

# 低水路沿いの樹木が複断面蛇行水路の 洪水流の挙動に及ぼす影響

EFFECTS OF VEGETATION ALONG A LOW-WATER CHANNEL ON  
BEHAVIOR OF FLOOD FLOWS IN A MEANDERING COMPOUND CHANNEL

重枝 未玲<sup>1</sup>・朝位 孝二<sup>2</sup>・坂本 洋<sup>3</sup>・西尾 崇<sup>4</sup>・秋山 壽一郎<sup>5</sup>・  
石原 仁<sup>6</sup>・樋口 直樹<sup>6</sup>・徳永 智宏<sup>3</sup>

Mirei SHIGE-EDA, Kouji ASAI, Hiroshi SAKAMOTO, Takashi NISHIO, Juichiro AKIYAMA,  
Jin ISHIHARA, Naoki HIGUCHI and Tomohiro TOKUNAGA

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 株式会社 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12 CTI 福岡ビル)

<sup>4</sup>正会員 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所所長 (〒870-0820 大分市西大道 1-1-71)

<sup>5</sup>フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科(同上)

<sup>6</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻(同上)

The effects of low-water channel alignment and the position of vegetation on the behavior of flood flows in a compound open channel were investigated experimentally and numerically. The relative depth and position of vegetation were changed in experiments. The numerical model based on a finite-volume method on unstructured grid using flux-difference spitting technique was used in numerical simulations. Through the experiments and numerical simulations, it is found that the changes of flow pattern due to relationship between sinuosity and relative depth as well as the relation between a location of maximum velocity and vegetation in the channel were related to increasing of flow resistance and bank protection.

**Key Words :** *vegetation, meandering compound channel, flood flow, experiments, numerical simulation*

## 1. はじめに

河道内樹木は、自然景観や生態系などの環境面や堤防や河岸の保護などの治水面で重要な役割を果たしている。一方で、河道内樹木は河道の流下能力を低減させ、治水面上問題を引き起こす場合がある。幾つかの河川では出水時に河道内樹木が集中繁茂する区間で計画高水位を上回った報告<sup>1), 2)</sup>がなされている。

従来、河道内樹木は治水安全度の確保が困難となった場合に伐採管理が行われてきた。しかし、近年では観測史上最大規模やそれに近い豪雨が頻発していることを踏まえると、今後、治水と環境の両機能を考慮にいたした河道内樹木の適正な管理の重要性が益々高まると考えられる。

河道内樹木の管理については、「河川における樹

木管理の手引き」<sup>3)</sup>に取りまとめられている。この中では、樹木伐採範囲は、洪水流下を阻害する樹木を想定し、準2次元解析により洪水時の水位と安全水位との関係などを踏まえた上で決定することが望ましいとされている。つまり、効果的な樹木管理を行うためには、洪水時に流下阻害となる河道内樹木の判別が重要になる。

福岡ら<sup>4), 5)</sup>は、洪水防備林を対象に、洪水時の流れや河床変動に及ぼす影響、洪水防備林の伐採に伴う低水路の護岸化が治水面に及ぼす影響について検討し、水害防備林が低水路内の流量を減少させること、伐採する樹木の位置によっては水衝部を移動させ、水害防備林の倒伏や流出を引き起こす可能性があること、などを示した。堤防や低水路などの河道線形と河道内樹木の位置は、水位上昇等の洪水流の挙動に密接に関係しており、これらの関係を明確にすることは、効果的な樹木管理を行う上で極めて重

