

土研新技術セミナー in 札幌
～ 維持管理技術の最先端 ～

「石礫の露出高を用いたダム下流の環境評価手法」



国立研究開発法人 土木研究所
自然共生研究センター 主任研究員
宮川 幸雄

1. 背景
2. 石礫の露出高
3. 予測モデルの仕組み
4. 予測モデル β 版の利用デモ
5. 予測モデルの精度検証
6. 今後の予定

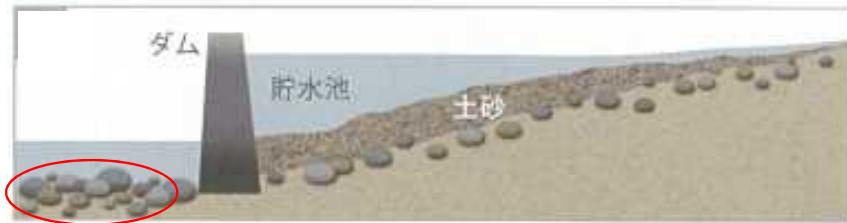
1. 背景

○ダム上流：流水とともに土砂がダムに流入

- ・貯水池に土砂が堆積し、貯水機能が低下 (Erskine, 1985)
- ・堆積した分、下流への土砂供給量が減少 (Kondolf, 1997)

○ダム下流：粒径の細かい土粒子（砂・砂利）から徐々に流出

→ 粒径の粗い材料が残存（粗粒化）し、固定化（アーマー化、armoring） (Dietrich et.al., 1989)

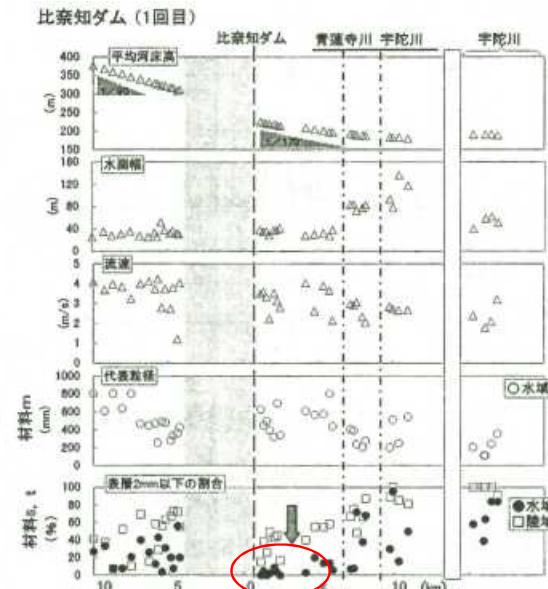


粒径別カテゴリとダム下流での挙動 (Bain et.al., 1985)

名称	英文名称	粒径範囲(mm)
シルト*	Silt	<0.062
砂	Sand	0.062~1
砂利	Gravel	2~16
礫	Pebble	17~64
石	Cobble	65~256
巨石	Boulder	>256

*貯水池から巻き上がり下流に流下することがある

事例：比奈知ダム（山原ら, 2007）



水域の2mm以下の割合がダム直下で急減

1. 背景



粗粒化した河床における河床環境の悪化
(付着藻類の異常繁茂、etc)

