

II-239 側岸部に植生をもつ河川における流れの安定性について

東京工業大学大学院 学生員 太田 賢一
 東京工業大学工学部 正 員 池田 駿介
 電 源 開 発 長谷川 洋

1. はじめに 河川の側岸部に植生が存在するとき、その水路内では植生域と非植生域との間で流速差が生じその境界付近では流れが複雑になっていることが考えられる。流速分布が変曲点を持つとき流れはそこで不安定となることは既に知られており、河岸に植生を持つ水路ではその植生域と非植生域との境界で流速分布が変曲点を持つ。そこで本研究ではこの不安定性に着目し、安定性理論を用いて解析を行い運動量交換のメカニズムを明らかにしようと試みた。これまで変曲点をもつ流れについての不安定解析は数例行われているが流速分布としてhyperbolic-tangent型を用いて不安定解析を行っているものがほとんどである。これは、流速分布の近似としては簡単に扱い易いものであるが実際流速分布との相違点が少なくない。よってここでは主流の流速分布として解析解(Exponential型)を用いて不安定解析を行い植生域と非植生域との間で発生する渦について考えた。

2. 計算式

2. 1 流速分布 河岸付近に樹木群を持つ直線河道の流れの場を図-1に示す。このように座標系を設定すると河岸付近に樹木群を持つ直線河道における水深方向に平均した運動方程式が成立する(参考文献(1)を参照)。通常の開水路では、 ν は十分小さい値をとるのでこれを微小パラメータとして特異摂動法を用いて解く。流れの安定性を議論する上では流速分布の変曲点の位置が問題であるのでここでは ν の二次のオーダーまでとすることにす。結果は

$$(\text{樹木群外}) U = 1 - (1/3)(1 - J) \exp(\sqrt{2p}) \{4 - \exp(\sqrt{2p})\} \quad (1)$$

$$(\text{樹木群内}) U = J \{J + (1/3)(1 - J) \exp(-\sqrt{2p}/J) \{4 - \exp(-\sqrt{2p}/J)\}\} \quad (2)$$

ここに、 $J = 1/(1 + \chi)^{1/4}$ 、 $\chi = C_D a D / 2C_f$ 、 C_f : 摩擦抵抗係数、 C_D : 植生一本当たりの形状抵抗係数、 $a = (d/2l_x l_y)$: 植生の密度を表すパラメータ、 d : 植生の直径、 l_x 、 l_y : 植生のそれぞれの方向の間隔、 $U = u/u_c$ 、 $p = y/B\sqrt{\nu}$ 、 $\nu = \varepsilon_y D / C_f u_c B^2$ 、 ε_y : y 方向の運動量拡散係数、 u_c : 植生域から無限遠での流速。

2. 2 不安定解析 非粘性流の安定性に関するRayleigh方程式は、微小攪乱に関する流関数を $\Psi = R_0[\phi(p) \exp(i\alpha(x - ct))]$ とおくと、

$$[U - c][\phi'' - \alpha^2 \phi] - U' \phi = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\phi(p)$: 固有関数、 α : 波数、 $c = c_r + ic_i$ 、 c_r : 位相速度、 c_i : 攪乱の増幅率。

境界条件は攪乱が無限遠で0、 U' が無限遠で0であるとする。数値積分を簡単にするために

$$\phi \sim \exp(\int \Phi dp) \quad (4)$$

とおくと(4)より $\Phi(p)$ に関するRiccati方程式を得る。

$$\Phi' = \alpha^2 - \Phi^2 + U' / (U - c) \quad (5)$$

これより境界条件は

$$\Phi(-\infty) = -\alpha, \quad \Phi(\infty) = +\alpha \quad (6)$$

積分区間を有限にするため、流速分布を表す(1)、(2)式をそれぞれ、 $S = \exp(\sqrt{2p}) - 1$ 、 $T = J \{1 - \exp(-\sqrt{2p}/J)\}$ とお

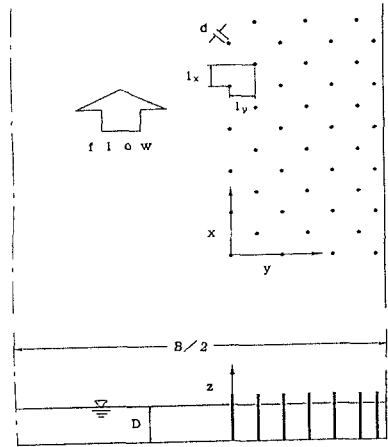


図 - 1

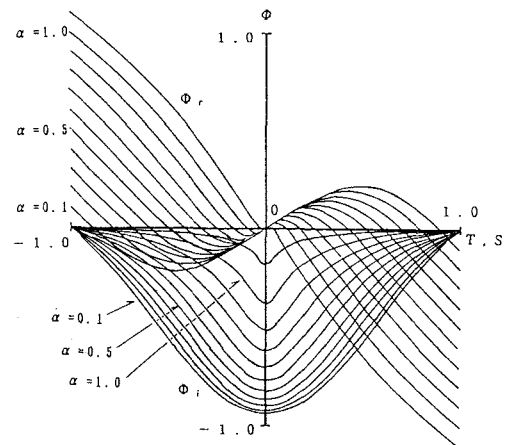


図 - 2

いて正規化する。求まった式を(10)に代入するとそれぞれ

$$(\text{樹木群外}) d\Phi_r/dS = (\alpha^2 - \Phi_r^2 + \Phi_i^2) / \{\sqrt{2}(S+1)\} + 8(1-J)S(U-c_r) / [3\sqrt{2}\{(U-c_r)^2 + c_i\}] \quad (7)$$

