

ラフネス上を発達する乱流境界層のラージ・エディ・シミュレーション

清水建設和泉研究室 正会員 野澤剛二郎
東京工業大学 正会員 田村 哲郎

1. はじめに

LES計算の流入境界条件で必要となる変動風作成の方法として、周期的境界条件を用いるドライバで作成する方法がある。しかし、流入変動風には統計量が時間的に変化しない流れ場を作成する必要があるため、一般的に用いられる周期境界条件では空間的に発達する大気境界層を模擬することは不可能である。Lund *et al.*¹⁾は平板境界層の鉛直分布の相似性を利用した準周期的境界条件により、空間的に発達するものの、時間的には統計量が不変となる境界層を作成する方法を提案している。しかし、この方法は滑面を対象としており、粗度の大きい境界層を対象とすることが多い土木建築構造物では、粗面に対する適用が期待される。Lund *et al.*の方法を簡便化して粗面に対応する流れ場を再現する方法も提案されているが²⁾、乱れ性状などが十分に再現されていない³⁾。そこで、本研究ではLund *et al.*の方法に対してラフネスブロックを床面上に配することで、粗面上に発達する乱流境界層の作成を試みる。

2. 準周期的境界条件

空間的に発達する境界層の計算では、境界層より上方は一様流として与え、外力としての圧力勾配をゼロとしていることから、流下するに従い境界層厚は増していく。本研究では、全計算領域の約6割の位置に設けられた下流境界での物理量を内層と外層に分けて、それぞれ境界層厚 δ と壁面摩擦速度 u_τ を用いたスケールを変換を行い、境界条件として流入(上流)境界に与える(図-1)。この方法により流入での境界層厚を一定に保つことができる。周期境界部分でのデータの受け渡しは下流境界から上流境界へのみ行われ、下流端には流出境界が設けられている。主流方向風速について、下流境界から上流境界への変換の方法は下記ようになる。

$$\text{内層: } U_i(y^+) = \gamma U_r(y^+), \quad u_i(y^+) = \gamma u_r(y^+) \quad \text{外層: } (U_\infty - U_i)(\eta) = \gamma(U_\infty - U_r)(\eta), \quad u_i(\eta) = \gamma u_r(\eta)$$

ここに、 U :平均風速、 u :変動成分、 y^+ :壁距離 ($y u_\tau / \nu$)、 η :高さのパラメータ (y/δ)、 γ :壁面摩擦速度比 ($u_{\tau,i}/u_{\tau,r}$) である。下付添え字 i と r はそれぞれ、上流境界と下流境界の物理量であることを示している。

上記の変換方法には、上下流境界の境界層厚(運動量厚)比と摩擦速度比の二つのパラメータがある。運動量厚比については上流境界は任意性があり、下流境界では計算結果の時間平均を用いることで決められるが、摩擦速度比については上流境界での設定に任意性はないため、決めることができない。Lund *et al.*の方法では、カルマンの運動方程式と滑面に適用されるブラジウスの公式から運動量厚比と摩擦速度比の関係式を導いている。そこで、本研究ではPrandtl *et al.*の粗面の局所的抵抗係数と粗度パラメータに関する経験式を用いて、運動量厚比と摩擦速度比の関係式を導く。ここでは周期境界の流下距離が短いことを利用して、局所的抵抗係数の経験式を指数関数の形に置き換えることで以下の式を得る。

$$\frac{\theta_r}{\theta_i} - 1 = \frac{c_f(x_i)}{2\theta_i} \frac{x_i}{1-\alpha} \left\{ \left(\frac{u_{\tau,r}}{u_{\tau,i}} \right)^{\frac{2-2\alpha}{\alpha}} - 1 \right\}, \quad \text{ただし、} \alpha = \frac{3.95}{2.87 + 1.58 \log(x_i/k_s)}$$

ただし、 k_s は粗度高さで、平板前縁からの距離に相当する x_i については、数値計算結果から求められる全抵抗係数とPrandtl *et al.*の全抵抗係数に関する経験式から同定する必要がある。

