

樹木群による河道湾曲流れの制御に関する数値計算

Numerical Study on the Structure of Flow Field with a Vegetation-covered Zones in a Curved Channel

清水義彦*・辻本哲郎**

Yoshihiko SHIMIZU and Tetsuro TSUJIMOTO

1. はじめに

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いわゆる水制効果も期待できる。すなわち、植生の密生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にローカルな流況特性を制御することが可能であり、植生の水制効果を明らかにできれば多自然型河川工法を進めて行く上できわめて重要な知見を与える。本研究ではこうした植生の水制効果を期待する一つの例として、湾曲部外岸沿いに樹木群がある場合を想定する。そして、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や遠心力に起因する2次流分布が、植生帯（樹木群）の存在によってどのように変化するかについて考察する。このような状況での樹木の水制効果については福岡ら¹⁾が水理実験を中心とした先駆的な研究を始めており、その可能性を検討しているが、ここでは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)・3)}を湾曲水路に適用して、樹木群が流路横断方向の主流速や2次流に与える影響などの流況特性を調べ、次に湾曲外岸側樹木群をもつ河道の動的平衡横断面形状を推定する。そして、樹木群のない湾曲河道での流況、平衡横断面形状との比較から樹木群による湾曲流路の流況制御の可能性を探る。

2. 樹木群を伴う湾曲流の数値シミュレーション

十分発達した一様湾曲流路において、その外岸に沿って一定幅の植生帯（樹木群）が流下方向に一樣に存在している場を想定する。このような状況では直線水路における植生流れと同様、水平渦の出現とそれによる横断混合の発生^{4)・5)・6)・7)}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ものとする。

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)・3)}を提案しているが、ここでもその方法を踏襲する。ただし、乱流モデルは遠心力に起因する2次流を再現でき、蛇行流や湾曲流での解析においてその有効性が認められている $k-\epsilon$ 乱流モデルを採用する^{8)・9)}。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ようである。

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

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

キーワード：河道湾曲部、植生流れ、樹木群水制、 $k-\epsilon$ 乱流モデル

* 正会員 博士（工学） 群馬大学助教授 工学部建設工学科（〒376 桐生市天神町1-5-1）

** 正会員 工学博士 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

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

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

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

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

ここで, s, n, z : 流下, 横断, 鉛直方向座標, 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, v_t : 渦粘性係数で, これは乱れエネルギー (k) とその逸散率 (ε) から,

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

と与える. また, P_k は乱れエネルギーの生成率⁹⁾, せん断応力の各成分については,

$$P_k = \frac{\tau_{ss}}{\rho} \left(\frac{\partial U}{\partial s} + \frac{V}{r} \right) + \frac{\tau_{ns}}{\rho} \left(\frac{\partial U}{\partial n} + \frac{\partial V}{\partial s} \right) + \frac{\tau_{nn}}{\rho} \left(\frac{\partial V}{\partial n} \right) + \frac{\tau_{nz}}{\rho} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial n} \right) + \frac{\tau_{zs}}{\rho} \left(\frac{\partial W}{\partial s} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\tau_{zz}}{\rho} \frac{\partial W}{\partial z} \quad (8)$$

$$\frac{\tau_{ss}}{\rho} = 2(v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial s} + \frac{V}{r} \right) - \frac{2}{3}k, \quad \frac{\tau_{nn}}{\rho} = 2(v + v_t) \left(\frac{\partial V}{\partial n} \right) - \frac{2}{3}k, \quad \frac{\tau_{zz}}{\rho} = 2(v + v_t) \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2}{3}k$$

$$\frac{\tau_{ns}}{\rho} = (v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial n} + \frac{U}{r} + \frac{\partial V}{\partial s} \right), \quad \frac{\tau_{zs}}{\rho} = (v + v_t) \left(\frac{\partial W}{\partial s} + \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad \frac{\tau_{zn}}{\rho} = (v + v_t) \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial n} \right) \quad (9)$$

