

耳川の通砂事業により 西郷ダム下流に形成した砂州の湧水特性

HYPORHEIC-FLOW EMERGENCE OF GRAVEL BARS FORMED BELOW THE SAIGO DAM BY SEDIMENT SLUICING IN THE MIMI RIVER

小林草平¹・中野大助²・深池正樹³・梶原慎介⁴・角 哲也⁵

Sohei KOBAYASHI, Daisuke NAKANO, Masaki FUKAIKE,
Shinsuke KAJIWARA, Tetsuya SUMI

¹非会員 農博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²非会員 理博 電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³非会員 九州電力株式会社耳川水力整備事務所 (〒883-8533 宮崎県日向市北町1丁目112番)

⁴非会員 九州電力株式会社耳川水力整備事務所 (〒883-8533 宮崎県日向市北町1丁目112番)

⁵正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Gravel bars were newly formed in the downstream of the Saigo Dam after sediment sluicing in 2017 in the Mimi River, Miyazaki. To evaluate effects of bar formation on river ecosystem, we measured discharge, water quality, water temperature, and fauna in the main-channel (surface flow) and secondary-channel (emerged subsurface/hyporheic flow), which flowed different sides of the bars. According to discharge and daily cycle of temperature, 33-50% of surface flow was submerged into the bars and re-emerged on surface with a hyporheic residence time of 2.5-6 hours. Spatial variation in the discharge of the emerged flow was roughly explained by hydraulic gradient estimated from surface water level of the bars. Turbidity decreased steadily in the downstream direction, which is likely due to a filtering process of gravel bars. Some benthic invertebrates and fish juveniles occurred in high density in the secondary-channel.

Key Words : sediment sluicing, gravel bars, hyporheic emergence, filtering, turbidity, benthic invertebrates, fish juvenile, Saigo Dam, Mimi River

1. はじめに

河川においてダム等の影響で上流からの土砂供給が極端に減少すると、河床低下が進み、河川の地形・景観や生物相が本来あるべき姿から離れ、生態系の劣化を招きやすい(河床の粗粒・安定化, 基岩の露出, 流路の固定・痩せ細り, 氾濫原の樹林・陸地化, 生物多様性の低下, 特定種の異常増殖など)。貯水池堆砂や下流河床低下の対策として、土砂還元(土砂供給を増やす取組み)が全国の河川で行われている¹⁾。土砂還元的环境への効果が様々な事例で報告されているが²⁾、その効果は土砂の供給条件(量や質など)によって異なると考えられる。

宮崎県の耳川水系では、2005年の台風水害をきっかけに流域総合土砂管理の取り組みが進められ、2017年より複数ダム連携によるダム通砂を実施している^{3,4)}。初めての通砂となった2017年9月台風時には、西郷ダムを推定

で約6万m³もの土砂が通過し、その一部がダム下流区間に堆積し、複数の砂州が発達した。土砂供給により砂州が発達することの効果は、熊本県の荒瀬ダム撤去の事例で報告されている⁵⁾：砂州の発達によって早瀬やワンドが生まれ(図-1)、流水環境を好む底生動物が増え、また、砂州の中に1m³/sを超える水が浸透し砂州の反対側から湧出した⁵⁾。湧出水は温度の日周変化や懸濁物質の濃度が小さく、高温時や濁水時における魚類等の避難場となりうる(図-1)。また、砂州で水が濾過されることで平水時に水質浄化のはたらきをすると考えられる。

通砂で西郷ダム下流に砂州が発達したことで、荒瀬ダム撤去事例と同様に早瀬が形成されるなど生物生息場環境が変化し、一部の砂州で湧出水が確認された。本研究は、砂州の湧出水に着目し、その特性(水量, 温度変化, 地形との関係, 濁度, 生物相など)を野外調査から明らかにし、土砂供給による砂州発達の効果, 砂州地形と湧水量の関係を考察することを目的とした。

