

植生群落を伴う河道の流路変動予測に関する研究

NUMERICAL ANALYSIS OF CHANNEL DEFORMATION WITH VEGETATION ZONE

関根正人¹・矢島英明²

Masato SEKINE and Hideaki YAJIMA

¹ 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

Channel deformation with bank erosion induced by the interaction between the flow and the vegetation along a water margin are investigated in the paper by numerical analysis. Some kind of LES model for flow field and the slope collapse model for movable bed evolution were applied. It can be realized that the river channel migrates laterally just upstream of the vegetation zones, if they set diagonally along the both sides of water margins. Comparison between the numerical result and the experimental one was conducted, and then the validity of the numerical model was verified.

Key Words : Channel deformation, vegetation zone, bank erosion, numerical analysis.

1. 序論

近年, 自然豊かな河川空間の創造を目指して, 環境に配慮した河川整備のあり方が議論されている. 例えば, これまで単調に直線化された中小河川が数多く見られたが, こうした河川をどのような姿にしていくかは今後益々議論が必要なところであり, できるだけ人の手によらない技術によって河道を再生していくことが望まれる. 河川には, 水理条件や人為的なインパクトに対して, より安定な状態を目指してその姿を変えていく機能(これを「河川の自律形成機能」と呼ぶ)があるとされる. 河川の自由蛇行や拡幅の過程などが最もわかりやすい例である. そこで, 今後の河川整備にはこのような河川本来の機能を生かしていくことが望ましく, そのためには, この機能の更なる理解とあわせて, 自然に戻した場合に生じうる河道の変動の予測技術を開発することが必要ではないかと考える. この際に重要なことは, 河道内に繁茂する植生群落も自然の一部としてその影響を考慮することであろう.

ところで, このような植生群落が「流れ-流砂-地形変動」という河道変動システムに及ぼす影響については, これまでもいくつかのグループによって研究が進められてきている. このうち多くは浮遊砂を対象と

した研究¹⁾などであり, 本研究で対象とする掃流砂に関わる研究の数はそれほど多くない^{2), 3)}など. 辻本ら²⁾は植生群落周辺に生起される組織渦によってリッジ状の縦筋が形成されることを示し, 泉・池田³⁾は植生を伴う直線流路の平衡河床形状について論じている.

著者らは, 近年, 網状流路の形成過程などの流路変動の数値予測を可能にするため, 数値解析モデルの開発に努めてきている⁴⁾. 本研究では, 上記の従来研究の成果を参考にしつつ, またこれまでの解析モデルを中核として, 植生群落が流路変動に及ぼす影響を陽に取り扱える解析モデルの構築を目指す. さらに, 実験と数値解析とを通じて, 後述する植生群落配置に対して誘起される流路変動過程について, その理解を深めることに努めた.

2. 解析の概要

(1) 解析対象と実験の概要

本研究での検討は, 主として数値解析によるものとするが, これに先立って移動床水路実験を行っている. 数値解析はこの実験と同一条件下で行われているため, 実験の概要から説明する. 実験は, 長さ18m, 幅0.6m, 初期水路床勾配1/125のアクリル製可変勾配直線水路

