

斜面崩落モデルを用いた 網状流路の形成過程シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF BRAIDED RIVER WITH THE AID OF SLOPE-COLLAPSE MODEL

関根正人¹

Masato SEKINE

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Numerical model of channel evolution like a braided river was constructed in the present study. Slope-collapse model was developed and was applied in the present simulation model so as to keep the local slope angle be equaled to or less than the angle of repose at any time in numerical computation. This model was also developed so that the effect of emerged bar was able to be treated reasonably. In this paper, the evolution process of braided river was the target of the investigation on the basis of numerical simulation under the condition of Fujita's experiment. The important remark of this study is that the side-bank erosion affects the braided channel formation process in low water channel considerably.

Key Words: braided river, channel evolution, slope-collapse model, emerged bar.

1. 序論

河道は、一般に直線流路、蛇行流路ならびに網状流路に分類できるとされる。蛇行流路については交互砂州との関係からその形成過程が論じられており、低水路法線形が直線であっても、交互砂州が形成される条件にあれば、やがては蛇行流路が発達することになる。一方、網状流路に関しては複列砂州との関係が指摘され、同様に低水路法線形が直線から大きく変動してくることも知られている。近年、「多自然型川づくり」をキーワードとして、環境に配慮した河川整備事業が進められてきている。この整備の基本的な方針は、そのひとつとして、低水路河岸に関してはコンクリートなどの人工材料を用いてその浸食制御を行う代わりに、ある程度この浸食を許容し、河道の自律形成機能を生かした川づくりを指向していると言えよう。この場合に、河川の自律形成機能の力学的理解と、結果として生じる流路変動過程の予測手法の確立とがこれまで以上に必要になることは言うまでもない。そこで、本研究では、網状流路の形成過程に焦点を当て、この形成過程を数値的に再現することを目指して、解析モデルの構築を行った。

ところで、この網状流路の形成過程に関する従来

研究を概括すると、たとえば藤田・赤松・村本¹⁾、芦田・江頭・里深ら²⁾のものを代表例とする実験的研究と、最近の倉林・清水³⁾あるいは竹林・江頭・岡部⁴⁾による数値解析とがある。本研究では、倉林ら³⁾ならびに竹林ら⁴⁾のものと同一問題を対象としているため、両者と共通する部分も多い。本研究の特徴は、解析モデルにおいて、水面下の河床に局所的に現れる「安息角を越える斜面」ならびに低水路河岸で生じる浸食・崩落をこれまでのものより合理的に取り扱うモデル(「斜面崩落モデル」)を組み込んでいる点にあり、あわせて河岸を含む流路全体が浸食可能な条件下にある地形変動を取り扱おうとしている点である。

この「崩落モデル」については、これまで長谷川のモデル⁵⁾あるいはこれに準じたものが長年にわたって使われてきている。しかし、これを用いて流路変動予測をする場合には、モデルの簡便性ゆえに不合理な取り扱いとなることがある。これについては後述する。こうした点に鑑み、前論文⁶⁾では新たな崩落モデルを開発・提案したが、本研究ではこれを拡張して再構成した解析モデルを適用することで、網状流路の形成・発達過程の数値模擬ならびにその理解に努めた。

2. 解析の概要

(1) 流れ場の解析と流砂量関数

本研究で対象とする流れは、通常の開水路流れと比較しても相対的に水深が小さく、流速の水深方向の変化よりも平面的な変化の方がはるかに重要である。そこで、ここでは浅水流方程式に依拠した解析を進める。浅水流方程式の解法にあたっては、非移流項に対して Adams-Bashforth Scheme を、移流項に関しては CIP 法をそれぞれ適用する。また、計算格子点としては Staggered 格子を採用する。境界条件に関しては、両側岸でこれを横切る流れがないという条件を、上下流端では周期境界条件を、それぞれ適用している。なお、抵抗則に関しては、シートフロー状の水深の極めて小さな流れであるため、澤井⁷⁾らの実験結果を踏まえて与えることにした。

