

京都大学工学部 正 員 中川博次

京都大学工学部 正 員 北村忠紀

京都大学大学院 学生員○藤井康嗣

1. まえがき

環境に配慮した河川整備を行う上で、植生を伴う流れの解明が望まれている。路床がある程度密な直立性植生層に覆われた流れは植生層境界のせん断に特徴づけられ、さらに植生が柔軟な場合、植生の組織の変形が下流方向に伝播する穂波現象が出現することが確認されている¹⁾。本研究では、穂波現象のような植生の揺動が流れにどのような影響をもたらすかという点に着目し、2成分熱線流速計を用いた乱流計測と $k-\epsilon$ 乱流モデルによる数値計算から植生の揺動が流れに及ぼす影響について考察した。

2. 実験方法

実験は、長さ12m、幅33cmの矩形断面直線水路の長さ6mの区間の路床に模擬植生層を設置し、そこに水流を導いて行われた。模擬植生層は、長さ10.4cm、直径0.026cmの塩化ビニール製繊維を流下方向、横断方向にそれぞれ0.16cm、0.3cm間隔で下端を路床に対して垂直に植え付けたものを用いた。なお、模擬植生を水中で自由振動させると過減衰状態を呈するが、固有周期は約1秒と推定された。2成分熱線流速計(Kanomax社製)による流速測定は、植生層を伴う流れが十分に発達した領域の水路中央部において、測定部の前後の区間の疑似等流状態を確認した後、行われた。熱線流速計からの出力はA/D変換機能を持つデータレコーダに、1測点につき200Hz、約50秒間収録された後、統計処理された。なお実験は、水深を植生高さの約1.5~2倍、路床勾配を1/1000~1/100の範囲で変えて行われた。

3. 計測結果

目視観測によれば植生は路床勾配や水深がより大きく、すなわち表面流の勢いが増せば、大きく組織的に揺動する。図1、2はそれぞれ平均流速 U 、Reynolds応力 $-\overline{uv}$ の計測結果の例である(Reynolds応力は $u_*^2 (= \sqrt{gh} I_e)$; g : 重力加速度, h : 植生層上のかぶり水深, I_e : 路床勾配)で無次元化している)。図より、流速分布は揺動状態に関わらず植生境界付近で変曲点を持ち、植生境界のせん断で特徴づけられる。またReynolds応力は揺動が小さい場合には表面流でほぼ三角形分布に従うのに対し、揺動が大きくなると三角形分布より欠損する。これは路床に倒伏して揺動する水草²⁾や粗レキ³⁾を伴う場合の特徴と類似しており、揺動に伴う付加的な運動量輸送の存在を示している(横断方向に位置を変えた計測において、計測値に明確な違いはみられなかったことから、定常的な2次流の影響はないものと考えられる)。

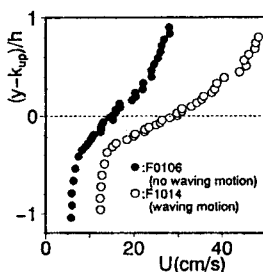
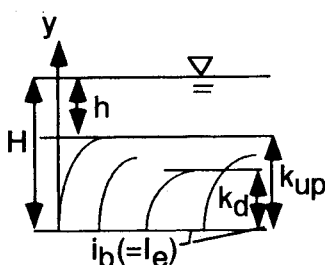


図1 平均流速分布

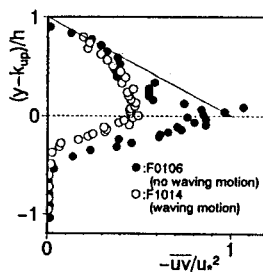


図2 Reynolds応力分布

4. 揺動に伴う植生層の変形を考慮した数値計算

では、揺動に伴う付加的な運動量輸送は何に起因するのでしょうか? 水路側壁からよく観察すると、植生の組織的揺動は植生層の不均一をもたらし、植生密度、植生層厚の空間変化を生じさせることがわかる。この効果を検討するために、近似的に個々の植生の変形を剛体棒の下部を中心とする回転運動で表現し、組織変形を次式のように表す。

$$\theta/\theta_0 = 1 + a \sin(2\pi x^*/L^*) \quad (1)$$

Hiroji Nakagawa, Tadanori Kitamura and Yasutsugu Fujii

ここで、 θ_0 : 植生の平均的な変形角、 $x^*=x/H$, $L^*=L/H$, L : 組織的変形の波長、 H : 路床からの全水深である。このとき、植生の組織的変形は図3のように模式的に書き、密生度の空間分布は例えば図4に示されるようである。こうした密生度、植生層厚の空間変化を考慮し、k- ϵ 乱流モデルによる数値計算を行った例が図5である。ここで、植生を考慮したk- ϵ モデルの定式化、数値計算の方法は清水ら⁴⁾に従っているが、抗力項については植生の傾きを考慮して若干補正している。図より、わずかではあるが場所により上昇・下降流が生じ、主流速分布が歪むことがわかるが、このことから植生密生度、植生層厚の空間変化が、植生境界でのせん断に起因した流速変動による運動量輸送以外にも強制的な運動量輸送を生じさせることが理解される。

