

温井ダム下流河川における土砂動態の現状と 環境改善のための河道システムの検討

PRESENT STATE OF SEDIMENT REGIME IN THE DOWNSTREAM
OF THE NUKUI DAM AND INVESTIGATION OF RIVER CHANNEL
SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT

加瀬瑛斗¹・前野詩朗²・宮崎 貢³
Eito KASE, Shiro MAENO and Mitsugu MIYAZAKI

¹学生会員 工修 株式会社ウエスコ 環境計画事業部 (〒651-0092 神戸市中央区生田町2-2-2)

²正会員 工博 岡山大学大学院教授 環境学研究科社会基盤環境学専攻
(〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)

³非会員 国土交通省中国地方整備局温井ダム管理所 所長
(〒731-3501 広島県山県郡安芸太田町大字加計1956-2)

After a dam construction, the armor coat progresses in the downstream of the dam, and it reduces the original river environment. It is therefore very important to investigate the sediment state such field and propose an effective river restoration method. To investigate river channel characteristics, field observation of the bed material was carried out in the downstream of the Nukui Dam, and one dimensional flow analysis was performed. Numerical and observed results showed that the river width and the bed slope were the main factors to control the sediment regime. Then, the bedrock and sediment supply by the mountain stream might be secondary factors. We arranged the feature in the field of each factor, and proposed the policy of river channel modification.

Key Words : *downstream of dam, armor coat, bed material survey, sediment regime, bedrock, sediment supply, river channel modification*

1. はじめに

ダム建設による下流河川の自然環境への影響が着目されている¹⁾。ダムの建設・供用に伴う下流河川の代表的な物理環境の応答として、「流況の変化」²⁾と「土砂供給の変化」³⁾が挙げられる。前者は、洪水時のピーク流量の低減、洪水頻度の減少、平水時の流量変化などであり、後者は、ダム地点より下流への土砂供給量の減少、供給される粒径の変化などである。これらの変化により、下流河川では、河床の攪乱域・攪乱頻度の減少、河床低下や粗粒化などが生じる。物理環境の変化は、そこに住む生物の変化を招く。例えば、河床攪乱作用の低下による砂州への樹木の侵入や、粗粒化による魚類生息数の減少、流砂の河床研磨作用の低下による付着藻類の剥離更新阻害などがあり、既に多くのダム下流河川で指摘され、最近ではそれらの問題が一般化されつつある⁴⁾。これらの問題に対して、ダムによる変化の影響を軽減し、人為的に物理環境を改善するための試みとして、近年、ダムの弾力的管理（フラッシュ放流）⁵⁾や、土砂還元⁶⁾などの環境改善施策が行われるようになってきた。

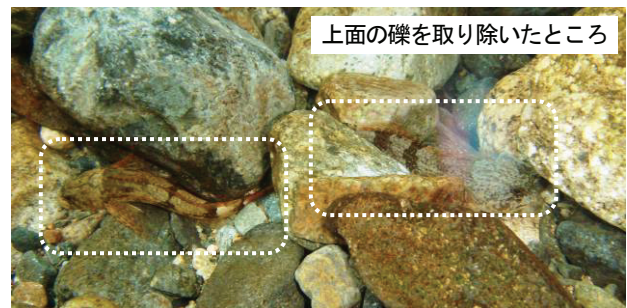


図-1 身体にフィットする礫間空隙を必要とするカジカ

本研究で対象とする温井ダムは、下流域の洪水防御、用水確保等を目的として、2002年に完成した比較的新しいダムであるが、下流河川では、一部で前述のような河川環境の変化が現れ始めている。例えば、同河川に生息しているカジカ（広島県RDB 絶滅危惧Ⅰ類）は、成長段階に応じた身体のサイズにフィットする“浮石の間隙”を必要とするが（図-1）、ダム下流河川でカジカの分布を調査すると、ダム堤体から離れた区間（物理環境の変化がそれほど及んでいない区間）では、大きい成魚から小さい稚魚まで様々なサイズのカジカが生息してい

