

成層性を考慮した実地形上気流のLES計算

神戸大学大学院自然科学研究科 正会員 中山 昭彦
 神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 岸 修士郎

1. 緒言

山や丘陵など複雑地形を過ぎる気流にどのような現象が出現するかは、大気汚染物質の拡散とも関連して重大なテーマとなっている。特に冬期夜間の強い成層性が気流に及ぼす影響は大きく、既往の研究により実験・数値解析が行われてきた¹⁾。実験ではレイノルズ数やフルード数に制約があり実地形に適用するには困難である。そこでそのような制約を一切受けない数値計算による解析の確立が求められている。本研究ではLES法を用いて成層流の再現を行い、既存の実験と比較することでその有効性を確認し、実地形状に適用した。

2. 数値解析手法

数値解析に用いるモデルは3次元孤立峰で、その形状を次式(1)に示す。

$$z=h/(1+(x^2+y^2)) \quad (1)$$

計算領域はFig.1に表す。格子数は x, y, z 方向にそれぞれ $87 \times 59 \times 38$ とした。 z 方向には不等間隔格子を用い最小間隔を $0.04h$ とした。

成層流の格子平均化した支配方程式を示す。

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

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right) - \frac{1}{Fr^2} \frac{\Delta T}{T_0} \delta_{i3} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} - d_j \right) \quad (4)$$

ここで、 $\langle \rangle$ はそれぞれの瞬時の値を空間平均した量、

ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数、 K は熱拡散係数である。 τ_{ij} 、 d_j はサブグリッド応力、熱流束であり、それぞれ次の渦粘性、渦拡散モデルを用いる。

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k_G + \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$k_G = \frac{\nu_t^2}{(C_k \Delta)^2} \quad (6)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 D_{ij} D_{ij}} \quad (7)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$d_j = -k_t \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} \quad (9)$$

ここで ν_t は x, y, z 方向の格子幅の相乗平均で、 $C_s = 0.13$, $C_k = 0.94$, $k_t = \nu_t$ とした。

計算は中立成層流と安定成層流の2ケース行い、既存の実験²⁾と比較できるようにRe数、Fr数を与えた。計算ケースはTable1に示す。

境界条件として流入速度に対数則分布を与え、流出に放射条件、上面・両側面滑り、物体表面は滑りなしとした。温度に対しては上面・物体表面にそれぞれ $95.18 \cdot 10.0$ に固定し流入面での温度分布は線形分布とした。境界表現法は矩形格子近似法を用いた。空間差分法は移流項に3次精度風上差分、粘性項に2次精度中心差分、時間進行法は2次精度Adams-Bashforth法、圧力解法はHSMAC法を用いた。計算格子はスタッガードメッシュ系を用いた。

3. 結果と考察

Fig.2に平均流速の絶対値のコンターラインを示した。実験値²⁾の中立成層流と安定成層流を比較してみると丘陵頂上付近の加速域が安定成層流の方が小さくなっているのがわかる。これは山の上流から流れてゆく気流が不安定・中立条件下では高さに係らず山を越えて流れるが、安定成層条件下ではある高さ以下なら山を迂回するという現象を捉えている。今回の計算結果を見てみると、1.1以上の域がCase2の方がCase1より小さくなっていることがわかり、成層性による影響が表現できているものと思われる。また、計算値も実験値よりやや小さい値になっているものの概ね合っている。

次にFig.3に乱れの強さのコンターラインを示した。実験値と違って局所的に値が分布しているのは平均をとる計算時間が十分ではなかったためと考えられる。値の誤差には乱流モデルに問題があるものと思われる。

LES, 実地形上気流, 成層流

神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学部建設学科中山教授 Tel&Fax: 078-803-6011

最後にFig.4に丘陵頂上付近とそれより1.5h程度下流の地点での平均温度鉛直分布図をそれぞれ示す．丘陵頂上付近ではほぼ実験値と一致している．下流付近では計算で地表面の温度を10.0 と固定したため実験値との差が出たものと思われるが，傾向は捉えられている．

4. 実地形上気流解析例

次に実際に複雑地形上気流の計算に適用した．Fig.5にFr=1.0の安定成層条件下での筑波山周辺流れを示す．赤のラインが流線で白の矢印が地上5mでの流速ベクトルを表している．谷間に気塊が回り込み流速が速くなっている．なお，地形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．

5. まとめ

成層性を考慮した3次元孤立峰周辺流れのLES計算を行いプログラムの有効性が示せた．安定成層条件下での実地形上に適用し，傾向が捉えられた．

[参考文献]

