

漸拡長方形断面開水路流の流況変化について

Flow Characteristics in a Gradually Expanded
Rectangular Open Channel Flow

浦 勝* 秋山壽一郎** 川崎淳一郎*** 鬼束幸樹****

By Masaru URA, Juichiro AKIYAMA,

Junichiro KAWASAKI and Kouki ONITSUKA

This study is concerned with flow characteristics in a gradually expanding smooth rectangular open channel. The spatially evolution of mean velocity-, Reynolds stress-, and turbulent intensity-profiles in the longitudinal direction were investigated experimentally. Cole's wake parameter is expressed as a function of the pressure gradient, assuming the entire mean velocity profiles to be described by Cole's law. It is found that the distributions of Reynolds stress and turbulent intensities under the adverse pressure gradient differ substantially from these in the favorable pressure gradient.

Keywords: turbulence, open channel flow, pressure gradient.

1. はじめに

開水路の一樣断面流れ¹⁾²⁾やそのモデルである2次元等流³⁾の詳細な姿が明かにされ、また断面の急変する急拡や急縮の研究も多く進められている。しかし、水路幅が流下方向に緩やかに変化する自由水面をもつ流れは河川などに多くみられるが、その流れの特性の変化を調べたものは意外に少ない。流れの断面が拡がる流れの研究は主として、圧力上昇をともなう境界層の研究⁴⁾⁵⁾と、diffuserの研究として空気流で行われており、自由水面をもつ流れの研究はほとんどみあたらない。著者らは、開水路流の漸拡流の最も簡単な場合として長方形断面が流下方向に直線的に拡がる流れをとりあげ、これまで実験的に研究を進めてきたが⁶⁾⁷⁾今回若干の知見が得られたので報告するものである。

2. 実験方法

実験は図-1に示す長方形断面の漸拡水路で行った。流れは水路幅 $B_e=60\text{cm}$ からいったん幅 $B_o=19.6\text{cm}$ の助走部(長さ 50cm)に導入された後、拡幅部に入る。助走部上流端には整流網(φ 6mm ,長さ 5cm のハニカム)

* 正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科(〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

** 正会員 PhD 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科

*** 学生員 九州工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程

**** 学生員 九州工業大学 工学部設計生産工学科 建設コース

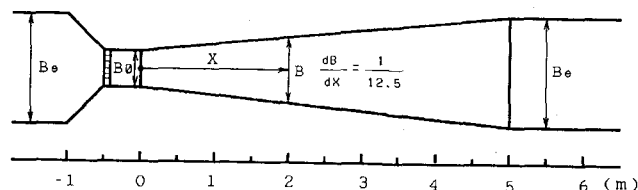


図-1 実験水路平面図

が設置されている。拡幅部入口より水路床にそって流下方向の中央線上にX軸、鉛直上向にY軸、水路幅方向にZ軸をとると、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 $B_0=60\text{cm}$ の一樣水路である。両側壁を上流側に延長した交点即ち仮想原点は $X=-264.6\text{cm}$ にあり、その中心角は 4.57° である。実験の水利条件は、水路床勾配 $I=1/10,000$ 、流量 $Q=9.61\text{L/s}$ 、下流端水位 $H_e=13.4\text{cm}$ に固定し、次の3つのシリーズに分けて測定を行った。まず第1のCシリーズにおいては水路中央断面内における流速諸量の水深方向分布が流下にともないどのように変化するかを調べた。流れ方向に9つの測線を取り、深さ方向の25点において流速変動を測定した。次に、流下距離Xの横断面内におけるX,Y方向流速成分即ちU,Vの特性(Vシリーズ)及びX,Z方向成分U,Wの特性(Wシリーズ)を深さ方向に8点、幅方向に12点計96点の格子点において測定した。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、サンプリング間隔 $1/200\text{秒}$ で4096個をデジタル変換し収録した。

