

石礫床河川の早瀬における流水抵抗と 河床表層状態の関係性

原田 守啓¹・吉川 敦希²・三輪 浩³

¹正会員 岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: m-harada@green.gifu-u.ac.jp (Corresponding Author)

²学生員 岐阜大学大学院自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³正会員 鳥取大学教授 工学部社会システム土木系学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: miwa-h@tottori-u.ac.jp

幅広い粒径の土砂からなる石礫床河川では、流量に応じて異なる粒径範囲の土砂移動が生じており、平水時であっても河床環境の変化が生じている。本研究は石礫床河川の早瀬において、平水時に生じている緩やかな土砂移動を河床変動解析モデルにより記述するための基礎的知見を得ることを目的に、移動床水理実験及び木曾川水系長良川扇状地砂州における現地調査を実施し、流水抵抗の評価方法及び河床面に作用する掃流力と河床表層粒度分布のバランスについて検討した。水理実験では、河床表層の粗粒化が進行し、混合粒径河床の粒径別限界掃流力に漸近する形で静的平衡状態に至る過程が観測された。実河川の早瀬においても平衡状態に近い状況が観測されたが、流量変動等の要因により平衡状態が崩れ、河床環境の更新や劣化が生じるであろうことも示唆された。

Key Words : *flow resistance, riffle, riverbed environment, gravel-bed rivers, flume experiment*

1. はじめに

幅広い粒径の土砂から構成される石礫床河川では、流量に応じて異なる粒径の範囲の土砂移動が生じており、一つの砂州でも平面的な地形に応じた粒度分布の違いや表層の粗粒化など、様々な形で時空間的な分級が生じることによって、多様な河床環境¹⁾が形成されている。砂州が発達するような大流量でなくとも、局所的に勾配が大きい早瀬では、平水時から中小出水時にかけても部分的な土砂移動が生じ、河床環境を変化させ、アユが産卵に利用する位置が変化することなどが報告されている²⁾。また、このような河床環境の質的な変化、河床の生息場にも“寿命”的な期限があることが示唆されている³⁾。

原田ら³⁾は、幅広い流況下において砂州河道に生じる諸現象を把握しやすくすることを目的に、流量を指標とした流量ステージ概念を提案し、中長期的な砂州の移動量を流量ステージごとの累積時間である程度表現可能であることを示したが、平瀬や淵と比べて局所的に掃流力が大きく作用する早瀬部では、小流量が連続する期間にも複雑な微地形の変化が生じていることを確認した。このような瀬の微地形・微環境の変化は、洪水時の流下能力等の治水上の議論にはほぼ影響しないためか土砂水理

学の検討対象とはされてこなかったものの、瀬の形態や河床環境の違いは生物の生息場としての質に大きく影響している⁴⁾。

平水時の早瀬は、土砂水理学的に見れば、混合粒径河床に部分的な土砂移動を生じる程度の掃流力が作用している状態にあると想定される。また、その流れの水深は土砂の粒径に対して相対的に小さく、水深に対して石礫粒子の凹凸が大きいために、相対水深の変化によって流水抵抗が大きく変化する粗度領域にある。この点に着目し、一般的な平面二次元河床変動解析に、表層の粒度分布と相対水深に対応した流水抵抗評価式を導入して流水抵抗及び掃流力を評価した結果、混合粒径河床における河床変動計算の分級現象の再現性が高まることが既に示されている⁵⁾。

本研究では、平水時の石礫床河川の早瀬における土砂輸送現象を河床変動解析モデル等で記述するにあたって、相対水深を考慮可能な流水抵抗評価式を混合粒径条件下での河床変動解析に適用することの有効性と必要性を確認することを目的に、混合粒径条件における移動床水路実験及び木曾川水系長良川扇状地砂州における現地調査を実施した。実験及び調査結果に対し、流水抵抗の評価方法及び流水抵抗の反作用として河床面に作用する掃流