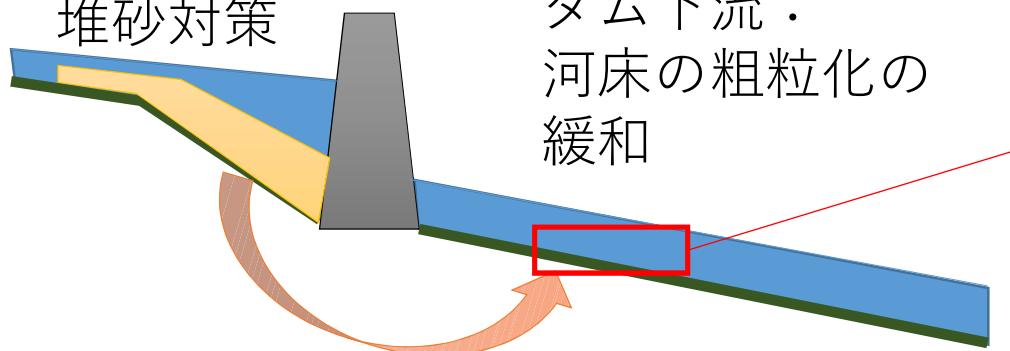


1. 背景

ダム下流への土砂供給による河床環境の改善



ダム貯水池：
堆砂対策



ダム下流：
河床の粗粒化の
緩和



1. 背景

ダム下流に人工的に土砂を供給（砂・砂利主体）

→貯水池：ダムの機能維持（堆砂対策）

→ダム下流：粗粒化の解消が期待

- 事例
- ・河床間隙に供給土砂が堆積（福島ら, 2009）
 - ・供給箇所直下で河床が細粒化（Kantoush et.al., 2010）

粗粒化した河床



河床環境の改善が期待

- 事例
- ・異常繁茂した付着藻類の剥離が促進（坂本ら, 2006）

一方で、どの程度の土砂を供給すればよいかの議論が必要

河床環境への影響：河床の石礫の埋没、濁り



河床の石礫をテーマとして研究

多様な粒径の河床



2. 石礫の露出高

河床を利用する生物を軸とした石礫の評価

○どの生物が評価のキーとなるのか？

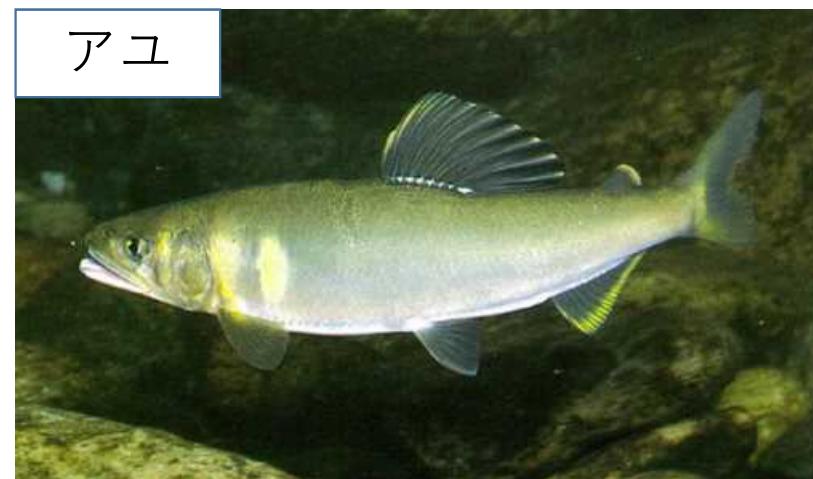
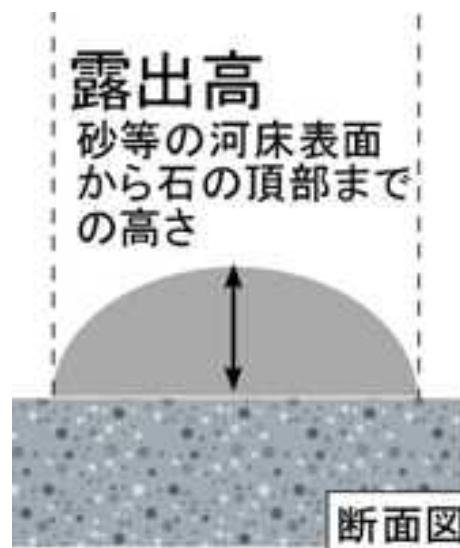
アユ*を主な評価対象種として、河床環境の変化による影響およびその評価を議論

*概ね日本全国に分布、水産有用魚種

アユに対する巨石や浮き石の割合の重要性（坪井・高木, 2016）

○アユを対象とした河床の石礫の評価事例

石礫の露出高（土砂による埋没度合）とアユの利用有無による評価



山溪カラー名鑑
日本の淡水魚より

2. 石礫の露出高

露出高を評価軸とするメリット①

命題：どの程度の土砂を供給すればよいのか？

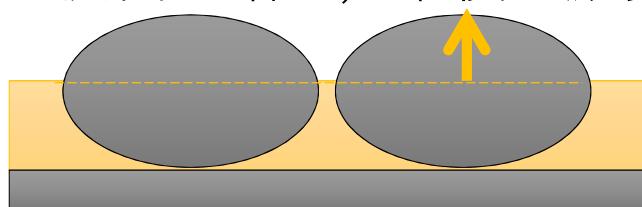
- 項目：土砂量、質（粒の大きさ等）、供給のタイミング
→ 土砂量に着目（現場で検討対象になることが多い）