3. 拡幅にともなう水路中央線上の水量の流下方向変化

拡幅にともなう水量の流下方向変化を水路中央線上で調べた。Cシリーズの実験条件及び結果を表-1に示す。同表にはV,Wシリーズ中央線上の値も示している。表中Xは漸拡部入口からの流下方向距離、Bは水路幅、Hは水深である。 U_c 、 y_c は最大流速の値とその位置。その他は本文中に記した。

表-1 水路中央線上の水利諸量 (Series Cは $Q=9577\text{cc/s}$, V,W Seriesは表-3参照)

EXP.NO	X (cm)	B (cm)	H (cm)	u_{10} (cm/s)	U_c (cm/s)	y_c (cm)	δ_r (cm)	DP ($\times 10^{-3}$)	β (-)	Π (-)	U_c/u_r (-)	Δ (cm)
C000	0	19.8	12.81	1.802	39.30	3.50	0.506	6.075	0.928	0.240	21.81	11.0
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	88.1
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	0.092	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	39.7	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
3.5W20	355	46.0	13.14	0.862	27.77	11.83	2.887	0.464	1.767	1.972	33.10	95.6
4V13	440	52.3	13.43	0.825	22.67	12.09	2.415	0.316	1.090	1.137	27.38	66.1
4W10	440	52.5	13.23	0.825	22.05	12.24	2.239	0.322	1.049	1.019	26.86	60.1
4V10	447	53.0	13.27	0.802	20.80	11.94	2.861	0.316	1.377	0.751	27.23	77.9

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-2に示す。図中の直線は次の対数分布則である。

$$U^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + A \tag{1}$$

ここに $U^+ \equiv U/u_{*o}$, $y^+ = y u_{*o}/\nu$

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

u_{*o} は水路中央線上の底面摩擦速度を表し、その値は $70 \leq y^+ < 0.2y/H$ における U^+ 値が式(1)に最も近くなるよう最小自乗法により決定した。図-2より底面近傍の内部領域($y^+ < 0.2y/H$)ではほぼ対数則に従うこと、漸拡部入口直前($X = -0.1\text{cm}$)においてほぼ一様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の後流関数の項で評価した。

$$U^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + A + \omega(\xi) \tag{2}$$

ここに $\omega(\xi) = (2\Pi/\kappa) \sin^2(\pi\xi/2)$

$$\Pi \text{は} 1/\text{Re}^\alpha \text{パラメータ}, \xi = y/y_c$$

本研究では y_c を最大流速 U_c の高さとしたが、 $X \leq 195$ の領域では表-1に示すような値を用いた。図-2の曲線は式(2)を表し、測定値に最も合致するよう求めた Π の値は表-1に示した。 Π の大きさは圧力勾配の関数と考えられるので、次式で定義される無次元圧力勾配 β をもとめた。

$$\beta = (\delta_* / \tau_o) (dp/dx) \tag{3}$$

ここに δ_* は境界層排除厚、 $\tau_o = \rho u_{*o}^2$ であり、圧力勾配は次の開水路不等流の式より求めた。

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

ここに ρ :水の密度、 R :径深、 $A = BH$:流積である。 δ_* 、 DP 、 β の値は表-1に示した。 Π と β の関係を図-3に示す。図中の数値は距離Xを表し、実線は次の実験式⁸⁾を表す。

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

これより $X \leq 90\text{cm}$ の区間は式(5)と一致しないが $150 < X < 490$ では適合性はよく開水路漸拡流でも式(5)の関係は成立し、水路中央部の流速分布は式(2)で表示できるといえる。