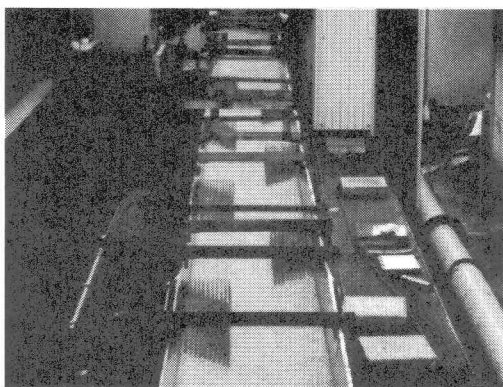


写真-1 植生の配置

に、比重2.65、平均粒径1.7mmの珪砂2号を用いて図-1に示すような台形断面の流路を形作り、その水際に沿って左右交互に植生群落模型を設置した。この植生模型の配置状況は写真-1に示す通りである。なお、植生としては剛性が大きく全く揺動しない非水没型のものを対象とする。ここでは、直径5mmの円柱を図-2のように流下方向ならびに横断方向に2cm間隔に設置したものを基本要素とし、これを組み合わせることで所定の規模の群落を構成した。本研究では、平衡状態の場合における植生と流れ・流路変動との相互作用系を理解することを目的とする。そこで、実験では合計で7つの群落模型のうち上流から4番目と5番目を含む区間を測定対象とすることにし、数値解析もこれに対する平衡状態の解を求めることにした。主な水理条件として、流量を5.16 l/s、初期の水路中央部の水深を5.0cmとした。実験時には、浸食状況を写真ならびにビデオに記録するとともに、水位ならびに水際位置の計測や水路下流端において流量・流砂量の測定を行った。さらに、90分の通水を経た後の水路床形状を、可視光レーザ式変位センサーを用いて計測した。この計測は、縦断方向に4cm毎、横断方向に1cm毎に設けられた測点上で行われた。

(2) 数値解析モデルの概要

a) 流れ場の解析

流れ場の計算には、灘岡・八木⁵⁾によって開発されたSDS-2DHモデルを適用する。このモデルは、水深に比べて水平スケールが大きな浅水流の場を対象として開発された一種のLESモデルであり、渦の生成発達過程を平面二次的に解析する上では優れたモデルである。このモデルを採用する理由は、以下の通りである。すなわち、今後予定している浮遊砂をも考慮する必要のある場を対象とした解析には、組織渦の影響を陽に反映できるこの手法が有効であること、本研究で取り扱う掃流砂のみが存在する場においても、浮遊砂の場合

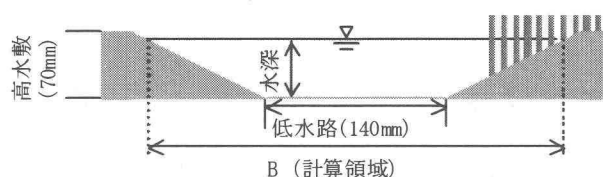


図-1 平面内での植生群落の設置位置

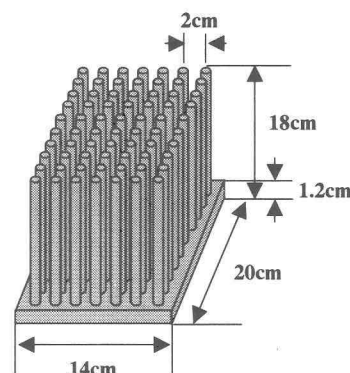


図-2 植生群落模型の基本要素

ほど顕著ではないものの、この渦の影響が無視し得ない³⁾こと、などである。なお、SDS-2DHモデルの詳細については、元論文⁵⁾を参照されたい。境界条件については、上下流端で周期境界条件を適用し、側方境界では左右両岸の水際位置で流速及び水深が0であるとした。計算領域としては、左右交互に存在する植生群落一組分に対応する区間をとることにした。方程式の離散化に当たっては、計算格子として流速の流下方向成分、横断方向成分ならびに水深を交互に配置するStaggered格子を用いており、計算格子間隔を流下方向に $\Delta x=2.5$ (cm)、横断方向に $\Delta y=2.0$ (cm)とした。計算時間間隔については、池田ら¹⁾や灘岡ら⁵⁾の解析を参考に0.01秒とした。また、基礎式の解法には、運動方程式の移流項以外に関してはAdams-Bashforth Schemeを、移流項の取り扱いにはCIP法をそれぞれ適用している。

b) 河床変動の解析

河床変動の解析には、局所的な河床勾配の影響を陽に反映した掃流砂量関数と、斜面崩落モデルとを導入する⁴⁾。

前者に関しては、局所的に安息角に近い角度まで傾斜した急な河床あるいは河岸を対象とすることが計算上あり得るため、これまでに用いられてきた掃流砂関数をそのまま適用することには限界がある。そこで、ここでは掃流砂量ベクトルの大きさについてはMeyer-Peter & Mullerの式をその基本形として用いる一方で、

