

リスケール・リサイクル法を用いた平板乱流境界層 DNSデータベースの構築

阿部浩幸, 溝淵泰寛, 松尾裕一 (JAXA)
宇宙航空研究開発機構

Establishment of DNS database in a turbulent boundary layer using the rescaling-recycling method

by

Hiroyuki Abe, Yasuhiro Mizobuchi and Yuichi Matsuo (JAXA)

ABSTRACT

DNS database of a zero-pressure gradient turbulent boundary layer has been established in the range $Re_\theta=300 \sim 1250$ with a relatively large computational domain, where the inlet condition is prescribed by the rescaling-recycling method. In the present study, basic turbulence statistics and turbulence structures are reported. A comparison with other numerical methods (viz. the fringe and passing wake methods) is also made. It is shown that the present turbulence statistics are close to those obtained from the fringe method, whilst there is some discrepancy in results between the rescaling-recycling method and the passing wake method at low Reynolds numbers.

1. はじめに

壁乱流の直接数値シミュレーション(DNS)においては, 平行平板間¹⁻³⁾ や円管内乱流⁴⁾ のDNSに加え, 空間発展する平板乱流境界層のDNS⁵⁻⁸⁾においてもデータベースの構築が近年精力的に進められている。

平板乱流境界層のDNSの代表的な計算方法は, 周期境界を用いたフリッジ法^{5,6)}とLundら⁹⁾により提唱された準周期境界に属するリスケール・リサイクル法^{8,11)}に大別される。本研究の対象となる後者の手法は, 下流のある任意の位置のデータを内・外層のスケーリング則を用いてリスケールし流入データとしてリサイクルして用いる。このため, 流入・流出境界を用いる計算となり, スペクトル法の適用が困難で有限差分法が多く用いられる。リスケール・リサイクル法を用いた平板乱流境界層のDNSの解析例としては, Kongら¹⁰⁾が2000年に自由速度および運動量厚さに基づくレイノルズ数 $Re_\theta = U_\infty \theta / \nu = 300 \sim 420$ (ν は動粘性係数を示す)のDNSを行っている。最近では, Simensら⁸⁾が大きな計算領域を設定したDNSを $Re_\theta = 620 \sim 2140$ のレイノルズ数域で実施している。Schlatter et al.⁶⁾, Wu and Moin¹²⁾の乱流遷移を考慮したDNSでも同様に大きな計算領域が用いられている。本研究では, 比較的大きな計算領域を用いたリスケール・リサイクル法のDNSを実施し, $Re_\theta = 300 \sim 1250$ のDNSデータベースを構築した。本報では, 基本的な乱流統計量および乱流構造を報告するとともに, Schlatter et al.⁶⁾, Wu and Moin¹²⁾の乱流遷移を考慮したDNSと比較・検討を行った結果を報告する。

2. 計算手法および計算パラメータ

流れ場には, ゼロ圧力勾配の平板乱流境界層を想定している。支配方程式は, 非圧縮性流体の連続の式, Navier-Stokes方程式より構成される。自由速度 U_∞ および流入部の運動量厚さ θ_0 (下付き0は流入部の諸量を表す)で無次元化すると,

連続の式

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\theta} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

と記述される(U, P はそれぞれ速度, 圧力を示し, 大文字は瞬時値, 小文字は変動値を示す。また, 下付き添字 $i=1,2,3$ は, それぞれ流れ方向(x), 壁垂直方向(y), スパン方向(z)を示す)。境界条件は, 流れ方向には入口ではLundら⁹⁾によるリスケール・リサイクル法, 出口では対流流出境界, スパン方向には周期境界, 壁面では滑りなし条件を与えた。境界層上部の境界条件は, Lundら⁹⁾, Simensら⁸⁾と同様に

