

台形断面開水路流れの3次元構造に関する実験的研究
Experimental Study on Turbulence Structure in Trapezoidal Open Channel

京都大学防災研究所 今 本 博 健 Hirotake IMAMOTO
京都大学防災研究所 石 垣 泰 輔 Taisuke ISHIGAKI

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 investigate the three-dimensional structure of turbulent flow 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 distribution of the boundary shear stress.

Keywords: turbulence, trapezoidal open channel, secondary flow, boundary shear stress

1. はじめに

乱流状態の開水路流れには水深規模の組織だった渦構造が見られ、長方形断面開水路の側壁近傍では隅角部に向かう二次流により形成される渦構造の存在が顕著となる。このような流れは、側壁および底面という境界の影響を強く受けているが、側壁が勾配を有する台形断面開水路流れでは側壁の勾配が緩やかになるに従って境界が流れに与える影響が小さくなる。本研究は、種々の勾配を有する台形断面開水路を対象に行なった速度および壁面せん断力の計測結果と流れの可視化結果を用い、開水路の境界形状が流れの構造に及ぼす影響について実験的に検討したものである。

台形断面開水路流れを対象とした研究としては、Chow¹⁾が示した斜面に作用する掃流力の分布、Ippen & Drinker²⁾あるいはGhosh & Roy³⁾らの壁面せん断力分布に関するもの、流れの構造を取り扱った富永ら⁴⁾の研究が挙げられるが、広範囲の形状が対象とされておらず未だ未説明の点が残されている。

2. 流れの3次元構造

2.1 3次元流況

図-1はカメロン効果を利用した表面流速分布の可視化結果を写真測量用図化機(WILD AVIOMAP AMH)で処理したものである⁵⁾。分布は一様でなく複雑な様相を呈しているが、高速部と低速部が横断方向に交互に並んでいるのが見られる。この特性は、流れの組織的構造と関連していると考えられ、低速部は下方からの低速流体の上昇位置を示し、高速部は流体が下降している箇所に相当するとの推測が可能である。この方法により得られた可視化結果を用いて得られた高速部と低速部の発生位置の頻度分布と、中立粒子トレーサ法による流れの可視化結果に基づき、側壁近傍の二次流セル配列に及ぼす境界形状の影響を示した結果が図-2⁵⁾である。すなわち、側壁が法勾配を有する場合には境界による制約が緩和されることによって渦A、BおよびCはそのスケールを増し、図に示すような二次流セルの配列が表われる。

2.2 二次流の可視化

図-2に示すような二次流セルは、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。

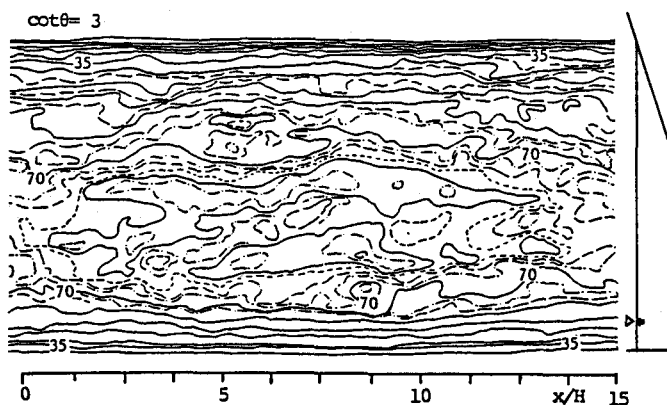


図-1 カメロン撮影により得られた水面における速度分布

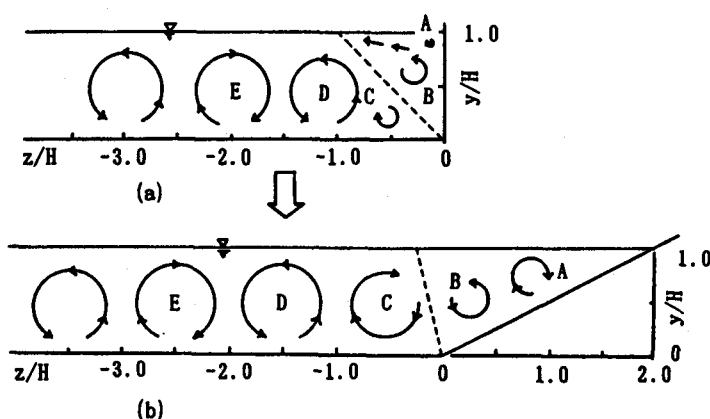


図-2 二次流セルの構造

写真-1は実験装置を示したものである。長さ13m、幅39cm、深さ19.5cmの亚克力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35mmスチルカメラ（300mm 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2mの横断面とした。トレーサとして平均粒径0.45mmのポリスチレン粒子を用い、移動撮影では幅約2cm、固定撮影では約20cm区間の横断面を1.5KW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併示した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たと判別される。