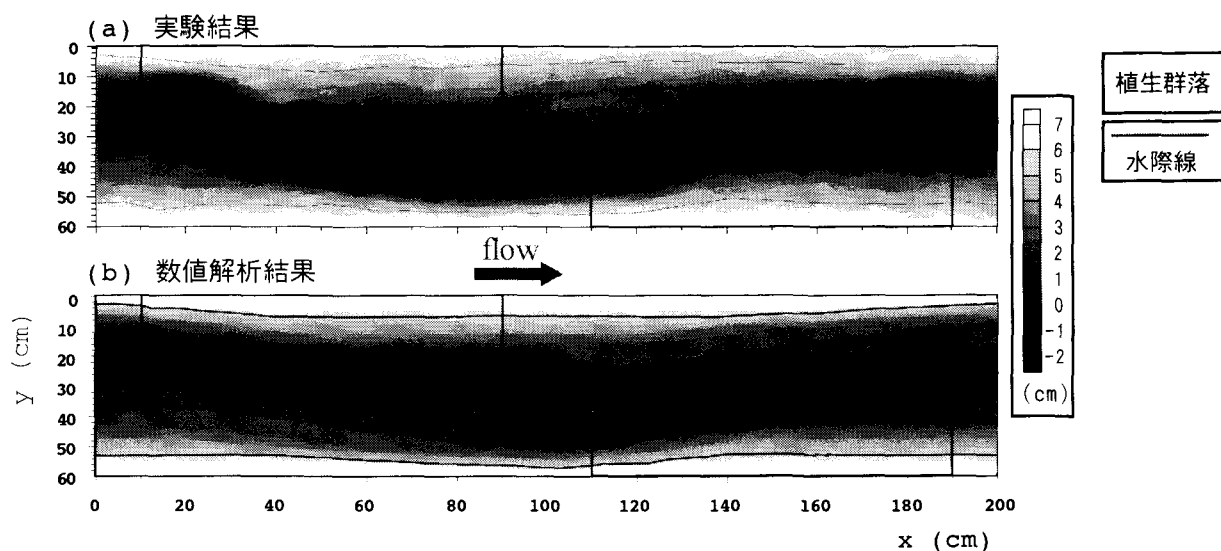


図-3 実験および数値解析による河床コンター図

これを成分分離する上で必要となる方向ベクトルについては土粒子に働く力の釣り合い式から評価することにした。

後者の崩落モデルに関しては以下の通りである。これまでに行われてきた多くの河道の変動計算を振り返ると、砂州の前縁部のように河床の局所的な地形勾配が安息角に等しいかあるいはこれを越えるような地形を、合理的に処理することはほとんどできていない現状にある。一方、河岸の浸食を伴う拡幅の解析や河川の自由蛇行の計算などでは、そのほとんどの場合に長谷川⁶⁾による河岸侵食モデルを適用してきたが、これはあくまでも地形の横断方向勾配が縦断方向勾配に比べ十分大きい場合に適用できるものである。そのため、幾何学的に複雑な地形の浸食を合理的に取り扱うことは難しい。たとえば、河岸の一地点において生じた浸食が縦断方向の隣接点へ連鎖的に影響を及ぼし、ある区間にわたって河岸浸食が引き起こされることがあるが、これを陽な形で評価することはできない。著者の斜面崩落モデルは、こうした場合をも合理的に取り扱えるものであり、ここで対象とする現象を再現する上では有用である。

3. 解析結果

(1) 本モデルの妥当性の検討

ここで対象とする現象の細部について議論する前に、解析モデルの妥当性について見ておくことにしよう。図-3には通水90分後の河床コンター図を示した。図中には比較のため実験結果ならびに数値解析結果が示してある。初期流路は、前述の通り台形断面であり、横

