

可視化法による複断面開水路流れの3次元構造に関する研究*

石垣泰輔¹・今本博健²

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所附属宇治川水理実験所 (〒612 京都市伏見区横大路下三栖)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所附属宇治川水理実験所 (〒612 京都市伏見区横大路下三栖)

複断面開水路の低水路と高水敷の境界部における流体混合と流れの3次元構造を、流れの水平面、縦断面および横断面流況の可視化結果の考察から検討している。実験では、境界部に存在する2種の渦構造、すなわち、速度差に起因する渦構造と断面形状に起因する斜昇流に伴う縦渦構造が直接可視化され、それらの特性に基づいて3次元構造が説明されている。

Key Words : compound open channel flow, secondary flow cell, flow visualization

1. 緒 言

複断面河道において、流量が増加して流れが高水敷に及んだ場合、高水敷高さを境界として種々の水理量が不連続的に変化する。このような場合の流れを考えると、低水路流れと高水敷上流れには大きな速度差が生じ、その境界で激しく流体が混合することが容易に推測される。この流体混合が複断面流れを特徴づける現象であり、流れの抵抗増加や浮遊砂などの物質の高水敷上への輸送現象を引き起こす。この現象は、低水路流れと高水敷上流れの相互干渉として捉えられ、現象そのものの解明および運動量輸送に伴う抵抗増加を考慮した流量計算法の確立に力が注がれて来た。また、流れの構造について、速度計測法を用いた実験的手法あるいは数値計算手法を用いた検討が行われ、その構造が明らかにされつつある。本研究は、複断面開水路流れの水理特性に関する基礎的研究として、一様水路における複断面開水路の低水路流れと高水敷上流れの混合機構とそれらの境界部の3次元構造について、流れの可視化法を用いた実験的検討を行ったものである。

低水路流れと高水敷上流れの速度差に伴う流体混合および高水敷先端付近の隅角凸部における2次流の存在を考慮すると、複断面開水路における流れは3次元적であり複雑な構造を有すると考えられる。これらのすべての現象は低水路と高水敷の境界部で発生し、そこに見られる流体混合が複断面流れを特徴づける現象である。

境界部における流体混合は、Sellin⁵⁾によって初めて

*本論文の個々の内容は既発表^{1)~4)}であるが、それらを統合し、検討を加えて取りまとめたものである。

可視化され、アルミ粉末を用いた水面流況の移動撮影により境界部における水面渦の存在が示された。その結果より、低水路の流体と高水敷上流体の混合、水面渦が流下方向にある間隔で発生していることなどが知れ、流れの相互干渉を検討する上で重要な事実が知れた。このような流体混合の結果、運動量輸送が行われるため境界部にせん断力が作用することになり、新たな抵抗が付加されることとなる。Zheleznyakov⁶⁾は、複断面水路を流れる流量が、流水面積が等価で低水路と高水敷上を独立に流れる流量の和より小さくなることを境界部の運動量交換によるものと指摘し、この現象を“運動学的効果(kinematic effect)”と呼んだ。芦田・高橋⁷⁾も境界部に大きなせん断力が作用することを指摘しているが、Wright & Carstens⁸⁾は、境界部の運動量輸送機構が、

- 1) 分子運動および分子間力、
- 2) 壁面に沿う流れが生成する渦、
- 3) 速度差のある流れの混合域で形成される渦、
- 4) 2次流、

の4種の現象によってなされるものとしている。彼らは、壁面せん断力の計測結果から境界面に作用する見かけのせん断力を算定し、そのオーダが低水路における平均壁面せん断力と同程度であることを指摘した。彼らの見かけのせん断力を評価する方法は、多くの研究者によって用いられており、流量計算法などに利用されている。

境界部の乱流構造は、速度計測法あるいは流れの可視化法による実験的研究と数値計算法を用いた研究が行われて来た。速度計測による方法はTownsend⁹⁾に始まり、Rajaratnum & Armadi¹⁰⁾の速度横断分布式の検討、Elsawyら¹¹⁾のレーザ流速計の適用以後、詳細な計測が

