

開水路流の三次元乱流構造に及ぼす側壁および境界粗度の効果

The Effect of Side Wall and Boundary Roughness on Three Dimensional
Turbulent Structure in Open Channel Flow

群馬大学工学部 正員 富 永 晃 宏
群馬大学工学部 正員 江 崎 一 博

1. まえがき

直線開水路流は、側壁の存在により三次元的な流れとなるが、この影響は断面全体の平均として考慮されるか、または幅水深比すなわちアスペクト比の大きな水路では流れは二次元的とみなされる。しかしながら河道の安定や拡散問題を考える上では、このような流れの三次元的な内部構造を考慮する必要がある場合がでてくると考えられる。側壁近傍では乱れの不均一に起因する二次流が発生し、これが流れに複雑な影響を及ぼすため、流れの三次元構造を容易に予測できず、実験水路においてさえも未だに明確に把握されていない。したがって、この場合の流れの三次元構造を理解するには、まず二次流の構造を明らかにしてから、これと流れの相互関係を明らかにする必要がある。本研究は、この観点に立って直線開水路流の二次流構造および三次元乱流構造を実験的に明らかにしようとしたものである。実験は全潤辺が滑面の場合と粗面の場合について、アスペクト比と粗度の効果を検討した。ここでは、まず二次流、平均主流速、壁面摩擦速度についての結果を示し、乱れ強度、レイノルズ応力等については触れていない。また、粗面においては並列らせん流の発生が認められたので、これについても検討を加えた。

2. 実験方法および実験条件

実験に用いた水路は、長さ12.5 m、幅40 cm、高さ40 cmの長方形断面開水路で、底面がペンキ塗装鉄板、側面がガラス張りである。計測断面は水路上流端より7.5 m下流に設け、幅を一定とし水深を変化させてアスペクト比を変化させた。粗面の場合、粗度として直径1.2 cmのガラス球を合板に密に張り付けたものを使用し、これを底面および側壁に設置した。このため粗面の水路幅は31.6 cmとなった。また粗度高さ K_s としては粒径 d に等しいとし、鉛直座標（ y 座標）の原点は粗度頂部より $1/4 d$ すなわち3 mm下にとった。表-1にそれぞれの実験条件を示す。アスペクト比が2, 4, 8の場合が滑面と粗面に対応し、粗面では並列らせん流との関係をみるためにアスペクト比6の場合を加えた。座標系は流下方向を x 、鉛直方向を y 、横断方向を z とし、それぞれの方向の平均流速および変動流速を（ U, u ）,（ V, v ）,（ W, w ）とする。流速の測定には、二成分X型ホットフィルムプローブ（日本科学工業製）を用い、プローブ先端を90°回転させることにより（ $U+u, V+v$ ）および（ $U+u, W+w$ ）を別々に計測して合成した。流速計の出力電圧は、サンプリング周波数50 HzでAD変換され一測点につき2048個のデータを得たのち電算処理された。なお滑面の3ケースは、二次流速だけ別に計測している。また流れの対称性はほぼ満足されていたので、計測は1/2断面で行われた。

表-1 実験条件

Case	Discharge Q (l/s)	Flow depth H(cm)	Channel width B(cm)	Aspect ratio Ar(=B/H)	Roughness height k_s (cm)	Mean velocity U_m (cm/s)	Maximum velocity U_{max} (cm/s)	Reynolds number $Re(=4RU_m/\nu)$	Froude number Fr	Energy gradient I_e
SH05	7.95	5.00	40.0	8.00	-	39.73	46.31	6.37×10^4	0.568	9.37×10^{-4}
SH10	7.58	10.15	40.0	3.94	-	18.68	23.50	5.07×10^4	0.187	1.38×10^{-4}
SH20	15.14	19.90	40.0	2.01	-	19.24	24.36	7.31×10^4	0.183	-
R101	4.70	4.00	31.6	7.90	1.2	37.17	49.80	4.71×10^4	0.594	5.22×10^{-3}
R102	9.02	7.70	31.6	4.10	1.2	37.08	52.06	7.35×10^4	0.427	2.05×10^{-3}
R103	5.81	5.26	31.6	6.01	1.2	34.95	48.70	5.20×10^4	0.487	2.87×10^{-3}
R104	14.86	15.77	31.6	2.00	1.2	29.83	40.14	8.73×10^4	0.240	0.76×10^{-3}