土砂移動とそれに伴う地形変化に関しては、次のように取り扱う。ここで対象とする河床ならびに側岸は、後述する通り、局所的には安息角にまで到る可能性がある。いま、安息角を越えない範囲内での地形変動について見ると、従来型の流砂量関数をもとに Exner の式（いわゆる土砂の連続式）を解くといった解析で十分である。しかし、安息角を越える急な地形が計算途上で出現する場合には、これを合理的に処理する方法が別途必要となる。これを扱う方法を本論文では「斜面崩落モデル」と呼ぶ。これについては次節で詳述する。さて、地形が縦横断方向に傾斜し、その値が安息角に近づくほど大きくなると、従来のように、縦断方向には Meyer-Peter & Muller の式あるいは芦田・道上式、また横断方向にはこれとの組み合わせで長谷川の式を用いる、といった解析では不十分であり、地形の傾斜に伴う重力の効果を的確に反映することができない。そこで、本解析では前論文で誘導した流砂量関数を適用する⁶⁾。この詳細については、前論文⁶⁾において説明済みであるため、ここでは紙面の関係からこれ以上の記述を省略する。

(2) 斜面崩落の取り扱い

これまで行われてきた多くの河床変動計算では、河床上の局所的な勾配が安息角にまで到ることは稀であった。わずかに、低水路河岸付近で生じる河岸侵食を取り扱う場合に限って、「崩落モデル」を適用した解析が行われているに過ぎない。ただし、この場合にも、横断方向の傾斜角が縦断方向の値に比べて十分大きいとし、その侵食をひとつの横断面内で起こる現象として近似的に取り扱ってきている。こうした取り扱いの代表例が長谷川のモデル⁵⁾である。このモデルでは、局所的に安

息角を越える斜面が出現した場合には、安息角で傾いた崩落面を定め、その上方にある土塊が下方に瞬時に移動・堆積するものとして、幾何学的に新たな斜面形状を決定するとしている。このような取り扱いの限界は、ある地点の河岸侵食に伴う土砂のやりとりがひとつの横断面内で閉じているものとしている点にある。この場合、崩壊面の法線ベクトルが流下方向成分をもつことを無視しているために、崩壊に伴い生じる土砂供給フラックスの流下方向成分が考慮されていない。そこで、三次元性の強い地形侵食の問題にこれを適用する場合には、崩壊土量、さらには崩壊によって生産され下方に供給される土量の評価に伴う誤差が大きくなる恐れがあり、結果的にそこで生じる地形変化が異なるものとなってくることも懸念される。たとえば「河床波」や「砂州」の前縁においては、前述の通り、崩壊面の法線ベクトルが流下方向成分をもつため、崩壊による供給土砂フラックスは横断方向のみならず縦断方向成分をもつ。このような場合に、従来型の崩落モデルを適用することは不可能である。これに対処するためには、流路全域にわたって安息角を越える斜面が生じているか否かを検索し、もしこれを越えている場合には、崩落面の方向を特定した上で、崩壊土量を算定することが必要となる。

こうしたことを考えて、著者は、前論文において新たな崩落モデルの考え方を提示した上で、核となるモデルを提示し、これを適用した河川上流域の裸地斜面侵食の数値実験を試みている。本研究では、このモデルを拡張することで、河川の流路変動予測を行う際に想定される諸過程（河岸侵食を含む）を合理的に取り扱えるようにすることを目指す。モデルの詳細を以下に説明する。

崩落モデルの概念図を図-1に示す。ここでは、図-1(a)の点0を中心とする斜面群を例に説明する。まず最初に、格子点0を原点としてその周りに広がる4つの斜面（第1から第4象限）に対して、ここに出現する最急勾配の値およびその方向を求める。ここでは、図-1(b)に示したような第1象限にそれが現れるものとして説明する。最急勾配の方向が点0から点Sに向かう方向にあるとすれば、最急勾配が生じる位置を表すベクトルは、以下のように表される。

$$\vec{OS} = (s^* \Delta x, (1-s^*) \Delta y, s^* z_e + (1-s^*) z_n)$$

$$s^* = \frac{(\Delta y)^2 z_e}{(\Delta x)^2 z_n + (\Delta y)^2 z_e} \quad (1a, b)$$

