

# 樹木型水制の配置と治水機能に関する水理的評価

## ASSESSMENT OF HYDRAULIC FUNCTIONS OF GROINS UTILIZING NATURAL WILLOWS

福岡捷二<sup>1</sup>・渡邊明英<sup>2</sup>・山内芳郎<sup>3</sup>・大橋正嗣<sup>4</sup>・関浩太郎<sup>5</sup>

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Yoshiro YAMAUCHI, Masatsugu OHASHI and Kotaro SEKI

<sup>1</sup>正会員 工博 PH.D 広島大学教授 工学部第四類 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類

<sup>3</sup>正会員 建設省東北地方建設局河川計画課課長補佐 (研究当時)

<sup>4</sup>正会員 工修 大阪ガス南部事業本部

<sup>5</sup>正会員 工修 清水建設東京支店第3部

Vegetation along riverbank or on floodplain is one of important elements which compose the river environments such as natures, scene and inhabiting space. The functions of vegetation along riverbank on river improvements and those utilization as the permeable groins are examined.

It was shown that it is suitable for the spaces of permeable groins made of natural vegetation to be longer than twice of groin length from the model experiments. The functions of groins utilizing natural willows in yonesiro river and mogami river are examined in field tests. In this paper, by using numerical simulation model, the function of willow-groins in model tests and field tests are evaluated.

**Key Words:** Arrangement of permeable groins, natural willows, field test, vegetation

### 1. はじめに

河川の水際には多くの樹木や草本類などが繁茂している。これらは河川の自然、生物の生息空間、景観等の河川環境を構成する重要な要素の一つである。しかし、洪水時に流れの抵抗となる場合には伐採されることが多かった。著者ら<sup>1)2)3)</sup>は、河川の治水と環境の調和を目指して、これら水際河川植生を存置するために、その治水効果について評価し、現地試験施工において実現可能性を検討してきた。

水際に群生する柳などの樹木群を水制的に利用する場合には樹木群水制の配置方法が重要となる。著者らはこれまで湾曲部をもつ単断面水路の外岸部に樹木群水制を種々の条件で配置した模型実験を数多く行い、湾曲部外岸における主流の集中と二次流の発達及び河床変動を抑制するためには樹木群水制の間隔を水制長さの2倍よりも長くした方が良いこと、かつ背部に連続的な樹木群がある場合には間隔をかなり長くとってもその効果が現れることを見出している。本文では、この条件下において流れを数値解析し、樹木群水制が流れ場に与える影響を検討している。

現地施工された米代川及び最上川の樹木群水制の

事例についても数値解析を行い、洪水時の航空測量写真による流速分布と比較検討し、樹木群水制の効果を評価した。

### 2. 解析方法

樹木群が配置された流れの手法は数多く開発されている。この場合重要なことは水平渦などによる混合を評価できることであり、水平渦による効果を取りこむ方法として、統計乱流モデルを用いた渦粘性による方法<sup>4)</sup>と渦運動を直接的に解く方法<sup>5)6)7)</sup>がある。本文では、高次差分による後者の方法が用いられている。対象とする場が比較的浅く、樹木は冠水していないため、解析には静水圧3次元モデルを採用している。

