

山地地形上気流シミュレーションの地表境界条件について

On the ground boundary condition for simulation of flows over hilly terrain

松酒大基*・中山昭彦**・田渕 豪***

Daiki MATSUSAKE, Akihiko NAKAYAMA and Go TABUCHI

*学生会員 神戸大学 工学部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**正会員 Ph.D. 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

***正会員 宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 つくば市千現 2-1-1)

Representation of complex hilly terrain in a numerical simulation of atmospheric flow over mountainous region has been examined by conducting large-eddy simulation (LES) of flow over a region in an island of Southern Japan. The terrain considered consists of many mountains and canyons of various sizes but similar ones extend over an extended area. A ground stress boundary condition that takes into account the effects of unresolved small terrain undulations has been applied in the LES. Computations have been conducted with the surface topography represented by a ground elevation data of fine resolution together with the smoothed ground elevation obtained by filtering. The results with the smoothed ground agree fairly well with the results obtained with fine-resolution ground geometry implying the effectiveness of the proposed ground-stress model. The method will be applicable in wind-field evaluation such as in selection of wind-mill installation sites.

Key Words: Atmospheric flow, LES, ground condition, mountainous terrain

キーワード: 大気流れ, LES, 地表条件, 山地地形

1. はじめに

計算機性能の向上により、地形上大気流の予測にもこれまで計算負荷が大きすぎ現実的でないと思われてきた Large-eddy Simulation (LES) 法が開発・適用され実用にも供されている(例えば参考文献1) ,2)。入った山地地形上気流のシミュレーションでは複雑な起伏の多い地形形状をどの程度解像し、解像されない部分の影響をどうモデル化するか最大の問題になる。流れの大スケール変動は直接計算し、小スケール運動はモデル化する LES では、地表面境界条件を如何に与えるべきかという問題で、計算格子スケール以下 (SGS) の運動のモデル化や数値計算法と差分法自体にも関連している。シミュレーションの精度や適用範囲に影響する重要な問題であるが、地表の樹木や植生キャノピーの影響や、最近では都市建物構造物なども考慮する必要が出てくるなど複雑な状況に対応する必要があり適切なモデル法、計算法は確立されていると言えない。

著者ら³⁾は小スケール境界形状のモデル化に SGS 応力を Dynamic に決定する手法に似た境界応力を動的に算定する方法を提案した。しかし動的算定には余分な計算負荷がかかり、また決定されたモデル係数は平均的な値をとり、境界応力のモデル係数を巧く設定するとある程度の結果が得られることも分かった⁴⁾⁵⁾。しかしこの方法は波状境

界上流れなど規則的な形状のモデルでしか検証されていない。本研究の目的はこの壁面境界モデルを実際の山地地形で確認しようとするものである。

Bou-Zeid, et al.⁶⁾ は山地地形の相似性に着目し解像できない地表形状の影響を Monin-Obkhov 相似則より決定する手法を提案している。本研究では形状や大きさの似た山地地形が続く地域の気流のシミュレーションを行う場合を対象とし、主に地表形状による地表面抵抗のモデルを提案し、解像スケールの異なる地表形状で LES 計算を行いモデルの有効性を検証するものである。

計算法はこれまで地表境界条件に粘着条件や対数則を仮定する方法などで検証されているものを元としているので基礎的数値解法の検証は省略する。

2. LES 基礎式と SGS モデル及び壁面モデル

以下に本研究で用いる基礎式と用いるサブグリッドおよび地表面モデルをまとめる。

2.1 基礎方程式

本LES では、温度変化の無視できる中立大気流を想定し、用いる運動方程式と連続の式は

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

である。ここで、 x_i は x_2 (\Rightarrow) 方向を鉛直上向きにとったデカルト座標で、 t は時間、 u_i はフィルタ平均された速度成分、 p はフィルタ平均された圧力、 ρ は流体の密度、 g_i は重力の加速度、 T_{ij} はSGS 応力と粘性応力の和である。樹木など植生層の厚い場合にキャノピー抵抗などを導入する方法も考えられるが、本 LES では植生層の厚さは計算格子幅に比べ小さいとし地表極近傍の抵抗はすべて地表境界抵抗としてモデル化する。

SGS 応力 T_{ij} の非対称部の和で、動粘性係数を ν とすると

$$\frac{T_{ij}}{\rho} = \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \right) \quad (3)$$