である. また, F_s, F_n は植生の形状抵抗による反力で, C_D を植生の形状抵抗係数, λ を植生密度として,

$$F_s \equiv \frac{1}{2} C_D \lambda U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad F_n \equiv \frac{1}{2} C_D \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (10)$$

である. k - ε 乱流モデルのパラメータ値 ($C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$) は標準値を用い¹⁰⁾, 係数 C_{fe} については植生層を伴う流れ場の計測から決められた1.3を用いる ($C_{fk}=1.0$). 壁面境界条件は壁関数法を用いた (計算例では壁面は滑面条件とした). また, 樹木群領域では式 (10) で与えられる形状抵抗を与え, 計算では樹木群は非水没の条件を課した. なお, 計算では上記の基礎方程式系を速度スケールとして平均流速 (U_m), 長さスケールとして平均水深 (h) を用いて無次元化して行う. このとき, 計算結果から無次元圧力勾配が得られ, この値を用いて各物理量の有元値を求めた.

数値計算のアルゴリズムは河原らによる複断面流れの3次元解析¹¹⁾と同じであり, 放物形流れによる近似のもとに基礎式をコントロール・ボリュームについて積分したのち離散化し, 離散化式の解法には Patanker-Spalding の SIMPLE 法¹²⁾を用いた.

3. 樹木群による湾曲流の流況変化

3. 1 主流速コンター, 断面内2次流ベクトル

ここでは, 数値シミュレーション結果を用いて, 外岸側に樹木群がある場合とない場合の湾曲流の流況を比較する. 樹木群は外岸に沿って流下方向に一樣に存在するものとし, 以下の計算ではその横断幅は0.2B

(B :水路幅で、 $B=10h$)、湾曲流路の内岸の曲率半径 r_{in} は $10B$ とした。

図1は主流速 (U/U_m , U_m :平均主流速) の等値線図であり、無次元植生パラメータ C^* ($=C_D \lambda l_0$, l_0 :植生高さ) を $C^*=0$ (樹木群なし), $C^*=0.01$, 0.1 と変えて比較した。また、図2は水路横断面内の2次流ベクトル図 (平均主流速 U_m で無次元化) で C^* を同様に変えて示したものである。図1より、 $C^*=0$ (樹木群なし) では、図2に見られるよう水面付近で外岸向き、底面付近で内岸向きの2次流によって流心が湾曲外岸に偏り、いわゆる湾曲部特有の流況を示している。2次流セルが横断面全体で生じることによるこうした流況は湾曲部外岸での河床洗掘を産み、水衝部の発生の引き金となることが多い。

一方、 $C^*=0.01$, 0.1 と大きくなるにつれて、外岸に生じた流心は流路中央付近へと移動し、とくに、 $C^*=0.1$ の場合では樹木群内の2次流はきわめて微弱になり、樹木群外の主流場でセル構造が閉じるようにも見られる。こうした断面内2次流ベクトルの特徴は福岡らの水理実験¹⁾ からも見出されている。図3は $C^*=0$, 0.01 , 0.1 の場合について底面せん断応力 (断面内の最大せん断応力値で無次元化) の横断分布を示したもので、 C^* の増加に伴い最大せん断応力が生ずる横断位置も流路中央で移行していく。

