河川技術論文集, 第24巻, 2018年6月

土砂供給に伴う河床環境変化の評価に向けた露出高による石礫の埋没度の定量化

QUANTIFICATION OF BURIAL DEGREE OF STONES BY EXPOSURE HEIGHT FOR ASESSMENT OF CHANGES IN RIVERBED ENVIRONMENT ASSOCIATED WITH ARTIFICIAL SEDIMENT SUPPLY

小野田幸生[1]・堀田大貴[2]・萱場祐一[3]
Yukio ONODA, Taiki HOTTA and Yuichi KAYABA

[1]非会員　博（理）（国研）土木研究所　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　修（環境）　株式会社 建設技術研究所 中部支社 環境室
（〒460-0003 名古屋市中区錦1-5-13）
[3]正会員　博（工）（国研）土木研究所　水環境研究グループ
（〒305-8516　茨城県つくば市南原１番地６）

Exposure height of stones — the maximum height from the riverbed surface to the top of stones — was proposed as an indicator for quantification of burial degree of stones then applied to an assessment of changes in riverbed environment after an artificial sediment supply in the Yahagi River using the BACI (Before-After-Control-Impact) design. As interaction between time (before and after) and sites (control and impact) was not significant, the effects of the artificial sediment supply were not detected in this study. The results should be caused by the used fine sediments (particle size at 50% percentage passing: 0.2 mm), which were expected to be little deposited. Trends of decrease in exposure height in the both control and impact sites may be caused by deposition of fine sediments associated with natural flow regimes because trends of increase in coverage of smaller size classifications (less than or equal to gravel) on the riverbeds were observed in the both sites. Therefore, the exposure height of stones should relate to fine sediment deposition. Effectiveness of the exposure height of stones for evaluation of changes in riverbed environment should be examined in the future studies aimed to artificial sediment supply using coarser sediments which are expected to be deposited on riverbed.

Key Words: *Exposure height, Yahagi River, comprehensive sediment management plan, ayu (Plecoglossus altivelis), sediment replenishment, artificial sediment supply*

１．はじめに

ダムの堆砂問題の解消は，ダムの治水・利水容量の回復だけでなく，河川における土砂輸送の連続性の改善の観点から重要である．その具体的な手段として，ダム下流への人為的な土砂供給があるが，総合土砂管理の本格的な実施に向け，土砂供給に伴う河床環境の変化を定量化し，生物の応答の予測の高度化を図る必要がある[1),2)]．

これまで，土砂還元などが実施される中で生物への影響についても検討されてきた．例えば，供給された土砂が研磨剤として機能することで，石面上の付着藻類を少ない流量でも剥離することができ（クレンジング効果），付着藻類の更新を通じたアユの餌の質の向上などが報告されている[3)]．しかしながら，土砂供給が本格化し土砂供給量が多くなった場合には，礫間への砂成分の充填に伴う石礫の埋没など，異なった側面からの影響が顕在化することも考えられる[4)]．そのため，土砂供給量や土砂堆積量に呼応して変化する変量を用いた河床生息場所の指標が必要とされる．

生息場所としての河床の記述には，石礫の存在様式が重要視され，例えばアユの生息場所の記述には，浮き石の多さなどが用いられてきた[5),6),7)]．浮き石の多さは，土砂堆積量の増加によって減少するため，生物の応答をつなぐ指標として有用であると考えられる．しかしながら，浮き石・はまり石という定性的な記述では，本格的な運

