

河川における土砂環境と砂州地形特性 —排砂バイパスダムの上下流区間における調査事例—

Sediment Conditions and Gravel-Bar Characteristics in River Channels: Field Surveys in Reaches of Dams with Sediment Bypass Tunnel

小林草平・角哲也・竹門康弘

Sohei KOBAYASHI, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

Synopsis

We measured riverbed topography in the upstream and downstream reaches of Asahi and Koshibu dams with sediment bypass tunnel (SBT) using drone. Aerial photos of a gravel-bar were taken with >70% overlap between images, which were analyzed to generate DEM data by a stereo photogrammetry. Bed profiles were longitudinally smooth in upstream reaches with natural sediment supply, while they were rough with irregular and step-like forms in the downstream reaches with least sediment supply. Riffles were cross-sectionally flat in the upstream reaches, while they were incised in the downstream reaches. In contrast, pools were cross-sectionally confined in the upstream reaches, while they were relatively flat in the downstream reaches. These differences in topography can be explained by gravel-bar shape that varies according to sediment condition. Drone and image analysis are suggested to be an effective and time-saving method to evaluate changes in gravel-bar topography and related flow patterns.

キーワード: ドローン, 写真測量, 瀬淵構造, 河床形状, 土砂

Keywords: drone, stereo photogrammetry, pool-riffle, bed profile, sediment

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ているため、河床低下や粗粒化、それらに伴う河川環境の劣化が起こる (Ward and Stanford, 1979; Kondolf, 1990)。その結果、在来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)。砂州 (特に樹林化していない裸地のタイプ) は、河川区間という空間スケールにおける流れ、底質、生物群集の空間的異質性や多様性を生み出す物理基盤で、土砂の減少によって失われつつある河川要素の一つである。また、砂州があることで、表流水の一部が砂州内に浸透し再湧出すれば、湧出先に安定した水温や流れが生じ、増水時や高水温時の水生生物の一時的避難場となる。砂州は平水

時において水中の濁り、有機物、栄養塩を濾過・除去することで水質浄化にも一役買っている。

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、堆砂問題の解決と同時に、ダム下流の環境が本来の姿へと回復させる効果が期待される。著者らは、SBT を有する日本とスイスのダムを対象に、その上流と下流において河床環境調査を行い、SBT の導入によるダム下流環境の回復について評価してきた (栗津ら, 2015; Auel et al., in press)。研究の主な対象の一つは底生動物で、ダム上流と下流の群集の類似度を指標として、ダム下流における環境の回復度合いを調べた。SBT 吐口の前後区間による群集の違い、あるダムにおける SBT 導入後のダム下流群集の時系列変化、複数ダムの間における SBT

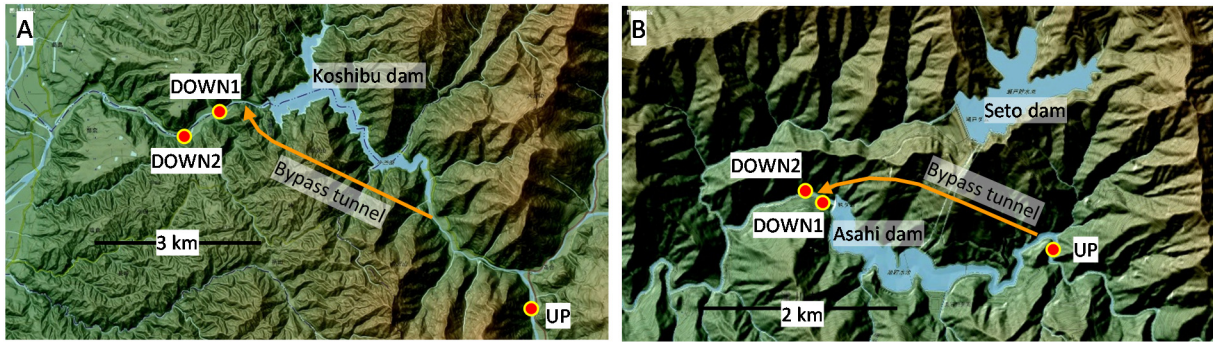


Fig. 1 Location of dam and survey sites (A: Koshiyuu, B: Asahi)

運用年と群集の関係の解析から、SBTの導入後数年のうちにダム下流環境は大きく回復することを示した。また、その回復には、短期的に生じる河床表面の粒径や微小な凸凹の変化、長期的に生じる瀬淵構造や砂州などより大きな河床波形態の変化など、複数のステージがあると考えられた。

ダム下流を広域的に調査するには、特に砂州を対象とする場合は、従来の方法では多大な労力と時間を要する。航空写真、衛星画像、横断測量からは地形の様々な情報が得られるものの、詳細な河床粒径や砂州形状の情報を得るには限界がある。近年河川調査においても普及しつつあるドローンは、砂州全体を短時間で見渡すことができ、また衛星画像や航空写真では捉えきれない細かい情報を得ることができる。ドローンによって、砂州特性の変化や、土砂供給条件とその関係が今後明らかになることが期待される。昨年の報告で著者らは、河床表面の粒径分布や微小な河床地形の評価にドローンを利用した調査が有効であることを示した(小林ら, 2016)。本研究では、SBTを有する2つのダムの上流と下流区間を対象に、土砂条件による砂州形状の違いをドローン空撮画像より評価できるかを確かめた。

2. 調査地と方法

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はじめとする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(水量)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。小渋ダムでは2016年にSBTが完成し試験運用が開始した(本運用は2017年以降)。調査は2016年12月に行ったが、まだSBTによって十分な土砂は運ばれておらず、ダム下流全般的に粗礫化した河床および

