

排砂バイパスの運用とダム下流環境の変化 —河床粗度と流水・止水ハビタットの多さに着目して—

Changes in Below-Dam Environment after Sediment Bypass Operation: Viewing from Bed Roughness and the Dominance of Lotic-Lentic Habitats

小林草平・角哲也・竹門康弘

Sohei KOBAYASHI, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

Synopsis

Effects of sediment bypass tunnel (SBT) on environmental recovery of the degraded channels below dams, which were suggested by Awazu et al. (2015), were further examined by aerial photos using a drone. Coarse bed materials such as boulders were more represented below than above the Koshiyama Dam, where SBT had not been in operation yet. The coarse bed materials protruded into the water column or formed steps, which increased slow-flow areas below the Koshiyama Dam. On the other hand, sand, gravel, and cobbles dominated below as in above the Asahi Dam, where SBT had been operated for more than 17 years. Although bed characteristics below Asahi Dam seem to have almost recovered to a pre-dam state, less representation of large cobbles and boulders may suggest limitations of SBT system to transport downstream full sizes of sediment especially for the coarsest class of the bedload materials.

キーワード: ダム下流, 排砂バイパストンネル, 河床地形, 河床材料, ドローン

Keywords: below dam, sediment bypass tunnel, bed topography, bed materials, drone

1. はじめに

ダム下流では上流からの土砂供給が遮断されるため、河床低下や粗粒化に付随した河川環境の劣化が起こる (Ward and Stanford, 1979; Kondolf, 1990)。その結果、固有種が外来種に置き換わるなど、従来の生物群集や健全な生態系の姿が失われやすい (Ward and Stanford, 1979; Boon, 1988; Bunn and Arthington, 2002)。排砂バイパストンネル (Sediment bypass tunnel, 以降 SBT と略す) の建設は、ダム堆砂問題の解決策の一つであるが (Vischer et al., 1997)、SBT によって土砂が下流へ運ばれるため、堆砂問題と同時にダム下流環境の回復への効果が期待されている。しかし、SBT を有するダムは国内とスイスにのみ存在し、合わせても 10 ほどのダムに限られている。

著者らは、SBT を有する日本とスイスの 4 つのダムの上・下流区間において河床環境調査を行い、SBT

の導入による河床環境の回復について検証を行ってきた (粟津ら, 2015)。その結果、SBT を導入してからの経過年数が長いダムほど、ダム下流とダム上流の河床特性や底生動物群集は似通うという傾向が明らかになりつつある。粗粒化していたダム下流に SBT によって土砂が供給されると、河床がより細かい土砂で覆われることで、河床礫の動きが活発となり、また河床の凹地がなくなる。その結果、底生動物群集には急流を好む底生動物種が増えるといった傾向がみられる (粟津ら, 2015)。

本研究では、SBT 導入による河床環境の回復に関わる地形プロセスについての理解を深めるため、また河床粒径分布を区間全域的に広く確認するため、小渋ダムと旭ダムの上・下流区間においてドローンを用いた調査を試みた。小渋ダムにおける SBT の運用は 2016 年度以降である。一方、旭ダムでは 1998 年より SBT の運用が行われ、毎年出水の度に SBT を通し

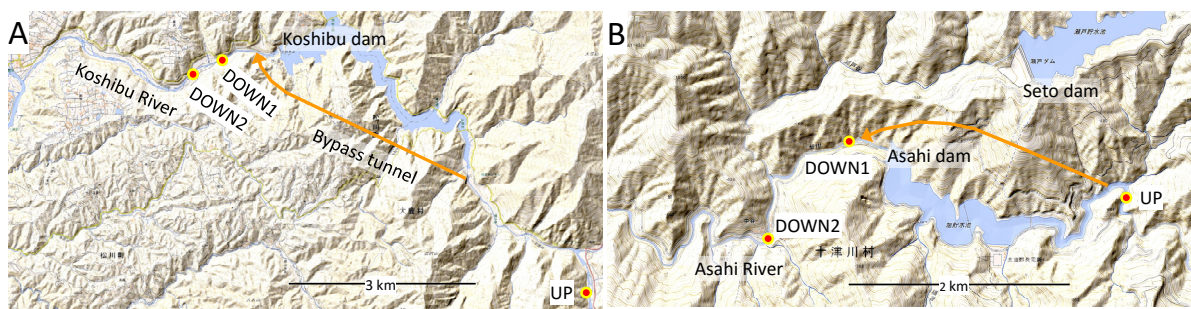


Fig. 1 Location of dam and survey sites (A: Koshiyabu, B: Asahi)

Table 1 Channel characteristics of survey sites

	Koshiyabu			Asahi		
	UP	DOWN1	DOWN2	UP	DOWN1	DOWN2
Mean local bed slope (%)	1.30	2.05	0.38	1.74	3.03	2.00
Mean bankfull width (m)	65.0	26.0	32.0	25.9	22.2	31.8

てダム下流へ土砂が供給される。本研究では、複数の手法で河床材料構成を評価し、上流に比べて下流区間で不足している粒径クラスを明らかにすることを1つの目標とした。また、平水時の流れに影響する地形要素として、水面上の石の突出やステップ構造の多さについて地点間で比較した。

2. 調査地と調査方法

2.1 調査地

長野県の小渋ダムは1969年に天竜川水系小渋川に建設された国土交通省が管理する洪水調節を含む多目的のダムである。集水域288 km²のほとんどは森林に覆われるが、河川に近い斜面の崩壊地も少なからずあり、そこからの土砂生産がある。年間の平均流入量は約3.4 m³/s、平均年最大流入量は331 m³/sで、平均年最大流出量は203 m³/sである。奈良県の旭ダムは1978年に熊野川水系旭川に建設された関西電力株式会社が管理する発電専用のダムである。集水域39.2km²のほとんどは森林に覆われるが、河川沿いに斜面の崩壊地もある。年間の平均流入量は2.5 m³/s、平均年最大流入量は299 m³/sで、流出量は流入量とほぼ同じである。

