

耳川水系ダム通砂による 魚類への影響予測の事後評価

EX POST EVALUATION OF EXPECTED IMPACT OF SEDIMENT SLUICING ON FISH IN THE MIMIKAWA RIVER BASIN

大塚海斗¹・森遼太郎²・井原高志³・齋藤剛⁴・吉村健⁵・鬼倉徳雄⁶
Kaito OTSUKA, Ryotaro MORI, Takashi IHARA, Tsuyoshi SAITO, Takeshi YOSHIMURA
and Norio ONIKURA

¹非会員 工修 九州電力㈱ 土木建築技術センター (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通2-11-82)

²正会員 工修 九州電力㈱ 日向水力センター (〒883-8533 宮崎県日向市北町1-112)

³非会員 農修 九州大学附属水産実験所 (〒811-3304 福岡県福津市津屋崎4-46-24)
西日本技術開発㈱環境部 (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁴非会員 学士 西日本技術開発㈱環境部 (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁵正会員 工博 京都大学 防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁶非会員 農博 九州大学附属水産実験所 (〒811-3304 福岡県福津市津屋崎4-46-24)

宮崎県耳川水系では、2005年台風14号の災害を契機に、河川管理者である宮崎県が2011年10月に耳川水系総合土砂管理計画を策定した。九州電力㈱は、本計画の中核的な事業としてダム通砂を実施しており、通砂によりダム下流の河床材料の粒度組成が変化し、生物の生息場の変化につながるものが想定される。そのため、通砂の効果や影響を把握することは、今後の総合土砂管理を検討する上で有益である。既往研究では、河床粒度との関係性が深い種としてカマツカ及びボウズハゼを対象に、通砂前の現地調査データから出現予測モデルを構築し、通砂後の両種の出現ポテンシャルの変化を推定している。本研究では、通砂後の現地調査データにより予測モデルの精度検証を行い、既往予測と実測データを比較することで、本予測手法の有効性を検証するとともに、通砂による魚類への効果や影響を推定した。その結果、本予測手法は通砂効果等の事前予測に有効であることが示され、通砂がダム下流の砂分増加及びカマツカの生息場創出に寄与している可能性が示唆された。

Key Words: *sediment sluicing, ex post evaluation, Species Distribution Model: SDMs, GLM, ROC analysis, cutoff point, habitat quality*

1. はじめに

九州南東部に位置する宮崎県耳川水系では、2005年の台風14号により、河川やダム貯水池に大量の土砂が流入し、流域市町村で甚大な浸水被害が発生した。この災害を契機に、河川管理者である宮崎県は、2011年10月に耳川水系総合土砂管理計画を策定した¹⁾。耳川水系内に7つのダムと発電所を有する九州電力㈱は、耳川水系総合土砂管理計画の中核的な事業として、ダム通砂を実施している²⁾。ダム通砂は、台風による大規模出水時に貯水池の水位を低下させ、河川状態を再現することにより、上流からダムに流入する土砂をダム下流へ通過させる取り組みである³⁾。本取り組みは、2017年から西郷ダムと大内原ダムの2ダム連携で、2021年からは上流の山須原ダ

ムを加えた3ダム連携で実施されている²⁾。

ダム通砂を実施した場合、河川環境の主要な変化の一つとして、ダム下流の河床材料の粒度組成が変化し、生物の生息場の変化につながるものが想定される⁴⁾。また、ダム通砂による生物への効果や影響を定量的に把握することは、今後の総合土砂管理を河川生態系から検討する上で極めて有益である。既往研究⁵⁾では、ダム通砂開始前（以下、通砂前）に現地調査を実施し、生物生息データ（魚類の在／不在）と物理環境データを取得している。さらに、ダム通砂に伴う河床粒度の変化に着目し、河床粒度等の物理環境との関係性が深い種としてカマツカ及びボウズハゼを選定し、物理環境データと在／不在データを用いて、両種の出現予測モデル（以下、予測モデル）を構築している。これにより、ダム通砂開始後（以下、通砂後）の両種の出現ポテンシャルの変化を事前に推定

