

ダム撤去後に下流に形成した砂州の 生物生息場機能

HABITAT FUNCTION OF A GRAVEL BAR FORMED DOWNSTREAM AFTER A DAM REMOVAL

小林草平¹・角哲也²・竹門康弘³

Sohei KOBAYASHI, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

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

³正会員 農博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Changes in bed topography and invertebrate community after a sediment supply event were investigated in a downstream reach of Arase Dam, which was in the last step of dam removal, in the Kuma River, Kyushu. A gravel bar was newly formed in the reach after the removal of the major walls and the following flood in June 2015. Cross-section profile of the reach suggested that shallow submerged (<1m water depth) and emerged (<1m up from water surface) areas increased substantially. According to a steady flow calculation of the reach, average flow velocity at baseflow increased 1.8 times more than the previous for a given discharge. Invertebrate species that prefer faster currents increased in the community of the main channel. We also estimated that subsurface and upwelling (spring) flow through the bar was more than 3% of the total river discharge. The spring with a clear and stable flow fed a lentic habitat (wando), which supported higher species richness than before.

Key Words : dam removal, gravel bar, cross section, flow velocity, riffle, invertebrate, infiltration upwelling, Arase dam, Kuma River

1. はじめに

日本全国の多くの河川で土砂還元事業が実施されている。土砂還元後の河床細粒成分の増加や河床攪乱頻度の回復によって、生物群集や生態系が変化することを報告する事例が増えつつある¹⁾²⁾。しかし、土砂還元によって生じる地形、流れ、生物群集の変化の方向性について系統だった整理はされていない。また、置土の土砂量は通常千m³規模で、自然河川の本来の土砂移動量に相当するレベル (>数万m³) の土砂供給に対する河川生態系の応答についての知見は少ない。

熊本県球磨川の荒瀬ダムでは国内初となるダム撤去が進められている³⁾。2014年度に主流側の堤体部分が撤去されたことで、2015年6月の出水によりダム上流に堆積していた20万m³以上の土砂が流出した⁴⁾。流出土砂の大半がダムのすぐ下流に堆積し、その結果それまでなかった大きな砂州が形成するなど河床地形が大きく変わった⁴⁾⁵⁾。この土砂堆積によって平水時の流れとともに、河

床に浸透する伏流水の量が変わり、水生生物の生息場としての質も大きく変化した可能性がある。

本研究では、荒瀬ダムの下流区間において大量の土砂供給によって、水生生物の生息場としての河床地形、平水時の流速、伏流水の湧水量が、また底生動物群集がどう変化したかを、以前の状態との比較により明らかにすることを目的とした。なお、今回の土砂堆積は短期的に生じた事象であり、定常状態ではなく今後の出水のたびに变化していく可能性の高いものである。

2. 調査地と研究内容

(1) 荒瀬ダムにおける経緯

本研究の対象は球磨川18.4k~19.8kの間になる(図-1)。19.91kに荒瀬ダムの堤体があった。その上流約10kmに瀬戸石ダムがある。

熊本県管理で発電専用の荒瀬ダムは、2010年3月に県の水利権が失効し、2012年度から6年をかけて撤去され

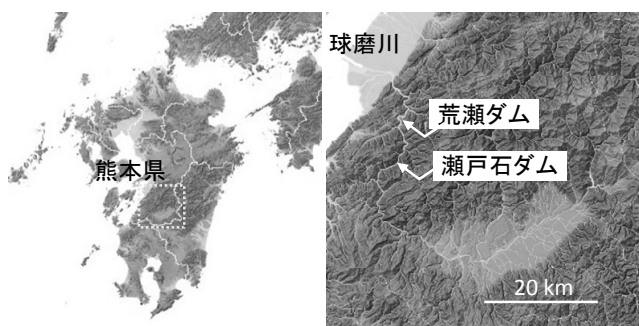


図-1 荒瀬ダムの位置（川だけ地図使用）。

ることになった。2014年度の工事で滞筋側の堤体部分が撤去され、旧湛水域内の土砂の下流移動が可能となり、2015年6月における3回の2000m³/s規模の出水により実際に大量の土砂が動いた。これによるダム上流の洗掘量は22万m³、ダム下流での堆積量は17.5万m³と推定された⁵⁾。