R=Hydraulic radius, ν =Kinematic viscosity

3. 二次流の構造

二次流の大きさは最大主流速のわずか2～3%以下の小さなものであるから、計測誤差の影響を受けやすい。このため、生の平均値から正しい二次流速値を得るのは困難であるが、二次流速値の空間的な変動は明確に認められる。したがって、まず二次流の境界条件をほぼ満足させ、次に質量保存則を満足するように次式のような補正を行った。ここに $\hat{V}$ 、 $\hat{W}$ は補正前の値を示す。

$$V = \hat{V} - \int_0^{B/2} \hat{V} dz, \quad W = \hat{W} - \int_0^H \hat{W} dy \quad (1)$$

図-1に滑面の二次流ベクトル図および、Wから次式によって計算された流れ関数の等値線を示す。

$$\psi = - \int_0^y \hat{W} dy \quad (2)$$

この結果、開水路における二次流は、管路流の結果¹⁾と著しく異なり、次のような特徴があげられる。

- 管路流では、コーナ角の二等分線を境にして底面渦と側壁渦という一对の二次流が形成されたのに対して、開水路流では $y/H \approx 0.6$ 付近で水平に中央から側壁へ向かう流れと、水面および底面で側壁から中央へ向かう流れが存在し、水面渦と底面渦というように呼ぶこととする。
- アスペクト比が2以上では、水面渦はその幅が増大し、水深の2倍程度にまで達する偏平な渦となる。一方、底面渦の幅はほぼ水深程度である。
- 最大流速で無次元化された二次流速の大きさは、管路の場合とほぼ同オーダーで、最大値が約1～2%程度であるが、開水路流ではVに比べてWの方が大きく支配的となっている。
- アスペクト比が8のケースSH05では、 $z/B = 2 \sim 3.5$ 付近に弱い反時計回りの渦が形成されているのが認められ、これは側壁の二次流に誘発された並列らせん流を示すものと思われる。

次に、粗面流における同様の図を図-2に示す。これは滑面の場合と比較して次のことがいえる。

- 側壁近傍の二次流のパターンは、滑面の場合とほぼ同様であり相似性を示す。
- アスペクト比が4以上では、水面渦が $z/H \approx 2$ 付近で底面近くにまで達する大きな渦に発達している。そしてアスペクト比が6および8の場合には、 $z/H > 2$ の領域に顕著な並列らせん流の発生が認められる。
- 最大流速で無次元化された二次流速の大きさは、アスペクト比2のケースR104では全体的にかなり

