

京都府立大学農学部 ○平野洋一・水原邦夫・大手桂二

1. はじめに

これまで抵抗則あるいは流砂量に関し数多くの研究がなされ興味ある成果が得られている。しかしながら、河床粗度として植物を対象としたものは少なく、いわゆる植生水路に関する流水と流砂のメカニズムについては未だ解明されるに至っていない。ここでは流路内に侵入し繁茂した植生の流水および流砂量に与える影響を明らかにすることを目的とし、植生水路における平均流速式、掃流砂量式について理論的、実験的に検討を行った。

2. 平均流速式の誘導

河床単位面積当りの植物抵抗を $\tau_v$ 、河床表面抵抗を $\tau_s$ とし、河床に作用するせん断力 $\tau_0$ を次式で表す。

$$\tau_0 = \alpha \tau_v + (1 - \alpha) \tau_s \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $\alpha$ は $\tau_v$ の $\tau_0$ に対する割合を表す係数である。植物の形状、配列が一定と仮定し、形状抵抗に比べ表面抵抗を無視すると、 $\tau_v$ は

$$\tau_v = \rho \cdot N \cdot C_d \cdot A \cdot \beta^2 \cdot U_m^2 / 2 \quad \dots\dots (2)$$

で表せる。ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $N$ ：河床単位面積当りの植物の本数、 $C_d$ ：抗力係数、 $A$ ：植物1本当りの流れ方向の投影面積、 $\beta$ ： $U_v / U_m$  ( $U_v$ ：植物に作用する代表流速、 $U_m$ ：平均流速)である。一方、 $\alpha = 0$ すなわち河床に植物が存在しない場合 ( $\tau_0 = \tau_s$ )、移動床の抵抗則<sup>1)</sup>として

$$U_m / U_* = 6 + 5.75 \log_{10} R / d \cdot (1 + 2 \tau_*) \quad \dots\dots (3)$$

$U_*$ ：摩擦速度、 $R$ ：径深、 $d$ ：河床材料の粒径、 $\tau_*$ ：無次元掃流力を採用すると河床表面抵抗は、

$$\tau_s = \rho U_m^2 / \{ 6 + 5.75 \log_{10} R / d \cdot (1 + 2 \tau_*) \}^2 \quad \dots\dots (4)$$

と表せる。式(2)、(4)を式(1)に代入すれば、抵抗則の一般式として次式を得る。

$$U_m / U_* = 1 / [ (\alpha \cdot N \cdot C_d \cdot A \cdot \beta^2 / 2) + (1 - \alpha) / \{ 6 + 5.75 \log_{10} R / d \cdot (1 + 2 \tau_*) \}^2 ]^{1/2} \quad \dots (5)$$

図-1は人工芝(アストロターフFG)を用いた実験により得られた係数 $\alpha$ と密度 $\lambda$ (水路床単位面積当りの粗度の占める面積)の関係を示している。図中の曲線は回帰式を描いたもので、

$$\alpha = \lambda / (\lambda + 0.007) \quad \dots (6)$$

で表せる。これからも $\lambda$ が0.05にもなると植物抵抗が全抵抗の約9割を占めることになる。したがって、このように植物が密生した流れでは式(1)において $\tau_0 \approx \tau_v$ と仮定できる。

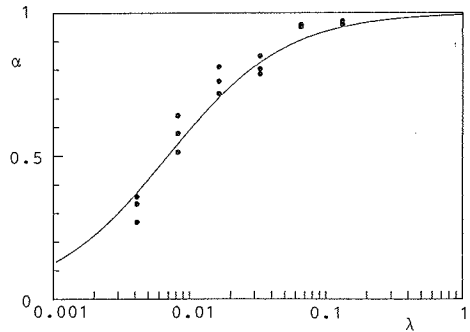


図-1 密度 $\lambda$ と係数 $\alpha$ の関係

さて、式(5)において植物の流れ方向の投影面積Aおよび係数βは植物のおかれた状況によって異なるものと考えられる。たとえば、流速に応じて植物は下流側に押し倒されAの値は小さくなるしβの値も水深によって変化するものと考えられ、実際の河川においてこれらの値を決定することは容易でない。いま簡素化のためこれらの影響を抗力係数に含めて扱おうと、つまり

