

台形断面開水路流れの水理特性について

今本 博健・石垣 泰輔・西田 雅

EXPERIMENTAL STUDY ON THE TURBULENT FLOW IN A TRAPEZOIDAL OPEN CHANNEL

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Masaru* NISHIDA

Synopsis

In this paper it is the objectives to investigate the effect of the channel boundary on the mean and turbulence structure in a trapezoidal open channel. Precise velocity measurements were carried out by using a Laser Doppler Anemometer, and two kinds of flow visualization techniques were used to make the three-dimensional structure of turbulent flow visible in several trapezoidal open channels.

Secondary flow and its induced secondary flow cells were directly visualized by the refined tracer method. Some attractive photographs are shown in this paper. The results show that secondary flow cells affect on the distributions of the velocity and the boundary shear stress.

1. はじめに

台形断面開水路流れを対象とした研究は、1) 水路の通水能に関する研究、2) 堤体斜面に作用する掃流力に関する研究、3) 壁面せん断力分布に関する研究、4) 乱流構造に関する研究に分類することができる。通水能に関するものは、最適断面形状を決定する方法に関するものであり、掃流力の分布に関する Olsen & Florey¹⁾ の研究結果とともに Chow²⁾ により示されている。壁面せん断力分布に関するものは、Ippen & Drinker³⁾ の湾曲水路における計測結果および Ghosh & Roy⁴⁾ の直線水路におけるものが挙げられ、乱流構造に関しては、富永ら⁵⁾ の研究が挙げられるが、流れの三次元性等の未解明な点が多く残されている。本研究では台形開水路流れの水理特性を解明する基礎として、流れの三次元的な構造について検討することを目的とし、上記の従来の研究が対象としていない側壁勾配の緩やかな台形開水路を含んだ一連の実験結果に基づく検討を行っている。

流れの三次元性を検討する場合に重要な現象の一つが二次流であり、Nikuradse が平均速度分布に見られる二次流の影響を実験結果で示し、Prandtl が二次流を2種に分類して以来、実験的・理論的研究が多くなされているが、長時間平均場での取り扱いが多く、二次流の発生位置の揺らぎや間欠性等の特性が平均化により隠され、非常に捉えにくいものとなっている。このように平均場で二次流を検討することは難しく、その特性を検討するには変動場の計測を行なう必要があるため、著者らは LDA による速度3成分同時計測および種々の流れの可視化法を用いて長方形開水路を対象として実験的検討を行ってきた⁶⁾⁻¹²⁾。その結果、Fig. 1(a) に示すような三次元構造の存在を指摘し、Fig. 1(b) の長方形開水路と台形開水路に見られる二次流セル（二次流により形成される流下方向軸を有する渦構造を意味し、以下この渦構造を二次流セルと呼ぶ）の横断面内配列の変化を推定してきたが、二次流を直接捉えるまでには到っていなかつ

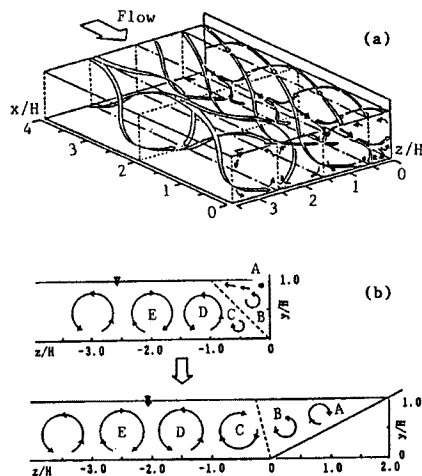


Fig. 1. Schematic illustration of secondary flow cells in a rectangular and a trapezoidal open channel (a) 3-D model and (b) secondary flow cells in cross sections.

た。本研究では、比較的簡単な方法にて二次流を直接可視化することに成功し、その特性を検討している。実験は、6種類の台形開水路での流れを対象とし、Table-1に示す水理条件のもとで、次の4種の実験を行なった。すなわち、

- 1) 流れの三次元性を水面流況より検討するため、カメロン効果を利用した瞬間速度場の可視化実験 (Case-C1~C6),
- 2) 二次流とそれにより形成される二次流セルの横断面内直接可視化実験 (Case-F1~F6),
- 3) LDAを用いた乱れ計測法による平均および乱れ速度分布計測 (Case-L1~L6),
- 4) 平均壁面せん断力分布計測 (Case-S1~S6) である。

Table 1. Hydraulic conditions.

Case	Slope of bank $\cos \theta$	Slope of bed I_b	Water depth H	Discharge Q (l/s)	Discharge velocity U_m (cm/s)	Friction velocity U_f (cm/s)	Reynolds number $R_e = U_m R / \nu$	Froude number $F_r = U_m / \sqrt{gR}$
C1	0.0	1/400	4.00	8.54	54.87	2.82	15000	0.88
C2	0.5	1/400	3.98	7.38	54.25	2.81	14500	0.88
C3	1.0	1/400	3.92	8.08	57.85	2.84	15300	0.96
C4	2.0	1/400	3.99	6.91	55.73	2.72	13900	0.95
C5	3.0	1/400	3.98	5.63	52.12	2.64	12300	0.92
C6	4.0	1/400	3.99	4.52	49.31	2.50	10500	0.92
F1	0.0	1/800	4.07	1.56	9.81	2.03	2900	0.17
F2	0.5	1/800	4.00	1.36	9.97	2.00	2900	0.18
F3	1.0	1/800	4.02	1.40	9.96	2.01	3000	0.18
F4	2.0	1/800	4.01	1.24	10.00	1.95	2700	0.18
F5	3.0	1/800	3.98	1.07	10.01	1.87	2600	0.19
F6	4.0	1/800	4.04	0.90	9.90	1.78	2300	0.20
L1	0.0	1/400	4.01	2.06	25.62	1.40	7700	0.48
L2	0.5	1/400	4.02	3.12	36.95	2.06	9300	0.69
L3	1.0	1/400	4.00	2.85	32.22	1.79	8600	0.60
L4	2.0	1/400	4.01	3.73	38.69	2.18	9600	0.72
L5	3.0	1/400	4.00	3.80	36.51	1.93	9300	0.69
L6	4.0	1/400	4.00	3.96	42.53	2.21	9200	0.84
S1	0.0	1/400	4.01	8.60	59.12	2.78	22500	1.03
S2	0.5	1/400	4.01	8.60	59.12	2.78	22500	1.03
S3	1.0	1/400	3.98	8.04	57.44	2.65	22000	1.01
S4	2.0	1/400	4.00	6.63	57.15	2.50	21600	1.04
S5	3.0	1/400	4.00	5.34	49.42	2.23	17500	0.93
S6	4.0	1/400	3.99	4.25	48.30	2.33	15400	0.96

2. 流れの三次元性および二次流

開水路流が三次元性を有することは、乱流状態を維持するための重要な特性であり、その解明には流れの可視化法が主要な方法として用いられてきている。本研究でも二次流の特性を検討する方法として流れの可視化法を用いているが、その方法は直接法と間接法に分類することが出来る。

二次流は主流に対して二次的な速度成分を有する流れであり、開水路流れのように流下方向の速度成分 u が卓越する流れでは鉛直方向成分 v と横断方向成分 w で規定される流れである。二次流の直接可視化法は、 v と w を同時に捉える方法であり、流れの横断面内の流況を可視化することが必要である。一方、間接法は流下方向速度成分 u のみか、 v あるいは w の2成分を対象として行なった水平断面あるいは縦断面内流況の可視化結果を用いる方法である。ここでは、自由水面上における流下方向速度成分 u の瞬間平面分布を可視化する間接法と、中立粒子を用いた直接法により得られた結果を用いて二次流の特性を検討する。

