

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

萱場祐一・森 照貴・小野田幸生・宮川幸雄・末吉正尚

1. はじめに

ダム貯水池における堆砂問題の解決、ダム下流の環境改善等を目的として、ダム貯水池に堆積した土砂を下流へ流す取り組み（以下「土砂供給」という。）が幾つかのダムで実施、計画されている。土砂供給は、ダム下流における河道地形、河床の状態を変化させ、水生生物に影響を及ぼす可能性があるため¹⁾、この影響を予測・評価することが必要となる。

本稿では、土砂供給地点となるダム直下およびその下流域を対象とし、大礫・巨礫から構成される河床（粗粒化した河床）に砂～小礫程度の細粒土砂を供給した場合を想定し河床環境（河床材料の粒度組成、河床近傍の流速等）の変化に対する付着藻類、底生無脊椎動物、魚類の応答を概説した上で、試案した予測・評価手法の考え方を説明する。なお、別報²⁾において、予測・評価の基本的な枠組みを概説しているため、併せてご覧頂きたい。

2. 付着藻類

2.1 予測・評価の視点

2.1.1 評価対象

河川において、付着藻類は食物連鎖を支える主要な一次生産者であるとともに³⁾、河川の景観を左右する要因の一つにもなることから⁴⁾、土砂供給による影響を十分に考える必要がある。付着藻類は主に珪藻や緑藻、藍藻から構成され、いずれも光合成色素としてクロロフィル a を持つために、現存量の簡易な指標としてクロロフィル a 量を用いて評価されることが多い。しかし、付着藻類を評価するには光合成速度などの生産性や餌資源としての質に関連する無機物量や有機物量についても考慮する必要もある⁵⁾。また、付着藻類の種組成は重要な情報であることから、種数や種ごとの細胞数についても理解

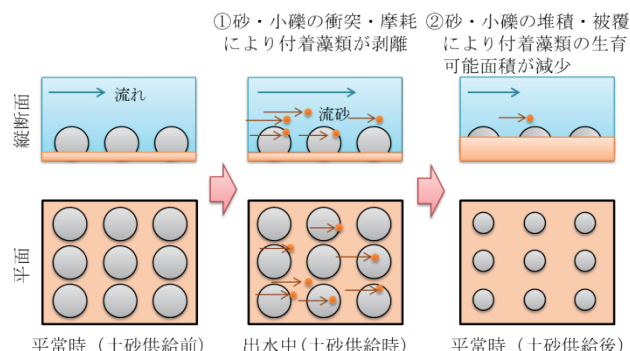


図-1 土砂供給により生じる現存量の低下イメージ

土砂供給に伴う現存量の低下は①砂・小礫等の細粒土砂が大礫・巨礫に衝突・摩耗することにより付着藻類が剥離する経路と②細粒土砂が堆積して付着藻類が生育できる面積が減少する経路の2つに分けることができる。

しておくべきである。このように付着藻類には幾つかの評価項目があるが、測定の簡便性を考えると、第一に評価すべき項目は瀬におけるクロロフィル a 量であり、本稿でもこの項目に焦点を当てる。ただし、クロロフィル a 量だけでは不十分な場合、生産性や種組成、無機物量や有機物量など、評価対象項目を追加する必要がある。

2.1.2 土砂供給による付着藻類の応答経路

土砂供給により砂・小礫が供給されることで、以下に示す2つの経路に沿って付着藻類の現存量（クロロフィル a 量）が減少すると考えられる^{1),6)}（図-1）。①供給された細粒土砂が流砂として河床上を移動し、これが大礫・巨礫に衝突することで付着藻類の剥離を引き起こす⁶⁾。②供給された細粒土砂が河床に堆積し、大礫・巨礫を被覆することで付着藻類が繁茂可能な面積が減少する。①は主として出水時に生じる短期的な経路であるのに対し、②は堆積した細粒土砂が再び掃流されない限り継続する長期的な経路である。したがって、現存量を予測する場合には、土砂供給による付着藻類の応答を①と②に分けてモデル化する等の工夫が必要となる。