2015年6月の出水の前後の航空写真および横断測量データを比較すると、特に19.0k～19.8kの区間における変化が著しいのが分かる（図-2に航空写真に基づく大まかな水際線と砂州形状を示す）。出水前は水面上に見える砂州は小さく、水際線は峡谷の岩盤や護岸に沿っていた。出水後は、大きな砂州が発達したことで、水面幅が小さくなった。19.4k～19.6kの間で滞筋は右岸側から左岸側へと移り、そこに横断型の早瀬が発達した。さらに、その砂州の中流から下流部にかけて右岸側にワンド地形が発達した。また、河道の屈曲部にあたる18.8k～19.2kにも内岸側に砂州が発達した。これに対して18.8kより下流における出水前後の変化はあまりなかった。

(2) 砂州の比高頻度分布

砂州の比高頻度分布は、砂州の形状や生物生息場を評価する上で重要な情報である⁶⁾。竹門ら（2013）⁶⁾に習いその評価を行った。概略すると、各横断線の河床高の測定値から線形補間によって横断線に沿って1m間隔の河床高値を算出し、それをさらに基準水面からの比高値へと変換する（地上なら＋、水中なら－の値になる）。昇順に並べた頻度分布曲線にすることで、各比高帯が横断線あたりどれくらいの幅で存在するかが明白になる。複数の横断線の場合、全横断の比高値を足してから横断数で除することで平均的な頻度分布曲線と各比高帯の幅を得ることができる。球磨川18.4k～19.8kの0.2k間隔の横断線を対象に、出水前（2014年12月）と出水後（2015年7月）の砂州比高を分析した。各横断の基準水面としては、次に述べる一次元の流れの計算により求めた平水時（50m³/s）の水面標高値を用いた。

(3) 平水時の流速の計算

出水前後で平水時の流れを比較するため、横断測量データを基にした一次元の定常不等流の計算を行った。

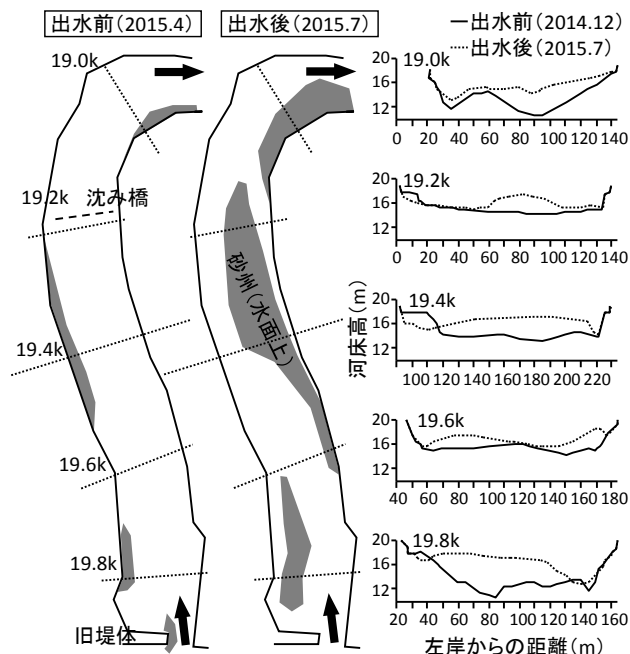


図-2 対象区間の河道平面図と横断形状。

計算にはHEC-RAS（U.S. Army Corps of Engineers）を用いた。出水前と出水後の地形として、それぞれの18.4k～19.8kの横断測量データ、さらにその前後の区間として2014年度の18.2k、19.91k、19.98k、20.08kのデータを加えて18.2k～20.08kを計算領域とした。上流端の流量に50m³/s、下流端の水位として測量データに基づく水面勾配（0.0004）を与えた。河床粗度係数（マニング n ）は0.03～0.07の範囲で変え、水面高の計算値と実測値（測量データ）の差が最も小さくなる値を最終的に採用した。他のパラメータはデフォルトの値を用いた。各横断の流れの断面積と平均流速を求めることを目的とした。

