

植生群落周辺の掃流砂運動と河川敷地形の形成

Lateral Bed-Load Transport near Vegetation Zone
and Formation of Flood Plain

辻本哲郎*・北村忠紀**・中川博次***

By Tetsuro TSUJIMOTO, Tadanori KITAMURA and Hiroji NAKAGAWA

In the equilibrium reach of flow with vegetation zone along a side wall, an appreciable fluctuation of transverse velocity with low frequency appears and it brings about alternation of lateral bed-load transport. Due to the strong lateral variation of longitudinal bed-load flux, alternation of lateral bed-load transport has a net component towards the vegetation zone. A derived model of non-equilibrium bed-load transport in the lateral direction evaluates the net flux of lateral bed-load transport and the subsequent change of lateral bed profile. Movable bed experiments in the flume have been conducted, and observed sand ridge along the vegetation zone has been estimated by the analytical model.

Keywords: river morphology due to vegetation, river environments, lateral bed-load transport, non-equilibrium bed-load transport

1. まえがき

近年なるべく自然に近い状態のまま河川を整備しようとする方向が模索されており、河川植生はその一つの鍵となっている。これに伴って河川植生の水理が活発に研究されるようになってきている¹⁾。とくにヤナギ、アシ、ツルヨシなど河川敷で流路に沿って縦断的に連続した群落を形成している例は多く見られ、こうした植生群落による抵抗増加、河川敷や側岸沿いの流速低減効果、横断方向流砂フラックスの出現による河床変動など工学的に研究すべき対象が多い。側岸に沿って植生帯のある流れは、植生帯内部の遅い流れと主流部の早い流れが隣り合うせん断乱流として特徴づけられ、水平2次元流れにおける横断方向の乱流拡散問題として流速分布や浮遊砂濃度分布（それによって浮遊砂による河床横断形状変化）が研究されてきた²⁾。一方、藤田・福岡³⁾によってこうした流れ場では低周波水面変動が出現し横断混合に強くかかわっていることが実験的に見いだされ、著者らは水面変動・流速変動の同時計測に基づく変動の相関構造を明らかにするとともに、こうした低周波変動が付加的抵抗をもたらし過程の説明を試みている⁴⁾。低周波変動の出現については最近Chuら⁵⁾や池田ら⁶⁾が水平2次元せん断乱流が流速分布の変曲点に起因する不安定の結果と考え不安定解析によって卓越周期が求められるとしているが、著者ら⁴⁾はさらに水面変動を取り込んだ閉鎖系の

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野2-40-20)

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部環境地球工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部環境地球工学教室

不安定問題として現象を捉えることを試みている。浮遊砂については既述のように横断方向乱流拡散として取り扱われているが、横断方向の混合はむしろ低周波の横断方向流速の変動としての側面をもっており、こうした低周波変動は掃流運動にも影響を与えるものと考えてよい。すなわち横断方向流によって掃流砂の横断方向フラックスが出現し、横断方向に交番した掃流運動の残差としてネットの横断方向掃流砂量が出てきて、植生帯周辺の地形形成にむしろ浮遊砂より大きく貢献しているだろうとの仮説で、本論文では流速変動の相関構造についての実験結果をもとに横断方向の非平衡な掃流運動をモデル化して解析するとともに水路での移動床実験によってそれを検証する。

2. 側岸部植生帯近傍の水面変動を伴う大規模流体運動と流れ場の表現

側岸部に一樣な植生帯を伴う流れが十分に発達した領域では、植生帯内外で有為な水面変動を伴う大規模な流体運動が生じる。著者ら⁴⁾は、水面変動・流速変動の相関構造を詳細に調べることによってその特性を明かにした。その結果を要約すると次のようである(図1参照)。(1)水面変動・流速変動は低周波で比較的規則正しい。(2)ほぼ植生境界の主流速で移流される。(3)横断方向の運動量混合は主としてこのような低周波の主流速変動・横断方向流速変動の相関によっている。(4)水面変動は横断方向にほぼ同位相であるが、植生域と非植生域で振幅が異なるため交番する横断水面勾配が生じ、横断方向への流体運動のdriving forceとなる。これは水面変動に対する横断方向流速変動の位相差がほぼ $\pi/2$ であることから確かめられる。(5)以上のような流体運動は水深方向にほぼ一樣な特性(同位相)を示しており2次元性の強い現象であると言える。

