

出水時の河岸浸食を伴う流路変動の発達要因

DEVELOPMENT FACTORS OF CHANNEL CHANGE WITH BANK EROSION IN A FLOODING RAPID RIVER

桑村 貴志¹・渡邊 康玄²

Takashi KUWAMURA, Yasuharu WATANABE

¹正会員 国土交通省北海道局 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-2)

²正会員 博(工) 北見工業大学 工学部 教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

It is necessary to practice river works to protect dikes in consideration of channel change in a rapid river. However, the knowledge of the long term movement of channels and development of meandering with bank erosion is insufficient. Therefore, in this study, we focused on factors of channel change in a flooding rapid river in the case of the Otohuke River in 2011. Other than the flood of 2011, we added two more floods which caused dike erosion but varied in duration of flood time and shape of channel in order to expand our study.

In the consequence, we found that a channel greatly transformed itself and river bank erosion occurred if the channel meandered before flood or flood water gentry decreased the level. We note that for the purpose of decrease the risk of dike destruction, it is necessary to manage rivers with paying attention to not only the peak water level in a flood but also the decreasing water level after the peak.

Key Words : Meandering channel, bank erosion, dike destruction, river works

1. 研究背景と目的

2004年7月の刈谷田川や2015年9月の鬼怒川等, 近年堤防の決壊による甚大な被害が多発してきている. これらの出水の原因となった線状降水帯や停滞前線は, 長時間にわたって同地点に大雨をもたらすため河川水位を急激に上昇させるとともに堤防決壊に対する警戒が必要となる.

北海道の代表的な急流河川である音更川においても, 2011年9月に停滞前線の発生による出水によって, 写真-1に示すように河岸浸食を伴って流路の蛇行が発達し, 堤防の一部を流出するに至った¹⁾.

出水による堤防決壊の要因としては, 河川水が越流して堤防法尻や法面を洗掘して破堤に至る越水破堤, 雨水の浸透による堤体の剪断強度低下により破堤に至る浸透破堤, 流水による低水路河岸の浸食が堤防に達して破堤に至る浸食破堤などが考えられるが, 音更川のような急流河川では, これらの破堤形態のうち, 特に浸食破堤に備えておく必要がある. 近年の河道変動計算技術の発達によって, 出水時の流路変動の予測を行って危険箇所を想定することも可能となってきた²⁾, 出水毎に降

雨波形や河道形状が異なることもあって計算結果のみで危険箇所を設定することには限界があり, 平常時や出水時の河川管理を的確に行うためには, 出水時における流路変動の発達要因をあらかじめ把握しておくことが必要である.

本研究では音更川を対象として, 堤防流出が生じた2011年出水と, 河道の変化が2011年の出水時とは異なる挙動を示した過去の二つの出水における流路変動の状況や水理条件などを調査し比較検討を行って, 出水時の流路変動の発達要因を明らかとして, 今後の河川管理に資するものである.



写真-1 音更川での2011年出水での堤防流出状況

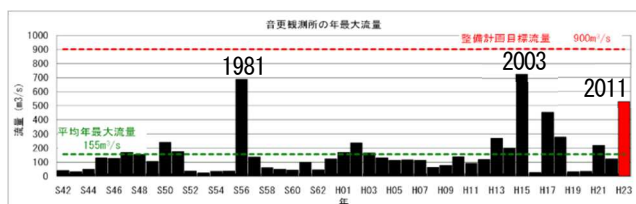


図-1 音更川（音更観測所）における年最大流量の変化

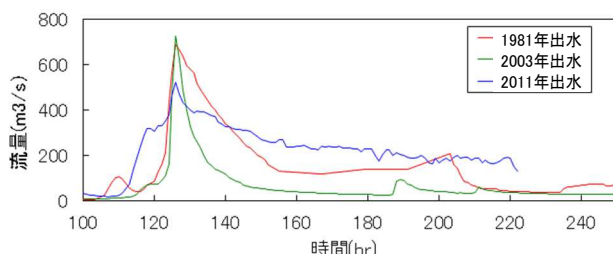


図-2 三つの主要出水の流量ハイドログラフ（音更地点）

2. 音更川における出水時の流路変動

(1) 音更川の概要

本研究で対象とした音更川は一級水系十勝川の一次支川であり、流域面積740km²、幹線流路延長93.5kmの北海道における代表的な急流河川である。上流の山間部には発電用の糠平ダム（1956年完成）があり、ダムから下流は狭隘な谷底平野の中を1/130～1/200の急勾配で流れている。河床材料は代表粒径が52～88mmの砂礫で構成されており、現在、低水路内には主に単列状の蛇行流路が形成されている。