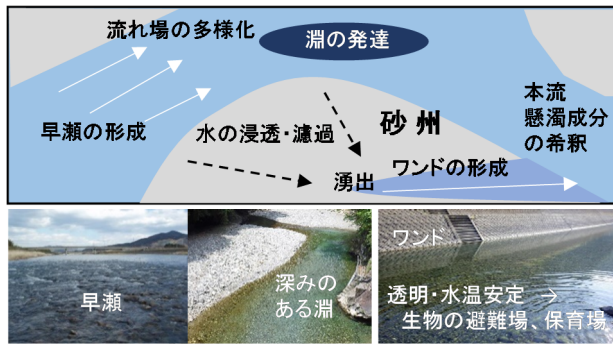


図-1 砂州の生態系効果の模式図。

2. 調査地と方法

(1) 調査地概要

耳川は宮崎県の北部を流れる二級河川である（流域面積：884.1km²，幹川流路延長：94.8km，図-2）。源流は熊本県との境で標高1500m以上の山々に囲まれる。耳川本流には上流から上椎葉，岩屋戸，塚原，山須原，西郷，大内原の6ダムが並び，支流柳原川には諸塚ダム（いずれも九州電力管理の発電用ダム）がある。耳川は源流域から東向きに主に山間地を流れ日向市の河口へと到達する。流域の年間降水量は2500mmのレベルである。

通砂に向けたダム改造工事が，2011年より山須原と西郷の2ダムで始まった。大内原と準備の整った西郷の2ダムで2017年より通砂が始まり，今後山須原を含む3ダムでの通砂が予定されている。本研究の対象である西郷ダム（河口から36.2km）は1929年に竣工し，流域面積は648km²，初期総貯水容量は245万m³，堤高は20mである。出水時に土砂の一部は堤体を乗り越えていたが，堤体切り下げ工事中の2013年から通過土砂が増えた⁴⁾。また，2016年に工事に伴うダムの水位低下により以前より粒径の粗い土砂が大量に堤体を通過し，ダム下流に堆積した。初めての通砂運用となった2017年9月の台風18号時において，通過土砂量（推定約6万m³）は2016年よりも小さかったが，土砂粒径は2016年と同等であった。通砂によりダム下流では土砂が堆積し砂州が発達した区間もあれば，堆積していた土砂が流出した区間もあった。

西郷ダムの下流に約5.5kmの河道区間があり大内原ダムの貯水池につながる。同区間のほとんどが発電取水による減水区間となっている。同区間の河床勾配は1/350-1/250，河道幅は40-60m（拡幅部では>100m）である。調査は西郷ダムから下流0.2km（ダム直下）と下流3kmの2地点の砂州で行った（図-2）。

(2) ドローンによる砂州地形調査

2018年3月下旬の平水時に現地調査を行った。砂州地形調査にはドローン（Phantom3 Professional，DJI Science and Technology社）を用いた。対象の砂州においてドローンを高度約50mに上げ，砂州全域をカバーするよう

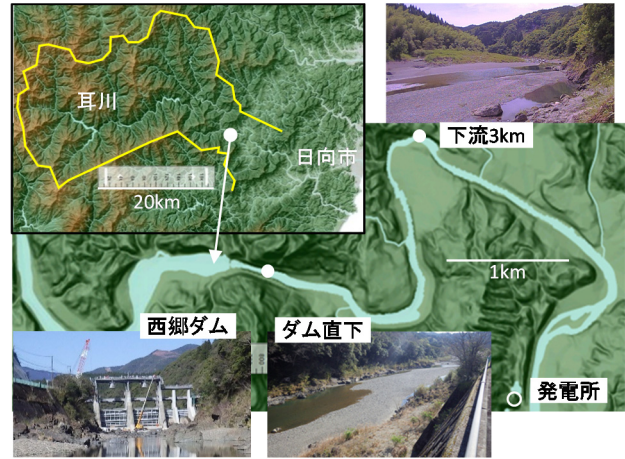


図-2 調査地概要。

に数往復飛行させた。15分程度の飛行の間に，レンズを真下に向けた搭載カメラによって，前後の画像どうしが60-70%以上重複するように撮影し，100枚前後の画像（4000×3000ピクセル）を得た。

撮影画像からPhotoscan Professional（Agisoft社）を用いて調査地点のオルソ化画像とDEMを作成した。同ソフトは異なる位置から撮影された多数の画像から，ステレオスコープの原理に基づくSfM（structure from motion）とMVS（multi-view stereo）の技術により高密3次元点群を導き出す。なお，GCP（基準点）座標を測定していないため，相対的な座標の評価に留まった。

