

複列・網状砂州河道における河床変動計算

NUMERICAL CALCULATION OF BED DEFORMATION IN BRAIDED STREAM

清水康行¹・倉林弘志²・藤田睦博³

Yasuyuki SHIMIZU, Hiroshi KURABAYASHI and Mutsuhiro FUJITA

¹ 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)

² 学生員 北海道大学工学部土木工学科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³ 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Two types of numerical models are tested to predict flow and bed deformation of braided bar channel. The first model is the classical 2-dimensional quasi-steady flow model with upwind differential numerical scheme. The second model is 2-dimensional unsteady flow model with CIP numerical scheme. The results of the models are favorably compared with the moveable bed experiments. The models are tested in the very wide channel to predict the development of multi-low bar or braided bed configuration. In this case, only the second model with CIP scheme show good performance. It is found that the second model can be a powerful tool to predict the formation of braided stream in alluvial rivers.

Key words: braided channel, numerical model, CIP numerical scheme.

1 はじめに

我が国の沖積地および扇状地河川の河床形態は中規模河床形態によって特徴付けられる。この中規模河床形態河川の河床・河道形状を定量的に予測することは河川工学上重要な課題である。特に近年は河川環境や生態系に配慮した河川改修に対する社会的なニーズも高く、この意味においても中規模河床形態の定量的な予測は益々重要となっている。中規模河床形態に関する研究は、古くは木下ら¹⁾の現地調査や実験による先駆的な研究に始まり、その後数多くの実験、理論解析、数値解析が行われてきた。初期の理論的研究の多くは線形安定解析によるものであり(例えば黒木・岸²⁾, Blondex and Seminara³⁾)この中で、中規模河床形態の発生限界や領域区分が明らかにされてきた。その後、非線型解析による砂州波高や安定形状に関する研究も行われ、直線流路における交互砂州の安定形状や、流路の蛇行と砂州の相互作用などに関しても明らかにされてきた[例えば、清水ら⁴⁾]。

しかしながら、これら既往の研究の多くは単列砂州河道についての研究であり、複列砂州河道や網状河川の流路形成機構を定量的に扱ったものは極めて少ない。流路内に発生する水みちの発生過程に関する研究[例えば、道上ら⁵⁾]も複列砂州や網状流路までは言及していない。複列砂州河道は扇状地の急流河川において頻繁に見ら

れる河床形状であり、活発な土砂移動や侵食を伴う場合も多く、その特性の定量的な把握は重要である。また、網状河川については河川改修の進んでいない発展途上国で多く見受けられ[例えば Enggrob and Tjerry⁶⁾]、これらの国の国土開発上、その研究は極めて重要である。図-1はメコン河のタイとカンボジア国境付近の衛星写真である。本研究の最終目標はこのような複雑な河道形状の形成機構の解明とその変動の定量的な予測である。このような網状流路に関する研究が、(1)交互砂州の研究→(2)複列砂州の研究→(3)河岸侵食の研究→(3)網状流路の研究という延長線上にあるのかどうかは定かでは無いが、本研究においては上記(2)の複列砂州河道における流れと河床変動の計算に関しての検討を行うものである。

中規模河床形態を解析する河床変動計算モデルにおいては浅水方程式を用いた2次元、またはこれに水深方向の流速分布を組み合わせた準3次元のモデル^{4,7)}が多く用いられている。流れの計算法に関しては、流れを定常として計算し、河床変動のみを非定常で扱う擬似定常モデルや、流れ・河床変動ともに非定常の計算を行うモデル、さらに乱流モデルとの併用、差分方法や計算座標の設定法など、数多くの組み合わせが提案されており、モデルの選択法も検討課題の一つである。

