

再層流化過程のポアズイユ流における乱流構造の維持機構

Sustenance Mechanism of Turbulent Structure in Relaminarizing Poiseuille Flow

○ 福留 功二, 名工大院, 愛知県名古屋市昭和区御器所町, 18416600@stn.nitech.ac.jp
 飯田 雄章, 名工大, 愛知県名古屋市昭和区御器所町, iida.oaki@nitech.ac.jp
 長野 靖尚, 名工大, 愛知県名古屋市昭和区御器所町, nagano@heat.mech.nitech.ac.jp
 Koji FUKUDOME, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-Cho, Showa-ku, Nagoya
 Oaki Iida, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-Cho, Showa-ku, Nagoya
 Yasutaka Nagano, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-Cho, Showa-ku, Nagoya

The direct numerical simulations (DNSs) with a spectral method are performed to study sustain mechanism of turbulent structure in relaminarizing Poiseuille flow where quasi-laminar and turbulent regions simultaneously appear in the computational region. In quasi-laminar region, streamwise vortical structure disappears and very long low-speed streaks appear, while in the turbulent region, many quasi-streamwise vortices exist densely. The criterion using streamwise vorticity is found to be useful to distinguish between quasi-laminar and turbulent regions. The advection velocity of the turbulent and laminar regions is 14.2 which is slightly larger than bulk mean velocity. Turbulent kinetic energy is transferred from turbulent to quasi-laminar region in the region away from the wall, while it is transferred vice versa in very near wall region. This energy transfer, mainly driven by low and high speed streaks, contributes to keeping turbulent and quasi-laminar regions steady.

1. 緒言

平行平板間乱流においてレイノルズ数を低下させると、時間的に定常で、空間的に乱流領域と準層流領域が交互に現れる乱流一層流パターンが生じる⁽¹⁾。この乱流一層流パターンは、各平板間流れで類似した構造を持ち、流体の再層流化現象だけでなく、層流一乱流遷移の理解にも大きく貢献すると考えられる。特に、流体抵抗低減の観点から、準層流領域が安定して存在することは興味深い。しかし、この乱流一層流パターンの発生するメカニズムはまだ不明である。

本研究では低レイノルズ数ポアズイユ乱流の直接数値シミュレーションを行い、乱流一層流パターンが安定して存在するメカニズムを明らかにする。

2. 計算手法と計算条件

非圧縮の連続の式およびNS式を用いて、ポアズイユ乱流の数値シミュレーションを行った。空間離散化は、フーリエ・チェビシェフ展開によるスペクトル法、時間離散化は、非線形項に二次精度のAdams-Basforth法、粘性項にCrank-Nicolson法を用いた。境界条件は、流れ方向及びスパン方向に周期境界条件、壁垂直方向に粘着条件を適応し、 x, y, z をそれぞれ流れ方向、壁垂直方向、スパン方向とする。エイリアシング誤差の除去はパディングを用いた。計算領域は $L_x \times L_y \times L_z = 22\pi\delta \times 2\delta \times 10\pi\delta$ 、格子点数は $N_x \times N_y \times N_z = 512 \times 65 \times 288$ 、時間ステップは $t^+ = 0.03$ とした。本計算で用いるレイノルズ数は $Re_\tau = 60$ とし、圧力勾配一定条件下流れを駆動する。初期場は、 $Re_\tau = 100$ の完全発達した流れからレイノルズ数を低下させ、定常になったものを用いた。以下、上付き文字+、*はそれぞれ、 ν と u_r 、 ν と u_e による無次元化を示す。ここで、 u_e は平均圧力勾配による代表速度である。

3. 計算結果と考察

図1に縦渦と $y^+ \approx 10$ における低速領域 $u'^+ < 0$ を示す。縦渦は偏在して乱流ノットを形成し、空間的な間欠構造が生じている。この縦渦が多く観察される領域を乱流領域、観察されないところを準層流領域とする。乱流領域は、流れ方向に対して約25度傾斜して分布し、乱流領域の下流には低速領域、上流には高速領域が多く存在する。準層流領域では、低速ストリークが非常に長く揺

動なしに存在している。流れ場は、ほぼその形状を保ち下流へ移動する。ここで流れ方向速度の2点相關を用いて平均移流速度を算出した。その結果、平均移流速度は $U^+ = 14.2$ で、平均バルク速度とほぼ同じ値を示した。

次に、定量的に乱流領域と準層流領域を区別する指標を考察した。乱流領域では、縦渦が多く存在することから、流れ方向渦度 ω_x を用いて乱流領域を抽出した結果、よく一致した。

この指標を用いて乱流領域と準層流領域それぞれの乱流エネルギー収支を計算した。ここで、乱流エネルギーは両領域で残差が生じる。両領域は時間的にほぼ安定して存在することから非定常項はほぼ0であり、両領域で乱流エネルギーの輸送があると考えられる。壁近傍 $y^+ < 17$ で、乱流領域から準層流領域、 $y^+ > 17$ で準層流領域から乱流領域へと乱流エネルギーの輸送が考えられる。乱流エネルギー輸送は低速ストリークと高速ストリークが大きく関係する。乱流領域の移流速度は $y^+ \approx 22$ での平均速度と一致し、 $y^+ > 22$ に存在する高速領域は、乱流領域よりも特に速く移動するため、乱流領域上流に見られる高速ストリークが乱流領域へと移動する。一方、 $y^+ < 22$ に存在する流体は全体として下流側に移動する。壁近傍になると、乱流領域より速く移動する流体は存在せず、低速ストリークと高速ストリークは、乱流領域から下流の準層流領域へと移動する。この乱流エネルギー輸送のため、両領域が安定して存在すると考えられる。

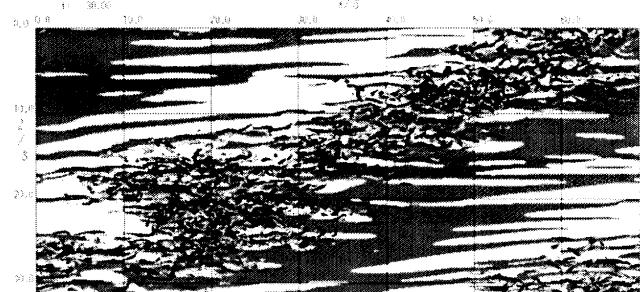


Fig. 1 Instantaneous distribution of low speed streaks and quasi-streamwise vortices. Gray regions: $u'' < 0$ at $y^+ = 10$, Black and light-gray isosurfaces: $II'' = -u_{i,j}' u_{j,i}' = 0.005$.

参考文献

- (1) Barkley, D. et al., *J. Fluid Mech.*, Vol. 576 (2007), pp. 109-137