

複断面開水路流れの水力特性について (4)

今本 博健・石垣 泰輔

ON THE HYDRAULICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW IN COMPLEX CROSS SECTION (4)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Taisuke* ISHIGAKI

Synopsis

In a compound open channel, the interaction between main channel and flood plain flow is the most important phenomenon to be clarified. This interaction affects the resistance to flow and sedimentation on the flood plain.

To carry on the research of the interaction, it is necessary to clarify the flow structure in this region. Strong secondary flows near the boundary, which were indirectly showed by Sellin or another researchers, have been investigated in experimental compound open chnnels in this paper. In spite of elusiveness of the secondary flows, many attractive photographs were obtained by the refined techniques to visualize the flow in a cross section. Characteristics of the secondary flow and interaction between main channel and flood plain flows were discussed here.

1. は じ め に

複断面開水路流れでは、低水路と高水敷上流れの複雑な相互干渉のため、流れの抵抗および高水敷上への堆砂機構などに未解明な点が残されている。これらを解明する基礎として、流れの相互干渉に支配的な斜昇流（低水路と高水敷の境界で観察される低水路側壁法肩より水面に向かって斜めに上昇する2次流）の特性を実験的に検討し、低水路と高水敷上流れの混合機構を明らかにするのが本研究の目的である。著者らは、低水路と高水敷の境界部における流下方向速度の横断分布特性および流れの3次元構造について、速度計測法および流れの可視化法を用いて検討してきた¹⁾⁻⁶⁾。その結果、境界部に間欠的に発生する斜昇流が、前述したような複断面開水路流れの複雑な現象を支配している素現象であることが知れた。また、この斜昇流は、長方形断面開水路流れで観察される2次流と比べると大きな速度を有しており、流速計を用いた点計測により得られる平均速度分布からも存在が確認されるが、発生の間欠性および流れの3次元性を特徴としているため、瞬間速度場の情報が得られる流れの可視化結果にその特性が顕著に表われることが知れた。したがって、斜昇流の特性を検討するためには流れの3次元的な挙動を直接可視化することが必要であり、本研究では、著者らが台形開水路流れの3次元構造を可視化するために用いた横断面内2次流直接可視化法⁷⁾を複断面流れに適用し、斜昇流およびそれにより誘起される2次流セルの特性について検討するとともに、低水路流れと高水敷上流れの混合現象についても検討を加えた。

2. 低水路と高水敷境界部の2次流に関する実験的検討⁸⁾

2.1 検討方法

本研究で用いた流れの可視化法は、横断面内の流況を直接に、しかも流れに擾乱を与えることなく可視化する方法であり、詳細については従来の研究⁷⁾に示しており、ここでは概略を述べる。

水路下流端に設置した観測窓を通して、スリット状の光により照明された流れの横断面内におけるトレーサの挙動を35 mmスチルカメラ (300 mm望遠レンズ使用) あるいはビデオカメラにより撮影する方法である。照明には1.5 kWのハロゲンランプを用い、トレーサとして中立粒子 (平均径0.45 mmのポリスチレン粒子) あるいは直径0.05 mmの白金線を用いて得られる水素気泡を用いた。中立粒子は流れのパターンおよび2次流速度ベクトルを定量的に評価することを目的として使用し、水素気泡は固定断面内の流況を捉えることを目的として用いた。スチルカメラによる方法は、中立粒子使用時に2次流速度成分のみを捉えるための、スリット光源を断面平均流速に等しい速度で移動させて行なう光源移動撮影、および、水素気泡が作るタイムラインを撮影するための光源固定撮影の2種類である。

実験は、長さ13 m、幅39 cm、深さ19.5 cmの亚克力樹脂性直線水路内に、高さ2.0 cm、幅12.0 cmの高水敷を左岸側に設置して作られた複断面水路を用い、以下の2種の水利条件を対象に行なった。すなわち、低水路側壁法面勾配 $\theta = 90^\circ$ のケースは、水深3.97 cm、流量1.35 l/s、断面平均流速 $U_m = 10.3$ cm/s、レイノルズ数 $Re = U_m R / \nu = 3630$ 、フルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gR} = 0.16$ であり、 $\theta = 45^\circ$ の水利条件は、水深3.98 cm、流量1.37 l/s、 $U_m = 10.3$ cm/s、 $Re = 3620$ 、 $Fr = 0.16$ である。

2.2 斜昇流の特性

本研究では、Photo. 1.に見られる低水路側壁法面より水面に向かって斜めに上昇する2次流を斜昇流と呼んでおり、複断面水路の境界部において観察される特徴的な2次流である。従来の研究では、境界部の水面で観察される渦の可視化結果、あるいは速度の横断分布などの間接的なデータに基づいて検討が加えられてきた。写真は、横断面内における斜昇流の特性を、直接かつ明確に示すものであり、従来の推定結果^{1), 3), 5)}の妥当性が確認される。

これらの写真は、中立粒子トレーサを用いた可視化結果であり、斜昇流の存在を明確に示しているものを抽出したものである。写真に見られるように各トレーサのパスラインは、短—長—ブランク (本実験で

