

# 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

## EFFECTS OF VEGETATED AREA ON FLOW STRUCTURE AND BED CONFIGURATION IN RIVER BENDS

富永晃宏<sup>1</sup>・長尾正志<sup>2</sup>・木村聡洋<sup>3</sup>

Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO and Akihiro KIMURA

<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>フェロー会員 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>学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Vegetation in a river may affect the 3-D flow structures and can control the local scour and accumulation in curved open channels. In this study, three-dimensional mean flow structures were measured in a curved open channel with various vegetation arrangements. Furthermore, experiments were conducted in a movable bed and the effects of vegetation on the local scour were examined. The secondary flow is generated only in the region outside the vegetation zones and the lateral scale of the vortex structures in bends are reduced. The main flow indicates complicated behaviors affected by the strong lateral shear, centrifugal force and momentum transport by the secondary flow. In movable beds, the secondary flow develops fast and becomes about 1.5 times larger than that in fixed beds. The vegetation changes the bed configuration through the change of mean velocity field.

**Key Words :** river vegetation, river bend, secondary flow, 3-D flow structures,  
lateral shear flow, movable bed, bed configuration

### 1. 序論

河川の湾曲部の流れは、遠心力と圧力勾配に起因する二次流と外岸側の洗掘および内岸側の堆積によって特徴づけられる。湾曲部における流れ構造と河床変動を予測し制御することの重要性から湾曲部の基本的な流れ構造および河床形状について多くの研究がなされ、実験的にも理論的にもかなり明らかにされてきている。湾曲部の河床形状を支配する要因として二次流の重要性が指摘されており、Rozovskii<sup>1)</sup>、池田<sup>2)</sup>、Vriend<sup>3)</sup>、石川・金<sup>4)</sup>、山坂ら<sup>5)</sup>は二次流に着目した研究を行っている。しかし、湾曲部の河道断面の複雑な境界条件に対する流れ構造および河床変動の変化特性については、まだ多くの研究がなされているとは言い難く、今後の多様な川づくりに対する科学的根拠を与える上でさらなる研究が望まれる。断面形状の影響についてはいくつかの研究が試みられ、複断面<sup>6),7),8)</sup>や台形断面<sup>9)</sup>といった代表的断面形状を有する開水路湾曲部の流れ構造の変化について、断面内二次流構造や3次元乱流構造が明らかにされている。また、湾曲部外岸側の洗掘を軽減するための方策が研究されており、Odgaard and Kennedy<sup>10)</sup>によ

るアイオワベーン工や関根・吉川<sup>11)</sup>による外岸への栈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り、その効果が認められている。

一方、河道内の樹木群の水理的影響についてすでに多くの研究成果が得られ、その基本的な特性が明らかにされている<sup>12),13)</sup>。河道内の樹木群は、湾曲部流れに対して形状抵抗を与えて横断方向のせん断流を形成するとともに、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>14)</sup>。このような河道内樹木群領域の河道平面における配置が、湾曲部の流れと河床変動に及ぼす影響は未だ明らかにされていない。そこで本研究では、湾曲部に対して様々な平面配置を有する河道内樹木群を設置した固定床および移動床実験を行い、流速分布および河床形状を計測した。その結果、湾曲部の二次流を含む流れ構造と河床変動に及ぼす樹木群配置の影響が明らかにされた。

2. 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。樹木群模型としては、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。ケースV1のみ $5\text{cm}$ の格子の中心に1本加えた千鳥状配置として密度を大きくした。樹木帯は内岸側配置、中央配置、外岸側配置を基本として流下方向設置位置も変化させて種々のケースを設定した。樹木帯の配置条件とケース名を表-1および図-2に示す。表中のケースR5およびK1は樹木群なしの長方形断面開水路のケースであり比較のために結果を用いる。また、樹木帯を内岸前半部に設置したケースV5は、内岸の流速が最も大きくなる位置に対応させたものであり、外岸後半部に設置したケースV6は、洗掘が最も大きい位置に対応させたものである。流量は $0.034\text{m}^3/\text{s}$ から $0.04\text{m}^3/\text{s}$ に設定し、湾曲入口より $90\text{cm}$ 上流において水深 $h=15\text{cm}$ となるように下流の堰を調整した。計測断面は湾曲入口上流の $x=-90\text{cm}$ 、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。流速計測には3成分電磁流速計(東京計測製)を用いた。

