

スプリットフィルムプローブを用いた気流計測システムの評価

杉谷, 賢一郎
九州大学応用力学研究所技術室

<https://hdl.handle.net/2324/14022>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 9, pp.100-108, 2008-03. Research
Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン :
権利関係 :

スプリットフィルムプローブを用いた気流計測システムの評価

九州大学応用力学研究所技術室 杉谷賢一郎

1. はじめに

応用力学研究所大気流体工学分野では平成12年より風力発電の高出力化を目的としたプロジェクト研究が行われている。このプロジェクトでは低風速でも発電可能で従来よりも大幅に高出力となる新しいタイプの風力発電システムの研究開発が進行しており、ここで開発された風車は、「つば」が付いたディフューザを有し、その効果として周囲の気流を集中、加速させることから「風レンズ風車」と称される(図1)。



図1 中国に設置された風レンズ風車

一方で、風力発電施設の適地選定に関する研究が風洞実験、数値シミュレーションによって行われ、著者らはこの方面の研究に携わっている。風力発電における風力タービンの発電出力は風速の三乗に比例する。そのため、発電施設は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。特に日本では、図2に示すように流れの衝突、剥離、再付着、逆流などの風に対する地形効果を考慮しなくてはならない。さらに、今後の風力発電施設は山間部などのより厳しい場所に設置せざるを得なく、結果として、風力発電施設の事業評価はより厳密に、かつより高精度に行う必要がある。こうしたニーズに対応するため、本研究では複雑地形上の風況特性の把握に特化した高精度気流計測システムの構築を目指した。

従来から、気流計測においては、速度変化に対する応答が良好であることから、熱線流速計が用いられる。しかし、その速度センサはワイヤー式のプローブであり、この方式では流れの方向が判別できず、逆流を含んだ流れ場の計測には不相当である。本研究で提案する計測システムは、速度センサにスプリットフィルムプローブを用いることにより、流れの方向と大きさを同時に計測可能としたもので、地形周辺の流れのような、流れの方向が複雑に変化する流れ場の計測に十分対応できる。

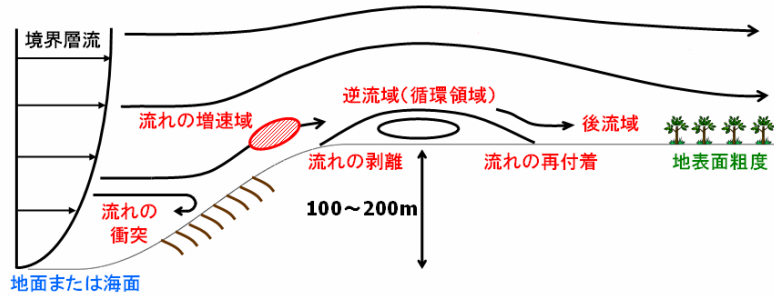


図2 地形を超える風況パターン

著者らは、このシステムを構築し、その精度検証のために単純地形を過ぎる流れ場を対象とした風洞実験を行った。流れの可視化や、従来からの方式であるワイヤープローブと構築したシステムを用いた気流の速度計測を行い、同時に風洞実験と同一条件での数値シミュレーションを実施した。本稿では、これらの結果を比較して、提案した計測システムの精度を評価した。

2. 風洞実験

本実験は応用力学研究所の温度成層風洞を用いて行った。但し、気流の温度制御は行わず、大気の安定度は中立状態である。風洞は開放型の吸い込み式で長さ 13.5m×幅 1.5m×高さ 1.2m の測定部を有する。風速範囲は 0.5~2.0m/s である。

2-1. 実験用モデル

実験では単純地形として2次元尾根モデルを用いた。モデル断面は

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

で示されるコサイン形状とし、モデル高さ h は 10cm、スパン方向の長さ b は 91cm である。モデルは厚さ 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製作した。スパン方向の2次元的な流れ場を再現するために、モデル両端に端板(高さ 60cm、流れ方向の長さ 160cm)を設置した。モデルは風洞床面に発達する地面境界層を排除し、近寄り流れを一様流とするため高さ 11.5cm の台座を置き、この上に設置した。台座先端には僅かな傾斜を付けたアルミ板を設置し、前縁からの剥離を抑制した(図3)。

