

流路の固定化に着目した河道形成機構と持続可能な河道の管理及び維持技術に関する研究

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、川村里実

【要旨】

樹林化により近年急速に礫河原が減少している十勝川支川の札内川では、H23 年度より礫河原再生事業として札内川ダムからのフラッシュ放流が実施されている。札内川では、かつて複列砂州が存在していた箇所でも流路固定化が進行して一本の主流路が明確になりつつあり、既に多くの派川が消滅してきている。フラッシュ放流では、流路固定化の抑制と旧流路周辺の固定砂州の攪乱を目的として、旧流路の回復とその流路の維持手法が試行錯誤的に実施されており、定量的な手法の確立が急務となっている。そこで本研究では、旧流路の回復と維持を定量的かつ効率的に実施する手法の確立を目的として検討を実施した。その結果、適切な箇所を選定すれば、比較的小規模な掘削であっても、旧流路が回復することによって、比較的大規模な河道攪乱が実現することを示した。また、掘削に適する箇所を選定手法を提案した。

キーワード：樹林化、札内川、複列砂州、縦断形状、分岐、掘削

1. はじめに

近年、多くの河川では、河道内の著しい樹林繁茂が治水や環境の面で深刻な問題となっている。低水路内の砂州が頻繁に攪乱されていけば、植生が実生や稚樹のうちに流出するなどして樹林化しにくい、砂州が一度樹林で覆われると、その砂州を避けるように一部の狭い範囲に流れが集中する細い流路となり、その位置も固定する。また、砂州の位置も固定化してしまうため、さらに樹林繁茂が進行することになる。北海道の十勝川水系の札内川においても、写真-1に見られるように樹林化により近年急速に礫河原が減少し、ケシヨウヤナギやチドリ類、セグロセキレイなどの礫河原を生息場所とする動植物の生息環境の悪化が懸念されている。

札内川はかつては複列砂州による網状流路と広い礫河原が特徴的であった。しかし、近年、著しい樹林繁茂によって急速に礫河原が減少した(写真-1)。流路が固定化して一本の主流路が明確になりつつあり、既に多くの派川(旧流路)が消滅してきている^{1), 2)}。札内川では、H24年度より礫河原再生の取り組みとして札内川ダムからのフラッシュ放流が実施されている^{1), 2)}。H24年度放流時には、河道攪乱を目的とした樹木除去や礫河原の造成を実施したが、効果的な攪乱は生じなかった。一方、H23年に生じた確率規模1/20年の出水



写真-1 札内川上流部の樹林化と流路の固定化

時に旧流路周辺で大規模な樹木の流亡を伴う攪乱が見られた。そのため、流路固定化の解消・抑制には旧流路の維持が重要であるという観点から、H25～H26年度フラッシュ放流では、閉塞してしまった旧流路の回復手法が試行錯誤的に実施されている³⁾。旧流路の回復と維持を効率的に実施する確実な手法の確立が急務である。

本研究では、複列砂州河道における旧流路への分岐部の特性を把握するとともに、H25～H26年度に札内川で実施された旧流路回復のための掘削試験の効果を検証することによって、既に閉塞した旧流路を効率的に回復させるために適した掘削箇所を選定手法について