音更川の河川改修は戦後になって本格的に着手され、現在では全川の堤防が整備されている。音更町の市街地を縦貫して流れる下流部(KP0.6～10.5)は、1980年代に低水路兩岸の低水護岸が完成している。中流部(KP10.5～30.0)は広い低水路幅を有して低水護岸の整備箇所が少なく、流路の蛇行が発達しやすい状況にある。上流部(KP30.0～47.0)は、頭首工や護岸などの整備が進んでおり、側岸浸食は発生しづらい状況にある。なお、中上流部は1970年代に実施された河道掘削によって蛇行流路が一度直線化されたが、2000年代には蛇行流路形状に戻っている²⁾。

(2) 検討対象とした三つの主要出水

音更川の最下流に位置する音更観測所地点の年最大流量の変化を図-1に示す。年最大流量の第1位は2003年出水($Q_p=725\text{m}^3/\text{s}$)、同2位は1981年出水($Q_p=687\text{m}^3/\text{s}$)、同3位は2011年出水($Q_p=526\text{m}^3/\text{s}$)である。また、それらの出水時の流域平均3日雨量は、1981年出水が278mmと最も大きく、次いで2011年出水が174mm、最も少ないものは2003年出水の164mmとなっている。なお、2003年出水は、

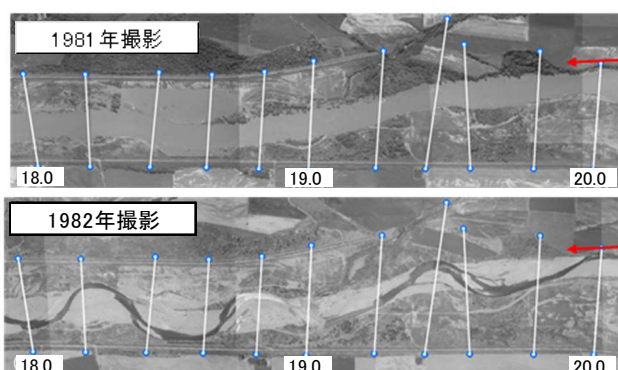


写真-2 1981年出水前後の流路形状

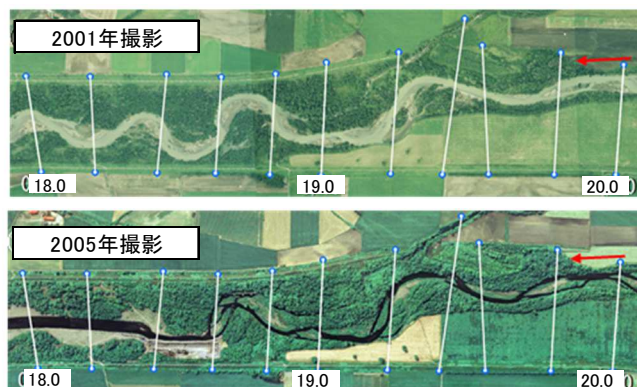


写真-3 2003年出水前後の流路形状

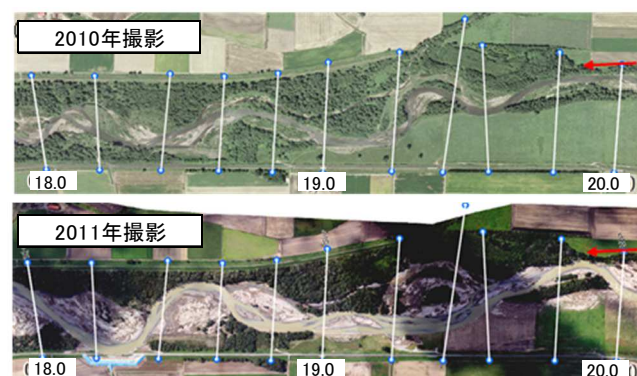


写真-4 2011年出水前後の流路形状

降水量は相対的に少なかったものの、短時間に降雨があったため、図-2に示すような先鋭的なハイドログラフとなっている。本研究ではこの三つの主要な出水を対象に、出水時の流路変動の状況、河道条件、水理条件等の比較検討を行って流路変動の要因に関する検討を行うこととした。

