# 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<sup>1</sup>・渡邊 康玄<sup>2</sup> Takashi KUWAMURA, Yasuharu WATANABE

<sup>1</sup>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)
<sup>2</sup>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<sup>1)</sup>.

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ているが<sup>2</sup>,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



## 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740km<sup>2</sup>,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, 現在では全川的に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 低水路両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い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<sup>2</sup>.

### (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(Qp=725m<sup>3</sup>/s),同2位は1981年出水(Qp=687m<sup>3</sup>/s),同3 位は2011年出水(Qp=526m<sup>3</sup>/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-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-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-3の1981年出水の蛇行振幅の変化は、出水前の澪筋 が撮影された航空写真が存在しないために出水後の蛇行 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慨成し 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.



## 3. 2011年出水の流路変動の要因分析

#### (1) 河岸浸食の発生形態

2011年出水は他の二つの出水に比べて,流路変動およ び河岸浸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浸食の発生箇所の属性 を調査した、河岸浸食の発生形態は図-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浸食 が進むケース、湾曲部が下流側に位相がずれていくよう に河岸浸食が進むケース、発達した蛇行部が下流側や対 岸に伝播して河岸浸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浸食されるケースに大別される. 図-7で使用した河岸浸食箇所を対象として、それぞれの 河岸浸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 下流側での河岸浸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浸食に加えて、新たな 蛇行発生による河岸浸食、流路短絡による河岸浸食も多 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 浸食は大きな浸食幅となる場合が多かった.

次に、出水時における河岸浸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.定期的に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值 | 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、本出水による浸食筒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浸食の多くは図中の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浸食するケースが 多かった.また、このような下流側方向への河岸浸食が 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浸食が新たに発生してい る. 2011年出水の河岸浸食の規模が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浸食の有 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 Nays2D<sup>4)</sup>)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<sup>5),6)</sup>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



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.

| 出水年   | 初期   | ピーク      | 洪水継続     | 蛇行発達 |  |  |
|-------|------|----------|----------|------|--|--|
|       | 流路形状 | 流量(m³/s) | 時間(hour) | 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    |  |  |

表-2 各出水の特徴

#### 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<sup>1)</sup>.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 変動の状況をとりまとめた.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小が大き 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m<sup>3</sup>、 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<sup>7</sup>、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<sup>1),3,7</sup> 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)
- 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)