

砂州地形に誘発された蛇行発達

DEVELOPMENT OF A MEANDERING CHANNEL CAUSED BY A SHAPE OF THE ALTERNATE BARS

永多 朋紀¹・渡邊 康玄²・安田 浩保³・伊藤 丹¹

Tomonori NAGATA, Yasuharu WATANABE, Hiroyasu YASUDA, Akashi ITO

¹ 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

² 正会員 工博 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒 090-8507 北見市公園町 165)

³ 正会員 工博 新潟大学准教授 災害・復興科学研究所 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

In September 2011, the largest discharge in recorded history was observed in Otofuke River, causing riverbank erosion in various parts of the basin. Damage was especially serious in the middle reaches, where part of a dike was completely washed out. The results of a survey suggested that the cause of the dike breakage was bank erosion associated with the development of a meandering channel. As the related development mechanism and predominant factors have not yet been clarified, this remains a priority for disaster prevention. In this study, the meandering-channel development process was reproduced using a slope failure model that linked bank erosion with bed fluctuations. The study attempted to clarify the meander development mechanism and predominant related factors based on this model.

Key Words: bank erosion, meandering channel development, alternate bars, numerical analysis

1. 序論

平成 23 年 9 月、梅雨前線の停滞に伴う記録的な豪雨により、十勝川水系音更川では既往最大規模の流量が観測され、流域各所で大規模な河岸侵食が発生した。侵食被害が最も顕著であった中流域左岸 KP18.2 付近では、堤防の一部区間がほぼ完全に流出するまでに至った。事後調査から、破堤の直接的な原因は、低水路内に形成された流路の蛇行発達に伴う河岸侵食であることが明らかとなった。しかし、これほど大規模な蛇行発達は過去にも例が無く、その発達メカニズムや支配的要因は未だ十分に解明されていない。今後の対策にあたっては、蛇行発達機構の解明は喫緊の課題である。

今回の洪水の最大の特徴は、低水路満杯規模の流量が長時間に亘って継続したことにある。このことは、出水期の河道変化が直線的な低水路内を流れる流水の作用に支配されていたことを意味しており、砂州の発達機構との関連が示唆される。一方、出水後の流路線形は、低水路河岸の侵食によって堤々間を大きく蛇曲する単列状の流路が形成されており、蛇行流路の発達機構との関連も同時に示唆される。すなわち、当該洪水で生じた蛇行発達は、直線水路内で起きるような砂州の発達機構と、蛇行流路の発達機構との相互影響下で生じた可能性が考えられる。

これまで行われてきた砂州に関する研究としては、渡邊らによる弱非線形安定解析を用いた砂州のモード解析¹⁾などがあり、直線水路内における砂州の移動・発達やモード減少過程については多くの有益な知見が得

られている。しかし、河岸の平面形状が侵食によって大きく時間変化するような場合に生じる砂州形態の変化については、研究事例は少なく現象の理解が十分であるとは言えない。

また、蛇行に関する研究としては、清水らによる数値解析モデルを用いた自由蛇行に関する研究²⁾が挙げられる。このモデルでは、河床低下によって斜面が一定の限界角度を越えた際に河岸が自然崩落するものし、限界角度を保つように河岸を後退させることで河岸侵食現象を良好に再現している。また、河岸侵食の進行とともに蛇行頂部内岸側の砂州は樹林化によって陸地化するものと仮定し、逐次計算領域から棄却することで、流路が初期の河道幅を維持したまま蛇行発達するプロセスを再現している。しかし、今回の洪水では、出水期間中、蛇行流路のみならず砂州を含めた低水路内全域で河道が変化していることから、砂州の移動・発達に伴う影響も常に考慮する必要がある。

以上より、本研究では上記モデルを計算領域全体に適用した斜面崩落モデル³⁾を用いて、低水路河岸の侵食に伴う蛇行流路の発達機構の解明とその支配的要因の分析を試みる。検討に際し、まず、定常流量下の模型実験を行い、その結果から解析モデルの適正化を行う。次に、実験結果と解析結果とを比較し、現象の再現性を検証するとともに定常流量下の蛇行発達特性を整理した。さらに、当該洪水の流量ハイドロを与えた数値実験を行い、非定常流量下の蛇行発達特性と砂州地形がもたらす効果について分析を行った。