そこで、本研究においては最も古典的と考えられる、

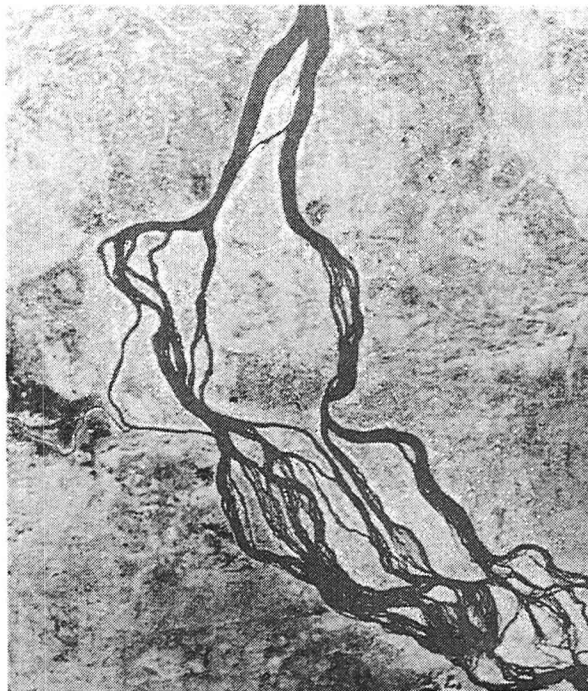


図 1: メコン河の網状流路 (AIT 泉典洋氏提供)

(I) 流れを 2 次元定常で扱い、差分法に風上差分法を用いた手法⁸⁾と、(II) 流れの計算に急変流の計算に有効な CIP 法⁹⁾を用いた手法¹⁰⁾の 2 つの方法を用いてその結果の比較を行うこととする。

これらの河床変動計算法は、既に、湾曲流れや単列砂州河道においては、その有効性が確かめられているが、複列砂州河道に関しては確かめられていない。本研究では、これら 2 つの方法を、木下¹⁾によって行われた複列砂州の移動床実験の条件に適用し、それぞれの適合性および問題点を比較検討する。さらに、仮想流路ではあるが非常に幅の広い条件での計算を実施し、網状河道の解析の可能性を検討する。

2 計算方法

中規模河床形態の計算を目的とした河床変動計算法は様々なものが提案されているが、本研究においては以下の 2 つの方法を用いて検討を行う。その概略は以下の通りである。

● 方法 (I): 擬定常流による風上差分計算法

2 次元、定常、非圧縮性流体の運動方程式および連続の式をもとに、流れの計算を水深方向の平均値を用いた 2 次元浅水流モデルで行ういわば古典的な方法である。移流項の計算は 1 次精度の風上差分を用い、水位 (水深) の計算には流れの連続式と運動方程式を連立し SIMPLE 法を用いる。各タイムステップにおいて流れが定常になるまで緩和法により繰り返し計算で流速および水深を求め、定常に達した後に流砂量の計算を行

い、河床変動の計算を流砂連続式により行う。流砂連続式の差分法は流下方向に 1 次精度の風上差分、横断方向に中央差分を用いて行う。この方法の詳細は清水⁸⁾による。

● 方法 (II): 非定常流による高精度差分計算法

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、移流項以外の項のうち、圧力 (水面) 勾配の項に関しては連続式と連立した SOR 法を、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¹¹⁾によるものとする。

なお、上記の 2 通りの計算法において共通に用いられる手法は以下の通りである。

① 運動方程式中の河床抵抗は Manning 則で与え、拡散項の渦動粘性係数は局所的な河床せん断力と局所的な水深のみの関数として次式で与える。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (1)$$

ただし、 κ はカルマン定数、 u_* は摩擦速度であり次式で与える。

$$u_*^2 = \frac{gn^2(u^2 + v^2)}{h^{1/3}} \quad (2)$$

ただし、 g は重力加速度、 h は水深、 u および v はそれぞれ流下方向および横断方向の水深平均流速である。

② 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 Meyer Peter-Müller 式および長谷川¹²⁾の式を用いる。

$$\frac{q_{bx}}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (3)$$

$$q_{by} = q_{bx} \left(\frac{v}{u} - N_* \frac{h}{r_*} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\nu_s \nu_k \tau_*}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (4)$$

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。(4) 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 Englund¹³⁾ による定

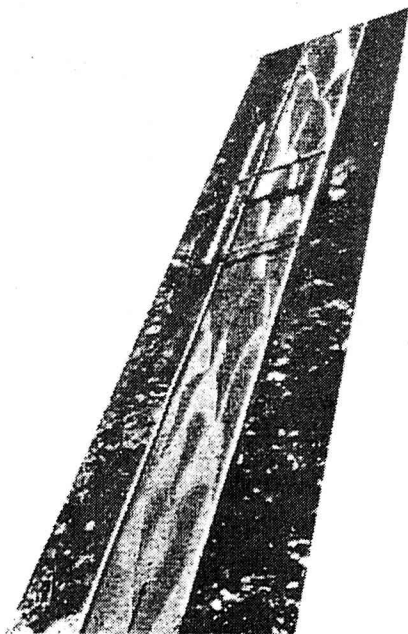


図 2: 木下¹⁾による複列砂州実験

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.

