

①技術研究開発テーマ名	河道掘削による洪水攪乱の誘発と新たな河川維持管理技術の確立に関する研究
②研究代表者	
氏名	所属・役職
清水 義彦	群馬大学大学院工学研究科・教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
須藤 達美	パンフィックコンサルタンツ（株），河川部河川計画グループリーダー
松田 浩一	パンフィックコンサルタンツ（株），河川部河川計画グループ技術課長
岩見 収二	建設技術研究所東京本社河川部・主幹
松本 健作	群馬大学大学院工学研究科・助教
内堀 寿美男	国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所・調査課長
大島 秀則	国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所・計画係長
④背景・課題	
<p>わが国の礫床河川の多くでは，最近の数十年の間に，低水路の河床低下，砂礫州の高水敷化によって河道横断面内の高低差（比高）が拡大し，これによって中小出水での洪水攪乱が集中する低水路周辺と，洪水攪乱が微弱な砂州の出現という二極化が生じている．その結果，低水路蛇行による水衝部が近接した堤防付近では，局所洗掘，河岸侵食の発生から堤防の安定性に障害をもたらすことが予測され，これまで護岸，水制等の治水対策が行われてきた．</p>	
<p>一方，洪水攪乱が微弱な砂州では草本の過剰な繁茂が進み，さらに木本群落は砂州を占有することで（河道内樹林化の進行），洪水の流下能力低下を招いている．国土交通省渡良瀬川河川事務所では河川維持管理の一環として河道内樹木の伐採・伐根を行っているが，伐根しても萌芽が著しく，3～4年で木本群落が再生しているのが現状であり，これには礫床河川での河道内樹林化を生む代表種のハリエンジュ（<i>Robinia pseudo-acacia</i>）が強く関わっている．ハリエンジュの拡大は種子散布のみならず栄養繁殖が大きな特徴で，伐根時に河床内で切断され残存した根茎からの萌芽が著しく，また，河床表層を水平に張った根茎からの萌芽（ルートサッカー）もあって群落再生能力がきわめて高い．そして，洪水のハリエンジュに与える攪乱が根茎層の流失を促す河床変動でなければ，栄養繁殖によってその後の再生がきわめて著しいことが明らかにされている（清水ら：ハリエンジュによる動的樹林化，水工学論文集，2001）．</p>	
<p>さらに，河床低下とともに砂州河床の植物被覆によって砂州がフラッシュされにくくなり，砂州の固定化と，植物繁茂がもたらす礫床景観の消失によって河川固有生物の生息環境も失いつつある．こうした礫床河川の河道特性の変質によって治水機能，河川環境機能が劣化しており，その回復が河川管理に強く求められている．</p>	

⑤技術研究開発の目的

本研究では、中小洪水の営力によってそれらの改善を試みるものであり、冠水頻度の低い固定化した砂州内に河床掘削を行って出水の一部を導き（砂州内での掘削路の設置）、洪水による攪乱を誘発させることをねらった。それにより、①砂州の樹林化を抑制すること、②掘削路が拡大することで低水路に集中した洪水流を緩和させること、③掘削路を中心にして生じる河床変動・河岸浸食が拡大することで砂州内の草本繁茂が抑制され、礫床が再生されること、④掘削路を通じて砂州内の堆積土砂を低水路に排出し、砂州比高による極端な横断内高低差を解消させること、⑤低水路に排出された砂礫が新たな流砂運動を生むことで低水路地形形成のダイナミズムが活発化することを効果として期待した。すなわち、掘削による洪水攪乱の誘発というインパクトに対し、中小洪水規模の営力のもとに生じる河道変化のレスポンスを利用しながら河川の治水機能、環境機能の回復を行うことを、新たな河川維持管理技術の確立として目指した。

⑥技術研究開発の内容・成果

利根川水系渡良瀬川礫床区間（河床勾配 1/110-1/140 程度）では、固定化された砂州と低水路蛇行により水衝部が形成され、また砂州・低水路の極端に大きな比高より河道内樹林化が進行している等、前述した河道特性の変質が著しい(図 1, 図 2)。図 2 は平成 19 年台風 9 号出水時における航空写真であ



図 1 渡良瀬川礫床区間の航空写真 (H14) (図の左側が上流側)

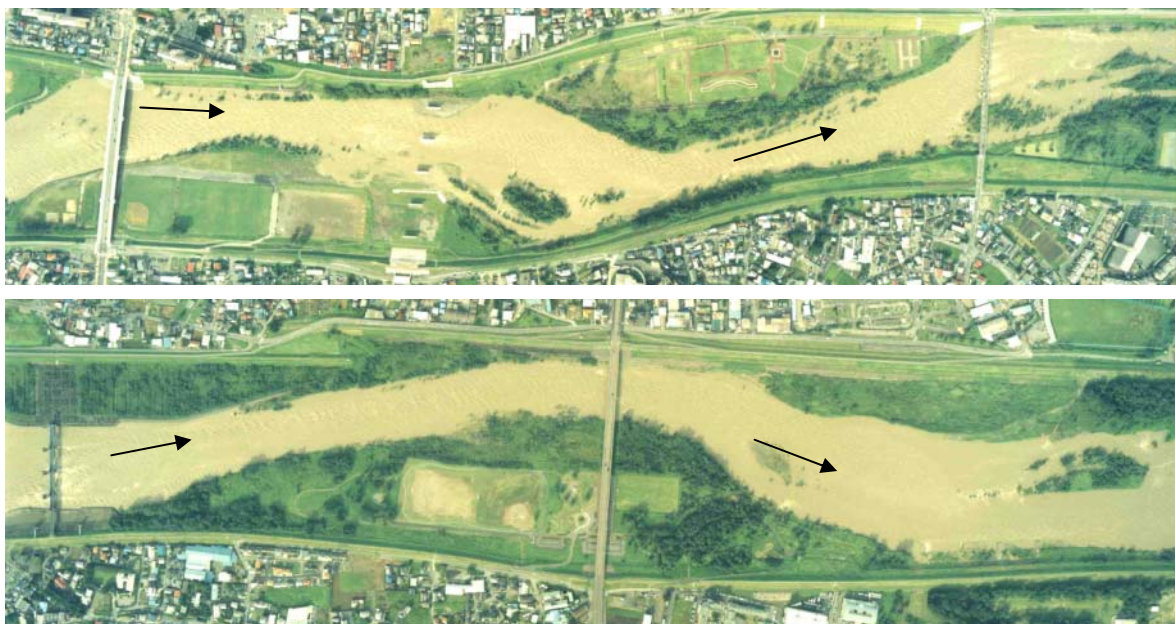


図 2 平成 19 年台風 9 号時における出水状況 (上図が中通り橋-昭和橋区間, 下図が松原橋付近)

