

Slump blockと内岸の陸地化の影響を考慮した 自由蛇行の形成過程に関する数値解析

NUMERICAL COMPUTATION OF FREE MEANDERING PROCESS OF RIVERS
CONSIDERING EFFECT OF SLUMP BLOCKS AND INNER BANK DEPOSITION

近藤祐介¹・清水康行²・木村一郎³・Gary PARKER⁴
Yusuke KONDO, Yasuyuki SHIMIZU, Ichiro KIMURA and Gary PARKER

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (同上)

³正会員 工博 北海道大学准教授 大学院工学研究科 (同上)

⁴非会員 Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois (302 East John Street
Champaign IL 6182 USA)

This paper presents a numerical model to reproduce free meandering process of rivers with cohesive bank material. The channel width is relatively kept constant during the free meandering process in natural rivers with cohesive bank material. In the actual river banks, non-cohesive material is capped by a cohesive material layer. When the non cohesive layer is eroded, slump blocks of upper-cohesive material crumble and cover the non-cohesive material on the outer bank below. The erosion speed of outer bank is eased due to this slump block. Then at the vicinity of inner bank, the vegetation grows at the inner bar, deposition of the bedload is promoted, and it becomes a land, and thus the channel width is kept constant during the development of river meandering. Results of the numerical model with and without considering the slump blocks and inner bank deposition are compared and the difference of the result are discussed.

Key Words : free meandering process, slump blocks, cohesive bank material, plane 2d model

1. はじめに

河川改修などが行われずに自然の状態のまま存在する河川は蛇行形状を有するものが多い。河川の自由蛇行に関する研究は、従来、数値計算や実験など様々な手法で行われてきた。池田ら¹⁾や長谷川ら²⁾は、河川の蛇行の支配要因について理論的に説明し、模型実験などによって検証している。また、清水ら³⁾や長田ら^{4),5)}は河床変動モデルと河岸浸食モデルを組み合わせ、砂質材料の河岸河道を有する蛇行河道の形状変化を追跡するモデルの提案を行っている。しかしながら、それらの研究は、河岸の浸食の速度に比べて内側の河岸の土砂の堆積速度が遅いため時間の経過と共に川幅が拡大する傾向がある。実河川においては図-1のように川幅をほぼ一定に保ったまま自由蛇行が発達している河川も多く、この現象は未だに解明されていない。