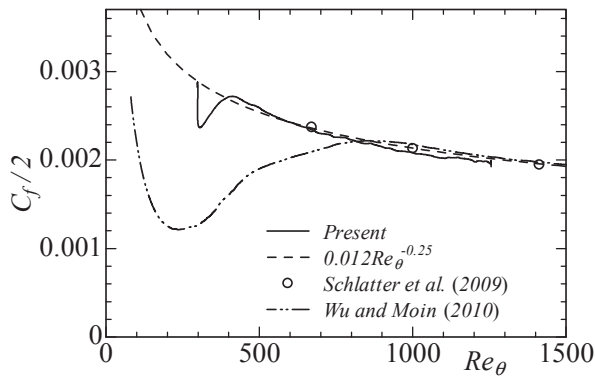
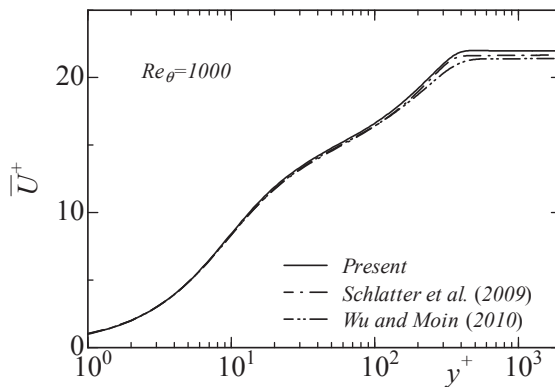
$$\frac{\partial U_1}{\partial x_2} = 0, \quad U_2 = U_\infty \frac{\partial \delta^*}{\partial x_1}, \quad \frac{\partial U_3}{\partial x_2} = 0 \quad (3)$$

として与えている(δ^* は排除厚さを示す)。

計算領域は $L_x \times L_y \times L_z = 1600\theta_0 \times 240\theta_0 \times 160\theta_0$, 所要格子数は $N_x \times N_y \times N_z = 2048 \times 256 \times 512$, 流入部の空間解像度は $\Delta x_0^+ = 12.3, \Delta y_0^+ = 0.17 \sim 46.8, \Delta z_0^+ = 4.92$, リサイクル位置は $L_{x,recy} = 800\theta_0$ に設定した。計算手法には有限差分法を用いた。詳細については阿部ら¹¹⁾に記した。

3. 結果および考察

摩擦係数 $C_f (= 2/U_\infty^2)$ の分布を図1に示す(上付き添字+は壁面量による無次元化を示す)。本計算結果は, 流入部付近においてSimensら⁸⁾のDNSと同様に流入データの影響により値が大きく減少しているが, $Re_\theta > 400$ では $C_f/2 = 0.012 Re_\theta^{-0.25}$ の経験式に良く一致している。他のDNSとの比較に関しては, 本計算結果はSchlatter et al.⁶⁾の結果とは非常に良く一致するものの, Wu and Moin¹²⁾のDNSは乱流への遷移が遅く $Re_\theta > 800$ にならないと結果が一致しない傾向が見受けられる。

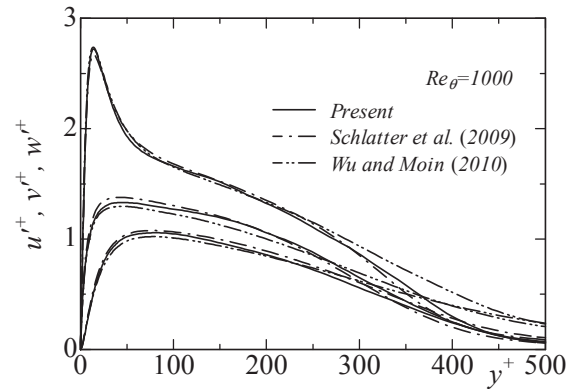
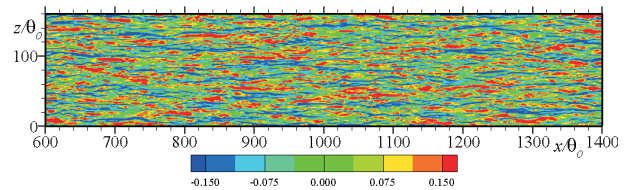
Fig. 1 Distributions of C_f .Fig. 2 Distributions of \bar{U}^+ .