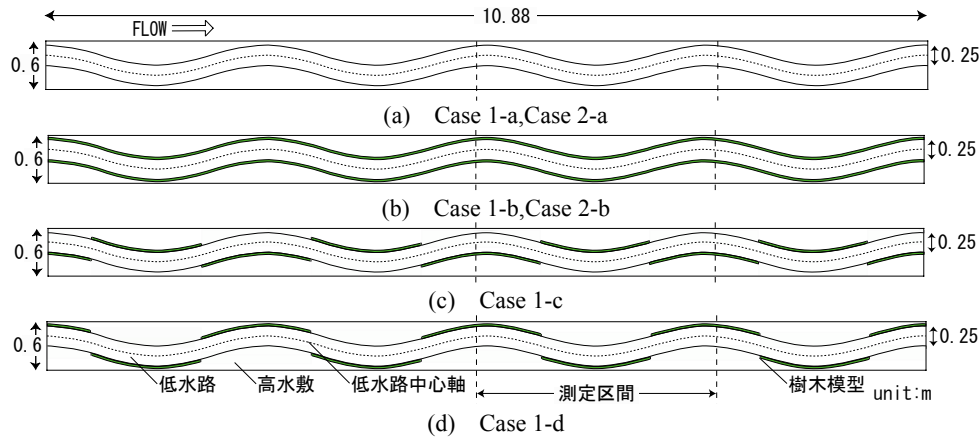


図-1 複断面直線水路と樹木繁茂位置

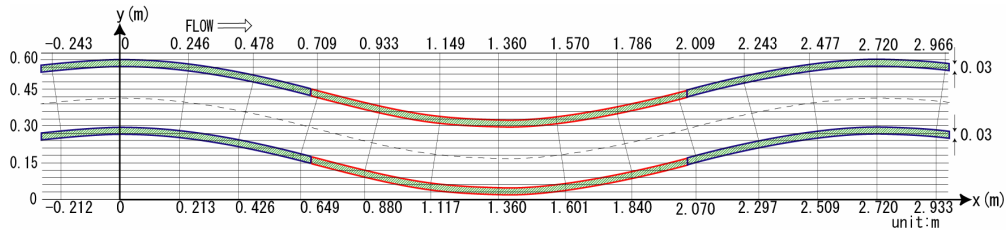


図-2 測定点

要である。

本研究は、河道内樹木の効率的かつ効果的な管理方法の確立を目的としている。ここでは、複断面蛇行水路の低水路形状と樹木繁茂位置が洪水流の挙動に及ぼす影響について、実験および解析に基づき検討した。

表-1 実験条件

	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	勾配 $I$	蛇行度 $S$	相対水深 $Dr$
Case 1-a	0.0221	1/1667	1.02	0.49
Case 1-b				0.65
Case 1-c				0.59
Case 1-d				0.57
Case 2-a	0.0095	1/500		0.29
Case 2-b				0.35

## 2. 実験と解析の概要

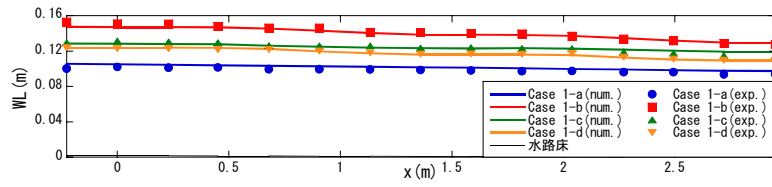
実験装置は、可変勾配開水路(長さ $L=20.5\text{m}$ 、幅 $B=0.6\text{m}$ )である。可変勾配開水路内には、図-1に示す発泡スチロール製の蛇行低水路を設けた複断面直線水路(長さ $10.88\text{m}$ 、低水路幅 $0.25\text{m}$ 、高水敷幅 $0.35\text{m}$ 、高水敷高さ $0.05\text{m}$ )が設置されている。高水敷には粒径 $d=0.75\text{mm}$ の珪砂を敷設し、低水路より粗度係数 $n$ を大きくした。高水敷と低水路の粗度係数 $n$ は、それぞれ $0.016$ と $0.009$ である。

低水路線形はSine-generated curveに従って蛇行しており、蛇行部は4波長設けた。その平面形状は、わが国の河川の平面形状特性の統計資料<sup>6)</sup>を踏まえ、蛇行度(低水路蛇行長/低水路蛇行波長)が $1.02$ 、低水路幅と水面幅との比が $0.42$ 、低水路幅と蛇行帯幅との比が $0.5$ 、低水路幅と蛇行波長との比が $0.092$ になるように設定した。