2.2 予測・評価の手法

2.2.1 予測手法の考え方

土砂供給に伴う付着藻類の変化は、対象とする瀬において、付着藻類が生育可能な礫面積に単位面積

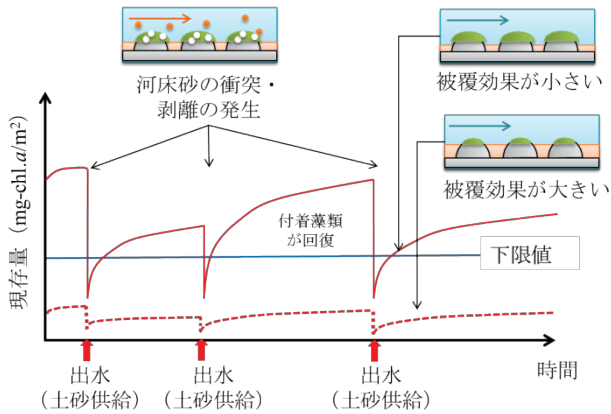


図-2 土砂供給に伴う現存量の変化の概念図

土砂供給量が適正な場合（実線）と過大な場合（点線）の例。土砂供給後の出水時には摩擦効果により現存量は低下するが、被覆効果が小さい場合には（実線）下限値を上回る回復を示すが、大きい場合には（点線）附着藻類の生育できる面積が小さいため、回復の程度が小さく下限値を下回ったままとなる。

あたりの現存量（クロロフィルa量）を乗じることによって予測できる⁷⁾。生育可能な礫面積は、河床変動計算等から算出された粒径別河床面積割合を元に推定することができる⁷⁾。また、単位面積あたりの現存量は、流速や水深、水温、栄養塩濃度、流砂量、粒径別河床面積割合などの説明変数から数理モデルを用いて推定できる⁷⁾。数理モデルを活用することで、平常時に増加し、出水時に減少する現存量の予測が可能となる。

数理モデルを用いた予測は①と②の経路を考慮したものであるが、実際には、細粒土砂の被覆の経路（②の経路）に沿った影響のみを考慮すれば、ある程度の予測・評価は可能である。その理由としては、①の影響は出水時が中心であり、出水後1～3週間程度で現存量が回復すること⁸⁾、②の経路に沿った影響は長期に及ぶこと、が挙げられる。

2.2.2 評価手法の考え方

附着藻類の現存量を予測した後は、その予測値が許容範囲内かどうかを評価すべきである。前述したように、土砂供給は二つの経路に沿って附着藻類の現存量を低下させる。このため、現存量の下限値を設定し、これを長期間下回らないように土砂供給方法を工夫することは大切である（図-2の実線は下回らないケース、点線が下回るケースに該当）。下限値は、リファレンス区間における附着藻類の時間変化を理解し、その変動幅をベースに設定することが基本的な考え方となる⁹⁾。また、附着藻類の餌としての資源量に着目し、十分な餌量を供給できるかどうかも評価の視点となる。例えば、水産重要種であ

るアユは附着藻類を主な餌とし、摂食量も極めて大きい¹⁰⁾。対象となる瀬において、アユの密度や摂食量から必要な資源量を既往研究等から推定し¹⁰⁾、これを目安に下限値を設定することも出来る。

3. 底生無脊椎動物

3.1 予測・評価の視点

3.1.1 評価対象

底生無脊椎動物とは、河床に生息する水生昆虫類や甲殻類、貝類などを指し、礫表面の附着藻類や河床に溜まった落ち葉、小型動物など様々なものを餌とする一方、魚類や鳥類などの餌として利用され、食物連鎖をつなぐ重要な役割を果たしている。生息場所である河床は、底生無脊椎動物の種数や生物量（密度やバイオマス）を規定する重要な要因であり、ダムによる土砂動態の変化は大きな影響を及ぼす¹¹⁾。そのため、底生無脊椎動物に対する土砂供給の影響を考える際、ダムが建設されたことによる土砂供給量の減少が既に影響を及ぼしている可能性が高いことを念頭に、予測・評価を行う必要がある。

