

植生が繁茂した砂州周辺の土砂輸送に関する基礎的研究

Study on Sediment Transport around a Vegetation-covered Alternating Bars

清水義彦*・小葉竹重機*・茂木宏一**・小松みわ子**

By Yoshihiko SHIMIZU, Shigeki KOBATAKE, Kouichi MOTEGI and Miwako KOMATSU

In rivers, alternating bars are often covered with vegetation and provide favorable spaces for natural habitat environment. Then one has to know more about the flow and sediment transport around vegetation-covered bars, which bring about river-morphological change during floods. In present study, river bed deformation around vegetation-covered alternating bars is discussed by flume experiments and numerical calculations with $k-\epsilon$ turbulence model. The results show that vegetation over alternating bars changes the formation of main channel and has possibility to control the spatial variation of river bed.

Keywords : sediment transport, bed load, river bed deformation, vegetation, alternating bars, $k-\epsilon$ turbulence model

1. まえがき

砂州上に繁茂する植生群落は、生態系の棲息空間の場であり、良好な水辺の形成にとって欠くことのできない存在である。幾つかの出水を経験しながら、河道内に取り残された砂州上の植生や、砂州によって形成された瀬や淵の構造が多様な河川空間を構成しており、自然河川ではこうした河川地形をしばしば見ることができる。近自然河川を創造して行く上で、また、将来にわたり維持管理して行く上でこうした河川地形の形成過程を知ることは重要で、さらに、形成過程に関する知見から、植生による安定した低水路形成・制御も考えられる。

地形の形成過程ではとくに洪水時の植生周辺での土砂堆積と、それに続く低水時のその領域での陸地化、及びそこへの植生の進入・繁茂が重要なプロセスの一つである。こうした考えから、浮遊土砂の堆積域での植生域の拡大過程が辻本・北村によって検討されている¹⁾。ここでは、砂州地形に繁茂する植生群落と洪水時の掃流砂輸送との相互作用によって生じる河床形成に着目する。はじめに渡良瀬川における砂州周辺の河床地形を概観する。次に、平水時において砂州上に繁茂した植生群落が、洪水時の流れと流砂に影響を及ぼして周辺の河川地形をどのように変形させるかという点に興味をおき、移動床水理実験と数値計算を通じて検討する。

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市天神町 1-5-1)

** 学生会員 群馬大学大学院工学研究科博士前期課程

2. 渡良瀬川48 k m付近における河道の状況

図1は利根川最大の支川である渡良瀬川の48 k m付近（河床勾配1/300程度）の河道平面図，写真1は付近の河道状況を示したものである。図より2つの砂州A、Bによって低水路の蛇行が見られ，砂州B上には植生が繁茂し，とくに高さ10m以上の樹木群（ヒカガシ）が繁っている。また，砂州Bについては右岸堤防沿いにも流路が形成され，洪水時には砂州Bを囲む形で流路の分岐が生じるものと思われる。砂州が流路の中に孤立した形で存在することは平水時においてもしばしば見られる。写真2（渡良瀬川の59 km付近）はその例で，2つの流路C、Dにおける水面高さの差は80 cm-1 m程度もあり，流路Cが砂州弧状の上に形成された流路であることが推測される。図2は，渡良瀬川の48 k m付近の砂州B周辺の河床変動の経年変化（実線は昭和50年，2点鎖線は平成3年）を航空写真から読みとったもので，その間， $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水を8回経験しているものの砂州Bの変形や前進はそれほど顕著ではないことが分かる。航空写真や繁茂している樹木群の成長度（例えば，幹周から推定される樹齢²⁾）から推測して，過去においてもこの付近の砂州にはかなりの植生群落が存在していたものと思われる。砂州上の植生の繁茂状況の違いによる出水時の砂州の変形・前進性については今後詳しく検討する必要があるが，植生が砂州上に繁茂すると，耐侵食性が増加することや交互砂州によって作られた深掘れ部が固定化される可能性が有り得るのではないかとこの観点から，以下では移動床実験と河床変動シミュレーションより検討した。