樹林化した景観が広がっていた。

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39.2 km²のほとんどは森林に覆われるが、河川沿いに斜面崩壊地もある。年間の平均流入量(水量)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。SBTは1998年に完成し運用が開始した。ダム堤体から0.3 km下流にSBTの吐口がある。そこから下流は、SBTを通してこれまでに運ばれた土砂の堆積によって、特に河道幅の広い区間では大きな砂州が発達し、樹林化などダム下流に典型的な景観は見られなかった。

各ダムにおいて、ダム上流(UP、ダム湛水域から離れた上流)とダム下流2ヶ所(DOWN1、DOWN2)の計3地点(それぞれ約100-m区間)を調査地とした[Fig. 1]。小渋ダムでDOWN1はSBT吐口から約0.5 km下流、DOWN2はさらに1 km下流であった。後者は堰堤(生田第二床固)上流側にあたり、過去に土砂が堆積したことで河道がより広がっている。旭ダムでDOWN1はSBT吐口よりも上流で、土砂が輸送されないため粗礫化した河床が今なお続く場所である。DOWN2はSBT吐口の直下で、SBTで輸送された土砂が堆積する。すなわち、DOWN1と2はSBT吐口を挟んだ前後の区間である。各ダムにおいて土砂堆積は量的に、UPで最大でDOWN1で最小、DOWN2はそれらの中間であると考えられた。

2.2 ドローン空撮

砂州の地形解析をするためドローンによる空からの撮影を行った。ドローンとして4枚回転翼のDJI Phantom3 Professional(DJI Science and Technology社)を使用した。これに4000×3000ピクセルで画像を取得するデジカメが搭載されている。ドローンは河川上空の高度75-100mにおいて、対象とする砂州を中心に区間全域を飛行した。飛行時間の20分以内に、河川縦断方向に3-4列以上、各列30枚以上を撮影するように、画像どうしの撮影範囲の重複が60-70%以上と

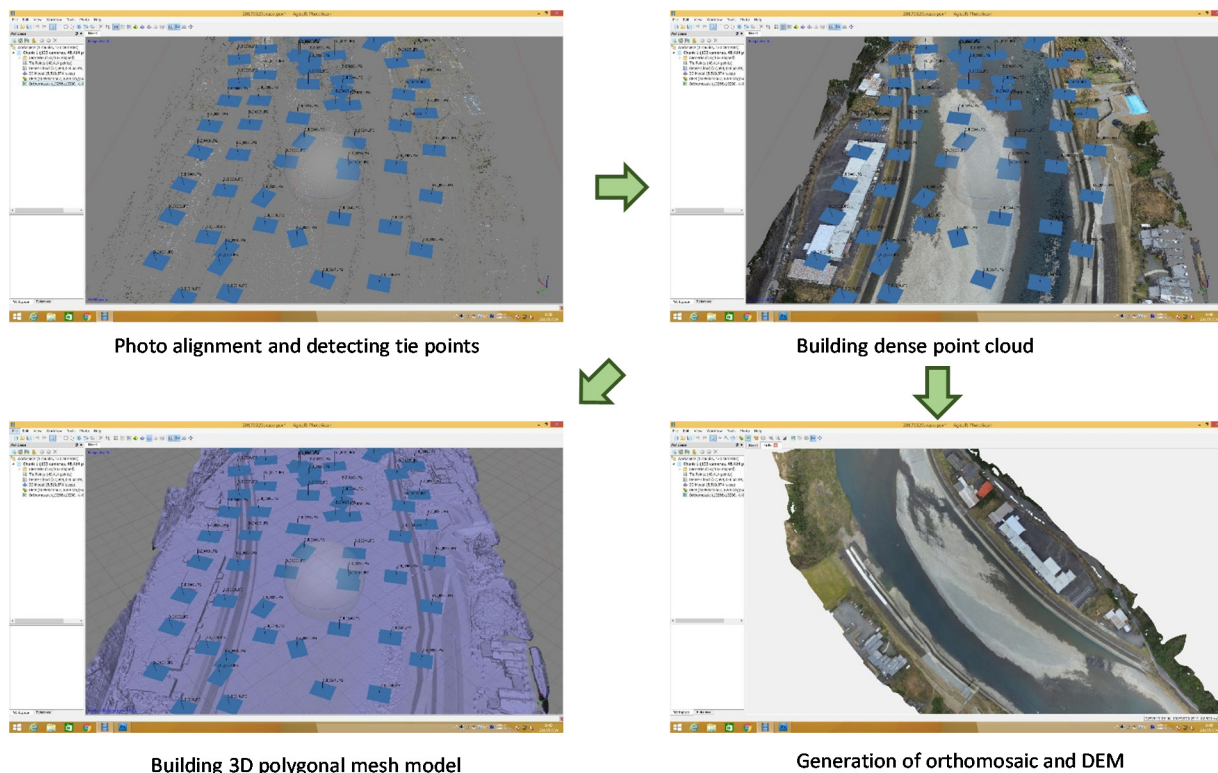


Fig. 2 Some procedures of stereo photogrammetry by a commercial software

なるように飛行し、全体で100-200枚の画像を取得した。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（ピンク色）を置き、画像分析の際のスケールとした。

空撮した砂州において実際に測量を行い、画像分析によって得られる地形が実際の地形をどれくらい反映しているかを確認した。砂州（中州）に5つの横断測線を設け、各測線において水際（右岸側、左岸側）とそれらの間の3か所について、比高を1cm単位で距離と高低差を測れるレーザ測器Leica DISTO D510（Leica Geosystems）により測量した。

2.3 空撮画像の分析

空撮画像を用いたステレオ写真測量の解析技術による河床地形の推定を行った[Fig. 2]。これは、複数の連続した位置から撮影されたステレオペアをなす画像間で特徴点の抽出とそれらの対応付けを行い、それに基づき3次元点群の生成、また各画像の撮影位置や角度、カメラのレンズ特性といった内部パラメータの推定を行うSfM（structure from motion）と呼ばれる技術、SfMにより得られた撮影位置と対象物の配置関係からさらに高密度な対応付けを行い、より高密度な3次元点群の生成を行うMVS（multi-view stereo）と呼ばれる技術を組み合わせたものである。こうした技術による解析は現在、市販のソフトウェアで半

