16 壁面乱流の可視化とそのデジタル画像解析

東大工 西野 耕一、笠木 伸英、平田 賢
関本 健太郎*、松本 聡

Flow Visualization and Its Digital Image Processing
in a Wall-Bounded Turbulent Shear Flow

by Koichi NISHINO*, Nobuhide KASAGI*, Masaru HIRATA*,
Kentaro SEKIMOTO** and Satoshi MATUMOTO***

A digital image processing has been applied to a quantitative analysis of the visual data obtained by the hydrogen-bubble technique to investigate the streamwise vortical structures, which are suggested as a primary turbulence mechanism in the near-wall region of wall turbulence. A good agreement of the statistical quantities of velocity fluctuations between the present result and those obtained by others verifies the present method as a new turbulence measuring technique. The streamwise vorticity fluctuations, of which measurements are extremely difficult, are calculated from the instantaneous spatial distributions of velocity fluctuations. The fact that the rms vorticity fluctuation has its minimum in the vicinity of the wall is first revealed experimentally, while it has been predicted by previous numerical works. In addition, the double layer structure of the instantaneous vorticity field near the wall is reconfirmed.

1. はじめに

壁面乱流の壁近傍領域には、バースティングに代表されるスケールの大きな組織的乱流構造が存在することが種々の側面からくり返し確かめられてきたが、近年この組織的構造の本質的な姿として、スパン方向に準周期的に配列した流れ方向に軸を有する非定常な交番の縦渦構造の存在が指摘されており、乱れの生産・輸送に支配的影響を及ぼしていると考えられるに至っている。この縦渦構造に関する実験的研究は少ないが、可視化を中心とした流れ場の観察、¹⁾²⁾あるいは熱線・熱膜流速計による速度場・渦度場測定³⁾⁴⁾が行なわれている。流れの可視化は、流れ場の空間的構造を把握・理解する方法としては極めて強力な手法であり、組織的乱流構造の解明に現在まで大きな役割を果たしてきた。しかしながら、可視化画像から定量的情報を得るには、一般には多大の労力を必要とし、また付随する不確かさもブロープ測定に比べて大きくなることが避けられない。一方流速計による測定では、その時系列信号から組織的乱流構造に関するものを抽出するために、種々の条件付き抽出法が考案されているが、得られた結果と流れ場との対応は必ずしも明確になり難い。

このように、その定量的把握の極めて難しい縦渦構造に関して知見を得るため、著者らは既報⁵⁾において、16mm映画解析機を画像データ入力装置として用い、水素気泡法により得られた可視化画像を定量的に処理し、可視化画像処理により初めて流れ方向渦度変動の測定を行なった。しかしながら画像データの入力をマニュアルで行なったため、乱流計測としての測定値に含まれる不確かさやデータ数にやや問題を残している。そこで本研究では、可視化画像を精度良くかつ高速に処理するためデジタル画像処理システムを導入し、縦渦構造に関する信頼性の高い定量的知見を得ることを試みた。

* Faculty of Engineering, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

** Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106

*** Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Moriguchi, Osaka 570

2. 実験装置及び可視化方法

実験装置は既報⁵⁾と同一の2次元チャネル回流水槽(矩形断面 $80 \times 800 \text{ mm}^2$)である。流れの可視化は、ノズル出口からチャネル幅の80倍下流の、流れが充分発達する位置で行なった。その位置では、中心流速 $U_c = 8.52 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、レイノルズ数 $Re(=U_c \cdot H/\nu) = 6790$ 、摩擦速度 $u_\tau = 4.07 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、摩擦速度と動粘度による時間スケールは $1t^+ = 0.0808 \text{ s}$ である。図1に可視化装置の配置図および電極部の拡大図を示す。流れと直交する面内の流動を可視化するため、7本の気泡発生用電極(直径 $20 \mu\text{m}$ のタングステン線)が壁からの距離を変えて張られている。長さ 10 cm 程度の各電極線はそれぞれ $1 \sim 2 \text{ mm}$ 間隔で電氣的に絶縁されており、それらより長さ約 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 程度の楕円形の離散的な気泡群が発生する。7本の電極線は壁面からチャネル中央までの観察領域($y^+ = 0 \sim 160$)全体を均一に覆うように、壁に対して傾斜して張られている。この7本の電極線に直流パルス電圧を印加することにより発生した気泡群は、下流のスリット光源による光のシート内を通過する。そのときの各気泡群の動きを、十分下流($\Delta x \sim 30 \text{ cm}$)の壁面上に設置した光学鏡を介して、 16 mm カメラ(フィルムスピード $=48 \text{コマ/秒}$)で撮影記録した。なお電極線から同時に発生した気泡群が下流の光のシート内中央に確率的に同時刻に到達するように、電極線を取り付けた異形の支持体は平均速度分布を考慮した形状となっている。また異なる時刻に発生した気泡群が光のシート内に重なって存在しないよう、平均速度分布および流れ方向の乱れ強さを考慮して、直流パルス電圧の印加時間間隔を 0.999 (s) 、また印加時間を 0.060 (s) とした。