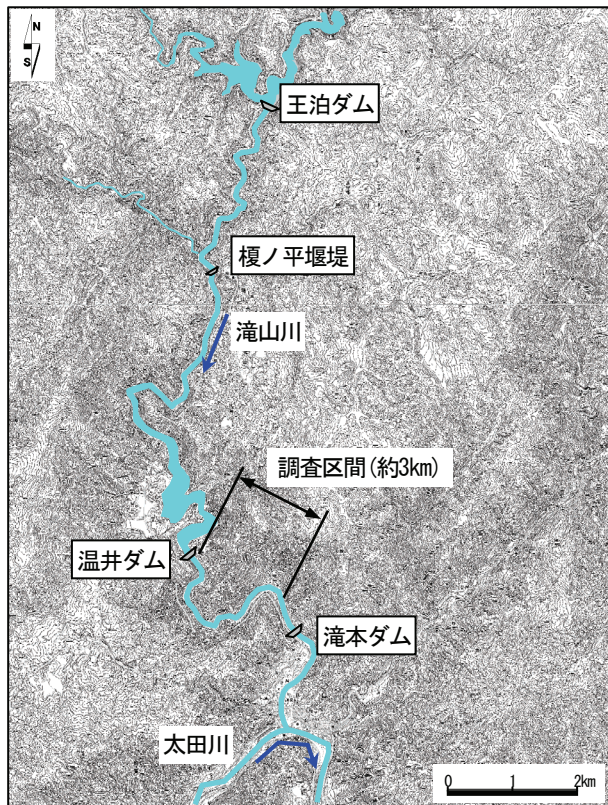


図-2 調査区間

るのに対して、ダム直下では大きいサイズのカジカしか確認されず、数も少ない。これは、ダム堤体から離れた区間では礫サイズも様々で、河床の間隙もそれに応じて分布するのに対して、ダム直下では、粗粒化によって小さい間隙が減少しているためと考えられる。また、表層河床材料の一方向的な減少によって、基盤岩が露出することも懸念される。岩盤河床化は、生物の生息環境の急激な劣化を招くため、これを防ぐための緊急な対応が求められる⁷⁾。しかしながら、温井ダムに限らず、日本において、ダム下流河川の環境変化についての本質的な研究は始まったばかりであり、環境改善施策についても試行錯誤的に実施されているのが現状である⁵⁾⁶⁾⁸⁾⁹⁾。

本研究では、温井ダム下流河川を対象として、ハビタットスケール、縦横断スケールでの、簡易かつ現状分析に必要な精度を有した河床材料分布調査を行い、ダム下流河川の現状把握を行った。また、それを踏まえ、ダム完成後の流況・土砂動態を考慮し、単に土砂を入れるだけでなく、現状河道特性を考慮して、土砂を受け止める器（河道）を改良する、効果的な河道システムの改善手法の提案を行った。

2. 調査区間と方法

(1) 調査区間の概要

調査区間は、広島県を流れる一級河川太田川水系滝山川の温井ダム下流約3km区間である（図-2）。河床勾配

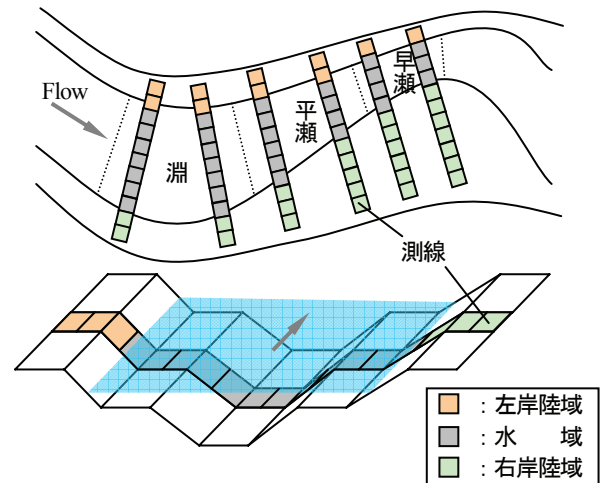


図-3 河床材料分布調査の測線

は、上流部（3.5kmより上流）で約1/60、下流部で約1/100、川幅（河道幅）約50m。滞筋は粒径2m以上の巨石や露岩に支配され、山本¹⁰⁾を参考にすれば、Seg.Mの山地河道に区分される。温井ダムは、太田川水系初の多目的ダムとして2002年に完成した。堤高156m、湛水面積1.6km²、総貯水容量82百万m³のアーチ式コンクリートダムで、堤体は、滝山川5.3km地点（広島県山県郡安芸太田町）に位置する。ダム地点における計画高水流量2,900m³/sのうち、1,800m³/sの洪水調節を行い1,100m³/sが放流される計画となっているが、現状では、下流の太田川が改修途上のため、最大放流量480m³/sで運用している。なお、滝山川には、中国電力により、温井ダム上流に榎ノ平堰堤（1930年完成）、王泊ダム（1935年完成）、温井ダム下流（調査区間下流端）に滝本ダム（1959年完成）が設置されている。