$$\frac{1}{r_*} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (5)$$

3 計算条件

上記の2つの計算法を用いて複列砂州流路の河床変動計算結果を比較するために, 同じ水理条件, 計算条件, 境界条件等を用いた. 計算条件は木下¹⁾によって行われた移動床実験で, 複列砂州形状が得られた実験と同じ条件とし, 具体的には, 水路幅 1.2m, 水路勾配 1/53.3, 流量 15.4l/sec, 平均水深 1.79cm, 河床材料の平均粒径は 2.33mm である. 図-2 は木下¹⁾による実験結果の写真であり, 半波長が約 3m のウロコ状 dune, すなわち複列交互砂州が形成されている. この時の砂州波高は必ずしも明らかでは無いが, 写真から判断して水深規模の砂州波高であったと推定される.

計算上の流路長は 10m 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¹⁵⁾による平坦河床の抵抗則を用いて実験の平均水深, 勾配, 河床材料の粒径から Manning の粗度係数を逆算して用いた. 計算格子は水路全体を流下方向に 61 分割, 横断方向に 21 分割の直交格子とし, 計算時間

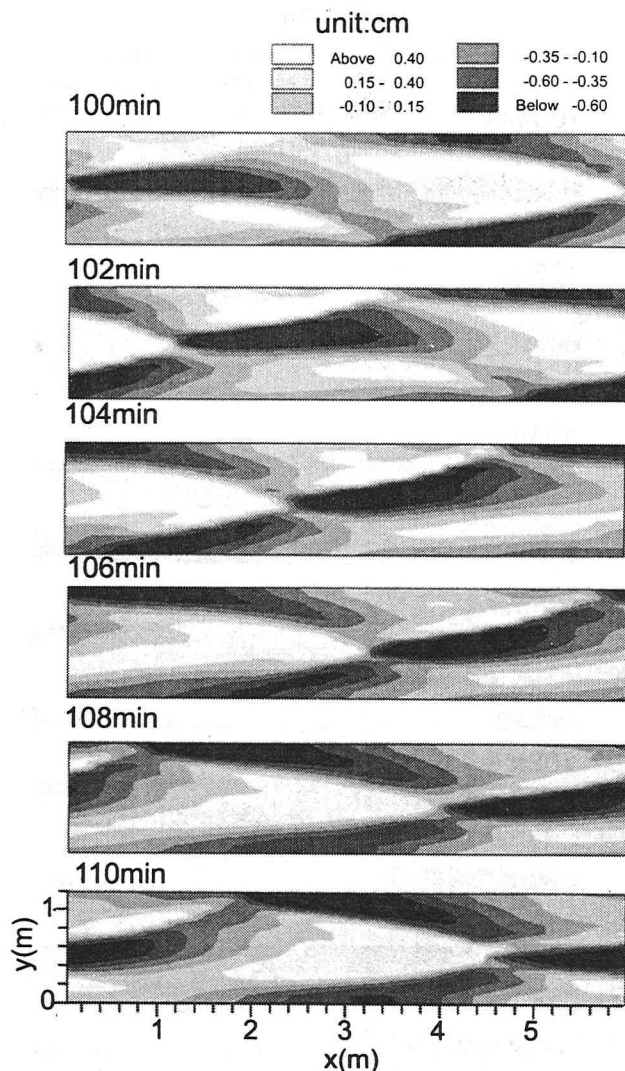


図 3: 複列砂州の計算結果 (方法 I)

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, 方法 (I) においては 60 秒, 方法 (II) では 0.02 秒が得られたのでこれを採用した. 計算初期河床は河岸付近に高さが水深の 1/10 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 10 時間後までの流れと河床変動の計算を行うこととした.

