

# 開水路湾曲部における運動量輸送に及ぼす 河道内樹木群の効果

EFFECTS OF VEGETATION ON MOMENTUM TRANSPORT IN CURVED OPEN CHANNELS

富永晃宏\*・長尾正志\*\*・木村聡洋\*\*\*

Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO and Akihiro KIMURA

\*正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

\*\*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 名古屋市昭和区御器所町)

\*\*\*学生会員 名古屋工業大学大学院 工学部社会開発工学科(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

Vegetation in a curved river is considered to influence the local flow structures and bed configuration by changing a pressure gradient and a momentum transport. In this study, three-dimensional mean flow structures were measured in curved open channels with various vegetation arrangements. Secondary flows are generated only in the region outside the vegetation zones and their strength indicates similar developing/decaying process. In order to investigate the effects of vegetation on momentum transport, two-dimensional depth-averaged momentum equations are used in an orthogonal, curvilinear coordinate system. The lateral momentum transport due to the secondary flow is modeled from an examination of the previous experimental data. The mean flow distributions and water surface profiles in curved channels with vegetation are well predicted by using this model.

*Key Words: curved open channel, vegetation flow, secondary flow, 3-D flow structures, momentum transport, numerical calculation*

## 1. 序論

河道内の樹木群の水理学的影響については、洪水時の水位上昇に及ぼす影響というマイナス面の評価とともに、河川の自然環境保全機能を兼ね備えた植生護岸や水制としての利用といったプラス面の評価も行う必要がある。直線開水路における樹木群の水理的影響についてはすでに多くの研究が行われ、その基本的な特性が明らかにされている<sup>1),2)</sup>。河道内の樹木群は、樹木群自体の形状抵抗に加えて、境界部における大規模渦を伴う運動量交換による付加的抵抗を与えて上流の水位上昇をもたらすと同時に、横断方向の主流速分布を大きく偏らせる。河道内樹木群が流下方向に非一様な河道平面形に置かれた場合にはさらに複雑な流れへの影響が予想され、これは河道計画上解明すべき重要な課題である。樹木群が河道湾曲部に存在するとき、これが湾曲部特有の二次流を含む3次元流れ構造を変化させる可能性がある。また、樹木群は一種の透過水制のような役割を果たし、堤防保護および湾曲部の河床変動の制御に利用されることも期待される<sup>3)</sup>。湾曲部では遠心力と釣り合う圧力勾配の変化によって

Prandtl の第1種二次流が発生する。二次流は湾曲部の河床形状を支配する要因として非常に重要な役割を果たしており、湾曲部二次流に着目した研究が数多く行われている(例えば、池田<sup>4)</sup>、石川・金<sup>5)</sup>、山坂ら<sup>6)</sup>)。著者らは、湾曲部に配置された樹木群が二次流構造に与える影響について実験的に検討し、樹木群のない領域で湾曲部特有の2次流が形成され、外岸に樹木群がある場合に二次流が強くなることを示した<sup>7)</sup>。また、湾曲部外岸側の洗掘を軽減対策として、Odgaard and Kennedy<sup>8)</sup>によるアイオワバーン工や関根・吉川<sup>9)</sup>による外岸への棧粗度の設置等が検討されている。これらはいずれも湾曲部特有の二次流とは逆回転の二次流を強制的に発生させて、二次流による横断方向の輸送効果を軽減しようとするものである。著者らはまた、河床変動に及ぼす影響についても検討し、湾曲部上流の内岸に樹木群が存在する場合に、外岸の洗掘が軽減されることが示された<sup>7)</sup>。清水・辻本<sup>10)</sup>は乱流モデルによって一様湾曲水路外岸樹木群の影響を検討している。このような樹木群の流れや河床変動に与える影響を予測するには、樹木群が湾曲部特有の圧力勾配の変化やこれによる運動量輸送の変化を明らかにすることが

重要である。

本研究は、湾曲部における樹木群の平面配置が流れに及ぼす影響を、水深平均の2次元運動方程式に基づいて検討したものである。まず、著者らの長方形断面の河道湾曲部の流れ構造に関する実験結果をもとに運動量式の内部構造を定量的に検討し、二次流および主流の分散項を評価した。次に、この結果をモデル化して取り込んだ平面2次元の数値計算を行い、実験結果と比較するとともに、湾曲部における樹木群の配置が湾曲部の水理特性に与える影響を検討した。

## 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  $30\text{cm}$ 、全長  $17.2\text{m}$  の長方形断面水路で、その平面形は図-1 に示すように上流端から  $10.8\text{m}$  の位置に湾曲角  $60^\circ$  の単一湾曲部を設置し、その下流に  $4.5\text{m}$  の直線部を接続させたものである。湾曲部の中心曲率半径は  $r=2.7\text{m}$  で曲率半径・水路幅比  $r/B=3.0$  である。樹木群のない場合の結果としてケース R5 のデータを用いた<sup>11)</sup>。この実験結果から主流および二次流の水深平均による分散項の評価を行った。

樹木群モデルとしては、直径  $5\text{mm}$ 、長さ  $18\text{cm}$  の木材の棒を用い、流下方向、横断方向に  $5\text{cm}$  間隔で格子状に配置し、横断方向に 5 列、 $22.5\text{cm}$  にわたって設置した。樹木帯は内岸側配置、中央配置、外岸側配置として流下方向設置位置を湾曲部上流  $90\text{cm}$  ( $x=-90\text{cm}$ ) から湾曲部下流  $90\text{cm}$  ( $x=90\text{cm}$ ) まで一様に設置したケースを基本とし、湾曲部上流  $90\text{cm}$  から湾曲中心角  $15^\circ$  まで設置したケース (V5) と湾曲中心角  $45^\circ$  から湾曲下流  $90\text{cm}$  まで設置したケース (V6) およびこれらを組み合わせて配置したケース (V7) を設定した。樹木帯の配置を表-1 および図-2 に示す。流量は樹木群なしのケース R5 では  $0.04\text{m}^3/\text{s}$  に、樹木群ありのケースでは  $0.034\text{m}^3/\text{s}$  に設定し、湾曲入口より  $90\text{cm}$  上流において

