



研究報告



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

Evaluation on Wind Characteristics around a Steep Simple Terrain in a Uniform Flow

-Case of a Two-Dimensional Ridge Model-

内田 孝紀^{*1} 杉谷 賢一郎^{*2} 大屋 裕二^{*3}

Takanori UCHIDA, Kenichirou SUGITANI, Yuji OHYA

SUMMARY

The purpose of this research is to construct a database of a non-stratified airflow past a steep simple terrain under an imposition of a uniform flow, and, in addition, is to do the accuracy inspection of the numerical model under development at present. This numerical model is referred to as the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain), and is for the purpose of the prediction of airflow over complex terrain with several m to several km.

This paper describes the experimental and numerical study of a non-stratified airflow past a two-dimensional ridge in a uniform flow as the first phase. The Reynolds number, based on the uniform flow and the height of the ridge, is about 10^4 . Airflows around the ridge include the unsteady vortex shedding. Attention is focused on airflow characteristics in a wake region. For this purpose, the velocity components in the streamwise direction were measured with a SFP (Split-Film Probe) in the wind tunnel experiment. In addition, the flow visualization was performed by using the smoke-wire technique. Through comparison of the experimental and numerical results, they showed a good agreement. The accuracy of both of the wind tunnel experiment by the SFP and also numerical simulation by the RIAM-COMPACT were confirmed as the result.

1. はじめに

現在、急峻な地形起伏に起因して生じる流れの衝突、剥離、再付着、逆流など、風に対する地形効果を高精度に予測するための数値モデルの開発が各方面で精力的に行われている。例えば文献^{1, 2)}がある。これらの研究では、乱流モデルとしてRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)が採用されている。同時に、数値モデルの予測精度を検証するための風洞実験も実施されている^{1, 2)}。ここでは、流入気流の

乱れの影響を考慮し、地形が大気乱流境界層(自然風)に完全に埋没した状態を模擬している。また、地形表面を覆う植生の影響も計算に取り入れられている。これに対し、我々は数百m～数(十)km程度の局所域スケールに的を絞り、LES(Large-Eddy Simulation)に基づいた数値モデルRIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)を開発している³⁾。

*1 九州大学応用力学研究所 助手 工博

Research Associate, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Dr. Eng.

*2 九州大学応用力学研究所 技官

Technical Staff, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

*3 九州大学応用力学研究所 教授 工博

Professor, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Dr. Eng.

一般に、LESなどの非定常流体シミュレーションの計算コードを開発する際には、最初のステップとして流入気流プロファイルの勾配や乱れ、地形表面の粗度の影響を省略した、すなわち、単純化・理想化された状況でその予測精度(風に対する地形効果)を検証し、次のステップとして実際の自然風を対象にした計算へ進むことが望ましい。以上の理由から、計算コードの検証を目的とし、単純化・理想化された条件設定で行われた風洞実験の需要は極めて高い。しかしながら、そのような実験データはこれまでにほとんど報告されていない⁴⁾。

そこで本研究では、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流れ場を対象に風洞実験を行う。この風洞実験の目的は、計算コードの予測精度を検証するためのデータを取得することである。本報では、第一段階として主流直交方向に同じ断面形状を有する2次元尾根モデルを対象にする。また同時に、非定常風況シミュレータRIAM-COMPACTによる数値シミュレーションを風洞実験と同一条件で行ったので、その結果も併せて示す。

2. スプリットフィルムプローブ(SFP)による風洞実験

本研究の風洞実験は、九州大学応用力学研究所の温度成層風洞を用いて行った。但し、気流の安定度は中立状態とする。この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。2次元尾根モデルへの近寄り流れとして一様流入条件を課すため、以下に示す二つの工夫を施した。一つは、風洞床面上流側に高さ11.5cmの台座を置き、この上に2次元尾根モデルを設置した。これは風洞床面に発達する地面境界層の影響を受けないようにするためである。もう一つは、先端に僅かな傾斜を付けた10cmのアルミ板をモデル前縁から設置し、そこからの流れの剥離を抑制した(Fig.2も参照)。本研究で使用した2次元尾根モデルの断面は以下の式で記述されるコサイン形状である。