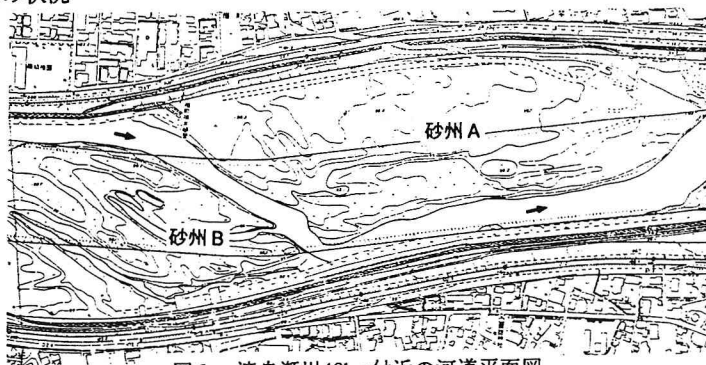


図1 渡良瀬川48km付近の河道平面図

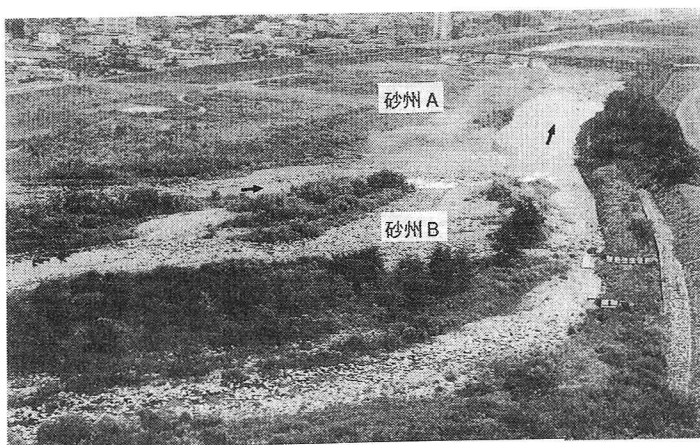


写真1 渡良瀬川48km付近の河道状況



写真2 砂州による流路の分岐

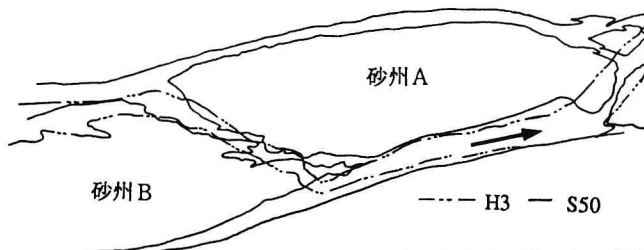


図2 渡良瀬川48km付近の河道変化（平成3年と昭和50年の比較）

3. 移動床水理実験

ここでは，模擬植生を砂州上に配置してその周辺の河床形成を移動床水理実験から抽出する。実験では

幅20cm，縦断長さ10mの矩形直線水路内に均一粒径の珪砂（平均粒径 $d=0.64\text{ mm}$ ）を平坦に敷き詰め，水路床勾配（ i_b ）を1/100，流量（ Q ） $1200\text{ cm}^3/\text{s}$ を40-50分程度通水して単列交互砂州を作った後（写真3 a），通水を止め，模擬植生を配置後（写真3 b）再び通水を開始して河床変動を調べた．用いた模擬植生はプラスチックの糸が絡み合ったもので，透水試験の結果，透水性の指標である $C_D\lambda$ （ C_D ：植生の抗力係数， λ ：植生密生度）³⁾は $1.2/\text{cm}$ 程度となった．なお，上流端からの給砂はしていないが，通水時間内においてもその影響が小さくなるような測定区間で河床高低差を測った．模擬植生の配置パターンはa) 砂州前縁先端の平均河床より高い付近の河岸沿いに配置，b) 砂州前縁部付近に配置（写真3 b）の2つを考えて，ともに各々の砂州上の同じ箇所に5カ所設けた．