ここに、 $z_e = \eta_{i+1,j} - \eta_{i,j}$ 、 $z_n = \eta_{i,j+1} - \eta_{i,j}$ である。そこで、最急勾配 $\tan \psi$ は、斜面の縦横断方向勾配をそれぞれ $\tan \alpha$ 、 $\tan \omega$ として、

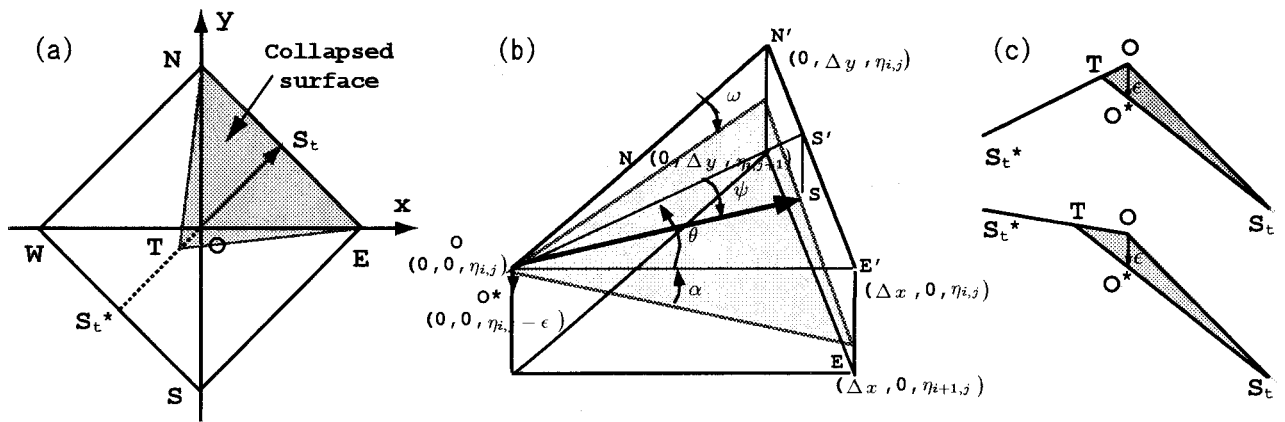


図-1 崩落モデルの概念図：(a) 平面図，(b) 鳥瞰図，(c) 崩落面が生じる方向に切った鉛直面

$$\tan \psi = \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \omega} \quad (2)$$

となる。そこで、この勾配が水中安息角に対応して決まる $\tan \phi$ を越える場合には、最急勾配の方向に向かって崩壊が生じることになる。崩壊は、浸食を受けた点 O が ϵ だけ低下するように進行すると考え、結果として、崩落面は図-1(a) 中に陰影を施した ΔTEN となる。なお、点 O における鉛直方向への低下量の ϵ は、次式で表される。

$$\epsilon = \sqrt{(s^* \Delta x)^2 + (1 - s^*)^2 (\Delta y)^2} \times (\tan \psi - \tan \phi) \quad (3)$$

そこで、点 O における地形高に関しては、この ϵ の分だけ差し引くことにする。次に、1つの計算時間ステップの間に起こった地形変化によって、結果として誘起された崩壊が、同じ長さの時間ステップ内で完了するものと近似する。このとき、崩壊による単位時間当たりの供給土砂量は、

$$Q_{Collapse} = \beta \times \frac{(1 - \lambda) (\epsilon \Delta x \Delta y)}{6 \Delta t} \quad (4)$$

となる。ここに、 β は図-1(a) 中の水平面に投影した ΔTEN の面積の ΔOEN の面積に対する比を表す。なお、この結果を点 O の周辺の格子点における地形高の計算に反映させるためには、この土砂量を x および y 軸方向の成分に分離することが必要である。そこで、この流砂量ベクトルが式(1)で表される最急勾配の方向を向くものと考え、これを各格子点幅で除して、単位幅当たりの流砂量ベクトルを定義すると、

$$\vec{q}_{Collapse} = Q_{Collapse} \times \left(\frac{\cos \theta}{\Delta y}, \frac{\sin \theta}{\Delta x} \right) \quad (5)$$

