

網状流路の形成過程における 河床と河岸との相互作用

INTERACTION BETWEEN BED DEFORMATION AND BANK EROSION AND ITS EFFECT ON THE FORMATION PROCESS OF BRAIDED STREAMS

関根正人¹・小笠原基²

Masato SEKINE and Motoki OGASAWARA

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

Channel evolution of braided stream was studied numerically in the present study. Slope-collapse model and modified bedload function were included in the numerical model whose validity had been almost verified. The formation and developing mechanism of each braided channels is the one of the target to be understood physically. The interaction between a bed deformation and a bank erosion in this process is the other main point to be investigated. On the basis of the enormous number of data obtained by the numerical experiments under the different conditions, the important and interesting remarks on the above two points were found and discussed here.

Key Words: braided streams, bed deformation, bank erosion, numerical analysis.

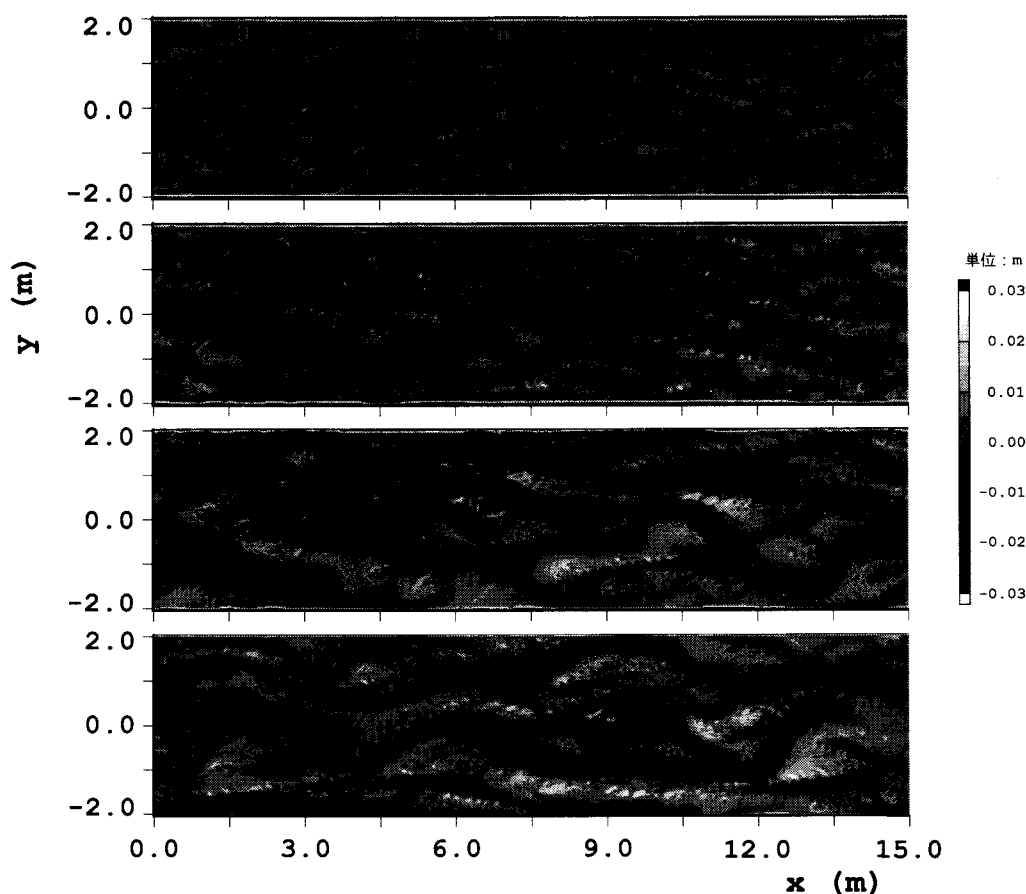
1. 序論

洪水等の水流の変化や人為的なインパクトを受けると、河道は与えられた変化に応じた安定な状態に向かってその姿を変えることが知られている。河道が自ずから持っているこのような変形の機構を「自律形成機構」と呼ぶことにしよう。たとえば河床波の形成も小規模ながらこの機能の現れであり、また、直線流路が蛇行流路や網状流路へと姿を変えていく大規模な変動も同様である。このうち、本研究では、後者の上空から見たときにその平面形状までが変わっていく大規模な河道の変動に焦点を当てて考える。

