

流下方向に水深が浅くなる開水路加速流の流況

FLOW CHARACTERISTICS OF GRADUALLY SHALLOWED OPEN CHANNEL FLOWS

浦 勝¹・岡本智和²・秋山壽一郎³・鬼束幸樹⁴・竹本憲充⁵

Masaru URA, Tomokazu OKAMOTO, Juichiro AKIYAMA,
Kouki ONITSUKA and Norimitsu TAKEMOTO

¹正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

³正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (同上)

⁴正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵学生員 九州工業大学 工学部設計生産工学科 (〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

Accelerating flow fields in gradually shallowed open channel flows are measured with a hot-film anemometer. Mean velocity profiles of the inner and outer region are well expressed by the log-wake law. The wake strength parameter Π varies slowly according to the sudden decrease of non-dimensional pressure gradient parameter β in the flow direction. The relationship between Π and β can be expressed by a biquadratic function. Reynolds stress distributions become slender in comparison with the universal distribution for a 2-D uniform flow. Secondary flow velocities are depressed and their flows pattern can not be confirmed in the accelerating flow. Iso-velocity lines in a cross-section become parallel to walls of the channel. Turbulence intensities decrease toward down stream direction in the accelerating region.

Key Words : open channel flows, gradually varied flow, accelerated flow, velocity profile, turbulence

1. はじめに

水深が流下方向に浅くなる流れは、河川においては淵から瀬への部分に見られる。河川の河床形状の多様性が生態系の保全にとって重要であることはよく知られているが、その流れの内部構造については不明な点が多い。水深が浅くなり加速される開水路流についてはこれまでほとんど研究されておらず、わずかに瀬津ら^{1,2)}によって加速・減速する流れの研究の中で取り上げられているのみである。

本研究は、水路床勾配が水路途中で急に逆勾配となり流下方向へ水深が浅くなるために、加速される流れの場を取り上げて、実験的に流れの特性を調べたものである。実験は、水路中央線上において平均流速分布・乱れ特性量等の水理諸量を2次元的に測定したCシリーズと、横断面内の流れを流下方向に数断面測定し、流れを3次元的に検討したRシリーズが行われた。

2. 実験装置および実験条件

実験に用いた水路は長さ2050cm、水路幅60cm、高さ60cmの可変勾配水路である。水路内には、図-1に示すように水路上流端より1200cmの上流部分の後に、長さ ℓ の逆勾配区間を設置し、その下流部を高さ3.0cmの底上げをした。以下、長さ ℓ の逆勾配区間を「加速部」、加速部より上流側の区間を「上流部」、加速部より下流側の区間を「下流部」と呼ぶ。座標系としては、加速部始点より水路床に沿って流下方向に x 軸、 x 軸と垂直上向きに y 軸、右岸から左岸に向かい z 軸とする。

実験条件を表-1に示す。加速部長さ ℓ を50, 100, 300cmと変え、それぞれの ℓ に対して上・下流部の水路床勾配 $\sin\theta_0$ を1/3000から1/10000の4段階とした。 $\sin\theta$ は加速部の水路床勾配を表し、 ℓ と $\sin\theta_0$ によって定まる。 U_* は摩擦速度、 $Fr = \bar{U}/\sqrt{gh}$