行われている(富永¹²⁾, Shiono & Knight¹³⁾, 今本¹⁴⁾). 数値計算法による研究は乱流モデルを用いて行われており, Keller & Rodi¹⁵⁾ などの水深平均した $k-\epsilon$ モデルを用いた研究, 河原・玉井¹⁶⁾, Naot ら¹⁷⁾ の代数応力モデルを用いた研究が行われ, 流れの構造が検討されている. 一方, 流れの可視化は, Townsend⁹⁾, 芦田・高橋⁷⁾ によって染料を用いた結果が示されているが, 今本・久下¹⁸⁾ がホット・フィルム流速計を用いた速度の3成分計測結果より, 高水敷端より水面に斜めに上昇する2次流の存在を指摘して斜昇流と呼んで以来, 主にわが国で可視化実験が行われた. 木下¹⁹⁾ は, 洪水流の観測結果より, 高水敷上の流速が低水河岸に沿う付近で若干流速が落ちる場合が極めて多いことに着目し, 実験水路での結果より, 低水河岸沿いには特に強い湧昇流の存在とそれらが或る間隔で並びやすいことを指摘した. これは, 今本・久下が指摘した斜昇流に相当するものと考えられる. 一方, 玉井・河原²⁰⁾ は Sellin が示した水面渦を可視化するとともに, 水面渦の存在を考慮した流量計算法を提示した. また, 福岡²¹⁾ は, 鉛直方向の斜昇流の他に, 水平方向の流体混合を伴う大規模渦の存在を指摘しており, 渦の中心が高水敷上にあり, 規則的かつ長時間存在すること, 低水路の底面付近の流体が上昇しながら高水敷上へ輸送されるとともに, 高水敷上の流体がやや沈降しながら低水路へ輸送されること, などの特性を指摘した. 一方, Knight ら²²⁾ は, 流れは3次元構造を有すると考え, 横断面形状, 隅角凹部の2次流, 境界面に存在する鉛直軸を有する渦と隅角凸部に生起する2次流が起す低水路流れと高水敷上流れの間の運動量輸送が速度分布やせん断力分布に影響を与えているとしている. 近年, 池田²³⁾, 中川²⁴⁾ およびその他の研究者によって境界部の構造が検討されているが, 流れの構造について十分な知見が得られておらず, 本研究で示すような境界部の流れを直接可視化する手法などで検討する必要があるものと考えられる.

2. 実験方法

流れの3次元構造を解明するために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. 本研究でも流れの3次元性の主要因である渦構造を検討するために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.

縦渦は主流方向軸を有し, 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速度成分 v と横断方向速度成分 w を可視化することによって捉えられる. 縦渦の直接可視化法とは, 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

Table 1 Hydraulic conditions

Case	Slope I	Discharge Q(l/sec)	Channel width B(cm)	Water depth H(cm)	Flood plain width b(cm)	Flood plain height h(cm)	Reynolds number Re	Froude number Fr
C1	1/400	1.399	20.0	4.0	12.0	2.0	6100	0.57
C2	1/1700	0.318	20.0	3.0	12.0	1.1	1160	0.11
C3	1/800	1.350	39.0	4.0	12.0	2.0	3630	0.16
C4	1/800	1.370	39.0	4.0	12.0	2.0	3620	0.16

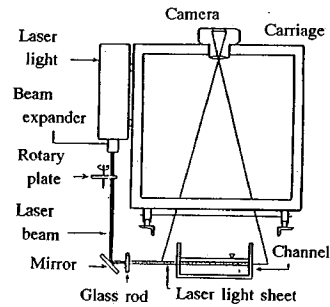


Fig.1 Experimental set-up for visualizing flow in horizontal and vertical cross-section

みか, u と v あるいは u と w の2成分を対象として行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. 本研究では, 水平面および縦断面内の流況を可視化するためにレーザ・ライト・シートを用いた中立粒子トレーサ法を, 横断面内の流況を可視化するための水素気泡法および中立粒子トレーサ法を用いている. 横断面流況可視化法については, 従来のように流れを乱す可能性がある鏡などを流水中に入れないことを条件とし, 水深規模の縦渦構造が直接可視化可能な方法を開発したものであり, 本研究独自の方法である. 以上のように, 本研究では, 中立粒子あるいは水素気泡をトレーサとして用いた間接法および直接法を用いており, それぞれの方法について以下に示す.

複断面開水路流れの構造は, 低水路水深/高水敷上水深比あるいは低水路幅/水路幅比などの幾何形状に影響されることが知られている. 本研究では境界部の流れの構造に着目し, 低水路流れおよび高水敷上流れの水路幅水深比を大きくすることにより側壁などの他の境界の影響をなるべく小さくするとともに, 従来成果^{12), 18)} より, 複断面流れ特有の斜昇流が顕著に見られる低水路水深/高水敷上水深として2.0を用いた. 水理条件をまとめて Table 1 に示す.

(1) 水平断面および縦断面流況可視化法¹⁾

本方法は, Fig.1 に示すように, 35 mm スチールカメラおよび照明装置を台車に載せ, 流水中に混ぜた中立粒

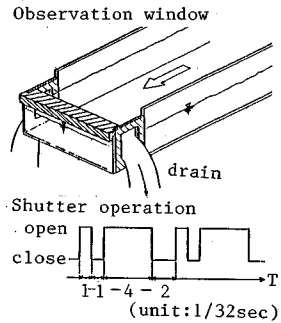
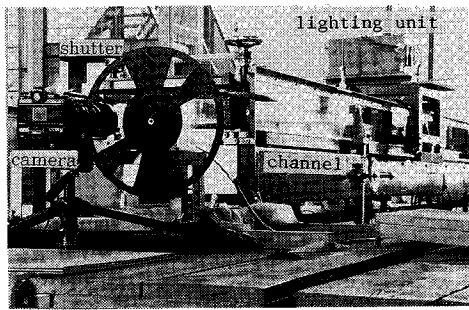