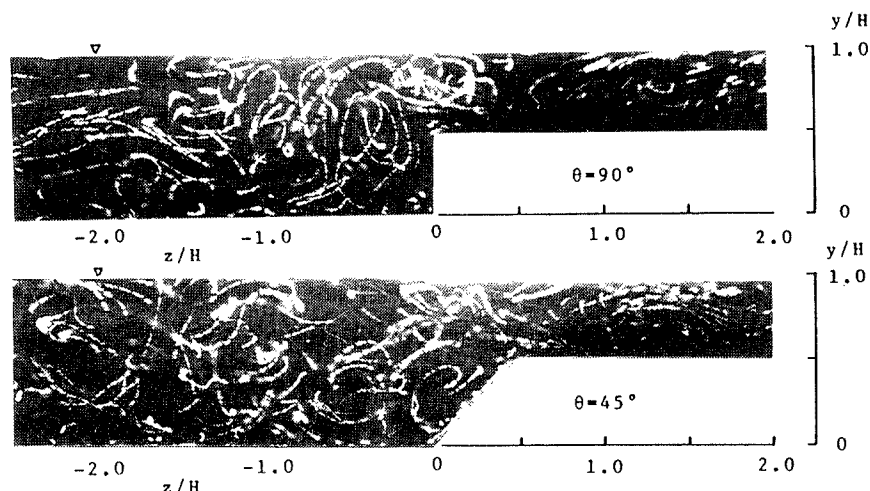


Photo. 1. Example photographs of secondary flows in two cross sections, those were obtained by the neutral buoyant tracer method.

は、各々の時間は、

1/32, 1/8,

1/16 秒である)

という単位から構

成されている。こ

れは、カメラ前面

に設置したパソコ

ン制御の回転板を

用いたことによる

ものであり、ここ

では短→長に向か

う方向がトレーサ

の移動方向を示し

ている。これらの

写真のネガフィル

ムを用い、各トレー

サの移動方向を判別

し、そのパスライン

を $\theta = 90^\circ$ および θ

$= 45^\circ$ の場合につい

て示したものが

Fig. 1. である。な

お、この結果は断面

平均流速と同速度で

流下する移動座標系

から観察した2秒間

のトレーサの挙動を

捉えたものである。

図より、 $\theta = 90^\circ$ の

場合には斜昇流と、

それにより誘起される渦（以下、本研究では2次流セルと呼ぶ）が明確に認められ、斜昇流の存在が横断面内で直接可視化された。一方、 $\theta = 45^\circ$ のケースでは、その強さは小さいものの、高水敷先端から水面に向かう斜昇流が認められるとともに、それに誘起される2次流セルも確認出来る。

斜昇流は、**Photo. 2.** に示すように、水素気泡法を用いた固定断面における可視化結果においても明確に認められる。これらの写真は、直径0.05 mmの白金線を2 cm間隔に鉛直に張り、200 ms間隔で水素気泡を発生させ、下流端に設置した観測窓を通して撮影したものである。写真は、高水敷先端付近に発生した斜昇流が2次流セルを形成する瞬間を捉えたものであって、両ケースともに境界の白金線から発生したタイムラインが、水面側で高水敷へ、底面側で低水路へ偏位しているのが明確に確認される。以上の結果が示すように、境界部では斜昇流の発生とともに、2次流セルが形成される。斜昇流および2次流セルについての定量的な検討を2.3において行なう。

2.3 境界部における2次流セル(縦渦)の特性

前述したように、境界部の流れは3次元であり、その特徴的な構造は2次流セルである。次に、その

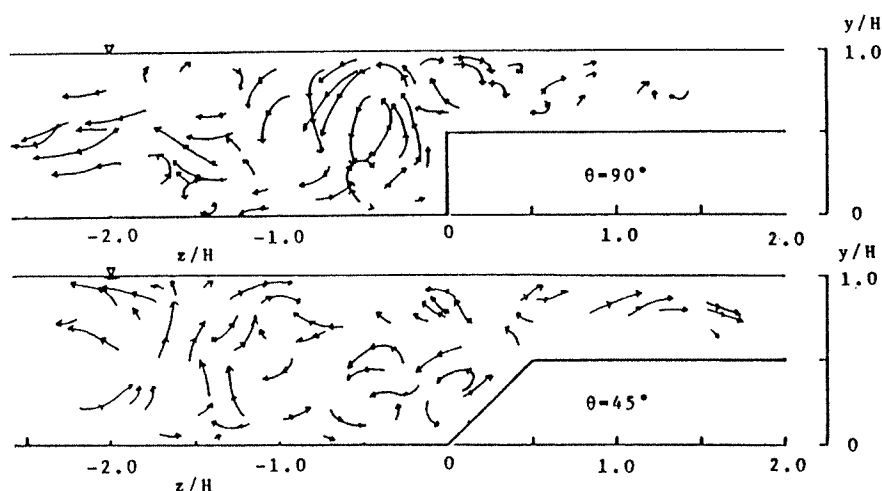


Fig. 1. Pass lines of tracers in the cross sections, those were traced on the pictures in Photo. 1.