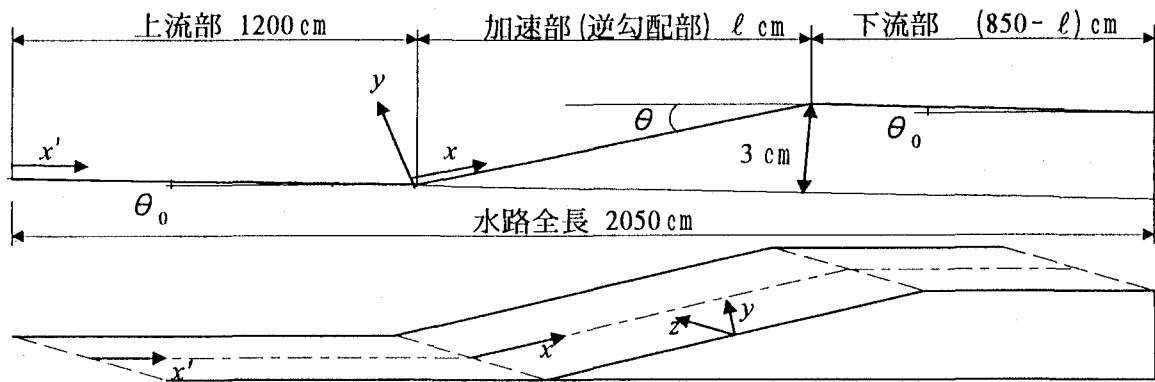


図-1 実験用水路

はFroude数、 $Re = \bar{U}h/\nu$ はReynolds数で、添え字1は $x = -25\text{cm}$ における値であることを表す。ただし $\bar{U} = Q/Bh$ は断面平均流速、 Q は流量、 h は水深、 g は重力加速度、 B は水路幅、 ν は動粘性係数である。流量は上流部で水深 h_1 が約10cmのほぼ等流とみなせる状態となるように設定したものである。

測定は水路中央線上における流速測定(Cシリーズ)、および横断面内流速測定(Rシリーズ)である。CシリーズではX型Hot-film流速計を用いて x 方向流速 $\tilde{u} = U + u$ および y 方向流速 $\tilde{v} = V + v$ を鉛直方向に16点、流下方向に16断面測定した。また、Rシリーズでは右岸側横断面内の x 方向流速、 y 方向流速および z 方向流速 $\tilde{w} = W + w$ を鉛直方向22点、水路幅方向21点、合計1断面に付き462点測定し、これを流下方向に6断面測定した。ここに $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ は瞬間流速、 U, V, W は時間平均流速、 u, v, w は変動成分を表し、変動成分のR.M.S値を u', v', w' で表示することにした。Cシリーズにおいては、サンプリング間隔 $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ 、サンプリング時間 $T = 81.92 \text{ sec}$ とし、Rシリーズにおいては、 $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ 、 $T = 40.96 \text{ sec}$ として測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 水路中央線上における水理諸量の変化

(a) 水面形

水面形の一例を図-2に示す。図中には実測値を○印で示し、次式で求めた水面形を細い実線で示す。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin\theta - n^2 R^{-4/3} \left(\frac{Q}{Bh} \right)^2}{\cos\theta - \frac{\alpha Q^2}{gh^3 B^2}} \quad (1)$$

ここに、 n はManningの粗度係数、 R は径深、 α はエネルギー補正係数であり、 n は上流部の値0.01を用い、 $\alpha = 1.0$ とした。

同図より、加速部では水位が低下しており、ここで大きな圧力勾配が生じていることが分かる。また、式(1)に上流部等流で得られた n の値を用いて求めた水面形は実測値と良好な一致を示す。

表-1 実験条件 (U_1 : cm/s)

ℓ	$\sin\theta_0$	1/3000	1/5000	1/7500	1/10000
50 (cm)	実験番号	5C3	5C5	5C7	5C10
	$\sin\theta$	-1/16.8	-1/16.7	-1/16.7	-1/16.7
	Fr_1	0.352	0.282	0.233	0.147
	Re_1	45500	27600	22600	19900
	U_{1j}	1.941	1.207	0.972	0.959
100 (cm)	実験番号	10C3	10C5	10C7	10C10
	$\sin\theta$	-1/33.7	-1/33.6	-1/33.5	-1/33.4
	Fr_1	0.350	0.282	0.229	0.197
	Re_1	48400	29100	23200	21200
	U_{1j}	1.908	1.356	0.863	1.011
300 (cm)	実験番号	30C3	30C5	30C7	30C10
	$\sin\theta$	-1/103	-1/102	-1/101	-1/101
	Fr_1	0.364	0.275	0.229	0.199
	Re_1	47000	27500	23400	20200
	U_{1j}	1.798	1.411	1.046	0.927

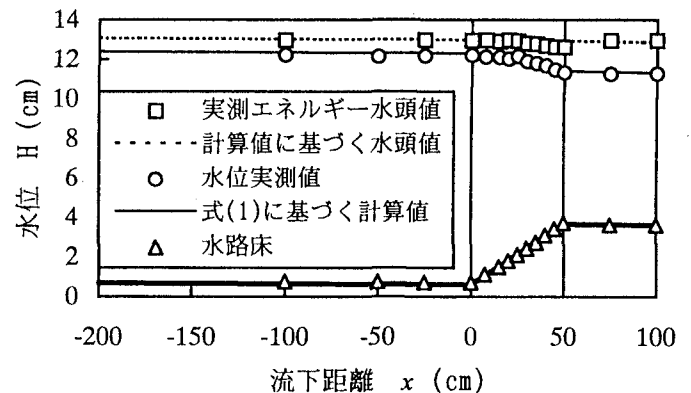


図-2 水面形 (実験番号5C3)