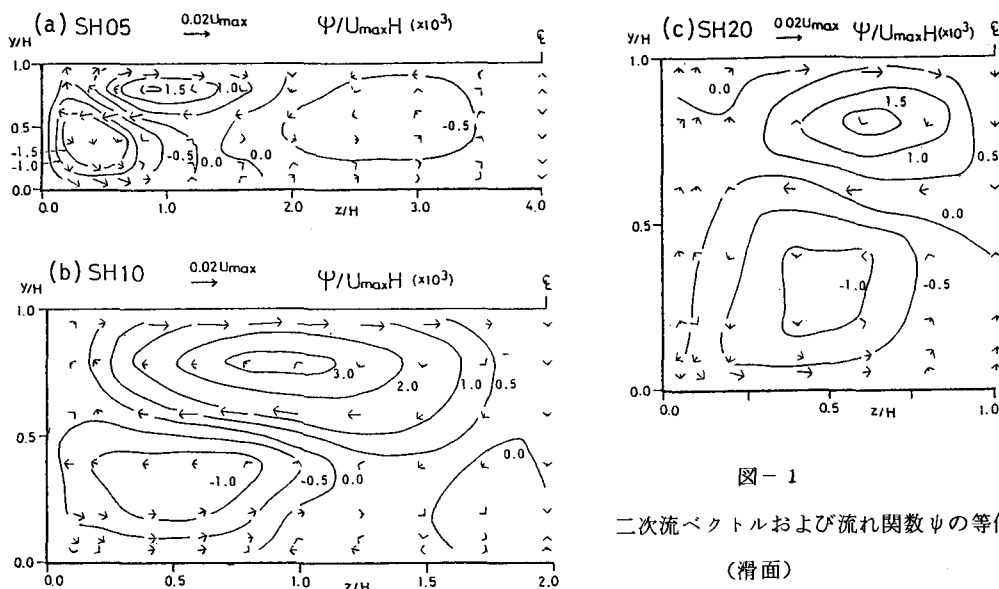


図-1

二次流ベクトルおよび流れ関数 ψ の等値線
(滑面)

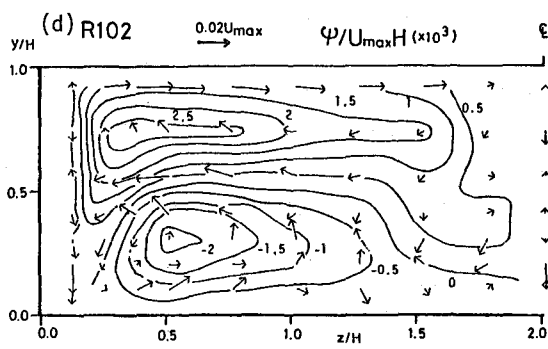
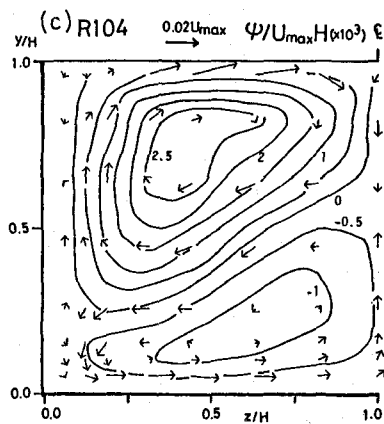
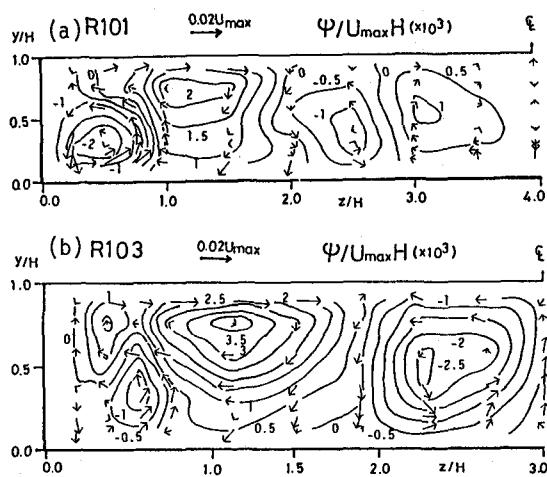


図-2

二次流ベクトルおよび流れ関数 ψ の等値線 (粗面)

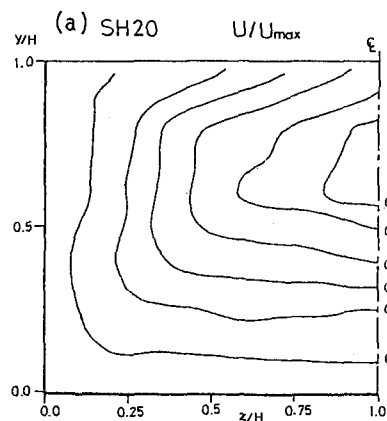


図-3 平均主流速 U の等値線 (滑面)

