

II-37 樹木群が存在する水路の流れと浮遊砂濃度分布

樹北開水工コンサルタント 目黒 春彦  
北海道開発局 渡邊 康玄

1. はじめに

近年、河川環境に対して自然との調和や多自然型川づくりを望む声が高まっている。このような、世論の高まりを受け、河道内に樹木が存在する場の流れや土砂移動に関する研究が数多くなされるようになってきている。河川における樹木の存在は、そのほとんどが高水敷に位置し縦断的に様々に変化している。また、複断面河道等における流れでは河道の弯曲などにより、低水路から樹木群が存在する高水敷へあるいは、高水敷から低水路へとその場所を変化させている。このため、樹木群内の流れの場と樹木群外の流れの場の遷移箇所における現象把握は、必要不可欠なものと考えられる。

本研究は、渡邊<sup>1)2)3)</sup>らの等流を仮定した樹木群内流速分布および浮遊砂濃度分布のこのような箇所への適用性の把握、および遷移領域における現象解明を目的として水理実験を実施した結果について報告するものである。

2. 実験概要

実験は長さ 50m、川幅 30cm のアクリル直線水路（一部鋼製）に粒径 0.053mm の珪砂を 10cm 程度の厚さで所定の勾配に敷きならし流下方向流速の水深方向分布の測定と浮遊砂濃度分布の測定、および水位、河床高の測定を行った。樹木群を想定して、直径 4.0mm のアルミ製円柱を縦断方向に 8.0cm、横断方向に 4.0cm の間隔で正則に case1 では水路の上流側 25m の区間に配置し、case2 では水路全体に川幅方向半断面（右岸側）に配置した。円柱は、流水に対して剛性が十分大きく通水中全く動揺しない。

表-1 実験条件

ケース名	流量 Q(cm <sup>3</sup> /s)	水深 h(cm)	勾配 I	河床粒径 d(cm)	樹木群高 ht(cm)	樹木密度 a (1/cm)	河床抵抗係数 Cb
case.1	4.000	10	1/1200	0.0053	10.0	0.0125	0.030
case.2	4.000	10	1/1200	0.0053	10.0	0.0125	0.030

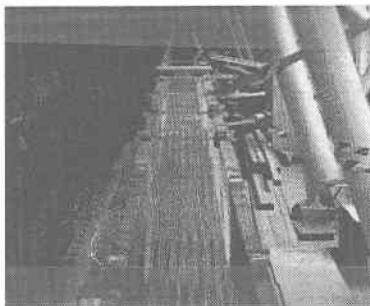


写真-1 case1 実験水路

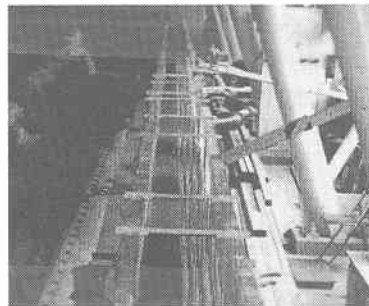


写真-2 case2 実験水路

Distribution of Suspended Sediment in Non-uniform Flow with Vegetation  
by Haruhiko MEGURO, Yasuharu WATANABE

## 2.1 case1

流速の測定には、直径 3.0mm の 2 次元電磁流速計を用い、樹木群境界から上下流に 0.3、5.0m と境界の計 5 地点について水深方向に 10 点 (1.2, 2.0, 2.8, 3.5, 4.3, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0cm) を測定した。なお、樹木群内の流速を代表するように、1 地点あたり図-1 示す 3 箇所 で計測を行い、その平均値を流速測定結果とした。一方、浮遊砂濃度は直径 5.0mm の管を用いてサイホンの原理で採水することにより測定された。採水位置は流速の測定地点と同じ箇所であるが、水深方向に 6 点 ( $z=1.2, 2.0, 3.5, 5.0, 7.0, 9.0\text{cm}$ ) とした。河床高と水位は、水路横断方向中央の位置において縦断方向に 1.0m 間隔で水路全体にわたってポイントゲージとレベルを用いて測定された。流速および浮遊砂濃度測定位置について、樹木群境界上流 5.0m から樹木群境界下流 5.0m にかけてそれぞれの地点を No.1, No.2, No.3, No.4, No.5 とする。通水中の水路の状況は、樹木群内では水面勾配がほぼ  $3/2500$  で一定していた。樹木群外では樹木群からの剥離を伴う水位回復が見られ、水面勾配はほとんどなかった。河床は樹木群内で若干の堆積、樹木群外での河床の洗掘が確認された。