(4) 河床粒径分布

2015年10月の平水時に、砂州地上部の表面河床材料をデジカメで撮影した。縦断方向約500mの砂州に7本の横断線を設け、各線上で左岸側、中央、右岸側の3ヶ所と、砂州上流と下流端の2ヶ所を加えた計23ヶ所で河床を撮影した。面格子法の考えに基づき、各画像に25格子点を設け、格子点上の礫について第二軸の長さを測定し、計575の粒径値から粒度曲線を作成した。

出水前の河床粒径として、2015年1月に行われた底質調査のデータを利用した。この調査では19.2k地点の左岸、中央、右岸の3ヶ所で50cm方形枠内の底質が約10cmの深さで採取され、室内でふるい分けされ重量が測定されている。この3ヶ所を平均した粒度曲線を作成した。

(5) 底生動物群集

2015年10月の平水時に、D形枠網（開口部50cm×40cm、網目0.25mm）を用いて本流の早瀬とワンド止水

域のそれぞれにおいて、水生昆虫等の無脊椎動物を対象とした定性採集を行った。採集は1名が10分間のみ行った。採集物はエタノール80%液で固定し保存した。室内で0.25mmと1mmのふるいを重ねて採集物を洗い流し、本研究では1mmふるいの上に残った底生動物について実体顕微鏡下で分類群（属または種）を同定し計数した。各分類群は生活型⁷⁾（遊泳型、滑行型、匍匐型、掘潜型、携巢型、造網型）に区分した。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分析対象から除いた。

出水前の底生動物群集として、2014年5月、2015年1月、2015年5月に19.2k地点付近で行われた定量採集（瀬）および定性採集（瀬、淵、ワンド、ヨシ帯）のデータを利用した。定量は河床25cm四方をサーバーネット（網目0.5mm）で3回の採集、定性はD形杵網（網目0.5mm）でなるべく多くの環境からの採集が行われる。0.5mm以上の個体を対象としており、出水後の調査と比べて種をより多く見つけやすい。

出水前後で調査手法に違いがあるため、比較は出現分類群数と組成（割合）に留めた。各生活型が全体に占める割合を各分類群の個体数を対数変換した後に算出した。

(6) 湧水量と水面比高

出水後に形成した砂州の右岸側に伏流水が湧き、下流へと流量を増し、それがワンドの水源となっていた（図-2）。2015年10月の平水時に、湧水の5地点において横断方向3-5点で6割水深の流速をプロペラ式流速計で測定し、水深と流れ幅をかけて流量を推定した。これとは別に湧水の6地点において湧水の水面と同横断線上の本流の水面の比高差を測量した。また、砂州幅（湧水と本流の間の距離）を基に、簡易に動水勾配を求めた。

3. 結果

(1) 砂州の比高頻度分布

図-3に地形変化の大きかった19.0k～19.8kの砂州の比高頻度分布を示す。同一流量条件（50m³/s）で、出水後は出水前に比べて水深の浅い場所（絶対値の小さい）が増加し、川幅（一値の全頻度）が減少したことが各横断線において明らかである。5横断線の平均において、出水前は比高<-1mの幅は64m、比高-1-0mの幅は39mで計103mの川幅であったのに対して、出水後は比高<-1mの幅は23m、比高-1-0mの幅は52mで計75mの川幅であった。また、冠水しやすい地上の低比高域が出水後に増えたことは、比高0-1mの幅が出水前の13mから出水後の44mと3倍以上になったことから明らかである。2014年12月において地上の低比高域に平坦な場所がほとんどないことが、各断面の比高曲線から分かる。

