

石礫床河川の石の生態的機能と 河道掘削工事における石の残し方・戻し方

HOW TO SORT AND PLACE STONES AND BOULDERS DURING RIVER CHANNEL EXCAVATION WORKS

原田守啓¹
Morihiro HARADA¹

¹正会員 博士（工学） 岐阜大学教授 高等研究院環境社会共生体研究センター
（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

石礫床河川における河床の石は、河道の安定、付着藻類による一次生産、粗度層の形成、空隙の提供など、多面的な生態的機能と流路安定機能を有する重要な要素である。しかし河道掘削により石が除去されることで、これらの機能は大きく損なわれる可能性がある。本論文では石の機能を整理するとともに、河道掘削工事における石の残し方・戻し方の課題を整理した。さらに、河川環境の定量的目標設定への活用可能性を踏まえ、その達成に資する施工方法および工事発注のあり方を提案した。

Key Words: gravel-bed river, excavation work, carrying capacity, boulders and cobbles

1. はじめに

河川における河道掘削は、洪水を安全に流下させるための河積確保を目的として広く実施されてきた。一方で、河道掘削は河川環境の骨格となる河床形状や河床材料に直接的な改変を及ぼす行為であり、特に石礫床河川においては、影響が長期に残存しやすいことが指摘される。

令和6年5月に国土交通省より公表された提言において、「生物の生息・生育・繁殖の場」を河川環境の定量的な目標として設定することが、今後の河川管理の基本的な方向性として示された。この提言は、河川環境を単に配慮すべき事項として扱うのではなく、治水と同様に、目標設定、評価、説明が求められる管理対象として位置づけるものであり、河道掘削を含む河川整備・維持管理の在り方に対しても新たな要請を与えるものである。

石礫床河川において水域の生息場の基盤となる瀬・淵構造や河床環境²⁾を、定量的な管理目標の対象として組み込むためには、国内外で得られた河川環境に関する科学的知見を改めて整理するとともに、それらを日本の河道掘削工事の現場でどのように実装するかという実践的な視点が不可欠であり、科学知と現場知を融合する必要がある。特に、盛んに行われている伐採や河道掘削を河川環境目標の達成に資するものとしていくことは、今後の河川管理における重要な技術課題の一つである。

本論文は、以上の問題意識に基づき、石礫床河川の河

床環境における石の役割について既往の知見を整理・再確認した上で、河道掘削工事において石を残すための現場実践上の課題を整理することを目的とする。さらに、実際の河道掘削工事において、石を選別して河床に戻す取り組みの実践例を示し、河床環境の保全・改善と、生物の生息・生育・繁殖の場を対象とした定量的目標設定に資する知見とその目標達成に向けた方策を提示し、「石を残す・戻す」ことを河道掘削の標準的な実践として位置づけることを提案する。

2. 石礫床河川における石の役割

本章では、石礫床河川における河床の石と空隙の生態的機能について、いくつかの側面から整理する。河道を安定させる上でも石を残すべきことを再確認し、治水と環境の調和した河道を実現する上で特に大きな石を残すことが重要であることを示す。

なお、石礫径には様々な区分があるが、本論文では公共土木工事に焦点をあて、径10～50cm程度の石を玉石、径50cm以上の石を巨石とひとまず呼称する。

(1) 河道の安定に果たす巨石の役割と巨石保全の原則

石礫床河川における大径の河床材料は、河床の安定に寄与している。福岡ら³⁾は、河床低下や河岸侵食が生じた際に、相対的に移動性が低い大径礫が表層に露出する

ことにより流砂量が減少し、河床低下が抑制される機構と、粒子同士のかみ合わせが効いて安息角が大きい巨石により河岸が安定する機構によって、流水に対して流路がより安定した状態に移行することを示している。

河床勾配が大きい急流河川では、巨石が河道の安定にもたらす役割はより大きく、河岸の粗度と相俟って河床低下と土砂流出を抑制する^{4,5)}。災害復旧においても、河道の安定の見地から「河道内にある巨石は取り出さず存置」することを原則とすることや、水衝部に形成される淵の保全に巨石を活用することなどが示されている⁶⁾。

