

蛇行低水路掘削に伴う中小河川の形状変化過程

MORPHOLOGICAL CHANGES OF A SMALL RIVER AFTER EXCAVATION OF THE MEANDERING LOW-FLOW CHANNEL

長田信寿¹・内倉嘉彦²
Nobuhisa NAGATA and Yoshihiko UCHIKURA

¹正会員 博(工学) 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ・インターナショナル (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

From river management point of view, it is important to forecast morphological behavior after river modification work such as straightening, widening and excavation. However, little is known about the influence of artificial impact on channel processes, especially in small rivers, because of lack of data. Therefore, in order to supply the information mentioned above, we investigated morphological changes after river channel improvement work in an actual river. In this paper, we deal with temporal changes of bed configuration after excavation of the meandering low-flow channel which was carried out in the Yamamori River. By field survey, we examined the plan form variation of low-flow channel, the bed profile in the longitudinal direction and the grain-size distribution of bed materials. The significant difference of discharge, which is one of the main features of floods in small rivers, leads to considerably different morphological behaviors. This channel morphology was analyzed by the numerical model, and channel processes in the Yamamori River were explained on the basis of the numerical results.

Key Words : River improvement, small river, numerical analysis, excavation of low-flow channel, non uniform sediment, non-equilibrium sediment transport

1. はじめに

近年, 河道改修を行う場合においても, 環境に配慮した工法あるいは河道形状が求められるようになってきた。しかし, 改修後の流路形状変化についての情報が少なく, その影響・効果の予測が難しいため, 計画・施工においては, 試行錯誤の繰り返しであるのが現状である。そこで本研究は, 今後の河川計画において重要と考えられる, 改修に伴って生じるその後の形状変化に関する基礎資料を提供することを目的とする。ここでは, 河道改修として低水路掘削を取り挙げ, 実際に蛇行低水路掘削を行った由良川水系の山森川を対象に, 改修後の流路変動過程について, 現地計測および数値解析により検討を行う。

2. 対象河川の概要

研究対象とした山森川は, 京都府北部の美山町を流下し, 由良川支川棚野川へ合流する河川である。調査対象地点は, 図-1に示すように, 山森川が棚野川に合流する直前の区間であり, 当地点で河床勾配は約1/125, 流域面積は17.6km²である。山森川および棚野川は, 昭和30年代に取水効率向上のために河床全体を嵩上げすると同時に拡幅を行った。その後, 拡幅に伴う掃流力の減少が

原因の一つと推察されるつるよしの異常繁茂が生じた。河道内に異常繁殖したつるよしは, 治水の観点からも, および景観的にも好ましくなく, それに伴う河川水面への日照量の減少が河川生態系に及ぼす悪影響も懸念されている。また, 平常時においても川幅全体に浅い水流があるため, 河道内に立ち入ることが難しく, つるよしの伐採などの河川の維持管理も困難であった。

このような状況を背景として, 両河川で行われた河道改修では, 低水路を掘削することにより, 流速・水深が, 常時, ある程度以上の状態を保持し得る領域を河道内に, 設け, つるよしの河道全体への侵入の抑制を図った。

まず, 棚野川では, 河道中央に直線状の低水路掘削を行った。その結果, 水みちは確保されたものの, 低水路形状は直線のままであり, 瀬や淵などのない, 単調な流路となった。そこで, 平成9年に行われた山森川の河道改修では, 低水路掘削を行う際, 河道内の多様性の創出を目的として, 低水路平面形を蛇行形状とした。なお, このとき, つるよしは伐採しており, 高水敷はほぼ平坦に, また低水路横断面は台形断面としている。写真-1は, 施工直後の平成9年3月に, 図-1に示した「写真機設置位置」から上流向きに, 対象区間を撮影したものである。当区間は, その後の出水によって, 河道形状に変化が生じた。次節では, その変化過程について検討する。

