

開水路側壁近傍流れの3次元構造について

今本 博健・石垣 泰輔・塩野 耕二

THREE DIMENSIONAL STRUCTURE OF THE FLOW NEAR THE SIDE-WALL IN OPEN CHANNEL

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Koji* SHIONO

Synopsis

Distribution of boundary shear stress and flow structure near the corner in a rectangular open channel are investigated. Boundary shear stress was estimated from velocity distributions obtained by LDA measurements, by using Preston tube and film sensor, and also calculated by Naot-Rodi model. Flow structure near the side-wall was visualized by the hydrogen bubble method. Results shows that the secondary flow cells closely relate the distribution of boundary shear stress and coherent structure of wall region on the side-wall.

1. はじめに

長方形断面開水路における側壁近傍の流れは3次元性が顕著であり、速度分布および壁面せん断力分布にその影響が見られる。この影響は、時間平均値として得られる2次流および可視化法で得られる渦構造に関する結果を用いて説明されている。例えば瀬津・中川¹⁾は、レーザ・ドップラ流速計を用いた詳細な速度計測結果から底面の壁面せん断力分布が波状となることを2次流との関係から説明するとともに、側壁の壁面せん断力分布が半水深付近で大きく、底面と水面近傍で小さくなる分布を示すこと、および水路幅水深比が大きくなるにしたがって側壁に作用するせん断力が小さくなることなどを指摘している。しかしながら、側壁における分布と流れの構造については不明な点が残されている。本研究では、長方形断面開水路における側壁近傍の流れを対象とし、側壁近傍の平均壁面せん断力分布の計測結果および代数応力モデルによる計算結果を用いて平均値の分布特性について検討するとともに、速度計測結果および流れの可視化結果を用いて壁面せん断力分布と流れの3次元構造との関係について検討している。また、速度変動と壁面せん断力の同時計測結果より流れの構造を検討するとともに、VITA法を用いて側壁面上のバースティング周期を定量的に検討した結果を示す。

2. 3次元構造の検討方法

2.1 速度計測法

速度の計測にはレーザ・ドップラ流速計(LDA)を用い、幅40 cm、深さ23 cm、長さ8 mの壁面ガラス製直線水路にて流れ方向速度成分 u と鉛直方向速度成分 v の計測を行っている。なお、水路幅水深比 B/H を1~10の範囲で変化させるため、 $B/H=1\sim3$ のケースでは水路内に長さ2 m、高さ10 cm、厚さ

Table 1. Hydraulic conditions.

Case	B	H	Q	I	Re	Fr
B/H= 5 (LDA)	20	3.9	3.97	1 / 1480	9300	0.42
B/H= 10 (PT)	40	4.0	3.12	1 / 680	9300	0.69
B/H= 1 (FV)	4	4.0	0.40	1 / 600	10300	0.40
B/H= 2 (FV)	8	4.0	0.79	1 / 840	10200	0.39
B/H= 3 (FV)	12	4.0	1.20	1 / 890	10300	0.40
B/H= 5 (FV)	20	4.0	2.02	1 / 1140	10500	0.40
B/H= 7 (FV)	28	4.0	2.80	1 / 1230	10300	0.40
B/H= 10 (FV)	39	4.0	3.90	1 / 1300	10300	0.40
B/H= 5 (FS)	20	4.0	1.99	1 / 1220	9000	0.40
B/H= 10 (FS)	40	4.0	4.01	1 / 1730	10400	0.40
B/H= 5 (VIT)	20	4.0	1.99	1 / 1220	8700	0.40

PT : Preston tube, FV : Flow visualization, FS : Film sensor, VIT : VITA method, B : cm, H : cm, Q : ℓ/s

0.75 cm のガラス板 6 枚 (右岸 3 枚, 左岸 3 枚) を, B/H=5, 7 のケースではガラス板 3 枚 (左岸) を下流端から 6 m にわたって設置した。ここでは 3 種の速度計測, すなわち, 平均速度計測, 速度と壁面せん断力の同時計測および bursting 周期を求めるための速度計測を行っており, それぞれの計測条件は, サンプリング周波数 $f_s = 20$ Hz で 60 秒計測を 3 回, $f_s = 20$ Hz で 60 秒計測を 10 回, $f_s = 200$ Hz で 512 秒計測を 1 回である。なお, 本研究で用いた結果の水力条件を Table 1 にまとめて示す。