るが、高水敷化した砂州の水際部は樹林化して低水路幅を縮小し、その対岸では堤防に近接した形で水衝部が生じている。このような状況に対し、国土交通省渡良瀬川河川事務所では、前述した目的のもとに複数箇所の砂州、低水路掘削を実施している。表1に検討した掘削部の諸元をまとめ、以下では、JR両毛線橋梁、桐生大橋の砂州掘削についての検討を中心に述べる。

表1 検討対象とした掘削路の諸元

掘削箇所名称	J R 両毛線橋梁	桐生大橋	昭和橋	松原橋	緑橋下流
距離杭範囲	50-51km	49-51km	47-48km	45-46km	36-37km
工事施工年月	H18.3	H21.3	H20.3	H20.2	H20.2
掘削幅(底面)	40m	5m	10m	10m	26m
掘削深(左岸, 右岸)	1.7m, 0.5m	2.7m, 2.9m	1, 2m 1, 6m	1.3m, 1.5m	2.9m, 1.7m
延長	517m	675m	377m	572m	400m
掘削幅/低水路幅	24.7%	2.8%	9.2%	6.8%	16.6%
目的・機能	固定化砂州の除去(偏流の防止, 比高解消), 樹林化の抑制, 水衝部緩和	樹林化の抑制, 固定砂州の除去	樹林化の抑制, 水衝部の緩和	樹林化の抑制, 固定砂州の除去	水衝部の緩和

(1) 狭窄部下流の中州掘削について (JR 両毛線橋梁)

対象とする中州は、河床勾配 1/130 程度の礫床区間における狭窄部下流に形成されたもので JR 両毛線橋梁の上下流にまたがっている (図 3)。明治 18 年測量図にも同中州は記載されており、昭和 22 年カスリン台風では中州左岸で越水破堤が生じ、氾濫流の流下によって桐生市市街地に甚大な被害を及ぼした。治水的な課題としては、比高の大きな固定化した中州の樹林化が顕著であることから、大規模出水時の洪水流下能力の低下とともに中州が流れの障害物となって偏流が生じ河岸を攻撃することが懸念されている。ここでの中州による低水路の分岐、偏流はカスリン台風での破堤の要因の 1 つでもある。図 3 に示すように白く囲まれた箇所が中州であり、低水路が中州によって分岐され、右岸側低水路には中州先端付近から下流にかけて落差の大きな瀬が形成されるため洪水主流は右岸側を集中して流れて水衝部を形成する。図 4 の横断面 (51km) から最深河床と中州との最大比高は約 6.0m にもなり、これが中州の冠水頻度、洪水攪乱規模を低下させて恒常的な安定域を生み、ハリエンジュ樹林地が形成されている。低水路は粗粒化が顕著に進み、その河床表層は 20cm~30cm 程度の石で覆われているため、近年進んできた河床低下は停止しているが、河岸侵食や護岸保護工の変形・崩れが生じている。ここでの掘削の目的は①樹木伐採伐根後の再樹林化の抑制、②礫河原再生、③右岸低水路流れの緩和による水衝部対策、④流下能力の向上である。これらに対し砂州掘削によって洪水流の一部を中州に導き、洪水かく乱を誘発させることをねらった。樹木の伐採伐根を行った後に掘削を行い、掘削路平面形状は幅 40m、縦断延長 517m の長方形で、中州のやや右岸側に配置し、掘削路左右岸側は現状形状を残している。深さは約 0.5m~1.7m で、底面高は右岸側低水路の平常時水面より 2m 程度高い (50.8k 地点)。図 5 に中

州を掘削した状況を示す。掘削後、平成 19 年（2007）9 月台風 9 号洪水により対象中州は中規模な出水（5 年確率規模）を経験した。本研究で検討した砂州掘削において、掘削後、中規模な出水を経験した唯一のケースであるため、掘削の目的である効果についての詳細な検討を行った。



図 3 掘削の対象となる中州

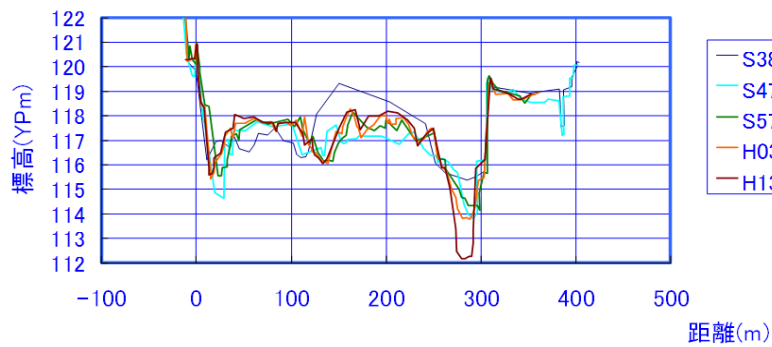


図 4 中州を含む横断面形状（51km）



図 5 中州に掘削路を設けた状況

図 6 は台風 9 号による出水中の状況を示す航空写真で、赤色の斜線部が掘削路に相当する。出水によって掘削路に洪水の一部が導かれ、流路化したことが分かる。その他の中州の部分は非冠水や冠水しても植物が残存している。図 7 には出水前後の横断面地形の比較、図 8 には低水路と出水後の中州上の粒度構成、図 9 に約 1 年後の中州の状況を示す。図 7 より低水路では地形変化が生じていないが、中州