図3に，砂州河床（初期状態）のコンターとパターンaの通水6分後の河床コンターを示す．これにより，河岸沿いに配置した場合，砂州上を流れてきた流水の流向が対岸に向けられ，流れの集中が生じる結果深掘れが生じている．しかも，この深掘れをつなぐように水みちが形成され，本来砂州地形が形成し

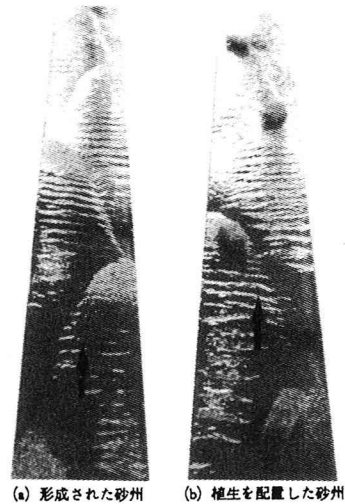


写真3 植生を伴う砂州の移動床実験

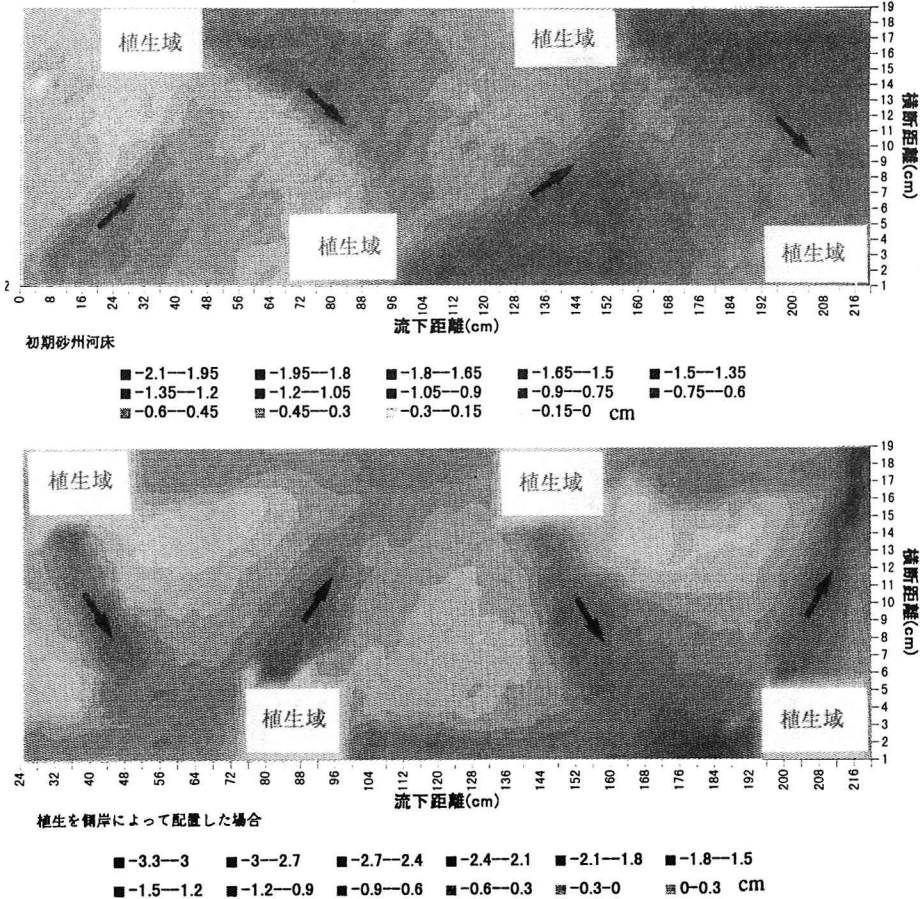


図3 パターンaの河床変動

た水みちとは逆転した形で低水路が形成されていく。こうした河床地形はいわば植生による水制効果によって生まれたものと言える。

一方、図 4 に初期状態の砂州河床コンターと、パターン b の通水 10 分後の河床コンターを示す。深掘れ位置の変化をもって砂州の前進を議論すると、この場合、砂州の前進性はほとんど見られない。しかし、本来砂州自身によって作られた深掘れ部の領域では深さ・面積ともに拡大されている。これは植生の配置によって、砂州先端の弧状からの土砂移動が植生によって抑制され、かつ深掘れ部では流れの集中から掃流力が大きく、河床を掘り下げることになるからである。パターン b では深掘れ部、すなわち水衝部の拡大はあるものの、砂州の前進に見られるような位置の変化はなく固定化されそうである。また、植生帯前後では土砂の堆積部が帯状に形成されてくる。このとき流れは蛇行流の他に、水路壁に沿って深掘れ部をつないだ流れも顕著化してくる。こうした傾向が拡大してくると、実河川で見られるように、砂州植生前後の堆積部を挟んで流路の分岐が生まれてくることが示唆される。