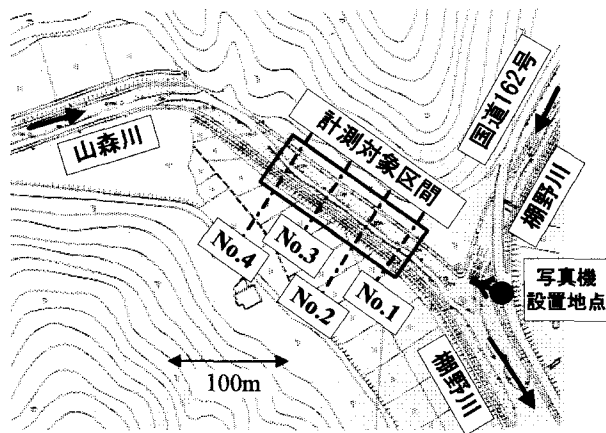


図-1 対象区間の概要

写真-1 蛇行低水路施工後の状況

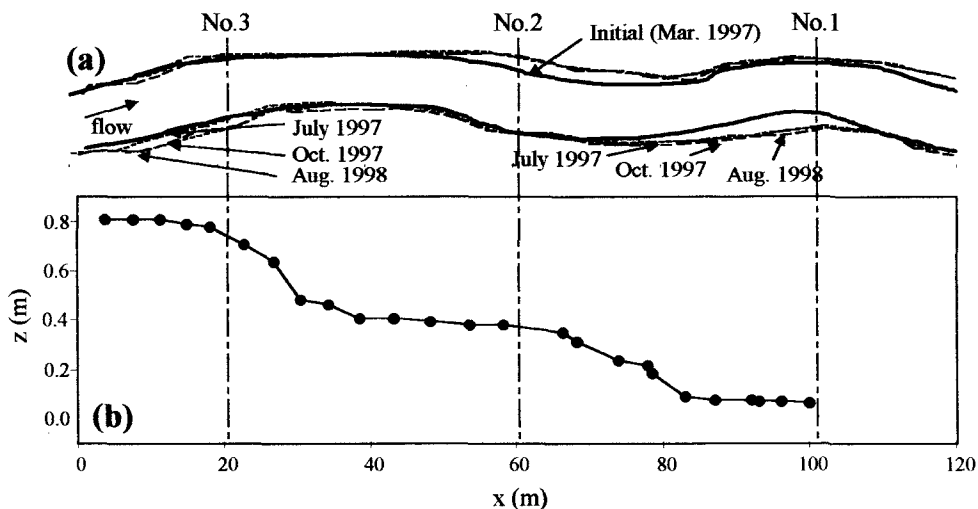


図-2 山森川対象区間の河道形状 (a) 低水路河岸線変化過程 (平成9年3月, 7月, 10月, 平成10年8月)
(b) 河床縦断形状 (低水路中央部, 平成10年8月)

3. 現地計測による改修後の形状変化過程の把握

図-1に示す対象区間で行った測量結果をもとに、改修後の形状変化過程について述べる。

まず、図-2(a)に、平面形状の変化過程を、施工後の平成9年3月から平成10年8月までを示す。図において、形状変化の初期値(平成9年3月)のみ実線で、他は点線で示している。同図より、河岸の侵食が生じているのは、No.1下流の左岸、No.1～No.2の右岸、No.2上・下流の左岸、No.3付近の右岸である。これらは、いずれも、蛇行頂部外岸の下流部が侵食されているものであり、蛇行流路の変動区分で言えば、蛇行が減衰(流路が直線化)の傾向にあると言える。ここで注目すべきことは、初期値(実線:平成9年3月)以外の形状はほぼ等しく、すなわち平成9年7月の計測以降、平面形状変化はほとんど生じておらず、河岸侵食がほぼ停止していることである。これは、現地河床の状況から、河床材料の粒度分布の変化が関係していると考えられる。すなわち、図-3に示すように、施工後から土砂交換がほとんど生じていないと考えられる高水敷部の粒度分布(資料採取においては、微細土砂の堆積の影響を避けるため表層の土砂は取り除いている)に対して、低水路部の河床材料は

