

開水路漸拡流の水利特性について

Flow Characteristics of a Gradually Expanded Rectangular Open Channel Flow

鬼束幸樹* 浦 勝** 秋山壽一郎*** 政徳克志****

By Kouki ONITSUKA, Masaru URA, Juichiro AKIYAMA and Katsushi SEITOKU

Flow field measurements of gradually expanded rectangular open channel flows are measured by a Hot-film anemometer. Mean velocity profiles along spanwise direction can be expressed by Goertler's equation for 2-D jets. Mean velocity profiles along vertical direction can be expressed by the log-wake law. The wake strength parameter Π increases in flow direction. Maximum turbulence intensity regions are near half-depth and quarter-width. The trend of form factors against total divergence is similar to Gibson's results of 2-D diffusers.

keywords : turbulence, open channel flow, form factor

1. はじめに

河川の基本的水利特性を把握するため、河川を最も単純化した等流の研究が盛んに行われ、その特性はかなり明らかにされている。断面の変化する開水路流に関しては、断面急変流²⁾については幾分明らかにされているものの、断面の緩やかに変化する流れの研究は非常に少なく、その水利特性に関しては不明な点が多い。一方、従来から行われている拡幅流れの代表的なものに、噴流³⁾やdiffuser⁴⁾があり、それらの水利特性はかなり解明されている。また、最近、「多自然型川づくり」に象徴されるように、河道形態は以前のように変化のない直線状河道よりも、変化のある河道の方が生態系によいのではないかという関心が高まってきている。このように、水文学的側面のみならず、生態環境学的側面からも断面の変化する流れの特性を明らかにすることが必要である。そこで、著者らは断面の緩やかに変化する開水路流を解明する第一歩として、長方形断面が流下方向に直線的にかつ緩やかに拡がる開水路漸拡流の実験的研究を行った。

本報告では噴流・diffuserおよび開水路等流に関する知見をふまえて、開水路漸拡流の剥離の予測、形状損失係数、水面形状、摩擦速度、流速分布および3次元流況の変化などの水利特性について検討したものである。

*	学生員	九州工業大学工学研究科博士後期課程	(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)
**	正会員 工博	九州工業大学工学部設計生産工学科	
***	正会員 Ph.D	九州工業大学工学部設計生産工学科	
****	学生員	九州工業大学工学研究科博士前期課程	

2. 剥離の予測

水路幅の変化が大きいと、流線が側壁からはがれる剥離現象が生じる。漸拡流を剥離が生じない拡幅流れと定義すると、まず、剥離の予測をする必要がある。漸拡水路を図-1のように定義すると、2次元diffuserの研究によれば、流れに影響を与える因子は、

- (a) 拡幅角 2θ
- (b) 変化部の長さ ℓ と入口幅 B_0 の比（長さ比） ℓ/B_0
- (c) 入口の流速分布

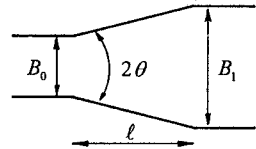


図-1 漸拡開水路の定義

であることが知られている⁴⁾。発達した乱流状態で流入するdiffuser内における流れの状態は図-2のようになる。a-a線より小さい 2θ の場合は剥離を生じず、a-a線とb-b線の間は時間的および場所的に不安定な局所的剥離を生じ、b-b線とc-c線の間は完全に剥離を生じるが、比較的長い不規則な時間間隔で剥離する壁面が交替し、c-c線より大きい 2θ の場合は噴流の状態になる⁵⁾。一方、開水路流において、芦田²⁾は長さ比が0.270~3.87、 2θ が $1\sim180^\circ$ の範囲で実験を行い、 2θ が $16^\circ\sim20^\circ$ 以上で剥離を生じ、 $2\theta>60^\circ$ で剥離領域の特性がほぼ拡幅角に対し一定の状態になると示している。本実験装置の長さ比と 2θ を表-1に示し、さらに、図-2に白丸で示している。本実験流れでは、剥離は生じなかった。これらより、開水路漸拡流はおおよそ $2\theta<16^\circ$ の流れと定義できると考えられる。

