

湾曲部に設けた側岸凹部流れに関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW IN CURVED RECTANGULAR OPEN CHANNEL WITH SIDE CONCAVITY

椿涼太¹・藤田一郎²・中野淳³

Ryota TSUBAKI, Ichiro FUJITA and Atsushi NAKANO

¹学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科後期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 学博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³学生会員 神戸大学工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

This study aims to clarify the flow structure in curved rectangular open channel with a side concavity. Surface flow velocity profile is measured using PIV technique and bottom flow direction is obtained by a new method using image analysis of bottom streamlines visualized by dye injection method. In curved channel flow, developing process of secondary flow is examined. The structure of channel flow with side concavity in each side is investigated and their differences are clarified. The results show that water level is larger in the case the side concavity is installed in the outer bank. On the other hand, surface fluctuation is greater in the inner bank case. The aspect ratio of channel width to water depth changed the structure of the flow around side concavity.

Key Words : Side concavity, curved open channel, secondary flow, three-dimensional flow structure, flow visualization, PIV

1. 緒言

近年, 河川の親水性向上を目的とし, 河川公園の整備等が進んできた. その中で, 河床へのアクセシビリティ確保を目的として, 河岸の片側に拡幅部を設け, 階段を設置する(以降, 階段工と称する)例が都市部の中小河川に見られる. このような構造がもたらす流れの抵抗や変動特性はさまざまな要因が影響する複雑な現象であるため, 設計段階で十分な流況の把握は行われておらず, また設置後の歴史が浅いこともあり, 洪水時の水位上昇量や変動については不明な点が多いのが現状と考えられる. 藤田¹⁾は直線開水路において側岸凹部流れの検討を行っているが, 河道の多くを占める, 湾曲部に側岸凹部を設けた際の流れに関する基礎研究例は少ない. そこで, 本研究では藤田らの従来の研究を湾曲水路に発展させ, 拡幅部を設けた際の水面形の変化ならびに流れの構造を明らかにすることを目的とした.

湾曲流れの研究には, Prandtlの流れの三次元的な構造の分類がある. Prandtlは湾曲流れの二次流を第一種二次流れと呼び, 直線水路にみられる第二種二次流れと区別した²⁾. 最近の研究では富永・長尾・千葉³⁾が, 幅水深比を6あるいは9とした長方形断面の曲がり開水路流れの乱流

計測を目的とし電磁流速計を用いて三次元流速分布を測定している. また, 複数の曲がり開水路により構成される蛇行開水路流れの乱流計測はShiono・Muto⁴⁾により報告されている. このような湾曲流れの研究で得られた知見も利用し, 本研究は凹部付近の流れの解明を目指した.

階段工は都市中小河川に設置される例が多いため, 本研究では幅水深比を6および3.75程度, 横断面形は長方形とし, 水位計測, 表面流速分布および, 底面流線の可視化から流況の把握を行った. まず, 凹部を設けない湾曲流れにおいて, 基本的な流れの特性を過去の研究と比較検討した後, 凹部を内岸あるいは外岸に設けた場合の凹部周辺の計測を行った.

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験水路の概要を図-1に, 平面図を図-2に示す.

