# 山地急流河川における川幅と河岸粗度が 河床安定に及ぼす影響

# THE INFLUENCE OF CHANNEL WIDTH AND BANK ROUGHNESS ON RIVERBED STABILITY IN MOUNTAIN STREAMS

# 原田守啓1・塩澤翔平2・國島佑紀<sup>3</sup> Morihiro HARADA, Shouhei SHIOZAWA and Yuuki KUNISHIMA

<sup>1</sup>正会員 工博 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)
 <sup>2</sup>学生員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
 <sup>3</sup>岐阜県県土整備部古川土木事務所河川砂防課(〒509-4263 岐阜県飛騨市古川町上野617-1)

We investigate the influence of the channel width and the bank roughness on the riverbed stability of mountain streams by the flume experiment. The experiment results show the following. The reduction of the channel width raises the bed sheer stress for the same flow rate and increases the sediment runoff amount. The amount of sediment runoff is not as large as expected by the bed load transport equation for mixed-size sediment. It is considered that the hiding function is exhibited and the runoff of sediment is suppressed by the stabilized large diameter stones and the progress of coarsening. Riverbank roughness has a clear effect on the control of sediment runoff. By the video analysis, it became clear that the stabilization of the rock near the riverbank makes it difficult to move many stones and stabilizes the riverbed. It was shown that the existence of the riverbank roughness increases the rate at which stones near the riverbank act as keystone. However, the effect seems to be limited if the channel width is narrow.

Key Words : riverbed stability, channel width, bank roughness, cross-section shape, step-pool

# 1. はじめに

自然度が高い山地渓流では、巨石が流路を横断して噛 み合った礫段(step)が河道を安定させる役割を有すると ともに, step-pool地形が多様な生息環境を形成している. Montogomery & Buffingtonによる山地河川の地形区分<sup>1)</sup>で は、複数河川の現地調査に基づき、異なる4タイプの河 川地形を呈する河床勾配の範囲が示されている. steppoolは河床勾配0.05あたりを中心とした勾配の範囲で確 認されており、より急勾配では小滝が連なるcascade、そ れより緩勾配では平坦河床plane-bedを呈する河川が多い ことが示されている. Step-poolの成因については、粗粒 化を伴った反砂堆が固定化したものであるとする芦田ら 2)の説、反砂堆波長と射流水面上に現れる斜め交錯波が 一致して生じた3次元河床波であるとする長谷川・上林 の説3など、土砂水理学的な観点によるものと、通常の 出水では移動しない巨石や岩盤突出部がkeystoneとして 機能して移動する石が詰まるなどしてstepが形成される とするZimmermanらの説<sup>4)</sup>などがある. 厳島ら<sup>5</sup>は、これ

らをそれぞれ反砂堆理論とkeystone理論として整理し, step-poolに関する既往の知見を幅広い分野から総説している.

このように、step-poolの形態や機能等についての知見 は蓄積されてきているものの、我が国の山地河川では、 河道改修や災害復旧によって平滑な護岸整備がなされた ことを契機に、改修後の出水によってstepが流失し急激 な河床低下を生じて、再度災害を被る河川や渓流も未だ 少なくない.河川における災害復旧の技術基準にあたる 「美しい山河を守る災害復旧基本方針」改訂版では、護 岸を平滑にしないことやstepの構成材料となりkeystoneに なりうる巨石を存置すること等の留意点が述べられてい るが、例えば改良復旧等の場面において、河道の断面設 定や護岸粗度の設計方法に関する知見はいまだ十分とは いえない.そこで本研究は、山地急流河川における川幅 設定と河岸粗度の有無が、河床の安定性、すなわち洪水 時の土砂移動に及ぼす影響について、移動床水理実験を

通じて検討した.

## (1) 実験概要

本研究では、山地急流の中小河川が河川改修を受ける際に、川幅、護岸の粗度の設定等が改修後の河床の安定にもたらす影響を検討することを目的とした水理実験を実施した.本実験の実施にあたり、岐阜県下の山地急流河川の現地調査を実施し、良好なstep-poolがみられる区間と、護岸整備後の出水でstep-poolが流失した区間が連続している木曽川水系長良川支川切立川(写真-1)を想定した実験を行うこととした.

