

開水路流における壁面乱流構造の ステレオPIVによる計測

STEREO PIV MEASUREMENT OF NEAR-WALL COHERENT STRUCTURES IN OPEN-CHANNEL FLOW

John C. WELLS¹・岸田圭史²
John C. WELLS, Keiji Kishida

¹正会員 Ph.D 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²非会員 理博 立命館大学PD研究員 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Coherent structures near the wall (streamwise vortices, low-speed streaks and coherent Reynolds stress producing events) in an open channel flow at $Re_\tau=300$ are investigated using stereo particle image velocimetry (SPIV) in a cross-stream plane. A time series of 3 velocity components in the plane is converted into an instantaneous full 3 dimensional velocity field by Taylor's hypothesis. It is observed that a pair of counter-rotating quasi-streamwise vortices cause coherent Reynolds stress contributions beside the vortices by their swirling motions. A kinked low-speed streak is also observed below the vortex pair. These structures are consistent with the conceptual model proposed by Jeong et al. (J. Fluid Mech. vol. 332 p185 (1997)), and is the first quantitative experimental verification of the complete combination of configuration among these structures to our knowledge.

Key Words : stereo-PIV, open-channel flow, coherent structures, low speed streaks, Reynolds stress

1. はじめに

近年, 数値計算は低レイノルズ数の壁乱流における壁面近傍の組織的な乱流構造の解析において有力な手法となってきた。これは3次元の場の情報が組織的乱流構造を定量的に理解する為に不可欠であるが, 数値計算はこれを提供出来るからである。Jeongら¹⁾は壁面乱流の数値計算により得られた場の情報の解析を行い, 壁面近傍における組織構造の概念的なモデルを提案した。(このモデルの原型はStretch²⁾により提案されている。)このモデルは流れ方向からやや傾いた縦渦の列(スタッガード構造)と, その下に位置している蛇行する低速ストリーク及び側面に存在するレイノルズ応力生成イベント(Q2/Q4イベント)からなっている。一方実験による定量的な計測法としては, 熱線流速計³⁾, レーザードップラー流速計(LDV)⁴⁾があるが, これらは一時刻に一点での流速計測しか出来ず, 空間的な広がりをもつ組織構造を直接的にとらえることは極めて困難である。染料による可視化法との併用⁵⁾により, これらの構造を捉える試みもなされているが,

直接3次元の場の定量的な情報を提供できるわけではない。これらの伝統的な方法に対し, 粒子画像流速測定法(PIV)^{6), 7)}は微小時間間隔で入射されるライトシートパルスにより照明されたトレーサー粒子の画像を撮影し, 粒子像の移動距離からライトシート面上の多点での流速を同時計測できる場の計測法である。多くの研究では, 粒子画像の撮影には1つのカメラが用いられ, カメラ光軸に対して垂直な2次元面内の速度2成分のみが計測される。Utamiら⁸⁾は水平面のライトシートを開水路底面から水面までスキャンさせることにより, 組織構造の計測を行っている。(Taylorの凍結仮説を用いることで, 彼らは壁垂直方向の流速も見積もっている。)またWellsら⁹⁾は横断面のライトシートによる時系列計測を行い, Taylorの凍結仮説を用いることで縦渦のスタッガード構造を検出している。PIVは2つのカメラを用いることでステレオ化することが可能である。ステレオPIV(SPIV)は従来の1つのカメラを用いたPIVに対し, 2つのメリットがある。一つはライトシート面内における流速3成分の同時計測が可能になる。このメリットは, 縦渦, 低速ストリーク, レイノルズ応力生成イベントを同時に

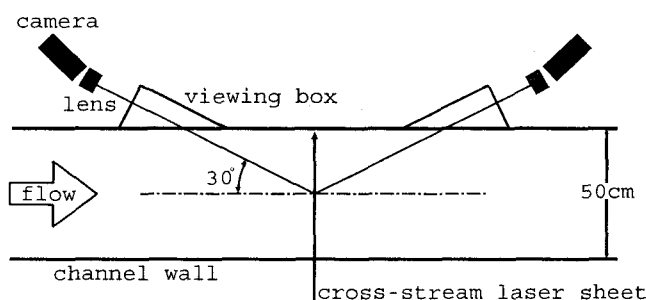


図-1 実験装置の平面図.