4 計算結果

方法 (I) および方法 (II) とともに計算開始後すぐに初期攪乱は消失し, 斜め縞状の細かい模様が発生した. 数 10 分後には複列砂州状の河床形状が出現し, その後は形を保ちながら一定の速度で下流へ移動する結果が得られた. 計算開始後 100 分から 110 分の間の河床形状を図-3 および図-4 に示す. ここで, コンター図の値は初期河床からの変動量 (単位 cm) で, 色は黒が洗掘部分で白が堆積部分である. 両者ともに水路中央が高い場合には両岸が深くなり, 中央部が深い場合には両岸が高くなる複列砂州の形状となっており, その波長も木下¹⁾

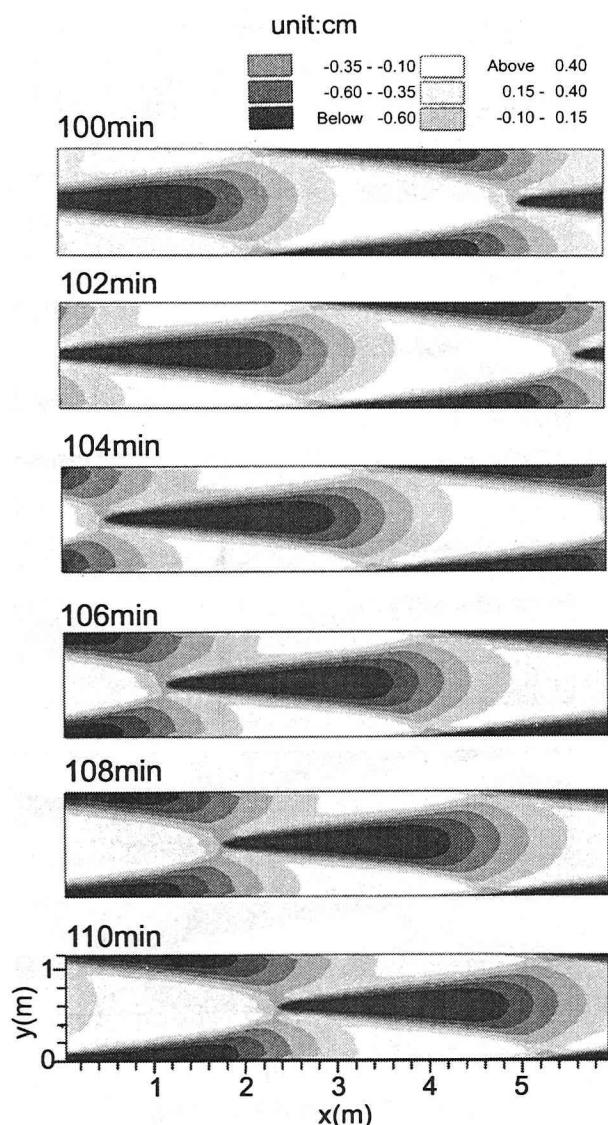


図 4: 複列砂州の計算結果 (方法 II)

による実験にほぼ一致している。砂州波高に関しても両者ともに 1cm 前後となっており、実験結果に一致しているように思われる。砂州の形状に関しては図-3 の方法 (I) によるものは必ずしも明瞭ではないのに対して、図-4 の方法 (II) によるものは非常に明瞭で左右ほぼ対称の河床形状が保たれている。前述のように方法 (I) では各タイムステップにおいて流れの計算が定常に達するまで緩和法による繰り返し計算を行うため、計算初期においては非常に速い速度で計算可能であるが、図-3 に示したように河床形状が複雑になると計算速度が徐々に遅くなり、最終的には流れの計算で定常状態を得ることが難しくなり (全ての計算点で連続式を満足出来なくなる) 計算時間が圧倒的に遅くなってしまふ。これに対して方法 (II) は流れの計算も非定常で行っているため、ほぼ一定の速度で計算を継続することが可能であり、結果的には方法 (II) の方が時間刻みを一定とした計算の場合には、短い時間で計算が可能となった。実験結果と

