

縦筋河床上の乱流構造について

九州大学 工学部 正 員 平野 宗夫
 九州大学 工学部 正 員 大本 照憲
 九州大学 工学部 学生員○天野 光歩
 九州大学 工学部 M. Saleh Pallu

1. はじめに

大気では筋雲、海洋ではラングミュア渦¹⁾そして河川では縦筋河床などせん断乱流は縞状のパターンを示すことが多く、それらに共通の支配因子として主流方向に軸を持ち横断方向に境界層厚さの約2倍の長さスケールの間隔で並列する縦渦群の存在が挙げられている。このような縦渦の発生機構については、Plandtl²⁾を始めとする数多くの研究者による現象論的、半理論的研究が行われてきたが、依然不明な点が多い。そこで本研究では、平均渦度方程式を用いて二次流の発生機構についての検討が試みられた。

2. 実験装置および方法

実験に使用した水路は、長さ 10 m、幅30 cm、深さ30 cm のアクリル樹脂製可変勾配水路で、測定部の長さは 8 m である。使用した座標系および記号の説明を図-1に示す。縦筋の河床高 y は、実測値と比較的適合性の良い次式³⁾

$$y^*/\Delta = \{1 - \cos(\tan \phi \cdot (z - z_t)/H_{max})\} / \{1 - \cos(\tan \phi \cdot b)/H_{max}\}$$

によって決められた。ここに、 z は水路横断方向の座標、 Δ および b はそれぞれ縦筋の波高および半波長、 ϕ は砂粒の水中静止摩擦角、 z_t は Sand Trough 中央位置である。波長、波高および静止摩擦角は、 $b=10$ cm、 $\Delta=7$ mm、 $\phi=37^\circ$ とした。

模擬した固定河床は、石膏を用いて作製し、粗度として中央粒径 1.7 mm のポリスチレン粒子を一樣に貼付けている。流速測定は、表-1の水理条件下で水路入口より6 m下流位置において

表-1 実験条件

流 量	$Q=6.24$ l/sec
最大水深	$H_{max}=4.82$ cm
平均流速	$U_m=45.55$ cm/sec
摩擦速度	$u_* = 3.37$ cm/sec
水路勾配	$I_g = 1/400$
レイノルズ数	$Re=18415$
フルード数	$Fr=0.66$

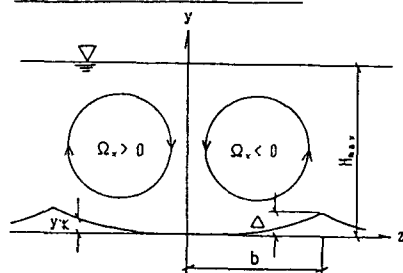


図-1 座標系および記号の説明

行った。センサーには、熱線流速計システムにx型エンドフロー・プローブを使用し、流速の主流方向成分と鉛直方向成分の同時計測および主流方向成分と横断方向成分の同時計測を同一地点で行った。計測結果は、サンプリング周波数 75 Hz で AD 変換した後、一測点 4096 個のデータに関して統計処理を施した。

3. 実験結果および考察

図-2および図-3は、それぞれ二次流の鉛直方向成分 v の横断分布および横断方向成分 w の鉛直方向分布を示したものである。図より、Trough上で下降流、Ridge上で上昇流があり、河床から半水深の間でTroughからRidgeに向う流れ、半水深から自由水面の間でRidgeからTrough向かう流れがあることがわかる。図-4は、乱れの強さの差の横断方向分布である。 $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})/U_*^2$ は、横断方向に大きな変動を示し、Ridge上で極大値、Trough上で極小値を取り、鉛直上方に向かって低減する。

4. 二次流の発生機構に関する検討

主流方向に流れが一樣で、レイノルズ数の大きく十分に発達したせん断乱流においては粘性項の影響を無視でき、主流方向の渦度方程式は

$$d\Omega_z/dt = \partial^2(\overline{v'^2} - \overline{w'^2})/\partial y \partial z + (\partial^2/\partial y^2 - \partial^2/\partial z^2)(-\overline{v'w'}) \cdots (1)$$

によって与えられる。ここに、 $\Omega_x = \partial w / \partial y - \partial v / \partial z$ である。図-1に示すように、 Ω_x は $-1 < z/b < 0$ では $\Omega_x > 0$ 、 $0 < z/b < 1$ では $\Omega_x < 0$ となる。

