高水敷先端部の円形化に伴う複断面開水路流れの二次流れの特徴

徳山高専　正会員　○渡辺　勝利
中電技術コンサルタント㈱　正会員　　片岡　航大

１．はじめに

複断面流れは，比較的高速となる低水路流れと比較的低速となる高水敷上の 2 つの流れから構成される．この 2 つの境界領域では，大規模なせん断層の形成に伴い，高水敷先端部から発生した低水路の水表面へと向かう大規模な二次流である斜昇流 [1]と，鉛直方向に軸を有する大規模な渦構造である水平渦 [2]とよばれる複断面流れ固有の現象が発生しており，これまでに多くの研究がなされてきた．それらは，高水敷先端部が 90 度及び傾斜しているものを対象としたものである．高水敷の屈折部は，流れに非常に強く影響を及ぼす幾何条件であるが，それが消失した場合の流れの構造については，これまで検討された例はない．そのため，複断面開水路流れの総合的な理解のためには，屈折部を消失させた円形断面について，その組織構造を明らかにする必要があると考えられる．

そこで，本研究では，低水路側壁を円形化した複断面開水路流れの二次流れと組織構造の特徴について検討を行い，低水路側壁が直角の流れ場との二次流れと組織構造の特徴の違いについて比較，検討した．

２．実験装置および方法

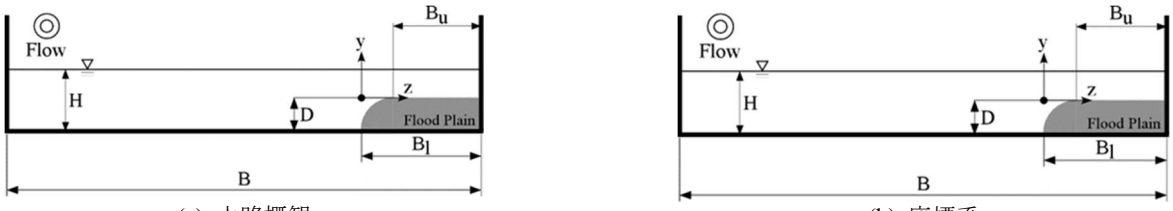
実験には，**図-1** に示すような水路勾配を 1/1000 に設定した透明アクリル樹脂板製の滑面直線開水路(長さ 0m，幅 60cm，高さ 15cm)を使用した．本水路の右岸側の側面に，高水敷先端部を半径 4cm の 1/4 円形に加工 1 した塩ビ樹脂板(幅 15cm，高さ 4cm)を上流端から 8m にわたって設置した．水路上流端には整流装置としてハニカム(径 4mm，長さ 3.2cm，幅 60cm)，下流端には水路調整用の堰を設置した．水路の上流から 5m 付近の地点において，流速計測および内部流況の可視化を行った．流速計測には，PTV(Particle Tracking　Velocimetry)法を用いた．トレーサーとして微細粒子(平均粒径 150μm，比重 1.04)を，照明にはレザースリット(PIV レーザー100mmW(カトウ光研))の厚さ 1mm の光膜を用いた．この微細粒子と水の混相液を，上流端から流れに連続的に注入し，**図-2** の(a)，(b)に示すように，縦断面および水平断面における粒子の流動状況をハイスピードカメラ(DITECT HAS-L1)で撮影した．組織構造の可視化では，トレーサーに蛍光染料水溶液(比重 1.005)，照明に前出のスリット光膜を用いて横断面視を行った．**図-3** の(c)では横断面視の概要を示している．それぞれの実験条件の詳細は表-1 に示す. Um は断面平均流速, Re はレイノルズ数（=Um D/ν）, Fr はフルード数（=U_m/√gH）を示している．水深(H)の条件としては，これまでの研究成果と比較するため， H=8cm，5cm，12cm とした．以降，H=8cm を中水深条件，H=5cm を低水深条件，H=12cm を高水深条件と呼ぶ.