断方向に $y=23-37$ (cm) の区間にわたってその高さが 0cm となっており、その両側に勾配 1/3 の側岸斜面が広がっている。また、図-3 の左上と右下の 2カ所に植生群落模型が配置されている。まず、図-3 より次のことがわかる。植生群落の上流端付近(たとえば右岸側で見れば $x=80-110$ (cm) 付近)において水際線が大きく側方へ変位し、結果的に水際線が蛇行した流れとなっていることがわかる。これはこの区間で流路側岸の浸食が生じたためである。また、植生群落内の中程からその下流側の区域と植生の下流側に広がる後流域においては、河床高にほとんど変化が生じていないこともわかる。いずれの点においても実験結果と数値解析結果は概ねよい対応関係にある。とりわけ、この河床変動における注目すべき特徴として、植生群落の水路中央部側の外縁線に沿って島状の局所洗掘域が形成される点を挙げることができるが、その位置ならびに規模とも両者はほぼ一致していることがわかる。また、側岸の浸食が最も顕著に現れた $x=100$ (cm) の位置に着目し、この断面における実験と数値解析による河床横断形状を比較した結果が図-4である。この図を見ると、右岸側で生じている側岸の最大側方変位量(8cm 程度)、水路中央部の堆積厚(約 1.5 cm)など、両者は比較的良好に一致していることがわかる。なお、図-4を見ると、数値解析による側岸浸食幅の方が実験結果より多少大きくなっていることがわかる。これは、この図の作成に当たっては、隣接する計測断面間でデータの線形補間を行うことでその横断面形状を得ていることなどが、その一因であると考えている。

(2) 数値解析による変動プロセス

次に、流路変動プロセスについて見ていくことにしよう。図-5(a),(b),(c)にはそれぞれ初期状態、通水開始から1分後、90分後の数値解析結果をまとめて示した。各々上から順に河床コンター図、流速ベクトル図、流砂量ベクトル図を示してある。ただし、図-5(a)の初期状態に対しては流砂量ベクトル図を示していない。この初期状態 $t=0$ (min.) については、簡単な説明を加えておく必要がある。本解析では、計算の手順として、最初に一樣な流速を仮定値として与え、河床変動を生じさせない状態で固定床上の計算を行った。そして、流速場が定常の状態に達したことを確認してから移動床計算を始めることにした。そこで、この初期状態とは、通水開始直後を指すものではなく、初期の台形断面流路に対して流れが十分に発達し定常に達した状態を表している。移動床計算を開始すると、その直後に急激な河床ならびに流路の変動が生じることになるのはそのためである。そこで、ここで再現されている流路の時間変動は、実験時に生じていたものと時間的にずれていることは否定できない。しかし、本研究では、平衡状態に達した後の流路形状ならびに流れ場を知ることを主たる目的としており、この議論においては大きな支障はないものとする。

それでは、図-5について詳しく見ていくことにしよう。河床高のコンター図を見ていく。前述の通り、移動床計算を開始してから1分程度での変動量は大きいものの、それ以降の変化については比較的緩やかになっていることがわかる。水際線に着目すると、初期状態でのものと1分後のものには大きな差異は見られないが、90分後には各々の植生群落の上流側の外縁付近において4cm程度の規模で側方に後退しており、この付近の横断面において流路の側方変位量が最大値をとることがわかる。また、時間の経過とともに、二つの植生に挟まれた $x=90-110$ (cm) の区間の水路中央部付近で徐々に堆積域が形成されており、前述の局所洗掘域との高低差が次第に顕著になってきている。

流速ベクトルについて見ると、前述の通り定義された初期状態において滞りが蛇行した流れが生み出されている。このような流れが生み出されるメカニズムはおおよそ以下の通りである。植生群落内では非植生域に比べ流水抵抗が大きいので、流れが植生前面で堰き上げられ、局所的な水位上昇が起こる。そして、この位置から相対的に水位の低い非植生域の方向に向かって、植生帯内を斜めに横切るような流れが生じる。植生を左右交互に配置すると、この斜め方向の流れが左