2.2 壁面せん断力計測法

開水路流れにおける壁面せん断力は, シア・プレートを用いた直接測定法, あるいはプレストン管等を用い, 仮定した速度分布より壁面せん断力を算定する間接測定法により計測されており, 例えば, Ghosh & Roy²⁾ によりその分布形が得られている。本研究では, 速度計測結果およびプレストン管あるいはフィルムセンサーを用いて得られた分布および Naot-Rodi³⁾ の代数応力モデル (N-R モデル) を用いて計算された結果を用いた。速度計測結果を用いる方法では, 潤辺の法線方向の平均速度分布に対数則分布を仮定し, カルマン定数 $\kappa = 0.41$ として平均壁面せん断力を算定した。また, プレストン管による方法では外径 3 mm のピトー管を用いており, 幅 1 m の直線水路中央に設置して検定した結果が Patel⁴⁾ の検定曲線と良好に一致したことから, Patel の検定曲線を用いてせん断力を求めている。さらに, あらかじめ広幅水路の中央で検定した幅 5 mm, 長さ 7 mm (センサー部分は 2.54 mm \times 1.54 mm), 厚さ 0.1 mm (計測時はステンレス板に取り付け総厚 0.5 mm) のフィルムセンサーで壁面せん断力を計測するとともに, LDV で流れ方向と鉛直方向の速度 2 成分 (u, v) を上流側 5 mm, 壁面より 5 mm の位置で同時計測した。一方, N-R モデルを用いた計算は, 実験と同じ水力条件の流れの水路半幅を対象に, 鉛直方向に 20 点, 横断方向には水路幅に応じて 8 ~ 60 点の格子点で行っており, 計算に用いた定数は Naot らと同じである。

2.3 流れの可視化法

実験には, 長方形断面水路の側壁に壁面から 0.5 mm の位置 ($z^+ = u_* z / \nu = 7 \sim 8$ でバッファ層内) に直径が 0.05 mm の白金線を設置し, これを陰極として発生させた水素気泡により流れを可視化する方法を用いた。長さ 13 m, 幅 39 cm の直線水路内に長さ 10 m の隔壁を設置して水路幅水深比を 1 ~ 10 の範囲で変化させ, 上流より 7 m の位置で流れを可視化した。水素気泡の発生間隔を 0.05 秒とし, 35 mm スチルカメラおよびビデオカメラ (1 / 250 秒の電子シャッターを利用) で撮影し, ビデオ解析装置で 0.1 秒毎にタイムライン間隔を読み取る方法で瞬間速度の分布を計測した。なお, 実験は Table 1 に示すとおり水深, レイノルズ数およびフルード数をほぼ一定として水路幅を変化させ, 水路幅水深比が流れの構造に与える影響を検討することを目的とした水力条件に設定した。

3. 平均速度及び平均壁面せん断力分布と流れの構造

3.1 平均速度分布と流れの構造

Fig. 1 は、2次流ベクトルの分布とそれに基づいて描いた2次流セルを示したものである⁹⁾。図より隅角部に向かう2次流を挟んで水面側と底面側に偏平なセルの存在が確認される。これらの2次流セルの存在により速度分布が影響を受け、壁面に向かう流れの存在する位置では壁面せん断力の値が大きくなって波状分布を呈することが指摘される。一方、側壁面に沿った速度の3成分について詳しく見ると Fig. 2 のような分布が得られる。図に示した流下方向速度成分の時間平均値 U 、鉛直方向速度成分の時間平均値 V (上向きが正) および横断方向速度成分の時間平均値 W (側壁から離れる方向が正) の鉛直分布から、隅角凹部に向かう2次流を挟んで形成される底面側と側壁側のセルと水面付近の3つセル (A, B, C) の存在が推定され、それらによって高速流体が輸送されて半水深付近のせん断力が最大となることが分かる。

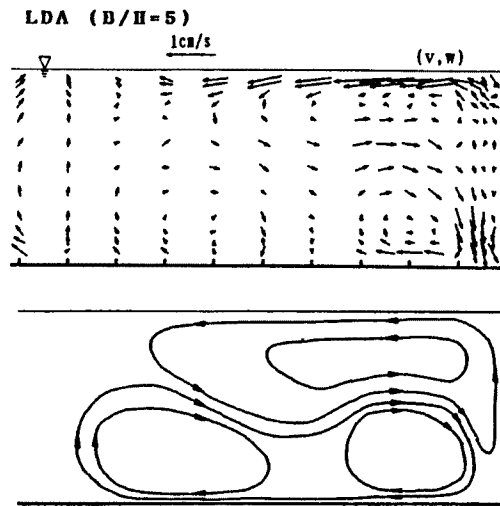


Fig. 1. Secondary flow vectors and secondary flow cells.

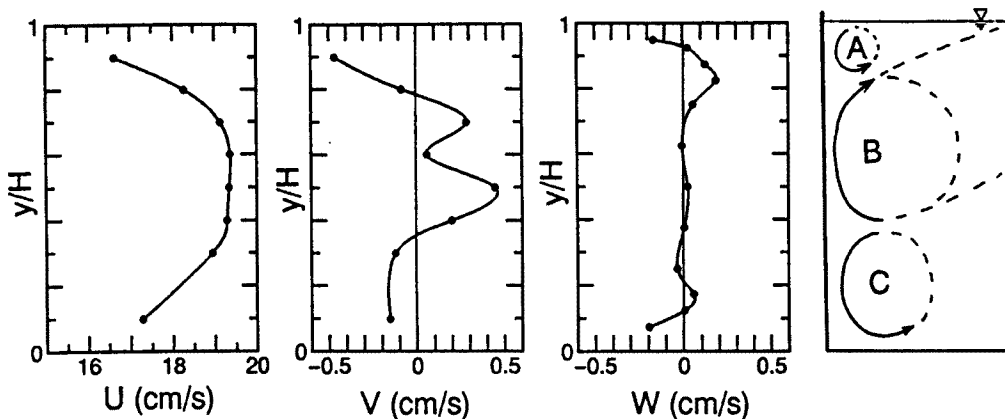


Fig. 2. Distribution of three components of velocity along the side-wall and secondary flow cells.