2.1 瞬間速度分布の可視化結果による検討¹³⁾

(1) 実験装置及び方法

ここで用いた方法は、2台のステレオカメラを用いたステレオ撮影法の一つであり、水面に散布したトレーサの微小時間内の移動距離が、実体視を行なう際の視差となって速度が高低差として可視化されるカメロン効果を利用したものである。本実験では、水面より2.04 m上方に2台のカメラ（Nikon F3, 50 mm, $f/1.2$ ）を16 cmの間隔で設置し、下流側のカメラを0.05秒先行して撮影するという条件を用いた。アルミ粉末を塗布したおが屑のトレーサを500 Wのハロゲンランプで照明し、絞り $f/2.8$ 、露光時間 $T = 1/500$ として各々のケースについて15組のステレオ撮影を行なった。各ケースについて1組を航空写真測量用の図化機（WILD AVIOMAP AMH）にて実体視し、詳細な等高線を専門家に依頼して図化した。また、その他の可視化結果については、簡易式実体図化機を用いた速度の極大部分に相当する峰状に観察される部分（以下では峰線部と呼ぶ）の発生位置に関する検討を行っている。なお、実験に用いた水路は幅39 cm、長さ13 mの亚克力製水路に塩化ビニル製の三角形断面斜面を設置して台形水路としたものである。

(2) 速度分布特性

Fig. 2は、カメロン撮影による表面流速の等速度線図を $\cot \theta = 0, 1, 3$ のケースについて示したものである。各ケースに共通の特徴として、横断方向に高速部（図中の着色部）と低速部が交互に並んでいるのが見られ、これらは流下方向に連なっている。このような特徴は流れの組織的構造（渦構造あるいは二次流構造）と関連するものである。低速部は下方からの低速流体の上昇を示すものであり、逆に、高速部では流体の降下位置を示す、との推測が可能である。また、流下方向測線に沿って1 cmピッチで速度を数値化し、その平均をとることにより得られた水面での平均速度 u およびその標準偏差として得られる乱れ強さ u' の横断分布を併示している。この縦断方向の平均値は、時間平均にほぼ等しいものと考えられる。分布形は波状を呈しており、これは先に示した速度分布の非一様性が、組織立ったものであることを示唆している。一方、乱れ強さについて見ると、多少のばらつきはあるものの、やはり波状に分布し、鉛直側壁から水深程度離れた位置付近、法尻上および側壁斜面上で大きな値を示しているのが特徴的である。

図に示されるように流れは三次元的な挙動を示すが、その中に見られる組織立った構造について、峰線の発生位置・流下方向長さ l ・横断方向間隔 s の頻度分布および確率分布の整理結果（Fig. 3）を用いて検討する。図の上段に示した発生位置の頻度分布を見ると、発生位置は全くのランダムではなく、ある間隔を置いて集中した波状分布を示すことが確認される。長方形断面の場合（上段・左）、側壁（ $z/H = 0$ ）より水深の2倍程度離れた位置のピークよりほぼ水深の2倍の間隔を置いてピークの存在が認められ

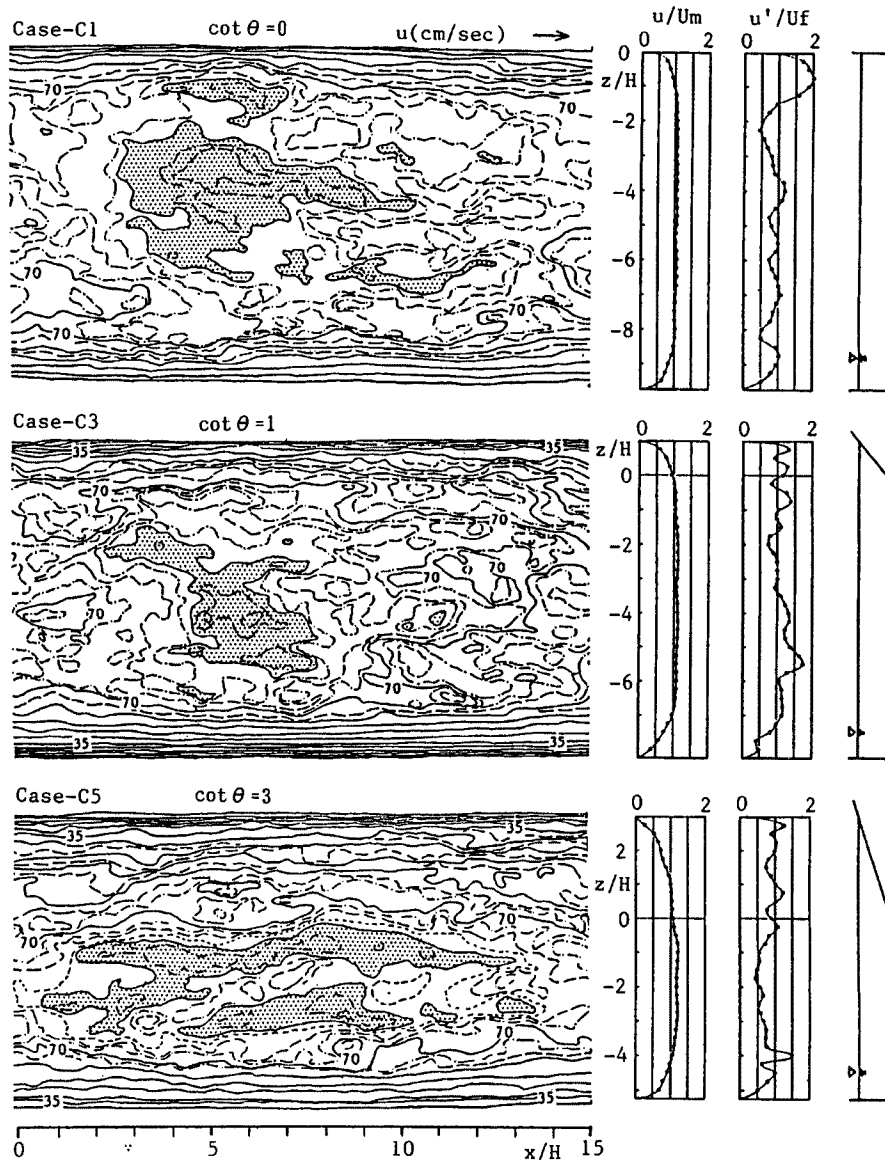


Fig. 2. Instantaneous distribution of longitudinal velocity on the water surface (left-hand side) and lateral distribution of normalized mean velocity, u/U_m , and normalized turbulence intensity (right-hand side).

る。これに対して台形断面の場合には、側壁法尻に相当する位置 ($z/H = 0$) を中心に側壁側・水路中央側の両側に水深のほぼ 2 倍の間隔でピークが見られる。また、 $z/H = 0$ 近傍の分布は長方形断面の結果に比してより明確なピーク位置の判別が可能であり、このことより流れの構造変化が示唆される。

峰線の流下方向長さ ℓ および横断方向間隔 s を水深 H で基準化したものの分布を、それぞれ、中段および下段に示す。峰線長さは組織的な構造の流下方向スケールを表わすものの一つであり、図に示した各ケースの平均値が側壁勾配が緩やかになるにつれて増加するという結果は、そのスケールの増大を示している。分布形について見ると、図に併示した正規分布と対数正規分布との比較より後者の分布形が良好な一致を示しているが、Case-C1 および C3 のモード値が 1~2 であるのに対して側壁勾配の緩やかな C5 の結果では $\ell/H = 2$ および 4 の二か所に見られると言う変化が認められる。一方、横断方向間隔 s は、いずれのケースにおいても水深の 2 倍程度の平均値を示すとともに分布形の差異も認められず、横断方向