また、2014年12月では地上の比高2m付近に幅10m前後

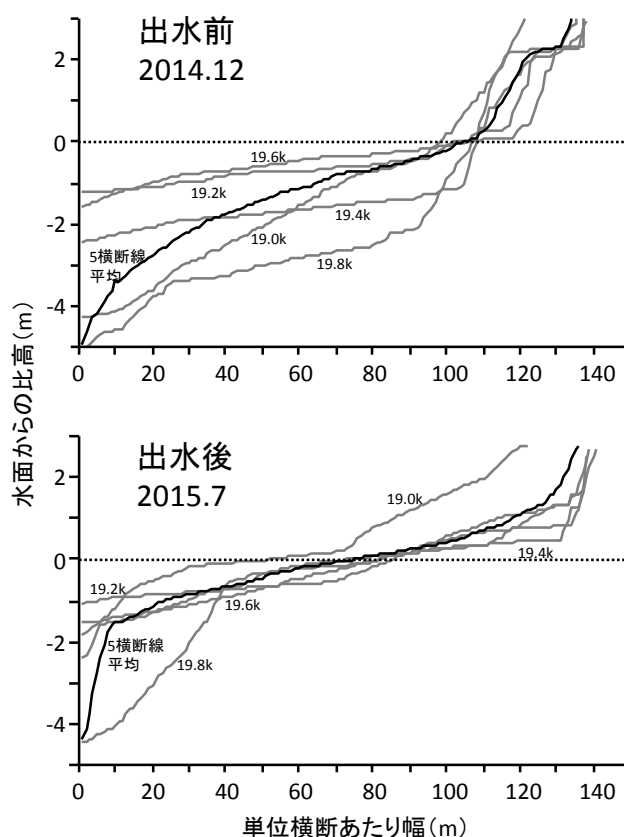


図-3 出水前（上）と後（下）の砂州の比高頻度分布。

の完全に平坦な場所があったことも確認できる。地上部の比高曲線に着目すると、2014年12月は上に凸、2015年7月は下に凸の形状であり、それぞれ土砂供給の少ない河川と多い河川に典型的なパターンであった⁶⁾。

(2) 平水時の流速の計算

水位データのある測量時の流量（出水前：54m³/s、出水後：77m³/s）において、粗度係数 n を変えて流れの計算を行ったところ、 n が0.06（出水前）または0.045（出水後）のとき水面の計算値と実測値の差が最も小さかったため（図-4）、これらを以降の計算に用いた。なお、出水前の計算では、19.2k直下にある沈み橋（図-2参照）による背水効果が入らないため、3断面に渡って計算値と実測値が大きくずれた。出水後の時点でこの沈み橋は堆積土砂の中にほぼ埋もれていたため影響はなかったと思われる。また、19.6kの計算値と実測値にずれがあるが、実測値は主流部の水位でなかったと思われる。

平水時50m³/sの流れは出水前後で大きく異なった（図-5）。19.0k～19.8k区間の平均において、流れの断面積は出水前の115m²から出水後の60m²へ減少し、流速は0.43m/sから0.81m/sへと1.89倍増加した（なお、出水前後で同一の粗度係数を用いて計算しても流速には1.5倍近くの違いがあった）。先述のとおり、出水前に実際は19.2k付近に沈み橋があり、それによる背水効果があったため、それより上流の流速はさらに小さかったと考え

