

交互砂州河道における低水路形成と 河岸侵食に関する数値解析

NUMERICAL STUDY ON THE FORMATION OF LOW-WATER COURSE IN A STRAIGHT CHANNEL WITH ALTERNATE BARS

清水義彦¹・長田健吾²・高梨智子³

Yoshihiko SHIMIZU, Kengo OSADA and Tomoko TAKANASHI

¹正会員 博士(工学) 群馬大学助教授 工学部建設工学科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²学生会員 群馬大学大学院工学研究科博士後期課程(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

³学生会員 群馬大学工学部建設工学科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

As recent channel characteristics of gravel-bed river, bed degradation, immobilization of the low-water course, local scour near river bank, extension of relative elevation, and overgrowth of vegetation are mentioned. These figures are produced as results of the morphological change under the medium-size floods in the low-water course affected by alternate bars. In this study, we discuss the low-water channel formation where recent river channel characteristics of the gravel-bed river are reflected, and the process of morphological change was examined from numerical calculation. First, a channel with alternate bar was made, afterwards, the flow discharge was lowered and the meandering low-water channel, which brings about the bank erosion and local scour, was formed. These processes were investigated from the results of present numerical calculation.

Key Words : *Formation of low-water channel, alternate bars, morphological change, bank erosion, local scour, numerical calculation of bed-variation*

1. はじめに

交互砂州に特徴づけられた礫床河川の最近の河道特性には、水衝部の深掘れ、横断面内比高差の拡大、みお筋の固定化、河道内樹林化と言ったものがあげられる¹⁾。とくに、低水路に見る落差のある瀬とその下流のゆるやかな縦断勾配をもつ淵といった河道ユニットは、礫床河川の代表的な景観であるが、一方で、落差の大きな瀬がさらに顕著化することによって低水路と州との比高さが増し、州上の植生繁茂、河道内樹林化を産む下地となり(冠水頻度・洪水攪乱規模の低下による安定的陸域の形成)、礫河原の消失など礫床河川固有の河相を消失させている。また、落差の大きな瀬の下流での河岸侵食がしばしば問題となり、深刻された低水路での流量集中に伴う河道変動が治水上のネックとなることがある。

こうした最近の河道特性は、交互砂州形成を生むような大規模クラスの出水よりも、むしろ、その後に何回か経験する中規模クラスの洪水(低水路満杯をやや超える程度の洪水)によって特徴づけられており、その形成プ

ロセスを把握することは河道管理上きわめて重要である。さらに、中規模洪水によって特徴づけられた河道が、大規模出水(砂州形成規模)を受けた場合にどのような変化を生じるかについても併せ知っておくことが重要である。本研究では、こうした礫床河川の最近の河道特性が反映される交互砂州河道での低水路形成に焦点をあて、側岸侵食を考慮した平面流数値計算による河床変動解析からそのプロセスを検討した。

交互砂州の発達に伴う流路での河床変動・河岸侵食を取り扱った数値解析的研究は長田ら²⁾、寺本ら³⁾が行い有用な知見を得ている。とくに、寺本ら³⁾が、砂州の進行と拡幅が同じ速度で進む段階と、拡幅の位置が固定される段階の2つに分けて流路変動を論じている点は興味深い。しかし、いずれの研究も砂州形成流量を対象としており、本研究では、砂州形成後の中規模出水による河道変化に注目している点が大きく異なる。一方、湯城らは⁴⁾、交互砂州河道が流量低減時に低水路を形成する実験を行い、発生限界流量や低水路変動の時間変化を検討している。ただし、通水時間が長いと上流端境界条件(河床低下)の影響が顕著化し、低水路形成を生む条件

に初期地形（砂州）以外のものが入り現象が複雑化する。ここでは、上流端の影響が入らない状況下での検討を行った。はじめに、発達した交互砂州河道を作り（平衡区間）、これを初期河道として流量を低下させた（砂州形成流量の約0.6倍）後の河道変化と低水路蛇行に伴う河岸侵食過程について数値計算から考察した。