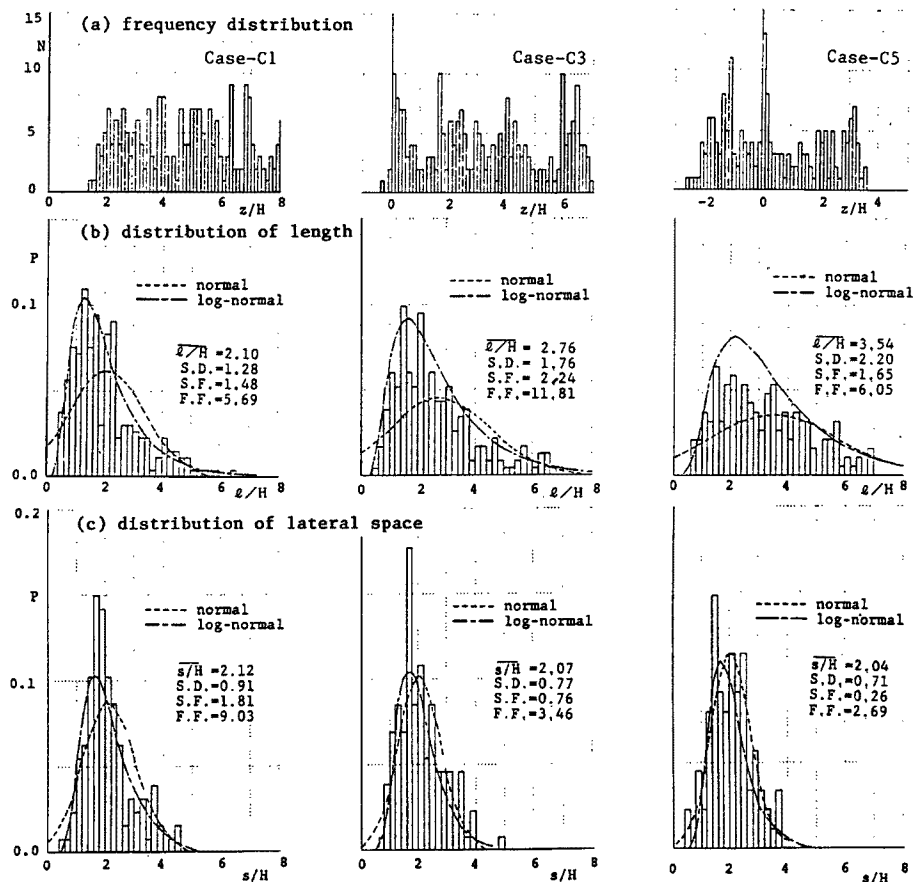


Fig. 3. Frequency distribution of observed number of high speed streaks (upper figures), and probability density distribution of length, l , (middle figures) and lateral space, s , of them. (a): frequency N , (b), (c): probability density P .

には水深スケールの挙動が卓越していると考えられる。

2.2 二次流および二次流セルの可視化¹⁴⁾

Fig. 1 (b) に示した二次流セルは、二次流ベクトルそのものが主流速に比べて非常に小さいことと、発生が間欠的でありその発生位置も揺らいでいること、などの理由により非常に捉えにくいものである。また、平均速度場の結果より推定すると、セルの揺らぐ範囲の外縁を包絡した扁平なものと認識する可能性がある。本研究では、次に示す方法で二次流を直接可視化してその特性を考察した。

(1) 実験装置及び方法

Fig. 4 は実験装置を示したものである。長さ 13 m、幅 39 cm、深さ 19.5 cm のアクリル製直線水路内に塩化ビニル製の三角形断面を有する斜面を設置して台形断面水路とし、その下流端に水位調節用堰を兼ねた観測窓を設けた。撮影には 35 mm スチルカメラ (300 mm 望遠レンズ使用) およびビデオカメラを使用し、スチルカメラでは移動撮影、ビデオカメラでは固定撮影を行なった。撮影断面は下流端の影響が及ばないことを確認し、観測窓より 2.5 m の横断面とした。トレーサとして平均粒径 0.45 mm のポリスチレン粒子を用い、移動撮影では幅約 2 cm、固定撮影では約 10 cm 区間の横断面を 1.5 kW のハロゲンランプにより照明した。なお、スチル撮影結果においてトレーサの移動方向を判別するため、写真に示すようにカメラの前面にステッピングモータを用いた回転板を設置した。この回転板を用いると図中に示すような時間間隔で露光されるため、以下に示す撮影結果では短いパスラインから長いものに向かう方向にトレーサが移動し

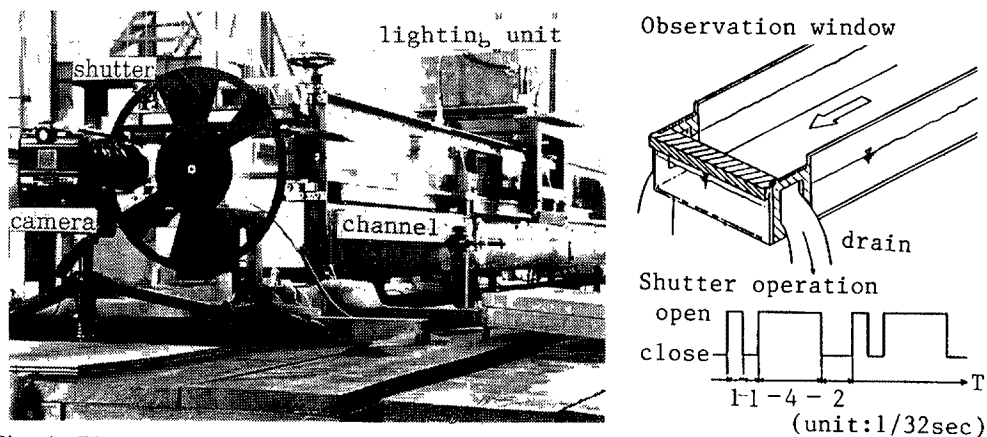


Fig. 4. Photograph of experimental set-up for the neutral buoyant tracer method and supplementary figures.

たと判別される。水力条件を Table 1 に示す。

(2) 可視化結果

二次流セルの可視化例として Fig. 5 (a) を示す。これは、2秒間のトレーサの挙動を移動撮影により捉えた結果であり、水深規模のセルが明瞭に認められる。これより、二次流セルは円形であることが確認される。一枚の写真には、このような二次流セルの発生前・発生後・消滅前・消滅後の様相が組み合わされて写し込まれており、これらの結果からセルの形成過程を知ることは出来ないが、ビデオ撮影の結果を観察すると、突然強い二次流が発生してセルを形成した後にそのセルが逆回転のセルを誘起し、やがて消滅するという過程を繰り返す。このような過程は間欠的に観察されるが、その発生位置は横断方向に揺らいている。また、長方形開水路の場合と台形開水路の結果を比較すると、台形開水路の場合の方がトレーサの動きが活発であり、隅角部の頂部まで二次流が頻繁に達し、二次流セルが形成される。また、長方形開水路の場合、Fig. 1 (b) に示した C 渦の存在は確認されるが、その強さは弱く規模も半水深程度である。ここに示した $\cot \theta = 0.5$ のケースでは、長方形開水路の場合に比べて C 渦のスケールが水深規模となってその存在も明確になるが、さらに法面勾配が緩いケースでは斜面上のセルの存在が明確になり、図に示すような結果が得られる。時計回りのセルと反時計回りのセルが明確に見られ、トレーサが時計回りのセルから反時計回りのセルに移動している。このことは、一つのセルが次のセルを誘起しながら斜面上方に伝播してゆくことを示している。また、法勾配が緩やかになるに従ってこのような傾向が認められる。このような特性はビデオ撮影結果でも確かめられた。

Fig. 5 (b) は、各ケースの撮影方向を判定しながらトレースした結果を示したものである。図より、Fig. 1 (b) で示した断面形状の変化に伴う二次流セルの構造変化の妥当性が確認されるとともに、台形開水路の隅角部の頂部まで二次流が達すること、法勾配の緩やかな場合に斜面上で二次流セルが形成されて流体の混合が活発になることなどが指摘される。