$$Cd \cdot A \cdot \beta^2 = Cde \cdot a \quad \dots\dots (7)$$

Cde: 係数、a: 植物1本当りの直立時の投影面積  
とすれば式(2)は、

$$\tau v = \rho \cdot N \cdot Cde \cdot a \cdot U_m^2 / 2 \quad \dots\dots (8)$$

と書き換えられる。図-2は、砂防流路工などでよく見られるツルヨシ、ミゾソバを対象とした実験によりτv(抗力)とρ・N・a・U<sub>m</sub><sup>2</sup>/2の関係を表している。これからもCde(図中直線の傾き)はほぼ一定の値(ツルヨシ: 0.055、ミゾソバ: 0.130)を示しており植物種固有の係数といえる。したがって、式(1)、(4)、(6)、(8)より植生水路の抵抗則は次式で表せる。

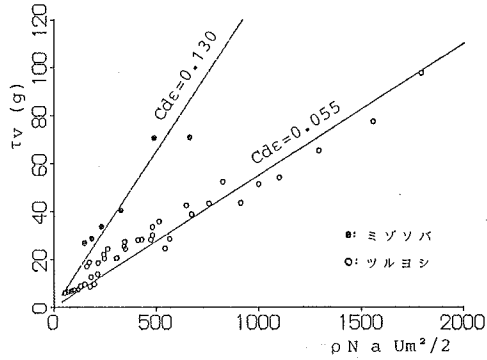


図-2 植物種によるCdeの変化

$$U_m / U_* = 1 / [ \{ \lambda \cdot Cde \cdot N \cdot a / (2\lambda + 0.014) \} + 0.007 / (\lambda + 0.007) \cdot \{ 6 + 5.75 \log_{10} R / d \cdot (1 + 2\tau_*) \}^2 ]^{1/2} \quad \dots\dots (9)$$

また、植物が密生した水路では、抵抗則はτ<sub>0</sub> = τ<sub>v</sub>より近似的に

$$U_m / U_* = (2 / Cde \cdot N \cdot a)^{1/2} \quad \dots (10)$$

で与えられる。図-3は式(8)を用いたU<sub>m</sub>/U<sub>\*</sub>の実測値と計算値の比較検討を行ったものである。ただし人工芝に関してCde = 0.85とした。これからも以上の仮定がほぼ正しいものと考えられる。

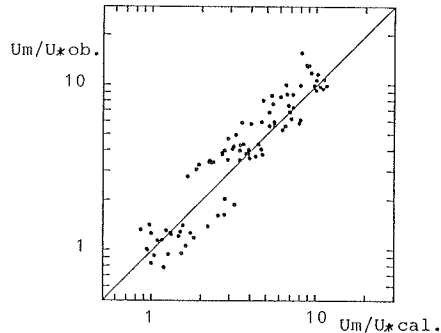


図-3 U<sub>m</sub>/U<sub>\*</sub>の実測値と計算値

### 3. ヨシ原における抵抗係数の算定

前述したように安定した砂防流路工内ではツルヨシ、ミゾソバなどの水好性植物が生育することが多い。中でもツルヨシはほふく茎により繁茂し高さ2m以上、1m<sup>2</sup>当たり100本以上のたいへん密生度の高い群落を作る。同種であるヨシ、セイタカヨシは3m以上にもなり大河川の洪水などでよく見られる。また、これらの植物は出水時下流側に押し倒されることがあるが群落が破壊されることは少なく、減水後すぐに回復するといったふうの流れに対する抵抗力が強い。ここで、ツルヨシが密生した水路での抵抗係数について考えてみる。

