

旧流路部を活用した水路掘削と平面掘削の併用 による砂礫河原再生手法の提案

PROPOSAL OF RESTORATION METHOD OF GRABEL BED RIVER BY COMBINING PLANAR EXCAVATION AND EXCAVATION UTILIZING OLD CHANNEL SECTION

岩井久¹・傳田 正利²・窪 宗昭³・平林 亮⁴・本多信二⁵・小川明宏⁶・萱場祐一⁷

¹非会員 前国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所 調査課 調査係長
(〒390-0903 長野県長野市鶴賀字峰村74)

²正会員 工博 国立研究開発法人 土木研究所, 水環境研究グループ河川生態チーム主任研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³非会員 前国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所 工事品質管理官
(〒390-0903 長野県長野市鶴賀字峰村74)

⁴非会員 前国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所 調査課 国土交通技官
(〒390-0903 長野県長野市鶴賀字峰村74)

⁵正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 河川計画室 室長
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目22番地)

⁶正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 河川計画室 課長代理
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目22番地)

⁷正会員 工博 国立研究開発法人 土木研究所, 水環境研究グループ河川生態チーム上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

To conduct gravel bed river restoration, limitation of overgrowth woodland at low cost, we studied on gravel bed river restoration by river channel excavation utilizing both old channel selection and planer excavation. In the result, we succeed in introducing overflow on river terrace, conducting bed river restoration, limitation of overgrowth woodland. And we reduced costs on excavation. These results were caused by planning a setting connecting points of channel excavation to upper region of riffle. We understood the important knowledge that are applicable for the other rivers.

Key Words: nature restoration, gravel bed river, bed excavation, flood disturbance

1. はじめに

千曲川のセグメント1における砂礫河原は、1940年に7.3km²であったが、2013年には、2.0km²と約1/3～4まで減少してきている。一方、水辺の国勢調査結果によると、外来種の本木類であるハリエンジュは、1995年に約1km²であったのが、2013年には1.8km²まで増加している。

このため、砂礫河原再生・樹林化抑制を目的とした砂礫河原再生事業が、2004年より試行的に行われてきており、年1回程度の陸域への冠水が、砂礫河原の再生と樹林化の抑制に効果があることが確認されている。

しかし、河床低下が進行し、平水時の流路と陸域の比高が増大した千曲川においては、河道掘削により冠水頻度を上昇させるには大規模な平面掘削が必要である。大

規模な掘削は、伐採・掘削費用、土砂処分の方法、土砂運送費用等の問題がある。また、土砂処分の方法が決まらない場合、河川堤防沿いへ仮置きされるが、外来種であるオオブタクサの繁茂が確認される等、河川環境管理上の問題も生じている。

このような問題に対し、既往研究は、大きな示唆を与える。渡良瀬川¹⁾や札内川²⁾の研究は、陸域に残存する旧流路を活用し、旧流路へ洪水流を誘導し、自然攪乱による表層土壌材料の更新・下流への土砂移動を促すことに成功した。これらの研究は、河川の特長である自然攪乱とそれに伴う土砂移動を巧みに利用し、出水後の植生動態を大きく左右する表層土壌材料を制御できる可能性を示す。また、既往研究が示す下流への土砂移動の促進は、掘削土砂の河道外へ移動よりも土砂動態の健全性に寄与するし、土砂移動等の費用が削減され厳しさを増す事業

費抑制への社会的要請に対応できる技術である。掘削水路を利用し、より少ない河道掘削で千曲川の環境管理目標である砂礫河原の再生に成功すれば、多自然川づくりが目標とする「自然営力を活かした河道管理」、長期にわたる低予算での河川生態系管理が実現できる。

本研究は、既往事例を参考とし、陸域に残存する旧流路部を活用し、陸域への洪水流の誘導と平面掘削の併用により、(イ)洪水による攪乱と土砂移動の促進、(ロ)砂礫河原再生・樹林化の抑制、(ハ)掘削量の軽減、という3つの目的を同時に達成する方法を確立すべく実施した。また、既往研究や掘削事例では、詳細に検討されることが少ない掘削水路の平面計画・縦断計画が、(イ)、(ロ)の実現に寄与した水理的メカニズムの検証を行い、事業計画時に必要となる河道特性について整理・検討し、掘削水路による砂礫河原再生の発展に資する事も同時に目的とした。