原田・手島⁷⁾は、大径の石礫が河道区間を流下するのに要する時間スケールを流砂の移動速度から検討し、玉石や巨石に相当する粒径の土砂は減多に移動することがなく、河道を流下するには相当な長期間を要することを推定している。玉石や巨石は河道の安定に寄与するとともに、“有限の資源”であるとの認識を持ち、河道からの持ち出しは慎むべきである。

(2) 石礫床河川における河床一次生産と付着藻類の更新

石の生態的機能を、まず河川生態系を支えるエネルギー循環の観点から見ていく。河川における一次生産の縦断的な分布については、河川連続体仮説(River Continuum Concept)⁸⁾により、中流域では付着藻類による一次生産が重要であることが知られている。

溝口ら⁹⁾は、日本の河川を対象として生態系代謝モデルを用い、河床一次生産(総一次生産量、GPP)および呼吸量(ER)を推定した。その結果、礫床を主体とする区間において、平瀬を中心とした河床一次生産が河川全体の代謝特性を大きく規定していることを示し、中流域における河床一次生産の重要性を定量的に裏付けた。

日本の谷底平野や扇状地区間に見られるいわゆるセグメント1河道は、石礫床からなる河床に十分な光が到達しやすい条件を有しており、玉石・巨石・岩盤などの安定した基質の表面における付着藻類の一次生産が生態系を支えている。一方、石礫床河川における付着藻類は、基質となる石が移動せず安定しているからといって一方方向に蓄積・発達するのではなく、物理的および生物的な攪乱によって動的に更新される点に特徴がある。

洪水時に石礫自体が移動しない規模の出水であっても、河床近傍を移動する砂粒子のサルテーションによって、石表面の付着藻類が剥離される効果が報告されている¹⁰⁾。また、生物的攪乱として、オイカワやアユなどの藻類食魚による採餌行動が、石表面の付着藻類を更新する役割を果たしていることが示されている¹¹⁾。魚類の採餌は付着藻類を除去し、生産性の高い若齢群集の維持に寄与する。特にアユに代表される付着藻類を主要な餌資源とする魚類では、河床一次生産と魚類の個体群動態が密接に結びついており、付着藻類と魚類との間には相互に影響し合うフィードバック関係が成立している。

したがって、河道掘削等により河床の石が除去され、

砂・砂利を主体とした底質に置き換わることは、付着藻類による一次生産基盤のみならず、その更新機構をも同時に損なう可能性があり、一次生産を基盤とする生物の環境収容力を大幅に低下させ、生物量の減少につながる。

(3) 石礫が河床近傍に形成する粗度層の役割

河床表層に石礫が突出していることで形成される特徴的な流れ場は粗度層(Roughness layer)と呼ばれ、河川中上流域の河川生態系に重要な役割を有している。

巨石等の粗度要素下流側に形成される後流域(wake region)の低流速域は、魚が少ないエネルギーで定位し続けることが可能なflow refugiaとして機能する¹²⁾。

大型水路でオイカワ供試魚を飼養しながら、河床の表層の巨石の凹凸を段階的に砂利で埋没させた実験では、凹凸の減少に伴い河床近傍の流速が増加し、供試魚が持続的に遊泳可能な空間が減少することで、その場を利用しなくなることが実験的に確かめられている¹³⁾。類似の実験¹⁴⁾では、魚の体サイズによっても粗度要素周りで定位する位置が異なることも指摘されており、体サイズに比例する遊泳能力がその一因と考察されている。

魚類はそれぞれが生きる環境の中で個体としてのエネルギー効率が高い場を選好するように形態・生態が適応進化しており¹⁵⁾、個体の成長のために合理的な生息場を選択する。端的に言えば基礎代謝と活動代謝で消費されるエネルギーよりも、得られるエネルギーの方が大きくなければ個体は成長することができない。河床近傍の粗度層は遊泳魚にとっても底生魚にとっても成長のために必要な空間であり、石が減少することで河床表層の凹凸が小さくなれば、粗度層を生息場とする生物の生息場が量と質の両面から減少し、環境収容力を低下させる。

