

樹木帯を伴う一様湾曲流路の流れに関する数値計算

群馬大学工学部 正会員 清水義彦*

金沢大学工学部 正会員 辻本哲郎**

1. まえがき

河道内植生はその繁茂の仕方によっては、洪水流量の疎通能力の阻害が懸念されるが、一方で、植生の形状抵抗により河床の洗掘防止、堤防・護岸の保護機能などの水制効果も期待でき、植生の密度や配置の仕方を適切に決めれば、断面全体の疎通能力低下を招かずローカルな流況特性を制御できる可能性がある。こうした観点から、福岡ら¹⁾は水理実験を通じて湾曲流路外岸に設けた樹木群水制の有効性を見出すための先駆的な研究を行っている。本研究ではこうした植生の水制効果を期待する一例として、湾曲部外岸沿いに樹木帯がある場合を想定し、湾曲部特有の流況特性すなわち外岸寄りに存在する主流の流心位置が植生帯の存在によってどのように変化するかについて、著者らの提案した植生流れの計算モデル（植生の形状抵抗を考慮した $k-\epsilon$ 乱流モデル）²⁾から検討する。

2. 樹木帯を伴う湾曲流の数値シミュレーション

一様湾曲流路の外岸に沿って一定幅の樹木帯が流下方向に存在するときの植生平衡流れを想定する。このような状況では直線水路における植生流れと同様、交番的な横断混合の出現^{3), 4), 5)}が予想されるが、ここではこうした組織的変動による運動量混合も乱流モデルに含めて扱う。著者らは、植生（疎な離散的障害物）を伴う流れの計算においては、植生流場を空間平均された均質な場として近似し、植生の抗力による運動量の吸い込みとその仕事量に相当する分の乱れエネルギーや逸散率の増加を考慮した計算モデル²⁾を提案しているが、ここでもその方法を踏襲し、乱流モデルは遠心力に起因する2次流を再現できる $k-\epsilon$ 乱流モデルを採用する。このとき、植生を含む流れ場を空間平均した3次元流の基礎式は以下のである。

$$\frac{\partial U}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rV)}{\partial n} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(U^2 - \tau_{ss}/\rho)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(VU - \tau_{ns}/\rho)}{\partial n} + \frac{\partial(WU - \tau_{zs}/\rho)}{\partial z} = g \sin \theta - \frac{d}{ds} \left(\frac{P}{\rho} \right) - \frac{(VU - \tau_{ns}/\rho)}{r} - F_s/\rho \quad (2)$$

$$\frac{\partial(UV - \tau_{sn}/\rho)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(V^2 - \tau_{nn}/\rho)}{\partial n} + \frac{\partial(WV - \tau_{zn}/\rho)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{P'}{\rho} \right) - \frac{(U^2 - \tau_{ss}/\rho)}{r} - F_n/\rho \quad (3)$$

$$\frac{\partial(UW - \tau_{sz}/\rho)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(VW - \tau_{nz}/\rho)}{\partial n} + \frac{\partial(W^2 - \tau_{zz}/\rho)}{\partial z} = g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P'}{\rho} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(Uk - \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial s} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} \left(rk - \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Wk - \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_k + C_{fk} (F_s U + F_n V) - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(U\epsilon - \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial s} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} \left(r\epsilon - \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(W\epsilon - \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) = \frac{\epsilon}{k} [C_{\epsilon 1} \{P_k + C_{fk} (F_s U + F_n V)\} - C_{\epsilon 2} \epsilon] \quad (6)$$

ここで、 s, n, z : 流下、横断、鉛直座標、 U, V, W : 流下、横断、鉛直方向の流速成分、 θ : 水路床勾配角、 r : 流路の曲率半径、 P, P' : 水路断面平均圧力とそれからの偏差分、 ν_t : 渦粘性係数で、 $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ とする。また、 P_k は乱れエネルギーの生成率、せん断応力の各成分は、次のとおりである。

キークス : 樹木群水制、湾曲流、 $k-\epsilon$ 乱流モデル

* 〒376 桐生市天神町1-5-1 TEL 0277-30-1642 FAX 0277-30-1601

** 〒920 金沢市小立野2-40-20 TEL 0762-34-4655 FAX 0762-34-4644

$$\begin{aligned}\tau_{ss} &= 2(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial s} + \frac{V}{r} \right) - \frac{2}{3}k, & \tau_{nn} &= 2(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial n} \right) - \frac{2}{3}k, & \tau_{zz} &= 2(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2}{3}k \\ \tau_{ns} &= (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial n} + \frac{U}{r} + \frac{\partial V}{\partial s} \right), & \tau_{zs} &= (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial U}{\partial z} \right), & \tau_{zn} &= (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial n} \right)\end{aligned}$$

