

Re_τ=1020 の平行平板間乱流の DNS に見る階層的な乱流構造

○阿部浩幸*, 松尾裕一*, 河村洋†

Hierarchical turbulence structures observed in DNS of a turbulent channel flow at Re_τ=1020

Hiroyuki ABE*, Yuichi MATSUO* and Hiroshi KAWAMURA†

Abstract

The structures of streamwise velocity fluctuations in a turbulent channel flow at a relatively high Reynolds number are studied by conducting direct numerical simulation. The Reynolds number is set to be 1020 based on the friction velocity and the channel half width. It is shown that large-scale structures of the streamwise velocity fluctuations appear hierarchically in the intermediate and outer regions. Indeed, the large-scale structures in the intermediate region appear noticeably at the present Reynolds number, which can hardly be recognized at low Reynolds numbers.

1. はじめに

高レイノルズ数壁乱流においては、近年の実験により、外層の大規模構造の重要性が指摘され、その力学的機構を解明するために数多くの研究が行われてきた。他方、レイノルズ数が高くなるにつれて内・外層がはっきりと分離され、中間層が顕著にあらわれる部分に相当することから、乱流構造に対しても普遍的な挙動があらわれることが期待され、渦構造や流れ方向速度変動 u' に対して、長さスケールの増加に関する機構やその階層性に関しての議論が行われてきた。その中でも、 u' のスパン方向に対する長さスケールの増加の機構に関しては、壁面近傍のストリーク構造と外層の大規模構造の平均間隔が大きく異なることから、議論がされてきた。例えば、Nakagawa & Nezu¹⁾ は、低レイノルズ数の open channel において実験を行い、 u' のスパン方向への平均的な長さスケールは、対数領域で、概ね線形に増加することを指摘している。Tomkins & Adrian²⁾ は、高レイノルズ数の乱流境界層において PIV の計測を行い、 u' のスパン方向への長さスケールの増加は、対数領域で、統計的には自己相似的に線形に増加し、瞬時では階層的に増加することを指摘している。

一方、本研究の対象となる平行平板間乱流の直接数値シミュレーション(DNS)においても、計算機の性能の発展とともに大規模構造の解析が行われてきた。del Álamo & Jiménez³⁾ は、壁面摩擦速度 u_τ とチャネル半幅 δ に基づくレイノルズ数 $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 180, 550$ において、 u' の大規模構造が、 $y/\delta = 0.5$ の位置に存在することを指摘している。Abe ら⁴⁾ は、 $Re_\tau = 180 \sim 640$ に対して、そのスパン方向の平均間隔を調べ、約 1.3~1.6 δ と報告している。また、これらの DNS を通じて、外層の大規模構造の影響が内層まで確かに及んでいることが、統計的、瞬時的結果から報告されている。最近では、 $Re_\tau > 1000$ の DNS が実行され、DNS で扱えるレイノルズ数が既存の実験結果と比較できるレイノルズ数域に達しつつある⁵⁻⁷⁾。これらの $Re_\tau > 1000$ の DNS の結果から外層の大規模構造の間隔は低レイノルズ数時と変わらず約 1.3~1.6 δ 程度であることが報告されている^{5,6)}。他方、高レイノルズ数の DNS の結果においては、低レイノルズ数では見られない階層的な構造が中間層に存在することが指摘されているが^{5,6)}、この構造に関する DNS による知見は未だ少ない。そこで、本報では、Wei & Willmarth⁸⁾ の実験のレイノルズ数に相当する $Re_\tau = 1020$ の平行平板間乱流の DNS を実行し、このレイノルズ数の階層的な乱流構造特徴について、特にスパン方向の挙動について調べた結果を報告する。

2. 計算手法

流れ場には十分発達した無限に長い平行平板間乱流を想定し、流れは平均圧力勾配により駆動されるものとした。設定されたレイノルズ数は、 $Re_\tau = 1020$ である。時間進行には、粘性項壁垂直方向は 2 次精度クランクニコルソン法を用い、その他の項は、3 次精度ルンゲクッタ法を用いた。なお、圧力の時間精度は 2 次精度を保つように計算を行っている。空間的離散化には、有限差分法を用い、流れ方向、スパン方向は 4 次精度中心差分を、壁垂直方向は 2 次精度中心差分を用いた。各種計算パラメータとしては、計算領域は、 $L_x \times L_y \times L_z = 12.8\delta \times 2\delta \times 6.4\delta$ 、所要格子数は、 $N_x \times N_y \times N_z = 2048 \times 448 \times 1536$ 、空間解像度は、 $\Delta x^+ = 6.38$ 、 $\Delta y^+ = 0.15 \sim 7.32$ 、 $\Delta z^+ = 4.25$ に設定した。統計量の積分時間は、低波数の挙動を極力把握するために、極力長く、 $tu_\tau^2/\nu = 13950$ とした。この時間は、流れが流路を 20 回通過した時間に相当する。計算手法の詳細、基本的な乱流統計量の結果は、Abe ら^{9,10)} に記した。