湾曲部の河床変動への樹木群配置の影響を調べるため平均粒径 $0.05\text{cm}$ の砂を湾曲上流の $x=-180\text{cm}$ から湾曲下流の $x'=200\text{cm}$ まで厚さ $11.5\text{cm}$ で敷詰めた。樹木群配置は固定床の実験ケースの中から6ケースを行った。ケースK1は樹木群なしで固定床のR5に対応し、ケースK2, K4, K5, K6およびK7はそれぞれ固定床のV2, V4, V5, V6およびV7に対応する。対象は静的洗掘のみであり、上流からの給砂は行っていない。通水開始から5時間後に河床形状を計測し

た。これには河床横断形状指示装置を用い、ビデオ撮影された画像を画像デジタイザによって読みとった。流速は河床変動後の河床表面をセメントで固めた後、3成分電磁流速計で計測した。

3. 実験結果

(1) 二次流構造

まず、図-3に樹木帯のない場合の湾曲中心角 $\phi=60^\circ$ における二次流ベクトル図を示す<sup>15)</sup>。値は $x=-90\text{cm}$ における断面平均流速 $U_m$ で無次元化されている。得られた二次流構造は従来の結果を支持するも

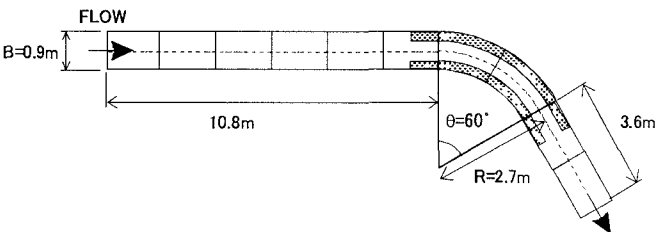


図-1 実験水路平面図

表-1 樹木帯配置

CASE	配置		河床
R-5	樹木群なし	—	固定床
V-1	内岸(密)	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$	固定床
V-2	内岸	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$	固定床
V-3	中央	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$	固定床
V-4	外岸	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$	固定床
V-5	内岸	$x=-90\text{cm}$ to $\phi=15^\circ$	固定床
V-6	外岸	$\phi=45^\circ$ to $x'=90\text{cm}$	固定床
V-7	内岸+ 外岸	$x=-90\text{cm}$ to $\phi=15^\circ$ $\phi=45^\circ$ to $x'=90\text{cm}$	固定床
K-1	樹木群なし	—	移動床
K-2	内岸	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$	移動床
K-4	外岸	$x=-90\text{cm}$ to $x'=90\text{cm}$	移動床
K-5	内岸	$x=-90\text{cm}$ to $\phi=15^\circ$	移動床
K-6	外岸	$\phi=45^\circ$ to $x'=90\text{cm}$	移動床
K-7	内岸+ 外岸	$x=-90\text{cm}$ to $\phi=15^\circ$ $\phi=45^\circ$ to $x'=90\text{cm}$	移動床