実験条件及び手順は,step-poolの形成に河床材料の粒 度分布が与える影響を検討した竜澤らのの実験を参考と した.竜澤らのは,水路長11m,幅40cmの矩形断面水路 を勾配0.05に設定し,最大粒径d<sub>max</sub>=50mmに固定して粒 度分布形を変化させた実験を行っている.本研究に用い た実験水路は水路長4m,幅30cmの矩形断面水路であり, 水路勾配は切立川の河床勾配である0.1とする.前出の 自然河川の河川地形の調査結果<sup>1)</sup>に照らせば,勾配0.1は step-poolが形成されうる勾配としては限度に近い急勾配 である.

実験に用いる混合土砂について述べる. 竜澤ら<sup>9</sup>は, 木曽川水系揖斐川支川白谷で実施した渓岸の堆積土砂の 粒度分布がTalbot型分布をなしていることに着目し, Talbot指数n=1/2~3/4の範囲でstep-poolが形成されること を実験的に示した. 一方,切立川のstepを構成する礫径

(3箇所,56個)とpoolに堆積している土砂(3箇所)の 粒度分布を図-1に示す.Step構成礫とpoolに堆積してい る土砂の粒径は最大で3オーダーもの開きがみられ,明 瞭な分級が生じている.一般に,土砂生産域における粒 度分布は粒径の幅が広いTalbot型をなし,step-poolが形 成される過程で粗粒化・分級が進むものと考えられる.

そこで本実験における混合土砂は、Talbot型分布(Talbot 指数n=1/2)となるよう調整した混合土砂(6種類を混合、 最大径40mm程度)を用いる.混合土砂をふるい分けた 粒度分布は図-2に示すとおりであり、実際の渓流と比べ れば粒径の幅は限定されているものの、目標とした Talbot型分布を概ね再現する形となっている.

水路幅,断面形の影響を検討するため,水路幅及び断 面形状は発泡ポリスチレン材を壁面に沿って設置するこ とにより調整する.また,河岸粗度の効果を検討するた め,粗度板を制作し,その有無による比較を行う.粗度 板は,平均粒径13mm程度の石を油粘土に密に埋め混ん だものにコーティングを施したものとする.粗度板に埋 め込まれた石の径は,水路に敷き詰める混合土砂のうち 概ね中央粒径に相当する.

## (2) 実験条件及び手順

実験条件は、矩形断面では水路幅3段階(25,20,



写真-1 良好なstep-poolがみられる区間と護岸整備後に stepが消失した区間(木曽川水系切立川)



15cm),実河川に多い両岸5分勾配の台形断面について 水路幅2段階(25cm,20cm)を設定する.水路幅は30cm あるものの,粗度板の有無によって水路幅が変化しない よう,粗度板も含めて底面幅が確保されるように調整す るため,最大で25cm幅の設定としている.また,台形 断面のケースでは土砂を敷き詰めた初期状態の底面幅を 所定の幅に揃えるため,幅15cmの設定では土砂の堆積 厚が薄く,水路床が簡単に露出してしまうため実施しな い.これらの5種の断面設定に対し,河岸粗度2段階(粗 度板なし,あり)の計10ケースの実験を行う.実験ケー ス一覧を結果の一部とともに表-1に示す.ケース名は, ローマ字2文字と数字2桁で表し,1文字目は断面形状 (R:矩形断面(Rectangular),T:台形断面(Trapezoidal)), 2文字目は粗度の有無(R:Rough,S:Smooth),数字は水 路幅をcm単位で示す.

実験開始時点で,混合土砂を河床に10cm以上の厚さ で敷き詰め,概ね平坦河床の状態から実験を開始する.