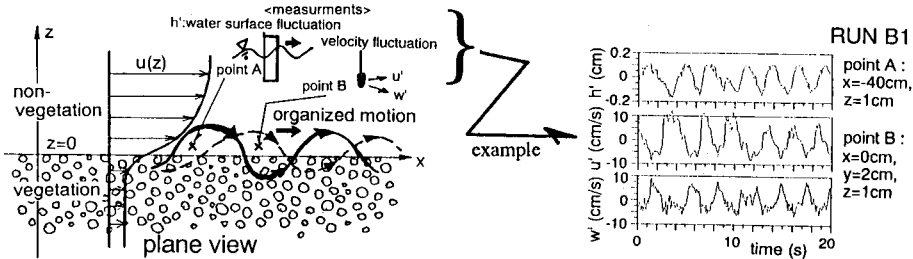


図1 概念図

平均流れの表現について簡単のため山崎ら⁷⁾による水平せん断流としての取り扱いを踏襲すると、渦動粘性係数を横断方向に一定として次のような指数型の流速分布が導かれる。

$$\text{非植生域 } (\bar{z} \geq 0) : \bar{u} = 1 + (\sqrt{\gamma} - 1) \exp(-\bar{z} / \bar{b}_m) \quad (1)$$

$$\text{植生域 } (\bar{z} \leq 0) : \bar{u} = \gamma + (\sqrt{\gamma} - \gamma) \exp(\bar{z} / \bar{b}_s) \quad (2)$$

ここで、座標は図1のようにとり、 $\bar{z} \geq 0$ が非植生域、 $\bar{z} \leq 0$ が植生域を表す。 $\bar{u} \equiv u / u_{m0}$ 、 $u_{m0} \equiv \sqrt{1/C_f} u_{*0}$: 非植生域で水平せん断の影響が及ばない領域の主流速値、 C_f : 非植生域での底面粗度による摩擦損失係数、 $u_{*0} \equiv \sqrt{gh_0 I_e}$ 、 g : 重力加速度、 h_0 : 平均水深、 I_e : エネルギー勾配、 $\bar{z} \equiv z/h_0$ 、 $\bar{b}_m \equiv b_m/h_0 = \sqrt{\varepsilon_{M*}/2 C_f}^{-1/4}$ 、 $\bar{b}_s \equiv b_s/h_0 = \sqrt{\varepsilon_{M*}/2 (C_f + \Omega)}^{-1/4}$ 、 b_m 、 b_s : 非植生域、植生域での混合領域幅スケール、 Ω : 植生密度を表すパラメタ ($\equiv 0.5 C_D \lambda h_0$; C_D : 植生の抗力係数、 λ : 単位体積当たりの植生の遮蔽面積)、 $\gamma \equiv \sqrt{C_f/(C_f + \Omega)}$ 、 $\varepsilon_{M*} \equiv \varepsilon_M / u_{*0} h_0$ 、 ε_M : 渦動粘性係数である。渦動粘性係数について山崎ら⁷⁾、池田ら^{2), 6)}は次のように表現し、さらに比例定数 η について実験結果から経験式が提案されている。

$$\varepsilon_{M*} = f(\bar{b}_m + \bar{b}_s) C_f^{-1/2} (1 - \gamma) \quad (3)$$

幅40cm及び50cm、長さ12mの矩形断面水路の片側に種々の透過係数 ($K_s \equiv (gh_0/\Omega)^{1/2}$; 120cm/s $\sim$ 295cm/s) を持つ円柱群で模擬された植生帯モデルを幅12cm $\sim$ 25cmにわたって水路の片側に設置した実験⁴⁾ (I_e : 0.00165 $\sim$ 0.00294, h_0 : 3 $\sim$ 5cm) で得られた水深平均流速の横断方向分布を式(1)、(2)と比較した例が図2で

