

温度変化のある実地形上気流の LES 計算

LES Calculations of Wind Field with Temperature Variation over Real Topography

岸修士郎*・中山昭彦**

Shujiro KISHI and Akihiko NAKAYAMA

*学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**正会員 Ph.D. 神戸大学教授 大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Large-eddy simulation has been conducted for flows over real topography with temperature variation based on the Boussinesq approximated LES equations of motion. The basic method is first applied to flows over ideal isolated three-dimensional hill and its capability and accuracy are examined. Reasonable agreement with experimental results is obtained with standard Smagorinsky type models for the subgrid stress and subgrid heat flux. No explicit representation of the buoyancy effects on the subgrid stress was used. The results applied to the real topography over a mountainous region also appear plausible.

Key Words: Turbulent flow, LES, real topography, temperature stratification

1. 緒言

山、丘陵、谷など複雑な形状を有する実地形上の気流を定量的に予測することは構造物の耐風設計、風力エネルギーの利用、大気汚染物質の拡散問題など工学・環境上重要な課題である。複雑地形上の乱流特性を定量的に評価する手法として現地観測や風洞模型実験、あるいは数値解析がある。現地観測なしに実態の解明はできないものの、対象とする風力や風向などの諸条件下で正確に観測できる可能性は薄く、観測だけで全面的に解明することは難しい。風洞模型実験ではある程度の信頼性と精度を伴う計測が可能であるが、地形模型を製作するには多大な時間と費用がかかる上、流入風や温度の境界値など実際の条件を正確に設定するのは困難で、レイノルズ数やフルード数などの設定範囲も制約を受ける。

一方近年の計算機の飛躍的な高速化、大容量化に伴い、現地観測や風洞実験で避けられない制約を受けない数値解析法が注目されつつある。数値解析では、条件パラメータを自由に变化させることができ、また地形そのものも改変させて解析するため、風洞模型実験に比べて低コストかつ短時間で地形上の流れ場を予測することができる。数値解析手法には直接数値シミュレーション(DNS)、レイノルズ平均式と乱流モデルを用いた

Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)法、Large Eddy Simulation(LES)法がある。比較的平坦な地域の地域気候などの予想や、理想化された滑らかな単純な地形上の風況予測にはRANS法が応用されている^{1)~3)}。しかし、RANS法で用いられる乱流モデルの適用範囲は限られており、複雑に込み入った地表形状の影響を受ける気流の解析にはモデル依存性の小さいLES法が適している。LESはもともと大気乱流のシミュレーションのために考えられた手法であるが、平坦な地表上境界層のシミュレーションが殆どである(例えばMason⁴⁾)。内田・大屋⁵⁾や著者ら⁶⁾はLES法を用いて中立成層条件下での実地形上気流の数値計算を行っている。しかし実際の大気境界層では温度成層を有する場合が多い。特に冬期や夜間の安定成層条件下での気流は中立時とは異なる様相を呈することが知られている^{7)~8)}。従って温度成層のある場合の複雑地形上での気流の予測を行うことは重要である。

本研究では温度変化を考慮したLES計算法を実地形上の気流と温度分布の予測に適用する。LES法ではサブグリッドモデルの普遍性が期待されるうえに、RANS法を温度成層のある乱流に適用するのに重要な浮力効果のモデル化が必要でなくなるなど有利な面がある。本研究では著者らの一様な温度場でのLES計算法^{6),9)}を基に、Boussinesq近似された運動方程式と温度輸送式を格子平均した

式も併せて解くLES法を構築し実地形上気流の予測計算に応用した。サブグリッド応力モデル及び境界条件の設定は精度の面で優れているとはいえないが、複雑な実地形に適用するには境界に適合する一般座標より優れている。計算法の有効性、精度の検証は3次元孤立峰周辺流れの実験値との比較によって行った。

2. 計算法とモデル

ここでは本数値シミュレーションに用いた計算法とモデルを記す。LESの基礎式は空間平均を施した連続の式と運動方程式及び温度輸送方程式である。これらの支配方程式は

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right) - g \frac{\Delta T}{T_0} \delta_{i3} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} - d_j \right) \quad (3)$$

である。ここで、 t は時間、 u_i は x_i 方向の速度成分、 p は圧力、 g は重力加速度、 T_0 は基準温度、 ΔT は基準温度との差、 δ はクロネッカのデルタ、 ρ, ν, K はそれぞれ空気の密度、動粘性係数、熱拡散係数である。また $\langle \rangle$ はそれぞれの瞬時の値を空間フィルター平均した量で、 τ_{ij} 及び d_j はフィルター平均によるサブグリッド応力及びサブグリッド熱流束で、本計算ではそれぞれ次の渦粘性、渦拡散モデルを用いてモデル化する。