表-1 既往研究⁵⁾条件一覧表

項 目	条 件	
予測モデル		河床粒度等の物理環境との関係性が深い種（カマツカ、ボウズハゼ）を選定
	モデル式	■カマツカ AUC : 0.937 $P(s) = 100 \times \frac{1}{1 + \exp(-f(s))}$ $f(s) = -2.774 + 0.204S - 0.002S^2 \quad (S : \text{砂分含有率})$ ■ボウズハゼ AUC : 0.939 $P(CV, I) = 100 \times \frac{1}{1 + \exp(-f(CV, I))}$ $f(CV, I) = -8.097 + 5.618CV + 0.316I - 0.003I^2 \quad (CV : \text{平均流速}, I : \text{石分含有率})$
出現ポテンシャル予測		ダム通砂運用時
	予測手法	従来の運用時
	予測範囲	下記の流量条件において平面二次元河床変動計算モデル ³⁾ にて算出した物理環境予測結果を上記予測モデルに入力
	流量条件	大内原ダム下流（耳川河口からの距離：18k800～23k600 ⁴⁾ ）
	ダム操作	予測範囲の河床形状及び河床粒度への影響が最も大きく現れる出水を採用 ピーク流量：1/5確率流量，大内原ダム地点2, 100m³/s 出水波形：実績波形のうち最緩波形，ダム通砂時間が長い条件
	ダム操作	ダム通砂運用を実施
	ダム操作	ダム通砂運用時と同一の流量条件で従来運用を実施

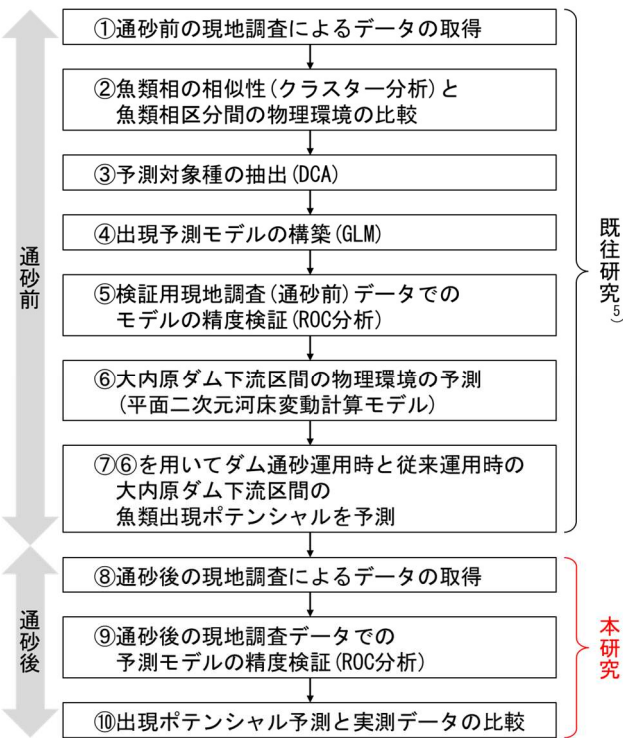


図-1 研究手順

している。一方で、通砂後にはダム下流の河床材料の粒度組成の変化に伴い、両種の生息場や生息状況に何らかの効果や影響が生じていると考えられるが、通砂後の調査結果は十分に整理・評価されておらず、その実態は明らかではない。そこで本研究では、通砂後の現地調査データを用いて既往の予測モデルの精度検証を行うとともに、通砂前後における出現ポテンシャル予測結果と実測データを比較することで、本予測手法の有効性を検証するとともに、ダム通砂が魚類に与える効果や影響を推定する。

2. 方法

(1) 研究手順

研究手順を図-1に示す。既往研究⁵⁾で実施した通砂前の現地調査と同地点にて通砂後の現地調査を実施し、生物生息データ及び物理環境データを取得した。次に、既往研究⁵⁾により構築したカマツカ及びボウズハゼの予測モデルについて、通砂後の物理環境データを用いて出現ポテンシャル（連続変数）を算出し、生物生息データ（二値変数）との比較により、通砂後の予測精度を検証した。最後に、現地調査で取得した物理環境データを予測モデルに入力し、通砂前後における両種の出現ポテンシャル予測結果及び現地調査により得られた在／不在データを比較することで評価した。