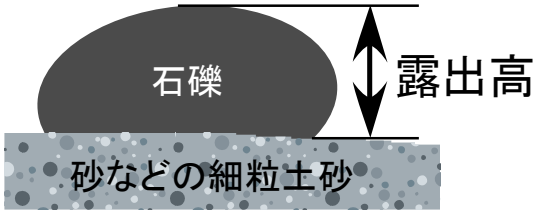

図-1 露出高の定義
露出高は，砂などの細粒土砂の表面から石礫の頂点までの高さの最大値として定義される．

用に向けて増加する土砂堆積量に対する変化を定量化することが困難で，その影響を詳述しにくい．

砂などの河床基質と大きな粒径の石礫との関係を定量化する手法として，石礫の埋没度（たとえば，石礫の高さに対する埋没した部分の高さの割合）も提案されている[8]．ただし，土砂供給による河床生息場所の変化を石礫の埋没度を用いて評価するには，2つの問題点があると考えられる．1つ目は，石礫の高さを計測するために，石礫を河床基質から外す必要があり，非破壊的な計測が困難であることである．土砂供給による河床環境の変化を評価する場合にはモニタリング調査が基本となるため，できるだけ非破壊的に計測できることが望ましい．2つ目は，埋没度は石礫の砂面からの露出部分を間接的にしか示せないということである．基本的には，埋没度が大きいほど露出部分は小さいと予想されるが，大きな石礫で埋没度が大きい時と小さな石礫で埋没度が小さい時とで露出部分の大きさが同じになることも生じうる．露出部分が同じであれば，河床表面を利用する生物（例えば，付着藻類を摂食するアユなど）にとっては等価と言えるため，埋没度の違いだけでは河床の生息場所の質を表せない場合もありうる．

これらの問題点を解決するためには，石礫が砂面から露出している高さを直接的に評価することが求められる．そこで，著者らは石礫の露出高（河床の砂面から石礫の頂点までの高さの最大値，**図-1**）をアユの摂食場所の指標として利用すること提案し，現地調査や大型水路を用いた実験などにより，アユの摂食場所の質の指標として有用であることを明らかにしてきた[4]．また，モデルを用いた露出高の予測も試みられている[9]．

ただし，人為的な土砂供給に伴う石礫の埋没度の変化に対して露出高による評価が適用されたことはなく，その有用性については不明だった．そこで，本研究では，人為的な土砂供給前後で露出高を用いた河床環境評価を試験的に適用するとともに，河床表面の細粒土砂成分の変化との関連性について考察を加えた．それにより，総合土砂管理の設計に必要とされる河床環境の評価に対する，露出高の有用性について検討することを目的とした．

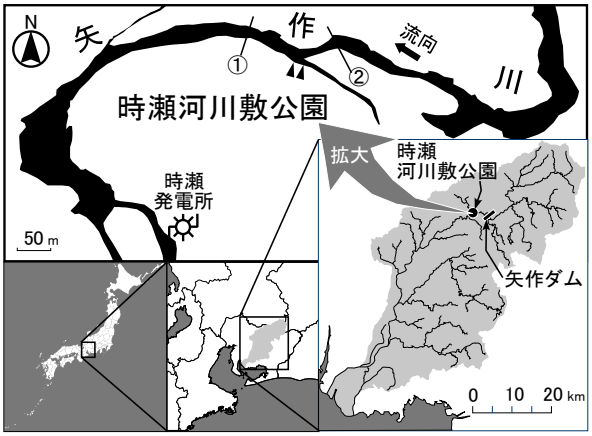

図-2 調査地点図
一番上の拡大地図における，三角形は2台のベルトコンベアによる土砂供給地点を表し，番号付きの直線は調査測線を表す（①：下流側，影響区；②：上流側，対照区）．

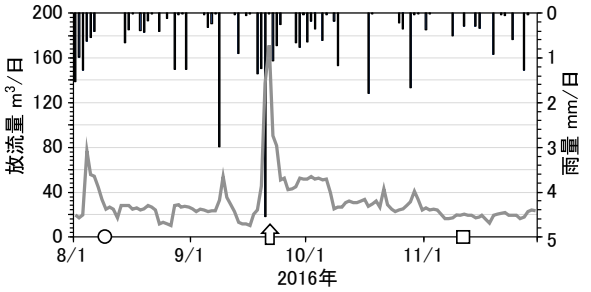

図-3 調査期間中の放流量と雨量（日平均）
調査地点の上流に位置する矢作ダム（78 kp付近）における放流量（折線グラフ）と雨量（下向き棒グラフ）を示す．日付軸上の白抜きの矢印，丸，四角は，それぞれ土砂供給，事前調査，事後調査のタイミングを表す．水文水質データベースのデータを基に作図．

