

山地河川における河床変動と 魚道の流入土砂量の制御

RIVERBED VARIATION AROUND A WEIR IN A MOUNTAINOUS RIVER AND CONTROL OF SEDIMENTATION IN A FISHWAY

和田 清¹・橋口喬太²・藤田裕一郎³

Kiyoshi WADA, Kyota HASHIGUCHI and Yuichiro FUJITA

¹正会員 工博 (独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 教授 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2)

²学生会員 (独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 専攻科 先端融合開発専攻

³フェロー 工博 岐阜大学名誉教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

The purposes of this study are to clarify observationally riverbed variation around a weir in a mountainous river and sedimentation in a fishway attached it during a fairly large flood and to grasp the influence of flood flow over the weir on sediment flush in the fishway. Both of the ordinary surveying by a total station and the photographic surveying from UAV (Unmanned Aerial Vehicles) by using image analysis softwares were carried out in order to estimate topographical changes in the riverbed and in the fishway deposits. Riverbed degradation occurred in the upstream reach from the weir, which became severer in the upstream direction, implying insufficient sediment supply from the upper reach to an equilibrium riverbed condition here while changes in riverbed topography is slight near the weir. During the flood, sediment deposits in pools of fishway were flushed away in the upstream ones while increased in several ones in the downstream part, indicating somewhat complicated influence of the flood flow on the flushing action in the fishway pools. A 2D shallow water analysis was applied to clarify the influence, and flood flow down the weir reproduction calculation of the analysis, it is pointed out the mutual influence between a flood flow and an overflowing water in the fishway.

Key Words: fishway, sedimentation, flood flow, interaction of riverbed, UAV, ArcGIS

1. はじめに

河川の魚類生態系を保全することは、環境機能の維持に大きく関係しており、河川管理上重要な課題の一つである。河川に設置される魚道は、ダムや堰などの高低差が生じる場所において、魚類の遡上や降下を可能とすることを目的として設置される構造物である¹⁾²⁾。しかしながら、経年的にその機能が失われていくことも多い。岐阜県内の河川には673ヶ所に魚道が設置されており、平成25年度の調査³⁾によると、良好な魚道はその約2割であり、約4割で改修が必要とされた。つまり、十分に機能していない魚道が数多く存在していた。それらの主な原因としては、魚道内や出入り口に土砂・流木が堆積して魚類の移動が妨げられる場合や、魚道本体の破損が著しい場合、さらに局所洗掘や河床低下によって魚道上り口の落差が大きくなって遡上が困難になる場合が挙げられている³⁾。

これらの原因の中で、土砂・流木の堆積は維持管理の重要性を示すものであり、本体の破損や河床低下などによる機能低下と比較すると、容易かつ短期間に対策が可能であり、早期の機能回復が見込める。入口および出口部に土砂が著しく堆積すると、魚道は魚類の遡上・降下の経路として利用されにくくなり、また、魚道プール内に土砂が堆積すると、魚類は越流部を遡上後、適度な休憩を取ることができず、かつ、流水の減勢が十分ではなくなって、下流ほど高速流になったり、揺動が激しくなったりして、機能が著しく低下する。

本研究では、土砂移動の大きい山地河川に設置された魚道付きの取水堰(頭首工)の周辺において、洪水時の河床変動量と魚道内の堆積土砂量に関する現地観測およびUAVによる地形測量を行い、洪水時における土砂流送の実態を明らかにした。また、維持管理に資するため、魚道入口への土砂流入状態を考慮した防止策としての河床保護工を試験施工し、効果を確認した。さらに、数値