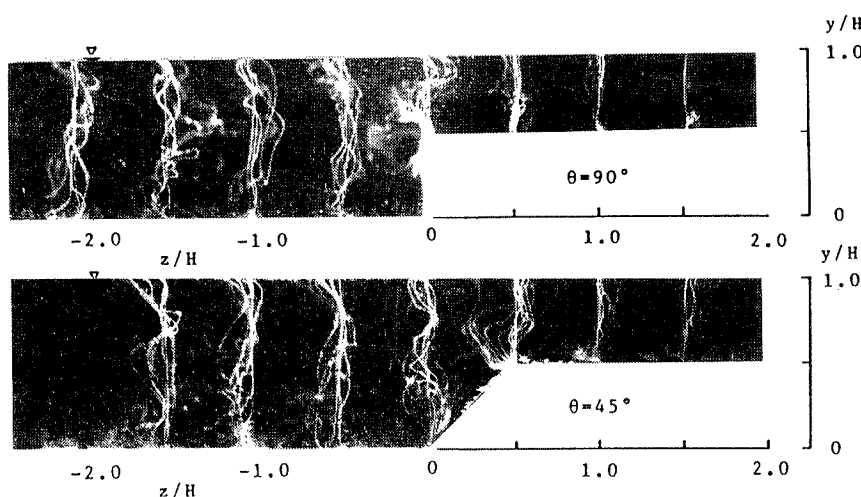


Photo. 2. Example photographs of time lines of hydrogen bubbles distorted by secondary flows in the cross sections.

特性について中立粒子トレーサの挙動から若干の検討を加える。**Photo. 1.** および **2.** で示したように、斜昇流は高水敷側および低水路側に2次流セルを形成する。ここでは、このような2次流により形成されるセルの特性から境界部における流れの3次元構造を検討する。なお、検討方法は、**Photo. 1.** に示したような写真のネガフィルムをスライド・プロジェクターで映写し、斜昇流の発生位置・強さなどのデータを読み取る方法を用いた。

Fig. 2. は、可視化結果において明瞭に2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はめた結果を、34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、破線のものとは反時計回り (ccw) のセルである。各ケースにおける可視化結果より、2次流セルに関する特性量を計測し、まとめたものが **Table 1.** である。表には、セルの観察率 P (=セルが観察されたフレーム数/撮影枚数)、回転方向ごとの観測数 N (+: cw, -: ccw)、観察されたセルの円弧長とセル円周長の比 $L/\pi D$ (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 Γ (= $(\pi D V) / (\pi h * \Delta U)$, h : 高水敷上水深, ΔU : 低水路流れと高水敷上流れの速度差) の計測結果の平均値を示している。

Table 1.(a) と **Fig. 2.** より、以下の特徴が指摘される。①セルの観察率を見ると、60%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40%程度であることと、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セルのスケールは半水深程度であり、セル外縁速度は断面平均流速の10%程度である。④基準化された循環は同程度であり、形成される2次流セルの強さに差異はない。

Fig. 2. 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。

これらの中から、境界部の斜昇流に關与する **Table 1.(b)** および (c) の付図に示した A~C のセルに相当するものについてまとめた結果を見ると、以下の特徴が指摘される。① $\theta = 90^\circ$ のケースでは境界部を挟んで A および B のセルが存在し、スケールは異なるものの、外縁速度はほぼ等しい。これは、両者のセルが同一の斜昇流により対をなして形成されることを定量的に示す結果である。② $\theta = 45^\circ$ の場合は $\theta = 90^\circ$ のケースと異なり、B と C のセルが同様の特性を示し、A セルは $\theta = 90^\circ$ の場合に比して若干弱いものとなっていることが、セルの外縁速度の差異から指摘される。

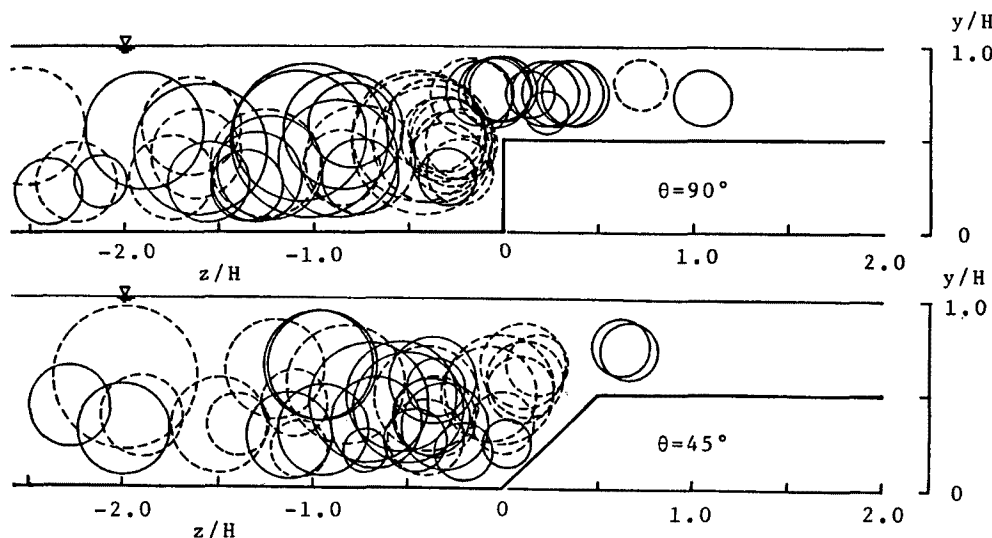
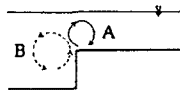


