

側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級*

辻本哲郎**・北村忠紀***・中川博次****

側岸部植生群落周辺でみられる特徴的な低周波流速変動は、交番する横断方向掃流砂をもたらすが、植生群落周辺は横断方向に掃流力が変化する場であるために、一周期平均での正味の横断方向掃流砂フラックスが生き残る。このため、植生境界付近には縦筋が形成され、さらに混合砂礫の場合には分級を伴う。ここでは、横断方向への非平衡掃流過程のモデル化から、こうした縦筋、分級縦筋の形成を説明している。

Key Words: river morphology due to vegetation, organized motion, lateral bed-load transport, sorting, non-equilibrium bed-load transport

1. 緒 言

近年、治水・利水に加えて環境機能も等しく充実させた河川整備が望まれておらず、そこでは河川に存在する植生の取扱いが鍵となってきた。河川には必ずといっていいほど存在しているはずの植生の存在を従来の河川工学ではほとんど無視してきたために、どのように植生の存在を捉えたらよいのかについて議論したり判断するための知見が充分蓄積されていなかったが、最近、ようやく植生を伴う流れについての研究が活発に行われるようになり、実用的な検討³⁾のみならず、興味ある研究対象として次々に様々なアプローチからの研究が行われるようになった⁴⁾。

河川の植生の生態は常に流水との関わりを持つ。例えば、河道内で流量の少いときには陸化したところに植生が侵入して自らの領域を広げ、一方、洪水のときにはその流水に耐えられない植生は衰退する。また、植生の存在は洪水時の流れの様相を変化させ、特徴的な流砂運動を生じさせる。流砂運動の結果として河床変形が生じ、洪水後には変形した河床にその場を好む植生が侵入するといった過程が繰り返され、こうした植生～流れ構造～流砂運動～河床形態の閉じた、しかも動的な系が植生を含む河道の姿（動態）であると考えられる。Fig.1はこのことを模式的に書いたものである。このような植生を含む移動床系を総合的に理解していく必要があるが、本論文ではこのうち図の実線で示したプロセスについて

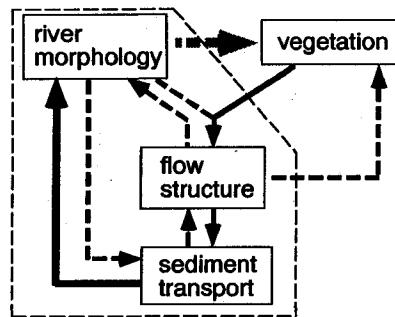


Fig.1 Fluvial system with vegetation

検討する。すなわち、植生群落が存在することによる特徴的な流れが流砂現象に影響し、その結果としてどのような河床形態が出現するのかという点について基礎的な検討を行うものである。

植生の絡む土砂輸送、河道形態に関する従来の研究には次のようなものがあげられる。泉・池田⁵⁾は掃流砂を対象とし、直線流路の平衡河床形状に与える植生の効果について理論的に研究している。ただし、最終形状を予測するもので、出現・形成過程については議論されていない。

一方、流れが流砂現象に与える影響という観点では、池田ら⁶⁾が側岸に植生群落を伴う流れ場の平均流速分布を一定の渦動粘性係数を用いた解析によって求め、その特徴的な流れが浮遊砂輸送に及ぼす影響を定量的に表現している。また、管・中井⁷⁾は浮遊砂輸送とそれによる河床変形に伴う流れ場の変化の関連について実験的に検討し、佐野ら⁸⁾は高水敷上に存在する植生が浮遊砂輸送に及ぼす影響を実験的に検討している。

これらはいずれも浮遊砂輸送についての検討である

* 本論文の内容の一部は第37回水理講演会¹⁾、第38回水理講演会²⁾で発表済みであるが、その後検討を加えてとりまとめたものである。

** 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
**** 正会員 工博 京都大学教授 工学部環境地球工学教室

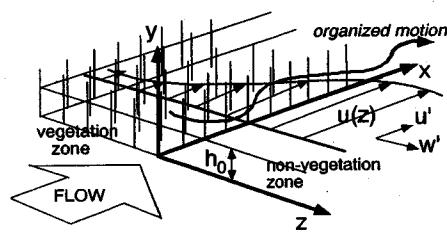


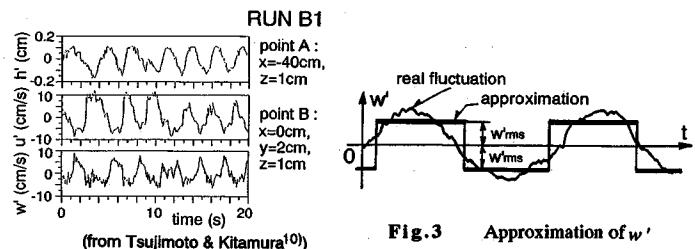
Fig. 2 Characteristics of flow with longitudinal zone of vegetation near side wall

が、浮遊砂輸送のみでなく、掃流形態での土砂輸送についても充分把握する必要があるものと考えられる。すなわち、実河川での複雑な河床形態形成プロセスを理解する手段の一つとして、掃流形態での輸送という一つの素過程を明らかにしておくことは、植生を伴う移動床系の理解を深めるはずである。

後述するように、植生群落を伴う流れでは低周波変動が出現し、掃流過程にも影響を与えている。本論文では、これまでの研究で明らかにされた側岸部に植生群落を伴う流れの特性をモデル化し、これに影響される掃流過程のモデルを組み立て、植生群落周辺に出現する河床形態について解析的現象記述を行う一方、基礎的な移動床実験を行う。移動床実験については、まず河床材料が均一砂であるとし、植生群落境界近傍に出現する縦筋に着目した。次に、混合粒径を対象とし、このときには縦筋河床が分級縦筋を伴う点に着目している。

2. 側岸部に植生群落を伴う流れ場の特徴と掃流砂運動

側岸部に植生群落を伴う流れが充分に発達した場合は、植生群落内の遅い流速と植生群落外の速い流速が隣りあう場として特徴づけられ、さらに植生群落内外での水面変動を伴う低周波の流速変動が横断混合に大きく貢献している。こうした現象については、様々な角度から実験的^{9)~11)}、理論的¹²⁾、数値計算的^{13)~16)}アプローチがとられている。著者ら¹⁰⁾も同時計測を工夫してこうした流れ場の特徴を捉えており、それを要約すると次のようである（Fig.2参照）。（1）水面変動・流速変動は比較的低周波で規則正しく、ほぼ混合領域の平均流速程度で移流される。（2）横断方向の運動量輸送は主としてこうした低周波の主流速変動、横断方向流速変動の相関構造によっている。（3）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を生じ、横断方向への流体運動が駆動される。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 $3\pi/2$ であることからも支持される。（4）以上のような流体運動は水深方向にほぼ同じ位相を呈しており、2次元性の強い現象であるといえる。