計測する上で有益である. もう一つのメリットは面外成分による系統誤差を取り除くことが出来ることである. このメリットは面垂直速度成分が大きな横断面での計測において有益である.

本研究では開水路横断面におけるSPIVにより壁面近傍の組織的な乱流構造の定量的計測を行った.

2. 実験方法

図-1に実験装置の平面図を示した. 水路の幅と長さはそれぞれ0.50m, 7.5mである. 水深 h は100mmに調節した. 水温は32°C, 流量は $2.04 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ である. バルク平均流速 U_m と h に基づくレイノルズ数は5200である. Blasiusの抵抗公式⁽⁹⁾より流量及び動粘性係数 ν から壁摩擦速度を求めると $u_\tau = 2.34 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ となった. この値を用いると u_τ と h に基づくレイノルズ数は300である. 比重がほぼ1の直径10 μm の中空ガラス球 (Spherical powder, Potters Industries, USA) をトレーサーとして用いた.

ダブルパルスNd-YAGレーザ (Quantel S.A.France, 出力70mJ/pulse, パルス周波数15Hz) により厚さ4mmのライトシートを形成した. シートの位置は水路上流端から5.4mの横断面である. 画像はKodak ES1.0 progressive-scan ビデオカメラ (画素数1K $\times$ 1K, 輝度解像度は256階調) により, 毎秒30回の各露光ごとに画像を記録した. 片方のレーザ発振器からのレーザパルスはカメラの250 μs の露光とシンクロナイズし, 他方はその $\Delta t = 5\text{ms}$ 後 (カメラの次の露光時間中) に発振するようにした. これにより, 各カメラは流速を求めるのに必要な時間間隔 Δt での2枚の画像のペアを毎秒15組撮影した. レンズ (Nikkor 105mm マイクロレンズ) はピントのあった画像を得るために, シャイムフラグ条件⁽¹¹⁾を満たすよう光軸に対しやや傾けて配置した. 2台のカメラの視線は主流方向に対し30度になるように配置した. 水路側壁での屈折の影響を打ち消すため, 水を満たした3角形の水槽を水路側壁に取り付け, これを通して画像を撮影した. Willertら⁽¹²⁾の方法に従って, カメラはライトシートの異なる面を撮影する配置にした. 一般的に用いられるライトシートの同じ面を

撮影する方法に対するこの方法のメリットは, 両方のカメラがより鮮明な画像をえることが出来る前方散乱光を利用出来ることである.

計測領域は水路中央底面近傍の5 $\times$ 5cm (150 $\times$ 150壁摩擦長さ単位) の領域である.

3. 3成分速度の算出

本章ではライトシート面内における速度3成分をデジタル粒子画像 (カメラ2台 $\times$ 露光2回) から求める方法について簡潔に説明する.

第一に, 各カメラの画像ペアからガウス補間によるサブピクセル精度の変位ベクトル $\Delta \mathbf{X}$ を一般的な相関法を用いて算出する⁽⁶⁾. 相関窓の大きさは65 $\times$ 65ピクセルとした. レーザシートの厚さおよび相関窓の大きさより, 本実験における空間解像度は4mm (12壁摩擦長さ単位) であると見積られる. 次に, 像空間における

4成分ベクトル場 $\Delta \mathbf{X}$ (変位ベクトル2成分 $\times$ カメラ2台) を物理空間の3成分ベクトル場 $\Delta \mathbf{x}$ へと写像関数 $\mathbf{F}$ を用いて写像する⁽¹³⁾. ここで $\mathbf{F}$ は $\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$ によって

定義される. $\mathbf{X}, \mathbf{x}$ はそれぞれ像空間, 物理空間の座標ベクトルである. 求めるべきベクトル場 $\Delta \mathbf{x}$ は以下の式を解くことにより得られる

$$\Delta \mathbf{X} = (\nabla \mathbf{F}(\mathbf{x})) \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (1)$$

写像関数 $\mathbf{F}$ は校正格子画像 (カメラ2台 $\times$ 主流方向平行移動5箇所の計10枚) から最小2乗法により求めた. 校正格子は太さ2mmの線により25個の格子点が描かれたOHPシートを厚さ2mmの亚克力板ではさんだものである. 最後に $\Delta \mathbf{x}$ を Δt で割ってやることにより, 横断面内の各点における3成分の速度ベクトルを得ることが出来る.