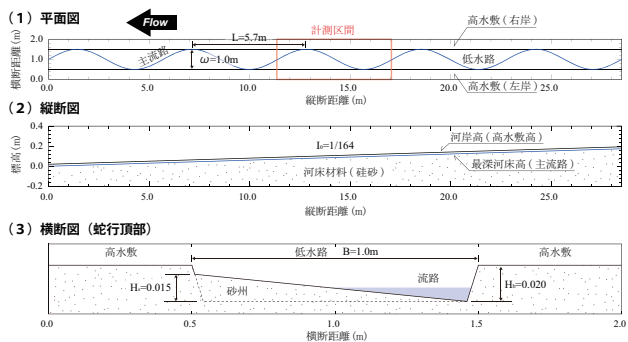


図-1 実験水路 ($s = 1/100$)

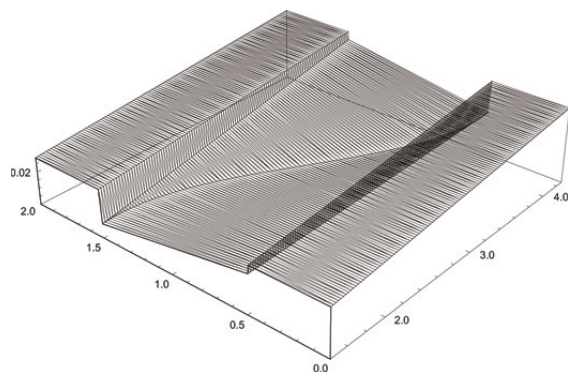


図-2 初期河床形状 (1/4 波長分)

表-1 実験条件 ($s = 1/100$)

実験番号	流量 (L/s)	粒径 (mm)	通水時間 (h)
CASE 1	2.0	0.5	6
CASE 2	3.0	0.5	6

2. 模型実験

解析モデルの再現性を検証するため、定常流を対象とした縮率 $s = 1/100$ の移動床水理模型実験を行った。実験水路の施設概要を図-1 に、初期河床として与えた砂州地形パターンを図-2 に、実験条件と当該条件下における砂州形態区分を表-1 及び図-3 に示す。

(1) 実験条件

実験施設上の制約から模型の縮率を $1/100$ とし、フルード則より各種実験条件を設定した。蛇行流路の平面形は、平成 23 年 9 月洪水前の航空写真をもとに、被災箇所周辺の流路線形を、波長 $L = 5.7m$ 、振幅 $\omega = 1.0m$ の周期波で近似し、最深河床部を図-1 上段に示すような線形とした。また、蛇行頂部の横断面形は、平成 21 年の測量結果から、低水路幅 $B = 1.0m$ 、砂州波高 $H_s = 0.015m$ 、河岸高 $H_b = 0.02m$ とし、図-2 に示すような単列交互砂州状の単純な地形を与えた。実験ケース間の違いは流量のみで、各流量における砂州形態区分は、いずれも複列砂州の発生領域に区分される (図-3)。また、河床材料の粒径は、昨年の現地調査結果をもとに流心部の d_{60} の平均値から $d = 0.5mm$ とした。

