

# 流量ハイドログラフ形状に対する蛇行流路の移動特性～十勝川水系音更川を事例として～

岡部 和憲<sup>1</sup>・久加 朋子<sup>2</sup>・清水 康行<sup>3</sup>・長谷川 和義<sup>4</sup>・  
新庄 興<sup>5</sup>・山口 里実<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道河川財団 (〒060-0807 札幌市北区北 7 条西 4 丁目 5-1)

E-mail: k.okabe@ric.or.jp

<sup>2</sup>正会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>3</sup>フェロー会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>4</sup>フェロー会員 北開水工コンサルタント先端技術開発センター(〒060-0015 札幌市中央区北 5 条西 6 丁目)

<sup>5</sup>正会員 北開水工コンサルタント (〒 080-0314 北海道河東郡音更町共栄台西 11 丁目)

<sup>6</sup>正会員 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

2016年8月、音更川上流区間では大規模な流路の蛇行化とそれに伴う左右岸連続7箇所の堤防決壊が生じた。痕跡水位調査からは、決壊した堤防はピーク水位時には存在しており外水氾濫を防いだものの、その後の流量低下時に決壊に至った状況が確認された。本研究では、音更川を急流河川災害のモデルケースとし、流量ハイドログラフ形状の違いが流路変動および堤防侵食リスクに与える影響を数値解析より検討した。結果、当該区間では出水ピークを前後にずらしても計算終了時の流路形状は類似し、同じ場所で同程度の川幅拡幅と堤防決壊が生じた。ただし、堤防侵食に至る時間は異なり、流量をゆっくり増大させるケースでは出水ピーク前に堤防決壊し、流量ピーク時に堤防の存在しない区間が生じた。当該区間の流路変動に伴う堤防侵食リスクは、流量ピーク値の大きさよりも、ある程度以上の大流量が出水前半・後半にかかわらず継続することが関与していると考えられる。

**Key Words:** meandering, bank erosion, large-scale flood disaster, Otofuke River, integrated flow rate

## 1. はじめに

河川中上流部の急流区間における蛇行流路の移動特性とそれに伴う堤防侵食リスクを予測することは、河川管理上重要な課題である。一般に、急流区間では流路変動特性が河川下流域の沖積河川と異なり、出水時に河川水位が計画高水位を超えずとも河岸侵食により堤防が侵食され、決壊に至ることが知られている<sup>1,2,3)</sup>。堤防決壊に伴う外水氾濫は、平成28年8月北海道豪雨災害でも認められたとおり、流域での被害規模を著しく大きくする<sup>4,5)</sup>。例えば、著者らが被害状況を整理した音更川<sup>3)</sup>を含む十勝川水系中上流域の急流区間では、堤防決壊に伴い市街地内への大量の土砂を含んだ高速な流れが流入するのみでなく、家屋の流失や地盤の大規模な侵食による農地の土壌流失等の被害、橋梁等の構造物取付部の侵食による道路崩落等、甚大な被害をもたらした<sup>5)</sup>。

急流区間の河川において適切な整備・管理を行うには、

下流の沖積河川(緩流区間)における整備・管理に関する観点とは異なる知見・技術が求められる<sup>6)</sup>。特に、急流区間における主な洪水リスクは、高速な流れとともに大量の土砂が移動することで河床や河道形状が大規模に変動するため、一出水中に侵食が急速に進行し堤防決壊や河川敷地外の侵食などの災害に至ることである。計画的に整備・管理を進めるためには、急流河川における出水時の大規模な蛇行発達メカニズムを把握し、対象河川ごとの特性を踏まえた河岸・堤防・地盤等の侵食リスクを推定する手法が必要となる。しかしながら、急流河川にみられるような大規模な側方侵食を伴う流路変動のメカニズムには未解明な部分が多く、まずは、既往の災害における支配的要因を分析・整理し、それぞれの要因に対する流路変動の応答を把握することが肝要となる。

