DNS データベースを用いた二次元チャネル内乱流構造の観察*

黒田 明 慈^{*1}, 工藤 一 彦^{*1}, 谷 口 博^{*2}
長谷川 聡^{*3}, 菅 家 淳 一^{*3}Observations of Turbulence Structure in a Two Dimensional Channel Flow
Reproduced by a Direct Numerical SimulationAkiyoshi KURODA, Kazuhiko KUDO, Hiroshi TANIGUCHI,
Satoshi HASEGAWA and Jun'ichi KANKE

Recent computer development has enabled such a numerical simulation of turbulence as the direct numerical simulation (DNS). Direct numerical simulation provides valuable information of the flow field, such as the distributions of fluctuating velocity, pressure, and vorticity in the three dimensional space, which are difficult or often impossible to be obtained from experiments. In this study, the unsteady behavior of coherent structures in the two dimensional turbulent channel flow reproduced by a direct numerical simulation was visualized and animated with the aid of three dimensional computer graphics technique. The space-time relationship between vortical motions and streaks, ejections, sweeps was clearly observed from a moving frame at a speed of $U^+ = 14.0$. In addition, it is found from the spectrum analysis that the coherent structures are constructed with relatively low wave number components of the fluctuating velocities and pressure.

Key Words: Flow Visualization, Turbulent Flow, Numerical Analysis, Coherent Structure, Direct Numerical Simulation, Wall Turbulence, Channel Flow

1. 結 言

近年の計算機ハードウェアの発達によって単純形状、低レイノルズ数流れに限られるものの、乱流の直接数値シミュレーション(DNS)が可能となり、統計理論の検証、乱流モデルの開発と評価など乱流現象の基礎研究に有益な情報を提供している。また、時空間の任意の点において定量的データを与えるDNSは、乱流場の組織的構造の研究にとって一つの理想的な情報源であるといえ、コンピュータグラフィックスを利用した可視化などによって従来の実験的手法では得られなかった新たな知見をこの分野にもたらした^{(1)~(4)}。

ところで、乱流構造の生成や発達に関与する力学的機構を明らかにするためには、場の時間的変化の観察が不可欠である。しかしながら、これに要するDNSのデータ量は膨大であり、これを操作することは現在のコンピュータ環境では必ずしも容易ではない。本研

究では、まずDNSによって再現される流れ場から連続的に乱流構造を抽出し、可視化・動画化するシステムを構築し、壁面近傍乱流構造の非定常挙動の観察を行った。また、乱流の組織的構造に関する一連の研究成果は、最終的に場の制御や乱流モデルの構築に役立てられることを目的としているが、この際、構造の特徴的なスケールを把握することは重要な手掛かりとなると考えられる。このような観点から、本可視化システムの応用として、乱流変動量の高波数成分を順次除去していった際に各構造がどのように変化するかを連続的に可視化することによって乱流構造の波数依存性を調べた。