4. 結果と考察

(1) 平均値

本節ではSPIVの結果 (20回の実験により計測, 各実験の計測時間は11秒) をLDV (各計測点での測定時間は1時間) 及び永翁らによる開水路乱流の直接数値計算 (DNS) の結果⁽⁴⁾と比較する. x, y, z はそれぞれ主流方向, 壁垂直方向, スパン方向の空間座標とし (右手系), u, v, w を各方向の速度成分とする. 上付き添え字+は u_τ 及び v_τ により作られる壁摩擦長さ単位によ

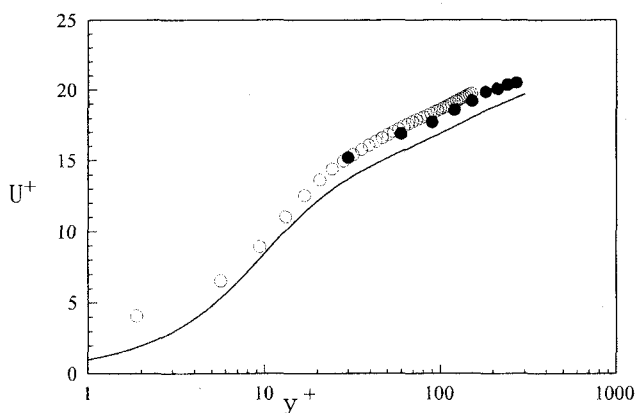


図-2 主流方向平均流速の壁垂直方向分布. ○はSPIV, ●はLDV, 実線はDNSの結果を示す.

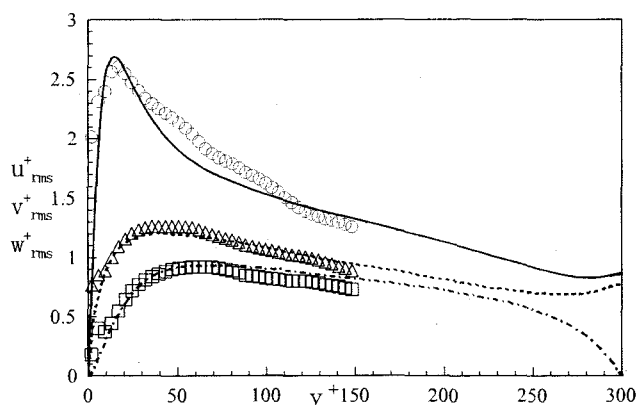


図-3 速度変動の2乗平均の平方根の壁垂直方向分布. プロットはSPIV, 線はDNS. 上から順に, 主流方向, スパン方向, 壁垂直方向.

り無次元化した量を, 上付き添え字'は各変数の平均からの変動成分を表すものとする.

図-2に主流方向平均流速 $U^+(y^+)$ の壁垂直方向分布を示す. 第一に, SPIVにより計測された分布とLDVによるそれはよく一致している. 計測値が計測方法に依存せず一致することから, 各計測は正確に行われたと考えられる. 次に $y^+ < 10$ 以外では, 本実験により計測された分布はDNSのそれと比べ, 一様に約10%大きな値となった. 我々はこの相違の原因が摩擦速度 u_τ を過少に見積もってしまった事が原因であると推測する. u_τ を求めるのに用いたBlasiusの抵抗公式は円管流についての経験則でしかない. さらに平均流速 U_m と h に基づくレイノルズ数が5200という本実験の条件は, Blasiusの抵抗公式の適用限界付近である. 以上の考察より, 我々は本実験のSPIVの計測は正確であるが, 壁摩擦単位による無次元化において約10%の様な誤差が生じたと結論付ける. なお, SPIVにより計測された $y^+ = 2$ における流速がDNSのそれより10%以上大きな値となっているが, これは本実験の空間解像度(12壁摩擦長さ単位)が不足していること