- 許容値の設定：

土砂量 → 河床の土砂の堆積量（どれだけ河床にたまつたか）
土砂の堆積量をどのように数値化？

露出高

細砂の流出で増加、堆積で減少



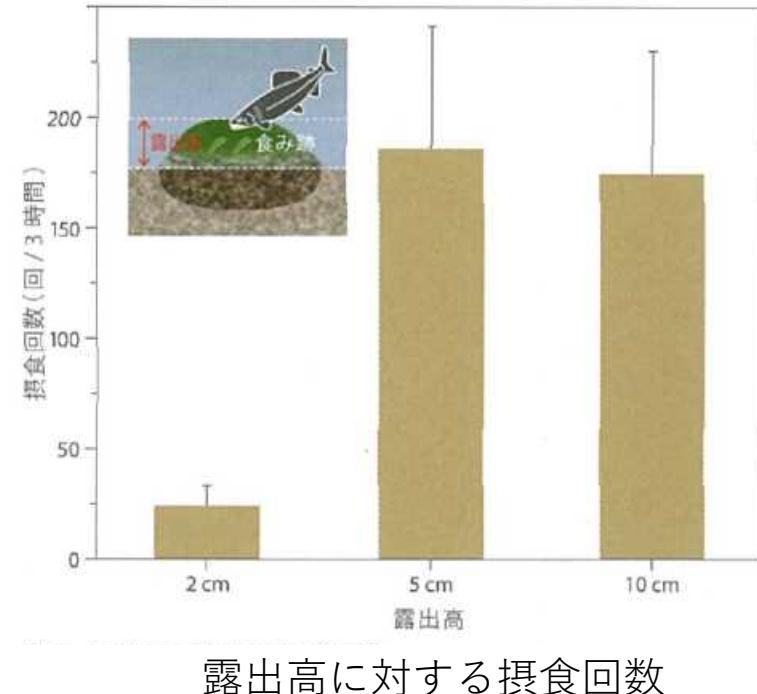
土砂の堆積量を定量化できる

2. 石礫の露出高

露出高を評価軸とするメリット②

Q. 露出高が減少すると何が問題か？

A. 例えば、石礫の付着藻類をアユが食みにくくなる（小野田ら, 2018）
魚類生息密度に一時的な低下が見られる等が報告



河川生物の生息条件を適切に捉えることのできる指標として注目
「総合土砂管理計画策定の手引き ver1.0」にも引用



河床環境にとっての許容値を見える化できる

2. 石礫の露出高

河床環境評価イメージ



2. 石礫の露出高

露出高を評価軸とする場合の課題

Q. 露出高は現場で測定できる?



↓ そこで

→ A. できるが、高コスト



河床の状態に関する要素（河床材料の大きさ等）を変数として
露出高を現場で簡易に予測するモデル（宮川モデル）を開発

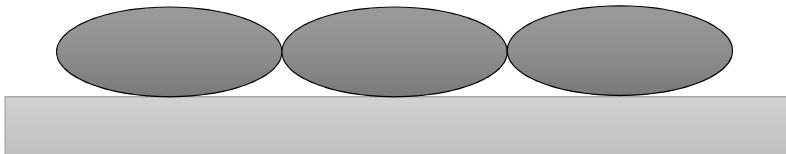
- ・長期に蓄積され、汎用性の高い河床粒径分布のデータから露出高を予測
- ・現場に利用しやすいモデルを目指し、変数を選定した簡易的なモデルを利用

3. 予測モデルの仕組み

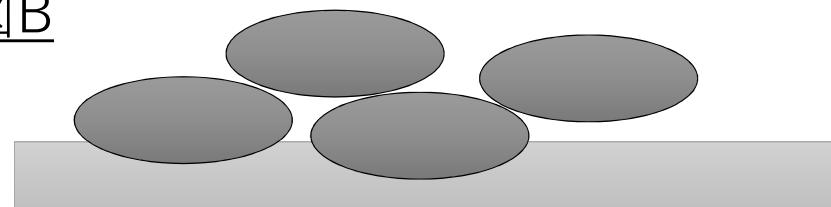
課題1：既往研究では、石礫を同じ高さに配置した想定（図A）が多いが、現場では一様ではなく、露出高は幅広い分布をもつ（図B）。

