

急峻な孤立地形まわりの複雑乱流場に対するLES —流入気流の乱れの影響について—

LARGE EDDY SIMULATION OF COMPLEX TURBULENT FLOW FIELD AROUND A STEEP HILL
—EFFECT OF INFLOW TURBULENCE—

内田 孝紀¹⁾ 大屋 裕二²⁾
Takanori UCHIDA¹⁾ and Yuji OHYA²⁾

ABSTRACT

This paper describes the effects of inflow turbulence on the flow around a three-dimensional isolated-hill, having a cosine-squared cross-section and a steep slope. For this purpose, two cases of large-eddy simulation (LES) are carried out: one is a numerical condition in which the hill is immersed in a fully-developed turbulent boundary layer; the other is a numerical condition in which a same mean-velocity profile, obtained from the former case, with no turbulence is imposed (i.e., non-turbulent inflow). For the former case, in order to generate instantaneous velocity fluctuations in an approaching flow to the hill, a turbulent flow field in a driver unit set upstream of the hill is calculated directly. Through comparisons between two cases, the significant change in the flow characteristics is not confirmed in both the near- and far-wake region behind the hill.

Key Words: LES, Steep hill, Complex turbulent flow field, Inflow turbulence

1. はじめに

日本国内の地勢を概観すると、平坦な地形は少なく急峻で多様な複雑地形がほとんどである。これら複雑地形を構成する最も基本的な幾何形状の一つは急峻な孤立地形であり、その周辺の風況特性を把握することは、実際の複雑地形上において風力エネルギーの有効利用、大気汚染物質の移流拡散予測、森林や農作物の風害対策などを考える上で非常に重要である。中立成層した大気について考えると、孤立地形を過ぎる乱流場の性質は山の傾斜角度によって大きく変化する。流れの剥離を伴わない緩やかな斜面を有する孤立地形の場合には、これまでに数多くの研究が報告されている。これらの研究成果は文献¹⁾などで詳しくレビューされている。一方、急峻な斜面を有する孤立地形の場合には、流れの剥離が生じるため、地形背後の乱流特性は十分に解明されていない^{2), 3)}。最近、石原らは逆流を検出できるスプリットファイバークロウを用い、乱流境界層に埋没した孤立地形周辺流れ場の乱流特性を詳細に調べている²⁾。また同時に、非線形渦粘性型 $k-\epsilon$ モデルにより数値解析を行っている³⁾。

これらの研究¹⁻³⁾は流入気流に乱れを伴う、すなわち、自然風を対象に行われており、流入気流の乱れそのものが孤立地形周辺の流れ場にどのような影響を与えるかを検討した例はない。流入気流の平均速度プロファイルは同じで、それが有する乱れの違いが地形周辺流れ場に与える影響を調べるには、任意の条件設定が可能な数値シミュレーションが有効である⁴⁻⁶⁾。そこで本研究では、流入気流の乱れの有無が急峻な斜面を有する孤立地形の周辺流れ

1), 2) 九州大学応用力学研究所 助手, 教授 (〒816-8580 春日市春日公園 6-1)

場に与える影響を調べることを目的とする。特に地形背後の後流域の気流性状に注目する。この目的に対し、流入気流条件の異なる二種類のラーゼ・エディ・シミュレーション(LES)を行う。一つは流入気流に乱れを伴う場合であり、孤立地形の上流側に設定したドライバ部で乱流境界層を直接生成し、これを流入条件として与える。もう一つは、先の計算結果から得られた平均速度プロファイルのみを流入条件として課し、乱れは伴わない場合である。両者の比較を通して、流入気流の有する乱れの有無が地形背後の後流域の気流性状に与える影響を詳細に検討する。

2. 数値計算法

図1に計算領域と座標系を示す。これは急峻な孤立地形が中立乱流境界層に埋没した場合である。孤立地形の形状は余弦の2乗で定義し、 $z(r)=h \cdot \cos^2(\pi r/2L)$ で記述する。ここで、 h は孤立地形の高さ、 r は地形中心からの距離、 $L(=2.5h)$ は底面半径である。流入変動風作成に関する最近の研究によると、流入境界面において確率統計量に基づき風速変動波形を人工的に生成する方法⁷⁻¹⁰⁾と、ドライバ部の非定常流体計算により乱流境界層を直接生成する方法¹¹⁻¹³⁾とがある。本研究では後者の方法¹¹⁻¹³⁾と同様、孤立地形の上流側にドライバ部を設定して乱流境界層を直接作成し、これを流入条件として与える。ドライバ部では一様流入条件を課し、同時に乱流促進体として長さ $1.2h \times$ 幅 $1.1h \times$ 高さ h の3次元ラフネスブロック4個を地面上に一列に設置する。ここで、流入境界面からラフネスブロック中心までの距離は $5.4h$ である。よって、乱流境界層を発達させるための助走距離は $74.6h$ と十分に長く設定し、その下流に厚い乱流境界層を発達させる。

