

# 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

富永晃宏<sup>1</sup>・長尾正志<sup>2</sup>・千葉茂樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>3</sup>正会員 工修 仙台市 (〒980-8671 仙台市青葉区国分町3-7-1)

開水路湾曲部の流れ構造については河道設計における重要性から従来より多くの研究がなされているが、幅水深比が大きな場合に限られており、中小河川のような幅水深比が小さな場合のデータはあまり得られていない。本研究ではこの点に着目し、幅水深比の小さな長方形断面開水路において曲率半径および湾曲角を変化させた湾曲部を設け、流速分布を詳細に計測したものである。得られた2次流構造は従来の結果を支持するものであるが、この2次流とは逆回転の外岸渦の存在が確認された。2次流強度の発達過程に対して定量的な解析が行われ、湾曲角度及び曲率半径の影響が明らかにされた。また、主流速、底面せん断応力および乱れエネルギーの湾曲部における発達過程が2次流との関連において説明された。

**Key Words :** curved open channel, secondary flow, aspect ratio, three-dimensional flow structure, bed shear stress

## 1. 序論

河道の湾曲部は堤防の洗掘、水位上昇、流水抵抗の面から治水上マイナスの働きをすると考えられるが、豊かな生態系を育む自然環境を提供し、また変化に富む河川の景観美を与えていた。河道湾曲部の流れ構造及び河床変動特性を的確に把握し、これを制御することは、河川工学の古くからの課題である。湾曲部の流れは遠心力に起因する2次流の発生と、これによる湾曲部外岸側の洗掘および内岸側の堆積という河床変動によって特徴づけられる。湾曲部流れの河道設計における重要性から、湾曲部の流れ特性に関してはすでに数多くの研究がなされており、上述のような特性が実験や解析的研究および数値計算による研究によってかなり明らかにされている。これらの研究は、実河道への適用を重視した連続湾曲や蛇行水路の流れや河床変動の研究と、基礎的な湾曲流れの機構の解明を目指した研究とに分類される。後者にあたる单一の湾曲部の流れを計測した例としては、古くは Rozovskii の実験と野外計測<sup>1)</sup>から、Ippen & Drinker の台形断面の開水路湾曲流の計測<sup>2)</sup>、村本らの 180° 湾曲流の実験<sup>3)</sup>、吉川・池田らの 270° 湾曲流の実験<sup>4)</sup>、今本・石垣らによる複断面開水路湾曲流の実験<sup>5)</sup>等がある。また、湾曲部の2次流に着目した解析的研究としては、Rozovskii<sup>1)</sup>、池田<sup>6)</sup>、Vriend<sup>7)</sup>、石川・金<sup>8)</sup>、山坂ら<sup>9)</sup>の研究がある。し

かしながら、河川湾曲部にも様々な形態が存在し、各種の幾何的なパラメータに対する流れ構造の応答に関しては十分理解されているとは言い難い。解析では幅水深比が大きいという条件や水深と曲率半径の比が小さいという条件が付されている場合が多く、これらの条件を満たさない流れ場においてはさらに検討の余地がある<sup>10)</sup>。湾曲部の流れは遠心力と圧力勾配および平均流の移流が支配的な流れであるため、層流での解析も行われている<sup>7),8)</sup>。乱流の数値計算技術も発達し、湾曲部の流れの計算も可能となってきたが<sup>11),12)</sup>、まだ比較すべきデータが不足しているといわざるを得ない。また、平衡状態を実現するために連続湾曲する蛇行河道<sup>13)</sup>や湾曲角が 180° 以上の湾曲部の流れ構造についての研究は多く見られるが、比較的湾曲角度の小さい曲がりが直線河道をつないでいるような領域における流れ構造の変化過程については十分な知見が得られていない。また、中小河川のような比較的幅水深比の小さな場合の各種断面における湾曲部の3次元的流れ構造についても従来の知見では十分に対応できない状態である。さらに乱流では乱れに起因する Prandtl の第2種2次流も存在し、これと湾曲部2次流との相互関係も不明である。

そこで、本研究では、種々の形態の湾曲部の基本的な流れ構造を実験的に把握しておくことが先決であると考え、湾曲部の構造が可変の湾曲水路を作成し、

各種湾曲条件における流れ構造の特性を明らかにすることを目的としたものである。特に、中小河川の河道設計を行う際に必要な情報が不足していることから、比較的幅水深比の小さな長方形断面を対象とし、水路幅と曲率半径の比および湾曲角度の影響を検討した。実験としては電磁流速計を用いた流速の点計測を行い、湾曲部の3次元流速分布、2次流構造および乱れの構造を明らかにした。残念ながら、乱れについては流速計の時間応答性の問題から十分な精度が得られなかつた。しかし、湾曲部流れにおいては平均流構造がダイナミックに変化する流れであるから、平均流構造を明らかにすることで十分意義がある。これらの実験結果は、中小河川の湾曲部の設計に際して流れ構造に対する理解とそれに基づく設計に対する指針を与えるとともに、平均流のみではあるが、流れの数値シミュレーションの比較データベースとしての利用も期待される。

## 2. 実験装置および実験方法

実験水路は水路幅  $B=90\text{cm}$ 、深さ  $30\text{cm}$  の長方形断面開水路で、湾曲区間の上、下流にそれぞれ  $10.8\text{m}$ 、 $3.6\text{m}$  の直線部を設け、その中間部に湾曲水路を挿入した。直線部は木製とし、湾曲部は鉄製で湾曲角が可変となるように内角  $30^\circ$  または  $15^\circ$  のユニット構造とし、これらはフランジによって連結された。接合部を充填材によってなめらかにした後、全体にペンキ塗装を施した。湾曲部は中心曲率半径  $R$  を  $1.35\text{m}$ 、 $2.7\text{m}$  および  $4.5\text{m}$  の3種類用意し、それぞれについて湾曲角  $\theta$  を  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  および  $90^\circ$  の3通り変化させた。湾曲部を付け替えるごとにこれに合わせて下流の直線部の架台を移動させた。ただし、 $R=4.5\text{m}$  ではスペースの関係で  $\theta=90^\circ$  の実験はできなかつた。3種類の曲率半径に対する実験水路平面図を図-1に示す。

流量は電磁流量計とインバータモータを用いたコンピュータ制御により、最大  $0.05\text{m}^3/\text{s}$ までの任意の値を設定できる。水は水路上流部の整流槽を経て供給される。水深は  $R=1.35\text{m}$  のケースにおいては  $h=9\text{cm}$  と  $15\text{cm}$  の2通り変化させたが、その他のケースでは  $h=15\text{cm}$  のみとした。ただし、湾曲部下流の直線部に十分な長さをとれなかつたため、下流端において堰上げを行い、計測区間において所定の水深が得られるようにした。実験条件表を表-1に示す。計測位置から下流端までの距離が短かつたため、流れは若干堰上げの不等流状態となっている。表中のエネルギー勾配は後述の平均摩擦速度から計算された値である。また、水深  $h$  および平均流速  $U_m$  は湾曲入口上流  $90\text{cm}$  における値である。