(b) 主流速分布

主流速分布 U/U_* の流下方向変化の一例を図-3に示す。ただし縦軸は断面ごとに5ずつシフトさせている。摩擦速度 U_* は図中に●印で示した内層 ($50 \leq yU_* / \nu, y/h \leq 0.2$) において式(2)のlog則に最も適合するよう最小二乗法より求めた。

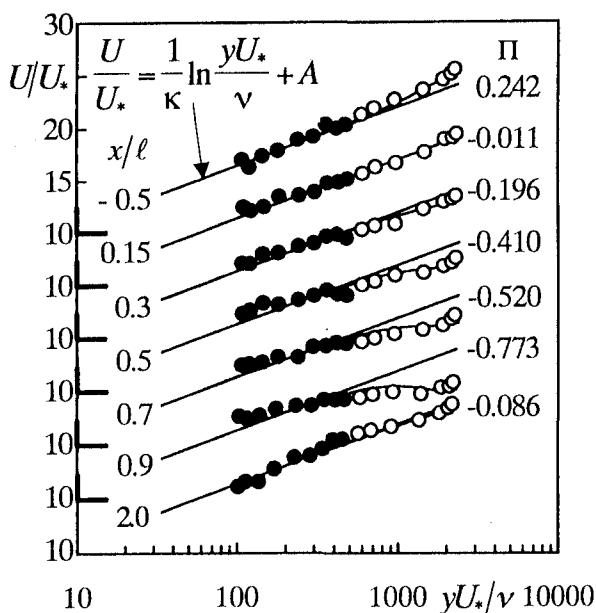


図-3 主流速分布 (実験番号5C3)

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yU_*}{\nu} + A \quad (2)$$

ここに、 κ はKarman定数、 A は積分定数であり、 $\kappa = 0.41, A = 5.3$ とした³⁾。

内層の主流速分布は加速部において、図中に直線で示したlog則で表現可能であるが、buffer層に近い所でやや大きめにでている。しかし、○印で示した外層($y/h > 0.2$)では、流下に伴いlog則の直線より小さくなり、次第に一樣化されていくと言える。この内・外層を含む主流速分布を式(3)のlog-wake則によって表現し、図中に曲線で示した。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yU_*}{\nu} + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \quad (3)$$

ここに π は円周率、 Π はwake strength parameterである。式(3)に実測値を当てはめ、算出した Π の値を図-3の右側に示している。上流部・加速部および下流部のいずれも内・外層を含む主流速分布がlog-wake則で表現できることが分かる。

次に、このようにして得られた Π の流下方向変化の例を図-4に示す。図中には、水路床勾配が $\sin\theta_0 = 1/3000$ で $\ell = 50, 100, 300\text{cm}$ の実験結果を示した。上流部では、等流における $\Pi = 0.2$ のほぼ一定値⁹⁾をとり、加速部に入ると緩やかに減少し、下流部では再び上流部での値に近づいていることがわかる。

wake strength parameter Π の値はこれまでの研究から圧力勾配によって規定されていると考えられる。鬼束ら⁹⁾は、次式で示される圧力パラメータ β が、圧力勾配を有する開水路流において、有効なパラメータであることを運動方程式より理論的に導いている。

$$\beta = \frac{gh}{U_*^2} \left(\frac{dh}{dx} \cos\theta - \sin\theta \right) \quad (4)$$