2.3 二次流セルの特性

二次流セルがほぼ円形であることが 35 mm スチルカメラで撮影された写真で明確に示されるとともに、その発生位置およびセルそのものが水路横断方向に揺らぐことを指摘した。また、法勾配の緩やかな台形開水路の流れでは、ある瞬間に発生した二次流セルがさらに新たなセルを誘起するという現象が観察されたことを報告した。ここでは、スチル写真より得られる二次流セルに関する情報を用い、セルの発生位置・大きさ・強さについて検討する。

Fig. 6 は、可視化結果において明瞭に二次流セルと認められるものについて、セルの外縁に円を当て

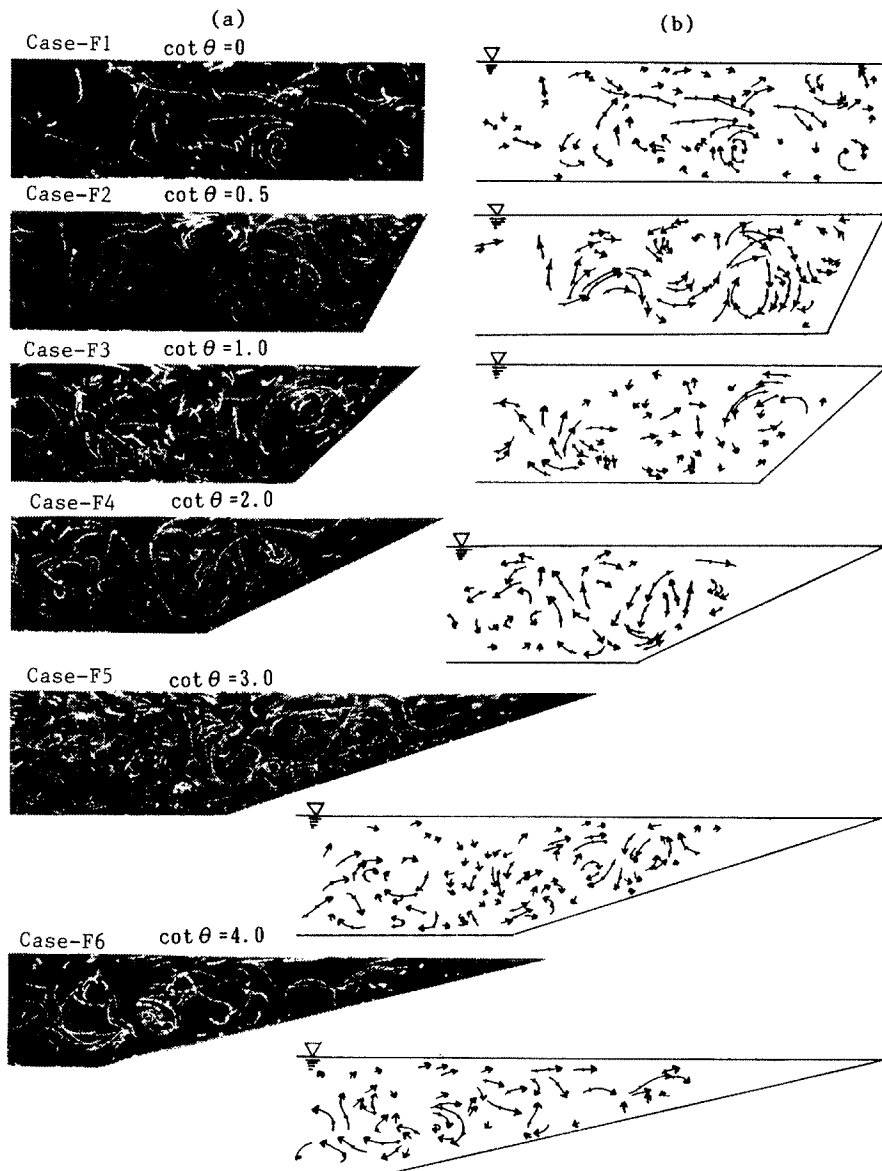


Fig. 5. Photographs of secondary flow cells in trapezoidal open channels, (a), and pass lines of neutral buoyant tracers in channel cross sections.

はめた結果を 26 ～ 49 フレームのネガフィルムより読み取って一枚の図に重ね書きしたものである。図中、実線で示した円は時計回り (cw) の運動をしていたセルを示し、破線のもの反時計回り (ccw) のセルである。各ケースにおける二次流セルの特性をまとめると **Table 2** のようになる。表には、セルの観察率 P (—観察枚数/撮影枚数)、回転方向ごとの観測数 N (+: cw, -: ccw)、セル外縁長 $L/\pi D$ (観察円弧長/セル円周長)、セル径 D 、局所水深で無次元化したセル径 D/h 、無次元化セル外縁速度 V/U_m および基準化した循環 $\Gamma' \{-(\pi DV)/(\pi H * 0.1 U_m)\}$ 、 H : 水深、 U_m : 断面平均流速) の計測結果を示している。なお、二段表示の欄は上段が平均値、下段が標準偏差である。また、循環の基準化については、便宜的に長さスケールとして水深を、セル外縁速度の基準値として断面平均流速 U_m の 10% を用いており、その妥当性については今後の検討が必要である。

Table 2 と **Fig. 6** より、以下の特徴が指摘される：① セルの観察率を見ると、長方形開水路の場合に

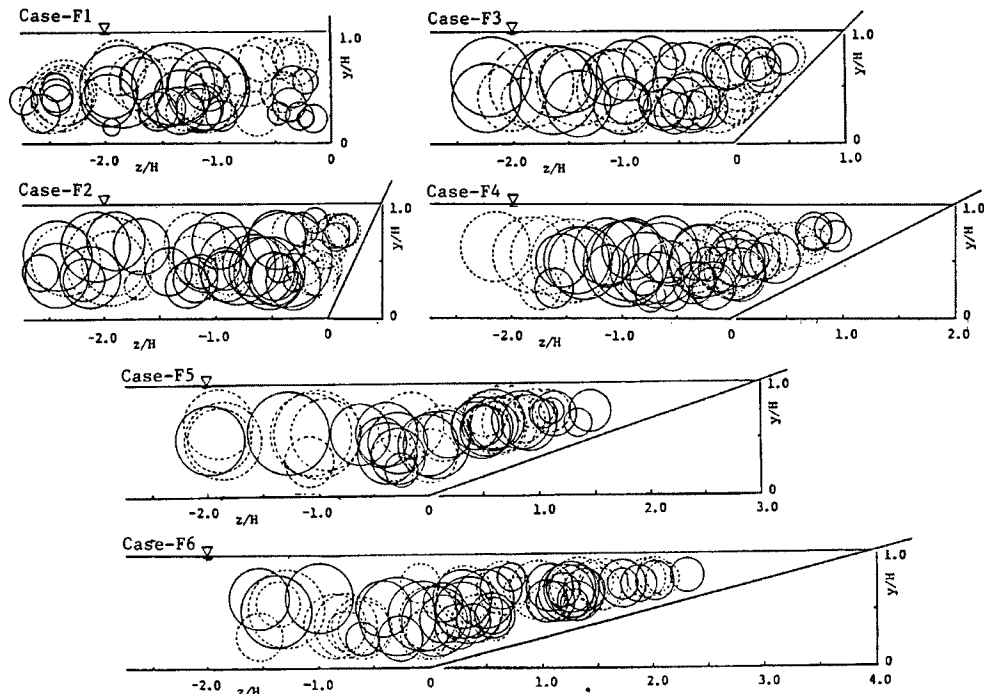


Fig. 6. Processed secondary flow cells in channel cross sections. Solid-line circles are clockwise cells, and broken-line circles are counter-clockwise cells.