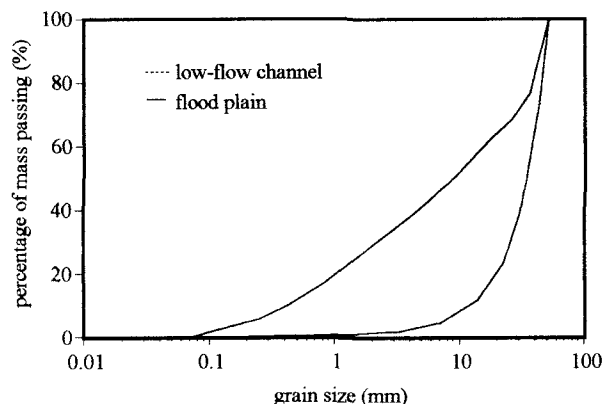


図-3 低水路・高水敷部の河床材料粒度分布

粗粒化しており、これが河岸侵食速度の減少に影響を与えたと考えられる。

次に、図-2(b)は、平成10年8月に計測した低水路中央の河床高の縦断分布である。河床縦断形は階段状になっており、この波長は、低水路の蛇行波長に対応するもので、蛇行低水路が河床の起伏の形成に関連しているものと考えられる。

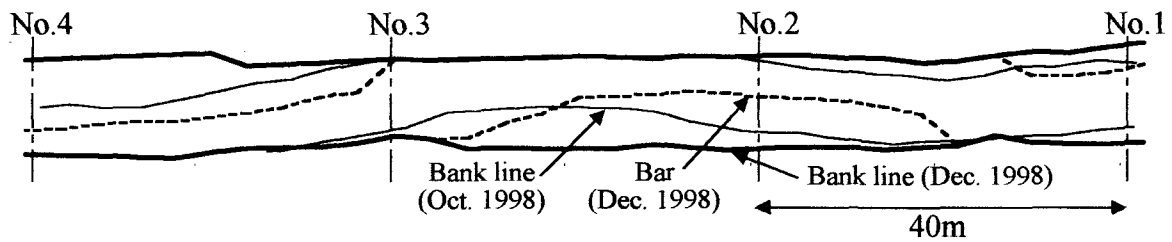


図-4 大出水後の蛇行低水路の破壊と砂州の形成

施工時から、この平成10年8月までの出水規模は、低水路満杯流量程度の比較的小規模なものであった。この出水が、図-2に示したような河道形状の変化を生じさせた。しかし、平成10年9月の出水で、低水路満杯流量を大幅に上回る流量（痕跡水位より約100m³/secと推定される）が生じた。なお、対象地点近傍の盛郷地点の降雨資料より、降雨は9月22日の14時～16時（2時間雨量100mm）に集中しており、洪水の継続時間は短いと推察される。この出水により、図-4に示すように、蛇行低水路が破壊され、新たな砂州が形成されるに至った。この新たに形成された砂州のうち、No.4下流左岸の砂州は、大規模出水以前の蛇行低水路の内岸部にあたり、この内岸高水敷に上乗せするような形で土砂の堆積が生じている。この下流のNo.2付近の右岸の砂州は、以前の蛇行低水路の蛇行頂部間の中央付近に形成されたもので、もとの低水路形状と砂州形成の関係は小さい。また、No.1～No.2の蛇行低水路内岸(左岸)の高水敷は、ほぼ消滅している。

本研究では、以上の現象を、数値解析手法を用いて検討する。次節では、その解析手法について説明する。

4. 数値解析手法

(1) 数値解析モデルの具備すべき要件

3.では、山森川における河道改修後の形状変化の特徴について述べた。ここでは、その現象を再現し、変化過程の原因を考察するための数値解析モデルについて説明する。本現象を再現するためのモデルとしては、いくつかの要件を満たす必要があると考えられる。すなわち、①河岸侵食現象を表現しうること、②混合砂を取り扱うこと（対象河川の粒度分布が広く、また形状の変化過程に粒度分布の変化が影響を及ぼしたと考えられるため）、③流砂の非平衡現象を考慮しうること（河岸侵食を伴う計算では、流砂の非平衡現象が卓越する水際部の河床変動量の算出が重要となるため）である。