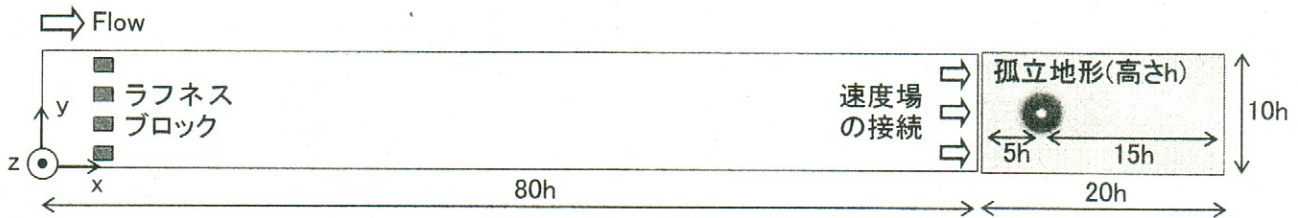


図1 計算領域と座標系, 孤立地形が中立乱流境界層に埋没した場合, x-y断面

本研究では、数百m～数(十)km程度の局所域の風況場解析に的を絞った3次元数値モデルRIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)¹⁴⁾を用いた。RIAM-COMPACT¹⁴⁾は差分法に基づいたLESコードである。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。ドライバ部は直交座標系の不等間隔スタガード格子で、孤立地形周辺は一般曲線座標系のコロケート格子で計算を行う。両者ともに支配方程式の時間積分法はオイラー1次陽解法に基づいた部分段階法である。圧力は2段階に分けたfilteredナビエ・ストークス方程式のうち、圧力勾配項を含む式から導出されるポワソン方程式をSOR法により緩和計算して求める。空間項の離散化はfilteredナビエ・ストークス方程式の対流項を除いて全て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(補間法による4次精度中心差分¹⁵⁾+4階微分数値拡散項)とする。但し、数値拡散項の重みは通常使用されるK-Kスキーム¹⁶⁾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。SGSモデルには標準スマゴリンスキーモデル¹⁷⁾を用いる。格子解像度はドライバ部と孤立地形周辺ともに主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に $201 \times 101 \times 61$ 点である。両者ともにx、y方向の格子分割は等間隔(ドライバ部のx方向は $\Delta x=0.4h$ 、孤立地形周辺は $\Delta x=0.1h$ 、y方向はともに $\Delta y=0.1h$)とし、z方向は地面付近で密になるように不等間隔($\Delta z=0.0035h \sim 0.25h$)とする。ここで、ドライバ部から孤立地形を含む計算領域へのデータ接続(速度場)を考慮して、y、z方向の格子分割は両者で同じにした。境界条件はドライバ部において、流入境界面は一様流入条件、側方境界面は周期境界条件、上部境界面は滑り条件、地面は粘着条件、流出境界面は対流型流出条件とした。孤立地形を含む計算領域では、流入境界面で同時並行計算を行うドライバ部の風速分布(流出境界面から $4h$ 前方)を1ステップ毎に与えた。側方境界面は滑り条件とし、その他の境界条件はドライバ部と同じである。両者ともに無次元時間刻みは 0.002 である。孤立地形の高さ h と流入境界面における高度 h の風速 U_h で定義されるレイノルズ数($=U_h h / \nu$)は約 $12,500$ である。

3. 計算結果と考察

3-1 ドライバ部の気流性状

図2に主流方向(x)の速度成分(\bar{u})の分布を示す。これは瞬間場であり、 $z=0.095h$ のx-y断面を示す。ここで、 h は孤立地形の高さである。ラフネスブロック背後において3次元の強い渦が形成され、それが流下し縞状のストリーク構造に成長しているのが分かる。ドライバ部の中央から下流では、計算領域全体にわたってほぼ定常的な渦構造が出現しているのが確認される。