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k_G + 2\nu_t D_{ij} \quad (4)$$

$$d_j = -k_t \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} \quad (5)$$

ここで k_G はサブグリッド乱流エネルギー、 ν_t, k_t は渦粘性係数及び渦拡散係数で、

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

これらの予測には次の標準型Smagorinskyモデルを用いる。

$$k_G = \frac{\nu_t^2}{(C_k \Delta)^2} \quad (7)$$

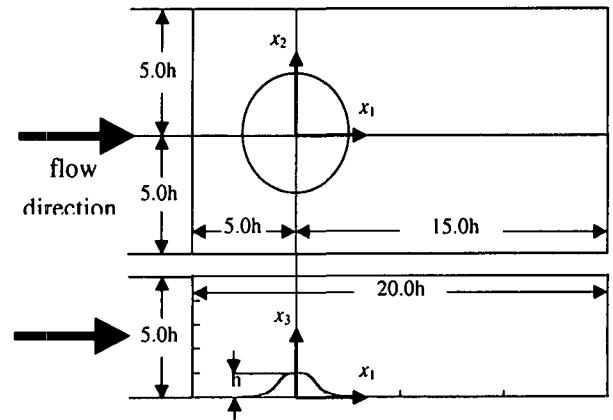


図-1 孤立峰周辺流れの計算領域

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 D_{ij} D_{ij}} \quad (8)$$

ここで Δ は x_1, x_2, x_3 方向の格子幅の相乗平均で、モデル定数 C_s, C_k の値はそれぞれ0.13及び0.094を用い、 $k_t = \nu_t$ とした。近年サブグリッド応力モデルの様々な改良モデルが提案され、スケール相似則と渦粘性モデルを合わせ、モデル定数を計算された流れ場からダイナミックに求める方法の精度が最も良いという結果が報告されている¹⁰⁾、検証は低レイノルズ数流れでしかも単純な境界条件のもとで行われておらず、計算時間も相当増加する¹¹⁾ことから本計算のような複雑な実地形上乱流に対してはまず比較的簡単な標準渦粘性モデルを適用することにする。数値計算法は参考文献⁹⁾の方法とほぼ同じで、食違い格子上で、圧力解法にHSMAC法、時間進行に2次精度Adams-Bashforth法を用い、移流項をUTOPIA3次精度風上差分法で、粘性項を2次精度中心差分法で離散化している。用いた座標は直交座標で、境界は矩形格子近似法で表現している。本計算のように複雑な流れ場での安定計算には風上差分法が必要である、またサブグリッド応力なしでは剥離流などの計算はうまく行かない¹¹⁾ので双方必要である。

3. 3次元孤立峰周辺流れの解析

上記の計算法を実地形上気流の計算に適用する前に、計算法検証によく用いられる3次元孤立峰周辺流れの解析を行い既存の実験と比較することで計算の妥当性を調べた。

3.1 計算条件

検証例としての3次元孤立峰は図-1に示されてい

	<i>Re</i> 数	<i>Fr</i> 数
Case1	12,000	
Case2	12,000	7.6
Case3	12,000	1.0

表-1 孤立峰周辺流れの計算ケース

る。孤立峰形状は次式で表される。

$$\frac{Z}{h} = \frac{1}{1 + [(x_1/h)^2 + (x_2/h)^2]^2} \quad (9)$$

ここで x_1 は風下方向 x_2 は水平横方向座標で、 Z は (x_1, x_2) での地表の高さである。この形状の3次元孤立峰については温度成層風洞で実験⁸⁾が行われており、その結果との比較が可能である。計算は図-2に示されているように x_1, x_2 方向には山近傍で、 x_3 方向には地表近傍で密になる不等間隔の直交格子を用いて行った。格子数は x_1, x_2, x_3 方向にそれぞれ $87 \times 59 \times 38$ とワークステーションで十分扱える粗いものである。

計算は表-1に示すような三つのケースについて行った。ここで *Re* 数と *Fr* 数は山の高さ h を基準高さ、接近流の $x_3=h$ での風速 U_h を基準速度と定義している。Case1とCase2については実験⁸⁾のテストケースと同じ *Re* 数、*Fr* 数の中立成層及び安定成層のケースである。

境界条件は上端で一様水平流れ、地表はすべりなし、側面では自由すべり、下流端には放射条件である。また地表及び上空での温度はそれぞれ 10.0°C 、 95.18°C と設定している。従って地表また上空での熱伝達率は指定していない。風洞実験では山模型の上流での境界層は非常に薄くほぼ一様な風速分布になっているので、計算でも流入面では一様分布を仮定した。また流入面では殆ど乱れが現れておらず、無視出来得ると仮定し変動風の導入はしなかった。温度分布も実験条件に合うよう線形分布を仮定した。本計算格子では地表近傍の粘性底層は解像できないのですべり無し条件を用いるより、地表から第一点目の計算点で壁関数を与える方法が一般的であるが、この方法は逆流を伴うような流れでは必ずしも良いとはいえない。本計算のように粗い格子での計算では、地表面から第一計算点で対数則あるいは一般的な壁法則に従うことも期待できない。むしろ地表の粗度による抵抗をするのが妥当と考えられるが⁶⁾、本計算では単純にすべり無しの条件を与

