

浮州の形成を考慮した網状流路における 河床変動計算

NUMERICAL CALCULATION OF BED DEFORMATION IN BRAIDED STREAM WITH EMERGED MID-CHANNEL BARS

倉林弘志¹・清水康行²

Hiroshi KURABAYASHI and Yasuyuki SHIMIZU

¹ 学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Development of emerged mid-channel bar is very important in the formation of braided stream. Numerical model is one of the powerful tools to predict the flow and bed topography in braided streams, however, it is very difficult to simulate the flow and sediment transport at the boundary of emerged bars. In this paper, a numerical model is tested under the condition of emerged bars are developed, in which a technique is tested to take into account for the emerged bars. The calculated results are favorably compared with experiments of the formation of braided streams. The formation of braided stream and transformation of bar mode is discussed using the results of the calculation.

Key words: braided channel, emerged bar, numerical model

1. はじめに

中規模河床形態に関する研究は古くから数多くの研究者によって行われている。このうち単列砂州河道に関する研究は実験的, 理論的にも数多く存在するが, 複列砂州河道の研究は今だ発展途上と言える。これは, 単純に複列砂州を扱うだけでなくその特性から, 河岸侵食, 浮き州の形成, 網状流路の形成, 砂州上の植生との相互関係など様々な要素を併せ持つ複雑な現象であるためでもある。

複列砂州に関する実験的な研究は, 木下¹⁾による先駆的な研究に始まり, 藤田ら²⁾による, より定量的な実験, 道上ら³⁾による水みちの形成の検討などが行われている。理論的な研究としては, Colombini⁴⁾, Seminara⁵⁾, Pornprommin⁶⁾などの研究が挙げられる。

著者ら⁷⁾は, 複列砂州の発生する条件下において河床変動計算を行い, 高次モードの砂州が, 安定的に発達, 形成, 移動する様子を示した。しかしながら, このモデルで扱う河床変動は, 流路内すべての地点で水深が存在する場合のみである。実際の河川を考える場合, 高次モードの複列砂州がその形状を保ちながら一定速度で移動していくことは稀であり, 時間経過とともに低次モードの砂州が卓越して行くその過程で砂州が浮き

州となり網状化して行く。このことは, 道上ら³⁾や竹林ら⁸⁾によっても詳しく検討・報告されている。

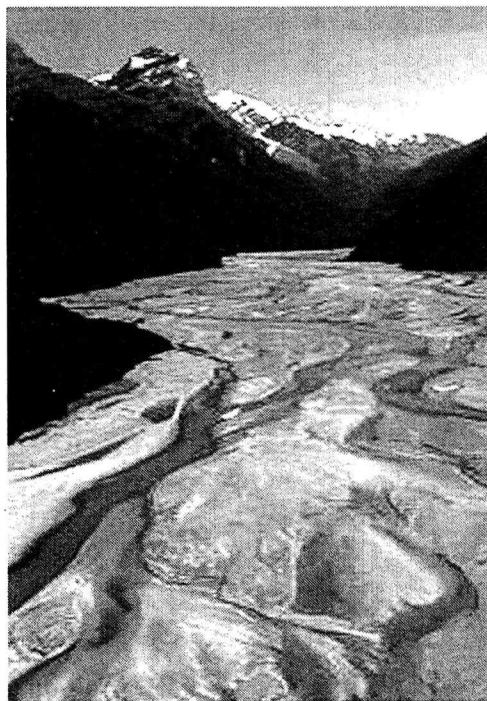


図- 1 Dart River, NZ

図-1 はニュージーランドの網状河川 Dart River の写真である。網状河川の形成および変動過程を議論する際、浮州をどのように扱うかは非常に重要な問題である。そこで本研究では、浮州の形成と高次モードから低次モードへの砂州の変移を考慮した河床変動計算モデルの開発を目的とし、網状流路の数値解析を試みる。従来より、河床変動や水位変化によって水路の一部が陸地化する計算は行われてきているが[道上ら³⁾、長田⁹⁾]本研究ではこれらの手法に改良を加え、複列砂州の形成とこれに伴う浮州の形成の計算に応用している。また、計算格子サイズの河床形状、特に高次モードの複列砂州形成に与える影響について考慮する。