そこで、圧力勾配パラメータ β を用いて Π の挙

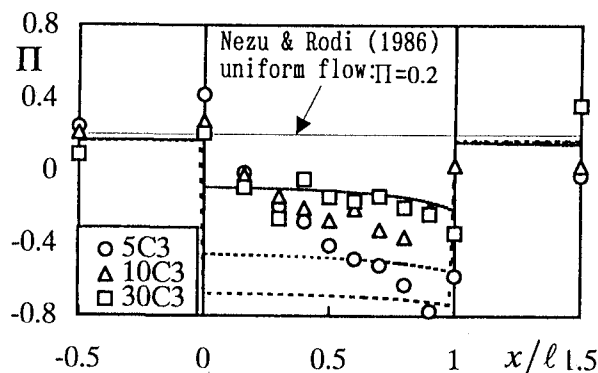


図-4 Π の流下方向変化

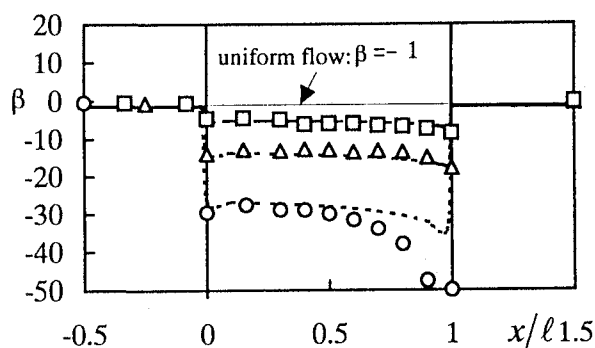


図-5 β の流下方向変化

動を検討する。 β の流下方向変化を図-5に示す。同図は図-4の実験に対応する。図-5の点線は、式(1)に基づく水深の計算値を式(4)に代入して求めた β の値である。

図-4と図-5から、 β が減少すると Π も減少するという相関性がみられるが、 β が加速部に入るとほぼ一定値をとるのに対して、 Π はかなり大きな変動をしながらも β に規定される値に漸近していくと判断される。この値を平衡値と呼ぶことにする。図-4の点線は、式(4)、(11)より求めた平衡値である。

ところで Π と β の関係については、瀬津ら¹⁾は一樣幅の滑面水路で水深の増加する開水路減速流および水深の減少する開水路加速流における Π は、 β と次式の関係があることを示した。

$$\Pi = 0.06\beta + 0.45 \quad (-21 \leq \beta \leq 28) \quad (5)$$

Song & Graf⁹⁾は主流速分布が相似な粗面開水路減速流において次式の関係があることを示した。

$$\Pi = 0.088\beta + 0.33 \quad (-4.5 \leq \beta \leq 0.4) \quad (6)$$

鬼束ら⁹⁾は滑面開水路減速流において次式の関係があることを示した。

$$\Pi = 0.07\beta + 0.27 \quad (-2.7 \leq \beta \leq 16.4) \quad (7)$$

本実験で得られた加速部における Π と β の結果を図-6に示す。同図にはSong & Graf⁹⁾と鬼束ら⁹⁾の減速流の場合の実測値および式(5)、(6)、(7)も示した。