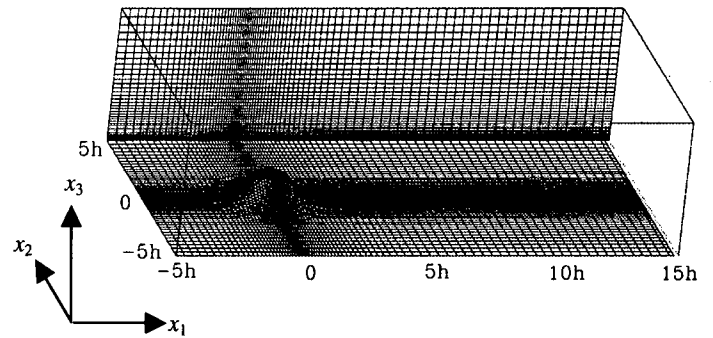


図-2 計算格子

えた。計算時間は無次元時間 $tU_h/h=15$ から $tU_h/h=30$ で時間平均を行った。

3.2 結果と考察

中立条件下 (Case1) と安定成層条件下 $Fr=7.6$ (Case2) について、図-3に平均風速を U_h で除した値 U/U_h の絶対値の等値線図を、図-4に相対乱れ強さを、それぞれ実験値と比較して表した。図-3から、計算結果は全体的に実験結果の傾向を捉えていることが分かる。安定成層のCase2の実験結果では山背後の低速領域がCase1の中立流に比べ下流に長くなる傾向を示しているが、計算でも同様の傾向が再現されている。しかし、山頂付近の加速の程度は計算では過小予測されている。図-4では、計算では両ケースとも実験の約1/2と低くなっているのが見られる。この原因として Smagorinsky モデルの不十分さ、また格子密度の粗さ及び境界条件の不十分さが考えられる。また流入風に変動がないため山の風上では乱れが殆ど出ていない。このため山頂付近の遷移的流れがうまく再現されず、下流での乱れの過小予測につながっているとも考えられる。乱れ及び乱流応力については岡島ら²⁾や石原・日比³⁾の中立流についての k - ϵ 法を用いた計算結果の方が実験に近い値になっているが、これは地表近傍での k 及び ϵ に直接壁関数を適用できるからと考えられる。粗い格子での LES 計算では解像される乱れの量が全乱れに対し小さい。こういった VLES (Very Large Eddy Simulation) 計算では乱流量の精度良い予測は非常に難しい。しかし、逆流を含む乱れ強度の高い領域での実験値にも精度に問題があることを考慮すれば本 LES 計算はある程度の再現性はあるといえる。なお、計算結果には SGS 成分も含まれており、その値は式(4)を用いて評価されている。

図-5に山の中心を通る鉛直面内での風速ベクトルの分布を、図-6に上流端の $x_3=0.3h$ から追跡した流れ線、中立条件下での計算 (Case1) 及び安定成層