(4) 石礫による河床空隙の役割

河床の空隙は、主に大型無脊椎動物が利用し、粒径が大きく空隙の多い“浮き石”状態の礫・玉石の河床ほど種数・個体数・多様度が高くなることが、多くの実験・野外研究で示されている^{16,17)}。単純に大きな径の石があれば良いということではなく、多様な底質が底生動物相の多様性を支えていることが示されている。

空隙のサイズは利用可能な生物個体のサイズも規定しており、径の大きい石はそれだけ空隙も大きく、また空隙の多い河床ほど深さ方向にも生物が分布するほか、洪水時や外敵からの避難場としても利用される。なお、前述した付着藻類の一次生産についても、出水時に洗い流されず残った空隙の付着藻類が、洪水攪乱後の回復源になることも確かめられている¹⁸⁾。

石礫による河床空隙の生態的機能は、浮き石状態の河床によって発揮され、砂・砂利により空隙が埋塞すると空隙率及び空隙サイズの減少により、急激に低下する。

3. 礫・玉石・巨石の還元に関する知見と課題

前章では、石礫床河川における玉石・巨石は流路を安定させ、幅広い生態的機能を持つことを示した。それでは、河床にどの程度の石があれば機能するのか、石を投入すれば生態的機能や環境収容力を高めることができるのか、といった観点から既往の知見を整理する。

(1) “石を増やす” レストレーションの事例

ダム下流における土砂還元(sediment replenishment)は、日本でも多くの取り組みがある。ダム下流の粗粒化が進行した区間に礫を戻す取り組みが中心であり、河道掘削時に石を残すことを提案する本論の趣旨とは事業目的や材料の由来が異なる場合も含まれるが、河川環境のために河床材料を操作対象とする点では一致しており、関連知見として参照する。

還元土砂の粒径はダムによって異なるが砂・礫スケールが中心である¹⁹⁾。国際的には、河川環境改善を目的にした礫増量・還元 (gravel augmentation / replenishment) の事例が報告されている²⁰⁾。

2020年のレビュー²⁰⁾によれば、礫増量・還元の効果としてサケ・マス類の産卵場形成、生息場の形成、大型無脊椎動物の増加、種組成変化などが報告されている。生物量が増えるだけでなく生物群集の構成が変化する方向でのレスポンスが多いと整理されている²⁰⁾。

国内でも、ダム下流区間に礫分を還元したことによる環境改善の効果は複数の報告がある。一方、河道掘削工事に際して玉石に相当する粒径を残す・戻す取り組みはダム下流に限らず国内河川で行われているのに対し、生物の応答まで整理された事例は少ない。

矢作川（愛知県）では、2017年に阿摺ダム下流に8～20cmの礫・玉石を敷き並べた人工瀬を造成する野外実験が実施され、矢作川研究所がモニタリング調査結果を公表している。礫置き区にはアユが蟄集する状況が見られたが、経年的に石表面にコケ類が付着し、生息場の質は低下した。2021年には豊田大橋周辺でも玉石を用いた瀬の再生事業が実施され、経過観察が行われている。

水資源機構が管理する一庫ダム（兵庫県）では、ダム下流区間に10～40cmの玉石を投入し、フラッシュ放流と土砂還元を行った事例²¹⁾がある。魚類相及び底生生物相調査が事前事後を含めて経年的に行われた貴重な事例であり、玉石投入と土砂還元の複合的な効果による生物量の増加が確認されている。

上記2事例を比較すると、玉石を還元しても、玉石そのものの移動や砂・砂利の流下によって石表面の付着藻類の更新が起こらなければ、生息場としての価値は低下することが示唆される。

単調化した河道に巨石を投入(boulder placement)する、いわゆる置き石工の効果についてはいくつかの報告が得られた。フィンランドの32溪流で、河床に細粒土砂が堆