Fig.2 Experimental set-up for visualizing flow in transverse cross-section

子の水平面内の挙動を可視化するトレーサ法の一つである。用いた粒子は平均粒径 0.45 mm のポリスチレン粒子であり、比重は 1.05 である。静水中の沈降速度から計算した見かけの比重は 1.005 以下であり、得られた結果より流れに十分追従していると判断した。一方、照明装置としては光の拡散が小さく、限られた水平断面が照明可能なレーザ・ライト・シート法(以下,LLSと略記)を用いた。これは、レーザ光が円形断面の硝子を通してシート状に広がる性質を利用したもので、ここでは 5 mw の He-Ne レーザを光源として用いた。また、レーザ光を回転板を用いて一定間隔で遮断することによりストロボ状として粒子の移動方向を判断した。実験水路は、幅 20 cm、深さ 15 cm、長さ 6 m の一部アクリル樹脂性木製水路を用い、35 mm スチルカメラによる移動撮影および固定撮影が行えるようになっている。一方、縦断面流況の可視化には同じ装置を用い、LLS で流れの縦断面を照明して台車側方に設置したカメラで流況を撮影する方法を用いた。

(2) 横断面流況可視化法²⁾

Fig.2 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照明を用いた撮影、ビデオカメラでは固定照明を用いた撮影を行った。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および直径 0.05 mm の白金線より発生させた水素気泡を用い、移動照明では幅約 2 cm、固定照明では流下方向に約 20 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中立粒子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プ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

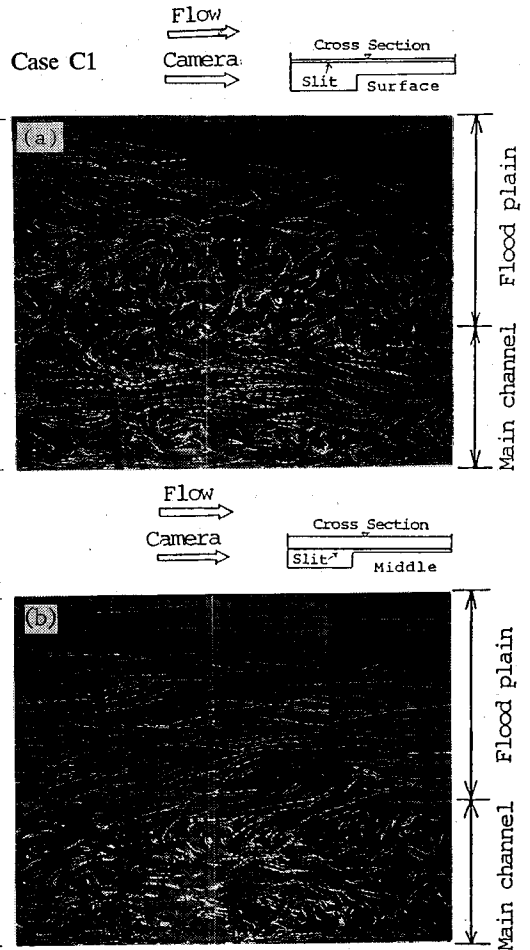


Photo.1 Flow in horizontal cross-sections obtained by moving shot; (a) near the water surface, (b) just above the flood plain

るため、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、流速だけでなく流向 (速度が 1 cm/sec 程度以上の粒子) も可視化可能となる。

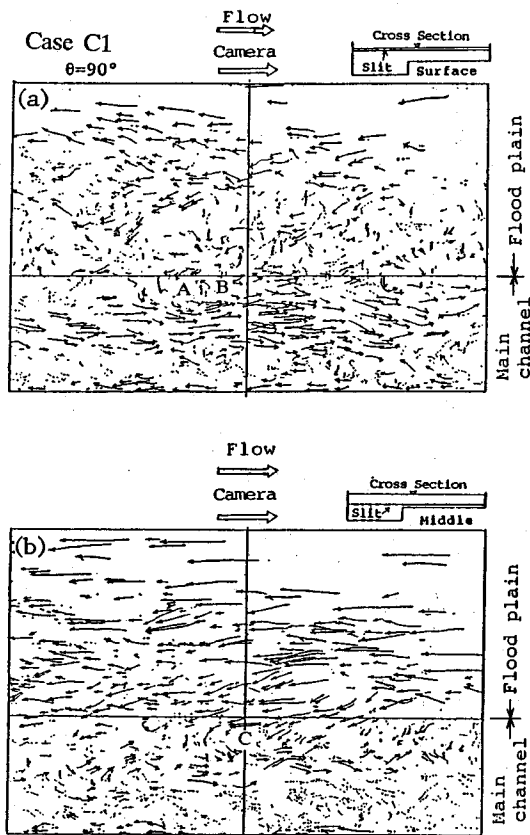


Fig.3 Pass lines of the tracers in horizontal cross-sections; (a) near the water surface, (b) just above the flood plain, those were traced on the pictures in Photo.1

3. 実験結果および考察

(1) 水平断面および縦断面流況¹⁾

Photo.1 は、断面平均流速に相当する速度で移動撮影を行った例を示したものであり、自由水面近傍（写真上段、路床より 3.5~3.8 cm）および高水敷直上（写真下段路床より 2.3~2.6 cm）の水平断面における結果を示している。写真を見るとトレーサのパスラインは長い線と短い線で構成されて写っている。これは前述した回転板の開口部幅を変化させて作ったストロボ光によって得られ、長い線と短い線の間隔が約 1/45 秒、長い線の間隔が約 1/15 秒となっている。ここで示した撮影条件では 3~4 組の長・短線が存在すれば露光時間内に対象とする層内に粒子が存在していたことになる。また、トレーサの移動方向は長い線より短い線の方である。いずれの写真においても、低水路中央および高水敷中央では比較的流れは一様であるが、高水敷先端近傍および低水路側壁近傍では複雑な動きをしており、発散、集中、回転などの流体の挙動がうかがわれる。また、これらの領域