研究対象として本河川を見たときの特徴が3点ある。一つは、支川合流がないことである。調査区間では、数本の小さい沢筋が流入するものの、集水面積は小さく、流量や土砂量を大きく変化させるような支川合流はない。そのため、流量・土砂量は温井ダムの放流量に規定されている。二つ目は、上下流をダムに挟まれているため、土砂動態が理解しやすいこと、三つ目は、ダム建設が比較的新しいため、自然環境に関するモニタリング調査が実施されており¹¹⁾、ダム下流の物理環境と自然環境の変化を比較する材料がある程度存在することである。なお、ダム完成後、河川の物理環境を大きく変化させるような大規模洪水は3度発生している（2004年9月：276m³/s、2005年9月：400m³/s、2009年7月：300m³/s）。

(2) 河床材料分布調査

滝山川における土砂動態の現状を分析するため、ベルトトランセクト法による河床材料分布調査を、2007年9月に実施した。調査区間約3kmの水域を、瀬淵等の流況をもとに83のハビタット¹²⁾に区分し、それぞれのハビタットで、図-3のように、横断方向に各2本の測線を設

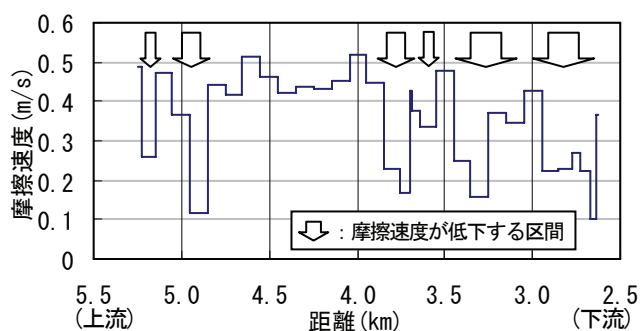


図-4 摩擦速度の縦断分布 ($Q=60\text{m}^3/\text{s}$)

定した（測線位置は、各ハビタットの粒径分布の特徴を示す箇所、例えば淵では最深部と淵尻とし、左岸陸域・右岸陸域・平時の水域に区分した）。測線上で、河床表層に分布する土砂の代表礫径及び、粒径8mm以下の細粒土砂の有無を、約70cm間隔で調査した。

本調査では、以下に示す2つの粒径集団に注目した。一つは、粒径2～8mmで、滝山川においては付着藻類の剥離更新など、河床のクレンジング作用に関して高く寄与していると考えられる材料（ちょっとした増水時でも移動し、河床表層に一時的に存在する材料、藤田¹³⁾を参考にtransient材料と呼ぶ）、もう一つは、粒径8～200mmで、例えばカジカの稚魚の生息に必要な小さな礫間空隙を創出する材料（河床を構成する材料のうち、主流線の脇や緩流域に堆積する材料、sub材料と呼ぶ）である。

(3) 一次元不等流計算

温井ダム下流の現況河道特性量の把握を目的として、一次元不等流計算を実施した。河道の蛇行や形状変化が複雑なため、計算断面は、定期縦横断測量成果（H.15, 200mピッチ）に、航空レーザ測量による地形データ（H.12）（共に国土交通省太田川河川事務所提供）から作成した断面を内挿して補間し、100mピッチとした。計算流量は、 $60\text{m}^3/\text{s}$ （年数回発生する洪水、またフラッシュ放流の最大流量）、 $200\text{m}^3/\text{s}$ 、 $400\text{m}^3/\text{s}$ （3年に1回程度発生する洪水、ダム完成後の既往最大流量）の3ケースとし、摩擦速度を算出した。

3. 滝山川の現況土砂動態

一次元不等流計算で算出された摩擦速度の縦断分布をもとに、現況の滝山川において、理論上、土砂が留まりやすい場所を抽出した。また、滝山川における現状の土砂分布の特徴について、2章(2)で述べた2つの粒径集団に注目して整理した。

