

出水時における音更川の流路変動特性と 堤防防護の対策について

帯広開発建設部 帯広河川事務所 ○ 桑村 貴志
寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 永多 朋紀
北海道河川財団 企画部 旭 一岳

平成23年9月の出水により、音更川では広い範囲にわたって大規模な河岸侵食が発生し、一部の堤防が流出する事態となった。そのため、堤防防護対策が急務となっているが、その計画立案にあたっては、出水時の流路変動の特性を知ることが重要となる。

本論文は、観測資料を用いた蛇行形状の分析や数値計算等により、音更川の流路変動の特性や、その対策を検討した結果について報告を行うものである。

キーワード：河岸侵食、計画手法、流路変動

1. はじめに

十勝川水系音更川では、平成23年9月上旬に発生した出水（ピーク流量 $526\text{m}^3/\text{s}$ 。以下では、H23出水と呼ぶ）において河岸侵食が多発し、大きな流路変動が生じた。特に写真-1のKP18.2地点では河岸侵食によって堤防の一部が流出し周辺住民を緊急避難させる事態となっている。今後の出水により、破堤による氾濫被害が発生する恐れがあることから、河岸侵食に対する堤防防護対策の実施が必要となった。今後、効果的かつ効率的に対策を進めていくため、音更川の流路変動特性を分析し、堤防防護計画を立案する。



写真-1 堤防の一部流出箇所の状況（H23.9.7撮影）

2. H23出水時における流路変動特性の分析

堤防防護計画の立案にあたっては出水時の危険箇所の推定が不可欠である。その推定にあたっての基本的な知見を得るため、過去最大の流路変動を引き起こしたH23出水の流路変動の特性の分析を行う。

音更川の直轄管理区間（約30km）は、河床勾配1/130～1/200、河床材料の代表粒径52～88mmのセグメント1に分類される急流河川である。このような急流河川では、出水時に容易に河岸侵食が生じやすく、洪水継続時間が5日間にも及んだH23出水では、河岸侵食を伴う大きな流路変動が随所で発生した¹⁾。H23出水前後の航空写真（写



写真-2 出水前の状況（H22年8月撮影）

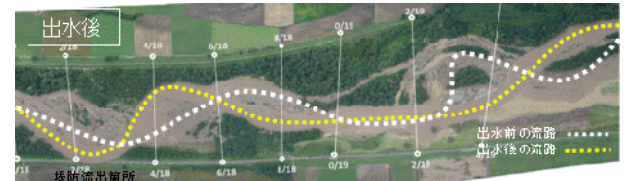


写真-3 出水中の状況（H23年9月7日12時頃撮影）

真-2-3）を見てみると、音更川では、主流路の蛇行が大きく変化し随所で河岸侵食を引き起こしており、河岸侵食規模および流路形状変化について定量的な分析を行う。

(1) 河岸侵食量

H23出水前後の流路位置を描いた図-1の航空写真を見ると、蛇行流路の位置が下流側へとずれ、蛇行形状が大きくなっていることがわかる。このような場合、河岸侵食量は蛇行形状の変化量と捉えられ、出水前後の蛇行流路の頂部の移動量を河岸侵食量として考えることが適当である。そのため、本研究では、図-2に示すように蛇行流路の頂点の偏移量を河岸侵食量として計測することとした。また、蛇行流路の中でどのような箇所でも河岸侵食が発生しているのかを把握するために、図-3に示すように発生箇所の属性別の分類を同時に行った。図-4に侵食幅（蛇行頂部の横断方向の偏移量）を示す。兩岸の低水護岸が整備されている下流市街地区間（KP0～5）を除くと、全区間で河岸侵食が発生している。また、侵食幅が120mを超えた2箇所は、いずれも発生場所の属性が「流路の短絡」となっている。流路の短絡は、水位の上昇などをきっかけとして新たな位置に流路を移す現象であり、