Fig. 2. Secondary flow cells overlaid on a diagram for each case.

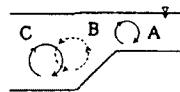
Table 1. Characteristics of secondary flow cells near the external corner in compound open channels.

(a) Using all data

Case	P (%)	N	$L/\pi D$	D (mm)	D/h	V/U_m	Γ'
90°	70.1 (24/34)	+27/-21	0.41	18.7	0.53	0.12	0.15
45°	64.7 (22/34)	+19/-19	0.43	17.4	0.51	0.12	0.15

 (b) Conditional sampling
 $\theta = 90^\circ$


Cell	z mm	y mm	N	$L/\pi D$	D (mm)	D/h	V/U_m	Γ'
A	3.8	28.2	+ 11	0.46	13.4	0.56	0.12	0.15
B	-12.4	19.8	- 12	0.44	19.3	0.48	0.13	0.14

 (c) Conditional sampling
 $\theta = 45^\circ$


Cell	z mm	y mm	N	$L/\pi D$	D (mm)	D/h	V/U_m	Γ'
A	26.0	29.5	+ 2	0.30	12.0	0.60	0.09	0.13
B	-2.5	18.7	- 11	0.40	16.6	0.41	0.12	0.12
C	-16.0	15.8	+ 8	0.44	16.9	0.42	0.11	0.11

P: observed rate of cell, N: number of observed cell, L: total length of pass line,
 D: diameter of cell, h: local water depth, V: secondary flow velocity, U_m : discharge velocity,
 Γ' : normalized circulation

3. 低水路流れと高水敷上流れの混合現象に関する実験的検討

3.1 検討方法

流水の混合現象を検討するためには、低水路と高水敷の境界面を通過する流体の挙動を捉える必要がある。前章で示したように境界部の流況は3次元的であり、2次流とそれにより誘起される2次流セルが流水の混合現象に関与するものと考えられる。しかしながら、斜昇流は間欠的に発生するものであるため、流況の時間変化を捉える必要がある。本研究では、境界部付近の流況の時間変化をビデオカメラにて撮影する方法を用いた。水素気泡法を用いた実験では、タイムラインの変動をビデオカメラで撮影する方法を、中立粒子トレーサ法では、光源を固定し、スリット幅を低水路水深の約2.5倍(10 cm)と約15倍(60 cm)の2通りに設定し、斜昇流の発生・消滅過程および低水路と高水敷の境界部近傍の3次元流況を捉えることにより、流水の混合現象を捉える方法を採用した。

流況の時間変化を捉えるためには、動画あるいは連続した静止画を解析する必要がある。粒子トレーサ法による可視化結果では、多数のトレーサを追跡することにより流況を把握することが目的であるが、これらの動画処理を行なうのは困難である。また、連続した静止画間での各トレーサの同定を相関解析などの手法で行なうには、大容量の記憶領域を有する計算機と計算時間が必要であり、同定結果の検証が必要である。本研究では、粒子トレーサの同定を容易かつ正確に行なうための解析方法として、目視による粒子の同定を行なう以下の方法を用いた。コマ送りが可能なビデオテープレコーダの画像出力を、ビデオ処理プロセッサを介してパーソナルコンピュータのディスプレイ上に表示させ、グラフィック画面上のマウス機能を用いて座標の読み取りを行なって得られる座標データファイルを解析処理に用いる方法である。この方法では、追跡粒子の前・後画面(±1/30秒毎)の位置が確認可能であり、粒子の同定が容易である。Fig. 3. に用いた画像解析システムの構成を示す。

