

漸拡長方形断面開水路流の流速分布変化

九州工業大学 工学部 正員 浦 勝 正員 秋山 壽一郎

九州工業大学 工学部 学生員 川崎 淳一郎 学生員 〇鬼東 幸樹

1. はじめに 開水路の一樣断面流れや2次元等流¹⁾の特性が明かにされ、また断面急変流の研究も進められている。しかし、河川等で見られる水路幅が緩やかに変化する流れの特性は、不明な所が多い。著者らは開水路流の漸拡流のモデルとして長方形断面が直線的に拡がる流れを実験的に研究し検討した。

2. 実験方法 実験は長方

表-1 水路中央線上の水理諸量

形断面の漸拡水路で行った。流れは水路幅 $B_e=60\text{cm}$ から幅 $B=19.6\text{cm}$ の助走部(長さ 50cm)に導入された後、拡幅部に入る。距離 X における水路幅 B の増加率は $dB/dX=1/12.5$ である。漸拡部は $X=5.00\text{m}$ までであり、これより下流 $X=16.7\text{m}$ の越流堰までは $B_e=60\text{cm}$ の一樣水路である。仮想原点は $X=-264.6\text{cm}$ にあり、その中心角は 4.57° 、水路床勾配 $I=1/$

EXP. NO	X (cm)	B (cm)	H (cm)	u_{∞} (cm/s)	U_c (cm/s)	y_c (cm)	δ_c (cm)	DP ($\times 10^{-3}$)	β (-)	Π (-)	U_c/u_{∞} (-)	Δ (cm)
C000	0	19.8	12.81	1.802	39.30	3.50	0.506	6.075	0.928	0.240	21.81	11.3
C020	20	21.4	12.80	1.511	37.94	6.00	0.880	4.834	1.826	0.885	25.11	22.1
C150	150	32.2	12.97	1.077	31.37	9.00	1.749	1.323	1.955	1.667	29.13	50.9
C195	195	34.8	13.10	0.975	30.40	9.00	2.212	1.041	2.374	1.843	31.18	69.0
C300	300	42.2	13.20	0.854	29.97	12.00	3.761	0.594	3.000	2.358	36.01	135.4
C395	395	48.0	13.25	0.896	27.13	12.00	2.908	0.397	1.408	1.480	30.28	86.1
C490	490	55.4	13.29	0.908	24.46	12.00	2.437	0.259	0.750	0.822	26.96	65.7
C550	550	60.0	13.30	0.831	19.27	13.00	1.542	0.024	0.052	0.266	23.18	35.8
C600	600	60.0	13.32	0.828	19.09	11.00	1.733	0.024	0.061	0.082	23.05	40.0
AV11	0	19.7	12.70	2.086	40.00	10.80	0.406	6.088	0.557	-1.109	19.17	7.8
2V10	90	26.9	12.92	1.209	33.24	11.63	1.682	2.317	2.612	1.074	27.49	46.2
3V10	270	38.7	13.22	0.826	26.73	11.96	3.082	0.715	3.167	1.995	32.36	99.7
3.5V20	355	46.0	13.34	0.838	27.34	12.02	2.920	0.455	1.855	1.828	33.41	97.6
AV13	440	52.3	13.43	0.825	22.67	12.09	2.415	0.316	1.090	1.137	27.36	66.1

10,000、流量 $Q=9.581/\text{s}$ 、下流端水位 $H_e=13.4\text{cm}$ に固定し測定を行った。流速の測定は2方向X型ホットフィルム流速計(カノマックス1241-20W及び1246-60W)を用い、1/200秒で4096個をデジタル変換し収録した。

3. 拡幅による水路中央線上の水理量の流下方向変化 水理量の流下方向変化を水路中央線上で調べた。表-1に測点X上の水理諸量を示す。Hは水深であり、 U_c 、 y_c は最大流速値とその位置である。