で、 τ_{ij} は SGS 応力、 ν は動粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

2.2 SGS モデル

LES では、用いる SGS モデルと差分スキームでその性能はほぼ決まるので SGS モデルの改良に力が入れられてきたが、境界近傍および境界条件を巧くモデル化すれば、SGS 応力は渦粘性モデルで十分であると考えられるようになってきている (例えば Froehlich and Rodi⁷⁾)。ここでは渦粘性仮定を仮定し

$$\frac{1}{\rho} \left(\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} \right) = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \quad (4)$$

とする。ここで、 $\overline{S_{ij}}$ はフィルタ平均された流れのひずみ速度テンソル、 ν_t はサブグリッド渦動粘性係数である。

本 LES では SGS 応力に標準 Smagorinsky モデルを用いるが次の節で説明するような粗度の効果も反映できるようなものとして、Smagorinsky モデルを修正し

$$\nu_t = (C_s \Delta')^2 \cdot \left(\overline{S} \right) \quad (5)$$

とする。 C_s は標準の値 0.13 とするが、 Δ' に次節のように粗面効果を考慮したモデルを適用する。

2.3 粗度モデルと地表面応力モデル

RANS 法では粗度の影響を反映させるのに、乱流長さスケールを粗度高さに応じ増加させる方法が提案され、効果も確認されている^{8,9)}。LES の SGS 応力にも同様な方

法で粗面抵抗を導入することが考えられる。境界条件として壁最近傍点で粗面対数則を仮定する方法⁸⁾や、抵抗を体積力として導入する方法があるが⁸⁾、ここでは境界条件と乱流長さスケールの修正で対応する方法を考える。

通常の Smagorinsky モデルでは長さスケールを格子幅にとるが、粗度効果導入のために、このスケールを解像していない境界粗度に依存させてその効果が表すことが考えられる。そこで Durbin et al.⁹⁾ が $k\text{-}\epsilon$ 法に用いた方法に倣い、渦粘性の長さスケールを地表面粗さスケールに依存させ

$$\Delta' = \Delta \left(1 + \frac{\Delta y}{y + \Delta} \right) \quad (6)$$

というモデルを提案する。ここで Δy は解像していない境界の粗さに依存する長さスケールで、解像されていない標高変動の平均値を用いる。渦粘性係数自体を大きくすることにより粗度効果を取り入れることになる。

以上は本計算で用いる SGS 応力のモデルであるが、地表条件として用いる地表面応力 τ_w のモデルを示す。地表面応力は壁面近傍の瞬時速度 u_1 を基にした抵抗則である代数式

$$\tau_w = \rho C_d u_1 |u_1| \quad (7)$$

で表わされる壁面モデルを用いる。ここで C_d は抵抗係数で、地表面粗度高さに依存する抵抗則

$$C_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y_1}{k_s} \right) + B_s \right)^2} \quad (8)$$

で評価する。ここで、 y_1 は地表面から最近傍計算点までの距離、 $B_s=8.5$ で、 k_s は Δy に比例する等価粗度高さである。(7)、(8) で表わされるモデルを以下では GSM (Ground Stress Model) と表記する。

計算は上述のモデル以外に地表面粗度を考慮せず、壁面応力モデルも用いないノースリップ条件を適用するもの (NS と表記) も行い比較する。ただしサブグリッドモデルには双方とも粗度効果を考慮した式 (5)、(6) を用いる。

3. 数値計算法

数値計算法の概要を表-1 に示す。本計算で用いる数値計算法は参考文献^{10,11)}と同様の手法で一般座標上コロケート格子を用いた Fractional step 法を基にしたもので、移流項は保存型 2 次精度中心差分で、粘性応力項も 2 次精度中心差分を用いている。この差分法では等間隔格子ある