(2) 計算手法

流路変動の数値解析モデルは、①流れの計算モデル、②河岸崩落・堆積モデル、③河床変動計算モデルで構成される。

a) 流れの計算モデル

河岸侵食による計算領域の時間変化に対応できるように、計算格子の時間変化を取り扱う移動一般座標系で表示された、平面2次元非定常流れの連続式と運動方

程式を用いる¹⁾。

b) 河岸崩落・堆積モデル

河岸侵食の間欠性を考慮した河岸崩落・堆積モデルを用いる²⁾。なお、ここでは、混合砂を対象としているため、河岸崩落土塊の堆積が生じた計算セルに対しては、河岸崩落により堆積したvolumeを考慮して、当該セルの河床材料の粒度分布を算出することとする。

c) 河床変動計算モデル

河岸侵食を対象とした計算において、本計算対象のように河岸高が低く、河岸材料の平均step lengthと河岸近傍河床の斜面長が同程度のスケールである場合、流砂の非平衡性を考慮する必要があると考えられる。そこで本研究では、混合砂を対象とし、流砂の非平衡性を考慮した河床変動計算モデルを構築する。

粒径別pick-up rateの算出

中川・辻本・原³⁾は、一様砂のpick-up rate推定式の限界掃流力の部分を粒径別に評価することによって、粒径別の砂粒のpick-up rateを推定できるとしており、本計算においても同様に次式を用いて算出することとする。

$$p_{si} \sqrt{\frac{d_i}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 \tau_{*i} \left(1 - \frac{k_2 \tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right)^l \quad (1)$$

ここに、 p_{si} ：粒径階iのpick-up rate、 d_i ：粒径階iの平均粒径、 τ_{*i} ：粒径階iの無次元掃流力、 τ_{*ci} ：粒径階iの無次元限界掃流力、 ρ, σ ：水・河床材料の密度、 g ：重力加速度であり、定数 F_0, k_2, l はそれぞれ中川らと同様に0.03, 0.7, 3とする。粒径別無次元限界掃流力については、芦田・道上⁴⁾による修正Egiazaroff式を用いる。

p_{si} を用いて、ある計算セルからpick upされる粒径階iの体積は次式で表せる。

$$V_{pi} = \frac{A_3 d_i}{A_2} f_{bi} p_{si} S_p \quad (2)$$

ここに、 V_{pi} ：計算セルからの粒径階iの離脱体積、 f_{bi} ：交換層（後述）中の粒径階iの含有率、 S_p ：pick up地点の計算セルの面積、 A_2, A_3 ：砂粒の2次元、3次元形状係数である。

砂粒の移動軌跡の計算

まず、斜面上の砂粒に作用する力のつり合いより、砂粒の移動方向とs-軸のなす角 ϕ の正接は次式のように表せる²⁾。

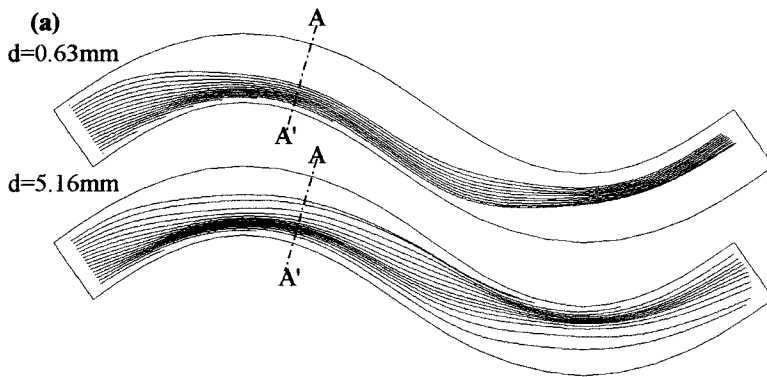
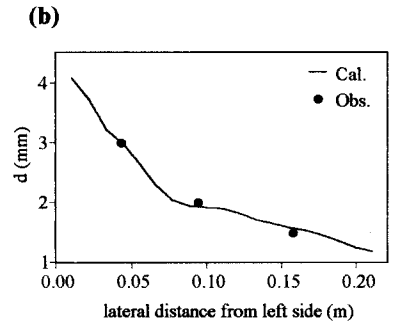