各ダムではダム上流 (UP) , ダム下流の2ヶ所 (DOWN1, DOWN2) の計3地点を調査地とした[Fig. 1]. UPはダム湛水域よりも上流, DOWN1はトンネル吐口の直下, DOWN2はダム下流における初めての支流合流後に位置し, それぞれ約100mの区間を調査対象とした。各区間の河道特性をTable 1に示す。

2.2 地形と河床の調査

ダム上・下流区間の調査を2015年5月の平水時に行った。各調査地において縦断的に早瀬 (riffle, 相対的に浅くて流れの速い場), 淵 (pool, 相対的に深くて流れの遅い場), 平瀬 (run, 上記二つの中間の場) に区分し, それぞれの河床勾配をデジタル水平レベル (SOKKIA SDL30, Topcon社) で記録した。

まず, 早瀬, 平瀬, 淵のそれぞれで優占する河床材料の定性的な調査を行った。すなわち, 岩 (bedrock), 巨石 (boulders, 径: 256 mm以上), 浮石 (cobbles, 64-256 mm), はまり石 (embed cobbles, 64-256 mmだが砂等に埋まった状態), 砂利 (gravel, 2-64mm), 砂 (sand, 2mm以下) のそれぞれの多さを4段階 (0: なし, 1: 少し, 2: 普通, 3: 多い) で記録した。なお, 砂利や砂は存在面積が100cm²以上のものを対象としたため, 例えば石の影に一握りの砂があっても0として扱った。同時に倒木や落葉など有機物を対象に同様の記録を行っているが, 本研究では割愛する。この調査は主観の影響が入るが, 区間全域を対象とできるため, 後述する河床粒径調査の結果を補う情報となる。

河床粒径調査の1つとして, デジカメによる河床表面撮影を行った。区間全体の川沿いからランダムに河床を抽出するため, 早瀬, 平瀬, 淵を含む全域の水際 (右岸または左岸側) に巻尺を張り, 巻尺の5mおきに撮影ポイントを設定した。各ポイントにおいて, 河床30cm四方かそれ以上の範囲をスケールを入れて撮影した。撮影した各画像からランダムに河床粒径を抽出するため, フリーソフトImageJ (Schneider et al., 2012) を用いて5×5の計25格子点を画像上で作った。各格子点上の粒子について第二軸 (b軸) の長さを記録した。各地点において画像は10枚以上であ

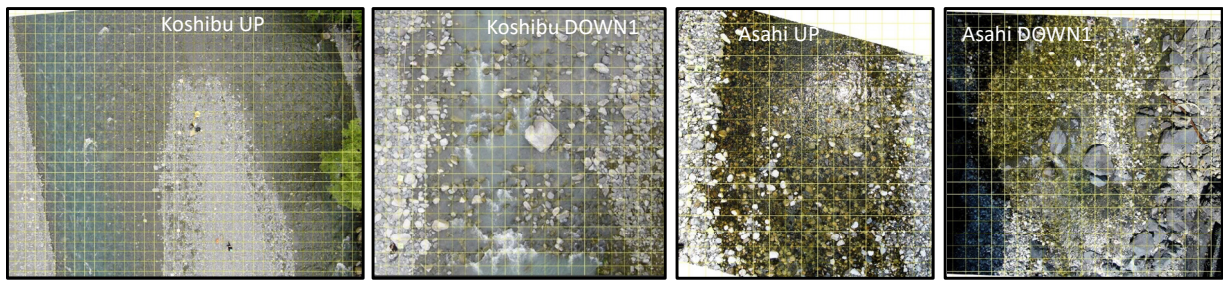


Fig. 2 Example images taken by quadrocopter with grid superimposed

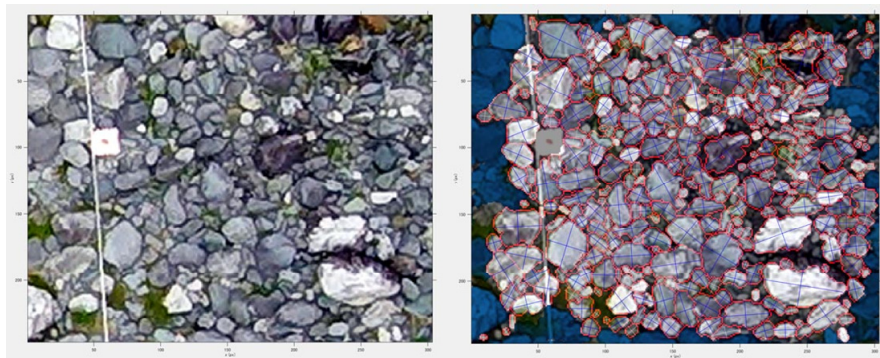


Fig. 3 Example of the grain size analysis by Basegrain (left: original image, right: particle detection)

ったため、250以上の粒子について長さを記録した。

2.3 ドローン空撮

ドローンによる空からの河床地形要素と河床材料の撮影を行った。4枚回転翼のDJI Phantom2 (DJI Science and Technology社)を使用した。これにデジタルカメラGoPro Hero4 Silver Edition (GoPro社)を搭載した。ドローンは河川上空の高度15-30mで区間全域を飛行した。河川全域の水際に沿って張った巻尺の5mおきに一辺30cmの正方形板(色:ピンク)を置き、ドローン画像からスケールが分かるようにした。ドローンのデジタルカメラを真下に向け、カメラのタイムラプス機能により10秒間隔で3840×2160ピクセルの静止画像を撮影した。