2．方法

(1) 調査対象とした土砂供給

矢作川の時瀬河川敷公園付近（愛知県豊田市時瀬町，73 kp付近，**図-2**）で，台風に伴う出水に応じて2016年9月21日に実施された土砂供給を調査対象とした（**図-3**）[10]．土砂の供給量は流量に応じて調節され，流量が多い時にはベルトコンベアを2台，少ない時には1台を用いて，副流路から合計735 m^3の土砂が供給された．供給された土砂の通過質量百分率50%粒径は0.2 mmだった．同地点における今後の実験も考慮し，不可逆的な堆積が生じにくい粒径の土砂が選択された．

(2) 調査地点

土砂供給による河床環境の変化を検出するために，BACI（Before-After-Control-Impact）デザイン[11]を利用し

た．つまり，土砂供給の事前（Before）と事後（After）で，土砂供給の影響を受ける土砂供給地点の下流側の影響（Impact）区とその影響を受けない上流側の対照（Control）区との間で変化パターンを比較することで，その影響を評価した（**図-2**）．それぞれの瀬はお互いに隣接しており，流量や水温などの諸条件が揃うようにした．なお，瀬に調査区を設定したのは，一般に生物量が多く，生物に対する土砂供給の影響評価の対象ユニットとされやすいことを考慮したためである[1),2)]．それぞれの調査地点で9 mの横断測線を設定し，事前・事後データを収集した．

(3) データ収集

土砂供給に対する事前・事後データは，できるだけ平水時に近い時期に収集するようにし，結果として2016年8月9日と11月11日に収集した（**図-3**）．

土砂供給に伴う石礫の露出高の変化を検証するために，各調査地点に設定した測線上の石礫について露出高を事前・事後で計測した．露出高は，潜水目視で砂などの細粒土砂成分の表面から石礫の頂点までの最大値となる部分（**図-1**）を計測した．計測は水中目視で行い，石が接する細粒土砂面と水平に視線を保ち，1 mm単位で計測した．なお，露出高が小さく視線を水平に保つことが困難な場合には，身長計測時のように，定規などを石礫の頂点に添えてその高さを計測した．石礫の露出高がアユの採餌場所の指標としても利用されることを考慮して，矢作川での予備調査でアユの食み跡が見られた長径20 mm以上の石礫を計測対象とした．結果として，合計201個（下流側：事前40個，事後52個；上流側：事前47個，事後62個）の石礫が露出高の計測対象となった．なお，結果で詳述するが，両地点とも礫以上の粒径区分の割合は約80%以上と高かった。

土砂供給に伴う土砂堆積による細粒化傾向を把握するために，粒径区分ごとの被度調査とペブルカウント[12)]を実施した．被度調査では，調査測線を3 mずつに区切り，それぞれの中央を中心とした1 m四方のコドラートに占める粒径区分（巨石：≧ 257 mm，石：65～256 mm，礫：17～64 mm，砂利：3～16 mm，砂：≦ 2 mm）[13),14)]の割合を潜水目視によって10%単位で記録した．合計3つのコドラートにおける各粒径区分の被度を平均化し，その測線の代表値とした．また，底質粗度[15)]（河床を構成する土砂の粗さを表す指標で，巨石から砂の区分に5～1のスコアを与え，それぞれの割合を掛け合わせた和）もコドラートごとに算出した．ペブルカウントでは，調査地点の瀬全体を対象にジグザグに移動しながら，100個の河床材料の中間径を1 mm単位で計測し，粒径加積曲線を作成した．