そこで、本研究では二つの事柄に着目した。一つは、外岸における粘性層の影響、もう一つは、内岸における

植生を伴う陸地化の影響である。数値解析において以上の項目をそれぞれ考慮することで、川幅一定で発達する自由蛇行の様子を再現しようと試みた。

(1) 外岸のslump blockの考慮

図-2より、自由蛇行している河川の河岸では非粘性層の上に粘性層が覆いかぶさっている構成が見られる。



図-1 自由蛇行の航空写真



図-2 粘性層を持つ河岸の様子

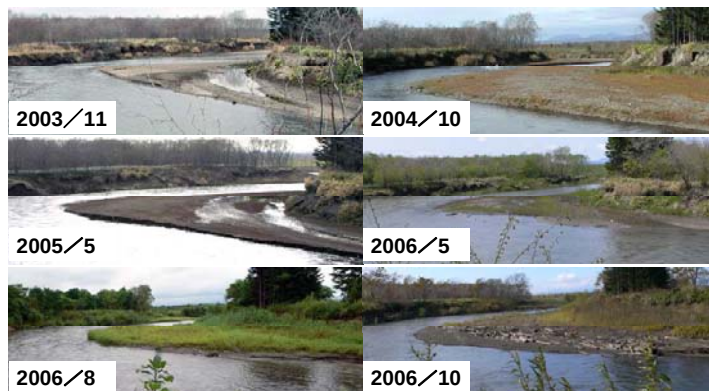


図-4 標津川の内岸堆積の様子

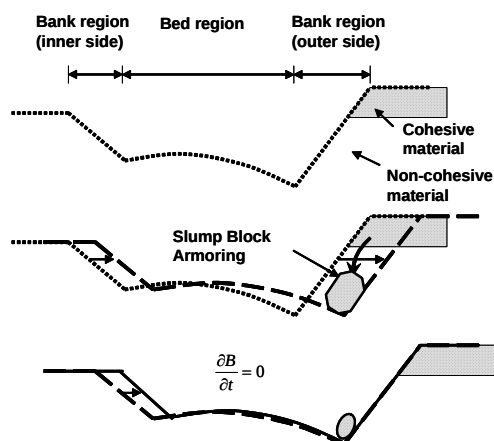


図-3 河岸浸食モデルの概念図

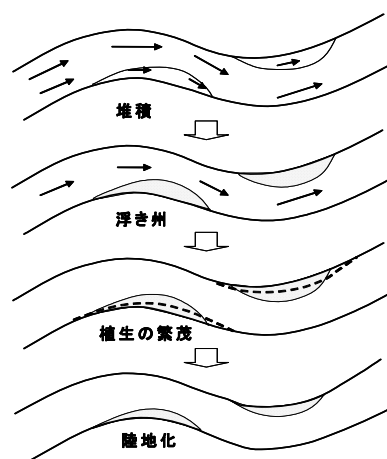


図-5 陸地化の概念図

そこで本研究では、図-3に示すように非粘性層が浸食されると上の粘性層から土砂の塊（Slump Block）が落下し、河岸がそれ以上浸食されるのを妨げる役割を果たすこと、さらに、Slump Blockの影響で浸食が抑えられている間に内側の河岸に土砂が堆積するものと仮定した。

(2) 内岸の植生化による陸地化の考慮

図-4は2003年11月から2006年10月の標津川の写真である。2003年の11月には、水流によって蛇行の内岸部に堆積が生じ、ある一定期間低水期が続いたことで、2004年10月には植生が繁茂しているのが分かる。その後流量の増加に伴い植生は消えるが、2006年8月には再度植生が現れ、同年10月にはほぼ陸地化しているのが見られる。この資料を基に、陸地化の概念図を図-5に示す。内岸においては浮き州ができ、水深が浅くなることで植生が繁茂し流砂の堆積が促進される。このことは、藤田⁹⁾による研究からも示されている。植生の影響による流砂の堆積が長時間続くことで、内岸が完全に陸地化したものとみなし、計算領域からはずす操作を行った。

2. 数値計算モデル

(1) 流れと河床変動計算モデル

流れと河床変動の計算には、河岸浸食により計算領域が遷移するため、移動一般座標系における流れと河床変動の式を用いた。移動一般座標系における流れと河床変動の計算には清水ら³⁾によって提案されたモデルを用いている。流砂は掃流砂のみを扱っている。

(2) 河岸浸食モデル

本研究では図-3に示すように、河岸浸食と平面形状の計算法として清水⁷⁾が提案した河岸浸食モデルにSlump Blockの影響を加えたモデルを用いた。河床変動計算により河岸近傍の河床が低下し、河岸の角度が限界角以上になった場合には限界角を超える部分が瞬間的に崩落すると仮定し、その浸食量に等しい量のSlump Blockが洗掘部に供給されることで、河岸浸食が妨げられArmoringの役割を果たす。外側の河岸の移動速度とSlump BlockによるArmoringの関係は以下の式で表される。

$$q_{chunk} = \Delta \eta \cdot H_c \quad (1)$$

$$\frac{dA_{chunk}}{dt} = q_{chunk} - \frac{A_{chunk}}{T_{chunk}} \quad (2)$$

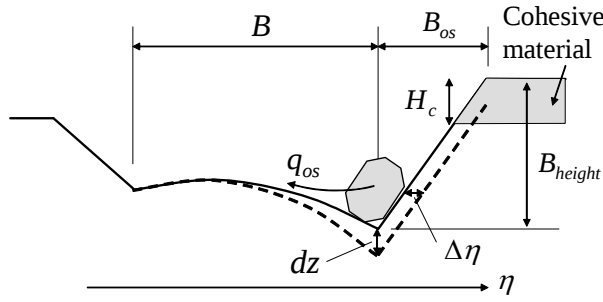


図-6 各パラメータの設定

$$K = \begin{cases} 1 - \left(\frac{A_{chunk}}{D_{chunk} B_{os}} \right), & 0 < \frac{A_{chunk}}{D_{chunk} B_{os}} < 1 \\ 0, & \frac{A_{chunk}}{D_{chunk} B_{os}} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$q_{os} = K q_{osu} \quad (4)$$

