

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第4424号

土木研究所資料

ダム下流の土砂供給による
河床環境への効果を
予測・評価する手法
～石礫の露出高を用いた簡易予測～

令和 4年 3月

国立研究開発法人土木研究所
水環境研究グループ
自然共生研究センター

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ダム下流の土砂供給による 河床環境への効果を 予測・評価する手法 ～石礫の露出高を用いた簡易予測～

自然共生研究センター 主任研究員 宮川 幸雄
元専門研究員 (現応用地質(株)) 小野田 幸生
専門研究員 末吉 正尚
上席研究員 中村 圭吾

要 旨 :

本資料は、土砂供給事業が実施または予定されているダム直下における適切な土砂供給量の設定を目指し、土砂供給による河床環境の変化を定量的に予測・評価する新技術について紹介する。はじめに、ダム下流における河床環境の改善の面から、土砂供給の意義および河床環境評価に関する既往の知見および評価における課題を説明する。次に、課題解決に効果的な新たな評価手法として石礫の露出高を用いた河床環境評価を紹介し、露出高による河床環境評価にあたって必要な露出高の簡易予測モデルの紹介およびその利用方法について説明する。最後に、露出高を評価指標とした河床環境評価手法による総合土砂管理への貢献等について説明する。

キーワード：総合土砂管理、露出高、アユ、付着藻類、採餌

ダム下流の土砂供給による河床環境への効果を予測・評価する手法

～石礫の露出高を用いた簡易予測～

目次

1. 本資料の位置づけと対象範囲	1
1-1. ダム下流の河床環境における課題と対策.....	1
1-2. 土砂供給による河床環境への効果とその効果の予測・評価手法の必要性.....	2
2. 土砂供給による河床環境の変化の予測・評価に関する考え方.....	5
2-1. 土砂供給による河床環境の変化の予測・評価の基本的な流れ.....	5
2-2. 土砂供給による生物への影響の予測・評価に関する対象範囲.....	6
2-2-1. 予測・評価対象とする時点、土砂動態	6
2-2-2. 予測・評価対象とする場所	6
2-3. 土砂供給による水生生物への影響の予測・評価の事例紹介	7
2-4. 土砂供給による水生生物への影響の予測・評価の課題と指標種の選定	8
3. 土砂供給による河床環境の変化を予測・評価する新技術の紹介.....	11
3-1. アユと河床の石礫との関係.....	11
3-2. 砂、小礫の堆積に伴う河床表層の変化の予測・評価指標の選定	12
3-3. 露出高を指標としたアユの採餌環境の評価	13
3-3-1. 露出高と大型糸状緑藻の定着リスクとの関係	14
3-3-2. 露出高がアユの摂食行動に及ぼす影響	14
3-3-3. 露出高がアユの採餌環境の評価に適する理由	15
3-4. 露出高を用いた河床環境評価のプロセス.....	15

4. 露出高の予測技術の開発および精度検証.....	18
4-1. 露出高の簡易予測モデルの開発.....	18
4-1-1. はじめに.....	18
4-1-2. 簡易予測モデルにおける石礫の配置の概念.....	18
4-1-3. 単一粒径の河床を想定した露出高の予測手法.....	19
4-1-4. 混合粒径の河床を想定した露出高の予測手法.....	21
4-2. 露出高の簡易予測モデルの精度検証および改善.....	23
4-2-1. 露出高の簡易予測モデルの現場適用.....	23
4-2-2. 露出高の簡易予測モデルの改善内容.....	25
4-2-3. 改善したモデルの精度検証.....	26
4-2-4. モデルの改善による成果および課題.....	34
5. 露出高の予測モデル（ β 版）の紹介および利用方法について.....	37
5-1. はじめに.....	37
5-2. データの入力方法.....	38
5-2-1. ファイルを開く.....	39
5-2-2. 必須項目の入力.....	40
5-2-3. 設定項目の補足.....	41
5-3. 出力内容.....	42
5-4. 補足事項.....	43
6. まとめと今後の展望.....	44

1. 本資料の位置づけと対象範囲

1-1. ダム下流の河床環境における課題と対策

ダムは貯水池に水を貯めることで、洪水および濁水を低減させ、治水および利水に貢献する社会的に重要な構造物である。一方、ダム貯水池には水だけでなく土砂も流入、堆積するため、下流へと流下する土砂が減少する傾向にある。この土砂輸送の連続性の寸断により、ダム下流に土砂が補充されないため、洪水等によりダム下流河床から細粒粒子が掃流されると、ダム下流河床には粗粒粒子のみ残る（粗粒化する）¹⁾（図 1-1）。この現象は、全国各地のダムで確認されている¹⁾。河床材料の粗粒化は、礫間の空隙率、河床近傍の流速等の変化をもたらすことで、礫間の空隙や砂礫を生息場、産卵場にする底生動物や魚類だけでなく、遊泳魚にまで影響が及ぶと考えられている^{2),3)}。また、洪水攪乱の減少によって河床が安定化することで、石礫上に生育する藻類（付着藻類）の剥離・更新が滞り、糸状に伸びた大型糸状緑藻などが異常繁茂し、景観の悪化、付着藻類を主な餌資源とする水生生物への影響が懸念される（図 1-1）^{4),5)}。

この課題を「総合的な土砂管理（以下、総合土砂管理）」における課題の一部に位置づけ、解決を図る取り組みが国土交通省の主導のもと鋭意進められている。総合土砂管理とは、流域の源頭部から海岸までの一貫した土砂の運動領域を流砂系という概念で捉え、土砂の生産の抑制、流出の調節、適切な流下土砂量の維持、海岸侵食対策等の必要な対策を講じ、多数の関係者が関わる土砂動態に関する課題解決を図る取り組みである⁶⁾。この中で、ダム下流においては、土砂輸送の連続性の回復とともに、ダムによる河床環境への影響の緩和が目標として明記されている。この目標に基づき、全国各地で、貯水池に堆砂した土砂または洪水時に流入する土砂を人工的に下流に供給するための様々な土砂供給手法が試行されている⁷⁾。



図 1-1 ダム下流において粗粒化が進行し、大型糸状緑藻が繁茂した河床の状況

1-2. 土砂供給による河床環境への効果とその効果の予測・評価手法の必要性

1-1.の土砂供給手法には、ダム貯水池に堆積した土砂を掘削、運搬しダム下流に置いて放流または洪水時に流下させる手法（置土）や、ダム上下流をトンネルでつなぎ、洪水時に貯水池に流入する土砂の一部をトンネルに迂回させて流下させる手法（排砂バイパストンネル）等がある。これらの土砂供給が行われたダム下流では、供給土砂の一部が河床間隙に堆積したことや⁸⁾、供給地点直下の河床で供給土砂と同じ粒径の割合が増加したことが報告されている^{9),10)}。また、真名川ダム下流の置土の事例では、土砂供給箇所の直上、直下で付着藻類の剥離量を比較し、流水のみの直上よりも流砂が加わった直下で剥離がより促されたことが報告されている¹¹⁾。このメカニズムについて、供給土砂を構成する粒子が河床の石礫に衝突することで表面の付着藻類が剥離されるためと考察されている¹²⁾。このように、ダムによる河床環境への影響が土砂供給によって緩和されることが認められ始めている。

しかし、対策のために適切な土砂供給量を推定した上で総合土砂管理計画を策定し、計画に基づく土砂供給を実施したダムは全国的にまだ少ない。この理由は、河床環境への影響を緩和させる効果を適切に把握することが困難なためである。特に、河床を利用する水生生物の観点から、ダム下流にどの程度の土砂を供給すればよいかという判断材料の不足は、総合土砂管理計画を策定する際の課題となっている。例えば、ダム下流への土砂供給量が千数百 m^3 程度の場合、河床に供給土砂と同じ粒径の割合が増加しなかったことが報告されている¹³⁾。また、付着藻類の剥離を促す効果についても、土砂供給量が千数百 m^3 程度の場合、石礫への固着力が強いとされる大型糸状緑藻に対しては、ほとんど期待できないことが報告されている¹³⁾。これらの事例は、土砂供給量が不十分な場合、河床環境の影響を緩和する効果が十分に得られない可能性を示している。一方、土砂供給量が過剰な場合、河床の石礫間の空隙が埋没し、水生生物が礫間の空隙を生息場に利用できなくなるリスクが報告されている¹⁴⁾。さらに、表層の凹凸によって形成される河床近傍の緩やかな流れの層が消失し、遊泳魚の休息場所が減少する可能性も報告されている³⁾。このため、土砂供給による水生生物への正と負の影響をバランスよく、総合的に捉えることが、河床環境を改善するための適切な土砂供給量の予測と評価に重要であり、総合土砂管理の推進に不可欠である。

以上の背景より、本資料では、土砂供給事業が実施または予定されているダム直下における適切な土砂供給量の設定を目指し、土砂供給による河床環境の変化を定量的に予測・評価する新技術について紹介する。本資料は、6章で構成されている。「1. 本資料の位置づけと対象範囲」（本章）では、主にダム下流河床の改善の面から土砂供給の意義について、「2. 土砂供給による河床環境の変化の予測・評価に関する考え方」では、河床環境評価に関する既往の知見および評価における課題について、「3. 土砂供給による河床環境の変化を予測・評価する新技術の紹介」では、課題解決に効果的な新たな評価手法として露出高を用いた河床環境評価について、「4. 露出高の予測技術の開発および精度検証」では、露出高による河床環境評価にあたって必要な露出高の簡易予測手法について、「5. 露出高の予測モデル（ β 版）の紹介および利用方法について」では公表されている露出高の簡易予測モデルの紹介お

よびその利用方法について、「6. まとめと今後の展望」では露出高を評価指標とした河床環境評価手法による総合土砂管理への貢献および残る課題等について、それぞれ説明および紹介している。

参考文献

- 1)Dietrich W.E., Kirchner J.W., Ikeda H., and Iseya F.: Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers, *Nature*, Vol.340, pp.215– 217, 1989.
- 2)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 the North American Benthological Society*, Vol.28(2), pp.331-351, 2009.
- 3)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(4)、pp.I_1339-I_1344、2014.
- 4)内田朝子：矢作川中流域におけるアユの消化管内容物、*矢作川研究*、Vol.6、pp.5-20、2002.
- 5) Horner R.R., Welch E.B., and Veenstra R.B.: Development of nuisance periphytic algae in laboratory streams in relation to enrichment and velocity, *Periphyton of Freshwater Ecosystems*, pp.121-134, 1983.
- 6)一般財団法人国土技術研究センター：総合土砂管理計画策定の手引き 第 1.0 版、2019.
- 7)Kondolf G.M., Gao Y., Annandale G.W., Morris G.L., Jiang E., Zhang J., Cao Y., Carling P., Fu K., Guo Q., Hotchkiss R., Peteuil C., Sumi T., Wang H.W., Wang Z., Wei Z., Wu B., Wu C., and Yang C.T.: Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents, *Earth's Future*, Vol.2(5), pp.256-280, 2014.
- 8)福島雅紀、武内慶了、箱石憲昭：砂礫の敷設・供給が下流河道へ与える影響とその応答速度、*河川技術論文集*、Vol.15、pp.477-482、2009.
- 9)Kantoush S.A., Sumi T., and Kubota A.: Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique, *River Flow 2010*, pp.1155-1163, 2010.
- 10)石神孝之、宮脇千晴、櫻井寿之、中西哲、萱場祐一、宮川幸雄、小野田幸生、末吉正尚、南山瑞彦、武田文彦、真野浩行：12.2.1 土砂供給に伴う河川環境影響評価およびダムからの土砂供給技術の運用手法に関する研究、平成 28 年度研究開発プログラム報告書(12. 流砂系における持続可能な土砂管理技術の開発)、pp.13-32、2017.
- 11)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.
- 12)北村忠紀、加藤万貴、田代喬、辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究、*河川技術に関する論文集*、Vol.6、pp.125-130、2000.

- 13)田中蕃：砂利投入による河床構造回復の試みとその効果Ⅳ、矢作川研究、Vol.4、pp.135-141、2000.
- 14)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.

2. 土砂供給による河床環境の変化の予測・評価に関する考え方

本章では、土砂供給による河床環境の変化の予測・評価の基本的な流れについて紹介した上で、具体的な評価技術の検討事例を示し、それらの課題について説明する。

2-1. 土砂供給による河床環境の変化の予測・評価の基本的な流れ

はじめに、土砂供給量および土砂供給手法を設定する。土砂供給量については、総合土砂管理計画等で定められる目標通過土砂量¹⁾、堆砂量、既往の通過土砂量を参考に、ダムごとに設定する。このとき、供給土砂を構成する粒径についても、現場で堆砂、通過する土砂の粒径を参照して設定する必要がある¹⁾。土砂供給手法については、総合土砂管理計画で想定されている手法等をもとに、置土、排砂バイパストンネル等から選択する。

次に、設定した土砂供給手法に基づき河床変動計算等を実施し、土砂供給前後の河床の地形および河床表層の粒径の変化を予測する。このとき、土砂供給前の河床の地形は、対象とする現場の横断図、LP データ等をもとに設定する。また、河床変動計算についての詳細の説明はここでは省くが、iRIC 等のソフトウェアを用いて解析する。最終的には、土砂供給前と比較可能な形で土砂供給後の河床の地形および粒径分布を算出できることが望ましい。

最後に、対象分類群別に河床環境の変化に対する生物の応答を既往の研究成果等から予測した上で、予測した生物の応答が、個体群の維持や水産資源の保全等の観点から許容できるかどうかについて評価する²⁾。生物の応答が許容できないと判断された場合には、必要に応じて生物への影響の軽減させるための土砂供給量および土砂供給手法の再検討を行う。このときの評価については、同じ場所の土砂供給前の状態または近隣で類似した環境を有し上流にダムのない場所との比較を基本として行うことが望ましい。

以上のプロセスを図 2-1 にまとめた。このプロセスの中の、評価指標および評価方法の設定については、対象とする生物ごとに指標および評価方法が異なる。このため、評価対象とするダムに存在する生物の中で、どの生物のどのような影響を予測・評価対象とするかは、総合土砂管理計画等の策定において重要といえる。

