

緩やかな逆圧力勾配を伴う開水路流について

九州工業大学大学院 学生員 ○松岡定和

九州工業大学工学部 正 員 浦 勝 秋山壽一郎

九州工業大学大学院 学生員 鬼束幸樹 政徳克志

1. はじめに

水深が流下方向に増加する開水路常流では、流速の減速と共に逆圧力勾配となる。本文は、開水路における緩やかな逆圧力勾配を伴った流れを対象として、流速分布、Reynolds応力分布特性などに関して実験的な検討を行ったものである。

2. 実験方法

図-1に実験装置を示す。実験用水路は長さ2050cm、幅60cmの可変勾配水路に、7mm製の上流部及び漸変部を取り付けてある。漸変部入口から流下方向にX軸、鉛直上向きにY軸をとり、漸変部の水路床勾配を $\sin \theta$ 、上流部及び下流部の水路床勾配を $\sin \theta'$ とした。上流部は水路床から $t=3(\text{cm})$ の底上げをしており、そこから長さ $\ell(\text{cm})$ の漸変部を接続した。表-1に各実験条件を示す。 h_0 は漸変部始点の水深、 h_ℓ は漸変部終点の水深である。流速測定はX型Hot-Film流速計を用いて、水路中心線上に18~25断面、鉛直方向に12~13点をサンプリング間隔0.01sec、サンプリング時間40.96secで行った。

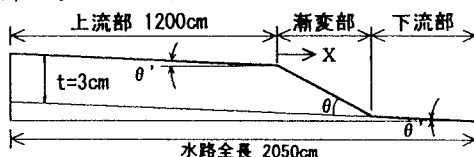


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Exp. No.	ℓ (cm)	t (cm)	$\sin \theta'$	$\sin \theta$	h_0 (cm)	h_ℓ (cm)	Q (cc/s)
C1-25	100	3.0	1/2500	1/33	6.21	9.48	11500
C1-50	100	3.0	1/5000	1/33	6.44	9.55	8100
C1-75	100	3.0	1/7500	1/33	6.51	9.64	6700
C2-15	200	3.0	1/1500	1/84	6.17	9.62	14700
C2-25	200	3.0	1/2500	1/85	6.53	9.75	11500
C2-50	200	3.0	1/5000	1/86	6.71	9.77	8000
C2-75	200	3.0	1/7500	1/87	6.79	9.80	6600
C3-15	300	3.0	1/1500	1/94	6.01	9.66	14800
C3-25	300	3.0	1/2500	1/96	6.49	9.78	11200
C3-75	300	3.0	1/7500	1/99	6.72	9.80	6500
C4-15	400	3.0	1/1500	1/122	5.72	9.66	14500
C4-25	400	3.0	1/2500	1/127	6.04	9.83	11500
C4-50	400	3.0	1/5000	1/130	6.21	9.85	8100
C4-75	400	3.0	1/7500	1/131	6.35	9.70	6700

3. 実験結果及び考察

図-2に主流速分布の流下方向変化の一例を示す。図中の太実線は式(1)の対数則であり、 x は測定位置である。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y U_*}{\nu} + A \quad (\kappa=0.412, A=5.29) \quad (1)$$

U_* は摩擦速度であり、その値は内層($50 < y U_* / \nu, y/h \leq 0.2$)に式(1)の対数則を適用して最小二乗法で算出した。上流部で対数則と良好な一致を示す主流速分布は、漸変部に流入すると平均流速の減速と共に逆圧力勾配となり、外層において対数則からズレを生じる。下流部に入ると外層における対数則からのズレは次第に減少し、主流速分布は再び対数則に近づく。漸変部における流速分布形状の外層での変化を次式のlog-wake則によって評価し、図-2に併示した。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y U_*}{\nu} + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2h} \right) \quad (2)$$

図-3に漸変部におけるWake strength parameter Π の流下方向変化を示す。同図は縦軸を1ずつずらしている。各シリーズとも Π は、 $0 < x < 80(\text{cm})$ の範囲で内部境界層の発達に伴って増加する。その後、漸変部出口までほぼ一定の値をとっており、流速分布形状が相似であることがわかる。 Π は、式(3)で定義される無次元圧力勾配 β の関数であると考えられる。図-4に漸変部における β の流下方向変化を示す。

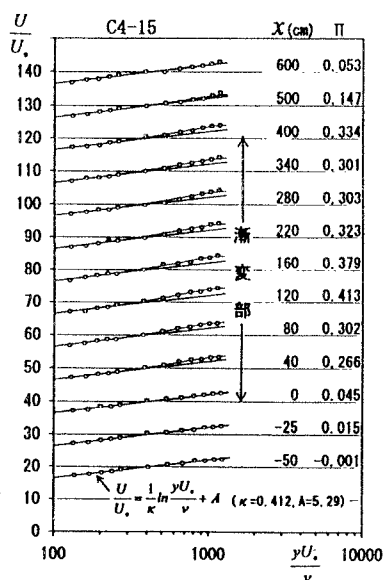


図-2 主流速分布の流下方向変化

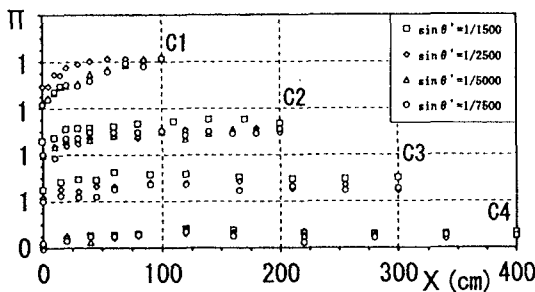


図-3 Πの流下方向変化

$$\beta = \frac{\delta_*}{\rho U_*^2} \frac{dp}{dx} = -\frac{g \delta_*}{U_*^2} \left(\sin \theta - \cos \theta \frac{dh}{dx} \right) \quad (3)$$

