

II-45

縦断方向に樹木群の分布が異なる河道の浮遊砂濃度分布

(株)北開水工コンサルタント 正員 目黒春彦
 北海道開発局 正員 渡邊康玄
 (株)北開水工コンサルタント 正員 住友裕明

1. はじめに

近年、河川環境への配慮に対する世論の高まりを受け、河道内に樹木が存在する場合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。しかし、これらの多くの研究は、樹木に関して等流状態を仮定しており、縦断方向に樹木の存在が変化する場の流れや流砂を扱ったものは少ない。しかし、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は、河道の湾曲などに起因して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、樹木群外の流れの場と樹木群内の流れの場と遷移箇所における現象把握についても必要不可欠なものと考えられる。

本研究は、渡邊^{1),2)}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. 実験の概要

実験は、長さ50m、幅30cmの亚克力水路（一部鋼製）に粒径0.053mmの硅砂を10cm程度の厚さで所定の勾配に敷き均し移動床で行われた。なお、樹木群を想定して水路の下流側25mの区間に直径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。実験水路の状況を写真-1に示した。

測定項目は、縦断方向流速の水深方向分布、浮遊砂濃度、河床高および水位である。流速は、直径3.0mmの2次元電磁流速計を用い、樹木群の境界から上下流に0.3, 5.0mと境界の計5地点(x=-5.0, -0.3, 0.0, 0.3, 5.0m)について水深方向に10点(z=1.2, 2.0, 2.8, 3.5, 4.3, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0cm)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に示す3箇所計測を行いその平均値を流速測定結果とした。



写真-1 実験水路の状況

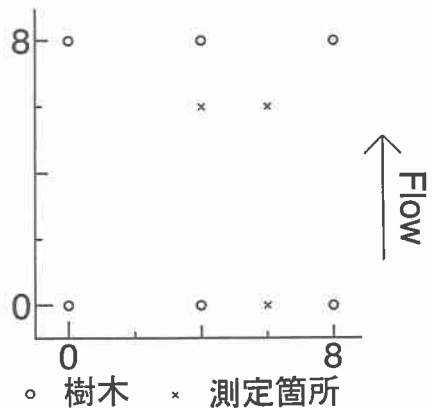


図-1 流速・浮遊砂測定箇所

Distribution of Suspended Sediment in Non-uniform flow with Vegetation
 by Haruhiko Meguro, Yasuharu WATANABE, Hiroaki Sumitomo

表-1 実験条件

	流量	水深	勾配	河床粒径	樹木群高	樹木密度	河床抵抗係数
	$\bar{Q}(cm^3/s)$	$\bar{h}(cm)$	i	$\bar{d}(cm)$	$\bar{h}_t(cm)$	$\bar{a}(1/cm)$	C_b
case01	7,560	10.0	1/1500	0.0053	-	-	0.025
case02	5,520	10.0	1/300	0.0053	10.0	0.0125	0.030
case03	3,240	10.0	1/300	0.0053	10.0	0.0125	0.030

一方、浮遊砂は、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、水深方向には6点($z=1.2, 2.0, 3.5, 5.0, 7.0, 9.0cm$)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1m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。

流速および浮遊砂測定位置について、樹木群境界から上流5.0m($x=-5.0m$)の地点をNo.1、上流0.3m($x=0.3m$)の地点をNo.2、下流0.3m($x=0.3m$)の地点をNo.4、下流5.0m($x=5.0m$)の地点をNo.5、樹木境界地点($x=0.0m$)をNo.3と呼ぶこととする。

実験の諸元を表-1に示す。今回の実験はcase03であるが、過去に著者らが行った等流条件での実験 case01 およびcase02についても併記している。なお、case01は樹木群の存在しない実験であり、case02は水路全体に樹木群を配した実験である。

3 実験結果と考察

水位および河床高の測定結果を図-2に示す。水面勾配は、樹木群境界で大きく変化しており、上流側の水位は下流側に存在する樹木群の影響により堰あがった形になっており、水面勾配はほとんど無い。また、樹木群内である下流側の水面勾配は、ほぼ1/2500で一定している。一方河床は、明確ではないが下流側で若干堆積する傾向を示している。水面形は下流側で堰上げられていないことから、この堆積は、樹木群の影響によるものと考えられる。