2. 研究方法

(1) 調査地の概要

図-1に冠着地区(直轄区間85~86km, 以下、「調査地」と記述する。)の概要を示す。調査地は、河床勾配1/220, 平均代表粒径53mmのセグメント1である。

調査地は、下流部と上流部で異なる状態であった。調査地の下流部(以下、「下流部」と記述する。)は、みお筋部の河床低下で冠水頻度が減少して樹林化している。一方、調査地の上流部(以下、「上流部」と記述する。)は砂礫河原が残存しているが、10年に1度程度の洪水規模である2013年洪水でも無次元掃流力評価が0.06以下と砂礫が動きづらく、今後、砂礫河原が消失するおそれがある。2016年3月には、上流部・下流部に対して砂礫河原再生の工事が実施された。

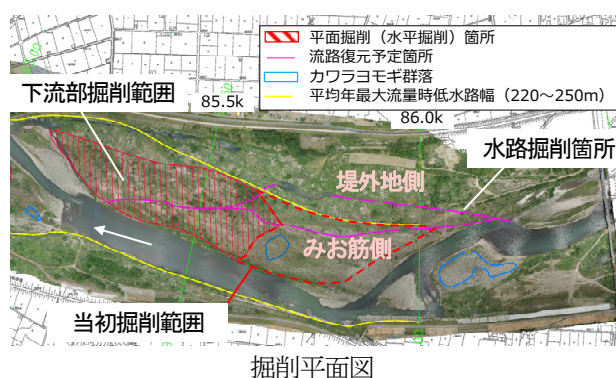
(2) 調査地における旧流路部を活用した水路掘削と平面掘削の併用の考え方

a) 水路掘削採用の経緯

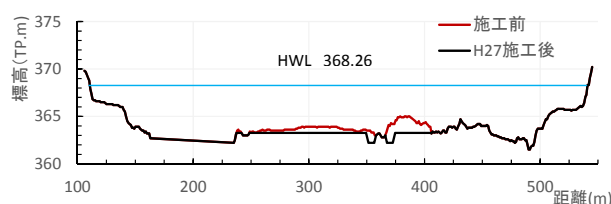
調査地における砂礫河原再生の当初計画は、図-1に示したとおり下流部・上流部の平面的切り下げを検討したが、掘削量が12.6万 m^3 であった(図-1:当初範囲)。そのため、下流部は「全体的な砂州の切り下げによる消失した砂礫河原の再生」、上流部は、「水路掘削による既存砂礫河原の活性化」を検討した。

b) 上流部での水路掘削

図-2にレーザープロファイラーを用いた掘削前の地盤高コンター図を示す。調査地は単列砂州で砂州上には旧流路跡が複数確認できる。水路掘削は、平水時の主流部に近接した2つの旧流路を掘削して行い(堤外地側、みお筋側)、旧流路への洪水流入に伴う攪乱を期待した。水路掘削の上流端位置(以下、「呑み口」と記述す



掘削平面図



掘削横断面図 (85.6kp)

図-1 調査地の概要

る。)は、瀬(砂州前縁線)の上流側に設定した。これは、中小洪水時には砂州前縁線による堰上げで水位が高くなり易く、掘削水路内へ洪水流を導流し易いと判断したことによる。

図-3に水路の掘削の縦断図を示す。水路の掘削高は、水路内の砂礫が平均年最大流量以下の1/1の確率規模(中小洪水)でも動ける掃流条件を基本とした。旧流路の一部は、たまりが存在するため、常時流入を防止するため豊水流量以下では流入しない高さとした。