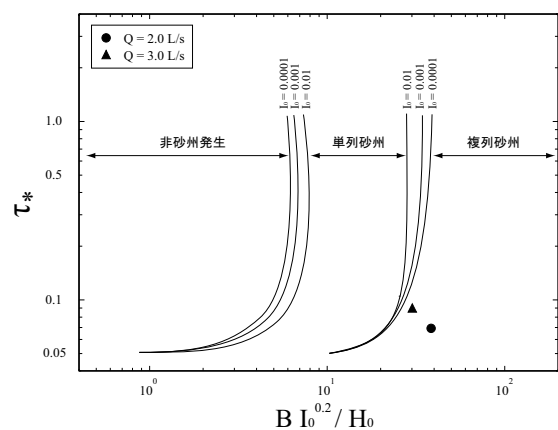


図-3 砂州発生領域区分図

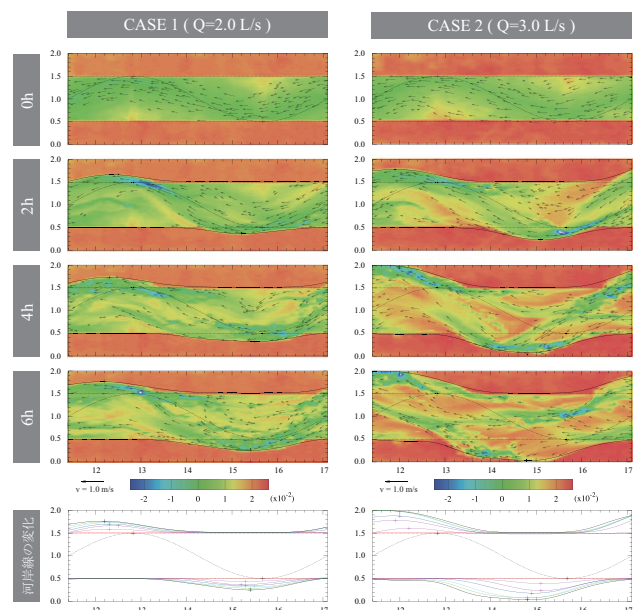


図-4 計測区間の河床高・河岸線の時系列変化

(2) 実験結果・考察

実験では、図-1 上段の赤枠で示す範囲を計測区間とし、河床高、水深、表面流速を測定した。図-4 はこの計測区間における河床高および河岸線の時系列変化で、黒矢印は表面流速を示している。図から、両ケースとも砂州地形に沿った流れが徐々に河岸を侵食し、蛇行を発達させていく様子が見てとれる。また、河岸の侵食量および侵食速度はそれぞれ流量に応じた規模・速度となることわかる。

時間経過を見ると、通水初期の段階では比較的波形の整った単列状の蛇行波形が維持されているが、通水開始から 4 時間以上が経過すると、砂州上を走る流れが徐々に卓越し、流路が複列化していく様子が確認できる。流路の複列化は、水衝部の位置を容易に変化させるほか、流水のエネルギーを水路内に分散させるため、通水前半で見られたような単列状の蛇行発達、通水後半ではある程度抑制されていた可能性がある。