流速計測にはセンサー部の直径  $5\text{mm}$ 、長さ  $16\text{mm}$  の

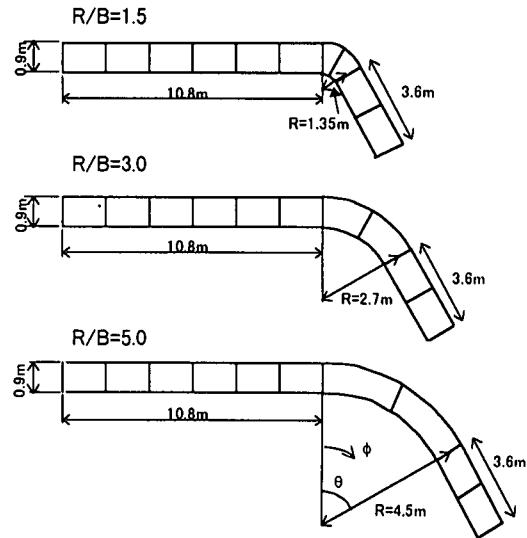


図-1 実験水路平面図

表-1 実験条件表

CASE	曲率半径 $R$ m	曲率半径 水路幅比 $R/B$	湾曲内弧角 $\theta$ degree	流量 $Q$ $\ell / \text{s}$	平均流速 $U_m$ $\text{m}/\text{s}$	水深 $h$ m	エネルギー勾配 $I_0$ $Ro(xl\theta)$	Reynolds数 $U_m h / v$ $\times 10^4$	Froude数 $Fr$ $U_m / \sqrt{gh}$
R-1	1.35	1.5	30	38.3	0.282	0.151	1.18	3.87	0.232
R-2	1.35	1.5	60	38.4	0.286	0.149	1.38	3.88	0.237
R-3	1.35	1.5	90	38.5	0.283	0.151	1.36	3.89	0.233
R-4	2.70	3.0	30	39.7	0.288	0.153	1.34	4.01	0.235
R-5	2.70	3.0	60	41.5	0.299	0.154	1.53	4.19	0.244
R-6	2.70	3.0	90	40.2	0.294	0.152	1.55	4.06	0.241
R-7	4.50	5.0	30	40.8	0.298	0.152	1.41	4.12	0.244
R-8	4.50	5.0	60	41.9	0.312	0.149	1.56	4.23	0.259
R-11	1.35	1.5	30	26.1	0.326	0.089	3.05	2.64	0.349
R-12	1.35	1.5	60	25.4	0.314	0.090	2.98	2.57	0.334
R-13	1.35	1.5	90	24.1	0.285	0.094	2.48	2.48	0.297

2成分電磁流速計(東京計測社製)を用いた。本実験では同一計測点においてL型電磁流速計で主流速成分( $u$ )と鉛直流速成分( $w$ )を、I型電磁流速計で主流速成分と横断流速成分( $v$ )をそれぞれ計測し、合成して3成分とした。主流速成分は両方の計測において得られることになり、両者の誤差は最大で  $\pm 5\%$  程度であった。ここでは両者の平均を取ることはせずに、後に主に2次流の考察に用いるI型電磁流速計から得られた値を主流速として用いた。座標系は水路中央線に沿う方向を  $x$  軸、これに直角な水平方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸とした。計測断面位置は、直線部では湾曲入口 ( $x=0$ )、湾曲入口より上流  $90\text{cm}$ 、湾曲出口、湾曲出口より下流  $45\text{cm}$ 、 $90\text{cm}$ 、 $135\text{cm}$  にとり、湾曲部では湾曲内弧角  $\phi=15^\circ$  または  $30^\circ$  ごとにとった。横断面内における計測点

は横断方向に9点から最大22点、鉛直方向には5点とした。今回の実験では、湾曲部の曲率半径および湾曲角度を多様に変化させ、この影響を明らかにすることに主眼をおいた。実験結果からも分かるように鉛直方向に5点というのは水深規模の2次流を検出する上で最低の点数と判断した。したがって、これより小さい規模の2次流については精度よく検出することは困難と考えられる。また、電磁流速計は壁および水面から1.5cm程度離す必要があるため、底面に最も近い計測点は高さ1.5cm、水面に最も近い計測点は水面から1.5cm下の高さとした。電磁流速計の出力電圧はコンピュータによりAD変換されZIPディスクに直接記録され解析された。サンプリング周波数は100Hzで、1点につき4100個のデータを統計処理した。水深はデジタルポイントゲージによって計測した。

### 3. 2次流構造

#### (1) 2次流速の抽出について

横断面内の2次流の渦構造を明確に把握するために、2次流成分を実測値から断面平均値を差し引いた偏差で表すこととする。補正後の時間平均流速を $V, W$ 、補正前の実測流速を $\tilde{V}, \tilde{W}$ とすると次式のように与えられる。

$$V = \tilde{V} - \bar{V}, \quad W = \tilde{W} - \bar{W} \quad (1)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{Bh'} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^B \tilde{V} dy dz, \quad \bar{W} = \frac{1}{Bh'} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^B \tilde{W} dy dz$$

ここで、 $z_1, z_2$ はそれぞれ計測された河床最近点および水面最近点の座標であり、 $h' = z_2 - z_1$ である。

#### (2) 2次流ベクトル構造

全ケースで明確な圧力勾配に起因する湾曲2次流ベクトル構造が捉えられた。その基本的構造は各種パラメータに関わらずほとんど同様であった。主な相違点は、2次流の強さと発達・減衰過程であり、これらについては後に詳しく述べる。ここでは最も詳細に計測したR/B=3.0の $\theta=60^\circ$ のケースR-5の2次流ベクトルの変化過程を示し、基本構造について検討する。

図-2に、流下方向の各位置における2次流ベクトルを示す。湾曲上流および入口では、側壁付近に乱れに起因するPrandtlの第2種の2次流がわずかに認められるが、この2次流の大きさは湾曲2次流に比べて1オーダー小さく、今回の計測で精度よく捉えることは困難である。湾曲部の位置を示す湾曲円弧角 $\phi$ で示すことにすると、 $\phi=15^\circ$ において水面で外岸へ向かい底面で内岸へ向かう湾曲特有の2次流が発生し始めている。ただし、外岸側では、水面で外岸へ向かう流れが水面を離れて潜り込み側壁コーナーへ向かう流