3.2 流水の混合現象

(1) 中立粒子トレーサ法による検討

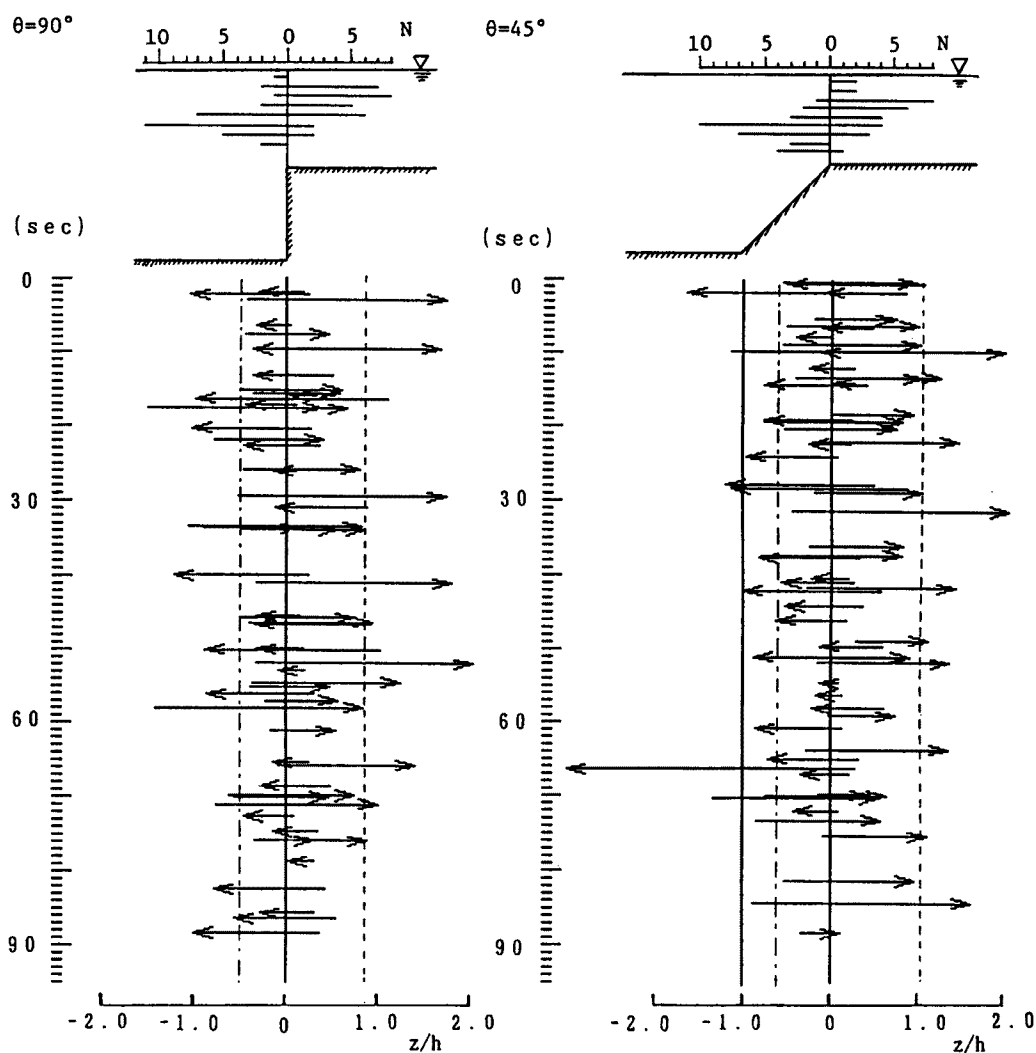


Fig. 5. Behavior of each tracer in the lateral direction. Distributions of the position and the direction of passing tracer at the boundary (upper part of the figure), and the moved distance of each tracer in the direction of the arrow (lower part).

面で観察される流水の混合現象の影響が及ぶ範囲であることを示す結果となっていることが指摘される。

以上の結果より、流水の混合現象にはいくつかのパターンが存在すること、境界面では水面付近で高水敷側へ、路床付近では低水路側への流体の移動が多く観察されること、境界面で観察される流水の混合現象の影響する範囲が存在することなどが指摘される。

(2) 水素気泡法による検討

Photo. 2. に示した境界面に沿って鉛直に設置した白金線より発生する水素気泡のタイムラインの挙動は、斜昇流の特性を示すとともに、流水の混合現象に関する情報を与えるものである。このタイムラインの形状変化を、ビデオ画像で観察すると、**Photo. 3.** に示す4パターンに分類することができる。Aは、高水敷上の流体が低水路に向かうものであり、Bの高水敷に乗り上げる流れを補うものと考えられる。Dは、斜昇流の発生に伴って高水敷側に形成される2次流セルを示すものであり、Cは斜昇流により低水路側に形成された2次流セルにより引き起こされるパターンであると考えられる。これらのタイムラインの

