

蛇行・網状流路形成過程の数値シミュレーション

九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山 壽一郎 九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲
九州工業大学工学部 学生会員 ○上田 和也 九州工業大学大学院 学生会員 森山 拓士

1. はじめに

近年、河川の再自然化の一例として、低水路護岸の侵食をある程度は許容し、河川の自立形成機能を活かす方法がある。河川の自立形成機能による流路の形成は砂州の形成と関連しており、砂州の形成・発達とともに浮州が生じ、砂州と浮州による流れの分裂あるいは集中により流路は形成される。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、混合粒径河床での流路変動を予測可能な数値モデルの構築を最終的な目的としている。ここでは、著者らの構築したドライ・ウェット状態の河床の取り扱いを組み込んだ平面 2 次元河床変動モデル¹⁾に、小規模河床形態に応じた抵抗則、有効掃流力、2 次流が河床変動に及ぼす影響を組み込んだ新たなモデルを開発し、一様粒径で構成される河道での単列砂州からの蛇行流路の形成、複列砂州からの網状流路の形成に関する既存の実験結果に適用することで、同モデルの検証を行った。

2. 解析の概要

流れの基礎方程式は 2 次元浅水方程式、河床変動の基礎方程式は流砂の連続の式であり、式(1)、(2)で表される。ここに、 $\mathbf{U}$ =保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ = x , y 方向の流速ベクトル、 $\mathbf{S}$ =発生項・消滅項ベクトル、 h =水深、 u , v = x , y 方向の流速、 g =重力加速度、 S_{ox} , S_{oy} = x , y 方向の地盤高勾配、 S_{fx} , S_{fy} = x , y 方向の摩擦勾配、 λ_b =河床材料の空隙率、 q_{Bx} , q_{By} = x , y 方向の流砂量である。流砂量の算定では、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した式を用いた。全流砂量式には芦田・道上の式を、有効掃流力には岸・黒木の小規模河床形態に応じた有効掃流力を用いた。有効掃流力、限界掃流力については斜面の影響を考慮した。砂州などによる流れの局所的な湾曲で生じる 2 次流が河床変動に及ぼす影響は、土砂の流送方向の底面流速を求めることで考慮した。水中安息角を越えるような極めて大きな河床勾配が存在する場合には、斜面崩落が生じる。この時の崩落土砂量は、関根の方法²⁾に準じ、セル境界線を挟む二つのセルの河床高が安息角を満たすような補正高さを求め算出した。ドライベッドについての取り扱いの詳細は参考文献³⁾に示す通りである。基礎方程式の離散化は有限体積法(FVM)に基づき行った。時間積分には Euler の陽解法を、空間積分には常・射混在流が安定して計算できる流束差分法(FDS)を用いた。また、曲率半径の計算には中心差分を用いた。計算格子には、任意の河道形状が再現可能な非構造格子を用いた。なお、解析手法の詳細については参考文献¹⁾に示す通りである。解析の初期条件は、初期河床には粒径を上限とした擾乱を与えた。また流れについては、微小な水深と流速 0 を与えた。上流端の流れの境界条件については単位幅流量、下流端については堰が設けてあるので限界水深を与えた。単位幅流量については、±1%の擾乱を与えた。河床については、上下流ともに河床高を与え、河床高が変化しないように上下流での流砂量がそのまま通過するようにした。なお、ドライベッド状態を表す水深の閾値は平均粒径とした。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (h, \quad uh, \quad vh)^T \\ \mathbf{E} &= (uh, \quad u^2h + 1/2gh^2, \quad uvh)^T \\ \mathbf{F} &= (vh, \quad uvh, \quad v^2h + 1/2gh^2)^T \\ \mathbf{S} &= (0, \quad -gh(S_{ox} - S_{fx}), \quad -gh(S_{oy} - S_{fy}))^T \end{aligned}$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda_b} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

