

II-372 横断面内に植生帯のある開水路流れの水理学的検討

金沢大学大学院 学生員 北村 忠紀

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

1. まえがき

横断面内に植生帯がある開水路流れについて最近多くの研究が行なわれるようになったが、それらの多くは縦断方向に様な場を対象とし、解析モデルあるいは数値計算によって平衡状態の流速分布や浮遊砂の横断面内でのバランス（主として堆積）の問題を扱っている。こうした解析においてはしばしば渦動粘性係数を仮定したりして現象を理解することよりもむしろ実験結果などを説明することに主眼がおかれているようである。著者ら¹⁾は、植生帯と非植生帯の混合過程そのものを巨視的ではあるが具体的に捉える立場での研究を始め、やはり平衡（縦断方向に変化しない）場での議論を行なっているが、植生帯は河道内でしばしば偏在していることにも鑑み、これを植生帯を有する区間の上流端から平衡状態までの遷移過程として捉え、混合現象を巨視的に考察した。

2. 実験の概要

実験は長さ12m、幅40cmの可変勾配水路で、流速測定に小型プロペラ流速計を用いて行なった。また前報に示したように、平衡場での混合現象は顕著な水面変動を伴うことから、容量式水位計による水面変動計測も並行させた。植生のモデルとしては直径 $D=1.5\text{mm}$ 、高さ $k=4.6\text{cm}$ の竹製円柱を $s=2\text{cm}$ の間隔で配置したもの（植生層の水理学的性質はいわゆる透過係数 K で代表され今回用いたものは $K=189\text{cm/s}$ ）を用い、水路中央から下流（ $x>0$ ）では水路の半幅（ $-B/2<z<0$ ）に設置した。流れの3次元性の卓越を避けるため水深は植生高さ以下に限定し（ $H<k$ ）、また $x>0$ の区間で断面平均水深がほぼ一定になるよう下流端堰を調整した。

3. 現象の特徴とモデル化

非植生帯・植生帯をそれぞれ1次元化して扱い（断面平均流速 U_i 、水深 H_i （添字 i は $i=1$ が非植生帯、 $i=2$ が植生帯を表す）で代表する）、相互作用は両水路に対する横流入流速（境界面での横断方向流速の水深方向平均値 W ）及び境界面せん断応力 τ_{si} で代表する（図1）。この時、それぞれの流路での流れに運動量則を適用することから、次の水面形方程式が得られる。前報で明らかにしたように、少なくとも平衡域では変動成分の貢献が大きいのので諸量に対し変動分（'を付して表す）も考慮した。ただし規準化された変動量の高次項は無視した。

$$d(H_i+H_i')/dx = \{i_b - I_{fb} - I_{si} + (\Omega_i + \Omega_i')\} / \{1 - U_i^2/(gH_i)\}; \quad \Omega_i + \Omega_i' = (-1)^i(W+W')U_i(2-\psi_i)/(gB_i) \quad (1)$$

ここに、 $I_{fb} \equiv \tau_{bi}/(\rho g H_i)$ 、 $I_{si} \equiv \tau_{si}/(\rho g B_i)$ であり、 $(-1)^i(W+W')>0$ のとき、 $\psi_i=1$ 、 $(-1)^i(W+W')<0$ のとき、 $\psi_i \equiv \gamma$ 、 $\psi_2 \equiv 1/\gamma$ （ $\gamma \equiv U_2/U_1$ ）である。この式は、横断方向流速（ $W+W'$ ）が与えられたときの諸量の関係を示す。

実験によって明らかにされた特徴を、水理モデルになじむように概略化すると図2に示すようになる。植生帯を伴う区間に入った流れ（横断方向にはほぼ様な流速分布、これを U_0 とする）は W の働きで植生帯から非植生帯へ流

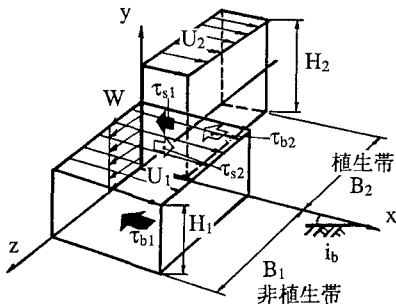


図1 概念図

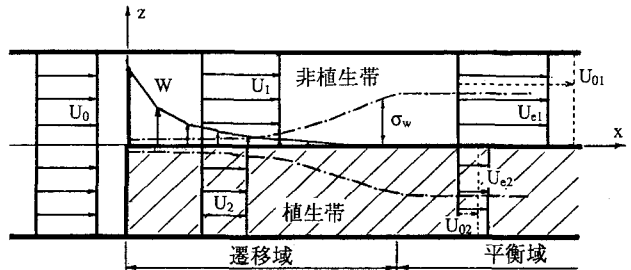


図2 流れの遷移域と平衡域の特徴

量をシフトさせる。すなわち、 W がゼロに指数関数的に漸近、 U_i はそれぞれの平衡値 U_{ei} へやはり指数関数的に漸近する。 W の変動(W')は遷移域ではほとんど有意でないのに、平衡域に近づくと急激に増加している(実はそこでは水面変動強度も著しく増加している)。こうしたことから、(i) 遷移域では W の定常成分のみ、(ii) 平衡域では W' のみを考慮して、以下では式(1)に基づいて現象理解を行なう。