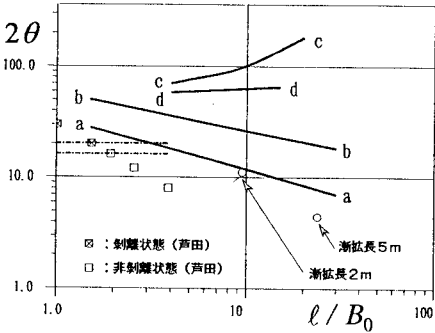


図-2 拡幅角と剥離の関係

表-1 長さ比と拡幅角

	ℓ/B_0	2θ
2m	9.52	11.10
5m	23.81	4.47

3. 実験装置および実験条件

3. 1 実験装置

実験水路として、図-3に示すように、長さ2050cm、水路幅60.0cmの勾配可変水路の内部に、アクリル板を用いて長さ600cm、幅21.0cmの助走部と、それに続く漸拡部を作成した。漸拡部は

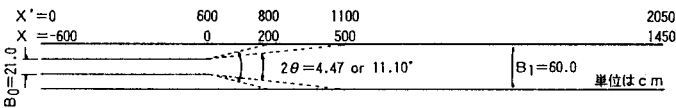


図-3 漸拡水路の平面図

長さ2 mと5 mとの2つがあり、両者とも幅21.0cmから60.0cmに直線状に拡幅する。漸拡部の長さ比と拡幅角 2θ の関係は既に表-1で示した。

3. 2 実験条件

漸拡部の下流側でFroude数が0.175の等流状態に設定した実験を行った。流量は $Q=6600\text{cc/s}$ 、水路床勾配は $\sin\Theta=1/11000$ である。測定は、水面形測定（Lシリーズ）、水路中心線上流速測定（Cシリーズ）および横断面内流速測定（Rシリーズ）の3つを行った。Lシリーズではポイントゲージとレベルを用いて水路全領域において水路床高および水位を測定し、Cシリーズでは2方向Hot-film流速計を用いて水路中心線上の流速分布を鉛直方向に約20点、流下方向に15~16断面において測定し、Rシリーズでは2方向Hot-film流速計を2回使用することで3方向流速を右岸側横断面内の約400点について、流下方向に6つの横断面において測定した。なお、サンプリング間隔0.01sec、サンプリング時間40.96secとした。

4. 実験結果および考察

Cシリーズの水理量を表-2に、Rシリーズの水理量を表-3に示す。ただし、 X' は水路入口からの距離、 X は漸拡部入口からの距離、 h は水深、 B は水路幅、 $Re = 4Rv / \nu$ はReynolds数、 $Fr = v / \sqrt{gR}$ はFroude数、 R は径深、 v は断面平均流速、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である。

表-3 R 2 及び R 5 の水理諸量

R 2						R 5					
NAME	X' (cm)	X (cm)	h (cm)	B (cm)	Re (-)	Fr (-)	NAME	X' (cm)	X (cm)	h (cm)	B (cm)
30R2	580	-20	6.88	21.0	83900	0.72	30R5	580	-20	6.68	21.0
40R2	632	32	7.23	26.7	69300	0.51	40R5	680	80	7.24	25.5
50R2	668	68	7.50	34.0	60700	0.37	50R5	790	190	7.47	32.7
60R2	732	132	7.47	46.0	47000	0.25	60R5	930	330	7.57	43.0
70R2	796	196	7.41	57.2	39300	0.20	70R5	1090	490	7.65	57.8
80R2	880	280	7.62	60.0	37800	0.19	80R5	1300	700	7.80	60.0

表-2 C 2 及び C 5 の水理諸量

C 2				C 5			
X' (cm)	X (cm)	B (cm)	h (cm)	X' (cm)	X (cm)	B (cm)	h (cm)
200	-400	21.0	7.42	200	-400	21.0	7.51
400	-200	21.0	7.13	400	-200	21.0	7.03
500	-100	21.0	7.01	500	-100	21.0	6.84
580	-20	21.0	6.86	580	-20	21.0	6.81
610	10	22.9	7.07	625	25	22.0	7.03
620	20	24.4	7.27	650	50	23.6	7.19
640	40	28.5	7.49	700	100	26.7	7.41
680	80	36.9	7.61	795	195	33.1	7.42
720	120	43.0	7.50	900	300	40.9	7.50
760	160	51.2	7.58	1000	400	48.2	7.68
796	196	57.2	7.52	1090	490	56.7	7.70
850	250	60.0	7.56	1225	625	60.0	7.71
900	300	60.0	7.58	1350	750	60.0	7.77
1000	400	60.0	7.74	1600	1000	60.0	7.85
1400	800	60.0	7.95	1800	1200	60.0	8.03
1800	1200	60.0	8.02				