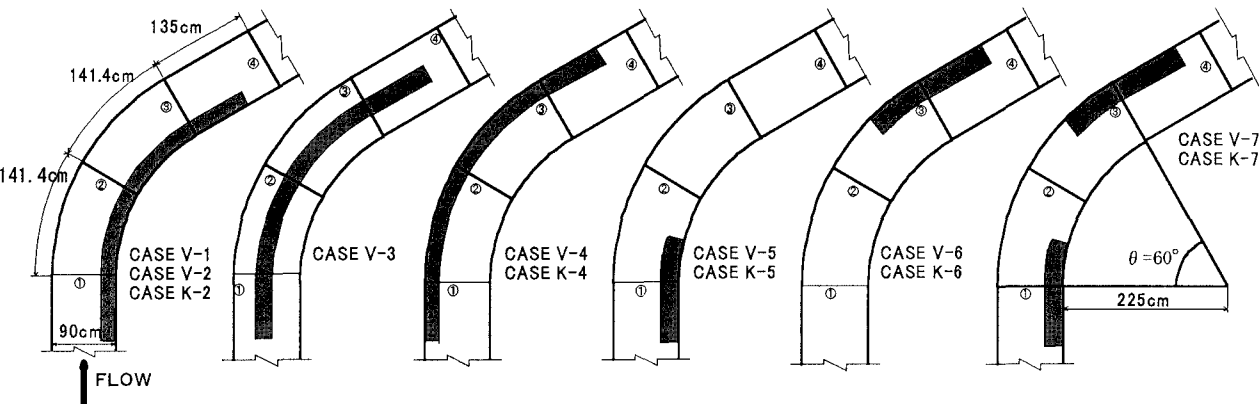


図-2 樹木帯配置平面図

のであるが、外岸側の水深規模の逆回転の渦の存在が明らかにされている。ここで内岸の大きな渦を湾曲渦、外岸の小さな渦を外岸渦と呼ぶことにする。

図-4(a) - (c)は、3つの代表的な樹木帯配置における二次流ベクトル図である。いずれのケースにおいても $\theta=30^\circ$ の断面で湾曲部に特有の二次流が発生し、樹木帯のないケースと同様に $\theta=60^\circ$ の断面で二次流は最大となる。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。結果として内岸樹木帯の幅の分だけ湾曲渦の横断方向スケールが小さくなっている。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二次流構造が発生している。これらは湾曲渦と同じ回転方向を持っており、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。この結果は、清水らによる数値計算結果の傾向と一致するものである<sup>16)</sup>。 $\phi=60^\circ$ においては樹木帯内へ向かう強い流れが観察される。しかし、湾曲下流の $x'=135\text{cm}$ では、湾曲渦の横断方向スケールはかえって小さくなっている点が注目される。樹木群を内岸前半部に設置したケースV5および外岸後半部に設置したケースV6においても、 $\theta=60^\circ$ から下流の2次流構造に大きな変化はなかった。

図-5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2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、2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 $V_{\max}/U_m=0.15\sim 0.17$ 程度であることがわかる。また、ケースV1、V2およびV7では湾曲出口から下流への減衰が小さいようである。

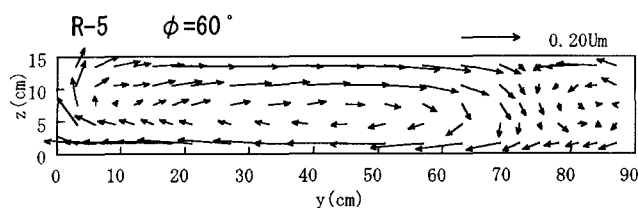


図-3 樹木帯がない場合の二次流ベクトル (CASE R5)