ところで、このような規模の河道の変動に関する従来の取り組みについてふりかえてみよう。これまでの流れとしては、河道の側岸を鉛直固定の状態にしておいてその「河床変動」に注目した研究が数多くなされてきた一方で、側岸の浸食をも許容することで河道が拡幅したり自由蛇行したりする過程を対象としたいいわゆる「流路の側方変動」の研究はそれほど多くは見られない^{1),2),3)}。後者に関す

る数値解析が試みられるようになったのはほとんどが1990年代であり、長谷川⁴⁾による河岸浸食モデルの提案がそのきっかけとなり、力学的な裏付けとなった。これまでのこうした流れは、河川整備に関する考え方とも無縁ではなく、これまでは河岸浸食をいかに制御するかに力点が置かれていたため、とりわけ流路の変動に注目する必要もなかった。しかし、近年、環境への配慮を欠くことなく河川を整備していく準備ができたとの認識から、低水路河岸の浸食をある程度は許容しつつ、河川本来の自律形成機構をうまく生かし、自然豊かな河川を目指すこととなった。そのため、流路が変動するプロセスについての更なる理解とこれを数値予測する手法の確立とが望まれようになってきた。

このような背景の下、最近いくつかの新しい試みがなされつつある。その代表例が、清水による論文⁵⁾に見ることができ、自由蛇行のプロセスに関する高度な数値計算手法の開発を進めるとともに、解析結果を基に河床変動と流路の側方変動との関連性について論じている。こうした状況の下で、著者も「安息角を越える急な斜面の崩落」を合理的に取り扱う



図ー 1 網状流路の形成過程（水路床高のコンター図）：上から順に 5 分後，10 分後，30 分後および 60 分後

力学モデルを提案し，これを長谷川の河岸浸食モデルに代わるものとして導入することで，河床ならびに河岸の浸食を一連のプロセスとして取り扱う新たな数値解析手法の開発を行っている⁶⁾．この解析の利点は，砂州の前縁などの水面下にありながら局所的に安息角を越えるような急斜面の取り扱いについても合理的に取り扱える点にあり，河床変動と河岸浸食との相互作用を考慮しながら別のプロセスとして数値的に取り扱っていた従来の解析とはこの点において根本的に異なる．

本論文では，前論文で検討が不十分であった点に鑑み，新たな解析結果を提示しつつ「網状流路の形成過程」の更なる理解を深めることを目的とする．ここでは，河床の変動と側岸の浸食の相互作用について論じるとともに，網状流路が時間の経過とともにその規模を増しつつ発達していくメカニズムに迫る．

2. 本解析の概要

本論文では，網状流路の形成過程において生じる河床変動と側岸浸食の相互作用と，水路幅の違いがこのプロセスに与える影響とを検討することを目的

として，数値解析を行った．

解析モデルは前論文⁶⁾で説明したものと同一であり，河道変動の計算に，(1) 安息角に到る急な斜面に対しても適用できるように拡張を図った掃流砂量関数と，(2) 前述の斜面崩落モデル，を導入している点が大きな特徴である．また，流れ場は浅水方程式に依拠し，その解法に当たっては，非移流項に対して Adams-Bashforth Scheme を，移流項に関しては CIP 法をそれぞれ適用している．境界条件に関しては，水際位置で水深を 0 とし，これを通過す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．この周期境界条件に関しては，計算領域の規模がそこで再現される現象の空間スケールを規定してしまう恐れがある．ここでは，その確認のため，計算区間長を変えた解析も複数通り行い，そこに再現される流路の統計的な性質が大きく変化しないことを確認している．この点については今後さらに詳しく検討していく必要がある．初期条件として，水路床高さに粒径を上限とした微小擾乱を与えており，その生成には一様乱数を用いた．これ以上の解析の詳細については，前論文を参照されたい．