4. 1 粗度係数の推定

漸拡流は流下に伴い流速が減速し、底面せん断応力は流下方向に減少する。本実験水路において等流状態の水面形測定より粗度係数を求めると、 $n=0.011$ となるが、この値が漸拡流において妥当か否か検討してみる。Rシリーズより求められた流速分布において、底面より鉛直方向 y 、側壁より水平方向 z の内層($50 < yU_* / \nu$, $y/h \leq 0.2$ および $50 < zU_* / \nu$, $z/B \leq 0.1$)で、式(1)の対数則¹⁾を適用させて摩擦速度 U_* を算出した。

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

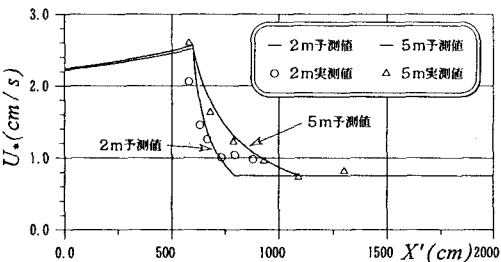


図-4 摩擦速度 U_* の流下方向変化

図-4に式(1)の対数則から求められた漸拡長2 mおよび5 mの場合の摩擦速度の潤辺平均値および粗度係数を摩擦速度で表した値の流化方向変化を示す。両者の摩擦速度は良好に一致し、等流の水面形測定から求められた粗度係数を本実験のような流れに当てはめることが可能であることがわかる。

4. 2 エネルギー損失および水面形の予測

開水路流のエネルギー損失は、流体と壁面とのせん断による摩擦損失と断面変化によって生じる形状損失とがある。急拡流では摩擦損失より形状損失が支配的であるが、漸拡流では形状損失と摩擦損失との定量的把握はあまり明らかにされていない。上流側および下流側の添字をuおよびdとし、静水圧分布を仮定するとエネルギー式は次式となる。

$$\frac{\alpha_u v_u^2}{2g} + z_u + h_u = \frac{\alpha_d v_d^2}{2g} + z_d + h_d + h_{ge} + h_f \quad (2)$$

ここに、 α はエネルギー補正係数、 h_{ge} は形状損失、 h_f は摩擦損失である。Rシリーズより得られた流速分布より、実測エネルギーを知ることができる。図-5に漸拡長5 mの水面形

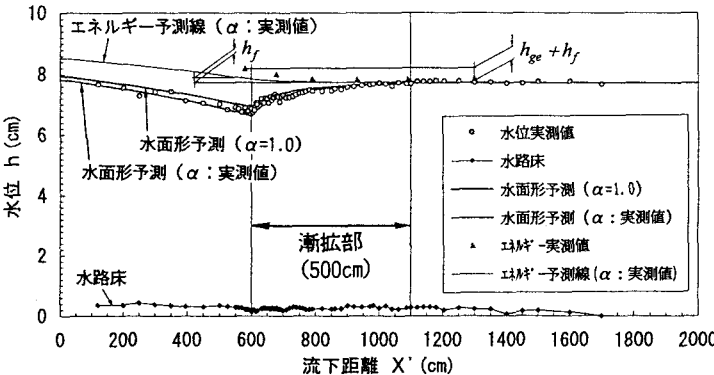


図-5 漸拡長5 mの水面形およびエネルギー線

を○で、実測エネルギーを▲で、水路床を◆で示している。実測エネルギーは流下方向に減少していくが、この損失には摩擦損失及び形状損失の両者が含まれている。そこで、実測した α を用い、4次のRunge-Kutta法で次式より水面形およびエネルギー線を予測した。

$$\frac{dh}{dx} = \left(\sin \Theta - n^2 R^{-4/3} \left(\frac{Q}{Bh} \right)^2 + \frac{\alpha Q^2}{g B^3 h^2} \frac{dB}{dx} \right) / \left(\cos \Theta - \frac{\alpha Q^2}{g B^2 h^3} \right) \tag{3}$$

ただし、粗度係数 n は等流の水面形測定より求められた $n=0.011$ を用いた。(3)式は形状損失を含まず、摩擦損失のみを含んでいる。よって、実線で示した予測エネルギー線と実測エネルギーとの差は形状損失を示すことになり、漸拡部上流の断面平均流速 v_0 および下流の断面平均流速 v_1 を用い、次式によって形状損失係数を算出することができる。

