

植生帯や高水敷を伴う流れの特性と数値計算

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

金沢大学工学部 ○泉 倫光

1. まえがき 近年、河川敷や高水敷、河道内の植生をむやみに撤去しないだけでなく適切な群落制御で環境機能のみならず治水機能を期待する向きもあるように見受けられる。景観や嗜好だけで河道に植生をアレンジするのではなく、的確な河川水理学的評価が必要と考えられ、本研究で河道断面と其中的の植生の配置が流れの構造をどのように変えるかを数値計算で検討するものである。すなわち、2方程式乱流モデルを用い、植生の抗力とそれによる乱れエネルギー生成・逸散の増加を計算に取り込む。

2. 植生を含む流れの計算 清水・辻本・中川¹⁾は植生層上の流れをk-ε乱流モデルを用いて解析するに当たり、空間平均されたReynolds方程式と乱れエネルギー、乱れの逸散率の輸送式に植生の形状抵抗による付加項を加味した。

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \varepsilon + C_{Rk} (F_x U + F_y V) \quad (1)$$

$$U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{1\varepsilon} \{ P_k + C_{R\varepsilon} (F_x U + F_y V) \} - C_{2\varepsilon} \varepsilon \right] \quad (2)$$

ここに、(U, V): 流下方向、鉛直方向の流速成分、 $v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$: 渦動粘性係数、 ν : 動粘性係数、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れの散逸率、 P_k : 乱れの生成率で、新たに導入した数値パラメータ C_{Rk} , $C_{R\varepsilon}$ 以外の数値パラメータ ($C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$) には標準値を用いる。

また、水路横断面内に植生群落を伴う流れについて、清水・辻本・中川²⁾は応力代数モデル (ASM) を用いた流れの3次元解析を行った。流下方向流れが卓越するとして基礎的に放物形流れの近似を施すと、支配方程式群は、

$$\frac{\partial}{\partial x} (U^2) + \frac{\partial}{\partial y} (VU - \Gamma \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (WU - \Gamma \frac{\partial U}{\partial z}) = g \sin \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (UV) + \frac{\partial}{\partial y} (V^2 - \nu \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (WV - \nu \frac{\partial V}{\partial z}) = g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (UW) + \frac{\partial}{\partial y} (VW - \nu \frac{\partial W}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (W^2 - \nu \frac{\partial W}{\partial z}) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_z + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zz}}{\rho} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Uk) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V_k - \left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ W_k - \left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} = P_k + C_{Rk} (F_x U + F_z W) - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (U\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V\varepsilon - \left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ W\varepsilon - \left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} = \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{1\varepsilon} \{ P_k + C_{R\varepsilon} (F_x U + F_z W) \} - C_{2\varepsilon} \varepsilon \right] \quad (7)$$

となり、ここに、 W : 時間平均された横断方向 (z) の流速成分、 P, P' : 断面平均圧力 (静水圧近似) とそれからの圧力偏差、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 $\Gamma = \nu + v_t$, F_x, F_z : 植生粗度によるx, z方向の単位質量あたりの形状抵抗で、 C_{Dx}, C_{Dy}, C_{Dz} を形状抵抗係数として次のように書ける。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \lambda U \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad ; \quad F_y = \frac{1}{2} C_{Dy} \lambda V \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad ; \quad F_z = \frac{1}{2} C_{Dz} \lambda W \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (8)$$

また、Launder-Yingモデル³⁾により、

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = v_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad ; \quad \frac{\tau_{xz}}{\rho} = v_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad ; \quad \frac{\tau_{yz}}{\rho} = C v_t \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\tau_{yy}}{\rho} = C v_t \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C_k k \quad ; \quad \frac{\tau_{zz}}{\rho} = C v_t \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 - C_k k \quad (10)$$

によってReynolds応力が表現される。乱流モデルにおける定数はLaunder-Yingモデル³⁾による標準値とする。

3. 植生層上の流れへの適用と付加の数値パラメータの同定 図1はASM計算のメッシュで水路断面内に任意に植生域 (および不浸透領域、たとえば高水敷) を配置できる。そこで、まず水路底が全幅高さK、密生度 $\lambda = D/s^2$ の

植生で覆われている場合を考える。この状況は上記の2つの方法で（簡単のためそれぞれ単に $k-\epsilon$ 、ASMモデルと呼ぶ）計算できる。計算においては植生の形状抵抗による付加項のために導入した2つの数値パラメータ C_{Rk} 、 $C_{R\epsilon}$ について、2つの方法の計算で同一の値を用いるという条件で清水ら⁴⁾の実験結果を良く再現できるようにこれらの値を定めることとした。その結果 $C_{Rk}=1.0$ 、 $C_{R\epsilon}=1.3$ と決定した。図2には流速分布、Reynolds応力分布を示した。