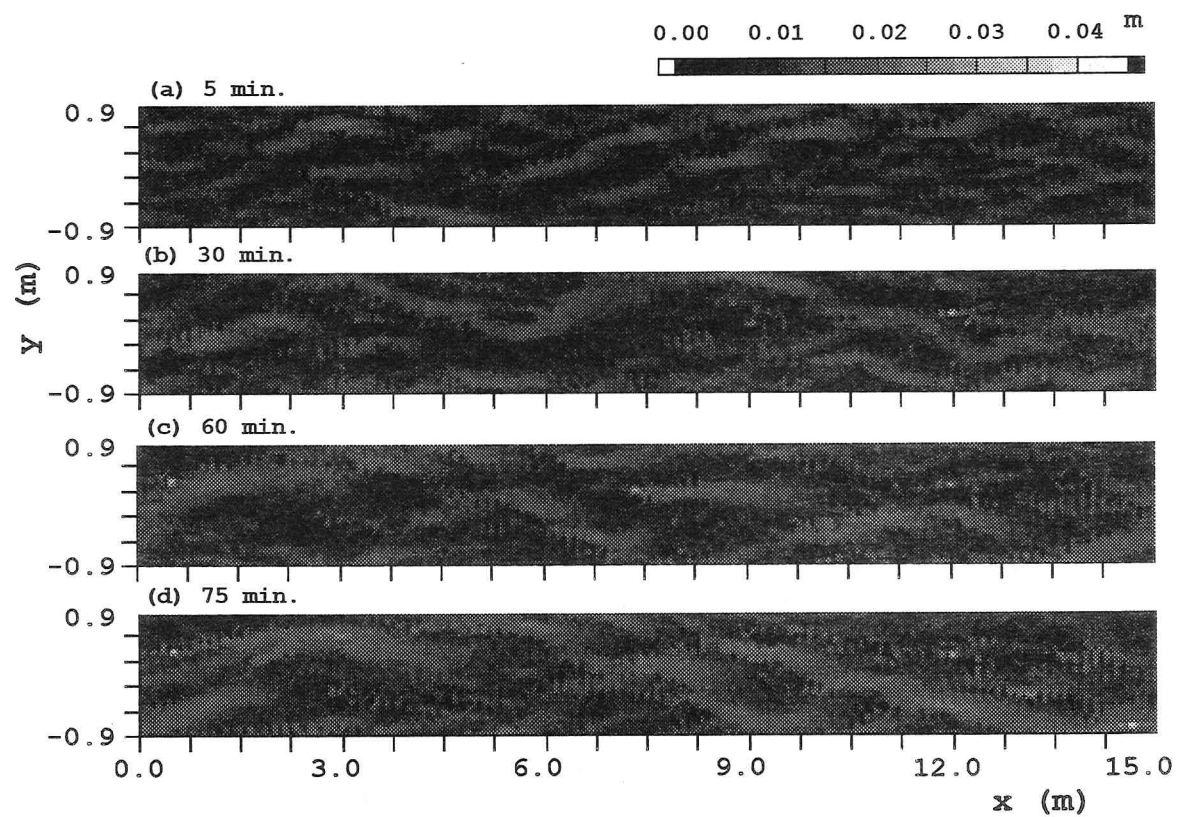
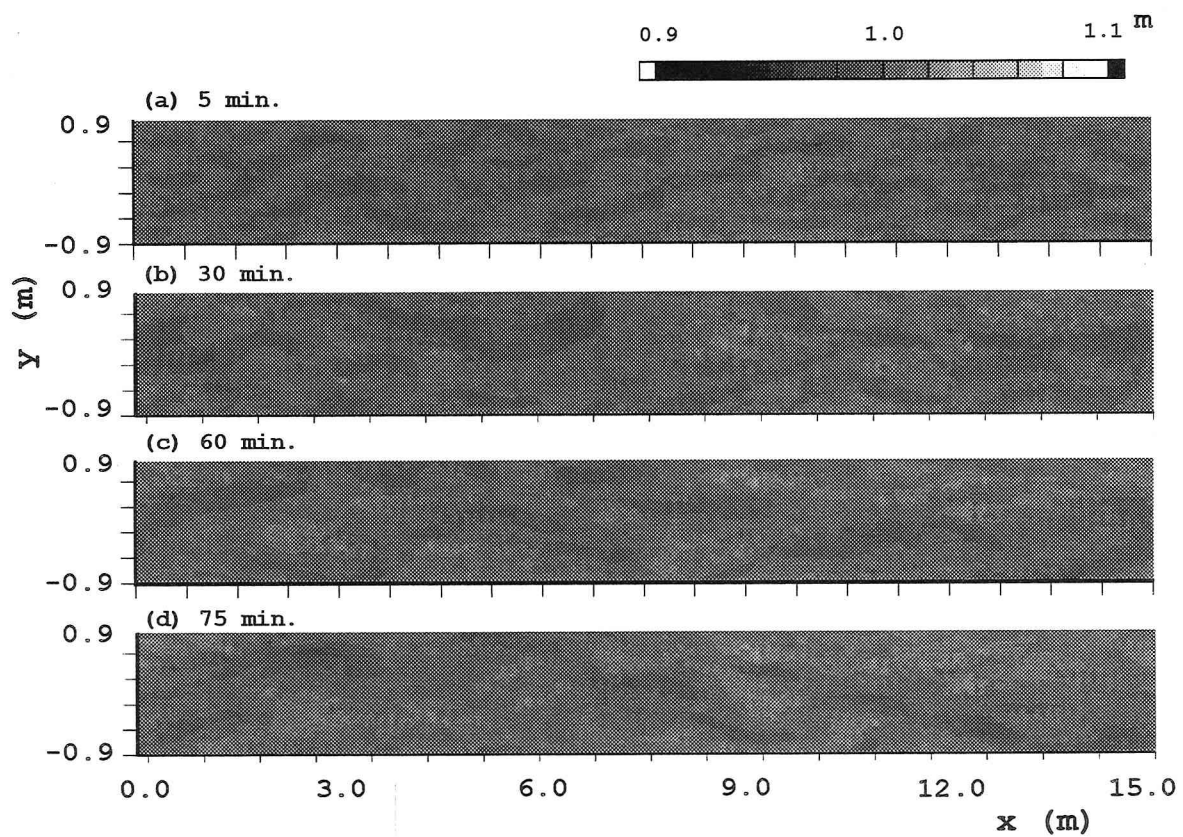
のように書き表される。この付加的な流砂量成分の扱いとしては、土砂の連続式を解く際に、いわゆる流砂量関数から定まる各流砂量成分にこれを加え合わせることで考慮することになる。具体的に、たと