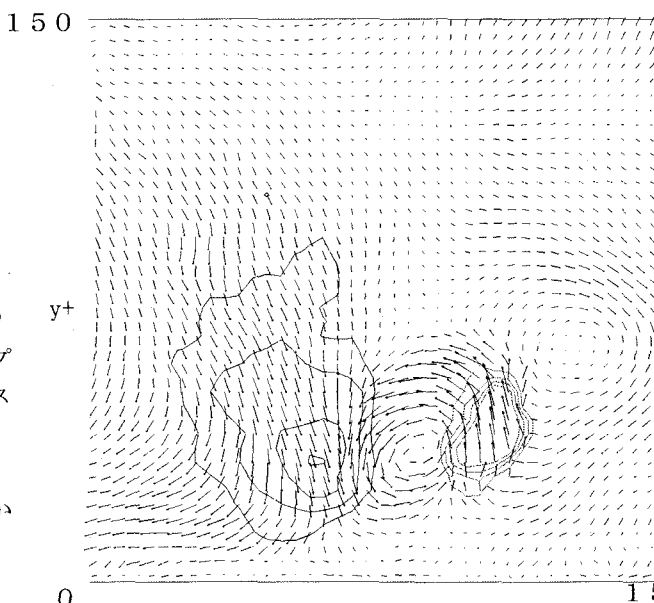
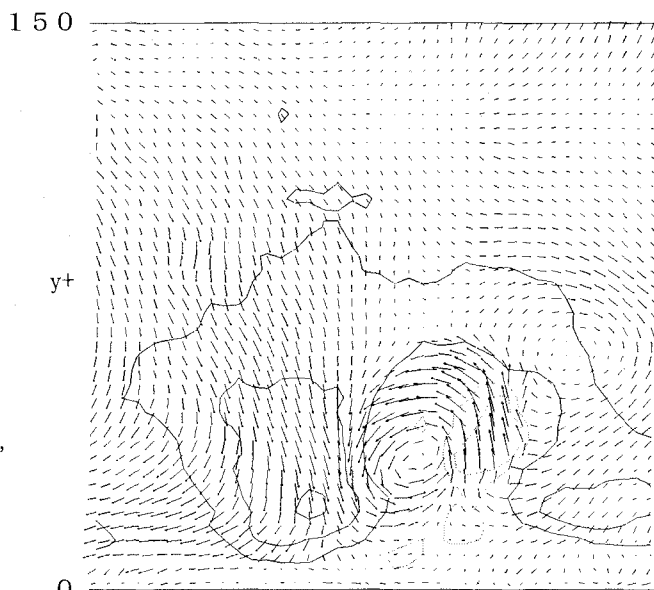


図-4 横断面内速度ベクトル場及び(上)主流方向速度変動($u' v' = -4, -2, 2, 4, 6$, 実線は正, 点線は負)(下)レイノルズ応力寄与項($-u' v' = 3, 6, 9, 12$, 実線は $Q4$, 点線は $Q2$)の等高線

