

網状流路のパターンおよび土砂輸送 予測シミュレーション

PREDICTION OF BRAIDED CHANNELS PATTERN AND SEDIMENT TRANSPORTATION

里深好文¹・高橋 保²

Yoshifumi SATOFUKA, Tamotsu TAKAHASHI

¹ 正会員 京都大学助手 防災研究所 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

² フェロー会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

In this study, we propose a simulating method to predict channel pattern in braided reach. Stream length which is defined as the distance from a channel bifurcating point to next bifurcating point, can be predicted by the channel width and the Froude number of the stream channel. We calculate the channel pattern using the channel length, separating rates of flow discharge and angles of channel bending at bifurcating points.

The channel pattern calculated by the simulation model agree well with the experimental data. And also, the temporal variation of sediment discharge through braided channels can be estimated by this model.

Key Words: Channel pattern, variation of sediment discharge, braided channels

1. 緒 言

河川流域の総合的な土砂管理を行うためには、様々な条件下における土砂の輸送システムを解明してゆく必要がある。いま、砂防ダムや河道狭窄部の上流域、あるいは遊砂地の内部といった領域からの土砂の流出を考えると、どのような流路が形成されるかを予測することは重要な課題のひとつである。一般にこのような領域では、流量の規模に対して土砂の堆積している幅が広いために、河道内に複数の水みちが形成され、いわゆる網状流路となっている場合が多く見られる。したがって、従来の一次元的な手法で流出土砂量を予測することは困難である。また、詳細な地形の調査に基づいて、2次元河床変動シミュレーションなどにより河道の変動を追跡する方法¹⁾も提案されているが、長期にわたる予測が難しいこと、地形情報の入手に労力を要することなど問題点も多い。

網状流路が複列砂州を起因として発生することはよく知られている。著者らが行った網状流路の流路変動に関する水路実験²⁾においても、平坦河床に通水を行った直後には複列砂州が形成され、その谷筋に流水が集中して網状流路が発生することが認められた。ただし、複列砂州が形成されたときの砂州の長さや幅などが、その後形成される網状流路の流路パターンに直接結びついているとは思えなかった。なぜなら、複列砂州の痕跡は網状流路の形成後ほとんど消えてしまい、水みち

の分裂・合流といったダイナミックな現象が流路変動を支配していたからである。したがって、複列砂州に関する研究の延長上で網状流路の流路変動や流砂量変動を考えることは必ずしも適当ではないと思われる。

いま、河道の任意領域に形成される流路形態を予測しようとするとき、比較的容易に入手可能な情報としては以下の4つが挙げられる。

- ・河床材料の特性(粒径, 比重など)
- ・平均的な河床の勾配(地形勾配)
- ・流量
- ・流路が変動可能な幅(以後、河道幅と呼ぶ)。

これらの情報から河道内部に形成される流路網のパターンを予測できれば、流出土砂量の平均値だけではなく、変動範囲をも予測可能となるであろう。本研究では、網状流路の変動過程に関する研究²⁾の成果に基づき、一本の流路が分裂するまでの流路長さを用いて、上記の4条件を与えたときに河道内に現れる流路網のパターンを予測する方法を提案する。

2. 流路網の予測モデル

(1) 網状流路の変動過程に関する従来の研究

網状流路の変動過程に関する実験²⁾から得られた、流路網のパターンの一例を図-1に示している。この実験は、比較的幅の広い水路に一定量の給水・給砂を長時間与え続けることにより行われた。その結果、網状