(4) データ解析

土砂供給に伴う露出高と底質粗度の変化の有無を検証するために，露出高と底質粗度それぞれを目的変数とし，調査地点と調査時期を説明変数とした二元配置分散分析を用いて解析した．なお，有意水準は0.05に設定した．解析には統計ソフト（Stat View-J 5.0 for Windows, SAS Institute, North Carolina, USA）を利用した．

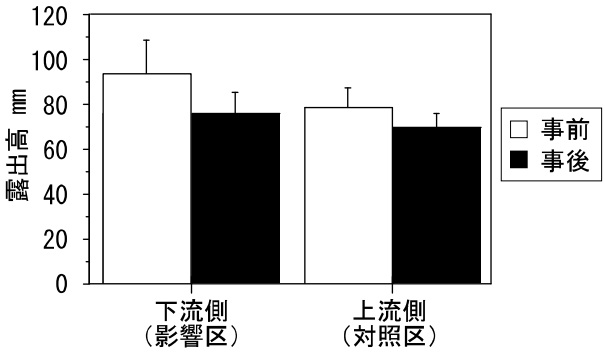

図-4 両調査地点における土砂供給前後の露出高（平均値±標準誤差）の変化

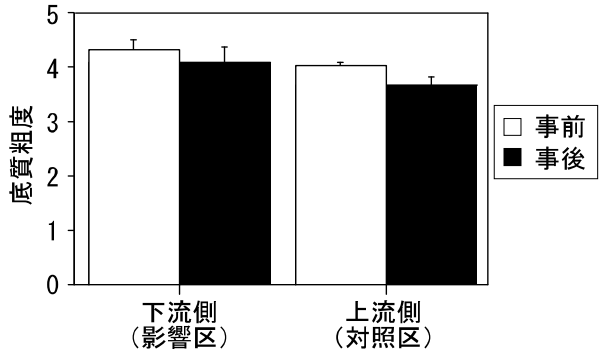

図-5 両調査地点における土砂供給前後の底質粗度（平均値±標準誤差）の変化

3．結果

石礫の露出高（平均±標準誤差）は，土砂供給地点の上流側では土砂供給前後でそれぞれ，78.2 ± 8.7 mm，69.1 ± 6.6 mmであり，下流側では同93.1 ± 15.1 mm，75.7 ± 9.1 mmで，どちらの地点でも露出高は減少傾向だった（**図-4**）．ただし，二元配置分散分析の結果では，調査地点間（$F_{1,197} = 1.246$, $p = 0.27$），調査時期間（$F_{1,197} = 1.879$, $p = 0.17$）で有意差が見られず，調査地点と調査時期の間にも有意な交互作用は見られなかった（$F_{1,197} = 0.186$, $p = 0.67$）．

土砂供給後の底質粗度の変化の傾向は，露出高の変化と似た傾向を示した（**図-5**）．底質粗度（平均±標準誤差）は，土砂供給地点の上流側では，土砂供給前後でそれぞれ，4.0 ± 0.1，3.7 ± 0.2であり，下流側では同4.3 ± 0.2，4.1 ± 0.3で，どちらの地点でも細粒化傾向だった．