2. 平面流河床変動計算のフレームワーク

流れの基礎式は平面2次元流の連続式および運動量輸送式である。これらを一般化座標系（ ξ, η ）に変換し、かつ、流速ベクトル、流量ベクトルの反変成分を未知量とする基礎方程式系を用いて解析する。このような方程式系は長田⁵⁾によれば、次のように示されている。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} - \frac{F^\xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2 h} \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v' h} \right) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v' h} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} - \frac{F^\eta}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2 h} \right) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v' h} \right) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v' h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$; 座標変換のメトリックス

(x : 縦断, y : 横断方向座標, 添え字に関する微分を表す), J ; 座標変換のヤコビアンで、流速ベクトル及び流量フラックスの反変成分は以下となる。

$$U \equiv \xi_x u + \xi_y v, \quad V \equiv \eta_x u + \eta_y v \quad (4)$$

$$Q^\xi \equiv \xi_x M + \xi_y N, \quad Q^\eta \equiv \eta_x M + \eta_y N$$

ここに、 u, v ; デカルト座標系での x, y 方向流速, M, N ; x, y 方向流量フラックス ($M=uh, N=vh, h$; 水深), z_s は基準面からの高さである。

また、底面せん断応力の反変成分は、

$$\tau_b^\xi \equiv \xi_x \tau_{bx} + \xi_y \tau_{by}, \quad \tau_b^\eta \equiv \eta_x \tau_{bx} + \eta_y \tau_{by} \quad (5)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6)$$

となる (g ; 重力加速度, n ; Manning粗度係数)。河床変動の解析では流砂量式として芦田・道上式⁶⁾、横断方向流砂量式には長谷川式⁷⁾を用い、次式の一般化座標系の流砂連続式から評価した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_s}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{B^\xi}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{B^\eta}}{J} \right) \right) = 0 \quad (7)$$

ただし、 z_s : 河床位, (q_{B^ξ}, q_{B^η}) : 流砂量の反変成分である。流速変動の相関 (レイノルズ応力) については、渦動粘性係数を摩擦速度と水深の積から与える0次モデルとした⁵⁾。河岸侵食・崩落の計算では、安息角以上の斜面は崩落させ、崩落土砂を近傍の計算格子に配分する後藤⁸⁾の方法と同様な取り扱いとした。境界条件として、上流端で河床位を一定、下流端では水位一定のもとに上流側流砂量がそのまま通過するものとした。交互砂州を形成させるにあたっては、黒木⁹⁾の砂州形成領域区分で交互砂州領域に入る水理条件のもと、福岡らの提案する2モードの砂州形状¹⁰⁾を微小擾乱として、その時間発展を計算から求めた。

3. 数値計算結果

(1) 交互砂州地形を初期条件とした低水路形成

はじめに、河床勾配1/80、幅20cm、縦断長さ20mの長方形断面（側岸は非侵食性）の直線水路を設定し、砂粒径0.1cmの移動床とし、流量500cm³/sのもと、1時間通水後の交互砂州を計算から求めた。図-1に交互砂州の平面形状を示す。発達区間における波長/水路幅比は10程度、波高は1cm程度である。計算では周期境界条件を用いていないため、上流側では明確な砂州は形成されず波高も小さいが、 $x=10m \sim 20m$ の区間では、交互砂州がきれいに発達している。そこで、この計算された交互砂州形状を初期条件として、図-2の流量ハイドログラフのもとに河床変動計算を進めた。すなわち、交互砂州形成流量 (500cm³/s) から出発し、順次、流量を低下させ30分後には流量300cm³/sとした。図-3は計算した河床地形の時