#### (1)基礎方程式

鉛直方向に変則 $\sigma$ 座標系<sup>8)</sup>を導入した一般座標系における静水圧流れの運動方程式は以下の式(1),(2)の様に表示される。

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \frac{\tilde{u}}{d\xi} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} + \frac{\tilde{v}}{d\eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} + \frac{\tilde{w}}{dz} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} - \frac{\tilde{u}}{d\xi} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \xi} (d\xi \cdot \xi_x) + v \frac{\partial}{\partial \xi} (d\xi \cdot \xi_y) \right\}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\tilde{v}}{d\eta} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \eta} (d\xi \cdot \xi_x) + v \frac{\partial}{\partial \eta} (d\xi \cdot \xi_y) \right\} \\
& = gI_\xi - gd\xi \left( \alpha \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \\
& + \frac{d\xi}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \xi} (JJ' \tau_{\xi\xi}) + \frac{d\xi}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \eta} (JJ' \tau_{\eta\xi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{\xi z}) \\
& + \frac{d\xi}{J'} (-y_{\eta\xi} \tau_{\xi x} + x_{\eta\xi} \tau_{\xi y} - y_{\eta\eta} \tau_{\eta x} + x_{\eta\eta} \tau_{\eta y}) \quad (1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \frac{\tilde{u}}{d\xi} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \xi} + \frac{\tilde{v}}{d\eta} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \eta} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \\
& - \frac{\tilde{u}}{d\xi} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \xi} (d\eta \cdot \eta_x) + v \frac{\partial}{\partial \xi} (d\eta \cdot \eta_y) \right\} \\
& - \frac{\tilde{v}}{d\eta} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \eta} (d\eta \cdot \eta_x) + v \frac{\partial}{\partial \eta} (d\eta \cdot \eta_y) \right\} \\
& = gI_\eta - gd\eta \left( \beta \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \\
& + \frac{d\eta}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \xi} (JJ' \tau_{\xi\eta}) + \frac{d\eta}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \eta} (JJ' \tau_{\eta\eta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{\eta z}) \\
& + \frac{d\eta}{J'} (y_{\xi\xi} \tau_{\xi x} - x_{\xi\xi} \tau_{\xi y} + y_{\xi\eta} \tau_{\eta x} - x_{\xi\eta} \tau_{\eta y}) \quad (2)
\end{aligned}$$

ここで、座標に関する下付き文字は微分を、応力に関する下付き文字は成分を表す。\$J\$ は3次元座標変換ヤコビアン、\$J'\$ は平面座標変換のヤコビアンを表す。ここで、\$(u, v, w)\$ 及び \$(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})\$ はそれぞれ \$(x, y, z)\$ 及び \$(\xi, \eta, \sigma)\$ の反変流速ベクトルを示す。

$$\begin{cases} \tilde{u} = d\xi(\xi_x u + \xi_y v) \\ \tilde{v} = d\eta(\eta_x u + \eta_y v) \\ \tilde{w} = \sigma_x u + \sigma_y v + w \end{cases} \quad (3)$$

\$d\xi, d\eta\$ は座標系の反変ベクトルの長さを表し、反変流速ベクトルは、通常反変ベクトルにこれらの長さをかけたものになっており、流速の次元を持っている。その他、

$$\begin{aligned}
\alpha & = \xi_x^2 + \xi_y^2, \quad \beta = \xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y, \quad \gamma = \eta_x^2 + \eta_y^2, \\
d\xi & = 1/\sqrt{\alpha}, \quad d\eta = 1/\sqrt{\gamma} \\
\tau_{\xi\xi} & = \xi_x \tau_{\xi x} + \xi_y \tau_{\xi y}, \quad \tau_{\eta\xi} = \xi_x \tau_{\eta x} + \xi_y \tau_{\eta y}, \\
\tau_{\xi\eta} & = \eta_x \tau_{\xi x} + \eta_y \tau_{\xi y}, \quad \tau_{\eta\eta} = \eta_x \tau_{\eta x} + \eta_y \tau_{\eta y}
\end{aligned}$$

であり、それぞれの応力は平面における \$\sigma\$ 座標の変化が、\$\xi, \eta\$ の変化に比べて十分小さいとして近似して表した。また、渦動粘性項には、以下の0方程式モデルを用いられている。

$$\tau_{\xi x} = \nu_T \left( \alpha \frac{\partial u}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial u}{\partial \eta} \right), \quad \tau_{\xi y} = \nu_T \left( \alpha \frac{\partial v}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial v}{\partial \eta} \right)$$

$$\begin{aligned}
\tau_{\eta x} & = \nu_T \left( \beta \frac{\partial u}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial u}{\partial \eta} \right), \quad \tau_{\eta y} = \nu_T \left( \beta \frac{\partial v}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) \\
\tau_{\xi z} & = \nu_T \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}, \quad \tau_{\eta z} = \nu_T \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \\
\nu_T & = \kappa u_* z_d (1 - z_d/h)
\end{aligned}$$

\$\tilde{w}\$ は連続式(4)から、水位は水深積分した連続式(5)からそれぞれ求められる。

$$\frac{\partial(\tilde{u}/d\xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\tilde{v}/d\eta)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J'\tilde{w})}{\partial \sigma} = 0 \quad (4)$$

$$J' \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \int (J'\tilde{u}/d\xi) dz + \frac{\partial}{\partial \eta} \int (J'\tilde{v}/d\eta) dz = 0 \quad (5)$$