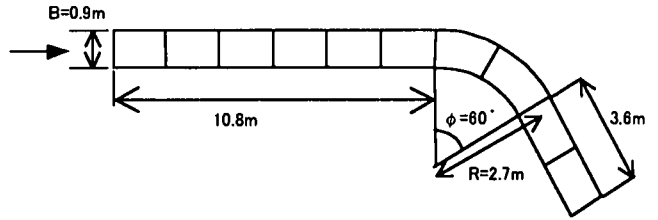


図-1 実験水路平面図

表-1 実験条件表

CASE	流量 $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	水深 $h$ ( $\text{m}$ )	樹木群配置	
			位置	範囲
R5	0.042	0.15	樹木群なし	—
V2	0.034	0.15	内岸	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$
V3	0.034	0.15	中央	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$
V4	0.034	0.15	外岸	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$
V5	0.034	0.15	内岸	$x=-90\text{cm}$ to $\phi=15^\circ$
V6	0.034	0.15	外岸	$\phi=45^\circ$ to $x'=90\text{cm}$
V7	0.034	0.15	内岸+ 外岸	$x=-90\text{cm}$ to $\phi=15^\circ$ $\phi=45^\circ$ to $x'=90\text{cm}$

水深  $h=15\text{cm}$  となるように下流の堰を調整した。流速計測には 3 成分電磁流速計 (東京計測製) を用いた。計測断面は R5 では湾曲入口上流の  $x=-90\text{cm}$ 、湾曲入口の  $x=0\text{cm}$ 、湾曲部では湾曲中心角で  $\phi=15^\circ$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $\phi=45^\circ$ 、湾曲出口の  $\phi=60^\circ$ 、湾曲下流直線部では湾曲出口からの距離  $x'=45, 90\text{cm}, 135\text{cm}$  において行った。その他のケースでは、湾曲入口、 $\theta=30^\circ$ 、湾曲出口 ( $\theta=60^\circ$ )、湾曲下流  $135\text{cm}$  の計 4カ所とした。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 MO ディスクに直接記録され解析された。

## 3. 湾曲部流れの 2 次元数値計算による検討

### 3.1 基礎方程式

湾曲部に配置された樹木群の流れへの影響として重要な点は、流れへの抵抗としてどれだけの水位上昇を

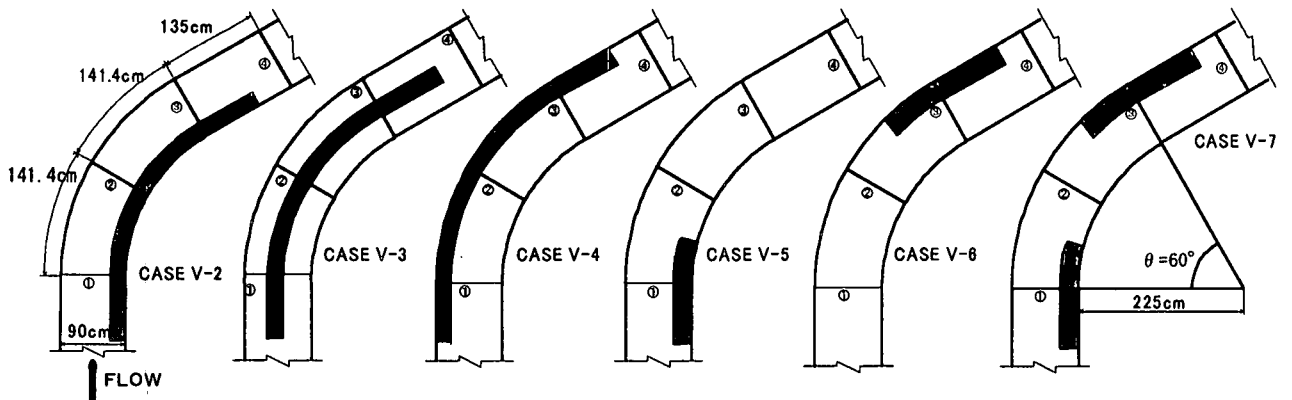


図-2 樹木帯配置平面図

もたらずかという点と、湾曲部の平均流構造にどのような影響を与え、結果として河床変動をどう変化させるかという点にある。湾曲部流れは二次流の発生に代表されるように本質的に三次元的な流れであるが、樹木群の平面配置の影響という観点からは、水深平均の平面流解析による考察も有用であると考えられる。この際、二次流の影響は水深平均によって生じる分散項に現れるが、湾曲部の平均流構造の実験結果がすでに得られており、これから概略値を見積もることができる。その結果、圧力勾配と水深平均流速の横断分布および底面せん断応力の構造が推測される。基礎式として次の曲線座標系における水深平均平面流方程式を用いる<sup>12)</sup>。

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{2UV}{R+y} = -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - F_x - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'U'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial y} - \frac{2\overline{U'V'}}{R+y} \quad (1)$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} - \frac{(U^2 - V^2)}{R+y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - F_y - \frac{R}{R+y} \frac{\partial \overline{U'V'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V'V'}}{\partial y} + \frac{\overline{U^2} - \overline{V^2}}{R+y} \quad (2)$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} + \frac{hV}{R+y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $R$ は水路内岸の曲率半径であり、 $U, V$ はそれぞれ流下方向  $x$  及び横断方向  $y$  の水深平均流速、 $\rho$ は水の密度、 $g$ は重力加速度である。 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ は  $x, y$  方向の底面せん断応力であり、マニング式を用いて次のように与えられる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ は水深平均レイノルズ応力であり、次式のように表される。

$$\tau_{xx} = 2\rho\nu_t \left( \frac{R}{R+y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{R+y} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{yy} = 2\rho\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \rho\nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{U}{R+y} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (8)$$