えば図-1の場合には、点 E の地形高の計算の際にその x 方向成分を、また、点 N の計算の際にその y 方向成分を、それぞれ考慮することになる。

最後に、全般的な計算の流れについて簡単に触れる。局所的に安息角を越えた面が生じているか否かの判定とその処理は、流路下流端の断面から始め、順次上流に向かって行う。ある格子点において崩落の処理が必要と判定された場合に、その点の処理を行うことにより隣接する点でも連鎖的に崩壊が引き起こされることが稀に見られる。たとえば次のような場合である。図-1(c) に崩落が生じる二つのパターンを模式的に示したが、河岸浸食はほとんどの場合下側のパターンと考えることができる。この図は、図-1(b) の最急勾配の方向を表す線を含む鉛直面で切った斜面の切り口を表したものであり、陰影を施した部分が崩落土塊を表す。この場合に水際近くの点として想定される点 O について見ると、点 O が低下することで隣接する点 S あるいは点 W との間の勾配が大きくなり、これらの点の周りで新たな崩落が誘起されることがある。このような場合には水際を跨いだ形の河岸浸食が生じることもあるが、前述の処理の手続きを順次行っていくことで一連のプロセスを合理的に再現することが可能である。

3. 網状流路の形成に関する数値実験

本研究では、前章で説明した「崩落モデル」を組み込んだ流路変動解析の例として、網状流路の形成過程を取り上げ、この数値実験を試みる。本論文では、藤田ら¹⁾が行った実験と同一の条件下で行った解析例を示し、解析モデルの妥当性ならびに流路変動プロセスについて考察を加える。さらに、藤田らの実験と同一の「側壁を浸食不可能な鉛直壁」とした場合に加え、基本的な条件は同一としつつも「側壁を浸食可能な斜面」とした場合の解析も行っており、これについても説明する。実験条件としては、藤田らの Run C-8 を念頭におき、次のような値に対



図一 2 網状流路の形成過程：上段が水路床高の、下段が水深の等値線図 (m 単位)
水路床高は 1.0 m を初期高さとして示してある。

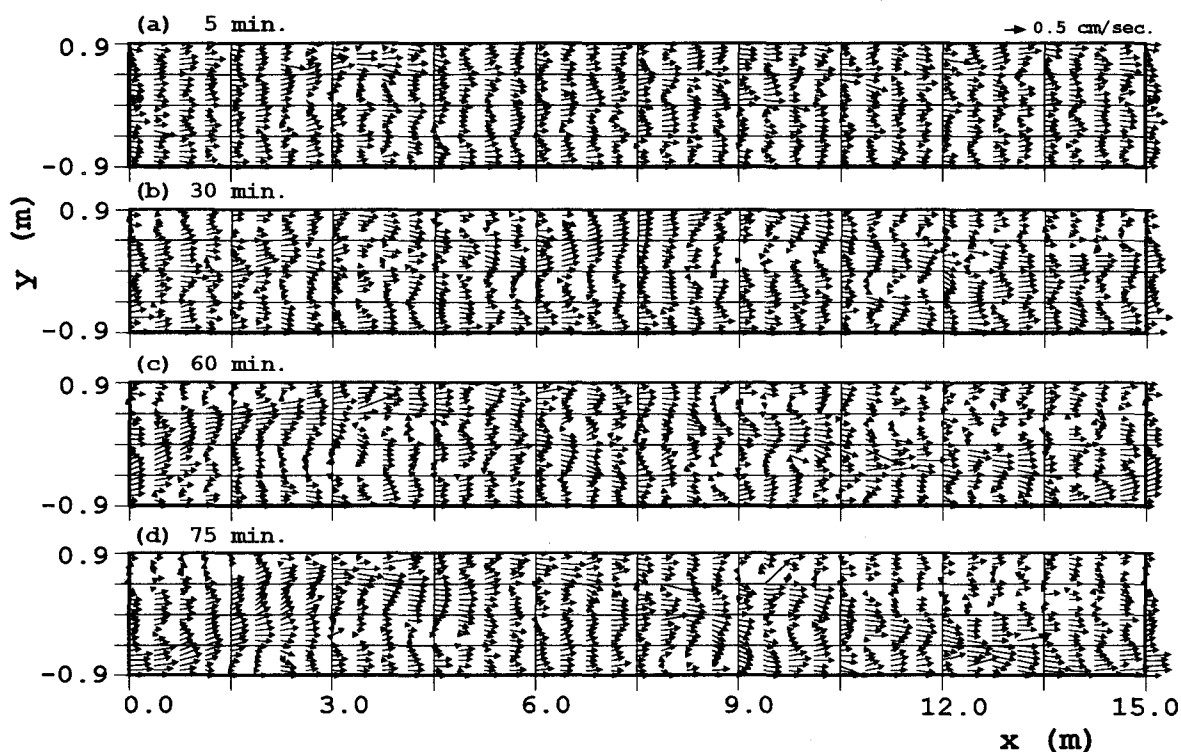


図-3 網状流路の形成過程：流速ベクトル図

して計算を行った。すなわち、水路の全長 15 m、幅 180 cm、初期水路床勾配 1/50、流量 4.0 l/sec. とし、水路床材料としては 1.05 mm の均一粒径砂を想定する。後者の解析の場合には傾斜した側岸を有する台形断面を初期流路形状とした。なお、初期条件として、水路床高さに粒径を上限とした擾乱を一樣乱数を用いて与えている。