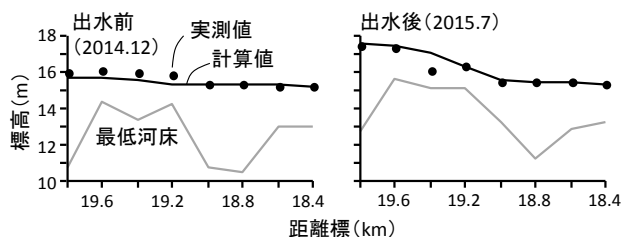


図-4 一次元の流れの計算と実測の水面。

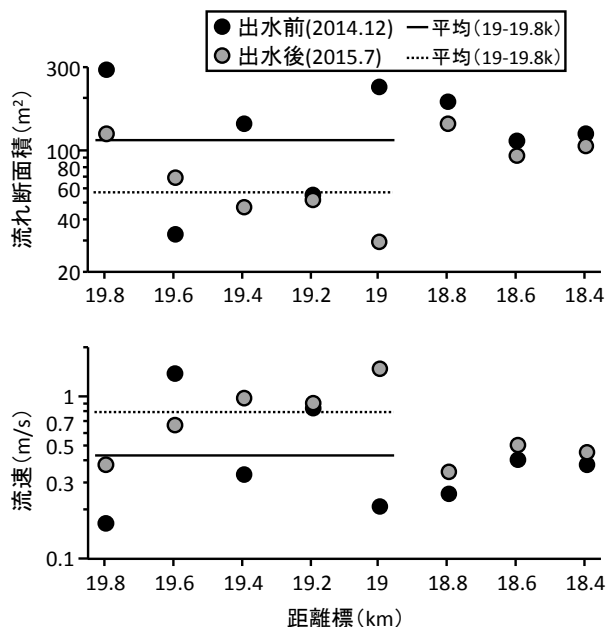


図-5 一次元の流れの計算に基づく平時50m³/sにおける流れの断面積（上）と平均流速（下）。

られる。一方、18.4k～18.8kの流れに出水前後の大きな違いは見られなかった（図-5）。

(3) 河床礫粒度分布

河床礫の D_{50} は出水前の75mmから出水後の32mmへと変化した（図-6）。出水前は75mm以上の成分が多く、それによって D_{50} も大きかったが、6mm以下の成分についても明らかに出水後よりも多かった。したがって、出水後に単に細粒化したのではなく、中間の成分である砂利や小礫が増えたと見ることができる。出水前後で調査手法が異なるため代表粒径を厳密には比較できないが、主成分の違いは明白である。

(4) 底生動物群集

瀬における出現分類群数に、出水前（定性および定量採集）と出水後（定性採集）の間で大きな違いは見られなかった（図-7）。出水前は小サイズの底生動物まで分析対象としているためより多くの種を見つけやすく、また一般に夏秋に対して冬春の方が水生昆虫の出現種数は高い。それにも関わらず出水前後で分類群数に違いがな

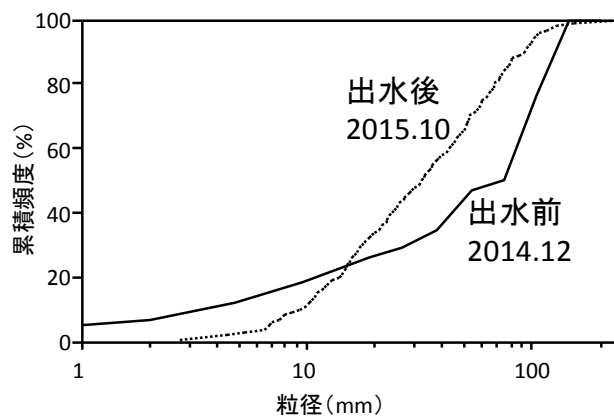


図-6 出水前後の河床粒径曲線。

かったことは、出水後において潜在的な出現分類群数が高かったことを示している。

出水前後で生活型組成に違いがあった（図-7）。出水前の3期においては、造網型がおおよそ4割、掘潜型と携巢型合わせて1割を占めていたが、出水後は造網型が2割で、掘潜型と携巢型は0であった。一方、出水前は合わせて2割以下であった遊泳型と滑行型は、出水後には4割以上に増加した。

出水後のワンド止水域（定性採集）における出現分類群数は、出水前の止水域（淵、ヨシ帯、ワンド、いずれも定性採集）における出現分類群数と同等かそれ以上であった（図-8）。また、魚類対象の調査ではなかったが、コイ科の稚魚が多数、また出水前に未記録のフナが採集された。瀬の場合と同様に、出水前の方が種を多く見つけやすい手法や時期であったことを踏まえると、止水域においても出水後に潜在的な出現分類群数が高まったと言える。なお、出水前は掘潜型や携巢型の優占度が大きかったが、出水後は様々な生活型がより均等な割合の状態での多さであった（図は省略）。

(5) 湧水量と水面比高

出水後の砂州の右岸側における湧水量は、下流へと増加し、最下流（ワンド出口）付近では1.2m³/sに達した（図-9）。計測時における本流の流量は約38m³/sであったため、1つの砂州において全流量の3.2%以上が伏流水として河床に浸透し湧き出したことになる。

