

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～

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

¹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

²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)

³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)

⁴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)

⁵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)

⁶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。痕跡水位調査によると、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と推察された。本研究では音更川を急流河川災害のモデルケースとし、流量低下能力はあるものの流量低下時に流路が蛇行化する現象について現地および数値解析から検討した。結果、数値解析においても流路の振幅増大は流量低下時に著しく進行した。これは、流量低下時に河道内に土砂が堆積することで河床高が上昇し、それに伴い流れが偏向することで、流路の側方移動が促されるためと推察された。

Key Words: meandering, bank erosion, large-scale flood disaster, Otofuke River, unsteady discharge

1. はじめに

平成 28 年 8 月、連続して到来した 4 つの台風は道内各河川に数波の降雨をもたらし、記録的な大雨となった。とくに太平洋側の南・東斜面では、既往の 1 月降水量記録の 2 倍程度を記録するに至り、十勝川水系、常呂川水系をはじめとした多くの水系の水位観測所において既往最大の水位が記録された。これにより、各河川流域では河川・道路・鉄道・農業等甚大な被害が生じ、とりわけ十勝川水系各河川の急流区間である中上流部において大規模な河道変動が発生し、これに起因する災害が多発した²⁾。

なかでも、音更川上流区間では図-1 に示すとおり、大規模な流路の蛇行化とそれに伴う左右岸連続 7 箇所の堤防決壊が確認された。また、出水後に決壊を免れた堤防の痕跡水位調査を実施したところ、当該区間におけるピーク水位は堤内地盤より 1.2m~1.6m 程度上昇していたものの、外水氾濫は発生していなかったことが認められた。つまり、本出水による当該区間の被害はピーク流量

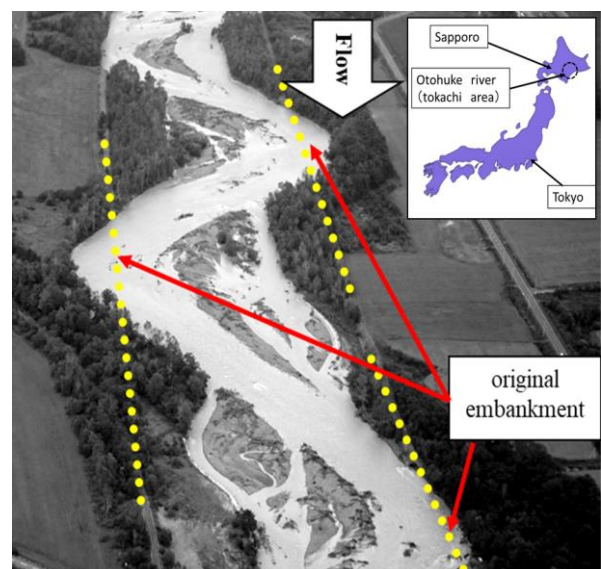


図-1 音更川の 2016 年 8 月出水後の被災状況

に対する川幅が不十分であったことが要因であるとは考えにくく、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と推察された。