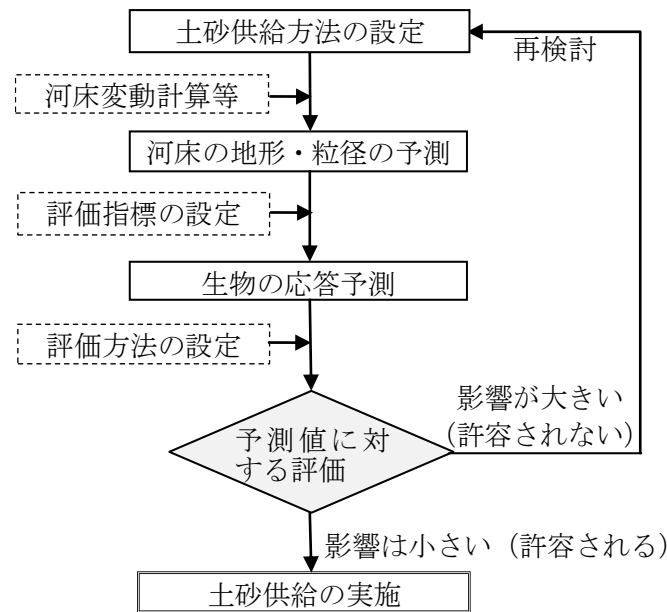


図 2-1 土砂供給による河床環境の変化の予測・評価の基本的な流れ²⁾

2-2. 土砂供給による生物への影響の予測・評価に関する対象範囲

2-2-1. 予測・評価対象とする時点、土砂動態

土砂供給による生物への影響の予測・評価にあたっては、はじめに、土砂供給実施前後にかけて、どの時点での影響を予測・評価するかを決める必要がある。洪水時、すなわち土砂流下時における生物の応答を現場で把握することは困難であることから、予測は土砂流下後、平水時に戻った状態の河床環境および生物を対象とすることが想定される。この場合、洪水時に河床を掃流し、洪水後に河床に堆積する砂～小礫程度の粒径集団（概ね 0.062～16 mm 程度³⁾）に対する生物の応答が予測・評価の対象となる。一方、洪水中に主に濁水として通過するシルト以下の粒径集団（概ね 0.062 mm 以下³⁾）についても、アユが濁水に対し忌避行動を示す傾向⁴⁾、アユ漁獲量への負の影響⁵⁾等の報告もある。しかし、ダムからの土砂供給に伴う濁りは、大規模な洪水の場合を除き、土砂供給後から 1 週間程度で土砂供給前と同程度の状態に戻ることが報告されていることから⁶⁾、本資料では土砂供給後の砂～小礫の堆積が生物に及ぼす影響を予測・評価の対象とする。このとき、水域内の河床における砂～小礫の堆積による影響を見るため、対象とする生物は水生生物の中から選定するものとする。

2-2-2. 予測・評価対象とする場所

次に、ダム下流河川全体の中で、対象となる場所を選定する必要がある。河川を横断的にみると河岸の影響を受けない流心部と影響を受けて水深・流速が低下する水際部があり、さらに流心部を縦断方向に見ると瀬と淵に区分することができる²⁾。このうち、砂、小礫の堆

積の影響を受けるのは、主に表層材料が礫以上で構成され礫間の空隙の埋没等が生じる流心部の瀬であり、そこが予測・評価の場所として適しているとされる²⁾。

2-3. 土砂供給による水生生物への影響の予測・評価の事例紹介

ダム下流への土砂供給により、流心部の瀬に堆積した砂、小礫が水生生物に及ぼす影響について予測・評価した事例を水生生物の分類群（付着藻類、底生動物、魚類）ごとに紹介する。

付着藻類については、河床の石礫の露出面積の減少を数値予測し、河床 1m²あたりの付着藻類の現存量を推定した結果、砂、小礫の堆積により現存量が減少する傾向が報告されている^{7),8)}。この現存量の減少が、水生生物の視点からどの程度許容されるかを考察するにあたっては、次の2つの観点で評価できる。一つは、付着藻類が多くの高次消費者の餌資源となることから⁹⁾、現存量が水生生物にとって必要最低限量を下回らないかである。もう一つは、現存量が多いほど餌資源として不適とされる大型糸状緑藻¹⁰⁾が優占しやすいことから¹¹⁾、現存量が大型糸状緑藻の優占する閾値を上回らないかである。このうち、必要最低限の餌資源量については、全ての水生生物で把握することは困難なため、相対的に摂食量が多い種、例えばアユ等に絞って試算する方法がある¹²⁾。

底生動物については、土砂供給前後で群集が変化することが報告されており¹³⁾、モニタリングデータやそれに基づく数値計算から予測・評価された事例が複数ある。例えば、底生動物を摂食機能群（破碎食者等）から5タイプ、河床を粒径分布から3タイプに分類し、摂食機能群ごとに生息に適した河床を対応づけ、水理解析による河床変動とそれによる各摂食機能群の底生動物のタイプ別構成割合の変動を予測した結果、現場の構成割合を高い精度で再現できたことが報告されている¹⁴⁾。また、河床環境と摂食機能群との関係を CCA（Canonical Correspondence Analysis）によって分析し、ダム下流の粗粒化により、シマトビケラ科を代表とする濾過食者が増える可能性があること、および生物多様性指数（Shannon 指数）がダム下流で減少する可能性があることも報告されている¹⁵⁾。このような底生動物の群集の変化に対する評価について、モニタリングデータおよび一般化線形モデルを用いた解析により、土砂供給による河床材料の細粒化を判定するのに最も適した指標種としてヤマトビケラ科が提案されている¹⁶⁾。最終的には、これらの指標や解析を基準に、目指すべきリファレンス（自然状態）に近づくかどうかで判断することが望ましいと考えられる⁷⁾。

魚類については、耳川を対象として、砂環境に依存する魚類としてカマツカ類、石環境に依存する種としてボウズハゼを抽出した上で、これらの出現を予測する一般化線形モデルを構築し、ダムからの通砂によりこれらの出現確率がダム下流で上昇することを予測した研究がある¹⁷⁾。また、モニタリングデータについても、近年、無人航空機（UAV）による空撮技術および複数の画像から3D地形を復元する技術（SfM/MVS）等、新技術が導入されている。同じ耳川を対象とした事例では、これらを用いて土砂供給後の河床変動量を推定

するとともに、環境 DNA からアユの生息域分布を推定し、ダムからの通砂がアユの生息域分布の増加に貢献した可能性が報告されている¹⁸⁾。アユについては、このほか、河床軟度が高いほどアユの産卵に適していることから、二次元河床変動モデルにより土砂供給後の河床変動量およびアユの産卵適地を面的に予測することで、土砂供給がアユの産卵場に及ぼす影響を推定した研究がある¹⁹⁾。このような土砂供給による魚類へのプラスの効果が報告される一方、過剰な土砂供給は、河床の石礫間の空隙を埋没させ、魚類の生息密度を一時的に低下させるリスクも報告されている²⁰⁾。このほか、瀬の末端とその下の落ち込み型の淵の間に形成される隙間の容積を予測するモデルを構築し、河床変動計算と組み合わせることで土砂供給時の容積の変化を予測した結果、土砂供給により容積の減少が確認されたほか、この減少とともにイワナの個体数の減少が報告されている²¹⁾。さらに、河床の凹凸が減少することで、河床近傍の緩やかな流れの箇所が消失し、遊泳魚が緩流箇所を利用できなくなる可能性も指摘されている²²⁾。

2-4. 土砂供給による水生生物への影響の予測・評価の課題と指標種の選定

2-3.では、土砂供給による砂、小礫の堆積が流心部の瀬における水生生物に及ぼす影響の予測・評価について、既往研究を紹介した。しかし、評価対象とする水生生物の選定にあたり、予測結果に対して正か負か、または許容されるか否かを判定可能な生物は限られている点が課題といえる。例えば、土砂供給後にダム下流のヤマトビケラ科の現存量が上流にダムがない場所の現存量にどの程度近づいたかを予測することで、ダムによる下流への影響緩和を相対的に評価することは可能だが¹⁶⁾、ヤマトビケラ科の現存量の増加が必ずしもよい河床環境を表すわけではないため、その河床環境にとって許容されるか否かを評価することは困難である。生物多様性を評価対象とした場合も、多様性の増加が必ずしもよい河床環境を表すわけではないため、生物多様性の予測結果に対して許容されるか否かを評価することは困難である。この課題の解決には、その増減自体が河床環境にとって正か負かを絶対的に評価できる水生生物を対象とするのが最も現実的といえる。そのような水生生物は、希少種（増加が正）、外来種（減少が正）、または人間の都合上となるが水産重要種（増加が正）が挙げられる。このうち、希少種、外来種については、土砂供給による河床環境の変化との関係がほとんど未解明である。一方、水産重要種の一つであるアユは、全国に分布し、河床環境の変化に応答することを報告した研究も多い（詳細は3-1.に記載）。また、アユは水産重要種であることから、漁業関係や地元住民の関心が高いといえる。このため、河床変化に伴うアユへの影響を評価することは、ステークホルダー間の合意形成に役立つと考えられ、総合土砂管理の円滑に実施する観点からも重要といえる。以上から、アユを対象種として選定することは、広範な課題の解決に適切といえる。

本資料ではこれらの課題および知見を踏まえ、全国の河川に生息し水産重要種であるアユを評価対象とした河床環境の変化の予測・評価手法を新たに提案する。

参考文献

- 1)一般財団法人国土技術研究センター：総合土砂管理計画策定の手引き 第 1.0 版、2019.
- 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)関根正人：移動床流れの水理学、共立出版、2005.
- 4)Mori T., Kato Y., Takagi T., Onoda Y., and Kayaba Y.: Turbid water induces refuge behaviour of a commercially important ayu: A field experiment for interstream movement using multiple artificial streams, *Ecology of Freshwater Fish*, Vol.27(4), pp.1015-1022, 2018.
- 5)喜多村雄一、松本正喜、勝山一郎：アユ漁獲量を用いた河川生態系の予測と評価、河川技術論文集、Vol.8、pp.295-300、2002.
- 6)梶原晶彦、久保成隆、伊藤良栄、中村良太：大規模洪水時における貯水池の濁水長期化現象の解析、農業土木学会論文集、Vol.185、pp.145-152、1996.
- 7)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、Vol.58、No.10、pp.30-35、2016.
- 8)宮川幸雄、角哲也、竹門康弘：砂面の変動高、礫の被度面積を考慮した付着藻類の現存量の変動予測、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73(4)、pp.1183-1188、2017.
- 9)Lamberti G.A., and Steinman A.D.: A comparison of primary production in stream ecosystems, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol.16(1), pp.95-104, 1997.
- 10)内田朝子：矢作川中流域におけるアユの消化管内容物、矢作川研究、Vol.6、pp.5-20、2002.
- 11)Tuji A.: Observation of developmental processes in loosely attached diatom (Bacillariophyceae) communities, *Phycological Research*, Vol.48, pp.75-84, 2000.
- 12)深見公雄、水成隆之、久保田浩、西島敏隆：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り、水産増殖、Vol.42(2)、pp.199-206、1994.
- 13)田中規夫、古里栄一：ダム下流礫床河川における水生昆虫動態と小型河床材料移動性の人為的土砂供給前後の変化、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.70(4)、pp.I_1327-I_1332、2014.
- 14)溝口裕太、戸田祐嗣：河床構造に基づく物理生息場の評価と河川底生動物モデルの構築、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.72(4)、pp.I_1009-I_1014、2016.
- 15)波多野圭亮、竹門康弘、池淵周一：貯水ダムが下流域生態系へ及ぼす影響評価 一流況変化・土砂供給減少による底質環境と底生生物群集の応答－、京都大学防災研究所年報、Vol.46(B)、pp.851-866、2003.
- 16)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.

- 17)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、Vol.22、pp.421-426、2016.
- 18)大中臨、赤松良久、佐藤領星、山口皓平、小室隆、乾隆帝：耳川におけるダム通砂が土砂動態及びアユ現存量に及ぼす影響の検討、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol.75(2)、pp.I_409-I_414、2019.
- 19)鈴木崇正、角哲也、竹門康弘、中島佳奈：土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測、京都大学防災研究所年報、Vol.54(B)、pp.711-718、2011.
- 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)木下篤彦、藤田正治、水山高久、澤田豊明：排砂による河床への土砂堆積に伴うイワナの局所的な避難空間の減少に関する研究、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol.68(4)、pp.I_1117-I_1122、2012.
- 22)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(4)、pp.I_1339-I_1344、2014.

3. 土砂供給による河床環境の変化を予測・評価する新技術の紹介

本章では、土砂供給による砂、小礫の堆積と連動し、水産重要種であるアユを評価対象にできる定量的な河床環境指標として「露出高」を紹介し、さらに露出高を用いた土砂供給の影響予測・評価手法について記載する。

3-1. アユと河床の石礫との関係

アユ（図 3-1）が河川のどのような場所を好むかは、アユの放流場所の選定や水産資源としてのアユの増産の観点から着目され、その中で濁水の有無や餌である藻類の付着基質となる石礫の存在が重要視されている¹⁾。土砂供給による砂、小礫の堆積が生じた場合、河床材料の粒径分布（以下、河床粒径分布）が変動するため、河床粒径分布とアユの選好性との関係に着目される。本州の 13 河川で行われた環境調査では、連続する瀬と淵 1 セットの河床に占める長径 25cm 以上の巨石の割合が 27%を下回るとアユの漁獲不振が生じやすいことが報告されている^{1),2)}。さらに、巨石のうち下側に隙間のある石を「浮石」とした上で（本資料でも浮石をそのように定義する）、浮石の占める比率が砂や小礫の堆積により減少することで、餌である付着藻類が減少し、アユの定着が阻害されることが示唆されている^{1),3)}。巨石や浮石がアユにとって正の効果を示す理由としては、それらがアユの餌となる藻類の付着基質となるだけでなく、捕食者からの逃避場所や、流れの緩い浮石の裏側が安息場所になる等、複数の効果があるためと考えられている⁴⁾。

一方、餌の質の面からは巨石が不利になる場合もある。ダム下流の粗粒化した河床では、付着藻類の剥離・更新が促進されず、カワシオグサ等の大型糸状緑藻が一面に繁茂しやすいことが報告されている⁵⁾。アユの消化管内容物を調査した研究によると、大型糸状緑藻は消化吸収されにくいことが確認され、藍藻や珪藻と比べて餌の質が低いと報告されている⁶⁾。また、アユの産卵にとっては、河床が砂や礫で構成され、かつそれが比較的最近に堆積した状態（河床軟度が高い状態）が最適であることが報告されている⁷⁾。以上から、アユが河川のどのような場所を好むかを考察する上で、河床粒径分布は非常に重要であり、単一の粒径のみで構成された河床ではなく、粗粒の巨石、細粒の砂・小礫両方が存在する河床が望ましいことが示唆される。



図 3-1 アユ近影

3-2. 砂、小礫の堆積に伴う河床表層の変化の予測・評価指標の選定

一般的に、洪水時の河床変動により粒径分布が変化するのは河床表層のごく近傍に限定され、その層は交換層、それより下の粒径分布がほとんど変化しない部分は原河床とよばれる（図 3-2）^{8),9)}。ダム下流への土砂供給に伴う砂、小礫の堆積は主に交換層で生じる。この交換層の中で砂、小礫が堆積している層を Subsurface layer（地下層）とよび、その天端のラインが、一般的に砂面とよばれ、河床地盤面とよばれる（図 3-2）。その面より上部は Surface layer（河床表層または露岩部）とよばれる（図 3-2）。

ダム下流のような粗い粒径の石礫で構成された河床に砂、小礫が堆積した場合、石礫間の砂面の高さが上昇するため¹⁰⁾、交換層内の Subsurface layer の厚さが増大し、Surface layer が減少する。一般的に土砂供給による河床変動量を予測する場合、砂、小礫の堆積厚、すなわち Subsurface layer の変動量に着目されるが、次の 2 つの点からアユを対象とした河床環境評価に関する指標には、Surface layer に関連するパラメータを採用するのが適切と考えられる。一つは、Subsurface layer と原河床との境目を現地調査から把握するのが困難なため、Subsurface layer の絶対値の議論ができない点である。もう一つは、アユは主に Surface layer を利用して摂食活動等の生活を行っており、アユの利用の観点から許容される河床環境の閾値を議論しやすい点である。実際に、3-1.で報告されたアユと河床環境との既存研究では、浮石率といった Surface layer の質を表す指標がアユの生息量を表すのに有効であることが示されている¹⁾。