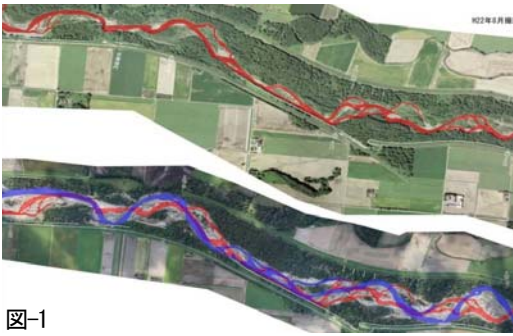


図-1 出水前後の蛇行形状の変化（上：出水前、下：出水後）



図-2 侵食幅の計測方法

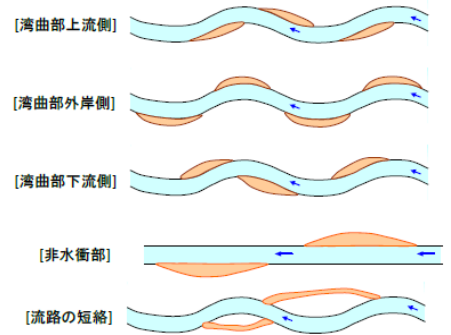


図-3 河岸侵食の属性分類

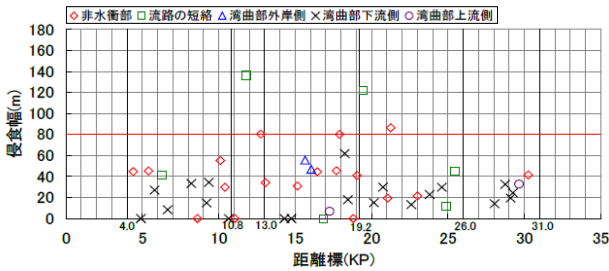


図-4 河岸侵食の侵食幅縦断面図（属性別）

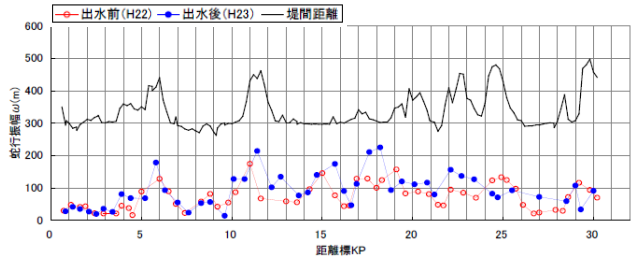


図-6 H23 出水前後の蛇行振幅縦断面図

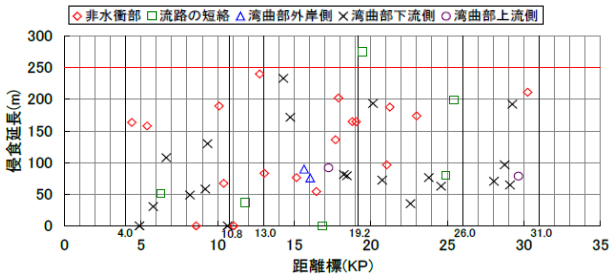


図-5 河岸侵食の侵食延長縦断面図（属性別）

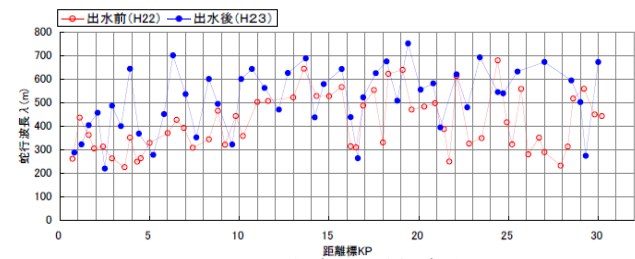


図-7 H23 出水前後の蛇行波長縦断面図

通常の河岸侵食とは現象を異にしていることから、一出水における最大侵食幅の推定の対象とするのは不適當である。そのため、流路の短絡を原因とするものを除くと、侵食幅の最大値は概ね80m程度である。また、図-5の侵食延長（縦断方向の偏移量）は、流路の短絡を除くと、最大値は概ね250m程度である。

図-4、図-5の図中のプロットの属性に着目すると、「湾曲部下流側」での侵食が最も多くなっているのは、出水時に蛇行流路の位相が下流側へずれていくことで、湾曲部下流側の侵食が数多く発生したものと考えられる。

