

複列砂州河道形成の安定計算に関する数値的研究

Numerical study of formative process and bed deformation of double row bars

北海道大学工学部 〇学生員 倉林弘志 (Hiroshi KURABAYASHI)
 北海道大学大学院 正 員 清水康行 (Yasuyuki SHIMIZU)

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。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。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^{2,3)}]。

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⁴⁾]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 Tjerry⁵⁾]、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。

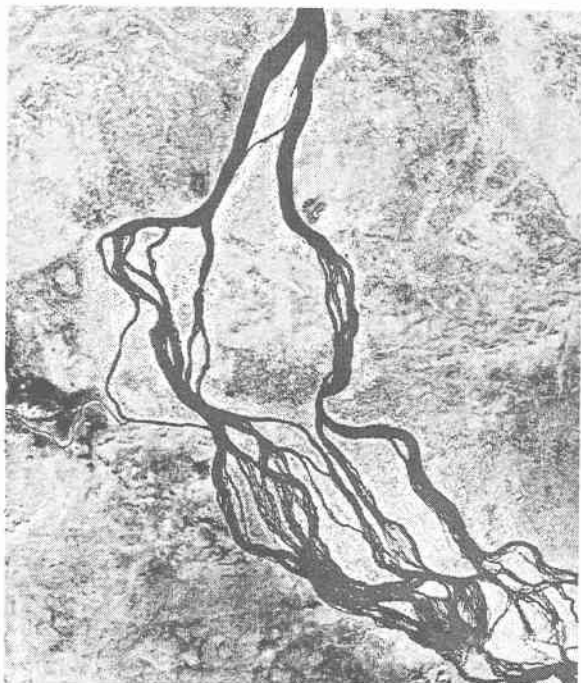


図 1: メコン河の網状流路 (AIT 泉典洋氏提供)

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關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流方程式を用いた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^{2,6)}が多く用いられている。流れの計算法に關しては、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。また、流砂量式や限界掃流式等も斜面効果を考慮したものなどが数多く提案されており、その選択も重要な課題である。本研究においては、無次元掃流力に縦断斜面効果を考慮した補正を行い、その補正を変化させ比較を行う。

本研究では、藤田ら⁷⁾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、その適合性および問題点を比較検討する。

2. 基礎式と計算方法

流れは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計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + h\nu_t \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + h\nu_t \nabla^2 v \quad (3)$$

ただし、 u および v はそれぞれ x, y 方向の水深平均流速、 h は水深、 H は水位 ($=h + \eta$, η は河床高)、 t は時間、 τ_x および τ_y それぞれ x および y 方向の河床せん断力、 ν_t は水深平均の渦動粘性係数、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。 τ_x および τ_y は Manning 則を用いて以下のように表す。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

ただし、 n は Manning の粗度係数である。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。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (5)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 u_* は摩擦速度であり次式で与える。

$$u_* = \frac{gn^2(u^2 + v^2)}{h^{1/3}} \quad (6)$$

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。

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⁸⁾の式を用いる。

$$\frac{q_{bx}}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_{*s} - \tau_{*c})^{3/2} \quad (7)$$

$$q_{by} = q_{bx} \left(\frac{v}{u} - N_* \frac{h}{r_*} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\nu_s \nu_k \tau_*}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (8)$$

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、 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。また、 τ_{*c} 無次元限界掃流力であり岩垣の式で求める。 τ_{*s} は無次元限界掃流力による補正を行った無次元掃流力であり、次式を用い計算を行う。

●方法 1

$$\tau_{*s} = \tau_* - \tau_{*c} \alpha \frac{\partial \eta}{\partial z} \quad (9)$$

●方法 2

$$\tau_{*s} = \tau_* - \tau_{*c} \tan^{-1} \left(\frac{\partial \eta}{\partial z} \right) \quad (10)$$

ここで、 τ_* は無次元掃流力 $[=u_*^2/(sgd)]$ 、 α は補正係数であり、本研究ではこの α の値を変化させ比較を行う。この補正は、縦断斜面効果を考慮したもので、河床の傾きが正の場合には無次元掃流力を小さく、負の場合には大きくするというものであり、結果として図-2 の様に、河床を平坦に保とうとする効果がある。そのため、この補正量を大きくすると砂州波高は小さくなり、最終的には砂州は発生しなくなる。

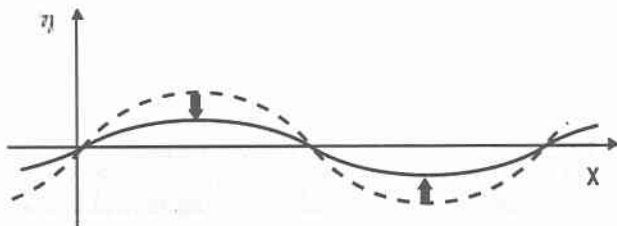


図 2: 補正のイメージ

(8) 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 Engelund⁹⁾ による定数 ($=7.0$) 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 Itakura¹⁰⁾ による次式を用いて計算する。

$$\frac{1}{r_*} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (11)$$

(1) ~ (3) 式の流れの計算は中山ら¹¹⁾と同様に運動方程式に関して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。詳細は清水ら¹²⁾によるものとする。