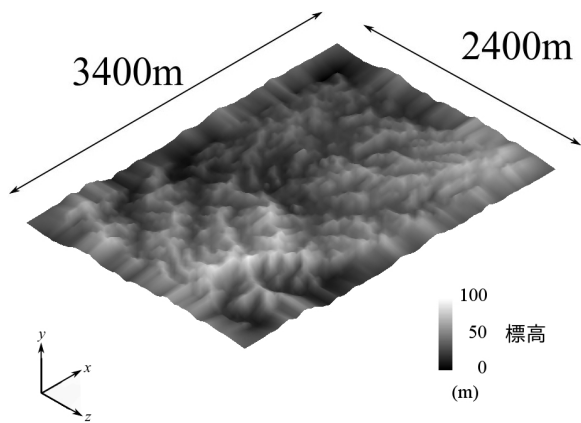
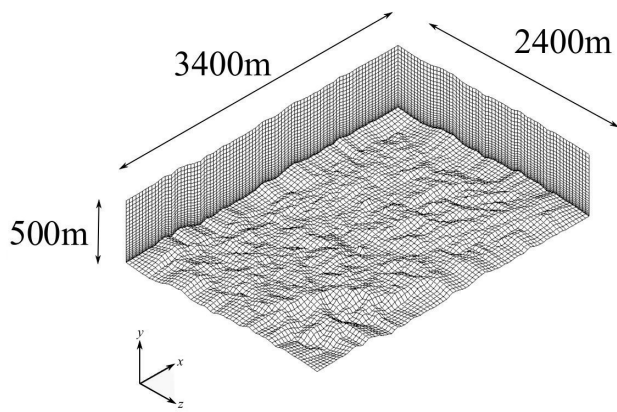


図-1 計算対象地域

(a) 地形 A



(b) 地形 B

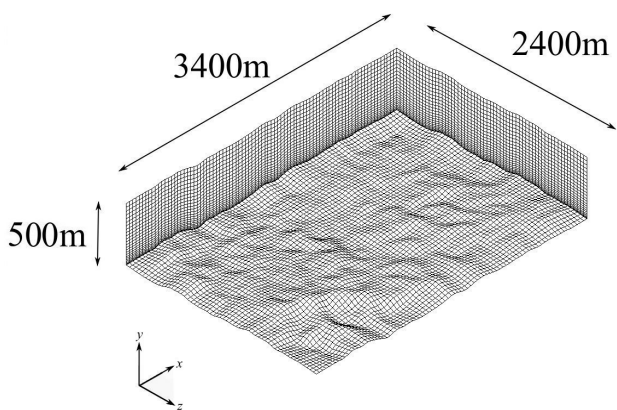


図-2 地表形状と計算格子

いは格子間隔の変化が小さい場合比較的安定な計算がで

きる。壁面応力は前節で説明した非線形代数式で与えられるので時間進行には陽的 Adams - Bashforth 法を用いている。圧力についてのポアソン方程式は共役勾配法を用いている。

座標は、 $x-z$ 面は地形に沿った曲面とし、地表面境界条件を設定しやすくするが、鉛直方向座標は直線とする境界適合シグマ座標を用いる。鉛直方向を直線とすることで、座標変換計算を軽減する。鉛直方向格子間隔は地表近傍で細かくまた上端面は水平になるように変化させている。

表-1 数値計算手法の概要

要点	手法
座標	境界適合座標系(シグマ座標)
格子, 変数配置	コロケート
移流項差分	保存型 2 次精度中心差分
粘性項	2 次精度中心差分
圧力解法	SOR 法
計算アルゴリズム	2 次精度 A-B 法
時間進行法	Fractional-step 法

4. 実地形上気流の計算

本計算で解析対象とする領域は図-1 に示す山岳地域で、特徴ある山や、ある方向にのみ傾斜したような地形ではなく、高さ 100m 程度の似たような山脈の続く約 2.4km × 3.4km の地域である。こういった地形は解像度を山の大きさ以上にとるとほぼ平坦な地形になるが、ある程度細かい格子で個々の山々を解像することも可能である。

計算は前説で述べた地表面応力モデル (GSM) を用いたものと、標準 Smagorinsky モデルに粘着条件 (NS) を用いたものの二通り合計 4 ケースの計算を行う。いずれも乱れを発達させるため流れ方向、横方向とも周期境界条件を用いている。上端はすべりとしているので、境界層は時間とともに上に広がり上空 1000m まで達した状態になる。

気流は x 方向に吹くとし、 x 方向に圧力勾配を与え、流入条件はとくに与えず周期境界条件としている。平均量の評価には平均速度で計算領域を 5 周通過する時間の平均をとっている。

4.1 計算に用いる地表形状

図-2 に図-1 の地形上気流の計算に用いる 2 種類の格子を示す。図-2(a) は水平距離 5m 間隔の点で定義された地表面標高をもとに作成した格子 (地形 A) である。平均的な山の標高は約 100m で、50m ほどの起伏がある。図-2(b) は同じ地形データを 40m × 40m の領域で平均し、更に 80m の長さスケールのガウシアンフィルタをかけ平滑化した地形に沿う地形 (地形 B) である。地形 B は地形 A に比べ鉛直方向に 1m から 4m 程度の起伏を平滑化したものになっている。