自動的に行える。本研究ではAgisoft（アギソフト）社のPhotoscan（フォトスキャン）を用いた。各地点において撮影した100~200枚の空撮画像をPhotoscanで読み込み、画像撮影位置、カメラ内部パラメータ、GCP（Ground control point）等の情報は全く与えず、ほぼデフォルト設定により解析を行い、最終的に3次元メッシュモデル、DEM（digital elevation model）、オルソ化画像を作成した。撮影時の天候や明るさなど取得画像の質にもよるが、得られた地形データの平面誤差は陸域であれば2-3センチ以下、垂直誤差は5センチ以下が期待できる。なお、水面下の地形は、光の屈折、濁り、水面の波立ちによる乱反射による影響を受けて推定に誤差が生じるため、本研究では参考程度に扱った。

作成したDEMをArcGIS 10.4.1（ESRI JAPAN社）で読み込み、砂州の縦断形状と横断形状を抽出した。縦断形状として、瀬と淵を含む60~100m区間における左岸と右岸の水際の標高値を抽出した。横断形状として、瀬と淵のそれぞれに上・中・下流の3か所に横断線を設け、線上の標高値を抽出した。

小浜ダムの各地点では、砂州表面の粒径分析も行った。この分析には粒子の自動判別と計測を行うソフトウェア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、地上撮影の画像に比べて河床は粗く写る。しか

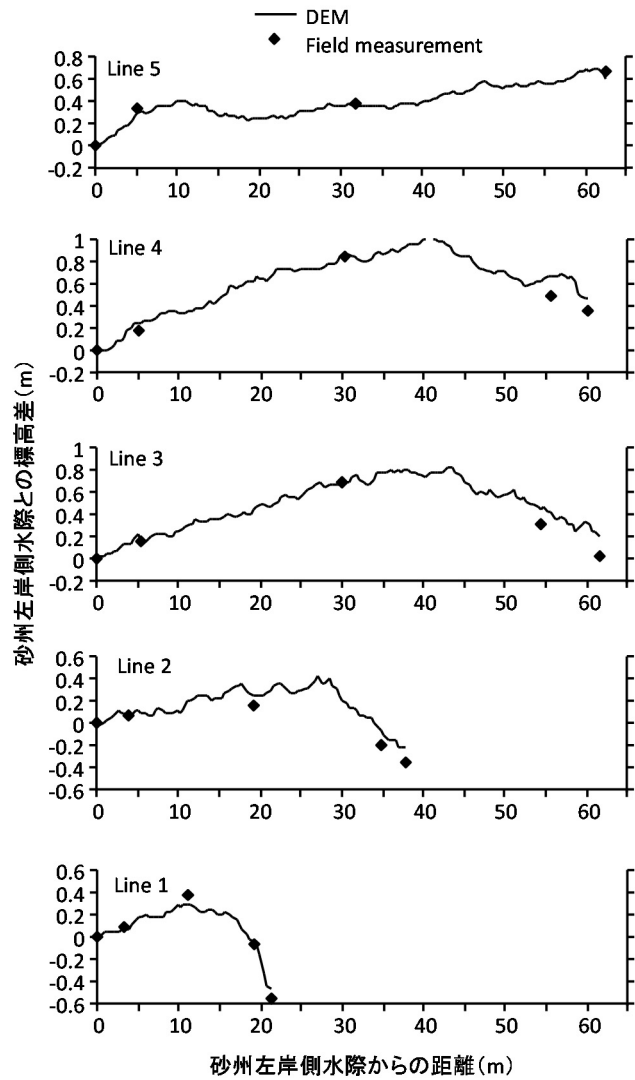
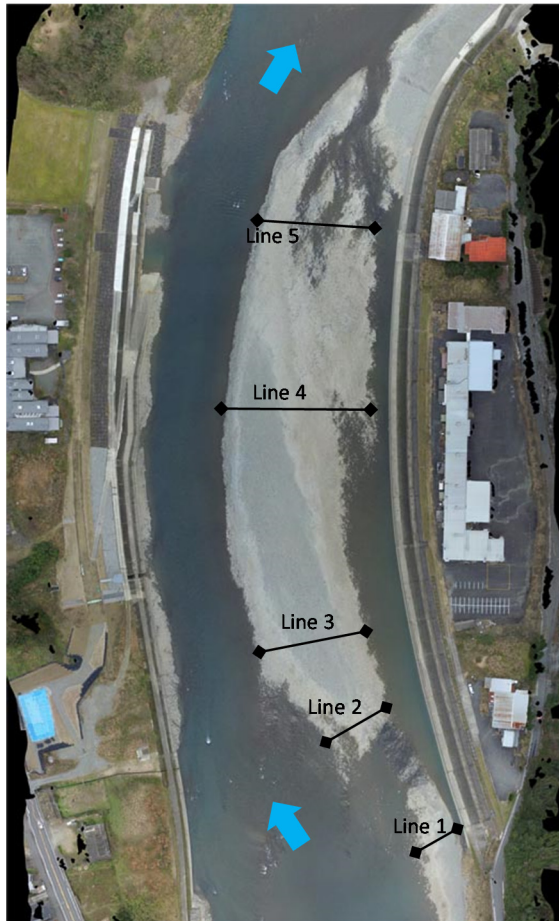


Fig. 3 Comparison of the elevation between field measurements and stereo photogrammetry. Arrows are flow direction.