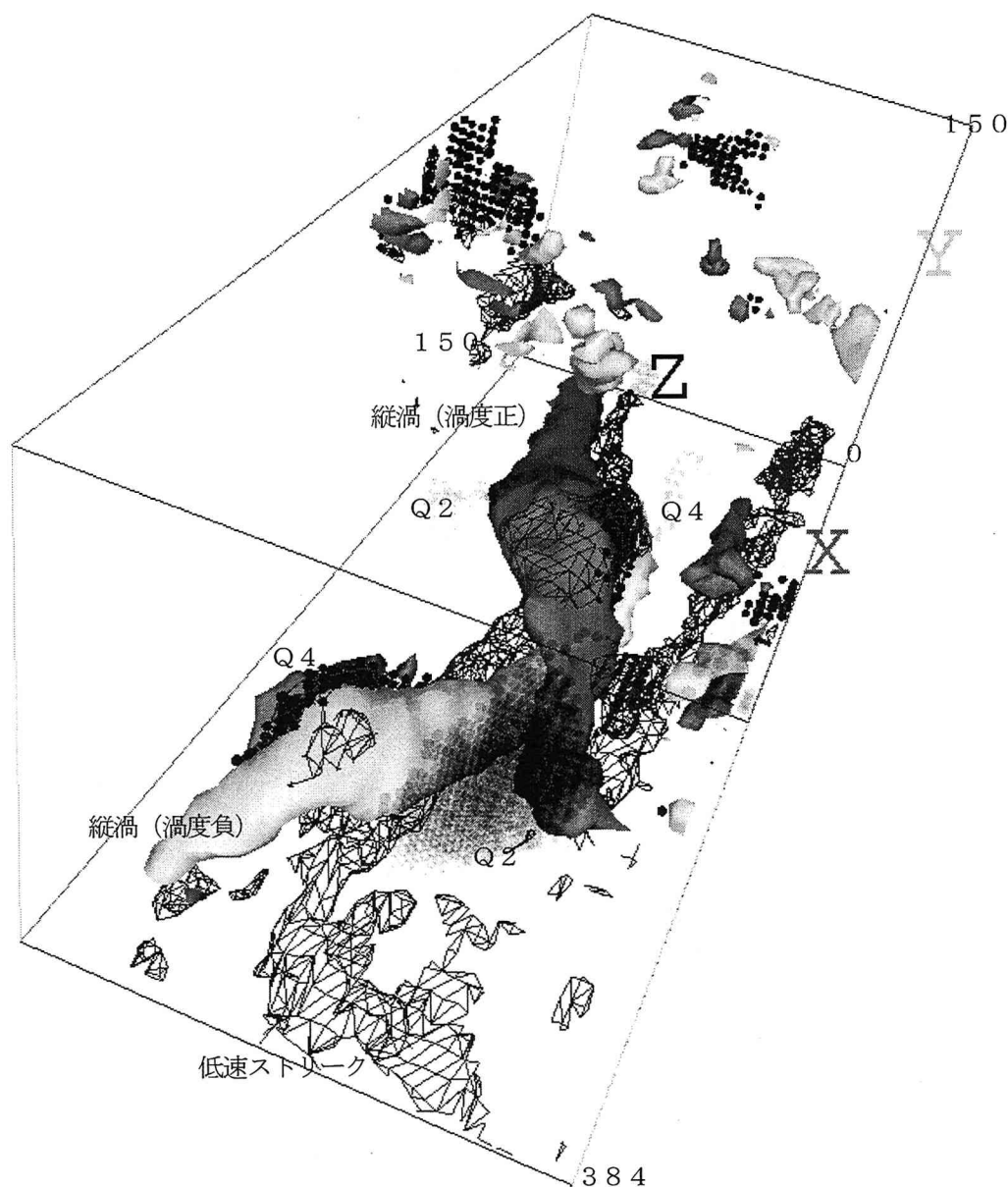
が原因と推測される.

図-3に速度変動の2乗平均の平方根の壁垂直方向の分布を示す. SPIVによる計測値とDNSの結果の相違は最大で約10%である. 相違の大きさは平均流速のそれと同程度であるが一様ではない. この相違の原因は, 本実験における計測時間がこれらの値を正確に見積もるには短すぎたと推測される. 上の考察より, 本実験における速度変動の2乗平均の平方根の計測誤差は10%以内であると結論付ける

(2) 空間構造

本節では壁面近傍の組織的な乱流構造の空間的な構造について議論する.