(2) 流路形状の変化の特徴

出水前後の蛇行振幅と蛇行波長を計測したものが、図-6と図-7である。出水前（赤線）と出水後（青線）の値を比較すると、蛇行波長、蛇行振幅ともに出水後の方が大きく、出水を通して蛇行形状が成長していたことがわかる。このような蛇行の特徴を表したものが図-8であり、赤線は出水前の流路、青線は出水後の流路を示している。

音更川では、出水を通して蛇行流路の振幅と波長が増大し、蛇行の位相が下流方向へと移動している。蛇行流路の移動と河岸侵食は一对の現象であり、蛇行流路の変化に応じて河岸侵食が生じる。その結果、振幅の増大が大きかった箇所（KP18付近）では流路が堤防にまで達して

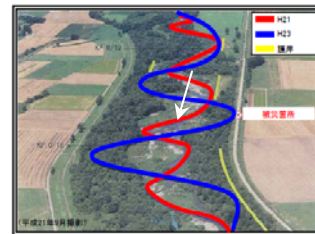


図-8 H23 出水の蛇行流路の変化（赤：出水前、青：出水後）

堤体の流出が生じたものと考えられる。

このように、河岸侵食の発生には蛇行流路の発達に密接に関わっていることが大きな特徴であり、河岸侵食対策を検討する際には、出水時の蛇行流路の移動を考慮することが重要であることが明らかになった。

3. 河道平面形状と蛇行流路線形の経年変化

過去の航空写真などから流路・河畔林などの位置を判読し、年代ごとの比較を行い、音更川の蛇行特性や河道状況の変化について分析を行う。

図-10に示すように、音更川の郊外区間は兩岸を段丘に挟まれた地形をしており、自然状態においては狭隘な谷底平野の中を流れていた。その流路位置は一定ではないが、写真判読により模式化した河道状況を図-9に示す。比較を行った年代は、本格的な河川整備前の状態を示す昭和38年、堤防が概成した平成12年、H23出水前後の平

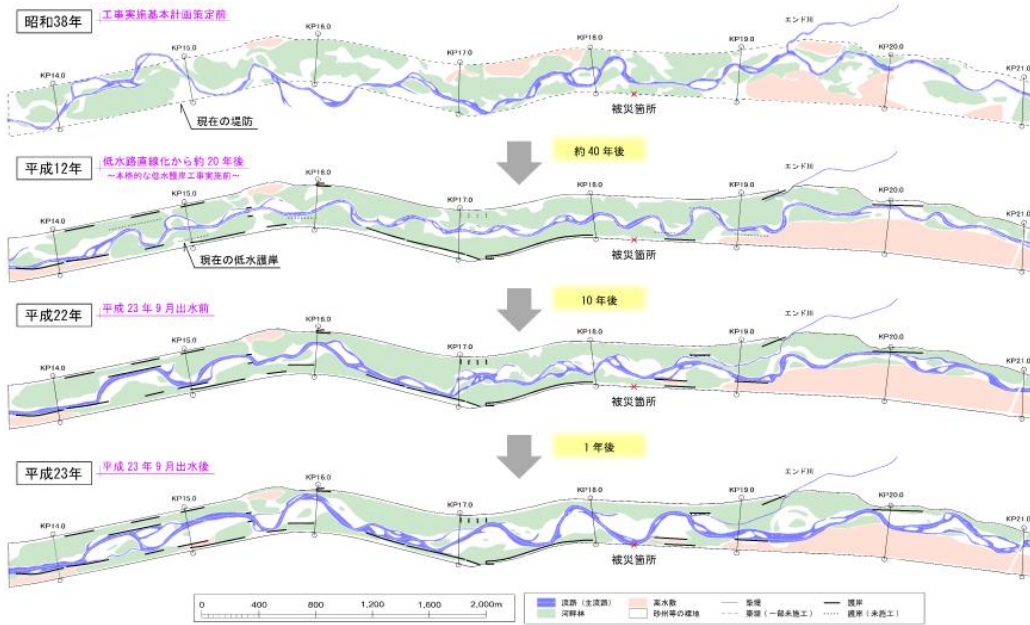


図-9 河道状況の変遷(KP14.0~21.0)