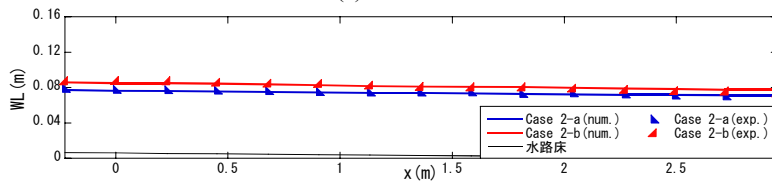
流れは、相対水深(高水敷水深/低水路水深)と蛇行度との関係<sup>6)</sup>から、低水路線形が流れに影響を与えず流れの直進性が大きくなる複断面蛇行流れ(Case 1)と低水路線形が流れに影響を与える複断面蛇行流れ(Case 2)とした。水理条件と水路床勾配は表-1に示す通りである。

樹木繁茂状況は、図-1に示すように、繁茂していない場合(Case 1-a, 2-a)、樹木群が低水路沿いの全区間で繁茂した場合(Case 1-b, 2-b)、低水路内岸部に繁茂した場合(Case 1-c)、低水路外岸部に繁茂した場合(Case 1-d)の4通りとした。このような低水路と高水敷の境界に樹木群が繁茂する状況は、樹木群が河道に沿って繁茂する場合に引堤などの河川改修を行うことで生じる。樹木群は透過係数 $K_s=0.31(\text{m/s})$ のプラスチック製の糸が絡み合った多孔体でモデル化した。樹木群の幅は $0.03\text{m}$ とした。

いずれのCaseについても定常状態を確認した後、測定を開始した。測定項目は水深 $h$ と $x$ 、 $y$ 方向の流速であり、それぞれ容量式波高計と2次元電磁流速計を用い測定した。上流から3波長目を測定区間とした。測定点は低水路では低水路線形に沿って、高水敷では水路線形に沿って設定されており、作業の容易さから次のように求めた。まず、低水路の1波長を低水路中心軸に沿って12分割し、分割点での中心軸の法線と、法線と低水路境界との交点を始点とした $y$ 軸に沿った直線を描いた。次に、 $y$ 軸方向について水路を20分割する $x$ 軸に沿った線を描いた。互いの線の交点を測定点とした。測定点は図-2に示す通りである。なお、Case 2の流速測定については高

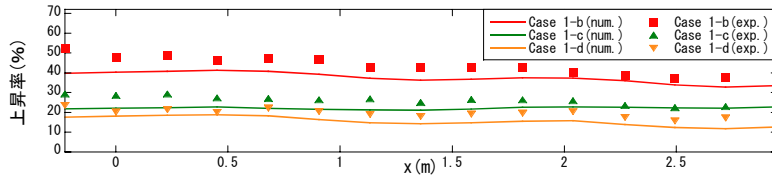


(a) Case 1

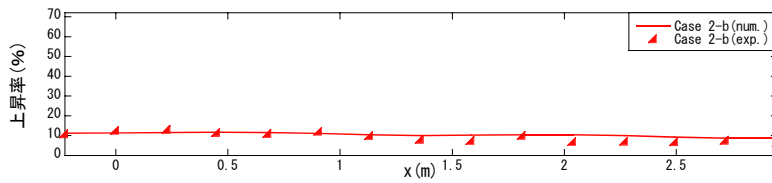


(b) Case 2

図-3 低水路中心軸の水位



(a) Case 1



(b) Case 2

図-4 樹木繁茂状況による水位の上昇率

水敷の水深が浅いために、低水路のみで行っている。流速測定では、各測定点で河床から鉛直方向に水深の2割、3.5割及び8割の位置で計測し、1点法、2点法により $x$ 、 $y$ 方向の水深平均流速 $u$ 、 $v$ を算定した。両者には有意な差は生じなかったため、以下では2点法の結果を示している。水深、流速測定のサンプリング間隔、サンプリング時間はそれぞれ0.05秒、90秒である。

解析には、著者等が開発したSA-FUF-2DFモデル<sup>7)</sup>を用いた。SA-FUF-2DFモデルでは樹木群は $x$ 方向、 $y$ 方向の運動方程式にそれぞれ $F_x=C_d \cdot a/2 \cdot uh(u^2+v^2)^{0.5}$ 、 $F_y=C_d \cdot a/2 \cdot vh(u^2+v^2)^{0.5}$ で表される空間平均された流体力項を付加することで取り扱われる<sup>7)</sup>。ここに、 $a$ =樹木群密度パラメーター(= $d \cdot N$ )、 $d$ =樹木の投影幅、 $N$ =樹木密生度(本/ $m^2$ )および $C_d$ =抵抗係数であり、各パラメーターは、樹木繁茂状況に応じて設定される。また、透過係数 $K_s$ はこれらの諸量を用いると、 $K_s=1/(a \cdot C_d/2g)^{0.5}$ で表される。境界条件として上流端には表-1の流量を、下流端には水位を与えた。