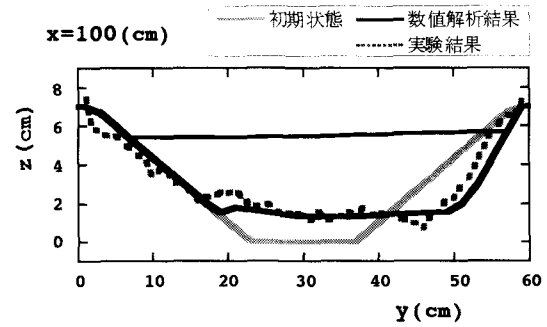


図-4 実験および計算結果による河床形状

右両岸で生じ、これが繰り返される結果として滞りが蛇行した流れが生成されるものと考えている。この流速ベクトルのパターンを比較すると、河床の変動が生じてそれほど顕著な変化を見せることはなく、側岸の浸食が進むのに伴わずかながら流速が減少していくのみである。

さらに、流砂量ベクトル図を見てみると、これと流速ベクトルとの対応関係が顕著であるのは言うまでもなく、流速の大きい流路中央部では流砂量も多く、流速の小さい植生群落内やその後流域では流砂量はほとんど生じない。掃流砂は河床の局所勾配の影響、言い換えれば重力の影響を顕著に受けるため、その移動区域は水流のそれとは異なりかなり狭い幅の中に限定されるとともに、流砂量ベクトルの向きは流速ベクトルのそれとは必ずしも一致しない。また、側岸浸食の結果として水際が大きく移動している植生前面から植生帯内にかけての区域では、河岸の傾斜方向に沿うように流路中央部へ向かう土砂移動が確認され、これが時間の経過とともに減少していく。本研究で対象とした現象は、大規模に崩落が生じ側岸が浸食されていく水理条件下にはなかったため、ここで適用した斜面崩落モデルの利点を最大限に発揮するには到らなかったと考えている。しかし、局所的な河床勾配に伴う重力の効果を陽に反映できる流砂量関数を適用しているため、たとえば植生群落内の極端に流速が小さな場所であっても、側岸の浸食に伴い横断方向勾配が増大し、土砂移動が生じることになるが、これをも合理的に捉えることができていると考える。

最後に、図-6には数値解析によって得られた各時刻における水路横断面形状の時間変化を示した。図の上から順に $x=15, 50, 85, 100$ (cm) の地点における変化を示してある。なお、参考までに付記すると、(a)-(c)は植生帯内の前方、中央、後方を、(d)は植生と植生の間に位置している。この全てに共通して言えることは、通水開始から0.5-3分程度の時間帯に比較的規模の大きな側岸浸食が生じ、30分程度でその進行が緩やかになり、90分後にはほぼ動的に安定した状態に到達