力と河床表層粒度分布のバランスについて検討した。

2. 方法

(1) 早瀬部の現地調査

平水時の早瀬部における流水抵抗及び河床表層粒度分布と掃流力のバランス等を把握するため、木曾川水系長良川扇状地区間の早瀬において、平水流量前後の流量が数日以上連続している秋季に現地調査を実施した。調査地は図-1 に示す2箇所である。2019年秋季には、早瀬1の1箇所(1a)と、早瀬2のうち状態が異なる3箇所(2a, 2b, 2c)、2020年秋季には、早瀬1のうち状態が異なる2箇所(1b, 1c)、計6箇所分の調査を行った。2020年秋季に早瀬1で調査した2箇所(1b, 1c)は、2020年7月豪雨による出水により早瀬の形状が大きく変化³⁾したため、2019年秋季の早瀬1(1a)とは状況が異なる。現地調査では、ネットワーク型RTK-GPS(Trimble R8s GNSS使用)を用いた複数の点観測により早瀬の平均河床勾配を把握し、早瀬内複数地点における水深・6割水深流速の計測(SonTek FlowTracker使用)、早瀬内複数地点における河床表層材料サンプリングを行い、土砂サンプルについてはふるい分け試験により粒度分布を把握した。

(2) 早瀬部を模した移動床水路実験

河川の早瀬は流量変動や微地形変化等の様々な変動要因にさらされていることから、概ね平水時とみなせる流量が継続した際に早瀬で生じているであろう流水抵抗と土砂輸送、これに伴う河床表層粒度の変化等を把握するため、早瀬部を模した混合粒径河床の移動床水路実験を実施した。実験水路の概要を図-2 に示す。実験水路は長さ6.0m、幅0.3mの長方形断面水路である。実験水路には、平瀬-早瀬-淵を意識した縦断形を設定しており、早瀬区間の下流には堰上げ板により堰上がった淵状の湛水区間を設定した。早瀬区間の末端には早瀬区間端部の位置を固定するとともに、流下してきた土砂粒子を捕捉するちり取り状の土砂トラップを設置した。

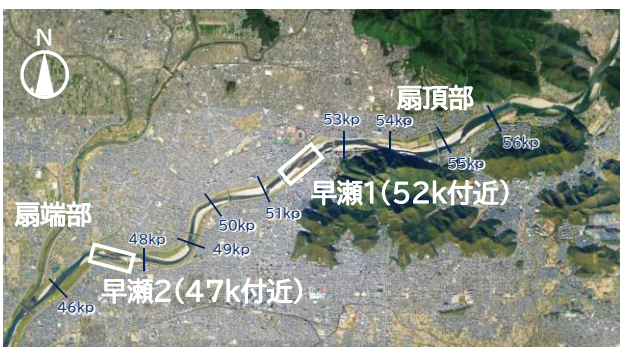


図-1 調査対象地(木曾川水系長良川)

実験水路の設定は3通りあり、水路本体の勾配である $I_b=1/200$ の平瀬区間の下流に、3通りの勾配の早瀬区間を設定した(表-1)。実験条件は、早瀬部の河床面に作用する掃流力に着目し、平均粒径程度の土砂粒径に対する無次元掃流力が移動限界をわずかに上回る程度になるよう河床材料粒度分布と通水流量を調整した。具体的には、河床材料は、河川管理者の許可を得た上で採取した長良川早瀬2の土砂のうち、最大粒径クラスの粒径集団をふるい分けにより除去して粒度を調整したものを使用した。実験に使用した土砂の粒度分布は実験結果とともに図-7 に示す。

三角堰を備えた計量タンクによりあらかじめ設定した流量が得られるようポンプ駆動周波数を調整した上で、河床材料を所定の縦断形に整正した後、一定流量・無給砂の条件下で合計8時間通水した。流水抵抗の算定を行うため、ポイントゲージにより水面形及び河床縦断形を通水開始から1時間後、2時間後、4時間後、8時間後の4回実施した。通水終了後に河床縦断方向0.5m間隔で各20cm区間の表層土砂(概ね最大粒径程度の厚み)をサンプリングし、通水終了時の表層粒度分布を把握した。

(3) 流水抵抗の検討

早瀬部の現地調査結果及び水路実験結果に対して、流水抵抗を算定するとともに、既存の流水抵抗則の適否について検討する。流水中で粗度要素として振舞う石礫の径に対する相対水深が小さい場では、流水抵抗が急激に増加する。Rikkenman & Recking⁷⁾は、石礫床河川における幅広い相対水深の流れにおいて推定誤差が少ない流水抵抗則を検討するため、膨大な計測データに対して既存の6種の抵抗則の適用性の検討を行い、古典的な抵抗則であるHey式⁸⁾が本来の適用領域外まで比較的誤差が小さいこと、幅広い相対水深の領域をカバーすることを目的にFerguson⁹⁾が提案した抵抗則が最も誤差が少ないことなどを示した。