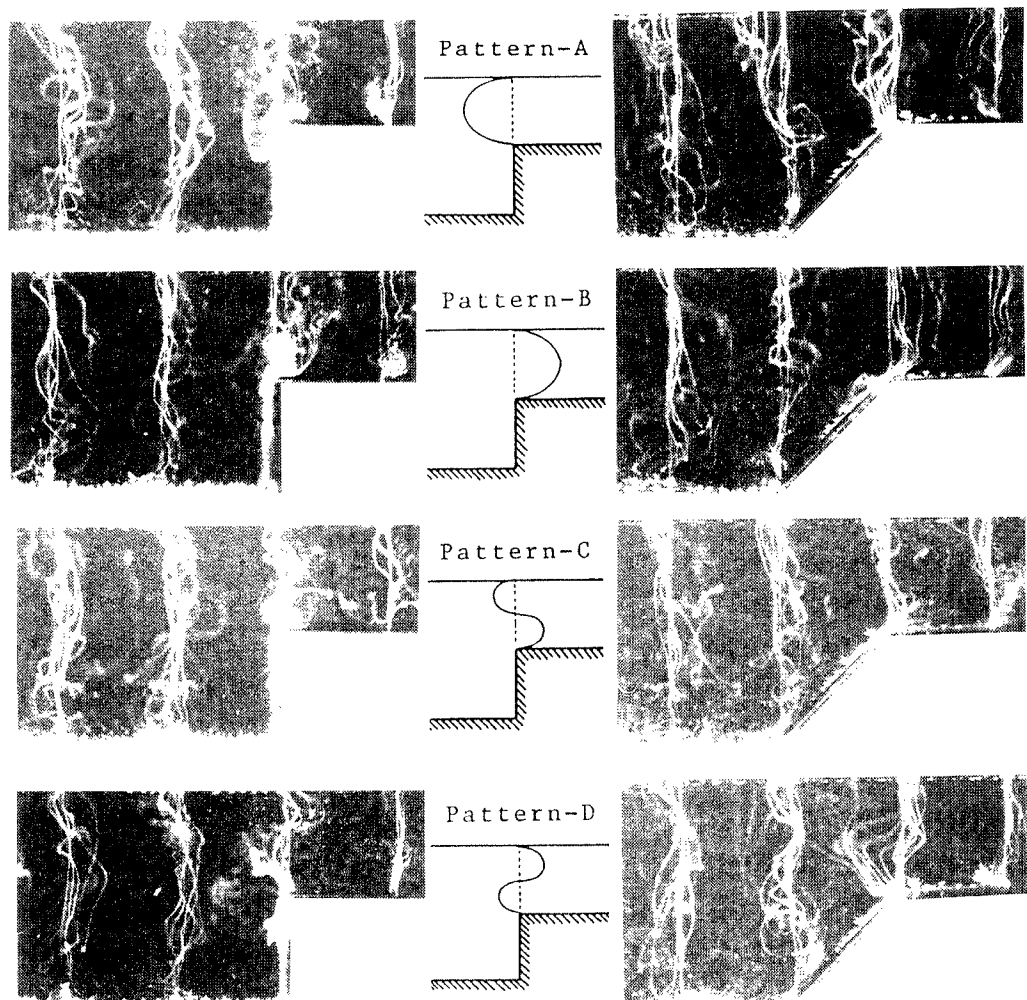


Photo. 3. Example photographs of typical four patterns of time line.

パターンは、 $\theta = 90^\circ$ および $\theta = 45^\circ$ のいずれの場合にも認められ、時間的に変動するものであるが、その形状は、高水敷上の相対水深 0.75 と 0.25 の高さでのタイムラインの位置を判断基準とすることにより分類することが可能である。

Fig. 6. は、この判断基準を用い、30 秒間のタイムラインの挙動を 0.1 秒毎に読み取ったデータを用いて分類し、各パターンの占める割合と用いた閾値との関係を示したものである。閾値は、高水敷水深 h で基準化し、境界面からの距離で設定したものであり、その領域内のタイムラインを E パターンとして分類した。なお、タイムラインは 0.2 秒間隔で発生させており、1 本のタイムラインの 0.1 及び 0.2 秒後の位置に関するデータに基づいて解析したものである。図より、 $\theta = 90^\circ$ では $0.5h$ 、 $\theta = 45^\circ$ では $0.3h$ を超えるタイムラインの横断方向変化はみられない。また、断面形状による差異に着目すると、B パターンの占める割合に明確な違いが見られ、これより、低水路側壁法面の形状が境界部の流況に影響を与えることが知れる。

次に、これらのパターンの時間変化については、Fig. 7. のような結果が得られた。 $\theta = 90^\circ$ の割合について変化特性を見ると、D (斜昇流) のパターンの現われる頻度が高く、D → B → A に移行する変化が多く見られる。これより、流況の変化特性として次のような説明がなされる。すなわち、高水敷上の流体が低水路流れに連行されるのに伴って斜昇流が発生し、流体の低水路内へ移動が促進される、つぎにその

