

植生を有する流れ場の遷移過程に関する研究

京都大学工学部 正 員 中川博次
 建 設 省 正 員 佐藤寿延
 京都大学工学部 学生員 石橋基之

1.はじめに 最近、河川にける環境機能の向上が重要視されている。植生も河川環境を構成する要素の一つとして重要なものであるが、疎通能力の低下などを生じ、治水面に与える影響は大きく、このような環境、治水の両面に対し調和をはかることが必要である。従来、植生を有する等流場における研究が行われてきたが、実際の河川を考えると等流状態を維持するほど長い区間植生群落があるのとは別に、植生層を有する流れが発達する過程の研究も必要と思われる。本研究においては模擬植生を用いて乱流計測を行いその乱流特性を検討するとともに、 $k-\epsilon$ モデルを用いて計測値の再現性を検証した。

2.実験方法 模擬植生の特性は、6-6ナイロン製で高さ4.1cm、直径0.1cm曲げこわさ $6.4 \times 10^2 \text{ gf/cm}^2$ であり、水中での固有振動数は2.4Hzである。このような模擬植生をアクリル板上に1cmの正方格子を形成するように直立に植え付け植生粗度を形成した。実験は、幅50cm、長さ12mの勾配可変型直線水路で行われ、その上流側6mにアクリル板よりなる滑面を、下流6mに植生粗度を設置し、粗度急変点（以下単に急変点と呼ぶ）より上流に40cm、下流に250cmの区間の流速を計測することによりその遷移過程の特性を明らかにしようとした。計測には、hot-film流速計を用い、データの収録条件は、sampling周波数200Hz、sampling個数8192個である。

3.実験結果 図-1～2に平均流速分布（流下方向）、Reynolds応力分布の流下方向変化（図にプロットされた点が計測値、下段は急変点近傍の拡大図）を示す。これより、急変点の直後に流速のくびれ、つまり、流速勾配が負となる点が生じ、そのような領域においては、Reynolds応力も負となることがわかる。このことは、渦動粘性モデルのような勾配拡散型の輸送形式が成立していることを示す。また、図-3に表面流についてのみ流速を片対数で整理した図を示す。同図より流速勾配の折れ点が徐々に水面方向に発達することがわかる。これは境界層の境を示していると考えられる。Reynolds応力分布にも同様に折れ点が見れ、この折れ点を延長することにより境界層の遷移長を求めた。水深で無次元した遷移長とフルー

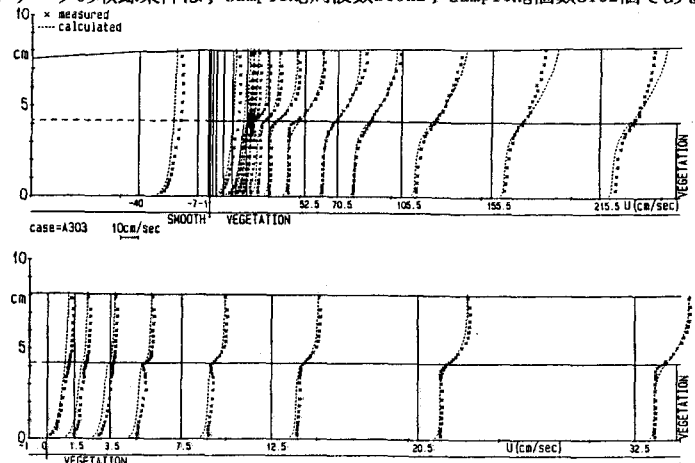


図-1 平均流速分布の流下方向変化

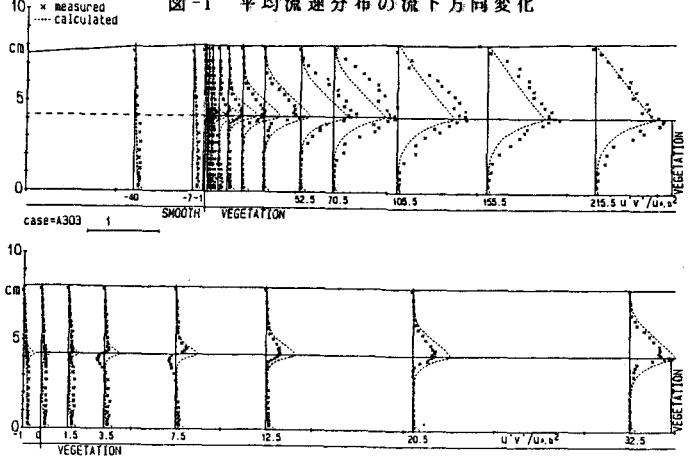


図-2 Reynolds応力分布の流下方向変化

ド数との関係を図-4に示す。これより、無次元遷移長は水理条件によらずほぼ17-23の一定値をとることがわかる。

4. $k-\varepsilon$ モデルを用いた計算方法 粗面上の乱流場を数値計算する場合、流れに対する障害物の形状を差分格子網の中に取り組めば解けるはずである。しかし、本研究で取り扱った植生粗度のように複雑な形状を持つものは容易に差分格子網に取り組むことはできない。また植生層内部や透過水制内の流れは鉛直2次元では取り扱えない。そこで、粗度形状を差分格子網に取り入れるのではなく、Wilson and Shaw¹⁾らが示したように、基礎式の中に粗度による形状抵抗の効果を抗力係数を用いて導入する。