3.2 平均壁面せん断力分布と流れの構造

Fig. 3 は、底面および側壁における平均壁面せん断力分布の計測結果 (図中・点) と計算結果 (図中の実線) を比較して示したものである。得られた値は、 $\tau_{mean} = \rho g R I$ で無次元化して示している。左図に示した結果は、速度計測結果より求めた平均壁面せん断力と計算結果を示したものであり、計測値に若干のばらつきはあるものの、底面では波状、側壁では放物型の分布を示していることを示しており、従来の結果と一致している。また、代数応力モデルによる結果ともほぼ一致している。一方、右図は、プレストン管を用いた計測結果を計算結果とともに示したものであり、左図に示した結果と同様に、底面での波状分布、側壁で放物型の分布形状を示している。また、併示した計算結果とは側壁近傍では良好な一致を示しているが、水路中央部では計測結果が若干大きな値となっている。以上のように、いずれの方法によっても同様の平均壁面せん断力分布が得られることが知れる。Fig. 4 は、種々の水路幅水深比 B/H における平均壁面せん断力分布の計算結果を示したものであり、水路幅水深比によらず底面の分布が波状となること、および側壁の分布が半水深付近で最大となる放物型の分布となることが分かる。また、水路幅水深比が大きくなるにしたがって側壁に作用するせん断力は小さくなり、それらの関係は、底面および側壁で平均したせん断力を全潤辺の平均値で無次元化して示した Fig. 5 のようになる。これらの結果は禰津・中川¹⁾の示した結果と良好な一致を示している。

つぎに、流れの構造との関係について検討する。Fig. 1 の 2 次流ベクトルの分布とそれに基づいて描いた 2 次流セルの配列と Fig. 2 および Fig. 3 に示した結果とを比較してみると、底面における壁面せん断力の波状分布は 2 次流セルの下降部および上昇部位置との対応で説明することが可能であり、下降部で壁面せん断力が大きく、上昇部で小さくなっている。一方、側壁における分布は半水深よりやや上方で最大値を示しており、側壁側の 2 次流セルが側壁に向かう部分との対応が認められる。

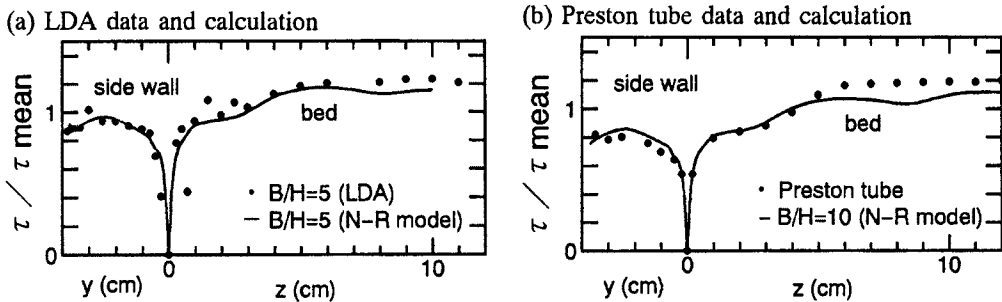


Fig. 3. Distribution of boundary shear stress obtained by measurements.

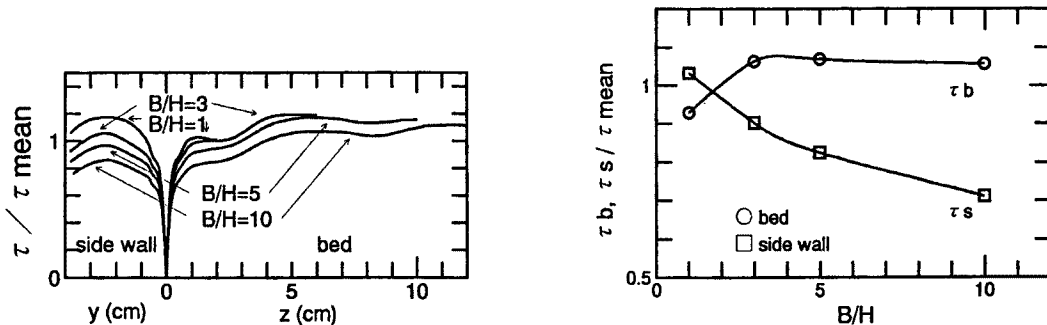


Fig. 4. Distribution of boundary shear stress calculated by Naot-Rodi model.