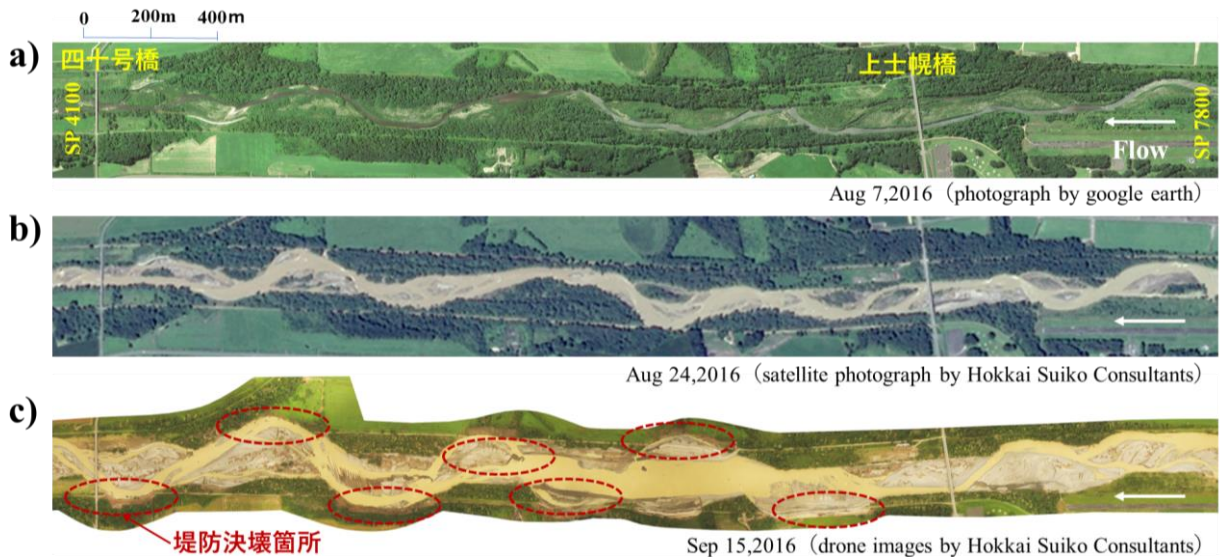


図-2 音更川当該地区の写真, a) 出水前 (2016/8/7), b) 3波目の出水終了時 (2016/8/24), c) 4波目の出水終了後 (2016/9/15)

音更川では、過去にも出水時に蛇行流による堤防決壊が発生してきた。そのため、地形図を用いた経年的な河道変遷が分析され、川幅について治水の評価が行われてきた³⁾。しかしながら、今回の災害では流量流下能力が十分であっても流路の側方移動により堤防決壊することが改めて確認され、急勾配区間の河川整備に際しては、大規模出水時の流量変動と河道変動との関係性を踏まえることの重要性が改めて明らかになった。ただし、現状では急勾配河川における河道の大規模な変動要因に関する知見は非常に限られており⁴⁾⁵⁾、とくに実河川において「いつ」「どこで」「どのくらいの規模」の河道変化が発生するのかを定量的に予測し、河岸侵食リスクを評価する段階には至っていない。

永多ら⁴⁾や Iwasaki et al.⁵⁾の報告では、中上流部の急勾配河川では水位低下時に洪水中期に形成されていた砂州地形に誘発された蛇行流路が河岸侵食を伴いながら振幅を増大させ、堤防の侵食決壊に至る場合があることが指摘されている。しかし、これらの既往報告では流量低下がなぜ蛇行発達を促すのかまでは考察されておらず、本プロセスを明らかにすることは重要な課題として残されている。そこで、本研究では音更川当該区間をモデルケースとし、現地データに基づいて流量規模と蛇行振幅の規模などを整理することで河道変化特性を把握するとともに、流路変動を再現する数値計算を実施することで非常流量下における流路の蛇行化のプロセスを考察した。

2. 平成 28 年 8 月洪水による被災の特徴と課題

平成 28 年 8 月洪水で音更川を含む十勝川水系の中上流河川における被災形態については、以下のような特徴が挙げられる。

- ・ 砂州や蛇行流の発達に伴う流路幅の拡大等による大

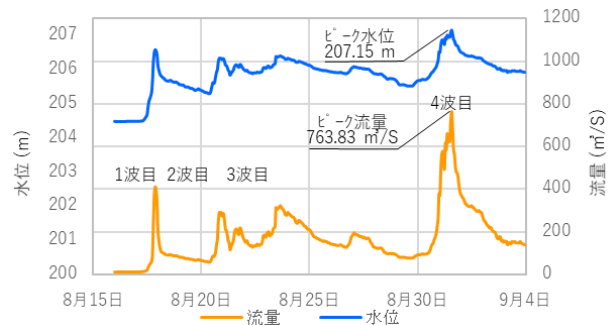


図-3 士幌観測所 (540km²) : 北海道開発局

規模な流路変動に起因する被災。河岸・堤防の決壊や市街地内の地盤の侵食、橋梁等の構造物の被災 (特に橋台背面や取付部の侵食が多発)

- ・ 外水の氾濫による大規模な流路移動や流路変動に起因す浸水や農地被害

このことから今後の急勾配河川の整備・維持管理に際して様々な課題が改めて提起された¹⁾。具体的には、急勾配河川の整備においてこれまで以上に河道の大規模な変動の可能性を踏まえることが必要であり、特に出水に伴う砂州や蛇行流の発達による河岸や堤防の侵食メカニズムに関する知見の蓄積・充実を図り侵食の可能性を推定する手法の確立が必要と考えられる。