し、粒子内の不均質な色彩が不鮮明になることで、このソフトウェアによる粒子の自動判別が容易に行えた。ただし、画像の解像度の問題により、粒径が3-5センチ以下の粒子の判別は難しく、本研究ではこれらは「それ以下の粒子」として扱った。各地点の砂州において水際沿いで等間隔の6~10か所（各5m×5mの面積）について粒径評価を行った。各画像において200~2000以上判別された粒子それぞれについて、第二軸の径と面積が計測される。それを基に各粒径の全粒子面積に占める累積割合を算出した。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。

3. 結果

3.1 現地測量と写真測量の比較

熊本県球磨川旧荒瀬ダム下流区間において砂州を

測量した結果を[Fig. 3]に示す（5つの各測線において、左岸側の水際の標高を0としたときの他の点の比高を示している）。写真測量で得られた砂州表面比高プロファイル上に、または近接するかたちで、現地測量の値がある場合が多く、写真測量により砂州地形がある程度正確に評価されたことを示している。上流の測線では左岸側の水際がより高いのに対して、下流の測線では右岸側の水際がより高いのが分かる。

しかし、測線によっては右岸側の水際の比高値には写真測量と現地測量の間で最大20cmのずれがあった。中央の測線ほど、右岸側の点ほど、現地測量よりも写真測量の方が相対的に高い比高になる傾向にあった。50m以上の距離になると、10-20cm程度の誤差が生じた可能性がある。もしくは、高さ10cm程度の石によって河床が凸凹している場所もあったので、それによって少しの位置の差による違いが反映された結果であるかもしれない。

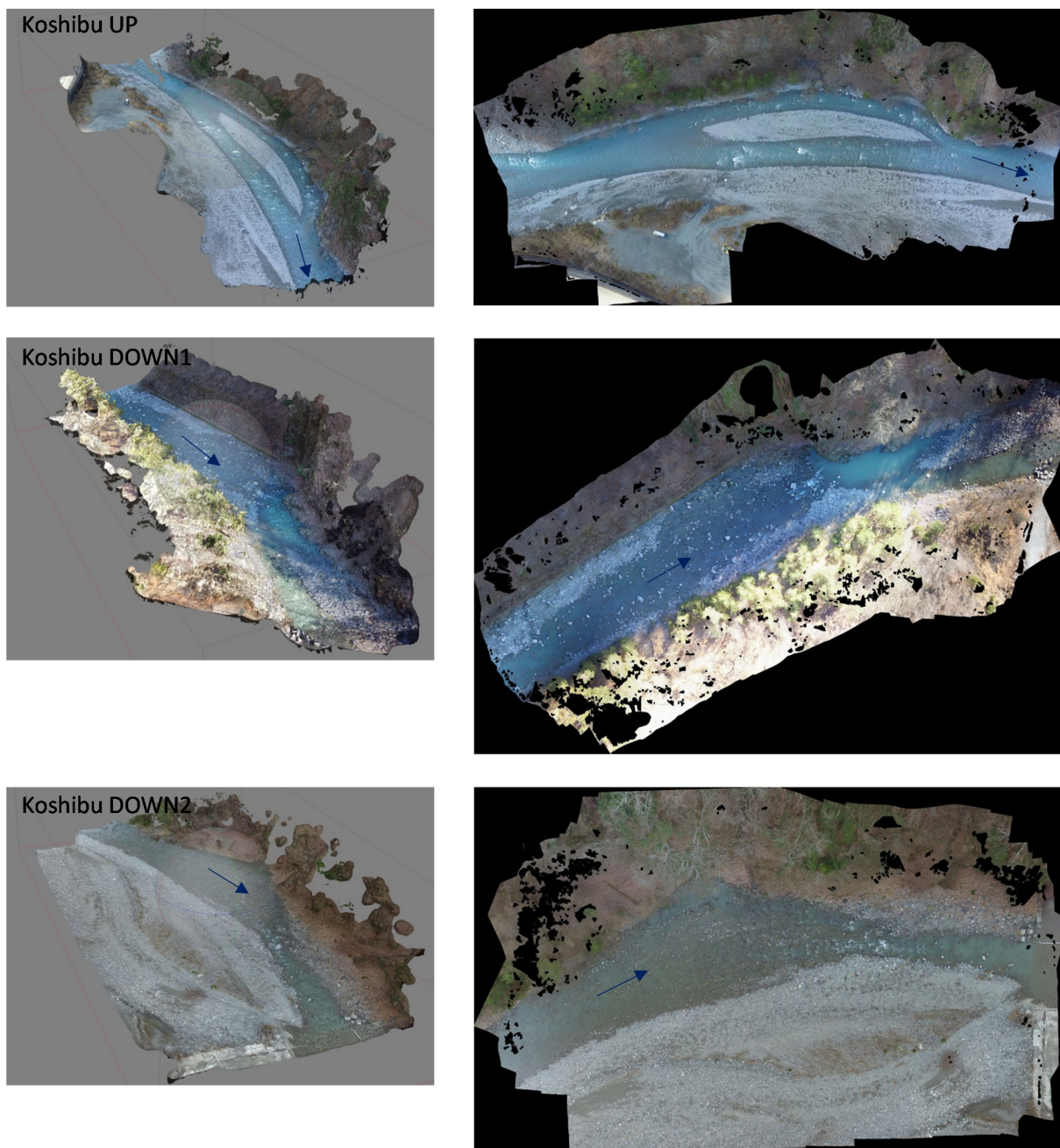


Fig. 4 3D polygonal mesh model (left) and orthomosaic image (right) in 3 reaches of Koshibu Dam.
Arrows are flow direction.