(3) 出水前後の蛇行流路形状の変化

写真-2～写真-4は各出水前後に撮影した航空写真(KP18～KP20)であり、出水による流路形状の変化を知ることができる。なお、1981年出水は、出水前に河道掘削が行われ低水路が人為的に直線的な形状に改変されているが、河道掘削が行われてから出水が発生するまでの間の航空写真が無いため、ここでは出水中に撮影された航空写真を1981年出水前の航空写真として代用とした。

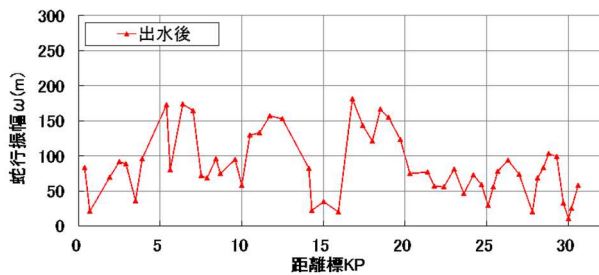


図-3 1981年出水前後の蛇行振幅の変化

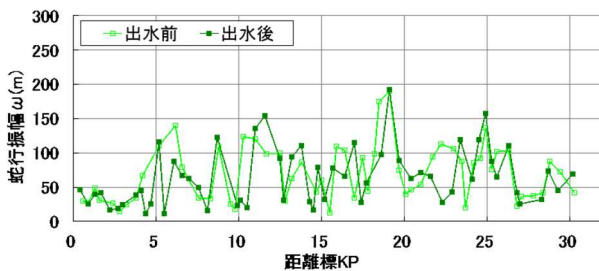


図-4 2003年出水前後の蛇行振幅の変化

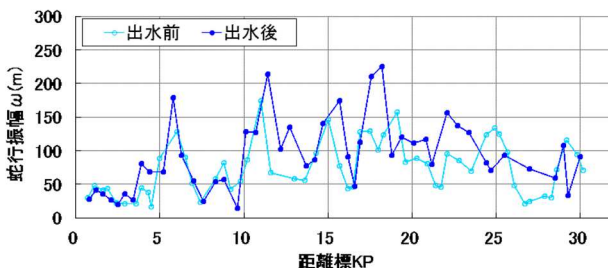


図-5 2011年出水前後の蛇行振幅の変化

写真-2の上段の1981年出水の写真では、低水路は直線的で幅広い流路となっており、洪水流も直線的に流れている。下段の出水後の写真では、平常時の流路自体は大きく蛇行しているが、低水路の河岸線の位置は出水前と大きく変化しておらず、河岸浸食を伴うような流路変動は確認できない。写真-3の2003年出水前の流路は低水路の中を大きく蛇行し、樹林化の進行により流路幅は狭い。出水後の写真の左側は出水直後の河道整正によって直線化された部分が写っている。右側の手が加わっていない箇所を見てみると、出水による流路形状の変化は大きくはない。写真-4の2011年出水前の流路は、は2003年出水と同様に蛇行した流れとなっているが、出水後の写真では蛇行がさらに発達して大規模な流路変動が生じている。

次に、出水前後の流路の蛇行形状の変化を把握するために、直轄管理区間(KP0～30)を対象として、出水前後の航空写真上の全ての蛇行箇所の蛇行振幅を計測した。1981年出水を除く出水前後の写真に撮影されている流路は平常時の蛇行流路形状であるが、各出水を通した蛇行流路の変形の大きさや規模を表わすことができる。図-3～図-5は、各出水前後の蛇行振幅の測定結果を縦断的に示したものである。