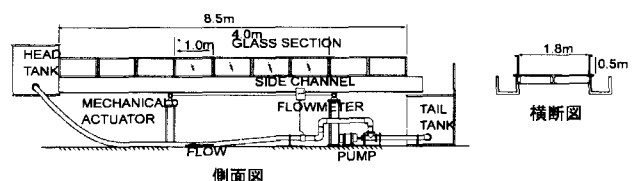


図-1 実験水路の概要

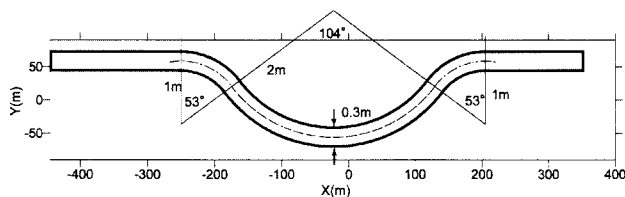


図-2 実験水路の平面図



図-3 撮影画像（底面可視化）

実験水路は長さ8.45m、幅1.8mの水路内に、水路幅0.3m、深さ0.1mの長方形断面湾曲水路を設置した。水路は、上流および下流の直線部を第一、第二、第三の湾曲水路で接続したものである。第一及び第三湾曲部の曲率半径は1mである。第二湾曲部は曲率半径2m、角度は104°である。湾曲部の組み合わせは、凹部を取り付ける中央部において発達した湾曲流れが得られるように水路幅および曲率を調節して配置した。直線部は木材製とし、湾曲部は1.8×0.9×0.1mの発泡スチロールを6枚組み合わせて作成した。木材はペンキ塗装を施し、発泡スチロールはカット後に水路内壁を研磨した。下流端では堰上げにより水位を調整した。また上流部には、整流と乱れの均一化を目的とし粗度を配置した。流量の調節は二つのバルブを利用して行い、流量計測には電磁流量計を用いた。目盛の最小単位は0.1l/sであった。

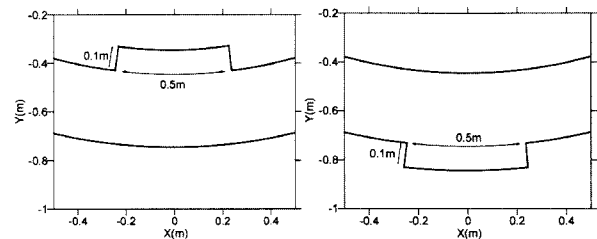
水深計測にはデジタル式ポイントゲージを用い、表面流速分布の計測はPIV法を利用した。トレーサーとして、ナイロン破砕粒子（平均粒径20μm）を散布し、側岸上方から500wのハロゲンランプを二灯設置し、水面を照射した。撮影にはSONY製デジタルビデオカメラDCR-VX1000を用いた。画像の解像度は720×480pixels、時間間隔は30Hzのインターレースモードで撮影した。底面流線の可視化は白色ポスターカラーを注射器で底面に付着させ、PIVと同様の方法で画像を取得した（図-3）。PIV、底面流の可視化とも、河床面を黒色とし、コントラストの増大を図った。撮影は水路全体を7分割して行い、画面上に映しこんだ基準点を利用して共通の座標系にまとめた。PIV、底面可視化の詳細については次節で述べる。

実験条件は勾配 $I=1/500$ とし、流量を $Q=7.5\text{l/s}$ および 15.0l/s と変化させた。この二つのケースの水理条件を表-1に示す。ここで、等流水深は直線水路のものを示している。

基本ケースは上記の二つであるが、これに第二湾曲部

表-1 水理条件

CASE	流量Q l/s	等流水深 H_0 m	平均流速U m/s	Reynolds数 UH_0/ν	Froude数 $U/\sqrt{gH_0}$
Q75	7.5	0.050	0.50	28000	0.72
Q150	15.0	0.080	0.63	56000	0.71



a) 内岸凹部

b) 外岸凹部

図-4 実験水路（凹部）

の中央の内岸側に凹部を設けたケースをQ75in,Q150inとする。同様に外岸に設置したケースはQ75out,Q150outとする。凹部長さは0.5m、奥行き0.1mとした（図-4）。

(2) PIV

PIV解析は0.05m間隔の格子上で行い、テンプレートサイズは $0.06 \times 0.06\text{m}$ (25×25pixels)とした。解析対象時間は10秒間とし、300枚の画像を用いて解析を行い、異常値を取り除いた上で平均操作を行った。異常値は相関係数およびテンプレートの輝度値の分散にしきい値を設けることで取り除いた。すなわち、表面流の可視化ではトレーサーを全面に均一に散布することが難しいため、ある瞬間にはトレーサーのまばらな領域が現れる。この領域は輝度値が均一になるため分散が小さくなり、そのテンプレートで得られた流速を無効とした。