## 2.2 case2

流速と浮遊砂濃度の測定は樹木群境界および樹木群境界から左岸側 (樹木群外) に 8.0cm の地点と樹木群境界から右岸側 (樹木群内) に 8.0cm の地点の計 3 地点について case1 と同様に測定した。左岸側から No.A, No.B, No.C とした。なお、図-2 に示すように 1 地点あたり 5 箇所 で計測を行いその平均値を流速、浮遊砂濃度分布測定結果とした。水位、河床高は、水路横断方向 3 点 (水路横断方向中央、および中央から左右岸側にそれぞれ 8.0cm の地点) を縦断方向に 1.0m の間隔で水路全体にわたってポイントゲージとレベルを用いて測定された。このとき 3 点の平均値を水位および河床高とした。同時に直径 3.0mm のトレーサーをながして流況の写真を撮影した。通水中の水路の状況は、トレーサーの動きから樹木群外から樹木群内への流れの出入りを見ることができた。水位は樹木群内では樹木群外に比べて上昇していた。また河床も樹木群内での若干の堆積がみられた。表-1 に実験の諸元を示す。

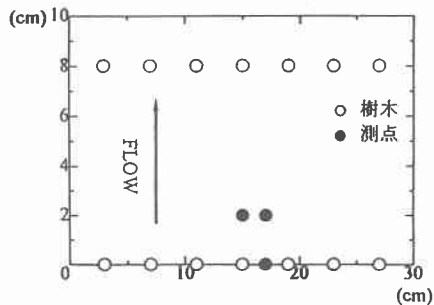


図-1 (a) case.1 流速、浮遊砂測定箇所

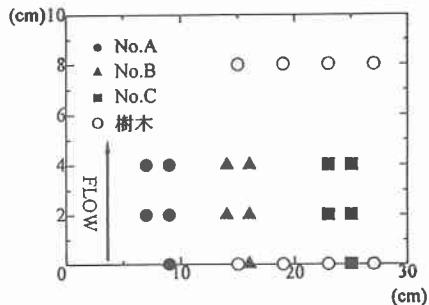


図-2 case.2 流速、浮遊砂測定箇所

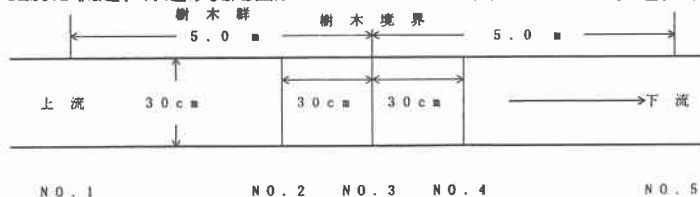


図-1 (b) case.1 流速、浮遊砂測定箇所

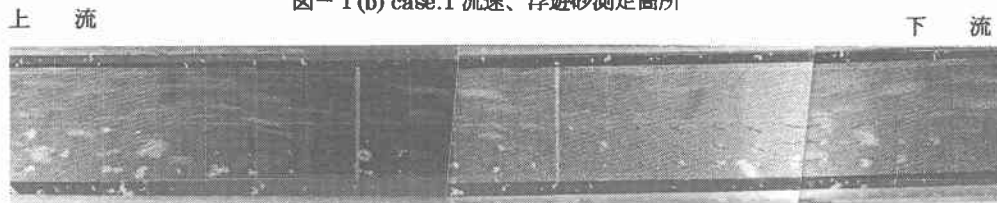


写真-3 流況写真

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 case1 流速分布

流速の測定結果を図-3に示す。なお、縦軸は河床からの高さ $z$ を水深 $h$ で無次元化した値 $z$ であり、横軸は流速 $\bar{u}$ を摩擦速度 $\bar{u}_*$ で無次元化した値 $u$ である。樹木群内である地点 No.1 では、(2)式で表せられる渡邊らが導いた樹木群の解析解(図-3中実線)にほぼ一致している。また、樹木群境界に近い地点 No.2 では、河床近傍で若干の変化は見られるもののほぼ解析解と一致している。一方樹木群境界地点である No.3 と樹木群境界から近い地点 No.4 では河床近傍からの流速の増加が同え、樹木群外である地点 No.5 では(1)式で表せられる放物分布(図-3中破線)に近い分布を示す結果となった。