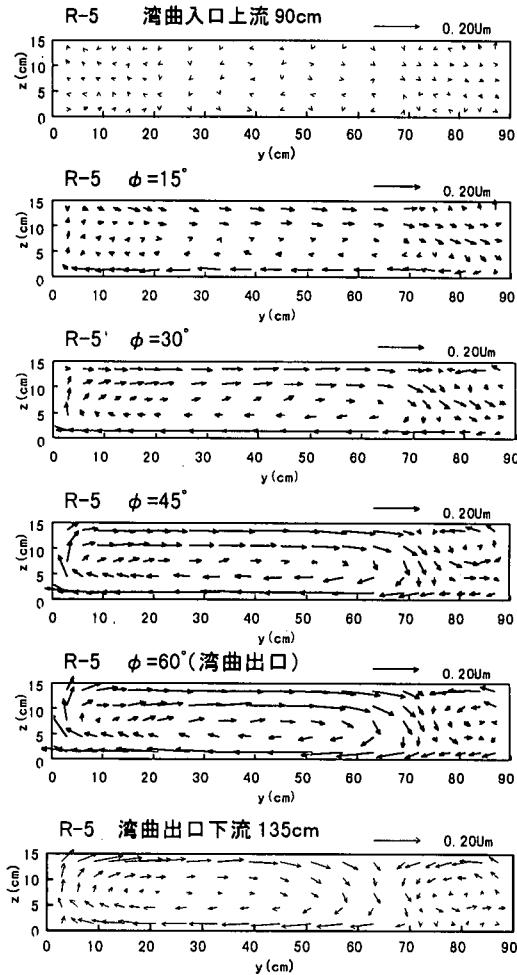


図-2 2次流ベクトルの変化 (R-5)

れとなる。さらに $\phi=30^\circ$ になると、外岸の水面側には湾曲による2次流とは逆回転の2次流が存在するようになる。以後、湾曲特有の渦構造を湾曲渦、外岸の逆回転の渦を外岸渦と呼ぶことにする。この外岸渦が発生する原因是明らかではないが、外岸付近の主流速の減速による遠心力の減少と、直線開水路ですでに存在するPrandtlの第2種2次流構造が遠心力によつて消滅せずに、逆に強められたことによるものと推測される。杉山らによる応力モデルを用いた数値計算によつてもこのような渦構造が現れることが示されており<sup>14)</sup>、普遍的な現象と考えられる。 $\phi=30^\circ$ から $\phi=45^\circ$ までは、湾曲渦と外岸渦の2つの渦を持つ構造を保ちながら速度が増大し、湾曲渦、外岸渦ともに明確になる。 $\theta=90^\circ$ のケースR-3、R-6では $\phi=60^\circ$ で2次流は最大となり、 $\phi=90^\circ$ にかけて若干減衰している。また、外岸渦が底面付近にまで達し水深規模の渦となるのを伴い、湾曲渦は $y/B=0.8 \sim 0.85$ 付近で下降する水路幅の約7~8割の幅を持つ渦となる。このような2重

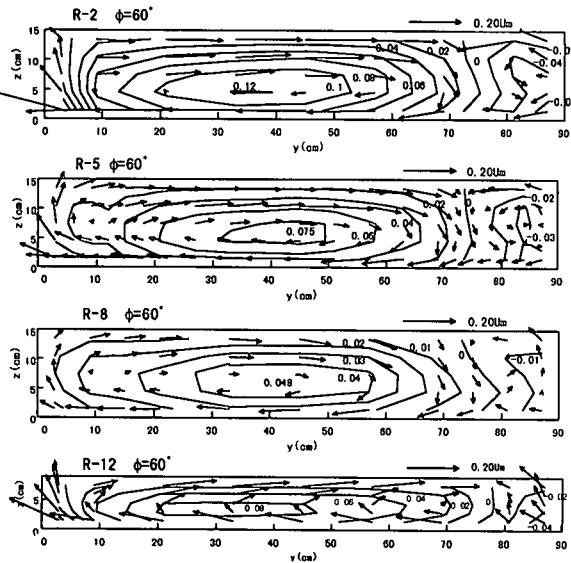


図-3 2次流流線の比較 ( $\theta=60^\circ$ )

渦構造については、Bathurst et al.<sup>15)</sup>, Vriend<sup>16)</sup>および富永<sup>17)</sup>による野外計測によっても指摘されており、今本・石垣らの実験<sup>5)</sup>によっても示唆されているが、本実験によってより明確にその存在が実証されたものと考える。

次に、湾曲角  $60^\circ$  の全ケースについて2次流が最も発達した湾曲出口における2次流流線をベクトルとともに図-3 に示す。これは次式で定義される流れ関数  $\psi$  の等値線で表される。

$$\psi = \int_0^h V dz \quad (2)$$

いずれのケースにおいても  $\psi=0$  の流線が  $y=70\text{cm}$  から  $80\text{cm}$  付近に現れており、これより外岸側では符号が負となり逆回転の渦が存在していることを示す。このような2重渦構造に関しては、曲率半径・水路幅比 (R/B) や幅水深比 (B/h) による大きな違いはみられない。ただし、2次流の強さは曲率半径や水深によって異なるため、次に2次流の強度について検討する。

### (3) 2次流の強度

2次流の強度を表すのに、流れ関数の最大値や2次流速の運動エネルギー等が考えられるが、ここではより実用性を考慮して直接的に2次流速の最大値を採用する。すなわち底面最近点と水面最近点の流速差の  $1/2$  で定義される横断方向流速偏差  $V_s$  を指標とする。2次流速の断面内の最大値は、ほぼ水路中央付近の横断方向流速で代表される。この  $V_s$  の横断方向最大値を  $V_{max}$  と定義する。2次流が最大となる  $x$  方

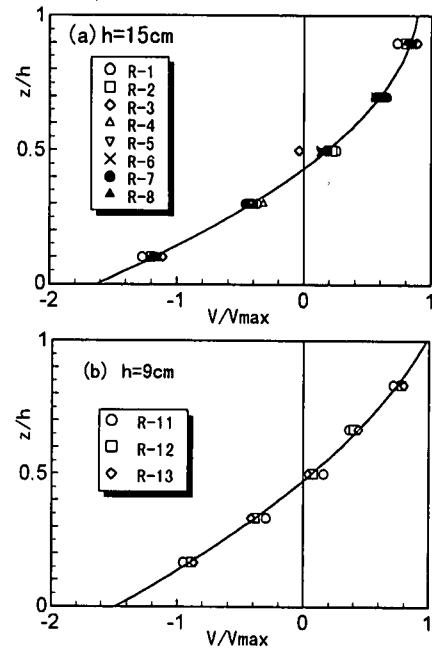


図-4 横断方向流速  $V$  の鉛直分布

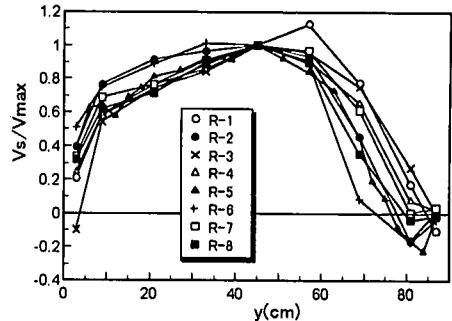


図-5 横断方向流速偏差  $V_s$  の横断分布

向位置において水深  $15\text{cm}$  および  $9\text{cm}$  の全ケースの水路中央での  $V$  の鉛直分布を、 $V_{max}$  で規格化したのが図-4(a), (b)である。 $V/V_{max}$  はほぼ相似な分布形状を示すが、水深によって若干異なり、水深が小さい場合水面側の分布がより急な勾配を示す。図中の実線はそれぞれの水深における2次回帰曲線であり、次式で表される。

$$h=15\text{cm}: \frac{V}{V_{max}} = -2.19 \left( \frac{z}{h} \right)^2 + 4.69 \left( \frac{z}{h} \right) - 1.62 \quad (3-a)$$

$$h=9\text{cm}: \frac{V}{V_{max}} = -1.27 \left( \frac{z}{h} \right)^2 + 3.73 \left( \frac{z}{h} \right) - 1.48 \quad (3-b)$$