以上から、湾曲外岸に樹木群を配置することで、流心を流路中央に移行でき、湾曲部固有の流況は外岸侵食の観点からは改善される可能性が認められた。

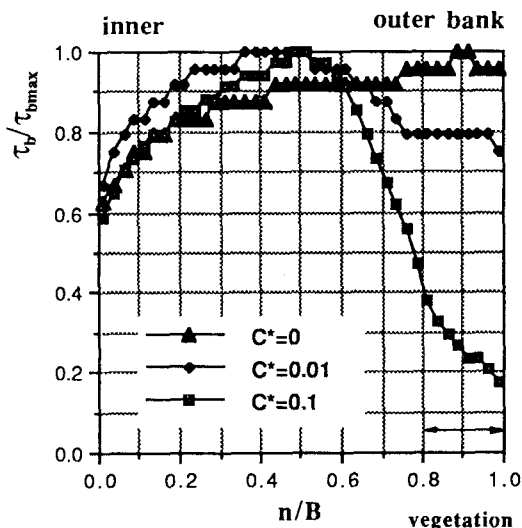


図3 底面せん断応力の横断分布

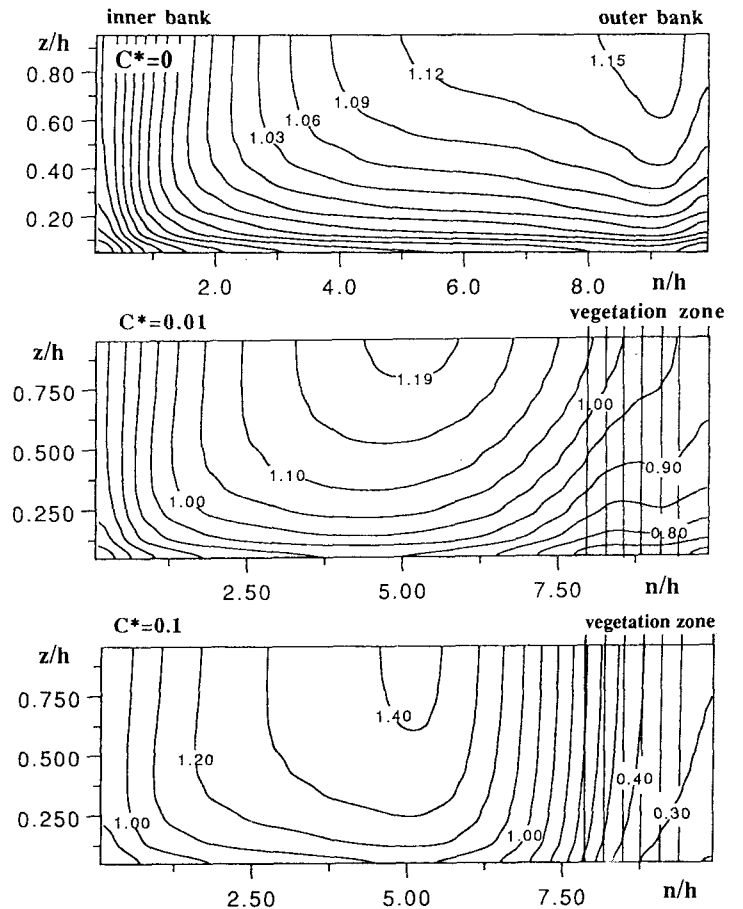


図1 主流速等値線図

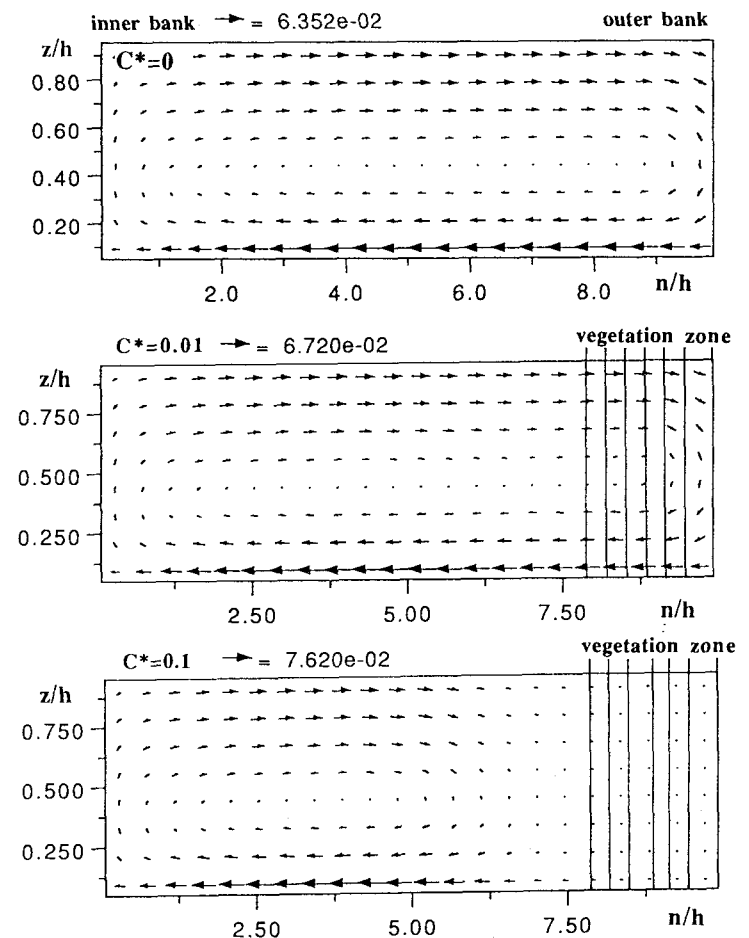


図2 横断面内2次流ベクトル図

3. 2 水深 - 流量曲線の評価

樹木群を湾曲外岸に配置したことにより、断面平均水深がどのくらい上昇するかを知っておくことは疎通能力評価のために重要である。そこで、数値計算から水理実験レベルの条件のもとに樹木群を配置した場合の水深・流量関係と水位上昇分を評価してみる。図4は水深・流量曲線で、水路勾配1/500、無次元植生パラメタ C^* を与えて求めたものである。また、図5は、同様に水路勾配1/500のもとに無次元植生パラメタ C^* を与えて単位幅流量 q (cm^2/s)に対する水位上昇分 Δh の関係を求めたものである。これらから、例えば、 $C^*=0.1$ の樹木群を湾曲外岸沿いに配置した場合（樹木群幅は $0.2B$ 、曲率半径 r は $10B$ ）、単位幅流量 $q=400\text{cm}^2/\text{s}$ （水深 10cm 、平均流速 40cm/s 程度）では水位上昇分が 1cm 程度と評価される。こうした数値計算法の援用から、樹木群による流況改善と疎通能の評価がなされ、適切な条件設定を得るための指針が得られる。