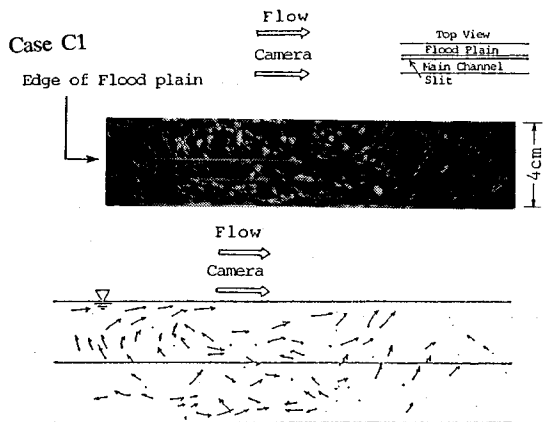


Photo.2 Pass lines in a vertical cross-section obtained by a moving shot

では、パスラインの長・短線の構成組数が露光時間内の所定数より少ないものが多く、粒子の撮影対象層外への移動あるいは層外よりの侵入があり、流体の出入りが推定される。

撮影したネガフィルムより水路全幅 20 cm×流下方向 30 cm の範囲に存在する粒子のパスラインを読み取り、流向が判別可能なものについては矢印を付して示したものが Fig.3 である。流れは図に向かって左より右であるが、移動撮影を行っているため、台車の移動速度より遅い粒子は左向き、速い粒子は右向きとなっている。水面近傍（図中上段）の結果を見ると、境界部では非常に複雑であり、境界に沿って島状に存在する渦（例えば図中 A）とその下流側に流出点状の運動（図中 B）が見られる。これは、斜昇流のなかでもボイル状の強いものが水面に達し、押しのけられた流体が低水路の速い流れに引き込まれて行く過程を示すものと考えられる。また、低水路から高水敷あるいはその逆方向の挙動が境界線付近で見られ、流体混合が行われていることを示している。一方、高水敷直上の結果（図中下段）では、高水敷上の流体は低水路の流れに引き込まれ、境界線の低水路側で渦を形成しているのが確認される（図中 C）。

境界部の低水路側の縦断面（高水敷端より 0.3 cm の範囲）における移動撮影では Photo.2 のような結果が得られ、路床より水面まで達するような水深規模の流体の動きが見られる。

斜昇流の特性を見るために、幅 20 cm、深さ 10 cm、長さ 2 m の水路内に高さ 1.1 cm、幅 12 cm の高水敷を片側に設置し、壁面より 0.3 mm の高さで潤辺に沿って設置した白金線より発生するシート状の水素気泡をトレーサーとして可視化実験を行った²⁾。なお、水理条件は低水路水深 3.0 cm、流量 0.318/s、勾配 $I=1/1700$ 、レイノルズ数は $Re=1160$ である。

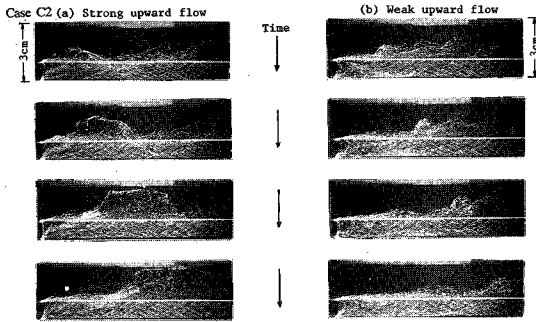


Photo.3 The upward flows near the edge of flood plain

Photo.3は、毎秒3.8コマで連続撮影を行ったものである。(a)は、高水敷先端付近で間欠的に発生する強い上昇流であり水面まで達しているのが観察される。一方、(b)は、(a)のような強い上昇流と次の強い上昇流の間で発生する弱い上昇流であり、高水敷先端より少し上る程度で下方にひきもどされる。このように、2種の状態が観察され、(a)のような強い上昇流が間欠的に発生し、その間に(b)のような弱い上昇流が存在する。また、流況を目視観察したところ、(a)のような強い上昇流は高水敷先端で発生し、ボイル状に上昇して水面に達するのに対し、(b)のような弱い上昇流は高水敷先端より少し上昇したところで低水路内の速い流れにひきずり込まれてゆく現象が見られた。このように、斜昇流は間欠的に発生し、流体塊として水面に達する。