### 3. 結果と考察

以下では、実験および解析結果に基づき、複断面蛇行水路で発生する流れ、最大流速の発生位置、樹

木繁茂位置が水位上昇や底面せん断応力に及ぼす影響について検討する。

#### (1) 水位と水位上昇率

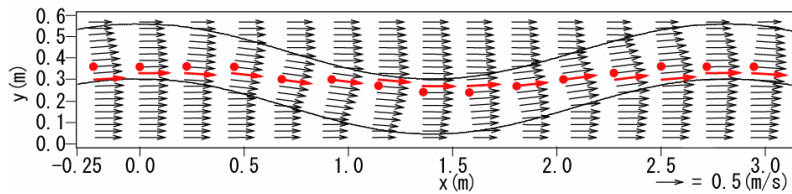
図-3は低水路中心軸上の水位の実験値と解析結果を、図-4は樹木繁茂状況による水位上昇率を調べたものである。水位上昇率は次式で定義される。

$$\text{上昇率(\%)} = \frac{\text{水位(Case1-b, c, d or 2-b)} - \text{水位(Case1-a or 2-a)}}{\text{水位(Case1-a or 2-a)}} \times 100$$

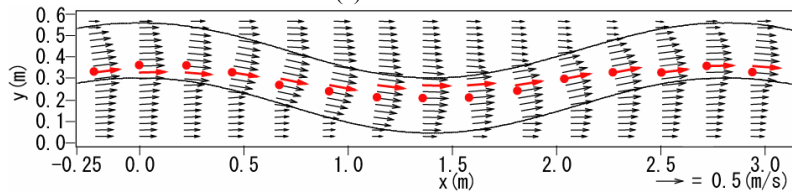
解析結果と実験値とを比較すると、SA-FUF-2DFモデルが平面2次元モデルであり低水路で発生する2次流を考慮できないため、若干の誤差は生じている。しかし、いずれのCaseについても水位および水位上昇率のいずれも解析結果は実験値を概ね再現していることがわかる。

図-3に着目すると、Case 1については、(1) Case 1-b, c, d, aの順に水位が全体的に下がること、また、水面勾配が緩くなること、(2) 樹木繁茂面積が同じにもかかわらず、Case 1-bからcへの水位低下に比べ、Case 1-bからdへの水位低下の割合が大きいこと、などがわかる。また、Case 2については、(1) Case 2-bに比べ、Case 2-aの水位は若干低下すること、(2) 水面勾配にはさほど違いがないこと、などがわかる。