$$\Delta \eta = f(q_{os}, dz) \quad (5)$$

$$Es = (\alpha \times \tau_* \times u_*) \times R_{wc}^{2.5} \quad (6)$$

$$T_{chunk} = \frac{D_{chunk}}{2 \times Es} \quad (7)$$

ここで、 q_{chunk} は単位河岸長当りで崩落するSlump Blockの体積、 A_{chunk} は単位河岸長当りでSlump BlockがArmoringする体積、 T_{chunk} はSlump Blockが崩壊するまでに要する時間、 D_{chunk} はSlump Blockの直径、 H_c は粘性層の厚さ、 $\Delta \eta$ は単位時間当たりの η 方向の河岸浸食量、 q_{osu} は河岸近傍における横断方向の流砂量で長谷川の式から算出される。 E_s はSlump Blockの浸食速度、 α は粘土の鉱物の違いや水温などによって決まる係数、 τ_* は無次元掃流力、 u_* は摩擦速度、 R_{wc} はSlump Blockの水含有率である。その他のパラメータについては図-6に示す通りである。Armoringにより外側の河岸が移動していない場合($\Delta \eta = 0$)には(2)式の右辺第二項が負であるため A_{chunk} は減少する。そのとき(3)式の条件よりArmoringの開始時には $K=0$ であったものが、 A_{chunk} の減少とともに K が増大することになるので、外側の河岸から河床への土砂の供給量である Kq_{osu} も増大する((4)式)。この結果(5)式より外側の河岸が移動し($\Delta \eta > 0$)、(2)式より再び A_{chunk} が増大し(3)式において $K=0$ となりSlump Blockが生産され浸食を妨げるように作用する($\Delta \eta = 0$)。また、 T_{chunk} を求めるにあたり、関根ら⁹⁾による粘着性土の侵食機構に関する研究を参考に(6)式を用いた。特に、浸食速度が摩擦速度の3乗に比例すること、水含有率が2.5乗に比例することに着目した。又、式中において次元を合わせるために τ_* を用いた。そして、(7)式においてSlump Blockの半径で浸食速度を除いた値をSlump Blockが崩壊するまでに要する時間とした。一方、内側の河岸につい

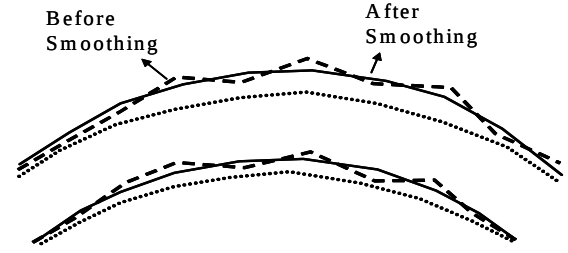


図-7 平滑化の概略図

表-1 計算ケース

	陸地化	Slump block
Case1	無	無
Case2	無	有
Case3	有(0.1min)	無
Case4	有(30min)	無
Case5	有(30min)	有

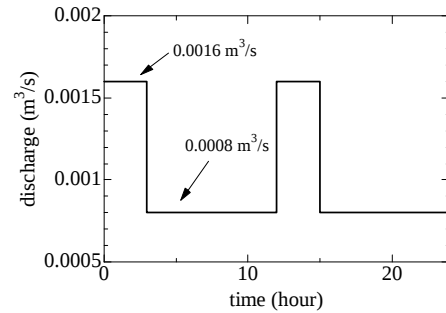


図-8 ハイドログラフ

ては、一定時間以上浮き州の状態が続いたときに陸地化したものとみなし計算領域からはずす操作を行っている(図-5)。また、本研究では上述のように計算領域の拡大・縮小を行う際に境界部分が乱れてしまい、計算の不安定を誘起してしまう。これは、本来連続な河岸を計算格子で離散化している点に原因があると考えられる。そこで計算を長時間、安定して行なうために境界部の平滑化処理を行うことによりこの問題を回避する(図-7)。平滑化は河岸の計算点において、毎時間ステップごとに河岸の移動量に関して隣接した前後3点ずつ計7点の移動平均をとった。

3. 計算条件

初期平面形状としてsine-generated curveの蛇行水路を設定した。蛇行水路は起点蛇行角：28.6°、蛇行波長：4.18m、水路幅：0.3m、初期河床勾配：1/242である。主な水理条件としては、河床材料の粒径：0.9mm、砂粒子の水中比重：1.65を用いた。計算格子は流下方向に1波長あたり28分割、横断方向に14分割した。