単位距離あたりの湧水量の増加率は、砂州上端から150～200mのところで最大であった（図-10）。ここは、砂州地上部の幅が小さく、湧水と本流の水面比高、さらに動水勾配が最大になる位置であった（図-10）。

4. 考察

(1) 出水前後の地形と主流の流れの変化

荒瀬ダム下流の19.0k～19.8k区間は2015年6月の出水に

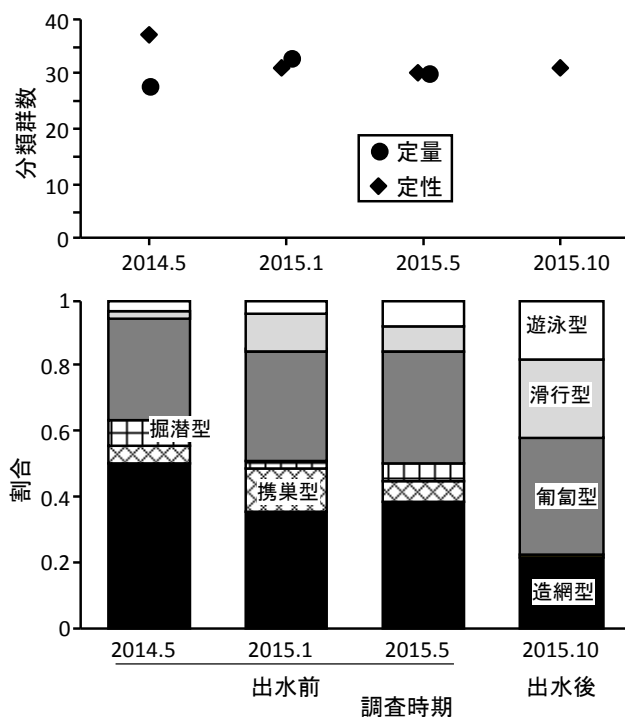


図-7 瀬の底生動物の分類群数（上）と生活型組成（下）。

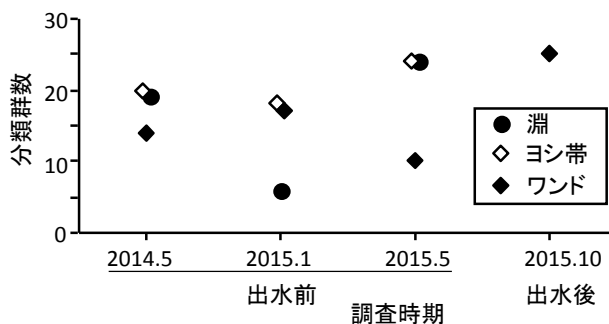


図-8 止水環境の底生動物の分類群数。

よって土砂が堆積し、それにより平水時の流れが大きく変化した。まず、出水後にそれまでなかった横断型の早瀬が出現したことは、浅く流れの速い場が増えたことを示している。また、一次元の流れの計算により、出水後は全体的に水深および川幅が小さくなり、その結果流れの断面積が小さくなり流速が高まったことが示された。河床粒径の減少、それに伴う河床粗度の低下も流速の増加に貢献したと考えられる。さらに、土砂堆積によって沈み橋が覆われ、その背水効果がなくなったことも、区間全体の流速を高める方向へ働いたものと推察される。一般に河道の土砂量とともに瀬など流れの速い環境が増えると言われているが、それを定量的に示した研究は少ない⁹⁾。

ダム上流から新たな河床材料が供給されたことに加え、流速環境が変化することで河床材料特性が変わったと考えられる。出水前は75mm以上の礫が優占するとともに、5-6mm以下の成分も多くはまり石の状態であったと推察