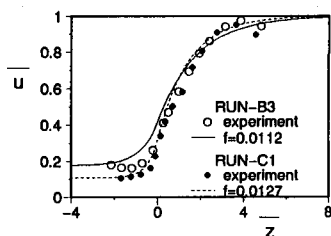


図2 水深平均流速の横断方向分布

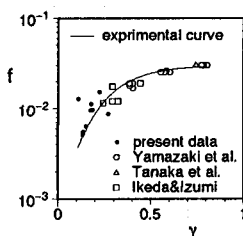


図3 f の値と γ の関係

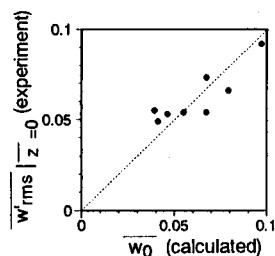


図4 横断方向流速変動の大きさ

ある。式(1) (2)と適合するように決められた f の値を池田ら^{2), 6)}が整理した図に追加したのが図3で、ここでは f の値と γ の関係を次式のように定式化した。 f の値(あるいは渦動粘性係数)は流れ場の性質が集約されたもので、本来は水面変動を伴う大規模流体運動の機構の検討から評価されるべきものである。

$$f = 0.03 \exp \{ -4.0 \exp(-6.0\gamma) \} \quad (4)$$

ところで非植生域・植生域をそれぞれ幅 b_m , b_s の領域で1次元化し両流路の相互作用は交番する横流出入流速で代表して解析を行なうことから、植生境界に働く付加せん断応力は次のように与えられる⁴⁾。

$$\tau/p = (1/\pi)w_0(U_m - U_s) = (\overline{w_0}/\pi)u_{m0}(\overline{U_m} - \overline{U_s}) \quad (5)$$

ここで、 $\overline{w_0} \equiv w_0/u_{m0}$, $\overline{U_m} \equiv U_m/u_{m0}$, $\overline{U_s} \equiv U_s/u_{m0}$, w_0 : 植生境界での流出入流速を正弦波で近似するときの振幅, U_m , U_s : 非植生域, 植生域での平均流速である。先の指数型の流速分布式を用いれば $(\overline{U_m} - \overline{U_s})$ は γ を用いて表され、式(5)は次のように書き直せる。

$$\tau/p = (\overline{w_0}/\pi)u_{m0}^2(1 - \gamma)e^{-1} \quad (6)$$

上式と式(1) (2) (3)の比較から次のように w_0 が f の値と関係づけられる。

$$\overline{w_0} = \pi e f (1 - \gamma) \quad (7)$$

実際の横断方向流速変動の振幅の分布は不規則なので $w'_{rms} \approx w_0$ とみなす。先の実験データから決められた f の値を用いて w_0 を推定し、植生境界の w'_{rms} の実測値と比較したのが図4であり、式(7)の妥当性が確認される。横断方向流速変動の横断方向分布は流速分布の混合領域幅スケールを用いて次式のように近似することとする。

$$\text{非植生域 } (\bar{z} \geq 0) : \overline{w'_{rms}} = \overline{w'_{rms0}} + (\overline{w_0} - \overline{w'_{rms0}}) \exp \{ -(\bar{z}/b_m)^2 \} \quad (8)$$

$$\text{植生域 } (\bar{z} \leq 0) : \overline{w'_{rms}} = \overline{w_0} \exp \{ -(\bar{z}/b_s)^2 \} \quad (9)$$

ここで、 $\overline{w'_{rms0}} \equiv w'_{rms0}/u_{m0}$, w'_{rms0} : 水平せん断の影響のない流れの横断方向乱れ強度の水深平均値で、 $\overline{w'_{rms0}} \approx C_f^{1/2}$ となる。式(8) (9)と実測値を比較した例が図5で、 w'_{rms} の横断方向分布の傾向が概ね表現されている。