式(10)をManningの粗度係数nで表すと

$$n = R^{1/6} \cdot (Cde \cdot N \cdot a / 2g)^{1/2} \quad \dots\dots (11)$$

g: 重力加速度

ツルヨシに関してaの値は植物の高さ(L)により次式で与えられる(図-4参照)。

$$a = 0.015 \cdot L^2 \quad \dots\dots (12)$$

$Cd\varepsilon = 0.055$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ とすれば式(11)より次式を得る。

$$n = 6.5 \times 10^{-3} \cdot R^{1/6} \cdot N^{1/2} \cdot L \quad \dots (13)$$

たとえば、 $R = 3 \text{ m}$ 、 $N = 100 \text{ 本}$ 、 $L = 2 \text{ m}$ とすれば  $n = 0.16$  となり植物によってかなり抵抗が大きくなることを示している。なお、ヨシ、セイタカヨシに関してもその形状、特性がツルヨシに類似していることから式(13)がほぼ適用できるものと思われる。

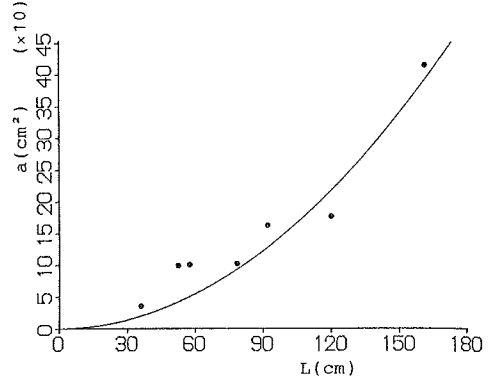


図-4 ツルヨシの高さとaの関係

#### 4. 掃流砂量

図-5は、 $\Phi$ の実験値と芦田、高橋、水山の緩勾配における掃流砂量式<sup>2)</sup>

$$\Phi = 1.2 \tau_{*c}^{3/2} (1 - 0.85 \tau_{*c} / \tau_{*}) \{ 1 - 0.92 (\tau_{*c} / \tau_{*})^{1/2} \} \quad \dots (14)$$

を用いた計算値の関係を示している。ここに、 $\Phi = qb / \{ (s-1)gd^3 \}^{1/2}$  ( $qb$ : 単位幅単位時間当りの流砂量、 $s$ : 砂レキと水の密度比)である。ただし、 $\tau_{*c}$ として0.06をとっている。 $\lambda = 0$ のときは式(14)の適合度が比較的高いが $\lambda$ が大きくなるにしたがいその適用が困難になる。これは式(1)、(6)でもわかるように植物抵抗によって掃流力が低減されているにもかかわらず、式(14)における $\tau_{*c}$ が過大に見積られているためと思われる。したがって、このような流れでは河床表面に有効に作用する掃流力を用いなければならない。図-6に、式(9)により計算される有効掃流力 $\tau_{*e}$ つまり、

$$\tau_{*e} = U_m^2 \cdot [ \{ \lambda \cdot Cd\varepsilon \cdot N \cdot a / (2\lambda + 0.014) \} + 0.007 / (\lambda + 0.007) \cdot \{ 6 + 5.75 \log_{10} R / d \cdot (1 + 2\tau_{*}) \}^2 ] / (s-1)gd \quad \dots (15)$$