本検討では、Manning-Strickler式¹⁾の原形式((1)式、以下M-S式)、Hey式((2)式)、Fergusonの提案式((3)式、

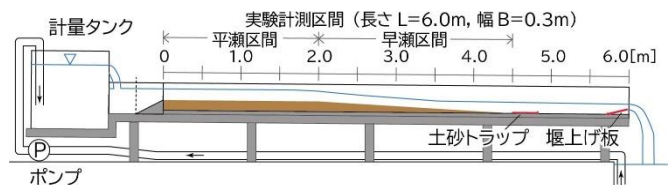


図-2 実験水路の概要(区間長は実験1,2に対応)

表-1 実験ケース設定

実験ケース	区間長		河床勾配		通水流量 Q[L/s]
	平瀬区間 L_1 [m]	早瀬区間 L_2 [m]	平瀬区間 I_{b1} [-]	早瀬区間 I_{b2} [-]	
Exp.1	2.0	2.5	0.005	0.033	9.4
Exp.2	2.0	2.5	0.005	0.020	9.4
Exp.3	1.0	4.0	0.005	0.009	11.9

以下、元論文に基づき VPE と表記) に、現地調査及び実験時に観測された河床表層材料の粒度分布及び水深から入力値を与え、流水抵抗の大小を示す U/U^* の予測性能を検討する。なお、M-S 式 (1)式) には相対水深が含まれているが、(1)式と Manning の等流公式を用いて粗度係数 n について展開すれば、水深 h は消え、粗度係数 n が d_{90} の 1/6 乗に比例した一定値として表現されていることと同義であることが確認される。

$$\frac{U}{U^*} = 8.3 \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{1/6} \quad (1)$$

$$\frac{U}{U^*} = 6.25 + 5.75 \log \left(\frac{h}{3.5d_{84}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{U}{U^*} = \frac{a_1 a_2 (h/d_{84})}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 (h/d_{84})^{5/3}}} \quad (3)$$

ここに、 U :水深平均流速[m/s]、 U^* :摩擦速度[m/s]、 h :水深[m]、 d_{90} :90%粒径[m]、 d_{84} :84%粒径[m]、である。(3)式の定数 a_1 、 a_2 はそれぞれ 6.5、2.5 とする⁷⁾。現地調査結果における U/U^* は、各計測地点における水深を h 、6割水深流速を U とし、早瀬の平均河床勾配 I_b に対する等流状態を仮定して摩擦速度 $U^* = (ghI_b)^{1/2}$ とし算出する。ここに、 g :重力加速度(=9.81)[m/s²]である。水路実験においては縦断方向 5cm 間隔で計測した水位と河床高から各地点の断面平均流速 U 及び全水頭を求め、0.5m ごとの平均エネルギー勾配 I_e を算出して、摩擦速度 $U^* = (ghI_e)^{1/2}$ を算出する。全水頭の算定において、速度水頭に関するエネルギー補正係数 α は 1 と仮定する。なお水路実験では、通水中に河床表層の粒度分布と流水抵抗のバランスが徐々に変化するために、本検討には十分な時間通水した通水終了時における水理量を用いて流水抵抗を評価する。

(4) 表層粒度分布に対する掃流力の検討

混合粒径河床における掃流砂現象は、連続した粒度分布をいくつかの粒径階に分割し、粒径階別無次元限界掃流力 τ^*_a と粒径階別無次元掃流力 τ^*_i によって表現されることが一般的である。現地調査結果及び水路実験結果における河床表層粒度分布に基づき修正 Egiazaroff 式¹⁰⁾ ((4)式) を適用して、粒径階別無次元限界掃流力 τ^*_a を求める。これに対して、河床面に作用している掃流力 (=流水抵抗の反作用) がどのようなバランスになっているかを検討する。粒径階別無次元掃流力は、流水抵抗の検討のために算出した摩擦速度 U^* の平均値を用いて、 $\tau^*_i = U^*/(sgd_i)$ とし算出する。ここに、 s :土粒子の水中比重 (=1.65 とおく)、 d_i :粒径階の代表粒径[m]、 d_m :平均粒径[m] である。

$$\frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} = \begin{cases} \left[\frac{\log_e 19}{\log_e \left(19 \frac{d_i}{d_m} \right)} \right]^2 \times \frac{d_i}{d_m} & \dots \frac{d_i}{d_m} \geq 0.4 \\ 0.85 & \dots \frac{d_i}{d_m} < 0.4 \end{cases} \quad (4)$$