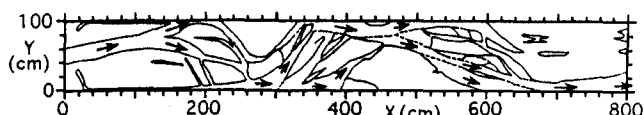


図-1 流路網のパターンの一例

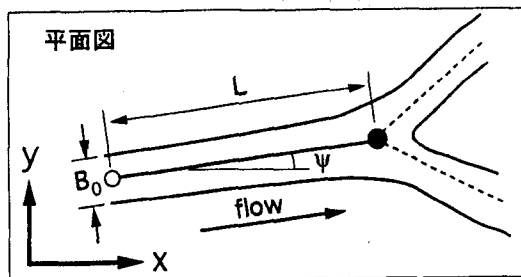


図-2 流路長さ L の定義図

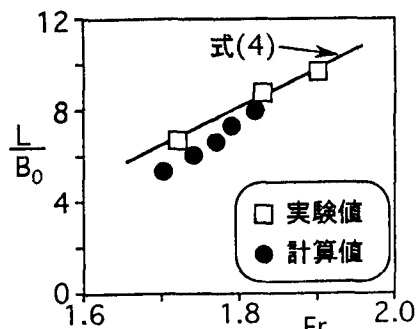


図-3 流路長さ L とフルード数の関係

流路の流路変動は水みちの分裂・合流や発生・消滅といったダイナミックな要素が支配的であり、これが下流端の流出土砂量にも大きな影響を与えていることが判明している。水みちの形状がほとんど変化しないまま、ゆっくりと横断方向へ振れるような、いわゆる蛇行現象に関しては、外岸の侵食量と内岸の堆積量がほぼ釣り合っていることから、流出土砂の変動には大きな影響が無いと考えられる。一見複雑そうに見える網状流路の変動過程においても、一本の水みちに注目して変動のプロセスを調べてみると、集中・拡幅・分裂という比較的シンプルな素過程で構成されていることが分かる。著者らは、図-2に示すように、ひとつの水みちが拡幅から分裂に至る距離 L 、すなわち流路の長さを予測するために水路実験と数値解析³⁾を行った。その結果、図-3のように水みち幅 B_0 とフルード数を用いて、流路の長さ L が推定できることが判明している。ここで、水みち内部の砂州の発生・発達が流路分裂の原因であることから、流路長さと砂州波長との関係が想像される。たとえば、池田の研究⁴⁾によれば単列交互砂州の波長は水みち幅の9倍程度であることが分かっているが、このような関係をそのまま流路長さの予測に用いることは難しいと思われる。なぜなら、流路の分裂は流下方向に水みち幅が広がっていく領域で発生するから、一定の水みち幅を与えた場合の知見を直接適用することはできないからである。

流路の長さ L を用いて、図-1の実験と同じ条件のもとで、手計算により流路網のパターンの予測を行ったところ、ある程度再現可能であることが分かった。しかし、手計算によるパターン予測は効率的ではなく、前

表-1 点の分類

ID	Flow	
1		分岐点
2		離脱点
3		合流点
4		側壁上合流点
5		衝突点

述の4条件を与えることによって自動的に流路網のパターンを予測できる計算モデルの構築が課題となっていた。

(2) 流路網予測モデルの基本的な構成

流路網の予測モデルの根幹は流路長さ L の予測にある。いま、水路上流端で水みちが1本であるとする、流量と勾配といった条件から流路長さ L が算定され、流路が分裂する位置が求められる。この位置において、流量を適当に分配すれば、ここを始点とする2本の流路の長さがそれぞれ算定され、つぎの分裂点を計算できる。この作業を下流方向へ順次進めることにより、流路網のパターンを予測するのである。

このような計算を行うには、流路網を点と線で表現することが有効であると考えられる。図-2に示すように、各流路は1本の線で表現され、各線の上・下流端は点で表される。水路の流下方向に x 軸をとり、横断方向に y 軸をとると、点と線が持つ情報は以下のようである。

<点を持つ情報>

- ・点番号
- ・ x, y 座標
- ・分岐点や合流点といった点の特性を示す ID 番号 (表-1 参照)
- ・下流に接続している線の数

<線を持つ情報>

- ・線番号
- ・流量 Q
- ・上流端にある点の番号 (始点番号)
- ・下流端にある点の番号 (終点番号)
- ・流下方向 (x 軸) からの偏角 ψ

(3) 流路長さの予測

本計算において流路長さ L (すなわち線の長さ) は次のような手順で計算される。まず、 x 軸方向の地形勾配 θ_0 、および線と x 軸とがなす角 ψ より、線方向の局所勾配 i が次のように求められる。

$$i = \tan \theta_0 \cdot \cos \psi \quad (1)$$

水みち幅 B_0 はこの局所勾配 i と線の流量 Q から、著者らによる次の推定式²⁾によって計算される。

$$B_0 = \alpha \left(\frac{Q}{\sqrt{gdi}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