2. 記 号

L_x, L_z : 流れ方向およびスパン方向の計算領域最大波長

N_x, N_y, N_z : 流れ方向、壁垂直方向およびスパン方向のスペクトルモード数

p : 圧力変動成分

Re_τ : レイノルズ数 $= \delta u_\tau / \nu$

Re_c : レイノルズ数 $= 2\delta U_c / \nu$

t : 時間

T_m : m 次のチェビシェフ多項式

* 原稿受付 1994年6月9日。

*¹ 正員, 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

*² 正員, 北海学園大学工学部 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)。

*³ 学生員, 北海道大学大学院。

u, v, w : 流れ方向, 壁垂直方向およびスパン方向の速度変動成分

U : 流れ方向速度平均成分

U_c : チャネル中心流速

u_τ : 壁面摩擦速度

x, y, z : 流れ方向, 壁垂直方向およびスパン方向

δ : チャネル半幅

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: 流れ方向, 壁垂直方向およびスパン方向の波長

ν : 動粘性係数

添字

()⁺: u_τ および ν による無次元化量

(^): スペクトル係数

3. 解析手法

解析対象とした流れ場は十分に発達した二次元チャネル内乱流であり, チャネル半幅 δ と壁面摩擦速度 u_τ で定義されるレイノルズ数 Re_τ は 205 とした。本流れ場をスペクトル法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた DNS により再現した。空間的離散化は, 流れ方向およびスパン方向には乱れの周期性を仮定してフーリエ・スペクトル法を用い, 壁垂直方向には壁面上で滑りなし条件を満たすようにチェビシェフ・タウ法を採用した。計算に用いたスペクトルモード数は $144(x) \times 129(y) \times 128(z)$ である。また, 計算領域は $3.6\pi\delta(x) \times 2\delta(y) \times (4/3)\pi\delta(z)$ とした。この計算領域および格子解像度は, 粘性スケールで見た場合に既存の DNS⁽⁷⁾⁽⁸⁾ の場合と同程度である。時間的離散化は, 対流項に二次精度の Adams-Bashforth 法, 拡散項に Crank-Nicolson 法を用いた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

計算結果による統計量の代表例として図 1 に平均速度分布, 図 2 に速度変動値を示す。中心流速 U_c とチャネル幅 δ で定義したレイノルズ数 $Re_c = 7580$ であり, ほぼ同じレイノルズ数で測定を行った Nishino ら⁽⁹⁾の実験データとよく一致しており, 本 DNS により乱流場が精度よく再現されていると考えられる。

計算領域および可視化領域(斜線部)を図 3 に示すように設定した。場が十分に発達した後のある時刻を起点 ($t^+ = 0$) とし, $t^+ = 0 \sim 357$ の範囲のデータを時間間隔 $\Delta t^+ = 3.0$ ごとに可視化を行い, 準秩序構造の非定常挙動解析のための動画を作成した。この際, 流下する乱流構造の時間的変化の観察を容易にするために, 秩序構造のおおよその対流速度である $U^+ = 14.0$ で下流に向かって視点を移動させた。この移動視点から見た場合, 低速ストリークなどの壁面ごく近傍の構造は平均的に上流側へ, ヘアピン渦のヘッド部など壁から

図 1 平均速度分布

図 2 速度変動値

図 3 計算領域および可視化領域

離れた構造は下流側へ移動するように観察される。

また, 瞬間場のデータに対して, ある物理量 a を

$$a(x, y, z; t) = \sum_{m=0}^{N_y} \sum_{k_x=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{k_z=-N_z/2}^{N_z/2-1} \hat{a}_m(k_x, k_z; t) \times \exp\{i2\pi(k_x x/L_x + k_z z/L_z)\} T_m(y) \cdots (1)$$

のように, 流れ方向およびスパン方向にフーリエ級数展開, 壁垂直方向にチェビシェフ多項式展開して, 各方向の高次成分を順次取り除いていった場合に乱流構造がどのように変化するかを観察し, 構造の波数依存性を調べた。なお, 式(1)中において $L_x = 3.6\pi\delta$

図4 可視化・動画化システム

($\approx 2318\nu/u_\tau$), $L_z=(4/3)\pi\delta(\approx 859\nu/u_\tau)$, N_x, N_y, N_z の最大値はそれぞれ $N_x=144$, $N_y=128$, $N_z=128$ である。

4. 可視化・動画化システム

本研究で作成した乱流構造の可視化・動画化システムは、DNSによって再現される速度変動、圧力変動、乱流応力変動等の各等値面の時系列画像データをVTRに記録するものである。その概要を図4に示す。