(3) 流量調査

ダム直下と下流3kmの砂州において，砂州の両脇を流れる主流路と副流路の流量を計測した。副流路の水は全て河床から湧いたもので，主流路とは砂州の下流で接続していた。各流路に2-4の横断線を設けて，各横断線の流れ幅，横断線上の5～10点で水深と流速（割水深）を計測した。プロペラ式流速計（VR-301及びVR3T-2-20N，ケネック社）を計測に用いた。流れの断面を横断方向に分割し，台形法（水体の幅，水深，平均流速の掛け算）により流量を求めた。

(4) 水温日周変化の調査

2018年5月下旬から6月中旬の平水時に，主流路と副流路に水温ロガー（HOBO UA-002-64，Onset社）を設置し，10分間隔で水温を記録し日周変化を調べた。主流路から砂州に浸透した水が，副流路の湧出水になっているのであれば，主流路と副流路の間で平均水温に大きな違いはないが，砂州内の熱容量により副流路で日周変化の振幅が小さく，また2流路間で周期のずれ（位相の違い）が生じうる⁹⁾。位相の違いは，水の砂州内通過時間（または滞留時間， T_b ）を表すと考えられる。水温の日周変化は正弦曲線に当てはめ分析されることが多いが⁷⁾，本研究での水温変化は正弦波に合わなかったため，主流路の時間を10分間隔でずらし，副流路との水温差の合計が最小となる時間を求め，位相の違いとした。

なお、同時にタイムラプスカメラ（TLC200, Brinno社）によって副流路周辺を毎時撮影し、期間中に主流路と副流路が砂州上流でつながらないことを確認した。

(5) 濁度、底生動物の調査と遊泳魚の確認

2018年3月下旬の平水時に、ダム直下、下流0.8km地点、下流3km地点の主流路と副流路において、電気伝導度計（D-54, 堀場製作所）とポータブル濁度計（TB-31, 東亜DKK）による計測を行った。

また、サーバーネット（方形枠：30cm×30cm, 網目：0.25mm）を用いて、ダム直下地点の主流路と副流路で底生動物の定量採集を行った。いずれも瀬の中の3ヶ所（＝河床0.27m²）で採集した。採集物はエタノール80%液で固定し、1mmふるいで濾して、ふるい上に残った底生動物の属や種を実体顕微鏡下で同定し計数した。なお、貧毛類やユスリカ科など光学顕微鏡下の同定が必要な分類群は今回の分析から除いた。底生動物は移動性（固着巣, 可携巣, 自由）と生息位置（礫面, 礫間, 礫下砂）に基づく河床生息型の区分を行った⁸⁾。

ダム直下地点において主流路と副流路の数個の淵について、水中カメラによって遊泳魚の出現を確認した。

(6) 砂州地形からの湧水ポテンシャル評価

砂州内伏流水の水位や流れを把握するのに通常は井戸観測が行われるが、砂州表面の地形データからこれらが推定できれば調査がより簡易に済み有効である。砂州内の水位は砂州周囲の水面に連続していることに基づき、砂州周囲水際の標高の空間分布から、砂州内の水位や流れを推定する試みを行った。まず、Photoscanで作成したオルソ化画像とDEMをArcGIS（Esri社）に取り込み、砂州周囲水際の標高を0.5m間隔で点抽出し、抽出点を内挿（natural neighbor機能を使用）することで、仮想の砂州内水位空間分布図を作成した（1セル：0.2-0.3m）。

次に、この水位空間分布図を用いてArcGISの地下水解析ツールセットで平面二次元のダルシーフロー解析を行った。ダルシー流速 q （m/s）は、透水係数 K （m/s）と水頭勾配（動水勾配 I ）により

$$q = KI \quad (1)$$

と表される。 K については、現地観測の水温変化から推定される砂州内の水の通過時間 T_h （s）、主一副流路間の距離 L_{ms} （m）、主一副流路間の水面差に基づく動水勾配 I_{ms} から次式により求まる K_{field} の値を砂州全域均一に当てはめた。