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

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とし、実大気スケールの約1/2000を想定している。(1)式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する。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。モデルの y 方向の長さは $L=9h(=91\text{cm})$ である。モデル高さ h と風洞高さ $H=1.2\text{m}$ とのブロック比は $H/h=12$ であり、対応する閉塞率($=h/H \times 100$)は8.3%である。なお、毛足の長さ $z_r=5\text{mm}(z_r/h=0.05)$ の人工芝をモデル表面とその下流地面上に添付し、気流性状に対する地表面粗度の影響についても検討を行った。この結果については、本報では省略する。モデルの設置に関して、 y 方向に2次元な流れ場を再現するため、モデルの両端に端板として上流側の角部をとったアクリル(可視化用)とベニヤ板を設置した。気流計測は逆流と順流が検知可能なSFP(Split-Film Probe)を用いて行った。SFPには日本カノマックス(株)のモデル1288(ストレート型)を用い、合わせて同社の熱線流速計(1010CTAユニット, 1013リニヤライザ)を使用した。SFPのセンサー部をFig.1に示す。SFPは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枚の半円筒形熱膜を形成させたものである。センサー部は直径152 μm 、有効感受部長さ2mm、分割線の幅約13 μm である。

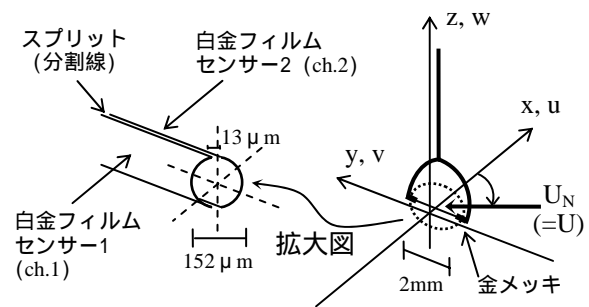


Fig.1 スプリットフィルムプローブのセンサー部
Tip of a SFP

本研究では、SFPの分割面がz軸と平行になるようにモデルの上方から挿入し、鉛直方向(z)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。SFPでは、スカラー風速 U_N と風向角度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 E_1, E_2 の差から求める。 U_N と θ が分かれば、 u は(2)式から求めることができる。なお、校正定数の算出にはstattsoftジャパン(株)の統計解析ソフトSTATISTICAを用いた。

$$u = U_N \cdot \cos \theta \quad (2)$$

電圧値の時系列データはオフセット電圧(シフト電圧)2.5V, アンプ(ゲイン)1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い, A/D変換ボードを介してサンプリング周波数500Hzでパーソナルコンピュータに取り込む。一連のデータ収集には、カーブス(株)のDSS for Windowsを用いた。これはカーブス製の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(u)に変換して平均速度と標準偏差の鉛直分布を求める。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0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。なお、気流のモニターやSFPの較正に必要な風速の基準値の測定には、超音波流速計(カイジョーDA-600, TR-90AX型プローブ)を使用した。

3. 非定常風況シミュレータRIAM-COMPACTによる数値シミュレーション

本研究では、2次元尾根モデルを過ぎる流れ場の数値シミュレーションを風洞実験と同一条件で行った。数値計算法は以下に示す通りである。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。一般曲線座標系のコロケート格子に基づき、(有限)差分法により数値解を求める。計算アルゴリズムは部分段階法(F-S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SOR法により解く。空間項の離散化は、フィルタ操作を行ったナビエ・ストークス方程式の対流項を除いてすべて2次精度中心差分とし、対流項については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補間法⁵⁾(4点差分 + 4点補間)を用いる。また、数値拡散項の重みは通常使用されるK-Kスキーム⁶⁾タイプの $\omega=3$ に対して、 $\omega=0.5$ としその影響は十分に小さ

