

格子ボルツマン法を用いた接地境界層乱流の解析

中島正寛(北大環境科学院)・渡辺力(北大低温研)

はじめに

接地境界層(接地層)では、地表面-大気間の運動量や熱、水蒸気などの輸送は、乱流によって効率的に行われている。接地層の乱流は、大規模で組織的な構造が存在し、輸送に影響していることが知られている。しかしながら、そのメカニズムには、大規模組織構造と輸送に寄与する小規模な渦構造との相互作用など、不明の点が多い。

本研究では、並列性の高さでアルゴリズムの単純さから近年注目されている格子ボルツマン法を用いた LES モデルを構築し、接地境界層における乱流を再現して組織構造の解析を行う。

格子ボルツマン法の概要

格子ボルツマン法(LBM)は流体を構成する粒子の速度分布関数を予測するボルツマン方程式を格子に離散化したもので、各格子点上の流体粒子の並進・衝突を考慮することで速度分布関数の時間発展を求め、速度分布関数の発展式は以下のようなになる。

$$f_i(\vec{x} + \vec{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau} (f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)) + F_i \Delta t$$

ここで f_i は i 方向に向かう粒子の速度分布関数、 \vec{c}_i は離散化された粒子の速度、 f_i^{eq} は局所的な平衡状態の速度分布関数、 τ は平衡状態へ緩和するのにかかる時間、 F_i は外

力による分布関数の変化率である。

密度、流速は速度分布関数のモーメントをとることで得られ、圧力は状態方程式の形で表現される。

$$\rho = \sum_i f_i, \quad \rho \vec{u} = \sum_i f_i \vec{c}_i, \quad p = \rho c_s^2$$

ここで c_s は格子ボルツマン法における音速であり、格子ボルツマン方程式は低マッハ数極限 ($u \ll c_s$) で Navier-Stokes 方程式と一致する。

また、高レイノルズ数の流れを計算するために LES の手法を用いた。LES は格子サイズより小さな運動(SGS)の影響を渦粘性としてモデル化する。動粘性係数 ν と渦粘性係数 ν_t の和を用いて

$$\nu + \nu_t = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) c_s^2 \Delta t$$

のように表すことにすれば、LBM を用いた LES を行うことができる。

今回は Kobayashi(2005)の SGS モデルを使用した。

検証計算の結果

作成したモデルの検証として平行平板間流の計算を行い、過去の DNS の結果と比較した。計算条件は摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 180$ 、格子点数 $216 \times 108 \times 72$ とした。平均主流流速について DNS の結果と良い一致が見られた(図 1)。

接地境界層乱流の計算結果

検証計算を踏まえ、LBM-LES により

水平一様な中立接地境界層の乱流を解析した。計算条件は格子点数 $384 \times 256 \times 64$ 、粗度 $\frac{z_0}{h} = 0.001$ (h : ドメインの高さ)で、 x 方向に一定の外力を与えることで流れを駆動した。図 2 に計算された主流風速変動の水平断面図(瞬間場)を示す。主流方向に長く伸びたストリーク構造(低速領域と高速領域が交互に並んだ構造)が見られる。このストリーク構造と運動量輸送の関係性を調べるために、強いイジェクション(低速な空気塊の上昇運動)に対してコンディショナルサンプリングを行った。強いイジェクション周辺で平均的に主流方向に伸びた低速領域が存在することがわかる(図 3)。

まとめ

格子ボルツマン法を用いた LES により接地境界層の流れを再現し、大規模な組織構造と運動量輸送の関係性についての解析を行った。

引用文献

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

Robert D. Moser, John Kim and Nagi N. Mansour, 1987: Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_{\tau} = 590$, *Phys. Fluids*, 11, 4

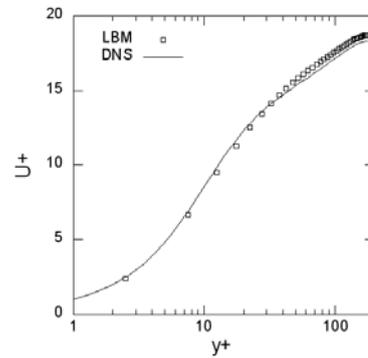


図 1 平均主流流速 のプロファイル(DNS の結果は Kim et al(1987)より引用)

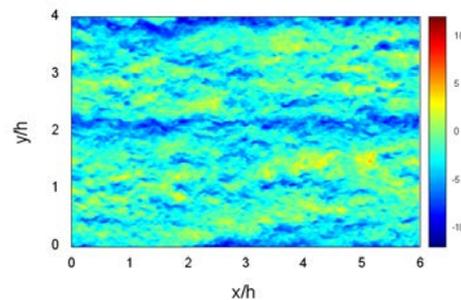


図 2 高さ約 $0.08h$ における主流風速変動の水平断面 (濃: 高速、薄: 低速)

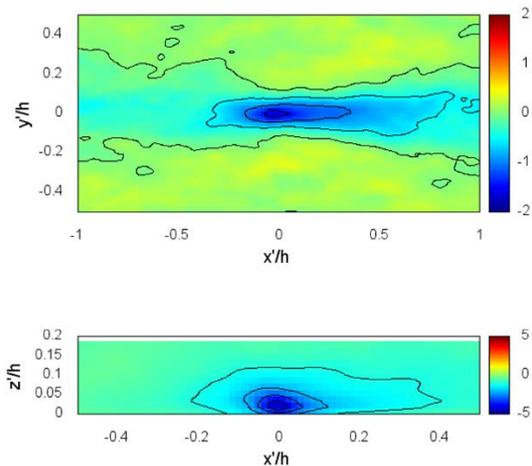


図 3 強いイジェクションに対するコンディショナルサンプリングによって得られた風速変動の分布 (上: 水平断面、下: 鉛直断面)