

徳山工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○河村優太
徳山工業高等専門学校 正会員 渡辺勝利
正会員 佐賀孝徳

1. はじめに

日本の河川は河状係数が大きいので、河道断面には複断面が多用されており、洪水時には、高水敷と低水路の流れの境界部では、速度差により複雑な流れになることが知られている。

一般的に、実河川の護岸の大半は傾斜しており、そこでは洪水時に、洗掘、堆積、すり付け部からの破壊や吸出し等が発生している。これらの災害を防止するには、傾斜側壁を有する複断面流れの内部構造を詳細に検討することが不可欠と考えられる。

傾斜側壁を有する複断面流れに関する研究はこれまでもいくつか行われている。例えば、瀬津ら¹⁾は側壁勾配が1:2の複断面開水路で流速計測を行い、主流速分布や二次流分布の特徴を明らかにしている。また、杉山ら²⁾は、数値計算法を用いて、傾斜側壁を有する複断面開水路流れの特徴を検討している。しかし、彼らの使用した水路断面は、傾斜側壁から対岸側壁までの距離が近いので、対岸側壁面付近に生じる二次流れが傾斜側壁の流れに影響を及ぼしていると考えられる。また、乱流場の形成に重要な役割を果たす組織構造については十分な解明に至っていない。一方、筆者ら³⁾は、これまでに垂直側壁を有する複断面開水路流れの内部構造に関する究明を進め、流れ場に形成される組織構造が、平均流速分布や二次流の形成に重要な役割を果たすことを明らかにした。

そこで本研究では、傾斜側壁を有する片複断面開水路流れの内部構造の特徴を、流れ場に形成される組織構造に注目し、流速計測、流れの可視化法を用いて検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験には、図-1に示した幅60cm、高さ15cmの透明アクリル樹脂板製の滑面開水路を使用した。本水路勾配は1/1000に設定した。また、水路の右岸底壁面上に