積した状況への対策として、巨石投入、大型流木投入などを行い比較調査した結果、巨石の方が河床への細粒土砂堆積を防ぐ効果が大きいとされている²²⁾。スウェーデンの10溪流では、サケ科魚類の産卵場のために砂利投入を行ったのに加え、一部の溪流では追加の巨石投入、大型流木投入を行って5年間のモニタリングが行われた結果、巨石投入の効果として河川地形は明確に複雑になったが、魚類群集の変化はその他の変動要因に隠れて明確には確認されなかったと報告されている²³⁾。

礫投入の効果に関する論文は多数見つかったのに対し、玉石・巨石投入の効果に関する知見は未だ限定的であり、その効果に関する体系的理解は十分とは言えない。

(2) 定量性のある環境目標設定に関する知見

河床にどの程度の玉石・巨石があれば“良好”な河川環境といえるのかを数値により定義できれば、定量的な河川環境目標の根拠となりうる。実際に目標設定を行う際には、前提として対象区間の潜在的な河床材料の粒度分布を考慮する必要があると考えられ、河川毎のセグメントと河床材料構成を考慮すべきであるが、ここでは議論をシンプルにするため、生物側が玉石・巨石に対して要求する条件の側から目標設定が可能か検討してみる。

日本を代表する水産対象魚種であるアユ、サケ・マス科魚類については、水産分野の研究者の知見が比較的多く得られており、例えばアユ産卵場については水産分野の膨大な知見の蓄積から、産卵場として選好される物理環境要因が整理され²⁴⁾、適地評価まで活用されている²⁵⁾。

一方で、“石のサイズや量”については定性的な情報が多く、定量的に活用可能な情報は少ない。数少ない情報の例として、長径25cm以上の石が河床表層に占める割合が26%以下の区間ではアユが漁獲不漁になるとの報告²⁶⁾がある。坪井・高木²⁷⁾は、国内13水系25地点のアユ個体観察数と物理環境の関係性をより詳しく調べた。その結果、アユ個体数を説明する物理環境要因として、川幅（負の効果）、河床表層に占める長径25cm以上の石の割合（正の効果）、長径25cm以上の石の浮き石の比率（正の効果）の3変数が選択され、大きな石と浮き石の割合は高いほど良いという結果が示されている。

アユに限定すれば、河道掘削時に“石は残す”ことを原則とし、様々な機会を通じて“河床表層の石を増やす”ことを目標とすれば、現時点における暫定的な目標設定としては十分であろう。また、前章に示した石の生態的機能によれば、アユが好む河床環境は結果的に他の種の生物量・種の多様性にもつながるとの仮説として位置づけることができる。佐々木²⁸⁾は、主にアユに着目して河床の物理環境とアユの生息場利用の関係性を解説しており、理想的な河床環境のイメージの理解と共有に役立つ。

(3) 効果的な石の残し方・戻し方に関する課題

河道掘削工事における石の残し方や戻し方については

公的な情報発信が少なく、工事等に要する労力とその効率も含めて、効果的な方法についての知見を整理・共有・蓄積することが、「石を残す」工事を一般化させるために必要である。

長良川（岐阜県）では、河道掘削工事で分別した玉石を滯筋に投入する、水際に存置する等の方策が継続的に実施されている。先に述べた矢作川（愛知県）では玉石を敷き並べて瀬が造成されたが、天竜川の秋葉ダム下流（静岡県）では、河床形状の是正も兼ねて巨石を配置し、早瀬を形成した事例がある。富士川中流域（山梨県）では、巨石をまとめて投入して瀬を形成し、その後の出水によって石が下流に撒きだされる経過が観察されている。高原川（岐阜県）では地元建設業と漁協が巨石の効果的な戻し方を勉強会形式で検討している。これらの取り組みに限らず、河川工事により発生した玉石・巨石を川に戻す取り組みは全国の現場で実施されていると思われる。しかしながら、採用した方法によって工事に要する労力にはかなりの幅が存在しており、工事発注時の積算に反映することが難しい作業も多い。