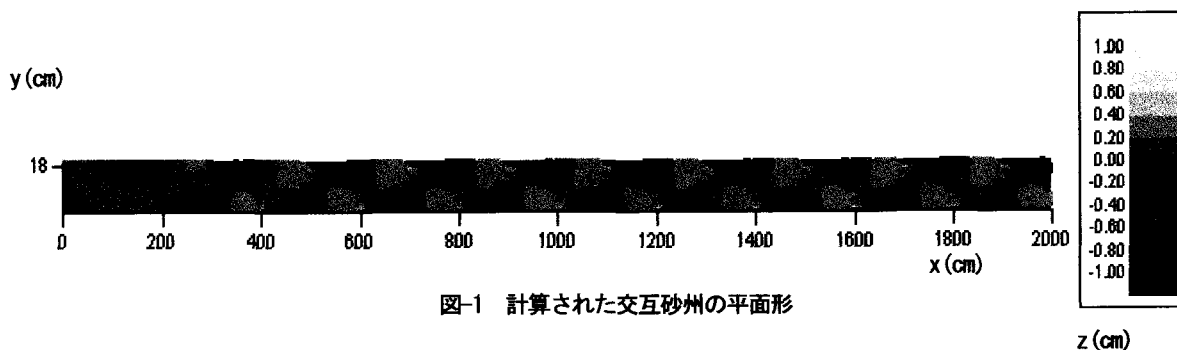


図-1 計算された交互砂州の平面形

間的变化, 図-4に対応する時間の一部の区間での計算流速ベクトルを示す。図-3から, 初期の交互砂州は下流へわずかに動き, はじめの1時間に至る過程の中では, 全体が冠水している時間もあり, 比高の高い州上でも堆積が生じている。時間経過による平面形のちがいを見ると, 交互砂州河床に起因する深掘れ部からの流砂が比高の高い州上に堆積し, 堆積域は上流側へ溯上しながら拡大していることが分かる。こうした堆積域の拡大は非冠水域(浮き州)を作り, 単位幅流量が低水路で増加することで流砂運動が活発となり河床を低下させる。言い換えると, みお筋で河床低下を引き起こした流砂が州の上流端に堆積するというプロセスで土砂輸送が生じている。

図-4のベクトル図から, 1時間経過後にはすでに非冠水域が生まれ, 低水路蛇行が顕著になっていることが分かる。ただし, 3時間経過するまでは, 全幅にわたって冠水する横断面も見られる。図-5は最終的(4時間経過後)に最も深掘れ部となる断面($x=11.4\text{m}$)での横断面河床変化を時系列で示したものである。図-5より, 交互砂州形状は1時間後において若干下流に移動しているため, この間に砂州の進行に伴う深掘れ部の堆積(埋め戻し)と右岸州の河床低下(洗掘)が生じている。しかし, 2時間後には右岸州の河床上昇, 深掘れ部(左岸付近)で河床低下が生まれている。これは堆積域をさけるようにして対岸の深掘れ部に水流が集中し, 河床低下が進行することから生じている。3時間後では, 深掘れ部に流水がより集中し, 深掘れ部の河床低下がますます顕著になる。最終的な横断面形(4時間後)は, 3時間通水後とほとんど変化がないが, 初期の交互砂州波高にもとづく比高差に比べ, 1.6倍程度の比高差をもつ横断面形状が計算より得られる。みお筋の顕著化に伴う比高差の拡大は, 近年の礫床河川の河道特性として見られるもので, 州上に, 冠水頻度低下, 洪水攪乱規模低下の領域を生み, 河道内樹林化を引き起こす要因をもたらす。こうした傾向を生む河床地形の変化を計算結果が再現していることは興味深い。図-6に, 初期形状(交互砂州形状)と4時間後の河床形状について, 最深河床位を結んだ縦断曲線を示した。低水路形成によって, 落差の大きな瀬, 緩やかな勾配の淵が形成されることが分かる。河道内樹林化の顕著な利根川水系渡良瀬川礫床区間のフィールド調査においても, 河床勾配は瀬でかせぎ, 淵ではほとんど緩やかであることが抽出されており, 現地のこうした河道

特性と計算結果は対応している。

(2) 低水路形成後に砂州形成流量を通水した河床変動

中規模出水によって低水路が明確に形成された後に, 大規模出水として砂州形成流量を通水した場合の河床変動を考察する。すなわち, 図-3における4時間経過後の

$Q(\text{cm}^3/\text{s})$

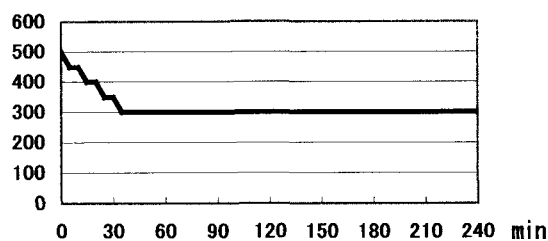


図-2 流量ハイドログラフ

河床形状を初期形状として, 交互砂州形成流量にあたる $500\text{cm}^3/\text{s}$ を通水し河床変動計算を進めた。その結果について平面形の時間的変化を図-7に, 流速ベクトルのそれを図-8に示す。これより, 州は全体的に侵食・崩落を起こして痩せ細るが, 州の上流端では堆積が見られる。一方, 低水路は初期に比べて河床上昇し, 低水路幅の拡大が見られる。しかし, 砂州のような洗掘, 堆積(埋め戻し)は見られず, ほぼ低水路は固定化している。