3. 結果及び考察

$Re_\tau = 1020$ の瞬時の u' の分布 (y - z 断面) を図 1 に示す。壁面近傍では、低速領域がスパン方向に $\Delta z^+ \approx 100$ 程度の間隔で存在しており、従来の実験結果に良く一致している。一方、 $y/\delta = 0.5, 1.5$ では、約 1.3~1.6 δ の間隔で大規模構造が存在している。他方、低速領域のスパン方向の長さスケールは、壁面から離れるにつれて階層的に増加している。ここで、瞬時の u' に対し、スパン方向の pre-multiplied spectra を壁からの全ての高さ位置で求め、図 2 に示す。結果として、図 1 に見た低速領域の階層構造に対応する離散的なピークが現れた。その中でも、対数領域の上限に相当する $y/\delta = 0.2, 1.8$ 付近に、0.9 δ 程度の波長を有した顕著なピークがあらわれている。

図 3 に、長時間積分を施した $Re_\tau = 1020$ における u' のスパン方向の pre-multiplied spectra の分布を示す。図 3 では、長時間の統計を重ねたことにより、図 2 に見た離散的なピークが消え、スペクトルが滑らかになっている。しかし、図 3 には、依然として 3 つのピークが顕著に残っている。壁面近傍では $\lambda_z^+ \approx 100$ にピーク値があらわれており、この波長はストリーク構造のスパン方向の平均間隔に一致している。壁面から離れるにつれて、ピーク位置は長波長側へ移行し、対数領域から外層にかけて $\lambda_z/\delta \approx 0.9, 1.3$ ($\lambda_z^+ \approx 900, 1300$) に顕著なピークがあらわれている。特に、0.9 δ の波長のピークは $y/\delta \approx 0.2$ ($y^+ \approx 200$) に、1.3 δ の波長のピークは $y/\delta = 0.3 \sim 0.5$ ($y^+ \approx 300 \sim 500$) に顕著にあらわれている。後者の 1.3 δ のピークは $Re_\tau = 180 \sim 640$ の DNS⁴⁾ で見受けられ、外層の

* 宇宙航空研究開発機構 計算科学研究グループ

† 東京理科大学理工学部機械工学科

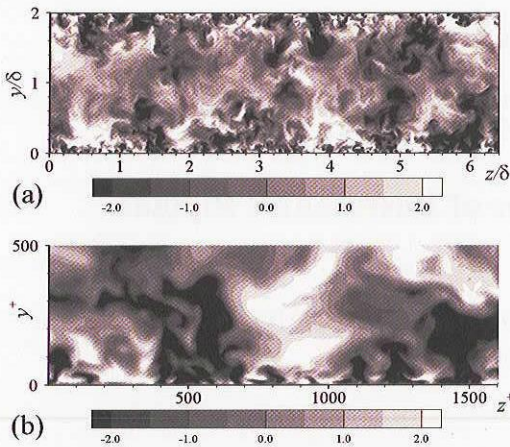


Fig. 1 Contour of instantaneous u' in the y - z plane at $Re_\tau=1020$: (a) whole view; (b) enlarged view.

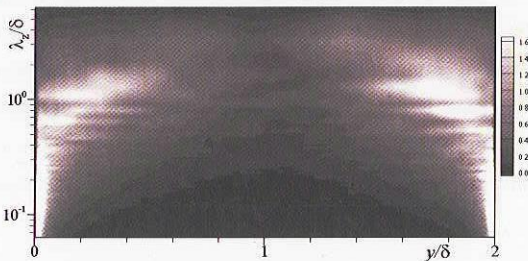


Fig. 2 Contour of spanwise pre-multiplied spectra of u' at $Re_\tau=1020$ normalized by u_τ^2 , which are obtained from one instantaneous realization.

大規模構造の間隔に一致している。一方、前者の 0.9δ のピークは、 $Re_\tau=1020$ に達して初めて顕著にあらわれた。この結果は、レイノルズ数の増加に伴い、対数領域の上限にあたる $y/\delta \approx 0.2$ に新たに大きなスケールの構造が顕著にあらわれたことを示唆している。

対数領域以下における大規模構造と外層における大規模構造を分けて 3 次元可視化し、図 4 に示す。図 4 では、図 3 のスペクトルのピークに一致し、スパン方向に $0.8 \sim 1.0\delta$ の間隔を有した低速の大規模構造が図 4(a) に、約 $1.3 \sim 1.6\delta$ の間隔を有した低速の大規模構造が図 4(b) にあらわれている。なお、図 1 から分かるように、図 4(a) と 4(b) に見る大規模構造には相互相関が存在する。すなわち、対数領域の上限に見る低速の大規模構造は、頻りにチャンネル中央へ吹き出し、外層における低速の大規模構造の形成に大きく寄与している。