図-1 H23年出水時に河道攪乱が大規模だった箇所

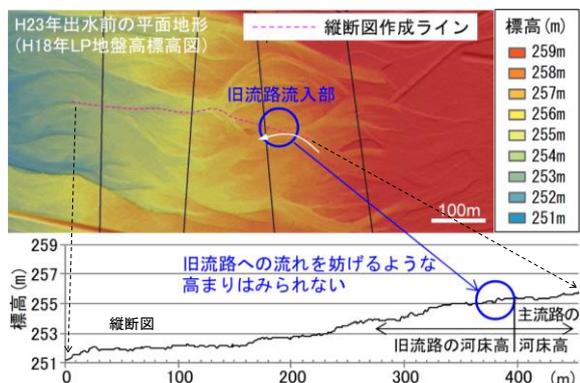
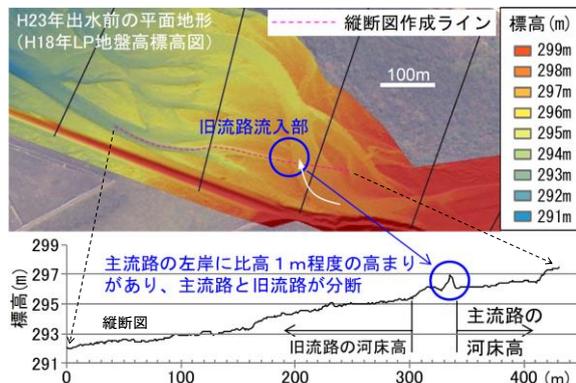


図-2 H23年出水時に河道攪乱が小規模だった箇所



検討した。

2. 札内川に見られる複列砂州河道の流路特性

複数の流路が合流と分岐を繰り返しているような複列砂州河道においては、旧流路への分岐流の消失が主流路の固定化に大きく影響していると考えられる³⁾ことから、本研究では札内川を対象として旧流路とその分岐箇所を調査し、その特性を検討した。

2.1 大規模出水時の旧流路攪乱状況

H23年出水時、旧流路沿いに樹木流亡をとまう大規模な河道攪乱が確認された(図-1)。これに対して、旧流路跡があるにも関わらず攪乱が小規模だった箇所も確認された(図-2)。図に示した旧流路の縦断面図によると、図-2には図-1にはない流入部の高まりが見られ、旧流路への流れが妨げられていることがわかる。この出水では、大規模な河道攪乱はほとんどが旧流路沿いで発生しているが、その数は少なく、多くの旧流路では攪乱が見られなかった。このように札内川上流では、多くの旧流路が流入部の土砂堆積によって閉塞し、高水時であっても旧流路への流れが妨げられるために主流路の固定化と樹林化が進行していると考えられる。

したがって、旧流路への流れを回復・維持できれば、比較的大規模な出水時に旧流路周辺の砂州が攪乱されることで砂州と流路の固定化が抑制または解消できる可能性がある。本研究では、旧流路を効率的に回復・維持することを目的として、まず、複列砂州河道に見

られる旧流路への分岐流の特性を検討した。

2.2 旧流路への分岐流量配分比に関する検討

多くの旧流路が閉塞する中で、写真-2に示す箇所では自然に分岐流路が維持されていて、最近では2013年10月頃に主流が流路aから流路bへと切り替わった。現在、流路aは流入部の土砂堆積によって平水時には閉塞している状況ではあるが、融雪出水やフラッシュ放流、夏期出水等の高水時は流路aへの流れは維持されている。流路aへの流れが維持されれば、今後も流路の交番現象⁴⁾が維持されるものと期待できる。しかしながら、流路aへの十分な流入の頻度が低いと植生の侵入により完全に閉塞してしまうことも懸念される。流路aへの導水を維持するのに必要な流量規模を検討するために、分岐流量に関する観測を実施し、その理論的な再現と予測を試みた。



写真-2 ADCP 観測箇所

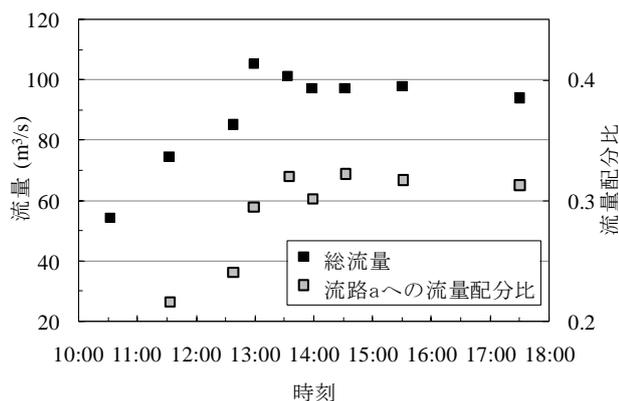


図-3 ADCP 観測結果 (総流量と流路 a への流量配分比)