Fig. 5. Mean value of secondary shear stress on the bed, τ_b , and on the side-wall, τ_s , and the aspect ratio of flow section.

4. 側壁面上の bursting 現象に関する検討

4.1 流れの可視化結果による検討

以上のように、側壁の壁面せん断力分布は半水深付近で最大となる放物型の分布となるが、著者らが壁面の極近傍に設置した白金線を用いた水素気泡法によるせん断力分布の計測結果⁶⁾では側壁の分布も波状となり、両者に差異が見られる。ここでは、側壁面近傍の流れを可視化した結果を用い、壁面近傍の組織構造と前章で示した結果との関係について検討し、この差異について考察する。

Photo 1 は、水路幅水深比 $B/H=5$ のケースにおけるタイムラインの撮影例を示したものである。写真 (a) に示すように、相対水深にして 0.4 と 0.7 程度の 2 箇所に低速部が見られる場合と、それらの低速部が消滅する写真 (b) のような流況が周期的に繰り返される。前者の流況が比較的長い時間継続した後、後者のように短時間に低速部が消滅する。この現象は底面で見られるバースティング現象と同じものと考えられるが、本実験結果から得られた発生周期は 2 秒程度と底面での値（このケースでは 0.5 秒程度）の数倍に相当する長いものであった。

Fig. 6 は平均速度 U および乱れの強さ u' の分布を示したものである。いずれのケースにおいても平均速度は底面側がやや大きい波状の分布をしており、二箇所の低速部の存在が明瞭に認められる。一方、乱れの強さも波状の分布をしており、低速部でやや小さくなっている。低速部の位置を見るために、30 秒間の速度変動データ（300 個）を用い、鉛直平均した速度の 60% 以下の速度が生じる頻度の分布を示したものが Fig. 7 である。図より、いずれのケースにおいても水深をほぼ 3 等分した位置での発生頻度が高く、全ケースの結果を平均すると相対水深で $y/H=0.37$ と 0.73 を中心とした位置となる。このように、低速部の間隔は水深の 0.36 倍となる。また、内部変数（摩擦速度 u_* と動粘性係数 ν ）で無次元化した間隔 λ^+

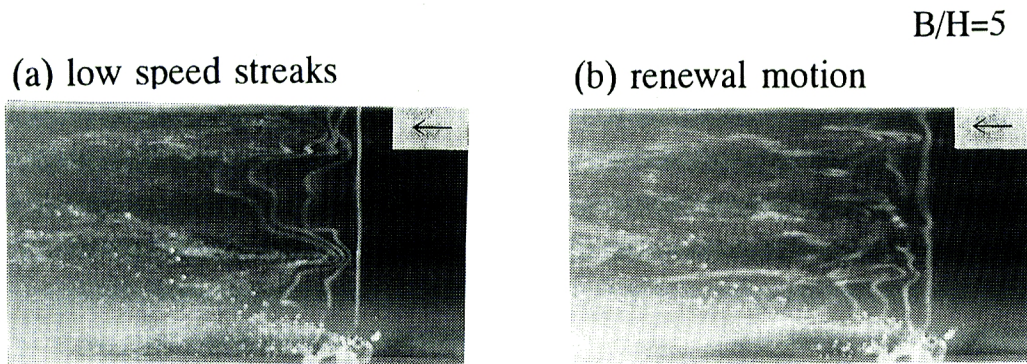


Photo 1. Example photographs of time lines near the side-wall ($B/H=5, z=0.5\text{mm}, z^+=7.4$).

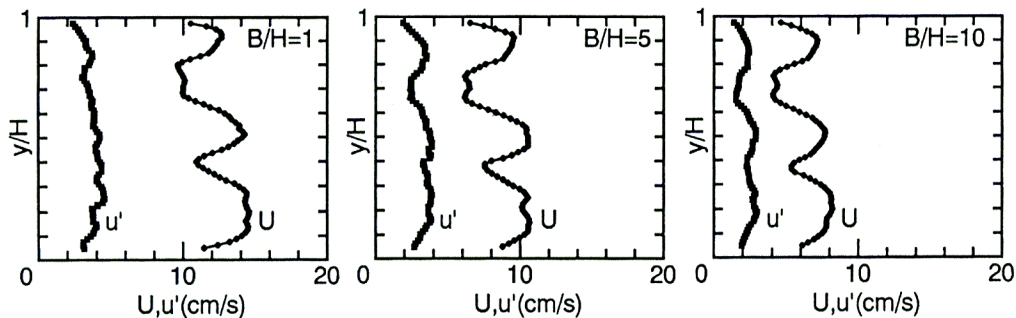


Fig. 6. Mean velocity U and turbulence intensity u' along the side-wall obtained by the hydrogen bubble method.