→ (1) 河床表層の石礫の鉛直方向の配置の設定

図A



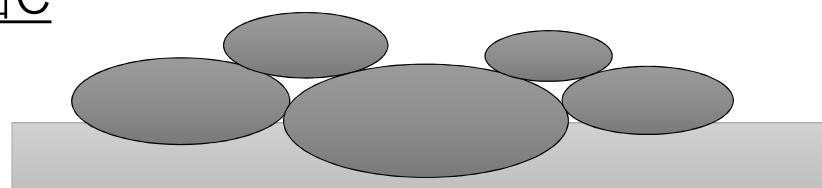
図B



課題2：既往研究では、単一粒径を想定した実験が多いが、現場は混合粒径である（図C）。

→ (2) 混合粒径の河床における石礫の露出高の平均値および分布状況の予測

図C

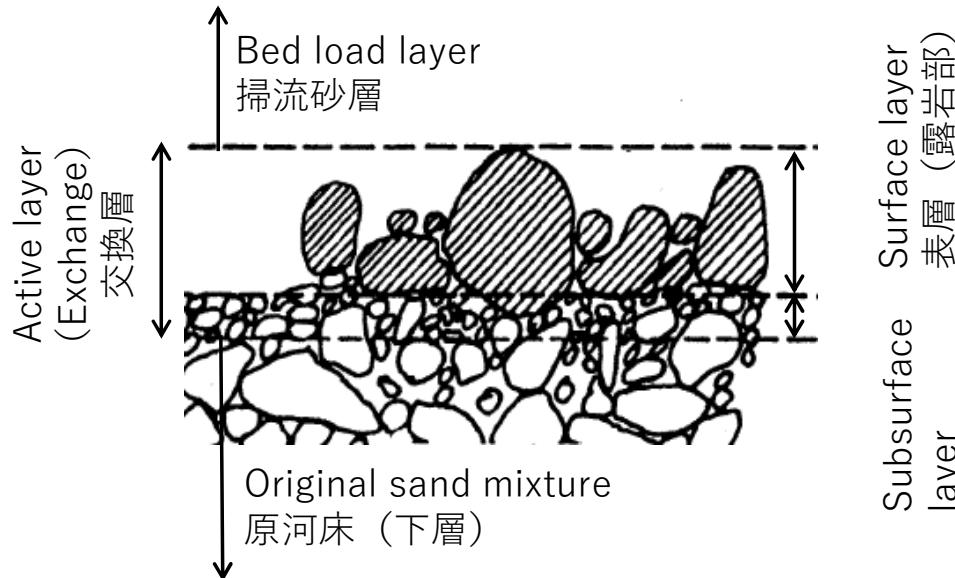


河床表層の凹凸（露出高のばらつき）をどのように数値化するか

3. 予測モデルの仕組み

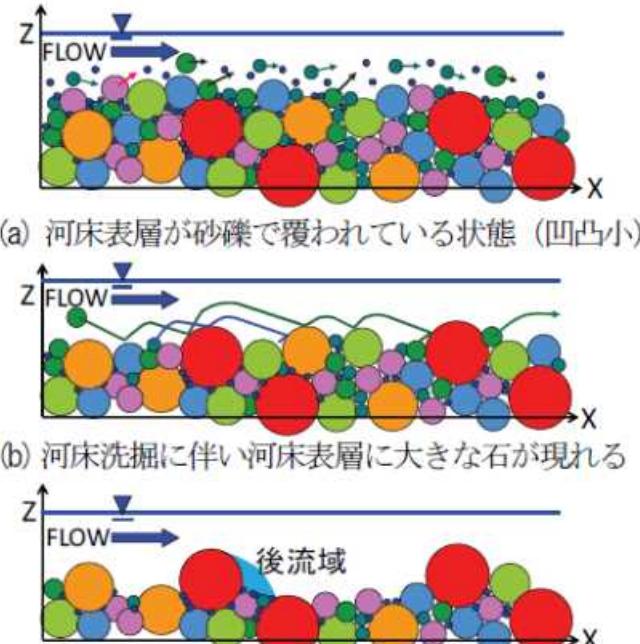
既往研究

河床の鉛直構造のモデル図
(平野, 1971, 鈴木・加藤, 1989)



- 交換層 (Active layer) から細粒子が流出
→ 河床のアーマー化
→ 表層 (露岩部) の凹凸が変化
- 原河床 (下層) の粒径分布はほとんど変化しない

表層の凹凸の変化 (長田ら, 2012)



(a) 河床表層が砂礫で覆われている状態 (凹凸小)

(b) 河床洗掘に伴い河床表層に大きな石が現れる

(c) 河床表層の大きな石により凹凸が形成され
河床が安定した状態
石礫河川の河床変動過程

- 表層の凹凸の大きさは河床表層の平均粒径に比例
(石礫河川)

河床粒径分布から表層の凹凸の程度を推定する手法の開発

3. 予測モデルの仕組み

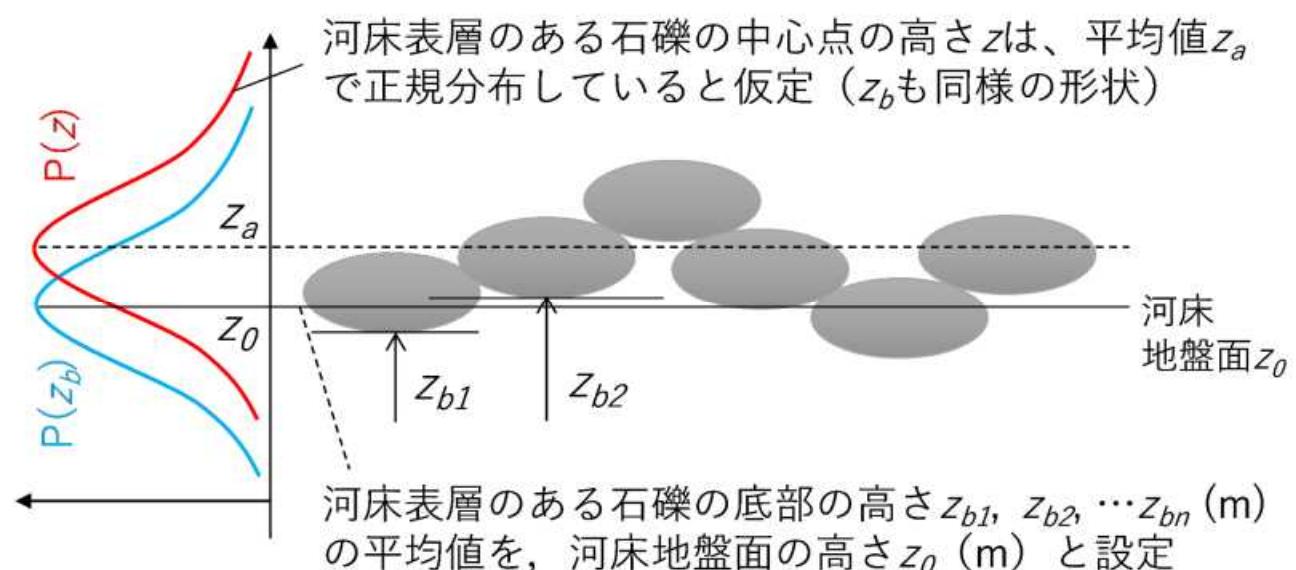
(1) 河床表層の石礫の鉛直方向の配置の設定

- ・個々の石礫の中心高さ z (m) は、平均値 z_a を中心に正規分布していると仮定
(村上ら、1992)
- ・底部高さ z_b (m) も同様とし、その平均値を河床地盤面の高さ z_0 (m) と設定