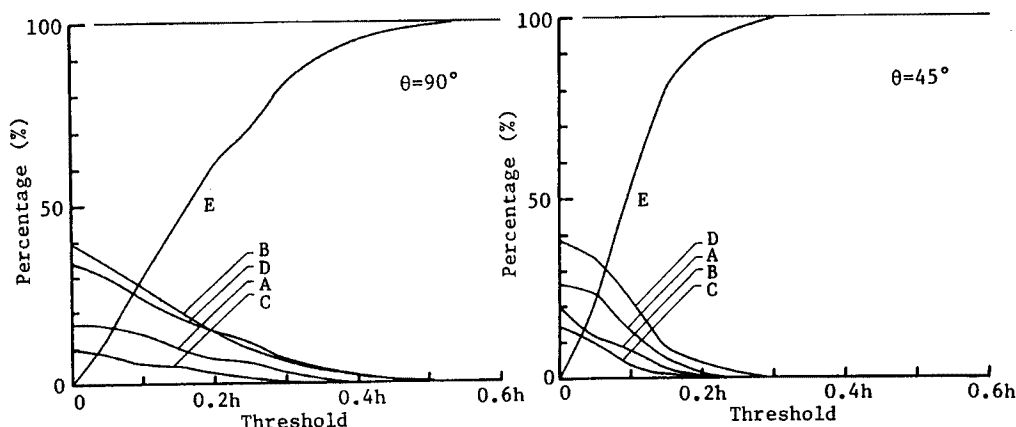


Fig. 6. Percentage of each pattern of the time line for several values of threshold.

反作用として高水敷上へ乗り上げる流れが発生する、この流れは幅方向に大きなスケールを持つ渦を形成してAパターンの流れを形成する。これに対し、 $\theta = 45^\circ$ の場合には、 $\theta = 90^\circ$ のようなD→B→Aに移行する変化はあまり認められず、D→B、D→A、およびB→Aという変化が多く観察される。これは、斜昇流に伴う流水の混合を補間する流れとして低水路へ向かう流れ(A)あるいは高水敷に向かう流れ(B)が生ずることを示すとともに、大きく高水敷に乗り上げる流れ(B)が間欠的に生じ、それを補間する流れ(A)が続いて生起することを示している。

断面形状による差異は、Fig. 8.に示した各パターンが占める割合を表示した結果でも認められる。なお、この図は、閾値を0.1hとした場合の結果である。図より、 $\theta = 45^\circ$ の場合には、 $\theta = 90^\circ$ の場合に比べると流れが一樣な期間が長く、流水の混合が緩やかに行われているものと考えられる。また、断面形状による差異がBパターンの占める割合の差に明確にみとめられる。

最後に、各パターンの発生周期 t_p および継続時間 t_d について若干の検討を行う。Table 2.は、発生周期および継続時間を高水敷水深 h (境界面の長さスケール)および境界部の平均流速 U_b から算定される時間スケール h/U_b で基準化して整理した結果をまとめたものである。発生周期について見ると、AおよびDについては低水路側壁法勾配 θ による差は小さいのに対し、BおよびCは θ による差異が大きく、断面形状による影響が大きい。また、斜昇流の発生を示すDパターンの発生周期は高水敷上水深と境界部速度で規定される時間スケールの5倍程度であり、著者らが水面上の渦間隔より求めた結果⁵⁾の2～4倍より若干大きなものとなってい

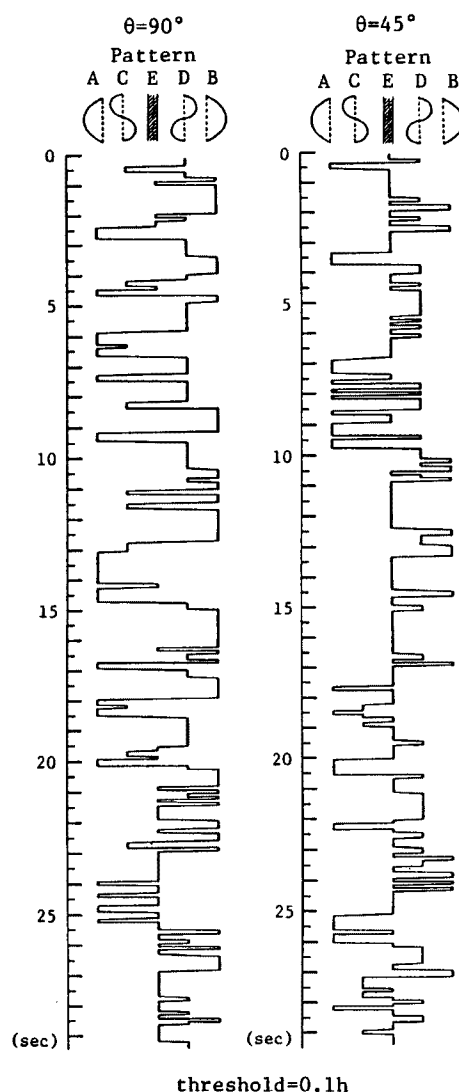


Fig. 7. Variation in pattern of the time line at the boundary in 30 seconds.

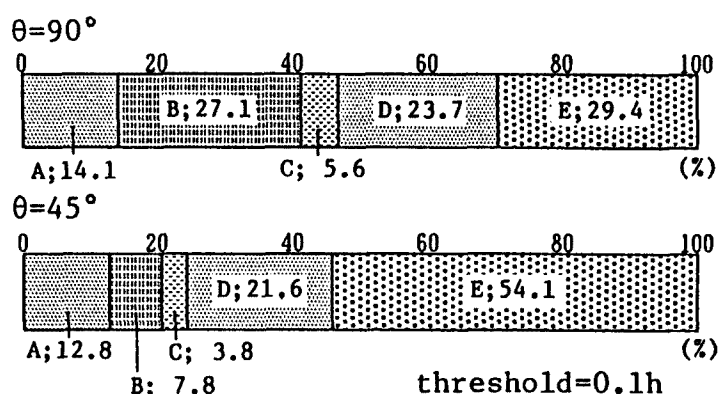


Fig. 8. Percentage of each pattern of the time line when the threshold is $0.1 \cdot h$, where h is the local water depth over the flood plain.

