

II-136 運動方程式に基づく二次流のある流れの内部構造の検討

群馬大学 正員 冨永晃宏
 群馬大学 正員 江崎一博
 群馬大学 学生員 中村悦由

1. まえがき 直線水路の三次元構造において二次流が重要な役割を果たしている。本研究は二次流による運動量輸送の効果を定量的に把握する事を目的として、横断方向に粗度を周期的に変化させた縦筋河床上の流れについて実験および若干の数値計算を行った。この縦筋流れの実験は、村本ら¹⁾、Studerus²⁾および中川ら³⁾によって、また縦渦流れの理論解析が林ら⁴⁾、黒木ら⁵⁾によって行われているが、まだ不明の点が残っているためここで改めて検討するものである。

2. 実験装置および方法 実験水路は、長さ12.5m、幅39cmでビニール製の滑面とピラミッド型粗面を図1の底面に示すように設置した。水深4.8cm、平均流速42cmであり、X型ホットフィルム流速計によって計測した。(詳細は文献6)参照)

3. 実験結果とその考察 粗面の特性を調べるための予備実験から、底面の高さは滑面と粗面で一致し、カルマン定数 κ が約0.33、粗度高さ $k_s = 0.2$ cmとなることわかった⁶⁾。x方向の運動方程式は粘性項を無視して次のようである。

$$V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = g I e + \frac{\partial (-\bar{u}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial (-\bar{u}\bar{w})}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、 $U, V, W, -\bar{u}\bar{v}, -\bar{u}\bar{w}$ の $z/H > -2$ の領域の分布について検討する。まず、二次流ベクトル図を図1に示す。側壁近くで渦が不明確であるが、 $z/H > -2$ では粗面上で下降し滑面上で上昇する水深規模の渦が明確に現れている。これによって図2の主流速 U は粗面上で高速、滑面上で低速となる顕著な波状の分布を示す。図3のレイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{v}$ は、底面近くでは粗面上が大きい。 $-\bar{u}\bar{w}$ は $z/H = -1$ の滑面中央でほぼ0となり、これより左側で負、右側で正となる。

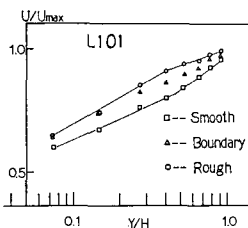


図5 Uの片対数分布

次に、 U の片対数プロットを図5に示す。 $y/H = 0.4$ 付近で勾配が急に変化し、粗面上と滑面上の勾配の大きさが逆転する。この底面側と水面側の両方の傾きから対数則によって U_{*1} を評価し、それぞれ U_{*1}, U_{*2} とし図6に示す。両者は逆位相となり、 U_{*1} は底面での摩擦速度を意味し、 U_{*2} は外部領域における乱れの大きさの指標となるものと考えられる。図7に $-\bar{u}\bar{v}$ の鉛直分布を示す。粗面上が凹型、滑面上が凸型の分布を示し、両者は $y/H = 0.2$ 付近で交差する。この分布形の変化は U の勾配の変化と関係しているものと思われる。 $-\bar{u}\bar{v}$ の底面近くの分布を底面まで延長した値から求めた摩擦速度を U_{*t} とし図6に示す。 U_{*t} は U_{*1} より、約15%程小さいが分布の傾向はほぼ一致する。次に、 $U, -\bar{u}\bar{v}, -\bar{u}\bar{w}$ の

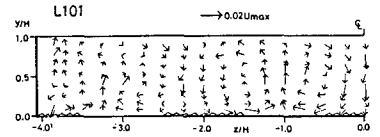


図1 二次流ベクトル図

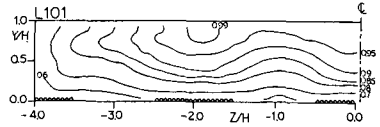


図2 平均主流速の等値線

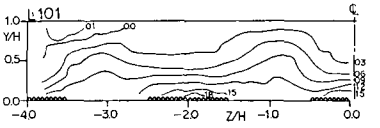


図3 レイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{v}$ の等値線

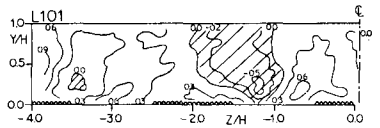


図4 レイノルズ応力 $-\bar{u}\bar{w}$ の等値線

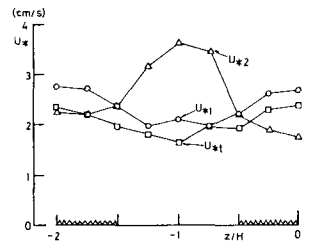


図6 摩擦速度の横方向分布

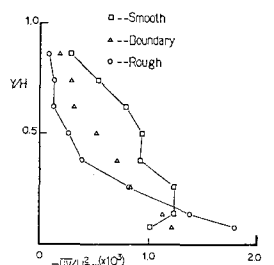


図7 $-\bar{u}\bar{v}$ の鉛直分布

横方向分布を図8~10に示す。図中の実線は横方向変動の近似式として与えた cosine および sine カーブであり、実測値と若干のずれがあるものの傾向をよく表している。ただし、 $-\overline{u\overline{w}}$ はばらつきが大きく底面近くが特にずれて、実測値にかなりの誤差が含まれている可能性がある。このフィットさせたカーブの振幅をそれぞれの高さについて求めプロットしたものを図11~13に示す。 $-\overline{u\overline{w}}$ の振幅は底面近くで符号が変わり、林らおよび黒木らの理論解析において縦渦の回転方向と $-\overline{u\overline{w}}$ の分布形の位相が逆になるという問題についてはこのことが重要な鍵となると思われる。