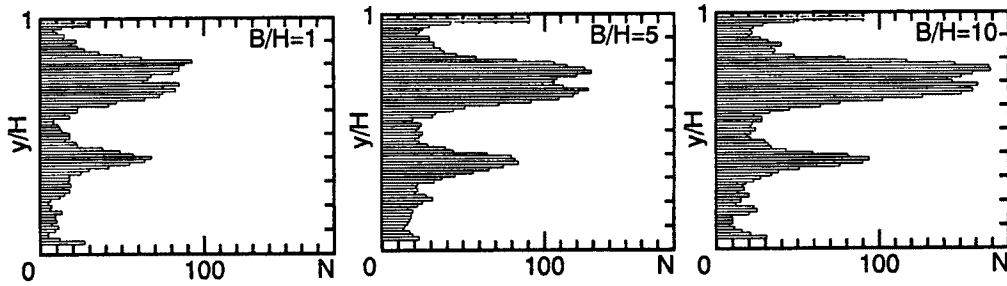


Fig. 7. Distribution of frequency N of the position where the velocity is lower than 60 percents of mean value along the side-wall.

$=u_* Ly/\nu$ は Fig. 8 に示すように水路幅水深比によらずほぼ一定の 210 程度であり、底面での低速縞の間隔 $\lambda^+ = 100$ の 2 倍となっている。なお、計算に用いた摩擦速度は Fig. 5 に示した水路幅水深比の増大に伴う低減を考慮したものである。

つぎに、速度の経時変化を見る。Fig. 9 は、Fig. 7 と同様に鉛直平均した速度の 60% 以下となる位置を時系列に並べたものであり、Fig. 10 は同一時間における二箇所の低速部における速度変動成分 u を示したものである。なお、ここに示した結果は $B/H = 10$ の場合であるが、他のケースの結果も同様の特性を示している。Fig. 9 を見ると、低速部は時間的に連続して存在するの

ではなく、流況特性で述べたように周期的に消滅する。そのことは Fig. 10 の波形を見れば明らかなように、急激な速度の増加が周期的に繰り返されている。この周期は 2 秒程度であり、流況特性で述べたように底面でのバースティング周期に比して長いものとなっている。また、ビデオ画像の観察から、水面に近い低速部は時間的に上方へ移動する傾向が見られた。

以上の結果と前章に示した結果を比較すると、Fig. 2 に示した B の 2 次流が側壁に当たって上昇する位置が水面側の低速部に相当し、この 2 次流により輸送される低速流体が水面付近の速度を低減させているものと考えられる。一方、底面側の低速部は、B あるいは C の 2 次流の影響を受けているものと考えら

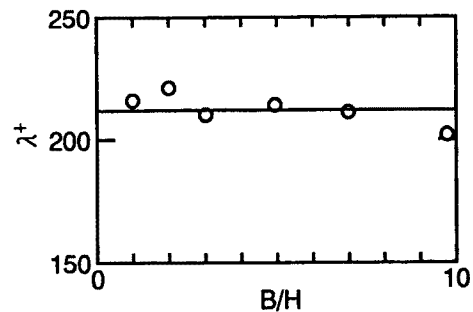


Fig. 8. Normalized spacing of low-speed streaks λ^+ and aspect ratio of flow section.

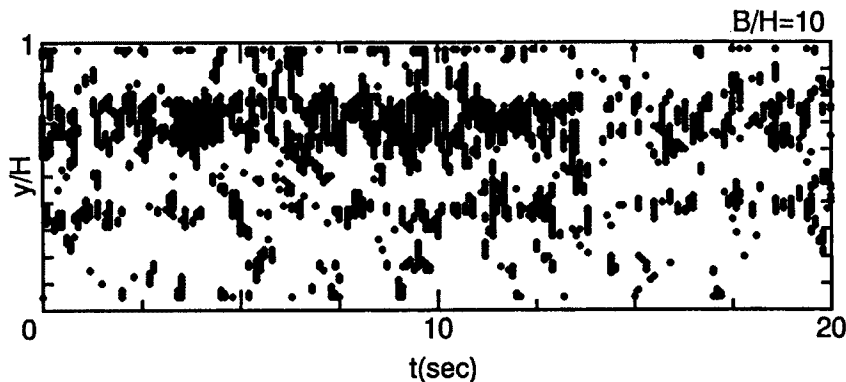


Fig. 9. Time records of low-speed position on the side-wall obtained by the hydrogen bubble method.

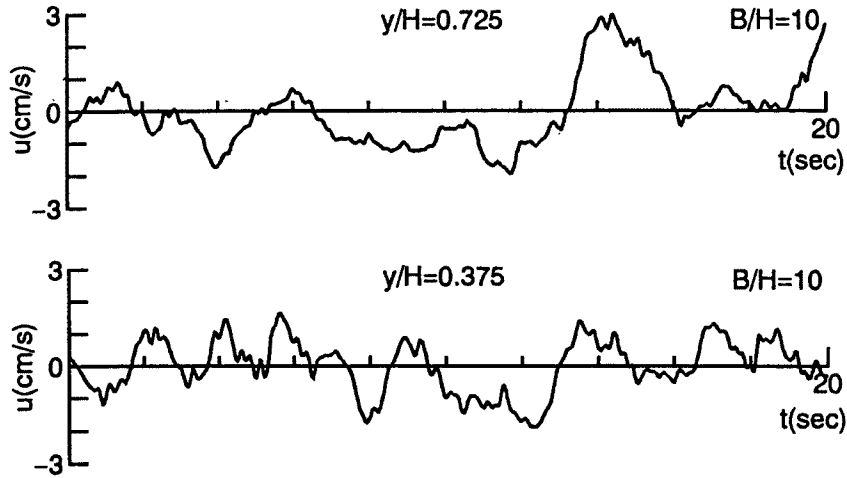


Fig. 10. Velocity fluctuations obtained by the hydrogen bubble method.

