

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：伊藤丹、永多朋紀、赤堀良介、
井上卓也、桃枝英幸

【要旨】

2011 年 9 月、台風や前線の停滞に伴う記録的な豪雨により、北海道東部の音更川では既往最大規模の流量が観測され、河道内の各所で大規模な河岸侵食が発生した。特にその中流域では、堤防の一部区間が完全に流出するほどの大きな被害を受けた。事後調査から、堤防流出の直接的な原因は蛇行流路の発達に伴う側岸侵食であると推察されたが、その発達機構及び支配的要因は未だ明らかではなく、防災上喫緊の課題である。蛇行流路の発達に関する既往の研究では、河岸侵食を河床変動に連動させた斜面崩落モデルを用いて蛇行流路の発達プロセスを良好に再現している。本研究では上記モデルを援用し、被災時の蛇行発達機構及びその支配的要因の解明を試みた。解析結果は、出水後に現れた蛇行波形の特性を良く再現するものであった。このことから、当該出水における蛇行の発達は、低水路河岸の湾曲形状によってもたらされた固定砂州がトリガーとなり、洪水時、蛇行した流れが長時間維持され、それが徐々に河岸侵食を伴いながら下流側へと伝播する過程で生じたものと推察された。キーワード：音更川、河岸侵食、蛇行発達、蛇行伝播

1. はじめに

2011 年 9 月、梅雨前線の停滞に伴う記録的な豪雨により（9 月 2 日～7 日までの総雨量で 383mm）、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 KP18.2 左岸付近では、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、堤防流出の直接的な原因は、低水路内に形成された流路の蛇行発達過程で生じた河岸侵食であることが明らかとなっている。しかし、これほど大規模な蛇行発達現象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、適切且つ有効な予防措置を講ずるにあたっては、これらの解明は喫緊の課題である。

当該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（平均年最大流量 $155\text{m}^3/\text{s}$ で約 40 時間）。このことは、出水期の河道変化が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、低水路内で起きる砂州の発達

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ある。

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。

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

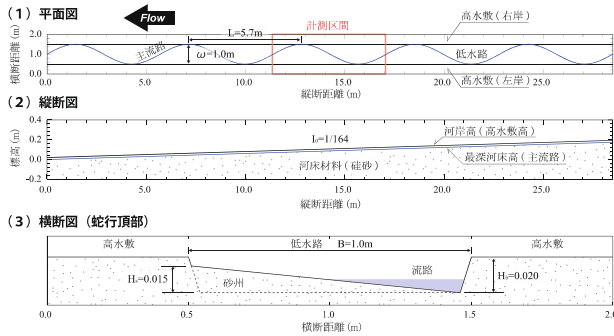


図-1 実験水路 (s=1/100)

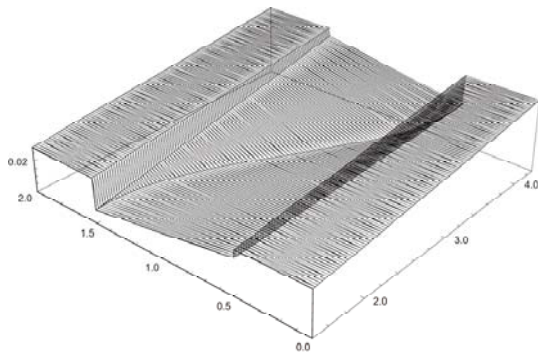


図-2 初期河床形状 (1/4 波長分)

表-1 実験水路 (s=1/100)

実験番号	流量 (L/s)	粒径 (mm)	通水時間 (h)
CASE1	2.0	0.5	6
CASE2	3.0	0.5	6

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²⁾を用いて、低水路河岸の侵食を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する。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。

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、図-3に示す。

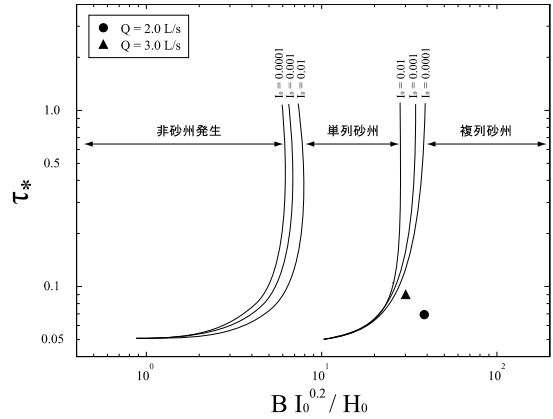


図-3 砂州発生領域区分図

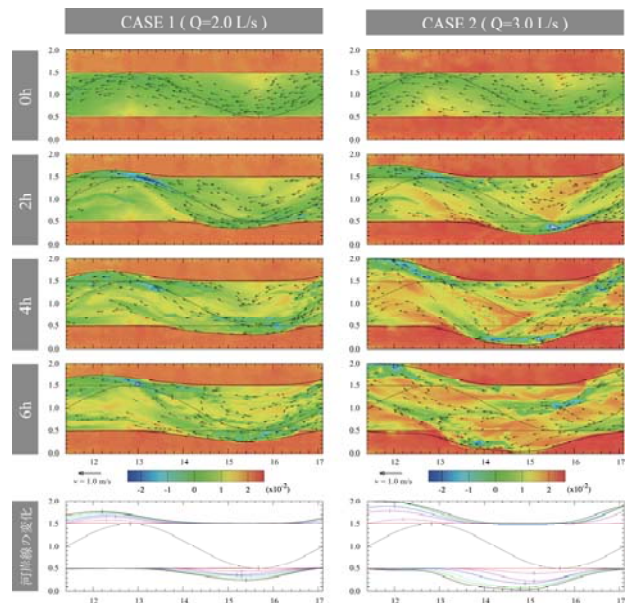


図-4 計測区間の河床高・河岸線の時系列変化

2. 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 $L=5.7\text{m}$ 、振幅 $\omega=1.0\text{m}$ 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、蛇行頂部の横断形は、平成 21 年の測量結果から、低水路幅 $B=1.0\text{m}$ 、砂州波高 $H_s=0.015\text{m}$ 、河岸高 $H_b=0.02\text{m}$ 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 $d=0.5\text{mm}$ とした。

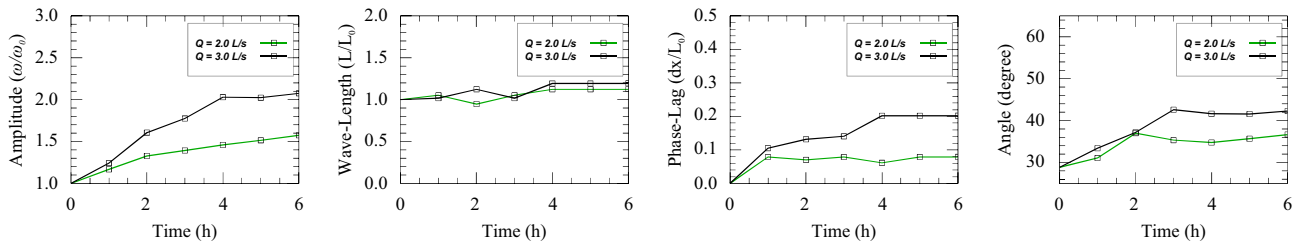


図-5 蛇行特性の時間変化（左から、蛇行振幅、蛇行波長、位相、蛇行角）

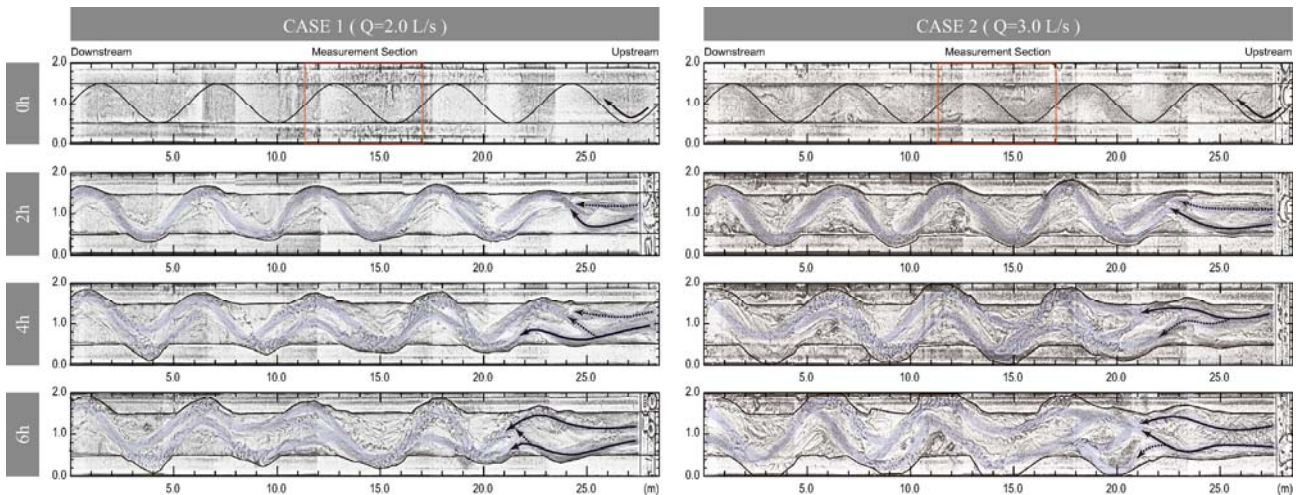


図-6 実験結果（水路全体・アスペクト比 2:1）

2. 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。図-5 は蛇行特性の時間変化を示しており、この図から、蛇行発達過程は、流量に応じた規模・速度で進行していくことがわかる。

ただし、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ことが確認できる。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、今回確認されたこのような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。

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-6 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（蛇行発達の抑制）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、実験結果の取扱いに際しては、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。

3. 1 解析モデル（水理河床変動）

本研究で行う解析は、当研究所が開発に関わっている「iRIC」³⁾及びそのソルバー「Nays2d ver4.0」²⁾を用いる。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流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。

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

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

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

ここで、 n ：マンニングの粗度係数、 v_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。

3. 2 河岸侵食モデル

本研究では、河岸侵食現象の再現に斜面崩落モデルを用いる。このモデルは、河床低下によって斜面が一定の限界角度を越えると河岸が自然崩落するものとし、限界角度を保つように河岸を後退させることで、間接的に河岸侵食現象を表現するものである。その際、土砂収支は、崩落土砂を河床低下部に埋め戻すことで整合が図られる。

このように、当モデルは河岸侵食現象を物理的に解くものではないため、解析結果が計算格子に依存するという課題もある。しかし、蛇行発達をもたらす支配的要因を抽出し、大まかな現象の理解を図るという意味では、本モデルは十分適用可能であると判断した。

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、斜面の限界角度を $\theta = 25^\circ$ とした。

3. 3 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、無次元限界掃流力には岩垣の式を用いる。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