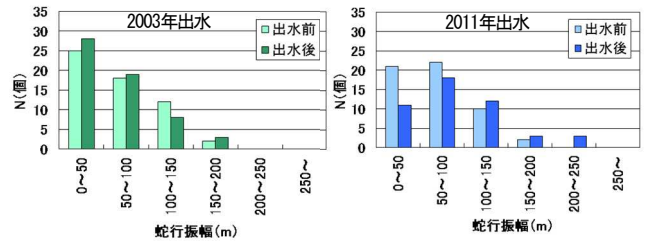


図-6 出水前後の蛇行振幅のヒストグラム

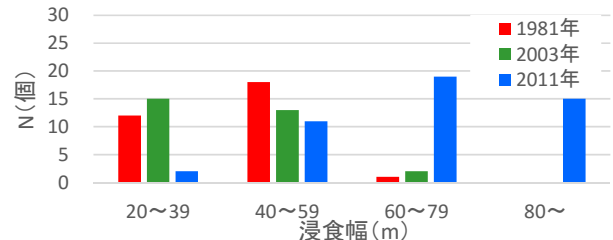


図-7 主要3出水における浸食幅のヒストグラム

図-3の1981年出水の蛇行振幅の変化は、出水前の滞筋が撮影された航空写真が存在しないため出水後の蛇行振幅のみのデータではあるが、1981年出水後には100m前後の振幅となる蛇行となっていたことが確認できる。なお、KP15付近の蛇行振幅が小さな値となっているのは、出水後の河道整正の影響によるものである。図-4の2003年出水と図-5の2011年出水の出水前後の蛇行振幅の変化を見てみると、二つの出水ともに護岸整備が概成していた下流部(KP0～10)では変化は小さく、中上流部(KP10～30)では変化が大きくなっている。

各出水前後の流路形状の変化について河岸の浸食の程度で比較することとする。図-8に示すように出水前後の航空写真の河岸線を重ね合わせて得た浸食箇所の横断方向の最大幅を浸食幅と定義して、蛇行振幅ごとの出現数を図-6のヒストグラムに整理した。なお、出水前の河道内において、比高が高く樹林化が進み陸地化した部分を浸食した場合にも河岸浸食として扱った。図を見てみると、2003年出水では出水を通して100～150mの振幅の出現数が減少した反面、100m以下の振幅の出現数が増加している。一方、2011年出水では、100m以下の振幅の出現数が減少し、100～150m以上の振幅の出現数が増加しているほか、200mを超える振幅が新たに出現するなど、2003年出水よりも蛇行が発達する傾向が見られた。

また、三つの出水時に発生した河岸浸食の浸食幅ごとの出現数のヒストグラムを図-7に示す。浸食幅が20m以上の浸食箇所数は、1981年出水が31箇所、2003年出水が30箇所でありほぼ同数となっている。一方、2011年出水は47箇所と大幅に増加している。また、1981年出水と2013年出水は、浸食幅が60m未満の河岸浸食が大部分を占めるが、2011年出水では浸食幅が60mを超える大きな規模の河岸浸食も多数発生している。

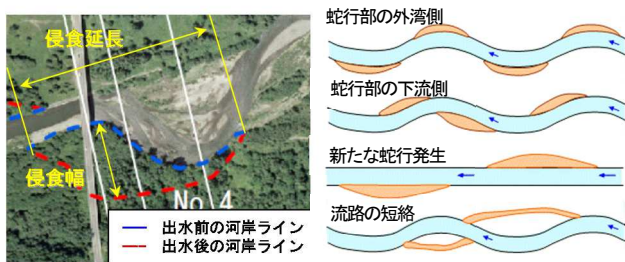


図-8 侵食幅の計測方法

図-9 河岸侵食の発生形態

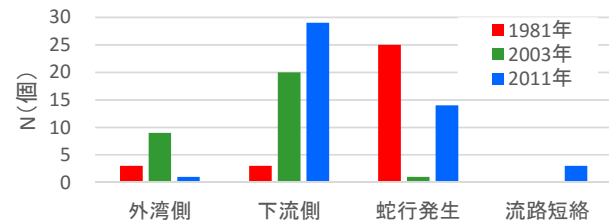


図-10 主要3出水における河岸侵食の発生形態のヒストグラム

3. 2011年出水の流路変動の要因分析

(1) 河岸侵食の発生形態

2011年出水は他の二つの出水に比べて、流路変動および河岸侵食の規模が突出して大きかった。このような大きな流路変動をもたらした要因について、三つの出水の比較を行いながら検討を行うこととした。