底生無脊椎動物には様々な分類群が含まれ、日本の河川上流から中流では、カゲロウ目・カワゲラ目・トビケラ目・ハエ目に分類される水生昆虫類が主体となる¹²⁾。そのため、土砂供給による影響の予測および評価の対象としては、水生昆虫が中心となる。対象河川において、甲殻類や貝類などが多く採取される場合は、水生昆虫類と種数や生物量が大きく異なることから、分けて評価すべきであろう。また、底生無脊椎動物は季節変化が大きい¹³⁾、種数や生物量が多い冬から早春に調査を行うことを基本とし、その場所の生物相をより正確に理解するためには初夏から盛夏にかけても実施するのが好ましい。

3.1.2 土砂供給による底生無脊椎動物の応答

土砂供給による底生無脊椎動物の応答については、二つの観点から捉えるべきであろう。一つは、特定の種に注目した応答であり、もう一つは群集もしくは機能群全体が示す応答である。

底生無脊椎動物の中には、細粒土砂を巣材として利用する種や、細粒土砂に潜り込んで生活する種がいる。このような種に対して、土砂供給は正の効果を発揮し、新しく定着が確認される可能性や、密度が増加する可能性がある。一方、大礫に固着する種や、大きな礫間にクモの巣のような網を張る種に

とって、大量の細粒土砂が供給されることは負の効果となるかもしれない。土砂供給に対する種ごとのレスポンスについては、少しずつ研究が進められている¹⁴⁾。正の効果が発揮される例としてはヤマトビケラ属が挙げられる¹⁴⁾。負の効果が発揮される種としては、ヒゲナガカワトビケラやシマトビケラ属が候補として挙げられるが、詳細な検討については今後の研究を待つ必要がある。

底生無脊椎動物は、わずか1m²の範囲内に数十種以上も生息していることがあり、その多くが土砂供給に対する応答が不明である。また複雑な生物間相互作用（競争や捕食—被食関係）により、どの種が影響を受けるのかを予想するのが困難となる。そのため、重要種や注目種の応答に加え²⁾、底生無脊椎動物を群集もしくは機能群レベル（機能群とは餌や生息場所などが類似する種群をまとめたものである）で捉えて応答を考える必要がある。具体的には、群集や機能群ごとに種数や生物量、各種の相対個体数から算出される多様度指数や群集の類似性を評価可能な非類似度などを計算することで¹⁵⁾、土砂供給による応答の理解が進むだろう。

3.2 予測・評価の手法

3.2.1 予測手法の考え方

底生無脊椎動物は種数が多く、種ごとの生活様式の違いも大きいことから、土砂供給の応答を演繹的に理解することは、ほとんどの種において困難である。そこで、帰納的な方法を用いた予測として、既存データの活用や対象河川から採取したデータを用いた統計モデルの利用が考えられる。

予測モデル（統計モデル）の導出には、河床環境（河床表層の粒度組成が対象になることが多い）及び底生無脊椎動物に関するデータが必要となる。評価対象となる河川もしくは周辺河川にて、既存のデータが存在する場合には、それを活用することで予測モデルを作成できる場合もある。しかし、より良い予測と評価のためには、既存のデータを集めるとともに、リファレンス区間（リファレンス区間についての詳細は別報²⁾に記述）での調査が必要となる²⁾。河床表層の粒度組成を表す簡易な指標は、Bain et al. (1985) によって提示された方法¹⁶⁾など数多くある。また、供給される土砂の粒径区分をもとに、例えば砂と小礫だけに注目し、河床に占める割合を指標として用いる方法もある。

底生無脊椎動物の調査は、水辺の国勢調査のマニュアルに記載されている方法を参考にするのが良い。ただし、定量調査に用いるサーバーネットでは4サンプル以上取ると、群集レベルでの調査の信頼性が増す¹²⁾（マニュアルでは2サンプルとなっている）。得られた生物種のデータをもとに、重要種・注目種のリストアップと群集全体から種数などの指標を求める。一連の手順から、底生無脊椎動物と河床表層の粒度組成との関係性を一般化線形モデルなどの統計モデルで表し¹⁷⁾、これを予測モデルのベースとする（図-3）。両者の関係性が直線的とは限らないため、二次項を含めたモデルを考えるなど、予測とするモデルの検討は、統計学的手法を用い、十分に検討すべきである¹⁷⁾。次に、土砂供給後の河床表層の粒度組成の変化を河床変動計算等で予測し、作成した統計モデルにおいて、底生無脊椎動物がどの程度変化するかを予測する（図-3）。なお、全国の河川を対象に図-3と同様の予測モデル（種数および特定の種の存在確率モデル）を作成できることを確認している（未発表）。

