

漸拡水路における河床変動に関する研究

Bed Variation in a Gradually Widening Channel

里深好文*・高橋 保**・江頭進治***

By Yoshifumi SATOFUKA, Tamotsu TAKAHASHI and Shinji EGASHIRA

In braided channels, channels vary spatially and temporally, which results in the big variation of the sediment discharge. It is important to know the channels pattern and process of stream channels variation. Channel patterns can be predicted by the length and width of each stream channel. In this paper, two dimensional simulation model are employed to clarify the process of sand bar formation and channel diverging phenomenon in a gradually widening channel, in order to investigate the length of a stream channel. The results of the calculation are compared with the data obtained from flume tests to verify the numerical model.

Keywords: bed variation, sand bar formation, braided channels, channel bifurcation

1. 緒 言

土砂の生産が活発な河川においては、河道に大量の土砂が堆積し、いわゆる網状流路が形成されている場合が多く見られる。このような流域における流砂量を予測することは、河川管理上重要な課題であるが、流路の変動に伴って流砂量も時・空間的に変動するため、現在、合理的な方法が確立されているとはいえない状況にある。著者らは網状流路の変動過程に関して研究^{1), 2), 3)}を進めており、流路の分岐点から次の分岐点までの距離を評価することにより、平均的な流路網の予測が可能となることを明らかにしている。また、このような距離は、下流方向に幅が緩やかに広がってゆく水路（以後、漸拡水路と呼ぶ）における拡幅開始地点から浮き州の形成地点までの距離によって評価できると考え、水路の開き角や流入する流れの条件を変化させた場合に水みちの分裂にいたる距離がどのような影響を受けるかを水路実験³⁾によって検討している。次いで、より詳細な検討のためには浮き州の形成を表現しうる数値シミュレーションモデルの開発が有効で

* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

*** 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒525 滋賀県草津市野路町1916)

あると考え、2次元浅水流モデルを用いた解析を行っている。しかし、流れを疑似定常の条件で解こうとしたため、水面上に砂州が突出する以前の段階における砂州の形成は計算できたものの、砂州が発達し局所的に水深が小さくなると計算が不安定になり、浮き州の発生までは再現できなかった。そこで、本研究においては、漸拡水路における河床変動に関して非定常の2次元浅水流モデルを適用することにより、浮き州の形成をも表現可能なモデルを構築し、水路実験の結果との比較を通して、シミュレーションモデルの妥当性の検証を行っている。

2. 漸拡水路の河床変動に関する数値シミュレーション

漸拡水路の河床変動に関する水路実験³⁾を対象として、非定常の2次元浅水流モデルによる数値シミュレーションを行う。実験に用いられた水路が図-1に示されている。水路の開き角 θ と流量 Q を変化させ、平坦な河床を初期条件として上流端から一定の給砂・給水を行い、砂州の発達過程を追跡した。給砂は上流導入部水路の河床勾配がほぼ初期状態を維持するような量を与えている。

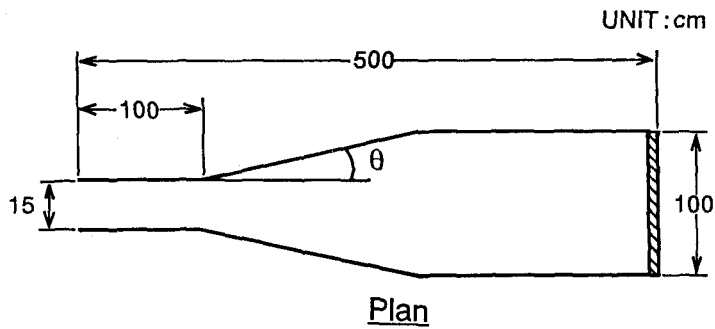


図-1 実験水路の平面図

2. 1 支配方程式

漸拡水路の河床変動に関する計算を行うため、図-2に示すような計算メッシュを採用した。計算時間を短縮し、かつ、計算容量を小さくするため、計算は左岸側半断面のみ行っている。漸拡部において流下方向に s 軸、それと直行する方向に n 軸をとっている。これは、水路の開き角を変化させた場合に比較的容易にメッシュを再構築できる利点をもっている。また、固定側壁における境界条件も簡単に設定できる。漸拡部におけるそれぞれの n 軸は共通の曲率中心をもつ円弧となっている。 s 軸は基本的には直線であるが、上流直線水路と漸拡部の接合点で曲率をもっている。