まず, 我々は横断面における速度ベクトル場につい



壁面近傍の組織的乱流構造の透視図 (Taylorの凍結仮説により3.13秒間の時系列データを変換したもの)。暗灰色面及び明灰色面は主流方向速度変動 u'^* の等値面(閾値0.25, -0.25)。ワイヤーフレームは主流方向速度変動 u'^* の等値面(閾値-2)。半透明球, 及び不透明球はそれぞれ $-u'^* > 3, u'^* < 0, v'^* > 0$ (Q2) 及び $u'^* > 4.5, u'^* < 0, v'^* < 0$ (Q4) を満たす点を示す。

て解析した。図-4に測定範囲の横断面内 ($5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$, 摩擦長さ単位で無次元化すると150) における速度ベクトル場を主流方向の速度変動 u'^* 及びレイノルズ応力寄与項 $-u'^* v'^*$ の等高線とともに示した。 $y^+=34, z^+=87$ 付近を中心とする明瞭な旋回運動が見られる。これが縦渦の横断面である。縦渦の上昇流(下降流)側に主流方向流速の低速(高速)領域がみられる。これらの領域は、縦渦の旋回運動により平均流速の低い(高い)場所にあった流体が輸送されたことにより発生したと理解する事が出来る。また半ば自明ではあるが、この低速(高速)領域とQ2(Q4)イベントの場所はよく一致している。

次に壁面近傍の組織的な乱流構造の3次元空間構造に

ついて解析する。バルク平均流速 U_m に関してのTaylorの凍結仮説¹⁵⁾

$$\mathbf{u}(-U_m t, y, z, 0) = \mathbf{u}(0, y, z, t) \quad (2)$$

を用いて横断面上の速度3成分の時系列データを, ある瞬間の3次元速度場へと変換する。平均流速が速度変動に対し十分に大きくないために(図-2及び3を参照), 本実験の実験条件においてこの仮説が成立するかどうかには議論の余地がある。しかしながら, Miyakeらによる壁乱流のラージエディシミュレーション¹⁶⁾ (Re_τ は本実験と一致)によれば, 壁面近傍の渦は局所平均流速 $U(y)$ により移流され, それらの形状及び位置関係は長時間に

渡り維持される。さらにKimら¹⁷⁾は壁乱流のDNSデータ解析により流速及び圧力の変動の伝播速度は $y^+ > 10$ では局所平均流速 $U(y)$ に等しく、 $y^+ < 10$ では一定であることを示している。(この研究では、伝播速度は時空間相関のピークにより決定している。)以上より、我々は試験的にこの仮説を本実験データに適用し、壁面近傍の組織的な乱流構造を解析することを試みる。

図-4に示した速度ベクトル場の時系列にTaylorの凍結仮説を適用することにより得られた壁面近傍の組織的な乱流構造の透視図を図-5に示す。一對の逆回転する主流方向に対し傾いた縦渦の対(スタッガード構造の基本単位)が見られる。これらの縦渦の下には縦渦にそって蛇行する低速ストリークが見られる。また卓越したレイノルズ応力生成イベントが、これらの縦渦の側面に見られる。図-4で示した横断面は図-5の $x^+=302$ (負の渦度を持つ縦渦の中央)に相当する。図-4において見られた低速領域は縦渦の側面へと上昇してきた低速ストリークの断面であったことがわかる。また図-4で示した横断面だけでなく、他の横断面での速度ベクトル場も解析したが、これらと図-5の間に矛盾は見られなかった。以上の観察より、この(Taylor凍結仮説を用いて得られた)ある瞬間の3次元速度場に対し、以下のことが見出された。1. 低速ストリークの蛇行は、縦渦の傾きと密接な関わりがある。2. 低速ストリークは縦渦の側面で持ち上がっている。3. 持ち上がった低速ストリークはQ2イベントと関連がある。これらの壁面近傍の縦渦構造及びそれらの位置関係は数値計算によりよく知られている(JeongらのFig. 10を参照)。しかしながら、本研究は定量的な実験計測により得られた場の情報に基づいて、縦渦のスタッガード構造、低速ストリーク、レイノルズ応力生成イベントの位置関係及び発生の因果関係の一部を明らかにしたところに意義がある。

