

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

EXTRACTION OF INDICATOR SPECIES TO TEST RESTORATION EFFECTS BY
SEDIMENT REPLENISHMENTS IN DOWNSTREAM REACHES OF DAM

片野泉¹・根岸淳二郎²・皆川朋子³・土居秀幸⁴・萱場祐一⁵

Izumi KATANO, Junjiro N NEGISHI, Tomoko MINAGAWA,
Hideyuki DOI, and Yuichi KAYABA

¹非会員 博（理学） 土木研究所専門研究員 自然共生研究センター
（〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地）

²非会員 博（農学） 土木研究所任期付研究員 自然共生研究センター

³正会員 博（工学） 土木研究所主任研究員 自然共生研究センター

⁴非会員 博（生命科学） Carl-von-Ossietzky University Oldenburg
学振海外特別研究員（Schleusenstraße 1 26382 Wilhelmshaven Germany）

⁵正会員 博（工学） 土木研究所上席研究員 自然共生研究センター

To establish indicator species for estimating the effects of sediment replenishment on the downstream ecosystems of dams, we investigated the densities of macroinvertebrates and the factors of river bed compositions at the seven dammed rivers in Kinki region of Japan. Case-bearer and burrower families would be nominated as the indicator species, since their densities were strongly correlated to the river bed condition, especially amounts of fine riverbed materials. Generalized linear mixing models showed that many case-bearer and burrower families were able to approve as the indicator for river bed conditions, and that *Glossosoma* spp. was the most useful indicator. Such indicator density would provide important information to determine the amounts and frequency of sediment replenishment on the dammed rivers for restoration of downstream ecosystems.

Key Words : indicator, sediment replenishment, fine riverbed materials, GLMM, *Glossosoma*

1. 研究の背景と目的

貯水ダムは河川流砂系の連続性を遮断する。ダム上流やダム湖内では細粒河床材料（小礫・砂等）が過剰に堆積する一方で、ダム下流では細粒河床材料が欠乏して河床粗粒化が引き起こされ、そこに生息する生物相が変化するなど、ダム下流生態系の劣化は近年強く問題視されている。ダム下流の生物相変化について、河床環境の変化と関連づけて同時検証した調査事例は決して多くはない¹⁾が、底生動物相については幾つかの報告がある。その変化様式は個々のダムによって様々であるが、いずれにしても底生動物相が大きく改変されることは共通している。すなわち底生動物は、河床攪乱・細粒河床材料供給の減少や流下プランクトン量の増加といった河床環境要因の変化に応じて、現存量の著しい増加または減少・

多様性の低下・造網型の優占・滑行型の減少など、顕著な反応を示すことが多い^{2), 3), 4)}。一方、ダム下流において支川が合流すると、細粒河床材料が再供給されることによって底生動物相が改善されることも近年わかってきた^{5), 6)}。これらの報告から、ダムによって分断される下流への細粒河床材料供給を元に戻してやることで、劣化したダム下流の生態系機能を改善できる可能性は高いと考えられる。近年いくつかのダムで行われ始めた「下流河川土砂還元」は、ダム下流の劣化した生態機能に対し、高い修復効果を持つのではないかと期待されている^{7), 8)}。しかしこれまでのところ、土砂還元の生態系機能への修復効果を実際に検証した事例はまだ少ない^{9), 10)}。現在、土砂還元を行っているダム河川の多くが、よりよい土砂還元方法（ダム下流生態系に対してより高い修復効果をもつ）を模索しているが、そのために、ダム下流生態系に対する土砂還元の修復効果を、客観的に、かつな

るべく単純に評価できる手法の確立が急務である。

本来、自然に対する人工的なインパクトレスポンスを評価するためには、環境や生息する生物など広い観点に立った総合的な評価軸が重要である。しかし実際にはコストや手間などの問題から、インパクトごとに詳細な調査を行うことは現実的ではなく、指標種などの簡便な評価軸を用いた手法をとることが多い。もちろん指標種の示す情報には限界があり、評価軸を指標種だけに頼ることは危険であるが、河川生態機能に対する土砂還元の効果も、指標種を用いることで客観的な評価が可能になることが予想される。