急流河川における流路の蛇行発達は、出水前の流路形状、流量ハイドログラフ形状、植生繁茂状況、低水護岸等の整備状況、上流からの土砂供給量など多岐に渡る要

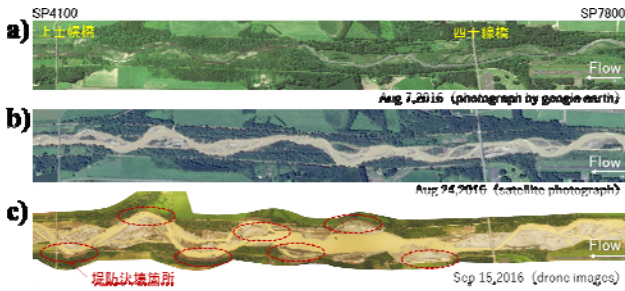


図-1 音更川上流区間の被災前後の航空写真

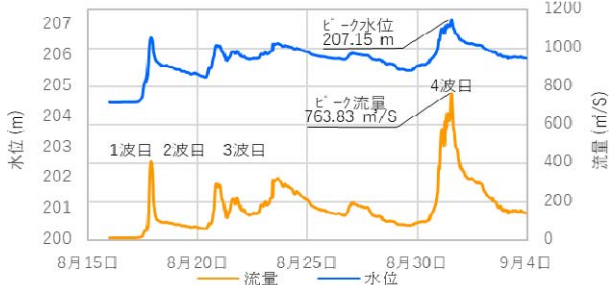


図-2 平成 28 年 8 月出水時の当該区間下流に位置する土幌観測所における水位と流量（暫定値）

因が影響していると考えられる。本研究では、まず、これまで上述の既往報告でも注目されてきた流量ハイドログラフ形状に着目する。平成 28 年北海道豪雨災害時、音更川上流域では流量ピーク後の流量低下時に流路の蛇行振幅が増大して破堤に至ったことは既往報告<sup>3)</sup>のとおりであるが、本研究では、当区間を対象事例とし、異なるハイドログラフ形状に対する流路変動の応答を数値解析より検討する。流量が増加または減少する過程や流量ピーク値自体がどの程度流路変動に影響を与え、堤防等の侵食リスクに関わるパラメーターになり得るかを検討し、今後、急流河川の侵食リスクを推定する手法を確立するための基礎的知見を得ることが目的である。

## 2. 音更川の諸元と出水前後の変化

図-1 に十勝川の支川音更川の上流区間（北海道庁管理区間の一部）について、平成 28 年 8 月出水前後の航空写真を示す。当該区間の諸元は以下の通りである。流域面積は約 500 km<sup>2</sup>、河床勾配は 1/120 程度と比較的急勾配であり、河床材料は平均粒径 55mm の砂混じりの礫で構成されている。また、当該区間の約 20km 上流には、1956 年と古くから発電用の糠平ダムが建設されている。平成 28 年 8 月の北海道豪雨災害では、図-1 から分かるように、直線的に整備された区間において流路の蛇行化によって河岸が大きく侵食され、左右岸 7 箇所にて堤防決壊に至った。今般の出水前の河道は、図-1(a)より、樹木が繁茂した河川敷地内においてある程度の蛇行は確認できるものの、既設の護岸も相まって比較的安定した河道の様相であった。しかしながら、図-2 に示す既往最大流量を観測した 4 波目の出水により、当該区間

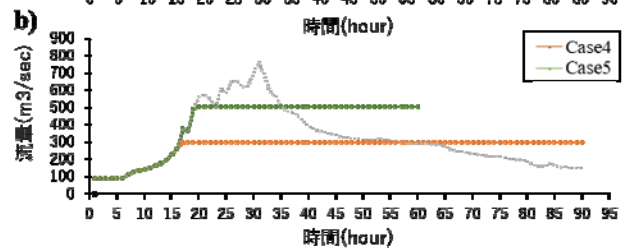
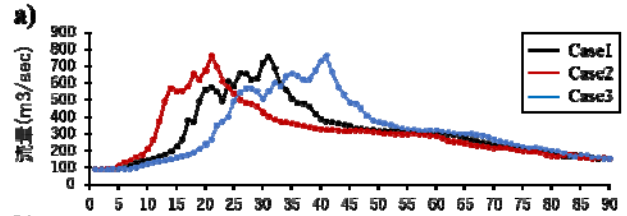


図-3 流量ハイドログラフ、  
a) Case 1～Case 3, b) Case 4～Case 5

では短時間で急速な流路変動が生じ、流路の平均水路幅は 2.54 倍、流路の最大振幅は 1.96 倍と大きく拡大した。当該区間の堤間は約 200m であったのに対し、出水後、流路の最大振幅は 298 m に達した。また、現地調査から当該区間の堤防接近箇所等には低水路護岸が設置されていたが、出水後には大部分の破壊流失が確認され、加えて痕跡水位からは、決壊した堤防はピーク水位時には存在しており外水氾濫を防いだものの、その後の流量低下時に決壊に至った状況が確認された。