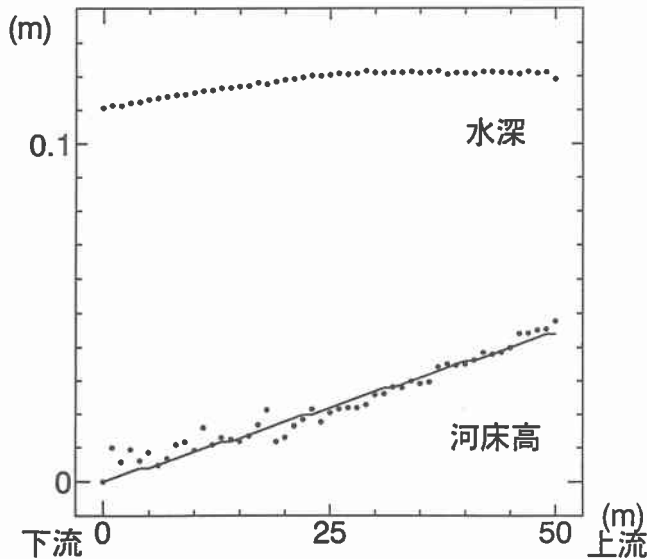


図-2 水位および河床高に関する実験結果

3-1 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 u を摩擦速度 u_* で無次元化した値 u である。樹木群外である地点No.1では、(1)式で表される放物分布(図-3中破線)に一致している。また、樹木群境界に近い地点No.2では、水面近傍でNo.1に比較して流速が若干減少していることが伺える。一方樹木群境界地点であるNo.3を含むNo.4およびNo.5地点では、No.3とNo.4において河床近傍の流速がNo.5に比較して大きく樹木の存在しない箇所の流速に近い値となっているが、(2)式で表される渡邊ら²⁾が導いた樹木群の解析解(図-3中実線)にほぼ一致する結果となった。

$$u = \frac{3}{\kappa}z\left(1 - \frac{1}{2}z\right) + \frac{1}{\sqrt{C_b}} \quad (1)$$

$$u = \sqrt{\frac{2}{aC_d}} + \frac{\kappa}{3aC_d}[C_0 \exp(\chi z) + C_1 \exp(-\chi z)] \quad (2)$$

$$\chi = \left(\frac{72aC_d}{\kappa^2}\right)^{1/4}, \quad C_0 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}, \quad C_1 = C_0 \exp(2\chi)$$

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

ここで、 κ ;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、である。

このことは、樹木群が存在しない箇所から樹木群が存在する場へ流れる場合、流速分布が樹木群境界近傍で急激に変化することを意味している。この場合、樹木群境界を挟んで水深の約6倍程度の縦断距離が遷移領域と考えられる。この遷移領域において流速の減速の仕方を見てみると、水面近傍で流速の減速が生じし始め河床近傍の流速の減速が遅れて生起していることが読みとれる。

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。

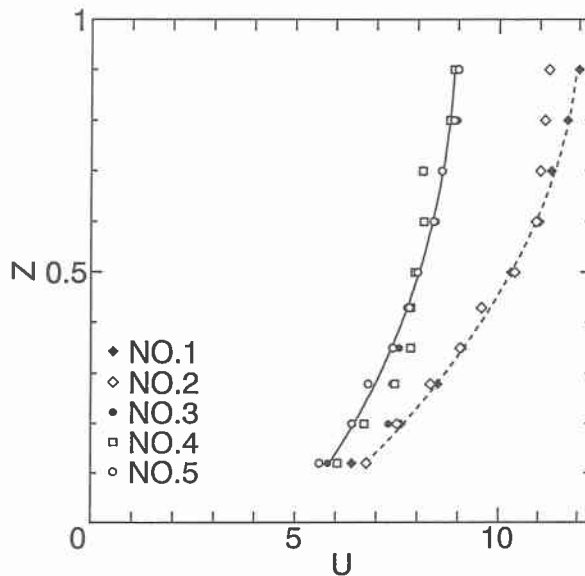


図-3 流速分布測定結果

3-2 浮遊砂濃度分布

浮遊砂濃度の測定結果を図-6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 C_0 で基準化された浮遊砂濃度 C/C_0 である。樹木群境界およびそれより上流である地点No.1, No.2, No.3では(3)式で与えられる樹木群の存在しない流れ場の浮遊砂濃度分布を表すRouse分布でほぼ表現され、この範囲では樹木の影響をそれほど大きく受けていない。また、樹木群内の地点No.4においても若干水深方向の濃度勾配が大きくなるもののそれほど大きな違いは無い。