そこで本研究では、ダム下流の粗粒化した河床に、土砂還元によって細粒河床材料が復活した条件下で生息可能になる指標種を選定することを目的とし、調査解析を行った。指標種には、希少な生物や、食物連鎖の上位種（河川では魚類等に当たる）を設定することが多いが、本研究では、①なるべく多くのダム河川に適応するため、地域特性をもたず、日本の自然河川では普通種として生息する当たり前の生物であること、②素人でも見つけやすく、調査採集が容易・安価であること、③水質等他の要因変化への反応と比べ、河床環境変化に対する反応が最も強いと考えられる生物であること等を考慮して、水生昆虫を主とした底生動物の中から指標種を設定することとした。調査ダムおよび調査地点を選ぶ際には、ダム下流における流入支川の有無、およびダムから支川流入までの距離に着目した。支川流入地点（河床材料割合が大きく変化する）の前後で生息する底生動物を比較することで、細粒河床材料の多寡に応答する指標種の抽出がしやすくなると考えたためである。最終的に、近畿地方の7つのダム河川それぞれに複数の調査地点（支川流入付近の3または4地点）を設定し、調査で得られたデータを解析することで指標種の抽出を行った。

2. 調査地概要および調査・解析について

(1) 調査地概要

図-1に、調査を行った蓮ダム、比奈知ダム、安濃ダム（三重県）、室生ダム、上津ダム（奈良県）、犬上川ダム、永源寺ダム（滋賀県）の7ダム河川を示す。各ダム河川は、ダム下流数キロメートル以内に流入する支川を持ち、その流入前後において河床の細粒土砂量が変化することが予測される。そこで、各ダム河川での調査地点を本川と支川の合流点周辺に複数設定した。すなわち、支川流入より上流の本川（UT: upstream of tributary confluence）、流入より下流の本川（DT: downstream of tributary confluence）、支川（TR: tributary）の3つである。ダムから最初の支川流入地点までの距離が1km以上ある蓮ダム、比奈知ダム、上津ダム、犬上川ダムの4ダムにおいては、UTにおいてダムの影響が軽減し

ている可能性があるため、ダム直下（DD: downstream of dam）も調査地点に加え、解析考察の参考とした。

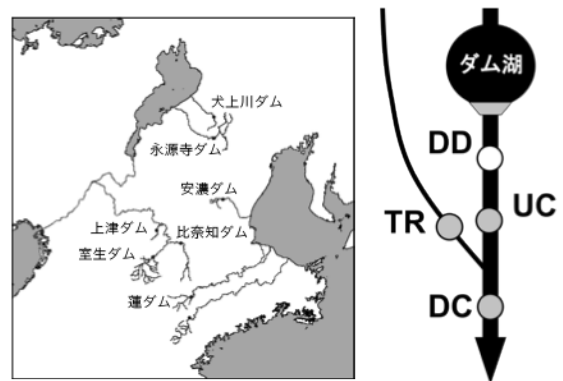


図-1 調査ダム河川の位置および調査地点模式図。各調査地点は、本川と支川の合流点から300m以内（UC・DC）および500m以内（TR）に設定した。

(2) 調査方法

調査は2006年3月末～4月中旬までの間に行い、各調査地点で河床環境測定と底生動物採集の両方を行った。25×25cmのコドラートを3箇所設定し、各コドラートでは、水深、流速、各河床材料の被度割合（巨礫・大礫・中礫・小礫・砂）の測定を行った。次に0.25mm-meshサーバネットを使用し、コドラート内の底生動物をすべて採集した。採集物はホルマリン固定した後に実験室に持ち帰り、ソーティングの後に可能な限り細かいレベルまで同定し個体数を計測して、後の解析に用いた。