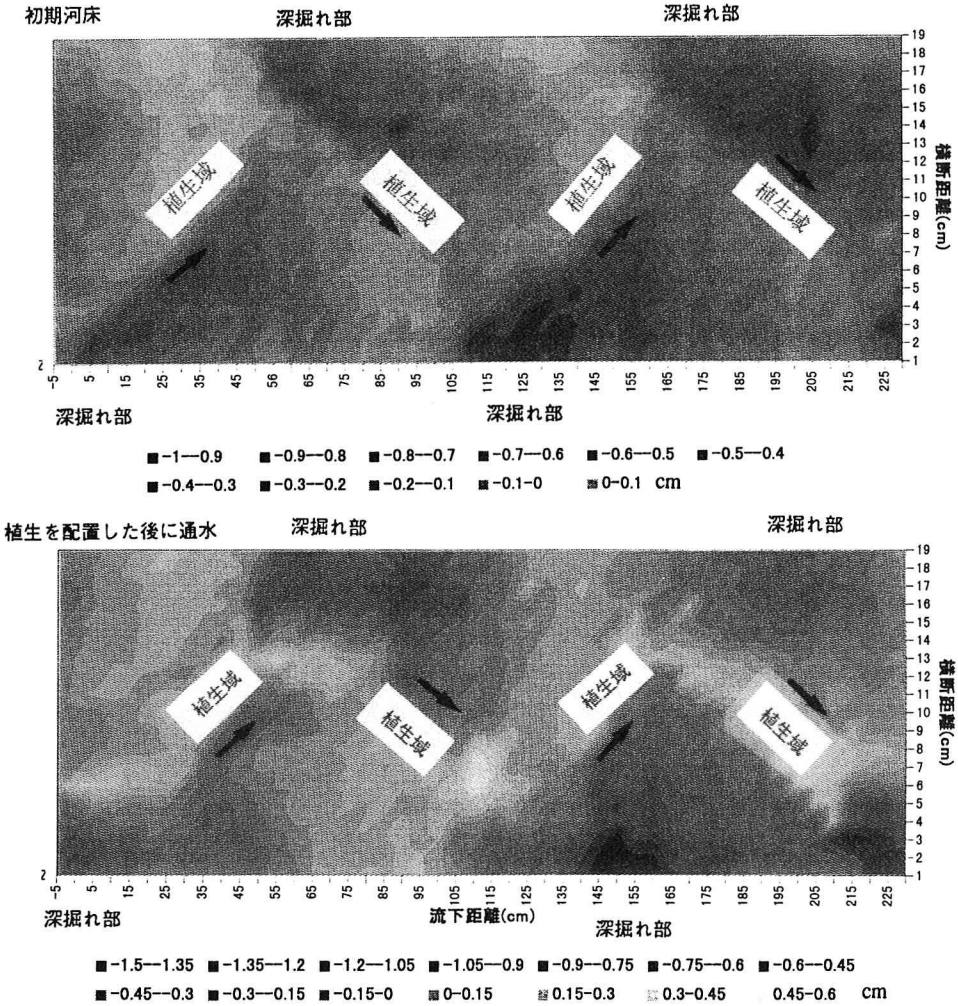


図 4 パターン b の河床変動

4. 砂州前縁部に植生帯を伴う流路の河床変動シミュレーション

砂州と植生が共存する流路における河床変動の数値シミュレーションを行い、洪水時における地形形成過程の理解を深めることにする。流れの場の計算には水深平均された平面 2 次元流モデルを用いる。ここでは、植生域を伴う流れ場の平均流構造に着目するため、植生による形状抵抗を運動量式、乱流エネルギー

輸送式, 乱れエネルギーの逸散率の輸送式に考慮した $k-\epsilon$ 乱流モデルを適用する^{4), 5)}. このとき, 流れの基礎式は以下になる.

$$\frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hU^2 - h\nu_t \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWU - h\nu_t \frac{\partial U}{\partial z}\right) = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_t \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_t \frac{\partial W}{\partial x}\right) - F_x - \tau_{bx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hWU - h\nu_t \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW^2 - h\nu_t \frac{\partial W}{\partial z}\right) = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_t \frac{\partial U}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h\nu_t \frac{\partial W}{\partial z}\right) - F_z - \tau_{bz} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hUk - h\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hWk - h\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) = P_k + P_{kv} + P_{kb} - h\epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hU\epsilon - h\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hW\epsilon - h\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right) = C_1 \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{v\epsilon} P_{kv} + C_{b\epsilon} P_{kb}) - C_2 h \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