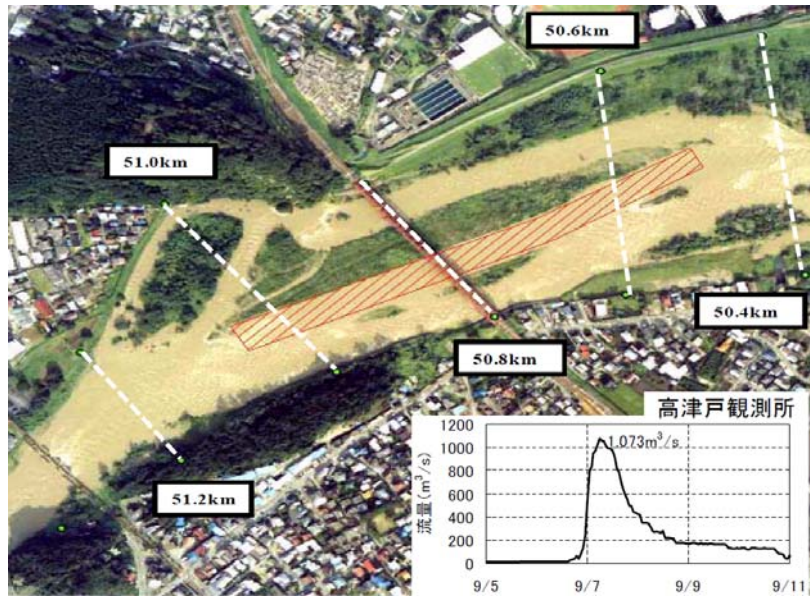


図 6 H19 洪水時の中州掘削路での洪水流の引き込み

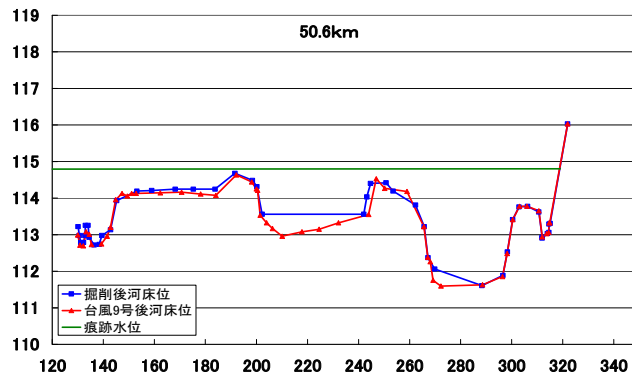
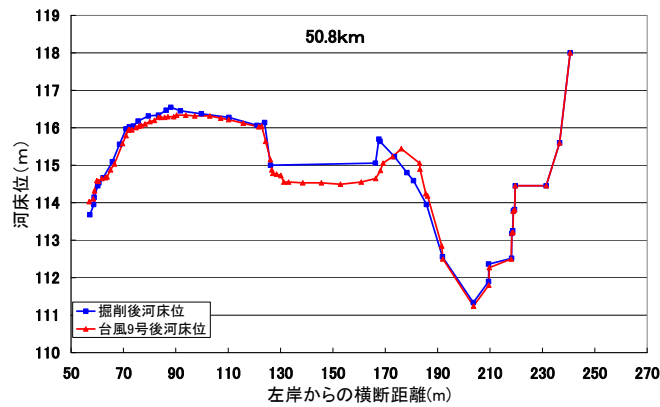


図 7 出水前後の横断面形状の比較(50.6, 50.8km)

掘削路では約 0.5m の河床低下が生じている。これは図 8 に見る粒度構成が関与しており、細粒分が堆積する砂礫州では洪水流の誘導により砂礫の掃き出しによって河床低下となり、その結果横断比高の解消につながる。一方、この出水規模では（生起確率年 5 年程度）、低水路の粗粒化によって低水路河床の攪乱が生じない（図 7）。出水 1 年後までには大きな出水は経験していないが、掘削路は平水時においても流路化し、その周辺に裸地河原が再生されている。テンポラリーにはカワヤナギの実生が見られる

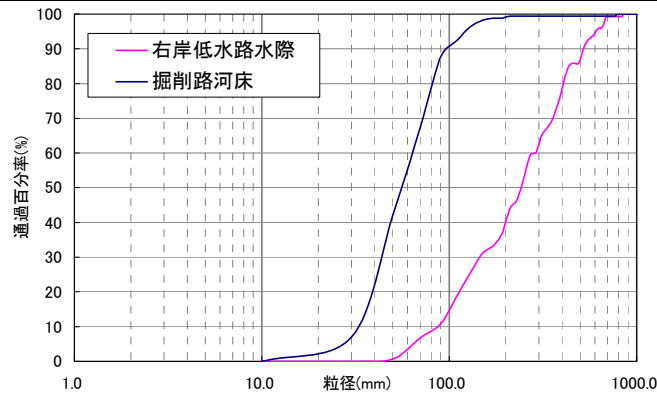


図 8 中州と低水路の河床材料の違い



図 9 1年経過後の中州の状況

が定着はしていない。しかし水際にはツルヨシの繁茂が進行している（図 9）。

平面 2 次元河床変動計算を用いて、中州の掘削を実施した場合としない場合の流況、河床変動の状況を比較し、中州掘削による河道攪乱への効果を分析した。計算には、一般座標系の平面 2 次元河床変動モデルを用い、樹木群の影響（透過係数 $k=36 \text{ m/s}$ ）および混合粒径を考慮した。河床材料は、図 8 のように低水路部と砂州掘削路床で大きく異なっているため、対象砂州上には掘削路での調査結果を、その他の低水路部には低水路水際での調査結果を与えた（図 8）。計算期間は、洪水ピーク時を含む 15 時間とし、流砂量は、掃流砂のみを対象として芦田・道上式を用い、上流端からの供給土砂量は調査結果の河床材料（図 8）から求められる平衡流砂量とした。また、粒度の計算は平野による粒度分布の連続式を用い、深度方向の粒度の履歴を考慮できるモデルとした。

掘削を実施した場合としない場合のピーク流量時の流速ベクトルを図 10 に示す。また、同時刻の流速の横断分布（50.8k）を図 11 に示す。これらより、中州の掘削により、洪水が砂州内部へ誘導され、掘削路が流量分担を担うことから有効に機能したことが分かる。砂州上の流速は掘削により約 2m/s から約 4m/s まで増加し、砂州の両脇のみお筋に生じていた高流速は、左岸では約 4m/s から約 3.5m/s に、右岸では約 4m/s から約 3m/s に緩和されている。一方、図 11 より、計算からも掘削路の河床低下、低水路における河床安定（粗粒化による河床変動の抑制）が認められる。図 12 は、掘削有り無しで計算した横断面内での平均水位の縦断形を比較したものである。中州の掘削により最大 60cm 程度の水位