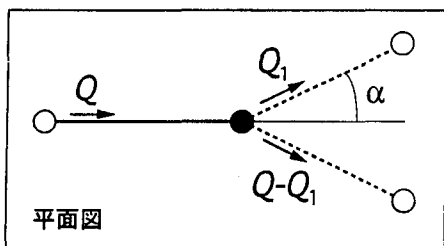


図-4 分岐点における流量の配分と水みちの振れ角
ここに、 g は重力加速度、 d は粒径である。係数 α は1.4としている。

いま、勾配が i で、水みち幅 B_0 が一樣な水路を考え、抵抗則としてマニング則を用いると、フルード数は次のように与えられる。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} = \frac{1}{n} g^{-\frac{1}{2}} i^{\frac{1}{2}} h^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに、 n はマニングの粗度係数、 v は流速、 h は等流水深である。

図-3の流路長さに関する実験値を一次式で近似すると、水みち幅とフルード数から以下のように流路長さ L が推定される。

$$L = B_0 (16.35 Fr - 21.19) \quad (4)$$

(4) 河道側壁の取り扱い

有限な幅をもつ河道内に形成される流路網を予測するには、河道の側壁における流路変動の条件を設定する必要がある。一般的な場において、この河道側壁とは、著しく侵食抵抗の異なる材料や人工構造物から成り、流路変動の横断方向の範囲を規定する物体を指す。例えば、人工の護岸・堤防や岩盤などである。

著者らは実験結果^{2),5)}に関する考察をもとに、河道側壁部に対して次のような条件を与えている³⁾。

1) 水みちが側壁に衝突するとき、水みちはその地点（衝突点）から側壁に沿って流れる。

表-1のID=5の欄に示されるように、水みちが固定側壁に衝突すると、そこに局所的な洗掘孔が形成され、側壁に沿う流れとなる。

2) 側壁に沿う水みちに関しては、側壁からの離脱が水みちの分裂に相当する。

固定側壁に沿った流れが側壁から離脱し、固定壁付近に浮き州が現れる機構は、1本の水みちが浮き州の形成に伴い2本に分裂する機構と同じであると考えられる。ただし、この点では流量の分配が行われず、流れの方向のみが変化することになる（表-1のID=2の欄参照）。

(5) 分岐点での流量の配分

表-1のID=1の欄に示されるような水みちの分岐点において、下流側2つの流路に流量がどのように分配されるかについては、詳細な検討が行われていない。そこでここでは乱数を用いて配分率を決定する方法を採用する。

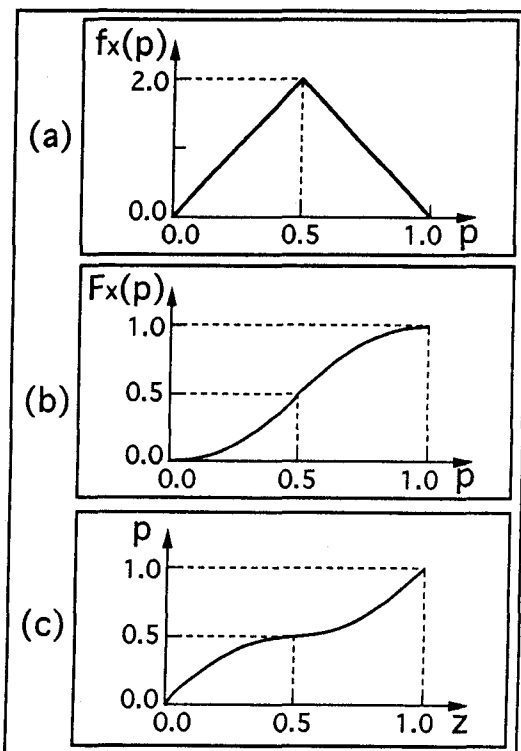


図-5 流量分配率の確率密度関数と分布関数

まず、図-4に示すように、分岐前の流量を Q とし、分岐後の片側の水みちの流量を Q_1 として、分配率 p を次のように定義する。

$$p = \frac{Q_1}{Q} \quad (5)$$

ついで、分裂時にはほぼ均等な2本の流路が形成される頻度が高いという実験結果を参考にして、分配率 p の確率密度関数 $f_x(p)$ を図-5(a)のような三角形分布であると仮定した。確率分布を三角形で与えることにさほど根拠はない。ただ、流路パターンの予測において、ある程度ランダム性をもたせようとする時、流量配分比をランダムに与えることが最も容易であったことが主たる理由である。また、確率密度の総和が1になり、かつ、 $p=1/2$ になる確率が最大になるよう設定するには、三角形分布が最もシンプルであったこともその理由である。