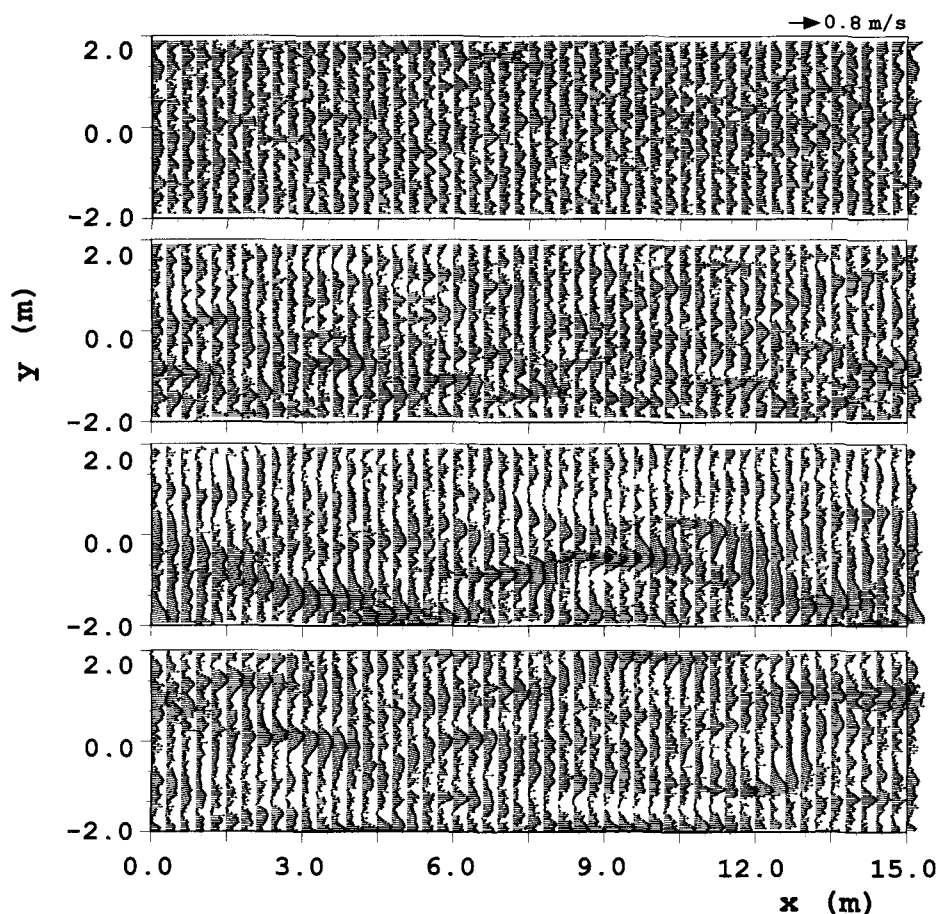


図-2 流速ベクトルの時間変化：上から順に5分後、10分後、30分後および60分後

次章以降で説明する解析条件は以下の通りである。前論文⁶⁾では、以下に示す藤田ら⁷⁾の実験 Run C-8 と同一の条件下で「側壁を浸食不可能な鉛直壁」とした解析を行い、解析モデルの妥当性の検証を行った。主な条件としては、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、水路床材料を 1.05 mm の均一粒径砂とする。本研究では、前論文で簡単には触れた「浸食可能な斜面を側岸にもつ流路」の変動を調べることにひとつのねらいがあることから、この側岸を傾斜角 1/2 の斜面とし、初期横断面形状を台形断面とした。そして、計算条件としては、(1) 側岸の条件を除いて上記のものと同じとする場合 (Case 1)、ならびに (2) 水路幅 (ここでは上記の値を台形の底辺長とする) と流量のみ上記の値の 2 倍にし、幅・水深比 B/h を 2 倍とした場合 (Case 2)、の二つを主要なものとし、これらの解析結果を基に考察を加える。