３．実験結果および考察

1) 平均流速分布特性

図-3(a)は，中水深条件における鉛直低水路側壁流れ（以下，鉛直流れと呼ぶ）および円形低水路側壁流れ（以下，円形流れと呼ぶ）における流速測定結果を示している．主流速(U)については，最大流速 Umax で無次元化して表している．両流れとも，高水敷先端部付近には，主流速(U)等値線の対岸方向への盛り上がりが認められるが，鉛直流れに比べ，円形流れの盛り上がりは非常にわずかである．また、円形流れでは，鉛直流れでは水路中央部にあった高速域がより高水敷へ流入していることが認められる．また，この主流速分布の特徴に対応して，高水敷先端部付近にそれぞれ時針，反時針方向の旋回状の二次流(以下，旋回流と呼ぶ)と斜昇流の形成が認められる．これらの旋回流と斜昇流の強度の変化を比較，検討するために，高水敷先端部周辺における，斜昇流の最大値（$=\sqrt{(V^2+W^2)}$）および x 軸回りの渦度 Ωx（$=\partial W/\partial y - \partial V/\partial x$）の正，負の最大値の発生位置

キーワード　円形高水敷，複断面開水路流れ，二次流れ，組織構造
連絡先　〒745-8585　山口県周南市学園台　徳山高専土木建築工学科　ＴＥＬ0834-29-6326



(a) 水路概観　　(b) 座標系

図-1　実験水路概観および座標系

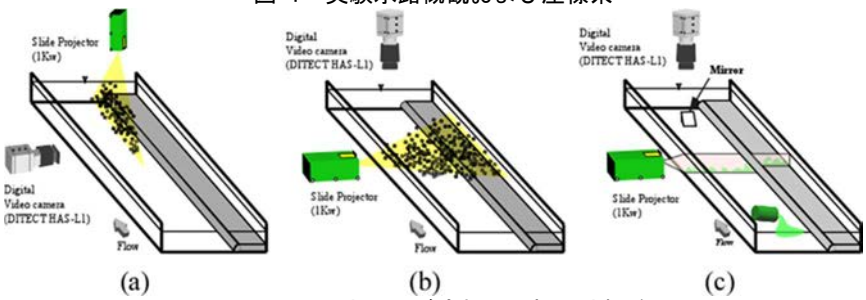


図-2　PTV 法および流れの可視化法概略

表－1 鉛直流れの実験条件

Case	H (cm)	D (cm)	U (cm/s)	Re (UmH/ν)	Fr (Um/(gH)$^{0.5}$)	H/D	remarks
VH8A	8.0	4.0	4.7	4391	0.053	2.00	横断面可視化
VH8B	8.0	4.0	5.7	5202	0.064	2.00	流速計測
VH8C	8.0	4.0	3.3	2979	0.037	2.00	横断面瞬間
VH5A	5.0	4.0	13.7	7787	0.196	1.25	横断面可視化
VH5B	5.0	4.0	12.5	7153	0.179	1.25	流速計測・水平断面瞬時
VH5C	5.0	4.0	15.8	8826	0.226	1.25	水平断面可視化
VH12A	12.0	4.0	5.7	6819	0.053	3.00	横断面可視化
VH12B	12.0	4.0	10.2	8887	0.094	3.00	流速計測

表－2 円形流れの実験条件

Case	H (cm)	D (cm)	U (cm/s)	Re (UmH/ν)	Fr (Um/(gH)$^{0.5}$)	H/D	remarks
CH8A	8.0	4.0	5.3	4828	0.060	2.00	横断面可視化
CH8B	8.0	4.0	5.3	4509	0.060	2.00	流速計測
CH8C	8.0	4.0	3.4	2591	0.038	2.00	横断面瞬間
CH5A	5.0	4.0	7.6	4273	0.109	1.25	横断面可視化
CH5B	5.0	4.0	12.7	7307	0.181	1.25	流速計測
CH5C	5.0	4.0	12.6	5467	0.180	1.25	水平断面瞬時
CH5D	5.0	4.0	16.3	8513	0.234	1.25	水平断面可視化
CH12A	12.0	4.0	5.8	7296	0.053	3.00	横断面可視化
CH12B	12.0	4.0	10.6	14617	0.099	3.00	流速計測

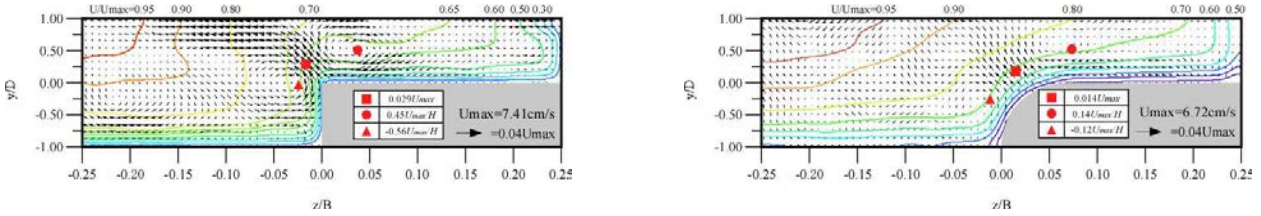
を，それぞれ赤色の四角，丸，三角で表示し，それらを無次元化した値を同図に表示をした．これらより，円形流れの斜昇流の強度は鉛直流れの 1/2，旋回流の強さは鉛直流れの 1/4 から 1/5 となっており，円形流れでの斜昇流と旋回流の強度は，鉛直流れに比べて弱体化していることが明らかである．