分布関数 $F_x(p)$ は

$$F_x(p) = \int_{-\infty}^p f_x(u) du \quad (6)$$

であるから、

$$\begin{cases} F_x(p) = 2p^2 & (0 \leq p \leq 0.5) \\ F_x(p) = -2p^2 + 4p - 1 & (0.5 < p \leq 1) \end{cases} \quad (7)$$

となる（図-5(b)参照）。

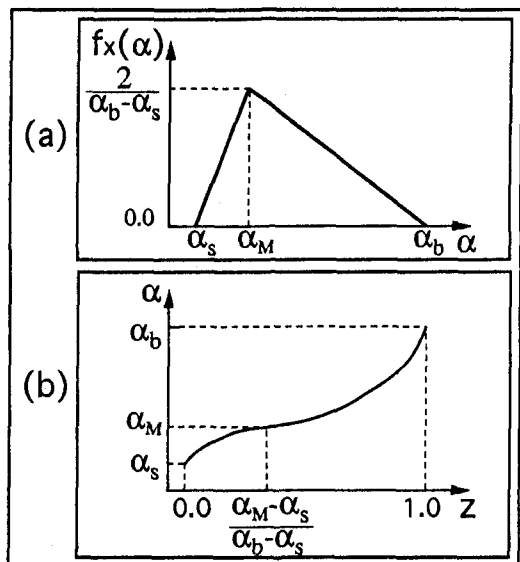


図-6 分岐点における振れ角の確率密度分布

分布関数 $F_x(p) (= z)$ を 0~1 の乱数を用いて表せば、分配率 p は次式から計算される (図-5(c) 参照)

$$p = F_x^{-1}(z)$$

$$\begin{cases} = \sqrt{\frac{z}{2}} & (0 \leq z \leq 0.5) \\ = 1 - \sqrt{\frac{1-z}{2}} & (0.5 < z \leq 1) \end{cases} \quad (8)$$

分配後の流量から計算される掃流力が限界掃流力より小さい場合には、その水みちは消滅すると考え、もう一方の水みちがすべての流量を受け取るものとする。

(6) 分岐点での水みちの振れ角の設定

分岐点での流量の配分と同様に、分岐点での水みちの振れ角 α (図-4 参照) も乱数を用いて決定するものとする。これも流路パターンにランダム性を持たせるために導入されたものである。

図-6(a) に示すように、振れ角 α の生起確率が三角形分布に従うと仮定する。(5) と同様の手順で分布関数を求め、これを 0~1 の乱数で表すことにより、各分岐点での振れ角を決定する。振れ角 α と乱数 z の関係は図-6(b) に示されているように、

$$0 \leq z \leq \frac{\alpha_M - \alpha_s}{\alpha_b - \alpha_s} \quad \text{のとき} \quad \alpha = \sqrt{z(\alpha_b - \alpha_s)(\alpha_M - \alpha_s)} + \alpha_s \quad (9a)$$

$$\frac{\alpha_M - \alpha_s}{\alpha_b - \alpha_s} < z \leq 1 \quad \text{のとき} \quad \alpha = -\sqrt{(1-z)(\alpha_b - \alpha_M)(\alpha_b - \alpha_s)} + \alpha_b \quad (9b)$$