同様の飛行条件で小渋ダムと旭ダムにおいて撮影した画像から解析によって得られた3次元メッシュモデルとオルソ化画像を示す（小渋ダム：Fig. 4，旭ダム：Fig. 5）。

3.2 縦断形状（水際）

各区間における河川縦断形状として、左岸と右岸の水際沿いの標高値プロファイルを示す（小渋ダム：Fig. 6，旭ダム：Fig. 7，各図右のグラフ）。各区間において、瀬の部分の勾配が大きく、淵の部分の勾配

が0に近いことが分かる。凸凹の激しい部分は、水際が巨礫または岩盤であるため、少しの位置の違いで標高値にばらつきが生じた場所である。小渋と旭の両ダムとも、土砂堆積が最も少なく河床が粗礫化しているDOWN1でこの傾向が最も顕著である。土砂堆積の多いUPであっても、片方の水際で特に淵において凸凹の激しい部分が見られた。これは、水衝部にあたる場所に岩盤または巨礫が存在するためである。小渋と旭の両ダムとも、瀬の勾配は土砂堆積の多いUPで最も小さく、土砂堆積の少ないDOWN1で最

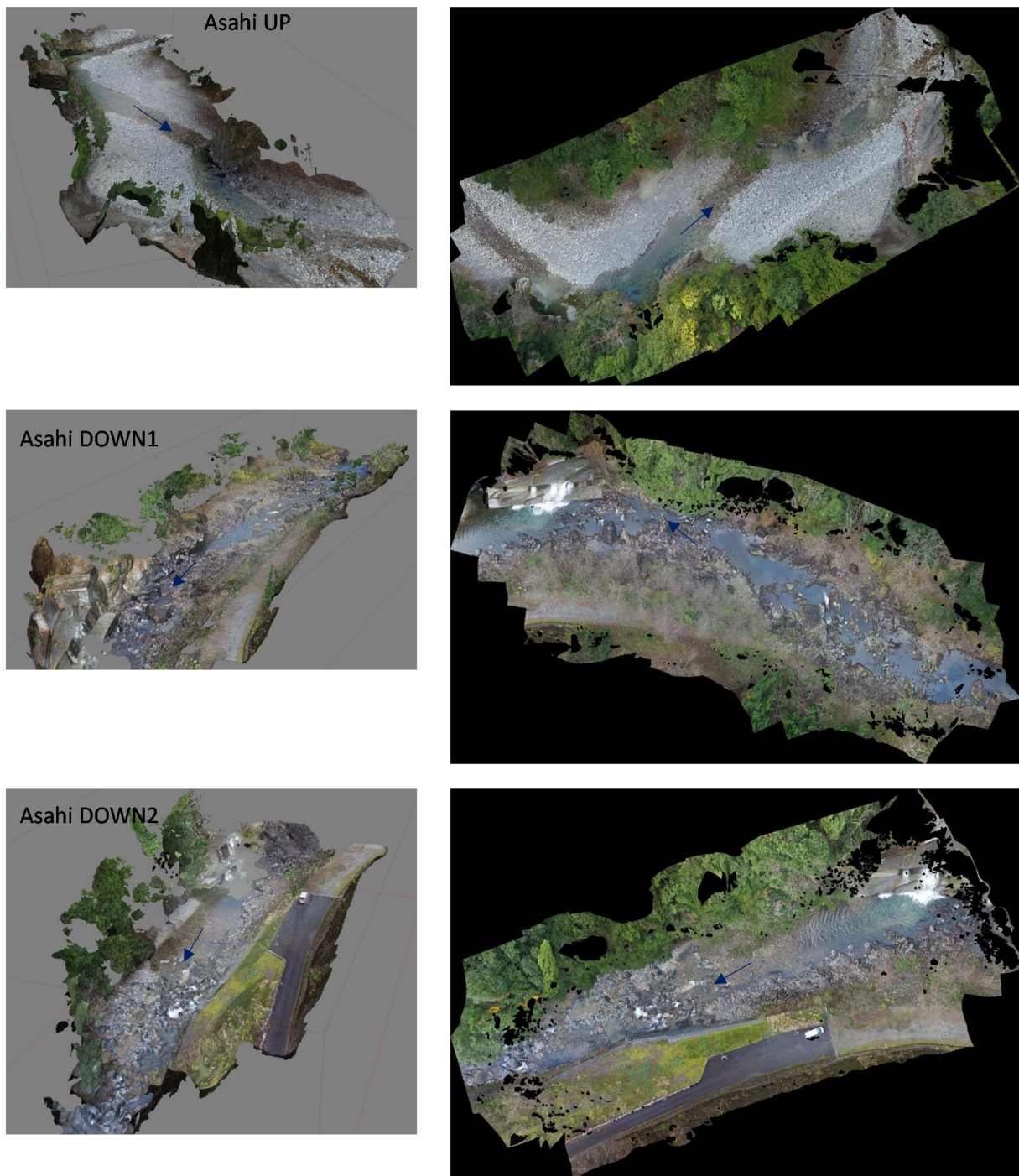


Fig. 5 3D polygonal mesh model (left) and orthomosaic image (right) in 3 reaches of Asahi Dam.
Arrows area flow direction.

も大きかった。UPにおける瀬は縦断的に長いが、DOWN1では瀬は急勾配であるがゆえに短かった。小渋ダムのUPでは、ほとんどが瀬のような縦断的な地形であったが、水衝部にあたる部分は景観的な淵が発達していることを現地で確認している。

3.3 横断形状

各区間における横断形状として、瀬と淵のそれぞれ

れにおいて上流、中流、下流の3横断線を抽出した (Fig. 6と Fig. 7の中央と右側のグラフ、なお、各ラインの中央部は水中にあたり、写真測量では誤差が大きい可能性がある)。瀬と淵では、土砂量に応じた形状の変化の仕方が異なっていた。例えば旭ダムにおいて、土砂堆積の多いUPとDOWN2では瀬における河床は平坦で、川岸の駆け上がりの勾配はそれほど急ではないのに対して、DOWN1では瀬は深掘れし川