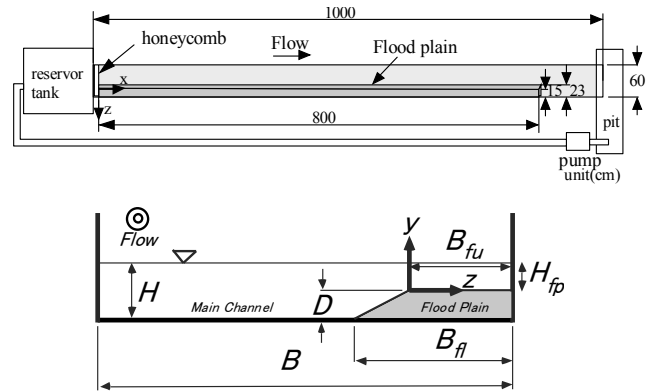


図-1 実験水路および座標系

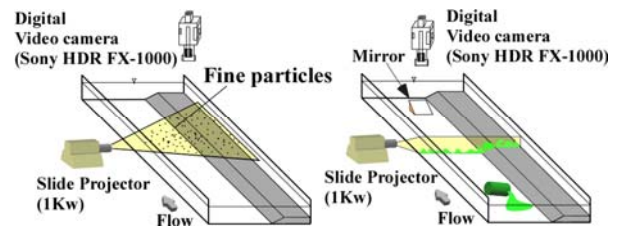


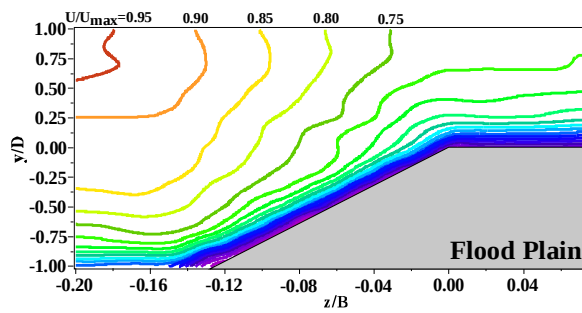
図-2 流速計測および流れの可視化法概略

表-1 実験条件

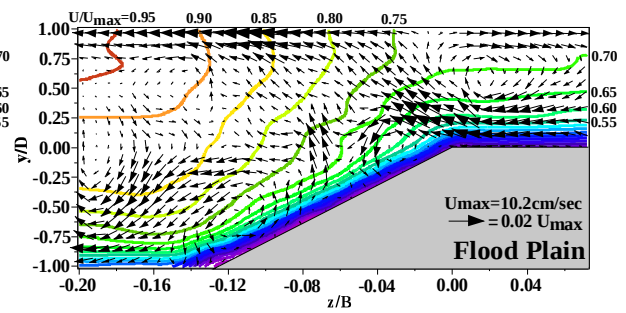
Case	H (cm)	D (cm)	U_m (cm/s)	Re $(\frac{U_m H}{\nu})$	Fr $(\frac{U_m}{\sqrt{gH}})$
A	8.0	4.0	7.3	6054	0.082
B	8.0		5.0	4115	0.056
C	8.0		5.0	4115	0.056
D	8.0		4.4	3470	0.050

台形断面(上底(B_{fu})15cm、下底(B_{fl})23cm、高さ(D)4cm)の塩化ビニル製樹脂板を高水敷として、上流から8mの区間にわたって設置した。また、低水路側壁の勾配はさまざまな護岸工種の標準値である1:2を採用した。

実験では、上流から5mの付近において、図-2に示すようにしてPTV(Particle Tracking Velocimetry)による流速計測と内部流況の可視化を行った。微細粒子(平均粒形150 μ m、比重1.04)をトレーサーとして水路に注入し、スライドプロジェクター(1kw)からの厚さ2mmのスリッ

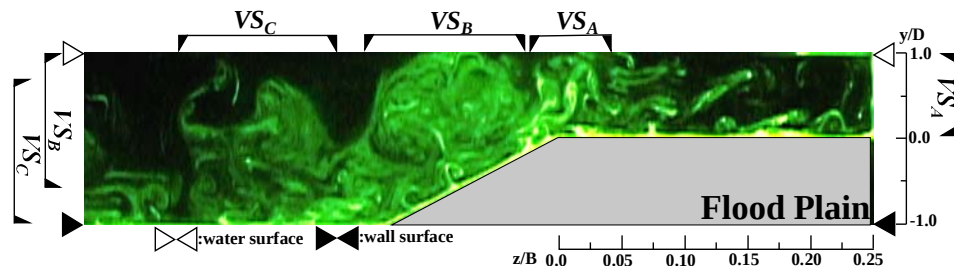


(a)主流速分布(U)

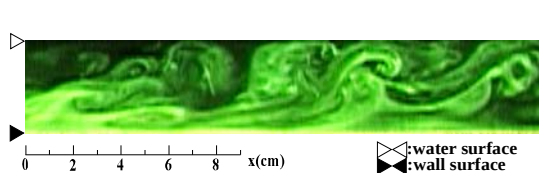


(b)主流速分布(U), 二次流ベクトルの重合図(V,W)

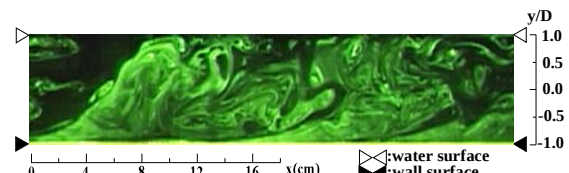
図-3 平均流速分布特性(Case A)



(a)横断面流況(Case B)



(b)z=0.0cm(Case C)



(c)z=-8cm(Case C)