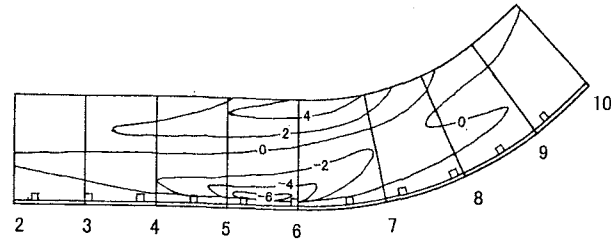
移流項の離散化は水平方向には4次精度の差分法で風上化されており、鉛直方向には風上化されていない。その他の空間微分は2次精度の中心差分で表されている。時間積分は2次精度の前進で行っている。

### 3. 模型実験の数値解析

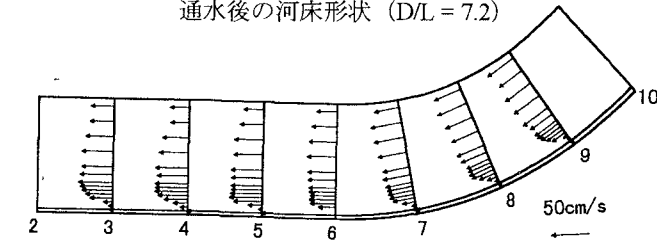
ここでは、福岡ら<sup>2)</sup>によって行われた水制長 \$L\$ に対する水制間隔 \$D\$ の比が 7.2 の場合を対象に解析を行う。解析対象の実験水路、樹木配置、及び通水後河床形状を図-1に示す。水路幅は 1.5m であり、左岸に連続樹木帯および樹木群水制模型が設置されている。断面番号は左岸に沿いの下流端からの距離を示している。河床勾配は 1/800、流量は 32 l/s である。

樹木群模型の抵抗度を表す透過係数は、樹木群を一樣に敷き詰めたときの実験値として与えられている。しかし、樹木群を流れが通過する場合にこの値を用いると、解析による通過流量や通過速度が実験値よりも小さくなる。そのため、解析にあたって、流れが樹木群を通過する場合の透過係数の値について検討した。流れが樹木群を通過する水制部分の透過係数の値を、一樣に敷き詰めた場合の透過係数 \$K = 0.38\$ m/s の 1 倍、\$\sqrt{2}\$ 倍、2 倍、3 倍と変化させ流れ場の解析し、流速分布、特に樹木群通過後の速度について実験値と比較した。その結果、樹木群の透過係数が 1 倍では通過流速が小さくなること、3 倍では逆に通過流速が大きくなることが分った。流速の比較から樹木群水制の透過係数の値は、一樣な場合の概ね \$\sqrt{2}\$ 倍~2 倍程度にすれば良いと考えられる。

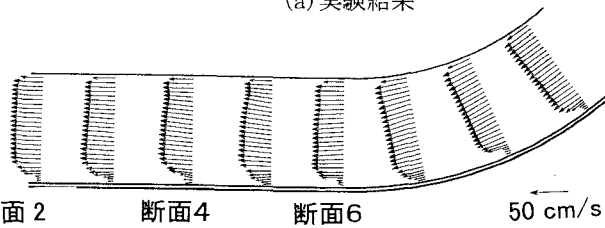
湾曲部全体の水深平均主流速分布の実験結果及び透過係数を \$\sqrt{2}\$ 倍にした場合の解析結果を図-2に、断面 No. 5 における樹木群水制領域の流速の実験結果と透過係数を \$\sqrt{2}\$ 倍にした場合の解析結果を図-3に示す。



断面番号  
 図-1 実験水路，樹木群水制の配置及び  
 通水後の河床形状 (D/L = 7.2)