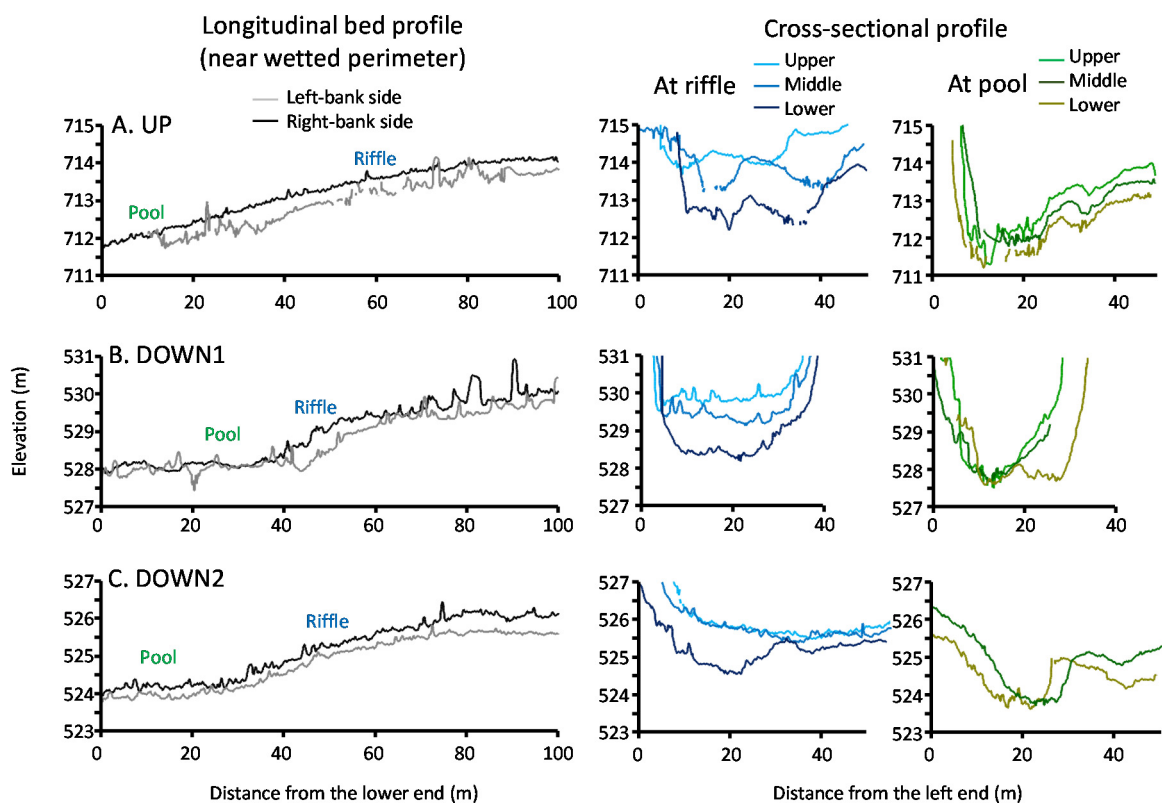


Fig. 6 Longitudinal (left) and cross-sectional (middle, right) bed profile in 3 reaches of Koshibu Dam.

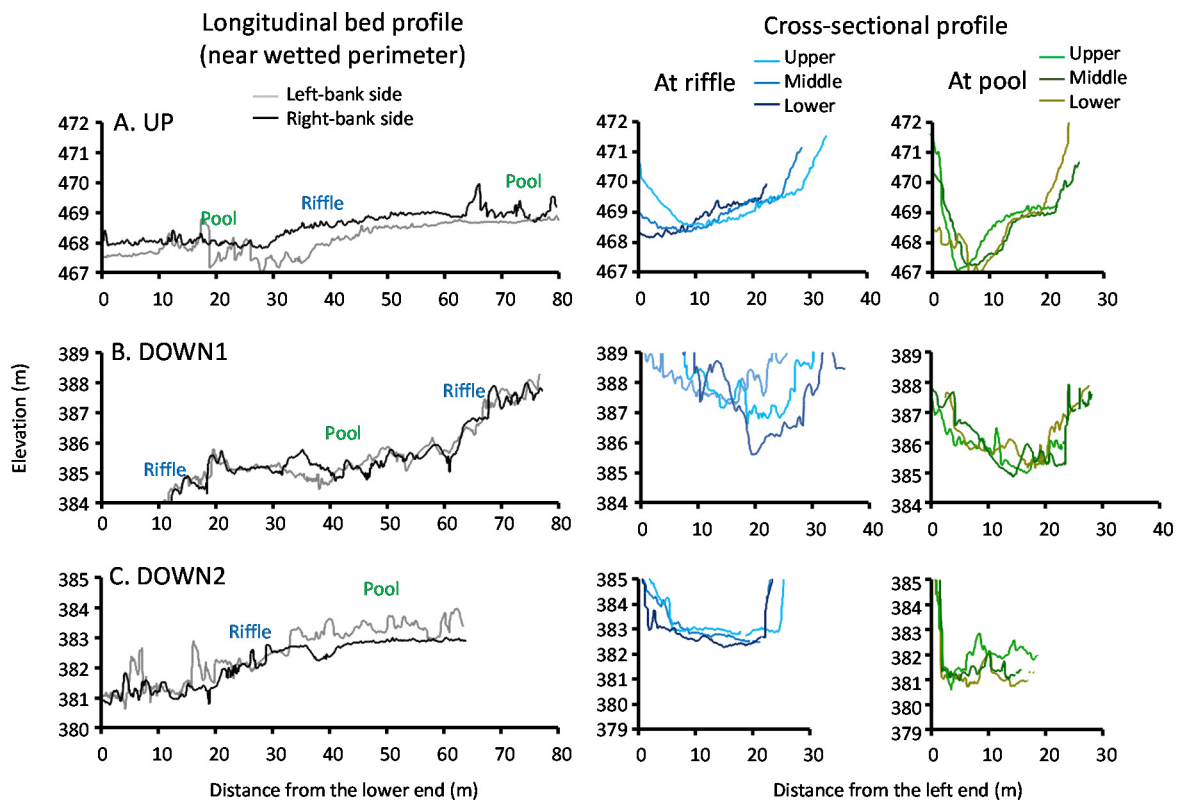


Fig. 7 Longitudinal (left) and cross-sectional (middle, right) bed profile in 3 reaches of Asahi Dam.