以上から、アユを対象とした河床環境評価においては、河床材料の粒径がアユの選好性にとって重要な要素であること（3-1.）、河床の交換層内における Surface layer に関するパラメータが評価指標として適していると考えられる。しかし、これまで、Surface layer の質に注目した研究例は少なく、有効性が示されている数少ない指標の一つである浮石率は、Subsurface layer にある浮石以外（沈み石等）の率が母数に含まれるため、計算による予測が難しい課題がある。そこで、本資料では砂、小礫の堆積に伴う河床環境の変化を予測・評価する指標として、石礫の天端から河床地盤面（または砂面）までの高さ（以下、露出高：ろしゅつだか、図 3-3）を選定し、さらにこの露出高を簡易的に予測するモデルを開発することで、Surface layer の質に基づいたアユの生息状況の評価を目指した。その選定理由について、次の 3-3.で解説する。

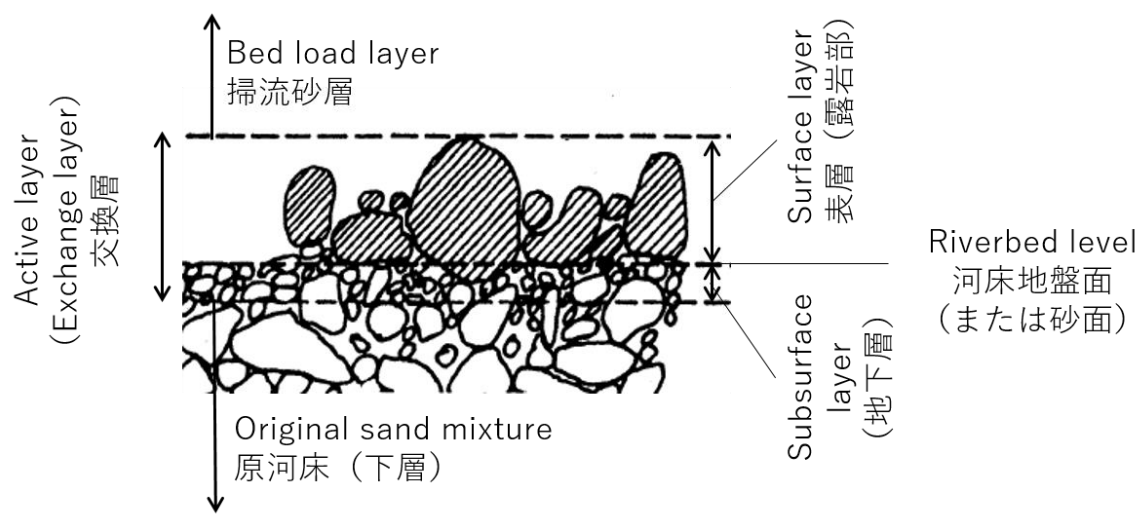


図 3-2 河床の鉛直構造のモデル図 (平野、1971、鈴木・加藤、1989 を改変) ^{8),9)}

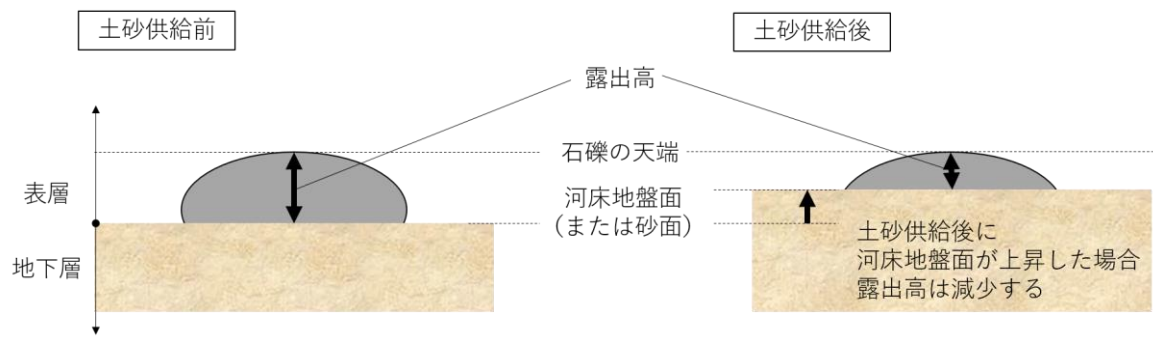


図 3-3 土砂供給前後における露出高の変動のイメージ

3-3. 露出高を指標としたアユの採餌環境の評価

露出高は、ダム下流のような粗粒化した河床の場合、砂、小礫の流出で増加し、堆積で減少することから (図 3-3)、土砂供給による河床変動量と定量的にリンクするといえる。つまり、土砂供給前後の露出高の変動量を調べることで、土砂供給により現場にどの程度砂、小礫が堆積したのかを露出高の増減として定量的に把握できるといえる。

また、露出高はアユの生活、特に採餌環境に影響を及ぼすパラメータとしても非常に有用であることが分かってきた。以下に、実河川で行った露出高とアユおよびアユの餌資源である付着藻類との関係を調べた研究事例を紹介する。

3-3-1. 露出高と大型糸状緑藻の定着リスクとの関係

はじめに、河床に砂、小礫が不足した場合のアユの採餌環境に及ぶリスクを報告した研究事例を紹介する。具体的には、石礫の露出高と、餌の質が低い大型糸状緑藻であるカワシオグサの被度との関係を調査した事例である。カワシオグサは、ダム下流の粗粒化した河床で一面に繁茂しやすいことが矢作川水系の調査で確認されており、アユの餌資源として低質かつ他の藻類種である珪藻や藍藻の発達を阻害することが報告されている⁵⁾。既往研究では、石礫の中間径が大きいほどカワシオグサが確認される傾向にあり、石礫が大きいほどカワシオグサの定着リスクが高くなることが示唆された¹¹⁾。これは、石礫が大きいほど流れに対し安定するため、転石による付着藻類の剥離・更新が生じにくいためと考えられる。このため、石礫の露出高とその石礫におけるカワシオグサの被度との関係が同じ矢作川水系の複数の地点で調査された¹²⁾。調査データをもとに、カワシオグサの被度と5つの物理環境変数（石礫の中間径、露出高、水深、流速、砂厚）との関係を重回帰分析によって解析した結果、カワシオグサの被度は5つの物理環境変数によって有意に説明され、全ての調査地点において、露出高の標準回帰係数が最大（符号は正）となった¹²⁾。この結果から、カワシオグサの被度に対して露出高が上記の5つ物理環境変数の中で最も影響が強く、大きい露出高をもつ河床材料ほどカワシオグサが繁茂するリスクが高いことが示された¹²⁾。露出高が中間径よりもカワシオグサの被度に対する影響が強かった理由として、付着藻類はサルテーション運動する掃流砂が衝突することで剥離されるが¹³⁾、露出高が大きい場合、サルテーション運動する掃流砂が石礫の天端まで届かないためと推定される。

3-3-2. 露出高がアユの摂食行動に及ぼす影響

次に、河床に砂、小礫が過剰に堆積した場合のアユの採餌環境に及ぶリスクを報告した研究事例を紹介する。具体的には、石礫の露出高に対するアユの摂食行動に関する現地調査および水路実験の結果を紹介する。現地調査では、琵琶湖に流入する6つの河川で2つずつの瀬を選定し、石礫の露出高とアユの摂食痕（食み跡）の有無を確認したところ、摂食痕は露出高が小さい石礫よりも大きい石礫で多く見られたことが報告されている¹⁴⁾。この報告をもとに実施された実験では、同じ形状をもつ人工石を用いて3種類の露出高を設定した流水環境において、体サイズをそろえた養殖アユを放流し、摂食行動を観察した。この結果、露出高が大きな石礫では小さな石礫よりもアユの摂食回数が多く、露出高2 cmと5 cmの間でアユの摂食回数が急変することが報告されている^{14),15)}。これらの報告から、アユは露出高の大きな石礫を摂食場所として選好していることが示唆される。逆に、土砂供給等により露出高がある高さを下回った場合に、アユの摂食回数が極端に少なくなる可能性も示唆されている。

3-3-3. 露出高がアユの採餌環境の評価に適する理由

土砂供給による砂、小礫の堆積がアユの採餌環境に及ぼす影響の予測・評価にあたり、石礫の露出高が指標として適する理由として 2 点挙げられる。一つは、露出高が河床の鉛直方向の環境を直接的に表す指標であり、アユの採餌環境が河床の鉛直方向の環境に大きく影響されると考えられるためである。このことは、3-3-1.で石礫のカワシオグサの被度が、中間径より露出高に強く影響される傾向、3-3-2.でアユの摂食回数がある露出高を境に急変することからも示される。もう一つは、露出高は現場で直接計測できるシンプルな指標という点である。アユの採餌環境に関する指標および河床の鉛直方向の環境を表す指標として有効とされているものには、浮石率もあるが、3-1.で説明した理由から、算出が難しい。アユの適切な採餌環境を維持するための許容範囲を設定する場合、その最大と最小の閾値を数値として示す必要があるため、露出高の方が浮石率よりも指標に導入しやすいといえる。以上の理由から、露出高をアユの採餌環境の予測・評価に導入した場合のプロセスについて、次の 3-4.にて説明する。

3-4. 露出高を用いた河床環境評価のプロセス

これまでに紹介した知見から、石礫の露出高を指標とすることで、土砂供給に伴う砂、小礫の堆積による河床環境の変化を定量的に把握できるといえる。さらに、露出高の変化を軸として、アユの採餌環境を採餌に適する付着藻類種および石礫の高さに基づき予測・評価できるといえる。

この具体的な評価プロセスをまとめると以下のとおりである（図 3-4）。アユの採餌環境という観点において、ダム下流の河床が粗粒化した状態では、石礫の露出高が高く、アユの餌として低質な大型糸状藻類が繁茂する傾向にある。このため、ダム下流への土砂供給方法を設定する場合、その土砂供給が大型糸状藻類の繁茂リスクの抑制に効果的かを含めて検討することが望ましい。そして、設定した土砂供給方法のもと、河床変動計算等を行い、土砂供給後の河床の地形および粒径を予測する（図 3-4）。さらに、河床の地形および粒径の予測結果をもとに、評価指標である露出高の変動予測を行う（図 3-4）。この露出高の予測手法の詳細については、次の 4 章で説明する。そして、土砂供給前後における露出高の変動量がアユの採餌環境の観点から許容されるかどうかを評価し、許容される場合は土砂供給を実施、許容されない場合は土砂供給方法の設定まで戻って再検討する（図 3-4）。

上記の露出高の許容範囲については、アユの採餌環境に適切かどうかをもとに設定する。具体的には、大型糸状藻類の繁茂リスクが急増する露出高の閾値をもとに許容範囲の最大値を設定する（図 3-4）。この最大値の予測は、3-1.の知見から、例えばカワシオグサと露出高との関係性モデルを構築する等により可能である。一方、アユはある程度露出した石礫を摂食場所として選好していることから、アユの摂食の選好性が急減する露出高の閾値をもとに許容範囲の最小値を設定する（図 3-4）。この摂食への影響予測は、3-3.のアユの摂食痕

と露出高との関係性モデルを構築する等により可能である。以上より、露出高は高すぎても低すぎてもアユの採餌環境の観点からは不適であり、高すぎる際の負の影響を大型糸状藻類との関係から、低すぎる際の負の影響を摂食痕との関係から予測することで、不足でも過多でもない適切な土砂供給量の設定がある程度可能となる。

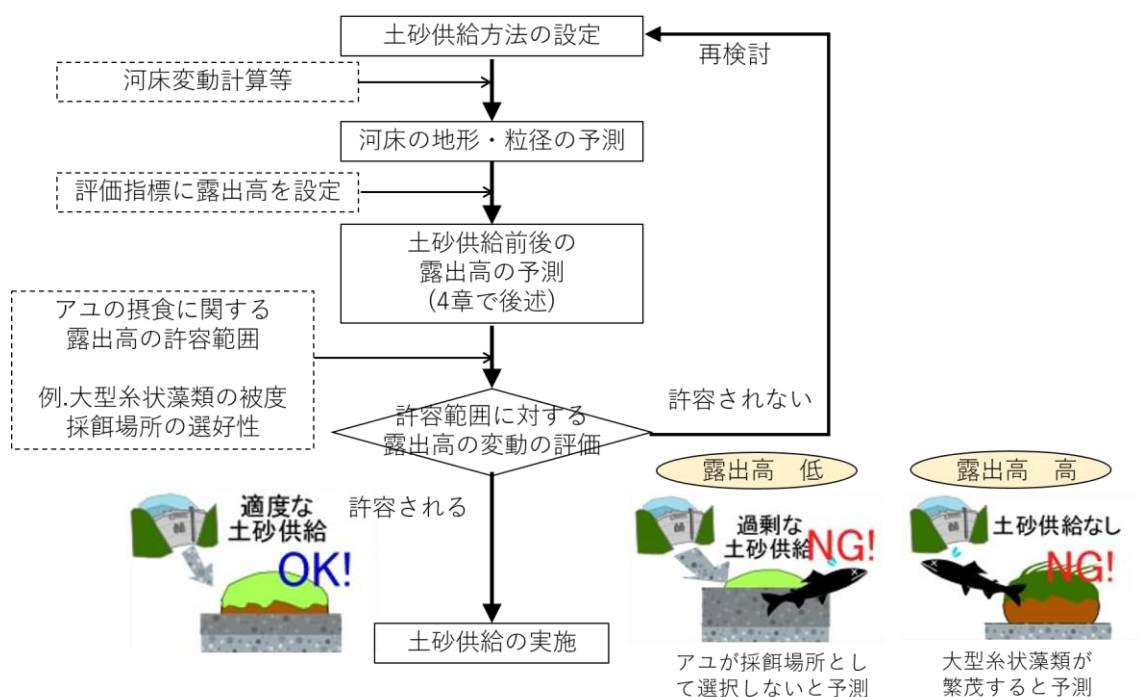


図 3-4 アユの採餌環境の観点から河床環境（露出高）を予測・評価するプロセス

参考文献

- 1)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、Vol.82(1)、pp.12-17、2016.
- 2)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、田子泰彦、山本俊哉：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、Vol.62、pp.37-43、2014.
- 3)坪井潤一、芦澤晃彦、熊田那央、有馬智子、阿部信一郎：流下する砂礫が放流されたアユ *Plecoglossus altivelis* の定着におよぼす影響、日本水産学会誌、Vol.78(4)、pp.705-710、2012.
- 4)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、Vol.60、pp.445-449、2012.