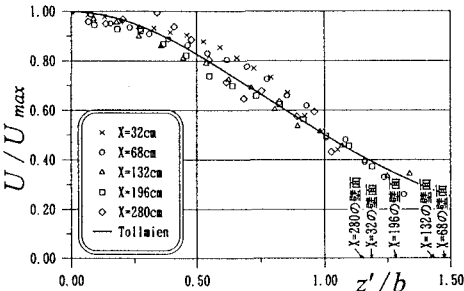
$$f_{ge} = h_{ge} \left(2g / (v_0 - v_1)^2 \right) \tag{4}$$

漸拡長 2 m では $f_{ge}=0.338$ で漸拡長 5 m では $f_{ge}=0.215$ であった。図－6 に拡幅角 2θ に対する f_{ge} を Gibson の拡大比 3.0 の diffuser の結果と共に示す。本実験結果は diffuser の結果と類似しているが、多少大きな値を取っている。

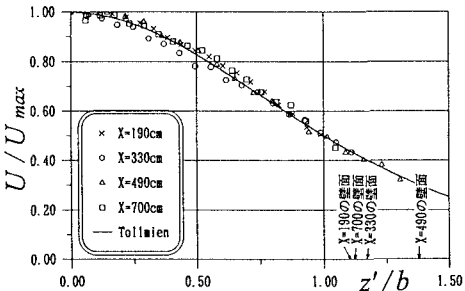
水面形状を予測するには形状損失および摩擦損失の両者を考慮して行う必要があるが、図－6 中に実線で示す通り、形状損失を無視し $\alpha=1.0$ として計算しても、かなり良好に水面形状が予測できる。

4. 3 主流速の水平方向分布

主流速分布は内層において、対数則で良好に表現できるが、流れの大半を占める外層の主流速分布はもはや対数則では表現できない。最大主流速 U_{max} と半値半幅 b によって無次元化した $y/h=0.8$ での主流速の水平方向分布を図－7 (a), (b) に示す。



図－7 (a) 漸拡長 2 m の主流速の水平方向分布



図－7 (b) 漸拡長 5 m の主流速の水平方向分布

但し、R 2 の $X=-20\text{cm}$ および R 5 の $X=-20, 80\text{cm}$ については最大主流速の半値まで測定していないため図中には示していない。同図には Goertler の 2 次元噴流の値も実線で示している。おおよそ $X=130\text{cm}$ より下流では Goertler の式によって表現できることがわかる。又、2 次元噴流のポテンシャルコアの長さは、

$$\ell_p = 5.85 B_0 \tag{5}$$

と実験的に知られており³⁾、本実験に用いるとコアの長さは 123cm となる。本実験での漸拡流は水路側壁によって流れの拡がり拘束されるので、式(5)は厳密には成立しないが、一つの指標として用いることができるであろう。

4. 4 主流速の鉛直方向分布

主流速の水平方向分布は側壁の拘束が緩いため、自由せん断乱流的な挙動を示したが、鉛直方向分布は底面の影響を強く受けるので、従来の開水路流と同様に壁面乱流として取り扱う。漸拡長 2 m での内層において、

式(1)の対数則を適応した流速分布を図-8に示す。内層では対数則は良好に成立し、外層では対数則からずれを生じている。圧力勾配の存在する流れでは外層を含む流速分布は次式のlog-wake則が用いられている⁶⁾。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y U_*}{\nu} + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2 y'} \right) \quad (6)$$

但し、 y' はwake頂点の y 座標である。外層において式(6)を適用することによって求めた Π の流下方向変化を図-9に示す。但し、流下方向距離は漸拡長 ℓ で無次元化されている。漸拡長2mおよび5m共に、助走部では Π は減少し、漸拡部では急増した後に減少する。一般に、加速流では Π は負で、減速流では Π は正の値をとるので、流速が減速される漸拡部では Π が急増したと思われる。さらに、漸拡部下流側では流速分布が等流の分布に近づいていくので、 $\Pi \approx 0$ への収束傾向があるとと思われる。