2.4 ドローン画像の解析

各地点においてドローンによって50枚以上の画像を撮影したが、地形や河床材料の解析ではそれぞれ異なる8-10枚の画像を選んだ。各画像における魚眼レンズ効果はGoProのフリーソフトであらかじめ除去した。

河床地形の解析において、各画像にあらかじめ1m間隔のグリッドを設けた[Fig. 2]。地形要素として早瀬と平瀬における段差(step)の数と飛出石(emerged stones)の多さを評価した。段差は巨石や石の流れに対して横並びの集積によって階段状になった地形で

ある(Knighton, 1998参照)。本研究では巨石や石が1m以上横並びにつながり、水の跳躍により白い波立ちが確認できた場合、段差であると定義した。全ての段差の長さを測定し合計した後、早瀬または平瀬の平均水面幅と縦断距離で除し標準化した(1m²あたりに見られる段差の数に相当する)。飛出石の多さは、早瀬または平瀬に含まれる各グリッドをそれらの被覆によって6段階の数値(0%, 10%, 30%, 50%, 75%, 100%)に目視で分け、それぞれのグリッド数と被覆数値を掛け合わせることで評価した(水域内での飛出石の被覆率に相当する)。段差は短い距離の間に流れのエネルギーを消費し、飛出石は流れの障害物となりその前後に緩い流れの場をもたらす。したがって、ある流量や勾配条件において、これらの要素の多さが早瀬や平瀬における止水的な環境の多さの指標になる。

ドローン空撮画像の河床粒径分析にはフリーソフトBasegrain (Detert and Weitbrecht, 2013)を用いた。空撮画像ではカメラと河床の距離があるため、デジタルカメラ画像に比べて河床は粗く写る。しかし、粒子内の不均質な色彩が不鮮明になることで、粒子間の区別がより容易になった[Fig. 3]。ただし、解像度の問題により粒径が3-5cm以下の粒子については判別できなく、これらは「それ以下の粒子」としてしか扱えなかった。各調査地において早瀬、平瀬、淵の川縁を含む8-10箇所からそれぞれ約25m²の河床を抽出