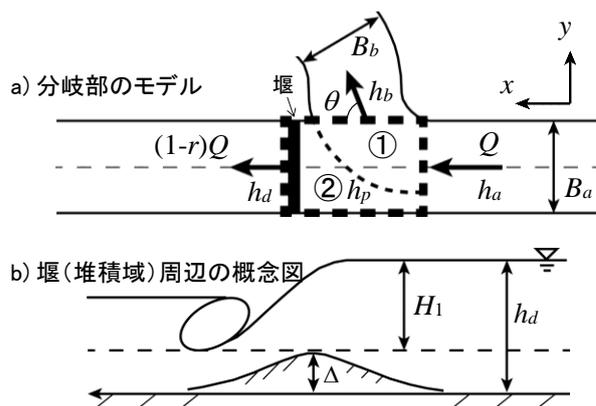


図-4 モデルの概念図 (長谷川ら⁴⁾の図を修正)

2.2.1 流路分岐箇所における現地観測

H26年度に実施されたフラッシュ放流時に、写真-2 に示す測線においてADCP流量観測を実施し、流路aへの分岐流量配分比について現状を把握した。流量観測は、ADCPを搭載した三艘フロートボートを横断方向にロープで牽引する方法で実施した。

2.2.2 分岐流量配分比の理論的予測

流路aでは流入部の堆積域が流れを妨げており、流路aへの流れを検討するには堆積域を越流する流れを考慮する必要がある。長谷川ら⁵⁾は、堰を有する河道での分岐特性を理論的に検討しており、本研究では彼らの理論を適用した分岐流量配分比の予測を試みた。

流路a流入部の堆積域が流れに対して堰のように働くと仮定し、長谷川ら⁵⁾と同様に図-4(a)のような分岐流路を考え、下流側に太線で示す堰(堆積域)を配置した検査断面(図中の破線)を設ける。分離流線により分けられる領域①と領域②についてそれぞれ運動量方程式(実際にはx方向成分運動量方程式のみを用いる)と連続式が立てられる。分岐部上流側水深 h_a と領域①下流側水深 h_b はマニング式による等流水深を仮定する。また、高さ Δ の堰(流入部のマウンド)による規定水深 h_d (越流前の水深)は、図-4(b)での比エネルギーを考慮することで得られる。完全越流の場合のみを対象とし、後述の解析結果では完全越流が生じる条件を満たす範囲のみを示す。具体的な定式化については、長谷川ら⁵⁾の論文を参照されたい。本研究では、 $1-r$ が流路aへの流量配分比である。

放流時を想定して流量を $100\text{m}^3/\text{s}$ とした解析結果を図-5に示す。図はマウンドの高さ(h_a に対する比 Δ/h_a)による流量配分比の変化を表している。本解析では、川幅は平水時の水面幅とし($B_a=25\text{m}$, $B_b=15\text{m}$)、勾配はLP地形データを参考に $1/100$ 、マニング粗度係数は

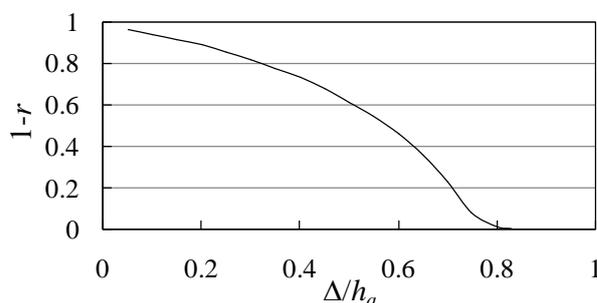


図-5 流路 a への流量配分比の予測値 ($Q=100\text{m}^3/\text{s}$)

