

複断面開水路流れの斜昇流に関する実験的研究
Experimental Study on Secondary Flow in Compound 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 a compound open channel, the interaction between main channel and flood plain flow is the most important problem 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 flow near the boundary, which was showed by Sellin and another researchers, is investigated in experimental compound open channels in this paper. In spite of elusiveness of the secondary flow, many attractive photographs are obtained by the refined techniques for flow visualization. Characteristics of the secondary flow and interaction between main channel and flood plain flow are discussed here.

Keywords: compound open channel, secondary flow, flow visualization, picture processing

1. は じ め に

複断面開水路流れでは、低水路流れと高水敷上流れの相互干渉により、流れの抵抗および高水敷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の特性を実験的に検討し、低水路流れ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、低水路流れと高水敷上流れの境界部における流れ方向平均速度の横断分布特性¹⁾および流れの三次元構造²⁾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。その結果、境界部に間欠的に発生する斜昇流（高水敷先端より低水路側の水表面に向かって斜めに上昇する二次的な流れ）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二次流に比べて強いものであり、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三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三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三次元構造を可視化するために用いた横断面内二次流直接可視化法³⁾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二次流セル³⁾の特性について検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 横断面可視化法

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^{3), 4)}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35mmスチルカメラ（300mm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 1.5kW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0.45mmのポリスチレン粒子）あるいは直径0.05mm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二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、中立粒子使用時に二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固定撮影である。一方、流況の時系列変化を捉えるために用いたビデオカメラを用いた方法では、光源を固定し、スリット幅を低水路水深の約 2.5 倍 (10cm) と約 15 倍 (60cm) 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三次元流況を捉えることを目的とした。

なお実験は、長さ 13m、幅 39cm、深さ 19.5cm のアクリル樹脂性直線水路内に、高さ 2.0cm、幅 12.0cm 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、高水敷先端法面勾配 $\theta = 90^\circ$ のケースは、水深 3.97cm、流量 1.35 ℓ /s、断面平均流速 10.3cm/s、Re 数 3630、Fr 数 0.16 であり、 $\theta = 45^\circ$ の水利条件は、水深 3.98cm、流量 1.37 ℓ /s、断面平均流速 10.3cm/s、Re 数 3620、Fr 数 0.16 である。

2.2 可視化結果の解析法

(1) スチル写真の解析：中立粒子トレーサを用いた可視化結果は図-1 に示すようであり、各トレーサのパスラインは、短-長-ブランク（本実験では、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。このような写真のネガフィルムをスライド・プロジェクタで映写し、斜昇流の発生位置・強さおよび斜昇流に誘起される二次流セルの発生位置・形状・スケール・強さなどのデータを読み取る方法を用いた。

(2) ビデオ画像の解析：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り、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 ($\pm 1/30$ 秒毎) の位置が確認可能であり、粒子の同定が容易である。