3.1 平均流速分布の流下方向変化 距離Xにおける平均流速 U の鉛直方向分布を図-1に示す。

$$U^* = (1/\kappa) \ln y^* + A \quad (1)$$

$$\text{ここに } U^* \equiv U/u_{\infty}, \quad y^* = y u_{\infty} / \nu$$

$$\kappa = 0.412, \quad A = 5.29$$

yは底面からの距離。 u_{∞} は水路中央線上の底面摩擦速度を表し、その値は $70 \leq y^* < 0.2$ y/Hにおいて最小自乗法により決定した。図-1より底面近傍ではほぼ対数則に従うこと、漸拡部入口直前においてほぼ一樣流速分布であったものが、漸拡にともなう平均流速の減速により逆圧力勾配となり流速分布が変化することがわかる。この流速分布の変化を次式で評価した。

$$U^* = (1/\kappa) \ln y^* + A + (2\Pi/\kappa) \sin^2(\pi y/2y_c) \quad (2)$$

図-1の曲線は式(2)を表し、測定値に最も合致するよう求めたコールパラメータ Π の大きさは、圧力勾配の関数と考えられ、次式で定義される無次元圧力勾配 β をもとめた。

$$\beta = (\delta_c/\tau_0) (dp/dx) \quad (3)$$

ここに δ_c は排除厚、 $\tau_0 = \rho u_{\infty}^2$ であり圧力勾配は次式より求めた。

$$\frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx} \equiv DP = \left(1 - \frac{u_c^2}{gR} + \frac{Q^2 H}{g A^2} \frac{dB}{dx} \right) / \left(1 - \frac{Q^2 B}{g A^2} \right) \quad (4)$$

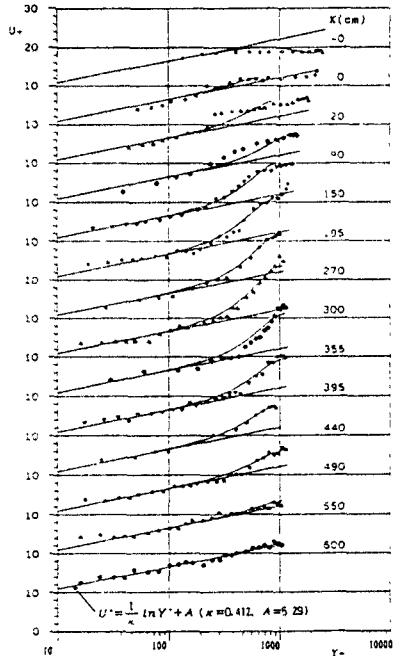


図-1 流速分布の流下方向変化

ここに ρ :水の密度、 R :径深、 $A=BH$:流積である。 Π と β の関係を図-2に示す。図中の数値は距離 X を表し、実線は次の実験式²⁾を表す。

$$\Pi = 0.8 (\beta + 0.5)^{0.75} \quad (5)$$

$X \leq 90\text{cm}$ のでは式(5)と一致しないが $150 < X < 490$ では適合性はよい。

3.2 平衡境界層の検討 Rotta³⁾の平衡条件、即ち、

$$u^*/U_c = \text{const}, \quad \beta = \text{const}, \quad d\Delta/dx = \text{const} \quad (6)$$

を調べた結果を図-3に示す。ただし $\Delta = \delta_* U_c / u_*$ (欠損厚)である。漸拡部の全領域($0 < X < 5.0\text{m}$)では上、下流の影響により式(6)は満たされず非平衡流である。しかし、 $1.5 < X < 3.0\text{m}$ のでは平衡に近いとみられる。

3.3 レイノルズ応力分布の流下方向変化 レイノルズ応力の流下方向変化を図-4に示す。底面に発達する境界層とそのレイノルズ応力の生成と発達過程がわかる。 $X=150\text{cm}$ より下流側では漸拡に伴う圧力上昇の為、底面の $-u'v'/u_*^2 \approx 1$ から放物線的变化を示し、極大点をもつ。またこの極大値は流下に伴って増大していくが、 $X=400\text{cm}$ 以降では減少する。圧力勾配のある場合の平衡境界層に対して、Mellor & Gibson⁴⁾は次のせん断応力分布式を与えている。