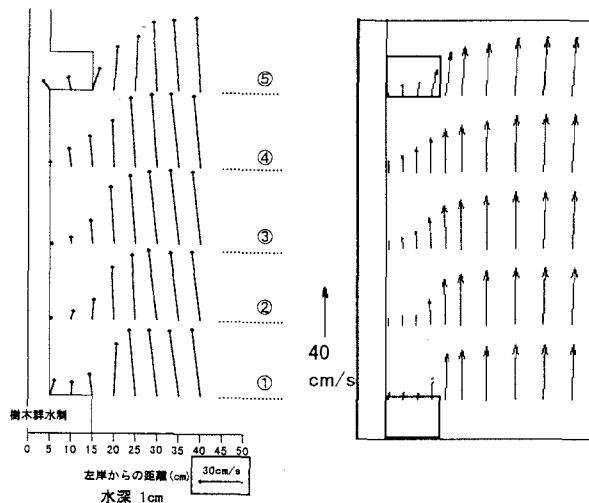


断面番号  
 (a) 実験結果



(b) 解析結果

図-2 水深平均主流速横断分布 (D/L = 7.2)



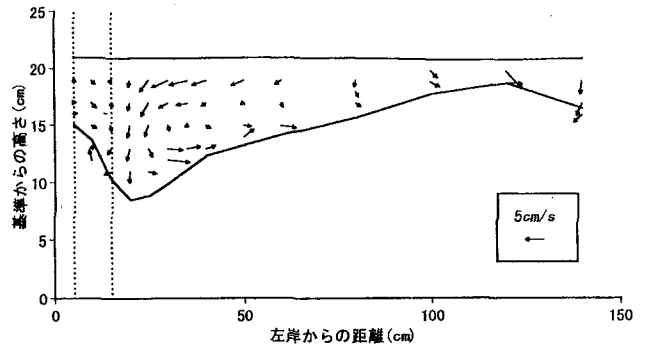
(a) 実験結果

(b) 解析結果

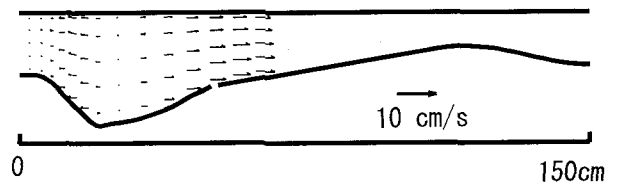
図-3 樹木水制の水制領域の流速分布  
 (断面5付近，水面から1cm)

本解析法は非常常解析で水平渦等を解くことができるが，計算値でも実験でも流下する大きな水平渦は見られない。本文で示す解析結果の流速ベクトルはその時間平均値を取ったものである。

図-2の比較から，解析結果では断面6より下流の位置で実験結果と比べて流れが一様化しており，左岸側に集中していないことが分る。



(a) 実験結果 (断面5付近)



(b) 解析結果 (断面5付近)

図-4 横断面内流速分布

図-3を見ても，実験ではまだ流れが左岸に集中してくるのに対して，解析結果の表面流速では樹木群水制よりも右岸側では全体的に流れが右岸へ向かう流れとなっている。樹木群水制の水制領域内の流れに関して言えば，一様に敷き詰めた時よりも透過係数を大きくした本解析の結果は，流速の大きさ及び方向共に実験結果とほぼ一致している。図-4に断面内の横断流速ベクトルを示す。先に述べた様に解析では断面5付近で流れが右岸へ向かうために，明確な二次流セルが形成されなくなっており，これはむしろ断面4付近の流れに近く二次流の減衰が早くなっている。また，透過係数を $\sqrt{2}$ 倍にした場合と2倍にした場合にはそれほど大きな流れ場の差は見られなかった。

#### 4. 現地試験の数値解析

##### (1) 最上川の事例

最上川の柳水制設置区間は182km付近である。対象区間における堤間幅は約300~350m，流路幅は約100mである。河床勾配は1/540，河床材料粒径は60%粒径で25mmとかなりの急流部である。水制設置区間の現地の状況を写真-1に示す。水制の配置を図-5に示す。水制は4基設置されており，水制長Lは15m，水制間隔Dは20m~63mでL/Dは上流から2.4，5.2，4.0である。また，背部に連続部分を有している。これらの水制は柳を部分的に伐採することで作られている。