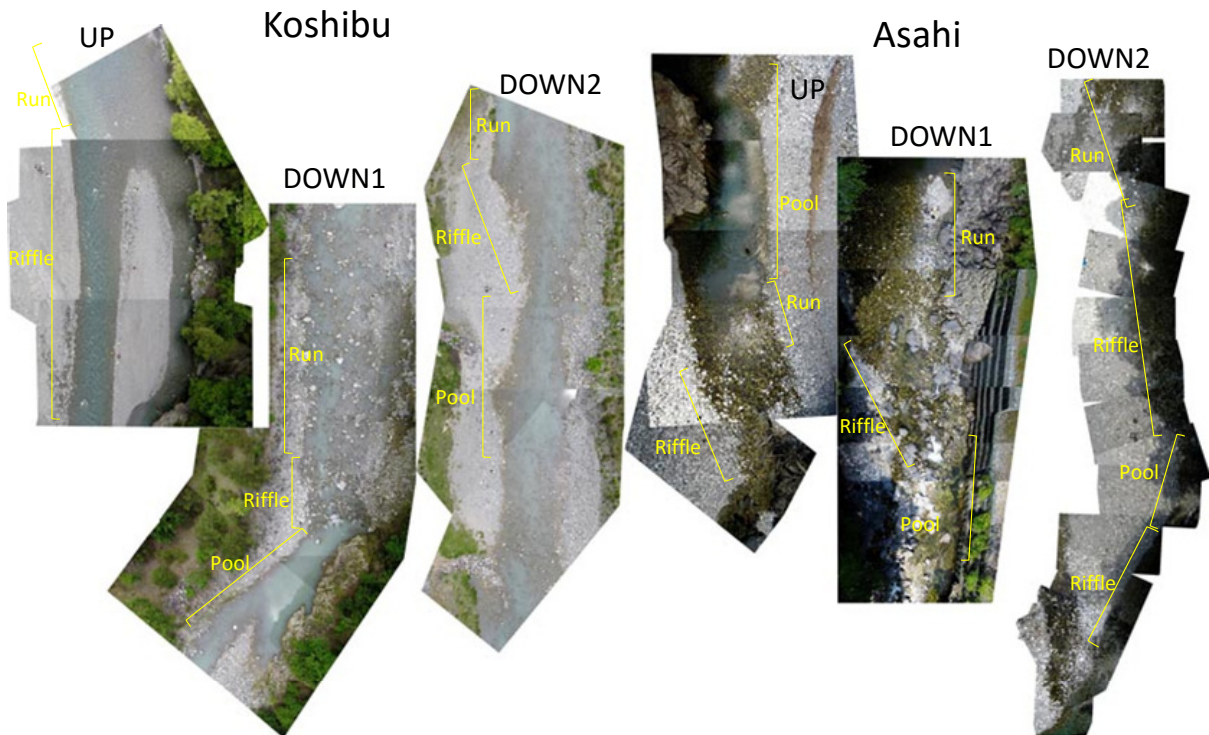


Fig. 4 Full image of each study reach taken by quadcopter

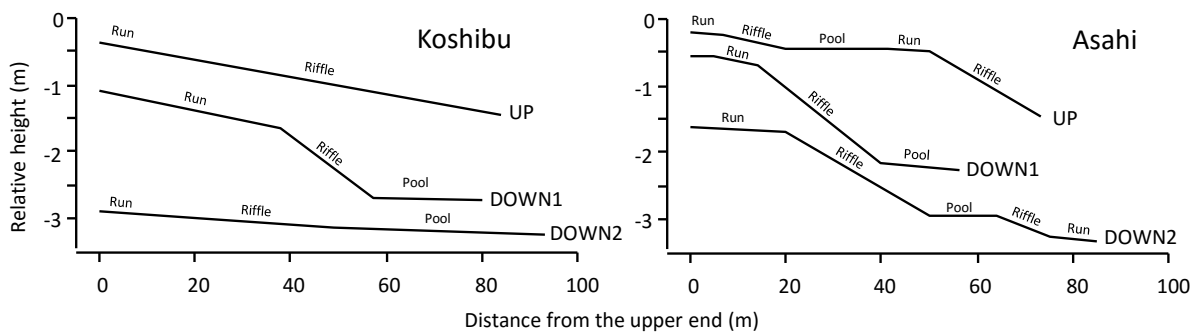


Fig. 5 Longitudinal bed profile of each site

した．各画像において200-2000以上の粒子について第二軸と面積が自動的に抽出される．それを基に各粒径の全面積に占める割合を算出した．河床空隙面積（void area）を検出可能最小粒径以下の占める面積とした．このように算出した粒径分布を地上デジカメ撮影の画像から算出した粒径分布と比較した．

3. 結果

ドローン空撮により得られた区間全体の画像を[Fig. 4]に示す．各調査地において早瀬は浅いため飛出石も多く，一方淵は深いいため飛出石はほとんどなく，また水透明度の高い旭川では水深に対応するような色彩の変異が確認された．小渋ダムの下流では，

ダム貯水池からの水が白濁しているため，こうした水深による色彩の違いは分らなかった．旭川では水面の波立ちのない平瀬などで，太陽や雲による反射がなければ水面下の河床材料も鮮明に見えた．なお，旭ダムのDOWN2ではドローンが安定せず，また樹冠の張り出しなどもあって，川幅全体を写すことができなかった．

3.1 河床勾配（水平レベル調査）

ほとんどの調査地で河床勾配は早瀬（riffle）で大きく淵（pool）で小さかったが[Fig. 5]，小渋ダムのUPとDOWN2では区間内の河床勾配は比較的均一であった．これらは河道の中央を流れる区間で，浸食地形である深い淵が発達していなかった．今回の調

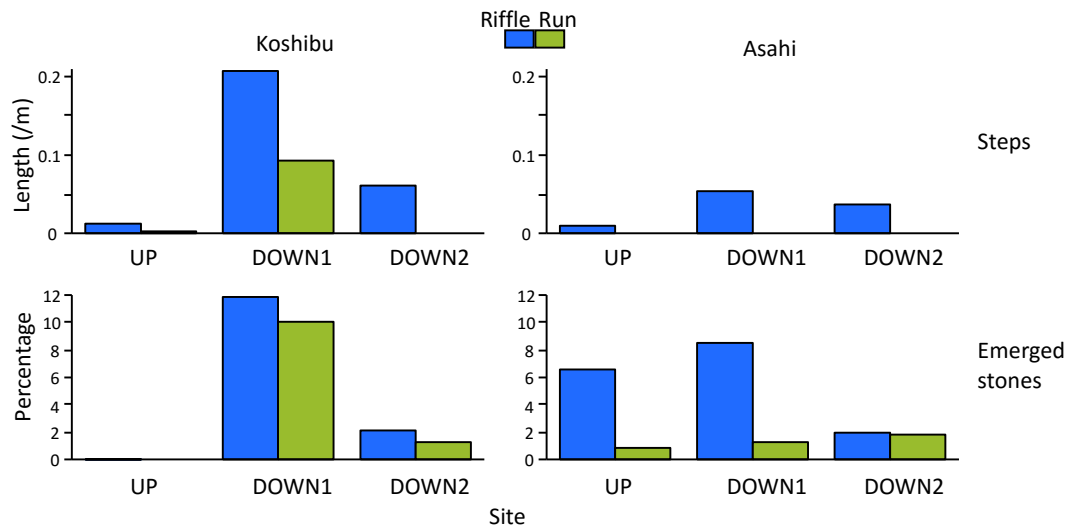


Fig. 6 Step length (upper) and abundance of emerged stones (lower) in each site

査の中で最も急な早瀬と最も緩やかな早瀬はいずれも小渋ダム下流でみられた。

3.2 河床地形要素（ドローン画像）

全調査地において、段差数（step, 川幅及び縦断距離で標準化）と飛出石の多さ（emerged stones, 水域に占める割合）はともに平瀬よりも早瀬で大きかった[Fig. 6]. 小渋川においては、段差数も飛出石の多さもUPに比べDOWNの2区間で大きく、特にDOWN1で格段に大きかった。旭ダムでは、段差数についてはUPよりもDOWNの2区間でやや多かったが、飛出石の多さはUPとDOWN1に違いはなく、DOWN2ではUPよりもむしろ少なかった。

3.3 優占河床材料（定性調査）

浮石（cobble）とはまり石（embed cobble）はどの調査地でも多いが、砂（sand）、砂利（gravel）、巨石（boulders）、岩盤（bedrock）は調査地によっては少なかった[Fig. 7]. 岩盤は主に川岸に見られるため、流れが川岸に接していない場所では岩盤は少なかった（例えば、小渋のUPとDOWN2）。

UPとDOWNの差（ $\Delta_{DOWN-UP}$ ）を求めることによって、ダム上流に比べてダム下流で少ない河床材料が判断できる[Fig. 8]. ここで、 $\Delta_{DOWN-UP}$ が正であればダム下流に多く、負であればダム下流に少ないことを示している。小渋ダムではダム下流において砂や砂利が少なく、巨石が多いのが明らかである。また、後述の粒径分布の結果にも関係するが、 $\Delta_{DOWN-UP}$ のマイナスの度合いは砂よりも砂利で大きい傾向にあった。