(3) 低水路形成と河岸侵食

(1), (2)の数値解析においては河岸を非侵食性として議論を進めた。しかし, 流量集中しやすい深刻化された低水路形状のもとでは水衝部での河岸侵食がますます懸念される。そこで, 図-9に示す台形断面をもつ低水路に, (1)で述べたみお筋の発達した河床形状(図-3の4時間経過後の河床形状)を初期形状として, 交互砂州形成流量にあたる $560\text{cm}^3/\text{s}$ を通水し河床変動計算を進めた。計算縦断長さは10mである。図-10に平面形の時間的変化, 図-11に流速ベクトルの時間変化を示す。低水路形成によって生まれた深掘れ部で河岸侵食が進み, 時間変化とともに低水路蛇行が発達する。しかし, 砂州形成流量規模を通水しても砂州の発達・進行は見られず, 河岸侵食箇所は固定化されていることが分かる。こうした特徴も, 礫床河川での低水路固定化¹⁾の一因になっていることが計算結果から示唆される。

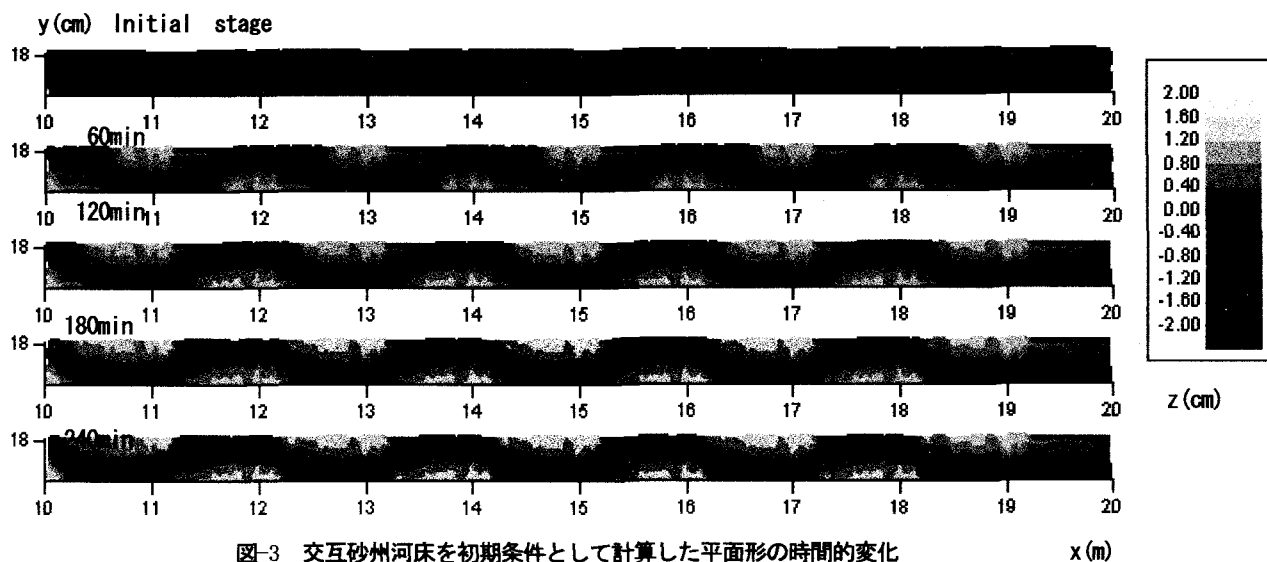


図-3 交互砂州河床を初期条件として計算した平面形の時間的变化

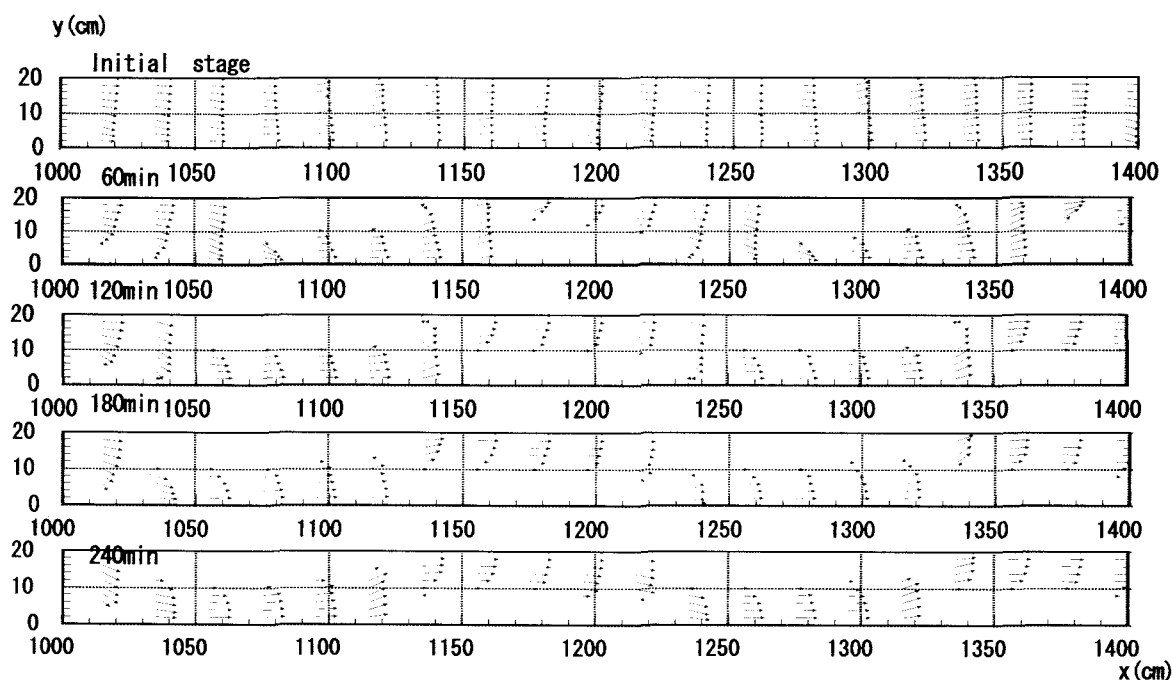


図-4 交互砂州河床を初期条件として計算した流速ベクトルの時間的变化

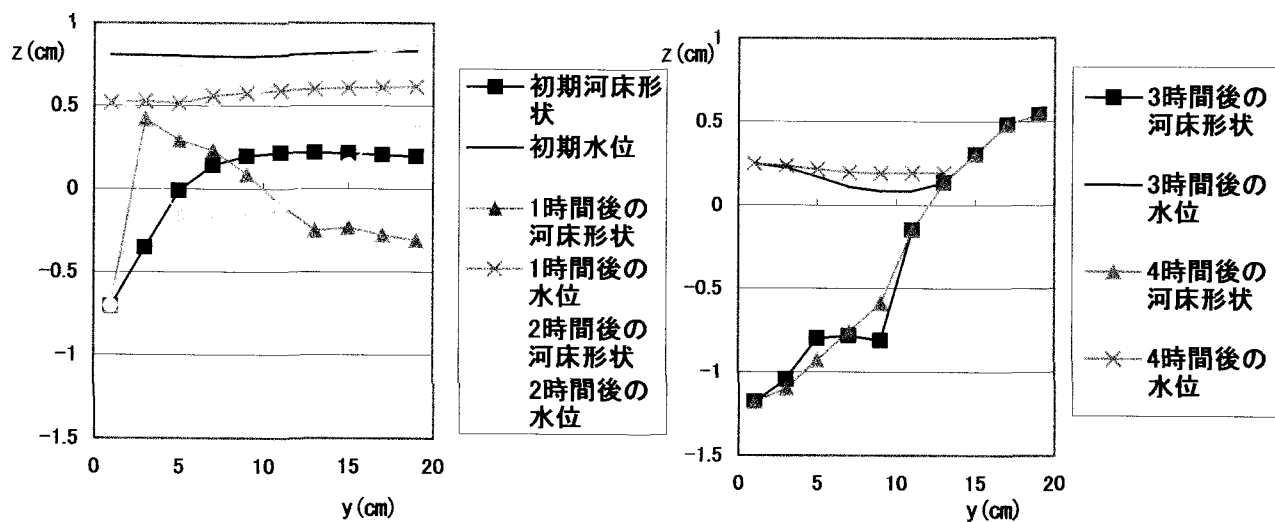


図-5 横断面形状の時間的变化 ($x = 11.4$ m)