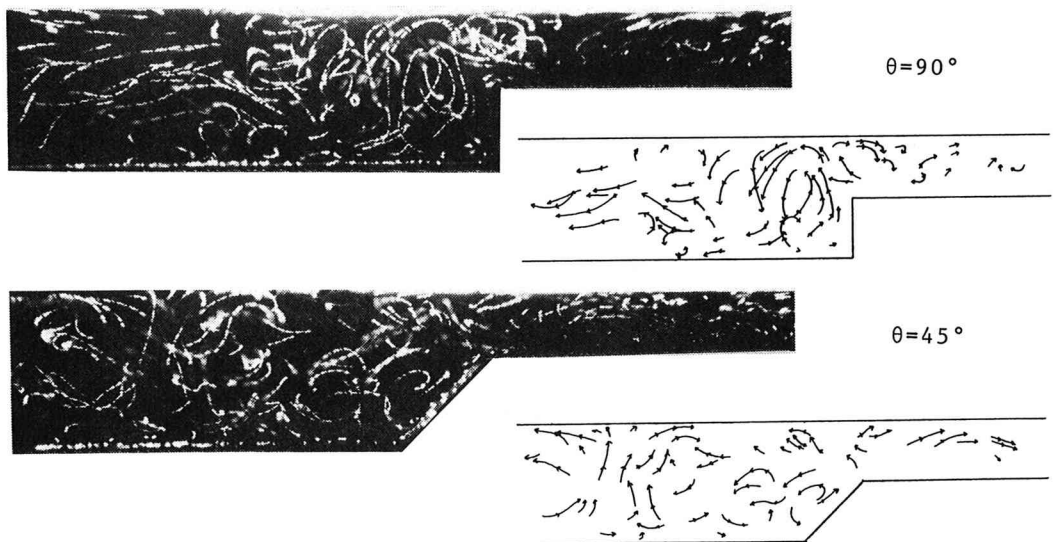


図-1 中立粒子トレーサ法による横断面可視化写真およびパスラインのトレーサ結果

3. 実験結果および検討

3.1 斜昇流の特性

図-1は、中立粒子トレーサ法による横断面流況の可視化写真と各々のトレーサの移動方向を判断して描いたパスラインを、 $\theta = 90^\circ$ および $\theta = 45^\circ$ の場合に、斜昇流の存在が認められる結果の一例を示したものである。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、本研究では二次流セルと呼ぶ）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、それに誘起される二次流セルも確認出来る。この結果から、3.2 で述べるような斜昇流の強さ・二次流セルの形状および配列などを知ることが可能であるが、時間的変化特性を検討することは出来ない。

本研究では、斜昇流の時間変化特性を検討するため、写真-1に示すような水素気泡法を用いた実験を行ない、タイムラインの変動をビデオカメラで撮影した。直径0.05mmの白金線を2cm間隔に鉛直に張り、水素気泡を発生させた。写真は、高水敷先端に発生した斜昇流が二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。なお、この写真の水素気泡発生間隔は100ms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、図-2(a)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二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二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。図-2(b)は、20秒間のタイムラインの形状変化を、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0.1秒毎に読み取ったデータを用いて分類し、時系列に表示したものである。それぞれのパターンが占める時間を図中に示しているが、これより、BとDがそれぞれ解析時間20秒の約1/3、Aが約1/4を占めるのに対し、Cは1割弱と短いことが知れる。変化特性を見ると、D（斜昇流）のパターンの

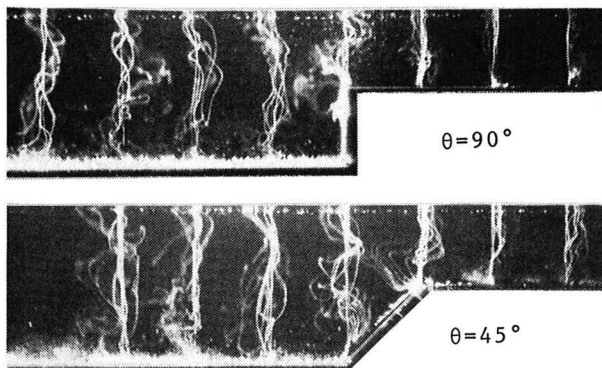


写真-1 水素気泡法による横断面可視化結果（その1）

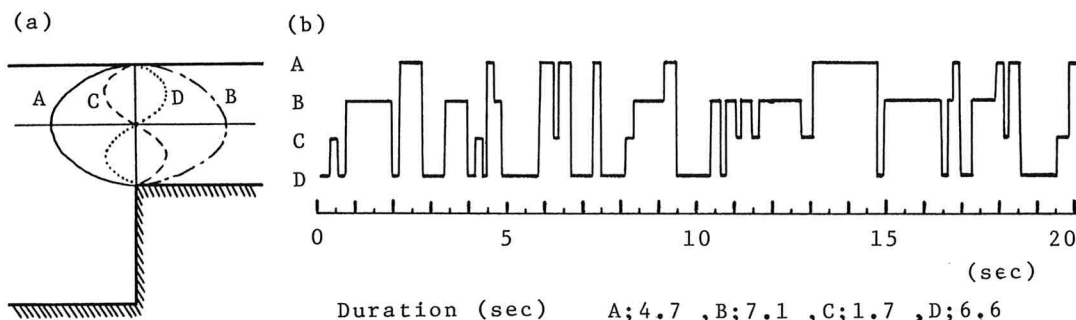


図-2 境界部の流れのパターンの時間変化

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。写真-2はBパターンの流れを捉えたものであり、高水敷上で右向きの流れが見られる。また、このデータよりDパターンの発生周期を算定すると1.32秒となり、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⁴⁾の2～4倍より若干大きなものとなっている。

以上の結果は、中立粒子トレーサを用いた可視化結果で確認される。図-3は、ビデオ画像を用いて4～5秒間のトレーサの挙動を追跡した結果の中から特徴的な5個のトレーサについて、(a)に軌跡、(b)に粒子の速度ベクトル変化、(c)に速度ベクトルの平均値および最大値を示したものである。ただし、これらの結果は同一時間内におけるものではない。図に