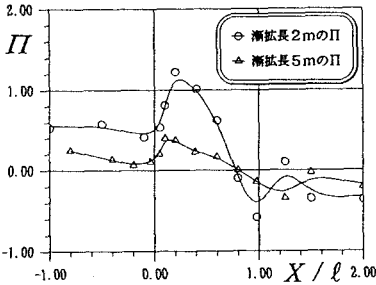


図-9 Π の流下方向変化

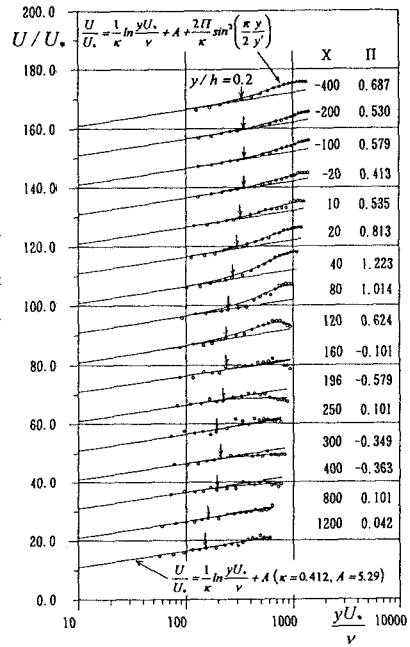


図-8 5mの主流速鉛直方向分布

4. 6 三次元流況変化

図-10に最大主流速 U_{max} で無次元化された漸拡長5mの主流速分布を示す。最大主流速の80%を示す太線は、漸拡部流入直前の $X=-20$ cmで側壁および底面付近に存在し、角張った形状であるが、漸拡部に流入すると丸みを帯びつつ側壁から離れていく様子が観察される。よって、速度勾配は壁面付近だけでなく、壁面から少し離れた領域でも大きくなっていく。また、流下に伴いアスペクト比が大きくなっても、最大流速点は水面より降下したままで、漸拡部より下流の $X=700$ cmにおいて水面付近に到達する。図-11に2次流ベクトルを示す。但し、2次流速には、(a)拡幅角による補正、(b)X型Hot-filmのセンサ間隔による補正、(c)連続条件による補正⁷⁾がなされている。 $X=-20$ cmで隅角部付近に存在する底面渦は、流下に伴い鉛直方向の規模は半水深規模のままで、水平方向に伸張していく。図-10の主流速分布と照合すると、2次流の向きに等流速線が張り出していることから、主流速分布は2次流によって変形を受けていると推察できる。その為、最大流速点の降下現象が生じていると考えられる。図-12に乱れエネルギー $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2) / 2U_*^2$ の分布を示す。 $X=-20$ cmでは乱れエネルギーの強い部分が底面および側壁付近であったものが、流下に伴い次第に水路中央部に移動していく様子が観察される。図-10の流速分布と照合すると、乱れエネルギーの大きな領域は速度勾配の大きな領域とほぼ一致する事が分かる。