また、巨石は、組み合わせることによってさまざまな工法に応用可能である。北海道の技術資料²⁹⁾では、「河床・みお筋の工夫」として、①水制工、②帯工、③置き石工、北海道発祥のバープ工法が提示されており、いずれも巨石を用いた簡易なものが手引きに掲載されている。岐阜県の技術資料³⁰⁾では、簡易な石組み落差工、巨石出し水制、捨石バープ工などが歩掛も含めて例示されている。北米発祥の湾曲した帯工状の構造物(cross-vane)³¹⁾、日本の伝統的な石積みの技術を用いる分散型落差工³²⁾なども、巨石を主材料とする点は共通していても、必要な技術力や工数に相当の幅がある。

河道掘削工事を通じた石の残し方・戻し方の条件として、①河道掘削工事の施工手順の中で無理なく実施できる方法であること、②工事後の出水により石が動くことを前提とすること、③やり直しが効く“見直し”的な方法であること、の3点を提示したい。加えて、④これらの取り組みに必要な労力が工事発注において出来る限り考慮されることも、重要な条件となるだろう。工事発注者から受注業者に対して適正な対価が支払われず、業者の持ち出しに頼る形では、石を残す・戻す取り組みは、持続可能なものにはなりえないと考える。

4. 河道掘削工事における石の残し方・戻し方の実践的課題と対応

河道掘削工事に際して石を残す・戻すことを持続可能な形で実施していくための課題と対応を、工事発注（積算・仕様）、出来形検査等の観点から検討する。現場実践の情報は公的に発信されていないケースが多く、岐阜県における筆者の経験や他県での事例の聞き取り等に基

づく情報と、工事積算・発注に使用されている公共土木工事積算基準等（R7版）を参照して議論する。

(1) 工事発注における積算方法の課題と対応

河道掘削工事に際して、ある程度大きな石は持ち出さず現場に残すという取り組みは、必ずしも珍しい取り組みではなく、漁業協同組合の要請等により、全国各地の河川で部分的に取り組まれているようである。しかしながら、河川管理者の工事積算に、石を残すための手間が適正に計上されているかどうかはケースバイケースであり、少なくとも公共土木工事積算の体系には、明示的に位置づけられていない。

地域建設業の経営の持続可能性を高めるためにも、河川環境目標の達成に向けた取り組みとしても、適正な積算に基づいて工事発注がなされるべきとの観点から、工事積算の工夫と事例について示す。

a) 掘削時に石を残す作業と計上方法の例

河道掘削工事は、河原に繁茂している樹木等の伐開を除けば、大部分が土工に属する工事である。掘削工事において石を残すためには、砂・砂利といった小径の土砂と、残したい石を分別する必要がある。

掘削土砂に含まれる巨石はバックホウのバケットでよけておくことも可能であるが、玉石を残そうとした際には、バックホウにスケルトンバケットを装着して、ふるい分け作業が行われている事例が多い。スケルトンバケットのマス目寸法が異なる100mm、150mmなどの製品があり、残せる石の大きさはマス目寸法に依存する。岐阜県の技術資料³⁰⁾では、スケルトンバケットによるふるい分けの手間（機器損料含む）を、類似した作業である掘削・積込の工種を一回追加して計上することで表現している。

また、河道掘削工事の全体工事費に大きく関わる土砂の運搬費・処分費は、残したい石の割合によって変動する。一般的に石礫床河川の河床表層には多くの石が見られるが、表面は細かい粒径が洗い流されて粗粒化しており、表層より下は砂分・砂利分が多く、表層の様子から想定するほどの石が含まれていないことが多い。

この不確実性に対する対応として、長良川（岐阜県）における掘削数量が大きい工事では、着工後に掘削エリアの複数地点でトレンチを試掘し、掘削土砂に占める凡その玉石の体積割合を把握した後に、工事費全体の内訳を調整する形で掘削範囲等の調整を行った事例がある。