以下では、音更川で発生した河岸・堤防の侵食を具体的ケースとして上記課題のうち、砂州や蛇行流の発達に伴う中上流河川の河道変動と河岸堤防決壊に着目し侵食メカニズムについて考察するものである。

3. 音更川上流で発生した河道変動

(1) 音更川諸元と出水時の概要

十勝川支川の音更川上流諸元は以下の通りである。道管理区間・流域面積約 500 km²、勾配 1/120 程度、堤間約

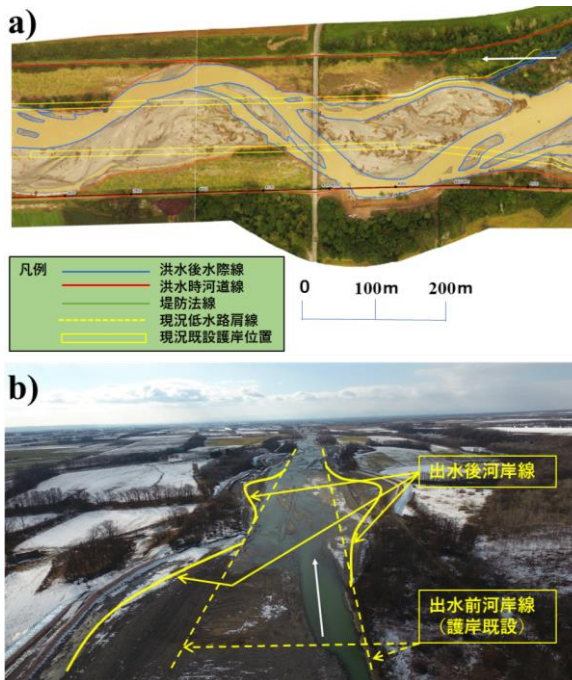


図-4 当該地区の流路蛇行状況, a) 上土幌橋前後を上空から UAV 撮影した写真, b) 当該地区の UAV 斜め写真

200m, 河床材料は砂混じり礫, 上流に発電用の糠平ダムが 1956 年に建設されている. 今般の出水前の河道(図-2-a)は, 樹林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-b および図-2-c に示すとおり, 平成 28 年 8 月の出水では, 川幅の著しい拡幅を伴う大規模な河道の変動が生じ, 一連区間で左右岸交互の複数箇所で見られる河岸・堤防が決壊する現象が発生した.

図-3 に土幌観測所の水位と流量(暫定値)データを示す. 図-3 より, 当該区間近傍の土幌観測所では 4 波の出水が観測され, 先の 3 波に比べ, 最後の 4 波目の流量が著しく大きく, 既往最大流量を記録したことが分かる. 図-2-b は 3 波目後の写真であり, この段階では一部の河岸の侵食や, 流路幅の若干の拡大, 蛇行発達の兆

表-1 水路幅と最大振幅

| 項目 | ① 出水前 | ② 3波後 | ③ 出水後 |
|-------|-------|-------|-------|
| 平均水路幅 | 63 m | 85 m | 160 m |
| 最大幅 | 152 m | 211 m | 298 m |

候も見受けられるものの, まだ蛇行流の顕著な発達や河岸の大規模な侵食は確認できないことが分かる. 一方, 図-2-c に示す出水後にドローンにより撮影された写真では, 大規模な蛇行流が発生するとともに流路幅が拡大し, 左右岸交互に 7 箇所に見られる堤防決壊にまで及んだ特徴的な河道の変動が明瞭に確認できる. このことから, 当該区間の大規模な流路の蛇行化は 4 波目の出水(既往最大流量)によって短期間に急速に発生したことが明らかである. なお, 当該区間では過去の侵食による堤防接近箇所等には低水路護岸が設置されていたが, 図-4 に示すとおり, 出水後には大部分が破壊流失したことが確認されている.

その他, 今般の調査では主流線の痕跡, 河岸・堤防の決壊状況, 樹林の流失状況等が明瞭に判読できる適切な時期にドローンを利用して高度約 50 m から対象の一連区間を迅速に撮影することが出来た. 衛星による写真とは異なる特色を有するドローンによる調査の有効性が改めて認識された.

(2) 音更川当該地区の河道変動の特性

出水による河道諸元の変化を, 図-2 に示す 3 ステージの写真から把握した. 図から分かるように, 当該区間は堤防がほぼ直線で一定の堤間であることから, 左岸堤防を基線として河道内流路の左右の河岸と主流線の位置(写真の水面等から推定)を計測した.