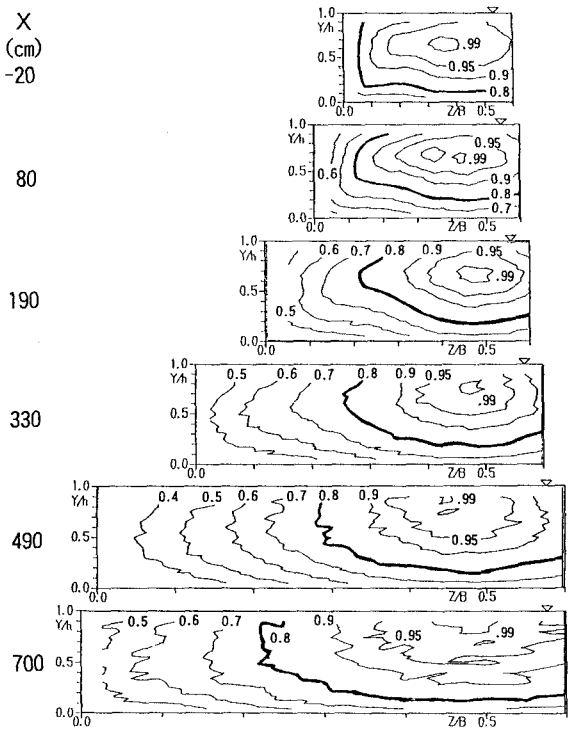


図-10 漸拡長5mの主流速分布

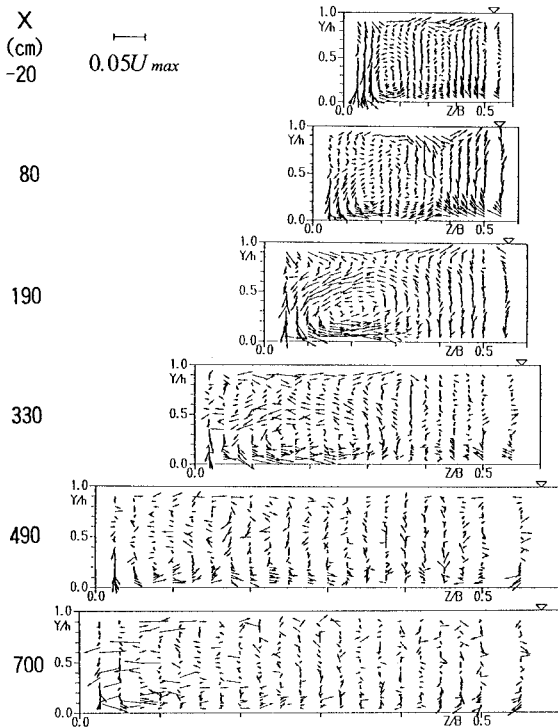


図-1 1 漸拡長 5 m の 2 次流ベクトル

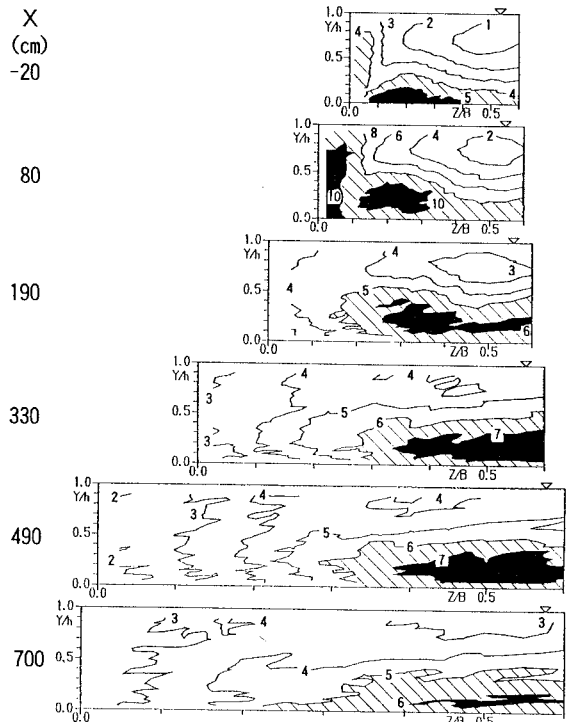


図-1 2 漸拡長 5 m の 乱れエネルギー

5. 結論

漸拡流の形状損失係数はdiffuserのそれと類似している。水面形状は形状損失を無視し、エネルギー補正係数を1.0として、一次元漸拡流の式を用いて良好に予測することができる。主流速分布は水平方向および鉛直方向ともに、内層において対数則で表現できる。外層においては、水平方向分布は2次元噴流式で表現でき、鉛直方向分布はlog-wake則で表現できる。三次元流況としては、主流速分布は水路中央で尖った形状となり、等値線は丸みを帯びた形状となる。底面渦は水路幅の拡幅に伴い水平方向に伸張して主流速分布を変形させ、最大流速点の降下現象を生じさせていると思われる。乱れのエネルギーの強い領域は壁面より多少離れた速度勾配の大きな帯状の領域に存在する。

謝辞

本研究を行うに当たり、実験および解析に協力頂いた大学院生、松岡定和氏に謝意を表す。又、多くの実験に協力頂いた卒論生、堅田憲司、堺博幸、坂本真、峯崎晃洋および技術補佐員の白神晴崇の諸氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) Iehisa Nezu and Wolfgang Rodi : *Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer*, JHE, vol.112, pp.335-355, 1986,
- 2) 芦田和男：開水路断面急拡部の水理とその適用に関する研究，京大防災研年報，第5号，pp.223-251，1962，
- 3) N.Rajaratnam：噴流，1976，
- 4) S.J.Kline：On the Nature of Stall, Journal of Basic Eng., pp.305-319,1959，
- 5) 田古里哲夫・荒川忠一：流体力学，1989，
- 6) A.H.Cardoso, W.H.Graf and G.Gust：Steady gradually accelerating flow in a smooth open channel, Journal of Hydraulic Research, vol.29, pp.525-543, 1991，
- 7) 鬼東幸樹・浦勝・秋山壽一郎・政徳克志：開水路横断面内流速測定自動化とX型Hot-filmによる2次元流測定値の補正，水工学論文集 第38巻，pp.715-720，1994