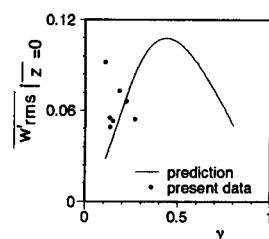
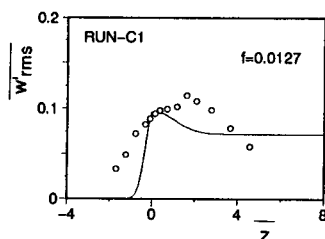
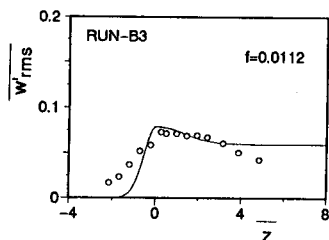


図5 横断方向流速変動の横断方向分布

図6 w_0 と γ の関係

以上のように $f \sim \gamma$ 関係さえ与えられると, C_t , Ω をパラメータとする任意の植生, 河床条件の流れ場について平均流速, 横断方向流速変動の横断方向分布がほぼ表現できる. なお図6には f 値について式(4)の経験式を用い, 式(7)から予測される $\overline{w_0}$ の γ に対する変化を示した.

3. 大規模流体運動に起因する掃流砂の横断方向輸送

植生帯近傍での掃流砂の運動は大規模流体運動の影響を受け, 図7に示されるように流下方向に運動するだけでなく横断方向にも運動する. この掃流砂の横断方向輸送を簡潔に表現するために次の近似をおく. (1) 横断方向流速変動 w' を図8のように振幅が変動の標準偏差 w'_{rms} の正負を繰り返す矩形波で近似する. (2) 掃流砂の運動は大規模流体運動による低周波流速変動に応答して変動するものとする.

図7に示すような掃流砂粒子の運動軌跡に沿って流砂は強い非平衡状態にあり, 上流側の pick-up rate を入力とし流砂量を出力とする畳み込み積分を用いた中川・辻本⁸⁾の非平衡掃流砂量式を運動軌跡に沿って適用する. 一般に掃流力の変化に対する step length Δ の変化が pick-up rate p_s の変化に比べて鈍感であるため平均 step length Λ_E は一定とし, また step length の分布は指数分布に従うとする. このとき $w' > 0$, $w' < 0$ の場合の非平衡流砂量の横断方向成分はそれぞれ次のように書ける.

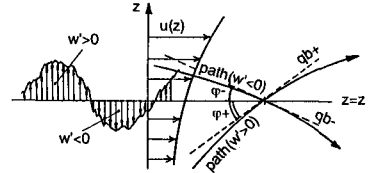


図7 掃流砂の横断方向への運動

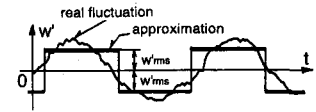


図8 横断方向流速変動の近似

$$q_{Bz+}(z) = \frac{A_3 d}{A_2} \int_0^{\infty} p_s(z-\xi) \exp\left\{-\frac{\xi}{\Lambda_E \sin[\phi_+(z)]}\right\} d\xi \quad (w' > 0) \quad (10)$$

$$q_{Bz-}(z) = \frac{A_3 d}{A_2} \int_0^{\infty} p_s(z+\xi) \exp\left\{-\frac{\xi}{\Lambda_E \sin[\phi_-(z)]}\right\} d\xi \quad (w' < 0) \quad (11)$$

ここに, A_2 , A_3 : それぞれ2次元, 3次元の形状係数, d : 砂粒径, ϕ_+ , ϕ_- : それぞれ $w' > 0$, $w' < 0$ における流砂の方向角の絶対値であり, 上式の有効積分範囲内で z によって決まる一定値で近似した. 一周期の流体運動に対するネットの横断方向掃流砂量は式(10)と式(11)の差で表され, u_{*0} に対する平衡流砂量 q_{B0} で規準化すれば次のようである.