- 5)内田朝子、近藤和広、竹内康之、永田直人：矢作川、豊川、長良川における大型糸状緑藻の発生状況、矢作川研究、Vol.8、pp.89-98、2004.
- 6)内田朝子：矢作川中流域におけるアユの消化管内容物、矢作川研究、Vol.6、pp.5-20、2002.
- 7)鈴木崇正、角哲也、竹門康弘、中島佳奈：土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測、京都大学防災研究所年報、Vol.54(B)、pp.711-718、2011.
- 8)平野宗夫：Armoring をともなう河床低下について、土木学会論文報告集、Vol.195、pp.55-65、1971.
- 9)鈴木幸一、加藤幸一：動的平衡状態における混合砂礫河床表層の粗粒化、第33回水理講演会論文集、pp.415-420、1989.
- 10)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、Vol.52、pp.547-552、2008.
- 11)宮川幸雄、小野田幸生、大槻順朗、中村圭吾：河床粒径分布を用いたダム下流におけるカワシオグサ定着リスクの簡易評価手法、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.75(2)、pp.I_505-I_510、2019.
- 12)小野田幸生：総合土砂管理の効果の評価に向けたカワシオグサの生育条件の解明、河川基金報告書、2020.
- 13)北村忠紀、加藤万貴、田代喬、辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究、河川技術に関する論文集、Vol.6、pp.125-130、2000.
- 14)国立研究開発法人 土木研究所 自然共生研究センター編：ARRC NEWS、Vol.14、2017.
- 15) 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.

4. 露出高の予測技術の開発および精度検証

4-1. 露出高の簡易予測モデルの開発

4-1-1. はじめに

本章では、3章の露出高を指標とした土砂供給によるアユの採餌環境への効果の予測・評価において重要となる土砂供給前後の露出高を予測するためのモデルについて説明する。

露出高は、3章で紹介したとおり、アユの採餌環境の適正範囲を評価可能な指標だが、現場で測定する場合、水深の浅い箇所を除いて、潜水目視が必要となる。潜水目視は長時間を要する高コストの観測方法であり、広範囲にわたって個々の石礫の露出高を測定する作業は膨大となり、実用的とは言い難い面もある(図4-1)。このため、ダム管理所でも測定・蓄積したデータが少ないのが現状である。この課題を解決するため、一般的に露出高よりも管理所で測定・蓄積したデータが多い河床粒径分布をもとに、露出高を簡易予測する手法を開発した。これにより、露出高を現場で広域的に捉え、アユの生息場の評価にも活用可能である。また、近年 UAV や画像解析技術を活用した空間的な河床粒径分布の把握技術¹⁾が展開されつつあり、河床粒径分布から露出高を簡易予測する技術にも応用できる可能性がある。

4-1.では、2019年に開発された河床粒径分布をもとに露出高を簡易予測するモデル²⁾を紹介する。次の4-2.では、このモデルの精度および適用範囲の確認を目的とした研究³⁾を紹介する。



図 4-1 潜水目視の状況例

4-1-2. 簡易予測モデルにおける石礫の配置の概念

本モデルのゴールは、現場の河床材料の粒径および中心点の位置が一様でないことから生じる河床の凹凸、すなわち露出高の分布を再現することである。石礫に砂、小礫が堆積する状況を数式で再現する場合、単一粒径の横並びの状態が簡易的に想定されるが(図4-2(A))、現場では混合粒径かつ相互に折り重なるように配置されており、石礫の中心部の鉛直位置は一様ではない(図4-2(B))。本モデルは、この鉛直位置の分布を考慮した露出高を

混合粒径で予測するものである。

モデル化にあたり、ある程度の簡略化を目的に、2つの仮定を設定した。一つは、現場では多様な形状を有する石礫を一律の扁平率を有する楕円体と仮定した。扁平率の設定については後述する。もう一つは、現場の石礫の長軸と河床地盤面との間の傾斜角は様々で覆瓦構造をなしているが⁴⁾、モデル上ではこの傾斜角を一律 0° （石礫の長軸が概ね河床面と平行）と仮定した。

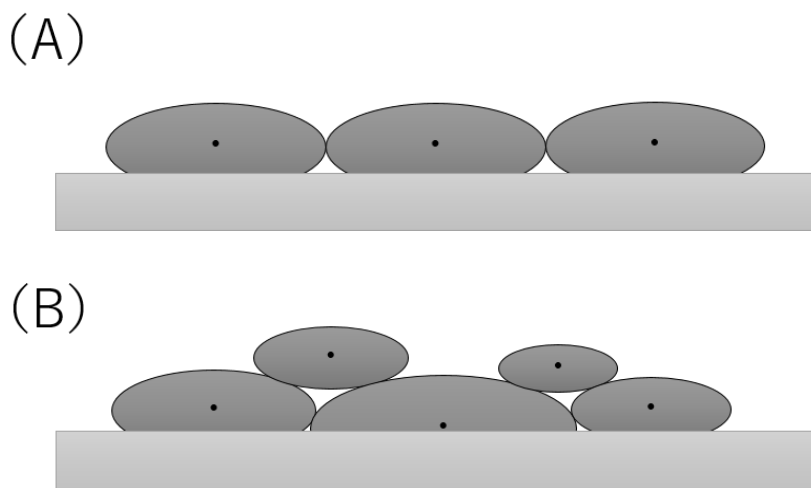


図 4-2 単一粒径かつ中心点の位置が一樣な石礫の配置 (A) および実河川における混合粒径の石礫の配置 (B) のイメージ⁴⁾ (石礫内部の・は中心点の位置を表す)

4-1-3. 単一粒径の河床を想定した露出高の予測手法

はじめに、簡略化のため、単一粒径の河床を想定してモデルの構造を説明する。河床表層に並ぶ石礫を横断的に見たとき、石礫が互いに隣接し連なっているものの、各石礫の鉛直方向の中心点の位置は異なるため、河床表層には凹凸が形成されている状況がイメージされる (図 4-3)。このとき、これらの石礫底部より下の部分の構造は表面に露出していないとみなし、モデルでは考慮しないものとする。

そして、河床表層に並ぶ石礫の中心点の標高 z (m) は、 z の平均値 z_a (m) を中心に正規分布していると仮定すると (図 4-3)⁵⁾、河床表層に露出する石礫の中心点の標高が z (m) である確率 $P(z)$ は、確率密度関数の式を用いて次の式で表される (式(1))。

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_a}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 σ は標準偏差を表し、粒径 d (m) に応じて粒径の 0.217~0.3 倍の間で変動し⁶⁾、石礫が単一粒径かつ完全球体の場合は粒径の約 0.3 倍とされる³⁾。

また、石礫の露出高 x (> 0) は、石礫の天端の標高 z_h (m) と河床地盤面の標高 z_0 (m) との差となる (式(2)、図 4-4)。ここで、河床地盤面の標高 z_0 は、河床表層の石礫の底部の標高 z_b (m) の平均値と定義する (図 4-3)。 z_b は z と同じ形状の正規分布にしたがうことから、同じ確率密度関数で表される (式(3))。ある石礫の厚さを S (m) とした場合 (式(4))、式(3)は z_b と z_0 を消去し、露出高 x を変数とした式(5)に変換される。これは、石礫の露出高 x が、石礫の厚さ S を平均値とした正規分布にしたがうことを表す (図 4-4)。この石礫の厚さ S は、(粒径 d) \times (扁平率) で求める。

$$x = z_h - z_0 \quad \text{式(2)}$$

$$P(z_b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z_b - z_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{式(3)}$$

$$S = z_h - z_b \quad \text{式(4)}$$

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - S}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{式(5)}$$

最後に、露出高の平均値 x_a は、 x と露出高が x である確率 $P(x)$ (式(5)) との積を、天端が埋没した石礫 ($x < 0$) は対象外のため (図 4-4)、 $x > 0$ の範囲で積分することで推定可能である (式(6))。露出高の予測モデルでは、これらの式を混合粒径で組み込んでおり、詳細は、次の 4-1-4. で説明する。

$$x_a = \int_0^{\infty} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - S}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{式(6)}$$

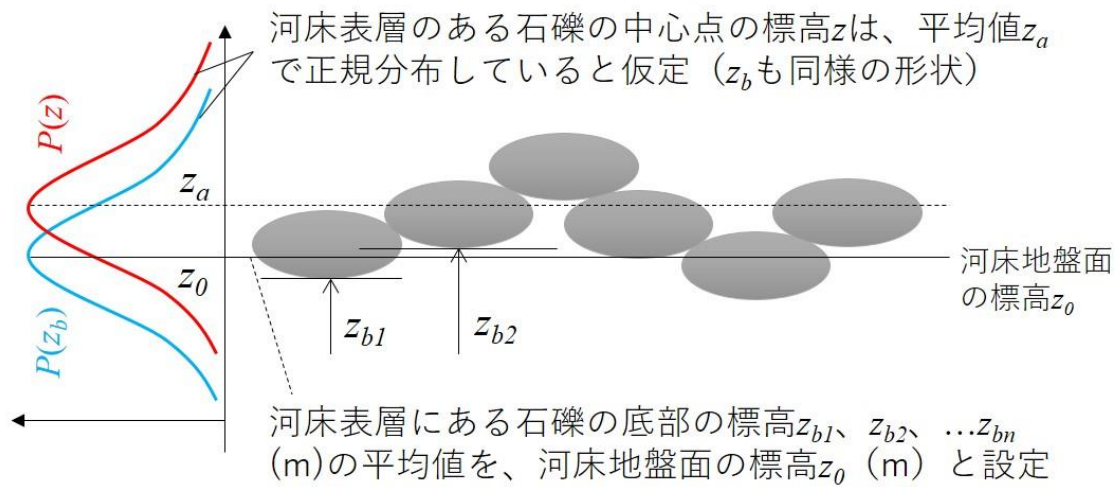


図 4-3 河床表層の石礫の鉛直方向の分布の設定に関するイメージ²⁾ (村上ら⁵⁾の図をもとに作成)

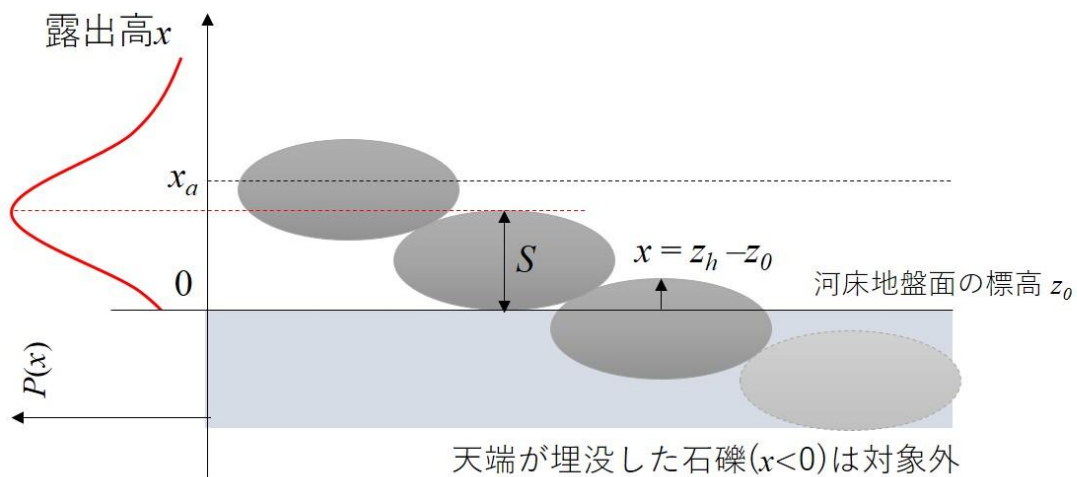


図 4-4 河床表層の石礫の露出高の分布状況²⁾

4-1-4. 混合粒径の河床を想定した露出高の予測手法

ここでは、4-1-3.のモデルを混合粒径で再現したモデルについて説明する。ただし、混合粒径の組成は、正規分布しているとは限らないため、確率密度関数で表すことは困難である。そこで、モデルでは、河床材料の組成を引用事例の多い Wentworth の粒径区分に基づき⁷⁾、巨石 (256 mm 以上)、石 (64 mm 以上 256 mm 未満)、および礫 (16 mm 以上 64 mm 未満) の 3 つに分類し、それぞれの河床表層中の存在割合で表す。このときの巨石、石、礫の存在割合 $F(i)$ を、それぞれ $F(1)$ 、 $F(2)$ 、 $F(3)$ とした。また、Wentworth の粒径区分に基づき

7)、粒径が礫未満の組成は、砂利 (2mm 以上 16 mm 未満)、砂 (2mm 未満) の 2 つに分類する。このときの砂利、砂の存在割合はそれぞれ $F(4)$ 、 $F(5)$ とし、モデルでは充填材料として考え、石礫の露出高の観測対象から除外する。

混合粒径下における石礫の鉛直方向の中心点の位置は、粒径区分ごとに正規分布していると仮定することで、混合粒径下でも石礫の鉛直方向の配置をある程度再現可能である⁶⁾。この知見に基づき、モデルでは $i = 1 \sim 3$ として 3 つに分類された各粒径の石礫は、粒径区分ごとに正規分布していると仮定した (図 4-5)。そして、粒径区分 i ごとに、4-1-3. と同じ手法で、露出高が x_i である確率 $P(x_i)$ および露出高の平均値 x_{ai} を算出し、最後にそれらを存在割合 $F(i)$ で重みづけをして足し合わせることで、混合粒径下における露出高 x の分布 $P(x)$ および平均値 X_a を予測する (式(7)、(8))。

$$P(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{F(i)}{F(1) + F(2) + F(3)} \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - S_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad \text{式(7)}$$

$$X_a = \sum_{i=1}^3 \frac{F(i)}{F(1) + F(2) + F(3)} \int_0^{\infty} x_i \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - S_i}{\sigma_i}\right)^2\right) dx_i \quad \text{式(8)}$$

ここで、 S_i は粒径区分 i の石礫の厚さの代表値である。また、粒径区分ごとの標準偏差 σ_i は、粒径区分ごとに代表粒径の 0.217~0.3 倍の間で変動するものの⁶⁾、次の 4-2. の事例では、モデル上で σ_i を 0.217~0.3 まで変動させても、計算結果にほとんど影響しなかった。このため、4-2. の事例では簡略化のため一律で代表粒径の 0.3 倍と仮定した。

