

相対水深の小さな開水路流の乱流特性について

九州工業大学工学部 学生員 ○千住司朗、吉本徳一
同 上 正 員 秋山壽一郎、浦 勝

1. はじめに

山地河川に代表される礫床河川は、粗度スケールと水深との比が極めて小さな流れであるが、その乱流構造については十分に把握されていないのが現状である。そのため流砂量、水質交換問題などの様々な水理学的な諸問題に対してなお多くの不明な点を残している。本研究は、このような問題点を解明するために、水路床に半円管を敷き並べた最もシブルな粗面を用いて系統的な水理実験を行い、相対水深の小さな開水路流の乱流構造について検討を加えたものである。

2. 実験

全長 20.5m、幅 60cm の可変勾配水路に 10m にわたって半円管($d=0.475\text{cm}$)を流れ方向に垂直に敷き詰め、相対水深を $H/d=4\sim 20$ 、レイノルズ数を $Re=2950\sim 36990$ 、フルード数を $Fr=0.077\sim 0.674$ の範囲で変化させ、等流状態で実験を行った。計測は、X-型 Hot-film 流速計を用いた。サンプリング間隔および計測時間はそれぞれ 0.005 秒、40.96 秒である。

3. 実験結果

一般に開水路乱流の流れの場合は、内層と外層とに分けられる。さらに内層では、粗度要素から放出される剝離渦によって支配される領域が存在し、対数則が成立する“対数則域”と対数則からズレが生じる“粗度域”とに分けられる。図-1 に定義図と用いたパラメータを示す。

(1)レイノルズ応力分布：等流状態の開水路乱流では、レイノルズ応力分布は式(1)の直線分布となる。

$$-\overline{u'v'}/u_*'^2 = 1 - y/H \cdots (1)$$

ここに、 $-\rho \overline{u'v'}$ = レイノルズ応力、 u_*' = 摩擦速度、 H = 水深である。

図-2 に $H/d=8$ と 16 でのレイノルズ応力分布を示す。図より相対水深が小さいほど直線せん断応力分布からせん断応力が減少する位置が小さいことが分かる。

(2)乱れ強度分布：滑面および相対水深の大きな粗面乱流では、乱れ強度分布は式(2)、(3)で与えられることが知られている¹⁾。

$$u'_{rms}/u_*' = D_1 \exp(-y/H) \cdots (2) \quad ; \quad v'_{rms}/u_*' = D_2 \exp(-y/H) \cdots (3)$$

ここに、 u'_{rms} 、 v'_{rms} = x 、 y 方向の乱れ強度、 $D_1=2.26$ 、 $D_2=1.23$ である。

図-3 に $H/d=8$ と 16 での u'_{rms}/u_*' および v'_{rms}/u_*' の分布を示す。 $H/d=8$ の場合では、 u'_{rms}/u_*' および v'_{rms}/u_*' とともに底面付近で減少が見られ、その位置はレイノルズ応力分布の減少し始める位置とほぼ対応している。 $H/d=16$ の場合では、 v'_{rms}/u_*' は底面付近と水面付近で減少が見られるが、 u'_{rms}/u_*' はレイノルズ数が小さいときに底面付近で値が大きくなるようである。

(3)レイノルズ応力の相関係数：レイノルズ応力の相関係数 γ_t は、式(1)に式(2)、(3)を導入すると式(4)で与えられる。

$$\gamma_t = -\overline{u'v'}/u'_{rms} v'_{rms} = \left((1 - y/H) / D_1 D_2 \right) \exp(2y/H) = \left((1 - y/H) / 2.92 \right) \exp(2y/H) \cdots (4)$$

相対水深の大きな流れでは、レイノルズ応力の相関係数 γ_t はレイノルズ数、フルード数および粗度の影響に依存せず、普遍的な値を示すことが知られている²⁾。図-4 は、本研究で得られた $H/d=8$ と 16 の場合の γ_t であるが、これより $H/d=8$ においても γ_t が普遍的であることが分かる。

(4)積分スケールと混合距離：式(5)、(6)で得られる積分スケールと式(7)の混合距離 ℓ との比較を図-5 に示す。

$$L = C \left((u'_{rms}{}^2 + v'_{rms}{}^2 + w'_{rms}{}^2) / 2 \right)^{3/2} / \varepsilon \cdots (5) \quad ; \quad \varepsilon = 0.48^{-3/2} 2\pi E(f)^{3/2} f^{5/2} / U \cdots (6)$$

$$\ell = \kappa y \sqrt{1 - y/H} \cdots (7)$$

ここに、 $E(f)$ =周波数スペクトル、 f =周波数、 ε =乱れエネルギーの散逸率、 U =断面平均流速、 C =係数(0.074($H/d=8$)、0.091($H/d=16$))、 w'_{rms} =横断方向の乱れ強度($=1.28 v'_{rms}$)である。