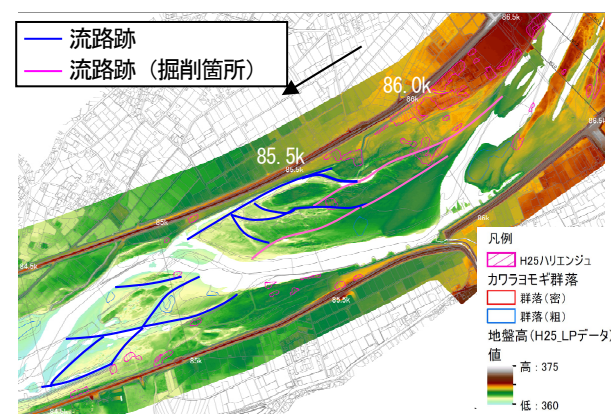
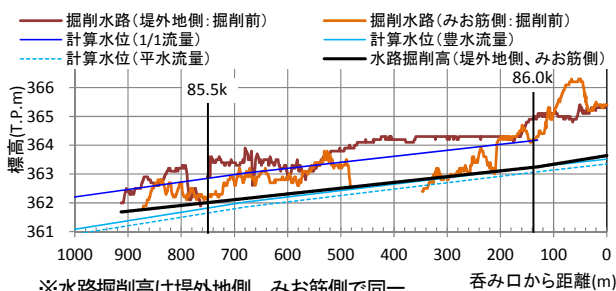


図-2 施工前の地盤高コンター図



※水路掘削高は堤外地側、みお筋側で同一

図-3 水路掘削縦断

b) 下流部での平面掘削

平面掘削範囲(図-1:下流掘削範囲)は、同一のセグメントで良好な状態で現存する砂礫河原を参考に、現存の河原環境に依存するカラヨモギ群落の保全に留意しつつ、過去に砂礫河原が存在した箇所を対象に、低水路幅250m程度となる様に設定した。

掘削高は、千曲川における砂礫河原経年変化や河川生態学術研究会千曲川グループでの研究成果³⁾である「概ね10年に1度程度の洪水で砂礫河原に回復すること」、「千曲川に多く繁茂しているハリエンジュの群落範囲は年1回未満の冠水頻度の箇所であること」に基づき、設定した。具体には、年1回程度の洪水水位で掘削高を算定し、平面二次元流解析を用いて、砂礫の攪乱が期待できる無次元掃流力0.06以上である⁴⁾ことを再確認して設定した。

(3) 水路掘削・平面掘削の効果検証のための現地調査の方法

2016年10月20日に洪水攪乱に伴う上流部・下流部の景観変化を把握するため、現地踏査を行い、砂礫河原の再生状況、植生動態に関する特徴的な変化を記録した。

水路掘削部の変化を確認するために施工箇所の水域内において1断面を対象に50mピッチで横断測量を実施した。

図-4に示す5調査地点(●)において、砂礫河原回復箇所・中州形成箇所における、河床材料調査を行った。河床材料調査は線格子法により実施した。

最後に、2016年夏期、秋期に植物群落調査を行い、植生図を作成した。

(4) データ解析

a) 砂礫河原の再生効果の検証

本事業では、下流地区における砂礫河原の再生を目的の一つとしている。そのため、砂礫河原面積の増加を評価した。砂礫河原面積は、判読者の属性、すなわち河川工学の専門家、植物の専門家で判断基準が異なる場合が多い。本研究では、水理計算時の粗度分布を判定する際に砂礫河原と判断される区域を洪水前後のUAV画像から画像解析で抽出し、面積を比較する方法で行った。画像解析方法、オブジェクトベース分類(セグメンテーションと呼ばれる処理により、スペクトル情報(RGB値、輝度等)や形状情報に基づいたオブジェクト(ピクセルの集合)を生成し、画像を分類する技術である⁵⁾。

次に、洪水前後の河道内地形変化を検証するために横断測量結果を比較し、地形変化を確認した。その後、洪水後に創出された砂礫地の粒度特性を分析するため、河床材料調査結果から粒度特性を比較した。また、河道内地形変化と出水流況の対応を検討するため、iRIC Solver-Mflow_02を用いて二次元河床変動計算を行った。

b) 樹林帯抑制効果の検証

上流地区における樹林帯抑制効果を検証するために、上述した植生図の植物群落変化を群落遷移の観点から評価した。

c) コスト削減効果の検証

本事業の最終施工図面に基づき掘削土砂量を算出し、調査地の全面掘削を行った場合の掘削土砂量との比較を通してコスト削減効果を検証した。

d) 事業効果が生じたメカニズム把握のための水理解析

上述の事業評価を通じて効果があった項目について、事業効果が出た要因を洪水時の水理解析を通して分析した。分析は、最も流量の大きかった2016年9月20日出水(確率規模1/3程度)におけるピーク流量までの中間段階である800m³/s、ピーク流量である1400m³/sを対象に行った。