## 3. 数値解析の解析条件

ここでは、音更川上流域を対象とし、積算流量（対象期間：図-3 に示す 0～90 時間）を統一したうえで流量ハイドログラフ形状のみ異ならせた場合における流路変動の応答を数値解析より検討する。数値解析には、出水中の局所洗堀に伴い植生が流出する条件を追加した iRIC Nays2D (<http://i-ric.org/ja/>) を用いた。計算範囲は、既往報告<sup>3)</sup>と同じく音更川 SP1300～SP8600 の区間とし、上流端には比較的川幅変化の認められなかった中央橋付近を選定した。計算格子サイズは縦断方向に 7 m、横断方向に 4 m とし、航空写真を参考に植生域を設定した。植生密度および流出する際の洗堀深は、十勝川水系の別支川である札内川における既往の現地調査結果<sup>7)</sup>を参考に、各々を 0.03、0.2 m で与えた。河床材料は、平均粒径  $d_m = 55$  mm の均一粒径とし、マンニングの粗度係数は 0.03 を与えた。流砂量式は芦田・道上の平衡流砂量式<sup>8)</sup>を用い、隣り合うメッシュ間の河床高の差が安息角以下になるように河岸侵食を考慮した。上流端からは平衡流砂量を与え、初期河床高が変化しない条件とした。

計算ケースの流量ハイドログラフ形状を図-3 に示す。計算は、4 波目のみを対象とした。図-3(a) に示す Case 1 は、2016 年 8 月の再現計算<sup>3)</sup>である。Case 1 では、音更川土幌観測所で得られた実績流量の暫定値（帯広開発建設部）の流量ハイドログラフ形状を与えている。Case 2

および Case 3 は、Case 1 とほぼ同じ積算流量 (Case 1:  $1.03 \times 10^8$ , Case 2:  $1.01 \times 10^8$ , Case 3:  $1.05 \times 10^8$  [m<sup>3</sup>]) , かつ同じ洪水ピーク流量値のもと、異なるハイドログラフ形状による変化を把握するものである。Case 2 では、Case 1 よりも速くピーク流量に到達し、その後ゆっくり減水する流量ハイドログラフ形状を、反対に、Case 3 では、Case 1 よりもゆっくりピーク流量に到達し、その後比較的速く減水する流量ハイドログラフ形状を与えている。次いで、図-3 (b) に示す Case 4, 5 は、Case 1 に対して異なるピーク流量と洪水継続時間を与えた場合の変化を把握するもの

である。Case 4 および Case 5 では、Case 1 の実績流量をベースとし、流量が各々 300m<sup>3</sup>/sec, 500m<sup>3</sup>/sec に達した後、定常流にて出水が継続する条件を想定している。各々の計算時間は、積算流量が Case 1 とほぼ同時になるように設定した。

