

# ダム下流生態系の再生を目指して ～流況・土砂と河川生物の関係性～

末吉正尚・小野田幸生・森 照貴・宮川幸雄・中村圭吾

## 1. はじめに

ダムは洪水調節、発電、水供給、レクリエーションの面で古くから人々の生活を支えてきた。その一方で、ダムは周辺の河川環境や生物に影響を及ぼすことも知られている。特に、ダム下流域においては、流量調節による流況（流量変動）の平滑化、土砂供給量の減少、水温の変化、濁水の長期化等が生じ、河川生物の生息場環境を変化させる可能性が報告されている。また、近年はダム下流域の環境改善を念頭に置き、ダムの弾力的運用によるフラッシュ放流、土砂還元等が行われるようになってきたが、その報告例は断片的であり、生物の生息場の改善効果に関する理解はあまり進んでいないのが現状である。本報では、流況の平滑化、土砂供給量の減少に伴う河床の粗粒化に焦点をあて、その改善事業の効果を検証した事例及び評価技術を報告する。

## 2. ダム下流域の環境施策と研究の経緯

提高の高いダムの下流では、建設からの時間の経過とともに、砂や小礫等の相対的に小さい粒径集団が河床表層から徐々に流出することで河床材料が粗粒化する現象が顕在化し、流況の平滑化と相まって、生息場を変化させることが指摘されてきた。

### 2.1 流量減少の改善

水管理・国土保全局（旧河川局）では、ダム下流におけるこのような問題の改善を図るため、様々な施策を行ってきた。例えば、1988年に通達された通称「発電ガイドライン」では発電水利権の許可更新に当たって、河川維持流量を確保するための取水制限等を条件として明示するというルールが定められた。さらに、1992年に通達された正常流量検討の手引き（案）では、動植物の保護、漁業、景観、流水の清潔の保持などの流水

が有する正常な機能を維持するための流量を設定することで、ダム下流の環境改善を促してきた。これらの通達により、取水によって生じた電力ダム下流の無水区間においても、動植物のために最低限流すべき流量が設定され、減少していた流量が改善され始めた。その後も、2001年、2007年に改訂が行われるなど、流量減少の改善に対する継続した取り組みが進められている。

### 2.2 流況の改善

流量の減少が改善されつつあるなかで、流況を自然状態に近づける努力も進められてきた。これは、ダム下流で洪水制御を行うことによる洪水攪乱の減少が生態系の変化を引き起こす要因として注目され始めてきたことによる<sup>1)</sup>。規模の大きい洪水攪乱の機能として、河床材料の移動を引き起こし、河床に棲む生物を排除することで生物相の更新を促すことが挙げられる。また、ダム下流において沈殿したシルト等の細粒分を掃流し、河床環境の維持に寄与する役割もある。水管理・国土保全局（旧河川局）は、ダムの弾力的運用を1997年度より試行し、2000年度に「ダムの弾力的管理指針（案）」として定めた。この指針によりダム下流における洪水攪乱機能の回復を目的とした、一時的な放流量の増加（フラッシュ放流）が実施されてきた。

### 2.3 土砂不足の改善

また、流況の改善とともに、ダム下流での土砂供給量減少に対する改善策も講じられてきた。例えば、ダム上流や貯水池に堆積した土砂を掘削してダム下流に還元する置土や、ダム上流と下流をトンネルでつなげて貯水池を経由せずに下流に土砂を放流する土砂バイパストンネルなどの土砂供給手法が現在用いられている。これらの手法の多くは、流量の増加に合わせて土砂を供給するため、増水やフラッシュ放流と連動して行われることが多い。

### 2.4 自然共生研究センターにおける研究の経緯

自然共生研究センター（以下「共生センター」という。）が開設された1998年は弾力的運用が全

国で行われ始めた直後である。また、1991年度には那賀川水系の長安口ダム下流において置土による土砂供給がスタートしている。フラッシュ放流や土砂供給は、ダム下流環境の再生において重要な役割を有しているが、事業を進めるうえで、適切な放流量や土砂供給量を設定するための科学的知見は不足していた。このため、共生センターではこれらの科学的知見の集積と技術支援を目指して、流量及び土砂と生物との関係に関する研究に開所当初から取り組んできた。共生センターで行われてきたダム下流域に関する研究は、前期の10年間（1999～2008）に主に実施した流量管理を巡る研究と、後期の10年間（2009～2018）に主に実施した土砂管理を巡る研究に分けることができる。