図-2～3には、側岸侵食が生じない場合の流路変動の時間変化をまとめて示してある。同図には、藤田らの論文に示された写真とほぼ同時刻の水路床高ならびに水深のコンター図、さらには流速ベクトル図を示してある。これらの図より、藤田らも指摘している通り、次のような流路の変動が生じていることがわかる。まず、通水 5 分程度の時間までに鱗状の砂州が砂面全体を覆うように発達する。その後、時間の経過とともに砂州のモードを順次低下させつつ変形が進む。そして、最終的（1 時間 15 分後）には水路中央部に形成された砂州の一部が浮洲になるなどして、網状流路が形成された。たとえば、図-2 下段 (d) において濃い黒で示されている部分がこの浮洲に当たる。また、図-3 (d) において、上流側（図の左半分）では左岸側に沿い、下流側では右岸側に沿う大きな流路が形成されていること、これに支流路が分合流するようなパターンとなっていることがわかる。さらに、図-4 には、水路下流端から流出する土砂量の総和の時間変動の状況を示している。網状流路の形成・発達の過程において指摘されている通り、流砂量は流路の発達の状態に応じて

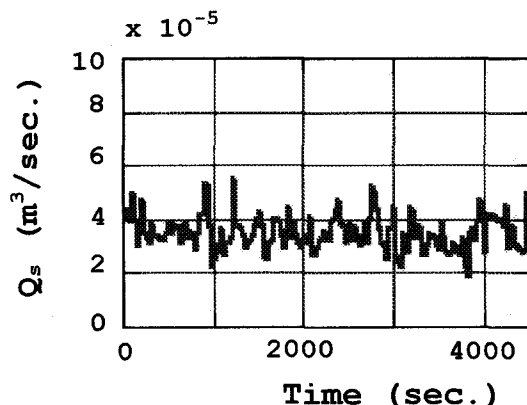
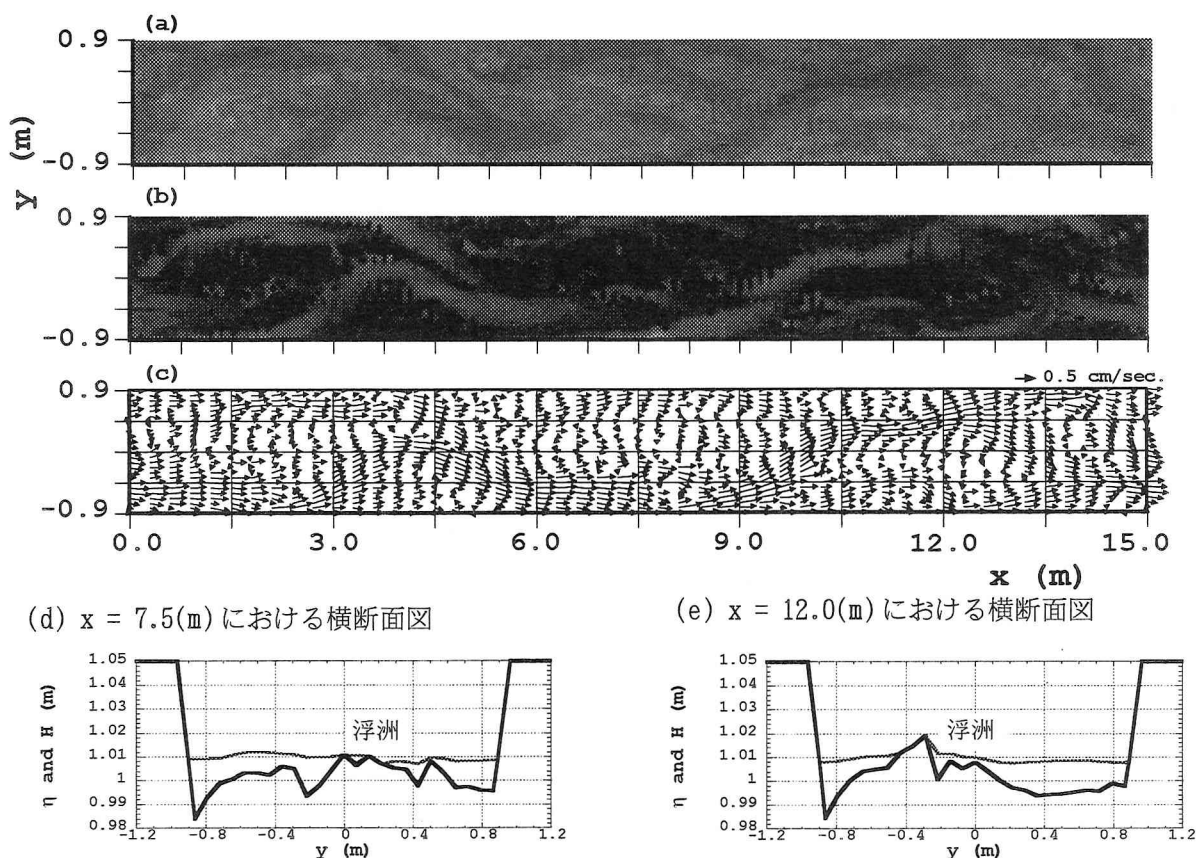