$$K_{field} = L_{ms}/T_h/I_{ms} \quad (2)$$

単位幅あたりの流量 Q （m²/s）は、 q と帯水層深さ b （m）より

$$Q = Kb \quad (3)$$

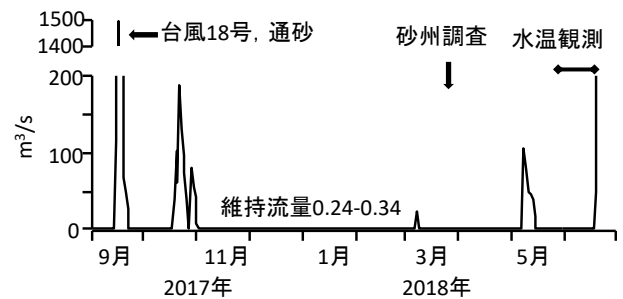


図-3 西郷ダム放流量と調査日。

と計算される。 b は砂州全域均一に1mを仮定した（DEMに基づく砂州水面下の堆積厚は>1-1.5mであったため）。この解析の結果として、砂州内各セルにおける流向、マグニチュード（流量）、水量収支残余が出力される。

この解析ではセル間での水量の連続式がないため、下流側のセルでは、その上流の水量収支残余の累積によっては、実際の流量とは大きくずれる可能性がある。これに注意しつつ、砂州地形に基づく湧水ポテンシャル（潜在的な浸透－湧出量）として、主流路から副流路に向かう水量の評価を試みた、すなわち、2流路の間に流路と同じ向きの1線分を引き（結果の図-8を参照）、その線分上のセルの流量の累積（＝線分を通過する流量）を求めた。その際、各セルの流量は、線分に対する流向の角度で（線分に対して流向が垂直から平行になるに従って小さくなるように三角関数を用いて）補正した。

3. 結果

(1) 砂州地形

西郷ダム下流では、2017年9月出水以降、100m³/sを超す出水は10月下旬と5月上旬の2回で、晩秋から春中旬まで安定した流量が続いた（図-3）。調査対象のダム直下の砂州は9月の通砂によって、一方下流3kmの砂州は衛星写真において11月から確認できたので10月下旬の出水で形成したと考えられる。野外調査した2018年3月下旬においては砂州形成から4-6か月経過し、水温計測を行っていた2018年6月下旬までには形成から7-9か月経過していたことになる。

ダム直下の砂州は地上面積が4551m²であった（図-4）。左岸側を主流路、右岸側を副流路が流れ、2流路の表面流は砂州下流でのみつながっていた。砂州上流において L_{ms} は約15m、本流路と副流路の水面差は約20cm、 I_{ms} は0.013であった。ダム直下地点と比べると下流3km地点の砂州は小さかった（地上面積：1401m²）。左岸側を副流路、右岸側を主流路が流れ、2つの流路の表面流は砂州下流でのみつながっていた。砂州上流において L_{ms} は約10m、水面差は約20cm、 I_{ms} は0.02であった。

なお、いずれの砂州も表面は礫や砂利が多く、空撮画像から判別できる3-5cm以上の礫径の面積割合から代表

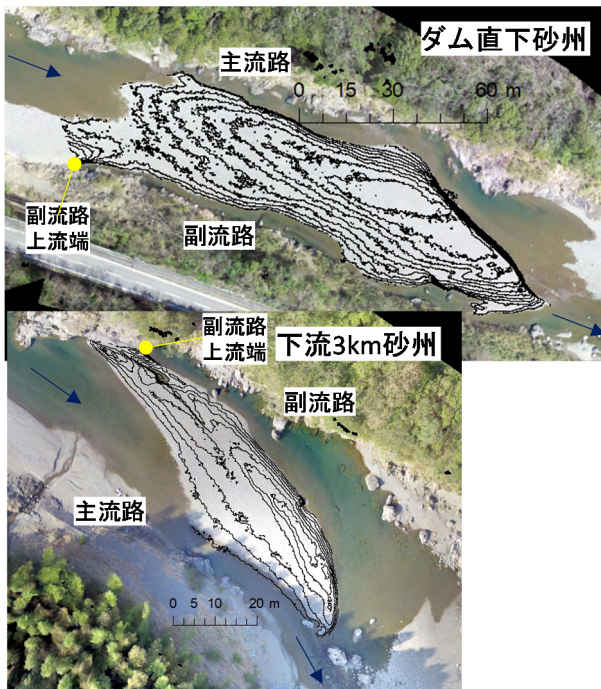


図-4 2砂州のオルソ化画像（砂州上等高線10cm間隔）。

粒径を出すと、ダム直下砂州は $D_{75}=52\text{mm}$ 、 $D_{90}=97\text{mm}$ 、下流3km砂州は $D_{75}=46\text{mm}$ 、 $D_{90}=98\text{mm}$ であった。