となる。ここに、 α_M は生起確立が最大となる振れ角、 α_b 、 α_s はそれぞれ振れ角の最大値、最小値である。

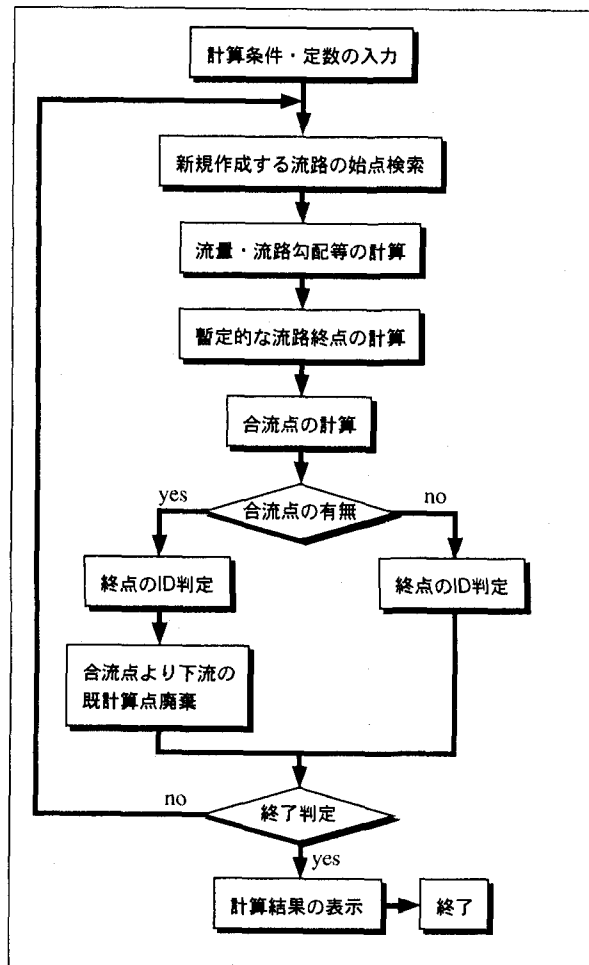


図-7 流路網予測モデルのフローチャート

(7) 水みちの合流に関する設定

計算された線が既に計算された別の線と交点を持つとき、水みちの合流が起こると考える (表-1 の ID=3 参照)。この合流点を始点とする流路を新たに計算する場合、合流する 2 本の流路のうち流量の大きい方の方向が維持されるものとする。

水路側壁に沿う点で合流が起こる場合 (表-1 の ID=4 参照)、合流点を始点とする新たな流路の方向は側壁に沿う方向とする。合流点では上流側 2 本の流量の和が下流側の流量となり、この流量に基づいて下流側流路の長さが新たに計算される。

(8) 計算の手順

河道幅、地形勾配、粒径、上流端の流量が与えられると、上記の各種の設定のもとで、次のような手順に従って流路網のパターンが計算される。計算のフローチャートを図-7 に示している。

1. 下流に接続する流路の本数が最大値に至っていない点、すなわち始点となる可能性がある点のうちで、最も上流側に存在する点を検出する。接続する流路の最大値は点の ID が 1 の場合には 2 本、それ以外では 1 本である。
2. 流量、勾配から流路長さを求め、流路の方向を決めた後、暫定的な終点を計算する。
3. 既に計算されている他の線との交点を探し、最も