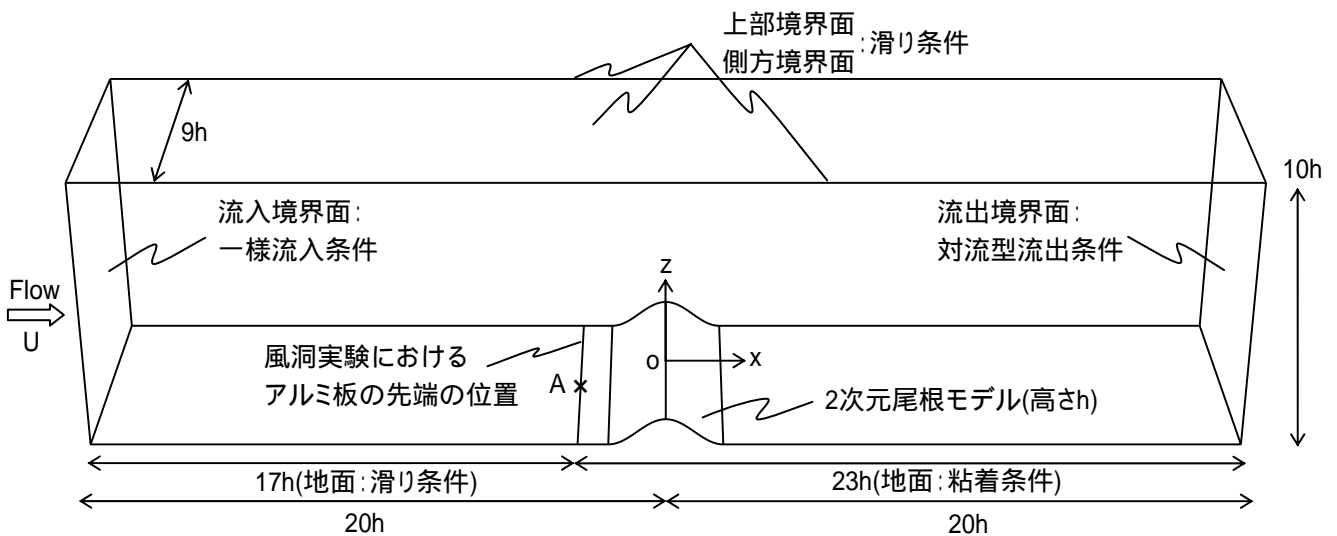
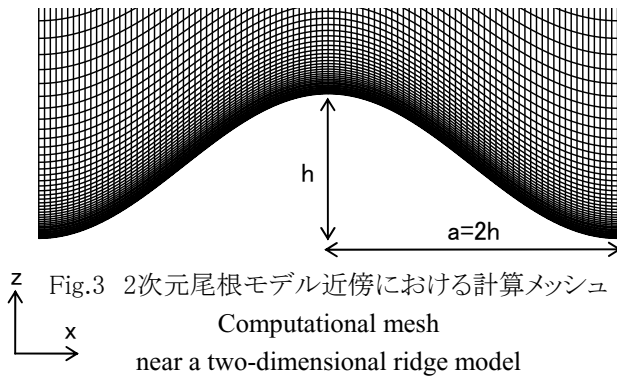


Fig.2 計算領域と座標系
Computational domain and coordinate system



くする。SGSモデルには標準的なスマゴリンスキーモデル⁷⁾を用いる。計算領域と座標系をFig.2に示す。主流方向(x), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)に $40h(\pm 20h) \times 9h \times 10h$ の空間領域を有し、風洞実験とほぼ同じである。ここで、 h はモデルの高さである。格子点数はx, y, z方向に $260 \times 91 \times 71$ 点である。2次元尾根モデル近傍における計算メッシュをFig.3に示す。x方向の格子幅は不等間隔に $(0.04 \sim 1)h$, y方向の格子幅は等間隔に $0.1h$, z方向の格子幅は不等間隔に $(0.0035 \sim 0.5)h$ である。Fig.2に示すように、流入境界面は一樣流入条件、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する。地面は風洞実験と同じ条件を課すため、流入境界面から $17h$ までは滑り条件とし、それより下流にのみ粘着条件を課した。レイノルズ数は風洞実験と同様、モデル高さ h と一樣流入風速 U に基づき、 $Re(=Uh/\nu)=10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U$ とした。

4. 結果および考察

2次元尾根モデルまわりの風況パターン(瞬間場)の比較をFig.4に示す。風洞実験では、スモークワイヤー法により流れ場の可視化を行った。この方法では以下のように流れ場を視覚化する。モデルのすぐ上流で高さレベルを変えて数本のワイヤー(0.3mmのニクロム線)を平行に配線する。これに流動パラフィンとアルミ粉を混ぜたものを塗り、ワイヤーに通電して加熱し、気化した煙で流れ場を可視化する。照明装置としてスリットを付けた1kWのプロジェクターを風洞上部に3~4台設置し、これからの光でモデルのスパン中央断面($y=0$)を可視化した。カメラによる撮影は標準レンズを

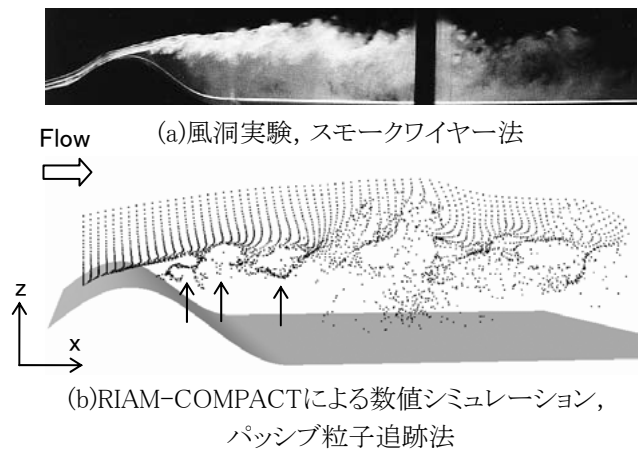


Fig.4 2次元尾根モデルまわりの風況パターンの比較, 瞬間場, 横から眺めた様子($y=0$)
Comparison of the instantaneous flow pattern around a two-dimensional ridge model, side view($y=0$)