図-4に着目すると、水位上昇率は全区間で概ね一定で、樹木が低水路沿いに繁茂するCase 1-b、樹木

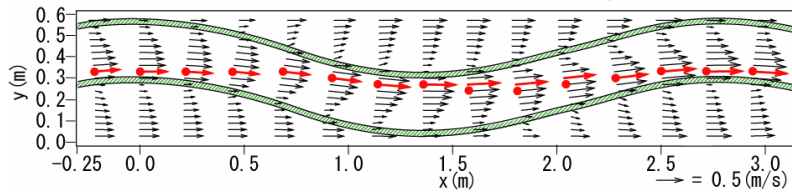


(a) Case 1-a

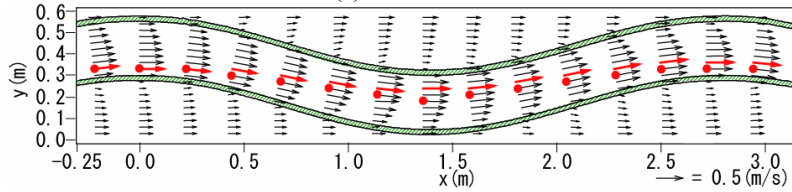


(b) Case 2-a

図-5 Case 1-aと2-aの流速ベクトルの比較

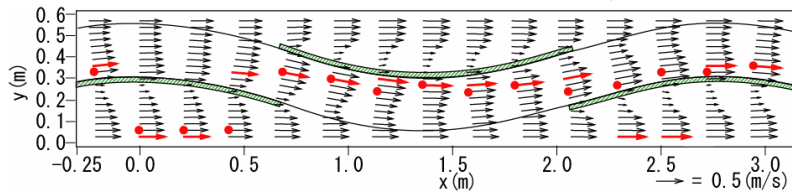


(a) Case 1-b

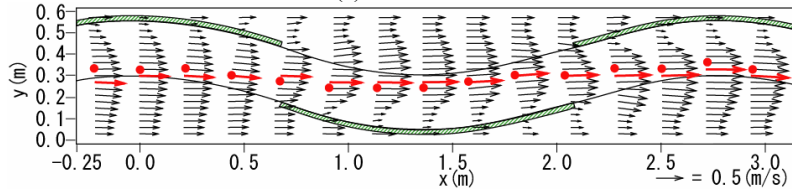


(b) Case 2-b

図-6 Case 1-bと2-bの流速ベクトルの比較



(a) Case 1-c



(b) Case 1-d

図-7 Case 1-cと1-dの流速ベクトルの比較

が低水路内岸側に繁茂するCase 1-c, 低水路外岸側に繁茂するCase 1-d, 低水路沿いに繁茂するCase 2-bの順番に上昇率が大きくなるのがわかる。Case 1-bとCase 2-b, Case 1-cとdは, それぞれ樹木繁茂面積は等しい。従って, 水位上昇率の違いは, Case 1-bとCase 2-bについては水路内で生じる流況により, Case 1-cとdについては樹木繁茂位置により生じたと考えられる。

## (2) 流速ベクトルと最大流速の発生位置による水位上昇率の変化

以下では, 流速ベクトルと最大流速の発生位置および樹木繁茂位置に着目し, 水位上昇率の違いにつ

いて検討する。

まず, 蛇行複断面水路で生じる流れが水位上昇率に及ぼす影響について検討する。図-5は, 樹木が繁茂していない場合のCase 1-aとCase 2-aについて流速ベクトルの解析結果を示したものである。なお, 実験結果も同様な傾向を示しており, 図中の赤のベクトルは解析により, シンボルは実験より求めた最大流速の発生位置である。これより, (1) 低水路の影響が小さい条件のCase 1-aでは, 低水路形状の影響を若干受けるものの, Case 2-aよりも直進性が強く全体的には水路形状に沿った流れが生じていること, (2) 一方, Case 2-aでは低水路で低水路線形に沿った流れが生じていること, (3) また, Case 1-aについ