ここに、 $\nu_t$ は渦動粘性係数であり、ゼロ方程式モデルによって次のように与える。

$$\nu_t = \varepsilon_0 U_* h \quad (9)$$

$F_x, F_y$ は樹木群の形状抵抗であり、次式で与える。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (10)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (11)$$

ここに、 $C_D$ は抵抗係数、 $\lambda$ は密度パラメータである。

$U', V'$ は流速鉛直分布における水深平均流速からの偏差を表し、式(2), (3)の右辺の最後の3項は水深平均に伴う分散項を示している。

### 3.2 水深平均に伴う分散項の評価

式(2), (3)中の分散項について長方形断面湾曲開水路の実験値(ケースR5)から検討する<sup>11)</sup>。まず、図-3に湾曲角度  $60^\circ$  における2次流ベクトルと平均主流速コンターを示す。内岸が  $y=0\text{cm}$ 、外岸が  $y=90\text{cm}$  である。二次流は  $y < 75\text{cm}$  の範囲の湾曲渦と  $y > 75\text{cm}$  の外岸渦の二重構造を示している。主流速は内岸付近で底面側が速く水面側が遅い分布となっている点が注目される。流下方向の各横断面において  $\overline{U'U'}$ ,  $\overline{V'V'}$  および  $\overline{U'V'}$  を計算し、これらの横断方向分布を図-4, 5, 6にそれぞれ示す。値は湾曲上流  $90\text{cm}$  の断面平均流速  $U_m$  で無次元化している。いずれの項もオーダー的にはほぼ同じ値をとることがわかる。 $\overline{U'U'}$  は、湾曲角  $\phi = 15^\circ$  より上流では水路中央よりやや外岸側で最大値をとる歪んだ凸型の分布を示している。 $\phi = 30^\circ$  から  $45^\circ$  にかけては外岸側の値が減少し、水路中央付近が増大している。また、 $\phi = 15^\circ$  から内岸付近の値が減少している。 $\phi = 60^\circ$  から下流にかけて  $\overline{U'U'}$  の値は急激に減少し、内岸付近の流速分布が逆転している領域の値が増加する。これは、 $\phi = 60^\circ$  から下流では内岸の逆転領域を除く領域で鉛直分布の一様化が進んでいることを示している。

次に、 $\overline{V'V'}$  の分布は、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す。 $y > 70\text{cm}$  の外岸渦領域の値はかなり小さい。このピークの大きさは二次流強度の発達減衰過程を示しており、湾曲入口から徐々に増大し  $\phi = 60^\circ$  で最大となり、下流

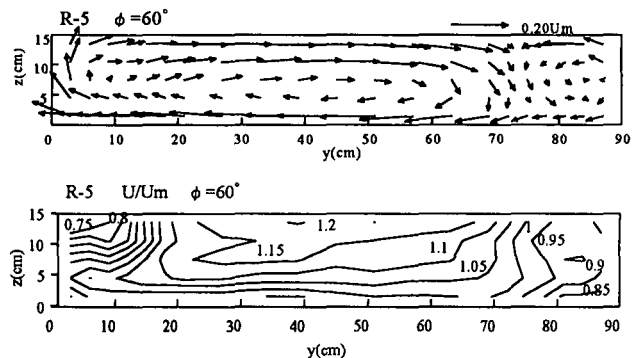


図-3 長方形断面湾曲開水路の二次流および主流速構造

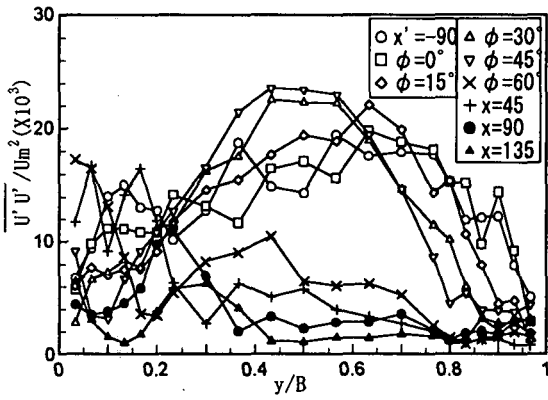


図-4  $\overline{U'U'}$ の横断方向分布

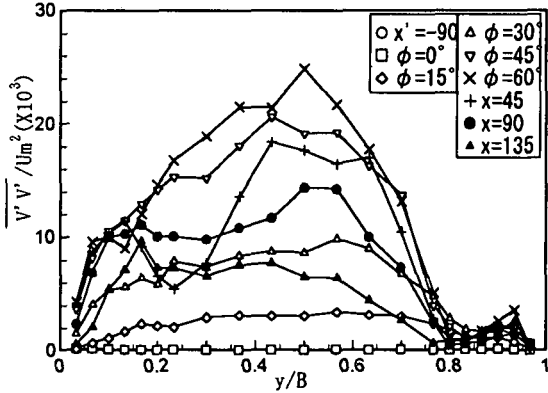


図-5  $\overline{V'V'}$ の横断方向分布

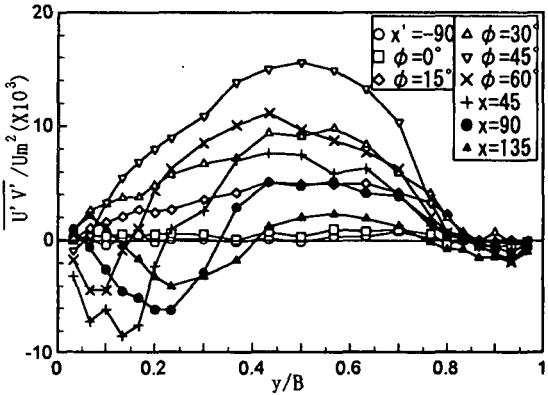


図-6  $\overline{U'V'}$ の横断方向分布

直線部で減少していく。

$\overline{U'V'}$ の分布は、 $\phi=45^\circ$ までは水路中央をピークとして内岸側壁および  $y=70\text{cm}$  でゼロとなる上に凸となる  $\overline{V'V'}$ と同様な分布を示しているが、 $\phi=45^\circ$ で最大となる。 $\phi=60^\circ$ より下流では内岸に負の領域が現れ、負のピーク位置が徐々に水路中央側へ移動していく。これは内岸の主流速鉛直分布の逆転領域では、同じ時計回りの二次流であっても横断方向の正味の運動量輸送方向が水路中央から内岸に向かうことを示している。