一方、旭ダムでは、ダム上流と下流の違いは小渋

ダムほど大きくはなかった。砂や砂利はDOWN1ではやや少ない一方で、DOWN2ではやや多い傾向にあった。後述の粒径分布の結果にも関係するが、DOWN1と2の両方で、流れ場によってCobblesやBoulderが少ない傾向にあった。

3.4 河床粒径分布（地上及びドローン画像）

地上デジカメ撮影による河床粒径の分析の結果、小渋ダムではどの区間も一山型の分布に近く、DOWN1で最も大きく、ついでDOWN2で大きく、これらとUPに大きな差があった[Fig. 9]. 代表粒径としての D_{60} はUPで31 mm、DOWN1で222 mm、DOWN2で112 mmであった。旭ダムにおいてもどの区間も一山型の分布に近かったが、小渋ダムほど区間による違いは大きくなかった。また、UPよりもむしろDOWN2で河床粒径は小さい傾向にあった。 D_{60} はUPで85 mm、DOWN1で70 mm、DOWN2で40 mmであった。なお、栗津ら（2015）でも同様の手法で同じような D_{60} 値を出している（例えば、旭ダムの上流では86 mm、下流では63 mmであった。しかし、小渋ダムの上流では57 mmで本研究より少し大きめの値を出している）。

ドローン空撮画像から求めた河床粒径は地上撮影画像の河床粒径よりも大きい値をとった [Fig. 9]. 2つの方法による分析結果の関係を示す[Fig. 10]において、1:1を示す点線より上側に各点がプロットされることはドローン画像の粒径がより大きいことを示している。どの区間でも一貫してドローン画像の方が粒径が大きい理由としては、2-3個の粒子を1つの粒子とするなど粒子判定の誤りの影響が考えられる。ドローン画像で3-5cm以下の粒子は検出できていな

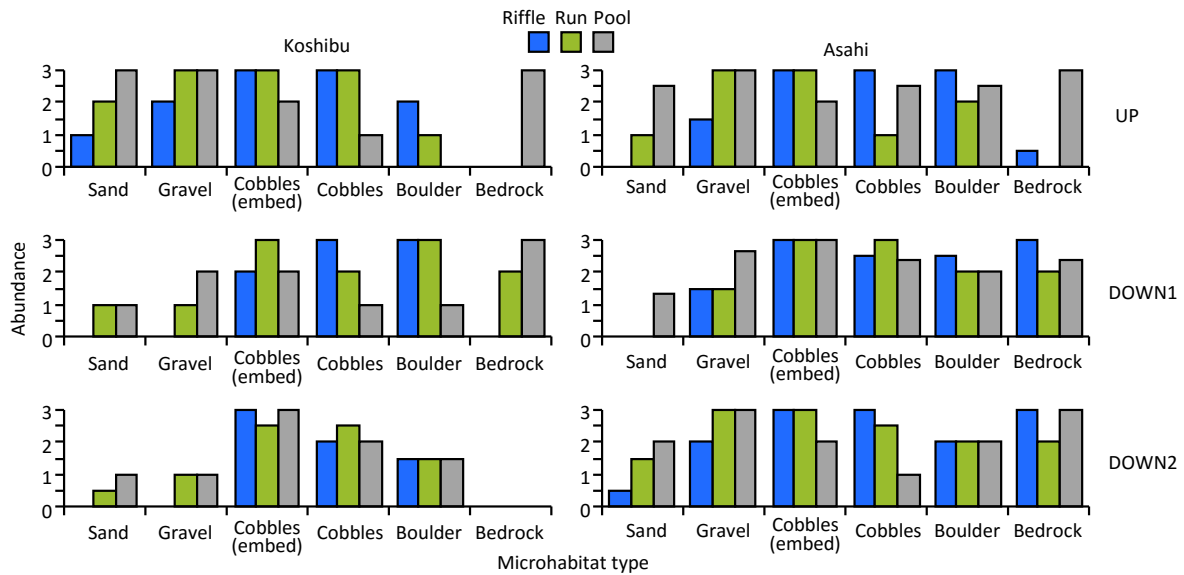


Fig. 7 Occurrence and abundance of bed material class each site

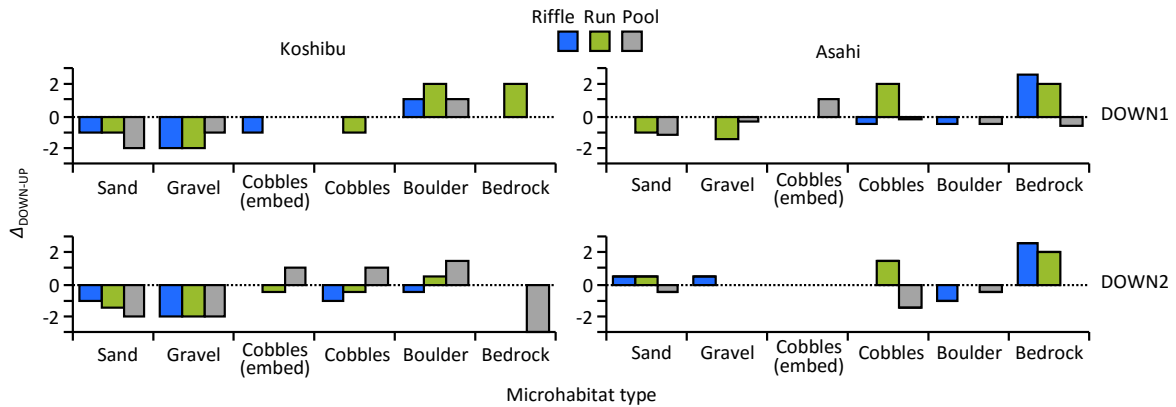


Fig. 8 Difference in abundance of bed material class between UP and Down sites, $\Delta_{\text{DOWN-UP}}$