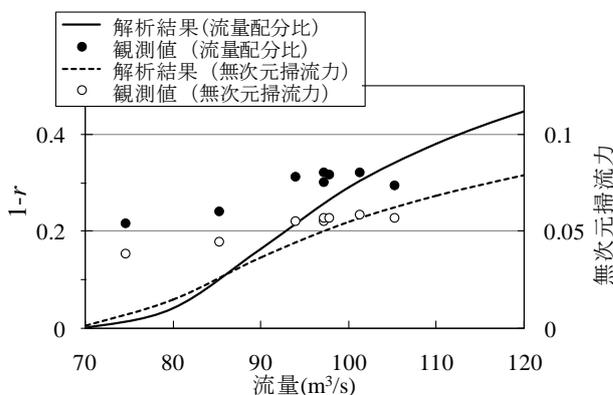


図-6 流路 a への流量配分比と無次元掃流力 ($\Delta=0.8h_a$)

0.03 とした(このとき $h_a=1.2\text{m}$)。図より、マウンドの高さ Δ が増加すると流路aへの配分比が著しく減少することがわかる。放流前の平水時では主流路の平均水深が 0.6m 程度であり、この時点では流路aは完全に閉塞していた(写真-2)ことから、マウンドの高さは最も低い箇所でも 0.6m 以上である。平均的な高さはこれよりも数十cm高く $0.7\sim 0.8\text{m}$ 程度の範囲であると考え、 Δ/h_a の値は $0.58\sim 0.67$ 程度となる。このとき本解析による流路aへの配分比は $0.3\sim 0.4$ を示し、観測値が良好に再現されている。

次に、総流量による流路aへの配分比の変化について解析より求めた結果を図-6に示す。ここでマウンドの高さ Δ は0.8mとした。流量の増加とともに流路aへの配分比が増大する。観測値と比べると、ピーク流量程度では良好に観測値を再現しているが、流量が小さい場合は観測値を過小評価している。これは、解析では横断方向に一様な堰を想定しているのに対して、実際の土砂堆積は一様ではなく、流量が比較的小さくても局所的に低い箇所から流路aへある程度流入していたと考えられる。また、観測された配分比は解析結果ほど流量に応じて敏感に変動していない。これは観測誤差の他に、対象区間では流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度で水位が低水路河岸高さに達するため、それ以上流量が増加しても主流路の水位上昇が少なく流量配分比が頭打ちになっている可能性も考えられる。低水路満杯規模以上の流量時の配分比については更に検討が必要であり、今後の課題である。

図-6には流路aでの無次元掃流力を併せて示している。破線が解析結果より得られた分岐流量を用いたもの、白丸が観測した分岐流量を用いて算出したもので

ある。粒径は、H24～H26年度にKP42より上流区間で実施された河床材料調査で得られた d_{60} の平均値である0.08mとした。総流量が $90\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ 以上で無次元掃流力が0.05以上となっており、放流のピーク流量規模であれば代表粒径程度の砂礫が移動することがわかる。従って、毎年実施される放流によって、流路a上への植生の侵入を抑制し、高水時の旧流路への導水を維持できる可能性が高い。

2.3 縦断形状に見られる特性

図-7に札内川上流 (KP45-46付近) のH25年のLP測量より得られた地形を示す。札内川上流部では、図-7に見られるような複列砂州河道の特徴である節と腹の平面形がよく見られる。図-7に示した縦断形を見ると、勾配が急な瀬と勾配が緩やかな淵が明確に存在していて、これらの瀬と淵がそれぞれ平面形状の腹と節の区間にほぼ対応している。また、図-7に見られる2箇所の節 (A、B) と流路変遷を過去の航空写真で調査したところ、過去に流路が大きく変動してもこれらの節の位置はほとんど移動していないことが確認された。縦断形の変遷については詳細なデータが存在しないが、節