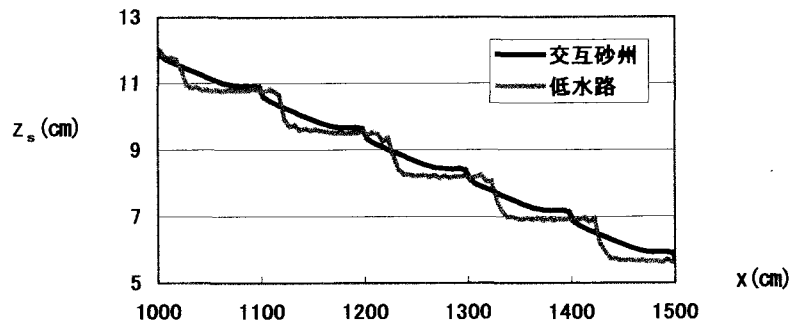


図-6 初期形状(交互砂州)と最終形状における縦断曲線の比較

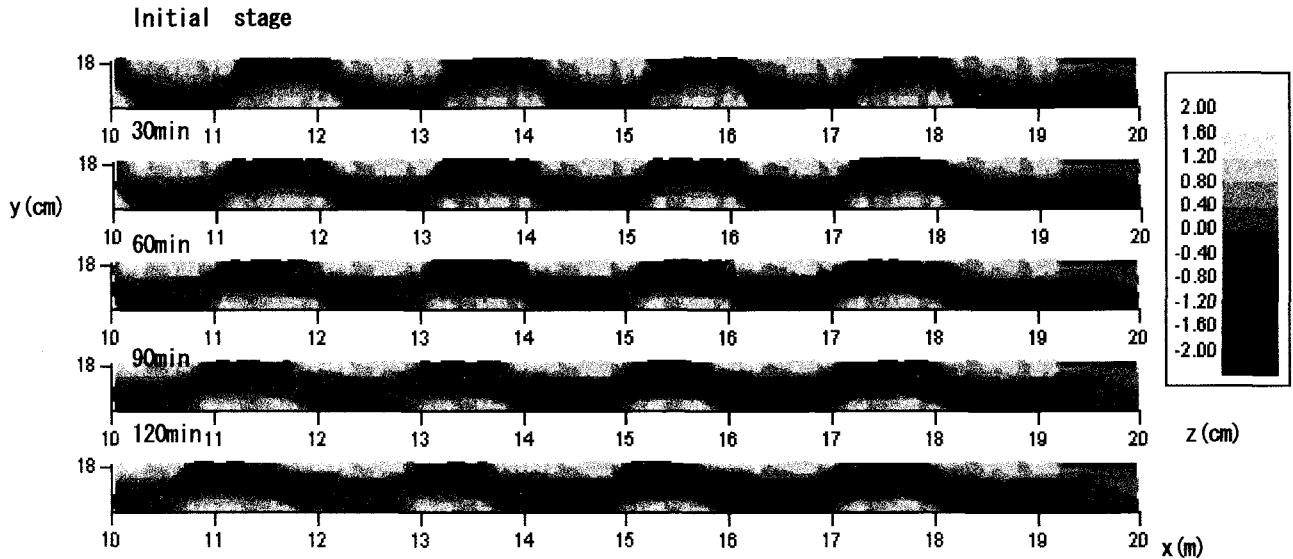


図-7 低水路形成後に砂州形成流量を流した場合の河床形状の時間的変化

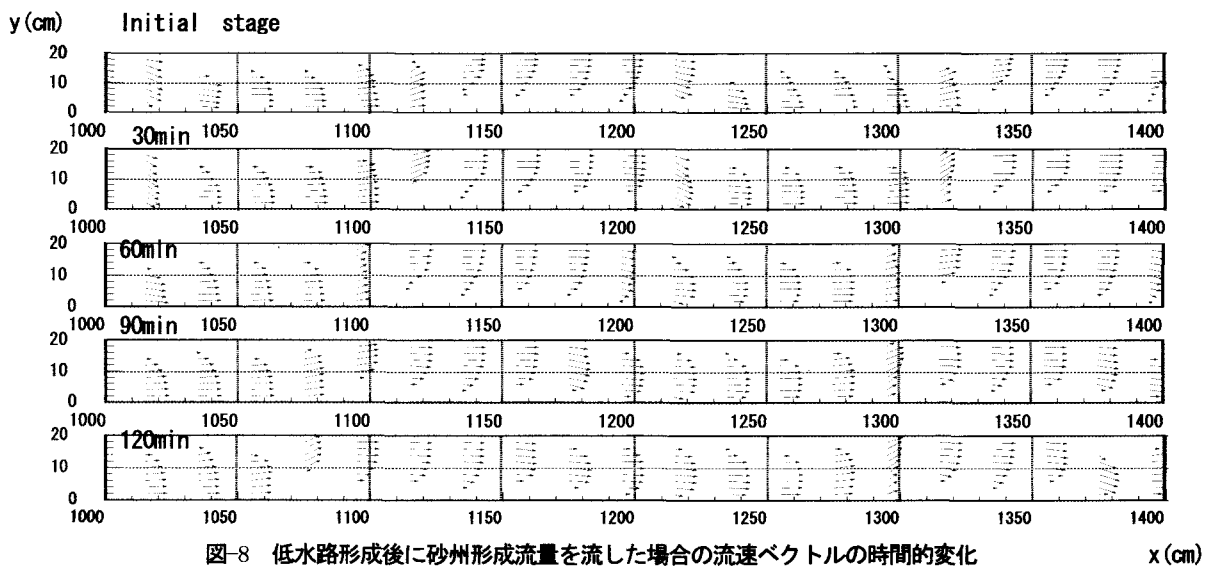


図-8 低水路形成後に砂州形成流量を流した場合の流速ベクトルの時間的変化

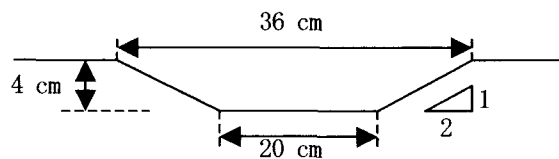


図-9 河岸侵食を伴う河床変動計算で用いた横断面形

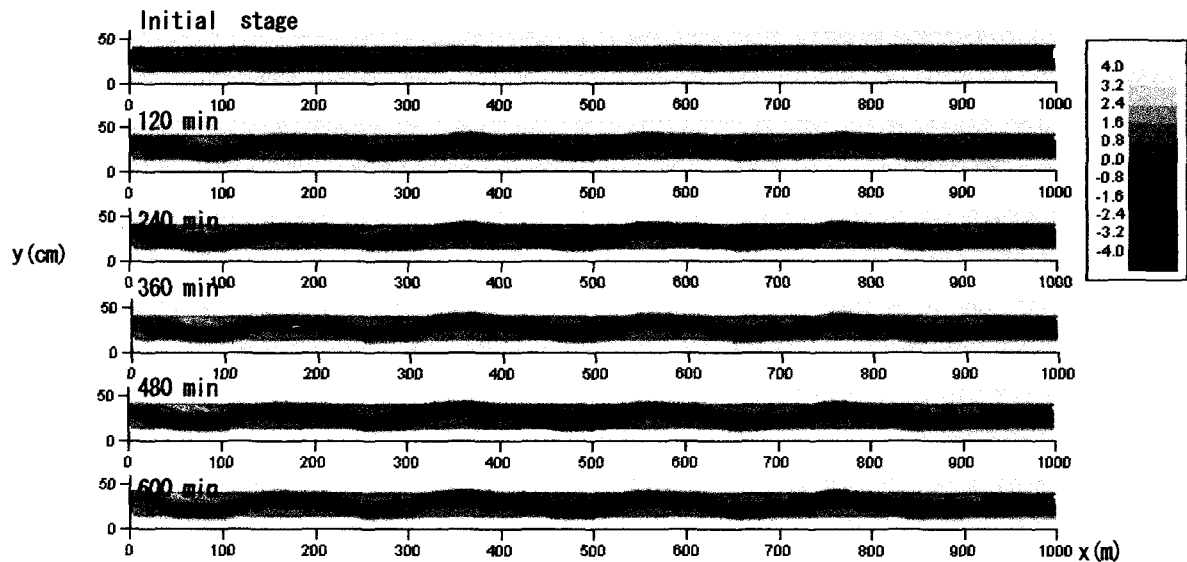


図-10 低水路形成後に砂州形成流量を流した場合の河床形の時間変化（河岸侵食を考慮）

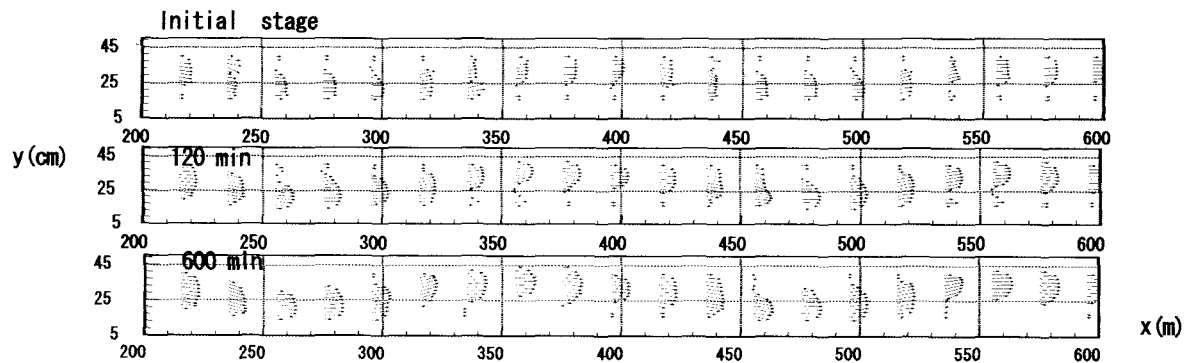


図-11 低水路形成後に砂州形成流量を流した場合の流速ベクトルの時間変化

4. まとめ