はじめに、各出水における河岸侵食の発生箇所の属性を調査した。河岸侵食の発生形態は図-9に示すとおり、出水前の流路の蛇行湾曲部が外湾側に増幅して河岸侵食が進むケース、湾曲部が下流側に位相がずれていくように河岸侵食が進むケース、発達した蛇行部が下流側や対岸に伝播して河岸侵食が引き起こされるケース、蛇行流路が自然短絡して河岸が侵食されるケースに大別される。図-7で使用した河岸侵食箇所を対象として、それぞれの河岸侵食箇所の発生形態を出水前後の航空写真から判別し発生形態別の出現数別に整理したものが図-10のヒストグラムである。1981年出水では、出水前に河道整正によって流路が直線化されたこともあって、新たな蛇行発生によるものがほとんどである。2003年出水では蛇行部下流側での河岸侵食のケースがほとんどであるが、2011年出水では蛇行部下流側での河岸侵食に加えて、新たな蛇行発生による河岸侵食、流路短絡による河岸侵食も多く発生していることが特徴的である。なお、2011年出水では、新たな蛇行発生と流路短絡を発生形態とする河岸侵食は大きな侵食幅となる場合が多かった。

次に、出水時における河岸侵食発生箇所の掃流力の大きさを把握することを目的として、2006年計測のレーザープロファイラー測量成果等を用いてピーク水位時における無次元掃流力の分布の検討を行った。結果を図-11に示す。定期的実施されている大横断測量成果等で確認すると2006年に計測が行われてから2011年出水まで

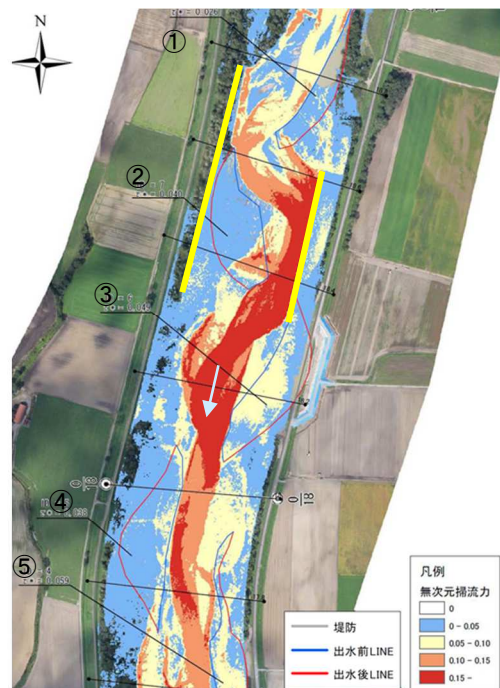


図-11 2011年出水前地形の無次元掃流力コンター図

表-1 計算に用いた主要諸量・パラメータ

計算格子	河床材料	粗度係数	植生Cd値	土安息角
800×50	31mm	0.025	0.7	0.5

の河道地形の変化は小さかったことから、この図は2011年出水直前の地形に近いと判断した。図上には、出水前の2010年、出水後の2011年に撮影した航空写真から読み取った流路の河岸位置をそれぞれ青線と赤線で記載しており、本出水による侵食箇所は青と赤の線で囲まれた①～⑤の領域となる。なお、護岸の位置を黄線で示した。2011年出水においても河岸侵食の多くは図中の①～②のように、蛇行流路の平面波形の位相が下流側にずれながら出水前時点の蛇行湾曲部の下流側を侵食するケースが多かった。また、このような下流側方向への河岸侵食が急激に進むと蛇行した流れが対岸に衝突し、③～⑤の地点のように出水前には水衝部でなかったような箇所に蛇行が伝播して規模が大きな河岸侵食が新たに発生している。2011年出水の河岸侵食の規模が2003年出水に比べて大きい理由は、このような発生形態を持つ河岸侵食の有無の影響も大きいと考えられる。