図より積分スケールの分布は、 $y/H \geq 0.3$ では混合距離の分布に比べて一様化しており、積分スケールが減少し始める位置はレイノルズ応力分布、乱れ強度分布の減少し始める位置にほぼ対応している。また、底面付近では $\kappa=0.41$ の傾きに漸近していることが分かる。

〔参考文献〕1)Nezu・Rodi(1986);ASCE, HY5. 2)瀬津家久(1977);京都大学学位論文。

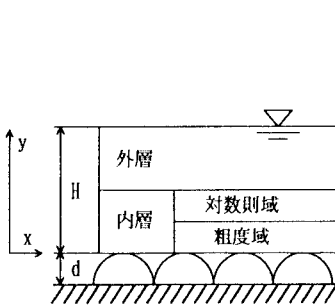


図-1 定義図

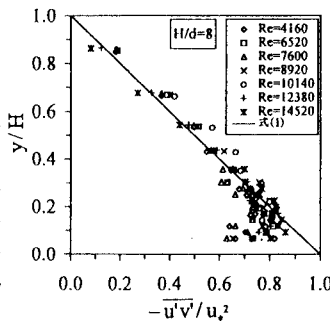


図-2(a)Re-応力分布

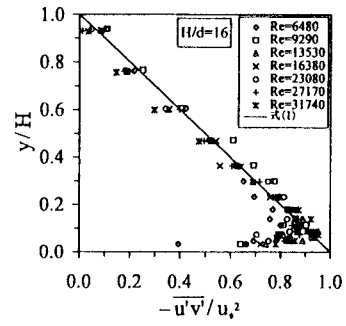


図-2(b)Re-応力分布

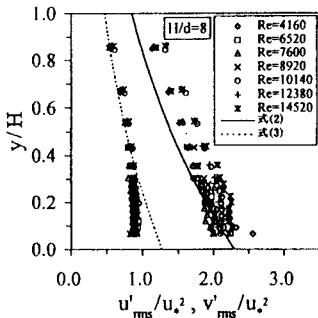


図-3(a)乱れ強度分布

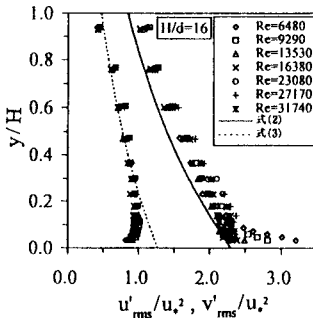


図-3(b)乱れ強度分布

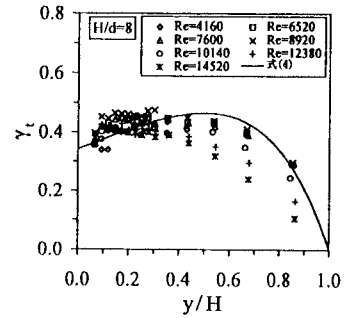


図-4(a)Re-応力の相関係数分布

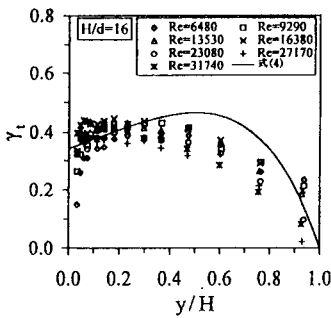


図-4(b)Re-応力の相関係数分布

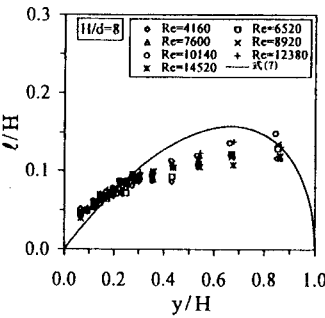


図-5(a)積分スケールと混合距離

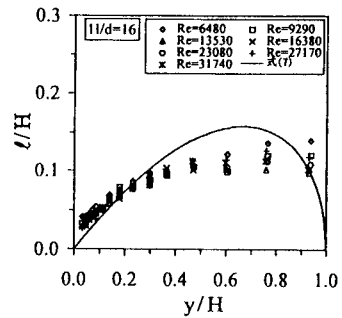


図-5(b)積分スケールと混合距離