以下に形状抵抗項を付加した基礎式を示す。下線部が形状抵抗項である。図-5に今回計算した計算格子を示す。植生層内部には形状抵抗を付

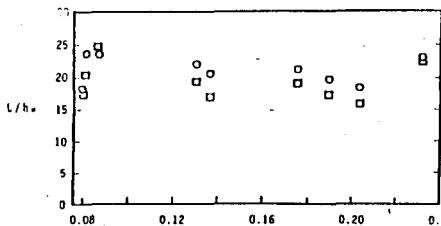


図-4 無次元遷移距離とフルード数との関係

□ レイノルズ応力分布より求めた遷移長
○ 流速分布より求めた遷移長

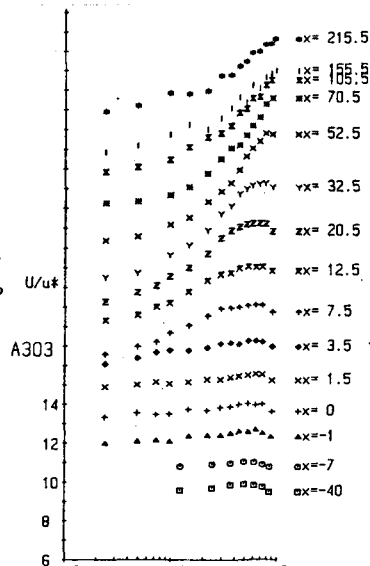


図-3 平均流速分布 (片対数表示)

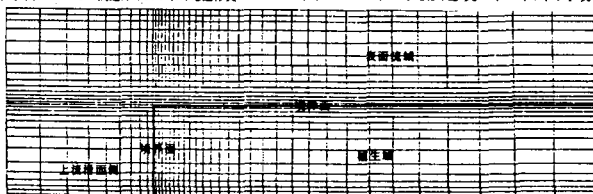


図-5 計算格子の配置

$$\frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = \varepsilon_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho'}{\partial x} - F_x$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(2\Gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right)$$

$$\frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho'}{\partial y} - F_y$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\Gamma \frac{\partial V}{\partial y} \right)$$

乱れエネルギー(k)の輸送方程式

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right]$$

$$+ \rho_k - \varepsilon + C_{1k} (F_x U + F_y V)$$

透散率(ε)の輸送方程式

$$U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right]$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k} \{ C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon + C_{3\varepsilon} (F_x U + F_y V) \}$$

$$P_k = \nu_t \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \Gamma = \nu + \nu_t$$

連続式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$$

(U, V): 平均流の流下(x)・鉛直(y)速度成分, ρ' : 静水圧から偏差分
 F_x, F_y : 植生粗度によるx, y方向の形状抵抗, C_{0x}, C_{0y} をそれぞれの形状抵抗係数
 $F_x = (1/2) C_{0x} (D/s^2) U (U^2 + V^2), \quad F_y = (1/2) C_{0y} (D/s^2) V (U^2 + V^2)$

D/s^2 (D: 粗度直径, s: 配置間距離) は流体の単位体積中に占める粗度の遮蔽面積
 $\nu_t = C_\mu \cdot k^2 / \varepsilon$

$C_\mu (=0.09), \sigma_k (=1.0), \sigma_\varepsilon (=1.3), C_{1\varepsilon} (=1.44), C_{2\varepsilon} (=1.92), C_{0x} (=1.04)$
 $C_{0y} (=0), C_{1k} (=0.07), C_{3\varepsilon} (=0.16)$

5. 計算結果 図-1~2に平均流速分布とReynolds応力分布の計算結果(図中の破線)と計測値を示す。ともに細部の再現性には若干の問題はあるものの対応は良好で、概ねその傾向を計算値は再現しているといえる。すなわち、このように差分格子網の中に取り組めないほど複雑な形状を持つものに対しても、基礎式中に形状抵抗項を付加することによって数値計算が可能である。

参考文献

1) Wilson, N.R. and Shaw, R.H.: A Higher Order Closure Model For Canopy flow, J. appl. Meteorol. vol.16, pp.317-326

2) 岩田美幸(1990): 植生を有する場合における流れ構造に関する研究

京都大学修士論文