確率密度関数P

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

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



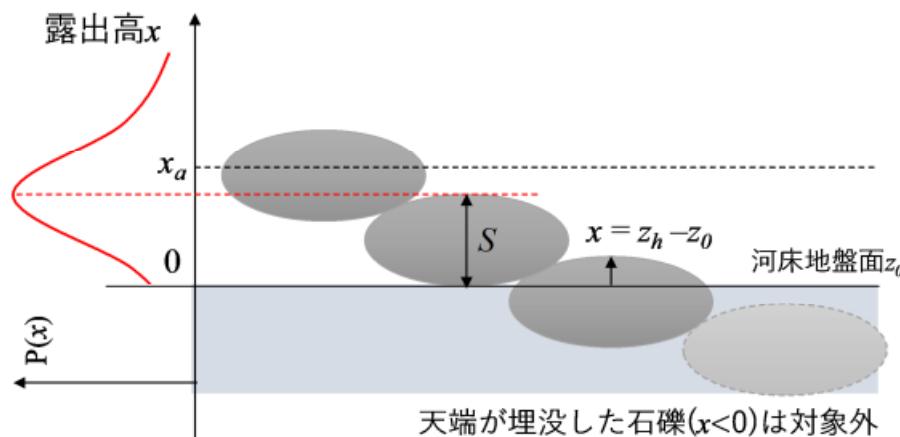
3. 予測モデルの仕組み

(1) 河床表層の石礫の鉛直方向の配置の設定

天端高さ z_h (m)、露出高 x (m)、石礫の厚さ S (m)を設定

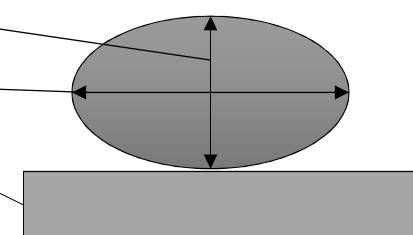
$$x = z_h - z_0$$

$$S = z_h - z_b$$



仮定

- ・石礫は一律の扁平率 (=0.5に設定) を有する橿円体と設定
- ・石礫の長軸は河床面と並行 (倒れた状態) と設定



3. 予測モデルの仕組み

$$\left\{ \begin{array}{l} P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z - z_a}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1) \\ P(z_b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z_b - z_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = z_h - z_0 \quad (3) \\ S = z_h - z_b \quad (4) \end{array} \right.$$

(3)、(4)から(2)の z_b 、 z_0 を消去

露出高が x の確率 $P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - S}{\sigma}\right)^2\right)$

露出高の平均値 $x_a = \int_0^\infty x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - S}{\sigma}\right)^2\right) dx$

3. 予測モデルの仕組み

(2) 混合粒径における石礫の鉛直方向の配置の設定

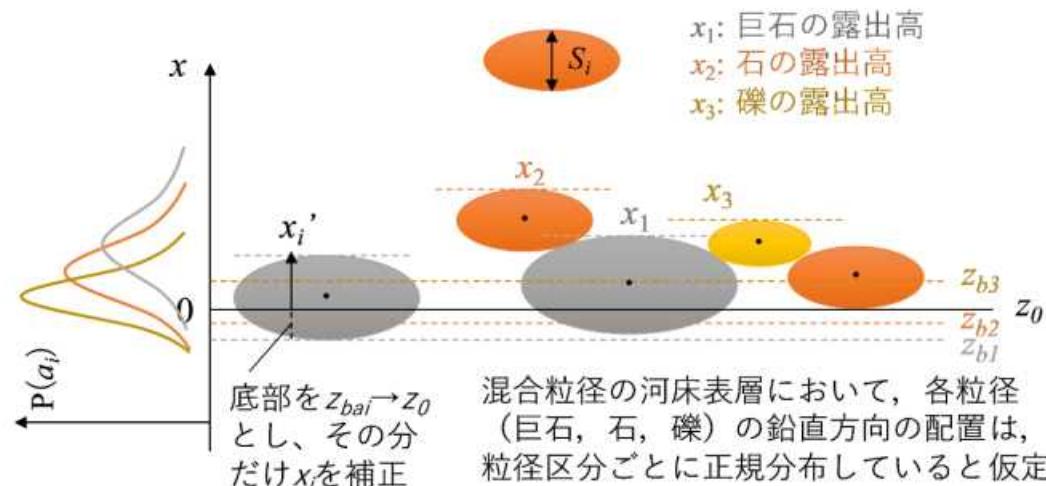
河床材料をいくつかの粒径集団に区分し*、各粒径集団の鉛直方向の位置は正規分布にしたがうと仮定して確率密度関数で数値化

* i : 粒径区分 (Wentworth, 1922)

1 : 巨礫 256 mm~ 2 : 大礫 64~256 mm

3 : 中礫 16~64 mm

$F(i)$ ：河床材料中の巨礫、大礫、中礫の割合



露出高がxである確率密度

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

xの平均値 混合粒径 確率密度関数

x の平均値 混合粒径 確率密度関数

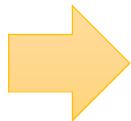
$$X = \sum_{i=1}^3 \frac{F(i)}{F(1) + F(2) + F(3)} \int_0^\infty x_i \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - S_i}{\sigma_i}\right)^2\right)$$