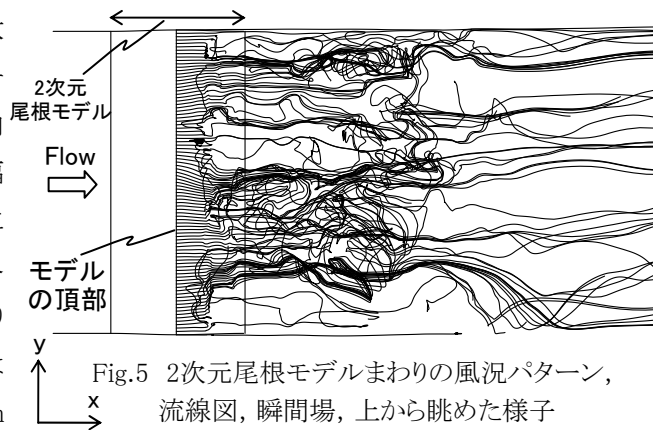


Fig.5 2次元尾根モデルまわりの風況パターン, 流線図, 瞬間場, 上から眺めた様子
Instantaneous flow pattern around a two-dimensional ridge model, streamlines, top view

用い、絞りは1.2でシャッタースピード(露出時間)は $1/125s$ とした。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。一方、数値シミュレーションでは、パッシブ粒子追跡法により流れ場の可視化を行った。パッシブ粒子の放出間隔(無次元時間)は $\Delta t=0.1$ で合計100コマ(無次元時間 $t=100 \sim 110$)のデータである。数値シミュレーションおよび風洞実験ともに定性的な流れの挙動は非常に類似している。すなわち、流れはモデルの頂部付近で剥離し、剥離したせん断層は孤立した渦に巻き上がっている。Fig.4(b)に示す数値シミュレーションの結果において、矢印を参照していただきたい。これらの孤立した渦は次々に合体して剥離バブルを形成し、ここ

から大規模渦(横渦)が放出されて流下している. 数値シミュレーションに関して, モデルの主流直交方向(y)の流れ構造(流線図)をFig.5に示す. 流線の広がり部などが明確に観察される. 以上のように, モデル背後の流れは複雑乱流場を呈している.

数値シミュレーションに関して, 時間平均および主流直交方向(y)の空間平均を行った流れ場に対して描いた流線図をFig.6に示す. 時間平均は無次元時間 $t=200\sim 300$ で行った. モデルの背後には渦領域が形成されている. その中心は, モデルの頂部から約 $4h$ 下流に位置する. 渦領域の大きさ, つまり, モデルの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, モデルの頂部から約 $8h$ である.

Fig.6に示すa~kの計11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, RIAM-COMPACTによる数値シミュレーションとSFPによる風洞実験の比較を行った. その結果をFig.7(平均速度プロファイル), Fig.8(標準偏差)に示す. ここで, 実線が数値シミュレーションであり, シンボルが風洞実験である. 記号 $\langle \rangle$ に関して, 風洞実験では時間平均を意味し, 数値シミュレーションでは時間平均および主流直交方向(y)の空間平均を意味する. 変動成分は $u'=u-\langle u \rangle$ で定義される. 数値シミュレーションでは, 2次元尾根モデルまわりの流れ場が十分に発達した無次元時間 $t=200\sim 300$ において, GS成分から上記の乱流諸量を算出した. 数値シミュレーションおよび風洞実験ともに, 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.