(1) 河道特性量から推定される滝山川の土砂動態

図-4に、 $Q=60\text{m}^3/\text{s}$ における摩擦速度 u_* の縦断分布を示す。摩擦速度が小さくなる区間（ここでは、粒径

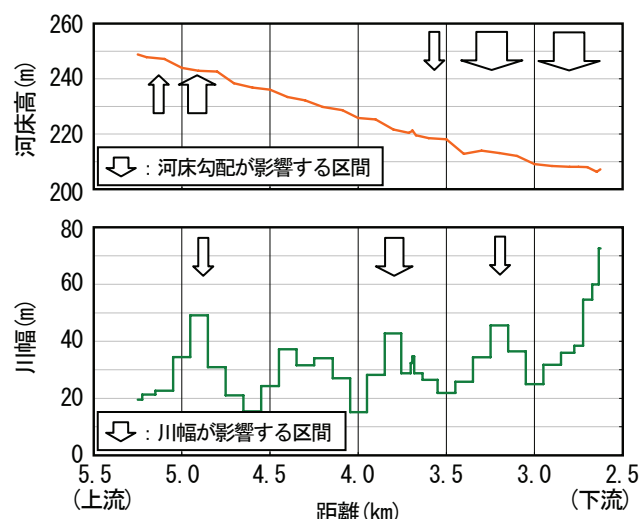


図-5 河床勾配と川幅の縦断分布

200mm以下の土砂が留まる目安として、岩垣公式¹⁴⁾より、 $u_* \leq 0.4\text{m/s}$ とした）は、土砂が留まりやすい場所と考えられる。摩擦速度は、エネルギー勾配と川幅（定期縦横断測量成果から判読した低水路幅）に規定され、①下流部に狭窄部があり川幅が広がっている区間、または、エネルギー勾配＝河床勾配と仮定すれば、②河床勾配の緩い区間に、土砂が留まりやすいと言える（図-5）。調査区間においては、以下の場所が該当した。

- ・ ①川幅大：3.2km, 3.7～3.8km, 4.9km
- ・ ②緩勾配：2.65～2.9km, 3.1～3.4km, 3.6km, 4.9～5.0km, 5.2km

(2) transient材料の分布特性

水域及び陸域におけるtransient材料（以下、t材料）の分布を図-6示す。分布傾向は、陸域（砂州）と水域（渚筋）で異なっており、以下の特徴が挙げられる。

- ・ 陸域：3.3kmより上流では、t材料の減少（河川の縦断方向または横断方向の相対的な減少傾向）は外岸で顕著であり、内岸では認められない。ダム建設後、t材料の供給量が減少した河道で、外岸ではt材料が洪水作用で減少したと考えられる。一方、下流では、t材料の減少は外岸、内岸ともに認められない。理由として、①ダムの土砂貯留の影響が未だ現れていない（土砂供給がない状態が続けば今後現れる）（図-6参照、上下流の分布を比較）、②調査区間で唯一直線的な河道であり、蛇行に伴う流れの集中による外岸側でのt材料の減少が起こり難い（図-6参照、3.3kmより下流の河道形状）、③河床勾配が緩くなる区間であり、掃流力が小さいため減少が起こり難い（図-5上図参照、3.3kmより下流の河床勾配）ことが推測される。
- ・ 水域：t材料の減少は特にダム直下で顕著であるが、沢筋が連続して合流する区間（3.9～4.6km）より下流では、減少傾向が緩和されている。下流部では、t材料の目立った減少は認められない。上流区間での河床発