ここで, x, z : 流下, 横断方向座標, U, W : 流下・横断方向の水深平均流速, h : 水深, y_b : 基準面からの路床高さ, ν_t : 渦粘性係数で, これは乱れエネルギー (k) とその逸散率 (ϵ) から,

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

と与える. F_x, F_z は植生の形状抵抗による反力で, C_D を形状抵抗係数, λ を植生の密生度として,

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \lambda h U \sqrt{U^2 + W^2}, \quad F_z = \frac{1}{2} C_D \lambda h W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (7)$$

と書ける. また, 乱れエネルギーの生成に関与するものとして,

$$P_k \equiv h\nu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\}, \quad P_{kv} \equiv F_x U + F_z W, \quad P_{kb} \equiv \tau_{bx} U + \tau_{bz} W \quad (8)$$

があり, 順に, 平均流速勾配によるもの, 植生の形状抵抗による仕事によるもの, 底面摩擦抵抗によるもので, これは Rastogi-Rodi³⁾ によって定式されたものである. 河床せん断応力はそれぞれ

$$\tau_{bx} \equiv C_f U \sqrt{U^2 + W^2}, \quad \tau_{bz} \equiv C_f W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (9)$$

となり, また, その係数は,

$$C_{b\epsilon} \equiv 3.6 \frac{C_2}{C_1} \frac{k}{\epsilon} C_\mu^{1/2} C_f^{1/4} \frac{\sqrt{U^2 + W^2}}{h} \quad (10)$$

として与えられる. 乱流モデルのパラメータ値 ($C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon$) は標準値を用い, 係数 $C_{v\epsilon}$ については植生層を伴う流れ場の計測から決められた 1.3 を用いる. 流れの境界条件としては, 側岸で対数則の成立と乱れの局所平衡を仮定し, 流入部では流量を与え, 一様流速で流入させる. 下流端では縦断方向微分値をゼロとし, 水位を与えた.