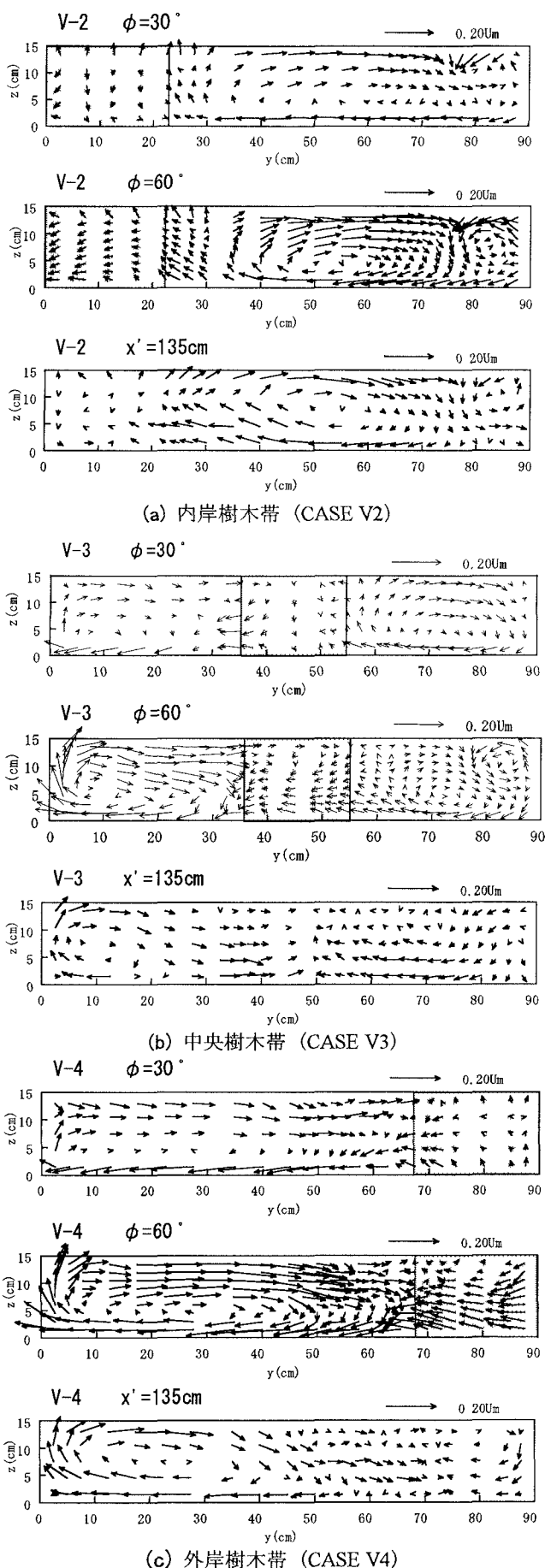
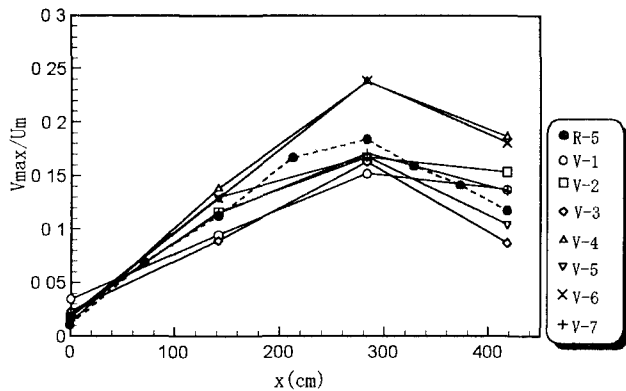


図-4 二次流ベクトル (樹木帯あり)