3. デジタル画像処理

本研究では、 16 mm フィルムから再現した時間的に連続する2枚の白黒写真をデジタル画像処理の原画像とした。図2に原画像の一例として、時間間隔 $\Delta t = 0.103 \text{ s}$ ($\Delta t^+ = 1.58$)で連続する2枚の写真を示す。本処理ではまず時間的に連続する2枚の写真を別々に処理して各気泡群の重心位置を求め、次に各気泡群の重心位置の変位を測定し、面内の変動速度分布を得た。図3に画像処理装置システムを示す。CCDカメラ(分解能 285×480)により原画像を入力し、イメージA/Dコンバータ(分解能 $640 \times 482 \times 8 \text{ bits}$)によりデジタル画像としてのホストコンピュータ(PC98XA)で処理を行なう。図4に画像処理のフローチャートを示す。処理は大きくわけて2値化・ラベリング・重心計算・座標変換・対応付け・補正とからなる。

①2値化 : 2値化するしきい値の決定は、写真の焼き付

図1 可視化装置および電極部の拡大図

図2 16 mm 可視化写真
(時間間隔 $\Delta t = 0.103 \text{ (s)}$)

け条件(焼き付け時間・露出)あるいは照明と密接に絡んだ問題である。ここではしきい値の変化による気泡群の重心位置の変化が最も小さくなる値をあらかじめ予備実験で求め、この値(輝度レベル=150)で2値化を行なった。なお原画像となる写真の焼き付け条件による影響をできるだけ取り除くため、すべての写真を統一した条件のもとで焼き付けた。さらに焼き付けの光量・露出現像時間も、それらによる影響が最も小さくなる条件を予備実験により選定した。

②ラベリング：2値化された画像では、各気泡群はそれぞれ10～70個程度の輝度レベル256(=白)を示す画素に分解される。気泡群の重心位置を計算するためには、同一の気泡群に属する画素の識別(ラベリング)を行なう必要がある。このためここでは上下左右の4方向から画像を走査し、互いに連結する輝度レベル256の画素は同一の気泡群に属すると判断した。

③重心計算：ラベリングされた気泡群の重心を計算する。また座標変換の基準となるスケールおよび壁面に対して、最小自乗法によりそれらの近似直線を計算する。またあらかじめ測定しておいたスケールの長さ・高さの値から、デジタル画像と実際の流れ場とのスケール比もあわせて計算した。

④座標変換：別々に処理して得られた2画像間の一致は、スケールの近似直線を一致させることにより行なった。また壁面の近似直線を基準にして、気泡群重心位置の壁からの距離を計算した。

⑤対応付け：時間的に連続する2枚の画像間での気泡群の対応付けは、気泡群の変位が各気泡群どうしの距離に比較して充分小さいことを考慮して、重心間距離の最も短い気泡群どうしを対応させることにより行なった。なおノイズあるいは気泡群の合体・分裂等の原因により、上記のアルゴリズムでは単純に対応付けができない気泡群が5%程度存在した。そのような場合、オペレータが画面上のデジタル画像と原画像である写真とを参考にしてその対応付けをキーボードより入力指示することとした。また面積の非常に微小な気泡群はノイズと