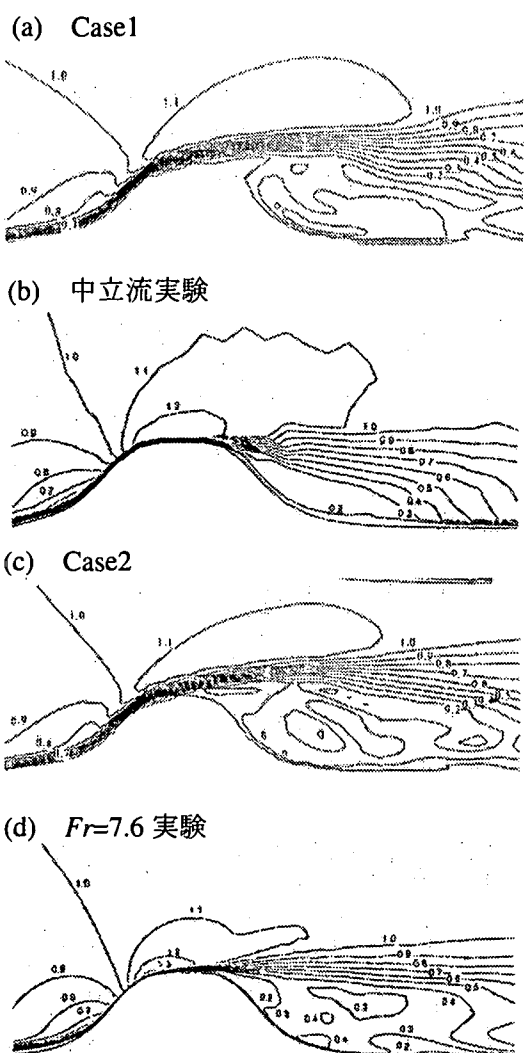


図-3 U/U_h の絶対値コンター

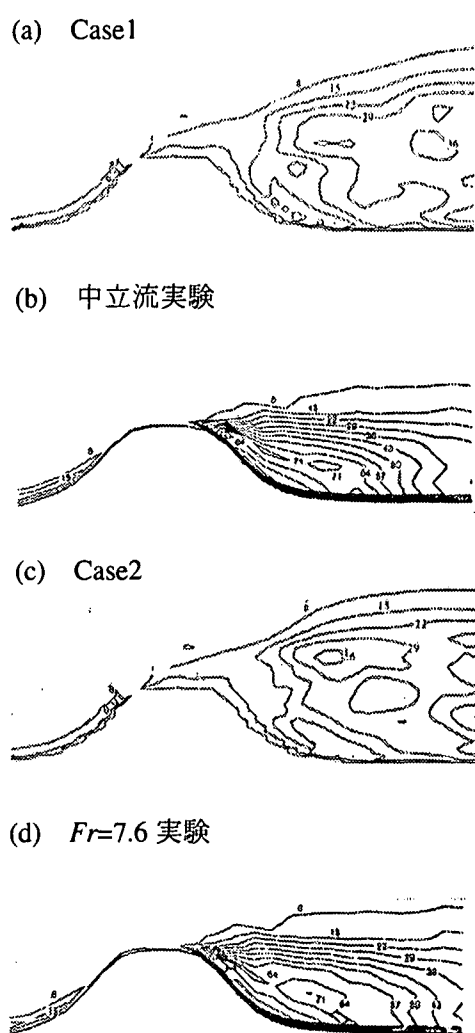


図-4 相対乱れのコンター

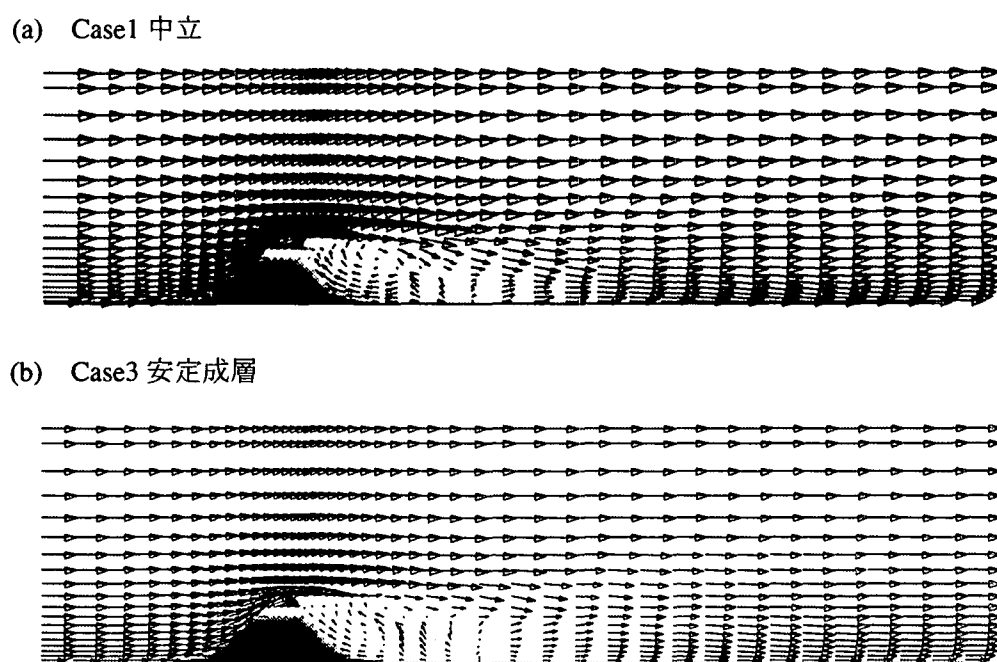
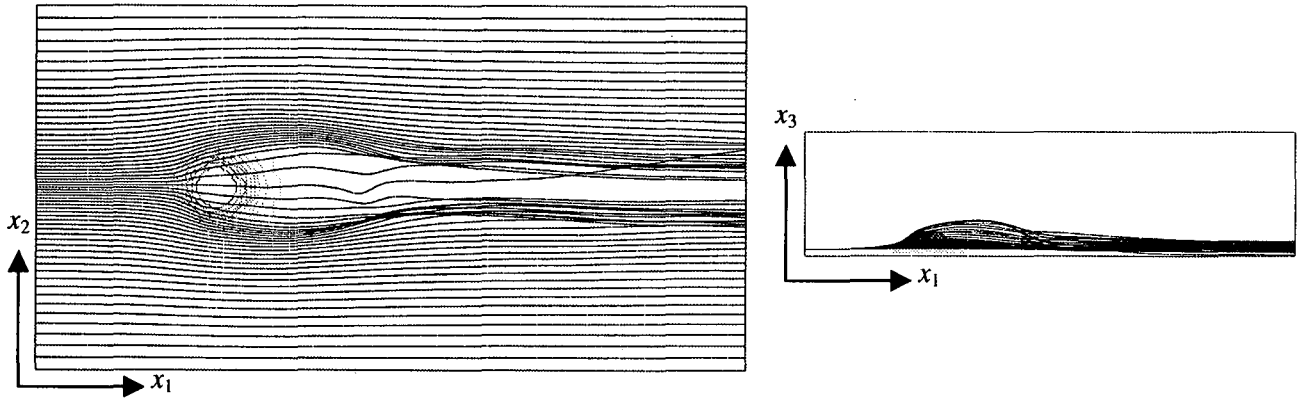