非定常の2次元浅水流モデルの基礎方程式は次のように表される。まず、流れの連続式は s 軸、 n 軸の曲率半径をそれぞれ r_s, r_n とし、 s 方向の流速を u 、 n 方向の流速を v 、水深を h とすると、

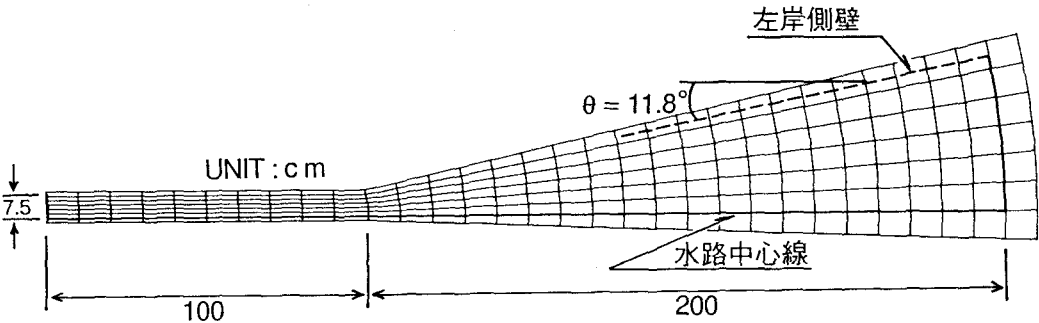


図-2 漸拡水路の河床変動計算に用いられた計算メッシュ

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial s} + v \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{uh}{r_n} + \frac{vh}{r_s} = 0 \quad (1)$$

となる。s軸、n軸方向の流水の運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r_s} - \frac{v^2}{r_n} = -g \frac{\partial(h+z)}{\partial s} - \frac{\tau_{bs}}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{uv}{r_n} - \frac{u^2}{r_s} = -g \frac{\partial(h+z)}{\partial n} - \frac{\tau_{bn}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) \quad (3)$$

と表される。ここに、 g は重力加速度、 z は河床位、 ρ は水の単位体積重量、 τ_{bs}, τ_{bn} はそれぞれ s, n 方向の河床せん断力であり、 ϵ は渦動粘性係数である。

河床せん断力 τ_{bs}, τ_{bn} はマニング則を用いて、

$$\frac{\tau_{bs}}{\rho h} = \frac{gn_m^2}{h^{\frac{4}{3}}} u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \frac{\tau_{bn}}{\rho h} = \frac{gn_m^2}{h^{\frac{4}{3}}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

としている。ここに、 n_m はマニングの粗度係数である。

渦動粘性係数 ϵ は摩擦速度 u_* を用いて、

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

としている。ここに、 κ はカルマン定数であり、その値は0.4としている。

河床位方程式は空隙率を λ 、 s, n 方向の単位幅流砂量をそれぞれ q_{bs}, q_{bn} として、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial q_{bs}}{\partial s} + \frac{\partial q_{bn}}{\partial n} + \frac{q_{bs}}{r_n} + \frac{q_{bn}}{r_s} \right\} = 0 \quad (6)$$

と表される。

q_{bs}, q_{bn} は流線方向の単位幅流砂量 q_{bx} とそれに垂直な方向の単位幅流砂量 q_{by} を用いて、

$$q_{bs} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_{bx} - \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_{by}, \quad q_{bn} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_{bx} + \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_{by} \quad (7)$$

と表される。 q_{bx}, q_{by} の計算にはそれぞれ芦田・道上の式⁴⁾、長谷川の式⁵⁾を用いている。

2. 2 差分化と境界条件

流況及び河床変動の計算を行うため前節の基礎方程式の差分化を行う。各変数の配置が図-3に示されて

いる。流れの連続式((1)式)は図-4に示されるコントロールボリュームに従い差分化される。流れの運動方程式((2),(3)式)の差分は、移流項に関しては風上差分、それ以外は中央差分を用いている。河床位方程式((6)式)の差分は s 方向には後退差分、 n 方向には風上差分を用いている。

水路中心線上における境界条件は、図-5に示されるように対称性を考慮したものとなっている。左岸側壁においては側壁を横切る流速を0としている。

水路上流端においては、単位幅流量を一定値与え、前ステップで得られた最上流部の水深を用いて流入流速を計算している。また、 $i=1, 2$ の河床位は固定している。