流れ場が既知となると, 流砂量式から流砂量 (q_B) が推定される. ここでは, Meyer-Peter-Müller の流砂量式,

$$q_{B*} \left(\equiv \frac{q_B}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} \right) = 8\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right)^{3/2} \quad (11)$$

から流砂量を評価する (σ : 砂の密度, ρ : 水の密度, τ_* : 無次元掃流力 ($= u_*^2 / [(\sigma/\rho - 1)gd]$), τ_{*c} : 無次元限界掃流力, d : 砂の粒径). 流砂量 (q_B) は流砂の運動方向角 ϕ を用いて, x, z 成分に分ける.

$$q_{Bx} = q_B \sin \phi, \quad q_{By} = q_B \cos \phi \quad (12)$$

ただし、 ϕ は次式から推定される⁶⁾。

$$\tan \phi = \tan \gamma - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_d \mu_f \tau_*}} \tan \theta, \quad \theta \equiv \tan^{-1} \left(\frac{\partial y_b}{\partial z} \right), \quad \gamma \equiv \tan^{-1} \left(\frac{W}{U} \right) \quad (13)$$

よって河床変動は次の流砂の連続式から計算される (μ_d : 砂の動摩擦係数, μ_f : 砂の静止摩擦係数)。

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\rho_0} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial z} \right) \quad (14)$$

河床変動計算の境界条件は、上流端で流砂量ゼロ、下流端で河床高さを一定とした。また、初期条件としての砂州形状は、福岡・山坂⁷⁾、山坂⁸⁾の研究より、

$$\frac{\eta}{h_0} = a_1 \sin \frac{\pi z}{B} \cos \left(\frac{2\pi x}{L} - \phi \right) - a_2 \cos \left(\frac{2\pi z}{B} \right) \quad (15)$$

と与える。ここに、 η は平均河床からの深さ、 h_0 は平均水深、 B は水路幅、 L は砂州波長、 a_1 、 a_2 は波高の振幅、 ϕ は位相差である。

はじめに、河床変動計算モデルの診断テストとして、植生なしの砂州のみの河床変動を計算した。図5aは初期砂州形状、図5bはこれの100秒後の河床変動を計算したものである。砂州は若干変形しているが、形を保持しながら流下している様子が分かる。ただし、上流端では給砂がないため河床低下している。