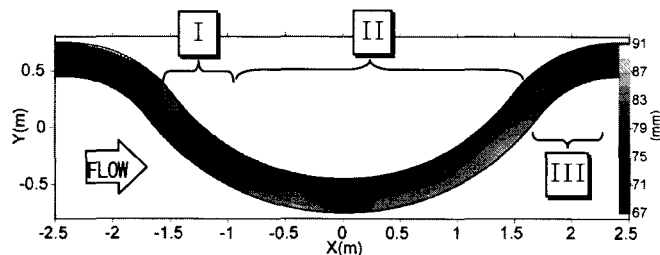
(3) 底面流線の画像計測

底面流線の計測は、PIVと同様の間隔およびテンプレートで画像を取り出し、各画像中の代表角度を抽出した。具体的には、まず画像中の各点で輝度勾配をもとめる（図-5a）。ここで、そのまま勾配ベクトルの平均を取ると、各ベクトルが打ち消しあって、有効な角度を得ることができない。そこで、勾配ベクトルの角度を2倍にした後（同b）、領域内でこのベクトルの平均を求め（同c）、得られた平均ベクトルの角度を2で除す（同d）ことで、画像の勾配に直行する角度を得ることができる⁵⁾。角度を2倍することで、反対向きのベクトル（135°、315°）は同じ向き（270°）となり、直行するベクトルは打ち消すことができる（図-5aの45°と135°は図-5bでは90°と270°となる）。また、PIVと同様、異常値除去のために輝度値の分散が一定値以上のテンプレートにおいて得られた結果を採用した。図-6に示すのは解析例で、撮影画像に解析

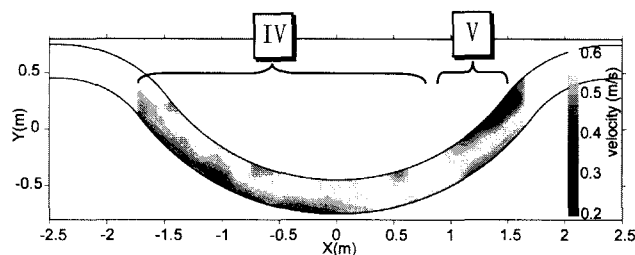


a) 勾配ベクトル b) 角度を二倍 c) 平均ベクトル d) 角度を半分

図-5 方向の抽出法



a) 水深分布



b) 流速絶対値の分布

図-7 計測結果 CASE Q150

で得られた流向ベクトルのプロットを合成したものである。

3. 実験結果

(1) 湾曲水路

凹部を設けない湾曲水路流れ (CASE Q150) の計測結果を図-7に示す。ここで、図-7aの太線は等流水深を示す。上流部の直線部を通過して、第一湾曲部に至った流れは、左岸にぶつかり左岸側の水位を上昇させ (図中の [I])、 $X=-1.25\text{m}$ 付近で一旦水面が平坦になった後に、[II]にかけて、右岸側の水位上昇が見られる。次に [III] でやや左岸の水位上昇が見られ、水面の平坦な直線流れへとつながっていく。湾曲流れでは、横断断面内の圧力勾配によって水位の変化する⁶⁾⁷⁾。断面内で、この圧力勾配と遠心力がつりあい、二次流の発達が促されることが知られている。

流速分布は、それぞれの湾曲点で内岸が高速、外岸が低速となる自由渦型分布が見られた。まず、[IV]において内岸側に高速域が確認される。これは次第に弱まっていき [V] 付近から、高速域が反転し外岸が高速となる。これは下流部の第三湾曲部の影響であるが、水位分布の反転に先駆けて流速が反転していることが確認できる。第二湾曲部にみられる平面流速分布の構造は富永らの結

果と共通するものであり、同様の現象が発生していると

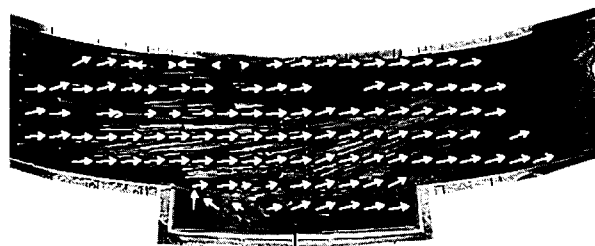


図-6 底面流線の計測 (ベクトルは画像解析結果)