表-1に流れの可視化を行なった水理条件を、後述する壁面せん断力の計測を行なったものと合わせて示す。なお、ここでは斜面の勾配をその角度 θ のcotangentを用いて表わす。

典型的な二次流セルの可視化例として写真-2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、時計回りの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

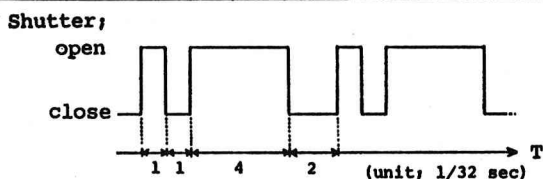
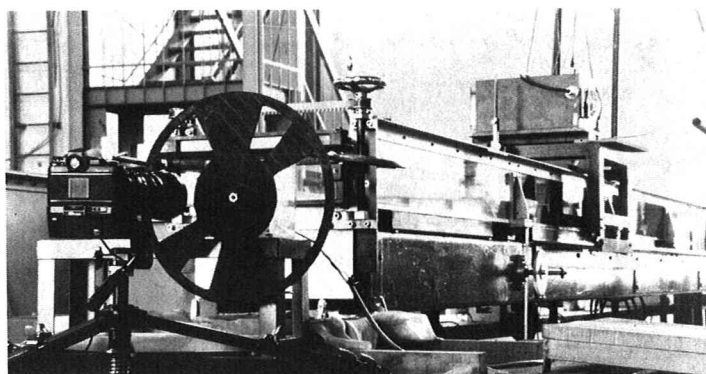


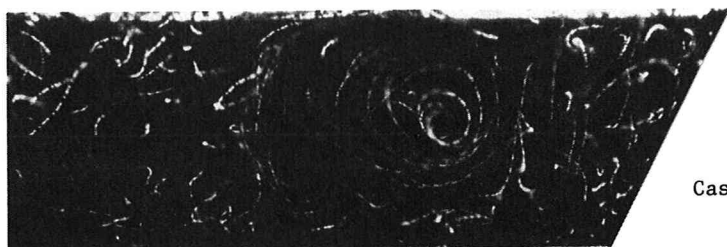
写真-1 実験装置

表-1 水理条件表

Case No.	Slope of bank cot θ	Slope I	Discharge Q(1/sec)	Water depth H(cm)	Discharge velocity Um(cm/sec)	Reynolds number Re=UmR/v	Froude number Fr=Um/ $\sqrt{gR}$
A-1	0	1/ 800	1.56	4.07	9.81	2900	0.17
A-2	0.5	1/ 800	1.36	4.00	9.97	2900	0.18
A-3	1.0	1/ 800	1.40	4.02	9.96	3000	0.18
A-4	2.0	1/ 800	1.24	4.01	10.00	2700	0.18
A-5	3.0	1/ 800	1.07	3.98	10.01	2600	0.19
A-6	4.0	1/ 800	0.90	4.04	9.90	2300	0.20
B-1	0	1/ 800	5.68	4.01	41.76	13700	0.74
B-2	0.5	1/ 800	5.68	4.01	41.76	13700	0.74
B-3	1.0	1/ 800	5.27	4.00	37.66	13100	0.66
B-4	2.0	1/ 800	4.99	4.00	40.21	12300	0.73
B-5	3.0	1/ 800	4.22	4.02	39.07	11600	0.74
B-6	4.0	1/ 800	3.19	4.00	36.28	9700	0.72
C-1	0	1/ 400	2.06	4.01	25.62	7700	0.48
C-2	3.0	1/ 400	3.80	4.00	36.51	10400	0.69