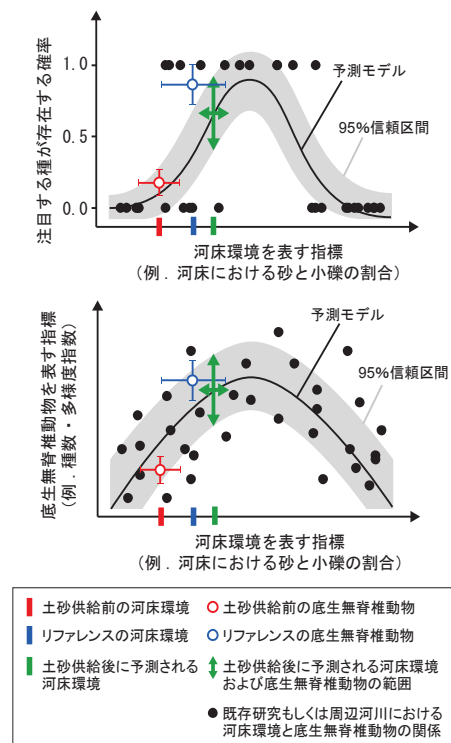


図-3 底生無脊椎動物における種レベル（上）と群集レベル（下）の予測と評価の概念図

予測モデルをもとに、土砂供給前の状況（赤）から、土砂供給による河床環境の変化に応答した底生無脊椎動物の変化（緑）が予測される。この時、リファレンスでの調査結果（青）が示す標準誤差の範囲（図中のエラーバー）と、予測される河床環境と底生無脊椎動物が示す信頼区間に重なりがあるか否かを評価手法として用いることが可能である。

3.2.2 評価手法の考え方

土砂供給による河床表層材料の粒度が河床変動計算等から予測され、その変化に対する底生無脊椎動物の応答が統計を用いた予測モデルから求められる。このとき、導き出された対象種の存在確率や群集全体が示す種数・多様度指数が、土砂供給前に比べて大きく増加するほど、好ましい生態系となりえるわけではないことに注意すべきである。例えば、対象河川が本来は砂床河川であった場合には、種数や多様度指数は小さかったかも知れない。重要なことは、予測モデルから得られた状況が、ダムが建設される前もしくはリファレンスから推定されるダム建設前の状況と比較して、どのような関係性にあるかを注意深く考えることである。ひとつの評価手法としては、予測される河床の表層粒度と底生無脊椎動物が、リファレンスの結果と乖離しているか否かを判断材料にすることが挙げられる。リファレンスで得られたデータは複数のサンプルを含むことから、平均値と標準誤差（図-3のエラーバー）などの幅（範囲）を示すことができる。予測される河床の状態に応じた底生無脊椎動物についても、統計モデルの95%信頼区間をベースに幅（範囲）を求めることができる。この両者を利用し、リファレンスでの結果が示す標準誤差の範囲と、予測される河床の状態および底生無脊椎動物が示す信頼区間の範囲に重なりがあるか否かをもとに予測の評価ができるだろう。ここでは、標準誤差を取り上げたが、サンプル数やリファレンスの環境がどれだけ変異性に富むかに応じて、標準偏差や90%信頼区間などについても考慮しても良いだろう。

4. 魚類

4.1 予測・評価の視点

4.1.1 評価対象

魚類は底生性と遊泳性に分けて予測・評価を行う。底生性魚類は河床表層に生息するため、河床表層の土砂の粒径や礫間の大きさ等が重要となる¹⁸⁾。遊泳性魚類は表層から底層までを広く遊泳するだけでなく、産卵、採餌において河床を利用する種も多いことから、河床表層の状態に加えて水深・流速等も加味した評価が必要となる。