次に、既往研究⁵⁾で選定した予測対象種及びその予測モデル式、並びに予測モデルを用いたダム通砂運用時と従来運用時における出現ポテンシャル予測での諸条件を表-1に示す。ダム通砂の実施により、ダム下流の河床粒度の変化が想定されることから、予測対象種には、河床粒度等の物理環境との関係性が深い種として、カマツカ及びボウズハゼを選定した。また、カマツカの予測モデルでは、砂分含有率及びその二乗項が説明変数として選択されており、ボウズハゼの予測モデルでは平均流速、石分含有率及びその二乗項が選択されている。さらに、ダム通砂運用時の両種の出現ポテンシャルの算出には、既往の検討³⁾により構築した平面二次元河床変動計算モデルを用いた。具体的には、予測範囲（大内原ダム下流：耳川河口からの距離18k800～23k600⁴⁾）において、河床形状及び河床粒度への影響が最も大きく現れると想定される出水条件（ピーク流量：1/5確率流量，大内原ダム地点2,100m³/s；出水波形：実績波形のうち最緩波形，

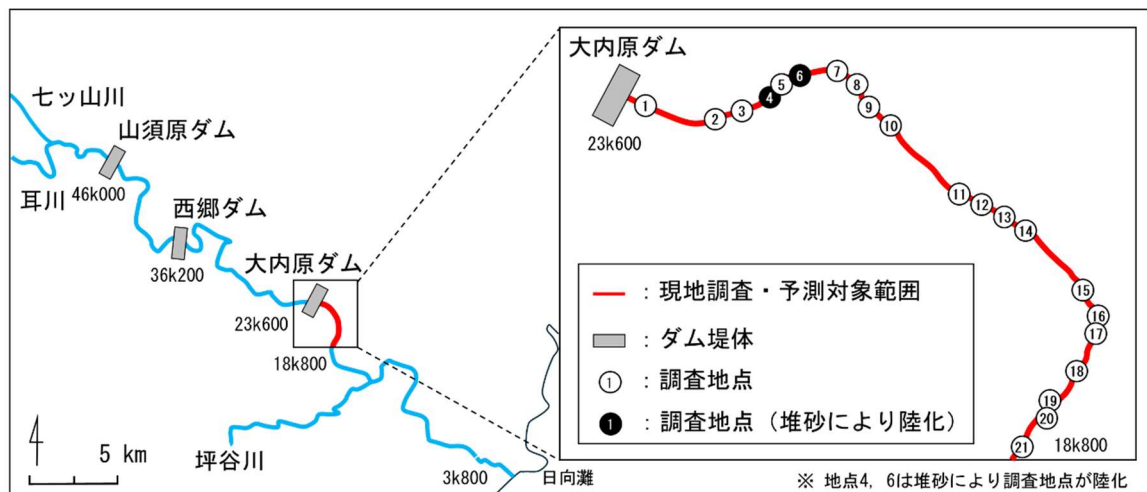


図-2 既往研究⁵⁾での現地調査・予測対象範囲

ダム通砂時間が長い条件)における物理環境予測結果を用いた。また、従来運用時については、上記と同一の流量条件のもとでダム通砂を実施しなかった場合の予測結果を用いた。これらを予測モデルに入力することで、予測範囲内におけるカマツカ及びボウズハゼの出現ポテンシャルを予測した。

(2) 研究対象地

既往研究⁵⁾で2015年11月11日～13日に実施した予測モデル検証用の現地調査(以下、通砂前の現地調査)21地点、並びにダム通砂運用時と従来運用時のカマツカ及びボウズハゼの出現ポテンシャル予測対象範囲を図-2に示す。既往研究では、調査地点は現地調査・予測対象範囲内において、アクセスが可能かつ安全に調査を実施できる地点が選定されており、本研究においても同様に、既往研究で選定された地点を調査地点とした。なお、地点4、6については、通砂後に複数回の出水により河道形状が変化し、堆砂により陸化していたことから、調査地点から除外した。

また、大内原ダムは、2017年よりダム通砂を開始しており、通砂後の現地調査時まで、計6回のダム通砂を経験している²⁾。内訳としては、平均年最大流量1,500m³/s程度の出水が1回(2017年)、1/5確率流量2,100m³/s程度が3回(2018年、2020年、2023年)、1/10確率流量3,000m³/s程度が1回(2024年)、及び既往最大流量5,400m³/s程度が1回(2022年)である。