また、 F_s, F_n は植生の形状抵抗による反力で、 C_D を形状抵抗係数、 λ を植生の密生度として、

$$F_s = \frac{1}{2} C_D \lambda h U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad F_n = \frac{1}{2} C_D \lambda h V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad C_{D1}, C_{D2}, C_{\mu}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon \text{は標準値, 係数 } C_{f_s} \text{は1.3とする.}$$

3. 植生帯による湾曲流の流況変化

図1は主流速(U)の横断面コンター（断面内最大流速で無次元化）で、a) 植生の無い場合、密生度を変えた場合 (b) $\lambda=0.01/\text{cm}$, (c) $\lambda=0.1/\text{cm}$) について示した（流路曲率半径4.5m, 水路幅0.5m）。樹木帯の存在から、外岸近傍に出現した流心は密生度が大きいほど内岸方向に移動する。図2は断面内2次流の計算結果で、樹木帯境界で下降流となり、樹木帯外で2次流セルが閉じる構造になっており、こうした特徴は福岡らの計測結果¹⁾と対応している。図3は河床せん断応力の横断分布（最大河床せん断応力で無次元化）したもので、これより樹木帯の密生度を適切に選べば、流路中央部に最深河床を維持した流路断面が可能であることが示唆されている。

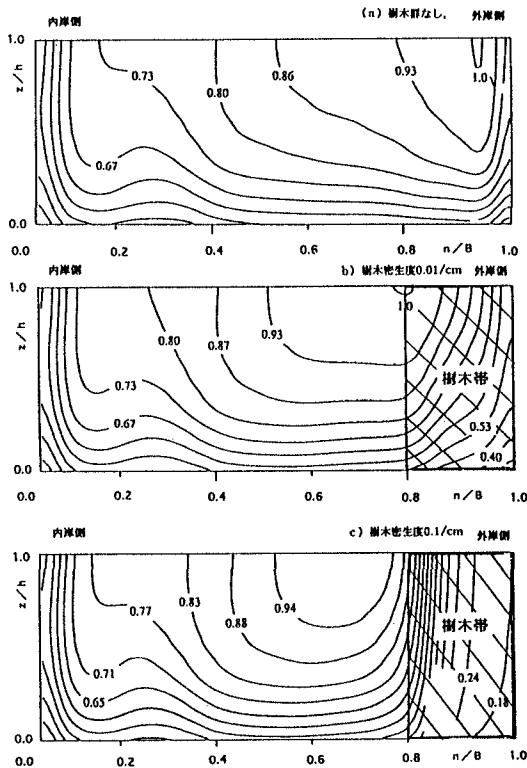


図1 主流速の横断面コンター
(a) 樹木群なし, (b) 樹木密生度0.01/cm,
(c) 樹木密生度0.1/cm)

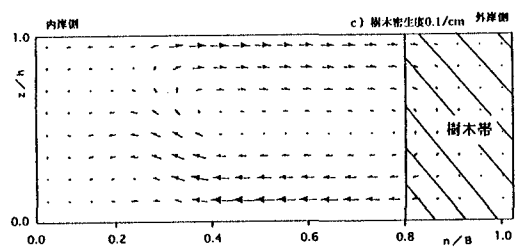


図2 湾曲外岸沿いに樹木のある場合の断面内2次流ベクトル図

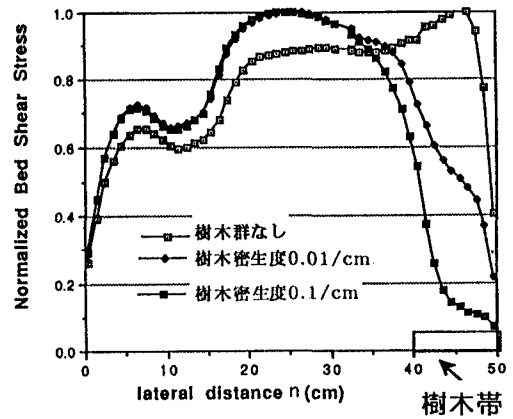


図3 河床せん断応力の横断分布

参考文献

- 1) 福岡・渡邊・大橋・姫野：樹木群の水制の利用可能性の研究，水工学論文集，第41巻，pp.1129-1132,1997.
- 2) 清水・辻本・中川：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No.447/II-19,pp.35-44,1992.
- 3) 藤田・福岡：洪水流における水平混合，土木学会論文集，No.429/II-15,pp.27-36,1991.
- 4) 辻本・北村：側岸に沿って植生群落のある流路での水面変動を伴う横断混合，水工学論文集，第36巻，pp.273-280.
- 5) 池田・太田・長谷川洋：側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-16，pp.47-54,1991.