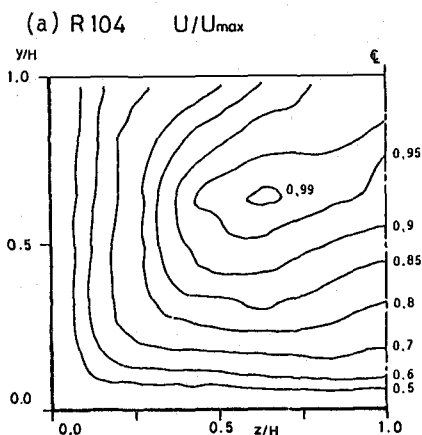
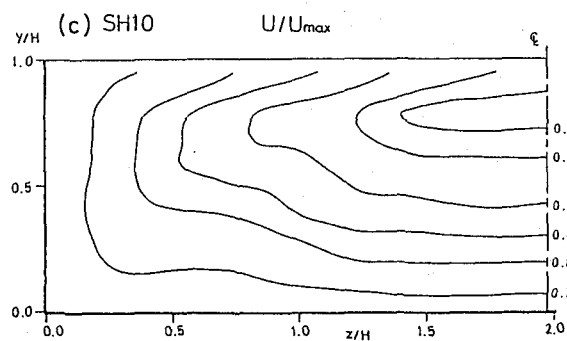
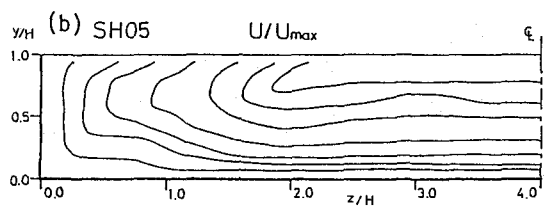


図-4 (a)

平均主流速 U の等値線 (粗面)

大きくなり、また滑面の場合に比べてVの値が大きくなっている点が特に注目される。その他のケースについては、やはりVの値が滑面よりかなり大きくなっているが、Wはほぼ同程度か若干大きい程度である。

以上が本質的と思われる二次流の特性である。二次流速の大きさについては、この二次流の発生原因が乱れ強度 v' , w' の非一様な分布にあることを考慮すると、乱れ強度の相対的に大きい粗面流で大きくなることが予想される。この結果からはVは明らかに増大しているがWについては明確でなかった。また、滑面と粗面の大きな相違点は、アスペクト比の大きい場合の中央付近の構造である。滑面でもケースSH05では弱い並列らせん流らしきものが認められたが、粗面流ではこれがいっそう発達し、安定したものとなっている。この滑面と粗面の異なった原因については、Vの増大という点が関与していると考えられるが、今のところ明らかでない。しかし、側壁に起因する二次流が引き金となって並列らせん流が誘発されるという中川らの仮説¹⁾がある程度立証されたものと考えられる。この並列らせん流の一つの渦の大きさは、ほぼ水深程度の直径であり、その発生個数はアスペクト比に依存している。

4. 平均流速分布

滑面および粗面の平均主流速Uの等値線を図-3および図-4に示す。粗面では流速勾配が大きく、壁面近傍の流速が滑面と比べて相対的に小さいため両者で分布が若干異なるが、 z/H が約2以下の等値線パターンはよく類似しており、二次流による運動量輸送の効果が認められる。すなわち、水面付近では流速が急激に減速されており、また底面渦によって $z/H < 1$ の底面付近で等値線が上に持ち上げられた形となってこの結果等値線は側壁に向かって突き出したような形状を示している。ただし、アスペクト比が2の場合、粗面では最大流速点が水路中央でなく、 $z/H = 0.6$ 付近に現われ、また水路中央付近の流速が小さくなっている点が滑面と異なる。これは、二次流のパターンの違い、すなわち、中央から側壁へ向かう流れがやや下降ぎみである点と、底面渦の上昇流が滑面に比して大きいことによるものと考えられる。