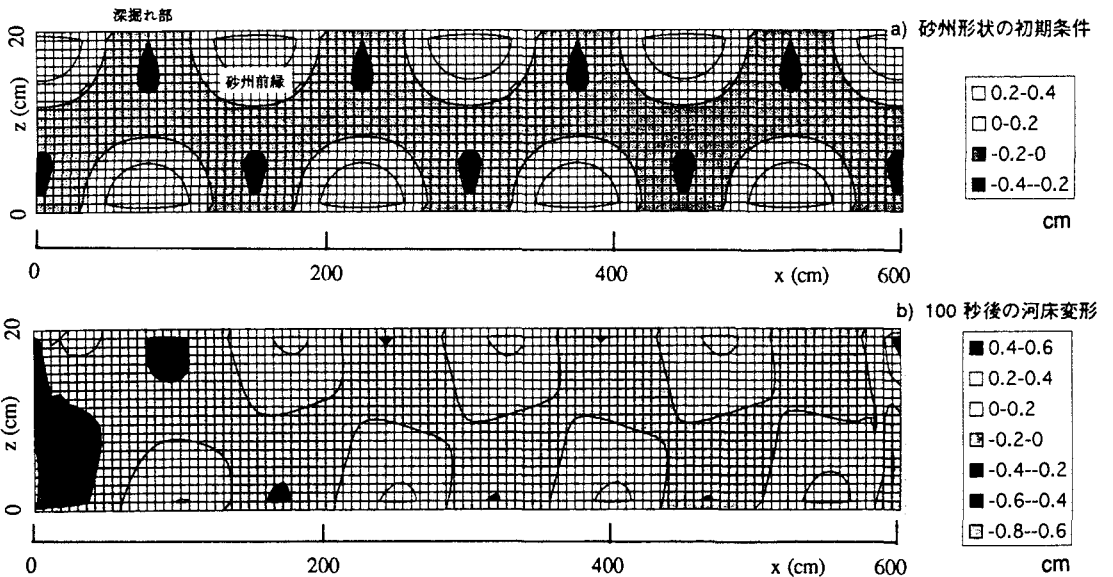


図5 砂州のみの河床変動結果

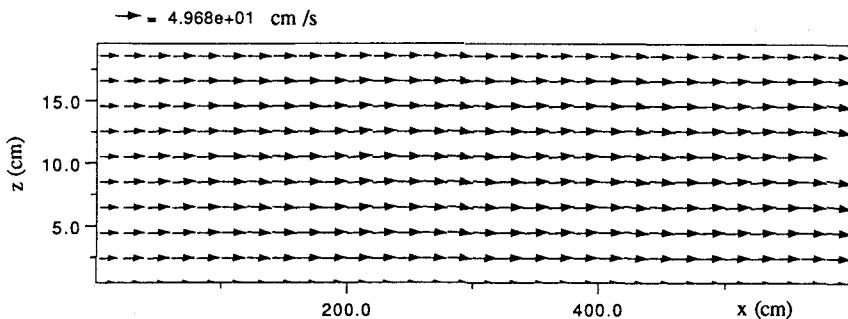


図6 流速ベクトル図 (横断流速を2倍表示)

また、図6はそのときの速度ベクトル図で横断方向流速は2倍して表示してある。一方、図7b(図7aは植生の配置位置を示す)は植生を砂州前縁部に5カ所配置し、150秒、250秒後の流れと河床変動を示したものである。流れのベクトル図(横断方向流速は2倍して表示)より、植生のある領域では、流れの蛇行度がより顕著になっている。また、砂州地形が生み出した深掘れ部が拡大している様子が認められる。これより砂州による深掘れ部が拡大するものの前進せず、また、植生域の上流側には堆積部が形成・拡大されてくる。こうした領域が平水時に陸地化し植生が繁茂して行くと、洪水時のさらなる河床変動から土砂堆積領域が拡大し、平水時での流路の分岐が生まれるものと推定される。