図-5 に, ① 出水前, ② 3 波後, ③ 出水後の状況について計測結果を重ね合わせた図を示す. 図-5 より, いずれの図からも, 3 波目までは小規模な変化に止まっていた河道の変動が, 4 波目の出水により大規模な蛇行流

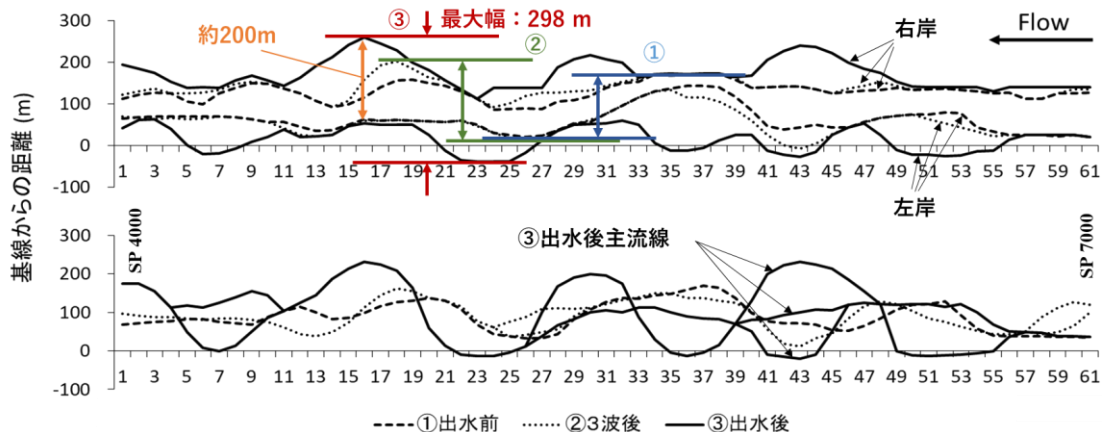


図-5 当該区間 (SP4000~7000) での出水による河道諸元の変化, 上) 左右岸の河岸位置の変化, 下) 主流線の位置の変化

※横軸は測線番号 ※③出水後の主流線は複数の区間がある

が発達し、河岸・堤防の決壊が急速に進行したことが河道の諸元の変化として確認できる。具体的には表-1に示すように、水路の平均幅については、① 63m → ② 85m (1.35倍) → ③ 160m (2.54倍) と 4波目の出水により急激に拡大しており、蛇行の最大振幅についても、152m → ②211m(1.39倍) → ③298m (1.96倍) と同様の傾向である。主流線の蛇行の波長については、① 出水前については必ずしも明瞭ではないが、② 出水後は概ね700m程度であり、③ 3波後においてもほぼ同程度の波長であったと判読され、顕著な変化は確認できない。つまり、4波目の大規模な出水時には、蛇行の波長はそれほど変化しないのに対して、蛇行の振幅は短時間で著しく増大したことが分かる。

4. 数値解析による音更川の検討

(1) 解析条件

2016年8月洪水における音更川当該区間を対象に、現地調査で確認された河道変動特性について、より詳細に変動過程を検討するため、平面2次元河床変動解析を行った。平面2次元河床変動解析には、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。計算は、既往最大流量を記録した4波目を対象とし、特に非定常流量下における蛇行流路の発達過程を把握することを目的とした。

計算範囲は、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7m、横断方向に4mとし、航空写真を参考に植生域を設定した。植生の密生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⁹⁾を参考に、各々を0.03、0.2mで与えた。上流端流量データ

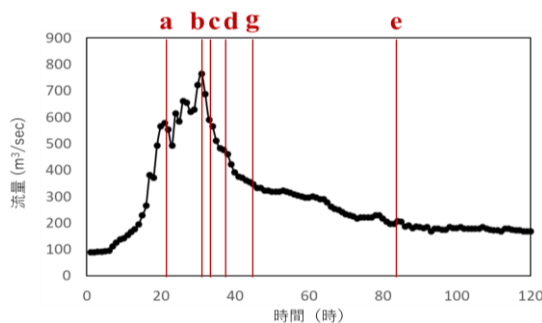


図-6 流量ハイドログラフ、

図中の流量 a~g は、図-8、図-10の流量時系列を表す

は、図-3に示す音更川の土幌観測所で得られた暫定値(帯広建設開建提供)を用いた(図-6)。河床材料は、現地調査より得られた平均粒径 $d_m = 55\text{mm}$ 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(1972)の平衡流砂量式を用い、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。