以上示した水平および縦断面流況の可視化結果より、斜昇流の存在および高水敷面付近の流体が低水路に引き込まれて行く流れの存在が確認された。これより、高水敷先端近傍において高水敷上の流体と低水路路床付近より上方に向かう流れが混合して渦を形成しつつ上昇し、水面に達して発散し、それにより押しつけられた流体が低水路の流れとの境界で渦を形成するという斜昇流の形成およびそれに伴う渦の形成過程が考えられる。しかしながら、高水敷面付近の低水路に向かう流れは、福岡ら²¹⁾が指摘した大規模渦の高水敷から低水路に向かう流れに相当するものとも考えられ、2種の流体運動を区別した取扱いが必要であるが、ここに示した結果ではこれらを分離して検討することは困難である。この問題については横断面流況による検討で取り扱うこととする。

(2) 横断面流況²⁾

Photo.4は横断面内に鉛直に設置した白金線より発生する水素気泡が形成するタイムラインを可視化した結果を示したものである。これは、水路下流端に設置した観測窓を通し、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水素気泡の挙動を、35 mm スチールカ

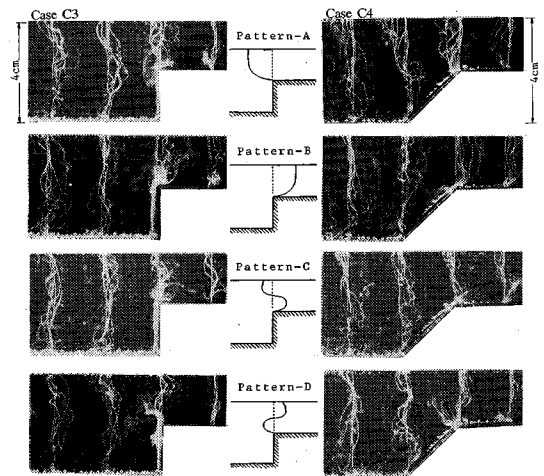


Photo.4 Typical four patterns of time lines obtained by the hydrogen bubble method in transverse cross-sections

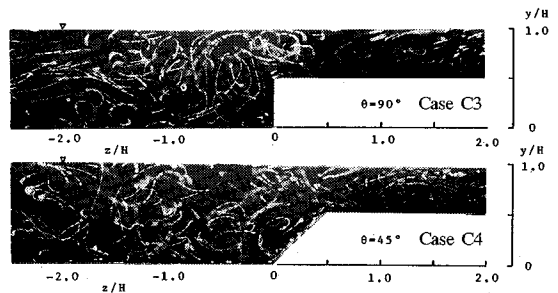


Photo.5 Upward flows in transverse cross-sections obtained by the neutral buoyant tracer method

メラにより撮影する方法で得られたものである。なお写真は、300 mm の望遠レンズを用い、絞り $F=2.8$ 、露光時間 $1/30$ で時間間隔 0.1 秒毎に発生するタイムラインを撮影したものである。低水路と高水敷の境界に鉛直に設置した白金線より発生する水素気泡が形成するタイムラインの挙動は、流れの3次元構造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、写真に示す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、高水敷先端付近に発生した斜昇流が縦渦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。これより、斜昇流の発生とともに、縦渦が形成されることがわかる。Cは斜昇流により低水路側に形成された縦渦により引き起こされるパターンであると考えられる。

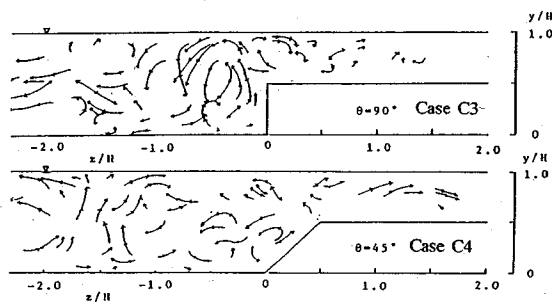


Fig.4 Pass lines of tracers in transverse cross-sections, those were traced on the pictures in Photo.5

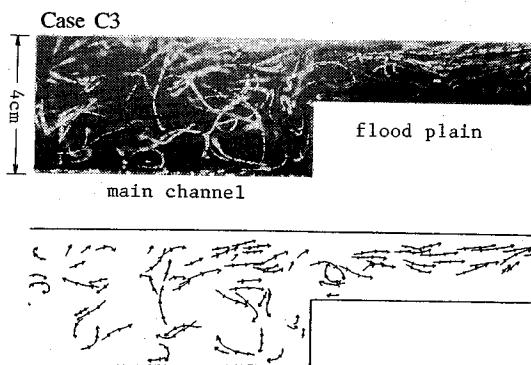


Fig.5 Cross flow and pass lines of tracers in a transverse cross-section

これらのタイムラインのパターンは、いずれの断面形状の場合にも認められ、それは時間的に変動する。

本研究では、Fig.4及びPhoto.5に見られる高水敷先端より水面に向かって斜めに上昇する2次流を今本・久下¹⁸⁾にしたがって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、これまで述べてきた結果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2種の断面形状の場合について示したものがFig.4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縦渦が明確に認められ、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、それに誘起された縦渦も確認できる。

以上は斜昇流の構造を見たものであるが、得られた写真には、Fig.5に示すような高水敷に乗り上げる流れを明瞭に捉えたものもある。図には、写真とパスラインを示しており、水面付近に低水路から高水敷上に向かう流れの存在が確認される。