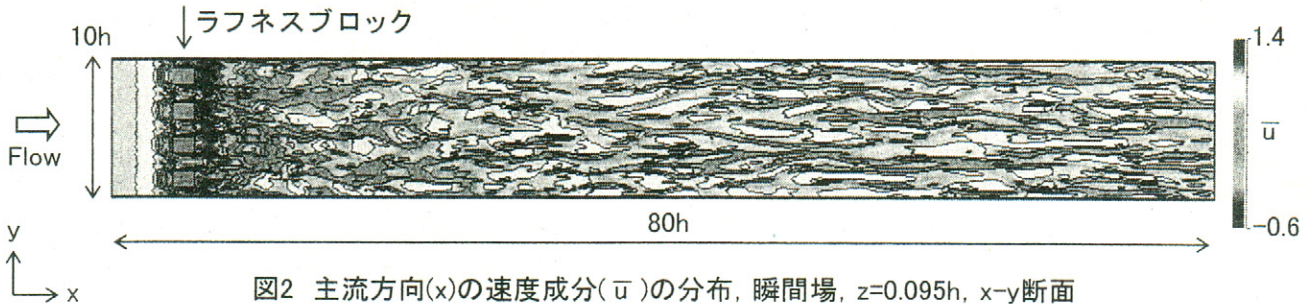


図2 主流方向(x)の速度成分(\bar{u})の分布, 瞬間場, $z=0.095h$, x-y断面

図3にy-z断面の流線図を示す。これは瞬間場であり、流出境界面から4h前方の位置、すなわち、流入境界面から76h下流の位置を示す。地面付近に大小様々な渦構造が形成されている。これらはストリーク構造や乱流バーストに対応するものである。またy, z方向ともに流れ場は十分に発達しているのが分かる。

図4に図3と同じ位置(流出境界面から4h前方, $x=76h$)で算出した平均速度プロファイル($\langle \bar{u} \rangle / U_h$)と各方向の乱れ強さ(σ_u / U_h , σ_v / U_h , σ_w / U_h)の鉛直分布を示す。縦軸は孤立地形の高さ h で、横軸は高度 h における風速 U_h で正規化している。これらはy方向の空間平均量を観察し、統計的定常状態に達したと判断した後、時間平均(無次元時間200~400)を行った。この図から、完全発達した乱流境界層が形成されているのが分かる¹⁸⁾。孤立地形の高さ h におけるx, y, z方向の乱れ強さは、それぞれ6.1%, 4.7%, 4.5%程度である。

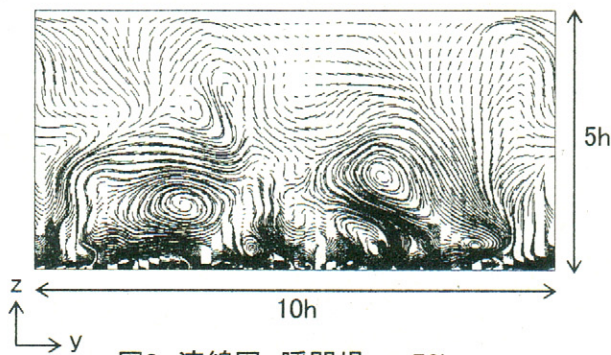
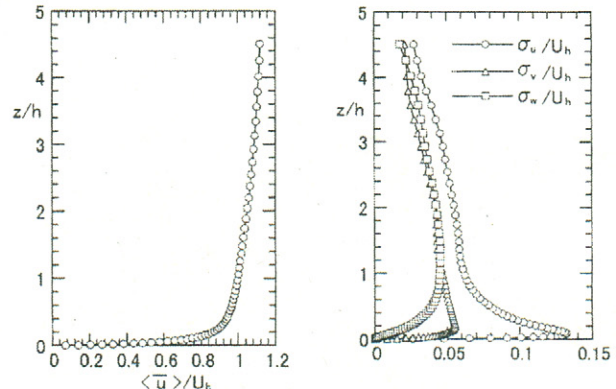


図3 流線図, 瞬間場, $x=76h$, y-z断面, rear view



(a)平均速度プロファイル (b)各方向の乱れ強さ

図4 ドライバ部で生成された流入気流特性, $x=76h$

以上述べてきたように、孤立地形の高さ h とほぼ同じスケールの3次元ラフネスブロックを地面上に配置し、その下流に75h程度の助走距離を設けた今回の方法で、厚い乱流境界層を生成することができた。よって、これを流入気流条件として用いた孤立地形周辺流れの計算は、地形が乱流境界層に完全に埋没した状況を模擬したものである。