図3 画像処理装置システム

図4 画像処理フローチャート

計算した。

⑤対応付け：時間的に連続する2枚の画像間での気泡群の対応付けは、気泡群の変位が各気泡群どうしの距離に比較して充分小さいことを考慮して、重心間距離の最も短い気泡群どうしを対応させることにより行なった。なおノイズあるいは気泡群の合体・分裂等の原因により、上記のアルゴリズムでは単純に対応付けができない気泡群が5%程度存在した。そのような場合、オペレータが画面上のデジタル画像と原画像である写真とを参考にしてその対応付けをキーボードより入力指示することとした。また面積の非常に微小な気泡群はノイズと

図5 処理画像と得られるベクトル線図

の識別が難しいためデータから除去することとした。

⑩補正：CCDカメラによる画像の歪および気泡群の流れ方向への移動により生じる虚変位は、予備実験で決定された補正式に従って補正した。

上記の処理により、流れと直交する面内の変動速度分布が2枚の写真から自動的に得られるが、この処理に要する時間は約10分であった。なお本研究では計422枚(211組)の写真进行处理し、得られた速度ベクトルのデータ総数は約29000であった。図5に画像処理された結果の一例として、2値化画像データとそれから計算された各気泡群の重心(黒丸)、およびそれより求めた速度ベクトル線図を示す。

4. 実験結果

図5の速度ベクトル線図中には、従来より指摘されているような流れ場中の秩序構造が観察され、またいくつかの強い渦運動も明瞭にとらえられている。このような組織的構造あるいは縦渦構造の存在は他のベクトル線図中にも多々観察された。なお従来より縦渦構造に関しては渦対として存在しているとの指摘があるが、本測定の結果では単独の渦として存在しているものも多く見られた。一方スイープあるいはイジェクションと類似の流動を示す構造も観察されたが、そのような構造はチャンネル中央の壁面からかなり離れた外層とも密接な関係を有していることがわかった。

流れと直交する y - z 面内にランゲムに分布するデータから平均量を計算するために、ここでは y 方向を $\Delta y^+ = 3$ の幅の小領域にわけ、この小領域でのデータ数が800以上のもののアンサンブル平均を求めた。小領域の幅はトレーサーである気泡群が y 方向に平均的に約 $3v/u_\tau$ の大きさを有していることを考慮して決定した。本測定では本来零となるべき w の平均が、気泡群の浮力のため零とはならなかった。一方 v の平均はその不確かさの範囲内で零となったが微小な差が存在した。そのため各小領域ごとにそのバイアス分を差し引いて v 、 w の平均を完全に零とした。図6に上記の方法で計算された v 、 w の乱れ強さを示す。本結果はその不確かさ(20:1 オッズ)の範囲内で従来の結果^{2) 4) 7)}と良く一致している。な

図6 v 、 w のrms値：——，Kreplin & Eckelmann⁷⁾；
---，Clark⁹⁾；- - -，笠木ら²⁾；●，本結果。

図7 v 、 w の歪度：——，Kreplin & Eckelmann⁷⁾；
---，Kastrinakis & Eckelmann⁹⁾；
- - -，菱田・長野・森本⁴⁾；●，本結果。

図8 v 、 w の平弧度：シンボルは図7参照

お本結果は全体的にやや低い値を示しているが、これは気泡群が平均的に y 方向には $3\nu/u_\tau$ 、 z 方向には $8\nu/u_\tau$ の大きさを持っており、この空間的平均化の結果であると考えられる。図7、図8に v 、 w の歪度および平坦度を示す。データ数が従来の結果 ω_x と比較して少ないにもかかわらず良い一致を示している。以上のように、 v 、 w の統計量は従来の結果と極めて良い一致を示しており、本測定方法ならびにその結果の妥当性が認められる。流れ方向の渦度変動 ω_x は v 、 w の分布より計算した。ここではデータポイントの密度が高い $0 \leq y^+ \leq 65$ 、 $-150 \leq z^+ \leq 150$ の領域を 31×8 の格子点に区切り、その格子点での速度勾配を近傍の速度データの回帰平面の勾配から求め、渦度を計算した。この際格子点近傍のデータとして格子点からの距離が約 $26\nu/u_\tau$ 以内のものを用いた。また壁面の拘束条件として、 $y^+=0$ の格子点上の v 、 w はすべて零とした。なお計算は y 方向への格子点位置を2通りに変えて行なった。図9に計算された渦度変動 ω_x の平均値を示す。流れの2次元性から ω_x の平均値は零となるはずであるが、その条件が良く満足されていることがわかる。図10に得られた ω_x のrms値と、それと比較すべき実験結果(Kastrinakis et al.²⁾、Kastrinakis & Eckelmann⁴⁾、笠木ら⁵⁾、LESによる数値計算の結果(Moin & Kim²⁾、Moser & Moin¹⁰⁾、そして構造論的モデリングによる予測値(笠木ら²⁾、笠木ら¹¹⁾)を示す。本結果はKastrinakis & Eckelmann、Moser & Moinの結果と類似の分布形を示しており、特に $y^+=10$ 付近で弱いながら極小値を示している。この極小値の存在は、Moin & Kim、Moser & Moinの数値計算の結果では示されているが、実験的には初めて確認することができた。図11、図12に ω_x の歪度および平坦度を示す。歪度は流れ場の2次元性から本来零になる量であるが、本結果はほぼそれを満足していることがわかる。一方平坦度は $y^+=10$ 付近で大きな値を示しており、この領域での ω_x の強い間欠性を示唆している。図13-a、図13-bにはベクトル線図とそれに対応する v 、 w 、 ω_x の等値線図を示す。 v の等値線図ではその正負の領域のスパ