実際の工事の手順の中で、石を残すためには、河床表層の石の保全是重要である。工事積算において、植物や土が混入した表土（表層0.5m程度）は残土処分として計上されていることが多い。しかしながら先に述べた通り、河床の表層には大きな粒径の石が集積・露出しているため、処分するのではなく、ブルドーザで押土した上でふるい分けするなど、貴重な石を廃棄物にしてしまわない配慮と工夫が求められる。

b) 掘削後に石を戻す方法

掘削工事の中で選り分けた玉石・巨石をどのように戻すのか、という点については、現場の状況に応じた創意工夫の余地が多い。玉石であればブルドーザで瀬に押し込む、バックホウで水際に撒き出す、といった様々な選択肢がある。石を戻すタイミングは、一般的には工事全体の終盤になることから、仮設撤去時に現場にある重機で少ない労力で対応可能な方法が望ましい。手間をかければきりがなく、また積算に反映することも難しいため、いたずらに施工業者の負担を増やす方向での対応は慎むべきである。

聞き取りで把握された特記すべき工夫として、仮締切の土堤や大型土嚢にあらかじめ玉石を多めに混ぜておき、仮締切堤を全撤去せず、一部を残して出水により玉石を撒き出す、大型土嚢の中身を撒き出す等の現場の知恵とも評すべき工夫を行った事例があった。

また、石の戻し方については、施工業者まかせではなく、発注者から具体的な指示が必要になる場合が多く、発注者の了解のもと、川に精通した漁業協同組合職員や地元有識者が立ち会う事例などがある。工事発注者・受注業者・地元関係者間のコミュニケーションを通じて、あらかじめ工事方法について合意形成を進めておくことが重要である。

(2) 施工管理・出来形検査の課題と対応

石を残す・戻すことを前提とした工事では、工事発注者と受注業者の合意形成が重要である。掘削工事の数量・出来形検査と、選別した玉石・巨石還元をどのように整理するか、打合せが必要である。

河川管理者側への聞き取りによると、現場に精通した発注担当者は施工業者との円滑なコミュニケーションがとれ、現場に合わせた施工方法・出来形検査方法を採用できるが、河川工事の経験の少ない職員は融通を利かせることが難しいとの指摘もある。また、近年普及が進むICT施工では、高い精度で出来形管理が出来る代わりに、仕上がり形状に対する自由度が低いという課題も指摘される。石を残す・戻す施工方法について、経験の少ない職員でも安心して取り組めるよう、現場知・経験知を継承するための工夫が求められている。

(3) その他の工夫

石を残す・戻す方策に関わる現場での工夫について得られたその他の工夫について紹介する。

a) 特記仕様書、県独自の技術資料等への記載

石を残す・戻すことが前提となっていることを工事特記仕様書や参考図面に明記する、土量計算に用いた直線的な断面形ではなく仕上げのイメージを参考図面で添付する等の工夫が行われている。また、公共土木工事積算基準類に掲載されていない作業を、県独自の歩掛りとして使用できるようにするために技術資料に記載する取り

組み（岐阜県）などもなされている。

b) 掘削土砂の資材活用によるコスト削減

河川内の堆積土砂は川砂利として資源利活用が可能である。掘削土砂を洪水の流れを阻害しない河川区域に仮置きし、砂利組合が県砂利採取料を支払って搬出する形で、コスト削減を図っている事例がある。

c) ストック材の活用

工事で発生した玉石・巨石を、河川区域外のストックヤードに貯留しておき、河川工事の際に還元する取り組みの事例がある。また、河川管理者との合意の元、漁業協同組合等が石の還元を実施している事例もある。

5. おわりに

石礫床河川の河床環境における石の役割について既往の知見を整理・再確認した上で、河道掘削工事において石を残すための現場実践上の課題と、河川環境目標への導入の可能性を整理した。整理の結果、「石を残す・戻す」取り組みの現状と課題を明らかにし、現時点で共有可能な知見を提示した。

本論文で提案する「石を残す・戻す」取り組みでは、治水上必要な河積確保を前提とした上で、対象区間のセグメント特性、現況および潜在的な河床材料構成、河床低下や細粒化・岩盤露出のリスクを踏まえ、保全・還元すべき粒径集団を区間ごとに判断する必要がある。

