

京都大学大学院 正会員 ○鬼束幸樹

京都大学大学院 正会員 瀬津家久

1. はじめに

開水路等流の特性はNezu & Rodi¹⁾によって詳細に調べられ、Karman定数 κ 、積分定数 A がReynolds数およびFroude数に依存しないこと、wake strength parameterがReynolds数の関数であることなどが明らかにされた。しかし、開水路等流の粘性底層およびbuffer層の特性はそれほど解明されていない。本研究では、レーザー流速計(LDA)を用いて極めて底面近傍の乱流計測を行い、乱れ強度分布、Reynolds応力分布などの特性を明らかにした。

2. 理論的考察

水路床に沿って流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上向きに y 軸を定義し、 x 軸および y 軸方向それぞれの時間平均流速を U および V とし、乱れ強さを u' および v' とする。せん断応力 τ の分布は次式のように示される。

$$\frac{\tau}{\rho U_*^2} = \frac{-\overline{uv}}{U_*^2} + \frac{dU^+}{dy^+} = 1 - \frac{y^+}{R_*} \quad (1)$$

ここに、 U_* は摩擦速度、 $-\overline{uv}$ はReynolds応力、 $U^+ = U/U_*$ 、 $y^+ = yU_*/\nu$ 、 $R_* = hU_*/\nu$ はReynolds数、 h は水深である。さて、式(1)におけるReynolds応力をPlandtlの混合距離仮説を用いて消去すると、次式となる。

$$\frac{dU^+}{dy^+} = \frac{2(1-\xi)}{1 + \sqrt{1 + 4\ell^{+2}(1-\xi)}} \quad (2) \quad : \quad \ell^+ = \kappa y^+ \Gamma \quad (3) \quad : \quad \Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (4)$$

Γ はダンピング関数で、 B はダンピング係数である。粘性底層($0 < y^+ \leq 5$)では、式(2)は次式に変形できる。

$$U^+ = y^+ \quad (5)$$

乱れ強度分布に関しては、以下のような半経験式が瀬津²⁾によって提案され、

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \quad (6) \quad : \quad \frac{v'}{U_*} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \quad (7)$$

基準値 $D_u = 2.26$ 、 $D_v = 1.23$ 、 $\lambda_u = 0.88$ 、 $\lambda_v = 0.67$ がNezu & Rodi¹⁾によって求められた。また、壁面付近の内部変数によって支配されている領域においては、乱れ強度 u'/U_* は次式に従うことが明らかにされている。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp\left(-\lambda_u \frac{y^+}{R_*}\right) \Gamma + Cy^+(1-\Gamma) \quad (8)$$

等流では、ダンピング係数 B_u は10をとり、 C は0.3をとる。さらに、粘性底層では次式となる。

$$\frac{u'}{U_*} = Cy^+ \quad (9)$$

3. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、長さ10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配水路である。瞬間流速の測定には4ビーム後方散乱型ファイバーレーザー流速計を用いた。実験条件は、Reynolds数を変化させた3ケースである。実験条件を表-1に示す。ここに、 U_{*1} 、 U_{*2} はそれぞれ粘性底層式(5)

表-1 実験条件

case	h cm	Fr	Re $\times 10^3$	v cm/s	U_{*1} cm/s	U_{*2} cm/s
R573	7.2	0.15	10.1	12.5	0.709	0.705
R381	7.2	0.10	6.7	8.3	0.472	0.497
R246	7.2	0.05	3.4	4.2	0.304	0.311

