

II-183

植生水路の遷移過程に関する数値計算

群馬大学大学院 学生員 小山 真史
群馬大学大学院 学生員 甲斐 誠士

建設技術研究所 正 員 稲葉 修一
群馬大学工学部 正 員 清水 義彦

1. はじめに

近年、洪水時における疎通能力の評価はもとより、近自然河川工法や河川敷の環境整備の要請から河川植生の水理研究が盛んに行われている。その中で植生流れの研究は実験、数値計算を問わず、十分発達した等流場を対象としたものが多く、植生群落による流れの不等流効果、例えば非植生域からの流れが植生域の等流区間に達するまでの遷移過程を知ること、こうした要請に備える河川水理の知識として必要である。本研究は植生の形状抵抗を基礎式に考慮した平面二次元流解析を行い、非植生域から植生域の等流区間に達するまでの遷移過程を数値計算して、その平均的な流れ場を明らかにすることを目的としている。

2. 基礎式

実河川のスケールからすれば水深は河道幅に比べてきわめて小さく、水深スケールでの流れの構造は平均化して平面二次元流解析できる場合がある。とくに、植生が存在すると、横断面内での運動量交換が卓越し、流れ場が二次元的になることも実験的な検討から明らかにされている。そこで、著者ら¹⁾が提案しているように植生の形状抵抗を考慮した基礎式を平面二次元のフレームで求めると以下ようになる。

連続式および流下、横断方向の運動量式：

$$\frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho h U^2 - \rho h v_t \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho h W U - \rho h v_t \frac{\partial U}{\partial z}\right)$$

$$= \left[-\rho g h \frac{\partial(h+Z_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho h v_t \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho h v_t \frac{\partial W}{\partial x}\right) \right] - \left(\rho C_f + \frac{1}{2} \rho C_d \lambda h \right) U \sqrt{U^2 + W^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho h W U - \rho h v_t \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho h W^2 - \rho h v_t \frac{\partial W}{\partial z}\right) \quad (2)$$

$$= \left[-\rho g h \frac{\partial(h+Z_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho h v_t \frac{\partial U}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho h v_t \frac{\partial W}{\partial z}\right) \right] - \left(\rho C_f + \frac{1}{2} \rho C_d \lambda h \right) W \sqrt{U^2 + W^2}$$

ここに、 U, W ：流下 (x)、横断 (z) 方向の時間平均流速、 h ：水深、 ρ ：水の密度、 Z_b ：基準面からの高さ、 C_f ：河床の摩擦係数、 C_d ：植生粗度の抗力係数、 λ ：植生の密生度（流体の単位体積あたりに占める植生の遮蔽面積）である。また、 v_t は乱流渦粘性係数で、これを1方程式モデルから与える（ k ：乱れエネルギー、 ε ：乱れエネルギーの逸散率）。

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = C_{\varepsilon d} \frac{k^{3/2}}{L}, \quad L = \alpha h \quad (3)$$

ここで、 C_μ は定数で0.09をとし、乱れの長さスケール L は灘岡ら²⁾に倣い、水深と関連づける。従って、 v_t を求めるための未知量は乱れエネルギー（ k ）となり、これについては次式の k の輸送式を解く。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho h U k - \rho h \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho h W k - \rho h \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) = P_k + P_{kv} + h C_{fk}(F_x U + F_z W) - \rho h C_{\varepsilon} \varepsilon \quad (4)$$

$$P_k \equiv \rho h v_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right] \quad P_{kv} \equiv \rho C_{kv} u_*^3$$

ここで P_k ：乱れエネルギーの生成項、 P_{kv} ：Rastogi-Rodi³⁾によるモデル化で、底面摩擦による乱れエネルギーの生成項（ u_* は摩擦速度）を示す。一方、 F_x, F_z ：植生による形状抵抗を表し、形状抵抗による乱れエネルギーの生成を仕事の概念を用いて定式化する¹⁾。

$$F_x \equiv \frac{1}{2} \rho C_d \lambda h U \sqrt{U^2 + W^2}, \quad F_z \equiv \frac{1}{2} \rho C_d \lambda h W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (5)$$