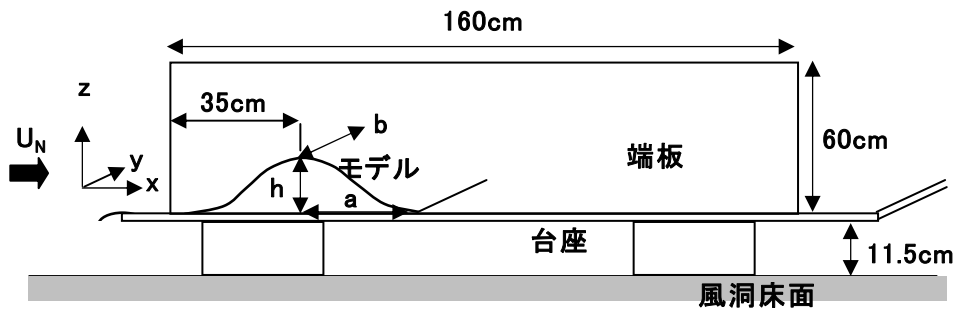


図3 モデルの設置状況

2-2. 流れの可視化

モデル周辺の流れの観察のために、スモークワイヤー法による流れの可視化を行った。図4に示すように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し、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。

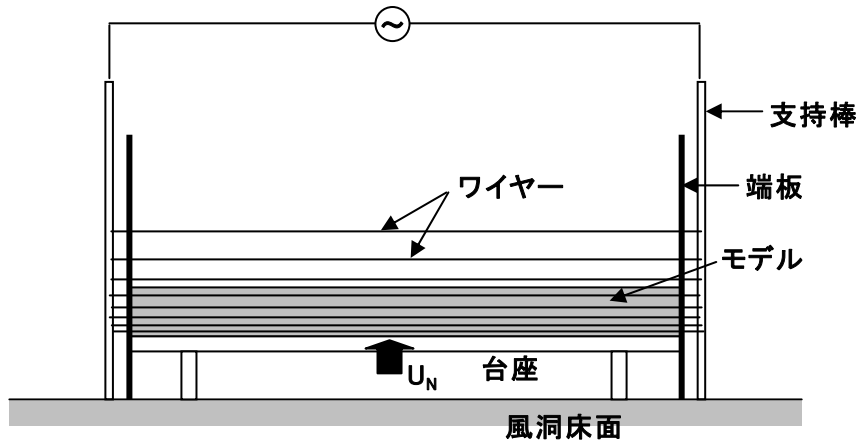


図4 可視化装置

2-3. ワイヤー式プローブによる流れの計測

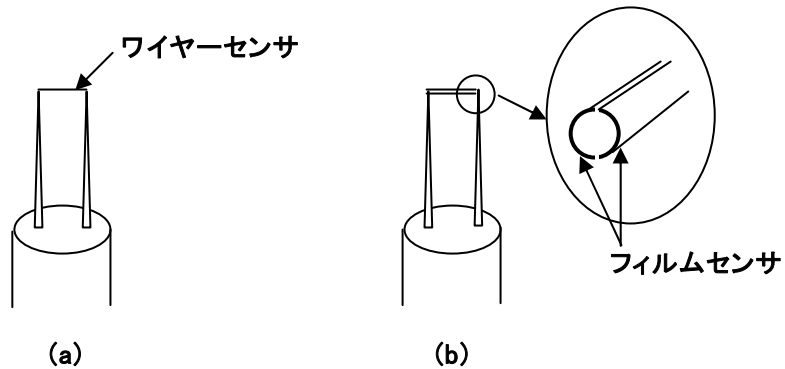


図5 流速計プローブ (a) ワイヤー式Iプローブ, (b) SFP

ワイヤー式Iプローブを図5(a)に示す。プローブ先端のセンサ部には $5\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーが装着され、計測時には 250°C 程度に過熱される。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。そのため、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。