ところで、等流の場合の β の値は、 $dh/dx = 0$,

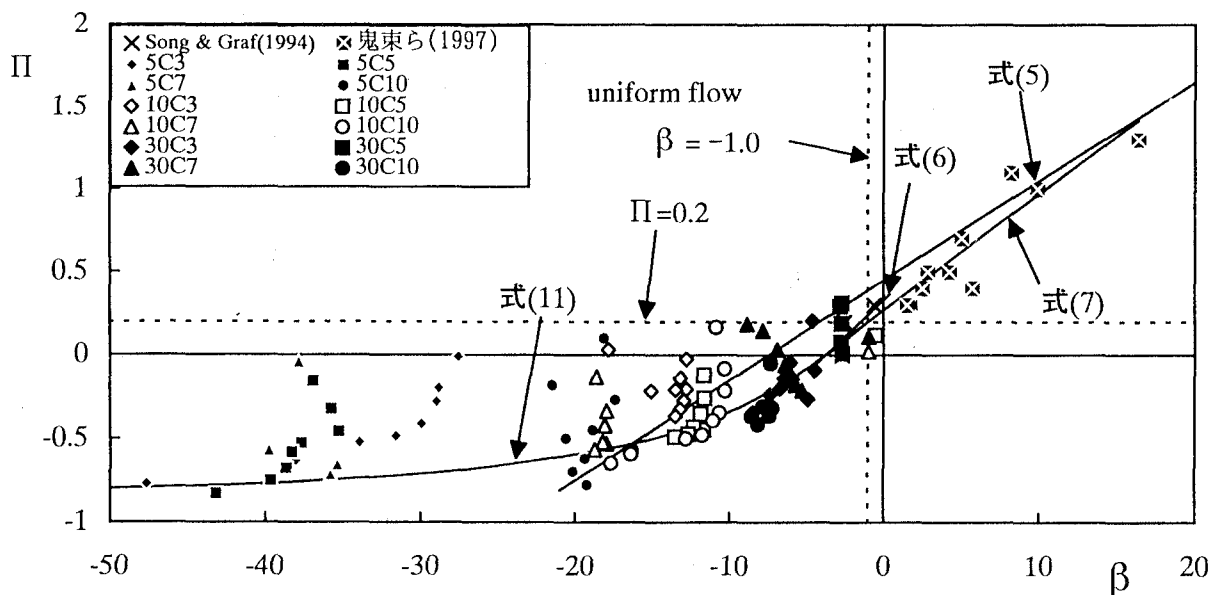


図-6 Π と β の関係

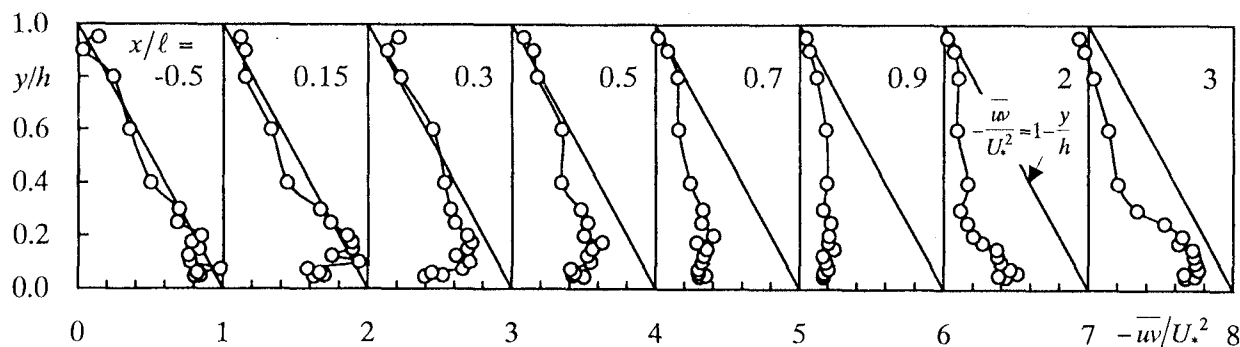


図-7 Reynolds応力分布 (実験番号5C3)

$U_*^2 = gh \sin \theta$ であるから、式(4)より $\beta = -1$ であることが分かる。また、水深が流下方向に増加する流れは $dh/dx > 0$ なので $\beta > -1$ であり、水深が減少する加速流は $dh/dx < 0$ なので $\beta < -1$ である。図-6において加速流の場合における Π の値が大きくばらつくことが特徴であるが、これは図-4, 5で示したように圧力勾配パラメータ β は速やかにほぼ一定値となるが、外層の流速分布を表す Π の挙動は上流の履歴を受け緩慢で、 β に対応する Π の値となるまでには時間(距離)を要す。このため、等流の $\Pi \doteq 0.2$ からその時の β に対応する Π の平衡値となるまで減少してゆく。

それでは β に対応する Π の平衡値はいかなる値となるであろうか。それについては以下のように考える。加速流である場合、外層の流速分布が内部に及んでくるが、抵抗を決定する内層までは影響を及ぼさないと考える。すなわち内層外縁の流速値 $U_{0.2}$ は外層の最大流速値 $U_{1.0}$ を超えることはない。内層外縁の $y/h = 0.2$ における式(2)の値は

$$\frac{U_{0.2}}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{0.2hU_*}{\nu} + A \quad (8)$$

であり、式(3)の $y/h = 1.0$ における値は

$$\frac{U_{1.0}}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{hU_*}{\nu} + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \quad (9)$$

である。従って $U_{0.2}/U_*$ のとりうる最大値は $U_{1.0}/U_*$ であり、式(8)=(9)とおけば

$$\Pi_{\min} = \frac{1}{2} \ln 0.2 = -0.805 \quad (10)$$

が得られる。本実験の各ケースにおける Π の最小値と、 $\beta = -1$ の等流の値 $\Pi = 0.2$ (Nezu & Rodi³⁾) および $\beta = -50$ で $\Pi_{\min} = -0.805$ を採用し、 β によって規定される Π の平衡値に関し、て次の実験式を提案する。

$$\begin{aligned} \Pi = & (4.25 \times 10^{-7}) \beta^4 + (6.07 \times 10^{-5}) \beta^3 \\ & + (3.34 \times 10^{-3}) \beta^2 + (9.02 \times 10^{-2}) \beta + 0.29 \end{aligned} \quad (\text{ただし } -50 \leq \beta \leq -1) \quad (11)$$