岸も急であった。小渋ダムではUPにおいて中州の発達のために河床が平坦には見えないが、それでも川

岸の駆け上がりの勾配は緩やかで、DOWN2とは大きく異なった。

淵では逆に土砂堆積の多い区間ほど、特に3つの横断線の中でも上流側における河床は狭窄状であった。例えば、小渋ダムにおいて、上流側横断線の低水路部分を比較すると、DOWN1と比べてUPで狭いのが分かる。旭ダムにおいては全横断線においてDOWN1に比べてUPで低水路部分が狭かった。

3.4 河床粒径分布

小渋ダムにおける河床粒径分析においても区間による違いは明らかであった[Fig. 8]。 D_{60} (60%粒径)は、UPでは73.0mm, DOWN1では219.1mm, DOWN2では124.1mmで、土砂堆積の多い区間ほど代表粒径は小さかった。また、UPやDOWN2に比べてDOWN1では場所間のばらつきが小さく、どこでも粗い粒径であることが分かる。なお、同様の手法で評価した前回調査と比べると、UPではやや粗く(前回は30mm)、DOWN1では同等の粒径であった。DOWN2に相当する場所では前回は調査していない。

4. 考察

SBTを有する小渋ダムと旭ダムの上流と下流の区間においてドローン空撮を行い、得られた画像を用いたステレオ写真測量によって、土砂堆積条件の異なる各区間の砂州形状を再現することができた。

一般に、ある程度の土砂堆積によって砂州が発達する区間では (Fig. 9のlongitudinal profileの中央の状態)、砂州の前縁に相当する場所にある程度の長さを持った瀬(勾配があり流れの速い場)が形成し、その下流に淵が形成する。これに比べ、土砂堆積が多寡である区間では (Fig. 9の左側の状態)、河床縦断形状がより滑らかになり、区間全体として瀬が卓越する。逆に、土砂堆積が不足した河川区間では (Fig. 9の右側の状態)、浸食による岩盤の露出や巨礫が集中分布することで、河床はいびつな形状となり、しばしば淵、瀨、平瀬が長い距離続いた後に急激な段差(急で短い瀬)が生じる。Fig. 10の上段は、本研究で見られた各区間の縦断形状の特徴を模式的に書いたもので、土砂堆積の多い状態はUP、土砂堆積の少ない状態はDOWN1を示し、DOWN2はこれらの中間の状態であった。なお、Fig. 9においてUPは中央、DOWN1は右側の状態を示している。

河床横断的には、土砂堆積が卓越する区間ほど平坦になりやすいと考えられる[Fig. 9のlateral profileを参照]。本研究において瀬ではそのような傾向があり、土砂堆積の多いUPで最も平坦であった。一方、淵ではUPで最も狭窄的な形状で、土砂堆積の少ないDOWN1でU字的であるが最も平坦な形状であった。砂州が発達すると、砂州前縁の下流部など局所的に

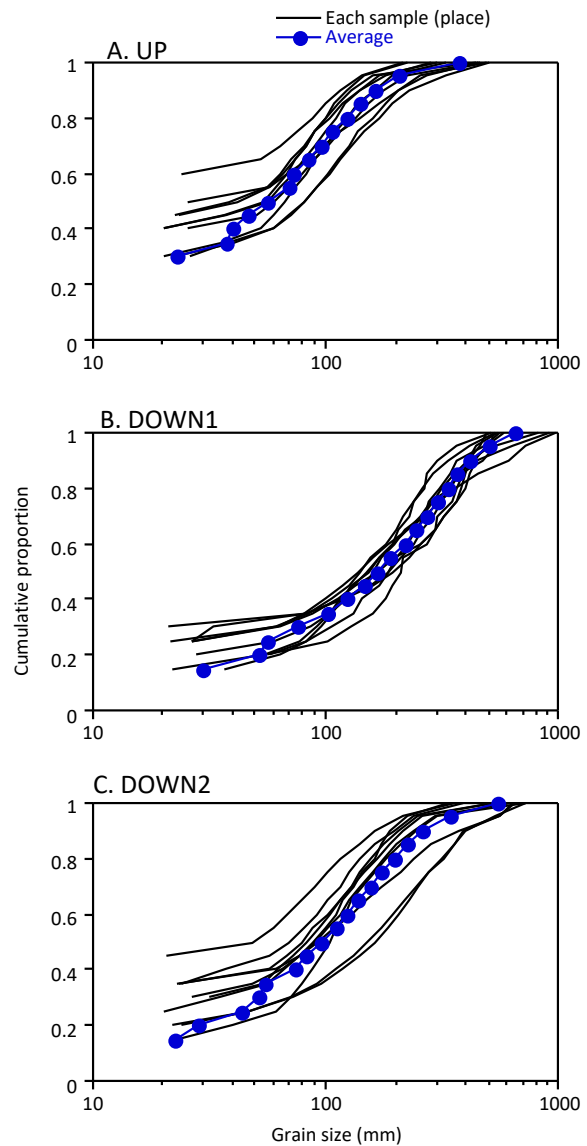


Fig. 8 Grain size distribution (each analyzed place and average) at each reach of Koshibu Dam.