ただし、底面で  $V$  は  $0$  になるはずであるため、この式は底面までは適用できない。 $V$  の鉛直分布形は、底面近傍が狭い範囲で高速となる、半水深に対して非対称な分布となっている。図-5 に2次流が最大となる位置に

における  $V_s$  を  $V_{max}$  で無次元化した横断分布を示す。分布はほぼ水路中央の  $y=45\text{cm}$  で最大となり外岸側で急激に減少し  $y>75\text{cm}$  で負またはゼロ近い値を示す。次に、最大横断方向流速偏差  $V_{max}$  の流下方向変化について示したのが図-6である。まず同じ曲率半径で湾曲角度による違いについてみると、いずれの場合も湾曲入口から同じ経路に沿って増大しており、2次流の発達過程はほぼ相似と考えられる。R/B=1.5 では  $\phi=90^\circ$  まで増加しているため、さらに大きな湾曲角の実験で上限を確認する必要があるが、R/B=3.0 では  $\phi=60^\circ$  で発達が止まり、R/B=5.0 では  $\phi=45^\circ$  でピーク値をとるのがわかる。R/B=1.5 の図には  $h=9\text{cm}$  の結果も示しているが、その発達過程はほぼ相似とみなせる。ピークの大きさは  $h=15\text{cm}$  の 60~70% 程度でありほぼ水深の比に対応する。最大に達した後は下流に行くにしたがい指數関数的に減少していく。2次流強度の最大値が大きいほど、湾曲終了後の減衰速度が速く、下流直線部をある程度流下するとほぼ同程度の2次流強度に収束する傾向にある。本研究では下流直線分距離が短いため、2次流の減衰過程を最後まで追跡することはできないが、湾曲渦が消滅するまでには相当長い距離を要することが報告されている<sup>16)</sup>。一方、曲率半径の影響をみると、2次流強度は曲率半径の増大にしたがって減少している。

2次流の発達過程の相似性を確かめるために、 $V_{max}$  をその流下方向最大値  $V_p$  で規格化した値を、湾曲入口から  $V_p$  が現れる位置までの距離  $x_p$  で除した無次元距離に対してプロットしたのが図-7である。ここで  $x_p$  は R/B=1.5, 3.0, 5.0 に対してそれぞれ 180cm ( $\phi \approx 76^\circ$ ), 280cm ( $\phi = 60^\circ$ ), 350cm ( $\phi = 45^\circ$ ) とし、湾曲角がこれより小さいときの減衰過程は除いている。2次流発達・減衰過程の相似性はかなり高く、図中に実線で示した次の近似式によって表すことができる。

$$\frac{V_{max}}{V_p} = \left( \frac{x}{x_p} \right)^{3/2} \exp \left\{ 1 - \left( \frac{x}{x_p} \right)^{3/2} \right\} \quad (4)$$

池田の導いた湾曲2次流の理論式は  $h/R$  が十分小さいときに適用される理論であるが、半径方向流速成分が水深に比例し曲率半径に反比例する形となっている<sup>6)</sup>。本実験の結果はこれを裏付けるものとなったが、比例定数は大きく異なっている。図-8に  $V_p/U_m$  の  $h/R$  に対するプロットを示す。池田の式に、 $\kappa = 0.41$ 、本実験における平均値  $U_m/U_{max} = 0.052$  を代入し、 $\xi = 0$  における半径方向流速の最大値を求めると次式となり、図中に示す。