いが、それらは全て3-5cm以下の粒子として扱われるため、それによって粒径値が大きくなることは考えにくい。また、2つの手法では実際に撮影した場所やスケールは異なるため、それが粒径の違いに影響している可能性はあるが、いずれも区間全体から場所をランダムに抽出しているため、全区間において一貫した違いをもたらすものではない。

2つの手法で粒径の絶対値は異なるものの、区間間の相対的な粒径の違いは概ね一致していた[Fig. 9]。例えば、小渋ダムではDOWN1, DOWN2, UPの順に代表粒径は小さく、旭ダムでは3つの区間の違いは小渋ダムに比べて小さかった。また、2つの手法の粒径値には正の相関が認められた[Fig. 10]。相関係数は粒径の大きい代表値ほど高い傾向にあった。地上画像に対するドローン画像の粒径値の比は代表粒径が大きい小渋ダムのDOWN1で小さく(1.06)、代表粒径

が小さい小渋ダムのUPで大きい(2.25)傾向にあった。地上画像もドローン空撮画像もそれぞれ長所短所があり、本研究だけではどちらがより正確であるかは判断できないが、いずれの手法も少なくとも地点間の相対的な河床粒径の違いの評価には使えることを示している。

各粒径クラスの割合におけるダム上流と下流の差($\Delta_{\text{DOWN-UP}}$)を求めた[Fig. 11]。先述と同じく、 $\Delta_{\text{DOWN-UP}}$ が正であればダム下流に多く、負であればダム下流に少ないことを示す。小渋ダムにおいてダム上流に比べてダム下流では、64 mm以下の粒径クラスの割合が少なく、128 mm以上のクラスの割合が多いことが地上画像の結果から分かる。また、河床材料の定性調査と同様に、ダム下流における少なさの度合いは砂よりも砂利に相当する粒径クラスで大きいことが示されている。一方、旭ダムにおいて、

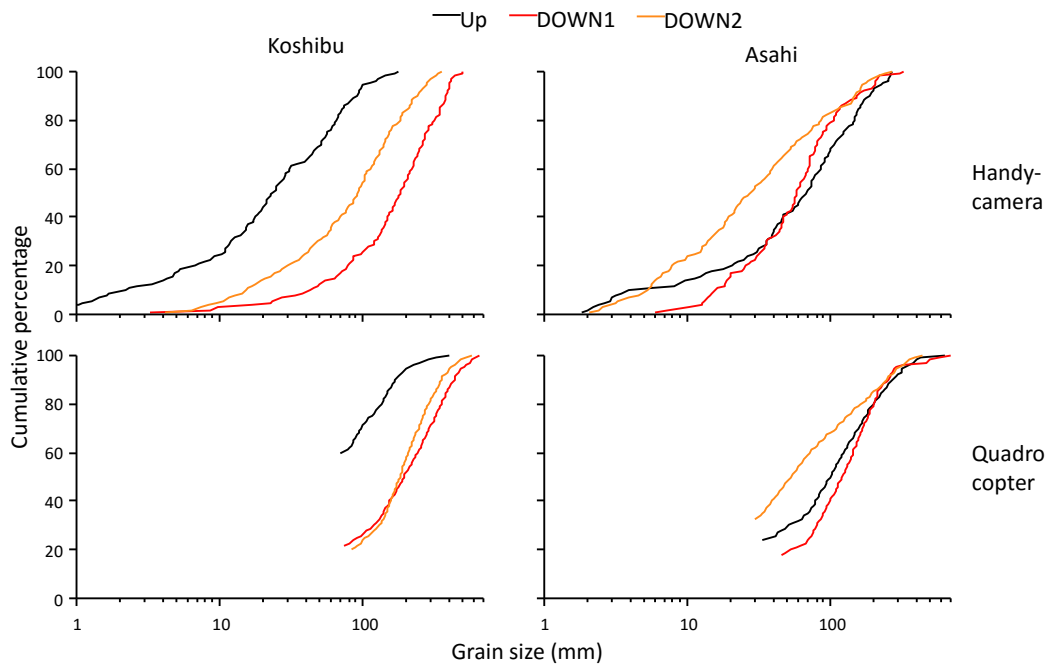


Fig. 9 Grain size distribution of surface bed materials analyzed from the images taken by handy (upper) and quadrocopter (lower) camera

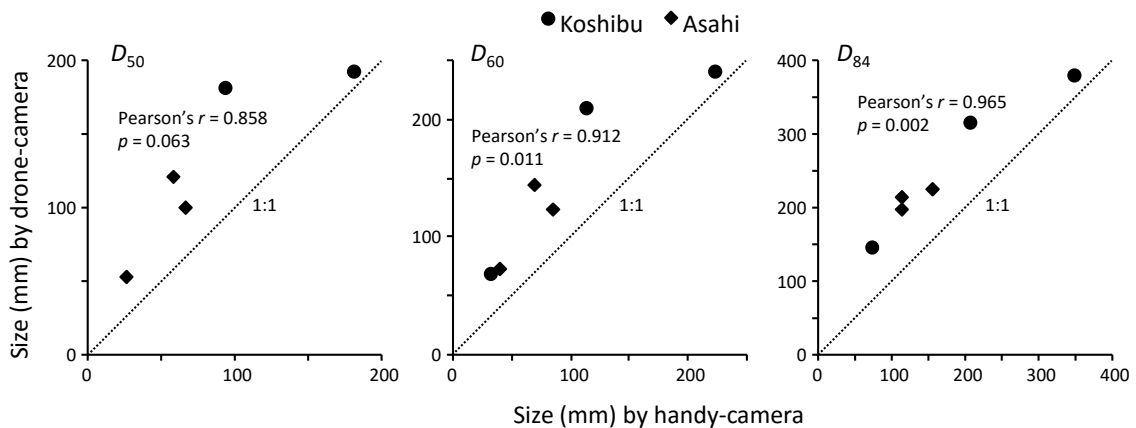


Fig. 10 Relationship between representative grain size obtained from different images