(2) 出水中の流路変動の変化

出水前後の流路形状の変化過程を明らかにするため、斜面崩落モデルを組み込んだ平面2次元河床変動計算(iRIC Nays2D⁴⁾)を用いた再現計算を行い、出水中の河道変動の状況の分析を行った。計算格子の地盤高は各出水前の横断測量成果を用い、計算流量は図-2の音更観測所地点の観測流量を用いた。なお、シミュレーションの再現性は2011年出水を対象として検証^{5),6)}がなされており、本検討で用いた計算のパラメータはそれらの検証

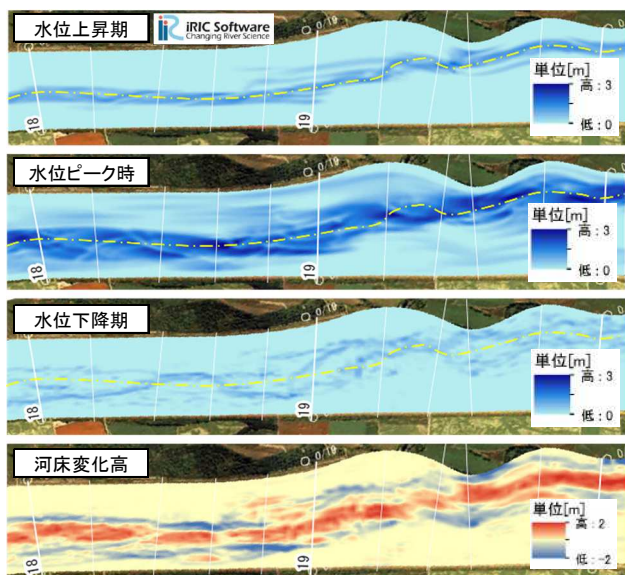


図-12 1981年出水再現計算結果

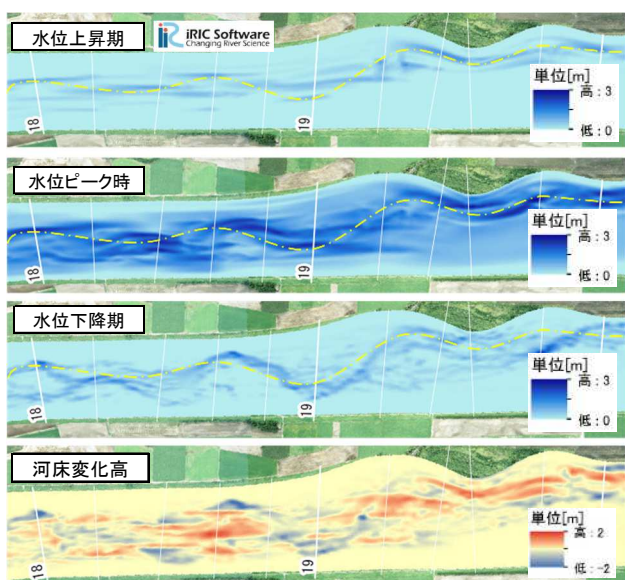


図-13 2003年出水再現計算結果

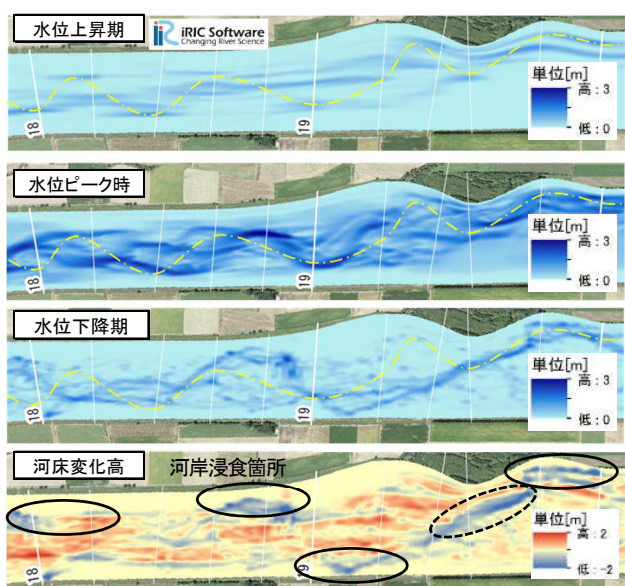


図-14 2011年出水再現計算結果

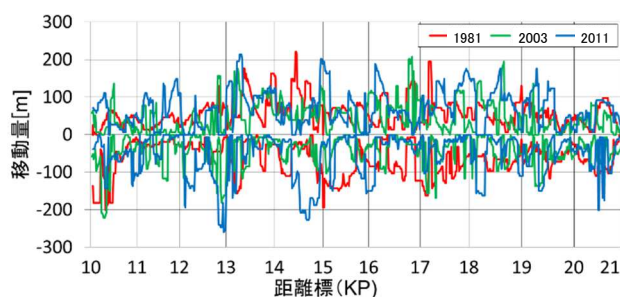


図-15 最深部の各横断面内移動量の縦断面図

結果を参考にして表-1のように設定した。

図-12～14に各出水の再現計算結果（KP18～20の区間を抜粋）を示す。各出水前後の航空写真に写る流路形状と計算結果を比較したところ再現性は良好であり、本計算結果を参考にして各出水の流路変動の特徴と変動の要因について検討した。図には、各出水における水位上昇期、水位ピーク時、水位下降期における計算水深のコンター図と、初期河床高と終了時の河床高の変化高コンター図である。変化高コンター図は、赤色が堆積、黄色が変化なし、青色は洗掘が生じたことを表している。なお、水深コンター図には初期河床時の蛇行流路の主流線形を一点破線で示している。また、図-15は、計算格子の各横断面上での最深河床位置の計算中の移動量を縦断的に示したものである。以下、結果について詳述する。

a) 1981年出水の流路変動

出水前の低水路幅は約60mであり流路は直線的であり、水位上昇期の段階では流路の蛇行は進行していない。水位ピーク時には低水路幅がほぼ左右均等に拡幅され、全体的に直進して流下しているようである。水位低下時に流路は拡幅され、網状の小さな流路と蛇行した主流路が混在して流れている。