平衡境界層は流下方向について流速分布が相似で速度と長さスケールだけで決定されるような流れであり、式(4)のRottaの平衡条件¹⁾をみたすことで成立する。

$$\frac{U_*}{U_{max}} = \text{const}, \quad \beta = \text{const}, \quad \frac{d(U_{max} \delta_* / U_*)}{dx} = \text{const} \quad (4)$$

ここに、 U_{max} は最大流速、 δ_* は排除厚である。本実験においては、C2, C3, C4シリーズの $80 \leq x < \ell$ (cm) の範囲で

式(4)の条件を満たしており、平衡境界層であるといえる。図-5に平衡境界層での β に対する Π の変化を示す。 β と Π はともに平衡境界層における平均的な値を採用している。Coles & Hirst²⁾ は境界層流において Π と β に次の関係が成り立つことを示した。

$$\Pi = 0.80(\beta + 0.5)^{0.75} \quad (5)$$

また、Kironoto³⁾ は粗面上の不等流に対して式(6)を示し、祢津ら⁴⁾ は開水路での加速流及び減速流の研究において式(7)の関係を示した。

$$\Pi = 0.75(\beta + 0.5)^{0.75} - 0.22 \quad (6)$$

$$\Pi = 0.47\beta + 0.28 \quad (7)$$

各シリーズとも、式(7)によく適合している。

図-6にReynolds応力の流下方向についての等値線図を示す。漸変部に流入すると、Reynolds応力の極大値は内部境界層の発達に伴って増大する。また、その極大値は上流部の水路床の延長線上に現れており、図-7に示すようにReynolds応力の極大値をとる位置は、流下するに従って $y/h = 0.3$ 付近まで上昇し、その分布は放物線状に膨らむ特徴を持つ。

4. おわりに

緩やかな逆圧力勾配を伴う開水路流の流速分布はlog-wake則によって表現でき、 Π は β の関数として表すことが出来る。Reynolds応力分布は放物線状に膨らみ、極大値は上流部の水路床の延長線上に現れる。

<参考文献> 1) J. C. Rotta, 乱流, 1972 2) D. E. Coles and E. A. Hirst, Stanford Univ, 1968

3) B. A. Kironoto, Doctoral Dissertation, 1993 4) 祢津, 門田, 戸田, 土木学会年講, 1994

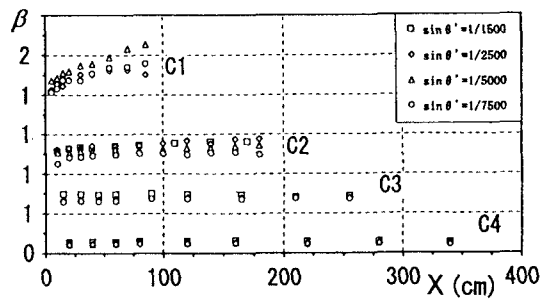


図-4 βの流下方向変化

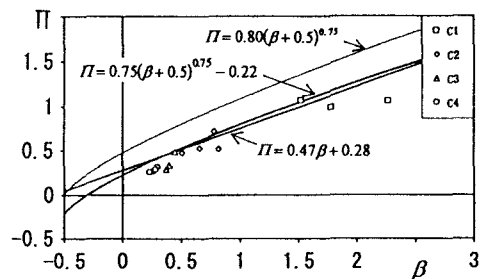


図-5 Πとβの関係

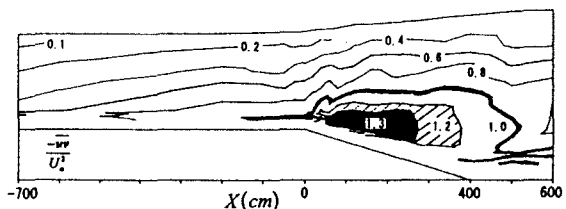


図-6 Reynolds応力の等値線図(C4-15)

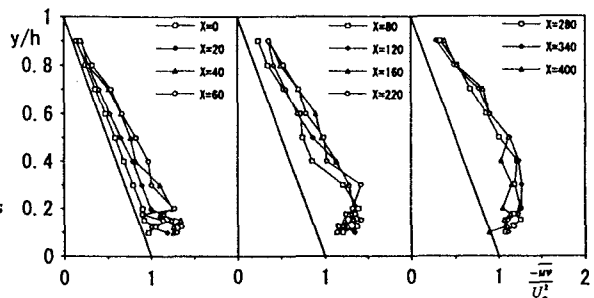


図-7 Reynolds応力の流下方向変化(C4-15)