今後、全国の現場での取り組みの実態把握と知見の蓄積を図り、「石を残す・戻す」工事が持続可能な形で実施されるよう、取り組みを進めていく必要がある。また、環境収容力の観点から河床環境の機能を捉え、河川生態学のみならず水産学も含めた科学的知見の収集・整理を進めることで、河川環境目標の検討に資する基盤を構築していくことが求められる。

謝辞：情報提供いただいた佐々木慎一氏（栃木県馬頭高校）、坪井潤一氏（国研水産研究・教育機構）、大浜秀規氏（山梨県漁連）、山本大輔氏（矢作川研究所）、岐阜県高原川漁協、郡上漁協、岐阜県県土整備部、栃木県水産試験場及び県土整備部関係諸氏に謝意を表します。本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発（代表：萱場祐一）、科研費JP23K28277により実施された。

参考文献

- 1) 原田守啓，萱場祐一：河道の限界—治水と環境が調和した持続可能な河道についての一考察，河川技術論文集，28，pp. 451-456，2022。
- 2) 原田守啓，萱場祐一：河川中上流域の河床環境に関する研究動向と課題，応用生態工学，18(1)，pp. 3-18，2015。
- 3) 福岡捷二，長田健吾，安部友則：石礫河川の河床安定に果たす石の役割，水工学論文集，52，pp. 643-648，2008。