このことは、樹木群が存在する場から樹木群が存在しない場へ流れる場合、流速分布が樹木群境界近傍から緩やかに変化をすることを意味している。この場合、樹木群境界から十分離れていると思われた地点 No.5 においても遷移領域と考えられる。この遷移領域において流速の加速の仕方を見てみると、河床近傍で流速の加速が生じはじめ、水面近傍での流速の加速が遅れて生起していることがよみとれる。

以上の結果、樹木群を含む河道における流れの解析において、上流側の樹木群境界では流れの遷移をそれほど意識する必要はないものと考えられる。また、下流側の樹木群境界では、樹木群境界から近い地点ではそれほど意識することはないが、樹木群境界から離れるにつれ水面近傍に比べ水深の中間付近の加速を意識しなければならない。今回のケースでは樹木群境界からかなり離れていると思われた、No. 5 においても遷移領域と考えられるので、この遷移領域の範囲は今後の課題と考えられる。

$$u = \frac{6}{\kappa} z \left(1 - \frac{1}{2} z\right) + \frac{1}{\sqrt{C_d}} \quad (1)$$

$$u_i \sqrt{\frac{2}{a C_d} + \frac{\kappa}{3 a C_d}} \left[ C_0 \exp(\alpha z) + C_1 \exp(-\alpha z) \right] \quad (2)$$

$$x = \left( \frac{72 a C_d}{\kappa^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad C_0 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4 \alpha \gamma}}{2 \alpha} \quad C_1 = C_0 \exp(2x) \quad \alpha = \frac{2 \kappa}{3 a^2 C_d^2} C_0 [1 + 2 \exp(2x) + \exp(4x)]$$

$$\beta = \left( \frac{32 C_b^2}{a^3 C_d^3} \right)^{\frac{1}{2}} [1 + \exp(2x)] - \left( \frac{8 \kappa^2}{9 a^3 C_d^3} \right)^{\frac{1}{4}} [1 - \exp(2x)] \quad \gamma = \frac{12 C_b}{\kappa a C_d}$$