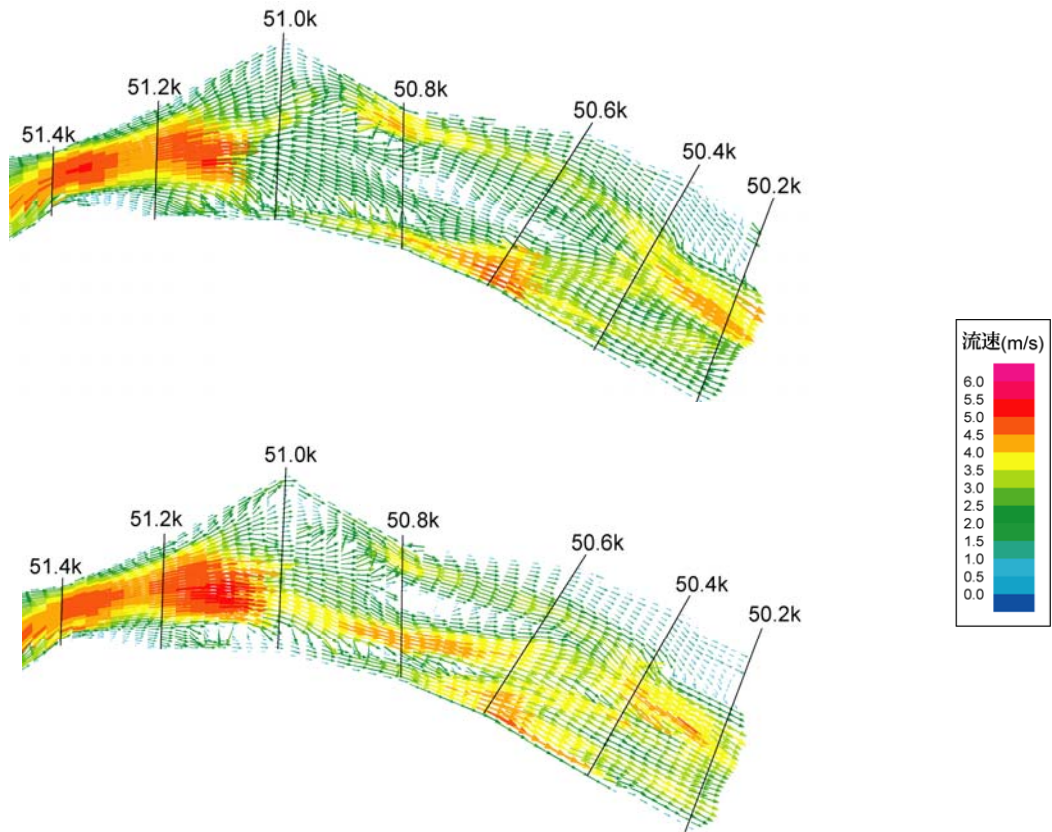


図 10 平面流計算による流況の違い（上図：砂州掘削なし，下図：砂州掘削あり）

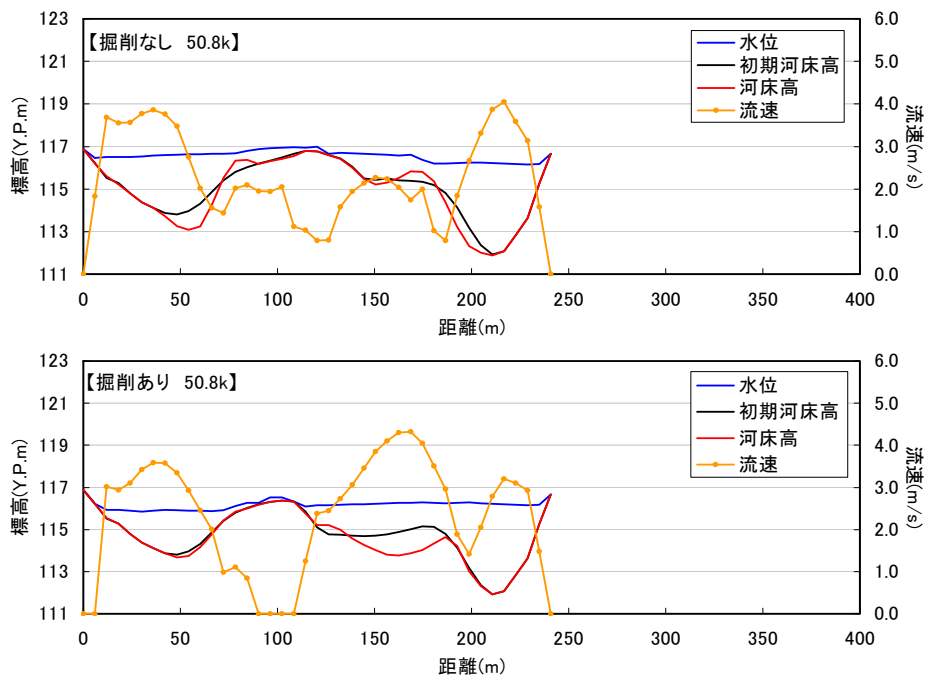


図 11 横断面(50.8km)における砂州掘削ありなしの水位・流速・河床変動の比較
（上図：掘削なし，下図：掘削あり）

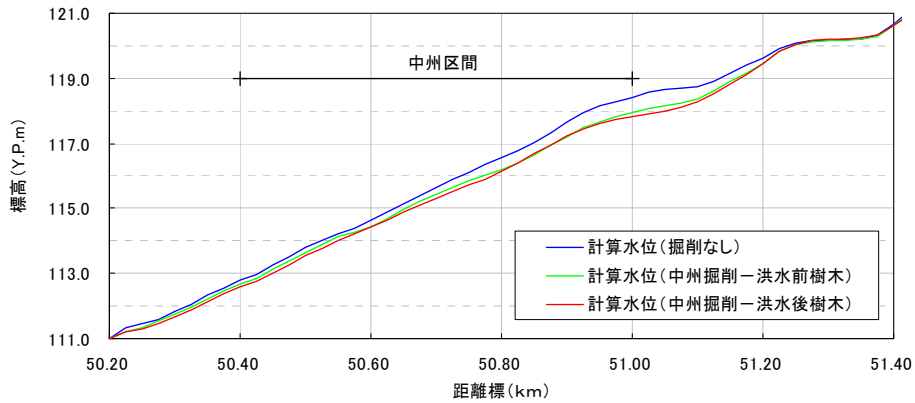


図 12 平均水位の縦断形（ピーク流量時における計算結果）

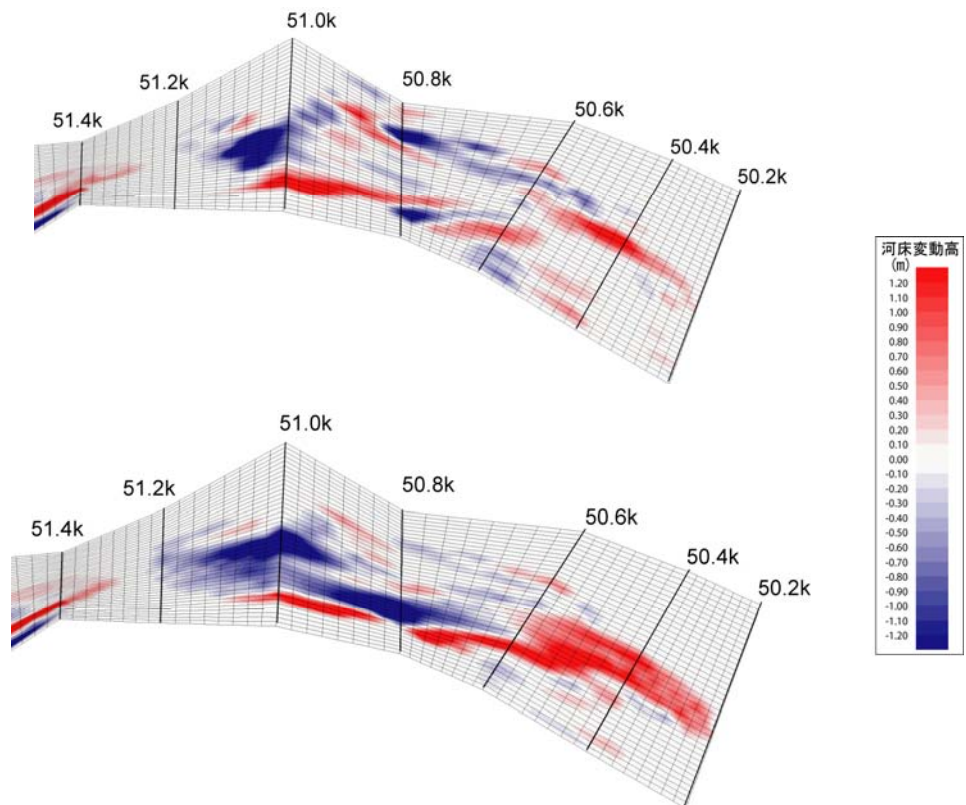


図 13 計算値による河床変動の比較
（上図：掘削なし，下図：掘削あり）

低下が生じている（51.0k 付近）。これは中州の一部掘削は洪水の誘導と同時に、樹木伐採効果を含めてピーク水位低下に対する効果である。

洪水ピーク 6 時間後の河床変動コンターを図 13 に示す。掘削を実施した場合、掘削路での河床低下が進行するとともに、砂州下流において堆積が進行している。掘削しない場合も砂州下流での堆積は生じているが、その範囲は狭い。砂州上の河床材料は低水路に比べて細かい構成となっているため、堆積範囲の河床材料が洪水前より細かくなっていれば、砂州上で洗掘された土砂が堆積したと見なすことが出来る。平均粒径変化のコンター(図 14)を見れば、砂州下流の堆積範囲の河床材料は洪水後細粒化する結果となり、砂州下流の堆積土砂は、砂州上の洗掘土砂が起源と考えられる。一方、砂州の上流端 (51.0k

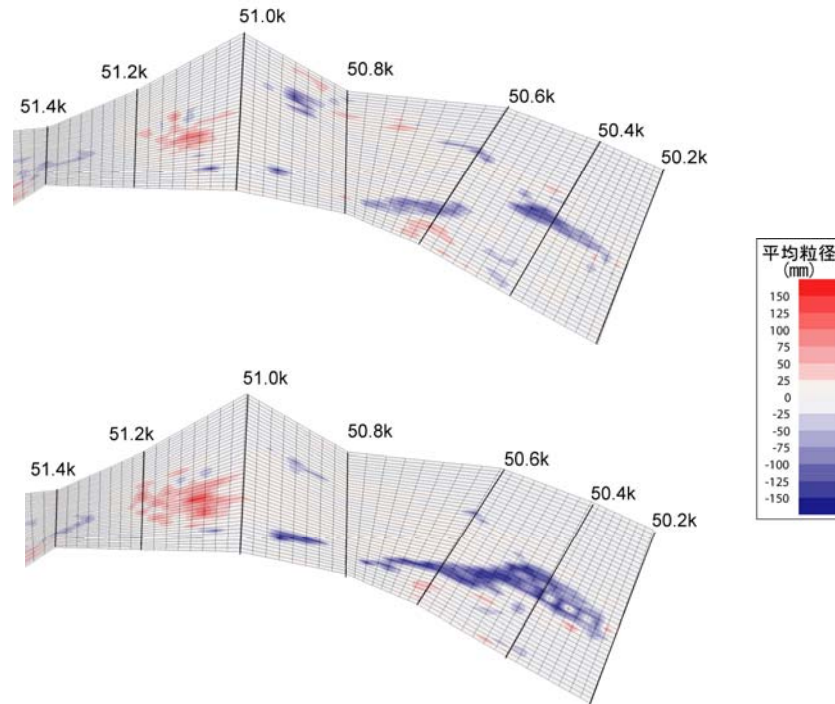


図 14 計算値による洪水前後の平均粒径の比較

～51.2k 付近) では河床低下とともに粗粒化が生じ、砂州の河床低下と同時に上流から粗粒径の土砂が供給されたものと考えられる。以上の考察から、中州における掘削路の効果として以下の機能が評価できた。