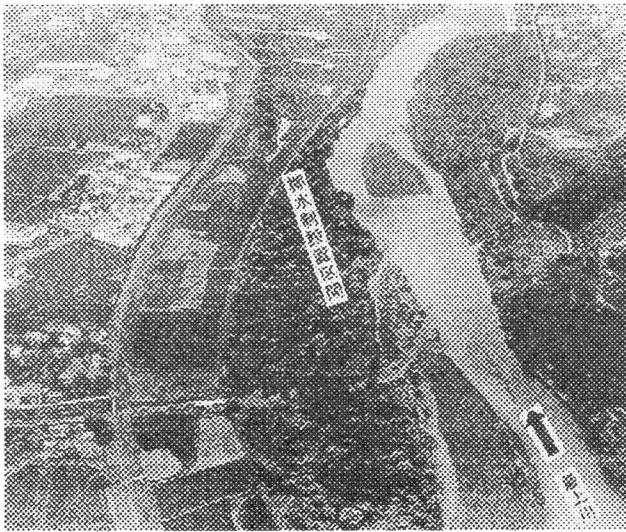


写真-1 最上川樹木群水制施工区間

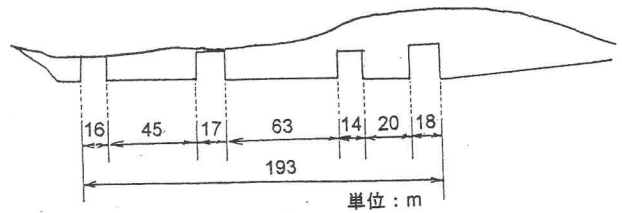


図-5 水制工の配置

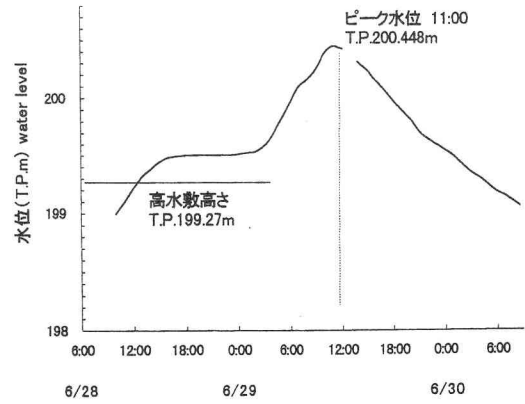


図-6 水位ハイドログラフ

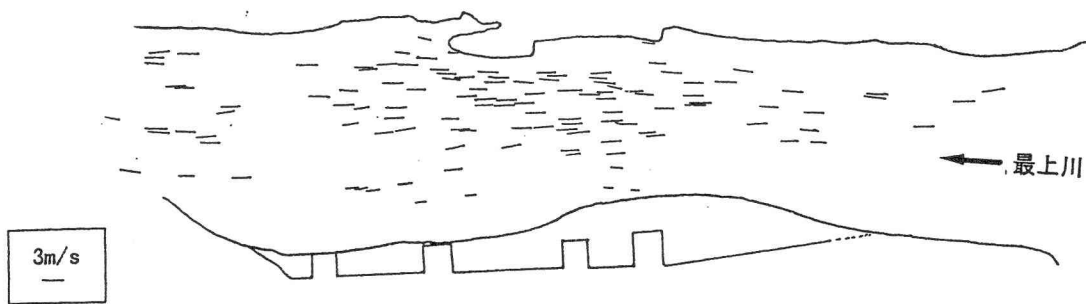


図-7 航空測量による表面流速ベクトル(最上川)

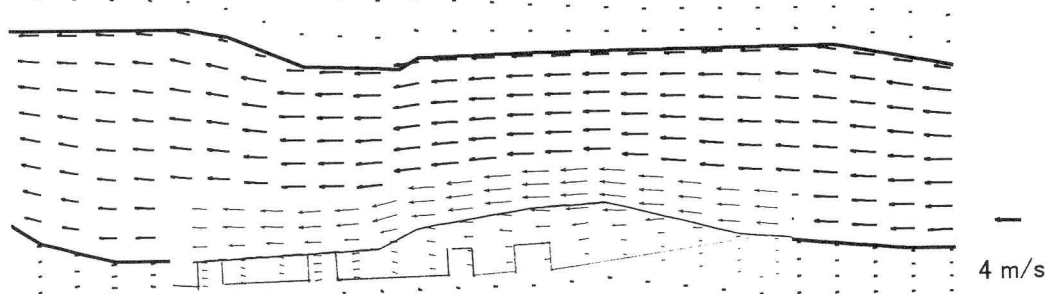


図-8 数値解析による上層の流速ベクトル(最上川: 樹木群を水制形状にした場合)