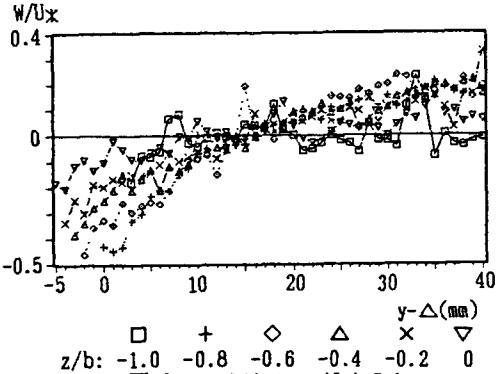


図-3 二次流 W の鉛直分布

図-5は、 $(\overline{v'^2} - \overline{w'^2})/U_x^2$ の鉛直分布に指数曲線を適用して求めた $\partial((\overline{v'^2} - \overline{w'^2})/U_x^2)/\partial y$ のグラフである。図から、 $\partial((\overline{v'^2} - \overline{w'^2})/U_x^2)/\partial y$ は、 $-1 < z/b < 0$ では、 z 方向に増大し、 $0 < z/b < 1$ では減少することがわかる。即ち、 $-1 < z/b < 0$ の領域では、 $\partial^2(\overline{v'^2} - \overline{w'^2})/\partial y \partial z < 0$ 、 $0 < z/b < 1$ の領域では $\partial^2(\overline{v'^2} - \overline{w'^2})/\partial y \partial z > 0$ の傾向を持つ。つまり、右辺第一項は、二次流に対して抑制項となる。

次に、右辺第二項は、 $-v'w'$ の直接測定が現段階では不可能であるため次式

$$\begin{aligned} -\overline{v'w'} &= -\overline{u'v'} / (\partial u / \partial y) \cdot \partial w / \partial y \\ &\quad + -\overline{u'w'} / (\partial u / \partial z) \cdot \partial v / \partial z \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

によって求められた。

図-6は $z/b = -0.6$ における $-\overline{v'w'}$ の鉛直分布を示したもので、式(2)を基に $-\overline{u'v'}$ 、 $-\overline{u'w'}$ 、 U 、 V および W の実測値に近似曲線を適用して算定された。図からわかるように、 $-\rho v'w'$ は流体粒子に対して横断方向の剪断力として河床近傍ではTroughからRidgeに、半水深ではRidgeからTroughに向かう方向に作用することがわかる。以上のことから、乱れの強さの差 $(\overline{v'^2} - \overline{w'^2})$ は、二次流に対して減勢作用として働き、横断方向のみかけの剪断力 $(-\rho v'w')$ が二次流を発生させる駆動力としての作用を持つことが認められた。

参考文献

- 1) Weller, R.A. (1985): Science 227, 1552-1556
- 2) Ludwig Prandtl: 流れ学 (上), コロナ社, 1978
- 3) 大本, 平野: 縦筋河床の形成領域と掃流力の分布特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 339, II-10, 1988

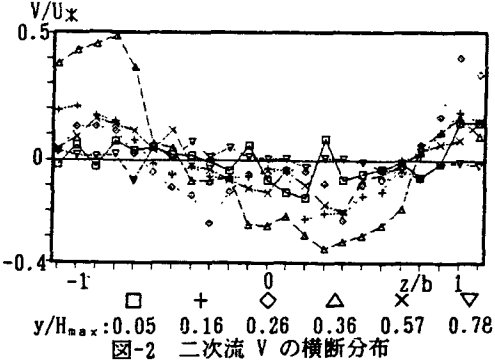


図-2 二次流 V の横断分布

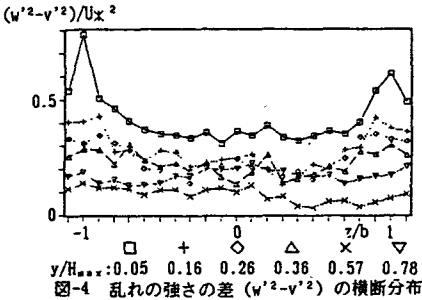


図-4 乱れの強さの差 $(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ の横断分布

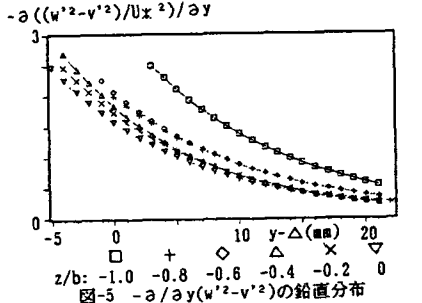


図-5 $-\partial/\partial y (\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ の鉛直分布

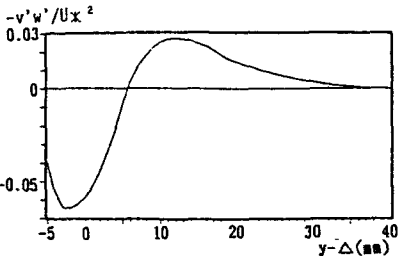


図-6 レイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ の鉛直分布 ($z/b = -0.6$)