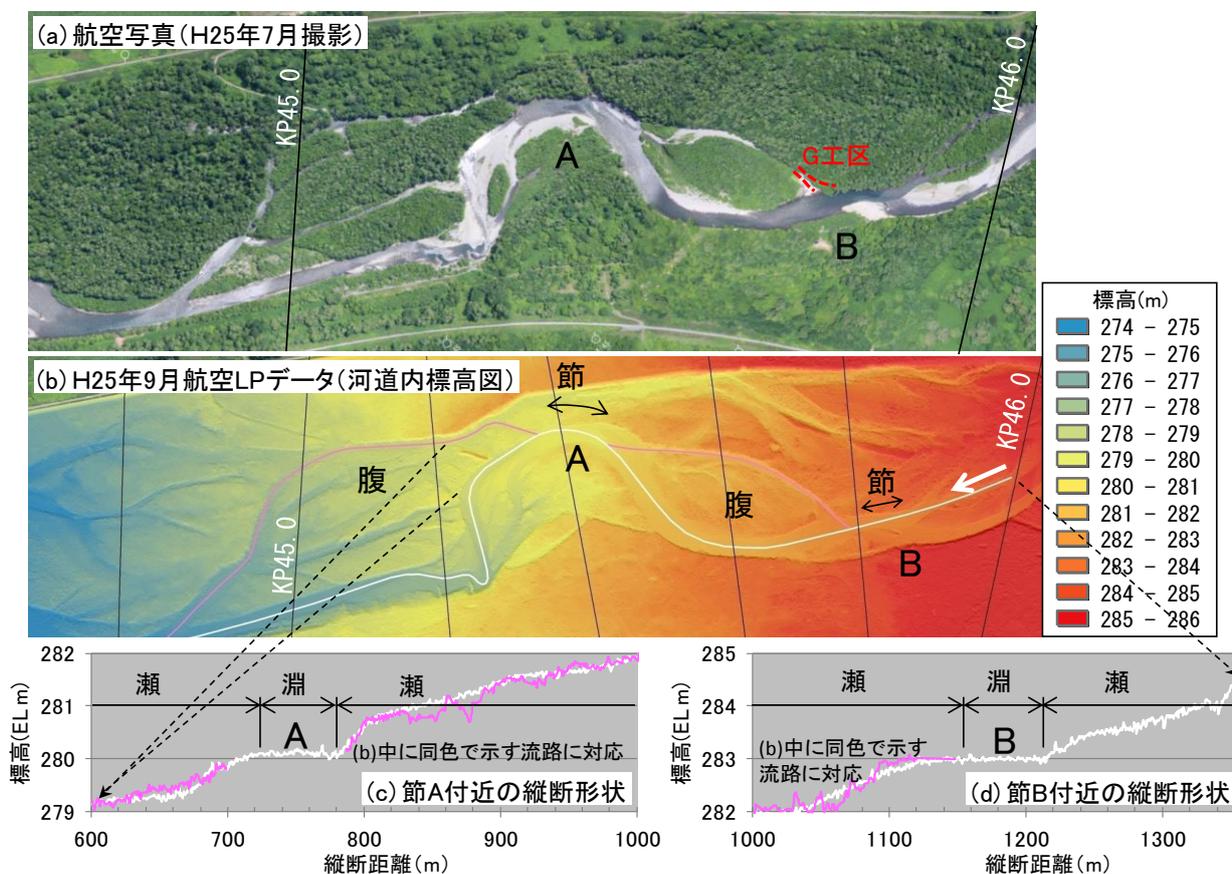


図-7 KP45-KP46 付近の航空写真, LP 地形データおよび流路の縦断形状



図-8 H25年度 E工区掘削箇所の概要と河床材料の粒度分布の変化



図-9 H25年度 D下流工区掘削箇所の概要と河床材料の粒度分布の変化



図-10 H26年度 F工区掘削箇所の概要と河床材料の粒度分布の変化

と対応して淵もほとんど移動していないと考えられる。

前出のADCP観測箇所である図-7中Aでは分岐流路が維持されている。その区間の縦断形状をみると、淵の下流の瀬が現れる位置で流路の分岐（節から腹への分岐）が生じている。また、後述するG工区と呼ぶBでは、H17年以降旧流路の閉塞が進行し、旧流路への分岐流が消失しつつある。しかし、H25年の地形データ（図-7）で瀬淵の縦断特性が明確に確認できることから、Bの箇所のように旧流路が閉塞した後も、節腹の平面形に対応した瀬と淵の縦断特性がある程度維持されているのがわかる。