モデルの検証には、藤田ら²⁾によって行われた移動床実験のうち、網状流路の形成が確認された実験を用いた。

2. 計算モデル

流れの計算は2次元、非定常、非圧縮性流れの運動方程式および連続の式をもとに行うが、運動方程式は移流項とそれ以外の項に対して分離解法を用いる。移流項には高精度の数値計算法として知られるCIP法を用い、拡散項には中央差分法を用いる。各タイムステップにおいて得られた水理量から流砂量を計算し、流砂連続式から河床変動量を求める。流砂連続式の差分計算は中央差分によって行う。詳細は清水ら¹⁰⁾によるものとする。

流砂量は掃流砂のみを対象とし、流下方向および横断方向に対してそれぞれ以下の芦田・道上の式¹¹⁾および長谷川¹²⁾の式を用いる。

$$q_{bx} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \sqrt{sgd^3} \quad (1)$$

$$q_{by} = q_{bx} \left(\frac{v}{u} - N_* \frac{h}{r_*} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\nu_s \nu_k \tau_*}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ただし、 q_{bx} および q_{by} はそれぞれ流下方向および横断方向の単位幅掃流砂量、 s は河床砂の水中比重、 d は河床砂の粒径、 τ_* は無次元掃流力 [$=u_*^2/(sgd)$]、 τ_{*c} 無次元限界掃流力であり岩垣の式で求める。また、 ν_s および ν_k は河床砂の静止摩擦係数および動摩擦係数、 η は河床高、 y は横断方向座標軸である。(2)式の右辺第2項は2次流が存在する場合の2次流に伴う横断方向の流砂量の付加量を表すものである。本文においては流れは2次元場を仮定しているが、砂州の形成などの河床変化に伴う流れの局所的な湾曲・蛇行により生ずる2次流を付

加的に考慮することとし、 N_* は Engelund¹³⁾ による係数 ($=7.0$) を、 r_* は水深平均流の曲がりの曲率半径を用いることとし、Shimizu and Itakura¹⁴⁾ による次式を用いて計算する。

$$\frac{1}{r_*} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (3)$$

3. 計算条件

(1) 水理条件

計算条件は藤田ら²⁾によって行われた移動床実験で、網状化が認められた実験と同じ条件とし、具体的には、水路長 15m、水路幅 1.8m、流量 4.0l/sec、平均粒径 1.05mm であり、河床勾配は、Run C-3 では 1/50、Run C-8 では 1/100 である。これらの実験条件は、黒木・岸による中規模河川の領域区分図¹⁵⁾によれば、複列砂州の領域に相当する。

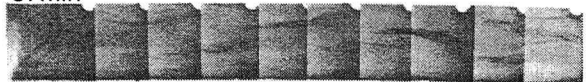
・実験結果

(a) Run C-3

22min



37min



192min



(b) Run C-8

8min



26min



56min



74min



図-2 実験結果

藤田ら²⁾の実験によれば、Run C-3 (図-2 (a)) では、通水開始後 20 分までのモード 6～7 の規則的な鱗状砂州が、38 分には上流でモード 3、下流でモード 4 の

砂州が卓越して行き、途中モード2の形態が現れかけたが、最終的には、1本の蛇行主流路と大きな砂州上の浮州を分断する数本の小流路という状態になり、網状流路を形成した。また、Run C-8 (図-2 (b)) の場合、通水5分で規則的な幾何学模様のようなモード8~9の鱗状砂州が砂面全体を覆い、モードが10分で5~7、25分で3~4と減少するにつれて、砂州は規模が増大し、次第に歪んだ形状になる。40分には全区間でモード3、55分過ぎにはモード2に類似の水流の状況も現れて、水路中心部の大きな砂州上の小規模な砂州が浮州となり、網状流路が形成された。