写真-2 混合土砂及び粗度板設置状況

上流からの土砂の供給が少ない中小河川を想定し,給砂 は行わない無給砂での実験とする.流量2段階

(Q<sub>1</sub>=3.4L/s, Q<sub>2</sub>=6.4L/s)の流量にて通水し,通水前後 に各種計測を行う.通水は流量2段階についてそれぞれ 通水2分×3回の計12分行う.流量2段階の通水は連続し て行うため,流量Q<sub>2</sub>の通水開始時には,流量Q<sub>1</sub>の通水3 回分の影響を受けた状態となっている.これは,小規模 出水を複数回受けたのちに,最大粒径まで移動しうるよ うな規模の出水を受ける状況を模擬している.

各通水前後の河床縦断形の変化,流出土砂量と流出土 砂の粒度分布,通水中のstepの形成状況等について動画 記録や計測を行う.河床縦断形は水路中心線に沿ってポ イントゲージにより計測し,水位はビデオ動画により読 み取る.流出土砂量は,水路下端に設置したタンクに堆 積した土砂を乾燥させ,ふるい分けした後,各ふるいに 残留した土砂の重量を記録する.動画記録は,一般的な ビデオカメラを2台,水路中央区間を側面からと下流側 から撮影できる位置に設置し,毎秒30コマで録画を行う.

#### (3) 実験結果の解析

実験結果について,以下の検討を行う.

①実験水理量の算出:動画により判読した水位から平均水深hを求め,断面平均流速U,摩擦速度U\*,掃流力τ等の水理量を求める.

②流出土砂量及び粒度分布の分析:各通水における流 出土砂量及び粒度分布を整理する.6段階の粒径階(ふ るい分け試験におけるふるい残留土砂の代表粒径)ごと の流出土砂量を,通水時間及び水路底面幅で除すること により,単位幅単位時間あたりの流砂量を得る.

また,①によって求めた水理量を用いて,掃流砂量を 算出する.限界掃流力は,岩垣式によって求めた平均粒 径の限界掃流力をもとに各粒径階についてEgiazaroff式 (式(1))によって粒径別限界掃流力を求め,M.P.M式 (式(2))によって各粒径階ごとの流砂量を算出する.

$$\frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} = \left[\frac{\log_e(19)}{\log_e(19d_i/d_m)}\right]^2 \tag{1}$$

$$q_{Bi} = F_i \times 8.0 \times \sqrt{sgd_i^3 \times (\tau_i^* - \tau_{ci}^*)^{3/2}}$$
(2)

ここに、τ<sub>ci</sub>\*:粒径別無次元限界掃流力,*d<sub>i</sub>*:任意の 粒径,*d<sub>m</sub>*:平均粒径,*q<sub>Bi</sub>*:単位幅当たりの掃流砂量,*s*: 土砂の水中比重,*F<sub>i</sub>*:土砂粒子が全体に対して占める割 合である.なお、流砂量式に与える無次元掃流力τ<sub>i</sub>\*は、 水路勾配I<sub>b</sub>とビデオ解析により計測した平均水深hより算 出する.以上の手順で求めた流砂量と実測の流出土砂量 を比較し、傾向を検討する.また、粗度の有無が土砂の 流出に与える影響を検討する.

③大径礫の移動状況に関する分析:実際の河川においてはstepの構成材料となる大径の石の移動状況に着目したビデオ解析を行う.実験に用いた混合土砂のうち大粒径の石(26.4~37.4mm,84%粒径から最大粒径に相当)は、 黒色の石を用いており、その他の石と視覚的に区別可能である.手順は以下のとおりである.[1]水路中央付近、流下方向に25cmの領域に着目する.[2]各通水前後の大粒径(26.4mm~37.4mm)の開始時の個数、通水前後で移動しなかった個数をカウントする.