前期では、環境変化の影響を最も受けやすく、餌資源として他の分類群へ波及的な影響を及ぼす底生性の付着藻類を対象とした研究に注力してきた。具体的には、付着藻類の剥離・更新に効果的な放流量、継続時間を決めるため、現地及び実験河川を用いた実験において流量増加と付着藻類量との関連を検証した。後期では、土砂供給による効果・影響の評価対象を付着藻類から底生動物、魚類にも広げて研究を進め、土砂供給時の掃流砂による付着藻類の剥離促進効果や、供給後の土砂を利用する底生動物の個体数増加などの効果を明らかにしてきた。一方で、土砂の供給量が過剰な場合には、石礫の埋没を通じた生息場所の消失も懸念される。そのため、付着藻類や魚類を対象として埋没度とこれらの分類群に対する影響評価に関する研究を行っている。近年は、このような個々の分類群に対する効果・影響評価に加え、土砂供給に伴う生物間相互作用への影響についての検討も行っている。例えば、シルトを含む付着藻類が水生昆虫の摂食行動へ及ぼす影響など、土砂供給による環境変化が河川生態系全体に及ぼす影響に関して研究が進められている。

以降では、前期の流量管理を巡る研究と後期の土砂管理を巡る研究に分けて、得られた代表的知見を紹介する。

### 3. 流量管理を巡る研究

#### 3.1 付着藻類の過剰繁茂による問題

石礫上を主な生息場とする付着藻類は、石礫表



図-1 ダム下流で繁茂した糸状藻類と堆積したシルト

面を薄く覆う珪藻を中心とした群集から、糸状の形態をもつ緑藻や藍藻を中心とした群集へと遷移する<sup>2)</sup>。ダム下流の攪乱が少ない環境下では遷移が進み、更新も生じないため、糸状藻類が優占する群集となることが多い。糸状藻類は、シルトなどの微細土砂を捕捉しやすく、藻類食者であるアユや水生昆虫の餌資源としての価値が低い（図-1）。さらに、浄水場や用水路の目詰まり、水質の悪化などの点において人間活動にも被害を及ぼすことが知られており<sup>3)</sup>、フラッシュ放流による一時的な流量増加は糸状藻類の剥離・更新を促すことで、これらの諸問題の解決に寄与することが期待されている。

#### 3.2 実験河川における放流の効果検証

付着藻類の剥離に対する効果的なフラッシュ放流の条件として、①放流前の藻類量、②放流量、③放流時期、④ピーク放流の継続時間が重要であることが分かっている。共生センターでは、流量を操作可能な延長800mの実験河川（平常時流量 $0.1\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ ）を用いて、上記の条件の具体的な閾値を探索してきた。ここでは、異なる放流量と放流前の藻類量、継続時間の組み合わせで行われた3つの実験で得られた知見を紹介する<sup>4),5)</sup>。1つ目の実験では、ピーク流量 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$ 、 $3.0\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ の5段階の出水を $0.5$ 時間発生させた。その結果、 $1.0\sim 2.0\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ の出水で藻類量（クロロフィル $a$ 量）が減少した。2つ目の実験では、ピーク流量 $0.25$ 、 $0.5$ 、 $1.0\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ の3段階の出水を $24$ 時間発生させた。その結果、 $0.5\sim 1.0\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ の出水で藻類量が減少した。3つ目の実験では、ピーク流量 $1.0$ 、 $2.0$ 、 $2.0\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ の3回の出水をそれぞれ $2$ 、 $1$ 、 $0.5$ 時間発生させた。その結果、いずれの出水でも藻類量は減少しなかった。