(i) 遷移域: $x>0$ の区間で水深の場所的変化がないよう下流端堰が調整されているので $dH_i/dx=0$ のはずである。このことから式(1) ($i=1, 2$ で2本の式を表す)を W について解くと次のようになる。

$$W = gB_1 i_b (U_{01}^2 - U_1^2) / \{ U_{01}^2 (2U_1 - U_2) \} = -gB_2 i_b (U_{02}^2 - U_2^2) / (U_{02}^2 U_2) \quad (2)$$

連行係数の形で ε を定義し ($\varepsilon = W / [U_{0i} - U_i B_i]$; U_{0i} : $W=0$ しかもここでは $W'=0$ の時、すなわち 両水路間の相互作用のない場合の各流路の流速), 上式に代入しこれについて解くと次のように ε が決定される。

$$\varepsilon = (i_b/2) [K + \sqrt{K^2 - 4\lambda_1 \lambda_2 / (B_1 B_2)}]; \Delta_0 \equiv B_i |U_{0i} - U_0|; \lambda_i \equiv gB_i / U_{0i}^2;$$

$$K = [\{ (2+B_2/B_1) + \Delta_0 / (B_1 U_0) \} \lambda_1 + \{ (4+3B_1/B_2) - (2+B_1/B_2) \Delta_0 / (B_2 U_0) \} \lambda_2] / \{ 2(B_1 + B_2) \} \quad (3)$$

ε が決まると連続式より、 U_i , W の縦断方向変化が次のように記述され、実験結果を良く説明する(図3, 4)。

$$U_i(x) = U_0 + (U_{0i} - U_0) [1 - \exp(-\varepsilon x)]; \quad W(x) = W(0) \cdot \exp(-\varepsilon x) \quad (4)$$

後述のように、平衡状態では W の変動に起因する付加的な境界面せん断力により平衡流速 U_{ei} は底面粗度のみ考慮した U_{0i} とは異なっている点は、ここでは説明できていない。

(ii) 平衡域: 平衡域では W の変動が有意でしかも水面変動を伴う。両者の同時計測時系列のスペクトル解析から低周波変動が卓越し、そのような低周波域で両者のコヒーレンスが高くスペクトル位相が $\pi/2$ 程度の差をもつこと、さらにこのような低周波の卓越波は両水路を合わせた断面平均流速程度で移流されていることが明らかにされた。よって、平衡域ではこの移流速度での移動座標系表示とし、変動は縦断方向変動で表す(遷移域でも現われた相関性が低く移流性の小さい高周波変動成分は無視する)。平衡域では $dH_i/dx=0$ であるから、式(1)は、

$$i_b [1 - (U_{ei}/U_{0i})^2] = -(-1)^i \{ U_{ei} / (gB_i) \} [(2 - \psi_{ei}) W']_{ave} \quad \text{or} \quad (U_{ei}/U_{0i})^2 = 1 - (-1)^i \{ U_{ei} / (gB_i i_b) \} [\psi_{ei} W']_{ave} \quad (5)$$

のように変形される。 $[\]_{ave}$ は(この移動座標系での)縦断方向平均であり、計測(point measurement)での時間平均を表す。 W' の平均はゼロであるが、これによってもたらされる横断方向運動量フラックスの平均はもはやゼロでなく、そのため U_{ei} と U_{0i} は異なる。上式によってその差を評価することができる。

一方、(移動座標系で)局所的な横断方向運動量フラックスとその平均値の差は水面形状(縦断方向の波)を与える。これが平衡域での水面変動の出現を説明する(前報ですでに発表済み)。

具体的に横断方向流速'の変動を正弦波で表現するなどすることから、 (U_{ei}/U_{0i}) や、水面変動の振幅、位相を定量的に評価することができるが、 W の変動と水面変動の相互作用を閉じる機構については今後の課題となっている。

4. あとがき

本研究では、植生・非植生域が同一断面に存在する流れについて、両域の相互作用を横断方向流速を用いて代表することでそれぞれ1次元化して扱った。これによって、遷移域、平衡域の重要な特性を定性的に説明できたが、定量的な評価については実験精度その他の面から十分な検証は今後に持ち越された。

参考文献 北村・辻本: 植生域と非植生域の流れの干渉についての基礎的研究, 第45回土木学会年講, 1990。

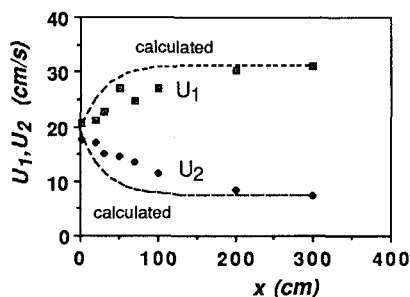


図3 遷移域での主流方向流速

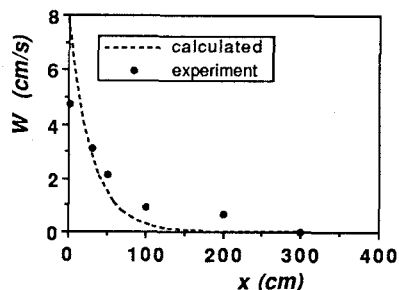


図4 遷移域での横断方向流速