$$\overline{q_{Bz*}^{net}}(\bar{z}) = \frac{1}{\lambda \bar{d}} \left[\int_0^{\infty} \overline{p_{s*}}(\bar{z}-\xi) \exp\left\{-\frac{\xi}{\lambda \bar{d} \sin[\phi_+(\bar{z})]}\right\} d\xi - \int_0^{\infty} \overline{p_{s*}}(\bar{z}+\xi) \exp\left\{-\frac{\xi}{\lambda \bar{d} \sin[\phi_-(\bar{z})]}\right\} d\xi \right] \quad (12)$$

ここで, $\overline{q_{B*}} \equiv q_{B*}/q_{B*0}$, $q_{B*} \equiv q_B/\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3}$, $\overline{p_{s*}} \equiv p_{s*}/p_{s*0}$, $p_{s*} \equiv p_s/\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd}$, α/ρ : 砂の比重, $\lambda \equiv \Lambda_E/d$, $\bar{d} \equiv d/h_0$ であり, 添字の0は局所摩擦速度が u_{*0} となる場所での量を示す.

特に横断河床勾配がない平坦河床では流砂の方向角は流れの方向角 ϕ と一致し $\phi_+ = \phi_- = \phi$ となり, ネットの横断方向掃流砂量は次のように書ける.

$$\overline{q_{Bz*}^{net}}(\bar{z}) = \frac{1}{\lambda \bar{d}} \int_0^{\infty} \left\{ \overline{p_{s*}}(\bar{z}-\xi) - \overline{p_{s*}}(\bar{z}+\xi) \right\} \exp\left\{-\frac{\xi}{\lambda \bar{d} \sin[\phi(\bar{z})]}\right\} d\xi \quad (13)$$

さらに, 上式中の pick-up rate を $\bar{z}$ について Taylor 展開する.

$$\overline{p_{s*}}(\bar{z}-\xi) = \overline{p_{s*}}(\bar{z}) - \xi \frac{\partial \overline{p_{s*}}}{\partial \bar{z}} + \frac{\xi^2}{2} \frac{\partial^2 \overline{p_{s*}}}{\partial \bar{z}^2} - \dots \quad (14)$$

$$\overline{p_{s*}}(\bar{z}+\xi) = \overline{p_{s*}}(\bar{z}) + \xi \frac{\partial \overline{p_{s*}}}{\partial \bar{z}} + \frac{\xi^2}{2} \frac{\partial^2 \overline{p_{s*}}}{\partial \bar{z}^2} + \dots \quad (15)$$

流れ場全体が限界掃流力以上の掃流力を有しており、さらにpick-up-rateの横断方向変化が線形近似できる場合には、上式の ξ の高次項を省略することから結局次式が得られる。

$$\overline{q_{Bz*}^{net}}(\bar{z}) = -2\lambda \bar{d} \sin^2\phi(\bar{z}) \frac{\partial \bar{p}_{s*}}{\partial \bar{z}} \quad (16)$$

しかしながら、一般に植生帯内はかなり掃流力が小さく限界掃流力以下である場合が多いこと、pick-up-rateの掃流力による変化は強い非線形性を有すること（特に限界掃流力付近）から上式の適用範囲は限定される。横断河床勾配がある場合も含め式(16)による近似式の適用が困難な場では、ネットの横断方向掃流砂量は式(12)を直接数値積分して求める他ない。