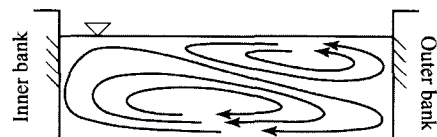


図-8 湾曲部の二次流の概要

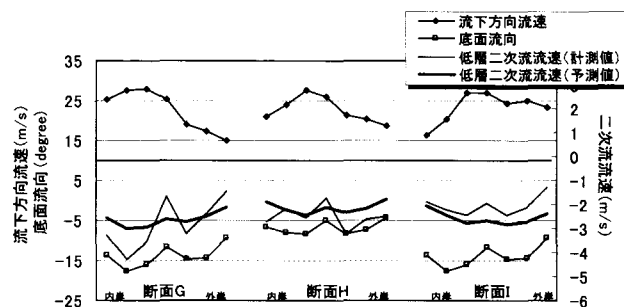


図-9 湾曲部の二次流

考えられる。富永ら³⁾は、このような区間において内部の二次流は、水面で外岸に、底面で内岸へと向かう流れが発達するとともに、外岸上部に逆循環領域がみられることを報告している。

二次流方向の流速は表面付近では流下方向に比べ1オーダー程度低く、表面流計測では精度良く計測することが難しい。そこで、本研究では底面流線分布を利用して、二次流の強度を推定することを考える。玉井ら⁶⁾は連続湾曲水路流れの構造をタフト法とプロペラ流速計を利用して明らかにしている。彼らは、同じ形状の90度湾曲を交互に10個配置して、これらの位相平均をとり15度おきに断面内の流速と、表面から底面までの流向を計測した。この中で、図-8のような湾曲流れの特徴が見られる断面での底面流線方向と表面流下方向流速、二次流流速の関係を再整理した結果、次式のような関係があることがわかった。

$$W \approx 0.52 V_s^{0.28} A^{0.28} \quad (1)$$

ここに、 V_s : 表面流速 (cm/s), W : 底面付近 ($z/h=0.17$) の二次流流速 (cm/s), A : 底面流向 ($^\circ$) である。

図-9は玉井らの実験データに著者らの提案式(1)で得られる予測値をプロットしたものである。今回はサンプル数が少ないため、関係式には改善の余地はあるが、底面付近の二次流の傾向をある程度把握できている。

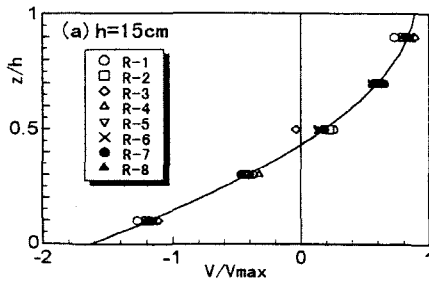


図-10 横断方向流速 V の鉛直分布(富永ら³⁾)

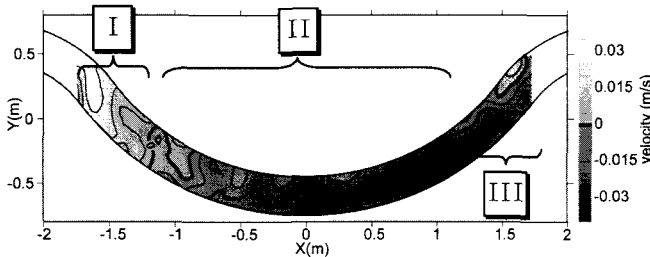


図-11 二次流の分布(CASE Q75)