Fig. 3 Approximation of w'

円柱群を用いた植生群落モデルを水路の片側に配置して通水し、植生群落モデル周辺に何個かの粒子を入れて掃流運動させ、その運動の様子をビデオ撮影によって観察すると、粒子は横断方向にゆったりとジグザグしながら下流へ運ばれる様子がわかる。掃流砂の運動は通常乱れの影響は受けず平均流のみに規定されるが、上記の流れ場では低周波の流速変動が横断混合に貢献しており、しかもそれが平面2次元的であるため、底面付近の掃流粒子も低周波流速変動の影響を受けることになる。こうした掃流粒子の交番する横断方向の運動は移動床においては交番する掃流砂の横断方向フラックスをもたらすことを示している。

3. 植生群落周辺の掃流過程のモデル化

植生群落周辺での掃流砂の横断方向輸送を簡潔に表現するために、低周波の横断方向流速変動 w' をその標準偏差 w'_{rms} で正負を繰り返す矩形波で近似する^{注1)}（Fig.3参照）。このとき、掃流砂の運動方向は x 軸（流下方向座標）に対して偏るが、これらの角度を ϕ_1 , ϕ_2 と表す（ここで、添字1, 2はそれぞれ $w'>0$, $w'<0$ のときの値を示す）。低周波変動の1周期 ΔT_L のうち、 $w'>0$, $w'<0$ となる時間はそれぞれ ΔT_L の半分 $\Delta T_L/2$ である。植生群落周辺は横断方向に掃流力が変化する場であり、ここでは流砂の運動軌跡に沿って中川・辻本¹⁷⁾の非平衡掃流砂量式を適用する。 $\Delta T_L/2$ 時間内の掃流砂の横断方向輸送量 $q_{Bzj}\Delta T_L/2$ は、 $w'>0$, $w'<0$ の場合それぞれ（ $j=1$ 及び $j=2$ ）に対して次のように書かれる。

$$q_{Bzj}(z) \cdot \frac{\Delta T_L}{2} = -(-1)^j \frac{A_3 d}{A_2} \int_0^{\infty} P_s[z + (-1)^j \xi] \cdot \exp \left\{ -\frac{\xi}{A \sin[\phi_j(z)]} \right\} d\xi \cdot \frac{\Delta T_L}{2} \quad (1)$$

ここで、 z : 横断方向座標であり、 $z=0$ が植生境界、 $z<0$ が植生域内を示す。添字 j は $w'>0$ のとき1, $w'<0$ のとき2

注1) 後述する流れ場の記述との整合性からは、横断方向流速変動は正弦波として近似すべきであるが、取扱いの容易さから、ここでは矩形波近似とした。ただし、矩形波近似によっても、掃流砂の横断方向成分が交番するという本質的な特徴は捉えることができる。

である。 ξ : 横断方向距離, A_2, A_3 : それぞれ砂礫の2次元, 3次元形状係数, d : 砂粒径, p_s : 砂礫のpick-up rate, Λ : 砂礫の平均step lengthであり, step lengthの確率密度関数は指数分布に従うものとした。

$z-\xi, z+\xi$ の位置でのpick-up rate及び掃流砂の偏向角($|\phi_1|, |\phi_2|$)が異なることから, $q_{Bz1}(z), q_{Bz2}(z)$ は必ずしもバランスせず, 1周期の流体運動による正味の横断方向掃流砂量 $q_{Bz}^{net}(z)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} q_{Bz}^{net}(z) \cdot \Delta T_L &= q_{Bz1}(z) \cdot \frac{\Delta T_L}{2} + q_{Bz2}(z) \cdot \frac{\Delta T_L}{2} \\ &= \frac{A_3 d}{2 A_2} \int_0^\infty \left[p_s(z-\xi) \exp\left\{-\frac{\xi}{\Lambda \sin \phi_1(z)}\right\} \right. \\ &\quad \left. - p_s(z+\xi) \exp\left\{-\frac{\xi}{\Lambda \sin \phi_2(z)}\right\} \right] d\xi \cdot \Delta T_L \end{aligned} \quad (2)$$

河床の横断勾配がそれほど大きくなきとき, 掃流砂の運動方向角は流れの方向角 β 及び横断河床勾配 θ と次のように関係づけられる¹⁸⁾。

$$\tan \phi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\mu_d T^*}} + \tan \beta \quad (3)$$

ここで, $T^* \equiv \mu_d \tau_s / \tau_{*e}$, μ_d : 砂粒の動摩擦係数, $\tau_s \equiv u_*^{*2} / \{(\sigma/\rho-1)gd\}$, u_* : 摩擦速度, σ : 砂の比重, ρ : 水の密度, τ_{*e} : 限界掃流力である。横断河床勾配がない平坦河床では, 掫流砂の運動方向角は流れの方向角と一致し, $\phi(z) \equiv |\phi_1(z)| = |\phi_2(z)|$ となる。このとき, 式(2)は次のように書ける。

$$q_{Bz}^{net}(z) = \frac{A_3 d}{2 A_2} \int_0^\infty \left[p_s(z-\xi) - p_s(z+\xi) \right] \exp\left[-\frac{\xi}{\Lambda \sin \phi(z)}\right] d\xi \quad (4)$$

さらに, 上式中のpick-up rateを ξ についてTaylor展開すると,

$$p_s\{z+(-1)^j \xi\} = p_s(z) + (-1)^j \xi \frac{\partial p_s}{\partial z} + \frac{\xi^2}{2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial z^2} + \dots \quad (5)$$

のようく表される。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。

$$q_{Bz}^{net}(z) = -\frac{A_3 \Lambda^2 d}{A_2} \frac{\partial p_s}{\partial z} \sin^2 \{\phi(z)\} \quad (6)$$

しかしながら, 一般に植生群落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(6)による近似式の適用が困難な場では, 正味の横断方向掃流砂量は式(2)を直接数値積分して求める他ない。

4. 流れ場の表現

山崎ら¹⁹⁾による水平せん断流としての取り扱いを踏襲すると, 湍動粘性係数を横断方向に一定として次のような主流速の指型横断方向流速分布が導かれる。これらは池田ら^{6), 12)}の1次のオーダーの近似式と一致する。

$$\left. \begin{aligned} u_s &= 1 + (\sqrt{\gamma} - 1) \exp\left(-\frac{z}{b_m}\right) \quad (z \geq 0) \\ u_s &= \gamma + (\sqrt{\gamma} - \gamma) \exp\left(\frac{z}{b_s}\right) \quad (z \leq 0) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで,

$$\gamma = \frac{u_{s0}}{u_{m0}} = \sqrt{\frac{C_f}{C_f + \Omega}} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{b_m}{h_0} &= \sqrt{\frac{E_{M*}}{2} C_f^{-1/4}} \\ \frac{b_s}{h_0} &= \sqrt{\frac{E_{M*}}{2} (C_f + \Omega)^{-1/4}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