3. 網状流路の形成のメカニズム

(1) 網状流路形成の素過程

本論文では、前述した Case 2 の解析結果を中心

に説明するとともに、これと Case 1 の結果との比較検討についても試みる。図-1 には通水開始から 5 分、10 分、30 分および 60 分後の水路床高のコンター図を示してある。図中の色の濃い部分が流路を表し、白で表される部分は浮州になっている可能性がある。また、図-2 には同時刻における流速ベクトル図を、図-3 には流砂量ベクトル図を、それぞれ示してある。これらの結果と Case 1 に対して得られた結果とから、網状流路の形成・発達過程において次のようなメカニズムが働いていることが理解された。(1) 複列砂州の形成領域に区分される本解析の条件下では、通水開始後 5 分程度でほぼ全領域にわたって複列の砂州が形成される。本解析の場合には、初期条件として水路床に最大でも粒径程度の擾乱を与えているが、この凹凸によって河床の局所勾配にばらつきが生まれ、これが土砂の移動性に不均一さを引き起こす。少なくとも本解析の場合の複列砂州が形成される主要因は、まさにこの点にあるのではないかと考える。(2) しかし、時間の経過とともに、小規模な水みちの合流点付近に深掘れが生じるようになり、これが流下方向に伸びること、ならびにその下流側に流送してきた土砂を堆