3-2 孤立地形周辺の気流性状

ここでは、図4(a), (b)で示した乱れを伴う乱流境界層を流入気流条件として用いた場合と、図4(a)に示す平均速度プロファイルのみ(乱れ無し)を流入気流条件として課した場合の計算結果の比較を示す。図5に瞬間場における主流方向(x)の速度成分(\bar{u})の比較を示す。(a), (b)が乱れ無し、(c), (d)が乱れ有りの計算結果である。(c), (d)ともに計算領域上流のドライバ部で生成された乱れが、流入境界面付近で非物理的な挙動を示すことなく、スムーズに接続され

流下している。結果として、(c)、(d)ともに計算領域全体で気流変動が明確に観察される。ここで特筆すべき点は、流入気流の乱れの有無に違いはあるものの、両者ともに孤立地形の背後に形成されている後流域の流れパターンは定性的にほぼ同じ傾向を示すということである。すなわち、(a)、(c)を比較すると地形下流の渦放出のパターンやそれに伴う後流域の幅はほぼ同じである。(b)、(d)においても後流域で両者の有意な差異は見られない。つまり、地形高さにおいて x 、 y 、 z 方向の乱れ強さが6.1%、4.7%、4.5%程度である本研究の場合には、地形からの剥離流に対して流入気流の乱れの影響はそれほど顕著に現れない。言い換えると、地形からの剥離流に起因して生成された乱れの影響が後流域では支配的であるということを示唆するものである。

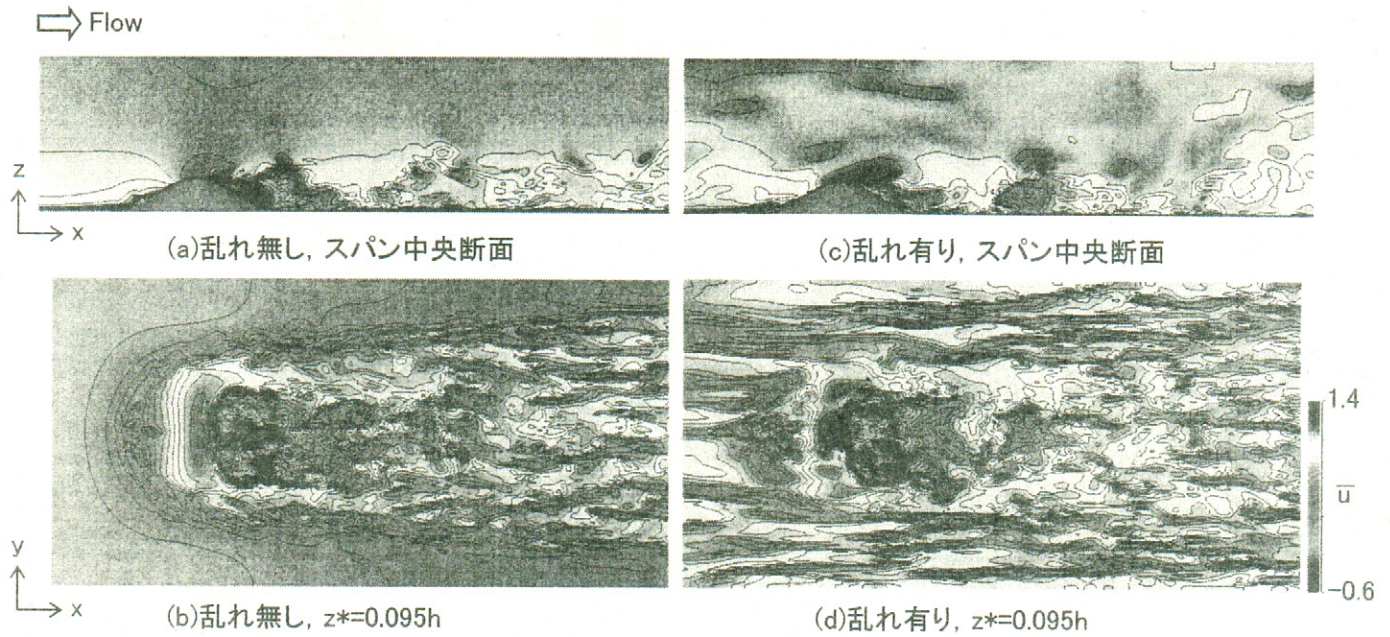


図5 主流方向(x)の速度成分(\bar{u})の分布, 瞬間場

時間平均場に対して描いた流線図に関して、スパン中央断面の様子を図6に、鳥瞰図を図7に示す。両者ともに(a)が乱れ無しの場合、(b)が乱れ有りの場合である。図6に注目すると、地形背後に形成されている循環領域の中心は、