S_i : 粒径区分*i*の石礫の厚さの代表値

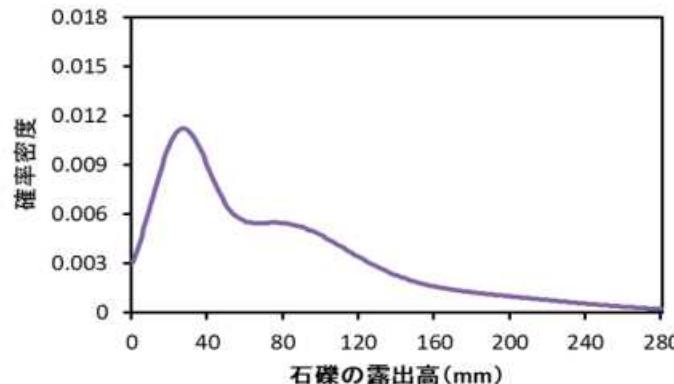
σ_i : 粒径区分*i*の標準偏差

3. 予測モデルの仕組み

粒径分布や被度の情報



露出高の確率密度関数



- 現在、自然共生研究センターのHPにモデルのβ版を公開中

https://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/research/m3_06.htm

The screenshot shows the homepage of the Natural Coexistence Research Center. The top navigation bar includes links for 'HOME', 'ABOUT THE CENTER', 'RESEARCH TOPICS', 'STAFF LIST', 'RESEARCH RESULTS', 'NEWSLETTER', 'ACTIVITY REPORTS', 'PUBLICATIONS', 'COLUMN', 'MULTI-CRITICAL RIVER SUPPORT TOOL', 'DOWNSTREAM ENVIRONMENT EVALUATION TOOL', and 'TECHNICAL SUPPORT'. The main content area features a photograph of researchers in a field and text about the evaluation tool for dam-downstream environments.

4. 予測モデルβ版の利用デモ

自然共生研究センターのHPにモデルのβ版を公開中

[https://www.pwri.go.jp/team/kyosei/jpn/research/m3_06.htm](https://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/research/m3_06.htm)

まずは、モデル（β版）とマニュアル
をダウンロード願います

露出高の簡易予測モデル（宮川モデル）

露出高を現場で測定する場合、潜水目視が必要となり長時間・高コストを要します。このため、河床材料の粒径に関する情報を用いて露出高を簡易に予測できるモデルを開発することで、露出高を現場で広域的に捉え、水生生物の生息場を定量把握できる指標として活用できることを目指しております。そして、現場の技術者のどなたでも本モデルを活用できるよう、β版を公開しています。本モデルは下記よりダウンロード可能です。ご利用の際は、マニュアルをご一読下さい。

■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）
■露出高の簡易予測モデルのマニュアル（pdf リンク）

*本モデルは精度の向上、適用範囲の拡大を目指して、随時バージョンアップ予定です。
(Last Update. 2020.3.30.)

露出高
砂等の河床表面
から石の頂部まで
の高さ
断面図

露出高は潜水
計測が必要で
高コスト
→予測技術の
開発と実用化

利用の際のお願い

1. 本モデルを用いた成果を論文等で公表する場合は、お手数ですが自然共生研究センターまでご一報いただくとともに、文章中に本モデルの利用がわかる記載（下記の参考文献を引用する、本文に「露出高の簡易予測モデルを利用」と記載、等）をお願いします。

参考文献：宮川幸雄、小野田幸生、末吉正尚、中村圭吾：ダム下流の環境評価を目的とした石礫の露出高の簡易予測手法の開発、ダム技術、No.396, pp.24-31, 2019.

ご質問、ご意見等は
土木研究所 自然共生研究センターの
宮川宛まで

Mail : kyousei4@pwri.go.jp
y-miyagawa@pwri.go.jp

5. 予測モデルの精度検証

一方で、簡易モデルには仮定も多いため、下記も重要

- ・簡易モデルの適用範囲およびその留意点
 - ・設定した仮定が一般的な土砂水理学等に照らして妥当かどうかの吟味
- より汎用性の高いモデルを目指す

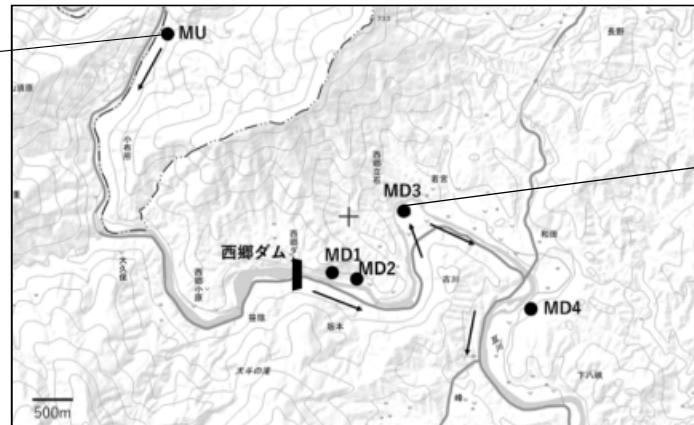
モデルの精度を現場の河床に適用して検証

- 複数の河川を対象に、石礫の露出高の簡易予測モデルの精度を現場の観測値と比較することで検証
- 精度の向上を目的として、モデルの改善案（以下、改善モデル）を提示し、改善前のモデル（以下、現行モデル）と比較