は、前述のAパターンを示すトレーサNo.2、Bパターンを示すNo.5、Dパターンを示すNo.1および3、そして、高水敷先端隅角凹部へ向かう二次流の存在を示すNo.4、の特徴的なトレーサの挙動が示されている。一方、速度ベクトルの計測結果を見ると、No.5を除くトレーサは、断面平均流速10.3cm/sの10%程度の速度で移動していることが知れる。また、No.5の挙動から、高水敷上でもかなり大きな速度で水面付近を移動するが、高水敷上の二次流セルにより底面に輸送されて急減速するという結果が得られる。

これは、高水敷上の堆砂機構の一面を示すものと考えられる。

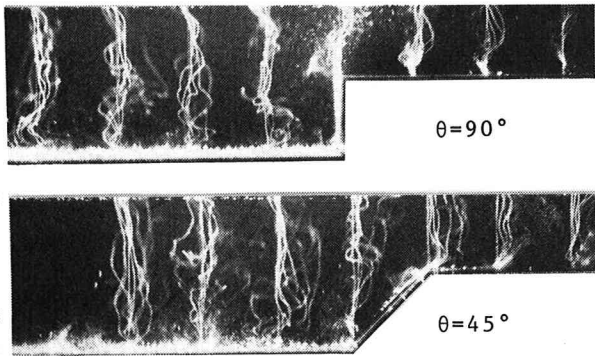


写真-2 水素気泡法による横断面可視化結果（その2）

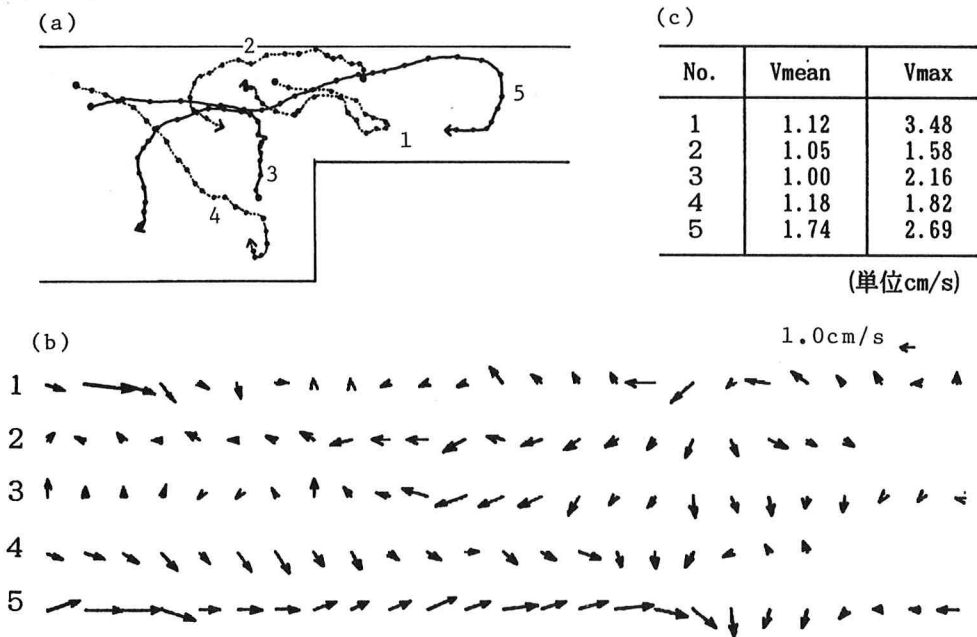


図-3 中立粒子トレーサのパスラインおよび速度ベクトル変化

3.2 境界部における流れの三次元構造

前述したように、境界部の流れは三次元的であり、ここでは中立粒子トレーサの挙動から若干の検討を加える。図-1で示したように、斜昇流は高水敷側および低水路側に二次流セルを形成する。ここでは、このような二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三次元構造を検討する。