- 1) 中州の掘削路の設置により、洪水が中州内部に誘導され、掘削路が二次的流路として機能するようになる。これにより再樹林化の抑制と礫床再生が認められた。
- 2) 掘削路の流量分担によって低水路部の高流速（水衝部）が緩和される。
- 3) 樹木伐採の他、掘削と洪水による掘削路の洗掘（河床低下）により河積が増大し、縦断的な水位低下となって流下能力の向上につながった。
- 4) 中州上に堆積した砂礫分が低水路に供給されることで、中州の河床低下から横断比高の解消が期待できる。また、低水路への供給砂礫によって河道内土砂の再移動が期待できる。これらについてはさらに継続してモニタリングする必要がある。

(2) 桐生大橋上下流の左岸砂州における掘削について（桐生大橋）

前述した中州の掘削よりも掘削幅を小規模にした砂州掘削によって、樹林化対策や比高解消に対する効果が得られるかを検討した。図 15 に示すように 50.1k から 49.6k 上流までの左岸砂州内に幅 5m、延長 675m、深さ 2.7～2.9m、河床勾配 1/110 の掘削路を平成 21 年（2009）3 月に設けた（以下、桐生大橋掘削路と呼ぶ）。掘削路表層の河床材料は 60%粒径で 26mm 程度であり、ハリエンジュなどの樹木が多く繁茂する箇所であったが、伐採伐根した後、掘削路を設置した。ここでは、洪水による攪乱状況を把握するため図 16 に示す洪水観測を実施しており、平成 21 年 8 月 15 日に発生した平均年最大流量よりもやや小さい洪水に対して、洪水前後の地形調査、河床材料調査、出水中の流速、水位観測等を実施した。

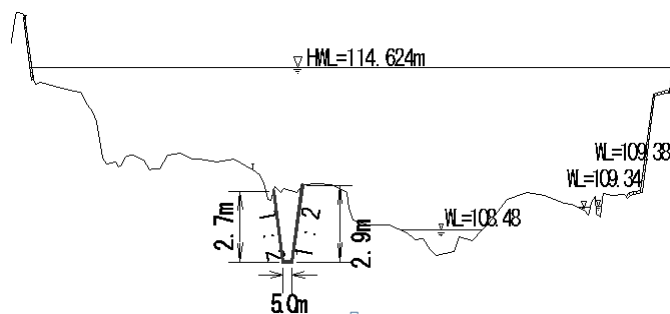
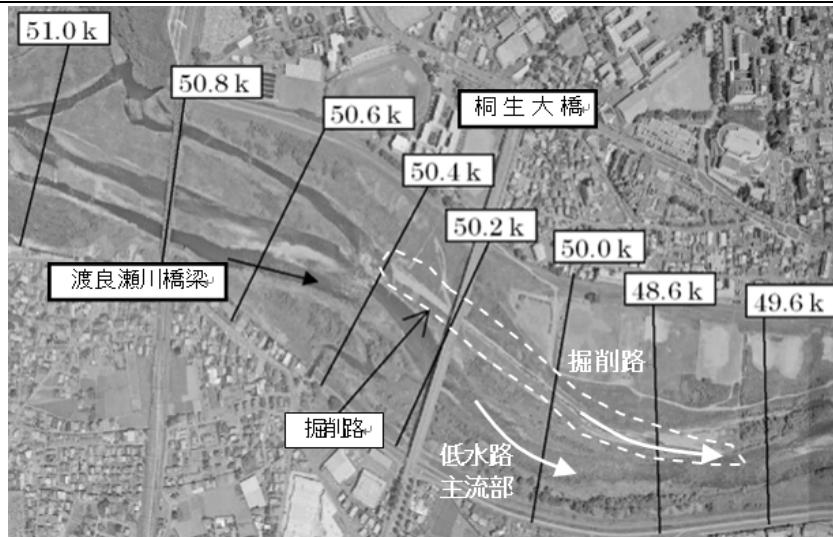