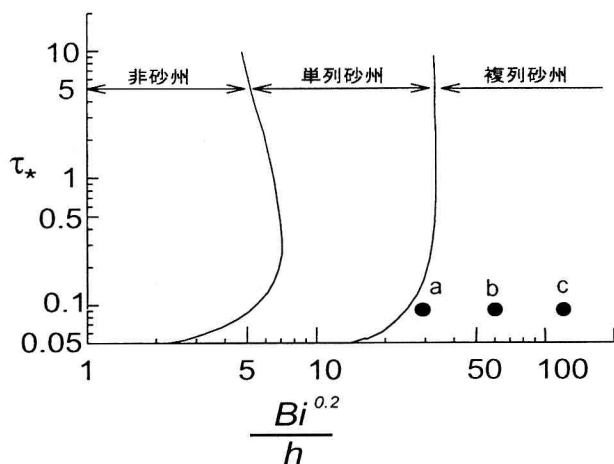


図 5: 中規模河床形態の領域区分

詳細な河床形状の比較は出来ないが、明らかに方法 (II) の方がスムーズな形状が得られることが確かめられた。この理由は、方法 (II) のほうが流れの計算法がより高精度のものであるため、河床変動の計算も結果的に精度が高くなっているためと思われる。

5 網状流路の試算

上記の計算条件は、図-5 に示す黒木・岸²⁾の中規模河床形態の領域区分図の点 (a) の条件に相当する。なお、図-5 のグラフの縦軸 τ_* は無次元掃流力、横軸 $Bi^{0.2}/h$ の B は水路幅、 i は水路勾配、 h は平均水深である。図-5 の点 (a) の位置は複列砂州の領域ではあるが単列砂州との境界に近い条件である。ここでは、同じ水深で水路幅が 2 倍、4 倍と広がった場合の計算を試み、複列砂州から多列砂州あるいは網状砂州の計算が可能かどうかを検討する。計算条件は前記の 2 つの方法のうち、スムーズな計算結果が得られた方法 (II) とし、同じ平均水深、勾配、河床材料で水路幅のみを 2 倍および 4 倍と変化させる (流量も 2 倍および 4 倍となる)。また、水路幅が広がることを考慮して、横断方向の計算格子数も 2 倍、4 倍と増やして計算を行うこととした。この条件は図-5 では (b) および (c) の点に相当する。

水路幅が 2 倍の場合の計算結果のうち 100 分から 108 分までのものを図-6 に 4 倍の場合の計算結果の 100 分と 110 分のものを図-7 に示す。なお、図-7 には同じ計算時間で得られた水深平均流速ベクトルも併せて示してある。これらの図によれば、水路幅の増加に比例して砂州の列数が増えている。図-7 の流速ベクトルによれば中州上部での流れの分散と直下流での流れの集中が良く表現されている。