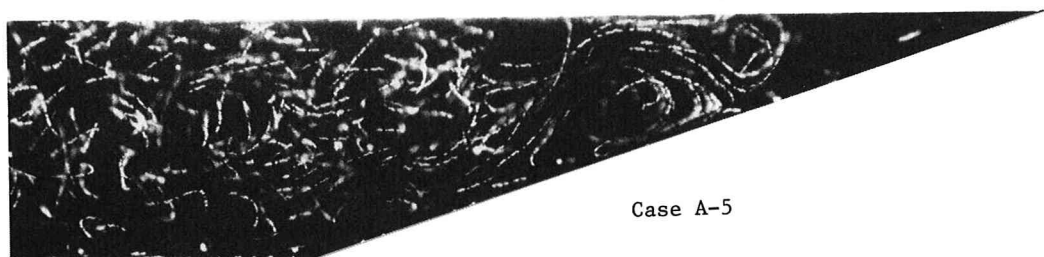
結果を観察すると、突然強い二次流が発生してセルを形成した後にそのセルが逆回転のセルを誘起し、やがて消滅するという過程を繰り返す。このような過程は間欠的に観察されるが、その発生位置は横断方向に揺らいでいる。また、長方形断面の場合 (cot $\theta=0$) と台形断面の結果を比較すると、台形断面の場合の方がトレーサの動きが活発であり、隅角部の頂部まで二次流が頻繁に達し、二次流セルが形成される。また、長方形断面の場合、図-2に示したC渦の存在は確認されるが、その強さは弱く規模も半水深程度である。

ここに示した cot $\theta=0.5$ のケースでは、長方形断面の場合に比べて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、写真-3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斜面上に見られるセルの発生位置の揺らぎが小さくなり安定してくる傾向が認められる。このような特性はビデオ撮影結果でも確かめられる。



Case A-2

写真-2 水深規模の二次流セルの可視化例



Case A-5

写真-3 斜面上に見られる二次流セルの可視化例

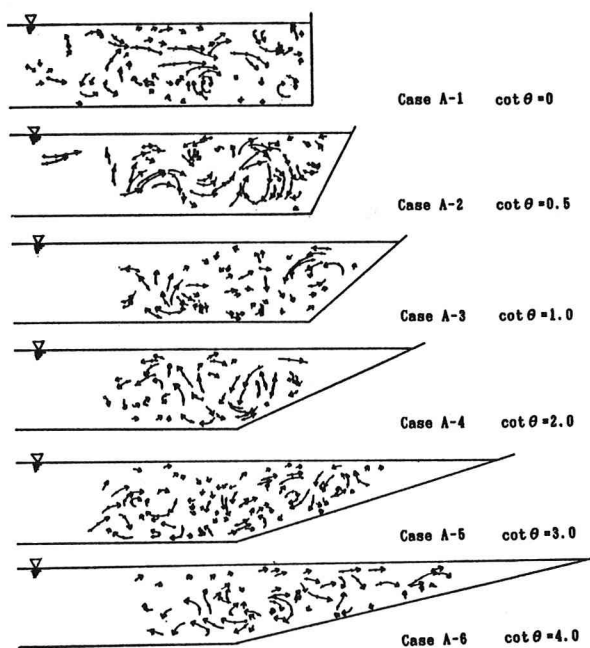


図-3 パスラインのトレース結果

図-3は、各々のケースにおいて水深規模の二次流セルが見られる撮影例について、ネガフィルムより各トレーサのパスラインをその移動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、図-2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、台形断面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。

3. 平均速度分布および壁面せん断力分布

図-4に主流速の分布を、図-5に壁面せん断力分布の計測結果を示す。流速計測には、レーザ流速計を用いており、壁面せん断力の計測には外径 3mm のビトー管をプレストン管として用いた。

Nikuradse が示したように等速度線の歪より二次流の存在が推定されるが、図-4に示すようにその歪は僅かである。これは前節で示したように二次流セルは存在するが、その発生位置が揺らぐために長時間平均した結果で見ると隠されてしまうためである。これに比して、図-5に示した壁面せん断力の計測結果には二次流セルの存在を示唆する分布特性がより明確に認められる。すなわち、法勾配の緩やかなケースの斜面上の分布が波状を呈することと台形断面水路の隅角頂部にせん断力の極大値が生ずることである。