3. 3 底面近傍の主流速、掃流力の評価

樹木群を伴わない場合の一樣湾曲流れについては従来より多くの検討がなされてきた^{13), 14)}。ここでは、主流速横断分布、掃流力分布の評価を、まず、樹木のない一樣湾曲流れについて行い、従来より指摘されている知見と数値計算結果とを比較し、次いで樹木群によってそれらがどのように変化するかを示す。

主流速の横断分布については2次流の完全発達域で強制渦型分布が成り立つことが知られており^{14), 15)}、次式のように書ける（ r_c は流路の中心曲率半径）。

$$\frac{U_m(n)}{U_m(n=B/2)} = \frac{r}{r_c} \quad (11)$$

主流速の横断分布が分かれば、河床せん断応力 τ_b は次式から求められる。

$$\tau_b = \frac{\rho}{2} C_f U_m^2 \quad (12)$$

ここに、 C_f は摩擦係数である。図6は樹木のない主流速の横断分布を比較して見たもので、側岸部付近の流速低減領域を除いて式(11)と数値計算結果は良い対応を示している（ここでは底面近傍での主流速値を用いて比較した）。とくに、流路中央から外岸側流心の付近まで式(11)で評価可能なことは従来の解析の妥当性を示している。図7は樹木群の存在による底面近傍の主流速横断分布の変化を示したものであり、樹木群外でも流路中央付近で強制渦型分布が成り立つようである。図8には強制渦型における河床せん断応