であり, $z \geq 0$ が非植生域, $z \leq 0$ が植生域を表わす。また, $u_s \equiv u/u_{m0}$, $u_{m0} \equiv u_{s0}/\sqrt{C_f}$: 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, $u_{s0} \equiv u_{s0}/\sqrt{C_f + \Omega}$: 植生域の固有浸透流速, C_f : 非植生域での底面粗度による摩擦損失係数, $u_{s0} \equiv \sqrt{gh_0 I_e}$, g : 重力加速度, h_0 : 平均水深, I_e : エネルギー勾配, Ω : 植生密生度を表すパラメータ($\equiv 0.5 C_p \lambda h_0$; C_p : 植生の抗力係数, λ : 水の単位体積当たりにおける植生の遮蔽面積), b_m, b_s : 非植生域, 植生域での混合領域幅スケール, $\varepsilon_{M*} \equiv \varepsilon_M / (u_{s0} h_0)$, ε_M : 湍動粘性係数である。

池田ら^{6), 12)}は植生境界に働くせん断力 τ_{int} を非植生域, 植生域で水平せん断の及ばない領域での主流速値の差($u_{m0} - u_{s0}$)を用いて, 次のように表した。

$$\frac{\tau_{int}}{\rho} = f(u_{m0} - u_{s0})^2 = f \cdot u_{m0}^2 (1 - \gamma)^2 \quad (10)$$

ここで, ρ : 水の密度であり, 係数 f (境界混合係数; ただし, 藤田・福岡⁹⁾の定義とは異なる)については実験結果に基づいて次の経験式が提案されている。

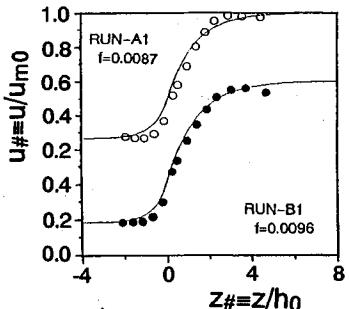
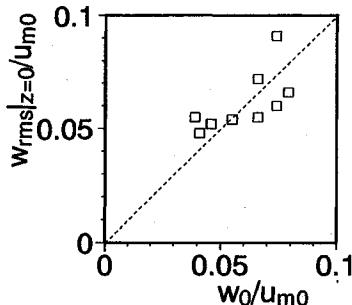
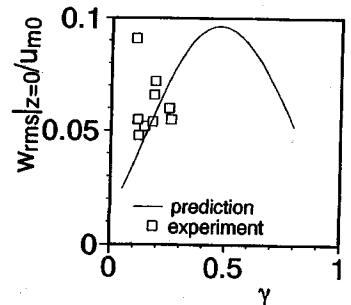
$$f = 0.035 \exp\{-2.95 \exp(-3.87)\} \quad (11)$$

また, 植生境界に働くせん断力 τ_{int} が式(10)のように表されるとき, 湍動粘性係数は次のように書ける。

$$\varepsilon_{M*} = \frac{f}{\sqrt{C_f}} (1 - \gamma) \frac{(b_m - b_s)}{h_0} \quad (12)$$

式(7)と実測値¹⁰⁾の適合性はFig.4に示されるように概ね良好であり(ここで係数 f は実測値を最もよく表現できるように選んでいる), 主流速の横断方向分布は式(7)で概ね表現できる。

ところで非植生域・植生域を幅 b_m, b_s の混合領域でそれぞれ1次元化し両流路の相互作用は交番する横流入出流速で代表する解析から, 植生境界に働く付加せん断応力 τ_{int} は次のように与えられる¹⁰⁾。

Fig. 4 Transverse distribution of mean primary velocity u Fig. 5 Comparison between w_0 and $w_{rms}|_{z=0}$ Fig. 6 Relation between w_0 and γ

$$\frac{w_0}{\rho} = \frac{w_0(U_m - U_s)}{\pi} = \frac{1-\gamma}{\pi} w_0 u_m \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 w_0 ：植生境界での横流出入流速を正弦波で近似するときの振幅、 U_m 、 U_s ：それぞれ非植生域、植生域の混合領域内での平均流速であり、 U_m 、 U_s について式(7)の指数型流速分布式を積分して与えると、式(13)中の最右辺の式となる。式(13)と式(10)を比較することから、次のように w_0 が f と関係づけられる。

$$\frac{w_0}{u_m} = \pi e(1-\gamma) \cdot f \quad \dots \dots \dots (14)$$

横断方向流速変動が実測されている著者らの実験¹⁰⁾において、主流速の横断方向流速分布が式(7)に最も適合するように選ばれた係数 f を用いて式(14)から w_0 を求め、植生境界の w_{rms} の実測値($w_{rms}|_{z=0}$)と比較したのがFig.5であり、式(14)によって推定される w_0 値はほぼ $w_{rms}|_{z=0}$ を表現できる。なお、Fig.6には境界混合係数 f について式(11)の経験式を用い、式(14)から予測される w_0 の γ に対する変化を示した。

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を用いて次式のように近似することとする。

$$\begin{aligned} w_{rms}(z) &= w_{rms0} + \{w_{rms}|_{z=0} - w_{rms0}\} \exp[-(z/b_m)^2] \quad (z \geq 0) \\ w_{rms}(z) &= w_{rms}|_{z=0} \exp[-(z/b_s)^2] \quad (z \leq 0) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 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、 $w_{rms0} \equiv u_{*0}$ となる。

以上により、 $f \sim \gamma$ 関係の経験式から出発すれば、 C_f 、 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、横断方向流速変動がほぼ表現できる。

5. 横断方向掃流砂量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群落モデル（透過係数： $K_s \equiv (gh_0/\Omega)^{1/2} = 160\text{cm/s}$ ）を水路上流端より6m下流の位置から下流端まで6mの区間にわたって水路片側に幅25cmだけ設置し

て行った。植生群落モデル上流端より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（Fig.7参照）。移動床は中央粒径0.088cmの均一砂を厚さ4cmだけ植生域内外ともに平坦となるように敷詰めて作成した。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づけした。水位は植生高さ以下とし、植生群落を伴う流れが充分に発達した領域（植生群落モデルの上流端より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。実験は流れが充分に発達した平衡部の水深を $h_0 = 4.1\text{cm}$ 、水路勾配 $i_0 = 1/100$ として行なった。実験条件をTable 1に示す。

植生群落モデルの上流端より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、植生境界付近での正味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採砂箱の周辺が掘れないよう注意深く埋め込み、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Fig.8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と正味の横断方向掃流砂量とみなした。測定は同一場所で数回行ない、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顕著になる前に終了した。なお、実験中上流からの給砂は行っていない。

Fig.9に正味の横断方向掃流砂量の実測値を非植生域で水平せん断の影響の及ばない領域での流下方向掃流砂量 q_{B_0} の実測値（外挿値）で無次元化 $(q_{B_0}^{net} \equiv q_{B_0}^{net}/q_{B_0})$ して示した。図より、植生境界付近で最大値を持ち、植生域へ向かう正味の横断方向掃流砂の存在が確認される。