5. 予測モデルの精度検証

土砂供給を実施しており、地形、地質の異なる以下の3河川を対象に検証

- | | | | | |
|------|---|-------------|-----------|-------------------------------|
| ・小渋川 | : | 小渋ダム (長野県) | KU, KD1~3 | 計11地点
(Uはダム上流、Dはダム下流地点を表す) |
| ・那賀川 | : | 長安口ダム (徳島県) | ND1, 2 | |
| ・耳川 | : | 西郷ダム (宮崎県) | MU, MD1~4 | |



- ・石礫の露出高 + 中間径 (100個/地点)
- ・河床材料の粒径 (100個/地点)
→粒径加積曲線を作成
- ・河床の被度 (50×50cm, 10箇所)



写真と地図は耳川の事例

5. 予測モデルの精度検証

<i>i</i>	現行モデル	改善モデル		
		A	B	C
1	256~	256~	350~	350~
2	64~256	150~256	250~350	300~350
3	16~64	64~150	150~250	250~300
4	2~16	16~64	64~150	200~250
5	~2	2~16	16~64	150~200
6		~2	2~16	100~150
7			~2	64~100
8				16~64
9				2~16
10	微細なため露 出高の礫とし て対象外			~2
11				125~150
12				100~125
13				75~100
14				50~75
15				16~50
16				2~16
				~2

モデル値（曲線）

実線は中間径、点線は被度による算出結果

観測値（ヒストグラム）

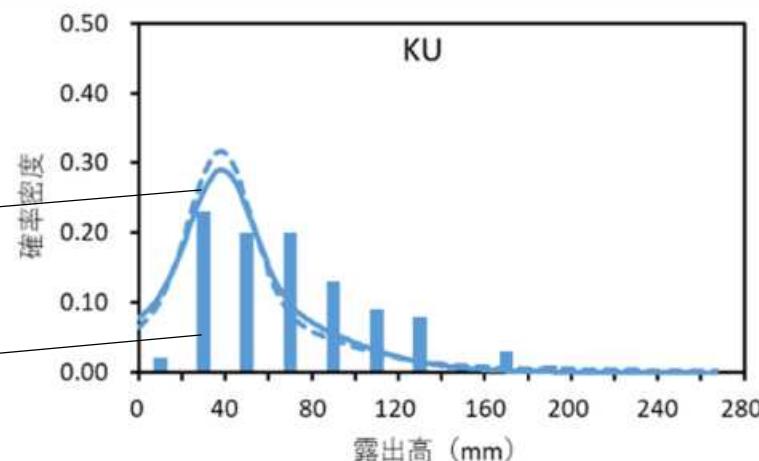
20 mm毎の階級

改善内容

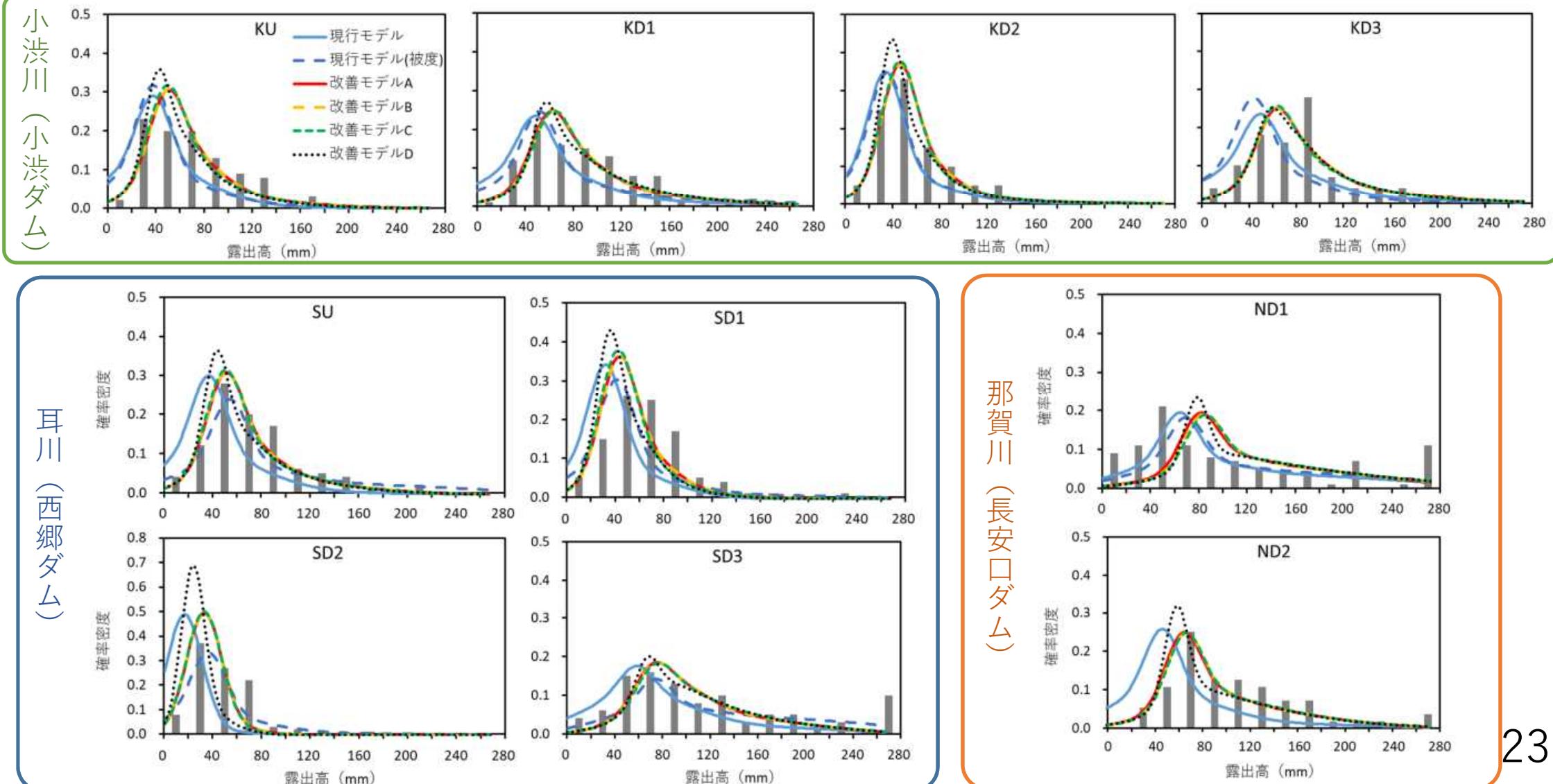
現行モデルから、区分*i*（特に2）を細分化し、細分化の度合い（A～D）で精度を検証