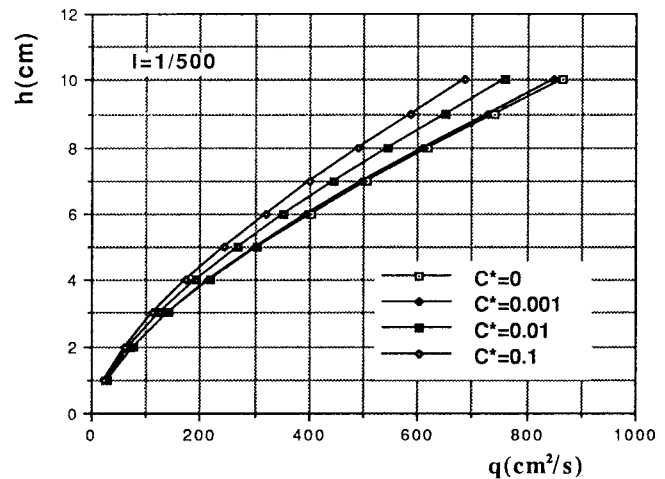


図4 水深－流量曲線

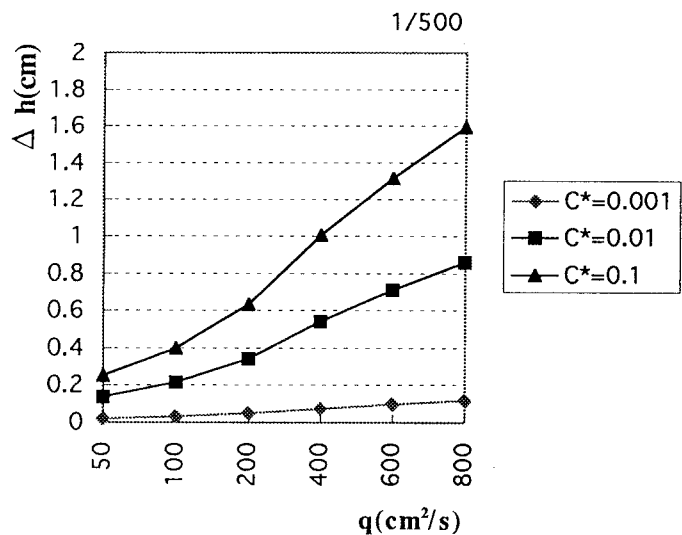


図5 単位幅流量に対する水位増分

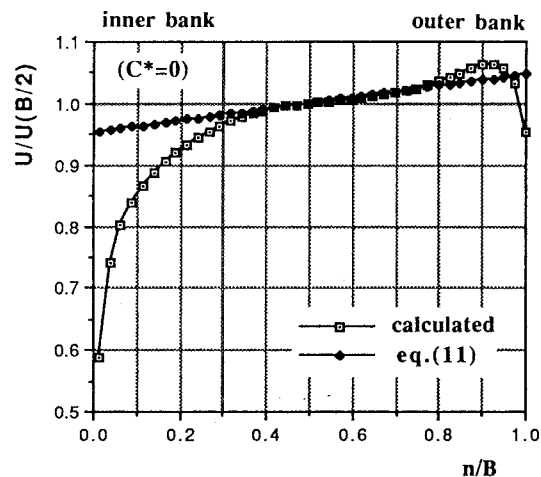


図6 主流速の横断分布（樹木なし）

力分布（式（11）及び式（12））と、数値計算結果を示した。

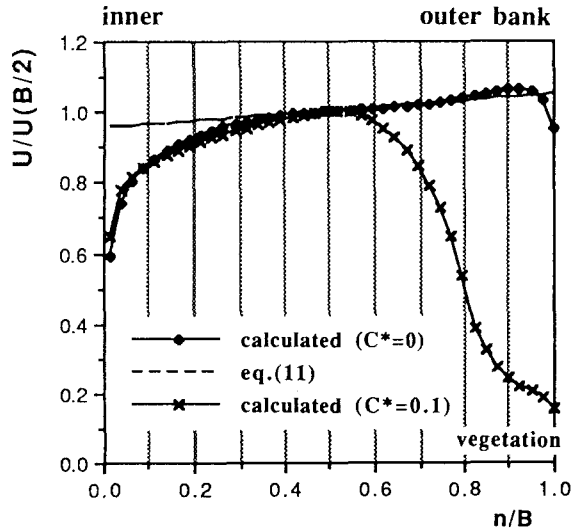


図7 主流速の横断分布の比較

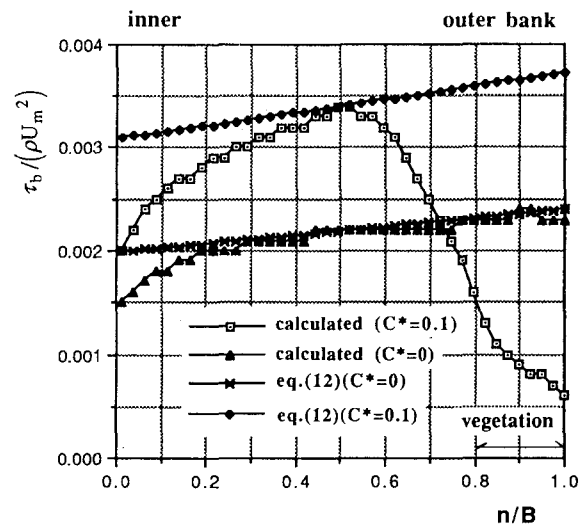


図8 底面せん断応力の横断分布の比較

4. 平衡横断面形状の推定

ここでは、数値計算から求められた流れ場の情報のもとに平衡横断面形状の推測を行う。2次流の存在から主流の偏向によって横断面形状が形成されると、横断勾配は横断方向の砂の移動を抑制する。砂の運動方向角 ϕ とすれば、 $\tan \phi$ については掃流砂の運動方程式をもとに次式が導かれている¹⁵⁾。

$$\tan \phi = \frac{\tan \theta_n}{\sqrt{\mu_d T_*}} + \Gamma, \quad T_* \equiv \frac{C_d A_2}{2 A_3} A_*^2 \tau_*, \quad \Gamma \equiv \left(\frac{V}{U} \right)_{\text{bed}} \quad (13)$$

ここに、 μ_d ：掃流砂の動摩擦係数、 θ_n ：河床の横断勾配角、 C_d ：砂の抗力係数、 A_2 、 A_3 ：砂の形状係数、 A_* ：底面付近の流速係数、 τ_* ：無次元掃流力である。砂の運動方向角 ϕ がゼロとなれば横断面形状の変化は無くなるので、式（13）より、