瀬は底生魚、遊泳魚の双方に対して評価対象となるが、魚類は付着藻類・底生動物と異なり、現地調査において定量的な把握を行うことは難しい。

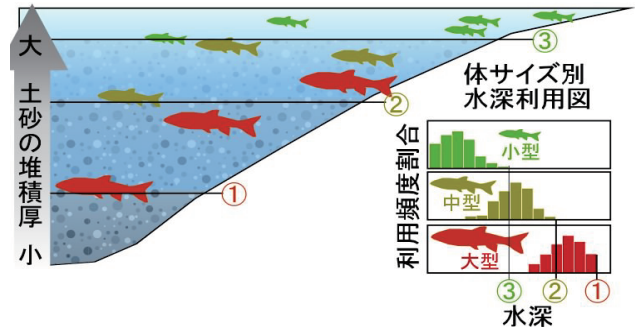


図-4 瀬における遊泳魚の空間利用と土砂堆積による影響の予測に関する概念図

大型個体ほど深部を利用する傾向があり、その水深利用図[右]を魚種・体サイズ別に作成することで水深の選好性を表示できる。水深の選好性から影響が及び始める水深の目安①～③を求められるため、土砂の堆積厚による水深減少が影響を及ぼすかの参考にできる。

また、河床の状態を含む生息環境から密度（個体数）を予測することは容易ではない。このため、予測・評価は、瀬における対象魚の在・不在（生息する・生息しない）を対象とするとよい。

瀬においては、供給土砂の堆積に起因する瀬の縮小に対して、体サイズの大きな遊泳魚の生息が困難になることが課題となる（図-4）¹⁹⁾。体サイズが大きくなる種は限られていることから、瀬の縮小の影響を受けそうな魚種を抽出し予測・評価対象種とする。なお、アユのような水産魚種は在・不在だけでなく、個体数密度、体サイズも重要になることが多い。この点については土木研究所において現在継続して研究を実施しているので、別途成果を報告する機会を設けたい。

4.1.2 土砂供給による魚類の応答

土砂供給方法によっても異なるが、瀬では粗粒化した河床に細粒土砂が過剰に供給されると、まず、大礫・巨礫によって形成されていた微小な空間が埋まり礫下・礫間を利用するヨシノボリ類が影響を受ける²⁰⁾。更に供給量が増加すると大礫・巨礫が埋没し、ここを餌場とするアユやオイカワだけでなく、河床近傍の低流速域を利用する遊泳魚も影響を受ける可能性がある²¹⁾。一方、河床の細粒化が進むと、ここを利用するカマツカなどの生息が期待できる。

瀬では、もともと細粒土砂が多い傾向があり、土砂供給による河床表層粒径の変化は大きくないと考えられる。一方、土砂堆積による瀬の水深の減少は、瀬の深部が大きな遊泳魚に利用される傾向があるため、遊泳魚の中でも体サイズが大きくなる種

に対して影響が大きいと考えられる。

4.2 予測・評価の手法

4.2.1 予測手法の考え方

予測においては、河床変動計算等に基づき推定した土砂供給に伴う河床の地形や表層の粒度組成に、対象魚種が選好する生息場の物理環境を重ね、対象魚種が選好する生息場所の量を定量化する。そして、この結果を用いて生息可能性を推定する。

瀬では河床の表層材料の粒径（以下「表層粒径」という）の変化が大きいことを鑑み、表層粒径を用いて簡易的に影響を把握する手法と、表層材料の粒径に加えて流速・水深等の要素を加味し、詳細に予測する手法がある。簡易的な予測では、土砂供給による表層粒径の変化を河床変動計算等から推定し、これに対象魚種が選好する粒径を重ねることで対象魚の生息場所量の変化と対象魚種への影響の概略を予測することができる（図-5）。簡易的な予測をより定量的に行う場合には、現地調査や既往研究に基づき表層粒径と対象魚種の在・不在データとの関係を明確にし、生息確率の予測式を作成して対象魚の生息可能性を判断する（図-6）。この予測式を用いれば、細粒化が進んだ場合の種の消失だけでなく、過去に消失したと考えられる種（リファレンスで見られる魚種）の生息回復の効果を予測することができる。

表層材料だけでなく流速・水深の変化も大きい場合には物理環境生息場評価モデルを用いてより詳細な予測を行うとよい。本手法は他の文献等に詳細が記述されているので、参考にして欲しい²²⁾。

