

河床生息場評価の低コスト化に向けた 石礫の露出高の簡易予測モデルの 複数現場への適用による精度検証

ACCURACY VERIFICATION BY APPLYING AN ESTIMATION MODEL OF
EXPOSURE HEIGHT OF STONES TO MULTIPLE SITES FOR COST REDUCTION
OF RIVERBED HABITAT EVALUATION

小野田幸生¹・宮川幸雄²・中村圭吾³・萱場祐一⁴

Yukio ONODA, Yukio MIYAGAWA, Keigo NAKAMURA and Yuichi KAYABA

¹非会員 博(理) (国研) 土木研究所 水環境研究グループ 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)
(現所属) 応用地質株式会社 応用生態工学研究所
(〒963-7722 福島県田村郡三春町大字西方字石畑275)

²正会員 博(工) (国研) 土木研究所 水環境研究グループ 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)

³正会員 博(工) (国研) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

⁴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)

Although a model for estimating exposure height of river-bed stones can reduce costs for evaluating riverbed environment in comprehensive sediment management, the accuracy of the estimation model should be verified. This study quantitatively examined the accuracy of the model by comparing between distribution shapes of measured and estimated exposure height using a statistical analysis method (Kolmogorov-Smirnov test). Significant difference was not detected in many cases (13 of 15 cases) where riverbed conditions were diverse, suggesting that the estimated model should have a certain accuracy. The accuracy was negatively correlated with ratio of coarser materials such as cobbles, indicating that the accuracy tends to be decreased when the model is applied to riverbed with high ratio of the coarser materials. In conclusion, the estimation model can be applicable to many locations in rivers although the accuracy of the model should be verified when applied to riverbed with much coarser materials.

Key Words : *Exposure height, Yahagi River, comprehensive sediment management plan, an estimation model*

1. はじめに

総合土砂管理では、人為的な土砂供給を伴うことが多く、供給した土砂が河道に堆積した場合の生物の応答を予測・評価する手法が求められている^{1),2)}。砂を主体とした土砂供給は、河床表面の石礫を埋没させることとなるため、「浮き石」環境の減少を生じさせる³⁾。そのため、浮き石環境の減少を定量的に把握し、その生物への影響を評価する必要がある。

定量的な把握手法の一つとして、砂面から石礫頂部までの高さで定義される「露出高」が提案されている⁴⁾。この露出高は、その定義から明らかなように、石が砂に埋没すると低下する変数であるため、浮き石を利用する生物の応答を説明する変数として有用であると考えられる。実際、浮き石を採餌場所として利用するアユの摂食場所利用の選択要因として、露出高が重要であることが確認されている⁵⁾。そのため、土砂供給に伴う河床環境の変化に対する生物の応答を評価するための指標として、総合土砂管理の現場でも利用されはじめて⁶⁾。この

河床からの高さに対する石の存在確率を正規分布 (分布形は仮定)で表現 (河床近傍で多い傾向)



図-1 石礫の露出高の分布形を簡易的に予測するモデルの概要. 宮川ほか (2018) ⁷⁾を基に作図

ように、露出高は土砂堆積に伴う河床表面の凹凸のなどの変化を定量化し、それに応じた生物の応答までをシームレスにつなぐ有用な指標であるが、水中目視観測が必要となるなど、調査におけるコストの高さが問題だった。

最近その問題解決のため、河床材料のデータから露出高を簡易的に予測するモデル (以下、予測モデル) が開発された (図-1参照) ⁷⁾。このモデルは、粒径区分 (利用されるのはWentworthの粒径区分⁸⁾のうち巨石 (> 256 mm)、石 (65 - 256 mm)、礫 (17 - 64 mm) の3区分) ごとに河床表面からの高さに対する石の頂部の高さの存在確率が正規分布に従うと仮定したものを統合することにより、露出高の分布形を予測するものである。河床近傍では、その高さを持つ粒径が多くなるという考えで、その平均的な高さは粒径が大きい区分ほど高くなる。また、大きい粒径区分ほど露出高の取る範囲が大きくなるため、そのばらつきが大きくなるという考えに基づく。