3. 結果

(1) 現地調査結果の概要

木曾川水系長川扇状地区間において 2019 年及び 2020 年 9 月秋季に現地調査を実施した計 6 箇所分の早瀬における流速・水深及び河床材料調査結果を図-3、図-4 に示す。

図-3 に示すとおり、流速・水深はそれぞれの早瀬においてばらつきがある程度のもつらみをもってプロットされる。一つの早瀬の中でも上流側 (瀬頭) から下流側 (瀬尻) にかけて流れの状態が異なる不等流状の流れを呈しており、淵の水面に連なる瀬尻では水深が深く、流れが減速しているため、本研究における調査では瀬頭・瀬尻付近は除外し、比較的等流に近い箇所を対象としている。早瀬における河床表層の粒度分布は、図-4 に

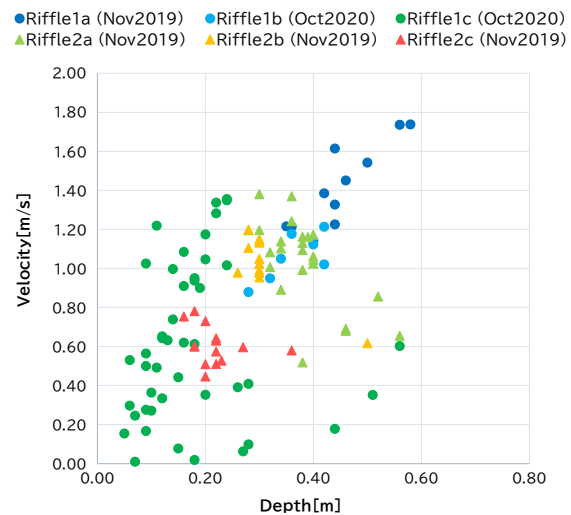


図-3 水深-流速の関係

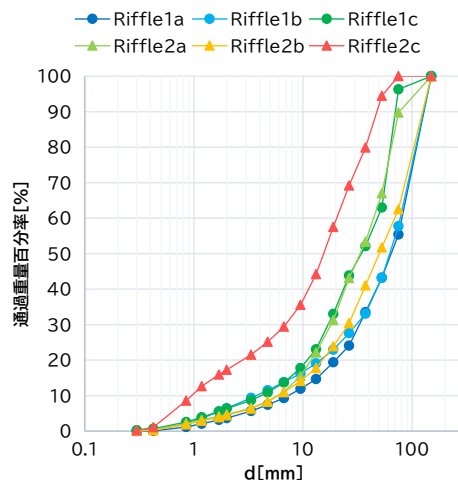


図-4 河床表層の粒度分布

示すとおりTalbot型に近い分布を示し、河床表層の粗粒化が進んで比較的安定した状況にあることを示している。

(2) 水路実験の結果の概要

実験3ケースそれぞれ、通水直後から早瀬区間において間欠的な土砂粒子の輸送が生じていたが、通水終了時には土砂の移動はほぼ全くみられない状況になっていた。8時間の通水による河床変動量はわずかであり、平瀬区間、早瀬区間の縦断形に明瞭な変化は見られなかった。しかしながら、表層粒度分布には明瞭な粗粒化の傾向がみられた。以後、現地調査結果と合わせて、流水抵抗及び河床表層粒度分布と掃流力のバランスについての分析結果の詳細を示す。

(3) 早瀬の流水抵抗

早瀬6箇所分、実験3ケース（通水終了直前）の合計9セットの観測値に基づく U/U^* を、図-5の箱ひげ図に示す。また、流水抵抗則の予測性能を確認するため、M-S式、Hey式、VPEの3式による評価値を合わせて表示している。表-2には、図-5の元となる水理量の一覧を示す。

U/U^* はその値が小さいほどその場の流水抵抗が大きいことを示しているが、図-5に示すとおり、現地及び実験において観測された U/U^* の値は小さく、しかも幅広い。加えて図-6には、M-S式、Hey式、VPEの3式における U/U^* と相対水深の関係と、図-5に示した9セットのデ

ータの位置をプロットしている。既存の流水抵抗則の中では、M-S式は U/U^* を過大評価（流水抵抗を過小評価）していることは明らかである。Hey式とVPEは同程度の値をとり、ともに観測値の傾向を良く表すことができている。