(2) 計算条件

計算上の流路長は15mとしたが、十分に長い流路を想定するために、計算上の流速、水深、流砂量および河床変動はの上下流を常に等しく保つ、繰り返し条件を用いることとした。また河床のManningの粗度係数は岸・黒木¹⁶⁾による平坦河床の抵抗則を用いて算定した。計算格子は水路全体を流下方向に65分割、横断方向に21分割の直交格子とし、計算時間刻みは予備計算の結果、安定に計算が進行する最大の時間刻みとして、0.01秒を採用した。計算初期河床は河岸付近に高さが水深の10%程度の立法体形状の初期微小攪乱を置いた平坦河床とし、計算開始からそれぞれ4時間後、3時間後までの流れと河床変動の計算を行うこととした。

(3) 浮州周辺の境界条件

計算中に浮州が形成された場合、浮州上では水深がないため、流れの計算が行われなくなる。浮州は計算領域から外れるため、一度出来た浮州が発達することはあっても、減衰・消滅することはない。そこで、氾濫解析等で用いられる手法を参考に浮州上に非常に薄い水深(h_{min})を仮定する(図-3 (a))。すなわち、水深がある一定値より下がらないように仮定する。これにより浮州を水面下の砂州と同様に扱うことが可能となる。本研究では、 $h_{min} = 0.1mm$ とした。

しかしながら、逆に、浮州上に水深を与えるということは、浮州上で流れの計算が行われる、すなわち、実際には水のない領域から流砂量を発生させてしまうことになる。そこで、その領域が浮州であるか否かの情報を与える必要がある。その判定は水深により行う。隣り合う計算グリッド上での水深が共に h_{min} ならばその領域は浮州内部、異なる値を取り、かつどちらかが h_{min} ならば水際境界とし、浮州内部においては、流速は0とする。また水際境界での流れに関しては、図-3 (b)に示すように河床勾配および水面勾配により浮州の発達・減衰を判断するものとする。具体的な計算点