留意点として、このまま計算した場合、粒径区分 i ごとの石礫の底部の標高 z_{bi} の平均値、すなわち河床地盤面の標高 (露出高が 0 となる位置) が異なるため、それらを一律にするための補正を行う必要がある。そこで、河床地盤面の標高 z_0 を巨石・石・礫の底部の平均標高 z_{ba1} 、 z_{ba2} 、 z_{ba3} と、 $F(1) \sim (3)$ を組み合わせた式で設定し (式(9))、それに基づき式(7)~(8) の露出高 x_i を x_i' に補正する (式(10)、図 4-5)。

$$-(z_{bai} - z_0) = \frac{1}{2} S_i - \sum_{i=1}^3 \frac{F(i) \cdot \frac{1}{2} S_i}{F(1) + F(2) + F(3)} \quad \text{式(9)}$$

$$x_i' = x_i - (z_{bai} - z_0) \quad \text{式(10)}$$

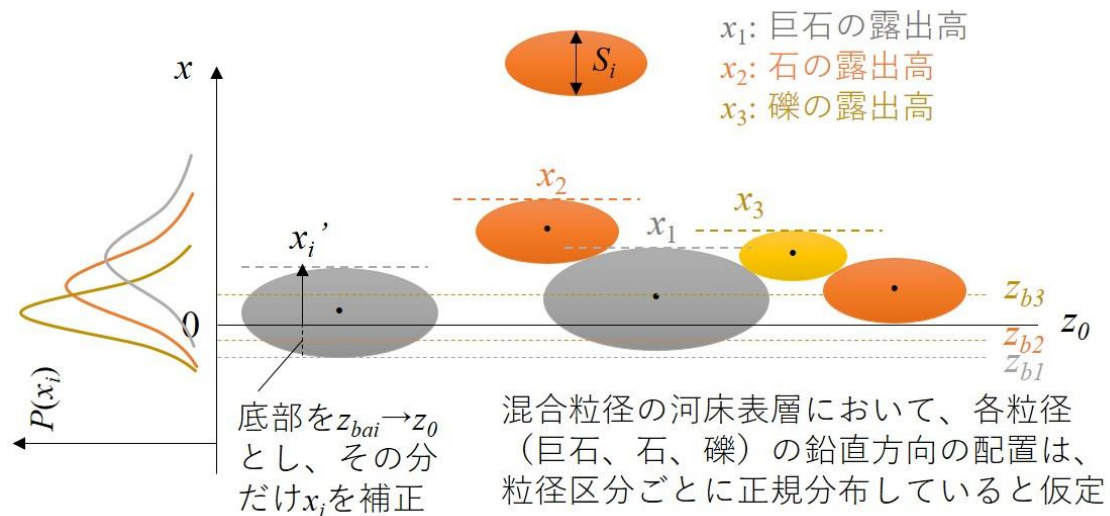


図 4-5 混合粒径の河床表層における巨石、石、礫の露出高の分布の設定

4-2. 露出高の簡易予測モデルの精度検証および改善

4-1.で開発したモデルは、露出高の簡易予測を目的とするため、扁平率を一律とする等の仮定を設定している。このため、本モデルの予測精度と適用範囲を現場の観測値との比較を通じて確認する必要がある。4-2.では、はじめに、4-1.で開発したモデルを実河川に適用し、その精度を検証した研究を紹介する。次に、開発したモデルの精度に関する課題を整理し、それに基づきモデルを改善した内容を紹介する。最後に、改善したモデル（以下、改善モデル）を実河川に適用し、その精度を4-1.で開発したモデル（以下、旧モデル）と比較しながら検証した研究を紹介し、改善効果と今後の課題について説明する。

4-2-1. 露出高の簡易予測モデルの現場適用

旧モデルの精度を、矢作川水系の2つの地点を対象に確認した事例を紹介する。この事例は、各粒径区分の石礫の割合（表 4-1）から旧モデルを用いて予測した露出高（以下、予測値）と実際に潜水目視で観測された露出高（以下、観測値）の平均値と分布状況を比較したものである^{2), 8)}。平均値を比較した結果では、予測値と観測値は概ね一致した（表 4-1）⁸⁾。一方、分布を比較した結果では、A地点で予測値と観測値は概ね似た傾向であったが、B地点で予測値が観測値よりも小さい方に偏る傾向であった（図 4-6）⁸⁾。旧モデルによる予測値の傾向を分析した別の事例では、石礫の粒径区分が3つ（巨石、石、礫）と少ないため、礫 F(3)の存在割合が過大評価されている（F(3)が大きいほどモデル上で0~20 mmの確率密度が上がる）ことが挙げられており、粒径区分が3つでは少ない可能性が指摘されている⁹⁾。

旧モデルの精度を検証した他の事例では、矢作川水系の3つの河川の15箇所でモデル予測した露出高の分布形と現場観測した露出高の分布形の違いが解析され、有意差が検出された箇所が2箇所にとどまったとの報告がある¹⁰⁾。一方、粒径分布が粗いほどモデルの精度が低下することも指摘されている¹⁰⁾。

以上の事例から、旧モデルは一定の精度を有しており、特に露出高の平均値を高い精度で予測できるといえる。一方、河床粒径分布が細かい方または粗い方に偏っている場合に、予測値の分布が観測値のものとずれる傾向にあるといえる。次の4-2-2.では、この結果を踏まえ、モデルを改善した内容について紹介する。

表 4-1 矢作川水系の観測地点（A、B 地点）における各粒径区分の石礫の割合、露出高の平均の予測値及び観測値⁸⁾

		A地点	B地点
巨石	(257 mm以上)	0.35	0.10
石	(65~256 mm)	0.50	0.20
礫	(17~64 mm)	0.05	0.40
砂・砂利	(16 mm以下)	0.10	0.30
露出高の平均値 (mm)			
予測値		82.1	40.6
観測値		93.1	37.1

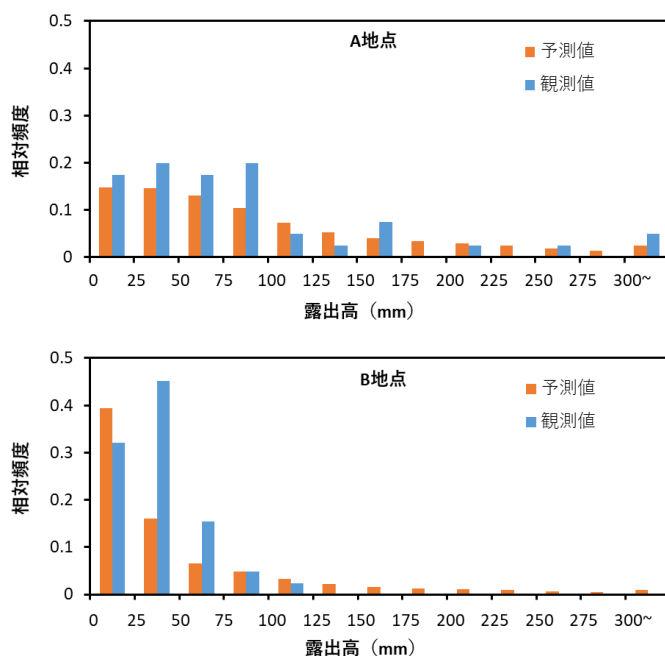


図 4-6 矢作川水系の観測地点（A、B 地点）における露出高の分布の観測値および予測値の分布形⁸⁾

4-2-2. 露出高の簡易予測モデルの改善内容

4-1-1.では、旧モデルの課題として、粒径区分の少なさが指摘された。特に、 $i=1, 2$ の範囲が 65 mm~と他の区分より広いことから、これらをより細分化することで、モデルの精度の改善を行った。具体的には、旧モデルから $i=2$ のみ 2分したもの(A)、 $i=1\sim3$ を概ね 100 (B)、50(C)、25 mm(D)の間隔で細分化したものの計 4つの改善モデルを構築した(以下、改善モデル A~D、表 4-2)。このとき、各代表粒径は、F(1)以外は、 i の範囲における中間値で設定した。一方、F(1)は、これまでの調査データをもとに、F(1)の範囲を旧モデルと同じにした改善モデル A で 330 mm、F(1)の範囲を 351 mm~に変更した改善モデル B~D で 400 mm に設定した。扁平率は、これまでの調査地点における平均値が、0.6~0.7 となったため、地点によらず概ね一定と仮定し、全地点の平均値である約 0.64 に設定した。

表 4-2 石礫の露出高の簡易予測モデルの旧モデルおよび改善モデル A~D における粒径区分 i の範囲 (mm、灰色の網掛けは旧モデルから改変した部分を表す)

i	旧モデル	改善モデル			
		A	B	C	D
1	257~	257~	351~	351~	351~
2	65~256	151~256	251~350	301~350	326~350
3	17~64	65~150	151~250	251~300	301~325
4	3~16	17~64	65~150	201~250	276~300
5	~2	3~16	17~64	151~200	251~275
6		~2	3~16	101~150	226~250
7			~2	65~100	201~225
8				17~64	176~200
9				3~16	151~175
10				~2	126~150
11					101~125
12					76~100
13					51~75
14					17~50
15					3~16
16					~2

4-2-3. 改善したモデルの精度検証

4-2-2.にて改善したモデルA～Dの精度を旧モデルと比較して検証した事例を紹介する³⁾。はじめに、モデルの汎用性を確認するため、調査データを地質の異なる複数の河川で収集した。具体的には、土砂供給事業が継続的に行われている小渋川（天竜川水系、長野県）、那賀川（那賀川水系、徳島県）、耳川（耳川水系、宮崎県）の3河川である。各地質は、小渋川が花崗閃緑岩、那賀川が砂岩・泥岩の混在、耳川が砂岩である¹¹⁾。

各河川の調査場所の特徴について、以下説明する。小渋川（長野県）は天竜川水系の支川で、天竜川合流点から約5 km 上流に小渋ダムがある（図4-7）。このダムでは2016年度より土砂バイパストンネルによる下流への土砂供給が実施されており、下流の3地点（堤体からそれぞれ約1.0、2.8、4.0 km 下流、それぞれKD1、2、3とする）および上流の1地点（滞水域上流端から約3.1 km 上流、KUとする）の計4地点で調査した（図4-7）。那賀川（徳島県）は那賀川水系の本川で、上流域にある長安口ダムでは、2004年度より置土による土砂還元事業を実施している。ここでは、ダム下流を対象に2地点（堤体からそれぞれ約1.6、2.0 km 下流、それぞれND1、ND2とする）で調査した（図4-7）。耳川（宮崎県）は耳川水系の本川で、中流域にある西郷ダムでは、2018年度にゲートの一部を切り下げ通砂可能な構造に改造された。ここでは、西郷ダム上下流を対象に、下流4地点（西郷ダム直下の砂州上、砂州下、西郷立石地区、西郷田代地区、ダム堤体からそれぞれ約0.5、0.7、2.8 km 下流、それぞれSD1、2、3とする）、上流1地点（滞水域上流端から約4.0 km 上流、SUとする）の計4地点で調査した（図4-7）。SU地点の更に上流には塚原ダム、SD3地点の更に下流には大河原ダムがある。

調査地点数は3河川で計10地点となった。各調査地点にて、アユが摂食場所として利用する瀬（早瀬または平瀬）の1リーチを対象として、以下のデータを収集した。はじめに、1地点につき100個の石礫の露出高を折尺で潜水測定した。次に、モデルに入力する粒径加積曲線の作成のため、ペブルカウントにより¹²⁾、1地点につき100個の石礫の中間径を測定した。このほか、地点ごとに50×50 cm 内の河床の被度をWentworthの粒径区分に基づき⁷⁾5区分の存在割合（4-1-4.参照）を10%刻みで9ヶ所、目視観測した。ただし、那賀川の調査地点ND2では、天候の急変により河床被度が計測できなかったため、該当部分のデータはN.D.とした。

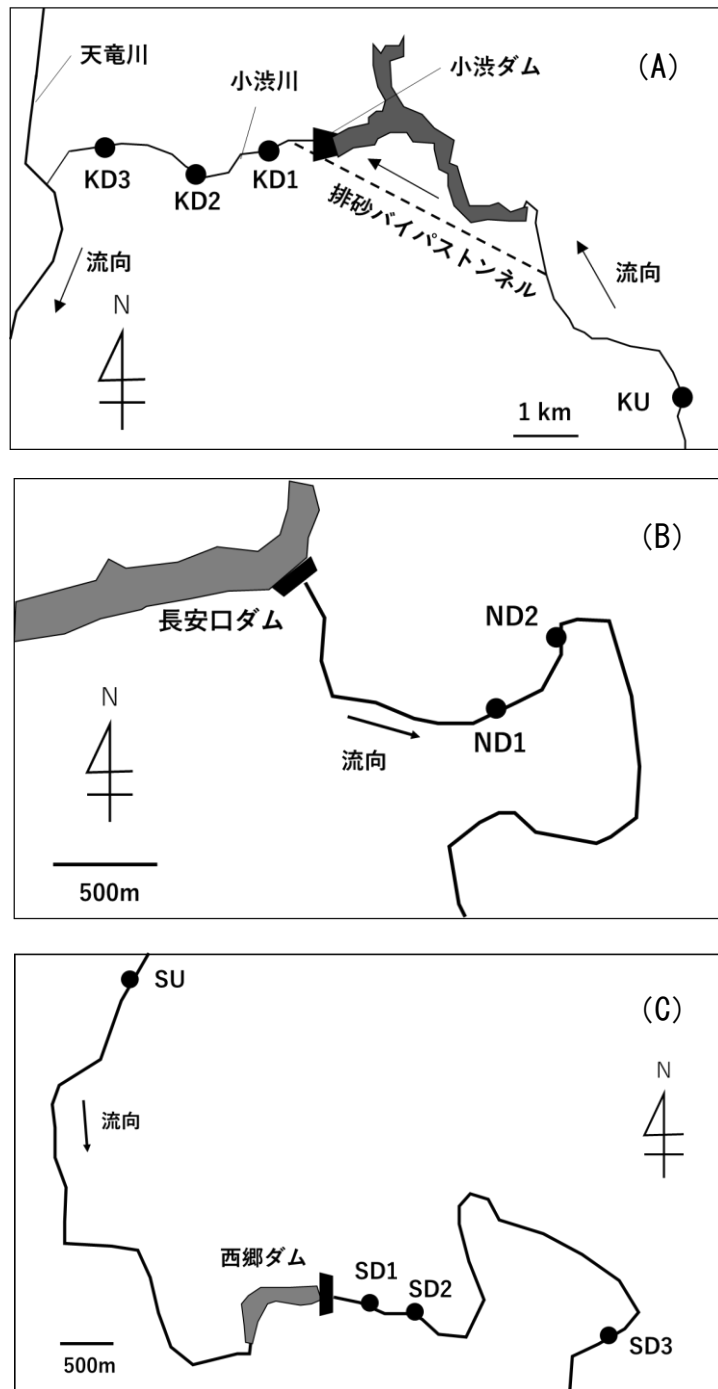


図 4-7 (A) 小渋川 (天竜川水系、長野県、KU:小渋ダム湛水域上流端から約 3.1 km 上流、KD1~3:小渋ダム堤体より約 1.0, 2.8, 4.0 km 下流)、(B)那賀川 (那賀川水系、徳島県、ND1, 2:長安口ダム堤体からそれぞれ約 1.6、2.0 km 下流)、(C)耳川 (耳川水系、宮崎県、SU:西郷ダムの湛水域上流端から約 4.0 km 上流、SD1~3:西郷ダム堤体より約 0.5、0.7、2.8 km 下流) の調査地点場所³⁾

解析方法は以下のとおりである。はじめに、調査地点間の河床粒径分布を比較するため、調査データをもとに粒径加積曲線を作成した。次に、旧モデルおよび改善モデル A~D について、河床粒径分布から各地点の露出高の分布形と平均値をモデルで予測した。一方、露出高の観測値の分布形として、100 個の露出高のデータのヒストグラムを 20 mm ずつの階級で作成した。これらの予測値および観測値の分布形を図示するとともに、観測値の分布形に対する予測値の分布形の精度を検証した。具体的には、既往研究をもとに¹⁰⁾、予測値と観測値の分布形に有意な違いがあるかを Kolmogorov-Smirnov (KS) test を用いて解析した。このとき、 p 値が 0.05 以上で予測値と観測値に有意差がないと判定し、 p 値を予測精度の指標として用いた（大きいほど分布形に差がない）。最後に、旧モデルについて、F(1)~F(5)を中間径の代わりに河床の被度割合で算出した場合のモデル予測結果についても、上記と同様の方法で精度を確認した。