4. 運動方程式の数値計算 次にこれらの結果の妥当性を確かめるために、式(1)において二次流速V, Wを実験値から流れ関数で次のように与えることによって数値計算を行った。

$$\psi = 0.01 U_* H \sin(\pi y/H) \cos(\pi z/H) \quad (2)$$

$-\overline{u\overline{v}}$, $-\overline{u\overline{w}}$ については渦動粘性モデルを用いたが、この ϵ_{xy} と ϵ_{zx} の分布を図14, 15に示す。 ϵ_{xy} は粗面上で小さく滑面上で大きく底面の U_* ではなくむしろVの位相と対応している。 ϵ_{zx} は横方向にほぼ一定とみなせ、また鉛直方向にも底面近くを除いて変化が小さい。したがって ϵ_{xy} , ϵ_{zx} は次のように与えた。

$$\epsilon_{xy} = \alpha U_* y (1 - y/H) + \alpha H V \quad (3)$$

$$\epsilon_{zx} = \gamma \alpha U_* H \quad (4)$$

ここに、 $\alpha = 0.1$, $\gamma = 0.25$ で ϵ_{zx} は ϵ_{xy} の平均値の約1.5倍である。また、粗度高さ k_s を次のように与えた。

$$k_s = 0.075 + 0.035 \cos(\pi z/H) \quad (5)$$

底面での境界条件は、第2格子点のUの値から対数則により U_* を計算し、この U_* を用いて第1格子点のUを求め直す方法を取った。これをSOR法によって計算した結果得られたU, $-\overline{u\overline{v}}$, $-\overline{u\overline{w}}$ の分布を図16~18に示し、その横方向変動の振幅を図11~13に実線で示す。これらの結果は実験値の $-\overline{u\overline{v}}$, $-\overline{u\overline{w}}$ の値が小さくなることを考慮すれば良好に分布の傾向を再現しており、この二次流と主流速およびせん断応力の関係がほぼ妥当であるといえる。

《参考文献》1) 村本ら; 京大防災研年報、第20号B-2、1977、2) Studerus, X; R19-82Report, ETH、Zurich、1982、3) 中川ら; 京大防災研年報、第24号B-2、1981、4) 林ら; 第21回水理講演会論文集、1977、5) 黒木ら; 土木学会論文報告集第312号、1981、6) 冨永ら; 第13回関東支部技研講演集、1986

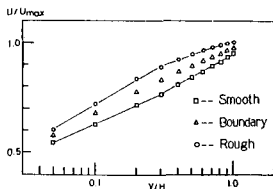


図16 Uの計算値

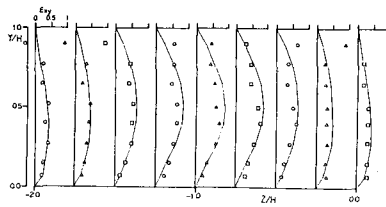


図14 渦動粘性係数 ϵ_{xy} の分布

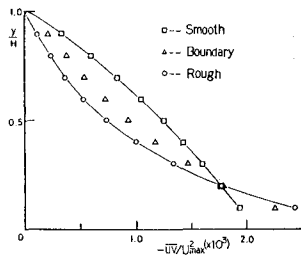


図17 $-\overline{u\overline{w}}$ の計算値

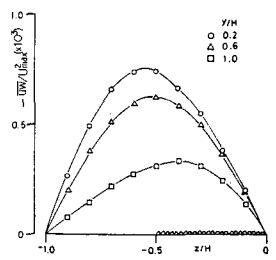


図18 $-\overline{u\overline{v}}$ の計算値

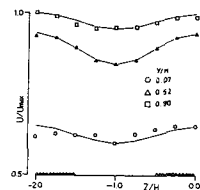


図8 Uの横方向分布

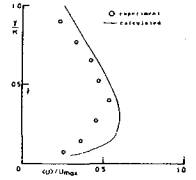


図11 Uの振幅

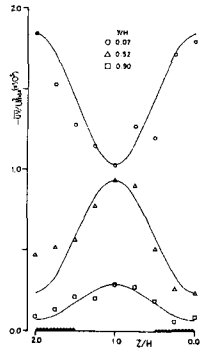


図9

$-\overline{u\overline{w}}$ の横方向分布

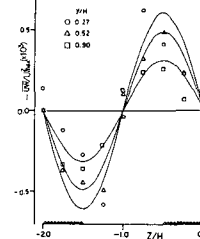


図10

$-\overline{u\overline{v}}$ の横方向分布

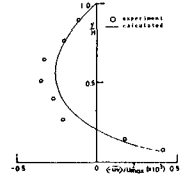


図12

$-\overline{u\overline{w}}$ の振幅

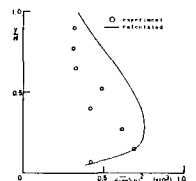


図13

$-\overline{u\overline{v}}$ の振幅

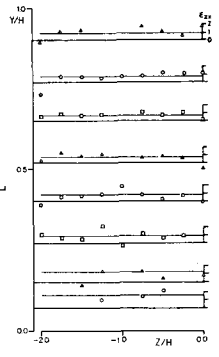


図15 ϵ_{zx} の分布