図-5 山の中心を通る鉛直断面での平均風速ベクトル

(a) Case1 中立



(b) Case3 安定成層

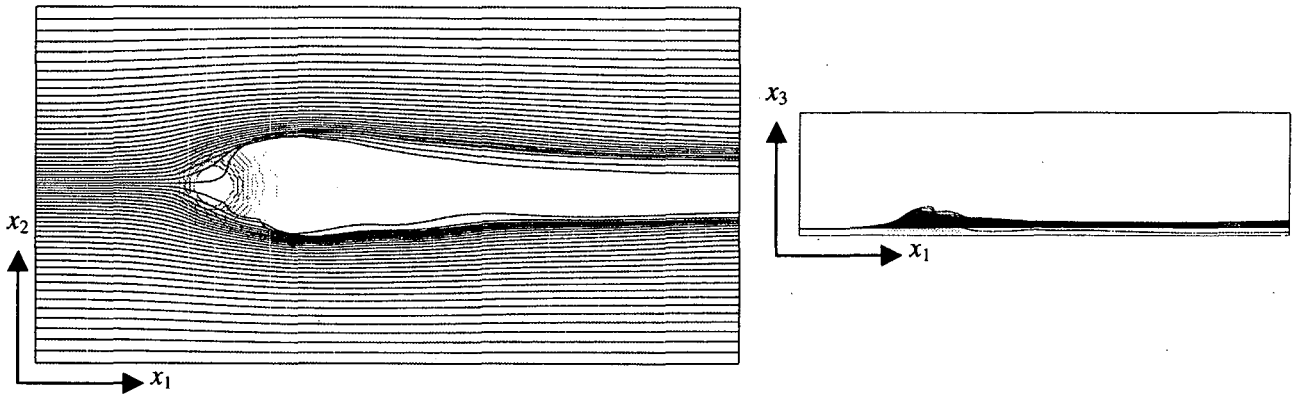


図-6 流線図

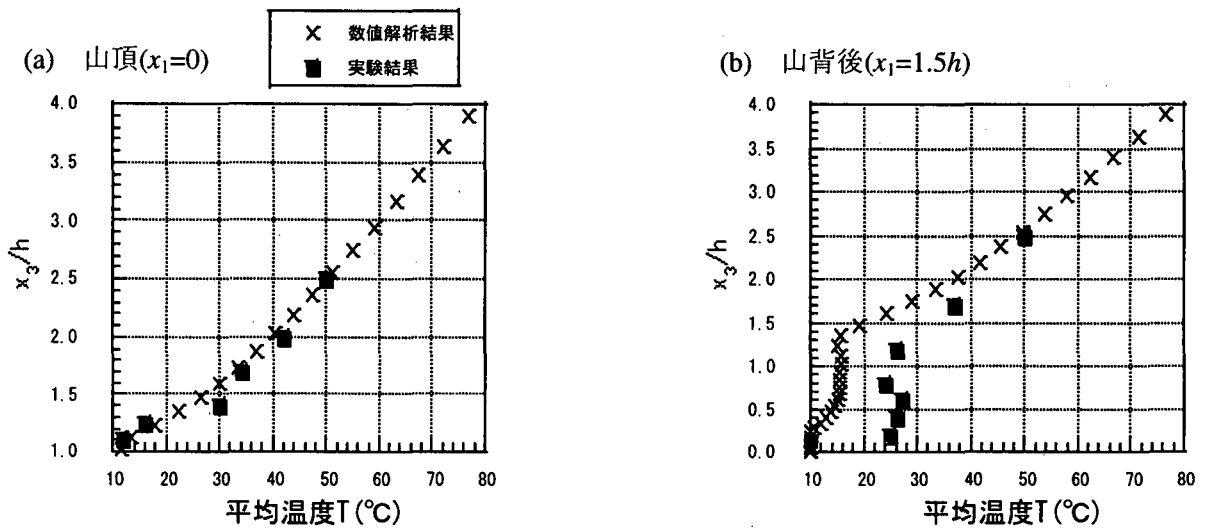


図-7 Case2 安定成層での平均温度の鉛直分布

条件下 $Fr=1.0$ の計算(Case3) についてそれぞれ示してある。ベクトル図からは安定成層の場合山背後での鉛直方向の運動が抑えられているのがみられ、流線図からは安定成層条件下では山を迂回する傾向がみられ、また鉛直方向より横方向に変動する様子も伺える。この傾向は成層流実験の煙観察でも見られている。最後に図-7 に山頂付近とそれより $1.5h$ 程度下流の地点での平均温度 T の鉛直分布図

の計算値(Case2)と実験値を比較する。山頂ではほぼ上流で与えた線形分布を取り実験とよく合っているが、風下では過小予測されている。これは計算では地表面の温度を 10.0°C に固定しているが、実験では地形模型への熱伝達があり地表面が 25°C 近くまで熱せられているためである。しかし山背後での乱れによる混合効果は現れており、温度勾配の傾向は捉えられているのが見てとれる。