#### 4. 解析結果

(1) ピーク流量到達時間の違いが変動特性に与える影響

図-4 に、出水前後の実績と Case 1 の計算終了時にお

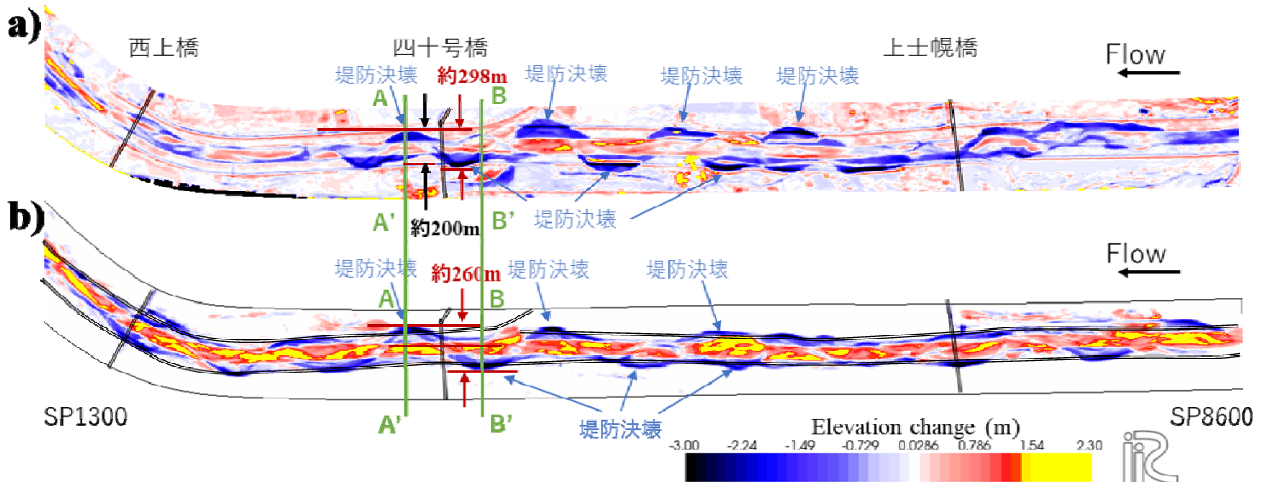


図-4 河床変動量コンター図, a) 実績出水前後 (出水前は H25 年度データ), b) Case 1 計算終了時

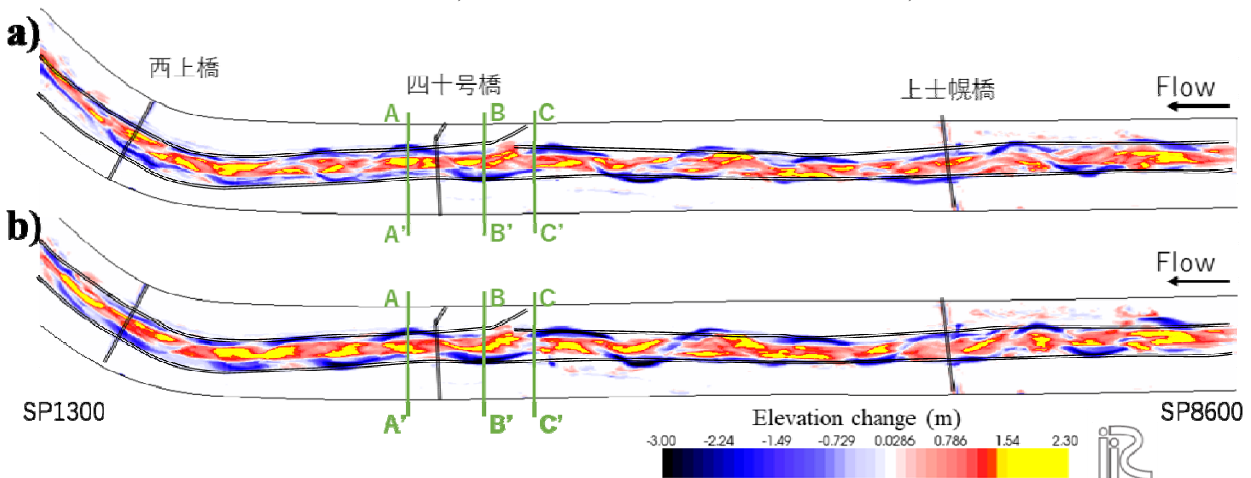


図-5 河床変動量コンター図, a) Case 2 計算終了時, b) Case 3 計算終了時

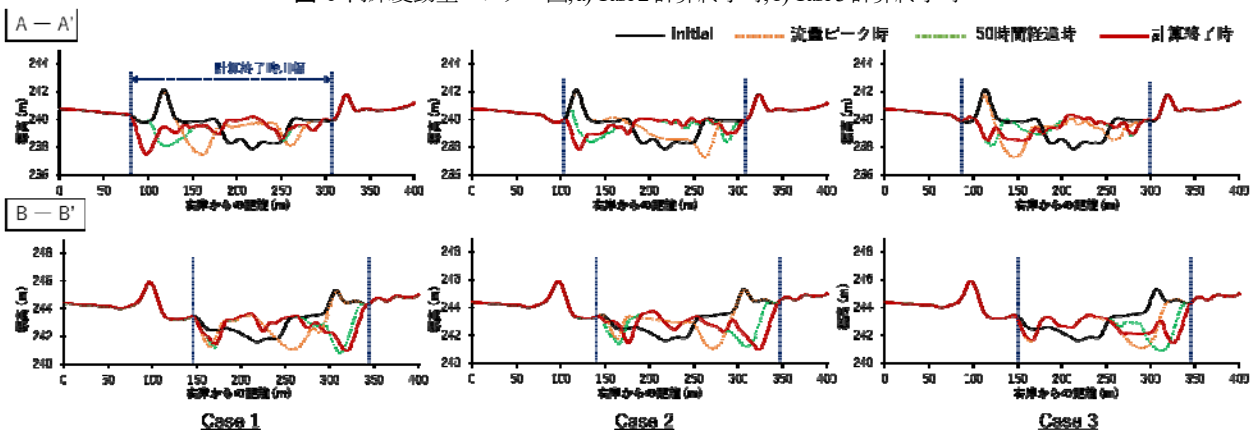


図-6 破堤箇所における河床高の時間変化, 上段) 測線 A-A' 断面, 下段) 測線 B-B' 断面

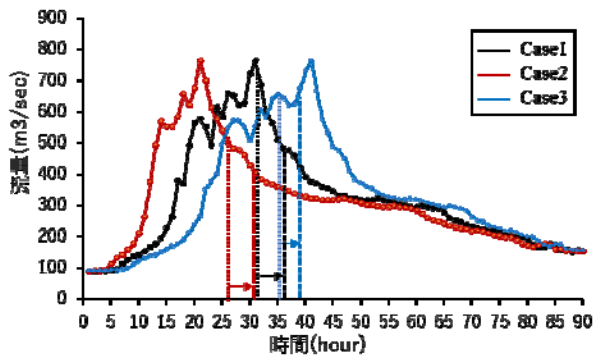


図-7 堤防の表水面流失から完全流失までの時刻 (矢印は測線 B-B'における堤防完全流失までの時間を示す)

ける河床変動量カウンター図を示す。Case 1 は再現計算であり、既往報告<sup>3)</sup>と同じ計算結果を用いている。図-4より、蛇行侵食による7か所に亘る左右岸一連の堤防決壊が位置も含めて再現されていること、侵食後の川幅 (A-A'断面, 現地: 200m、再現: 200m) および流路の最大振幅 (A~B 断面, 現地: 298m、再現: 260m) が概ね再現されていることが分かる。これより音更川上流における 2016 年出水時の河道変化状況を概ね再現できていると考え、本研究の目的である侵食リスク評価のための河道変動特性の把握に本解析モデルを用いて以下の検討を行った。

図-5に、Case 2, 3の計算終了時の河床変動量カウンター図を示す。また、図-6に測線 A-A', 測線 B-B'断面における各ケースの河床高の時間変化を示す。図-5, 6より、Case 1から Case 3ではヒドログラフの形状が異なるにも関わらず、全てのケースにて類似する流路変動が生じ、計算終了時の最終的な破堤箇所、および測線 A-A', 測線 B-B'断面の川幅の拡幅距離はほぼ類似することが分かる。