図5 検証計算結果 (a) 砂粒の粒径別移動軌跡



(b) A-A'断面における平均粒径の横断分布

$$\tan \phi = \frac{v_n}{v_s} = \frac{u_{bn}}{u_{bs}} - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\mu_s \mu_k \tau_{*i}}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \quad (3)$$

ここに、 v_s, v_n : 砂粒の移動速度の s, n - 方向成分、 u_{bs}, u_{bn} : 河床における流速の s, n - 方向成分、 z_b : 河床高、 μ_s : 河床材料の静止摩擦係数、 μ_k : 河床材料の動摩擦係数である。なお、 s -軸は主流方向、 n -軸はそれに直角方向である。上式において、河床における横断方向流速は、湾曲による2次流成分を考え、次式に示す曲率に比例する式形を用いて求めることとする。

$$u_{bn} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs} \quad (4)$$

ここに、 r : 流線の曲率半径、 N_* : 係数である。 N_* については池田⁹⁾の提示した式を用いて算出する。

一方、 x -軸と s -軸のなす角 γ は、その定義より、 x, y 方向の水深平均流速 u, v を用いて、次式で表せる。

$$\tan \gamma = \frac{v}{u} \quad (5)$$

式(3),(5)から ϕ, γ を算出すれば、砂粒の移動方向と x -軸のなす角 β ($=\phi+\gamma$) を求めることができる。この砂粒の移動方向角 β を用いて、次式により砂粒の移動軌跡を $m=1$ から逐次計算で求める。

$$\mathbf{p}_m = \mathbf{p}_{m-1} + \Delta s \cdot \mathbf{d}_{m-1} \quad (6)$$

ここに、 \mathbf{p}_m : 砂粒移動の出発地点から m 番目の砂粒の位置ベクトル (x_m, y_m)、 \mathbf{d}_{m-1} : $m-1$ 地点における砂粒の移動方向を表す単位ベクトル ($\cos \beta_{m-1}, \sin \beta_{m-1}$)、 Δs : 砂粒の移動軌跡の計算ステップ幅である。なお、初期値 \mathbf{p}_0 は pick-up rate の定義点の座標である。また、砂粒の移動距離 $s_{(m)}$ は、 $s_{(m)} = m \cdot \Delta s$ で与えられる。

depositする体積の算出

ここでは、砂粒の移動軌跡上の点において、粒径階毎に砂粒が deposit する体積を求める。ある点 j (この点での離脱体積を $V_{p(j)}$ とする) から出発した軌跡において、出発地点から k 番目の点の deposit 体積 $V_{d(j,k)}$ は、step length の確率密度関数を $f_s(s_{(k)})$ とすると、

$$V_{d(j,k)} = V_{p(j)} f_s(s_{(k)}) \Delta s \quad (7)$$

で示される。ここで、step length の確率密度関数を、次式で示す指数関数で表現する。

$$f_s(s) = \frac{1}{\Lambda_i} \exp\left(-\frac{s}{\Lambda_i}\right), \quad \Lambda_i = \lambda d_i \quad (8)$$

ここに、 Λ_i : 粒径階 i の平均 step length、 λ : 定数である。Nakagawa, Tsujimoto and Nakano⁶⁾ は、実験結果より、混合砂での λ は一様砂での値より小さいことを指摘しており、本モデルでは $\lambda=50$ とした。

河床変動と粒度分布変動の計算

河床高 z_b の変動、および粒径階についての河床変動量 $\partial z_i / \partial t$ は、 V_{pi}, V_{di} を用いて次式より算出する。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial t}, \quad \frac{\partial z_i}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} (V_{di} - V_{pi}) / S \quad (9)$$

ここに、 S : 計算セルの面積、 A_1 : 砂粒の1次元形状係数である。

また、混合砂礫床において砂粒の移動が生じるのは河床表面のごく薄い層 (交換層) であると考え⁷⁾、その交換層の厚さを θ_E とし、次式で河床の粒度分布の変動を求める。

$$\frac{\partial f_{bi}}{\partial t} = \frac{1}{\theta_E} \frac{\partial z_i}{\partial t} - \frac{1}{\theta_E} \frac{\partial z_i}{\partial t} (\zeta f_{bi} + (1-\zeta) f_{bi0}) \quad (10)$$