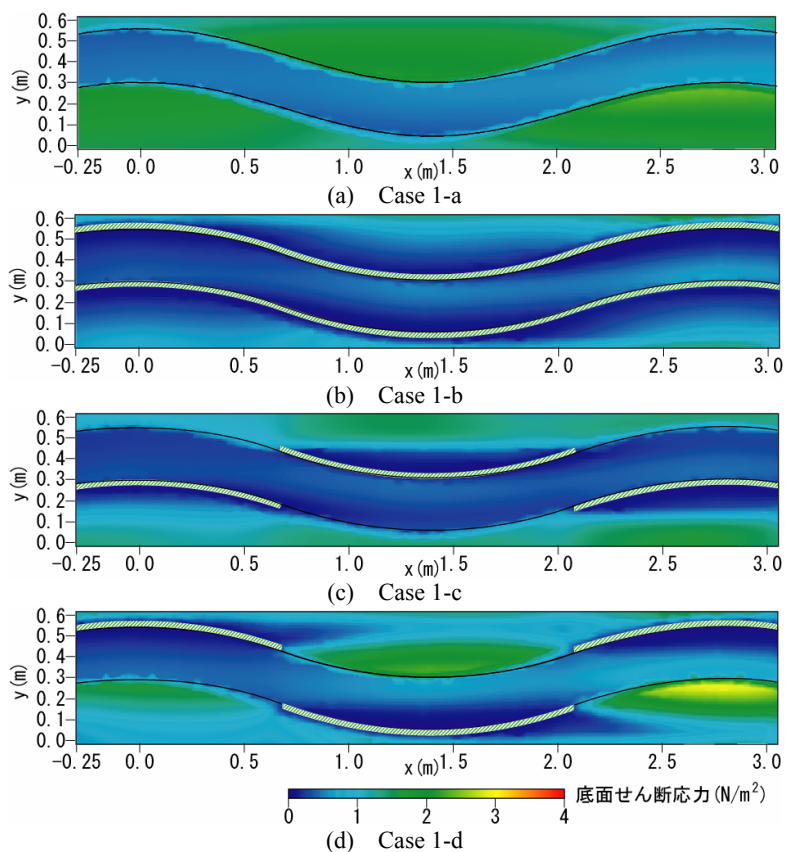


図-8 底面せん断応力の比較

ては最大流速の発生位置は直線的なのに対して、Case 2-aでは低水路線形の影響を受け、水路中央から内岸よりに最大流速が生じていること、などがわかる。

図-6は、樹木が低水路沿いに繁茂している場合のCase 1-bとCase 2-bについて、流速ベクトルの解析結果を示したものである。図-5と比較すると、低水路での流れは(1) Case 2-bについては流速ベクトルおよび最大流速発生位置のいずれもCase 2-aと大きな違いはないこと、(2) Case 1-bについては樹木により低水路沿いの流れが生じ、Case 1-aとは異なった流れが生じていること、などがわかる。

以上から、蛇行度と相対水深との関係<sup>6)</sup>により複断面蛇行水路内で生じる流れが、Case 1-bとCase 2-bの水位上昇率に大きな違いを生じさせたと考えられる。つまり、複断面水路では蛇行度と相対水深との関係<sup>6)</sup>が、低水路線形の影響を受ける領域に位置する場合には、主な流れは低水路に沿って生じるため樹木の境界で働くせん断応力が水位上昇を引き起こす主要な要因と考えられる。一方、低水路線形の影響を受けない領域に位置する場合には、樹木境界でのせん断応力に加え、流れの直進性が増すことで生じる樹木からの抗力が水位上昇を引き起こす主要な要因と考えられる。このような流れに作用する抵抗の違いが水位上昇率の違いを生じさせたと考えられる。

次に、樹木繁茂位置が水位上昇率に及ぼす影響について検討する。先述したように、樹木が水位上昇

に及ぼす影響は、低水路線形の影響を受けない複断面的流れの場合に大きくなる。従って、ここではCase 1についてのみ樹木を部分的に配置している。

図-7は、樹木が内岸側に繁茂する場合のCase 1-cと外岸側に繁茂するCase 1-dについて、流速ベクトルの解析結果を示したものである。内岸側はCase 1-aの最大流速が生じる位置に近い樹木であり、外岸側はその反対の樹木である。これより、(1) Case 1-cでは内岸側の樹木により流れが2分され、水路側壁付近で大きな流速が生じていること、(2) Case 1-dでは樹木周辺の流速は減速しているものの、最大流速発生位置などはCase 1-aと大きな違いはないこと、などがわかる。

以上から、Case 1-cとCase 1-dの水位上昇率の違いは、最大流速の発生位置と樹木の繁茂位置との相対的な関係により生じたと考えられる。つまり、最大流速が発生する位置に樹木繁茂位置がある場合に、流れは樹木からより大きな抗力受けるためCase 1-cの水位上昇率が大きくなったと考えられる。

このように、樹木繁茂位置、蛇行度と相対水深との関係により変化する蛇行水路内の流れと最大流速の発生位置が、水位上昇に及ぼす影響がわかった。従って、このような領域にある樹木を伐採すれば、効果的に河道の流下能力を向上できると考えられる。

### (3) 樹木繁茂位置による底面せん断応力の変化

低水路沿いの樹木の伐採は、流下能力を向上させ

る。一方で、区間伐採を行う場合には伐採区間の選定によっては低水路と高水敷の境界付近の河床せん断応力や堤防と樹木間の流速を増加させる可能性がある。これは、高水敷の崩壊ひいては護岸崩壊や堤防崩壊につながる恐れがあるため、この点についても注意が必要となる<sup>4)</sup>。