3. 旧流路の回復手法

旧流路上の高まりは流入部のみに土砂が堆積したものであるため、小規模な掘削により比較的容易に旧流路を回復できる可能性がある。旧流路を回復するためにフラッシュ放流と併せてH25～H26年度に実施した

6つの掘削箇所の効果を前章で検討した流路特性とともに検証し、より継続的で効率的な掘削箇所の特性の把握を行った。

3.1 主流路と旧流路の線形を考慮した掘削箇所の選定（H25年度施工の旧流路回復試験）

H25年度は4箇所で行った。この年の掘削箇所は、主に主流路と旧流路の線形に留意して選定した。具体的には、蛇行した主流路の水衝部であり、かつ下流側に明確な旧流路の地形が維持されている箇所を選定した。いずれの工区でも掘削後の敷高が平水位程度となるように最大でも約0.5m程度の掘削が実施された。例としてE工区とD下流工区（D工区は2箇所で行った）の概要を図-8、9に示す。

放流時、E工区では掘削箇所から旧流路への激しい流れ込みが見られた。放流前後の計測によると、主流路と旧流路の比高差が減少（主流路で堆積、旧流路で侵食）し、旧流路上の河床材料の粒度分布が大きく変

化（粗粒化）した。図-8の粒度分布の変化から、掘削後一年目の放流で細砂がフラッシュされ、二年目の放流時にも堆積が見られず、その状態が概ね維持されていた。

一方、D下流工区では、放流時に掘削箇所から旧流路への導水は確認されたが、粒度分布にはほとんど変化がみられず（図-9）、E工区と比べるとD下流工区での導水は比較的小規模であることがわかる。

H25年度に実施したその他の掘削箇所では、いずれもE工区同様、主流路と旧流路の比高差の解消と粒度分布の大きな変化がみられ、旧流路への比較的大規模な導水に成功している。しかし、蛇行した主流路の水衝部であり、かつ下流側に明確な旧流路の地形が維持されているような線形的に有利な箇所はかなり限定され、該当する箇所が少ないという課題がある。また、D下流工区のように、主流の水衝部を選定しても大規模に導水できるとは限らないという課題もある。

3.2 複列砂州河道の縦断形状特性を考慮した掘削箇所の選定（H26年度施工の旧流路回復試験）

H26年度は前述の課題を踏まえ、より多くの旧流路を回復・維持するには複列砂州河道本来の分岐特性を復元することが重要であるという観点から掘削箇所の選定を試みた。前章で検討したように、複列砂州河道では、淵の下流の瀬へと変化する箇所で流路の分岐が生じていて、旧流路の閉塞後もその縦断特性はある程度維持されている状況であった。このような流路の縦断的な瀬淵特性を考慮して掘削箇所を選定すれば本来の分岐特性が復元する可能性がある。具体的には、縦断的に淵から瀬へ切り替わる所またはその直下流側を選定することとし、G工区（図-7、航空写真中の赤の破線）とF工区（図-10）の2箇所の試験箇所を選定し、掘削を実施した。

G工区では、流路線形の有利さよりも淵の下流の瀬から導水させることを優先して掘削箇所を選定した。F工区では、直線化した主流路にも瀬淵の特性が維持されていることに着目し、やはり淵の下流の瀬から旧流路へ接続するように掘削箇所を選定した。

放流時、両工区で旧流路への激しい流れ込みが見られた。放流前後の調査から、主流路と旧流路の比高差の解消や河床材料の粗粒化も確認された。特にF工区（図-10）では、掘削した流入部で10m規模の側方侵食が発生するほど激しい流れ込みが生じた。このように、複列砂州河道の縦断的な瀬淵特性を考慮して掘削箇所を選定することによって、旧流路への大規模な導水が実現した。