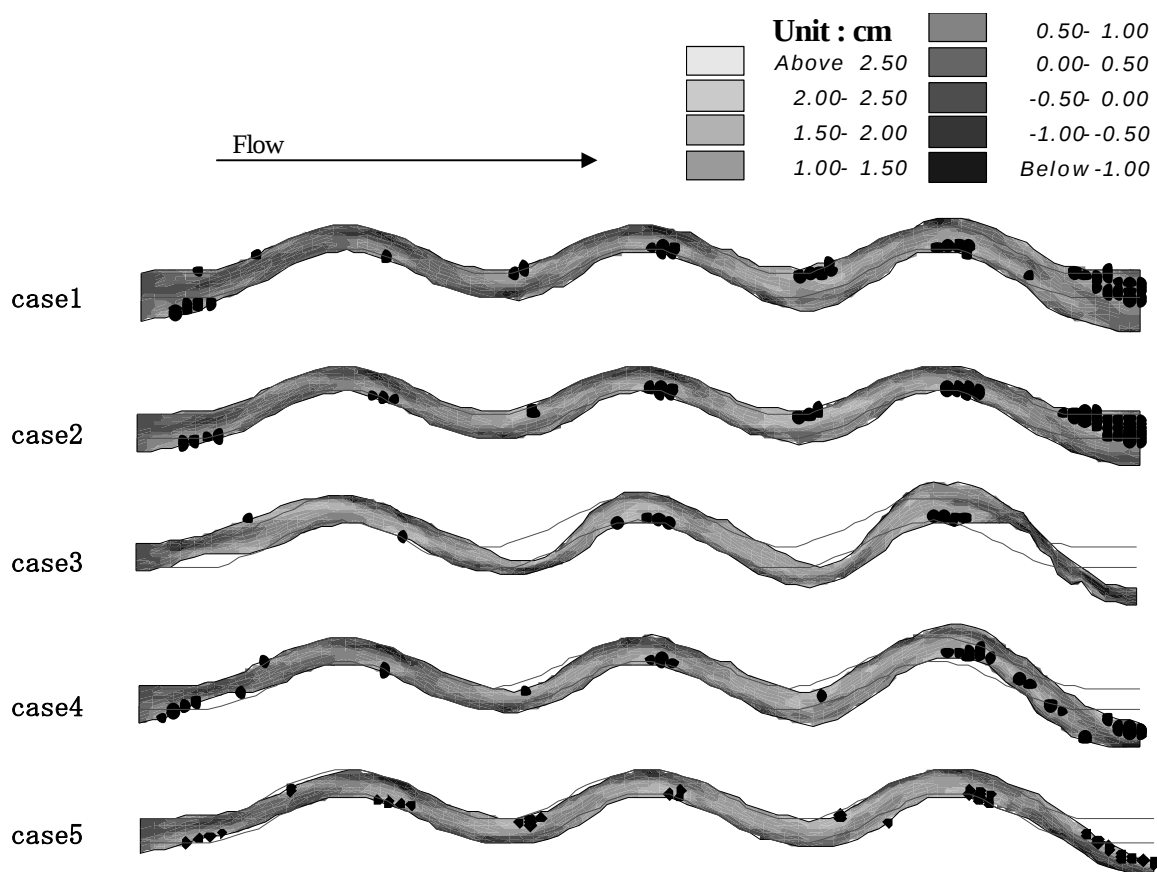


図-9 24時間経過後の河床コンター図

陸地化の効果とSlump Blockの効果を検証するために表-1の計算ケースで行った。陸地化の括弧内の数字は浮き州となってから陸地化するまでの時間を示す。また、PIZZUTO⁹⁾による報告から、川幅の拡大・縮小は流量変動に影響されると考え、図-8のように流量に変化をつけて計算を行った。計算時間は大流量を合計6時間、小流量を合計18時間、合わせて24時間計算した。Slump Blockに関するパラメータとしては、 $R_{wc} : 0.5$, $D_{chunk} : 1\text{cm}$, $H_c : 1\text{cm}$, $\alpha : 0.033$ を用いた。これらは、水路実験スケールを対象とした解析であるため、試行錯誤の結果、Slump Blockの影響が特徴的に再現される値を選定した。