アスペクト比が4以上では、 $z/H > 2$ の領域についてみると、滑面ではほぼ一様な分布となっているが粗面では二次流の構造においてみられた並列らせん流の影響を顕著に受けて、周期的な変動がみられる。アスペクト比が8のR101では、 $z/H = 2$ ($2z/B \div 0.5$) および4 (水路中央) で高速で、 $z/H = 3$ ($2z/B \div 0.75$) 付近で低速となっており、アスペクト比が6のR103では、 $z/H = 2$ ($2z/B \div 2/3$) 付近で高速で、 $z/H = 3$ (水路中央) で低速となる。これから、二次流の下降流部で高速となり、上昇流部で低速となる並列らせん流の特性が認められる。R103はR101の z/H が3以下の分布とほぼ相似であり、 $z/H = 2$ から3へかけてのUの変動はR101よりも大きくなっている。この場合最大流速点はもはや水路中央でなく、 $z/H = 2$ 付近に現われている。このことは、比較的アスペクト比の大きい水路においても、粗面の場合は並列らせん流の発生によって流れの三次元性が水路中央付近にまで及ぶことを示し、アスペクト比の変化によって中央付近の流速分布が大きく変化することを意味している。

5. 壁面摩擦速度分布

得られた主流速の分布は、底面および側壁の近傍では対数則に従うと仮定し、それぞれの壁面に対しての次式で示される対数則に壁面近傍の計測点を一致させるように、摩擦速度 U_* を評価した。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y(\text{or } z)}{A} + B \quad (3)$$

$$A = y/U_* \text{ (滑面)}, A = K_s \text{ (粗面)}$$

カルマン定数 κ はどこでも一定で0.4とし、定数項BはNikradseの値を用い、滑面で $B = 5.5$ 、粗面では $B = 8.5$ とした。先に述べたように粗面のy座標の原点は粗度頂部より3mm下にとり、 $K_s = 1.2 \text{ cm}$ としており、このとき本実験の範囲では $U_* K_s / v$ は200から400程度で完全粗面とみなされる。粗面の場合の U/U_* の片対数プロットの一例を図-5および6に示す。図-5は底面に対するy方向の分布で、図-6は側壁に対するz方向の分布である。底面に対しての分布は、壁近くで図中の直線で示した式3によく一致しており、上述の仮定の妥当性が示される。側壁に対しての分布は、式3に一致させるべき計測点の数が少

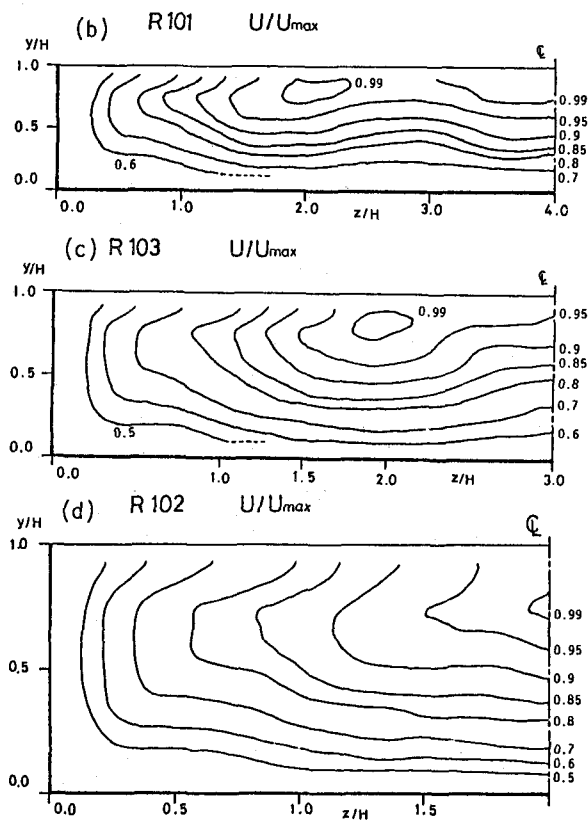


図-4 (b) (c) (d) 平均主流速 U の等値線 (粗面)