(2) 流量

調査当日の西郷ダムからの放流量は $0.33\text{m}^3/\text{s}$ であった。ダム直下砂州において、主流路の流量は砂州上流から中流の間で減少した（図-5）。一方、副流路の流量は砂州上流の40mの間に増加した。副流路における最大値は $0.11\text{m}^3/\text{s}$ で、全流量（ダム放流量 $0.33\text{m}^3/\text{s}$ ）の33%に相当した。少なくともこの割合の河川水が砂州内を通過することを示している。なお、砂州下流における主流路と副流路の流量合計は $0.32\text{m}^3/\text{s}$ でダム放流量とほぼ同じであった。したがって、砂州を浸透しても表面に湧出しない水量は、当砂州では僅かであったと考えられる。

下流3kmの砂州においても、副流路の流量は、上流端から20mの間に急増し、そこから80mの間にもやや増加した（図-5）。ダムからこの地点までに残留域からの流入があるため、当地点の流量はダム直下よりやや大きい。砂州下流での主流路と副流路の流量合計（ $0.46\text{m}^3/\text{s}$ ）を全流量と仮定すると、砂州を通過した水量は全流量の49.5%であった。

(3) 水温の空間分布と日周変動

下流3kmではダム直下より水温が高く日周変動も大きかった（図-6）。これらの地点の間の河道で日射や気温により水が温められたためと考えられる。各砂州で主流路と副流路の水温は平均値で大差はないが、副流路の方が日周変動の振幅が小さく、また位相の違い（副流路の周期が後にずれる）が明らかであった。

水温計測期間にダム放流量が変わったため（ $0.24\text{m}^3/\text{s}$

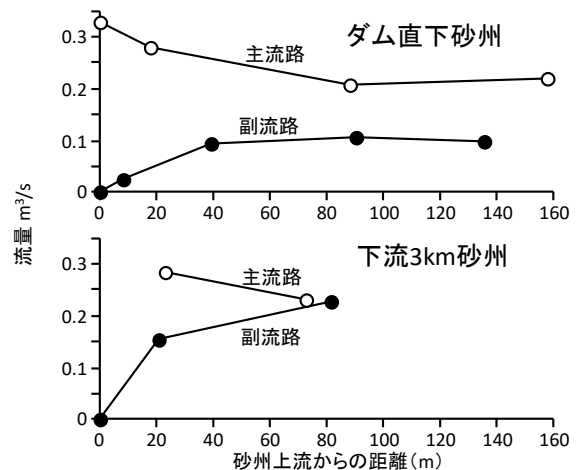


図-5 2砂州における主流路と副流路の流量。

から $1.48\text{m}^3/\text{s}$ へ）、それぞれの流量時の位相の違いを分析した。分析例（図-7左）では、主流路の水温を360分遅らしたときに主流路と副流路の水温差が最低となることを示している。位相の違いは、流量が大きいと小さい傾向にあった（図-7右）。流量が $0.24\text{m}^3/\text{s}$ における結果から、平水時における T_h はダム直下砂州で約360分、下流3km砂州で約150分と推定された。

(4) ダルシーフロー解析と湧水ポテンシャルの評価

先に決定した T_h 、 L_{ms} 、 I_{ms} から、(2)式より透水係数 K_{field} は、ダム直下砂州では 0.052m/s 、下流3km砂州では 0.056m/s と求まった。これらの値は、礫の間隙ではありえる範囲内だが、砂州を対象とした多くの既存研究と比べると1~2オーダー以上高かった⁹⁾。なお、本研究で L_{ms} は主一副流路間の最短距離を用いており、 K_{field} は控えめの評価となっている。