砂州の形成に関してしばしば問題になる点のひとつに、流量 (水位) の変化に対する河床形態の反応という問題がある。この問題の解析にここで示したモデルが

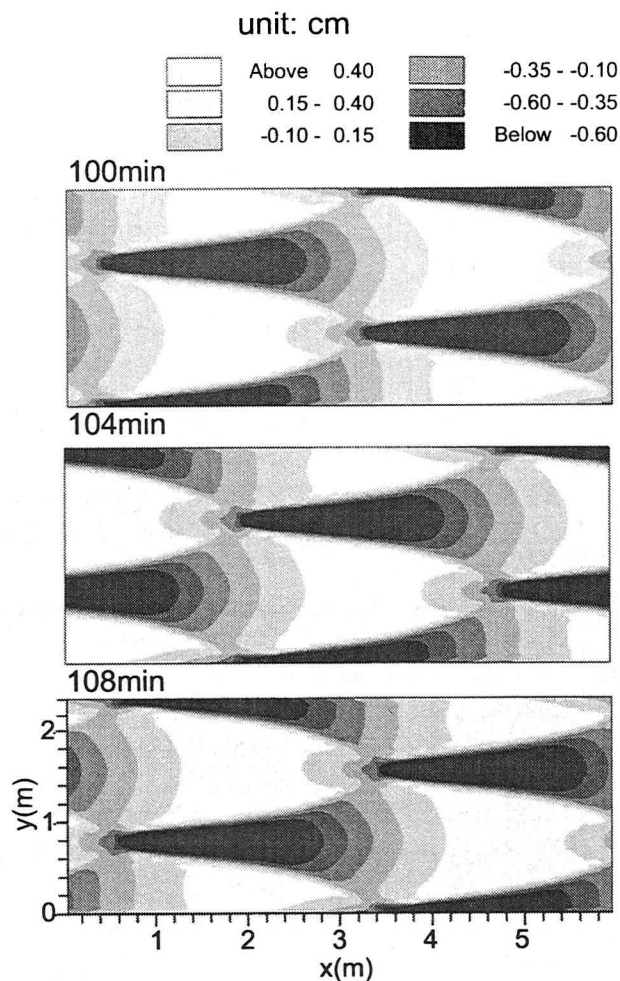


図 6: 水路幅を 2 倍にした場合の河床変動計算結果

適用可能かどうかを検討する目的で、図-7 の 100 分で得られた河床形状を初期河床として流量 (水位を) 半減させて計算を継続した。この結果図-8 に示すように河床形状は直ぐに反応して網状流路へと変化して行く様子が計算された。

なお、方法 (I) でも同様の計算を試みたが、安定した計算を継続することは出来なかった。

6 おわりに

本論文では複列砂州あるいは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、2つの手法を用いて最終的に網状流路の形成に至るまでの計算を行った。この結果本文中の方法 (II) によれば、複列砂州や網状砂州、あるいは流量変化による砂州形態の変化などの現象を比較的容易かつ安定な計算が可能であることが示された。ただ、本論文で示した結果は定性的な河床形状であり、今後は実験データとの照合が必要である。また、本モデルにすでに開発されている河岸侵食モデル [例えば長田ら¹⁶⁾、清水ら¹⁷⁾] を組入れることにより、実河川規模の流路変動や網状流路の形成過程