3. 計算条件

上記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。計算条件は藤田ら⁷⁾、また木下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、藤田ら⁷⁾の実験は、水路長 15m、水路幅 1.8m、水路勾配 1/100、流量 5.0ℓ/sec、平均水深 2.65cm、河床材料の平均粒径は 1.05mm、木下¹⁾の実験では、水路長 10m、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¹³⁾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、0.02 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 2 時間 10 分後までの流れと河床変動の計算を行うこととした。また、無次元掃流力の補正は、方法 1 では、 α の値は、0.0、すなわち補正を行わない場合と 2.0 とした場合で比較を行った。

藤田ら⁷⁾の実験によれば、通水 20 分過ぎにモード 3 ~ 4 の砂州が発生し、1 時間後には、モード 2 の砂州が卓越し、最終的に波高が水深程度、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。

4. 計算結果

全ての計算において、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。その後、方法 1 で $\alpha=0.0$ として無次元掃流力を補正した場合と、方法 2 による補正を行った場合には、浮州が発生しその周辺で河床形状が振動し、砂州波形が乱れるという結果が得られた。

藤田ら⁷⁾によって行われた実験の条件で行った計算結果の、計算開始後 30, 60, 90, 120 分の間の河床形状を図-4、図-5 および図-6 に示す。河床コンター図の出力範囲は、長さ 6m、幅 1.8m である。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。全ての計算において、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、その波長も藤田ら⁷⁾、木下¹⁾による実験にほぼ一致している。砂州波高に関しても 1cm 前後となっており、実験結果に一致している。

砂州波形に関しては、方法 1 で α を 2.0 とした場合には、非常に明瞭で左右ほぼ対称の河床形状が保たれるという結果を得た。方法 1 において α を 0.0 にした場合、すなわち補正を行わなかった場合、また、方法 2 により補正を行っ

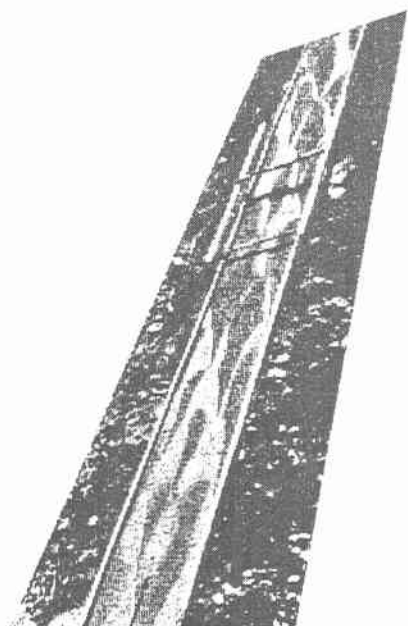


図 3: 木下¹⁾による複列砂州実験

た場合には、実験では現れなかった浮州が発生した。今回使用した計算モデルにおいては、浮州が発生した場合、浮州上では流量が 0 になるという扱いをしているため、一度発生した浮州は最後まで残ることになる。この浮州の扱いについては、すでに開発されている側岸侵食が起こる場合の計算モデル [例えば長田ら¹⁴⁾、清水ら¹⁵⁾] と同様の原理を取り入れるなどして検討することが必要である。

また、方法 1 で補正を行わない場合の計算を、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て行ったところ、図-7 に示すように、砂州波形が激しく振動するという結果を得た。河床コンター図の出力範囲は、長さ 6m、幅 1.2m である。そのため、時刻刻みや計算メッシュを細かくして同様の計算を行ったが、改善は見られなかった。

6. おわりに

本研究では、複列砂州河道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、無次元掃流力を補正した計算を行い比較検討を行った。

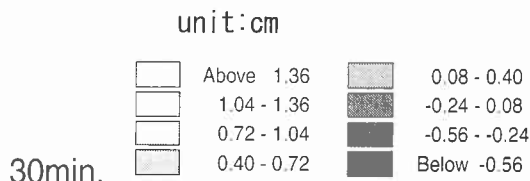
本研究で使用したモデルでは、縦断斜面効果による補正を無次元掃流力のみになら適用していないが、その影響は河床形状の挙動に大きく現れた。よって、今後は流量式などにも縦断斜面効果による補正を行う必要がある。

また、境界条件や初期条件の与え方、浮州の扱いなど安定した解析を行う上で考えなければならない要素は数多く残されている。

更に、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の検討が可能となることを期待される。

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.



30min.



61min.



92min.



120min.



図 4: 方法 1 で α を 0.0 とした場合の河床変動計算結果

2) 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.

3) 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.

4) 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.

5) Enggrob, H. and Tjerry, S.: Simulation of morphological characteristics of a braided river, Proc. of RCEM, IAHR, Genova, Italy, pp.585-594, 1999.

6) 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.

7) 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実験, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号 B-2, pp.451-472, 1986.

8) 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.

9) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Journal of Hydraulic Div., ASCE, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.