平坦河床では、前節で述べたように様々な条件について流れ場の特性が調べられ、その結果が近似的に定式化され、任意の植生、河床、水理条件（ Ω , $\bar{d}$, F_{r0} をパラメタとする。ここで、 $F_{r0} \equiv u_{m0}^2/g h_0$, $\bar{d}$ は抵抗則としてManning-Stricklerの式を用い $C_f = 7.66 \bar{d}^{1/3}$ として C_f と結び付けられる。）における平坦河床でのネットの横断方向流砂量が上述の方法で求められる。その結果の例を図9に示した。ただし $\sin\phi \equiv \tan\phi = w'_{rms}/\bar{u}$ とし、各横断方向位置での局所的な掃流力は式(1) (2)で表現される平均流速分布から C_f 一定として逆算した（ $\tau_* = u_*^2 = \bar{u}^2$, $\tau_* \equiv \tau_*/\tau_{*0}$, $\tau_{*0} \equiv u_{*0}^2/[(\alpha\beta-1)gd]$, $\tau_{*0} \equiv u_{*0}^2/[(\alpha\beta-1)gd] = C_f F_{r0}^2/[(\alpha\beta-1)\bar{d}]$, $u_* \equiv u_*/u_{*0}$, u_* : 局所摩擦速度）。また平均step lengthは粒径の100倍とし、pick-up-rateは中川・辻本式⁸⁾によって推定した。図には式(16)と、式(13)を直接数値積分した結果とを併示した。掃流力の大きな範囲では両者はほぼ一致するが限界掃流力付近ではずれが生じることがわかる。河床高の時間変化率（ $\partial y_b/\partial t$ ）は縦断方向に平衡な場では $-(\partial q_{Bz}/\partial z)$ に比例するので、図9の結果は Ω , $\bar{d}$, F_{r0} の選び方によっては堆積域の生じる位置が植生帯外あるいは植生帯内のどちらにもなる可能性のあることを示唆している。植生帯外が堆積域となる場合、堆積域に植生が侵入し植生帯は自らの領域を拡大して河川敷の形成を促進することが予想される。

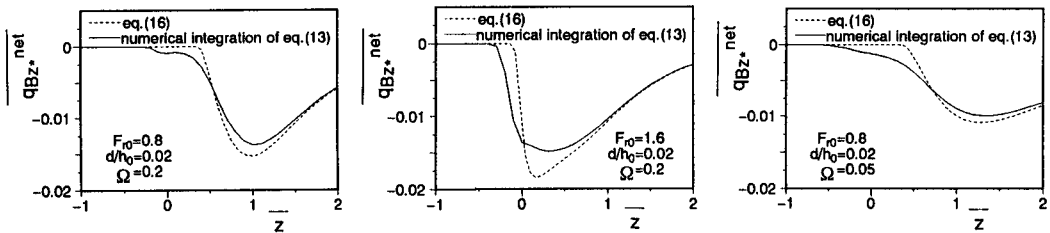


図9 解析モデルによるネットの横断方向掃流砂量の計算例

4. 掃流砂の横断方向輸送と河床変動に関する実験

移動床実験は長さ12m、幅50cmの矩形断面直線水路において、高さ10cm、直径0.25cm、中心間隔2cmの円柱群で模擬された植生帯モデル（透過係数 $K_s=160\text{cm/s}$ ）を水路の上流端より6m下流の位置から下流端まで水路片側に幅25cmだけ設置して行なった。植生帯モデル上流端より1m上流の位置から下流に向かって5mの範囲を水路全幅にわたって移動床とし、残りの部分は固定床とした。移動床は中央粒径0.088cmの均一砂を厚さ4cmだけ植生帯内外ともに平坦となるように数詰めて作成し、固定床は移動床と同一高さとなるようにし、さらに移動床と同一の河床材料をニスつけた。水位は植生高さ以下とし、植生帯を伴う流れが十分に発達した場所（植生帯の上流端より3.5m下流の位置）の前後1mがほぼ等流となるように下流端の堰を調節した。

実験は水路勾配 $i_b=0.01$, $h_0=4.1\text{cm}$ で行ない（ $\Omega=0.157$, $\bar{d}=0.021$, $F_{r0}=1.44$ ）、植生帯の上流端より3.5m下流の位置において流下方向掃流砂量の横断方向分布、植生域・非植生域境界付近のネットの横断方向掃流砂量を測定した。掃流砂量は採砂箱を移動床内に埋め込み、一定時間内（10～20秒）に採砂箱に捕獲される砂の量を計測することにより求めた。特に横断方向掃流砂量の測定には図10に示される採砂箱（深さ2cm）を用い、図のa及びbの部分に捕獲される砂の量の差をa及びbの部分の流下方向長さで除したものをネットの