本研究では、交互砂州形成後の河道において、中規模出水による河道変化としての低水路形成過程を数値計算から検討した。その結果、横断面内比高差の拡大、落差の大きな瀬、緩やかな勾配をもつ淵の形成や、河岸侵食箇所が固定化されること等が求められた。計算されたこうした河道特性は礫床形態をもつ礫床河川の近年の特徴と対応しており、礫床河川の河川整備、管理を考える上で、今後、流量規模別の河道動態を数値計算から検討しておくことが必要と考える。また、こうした河道動態に与える河道内樹林地の影響も評価したい。本研究では数値計算から検討したが、水理実験との比較から数値解析の精度を検証したいと考えている。

参考文献

- 1) 清水義彦（分担執筆）：河道変遷特性に関する研究。（財）河川環境管理財団，pp. 124-142, 1999.
- 2) 長田信寿，細田尚，村本喜雄：河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究，土木学会論文集，No.621/II-47, 23-39, 1999.

- 3) 寺本敦子，辻本哲郎：砂州を伴う河道の低水路河岸侵食に関する数値解析による研究，水工学論文集，第47巻，649-654, 2003.
- 4) 湯城豊勝，芦田和男，江頭進治，岡部建士：低水路の形成と変動機構，水工学論文集，第36巻，75-80, 1992.
- 5) 長田信寿：一般化座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義集，土木学会水理委員会基礎水理部会，61-76, 1999.
- 6) 芦田和男，道上直規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第195号，55-65, 1971.
- 7) 長谷川和義：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する水理学的研究，北海道大学博士論文，1984
- 8) 後藤孝臣，北村忠紀，辻本哲郎：上下流境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究，土木学会論文集，No. 684, 35-46, 2001.
- 9) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，第342号，87-96, 1984.
- 10) 福岡捷二，山坂昌成：河床形状・流れ・流砂量の非線形関係を考慮した交互砂州の平衡波高の理論，土木学会論文集，第357号/II-3, 45-54, 1985.