(2) 非定常流量下における流路の蛇行化のプロセス

図-7に、計算終了時における河床変動量コンター図を示す。また、図-8に、図-7に示す堤防決壊箇所 A-A'、B-B'、C-C' 測線における河床の横断形状の時間変化を示す。図-7および図-8より、本計算は堤防決壊箇所に若干の違いはあるものの、流路の蛇行化に伴い左右岸連続での破堤が再現できていること、川幅の拡幅距離(たとえば図-8のA-A'断面)が約200m程度と現地データと類似することから、ここでの流路変動特性の考察にある程度十分な精度があると考えられる。

また、図-9に、数値解析による水深、流速、河床変動量の時間変化をコンター図で示す。図-8および図-9より、当該区間の流路の蛇行化は、数値計算においても

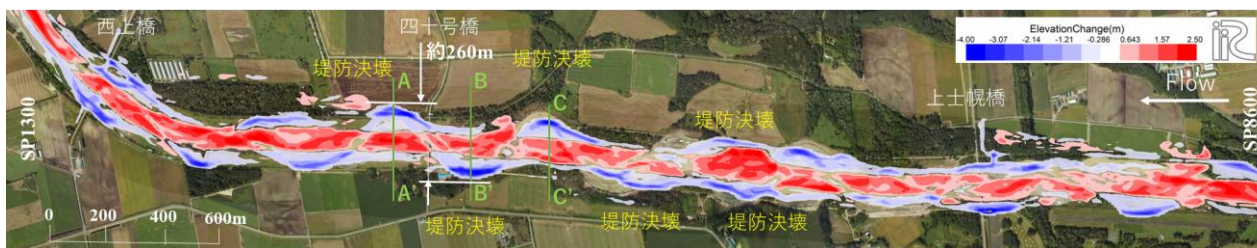


図-7 当該区間における Case 1 終了時の河床変動量コンター図

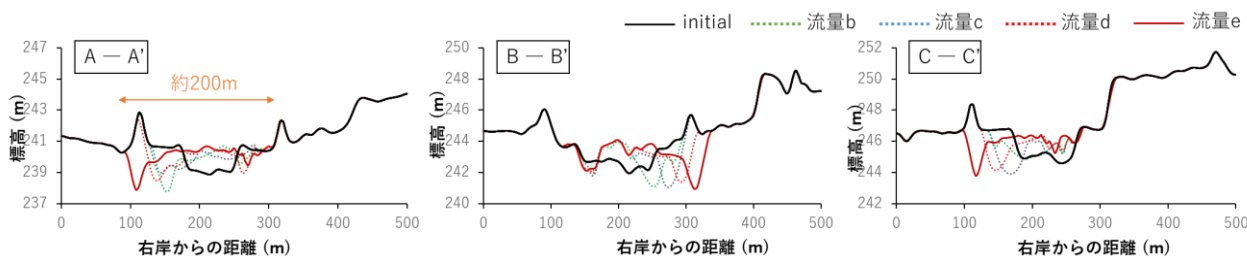


図-8 図-7に示す堤防決壊箇所 A-A'、B-B'、C-C' 測線における河床の横断形状の時間変化