およびlog則より求めた摩擦速度である。

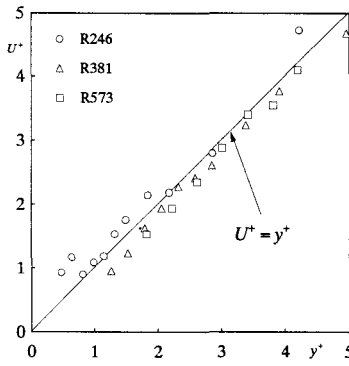


図-1 主流速分布

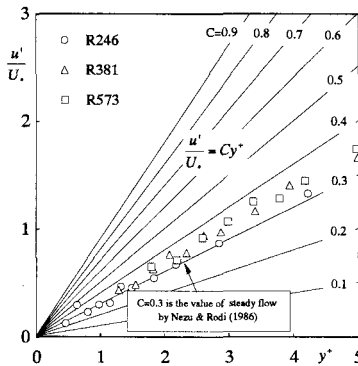


図-2 流下方向乱れ強度分布

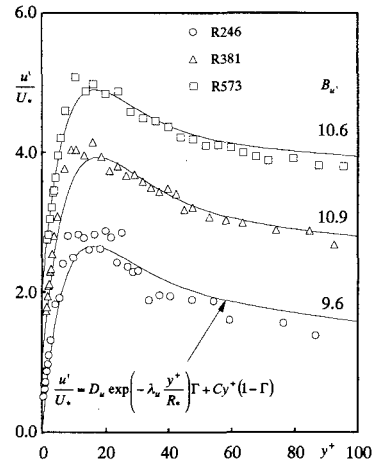


図-3 鉛直方向乱れ強度分布

4. 実験結果および考察

図-1 は粘性底層から求められた摩擦速度により無次元化された主流速分布を示している。いずれのケースもほぼ式(5)に適合していることが分かる。これは、本実験の平均流速測定精度が高いことを示すものである。

図-2 は粘性底層における乱れ強度 u'/U_* の分布を示している。分布はほぼ線形となっている。そこで、実測値を式(9)に当てはめて最小自乗法により C を求めた。R246, R381, R573 の C はそれぞれ 0.31, 0.34, 0.35 であり、ほぼ $C=0.3$ である。

図-3 は内層表示された流下方向乱れ強度分布を示している。 $5 < y^+ \leq 40$ における実測値を式(8)に当てはめて、最小自乗法によりダンピング係数 B_v を求めた。求めた B_v による式(8)を図-3 に示しているが、良好に実測値を表現しているといえる。

図-4 は鉛直方向乱れ強度の分布を示している。図中の右下がりの曲線は彌津の式(7)である。バッファ層よりも離れた領域における鉛直方向乱れ強度はほぼ式(7)に適合しているが、壁面に近づくに従い式(7)よりずれが生じている。そこで、次式を提案する。

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \exp\left(-\lambda_v \frac{y^+}{R_*}\right) \Gamma \quad (10)$$

ダンピング関数 Γ は式(4)と同様であり、ダンピング係数を B_v とする。式(10)を図-4 に示しているが、良好に実測値を表現しているといえる。

図-5 は Reynolds 数に対する B , B_u , B_v および C の挙動を示したものである。本実験範囲においては、これらの諸量の Reynolds 数への依存性は認められない。

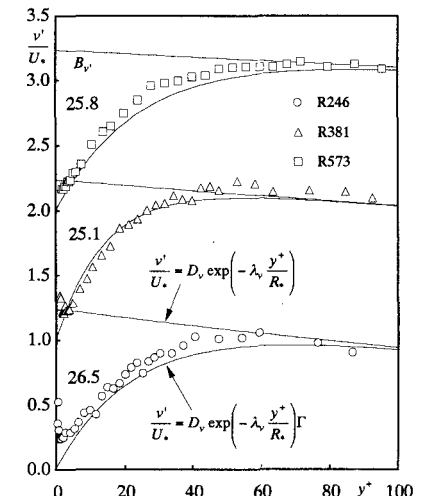


図-4 鉛直方向乱れ強度分布

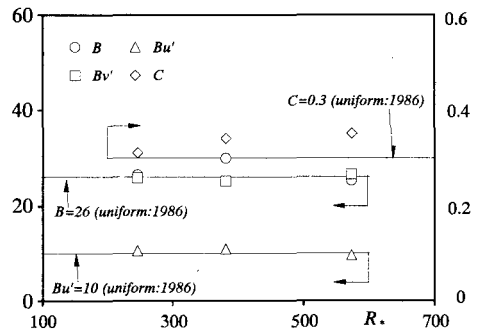


図-5 各係数の Reynolds 数に対する挙動

5. おわりに

今後、広範囲に Reynolds 数および Froude 数を変化させて、各係数の挙動を調べる必要があると考えている。

参考文献

- 1) Nezu, I. and Rodi, W., *Journal of Hydraulic Engineering*, vol.112, pp.335-355, 1986.
- 2) 祢津家久, 土木学会論文集, 第261号, pp.67-76, 1977.