B10

微気象場の LES に向けた数値計算手法の開発
Development of Computational Method for Large Eddy Simulation of Micrometeorological Field

○井上実
○Minoru INOUE

It is important to understand the diffusion phenomena of heat and pollutants in the non-isothermal field for a prediction of sudden local heavy rain and a relaxation of local air pollution. The purpose of this study is to develop a computational method for large eddy simulation of micrometeorological field with heat and vapor transportation. The equations for conservation of mass, momentum, heat, vapor and liquid water are discretized by the finite volume method using a generalized curvilinear coordinate system, and the coherent-structure Smagorinsky model is applied to a subgrid-scale turbulence model. The large eddy simulations of the Reyleigh-Bénard convection and the shallow cumulus convection are carried out to demonstrate the validity of this method.

１．はじめに

熱対流や温度成層中の乱れによる熱や物質の拡散現象は、局地的な集中豪雨や大気汚染物質の高濃度化に係わる重要な現象である。その挙動や乱流構造を理解することは、集中豪雨の早期予測や大気汚染の緩和に役立つものと考えられる。

このような現象を解析する有効な手段の一つとして、非等温場での乱流構造を捉えることができる LES(Large Eddy Simulation)が挙げられる。

本研究では、乱流構造に基づく新しい乱流モデル(Kobayashi, 2005)を用いた LES モデルを構築し、このモデルを微気象場での熱輸送や水蒸気輸送を扱えるように拡張した。本手法の熱輸送に対する妥当性を確認するため、レイリー・ベナール対流の数値実験を行った。また、水蒸気輸送に対する妥当性を検証するため、Siebesma et al.(2003)が行った境界層積雲の LES の結果と比較した。

２．計算方法

本モデルは複雑地形にも適用できるよう支配方程式を一般曲線座標系上で有限体積法によって離散化する。閉曲面 S で囲まれた体積 V のコントロールボリュームを考えると、フィルター操作を施した質量保存側および運動量保存則は、

$$\int_S \mathbf{n}\cdot\mathbf{u}dS = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \mathbf{u}dV = \int_S \mathbf{n}\cdot T dS - \int_V \beta\mathbf{g}(\theta_v - \theta_0)dV \tag{2}$$

と表される。ここで $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、$\mathbf{n}$ は境界 S における外向き単位法線ベクトルである。β は大気の体積膨張率、$\mathbf{g}$ は重力加速度、θ_v は仮温位、θ_0 は基準温位を表す。T は応力テンソルであり、

$$T = -pI - \mathbf{uu} + (\upsilon + \upsilon_t)\{\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^{Tn}\} \tag{3}$$

と与えられる。ここで p は圧力、I は恒等テンソルである。また温位 θ、比湿 q_v および雲水量 q_l をスカラー量 ϕ とおくと、それぞれの保存則は、

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \phi dV = \int_S \mathbf{n}\cdot\{-\phi\mathbf{u} + (\alpha + \alpha_t)\nabla\phi\}dS \tag{4}$$

と表される。ここで(3)式の ν および(4)式の α はそれぞれ動粘性係数および熱拡散係数である。下付き添え字 t は乱流によるそれぞれの拡散係数を表しており、次のようにモデル化する。

$$\nu_t = C_s(\Delta)^2\left(2S_{ij}S_{ij} + \frac{\beta\mathbf{g}_i}{Pr_t}\frac{\partial\theta_v}{\partial x_i}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$$\alpha_t = \frac{\upsilon_t}{Pr_t} \tag{6}$$

ここで Δ はフィルター幅、S_{ij} は速度歪みテンソルであり、Pr_t は乱流プラントル数である。C_s はモデル係数であり、Kobayashi が提案した手法 CSM (Coherent-structure Smagorinsky Model)に従い、その乱流場に応じたコヒーレント構造関数 F_{cs}（無次元化した速度勾配テンソルの第 2 不変量）を用いて、

$$C_s = C_1|F_{CS}|^{\frac{3}{2}}\ ,\quad C_1 = 0.05 \tag{7}$$

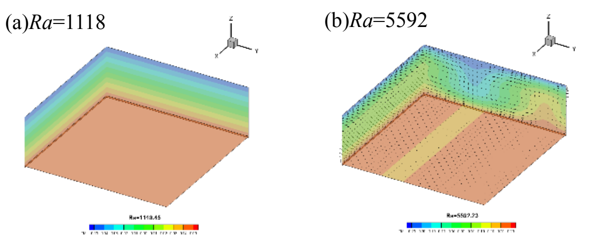
と与える。この手法の特徴は、標準 Smagorinsky モデルに対して、ある時間や場所ごとの乱流構造に応じたモデル係数を与えることができる点である。

本モデルでは水蒸気の相変化を扱えるよう凝結過程を導入する。水蒸気の凝結量(雲水量)は、ある時間や場所ごとの水蒸気の飽和条件から過飽和か否かを判断し、それに伴う温度変化を考慮する湿潤飽和調節によって求める。