式(11)は図-6に示されるように平衡値を良好に再現し、また減速流 $\beta > -1$ の式(7)となめらかに接続する。

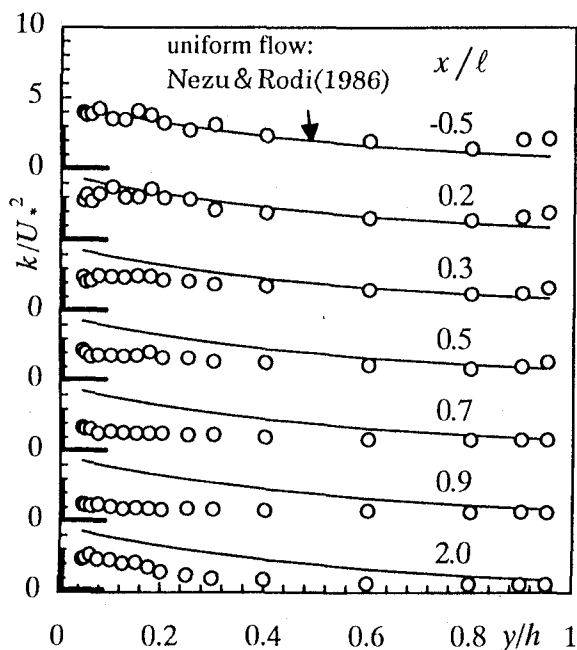


図-8 乱れエネルギー分布 (実験番号5C3)

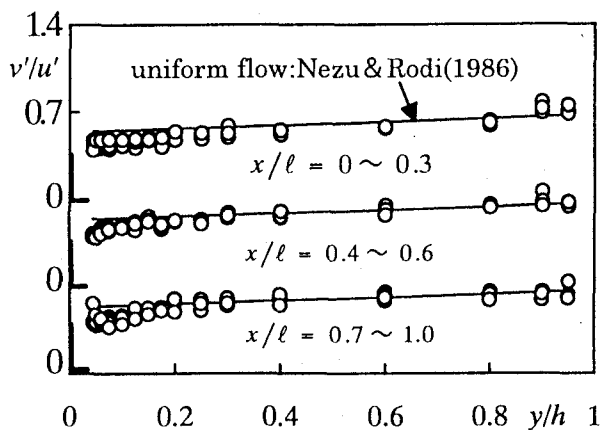


図-9 乱れ強さ比 v'/u' (実験番号5C3)

(c) Reynolds応力分布

Reynolds応力 $-\overline{uv}/U_*^2$ の流下方向変化を図-7に示す。上流部でのReynolds応力分布は図中に直線で示した等流において成立する普遍分布

$$-\overline{uv}/U_*^2 = 1 - y/h \quad (12)$$

とほぼ一致している。加速部では流下に伴い、普遍分布から徐々に減少する傾向が見られる。これは、礫津ら⁹⁾による開水路加速流の結果と類似している。下流部では底面付近より水面に向かい再び普遍分布に回復する。

(d) 乱れエネルギー分布

乱れエネルギー k/U_*^2 の流下方向変化を図-8に示す。実測値をプロットで、等流の分布を曲線で示す。ここに、 $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ で、図中において縦

軸は5ずつシフトさせている。また、横断方向乱れ強度は式(13)により算出した。

$$\frac{w'}{U_*} = \frac{D_w}{D_u} \exp \left\{ -(\lambda_w - \lambda_u) \frac{y}{h} \right\} \frac{u'}{U_*} \quad (13)$$

ここに $D_u = 2.26$, $D_w = 1.63$, $\lambda_u = 0.88$, $\lambda_w = 1.0$ は、開水路等流において得られた経験値である⁹⁾。乱れエネルギー分布は上流部ではほぼ等流の分布に適合している。加速部では流下に伴い乱れエネルギーが減少し、特に底面近傍を除いた領域で一様化を示す。下流部では再び等流の分布に漸近していく。このように加速された流れにおける乱れエネルギーが等流の分布より減少する理由として図-3に示されるように内層における速度勾配が減少し、さらに図に示されるようにReynolds応力も減少していることが考えられる。なお、水表面近傍において、実測値が曲線より大きくなっている理由は水面変動が v' として計測されたことによると判断される。