れる。また、低速部の消滅周期が長いことも2次流の影響が及んでいることを示すものと考えられる。以上のように、側壁面での組織構造の横方向スケールおよび周期は2次流の影響を受けていると言える。

4.2 流速と壁面せん断力の同時計測結果による検討

側壁近傍においては Fig. 2 に示すような2次流セルが存在し、従来の研究で指摘されているように壁面せん断力分布や速度分布形状に影響を与えていることを確認した。ここでは、2次流セルを図に示すように A を水面セル、B を側壁セル、C を底面セルと呼び、速度と壁面せん断力の同時計測結果を用いて両者の関係を検討する。Fig. 11 は、フィルムセンサーによる計測結果と乱流モデル (Naot-Rodi Model) による計算結果を比較したものであり、両者がほぼ一致していることから計測結果の妥当性が伺える。Fig. 12 は、図中に示した各点の流下方向流速とせん断力、および鉛直方向流速とせん断力の相互相関係数である。A および B 点は、既報において側壁極近傍の可視化結果で低速部が安定して観察された位置であり、Fig. 2 の側壁セルで側壁から離れる位置と側壁に向かう位置に相当し、C 点は底面セルで底面に向かう位置に相当する。また D 点は水路中央である。

C および D 点の結果より高速流体が壁面に向かうときに大きなせん断力が作用することが知れる。この

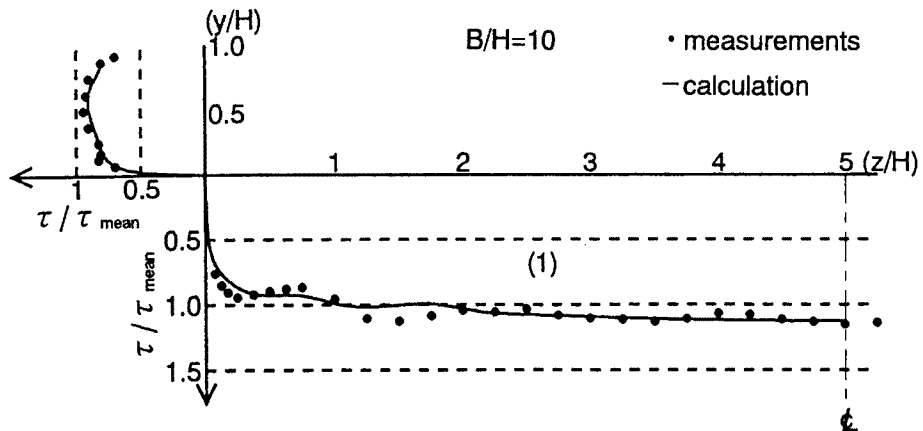


Fig. 11. Distribution of boundary shear stress obtained by film sensor (rigid circles) and Naot-Rodi model (solid line).

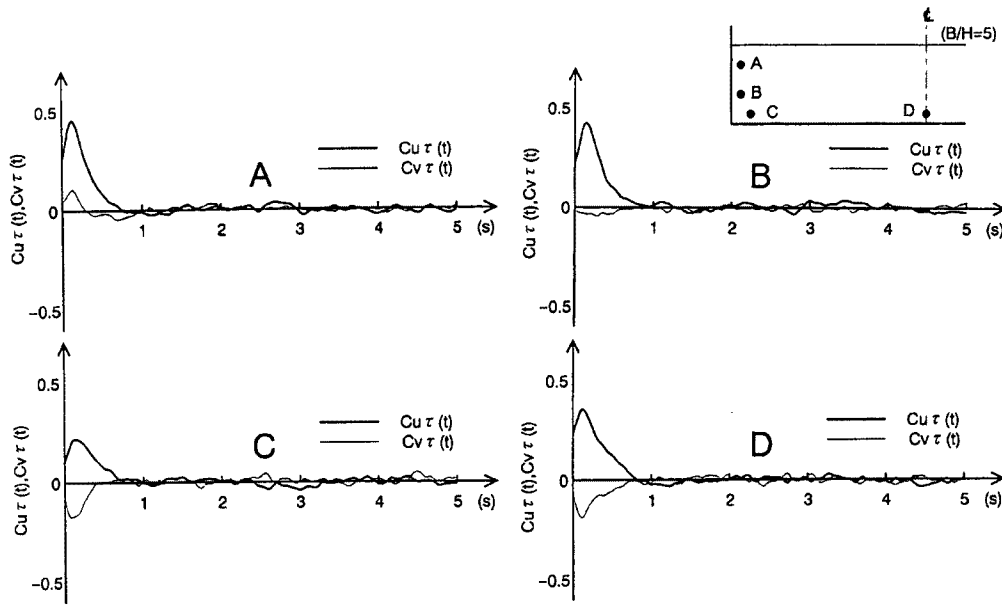


Fig. 12. Correlation between velocity and boundary shear stress.