## (2) 主流速分布

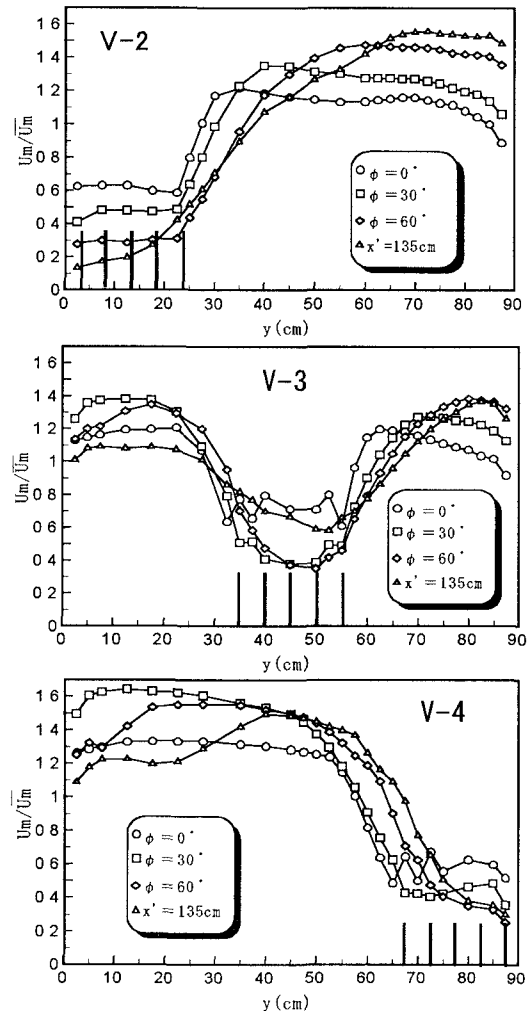
図—6はケースV2, V4の主流速コンターである。また、平均主流速の横断分布特性を引き出すために水深平均主流速の横断分布を図—7に示す。平均主流速は樹木帯内で大きく減速され、境界付近で強いせん断層が形成される。樹木帯の外の領域では、流下にしたがって高速域が内岸から外岸へ移動している。内岸側樹木帯のケースV2では流下にしたがい樹木群内の流速が減少し、境界部のせん断層は樹木群内へ進入せず外岸側へ発達していき、結果として外岸近傍が大きく加速される。外岸側樹木帯のケースV4では、 $\phi=30^\circ$  で内岸側が大きく加速されたあと減速しはじめ、減速域は内岸から外岸側へ広がっていく。樹木群境界部のせん断層は、流下にしたがって樹木帯の中へ平行移動していることがわかる。湾曲出口より下流では内岸側が大きく減速し、水路中央部よりやや外岸側に最大流速が現れている。中央に樹木帯を設置したケースV3では、主流速の流下方向変化は相対的に小さい。樹木帯を挟んだ両側の主流速の変化過程は同様な傾向を示し、内岸側は外岸側樹木帯のケースと、外岸側は内岸側樹木帯のケースとそれぞれ類似している。

二次流による運動量輸送の効果についてみると、内岸境界の水面付近で主流速が減速され、ここでは

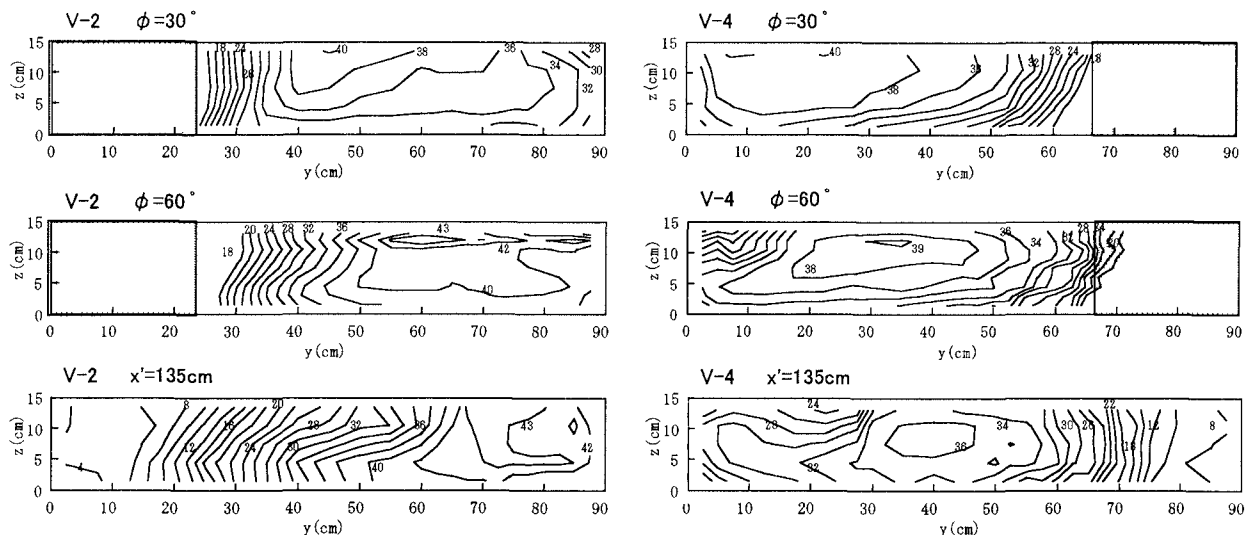


図—5 二次流強度の発達過程

鉛直分布が底面付近で速く水面の方で遅い逆の分布を示す。結局、樹木の形状抵抗によるせん断層の形成と圧力勾配の変化による主流速の加減速ならびに二次流による横断方向運動量輸送が主流速構造を決定しているものと考えられる。また、染料注入による可視化実験によると、樹木群境界部では、池田らの実験で見られたように<sup>17)</sup>、長周期の大規模水平渦