ここに、 f_{bi0} : 原河床の粒径階 i の含有率であり、 ζ は $\partial z / \partial t > 0$ のとき $\zeta=1$ 、 $\partial z / \partial t < 0$ のとき $\zeta=0$ である。

(3) モデルの検証

本手法の適用性の検証のため、芦田らの混合砂を用いた蛇行流路の変動実験 Case2⁸⁾ に本モデルを適用した。まず、図-5(a)は、計算において設定した粒径階のうち、最小粒径階 ($d=0.63\text{mm}$) と最大粒径階 ($d=5.16\text{mm}$) に関する砂粒の移動軌跡の計算結果である。同図では、小さい粒径の砂粒が内岸側へ、粗い砂粒が外岸側へ移動しており、これは芦田らが実験で指摘した砂粒の移動軌跡の特徴と合致する。また、図-5(b)に示した A-A' 断面 (図-5(a)参照) における交換層中の平均粒径の横断分布より、本モデルの再現性は良好であると考えられる。

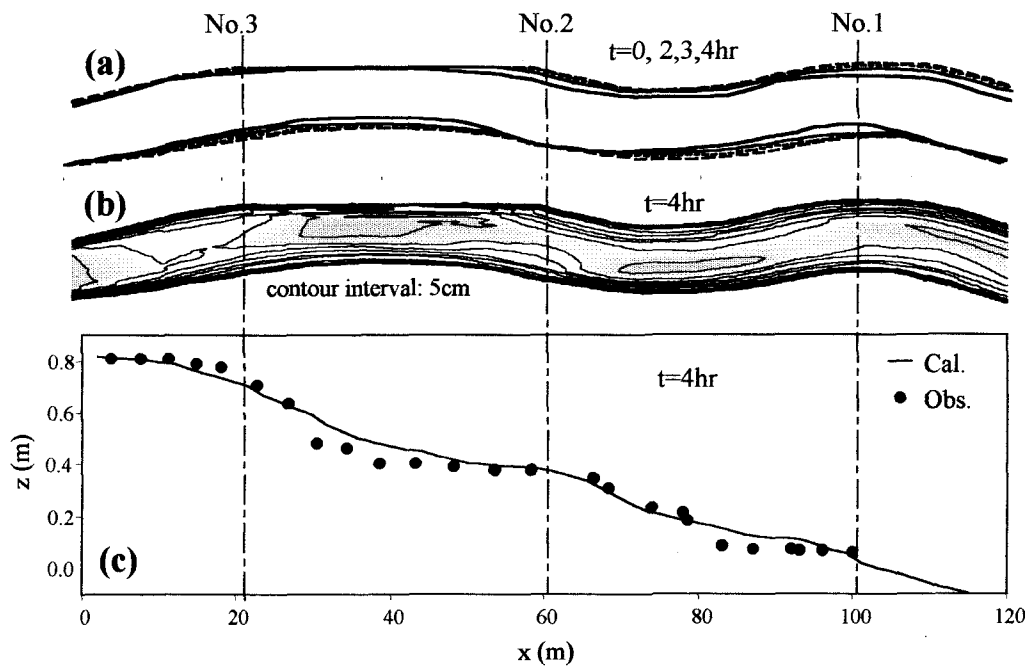


図-6 小出水を対象とした計算結果 (a)低水路河岸線変化過程, (b)河床コンター, (c)河床縦断形状

5. 数値解析結果と考察

(1) 計算条件

4.のモデルを山森川に適用する。まず、計算初期低水路形状として、平面形状は前出図-2に示した施工後（平成9年3月）の形状を用いることとし、また、横断形状は、No.1～No.3断面の施工後の測量成果から、その平均的な諸元（河岸高72cm、河岸斜面角25°）を有する台形断面とした。初期の河床縦断勾配は、実測データを参考に1/125とした。初期河床材料については、図-3に示した粒度分布のうち、施工後の状態に近いと考えられる、表層を取り除いた高水敷部の粒度分布を用いることとした。