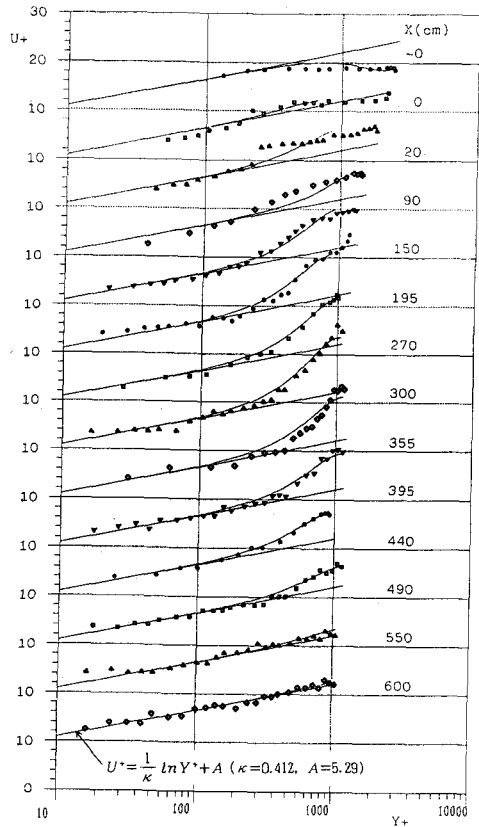


図-2 中央線上の流速分布の流下方向変化

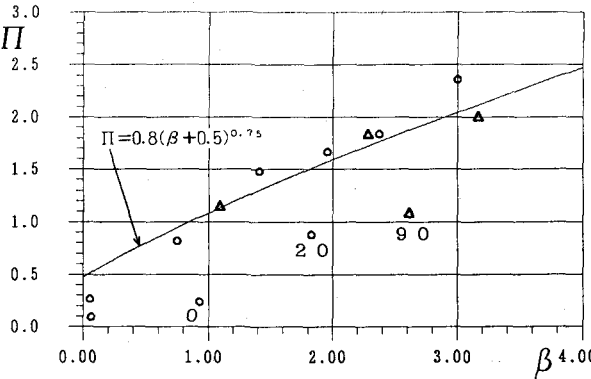


図-3 Π と β の関係(○:series C, △:series V)

3.2 平衡境界層の検討

前節で調べた流れが平衡領域にあるのかどうかをRotta⁹⁾の条件、即ち、

$$\left. \begin{aligned} u_* / U_c &= \text{const} \\ \beta &= \text{const} \\ d\Delta / dx &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

に従って見ておこう。 u_* / U_c , β , $\Delta = \delta_* U_c / u_*$ (欠損厚) の値は表-1に示したが、これを図-4(a), (b), (c)に示す。同図より漸拡部の全領域 ($0 < X < 5.0\text{m}$) では上、下流の影響が効いて、式(6)の条件は満たされない。すなわち非平衡流れである。しかし、 $1.5 < X < 3.0\text{m}$ の区間では平衡に近いとみられる。

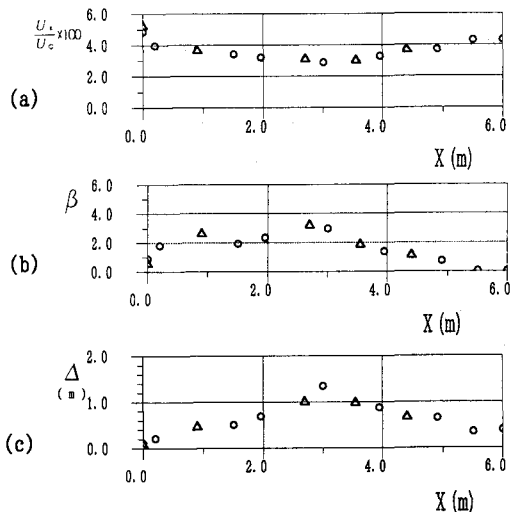


図-4 平衡パラメータの流れ方向変化

(a) u_* / U_c , (b) β , (c) Δ

3.3 レイノルズ応力分布の流下方向変化

水路中央線上で測定されたレイノルズ応力 $-\overline{uv} / u_*^2$ の鉛直分布の流下方向変化を図-5に示す。同図より、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。特徴的なことは○印で表した $X=150\text{cm}$ より下流側では漸拡流れに伴う圧力上昇の為、レイノルズ応力が底面の $-\overline{uv} / u_*^2 \approx 1$ から水面