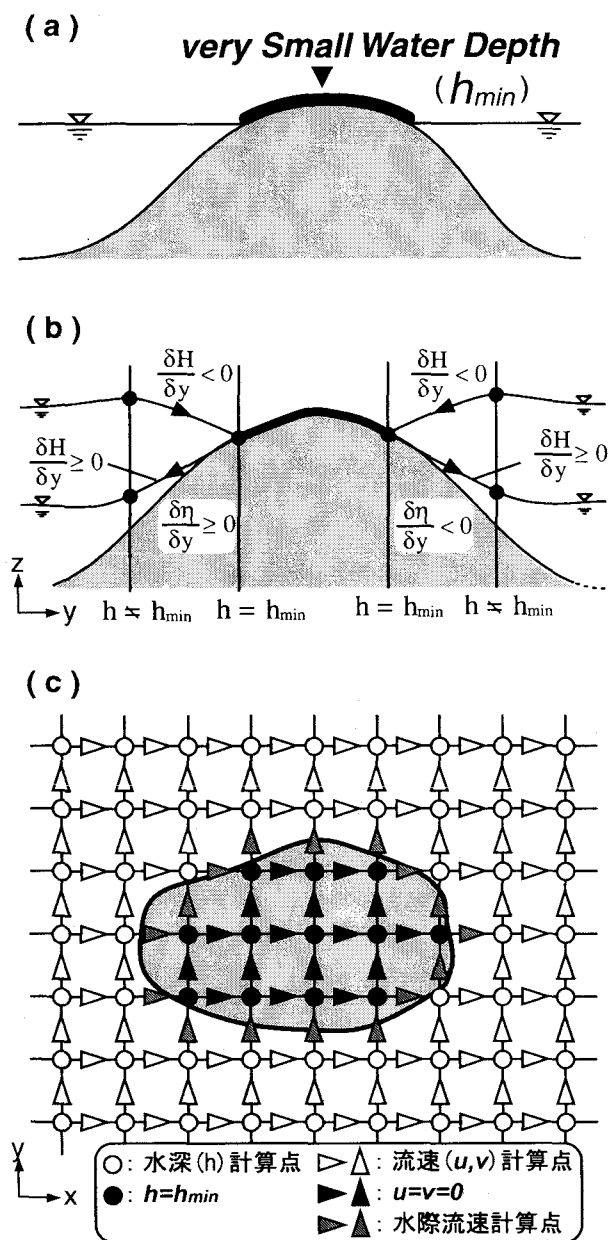


図-3 浮州周辺の流れの計算方法

に照らし合わせると図-3 (c) のようになる。

4. 計算結果

図-4, 5にそれぞれの計算結果を示す。図-4はRun C-3の1200秒ごとと14400秒までの計算結果である。図-5はRun C-8の300秒ごとと1500秒まで、以降1000秒ごとと4500秒までの計算結果である。どちらの場合も計算開始後ただちに初期攪乱は消滅し、高次モードの複列砂州を形成した。その後、時間経過と共に、低次モードの砂州が卓越し、Run C-3では、1本の蛇行主流路と数本の細かい小流路を形成し網状化するという結果が計算された。一方、Run C-8の場合は、モード2の複