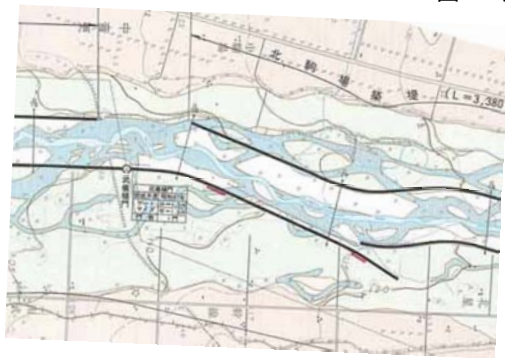


図-10 治水地形分類図(図中の流路は大正9年、昭和22年、平成3年の3年代もの)

成22年、平成23年の4年代とし、図はH23出水の堤防の一部流出箇所を含むKP14.0~21.0の区間を対象とした。昭和38年時点では流路は谷底平野の中央を流れ、現在の河道は昭和38年当時の流路のほぼ両端の位置に堤防が整備されており、自然状態の蛇行の振幅と現在の堤防幅には大きな差異は無い。

また、現在の低水路の中心線を基準とした各年代の流路の位置を年代ごとに整理した結果を図-11に示す。この図は、低水路の中心を基準軸と定め、蛇行特性の把握を試みたものであり、このような処理を経ることで、副次的に河道や低水路自体が湾曲している影響も取り除くことができるため、流路本来の蛇行特性をより正確に評価することが可能になる。自然状態の昭和38年では、KP14~17の区間において振れ幅が大きくなっているが、これは現在の河道とは異なる位置に流路が位置していた影響が大きい。ただし、そのことを割引いて考えても、自然状態の蛇行振幅は比較的大きい。その40年後の平成12年では、波数が多くなって蛇行振幅は小さくなるなど蛇行が小規模になっている。その後の平成22年では、全体的に波長が伸び波数が減少している。そしてH23出水を経た平成23年では、全体的に波数が減少するとともに

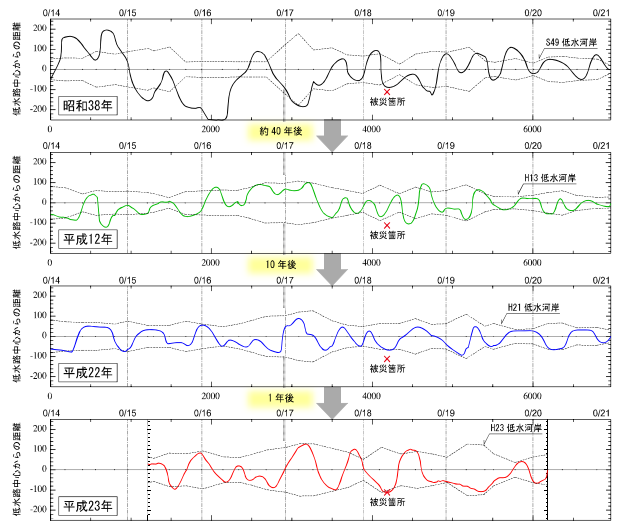


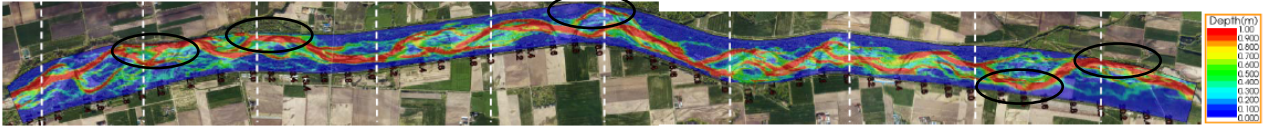
図-11 低水路中心線を基準とした蛇行線形比較

蛇行振幅が増大し、特に堤防流出箇所付近(KP17.0~19.0区間)における蛇行振幅の増大が特に顕著で、出水前後で比較すると、約2倍程度増幅するなど、自然状態であった昭和38年当時と同程度の蛇行が発生した。この蛇行振幅は、現在の堤防間の幅にほぼ相当することから、今後も流路変動によって河岸侵食が堤防に達する危険性が高いと考えられる。