(3) 解析方法

河床に存在する細粒河床材料（砂・小礫）の量に対し、生息密度が良く反応する種を抽出し、それらから土砂影響を予測できるモデルを構築することを目的とした。過去の文献などから、細粒河床材料を利用して生活していると考えられる種（生活型が掘潜型・携巢型に分類されるもの¹¹⁾）を指標種候補として目的変数に、底質粗度・砂被度・小礫被度（%）を説明変数（平均＝0，SD＝1に標準化）にした、一般化線形混合モデル（GLMM）を用いて、予測式を構築した。GLMMとは、ランダム効果と固定効果の混合モデルであり、ランダム効果としてランダム切片や傾きを扱うことができる。GLMMはポアソン分布を誤差分布として用い、ランダム効果として「ダムの違い（7ダム間）」および「調査地点の違い（UT・DT・TR）」を階層性のあるランダム切片として組み込んだ。これにより、複数ダムでの様々な生息場所における、ある程度一般的な土砂の影響を考慮することができると考えられる。固定効果として砂割合、小礫割合、底質粗度の各要因を組み込んだ。

予備的に、負の二項分布モデルやGLM、ランダム効果1

つのモデルなども検討したが、GLMMを用いた場合にAIC（赤池情報量基準）が最小となったため、GLMMを採用することとした。例として、携巢型のヤマトビケラ科（上中流域において代表的な付着藻類食者）について説明する（図-2）。ダムと調査地というランダム効果2つを組み込んだGLMMではうまく予測できているが、ランダム効果1つのGLMMやGLMでは、土砂環境要因でヤマトビケラ個体数は予測できないことがわかる。このことは複数ダムでの結果をまとめる際に、GLMMなどランダム効果を考慮したモデルを検討する必要があることを示唆している。

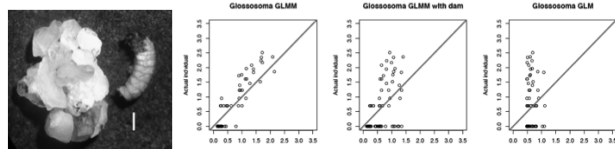


図-2 ヤマトビケラ科（左写真）に対する各モデルの予測値 x と実測値 y の関係。左から、ランダム効果2つのGLMM、ランダム効果1つのGLMM、ランダム効果なしのGLM結果を示す。

3. 結果と考察

GLMMで構築したモデルの結果、底生動物のうちトビケラ・二枚貝・甲虫など多くの分類群の種が、土砂指標モデルとよくフィットし、指標種となる可能性があることが示唆された（図-3）。その中でも、小礫や砂などの中に潜って生息する掘潜型のシジミ科、トビロカゲロウ科、ヒメドロムシ科、また、砂を巢材として用いる携巢型のヤマトビケラ科、ヒメトビケラ科、グマガトビケラ