同図(b)は，低水深における鉛直流れおよび円形流れにおける流速測定結果を示している．U/Umax=0.9 に注目すると，鉛直流れでは，高水敷先端部から z=-0.12 付近に位置しているが，円形流れでは，z=-0.075 付近まで近づいていることが明らかである．また，中水深条件同様，円形流れでは，鉛直流れでは水路中央部にあった高速域がより高水敷へ流入していることが認められる．また，鉛直流れでは，高水敷先端部に時針，反時針方向の対を成す旋回流が形成されており，その旋回流は横方向に扁平な形状を呈している．一方，円形流れでも，曲面上に時針，反時針方向の旋回流が形成されているが，鉛直流れの場合と比べ小規模となっており，強さについても円形高水敷の方が小さくなっている．特に，反時針方向の旋回流については，より小規模となり，それに応じて底面付近の渦構造が大きくなっていることが認められる．

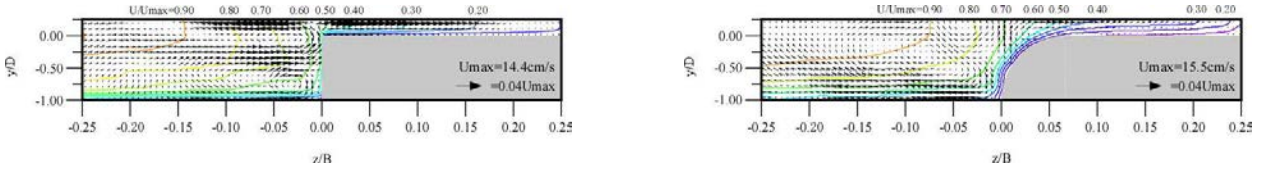
同図(c)は，高水深における鉛直流れおよび円形流れにおける流速測定結果を示している．鉛直流れでは，高水敷先端部付近の等値線が水表面方向に大きく膨らんでいるが，円形流れでは，それはわずかである．また，鉛直流れでは、中水深条件と同様に，時針，反時針方向に大規模な旋回流と斜昇流が形成されている．また，高水敷上の側壁付近に複数の渦構造が確認でき，水表面付近の流速の値が大きくなっていることが認められる．一方，円形流れにおいては，鉛直流れと同様に，時針，反時針方向に旋回流と斜昇流れが形成されているが，その規模や強度は小さくなっていることが認められる．また，鉛直流れと同様に，高水敷上の側壁付近に複数の渦構造が確認でき，水表面付近の流速の値が大きくなっていることが認められたが，円形流れの流速ベクトルは鉛直流れの半分となっている．

2) 組織構造の特徴

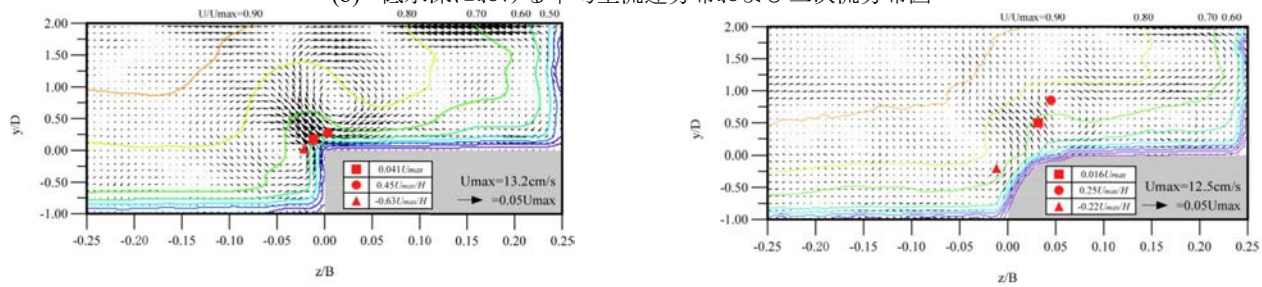
図-4 は，各水深条件における鉛直流れおよび円形流れにおける横断面可視化の一例を示している．同図(a)，(b)は，中水深条件の結果を示している．鉛直流れでは，高水敷先端部に縦渦構造が時空間的に集中して形成されている．円形流れでは，低水路側壁上および高水敷上に縦渦構造が形成されていた．また，縦渦構造の水表面への到達が間欠的であることが観察された．同図(c)，(d)は，低水深条件の結果を示している．鉛直流れで