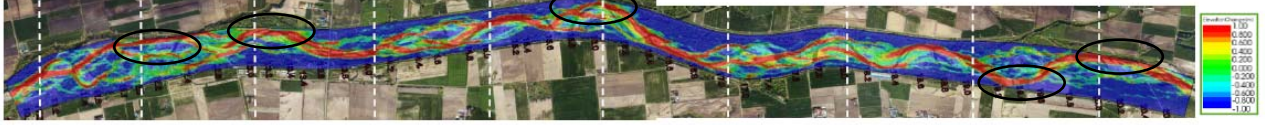
4. 将来の出水時の流路変動の傾向分析

音更川は出水時の流路変動が大きく、河岸侵食対策を進めていくためには、流路変動の予測が重要となる。流路変動は洪水外力の規模により、危険箇所が異なることも想定されるため、河床変動計算により流路変動の傾向分析を行う。

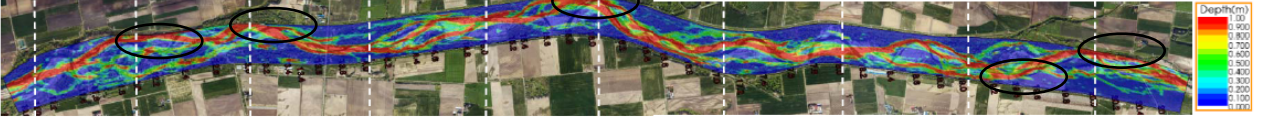
計算結果① H23出水ハイドロ（流量ピーク後 300m³/s 時点の河床形状）



計算結果② 整備計画ハイドロ（流量ピーク後 300m³/s 時点の河床形状）



計算結果③ 基本方針ハイドロ（流量ピーク後 300m³/s 時点の河床形状）



初期河床形状（出水による河床変動が生じる前の初期河床）

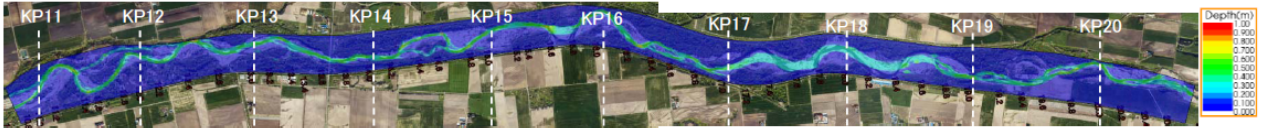


図-12 初期河床および将来予測計算結果①～③（水深陰影図）

表-1 河床変動解析時の主な計算条件

項目	設定
河床材料の種類	均一粒径
流砂の種類	掃流砂
均一粒径の掃流砂公式	芦田・道上式
河岸侵食	無効
斜面崩落モデル	有効
土粒子の水中安息角	0.5
下流端水位	等流計算による
上流端流量	等流計算による
計算格子	1メッシュ、縦12m×横6～8m
計算タイムステップ	0.1sec
樹木の設定	CD=0.7、H24年5月航空写真で範囲を設定

分析には、高精度な河床変動解析が可能なi-RIC Nays2D_ver4.0 (URL: <http://i-ric.org/ja/>) のソフトウェアを用い、Toshiki Iwasakiらによる解析²⁾を参考に計算を行った。なお、本計算結果は傾向分析に用いることに主眼を置いている。

(1) 計算条件

H23出水時に流路変動が大きかったKP10～20の約10kmを対象算区間とし、表-1の条件により計算を行っている。計算には高密度の地盤データが求められるため、出水後のH24年5月にLP航空測量を実施し、その計測データを用いる。また、計算時の外力には、基本方針計画高水流量ハイドロ (Qp=1,700m³/s)、整備計画目標流量ハイドロ (Qp=900m³/s)、H23出水ハイドロ (Qp=526m³/s) の3つの外力を与える。

(2) 計算結果

将来予測計算の結果を図-12に示す。計算結果は、水位低下期の流量300m³/s時点の水深であり河床形状を表している。堤防近傍で堆積・洗掘が生じた箇所を危険箇所を黒い○で示すが、いずれもケースでも、河岸侵食

が堤防にまで達する結果となっている。全体的な傾向は変わらないが、各ケースの変化を見てみると、以下の特徴がある。

- ①H23出水ハイドロ～蛇行部外岸側の侵食、流路の短絡、流路位置の変化が見られる。
- ②整備計画ハイドロ～H23出水と比べ、河床変動高の高低差がやや大きくなるが、危険箇所は同様。
- ③基本方針ハイドロ～危険箇所は上記と同様であるが、他の場所でも流路の短絡や流路位置の変動が見られるほか、河床高の変動がより大きくなる。