Table 2. Period, T_p , and duration, t_d , of each patterns, those are normalized by h/U_b , where h is the local water depth over the flood plain and U_b the velocity at the boundary.

Pattern	$t_p / (h/U_b)$		$t_d / (h/U_b)$	
	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 45^\circ$
A	8.3	9.0	1.4	1.2
B	5.8	9.5	1.7	0.8
C	13.9	21.3	0.8	1.0
D	6.6	5.1	1.5	1.1

threshold=0.1h

る。これより、水面で観察される渦が斜昇流そのものにより誘起されるものと、2次的に形成される渦の両者が存在しているものと考えられる。一方、継続時間について見ると、いずれのケースにおいてもA, B, およびDがほぼ同様の継続時間を示すのに対し、Cの継続時間は θ により異なることが知れる。

4. お わ り に

本研究では、横断面内流況の直接可視化法を用い、複断面開水路流れの低水路と高水敷の境界部で観察される2次流とそれにより誘起される2次流セルの特性を検討するとともに、低水路流れと高水敷流れの混合現象についても若干の検討を加えた。

本研究で得られた主な結論を以下に列挙する。

- 1) 高水敷先端より水面に向かう斜昇流が横断面内で直接可視化され、その存在が確認された。この斜昇流は、低水路側と高水敷側に水深スケールの2次流セル(縦渦)を誘起する。
- 2) 斜昇流により低水路側と高水敷側に2次流セルがほぼ同時に誘起される。斜昇流の強さを2次流速で表わすと、平均値で断面流速の10%を越える強いものであることが計測された。
- 3) 2次流セルは斜昇流を挟んで両側に生じ、低水路および高水敷上水深の50%前後のスケールを持ち、セル外縁の2次流速は同程度となっている。また、境界部の流速と高水敷上水深で基準化したセルの循環は、いずれの断面形状に対してもほぼ同様の値を示す。
- 4) 境界面を通過する中立粒子の挙動を解析した結果、水面付近で高水敷に向かう流れ、路床付近で低水路に向かう流れが卓越する頻度が高いことが知れた。また、粒子の移動範囲を検討した結果より、低水路側に高水敷水深程度、高水敷側にその水深の2倍程度の範囲が、高水敷側での流水混合が顕著な領域であることが推定された。
- 5) ビデオ画像の解析結果より、境界部の横断面内の流れを4つのパターンに分類することができる。Aは、高水敷上の流体が低水路に向かうものであり、Bの高水敷に乗り上げる流れを補うものと考えられる。Dは、斜昇流の発生に伴って高水敷側に形成される2次流セルを示すものであり、Cは斜昇流により低水路側に形成された2次流セルにより引き起こされるパターンであると考えられる。流況の変化特性として次のような説明がなされる。すなわち、高水敷上の流体が低水路流れに連行されるのに伴って斜昇流が発生し、流体の低水路内へ移動が促進される、つぎにその反作用として高水敷上へ乗り上げる流れが発生する、この流れは幅方向に大きなスケールを持つ渦を形成してAパターンの流れを形成する。
- 6) 低水路側壁法面勾配 θ を、 90° と 45° の2種類について実験を行ったが、両者の明確な差異は流水の混合現象に見られ、低水路より高水敷に向かう流れの存在する割合が異なる。

参 考 文 献

- 1) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの水理特性に関する実験的研究，第 27 回水理講演会論文
集，1983, pp. 61 - 66.
- 2) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れにおける中規模渦の形成過程に関する研究，第 29 回水理
講演会論文集，1985, pp. 833 - 838.
- 3) 今本博健・石垣泰輔・稲田修一：複断面開水路流れの水理特性について(1)，京大防災研年報，第
25 号 B-2，1982, pp. 509 - 527.
- 4) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司：複断面開水路流れの水理特性について(2)，京大防災研年報，第
27 号 B-2，1984, pp. 433 - 444.
- 5) 今本博健・石垣泰輔・福井淳太：複断面開水路流れの水理特性について(3)，京大防災研年報，第
28 号，B-2，1985, pp. 487 - 498.
- 6) Imamoto, H. and T. Ishigaki : Secondary Flow in Compound Open Channel, Computational Modelling and Experimental Methods in Hydraulics (HYDROCOP '89),
Ed. C. Maksimovic and Radojkovic, Elsevier Applied Science, 1989, pp. 234 - 243.
- 7) 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 回水理講演会
論文集，1989, pp. 517 - 522.
- 8) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの斜昇流に関する実験的研究，水工学論文集，第 34 巻，
1990, pp. 403 - 408.