図—7 水深平均主流速横断分布



図—6 平均主流速コンター

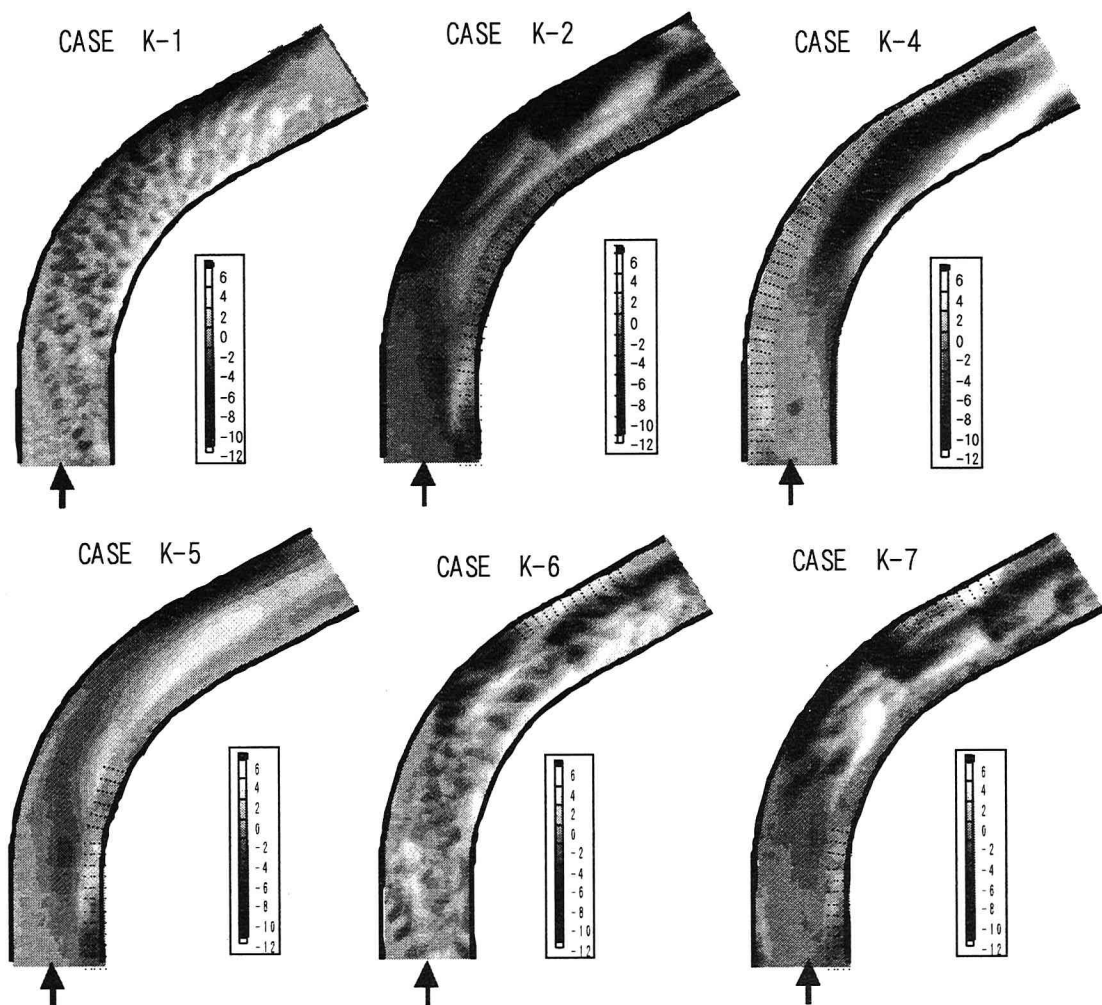


図-8 移動床における河床高平面図

が観測された。この渦構造の発生周期および渦スケール等の樹木群配置による変化は明確でなかったが、この効果については今後の検討課題としたい。

#### 4. 移動床実験の結果

図-8は各ケースの通水開始から5時間後の河床高コンターである。樹木群のないケースK1の結果は従来の結果と同様である。河床変動の時間経過を見ると、洗掘は湾曲出口直下流の外岸側壁付近から始まり、ゆっくりと上流へ伝播していく。洗掘領域は $\phi=35^\circ$  から $x'=120\text{cm}$ に現れ、最大洗掘深は外岸の $x'=0\text{cm}\sim 50\text{cm}$ にかけての外岸で約10cmであった。堆積領域は内岸の $\phi=35^\circ$ から $\phi=60^\circ$ 付近に現れ、 $\phi=60^\circ$ より下流に向かって水路中央付近へ移動している。

次に、内岸全体に樹木帯を設置したケースK2では、外岸側に高速域が発生し二次流も樹木群のない領域に発生するために河床変動量が大きくなり、湾曲出口外岸付近の洗掘が著しく大きくなり、最大洗掘深は-11cmに達する。また、 $\phi=30^\circ$ 付近の外岸付近にも洗掘が見られ、樹木群なしの場合とは異なる変動を示す。外岸全体樹木帯のケースK4では、