は50.7%と他のケースが70%以上の高率を示しているのに比べて低いものの、過半数以上の可視化結果で認められることより、二次流セルの存在が確認される。② セル外縁長の平均が30～40%であることと、流下方向に水深の5倍の範囲が可視化されていることを考慮すると、水深の10倍のオーダーで1回転するものと推定される。③ Fig. 6において、時計回りのセル（実線）と反時計回りのセル（破線）を区別して見ると、いくつかのクラスターに分類することが出来る。これらはFig. 1(b)に示すようなA～Eのセルに相当するものであり、それぞれのグループに属するセルの位置は横断方向に分布している。分布範囲の外側を包絡した線は、速度計測により得られ

た二次流ベクトルの包絡線で示される扁平なセルと類似しており、計測結果から二次流セルを推定する場合にはこの点に注意する必要があることが指摘される。しかしながら、セルをグループに分類出来るのは側壁勾配が2割 ($\cot \theta = 2$) のケースまでであり、さらに勾配の緩やかなケースにおいては困難となる。これは、隅角部の影響による二次流セルの安定化が側壁勾配が2割程度までであることを示している。④

Table 2. Characteristics of secondary flow cells

Case	$\cot \theta$	P (%)	N	$L/\pi D$	D	D/h	V/U_m	Γ'
F1	0	50.7 (35/69)	+32 -25	0.42 0.17	1.59 0.58	0.40 0.15	0.13 0.03	0.51 0.26
F2	0.5	80.0 (28/35)	+40 -23	0.40 0.15	1.75 0.58	0.44 0.15	0.09 0.02	0.40 0.17
F3	1	71.0 (49/69)	+55 -36	0.32 0.14	2.16 0.64	0.56 0.14	0.11 0.02	0.57 0.21
F4	2	82.9 (29/35)	+44 -24	0.42 0.15	1.79 0.61	0.49 0.14	0.10 0.03	0.43 0.22
F5	3	77.1 (27/35)	+25 -18	0.30 0.15	2.01 0.50	0.58 0.12	0.12 0.03	0.60 0.19
F6	4	74.3 (26/35)	+38 -27	0.40 0.16	1.72 0.48	0.54 0.14	0.13 0.03	0.58 0.23

P : ratio of available photos to all of them, N : number of cells, +; clockwise, -; counter-clockwise, D : diameter of cell, L : arc-length of cell, V : tangential velocity of cell, h : local water depth, U_m : discharge velocity, Γ' : normalized circulation.

Table 3. Characteristics of secondary flow cells by conditional sampling

Case	$\cot \theta$		$L/\pi D$	D	D/h	V/U_m	Γ'
F1	0	B	0.41	1.37	0.34	0.12	0.46
		C	0.373	1.00	0.25	0.11	0.28
F2	0.5	A	0.38	1.10	0.37	0.10	0.27
		B	0.38	1.38	0.36	0.08	0.28
		C	0.39	1.79	0.47	0.08	0.42
F3	1	A	0.34	1.35	0.49	0.10	0.35
		B	0.33	2.03	0.52	0.11	0.55
		C	0.31	2.09	0.52	0.10	0.55
F4	2	A	0.42	1.12	0.50	0.09	0.24
		B	0.42	1.58	0.44	0.09	0.35
		C	0.39	1.89	0.49	0.10	0.48
F5	3	CW	0.36	1.82	0.56	0.12	0.54
		CCW	0.31	1.84	0.57	0.12	0.54
F6	4	CW	0.41	1.69	0.55	0.13	0.55
		CCW	0.41	1.58	0.53	0.12	0.49

 (L, D, h, V, U_m, Γ' : cf. foot note of Table 2)

図に見られるように、セルの大きさは半水深以上と以下の2グループに分けられるが、平均的には表に示すように半水深程度である。⑤セルの外縁の速度は断面平均流速の10%前後であり、セルの強さを表わす循環は断面形状による差異は小さく同程度の値を示している。

Fig. 1 (b) に示した側壁近傍の A ~ C の二次流セルの特性をまとめると Table 3 のようになり、A セルのスケールが側壁勾配の変化に伴って大きくなっていくこと、B セルと C セルの特性が類似していること等が知れる。

以上述べた二次流セルの大きさ・外縁速度・強さについて、その分布状況を、長方形開水路 (Case-F1), 台形開水路 (Case-F3: $\cot \theta = 1$, Case-F5: $\cot \theta = 3$) のデータおよび全データを用いた場合について

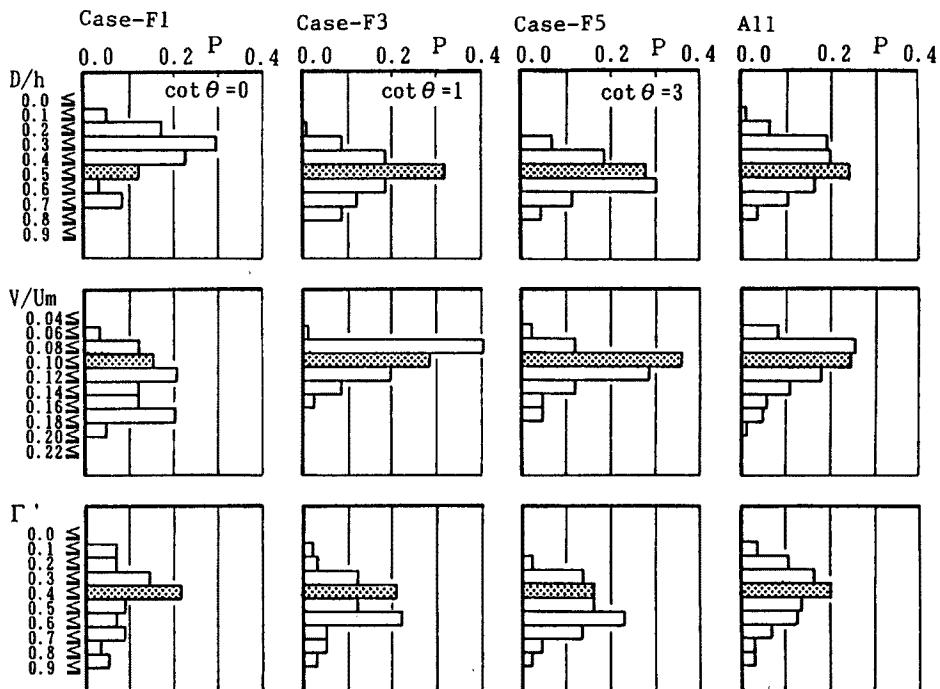


Fig. 7. Probability density distribution of normalized diameter, D/h (upper figures), normalized tangential velocity, V/U_m (middle figures), and normalized circulation, Γ' (lower figures), of secondary flow cells.

Fig. 7に示している。セル径 D の分布について見ると、長方形開水路の場合には側壁近傍の小スケールのセル($D/H=0.3\sim0.4$)と水路中央側の大スケール($0.7\sim0.8$)のセルの存在を示す二山分布が、側壁勾配が緩かになるにつれて一山分布へと変化するとともにスケールも大きくなっていることが知れる。また図より、外縁速度 V は平均速度 U_m の8~12%が多く、基準化した循環 Γ については0.5前後が多くなっており、分布形そのものにはケースによる差異は認められない。

3. 流れの平均特性と二次流

3.1 平均および乱れ速度分布特性

ここでは、長方形開水路にて行なった速度3成分同時計測結果(Case-L1)と本研究で行なった2成分LDAを用いた計測結果(Case-L2~L6)を比較することにより平均および乱れ速度分布特性と二次流の関係について考察する。なお2成分LDAによる計測は、2Wアルゴンレーザを用いた後方散乱型の2カラーLDAシステムを使用し、Table 1に示した水理条件のもとで行なったものである。また、各点での計測時間を120秒とし、周波数 40 Hz にてサンプリングした4800個のデータを統計処理している。