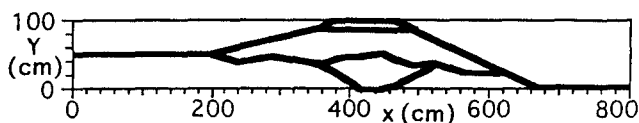


図-8 計算された流路網

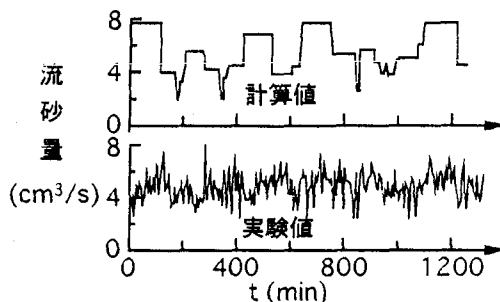


図-9 流砂量に関する実験値と計算値の比較

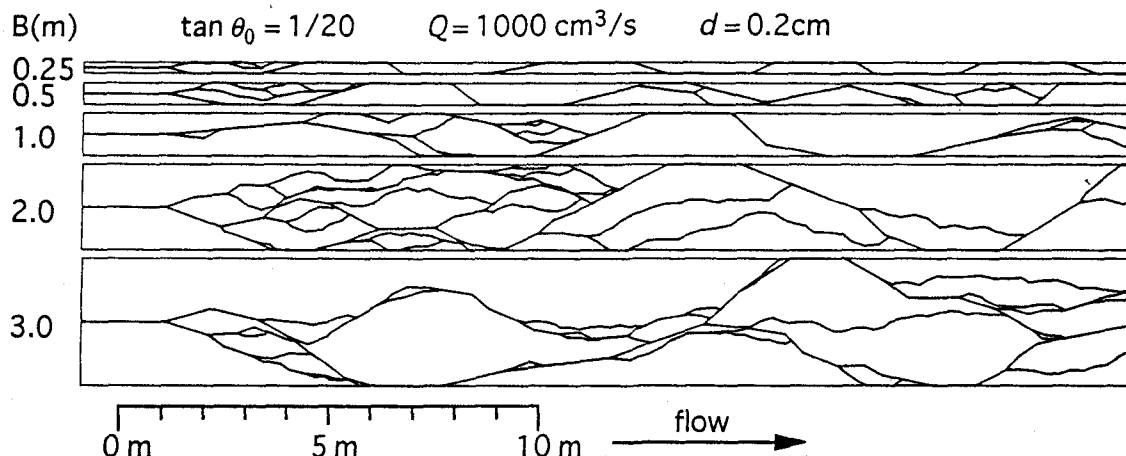


図-10 流路パターンの計算結果

上流側で交差する点を合流点とする。

4. 合流点から下流に存在する、既に計算された点および線をすべて廃棄する。
5. 下流端まで計算できていなければ1.へ戻る。

3. 流路網予測モデルの適用例

(1) 水路実験への適用

モデルの妥当性を検証するために、網状流路の流路変動に関する水路実験²⁾への適用を図った。実験は幅1m、長さ8mの水路で行われ、上流端の中心部、幅20cmの部分から一定の給水と給砂が22時間にわたって続けられた。給水量は1000cm³/sec、給砂量は5.38cm³/secであった。水路勾配および初期河床勾配は1/20であり、河床砂は $d_{50}=0.192\text{cm}$ のほぼ一様な珪砂である。

図-1はこの実験の $t=22$ 時間における流路網のパターンである。マンニングの粗度係数を0.018、振れ角のパラメータとして $\alpha_M=11.8^\circ$ 、 $\alpha_s=8.0^\circ$ 、 $\alpha_M=45.0^\circ$ とし、粒径を2mmとして、流路パターンの予測を行った結果を図-8に示してゐる。これを見ると、水みちの分裂・合流、水路側壁部での衝突・離脱が良好に再現されていることが分かる。図-9に流砂量の時間的変動に関する実験値と計算値との比較を示している。実験値の流砂量は水路下流端において5分間隔で採取された土砂量から算定されたものである。計算においては特定の地点での流砂量の時間変動を計算することはできないので、以下に示すように、流砂量の縦断分布と流路網の位相速度から推定している。

1. 長時間の流砂量変動を計算するためには、十分長

い区間における流砂量の縦断分布が必要である。ここでは、 x 方向に50mにわたって流路網の計算を行った後、 x 方向に10cmピッチで断面を設定する。

2. 各断面においてここを通過する水みちを抽出し、流量、局所勾配等から各水みちの流砂量を計算する。流砂量の計算には芦田・道上⁶⁾の式を用い、流砂幅は水みち幅の80%としている。
3. 各断面ごとに水みちの流砂量を合計することにより、流砂量の縦断分布を求める。
4. 実験値では20時間の間に6つの流砂量ピークが見られ、計算値の方では20mの区間で6つのピークが見られることから、流路網の位相速度を1m/時間として、流砂量の時間変動に関する計算値を求める。

図-9をみると、計算値の方が若干大きめになってはいるものの、流砂量の最大値や最小値がかなり良好に予測できることが分かる。

(2) 河道幅の影響に関する考察

河道幅が異なると、形成される流路網のパターンや流砂量にどのような変化が現れるかという問題に関して、流路網予測モデルを用いて検討を行った。図-10には、水路勾配、粒径、流量が同じで、河道幅のみを25cm～300cmと変化した場合の流路網の予測結果が示されている。計算は $x=50\text{m}$ まで行われたが、ここには上流側の25mのパターンを表示した。

河道幅が25cmの時には、水みちはほとんど分裂せず、側壁に沿った流れが急に向きを変えて対岸に衝突し、また側壁に沿って流れるようなパターンとなっている。これは交互砂州が発達した河川の水みちの特性