次に、式(2)、(3)に現れるこれらの微分項の分布を図-7に示す。流下方向の微分項は横断方向微分に比べてかなり小さな値となっている。 $\partial\overline{U'V'}/\partial y$  および  $\partial\overline{V'V'}/\partial y$  は同程度の値を示し、内岸側で正の値、外

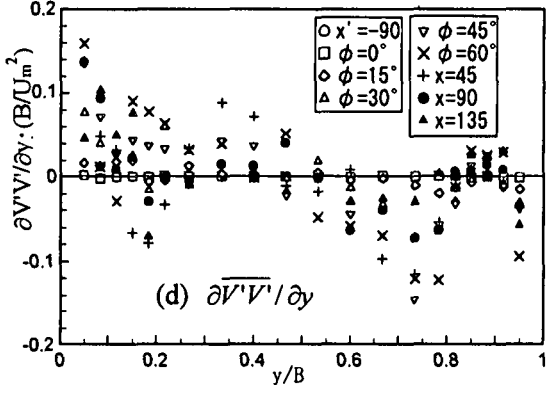
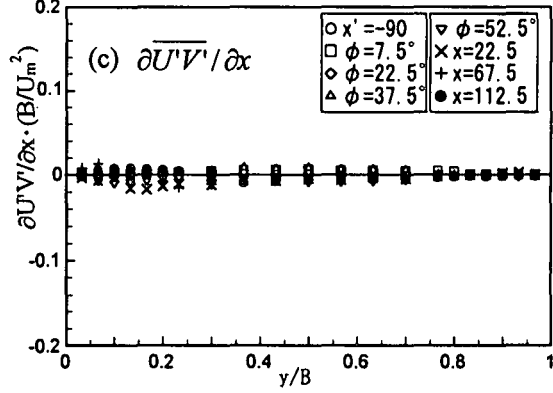
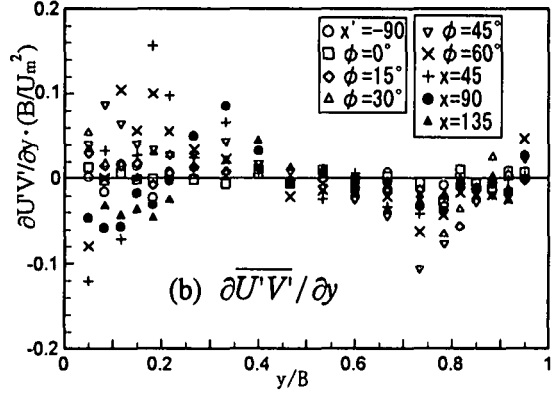
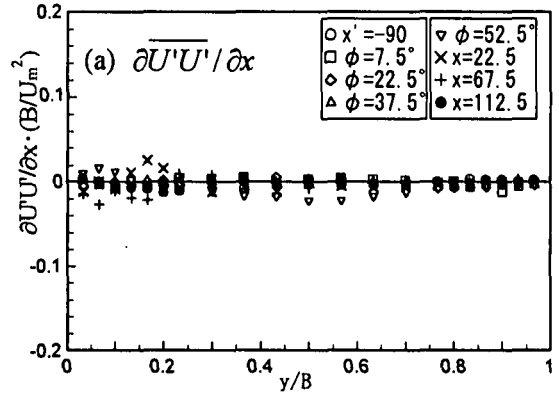


図-7 運動方程式中の分散項の横断分布

岸側で負の値をとる傾向にある。また、式(1)、(2)の右辺の最後の項も、本実験程度の曲率半径でも無視できるほど小さい値となった。したがって分散項としては式(1)中の  $\partial\overline{U'V'}/\partial y$  と式(2)中の  $\partial\overline{V'V'}/\partial y$  を考慮すればよいであろう。 $\partial\overline{U'V'}/\partial y$  は2次流による内岸から外岸への主流速の運動量輸送を意味している。式(2)にお

いて横断方向の水深平均流速  $V$  はオーダー的に小さいため、左辺の遠心力項  $-U^2/(R+y)$  と右辺の横断方向の圧力勾配項  $-g\partial H/\partial y$  の釣り合いに対して、 $\partial\overline{V'V'}/\partial y$  は内岸で勾配を減少させ外岸で増大させる効果があるものと推測される。

### 3.3 二次流分散項のモデル化

上述の各分散項のオーダー比較により、 $\partial\overline{U'V'}/\partial y$  および  $\partial\overline{V'V'}/\partial y$  が重要であることが示されたので、 $\overline{V'V'}$  および  $\overline{U'V'}$  を R5 の実験値をもとにモデル化して与えるを試みる。これは、湾曲角度や曲率半径の違いおよび樹木群の存在によらず二次流の発達・減衰過程がほぼ相似であることを考慮したものであり、二次流のピーク値およびピーク発生位置さらには湾曲渦の幅をパラメータとしてこれら境界条件の違いを考慮することができるからである。また、外岸渦の存在や内岸の分散項の符号の逆転現象などの複雑な要素を取り込むために、直接実験値の近似によって運動量輸送効果を検討しようとするものである。