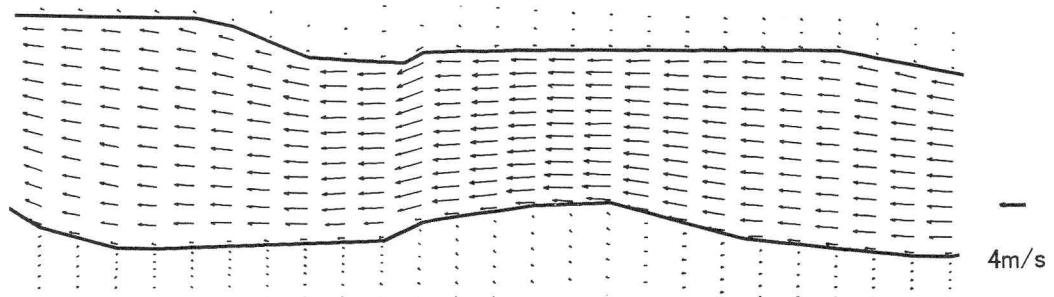


図-9 数値解析による上層の流速ベクトル(最上川: 樹木群を水制形状にしなかった場合)

最上川当該地区における柳の密度は平均約 12 本/100m<sup>2</sup> である。柳水制部では第 1 水制が約 12 本/100m<sup>2</sup> であり、第 2 水制～第 4 水制が 4～6 本/100m<sup>2</sup> である。解析にあたって、樹木群の透過係数は連続密生部及び第 1 水制で 10 m/s とし、第 2 水制～第 4 水制でこれの $\sqrt{2}$  倍とした。解析対象は平成 9 年 6 月 29 日の台風 8 号洪水である。水位ハイドログラフを図-6 に示す。ピーク水位は T.P. 200.45 m、水制区間の高水敷高さが T.P. 199.27 m であり、ピーク時に高水敷に 1.1m 冠水した。洪水ピーク直前の 29 日 10 時 30 分に航空写真測量が行われており、この流れ場が求められている。ここでは、この水位における流れ場を対象とする。急流河川であり、流路の水深も 2 m 程度と浅かったことから、解析では高水敷高さで鉛直方向に 2 分割のみしている。

図-7 に航空測量写真から求められた流速分布を、図-8 に解析によって得られた流速分布を示す。図-9 は樹木群を水制形状に伐採しなかった場合の解析結果である。航空測量による表面流速は主流部で 4 m/s 程度となっている。低水路部の流れはほぼ直進している。一方、数値解析結果でも主流部の流速はほぼ 4 m/s で河道に沿って直進している。図-9 と比較しながら樹木群水制近傍の流速を細かく見ると、伐採してテラス状になった高水敷に流れが侵入し、第 1 及び第 2 水制で、特に第 1 水制周りで流れが乱れられていることが分かる。これは現地の河岸付近の流れにおいても見られる。ただし、その効果は遠くまで及んでおらず、主流部の流れを変化させるまでには至っていない。また、第 3 及び第 4 水制では大きな水乱れは見られない。現地では第 3 水制付近で 2m 程河岸が侵食され、第 3 水制先端部は流出した。

## (2) 米代川の事例

米代川では、蟹沢地区(39 k m 付近)及び鶴形地区(13 k m 付近)の 2 箇所に設置された。ここでは蟹沢地区を解析の対象とする。蟹沢地区では、堤間幅約 650m、河床勾配 1/1600、60%河床材料粒径 27mm の複断面蛇行河道となっている。水制設置区間の現地の出水状況を写真-2 に示す。当該区間の上流部では湾曲しており、水制設置区間では河道の蛇行による弱い偏流部となっている。水制の配置を図-9 に示す。水制は 4 基設置されており、水制長は 30m、水制間隔は 67m～149m で L/D は上流から 5.6, 3.2, 4.2 である。また、水制背部には連続樹木部分がある。当該地区における柳の密度は平均約 14 本/100m<sup>2</sup> である。米代川における樹木群の透過係数は 8m/s とし、

水制部分の透過係数ではこれの $\sqrt{2}$  倍とした。解析対象は平成 9 年 5 月 8 日～9 日の洪水である。ピーク流量は 2300m<sup>3</sup>/s であった。