$$\tan \theta_n = -\sqrt{\mu_d T_*} \cdot \Gamma \quad (14)$$

が動的平衡形状を与えることになる¹⁶⁾。横断勾配は次式で与えられるから、

$$\tan \theta_n = -\frac{\partial z}{\partial n} \quad (15)$$

平衡横断面形状は、

$$z(n) = z(n_0) + \sqrt{\mu_d} \int_{n_0}^n \sqrt{T_*} \cdot \Gamma \cdot dn \quad (16)$$

で与えられる。すなわち、底面での横断・流下方向流速比 Γ と掃流力が評価されれば動的平衡形状が求められるフレームワークとなっており、池田らの解析¹³⁾も同様な定式化となっている。そこで、樹木群がある場合とない場合とで、動的平衡横断面形状がどのように異なるかを推定してみる。

図9は底面での横断・流下方向流速比 Γ を比較したもので、樹木群に近づくにつれて2次流の低減により Γ 値は急激に減少する。これは式（14）からすれば横断河床勾配が緩やかになることに他ならない。実際、流れの数値計算結果を用いて、式（16）を数値積分すると平衡横断面形状が図10のように推定される（計算条件は路床勾配1/500、 $q=250\text{cm}^2/\text{s}$ で、樹木群は $C^*=0.1$ とし、樹木がない場合での最大洗掘深で無次元化している）。図10より洗掘が抑制され、樹木群の水制効果が発揮されることがわかる。

5. あとがき

本研究では樹木群の水制効果を期待する一つの例として、湾曲部外岸沿いに樹木群がある場合を想定し、湾曲部特有の流況特性や動的平衡横断面形状が治水においてどのように改善されるかを数値計算より検討した。