図-4 組織構造の断面形象

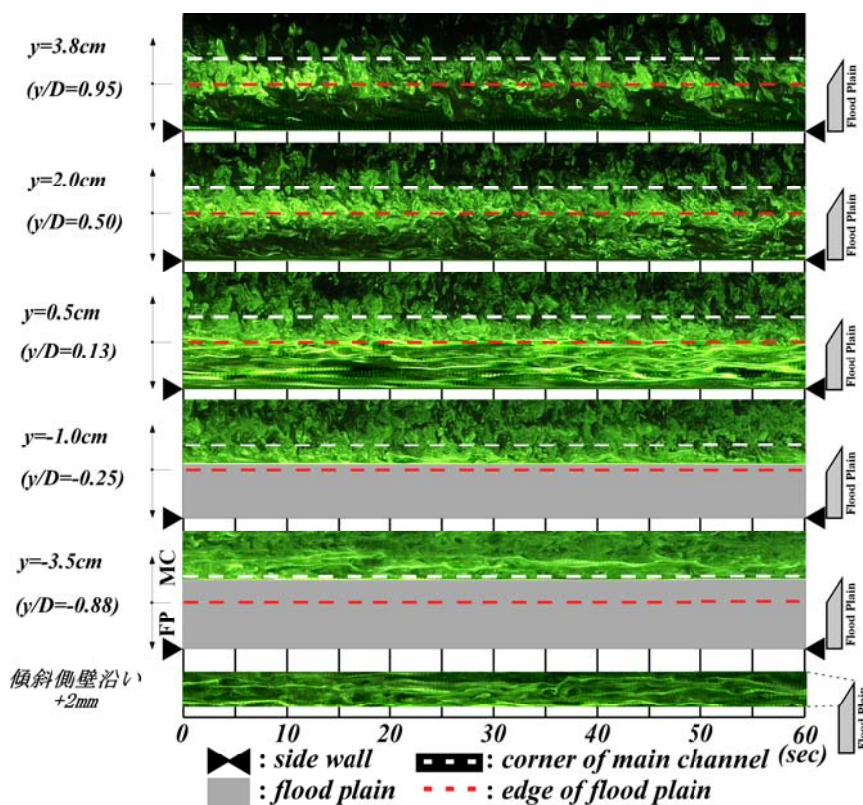
ト光膜によって可視化された粒子の流動状況をデジタルビデオカメラ(Sony HDR-FX1000)で撮影した。PTVの解析では、撮影した映像を連続画像としてコンピュータに取り込み、解析ソフト「Flow PTV」((株)ライブラリー)を用いて瞬時流速を求め、それらを統計処理することによって平均流速分布を求めた。内部流況の可視化には、トレーサーに蛍光染料水溶液(比重1.005)を用いて、上流から横断方向に均一に注入し、各断面の流況を同デジタルビデオカメラで撮影した。また、組織構造と瞬時流速との相互関係を考察するために、微細粒子と蛍光染料水溶液を同時注入するDPTV(Dye-streak-pattern Particle Tracking Velocimetry)⁴⁾を行った。実験条件を表-1に示す。

3. 実験結果および考察

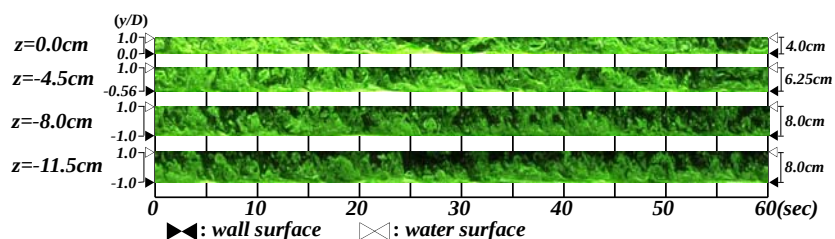
(1) 平均流速分布および二次流分布特性

図-3(a)は、PTV流速計測によって得られた平均主流

速分布(U)を示している。同図より、主流速の等値線が高水敷水平先端部(以下、高水敷先端部と呼ぶ)では凸型に膨らみ、傾斜側壁の隅角部(以下、低水路隅角部と呼ぶ)においては凹型を呈していることが明らかである。これらの特徴は、同図(b)に示した主流速分布と二次流ベクトルの重合図から、同領域に形成された二次流によって生成されたことが明らかである。すなわち、高水敷先端部における凸型の膨らみは、時計、反時計方向の旋回流によって形成された斜昇流に対応しており、高水敷上の低速領域が斜昇流によって低水路側に輸送されることによって生じたものと考えられる。また、低水路隅角部の凹型の分布は、そこに形成された反時計方向の旋回流に対応していることが明らかである。また、傾斜側壁の中央付近では強い上昇流の存在が確認でき、これも等値線図の凸型の歪みに対応していることが認められる。これらの二次流分布の特徴は、本研究と同様な傾斜角度の側壁を有する単断面水路で行われた林ら⁵⁾の数値解析による二次流分布