観測地点における粒径加積曲線を作成し、F(1)~F(5)を求めた結果、小渋ダム上下流では KD2 を除き、下流の方が上流 (KU) より河床材料が粗い傾向が見られ、長安口ダムや西郷ダムと比べ、F(2)に占める割合が高い傾向であった (図 4-8、表 4-3)。長安口ダム下流では、両地点とも似た河床粒径分布を有しており、いずれも他河川と比べ、F(1)~F(5)まで粒径が幅広く分布する傾向であった (図 4-8、表 4-3)。一方、西郷ダム上下流では特にダム直下 (SD1、2) において、他地点よりも F(3)の割合が高く、特に SD2 においてその傾向が顕著であった (図 4-8、表 4-3)。各地点の石礫の露出高、中間径、扁平率の平均値は、それぞれ 47.9~115.3 mm、69.1~186.3 mm、0.60~0.71 の範囲であった (表 4-4)。この結果から、様々な河床粒径分布および露出高の分布状況の河床で予測モデルの精度が検証できたといえる。また、扁平率が今回調査した河床では、それほど変動しなかったことも確認された。

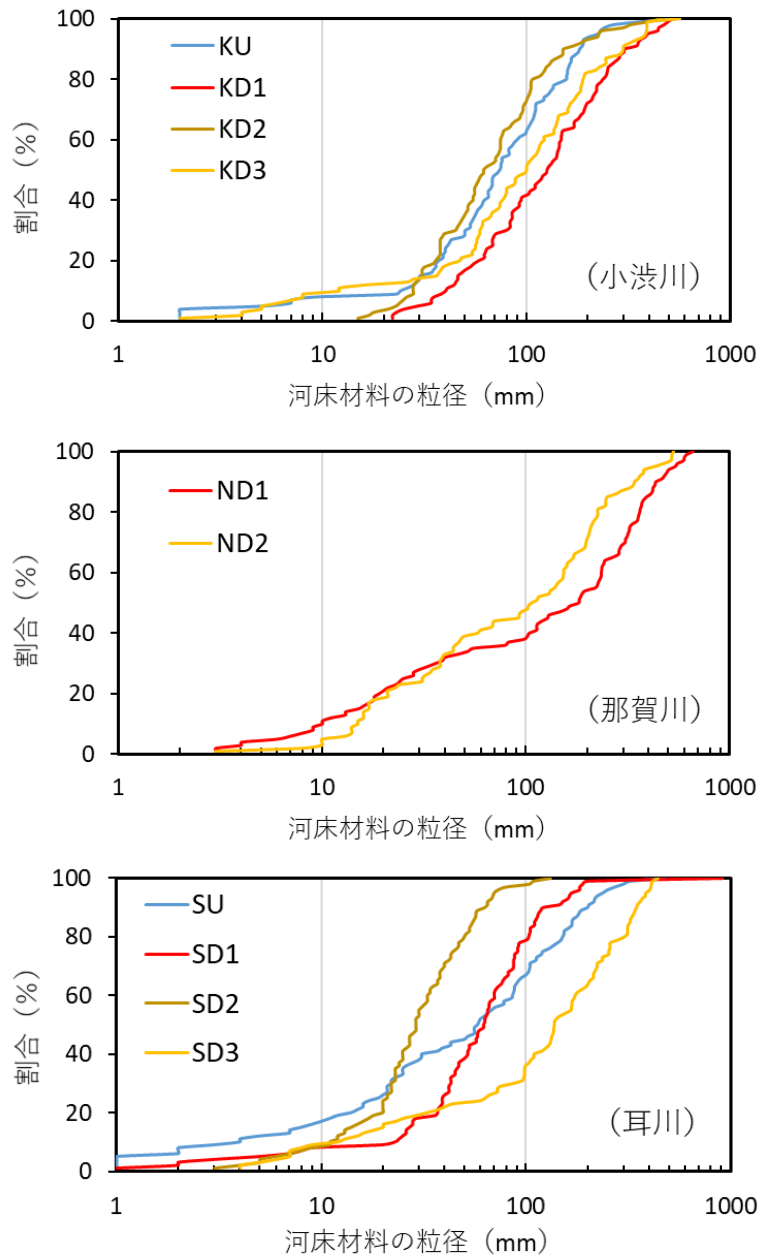


図 4-8 小渋ダム（小渋川）、長安口ダム（那賀川）、西郷ダム（耳川）の上下流における各調査地点の粒径加積曲線³⁾

表 4-3 各地点における F(1)～F(5)の値

		KU	KD1	KD2	KD3	ND1	ND2	SU	SD1	SD2	SD3
F(1)	> 256mm	0.03	0.16	0.04	0.13	0.36	0.15	0.04	0.01	0.00	0.05
F(2)	65～256mm	0.57	0.60	0.45	0.54	0.29	0.44	0.43	0.46	0.10	0.28
F(3)	17～64mm	0.32	0.24	0.50	0.21	0.19	0.27	0.30	0.45	0.73	0.43
F(4)	2～16mm	0.04	0.00	0.01	0.11	0.16	0.14	0.15	0.05	0.17	0.23
F(5)	≦ 2mm	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.01

表 4-4 各地点における露出高、中間径および扁平率の平均値および標準偏差

		KU	KD1	KD2	KD3	ND1	ND2	SU	SD1	SD2	SD3
露出高	平均値	73.3	88.4	60.2	85.5	115.3	110.2	75.7	66.5	47.9	86.5
	標準偏差	38.9	46.9	31.8	46.8	104.5	59.1	40.4	33.6	23.9	56.9
中間径	平均値	114.4	157.3	110.9	153.9	185.9	165.6	130.8	98.0	69.1	139.8
	標準偏差	49.9	96.6	72.5	88.7	148.0	74.5	78.9	59.9	27.5	82.2
扁平率	平均値	0.65	0.63	0.61	0.60	0.62	0.67	0.62	0.71	0.69	0.64
	標準偏差	0.22	0.27	0.22	0.23	0.27	0.19	0.22	0.26	0.19	0.26

設定した扁平率から S_i を算出し分布形をモデル予測した結果、全ての露出高の簡易予測モデルによる分布形と観測値の分布形（ヒストグラム）は概ね一峰性を有する傾向であったが（図 4-9～11）、KS test による結果はモデルおよび地点ごとに異なった。旧モデルの予測結果では、予測値の分布形が観測値よりも左寄りの傾向で、予測値と観測値の分布形に有意差がなかったのは ($p > 0.05$) SD3 のみであった（図 4-9～11、表 4-5）。旧モデルと河床の被度からの予測結果の場合、KD1 のみが有意差なしと判定された（図 4-9～11、表 4-5）。一方、A～D の 4 つ改善モデルでは、ND1、SD3 を除き、いずれも旧モデルより p 値が高く、有意差のない地点 ($p > 0.05$) が増加し、10 地点中、D が 7 地点、A が 6 地点、B、C が 5 地点であった（表-4-5）。特に小渋ダムでは、全ての地点において、観測値と改善モデル A～D による予測値との分布形に有意差が見られなかった（図 4-9～11、表 4-5）。

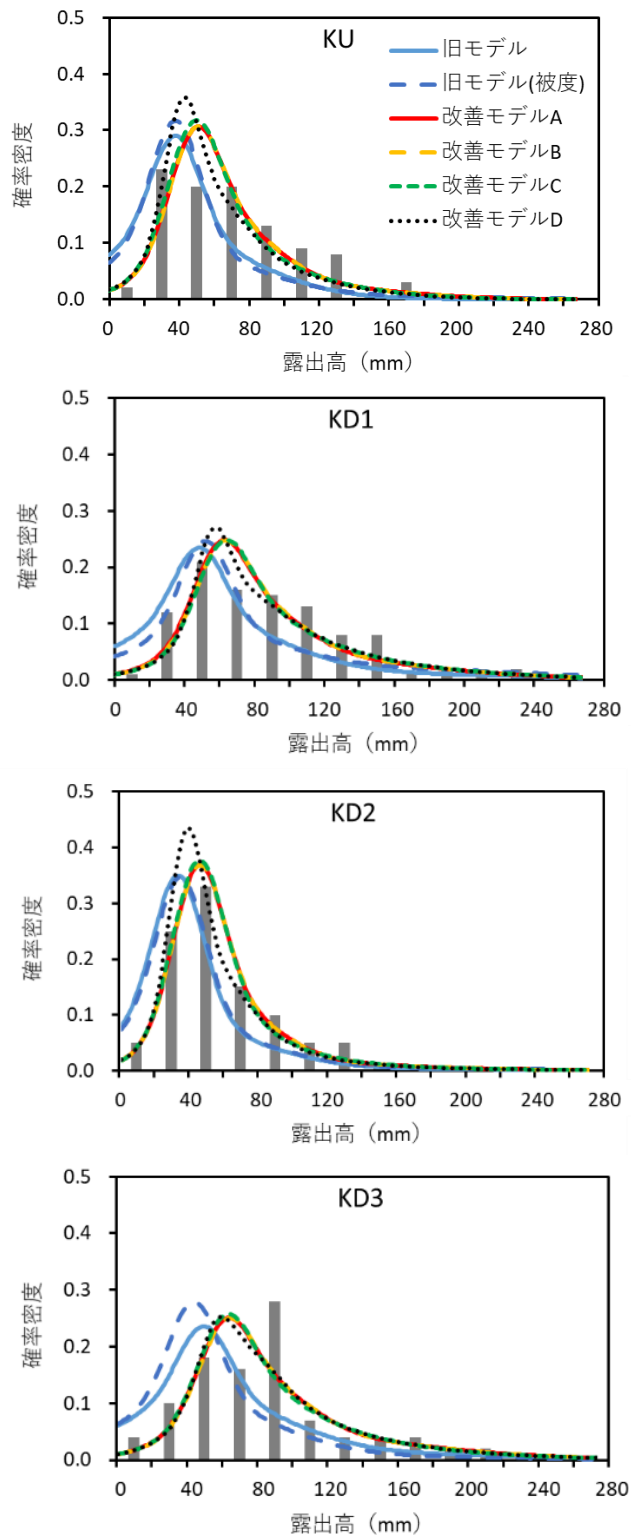


図 4-9 小渋ダム上下流における露出高に関する観測値とモデル値の分布形（モデル値は、旧モデルおよび改善モデル A～D の予測値であり、旧モデルはペブルカウントを用いた場合と河床の被度を用いた場合の 2 パターンあり、ヒストグラムは観測値、曲線はモデル値を表す³⁾）

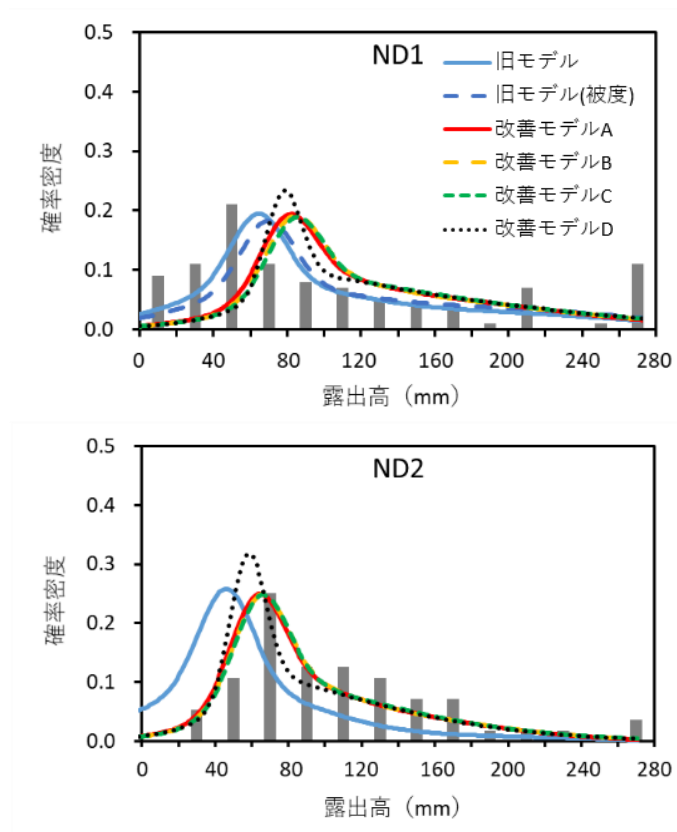


図 4-10 長安口ダム上下流における露出高に関する観測値とモデル値の分布形³⁾

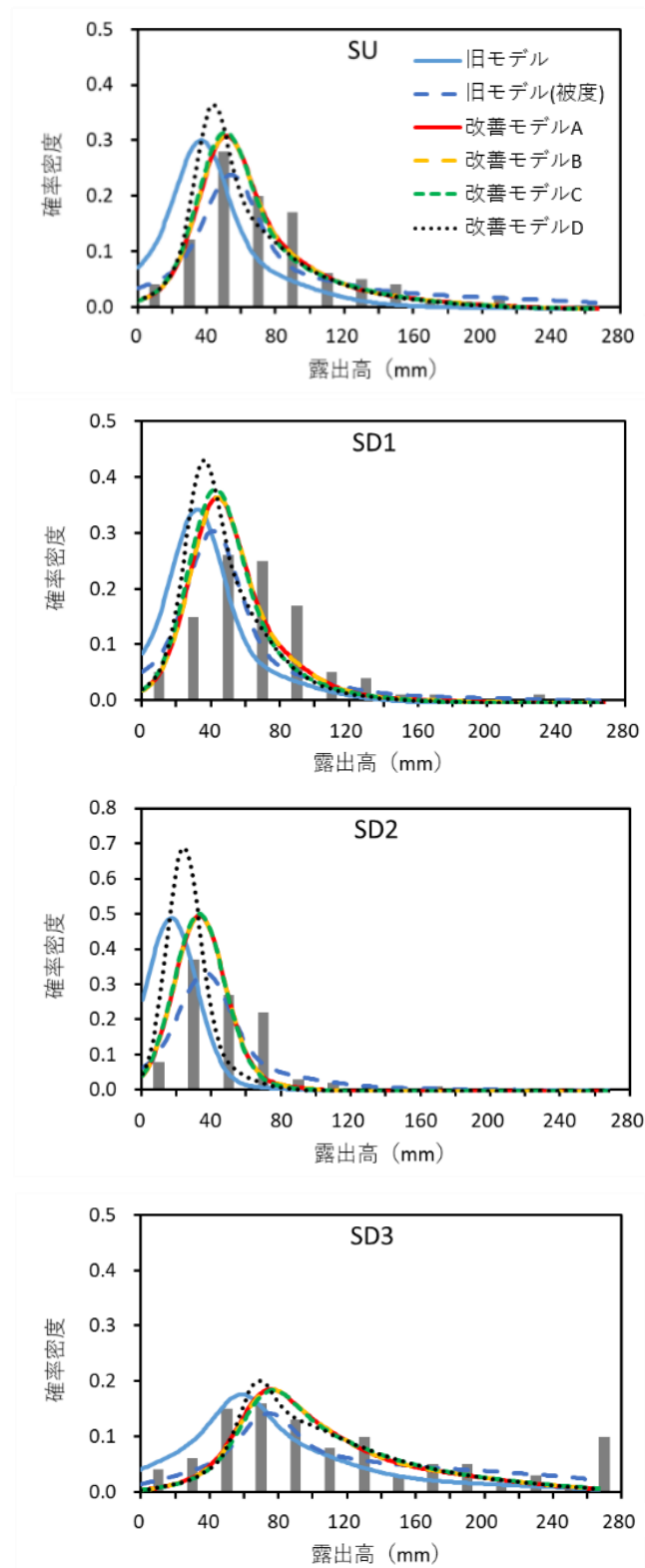


図 4-11 西郷ダム上下流における露出高に関する観測値とモデル値の分布形³⁾

表 4-5 各調査地点における露出高に関する観測値とモデル値の分布型の KS test による p 値（太字・下線部は予測値と観測値の分布形に有意差がなかったものを表し、N.D. はデータがないことを表す³⁾）