(3) 通砂後の現地調査

通砂後の現地調査は、2025年10月21日に計19地点で実施し、生物生息データと物理環境データを取得した。

生物生息データは、上記19地点においてシュノーケリングによる潜水目視確認(1地点あたりの努力量:12分)により、カマツカ及びボウズハゼの在/不在を確認した。物理環境データは既往研究⁵⁾と同様に、上記19地点で流速と水深を計測した。具体的には、各地点の上流・中

流・下流の3ライン上において、各3ポイントを計測し、合計9ポイントの平均値を代表値とした。また、河床材料については、面積格子法⁶⁾により代表ポイントにおいて砂分含有率(粒径0.075mm～2mmの割合)及び石分含有率(粒径75mm以上の割合)を測定した。

さらに、今回取得した通砂後の物理環境データと既往研究⁵⁾で取得した通砂前の物理環境データについて、Mann-WhitneyのU検定を用いて比較した。なお、解析には「R ver.4.5.2(<https://www.r-project.org/>)」を用いた。

(4) 通砂後の出現予測モデルの精度検証

現地調査で取得した物理環境データを予測モデルに入力し、各調査地点のカマツカ及びボウズハゼの出現ポテンシャルを算出した。通砂後の現地調査結果に基づく予測モデルの精度を検証するため、出現ポテンシャルを連続変数、現地調査で取得した両種の在/不在データを二値変数としてROC分析^{7), 8)}を行い、AUCを算出するとともに、在/不在の閾値を算出した。なお、これらの解析には「R ver.4.5.2」を用いた。

(5) 通砂前後の出現ポテンシャルと実測データの比較

(4)で算出した通砂後の出現ポテンシャルと既往研究⁵⁾で算出した通砂前の出現ポテンシャルをMann-WhitneyのU検定を用いて比較した。なお、解析には「R ver.4.5.2」を用いた。

さらに、通砂前後の生息場占有率⁹⁾(出現地点数/適正生息場数)を算出した。ここで、適正生息場数は、カマツカまたはボウズハゼの生息に適すると判断される生息場数(出現ポテンシャルがROC分析により算出した在/不在の閾値を超える地点数)とした。また、出現地点数は、適正生息場のうち、現地調査により対象種の生息が確認された地点数とした。なお、本研究では通砂前の状態を基準として通砂後の変化量を評価することを目的としているため、通砂後の適正生息場数の算出においても、通砂前の閾値を用いた。

