

神戸大学大学院 学生員 ○森野 貴博

神戸大学工学部 正会員 中山 昭彦

1.はじめに

ラージエディシミュレーション(LES)法は大気乱流の計算から始まり¹⁾、ほかのいろいろな分野で応用されている。大気の温度成層は、乱れの生成、消散のモデリングに大変重要な要素であるが、LES シミュレーションではあまり検討されていない。本研究では中立成層で検証された LES 法を温度成層のある場合に適用し、その結果の妥当性を評価する。

2.基礎方程式

本研究では、次のようなブジネー近似式の空間平均である LES の基礎式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \alpha \left(\frac{\bar{\theta} - \theta_e}{\theta_e} \right) g \delta_{i3}$$

ここで α は体積膨張係数、 $\bar{\theta}$ は温度、 θ は環境温度、 $\bar{u}_i$ はフィルタリングされた流速であり、圧力 $\bar{p}$ にはサブグリッド乱流エネルギー成分が含まれている。また、渦粘性係数 ν_t には等温乱流に使われている次の Smagorinsky モデルを用いる。

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 (2D_{ij}D_{ij})^{\frac{1}{2}}, \quad D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{\frac{1}{3}}$$

ここで C_s は Smagorinsky 定数で、 Δ は各方向の格子幅を用いた粗視化のスケールである。

また、熱拡散の式として次式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} = K \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_i^2} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_t \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right)$$

K は熱拡散係数であり、 k_t 乱流熱拡散係数であり、ここではレイノルズ相似則に従い $k_t = \nu_t$ としている。

3.計算方法

主流方向の座標をX、水平方向の座標をY、鉛直方向の座標をWとおき、速度の各成分を u, v, w としている。計算領域はX方向 4000 m、Y方向 1700 m、Z方向 900 mの直方体で、 $40 \times 20 \times 40$ 点の格子点を用いている(ケース1のみ計算領域はX方向 8000 m、Y方向 1700 m、Z方向 3700 mである。)。計算方法は、基礎式を離散化し、食い違い格子を用いた HSMAC 法に基づくもので、時間に関する進行は Adams-Bashforth の2次精度、移流項には3次精度の風上差分、粘性項には2次精度中心差分を採用している。また、地表面での速度の境界条件は

$$\bar{u} = \left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \ln \left(1 + \frac{\Delta z}{z_0} \right)$$

の対数則で与えた。ここで、 u_* は摩擦速度、 κ はカルマン定数で 0.4、 z_0 は速度の粗度定数であり 0.1 m である。計算例として、Smagorinsky 定数 C_s は 0.1、体積膨張係数 α は 0.8、環境温度 θ_e は 283K とし、次の三つのケースについて計算を行った。

LES、温度成層効果、地形上乱流

〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-803-1235 FAX 078-803-1234

ケース 1: 平らな地表面で、温度勾配のない大気境界層

ケース 2: 山のある地形上で、温度勾配のない大気境界層

ケース 3: 山のある地形上で、地表と大気境界層上部の間に $1/180(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ の勾配を与えた安定成層

初期条件は、 x 方向の速度 $u=10(\text{m/s})$ 、 Y 方向の速度 $y=0(\text{m/s})$ 、 Z 方向の速度 $w=0(\text{m/s})$ とした。

4. 計算結果

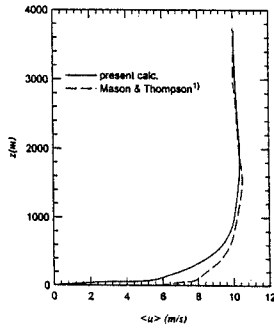


図-1 中立成層での平均風速分布

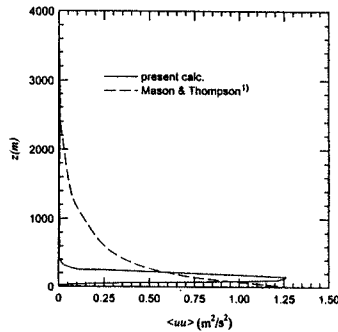


図-2 中立成層でのレイノルズ応力 $\overline{uu}$ (m^2/s^2)

図-1、図-2は Mason²⁾らによる研究と、この研究と条件を一致させ、自ら行った研究（ケース1）の $X-Z$ 面における平均速度 $u(\text{m/s})$ と流れ方向のレイノルズ応力 $\overline{uu}(\text{m}^2/\text{s}^2)$ の鉛直分布である。また、このことをふまえ Mason らの研究と条件を変え、地表面に一つの山を造り、温度勾配のない大気境界層（ケース2）と、鉛直方向に 5°C の温度差のある安定成層（ケース3）の二つの場合において数値解析を行った。図-3(a)と図-3(b)は、ケース2とケース3における $X-Z$ 面の速度ベクトル図である。また、ケース3における温度分布を図-4に示す。

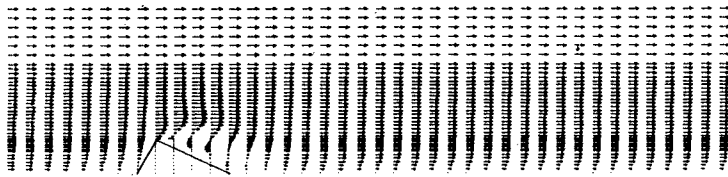


図-3(a) 中立成層での瞬間速度ベクトル

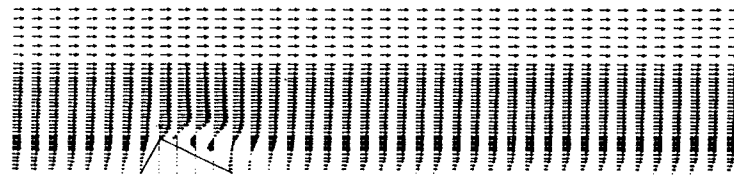


図-3(b) 安定成層での瞬間速度ベクトル

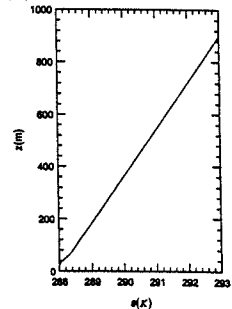


図-4 $X-Z$ 面での温度分布

5. 考察

図-1において、本研究ではコリオリ力を考慮していないため、 Z が 1000m 以下でずれが生じているが、 Z が 1000m まで膨れ上がりその後 $u=10(\text{m/s})$ 程で一定しており、中立成層における解析では Mason らによる研究結果とほぼ一致し、これをもとに温度成層での解析を行うことができた。図-3(a)と図-3(b)を比較すると、安定成層である図-3(b)では中立成層である図-3(a)と比べ、山の風下側での乱れが小さく抑えられている。よって、温度成層の効果を直接モデルに反映させずに、成層による傾向が計算されているといえる。

<参考文献>

- 1) Mason, P.J.: Large-eddy simulations A critical review of technique. Q.J.R. Meteorol. Soc., 120, 1-26 1994
- 2) Mason, P.J. and Thomson, D.J.: Large-eddy simulations of the neutral-static-stability planetary boundary layer. Q.J.R. Meteorol. Soc., 113, 413-443 1988