

(II-88) ヨシ群落が繁茂した大型水路を用いた現地スケール実験と抵抗則の検討

建設省土木研究所河川研究室 正員 瀬崎智之・服部 敦・近藤和仁・藤田光一

1. 目的と概要

ヨシのような柔軟性に富んだ長い茎を有する植物が優占する群落の抵抗則を提案する。抵抗則は、山田ほか¹⁾の混合距離理論および室田ほか²⁾の茎変形を参考にして構築されている。その適用性(揺動した場合など)について、ヨシ群落を繁茂させた屋外大型水路での現地スケール水理実験に基づいて検討を行った。

2. 実験概要

最大流量 4.5m³/s が通水可能な幅 4m、高さ 2.5m、長さ 80m の水路に、山砂(シルト～細砂)を勾配 1/1,470 で敷設した後、ヨシを植え付けた。その 2 年後に表-1 に示す実験条件で Case1～6 の実験を行った。電磁流速計による平均流速・レイノルズ応力の水深方向分布の測定、水路側壁の観察窓から倒伏・揺動状況の観察、そしてヨシの形状・力学パラメータ(表-2 参照)の測定を実施した。また、葉・茎の抵抗について調べるために、一様流速分布中でのヨシ単体の倒伏実験および葉面の摩擦抵抗係数の測定も別途実施した。

3. 葉の影響を考慮したヨシ単体の抵抗モデル

流れを受けた葉は、下流方向になびく。その際、流れと逆方向に伸びた葉が、茎との接合部において、写真-1 に示すように帆を張るような形で茎に押しつけられた。この状況は、茎が下流方向に傾いても保たれた。この観察結果から葉の抵抗については、接合部での形状抵抗と葉先端での摩擦抵抗の 2 つに大別できると考え、式 (1) に示すようにモデル化した。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \left(C_D + C_{D_0} \frac{A_\theta}{2 \ell d} \right) d u^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \rho C_{f_0} \frac{A_\theta u^2}{\ell \cos \theta} \quad F_L = -\frac{1}{2} \rho \left(C_D + C_{D_0} \frac{A_\theta}{2 \ell d} \right) d u^2 \cos \theta \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 F_D と F_L は抗力と揚力 (z 軸方向の単位長さあたり)、 u は流速、 θ は茎の倒伏角度、 C_D, C_{D_0} は茎および葉の抗力係数、 C_{f_0} は葉面の摩擦抵抗係数である (A_θ, d, ℓ については表-2 参照)。実験より、 $C_D=1.0, C_{D_0}=0.095, C_{f_0}=0.015$ と定めた。式 (1) を用いると透過係数³⁾ K は式 (2) で求められる。

$$K = \left(\frac{g \rho u^2}{N F_D} \right)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 N は単位面積あたりの繁茂本数、 g は重力加速度である。

4. 平均流速・レイノルズ応力分布と植物倒伏のモデル

流れを受けて倒伏する(ただし揺動しない)一様な透過係数を有する植物群落を想定してモデル化を行う。群落内での渦動粘性係数 ν_t は、清水ほか⁴⁾を参考にして一定と仮定する。河床面に原点、下流方向に u 軸、鉛直上方に z 軸を有する座標を定義して、運動方程式を式 (3) で与える。

$$\nu_t \frac{d^2 u}{dz^2} - g \left(\frac{u}{K} \right)^2 + g i = 0 \quad (3)$$

ここで、 i は水面勾配である。河床面のごく近傍を除いて河床粗度の影響が植生に比較して無視できる場合、境界条件として $z \rightarrow -\infty$ で $u=K \cdot i^{0.5}$ 、 $du/dz=0$ を近似的に用いることができる。この境界条件のもとで、式 (3) を積分すると式 (4) が求められる。

$$\eta = \frac{z}{\ell} - 1 \quad u = \frac{u_0 \psi_0}{\chi} \left[3 \left(\frac{1+c e^{\eta}}{1-c e^{\eta}} \right)^2 - 2 \right] \quad \chi = \frac{u_0 \psi_0}{K i^{0.5}} \quad c = \frac{\sqrt{\chi+2}-\sqrt{3}}{\sqrt{\chi+2}+\sqrt{3}} \quad \alpha = \sqrt{\frac{2\chi}{F}} \quad \varepsilon = \frac{u_0 \psi_0 \nu_t}{\ell^2 g i} \quad (4)$$