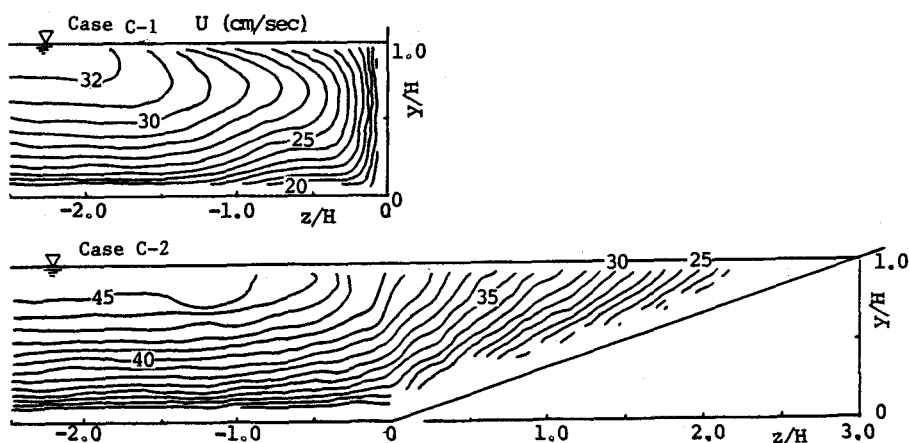


図-4 等速度線図

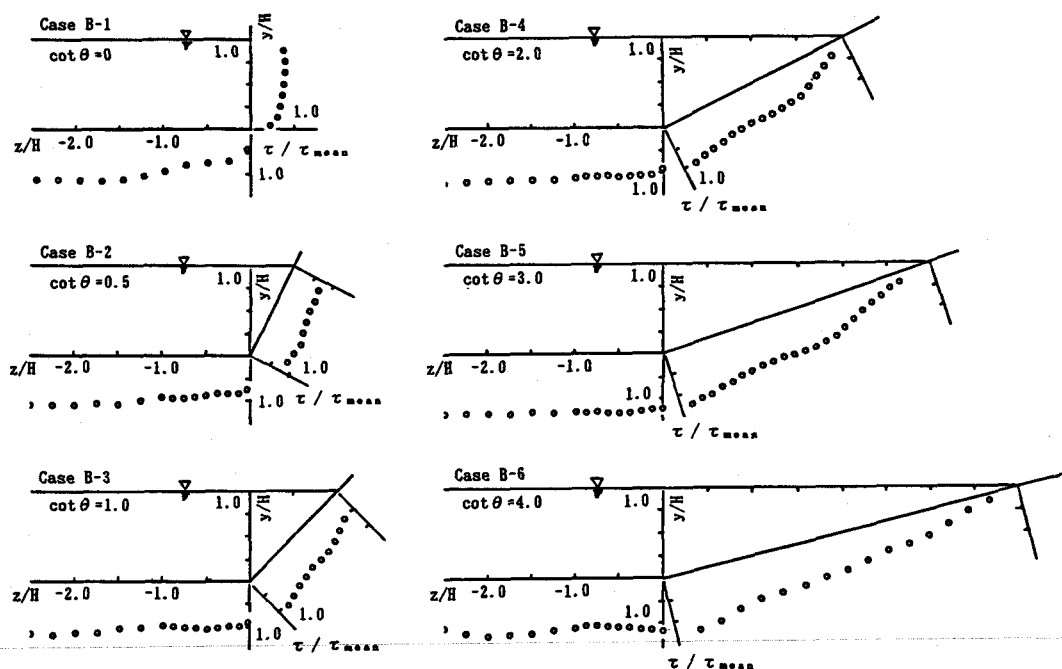


図-5 平均壁面せん断力分布の計測結果

4. おわりに

本研究で得られた結果を要約すると次のようである。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。

参 考 文 献

- 1) Chow, V.T.: Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, 1959.
- 2) Ippen, A.T. and Drinker, P.A.: Boundary shear stresses in curved trapezoidal channel, Jour. Hydr. Div., ASCE, Vol. 88, No. HY5, pp. 143-179, 1962.
- 3) Ghosh, S.H. and Roy, N.: Boundary Shear Distribution in Open Channel Flow, Jour. HYdr. Div., ASCE, Vol. 96, HY4, pp. 967-994, 1970.
- 4) 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、p. 55-63, 1987.
- 5) Imamoto, H. and Ishigaki, T.: 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, p. 545-552, 1988.