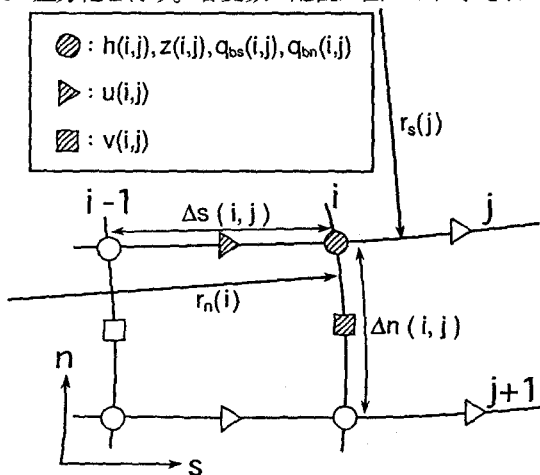


図-3 変数の配置

水路下流端においては $\partial h / \partial s = 0$ とし、かつ、 $\partial(r_n u h) / \partial s = 0$

とした。河床の条件としては $\partial z/\partial s$ が初期の値を保持するものとしている。

2. 3 計算の改良点

浮き州の形成を伴うような河床変動を計算する際には、水深が局所的に小さくなり計算が不能になる場合が多く見られる。そこで本研究においては、すべての水深の計算点にあらかじめ微小な値（とりあえずこの値は一粒径分としている）を与え、水深がこの値以下の場合流速が0であるとした。すなわち、ドライベッド上の地点であっても仮想的に水深が存在していることになる。これにより、水深の減少に伴う問題は解決されたが、当然、処理すべき項目も現れる。以下に解決すべき問題点とその対策を示す。

(a) フロントの進行条件 浮き州の形成を計算するには、ドライベッド上の流れのフロントの進行がうまく表現される必要がある。通常の氾濫計算のように河床勾配が小さい場合には、水深が閾値を越えるまでは隣のメッシュに流入しないとする条件で十分であるが、例えば流れに対して河床がきつい逆勾配であった場合など河床勾配を考慮しないと進行の判定に不都合が生じる。そこで本研究では閾水深の条件に加えて、水位が流速計算点の河床位を上回ることをフロント進行の条件とした。

(b) 水際での圧力項の処理 モデルではドライベッド上の地点にも仮想的に水深を与えているため、水際線のところで大きな水面勾配となることが予想される。そこで圧力項の算定に際し、どちらかがドライベッド上の地点であると判断された場合、他方の水位がこの地点の水位を上回るまでは圧力項を0とすることにした。

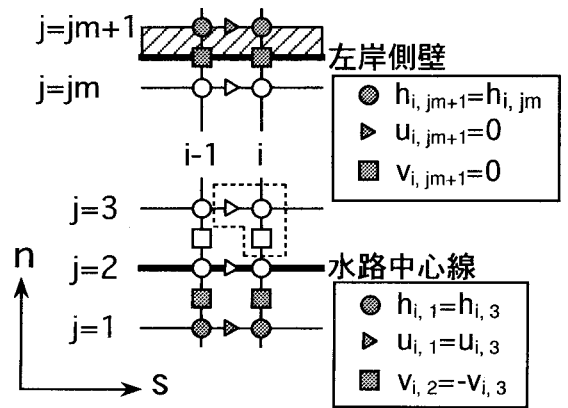
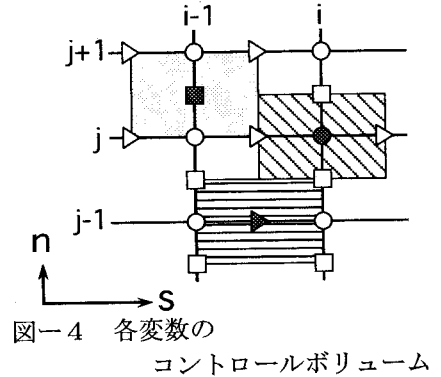
(c) 浮き州上の水深の処理 浮き州上の水深が計算の過程で小さくなることを防ぐために、前述の仮想水深より小さい水深が計算された場合、そのメッシュから流出する流速をすべて0とし、その分だけ水深に補正を加えた。