有効掃流力、限界掃流力については斜面の影響を考慮した。砂州などによる流れの局所的な湾曲で生じる 2 次流が河床変動に及ぼす影響は、土砂の流送方向の底面流速を求めることで考慮した。水中安息角を越えるような極めて大きな河床勾配が存在する場合には、斜面崩落が生じる。この時の崩落土砂量は、関根の方法²⁾に準じ、セル境界線を挟む二つのセルの河床高が安息角を満たすような補正高さを求め算出した。ドライベッドについての取り扱いの詳細は参考文献³⁾に示す通りである。基礎方程式の離散化は有限体積法(FVM)に基づき行った。時間積分には Euler の陽解法を、空間積分には常・射混在流が安定して計算できる流束差分法(FDS)を用いた。また、曲率半径の計算には中心差分を用いた。計算格子には、任意の河道形状が再現可能な非構造格子を用いた。なお、解析手法の詳細については参考文献¹⁾に示す通りである。解析の初期条件は、初期河床には粒径を上限とした擾乱を与えた。また流れについては、微小な水深と流速 0 を与えた。上流端の流れの境界条件については単位幅流量、下流端については堰が設けてあるので限界水深を与えた。単位幅流量については、±1%の擾乱を与えた。河床については、上下流ともに河床高を与え、河床高が変化しないように上下流での流砂量がそのまま通過するようにした。なお、ドライベッド状態を表す水深の閾値は平均粒径とした。

3. 結果と考察

まず、単列砂州の形成から蛇行流路の形成に関する実験結果⁴⁾において、浮州が形成されたケース S-10 へ本モデルを適用した。ケース S-10 では、複列砂州から単列砂州へモードが現象した後、浮州が生じ、流れが砂州前縁を通る流れと側壁沿いの弱い流れになり、蛇行した滞筋を形成し、蛇行流路の様相を呈する⁴⁾。

図-1 は、初期河床を基準とした河床コンターと流速ベクトルの解析結果の経時変化を示したものであり、流速ベクトル図は、容易に識別できるように解析結果の 1/4 としている。これより、交互砂州が形成され、その後、流れは交互砂州の前縁に沿って流れ、時間の経過とともに浮州が生じ始め、滞筋を形成しながら蛇行流路の様相を呈す

る。実験では、最初に複列砂州が生じた後に単列砂州が生じるが、解析では、そのような現象が再現されていない。これは、本モデルが1次精度の空間精度であるため、解析結果に拡散が生じ、高次モードの現象を再現できなかったためと考えられる。しかしながら、本モデルは、実験結果より得られた単列砂州の形成から蛇行流路の形成までのプロセスを再現しており、このような流路変動を再現できる性能を有していることが確認できる。

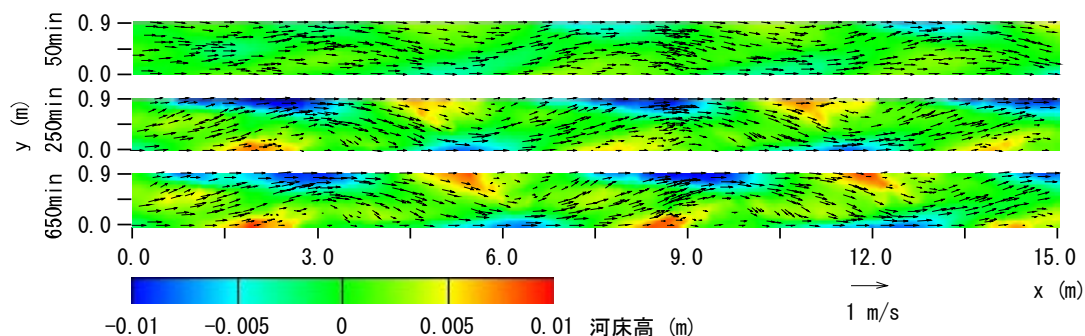


図-1 蛇行流路の形成過程の河床コンターと流速ベクトルの解析結果(ケース S-10)