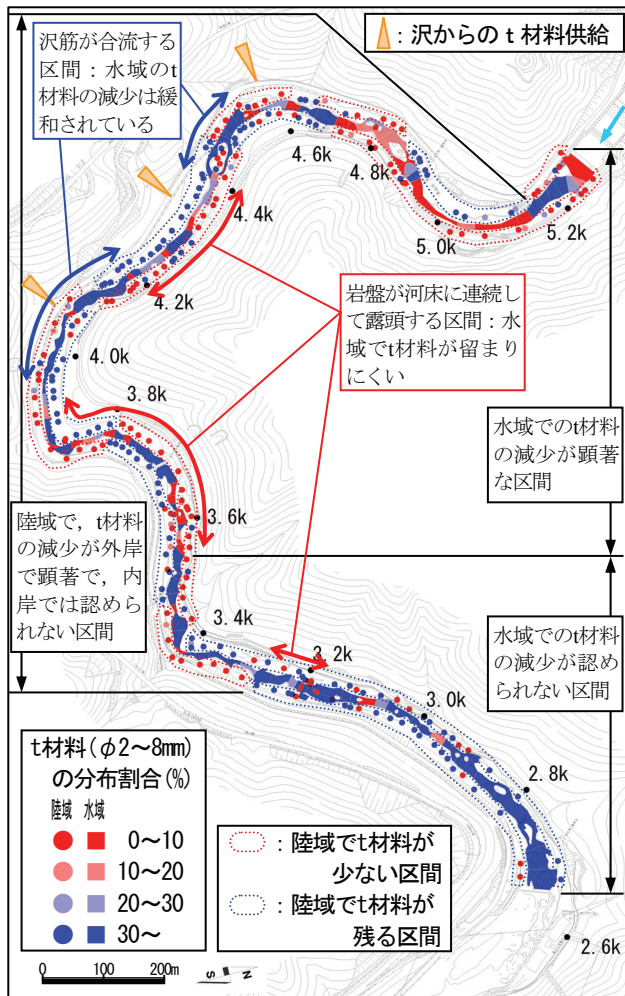


図-6 transient材料分布(陸域・水域)

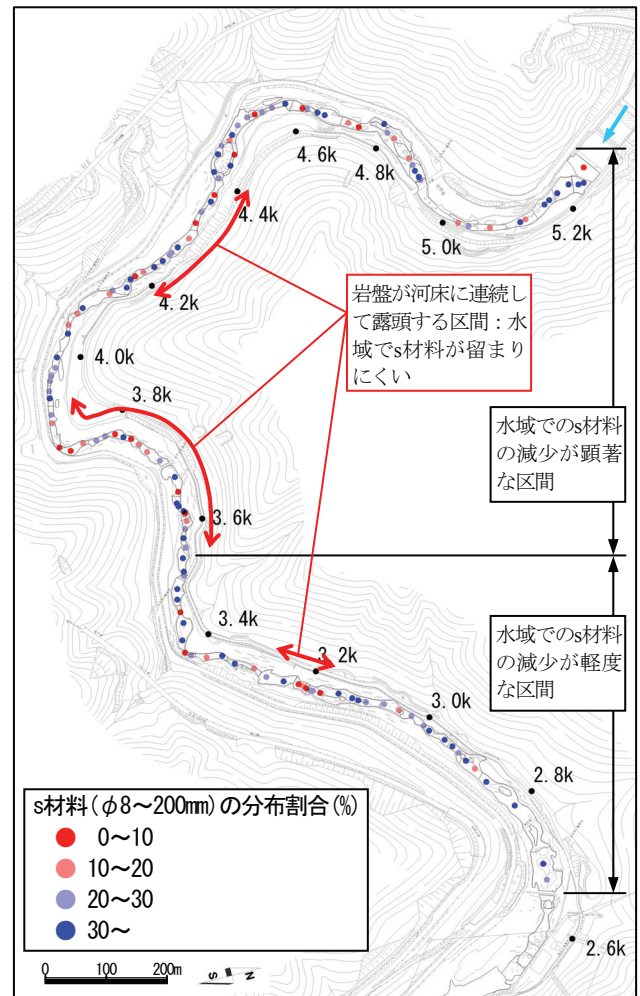


図-7 sub材料分布(水域)

生による供給で、未だt材料の減少傾向が現れていないと考えられる。ただし、上下流問わず、岩盤河床が連続する区間（3.2～3.3km, 3.5～3.9km, 4.2～4.4km）では、t材料は少ない。河床粗度が小さいため、河床材料が留まらない状況と考えられる。

(3) sub材料の分布特性

水域におけるsub材料（以下、s材料）の分布を図-7に示す。s材料の分布傾向は、以下の特徴を有している。

- ・ s材料は、約3.5kmを境に上流側で少なく（減少傾向が顕著）、下流側で多い（減少傾向が緩やか）。温井ダム下流では、（t材料と異なり）s材料の供給がないこと、一次元不等流計算及び、滝山川における着色礫移動調査⁸⁾で、上流部では $Q=60\text{m}^3/\text{s}$ で粒径200mm程度の礫が移動することが確認されており、年数回発生する洪水でも粗粒化が進行すると考えられる。
- ・ s材料は、岩盤河床が連続する区間で少ない。t材料と同じ現象がs材料でも起こっており、流下土砂が留まらないためと考えられる。