上記実験に関して、放流前の藻類量を縦軸、掃

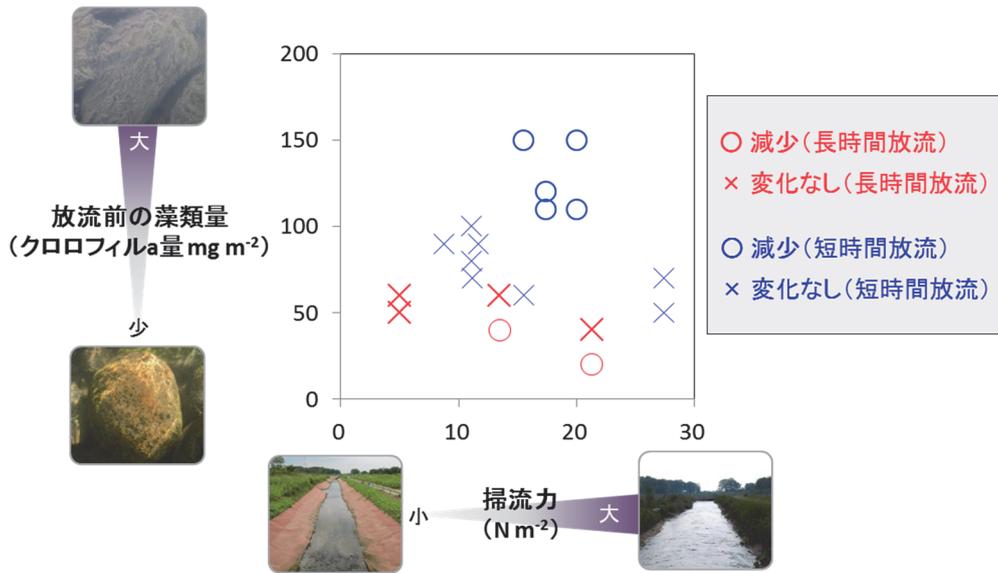


図-2 放流前の藻類量と掃流力、放流時間に対する付着藻類の減少の有無。放流前藻類量は参考文献4)、5)の図より5mg m<sup>-2</sup>単位で読み取った。長時間放流はピーク流量継続時間が24時間、短時間放流は0.5～2時間である。

流力（河床にかかるせん断力）を横軸にとり、藻類の減少の有無を○と×で示したものが図-2である。放流が短時間の場合（青）は、放流前の藻類量がおおよそ110mg m<sup>-2</sup>以上あると、付着藻類が減少した。長時間放流の場合（赤）は、放流前の藻類量が少なくても減少するケースが確認された。掃流力では、約15N m<sup>-2</sup>を超えると減少が確認されたが、小さい掃流力での実験では、放流前の藻類量も少なかったため、今後付着藻類の剥離に必要な掃流力の閾値を検証する必要があるだろう。

### 3.3 ダム下流における放流の効果検証

現地調査では、巖木ダム（松浦川水系）、宮ヶ瀬ダム（相模川水系）でのフラッシュ放流事業を対象に、ダム下流の付着藻類の剥離に及ぼす影響を評価した<sup>4),6)</sup>。巖木ダムでは1998年に、放流前流量0.8m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>に対して10.7m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>の放流量増が行われたが、藻類量（クロロフィルa量）は減少しなかった。宮ヶ瀬ダムでは2005年に、放流前15m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>に対して100m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>の放流が行われ、下流3km地点において藻類量が減少した。後者の事例では、糸状の藻類は他の形態の藻類に比べて剥離効果が小さかった。また、放流5～11日後には放流前と同等以上に藻類量が回復しており、剥離の効果は比較的短期的であることが分かった。前者

の事例で剥離効果が確認されなかった理由としては、放流前藻類量が少なかったことが挙げられる。

### 3.4 フラッシュ放流の効果最大化に向けた示唆

実験河川及び現地調査で得られた知見と他の既存研究から効果的なフラッシュ放流の条件として以下の点が重要と考えられる。

- (1) 放流前の藻類量が多いほど、放流による剥離効果が期待できる。
- (2) 放流後の付着藻類は時間の経過とともに回復するため、定期的な放流が必要である。
- (3) 流量の増加による剥離効果は、付着藻類の形態に依存して異なるため、流量と合わせて他の試みが必要である。
- (4) 効果的な流量（掃流力）は、河川規模や横断形状、勾配、河床材料によって変わるため、現地での計測に基づき設定する必要がある。

各要素の具体的な数値に関しては、現地での計測・計算に基づき設定する必要がある。実験河川の条件下（平常時流量0.1m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>、勾配1/200～1/560）では、放流前の藻類量がおおよそ110mg m<sup>-2</sup>以上、掃流力が15N m<sup>-2</sup>以上の時に藻類量が減少した。