計算条件として与える流量・水深については、詳細なデータがなく設定が難しいが、ここでは、3.で述べたように、低水路満杯流量程度の出水と、それを大きく上回る出水で、著しく流路変動過程が異なることから、それぞれの特徴を再現・把握するため、Case 1：流量4m³/sec、Case 2：流量100m³/secの2ケースの計算を行う。なお、Case1は低水路河岸高をやや下回る程度の流量であり、Case2の流量は平成10年9月出水の痕跡水位より設定したものである。

また、No.2～No.3の左岸については、現地河川においてコンクリートブロックが設置されていたため、この区間についてのみは河岸侵食が生じないものとした。

(2) 解析結果とその考察

図-6に、Case1の計算結果を示す。図-6(a)は河岸線平面形状の変化過程（初期および計算開始後t=2hr, 3hr, 4hr）、(b)は河床コンター（t=4hr；初期低水路底面からの高さをコンター間隔5cmで表示）、(c)は低水路中央部

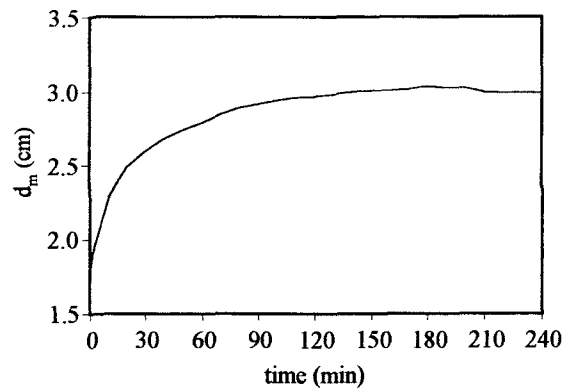


図-7 平均粒径の時間変化（低水路）

の河床縦断形状（t=4hr）である。まず、河岸線平面形状については、図-2に示した実測結果と同様に、蛇行頂部の下流側で河岸侵食が生じ、流路は時間的に直線化する傾向を示しており、その侵食速度は徐々に減少している。この侵食速度の減少に関係すると推察された（3.参照）低水路の河床材料の時間変化については、計算においても、図-7に示すように粗粒化が進行しており、平均粒径 d_m の変化がほぼ一定となったときの $d_m = 3.0\text{cm}$ は、図-3で示した現地低水路の河床材料の $d_m = 3.4\text{cm}$ に近い値となっている。

次に、(b)、(c)に示した河床形状については、蛇行部外岸で深掘れが生じており、縦断的には深掘れ部の上流で急勾配の河床となっている。現地においても、縦断勾配の大きいNo.3付近、No.2下流付近は、瀬となっており、河床高平面分布から瀬と淵の関係を見ると、いわゆるBb型の河川形態を形成している。そのような観点からは、2.で述べた棚野川における直線状の低水路掘削で生

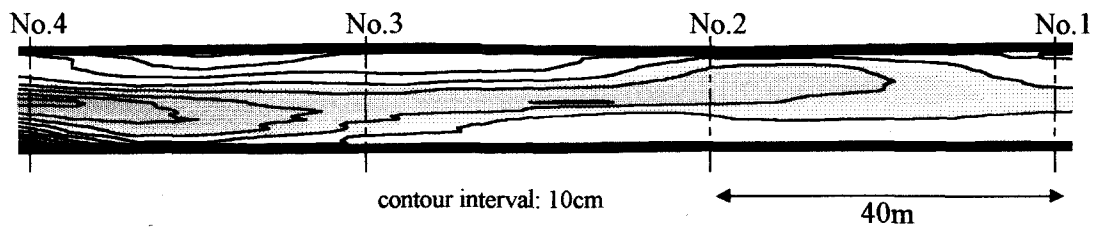


図-8 大出水を対象とした計算結果 (河床コンター)