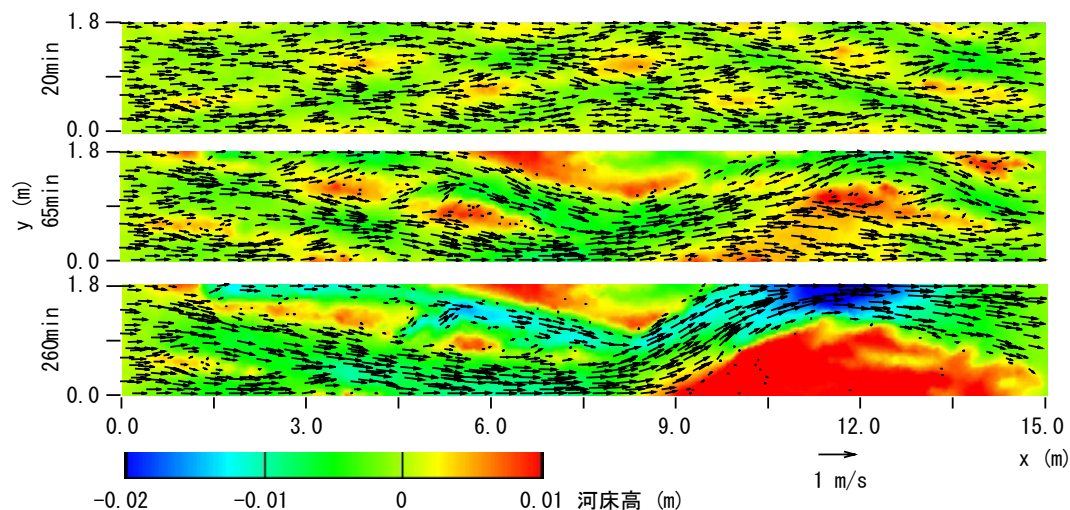


図-2 網状流路の形成過程の河床コンターと流速ベクトルの解析結果(Run C-10)

次に、複列砂州の形成から網状流路の形成に関する実験結果⁵⁾において、最急勾配である Run C-10 に本モデルを適用した。Run C-10 では鱗状の砂州が生じ、モードが2~3 になった段階で小さい流路で分割された浮州が発生し、8 の字蛇行を組み合わせた網状流路が形成される⁵⁾。

図-2 は Run C-10 の初期河床を基準とした河床コンターと流速ベクトルの解析結果の経時変化を示したものであり、解析結果のベクトル数については、先ほどと同様である。また、解析結果より得られる流路形成プロセスは以下の通りである。まず、計算開始20分程度で、モードが2~3 程度で浮州が発生した。その後、8 の字蛇行流路を組み合わせた形状で流路が形成され、その後、下流側では一本の蛇行流路が形成された。上流左岸側の流路には若干の変形があるものの、この形状を維持する。

以上のように、本モデルは、単列砂州の形成から蛇行流路、複列砂州の形成から網状流路の形成プロセスを再現できる性能を有していることが確認できた。

4. おわりに

本研究は著者らが構築したモデルを、一様粒径で構成される河道での単列砂州からの蛇行流路の形成、複列砂州からの網状流路の形成に関する既存の実験結果に適用した。その結果、本モデルは、単列砂州の形成から蛇行流路、複列砂州の形成から網状流路の形成プロセスを再現できる性能を有していることが確認できた。今後は、実験を通じてモデルの定量的な検証を行うとともに、同モデルが混合粒径砂礫床を取り扱えるように、改善したいと考えている。

参考文献

- 1)重枝未玲, 秋山壽一郎, 小牧貴大, 才木康裕: 水工学論文集, 第51巻, pp.949-954, 2007.
- 2)関根正人: 水工学論文集, 第47巻, pp.637-642, 2003.
- 3)重枝未玲, 秋山壽一郎, 重岡広美: 水工学論文集, 第51巻, pp.781-786, 2007.
- 4)渡邊康玄, 桑村貴志: 水工学論文集, 第48巻, pp.997-1002, 2004.
- 5)藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄: 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, pp.451-472, 1986.