ここで、 ψ_0, u_0 は $z=t$ (倒伏後の群落高さ) における流速係数と摩擦速度である。また、群落上 ($z \geq t$) での流速分布は、式 (5) (混合距離 = $\kappa(z-t) + L$ とした対数則¹⁾) で与える。

$$u = u_0 \left[\frac{1}{\kappa \ln \left\{ \frac{\kappa(z-t)+L}{L} \right\}} + \psi_0 \right] \quad (5)$$

ここで、 L は $z=t$ における混合距離、 κ はカルマン定数である。式 (4)、(5) 図-1

表-1 実験条件

CASE	断面平均流速 U (cm/s)	水深 h (m)	倒伏後の群落 高さ t (m)	水面勾配 i
1	17	1.79	1.40	1/1,401
2	28	1.76	1.30	1/1,010
3	42	1.77	1.15	1/704
4	63	1.80	0.90	1/647
5	75	1.50	0.75	1/402
6	90	1.20	0.60	1/272

表-2 ヨシの形状・力学パラメータ

茎の長さ(群落高) ℓ (m)	1.50
茎の直径 d (cm)	0.67
茎の曲げ剛性 EI (N·m ²)	0.294
根元のバネ定数 k (N·m/rad)	0.98
倒伏限界角度 θ_{0cr} (rad)	0.83
葉の総面積 A_θ (cm ² /本)	674
単位面積当たり本数 N (本/m ²)	79.2

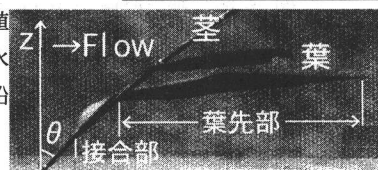
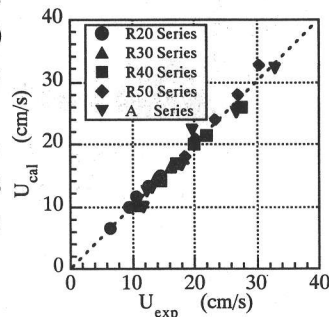


写真-1 流水中で葉がなびく状況



キーワード：ヨシ群落, 粗度, 抵抗, 流速分布, 混合距離理論

連絡先：〒308-0804 茨城県つくば市旭1番地 TEL 0298-64-2211 FAX 0298-64-1168

は $z=t$ において du/dz , v_i が同一とならなければならない。この条件より、 v_i , ψ_0 について式(6), (7)が得られる。

$$v_i = L u_{,0} \quad (6) \quad \psi_0 = \frac{\chi t}{12L} \frac{(1-c)^3}{\alpha c(1+c)} \quad (7)$$

式(2), (4) ~ (7) から、 L, t, θ が与えられれば、流速分布が水深 h 、勾配 i の関数として求められることが分かる。 L については、山田ほか¹⁾を参考にし式(8)で与える。

$$\frac{L}{Kt} = \frac{\beta}{t} \int_0^t (t-z)(u-Kt^{0.5}) dz \quad \beta^{-1} = \int_0^t (u-Kt^{0.5}) dz \quad (8)$$

また、倒伏(t, θ)に関する基礎方程式は、室田ほか²⁾と基本的に同一である。ただし、根元の倒伏角度 θ_0 と茎に作用するモーメントの計算方法を変えた。ヨシ倒伏実験によると、モーメント M_0 を受けた根元はその大きさに応じた角度まで倒伏することが分かった。これをモデル化し、式(9)で与える。

$$M_0 = k \theta_0 \quad (\theta_0 \leq \theta_{0cr}) \quad M_0 = k \theta_{0cr} \quad (\theta_0 \geq \theta_{0cr}) \quad (9)$$

k, θ_{0cr} については表-2に示した。また、モーメントの計算にあたっては、簡略化を目的として、茎の形状を根元と先端を結ぶ直線で近似した。つまり、式(1)で用いる θ は一定(直線の傾き)なので、 K も水深方向に一定となる。