## 3. 結果

#### (1) 各ケースの水理量

各ケースの通水開始直後の平均水深,平均流速,摩擦 速度,逆算粗度係数等と,6段階の粒径別無次元掃流力 を表-1に示す.通水中に土砂流出が進み,河床形態及び 流れの状態が時々刻々と変化するため,各ケース,流量 2段階の通水開始直後の水理量を示している.また,こ れらの水理量について,無次元限界掃流力との関係を図 -3に示す.粒径別の限界掃流力は平均粒径dm=9.3mmと してEgiazaroff式によって求めたものである.流量Q1で は最大径クラスの石が移動限界状態,流量Q2では全ての 粒径の土砂に移動が生じると判定される状態である.

#### (2) 通水時の河床変動の概況

土砂の流出に伴う河床変動は,水路下流端の河床高が 固定されていることと無給砂条件であるため,上流側か

Case	流量	平均水深	平均流速	摩擦速度	<i>U/U</i> *	逆算	掃流力 -	無次元掃流力 <i>t</i> *					
	Q (L/s)	<i>n</i> (m)	(m/s)	(m/s)		租度除数 n	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> )	$\tau^*$	$\tau^*{}_2$	$\tau^*{}_3$	$\tau *_4$	$\tau *_5$	$\tau *_6$
RS25	3.4 6.4	0.014	0.97	0.12	8.3	0.018	13.7	0.306	0.111	0.063	0.055	0.035	0.023
RS20	3.4 6.4	0.020	0.61	0.15	4.1	0.029	21.9 28.1	0.489	0.176	0.101	0.088	0.056	0.036
RS15	3.4 6.4	0.028 0.034	0.48 0.76	0.17 0.18	2.9 4.2	0.030 0.020	27.8 33.0	0.620	0.224 0.266	0.128	0.112 0.133	0.071 0.084	0.046 0.055
RR25	3.4 6.4	0.022 0.028	0.63 0.90	0.15 0.17	4.3 5.4	0.035 0.028	21.3 27.8	$0.474 \\ 0.620$	0.171 0.224	0.098 0.128	0.085 0.112	0.054 0.071	$0.035 \\ 0.046$
RR20	3.4 6.4	0.022 0.030	0.61 0.84	0.15 0.17	4.1 4.9	0.029 0.024	21.9 29.8	0.489 0.664	0.176 0.240	0.101 0.137	0.088 0.120	0.056 0.076	0.036 0.049
RR15	3.4 6.4	0.027 0.034	0.50 0.75	0.16 0.18	3.0 4.1	0.028 0.021	26.8 33.4	0.598 0.744	0.216 0.269	0.123 0.154	0.108 0.134	0.068 0.085	0.044 0.055
TS25	3.4 6.4	0.024 0.033	0.56 0.77	0.16 0.18	3.6 4.2	0.042 0.036	23.9 32.7	0.533 0.730	0.192 0.263	0.110 0.151	0.096 0.131	0.061 0.084	0.039 0.054
TS20	3.4 6.4	0.027 0.036	0.50 0.72	0.16 0.19	3.1 3.8	0.039 0.031	26.5 35.0	0.591 0.781	0.213 0.282	0.122 0.161	0.106 0.141	0.068 0.089	0.044 0.058
TR25	3.4 6.4	0.024 0.036	0.58 0.72	0.15 0.19	3.8 3.8	$\begin{array}{c} 0.040\\ 0.040\end{array}$	23.2 35.0	0.518 0.781	0.187 0.282	0.107 0.161	0.093 0.141	0.059 0.089	$\begin{array}{c} 0.038\\ 0.058\end{array}$
TR20	3.4 6.4	0.026 0.036	0.53 0.72	0.16 0.19	3.3 3.8	0.036 0.031	25.2 35.0	0.562 0.781	0.203 0.282	0.116 0.161	0.101 0.141	0.064 0.089	0.042 0.058

表-1 実験ケース及び通水開始直後の水理量一覧

無次元掃流力算出時の代表粒径は以下のとおり. d」=2.67mm, d2=8.05mm, d3=12.9mm, d4= 16.1mm, d5=22.7mm, d6=32.0mm







25

図-3 無次元限界掃流力と実験水理量の関係

ら河床低下が進行し、河床勾配が次第に緩くなっていく 形で進行した.しかしながら、台形断面のケースでは、 河床低下が水路の途中部分から急激に進行するケースも 見られた.