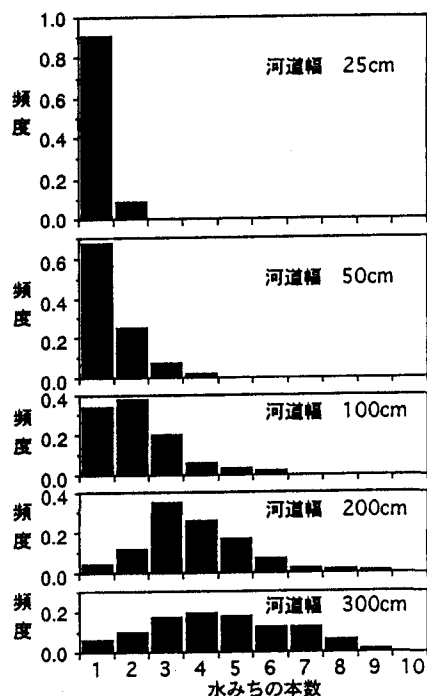


図-11 水みち本数の頻度分布

と似通っている。

河道幅が広がるに伴い、水みちはより細かく分裂し、縦断方向に流路本数の多い部分と少ない部分が交互に現れることが分かる。また、計算において、流路本数の多い部分では流砂量が小さくなる傾向がみられた。これらは水路実験において観察された流路変動・流砂量変動の特徴と一致している。

一断面あたりの水みちの存在数を縦断方向に 10cm ピッチで調べた結果から得られた、水みち本数の頻度分布を図-11に示している。これをみると、河道幅が広がるほど水みち本数の平均値が増加し、幅広い分布を示すことが分かる。図-12には、(1)と同様の手順で得られた流砂量の縦断分布を示している。河道幅が広がると、輸送される流砂量の平均値は減少することが分かる。これらの結果は、遊砂地の機能評価をする際などに有効であると考えられる。

4. 結 語

本論では、流量、河床砂の特性、地形勾配、河道幅が与えられたときに、河道内部に形成される流路網のパターンを予測できるモデルを提案した。以下に本研究によって得られた成果と問題点を要約する。

1. 水みち幅とフルード数から水みちの分裂に至る距離、すなわち水みちの長さを予測する式を用いて、流路網のパターンを予測できる。
2. 水みちを表す「線」と、分岐点や合流点を表す「点」を用いることにより、様々な条件下における流路網を簡単に計算できる。
3. 予測された流路網における流砂量を求め、適当な位相速度で時間的変動に変換すると、網状流路における流砂量変動に関する実験値を再現できた。
4. 河道幅を種々変化させて、流路網のパターンや流砂

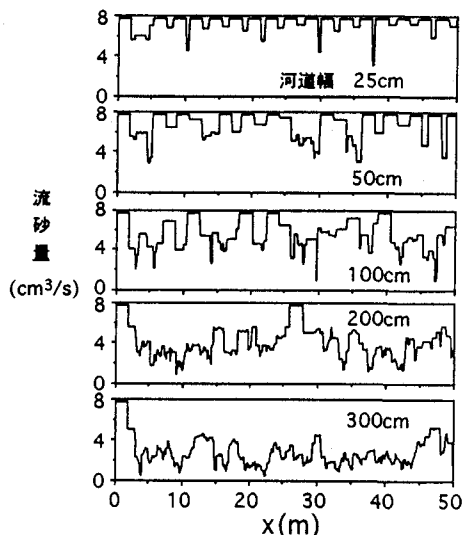


図-12 流砂量の縦断分布に関する計算値

量を調べたところ、河道幅が広がるほど水みちの本数が増え、平均的な流砂量が減少することが分かった。

5. 本モデルでは水みちの幅に関する考察が行われていない。すなわち、水みちはあくまで幅のない「線」として考えられているため、小さな水みちが多数現れた場合などに問題が生じるおそれがある。

6. 本モデルでは流砂量の空間的な分布は計算できるが、流砂量の時間的変動を得るためには、流路網の位相速度が必要となる。今回、位相速度に関しては実験結果から推定した値を用いているが、今後、より一般的な場への適用を図るためには、この問題に関して検討が必要である。

今後、実河川のデータ等を用いて、水みちの長さや流れの抵抗などに関する精度を向上させ、色々な条件のもとで流路パターンの予測が可能となるよう、モデルを改良してゆくつもりである。

参考文献

- 1) 道上正規, 藤田正治, 日下部重幸: 水みちの発生・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) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文, 後藤隆之: 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, pp.241-260, 1990.
- 3) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文, パンビンドン, 矢島英邦: 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, pp.451-464, 1993.
- 4) 池田駿介: 単列交互砂州の波長と波高, 第27回水理講演会論文集, 1993.
- 5) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文, 後藤隆之, 寺西直之: 網状流路における混合砂礫の分級と流路変動, 京都大学防災研究所年報, 第34号 B-2, pp.247-260, 1991.
- 6) 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, 第206号, pp.59-69, 1972.

(1997.9.30 受付)