5. 揺動する模型群落への適用性

最初に変形・揺動がない模型群落への適用性を、清水ほか⁴⁾の実験結果を用いて確認する。図-1に断面平均流速について実験値 U_{exp} と計算値 U_{cal} を比較した結果を示すが、両者は良好に一致した。次に、変形・揺動が生じる模型群落について、室田ほか²⁾および辻本ほか³⁾の実験結果を用いて同様な比較を行った結果を図-2に示す。なお計算に際して t には実験値、 $\theta = \tan^{-1}(t/l)$ を用いた。いずれのSeriesも揺動しているが、計算値は実験値とおおむね一致した。しかし、組織だった大きな揺動(水の波のような連続した"うねり"³⁾)が顕著に見られたF2 Series(うねりあり: $\bigcirc$ プロット)のみ、 U_{cal} が過大となった。本モデルの適用外となる"うねり"の発生条件は現時点では不明である。

6. ヨシ群落への適用性

流速 U と群落高さ t の計算値と実験値を比較した結果を図-3, 4に示す。勾配 i が大きいCase5, 6では、 U_{cal} が過大になった。この一つめの原因として、"うねり"が考えられる。実験観察によると、強い湧昇流による水面の間欠的な盛り上がりが見られるのに伴って、ヨシ先端部が振幅10~20cm程度でゆっくりと上下運動をする様子が確認できた。ただし、"うねり"のようには見えなかったため、"うねり"のみを原因とするのは難しい。二つめの原因として、 t_{cal} が小さくなったため(図-4参照)とも考えられる。そこで、 t_{exp} を代入して U を求めたところ(図-3の Δ プロット)、最大で1割程度のズレとなるまで過大評価傾向が改善された。以上の検討から、 i が大きくなると t の僅かなズレで平均流速(つまり粗度)が大きく増減することが、"うねり"の発生とともに粗度予測を困難にする原因となりうると指摘できる。このような問題が残されているものの、1/700程度以下の勾配では、 U だけでなく、図-5に一例を示すように流速・レイノルズ応力分布についてもおおむね良好な予測結果が得られた。勾配が緩い河道区間(小礫~砂床河道)に適用範囲を絞れば、本モデルは有効と思われる。

参考文献

- 1) 山田 正・川端規之: 浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第325号, pp69-80, 1982.
- 2) 室田 明・福原輝幸: 直立性の植物を有する開水路の流れ構造について, 第28回水理講演会論文集, pp.225-231, 1984.
- 3) 辻本哲郎・北村忠紀: 柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, 土木学会論文集, No.607, II -45, pp.29-44, 1998.
- 4) 清水義彦・辻本哲郎ほか: 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.438, II -17, pp.31-40, 1991.

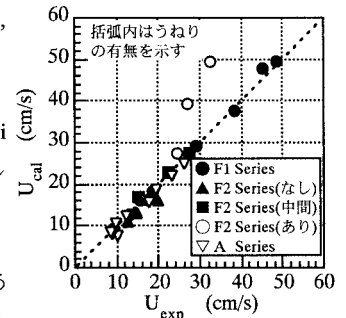


図-2 変形模型群落での流速比較

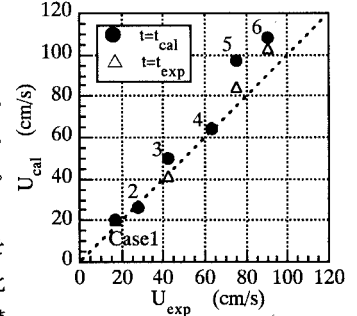


図-3 ヨシ群落での流速比較

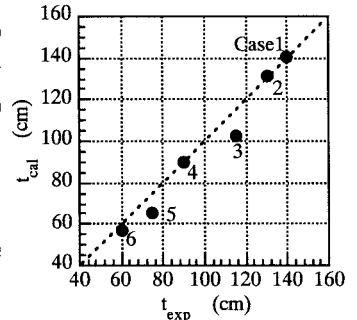


図-4 ヨシ群落の倒伏高比較

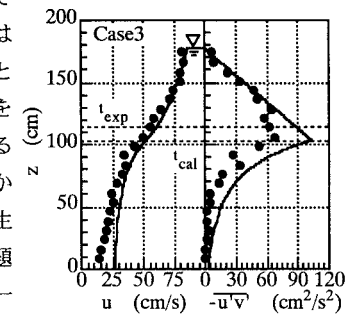


図-5 流速・レイノルズ応力分布の比較