本節で示した結果より、複断面流れの低水路流れと高水敷上流れの境界部には斜昇流とそれに伴う縦渦および水平方向の混合の2種の構造が存在することが明瞭に示され、前節までに述べた推定結果の妥当性が確認された。これらの構造は低水路流れと高水敷上流れの混合機構を示すものであり、これらの現象を検討することによって流れの相互干渉が明らかとなる。

(3) 境界部の混合現象⁴⁾

境界部における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部を通過する流体の挙動を捉える必要がある。ここまで示してきたように境界部の流況は3次元的存在であり、斜昇流とそれにより誘起される縦渦および水平方向の流れ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、斜昇流および水平混合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。ここでは、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(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。ここでは、粒子トレーサの同定を容易かつ正確に行うための解析方法として、目視による粒子の同定を行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($\pm 1/30$ 秒毎)の位置が確認可能であり、粒子の同定が容易である。

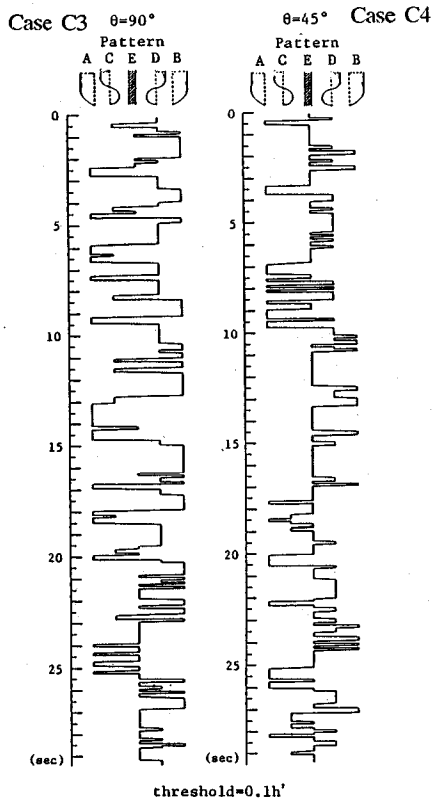


Fig. 6 Variation in patterns of the time line at the boundary between main channel and flood plain

Photo.4 に示したように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形状は4パターンに分類することができる。すなわち、水平混合を示すAおよびB、斜昇流に起因するCおよびDである。これらのタイムラインのパターンは、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。

この判断基準を用い、これらの4パターンの時間変化を解析すると、Fig.6のような結果が得られる。なお、パターンの識別を明確にするために、白金線より高水敷上水深 h' の10%以上横断方向に移動したタイムラインのみを対象として分類し、いずれにも該当しないものをEパターンとする、いわゆる閾値を用いた解析法を用いた。 $\theta=90^\circ$ の場合について変化特性を見ると、D(斜昇流に誘起される縦渦)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、つぎにその流れとは逆に高水敷上へ乗り上げる流

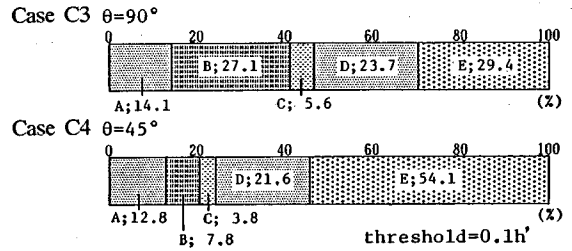


Fig. 7 Percentage of each pattern in the observations

Table 2 Period t_p , and duration t_d of each pattern, those are normalized by h'/U_b , where h' is the water depth on 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'

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完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同時に、大きく高水敷に乗り上げる流れ(B)が間欠的に生じた後、それを補完する流れ(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.7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異なる期間が長く、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認められる。

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5~7倍程度となっている。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

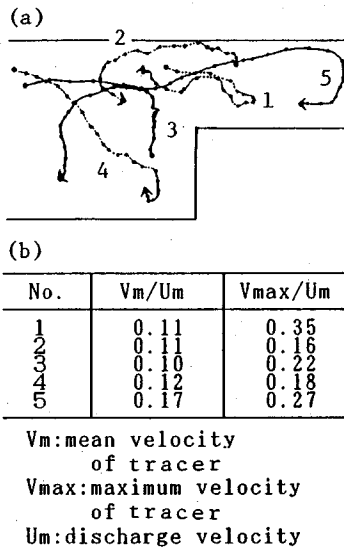


Fig.8 Pass lines and velocity of tracer

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。

Fig.8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)に横断面内の移動速度の平均値および最大値を断面平均流速で基準化して示したものである。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、斜昇流および縦渦の存在を示すNo.1およびNo.3の粒子、低水路の流れに連行される動きを示すNo.2、低水路側壁法尻に向かう隅角凹部の縦渦の存在を示すNo.4、高水敷に大きく乗り上げているNo.5などの特徴的なトレーサの挙動が示されている。一方、トレーサの移動速度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10.3 cm/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、高水敷上の縦渦により底面付近に輸送された後に急減速するという結果が得られている。この現象は、高水敷上の堆砂機構の一面を示すものと考えられる。