ここで、 $\kappa$  : カルマン定数、 $C_b$  : 河床の抵抗係数、 $a$  : 無次元樹木密度、 $C_d$  : 樹木の抗力係数

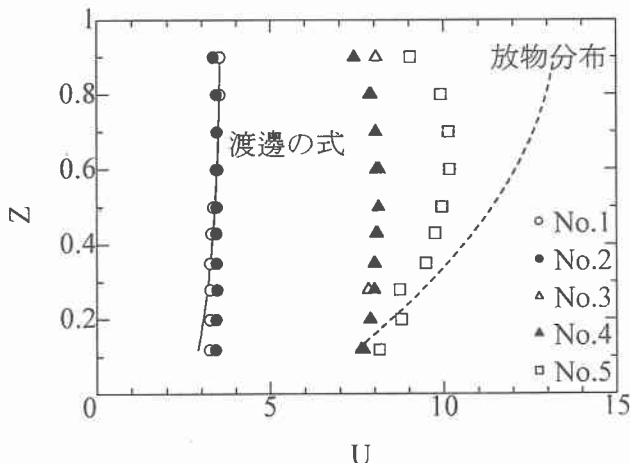


図-3 case.1 流速分布測定結果

### 3.2 case1 浮遊砂濃度分布

浮遊砂濃度の測定結果を図-4に示す。縦軸は図-3と同様に無次元化された河床からの高さ  $z$ 、横軸は河床にもっとも近い観測点の浮遊砂濃度分布  $C_a$  で基準化された浮遊砂濃度  $C/C_a$  である。樹木群境界から5m離れた地点 No.1 では(4)式で表される渡邊らの樹木群内の浮遊砂濃度分布(図-4中実線)に近い分布となっている。また、樹木群境界に近い地点である No.2 においては、若干水深方向の濃度勾配が大きくなるものの(3)式で与えられる樹木群が存在しない流れの場の浮遊砂濃度分布を表す Rouse 分布(図-4中破線)でほぼ表現される。樹木群境界およびそれより下流である地点 No.3, No.4, No.5 でも、ほぼ Rouse 分布で表せられる。このように浮遊砂濃度分布は、樹木群内の領域から樹木群外の領域に極めて緩やかに変化することがわかる。遷移領域での浮遊砂濃度分布は上流側の樹木群境界では浮遊砂濃度分布の遷移を意識しなければならぬ。流れの遷移領域は樹木群境界より下流側であったが、浮遊砂濃度分布の遷移領域は樹木群境界より上流側であると考えられる。

$$C/C_a = \left[ \left( \frac{h-z}{z} \right) \left( \frac{z_0}{1-z_0} \right) \right]^{\frac{w_f}{\kappa}} \quad (3)$$

ここで、 $z_0$  : 基準点濃度の水深、 $w_f$  : 摩擦速度で無次元化された砂粒子

$$C/C_a = \exp \left( - \int_{z_0}^z \frac{w_f}{\varepsilon} dz \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon = i_*^2 \frac{\kappa x}{3aC_a} [C_0 \exp(xz) - C_1 \exp(-xz)] \quad l_i = \frac{\sqrt{\frac{2}{aC_a} + \frac{\kappa}{3aC_a} (C_0 + C_1)}}{\frac{\kappa}{3aC_a (C_0 - C_1)}} \sqrt{C_b}$$