(a)　中水深における平均主流速分布および二次流分布図



(b)　低水深における平均主流速分布および二次流分布図



(c)　高水深における平均主流速分布および二次流分布図

図-3　各水深における直角流れおよび円形流れにおける流速計測結果

は，高水敷の先端部から対岸方向にかけて水表面付近に縦渦構造が形成されていることが認められている．また，底壁付近にも縦渦構造が形成され，水表面付近に形成された縦渦構造は対岸方向へ伸長運動していることが観察された．円形流れでは，高水敷の曲面上に縦渦構造が形成されており，この縦渦構造は鉛直流れのそれに比べて対岸方向への伸長挙動は顕著ではないことが観察された．しかし，斜昇流に相当する水表面への上昇する運動が顕著であることが観察された．同図(e)，(f)は，高水深条件の結果を示している．鉛直流れでは，高水敷先端部と側壁上に大規模な縦渦構造が形成されていることが観察された．円形流れでは，鉛直流れ同様，高水敷先端部と側壁上に縦渦構造が形成されているが，側壁上で縦渦構造がより大規模となり、時針方向の旋回流が小さくなっていることが観察された．

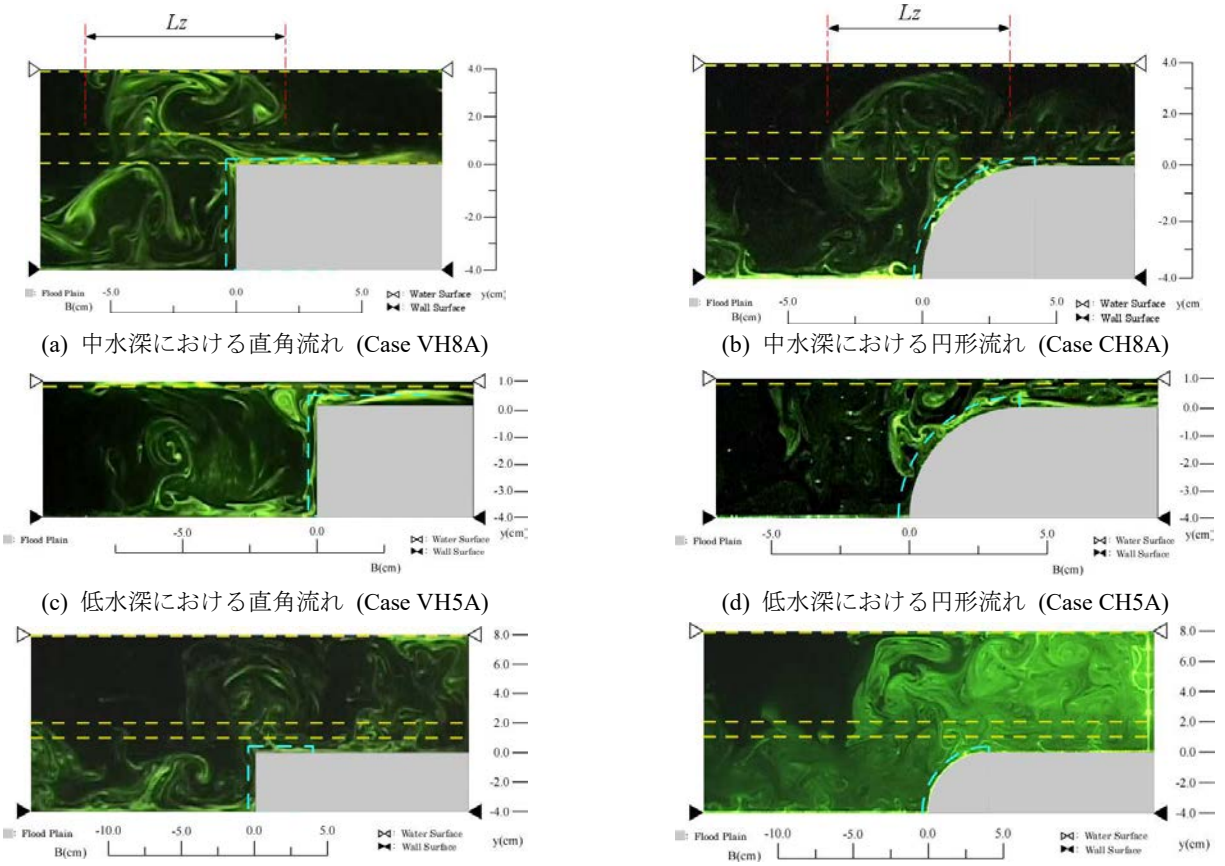
このような縦渦構造は瞬時の二次流れや乱れの生成に主要な役割を果たすことが明らかにされている[3)]．本流れ場に形成された縦渦構造については，その挙動特性，時空間特性について検討された．その詳細については紙数の関係で省略する．