そこで、次に洪水ピーク流量の到達時間の違いが破堤リスクに与える影響を把握するため、測線 B-B'を代表点とし、図-7に各ケースの堤防の表水面流失時刻と堤防の完全流失時刻をヒドログラフに重ねた図を示す。図-7によると、Case 1~Case 3の最終的な流路形状は上述(図-4と図-5)のとおり類似していたものの、破堤開始と終了時刻はケースごとに大きく異なる結果が示された。最も短時間で堤防侵食が始まった流量ヒドログラフ形状は、ピーク流量到達時間が Case 1 よりも早い Case 2であった。また、そのタイミングは流量減衰期であり、堤防が完全に流失するまでにかかる時間は約5時間と、その他2ケースに比べてゆっくり堤防決壊に至った。一方で、最も堤防の侵食・破堤の遅い流量ヒドログラフ形状は Case 3であった。Case 3では比較的ゆっくりと流量上昇しており、他2ケースと異なり堤防侵食はピーク流量到達前に始まり、その後、3時間程度と比較的短い時間で堤防が決壊した。これは、当該区間における本計算条件下では、Case 3のようにゆっくりと流量上

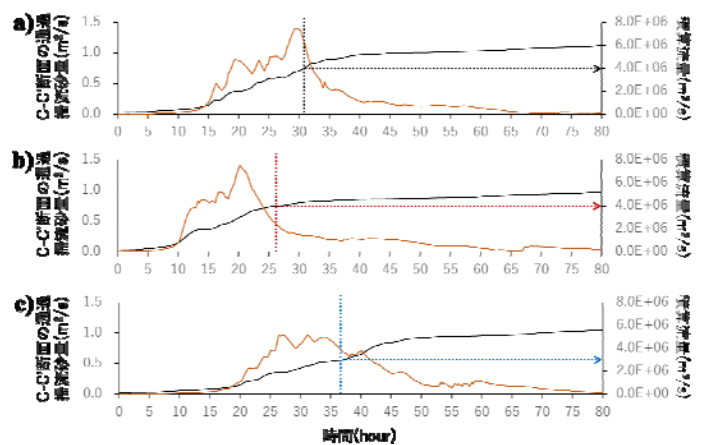


図-8 測線 C-C' (図-5)における積算流量と断面通過掃流砂量の時間変化、図中の点線は堤防法面の流失時刻を示す。

a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3,

昇させた場合、最も水位上昇する洪水ピーク到達前に複数箇所にて堤防決壊する可能性を示すものである。つまり、本計算条件下では、積算流量とピーク流量を統一したうえで出水ピーク到達時間のみを異ならせた場合、(1) 音更川の当該区間における最終的な堤防侵食リスクはいずれのケースもほぼ同等であること、(2) しかし、そのタイミングは流量ヒドログラフ形状によって異なり、出水の比較的后半に堤防決壊する場合もあれば、ピーク流量到達前に堤防決壊してしまう場合もありうる事が分かる。これまで、急流河川においては出水後半にダム操作等にて流量をゆっくり減衰させることが流路の蛇行化を促す要因の一つである可能性が指摘されてきたり。しかし、本結果からは、降雨条件やダム操作等により流量増加がゆっくりと生じた場合、出水ピークの前に堤防侵食リスクが高まり出水ピーク時には堤防が失われ外水氾濫の危険性の増大に繋がる可能性が示された。