(4) 限界掃流力と河床面に作用する掃流力のバランス

河床表層粒度分布に基づき、修正Egiazaroff式 ((4)式)により求めた粒径別無次元限界掃流力 τ_a^* と、これに対して実際に作用している掃流力のバランスについて検討する。まず、境界条件が厳密にコントロールされている水路実験について検討する。図-7に通水開始前と通水終了後の早瀬区間における表層粒度分布の平均値を示す。実験開始時と比べると、各ケースで粗粒化が生じている。早瀬区間の勾配は、実験1が最も急で、実験3が最も緩やかであり、勾配が急であるほど粗粒化が進む傾向にある。

図-8は、粒径別無次元限界掃流力 τ_a^* と無次元掃流力 τ_b^* をそれぞれ示している。通水開始直後には、粒径の小さい領域で $\tau_b^* > \tau_a^*$ となっており、部分移動状態にあるのが、長時間の通水の過程で、ほぼ全ての粒径の領域で $\tau_b^* \approx \tau_a^*$ となっており、 τ_a^* と τ_b^* の曲線がほぼ一致する形で、土砂移動が生じない静的平衡状態に至っている。これは、芦田・道上¹⁰がArmour coatの形成過程をいくつかのタイプに区分した中で、parallel degradation（河床は初期河床にほぼ平行に若干低下することとどまるが、河床砂

