

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 近年河川内植生の積極的認識に伴い、植生を伴う開水路流れの特性の把握が重要になってきている。特に植生群落は河川内で河岸寄りに偏ったり、中州を形成して存在することが多く、遅い植生域流れと早い非植生域流れの相互作用は興味深い現象を産んでいる。本研究ではとくに福岡・藤田が見いだした植生域の偏在によって誘起される水面変動に注目、それが運動量交換に果たす役割を考察した。

2. 実験の概要 実験は長さ12m, 幅0.4mの可変勾配水路で、高さ4.59cm, 直径1.5mmの竹製円柱を正方形格子で植えた植生群落モデルを、水路の片側半分に配し、植生高さより水位が高い場合と低い場合の代表的な2つのケースについて開水路流れの特性を調べた。実験に当たっては水路下流端堰の調節で、近似的に等流状態を作り出し流速測定（直径3mmの小型プロベラ流速計）、水面変動測定（容量式波高計）等を行なった。流速・乱れ強度の流下方向成分分布を見ると、植生域と非植生域の界面での大きな乱れ強度と流速勾配が植生域と非植生域の運動量交換の活発なことを示唆している。図1は水面高さの時間平均とその変動の標準偏差の横断方向分布を示したもので、植生域の方が大きい抵抗係数を有するにもかかわらず低い水位を示していること（非植生域への流量の集中）、水面変動強度は植生域と非植生域の境界で最大値をとりそれより離れるにしたがって減衰するが植生域の方が減衰が強く非植生域の方に水面変動が目立つ。なお、水面変動は後述するように横断方向に顕著な位相差は見られない。

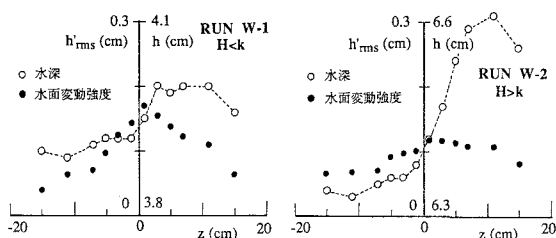


図1 水面高さとその標準偏差の横断方向分布

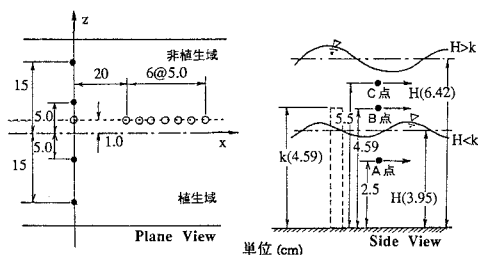


図 2 定義図と測定点

3. 水面・流速変動の時間・空間相関特性 植生が偏在する開水路流れでは目視で充分認識できる程度に組織的な水面変動が現われ、これが植生域と非植生域の運動量交換と大きく関係していることが類推され、その内容を検討するため、水面高さと流速の横断あるいは縦断方向に離れた2点での同時計測からの相関解析を行なった(測定点は図2に示す)。図3は横断方向に離れた2点での水面変動の同時計測例で、とくに水深が植生高より小さい場合には極めて規則正しい水面波が出現しており、それが植生域と非植生域で変動振幅に差はあるものの同位相であることが特徴である。植生に対する被り水深が大きいと水面波の規則性は薄れる。なお、このような振幅の異なる同位相の水面変動は植生域と非植生域の水面差に中立状態から正負の交番をもた

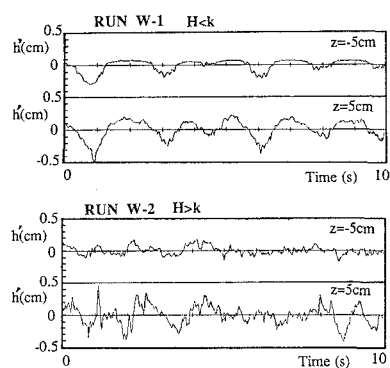


図 3 植生域・非植生域の水面の時間変動時系列

らし、運動量交換の起動力となりうる。図4は植生域と非植生域の境界線上 ($z=1\text{cm}$, 図2参照) で縦断方向に ξ だけ離れた2点での水面及び流速変動 (河床から $y=2.5\text{cm}$ の高さの点 (A) でこれは植生高より小さい, 図2参照) の同時計測から得た時間相関係数 $r(\tau|\xi)$ を示したもの (τ : ずらし時間) で、保存性の良い波の伝播が推察される。 $r(\tau|\xi)$ のピークに対する τ の値を ξ に対してプロットすることにより変動波の伝播速度が知られる。この例では約 30cm/s で、ほぼ断面平均流速に等しいが、横断方向に同位相の波が保存されていることを考えるとこの波は移流

されている性質のものではないと思われる。図4のうち $r(\tau|0)$ は自己相関係数でその $\tau=0$ でないピークより卓越周期を計算した。水面変動と植生に近い位置での流速変動の卓越周期（約1.5から2秒）はほぼ一致している。水深が高い場合植生域と非植生域の境界面近くでも植生高より高い測点での流速変動の卓越周期は小さくなっており、通常の乱れの卓越周期と混在してくるものと推察される。以上の結果、植生域と非植生域の運動量交換に低周波変動が貢献しており、それが水面変動を伴うことが推定された。被り水深が大きい場合この機構はより高周波の通常の乱れによってはやけさされるが、水深が植生高より小さいと極めて明確に観察される。