長方形開水路における二次流ベクトルの計測結果と、これらのデータを用いて計算した流下方向渦度 ξ の分布を示したものがFig. 8¹²⁾であり、他研究者の結果¹⁵⁾と定性的に一致している。なお、図中の渦度 ξ は、時計回りを正方向としている。図より、側壁近傍に時計回りと反時計回りの二次流セルの存在が見られるが、これらのセルの形状は、間欠的に形成される二次流セルの同一グループ(同一領域に発生する同回転方向のセル群)の存在範囲の外縁を示すものであって、二次流セルそのものではないことは前章の検討結果を見ると明らかである。しかしながら、長時間平均処理により得られる結果では、これらの扁平なセルが存在するかのごとく以下に示すように平均および乱れ速度分布に影響を及ぼす。Fig. 9は流下方向平均速度 U 、鉛直方向平均速度 V の分布を長方形と台形開水路の場合について示したものである。図より、長方形開水路の場合にはNikuradseが示したような二次流の存在による等速度線の歪が認められるが、台形開水路では側壁勾配が緩やかになるにつれて二次流の影響が不明確となっている。これは前章で示したように、個々の二次流セルそのものは台形開水路の場合の方がより頻繁に観察されるが、その発生位置の横断方向揺らぎ幅が大きくなり個々の影響が平均化されてしまうことで説明できる。一方、同様の指摘が V の分布からも可能であり、長方形開水路で見られる隅角凹部へ向かう二次流の存在を示す負領域が、台形開水路の場合には側壁勾配が緩やかになるにつれて不明確になっている。

流下方向および鉛直方向乱れ強さ $u'/U, v'/U, w'/U$ の分布について見ると(Fig. 10)、隅角凹部へ向かう二次流の影響による高乱れ領域の突出が長方形開水路の結果では明確であるが、台形開水路では平均速度の分布と同様に側壁勾配の増加とともに不明確になっている。また、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の分布は、側壁近傍の水面付近に見られる負領域が、二次流の存在に伴う最大流速点の降下する領域(Fig. 9)と対応しており、側壁勾配 $\cot\theta=1\sim3$ の間を境に認められなくなる。

以上の結果より次のことが結論として導かれる。すなわち、流速計を用いた二次流ベクトルの計測では

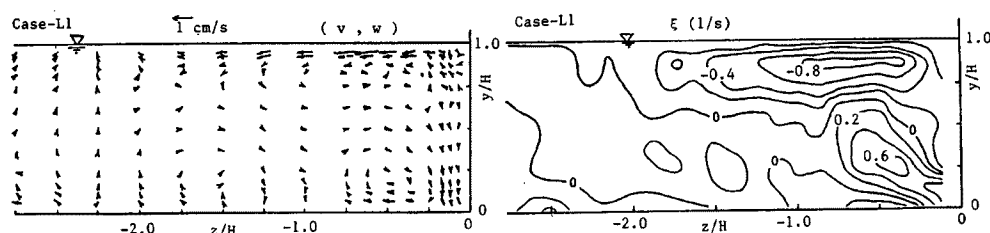


Fig. 8. Secondary flow vectors (left-hand side) and contour lines of longitudinal component of vorticity, $\xi = \partial W / \partial y - \partial V / \partial z$, in a rectangular open channel.

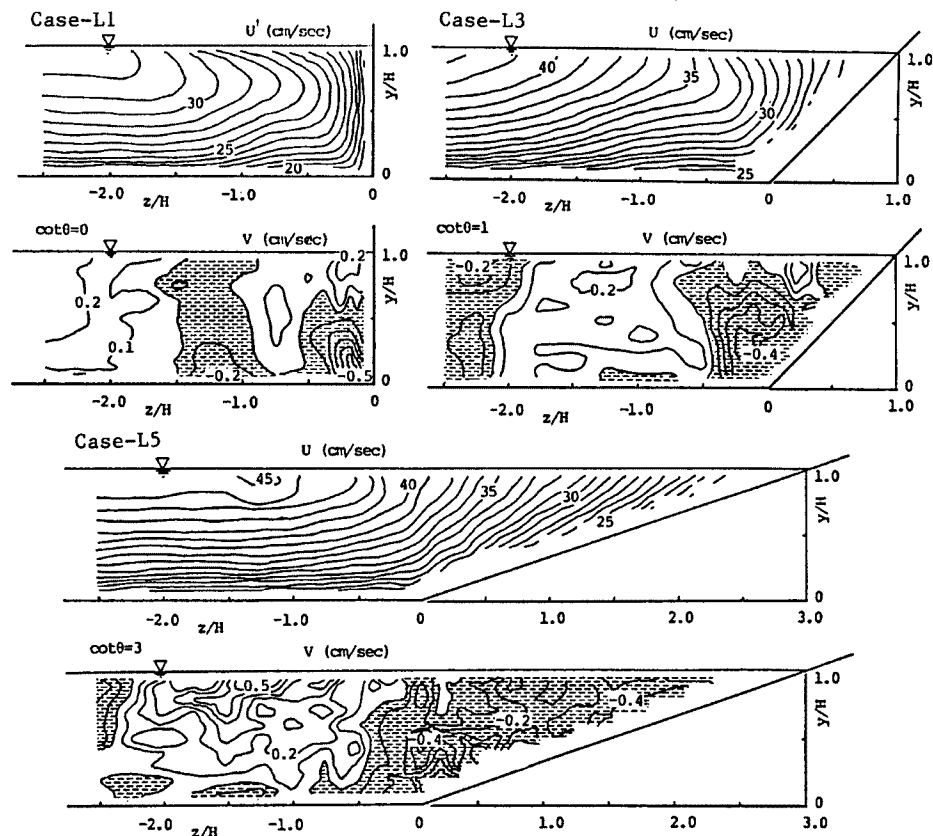


Fig. 9. Distribution of longitudinal mean velocity U and vertical mean velocity V in a rectangular open channel and trapezoidal open channels.

各点での平均的な二次流方向は計測出来るが、二次流セルについて検討することは個々のセルの持つ特性の一面のみを見ることになるため、結果の取り扱いには注意が必要である。

3.2 平均壁面せん断力分布特性

開水路流れの二次流構造と壁面せん断力分布との関連については、Leutheusser⁽⁶⁾ がダクト流の隅角部において二次流との関係を指摘して以来、Ghosh & Roy⁽⁴⁾, Knight & Patel⁽¹⁷⁾, Nezu & Rodi⁽¹⁵⁾ および著者ら⁽¹⁸⁾ などの多くの研究者により長方形開水路の隅角部について実験結果に基づく指摘がなされている。また、台形開水路についてはGhosh & Roy⁽⁴⁾, 富永ら⁽⁵⁾ によって実験結果が示されている。

ここでは、プレストン管法による計測結果を示し、平均壁面せん断力分布と二次流の関係について検討する。

壁面せん断力の計測法は、直接法と間接法に大別され、間接法の代表的なものがPrestonによるプレストン管法である。通常、プレストン管を用いて圧力を計測するが、歪ゲージを用いた圧力トランスデューサは長時間計測時に温度ドリフト等の影響を補正する必要がある。本研究では、温度ドリフト等の影響が小さい可変リアクタンス方式の圧力トランスデューサ（バリダイン社製）を用い、0～40 mmH₂Oの測定範囲で0.1 mmの精度で計測を行なった。用いたプレストン管は、外径3 mm、内径1.5 mmのJIS準拠ピトー管と外径2 mm、内径1 mmの真鍮パイプを用いた手製管の2種類を検定して用いた。これらのプレストン管およびその検定結果を示したものがFig. 11である。図中の曲線はPatelの検定曲線⁽¹⁹⁾,

$$y^* = 0.8287 - 0.1381x^* - 0.1437x^{*2} - 0.006x^{*3} \quad (2.9 \leq x^* \leq 5.6) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$x^* = y^* + 2\log_{10}(1.95y^* + 4.1) \quad (5.6 \leq x^*) \quad \dots\dots\dots (2)$$