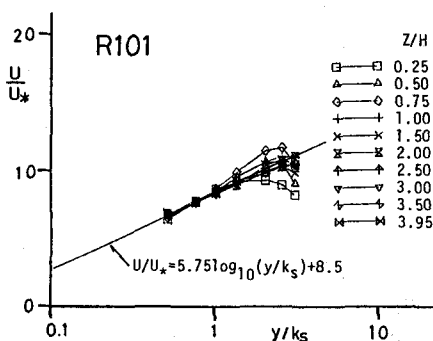


図-5 底面に対する U/U_* の片対数プロット (粗面)

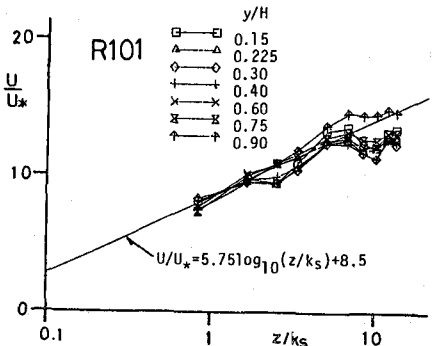


図-6 側壁に対する U/U_* の片対数プロット (粗面)

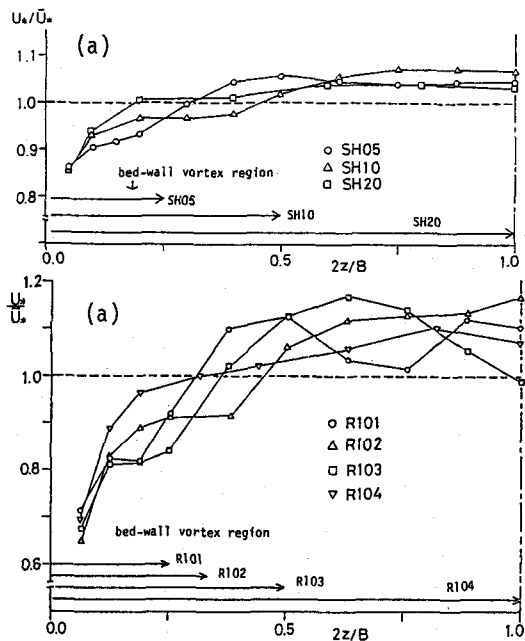


図-7 局所的摩擦速度 U_* の分布 (滑面)

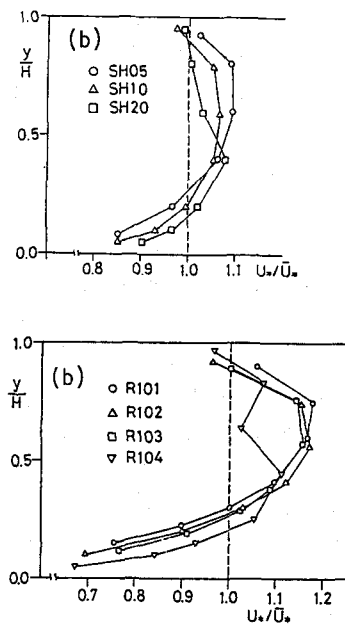


図-8 局所的摩擦速度 U_* の分布 (粗面)

なく、また多少傾きのずれが認められる。以上の傾向は滑面においても同様であった。この結果得られた滑面および粗面の場合の局所的摩擦速度 U_* の底面および側壁上の分布を図-7および図-8に示す。まず滑面については、底面上の分布は底面渦の影響が認められる。すなわち、 U_* は側壁から中央へ向かって増大するが、底面渦の範囲内（図中に示す）では増加が緩やかになるかほぼ一定となり、底面渦の上昇流部付近から急に増大し始め（SH20を除く）、中央付近で一定値に近づく。この傾向は管路流においてもみられたものである¹⁾。又SH05では $2z/B = 0.5$ 付近でゆるやかなピークがみられる。次に側壁上の分布はSH05およびSH10では $y/H = 0.6 \sim 0.7$ 付近でピークをとり、水面で減少する。これは水平方向の二次流の影響と考えられるが、SH20ではこの影響が小さいためか $y/H = 0.4$ 付近がピークとなる。