$$V_p/U_m = 934 h/R \quad (5)$$

吉川・池田の実験値は  $h/R$  が 0.01 程度でありほぼ式(5)に一致するが<sup>4)</sup>、本実験のように  $h/R$  が大きい場合

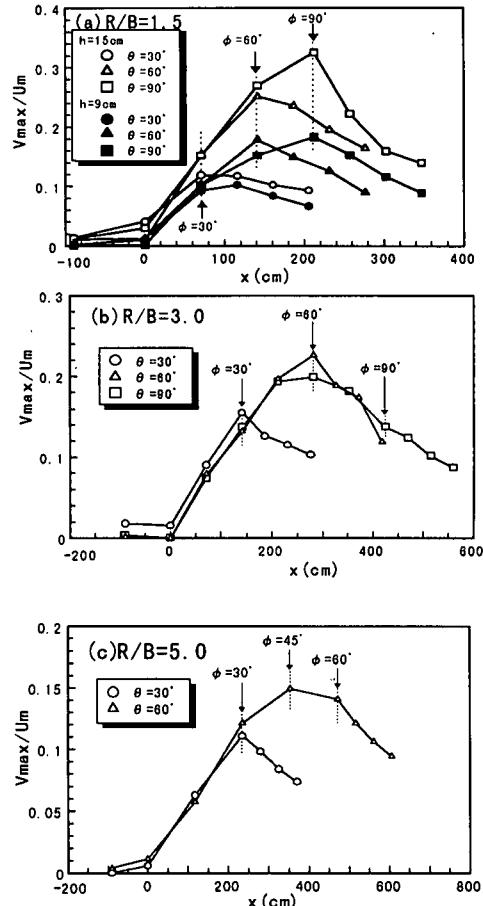


図-6 2次流強度の流下方向変化

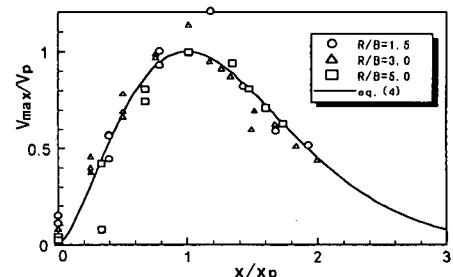


図-7 2次流の流下方向発達・減衰過程

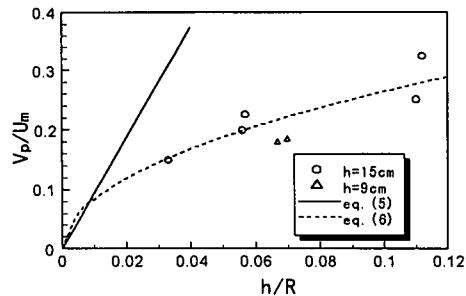


図-8 2次流最大値の変化

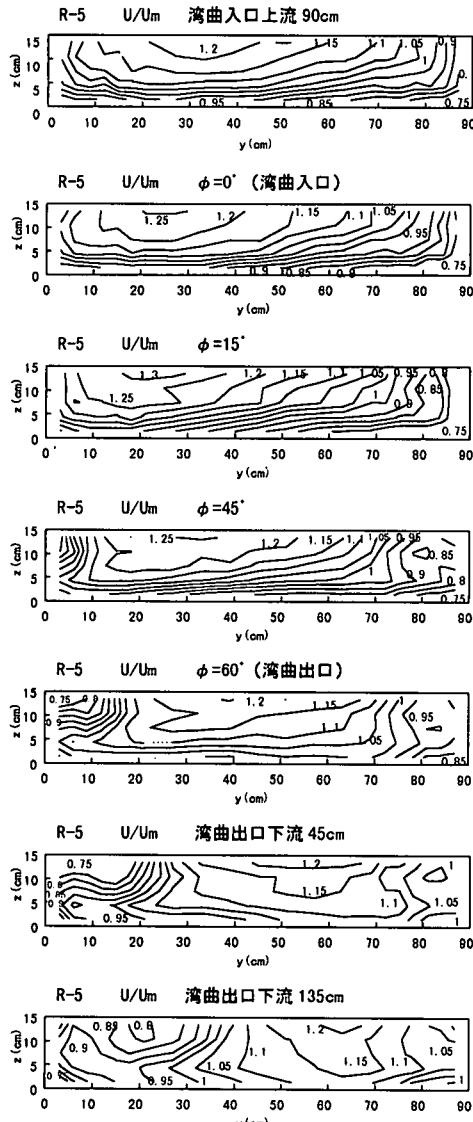


図-9 主流速センターの変化過程 (R-5)

には式(5)を大きく下回ることがわかる。実験データはまだ十分とはいえないが、およその経験式として次式を提案する。

$$V_p/U_m = 0.84(h/R)^{0.5} \quad (6)$$

#### 4. 主流速の構造

主流速の横断面内構造はいずれのケースも同様な流下方向変化過程を示す。代表例としてケースR-5の主流速センターを図-9に示す。湾曲入口上流 90cm ですでに分布は非対称となり高速域が内岸に寄っている。湾曲入り口ではさらにこの傾向が進み、最大流速位置は  $y/B=0.3$  付近になる。このような内岸が高速で外

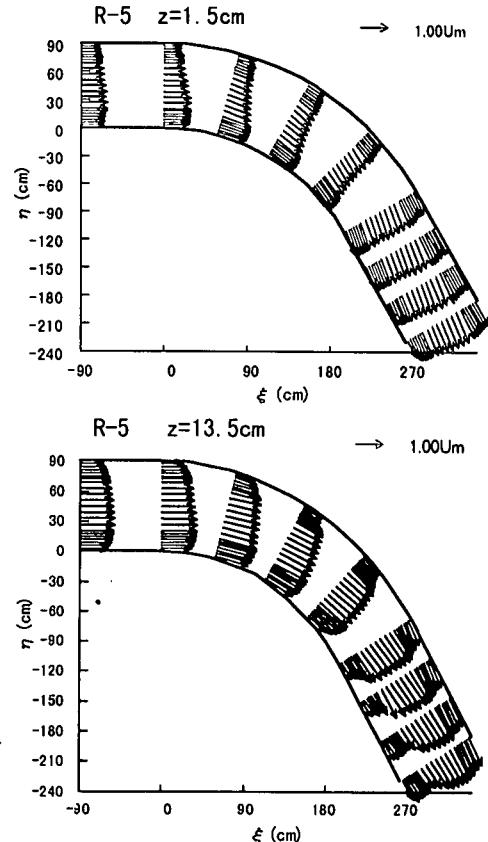


図-10 平面流速ベクトル図 (R-5)

岸が低速になる、いわゆる自由渦型分布<sup>3)</sup>は湾曲角度  $\phi = 15^\circ$  付近で最も顕著となり、最大流速位置は  $y/B=0.2 \sim 0.22$  付近に達する。これより下流に向かって自由渦型の横断分布傾向は弱まり、 $\phi = 60^\circ$  では水路中央付近で横断方向にほぼ一様な分布を示す。また  $\phi = 45^\circ$  付近から内岸近傍水面近くの流速が低下し始め、流下に伴いしだいに低速域が拡大する。この内岸低速域の拡大は湾曲出口下流の直線部でも続き、135cm 下流では水路中央付近まで及ぶ。これより内岸では水面側が低速、底面側が高速という顕著に2次流の運動量輸送を反映した構造となっている。一方これより外岸側では鉛直方向に流速の一様化が進み、最大流速は2次流の下降部にあたる  $y/h=0.7$  付近に現れる。これらの結果として湾曲出口より下流で内岸が遅く外岸が速い、いわゆる強制渦型の流速分布<sup>3)</sup>を示すようになる。図-10 はケースR-5における底面近傍と水面近傍の水平面の流速ベクトル図である。図は湾曲入り口の右岸を原点とする  $\xi$ ,  $\eta$  座標で示している。底面近くでは湾曲入り口から内岸が加速され流下するにしたがい内岸向きの偏流が認められ、しだいに外岸付近まで全体に高速化している。水面近くでは湾曲入り口からの内岸

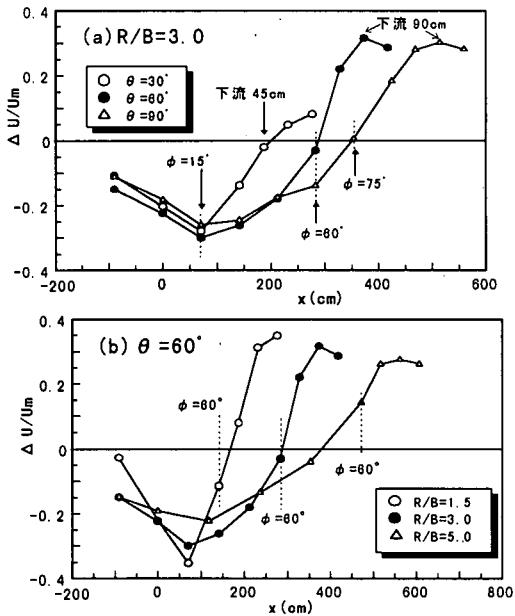


図-11 横断方向主流速差の流下方向変化過程

の加速は同様であるが、角度 30° 付近から外岸付近の減速と 45° 付近からは内岸の減速が顕著である。湾曲後半からは外岸付近を除き外岸に向かって偏流しているのがわかる。