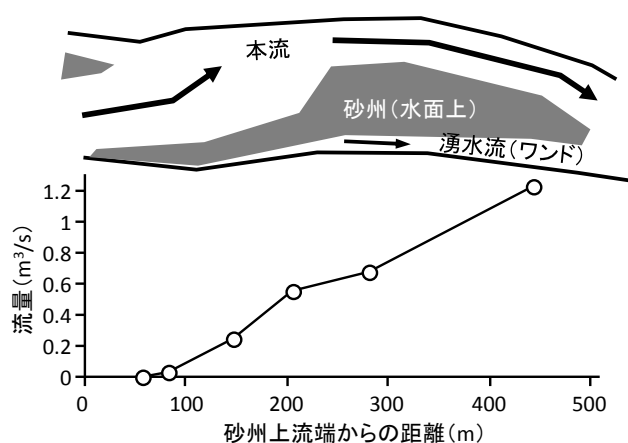


図-9 湧水の平面模式図（上）と湧水流量（下）。

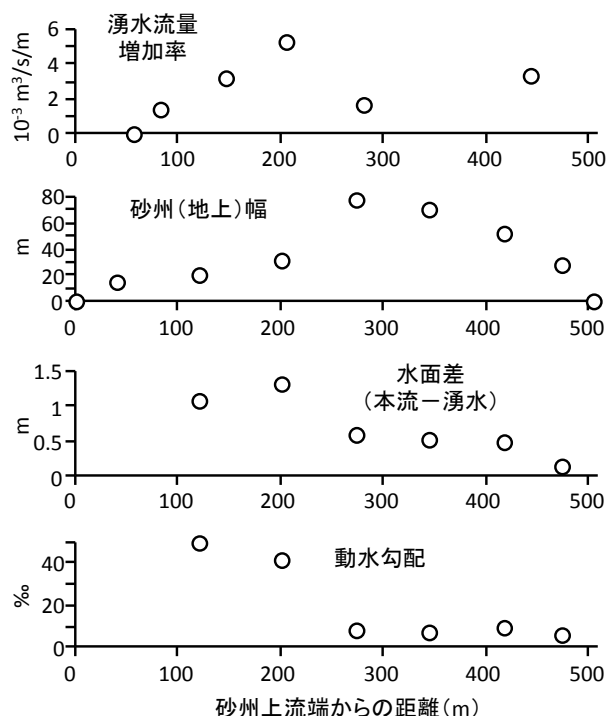


図-10 湧水量に影響する砂州特性。

される。出水前の粗粒化した状況でこうした細粒成分が多かったのは、流れが遅く堆積しやすかったためかもしれない。出水後に砂利や小礫など中間の成分が増えたことで、大きな礫のはまりが解消し河床空隙量が増えた可能性がある。

同じ瀬という場であっても、出水前に比べて出水後は潜在的な出現分類群数が高く、また速い流れを好む底生動物が多くなった。早瀬という一般に底生動物出現種数が高い場が形成されたこと、河床の空隙をすみ処とする種の生息が可能になったことなど、潜在的な出現分類群数が高まる理由は複数考えられる。出水後に多かった生活型は、流れに適応した流線形や扁平な体型をした種を多く含む遊泳型や滑行型で、少なかったのは淀みや緩流を好む掘潜型や携巢型であった。また、定住生活をす

るため安定した河床を好む造網型も出水後に少なかった。こうした底生動物の変化は流速の変化と一致するものである。なお、区間全体としての底生動物群集の変化は、こうした瀬の質の変化とともに、瀬の空間的多さの変化に関わることで、より大きかったと考えられる。

(2) 砂州形成により生じた湧水とワンド

出水後に砂州の下流右岸側に形成したワンドは、砂州内を伏流した湧水によって湛えられていた。この湧水はどこでも濁度がほぼ0で、水温変動も本流に比べ小さいことが分かっており、砂州内で十分に滞留し濾過された水であったと言える。

この湧水によるワンドが、特に緩流・止水的環境に棲む底生動物にとって好ましい生息場であったことは、潜在的な出現分類群数の高さから示唆される。湧水ワンドでは流量変動が小さいため、本流の淵や岸際よりも安定的な緩流・止水環境を提供していると考えられる。また、本流が濁っていても河床で濾過された水はきれいであるため、特に濁水に弱い稚魚や魚種にとっては効果的な避難場になると考えられる。砂州によって本流の流量の数%の水が濾過されており、もしこうした砂州の発達に10キロ以上繰り返せば、相当な割合の河川水が河床に濾過されることになる（例えば、500mごとに水中物質の3%が河床に濾過され除去されるなら、10km続けば単純計算で $1 - 0.97^{20} = 46\%$ が除去される）。