下流地区に関しては、砂礫帯形成効果を検証するため摩擦速度を中心とした解析を行い、上流地区に関しては、水路拡幅効果を検証するため、流速分布、流向ベクトル、水路拡幅部と呑み口の800m³/s、1400m³/sの水面標高値を比較し、水路拡幅部に生じた流体力を考察した。本研究では、河床変動計算を実施しているが、水位変化をより詳細に検討するために、河床変動によるエネルギー消化がなく水位変化が顕著に現れやすい平面流計算を別途実施した。

3. 結果

(1) 砂礫河原の再生効果の検証

図-4は施工直後と洪水後のUAVによる垂直写真による変化を示す。上流部における植生侵入箇所の砂礫への回復、拡幅したみお筋側水路では水路の外岸側・内岸側の拡大、下流部・上流部の接合部において扇状地出口部で見られる中州の形成が確認された。

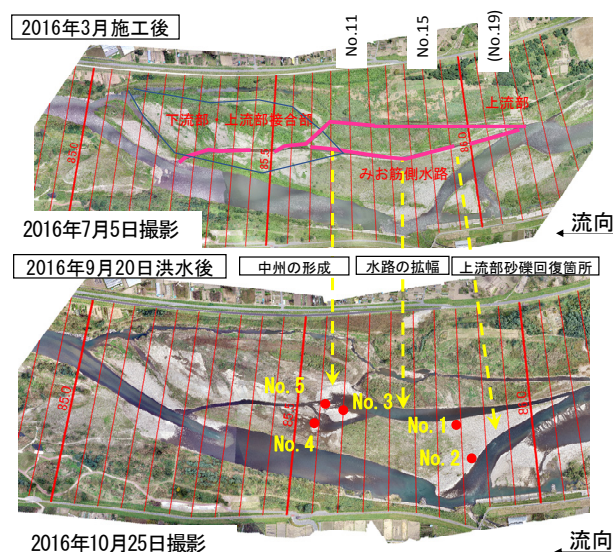


図-4 洪水前後でのUAVによる地形変化



写真-1 2016年9月20日洪水後の状況

写真-1に砂礫河原形成箇所の現地写真を示す。砂礫の回復箇所において、砂礫帯が移動し植生を一部埋めていた。

図-5に画像解析の面積比較を示す。砂礫河原面積が約2.6倍の面積増加が確認できた。

図-6に上流地区（水路掘削部）における洪水前後の横断測量結果の比較を示す。中州形成箇所（図-6：No. 11）においては、掘削した水路を0.5m程度埋め戻し、その周辺に新たな流路が形成した。砂礫回復箇所・水路拡大箇所（図-6：No. 15）においては、砂礫帯が0.1m程度で薄く堆積することにより砂礫河原が回復した。水路幅が約10mから約25mに拡大し、拡大は外岸側より内岸側の方が大きかった。水路の河床高は0.5m程度堆積した。水域での地形変化は、みお筋が固定化し、本流の深掘れしている箇所（図-6：No. 19）において、0.5m程度埋め戻しが発生した。

図-7に、砂礫河原回復箇所、中州形成箇所での河床材料調査結果を示す。砂礫回復箇所の代表粒径は30～50mm、中州形成部では70～80mmと粒度分布が異なった。

掘削前の既往調査は、調査地における代表粒径は40～80mmであり、砂礫回復箇所及び中州形成部の粒径は、過去の粒度分布の範囲内であるが、砂礫回復箇所においては、より粒径が小さい集団、中州部においては、粒径が大きい集団が確認された。