本計測では、プローブはカノマックス MODEL 0251R、熱線流速計はカノマックス MODEL 1011を用いた。流速計出力はリニアライザー(カノマックス MODEL 1013)、フィルタを介してAD変換してデータ収録用パソコンに取り込んだ。

流速計の出力 E はリニアライザーで直線化し、また、風速 $U_N=0$ の時の出力を0とするため、 U_N と E の関係は

$$E = aU_N \quad (1)$$

a : 定数

となる。収録データの解析においては、計測した電圧値 E から(1)を逆算して風速 U_N を求めた。

2-4. スプリットフィルムプローブ(以下、SFP)システムによる流れの計測

SFPを図5(b)に、本研究において構築したSFPの計測システムを図6に示す。SFPの先端には一対のフィルムセンサ(1 μ mの白金膜)が対称に装着されている。本システムにおいては、このSFPを2チャンネルの流速計、および二乗器と組み合わせ、その出力はオフセット、アンプ、フィルタ処理を行い、A/D変換してデータ収録用パソコンに取り込む。SFPはカノマックス MODEL 1288、流速計はカノマックス MODEL 1010 を使用している。

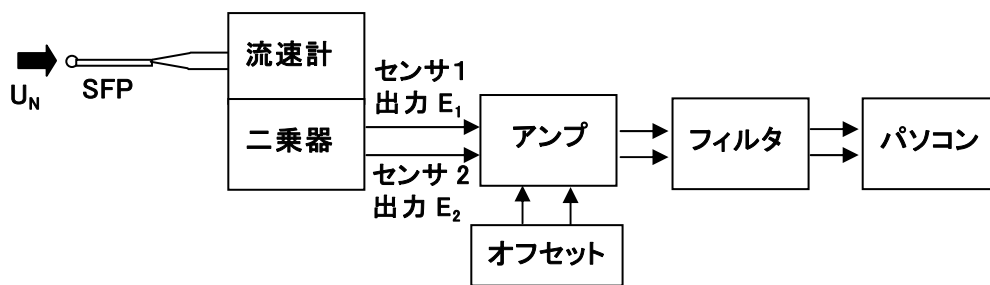


図6 SFP 計測システム

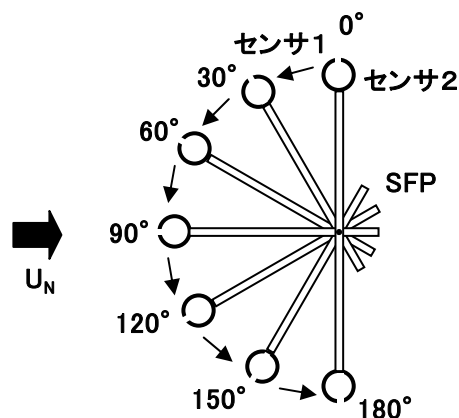


図7 SFP の校正

SFP の校正は図7のように SFP を取り付けたサポートを回転させて風向角を変え、それぞれの風向で設定風速を種々変化させる方式とした。図8～10は、その校正データである。

図8にセンサ1, 2の出力 E_1 、 E_2 の和 E_1+E_2 と、設定風速の関係を示す。 E_1+E_2 は風向に関わらず一定で、スカラー風速 U_N に対応している。 E_1+E_2 と U_N の関係は