次に、Case 1から Case 3の積算流量と図-5に示す C-C'断面における通過掃流砂量を図-8に示す。図-8より、本計算条件下における Case 1~3を比較すると、流量が速く増加する Case 2において、多量の土砂が早く動きだすことが分かる(図-8(b))。この土砂は砂州の波高拡大につながり、比較的短時間で堤防侵食・破堤を導いたものと推察される。

次に、Case 1~3における堤防侵食開始(破線矢印)までの積算流量値を比較すると、Case 1では  $4.05 \times 10^7$  [m³/sec], Case 2では  $3.99 \times 10^7$  [m³/sec], Case 3では  $3.00 \times 10^7$  [m³/sec]であった。また、堤防侵食開始までの C-C'断面における通過掃流砂量の積算値は、Case 1にて 897.6 m², Case 2にて 822.3 m², Case 3にて 541.9 m²であった。これより、Case 3の堤防決壊に至る積算流量および積算掃流砂量は、Case 1と Case 2に比べて7割程度であることが分かる。低水路内に形成された砂州地形が蛇行発達をもたらすためには、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ると報告されているが、本結果は、

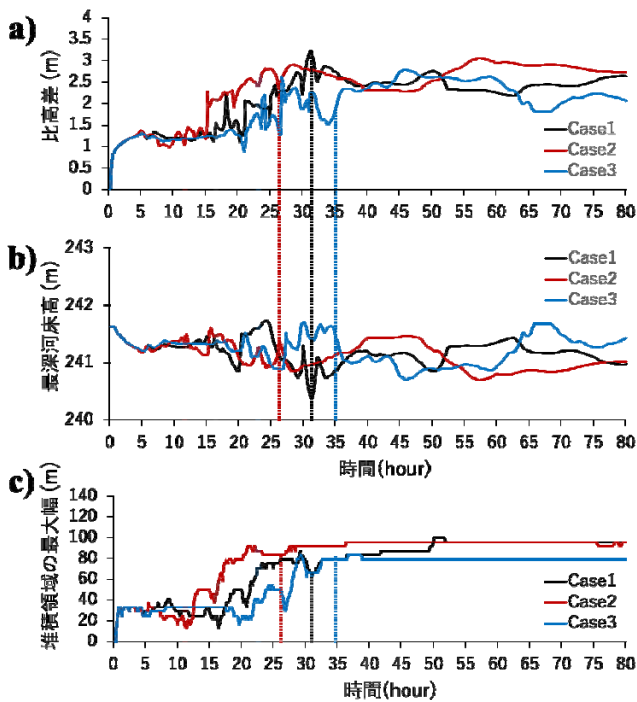


図-9 Case 1 から Case 3 の測線 B-B' 断面における時間変化、a) 比高差、b) 最深河床高、c) 堆積領域の最大幅（発達）、図中の点線は各ケースの堤防表法面流失時刻、図中の棒線は各ケースの流量  $400\text{m}^3/\text{sec}$  を超えた時刻を示す。図中の点線と棒線の色は、凡例の色に対応する。

そうした状況の創出には、出水ピーク値の大きさよりも、ある程度以上の大きな流量が継続することの方が大きく影響することを示すものと考えられる。

そこで、当該区間における“ある程度大きな流量”とはどの程度かを確認することを目的に、図-9 に Case 1～3 の測線 B-B' 断面における比高差、最深河床高、および堆積領域の横断方向への発達（初期河床より河床高が上昇した領域の最大幅）について、その時間変化を示す。図-9(a) および図-9(b) より、各ケースの比高差と最深河床高を比較すると、流量の上昇速度が速い Case 2 ほど砂州の波高の成長速度が速いことが分かる。一方、流量をゆっくり増加させた Case 3 を確認すると、砂州の比高差や最深河床高は、破堤時においても Case 1 や Case 2 ほど発達しないことが分かる。これは、“ある流量”を超えると、それ以上砂州の波高が高くなるとも、流路が横方向へと移動し始め、堤防侵食リスクが時間経過と共に増大することを示すものと考えられる。