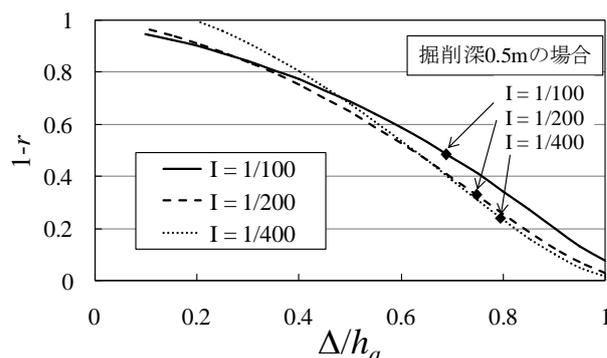


図-11 流路勾配による分岐流量配分比の変化（ $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ ）

3.3 効率的な掘削箇所選定に関する検討

H26年度に実施した旧流路回復試験の結果より、縦断的な瀬淵特性を考慮して掘削箇所を選定することによって確実に旧流路を回復できる可能性が示された。

H25年度に実施した掘削箇所の縦断特性を調べると、D下流工区以外はいずれも淵の下流の瀬の箇所が選定されており、H26年度の選定手法に合致していた。これに対して、D下流工区だけは淵にあたる箇所が選定されていた。D下流工区は今のところ大規模な導水を唯一回復できていない試験工区であることを考えると、淵のように勾配が緩やかな箇所は、たとえ主流路の水衝部だとしても掘削箇所として適さない可能性がある。

前出の分岐流量配分比に関する理論⁵⁾を用いて、流路勾配によって配分比がどのように異なるかを検討した。蛇行した主流路の水衝部に旧流路が位置するとし（図-4）、流路幅は15m（ $B_a=B_b=15\text{m}$ ）、流量は放流ピーク程度の $100\text{m}^3/\text{s}$ として、勾配 $I=1/100$ 、 $1/200$ 、 $1/400$ について解析した結果を図-11に示す。図-7の縦断形状を見ると、瀬では勾配が $1/100$ 程度、淵ではほとんど勾配がない（淵でのエネルギー勾配を不等流計算により求めると $1/400$ 程度となる）。図をみると、 Δ/h_a が同じ値であれば急勾配であるほど旧流路への流量配分比は若干増加する。次に、試験施行と同様に0.5m掘削した場合を考える。前述したように札内川上流部では流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度で水位と河岸高さがほぼ一致することから、旧流路が完全に閉塞している場合は $\Delta=h_a$ （ $I=1/100$ の場合 $h_a=1.6\text{m}$ 、 $I=1/200$ の場合 $h_a=2.0\text{m}$ 、 $I=1/400$ の場合 $h_a=2.4\text{m}$ ）と考え、そこから0.5m掘削すると、掘削後は $\Delta=h_a-0.5\text{m}$ と想定できる。このとき、図示したように勾配が緩やかな場合は勾配が急な場合に比べて配分比が著しく低下する。したがって、旧流路を回復させるには勾配が緩やかな淵の領域よりも勾配が急な瀬の領域で掘削を実施する方が有利であることが

わかる。

複列砂州河道では、主流路と旧流路が合流して分岐する領域（節）に淵が存在するため、分岐部周辺では縦断勾配が大きく変化している。急勾配である有利性と複列砂州河道の縦断的特性から、閉塞した旧流路を回復するためには、淵の下流で瀬が現れる（急勾配になり水深が浅くなる）箇所を選定して旧流路へ接続するように掘削するのが効率的であることがわかる。実際に、これに該当する箇所を選定された試験工区では、前出のようにいずれも大規模な旧流路への導水に成功しており、確実な選定手法であると考えられる。