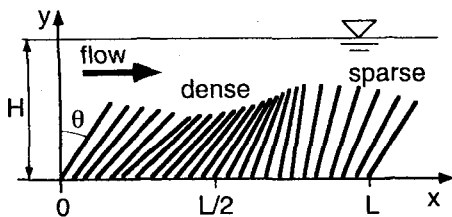


図3 植生の組織的変形

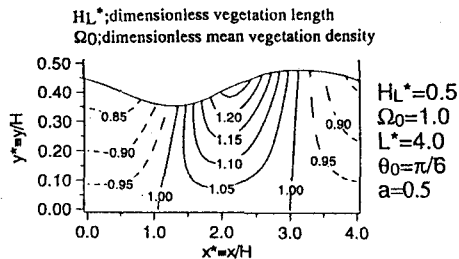


図4 植生密生度分布

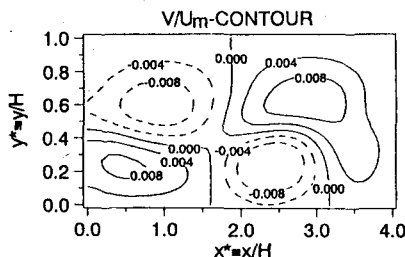
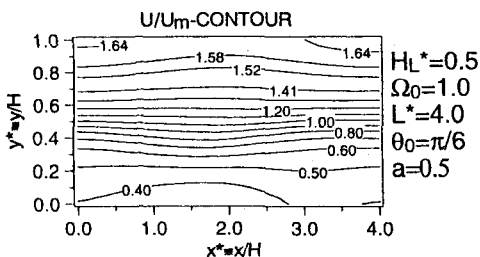


図5 植生密生度、植生層厚の空間変化を考慮したk- ϵ 乱流モデルによる数値計算結果

実際の穂波現象は組織変形が下流に伝播(移流)するため、上述の空間的な主流速分布の歪み、上昇・下降流による付加的な運動量輸送は、それらの空間平均されたもの(組織変形の移流性から時間平均に等しい)の効果として出現する。組織変形に起因する主流速分布の歪み、上昇・下降流を $u_s(x,y,t)$, $v_s(x,y,t)$ と書き、植生境界でのせん断に起因する流速変動 u' , v' と区別すると、トータルの運動量輸送は、次のように書ける。

$$\tau = -u_s v_s - \overline{u' v'} \quad (2)$$

一方、点計測で得られる時系列情報から、 u_s , v_s を分離せずに統計処理を行うと、

$$-\overline{u v} = -\overline{(u_s + u')(v_s + v')} = -\overline{u_s v_s} - \overline{u' v'} - \overline{u_s v'} - \overline{u' v_s} \quad (3)$$

となるために、上式の右辺第3, 4項の分だけトータルの運動量輸送と異なることになる。3. では u_s , v_s を分離せずに統計処理を行ったため、Reynolds応力が見かけ上欠損しているかのように表現されたものと考えられる。波流れ共存場のように、波動成分と乱れの周期が極端に異なるような場では、2つの異なる構造を有する流速変動成分を分離することは容易であるが、本研究の場合、 u_s , v_s はほとんど u' , v' と同一の周期成分であると考えられ、これらの分離は容易ではない。

5. あとがき

本研究では、植生の組織的揺動に起因して付加的な運動量輸送が生じることを乱流計測と揺動に伴う植生層の変形を考慮した数値計算から示した。計測面から、こうした付加的な運動量輸送を分離して取り扱うことは容易ではないが、今後工夫した計測から現象把握に努めたい。

参考文献

- 1) 例えば、辻本：水工学に関する夏期研修会，1991. 2) 室田・福原：土論，338，1983. 3) 中川・辻本・清水：土論，423/II-14，1990. 4) 清水・辻本・中川：土論，447/II-19，1992.