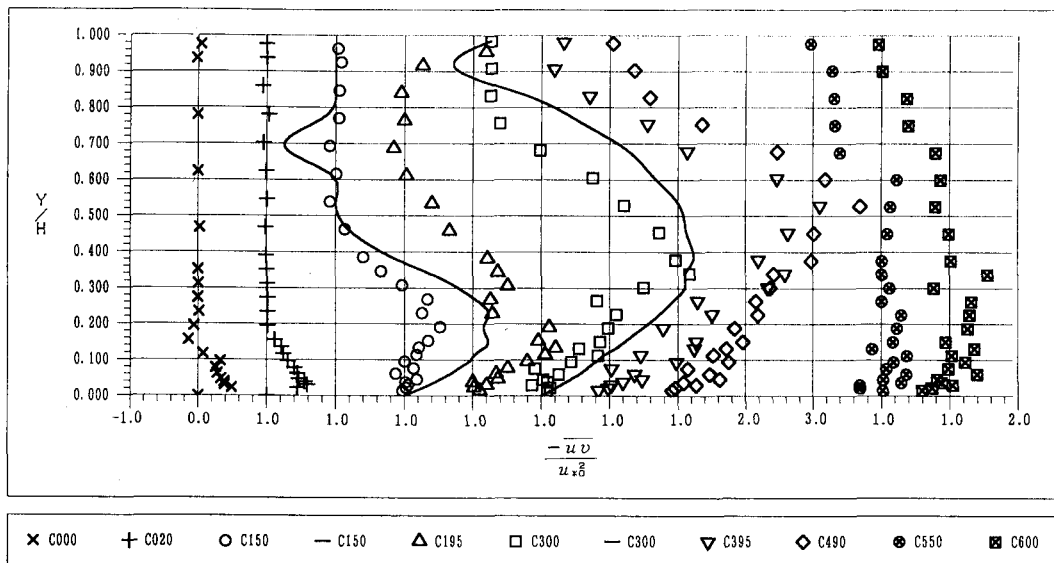


図-5 水路中央線上のレイノルズ応力分布の流下方向変化

に向かって増大し、底面より離れたところで極大値をもち、それ以上の高さでは水面に向かって減少することである。またこの極大値は流下に伴って増大していくが、X=400cm以降では減少し、一様部に入って、底面より水面に向かって単調減少の形に近づいていく。

圧力勾配のある場合の平衡境界層に対して、Mellor&Gibson¹⁰⁾は次のせん断応力分布式を与えている。

$$\frac{\tau}{\tau_0}=1-\beta\left(\frac{1}{m}+1\right)\left[\eta F-\frac{\kappa}{\kappa+\gamma}\int_0^{\eta}F d\eta_1-\frac{\kappa\gamma}{\kappa+\gamma}F\int_0^{\eta}F d\eta_1\right.\\ \left.+\frac{(\kappa-\gamma)\gamma}{\kappa+\gamma}\int_0^{\eta}F^2 d\eta_1\right]+\beta\left[2\int_0^{\eta}F d\eta_1-\gamma\int_0^{\eta}F^2 d\eta_1\right] \quad (7)$$

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

本実験では前節で検討したように平衡領域にはないが、表-1に示した実測値と表-2の値を用いて式(7)により τ/τ_0 を計算した。その結果の一例をX=150と300cmのものについて図-5に実線で示した。実線はせん断応力が壁面から少し離れた所で最大値をとり、その高さと大きさが増していく傾向を示している。

理論式(7)を用い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。

表-2 ΔとUcの変化率

X (cm)	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

3.4 乱れ強度分布の流下方向変化

水路中央線上の乱れ強度 u' 及び v' の鉛直分布の流下方向変化を図-6,7に示す。図中の3本の線の両側は柵津³⁾らによる開水路2次元等流の測定範囲を示し、中央の実線は柵津らによって次式で与えられている。

$$u' / u_* = D_u \exp(-\lambda_u y / H) \quad D_u=2.26, \lambda_u=0.88 \quad (8)$$

$$v' / u_* = D_v \exp(-\lambda_v y / H) \quad D_v=1.23, \lambda_v=0.67 \quad (9)$$