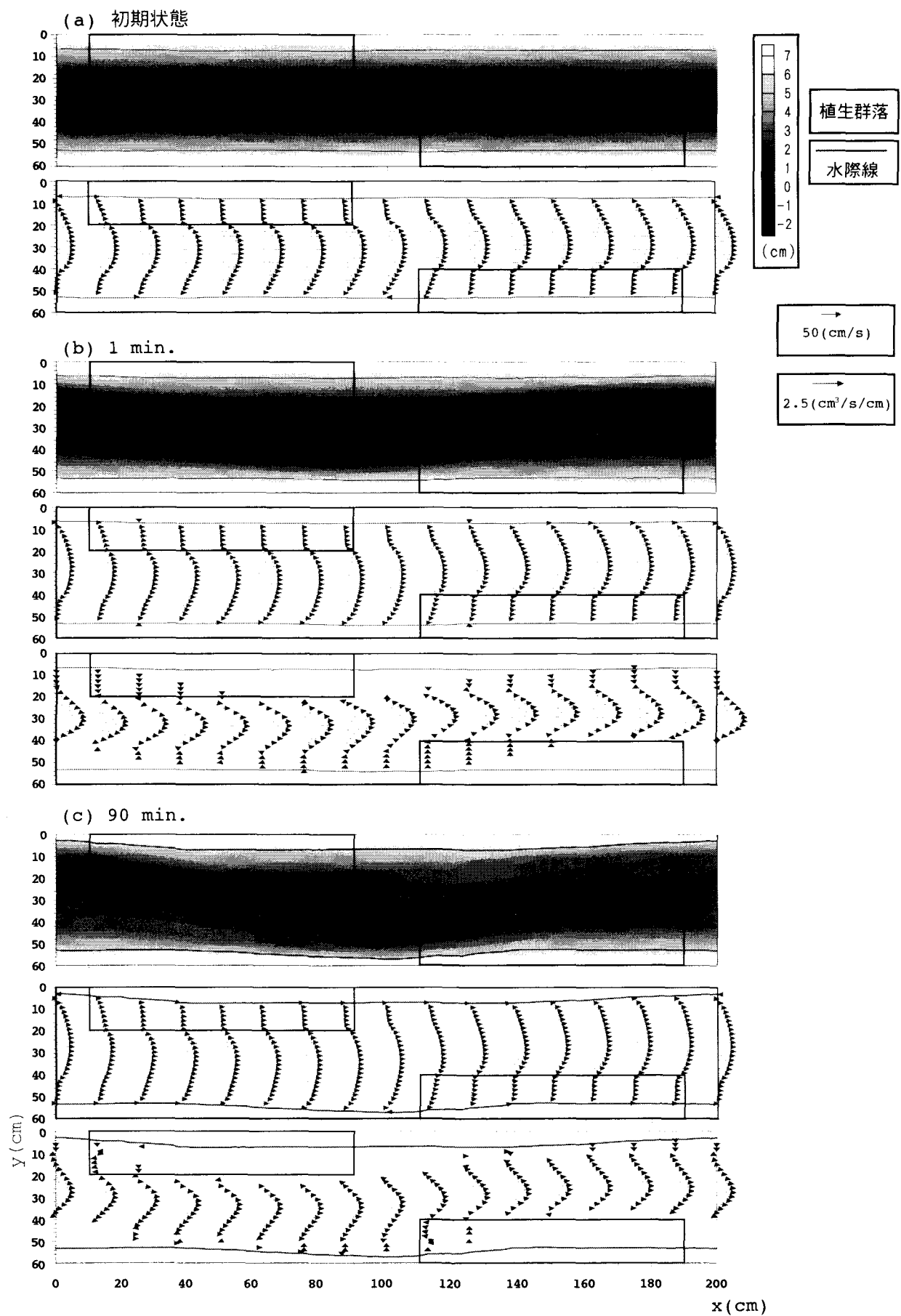


図-5 各時刻における河床コンター図・流速ベクトル図・流砂量ベクトル図(数値解析結果)
(移動床計算開始時を表す「初期状態」に対しては紙面の関係で流砂量ベクトルを省略した.)