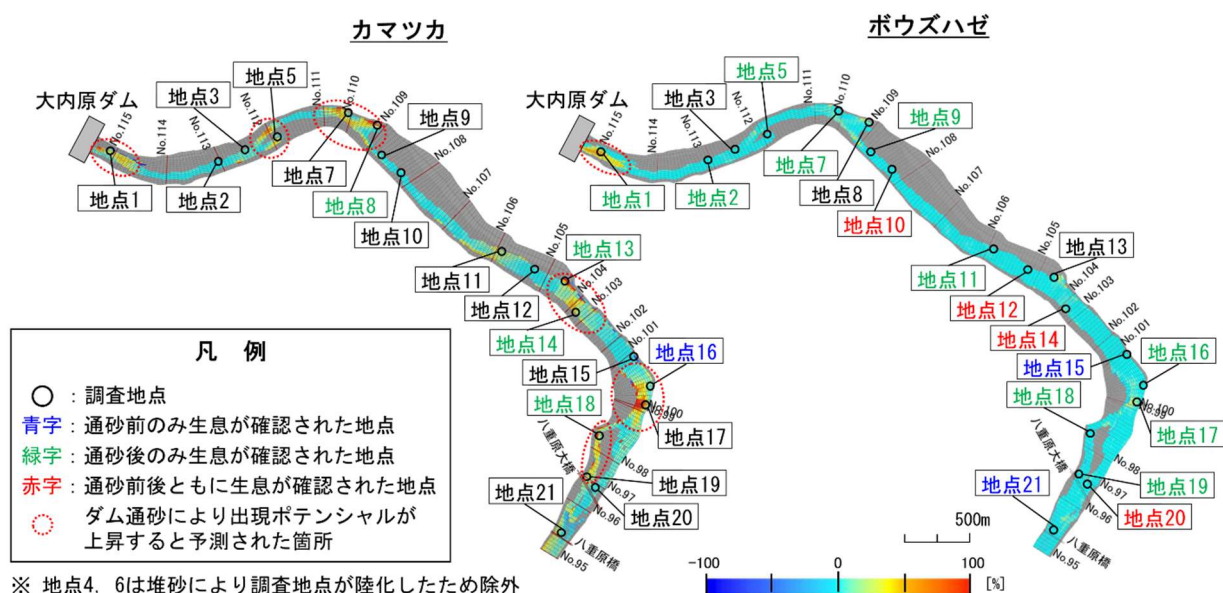


図-3 出現ポテンシャル予測結果（通砂運用—従来運用との差分）⁵⁾とカマツカ及びボウズハゼの在／不在

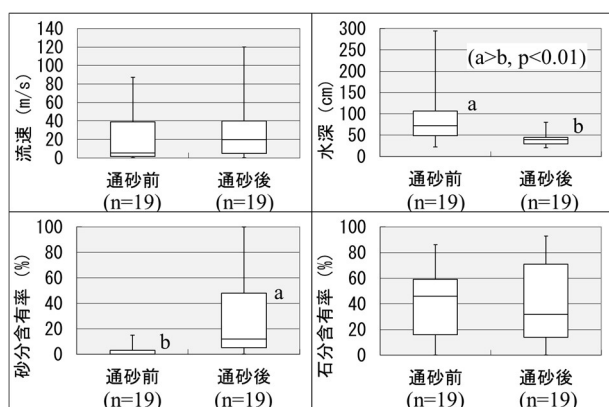


図-4 通砂前後の物理環境の比較

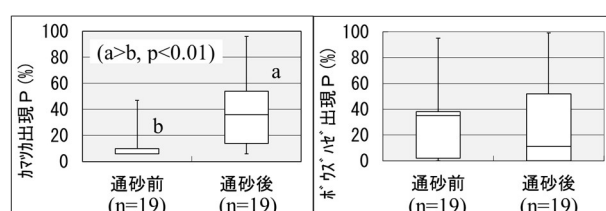


図-5 通砂前後の出現ポテンシャルの比較

3. 結果

(1) 通砂後の現地調査

既往研究⁵⁾で整理されたダム通砂運用時と従来運用時のカマツカ及びボウズハゼの出現ポテンシャル予測結果の差分に、現地調査による両種の生息確認結果を重ねたものを図-3に示す。出現ポテンシャルの差分が正の場合、各メッシュを黄色～赤色で示し、通砂運用によるポテンシャルの増加を意味する。一方、差分が負の場合、各メッシュを青色～濃青色で示し、その低下を意味する。なお、ポテンシャルの低下が認められた箇所はカマツカのダム直下左岸の一部に限られ、他の大部分では、上昇が認められた、または顕著な変化が認められなかった。

カマツカの生息が確認された地点数は、通砂前は1地点（地点16）のみであったが、通砂後は4地点（地点8, 地点13, 地点14, 地点18）へと増加していた。また、これらの地点はいずれも既往研究⁵⁾において、ダム通砂により出現ポテンシャルが上昇すると予測されていた地点

（図-3赤破線囲い箇所）と一致した。一方、ボウズハゼについては、既往の予測では通砂前後で顕著な変化は生じないとされていたが、実測では通砂前が6地点に対し、通砂後は14地点へと増加していた。

次に、通砂前後の物理環境を比較した結果（図-4）、水深及び砂分含有率において有意な差が認められた（水深：通砂前中央値72, 通砂後中央値40, $p < 0.01$ ；砂分含有率：通砂前中央値0, 通砂後中央値12, $p < 0.01$ ）。

(2) 通砂後の出現予測モデルの精度検証

通砂後の現地調査結果を用いて、カマツカ及びボウズハゼの出現ポテンシャル（連続変数）と実測データ（二値変数）に基づくROC分析を行った。その結果、カマツカのAUCは0.93, ボウズハゼのAUCは0.72であった。一般的に、AUCが0.9を超えると極めて高い予測精度、0.7を超えると適度な精度を有するとされている⁸⁾ことから、両種の予測モデルは通砂後においても高い精度を有することが確認された。さらに、これらの結果及び既往の精度検証⁵⁾を踏まえると、本予測モデルは通砂前後を通じて両種の生息場を高精度に再現可能であり、出現ポテンシャルの比較・評価に適応可能であると判断された。