- 1) 内田孝紀 他(1996) 第10回数値流体力学シンポジウム
- 2) 松本繁則 他(1997) 第2回環境流体シンポジウム

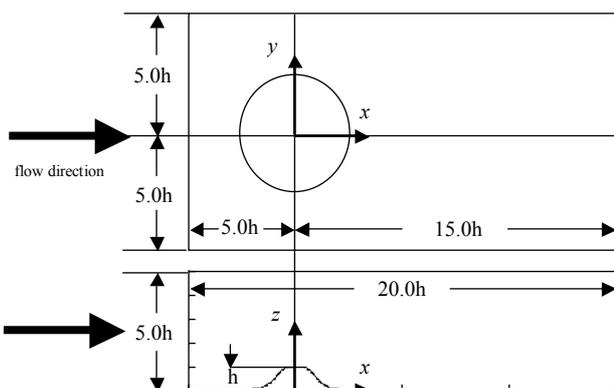


Fig.1 計算領域

	Re	Fr
Case1	120000	
Case2	120000	7.6

Table1 計算ケース

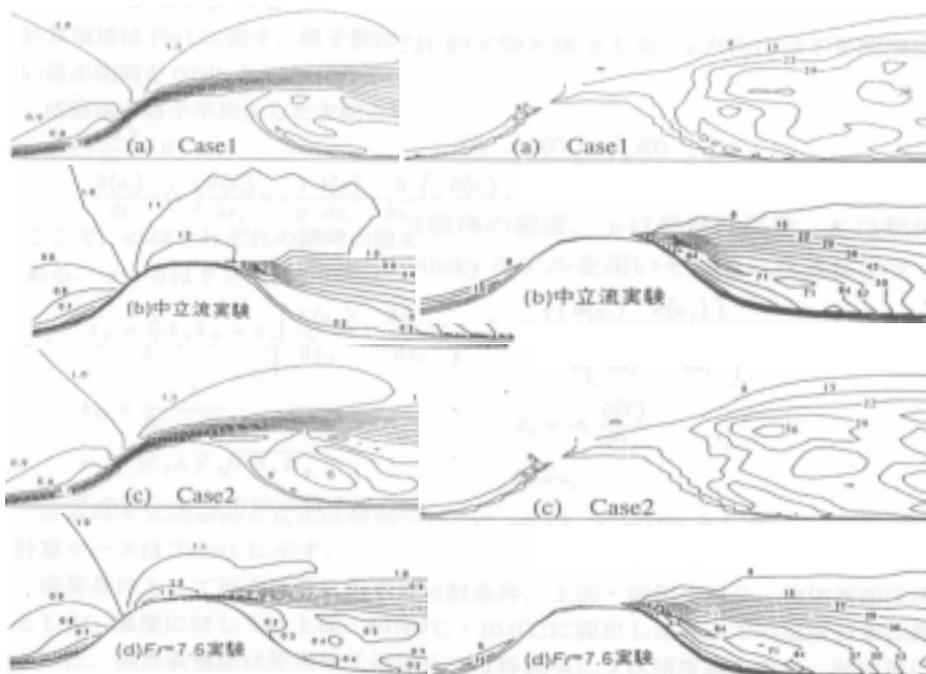


Fig.2 平均流速の絶対値のコンター

Fig.3 乱れ強さのコンター

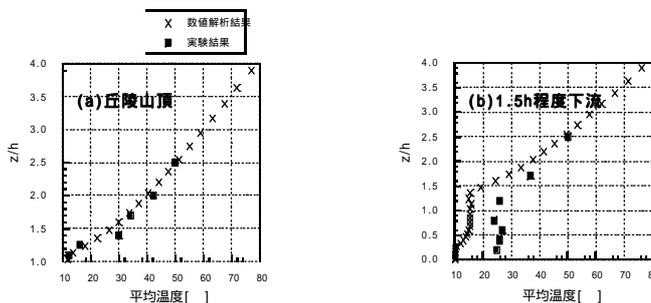


Fig.4 平均温度の鉛直分布

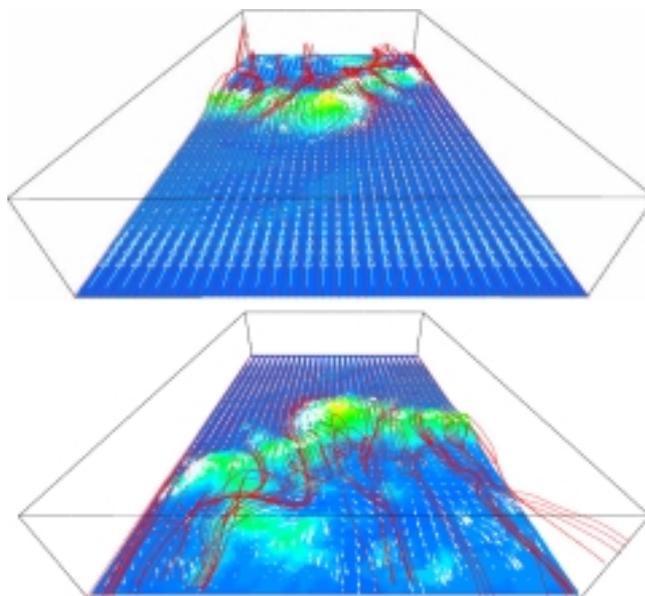


Fig.5 安定成層下での筑波山周辺流れ