5. まとめ

開水路流の壁面近傍の組織的な乱流構造(主流方向渦及びそれらが構成するスタッガード構造、低速ストリーク、Q2/Q4イベント)がステレオPIV(SPIV)による横断面時系列計測により調べられた。SPIVによる主流方向平均流速はLDVによるそれとよく一致(相違は約3%)し、摩擦速度が正しく見積もられたのであれば、直接数値計算(DNS)の結果ともよく一致するであろうことが確かめられた。縦渦が長時間に渡って変形しない¹⁵⁾ことを利用して、Taylorの凍結仮説を適用し、横断面上の流速3成分の時系列データを3次元ベクトル場の瞬間速度場に変換し、組織構造の空間構造およびそれらの位置関係を調べた。ある瞬間速度場においてみられた、縦渦のスタッガード構造、蛇行する低速ストリーク、Q2/Q4イベント、及びそれらの相対的な位置関

係はDNSデータの解析によりJeongらにより提案されたモデルとよく一致している。これらを定量的な実験計測により確かめたのは、我々が知る限り、初めてである。

謝辞: 開水路のDNSデータを快く提供して頂いた、産業総合技術研究所の永翁龍一博士に深く感謝します。

参考文献

- 1) Jeong, J. Hussain, F. Schoppa, W. and Kim, J. : Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.332, pp.185-214, 1997.
- 2) Stretch, D. : Automated pattern eduction from turbulent flow diagnostics, *Center for Turbulence Research Annual Research Briefs*, pp.145-157, 1990.
- 3) Bogard, D. G. and Tiederman, W. G. : Burst detection with single-point velocity measurements, *J. Fluid Mech.*, Vol.162, pp.389-413, 1986.
- 4) Nezu, I. and Rodi, W.L.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Proc. ASCE, HY* Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 5) 佐賀考徳, 大成博文, 渡辺勝利, 斎藤隆 : 開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係, 土木学会論文集, No. 393/II-9, pp. 131-140, 1988
- 6) Adrian, R. J. : Particle-imageing techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol.23, pp.261-304, 1991.
- 7) Raffel, M. Willert, C. E. and Kompenhans, J. : *Particle Image Velocimetry*, Springer-Verlag, Berlin 1998.
- 8) Utami, T. and Ueno, T. : Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing, *J. Fluid Mech.* Vol.174, pp.399-440, 1987.
- 9) Wells, J. C. Yamamoto, Y. Yamane, Y. Egashira, S. and Nakagawa, H. : Dye visualization and P.I.V. in the cross-stream plane of a turbulent channel flow, *IUTAM Symposium on Geometry and Statistics of Turbulence*, ed. T. Kambe, T. Nakano and T. Miyauchi, Kluwer pp.357-364, Academic Publishers, 2000.
- 10) Schlichting, H. *Boundary-Layer Theory*, 7th edition, Ch. XX McGraw-Hill, New York, 1979.
- 11) Prasad, A. K. and Jensen, K. : Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flow, *Appl. Optics* Vol.34, pp.7092-7099, 1995.
- 12) Willert, C. : Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows, *Meas. Sci. Technol.* Vol.8, pp.1465-1479, 1997.
- 13) Soloff, R. J. Adrian, R. J. and Liu, Z-C. *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp.1441-1454, 1997.
- 14) Nagaosa, R. and Handler, R. A. : Statistical analysis of coherent vortices at a free surface in a fully developed turbulence, *submitted to Phys. Fluids*,
- 15) Monin, A. S. and Yaglom, A. M. *Statistical Fluid Mechanics*,

Vol. 2, Section 21, MIT Press, 1975.

- 16) Miyake, Y. Ushiro, R. and Morikawa, T. : The regeneration of quasi-streamwise vortices in the near-wall region, *JSME Intern. J.* Vol.40-2, pp.257-264, 1997.
- 17) Kim, J. and Hussain, F. : Propagation velocity of perturbations in turbulent channel flow, *Phys. Fluids. A* Vol..5, pp.695-706, 1993.

(2001. 10. 1受付)