点を考慮すると、A点では側壁セルの上昇部に伴って輸送される高速流体が大きなせん断力を作用させること、B点では τ と v の相関がほぼ0であることから側壁に鉛直に向かう流れが大きなせん断力の要因であること、などの2次流構造と壁面せん断力との関係が指摘される。

4.3 VITA 法による bursting 周期の検討

VITA 法 (Variable-interval time-averaging technique) は、流下方向流速 U に着目し、可動区間 T_m (sec) 内で次式に表わす VITA variance の算定値が定数 k および標準偏差 u' で与えられるしきい値 $k \cdot u'^2$ を上回る点の変動波形を抽出する方法である⁷⁾。これらの抽出された波形をアンサンブル平均し、組織構造の検討に用いようとするものである。

$$var(t, T_m) = \frac{1}{T_m} \int_{t-\frac{T_m}{2}}^{t+\frac{T_m}{2}} u^2(s) ds - \left\{ \frac{1}{T_m} \int_{t-\frac{T_m}{2}}^{t+\frac{T_m}{2}} u(s) ds \right\}^2$$

ここに t はデータの始めの $t=0$ とした時間であり、 s は T_m 区間の始めを $s=0$ とした時間である。また、 $var > k \cdot u'^2$ となる区間の中点を $\tau=0$ とし、アンサンブル平均波形を求めた。本研究においては水路中央部と側壁近傍の時間スケールの違いを確認するため、Komori ら⁸⁾が用いた $k=0.4$ 、 $T^+ (= T_m U_*^2 / \nu) = 45$ という一定条件で解析を行った。Fig. 13 は、サンプリング周波数 200 Hz、102,400 個のデータから求められたバースティング周期である。図中○は、 $var > k \cdot u'^2$ となるすべての生起データを用いたもの (All)、□は $du/dt > 0$ (Positive)、◇は $du/dt < 0$ (Negative) の条件を考慮したものであり、実線は従来の研究による次式、

$$Tb = (1.5 \sim 3.0)H/U$$

一点鎖線は今本ら⁹⁾による実験結果より推定される次式

$$Tb = (0.115 \pm 0.03)H/U_*$$

を表わしている。図より、All, Positive, Negative のいずれも水路中央から側壁付近に近づくにしたがい、

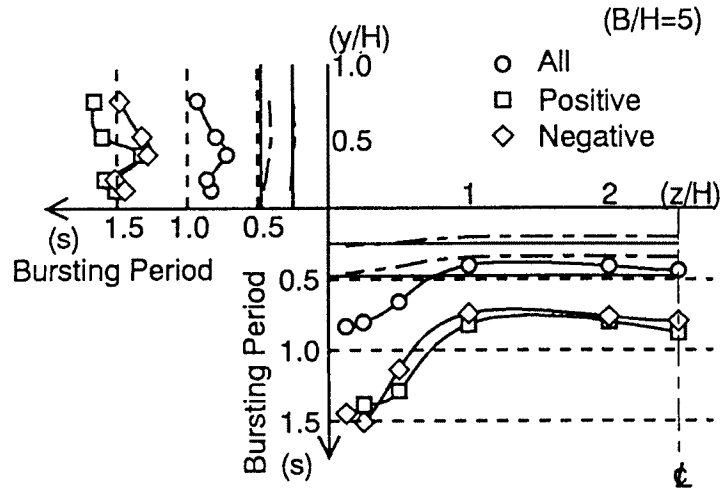


Fig. 13. Distribution of bursting period along the perimeter obtained by VITA method ($k=0.4, T^+=45$).