$$E_1+E_2=a+bU_N^c \quad (2)$$

a, b, c : 定数

で示される。二乗器では風速0の時の出力を0に設定することができ、(2)式は

$$E_1+E_2=aU_N^b \quad (3)$$

となる。ここでの定数 a, b の算出にはstattソフトジャパン(株)の統計解析ソフト STATISTICA を用いている。

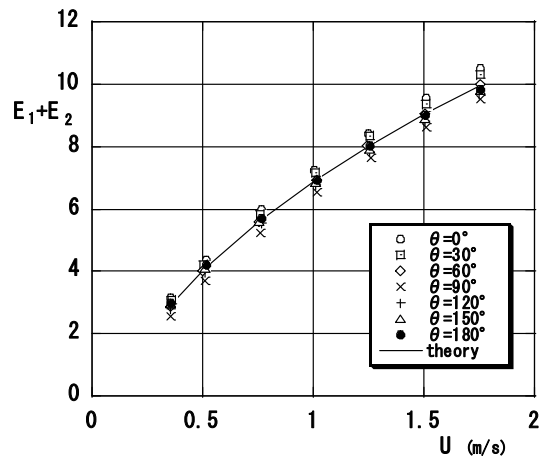


図8 校正データ(E_1+E_2)

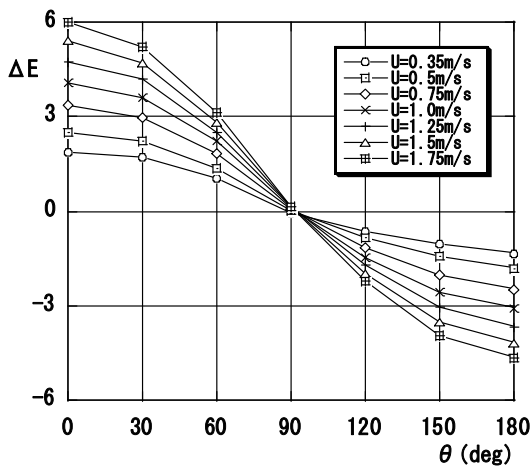


図9 校正データ(ΔE)

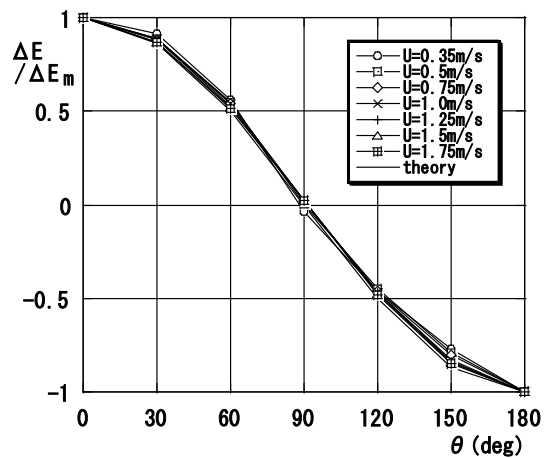


図10 図9の正規化

また、図9で示すように、設定風速 U_N におけるセンサの出力差 $\Delta E (=E_1-E_2)$ は風向角 θ によって変化するが、それぞれの場合の出力差の最大値 ΔE_m で正規化すれば、 ΔE と θ の関係は

$$\theta = \cos^{-1}(\Delta E / \Delta E_m) \quad (4)$$

で近似できる(図10)。

流れ場の計測において、SFP は分割線が y 軸(スパン方向軸)と平行になるようにモデル上方から挿入し、主流方向の速度成分 u を測定する。出力電圧の和 E_1+E_2 から(3)式を用いて U_N を、出力電圧の差 E_1-E_2 から(4)式で θ を求め、

$$u = U_N \cdot \cos \theta \quad (5)$$

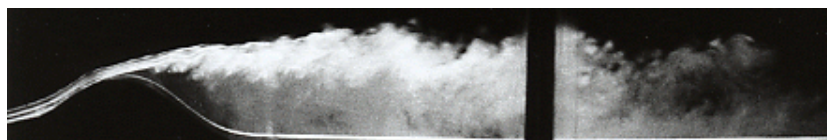
によって u を求めた。

3. 数値シミュレーション

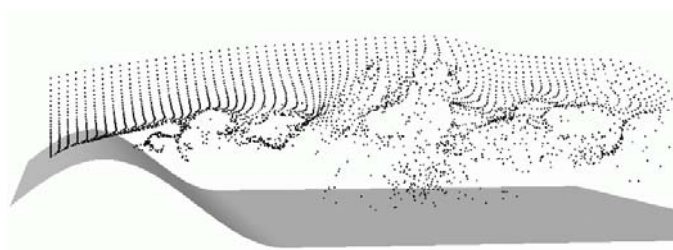
風洞実験と同一条件での数値シミュレーションは本研究所大気流体工学分野で開発された数値シミュレータ RIAM-COMPACT によって行われた。詳細は文献1)を参照して頂きたい。