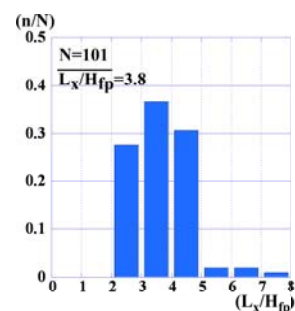


(a)水平切断重合図

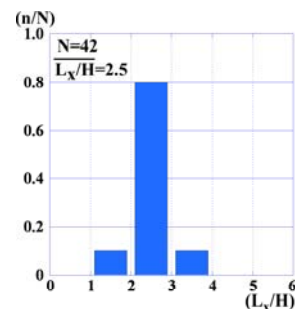


(b)鉛直切断重合図

図-5 縦渦構造の形成領域の経時変化(Case B)



(a) $z=0\text{cm}$



(b) $z=-8\text{cm}$

図-6 縦渦構造の流れ方向スケール特性(Case C)

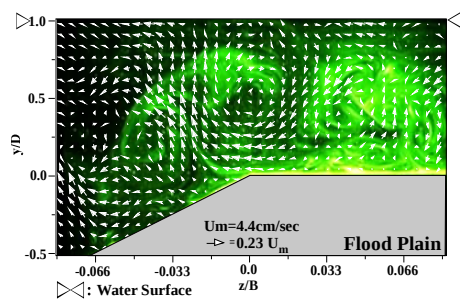


図-7 DPTV解析結果(Case D)

とほぼ一致している。

(2) 組織構造の可視化および時空間特性

図-4(a)は横断面の流れの可視化結果の一例を示したものである。これより、高水敷先端部及び傾斜側壁上、低水路隅角部近傍には、それぞれ VS_A 、 VS_B 、 VS_C で示したような縦渦構造が形成され、それらの左右への揺動、渦運動による高水敷側の流体の低水路側への輸送、逆に低水路から高水敷側へ流体が輸送されている様子が観察された。同図(b), (c)は、それぞれ高水敷先端部 $z=0\text{cm}$ 、低水路隅角部 $z=-8\text{cm}$ における組織構造の縦断面視の一例を示しており、いずれも縦渦構造が水表面方向に発達していく様子が観察された。

図-5は、縦渦構造の形成領域の経時変化を検討する

ために作成した。同図(a)は1分間に亘る横断面視画像(1800枚)を各高さにおいて実寸厚さ約1mmで水平切断し、それらを重合したものである。緑色の部分は蛍光染料であり、縦渦構造の存在領域に相当する。これらより、低水路隅角部および高水敷上に縦渦構造の存在を示す蛍光染料の分布が連続的に形成されていることが明らかである。その形象は水表面付近 $y=3.8\text{cm}$ では幅広く、壁面付近 $y=0.5\text{cm}$ および $y=-3.5\text{cm}$ では細くstreak状を呈している。

横断面視の観察では、傾斜側壁上においても縦渦構造の形成が認められたが、その形成領域の経時変化を検討するために、 $y=2\text{mm}$ の位置で傾斜側壁と平行な断面で切断重合した。この画像では、傾斜側壁のほぼ中央付近にstreak状の蛍光染料が長時間にわたって分布

しており、縦渦構造の長時間に亘る安定した形成が認められる。同図(b)は同様な方法で実寸厚さ約1mmで横断面視画像を鉛直方向に切断し、それらを重合したものである。高水敷先端部 $z=0\text{cm}$ および低水路隅角部 $z=-8.0\text{cm}$ では、図-4(b), (c)に示したような縦渦構造が連なって流下する形象が認められる。また、傾斜側壁上の $z=-4.5\text{cm}$ および低水路側の $z=-11.5\text{cm}$ でも、同様に連続した縦渦構造の縦断面形象が認められるが、これは、横断面視において観察された傾斜側壁上および低水路側の縦渦構造が同領域に長時間に亘って形成されることに相当しており、傾斜側壁と平行した断面および $y=-3.5\text{cm}$ での水平切断重合図に見られるstreak状の形象とも対応している。