このモデルでは、露出高が粒度組成という河床材料を評価する基礎的な変量のみを用いて予測されるため、応用範囲が広いという特長を有する。たとえば、総合土砂管理では、河床変動計算の出力結果として粒径区分が出力されれば、露出高を予測することで生物の応答までを含めて評価することが可能となる。それ以外にも、過去に計測された粒径区分の被度や粒径加積曲線などのデータに適用すれば、ダム建設前のような近過去の復元にも利用できるため、露出高の目標値の設定などにも活用可能である¹⁰⁾。

しかしながら、予測モデルを現場実装するにあたって、その予測精度と適用範囲を明確化する必要があるが、現在の予測精度は、露出高ヒストグラム (以下、分布形) の一致の程度の確認にとどまっております⁷⁾、定量的な予測精度の検証は実施されてこなかった。この解決策とし

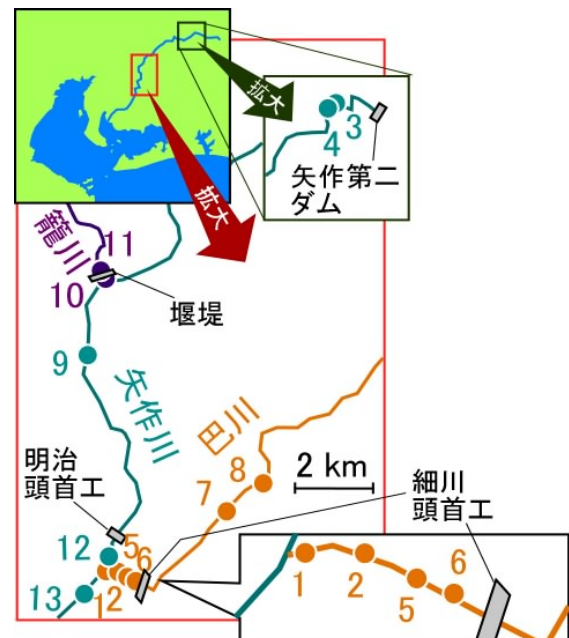


図-2 矢作川水系における調査地点

て、分布形の相違の有無を検定できる統計解析手法の利用が考えられる。それによって、予測精度を客観的かつ定量的に評価することが可能となる。

そこで、本研究では複数地点において実測された露出高の観測値と河床表層の粒径分布から推定された予測値について、両者の分布形の違いの有無を統計解析手法によって検証することで、予測モデルの精度を検証した。さらに、両者の分布形の違いが検出されやすい (= 予測精度が低下しやすい) 条件も探索した。これにより、露出高の簡易予測モデルの有効性と適用範囲を明確化し、総合土砂管理における評価ツールとして石礫の露出高とその予測モデルを実装可能にすることを目的とした。

2. 方法

(1) 調査地

予測モデルの精度の検証に用いる実測データを取得するため、矢作川水系で河床材料の組成の異なる13地点（矢作川本川5地点、巴川6地点、籠川2地点）を選定し（図-2）¹⁰⁾、様々な河床状態を評価対象とできるようにした。なお、矢作川本川の上流側2地点（St.3, 4）では、ベルトコンベアを用いた土砂供給の前後で2回計測したため⁴⁾、すべて検証データに含めた。結果として、検証用のデータは合計15個となった。

(2) データ収集

各地点におけるデータ収集は瀬を対象に行った。これは、露出高がアユの採餌環境の評価に利用されること、そのアユの主要な採餌場所が瀬であること¹¹⁾を考慮したものである。瀬において調査測線を設定し、その測線上の石礫の露出高を実測した。なお、露出高がアユの採餌場所の評価に用いられることを考慮し、予備調査でアユの食み跡が確認された最小の粒径である約20 mm以上の河床材料（本研究では石礫と呼称する）を露出高の計測対象とした。さらに、調査地点の河床表層の粒度分布としてペブルカウント（調査区間をジグザグしながら河床材料を拾い、その中間径をmm単位で計測）を行い、宮川ほか（2018）で提示された手法⁷⁾に従って、石礫の露出高の予測値を得た。