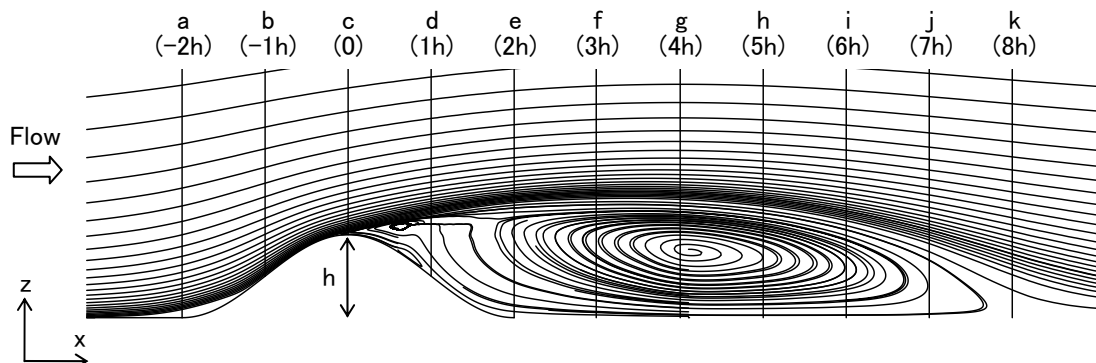


Fig.6 時間平均および主流直交方向(y)の空間平均を行った流れ場に対する流線図, $t=200\sim 300$
Streamlines for the time- and span-averaged flow field around a two-dimensional ridge model, $t=200\sim 300$

Fig.7に示す平均速度プロファイルに注目する. 全ての地点においてRIAM-COMPACTによる数値シミュレーション(実線)とSFPによる風洞実験(シンボル)の結果は図に示す程度的一致を得た. 以下では, それぞれの地点における気流性状を考察する. ここには示さなかったが, モデルが無い場合において事前にFig.2のA点で近寄り流れを評価し, 鉛直方向にほぼ同様であることを確認した. モデルの上流裾部のa($x=-2h$)では, モデルの影響により, 平均速度プロファイルは $z^*/h < 2$ で減速している. モデルの上流側斜面のb($x=-1h$)では, $z^*/h < 2$ における下層部の流れは若干回復している. モデルの頂部のc($x=0$)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. モデルの下流のd($x=1h$), e($x=2h$), f($x=3h$), g($x=4h$), h($x=5$), i($x=6h$), j($x=7h$)では, Fig.6に示す渦領域を反映して, $z^*/h < 2$ で流れの減速と逆流が明確に観察される. また, 下流に向かうに従い, $z^*/h < 2$ の流れは徐々に回復している. モデルから最も離れたk($x=8h$)では, 平均速度プロファイルに大きなマイナスの領域は見られず, 最下層でほぼ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, モデルの頂部から約 $8h$ であることが理解される.

Fig.8に示す標準偏差の鉛直プロファイルに注目する. 標準偏差の分布についても, 全ての地点においてRIAM-COMPACTによる数値シミュレーション(実線)とSFPによる風洞実験(シンボル)の結果は良好な一致を得た. モデルの上流裾部のa($x=-2h$), 上流側斜面のb($x=-1h$), 頂部のc($x=0$)では, 標準偏差は全て