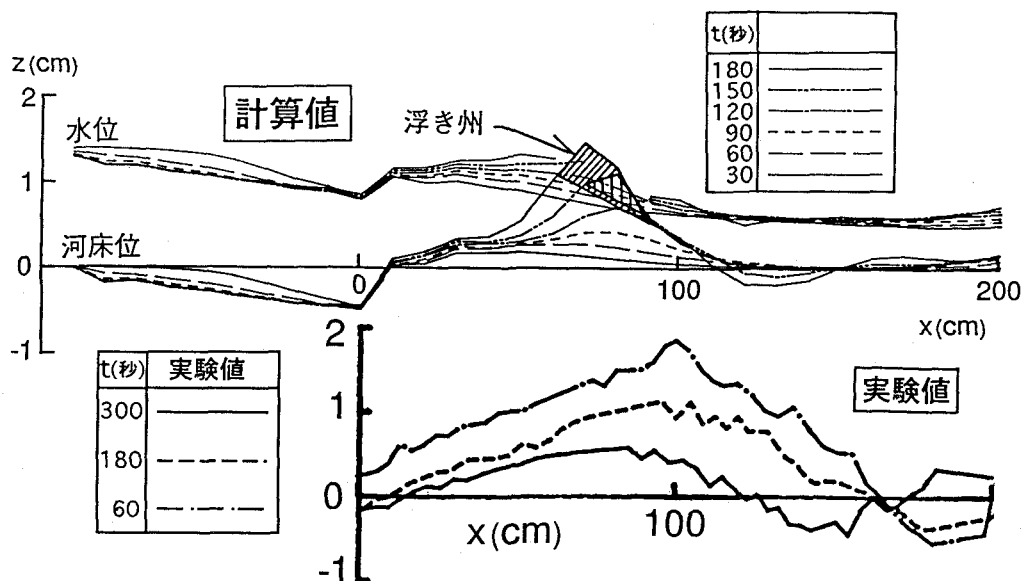
(d) 崩壊の処理 河床勾配がある程度より大きくなれば崩壊が発生すると考えられる。そこで隣り合う河床位を比較し、安息角を越えたと判断された場合、超過分を移動させることにより対応している。

2. 4 計算条件

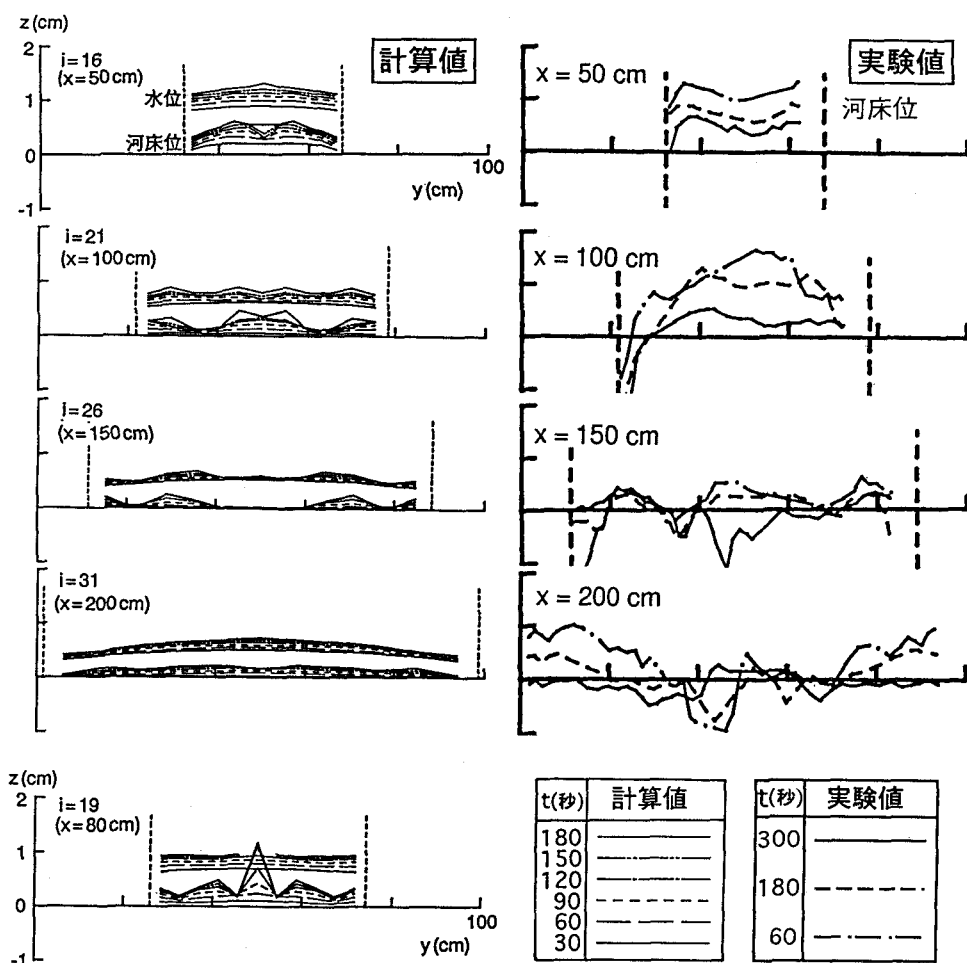
初期河床勾配は0.05、水路の開き角 θ は11.8°、流量 Q は1046(cm³/sec)である。砂礫の粒径は0.196cm、マニングの粗度係数 n_m は0.025、 Δt は0.001秒としている。崩壊の発生する角度は30°としている。平坦な河床上に仮想的な水深(=0.196cm)が存在し、かつ、流速がすべての地点において0である状態を初期条件として計算を行った。通水時間は5分間である。