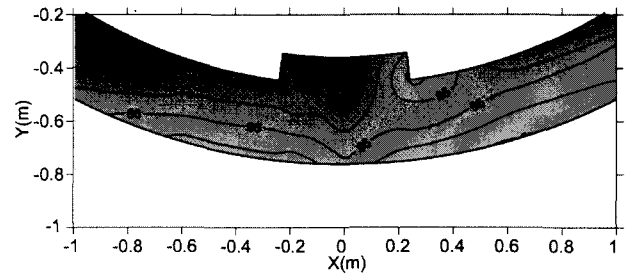
富永ら³⁾によれば水路中央付近での二次流流速分布(横断流速成分)は、図-10のような $z/h=0.4$ 付近で $V=0$ となる、二次式(式-(2))で近似できる。よって、底面付近の二次流流速は、断面の二次流の強さを代表するものとみなせる。

$$\frac{V}{V_{\max}} = a \left(\frac{z}{h} \right)^2 + a \left(\frac{z}{h} \right) - a \quad (2)$$

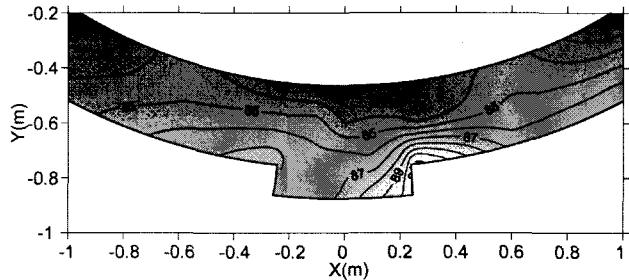
ここに V :横断方向流速, $V_{\max}$: V の断面内最大値である。

ここでは、便宜的に式(1)を用いて底面付近の二次流流速の推定した(図-11)。正の値は底面で左岸側へ向かう二次流を表す。図中の太線は二次流成分が0であることを示す。これによって、二次流の反転をよび発達を定性的に確認することができると考えられる。

まず、第一湾曲部を通過した流れには、反時計回りの二次流成分が生じていることが図の[I]付近の分布で確認できる。次に、 $X=-1.25\text{m}$ 付近で二次流の向きが反転し、[II]で第二湾曲部の終点付近に向けて時計回りの回転が発達していく様子を確認することができる。Q75とQ150を比較するとQ150では、二次流が $x=1.25\text{m}$ 付近で最も発達していたが、Q75ではやや上流寄りの $x=1\text{m}$ あたりにピークが生じている(図-11)。これは水路幅に対する水深の違いが影響していると考えられる。Q75での二次流の反転からピークに達するまでの長さは、 $X=-1.25\text{m}$ から $x=1\text{m}$ までで約 60° である。富永らは直線水路に接続した 90° の湾曲流れにおいて、二次流のピークは湾曲開始から 60° の位置で最大となり、 90° にかけて若干減衰すると報告している。本実験とは湾曲の平面形状や水理条件がやや異なるが、二次流の発達及び消滅過程は同様の経過をたどることが確認された。



a) CASE Q150in



b) CASE Q150out

図-12 水深分布図

(2) 側岸凹部流れ

次に第二湾曲部の中央の側岸に矩形の凹部を設けた場合の流れを調べた。CASE Q150in, Q150outの水深分布図を図-12に示す。

水深は基本ケース(図-7a)と比較してどちらも全体的に上昇している。特に凹部下流端で局所的な上昇がみられ、周辺にも全体的な水位上昇が確認できる。藤田ら¹⁷⁾の直線水路の側岸凹部流れの研究でも同様の傾向が示されている。特に、外岸に凹部を設けたケースではこの二つの特徴がよりはっきり現れている。内岸設置のケースでは、基本ケースにおいて内岸の水深が元々低いため、凹部下流端での水位上昇量は小さい。凹部周辺の平均的な水位の上昇は、内岸に凹部を設けた場合は5%程度、外岸凹部では8%ほどであった。

水面の変動は、特に内岸に凹部を設置した場合に顕著にみられ、水深変動幅約1.5cmで周期は約1秒の規則的な振動が確認された。このような変動は直線水路に凹部を取り付けた場合にみられるもの⁸⁾と同様の現象と考えられる。外岸凹部ケースではこのような明確な水面変動は確認されず対照的であった。