図-4 下流端からの流出土砂量の時間変動

時間的に大きく変動していることがわかる。このように、本解析結果は藤田ら¹⁾の実験結果と概ね一致した結果を予測していることがわかった。なお、この過程において、崩落モデルを適用すべき急な地形面が頻繁に出現していたことを確認している。

次に、河岸を侵食可能な斜面（勾配 1:2）とした場合の解析結果を図-5 に示す。ここには、紙面の関係で通水 60 分後の結果のみまとめて示す。この図より、側岸の侵食を許すことで水際付近への流れの集中とその付近の深掘れとが顕著に現れること、そのためか全般的に形成された水みちが明瞭であることなどがわかる。このように、河床変動と連動して側岸侵食が生じることで網状流路の発達過程自体に大きな変化が現れる可能性がある。今後はこのメカニズムの解明についても検討していきたい。



図－5 側岸浸食可能な場における網状流路の形成過程 (60 分後, 凡例は図－2, 3 と同一) :

上から順に水路床高, 水深の等値線図, 流速ベクトル図 (水面下にある部分のみ), 最下段は着目した横断面内の水路床高と水位

5. 結論

本研究では, 流れと流砂ならびに地形変動を予測する数値解析モデルに, 新たに開発した「斜面崩落モデル」を導入することで, 数値計算途上に安息角を越えるような急な面が出現する可能性がある現象についても数値計算が行えるようにした。この「斜面崩落モデル」は, 従来のものに比べて崩落の方向やその土量を合理的に評価できる点に利点がある。さらに, この解析モデルを用いて, 網状流路の形成・発達過程の数値実験を行い, その適用性を探るとともに, 現象の進行過程に関する考察を加えている。さらに, 低水路河岸の拘束条件を解き, 河岸浸食が生じる場における流路変動を, 特に網状流路が形成される条件下で解析したところ, 側岸侵食が流路の形成・発達に大きな影響を及ぼすことが理解された。詳しい考察は別の機会に譲るが, 自然河道の流路変動予測という観点に立つと, ひとつの前進を見たのではないかと考えている。しかし, 解析モデルの妥当性に関しては検証が十分であるとは言えなく, 今後更なる検討を行う必要がある。

謝辞: 本研究は, 国土交通省下館工事事務所との間で進められている鬼怒川における河川懇談会共同研

究の一環として行われたものである。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 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, 水工学論文集, 京都大学防災研究所年報, 第 33 号 B-2, pp.241-260, 1990.
- 3) 倉林弘志, 清水康行: 浮洲の形成を考慮した網状流路における河床変動計算, 水工学論文集第 46 巻, pp.743-748, 2002.
- 4) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士: 網状流路の時空間的な変動特性, 水工学論文集第 46 巻, pp.737-742, 2002.
- 5) 長谷川和義: 非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 316 号, pp.37-50, 1981.
- 6) 関根正人, 小野 了: 降雨による斜面浸食過程に関する数値解析, 水工学論文集第 46 巻, pp.647-652, 2002.
- 7) 澤井健二: 粘着性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究, 京都大学学位論文, 1977.

(2002. 9. 30 受付)