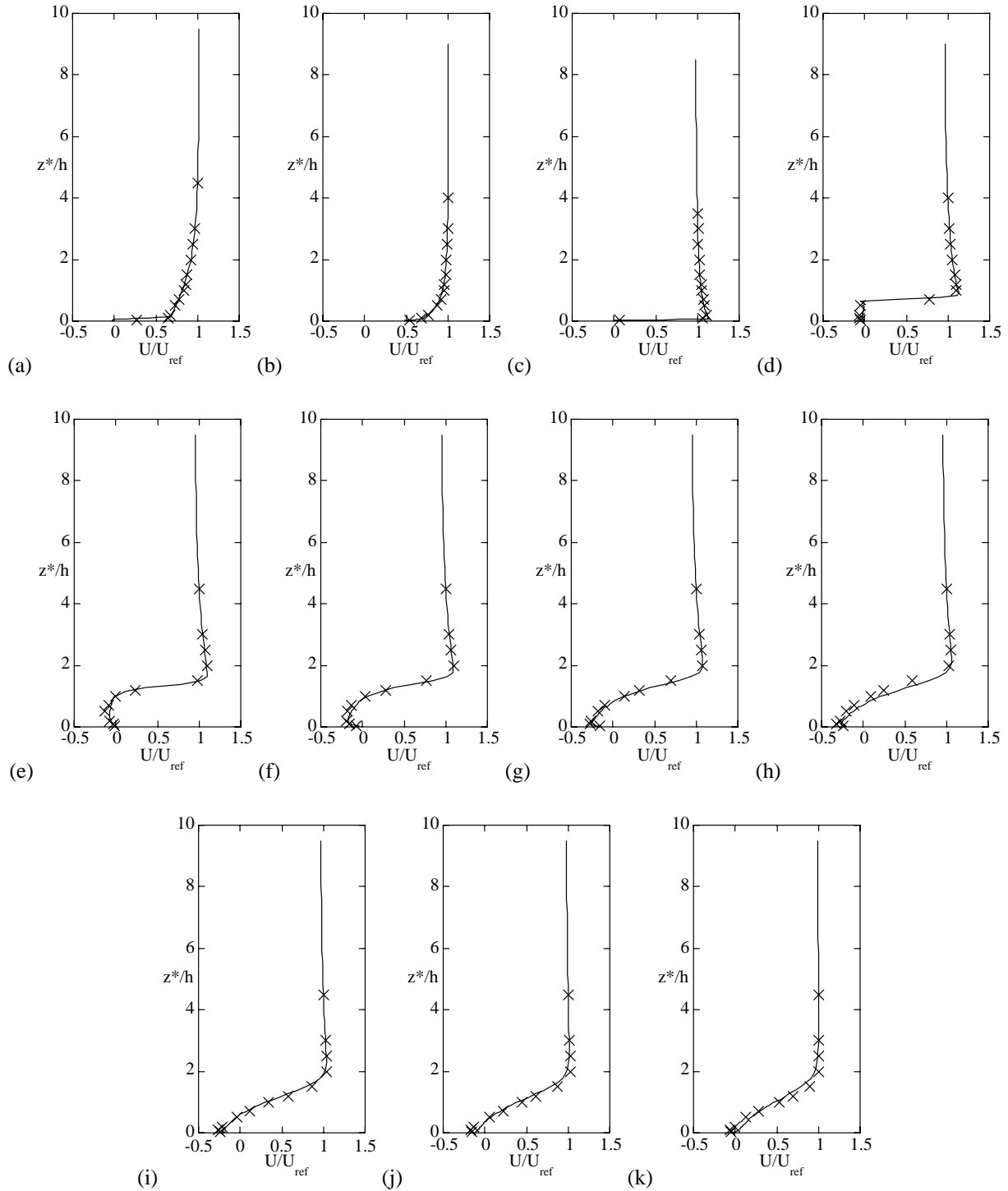


Fig.7 平均速度プロファイルの比較, 実線: 数値シミュレーション(RIAM-COMPACT), シンボル: 風洞実験(SFP)
 Comparison of the mean-velocity profiles, line : calculation by RIAM-COMPACT, symbol : experiment by SFP

の高さレベルでほぼゼロである。つまり、モデルへの近寄り流れが有する乱れの影響はほとんど無いことを示している。モデルの下流のd~kでは、 $z^*/h < 2$ において有意な値を示している。これはモデルからの剥離流に起因して生成された乱れの影響を示すものである。特にd~iでは、 $z^*/h < 2$ において鋭いピークが観

察される。これは、Fig.7に示す平均速度プロファイルと併せて吟味すると、それぞれの位置における平均速度プロファイルが急変する場所、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。これはモデルから剥離したせん断層の挙動を明確に示すものである。