(3) データ解析

露出高の実測値と予測値の分布形を図示するとともに、両者に有意な違いがあるかを検証するために一標本Kolmogorov-Smirnov (KS) testを用いた。検定の際には実測値と予測値を同数とみなして解析した。一標本KS testの p 値は、実測値と予測値の乖離度を反映したものであるため、本研究ではそれを予測精度の指標として用いた。その予測精度と各粒径区分の比率との相関関係をSpearmanの順位相関によって解析し、どのような粒径区分の多寡が予測精度に影響を及ぼすのかを探索した。また、露出高を計測した石礫について、その中間径に対する露出高の散布図を作成し、石礫の粒径と露出高との関連を調べた。全ての解析の有意水準は0.05とし、解析には統計ソフトStat View 5.0Jを用いた。

3. 結果

(1) 河床材料の粒径区分ごとの割合

調査対象地点の瀬では、13地点とも、巨石や砂の割合は低かったが（巨石割合の最大値は0.20、砂割合の最大

表-1 各地点における河床材料の粒径区分ごとの割合

地点	巨石 >256mm	石 65- 256mm	礫 17- 64mm	砂利※ 2- 16mm	砂※ <2mm
矢作川					
St. 3	0.06	<u>0.61</u>	0.24	0.09	0.00
St. 3-2	0.10	<u>0.60</u>	0.16	0.08	0.06
St. 4	0.20	0.50	0.20	0.09	0.01
St. 4-2	0.09	0.49	0.18	0.20	0.04
St. 9	0.06	<u>0.62</u>	0.18	0.12	0.02
St. 12	0.00	<u>0.33</u>	0.30	0.34	0.04
St. 13	0.00	0.12	0.42	0.37	0.09
巴川					
St. 8	0.00	<u>0.65</u>	0.24	0.04	0.07
St. 7	0.00	0.20	0.43	0.25	0.12
St. 6	0.01	0.16	0.28	0.33	0.22
St. 5	0.01	0.17	0.39	0.29	0.14
St. 2	0.00	0.09	0.48	0.30	0.13
St. 1	0.00	<u>0.03</u>	0.32	0.48	0.17
籠川					
St. 11	0.00	0.05	0.46	0.37	0.12
St. 10	0.00	<u>0.27</u>	0.36	0.35	0.02

※ 砂利と砂の割合は露出高の予測には使用されていない。
※ St.3,4は、それぞれベルトコンベアによる土砂供給地点の上流と下流を示し、St. 3-2, 4-2は土砂供給後を表す。

値は0.22）、石、礫、砂利の割合は高い傾向だった（各割合の最大値は、石が0.65、礫が0.48、砂利が0.48；表-1）。この中で、矢作川本川（特に上流側のSt.3, 4）では石の割合が高く、支川の巴川や籠川では礫や砂利の割合が高い傾向だった。結果として、調査対象の13地点における粒径区分の割合の組み合わせは多様だった。

(2) 露出高の実測値と予測値

露出高の実測値の分布形は0 - 100 mmまでの範囲に最頻値をもち、その後減少する一峰性の分布形を示した（図-3）。100 mm以上の露出高の頻度は低い傾向がみられたが、矢作川本川（特に上流側のSt.3, 4）では100 mm以上の大きな露出高も散見された。露出高の予測値の分布形も基本的には実測値の分布形と同様だったが、最頻値が実測値よりも低い傾向がみられた。