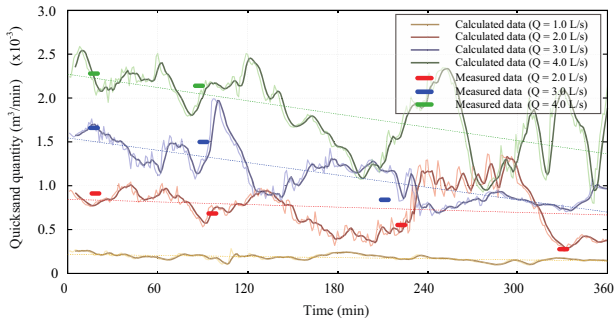


図-7 流砂量の時間変化

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、 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。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。

ここで、流砂量の時間的変化の特性について以下に追記する。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、流砂量が時間的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。

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。

3. 4 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。

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

ここで、 k_s ：相対粗度、 d ：河床材料粒径である。

設定粗度の妥当性を検証するため、通水初期の水面形を解析値と実測値で比較した結果、初期水面形は概ね良好に再現されることを確認した。

3. 5 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ケースについて河床変動解析を行った。結果を図-8に示す。

解析結果を見ると、蛇行流路が流量に応じた規模・速度で発達していく様子が見てとれ、そのプロセスは実験結果とも良く符合する。このことは、本解析モデルが砂州由来の蛇行発達現象に対して一定の再現性を有することを示している。

解析結果から得られた蛇行特性（波長・振幅・位相・蛇行角）の時間変化を図-9に示す。6時間通水後の最終的な蛇行振幅を見ると、実験から得られた

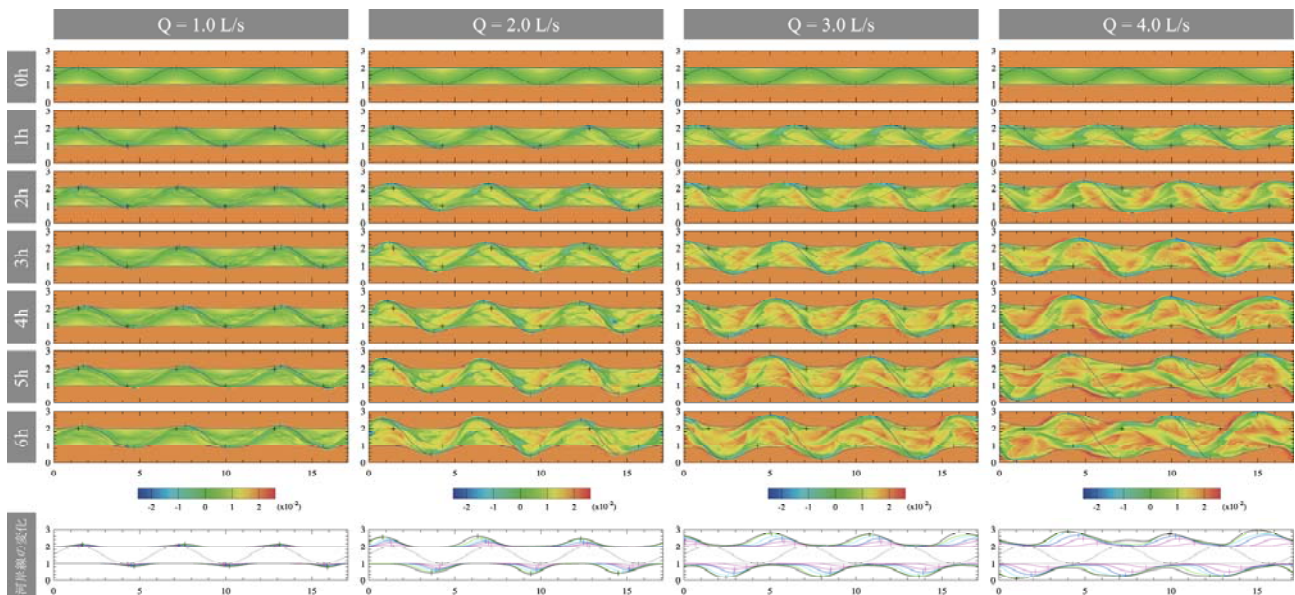


図-8 定常流の解析結果（河床高および河岸線の変化）

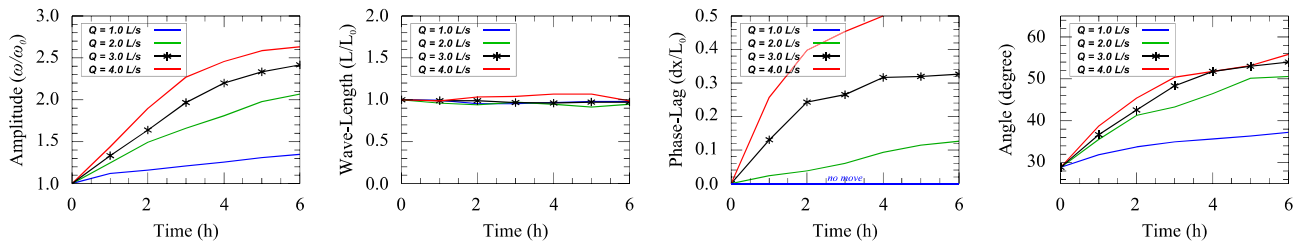


図-9 蛇行特性の時間変化（左から、振幅、波長、位相、蛇行角）

計測値（図-5）の約 1.20～1.25 倍の増幅率を示しており、その他の蛇行特性（波長・位相・蛇行角）についても同様であるが、実験と比較すると若干蛇行発達の規模は過大に現れている。

その理由について考察する。解析では、上流端の境界条件に周期境界条件を用いているため、蛇行波形が比較的整った状態で長時間維持されている。一方、実験では、上流側の乱れの影響が下流側へと伝播する様子が確認されており、蛇行発達を一定程度抑制していたものと考えられる。このような上流端

の境界条件の違いが、両者の蛇行発達過程に大きな影響を及ぼしたものと推察される。

3. 6 非定常流量下の蛇行発達特性

次に、非定常流量下の蛇行発達特性の分析を行う。計算条件は、流量以外は先の定常流解析と同様とし、流量条件には実績洪水と計画規模の流量ハイドロを計 4 パターン与える（図-10、図-11）。

解析結果を図-12 に示す。なお、図中の表記は実スケール換算値を示しており、計算領域の左右端は、現地では堤防の位置にあたる。

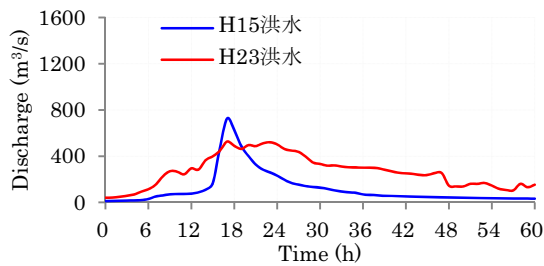


図-10 実績主要洪水

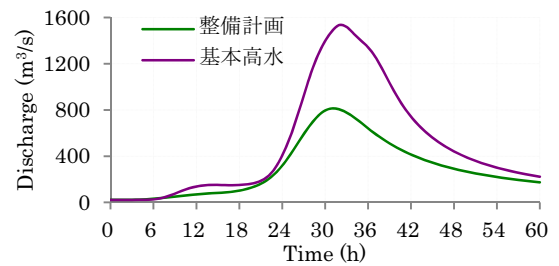


図-11 計画規模洪水

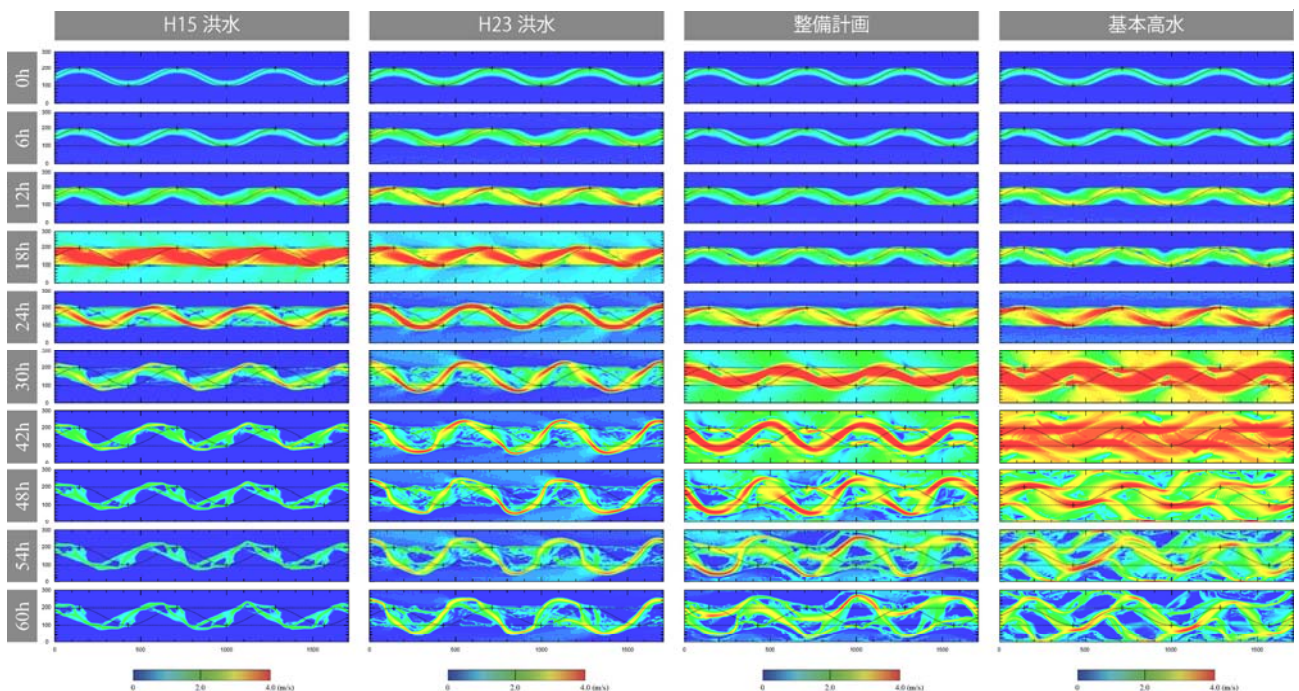


図-12 非定常流の解析結果（流速）

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

解析結果から確認された、実績・計画洪水における蛇行発達特性を以下に列記する。

- ピーク流量前後で位相が下流側へ遷移、ピーク流量を越えてから蛇行が発達する。
- H15 洪水のように、ピーク後の減水期間が短いハイドロでは蛇行発達は起きにくい。
- H23 洪水では、蛇行振幅は約 2 倍 (100m→200m) に増幅。
- 整備計画流量規模では、蛇行振幅は約 3 倍 (100m→300m) に増幅。
- 基本高水流量では、河道内全域が攪乱され、複列状の流路が形成される。

3. 7 単列交互砂州状の地形が形成される要因

ここで、初期河床として砂州地形を与えたことの妥当性について補足する。

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 (図-3 で左側へ遷移)。したがって、出水期の流量ハイドロ