土砂堆積があっても砂州の形状によってはワンドが形成されないことが予想される。例えば、比高差の小さい砂州では網状流のような流れとなり、河道全面的に流水環境となり、止水環境は消失するだろう。また、土砂堆積が横断的に偏って砂州の比高差が大き過ぎる状況では、流れは一部に集中し砂州への浸透と湧水は起こりにくいだろう。今回の出水後の砂州のように、水中と地上の各比高域が満遍なくある状況が、湧水およびワンドを生む1つの条件と考えられる。

5. まとめ

荒瀬ダム撤去後の2015年6月の出水により下流に土砂が流出し大きな砂州が発達した。横断型の早瀬が形成し、水深や川幅が小さくなった結果、本流の平均流速が高まった。新たに供給された土砂と流速環境の変化によって河床に砂利や小礫が増え、はまり石の状況が解消されたと考えられた。生息場としての瀬の質が高まったことが底生動物の分類群数や生活型組成から示された。

また、砂州によってその下流側にワンド地形が出来たことで、本流の流速は高まったにも関わらず生息場として質の高い止水環境が対象区間に維持されていた。ワン

ドを湛える伏流水の湧水は本流流量の3.2%以上にもなることから、こうした砂州の状況が長い距離に渡って続けば相当な割合の河川水が河床に濾過されることになる。

本研究で対象とした砂州は一時的に形成されたもので、今後の出水によって形状が変化していくと考えられる。また河床材料が新たに更新されなければ、細粒成分が蓄積していき湧水特性も変化していくだろう。

土砂供給により河床や地形的な窪みが埋まることで、止水的な環境が流水的な環境に変化することは起こりやすい現象である。一方、ワンドや湧水環境はたとえ土砂供給があっても特定の砂州形状にならなければ創出されないであろう。河川における土砂供給と生物生息場の関係において、横断形状など河床形態がどのように関わっているか今後も注目していく必要がある。

謝辞：資料の提供、調査の調整など多大なご協力をいただいた熊本県企業局荒瀬ダム撤去室に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 西田守一，浅見和弘，石澤信彰，熊澤一正，中沢重一：(2011) ダム下流河川における試験湛水時の流量制御，その後の粗粒化と土砂還元に伴う底生動物の変化—11年間にわたる三春ダム下流河川のモニタリング結果—，応用生態工学，Vol.14，pp.63-74, 2011.
- 2) 田中規夫，古里栄一：ダム下流礫河床における水生昆虫動態と小型河床材料移動性の人為的土砂供給前後の変化，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70，No.4，pp.I_1327-1332, 2014.
- 3) Fukuoka, S., Sumi, T. and Horiuchi, S.: Sediment management on the Arase Dam Removal Project, *Advances in River Sediment Research*, Fukuoka, S. et al. eds., Taylor & Francis Group, London, pp.1201-1209. 2013.
- 4) 熊本県企業局：荒瀬ダムフォローアップ専門委員会第10回委員会資料，<http://www.arasedamtekkyo.hinokuni-net.jp/index.htm>
- 5) 大槻順朗，伊豫岡宏樹，二瓶泰雄，吉森佑介，中村俊介，鬼倉徳雄：荒瀬ダム撤去後の堆積土砂の流出・堆積状況，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.72，No.4，pp.I-853-858, 2016.
- 6) 竹門康弘，小林草平，崔美景，寺田匡徳，竹林洋史，角哲也：河川の横断測量データに基づく水面比高分布を用いた生息場評価法，河川技術論文集，第19巻，pp.519-524, 2013.
- 7) 竹門康弘：底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価，日本生態学会誌，Vol.55，pp.189-197, 2005.
- 8) Kobayashi, S., Nakanishi, S., Akamatsu, F., Yajima, Y. and Amano, K.: Differences in amounts of pools and riffles between upper and lower reaches of a fully sedimented dam in a mountain gravel-bed river, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.8, pp.145-155, 2012.

(2016. 4. 4受付)