精度検証

観測値の分布形（ヒストグラム）と予測値に
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
($p>0.05$: 有意差なし, $p<0.05$: 有意差あり)



5. 予測モデルの精度検証



5. 予測モデルの精度検証

	KU	KD1	KD2	KD3	ND1	ND2	SU	SD1	SD2	SD3
現行モデル	4.5E-04	0.029	2.0E-05	0.005	0.004	0.002	9.0E-06	1.4E-09	1.8E-15	<u>0.270</u>
現行モデル（被度）	7.0E-05	<u>0.222</u>	1.6E-04	1.2E-06	6.5E-05	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>	5.0E-11	<u>0.068</u>	<u>0.777</u>	4.7E-04	5.7E-06	0.034
改善モデルB	<u>0.630</u>	<u>0.131</u>	<u>0.997</u>	<u>0.181</u>	3.1E-12	0.031	<u>0.725</u>	0.001	5.7E-06	0.026
改善モデルC	<u>0.395</u>	<u>0.102</u>	<u>0.988</u>	<u>0.286</u>	1.1E-12	0.025	<u>0.456</u>	2.4E-05	2.1E-06	0.014
改善モデルD	<u>0.061</u>	<u>0.184</u>	<u>0.129</u>	<u>0.186</u>	2.4E-12	<u>0.128</u>	<u>0.120</u>	4.9E-08	1.4E-17	<u>0.064</u>

- 現行モデルでは、予測値の分布形が観測値より左寄りの傾向
予測値と観測値に有意差がなかったのは、SD3(河床粒径分布)、KD1(被度)のみ
- 改善モデルA～Dでは、ほとんどで現行モデルよりp値が高く、有意差のない箇所が増加（特に小渋ダムでは、全ての地点で有意差なし）
- 同じ地点で比較すると、改善モデルDの分布形は他の改善モデルA～Cと異なる上、p値も低い場合が多くかった

5. 予測モデルの精度検証

考察

○改善モデルは現行モデルより概ね高い予測精度を有しており、大礫*の区分 (64 ~ 256 mm) の細分化がモデルの精度の向上に貢献したと考えられる

*ダム下流の粗粒化した河床でよく見られる粒径

○改善モデル間の精度を見ると、主に大礫区分を二分割した場合 (A) でもそれ以上の場合 (B、C) でもほとんど変わらず、細分化しすぎると (D) 逆に精度が低下

→区分数 (16個) に対するデータ不足 (100個) の可能性

○モデルが正規分布の重ね合わせから構成されており、分布形が複雑な形状の場合に精度が低下する課題については、引き続き解決策を検討予定

6. 今後の予定

- HP上で公開している β 版モデルを改善モデルにバージョンアップ
(今年度予定)
- 設定した仮定が一般的な土砂水理学等に照らして妥当かどうかを引き続き吟味
(例：一律で設定している扁平率 (=0.5) の見直し)
- 二峰性を有する分布形の場合の対処を検討
- モデルの紹介・普及活動

参考資料

【露出高の予測モデルの仕組み】

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.

【モデルの活用】

小野田幸生, 堀田大貴, 萱場祐一：土砂供給に伴う河床環境の評価に向けた露出高による石礫の埋没度の定量化, 河川技術論文集, Vol.24, pp.343-348, 2018.

宮川幸雄, 小野田幸生, 末吉正尚, 中村圭吾：ダム下流の環境評価を目的とした石礫の露出高の簡易予測手法の開発, ダム技術, No.396, pp.24-31, 2019.

【モデルの精度検証】

小野田幸生, 宮川幸雄, 中村圭吾, 萱場祐一：生息場評価の省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.

【モデルの改善】

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, 水工学論文集, Vol.65, 2020.

ご清聴ありがとうございました



謝辞：

中部地方整備局 天竜川ダム統合管理事務所、四国地方整備局 那賀川河川事務所および九州電力株式会社 耳川水力整備事務所に、現地の調査場所の情報等、多くのご協力をいただきました。

また、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したものです。