図-8は、Case 1-a～dについてManningの式( $\rho g n^2(u^2+v^2)/h^{1/3}$ )を用いて求めた底面せん断応力分布図である。ここに $\rho$ は水の密度である。なお、実験値について同様な傾向が認められたので、ここでは解析結果のみを示している。先述したように、解析に用いたSA-FUF-2DFモデルは低水路で発生する2次流を考慮できないため底面せん断応力には誤差がある。しかし、Case 1-a, 2-aの水位について解析結果と実験値との間に大きな違いが生じていないことから、その分布については概ね再現していると考えられる。図-8より、(1) 樹木が低水路沿いに繁茂するCase 1-bについては、Case 1-aに比べ、低水路沿いの底面せん断応力が全体的に小さいこと、(2) 一方で、樹木と水路側壁間の距離が小さな箇所では流れが加速されるため、大きな底面せん断応力が働いていること、などがわかる。また、Case 1-cについては、(1) 樹木により流れが2分されるために、高水敷に水が乗り上がり、水路幅との関係もあるが、水路側壁付近で樹木がないCase 1-aと同程度の底面せん断応力が生じていることがわかる。一方、Case 1-dについては、(1) 低水路内岸でCase 1-aよりも大きな底面せん断応力が生じていること、などがわかる。

このように、樹木の繁茂位置によっては、低水路内岸や堤防付近で大きな底面せん断応力を引き起こす場合があり、低水路内岸側や堤防付近で洗掘を生じさせる危険性がある。従って、樹木伐採を行うに当たっては、流下能力の向上だけでなく、樹木繁茂位置による底面せん断応力の変化についても検討する必要があると考えられる。ただし、これらの結果は、堤防線形と低水路線形および樹木配置位置が相互に関係していると考えられることから、様々な組み合わせについて検討していく必要がある。

以上のように、複断面での流況、最大流速の発生位置および河道内樹木の位置は、流れの抵抗を増大させることや河岸や堤防保護に密接に関係していることが確認された。

#### 4. おわりに

本研究では、河道内樹木の効率的かつ効果的な管

理方法の確立を目的に、直線複断面河道の低水路形状と樹木繁茂位置が洪水流の挙動に及ぼす影響について、実験および解析に基づく検討を行った。その結果、以下のことが確認された。

- (1) 蛇行度と相対水深との関係<sup>6)</sup>により生じる流況の変化が、流れの抵抗の増大や河岸や堤防保護に密接に関係していること
- (2) 最大流速の発生位置および河道内樹木の位置の相対的な関係が、流れの抵抗の増大や河岸や堤防保護に密接に関係していること

今後は、数値シミュレーションや実験を通じて、様々な堤防線形や低水路蛇行形状について検討していきたいと考えている。

**謝辞：**本研究は、河川懇談会の活動の一環として、国土交通省大分河川国道事務所と共同で研究を行ったものである。本研究を実施するに当たり、大分河川国道事務所の関係各位にはデータ提供などの多大な協力を得た。また、九州工業大学工学部生 中江邦昭君には実験を行うにあたり協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 桑原正人, 藤堂正樹, 小笠原豊, 石尾年光, 石井克尚, 犬丸潤, 中村敬司: 加古川の河道内樹木の生長特性を考慮した管理方法, 河川技術論文集, 第12巻, pp.461-464, 2006.
- 2) 重枝未玲, 朝位孝二, 坂本洋, 長太茂樹, 秋山壽一郎, 樋口直樹, 重岡広美, 徳永智宏: 樹木群を考慮した平面2次元モデルによる乙津川の洪水流解析, 水工学論文集, 第50巻, pp.1171-1176, 2006.
- 3) 財団法人リバーフロント整備センター(編): 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, 1999.
- 4) 福岡捷二, 五十嵐崇博, 高橋宏尚: 江の川水防林の特性と治水効果, 水工学論文集, 第39巻, pp.501-506, 1995.
- 5) 福岡捷二, 川岡秀和, 平林由希子: 水害防備林と低水路線形が洪水流に与える影響, 水工学論文集, 第42巻, pp.967-972, 1998.
- 6) 岡田将治, 福岡捷二, 貞宗早織: 複断面蛇行河道の平面形状特性と蛇行度, 相対水深を用いた洪水流の領域区分, 水工学論文集, 第46巻, pp.761-766, 2002.
- 7) 重枝未玲, 秋山壽一郎: 数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.19-30, 2003.

(2006. 9. 30受付)