次に各湾曲パラメータの影響をみるために、水深平均主流速について外岸と内岸の差を指標として検討する。側壁近傍は局所的影響を受けやすいために  $y=69\text{cm}$  と  $y=21\text{cm}$  における水深平均主流速の差を  $\Delta U$  として断面平均流速  $U_b$  で規格化した値の流下方向変化を図-11(a), (b)に示す。(a)で湾曲角度の影響をみると、いずれも  $\phi=15^\circ$  で負の最大値をとり、ここから下流へ増大していく。ほぼ差がゼロとなる位置は  $\theta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  でそれぞれ湾曲下流 45cm,  $\phi=60^\circ$  の湾曲出口,  $\phi=75^\circ$  である。さらに下流で正の値へと推移し、湾曲角度が大きいほどその差は増大していく。湾曲角度  $\theta=30^\circ$  では最終断面でもまだ増加途中であるが、 $\theta=60^\circ, 90^\circ$  では湾曲下流 90cm 付近でほぼ最大値を示すようである。(b)は  $\theta=60^\circ$  のケースで曲率半径の影響を比較したものである。これによると、最小値、最大値ともに曲率半径の増大とともにわずかながら減少している。湾曲角を基準とした相対的な位置に関しては、ほぼ相似な変化過程を示している。

## 5. 底面近傍流速分布に基づく底面せん断応力分布の推定

今回の実験では電磁流速計を用いたため底面近傍の流速が計測できず、底面に最も近い計測点の高さは

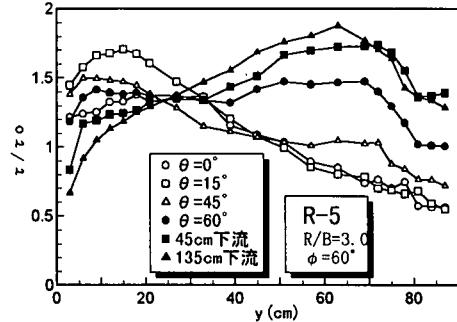


図-12 底面せん断応力概算値の横断分布の流下方向変化

1.5cm で、 $y/h=0.1$  であった。したがって、本研究では精度よく底面せん断応力を評価することは困難であるが、ここでは底面より水深の1割の高さの流速  $U_b$  および  $V_b$  を用いて流れ方向および横断方向の底面せん断応力を以下のように推定することとした。

$$\tau_{bx} = C_f U_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2}, \quad \tau_{by} = C_f V_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2} \quad (7)$$

ここに、 $C_f$  は摩擦損失係数である。この場合  $C_f$  の値は不明であるが、 $C_f$  は全領域で一定と仮定し、湾曲入口上流 90cm の断面における底面せん断応力の平均値  $\tau_{bx0}$  によってすべての値を無次元化することにより、底面せん断応力の平面分布構造を把握することができる。

この方法によって得られた、ケースR-5における規格化された流下方向底面せん断応力概算値の横断分布の流下方向変化過程を図-12に示す。側壁近傍を除く中央領域ではほぼ直線的な分布を示し、 $\phi=15^\circ$  で内岸が最も大きくなり、 $\phi=60^\circ$  でほぼ水平になった後、下流にいくにしたがって外岸側が増大し、 $y=60\sim70\text{cm}$  付近がピークとなる様子が明らかである。特に外岸におけるせん断応力の増加は著しい。各ケースにおける底面せん断応力概算値の平面コンターを図-13に示す。値は湾曲上流 90cm の平均せん断応力で無次元化されている。いずれのケースも湾曲開始点近くの内岸沿いおよび湾曲終了後の直線部の外岸付近に極大値が現れる。湾曲角度  $\theta=30^\circ$  では、湾曲下流の極大値が顕著ではない。これは2次流による主流速運動量輸送が十分に行われず外岸が高速化していないためである。湾曲角度  $\theta=60^\circ$  では外岸よりの  $y/B=0.75$  付近を中心とした底面せん断応力の大きい領域が現れる。曲率半径が小さい場合には計測位置の下流端でもまだ発達段階にある。 $\theta=90^\circ$ になると、湾曲出口下流 90cm 付近のやはり  $y/B=0.75$  を中心としたピークが認められる。この外岸のピーク位置は明らかに2次流の下降流位置に対応している。曲率半径が大きい場合には  $\theta=60^\circ$  でも下流 90cm 付近にピークが現れる。湾曲入り口内岸のピーク値は  $\tau/\tau_0=1.5\sim1.8$  を示し、曲率半径が小さいほ