図-8は、式(13)を用いて示したが、同式が使用できるかどうかを、図-9に乱れ強さ比 v'/u' の流下方向変化を示すことで検討した。同図は縦軸を0.7ずつシフトさせており、図中の曲線は v' と u' の等流の経験式⁹⁾より求めたものである。図を見ると、各プロットとも底面近傍を除き、等流の分布とほぼ一致しており、乱れ強度比が等流状態の場合に近くなっている。このことより w'/u' の比も等流状態の場合に近くなっていることが推察できる。よって、式(13)を用いて乱れエネルギーを算出しても支障はないといえる。

3.2 横断面内流況変化

(a) 2次流

加速部における2次流の大きさは、主流速の値と比べて小さくなり、今回の実験では2次流を精度良く検出することはできなかった。

(b) 主流速分布

断面内最大流速 $U_{\max}$ で無次元化した主流速分布 $U/U_{\max}$ の等値線を図-10に示す。図中には、 $U/U_{\max}$ の数値を記入し、 $U/U_{\max} = 0.8$ の等値線を太線で示した。横軸には $z/h = 1.0$ と 2.0 に△と▲印を記入した。上流部においては、 $z/h > 2.0$ の2次元領域においては、等値線が水路床とほぼ平行になっていることから、流れが2次元的であると言える。側壁付近においては、2次流の影響を受けて等値線がゆがめられており、半水深付近で側壁に向かって突き出した形となっている。

加速部においては、最大流速域が水面下に没し、側壁側に近づきわずかに左右対称性が崩れている。2次流強度の減少により、上流部で観察された隅角部付近での等値線の丸みは流下に伴い失われてゆき、主流速分布の等値線は流路壁面に平行となる。

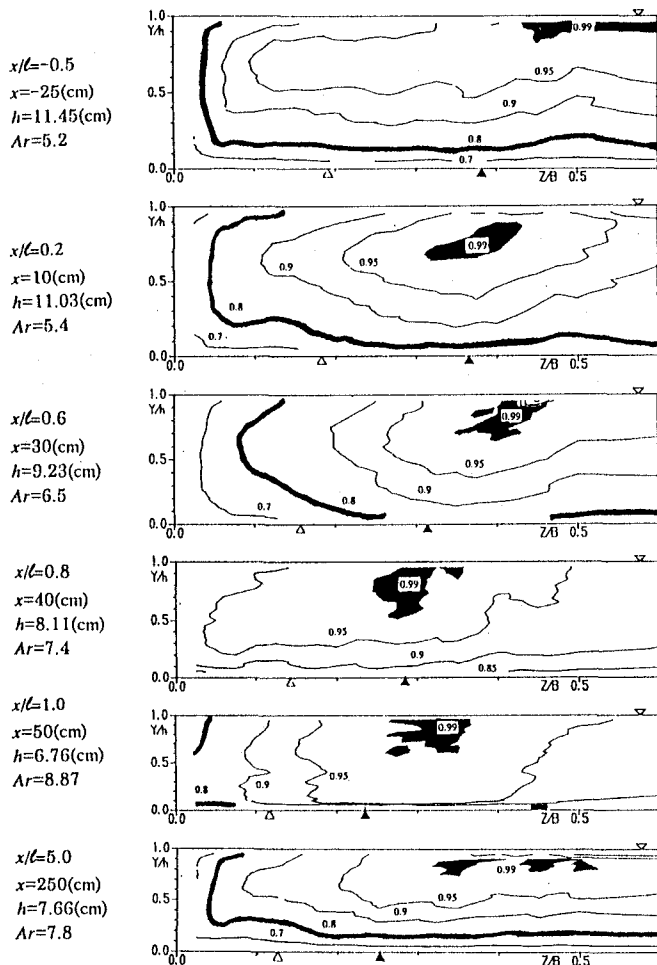


図-10 主流速分布 (実験番号5R3)

