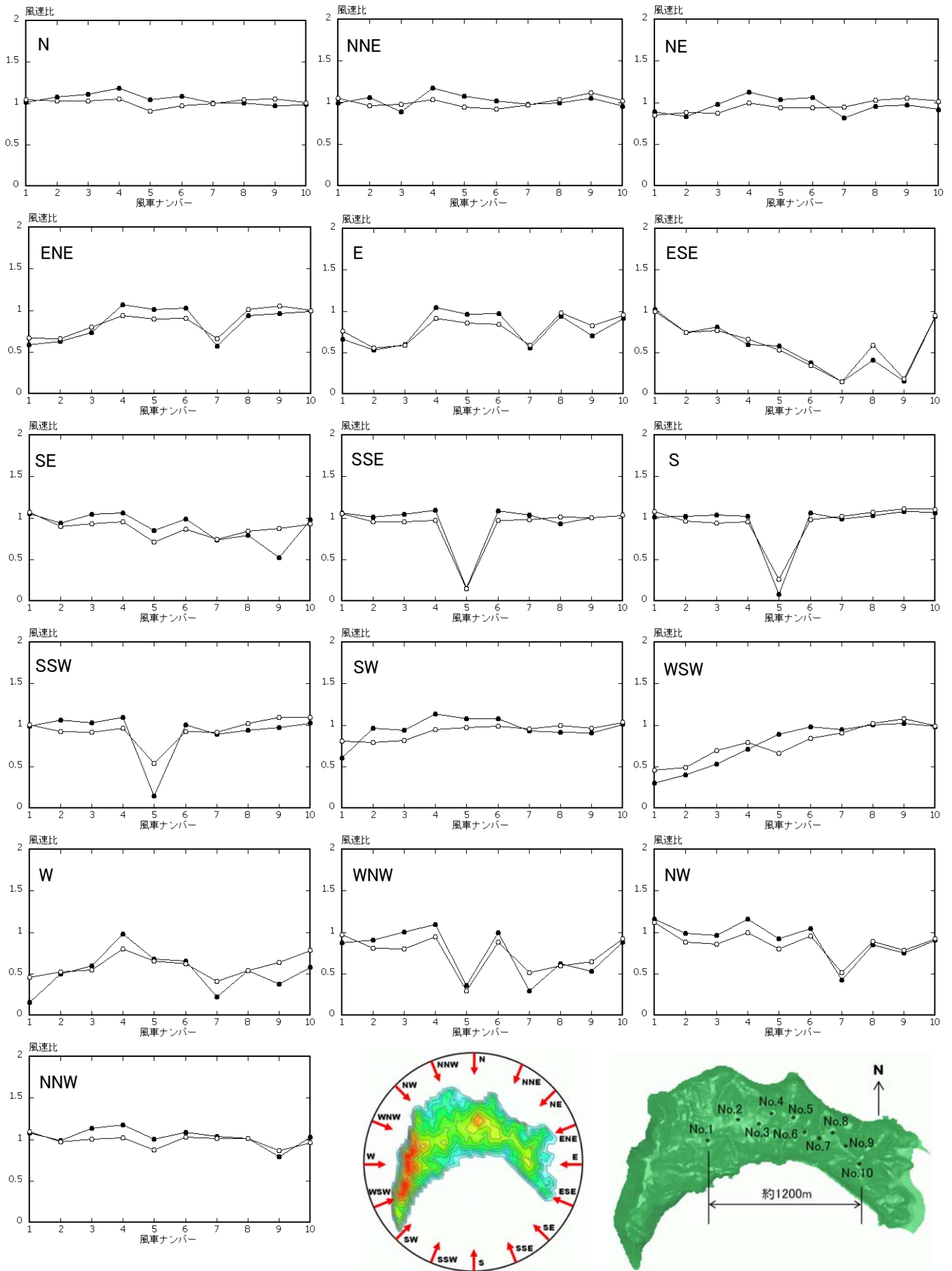


図-12 風車ハブ高さにおける風速比の比較, I型熱線プローブを用いた風洞実験の結果, 塗りつぶしのシンボル: “凹凸あり縮尺模型”の風洞実験結果, 塗りつぶしなしのシンボル: “凹凸なし縮尺模型”の風洞実験結果

に与える影響に着目した。この目的に対し、定格300kWの風車が10基設置されている鹿児島県野間ウィンドパークを対象に風洞実験を行った。縮尺模型は、1mm厚の亚克力板をレーザーで切り出し、それらを階段状に積み上げて作成したものと、ポリカーボネートを材料とした模型表面に凹凸が無いものを作成した。二種類の模型縮尺は、ほぼ同じ約1/2800のスケールとした。22.5度おきに16風向の流入気流を設定し、10基すべての風車ハブ高さ位置で平均風速を評価した。その結果、同じ風向においても、風に対する地形の影響に起因して平均風速が大きく変化することが示された。また、本研究で使用した二種類の縮尺模型の場合、風車ハブ高さ位置での風速比はすべての風向で定量的、定性的にはほぼ類似した傾向を示した。以上から、1/2800程度の縮尺模型を使用した今回の風洞実験では、風車のハブ高さ位置の気流に対して、地形表面が有する人為的凹凸の影響は顕著に現れないという結果を得た。

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などの資料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:CFDを用いた複雑地形上の実風速推定法の提案, 応用力学論文集, Vol.10, pp.733-740, 2007.
- 5) 内田孝紀, 杉谷賢一郎, 大屋裕二:一様流中の2次元崖状地形まわりの気流性状に関する実験的研究, 日本風工学論文集, Vol.28, pp.233-244, 2003.
- 6) 内田孝紀, 杉谷賢一郎, 大屋裕二:一様流中に置かれた急峻な単純地形まわりの気流性状の評価—2次元尾根モデルの場合—, 日本風工学会論文集, Vol.29, pp.35-43, 2004.
- 7) 内田孝紀, 杉谷賢一郎, 大屋裕二:一様流中に置かれた急峻な単純地形まわりの気流性状の評価—3次元孤立峰モデルの場合—, 日本風工学会論文集, Vol.31, pp.63-74, 2006.
- 8) 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.
- 9) 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.
(2008年4月14日 受付)