4. 計算結果と考察

(1) 陸地化の影響による河道の比較

図-9は、Case1～Case5における24時間経過後の河床コンターである、河床コンター上の黒点部は水深が0.001 m以下になった点を示し、黒点が集中する部分は浮き州とみなすことができる。陸地化有りの計算結果では、大流量時にできた内岸の堆積により小流量時に浮き州が形成され、河岸側から徐々に陸地化している。Case3では、浮き州となってから陸地化するまでの時間が早いため内岸の移動が他のケースに比べて早く川幅が縮小傾向となっている。又、河道の急激な変化により、河道形状が

不安定となり、短時間で計算が破綻する。Case4では、川幅が急縮する箇所も見られるが、他のケースに比べ川幅も安定しており、良好な蛇行発達が見られる。また、陸地化を考慮しているCase3, Case4では、陸地化を考慮していないCase1の場合に比べ、水流が外岸に押しやられ、その影響により外岸が浸食される箇所も見られる。図-10に陸地化しないモデル (Case1), 浮き州となってから0.1分後に陸地化するモデル (Case3), 30分後に陸地化するモデル (Case4) での川幅の時間変化を示す。ここでの川幅は全断面を平均した値である。グラフから分かるように、川幅はハイドログラフにあわせるように拡大、縮小を繰り返す。中でも、陸地化を考慮したCase3, Case4では、流量増加時に川幅が広がり低下時に縮小するという、流量に追従してそれに適した川幅が自動的に形成される様子が再現されている。川幅の流量追従性はモデルの陸地化時間によって変化し、30分としたCase4では図のように緩やかに追従するのに対し、0.1分としたCase3では、流量変化後1時間以内に川幅変化がほぼ収束する。

(2) Slump Blockの影響による河道の比較

図-11にSlump Blockの影響を考慮していないモデル (case1), Slump Blockの影響を考慮したモデル (case2) の川幅の時間変化を示す。Case1とCase2の結果を比べると、陸地化を考慮していないため、小流量時に川幅の変化は

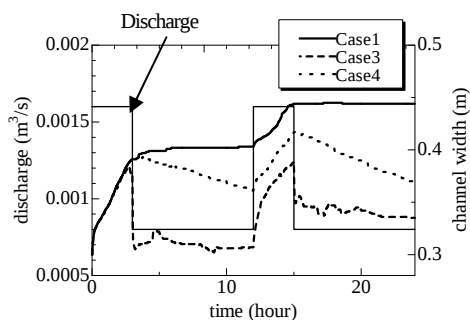


図-10 ハイドログラフと川幅の時間変化
(陸地化の時間比較)

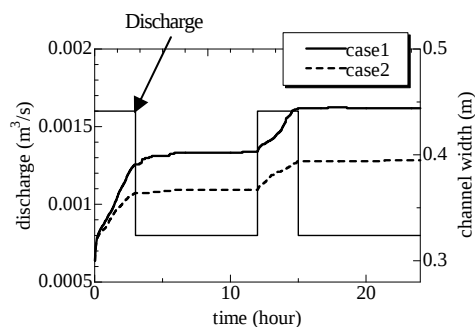


図-11 ハイドログラフと川幅の時間変化
(slump blockの有無の比較)