その前縁によって狭窄的な部分が生じるためと考えられる。これを模式的に示したのがFig. 10の下段で、土砂堆積の多い状態はUP、土砂堆積の少ない状態はDOWN1を示し、DOWN2はこれらの中間の状態であった。こうした瀬と淵による違いから次のようなことが推察される。砂州が発達する区間ほど、瀬では河床が平坦であるため流量に対する水位の上昇が緩やかなのに対して、淵では水路幅が狭いので流量に対する水位の上昇が急となりやすい。すなわち、砂州が発達する区間ほど、瀬と淵による増水時の水位変動パターンの違いが大きく、増水時の流れの変化の仕方がより複雑である。

本研究において土砂堆積条件による砂州形状の違いが、水際河床の縦断プロファイルや瀬や淵の横断プロファイルから評価できることが示された。本研

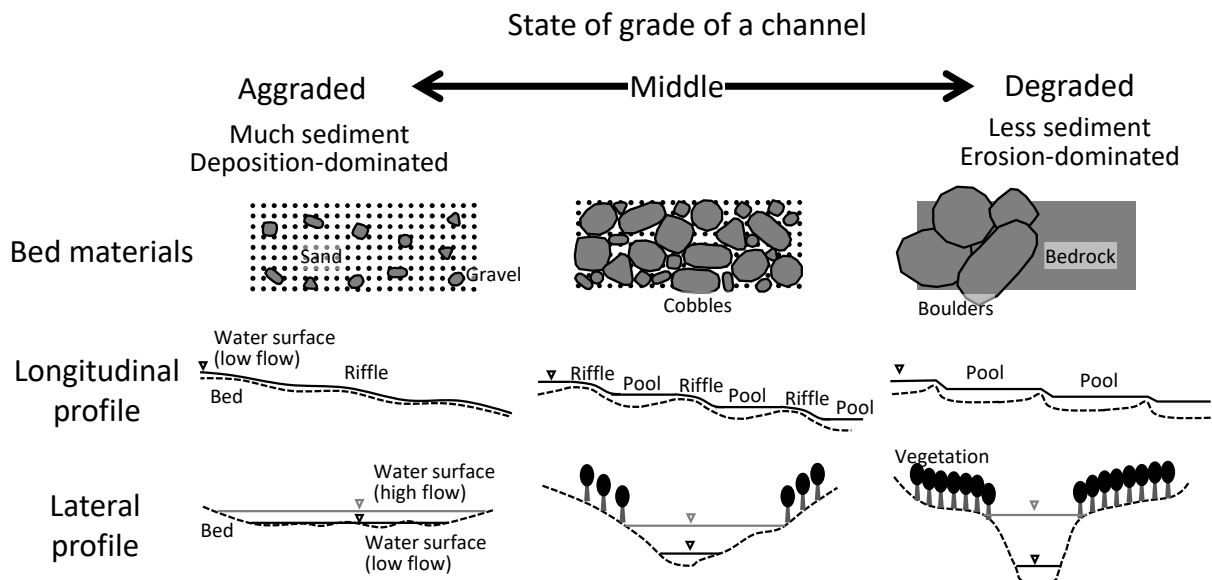


Fig. 9 Schematic view of relationship between channel gradation and bed topography (hypothesis).

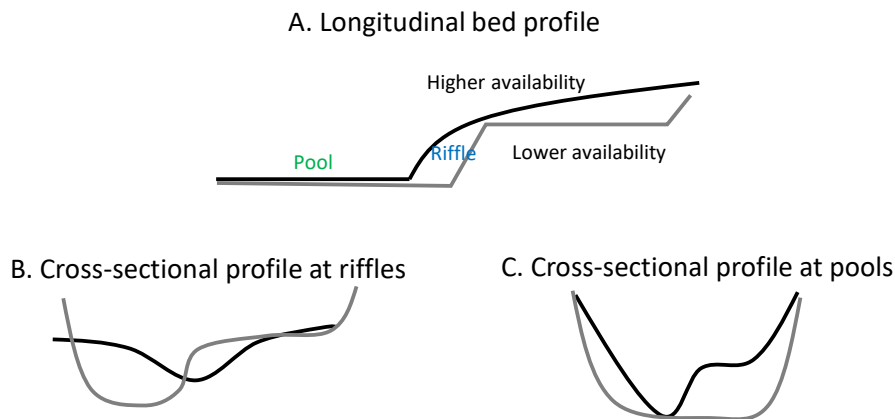


Fig. 10 The difference in bed profile between high and low sediment condition revealed in this study.

究では形状の記載に留まったので、今後こうした形状を数値的に示す何らかの指標を考えていくことが、砂州形状の評価を発展させる上で必要である。

5. まとめ

SBTのある小渋ダムと旭ダムで土砂堆積条件の異なる複数の河川区間で河床地形調査を行った。ドローン空撮によって得られた画像で写真測量を行い、それによって砂州形状を再現し、土砂量との関係を示すことが可能であることを示した。土砂堆積が多く砂州が発達する区間ほど、滑らかな縦断形状で瀬に相当する部分が長く、また横断形状において瀬では平坦である一方淵では狭窄的な形状であることが示された。本研究では砂州形状の記載に留まったが、今後は数値や新たな指標に基づき、砂州形状の評価がさらに発展することが望まれる。

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。また小渋ダムの現地調査及び河床粒径分析にご協力・担当いただいた防災研究所技術室の中本氏、荒上氏にお礼を申し上げる。

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.
- 小林草平・角哲也・竹門康弘 (2016) : 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－, 京都大学防災研究所年報, 第59号B, pp. 508-516.
- Auel, C., Kobayashi, S., Takemon, Y. and Sumi, T. (in press): Effects of sediment bypass tunnels on grain size distribution and benthic habitats in regulated rivers, *Journal of River Basin Management*.
- 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.
- Kondolf, G.M. (1997): Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels, *Environmental management*, Vol. 21, pp. 533-551.
- 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 : 2017年6月13日)