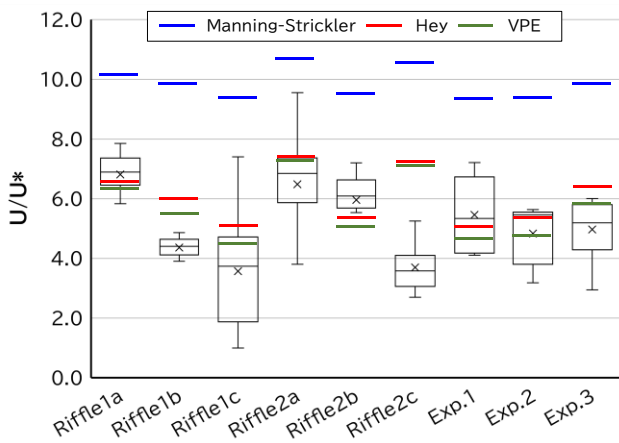


図-5 調査地及び水路実験早瀬部における流水抵抗と評価式による計算値（×：観測値の平均値、箱ひげ図は最大値、第三四分位、中央値、第一四分位、最小値を示す）

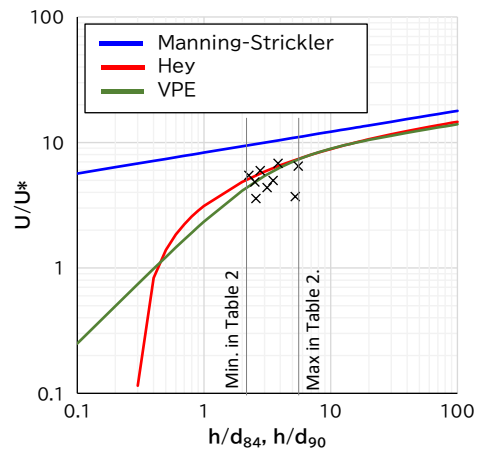


図-6 流水抵抗評価式ごとの相対水深に対する振る舞い（×：観測値の平均値）

表-2 現地調査結果及び水路実験結果に基づく流水抵抗の観測値、各種流水抵抗則による評価値

調査地(調査時期)	データ数	水深 (平均) h[m]	流速 (平均) V[m/s]	河床勾配 $I_b[-]$	90%粒径 $d_{90}[m]$	84%粒径 $d_{84}[m]$	相対水深 (平均) $h/d_{84}[-]$	摩擦速度 (平均) $U_*[m/s]$	移動限界粒径 (平均) $d_c[m]$	平均流速/摩擦速度			
										M-S式 $U/U_*[-]$	Hey $U/U_*[-]$	VPE $U/U_*[-]$	
Riffle1a (Nov2019)	11	0.45	1.42	0.010	0.129	0.117	3.84	0.21	0.054	6.8	10.2	6.5	6.2
Riffle1b (Oct2020)	7	0.36	1.06	0.017	0.127	0.115	3.15	0.24	0.073	4.4	9.9	6.0	5.5
Riffle1c (Oct2020)	39	0.17	0.70	0.025	0.070	0.066	2.57	0.20	0.052	3.6	9.4	5.1	4.5
Riffle2a (Nov2019)	24	0.38	1.04	0.007	0.076	0.069	5.55	0.16	0.033	6.5	10.8	7.4	7.3
Riffle2b (Nov2019)	12	0.31	1.03	0.010	0.125	0.112	2.78	0.17	0.038	6.0	9.6	5.6	5.1
Riffle2c (Nov2019)	14	0.22	0.61	0.013	0.048	0.041	5.25	0.17	0.035	3.7	10.7	7.2	7.1
Exp.1	6	0.06	0.57	0.026	0.030	0.026	2.26	0.11	0.017	5.5	9.3	5.1	4.5
Exp.2	5	0.07	0.52	0.019	0.030	0.026	2.52	0.11	0.015	4.8	9.4	5.4	4.8
Exp.3	6	0.07	0.54	0.019	0.025	0.021	3.51	0.11	0.017	5.0	9.9	6.3	5.9

礫の粒度分布が大きく変化する) によって形成された **armour coat** そのものであり、実験ケースによって異なる早瀬区間の勾配に対応した形で、修正Egiazaroff式により表現される粒径別無次元限界掃流力とバランスする粒度分布に向かって粗粒化が進行したものと解釈できる。一方、**図-9**に示す現地調査結果は、水理実験結果と類似の傾向を示すものの、 τ_{ci}^* と τ_i^* の大小関係は揃ってはいなかった。一つの大きな早瀬の中でも状態は異なり、早瀬2の異なる3地点 (**図-9**右段) の間でも、土砂移動が停止しているであろう瀬、活発に土砂移動が生じているであろう瀬があることが示唆された。ただし、水理実験と現地調査における摩擦速度の算出に用いた勾配の評価方法の違いが、結果に影響を与えている可能性がある。

4. 考察

(1) 石礫床河川における流水抵抗の評価方法

河床変動解析の根幹をなす流量式・流速式の計算にあたり、最も重要な変数は、河床面に作用する掃流力と土砂粒子の限界掃流力の評価である。河床面に作用する掃流力と

流水抵抗とは、基本的には作用・反作用の関係にあることから、流水抵抗を適切に評価することは流砂現象を定量的に検討する上での前提条件となる。

石礫床河川の平水時の早瀬の流れは、相対水深が小さいために、流水抵抗が大きく、また相対水深の変化に対して流水抵抗がダイナミックに変化する場である。したがって、石礫床河川の幅広い流況下の流れを解析するには、幅広い相対水深に対応した流水抵抗則を用いることが好ましい。M-S式 ((1)式) は既往の検討⁷⁾と同様、相対水深が小さい領域で流水抵抗が過小評価される傾向を示した。M-S式はManningの粗度係数が一定値とにおいて流水抵抗を評価することと同義であり、粗度係数を一定値とおいた水理解析は流水抵抗の過小評価を生じうる⁹⁾。古典的なHey式は**図-6**に示すとおり、相対水深が非常に小さい領域までは表現しえない。あらかじめ幅広い相対水深をカバーするよう提案されたVPE⁷⁾は、これらの手法に対して比較的有望な手法であると考えられる。