図-8 は湾曲入口からの距離  $x$  における二次流強度  $V_{max}$  と最大二次流強度  $V_p$  ( $x=x_p$ ) の比を  $x/x_p$  に対してプロットしたものである<sup>11)</sup>。これより二次流の発生・発達・減衰過程は曲率半径や水路幅・曲率半径比によらず、ほぼ相似な過程をたどることが示される。二次流の発達・減衰過程はほぼ図中に示す関数形で与えられることから、ここでも類似の関数形を用いて表現することとする。湾曲入口の  $x$  座標を  $x_0$ 、二次流が最大となる  $x$  座標を  $x_p$ 、 $\overline{U'V'}$  の正のピーク位置  $x$  座標を  $x_a$ 、 $\overline{U'V'}$  の内岸での負のピーク位置を  $x_b$  とする。また、湾曲渦の左岸境界の  $y$  座標を  $y_a$ 、右岸境界の  $y$  座標を  $y_b$ 、 $\overline{U'V'}$  の内岸での負の領域の幅を  $y_0$  とするとき、両項を次のように与える。

( $\overline{V'V'}$ )

$$1) x < x_0: \overline{V'V'} = 0$$

$$2) x_0 \leq x:$$

$$y < y_b: \overline{V'V'} = \gamma \sin(\pi y / y_b) \quad (12)$$

$$y < y_b: \overline{V'V'} = 0$$

$$\gamma = \gamma_0 \left( \frac{x-x_0}{x_p-x_0} \right)^{1.5} \exp \left\{ 1 - \left( \frac{x-x_0}{x_p-x_0} \right)^{1.5} \right\} \quad (13)$$

( $\overline{U'V'}$ )

$$1) x < x_0: \overline{U'V'} = 0$$

$$2) x_0 \leq x \leq x_a:$$

$$y \leq y_b: \overline{U'V'} = \alpha \sin \{ (\pi(y-y_a)/(y_b-y_a)) \} \quad (14)$$

$$y_b \leq y: \overline{U'V'} = 0$$

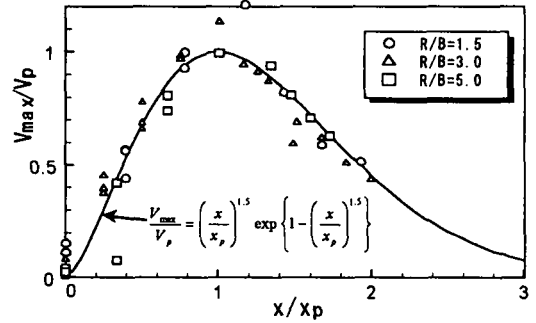


図-8 二次流の流下方向発達・減衰過程

$$3) x_a \leq x:$$

$$y \leq y_0: \overline{U'V'} = \beta \sin \{ (\pi(y-y_a)/(y_0-y_a)) \} \quad (15)$$

$$y_0 \leq y \leq y_b: \overline{U'V'} = \alpha \sin \{ \pi(y-y_0)/(y_b-y_0) \} \quad (16)$$

$$y_b \leq y: \overline{U'V'} = 0$$

$$\alpha = \alpha_0 \left( \frac{x-x_0}{x_a-x_0} \right)^2 \exp \left\{ 1 - \left( \frac{x-x_0}{x_a-x_0} \right)^2 \right\} \quad (17)$$

$$\beta = \beta_0 \left( \frac{x-x_a}{x_b-x_a} \right)^2 \exp \left\{ 1 - \left( \frac{x-x_a}{x_b-x_a} \right)^2 \right\} \quad (18)$$

$$y_0 = 0.6B(x-x_0)/(x_p-x_0) \quad (19)$$

ここに、 $x_a$  はおよそ  $0.25(x_p-x_0)$  程度、 $x_b$  は  $0.16(x_p-x_0)$  程度であるが、ここでは直接実験値を与えた。 $y_0$  は主流速鉛直分布の逆転領域の広がり幅を示すもので、 $\overline{U'V'}$  の正のピーク位置付近から流下方向に直線的に増大している。湾曲下流 135cm までしか計測が行われていないためこれより下流の挙動は不明であるが、二次流も減衰するため、最大でもほぼ水路中央付近までと考えてよいであろう。 $y_a$  は内岸に樹木群のない場合は0、ある場合はその幅であり、 $y_b$  は外岸に樹木群のない場合は湾曲渦の下降位置、ある場合は樹木群境界の  $y$  座標である。

### 3.4 計算結果と実験値との比較

以上の二次流分散項のモデル式を与えて、ケース R5 について計算し、実験結果と比較した。計算は有限体積法による離散化と SIMPLE 法を用いて行われた<sup>14)</sup>。渦動粘性係数の定数項  $\epsilon_0$  は 0.14 とした。図-9, 10 はそれぞれ水深平均主流速と水位の横断分布について計算値と実験値を比較したものである。計算値は式(1), (2)中の代表的分散項  $\partial\overline{U'V'}/\partial y$  と  $\partial\overline{V'V'}/\partial y$  の項を取り入れた場合と取り入れない場合について示している。水深平均流速についてみると、湾曲部の前半部で内岸の高速化がよく再現されているが、 $\phi=30^\circ$  で内岸流速が過小評価となっている。二次流分散項の効果はこのあたりでは大きくない。湾曲出口の  $\phi=60^\circ$  では水路