図9 ω_x の平均値

図10 ω_x のrms値：□，Kastrinakis et al.²⁾；■，Kastrinakis & Eckelmann⁴⁾；○，笠木ら⁵⁾；---，Moin & Kim²⁾；—，Moser & Moin¹⁰⁾；---，笠木ら²⁾；---，笠木ら¹¹⁾；●，本結果。

図11 ω_x の歪度：■，Kastrinakis & Eckelmann⁴⁾；○，笠木ら⁵⁾；●，本結果。

図12 ω_x の平坦度：シンボルは図11参照

図13-a ベクトル線図と等値線図：

—, 正; — — —, 零; ·····, 負.

図13-b ベクトル線図と等値線図：

—, 正; — — —, 零; ·····, 負.

方向への周期性が顕著であり、その周期はオーダ的には $100\nu/u_\tau$ 程度である。このことは壁近くのストリーク構造に対して、そのスパン方向への周期性の波長が $\lambda^+ \sim 100^{(1)(2)}$ であることと符合している。一方 w の等値線図では、 $y^+ = 20 \sim 40$ でその符号が反転する傾向が顕著に見られる。このような v , w の等値線図上の傾向は、ベクトル線図上で渦運動が顕著に見られる位置では特に明瞭である。また ω_x の等値線図では y 方向にその符号が反転する階層構造をなしていることがわかる。

5. 結論

(i) 壁面乱流壁領域において流れと直交する面内の速度変動成分 v , w を可視化画像のデジタル処理により測定し、それらの rms 値・歪度・平坦度が従来の測定値と良い一致を示すことから、本測定手法の有効性を示した。(ii) さらに v , w の分布から流れ方向の渦度変動を求め、その rms 値が壁近くで極小値をとることを実験的に初めて示した。また瞬間的渦度場が壁垂直方向にその符号を反転する階層構造をなすことを再確認した。

参考文献

- (1) Smith, C. R. and Schwartz, S. P., Phys. Fluids, **26**(1983), 641. (2) 笠木・平田・西野, 機論, **51**-467, B(昭和60), 2272. (3) Kastinakis, E. G., Wallace, J. M. and Willmarth, W.W., Bull. Am. Phys. Soc., **20**-11(1975), 1442. (4) Kastinakis, E. G. and Eckelmann, H., J. Fluid Mech., **137**(1983), 165. (5) 笠木・平田・西野, 流れの可視化, **4**-14(1984), 239. (6) Clark, J. A., Trans. ASME, Ser.D, **90**-4(1968), 455. (7) Kreplin, H. P. and Eckelmann, H., Phys. Fluids, **22**-7(1979), 1233. (8) 菱田・長野・森本, 機論, **46**-408, B(昭和55), 1455. (9) Moin, P. and Kim, J., J. Fluid Mech., **118**(1982), 341. (10) Moser, R. D. and Moin, P., Rep. TF-20, (1984), Stanford. (11) 笠木・西野・平田, 第23回日本伝熱シンポジウム, (1986). (12) Smith, C. R. and Metzler, S. P., J. Fluid Mech., **129**(1983), 27. (13) 入谷・笠木・平田, 機論, **51**-470, B(昭和60), 3092.