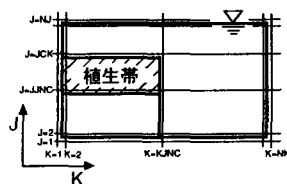


図1 ASM計算のメッシュ

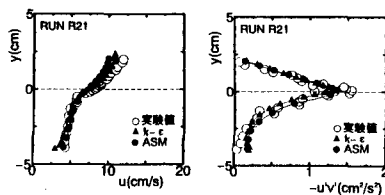


図2 植生に覆われた路床上の流れ

の値を定めることとした。その結果 $C_{Rk}=1.0$ 、 $C_{R\epsilon}=1.3$ と決定した。図2には流速分布、Reynolds応力分布を示した。

4. 植生帯を伴う流れ 断面内に植生帯を伴う流れでは低周波変動が現われ⁵⁾運動量の横断混合機構がASMの様な乱流モデルで表すのが適当否か議論の予知があるが、植生帯が側岸よりに存在する場合と、水路中央に存在する場合について、計算結果⁶⁾と実験結果の比較を行なった。ASMによる計算結果は水深平均し、中央水深で小型電磁流速計での測定値とを図3に比較した（主流速、横断方向Reynolds応力 $-u'w'$ および乱れ強度 u_{rms} 、 w_{rms} の横断方向分布）。図によると、両者の対応はほぼ良好と言える。

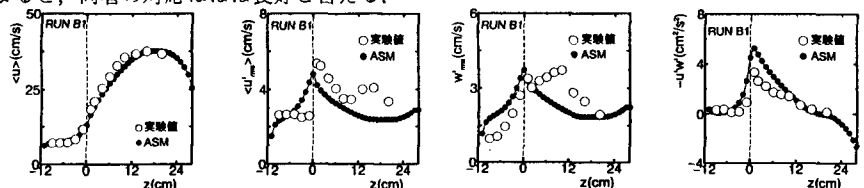


図3 側岸に沿って植生帯を伴う流れ

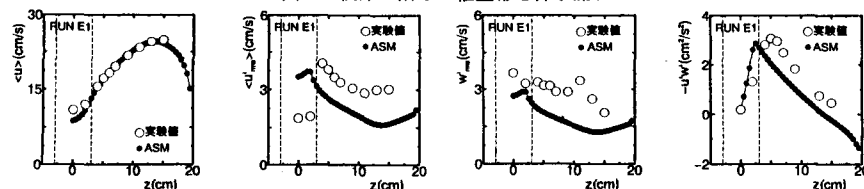


図4 水路中央に植生帯を伴う流れ

5. 複断面水路で植生を伴う流れ 実際の河川では植生帯域に土砂が堆積し河川敷が形成されるし、複断面河道の低水路よりに植生が縦断帯状に繁茂している例も多い。水理実験では菅・中井ら⁷⁾の興味深い実験例がある。ここではそれを計算で再現し、図5に水深平均された主流速、横断方向Reynolds応力 $-u'w'$ および乱れ強度 u_{rms} 、 w_{rms} の横断方向分布を示す。実験結果は植生帯幅を変えた2ケースであるが、乱れ特性量の計測は行なわれていないので実験との比較は平均流速のみとなっているがASM計算は流れの特徴を的確に再現できているようである。

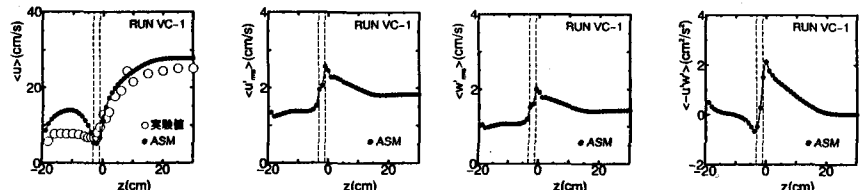


図5 高水敷の低水路よりに植生帯を伴う流れ

6. あとがき 本研究では、植生を伴う流れについての $k-\epsilon$ モデル、ASMによる数値計算について検討し、形状抵抗による付加項にかかわる数値パラメータを2つのモデルで共通に同定した。また、従来の実験との対応を検討することにより、断面内で植生、地形がさまざまに組み合わせられたケースでの流れを予測する見通しがたつた。

参考文献： 1) 清水・辻本・中川：土木学会論文集，447/II-19，1992。 2) 清水・辻本・中川：水工学論文集，36，1992。
3) Launder, B.E. & W.M. Ying: Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.187, 1973。 4) 清水・辻本・中川・北村：土木学会論文集，447/II-19，1991。 5) 辻本・北村：水工学論文集，36，1992。 6) Tsujimoto, T. & T. Kitamura: KHL Comm., Kanazawa Univ., Vol.3, 1992。
7) 佐久・野崎・濱谷・中井・菅：水工学論文集，35，1991。