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{1-z}{z} \frac{z_0}{1-z_0} \right]^{w_f/\kappa} \quad (3)$$

ここで、 z_0 ; 浮遊砂濃度の基準面高さ、 w_f ; 摩擦速度で無次元化された砂粒子の沈降速度である。

一方、樹木境界から5m下流の地点No.5では、濃度勾配が樹木群の無い箇所の浮遊砂濃度分布に比較して大きくなっており、(4)式で表される渡邊らの樹木群内の浮遊砂濃度分布に極めて近い分布となっている。このように浮遊砂濃度分布は、樹木群外の領域から樹木群内の領域に極めて緩やかに変化していることがわかる。

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\int_{z_0}^z \frac{w_f}{\epsilon} dz\right) \quad (4)$$

$$\epsilon = l_t^2 \frac{\kappa\chi}{3aC_d} [C_0 \exp(\chi z) - C_1 \exp(-\chi z)] \quad , \quad l_t = \frac{\sqrt{\frac{2}{aC_d} + \frac{\kappa}{3aC_d}(C_0 + C_1)}}{\frac{\kappa\chi}{3aC_d(C_0 - C_1)}} \sqrt{C_1}$$

ここで、 l_t ; 水深で無次元化された混合距離である。

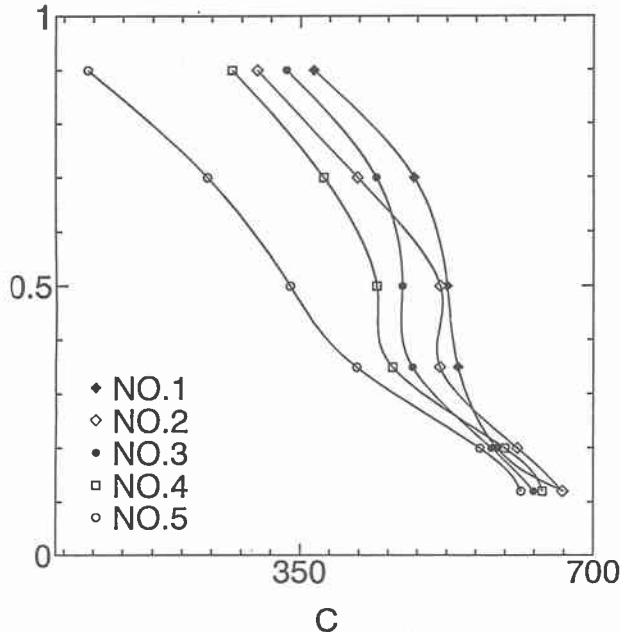


図-4 浮遊砂量分布図

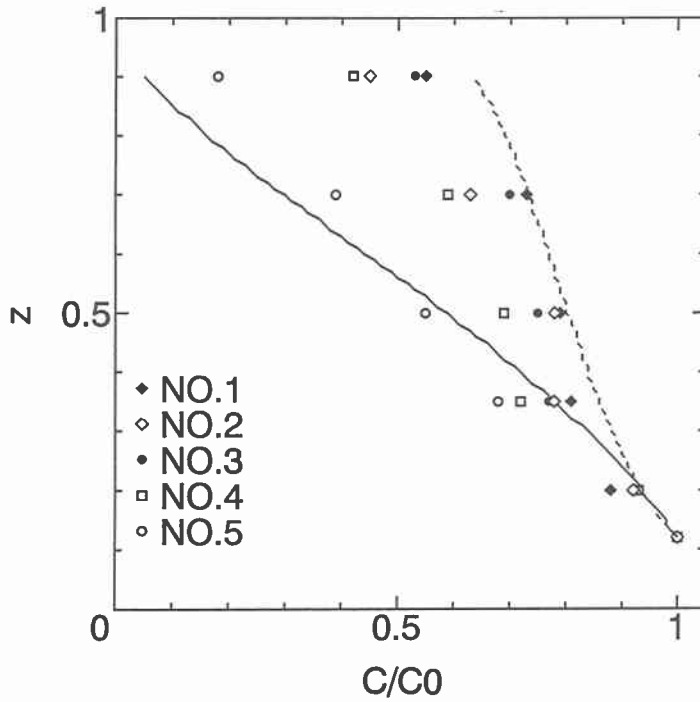


図-5 浮遊砂濃度分布測定結果

4. 不等流計算

case03は、定常不等流を実験条件としているので樹木群の影響を考慮した不等流計算を述べる。このとき常流で流下すると考える。樹木群が存在する場合の水深方向分布が樹木群が存在しない場合の流速分布と大きく異なることから、この影響を取り込んだ不等流計算の方法を考えることとする。(7)式は、不等流の式の差分表示である。ここで、樹木群内での流速分布が異なる影響を考慮した樹木群内のマンニングの粗度係数 n_t で表す。計算結果を図-6に示す。