4. 土砂分布を支配する要因とそれに対する河道システム改善策に関する考察

(1) 河道システム改善における課題

冒頭で述べたように、土砂供給の変化に対する施策として、近年、土砂還元が試行されている⁶⁾⁹⁾。しかしながら、土砂を投入しても、それがすぐに通過してしまうような河道では、主に流下土砂による河床のクレンジング作用の増加は期待できても、供給土砂の河床堆積による環境改善効果を得ることはできない。また、土砂還元では、主にダム上流の堆砂を使用しているが⁹⁾、例えば温井ダムのように、新しいダムなど、堆砂が進行していないダムでは、土砂の調達が十分ではない（定期的に入手できない）場合も考えられる。また、上流で入手できる土砂の粒径が、下流の要求に合致しない場合もある。このため、現状で沢筋等の土砂供給源がある場合は、それが微量であっても活用することが望まれる。さらに根本的な課題として、ダムによって下流のピーク流量と供給土砂量が相対的に減少している現状を理解する必要がある。これらを考慮すれば、環境改善の観点からは、ダム完成後の河道特性に見合った人為的な土砂供給と共に、

それに見合う器（河道）を準備することが必要になると考えられる。

(2) 土砂分布の特徴と河道システムの改善策

数値計算による予測（3章(1)）で推定された土砂動態と、現地調査による河床材料分布（3章(2)及び(3)）を比較すると、両者が一致する場所（計算予測上、摩擦速度が小さく、土砂が留まりやすいと考えられ、現地でも土砂の減少が緩やかな場所。例えば2.65～2.9kmは摩擦速度が小さく（図-4）、現地でも小粒径土砂の減少傾向が見られない（図-6、図-7））と、そうでない場所に分類される。一致した場所では、土砂分布は河道特性に大きく影響されていると推測され、a.川幅、b.河床勾配が、相当に支配的であると考えられた。他方、一致しない場所では、河道特性以外に、現地の土砂分布に影響を与える条件として、c.岩盤河床、d.沢筋の合流が、副次的要因として考えられた。それぞれについて、滝山川における現地の特徴と、河道システムの改善施策のポイントを整理する。

a) 川幅

特徴：滝山川では、上流部の瀬を中心に滞筋の水面幅が5～10mと小さく、また、滞筋と砂州の比高が大きいいため、大規模洪水を除いて狭い滞筋に流れが集中する。このため、滞筋の掃流力が大きくなり、河床材料が流出する（留まりにくい）と考えられる。

施策の方針：滞筋の水面幅を拓げる（widening）ことにより、掃流力を小さくする方針が持たれる（図-8）。掃流力低減を目的とした拓幅は、ドイツやスイスで実施されている¹⁵⁾。拓幅する際は、併せて、拓幅後の流れが単調にならないように（アユやアマゴなどは、河床地形や礫で創出される流れが集中する場所を好む）、現地発生の巨石配置をデザインするなどの工夫が必要である。

b) 河床勾配

特徴：滝山川は、平均河床勾配1/100以上の急勾配河道であり、流れのエネルギー勾配も必然的に大きくなる。河床勾配が相対的に緩やかな下流部と一部の淵を除いて、概して掃流力が大きい。

施策の方針：河床勾配の緩和には、落差工を用いるのが一般的である。砂防溪流等では、恒久的な砂防施設が建設されるが、水生生物や土砂の連続性を阻害するとして問題となる場合が多い。溪流では、洪水時に移動した巨石同士がうまく噛み合わさって、自然の落差工を形成する場合がある。水も土砂も巨石の空隙を透過するため、前述のような連続性への問題がない。近年、この仕組みを人為的に再現した近自然落差工が施工される例もあり^{7,16)}、そのような手法も参考として考えられる。