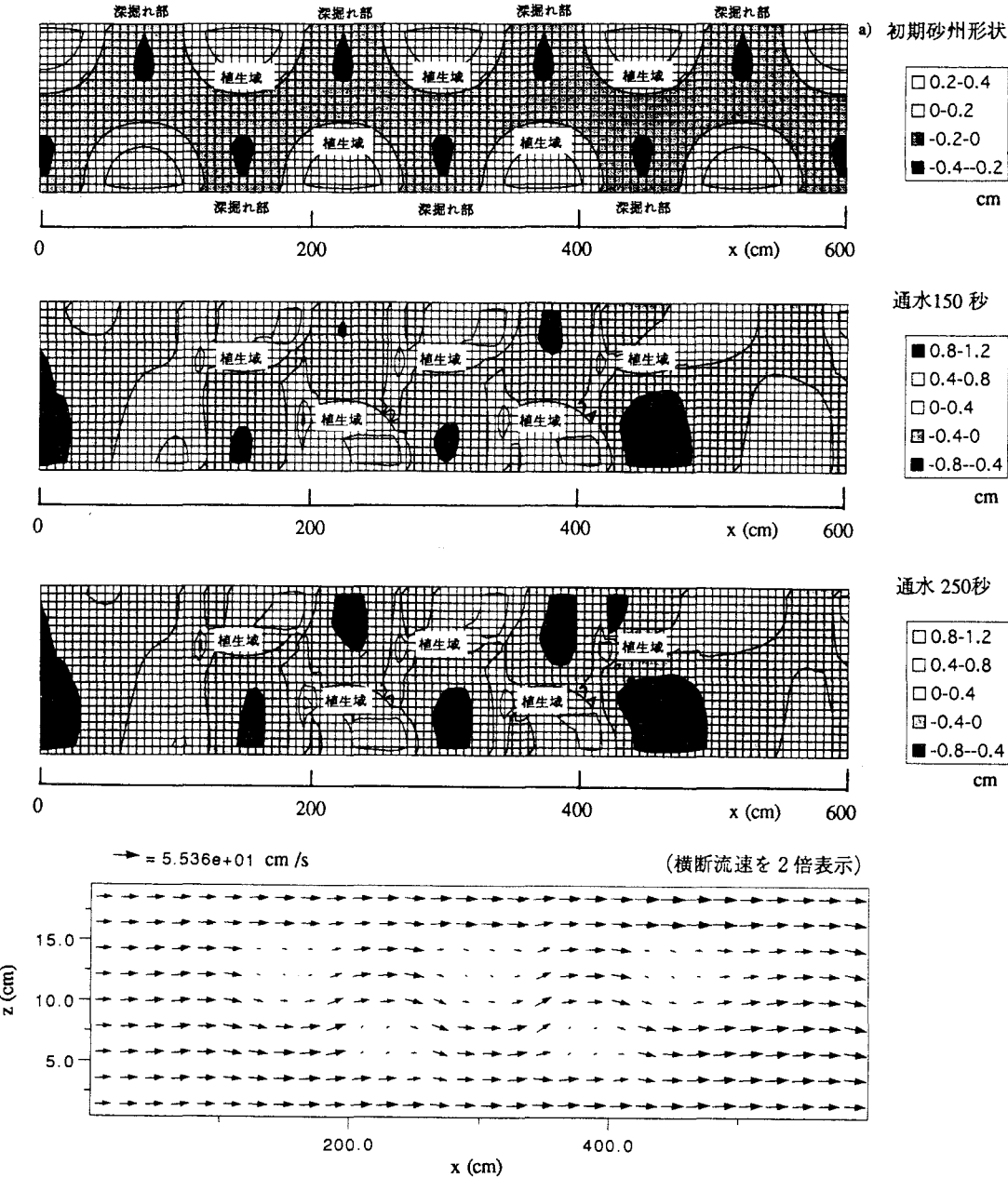


図7 砂州前縁に植生域を伴う流れと流路の河床変動結果

5. あとがき

本研究では、洪水時を想定し、植生の繁茂した砂州周辺での河床地形の変化を調べた。その結果、植生による水制効果によってできる低水路の蛇行や、植生が砂州前縁に繁茂することにより砂州の前進が弱まり、砂州によって作られた水衝部の位置が固定化する可能性があることを示した。ここでは、配置した植生域の規模（密生度や砂州上を占有する面積比など）については検討しなかったが、今後、現地のフィールド調査から、より現実に近い形で砂州植生が河床変動に及ぼす影響を明らかにして行きたい。本研究を進めるにあたり、群馬大学工学部4年生・館野英志君、吉原和隆君、本多伸匡君に実験の協力を得た。また、河川整備基金助成（植生による河道流の制御に関する研究、代表・小葉竹重機）を受けたことを期して謝意を表す。

参考文献

- 1) 辻本哲郎・北村忠紀：植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程，水工学論文集，第40巻，pp.1003-1008, 1996.
- 2) 小松みわ子・小葉竹重機・清水義彦：河道内植生と河床変動の関係，土木学会第51回年次講演会講演概要集，第2部，pp.602-603, 1996.
- 3) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No.447/II-19, pp.35-44, 1992.
- 4) 清水義彦・辻本哲郎：植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析，水工学論文集，第39巻，pp.513-518, 1995.
- 5) 辻本哲郎・北村忠紀：河床低下に及ぼす植生繁茂の影響，水工学論文集，第40巻，pp.199-204, 1996.
- 6) 辻本哲郎・中川博次：移動床流れの水理，土木学会編新体系土木工学23号巻，pp.196-199, 1986.
- 7) 福岡捷二・山坂昌成：直線流路の交互砂州，第27回水理講演会論文集，pp.703-708.
- 8) 山坂昌成：河川の交互砂州と流路変動に関する基礎的研究，東京工業大学博士論文。