	KU	KD1	KD2	KD3	ND1	ND2	SU	SD1	SD2	SD3
旧モデル	4.5×10^{-4}	0.029	2.0×10^{-5}	0.005	0.004	0.002	9.0×10^{-6}	1.4×10^{-9}	1.8×10^{-15}	<u>0.270</u>
旧モデル(被度)	7.0×10^{-5}	<u>0.222</u>	1.6×10^{-4}	1.2×10^{-6}	6.5×10^{-5}	N.D.	0.001	0.004	0.001	0.026
改善モデルA	<u>0.674</u>	<u>0.203</u>	<u>1.003</u>	<u>0.210</u>	5.0×10^{-11}	<u>0.068</u>	<u>0.777</u>	4.7×10^{-4}	5.7×10^{-6}	0.034
改善モデルB	<u>0.630</u>	<u>0.131</u>	<u>0.997</u>	<u>0.181</u>	3.1×10^{-12}	0.031	<u>0.725</u>	0.001	5.7×10^{-6}	0.026
改善モデルC	<u>0.395</u>	<u>0.102</u>	<u>0.988</u>	<u>0.286</u>	1.1×10^{-12}	0.025	<u>0.456</u>	2.4×10^{-5}	2.1×10^{-6}	0.014
改善モデルD	<u>0.061</u>	<u>0.184</u>	<u>0.129</u>	<u>0.186</u>	2.4×10^{-12}	<u>0.128</u>	<u>0.120</u>	4.9×10^{-8}	1.4×10^{-17}	<u>0.064</u>

4-2-4. モデルの改善による成果および課題

改善モデル A~D による分布形は、ND1、SD3 を除き、いずれも旧モデルより観測値の分布形に近いと判定されたことから、改善モデルは旧モデルより概ね高い予測精度を有しているといえる（表 4-5）。観測値のものと有意差がないと判定された分布形の数、粒径区分が最も細かい改善モデル D であった（10 個中 7 個、表 4-5）が、同じ地点で比較すると、改善モデル D の p 値は他の A~C よりも低い場合が多く、粒径区分が多いこともあり、効率的なモデルとは言い難い。これに対し、改善モデルの中では区分の数が最も少ない改善モデル A において、同じ地点で比較しても他の改善モデルとほとんど p 値が変わらなかったことから、改善モデル A が B~D と比べて遜色のない精度を有しているといえる。

このことから、粒径区分を細分化するという今回のモデルの改善について、主に粒径区分の範囲が広い石の区分（65~256 mm）の細分化がモデルの精度の向上に貢献したといえる。ダム下流においては、石のような比較的粗い粒径の割合が高い傾向であり、その区分を細分化することで、より精緻なモデル予測が可能となったと考えられる。事実、石の粒径区分の割合が比較的高い傾向であった小渋ダムでは、全ての地点において改善モデルの適用によりモデルの分布形と観測値の分布形に有意差が生じなかった。さらに、矢作川の中流域にモデルを適用した既往研究では¹⁰⁾、今回のダム下流より河床材料が比較的細かったことから、旧モデルでも十分な精度が得られたと考えられる。

また、この改善効果は二分割した場合（改善モデル A）でもそれ以上に分割した場合（B~D）でもほとんど変わらなかったことから（表 4-5）、旧モデルから石の粒径区分を 2 分割するわずかなモデルの改変（改善モデル A）でも、現場の露出高の分布をより精緻に予測できるといえる。逆に、モデルの区分を細かくしすぎた場合、現場でのデータ収集もより精緻に行う必要があり、河床の被度のように細かい区分設定が困難な項目では、モデルの適用が困難になるといえる。河床の被度は、今回の旧モデルへの適用結果から、中間径の代用としてモデルに用いても遜色ない精度を有すると考えられるが、現地での計測が目視のため、改善モデル A のような 6 区分程度までしか細かく分類できないと考えられる。

ただし、精度が向上した改善モデルにおいても、分布形が正規分布の重ね合わせから構成されている点は旧モデルと同じであり、単純な正規分布の形状から外れるような分布形、例えばND1のように各粒径区分が概ね均等に分布している場合、2つ以上のピークをもつ複雑な分布形を有している場合にモデルの分布形が観測値のものと一致しにくくなる課題は依然残る。また、予測モデルによる計算では扁平率を概ね一定と仮定しているが、今回のような河川地形や地質、露出高や中間径が多様な調査地点においても、扁平率の平均値は概ね0.6~0.7の範囲に収まったことから、この仮定はある程度の妥当性を有しているといえる。扁平率が一般的にどのような河床環境でも概ね一定の傾向を有するののかについては、既往の報告も確認した上で¹³⁾、今後検討の余地があるといえる。

参考文献

- 1)寺田康人、藤田一郎、浅見佳世、渡辺豊：UAVによる撮影画像を用いた洪水前後の砂州上粒度分布の計測、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.71(4)、pp.I_919-I_924、2015.
- 2)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、Vol.24、pp.83-88、2018.
- 3)宮川幸雄、小野田幸生、中村圭吾：河床環境評価に資する石礫の露出高の簡易予測手法の改善と複数河川への適用による改善効果の検証、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.76(2)、pp.I_1333-I_1338、2020.
- 4)福留脩文、有川崇、西山穂、福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計、土木学会論文集 F、Vol.66(4)、pp.490-503、2010.
- 5)村上正吾、辻本哲郎、中川博次：河床砂礫の pick-up rate 推定式について、土木学会論文集、Vol.443、II-18、pp.9-16、1992.
- 6)長田健吾、福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.68(1)、pp.1-20、2012.
- 7)Wentworth C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, The Journal of Geology, Vol.30(5), pp.377-392, 1922.
- 8)国立研究開発法人 土木研究所 自然共生研究センター編：自然共生研究センター活動レポート~平成30年度の成果から~、2019.
- 9)宮川幸雄：河床材料の粒径分布を用いた石礫の露出高の簡易予測手法の複数河川への適用による精度の検証、河川基金報告書、2019.
- 10)小野田幸生、宮川幸雄、中村圭吾、萱場祐一：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、河川技術論文集、Vol.26、pp.271-276、2020.
- 11)国立研究開発法人産業技術総合研究所 Web サイト：地質図 Navi、<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php> (2020.4.7 閲覧).

- 12) Wolman M.G.: A method of sampling coarse river-bed material, EOS Transactions American Geophysical Union, Vol.35 (6), pp.951-956, 1954.
- 13) 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、Vol.18(1)、pp.35-45、2015.

5. 露出高の予測モデル（β版）の紹介および利用方法について

5-1. はじめに

4章で開発、精度検証した露出高の簡易予測モデルは、現場の技術者が広く活用できるよう、β版として国立研究開発法人 土木研究所 自然共生研究センターのWebサイトにて公開されている。本章では、この公開モデルについて、数値入力の方法(5-2.)、出力値に関する解説(5-3.)、簡易予測モデルの補足事項(5-4.)について概説する。

モデルのダウンロード方法は、以下のとおりである。はじめに、自然共生研究センターのWebサイト (<https://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/index.htm>) に入り、その中の左側の項目の一つである「研究成果」－「ダム下流の環境評価ツール」をクリックする(図5-1)。すると、図5-2のような画面に切り替わる。そのページの中央部に「■露出高の簡易予測モデル(宮川モデル)β版(エクセル リンク)」とあり、その部分をクリックすると露出高の簡易予測モデル(β版)がダウンロードされる。同じ場所に使用方法について記載された簡易マニュアルもあるため、併せて参照可能である。



図 5-1 自然共生研究センターWeb サイト トップページ (画像は 2021 年 12 月現在のもの、赤枠は露出高の簡易予測モデルがある「ダム下流の環境評価ツール」を示す)



図 5-2 自然共生研究センターWeb サイト ダム下流の環境評価ツールのページ（画像は 2021 年 12 月現在のもので、赤枠は露出高の簡易予測モデルのダウンロード先を示す）

5-2. データの入力方法

露出高の簡易予測モデルは、汎用性が高く、ダム管理所でも多くのデータが蓄積されている河床粒径分布をもとに簡易予測するものである。このときの石礫は Wentworth の粒径区分に基づく¹⁾5 区分（巨石：F(1)（256 mm 以上）、石：F(2)（65mm 以上 256 mm 未満）、礫：F(3)（16mm 以上 64 mm 未満）、砂利：F(4)（2mm 以上 16 mm 未満）、砂：F(5)（2

mm 未満)のうち礫以上のものと定義する(16mm以上)。砂利以下の細かい粒径(16mm未満)については、充填材として考え、露出高の予測の対象外とする。これにより、モデル上では、砂利・砂の割合の増大により巨石、石、礫の割合が減少することで、露出高が低下する仕組みとなっている。以下にデータの入力方法について記載する。このモデルは、2021年12月時点のもの(ver2.0)で今後、バージョンアップによって構成等が変更される可能性がある。

5-2-1. ファイルを開く

はじめに、エクセルファイル「rosyutsudaka Miyagawa-Model ver2.0 β」を開くと、ファイルは「入力部分」「出力部分」「簡易マニュアル」の3つのシートに分かれており、この中の「入力部分」シートを開く(図5-3)。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	露出高推定モデル(混合粒径対応)				バージョン2.0 β					
2	ファイル名				rosyutsudaka miyagawa-model ver2.0 β					
3					黄色く塗った箇所を入力してください		入力値に基づく粒径加積曲線 →			
4										
5										
6	i	粒径範囲*	各区分の存在割合F(i)	←この部分は入力必須です						
7	F(1)	256mm~	0.02							
8	F(2)	128~256mm	0.03							
9	F(3)	64~128mm	0.02							
10	F(4)	16~64mm	0.01							
11	F(5)	2~16mm	0.01							
12	F(6)	~2mm	0.01							
13	計				1					
14					ok.					
15	青く塗った箇所は自分で設定したい場合に入力してください						計算で使う部分(自分で設定しない場合は、自動で設定されます)			
16										
17	i	粒径範囲*	各区分の代表粒径			i	各区分の代表粒径 mm			
18	F(1)	256mm~	←巨礫(目安:330mm)			F(1)	330			
19	F(2)	128~256mm	←大礫(目安:200mm)			F(2)	192			
20	F(3)	64~128mm	←大礫(目安:100mm)			F(3)	96			
21	F(4)	16~64mm	←中礫(目安:40mm)			F(4)	40			
22	F(5)	2~16mm	←砂利(目安:9mm)	←露出高にカウントしない		F(5)	9			
23	F(6)	~2mm	←砂(目安:1mm)	←露出高にカウントしない		F(6)	1			
24										
25	i	粒径範囲*	各区分の代表高さSi	←代表粒径の0.64倍が目安(2021/4/1更新)		i	各区分の代表高さSi mm			
27	F(1)	256mm~				F(1)	211.2			
28	F(2)	128~256mm				F(2)	122.88			
29	F(3)	64~128mm				F(3)	61.44			
30	F(4)	16~64mm				F(4)	25.6			
31	F(5)	2~16mm		←露出高にカウントしない		F(5)				
32	F(6)	~2mm		←露出高にカウントしない		F(6)				
33										
34										
35	i	粒径範囲*	各区分の標準偏差σ	←代表粒径の0.217~0.3倍が目安(2021/4/1更新)		i	各区分の標準偏差σ			
36	F(1)	256mm~				F(1)	99			
37	F(2)	128~256mm				F(2)	57.6			
38	F(3)	64~128mm				F(3)	28.8			
39	F(4)	16~64mm				F(4)	12			
40	F(5)	2~16mm		←露出高にカウントしない		F(5)				
41	F(6)	~2mm		←露出高にカウントしない		F(6)				
42										
43										
44	* Wentworthの粒径区分を参照						i ゼロ点補正			
45	F(1)	256mm~				F(1)	46.88			
46	F(2)	128~256mm				F(2)	2.72			
47	F(3)	64~128mm				F(3)	-28.00			
48	F(4)	16~64mm		↑露出高にカウントした範囲		F(4)	-46.88			
49	F(5)	2~16mm				F(5)				
50	F(6)	~2mm				F(6)				
51										
52										
53										
54										

図5-3 露出高の簡易予測モデル(β版)の「入力部分」のシート(画像は2021年12月現在のもの)

5-2-2. 必須項目の入力

画面左上、セル D7~D12 (図 5-4 の①の赤枠、黄色く塗った部分) に 4 章で定義した粒径割合を入力する (0~1)。この各区分の存在割合 $F(i)$ は、Wentworth の粒径区分¹⁾を参考に、河床材料の

F(1) : 256mm 以上の粒径の存在割合

F(2) : 128mm 以上 256mm 未満の粒径の存在割合

F(3) : 64mm 以上 128mm 未満の粒径の存在割合

F(4) : 16mm 以上 64mm 未満の粒径の存在割合

F(5) : 2mm 以上 16mm 未満の粒径の存在割合

F(6) : 2mm 未満の粒径の存在割合

をそれぞれ入力する。このとき、合計は 1 となるように入力する必要がある。F(1)~F(6)の値は、ペブルカウント法²⁾等による河床材料調査データから作成した粒径加積曲線をもとに入力する。ペブルカウント以外には、面格子法による観測データ、河床表層の被度割合 (目視) 等で代用して値を出力することも可能である。