(3) 出現ポテンシャル予測と実測データの比較

図-5に通砂前後のカマツカ及びボウズハゼの出現ポテ

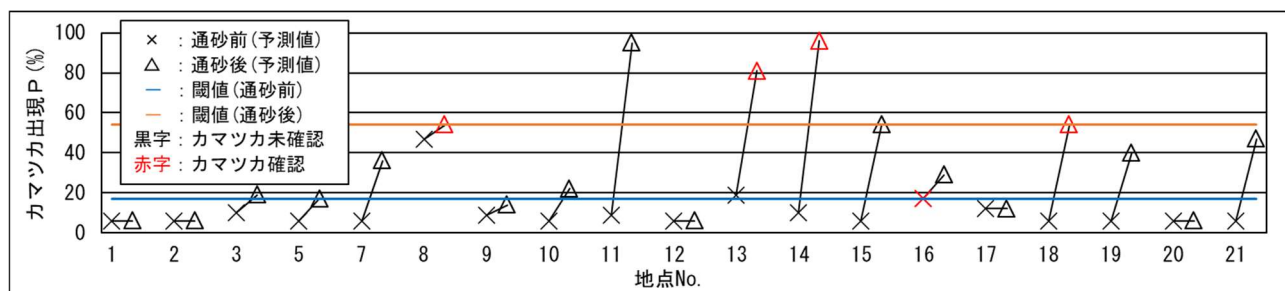


図-6 通砂前後のカマツカの出現ポテンシャルと実測データの比較

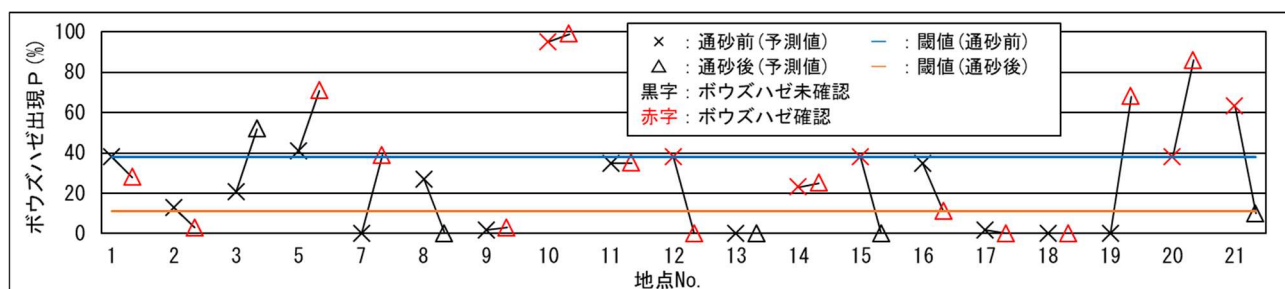


図-7 通砂前後のボウズハゼの出現ポテンシャルと実測データの比較

ンシャル比較結果を示す。カマツカの出現ポテンシャルは通砂後に有意に増加した（通砂前中央値6, 通砂後中央値36, $p<0.01$ ）。

次に、通砂前後の両種の出現ポテンシャルと現地調査での生息確認結果を図-6、図-7に示す。通砂後にカマツカの生息が確認された4地点では、全ての地点において出現ポテンシャルが通砂前より上昇し、かつ通砂前の閾値を上回っていた。一方で、出現ポテンシャルが上昇し、通砂前の閾値を超えたにも関わらず、生息が確認されなかった地点が複数認められた（地点3, 地点5, 地点7, 地点10, 地点11, 地点15, 地点16, 地点19, 地点21）。ボウズハゼについては、通砂後に出現ポテンシャルが通砂前の閾値を超えた地点のほぼ全てにおいて生息が確認された（地点5, 地点7, 地点10, 地点19, 地点20）。一方で、出現ポテンシャルが閾値を下回る地点であっても、生息が確認された地点が複数認められた（地点1, 地点2, 地点9, 地点11, 地点12, 地点14, 地点16, 地点17, 地点18）。