実験経過から、今回確認された流路の複列化は水路上流側の砂州地形の乱れに起因するものと推察された。

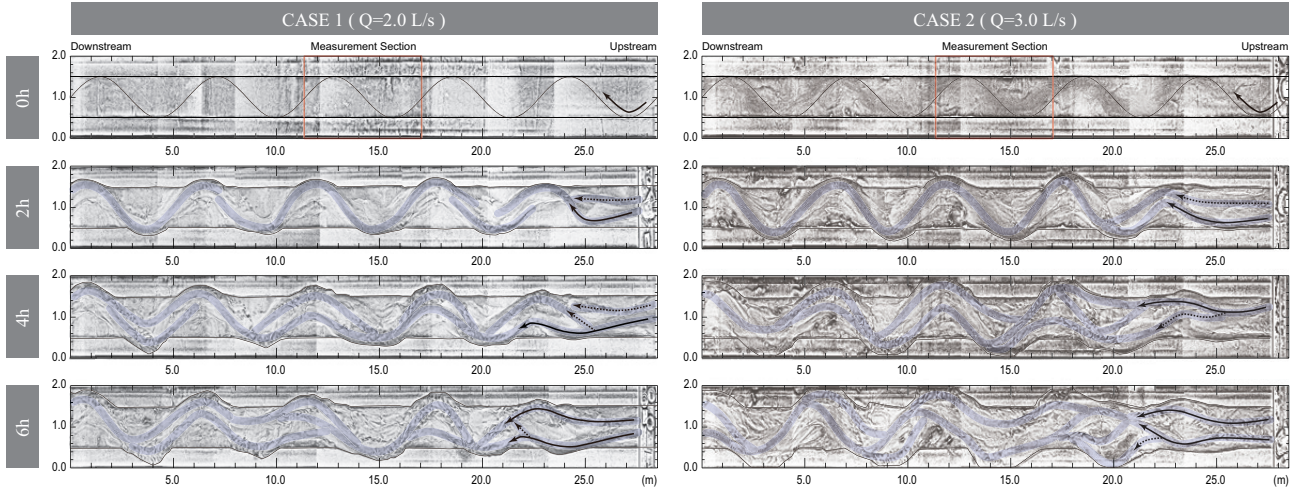


図-5 実験結果（水路全体・アスペクト比 2:1）

このことから、次は計測区間を含む水路全体の流路形成過程を確認する。

図-5 に示す写真は水路全体を 2 時間毎に撮影したもので、図中の青塗り箇所および黒矢印はともに主流路の平面線形を示している。実験では、水路上流端の河床高を動的平衡に保つように給砂管理を行っており、上流端では常に流下方向に対して並行且つ直線的な流れが形成される。CASE1, 2 の上流端付近の流路変化を見ると、上流端で生じた直線的な流れによって、通水初期とは異なる蛇行特性（波長・振幅）を持った流路が形成されており、これが時間経過とともに水路下流側へと伝播していった様子が見てとれる。上流側の乱れが下流側へ伝播するには一定の時間を要するため、CASE1 の 6 時間後の河岸平面形状にも現れているように、乱れの影響が少ない下流側ほど初期の砂州地形の影響を強く受け、河岸侵食がより進行する結果となった。

実験水路の上下流端 1 波長分は助走区間の位置づけであるが、当実験は流路の変動が非常に大きいため、図-4 で示したように、複列化の影響（蛇行発達抑制）は少なからず計測区間にも及んでいたものと推察される。

以上、今回の実験結果から、低水路内に形成された単列交互砂州が、蛇行流路の発達をもたらす一つの要因と成り得ることが確認された。ただし、上流側で生じた砂州地形の乱れとそれに伴う流路の複列化によって、通水後半では、単列状の蛇行発達がある程度抑制されていた可能性があるため、実験結果の取扱い際には、この点を十分に留意する必要がある。

3. 数値実験

実験結果から、初期河床に単列状の砂州地形を与えた場合であっても、上流側の河床に乱れが生じた場合、その影響が徐々に下流側へと伝播し、蛇行の発達が抑制されることが示唆された。複列化した流れは、不規則に分岐合流を繰り返しながら水衝部を変化させるた

め、解析上、このような複雑な流路変化を正確に予測し、河岸侵食量を定量的に評価することは非常に困難である。よって本解析では、このような乱れの影響を極力無くするため、上下流端の境界を無限遠に仮定できる周期境界条件を用いる。初期河床には実験と同じ砂州地形を与え、流量規模の違いが蛇行発達にどのような影響を及ぼすかを検証する。

(1) 解析モデル

本研究で行う解析は、北海道河川財団より無償配布されている「iRIC」及びそのソルバー「Nays2d ver4.0³⁾」を用いた。当解析モデルが扱う流れの支配方程式は、以下に示す非定常平面二次元浅水方程式と連続の式である。実際の計算には下式を一般座標系に変換した式が用いられるが、詳細については文献を参照されたい。なお、移流項の差分には CIP 法を、乱流場の計算にはゼロ方程式モデルを用いた。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (1)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 x, y : 直交座標系座標軸、 u, v : 各座標軸方向流速、 t : 時間、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度、 ρ : 流体の密度、 τ : 剪断応力、 D : 粘性力である。

式中の粘性項・拡散項は次式で与えられる。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (5)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