4. 実験およびシミュレーションの結果

風洞実験(流れの可視化)と数値シミュレーションによる2次元尾根モデル周辺の流れのパターンの比較を図11に示す。両者の流れの挙動は非常に類似しており、流れはモデル頂部付近で剥離し、剥離したせん断層は孤立した渦に巻き上がっている。これらの渦は合体して、モデル下流に大規模な渦領域を伴った剥離バブルを形成する。このバブルの大きさ、つまり、モデル頂部付近から剥離したせん断層が下流側地面上に再付着する位置は、モデル頂部から約 $8h$ である。



風洞実験, スモークワイヤー法



RIAM-COMPACT による数値シミュレーション,
パッシブ粒子追跡法

図11 2次元尾根モデルまわりの風況パターンの比較

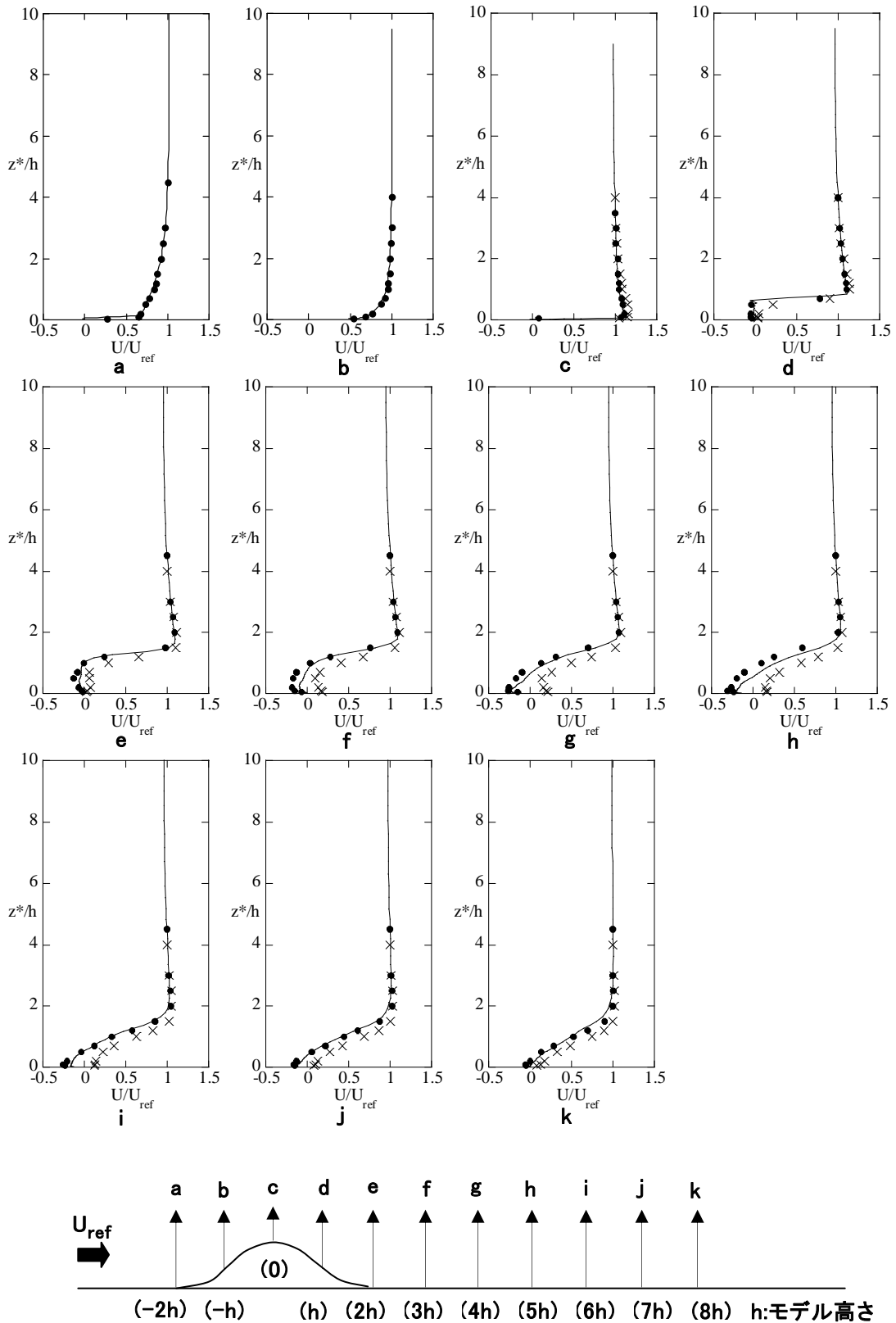


図12 平均速度分布, x:風洞実験(Iプローブ) ●:風洞実験(SFP),
実線:数値シミュレーション(RIAM-COMPACT)

