壁近傍での縦渦の力学とレイノルズ数依存性 Dynamics of Coherent Structures in Near-Wall Turbulence and the Effect of the Reynolds Number

○ 正 永翁龍一 (産総研・環境管理部門)

Ryuichi NAGAOSA, Institute of Environmental Management Technology, AIST, Tsukuba 305-8569

Key Words: Coherent Structures, Near-Wall Turbulence, Streamwise Vortex, Turbulent Shear Layer

1 はじめに

壁近傍の乱流場において縦渦状あるいはシート状の組織構造や、これらの構造が複数個集まったと考えられるヘアピン状の渦構造などが存在することはかなり以前から知られている。特に最近の実験測定技術の著しい進歩^{(1),(2)}や乱流の三次元直接数値計算手法の発達⁽³⁾⁻⁽¹¹⁾によって、これらの壁乱流での素過程とも言える組織構造の力学が徐々にではあるが解明されつつある。これらの壁面近傍での乱流素過程の力学機構解明は、工学的に貴重な知見を与えることから、壁乱流に関する詳細な知見の必要性は今後もさらに大きくなるものと予測される。

本研究では開水路乱流場のDNSによって得られた $Re_\tau = 150$ 及び $Re_\tau = 300$ の瞬時乱流場のデータ群を用いて壁面近傍における渦度場の乱流統計量や組織構造の可視化を行うことによって壁面乱流場における組織構造の力学機構について議論を行った。

2 直接数値計算の概要

本研究では開水路乱流場のDNSによって得られた瞬時乱流場を解析対象とする。底部の境界は固定壁面で、また上部の壁面は滑り壁面で近似し自由表面として扱った。主流(x_1)方向に一定の圧力勾配を作用させ、壁面での摩擦速度が u^* がほぼ一定に保たれるようにした。

本研究では $Re = u^*\delta/\nu = 150$ (u^* は摩擦速度、 δ はチャネル水深、 ν は動粘性係数)及び300の二種類のレイノルズ数に対してDNSを適用し、十分に長い時間にわたって時空間平均をとることによって乱流統計量の算出を行った。

3 結果及び考察

図1に $Re_\tau = 150$ 及び300での壁面近傍での組織構造の一例を示す。組織構造は速度勾配テンソル $A_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$ の第二不変量である $Q = -(\partial u_i / \partial x_j)(\partial u_j / \partial x_i)$ を用いて、 $Q^+ > 0.03$ の領域を渦管として抽出した。この図から明らかに、 $Re = 150$ の場合には可視化された組織構造はその殆どが縦渦状のものであるのに対して、 $Re = 300$ の場合には縦渦ばかりでなく、スパン方向に平行なかなり大規模な渦構造(図1(b)で矢印で表示した)も観察されることがわかる。また $Re = 150$ の場合にはスパン方向に強い渦度変動を持つ組織構造はその殆どがシート型の形状を持つが、 $Re = 300$ ではシート型のものと同時に管型の形状を持つものもあることがわかった。このことはレイノルズ数が高くなることにより壁面近傍でのせん断の効果が強く現れ、縦渦同様にスパン方向渦の重要性も大きくなることを示す。また壁近傍での組織構造の時間発展を検討したところ、スパン方向渦と縦渦の成長と相互作用に低

Fig. 1: Coherent structures in the near-wall region: (a) $Re = 150$; (b) $Re = 300$. These structures are educed by $Q^+ > 0.03$. The sizes of the depicted region are 1885 and 943 viscous wall units.

速流体の壁垂直方向への成長(四象限解析での $Q2$ 事象に相当する)が大きな役割を果たすことがわかった。

4 まとめ

壁近傍に生成される組織構造の詳細をDNSデータを用いて検討した。その結果、 $Re = 300$ の場合には、スパン方向に回転軸を持つ組織構造が観察された。またスパン方向渦は低速流体の壁垂直方向への成長($Q2$ 事象)によって強化され、比較的大規模な構造に発達することも明らかとなった。この種類の組織構造は $Re = 150$ の場合にはほとんど観察されず、レイノルズ数が高くなるにつれてその力学的重要性は大きくなると考えられる。