ここで、 $\varepsilon$  : 渦動粘性係数

$l_i$  : 水深で無次元化された混合距離

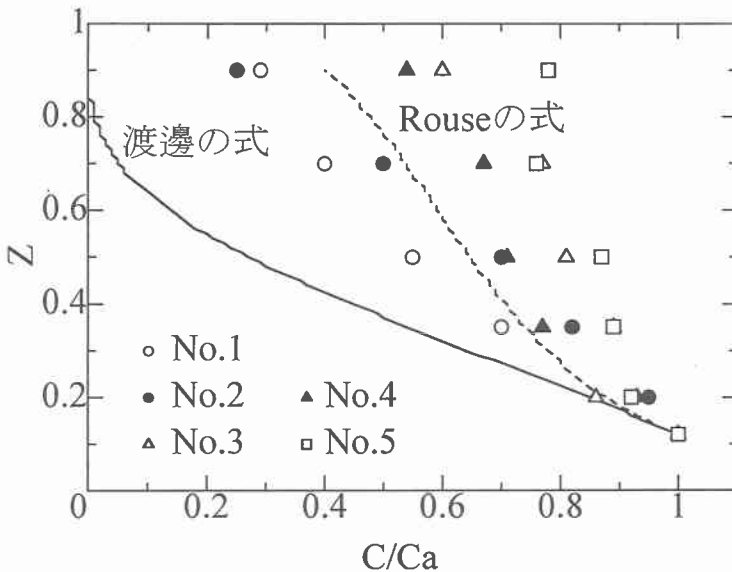


図-4 case.1 浮遊砂濃度分布測定結果

### 3.3 case2 流速分布

流下方向流速の鉛直分布の測定結果を図-5に示す。図中の縦軸と横軸は図-3と同様である。図中の実線は(2)式の渡邊らが導いた樹木群の解析解である。また、破線は(1)式で表せられる放物分布である。No.Aである樹木群外では、放物分布とほぼ一致する結果となった。樹木群境界である No.B では水面近傍で流速の減速が生じはじめ放物分布からはずれた分布となった。一方、樹木群内である No.C では渡邊らが導いた解析解とほぼ一致する結果となった。

次に、水深平均流下方向流速  $u$  の横断方向分布を図-6に示す。縦軸は流速  $u$  を摩擦速度  $u_*$  で無次元化した  $u$ 、横軸は水路横断方向中央の位置からの距離  $\bar{y}$  を水路幅  $\bar{b}$  で無次元化した  $y$  である。一側が樹木群内を表し、+側が樹木群外を表す。図中の実線は渡邊らによって導きだされた、側岸に樹木を有する河道に対する水深平均流下方向流速の横断分布式である。同理論式は(5),(6)式で表される。case.2 の流下方向流速の横断方向分布はほぼ理論式と一致する結果となった。

$$\langle u_0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{C_{f0}}} \left[ 1 + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\zeta}} y\right) \right] \quad \text{樹木群外} \quad (5)$$

$$\langle u \rangle = \frac{1}{\sqrt{C_f' + \frac{a'}{2} C_d}} \left[ 1 + C_3 \exp\left(\sqrt{\frac{2}{\eta}} y\right) \right] \quad \text{樹木群内} \quad (6)$$

$$\text{ここで、} \quad C_2 = \frac{\eta - \zeta}{\zeta + (\eta\zeta)^{0.5}} \quad C_3 = -\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)^{0.5} C_2 \quad \zeta = \varepsilon \frac{1}{\sqrt{C_{f0}}} \quad \eta = \varepsilon \frac{1}{\sqrt{C_f' + \frac{a'}{2} C_d}}$$

$$C_f' = C_b \frac{u_b^2}{\langle u_1 \rangle} \quad C_{f0} = \frac{1}{\left(\frac{2}{\kappa} + \frac{1}{\sqrt{C_b}}\right)^2} \quad a' = \frac{a \int_0^1 u^2 dz}{\langle u_1 \rangle^2}$$

$$\langle u_1 \rangle = \sqrt{\frac{2}{aC_d}} - \frac{\kappa}{3aC_d x} C_0 [1 - 2\exp(2x)] \quad u_b = \sqrt{\frac{2}{aC_d}} + \frac{\kappa}{3aC_d} C_0 [1 + \exp(2x)]$$

$u_b$  : 河床における流速、 $C_{f0}$  : 樹木が無い場合の摩擦係数、 $C_f'$  : 摩擦係数、 $\langle u_1 \rangle$  : 水深平均流速