平坦河床では4章で示したように様々な条件について流れ場が近似的に表現できる。ここでは植生、河床、水理条件を表す Ω 、 d/h_0 、 F_r をパラメタとする。ただし、 $F_r \equiv u_{*0}^2/gh_0$ であり、 d/h_0 は抵抗則としてManning-Stricklerの式を用い、 $C_f = 7.66^2(d/h_0)^{1/3}$ として C_f と結び付

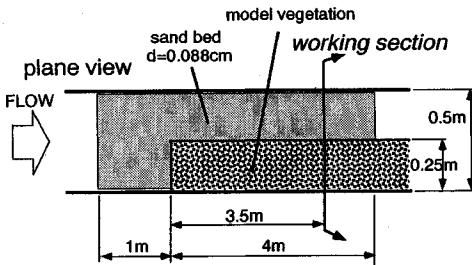


Fig. 7 Setup of vegetation model and sand bed

Table 1 Experimental condition

d (cm)	I_b	h_0 (cm)	$u \cdot g$ (cm/s)	Ω	d/h_0	F_{r0}
0.088	1/100	4.1	6.34	0.157	0.021	1.45

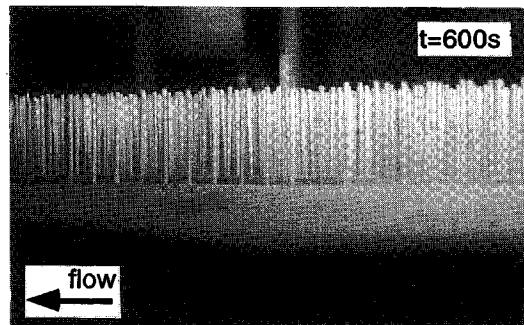


Photo 1 Sand ridge near vegetation zone

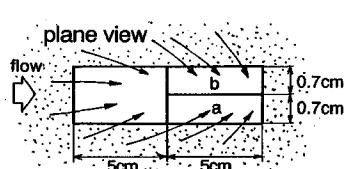


Fig. 8 Devised sand trap

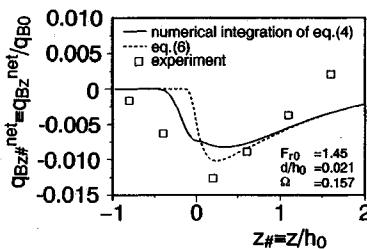


Fig. 9 Transverse distribution of net lateral transport rate of bed-load

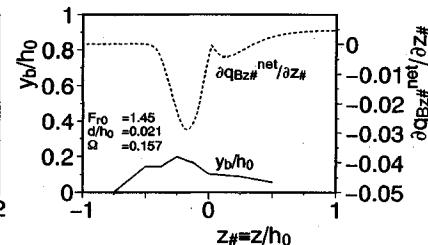


Fig. 10 Transverse bed profile near vegetation zone

けられる。流砂の方向角 $\phi(z)$ は $\sin\{\phi(z)\} \equiv \tan\{\phi(z)\} = w_{rms}(z)/u(z)$ とし、各横断方向位置での局所的な掃流力は式(7)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（非植生域で水平せん断の影響の及ばない領域での無次元掃流力は $\tau_{s0} \equiv u_{s0}^2/((\sigma/\rho-1)gd) = C_f F_{r0}^2/((\sigma/\rho-1)(d/h_0))$ と書け、 Ω 、 d/h_0 、 F_{r0} によって決まる）。また、平均step lengthは粒径の100倍とし、pick-up rateは次の川・辻本式¹⁷⁾によって推定する。

$$\frac{p_s}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd}} = 0.03\tau_* \left(1 - \frac{0.035}{\tau_*}\right)^3 \quad \dots \dots \dots (16)$$

このとき、3章のモデルによって植生群落周辺の掃流過程が記述される。Fig.9には、式(6)による正味の横断方向掃流砂量及び式(4)を直接数値積分して得られた結果を併示した。ただし解析結果は $q_{Bz} = (A_s/A_d)p_{s0}Ad$ (p_{s0} : τ_{s0} に対応するpick-up rateである)で無次元化されている。図より、両者とも実測値の傾向をうまく表現しているが、限界掃流力付近では式(4)を直接数値積分した結果の方が実測値をうまく表現出来るようである。以後、本論文では解析結果として式(4)を直接数値積分した結果を用いることとする。

通水後10分経過した時点での河床の状態をPhoto 1に示す。植生域境界よりやや植生域側に縦断方向に長く筋のような堆積域（縦筋）が生じているのがわかる。この堆積域の横断河床形状はFig.10に示される。河床高の時

間変化率($\partial y_b/\partial z$)は縦断方向に平衡な場では $-(\partial q_{Bz}^{\text{net}}/\partial z)$ に比例し、 $-(\partial q_{Bz}^{\text{net}}/\partial z)$ が最大となる位置が最大堆積傾向位置となるが、図に併示された $-(\partial q_{Bz}^{\text{net}}/\partial z)$ の解析結果から分かるように、解析モデルは移動床実験で出現した縦筋の位置をほぼ再現している。

以上より、植生群落周辺での掃流砂の横断方向輸送を本解析モデルにより表現できることが確かめられた。

6. 縦筋地形の形成に関する考察

植生、河床、水理条件 (Ω 、 d/h_0 、 F_{r0}) を変化させて正味の横断方向掃流砂量を計算した例をFig.11に示す。図より、概ね限界掃流力程度となる横断位置付近が最大堆積傾向位置となり、掃流力が小さいような条件では、非植生域が堆積傾向となる。すなわち、条件の取り方によっては堆積傾向となる位置が植生域、非植生域どちらにもなる可能性があることが分かる。浮遊砂を対象とした池田ら⁶⁾の解析では、ほぼ植生域内では堆積、植生域外では洗掘となる傾向であるのに対し、掃流砂を対象とした本解析では必ずしもそうならない点が興味深い。ただし、掃流力が小さい条件では、 q_{Bz} 自体が小さいため、 $-(\partial q_{Bz}^{\text{net}}/\partial z)$ が小さくなり、今取り扱っている現象による河床の変形速度は遅く、実験室ではこれらの現象の確認は容易でないし、実河川では洪水継続時間との対応も問題となろう。なお、Fig.12に植生、河床、水理条件