図-7,8よりわかることは流下とともに乱れが大きくなり、図-5に示したレイノルズ応力の発達と同様、底面の乱れは2次元等流の値とほぼ一致するが、最大値は $u' / u_* \approx 3.5$ 、 $v' / u_* = 2$ となり乱れの強度が著しく大きくなるといえる。この傾向はBradshaw⁵⁾が示した逆圧力勾配境界層の場合の結果と一致する。一方、開水路における加速流の場合¹¹⁾は $\beta < 0$ であり式(8),(9)に比してかなり小さくなることが示されている。

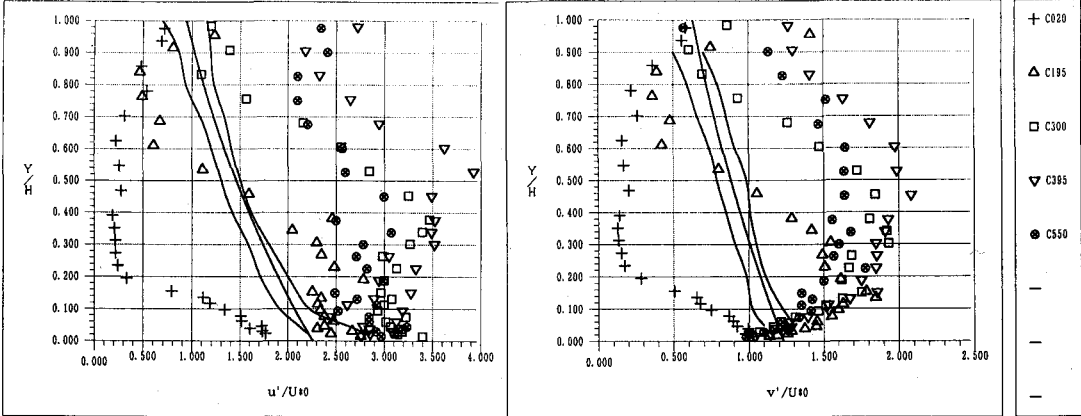


図-6 乱れ強度 u' / u_* 分布の流下方向変化 図-7 乱れ強度 v' / u_* 分布の流下方向変化

4. 水理量の横断面内分布

シリーズV,Wにおいては表-3に示す条件で測定を行った。表中Rは径深、Q1,U1は柵による流量と断面平均流速、 u_{*s} は側壁の平均摩擦速度、 $Q\sigma$, $U\sigma$ は速度分布の積分より求めた流量と断面平均流速。ここでは、 $X=270\text{cm}$ における結果を図-8に示す。図-8の(a)は平均速度の等値線図で $U/U_c=0.9$ から0.3まで0.1間隔で示した。なお0.95は点線で、 $U/U_c=0.8$ は太実線で示した。同図には2次流のパターンも示して

いる。図-8(b)はレイノルズ応力 $-\overline{uv}/u_{*0}^2$ 、(c)は $-\overline{uw}/u_{*0}^2$ 、(d)は主流方向乱れ強度 u'/u_{*0} の等値線図である。(b)図は前章で述べたように最大流速の位置が壁から離れていること、(c)図も同様に側壁から離れていることがわかる。(b),(c)の最大流速位置で乱れが生成されており、その合成が(d)図に現れている。

5. おわりに

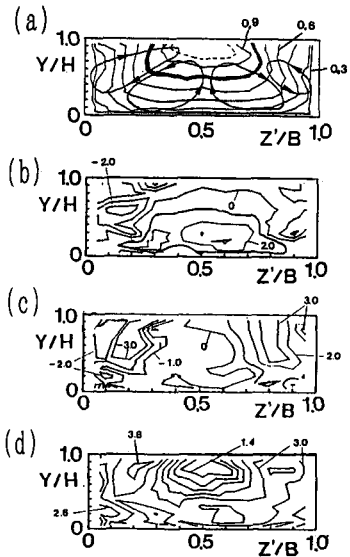
開水路漸拡流の流速分布、乱れ諸量について測定しその特性を調べるとともに、これらが圧力勾配の関数として表されることを示した。最後に、協力いただいた卒論生、和田誠一君に謝意を表す。