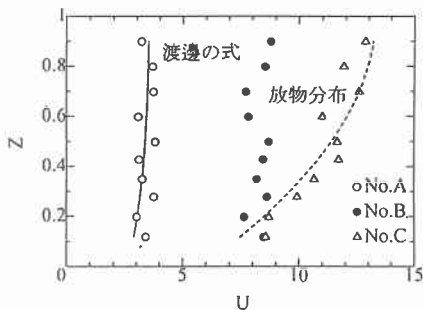


図-5 水深方向流速分布

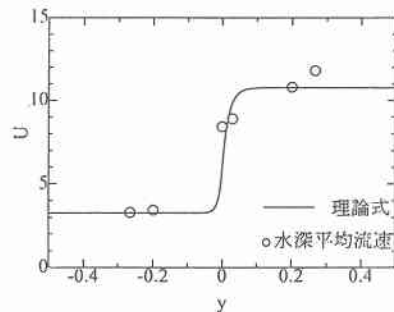


図-6 縦断方向水深平均流速横断方向分布

### 3.4 case2 浮遊砂量分布

No.A, No.B, No.C の浮遊砂量の結果をそれぞれ、図-7、図-8、図-9に示す。縦軸は図-4と同様に無次元化された河床からの高さ  $z$ 、横軸は浮遊砂濃度  $C$  である。図中の破線は(3)式の Rouse 分布から清水<sup>4)</sup>らと同様に(7)式で与えられた  $C_a$  の値からもとめられた。同様に図中の実線は(4)式の渡邊らの樹木群内の浮遊砂濃度の式からもとめられた。樹木群外である No.A ではほぼ Rouse 分布と一致する結果となった。樹木群境界である No.B でも Rouse 分布と一致する結果となった。一方樹木群内である No.C では渡邊らの分布式で表せた断面と、渡邊らの分布式と大きくはずれた断面とにわかれた。これは、流況の写真等から考えると、樹木群外と樹木群内との流速差等による渦の発生によって起こる流れの樹木群外から樹木群内への出入りによるものと考えられる。

以上の結果、case.2 のように河道の側岸に樹木群がある場合、流速差などによる大規模な渦が発生することから、樹木群内の浮遊砂濃度は縦断方向の違いによって分布が大きく変わると考えられる。case.2 をもとに弯曲した河川を考慮したモデルの開発が必要となる。

$$C_a = 0.002 \left( \frac{\tilde{u}_{*b}}{\tilde{w}_f} \right)^2 \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{u}_{*b}$  : 有効摩擦速度、 $\tilde{w}_f$  : 砂粒子の沈降速度

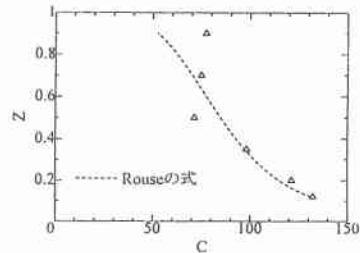


図-7

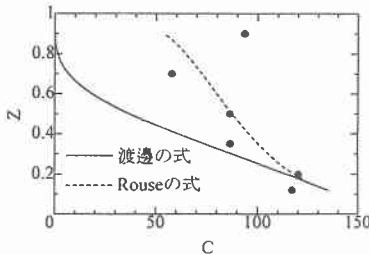


図-8

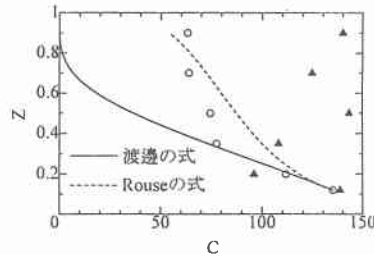


図-9

## 4. まとめ

- (1) case.1 のように樹木群内から樹木群外に流れるとき流速分布の解析では、上流側の樹木群境界では流れの遷移をそれほど意識する必要はない。
- (2) 樹木群境界での浮遊砂濃度分布は、Rouse の浮遊砂濃度分布で表される。
- (3) case.2 のように河道の側岸に樹木群が存在するときの樹木群内の浮遊砂濃度分布は流れの方向に大きく影響されることがわかった。

## 参考文献

- (1) 住友裕明、渡邊康玄、井出康郎；樹木群内の浮遊砂濃度分布に関する実験、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、1995 年 9 月
- (2) 渡邊康玄、北條紘次、清水康行；樹木の存在する河道の流況特性、水工学論文集第 35 巻、1991 年 2 月
- (3) 渡邊康玄、石田享平、井出康郎；樹木群内の流速水深方向分布と浮遊砂濃度分布、開発土木研究所月報 No.502、1995 年 3 月
- (4) 清水義彦、辻本哲郎、北村忠紀；植生に覆われた砂床上流れの浮遊砂濃度分布、水工学論文集第 35 巻、1991 年 2 月