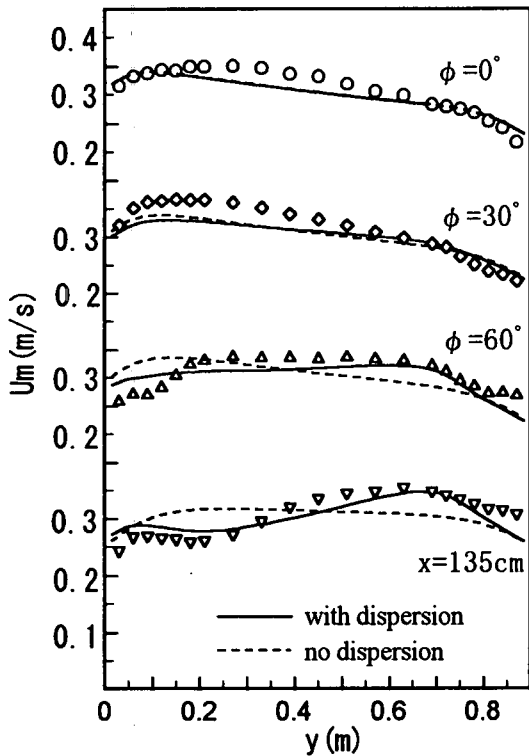


図-9 水深平均主流速横断分布  
(計算値と実験値の比較)

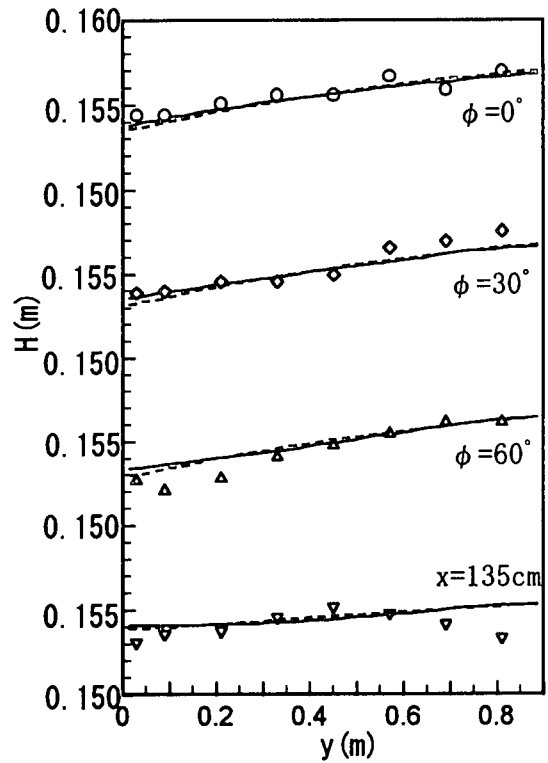


図-10 水位速横断分布  
(計算値と実験値の比較)

中央部でフラットな分布になる様子が再現されているが、内岸の急な減少が計算には現れていない。ここでは二次流分散項の運動量輸送効果が明確に現れてくる。下流直線部の  $x=135\text{cm}$  では、二次流分散項を取り入れた場合に外岸流速の増大が良好に再現される。二次流分散項を省略した場合は、この外岸の高速化がほとんど現れず、二次流による内岸から外岸への運動量輸送効果が大きな役割を果たしていることが分かる。一方、水位の横断分布については、実験精度も十分ではないが、外岸が高く内岸が低い水面勾配をほぼ再現しているといえる。ここでは、二次流分散項の効果は小さく、圧力勾配項はほぼ遠心力項とのバランスから決まることを示している。

以上より、曲線座標を用いた水深平均平面流方程式において、二次流の横断方向流速による分散項  $\partial \overline{U'V'}/\partial y$  を適当に評価することにより、実験値を十分再現できることが示された。

#### 4. 樹木群を有する湾曲部の流れ構造

図-11は、各ケースの湾曲出口における二次流ベクトル図である。樹木群内では横断方向流れが見られるが、明確な渦構造は見られない。その結果、樹木帯がある場合、遠心力による二次流は樹木群を除いた領域において発生している。

内岸側に樹木群があるケース(V2)では、長方形断

面と同様の二次流構造が樹木帯の外側の領域に形成され、外岸渦も認められる。水路中央に樹木帯を設置したケース(V3)では、樹木帯より内岸側および外岸側の領域でそれぞれ独立した湾曲渦が発生しており、内岸の二次流の方が外岸のものより強い。外岸領域ではやはり外岸渦の存在が見られるが、内岸領域では見られない。外岸側に樹木群があるケース(V4)では、外岸の樹木帯の影響で外岸渦が消滅し、このケースにおいて湾曲渦がスケール、強さともに最も大きくなる。内岸上流部のみに樹木群を設置したケース(V5)は、内岸全体に樹木群を設置したケースV2とほとんど同様な二次流構造を示す。同じく、外岸の下流部のみに樹木群を設置したケース(V6)はケースV4と同様である。内岸上流部と外岸下流部に樹木群を設けたケース(V7)では、 $\phi=60^\circ$ においてケースV6と同様な二次流構造を示しているが、内岸の上昇流はこれより弱くなっていることがわかる。

図-12は、横断平均流速  $V$  の水面最近点と底面最近点の差の1/2で表示される二次流強度  $V_{max}$  の流下方向変化を示す。樹木群を有する場合の二次流強度も樹木群のない長方形断面のケースR5とほぼ同様な発達・減衰過程を示し、 $\phi=60^\circ$  ( $x=282.8\text{cm}$ )で最大となる。外岸に樹木群のあるケースV4、V6が、二次流強度としては最も大きくなり、 $V_{max}/U_m=0.24$ 程度になるが、その他のケースではほぼ同程度で  $V_{max}/U_m=0.15\sim 0.17$ 程