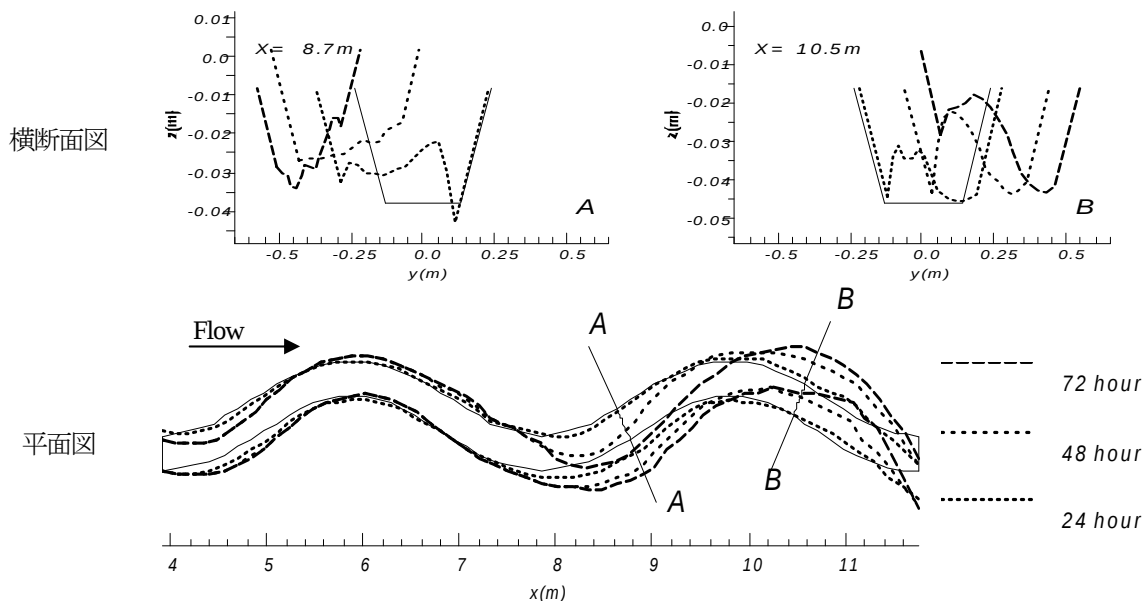


図-12 河道平面形状の変化と横断面図

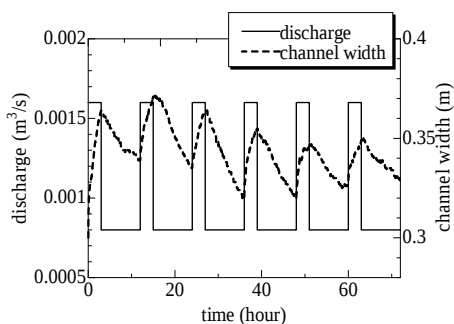


図-13 ハイドログラフと川幅の時間変化

みられないが、大流量時の川幅拡大過程でSlump Blockの影響がみられる。すなわち、図に示した24時間経過後で、Case1の川幅拡大量がCase2に比べ5cm程度大きい。このことから流量増加時におけるSlump Blockの生成により河岸浸食が抑えられているのがわかる。

(3) 自由蛇行の発達過程

陸地化とSlump Blockの影響を考慮した長時間の計算を行い自由蛇行の再現性を検討した。計算条件はCase5と

同一とし、計算時間72時間とした。図-12は河道の平面形状とA、B断面の横断面図である。なお、上流側の1波長については上流端境界条件の影響を強く受け、蛇行の発達が抑えられたため、下流側2波長分の結果を示すこととする。計算開始後24、48、72時間のいずれの時点においても、川幅が大きく変化することなく蛇行が進行し、初期形状から50cm程横断方向に浸食発達しているのがわかる。図-13は、この計算におけるハイドログラフと川幅の時間変化を示したものである。流量増加時には、Slump Blockにより浸食が抑えられているものの、浸食が堆積を上回り拡幅が起きているが、流量減少時には、大流量時にできた堆積が小流量時に浮き州となって陸地化が進行し川幅が縮小するため、全体として川幅がほぼ一定に保たれている。川幅は流量の増加時に河岸浸食による増大、流量減少時に陸地化による縮小を繰り返すという傾向があり、その繰り返しの自由蛇行が発達していく。また、本数値計算により自由蛇行の発達過程においては外側の河岸と内側の河岸は互いに独立して移動するという特性が示された。以上の結果は、実河川においては、洪水や融雪などの流量増加時における河岸浸食