いずれのケースでも、危険箇所と推測される箇所は概ね違わないが、流量規模が大きくなるほど堆積や洗掘がより明瞭となる傾向にあるほか、堤防近傍にまで流路変動が及ぶ箇所も増加する。

H23出水時の流路変動を基に危険箇所を設定した場合、より大きな外力時の流路変動に対しても有効に機能すると考えられるため、H23出水の実測の蛇行帳部の偏移量を用いて危険箇所を設定することは妥当と考えられるが、将来的には、より長大な延長の対策が必要となる可能性もある。

5. 堤防防護計画の検討

H23出水における流路変動の分析結果を踏まえ、堤防防護計画の検討を行った。前章までの分析により、音更川では出水時の蛇行の発達により大きな河岸侵食が生じ、堤防が流出に至る危険性が大きいことが確認された。堤防防護のために最も重視すべき点は河岸侵食対策であるが、この対策は低水護岸の整備が進んでいない区間全体が対象となるため、基本となる低水路整備方式、最適低水路幅の設定を行い、具体的な護岸配置計画を立案する。また、効果的かつ効率的に対策を進めていくために各対策箇所の危険度設定を行う。

なお、音更川は市街地と郊外区間（両岸堤防区間、河岸段丘区間）に区分される。市街地区間では低水護岸が既に概成しているが、H23出水時に高水敷の洗掘が発生するなど堤防堤脚部の保護対策が必要である。この対策は現河川整備計画において既に位置づけられていることから、本論文では郊外区間を対象とした堤防防護計画の検討内容について述べる。

(1) 最適な低水路整備方式

他河川で実績のある複数の低水路整備方式を立案し、経済性、治水、環境、維持管理の観点から総合比較を行った。ここでは概要のみ記す。

まず、河道掘削により流路を堤防から遠ざけて直線化する河道整正方式が考えられたが、初期費用は有利であるものの、整備完了後の中小出水によって容易に元の蛇行流路に戻るため、再掘削に要する維持費用を考慮すると不利である。次に、蛇行流路の変化を許容し、堤防が危険となる箇所を構造物で防御する方法がある。その構造には水制または護岸が考えられるが、水制は整備後の河道の反応の予測が難しく、音更川の場合には確実に河岸防御を図ることができる護岸の方が有利である。また、現在の水衝部に護岸あるいは水制を配置して水衝部を移動させないことで対策延長を短くすることも検討したが、出水時に蛇行流路の位相が下流へとずれてしまった場合、堤防防護ができない危険性があるため、堤防法線に並行して低水護岸を連続的に配置する方式とした。

(2) 最適な低水路幅

低水護岸を連続的に配置すると側方への流路変動が拘束されるため、護岸の設置位置によって低水路幅が確定することになる。低水路幅は、河道の安定性に対して非常に大きな要素であり、最適と考えられる低水路幅の検討が必要となる。

現在の音更川の低水路は概ね110m幅であり、比較的広い川幅を持っている。そのため、流路が動きやすく、低水路内には幾筋もの旧流路跡が存在している。H23出水で見られたように出水時には旧流路へと主流路が移動して予期せぬ場所で新たな水衝部が発生するなどの問題がある。このような複数の流路を形成させないためには、低水路内に形成される砂州を横断方向に複数発生するような河道条件（複列砂州領域）から、単列砂州領域へと河道条件を変化させる方法がある。この河道条件について、図-13の岸・黒木の中規模河床波の領域区分図を基に検討を行う。

平均年最大流量(概ね150m³/s)時における現河道の水量および川幅水深比を図-13に黄色の○でプロットすると、現河道のほとんどが複列砂州領域に位置していることがわかる。これを、同図の赤色の○で示す単列砂州領域へと移行させるためには、現在の低水路幅を40~70%縮小し約60m幅とする必要がある。