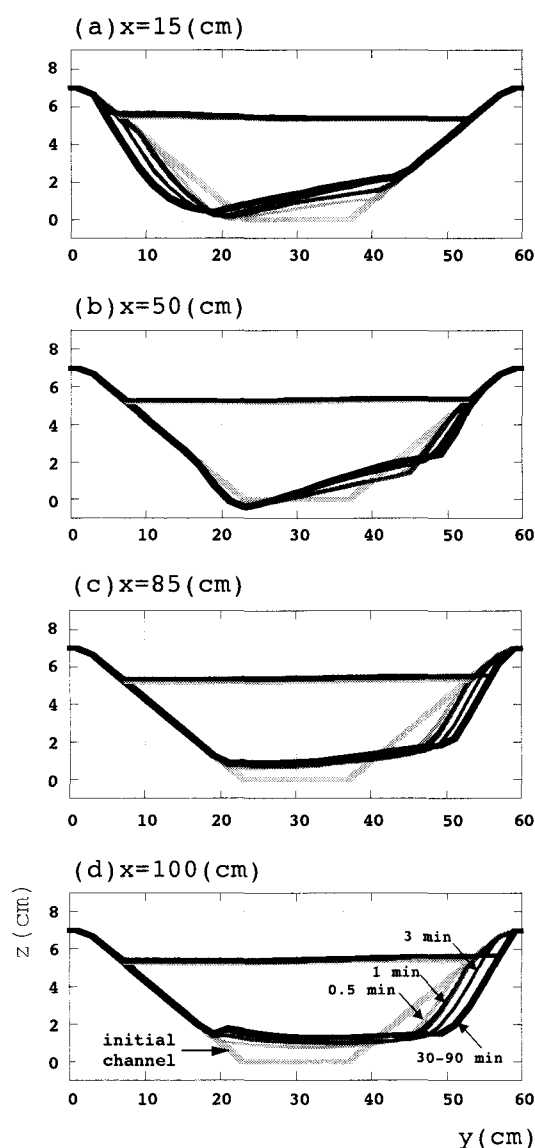


図-6 河床形状の経時変化(数値解析結果)

していることである。植生帯を含む断面(a)-(c)のうち(a)に注目して見ると、植生の存在する左岸側で比較的大きな浸食が生じていることがわかる。これは、実際の植生を対象とするならば、その根の状況にもよるものの、この付近の植生がまとまって倒壊し、流失する恐れがあることを意味する。さらに、(b)の左岸側にある植生帯においては、流速も小さく30分以降は流砂量もほとんど見らず、この区域においては河床変動が生じていない。また、二つの植生帯の間に位置する(d)は、最も大きな側岸の浸食を受けているところであり、法肩までその浸食が進むとともに、その影響がこの地点の下流側20-30cm程度の範囲にまで及んでいることがわかる。

4. 結論

本研究では、植生を伴う河道の流路変動を合理的に予測する解析手法を開発するため、著者らのこれまでの解析モデルにSDS-2DHモデルを組み込んだ数値解析モデルを作成した。また水路実験もあわせて行い、両者の結果を比較することにより、現象の理解を深めるとともに解析手法の妥当性の検証を行った。その結果、数値解析により実験結果が概ねよく再現できることが明らかになった。また、このような準備の下で行った解析結果を通じて、植生群落が存在することで引き起こされる流路の変動について、その特性の一端を明らかにすることができたと考えている。

今後は、本モデルを現地河川に適用し、たとえば砂州上の植生群落が河道区間全域にどのような影響を及ぼすのか、これが河道の網状のプロセスをどのような変化を与えるのか、などについて検討することとあわせて、混合粒径砂礫を取り扱えるように解析モデルを拡張し、浮遊土砂を伴う現象についても解析を行う予定である。

謝辞：本研究は、土木学会と国土交通省との間で進められている河川懇談会の活動の一環として進めているものであり、下館河川事務所の関係各位にはここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 池田駿介・佐野貴之・福元正武・河村一弘：複断面開水路に生じる大規模組織渦と浮遊砂輸送，土木学会論文集，No.656/II-52，135-144，2000。
- 2) 辻本哲郎・北村忠紀・中川博次：側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級，土木学会論文集，No.503/II-29，99-108，1994。
- 3) 泉 典洋・池田駿介：側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断河床形状，土木学会論文集，No.411/II-12，151-160，1989。
- 4) 関根正人：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，水工学論文集，第47巻，637-642，2003。
- 5) 灘岡和夫・八木宏：SDS-2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション，土木学会論文集，No.473/II-24，35-44，1993。
- 6) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究，土木学会論文報告集，第316号，37-50，1981。

(2003.9.30 受付)