解析モデルにより、取水堰を越流する洪水流が魚道部の流れに及ぼす影響などについて検討を行い、魚道と河道の相互作用について考察して新たな知見を得た。

2. 研究方法

対象河川の牧田川は、岐阜県大垣市上石津町から養老山地を迂回して養老郡養老町を流れ、安八郡輪之内町で木曽川水系揖斐川に合流する一級河川である。対象魚道は、牧田川上流区間の田村頭首工（川幅50m、落差1.5m、前後の平均河床勾配1/100）であり、両岸から取水されている。右岸取水路の前面に設置された魚道は、流入した流水のエネルギーをプール部で減勢するプールタイプ構造となっている（図-1参照）。洪水規模を把握するために、メモリ式水位計（S&DL mini）を堰の約20m上流左岸法先に設置し、大気圧補正をして水位データに換算した（計測間隔10分）。なお、調査期間中の台風16号による9/19～20の2日間における観測点（大垣）の総降水量は150.0mm、最大1時間降水量は29.5mmであった。

洪水前後の河床変化量の算定のため、UAVによる空撮およびトータルステーションによる地形測量を実施した。河道のUAV画像の立体化には画像解析ソフトウェア（Photo Scan Pro）を用いた。このソフトはUAV画像をポイントクラウドという位置と高さの情報をもつ点の集合体にして、ポイントクラウドの点を繋ぎ合わせることで3次元画像を作成する。作成した3次元画像に任意の座標データを入力すると、標高値を補完で得ることができる。得られた複数の所定座標の3次元画像をソフトウェア（ArcGIS）で比較することで地形変化量の推定が可能になる。これにより、河床形状の変化及び魚道の堆積土砂量を推定した。なお、UAVの空撮では、キャリブレーション用の基準点やプレートを地上及び水面下に35ヶ所設置し、それらの画像を解析ソフトによる画像多重合成によって地形情報を3次元化した。

魚道プール内の堆積土砂量は自作したフレームにより計測の補正に利用した。魚道の設計図面より魚道のプール部の寸法（1.0m×1.7m）に合わせたスチール枠を作製し、縦横25cmピッチでワイヤーを張って25cm四方のマスを24個（6列目のみ20cm×25cm）設けた。この枠を10ヶ所のプール部それぞれに載せて、全40ヶ所のマス目の角において堆積土砂面から側壁天端までの高さをスケールで測定した。角4点の平均高さから個々のマス目堆積土砂の体積を求め、計24個の総和を各プール部の堆積土砂量とした。

さらに、堰上流部の滞筋、右岸側の砂州による流速分布や堰下流側の微地形（巨石や岩盤の凹地など）によって河道から魚道へ向かう洪水時の流れの影響などを考察するために、平面2次元流れ解析を行った。解析にはiRIC Nays2DHのソルバーを用いて、上述した地形測量

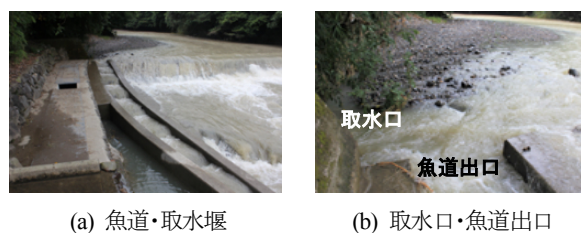


図-1 田村魚道（牧田川）

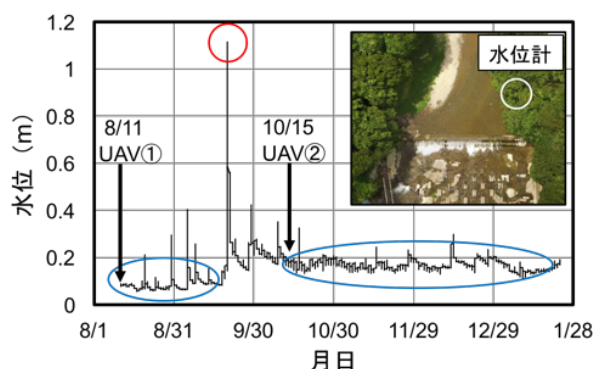


図-2 出水前後における水位変動（牧田川）

結果から得られた3次元座標データを数値地形モデルとして設定し、洪水時（流量70～300m³/s）の流況を推定した。ここで、洪水のハイドログラフをステップ状の離散的な流量に分割し、流況が安定した定常状態の値を採用した。計算条件は、マニングの粗度係数： $n=0.02\sim0.03$ ，上下流端の河床勾配： $i=1/100$ などとした。なお、洪水時の平面2次元的な流速分布に着目しているため、河床変動解析は実施していない。