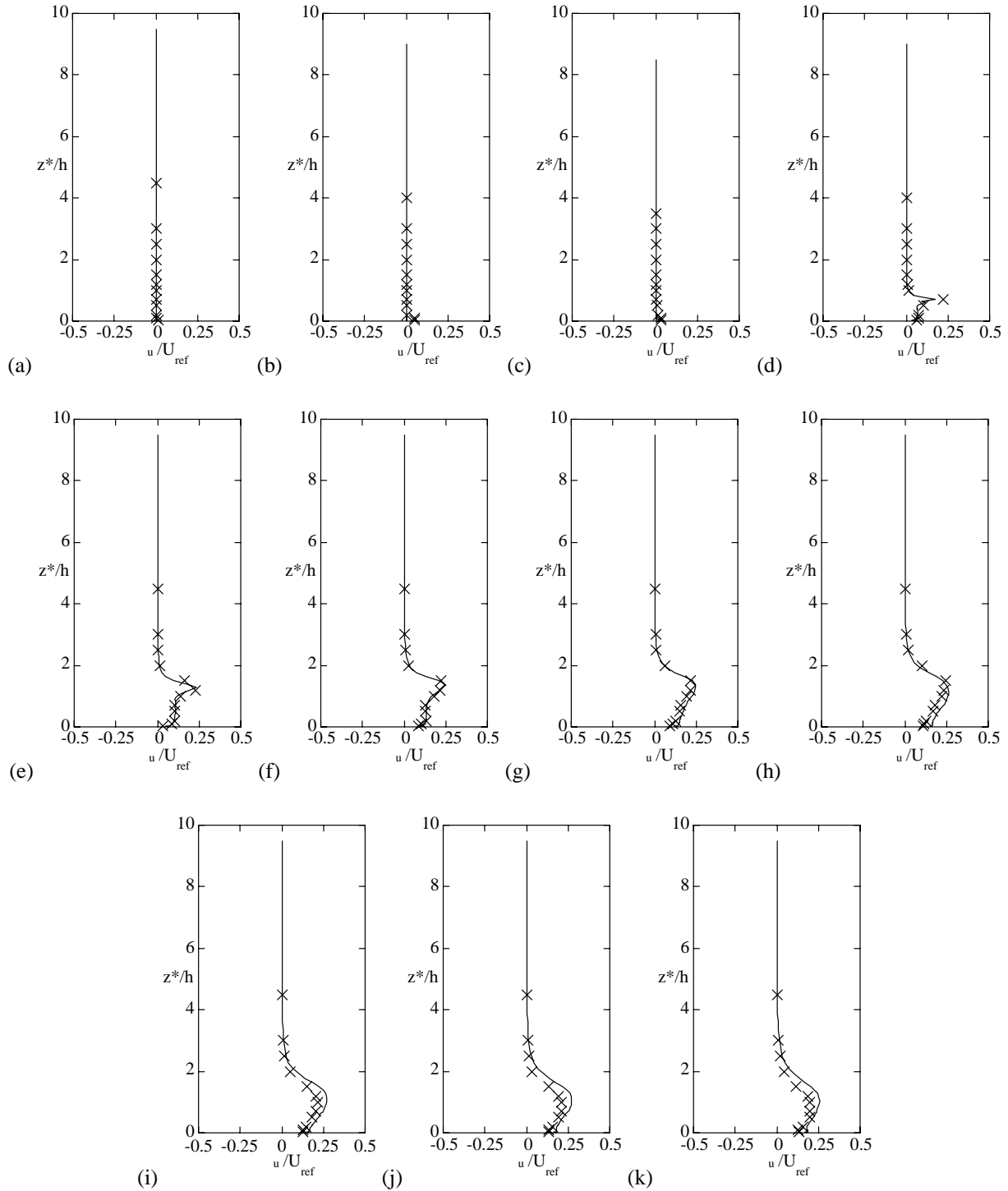


Fig.8 標準偏差の比較, 実線: 数値シミュレーション(RIAM-COMPACT), シンボル: 風洞実験(SFP)
 Comparison of the standard deviations, line : calculation by RIAM-COMPACT, symbol : experiment by SFP

5. おわりに

流入気流プロファイルの勾配や乱れ, 地形表面の粗度などの影響を省略した状況において, 単純地形が流れに与える影響を詳細に調べることが目的とし, 一様流中に置かれた二次元尾根モデルを対象に風洞実験を行った. 併せて, 同じ条件で現在開発中の非

定常風況シミュレータRIAM-COMPACTによる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比較など, 定性的および定量的な比較を試みた. その結果, SFPを用いた風洞実験では, モデルの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良く再現された. また同時に, これらの結

果はRIAM-COMPACTによる数値シミュレーションと良好な一致を示した。以上から、複雑乱流場に対するRIAM-COMPACTの予測精度が確認された。現在、一様流中に置かれた3次元孤立峰モデルを対象に風洞実験および数値シミュレーションを行っており、この結果については次報で報告する予定である。本研究における結果が、計算コード検証用のデータベースとして活用されれば幸いである(Appendixを参照)。

謝 辞

本研究では、当時、九州大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻大学院生であった宮崎康伸君に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

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, 2003, pp.375-386
- 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, 2003, pp.387-396
- 3) 内田孝紀, 大屋裕二, 風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの開発, 日本流体力学会誌“ながれ”, Vol.22, No.5, 2003, pp.417-428
- 4) 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, 日本風工学会誌, 第95号, 2003, pp.233-244
- 5) 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, 1997, pp.3247-3254
- 6) 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, 1986, pp.145-162

- 7) J. W. Deardorff: A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol.41, 1970, pp.453-480

Appendix

以下に, Fig.7(平均速度プロファイル), Fig.8(標準偏差)で用いた風洞実験の数値データを示す。計測位置はFig.6を参照していただきたい。記号の意味は以下に示す通りである。

h	2次元尾根モデルの高さ
z^*	モデル表面からの高さ
u	瞬間値(主流方向の速度成分)
u'	変動成分(= $u - \langle u \rangle$)
U	平均値(= $\langle u \rangle$)
σ_u	標準偏差(= $\langle u'^2 \rangle^{1/2}$)
$\langle \rangle$	100sの時間平均
U_{ref}	各地点における上空風速