格子数は地形 A、地形 B とも (85×50×60) で多くはないが、本計算は検証目的で実際のシミュレーションではもっと多くとれる。

5. LES 計算結果

5.1 瞬時風速分布

図-3 に、地表近傍瞬時風速ベクトルと地表面圧力を示す。地形 A の結果は地形 B の結果に比べ小さいスケールの地表の凹凸による変動があり、圧力による抵抗が反映される。地形 B は平滑化により小スケール起伏がないため、速度分布圧力分布とも地形 A に比べ滑らかになっている。とくに圧力分布は小さい起伏の前後の圧力差がなくなり個々の起伏の抵抗、すなわち粗度抵抗が失われた形になっている。本 GSM モデルではこの失われた抵抗を抵抗係数の増加、また失われた速度変動はサブグリッド粘性を増加させることにより反映することになる。

5.2 平均風速分布

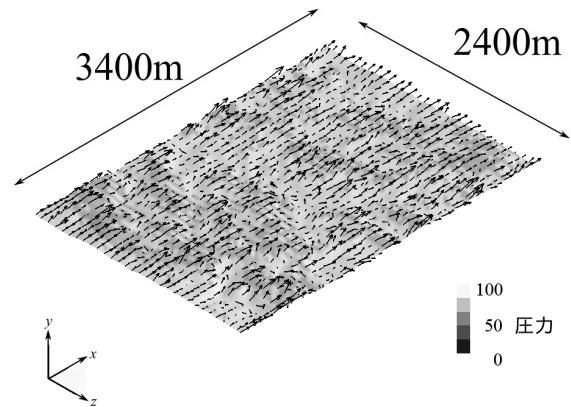
次に平均風速の予測性能を検証するため計算領域中心線上の何点かでの鉛直分布を調べる。図-4 が中心線上 5 点での x 方向時間平均風速 U の鉛直分布を示す。地形 A、地形 B も用いた計算でそれぞれ、GSM を用いたものと、粘着条件を用いた NS の計算結果を比較してある。

平滑化前の地形 A と平滑化された地形 B の結果を比べると、当然であるが地形 B の結果は滑らかになっている。地形 A の結果は、小さな山の上で加速され山の風下では低速域が見られる。GSM と NS を用いた計算結果を比べると、両者の差は地形 A より地形 B の方が大きい。すなわち地形の解像度の低い場合にモデルの差が顕著になっている。これは平滑化で失われた抵抗とサブグリッド応力がモデルに反映されているかいないかの差と考えられる。

5.3 乱れ強度分布

図-5 に図-4 で示した地点と同じ位置での流れ方向乱れ強度 ($\overline{u'^2}$) の分布を示す。図-4 で示したものと同様の 4 ケースの結果であるがケースにより大きさや分布に大きな差が見られる。地形 A の結果は地形 B に比べの乱れは一般に大きい。また地形 A の場合 GSM と NS の差も大きい。とくに NS を用いた結果が大きな乱れを示している。起伏のある地表の場合、ノースリップ条件を用いた方が壁面応力を与えるより速度に大きな変動を与えようと考えられる。GSM の場合せん断応力の増加が抵抗を分担することになるので変動が小さいと考えられる。これらは笠井・中山⁴⁾のモデル地形での検証計算でも見られている。

(a) 地形 A



(b) 地形 B

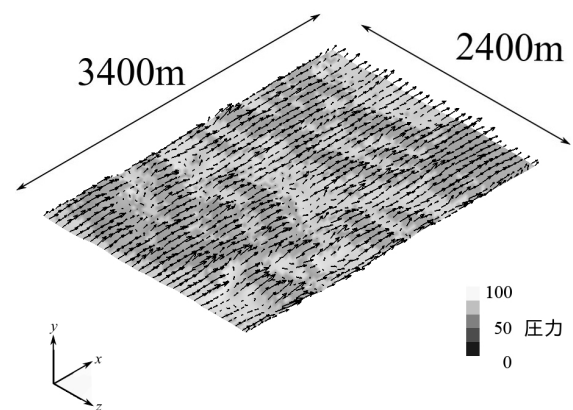


図-3 地表近傍風速ベクトルと地表面圧力

5.4 レイノルズせん断応力分布

図-6 に図-5 で同様に水平方向レイノルズせん断応力 ($\overline{u'v'}$) の分布を示す。図-4 で示したものと同様の 4 ケースの結果であるが、図-5 の乱れ強度の結果同様ケースにより大きさや分布に大きな差が見られる。GSM 結果は地形 A と地形 B の結果がほぼ近い結果になっているが、NS を用いた地形 B の結果もそこそこ合っており、粘着条件でも粗度効果を導入したサブグリッドモデルを用いることで良い結果が得られることが分かる。