横断方向掃流砂量とみなした。測定は同一場所で2回行ない平均値を求めた。なお今回の実験条件では非植生域の植生境界から離れた領域で河床波が形成されるが、流砂量の測定は河床波が発達する前に終了した。

図11にネットの横断方向掃流砂量の実測値と式(16)、式(13)の解析モデルから計算される値の比較を示す。ここで流砂量を基準化するのに用いる q_{B0} は流下方向掃流砂量の実測値から外挿して求めた。図より解析モデルは実測値を良く説明する。

通水後10分経過した時点での河床の状態を写真1に示す。植生帯境界よりやや植生帯側に縦断方向に長く筋のような堆積域が生じているのがわかる。この堆積域の横断河床形状は図12に示されるが、上述したネットの横断方向掃流砂分布の解析モデルから予測される堆積位置と良く一致している。

5. あとがき

本研究では植生帯を伴う流れが十分に発達した領域で生じる大規模流体運動に起因した掃流砂の横断方向輸送を、横断方向の非平衡な掃流運動のモデルによる解析と移動床実験から検討した。このような掃流砂の横断方向輸送は通常よく行なわれる平均流速の分布のみを求めて平衡流砂量式を用いる解析からは得られないものである。本研究での解析モデルはネットの横断方向掃流砂量の実測値をうまく表現でき、さらに解析モデルの結果は植生、河床、水理条件によっては植生帯が河川敷の形成を促進することを示した。なお河床変形に伴う流れ場の変化が顕著でない場合には式(12)を用いた逐次計算から河床形状の時間変化を追跡することが可能である。また河床が平坦河床からの変形によって2次流が発達するなど流れ場の性質が変化するような場合は流れの変化を表現できるモデルとのカップリングを行えば本研究の解析モデルはなお適用可能である。今後こうした方向で河川敷形成の過程についての記述・予測へと研究を進める予定である。

謝辞：実験、解析にあたり京都大学大学院生石橋基之君の熱心な協力を得た。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 辻本：植生を伴う流れの水理，水工学シリーズ，91-A-5，土木学会水理委員会，1991。
- 2) 池田・太田・長谷川：側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響，土木学会論文報告集，No.447/II-19，pp.25-34，1992。
- 3) 藤田・福岡：洪水流における水平乱流混合，土木学会論文報告集，No.429/II-15，pp.27-36，1991。
- 4) 辻本・北村：側岸に沿って植生群落がある流路での水面変動を伴う横断混合，水工学論文集36，pp.273-280，1992。
- 5) Chu, V.H., J.H.Wu & R.E. Khayat: Stability of transverse shear flows in shallow open channel, *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol.117, No.10, 1991。
- 6) 池田・太田・長谷川：側岸部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文報告集，No.443/II-18，pp.47-54，1992。
- 7) 山崎・石川・金丸：開水路平面せん断流に関する実験的研究，第39回土木学会年次学術講演会講演概要集，II-237，pp.473-474，1984。
- 8) 中川・辻本：移動床流れの水理，技報堂出版，1986。

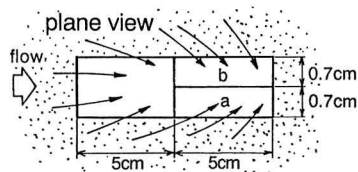


図10 採砂箱

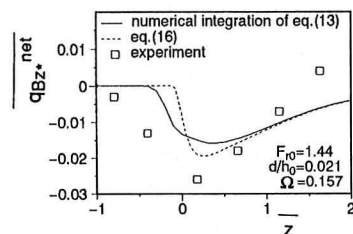


図11 ネットの横断方向掃流砂量の実測値と解析モデルの比較

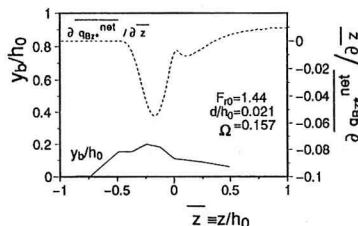


図12 通水10分後の横断河床形状



写真1 通水10分後の河床状態