図 15 桐生大橋上下流における左岸砂州の掘削と代表横断面形

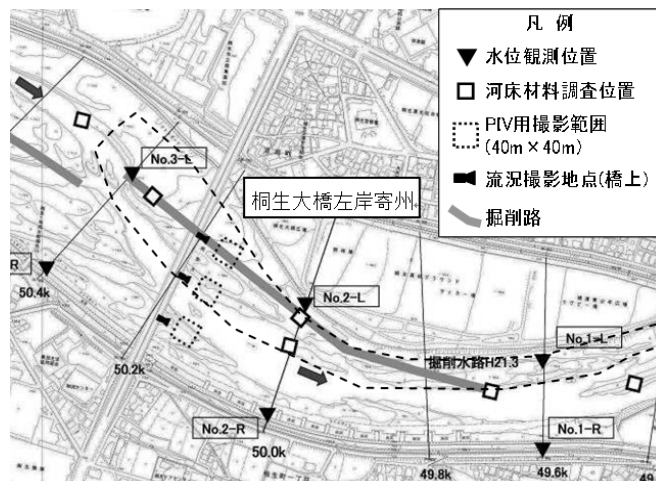


図 16 洪水攪乱の観測体制

出水中の状況を図 17 に、出水前後の状況を図 18 に示す。流量規模は桐生大橋地点では約 $530\text{m}^3/\text{s}$ 程度の洪水規模で、平均年最大流量よりやや小さい規模の出水であった。水位については 50.0km 付近で左岸の高水敷（グラウンド）には達しないものの、掘削路の河岸肩から約 1m の水深が発生する程度まで上昇した。図 19 に出水後の掘削路周辺の地形変化の概要を、図 20 にその縦断河床地形の変化を示す。掘削路では縦断距離 400m～500m にかけて河床低下し、その下流から掘削路末端にかけて河床上