水位ハイドログラフを図-11 に示す。図-12 に第 2、第 3 水制付近の河床高横断変化を示す。右岸側の高水敷は高くなっており、ほとんど冠水していない。

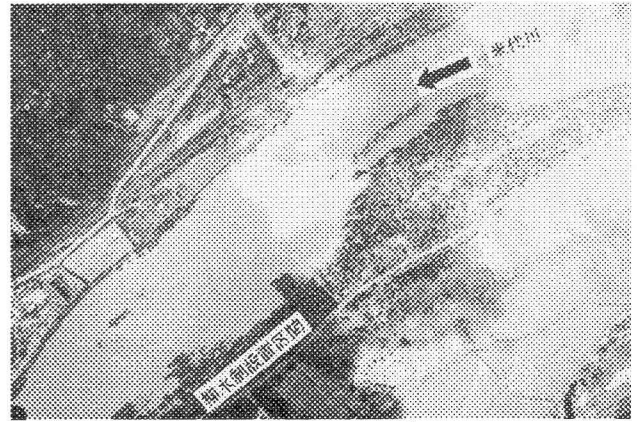


写真-2 米代川水制設置区間

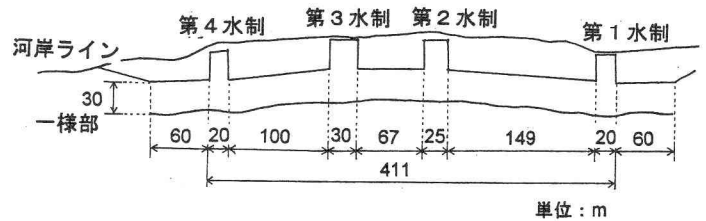


図-10 水制工の配置

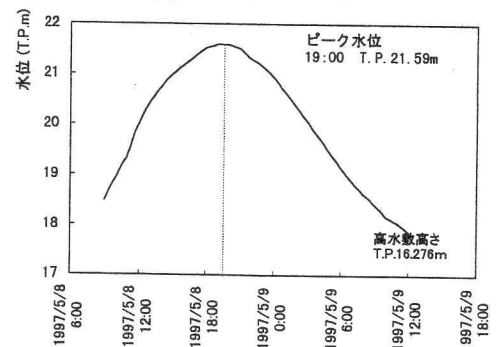


図-11 水位ハイドログラフ

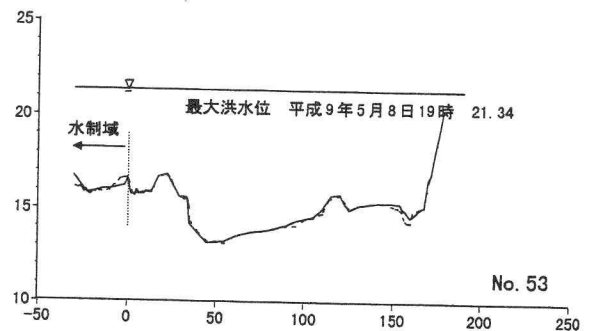


図-12 横断河床形状

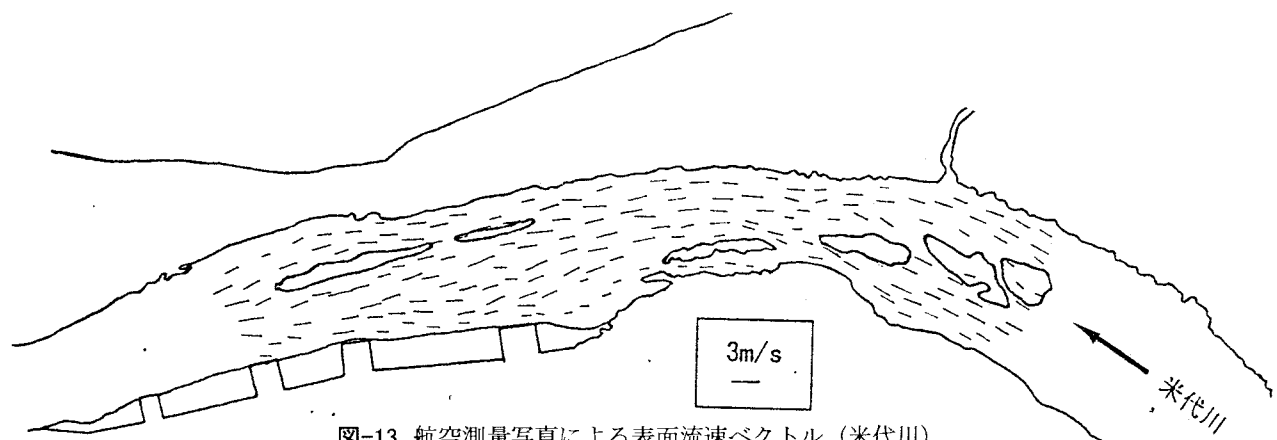


図-13 航空測量写真による表面流速ベクトル (米代川)