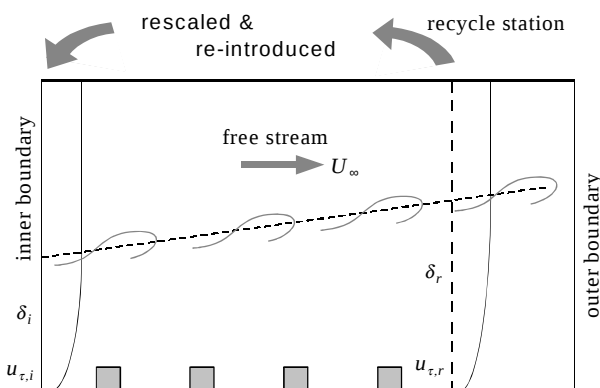


図-1 Lundの方法の概念図

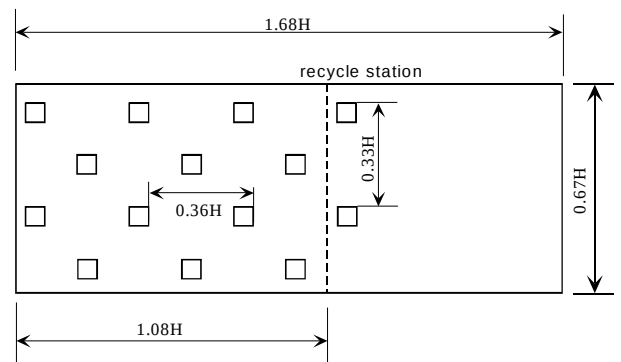


図-2 計算領域とラフネスブロックの配置

keywords: 乱流、大気境界層、LES、ベキ乗則、乱れ強度、粗面

連絡先: 〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2 フコク生命ビル 27F, TEL03-3508-8101, FAX03-3508-2196

3. 数値計算手法

本研究では、LESによりフィルター化された非圧縮性のNavier-Stokes方程式と連続の式を、コロケーション格子上に離散化している。空間に対しては2次精度の中心差分、時間に対して対流項にAdams-Bashforth法、粘性項にCrank-Nicolson法を用いる。圧力と速度のカップリングにはFractional Step法を用い、無次元時間刻み幅 $\Delta t=0.0002$ 、一様流 U_∞ と境界層厚 δ で決まるレイノルズ数は約90,000である。側面は周期境界条件とし、上面は水平方向にはすべりの条件、鉛直方向には排除厚の増加に併せて面に一様な風速を与えている。流出境界では移流型の境界条件としている。SGSモデルにはSmagorinskyモデルを用い、壁面ではVan-Driest型の減衰関数を用いている。計算領域は水平解像度の異なる三つの領域に分割して計算を行っている。床面近傍の解像度（主流方向×スパン×鉛直）は $(6.7 \times 3.7 \times 0.14) 10^{-3}H$ で、鉛直方向には床から離れるに従って格子間隔が広がるようにしている。

床面に設置されたラフネスブロックは $8 \times 12 \times 31$ 格子からなり、その大きさは約 $0.053H \times 0.049H \times 0.043H$ である。ラフネスブロックは流入面から千鳥状に等間隔で14個置かれている（図-2）。ラフネスブロックの占める床面の表面積は約4%である。ラフネスブロックの近傍では、比較的少ない格子点数でも精度良く計算を行うため、瀧口ら⁴⁾が提案している簡易CIP法を用いる。簡易CIP法はラフネスブロックの周囲3格子分に範囲でのみ適用している。

4. 計算結果

図-3に流れ場の様子を示すが、比較的少ない格子点数でもラフネスブロックの側面と背後に逆流域が形成されていることが確認できる。図-4に境界層の流下方向への発達具合を示す。排除厚 δ^* はほぼ一定の割合で増加しているのに対して、運動量厚 θ はラフネスブロックの無くなるあたりから勾配が大きくなる。最も下流にあるラフネスブロックから約 $0.3H$ 下流での平均風速分布を見ると、境界層厚 δ は約 $0.7H$ で、壁近傍では対数則分布に、上方ではべき乗則に当てはまっており、べき指数は約 $1/4$ である（図-5）。乱れ強度分布を見ると、ラフネスブロックの高さ付近（ $z=0.05H$ ）で主流方向が約0.3、スパン方向が約0.17、鉛直方向が約0.15となっている（図-6）。レイノルズ応力の最小値が約0.004であることから（図-7）壁面摩擦速度 u_τ は約0.065となり、壁摩擦速度で無次元化された主流方向の乱流強度の最大値は約2.3となる。これは、既往の実験結果⁵⁾（約2.1）と良く一致している。また、スパン方向成分、鉛直成分はそれぞれ、約1.5、1.2であり、実験結果の平均的な値1.4、1.2とも一致している。

参考文献 1) T.S.Lund, X.Wu, K.D.Squires, J.of Comp. Phys. vol.140, pp.233-258, 1998. 2) 片岡浩人、水野稔、第12回数値流体力学シンポジウム、pp.173-174、1998. 3) 野澤剛二郎、田村哲郎、日本建築学会構造系論文集 第530号、pp.13-20、2000. 4) 瀧口智志、梶島岳夫、三宅裕、日本機械学会論文集B編 64巻625号、pp.48-55、1998. 5) M.R.Raupach, R.A.Antonia, S. Rajagopalan, Appl. Mech. Rev. vol.44, no.1, pp.1-25, Jan. 1991.