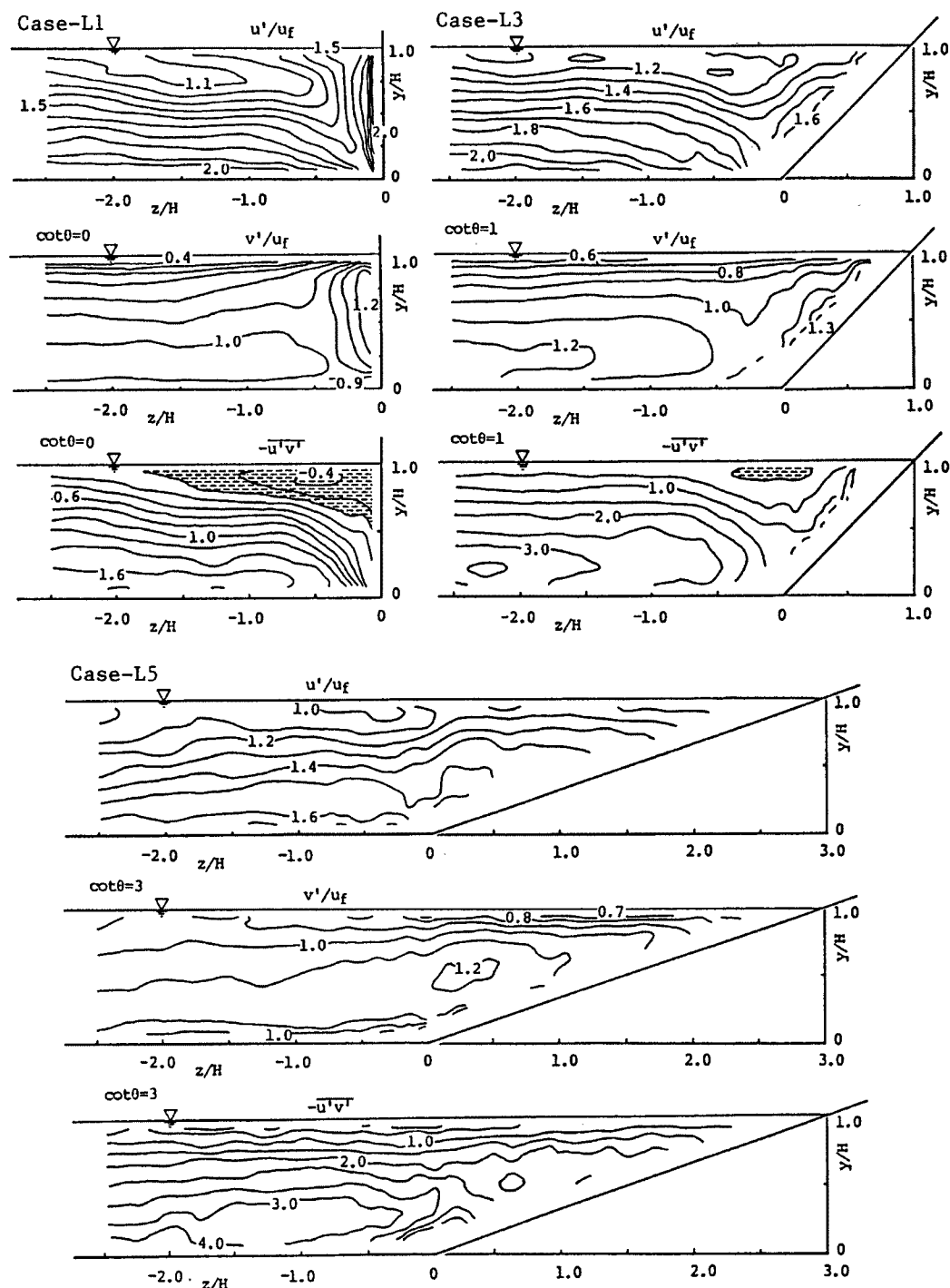


Fig. 10. Distribution of longitudinal and lateral components of turbulence intensity u' and v' , and Reynolds stress $-u'v'$ in a rectangular open channel and trapezoidal open channels.

ここに、 $x^* = \Delta p d^2 / 4 \rho v^2$ 、 $y^* = \tau d^2 / 4 \rho v^2$ である。図に見られるように、計測データと Patel の曲線は良好な一致を示しており、これより検定曲線として式 (1)、(2) を採用することにした。なお、検定は 1 m 幅水路の中央にプレストン管を設置し、路床勾配、流量を変化させた種々の等流状態の流れに対し

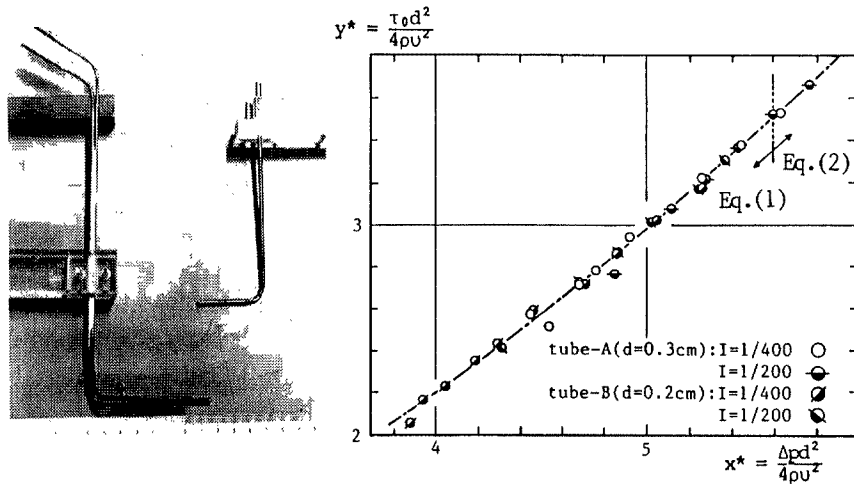


Fig. 11. Preston tubes and their calibration results compared with Patel's curve.

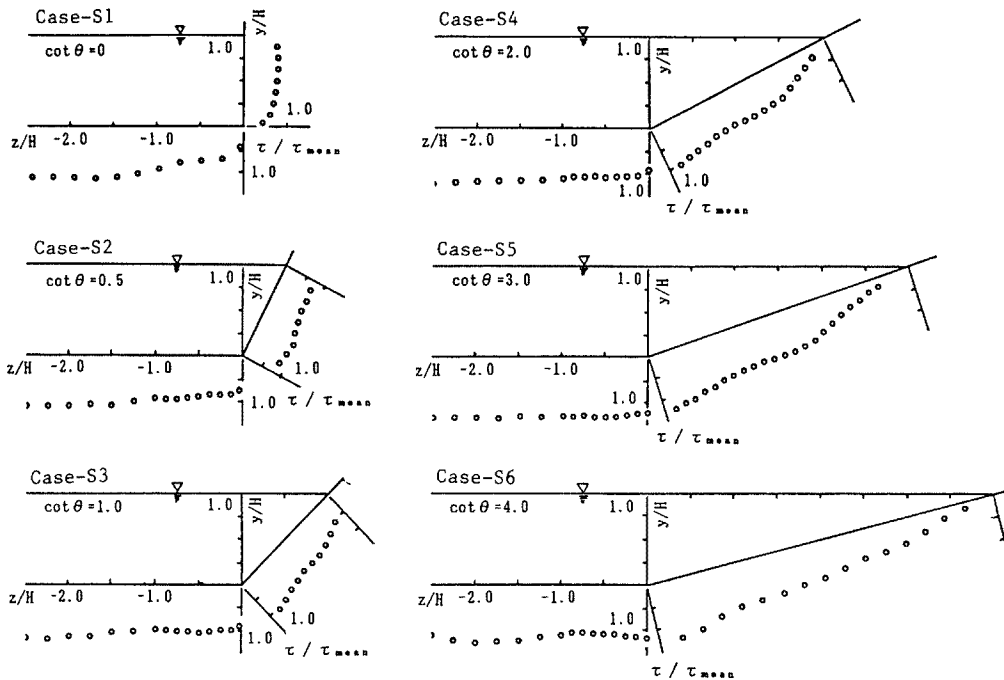


Fig. 12. Boundary shear stress distributions in trapezoidal open channels.