を考えた場合、洪水期間中に、河床形態の特性が複列砂州と単列砂州の形成領域を行き来するような場合も想定される。音更川の河床形態は、平均年最大流量規模 ($Q=155\text{m}^3/\text{s}$) では、概ね複列砂州の形成領域にあるが、上記のことからも、比較的大規模な洪水を経て形成される河床形態は、これとは異なる特性を示す可能性がある。以上より、ここでは、初期河床形状を平坦河床とし、ひと洪水を経て形成される河床形態の特性を検証する。

解析は、音更川の被災箇所上下流 2km 区間を想定し、流量条件には平成 23 年 9 月洪水の流量ハイドロを与える。解析結果と流量ハイドロを図-13 に示す。

解析結果から、音更川の被災箇所周辺の河道状況は、比較的大規模な洪水を受けると、単列交互砂州状の地形が形成される得ることがわかる。このことから、これまで初期河床形状として与えた単列交互砂州状の地形は、過去の大きな出水によって形成された河床履歴に相当するものと捉えることができる。

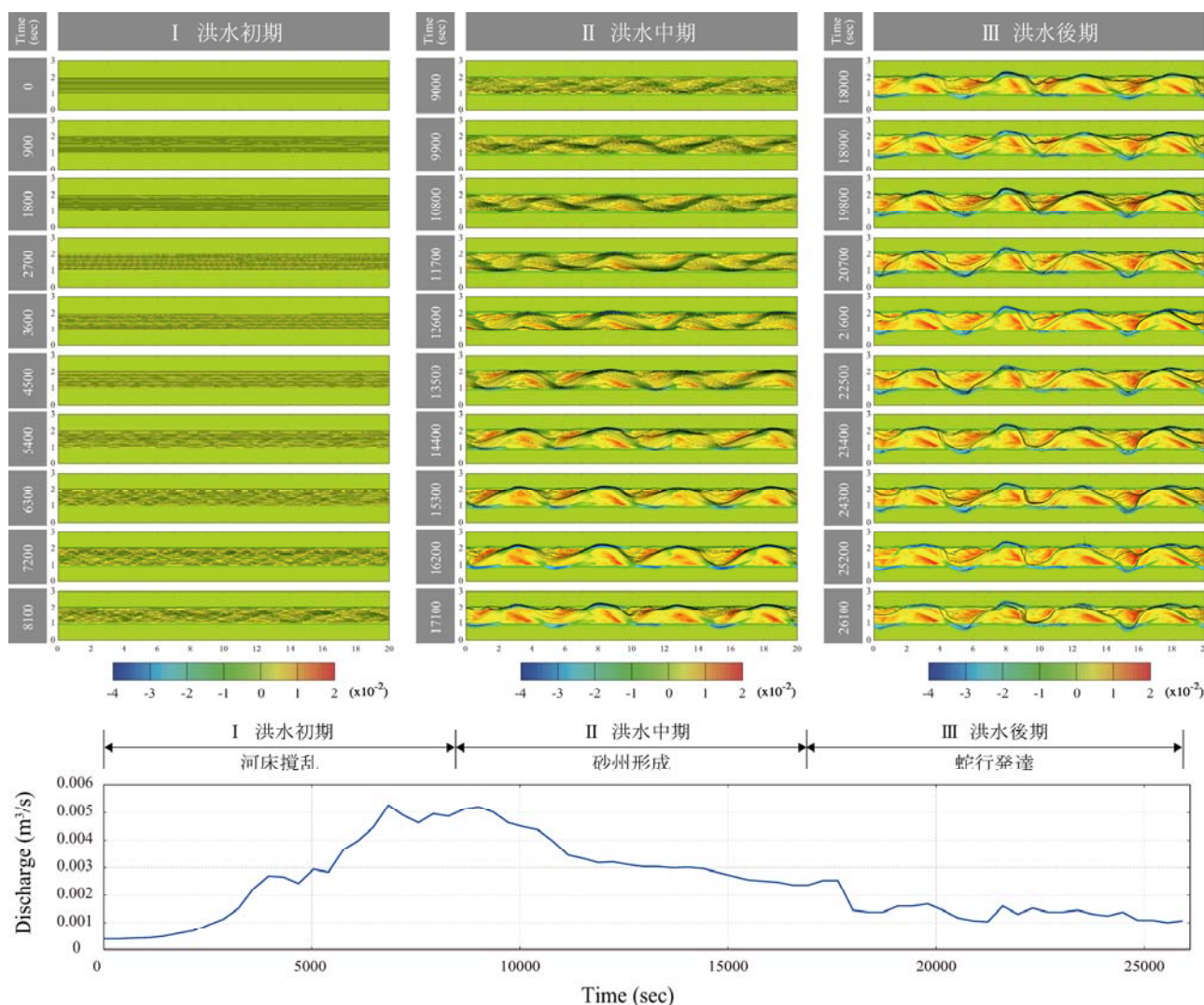


図-13 上段：非定常流の解析結果（河床高変化量および流線），下段：平成 23 年 9 月洪水の流量ハイドログラフ

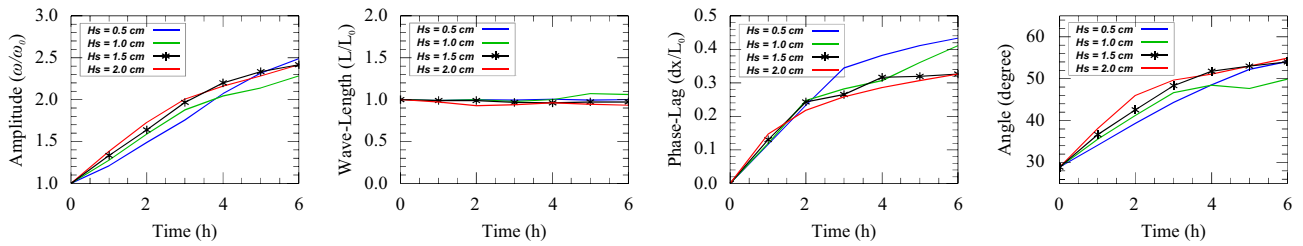


図-15 蛇行特性の時間変化（左から、振幅、波長、位相、蛇行角）

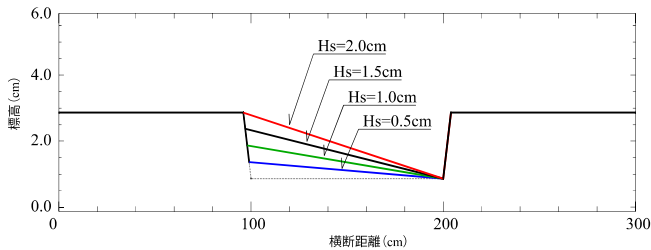


図-14 砂州波高条件

3. 8 砂州波高に対する感度分析

次に、砂州波高を変化させた複数パターンの河床形状に対する感度分析を行い、交互砂州状の地形的な起伏が蛇行発達現象に及ぼす影響を検証する。

計算条件は、砂州波高以外は先の解析と同様とし、流量条件には $Q=3.0\text{L/s}$ の定常流を 6 時間分与える。砂州波高は $H_s=0.5\sim 2.0\text{cm}$ を 0.5cm 間隔で変化させた計 4 パターンの砂州地形とする（図-14）。[実スケール換算： $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ 、60 時間、 $H_s=0.5\sim 2.0\text{m}$]。

解析結果から得られた蛇行特性の時間変化を図-15 に、砂州波高 $H_s=0.5, 1.5\text{cm}$ の蛇行発達過程を図-16 に示す。なお、図-15 は、初期振幅 w_0 、もしくは初期波長 L_0 に対する増幅率を表している（蛇行角を除く）。

蛇行振幅の時間変化を見ると、通水初期段階では、砂州波高に応じた変化を見せるが、通水後半では、いずれのケースも増幅率 2.5 倍程度へと収束していくことがわかる。これは、通水初期は砂州前縁に沿った流れが卓越し、低水路河岸の侵食を伴いながら蛇行を発達させるが、蛇行度がある程度高まると、河床勾配が相対的に緩やかになるため、水位が上昇し、低水路内における直線的な流れが卓越しはじめ、結果的に側岸方向へ向かう流れが弱まるためであると考えられる。

このことは、蛇行流路の振幅は流量規模に応じた一定の限界値を持つことを示唆しており、本解析では、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ の外力のもとでは、流路の最大蛇行振幅は 250m 付近に上限値があるものと推察された。

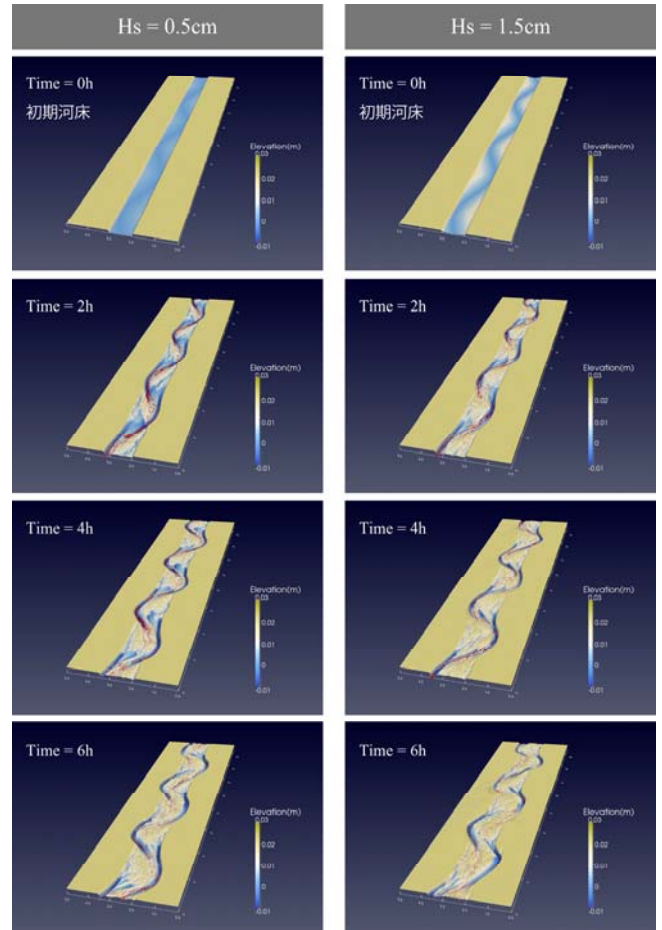


図-16 蛇行発達過程（赤線は流速ベクトル）

すなわち、現況の低水路幅が 100m であるとした場合、当該流量条件下では、左右岸に最大 75m の高水敷侵食が生じることを意味している（実スケール換算値）。

また、本解析では周期境界条件を用いているため、蛇行波長には大きな変化は見られない。一方、 $H_s=0.5, 1.5\text{cm}$ の 2h 以降の位相変化には大きな違いが現れている。これは、砂州波高が低いほど、蛇行発達が相対的に緩やかに進行するため、直線的な流れの影響を強く受け、砂州の前進が比較的長時間に亘って継続するためであると考えられる。