## 4. 土砂管理を巡る研究

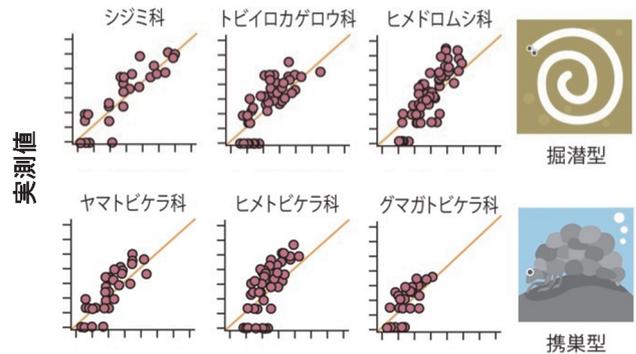
### 4.1 細粒土砂不足が引き起こす問題

ダム下流では土砂が供給されにくく、砂・小礫等相対的に小さい粒径集団が流出しやすいため、河床は粗粒化しやすい。このため、砂・小礫等を生息場として利用する底生動物や魚類を減少させる可能性がある。また、小規模洪水時にも流出しやすい河床表層の砂・小礫は、比較的高頻度に石礫表面の付着藻類に衝突することで、付着藻類の剥離・更新を促す。そのため、砂・小礫が欠乏傾向にあるダム下流では、流況の平滑化と相まって付着藻類の剥離・更新機会が減少する。また、流量増加のみでは砂・小礫等を利用する底生動物や魚類などの生物種の生息場形成が期待できない。これらの問題を改善するため、土砂供給の際は、大礫などの粒径集団ではなく、砂 (0.075~2mm)・小礫 (2~16mm) を中心とした供給が行われることが多い。ただし、供給量が過剰になった場合は、石礫が埋没することでそれらを利用する種の消失にもつながるため、河床環境の保全の観点からは適切な土砂供給手法の検討が必要である。

### 4.2 土砂供給による付着藻類の剥離効果の促進

土砂供給による付着藻類の剥離効果に関する現地調査<sup>7)</sup>、実験<sup>8)</sup>で得られた知見を紹介する。多摩川羽村堰において、2003年3月に土砂8,650m<sup>3</sup>が堰下流に投入された。土砂は出水時に徐々に流出し、5ヵ月後には全量が流出した。供給地点の下流2地点では、河床表面 (河床0~10cm) の流砂量が上流の約4倍 (約12g hour<sup>-1</sup>) となり、9月中旬ごろまで藻類量 (クロロフィルa量) はほぼ50mg m<sup>-2</sup>未満と上流よりも低く維持された。しかしながら土砂の流出が終わった後1~2か月で藻類量は土砂を投入していない上流とほぼ同等まで回復した。

また、共生センターにおいても流砂の有無による付着藻類の剥離検討がなされた。この実験では循環型管水路を用いて、比較的高流速 (~4.0m s<sup>-1</sup>) での検討が行われたのが特徴である。実験結果では、掃流砂を伴うと流速によらず藻類量がより減少することが分かった。今後は糸状藻類の剥離に効果的な掃流砂量の具体的な閾値探索が必要とされる。



個体数予測モデルの推定値

モデル式: 個体数 ~ 砂割合、小礫割合、底質粗度

図-3 土砂による個体数予測モデルと実測値との相関。縦軸は実際の調査による個体数、横軸は予測モデルによる推定値を示す。予測値と実測値の当てはまりがよい代表的な土砂指標種を示した。

### 4.3 砂や小礫の多寡に応答する底生動物種の探索

砂・小礫等の供給による生息環境の改善効果を客観的に評価するために、生息に土砂を必要とする指標種を選定した。東海地域の7のダム河川で行った調査データを用いて、砂と小礫の河床表層における割合と底質粗度を説明変数とした個体数の予測モデルを構築し、このモデルと実測値の当てはまりがよい種を指標種として選定した。その結果、シジミ科、トビイロカゲロウ科、ヒメドロムシ科のような砂に潜る掘潜型や砂で巣を作る携巢型と呼ばれる分類群が抽出された (図-3)。実際に置土による土砂供給を行った木曾川水系阿木川ダム下流で供給前後の個体数を調べたところ、土砂指標種の個体数割合が増加し、生息環境の改善効果が確認された<sup>9)</sup>。