淵における予測は、河床変動計算等によって推定された淵の水深に、対象魚種が必要とする水深を重ねることにより行う。対象魚種が必要とする水深は体サイズによって異なるため、体サイズと水深との関係を事前に明確にする必要がある。このためには、対象水域における幾つかの淵において潜水調査を行い、個体サイズ別の利用水深の頻度分布を作成し選好性を整理する必要がある（図-4）。やむなく他の水域における淵の調査データを利用する場合には、淵の規模によって同一魚種・同程度の体サイズでも利用する水深が変化するので注意を要する。

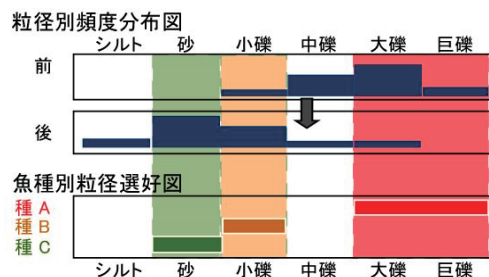


図-5 瀬における簡易的な予測と評価の概念図

粒径別頻度分布図：河床表層粒径を粒径区分ごとの頻度分布で表した図、魚種別粒径選好図：既往知見を基に各魚種の選好する粒径区分を表した図。この両者を重ねることで対象魚種の生息可能性を予測する。たとえば、種Aは土砂供給後に選好する大礫・巨礫の減少[赤部分の頻度分布図での減少]により生息が難しくなると判断する。なお、ある粒径集団の割合が10%未満となった場合には、当該粒径集団の消失とみなす等の判断が必要となる。

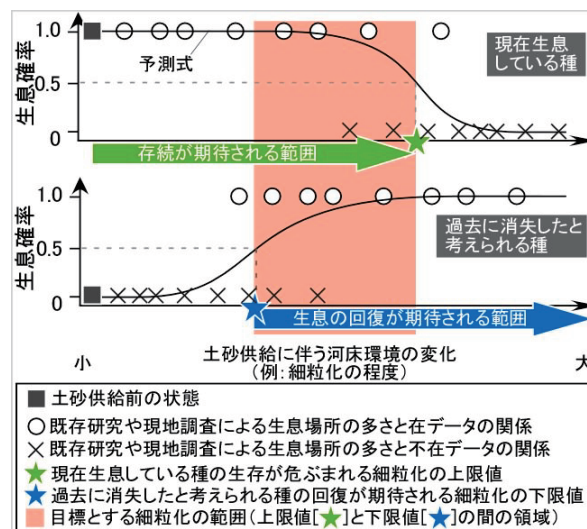


図-6 魚類の生息可能性の予測手法と評価の概念図

河床環境と魚種の在[○]・不在[×]のデータから、河床環境の変化に対する生息確率を予測する式を統計的に求め、生息確率が0.5となる河床環境を閾値として求める[星印]。現在生息している種[例：図5の種A]については、その閾値以下で存続が期待される範囲かで評価する[上図緑矢印]。逆に、過去に消失した種[例：図5の種C]では、その閾値以上で生息の回復が期待される範囲かで評価する[下図青矢印]。横軸をそれぞれの予測手法における生息場所の変化量に置き換えることで、同様に評価することができる。

4.2.2 評価手法の考え方

評価の基本的な考え方は、底生無脊椎動物で述べたものと同様であり、予測される状況と現況およびダム建設前もしくはリファレンス区間と比べて、現在生息している種が消失しないことに加えて、ダム建設前もしくはリファレンス区間で確認されているが、現在は生息していない種の生息可能性も判断材料として評価するとよい。

5. まとめ

本稿では、代表的な水生生物の分類群である付着藻類等について対象種等を設定し、提案している予測・評価手法を概説した。本手法は試験的な適用段階にあることから、今後、有効性の確認を進め、改良を図りながら精度を高めていきたい。