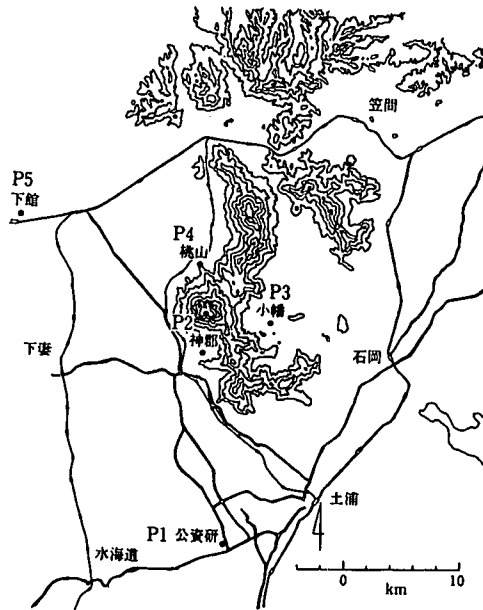


図-8 筑波山周辺地形

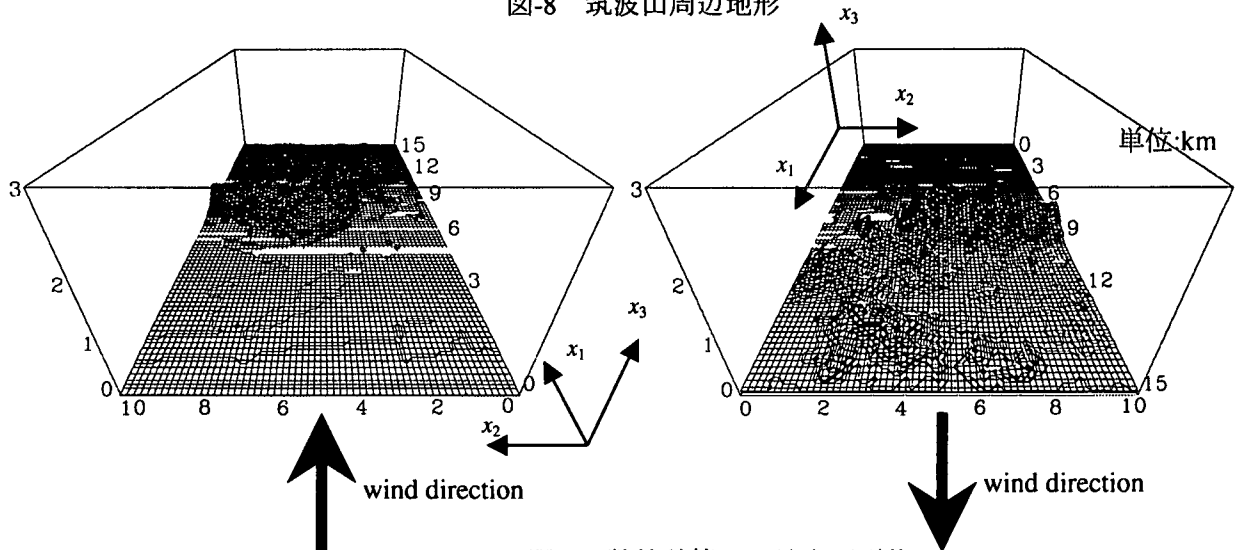


図-9 数値計算での地表面形状

4. 実地形上安定成層流解析例

前節のようにモデル化された孤立峰を過ぎる気流の計算より少なくとも平均量計算結果の妥当性が確認できたが、本節ではこれを実地形上気流の予測に適用する。

4.1 計算条件

気流シミュレーションを行う対象地形は図-8 に示してある筑波山周辺地域である。筑波山は関東平野の北部、東京から約 60km 北に位置する比較的孤立した山であり、海拔約 30m の平地から 875m の山頂へと直線的に続いている。北と南東に 2 つの尾根

を有しており、前者は約 10km 北の加波山(海拔 709m)へと続いている。南東方向へ伸びる尾根は風返峠、不動峰など 300~400m の高低を繰り返して土浦方向へ伸びている。筑波山より西南西方向の地形が開けている。この地形については、成層風洞での実験結果¹²⁾も報告されているので比較も可能である。計算は接近風に上空で 10m/s 程度の西南西の風があるときを想定した。

数値計算モデル化された地形と計算領域を図-9 に示す。地表の標高については国土地理院の数値地図を使用して出力した。計算格子数は $91 \times 61 \times 51$ とした。筑波山の最高標高約 1000m を標準高さ h 、高度 1000m での風速 U_{1000} を基準速さとし Re 数を