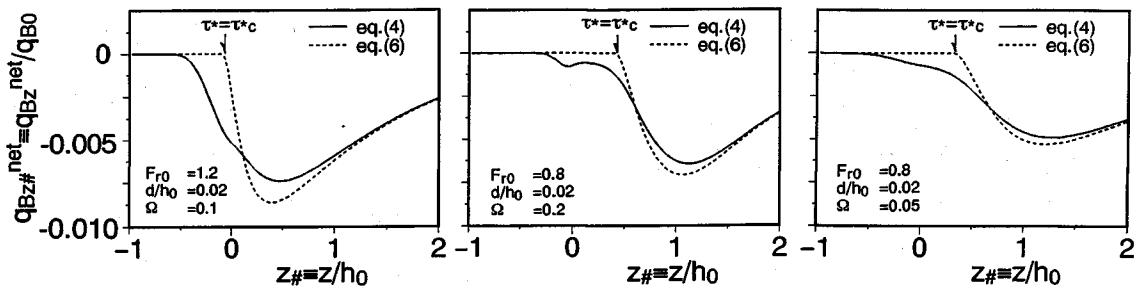
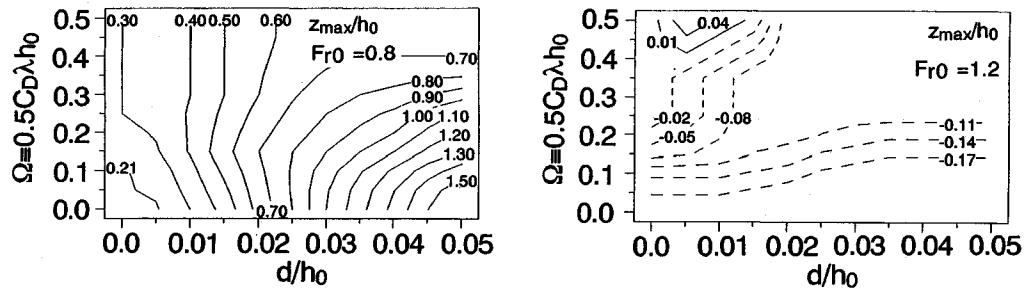
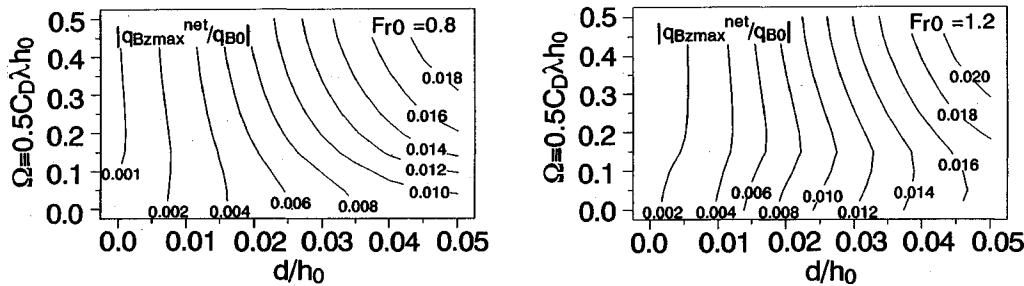


Fig. 11 Calculated net lateral transport rate of bed-load

Fig. 12 Contour of z_{\max}/h_0 on $\Omega-d/h_0$ planeFig. 13 Contour of $|q_{Bzmax}^{net}/q_{B0}|$ on $\Omega-d/h_0$ plane

件による最大堆積傾向位置 z_{\max}/h_0 の変化を、幾つかの F_r について $\Omega \sim d/h_0$ 平面上にコンター表示した。

ところで、ここでの正味の横断方向掃流砂量は、横断方向に掃流力が変化するような場であるために、掃流砂礫が植生域へ向かって運動するときと非植生域へ向かって運動するときで横断方向掃流砂量に差があるために生じるものであり、本解析モデルはこのことを非平衡掃流砂量式を用いて表現した。このため、流砂運動の非平衡性が現象に対して重要な要素となり、流砂運動の非平衡性に関するスケールが場のスケールに比べて充分小さい場合、今対象としている現象は河床形成に対してそれほど重要でなくなる可能性がある。流砂運動の非平衡スケールは平均step lengthで代表され、平均step lengthは砂粒径 d によってほぼ決まる量である。場のスケールとしては、非平衡性の原因となっているのが横断方向への

掃流力の変化であることから、混合領域幅で代表されよう。混合領域幅は植生や水理条件で変化するが、ほぼ水深 h_0 の数倍程度である。このことから、正味の横断方向掃流砂量の大きさは砂粒径 d と水深 h_0 の比 d/h_0 に強く支配される。Fig.13は水平せん断の影響の及ばない領域での流下方向掃流砂量 q_{B0} で基準化された正味の横断方向掃流砂量の絶対値の最大値($|q_{Bzmax}^{net}/q_{B0}|$)の植生、河床、水理条件による変化を、幾つかの F_r について $\Omega \sim d/h_0$ 平面上にコンター表示したものである。図より、 $|q_{Bzmax}^{net}/q_{B0}|$ は d/h_0 に強く影響され、 d/h_0 が大きいほどその絶対値は大きくなる。このことは、河床材料が大きく、洪水時でも比較的水深が小さく流れが激しい扇状地河川や山地河川で、今回取り扱ったような現象がより顕著に現れることを示している。

Table 2 Experimental condition (for non uniform sand bed).

RUN	d_1 (cm)	d_2 (cm)	p_{10}	i_b	h_0 (cm)	u_{*0} (cm/s)	Ω
RUN 1	0.088	0.034	0.5	1/150	4.0	5.11	0.152
RUN 2	0.088	0.034	0.5	1/300	4.0	3.61	0.152