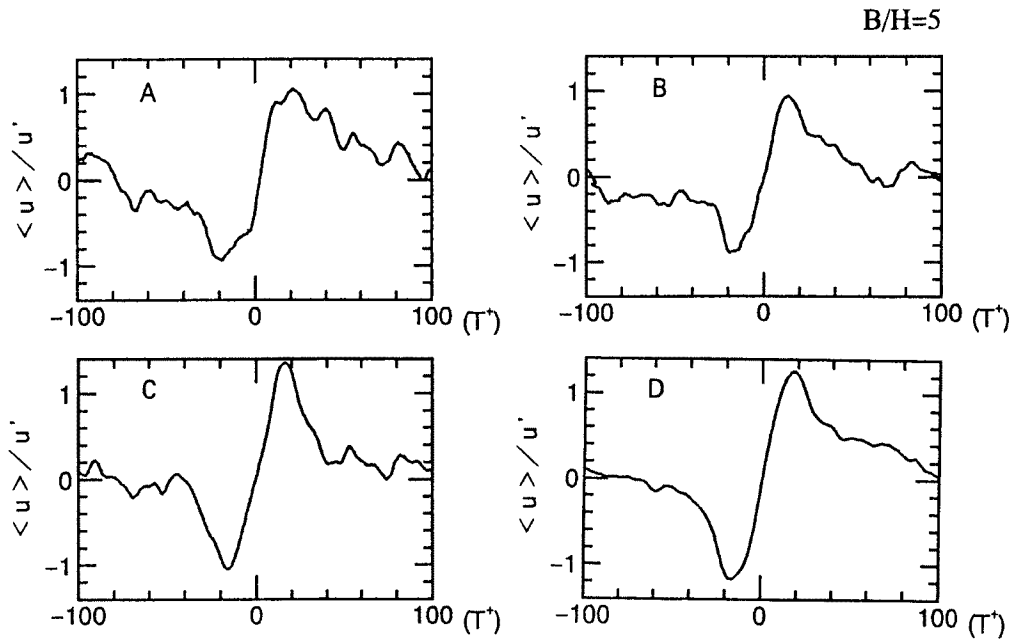


Fig. 14. Conditional averages of longitudinal velocity $\langle u \rangle$ obtained by VITA method.

バースティング周期は大きな値となる。All の場合は、中央よりの点で従来の研究成果に当てはまる結果を示しているが、側壁よりの底面および側壁近傍では、従来の研究の 2 倍近い値を示している。この結果から 4.1 で示した可視化結果と同様に側壁におけるバースティング周期が、底面におけるものに比して長いものとなっていることが確認できる。また、従来の研究は水路幅の大きい水路の中央部におけるバースティングに関するものであり、側壁付近のような三次元性の強い場には適用できないことがわかる。Fig. 14 は、図に示した点における positive ($du/dt > 0$) のアンサンブル平均波形を示したものである。各点の波形にはほとんど差異は見られず、バースティングを示す速度変動が、底面と側壁で同様のものであることが知れる。以上の結果より、側壁においても底面と同様にバースティングが発生するが、その発生周期が異なることが指摘される。

5. おわりに

本研究で得られた主な結果をまとめるとつぎのようである。

- 1) 平均壁面せん断力の計測結果とN-Rモデルによる計算結果は良好な一致を示し、底面での波状分布、側壁で放物型の分布をすることが確認された。また、これらの分布は側壁近傍の2次流構造で説明される。
- 2) 側壁近傍には3つの2次流セルが存在する。それは、隅角凹部へ向かう2次流を挟む底面側のセルと側壁側のセルおよび側壁水面近傍のセルである。
- 3) 側壁面近傍の速度分布には低速部が二箇所安定した位置に発生し、その低速部は周期的に消滅する。二つの低速部は相対水深 $z/H = 0.37$ と 0.73 の位置で発生し、その間隔は水深で無次元化すると 0.36 、内部変数で無次元化すると 210 程度となった。消滅の発生周期は2秒程度と長い。これらの発生間隔および発生周期は底面のバースティング現象のスケールとは異なり、2次流の影響を受けているものと考えられる。

以上の結果より、2次流構造と壁面せん断力の関係がより明確に示されるとともに、側壁での乱れ生成の時間スケールが底面側よりも長いことが定量的に示された。このことは、側壁で形成される乱流構造の空間スケールが底面側の乱流構造のスケールである水深よりも大きく、側壁乱流がより大きなスケールの乱れを形成することを示唆している。なお、詳細な検討は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 瀬津家久・中川博次：開水路流れの三次元構造（縦渦）とそれに及ぼす自由す面の影響に関する研究，京都大学防災研究所年報，第28号B-2，pp.499-522，1985.
- 2) Ghosh, S. N. and Roy, N. : Boundary shear distribution in open channel flow, Proc. ASCE, Vol. 96, No. HY4, pp. 967-994, 1970.
- 3) Naot, D. and Rodi, W. : Calculation of secondary currents in channel flow, Jour. ASCE, HD, Vol. 108, No. HY8, pp. 948-968, 1982.
- 4) Patel, V. C. : Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradient, J. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 185-208, 1965.
- 5) Imamoto, H., Ishigaki, T. and Shiono, K. : Secondary flow in a straight open channel, Proc. of 25th IAHR, Vol. I, pp. 73-80, 1993.
- 6) 今本博健・石垣泰輔：開水路隅角部付近における縦渦の配列特性について，第28回水理講演会論文集，pp. 257-262，1984.
- 7) Blackwelder, R. F. and Kaplan, R. E. : On the wall structure of turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., 76, pp. 89-112, 1976.
- 8) Komori, S., Murakami, Y. and Ueda, H. : The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow, J. Fluid Mech., 203, pp. 103-123, 1989.
- 9) Imamoto, H., Asano, T. and Ishigaki, T. : Experimental investigation of a free surface shear flow with suspended sand-grains, 17th Congress of IAHR, Vol. 1, A 14, pp. 105-112, 1977.