c) 岩盤河床

特徴：岩盤河床は河床粗度が小さく、上流から供給された土砂は通過し、ほとんど堆積しない。すなわち、岩盤河床への変化は一方向的である。温井ダムが位置する

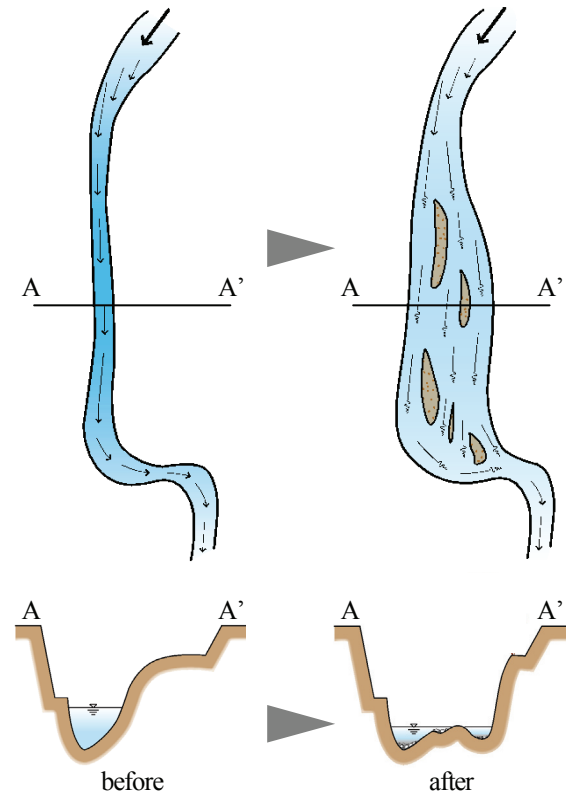


図-8 拓幅（widening）のイメージ

滝山川は、滝山峡と呼ばれる区間であり、元々岩盤河床は分布したが、ダム下流では、土砂供給量の減少に伴い、岩盤河床区間が拡大傾向にある。

施策の方針：軟岩の場合、滞筋に分散型落差工を設置し、下流側の岩盤をすり鉢状に掘削して淵を創出することで、淵の周辺に礫を堆積させようとする試みもみられる¹⁷⁾。しかし、一般的には、岩盤の掘削は困難だけでなく、そのような行為が（例えそれが試行だとしても）元通りの川へ後戻りできなくしてしまう恐れがある。細粒土砂を堆積させるには、一定以上の大きな粒径土砂で粗度を増大させることが考えられるが、その前提として、それを岩盤河床に留まらせておく必要がある。上記b)の落差工を施工し、その背後（上流の背水区間）に、粗度を与えるための材料を投入するなどして、（冒頭で述べたカジカを始め、河床の小空隙で生息する生物の棲み場の修復・再生にもつながる）様々な粒径の礫河床を創出することが必要であると考えられる。

d) 沢筋の合流

特徴：ダム下流河川においても、支川合流により土砂量は回復する³⁾。滝山川調査区間においては、大きな支川合流こそないものの、数本の小さい沢筋が合流する。沢筋で発生する土砂は、大きな材料を中心に、多くが砂防施設や管理道、その側溝にトラップされる。しかし、普段の降雨時にも発生するスケールの細粒土砂は、河道内に供給され、砂州上の高い位置で堆積している。

施策の方針：現状で砂州上に堆積する細粒土砂（t材

料)は、数年に1度発生する洪水でないと冠水しないため、砂州上の土砂が滞筋に配布される機会は少なく、またそのような規模の洪水では、ウォッシュロード的に挙動するため、滞筋河床のクレンジングには機能しない可能性がある。砂州を切り下げ、沢筋から河道に供給される材料を貯留し、年に数回起こるような洪水でも滞筋へと配布される仕組みが提案される。また、切り下げによって、水面幅も拡大するため、現況滞筋の粗粒化抑制も見込める(前述a)の方針による)。

5. 今後の展開に向けての課題と留意点

本研究では、現地調査と一次元計算で、温井ダム下流河川における現状土砂動態の推定を行った。河道の縦断スケールにおける土砂移動や、土砂還元を実施した場合の効果の持続期間等は、一次元計算でも大まかに把握され、また効率よく予測できることが分かった。しかし、およそ多くのダムが建設されがちな溪谷河川では、蛇行や巨石・岩盤などに影響される複雑な平面流れがあり、それに伴う土砂移動、また、4章(2)で述べたような施策(河道の改良)の効果は、一次元計算では再現が困難である。そのため、将来的には平面二次元計算による流況や河床変動の、より正確な予測が求められる。一方で、物理変化を伴う河川環境の予測は、技術的に未成熟であり、その成熟を待って施策を講じているのは、現場の環境劣化・損失は進行するばかりである。現場での検証による理論の確実性の向上が要求され、その実証データとの照らし合わせによって予測精度の向上を図っていくスケジュールの方が、現実的かつ合理的とも思える。

