

II-300

植生開水路流れにおける底面せん断応力の評価

京都大学大学院 学生員 ○池谷和哉
京都大学大学院 正 員 瀬津家久
石川県 正 員 定免英樹

1. はじめに 従来、植生開水路流れにおいて、底面せん断応力は、単純に主流速分布から算出することが多い。しかし、底面せん断応力は2次流や Reynolds 応力などにも影響を受ける。そこで、流体混合が活性化される比較的かぶり水深の浅い植生開水路流れを対象とし、現在最高精度を誇る4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザー流速計(LDA)を用いて乱流計測を行い、植生開水路流れにおける、底面せん断応力の評価法について吟味した。

2. 理論的考察 運動方程式を積分すると底面せん断応力 τ_b を求める次式が得られる。

$$\tau_b = gHS + H \frac{d}{dz} (T - J) - \int_0^H F_x dy \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{H} \int_0^H (-uw) dy \quad (2)$$

$$J = \frac{1}{H} \int_0^H (UW) dy \quad (3)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \lambda C_d U \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (4)$$

ここに T は Reynolds 応力によるせん断応力、 J は2次流 W により横断方向へ輸送された運動量、 H は水深、 S は水路床勾配、 F_x は植生が流体に作用する力、 H_s は植生棒の長さ、 C_d は形状抵抗係数である。 λ は植生密度を示す。

式(1)を用いると底面せん断応力が理論的に求められるが、平均流速のみしか既知でないときは、Ludwig-Tillman の経験公式や対数則などの経験則が用いられる。Ludwig-Tillman の経験公式は、境界層流において流速分布の形状から摩擦速度を評価する方法である。

$$C_f = 2 \left(\frac{U_*}{U_{max}} \right)^2 = 0.256 \times 10^{-0.678K} \times Re_\theta^{-0.268} \quad (5)$$

ここに K は形状係数、 δ^* は排除厚、 θ は運動量厚、 C_f は壁面摩擦係数、 U_{max} は最大平均流速である。

$$Re_\theta = \frac{U_{max} \theta}{\nu} \quad (6)$$

$$K = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (7)$$

$$\delta^* = \int_0^H \left(1 - \frac{U}{U_{max}} \right) dy \quad (8)$$

$$\theta = \int_0^H \frac{U}{U_{max}} \left(1 - \frac{U}{U_{max}} \right) dy \quad (9)$$

対数則による評価方法は以下の対数則分布式に得られた流速分布を代入し、最小2乗法を用いることで求められる。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y U_*}{\nu} + A \quad (10)$$

ここに、 κ は Karman 定数、 A は積分定数である。

3. 実験装置および実験方法 図1に実験装置図を示す。本実験で使用した水路は全長10m、幅 $B=40$ cm の可変勾配型循環式直線水路である。水路側壁と下方から LDA を用いて高精度に3次元計測(u, v, w)を行った。植生モデルとしては、水路断面($B \times H=20$ cm)に高さ $H_s=5$ cm、直径 $D=2$ mm の真ちゅう製植生棒を設置した。植生棒は1辺が1cmの正方形格子状に配置した。実験条件としてはフルード数のみ0.10, 0.24, 0.40の3通りに変え(case FR1, FR2, FR4とする)、どのケースにおいても水深 $H=7$ cm に設定した。実験ケースおよび実験条件を表1に示す。

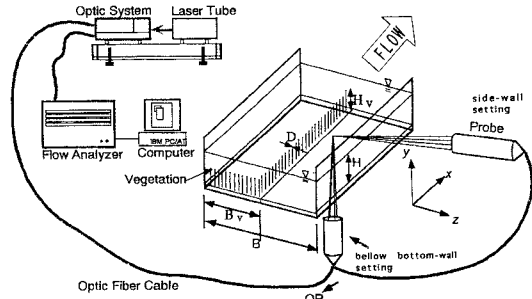


図1 実験装置
表1 実験条件

Case	Bed Slope S	Spacing of Vegetation S_v (cm)	Depth H (cm)	Discharge Q (l/s)	Froude Number Fr
FR1	1/3100	1.0	7.0	2.23	0.10
FR2	1/2700			5.50	0.24
FR4	1/2600			8.93	0.40

4. 実験結果および考察 図2に横断方向の Reynolds 応力 $-uw$ の等値線を示す。境界部の半植生高さ付近において最大値をとり、その大きさはフルード数の増加に伴い大きくなる。境界部付近では横断方向に変化が激しい。

図3に T, J および T/J の横断方向分布を示す。 T/J は植生領域側では境界に近づくにつれて徐々に増加し、境界部で明確な最大値をとる。そこから非植生領域側にむけて、ほぼ同じ勾配で低減している。