露出高の観測値と予測値で分布形を比較した結果、有意差が見られたのは2地点のみで（St. 8, $p = 0.025$; St. 10, $p = 0.002$, KS test）、15のうち13個のデータ（87%）では有意差が見られなかった（ $p > 0.05$ ）。有意差がみられた地点では、実測値の分布が予測値と同様の一峰性を示したものの、実測値の最頻値が右側にずれていた。また、土砂供給前後で繰り返し計測のあった地点では同様の p 値が得られた（St.3 1回目 $p = 0.236$, 2回目 $p = 0.313$; St.4 同 $p = 0.399, p = 0.414$ ）。

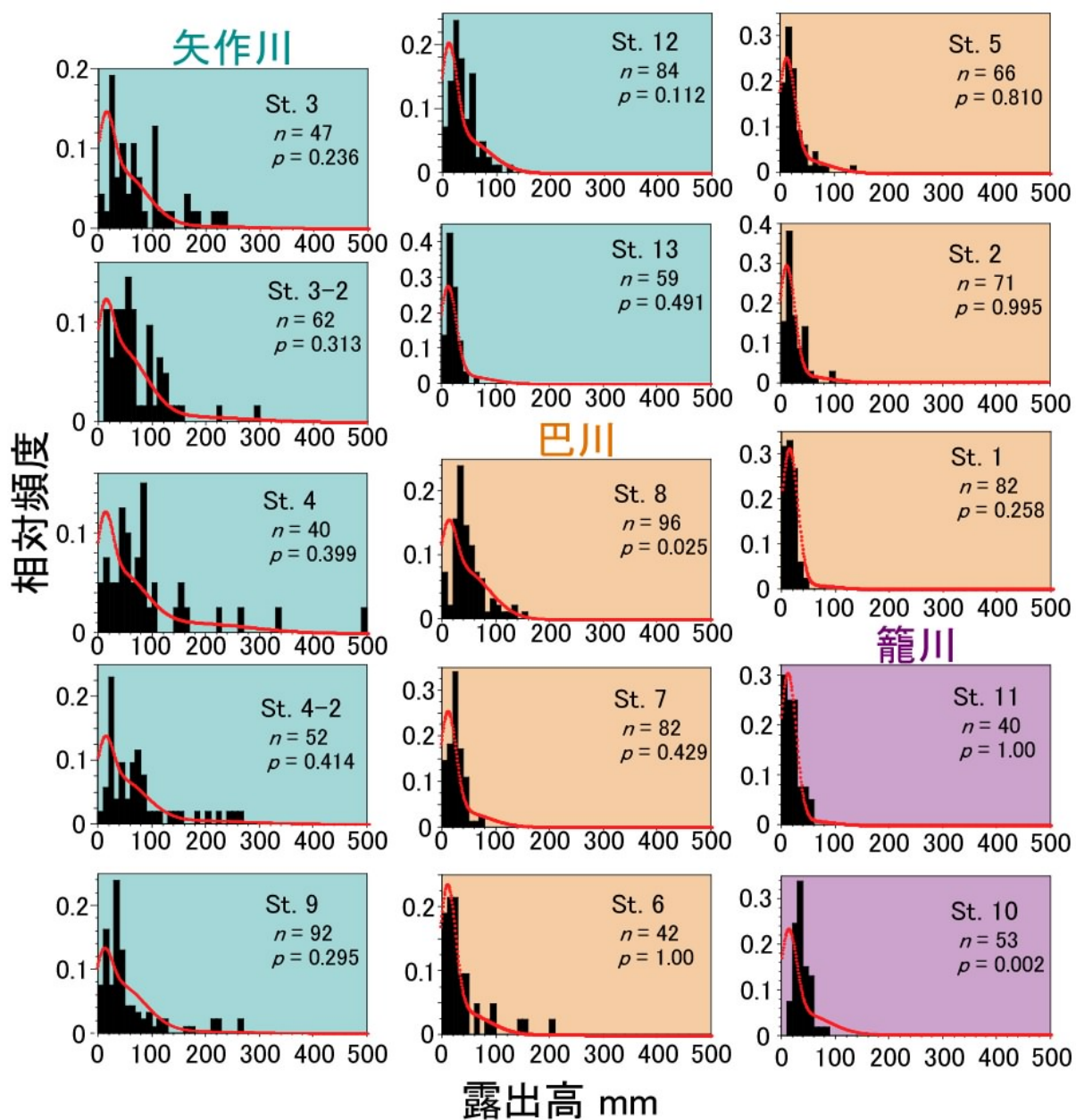


図-3 露出高の実測値（ヒストグラム）と予測値（赤色曲線）の分布形。
グラフ内の n と p は、それぞれ各地点における露出高の実測数とKStestの検定結果を表す。

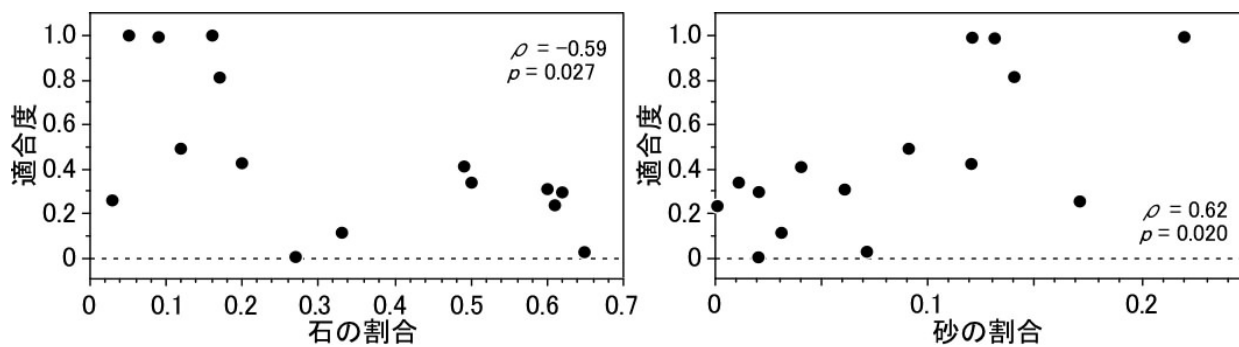