じた単調な河川よりは、山森川における低水路の蛇行掘削は、多様性を有する河川を創出したと考えられ、それは数値解析モデルでも予測が可能であったと言える。

以上の形状変化は、小規模な出水を対象とした場合であるが、図-4に示したように、低水路河岸高を大幅に上回る出水が生じた場合は、形状変化過程が前述のものと大きく異なる。図-8に、Case 2の計算結果 ($t=2hr$) を河床高コンターとして示す。同図と図-4を比較すれば、高水敷であった部分については、その河床高が低下する傾向にあり、低水路と高水敷の境界が明確でなくなっていることが分かる。特に、上流部 (断面No.3~No.4) と比較して、下流部 (断面No.3より下流) 右岸の方が、その傾向が顕著である。上流湾曲部が存在する場合は、それが下流の砂州形成に影響を及ぼすが⁹⁾、本現象も対象区間直上流の湾曲部 (図-1参照) が、前述の河床変動に影響を与えたと考えられる。すなわち、湾曲部の右岸固定砂州に対応する位置にあったと思われるNo.3~No.4にかけての左岸高水敷は、その高水敷の形状を比較的維持して砂州が形成されている。しかし、その下流にあった右岸高水敷については、上流からの砂州の波長に対応せず、河床が均されたものと考えられる。実測された出水後の砂州位置 (図-4) と計算結果の堆積位置を比較すると、No.3~No.4にかけての左岸砂州が、実際よりも流下方向に伸長された計算結果となっているが、上述の河床変動の特徴は概ね表していると考えられる。

6. おわりに

中小河川では、出水による流量の変動幅が大きく、河道の計画、特に環境に配慮し自然の営力による形状変化を許容するような計画を行う場合は、河道形状の決定は難しい。

山森川においては、本研究で述べたように、出水規模が小さい場合、低水路の蛇行形状は、施工後しばらく直線化する傾向にあるが、徐々に河床材料が粗粒化され河岸侵食速度が減少するため、低水路蛇行形状は維持される (山森川対象区間では、施工後1年半にわたって蛇行形状が維持されていた)。しかし、低水路河岸高を大幅に上回る大規模な出水が生じた場合は、低水路形状とは無関係に、その場の河道特性に見合った砂州が形成され、特に上流湾曲部などが存在した場合は、その影響を受けた砂州形成が生じる。

河道計画を行う際に、どの程度の流量を対象とするのかを、まず決定すべきであろうと思われるが、その場合、それぞれの出水規模による河道形状の変化過程の予測モデルの構築は重要であろう。そのような観点から、本手法は、簡便性・再現性に改良すべき点が残されているものの、小出水・大出水のいずれのケースの変動過程についても、その特徴を再現しており、現在の中小河川における、環境に配慮した河道改修事業の試行錯誤的な現状に対しては、有用な資料を提供し得る可能性があるものと考えられる。今後、計算精度・汎用性を向上させ、より詳細な検討を行い、中小河川の河道改修と形状変化の応答などに関する一般的な特性を把握していきたい。

謝辞: 本研究を行うにあたり、京都府周山土木事務所および水建設コンサルタントには、資料の提供等でご協力いただきました。また、山森川の計測にあたっては、京都大学大学院修士課程・道端浩司君、若公崇敏君にご助力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄: 河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.23-40, 1999.
- 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) 中川博次, 辻本哲郎, 原 稔明: 混合砂れき床面の粗粒化過程について, 京大防災研究所年報, 第20号, B-2, pp.259-273, 1971.
- 4) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂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.
- 5) 池田駿介: 移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について, 土木学会論文報告集, 第229号, pp.55-65, 1974.
- 6) Nakagawa, H., Tujimoto, T. and Nakano, S.: Characteristics of sediment motion for respective grain sizes of sand mixtures, *Bulletin, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol.32, pp.1-32, 1982.
- 7) 平野宗夫: Armoringをとまなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.
- 8) 芦田和男, 江頭進治, 劉 柄義, 梅本正樹: 蛇行河川におけるSorting現象および平衡河床形状に関する研究, 京大防災研究所年報, 第33号, B-2, pp.261-279, 1990.
- 9) 長田信寿, 村本嘉雄, 内倉嘉彦, 細田 尚, 矢部昌之, 高田保彦, 岩田通明: 各種河道条件下における交互砂州の挙動について, 水工学論文集, 第43巻, pp.743-748, 1999.

(1999. 9. 30受付)