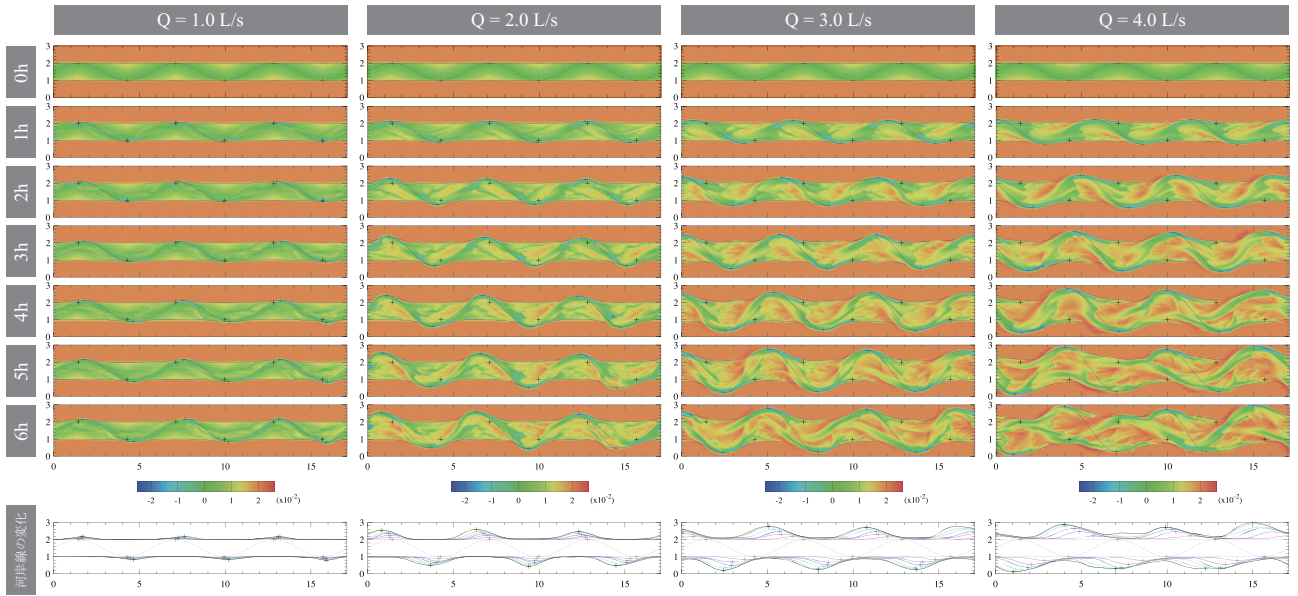


図-6 定常流の解析結果（河床高および河岸線の変化）

ここで、 n :マンニングの粗度係数、 ν_t :拡散係数である。
河床変動量は以下の流砂の連続式から算出される。なお、実際の計算では流れ同様に一般座標系に変換した式が用いられる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_b^x}{\partial x} + \frac{\partial q_b^y}{\partial y} \right] = 0 \quad (7)$$

ここで、 t :時間、 z_b :河床高、 q_b^x, q_b^y : x, y 方向の単位幅掃流砂量、 λ :河床材料の空隙率である。

(2) 解析モデルの適正化

本研究では、単一粒径のもと、掃流砂のみを対象とし、流砂量式には芦田・道上の式を用いることとした。ここで、実験で得られた流砂量の計測値をもとに流砂量式の定数を下式のように調整した。

$$q_b = 13\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_*^c}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_*^c}{\tau_*}} \right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (8)$$

ここで、 q_b :流砂量、 τ_* :無次元掃流力、 τ_*^c :無次元限界掃流力（岩垣の式）、 s_g :砂粒の水中比重、 g :重力加速度、 d :河床材料の粒径である。

水路下流端における流砂量の時間変化を図-7に示す。この図から計算値は計測値を概ね良好に再現していることがわかる。数値解析から得られた結果及び実験から得られた計測値は、ともに流砂量が時間経過とともに逓減する傾向を示した。これは、蛇行発達によって河床勾配が緩やかになることと、河岸侵食が低水路幅の増大をもたらすことに起因するものと考えられる。また、流砂量が時間経過とともに大きく振動しているのは、形成された蛇行流路の位相変化に由来するもので、河床・河岸の変動量が大きい蛇行頂部下流側が下流端に到達した際、流砂量は急激に上昇し、蛇行波形の変曲点付近では逆に減少するためである。

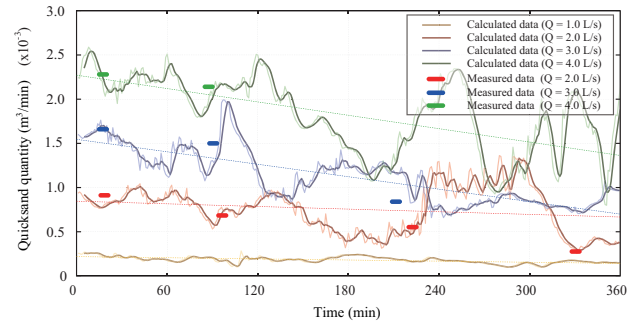


図-7 流砂量の時間変化

(3) 計算条件

粗度係数は、以下に示す Manning-Strickler による平坦河床の抵抗則から $n = 0.013$ とした。

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66 \sqrt{g}} \quad , \quad k_s = 2d \quad (9)$$

