

# 開水路側壁近傍の壁面せん断力分布と流れの3次元構造について

Boundary Shear Stress and Flow Structure near the Side-wall  
in Rectangular Open Channel

石垣泰輔\*・今本博健\*\*・塩野耕二\*\*\*

By Taisuke ISHIGAKI, Hirotake IMAMOTO and Koji SHIONO

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 and by using Preston tube, 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.

Keywords: boundary shear stress, secondary flow, coherent structure

## 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。例えば橋津・中川<sup>1)</sup>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、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側壁面近傍の流れの構造と壁面せん断力分布との関係について検討を加える。

---

\* 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所附属宇治川水理実験所

\*\* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所附属宇治川水理実験所

(〒612 京都市伏見区横大路下三栖)

\*\*\* 工博 ラフボロー工科大学助教授 土木工学科

(Loughborough, Leics, LE11 3TU UK)

2. 平均壁面せん断力分布

2.1 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 & Roy<sup>2)</sup>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を用いて得られた分布および Naot-Rodi<sup>3)</sup>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3mmのピトー管を用いており、幅1mの直線水路中央に設置して検定した結果が Patel<sup>4)</sup>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。一方、N-Rモデルを用いた計算は、実験と同じ水理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。なお、本研究で用いた結果の水理条件を表-1にまとめて示す。

2.2 平均壁面せん断力分布特性

図-1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。上図に示した結果は、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、下図は、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、上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。図-2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図-3のようになる。これらの結果は橋津・中川<sup>1)</sup>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。図-4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<sup>5)</sup>。この結果と図-1および図-2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。これは側壁面近傍の平均速度分布を示した図-5で説明される。すなわち、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

表-1 水理条件表

| 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 |

PT:Preston tube, FV:Flow visualization  
B:cm, H:cm, Q:l/s

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。以上のように、壁面せん断力分布は、図-4に示された2次流構造で説明されることが知れる。

(a)速度計測法とN-Rモデルによる結果の比較

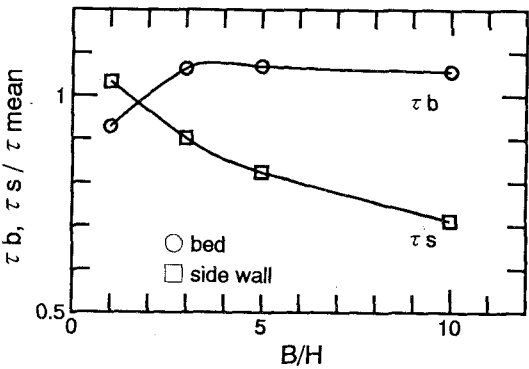
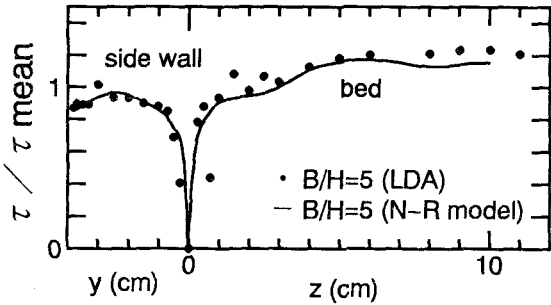


図-3 底面および側壁の平均値と水路幅水深比

(b)プレストン管法とN-Rモデルによる結果の比較

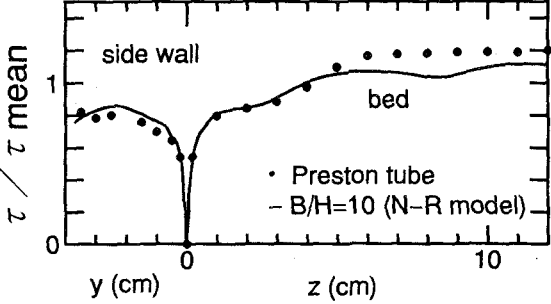


図-1 平均壁面せん断力分布

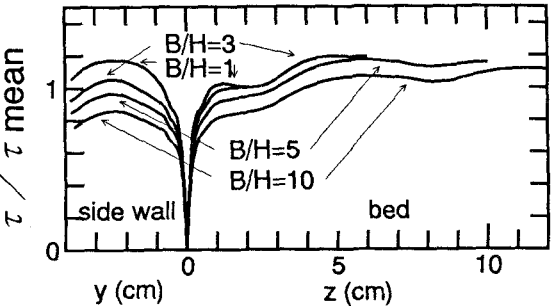


図-2 平均壁面せん断力分布 (N-Rモデル)