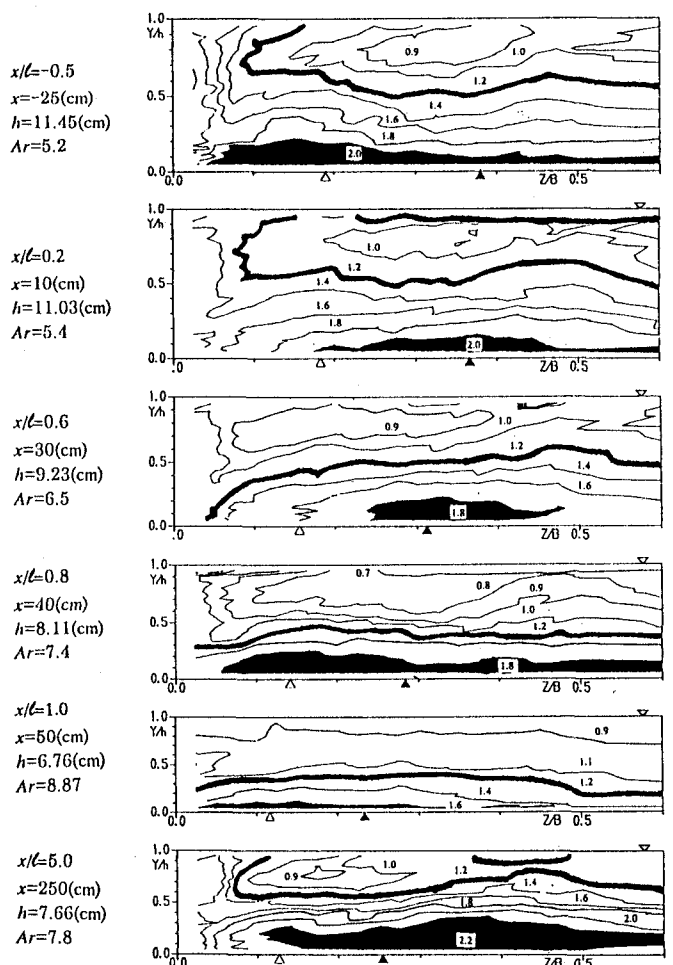


図-11 乱れ強度分布 (実験番号5R3)

(c) 乱れ強度分布

水路中央摩擦速度で無次元化された乱れ強度 u'/U_c の分布を図-11に示す。太線で示した等値線は $u'/U_c = 1.2$ の線である。この太線は等流では $y/h \div 0.6$ に位置しているが、加速部に入ると、およそ $y/h \div 0.4$ となり、底面に平行に近づいている。このことから、加速部において乱れ強さが減少しているが、2次元性は保たれていることが分かる。

4. おわりに

水深が浅くなる開水路加速流においてX型Hot-film流速計を用いて流速分布を測定することにより、以下の知見を得た。

- (1) 内・外層の水路中央部での主流速分布はlog-wake則によって表現可能で、wake strength parameter Π は無次元圧力勾配 β の減少に応じて減少する。
- (2) Π と β の関係は加速部では上流の履歴を受け一定値に漸近していくことに着目し、その関係式を式(11)の4次式で表した。
- (3) 水路中央部でのReynolds応力分布は等流で成立する普遍分布よりも減少した分布となり、乱れの発生は減少するが v' と u' の比は等流の場合とほぼ同様

である。

- (4) 2次流速は減少し、主流速分布は流路壁面に平行な等値線をもつ分布となる。

謝辞：実験に多大な協力をしていただいた、木下敦之氏(現・JR九州)に心からの謝意を表す。

参考文献

- 1) 瀬津家久, 門田章宏, 戸田孝史, 中川博次: 加速流および減速流の解析手法とその乱流特性, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.89-97, 1995.
- 2) 瀬津家久, 門田章宏, 戸田孝史: 定常開水路における加速・減速流の乱流構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.755-760, 1996.
- 3) Nezu, I. and Rodi, W.: open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.112, No.5, May, pp.335-355, 1986.
- 4) 鬼束幸樹, 浦 勝, 秋山壽一郎, 岡本智和, 松岡定和: 逆圧力勾配を有する開水路流に関する研究, 土木学会論文集, No.558/II-38, pp.71-79, 1997.
- 5) Song, T. and Graf, W. H.: Non-uniform open-channel flow over a rough bed, *Journal of Hydrosience and hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.12, No.1, May, pp.1-25, 1994.

(1997.9.30受付)