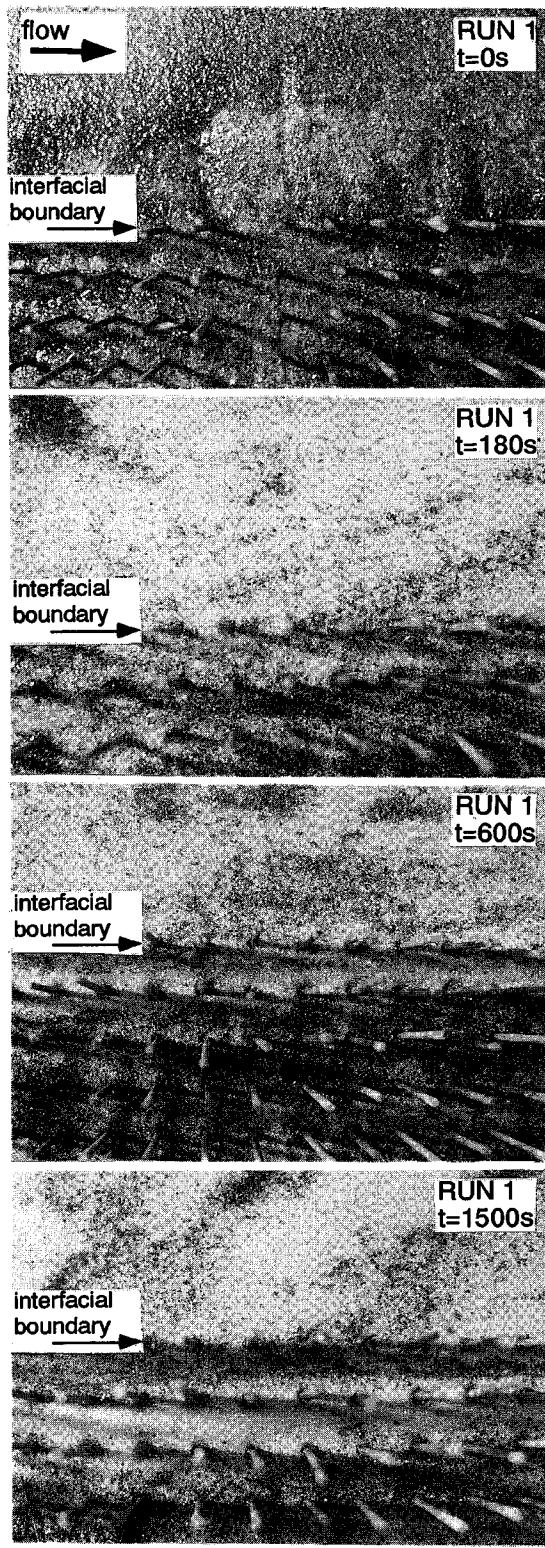
7. 混合砂礫床での移動床実験

混合砂礫床での移動床実験は、5章の均一砂を用いた実験と同じ水路、植生群落モデル及びその配置状態を行った。ただし、実験の都合上、移動床区間は若干短くし、植生群落モデル設置上流端より2m下流の位置から下流に向かって3mの区間とした。混合砂礫床は粗細2粒径で代表し、粗砂、細砂についてそれぞれ中央粒径0.088cm, 0.034cmの均一砂を用い、これを体積割合で50%づつ混ぜ合わせたものを混合砂礫として用いた。粗砂には緑色の着色を施し、それぞれの粒径の砂の運動状態、粒度構成が分かるようにした。移動床部分を表層の粒度構成に偏りがないように注意深く、植生域内外ともに平坦となるように敷き詰め、そこに水流を導き、植生群落を伴う流れが充分に発達した領域で、ほぼ等流状態となるように下流端の堰を調節した。水位 h_0 は植生高さ以下の4cmとし、路床勾配 i_b は1/150, 1/300の2通りとした。実験条件をTable 2に示す。

通水後、適当な時間毎に注意深く通水を止め、植生群落モデル設置上流端から4m下流の位置で、河床高さの変化をポイントゲージを用いて計測するとともに、河床状態を写真撮影により記録した。なお、計測地点の上下流部ではほぼ同様の現象が生じており、固定床・移動床接続部から充分下流では流下方向への現象の違いのないことを確認した。さらに、通水中給砂は行っておらず、実験は固定床・移動床接続部の洗掘が顕著となってくる前に終了した。

Photo 2はRUN 1における河床表層の粒度構成の変化を示したものである。 $t=180s$ では植生境界付近にぼんやりと細砂の分級縦筋が形成され、 $t=600s$ ではそれがはっきりと確認されるようになり、 $t=1500s$ では植生域内部へその位置をシフトしている。また非植生域では縦断方向の交互分級（diffuse gravel sheet²⁰⁾）が形成されている。Fig. 14は植生境界付近の横断河床形状の時間変化を示したものであるが、植生境界付近に砂礫が堆積し、縦筋が形成されていく様子が分かる。この縦筋は時間の経過とともに植生域内部へ位置をずらしていく。Fig. 14にはPhoto 2より読みとらる細砂の分級縦筋の位置を併示したが、その形成位置は縦筋のクレスト部分にほぼ対応している。

こうした細砂の分級縦筋は、そこに細砂を好むような植生が選択的に侵入する可能性も考えられ、植生と河道の動態を考える上でもきわめて興味深い現象であるといえよう。

**Photo 2** Process of lateral sorting near vegetation zone.

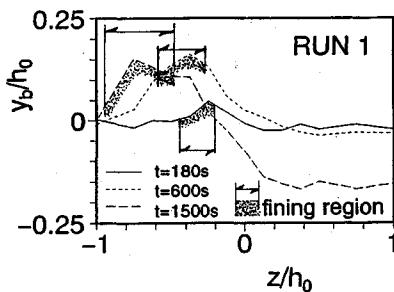


Fig.14 Growth of sand ridge and change in fining region

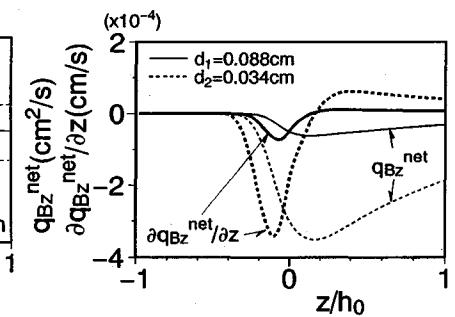
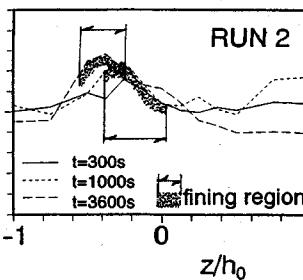


Fig.15 Calculated net lateral fractional transport rate of bed-load for each grain size

8. 解析モデルの粒径別砂礫への適用

ここでは3章の基本的考え方によれば、様々な分級現象を巧みに説明する辻本ら^{20), 21)}による粒径別非平衡掃流砂モデルを追加して適用し、前章で述べた分級過程の記述を試みる。

河床表層に占める粒径 d_i の砂礫の体積含有率を p_i 、そのクラスの砂礫のpick-up rateを p_{si} とし、砂礫粒子のstep lengthの確率密度関数が粒径別に平均値 A_i の指數分布に従うものとすると、粒径別横断方向掃流砂量は $w'>0$ 、 $w'<0$ の場合について、それぞれ次のように書ける。

$$q_{Bzi}(z) \cdot \frac{\Delta T_L}{2} = -(-1)^i \frac{A_3 d_i}{A_2} \int_0^\infty p_i \left\{ z + (-1)^i \xi \right\} p_{si} \left\{ z + (-1)^i \xi \right\} \exp \left\{ -\frac{\xi}{A_i \sin[\phi_{ij}(z)]} \right\} d\xi \cdot \frac{\Delta T_L}{2} \quad (17)$$

ここで、添字*i*は各粒径クラス*i*の量であることを示し、添字*j*は $w'>0$ のとき1、 $w'<0$ のとき2である。また、 ϕ_{ij} ：流砂の方向角である。流砂の方向角 ϕ_{ij} は平坦河床では流れの方向角と一致する。