参考文献

- 1) 柵津家久・中川博次：一樣開水路の三次元乱流構造に関する研究、土木学会論文集，第369号/II-5, 8 9-98, 1986
- 2) 富永晃宏・江崎一博：長方形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究、土木学会論文集，第357号/II-3, 81-88, 1985
- 3) Nezu, I. and W. Rodi: Open Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer, Proc. ASCE. J. Hydraulic Eng. Vol. 112, No. 5, 335-355, 1986
- 4) Clauser, F.: Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients, J. Aero. Sci. 21, 91-108, 1954.
- 5) Bradshaw, P.: The turbulence structure of equilibrium boundary layers, J. F.M., 29, 625-645, 1967.
- 6) 浦、秋山、久保、山本：漸拡長方形断面開水路流の乱れについて、水工学論文集，34, 451-456, 1990.
- 7) 川崎、浦、秋山：漸拡長方形断面開水路の乱れと2次流、土木学会 第46回年講II、516-517, 1991.
- 8) WHITE, F.M.: Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company, New York, 1974.
- 9) Rotta, J.C.: Turbulente Strömungen, B.G. Teubner, Stuttgart, 1972. (大路通雄訳、J.C. ロッタ：乱流、岩波書店、1975)
- 10) Mellor, G.L. and D.M. Gibson: Equilibrium turbulent boundary layers, J. F.M. 24, 225-253, 1966
- 11) Cardoso, A.H., W.H. Graf and G. Gust: Steady gradually accelerating flow in a smooth open channel, J. Hydr. Res., 29, 527-543, 1991.

表-3 実験条件(V, W Series)

	V Series										W Series					
Exp. No.	AV13	AV11	AV12	2V10	3V10	3.5V10	3.5V20	4V13	4V10	2W10	3W10	3.5W20	4W10			
x(cm)	-20	0	20	90	270	355	355	440	0	90	270	355	440			
H(cm)	12.68	12.70	12.82	12.82	13.22	13.38	13.34	13.43	12.55	12.91	13.28	13.14	13.23			
B(cm)	19.5	19.7	21.5	26.9	39.7	45.7	46.0	52.3	19.7	26.6	39.5	46.0	52.5			
B/H	1.54	1.55	1.68	2.08	3.00	3.42	3.45	3.89	1.57	2.06	2.97	3.50	3.97			
R(cm)	5.51	5.55	5.85	6.59	7.94	8.44	8.44	8.87	5.52	6.55	7.94	8.36	8.80			
Q1(cc/s)	9821	9543	9419	9600	9623	9684	9427	9853	9635	9643	9735	9490	9411			
U1(cm/s)	39.72	38.14	33.14	27.82	18.34	15.84	15.36	13.74	38.97	28.08	18.56	15.70	13.55			
Uc(cm/s)	43.35	40.50	34.17	33.13	25.83	27.49	28.00	22.44	42.39	35.20	27.38	28.70	22.15			
u_{*0} (cm/s)	1.986	2.086	1.570	1.208	0.826	0.793	0.838	0.825	1.734	1.154	0.818	0.862	0.821			
u_{*s} (cm/s)	1.885	1.791	1.431	1.191	0.594	0.527	0.524	0.416	1.868	1.200	0.650	0.598	0.485			
Qσ(cc/s)	9202	9039	7730	8941	8514	9359	8724	9132	9092	8287	8884	9907	9367			
Qσ/Q1	0.937	0.947	0.821	0.931	0.865	0.964	0.925	0.946	0.944	0.983	0.913	1.050	0.995			
Uσ(cm/s)	37.22	36.12	28.04	25.73	16.22	15.27	14.21	13.00	36.71	27.04	18.94	16.49	13.49			
Uσ/Uc	1.16	1.12	1.12	1.29	1.59	1.80	1.97	1.73	1.15	1.30	1.62	1.74	1.64			



$X=270\text{cm}$, $B/H=3.0$

図-8 横断面内諸量の等値線図

(a) U/U_c , (b) $-\overline{uv}/u_{*0}^2$

(c) $-\overline{uw}/u_{*0}^2$, (d) u'/u_{*0}