5.5 地表面近傍平均風速分布

次に地表近傍での平均風速の分布の例として、図-7 の濃淡図で示す。これは特に特性のある分布ではないが、風況予測などでは大事なもので、ここでは GSM、地形 B の結果を示してある。

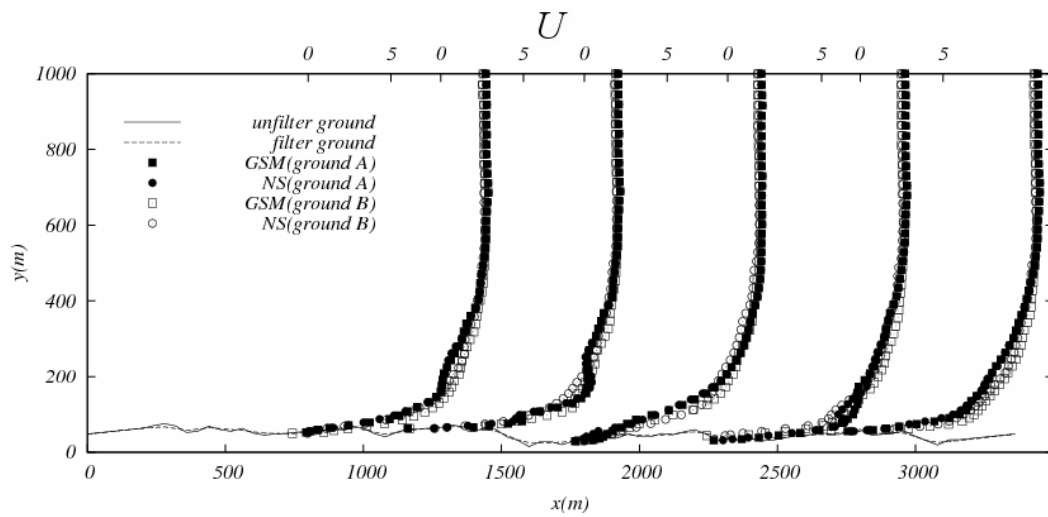


図-4 平均風速 U の鉛直分布

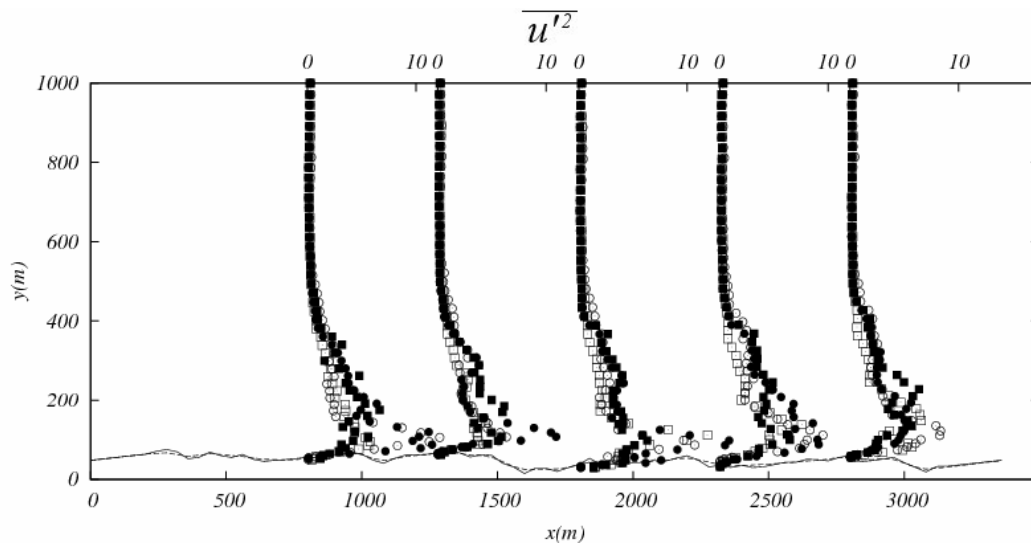


図-5 流れ方向乱れ強度 $\overline{u'^2}$ の鉛直分布

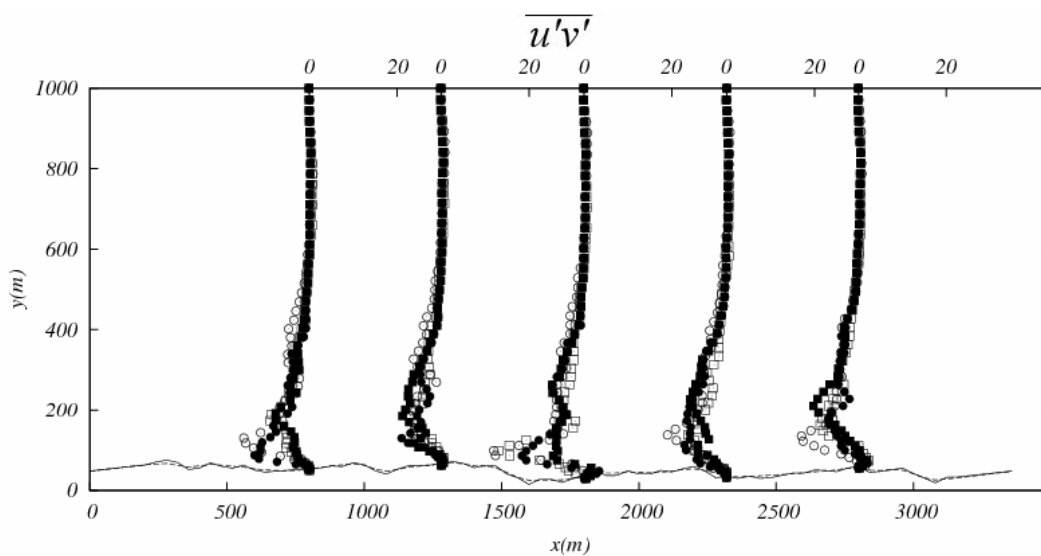


図-6 レイノルズせん断応力 $\overline{u'v'}$ の鉛直分布

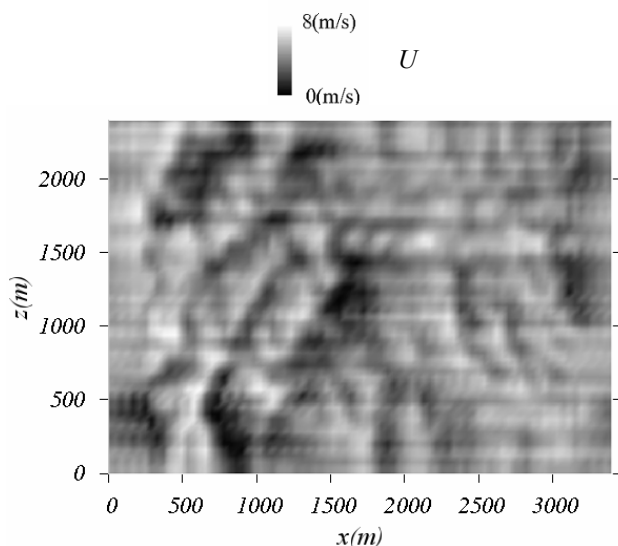


図-7 地表近傍平均風速分布

5.6 鉛直断面内瞬時風速分布

次に、図-8,9,10,11 に地形 A, 地形 B で GSM モデルおよび NS モデルを用いた計算結果の鉛直断面内瞬時風速分布を示す。地表近傍の詳細を示すため中央部を拡大した図を併せて示している。図-4 の平均風速分布の結果に対応し、平滑化された地形 B の結果は地形 A に比べ滑らかで、局所変動が小さく、逆流も殆どない。また平滑化前の地形 A では地表面モデルによる差がみられるが、平滑化された地形 B の計算結果ではモデルによる差は小さい。

以上より SGS モデルと地表面条件に境界形状に表れない平滑化された起伏の長さスケールを導入することにより、表現できない地形の影響を反映できることが分かった。ただし、地表面抵抗モデルを導入したものと、地表面応力