以上のことから、本流れ場の高水敷先端部、傾斜側壁中央部、低水路隅角部近傍には、縦渦構造が時空間的に集中して形成されることが明らかとなった。

図-6は縦渦構造の流れ方向のスケール L_x を測定した結果である。 N は測定個数、 L_x/H_p は平均値を表している。同図(a)より、高水敷先端部の縦渦構造の流れ方向のスケールは、高水敷水深 H_p の3~4倍程度であり、これは垂直側壁の高水敷先端部に形成される縦渦構造と同程度である。また、同図(b)より、低水路隅角部の流れ方向のスケールは低水路水深 H の2.5倍程度であることが認められた。水深に対する縦渦構造の流れ方向のスケールについては、高水敷先端部の縦渦構造の方が低水路隅角部のスケールに比べて大きいことが明らかとなった。

(3) 縦渦構造と瞬時二次流れの相互関係

図-7は、傾斜側壁近傍に形成された組織構造の横断面形象と瞬時二次流ベクトルとを重合したものである。同図(a)では、高水敷先端部に縦渦構造が形成され、それと対応するように右側に時計方向、左側にやや不明瞭ではあるが反時計方向の二次流ベクトルが形成されていることが認められる。また、それらの境界部には、低水路水表面方向に傾斜した二次流である斜昇流が形成されている。

このように、高水敷先端部に形成された縦渦構造は瞬時の二次流を生成することが明らかとなった。傾斜側壁上および低水路隅角部に形成された縦渦構造も同様に二次流を生成することが推測される。これらの縦渦構造の運動によって高水敷側の低速領域の低水路側

への輸送や、低水路隅角部に反時計方向の旋回流が形成され、図-3(a)で示したように高水敷先端部における平均主流速分布の等値線図の凸型、低水路隅角部の凹型の歪みや、傾斜側壁の中央部に強い上昇流が生ずるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、低水路に傾斜側壁を有する片複断面開水路流れの内部構造を、流速計測および組織構造の可視化により検討した。以下に、本研究によって得られた知見を示す。

- (1) 傾斜側壁を有する複断面開水路流れにおいては、高水敷先端部および低水路隅角部に、旋回状の二次流れが形成される。また、傾斜側壁の中央部では強い上昇流が形成される。
- (2) 高水敷先端部、傾斜側壁中央部、低水路隅角部近傍には、縦渦構造の時空間的集中が確認され、高水敷先端部に形成された縦渦構造の流れ方向のスケールは、高水敷水深 H_p の3~4倍程度であり、また、低水路隅角部の縦渦構造のスケールは水深 H の2.5倍程度となる。
- (3) DPTVの解析より、高水敷先端部に形成された縦渦構造は二次流の形成に直接寄与していることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 瀬津家久, 阿部崇, 志村拓也, 中山忠暢: PTV 法による複断面開水路流れの時空間相関解析, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.89-98, 1996.
- 2) 杉山均, 秋山光庸, 亀澤正之, 野口大介: 傾斜側壁を有する複断面開水路内の乱流構造解析, 土木学会論文集, No.565/II-39, pp.73-83, 1997.
- 3) 渡辺勝利, 森山拓士, 佐賀孝徳: 複断面開水路流れの斜昇流と高水敷上に形成された組織構造の相互関係, 水工学論文集, 第51巻, pp.649-654, 2007.
- 4) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 斉藤隆, 波多野慎: 壁乱流の縦断面せん断構造, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.31-40, 1998.
- 5) 林俊一郎, 大本照憲, 本田逸郎: 直接数値シミュレーションによる開水路隅角部の三次元乱流構造の解明, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.80-99, 2006.