図-4 石の割合および砂の割合に対する分布の適合度。

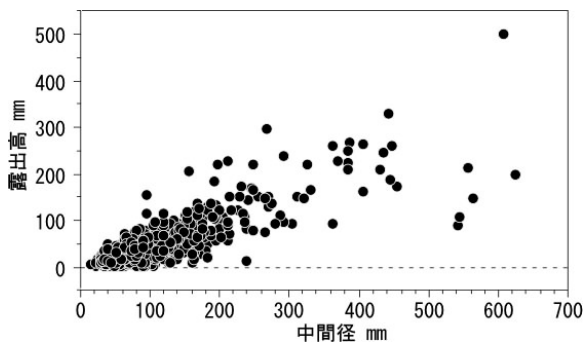


図-5 石礫の中間径に対する露出高の分布

(3) 予測精度に影響する要因

予測精度 (KS testの p 値で代替) は、石の割合との間に負の相関がみられ ($\rho = -0.59$, $p = 0.027$, Spearmanの順位相関, 図-4), 石の割合が高いほど露出高の実測値と予測値の分布形が異なりやすい傾向が確認された。逆に、砂の割合との間には有意な正の相関がみられ、砂の割合が小さいほど露出高の実測値と予測値の分布形が異なりやすい傾向が確認された ($\rho = 0.62$, $p = 0.020$, 図-4)。ただし、石の割合と砂の割合との間には有意な負の相関がみられた ($\rho = -0.735$, $p = 0.006$)。そのほかの粒径区分とは有意な相関関係は確認されなかった (巨石, $p = 0.890$; 礫, $p = 0.102$; 砂利, $p = 0.320$)。