3.4 高頻度出水時に見られる旧流路回復の効果

H26年8月に確率規模1/3年程度の出水が発生した。このときE工区では写真-3に示すように、回復させた旧流路に沿って大規模な樹木流亡を伴う河道攪乱が発生し、主流路と旧流路の切り替わりが生じた。掘削前（図-8）の写真と比べると、一筋の蛇行流路への固定化が進行していた状況が解消されている。F工区やG工区でも、旧流路沿いで大規模な樹木流亡を伴う河道攪乱が発生しており、高頻度で発生する出水規模でも旧流路を回復させた効果が確認された。このように、流入部だけの比較的小規模な掘削であっても、旧流路が回復することによって、比較的大規模な河道攪乱が実現した。毎年実施されているフラッシュ放流によって回復した旧流路を維持することで、本来の複列砂州河道の分岐特性が将来にわたって復元・維持できるものと期待される。

4. おわりに

札内川での流路の固定化は旧流路流入部の閉塞によって進行していることが確認された。また、札内川のような複列砂州河道において流路固定化を解消または抑制するには、流入部の掘削による分岐流路の回復が有効であることが示された。旧流路を効率的に回復させるために適した掘削箇所を選定手法について検討した結果、複列砂州河道の縦断的な瀬淵特性を考慮し

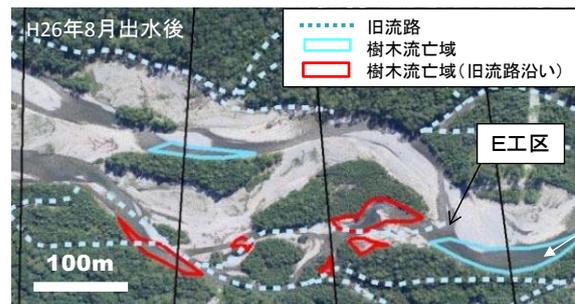


写真-3 H26年8月出水後のE工区周辺の航空写真

て掘削箇所を選定すれば効率的に旧流路を回復できることがわかった。H25～H26年度に札内川で実施した掘削試験結果とH26年8月出水時の河道攪乱状況から、縦断特性を考慮して選定した掘削箇所では、旧流路が回復し、複列砂州河道本来の分岐特性が復元する可能性の高いことが示された。

参考文献

- 1) 川岸秀敏, 川邊和人, 武田淳史: 札内川における礫河原再生の取り組み—旧川（派川）を活用した放流効果の最大化に向けて—, 北海道開発局技術研究発表会, 2014.
- 2) 北海道開発局帯広開発建設部: 札内川技術検討会資料, http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/kakusyu/satsunai_kentoukai/, 2014.
- 3) 渡邊康玄, 武田淳史, 川岸秀敏, 住友慶三: 札内川人工放流における派川復元手法の検討, 応用生態工学会第18回研究発表講演集, pp. 275-278, 2014.
- 4) 長谷川和義, 広瀬健治, 目黒嗣樹: 山地河川における分岐部流路交番現象に関する抽出実験とその解析, 水工学論文集, 第47巻, pp. 679-684, 2003.
- 5) 長谷川和義, 藤田将輝, 渡邊康玄, 桑村貴志: 標津川旧蛇行通水時の堰をともなう分岐流量配分比に関する研究 水工学論文集, 第47巻, pp. 529-534, 2003.

STUDY ON THE EFFECTIVE METHOD FOR THE MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF THE RIVER WHERE THE WATERCOURSES ARE WELL ESTABLISHED

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : River Engineering Research Team

Author : FUNAKI Jungo

KAWAMURA Satomi

Abstract: In recent years, on the Satsunai River, a tributary of the Tokachi River, the area of gravel dry riverbeds has been rapidly decreasing because of the invasion by riparian forests. The watercourses have concentrated into one main watercourse and many of the branched streams have already disappeared even at locations where double-row bars had existed. In this study, onsite surveys and theoretical analysis were done to clarify the characteristics of bifurcations in watercourses with double-row bars and to determine a method of selecting the optimum excavation locations for effectively restoring already closed former watercourses. It was found to clearly identify riffles and pools in the longitudinal profile of the watercourse in the Satsunai River. Excavation at locations slightly downstream of a pool, where a riffle starts to emerge, were found to be effective.

Keywords: Trees invasion, The Satsunai River, double-row bars, longitudinal profile, bifurcations, excavations