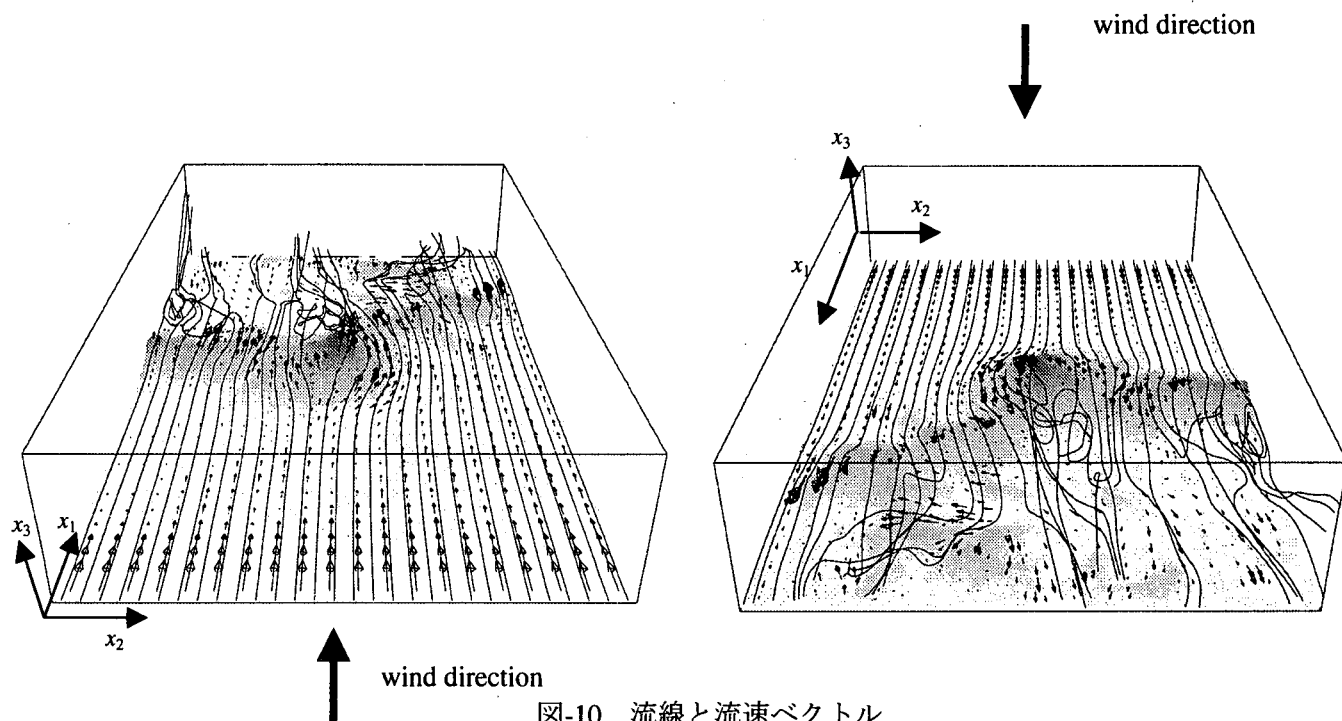


図-10 流線と流速ベクトル

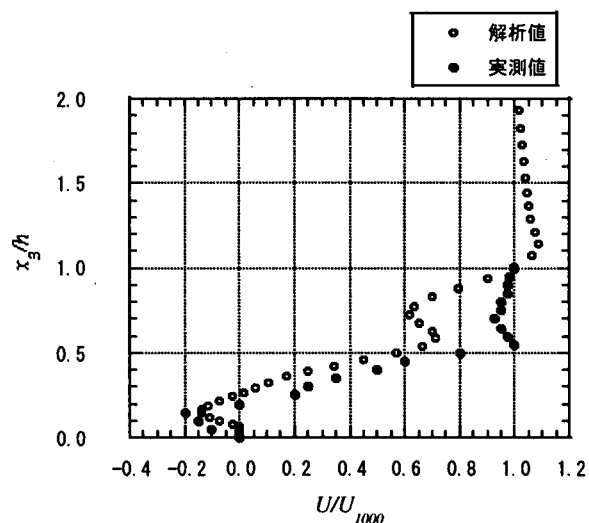


図-11 筑波山山頂から $2h$ 下流での流速分布

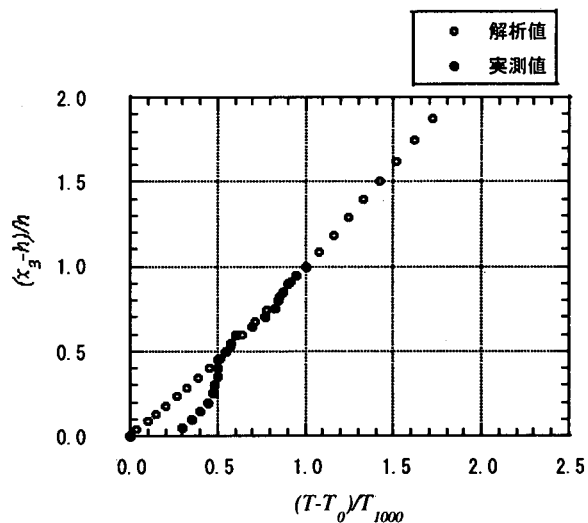


図-12 筑波山山頂での温度分布

100,000 とした. x_3 軸方向には地表面近くで格子を密になる不等間隔格子を用い, 最小間隔を $0.015h$ とした. 流入面では上空の風速が 10m/s になるような対数則を鉛直分布に仮定し, 温度は線形分布を仮定した. またフルード数($=U_{1000}/(gh)^{1/2}$) は現地観測に対応する 1.0 の安定成層条件を与えた. その他の条件は前節の孤立峰気流計算と同様の境界条件を設定し計算を行った.