3. 9 砂州地形に起因した蛇行発達現象のまとめ

以上まで、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。結果を以下にまとめる。

1) 流量規模に対する感度分析

① 定常流量（実験・解析）

- 単列交互砂州に起因した蛇行発達は、流量規模と継続時間に応じて徐々にその蛇行度を高めていく。その際、河道内にはある程度発達した砂州地形が形成されている必要があり、出水前の河道状況が大きく影響する。

3) 非定常流量（解析）

- 音更川の被災箇所周辺は、比較的大きな出水を受けると単列交互砂州を形成する河道条件下にある。
- 非定常流に対しては、ピーク流量前後で位相が下流側へ遷移し、ピーク流量を越えてから蛇行が発達し始めるため、H15 洪水のように減水期間が短いハイドロでは蛇行発達は起きにくい。
- 蛇行振幅の増幅率は、H23 洪水では約 2 倍、整備計画流量では約 3 倍となり、基本高水流量では河道内全域が攪乱され、複列状の流路が形成される。

2) 砂州波高に対する感度分析

- 蛇行発達速度は砂州波高に比例するが、蛇行振幅には流量規模に応じた一定の限界値がある。本解析では、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ に対して最大蛇行振幅は 250m 付近に上限値を持つものと推察された。
- 砂州地形に起因した蛇行発達では、波長の変化はごくわずかで、位相変化は砂州波高に反比例する（砂州波高が高いほど、位相の変化は小さくなる）。

3) 今後の課題

解析上の課題を以下に列記する。

- 平面二次元モデルでは、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。
- 斜面崩落モデルでは、側岸方向への侵食量は計算格子幅に依存するため、計算格子の取り方によって解析結果にも違いが生じる。
- 周期境界条件を用いる場合、現れる蛇行波形は整数以外の波数を持ち得ないため、本来波長が

徐々に変化するような現象に対しても、波数を維持しようとする効果が働き、蛇行振幅が過大もしくは過小に評価されている可能性がある。

- 河道内植生と蛇行発達現象との関係を明らかにするためには、植生の流出や、根系による河床面の被覆効果（土砂緊縛効果）なども考慮する必要がある。

実河川では、河道内に残された過去の洪水履歴（砂州地形、流路跡、河道・河岸の平面形状等）や、砂州上に繁茂する樹木、護岸・水制工などの人工構造物など、様々な要素が洪水流を側岸方向に誘導するきっかけとなり、蛇行発達現象に何らかの影響を与えているものと考えられる。

以上のことを踏まえ、次は、被災箇所周辺をケーススタディーとした包括的な検討を行い、音更川で起きた蛇行発達現象の支配的要因を明らかにする。

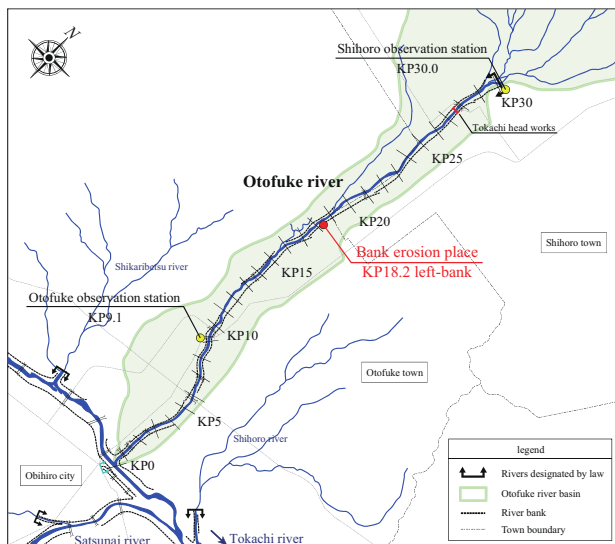


図-17 堤防被災箇所（音更川）

4. H23.9 音更川堤防被災原因の分析

当研究所では、今回の堤防被災の発生直後から北海道開発局と共同で詳細な現地調査を実施している。2011 年は、その第一報として、被災箇所周辺の土質調査結果と簡易的な要因分析に関する報告⁴⁾を行った。

以降では、2011 年の報告及び前節までの研究成果を踏まえ、主に数値解析を用いて当該被災原因の究明を試みる。

4. 1 蛇行発達要因（着眼点）

蛇行流路の発達は、概略的には、洪水時の流れが河岸方向へ導かれることによって生じる。したがって、推定される要因としては、砂州や旧流路跡等による河床面の起伏や河岸の平面的な形状、さらに、河道内植生や既設構造物などの影響も考えられる。

実際の河道変化は、これら様々な要素が複合的に作用した結果として現れるものであり、場所によってその特性は大きく異なるものと推察されるが、今後、具体的な対策を講ずる上では、蛇行発達現象に対してより支配的となる要素をある程度明らかにしておく必要がある。

以上まで、推定される要因の一つとして、主に砂州地形に着目した検討を行った。実験・解析の結果からは、単列交互砂州状の地形が蛇行流路を発達させる一因となり得ることが確認されたが、音更川の被災箇所周辺で起きた現象に関しては、砂州由来の蛇行発達では説明できない点がいくつか存在する。

中でも最大の相違点は、出水前後における蛇行波



図-18 堤防被災時の状況（2011 年 9 月 7 日撮影）

長の変化である。被災箇所周辺では、蛇行流路の波数が減少するほどのダイナミックな変化が起きている。一方、砂州由来の蛇行発達過程では、これほど大きな波長変化は確認できておらず、単列交互砂州状の地形以外の要因がより支配的であった可能性が示唆された。

砂州地形以外の要因として、最も有力なのは河岸の平面的な形状である。現地でも確認されているが、低水路河岸は極度に発達した砂州によって形成されている場合もあり、地形由来の要因としては両者に本質的な違いはない。波高が低水路河岸高に達する規模にまで発達した砂州は、河岸に等しく、低水路満杯規模で流れる洪水流に対して、非常に強い拘束力を持って流れを湾曲させるものと推察される。

以上のことから、本研究では、砂州地形と低水路河岸の平面形状の双方に着目し、数値解析を用いた各種検討を通じて、今回の堤防被災をもたらした主たる要因の解明を試みる。

4. 2 河道変遷履歴

堤防被災をもたらした蛇行発達要因を推定するため、被災箇所を含めた KP17.0～21.0 の区間における河道形成過程を調べた。

図-19 は、1970 年代後半から当該洪水後までの約 30 年間の河道状況を代表する特徴的な年代の航空写真を並べたものである。左の年表には、人為的な外力である河川改修工事と、自然由来の外力である主要洪水、さらにそれらの影響を受けた蛇行流路の発達状況のイメージを示している。

当該区間では、1970 年代に大規模な低水路の直線化が行われており、この時期が現在の河道を形成す

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと 多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

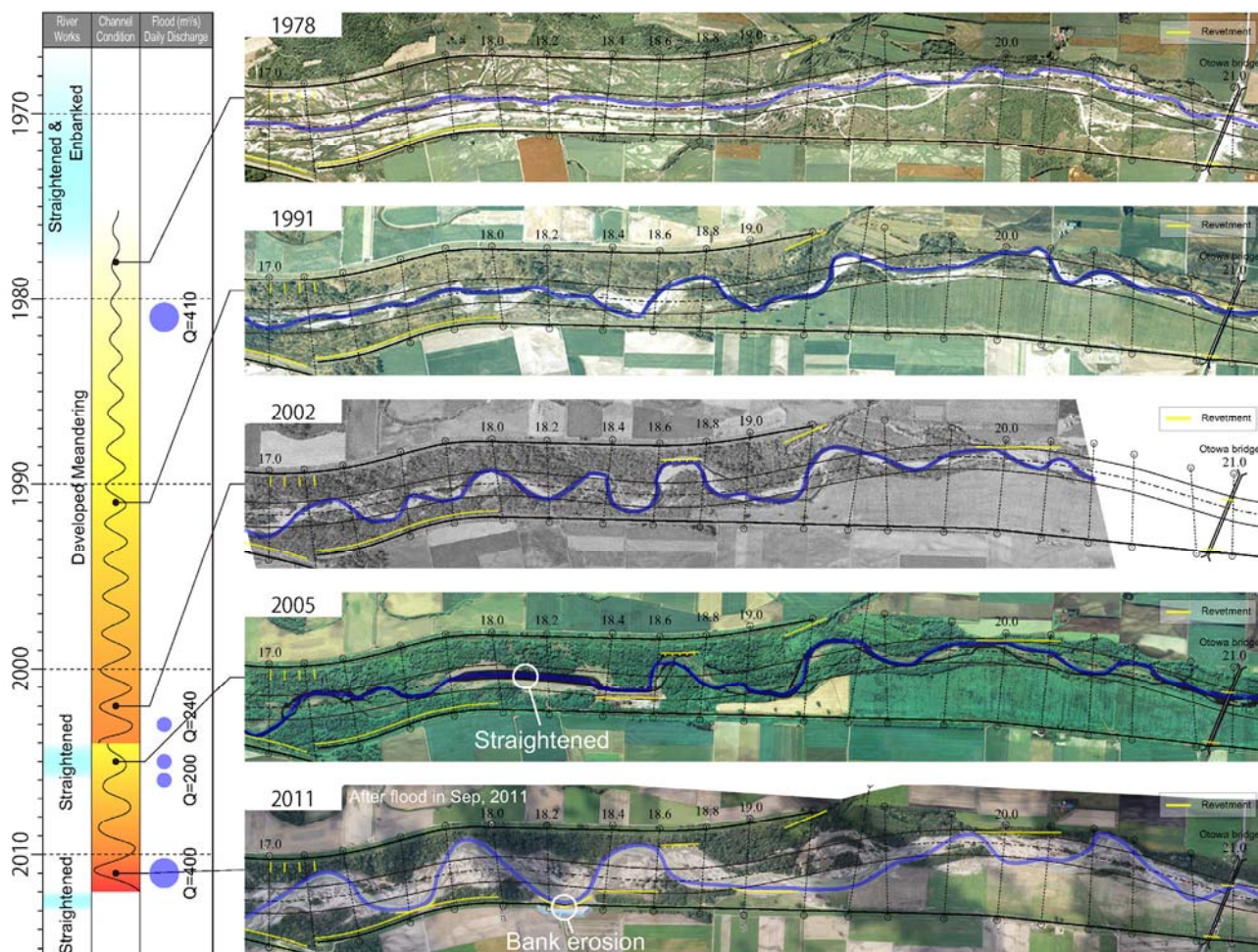


図-19 河道変遷履歴（音更川 KP17.0～21.0）

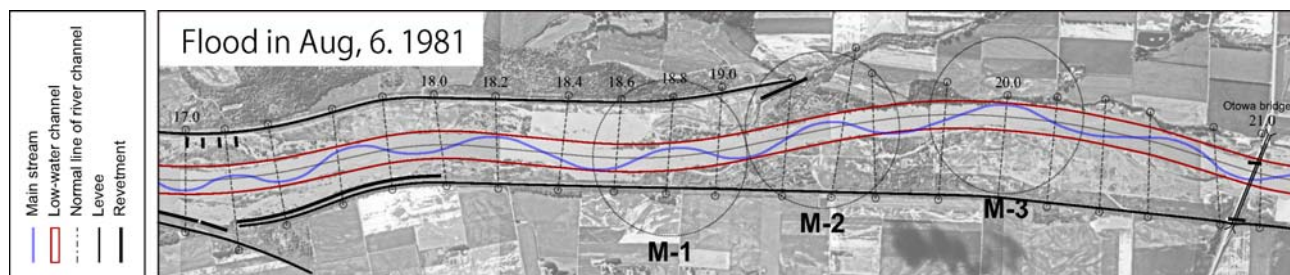


図-20 1981年洪水（流量低減期）における主流線と低水路河岸線

る起点となっている。その後、1981年に発生した既往最大規模の洪水によって、蛇行流路が大きく発達しはじめるきっかけがもたらされた。

図-20は、1981年洪水の流量低減期の流況で、赤線が河道法線沿いの低水路河岸、青線が主流線を示している。このとき既に上流区間（KP18.4～21.0）には3つの大きな蛇行が形成されており、図-19に示すように、これらが約30年の期間を経て徐々に蛇行度を高めていったことがわかる（以降、下流からM-1・2・3と呼ぶ）。