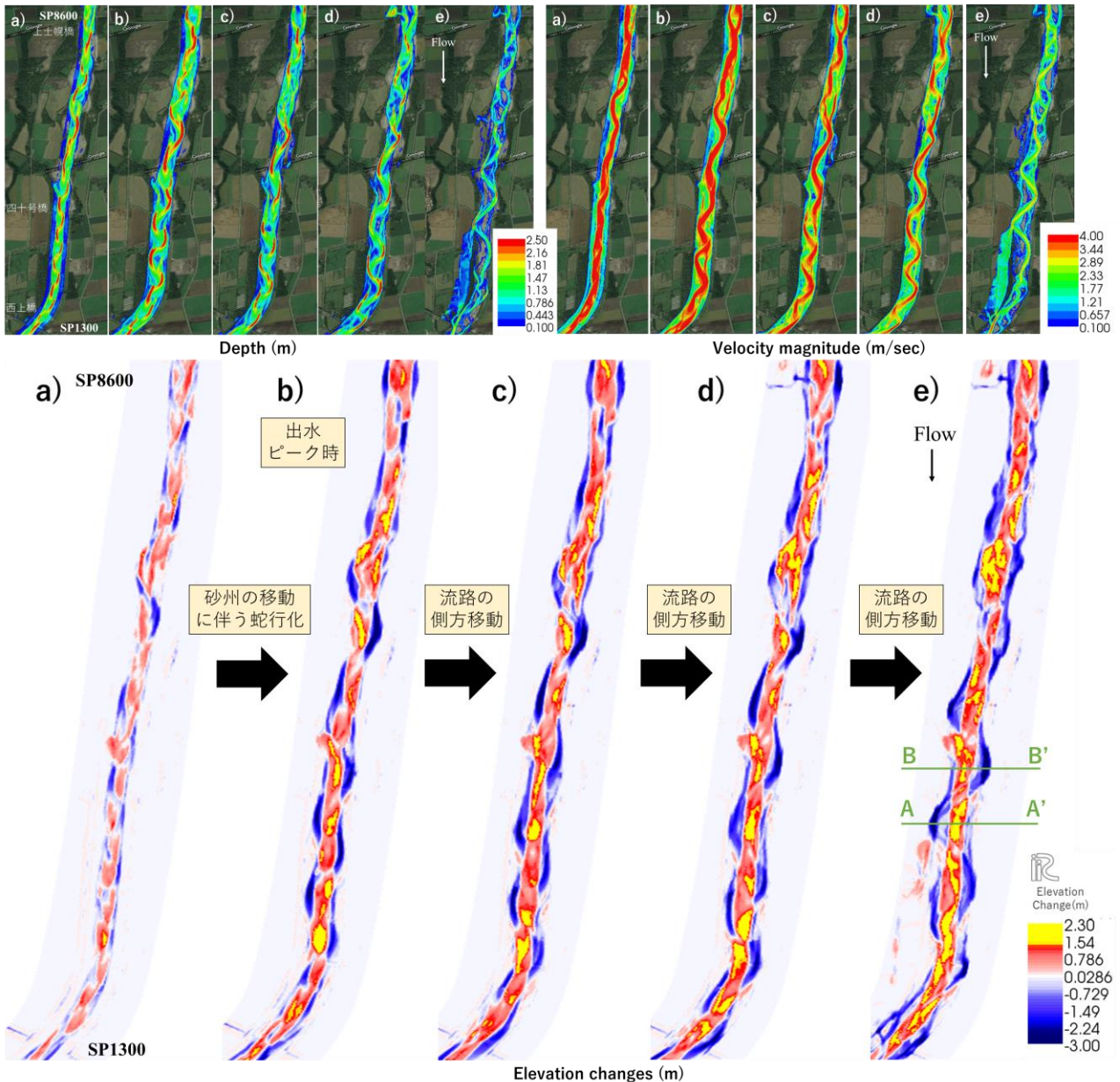


図-9 数値解析による水深、流速、河床変動量の時間変化をコンター図（画像背景：Google Earth 2016/9），
 図中のa～eは図-6に示す流量に該当する，図中のA-A'，B-B' 測線は図-7に相当する

出水ピーク後に明瞭化する様子が示された。

図-8 および図-9 より堤防決壊箇所の河床高の横断形状を確認すると、流路の側方移動に伴う堤防の決壊は、図-6 の流量（Hydrograph）に示す流量 d 付近で生じていることが分かる。しかしながら、図-9 より、流量 d 付近の合成流速コンター図を確認すると、合成流速は流量 a や流量 b（ピーク時）付近にて最も高速であり、出水ピークを過ぎると時間と共に値が小さくなる様子が見てとれる。つまり、出水後半より出水前半から出水ピークにかけての方が河道内の流速や掃流力が大きい条件であったにも関わらず、音更川当該区間では流量低下時に流路が側方移動し、蛇行化に伴う堤防決壊が進んだことが分かる。