4.2 結果と考察

図-10に計算結果の地表より 15m の高度での流速ベクトルと, 流入面で地面から 15m の位置から発する流線の軌跡を示している. 3次元孤立峰の計算

結果と同じように山の手前までは乱れの小さい流れになっており, 山前方でよどみ域は見られない. しかし強安定成層で見られる山を迂回する流れが見られる. 筑波山後方では山を回り込んだ流れにより鉛直向きの渦が形成されていることがわかる. またこの回り込みにより, 山間の谷で流速が速くなっていることが分かる. 風速分布の詳細計測結果はないので詳しく調べられないが, 定性的に現地観測による風況が計算で現れている. 計算領域風下に向かって左端で流線が急に上昇しているがこれは側面境界でのすべり条件の影響が原因と考えられる.

図-11 に筑波山山頂から $2h$ 風下の地点での平均風速分布の計算結果と実測結果を示す. 風速は高度

1000m での値 U_{1000} で無次元化されている。 $x_3/h=0.6$ 近傍での増速度及び逆流はうまく計算できている。ただ $x_3/h=0.5$ から 1.0 での風速分布の傾向は実測から離れているが、バルーンによる実測値は高度が高いところでは不正確であるので一概に予測が悪いとはいえない。図-12 は山頂から上方での平均温度の鉛直分布を高度 1000m の温度 T_{1000} で無次元化したものである。 $x_3/h>0.5$ では計算値と実測値はよく合っている。しかしそれより低い領域での計算結果は流入面で仮定した線形分布から殆ど変化していないが、実測ではやや高い温度になっている。これは前節での孤立峰気流の山下流での傾向と異なり、山頂付近での温度拡散がうまく計算されていないためと考えられる。

5. おわりに

温度成層のある大気流の解析にパーソナルコンピュータ、ワークステーションレベルで実行可能な程度の粗い格子を用いた LES シミュレーションを行い、その妥当性と精度について検討した。LES シミュレーションはその解像度により非常に精密な準 DNS 的な計算から本計算のように非常に粗い VLES までであるが、実地形上気流という非常に大きいスケールの流れを対象とする場合、高解像度、高精度のシミュレーションは現在また近い将来でも不可能である。従って粗い格子での試し計算は LES でどの程度の精度が得られるかの指標になる。すなわち、地表形状の表現法及び境界条件の与え方また流入風の設定法なども近似に頼った場合どの程度の結果が得られるかという意味で本計算結果はその限度と可能性を表すものである。そういった意味で本シミュレーション結果は平均風速及び平均温度分布などについてはある程度の予測性を示唆しているが、乱流量の予測には限界があることを意味している。今後流入風設定法、地表の表現及び境界条件の与え方を改良すれば乱流量も含めた量の精度良いシミュレーションとなり得る。また計算機機能の向上によりより細かい格子による計算が可能になるのを考えると、同様な計算でより詳しい予測が可能になると期待できる。

参考文献

- 1) Yamada, T. : a Numerical Model Study of Turbulent Airflow in Above Forest Canopy *J. Met. Soc. Japan*: Vol.60. pp.439-454. 1982.
- 2) 岡島厚, 葛見俊之, 木綿隆弘: 山越え風の数値解析及び実験的研究, 応用力学論文集, Vol.1, pp.625-632, 1998.
- 3) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値解析, 日本風工学会論文集第83号, pp.175-188, 2000.
- 4) Mason P.J.: Large-eddy simulation A critical review of the technique, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol.120, pp.1-26, 1994.
- 5) 内田孝紀, 大屋裕二: 複雑地形上の乱流場に対するLESの適用, 第15回生研NSTシンポジウム講演論文集, pp.85-92, 2000.
- 6) 中山昭彦, 岸修士郎: ラージ・エディ・シミュレーションによる実地形上気流の予測, 応用力学論文集Vol.3, pp.729-736, 2000
- 7) 内田孝紀, 大屋裕二: 丘陵地形を過ぎる安定成層流の2次元数値シミュレーション, 応用力学論文集Vol.3, pp.729-736, 2000.
- 8) 松本繁則, 田村哲郎, 中原輝夫: 丘陵地形周辺の実験と数値解析, 第2回環境流体シンポジウム講演論文集, pp.457-457, 1997.
- 9) Nakayama, A. and Noda, H.: LES simulation of flow around a bluff body fitted with a splitter plate, *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, Vol. 85, pp.85-96, 2000.
- 10) Zang, Y., Street, R. and Koseff, J.R.: A dynamic mixed subgrid model and its application to turbulent recirculating flows, *Phys. Fluids A*5, pp.3186-3196, 1993.
- 11) Vengadesan, S. and Nakayama, A.: On the influence of numerical schemes and subgrid-stress models on LES of turbulent flow past a square cylinder, *Int. J. Num. Meth. in Fluids*, to appear 2001.
- 12) 北村興二, 吉門洋史, 近藤裕昭, 横山長之: 複雑地形上の安定成層流の観測と風洞実験, 公害 Vol.21, No2, pp53-62, 1986.

(2001年4月20日受付)