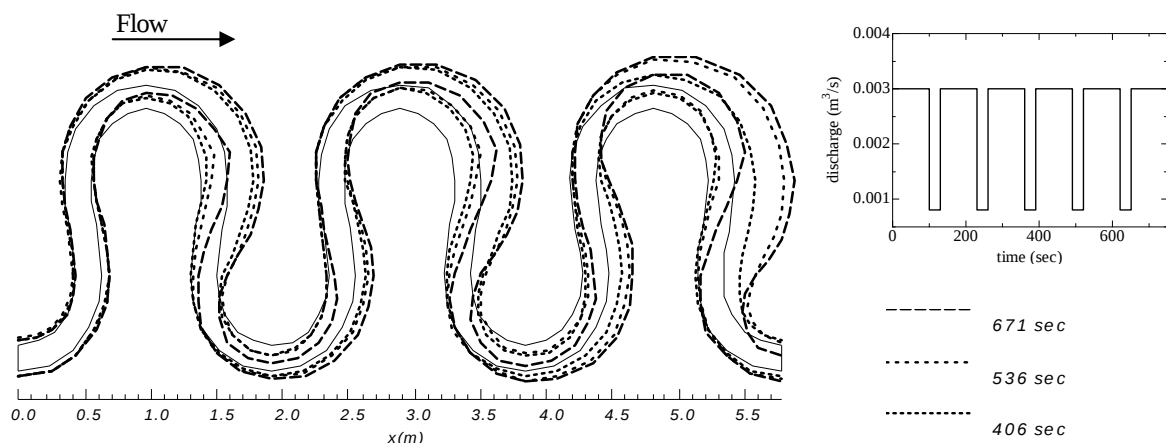


図-14 蛇行角が大きい場合の河道平面形状の変化とハイドログラフ（初期蛇行角： 100° ）

によるSlump Blockの生成と、平常時においては洪水時に堆積した土砂の植生を伴う陸地化という二つのメカニズムを繰り返すことで自由蛇行が発達しているということを示唆している。

(4) 急蛇行角を有する河川への適用

計算の初期形状をある程度蛇行発達したと仮定し、起点蛇行角： 100° 、蛇行波長：5.17m、水路幅：0.2m（横断方向格子10分割）として、最大流量 $0.003\text{m}^3/\text{s}$ を100秒、最小流量 $0.0008\text{m}^3/\text{s}$ を30秒間繰り返し与え、計750秒間計算を行なった。図-14に最も陸地化が進行した406、536、571秒後の計算結果の平面図とハイドログラフを示す。計算時間短縮のために低流量時間を短くしているが、陸地化に要する時間を1秒とすることで、各周期の陸地化進行度合いは図-6のハイドログラフの場合と同程度となった。これにより低流量時期が長い場合の計算を短縮して効率よくできる。また、Slump Blockの影響は考慮に入れていない。その他の条件は(1)～(3)の計算条件と同じである。川幅は部分的に広がる箇所が見られるものの、下流方向への湾曲が上流方向への湾曲に比べ大きく発達しており、図-1のような実河川に概ね近い形状が得られた。

5. まとめ

本研究ではSlump Blockと陸地化の影響をそれぞれ考慮した自由蛇行の発達過程に関する数値解析モデルを構築、検証した。その結果、外側の河岸と内側の河岸が独立して移動することで川幅をほぼ一定に保ったまま自由蛇行が発達していく様子を示すことができた。この結果は、川幅の拡大・縮小は流量変動に影響されるというPIZZUTOによる報告とも一致している。したがって、拡幅を生じることなく自由蛇行の発達している河川においては、外岸における粘性層の影響によって河岸侵食が抑えられ、また内岸における植生の繁茂により陸地化が起こり、河岸の移動のバランスが保たれているのではな

いかと推察される。また、今回の計算モデルにおいては、Slump Blockと陸地化、双方の影響を考慮に入れることで、長時間安定した計算を行なうことが可能となり、河川形状の長期的予測において有効なツールとなりうることを示された。

ただし、Slump Blockの影響の定量的な評価には未だ至っておらず、 A_{chunk} 、 D_{chunk} および H_c 等のパラメータ値の同定について課題が残る。また、陸地化したと見なすまでの時間スケールについてもさらに検討を要する。

本研究では自由蛇行の発達過程について妥当な計算例を示すことができたが、今後更に適用例を増やし、実験や現地観測などと比較することで計算モデルの妥当性を検討していきたい。

参考文献

- 1) 池田駿介, Parker, G., 沢井健二：河川の蛇行に関する統一見解, 第24回水理講演会論文集, pp.339-349, Feb, 1980.
- 2) 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.
- 3) 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, 水工学論文集第40巻, pp.921-926, 1996.
- 4) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, M., 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, 水工学論文集第40巻, pp.927-932, 1996.
- 5) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, M., Rahman：河岸侵食過程における流砂の非平衡性を考慮した流路変動の数値解析, 水工学論文集第41巻, pp.921-926, 1997.
- 6) 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, 水工学論文集第47巻, pp.643-648, 2003.
- 7) 藤田光一：河道セグメント2における川幅縮小のメカニズムと予測技術, 第43回水工学に関する夏期研修会, 講演原稿, 2007.
- 8) 関根正人, 西森研一朗, 藤尾健太, 片桐康博：粘着性土の侵食進行過程と侵食速度に関する考察, 水工学論文集第47巻, pp.541-546, 2003.
- 9) JAMES E. PIZZUTO：Channel adjustments to changing discharges, Powder River, Montana, Geological Society of America Bulletin, 1994.

(2008. 9. 30受付)