図-4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はめ

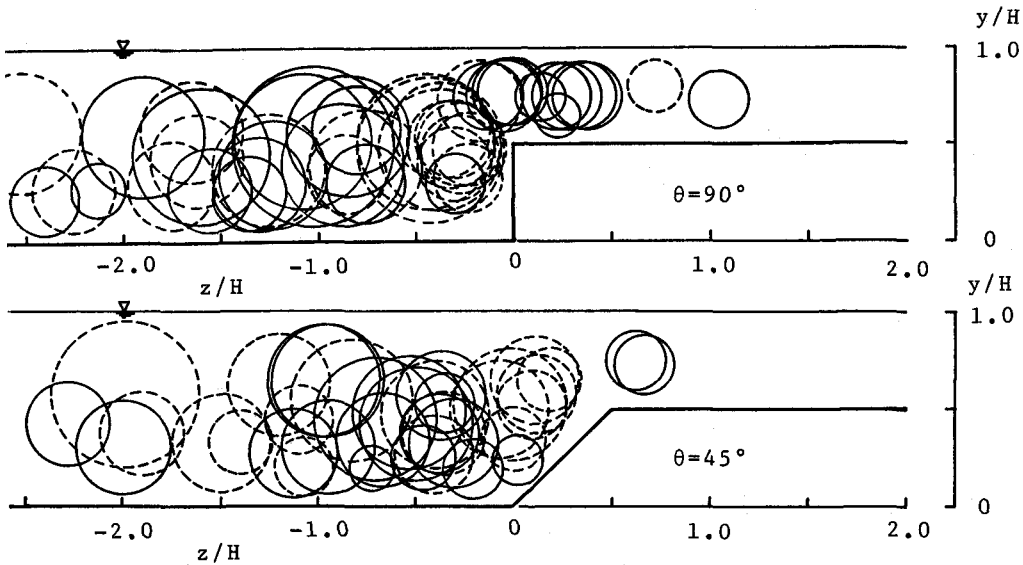


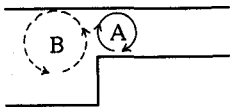
図-4 複断面開水路流れの横断面で観察された二次流セル

表-1 二次流セルの特性

(a) 全数

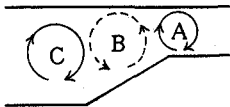
Case	P (%)	N	$L/\pi D$	D	D/h	V/U_m	DV/H
90°	70.1 (24/34)	+ 27	0.41	1.87	0.53	0.12	0.66
		- 21	0.12	0.55	0.15	0.02	0.25
45°	64.7 (22/34)	+ 19	0.43	1.74	0.51	0.12	0.61
		- 19	0.16	0.47	0.14	0.02	0.19

(b) グループ別 ($\theta = 90^\circ$)



Cell	z mm	y mm	N	$L/\pi D$	D	D/h	V/U_m	Γ'
A (flood plain)	3.8	28.2	+ 11	0.46	13.44	0.56	0.12	0.67
	8.1	5.7		0.13	1.42	0.17	0.03	0.31
B (main channel)	-12.4	19.8	- 12	0.44	19.25	0.48	0.13	0.63
	3.2	3.7		0.12	5.15	0.13	0.02	0.21

(c) グループ別 ($\theta = 45^\circ$)



Cell	z mm	y mm	N	$L/\pi D$	D	D/h	V/U_m	Γ'
A (flood plain)	26.0	29.5	+ 2	0.30	12.0	0.60	0.09	0.54
B (main channel)	-2.5	18.7	- 11	0.40	16.55	0.61	0.12	0.72
	8.3	5.3		0.14	3.82	0.15	0.02	0.17
C (main channel)	-16.0	15.8	+ 8	0.44	16.88	0.42	0.11	0.47
	3.8	4.9		0.17	4.20	0.11	0.01	0.12

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、破線のものは反時計回り(ccw)のセルである。各ケースにおける二次流セルの可視化結果をまとめると表-1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 $\Gamma' = (\pi DV)/(\pi H \cdot 0.1U_m)$ (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。

表-1(a)と図-4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。

図-4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。これらの中から斜昇流に関与する表-1(b)および(c)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。

4. お わ り に

主な結論を以下に列挙する。

- 1) 図-1、写真-1、2に示すように、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、確認された。
- 2) 斜昇流により低水路側と高水敷側に二次流セルがほぼ同時に誘起される。斜昇流の強さを二次流流速で表わすと、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) 二次流セルは斜昇流を挟んで両側に生起し、低水路および高水敷上水深の50%前後のスケールを持ち、セル外縁の二次流流速は同程度となっている。
- 4) ビデオ画像の解析結果より、境界部の横断面内の流れを図-2に示す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二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二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。

参 考 文 献

- 1) 今本・石垣：複断面開水路流れの水利特性に関する実験的研究、27回水講, p. 61-66., 1983.
- 2) 今本・石垣：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、29回水講, p. 833-838., 1985.
- 3) 今本・石垣：台形断面開水路流れの3次元構造に関する実験的研究、33回水講, p. 517-522., 1989.
- 4) 今本・石垣・福井：複断面開水路流れの水利特性について、京大防災研年報, 28B-2, p. 487-498., 1985.