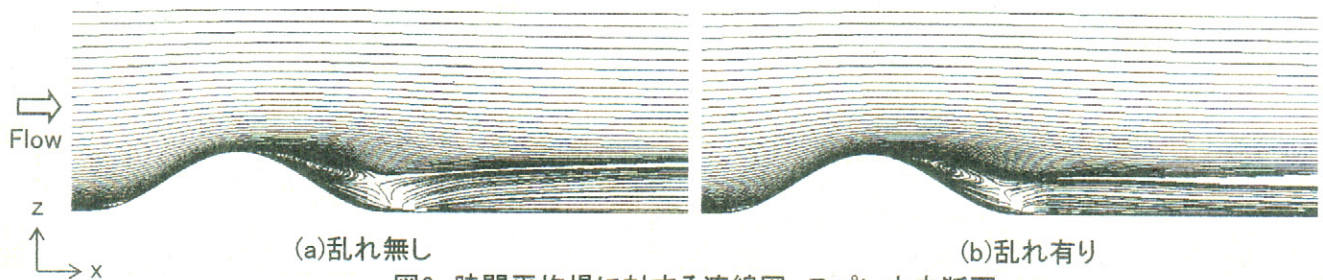


図6 時間平均場に対する流線図, スパン中央断面

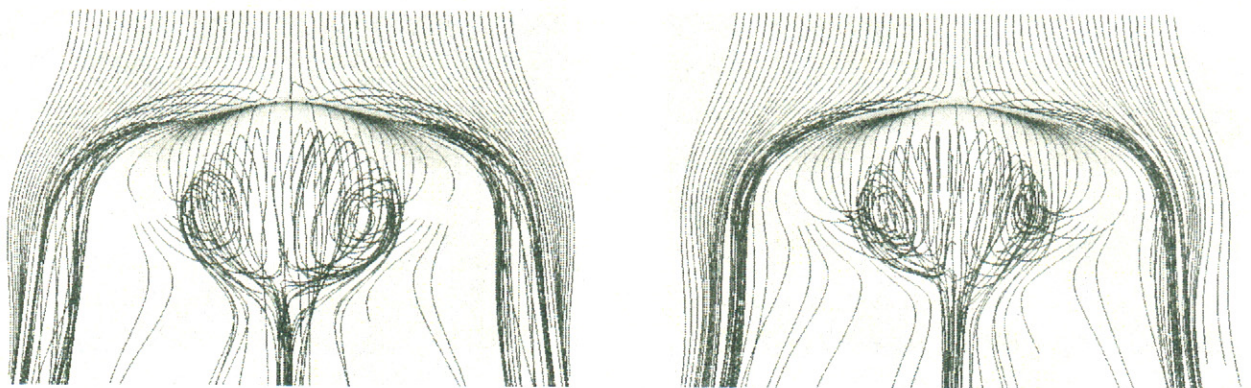


図7 時間平均場に対する流線図, 孤立地形の下流から見た鳥瞰図

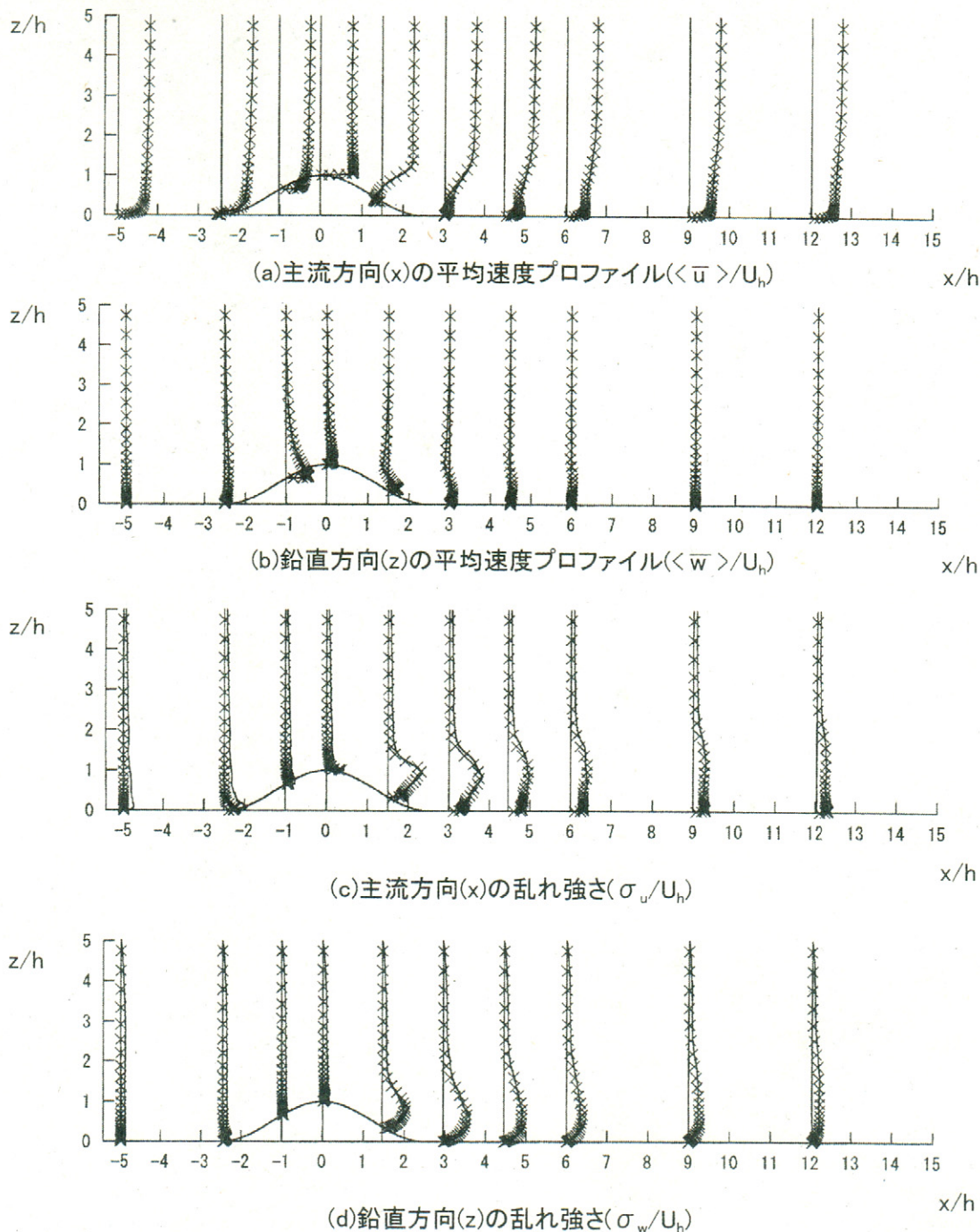


図8 各種乱流統計量の鉛直分布の比較, スパン中央断面, シンボル: 乱れ無し, ライン: 乱れ有り

(b)の方が地形中心にわずかに近い。しかしながら、循環領域の大きさは両者でほぼ同じである。循環領域の3次元的な大きさについては、図7からより顕著に分かる。これについても(b)の方が若干(a)よりも小さいが、両者で有意な違いは見られない。

図8にスパン中央断面における各種乱流統計量の鉛直分布の比較を示す。(a)は主流方向(x)の平均速度プロファイル($\langle \bar{u} \rangle / U_h$), (b)は鉛直方向(z)の平均速度プロファイル($\langle \bar{w} \rangle / U_h$)である。(c)はx方向の乱れ強さ(σ_u / U_h), (d)はz方向の乱れ強さ(σ_w / U_h)である。ここで、シンボルが乱れ無し、ラインが乱れ有りの計算結果を示す。図中の座標軸と各種乱流統計量は孤立地形の高さhと、流入境界断面における高度hにおける風速 U_h で正規化している。各統計量は $x/h = -5, -2.5, -1, 0, 1.5, 3, 4.5, 6, 9, 12$ の計10点において無次元時間100の時間平均を行い算出した。(a), (b)に示す平均速度プロファイル($\langle \bar{u} \rangle / U_h, \langle \bar{w} \rangle / U_h$)に注目する。(a), (b)ともに全ての場所において流入気流の乱れの有無による差異はほとんど見られず、両者は良く一致している。一方、(c), (d)に示す乱れ強さ($\sigma_u / U_h, \sigma_w / U_h$)の鉛直