低水路流れと高水敷上流れの境界を、低水路法肩を通る鉛直面とし、この面を通過するトレーサの挙動に着目したビデオ画像の解析を行った結果がFig.9である。図の上部は、粒子の移動方向と境界面における通過位置を、頻度分布で示したものであり、低水路側には高水敷より低水路に向かった粒子について、高水敷側には高水敷に向かった粒子について90秒間の結果を整理したものである。図の下部には、各粒子の横断方向移動範囲を境界面の通過時刻について整理して図示したものである。な

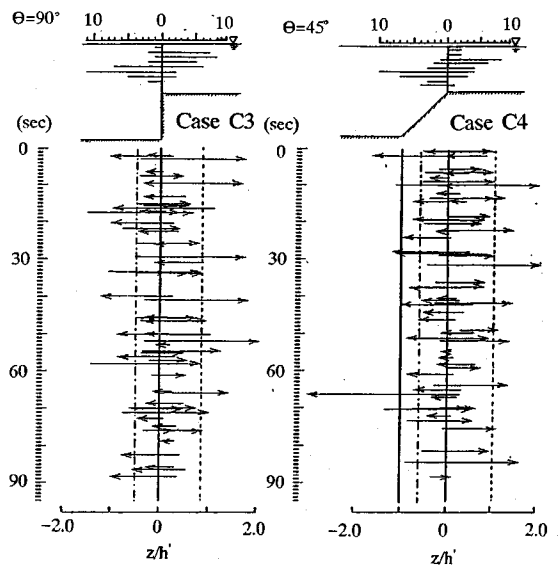


Fig.9 Distribution of the position and direction of passing tracer at the boundary (upper), and the travel distance of each tracer (lower)

お、横断方向の位置は高水敷水深 h' で基準化しており、図中の破線および一点鎖線は移動範囲の高水敷側と低水路側の平均値を表示したものである。

頻度分布の結果を見ると、境界面を通過する粒子の総数には移動方向による差異は無く、連続の条件が満たされていることが知れ、実験の妥当性が認められる。また、いずれのケースについても、水面付近で高水敷に向かう流れが多く見られ、路床付近で低水路に向かう流れが多く見られる。これは、前節で検討した斜昇流により誘起される縦渦の高水敷側に形成される渦の影響が明瞭に表れた結果である。また、水平混合が存在することを考慮すると、低水路から高水敷に向かう流れは水面付近に集中し、その逆方向の流れは底面付近に集中していることが指摘される。これは、水平断面流況による結果でも示されているとともに、1.で記した福岡ら²⁾の大規模渦に関する特性と一致している。一方、図の下側に示した個々のトレーサの水平方向の移動距離を示す結果を見ると、低水路側に高水敷上水深程度、高水敷側にその2倍程度の範囲が境界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。

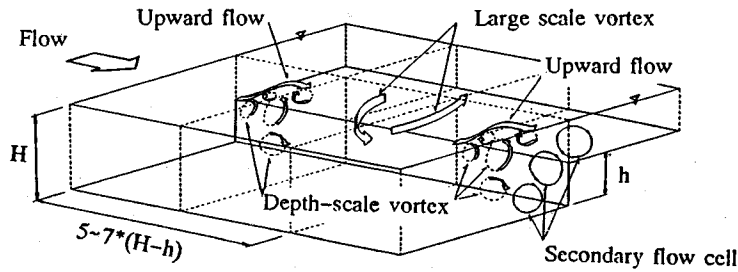


Fig.10 Three dimensional structure of flow

4. 結 論

本研究では、低水路水深が大きく、斜昇流の存在が顕著に見られる流れを対象とし、このような条件では複断面流れの境界部に2種の渦構造が存在することを示した。以下に、境界部の3次元構造に関して得られた主な知見をまとめて結論とする。

1) 低水路流れと高水敷上流れの速度差に起因する渦構造および断面形状に起因する斜昇流が存在し、それらは交互に発生する。なお、これら2種の構造は、水平断面および縦断面流況の可視化結果では判別できず、横断面流況の可視化結果から見い出された。

2) 速度差に起因する渦構造は3次元的な構造を有し、その横断方向スケールは比較的大きい。低水路から高水敷へ向かう流れは水面側に集中して生ずるのに対し、高水敷から低水路に向かう流れは高水敷面側に集中している。これらの流れは、平均化により隠蔽されやすく、流れの可視化法によって検出される。

3) 斜昇流は、高水敷先端付近より急激に上昇し、低水路流れに引き込まれながら低水路水面に達する。流れは間欠的に発生し、流体塊が上昇しながら両側に縦渦を形成する。本研究で対象とした流れでは、その発生間隔は高水敷上水深の5~7倍程度であり、斜昇流の流速は局所平均流速の10%程度であった。

4) 2種の渦構造の発生は、斜昇流とそれに伴う縦渦の生起、低水路から高水敷に向かう流れ、高水敷から低水路に向かう流れの順に観察されることが多い。

これらの境界部の3次元構造を説明する流体の挙動をモデル化して示すと Fig.10 のようになる。まず、間欠的に斜昇流が発生し、高水敷先端より水面に向かって流体塊が上昇するのに伴って低水路側と高水敷側に縦渦を形成することによって高水敷上流体が低水路側に連行される。これを補完するように低水路より高水敷に向かう流れが生じて低水路内の高速流体が高水敷に乗り上げる、さらにこの流れを補完するように高水敷から低水路に向かう流れが生ずる。このような挙動が繰り返され、低水路流れと高水敷上流れが混合して相互干渉する。以