出水前後の河床高の変化を見ると、出水前の低水路の両岸が浸食され低水路幅は出水を通して約150～200mにまで拡大している。出水後の流路は、左岸あるいは右岸方向に偏った蛇行形状を呈しているものの、低水路幅が拡幅される過程においては左右岸のどちらかに偏った大きな河岸浸食は発生していない。最深河床部の位置は、図-15に示すとおり他の出水に比べると左右岸方向に均等に移動しているが、これらは出水前の流路が直線形状であった影響が大きいと考えられる。

b) 2003年出水の流路変動

この出水では、出水前に既に蛇行流路が形成されていた。流量ピーク時の流路の蛇行形状は、出水開始時点と比べて若干蛇行の振幅が大きくなっているが、水位低下期では振幅の発達は少ないようである。河岸浸食は出水前の蛇行流路の外湾部の振幅を広げるように発生しているが規模は小さい。また、河床変化高の変化を見てみると、洗掘および堆積の変化量つまり縦横断方向の移動量の収支が他の出水より全体的に少ない。2003年出水は、後述の2011年出水を含め、三つの出水の中で最も流路変動が小さい結果であった。

表-2 各出水の特徴

出水年	初期 流路形状	ピーク 流量(m³/s)	洪水継続 時間(hour)	蛇行発達 河岸浸食
1981年	直線的	690	99	中
2003年	蛇行	725	58	小
2011年	蛇行	526	68	大

c) 2011年出水

出水前の流路形状は、2003年出水後の形状とほぼ同様の蛇行形状が引き続かれている。水位ピーク時には主流路の蛇行がより明確となり、水位低下期にかけて蛇行がさらに発達しているが、これらの計算結果の変化過程は、出水時の現地観測においても観察されている¹⁾。河岸浸食は他の出水と比べて全体的に大きな河岸浸食が生じており、図-14に黒点線で囲んだ箇所のように他の出水では見られない流路の短絡に伴う河岸浸食も発生している。

(3) 各出水の流路変動と外的要因の違い

表-2に、三つの出水の初期流路形状、出水諸量、流路変動の状況を取りまとめた。2011年出水を基準に考えたとき、1981年出水はピーク流量が大で洪水継続時間も長く出水の規模は大きかったが、蛇行発達や河岸浸食は小さかった。両洪水で大きく異なっている点は、初期の流路形状である。2011年出水の出水前の流路形状が蛇行流路となっていたのに対し、1981年出水では出水前の流路形状が直線流路となっていた。