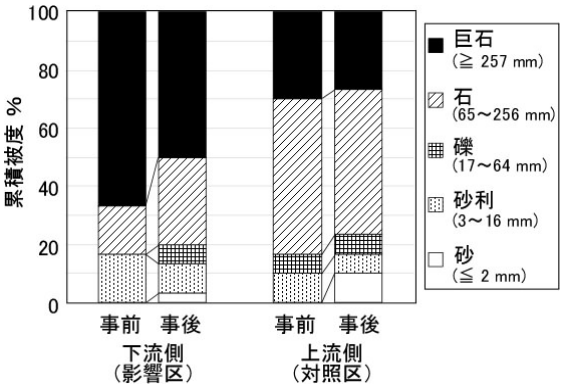

図-6 土砂供給前後における各調査測線の粒径区分別の被度

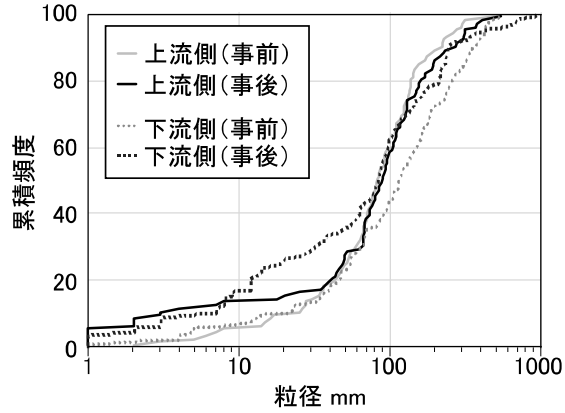

図-7 土砂供給前後における各調査地点のペブルカウントにより作成した粒径加積曲線

ただし，二元配置分散分析の結果では，調査地点間（$F_{1,8} = 4.137$, $p = 0.08$），調査時期間（$F_{1,8} = 2.769$, $p = 0.13$）で有意差が見られず，調査地点と調査時期の間にも有意な交互作用は見られなかった（$F_{1,8} = 0.137$, $p = 0.72$）．

調査測線における粒径区分別の被度（**図-6**）や調査地点におけるペブルカウントによる粒径加積曲線（**図-7**）といった粒径に着目した結果でも，土砂供給後に上流側と下流側の両調査地点において．河床材料が細粒化したことが確認された．

粒径区分別の被度の結果では（**図-6**），下流側と上流側の両地点とも，土砂供給後に礫以下の細粒土砂成分の割合が増加した．なかでも2 mm以下の砂が新たに加わったことが特徴的だった．それに応じて，上流側の地点では石以上の割合が減少し，下流側の地点では，巨石の割合の減少が特に大きかった．

ペブルカウントにより作成した粒径加積曲線を見ると（**図-7**），上流側の調査地点では1 mm程度の粒径が増えたことが特徴的で，40 mm程度以上については変化が小さかった．一方，下流側の調査地点では粒径加積曲線が全体的に粒径の小さい側にシフトしており，河床表面が全体的に細粒化したことを示した．

4．考察

(1) 石礫の露出高を用いた河床環境の変化の評価

本研究によって，石礫の露出高は河床環境の変化の指標として利用可能であると考えられた．土砂供給後の露出高の低下傾向（**図-4**）が，底質粗度の低下傾向（**図-5**）と類似したことは，露出高が河床の細粒化によって減少することを示すものである．この河床の細粒化は，細粒土砂の割合の増加を反映したものであることが粒径区分別の被度や粒径加積曲線の結果（**図-6, 7**）から読み取れ，このことは細粒土砂の堆積を示唆する．したがって，事後に見られた露出高の低下傾向は，細粒土砂の堆積に応じた石礫の埋没度の増加を反映したものであると考えられる．

ただし，この露出高の減少傾向は土砂供給による影響とは考えにくい．なぜなら，同様の露出高の減少傾向は土砂供給の影響を受けない上流側でも確認されており（**図-4**），調査地点と調査時期との間に有意な交互作用は検出されなかったためである．土砂供給による露出高の減少が検出できなかった理由として，供給された土砂が細かく（通過質量百分率50%粒径：0.2 mm）[10]，河床に堆積しにくかったことが挙げられる．土砂供給後の調査で，細粒土砂の堆積と考えられる被度や粒径加積曲線の変化が確認されたが（**図-6, 7**），これは，土砂供給の効果というよりは，事前・事後の調査間で発生した出水（**図-3**）に伴う，自然状況下の土砂輸送による土砂堆積の結果を反映したものかもしれない．土砂供給地点の下流側だけでなく上流側でも砂などの細粒成分の増加が確認されたことは（**図-6, 7**），この推察を支持するだろう．