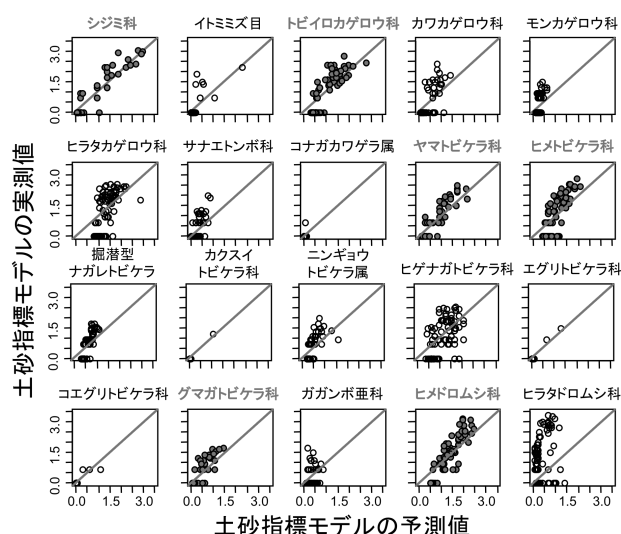


図-3 GLMMで構築された土砂指標種モデルの予測値と実測値の関係。色つきの丸で示した種は、モデルの当てはまりがよいことを示す。

科の各種類では $R^2 > 0.7$ となり、河床に存在する細粒河床材料の量によって、その種の生息密度（分布）をよく説明できることが明らかとなった。

これら6種の底生動物は、河床に存在する細粒河床材料量の指標として扱える可能性が高い。そこで、実際にこれら6種が別のダム河川でも指標となりうるかどうか、同様のGLMMを用いて検証してみることにした。対象としたのは、これまで我々が河床環境と底生動物の調査を併せて行ってきた中部地方のダム河川2つ（矢作第2ダム⁵⁾・阿木川ダム⁶⁾）である。その結果、6種とも土砂指標モデルと有意によくフィットしたことから（図-4）、これら6種の底生動物は、少なくとも近畿・中部地方のダム河川においては、細粒河床材料に関する指標種となりうることを示された。

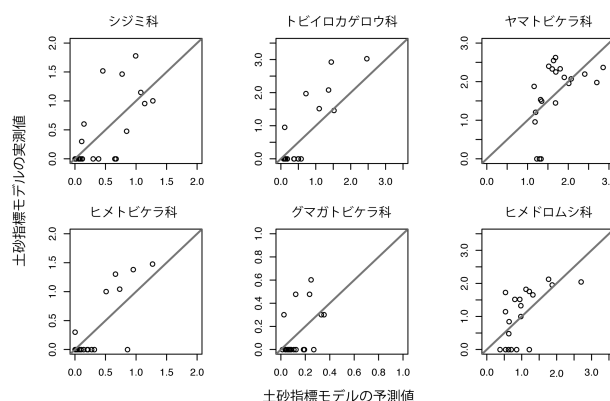


図-4 阿木川・矢作川でのデータを用いたGLMMで構築された、土砂指標主モデルの予測値と実測値の関係。

ところで、「はじめに」で触れた指標種選定の条件「②見付けやすく調査が容易であること」を考えると、河床を掘り返さなければ発見できない掘潜型のシジミやヒメドロムシよりも、河床表面に生息する携巢型のほうが、見つけやすいという条件をより満たしていると考えられる。また、その携巢型の中でも比較的大きなサイズの携巢を持つヤマトビケラ科は、礫表面に分布していることが多いため非常に見つけやすい。そのため、ヤマトビケラ科は細粒河床材料に関する指標種として最も適していると考えられる。

そもそも、ヤマトビケラ科は日本のみならず世界中の広い範囲に分布する普通種で、自然河川の上・中流域でよく優占する。しかしその一方で、ダム直下やダム下流においては、生息密度が非常に小さくなることが報告されている種でもある^{5), 6)}。この種は主たる巢材料として極粗粒砂（ $\phi 1 \sim 2\text{mm}$ ）を用いることから、生息場所にはある程度の細粒河床材料が存在していることが必要と考えられる。一方で、ヤマトビケラは匍匐移動しつつ付着藻類を強力にこそげとって摂食する藻類食者である。そのため大礫や巨礫などの大きな河床材料

は、安定した良い生息場としてだけではなく、付着藻類現存量の高い、良い餌場としても重要であると考えられる。すなわち、ヤマトビケラが普通に生息する状態は、河床に細粒から粗粒までの河床材料が適度に揃う状態を示しているのではないだろうか。

ヤマトビケラ科が指標種として有用である可能性についてもう1点紹介したい。表-1は、阿木川ダム下流における土砂還元時期の前後で、ダム下流地点での底生動物群集を比較した結果である。土砂還元前には優占していないヤマトビケラが、土砂還元後には第1位の優占種として生息するという変化⁸⁾が見られる(表-1)。このことから、ヤマトビケラは土砂還元による細粒河床材料の増加に対し顕著に反応する種であり、指標種として有用であることがうかがえる。