3. 出水履歴及び河道の河床変動の把握

(1) 台風前後でのにおける出水履歴

水位計は密閉式であるため、大気圧補正をする必要がある。水位計で測定したデータには、水圧に加えて大気圧が付加されているため、大気圧計によって得られた大気圧をデータ圧から差し引く必要がある。そのようにして得られた台風16号による洪水前後の水位変化を図-2に示している。なお、水位の基準点は魚道出口の側壁天端としている。平水時では10～20cm程度の越流水深であることに対して、台風16号（930hPa、最大風速50m/s、牧田川下流合流点の文篠橋での最大水位6.87m）の出水では、1.1mの最大水位が記録された。平水時と比較すると約1mの増水であることがわかる。

(2) 画像解析による河床形状の把握

洪水期間における土砂流送の概要を把握するために、解析ソフトArcGISを用いて河床縦横断面図を作成した。河床縦断面図は堰中央を通過する、堰から下流に35m、上

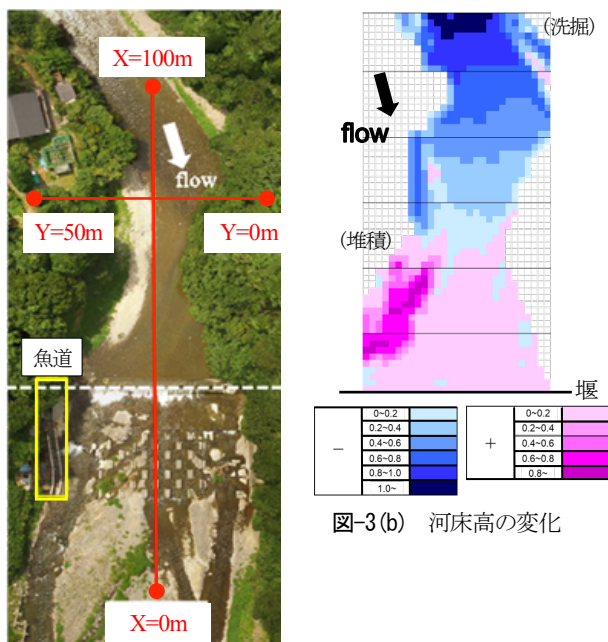


図-3(a) 河床断面図の作成

流に65mの100mの範囲、横断面は堰から上流40mの右岸に砂州が広がっている箇所の幅50mの範囲である。

図-3(a)は出水前(8月)の河道の状況を示したもので、縦横断面図の位置も記入してある。また、図-3(b)は出水前後の河床データから1m四方の河床高を示したものであり、上流側では河床洗掘、下流の堰周辺では堆積傾向にあること、出水で堰上流の右岸側に発達していた砂州が縮小したことなどがわかる。出水前後の河床縦断形状の変化を図-4に示している。同図から、洪水後、堰から上流に20mの範囲までは河床高に変化は見られないが、そこから上流に向かうほど大きな河床低下が生じている。低下量を詳細に見ると、30m地点で約0.2m、40mで約0.4m、50mで約0.6m、60mでは約1.0mとなっている。一方、堰直下部から下流に10mの範囲と護床工ブロックの下流10mの範囲では僅かな堆積が見られる。これらのことから、洪水時の掃流力の増大に見合うだけの土砂供給がなかったため、上流部では河床が低下し、それで増えた流送土砂量が堰直上流での掃流力に見合ったものとなったため、河床高が維持されたものと考えられる。