３．計算結果

まず、本手法の熱輸送に対する妥当性を確認するため、上下が壁面で囲まれた流体層でのレイリー・ベナール対流の数値実験を行った。伝熱に関する無次元数 *Ra* が臨界値(Ra_c=1708)より小さい場合、熱は熱伝導によって伝達され、臨界値を超えると熱対流が起こり、さらに *Ra* が大きくなると乱流へ遷移することが知られている(例えば新野, 1987)。ここでは上下の壁面間の温度差を変化させることで *Ra* が異なる 5 ケースの数値実験を行い、それぞれの熱輸送の様子を比較した。

図 1 は 3 つの *Ra* での温度分布および速度ベクトル図の比較である。*Ra* が臨界値以下の場合は熱伝導によって熱が伝達され、臨界値を超えると規則的なロール状の対流が熱を輸送していることがわかる。さらに大きな *Ra* では非定常で複雑な熱対流が生じており、流場が乱流へと遷移した。この結果は、*Ra* の違いによるレイリー・ベナール対流の特徴を良く捉えたものであり、本手法の熱輸送に対する妥当性が示された。



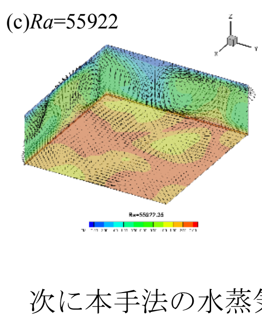


図 1　*Ra* による温度分布および速度ベクトル図の比較(T=1000s)
(a)*Ra*=1118,　(b)*Ra*=5592,
(c)*Ra*=55922

次に本手法の水蒸気輸送および雲水の生成に関する妥当性を検証した。Siebesma et al.が行った境界層積雲の LES の結果と比較するため、彼らと同じ計算条件で 6 時間後までの LES を行った。

図 2 は 5～6 時間後までのアンサンブル平均をとった雲水量および雲量(0～1 の値で表現)の鉛直分布を Siebesma et al.の結果と比較したものである。Siebesma et al.の結果は 10 の研究機関のモデルを比較したもので、実線が平均値、ハッチがモデル間のばらつきを示している。雲水量について、本手法の結果は雲底の他に1500m付近にもピークが見られるが、雲量ともに概ね定量的に一致する結果が得られた。このことは本手法の水蒸気輸送や雲水生成に対する妥当性を示す結果と考えられる。

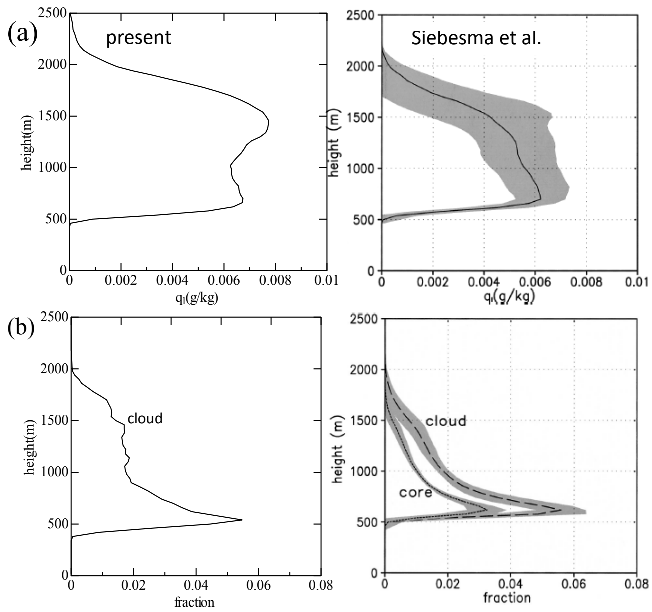


図 2　(a)雲水量(q_l)および(b)雲量(fraction)の比較
(左)本計算結果, (右)Siebesma et al.

４．おわりに

熱対流や温度成層中の熱や物質の拡散現象を解析するため、熱輸送や水蒸気輸送を考慮した LES モデルを開発した。レイリー・ベナール対流や境界層積雲の問題に本手法を適用し、その妥当性を検証した。その結果、*Ra* による熱輸送の違いや水蒸気輸送に伴う境界層積雲の生成について概ね妥当な結果が得られており、本手法の非等温場における乱流解析の有効性が示された。

参考文献

(1) 新野宏(1987)：流れの安定性について, 天気, 34, 11, pp.671-684

(2) Kobayashi, H. (2005) : The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and tuebulent channel flow, Phys. Fluids, 17, 045104

(3) Siebesma, A. P. et al. (2003) : A large eddy simulation intercomparison study of shallow cumulus convection, J. Atmos. Sci., 60, 10, pp.1201-1219