ここで、 $Re_\theta = 1000$ において平均流速 \bar{U}^+ を比較すると、wake 付近で若干の差異が見受けられるものの、3 者のデータは確かに良く一致している (図2)。一方、乱流強度 u^{+} , v^{+} , w^{+} の分布 (プライムは RMS 値を示す) は、平均量と違い、Wu and Moin¹²⁾ のデータが外層で大きな差異を示している (図3)。Wu and Moin¹²⁾ の DNS は、Schlatter et al.⁶⁾ の DNS のように境界層内部においてじょう乱を与えるのではなく、境界層の外側にじょう乱を与えることにより遷移させていることが原因の一つと考えられる。

図4に壁面近傍のストリーク構造の分布を示す。平行平板間乱流¹⁻³⁾と同様に、流下してレイノルズ数が高くなるとストリーク構造がクラスター化する傾向が見受けられる。

4. 結論

リスケール・リサイクル法を用いた平板乱流境界層の DNS を実行し、 $Re_\theta = 300 \sim 1250$ の DNS データベースを構築した。得られた乱流統計量に対して乱流遷移を考慮した DNS (Schlatter et al.⁶⁾, Wu and Moin¹²⁾) と比較・検討を行った結果、本計算結果は Schlatter et al.⁶⁾ の DNS の結果に最も良く一致することが分かった。また、壁面近傍のストリーク構造に関しては、平行平板間乱流と同様に、流下してレイノルズ数が高くなるとクラスター化する傾向が見受けられた。

Fig. 3 Distributions of u^{+} , v^{+} and w^{+} .Fig. 4 Contours of u^+ at $y^+=10$.

謝辞

本研究では、JAXA スーパーコンピュータシステムを使用し計算を実行した。また、平成 20~21 年度科学研究費補助金 (若手研究(B), 課題番号 20760125) の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Hoyas, S. and Jiménez, J., Phys. Fluids, Vol. 18, (2006), 011702.
- (2) Abe, H., Kawamura, H. and Matsuo, Y., Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 25, (2004), pp. 404-419.
- (3) Iwamoto, K., Kasagi, N., and Suzuki, Y., Proc. of the 6th Symp. on Smart Control of Turbulence, March 6-9, (2005), Tokyo, pp. 327-333.
- (4) Wu, X. and Moin, P., J. Fluid Mech., Vol. 608, (2008), pp. 81-112.
- (5) Spalart, P., J. Fluid Mech., Vol. 187, (1988), pp. 61-98.
- (6) Schlatter, P., Örlü, R., Li, Q., Brethouwer, G., Fransson, J.H.M., Johansson, A.V., Alfredsson, P.H., & Henningson, D.S., Phys. Fluids, Vol. 21, (2009), 051702.
- (7) Wu, X. and Moin, P., J. Fluid Mech., Vol. 630, (2009), pp. 5-41.
- (8) Simens, M.P., Jimenez, J., Hoyas, S. and Mizuno, Y., J. Comp. Phys., Vol. 228, (2009), pp. 4218-4231.
- (9) Lund, T.S., Wu, X. and Squires, K.D., J. Comp. Phys., Vol. 140, (1998), pp. 233-258.
- (10) Kong, H., Choi, H. and Lee, J.S., Phys. Fluids, Vol. 12, (2000), pp. 2555-2568.
- (11) 阿部 浩幸, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, 第 25 回生研 TSFD シンポジウム講演論文集, (2010), pp. 24-27.
- (12) Wu, X. and Moin, P., Phys. Fluids, Vol. 22, (2010), 085105.