図-5は堰から上流40m地点の河床横断形状を出水前後で比較したものである。左岸側では約0.2~0.4m、右岸側で約0.4~0.7mと、全断面にわたる河床低下が確認でき、洪水期間には河床から多量の土砂が供給されたことがわかる。右岸側では、砂州の部分も0.7m以上と大きく河床が低下している。図-3からもわかるように、この砂州は緩弯曲部の内岸に形成されていた比高0.3~0.4m程度の、容易に冠水する規模のもので、約1m水位が上昇した今回の洪水時には、その上面でも土砂は十分に移動したと推察される。しかしながら、上流からの土砂供給が少なかったために、結局、砂州も全体が洗掘されるよ

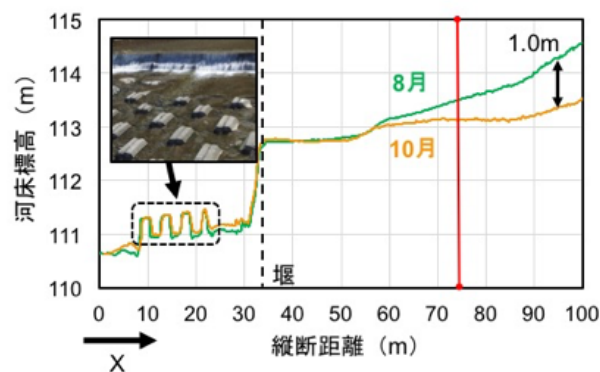


図-4 河道縦断方向の河床標高

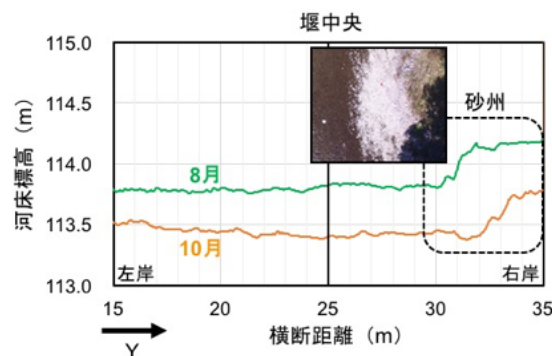


図-5 河道横断方向の河床標高(堰上流40m)

うな広範囲での河床低下が生じたものと考えられる。上流部の河床からの供給を受けて増加した流送土砂は、ほとんどが堰下流部から流下し、一部は魚道にも流入したと推察される。

4. 魚道内の堆積土砂量の算定

前述の方法で、洪水前の8月に各プール部の堆積土砂量の測定を行い、台風16号通過後の10月にも同じく測定を実施した。最上流のプール部をNo.1として順次付したプール番号を記入した魚道の全体状況を図-6に示す。

図-7には、出水前後での堆積土砂量の測定結果を比較している。No.1は本川から流送土砂が直接流入する箇所であるため、ほぼ常に堆積状態であり、土砂量も他のプール部より多い傾向にある。8月測定時のNo.2のプール部で土砂が少ないのは、測定を行う前に取り除いたためである。なお、洪水後の計測時、No.11では側方の取水路の余水吐きからの流水の影響で測定できなかった。洪水後のNo.2~5では0~0.05m³と土砂の堆積はほぼ見られず、大きく減少している。No.6では2倍以上に堆積量が増加しているが、No.7では減少、No.8では同程度となっていて、No.9、10では増加している。上流側のプール部で堆積量が大きく減少した理由は、洪水時に流量が増大したものの流入土砂量が少なく、プール内の土砂が