$$d\Phi_i/dS = -2\Phi_r\Phi_i / \{\sqrt{2}(S+1)\} + 8(1-J)Sc_i / [3\sqrt{2}\{(U-c_r)^2 + c_i\}] \quad (8)$$

$$(\text{樹木群内}) d\Phi_r/dT = (\alpha^2 - \Phi_r^2 + \Phi_i^2) / \{\sqrt{2}(1-T/J)\} + 8(1-J)T(U-c_r) / [3\sqrt{2}/J^2\{(U-c_r)^2 + c_i\}] \quad (9)$$

$$d\Phi_i/dT = -2\Phi_r\Phi_i / \{\sqrt{2}(1-T/J)\} + 8(1-J)Tc_i / [3\sqrt{2}/J^2\{(U-c_r)^2 + c_i\}] \quad (10)$$

(7)～(10)式を用いて、 α を与えて樹木群外、樹木群内についてそれぞれ $p=-\infty, \infty$ の境界条件から出発し $p=0$ で Φ_r, Φ_i が合うように c_i を決定して解を求める。 χ が比較的小さい場合の結果を図-2に示す。求めた Φ について α と c_i の関係をもとにいくつかの χ について図-3に $\alpha/\Delta u$ と ω の関係を示す。ここに $\Delta u = 1 - J^2, \omega = \alpha c_i$ である。この極値は与えられた攪乱が最も発達する点を示しており、その点は植生の密度が増していく程左へシフトしていくことがわかる。このことから植生の密度を変えると最大発達を示す攪乱の周期は若干大きくなっていくことがわかる。

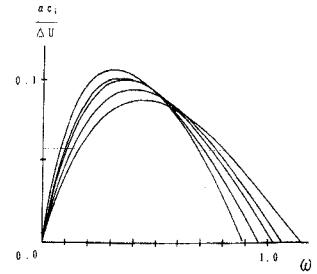


図-3

3. 実験 実験装置は図-1に示す様に幅96cm、長さ12mの水路の片側に幅30cmにわたって植生の模型を設置し、3mmプロペラ流速計によって流速を測定した。さらに渦の通過をサーボ式水位計によって0.4秒毎の水位変化を200～300秒間測定し、グラフ化した。周期渦の周期はこれらのデータの平均値として求めた。水理諸元は表-1に示す。

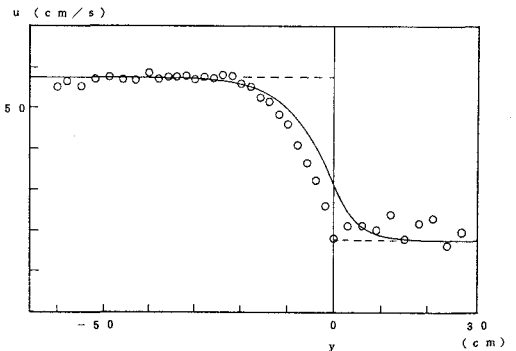


図-4

4. 計算結果と実験結果との比較及び考察 (1)、(2)式によって得られた流速分布と実験値とを比較したのが図-4である。ここにはRun2、 $x=5.00m$ の場合を示している。hyperbolic tangent型にくらべて実験値、理論値共に植生と非植生との境界での流速が小さく、また植生域に入ってから流速の定常化が早いものとなっている。図-5に水面変動の一例を示す。ここで明確な周期性が認められ染料によって可視化された流れの写真から判断すると間欠的に発生する渦の通過に伴うことがわかる。実験データから求まった周期渦の周期と解析で求めた周期を比較したところ、良好な一致がみられた。

	$Q(l/s)$	$D(cm)$	S	$u_*(cm/s)$	$u_c(cm/s)$
Run1	15.3	6.0	1/1000	2.42	31.6
Run2	22.6	6.0	1/300	4.43	57.3
Run5	23.8	8.5	1/1500	2.36	40.0

表-1

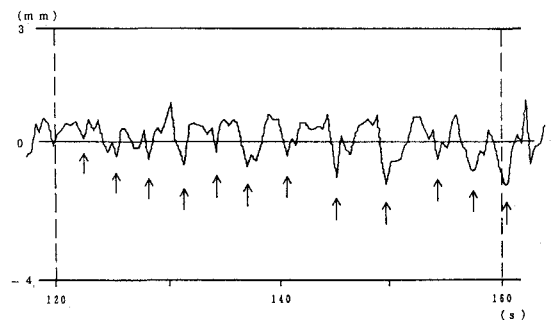


図-5

参考文献 1) 池田・泉・伊藤：流水抵抗及び浮遊砂濃度に及ぼす植生の効果、第33回水理講演会(1989).
2) Michalke, A: On the inviscid instability of the hyperbolic tangent velocity profile, JFM 19 (1964). 3) Monkewitz, P.A & Huerre, P: Influence of the velocity ratio on the spatial instability of mixing layers, Phys. Fluids 25 (1982).