参考文献

- 1) 坂本博文、谷崎 保、角 哲也：河川土砂還元を組み合わせた真名川ダム弾力的管理試験「フラッシュ放流」、河川技術論文集、Vol.11、pp.273~278、2005
- 2) 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、Vol.58、No.10、pp.8~13、2016
- 3) Lamberti G.A., Steinman A.D.: A comparison of primary production in stream ecosystems, Journal of the North American Benthological Society, Vol.16, No.1, pp.95-104, 1997
- 4) 皆川朋子、福嶋悟、萱場祐一：河川流量管理のための河床付着物の視覚的評価に関する研究、河川技術論文集、Vol.11、pp.553~558、2005
- 5) 宮川幸雄、森照貴、小野田幸生、萱場祐一：濁水に含まれる無機物の堆積が付着藻類の一次生産に及ぼす影響、土木技術資料、Vol.56、No.2、pp.34~37、2014
- 6) 萱場祐一、小野田幸生：掃流砂が一次生産速度に及ぼす影響—被覆効果と摩耗効果に着目した砂供給実験—、応用生態工学第15回金沢大会 講演集、pp.127~128
- 7) 萱場祐一、宮川幸雄、小野田幸生、堀田大貴、末吉正尚：ダムからの土砂供給に伴う河床環境の変化が水生生物に及ぼす影響に関する研究、平成27年度プロジェクト研究報告書、2016
- 8) De Nicola D.M., McIntire C.D., Lamberti G.A., Gregory S.V., Ashkenas L.R. : Temporal patterns of grazer-periphyton interactions in laboratory streams, Freshwater Biology, Vol.23, pp.475-489, 1990
- 9) 萱場祐一、皆川朋子、真田誠至：河床の生態的健全性を維持するための流量設定手法に関する研究、平成22年度重点プロジェクト研究報告書、2011
- 10) 深見公雄、水成貴之、久保田浩、西嶋敏隆：高知県下の二河川における付着藻類の増殖速度およびアユによる藻類消費速度の見積もり、水産増殖、Vol.42、No.2、pp.199~206、1994
- 11) 池淵周一 編：ダムと環境の科学 I ダム下流生態系、285p、京都大学学術出版会、2009
- 12) 水野信彦、御勢久衛門：河川の生態学 補訂新装版、築地書館、1993
- 13) 西村登、信本励、三橋弘宗：山陰・北陸・近畿地方16河川における底生動物の現存量とそれに関連する要因、ホンザキグリーン財団研究報告、Vol.5、pp.161~206、2001
- 14) 片野泉、根岸淳二郎、皆川朋子、土居秀幸、萱場祐一：土砂還元によるダム下流域の修復効果検証のための指標種の抽出、河川技術論文集、Vol.16、pp.519~522、2010
- 15) Magurran A.E. : Measuring Biological Diversity, Wiley-Blackwell, 2008
- 16) Bain M.B., Finn J.T., Booke H.E.: Quantifying stream substrate for habitat analysis studies, North American Journal of Fisheries Management, Vol.5, pp.499-506, 1985
- 17) 久保拓弥：データ解析のための統計モデリング入門、岩波書店、2012
- 18) 小野田幸生、遊磨正秀：魚類生息環境としての河川河床の動態、土と基礎、Vol.55、pp.33~40、2007
- 19) 水野信彦：魚にやさしい川のかたち、135p、信山社、1995
- 20) 小野田幸生、萱場祐一：石礫河床への大量の覆砂が魚類生息密度に及ぼす影響について、河川技術論文集、Vol.19、pp.525~530、2013
- 21) 原田守啓、小野田幸生、萱場祐一：粗粒化した石礫河床への土砂供給が遊泳性魚類の空間利用に及ぼす影響に関する一考察、土木学会論文集B1(水工学)、Vol. 70、No.4、pp.I_1339~I_1344、2014
- 22) 玉井信行、奥田重俊、中村俊六：河川生態環境評価法 潜在自然概念を軸として、270p、東京大学出版会、2000

萱場祐一



土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター 上席研究員、博(工)
Dr. Yuichi KAYABA

森 照貴



東京大学総合文化研究科広域システム科学系特別研究員、博(環境科学)
Dr. Terutaka MORI

小野田幸生



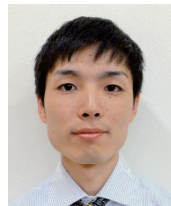
土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター 専門研究員、博(理)
Dr. Yukio ONODA

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
Yukio MIYAGAWA

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(農)
Dr.Masanao SUEYOSHI