さらに、ROC分析により算出した在／不在の閾値を比較すると、カマツカでは通砂後に閾値が上昇し（通砂前17, 通砂後54）、ボウズハゼでは低下した（通砂前38, 通砂後11）。また、通砂前後の生息場占有率を比較すると、カマツカではわずかに低下し（通砂前0.33, 通砂後0.31）、ボウズハゼでは上昇していた（通砂前0.71, 通砂後0.83）。このように、閾値の上昇と生息場占有率の低下、及び閾値の低下と生息場占有率の上昇という傾向は、鬼倉ほか⁹⁾においても同様に報告されている。鬼倉ほかは、生息場占有率と対数変換した個体群密度には正の相関があり、閾値と生息場占有率及び個体群密度に負の相関があることを示している。これらの関係について、低密度条件では高品質な生息場が優先的に利用され、

高密度条件ではより広範囲の生息場が利用されるためと考察している。本研究では、個体群密度までは評価できていないものの、これらの知見を踏まえると、カマツカは相対的に高品質な生息場に選択的に分布している可能性が高いのに対し、ボウズハゼは高品質な生息場に加えて、より広範な生息場を利用している可能性が示唆された。

4. 考察

(1) ダム通砂による効果・影響

本研究では、通砂後の現地調査を実施し、通砂前後の生物生息データ及び物理環境データを比較した。その結果、通砂後には砂分含有率及びカマツカの出現ポテンシャルが通砂前に比べ有意に増加した一方で、石分含有率及びボウズハゼの出現ポテンシャルには顕著な差は認められなかった。これらの結果は、ダム通砂により、粗粒化が進行しているダム下流へ砂分が供給されることで、河道全面が砂化するのではなく、カマツカの生息場が局所的に増加したことを示しており、既往の予測⁵⁾と一致している。すなわち、ダム通砂はボウズハゼの生息場を維持しつつ、カマツカの新たな生息場の創出に寄与している可能性が考えられる。また、通砂後の現地調査において、通砂前にはカマツカの生息が確認されていなかった4地点で、新たに生息が確認され、これらの地点では出現ポテンシャルの上昇も認められたことから、ダム通砂による生息場創出効果が生物分布の変化として表れていることが示唆された。

一方で、ボウズハゼの生息確認地点数が通砂後に増加した点については、①既往の予測⁵⁾及び本研究の結果から通砂前後で出現ポテンシャルに顕著な変

化が認められないこと、②本種が両側回遊性を有する種であり、外的な加入過程の影響を強く受けること¹⁰⁾を踏まえると、ダム通砂による直接的な効果や影響ではなく、資源量や遡上量の年変動といった自然要因による影響が大きいと考えられる。

さらに、在／不在の閾値及び生息場占有率の変化から、カマツカは現在、より高品質な生息場に選択的に分布している状態にあると推察される。これは、ダム通砂によりカマツカの生息場の質が向上しつつある一方で、個体群としては十分に増加しきれていない段階にある可能性を示唆するものである。したがって、今後もダム通砂を継続することにより、現在生息が確認されている地点に加え、出現ポテンシャルの高い未占有地点へと分布が拡大し、カマツカの個体群が段階的に増加していく可能性がある。

(2) 本予測手法の有効性

既往研究⁵⁾及び本研究で用いた予測手法は、将来予測が困難な河川環境及び生物分布の変化に対して、ダム通砂の実施によって、それらが改善するのか、あるいは悪化する可能性があるのかといった変化の大局的な傾向を相対的に評価することを目的としている。本手法では、ダム通砂により大きく変化すると考えられる河床形状や河床粒度に着目し、これらの物理環境と強い関係を有するカマツカ及びボウズハゼを予測対象種として選定し、両種の予測モデルを構築した。さらに、ダム通砂による影響が最も大きく現れると想定される予測範囲・流量条件を仮想的に設定し、その条件下における物理環境を予測することで、ダム通砂による効果・影響を事前に推定した。本研究では、これらの予測結果に対して通砂後の現地調査データを用いた検証を行っており、予測と実測を一体的に評価している点に特徴がある。