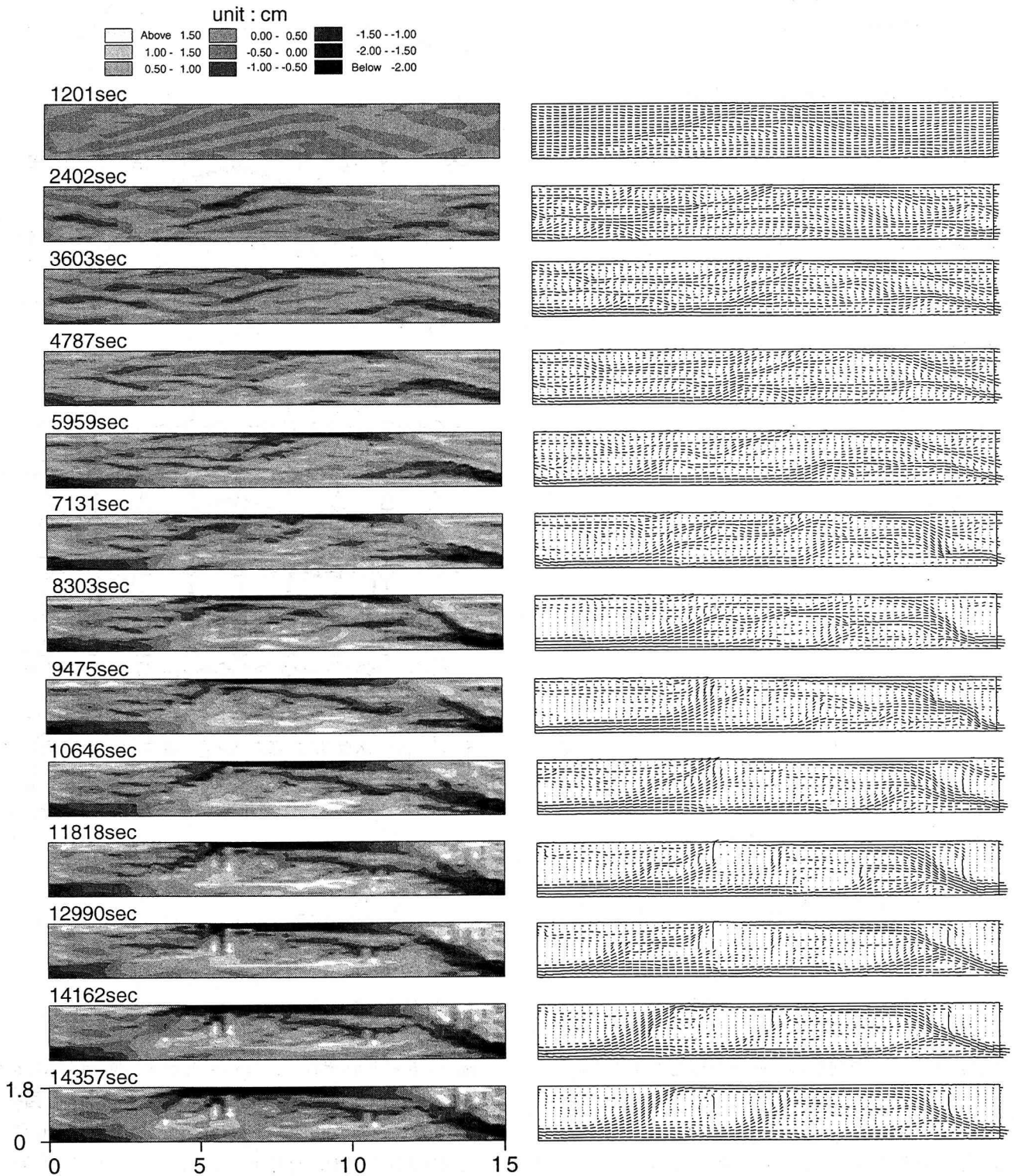


図-4 Run C-3 河床コンターおよび水深平均流速ベクトル計算結果

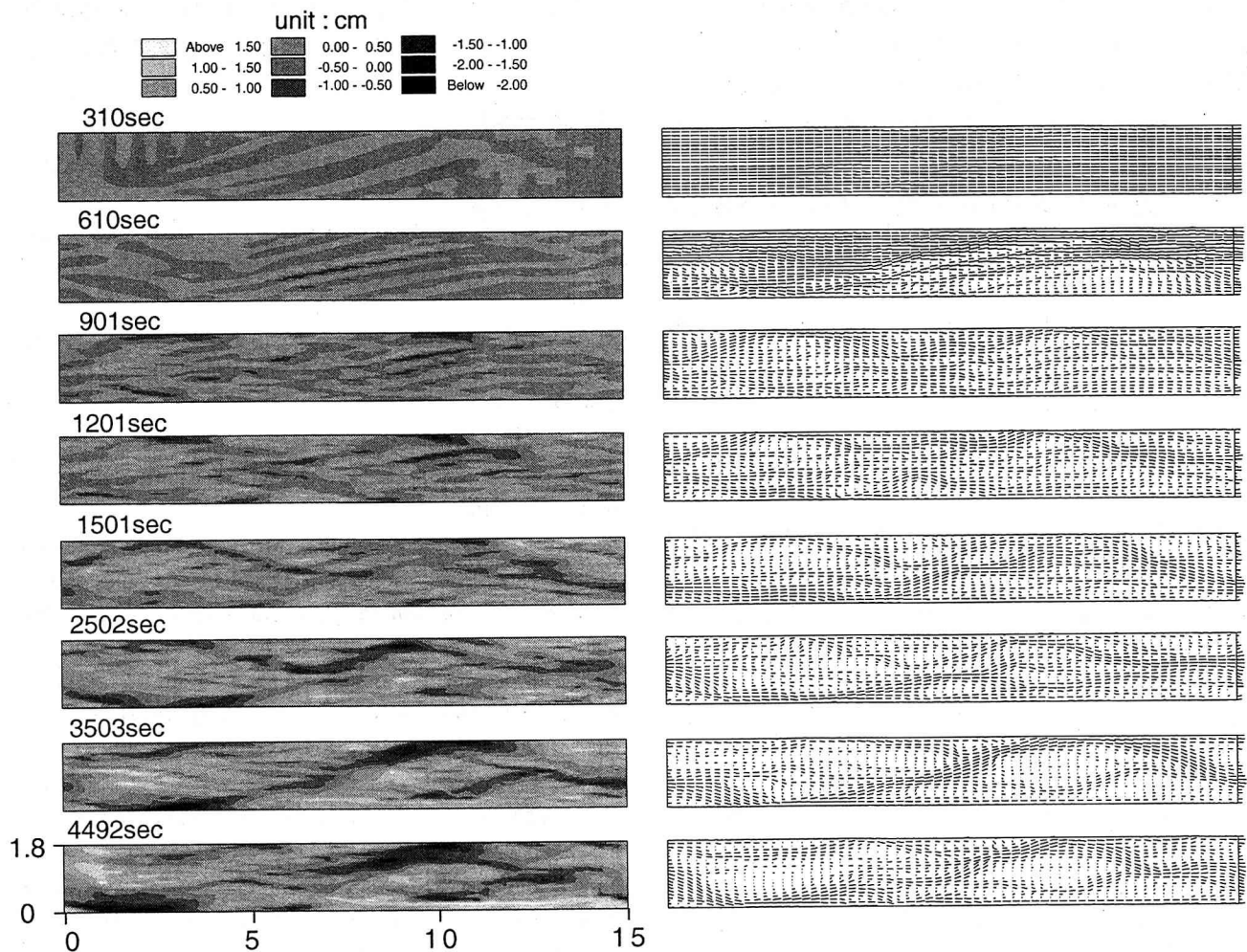


図-5 Run C-8 河床コンターおよび水深平均流速ベクトル計算結果

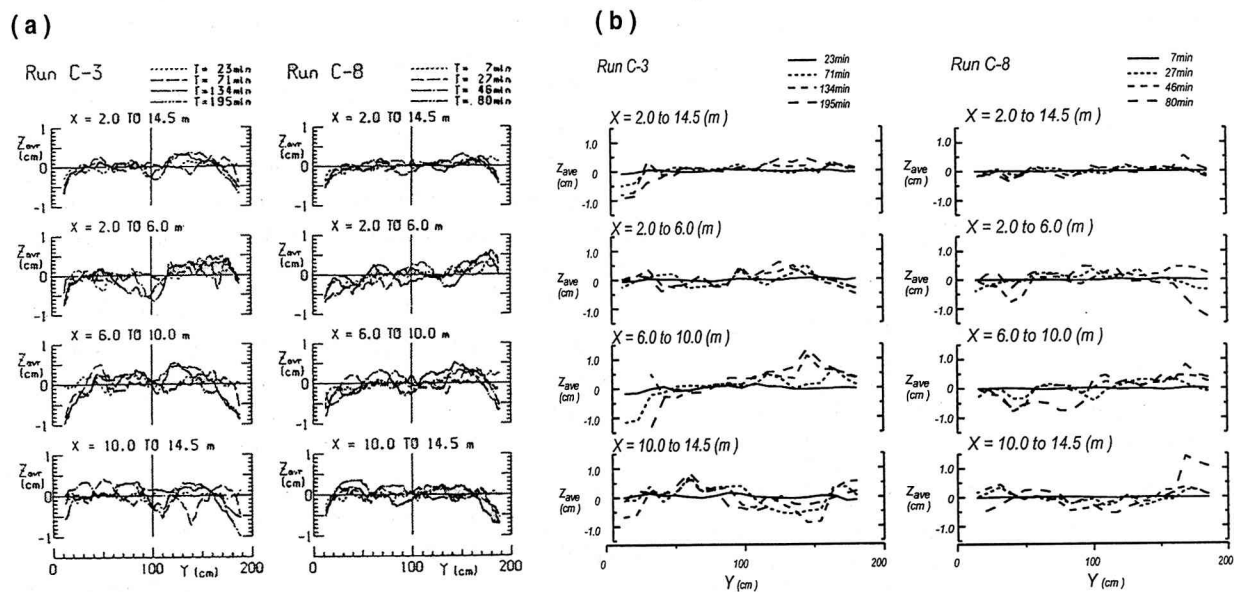


図-6 平均横断形状の比較 - (a) 実験結果, (b) 計算結果

列砂州に類似した砂州を形成するが、その砂州の上部が浮州となって流れを分断し、網状流路を形成して行った。なお、実験との比較は出来ないが、Run C-8の計算を実験の実験より長く継続したところ、図-4に示したように、12000秒から14400秒の間で、水路中央の大きな浮州を流れが分断して行く様子が計算された。

また、図-6は平均横断河床形状の実験値と計算結果の比較である。この図によると、計算結果は必ずしも実験値と一致しないが、砂州波高や流砂の堆積傾向に大きな違いは見られず、おおむね良好な結果が得られたと言える。