て計測した差圧 Δp と $\tau_0 = \rho g R I$ で求められる平均壁面せん断力の関係を求める方法に依った。また、以下に示す結果は $d = 0.3\text{ cm}$ のピトー管を用いたものである。

Fig. 12 は、各点での計測時間を 120 秒とし、サンプリング周波数 5 Hz にて 600 個のデータを平均して得られた差圧 Δp から (1) あるいは (2) 式を用いて τ を求め、 τ_0 で基準化して示したものである。なお、計測値を潤辺 s に沿って積分した値と $\tau_0 s - \rho g A I$ を一致させる補正法を用いているが、その補正量の平均値は約 6% でありほぼ満足される計測精度が得られている。図より、分布の波状性が明確に認められ、二次流と壁面せん断力分布に密接な関係の存在する事が示唆される。また、これらの分布は壁面近傍の平均速度分布より推定した結果¹³⁾ と良好な一致を示しており、計測の妥当性が伺われる。側壁上の分布について比較すると次の点が指摘される。長方形開水路の場合には水面で 0 でない値を示し隅角頂部付近で急激に減少して 0 となる分布であるのに対し、台形開水路の場合には水面で 0、隅角頂部付近で極大値を示

す異なった分布形状となっている。なお、台形開水路の場合に隅角頂部で壁面せん断力が0となるかどうかという問題については、その点での計測が本方法では困難であるため、今後の他手法による計測結果を待たねばならない。また、前章で示したように、二次流は横断方向に揺らぎながら間欠的に発生するため、壁面せん断力と二次流の詳細な検討には τ の変動計測が必要である事が指摘される。

4. おわりに

本研究では、台形断面開水路における乱流状態の流れについて、その三次元性の主要因である二次流およびそれにより形成される二次流セルに着目して実施した種々の実験結果を示し、二次流そのものの特性を検討するとともに速度分布および壁面せん断力分布などの平均特性との関係についても検討を加えた。その結果を要約すると次のようである。

1) カメロン効果を利用した自由水面における瞬間速度の平面分布可視化結果の検討より、横断方向に水深スケールを有する組織的な構造の存在することが、水面より下降する二次流と関係する高速度部分の発生位置の統計処理結果より確認された。また、台形開水路の側壁斜面上にも局所水深とほぼ同程度の横断方向スケールを有する構造の存在が認められた。

2) 水路下流端に設けた観測窓より横断面内の二次流と二次流セルを、中立粒子を用いた流れの可視化法で直接可視化することが可能となった。

3) 二次流セルは円形であって間欠的に発生するが、その発生位置は揺らぐ。このため、長時間平均した二次流ベクトルの計測結果を用いてその形状を推定すると、ひとつのセルが揺らぐ範囲の外縁を包絡したような扁平なセルとして捉えてしまう可能性があることが指摘された。

4) 台形断面水路の隅角部では境界の影響が緩和されるにつれて二次流セルの形成が顕著となる。また、法勾配が緩やかな場合には斜面上に比較的安定した二次流セルが形成され、壁面せん断力の計測結果などでもその存在を示唆する波状分布が捉えられる。

5) これらの二次流セルは、ある瞬間に発生した強い二次流により誘起され、そのセルがさらに新たなセルを誘起して伝播する。

6) 二次流セルの大きさ・外縁速度・強さを検討した結果、水深の0.5～0.6倍の大きさを持ち、断面平均流速の10%前後の外縁速度を示すセルが平均的なものであり、水深と断面平均流速の10%値を用いて基準化した循環は0.5前後となる。

7) 平均速度および乱れ強さの分布には、二次流の存在を示す最大流速点の降下や分布の歪などが認められるが、それらは側壁勾配 $\cot \theta = 2$ を境に不明確となる。また、二次流セルによる影響は、その発生位置の横断方向揺らぎおよび間欠性により平均化されて表われるため、顕著には認められない。

8) 可視化結果と平均特性の計測結果の比較より、流速計を用いた二次流ベクトルの計測では各点での平均的な二次流方向は計測出来るが、二次流セルについて検討することは個々のセルの持つ特性の一面のみを見ることになるため、結果の取り扱いには注意が必要であることが指摘される。

以上が主な結論であるが、今後は可視化結果の画像処理法の進展を図り、二次流の発生過程などを解明するとともに、壁面せん断力等との関係についても検討を加える予定である。

参 考 文 献

- 1) Olsen, O.J. and Q.L. Florey: Sedimentation Studies in Open Channel: boundary shear and velocity distribution by membrane analogy, analytical and finitedifference methods reviewed by D. McHenry and R.E. Glover, U.S. Bureau of Reclamation, Laboratory Report No. Sp-34, Aug. 5, 1952.

- 2) Chow, V. T.: Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Civil Engineering Series, McGraw-Hill Book Co., 1959.
- 3) Ippen, A. T. and P. A. Drinker: Boundary shear stresses in curved trapezoidal channel, Jour. Hydr. Div., ASCE, Vol. 88, No. HY 5, 1962, pp. 143-179.
- 4) Ghosh, S. H. and N. Roy: Boundary shear distribution in open channel flow, Jour. Hydr. Div., ASCE, Vol. 96, HY 4, 1970, pp. 967-994.
- 5) 富永晃宏・江崎一博・祢津家久：台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 381 号，II-7，1987，pp. 55-63.
- 6) 今本博健・石垣泰輔：LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について（1），京都大学防災研究所年報，第 28 号，B-2，1985，pp. 471-486.
- 7) 今本博健・石垣泰輔・梶間厚邦：LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について（2），京都大学防災研究所年報，第 29 号 B-2，1986，pp. 627-645.
- 8) 今本博健・石垣泰輔・梶間厚邦：LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について（3），京都大学防災研究所年報，第 30 号 B-2，1987，pp. 643-654.
- 9) 今本博健・石垣泰輔：LDV による開水路流れの速度ベクトル計測について（4），京都大学防災研究所年報，第 31 号 B-2，1988，pp. 815-823.
- 10) 今本博健・石垣泰輔：開水路流れにおける縦渦の 3 次元構造について，第 30 回水利講演会論文集，1986，pp. 565-570.
- 11) 今本博健・石垣泰輔・梶間厚邦：開水路流れの側壁近傍における 3 次元特性について，第 31 回水利講演会論文集，1987，pp. 431-436.
- 12) Imamoto, H. and T. Ishigaki: Measurement of secondary flow in an open channel, Proc. of APD IAHR, Vol. II-2, 1988, pp. 513-520.
- 13) Imamoto, H. and T. Ishigaki: Mean and turbulence structure near the inclined side-wall in an open channel flow, Proc. 3rd Int. Symp. on Refined flow modelling and turbulence measurements, IAHR, Tokyo, Japan, 1988, pp. 545-552.
- 14) 今本博健・石垣泰輔：台形断面開水路流れの 3 次元構造に関する実験的研究，第 33 回水利講演会論文集，1989，pp. 517-522.
- 15) Nezu, I. and W. Rodi: Experimental study on secondary currents in open channel flow. 21st IAHR Congress, Melbourne, 1985, pp. 115-119.
- 16) Leutheusser, H. L.: Turbulent flow in rectangular ducts, Jour. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 86, 1963, pp. 1-19.
- 17) Knight, D. W. and H. S. Patel: Boundary shear in smooth rectangular ducts, Jour. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 111, No. 1, Jan., 1985, pp. 29-47.
- 18) 今本博健・石垣泰輔：開水路流れの壁面せん断分布と縦渦に関する実験的検討，京都大学防災研究所年報，第 26 号，B-2，1983，pp. 477-487.
- 19) Patel, V. C.: Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradient, J. Fluid Mech., Vol. 23, 1965, pp. 185-208.