### 4.4 石礫の埋没による魚類への影響評価

魚類は礫間を生息場とする種が多く、深い水深を好む種も多い。土砂供給によって礫間が埋没することや河床が上昇して浅くなることにより、魚類の生息に影響を及ぼすことが現地調査や実験によって分かってきた。矢作川の矢作第二ダム下流で2011年に行われた野外実験では、約10m<sup>3</sup>の砂 (代表粒径D<sub>60</sub>=2.0mm) を25m<sup>2</sup>の石礫河床上に投入し、石礫の埋没が魚類にどのような影響を及ぼすのかを調べた。覆砂された石礫河床に9m<sup>2</sup>の調査区を設定し、砂投入の前後で河床環境と魚類相の変化を調査した結果、砂投入から2週間後においても、調査した区画面積 (9m<sup>2</sup>) の6割以上



図-4 アユの摂食痕と石礫の露出高

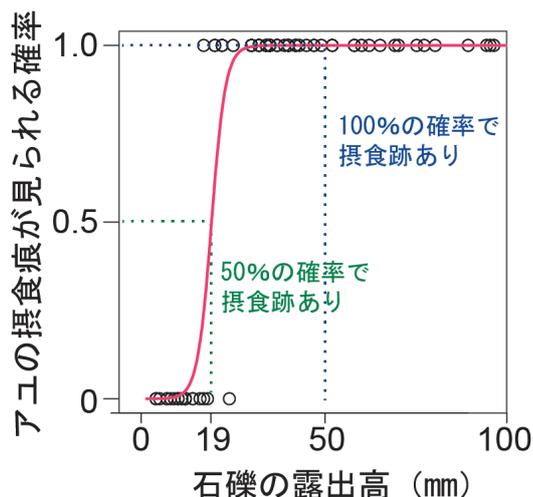


図-5 アユの摂食痕と石礫の露出高の関係性（一例）

が2mm以下の砂に覆われたままであり、水深も約40cmから20cm以下へと減少していた。そして、砂投入前に確認された魚類（約3個体  $m^{-2}$ ）が確認できない状態となった。

このような埋没による負の効果を回避するために、水産有用種であり、藻類食者でもあるアユの摂食行動に影響を及ぼさない埋没の閾値を検証した事例の一部を紹介する。矢作川中流域において、瀬を対象に3mの側線を6つ設定し、側線上に存在する20mm以上の石礫の露出高を測り、その石礫にアユの摂食痕があるかどうかを調べた（図-4）。アユの摂食痕の有無を応答変数、石礫の露出高を説明変数としたロジスティック回帰モデルで推定した結果、約19mmの露出高で50%、約50mmの露出高で100%の確率でアユの摂食痕が見られることが分かった（図-5）。このことから、アユが摂食するために一定以上の石礫の露出高が必要であることが分かった。また、現在進行しているプロジェクト研究においても、実験水路において石礫の埋没度を操作し、アユの採餌行動との関係性を観察したところ、20mmよりも50mmの露出高でアユの摂食回数が多くなることが分かりつつあ

る。今後、多地点での実地調査や異なる条件下での実験検証を行い、正確な閾値を明らかにする必要があるが、アユの摂食行動に影響を及ぼさない安全な閾値として、50mm以上の石礫の露出高を維持することが重要であることが示唆された。

#### 4.5 適切な土砂供給に向けた示唆

- (1) 掃流砂を伴う放流を行うことで繁茂した藻類の剥離・更新を促すことができる。
- (2) 土砂の多寡に応答する底生動物指標種を対象とすることで、生物の生息環境の改善効果を簡易かつ客観的に評価できる。
- (3) 過剰な土砂供給による石礫の埋没は、魚類個体数の減少やアユの採餌行動に影響するため、石礫が過度に埋没しないように供給土砂量を設定する必要がある。

これらの土砂に関する現地調査・検証実験によって得られた知見は、実際のダム下流再生事業における影響評価の考え方としてまとめており<sup>10),11)</sup>、現場への適用も進められている。

#### 5. おわりに

今後の課題として、個々の分類群だけでなく、生物間相互作用（捕食-被食関係など）も考慮した生態系への影響を幅広く評価する必要がある。例えば、土砂供給によって、剥離・更新された付着藻類や、河床環境の変化によって変化した底生動物群集が、それを餌とする魚類などの捕食者に対してどのような効果を及ぼすのかといった波及効果が挙げられる。加えて、陸域環境への影響評価も行っていく必要がある。フラッシュ放流による洪水攪乱は、水域だけでなく、陸域の植物や動物にとっても攪乱となり、供給された土砂は陸域にも堆積すると考えられる。さらに水域の水生昆虫は、羽化することで陸域の動物の餌に、陸域から落下した有機物（落ち葉など）や陸生昆虫は水生生物にとっての餌となることが知られている。このような水域・陸域を含んだ生態系全体への影響を評価していくことがダム下流環境の包括的な保全につながる。