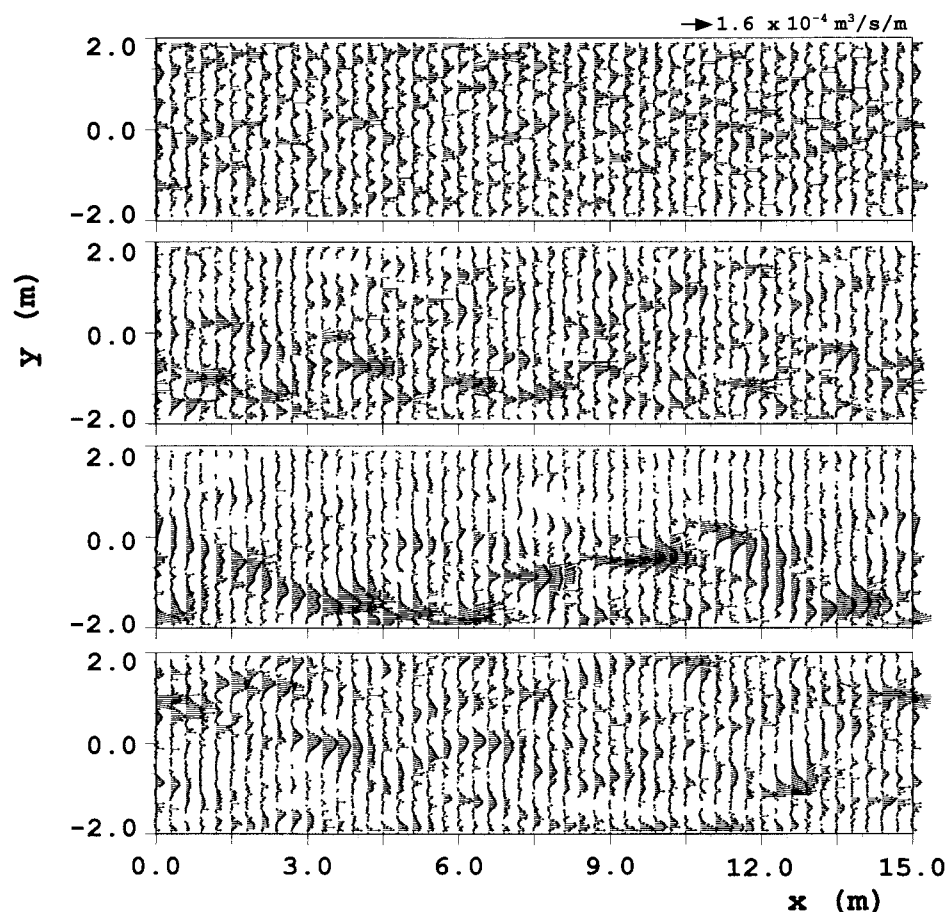


図-3 流砂量ベクトルの時間変化：上から順に5分後、10分後、30分後および60分後

積させることで、河床上の凹凸の規模が増大する。(3) この堆積区域は流下方向に移動しつつ次第にその規模を増していく。このため、その上流側の水みちはこの堆積域を迂回するように分岐し、その方向ベクトルがx軸となす角度が大きな値をとるようになる。(4) この結果、新たに発達した水みちは空間的に離れた位置にある別の水みちとぶつかる可能性が増し、点在していた深掘れ部が相互につながりを見せるようになる。これがより規模の大きな水みちが生み出され発達していく素過程ではないかと考える。(5) ところが、水みちが発達を遂げ、そこに集中する水量が増してくると、分流後の流れは比較的大きな慣性力を持ち、その曲率から遠心力も作用するようになるため、水みちが側岸にぶつかり、そこに水衝部を形作るようになる。こうして側岸浸食が引き起こされる。側岸の浸食が生じると水みちに新たな土砂が供給されるため、この後の流路の変動は上記の発達のプロセスとは異なるものとなる。(6) 側岸浸食が生じるようになると、側岸に沿って深掘れ部が伸びるためか、比較的大きな距離にわたって水みちが維持される傾向にある。しかし、浸食に伴い供給された土砂が直ちには運び去られず、そこに堆積するため、そこを避けるように側岸から離れる新

たな水みちが形成される。(7) このような変動が発達してくると(本解析の場合には60分程度)、そこに形成された比較的大きな流路が流下方向に移動しているかのような流路パターンの変化となる。たとえば図-4に示したCase 1の場合には、「∞型」の流路が移動しているように見える。しかし、幅・水深比を2倍としたCase 2の場合には、横断方向に同じ規模の対称の「∞型」の流路が形成されることは稀で、どちらか一方が卓越したパターンをとることが多いようである。たとえば図-3の30分後の流砂量ベクトルを見ると、この時刻には右岸側(図の下半分)に偏って主要な流路が伸びていることが見て取れる。さらに、推論を展開するならば、更なる時間の経過の後には、Case 2の場合もCase 1に類似した横断方向に単一の「∞型」の流路が残るのではないかと。また、単一の「∞型」の流路とはいえ安定ではなく、横断方向に左右対称性を維持できないならば、最終的には竹林・江頭ら⁸⁾が指摘している通り、横断面内にたったひとつの流路(彼らが「自己形成流路」と名付けたもの)だけが残ることになるのではないかと。この推論部分については今後の更なる検討を待って改めて議論したい。