$\phi=30^\circ$ から $\phi=45^\circ$ にかけての水路中央付近から $\phi=50^\circ$ から $x'=80\text{cm}$ にかけての樹木群のすぐ横に洗掘領域が現れる。最大洗掘深は湾曲出口下流20cm付近で約8cmである。この場合、湾曲出口から下流にかけての堆積が非常に大きく横断方向変動は大きくなる。湾曲入口付近の内岸に樹木帯を設置したケースK5では、全体に河床変動量が小さくなった。外岸の洗掘深も小さくなり約8cmであった。洗掘域は樹木群横から水路中央を経て外岸に洗掘領域が伸び、樹木群後方の水路中央付近に堆積が見られる。洗掘が最大となる外岸側の湾曲出口付近に樹木群を設置したケースK6では、樹木群の設置によって当然ながら湾曲出口付近の外岸側洗掘はなくなるが、樹木群の上流部と横で大きな洗掘が発生する。特に、樹木群の直前の $\phi=35^\circ$ 付近が著しく洗掘されている。洗掘領域は樹木群内部まで入り込んでおり、樹木自体の安定性が失われつつある。また、樹木群上流側の洗掘領域のすぐ内側と、 $\phi=15^\circ$  付近から内岸側に大きな堆積がみられる。湾曲入口内岸と湾曲出口外岸に樹木帯を設置したケースK7では、K6とよく似た河床形状を示すが、洗掘速度は速く約3時間で最大洗掘深11cmに達した。特に、 $\phi=30^\circ$ 付近の外岸側の洗