一方で、大内原ダムでは、ダム通砂を開始した2017年以降に計6回のダム通砂が実施されており²⁾、予測に用いた仮想条件とは、出水規模や出水（通砂）回数が異なっているため、実際の土砂供給量や河床変動過程は予測条件とは必ずしも一致しないと考えられる。すなわち、本手法は現象の詳細な経年変化や局所的な変動を厳密に再現するものではなく、長期的・空間的な平均挙動に基づく評価手法である点に留意する必要がある。しかしながら、通砂後にはカマツカの生息確認地点数が増加し、ボウズハゼについても生息状況の悪化は認められなかったことから、両種に対する効果や影響は概ね既往の予測⁵⁾と整合的であった。このことは、本手法がダム通砂による河川環境及び生物分布の変化の方向性を適切に捉えていることを示している。

以上より、本予測手法は、ダム通砂の実施による河川環境及び生物分布の変化について、大局的な傾向を把握する上で有効であることが示された。したがって、本手法は、ダム通砂の事前評価及び運用検討において、学術的・実務的に有用であり、複数の運用条件を比較検討するための意思決定支援ツールとしても活用可能であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、ダム下流における河床材料の粒度組成を通じて生物の生息場の変化が生じると想定されるダム通砂を対象に、計画段階からその効果・影響の予測を行い、通砂後の現地調査により検証及び評価を実施した。その結果、本予測手法によりダム通砂の実施による河川環境及び生物分布の変化について、大局的な傾向を把握可能であることが確認された。また、ダム通砂はボウズハゼの生息場を維持しつつ、カマツカの生息場の創出に寄与している（通砂の効果が段階的に顕在化しつつある）可能性が示唆される。以上より、本研究で得られた一連の成果は、ダム通砂による生物への効果・影響の事前予測及び事後評価手法のモデルケースとして有用であり、今後の河川整備や河川管理における評価手法の構築や保全目標の設定に資するものと期待される。

謝辞：現地調査の実施及びデータ分析にあたり、ご指導・ご協力を頂いた流域関係漁協、(株)ベントスの関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 耳川流域における総合土砂管理について。宮崎県 HP(<https://www.pref.miyazaki.lg.jp/kasen/kurashi/shakaikiban/page00135.html>). 2026.3月閲覧。
- 2) 耳川水系ダム通砂関連情報。九州電力(株)宮崎支店 HP(<https://www.kyuden.co.jp/company/outline/branch/miyazaki/initiative/mimikawa.html>). 2026.3月閲覧。
- 3) 川上馨詞, 吉村健, 新屋裕生: 耳川水系ダム通砂に向けた河川環境調査結果に基づくモニタリング計画の概要, 河川技術論文集, 第22巻, pp.115-118, 2016.6月。
- 4) 川上馨詞, 吉村健, 新屋裕生: 耳川水系ダム通砂基本操作策定に係る河川環境面からの検討アプローチ, 電力土木, No.381, pp.31-35, 2016.1月。
- 5) 井原高志, 川上馨詞, 坂田賢亮, 鬼倉徳雄: 耳川水系ダム通砂実施計画の策定に向けたダム通砂による魚類への影響予測, 河川技術論文集, 第23巻, pp.663-668, 2017.6月。
- 6) 建設省河川局: 建設省河川砂防技術基準(案)同解説, 調査編, 日本河川協会, pp.292-295, 1997.10月。
- 7) Metz C. E.: Basic principle of ROC analysis, Seminars in Nuclear Medicine, No.8(4), pp.283-298, 1978.10月。
- 8) Akobeng A. K.: Understanding diagnostic tests 3: Receiver operating characteristic curves, Acta Paediatrica, No.96, pp.644-647, 2007.5月。
- 9) Onikura, N., Inui, R., Oikawa, S., Kawamoto, T.: Performance of a species distribution model based on presence/absence for various population sizes in the amphidromous fish species *Sicyopterus japonicus*, Ichthyological Research, Vol.61, pp.90-96, 2014.1月。
- 10) 道津喜衛, 水戸敏: ボウズハゼの生活史, 九州大学農学部芸雑誌, 第15巻, pp.213-221, 1995.3月。

(2026. 4. 2受付)