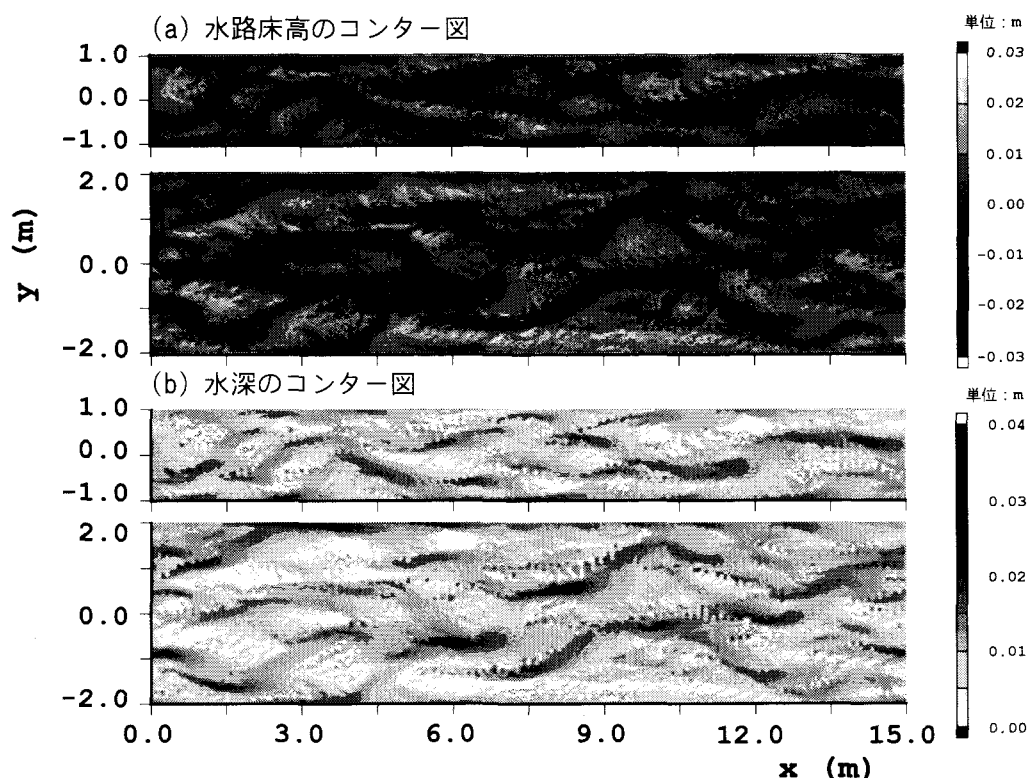


図-4 幅・水深比の違いが網状流路のパターンに与える影響(120分後):
上段が水路床高, 下段が水深のコンター図

(2) 河床変動と側岸浸食の相互関係

次に, ここでは河床の変動と側岸浸食との相互関係について見ておきたい. 図-5には図-1の各時刻における水際位置の y 座標の時空間的变化を示してある. なお, この水際位置の変化は, 側岸浸食のみならず一時的な水位上昇によっても引き起こされるため, 時刻によっては水際線が振動状の変動を示しているかのような印象を与えるが, これは主として局所的な水位変動に起因するものようである. なお, 初期の水際位置は ± 1.82 mであった. さて, この水際の側方移動を詳細に調べてみると, これはその付近の河床の局所洗掘と密接に関わって生起し, 側岸浸食を伴う水際の移動はその付近の顕著な深掘れの発生時刻と符合する時間帯に生じていることがわかる. たとえば, 図-5の30分と60分後の水際線を比較すると, $x=7.5$ (m) 付近の右岸側でこの間に大きな側方移動が生じており, 側岸浸食が生じたことがわかる. これを図-1の水路床高のコンター図の方から見てみると, 同時時間帯に右岸側水際付近に水みちが伸び, このあたりの側岸が水衝部となっている. このように河床の変動と側岸浸食とは常に連動して起きているのである. 一方, 図-5を見ると, いわばカオス的に生じる水みちの発達と移動とに起因するために, 次にどの位置で側岸浸食が生じるかを予測することは容易ではないが, 60分程度の時間スケールで見ると, その側岸浸食は

場所によらずほぼ0.1m弱ほど一律に生じているのは興味深い. 結果として, この時刻あたりで水際線は初期と同じように x 軸にほぼ平行になっている.

さらに, 図-6には, $x=7.5$ (m) の地点における流路横断面形状を実線で, 水面の形状を点線で, それぞれ描いてある. この地点では, 前述の通り30分以降に顕著な側岸浸食が生じていたことが理解される. なお, 参考までに, 図-1のコンター図において, その横軸に沿って白い区域が残っている地点は, その点の浸食が斜面の天端までは及んでいないことを表し, 黒い帯状の区域が広がっている地点では, 既に天端にまで到る大きな側岸浸食が生じてしまったことを表している.