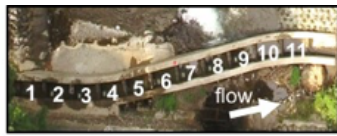


図-6 魚道プール

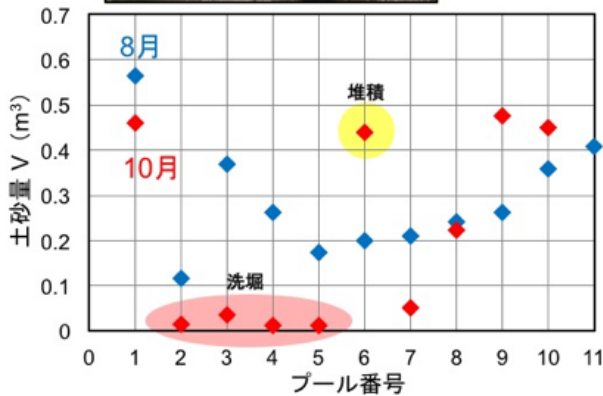


図-7 出水前後の堆積土砂量の比較

越流水でフラッシュされたことによると思われる。また、No.6で堆積量が増加した原因としては、河道にある段差のために魚道側壁と河床との比高が小さくなっている箇所であって、魚道部の流れが河道流の影響を受けることや、河道流砂が流れ込んだことが考えられる。前者は、横からの流れで魚道内の土砂をフラッシュする流れが妨げられた可能性であり、後者は河道からの横方向の流れに伴って巻き上げられた土砂が流入する可能性である。No.6の側壁天端と河床の高低差が約0.8mであることに対して洪水時の水位上昇は1m以上であるため、河道から魚道に向かう流れの影響を受けた可能性は高い。No.7とNo.8では再び堆積量が減少しているのは、河道からの影響が収まるとともにプール内の土砂フラッシュ流れが回復するためであろう。また、側壁の比高が大きくなって土砂の横流入が少なくなる影響も考えられる。これらについて、次節で河道部の流れの影響に検討を加えるが、今後、魚道プール内の土砂フラッシュ流れを詳しく検討するなど、さらに、可能性を追究していきたい。

No.9とNo.10のプール部の堆積量の増加については、側壁天端と河床の高低差が約0.4mと低く、また、魚道がやや中央向きになっていることや、粒径200mm内外の大きい砂礫も多数入っていることから、洪水時に河道から側壁を乗り越えて流入したものと判断される。

5. 平面2次元解析による魚道方向流れの検討

プール部No.6のみにおける堆積土砂量の増加と側壁が相対的に低いという現地の状況から、河道からの流れの影響で魚道プール内の土砂をフラッシュする流れが阻害されている可能性を指摘した。そこで、実際に魚道に影響を与えるような流れが洪水時に発生しているか否かを確認するために、堰上流60mから堰下流30mの範囲を対

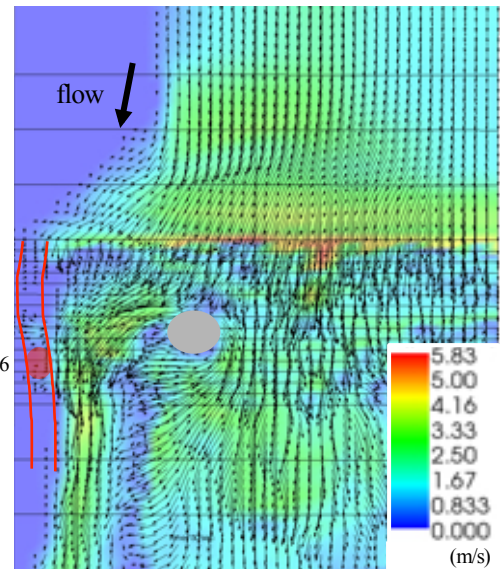
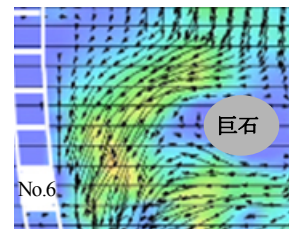
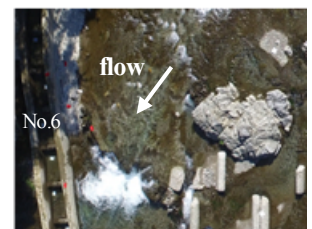


図-8 河道から魚道方向への流れ



(a) 解析結果



(b) UAV画像

図-9 巨石・段差が魚道に及ぼす影響

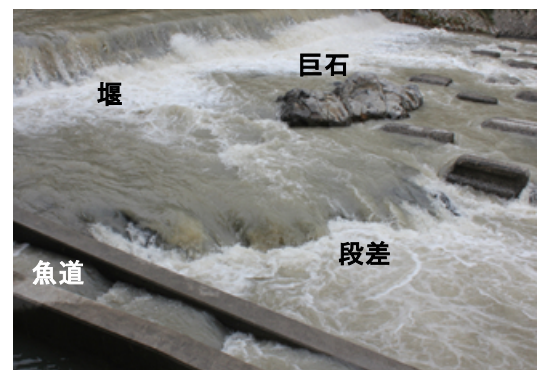


図-10 魚道周辺の微地形 (巨石・段差)