乱流諸量の等値面の検出には、マーチン・キューブアルゴリズム⁽¹⁰⁾を、等値面データの二次元面投影の際の陰面処理には、Zバッファアルゴリズム⁽¹¹⁾を用いている。動画の作成にはDNSの供出する極めて膨大な時空間データ(今回の計算では一つの時間ステップにつき2377728点の計算点が存在する)を処理する必要があるが、これらのデータをあらかじめ計算によって求め、保存しておくことは現行システムでは困難である。そこで本システムでは、流れ場のシミュレーションを行いながら、適当な時間ステップごとにDNSプログラムにリンクされた上述の可視化アルゴリズムによる処理を行い、画像データを作成・保存する方法を用いた。また、画像データは、ランレングスエンコーディングフォーマット形式⁽¹²⁾による圧縮を行うことによって、データ容量を約1/8にし、必要ディスク容量および画像データ転送時間の節約を図っている。以上の手続きによって、スーパーコンピュータのディスク上に一時的に保存した画像データをコンピュータネットワーク(LAN)を通じて、パーソナルコンピュータシステム上の光磁気ディスクに転送し、これをVTRにこま撮り録画することによって、動画の作成

図5 ハードウェア構成

を行った。

パーソナルコンピュータを中心としたハードウェア構成を図5に示す。光磁気ディスクに保存された画像データを逐次コンピュータ画面に表示し、これをこま撮り可能なビデオレコーダで数フレームずつ録画する操作を自動的に繰返すことによって動画を作成する。この際、ビデオレコーダはRS232Cを通じてコンピュータによって制御されている。また、必要な場合にはビデオプリンタによる画像のカラーハードコピー出力を行った。なお、システム制御プログラムはC言語によって開発した。

5. 結果・考察

可視化を行ったのは、流れ方向速度変動、圧力変動、乱流応力変動の各等値面である。各等値面のしきい値は、構造の見え方に影響を与えるが、ここでは過去の可視化研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾との整合性を考慮して、低速ストリークの抽出には $u^+ = -3.0$ 、渦構造の同定には低圧領域検出法⁽¹⁾⁻⁽³⁾を用い $p^+ = -3.0$ 、乱流応力変動の抽出には $u^+v^+ = -3.0$ をしきい値とした。

5.1 瞬間場における乱流構造 可視化の結果(図6, 7)から、低速ストリーク、縦渦・ヘアピン渦・フック渦等の存在が確認された。低速ストリークにおいて流れ方向の長さが $1000\nu/u_\tau$ 以上に至るものが存在すること、低速ストリークのスパン方向平均間隔が約 $100\nu/u_\tau$ であること、また渦構造と低速ストリーク、渦構造とイジェクション、スイープの空間的位置関係など、多くの点で従来の可視化結果⁽¹⁾⁽²⁾との整合性が確認された。

5.2 乱流構造の非定常変化 図6は渦構造と低速ストリーク、図7は渦構造とイジェクション(Q2イベント)およびスイープ(Q4イベント)⁽¹³⁾の時系列画像を示したものである。Guezennecら⁽¹⁴⁾、Nishinoら⁽¹⁵⁾が指摘したように、各構造はスパン方向にはほ

図 6 渦構造と低速ストリーク ($Re_\tau=205$) [gray $p^+ < -3.0$, white $u^+ < -3.0$, $U^+=14.0$ で下流に向かって移動する視点から見た画像]

とんど揺動せず、流れ方向に直線的に流下する様子がわかる(移動視点から見ているため、図ではほぼ同じ位置に観察される)。

5・2・1 渦構造と低速ストリーク 渦構造は低速ストリークの下流端近傍、あるいはストリークの屈曲部下流側(図6のA1, B1, C1部分など)で数多く発生することが観察された。このような領域では、上流

から下流に向かって流速が増加している。すなわち流れ方向に渦を伸張するストレイン場が局所的に形成されており、これが縦渦の発生と発達の一要因となると予想される。発生した渦は低速ストリークに沿うように発達するが、流下速度はチャンネル中央部に近づくほど大きくなり、さらに流れ方向に伸張される。

大規模なヘアピン渦は複数のストリークをまたいだ

図 7 渦構造とイジェクション・スイープ($Re_\tau=205$) [gray $p^+ < -3.0$, white $(u^+v^+)_2 < -3.0$, dark gray $(u^+v^+)_4 < -3.0$, $U^+=14.0$ で下流に向かって移動する視点から見た画像]