図 17 小規模掘削路による砂州への洪水誘導

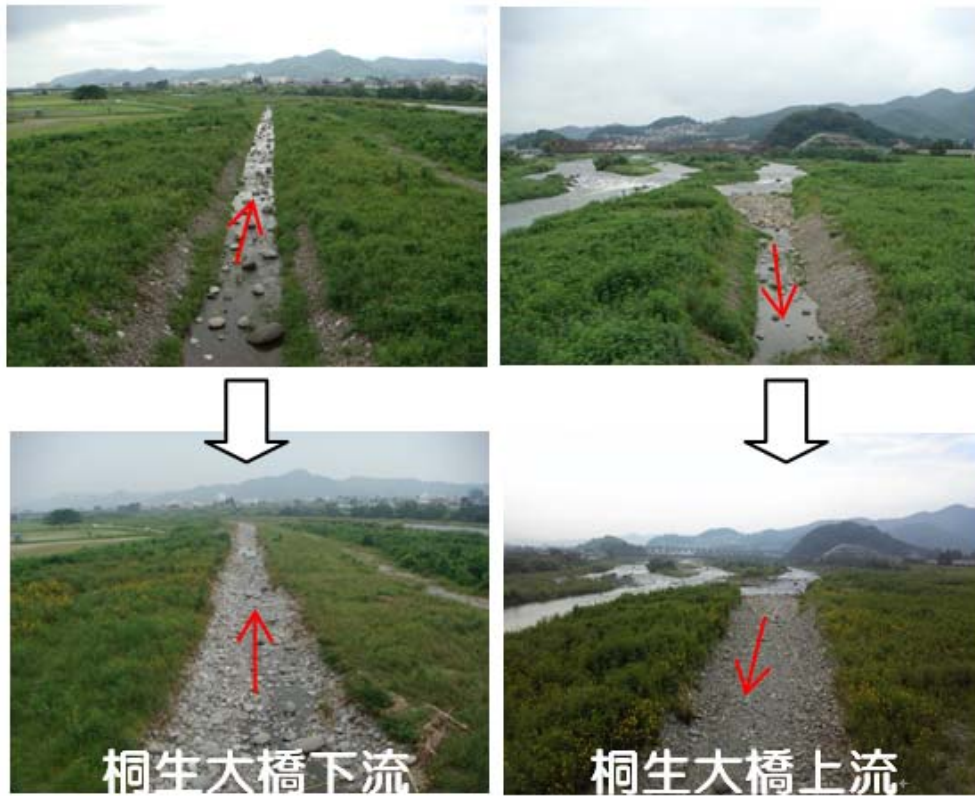


図 18 出水前後の掘削路の比較

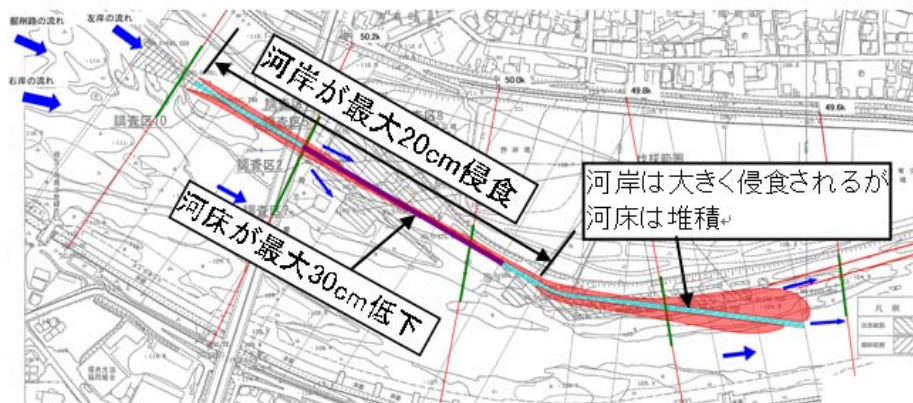


図 19 出水後の掘削路地形変化の概要

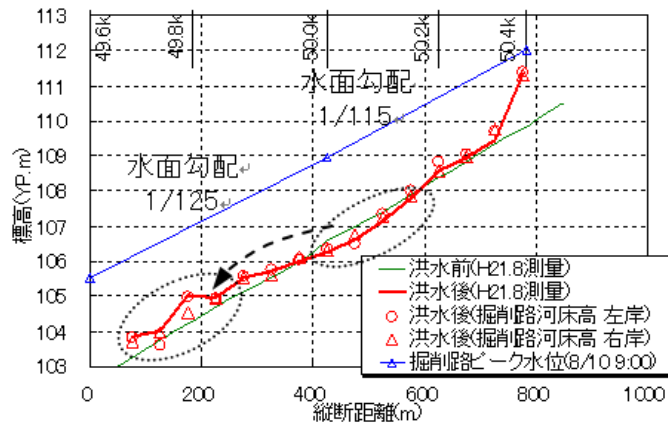


図 20 出水後の掘削路縦断河床地形の変化

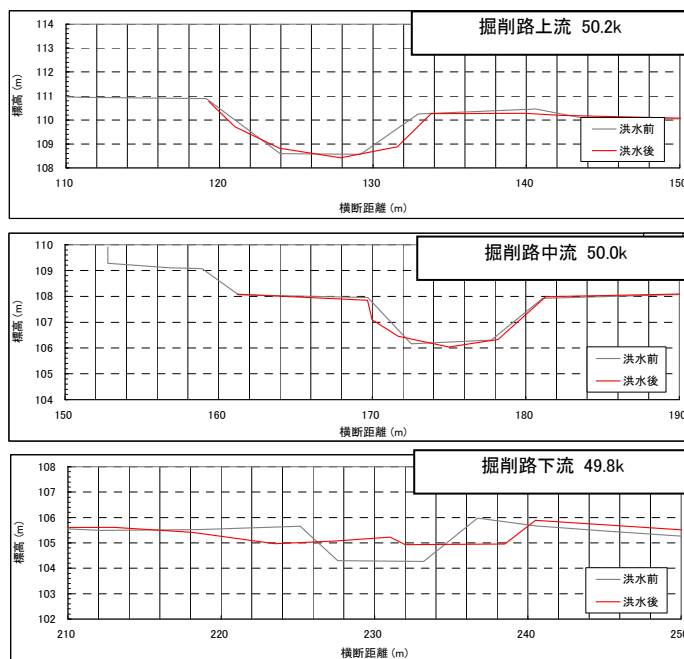


図 21 出水後の掘削路横断面形状の変化

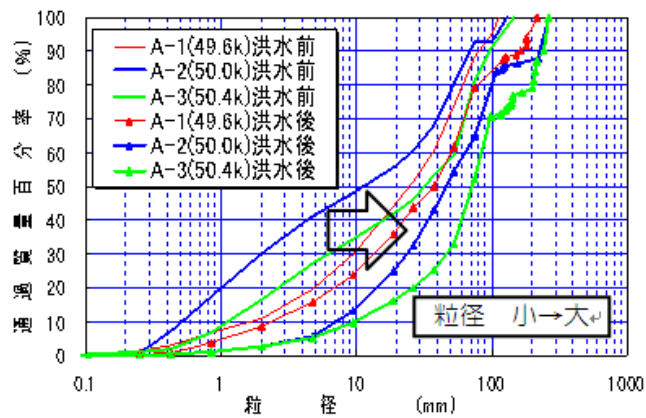


図 22 掘削路の粒度構成の変化

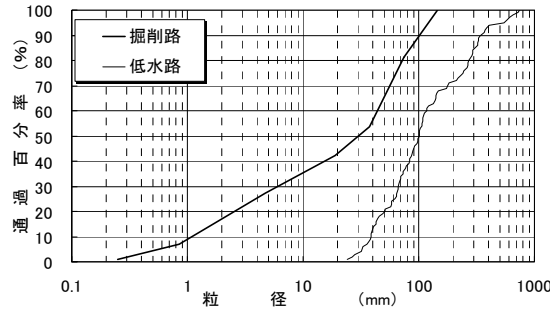


図 23 平面 2 次元河床変動解析に用いた掘削路と低水路の粒度構成

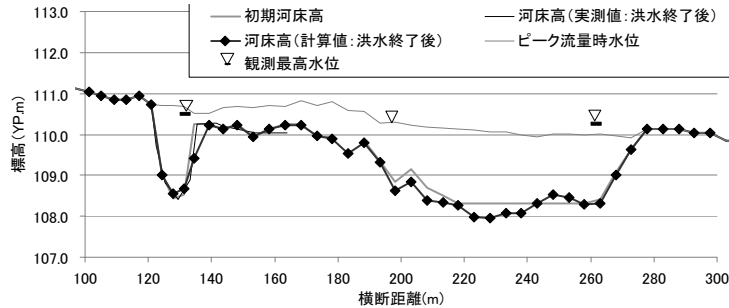


図 24 掘削路を含む横断面内の水位・河床高の実測と計算の対応

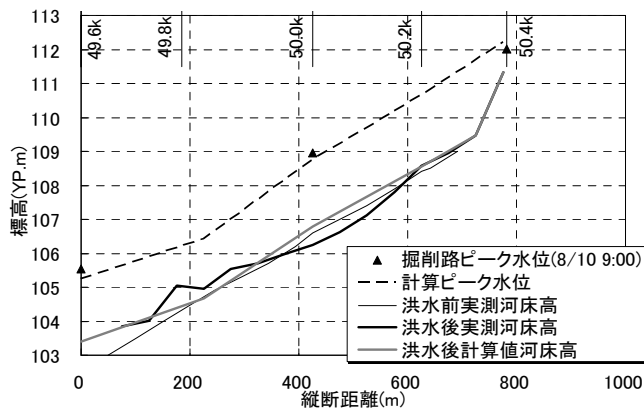


図 25 水位・河床縦断形の実測と計算の対応

昇しており（堆積開始箇所は平面的に掘削路が本川に近づき、水位が高いときには流れが合流し始める箇所であり、湾曲部の内岸側にもあたることから、この箇所掘削路上流側よりも流速が低下して堆積がしたものと推測される）、流砂現象が見られるとともに、掘削路での河岸侵食も生じた。下流側の 49.8k 付近では左岸側の掘削路法面が崩れており（図 21）、土砂堆積とともに流れが一部蛇行したような痕跡が確認された。横断形状では、図 21 に示すとおり、掘削路の中・上流部では左右岸に最大 20cm 程度の側方侵食が確認された。全体的に両岸が連続的に侵食されているが、50.2k では右岸、50.0k では左岸側の侵食が顕著であり、直線水路に近い掘削路に蛇行的な流れが生じようとしていることが確認される。下流側の 49.8k では、河岸は侵食され、掘削路の水路幅は 2 倍程度に大きく広がっているが、上流側で侵食された土砂が堆積し、河床高が 70cm 程度上昇している。河床材料について、洪水前後の掘削路河床の粒度分布を図 22 に示す。掘削路の粒径は全ての地点において粗粒化しており、60%粒径で出水前が 25~55mm 程度であったのに対し、出水後は 50~85mm 程度となった。とくに 10mm 以下の細粒分が多く流出し、植物繁茂の物理基盤の消失によって草本侵入を抑制させている。