ここで、流路の蛇行化のタイミングは、図-9(c) に示す流路が横方向へ拡大し始めるタイミングと概ね一致するものと仮定する。図-9(c) より堆積領域の最大幅が発達し始める時刻を読み取ると、Case 1 では計算開始より約 16 時間経過後、Case 2 では約 11 時間経過後、Case 3 では約 23 時間経過後ごろから堆積領域の最大幅が発達していることが分かる。これらの時間と各ケースの流量を比較すると、いずれのケースも概ね流量  $400\text{m}^3/\text{sec}$  程度を超える時刻（図内の棒線）と一致した。このことは、

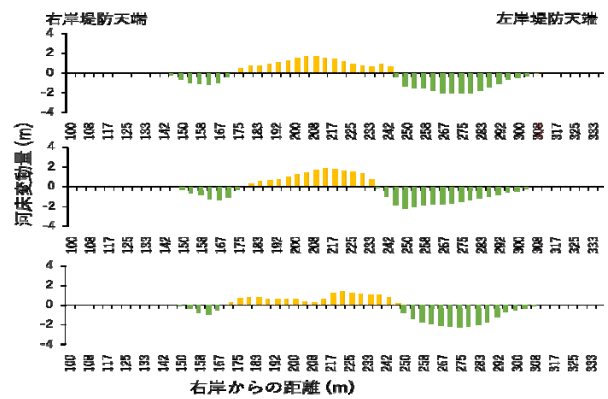


図-10 堤防表法面流出時における測線 B-B' の河床変動量積算図

音更川当該区間における砂州地形が急激な蛇行発達を促し始める“ある流量”とは、流量  $400\text{m}^3/\text{sec}$  付近を超えたあたりには存在するのではないかと推察される。

その他、図-10 に、Case 1～3 における堤防表法面流出時における測線 B-B' の河床変動量の積算図を示す。本図からも、Case 3 では、堤防流失時における砂州の波高は他 2 ケースよりも小さいことが分かる。これは、Case 3 では堤防侵食・破堤時にピーク流量を迎えないため、その他 2 ケースに比べてゆっくりと砂州の波高が発達するためと考えられる。つまり、Case 3 のようにゆっくり流量増加する場合、河床の鉛直方向の変化量は小さくとも、流路が大規模に横移動するような流路変動特性が現れるようである。

## (2) 高流量の継続時間が流路変動特性に与える影響

ここでは、流量ピークの大きさと継続時間による影響を確認する。図-11 に、Case 4 および Case 5 の計算終了時の河床変動量コンター図を示す。図-11 より、出水ピーク流量の  $300\text{m}^3/\text{sec}$  が継続した Case 4 では、計算開始から 90 時間経過後も堤防決壊に至らなかったことが分かる。一方、出水ピークを  $500\text{m}^3/\text{sec}$  とし、この流量を定常流で与え続けた Case 5 では、計算開始から約 35 時間経過後に堤防表法面が流失し、41 時間後に堤防は完全に決壊した。これより、本計算条件下における音更川当該区間では、流量  $300\text{m}^3/\text{sec}$  程度の出水であれば長時間継続しても破堤する可能性は低いが、流量  $500\text{m}^3/\text{sec}$  程度を超えた出水が 15-20 時間ほど続くと、出水中の水位が堤防を越流せずとも流路の蛇行化に伴い堤防下部が損傷し、破堤に至る可能性が示された。これは、前述の Case 1～3 にて推察された、音更川当該区間において砂州地形が蛇行発達を促す流量（ $400\text{m}^3/\text{sec}$  付近を超えたあたり）と矛盾しない結果である。今後、この点に関しては急勾配河川における侵食リスクを考慮した河川整備を検討するにあたって重要な知見となると考えられるので、条件を単純化した実験水路と数値解析にてより詳細に検討していく必要があると考えられる。