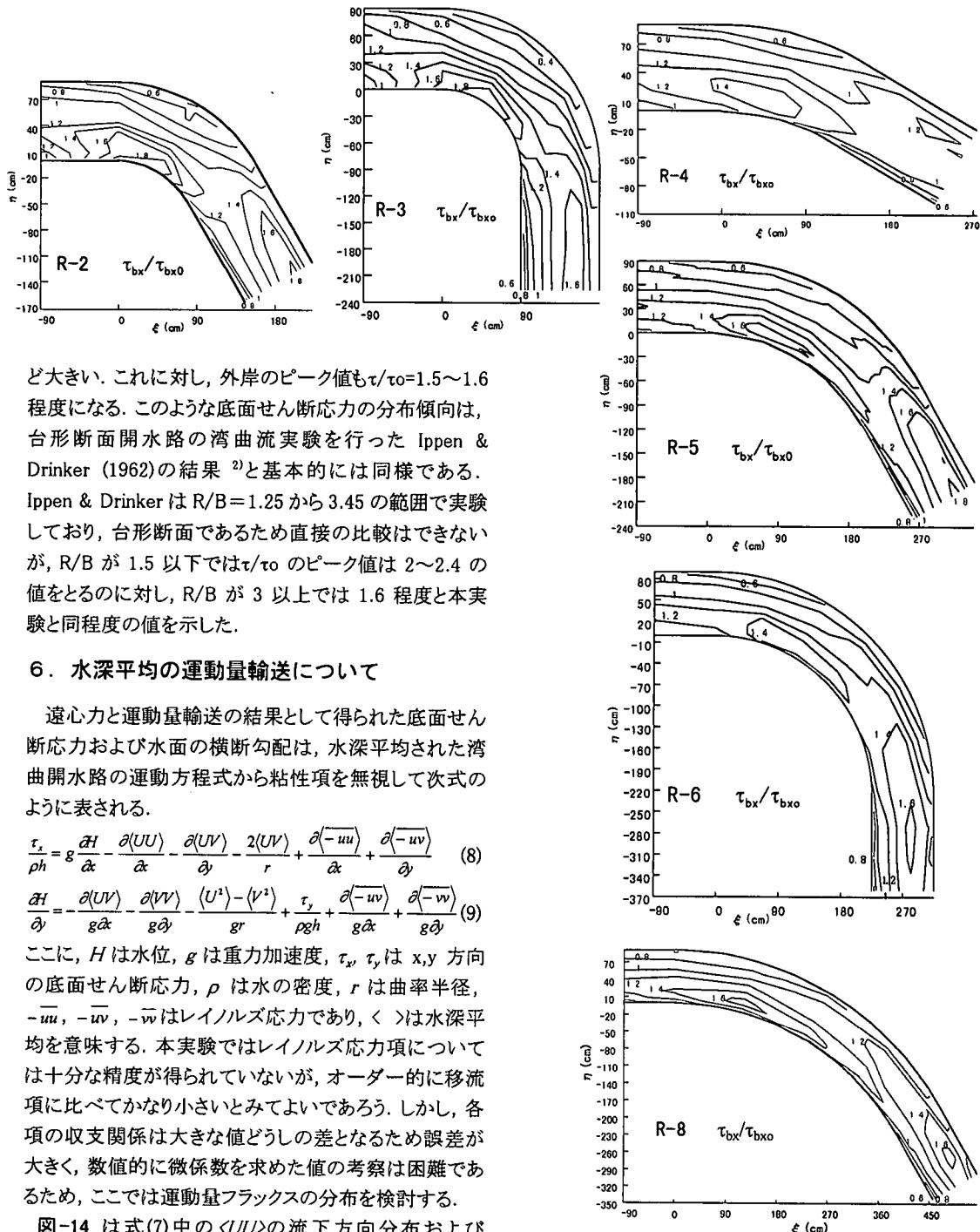


図-13 底面せん断応力概算値のコンター

ど大きい。これに対し、外岸のピーク値も  $\tau/\tau_0=1.5 \sim 1.6$  程度になる。このような底面せん断応力の分布傾向は、台形断面開水路の湾曲流実験を行った Ippen & Drinker (1962) の結果<sup>2)</sup>と基本的には同様である。Ippen & Drinker は  $R/B = 1.25$  から  $3.45$  の範囲で実験しており、台形断面であるため直接の比較はできないが、 $R/B$  が 1.5 以下では  $\tau/\tau_0$  のピーク値は  $2 \sim 2.4$  の値をとるのに対し、 $R/B$  が 3 以上では 1.6 程度と本実験と同程度の値を示した。

## 6. 水深平均の運動量輸送について

遠心力と運動量輸送の結果として得られた底面せん断応力および水面の横断勾配は、水深平均された湾曲開水路の運動方程式から粘性項を無視して次式のように表される。

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial h} = g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial \langle UU \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle UV \rangle}{\partial y} - \frac{2\langle UV \rangle}{r} + \frac{\partial \langle -uu \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle -uv \rangle}{\partial y} \quad (8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{\partial \langle UV \rangle}{g \partial x} - \frac{\partial \langle VV \rangle}{g \partial y} - \frac{\langle U^2 \rangle - \langle V^2 \rangle}{gr} + \frac{\tau_y}{\rho gh} + \frac{\partial \langle -uv \rangle}{g \partial x} + \frac{\partial \langle -vv \rangle}{g \partial y} \quad (9)$$

ここに、 $H$  は水位、 $g$  は重力加速度、 $\tau_x, \tau_y$  は  $x, y$  方向の底面せん断応力、 $\rho$  は水の密度、 $r$  は曲率半径、 $\langle -uu \rangle, \langle -uv \rangle, \langle -vv \rangle$  はレイノルズ応力であり、 $\langle \rangle$  は水深平均を意味する。本実験ではレイノルズ応力項については十分な精度が得られていないが、オーダー的に移流項に比べてかなり小さいとみてよいであろう。しかし、各項の収支関係は大きな値どうしの差となるため誤差が大きく、数値的に微係数を求めた値の考察は困難であるため、ここでは運動量フラックスの分布を検討する。

図-14 は式(7)中の  $\langle UU \rangle$  の流下方向分布および  $\langle UV \rangle$  の横断方向分布を示す。湾曲入り口付近では  $\partial H / \partial x$  の効果が大きく考えられるが、湾曲後半から下流では移流項が大きな変動を示す。 $\langle UV \rangle$  は湾曲の後半から下流の水路中央部で外岸への輸送が卓越し  $\phi = 60^\circ$  で最大となる。側壁側の領域ではこれとちょうど逆の符号を示している。下流直線部に入ると内岸領域から減少し始め、最下流ではまだ強い2次流が残っている。

るにもかかわらず、横断方向フラックスは全体的に小さな値となる。これは最下流では2次流による運動量輸送の結果主流速の鉛直分布構造が変化したため、2次流が存在しても実質の運動量輸送が小さくなつたものと考えられる。 $\phi = 60^\circ$  に着目すると  $\langle UV \rangle$  は内岸で正の勾配、

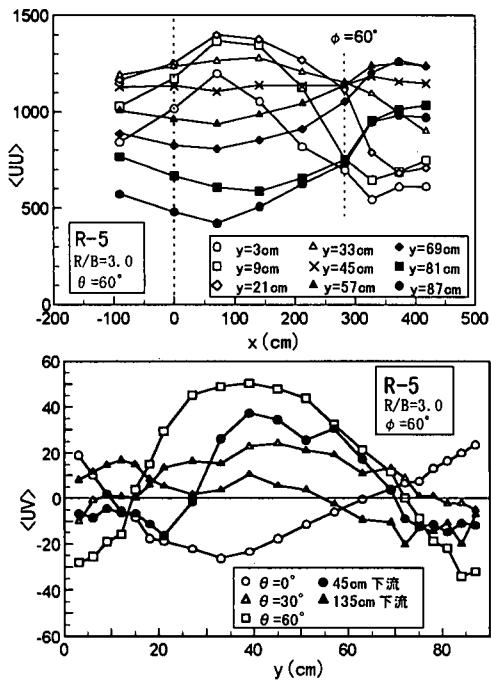


図-14 式(8)中の運動量フラックス

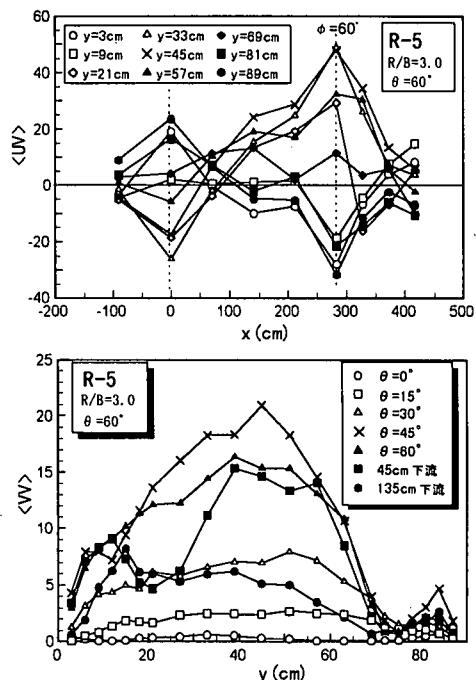


図-16 式(9)中の運動量フラックス

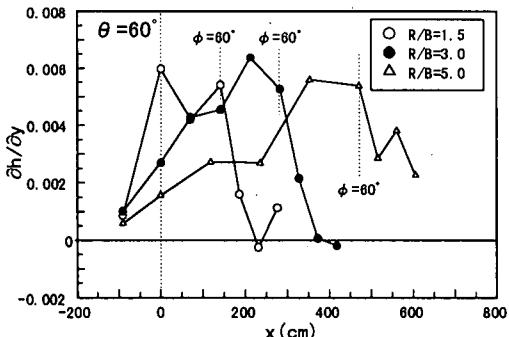


図-15 横断方向の水面勾配

外岸で大きな負の勾配を示す。これは底面せん断応力の内岸での減少、外岸での増加を意味する。しかし、 $\langle UV \rangle$ の流下方向変動を見ると、 $\phi = 60^\circ$ 付近では内岸で負の勾配、外岸で正の勾配を示し、これはちょうど $\langle UV \rangle$ の勾配と相殺する関係にあり、両者のバランスでせん断応力  $\tau$  が決定されているといえる。