(2) 石礫床河川の早瀬における土砂輸送現象

水路実験では、長時間の通水の過程で河床表層の粗粒

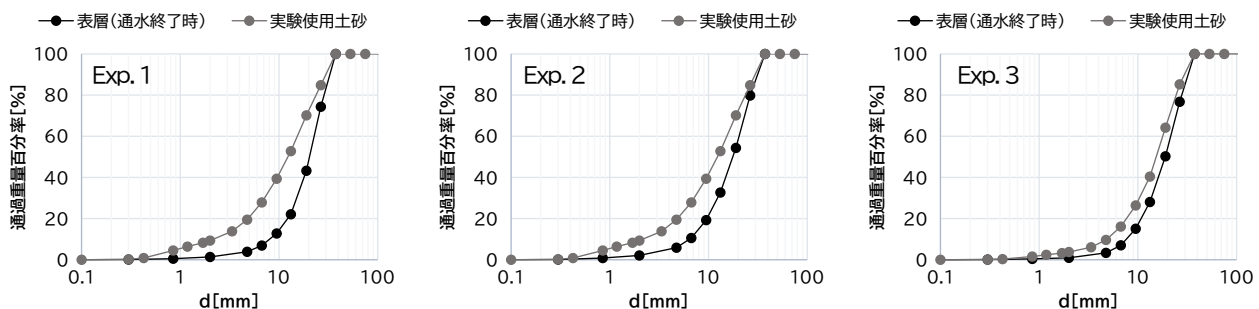


図-7 実験水路 (早瀬区間) 表層粒度分布

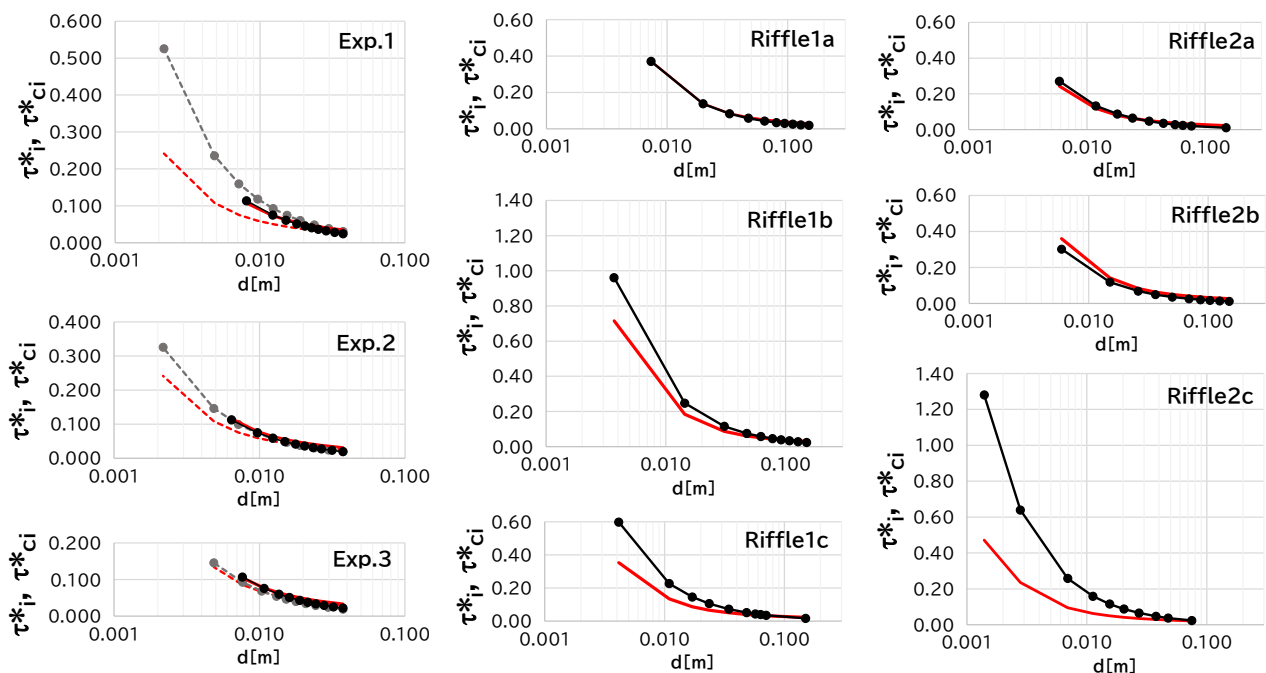


図-8 実験水路における粒径別の無次元限界掃流力 τ_{ci}^* と無次元掃流力 τ_i^*

図-9 早瀬の河床表層における粒径別の無次元限界掃流力 τ_{ci}^* と無次元掃流力 τ_i^*

化が進行しながら、修正Egiazaroff式により示される粒径別限界掃流力に漸近する形で静的平衡状態に至る過程が観測された(図-7, 8)。この過程は、芦田・道上¹⁰⁾によればparallel degradation領域におけるarmour coatの形成過程であり、平瀬区間からの土砂供給が欠乏した早瀬区間に一定流量が流下し続ければ、実際の河川の早瀬でも同様の過程を経てarmour coatが形成されるものと考えられる。

しかしながら、図-9に示すとおり、実河川の平水時の早瀬も静的平衡状態に近い状況にはあるものの、流量の変動、早瀬の平面的な地形変化による隣接した早瀬間の流量配分の変化、側岸侵食による土砂の供給など、さまざまな要因により平衡状態は容易に崩れ、自然状態では完全な静的平衡に落ち着くことは稀であることも示唆されている。とくに、流量の増加や早瀬流路の側岸侵食による土砂供給などは、一旦粗粒化し河床表層に形成されたarmour coatを攪乱し、河床環境を更新する方向に作用する。逆に、流量の減少は細粒土砂の堆積など、河床環境を劣化させる要因になると考えられる。