この部分を入力すると、右上に入力値に基づく粒径加積曲線のイメージ図が表示される (F(1)~F(6)の 6 つの数値からの推定値、図 5-4 の②の赤枠)。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	露出高推定モデル(適合粒径対応)				バージョン 2.0 β					
2	ファイル名		nosyutsudaka miyaaws-model ver2.0 β							
3	黄色く塗った箇所を入力してください				入力値に基づく粒径加積曲線 →					
4							②			
5							①			
6	i	粒径範囲	各区分の存在割合 F(i)		←この部分は入力必須です					
7	F(1)	256mm~	0.02							
8	F(2)	128~256mm	0.03							
9	F(3)	64~128mm	0.02							
10	F(4)	16~64mm	0.01							
11	F(5)	2~16mm	0.01							
12	F(6)	~2mm	0.01							
13							②			
14	赤く塗った箇所は自分で設定したい場合に入力してください						計算で使う部分(自分で設定しない場合は、自動で設定されます)			
15										
16	i	粒径範囲	各区分の代表粒径							
17	F(1)	256mm~	←巨礫(目安:330mm)		F(1)		各区分の代表粒径 mm		330	
18	F(2)	128~256mm	←大礫(目安:200mm)		F(2)		192			
19	F(3)	64~128mm	←大礫(目安:100mm)		F(3)		96			
20	F(4)	16~64mm	←中礫(目安:40mm)		F(4)		40			
21	F(5)	2~16mm	←砂利(目安:3mm)		F(5)				←露出高にカウントしない	
22	F(6)	~2mm	←砂(目安:1mm)		F(6)				←露出高にカウントしない	
23										
24	i	粒径範囲	各区分の代表高さ Si		←代表粒径の0.64倍が目安(2021/4/1更新)					
25	F(1)	256mm~	211.2							
26	F(2)	128~256mm	122.88							
27	F(3)	64~128mm	61.44							
28	F(4)	16~64mm	25.6							
29	F(5)	2~16mm			←露出高にカウントしない					
30	F(6)	~2mm			←露出高にカウントしない					
31										
32	i	粒径範囲	各区分の標準偏差 σ		←代表粒径の0.217~0.3倍が目安(2021/4/1更新)					
33	F(1)	256mm~	93							
34	F(2)	128~256mm	57.6							
35	F(3)	64~128mm	28.8							
36	F(4)	16~64mm	12							
37	F(5)	2~16mm			←露出高にカウントしない					
38	F(6)	~2mm			←露出高にカウントしない					
39										
40	※ Wentworth の粒径区分を参照						i			
41	F(1)	256mm~	46.88		F(1)		ゼロ点補正		46.88	
42	F(2)	128~256mm	27.2		F(2)		27.2			
43	F(3)	64~128mm	13.6		F(3)		13.6			
44	F(4)	16~64mm	5.44		F(4)		5.44			
45	F(5)	2~16mm	2.17		F(5)		2.17			
46	F(6)	~2mm	0.87		F(6)		0.87			
47										
48										
49										
50										
51										
52										
53										
54										

図 5-4 モデルの「入力部分」必須項目の入力 (画像は 2021 年 12 月現在のもの)

5-2-3. 設定項目の補足

F(1)～F(6)について、各区分の代表粒径（セル I18～I23）、粒径の代表高さ（セル I27～I32）、標準偏差（セル I36～I41）について、モデル上で既に設定されており（図 5-5 の①の赤枠、肌色部）、数値が自動入力されている。このままで予測モデルの実行は可能だが、使用者でこの設定を任意に変更可能である。この場合、セル D18～D23、D27～D32、D36～D41（図 5-5 の②の赤枠、青色部）に代表粒径（mm）を直接入力すれば、①の赤枠部がそれに合わせて自動的に変わる仕組みとなっている。

また、露出高予測の式に直接使用するのは、礫以上の割合の部分（F(1)～F(4)）のみとなる。このとき、F(5)、F(6)の増減でも F(1)～F(4)は変動するため、露出高の予測に間接的に影響する。これ以外のセルは入力できないように設定されている。この中で、ゼロ点補正の項目（図 5-5 の③の赤枠）はモデルの計算上、必要となる補正值（詳細は 4-1-4.を参照）を表す。

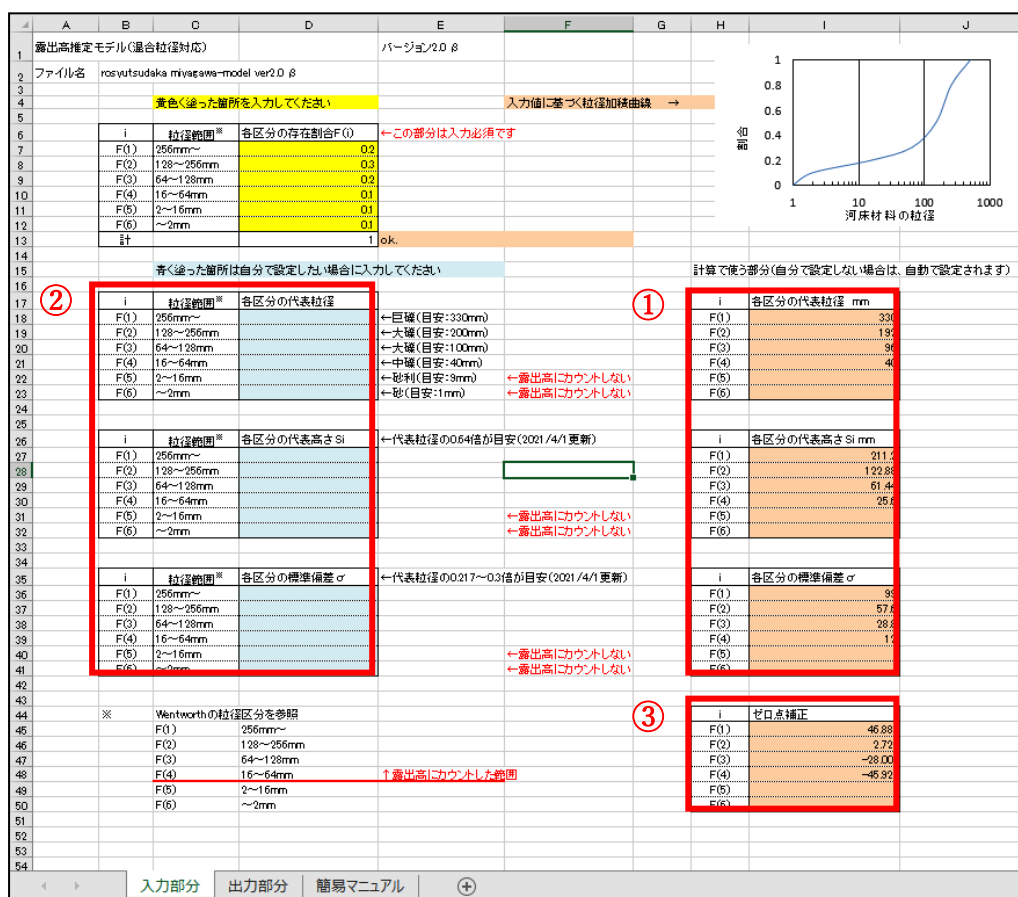


図 5-5 露出高の簡易予測モデル（β版）の「入力部分」補足部分の入力（画像は 2021 年 12 月現在のもの）

5-3. 出力内容

「入力部分」の必須項目等を入力すると、「出力部分」シートに入力部分に基づき予測された露出高の分布等が出力される。分布は横軸が露出高 (mm)、縦軸が確率密度を表しており、露出高が X である確率の分布が表示される (図 5-6 の①の赤枠)。この分布のグラフに加え、露出高の平均値がセル F6 に表示される (図 5-6 の②の赤枠)。

露出高の分布のグラフの全累積値は通常 1 となるが、鉛直方向の配置上、露出高は 0 以上で設定されており、露出高がマイナスとなる確率は除かれているため、その除いた分の累積値がセル G6 に参考値として表示される (図 5-6 の③の赤枠)。

グラフの数値情報は I、J 列に表示される (図 5-6 の④の赤枠の紫部分)。このグラフは F(1)~F(4)の確率密度関数を F(1)~F(4)の存在割合で重み付けして足し合わせたものであり、F(1)~F(4)の確率密度関数は L~AD 列に表示される。

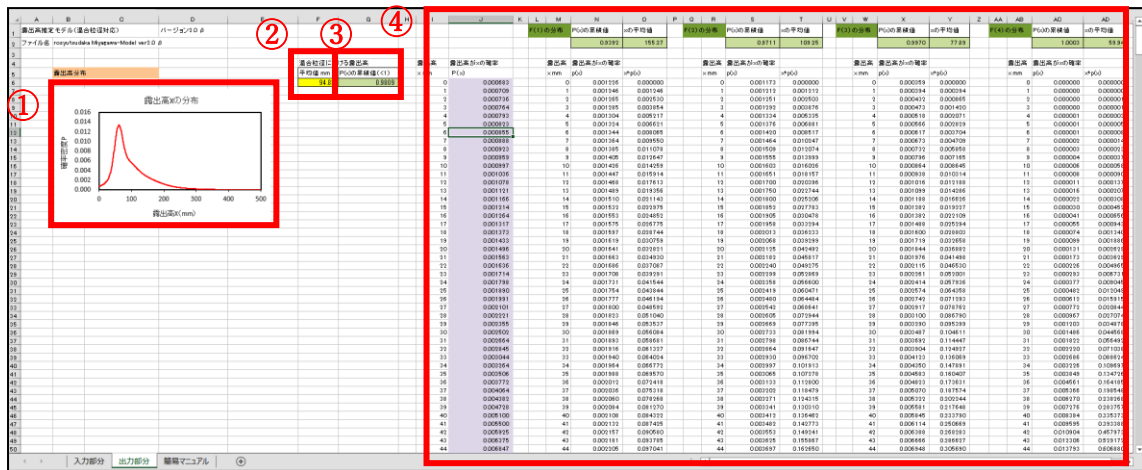


図 5-6 露出高の簡易予測モデル (β版) の「出力部分」のシート (画像は 2021 年 12 月現在のもの)

5-4. 補足事項

露出高の簡易予測モデルは、現場の石礫の状態について、ある程度の簡略化を目的に、各粒径区分において露出高が正規分布になるという仮定のほか、2つの仮定を設定している。一つは、現場では多様な形状を有する石礫を一律の扁平率を有する楕円体と仮定している（モデルでは、この扁平率を0.64に設定）。もう一つは、現場の石礫の長軸と河床地盤との間の傾斜角は様々で覆瓦構造をなしているが、モデルではこの傾斜角を一律0°（石礫の長軸が概ね河床面と平行）と仮定している。

簡易予測モデルの精度は、現状、矢作川水系の矢作川上流域、矢作第2ダム直下、天竜川水系の小渋ダム上下流域、那賀川水系の長安口ダム下流域、耳川水系の西郷ダム上下流域の現場データにて確認されている^{3),4)}。今後も、より多くの現場データをもとに精度の向上および適用範囲の確認を行う予定である。

本モデルは精度の向上、適用範囲の拡大を目的として、随時バージョンアップ予定であり、これに伴い、本モデルおよびマニュアルを予告なく更新することがある。

参考文献

- 1)Wentworth C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, The Journal of Geology, Vol.30(5), pp.377-392, 1922.
- 2)Wolman M.G.: A method of sampling coarse river-bed material, EOS Transactions American Geophysical Union, Vol.35 (6), pp.951-956, 1954.
- 3)小野田幸生、宮川幸雄、中村圭吾、萱場祐一：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、河川技術論文集、Vol.26、pp.271-276、2020.
- 4)宮川幸雄、小野田幸生、中村圭吾：河床環境評価に資する石礫の露出高の簡易予測手法の改善と複数河川への適用による改善効果の検証、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.76(2)、pp.I_1333-I_1338、2020.

6. まとめと今後の展望

露出高は、3章から、アユの採餌環境を保全するための適正範囲を示すことが可能な指標といえる。アユは全国に分布する水産有用魚種であり、3章で示したとおり、砂や小礫の堆積による露出高の変化の影響を受けることが明らかである。露出高は、Surface layerの質を表す定量的な絶対値指標であり、ダム下流への土砂供給による砂、小礫の堆積と連動するため、土砂供給によるアユへの影響を予測・評価するうえで、非常に有効であると考えられる。2章で紹介したとおり、ダム下流への土砂供給に伴い、河床環境に粒子の通過による影響、粒子の堆積による影響の2つが生じる。粒子の通過が主に洪水時・土砂供給時の短期的な影響に対し、粒子の堆積は洪水後の平水時に戻った後にも影響を及ぼすことから、土砂供給による長期的な河床環境への影響として着目される。1章で概説したとおり、全国のダムでは下流の粗粒化の進行およびそれによる付着藻類の繁茂等の河床環境の劣化を緩和するため、総合土砂管理計画に基づく土砂供給事業およびそのための試験的な土砂供給が実施されている。総合土砂管理計画の策定を実施または検討しているダムは増加しており、土砂供給に伴うダム下流への影響の予測・評価技術の需要も増加傾向にある。

4章で紹介した露出高の簡易予測モデルは、河床粒径分布から露出高の分布および平均値を予測するものであり、高コストな計測が必要な露出高を簡易推定できる。このため、このモデルは河床変動計算等、土砂供給による河床変動量を推定する技術と組み合わせることで、土砂供給による露出高の変動量を推定でき、アユの採餌環境にとって許容されるかの判断材料を提供可能な技術といえる。総合土砂管理では、流砂系で生じる様々な課題について、複数の関係者が山地～海岸までの各領域の通過土砂の量および質に関する情報を共有し、解決を図ることが謳われている。このため、ダム領域において、環境面から適切な通過土砂量を提案するにあたり、簡易ではあるが現場視点で一般にも理解しやすい評価指標および評価方法を提案することは、総合土砂管理の推進に大いに寄与するものといえる。この背景を踏まえ、露出高の簡易予測モデルは、5章で紹介したとおり、自然共生研究センターのWebサイトにて誰でも利用できるよう一般公開されている。また、露出高による河床環境評価が総合土砂管理の推進に貢献できることを示す事例もある。2019年に公表された「総合土砂管理計画策定の手引き ver1.0」では、アユなどの水生生物の生息に適した河床環境の保全の観点から、露出高は目標通過土砂量の設定に関する参考事例に挙げられている¹⁾。

露出高の簡易予測モデルによって出力される分布形は、正規分布の重ね合わせから構成されており、単純な正規分布の形状から外れるような露出高分布（二峰性を有するもの等）をもつ河床に対しては、あてはまりがやや悪くなる。また、モデル上の仮定（扁平率が一定、石礫の長軸と河床面が平行）の妥当性についても、精度検証した水系が未だ限られていることから今後も検証の余地があるといえる。このように精度面では未だ検証の余地があるモデルといえるものの、3章で説明したとおり、河床の鉛直方向の環境を直接的に表せる数少ない指標であり、現場で直接計測が可能な絶対値指標という点で、アユの採餌環境を予測・

評価する面では、浮石率等、他の河床環境関係の指標より有利な部分がある。

今回の露出高に基づく河床環境の予測・評価手法は、アユおよびその餌である付着藻類を評価対象としている。露出高からアユへの影響予測を行う際の適正範囲は、今回の事例では大型糸状藻類とアユの摂食行動に基づき、それぞれ最大値、最小値を閾値として設定する案を提示したが、根拠となる事例はまだまだ少なく、さらなる研究が必要とされる。また、本資料での予測・評価は、あくまでアユが生息している河川の流心部の瀬における評価手法の提案であり、水際や淵には対応していない点に留意すべきである。実際は、評価を実施する河川において、どのエリア（水域（水際、瀬、淵）、陸域）のどの生物を評価対象とするかを、その場所の河川環境のモニタリングデータ等をもとに検討し、決定するプロセスが必要といえる。その際には、その対象生物やエリアにおいて、露出高が適切な河床環境指標かどうか判断する必要があるだろう。また、土砂供給手法の決定には、環境面のみでなく、供給コスト、実現可能な土砂供給量等の検討も必要であり、それらを総合的に勘案するプロセスが必要な点にも留意する必要がある。

今後は、近年、全国的に増加する総合土砂管理計画策定の流れに対応するため、ダム下流への土砂供給に伴う河床の地形、粒径の予測結果からシームレスに露出高を予測し、河床環境評価が可能なシステムを提案することで、土砂供給による河床環境への影響予測・評価の迅速化を目指す等、システムの高度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 一般財団法人国土技術研究センター：総合土砂管理計画策定の手引き 第 1.0 版、2019.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4424 March 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754