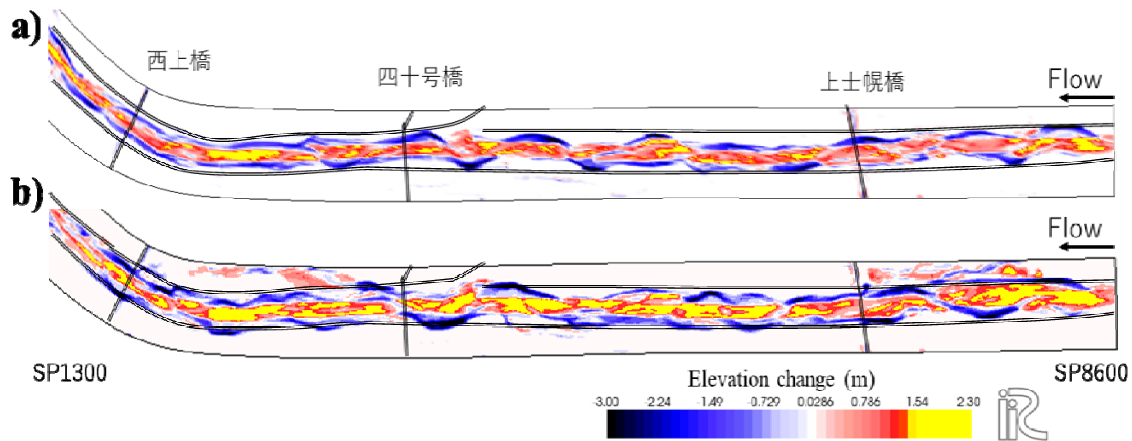


図-11 河床変動量カウンター図, a) Case 4, b) Case 5

#### 4. 結論

2016年8月、音更川上流区間では大規模な流路の蛇行化とそれに伴う左右岸連続7箇所の堤防決壊が生じた。本研究では、音更川当該地区を急流河川災害のモデルケースとし、既往報告<sup>3)</sup>に続く検討として、異なるハイドログラフ形状に対する流路変動の応答を数値解析より検討した。結論は以下の通りである。

- (1) 数値解析にて、実績での総流量と洪水ピーク流量を統一した条件のもと流量ハイドログラフの形状のみ異ならせた場合、全てのケースにて同じ場所での類似規模の堤防決壊が生じた。ただし、その堤防侵食開始タイミングは異なり、流量が速く上昇する場合は出水後半に堤防侵食が生じ、流量をゆっくり増加させたケースではピーク流量到達前に堤防侵食が始まり決壊した。
- (2) 本計算条件下の当該区間では、ピーク流量自体の大きさよりも、砂州の波高の成長に必要なある程度の高流量が長期間続くことが流路の蛇行化を促す主要因であると示された。降雨条件等により流量増加がゆっくりと生じた場合、出水ピークの前での堤防侵食リスクが高まり、出水ピーク時における外水氾濫の危険性が增大することに留意する必要がある。

謝辞：音更川現地データは帯広開発建設部にご協力いただいた。ここに謝意を記す。

#### 参考文献

- 1) 永多朋紀, 渡邊康玄, 清水康行, 井上卓也, 船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究, 水工学論文集, Vol.60, 1081-1086, 2016.
- 2) Iwasaki T., Shimizu Y., Kimura I.: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, *Advanced in Water Resources*, Vol.93, pp.118-134, 2016.
- 3) 岡部和憲, 久加朋子, 清水康行, 長谷川和義, 新庄興, 山口里実：流量低下時における河道変動の応答特性～十勝川水系音更川を事例として～, 水工学論文集, Vol.74, pp.1501-1506, 2018.
- 4) 石田・山口・久加・岩崎・清水・川村・泉：札内川・戸蔭別川合流地点における堤防決壊と氾濫原からの還流による被害特性の検討, 河川技術論文集, 23, pp.1-6, 2017.
- 5) 土木学会災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団緊急報告会資料, 2017.
- 6) 桑村貴志：地形データを用いた河道変遷の調査, 北海道開発局技術研究発表会論文集, 2013.
- 7) 北海道開発局：平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方委員会報告, 2017.
- 8) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 206, pp.59-69, 1972. (2018. 5. 31 受付)

### EFFECTS OF DISCHARGE HYDROGRAPH ON CHANNEL MEANDERING AND BANK EROSION –A CASE STUDY ON OTOFUKE RIVER IN JAPAN –

Kazunori OKABE, Tomoko KYUKA, Yasuyuki SHIMIZU, Kazuyoshi HASEGAWA, Kho SHINJO and Satomi YAMAGUCHI

In 2016 August, Otofuke River, located in Tokachi prefecture of Hokkaido, faced active bank erosion leading into a significant migration in the path of the channel due to the four major flooding events. Following our previous report, this study focused on the effects of discharge hydrograph shapes on channel migration during high discharge flood by means of numerical analysis. The results showed that, both the shape of channel path and the locations of levee breach were almost same even if the timing of peak discharge was shifted under the same total flow and same peak discharge conditions. Moreover, integrated flow rate and sediment transport rate until the breach was also substantially similar in each case. It means that, under this numerical conditions, there is a possibility that the duration of high water is strongly influenced on channel formation than the peak flow rate itself.