また、2005年の河道状況から、蛇行頂部が堤防に近接したKP18.6の下流側では、再び低水路の直線化が行われたことがわかる。一方、その上流側は高水敷と段丘に囲まれているため、堤防防護上の安全性は確保されており、大規模な改修工事はこれまで行われていない。

したがって、2011年の洪水前の河道状況は、KP18.6付近を境に上下流で大きな違いが生じていたことになる。このような現地状況を鑑み、以降の解析では上下流区間を分けて検証することとし、上

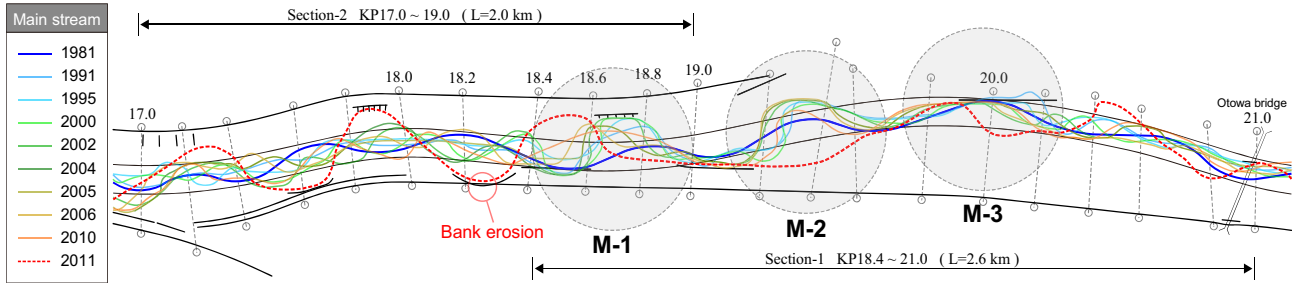


図-21 蛇行流路線形の変化 (1981~2011 年、KP17.0~21.0)

流側の KP18.4~21.0 を Section-1、下流側の KP17.0~19.0 を Section-2 と呼ぶ。なお、両区間に重複があるのは、M-1 の蛇行部が本解析の鍵となるため、これについては後述する。

4. 3 流路変化

図-21 は、過去 30 年間、計 10 箇年分の航空写真から読み取った主流路の平面線形である。1981 年から 2010 年までの変化を見ると、KP18.6 の下流側では、流路が左右岸へ不規則な変化を繰り返していたことがわかる。

一方、その上流側の M-1~3 は、蛇行波形の前傾化とともに位相は若干下流側へとシフトしているが、砂州の位置はほぼ固定された状態で一方向に蛇行度を高めており、下流側とは明らかに異なる変化を示している。

一般的に、単列交互砂州は、直線河道では流下方向へと移動するが、蛇行河道ではほぼ一定の位置にとどまる特性がある。木下ら⁹⁾の研究から、このような砂州の移動・停止状態は、水路の蛇行波長 (D)・水路幅 (B)・蛇行角 (θ_0) によって規定され、蛇行角には、砂州の移動を停止させる一定の限界角度が存在することがわかっている。

図-21 から明らかなように、上流区間の低水路法線は、KP20.0 付近を頂点に大きく湾曲した形状を成している。すなわち、上記知見によれば、このような低水路河岸の平面形状が、M-1~3 における固定砂州の発達を誘発した可能性が示唆される。

また、2011 年の洪水後の変化を見ると、M-1 の下流側には M-1 に等しい規模の新たな蛇行が 2 波長形成され、M-2 では自然短絡が生じるなど、これまでとは、規模も形態も全く異なる変化を遂げていたことがわかる。

4. 4 低水路法線の湾曲と固定砂州の関係

以上より、初めに Section-1 (KP18.4~21.0) を対

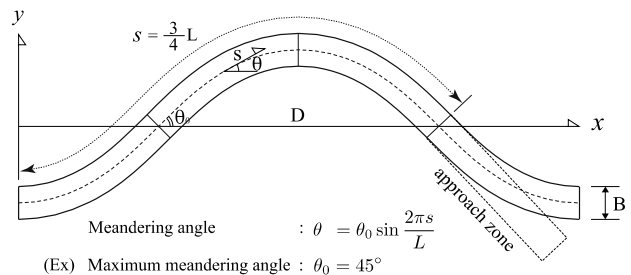


図-22 sine-generated-curve の定義

象とした解析を行い、低水路法線の湾曲と M-1~3 の固定砂州の発達との関係について検証を行う。

なお、以降では、前章までの検討との整合性を図るため、1/100 スケールで解析を行っているが、本稿での表記は、現地との比較を容易にするため、実スケールに換算した値で示す。

4. 4. 1 計算条件 (Section-1)

Section-1 の初期河道条件として、低水路直線化後 (1981 年洪水前) の河道状況を次のように簡略化する。低水路の平面形状は、当該区間の低水路法線を図-22 に示す sine-generated-curve で近似し、図-20 の赤線で示す、蛇行角 $\theta_0=13^\circ$ 、低水路幅 $B=100\text{m}$ の蛇行流路とする。横断形状は過去の測量データから河岸高 2.0m、法勾配 1:2 とし、河床面は平坦河床に粒径サイズの擾乱を与える。低水路の左右岸には河岸侵食を許容する 100m 幅の高水敷を設け、計算領域全てを移動床とする。河床縦断勾配は区間平均値の 1/164 を用いる。

なお、音更川の現地には KP21.0 付近に橋梁 (音和橋) が設置されていることから、本解析ではこの地点を解析区間の上流端とし、これより上流側には、助走区間として湾曲形状を含まない直線河道を接続させる。

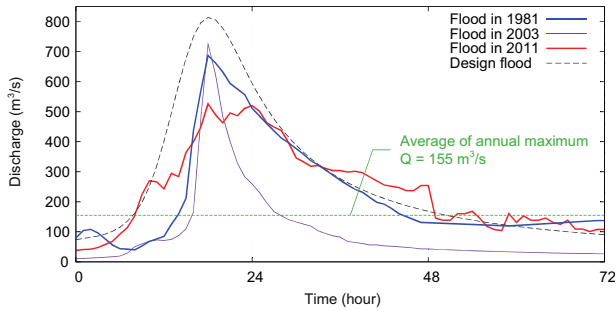


図-23 主要洪水の流量ハイドロ

図-23 は過去の主要洪水の流量ハイドロを比較したものである。Section-1 の解析では、定常流への応答に加え、1981 年の洪水によって形成される河床形態の特性を見る。図から、1981 年の洪水は整備計画流量（1/60）に匹敵するほどの規模であったことがわかる。また、2011 年の洪水は、ピーク流量ではこれを下回るが、平均年最大流量の継続時間では、1981 年の洪水を上回っている。

4. 4. 2 解析結果（Section-1）

定常流で 3 日間通水した後の河床高平面図を図-24 に示す。図は、一定勾配の河床高を基準とした

際の比高差を表しており、以降も全て同様とする。この結果から、本解析の河道条件下では、 $300\text{m}^3/\text{s}$ 規模の流量が蛇行発達に対して支配的な流量であることが推察できる。また、ここで注目するのは、河道湾曲部下流側で形成された蛇行流路（固定砂州）の位置とその間隔である。流量によって若干状況は異なるが、概ね波長 600m 程度の蛇行流路が、ほぼ等しい間隔で形成されている。これは、現地でも実際に確認されている M-1～3 に相当するもので、発生位置・間隔ともに良く符合する。

次に、1981 年洪水の流量を 3 日間通水した後の河床高平面図を図-25 に示す。図中、青点線は 1981 年洪水の減水期における主流路の線形で、赤線は洪水後にあたる 1991 年の低水時のものである。解析結果を見ると、KP18.5～20.3 の 1.8km 区間に、波長 600m 程度の蛇行流路（固定砂州）が 3 つ形成されている（M-1～3）。1981 年と 1991 年の実際の流路線形と比較すると、それらの発生位置や間隔は概ね一致している。