一方、2003年出水の初期流路形状は、2011年出水とほぼ同様の蛇行流路となっていたが蛇行発達や河岸浸食は小さかった。2003年出水は先鋭的なハイドログラフとなっていてピーク流量は大きかったものの、洪水継続時間が短い点が2011年出水と比べて大きく異なる点である。

流路変動は、蛇行流路の水衝部における浸食の進行あるいは砂州形状の変化など、河道内の土砂の移動に伴い発生するため、洪水時の流水による掃流力の大きさが大きく影響する。観測水位等をもとに三つの出水時の掃流砂量の総量を求めてみると、1981年出水は6.2百万m³、2003年出水は3.3百万m³、2011年出水は4.1百万m³となり2003年出水が最も少ない量であった。1981年出水及び2011年出水では、水位低下期の減水勾配が緩やかであったことにより、長時間に渡って大量の土砂が移動して流路変動が生じやすい条件にあったと考えられる。

また、2011年出水においては、出水が発生する時点では既に明瞭な蛇行流路形状となっていたため、出水の早い段階から河岸浸食を伴う蛇行流路の発達が見られたが、1981年出水では左岸あるいは右岸方向に偏った大規模な河岸浸食は発生していない。直線河道から顕著な河岸浸食を伴う蛇行流路への変化には流水を大きく偏向させる砂州の発達が必要であり⁷⁾、2011年の出水では出水前から流れの変更をもたらす砂州がある程度発達していたのに対し、1981年出水では洪水初期から砂州の形成に時間

が費やされたため大規模な河岸浸食が生じるような状況までには至らなかったものと考えられる。このことは、本研究における再現計算においても1981年出水では出水を通して洪水流が直線状に流下していたことに対して、2011年出水では流量ピーク時から洪水減衰期にかけて蛇行が発達していた結果となっている。

4. まとめ

本研究では、流路形状や洪水継続時間の条件が異なる三つの主要洪水の比較検討を行うことで、出水時の破堤を伴うような蛇行流路が発達する条件の検証を行った。出水時における蛇行の発達や河岸浸食の大きさは、ピーク流量の大小だけで定まるのではなく、洪水継続時間が長く総流出量が大きな出水であること、出水開始時点において蛇行流路が形成されていることが要因であることを明らかにした。

また、音更川ではもともと河岸の土質が、粘着力が小さい砂礫質の材料で構成されているうえに、中流部の護岸の整備率が低かったため河岸浸食が発生しやすい状況であった。著者らが実施した2011年出水後の調査^{1), 3), 7)}の中で2011年出水の洪水流出時間が長かったことと、出水発生時点において水みちが既に明瞭な蛇行流路が形成されていたことが蛇行の発達要因であった可能性が高いと指摘していた点について、今回の比較検討により明確にすることができたと考えられる。

今後、河岸浸食から堤防を防護するためには、現在の流路形状だけではなく、出水が長時間に及ぶと流路変動が大きくなり堤防が危険な状態になることに留意し、河岸浸食の進行の監視体制の強化を図ることが重要である。

参考文献

- 1) 桑村貴志, 河合崇, 永多朋紀: 音更川における堤防流出の原因分析, 平成23年度国土技術研究会, 国土交通省, 2011.
- 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, 第47巻, 2003
- 3) 桑村貴志, 渡邊康玄: 急流河川における長期的な流路変動特性の分析, 河川技術論文集, 第21巻, 2015
- 4) iRIC(<http://i-ric.org/nays/en/index.html>)
- 5) Toshiki Iwasaki, Yasuyuki Shimizu & Ichiro Kimura: Numerical simulation on bed evolution and channel migration in rivers, in Proceedings River Flow 2012.
- 6) 旭一岳: 河岸浸食と河道の陸地化を考慮した河道追跡モデルの開発研究, 北海道大学学位論文, 2014
- 7) 渡邊康玄, 清水康行, 安田浩保: 洪水時における中規模河床波の変形に注目した流路形成機構に関する研究, 科学研究費助成事業基盤研究 (B)20360224, 2011

(2016. 4. 4受付)