DOWN2では32 mm以下の粒径クラス，DOWN1では16–128 mmの粒径クラスの割合がUPよりも多い傾向にあった。また，河床定性調査の結果にもかかわらず，DOWN2では64 mm以上の粒径クラス，DOWN1では128 mm以上の粒径クラスの割合がUPよりも少ない傾向にあった。ドローン画像では64 mm以上の粒径クラスでしか判断できないが，それらの範囲では地上画像と同様の傾向が見られた。

4. 考察

本研究では，優占河床材料の定性調査と，地上およびドローン空撮により得られた河床粒径画像の分析により，区間全体としてダム上流に比べてダム下

流で少ない/多い粒径を明らかにした。（栗津ら，2015）でも河床粒径の違いは明らかにされているが，より詳細にどの粒径クラスがダム下流で不足しているかが明らかとなった。異なる手法の結果を比較することで，ドローン空撮画像により少なくとも地点間の相対的な河床粒径の違いは評価できることが示された。また，ドローン画像から河床地形要素の多さについて評価し，（栗津ら，2015）で示された仮説を補う結果が得られた。

SBTが運用前である小渋ダムにおいては，ダム下流の河床粒径は粗く，ダム上流に対して64 mm以下の粒径が少なかった。その中においても，砂よりも砂利に相当する粒径においてダム下流での欠落の程度が大きいことが示された。河川一般的に2-16 mm

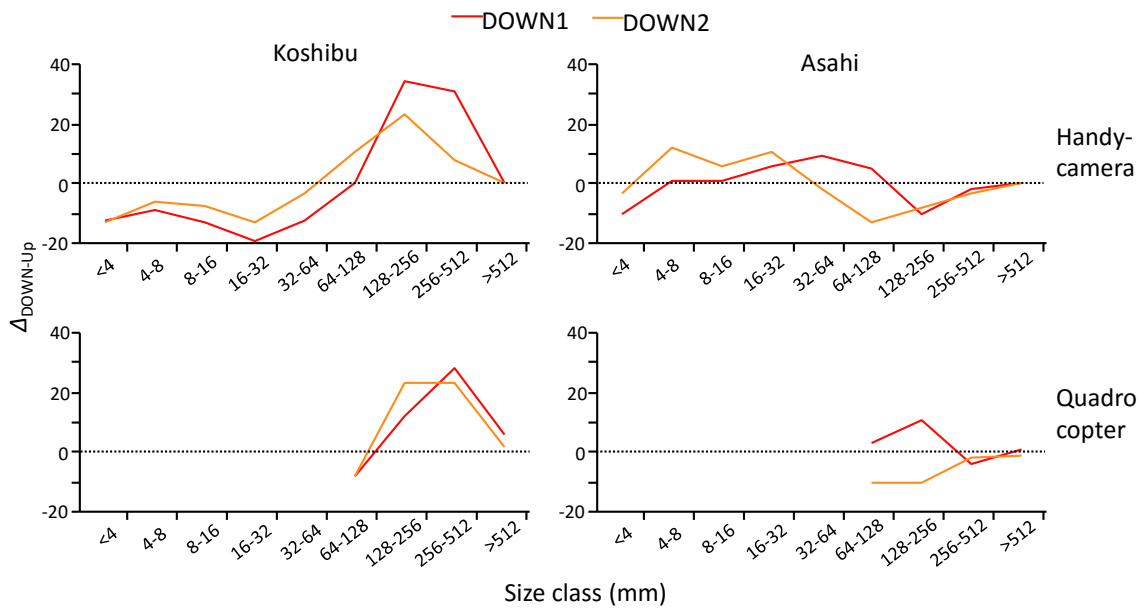


Fig. 11 Difference in percentage of each grain size class between UP and DOWN, $\Delta_{DOWN-UP}$, obtained from handy camera (upper) and quadrocopter (lower)

の砂利は少ない材料とされている (Fryirs and Brierley, 2013) . SBTの運用後に砂や砂利が十分に供給されることが河床環境の回復につながることは言うまでもない. しかし, 砂だけ供給されてもすぐに下流へ流出しやすいこと, また実際に砂よりも砂利が不足していることを踏まえると, 砂利に相当する粒径を供給することが小渋ダム下流における河床環境の回復の鍵になる可能性がある.

小渋ダム下流において優占していた巨石や石といった128 mm以上の粒径は早瀬や平瀬において段差を形成した. また, 河床におけるこうした粗い粒径は平水時において水面上に飛び出していた. 段差において流れは跳躍することでエネルギーが消費されるとともに, 飛出石によって流れが妨げられその前後に緩い流れの場が形成される. こうして急勾配の早瀬であってもその中に止水的な環境が生じうる. SBTの運用が短いダム下流において瀬の群集に止水環境を好む種が多かった (栗津ら, 2015) 理由としては, このような河床の粒径に関係する凸凹地形の存在が影響していることが強く示唆された. なお, 土砂供給が少なく河床低下した河道においては, 早瀬自体が少なく, 淵が多くなることが報告されている (Kobayashi et al., 2012) .