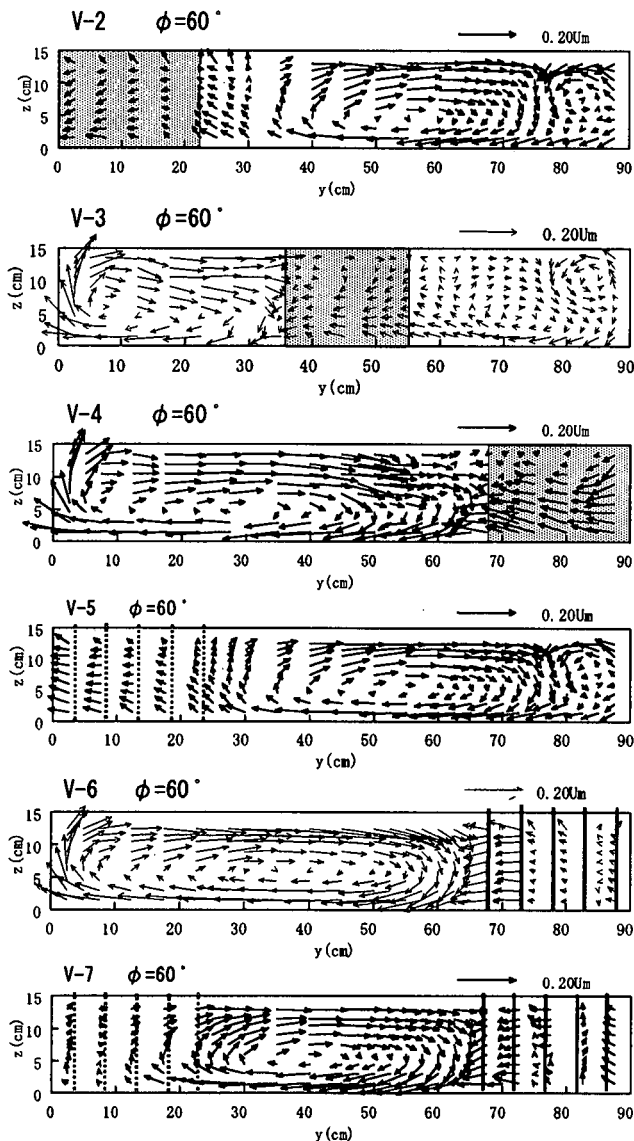


図-11 二次流ベクトル図 (樹木群のあるケース)

度である。

以上より、樹木群が存在する場合、樹木群のない主流領域に湾曲渦が発生し、外岸が壁の場合は外岸渦が存在し、外岸が樹木帯の場合は外岸渦が消滅することがわかった。また、二次流の発達・減衰過程は樹木群のない場合と同様で、外岸に樹木帯がある場合に二次流が強くなることが示された。したがって、先述の二次流分散項のモデル式は、二次流の発生している横断方向領域を考慮することによって適用できることがわかる。二次流のピーク位置は樹木群がある場合もほとんど変化せず、したがって  $x_a$ ,  $x_b$  は R-5 と同じ値を用い、 $y_a$ ,  $y_b$ ,  $y_0$  のみを変化させた。

式(10), (11)において実験の樹木群の密度パラメータ  $\lambda$  は  $2(1/m)$  となり、抵抗係数  $C_D$  は実験値に一致するように定め、 $C_D = 1.25$  とした。ケース V5, V6 の水深平均流速の計算結果を実験値とともに図-13 に示す。樹木群配置の影響を検討する上では非一様な配置の再現

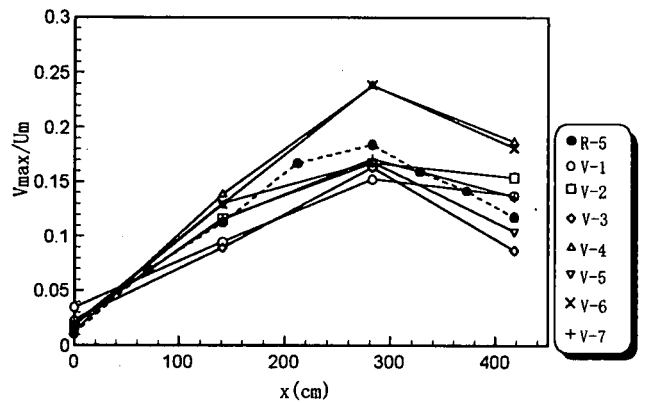


図-12 二次流強度の発達過程

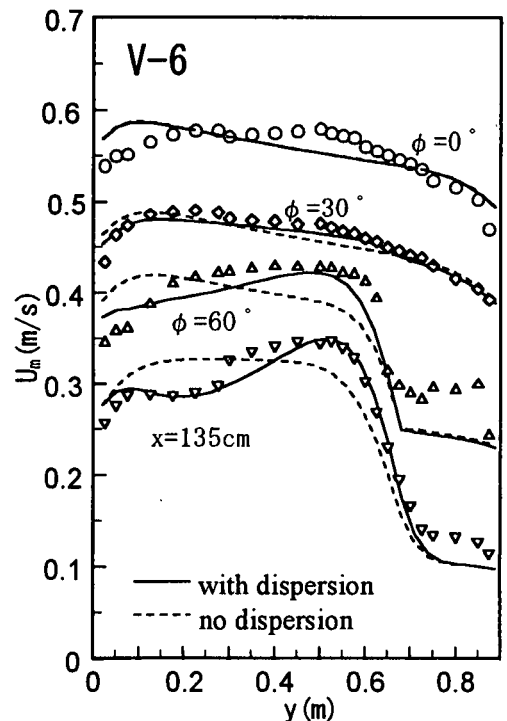
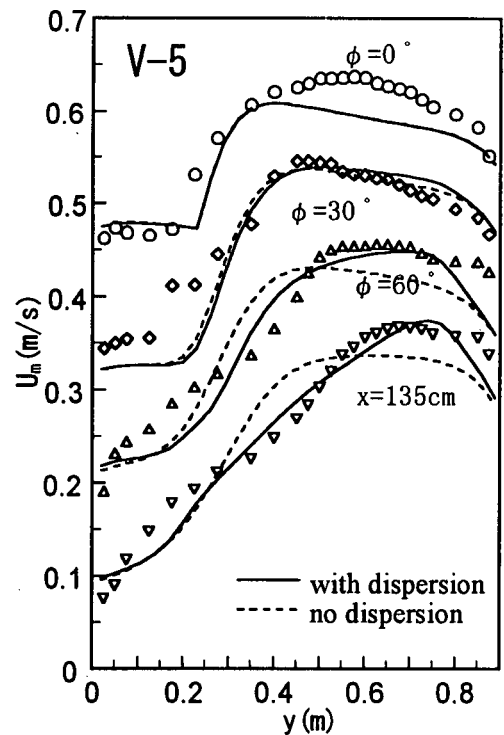