a点, $x=-2h$			b点, $x=-1h$		
z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}	z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}
0.05	0.266	0.0171	0.05	0.544	0.0504
0.10	0.646	0.0047	0.10	0.683	0.0497
0.20	0.670	0.0052	0.20	0.766	0.0055
0.50	0.730	0.0045	0.50	0.875	0.0043
0.70	0.773	0.0038	0.70	0.923	0.0051
1.00	0.833	0.0038	1.00	0.958	0.0041
1.20	0.859	0.0037	1.20	0.958	0.0041
1.50	0.875	0.0038	1.50	0.984	0.0039
2.00	0.925	0.0035	2.00	0.981	0.0035
2.50	0.948	0.0035	2.50	0.985	0.0035
3.00	0.964	0.0038	3.00	0.997	0.0039
4.50	1.000	0.0035	4.00	1.000	0.0034

c点, $x=0$			d点, $x=1h$		
z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}	z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}
0.05	0.071	0.0354	0.05	-0.050	0.0645
0.10	1.067	0.0331	0.10	-0.063	0.0752
0.20	1.113	0.0119	0.20	-0.063	0.0726
0.50	1.089	0.0068	0.50	-0.052	0.1031
0.70	1.076	0.0049	0.70	0.780	0.2219
1.00	1.044	0.0048	1.00	1.103	0.0155
1.20	1.045	0.0049	1.20	1.098	0.0080
1.50	1.031	0.0037	1.50	1.081	0.0051
2.00	1.031	0.0037	2.00	1.053	0.0038
2.50	1.008	0.0038	2.50	1.032	0.0035
3.00	1.009	0.0033	3.00	1.020	0.0044
3.50	1.000	0.0032	4.00	1.000	0.0032

e点, x=2h			f点, x=3h			i点, x=6h			j点, x=7h		
z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}	z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}	z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}	z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}
0.05	-0.020	0.0353	0.05	-0.076	0.0835	0.05	-0.239	0.1250	0.05	-0.157	0.1350
0.10	-0.031	0.0835	0.10	-0.156	0.1046	0.10	-0.259	0.1275	0.10	-0.169	0.1346
0.20	-0.071	0.1038	0.20	-0.187	0.1331	0.20	-0.216	0.1449	0.20	-0.132	0.1550
0.50	-0.134	0.1041	0.50	-0.177	0.1242	0.50	-0.040	0.1795	0.50	0.052	0.1903
0.70	-0.090	0.1040	0.70	-0.138	0.1295	0.70	0.115	0.2052	0.70	0.216	0.2075
1.00	-0.006	0.1392	1.00	0.035	0.1807	1.00	0.335	0.2154	1.00	0.441	0.2081
1.20	0.237	0.2281	1.20	0.276	0.2165	1.20	0.575	0.2032	1.20	0.611	0.1951
1.50	0.976	0.1626	1.50	0.763	0.2214	1.50	0.855	0.1493	1.50	0.876	0.1357
2.00	1.093	0.0121	2.00	1.093	0.0260	2.00	1.042	0.0513	2.00	1.026	0.0324
2.50	1.070	0.0048	2.50	1.066	0.0080	2.50	1.037	0.0144	2.50	1.023	0.0169
3.00	1.041	0.0040	3.00	1.040	0.0044	3.00	1.021	0.0075	3.00	1.010	0.0083
4.50	1.000	0.0035	4.50	1.000	0.0035	4.50	1.000	0.0040	4.50	1.000	0.0042

g点, x=4h			h点, x=5h		
z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}	z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}
0.05	-0.154	0.0902	0.05	-0.241	0.1068
0.10	-0.269	0.1102	0.1	-0.317	0.1166
0.20	-0.260	0.1300	0.2	-0.269	0.1278
0.50	-0.176	0.1530	0.5	-0.204	0.1664
0.70	-0.097	0.1581	0.7	-0.110	0.1830
1.00	0.1354	0.1929	1.0	0.096	0.2217
1.20	0.3140	0.2174	1.2	0.251	0.2336
1.50	0.700	0.2148	1.5	0.593	0.2451
2.00	1.074	0.0603	2.0	1.026	0.1021
2.50	1.060	0.0114	2.5	1.051	0.0235
3.00	1.037	0.0060	3.0	1.035	0.0099
4.50	1.000	0.0034	4.5	1.000	0.0040

k点, x=8h		
z^*/h	U/U_{ref}	u/U_{ref}
0.05	-0.053	0.1320
0.10	-0.064	0.1298
0.20	0.002	0.1561
0.50	0.130	0.1954
0.70	0.286	0.2010
1.00	0.524	0.2011
1.20	0.694	0.1860
1.50	0.902	0.1168
2.00	0.998	0.0458
2.50	1.004	0.0189
3.00	0.999	0.0091
4.50	1.000	0.0048