(2) 樹林帯抑制効果の検証

図-8に、洪水後の植生群落図の調査結果を示す。下流地区においては、施工後、シロバナシナガワハギ群落は形成されたが、洪水により砂礫河原が回復した。

上流地区においては、砂礫帯により砂礫河原に回復し

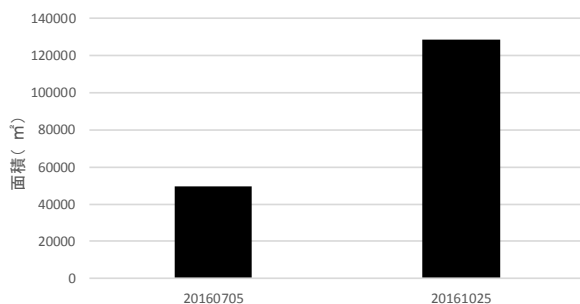


図-5 画像解析、植生図に基づく砂礫河原の面積比較

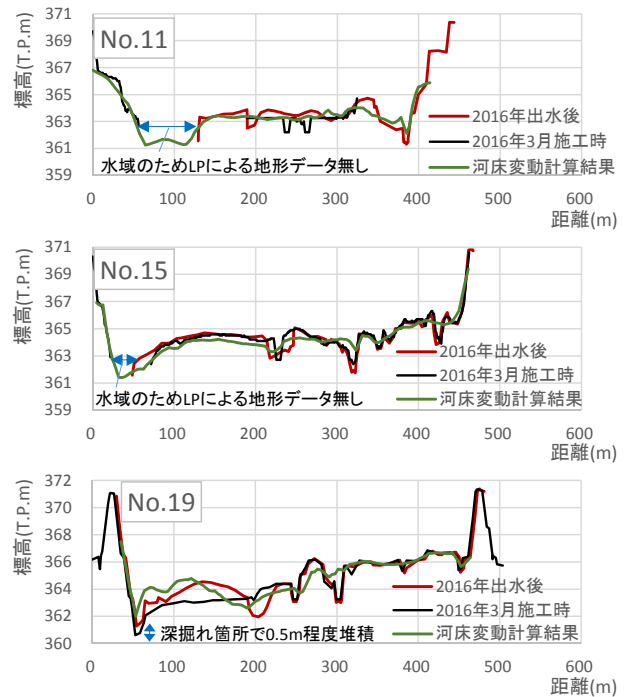


図-6 上流地区（水路掘削部）における洪水前後の横断測量結果の比較

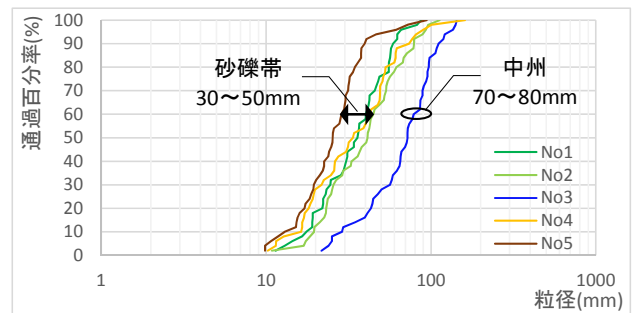


図-7 砂礫上で変化が見られた箇所の粒度分布

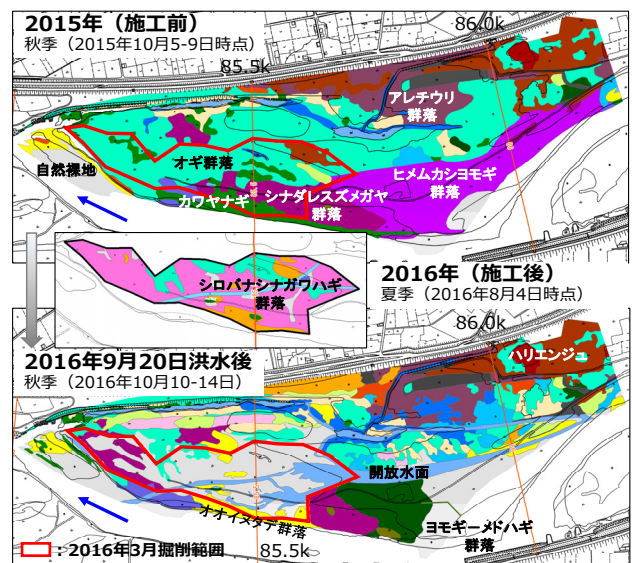


図-8 洪水後の植生群落図

た箇所以外は植生がヒメムカシヨモギ群落からヨモギーメドハギ群落へ変化し、徐々に陸生化が見られる。

(3) コスト削減効果の検証

掘削量は、全領域を平面掘削した場合、約12.6万 m^3 、本形状は3.9万 m^3 であり、掘削量に起因するコストは1/3に削減できた。

(4) 事業効果が生じた要因把握のための水理解析

図-9に、2016年9月20日洪水ピーク流量時約1,400 m^3/s における摩擦速度コンター図と砂礫帯形成状況を示す。砂礫帯形成箇所の摩擦速度は概ね0.25 m/s 程度となっており、無次元掃流力が約0.06、粒径換算で50 mm 以下が動くと推定された。