このように，本研究では，河床に堆積しにくい土砂を用いた土砂供給を対象としたため，それによる露出高の変化は検出できなかったものの，自然条件下の土砂輸送に伴う土砂堆積による露出高の減少を検出できたと考えられる．供給される土砂の増加に伴って，石礫間への砂の堆積量が増加し，砂面高が上昇することが報告されていることから[16]，人為的な土砂供給によって土砂負荷量が増大し，土砂堆積量の増加が見込まれる場合には，土砂供給に伴う露出高の低下が検出されることが期待される．実際の総合土砂管理においては，供給土砂量の増加や，それに伴う土砂堆積厚の増加も生じうるため，露出高を用いた河床環境の変化の評価は有効であると考えられる．今後，供給土砂の堆積が見込まれる土砂供給を対象に，本研究と同じ評価手法を適用することで，露出高の有効性を確認することが望まれる．

(2) 土砂供給に対する露出高を用いた評価の有効性

本研究で用いた石礫の露出高は河床環境の垂直方向の状態を表す変量であるため（**図-1**），供給土砂の堆積に

よる河床環境の変化とそれによる生物への影響を評価するのに役立つと考えられる．総合土砂管理でも，土砂供給に伴う河床物理環境の変化とそれに対する生物の応答を予測する必要があるため，露出高は有用な指標になると考えられる．

土砂堆積による石礫の露出高の減少は，石礫河床への砂などの細粒成分の陥入予測の研究[16]と親和性が高く，砂面高の予測モデルの高度化によって，礫天端との差分である露出高も精度よく推定できることが期待される．遮蔽効果の検討などの課題はあるものの，現行の予測技術を応用可能なことは有利な点として挙げられる．ただし，実際の土砂供給の現場で，上記のような詳細な予測手法を適用するのはコスト上困難かもしれない．その場合であっても，評価対象区間の土砂収支による土砂堆積量を予測し，そこから土砂堆積厚に変換することで石礫の露出高の減少を予測することは，ある程度可能であると考えられる．石礫の露出高が非破壊的に計測可能であるという利点を活かせば，実際に露出高の予測手法を試しながらその精度の検証もできるため，実効性のある予測手法の改善にも寄与できるだろう．

石礫の露出高は，河川生物による生息場所利用とも関連性があるため，河床環境の変化に対する応答予測にも有益だと考えられる．たとえば，評価対象として良く用いられるアユについては，大きな粒径の石が浮き石状態であることや，凹凸のある河床が，好漁場を規定する条件や選好性の対象として報告されている[5),6),7)]．大きな粒径の石はその高さも大きい傾向にあり露出高が大きくなりやすく，さらに浮き石状態であるということは砂などに埋没していないことを示している．凹凸のある河床という表現はそれらを統合した結果といえるだろう．このように，アユの好適な生息環境を表す指標として河床の石礫がより砂などの表面から露出しているかが重要であり，本研究で扱った石礫の露出高はアユの生息場所の指標としても有効であると考えられる[4)]．また，アユの餌となる付着藻類についても，石礫の露出高が低いほど，砂の躍動による衝突を受けやすく，剥離作用を受けやすくなることが認識されており[17)]，供給された土砂による直接的な剥離だけでなく[3)]，その後の付着藻類の現存量にも影響を及ぼすと考えられる．アユ以外についても，土砂供給による土砂堆積に伴う河床表面の凹凸の減少が，流れ場の変化を通じて遊泳魚の空間利用に影響するという報告もあり[18)]，石礫の露出高の変化による生物への影響は多岐にわたるといえる．

このように，石礫の露出高を用いれば，供給された土砂の堆積による河床環境の変化とそれに伴う水生生物の生息場所の変化を，露出高という同じ指標でつなぐことが可能になる．したがって，土砂供給が本格化して土砂の堆積が顕著になりうる場合には，石礫の露出高は河川生物の応答を予測する上で欠かせない指標になると考えられる．