そこで、図-10 に図-8 に示す測線 A-A' と測線 B-B' 付近の河床変動量コンター図に掃流砂ベクトルを重ねた

ものを示す。図-10 より流量変化と流路変動特性との関係に着目すると、流量低下時、低水路内の水深は次第に浅くなる反面、流路内の河床高は次第に上昇する傾向が認められる。これは、それまで移動していた土砂が停止することで河道内への土砂の堆積が進行し、砂州が発達するためである。これより、図-10 に示す掃流砂ベクトルから分かるように、低水路内にて流れが偏向しやすく、流路の蛇行化や分岐といった、活発な流路変動が生じやすい状況が形成されると推察される。なお、藤田ら⁷⁾によると、側岸侵食が始まると砂州の前進が停止することで砂州の波高が成長することも指摘されている。したがって、流量低下時に流路が側方に移動し、堤防や河岸まで到達した場合、側岸侵食により土砂が河道内に供給されることが更なる流路の側方移動が促す可能性も考えられる。以上のことから、冒頭で述べたように中上流部

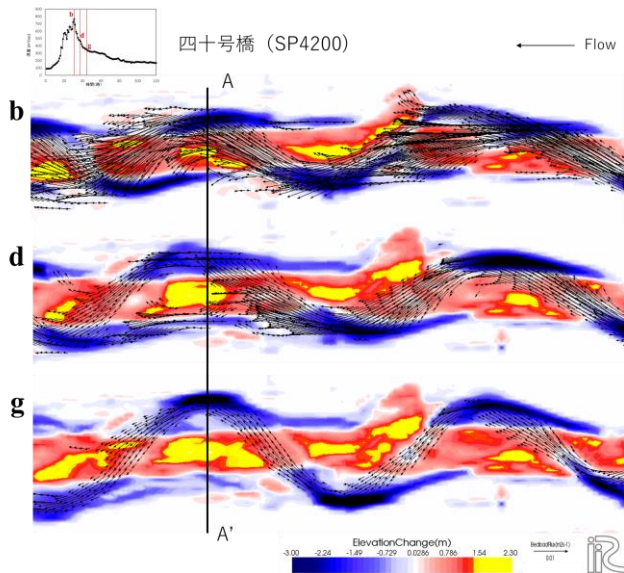


図-10 数値解析による四十号橋付近における河床変動量コンター図に掃流砂ベクトルを重ねた図

の急勾配区間における河川整備に際しては、流量流下能力を確保するのみでは想定以上の大規模出水が生じ、多量の土砂が移動するような場合、河岸侵食リスクを十分に抑制できない可能性が示された。たとえ流量ピーク時に外水氾濫しなかったとしても、流量低下時に流路の大規模な側方移動が生じ、堤防破堤に至る可能性があることに留意する必要がある。なお、本計算では侵食による樹木流失を考慮することで実河川での事例を再現した。樹木が蛇行に及ぼした影響については別報（久加・山口）として本水工論文に同時投稿している。

5. 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、現地調査から出水規模と流路変動特性との関係性を把握すると共に、数値解析から流路の蛇行要因に

ついて検討を行った。結論は以下の通りである。

- 1) 痕跡水位調査によると、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と推察された。
- 2) 当該区間の大規模な蛇行の発達は4波目の出水（既往最大流量）によって短期間に急速に発生した。この際、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、出水後には大部分が破壊流失した。
- 3) 4波目の大規模な出水時には、蛇行の波長はそれほど変化しないのに対して、蛇行の振幅は短時間で著しく増大した。
- 4) 数値解析より、流量増加時は砂州の移動に伴い流路が蛇行化し、流量低下時は流路内の河床高が次第に上昇することで低水路内の流れが偏向し、流路が側方移動しやすい状況が創出されたと推察された。

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) 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.
 - 2) 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.
 - 3) 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.
 - 4) 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, Vol.69, 1009-1104, 2013.
 - 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) 藤田裕一郎, 村本喜雄, 宮坂裕文：河川における側岸侵食, 京大防災研究年報, 26, B-2, pp.427-444, 1983.
- (2017. 9. 29 受付)

DISCHARGE FLUCTUATION DOMINATING FACTORS INFLUENCING THE PASS OF RIVER –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 within a time span of as short as 14 days. In order to understand the mechanism of river meandering of steep-slope rivers under the unsteady-flow conditions during floods, field investigation and numerical analysis were conducted. Results from field research showed that bank erosion seemed to be caused by lateral channel migration which was occurred after peak-flow discharge, since the maximum water level traces were lower than the height of both embankments. Additionally, numerical analysis indicated that sediment accumulation becomes active when the flow rate decreases and it deflects flow path toward to the lateral direction.