次に、凹部内部の流れの三次元構造を調べるために時間平均された表面流速の発散分布を求めた(図-13)。図-13の上流側($x=-0.3\text{m}, y=-0.5\text{m}$ 付近)では、発散値が小さく比較的安定した表層が形成されている。ただし、図中の左右壁面付近でみられる発散の変動は、計測誤差であると考えられる。これはPIVでは矩形の領域同士の相関を用いるため、壁面近傍では壁面とトレーサー粒子を混合して計測してしまうからである。内岸凹部ケースでは主流部と凹部との境界で負の発散領域がみられる。この

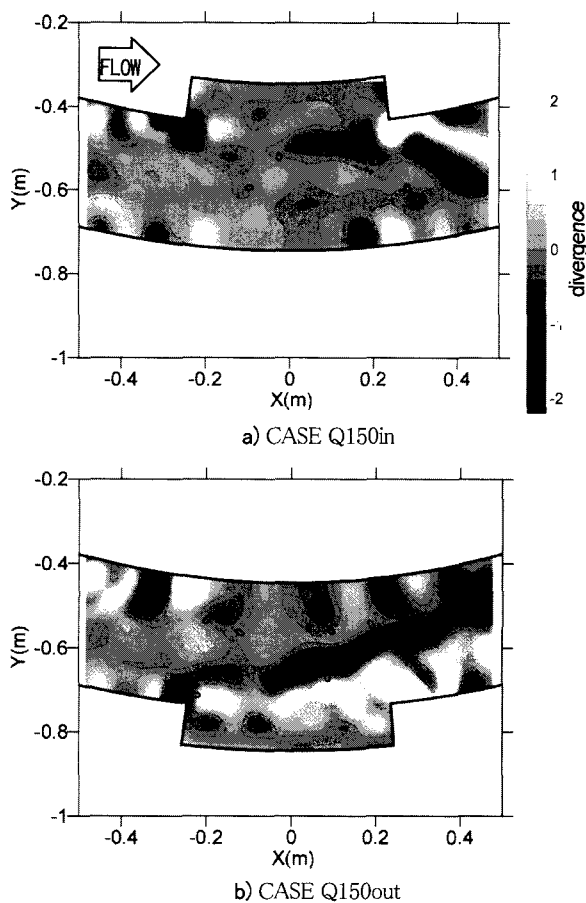


図-13 表面流速の発散分布

領域はせん断層に対応しており剥離渦の発達がみられる。この剥離渦が表面層を吸い込むように働き表面トレーサーが集められた結果、負の発散領域が現れたものと考えられる。この層は、凹部下流端に衝突し、一部は凹部内の循環流に取り込まれ、それ以外は主流部へ合流するが、凹部下流端では衝撃波が発生しており、この波に沿った流れとなる。この衝撃波は発散分布では強い負の領域となって現れている。主流部の中央付近を流下するトレーサーもこの衝撃波の影響を受けたのち、通常の湾曲流れへと戻っていく。

外岸凹部(図-13b)では、まったく異なる分布がみられた。このケースでは、凹部の上流端から衝撃波が発生しており、図中では負の発散領域となっている。次に、主流部と凹部との境界から凹部内にかけて正の発散領域が確認される。これは、凹部内で発生した湧昇流の存在を示唆している。ここで湧き上がった流れは、衝撃波に沿ってやや内岸向きに流下していくため、凹部下流端への衝突は比較的緩やかとなる。

水深計測において、内岸凹部で強い変動が観察されるが、外岸凹部では見られないことを述べたが、この変動は、凹部下流端へのせん断層の衝突が原因であると考えることができる。内岸凹部ケースでは凹部下流端で強い衝突がみられ、また凹部内に循環流が形成されることが振動を引き起こすが、外岸凹部ケースでは、下流端への