全てのケースで通水開始直後から土砂の移動がみられ たが、大径の石の挙動によって土砂の流出の仕方に大き な違いがみられた. 突出した大径の石が転動し, 他の石 に乗り上げるような形で停止することによって反砂堆状 の水面形が維持されるケース,いわゆるstep-poolが形成 されるケースは少なかった. Step状の凸部が大径の石に よって形成されても、短時間(数秒)で破壊され、中小 の粒径を巻き込みながら土砂流出が進むケースも多く見 られた. これらの主観的観察によるstepの形成・維持状 況と流出土砂量の関係性について次に示す.

#### (3) 流出土砂量及び粒度分布

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

\$-32

**P**570

長方形

■ 26.5~37.4 ■ 13.2~19.0

■ 3.35~6.7

■ 19.0~26.5 [mm] ■ 6.7~13.2

■ 2.0~3.35

\*\*

\*\*

"PBD

1515 152 15D

粗度なし

台形

2820

長方形

PR15

粗度有り

RDS RDD

台形

流量Q1, Q2それぞれ通水3回(計6分)の流出土砂量及 び粒度分布を図-4に示す.また、(2)で述べた固定された step状の地形の形成・維持の状況をビデオ動画から主観 的に判定した結果も合わせて示す(図-4中の\*,\*\*).

まず、水路幅の違いに着目すれば、同一流量に対して 水路幅を狭めた場合、水深が増加するため河床面に作用 する掃流力が増加し, それに伴って流出土砂量も増加す ることが予想され、実験結果における流出土砂量の大小 関係も概ねこの予想に対応したものになっている. しか しながら、極端に流出土砂量が少ない又は多いケースも 見られた. 例えば台形断面のTS20では, 流量Q1の通水 中に生じた部分的な河床低下が水路床に達し、急激な土 砂流出が生じた. 同様の現象はTR20の流量Q2の通水中 にも生じた. これは、台形断面で河床低下が生じると断



図-7 通水前後の大径礫の個数と移動状況

面幅が狭まるために水深が大きくなり、また平滑な河岸 が潤辺に占める割合が増加して、相対的に河床面に作用 する掃流力が増大し、より土砂流出が増加するという不 可逆的なサイクルが生じているためであると考えられる. 次に、河岸粗度の有無に着目すると、RR25、RR20の2 ケースで、粗度なしのケースに対して総流出土砂量はそ れぞれ23%、38%と、大幅に低減されていることが確認 できた.これらのケースは、大径の石が集積したstep状

できた.これらのケースは、大径の石が集積したstep状 の地形が安定して維持されたケースであった.RS15, RR15では、ともにstepは形成されず、平坦な河床を保っ たまま土砂の流出が進み、粗度の有無による違いは把握 されなかった.台形断面のTR25,TR20については、河岸 粗度の有無の影響を一概に論じることは難しいようであ る.TS25,TR25では共に河床が安定し河床低下はほぼ進 行しなかった.一方、TR20では部分的な河床低下を契 機として多量の土砂流出が生じているなど、河床低下に よって同時に水路幅が狭まる台形断面では、河岸粗度の 有無よりむしろ水路幅が支配的であるようにみえる.

## 4. 考察

#### (1) 混合粒径流砂量式による流砂量と実測の比較

実測された流出土砂量(図-4)を単位幅単位時間の流 出土砂体積に換算した数値(すなわち流砂量)と,混合 粒径の流砂量式から算出される数値と比較した結果,実 測値は流砂量式の値に対して,流量Q<sub>1</sub>の条件下では1~ 9%,流量Q<sub>2</sub>の条件下では2~59%と限定されていた.