ここで、 k_s :相対粗度、 d :河床材料粒径である。

水理解析結果と水位計測値との比較から、水面形は概ね良好に再現されていることを確認した。斜面の限界角度を表す水中安息角は河岸侵食現象を再現する上で重要な定数の一つとなる。今回 $\theta = 20 \sim 30^\circ$ の範囲で試行計算を行い、河岸侵食量を実験結果と比較した結果、 $\theta = 25^\circ$ 前後で最も高い再現性が得られたことから、本解析では $\tan\theta = 0.466$ とした。

(4) 定常流量下の蛇行発達特性

以上で決定した計算条件のもと、 $Q = 1.0 \sim 4.0 \text{ L/s}$ の計4ケースについて解析を行った。結果を図-6に示す。

解析結果は実験結果同様、砂州地形に誘発された蛇行発達が、流量に応じた規模・速度で起きることを裏付けるものであった。実験結果と大きく異なる点は、解析では固定された境界条件を持たないことから、長時

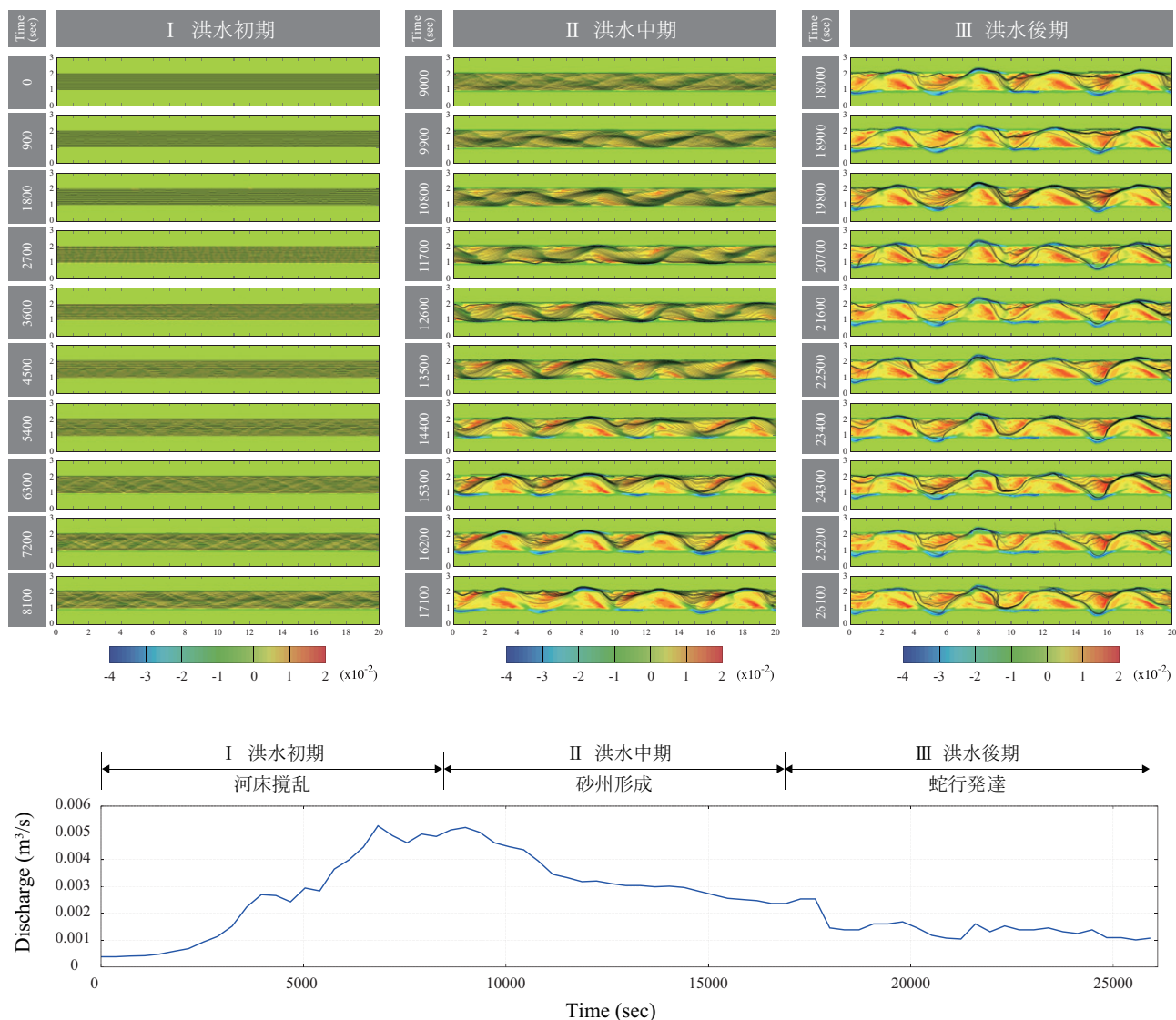


図-8 上段：非定常流の解析結果（河床高変化量および流線），下段：平成 23 年 9 月洪水の流量ハイドログラフ

間に亘って蛇行波形が整った状態で維持され、その振幅を増大させていくことである。蛇行振幅の変化は実験と比べ、やや過大に評価される結果であったが、すでに述べた通り、実験結果は上流端の乱れの影響によって本来の蛇行発達が抑制されていた可能性が高く、両者を定量的に比較するには至らなかった。また、解析上の問題として、周期境界条件のもとで現れる蛇行波形は整数以外の波数を持ち得ないことから、本来波長が徐々に変化するような現象が起きるような場合でも、波数を維持しようとする作用が働いた結果、蛇行振幅が過大もしくは過小に評価されている可能性もある。

4. 非定常流量下の蛇行発達特性

次に、非定常流量下における蛇行発達特性の分析を行う。砂州の発達機構においては、低水路内で収まる規模の流量増加は河幅水深比の低下を意味する。したがって、本来は複列砂州の河床形態に区分されるような河