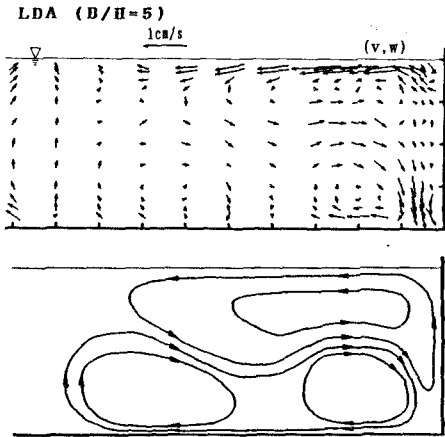


図-4 2次流ベクトルと2次流セル

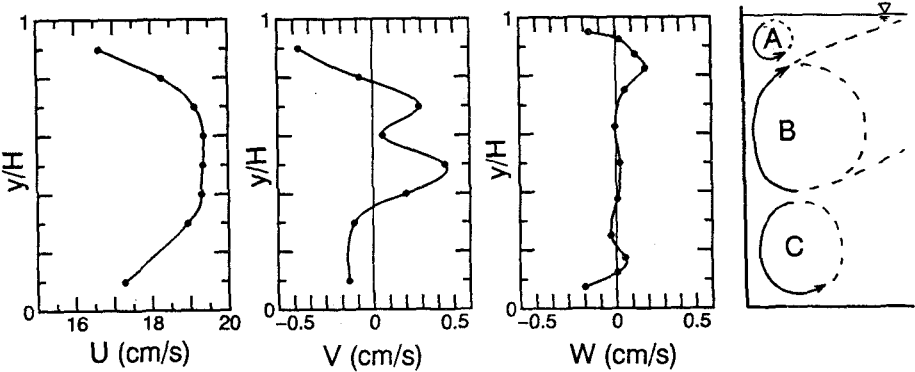
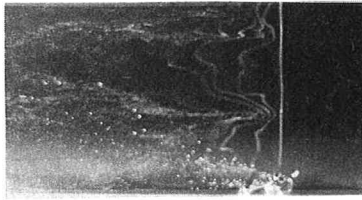


図-5 側壁近傍の平均速度分布と2次流構造

(a)低速部が発生している流況



(b)低速部が消滅した時の流況

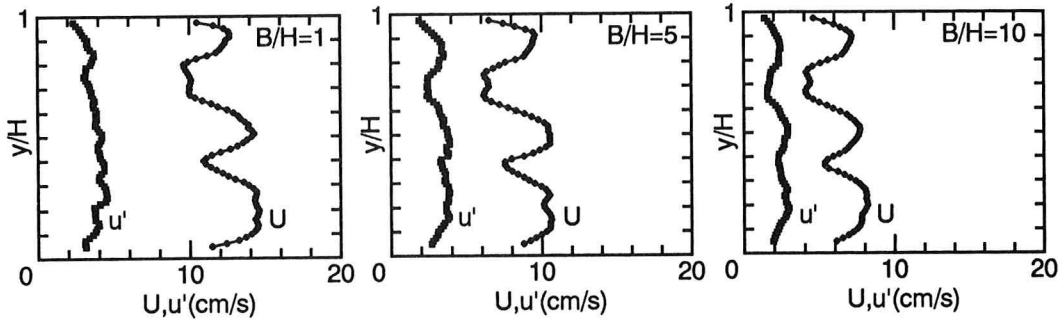
写真-1 側壁面極近傍の流況 ( $B/H=5$ ,  $z=0.5\text{mm}$ ,  $z^+=7.4$ )

図-6 側壁面極近傍の速度および乱れの強さ

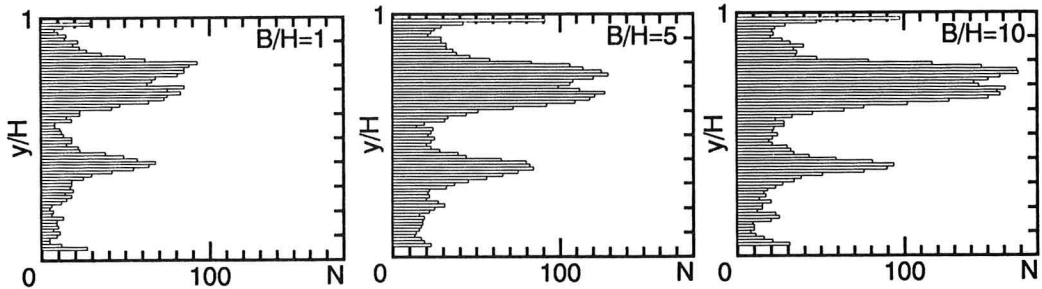


図-7 低速部の発生位置の頻度分布

### 3. 側壁面近傍の流れの構造

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<sup>6)</sup>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。