10) 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.

11) 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.

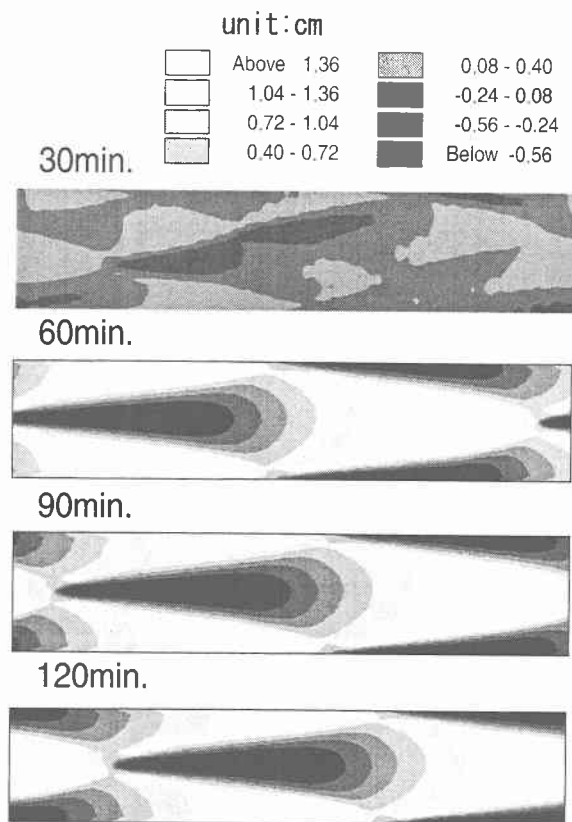


図 5: 方法 1 で α を 2.0 とした場合の河床変動計算結果

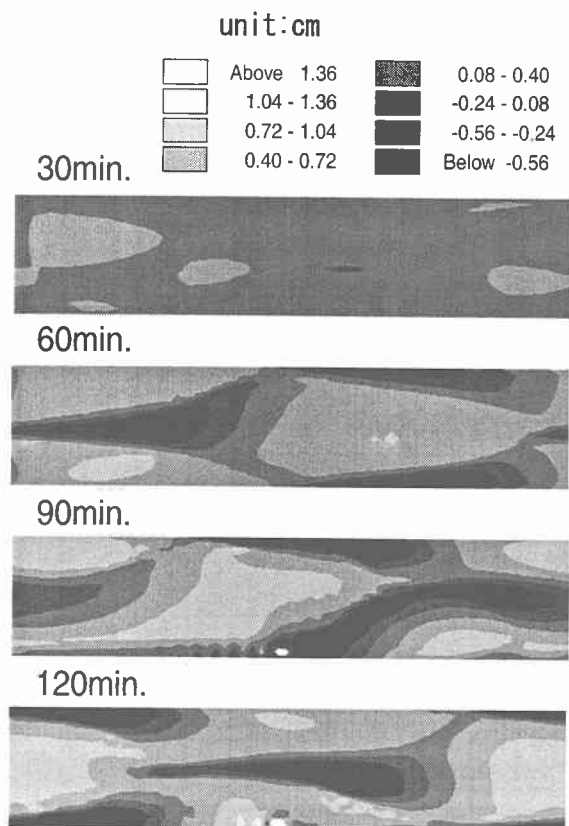


図 6: 方法 2 による河床変動計算結果

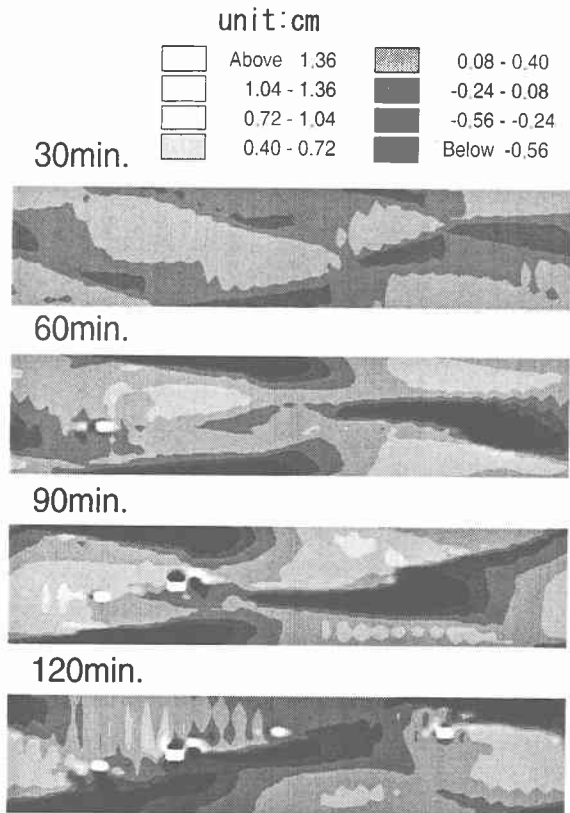


図 7: 砂州波形が振動する場合の河床変動計算結果

- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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
- 15) 清水康行, 平野道, 渡邊康玄: 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.