5. おわりに

本研究は石礫床河川の早瀬において、平水時に生じている緩やかな土砂移動を河床変動解析モデル等により記述するための知見を得ることを目的に、混合粒径条件における移動床水路実験及び木曾川水系長良川扇状地砂州における現地調査を実施し、流水抵抗と河床表層粒度分布の釣り合いの状態について検討した。

その結果、平水時の早瀬における流れは、河床材料粒径に対する相対水深が小さいために、流水抵抗を評価するにあたっては、幅広い相対水深を対象とする流水抵抗評価式を用いることが必要であることが確認された。また、長時間の通水の過程で河床表層の粗粒化が進行しながら、修正Egiazaroff式により示される混合粒径河床における粒径別限界掃流力に漸近する形で静的平衡状態に至

る過程が観測された。実河川の早瀬においては流量変動等の要因により静的平衡が崩れ、河床環境の更新や劣化が生じるであろうことも示唆された。これらの現象を河床変動解析モデルで表現するためには、幅広い相対水深に対応した流水抵抗則を導入し、河床面に作用する掃流力を適切に見積もった上で、混合粒径条件下の掃流砂量式に適用する必要があるといえる。

謝辞：本研究はJSPS科研費 JP19K04612 (代表：原田守啓)の助成により実施された。

参考文献

- 1) 原田守啓, 萱場祐一: 河川中上流域の河床環境に関する研究動向と課題, 応用生態工学, 18(1), pp.3-18, 2015.
- 2) 兵藤誠, 竹門康弘, 角哲也: 天竜川におけるアユ産卵床の河床地形特性と変動履歴の関係, 河川技術論文集, 20, pp.67-72, 2014.
- 3) 原田守啓, 平野和希: 幅広い流況下における砂州動態を記述するための流量指標, 河川技術論文集, 第 27 巻, pp.439-444, 2021.
- 4) Takeyoshi Chibana, Tetsuro Tsujimoto, Motofumi Miyake, Gaku Sasaki, Hidehito Iwano: Hierarchical Analysis of Physical Environment in Riffles, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 9,1, pp.1-6, 2005.
- 5) 小林草平, 竹門康弘: 木津川における底生動物生息場としての瀬の形態の歴史的変遷, 京都大学防災研究所年報, 56B, pp.681-689, 2013.
- 6) 原田守啓, 塩澤翔平, 荒川貴都: 流水抵抗と空隙率の評価方法が石礫床河川の平面 2 次元河床変動計算に与える影響, 土木学会水工学論文集 B1 (水工学), 75, 2, pp.I_997-I_1002, 2019.
- 7) Rickenmann D. and Recking A.: Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resource Research*, 47, W07538, 2011.
- 8) Hey R. D.: Flow resistance in gravel-bed rivers. *Journal of the Hydraulic Division*, 91(HY4), pp.365-379, 1979.
- 9) Ferguson, R.: Flow resistance equations for gravel and boulder bed streams, *Water Resour. Res.*, 43, W05427, pp.1-12, 2007.
- 10) 芦田和男, 道上正規: 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 14B, pp.259-273, 1971.

(Received June 30, 2021)

(Accepted September 3, 2021)

THE FLOW RESISTANCE AND RIVER-BED CONDITION IN THE SHALLOW RIFFLE ON GRAVEL-BED RIVERS

Morihiro HARADA, Atsuki YOSHIKAWA and Hiroshi MIWA

In the riffle of a gravel-bed river with a wide grain size, sediment transport corresponding to the magnitude of the flow rate occurs. The purpose of this study is to obtain basic knowledge for sediment transport modeling in riffle under the ordinary flow rate. The six field surveys were conducted on the Nagara River, and three cases of experiments were conducted in the experimental flumes. For the observed hydraulic values, the magnitude of flow resistance, the balance between the movement limit of surface sediment mixture and the tractive force were examined. As a result, Hey's and VPE with the relative water depth as a parameter were able to evaluate the observed values of U/U^* relatively well. In the process of continuous water flow, partial sediment movement occurred and the process of coarsening the surface layer of the riverbed was observed in the flume. However, it was suggested that the balance of the actual river riffle would be unstable due to various fluctuation factors.