図-10は、中間段階の流量規模である800 m^3/s 時の流速コンターベクトル図を示す。砂州上の流れは水路に沿った流れを主体としながら、内岸側から落ち込むような流れが生じている。

図-11は、洪水ピーク時の流速コンターベクトル図であり、この規模では水路上の流れも直線的となり、水路内岸側は逆に水当たりのような状況となっている。

図-12に水路拡幅部における800 m^3/s における水位横断面図、1,400 m^3/s における水位横断面図の比較、図-13に呑み口における800 m^3/s 時の水位横断面図、1,400 m^3/s 時の水位横断面図の比較を示す。

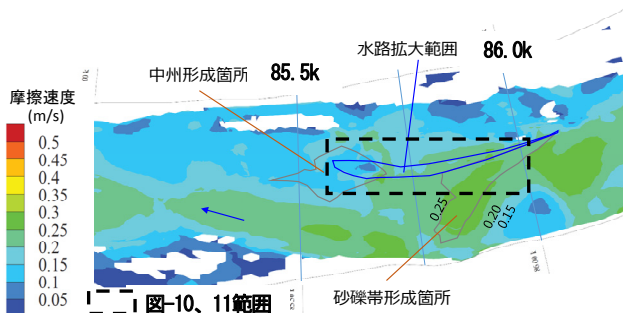


図-9 摩擦速度コンター図
(2016年9月20日洪水ピーク流量時)

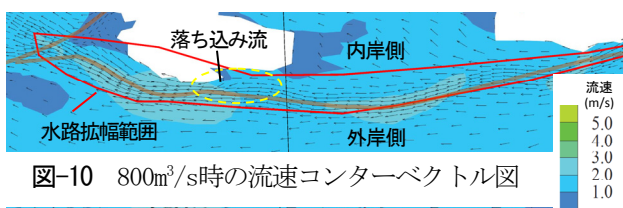


図-10 800 m^3/s 時の流速コンターベクトル図

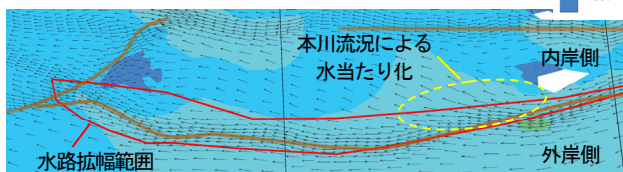


図-11 洪水ピーク時 (1,400 m^3/s) の
流速コンターベクトル図

図-12、図-13ともに左岸から中央部の横断方向で0.5 m ～1 m の緩やかな水位上昇が確認された。一部の地点では急激な水面変化が確認され、右肩上がりの水面勾配上昇が確認された。また、800 m^3/s 時にはその傾向が顕著であった。また、水路拡幅部と呑み口部における縦断方向