樹木群は透過水制の働きをもつが、透過水制を設置しても経年の土砂堆積などにより埋没する例も少なくな

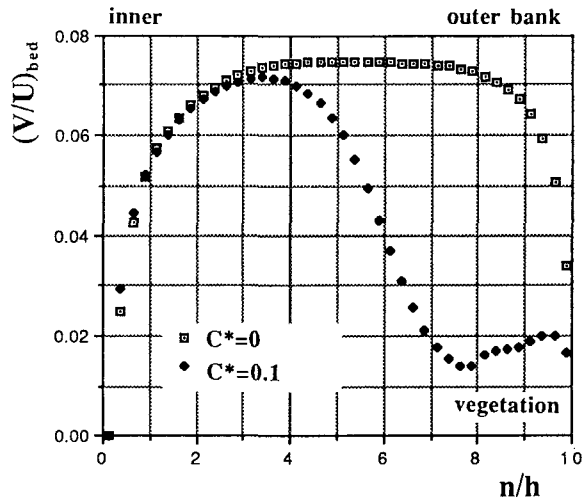


図9 横断・流下方向流速比の横断分布

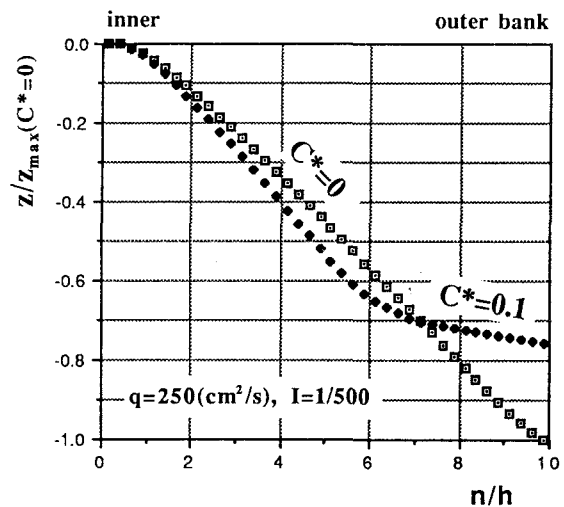


図10 推定された動的平衡横断面形状

い。一方、こうした土砂堆積域は植生を育む環境を与え、植生が繁茂することで洪水時での透過水制機能を確保できる可能性もある。こうした観点から樹木群水制の水理学的機能評価を今後さらに進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 福岡捷二・渡邊明英・大橋正嗣・姫野至彦：樹木群の水制的利用可能性の研究，水工学論文集，第41回，pp.1129-1132，1997.
- 2) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：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) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：水路横断面内に植生帯を伴う流れ場の数値計算，水工学論文集，第36巻，pp.265-272，1992.
- 4) 藤田光一・福岡捷二：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.
- 5) 辻本哲郎・北村忠紀：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.
- 6) 池田駿介・太田賢一・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.
- 7) 清水義彦・辻本哲郎・小葉竹重機：平衡植生流と浮遊砂輸送に関する数値計算，水工学論文集，第41巻，pp.845-850，1997.
- 8) 池田駿介・田中昌宏・千代田将明：空気蛇行流の乱流特性に関する研究，土木学会論文集，No.351/II-2，pp.77-86，1984.
- 9) 福岡捷二・西村達也・三宮武・藤原剛：緩傾斜河岸を設置した河道湾曲部の流れと河床形状，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.155-167，1995.
- 10) W. Rodi：Turbulence models and their application in hydraulics，IAHR publication，pp.29，1984.
- 11) 河原能久・玉井信行：複断面開水路流の三次元数値解析，第31回水理講演会論文集，pp.425-429，1987.
- 12) スハスV. パタンカー（水谷幸夫・香月正司訳）：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，198p.，1985.
- 13) 池田駿介：移動床河川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.
- 14) 吉川秀夫・池田駿介・北川明：湾曲水路の河床変化について，土木学会論文報告集，第251号，pp.65-75，1976.
- 15) Tsujimoto, T. and T. Fukushima：Three dimensional sand bed instability due to bed load motion. Memories, Faculty of Technology, Kanazawa University, Vol.19, No.1, pp.13-23, 1986.
- 16) 辻本哲郎：漸拡・漸縮を繰り返す流路における流砂量と河床変動，水理講演会論文集，第31回，pp.713-718，1987.