#### 3.1 実験方法

実験には、長方形断面水路の側壁に壁面から0.5mmの位置 ( $z^+=u_*z/\nu=7\sim 8$ でバッファ層内)に直径が0.05mm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13m、幅39cmの直線水路内に長さ10m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7m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、35mm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、実験は表-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理条件に設定した。

### 3.2 流況特性

写真-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2～3秒と底面での値（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。

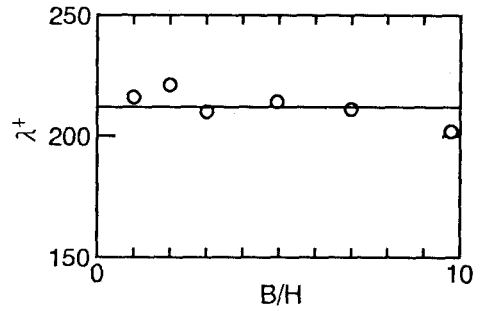


図-8 発生位置の鉛直方向間隔

### 3.3 速度変動と流れの構造

図-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図-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

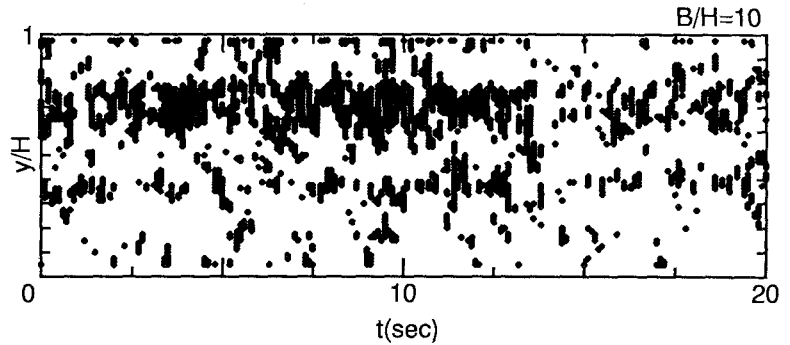


図-9 低速部の発生位置の経時変化

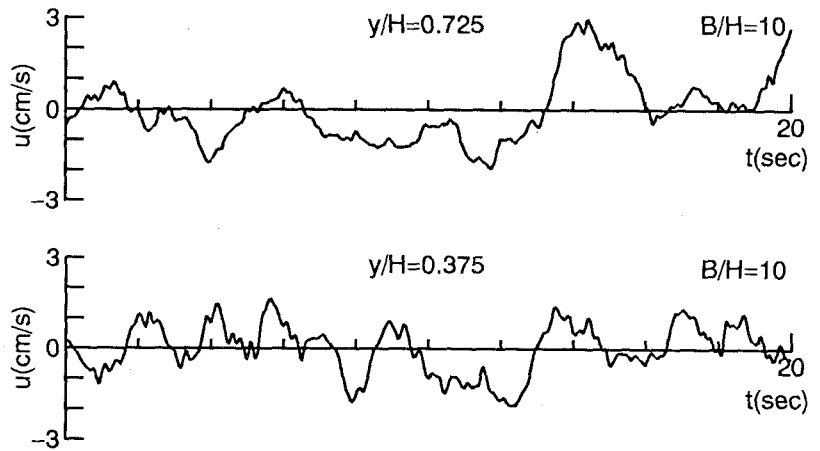


図-10 低速部の速度変動波形

$\nu$ )で無次元化した間隔 $\lambda^+ = u_* L_y / \nu$ は図-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図-3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。図-9は、図-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、図-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。図-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。そのことは図-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2～3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、図-5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. 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2～3秒と長い。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。

以上は、限られた結果から得られた結論であり、今後さらに詳細な検討を加える予定である。

#### 参考文献

- 1) 楠津家久・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 N. Roy : Boundary shear distribution in open channel flow, Proc. ASCE, Vol.96, No.HY4, pp.967-994, 1970.
- 3) Naot, D. and W.Rodi : 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., Isigaki, 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.