一周期の流体運動による粒径別の正味の横断方向掃流砂量は次のように表される。

$$q_{Bzi}^{net}(z) = [q_{Bzi1}(z) + q_{Bzi2}(z)]/2 \quad (18)$$

粒径別pick-up rateは辻本ら^{20), 21)}に従い、

$$\frac{p_{si}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_i}} = 0.03 \tau_{ci} \left(1 - \frac{0.7 \tau_{ci}}{\tau_{cem}} \right)^3 \quad (19)$$

で与える。ここで、 $\tau_{ci} \equiv u_*^2 / ((\sigma/\rho-1)gd_i)$ である。粒径別の限界掃流力 τ_{ci} については、Egiazaroff²²⁾の研究に代表されるが、ここでは動的分級の解析で辻本ら^{20), 22)}が用いた次式を援用する。

$$\frac{\tau_{ci}}{\tau_{cem}} = \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-1} \quad (20)$$

ここで、 τ_{cem} ：平均粒径 d_m に対する無次元限界掃流力であり、便宜上均一砂の無次元限界掃流力で代用する。式(20)は粒径が異なっても移動限界は等しいことを示しており、移動限界の差による分級を除外して説明すること

になる（動的分級は移動限界に差がなくても生じる^{20), 22)}こと、また、すべてのクラスの砂が運動状態にあるときはむしろ式(20)が成立することに配慮した）。ここでは平均粒径 d_m を次式で定義する。

$$d_m = \sum_{i=1}^n d_i p_i \quad (21)$$

上述の掃流過程の計算に必要な流れ場について、4章の表現を用いると、粒径別の正味の横断方向掃流砂量は例えば本実験のRUN 1に対してFig.15のように計算される。ただし、非植生域での底面粗度による摩擦損失係数は平均粒径 d_m からManning-Strickler式を用いて逆算した。また、植生境界付近で平均粒径 d_m を用いた砂粒Reynolds数が20~30であることから、岩垣公式²⁴⁾より $\tau_{cem}=0.034$ とした。各粒径の砂礫の平均step lengthは、混合砂礫床における砂粒運動を検討した中川ら²⁵⁾の結果から、粒径で無次元化した平均step lengthは $\lambda_1=20$ 、 $\lambda_2=100$ ($\lambda_i \equiv A_i/d_i$)とした。

Fig.15には $\partial q_{Bzi}^{net} / \partial z$ も併示したが、植生境界から植生域内にかけて細砂の方が大きな絶対値を持つことから、この領域で細砂の堆積が粗砂に比べて相対的に卓越し、河床が細粒化する傾向にあることを示している。

このように、移動床実験で出現した植生域内での細砂の分級縦筋は、低周波流速変動によって出現する正味の横断方向掃流砂量が粒径毎に異なることに起因するものであると言える。

9. 分級縦筋形成のシミュレーション

正味の横断方向掃流砂フラックスの存在により、河床高さ、河床表層の粒度構成が変化し、流れ場も変化するが、ここでは流れの変化が無視できる段階での分級縦筋形成過程の記述を試みる。

正味の横断方向掃流砂により、 Δz 区間で Δt 時間内に堆積または、侵食される粒径*i*クラスの砂の見かけの体積 Δq_i は、

$$\Delta q_i = -\frac{1}{1-\rho_0} \frac{\partial q_{Bzi}^{net}}{\partial z} \Delta z \Delta t \quad (22)$$

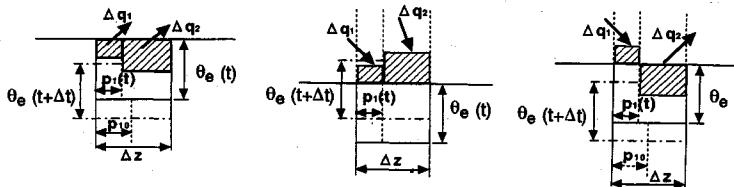


Fig.16 Treatment of active layer

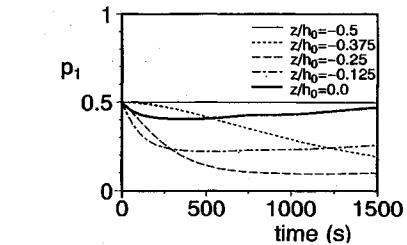
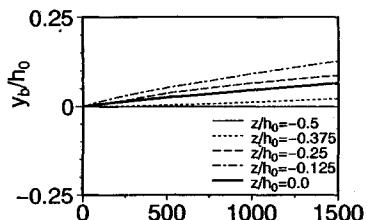


Fig.18 Calculated results on transverse distribution of bed level and bed-surface composition

と表される。ここに、 p_0 : 空隙率である。また、 $\Delta q_i > 0$ が堆積傾向を表す。

さて、河床表層において、実際に砂礫が移動する層として、交換層²⁶⁾という概念がよく用いられるが、ここでもこれを踏襲する。交換層の厚さを θ_e とし、堆積、侵食後に河床高さが変化しても交換層の厚さは一定（粗砂の粒径程度）とし、その交換層内で混ぜあわされたものを表層における粒度構成と見なすこととする。Fig.16を参考にして、河床低下の場合には、交換層内で侵食された量にみあう分だけ交換層より下の層の砂礫が露出し、新たな交換層を形成するものとする。このとき、交換層より下の層では初期粒度分布であるものと仮定すれば、 Δt 時間後の表層での粗砂 ($i=1$) の体積割合 p_1 は次のように書ける。

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{p_1(t)\theta_e\Delta z - p_{10}\sum \Delta q_i + \Delta q_1}{\theta_e\Delta z} \quad \dots \dots \dots (23)$$

ここで、 p_{10} : 粗砂の初期体積割合である。河床上昇の場合には、新たに堆積した量にみあう分だけ交換層の位置が上昇するものとし、 Δt 時間後の表層での粗砂の体積割合 p_1 は次のようにになる。

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{p_1(t)\{\theta_e\Delta z - \sum \Delta q_i\} + \Delta q_1}{\theta_e\Delta z} \quad \dots \dots \dots (24)$$

これらは、侵食、堆積が交互に生じるような場合には適用できず、さらに工夫が必要となるが、本シミュレーションでは問題はない。また、時間間隔 Δt は各時間ごとに、 $|\sum \Delta q_i| < \theta_e\Delta z$ かつ $|\Delta q_i| < \theta_e\Delta z$ となるように決めるものとする。ここで、 $\Delta q_i < -p_1(t)\theta_e\Delta z$ となる場合には Δt 時間内には交換層内にある以上の砂はそれ以上侵食されないものとし、 $\Delta q_i = -p_1(t)\theta_e\Delta z$ とするものとする。

Fig.17は実験RUN 1の条件について、それ代表的

な横断位置での河床粒度構成、河床高さの時間変化のシミュレーション結果を示したものであり、Fig.18はそれ代表的な時間における河床粒度構成、河床高さの横断方向分布を示したものである。ここで、添字1は粗砂の量を表している。これらの図より、形成位置にはややずれがあるものの、細砂の分級縦筋が形成され、それが時間の経過とともに植生域内へと位置をずらしていく傾向が再現されている。