(4) 石礫の中間径に対する露出高の分布

石礫の中間径に対する露出高との関連をみると、両者の間には一定の線形関係が確認された (図-5)。ただし、中間径が大きい場合 (約300 mm以上の範囲) では、それまでの線形直線から外れるケースも見られた。ばらつきに着目すると、大きな中間径の石礫ほど露出高のばらつきが大きい傾向がみられた。

4. 考察

(1) 露出高の簡易予測モデルの精度検証

各調査対象地点の瀬における粒径区分は石、礫、砂利の割合の組み合わせが多様であったため (表-1)、本研究では様々な河床環境を対象とした実証用のデータを収集できたと考えられる。

ほとんどのデータ (87%) において、露出高の実測値と予測値との間で分布形に有意差がみられなかったことは、多様な粒径の河床環境を対象にした場合でも、露出高の簡易予測モデルの予測精度は低くないことを示していると考えられる。また、同じ地点で異なる時期 (土砂供給前後) の計測についても、 p 値は同程度だったことから、土砂供給の評価に対しても露出高の簡易予測モデル

は利用可能であると考えられる。

(2) 露出高の簡易予測モデルの予測精度に影響する要因

露出高の簡易予測モデルによる分布形の予測精度は、石の割合が増加するほど低下する傾向がみられ、砂の割合が増加するほど向上する傾向がみられた (図-4)。ただし、石の割合と砂の割合との間に負の相関がみられたことや、砂の割合は予測モデルには利用されないこと (図-1) から、予測精度に影響する要因として石の割合に着目するのが妥当と言える。本研究の実測データでは、石、礫、砂利の割合が優占的で (表-1)、石は其中で一番粗い粒径区分であることから、一般的には粗い粒径区分が多い時には予測精度が低下する可能性があることに注意が必要であると言える。この予測精度の低下は露出高の分布形の全体に波及し、中でも比較的高い露出高部分の形状に影響を及ぼすと考えられるが、露出高を環境面から見る際の中心となるレンジは比較的小さいため (数十mm程度⁶⁾)、環境面における予測精度への影響は比較的小さいと推定される。

粗い粒径区分の割合が高い場合に、露出高の簡易予測モデルの精度が低下する理由として以下の2つが考えられる。まず、粗い粒径区分 (たとえば、石) は中間径の範囲が大きいので、それを1つにまとめることによる情報量の損失が挙げられる。次に、粗い粒径はその高さも大きいので取りうる露出高の範囲 (ばらつき) が潜在的に大きくなりやすいことが挙げられる。前者の問題は、粒径区分を細かく区切ることで解消可能と考えられる。一方、後者の問題 (大きな粒径における露出高の潜在的な大きさ) については本研究でも確認されており (図-5)、その改善を進めることで予測精度のさらなる向上が期待できる。

ただし、本研究における矢作川本川の上流側の地点 (St.3, 4) のように石の割合の高かった場所でも、露出高の簡易予測モデルはある程度の予測精度を保持していた (図-3)。そのことから、粗い粒径区分の多い場合の予測精度の低下の可能性は一つの注意点として意識しつつ、事前にその適用可能性を確認するなどして、総合土砂管理に活用していくのが実用的であると考えられる。

(3) 今後の課題

本研究では、矢作川水系の複数地点において、露出高の実測値と予測値の分布形に有意差がみられた地点が少なかったことを示すことで、簡易予測モデルが一定の予測精度を有することを確認した。ただし、分布形に有意差がみられないことは分布形が等しいことを示すわけではないので、今後多くの事例を積み重ね、どのような場合に実測値との分布形が異なるのかを慎重に検証していく必要があると考えられる。

また、本研究では同一水系 (矢作川水系) を対象に露出高の簡易予測モデルの精度検証を行ったため、異なる

水系に対して簡易予測モデルを適用する際には、本研究と同様の手法を用いてその精度を検証する予備検討を行うことが望ましいといえる。特に、流域の地質が異なると石礫の扁平度が異なる場合も知られており¹²⁾、予測モデルの調整が必要になる場合も生じうると考えられる。