(3) 実装に向けた今後の課題・展望

本研究では，河床に堆積しにくい土砂を用いた土砂供給を対象とした結果として，土砂供給後による露出高の減少は検出されなかったと考えられた．露出高の定義より，供給土砂の堆積厚の増加によって，石礫の露出高が減少することが予測されるものの，今後は堆積が見込まれる粒径の土砂や大量の土砂を供給するような土砂供給を対象にした調査によって，実際に露出高が減少するかを確認することが必要だろう．さらに，土砂堆積量の条件を様々に振り，それに対する露出高の変化についての知見を集積することも重要であると考えられる．それによって，実際の総合土砂管理で設定される条件に対する石礫の露出高の変化を内挿によって予測できるようになり，外挿による予測に比べて相対的に高い予測精度が期待できるからである．

河床環境の変化を石礫の露出高で評価できることを確認することと並行して，河床環境の変化に対する生物の応答についても露出高で整理することが望まれる．特に，浮き石などの石礫の立体構造と関連付けて生息場所の記述がなされてきた生物（例えば，アユなど）については，定量的な指標である石礫の露出高で整理しなおすことで，供給された土砂の堆積具合に対する応答を客観的に評価できる可能性が高い．具体的には，石礫の露出高に対する生物の在・不在，密度，選好性などが整理されると良いだろう[4)]．

このように，石礫の露出高は河床環境の変化とそれに伴う生物への影響を同じ指標で評価可能という長所を有するが，その計測にコストを有するという短所がある．石礫の露出高は砂などの細粒土砂の表面から礫の頂点までの高さであるため（**図-1**），その正確な計測のために潜水目視を行う必要があるからである．その結果として，努力量当たりの計測可能数は多いとは言えず，実際の土砂供給の現場で広範囲の河床環境の変化を評価しなければならない場合には，石礫の露出高を計測しつくすのは現実的でないかもしれない．その解決には，石礫の露出高を簡易的に予測できる手法の開発が必要とされる．本研究では，石礫の露出高の変化傾向（**図-4**）と河床表面の細粒成分の変化（**図-5, 6, 7**）との関連性が示唆されたことから，粒径加積曲線や粒径区分別被度などから石礫の露出高を予測するモデルの構築[9)]とその精度検証やモデルの高度化が望まれる．特に，粒径加積曲線や粒径区分別被度などは，河床環境の基本的な調査メニューであり，既存データの蓄積が多いため，その活用方法が確立されることによって，石礫の露出高を用いた河床環境の評価の実装化が促進されるものと考えられる．

5．まとめ

本研究では，矢作川で実施されたベルトコンベアを用いた人為的な土砂供給による石礫の埋没度の変化を，露出高（砂面から石礫の長短までの高さ）を用いて定量的にモニタリングした．土砂供給地点の下流側を土砂供給の影響区，上流側を対照区に設定し，土砂供給の前後で露出高を比較することによって，土砂供給が石礫の露出高に及ぼす効果を検証した．その結果と今後の課題を以下にまとめる．

1) 土砂供給後に石礫の露出高の減少傾向が見られたが，影響区と対照区の両調査区で確認されたため，土砂供給による効果とは考えられなかった．
2) 土砂供給による石礫の露出高の減少が検出されなかった理由は，河床に堆積しにくい細粒土砂（通過質量百分率50%粒径：0.2 mm）が供給土砂として用いたためと考えられた．そのため，土砂供給後に両調査区で見られた石礫の露出高の減少傾向は，自然状況下での土砂輸送に伴う結果と考えられた．
3) 石礫の露出高の減少傾向が，底質粗度の減少傾向や礫以下の被度や頻度の増加と一緒に確認されたことから，露出高は細粒土砂の堆積と関連性のある指標であることが示唆された．
4) 今後，土砂堆積が見込まれる土砂供給を対象に，石礫の露出高に対する土砂供給の効果を検証するとともに，様々な条件の土砂供給に対する石礫の露出高の変化の事例を蓄積することで，河床環境の変化に対する指標としての有効性を確認していく必要がある．
5) 露出高は浮き石を利用する生物の生息場所利用を定量的に記述できる可能性があり，露出高と河川生物との関係の解明が進めば，露出高を用いて河床環境の変化に加え生物の応答までの一連の評価が円滑に進むことが期待される．