4. 植生域と非植生域の運動量混合の仕組み 植生域と非植生域の運動量混合機構をモデル化する第一歩として、植生域と非植生域をそれぞれ1次元化して混合の仕組みを考察した。それぞれの流路に w で表される横流入を考えた運動量保存則から、植生域、非植生域に対してそれぞれ次の水面形方程式が得られる。

$$\frac{dh_i}{dx} = \frac{i_b - I_i' - I + (-1)^i (Fr_{0i}^2 / \beta_i) \sqrt{\psi_i(2 - \psi_i)} \zeta}{(1 - Fr_{0i}^2)} \quad (1)$$

ここに、添字 0 は非擾乱時の値、添字 1, 2 はそれぞれ非植生域、植生域にかかわるもので、 i_b : 路床勾配、 $Fr_{0i} = U_{0i} / \sqrt{gh_0}$ 、 U_{0i} : 各領域の断面平均流速、 $\beta_i = b_i / h_0$ 、 b_i : それぞれの領域の流路幅、 $\gamma = U_{02} / U_{01}$ 、 $\psi_i = U_{ex} / U_{0i}$ 、 U_{ex} : 隣の流路と交換する流体の流下方向流速（よって、流出時は $\psi_i = 1.0$ 、流入時は $\psi_i = \gamma$ 、 $\psi_2 = 1/\gamma$ ）、 $\zeta = w / \sqrt{U_{01} U_{02}}$ （植生域から非植生域へ向かう流れを正とする）、 I : エネルギー勾配、 $I_i' = \tau_{si} / \rho gh_0$: 隣り合う流路との境界でのせん断応力、 ρ : 水の密度である。横断方向流れが、 $\zeta = \zeta_0 \sin k(x - ct)$ (2) のように変動する（ ζ_0 : ζ の変動振幅、 k : 角波数、 c : 波速）とする。式(2)を式(1)に代入し、水面勾配の1波長平均がゼロとなることから植生・非植生領域境界での付加せん断応力（ $\tau_s = \tau_{s1} + \tau_{s2} = \rho gh_0(I_1' + I_2')$ ）について、

$$I_i' = Fr_{0i}^2 \sqrt{\psi_i(\psi_i - 1)} \zeta_0 / \{\beta_i(\pi/k)(1 - Fr_{0i}^2)\} \quad (3)$$

が、得られる。この時の変動成分を正弦波近似して水面形を求めると次のようである。

$$h_i = h_0 \{1 + [(-1)^i \sin \phi_i Fr_{0i}^2 \sqrt{\psi_i(3 - \psi_i)} \zeta_0 / \{2\beta_i h_0 k(1 - Fr_{0i}^2)\}] \cdot \sin[k(x - ct) - \phi_i]\} \quad (4)$$

ここに ϕ_i は各領域の水面形の、式(2)に対する位相差で、 $\phi_1 = \pi/2$ 、一方、 $\phi_2 = \gamma < 1/3$ では $-\pi/2$ 、 $\gamma > 1/3$ では $\pi/2$ となるので、 $\gamma < 1/3$ のとき植生域と非植生域の水面は同位相、 $\gamma > 1/3$ では逆位相となることがわかる（今回の実験では前者が出現した）。また植生域と非植生域の水面変動振幅の比は次式のようになり、一般に $\gamma < 1.0$ であることより非植生側の変動が大きいことが説明された。

$$\sigma_1 / \sigma_2 = |\beta_2(1 - \gamma^2 Fr_{01}^2)(3 - \gamma) / \{\beta_1(1 - Fr_{01}^2)(3\gamma - 1)\}| \quad (5)$$

5. あとがき 本研究では、植生群落が偏在する開水路での流れでは、水面変動を伴う低周波成分での運動量混合が生じていることを実験によって示し、その機構を巨視的にモデル化して現象の概要を説明した。今後は乱流計測の結果も踏まえて流れの詳細な構造を明らかにすると共に、抵抗や流量集中などより工学的な問題と結び付けて調べて行きたい。参考文献 1) 福岡・藤田：33水講論文集，1989。2) 中川・辻本・清水：水工学論文集，34，1990。

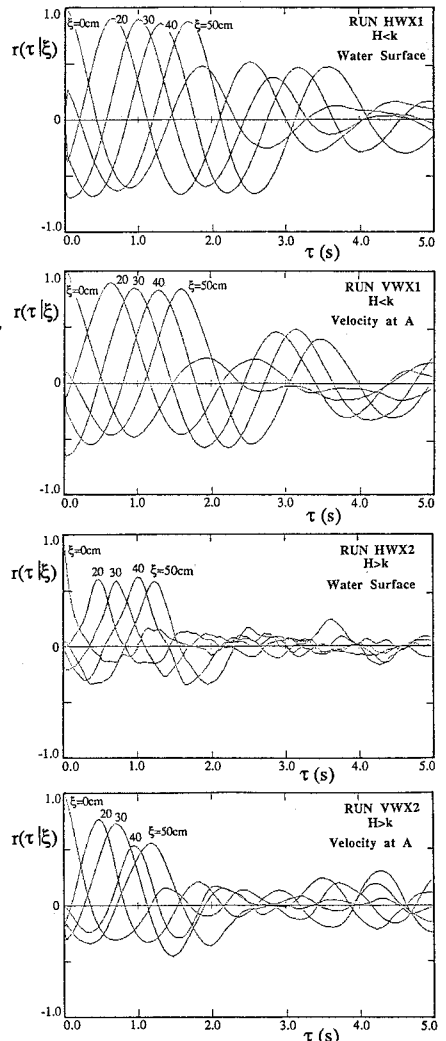


図4 水面高さ・流速の時・空間相関