フラッシュ放流や土砂供給がダム下流のどの流程まで改善効果を及ぼすのかといった影響範囲に関することも未解明である。放流の流量・継続時間や土砂供給量によって改善効果が及ぶ流程範囲

は異なると予想される。また、ダム下流の粗粒化現象は、下流に合流する支流から土砂が供給されることで緩和されることが分かっており<sup>12)</sup>、支流が合流しない場合は、より下流域にまで粗粒化が起こることが予想される。そのため、水系全体での土砂動態を把握し、水系一貫での総合的な土砂管理を行うことが重要となるだろう。また、河床変動計算などの水理モデルと生物の生息モデルを組み合わせることで、広域かつ長期的な生物の変化を予測していくことも今後の課題である。

## 謝 辞

本報告における一連の研究は過去の自然共生研究センター所属の職員、特に皆川朋子氏（現、熊本大学）、片野泉氏（現、奈良女子大学）、堀田大貴氏（現、建設技術研究所）の貢献によるものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Mori, T., Onoda, Y. and Kayaba, Y.: Geographical patterns of flow-regime alteration by flood-control dams in Japan, *Limnology*, Vol.19, pp.53-67, 2018
- 2) Biggs, B.J.F.: Patterns in benthic algae of streams, pp.36-38, *Algal Ecology* (eds. R. J. Stevenson, M. L. Bothwell and R. L. Lowe), 1996
- 3) 野崎健太郎、内田朝子：河川における糸状緑藻の大発生、*矢作川研究*、No.4、pp.159～168、2000
- 4) 皆川朋子、清水高男、島谷幸宏：流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討、*河川技術に関する論文集*、第6巻、pp.191～196、2000
- 5) 皆川朋子、福嶋悟、萱場祐一、尾澤卓思：出水が河床石面付着物に及ぼす影響に関する実験的検討、*河川技術論文集*、第9巻、pp.475～480、2003
- 6) 皆川朋子、福嶋悟、萱場祐一：ダム下流の河床付着膜の特徴とフラッシュ放流による掃流、*土木技術資料*、第49巻、第8号、pp.52～57、2007
- 7) 皆川朋子、福嶋悟、天野邦彦：土砂投入が付着藻類に及ぼす影響—多摩川永田地区を事例に一、*河川技術論文集*、第10巻、pp.477～482、2004
- 8) 萱場祐一、宮川幸雄、森照貴：恒久的堆砂対策に伴う微細土砂が底生性生物に及ぼす影響に関する研究、平成25年度土木研究所重点研究報告書、No.重.9、pp.1～13、2014
- 9) 萱場祐一、片野泉、皆川朋子：土砂還元によるダム下流域の生態系修復に関する研究、平成19年度土木研究所重点研究報告書、No.13.10、pp.1～6、2008
- 10) 萱場祐一、森照貴、小野田幸生、宮川幸雄、末吉正尚：ダムからの土砂供給が下流河川に生息する水生生物に及ぼす影響・効果の予測・評価手法の提案、*土木技術資料*、第58巻、第10号、pp.30～35、2016
- 11) 萱場祐一、堀田大貴、森照貴：ダムからの土砂供給に伴う水生生物の応答と予測・評価の枠組み、*土木技術資料*、第58巻、第10号、pp.8～13、2016
- 12) Katano, I., Negishi, J.N., Minagawa, T., Doi, H., Kawaguchi, Y. and Kayaba, Y.: Longitudinal macroinvertebrate organization over contrasting discontinuities effects of a dam and a tributary, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol.28, No.2, pp.331-351, 2009

末吉正尚



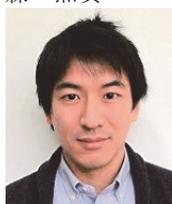
土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター 専門研究員、博士（農学）  
Dr.Masanao SUEYOSHI

小野田幸生



土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター 専門研究員、博士（理学）  
Dr.Yukio ONODA

森 照貴



土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター 研究員、博士（環境科学）  
Dr.Terutaka MORI

宮川幸雄



土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター 主任研究員、博士（工学）  
Dr.Yukio MIYAGAWA

中村圭吾



土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム 上席研究員、兼自然共生研究センター長、博士（工学）  
Dr. Keigo NAKAMURA