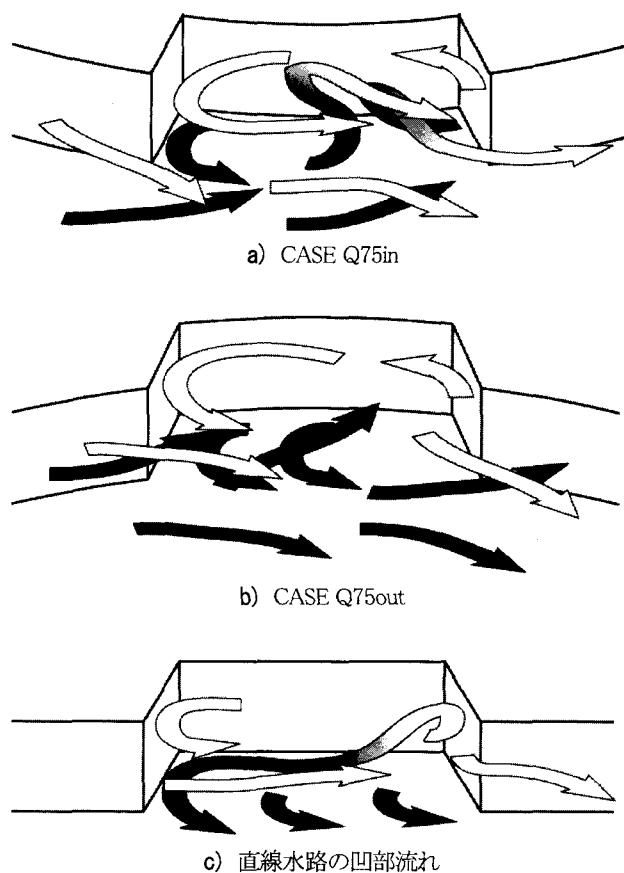


図-14 流れの推定図

衝突が緩やかであり、凹部内の流体塊は凹部上流端に発する衝撃波に沿って速やかに主流部へと流下していくため、周期的な振動が発生しないものと考えられる。

内岸凹部のケースでは主流部に投下されたトレーサーの一部はせん断層に取り込まれた後に凹部内に入るが、外岸凹部では主流部のトレーサーは衝撃波によって内岸へ集まるため、凹部内にはほとんど流入することはない。

底面流線は、内岸凹部ケースでは内側へ向かう流れが、また外岸凹部ケースではほぼ平行な流れがみられた。凹部内部では、流速が小さく、三次元的な乱れも強いいため本研究の手法では底面流線を計測することができなかった。従って、染料によって可視化された流れの目視観測によってえられた凹部内の流線、表面流速分布、および発散分布の計測結果に基づいて推定した流れの三次元構造を図-14に示す。また、比較のために直線水路での凹部流れ⁷⁾の推定構造も示した。

まず、比較的水深の低いQ75in, Q75outでは次のような流れの構造が考えられる。なお、矢印は平均的な流れを示し、黒は低層、白は表層での流れを現している。

内岸凹部(CASE Q75in)の場合は、低層から凹部内へ入り込み凹部内で乱流拡散を伴いながら上昇し、せん断層の剥離渦によって主流部との運動量の交換を経て主流部へと合流する。これは、凹部を設けない湾曲流れでは

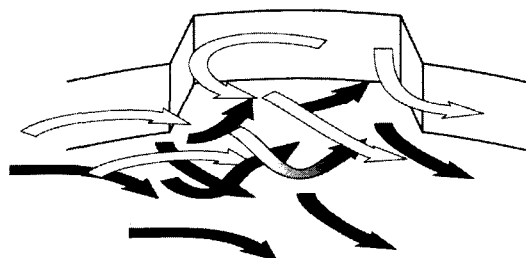


図-15 流れの推定図 (CASE Q150out)

内岸で低層から表層へと向かう流れが存在するが、この流れが凹部内まで入り込んだものと考えられるからである。凹部内の水平循環は凹部全体に渡る大規模なものである点が特徴的である。また、凹部と主流部との運動量交換は、低層から入り込み、上層から押し出される循環によるものと、せん断層での剥離渦に起因する混合によるものがあると考えられる。