もの(図6のA4)も存在している。このような大規模なヘアピン渦は、単一ストリークから発生した渦(図6のA1)がヘアピン状になった後(図6のA2)、ストリークが分岐(図6のA3)、結合(図6のA4)して生成されることが観察された。

また、 $U^+=14.0$ で移動する視点から観察した場合、低速ストリークは平均的に上流側へ、渦構造は平均的

に下流側へ移動する。これは、これら二つの構造の対流速度が異なることを表すとともに、低速ストリークが渦構造の通過した残脈であるという仮説⁽¹⁶⁾と整合している。

5・2・2 渦構造とイジェクション・スイープ 渦構造とイジェクション、スイープ等の強い乱流応力の発生領域は、空間的に近接して存在し、これらの領域は

空間的に間欠性をもって分布している。このうち運動が活発な領域(図7で丸で囲った部分など)においては、複数の渦構造が連続的に発生し、活性化された状態は数百 ν/u_τ^2 以上の時間にわたって継続している。

渦構造, イジェクション, スイープのうちではイジェクションが最も安定して存在し続け、移動・変形を繰り返すが、不活性領域に新たにイジェクションが発生することは、極めてまれである。また、渦構造の発達に伴ってイジェクション領域が拡大することはあっても、新たに発生することはなく、むしろイジェクション領域の下流部において渦が発生している(図7のaなど)のが多く観察された。

5.3 乱流構造の波数依存性 図8~10は前述したように、瞬間場における速度および圧力を、それぞれスパン方向, 流れ方向および壁垂直方向についてスペクトル分解し、高波数成分を順次取り除いていった場合の乱流構造の変化を示したものである。図8~10中において、例えば $18/64 \geq |k_z|/(N_z/2) (\lambda_z^+ \geq 47.7)$ は、式(1)において $|k_z| \leq 18$ (波長 $\lambda_z \geq 47.7$ に相当)の波数成分のみによって乱流構造を再構成したことを表す。

スパン方向について高波数成分を順次取り除いていった場合、図8に示す渦構造や低速ストリークの各空間構造は、 $\lambda_z = 48$ 程度までその形状にはほとんど変化が見られないが(図8①~③)、これより低波数の成分を取り除くと大きな変化が見られ(図8④~⑥)、細部の構造が次第に消失していく様子が観察される。このことから、渦構造や低速ストリークのような各空間構造を形成する主要波数成分は、 $\lambda_z \geq 50$ の低波数成分であることがわかる。また、イジェクションやスイープの場合に関しても同様に、 $\lambda_z = 50$ 付近で大きな変化が見られるようになることを確認している。 $\lambda_z = 50$ は、低速ストリークのスパン方向平均間隔の約半値であり、壁垂直方向速度 v のスパン方向2点相関の値が極小となる間隔の約2倍に相当するが、変動物理量の等値面として検出した渦構造、低速ストリークおよびイジェクション、スイープが、このような低波数成分のみから構成されていることは興味深い。

同様に図9より流れ方向について、高波数成分を取り除いていった場合の渦構造およびストリークの構造は $\lambda_z = 136$ 程度まであまり変化が見られず、これよりも低波数成分を取り除くと大きな変化が見られるようになっている。低速ストリークは、渦構造と比べ、はるかに長い空間スケールを有しているが、今回の結果は、ストリーク構造の空間的変化の度合いが渦構造のそれと同程度であることを示している。これは、ストリー

クが渦構造の残脈としての静的な構造にとどまらず、渦構造の発生や成長とかかわっているためと思われる。

また、図10の壁垂直方向の場合についても $18/128$ (このとき、壁面にいちばん近い格子点において $\lambda_y^+ \geq 3$, $y^+ = 15$ 付近において $\lambda_y^+ \geq 15$, $y^+ = 50$ 付近において $\lambda_y^+ \geq 25$, $y^+ = 100$ 付近において $\lambda_y^+ \geq 29$, チャンネル中央部において $\lambda_y^+ \geq 36$ に相当する)程度まではあまり変化は見られず、これよりも低波数成分を取り除