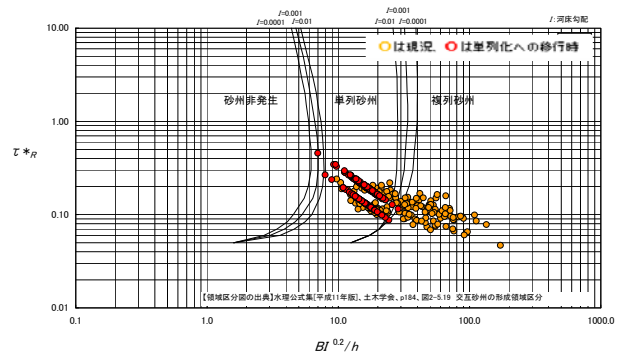


図-13 中規模河床波の領域区分図

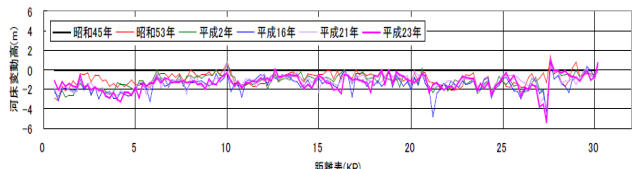


図-14 最深河床高の実測変動量（基準年：S45年）

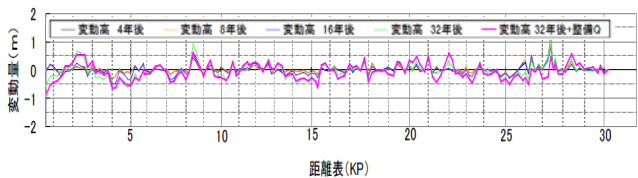


図-15 河床変動計算による将来予測（30年後）

川幅を縮小させた場合、最も懸念されるのは過度の河床低下である。音更川では図-14に最深河床高の変動量を示したとおり経年的に河床が低下している。特に、過去に高水敷造成のために川幅を60m程度にまで狭めた下流市街地区間(KP0~5)において河床低下が顕著である。また、一次元河床変動計算による将来の変動予測(図-15)でも全川の河床低下傾向となっていることを踏まえると、もしも郊外区間の低水路幅を60m幅に狭めた場合、大きな河床低下が発生し、既設の構造物の根入れ不足などが多発して河川管理に支障をきたすことが考えられる。そのため、今後の河床低下を抑制する観点から、現状程度の川幅を維持していくことが妥当であると考えられる。

(3) 堤防防護計画の検討

これまでの検討結果を踏まえ、図-16に示す検討フローの手順により堤防防護計画の立案を行う。

H23出水時の音更川では出水時の蛇行の発達により大きな河岸侵食が生じて堤防が流出に至る危険性が大きい。そのため、その河岸侵食対策として低水護岸の整備を行う。出水時には蛇行流路が移動して現在の水衝部以外の場所で河岸侵食が発生する恐れがあることから、将来、出水が発生した時の蛇行流路の移動範囲の推定を行って堤防が危険となる区間を抽出する。また、洪水による侵食・洗掘に対する安全性確保のため必要な高水敷幅（堤防防護ライン）を、H23出水時の河岸侵食幅の最大包絡値である80mとする。

出水時の流路変動位置の推定は、H23出水の蛇行頂部

の実績の偏移量（縦方向250m、横方向80m）を用い、現在の蛇行流路の頂部がどの位置にまで移動するかを推定し、河岸侵食が堤防に達すると予想されたり、堤防防護ラインを確保できない箇所には、新設の護岸を配置する計画とした。なお、新設護岸は点在する既設護岸を繋ぐように配置する。

次に、対策の優先度の指標として、対策必要箇所の危険度のランク設定を行った。図-17に示すように出水時の蛇行流路の移動範囲を推定し（青線から緑線の位置にまで移動）、河岸侵食が堤防にまで達する箇所をSランク、堤防防護ラインを割りこむ箇所をAランク、それらの護岸の機能維持に必要な箇所をBランク、緊急性が低い箇所をCランクのランクに区分した。このとき、片岸が河岸段丘に接している区間で、段丘側の安全な位置にまで流路を遠ざけることが可能な場合には、河道整正を行うことにより危険度をランクダウンさせた。