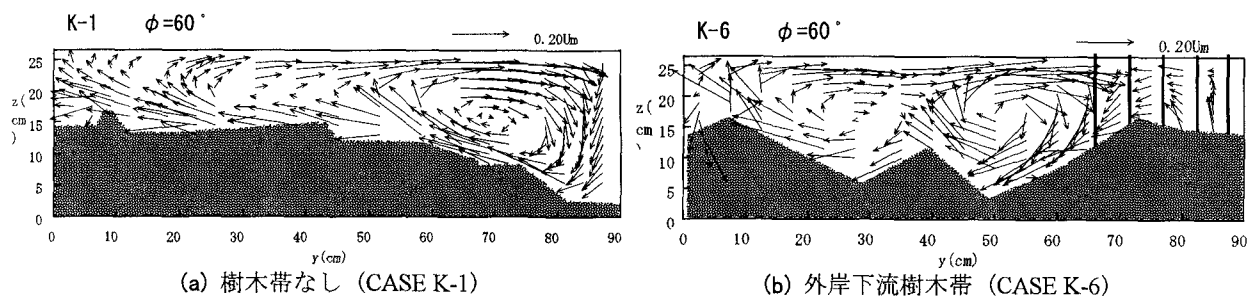


図-9 移動床実験における二次流ベクトル

掘が激しく、内岸付近では大きな堆積がみられ、横断方向に大きな変動が生じている。また、外岸樹木帯の前面から樹木帯内部にかけての洗掘も大きい。

図-9はケースK1とK6の湾曲出口の $\phi=60^\circ$ における河道横断面図と二次流ベクトル図である。ケースK1では、外岸で大きく洗掘された河床形状に適した水路全体に及ぶ強い2次流が形成される。固定床で見られた外岸渦が消滅している。二次流の強さは固定床の1.5倍程度となり、また、発達も固定床に比べて速い。特に下降流の強さが固定床の場合より大きくなるようである。ケースK6では、水路中央に堆積部があり、ここで弱い上昇流が発生するものの、全体として河床形状に沿った一つの湾曲渦が存在する。

## 5. 結論

長方形断面の湾曲水路の一部に樹木群を設置して、その配置の流れ構造への影響を検討した。固定床における実験より、樹木群との境界は一種の壁の役割を果たし、湾曲渦を樹木群のない範囲に縮小させ、発生位置を移動させることがわかった。二次流の発達過程は樹木群のない場合と大差ないが、外岸に樹木帯を設けた場合に二次流強度が大きくなった。主流速分布は、樹木群による横断方向せん断流と湾曲に伴う遠心力と圧力勾配の効果が混在した複雑な流れとなる。

次に、移動床における実験から、湾曲二次流は移動床において発達が速くなり強度も固定床の1.5倍程度に増大することがわかった。樹木群の河床変動に及ぼす影響については、樹木帯の存在によって加速、偏流させられた主流がおよび二次流が河床形状を変化させる。内岸全体に樹木帯がある場合は外岸の洗掘が大きくなるが、湾曲入口付近の内岸に樹木帯がある場合はかえって洗掘が抑制されることがわかった。また、外岸の洗掘が大きい場所に樹木帯がある場合は、樹木帯周辺の洗掘が大きくなり、樹木自体の安定性が失われる結果となった。今後はさらに移動床における流速計測を追加するとともに、運動量輸送に関して数値計算による検討が望まれる。

## 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) 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.
- 3) Friend, H.J.: Velocity redistribution in curved rectangular channels, J. Fluid Mech., vol.107, pp.423-439, 1981.
- 4) 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.
- 5) 山坂昌成, 池田駿介, 酒寄建之: 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.
- 6) 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.
- 7) 富永晃宏, 長尾正志: 複断面開水路湾曲部の流れ構造, 応用力学論文集, vol.1, pp.693-700, 1998.
- 8) 杉山均, 秋山光庸, 田中美恵子: 複断面曲がり開水路流れの水理特性に関する研究, 応用力学論文集, vol.1, pp.683-692, 1998.
- 9) 富永晃宏, 長尾正志, 大沼保仁: 台形断面開水路湾曲部の2次流構造, 水理講演会論文集, 第42巻, pp.895-900, 1998.
- 10) Odgaard, A. J. and Kennedy, J.F.: River-bend bank protection by submerged vanes, J. Hydr. Eng., ASCE, 109(8), pp.1161-1173, 1983.
- 11) 関根正人, 吉川秀夫, 井田泰蔵, 高松諭, 仲村学: 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.
- 12) 福岡捷二, 樺澤孝人, 齋藤潤一, 布施泰治, 渡辺明英, 大橋正嗣: 柳水製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.
- 13) 福岡捷二・藤田光一: 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 清水義彦・辻本哲郎: 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.
- 17) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋: 測岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.47-54, 1992.

(1998. 9. 30受付)