砂州周囲の水際の標高から砂州内の水位（水頭）の空間分布を推定し、先に推定した K_{field} の値を用いてダルシーフロー解析を行った（図-8）。ダム直下砂州では、砂州上流において主流路から副流路への水頭の強い勾配があり、その方向に強い伏流水の流れが予測された。一方、砂州の中流では勾配が緩く伏流水の流れは小さくなり、砂州の下流では水頭の勾配は流路と平行になり副流路へ向かう伏流水の流れは小さいことが予測された。下流3km砂州では、砂州の上流から下流まで比較的均一な主流路から副流路への水頭の勾配があったが、上流側ほどその勾配が強く伏流水の流れも強いと予測された。

砂州の湧水ポテンシャルとして、主流路から副流路に向かう水量を、砂州上の線分（図-8の黒線）を通過する伏流水流量の累積で評価した（図-9）。両地点とも砂州上流で湧水ポテンシャルの増加が大きいことは、実測の副流路の流量パターンとも一致する。砂州の中流から下流では、実測では流量の寄与はほとんどなかったが、湧水ポテンシャルは小さい増加が続いた。特にダム直下砂州など、砂州の中流から下流において単純でない（主流路から副流路への一方向でない）流れがあると、実際の

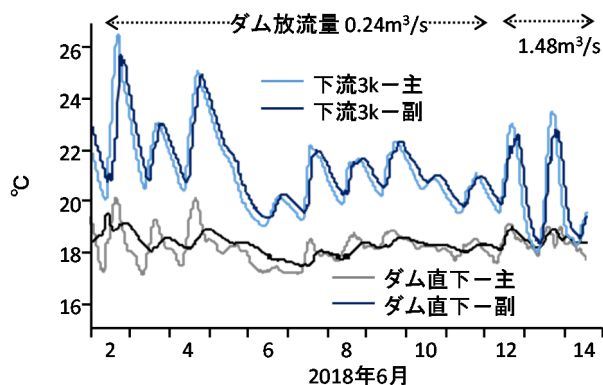


図-6 主流路と副流路における水温変化。

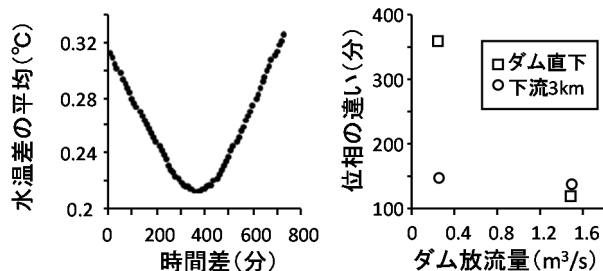


図-7 位相の違いの分析例(左)と流量との関係(右)。

伏流水の流れをうまく表現できないことが考えられる。

湧水ポテンシャルの値は帯水層の厚さや透水係数の設定で変わるので絶対値にあまり意味はないが、砂州内場所間や砂州間の相対的な違いの議論においてはなお有効である。下流3km砂州はダム直下砂州より面積的には小さいが、実測の湧水量とともに湧水ポテンシャル(累積値、ダム直下: 0.28, 下流3km: 0.38)は大きかった。

(4) 水質、底生動物、遊泳魚

電気伝導度は主流路よりも副流路でやや高かった(図-10)。砂州内の水の通過による電気伝導度の微増は他の河川でも確認している。また、下流の地点ほど電気伝導度が高かったが、水が砂州通過を繰り返したことで、残留域からの水の流入のためと考えられる。濁度は全般的に低かったが、ダム直下において主流路では低いながらも濁りが見られたのに対し、副流路の濁度は測定限界を下回る0であった(図-10、図-11下も参照)。ダム直下の主流路において砂州の上流から副流路混流後の間に濁度は32%低下した。これは湧出水(全流量の33%)による希釈で説明できる低下の度合いである。主流路の濁度は、0.8km下流にある砂州の下流で0になった。

ダム直下砂州での底生動物調査から主流路で20、副流路で21の分類群が確認された(図-11上)。過去と比べ礫面砂-自由型、可携巢型、固着巢型(いずれも移動性が低く比較的安定した河床を好む)が少なかったが、礫面-自由型と礫間-自由型(いずれも移動性が高く、後者は河床空隙を好む)は同等かそれ以上であった。本調査では礫面-自由型を除くどのグループも主流路より副流路で多かった。主流路に比べ副流路で個体数が多かつ