変数	計算点	コントロールボリューム
h	●	斜線
u	▶	横線
v	■	白





図一六 河床位・水位の縦断形状



図一七 河床位・水位の横断形状

2. 5 計算結果と考察

図-6に水位および河床位の縦断形状に関する計算結果ならびに芦田らによる水路実験³⁾の結果を示している。図-7には横断形状に関する計算値と実験値とを示している。これらを見ると、 $x=80\sim 100\text{cm}$ 付近に砂州が形成され、やがて浮き州となっていく過程がある程度良好に再現されていることが分かる。ただし、計算値における浮き州の形成位置が若干上流側にずれていること、計算値における砂州の発達速度が実験値の約2倍程度になっていることなどが相違点として挙げることができる。これは、給砂量の設定に問題があるのかもしれない。計算において上流河道部の勾配が時間の経過とともに急になっていることが確認されるが、これもその影響であると考えられる。本モデルでは、上流端において流量の条件のみを設定し、上流端2断面($i=1, 2$)の河床を固定して、 $i=2$ の断面で計算される流砂量を給砂量として用いている。そのため、給砂量を任意に設定することができない。試みに任意の給砂量を上流端に与えてみたところ、横断方向に流速差があるため、横断方向に様な単位幅流砂量を与えると河床が不安定になった。今後、この部分に関してはより一層の検討が必要である。

本モデルでは流砂量式として平衡流砂量の式を用い、2次流を考慮していない。砂州の発達速度や形成位置をより精度よく再現するには、流砂の非平衡性や底面付近の流速に関して考慮してゆく必要がある。また、崩壊の発生も砂州の形状に大きな影響をもつと考えられるが、現時点では情報が不足しており、より詳細な検討が必要である。

3. 結 語

漸拡水路における浮き州の形成を伴うような河床変動に関して、非定常の2次元浅水流モデルを適用した。水深が小さくなることに伴う計算のオーバーフローを防ぐために、ドライベッド上の点に関しても仮想的な水深を与えることにより、浮き州の形成過程を再現できた。このモデルを用いることにより、様々な条件下における砂州の発生位置を調べることができると考えられる。ただし、砂州の発達速度などに問題を残しているため、今後、流砂の非平衡性や底面付近の流速に関してより詳細な検討を加える必要がある。

最後に、本研究の数値シミュレーションモデルの開発に当たり、当時京都大学大学院生であった矢島英邦君（東京ガス）、河田俊樹君（大林組）並びに山口昌広君（水資源開発公団）に御協力いただいた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 芦田和男・江頭進治・里深好文他：網状流路の流路変動と流砂量，京都大学防災研究所年報，第33号 B-2，1990，pp. 241～260.
- 2) 芦田和男・江頭進治・里深好文他：流路の分裂機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第35号 B-2，1992，pp. 63～78.
- 3) 高橋保・江頭進治・里深好文他：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36号 B-2，1993，pp. 451～464.
- 4) 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，土木学会論文報告集，206号，1972，pp. 59～69.
- 5) 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.