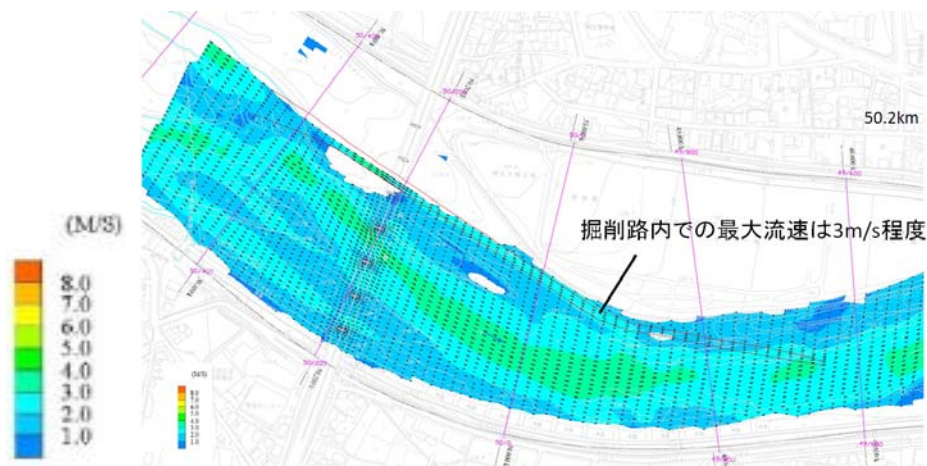


図 26 平面 2 次元河床変動計算によるピーク流量時の流速ベクトル

桐生大橋の掘削事例についても平面 2 次元河床変動計算を行い、実測との対応を調べた。図 23 に示す左岸砂州掘削路と低水路の粒度構成を与えて掃流砂のみとし、地形は H21 定期横断測量に現地調査測量結果を補間して与えた。また、流砂の上流側境界条件としては平衡給砂とした。図 24 に 50.2km 横断面の水位、河床形状の実測と計算値を比較した。水位については実測値と計算値はよく対応している。また、河床変動については、対象洪水の規模は小規模なために、粒度構成の細粒な掘削路においても図 24 からほとんど河床変動は生じていない。しかし、図 25 に示すように縦断方向においては、計算値は実測と異なり若干の堆積傾向となった。掘削路における河床変動は掘削路床の変動の他、上流端からの流入流砂量（粒度構成を含めて質と量）と、側岸侵食による側岸からの供給量が影響するため、これらのモニタリングも含めた流砂の観測体制が必要である。図 26 にピーク流量時の流速ベクトルを示した。掘削路では最大 3m/s の流速が生まれ、これは PIV 観測結果とも対応している。その結果、低水路で約 530m³/s、掘削路で約 40m³/s 規模の流量が生じた。セグメント 1 河道では小規模な砂州掘削でも、砂州の縦断勾配が大きいことから有意な洪水の攪乱が誘発できることが再度確認された。

(3) その他の砂州掘削箇所について

これまでの 2 例の他、渡良瀬川礫床区間では松原橋、昭和橋、緑橋等の複数地点において砂州内に掘削路を設置し、中規模な出水に備えて掘削路機能の効果評価のためのモニタリング体制を整えている。図 27 は昭和橋下流砂州の掘削路を示す航空写真であるが、施工後の 2008 年にはこの掘削路に 23 回もの流入が生じており（図 28）、その結果、ハリエンジュの再樹林化は現時点においても抑制されている。



図 27 昭和橋下流の右岸砂州における掘削路



図 28 昭和橋下流右岸砂州における掘削路への流入状況と流入後の様子

J R 両毛線橋梁の砂州掘削以外は中規模な出水に経験していない。今後、出水による河道のレスポンスをモニタリングすることで効果評価を行い、河川管理に活用すべき知見を蓄積させて行く予定である。

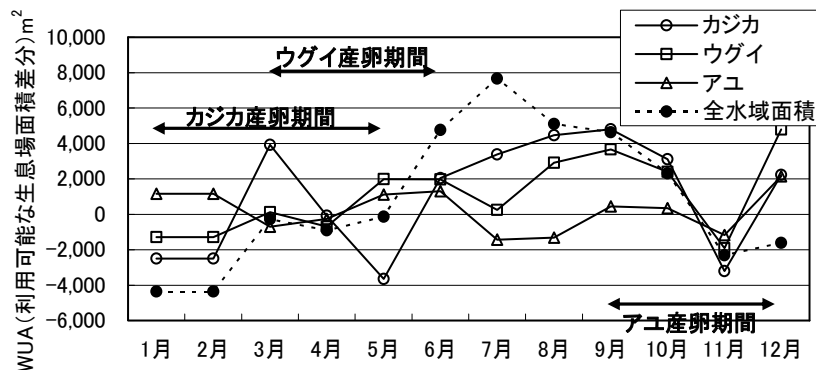


図 29 砂州掘削の有無による 3 魚種の重み付き利用面積 (WUA) の差分 (WUA が正となることで、砂州掘削による生息環境の改善効果が見られる)

⑦今後の課題・展望

以上から、洪水のダイナミズムを利用した砂州の部分掘削や低水路とつなぐ砂州上の小流路 (掘削路) の設置により、樹木伐採根後の再樹林化の抑制、砂州の礫床再生、水衝部の緩和、流下能力の向上、極端な横断比高の解消、低水路への砂礫供給等、掘削路がもたらす多機能性が抽出され、河川維持管理手段としてきわめて有用であることが示された。砂州内で河床変動が生じるキーポイントは河床材料の粒度構成にある。これは掘削路の河床低下とともに粗粒化によって地形攪乱の鈍化が予測されるが、前述したように流れの蛇行化によって掘削路内での河岸侵食を積極的に誘発されることが有用な手段となり得るため、今後の検討に活かすべき事項である。環境面では礫床再生の他、掘削路下流端がわんどに見る水域環境を生み出すことも確認されており、水棲生物の生息環境評価、PHABSIM 等の手法を通じて掘削路の効果評価も検討中である (図 29)。

本技術研究開発である「河道掘削による洪水攪乱の誘発と新たな河川維持管理技術」については、出水による河道の応答を継続してモニタリングし、その結果を反映しながら管理技術を試行し実施して行くものであり、その考えはまさに adaptive management である。本研究では、その第一段階として、これまでの成果を取りまとめた「手引き」を作成する予定であるが、それは今後、出水による河道のレスポンスと河川管理の試行を蓄積しながら改訂すべきものとして位置付けている。