非植生領域側における底面せん断応力の横断方向分布を図4に示す。式(3)における C_d は、一様流中に円柱がある場合に得られる形状抵抗係数を第一近似として代用した。上からそれぞれ、運動量輸送解析、対数則および Ludwig-Tillman の経験公式によって評価された結果である。いずれの図も、縦軸は非植生領域側における底面せん断応力の横断方向平均値である。対数則による評価は、運動量輸送解析の結果と比較し、すべてのケースにおい

キーワード（植生開水路流れ、底面せん断応力、2次流、運動量輸送解析、レーザー流速計）
連絡先（〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL:075-753-5081 FAX:075-753-5066）

て良好に一致しており、波打つ状態でもかほぼ再現されている。このウェビー特性は2次流の影響によるものである。よって非植生領域において対数則を用いることで、底面せん断応力を良好に評価できることがわかった。

Ludwig-Tillman の経験公式による結果は大体的な傾向に関しては運動量輸送解析による結果と一致するが、ウェビー特性が再現されておらず、ケース間の相違もない。これはこの経験公式に2次流効果がまったく含まれていないことに起因し、これが欠点として挙げられる。よってこの2次流の効果や微妙な挙動の再現となると不安が残るのは否めない。以上の検討から、非植生領域側における底面せん断応力の評価としては、Ludwig-Tillman の経験公式を用いるよりも対数則を用いる方が信頼性は高いといえる。

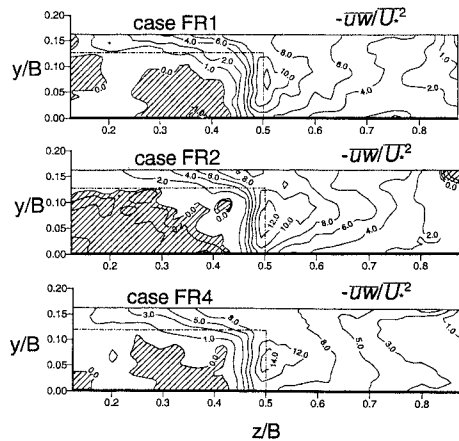


図2 横断方向の Reynolds 応力の等値線

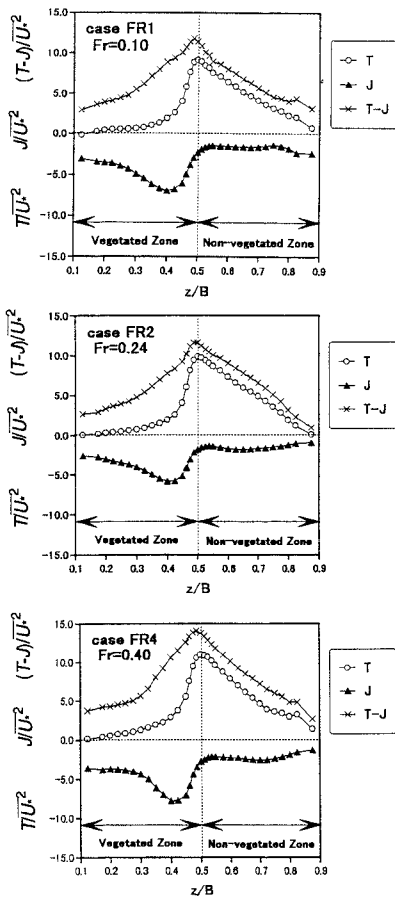


図3 T, J , および $T-J$ の横断方向分布

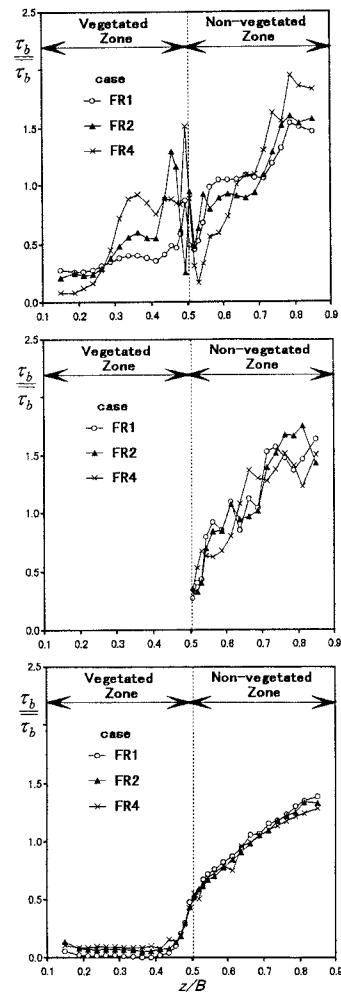


図4 底面せん断応力の横断方向分布

5. おわりに 本研究は植生開水路流れを対象として底面せん断応力の算定手法について考察を行ったものであり、今後より詳細に検討して行きたい。