のモデルは導入せずサブグリッド応力と粘着条件をそのまま適用した場合の差は小さいことも分かった。地表形状が小スケールの剥離など形状による抵抗である場合、ノースリップ条件で流れを乱すことによりある程度の粗度効果を表わしている可能性もある。

6. 結論

複雑山地地形上気流のシミュレーションでは複雑な起伏の多い地形形状をどの程度解像し、解像されない部分の影響をどうモデル化するかが最大の問題になる。流れの大スケール変動は直接計算し、小スケール運動はモデル化する LES では、地表面境界条件を如何に与えるべきかという問題に関連し、計算格子スケール以下 (SGS) の運動のモデル化や計算法自体にも関連し重要な問題であるが、適切な計算法は確立されていない。本研究では解像できない小スケール起伏のモデルを提案し、解像度の高い地形データのある実地形を対象にし、解像度の高い地形とフィルタ操作で平滑化した地形の両方で LES シミュレーションを行った。

地表面境界条件には一般に便宜的に用いられる粘着条件を課する方法と、提案する地表面応力モデルを適用したものを実行した。粘着条件を用いたもの、地表面応力モデルを用いたものの結果に大差は見られず粘着条件は懸念されるほど悪くない。しかし地表面応力モデルを用いたものは高解像地形、平滑化された地形とも結果はほぼ一致し、壁面モデルの妥当性が示唆された。

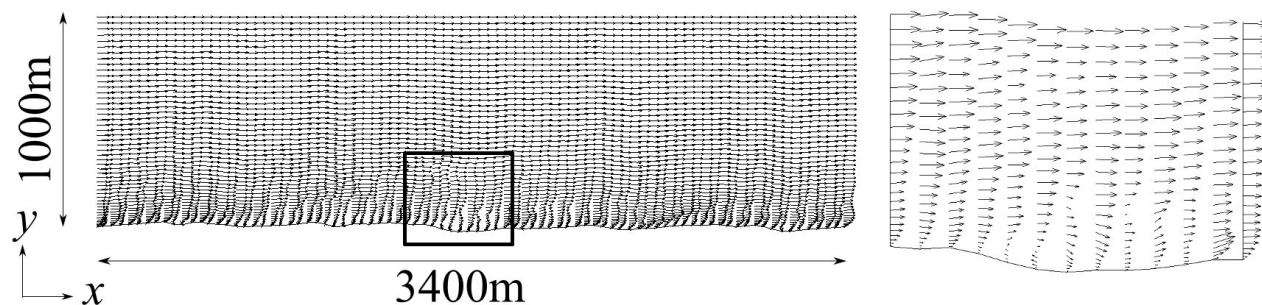


図-8 鉛直断面内風速ベクトルとその拡大図(左図の□部分), 地形 A, GSM.モデル

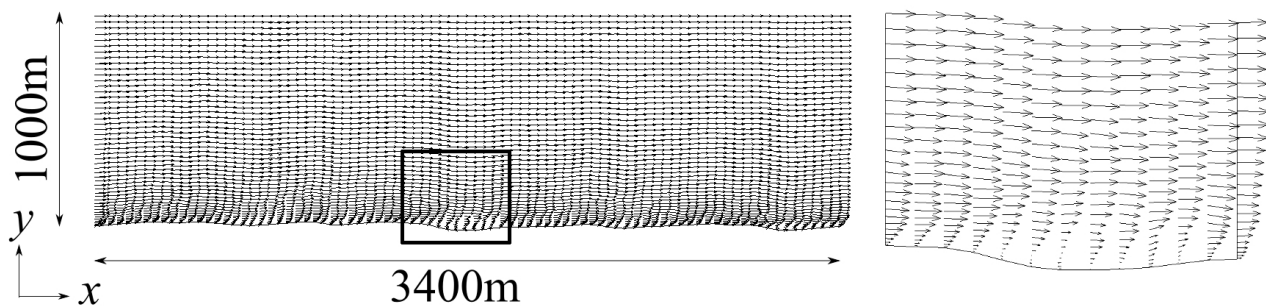


図-9 鉛直面内風速ベクトルとその拡大図(左図の□部分), 地形 B, GSM.モデル.