図8 渦構造と低速ストリークの波数依存性(スパン方向)
[gray $p^+ < -3.0$, white $u^+ < -3.0$]

図9 渦構造と低速ストリークの波数依存性(流れ方向)
[gray $p^+ < -3.0$, white $u^+ < -3.0$]

図10 渦構造と低速ストリークの波数依存性
(壁垂直方向)
[gray $p^+ < -3.0$, white $u^+ < -3.0$]

くと大きな変化が見られるようになっている。このように、流れ方向および壁垂直方向においても渦構造、低速ストリークおよびイジェクション、スweepのような乱流構造が低波数変動成分のみで構成されている

ことが確認された。

6. 結 言

十分に発達した二次元チャンネル内乱流をDNSによって再現し、三次元コンピュータグラフィックスを用いて動画化を行い、低速ストリーク、低圧領域検出法によって同定した渦構造、イジェクション(Q2イベント)、スweep(Q4イベント)の時間的挙動および波数依存性についての観察を行った結果、以下のような結論が得られた。

(1) 壁面近傍の渦構造は、低速ストリークの下流端近傍あるいは屈曲部下流側において数多く発生し、それらの一部は大規模なヘアピン渦に成長していく。

(2) 各構造は空間的に間欠性をもって分布しているが、このうち運動が活発な領域においては、複数の渦が連続的に発生し、活性化された状態は数百 ν/u_τ^2 以上の時間にわたって継続する。

(3) 渦構造、イジェクションおよびスweepのうちではイジェクションが最も安定して存在し続け、不活性領域に新たにイジェクションが発生することはない、むしろイジェクション領域の下流部において渦の発生が確認されることが多い。

(4) 渦構造、低速ストリークおよびイジェクション、スweepのような空間構造は高波数変動成分にはほとんど影響を受けず、低波数変動成分のみによって構成されている。

本研究は文部省科学研究費重点領域研究(No. 05240201)、奨励研究(No. 05750182)の援助を受けた。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Robinson, S. K., Kline, S. J. and Spalart, P. R. (Kline, S. J. and Afgan, N. H., eds.), *Near Wall Turbulence*, (1988), 218, Hemisphere.
- (2) 笠木・住谷・鈴木・飯田, 機講論, No. 920-78, C(1992-9), 515.
- (3) 鈴木・笠木, 機講論, No. 910-62, B(1991-10), 233.
- (4) 三宅・渡辺・坂東, 機講論, No. 910-62, B(1991-10), 422.
- (5) 黒田, 機講論, No. 910-62, F(1991-10), 74.
- (6) Gottlieb, D. and Orszag, S. A., *Numer. Anal. Spectral Methods*, 26(1977), 159.
- (7) Kuroda, A., Kasagi, N. and Hirata, M. (Yasuhara, M., ほか2名編), *Numerical Methods in Fluid Dynamics, Jpn. Soc. Comput. Fluid Dyn.*, 2(1989), 1012.
- (8) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., *J. Fluid Mech.*, 177(1987), 33.
- (9) Nishino, K. and Kasagi, N., *Proc. 7th Symp. Turbulent Shear Flows*, 2(1989), 22.1.1.
- (10) Lolens, W. E. and Cline, H. E., *Comput. Graph.*, 21(1987), 163.
- (11) Harrington, S. (郡山訳), コンピュータグラフィックス, 2, (1988), 413, マグロウヒル.

- (12) 高木・下田監修, 画像解析ハンドブック, (1991), 606, 東京大学出版会.
 - (13) Brodkey, R., Wallace, J. M. and Eckelmann, H., *J. Fluid Mech.*, **63**(1974), 209.
 - (14) Guezennec, Y. G., Piomelli, U. and Kim, J., *Phys. Fluids*, **A2**(1989), 746.
 - (15) Nishino, K. and Kasagi, N., *Proc. 8th Symp. Turbulent Shear Flows*, (1991), 28.3.1.
 - (16) Robinson, S. K., *Annual Rev. Fluid Mech.* **23**(1991), 601.
-