一方, SBTが運用されて17年以上になる旭ダムではダム下流と上流の河床粒径分布は似通っていた. また, 段差数や飛出石の多さにおいてもダム上流とダム下流はほとんど変わらなかった. SBTが運用される前は粗粒化していたはずの河床は, SBTの運用後に上流から供給された土砂によって広く覆われ,

ダムが建設される前の河床状態に近づいたと考えられる. こうしたSBTの運用からの経過年数の長いダム下流では瀬において止水環境を好む底生動物種が少ないが (栗津ら, 2015) , それは土砂供給によって河床粗度が小さくなったためと考えることができる. 旭ダム下流において, SBT運用後数年において底生動物種が増えてきたこと (Harada et al., 2000; Mitsuzumi et al., 2009) , 砂州が形成されたこと (Osada et al., 2012) がこれまで報告されている. これらの事実から旭ダムの下流における河床環境は以前の状態へとかなり回復したと判断できる. ただし, 本研究の結果から, 旭ダムの下流では上流に比べて粗い128 mm以上の粒径 (64か128 mm以上) のクラスが少ないことも示された. こうした粗い粒径はトンネル呑口の上流で堆積してしまい, トンネル下流には供給されていない可能性がある (Osada et al., 2012) . こうした粗い粒径も河川における生息場形成に重要な粒径であることを踏まえると (Kobayashi and Takemon, 2012) , 旭ダムの下流において完全な河床環境の回復を目指すのであれば, こうした粗い粒径の下流への供給が今後の課題となる.

5. まとめ

排砂バイパストンネル (SBT) が運用前の小渋ダムと運用17年以上の旭ダムにおいて, ダム上・下流区間の河床材料と地形要素についてドローン等を用いて面的に調査した. 小渋ダムの下流では石や巨石が優占した状態で粗礫化が明らかであった. 石や巨

石は段差を形成し、早瀬や平瀬の中に止水的な流れを生み出している可能性が示された。河床環境の回復においては特に不足している砂利の供給が必要と考えられた。旭ダムではダム上流とダム下流の河床粒径分布や地形要素の数は類似しており、長年のSBTの運用によって下流の河床環境は回復していると考えられた。ただし、石や巨石はむしろダム上流より下流で少ない傾向にあり、掃流砂の中でも最も大きいクラスはダム呑口上流に堆積してしまい下流へは供給されていない可能性が考えられた。ドローン空撮画像によって河床粒径の少なくとも区間による相対的な違いは評価できることが示された。

謝 辞

研究に関係するデータを提供いただき、調査にご協力いただいた国土交通省国土交通省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所、関西電力株式会社の方々に感謝の意を表する。

参考文献

- 栗津陽介・小林草平・角 哲也・竹門康弘 (2015) : 排砂バイパスを導入したダム下流における河床環境と底生動物群集, 京都大学防災研究所年報, 第58号B, pp. 527-539.
- Boon, P.J. (1988): The impacts of river regulation on invertebrate communities in the U.K., *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol. 2, pp. 389-409.
- Bunn, S.E. and Arthington, A.H. (2002): Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, *Environmental Management*, Vol. 30, pp. 492-507.
- Detert, M. and Weitbrecht, V. (2013): User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN, In: *Advances in Science and Research*, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang (Eds.), pp. 1789-1795.
- Fryirs, K.A. and Brierley, G.J. (2013): *Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape*, Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, UK.
- Harada, M., Morimoto, H. and Kokubo, T. (2000): Operational results and effects of sediment bypass system. In *Transactions of the International Congress on Large Dams*, Vol. 2, pp. 967-984.
- Knighton, D. (1998): *Fluvial Forms and Processes: a New Perspective*, Arnold, London.
- Kobayashi, S., Nakanishi, S., Akamatsu, F., Yajima, Y. and Amano, K. (2012): Differences in amounts of pools and riffles between upper and lower reaches of a fully sedimented dam in a mountain gravel-bed river, *Landscapes and Ecological Engineering*, Vol. 8, pp. 145-155.
- Kobayashi, S. and Takemon, Y. (2012): River habitat evaluation using sediment load and grain size distribution, *Annals of DPRI, Kyoto University*, No. 55B, pp. 537-545.
- Kondolf, G.M. (1997): Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels, *Environmental management*, Vol. 21, pp. 533-551.
- Mitsuzumi, A., Kato, M. and Omoto, Y. (2009): Effect of sediment bypass system as a measure against long-term turbidity and sedimentation in dam reservoir. In *23rd ICOLD Congress*, Q89-R8, Brasilia, Brazil.
- Osada, K., Fukuda, T., Yamashita, K. and Fukuoka, S. (2012): Study on flushing mechanism of dam reservoir sedimentation and recovery of riffle-pool in downstream reach by a flushing bypass tunnel, *Journal of JSCE, Division B*, Vol.68, No.4, pp. I_1105-I_1110.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S. and Eliceiri, K.W. (2012): NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nature Methods*, Vol. 9, pp. 671-675.
- Sumi, T. (2015): Comprehensive reservoir sedimentation countermeasures in Japan, *Proceeding of the First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, Zurich, Switzerland, pp. 1-20.
- Vischer, D.L., Hager, W.H., Casanova, C., Joos, B., Lier, P. and Martini, O. (1997): Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation, Q74-R37, in *Proceeding of the 19th ICOLD Congress*, Florence, Italy, pp. 605-624.
- Ward, J.V. and Stanford, J.A. (1979): Ecological factors controlling stream zoobenthos with emphasis on thermal modification of regulated streams. In: *The Ecology of Regulated Streams* (Eds J.V. Ward & J.A. Stanford), pp. 35-55. Plenum, New York.

(論文受理日 : 2016年6月13日)