象として、iRICNays2DHのソルバーを用いて平面2次元数値解析を行った（流量：70～300m³/s）。なお、洪水流量の増加により魚道入り口の単位幅流量の増加が確認されている。図-8に流量70 m³/s時における流速と流れベクトルの解析結果のうち、魚道周辺についての平面分布を示す。堰上流からの流れは、河川中央に近い場所では堰に対して垂直、魚道出口に近づくにつれてそこに向かって流れていることが確認できる。これは、堰直上流部の微地形を反映したものであって、流送土砂の一部が魚道や隣の取水路に流入する可能性も示唆している。

図-9は、堰下流部の魚道および巨石周辺について、解析結果と画像を比較してのものである。これらの図から、堰を流下した高速流が巨石によって左右に二分され、右岸側へ向かう流れは、魚道プールNo.6を中心に周辺の側

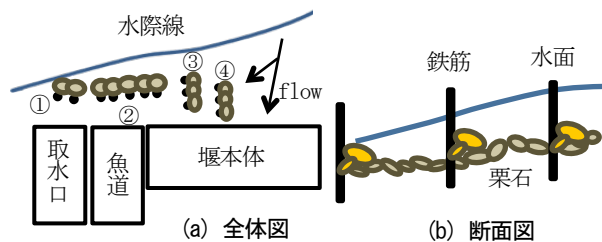
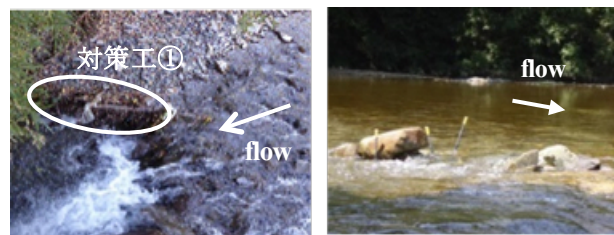


図-11 簡易河床保護工の施工イメージ⁴⁾⁵⁾



(a) 取水口上流部 (b) 差し筋

図-14 取水口上流部及び河道部

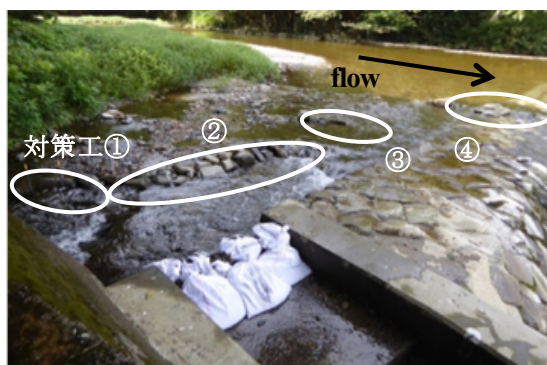


図-12 土砂流入防止対策（洪水前）



図-13 土砂流入防止対策（洪水後）

壁に衝突して下流に向きを変えるが、一部は側壁を乗り越えて魚道を横断する流れとなって、魚道内の流れに影響を与えていることがわかる。もう一方も巨石を回り込んで右岸へ偏向し、再度合流しつつ段差で加速された後に魚道下流部に斜交するような流れとなっている。この斜交する流れも流速 2.5m/s を超えていて、十分土砂を魚道内にもたらしうると推察される。

6. 土砂流入の防止対策

平面2次元解析の結果でも述べたように、堰上流の流れは魚道出口（流込み口）に近づくにつれてそこに向かっていく。これは、河床が堰上流面に沿って堰天端よりも低い魚道の流込み口に向かって下がっていることによる。魚道内部への土砂流入対策として、通常は流込み口近くに角落しや土砂吐きなどを設置して強制的に流入