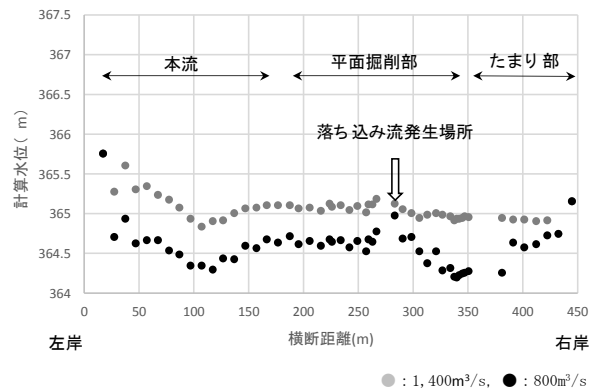


図-12 水路拡幅部における800 m^3/s 時及び1,400 m^3/s 時の計算水位の横断比較図

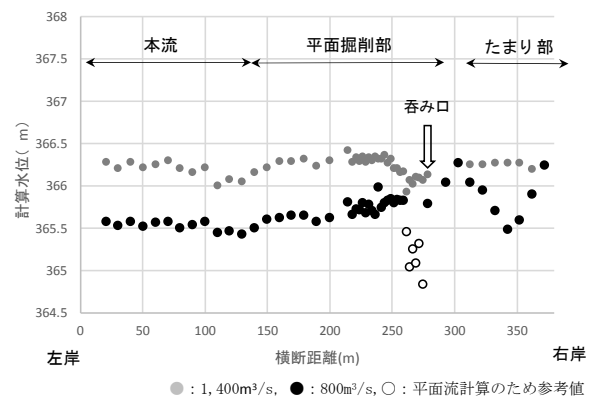


図-13 呑み口における800 m^3/s 時及び1,400 m^3/s 時の計算水位の横断比較図
の水面勾配は、約1 m ～1.5 m の1/200程度であった。

4. 考察

(1) 水路掘削による事業効果の検証

本事業は、下流部においては砂礫河原の再生を、上流においては樹林化の抑制を、河川環境管理の目標に掲げ、同時に、コストの抑制も目標とした。検討の結果は、全ての目標を達成できていることを示している（図-5、図-8、3章3節）。

砂礫河原再生に関しては、洪水による攪乱で砂礫河原面積が約2.6倍に増加し（図-5）、現地踏査やUAV画像からも一定面積の砂礫河原の点在が確認できる（図-4、写真-1）。景観面だけでなく表層土壌に関しても粒径が小さい集団（30 mm ～40 mm ）が増加するなどの良好な変化が生じた（図-7）。30 mm ～40 mm の粒径集団は、中礫と考えることができ、千曲川で減少するカワラヨモギ個体群の生育が期待される。

樹林化の抑制に関しては、掘削直後は、シロバナシナガワハギ群落やオオブタクサ群落等の生育が確認されたが、洪水により砂礫河原が再生され、植物群落の遷移が更新された（図-8）。しかし、上流部においては、ヒメムカシヨモギ群落からヨモギメドハギ群落への遷移が確認され、更なる植生への遷移の可能性がある。今後の

出水により消失する可能性は十分にあるが、今後注視しなければならない。

コスト削減効果に関しては、掘削土砂量が1/3になった点は、人口縮小に伴うコスト削減が求められる昨今の河川管理には極めて大きな成果である。本研究では、掘削土砂量のみをコスト評価の対象としたが、掘削土砂の発生は、掘削土砂の受け入れ先の調整、仮置き場におけるオオブタクサ等の外来生物生育状況の監視、掘削土砂の運搬・処分費等のコスト増大等、河川管理者にとっての多くの費用と業務の負担を発生させる。これらの付随する費用・業務を含めれば、コスト削減効果は極めて高いと考えられる。

また、本流の深掘れしている箇所への埋め戻しは、全国的な河床低下の抑制に効果があることや、掘削土砂を人為的に取り上げ移動せず、自然攪乱を活用して下流へ供給することができるなど、多自然川づくり・総合土砂管理の理念に合致する良好な成果を確認できた。

全国の河川において実施される河道掘削適用が図れば、大規模なコスト削減が期待される。

(2) 事業効果を支えた水理特性の把握

3章4節における検討は、「陸域越流時の流況の多様性」の重要性を示す。事業計画時、筆者らは、水路掘削部を洪水が流下し、水路掘削部から砂州全体の土砂移動が生じると推定していた。