5. 計算格子サイズの河床形状に与える影響

本研究では、計算格子を流下方向に65分割、横断方向に21分割としたが、そのサイズが大きすぎるために計算初期に形成される高次モードの砂州が表現しきれないのではないかと懸念があったため、計算格子数を各方向にそれぞれ約2倍程度にとり、その結果について2重フーリエ解析¹²⁾をもちいて検討を行った。検討には、計算時間の制約上、実験において比較的早い時間帯に高次モードの砂州が形成されたRun C-8をもちいた。

解析の結果、どちらの計算においても、若干乱れた河床の中に高次モードの砂州が混在するといった結果が得られ、計算初期段階における河床形状の計算格子サイズ依存性は確認されなかった。しかしながら、計算時間が経過するにつれ、計算格子を小さくした方が、若干ではあるが卓越するモードの幅が大きくなるという結果が得られた。

6. おわりに

本論文では、浮州の形成を考慮し、網状流路の形成過程を解析するモデルの開発と、その有効性を検討する目的で、流れと河床変動の計算を試みた。その結果、浮州の発達・減衰過程あるいは、高次モードから低次モードへの砂州の変移といった現象を、安定して再現することが可能であることが示された。また、流れや砂州の挙動以外に、砂州波高や波長に関しても、おおむね良好な結果が得られており、今後、河岸侵食モデル等を取り入れることで、より実際の河川に近い現象を再現出来るようになることが期待される。また、河床形状の計算格子サイズ依存性については、今回の計算では大きな違いは確認されなかったが、更に細かくした場合や水理条件を変えた場合の計算についても検

討が必要である。しかしながら、計算格子サイズと計算時間の兼ね合いから、計算の高速化および最適な計算格子サイズを見つけることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 木下良作: 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料第36号, 1961.
- 2) 藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄: 複列砂州と網状流路の形成過程に関する研究, 京都大学防災研究所年報第29号B-2, 1986.
- 3) 道上正規, 藤田正治, 日下部重幸: 水みち発生・発達過程の実験とシミュレーション, 水工学論文集第39巻, 613-618, 1995.2.
- 4) Colombini, M., Seminara, G. and Tubino, M.: Finite-amplitude alternate bars, *Journal of Fluid Mechanics*, pp.213-232, 1987.
- 5) Seminara, G. and Tubino, M.: Alternate Bars and Meandering: Free, Forced and Mixed Interactions, *Water Resources Monograph 12, River Meandering*, pp.267-320, 1989.
- 6) Pornprommin, A. and Izumi, N.: Nonlinear Stability Analysis of Alternate and Multiple Bars, *Proceedings of RCEM2001, IAHR, Obihiro, Japan*, pp.693-702, 2001.8.
- 7) 清水康行, 倉林弘志, 藤田睦博: 複列・網状砂州河道における河床変動計算, *水工学論文集*, 第45巻, pp.739-744, 2001.2.
- 8) Takebayashi, H., Egashira, S. and Okabe, T.: Stream Formation Process Between Confining Banks of Straight Wide Channels, *Proceedings of RCEM2001, IAHR, Obihiro, Japan*, pp.575-584, 2001.8.
- 9) 長田信寿: 一般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*, pp.51-76, 1999.8.
- 10) 清水康行: 連続床止め工を有する複断面河道における流れと河床変動の計算, *水工学論文集*, 第43巻, 683-688, 1999.2.
- 11) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木論文集*, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 12) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, *北海道大学学位論文*, 1983.
- 13) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Cannel Bends, *Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol.100, HY11*, pp.1631-1648, 1974.
- 14) Shimizu, Y. and Itakura, T.: Calculation of flow and bed deformation with a general nonorthogonal coordinate system, *Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2*, pp.41-248, 1991.
- 15) 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, pp.87-96, 1984.
- 16) 岸力, 黒木幹男: 移動床における河床形状と流体抵抗 (I), *北海道大学工学部研究報告*, 第67号, pp.1-23, 1973.

(2001.10.1受付)