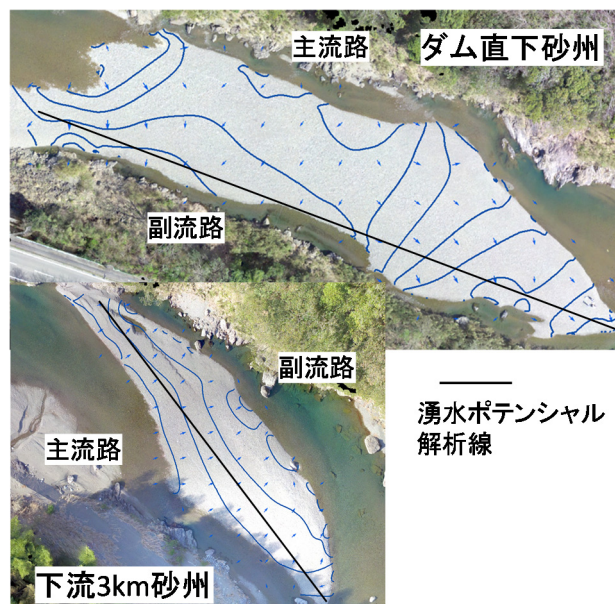


図-8 砂州水際の標高から推定した水頭の等高線(5cm間隔)とダルシーフロー解析による砂州内流れのベクトル。

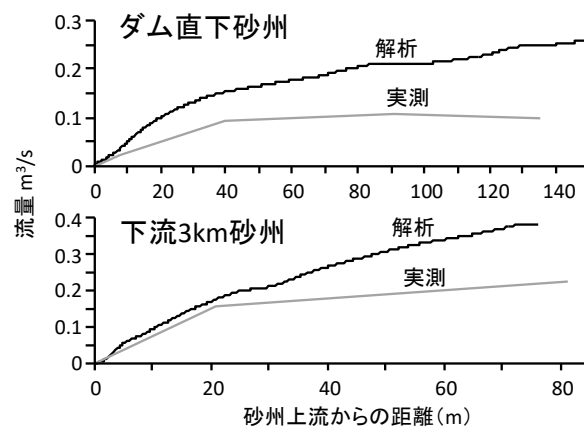


図-9 湧水ポテンシャル解析結果と実測の流量(副流路)

たのはヨシノマダラカゲロウ、ヒメカワゲラ属、コグサヒメカワゲラ属、カミムラカワゲラ、ホソカワゲラ科、ヤマトビケラ属、ナミコガタシマトビケラであった。

ダム直下砂州では調査中に主流路で魚類は確認されなかった。一方、副流路においてはどの淵においても無数の遊泳魚(未熟個体)が確認された(図-11下)。

4. 考察

砂州における全流量の33-50%という湧水量は、これまでに報告のない大きな値である。これには、西郷ダム下流は減水区間で平水時流量が小さいことがまず関係している。しかし、高い湧水ポテンシャルを持つ砂州の条件があったことは、透水係数の推定や砂州地形に基づくダルシーフロー解析の結果から明らかである。

通砂の前年にも大量の土砂がダム下流に供給されたにも関わらず湧水量の大きい砂州は確認されなかった。砂

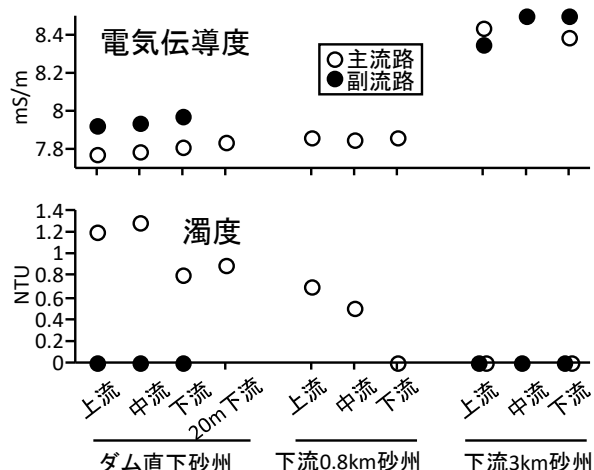


図-10 電気伝導度と濁度の空間変異。

州の発達や湧水の発生には、土砂供給量とともに土砂粒径、また地形を発達させる流量と土砂量のバランスが重要と考えられる。前年はダム水位低下時の土砂供給であったため、砂州を発達させる流量ではなかった。