以上の結果から、現地で形成された M-1～3 の蛇行部は、低水路法線の湾曲形状によって必然的にもたらされた固定砂州である可能性が示唆された。

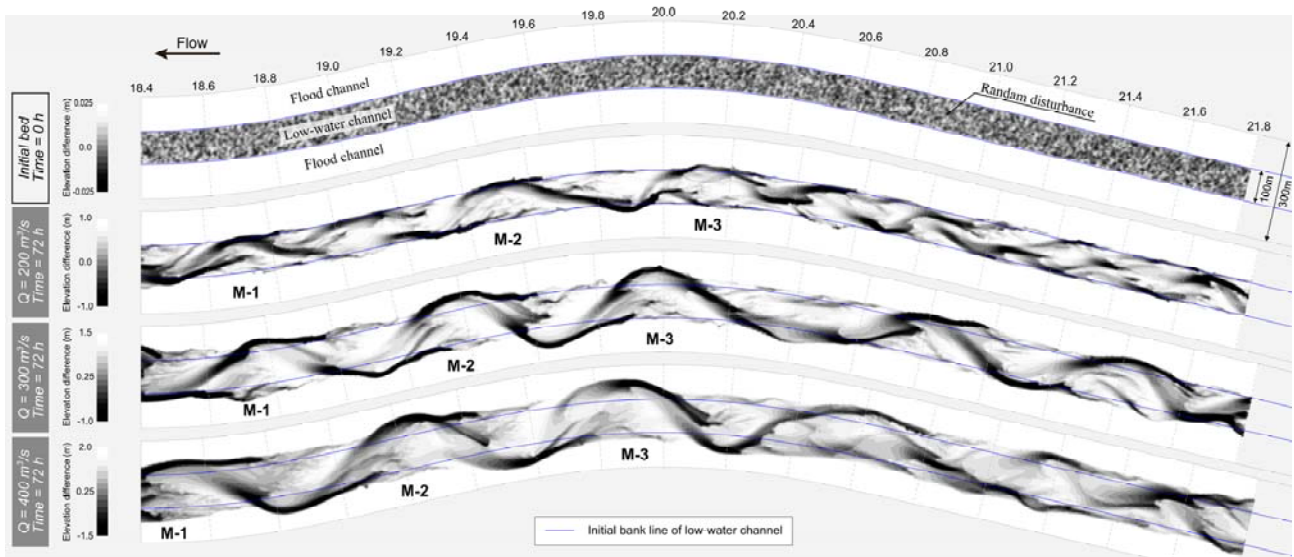


図-24 定常流の解析結果（河床高）

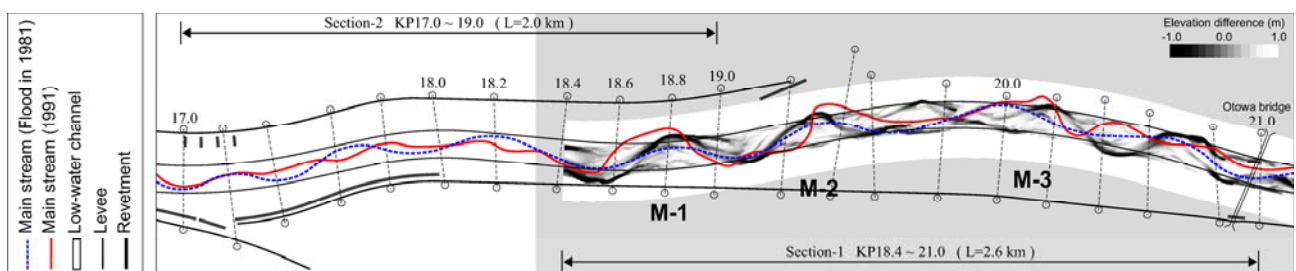


図-25 1981 年洪水の解析結果（河床高）

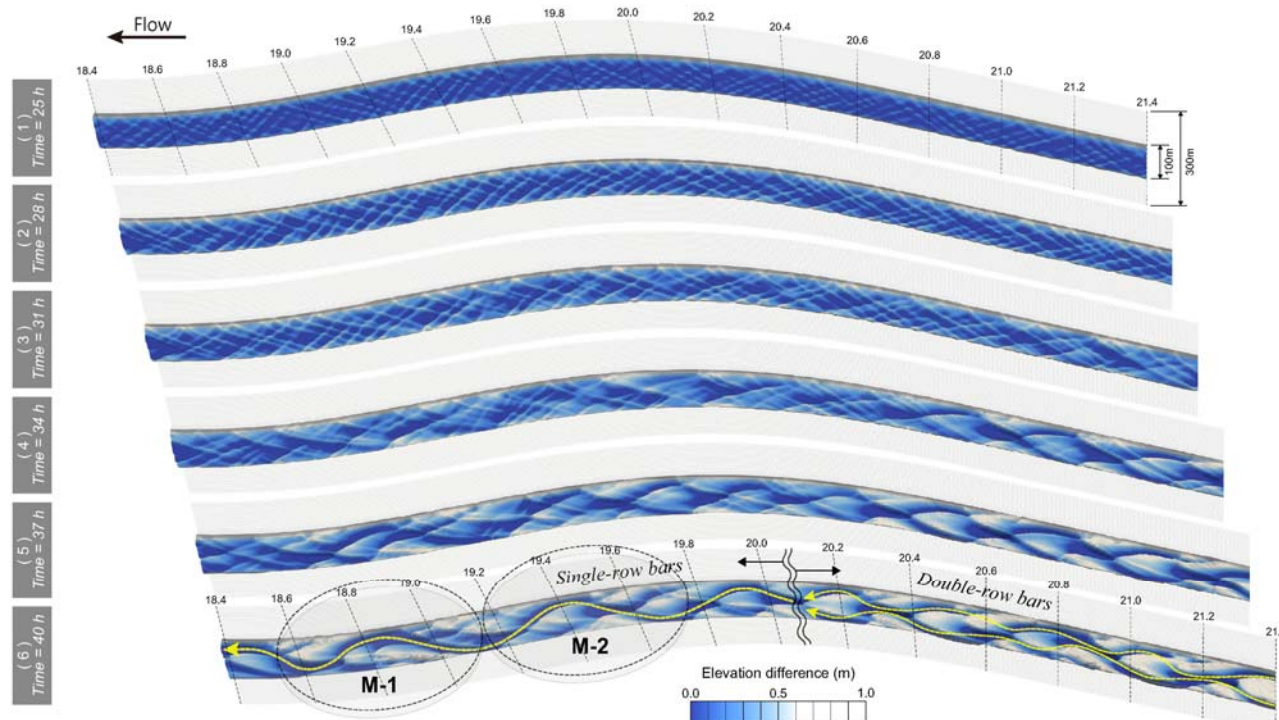


図-26 ピーク流量後の河道形成過程 (1981 年洪水、KP18.4~21.4)

4. 4. 3 1981 年洪水時の河道形成過程

次に、このような固定砂州が形成される要因について、洪水期の河床形態の遷移過程をもとに検証する。図-26 は、1981 年洪水の流量低減期における河道形成過程を示しており、各結果の表示時刻は図-27 の(1)~(6)に対応する。

当該洪水時の河床形態の遷移過程は、概ね、ピーク流量を越えた時点から河床面に変化の兆しが現れ、それが時間経過とともに多列状態から複列状態へと遷移していくものである。

ただし、(5)~(6)の期間を見ると、河道湾曲部周辺を境に、上下流区間で河床形態に明らかな違いが生じている。上流区間は複列状態が比較的維持されているのに比べ、下流区間には既に単列化の傾向が強く現れている。これは、河道湾曲部周辺では、流下方向への砂州の移動が抑制されるため、直線河道に比べて砂州が発達しやすい条件下にあり、発達した砂州は、時間経過とともにやがて完全に停止し、流路の単列化を促進するためであると考えられる。

また、本解析では、下流側の湾曲部で形成された M-1 の砂州が起点となり、やがて上流側の M-2 を形成し、それらが徐々に蛇行度を高めていく様子が確認された。すなわち、このような河道湾曲部で形成される固定砂州は、上流側の砂州の移動をも抑制するため、間接的にその影響は上流側へと波及してい

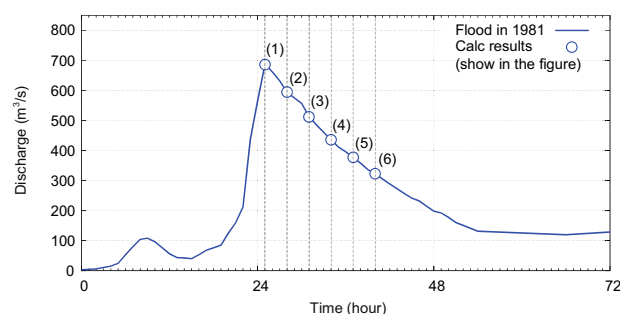


図-27 計算結果表示時刻 (1981 年洪水)

くものと推察される。

4. 4. 4 蛇行角が蛇行発達に及ぼす影響

既述のように、現地の低水路法線は蛇行角 $\theta = 13^\circ$ で湾曲した平面形状を成している。解析結果から、このような低水路の平面的な形状が、砂州の移動を抑制し、湾曲部周辺における固定砂州の発達を誘発した可能性が示唆された。

このことから、次は、湾曲河道の蛇行角の違いが蛇行発達に及ぼす影響と、砂州の移動を停止させる限界角度について検証を行う。

計算条件は、先の解析と同様とし、蛇行角のみを $\theta = 0 \sim 26^\circ$ の間で変化させ、1981 年洪水を 3 日間与えた後の蛇行発達状況をそれぞれ比較する。

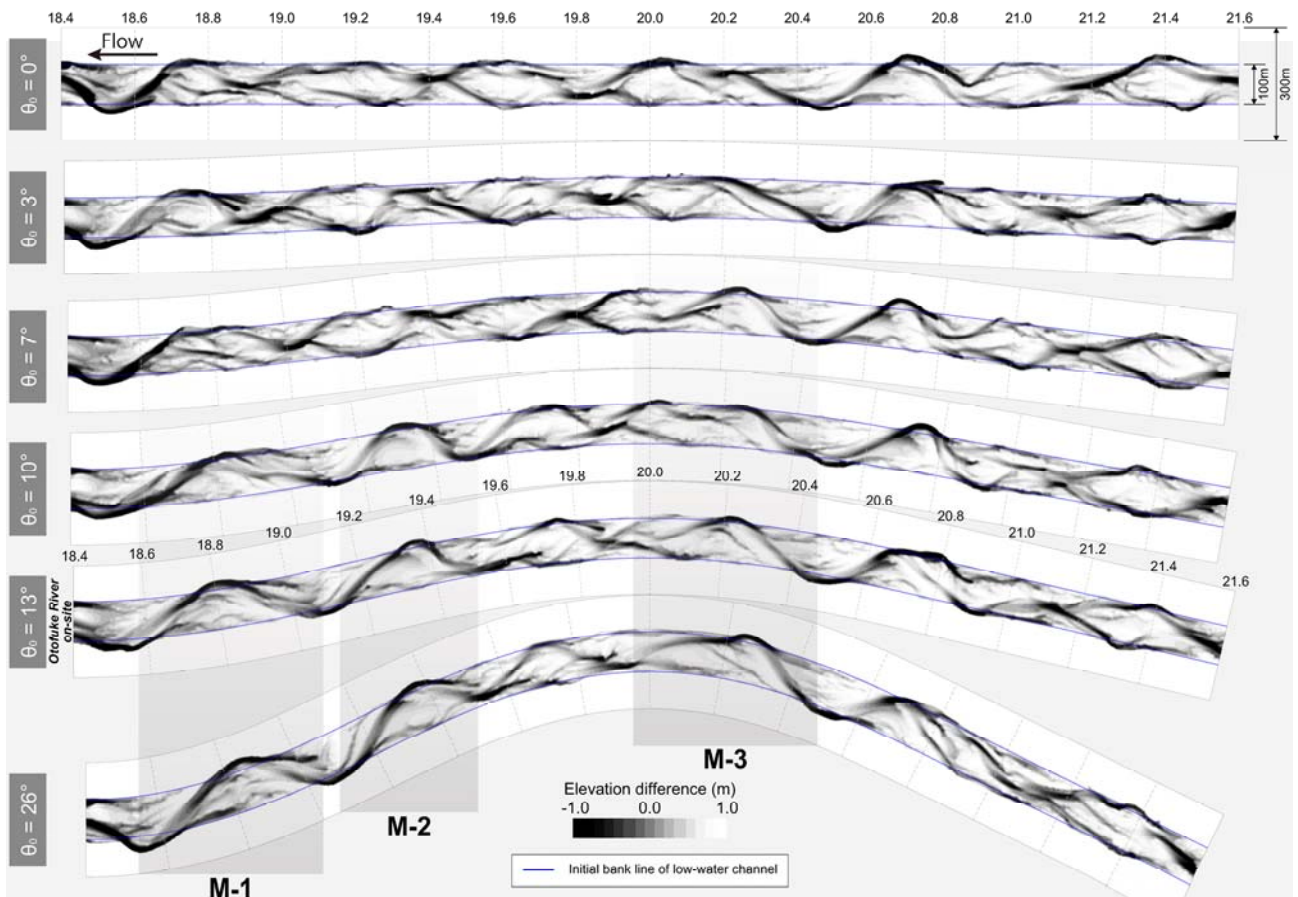


図-28 蛇行角の違いによる蛇行発達状況の変化（1981 年洪水、KP18.4～21.6）

図-28 に解析結果の一例を示す。なお、今回の計算条件は、図-29 に示すように、ピーク流量付近では単列砂州の形成領域にあるため、直線水路であっても単列化の傾向は生じ得る。したがって、この解析結果から河道の湾曲による単列化の影響のみを取り出すことは難しいが、蛇行角 $\theta=0^\circ$ の河道状況を基準に、蛇行流路の発達状況を比較することで、蛇行角の違いによる影響をある程度は評価できる。