上のような構造で混合機構が説明されるが、2次流と渦構造との関係はつぎのようであると考えられる。斜昇流の生起に伴って形成される縦渦(depth-scale vortex)は、発生位置が比較的安定しているため、図の下流端の面に示したような水深規模の2次流セル(secondary flow cell)として検出されるが、鉛直軸を有する大規模渦(large scale vortex)は平均化されるために2次流としては検出されない。

以上、低水路水深が大きく斜昇流が顕著となる限られた条件について、一樣水路における複断面開水路流れの3次元構造について得られた結果を示した。しかしながら、ここに示した構造のレイノルズ数依存性についての検討、高水敷粗度あるいは低水路の蛇行などが流れの構造に与える影響についての検討が必要であり、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 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, pp.833-838, 1985.
- 2) 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, pp.403-408, 1990.
- 3) 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, pp.61-66, 1983.
- 4) 今本博健, 石垣泰輔, 武藤裕則: 複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れ混合機構に関する実験的研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.139-144, 1992.
- 5) Sellin, R.H.J.: A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over flood plain, *La Houille Blanche*, No.7, 1964.
- 6) Zheleznyakov, G.V.: Relative deficit of mean velocity of instable river flow, kinematic effect in river beds with flood plains, *IAHR*, 1966.
- 7) 芦田和男, 高橋 保, 竹元忠嗣: 複断面水路における洪水流, 京都大学防災研究所年報, 第10号B, pp.133-145, 1967.
- 8) Wright, W.W. and Carstens, M.R.: Linear momentum flux to overbank section, *ASCE*, HY9, 1970.
- 9) Townsend, D.R.: An investigation of turbulence charac-

- teristics in a river model of complex cross section, *Proc. Institution of Civil Engineers*, London, Vol.40, 1968, pp.155-175.
- 10) Rajaratnum, N. and Ahmadi, R.M. : Hydraulics of channels with flood-plain, *J. Hydraulic Research*, 1981.
 - 11) Elsayy, E.M., McKee, P.M. and McKeogh, E.J. : Application of LDA techniques to velocity and turbulence measurements in an open channel of compound cross section, *20th IAHR*, B.b, pp.255-263, 1983.
 - 12) 富永晃宏, 江崎一博, 森上秀樹: 複断面開水路接合部の乱流構造, 第33回水理講演会論文集, pp.523-528, 1989.
 - 13) Shiono, K. and Knight, D.W. : Turbulent open channel flows with variable depth across the channel, *J. Fluid Mech.*, Vol.222, pp.617-646, 1991.
 - 14) 今本博健, 石垣泰輔, 塩野耕二: 複断面開水路流れの水理特性について(6), 京大防災研年報, 第35号B-2, pp.349-364, 1992.
 - 15) Keller, R.J. and Rodi, W. : Prediction of two dimensional flow characteristics in compound channel cross-section, *Proc. Hydrosoft '84*, 3-3, 1984.
 - 16) 河原能久, 玉井信行: 複断面開水路乱流の三次元数値解析, 第31回水理講演会論文集, pp.425-429, 1987.
 - 17) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. : Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.3, pp.390-408, 1993.
 - 18) 今本博健, 久下俊夫: 複断面流れの水理特性に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, pp.665-679, 1974.
 - 19) 木下良作: 洪水と流路形態の現地観測, 土木学会水工学シリーズ, 78-A-7, 1978.
 - 20) 玉井信行, 河原能久: 複断面開水路流れの特性と抵抗則に関する研究, 第25回水理講演会論文集, pp.113-118, 1981.
 - 21) 福岡捷二, 浅野富夫, 藤田光一, 坂野章: 複断面河道における洪水流の抵抗特性, 第30回水理講演会論文集, pp.499-504, 1986.
 - 22) Knight, D.W., Demetriou, J.D. and Hamed, M.E. : Stage discharge relationships for compound channels, *Proc. 5th GAMM Conf. on Numerical Method in Fluid Mech.*, 1983.
 - 23) 池田駿介, 村山宣義, 空閑健: 複断面開水路流に発生する平面周期渦の発生について, 水工論文集, 第38巻, pp.431-436, 1994.
 - 24) 中川博次, 綱津家久, 佐伯賢一, 安部崇: Particle-Image Velocimetry(PIV)による複断面開水路流れの流速計測法, 水工論文集, 第38巻, pp.697-702, 1994.

(1994.6.6受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON 3-D FLOW STRUCTURE IN COMPOUND OPEN CHANNEL

Taisuke ISHIGAKI and Hirotake IMAMOTO

In compound open channels, 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 investigate the flow structure in the mixing zone between main channel and flood plain flow. In this paper, the three dimensional structure in the zone is visualized in horizontal, lateral and transverse cross section of the flow by the neutral buoyant tracer method and the hydrogen bubble method. The results show the existence of two kinds of vortex there, the one is the lateral vortex induced by the velocity difference of the two flows, and the other is the longitudinal vortex induced by the strong secondary flow which is observed near the external corner of the flood plain.