ただし、本研究では調査地点を工夫することで、異なる粒度組成を有する様々な河床環境を対象に精度が検証されたので、その適用可能性は決して低くないと考えられる。また、モデルの適用範囲として粗い粒径の割合が多い時には注意を要することを提示できたことは、実装に向けた有益な知見といえる。

5. まとめ

本研究では、石礫の露出高の分布形を予測するモデルの精度を客観的に検証するため、矢作川水系の複数地点における石礫の露出高の実測値の分布形と予測値の分布形とを統計解析手法を用いて比較した。その結果と今後の課題を以下にまとめる。

- 1) 露出高の実測値と予測値の分布形の間で、有意差が検出されたのは、15個のうち2個のデータだったことから、ほとんどのデータ（87%）に対しては、このモデルが一定の予測精度を有していることが確認された。
- 2) 土砂供給地点における土砂供給前後で、予測精度が大きく変わらなかったことから、土砂供給に伴う河床環境の変化の評価にも、このモデルが利用可能であると考えられた。
- 3) 統計解析（KS test）の p 値をモデルの予測精度とみなした解析では、粗い粒径（本研究では石）が多いほど予測精度が低下する傾向がみられ、本モデルの適用の際の注意事項として挙げられた。そのため、粗い粒径に対する露出高の予測精度を向上させることで、さらなる改善が期待できると考えられる。
- 4) 本研究では、同一水系において複数地点を設定することで、本モデルが一定の予測精度を有することを確認した。そのため、異なる水系で本モデルを適用する際には、その予測精度について事前に検討することが望ましい。ただし、本研究では粒径区分の組成の異なる様々な河床環境を対象に検証したので、このモデルの適用可能性は低くないものと考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、矢作川漁業協同組合にはデータ取得のために漁場に入ることに對してご理解頂きました。株式会社建設技術研究所、株式会社建設環境研究所、浜松溪友会には現場調査にご協力いただきま

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。本研究の一部は、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。

付記：本研究で用いた、石礫の露出高を簡易的に予測するモデルの β 版は、土木研究所自然共生研究センターのHPにて、2020年3月31日から公開されています。

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) 自然共生研究センター：ダム下流に土砂を流す一健全な河床を目指して，ARRC NEWS，No.14，7p.，2017.
- 4) 小野田幸生，堀田大貴，萱場祐一：露出高による石礫の埋没度の定量化と人為的な土砂供給に伴う河床環境変化の評価への適用，河川技術論文集，24，pp.343-348，2018.
- 5) Hotta T, Onoda Y, Miyagawa Y, Sueyoshi M and Kayaba Y: Relationship between exposure height of stones and feeding behavior of ayu in a large experimental flume. In Proc. 12th International Symposium on Ecohydraulics, 2018.
- 6) 平成30年度矢作川水系総合土砂管理検討委員会資料 <http://www.cbr.mlit.go.jp/toyohashi/kaigi/yahagigawa/dosyakanri/H30/h30-1shiryo1.pdf>（2020年3月31日確認）
- 7) 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，pp.83-88，2018.
- 8) Wentworth C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, The Journal of Geology, Vol.30, No.5, pp.377-392, 1922.
- 9) 竹門康弘：水域の棲み場所を考える。In 竹門康弘，谷田一三，玉置昭夫，向井宏，川端善一郎（著）棲み場所の生態学，pp.11-66，1995.
- 10) 小野田幸生：アユの体サイズを加味した石礫の露出高に対する選択性に基づく堆積土砂量の許容値の詳細検討，平成29年度河川整備基金助成事業報告書，2018.
- 11) 川那部浩哉，水野信彦：山溪カラー名鑑 日本の淡水魚，山と溪谷社，719p.，1989.
- 12) 田代喬，辻本哲郎：流域地質の異質性からみた山地河川の河床材料構成と底生動物の関係：櫛田川流域における現地観測，応用生態工学，18(1)，pp.35-45，2015.

(2020. 4. 2受付)