図から、全体的な傾向として、蛇行角が小さいほど河床形態は複列状態に近づき、蛇行角が大きくなるほど単列化の傾向がより強く現れる。特に、色掛けで示す M-1～3 の蛇行部は、蛇行角 $\theta=10^\circ$ 付近を境に明瞭な固定砂州が形成されることがわかる。

4. 5 河岸平面形状に起因した蛇行伝播

以上、Section-1 の解析結果から、KP18.4～21.0 の区間に形成された M-1～3 の蛇行部は、低水路法線の湾曲形状によって必然的にもたらされた固定砂州であると推察された。また、河道変遷履歴から、この区間は過去 30 年に亘って大規模な改修工事が行われておらず、これら 3 つの砂州は、1981 年の洪水以降、ほぼ固定された位置で年々蛇行度を高めてい

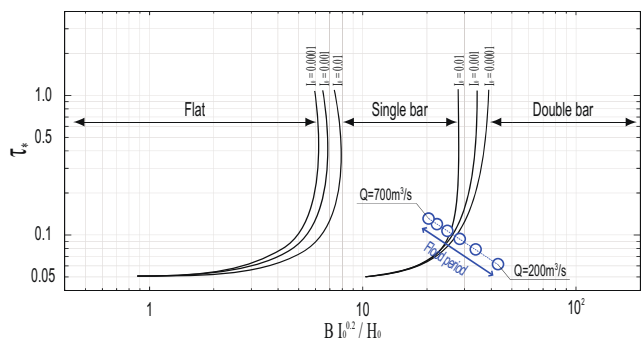


図-29 中規模河床形態区分（1981 年洪水）

たことがわかった。

極度に発達した砂州は、湾曲形状を成した低水路河岸に等しく、洪水流を側方方向へと強く誘導し、蛇行流路の発達を促進するものと考えられる。すなわち、M-1 における砂州の発達は、その直下で発生した堤防被災（KP18.2 付近）に対して、非常に大きな影響を及ぼしていたものと考えられる。以上のことから、次は、M-1 の砂州と被災箇所周辺を含めた Section-2（KP17.0～19.0）を対象とした解析を行う。

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

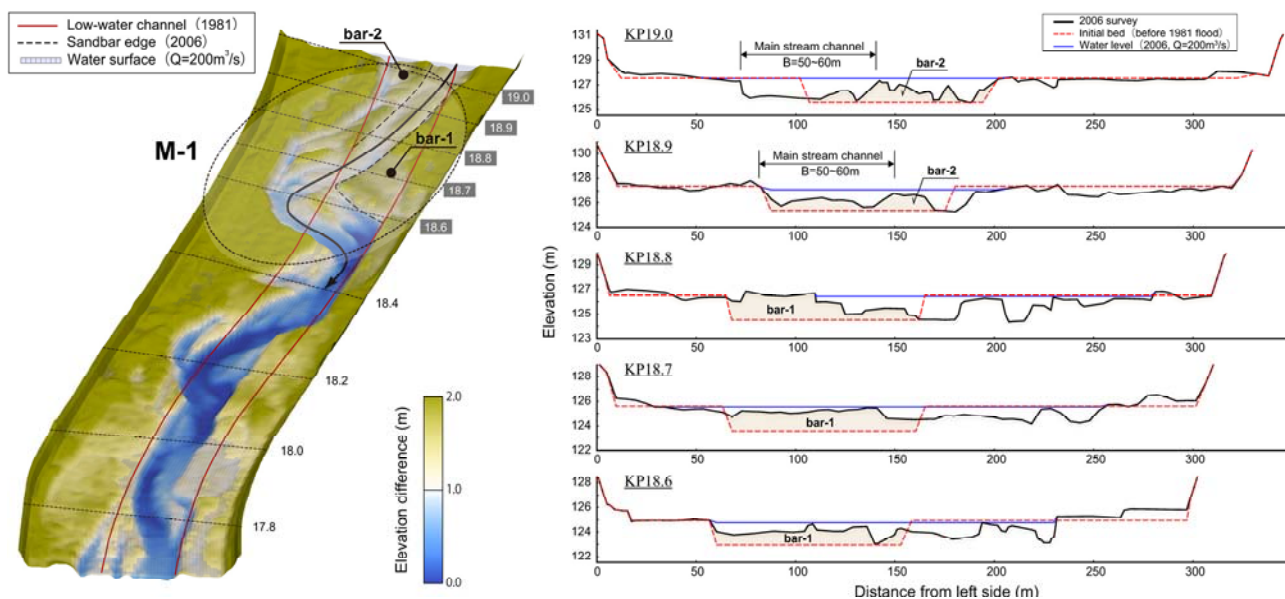


図-30 2011 年洪水前の砂州発達状況 (M-1)

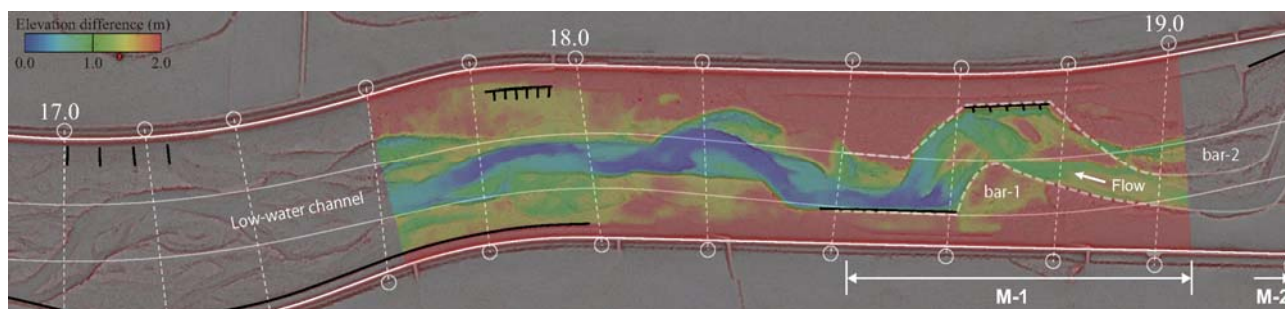


図-31 2011 年洪水前の実測河床高 (LP データ : 2006. 5)

4. 5. 1 固定砂州の発達と河岸平面形状 (Section-2)

まず、解析に供する河道条件をモデル化するため、2011 年の洪水前における M-1 の発達状況を確認する。図-30 及び図-31 は、2006 年の LP 測量データをもとにした Section-2 の河道状況で、図-30 左に鳥瞰図を、右に M-1 の横断面を、図-31 には河床高平面図を示す。

M-1 の横断面を見ると、左岸側に形成された bar-1 は、赤点線で示す 1981 年当時の低水路を完全に埋め尽くすほどの規模にまで発達し、河岸高に等しい砂州波高を持った強固な固定砂州が形成されていたことがわかる。本解析では、蛇行発達現象の支配的要因を特定するため、現地の河道状況から主要なポイントのみを抽出し、極力単純化した地形モデルを与える。ポイントとなるのは、被災箇所上流側は、発達した固定砂州 M-1 の影響により低水路が大きく右岸側に湾曲していたこと、また、その下流側は、2005 年の改修工事の影響により直線的な河道状況が残されていたことである。

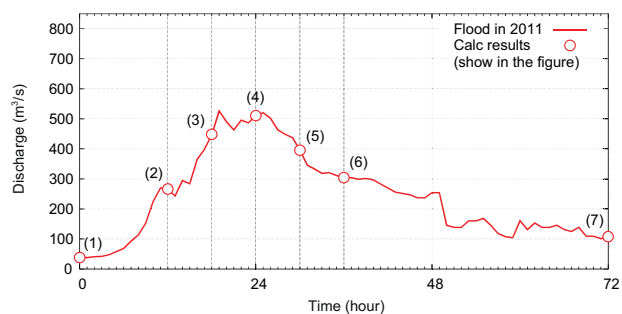


図-32 計算結果表示時刻 (2011 年洪水)

以上より、解析区間の上流側には図-31 の点線で示すような蛇行部 (M-1) を模した河岸平面形を与え、下流側には低水路幅 100m の直線河道を接続させる。河岸平面形状の詳細は図-33 の最上段に示す。

4. 5. 2 計算条件 (Section-2)

本解析では、図-32 に示す 2011 年の洪水 (3 日間) を外力として与え、堤防被災をもたらした蛇行発達現象の支配的要因とその発達プロセスの解明を試みる。解析対象区間は KP17.0~19.0 の延長 2km とし、