流砂量式の計算には、河床表層の粒径ごとの土砂の存 在割合F」に初期値を用い、平坦河床として全掃流力を用 いたが、実際の現象では、通水中に表層の粗粒化が生じ ること、河床形状の変化による有効掃流力の減少など、 流砂量を減少させる方向の変化が生じるために、実際の 流出土砂量が流砂量式より抑え込まれていると考えられ る. また、本実験のような急勾配水路では、限界掃流力 に勾配が与える影響を考慮する必要性も指摘されている <sup>7)</sup>.以上より, 急勾配河川の流砂量を流砂量式を用いて 表現するためには、表層の粗粒化、河床形状の形状抵抗 と有効掃流力の分離、限界掃流力の変化の3点を考慮す る必要があると考えられる. さらに、安定したstepは、 土砂粒子単体の移動限界と比べてかなり大きい外力に抵 抗しうる<sup>例えば4,8)</sup>とされており、もし通水中に安定した stepが形成された場合,これらの要因が強く作用するた めに、流砂量が大幅に軽減されると考えられる、本実験 において比較的安定したstepが形成されたケースを中心 に、ステップの形成要因について考察を進める.

#### (2) 河岸粗度の有無とstep形成の関係性

はじめに述べたように、stepの形成に関する理論とし ては、反砂堆理論とkeystone理論が示されている.本実 験では図-4に示したとおり、反砂堆状の河床形状・水面 形を伴ってstepが形成されたケースが複数見られたもの の、すぐに破壊されたケースと安定して維持されたケー スがあり、stepが安定していたケース(図-4中の\*\*: TS25, RR25, RR20)では、流砂量が大幅に抑え込まれて いた. Zimmermanらは、多数の実験結果から、stepの形 成に河岸粗度の有無が支配的であると結論づけている<sup>4</sup>. 彼らの実験に用いられた粗度は桟型粗度状のもので、転 動してきた石礫が粗度に衝突して停止し、その周りに石 が堆積してstepが構成されることが述べられている.一 方、本実験の粗度要素は、彼らの実験と比較して相対的 に小さいものである.本実験において、河岸粗度の有無 がstepの形成・維持に与えた影響について考察する.

まず,流出土砂量に占める各粒径階の割合を図-6に示 す.流出土砂量は各ケースでかなり違いがあるのに対し て,流出土砂の内訳は,それほど大きな差がないことが 見て取れる.実験時の土砂移動の状況を観察すると,大 径礫が移動しない際は周辺の中間径以下の土砂も安定し ているが,大径礫が流失すると同時に周辺の土砂も一気 に流出していた. すなわち, 遮蔽効果をもたらす大径礫 の移動の有無が, 流出土砂量を決定しているようである. そこで, 大径礫に着目し, 各ケースのビデオ動画に記録 された大径礫の移動状況についての解析結果を参照する. 図-7は, 安定したstepが形成されたRR25, RR20の流量Q<sub>2</sub> 通水前後の大径礫の個数を示している. 通水中移動せず 残存した個数をグレーで示している. RR25, RR20におけ るstepの形成過程を観察すると, 上流から転動してきた 礫が, 河岸近傍で静止している礫にぶつかって静止し, 集積が進んでいく. 図-7にグレーで示した移動しなかっ た礫は, ほとんどが河岸近傍の石であった.

原田ら<sup>9</sup>は、単断面河道の底面と側壁の粗度が、流水 抵抗、断面内の流速分布、潤辺に作用するせん断力分布 に与える影響を系統的な実験により検討した. 側壁の粗 度は、底面粗度と比較して流水抵抗に与える効果は限定 的であるが,底面と側壁に粗度がある場合,隅角部に流 速が大幅に軽減された領域が形成される<sup>9</sup>. 流水中の物 体に作用する流体力は、流速の2乗に比例するため、河 岸の粗度は、隅角部に位置する河岸近傍の石に作用する 流体力を大幅に軽減することに寄与し、河岸近傍の石を 安定させ、stepを構成するkeystoneとして機能させている と考えられる. また, Zimmermanらが実験で観察した stepのうち, stepの幅が84%粒径の6倍以下(W/D<sub>84</sub>≦6) のstepが限界掃流力の数倍程度まで安定していたことが 示されている4. 本実験で観察された, 河岸近傍に安定 した石が存在することにより、その間に石が集積し、安 定したstepが形成された状況とよく一致している.