しかし、陸域における洪水流の冠水域が土砂移動を促していた(図-9)。水路掘削は、洪水時の流量増加に伴う冠水域の拡大を陸域へ呼び込むトリガー的役割を果たし、図-10の上流部右岸側のベクトルの2分化が、それを実証している。また、下流部への流下に伴い、主流部との位相差、氾濫水域内における比高差(相対水深)の均一化の調整(図-12)が生じ、落ち込み流等が生じる。この落ち込み流が水路拡幅範囲の内岸側の拡大などを促したと考えられる(図-11)。

また、この調整を促すには、十分な水面勾配があった点も大きい(図-12、図-13)。図-12、図-13は、河床変動計算よりも、より顕著に水位変化が生じるため留意が必要であるが、水路掘削から落ち込み流が生じた区域までは水面勾配は1/200であり、河床勾配よりも大きな水面勾配が生じている可能性が高く、大きな流れのエネルギーがあったと考えられる。本研究の水路掘削部では、呑み口を平水時の瀬(砂州前縁線)の上流部であり、かつ、洪水初期の流向を意識した呑み口の角度設定が有効であったと考えられる。

(3) 水路掘削と平面掘削の一般化にむけて

河道掘削を行う場合には、二次元河床変動計算は、必須の検討課題とし、本事業においても、計算条件を変えてその精度検証を行った。

この検討結果で重要なのは、浮遊砂を考慮すると、計算コストの増大に対して得られた地形再現精度は良くな

かった点である。むしろポピュレーションブレイク(10mm以下の除去)を適用し、浮遊砂を考慮しない方が、河床地形の再現精度は高かった。現段階では、限定された事例的検討に過ぎないが、調査地のような砂礫が主の洪水に伴う土砂移動を表現するには、まず、砂礫を対象に砂州地形変化概略を推定する取り組みの方が、低コストで、河床変動傾向の大枠を把握できる可能性も確認できた。河床変動計算を適用する河川の特性(平面形状、河床材料特性)を考慮しながら、ポピュレーションブレイクを適用する方が、精度向上が見込める河川においては、適切にポピュレーションブレイクを適用し、河床変動を予測することで、より確度の高い事業効果を事前に検討できる可能性を確認した。

5. まとめ

河道掘削による砂礫河原再生、樹林化抑制を低コストで行うために、旧流路部を活用し洪水流を陸域へ導水する水路掘削と平面掘削の併用による砂礫河原再生を検討した。

その結果、洪水流の陸域への導流・越流に成功し、砂礫河原再生、樹林化抑制に成功した。また、掘削コストは1/3に圧縮することに成功した。これは、水路掘削水路掘削部の呑み口の設計にあたり、瀬の上流部、平水・出水初期の流向を考慮した効果が大きく他の河川でも適用できる重要な知見を得た。

参考文献

- 1) 松田浩一・内堀寿美男・清水義彦・石原正義・藤堂正樹：固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究，河川技術論文集，第16巻，pp.235-240，2010。
- 2) 山口里実・渡邊康玄・武田淳史・住友慶三：流路の固定化が進行した河道における効率的な旧流路回復手法に関する検討，河川技術論文集，第21巻，pp.217-222，2015。
- 3) 西嶋 貴彦・前田 諭・阿部 充・五十嵐 武・竹内 洋子：千曲川中流域の試験的河道掘削に関する研究，リバーフロント研究所報告 Vol.25，pp. 3-12，2014。
- 4) 八木澤順治・田中規夫：洪水時における砂礫州上の土砂堆積とそれに応じた植生遷移を考慮した植生動態モデルの開発，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70，No.3，pp. 71-81，2010。
- 5) 村上拓彦・大西紀子・加治佐剛・溝上展也・吉田茂二郎：林相区分を目的としたオブジェクトベース画像解析における最適なセグメンテーションの検討，写真とリモートセンシング，Vol.49，No.3 pp. 159-165，2010。

(2017. 4. 3受付)