

壁面せん断乱流における大規模構造と微細渦

Fine-Scale and Large-Scale Structures in Turbulent Wall Shear Flows

○ 富永 泰裕, 東工大院, 〒152-8580 東京都目黒区大岡山 2-12-1, ytominaga@navier.mes.titech.ac.jp
 店橋 護, 東工大院, 〒152-8580 東京都目黒区大岡山 2-12-1, mtanahas@mes.titech.ac.jp
 宮内 敏雄, 東工大院, 〒152-8580 東京都目黒区大岡山 2-12-1, tmiyauch@mes.titech.ac.jp
 Yasuhiro TOMINAGA, Mamoru TANAHASHI and Toshio MIYAUCHI
 Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology,
 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

To investigate fine-scale and large-scale structures of turbulent wall shear flows, direct numerical simulation of turbulent channel flow has been conducted for $Re_\tau = 1270$. The central axes of coherent fine scale eddies (CFSEs) are identified, and spatial distributions of the axes of the CFSEs and characteristics of the flow field are visualized by using a new method. The low-speed regions in the logarithmic law region are composed of many CFSEs or the cluster of the CFSEs with relatively strong swirling motions. The scale growth of clusters of CFSEs with a distance from the wall is deeply related with the scale growth of the low-speed regions in the logarithmic law region. The cluster of the CFSEs is closely related to the production of the Reynolds stress and the dissipation rate of the kinetic energy in the logarithmic regions.

1. 結論

壁面せん断乱流中には種々の渦構造が存在し、それらは壁面摩擦抵抗や熱物質輸送などの壁面近傍における工学的に重要な現象と密接に関係している。以前の研究から、壁面せん断乱流中にはコヒーレント微細渦構造が存在し、それらはコルモゴロフ・スケールとコルモゴロフ速度によってスケールリングできることが明らかにされている⁽¹⁾。また、外部領域に存在する低運動量領域はコヒーレント微細渦のクラスターで構成され、それらの内部では強い回転率を有するコヒーレント微細渦の存在確率が高いことが明らかにされている⁽²⁾。さらに、それらのクラスターではレイノルズ応力と乱流エネルギー散逸率が大きいことが明らかにされている⁽²⁾。しかし、コヒーレント微細渦のクラスターと低運動量領域、レイノルズ応力及び乱流エネルギー散逸率の空間構造との関係は必ずしも明らかにされていない。本研究では高レイノルズ数平行平板間乱流のDNSを行い、それらの結果から壁面せん断乱流における大規模構造と微細渦の関係を解明することを目的としている。

2. 平行平板間乱流の直接数値計算

非圧縮性の Navier-Stokes 方程式と連続の式を基礎方程式として平行平板間乱流の DNS を行った。流れ方向(x 方向)とスパン方向(z 方向)には周期境界条件を、壁垂直方向(y 方向)には壁面上で滑りなしとする no-slip 境界条件を用いた。流路半幅 δ と壁面摩擦速度 u_τ に基づくレイノルズ数 (Re_τ) は 1270 であり、計算領域と格子点数は流れ方向、壁垂直方向及びスパン方向にそれぞれ $2\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$ と $864 \times 1239 \times 648$ である。



Fig. 1 Spatial distribution of the axis of CFSE with the streamwise velocity fluctuation.

3. 壁面せん断乱流における大規模構造と微細渦

図 1 は対数則領域におけるコヒーレント微細渦の回転軸分布を示している。ここで、微細渦の抽出には Tanahashi ら⁽¹⁾によって開発された手法を用いた。可視化領域は $x^+ = 0 \sim 7980, y^+ = 360 \sim 800, z^+ = 0 \sim 3990$ である。回転軸の太さは、渦中心における第 2 不変量の平方根に比例するように描かれている。すなわち、剛体回転の強い渦ほど太く描かれている。軸の色は各 y^+ の位置における u_{rms}^+ によって正規化された主流方向変動速度 (u_c^*) に対応し、黒は低速領域を、白は高速領域を示している。以前の研究⁽²⁾では、低運動量領域とレイノルズ応力を等値面を用いて可視化し、それらと微細渦の回転軸分布との関係を議論した。本研究の可視化方法を採用することでより明確な可視化が可能となる。図 1 から、微細渦のクラスターは対数則領域に存在する低速領域と良く対応していることがわかる。また、強い回転率を有する太い軸は低速領域内に存在する確率が高い。外部領域に存在する微細渦とストリーク構造の関係を定量的に検討するために、微細渦中心軸上の流れ方向変動速度 (u_c^*) の確率密度関数 (PDF) を図 2 に示す。PDF は軸上の第 2 不変量によって条件付けられている。軸上の第 2 不変量が小さな渦の場合、PDF は 0 付近で最大値を示すが、軸上の第 2 不変量が大きな場合は、壁面から離れるに従い PDF は非対称となり、PDF の最大値は低速側に存在している。これは、剛体回転率の大きな微細渦が外部領域における低速領域に存在していることを示しており、上述の可視化結果と良く一致している。

参考文献

- (1) Tanahashi, M., et al. Int. J. Heat and Fluid Flow, 25(2004), 331-340.
- (2) Kang, S.-J. et al., Proc. 4th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena, 1(2005), 183-188.

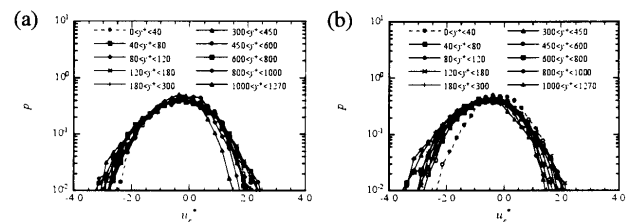


Fig. 2 Conditional probability density functions of u_c^* on the axes of the CFSEs. a: $Q_c^* < Q_c^*(y^+)$ and b: $Q_c^* \geq Q_c^*(y^+)$