外岸凹部(CASE Q75out)の場合は、中間層から凹部内に入り込み、表層から主流部へと合流して流下する。凹部内の水平循環は上流側に生じており内岸凹部より規模が小さく安定している。これは内岸凹部に比べ、凹部と主流部の境界でのせん断層があまり発達せず、表層において凹部と主流部が一体となって流下していくためである。凹部と主流部との流れの交換は、主に中間層から入り、表層から押し出される流れによって行われる。低層に比べ、中間層や表層は流速が速いため、内岸凹部より外岸凹部は速やかな質量・運動量交換が行われる。このことが、外岸凹部の場合に凹部周辺の水位上昇が強く起こる原因となっていると考えられる。

CASE Q150inの流況はCASE Q75inとほぼ同様であった。CASE Q150outは図-15に示したような流れが観察された。このケースでは底面流線から上流端の底面で流れが集中する領域が確認された。これは表面での衝撃波と同様の分布であったことから、凹部上流部(図-13の $x=-0.4\text{m}$ 付近の横断面)では図-16のような二次流が発生していると考えられる。

図-8の二次流には見られない、外岸側底部の循環流が凹部の上流($x=-0.4\text{m}$ 付近)で発生しており、これによって凹部周辺の流れがより複雑なものとなっている。この循環流は、Q75outに比べてQ150outの水深が大きいいため、流れの三次元性が強くなることが原因と考えられるが、凹部のないQ150では見られなかったことから、凹部の存在がこの循環の発生の要因になっていると考えられる。

4. 結言

湾曲部に設けた側岸凹部流れについて実験的検討を行った。流れの三次元的な循環を捉えるために、PIVによる表面流速分布および染料の塗膜法による底面流線の

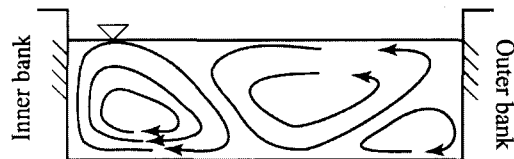


図-16 Q150outの二次流 (凹部上流部)

計測を行った。底面流線は画像処理によって、各点での流向の分布を得ることができた。凹部を設けない湾曲流れにおいて、表面流速と底面流向から二次流の流速を推定する式を提案し、これを利用して、従来の研究と同様の二次流の発達経過を確認することができた。次に凹部を設けた湾曲流れに見られる水位上昇と凹部周辺の流れを調べ、内岸凹部は外岸凹部に比べ、

- a) 周期的な強い変動が見られる
- b) 大規模な水平循環がみられる
- c) 水位上昇量が少ない
- d) 主流部との質量・運動量交換が小さい

という結果が得られた。また内岸凹部ケースでは凹部下流端から衝撃波の発生が見られるが、外岸凹部ケースでは凹部上流端から発生するという相違がみられた。今後は、凹部のアスペクト比や設置場所による影響を詳細に調べるとともに、数値シミュレーションによる検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 藤田一郎, 椿涼太, 熊城秀輔: 側岸凹部の形状変化が開水路流に与える影響, 応用力学論文集, Vol.6, pp.967-974, 2003.
- 2) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in open-channel flows, Balkema, 1993.
- 3) 富永晃宏, 長尾正志, 千葉茂樹: 幅水深比の小さな長方形断面開水路の湾曲部流れ構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.607/II-45, pp.19-28, 1998.
- 4) Shiono, K. and Muto, Y.: Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, J. Fluid Mech., Vol.376, pp.221-261, 1998.
- 5) 平工良三: 単視点粒子画像を用いた三次元非定常流場計測法の開発に関する研究, 大阪大学博士論文, 2000.
- 6) 玉井信行, 池内幸司, 山崎晶: 連続わん曲水路における流れの実験的研究, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.83-94, 1983.
- 7) 杉山均, 秋山光庸, 亀澤正之: 曲がり開水路乱流の構造解析と二次流流れ遷移に関する研究, 土木学会論文集, No.572/II-40, pp.11-20, 1997.
- 8) 藤田一郎, 小沢純, 長浜弘典: 直線開水路に設置された側岸凹部が主流に与える影響について, 応用力学論文集, Vol.4, pp.549-556, 2001.

(2003. 9. 30受付)