4. 結論

本研究では, 網状流路の形成・発達過程を検討の対象とし, その理解を深めるために数値解析を行った. ここでは, 前論文において妥当性を検証した解析モデルを適用し, さらに詳細にわたる解析を行い, この形成過程のメカニズムを探ろうと試みた. その結果, 小さな水みちが分合流を経てより規模の大きなものへと発達を遂げていく機構や, 河床変動と側岸浸食の相互関係などについて説明を加えることができた. 今後は, さらに長時間にわたる解析を行い,

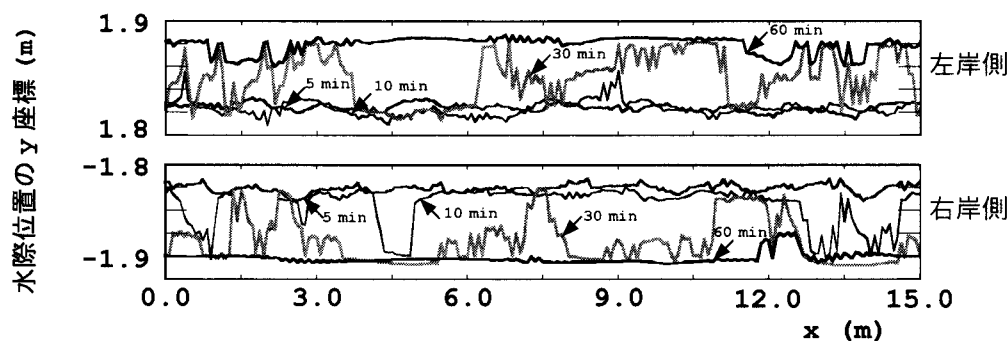


図-5 水際位置の時空間的变化：上段が左岸側，下段が右岸側の水際

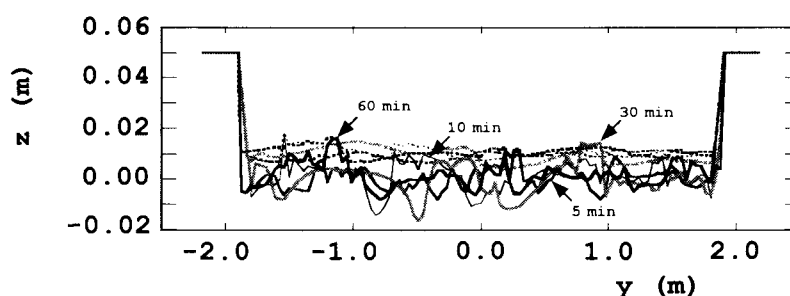


図-6 横断面形状の時間変化： $x = 7.5$ (m)

ここで注目してきた水みち群が最終的にはどのような状態で安定化するのか，を見極めたいと考えている．また，本文中にも記したが，周期境界条件がこのような解析に及ぼす影響についても考察を加えていかなければならない．さらに，本解析モデルを混合粒径を扱えるように拡張した上で実河川の予測に適用することを検討中であり，現地データの問題など今後解消すべき問題も多く残されている．これについては，改めて別の機会に報告していきたい．

謝辞：本研究は，鬼怒川を対象として国土交通省下館工事事務所との間の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) 清水康行・平野道夫・渡邊康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算，土木学会水工学論文集，第40巻，921-926，1996．
- 2) 関根正人：側岸浸食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.533/II-34，

51-59，1996．

- 3) 長田信寿・細田 尚・村本嘉雄・Md. Munsur Rahman：移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析，土木学会水工学論文集，第40巻，927-932，1996．
- 4) 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．
- 5) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について，土木学会水工学論文集，第47巻，643-648，2003．
- 6) 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，土木学会水工学論文集，第47巻，637-642，2003．
- 7) 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-2，451-472，1986．
- 8) 竹林洋史・江頭進治・中川博次：直線水路における自己形成流路の形成条件と形成機構，土木学会水工学論文集，第44巻，771-776，2000．

(2003.9.30 受付)