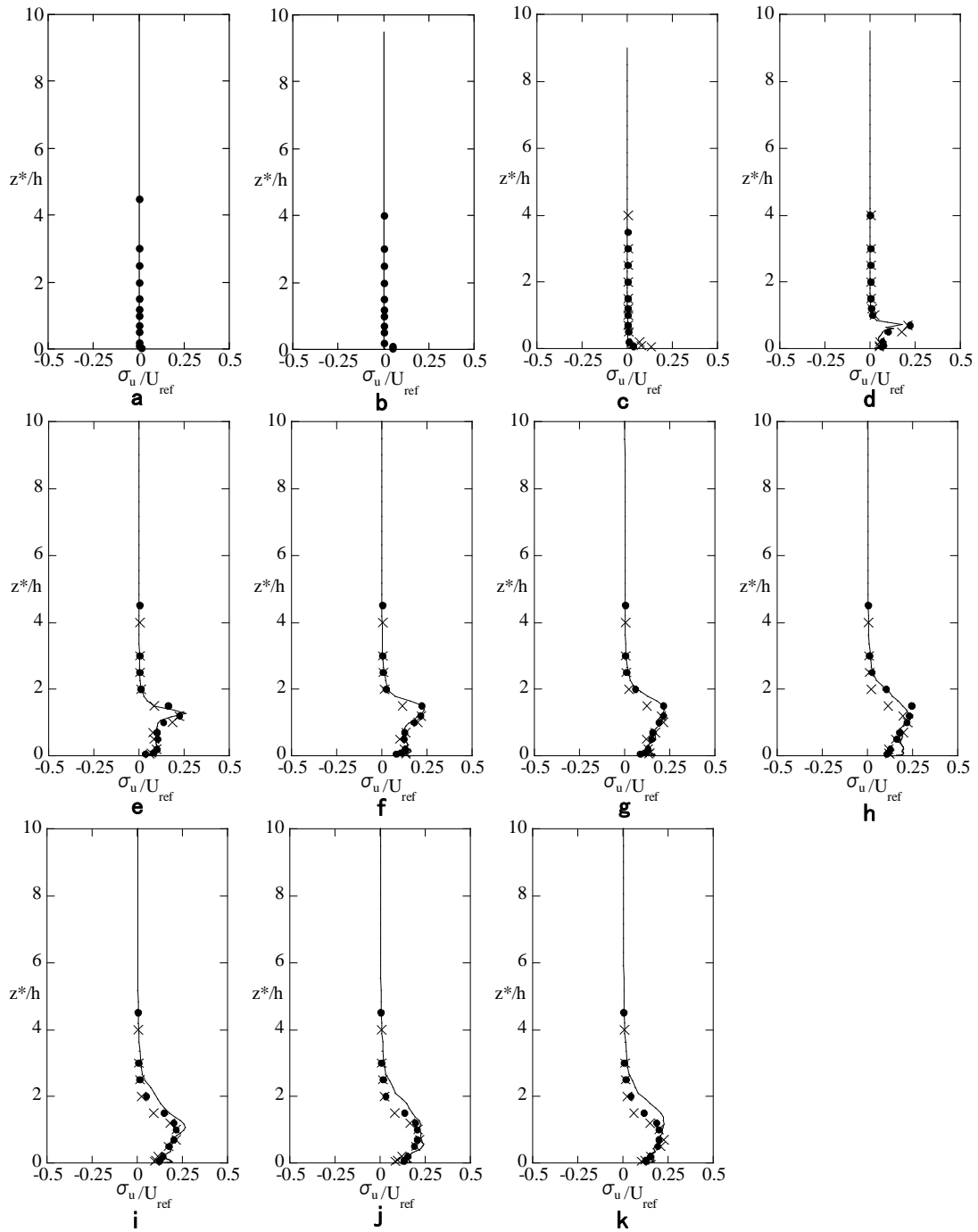


図13 乱れの標準偏差, x:風洞実験(Iプローブ) ●:風洞実験(SFP),
実線:数値シミュレーション(RIAM-COMPACT)

モデルの頂部から上流側 2h、下流側 8h の間の 11 点において、風洞実験による気流の速度計測と数値シミュレーションの結果を比較した。

図12は主流方向の平均速度分布である。図で示すように、Iプローブによる計測結果はモデル後方の渦領域において逆流が再現されていない。一方、SFPの結果では逆流が明確に示され、数

値シミュレーションの結果とも非常によく一致している。この結果における各計測点の気流性状を以下に述べる。

- 1) モデル裾部の a では、モデルの影響により平均速度は $z/h < 2$ で減速している。この減速の程度は上流側斜面の b では若干回復している。
- 2) モデル頂部の c では、モデル表面のすぐ上方で流れが局所的に増速している。
- 3) モデルの下流の d~j では、渦領域を反映して $z/h < 2$ で流れの減速と逆流が観察される。また、下流に向かうに従い $z/h < 2$ の速度は徐々に回復している。
- 4) 最下流の k では、速度分布にマイナス領域は見られず、下層でゼロの値を示している。この結果からも、剥離したせん断層の再付着位置が、モデル頂部から約 8h であることが分かる。乱れの標準偏差の鉛直分布を図13に示す。Iプローブによる計測、SFPによる計測、および数値シミュレーションの結果は、全ての計測点において良好な一致を示し、以下の知見が確認された。