川であっても、出水期の流量ハイドロを想定した場合、増水期間中に河床形態が単列交互砂州を形成するような条件となっている場合も考えられる。そこで、出水期にどのような河床形状が形成され、それがどのような過程を経て蛇行発達にまで至るのかを明らかにするため、実際の流量ハイドロを用いた試行計算を行った。

(1) 計算条件

計算はこれまでの解析と同様に 1/100 スケールで行う。まず、初期河床形状を平坦河床とし、計算領域全体に砂州の発達を促す粒径サイズの擾乱を与えた。また、音更川の被災箇所上下流 $L = 2\text{km}$ 区間を想定し、計算区間延長を $L = 20\text{m}$ とした。流量条件は平成 23 年 9 月洪水の流量ハイドロを与える。

(2) 計算結果

解析結果と流量ハイドロを図-8 に示す。得られた結果から、河道が形成されていく各段階を以下の 3 つの期間に分けて考えることとした。

- I 洪水初期：河床攪乱期間
- II 洪水中期：砂州形成期間
- III 洪水後期：蛇行発達期間

洪水初期の段階では、流量の増加に伴って河床が大きく攪乱され、やがて流れが一筋に収束していく様子が見てとれる。洪水中期の段階を時間毎に見てみると、 $Time = 9000 \sim 10800$ ($Q = 4.0L/s$ 程度, $0.5h$) では、流れがさらに収束し、蛇行流路の波形が概ね定まっていくな過程にあり、流量に応じて位相は大きく変化している。 $Time = 11700 \sim 14400$ ($Q = 3.0L/s$ 程度, $0.75h$) では、砂州が徐々に発達しはじめ、砂州波高の上昇に伴って水みちと浮洲部分が明瞭に分かれていくのがわかる。 $Time = 15300 \sim 17100$ ($Q = 2.0L/s$ 程度, $0.5h$) では、位相変化はほぼ停止し、等間隔で比較的整った単列交互砂州が形成される。このように、洪水初期から洪水中期にかけては、平坦河床から徐々に砂州が形成されていく途上段階にあり、この間は、河岸侵食を伴う蛇行発達はほとんど生じていないことから、直線水路内における砂州の発達機構が河道形成を支配していたものと考えられる。