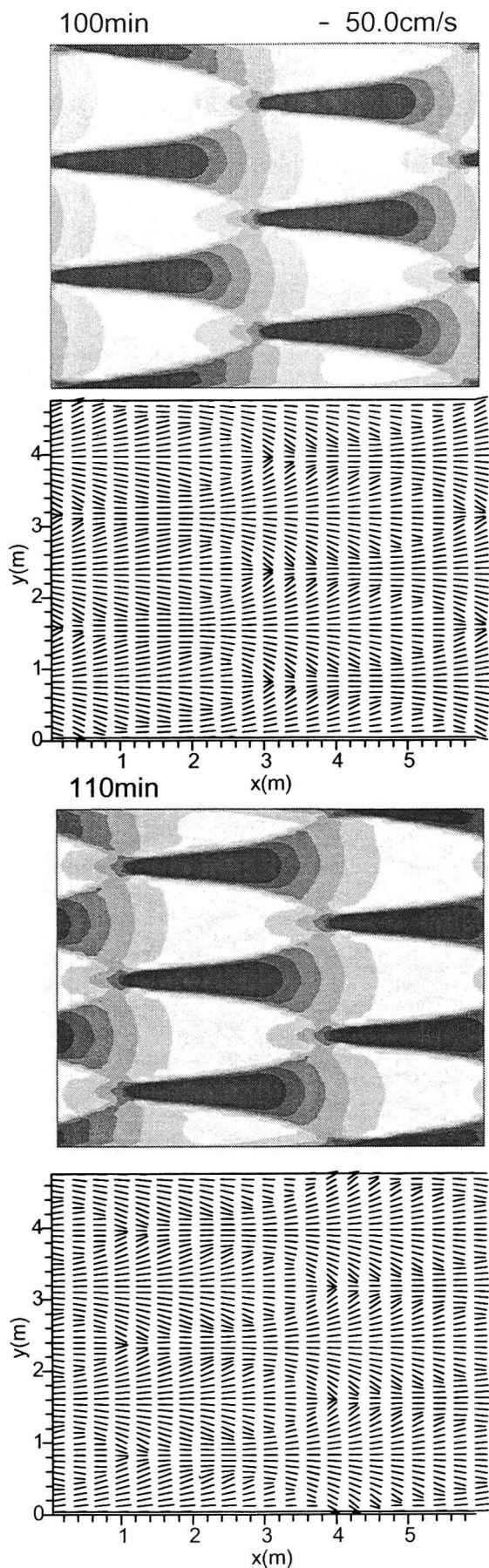


図 7: 水路幅を 4 倍にした場合の流れと河床変動計算結果

の検討が可能となることが期待される。

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) 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.
- 3) Blondeaux, P. and Seminara, G.: A unified bar-bend theory of river meanders, Journal of Fluid Mech., Vol.157, pp.449-470, 1985.
- 4) 清水康行, 渡辺康玄, 鳥谷部寿人: 直線および蛇行河川の安定河床形状に関する研究, 土木学会論文集 No.509/II-30, 67-78, 1995.2.
- 5) 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, pp.613-618, 1995.2.
- 6) Enggrob, H. and Tjerry, S.: Simulation of morphological characteristics of a braided river, Proc. of RCEM, IAHR, Genova, Italy, pp.585-594, 1999.
- 7) 清水康行, 板倉忠興, 山口甲: 2次元モデルを用いた河床形態変化のシミュレーション, 第31回水理講演会論文集, pp.689-694, 1987.
- 8) 清水康行: 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道開発局開発土木研究所報告, 第93号, 1990.
- 9) Yabe, T., Ishikawa, T.: A numerical cubic-interpolated pseudoparticle(CIP) method without time splitting technique for hyperbolic equations, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.59, No.7, pp.2301-2304, 1990.
- 10) 中山恵介, 佐藤圭洋, 堀川康志: CIP法を用いた浅水流方程式の数値計算手法の開発, 水工学論文集, 第42巻, pp.1159-1164, 1998.
- 11) 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, pp.683-688, 1999.2.
- 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 channel bends, Journal 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) 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.
- 16) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, M., Rahman: 移動一般座標系による側岸浸食を伴う河道変動の数値解析, 水工学論文集, 第40巻, pp.927-932, 1996.
- 17) 清水康行, 平野道, 渡辺康玄: 河岸浸食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.921-926, 1996.

(2000. 10. 2受付)

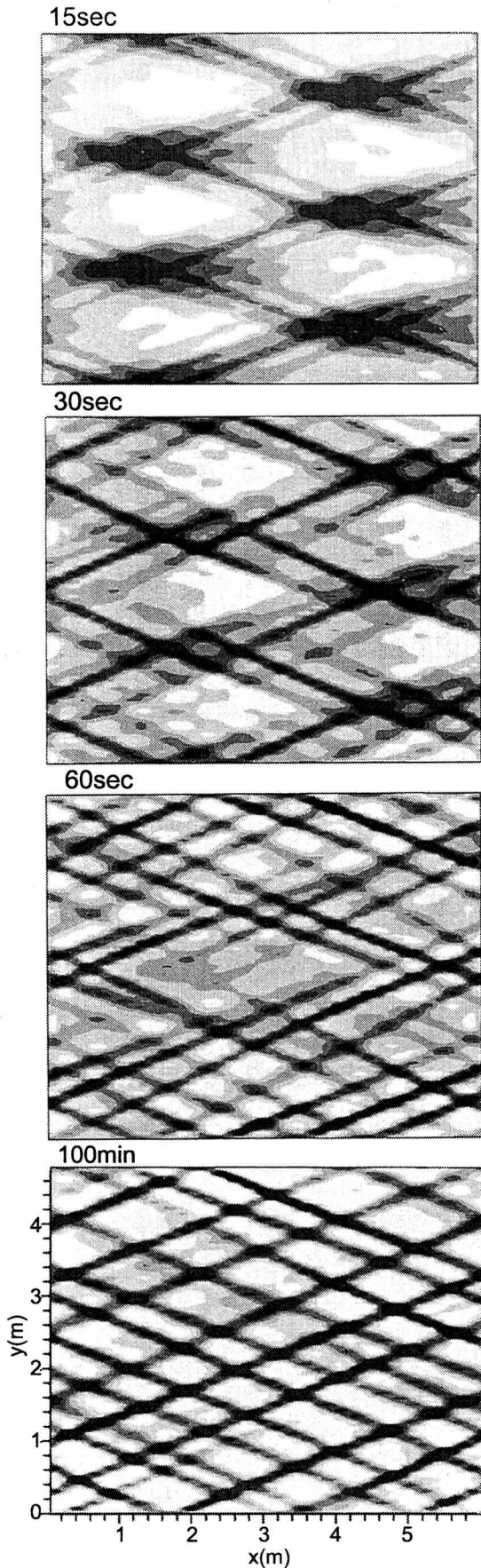


図 8: 水深 (流量) を半減させた後の河床変動計算結果