図-13 主流速横断分布計算値

性が問われるため、これらのケースについて検討するものである。湾曲入口で実験値は中央付近が上に凸となる傾向にあるが、計算はこれを再現していない。特にケース V5 の  $\phi = 0^\circ$  では計算値の水深が若干過大となったことも原因していると考えられる。また、V5 の内岸の樹木群下流で計算値は過小評価となっている。それ以外では計算値は実験値の特徴である樹木群抵抗の影響と湾曲の効果を非常によく再現している。また、樹木群がある場合も湾曲部後半から下流にかけては二次流による運動量輸送効果が大きいことがわかる。

次に、計算された内岸・外岸に沿う水位縦断分布を図-14 に示す。参考として樹木群のないケース R5 の水面形を下流端水位を一致させて示している。湾曲部直上流では、外岸側で増加、内岸側で減少し、湾曲部直下流では、外岸側で減少、内岸側で増加することが R5 の結果からわかる。これに樹木群の影響が加わると、水位は樹木群上流で大きく堰上げられ、樹木群を通過する間に急激に減少する。湾曲部上流を見ると V5 の方が内岸の水位上昇が大きく水位横断勾配は他のケースよりも小さくなっている。したがって、内岸の樹木群抵抗は湾曲部の内外岸の水位差を緩和する働きがあることがわかる。ケース V5 における内岸上流の樹木群抵抗は V6 の外岸下流の樹木群抵抗よりも大きく、水位上昇効果も V5 の方が大きくなっている。このように、湾曲部平面形に対する樹木群の配置によって圧力勾配が変化し、結果として主流速分布や二次流の発生に影響を与えるものと考えられる。

## 5. 結論

開水路湾曲部の流れは圧力勾配と二次流を含む平均流の運動量輸送に強く支配された流れである。本研究は、長方形断面湾曲開水路の実験データを用いて水深平均に伴う分散項を評価し二次流による運動量輸送項をモデル化した。これにより曲線座標系を用いた水深平均平面流方程式の数値計算を行い、計算は実験値を良好に再現することが示された。

樹木群を有する湾曲部流れにおける二次流構造が実験によって明らかにされ、樹木群による二次流の幅の変化を考慮すれば同一のモデルを適用できることがわかった。これにより、湾曲部流れに樹木群の抵抗が加わったときの流れ構造の変化が予測可能となり、実験値をよく再現することができた。二次流構造が推定できないような複雑な配置の場合には、とりあえず二次流分散項を無視しても水位予測は可能であるといえる。

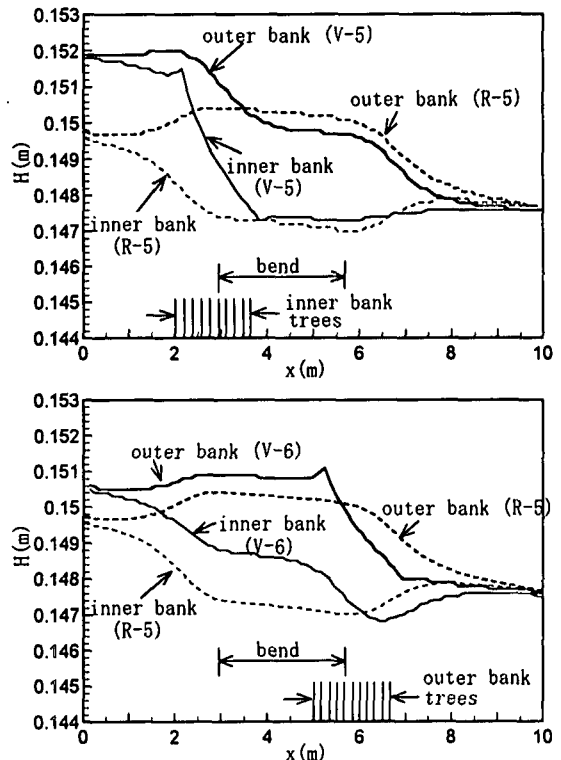


図-14 計算された水位縦断分布

## 参考文献

- 1) 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案),リバーフロントセンター編集, 山海道, 1994
- 2) 福岡・藤田: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告, 第180号, pp.129-192, 1990.
- 3) 福岡他: 柳水制の試験施工とその機能の現地調査, 水工学論文集, 第42巻, pp.445-450, 1998.
- 4) 池田: 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.
- 5) 石川, 金: 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.
- 6) 山坂, 池田, 酒寄: 一樣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.
- 7) 富永, 長尾, 木村: 湾曲部の流れ構造と河床形状に及ぼす樹木群配置の影響, 水工学論文集, 第43巻, pp.809-814, 1999.
- 8) Odgaard, A.J. and Kennedy, J.F.: River-bend bank protection by submerged vanes, J. Hydr. Eng. ASCE, 109(8), pp.1161-1173, 1983.
- 9) 関根他: 斜め棧粗度による河川湾曲部の二次流制御に関する研究, 土木学会論文集, No.558/II-38, pp.61-70, 1997.
- 10) 清水・辻本: 樹木群による河道湾曲流れの制御に関する数値計算, 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 31-36, 1997
- 11) 富永, 長尾, 千葉: 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, 1989.
- 12) Shimizu, Y. et al.: Three-Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation, J. Hydraulic Engineering, vol.116, No.9, pp.1090-1108, 1989.

(1999年4月23日受付)