また、対数領域の上限 ($y/\delta \approx 0.2$) における低速の大規模構造のスパン方向の間隔に関しては、最近、Tomkins & Adrian¹¹⁾ が $Re_\tau=426, 2216$ の乱流境界層において PIV による実験を行い、本研究と同様に、 u' のスパン方向の pre-multiplied spectra を求めて調べている。彼らは、レイノルズ数によらず約 0.9δ の波長にピークがあらわれることを指摘している。この波長は、図 3 に見た本研究のスペクトルのピーク波長と良く一致している。また、彼らは瞬時場に対する実験的研究も行っている²⁾ が、本研究の結果は瞬時的にも彼らの結果と良く一致している (図省略)。これらの結果は、対数領域の上限に見る大規模構造は、外層の大規模構造とは違い、平行平板間乱流と乱流境界層で非常に類似したものであることを示唆しているものと考えられる。

本研究の計算は、宇宙航空研究開発機構の数値シミュレータ III を用いて行った。

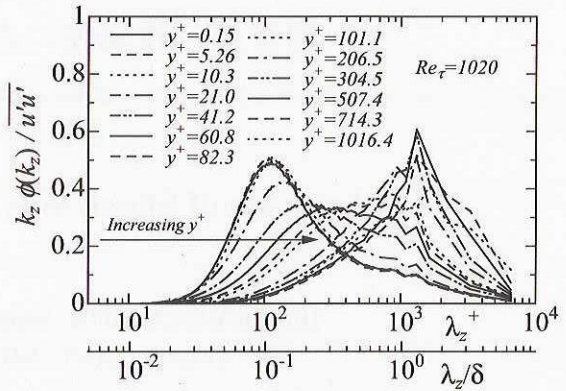


Fig. 3 Spanwise pre-multiplied spectra at $Re_\tau=1020$.

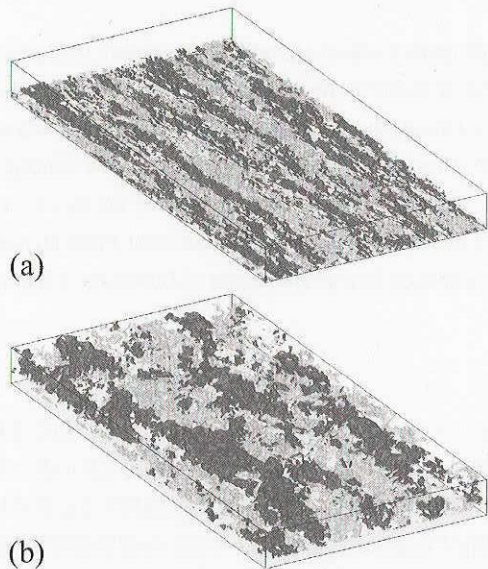


Fig. 4 Iso-surfaces of instantaneous u' normalized by their own rms value at each y^+ for $Re_\tau=1020$: (a) $y/\delta=0 \sim 0.2$; (b) $y/\delta=0.2 \sim 1.0$. Light-gray, $u'/u'_{rms} > 1.5$; dark-gray, $u'/u'_{rms} < -1.5$. The boxes visualized here are $12.8\delta \times \delta \times 6.4\delta$ in x, y and z directions, respectively. The direction of the flow is from top-left to bottom-right.

謝辞

京都大学の藤定義先生には、大規模構造の階層性について貴重なご議論をさせて頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

1) H. Nakagawa & I. Nezu: J. Fluid Mech. **104** (1981) 1. 2) C. D. Tomkins & R. J. Adrian: J. Fluid Mech. **490** (2003) 37. 3) J. C. del Álamo & J. Jiménez: Phys. Fluids **15** (2003) L41. 4) H. Abe, H. Kawamura & H. Choi: Trans. ASME J. Fluids Eng. **126** (2004) 835. 5) 岩本, 鈴木, 笠木: 日本流体力学会 2003 講演論文集 (2003) 46. 6) 阿部, 松尾, 河村: 日本流体力学会 2004 講演論文集 (2004) 398. 7) S. Hoyas & J. Jiménez: Phys. Fluids **18** (2006) 011702. 8) T. Wei & W. W. Willmarth: J. Fluid Mech. **204** (1989) 57. 9) H. Abe, H. Kawamura & Y. Matsuo: Trans. ASME J. Fluids Eng. **123** (2001) 382. 10) H. Abe, H. Kawamura & Y. Matsuo: Int. J. Heat and Fluid Flow **25** (2004) 404. 11) C. D. Tomkins & R. J. Adrian: J. Fluid Mech. **545** (2005) 141.