洪水後期の段階では、洪水中期に形成された砂州地形に誘発され、蛇行流路が河岸侵食を伴いながら振幅を増大させる様子が見てとれる。しかし、既にこの段階では流量は $Q = 1.0L/s$ 程度まで低下しているため、砂州地形がもたらす蛇行発達規模および速度は、定常流の解析結果からも明らかなように、非常に緩慢且つ規模も小さいものとなった。この間、砂州の移動も若干見られるが、水みちはほぼ固定されており、概ね蛇行流路の発達機構が河道形成を支配しているものと考えられる。

本解析で大規模な蛇行発達が起きなかったのは、蛇行発達を誘発する十分な砂州が形成されるまでに、概ね洪水初期から洪水中期にかけて約 5 時間を要しており、十分な砂州が形成された時点では、既に流量はかなり低下していたことが大きな要因であると考えられる。そのため、今回の解析結果からは、流量の非定常性が砂州地形を要因とした蛇行発達にどのような影響を及ぼすかは確認することができなかった。しかし、低水路内に形成された砂州地形が蛇行発達をもたすためには、実験で与えた砂州地形のような、ある程度の波高を持った砂州が形成されている必要があり、且つ、ある程度の規模と継続時間を有した流量が必要であることがわかった。

また、本研究において実験・解析などで初期河床形状として与えた砂州地形は、このような出水ピーク前後の砂州発達過程で形成されるものと捉えることができ、初期河床に砂州地形を与えて検討を行った定常流下の蛇行発達特性は、洪水減水期に現れるような蛇行発達特性と位置づけることができる。

5. 結論

本研究では、蛇行発達を誘発する要因の一つとして、低水路内に形成された砂州地形がもたらす効果を、実験・解析を用いて検討を行った。その結果、定常流下の実験・解析からは、砂州地形が蛇行発達を誘発し、流量に応じた規模・速度で振幅が増大することが確認された。また、非定常流下の解析結果からは、低水路内に形成された砂州地形が蛇行発達をもたすためには、ある程度の波高を持った砂州が形成されている必要があり、且つ、ある程度の規模と継続時間を有した流量が必要となることがわかった。

ただし、本研究では平面二次元モデルを用いて解析を行っているため、本来、蛇行頂部外岸側などで生じるような鉛直方向の流速成分は考慮されておらず、河岸侵食量の評価には精度上の限界がある。

実河川では、河道内に残された過去の洪水の履歴（流路跡・侵食跡）や、砂州上に繁茂する樹木、護岸・水制工などの人工構造物、さらに河道・河岸の平面形状なども、洪水流を河岸方向に誘導するきっかけとして、砂州地形同様に蛇行発達に何らかの影響を与えているものと考えられる。蛇行発達に影響を及ぼすと考えられる要素を以下に列記する。

- (1) 砂州地形
- (2) 過去の洪水履歴
- (3) 河道内樹木
- (4) 護岸等の構造物
- (5) 河道・河岸の平面形状

今後、砂州地形以外の蛇行発達要因についても検討し、音更川で起きた現象の支配的要因を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 渡邊康玄：モード干渉を考慮した砂州のモード減少過程、水工学論文集, No.50, pp.967-972, 2006.
- 2) 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, No.47, pp.643-648, 2003.
- 3) 北海道河川財団：iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 4) 渡邊康玄、桑村貴志：砂州のモード減少過程水理実験への安定解析の適用、水工学論文集, No.49, pp.943-948, 2005.
- 5) 渡邊康玄、桑村貴志：複列砂州のモード減少過程に関する水理実験、水工学論文集, No.48, pp.195-200, 2004.
- 6) 渡邊康玄、桑村貴志：幅広水路における非定常流下での砂州形成実験、水工学論文集, No.47, pp.233-238, 2003.
- 7) 渡邊康玄、佐藤耕治、大山史晃：非定常流の下での砂州形成実験、水工学論文集, No.46, pp.163-168, 2002.
- 8) 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, No.40, pp.921-926, 1996.
- 9) 近藤祐介、清水康行、木村一郎：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、水工学論文集, No.53, pp.769-774, 2009.