最終的にとりまとめた堤防防護計画には、前述の河床変動解析による予測計算結果を併用して危険箇所の特定を行い、低水護岸の具体的な配置場所および危険度ランクを図-18の平面図にとりまとめた。新設の護岸の設置位置は、将来の流路変動や既設護岸との連続性などを考慮して設定し、護岸の構造は大型接続ブロックにより法覆を行い、将来の洗掘にも耐えられるように6m幅の根固ブロックを設置するほか、堤防の表法面に腹付工を行って堤防の強化を図ることとした。また、護岸などによるハード対策の他に、河道モニタリングの強化など河川監視体制の強化、緊急復旧協定業者の拡大による体制の強化、関係機関との情報共有および伝達の強化など、河川監視体制の強化を図り、洪水時における確実な河川管理を進めていくこととした。

あとがき

音更川では、河岸侵食がある特定の箇所でのみ発生するのではなく、蛇行流路の変化に伴い水衝部が移動することから、あらゆる場所で堤防流出の危険性を抱えている。今回策定した堤防防護計画は、現在の河道において最も危険度が高い箇所を想定し、そこでの河岸侵食を防ぐための護岸を配置する計画となっているが、今後、中小洪水によって河道形状が大きく変化した際には、適宜計画の見直しが必要である。

今回の検討では、従来の河道計画の考え方に留まらず、流路変動を考慮した河道計画の立案を試みた。今後、本計画に基づき対策を実施していくが、河道変化モニタリングを継続的に実施して河道の反応について検証を行い、急流河川における堤防防護対策の研究を進めていきたい。

なお、本計画は音更川河道計画ワーキングにおける検討結果をとりまとめたものであり、北海道大学 泉教授、北見工業大学 渡邊教授をはじめとする各委員に感謝の意を表す。

Takashi Kuwamura, Nagata Tomonori, Asahi Kazutake

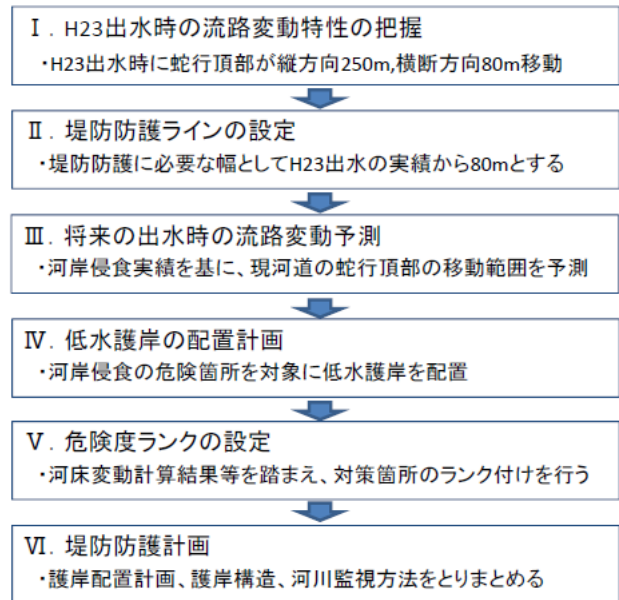


図-16 堤防防護計画の検討フロー

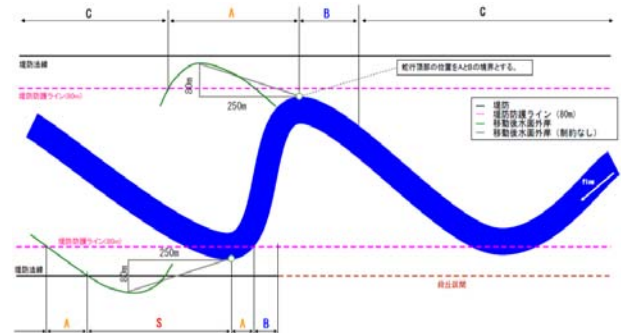


図-17 危険度のランク設定の模式図



図-18 最終的な堤防防護計画平面図（一部）

参考文献

- 1) 帯広開発建設部、寒地土木研究所：十勝川水系音更川の堤防の一部流出に係る調査報告。2012。
- 2) Iwasaki, I., Y. Shimizu and I. Kimura, Numerical simulation on bed evolution and channel migration in rivers, 6th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2012, San Jose, Costa Rica.