粗面についてみると、底面上の分布は、底面渦との関連については滑面とほぼ同様のことがいえるが、粗面では平均値に対する変動の割合が大きい。アスペクト比が4以上となると滑面と違って中央領域で大きな変動がみられる。アスペクト比が8のR101では、 $2z/B = 0.5$ と1付近で2つのピークを持ち、アスペクト比が6のR103では、 $2z/B = 2/3$ 付近で1つのピークを持って水路中央で大きく減少している。これは明らかに並列らせん流の影響の現われであり、底面せん断応力は、二次流の下降流部で大きくなり、上昇流部で小さくなるのがわかる。このことは、移動床における縦筋の発生²⁾のメカニズムを説明するものであり、さらに縦筋の発生によって二次流が発達し安定したものとなることが予想される^{3) 4)}。側壁上の分布は、滑面とほぼ同様であり、アスペクト比が2の場合のみ異なる。またやはり滑面に比べて平均値に対する変動の割合が大きい。

次に、この局所的な U_* の平均値について検討する。全潤辺についての平均値を $\bar{U}_*$ 、底面上の平均値を $\bar{U}_{*b}$ 、側壁上の平均値を $\bar{U}_{*s}$ 、側壁に働くせん断力 S_s と全潤辺に働くせん断力 S_o との比 S_s/S_o およびエネルギー勾配より得られた断面平均の $U_{*o} (= \sqrt{gRI_e})$ を表-2に示す。なおSH20の I_e は微小で計測できなかった。その他については $\bar{U}_*$ と U_{*o} の誤差は5%以下でほぼ一致しているといえ、対数則による U_* の評価が妥当であると考えられる。全体としてアスペクト比が大きくなるほど、側壁上の $\bar{U}_{*s}$ が底面上の $\bar{U}_{*b}$ に対して相対的に小さくなり、粗面ではこの傾向が強まる。また、 S_s/S_o は、その幾何学的な比 $2H/(2H+B)$ よりも小さくなり、これは滑面ではKnight⁵⁾の結果とほぼ一致するが、粗面ではさらに小さな値となっている。これは、二次流による運動量輸送の結果と考えられ、粗面ではこれが滑面と異なることを示すものと思われる。

表-2 平均摩擦速度およびせん断力比

Case	$\bar{U}_*$	$\bar{U}_{*b}$	$\bar{U}_{*s}$	S_s/S_o	U_{*o}
SH05	1.981	2.041	1.720	0.151	1.917
SH10	0.932	0.961	0.873	0.298	0.954
SH20	0.898	0.912	0.884	0.483	-
R101	4.029	4.221	3.155	0.124	4.040
R102	3.357	3.532	2.971	0.257	3.226
R103	3.496	3.715	2.735	0.152	3.333
R104	2.461	2.490	2.432	0.490	2.424

5. あとがき

本実験により、開水路における側壁の存在による二次流構造および主流速分布の三次元構造との関係が明らかにされ、管路流との相違点が示された。また、粗面においてはアスペクト比の大きいケースで並列らせん流の発生がみられ、側壁の二次流が並列らせん流の発生原因となることが立証された。これについてはアスペクト比がもっと大きい場合や水路幅が水深の偶数倍でない場合についての検討がさらに望まれる。ここでは乱れ強度、レイノルズ応力等については触れなかったが、今後これらの結果を検討し、二次流の発生機構、乱れとの関係、流砂や拡散等に及ぼす影響について検討していきたいと考える。

〈参考文献〉

- 1) 中川・福津・富永・若井：第27回水理講演会論文集，1983，2) 村本，河田，布村：京大防災研年報第20号B-2，1977，3) 中川・福津・富永：京大防災研年報第24号B-2，1981，4) 中川・福津・富永：第26回水理講演会論文集，1982，5) Knight, D.W.: ASCE, HY7, 1981