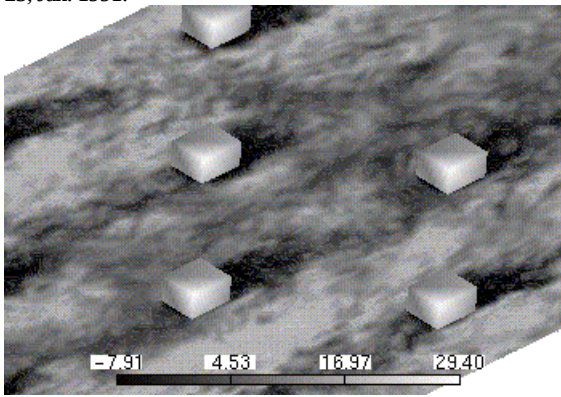


図-3 床面近傍の流れの様子（主流方向流速分布）

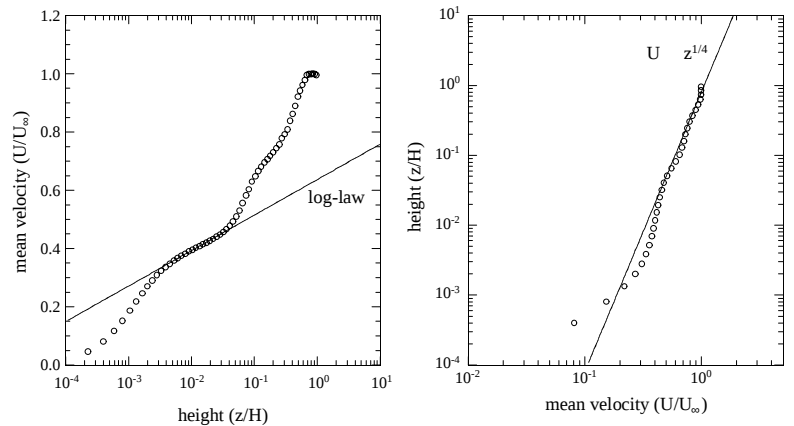


図-5 平均風速分布（ $x=1.5$ 付近）

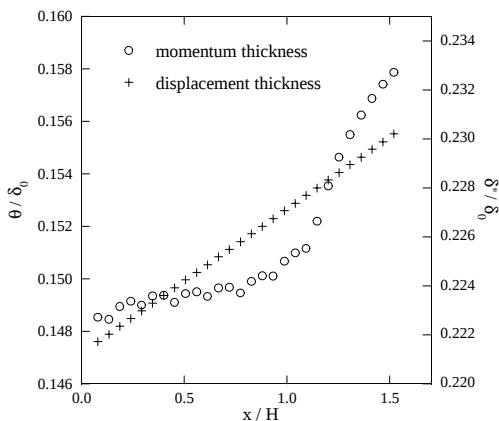


図-4 運動量厚と排除厚の流下方向への変化

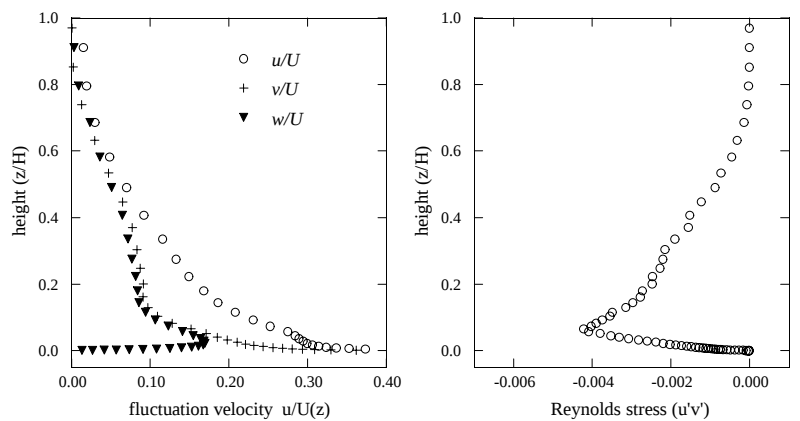


図-6 乱れ強度分布とレイノルズ応力分布（ $x=1.5$ 付近）