分布では、孤立地形の上流側($x/h=-5, -2.5, -1$)で乱れ無し(シンボル)と乱れ有り(実線)の違いが明確に確認される。しかしながら、後流域($x/h=1.5, 3, 4.5, 6, 9, 12$)の $z/h > 2$ では両者の違いが見られるものの、 $z/h \leq 2$ では有意な違いはほとんど確認できない。この結果からも、本研究の場合においては地形からの剥離流に起因して生成された乱れの影響が後流域では支配的であるということが示された。

4. おわりに

流入気流の乱れの有無が急峻な斜面を有する孤立地形背後の気流性状に与える影響を調べるため、流入気流条件の異なる二種類のLESを行った。一つは流入気流に乱れを伴う場合であり、地形上流側に設定したドライバ部で乱流境界層を直接生成し、これを与えた。もう一つは、先の計算結果から得られた平均速度プロファイルのみを流入気流条件として課し、乱れを伴わない場合である。その結果、以下に示す知見を得た。地形高さにおいて主流方向、主流直交方向、鉛直方向の乱れ強さが6.1%、4.7%、4.5%程度である本研究の場合には、地形からの剥離流に対して流入気流の乱れの影響はそれほど顕著に現れない。すなわち、地形からの剥離流に起因して生成された乱れの影響が後流域では支配的である。

参考文献

- 1) P.A.Taylor et al., Boundary-layer flow over hills -A review-, Boundary-Layer Meteorol., Vol.39, pp.107-132, 1987
- 2) 石原孟 他, 急な斜面をもつ3次元孤立峰周りの流れ場の乱流特性, 日本風工学会誌, No.73, pp.3-14, 1997
- 3) 石原孟 他, 急な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学会誌, No.83, pp.175-188, 2000
- 4) 内田孝紀 他, 乱流境界層中の孤立峰周辺流れの3次元数値シミュレーション, 第4回環境流体シンポジウム講演論文集, pp.521-522, 1999
- 5) 内田孝紀 他, 地面上に置かれた3次元立方体周り流れのDNS解析-層流境界層と乱流境界層の比較-, 第13回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, pp.82, 1999
- 6) 内田孝紀 他, 急峻な孤立地形まわり流れの局所風況シミュレーション-流入気流の乱れの影響について-, 第33回流体力学講演会講演集, pp.237-240, 2001
- 7) 丸山勇祐 他, 直方体周りの流れ場に及ぼす接近流の気流性状に関する数値計算, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.167-172, 1998
- 8) 野田博 他, 数値流体力学計算のための流入部乱流の作成に関する研究, 日本風工学会誌, No.79, pp.169-170, 1999
- 9) 近藤宏二 他, 流入変動風生成時の空間相関の再現精度が平板乱流境界層のLES計算結果に及ぼす影響について, 日本風工学会誌, No.79, pp.171-172, 1999
- 10) 持田灯 他, LESによる2次元角柱周辺流れの解析 流入変動風の及ぼす影響について, 日本風工学会誌, No.79, pp.173-174, 1999
- 11) 片岡浩人 他, 流入変動風を用いた三次元角柱周り流れの計算-平均速度分布を与条件とした流入変動風の作成方法について-, 第12回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.173-174, 1998
- 12) 野津剛 他, 乱流境界層中での3次元角柱まわりの流れのDNS-一様流と乱流中での比較-, 日本風工学会誌, No.79, pp.175-176, 1999
- 13) 野澤剛二郎 他, 乱流境界層内の構造物まわりの流れの数値シミュレーション, 日本風工学会誌, No.79, pp.177-178, 1999
- 14) 内田孝紀 他, ネストグリッドを用いた複雑地形上の風況予測シミュレーション, 日本風工学会誌, No.92, pp.135-144, 2002
- 15) 梶島岳夫 他, 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, pp.3247-3254, 1997
- 16) T.Kawamura et al., Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986
- 17) J.W.Deardorff, A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid. Mech., Vol.41, pp.453-480, 1970
- 18) J.O.Hinze, Turbulence, 2nd edition, McGraw-Hill, 1975