図-15 魚道の堆砂状況（堰内砂防堰堤）

を防止したり、排出したりする方法が採用されているが、実状に沿った簡易な工夫で土砂流入を軽減できれば維持管理が容易になる。現況は、取水口の水路床高が河床面よりもかなり低いため、平水時でも取水口に向かってかなりの横断勾配で勢よく流れ込んでおり、河床材料が小さいため、ちょっとした出水でも周辺河床が浸食され、それだけ上流からの土砂も引き込まれる量が増加して魚道に土砂が生じるようになっている。そこで、上流からの土砂はできるだけ堰を流下させるようにするため、河床を覆瓦構造で積み重ねた 250mm 以上の栗石で保護することとした。すなわち、堰に直角方向に 25cm 程度の間隔で鉄筋を数本打ち込み、その間に栗石を並べたものを魚道に向かって3、4列設置して上流側の河床安定化して、流入土砂量の軽減を図るものである。この簡易河床保護工の施工イメージと設置位置①～④を図-11に示す⁴⁾⁵⁾。本研究では本川から魚道への土砂流入防止策として、施工イメージに基づいた簡易河床保護工を出水前の8月に、岐阜県大垣土木事務所と岐阜県自然共生工法研究会の協力を得て設置した（図-12参照）。

洪水後の10月に土砂流入防止策の確認を行ったところ、本川の主流が作用する堰中央に近い場所④では栗石が流失していたが、①～③は残っており、防止策としての機能は維持されていたと思われる（図-13参照）。実際、魚道内部の土砂堆積量は上流側のプール部を中心に全体として大きく減少しており、土砂流入をかなり制御したものと判断できる（図-14(a)参照）。

図-15は、揖斐川水系の坂内砂防堰堤において、魚道プール内に堆積した土砂の状況を示したものである。同図からわかるように、土砂生産が多い坂内砂防堰堤では田村魚道以上に横断構造物による土砂の魚道への流入が

課題となっている。魚道プールに堆積した土砂をフラッシュする流れをいかに利用するか、あるいは魚道出口に土砂が流入しにくい構造物の設置などにより、魚道周辺の流れの構造を把握して対策に結びつける必要がある。

7. おわりに

本研究では、UAVおよびトータルステーションによる測量と解析ソフトを用いた画像解析によって、河道および魚道内の3次元的地形形状の変化を明らかにした。これらにより、堆積していた土砂が一掃される魚道プールのある箇所と逆に堆積するプールのある箇所が生じることが判明した。これは魚道に隣接する河道の微地形（巨石・段差）に支配された洪水流の特性が大きく影響していることが推察され、数値解析により、河道から魚道に向かう流れとして確認された。今後、プール内の土砂フラッシュ流れなどについてもさらに検討を深めたい。

魚道への土砂流入は、上流の魚道出口ばかりではなく、その途中から生じる場合があることも今回の事例は示している。以上のことから、魚道設計において、本川側からの様々な影響を十分考慮することの必要性が改めて示された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、現地観測や設計図面の提供などについては岐阜県河川課、既設魚道の改善策の現地調査については岐阜県自然共生工法研究会、魚道研究専門WGの方々にご協力をいただいた。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 俊六：魚道のはなし，リバーフロント整備センター，山海堂，pp.225-226, 1995.
- 2) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，155p., 2005.
- 3) 奥田好章：岐阜県内における魚道点検結果の分析と補修工法の提案（中間報告），岐阜県自然共生工法研究会，pp.3-10, 2013.
- 4) 岐阜県自然共生工法研究会魚道研究専門 WG：平成 27 年度第 2 回魚道研究専門 WG 議事録（案），岐阜県自然共生工法研究会，2015.
- 5) 和田 清・藤井克哉：岐阜県魚道カルテの評価軸の分析と既設魚道の改善策，土木学会環境システム研究論文集，vol.43, pp.337-342, 2015.

(2018. 4. 3受付)