3. 遷移過程の数値計算

基礎式をコントロールボリュームで積分したのち、スタaggerド格子を用いて離散化し、SIMPLE法より圧力場（水深）と流速場を求める。計算対象とする流れ場は、全く植生のないところから、水路側岸領域を植生域とする区間へ流れが流入する場とする。植生域では植生による形状抵抗を与え、非植生域ではこれらを見捨てる。図1、2は金沢大学で行われた実験（水路幅40cmのうち植生域の幅は12cmで十分発達して地点でのみ計測が行われた）と同じ条件で計算を行ったもので、主流速とレイノルズ応力の計算値と実験値の比較が示してある。また、図3は京都大学に行われた同様な実験に対応して計算されたものである。ともに、実測値との対応は良好で、レイノルズ応力分布については若干計算値が小さくなるものの、分布の傾向はうまく再現しており、モデルは平均流速場を記述できることがわかる³⁾。

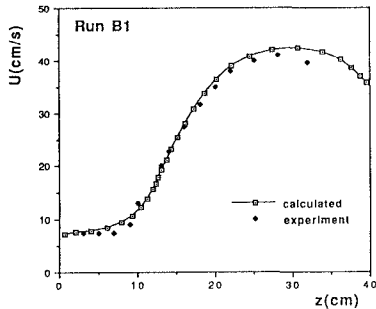


図1 主流速分布の比較（等流場）

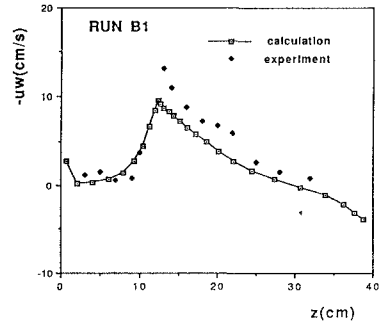


図2 レイノルズ応力分布の比較（等流場）

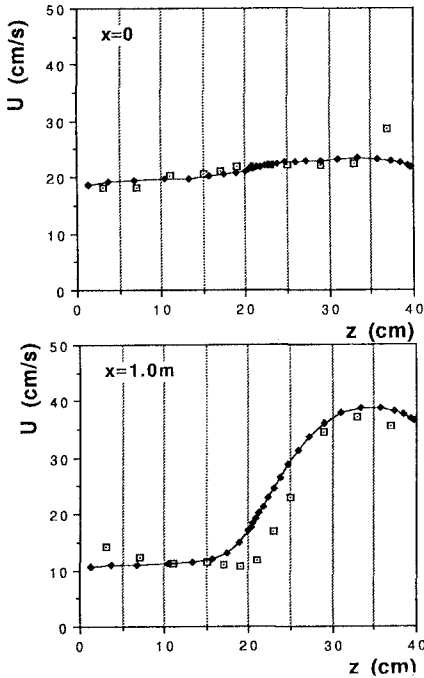


図3 主流速分布の遷移過程

本研究を進めるにあたり、東京大学工学部・河原能久助教授に有意義なご助言をいただきました。
 注) 用いたパラメータの値を以下である。乱流モデル定数； $C_{\mu}=0.09$, $C_{\epsilon d}=0.17$, $\sigma_k=1.0$, $C_k=1$
 $/C_{\epsilon k}^{1/2}$ （以上は乱流モデルの標準値）， $\alpha=0.4$ ，植生の形状抵抗に関する定数； $C_d=1.0$, $C_{\epsilon k}=1.0$
 参考文献1）清水・辻本・中川：土論447/II-19, pp.35-44, 2）灘岡・八木：土論473/II-24, pp.35-44,
 3）Rastogi-Rodi：Proc.ASCE, Vol.104, HY3, pp.397-420.