砂州は目詰まりを起こし、時間とともに湧水量は低下しやすいが、本砂州では半年以上にわたって高い湧水量が続いた。主流路より副流路で底生動物や魚類が多かったのは、湧水の流れの安定性（短期的変動の小ささ、水量の長期的維持）のためと考えられる。副流路では安定した流量と水の透明性のため付着藻類が多く、食物の観点でも底生動物に好都合であった可能性がある。

砂州における浸透－湧出水の空間変異は、砂州地形や表流の水位差からある程度予測できることが示された。荒瀬ダム撤去の事例でも、湧水量の空間変異は砂州周囲の水面差と関係していた⁹⁾。伏流水の流れが複雑でなければ、本研究の手法で異なる砂州間での湧水ポテンシャルの比較も可能である。事例が増え、砂州の湧水ポテンシャル評価における今後の発展が望まれる。

5. まとめ

2017年9月の通砂によって形成した砂州において、ドローンによる砂州地形調査、砂州を通過する水量（湧水量）の計測、ロガーによる水温日周変動の計測を行い、砂州の湧水特性を明らかにした。湧水量は全流量の33-50%に達することが明らかとなった。砂州地形データからの湧水量の空間変異を分析し、砂州周囲水際の高さから湧水量の空間変異が予測できることを示した。砂州は目詰まりすることなく湧水は半年以上にもわたって持続し、湧水は底生動物や魚類の生息場として機能するとともに、下流への濁度低下にも寄与した。本研究は、通砂によってダム下流に砂州が発達したことで生態系に様々な正の効果があったことを示すものである。

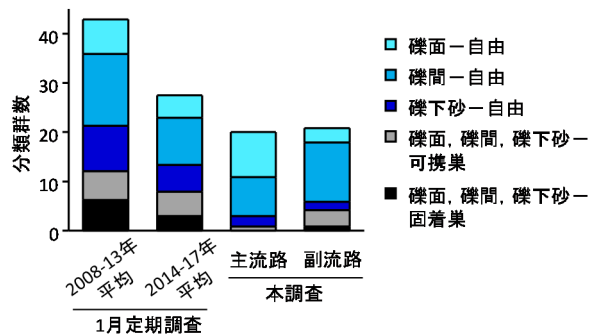


図-11 底生動物調査結果（上）と副流路水中写真（下）。

謝辞：本研究は「流況・土砂管理を組み合わせたダム下流の自然再生事業の生態学的評価」（科研費基盤研究A、17H01666、代表：角哲也、H29-H31）で行われた。調査協力と情報提供においてXiao Enbang氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局河川環境課：下流河川土砂還元マニュアル（案）第2版、2011。
- 2) 宮川幸雄：アーマー化したダム下流における河床表層の鉛直構造に着目した付着藻類現存量の管理のための土砂供給効果の評価手法、京都大学大学院工学研究科博士論文、2018。
- 3) 川上馨詞、吉村 健、新屋裕生：耳川水系ダム通砂に向けた河川環境調査結果に基づくモニタリング計画の概要、河川技術論文集、Vol.22, pp.421-426, 2016
- 4) 吉村 健：水力発電ダムにおける連携通砂の総合評価に関する研究、京都大学大学院工学研究科博士論文、2019。
- 5) 小林草平、角 哲也、竹門康弘：ダム撤去後に下流に形成した砂州の生物生息場機能、河川技術論文集、Vol.22, pp.463-468, 2016。
- 6) Hatch, C.E. et al.: Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development. Wat. Resour. Res., Vol.42, W10410, 2006。
- 7) Ock, G., Gaeuman, D., McSloy, J. and Kondolf, G.M.: Ecological functions of restored gravel bars, the Trinity River, California, Ecol. Engineer., Vol.83, pp.49-60, 2015。
- 8) 小林草平他：愛知県豊川における瀬の物理特性と底生動物現存量、陸水学雑誌、Vol.71, pp.147-164, 2010
- 9) 小林草平、角 哲也、竹門康弘：ドローンとサーモグラフィを組み合わせた砂州の湧水ポテンシャルの評価、河川技術論文集、Vol.23, pp.621-626, 2017。

(2019. 4. 2受付)