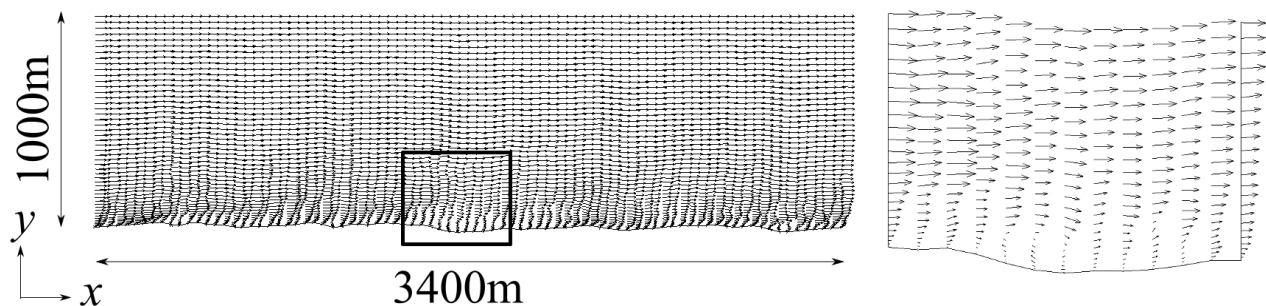


図-10 鉛直面内風速ベクトルとその拡大図(左図の□部分), 地形 A, NS 条件.

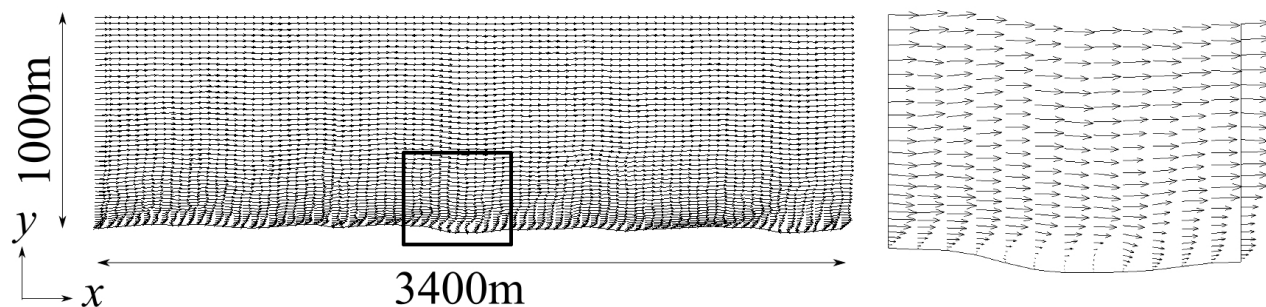


図-11 鉛直面内風速ベクトルとその拡大図(左図の□部分), 地形 B, NS 条件

参考文献

- 1) 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.387-396, 2003.
- 2) Advanced Regional Prediction System (ARPS): A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and predictions tool, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 76, pp.143-165, 1998.
- 3) 北野有哉, 中山昭彦 LES における動的境界条件の導入, 応用力学論文集, Vol.9, pp.773-782, 2006.
- 4) 笠井大彰, 中山昭彦: 複雑境界上乱流の LES 計算における壁面モデルの検証, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1051-1056, 2009.
- 5) 笠井大彰, 中山昭彦: 河床波上流れでの LES 粗面モデルの検証, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1135-1140, 2010.
- 6) Bou-Zeid, E., Parlange M. B. and Meneveau, C.: On the parameterization of surface roughness at regional scales, *J. Atmos. Sciences*, 64, 216-227, 2007.
- 7) Froehlich, J. and Rodi, W.: Introduction to large eddy simulation of turbulent flows, in *Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows*, by Launder, B.E. and Sandham, N., Cambridge Univ. Press. Cambridge U.K., 2002.
- 8) Patel, V.-C. and Yoon, J.Y.: Application of turbulence models to separated flow over rough surfaces, *ASME, Jour. Fluids Engrng.*, Vol.117, pp.235-241. 1995.
- 9) Durbin, P.A., Medic, G., Seo, J.-M., Eaton, J.K. and Song, S.: Rough Wall Modification of Two-Layer k-ε, *ASME*

Jour. Fluids Engng., Vol. 123, 16-21, 2001.

- 10) Nakayama, A., Hori, K. and Street, R.L. : Filtering and LES of flow over irregular rough boundary, Proc. Summer 2004 Program, Center for Turbulence Research, NASA/Stanford University, pp.145-156, 2004.

- 11) Nakayama, A. and Sakio, K. Simulation of Flows Over Wavy Rough Boundaries, *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs, Stanford University/NASA, Ames Research Center.* 313-324, 2002.

(2010年3月9日 受付)