次に図-15 は湾曲角度  $\theta = 60^\circ$  の3ケースについて直線回帰によって求めた水深の横断勾配  $dh/dy$  の流下方向変化を示す。全体に正の値を示し、遠心力によって水深の外岸が高く内岸が低くなる横断方向の水面勾配を示している。曲率半径の影響をみると、湾曲入り口では曲率半径に応じた水面勾配を示すが、曲率半径が大きい場合流下にしたがって増加しほぼ同程度のピーク値まで達している。曲率半径が大きくなるほど遠心力項は小さくなり、これと釣り合う水面勾配も小さくなるは

ずであるが、移流項の効果がこの水面勾配を支えているものと考えられる。図-16 は式(8)中の $\langle UV \rangle$ の流下方向分布および $\langle VV \rangle$ の横断方向分布を示す。 $\langle UV \rangle$ は両側岸近傍では湾曲入り口から出口まで減少し、ここから下流へ再び増加する。水路中央領域ではこれとは逆の変化を示す。 $\langle VV \rangle$ の横断分布は水路中央を頂点として内岸側壁と  $y=70\text{cm}$  付近でゼロとなる上に凸の分布を示し、湾曲出口付近で最大となる。したがって水路中央より内岸側では正の勾配、外岸側では負の勾配を示す。 $\langle VV \rangle$ の縦断分布と相殺しあう部分と同符号になる部分が存在し、複雑に関連しあっている。他のケースでも同様の傾向を示したが、曲率半径が大きいほど移流項の流下方向の勾配が小さくなるため、合計の効果が異なってくるものと考えられる。

## 7. 結論

幅水深比が小さな開水路の湾曲部の流れ構造を2次流構造を中心として実験的に明らかにした。曲率半径および湾曲角度を変化させてその影響を検討した。得られた主な結論は以下のようである。

- (1)圧力勾配による湾曲2次流と、これとは逆回転の外岸の2次流が存在する長方形断面開水路の湾曲部の2次流構造が明らかにされた。
- (2)2次流の強度を定量的に評価し、湾曲部2次流の流下方向の発達・減衰過程が明らかにされ、その相似性が示された。

(3) 湾曲部2次流の強度に及ぼす曲率半径と湾曲角度の影響が明らかにされた。2次流強度が最大となる位置は曲率半径の増大とともに湾曲角の位相からみて上流側に移動し、2次流強度は  $h/R$  の増加とともに増大する傾向にある。

(4) 主流速は湾曲角が  $15^\circ$  付近で内岸側が速く外岸側が遅い自由渦型分布が最も顕著となり、その後2次流による横断方向の運動量輸送効果により急速に外岸側が高速な強制渦型分布へと移行する。湾曲角度が大きくなるほど強制渦型分布が発達するが、曲率半径の影響は少ない。湾曲後半から下流の内岸では、水面近傍の減速が顕著となる。

(5) 底面せん断応力は、湾曲入り口内岸付近と湾曲出口下流の  $y/B=0.75$  付近にピークが現れる。下流のピーク位置は2次流の下降流位置と対応している。

以上、限られた範囲ではあるが、曲率半径と湾曲角度の湾曲部流れに及ぼす影響を明らかにした。今後は断面形状の影響について検討する予定である。

## 参考文献

- 1) Rozovskii, I.L.: Flow of water in bends of open channels, Academy of science of U.S.S.R., Kiev, U.S.S.R., 1957.
- 2) Ippen, A.T. & Drinker, P.A.: Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels, J. Hydraulics Div., ASCE, vol.88, No.HY5, pp.143-179, 1962.
- 3) 村本嘉雄, 井上喬之:開水路湾曲流の内部機構, 京都大学防災研究所年報, 第 8 号, pp.415-427, 1965.
- 4) 吉川秀夫, 池田駿介, 北川明:湾曲水路の河床変化について, 土木学会論文報告集, 第 251 号, pp.65-75, 1976.
- 5) 今本博健, 石垣泰輔, 藤沢寛:複断面湾曲開水路流れの水理特性について(1), 京都大学防災研究所年報, 第 25 号 B-2, pp.529-543, 1982.
- 6) 池田駿介:移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.55-65, 1974.
- 7) Vriend, H.J.: Velocity redistribution in curved rectangular channels, J. Fluid Mech., vol.107, pp.423-439, 1981.
- 8) 石川忠晴, 金舜範:湾曲部の2次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 375 号 / II-6, pp.143-149, 1986.
- 9) 山坂昌成, 池田駿介, 酒寄建之:一様湾曲流路の流れの三次元解析, 土木学会論文集, 第 411 号 / II-12, pp.99-108, 1989.
- 10) 土木学会水理委員会研究小委員会:洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究, 土木学会論文集, 第 345 号 / II-1, pp.41-52, 1984.
- 11) 池田駿介, 田中昌宏, 千代田将明:空気蛇行流の乱流特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 351 号 / II-2, pp.77-86, 1984.
- 12) Leschziner, M. & Rodi, W.: Calculation of strongly curved open channel, J. Hydraulics Div., ASCE, vol.105, No.HY10, pp.1297-1314, 1979.
- 13) 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.
- 14) 杉山均, 秋山光庸, 龍澤正之:曲がり開水路乱流の構造解析と二次流れ遷移に関する研究, 土木学会論文集, 第 572 号 / II-40, pp.11-21, 1997.
- 15) Bathurst, J.C., Throne, C.R. and Hey, R.D.: Secondary flow and shear stress at river bends, J. Hydraulics Div., ASCE, vol.105, No.HY10, pp.1277-1295, 1979.
- 16) Vriend, H.J. and Geldof, H.J.: Main flow velocity in short river bends, J. Hydraulic Engineering, ASCE, vol.109, No.7, pp.991-1011, 1983.
- 17) 富永晃宏:幅の狭い用水路湾曲部における二次流構造の変形に関する現地計測, 第 24 回乱流シンポジウム講演論文集, pp.253-257, 1992.

(1997.5.29 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW STRUCTURE IN BENDS OF RECTANGULAR OPEN CHANNELS WITH SMALL WIDTH-TO-DEPTH RATIO

Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO and Shigeki CHIBA

A number of researches had been conducted about the flow structures in curved open channels, but they were limited to the channel with large width-to-depth ratio. This study aims to clarify the flow structure in curved rectangular open channels with small width-to-depth ratio, experimentally. The effects of the circumference angle and the radius of curvature of the curved channel were investigated. The obtained structures of secondary flow supported the conventional knowledge, but the existence of the counterrotating vortex near the outer bank was indicated. The developing process of the secondary flow was examined quantitatively with respect to the circumference angle and the radius of curvature. The structure of the primary mean velocity, the bed shear stress and the momentum transport were explained in relation to the secondary flow.