- 1) a,b,c では標準偏差は全ての高さでほぼゼロであり、モデルへの近寄り流れの乱れが無いことを示している。
- 2) d~k では $z/h < 2$ において標準偏差は有意な値を示し、モデルからの乱れの存在が確認できる。特に d~j では鋭いピークが観察される。そのピーク的位置は、平均速度分布(図12)における速度が急変する場所、すなわち、速度勾配が大きく変化する領域に対応している。

5. まとめ

SFP を用いた気流計測システムを構築し、その精度検証のために2次元尾根モデルを対象に風洞実験を行った。併せて、同じ条件で数値シミュレーションを実施した。流れの可視化や気流性状の定性的、定量的な比較を行った。その結果、SFP 計測システムによる風洞実験では、モデル下流における流れの剥離や再付着など、複雑乱流場の挙動が精度よく再現された。同時に数値シミュレーションと良好な一致を示し、その計測精度が確認された。

謝 辞

本報告の投稿にあたり、快く承諾され助言を頂いた大気流体力学分野大屋裕二教授に感謝いたします。本研究における数値シミュレーションは同分野内田孝紀助教によって行われた。記して感謝の意を表します。

本研究は平成19年度科学研究補助金(奨励研究)を使用して行った。

参考文献

- 1) 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, 日本風工学会論文集, Vol.29No.3(2004)35-43.
- 2) 杉谷賢一郎: 逆流を伴う流れの計測, 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, Vol. 6 (2005)50-57.