を用い $\Phi$ と $\tau_{*e} (1 - \tau_{*c} / \tau_{*})$ の関係を示す。

図より植物の密生度 $\lambda$ による影響は修正され

$$\Phi = 8 \tau_{*e}^{3/2} (1 - \tau_{*c} / \tau_{*})^{3/2} \quad \dots (16)$$

が適用できる。なお、植生水路における移動限界掃流力 $\tau_{*c}$ として著者らは、

$$\tau_{*c} = 3 \cdot f \cdot \tan \Psi \quad \dots (17)$$

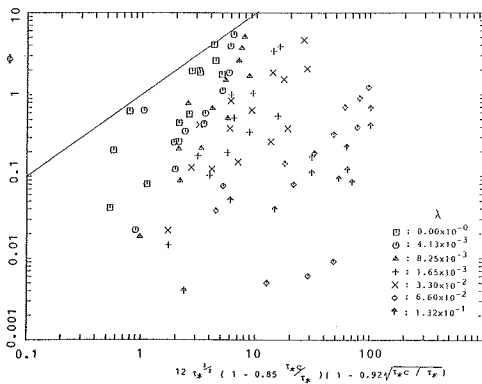


図-5 流砂量の実験結果

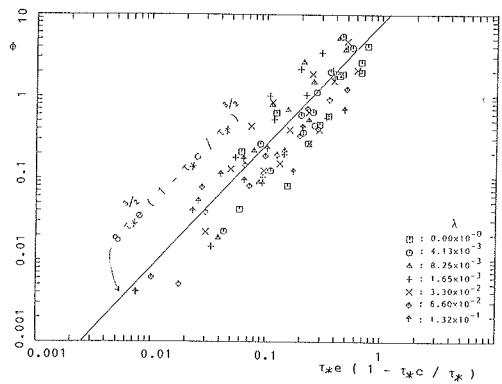


図-6  $\Phi$ と有効掃流力の関係

を提案している<sup>3)</sup>。ここに、 $\Psi$ は植生水路における河床材料の静止摩擦角、 $f$ はダルシーワイズバッハの摩擦係数で式(9)により $f = 8 (U_* / U_m)^2$ と表せる。また、静止摩擦角 $\Psi$ は図-7(図中 $\psi$ は植物がない場合の静止摩擦角)に示すように植物の密生度 $\lambda$ および河床材料の粒径 $d$ によって大きくなる傾向があり次式で与えられる。

$$\tan \Psi = 0.964 \cdot d^{0.089} \cdot \{ 2(1-\lambda) d / e + 1 \} \quad (\text{単位: cm}) \quad \dots (18)$$

$e$ : 植物の水路横断方向の平均間隔

### 5. おわりに

以上、植生水路における流れの抵抗則および掃流砂量について理論的、実験的に検討を行い、平均流速式として式(9)、掃流砂量式として式(16)を得ることができた。ここでは人工芝、ツルヨシという限られたものに対する考察ではあるものの、こうして得られた結果は新たな流路工を作るといった河川改修計画あるいは河床整備計画にとって何らかの科学的基準を与えるものと期待される。

最後に、本学専攻生の山中光彦氏には調査、実験に際し御協力頂いた。また、本研究は昭和60年度文部省科学研究費補助金によった。記して、謝意を表する。

### — 参考文献 —

- 1) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究；土木学会論文報告集 第206号、1972
- 2) 芦田和男、高橋保、水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究；新砂防 107、1978
- 3) 平野洋一、水原邦夫、大手桂二：植生水路における掃流砂について；京府大演習林報告 第29号、1985

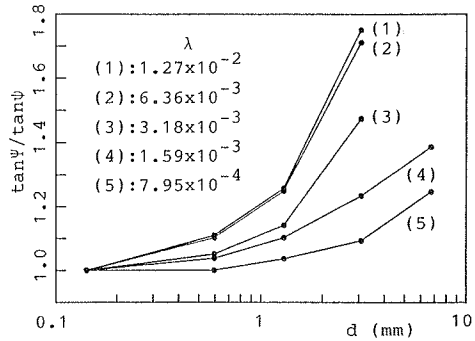


図-7 植生水路における静止摩擦角

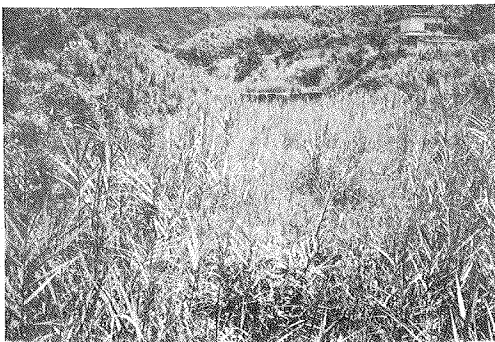


写真-1 ツルヨシ群落(木津川支川玉川)

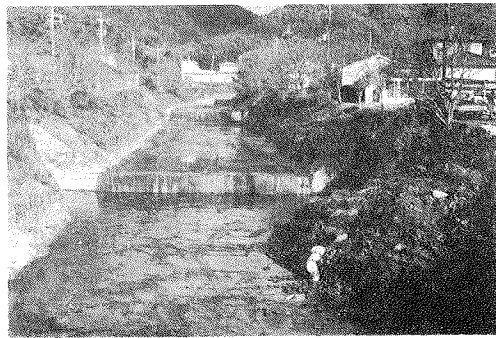


写真-2 河床整備後の状況