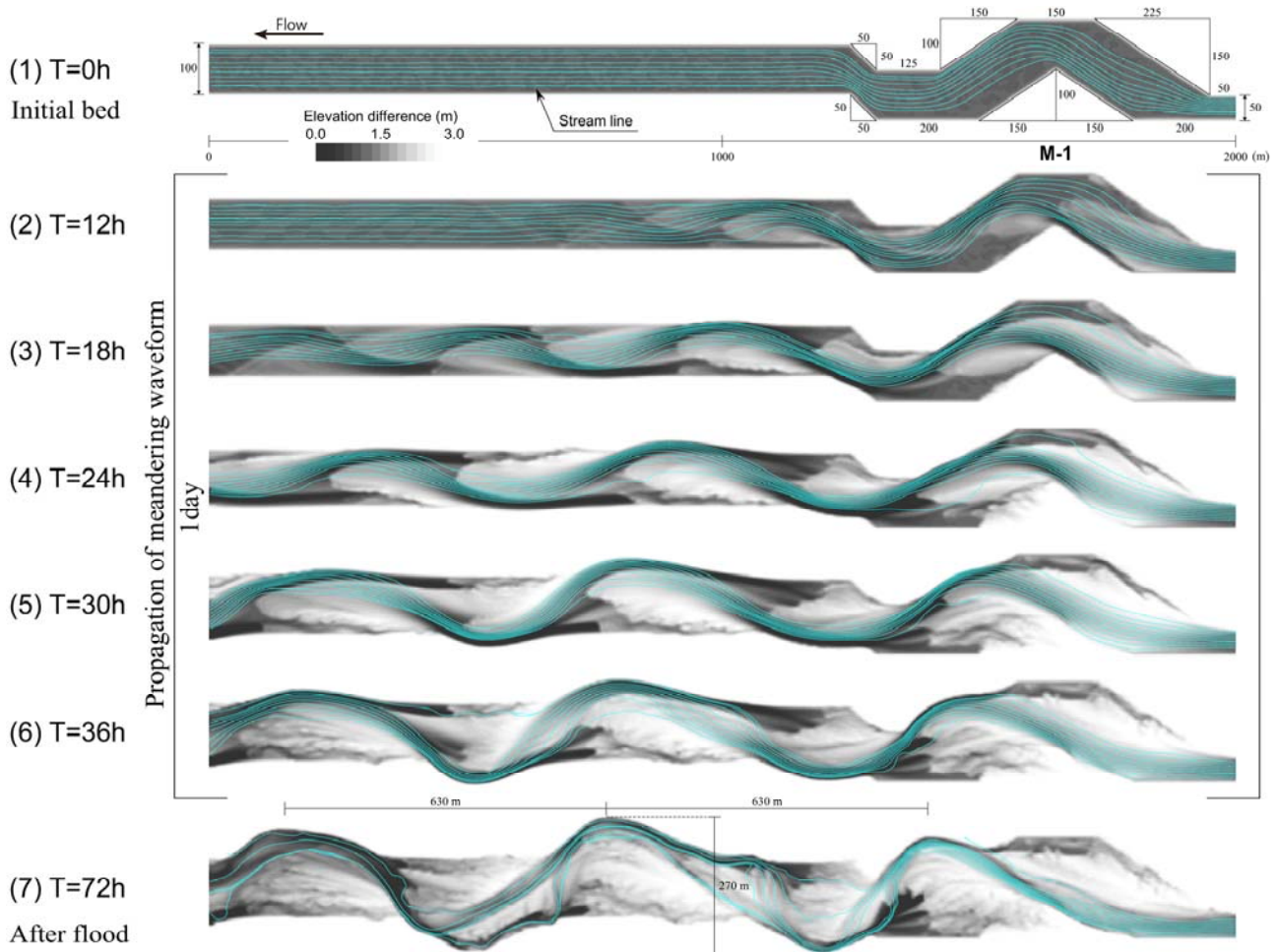


図-33 2011年洪水の解析結果（河床高・流線）

初期河床には前節の模式化した地形を与える。その他の計算条件は Section-1 と同様である。

ここで、KP19.0 を解析区間の上流端とすることの妥当性について補足する。KP19.0 付近では、M-1、2 の固定砂州の影響により、洪水期間中も常に左岸側に寄った流れが維持されており、横断方向への流路変化は生じていない。また、現地では、洪水期間中、蛇行部 M-2 は自然短絡しているが、KP19.0 付近の河道断面形状には、出水前後でそれほど大きな変化は起きていない。

以上のことから、本解析では、洪水時、KP19.0 の河道断面は動的平衡状態にあったものと仮定する。

4. 5. 3 蛇行発達過程（蛇行波形の伝播過程）

解析結果を図-33 に示す。なお、各結果の表示時刻は図-32 の(1)～(7)に対応する。

解析結果から、増水期、流量が $200\text{m}^3/\text{s}$ を越えたあたりから河道に大きな変化が現れはじめ、ピーク

流量を挟んだ(2)～(6)の間を経て、蛇行流路の概形が形成されていったことがわかる。(6)～(7)の変化から、その後は、ほぼ波長や位相の変化を伴わずに、蛇行振幅のみが増大していく様子が見てとれる。

(2)～(6)の変化を、青線で示す流線に注目すると、M-1 の蛇行部では、河岸の湾曲形状によって洪水流が強く拘束され、洪水期間中、常に蛇行した流れが維持された状態にある。当該洪水では、このような状態が長時間に亘って継続したことで、M-1 の蛇行波形が徐々に下流側へと伝播していき、最終的に波形の揃った蛇行流路が形成されるに至ったものと推察できる。

また、この時、M-1 では、蛇行流が河岸を侵食しながら位相をやや下流側へと変化させたことで、結果的に水衝部の位置が既設護岸から外れたことも、今回の堤防被災に至る過程では大きな分岐点となった。

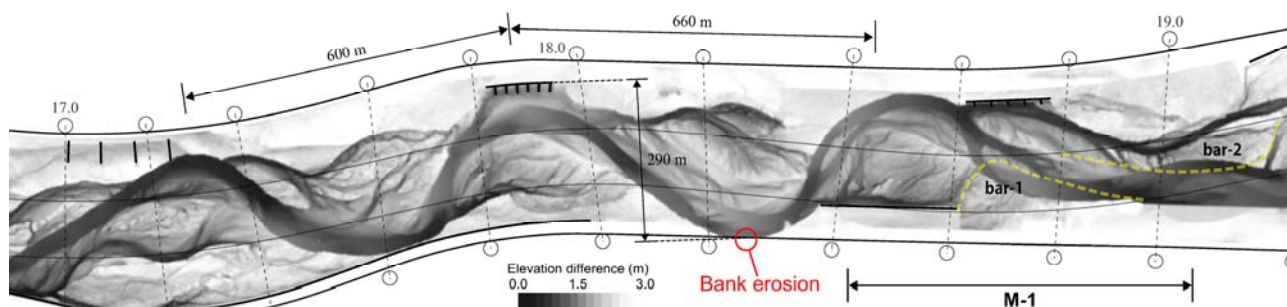


図-34 2011年洪水後の実測河床高（LPデータ：2012.5）

図-34は、洪水後に実施したLP測量のデータから得られた現地の河床形状である。解析結果の(7)の時点と比較すると、両者の蛇行特性（波長、振幅）は概ね一致する。細かい点では、M-1の位相ずれの状況や、形成された砂州上に残る流路の痕跡など、多くの類似点が認められ、本解析結果の妥当性を示すものと言える。

4. 6 H23.9 音更川堤防被災原因分析のまとめ

以上、本研究では、砂州地形と低水路河岸の平面形状の双方に着目し、数値解析を用いた各種検討を通じて、2011年9月の堤防被災をもたらした主たる要因の解明を試みた。

その結果、KP18.4～21.0を対象とした解析結果から、低水路の湾曲形状が当該区間における固定砂州の形成を誘発したものと推察された。また、河道変遷履歴から、これらの固定砂州は約30年余りの期間を経て徐々に蛇行度を高め、やがてその波高は河岸高に達する規模にまで発達していたことがわかった。

さらに、KP17.0～19.0を対象とした解析結果から、このような固定砂州が形づくる河岸平面形状（湾曲形状）によって、洪水時、蛇行した流れが長時間に亘って維持されることとなり、徐々にその波形が下流側へと伝播していくことで、最終的には、堤防に達するほどの大規模な蛇行発達をもたらされたものと推察された。

当該被災をもたらした主要因を以下にまとめる。

- ① 低水路の湾曲形状に起因した砂州の固定化
- ② 数十年の期間を経て起きる固定砂州の発達
- ③ 河岸平面形状に起因した蛇行波形の伝播

今後、河岸保護が実施されていない区間を対象に、応急的な対策を実施する際には、上記②に相当する危険箇所をある程度特定し、発達した固定砂州の影響を弱める措置を講ずることが有効であると思われる。具体的には、砂州上部切下げ等の対策が考えられるが、下流側へ与える影響も含めて今後十分検証

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) 北海道開発局，寒地土木研究所：平成23年9月2日からの停滞前線による大雨災害 十勝川水系音更川の堤防の一部流出に関わる調査報告，2011。
- 5) 永多朋紀，柿沼孝治，桑村貴志：音更川の河道変遷と蛇行特性について，寒地土木研究所月報，No.706，2012。
- 6) 木下良作，三輪弼：砂レキ堆の位置が安定化する流路形状，新砂防，Vol.94，pp.12-17，1974。
- 7) 永多朋紀，渡邊康玄，安田浩保，伊藤丹：砂州地形に誘発された蛇行発達，水工学論文集，No.57，pp.1099-1104，2013。
- 8) 永多朋紀，渡邊康玄，安田浩保，伊藤丹，桑村貴志：低水路河岸の平面形状に誘発された蛇行発達，寒地土木研究所月報，No.721，2015。
- 9) 柿沼孝治，渡邊康玄，泉典洋，永多朋紀，桑村貴志：急流河川における蛇行発達メカニズムと堤防防御対策について，河川技術論文集，第18巻，2012。
- 10) 永多朋紀，柿沼孝治，桑村貴志：音更川堤防流出原因調査の経過報告について，土木学会北海道支部論文報告集，第68号，2012。
- 11) 永多朋紀，渡邊康玄，伊藤丹，桑村貴志：交互砂州状の地形起伏と蛇行発達現象に関する感度分析，年次学術講演会講演概要集，第68回，2013。
- 12) 高橋玄，安田浩保：複列砂州の維持条件に関する一考察，水工学論文集，第56巻，2012。

A STUDY ON THE MECHANISM OF BANK EROSION AND THE RESISTANCE CHARACTERISTICS, AND FUNCTIONAL EVALUATION OF RICH-IN-NATURE REVETMENT IN THE RIVER FOR SNOW COVERAGE AND COLD REGION

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi

NAGATA Tomonori

AKAHORI Ryouzuke

INOUE Takuya

MOMONOE Hideyuki

Abstract : Due to a typhoon and a stationary rain front, record amounts of rain fell in September 2011, and the largest class of discharge in recorded history was observed in the Otofuke River of eastern Hokkaido, and extensive bank erosion occurred in various parts of the river channel. Damages were especially serious in the middle reaches, where part of a dike was washed out. The results of a post-flood survey suggested that the direct cause of the dike breach was lateral advance of the bank erosion associated with the development of meandering channel. As the related development mechanism and predominant factors have not yet been clarified, this remains a priority from the viewpoint of disaster prevention. A past study on the development of meandering channels was reported by Shimizu et al. In this study, the meandering-channel development process was reproduced using a slope failure model that linked bank erosion with bed changes. The study attempted to clarify the meandering development mechanism in the disaster and its predominant factors by using this model. The analysis properly reproduced the characteristics of the post-flood meandering waveforms. Therefore, it is suggested that the development of meandering during the flood attributed to the propagation of meandering to downstream, which is triggered by the meandering flow from the meandering channel in the upstream, and also suggested that this propagated meandering then caused a gradual increase of meandering amplitude accompanied by bank erosion in the recession period of the flood.

Key words : Otofuke River, bank erosion, meander development, propagation of meandering