また、本実験においてstepが形成される過程では、河 床低下と粗粒化を伴う反砂堆が例外なく観察されている ことから、本実験に限れば、反砂堆理論とkeystone理論 の両方が成立することが、安定したstepが形成・維持さ れる条件であると結論づけられる.

# 5. おわりに

本研究では、山地急流河川における川幅設定と河岸粗 度の有無が、河床の安定性、すなわち洪水時の土砂移動 に及ぼす影響について、水路幅、断面形、河岸粗度の有 無が異なる10ケースの移動床水理実験を通じて検討した. 主要な結果を以下に示す.

- (1)水路幅の縮小は、同一流量に対する掃流力を増加させ、 土砂流出の増加(河床低下)をもたらした.しかしな がら流出土砂量は、混合粒径の流砂量式から算定され る流砂量に対して1~59%に限られていた.表層の粗 粒化、河床形状の変化による有効掃流力の減少等がそ の要因と考えられた.
- (2)台形断面は、急激な土砂流出と河床低下を生じやす かった.河床低下に伴って底面幅が狭まることに起因

していると考えられた.

- (3)河岸の粗度の有無は、一部のケースで流出土砂量に大きな変化を与えた.河岸近傍の大径礫が安定することによりkeystoneとして機能し、安定したstepが維持された.ただし、水路幅が狭いケースではこの効果は見られなかった.
- (4)安定したstepが形成・維持されるためには、反砂堆理 論とkeystone理論が同所的に成立する必要があり、河 岸粗度は大径の石礫がkeystoneとして機能しやすくす る効果を有する.

以上より、山地急流河川の河道改修にあたっては、川 幅の確保が第一であり、加えて河岸の粗度を確保するこ とが、河道の安定に重要な役割を果たすことを示した.

謝辞:本研究は河川基金助成:285211038(山間地河道の 河川地形を保全・復元するための改修手法〜河岸の粗度 に着目して〜,平成28-29年度)により実施された.平 成28年度の研究室学生であった板垣侑理恵氏には主に現 地調査に協力を得た.本研究の実施にあたり,岐阜県県 土整備部郡上土木事務所より資料提供等の協力を得た.

#### 参考文献

- Montgomery, D. R., Buffington, J. M.: Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), pp.596-611., 1997.
- 2) 芦田和男, 江頭進治, 安東尚美: 階段状河床形の形成機構と 形状特性に関する研究. 水理講演会論文集, 28, pp.743-749., 1984.
- 3) 長谷川和義, 上林悟: 渓流における淵・瀬 (ステップ・プール) の形成機構とその設計指針, 水工学論文集, 40, pp.893-900., 1996.
- 4) Zimmermann, A., Church, M., Hassan, M. A.: Step pool stability: Testing the jammed state hypothesis. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F2)., 2010.
- 5) 厳島怜, 佐藤辰郎, 西田健人, 真砂祐貴, 坂田知謙, 島谷幸 宏:山地河川における step-pool 構造に関する既往の知見と 河川技術への応用. 応用生態工学, 19(2), pp.165-180., 2017.
- 6) 竜澤宏昌,林日出喜,長谷川和義: 渓流河川における河床砂 礫の混合特性と階段状河床形の形状特性.水工学論文集,42, pp.1075-1080.,1998.
- 7) 芦田和男,高橋保,水山高久:流路工計画に関する水理学的研究.砂防学会誌,28(2),9-16.,1975.
- 8) 芦田和男, 江頭進治, 西野隆之, 亀崎直隆: 階段状河床波の 形成・破壊過程における流砂機構, 京大防災研年報, 30, B-2, pp.493-506, 1987.
- 9) 原田守啓,松岡俊一郎,藤田裕一郎:粗度配置が異なる長方 形断面開水路の抵抗特性とせん断応力分布に関する実験的研 究,土木学会論文集B1(水工学),64(4), I\_1273-I\_1278,2012. (2019.4.2受付)