温井ダムでは、環境改善施策として、既に実施されているフラッシュ放流⁸⁾に加え、土砂還元が予定されている。今後、土砂還元が実施される場合、また、それに際しての河道改良が行われる場合は、そのレスポンスを把握するための、事前・事後のモニタリングが重要視される。モニタリングでは、物理環境(河床材料の粒度分布や堆積状況)の変化に加え、それに対する生物の応答として、例えばカジカの生活史の視点(稚魚から成魚まで、成長段階に応じた生息環境、また、産卵環境の分布等)の評価をもって施策の良否が判定されるべきであろう。さらにその判定が、成功と失敗に限らず、理論的に説明されるための科学的アプローチ(adaptive management等の仮説—検証スタイル)と、数値計算による検証と予測が、他の現場への応用を可能にするための普遍性の上で必要とされる。今後、そのような要求に一つずつ応えていくことが求められる。

参考文献

1) 例えば、辻本哲郎：ダムが河川の物理環境に与える影響—河川工学及び水理学的視点から—、応用生態工学、Vol.2,

No.2, pp.103-112, 1999.

- 2) 例えば、大沼克弘、藤田光一、井上優：ダムによる流量変化の特性分析、河川技術論文集、第12巻、pp.241-246, 2006.
- 3) 例えば、山原康嗣、藤田光一、小路剛志、富田陽子、大沼克弘、福田晴耕、井上優：ダム下流で水理条件がほぼ同様な河道区間の河床材料比較、河川技術論文集、第13巻、pp.147-152, 2007.
- 4) 例えば、吉田隆年、岩城安英、五十嵐崇博：ダム事業が下流河川の物理環境や生物の生息状況に及ぼす影響、平成17年度ダム水源地環境技術研究所所報、pp.72-77, 2006.
- 5) 例えば、坂本博文、中村甚一、角哲也、浅見和弘：真名川ダム弾力的管理試験における「フラッシュ放流」の計画と効果の評価手法について、河川技術論文集、第12巻、pp.271-276, 2006.
- 6) 例えば、菊池英明、小出武文、小林信昭、末次忠司、岡野眞久：長期排砂対策を考慮したダム下流土砂還元試験と影響調査に関する提案、河川技術論文集、第13巻、pp.69-74, 2007.
- 7) 石山信雄、渡辺恵三、永山滋也、中村太士、剣持浩高、高橋浩揮、丸岡昇、岩瀬晴夫：河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価、応用生態工学、Vol.12, No.1, pp.57-66, 2009.
- 8) 藤原正季、渡辺敏、岡公雄：温井ダムにおけるダム下流河川の環境改善に対する取り組みとその効果について、応用生態工学会、第10回研究発表会講演集、pp.25-28, 2006.
- 9) 藤田信夫、浅井考多郎：河川土砂還元の実施状況とその推進に向けての取り組み、平成17年度ダム水源地環境技術研究所所報、pp.42-49, 2006.
- 10) 山本晃一：構造沖積河川学、pp.126-129, 山海堂, 2004.
- 11) 大矢広志、大本家正：温井ダムにおける生物モニタリングの取り組み、平成17年度ダム水源地環境技術研究所所報、pp.99-108, 2006.
- 12) 水野信彦、御勢久右衛門：河川の生態学、pp.5-13, 築地書館, 1993.
- 13) 藤田光一：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望、土木学会海岸工学委員会・水理委員会、水工学シリーズ00-B-4, 2000.
- 14) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(Ⅰ) 限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集、第41号、pp.1-21, 1956.
- 15) Hunzinger, L.: Flussaufweitungen: Möglichkeiten und Grenzen, *Wasser, Energie, Luft* 96(9/10), pp.243-249, 2004.
- 16) 福留脩文：多自然川づくりに関する現場技術の事例と課題、水環境学会誌、Vol.31, No.7, pp.18-21, 2008.
- 17) 早川博、宮本大：岩床河川における瀬と淵の再生に関する研究、河川技術論文集、第15巻、pp.219-224, 2009.

(2009. 9. 30受付)