表-1 阿木川ダム下流地点の底生動物を土砂還元前後(2005年3月および8月)で比較した例。優占順位1位から3位までの種を示す。

	土砂還元前	土砂還元後
1位	エリュスリカ亜科	ヤマトビケラ
2位	アカマダラカゲロウ	マダラカゲロウ属
3位	フタバコカゲロウ	エリュスリカ亜科

4. おわりに

本研究は、土砂還元による細粒河床材料の増加を適切に指標する指標種を抽出することを目的とした。なるべく多くのダム河川に適用できる普通種であること、見付けやすく調査が容易・安価であること、河床に強く依存して生息することなどの条件から、携巢型・掘潜型の底生動物を候補として、各種の生息密度を目的変数に、河床の細粒河床材料を説明変数としたGLMMによる解析を行った結果、ヤマトビケラ科が最も指標として有用であることが示された。これらの結果からは、生態系機能修復効果の高い土砂還元を行うべく、ヤマトビケラの生息密度を指標として、還元土砂量や還元頻度などを十分に検討すべきであることが示唆された。

ただし、解析方法の特性により、ヤマトビケラ密度と細粒河床材料量の具体的な数値の一致を明示的に示すまでは至っていない。実際の指標として扱うには、今後新たなモデルを組むなどの手法により「あるヤマトビケラ密度が、河床にどの程度の細粒河床材料量が存在することを示すのか」を明示的に示せるようにする必要がある。また、本研究で調査・解析対象としたのは近畿・中部地方のダムのみであり、今回得られた指標種候補を他地方および全国のダムに適用できるかどうかは不明な点が多い。これらは今後の課題であり、さらに調査事例を増やす必要があるだろう。

謝辞：本研究で調査を行った各ダム管理事務所の皆様には、流量データ等の提供にご協力いただきました。また本研究の一部は、WEC応用生態研究助成(2006-04)および日本学術振興会科研費補助金・若手研究B(18710031)を受けて行いました。心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 谷田一三, 竹門康弘: ダムが河川の底生動物へ与える影響, 応用生態工学, Vol. 2, pp. 153-164, 1999.
- 2) 波多野圭亮, 竹門康宏, 池淵周一: 貯水ダムが下流域生態系へ及ぼす影響評価: 流況変化・土砂供給減少による底質環境と底生動物群集の応答, 京都大学防災研究所年報, 第46号B, pp. 851-866, 2003.
- 3) 波多野圭亮, 竹門康宏, 池淵周一: 貯水ダム下流の環境変化と底生動物群集の様式, 京都大学防災研究所年報, 第48号B, pp. 919-933, 2005.
- 4) 竹門康宏: ダム下流河川の底質環境と底生動物群集の変化, *ダムと環境の科学 I: ダム下流生態系*, 池淵周一 編, 京都大学出版会, pp. 147-176, 2009.
- 5) Takao, A., Kawaguchi, Y., Minagawa, T., and Kayaba, Y.: The relationships between benthic macroinvertebrates and biotic and abiotic environmental characteristics downstream of the Yahagi dam, central Japan, and the state change caused by inflow from a tributary, *River Research and Applications*, Vol. 24, pp. 580-597, 2008.
- 6) 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 North American Benthological Society*, Vol. 28, pp. 331-351, 2009.
- 7) 岡野真久, 菊井幹男, 石田裕哉, 角哲也: 貯水池堆積土砂の掘削管理とその下流河川還元に関する研究, *ダム工学*, Vol. 15, pp. 200-215, 2005.
- 8) 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, 2007年度土木研究所重点プロジェクト報告書, 2008.
- 9) 角哲也: ダム下流の河川環境保全策, *ダムと環境の科学 I: ダム下流生態系*, 池淵周一 編, 京都大学出版会, pp. 195-230, 2009.
- 10) 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」, *土木学会河川技術論文集*, Vol. 11, pp. 273-278, 2005.
- 11) 竹門康弘: 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価, *日本生態学会誌*, Vol. 55, pp. 189-197, 2005.

(2010. 4. 8受付)