- 4) 原田守啓, 塩澤翔平, 國島佑紀: 山地急流河川における川幅と河岸粗度が河床安定に及ぼす影響, 河川技術論文集, 25, pp.699-704., 2019.
- 5) 敵島怜, 佐藤辰郎, 西田健人, 真砂祐貴, 坂田知謙, 島谷幸宏: 山地河川における step-pool 構造に関する既往の知見と河川技術への応用, 応用生態工学, 19(2), pp.165-180., 2017.
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局: 美しい山河を守る災害復旧基本方針, 207p., 2018.
- 7) 原田守啓, 手島翼: 土砂粒径ごとの「平均流送速度」を用いたセグメントスケールの土砂通過時間の検討, 土木学会論文集, 81(16), 24-16126., 2025.
- 8) Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., and Cushing, C. E.: The River Continuum Concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), pp.130-137, 1980.
- 9) 溝口裕太, 戸田祐嗣: 砂床及び礫床河道区間を対象とした生態系代謝観測に基づく物理的攪乱からの回復過程の評価. 土木学会論文集 B1 (水工学), 73(4), pp. I_1099-I_1104., 2017.
- 10) 田代喬, 渡邊慎多郎, 辻本哲郎: 掃流砂礫による付着藻類の剥離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について, 水工学論文集, 47, pp. 1063-1068., 2003.
- 11) 皆川朋子, 萱場祐一: アユ, オイカワの摂食が河床付着膜の性状に果たす役割—藻類食者の生態的機能を加味した河床環境の保全—, 河川技術論文集, 15, pp.97-102., 2009.
- 12) Niayifar, A., Oldroyd, H. J., Lane, S. N., Perona, P. : Modeling macroroughness contribution to fish habitat suitability curves. *Water resources research*, 54(11), pp.9306-9320., 2018.
- 13) Harada, M., Rahma, Y., Yukio, O., Yuichi, K: Swimming fish habitat evaluation concept focusing on flow characteristics around the roughness layer in streams, In *E-proceedings of the 37th LAHR World Congress*, pp. 2596-2601., 2017.
- 14) Hockley, F. A., Wilson, C. A. M. E., Brew, A., Cable, J.: Fish responses to flow velocity and turbulence in relation to size, sex and parasite load, *Journal of the Royal Society Interface*, 11(91), 2014.
- 15) Di Santo, V., Goerig, E. : Swimming smarter, not harder: fishes exploit habitat heterogeneity to increase locomotor performance, *Journal of Experimental Biology*, 228(Suppl_1), JEB247918., 2025.
- 16) Barnes, J. B., Vaughan, I. P., Ormerod, S. J.: Reappraising the effects of habitat structure on river macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 58(10), pp. 2154-2167., 2013.
- 17) Natsumeda, T., & Iguchi, K. I.: Habitat-specific effects of interstitial space between stream substrate particles on the colonization of aquatic organisms. *International Aquatic Research*, 11(4), pp.347-358., 2019.
- 18) Bergey, E. A.: How protective are refuges? Quantifying algal protection in rock crevices, *Freshwater Biology*, 50(7), pp.1163-1177., 2005.
- 19) 角哲也, 金澤裕勝, 小野雅人: 第9章日本の土砂還元 (置き土) の最新事情, ダムと環境の科学IV 流砂環境再生, pp. 227-247., 2023.
- 20) Staentzel, C., Kondolf, G. M., Schmitt, L., Combroux, I., Barillier, A., Beisel, J. N.: Restoring fluvial forms and processes by gravel augmentation or bank erosion below dams: A systematic review of ecological responses, *Science of the Total Environment*, 706, 135743., 2020.
- 21) 北爪皓, 廣瀬早苗, 滝本正之: 一庫ダムにおける河川環境復元対策と効果について, 令和6年度多自然川づくり近畿地方ブロック会議発表資料, 2024. (<https://www.kkr.mlit.go.jp/river/kankyotashizen/r9733f0000022qtf-att/No.02.pdf>, 2026/3/29最終閲覧)
- 22) Marttila, H., Turunen, J., Aroviita, J., Tammela, S., Luhta, P. L., Muotka, T., Kløve, B.: Restoration increases transient storages in boreal headwater streams, *River research and applications*, 34(10), pp.1278-1285., 2018.
- 23) Nilsson, C., Sarnel, J. M., Palm, D., Gardeström, J., Pilotto, F., Polvi, H.: How do biota respond to additional physical restoration of restored streams?, *Ecosystems*, 20(1), pp.144-162. 2017.
- 24) 藤田朝彦, 横山良太, 加藤康充, 井上修, 原田守啓: アユの産卵環境はどこまでわかったのか. 応用生態工学, 24(2), pp.217-234., 2022.
- 25) 原田守啓, 塩澤翔平, 鈴木崇史, 永山滋也: 河床環境に着目したアユの産卵適地評価. 土木学会論文集, 80(16), 23-16105., 2024.
- 26) 阿部信一郎: アユ漁場環境評価手法の開発～アユが釣れない川の環境～, 良好なアユ漁場を維持するための河川環境調査の指針, 水産総合研究センター・全国内水面漁業協同組合連合会編, 水産庁, pp.34-43., 2011.
- 27) 坪井潤一, 高木優也: アユの生息にとって重要な環境要因の検討, *日本水産学会誌*, 82(1), pp.12-17., 2016.
- 28) 佐々木慎一: 上中流域の内水面漁業に重要な瀬と淵のはなし, 東京水産振興会, 22p., 2025. (https://naisuimen.suisan-shinkou.or.jp/pdf/report_2510.pdf, 2026/3/29最終閲覧)
- 29) 北海道河川環境研究会: 北海道の多自然川づくりガイド～川づくりの評価と事例集Ⅴ～, 342pp., 2018. (https://www.hoctec.info/guide/files/2018tashizen_guide_all.pdf, 2026/3/29最終閲覧)
- 30) 岐阜県土整備部河川課: 岐阜県自然共生川づくりの手引き (改訂案), 2023. (<https://www.pref.gifu.lg.jp/page/120.html>, 2026/3/29最終閲覧)
- 31) Rosgen, D. L.: The cross-vane, w-weir and j-hook vane structures... their description, design and application for stream stabilization and river restoration. In *Wetlands Engineering & River Restoration 2001*, pp. 1-22., 2001.
- 32) 福留脩文, 有川崇, 西山穂, 福岡捷二: 石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計. 土木学会論文集 F, 66(4), pp.490-503., 2001.