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 - \beta \left(\frac{1}{m} + 1 \right) \left[\eta F - \frac{\kappa}{\kappa + \gamma} \int_0^\eta F d\eta_i - \frac{\kappa \gamma}{\kappa + \gamma} F \int_0^\eta F d\eta_i + \frac{(\kappa - \gamma) \gamma}{\kappa + \gamma} \int_0^\eta F^2 d\eta_i \right] + \beta \left[2 \int_0^\eta F d\eta_i - \gamma \int_0^\eta F^2 d\eta_i \right] \quad (7)$$

ここに $\frac{1}{m} = \frac{u_*}{\delta_*} \frac{d\Delta}{dx} \bigg/ \frac{dU_c}{dx}, \quad \eta = \frac{yu_*}{\delta U_c}$
 $\gamma = \frac{u_*}{U_c}, \quad F = \frac{U_c - U}{u_*}$

本実験では前節で検討したように平衡領域にはないが、実測値と表-2の値を用いて式(7)により τ/τ_0 を計算し、 $X=150, 300\text{cm}$ について図-4に実線で示した。計算値と測定値の適合性は必ずしもよくないが、漸拡流すなわち逆圧力勾配($\beta > 0$)がせん断応力の鉛直分布に及ぼす影響を平均速度分布から説明することができる。

4. おわりに 開水路漸拡流の流速分布せん断応力分布について測定し、その特性を調べるとともに、これらが圧力勾配の関数として表されることを示した。最後に、協力いただいた卒業生、和田誠一君に謝意を表す。

<参考文献> 1) Nezu, I. and W. Rodi: Open Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer, Proc. ASCE, J. Hy. Eng. Vol. 112, No. 5, 335-355, 1986. 2) WHITE, F. M.: Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill Book Co, N. Y., 1974. 3) Rotta, J. C.: Turbulente Strömungen, B. G. Teubner, Stuttgart, 1972. 4) Mellor, G. L. and D. M. Gibson: Equilibrium turbulent boundary layers, J. F. M. 24, 225-253, 1966.

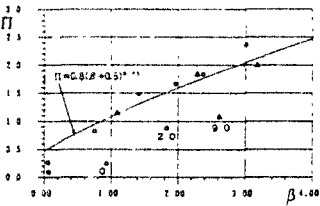


図-2 Π と β の関係

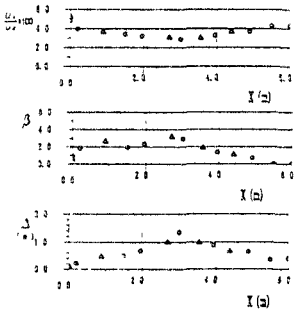


図-3 Rottaの条件

X(m)	0-90	150	195-270	300	350-490	500-600
dΔ/dX	0.555	0.222	0.402	0.632	-0.236	0.084
dU _c /dX	-0.068	-0.025		-0.030	-0.0036	

表-2 Δ と U_c の関係

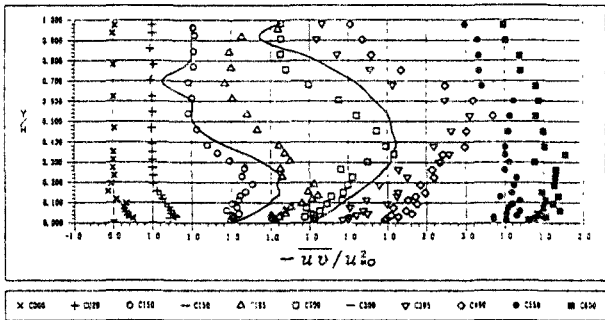


図-4 レイノルズ応力の流下方向変化