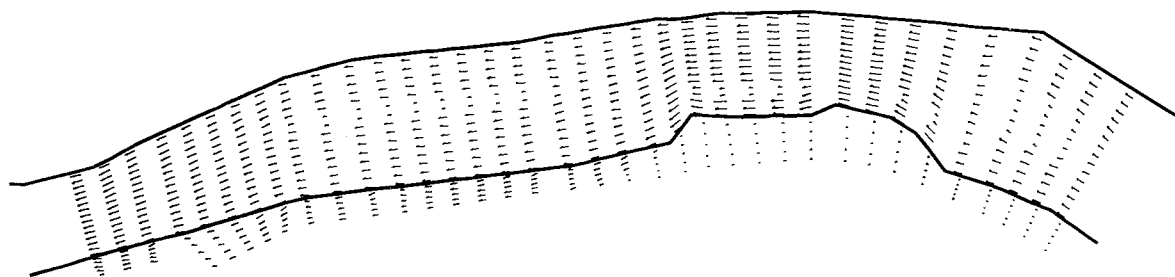


図-14 数値解析による上層の流速ベクトル (最上川)

一方、水制区間の冠水深はピーク時には約 5.3 m に達した。航空写真は 9 日 13 時に撮影されている。この時点で水位はピークから 3.5 m 低下しているが、水制区間には 1.8 m 程度冠水している。

図-13 に航空測量写真から求められた流速分布を、図-14 に解析によって得られた流速分布を示す。航空測量による表面流速は主流部で 3 m/s 程度、水制近傍で 1 m/s 程度である。解析は鉛直方向に 4 分割した。解析による樹木群水制部の流速は実測値よりも速くなっている。連続樹木帯内がほぼ死水領域となっていることから、樹木群水制に与えた透過係数が小さい可能性がある。現地の第一及び第二水制の周りで水刎ねが見られるが、解析の水刎ねは実測と比べて弱い様である。

## 5. おわりに

樹木群水制の水理機能について河床変動を含めた検討がさらに必要であるが、本文では流れの観点から取りまとめを行った。樹木群を通過する場合には透過係数の値を小さくしないと解析で流れが透過しないため、透過係数について検討する必要がある。透過型の樹木群水制が持つ河岸近傍の流速を低減させ、流れを河道中央に向ける効果を実験、解析、現地試験の結果から確認できた。この効果は十分期待

することができ、樹木群水制工近傍では特に大きい。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二・渡邊明英・大橋正嗣・姫野至彦：樹木群の水制的利用可能性の研究、水工学論文集 Vol.41, pp. 1129-1132, 1997.
- 2) 福岡捷二・渡邊明英・大橋正嗣・姫野至彦：河岸に群生する樹木群の水制機能の評価、土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, pp. 710-711, 1997.
- 3) 福岡捷二・樺澤孝人・斎藤潤一・布施泰治・渡邊明英・大橋正嗣：柳水制の試験施工とその機能の現地調査、水工学論文集 Vol. 42, pp. 445-450, 1998.
- 4) 灘岡和夫・八木宏：SDS&2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション、土木学会論文集, No. 473/II-24, pp. 35-44, 1993.
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 津森貴行: 樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析, 土木学会論文集 No.491/II-27, pp.41-50, 1994
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 上阪恒雄, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造—利根川新川通昭和 56 年 8 月洪水—, 土木学会論文集 No.509/II-30, pp.79 -88, 1995
- 7) 福岡捷二, 渡邊明英: 複断面蛇行水路における流れ場の 3 次元解析, 土木学会論文集 No.586/II-42, pp. 39-50, 1998.
- 8) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水圧近似 3 次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集 Vol. 42, pp. 1015-1020, 1998.

(2000.4.17 受付)