本研究において得られた知見を総合して，円形流れにおける概念図を**図-5** に示す．同図(a)のように円形側壁上には 2 つのせん断層∂U/∂y と∂U/∂z が形成されている．このようなせん断層が形成されると∂U/∂y によって生成された渦管が∂U/∂z によって変形を受け，対を成す複数の縦渦構造流が円形側壁上に形成されることが明らかになった．これらの縦渦構造の形成領域は，同図(b)のような鉛直側壁における高水敷先端部のように集中することはなく，円形流れでは，形成領域が不安定となり，傾斜および蛇行するため，二次流成分が相殺されることにより，時間平均をとると弱体化した二次流分布となると考えられる．

４．おわりに

本研究では，高水敷先端部の形状による二次流れの特徴を検討した．以下に主要な結論を示す．

(1) 中水深条件および高水深条件における円形流れ場においては，鉛直流れと同様に斜昇流と対を成す旋回状の二次流れが形成されるが，その強度は弱体化することが明らかになった．低水深条件における流れ場では，鉛直流れで形成される扁平な旋回流と顕著な横流れが，円形流れでは消失し，小規模な斜昇流と対を成す旋回流が形成されることが明らかとなった．

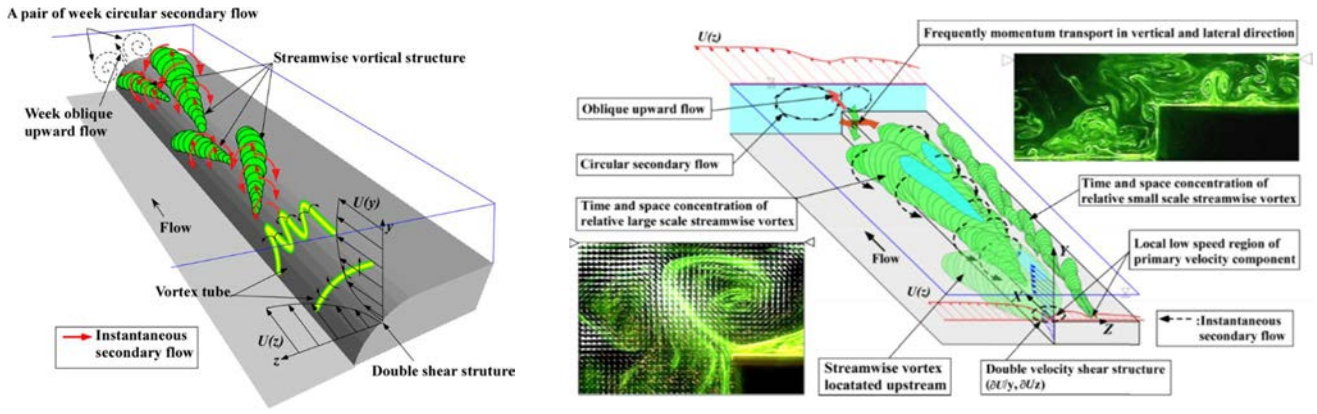


(a) 中水深における直角流れ (Case VH8A)　(b) 中水深における円形流れ (Case CH8A)

(c) 低水深における直角流れ (Case VH5A)　(d) 低水深における円形流れ (Case CH5A)

(e) 高水深における直角流れ (Case VH12A)　(f) 高水深における円形流れ (Case CH12A)

図-4　各水深条件における横断面視の一例



(a)　円形流れの概念図　(b)　鉛直流れの概念図

図-5　直角流れ，円形流れの概念図

(2) 中水深および高水深条件における流れ場においては，鉛直流れでは高水敷先端部に大規模な縦渦構造が直線上に時空間的に集中して形成されるが，円形流れではその形成領域が円形側壁上において傾斜あるいは蛇行していることが明らかとなった．

参考文献

1) 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，pp665-679，1974.

2) Sellin，R. H. J : A laboratory investigation into the interaction between the flow in the open channel of a river and that over its flood plain，La Houille Blanche ，No.7，pp.793-801，1964.

3) 渡辺勝利，森山拓士，佐賀孝徳 ： 低レイノルズ数の片複断面開水路流れに形成される斜昇流の内部構造，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.67，No.2，pp41-53，2011.