$$\frac{dH}{dx} + \frac{dV^2}{dx} + i_e = 0 \quad (5) \quad \frac{dH}{dx} + \frac{dV^2}{dx} + i_e - \frac{\tilde{a}}{2} C d\tilde{u}_t^2 \quad (6)$$

$$[Z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{2gB_2^2 h_2^2} + \frac{n^2 Q^2 \Delta X}{2B_2^2 h_2^3} + \frac{1}{2} \Delta X F] = [Z_1 + h_1 + \frac{Q^2}{2gB_1^2 h_1^2} - \frac{n^2 Q^2 \Delta X}{2B_1^2 h_1^3} - \frac{1}{2} \Delta X F] \quad (7)$$

$$n_t = \left(\frac{2}{\kappa} \sqrt{c_b} + 1 \right) \frac{\left\{ \sqrt{\frac{2}{ac_d} + \frac{\kappa}{3ac_d} c_0 [1 + \exp(2\chi)]} \right\}}{\left\{ \sqrt{\frac{2}{ac_d} - \frac{\kappa}{3ac_d} c_0 [1 - \exp(2\chi)]} \right\}} n_i \quad (8)$$

$$F = \frac{\frac{1}{2} ac d\tilde{u}_t^2 * \tilde{A}_i}{g \tilde{A}_i} \quad : \text{樹木群の抵抗} \quad V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad : \text{マンニングの式}$$

ここで、 \tilde{A}_i :断面積、 h_i :水深、 \tilde{u}_i :流速、 i_e :エネルギー勾配、 n_i :マンニングの粗度係数

4.2 計算結果

浮遊砂濃度分布では理論値と実験結果は遷移領域での再現性が悪いが、理論解析結果を利用した不等流計算結果では遷移領域での再現性はある程度有効である。

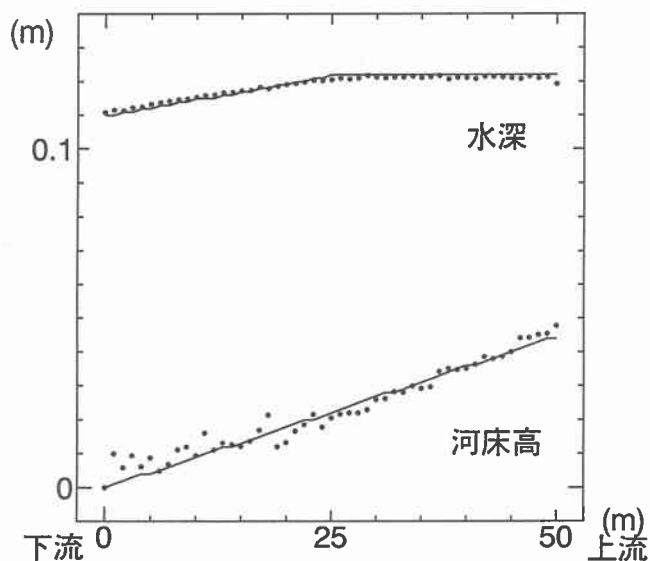


図-6 不等流計算の結果

5. おわりに

今回の実験でわかったことを以下に示す。

1. 今回のようなケースでの流速分布の解析では、上流側の樹木境界では流れの遷移をそれほど意識する必要はない。
2. 樹木境界での浮遊砂濃度分布は、Rouseの浮遊砂濃度分布でほぼ表される。
3. 水面形を表す不等流の計算値は、マンニングの粗度係数を樹木群内と樹木群外とに分けることによってある程度有効な結果を得ることができた。

今回の実験では取り組むことができなかったが、浮遊砂濃度分布を明らかにするためには河床変動についても取り組んでいく必要がある。

《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, 平成7年9月, p394-p395.
- 2) 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 No502, 1995年3月.