本シミュレーションでは、流れ場の変化についてはいっさい考慮しなかったにもかかわらず、分級縦筋の形成位置が植生域内へ移動するという結果が得られた。これは、分級の進行によって、河床表層の粒度構成が変化すること、それ自身の作用が分級縦筋の位置をずらす働きを持つことを示している。

10. 結 言

本論文では、側岸部に植生群落を伴う流れが充分に発達した場での低周波流速変動による横断混合が、掃流砂の運動にさえ影響し、掃流砂の横断方向フラックスを生じさせることに着目して、解析モデルと移動床実験から検討を行った。

本論文の解析モデルは、移動床実験で出現した縦筋や混合砂礫床の場合の分級縦筋の形成を良好に説明し得た。また、こうした現象は平均流速のみを与えて平衡流砂量式を用いるアプローチからでは説明できない現象であり、今後植生群落を伴う流れ場での河床変形を取り扱う上で重要なポイントを示していると考える。

本論文では、実験結果に基づく流れ場の近似的な表現を用いたが、今後流れ場についての研究が進み、より精密な流れ場の表現が得られれば、それらを用いる方が望

ましい。ただし、本課題の解析精度の上で今回の流れ場の近似的表現は充分な精度を持つ。

今後の課題としては、河床がより大きく変形したときの流れ場の変化をどう取り込むか、さらに、植生群落が必ずしも河道内で一様に存在しないことによる植生群落を伴う場への流入部、流出部の問題、湾曲部、蛇行流路との関連などが挙げられるが、いずれの場合も流れの適確な記述もさることながら、それを支配する特徴の抽出が流砂現象のモデル化の鍵であると思われる。

本論文では、緒言で述べた植生を含む移動床系のうちの一つのプロセスを実験室レベルで取り出して追いかけ、現地での観測・観察ではよく分からぬ複雑に入り交じった現象の素過程の一つを明らかに出来たと考える。ただし、系を全体として把握することも重要なことであり、そうした意味でも実河川での観測を中心とした方法がますます重要となってくるものと考える。

謝 辞

実験・解析を進めるにあたり、京都大学工学部環境地球工学教室上正吾助手に有益な助言をいただくとともに、当時京都大学大学院生石橋基之君（現在、（株）新日本製鐵）に熱心な協力をいただきました。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 辻本哲郎・北村忠紀・中川博次：植生群落周辺の掃流砂運動と河川敷地形の形成、水工学論文集、第37巻、pp.687-692、1993.
- 2) 辻本哲郎・北村忠紀・中川博次：植生帯周辺での分級縦筋の形成、水工学論文集、第38巻、pp.665-670、1994.
- 3) 建設省河川局水課監修・（財）リバーフロント整備センター編集：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案）、山海堂、1994.
- 4) 土木学会水理委員会・基礎水理部会「河川植生の水理」研究分科会発行：河川植生の水理研究Circular No.1、1992.
- 5) 泉典洋・池田駿介：側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断河床形状、土木学会論文集、No.411/II-12、pp.151-160、1989.
- 6) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：側岸部植生帯が流れ及び粒子懸物質の輸送に及ぼす影響、土木学会論文集、No.447/II-19、pp.25-34、1992.
- 7) 管和利・中井正則：側岸に樹木群を伴う直線河道の浮遊砂輸送、水工学論文集、第38巻、pp.659-664、1994.
- 8) 佐野良久・野崎一郎・浜谷拓・中井正則・管和利：高水敷に樹木を有する複断面直線水路の流れと浮遊砂の輸送について、水工学論文集、第35巻、pp.447-488、1991.
- 9) 藤田光一・福岡捷二：洪水流における水平乱流混合、土木学会論文集、No.429/II-15、pp.27-36、1991.
- 10) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究、土木学会論文集、No.491/II-27、pp.61-70、1994.
- 11) 石川忠晴・高橋和明・細井俊一：河岸植生付近の横断混合流れの位相平均解析、水工学論文集、第37巻、pp.837-840、1993.
- 12) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：側岸部植生境界の周期渦の発生機構、土木学会論文集、No.443/II-18、pp.47-54、1992.
- 13) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：水路横断面内に植生帯を伴う流れの数値計算、水工学論文集、第36巻、pp.265-272、1992.
- 14) 篠岡和夫・八木宏：SDS & 2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション、土木学会論文集、No.473/II-24、pp.35-44、1993.
- 15) 渡邉明英・福岡捷二・津森貴行：樹木群のある河道の流れの水平乱流混合とその卓越波数、水工学論文集、第38巻、pp.357-364、1994.
- 16) Naot, D., I. Nezu and H. Nakagawa : Towards the modelling of the hydrodynamic forces in compound open channel with vegetated flood plain, Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.38, pp.437-442, 1994.
- 17) 例えば、中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理、技報堂出版、1986.
- 18) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Murakami : Non-equilibrium bed load along side bank, Proc. 3rd Int. Sym. River Sedimentation, Jackson, Mississippi, USA, pp.1029-1065, 1986.
- 19) 山崎真一・石川忠晴・金丸督司：開水路平面剪断流れに関する実験的研究、土木学会第39回年次学術講演会概要集、II-237、1984.
- 20) 辻本哲郎：河床表層粒度構成の不安定現象としての縦断交互分級の形成機構、土木学会論文集、No.411/II-12、pp.143-150、1989.
- 21) 辻本哲郎・本橋健：混合砂礫床の粗粒化について、土木学会論文集、No.417/II-13、pp.91-98、1990.
- 22) 辻本哲郎：2次流による分級縦筋の形成、水工学論文集、第33巻、pp.403-408、1989.
- 23) Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentration, Jour. of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 2, pp. 73-80, 1965.
- 24) 岩垣雄一：限界掃流力に関する流体力学的研究、土木学会論文集、No.41, pp.1-21, 1956.
- 25) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Nakano : Characteristics of sediment motion for respective grain sizes of sand mixtures, Bulletin, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto University, Vol.32, pp.1-32, 1982.
- 26) パーカー・ゲーリー：粗粒化について、土木学会論文集、No.375/II-6, pp.17-27, 1986.

(1994.4.21 受付)

LATERAL BED-LOAD TRANSPORT AND SORTING NEAR VEGETATION ZONE ALONG SIDE WALL

Tetsuro TSUJIMOTO, Tadanori KITAMURA and Hiroji NAKAGAWA

In fluvial stream with vegetation zone along side wall, low frequency fluctuation of transverse velocity brings alternate lateral bed-load transport. Since the bed shear stress near vegetation zone changes rapidly in the transverse direction, net lateral bed-load remain after the average of one period of fluctuation. It causes longitudinal sand ridge formation; furthermore it accompanies a longitudinal sorting in case of graded materials. In this paper, flume experiment is conducted to demonstrate the above phenomena, and they are explained by using of the model of non-equilibrium bed-load transport.