謝辞：本研究を行うにあたり，国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所には土砂供給実験に関する情報提供などの便宜を図っていただきました．矢作川漁業協同組合にはデータ取得のために釣り場に入ることに対してご理解いただきました．浜松渓友会の小野田恒則氏，新庄博氏には予備調査や野外調査の補助でお世話になりました．土木研究所自然共生研究センターのメンバー諸氏には，データ収集や解析作業にご協力頂きました．本研究は，公益財団法人河川財団の河川基金の助成を受けて実施されました．ここに記して深謝いたします．

参考文献

1) 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，58(10), pp. 8-13，2016.
2) 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，58(10), pp. 30-35, 2016.
3) 坂本博文，谷﨑保，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.
4) 自然共生研究センター：ダム下流に土砂を流す―健全な河床を目指して，ARRC NEWS，No.14，7 pp.，2017.
5) 阿部信一郎：でこぼこした河床と平滑な河床に対するアユの生息場所選択，水産増殖，60(4)，pp.445-449，2012.
6) 阿部信一郎，新井肇，荒木康男，榎本昌宏，原徹，藤本勝彦，伊藤陽人，井塚隆，松崎賢，田子康彦，山本敏哉：河床に露出した巨石の割合とアユの漁獲不振の関係，水産増殖，62，pp. 37-43，2014.
7) 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.
8) Sylte, T. and Fischenich, C.: Techniques for measuring substrate embeddedness. EMRRP Technical Notes Collection (ERCD TN-EMRRP-SR-36). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 2002.
9) 宮川幸雄，小野田幸生，萱場祐一，角哲也，竹門康弘：土砂供給で変動する河床の石礫の露出高を予測する方法の提案，河川技術論文集，24巻，（投稿中）．
10) 中部地方整備局：矢作川水系総合土砂管理検討委員会資料 河道・環境WGの報告，2016（http://www.cbr.mlit.go.jp/toyohashi/kaigi/yahagigawa/dosyakanri/H28/h28-1shiryo2.pdf , 20180327閲覧）．
11) 佐川志朗，中森達，秋葉健司，張裕平，近藤智，渡辺雅俊：滝里ダム運用が下流河川の物理環境および水生生物に与える影響，応用生態工学，7(1)，pp. 65-80，2004.
12) Wolman, M. G.: A method of sampling coarse river‐bed material. EOS, Transactions American Geophysical Union, 35(6), pp. 951-956, 1954.
13) Wentworth, C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5), pp. 377-392, 1922.
14) 竹門康弘，谷田一三，玉置昭夫，向井宏，川端善一郎：棲み場所の生態学，平凡社，東京，1995.
15) Bain, M. B., Finn, J. T. and Booke, H. E.: Quantifying stream substrate for habitat analysis studies. North American Journal of Fisheries Management, 5, pp. 499-500, 1985.
16) 藤田光一，山原康嗣，冨田陽子，伊藤嘉奈子，小路剛志：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究，水工学論文集，52，pp. 547-552，2008.
17) Luce J. J., Steele R. and Lapointe M. F.: A physically based statistical model of sand abrasion effects on periphyton biomass. Ecological Modelling, 221, pp.353-361, 2010.
18) 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，土木学会論文種B1（水工学），70(4)，pp.I_1339-I_1334，2004.

（2018. 4. 3受付）