

花崗岩山地源頭部における 河床形態の出現特性と階段状河床形態の構造

敵島 怜¹・佐藤 辰郎²

¹正会員 九州大学助教 持続可能な社会のための決断科学センター (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)
E-mail: itsukushima@civil.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学助教 持続可能な社会のための決断科学センター (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)
E-mail: sato@civil.kyushu-u.ac.jp

本研究は、花崗岩山地河川源頭部に出現する河床形態と河床勾配の関係及び階段状河床形態を構成する step 構造とその支配要因の関係を調べたものである。源頭部では、河床勾配に応じた河床形態の遷移が確認され、勾配が急な上流から下流に向けて、滝、cascade、step 及び早瀬と優占する河床形態が変化した。また、階段状河床形態は、河床勾配や step 間隔と step 高の比によって step-pool、step-早瀬、step-pool-早瀬の3形態に変化することを示した。step 高と step 構成礫の最大径の関係は、反砂堆型と keystone 型で異なり、反砂堆型では step 構成礫の最大径と摩擦速度が正の関係にあり、keystone 型では、河床勾配及び step 幅と正の関係があることが明らかとなった。

Key Words: mountainous river, river bed morphology, river-bed gradient, step-pool

1. はじめに

山地河川は沖積河川に対する土砂供給源であり、降雨流出水の集中運搬路として重要な役割を担っている¹⁾。一方、崩壊地を流れる山地河道には、大量の砂礫・土砂が流出・堆積することから治山ダム、砂防堰堤及び流路工など設置され、災害防止に貢献する一方、生物生息場の消失など環境面の課題を有している。自然状態の山地河川では、生産された土砂が侵食及び堆積の平衡状態を保つことで、河床勾配を維持する自己形成メカニズムが機能し河道が形成されている²⁾。山地河川の河道地形は Colluvial (崩積), Alluvial (沖積), Bedrock (基岩) のセグメントに分類され、更に7つのリーチタイプ (崩積, cascade, step-pool, 平坦河床, 瀬淵, 砂堆・砂漣, 基岩) に細分化され、これらのリーチタイプは河川縦断方向に遷移する³⁾。

山地河川の自己形成メカニズムに重要な役割を果たす階段状河床形態 (step-pool) は、落差の緩和やエネルギーの減勢に大きな役割を果たすことから、急勾配河川の自然再生や災害復旧の際の要素技術として注目されている⁴⁾⁵⁾。step-pool の種類はその構成物によって、巨礫や巨石によって構成されるもの、岩盤河床が侵食、洗掘され形成されるもの、倒木に上流から供給された礫等が捕捉され形成されるものに分類される⁶⁾。更に、石礫により形成される step は、反砂堆が発達し形成される反砂堆型

と、偶発的に河道に存置された最大径の材料に礫が捕捉され形成される keystone 型が存在する⁷⁾。反砂堆型の step 形成のためには、流送土砂と特定の水利条件が必要であり、keystone 型の step 形成のためには、大規模出水や山腹崩壊による keystone の供給が必要である。低頻度の出水や山腹崩壊は同一の場所で起こりうるため、反砂堆型と keystone 型は同所的に発生すると考えられる。これまで、step 構造とその支配要因として、step 高と構成礫径の関係が調べられているが⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、step 形成過程に着目した研究は行われておらず、地域的な差異が大きく、step 構造と支配要因の关系到統一的理解はみられない。

これまで、階段状河床形態を中心とした山地河道の河床形態に関する研究は河床勾配が 1/50~1/10 程度の領域で行われている。一方、治山ダムや砂防ダムなどの土砂動態を制御する施設がない源頭部では、土石流の発生機構や流動特性¹¹⁾¹²⁾及び土砂動態のモニタリング¹³⁾に関する研究が多く行われているが、出現する河床形態に関する知見はみられない。しかし、源頭部は土砂供給が豊富で、人為的インパクトが低いことから自然河川における河道の自律形成機構を調べるうえで重要な区間である。

本研究は、花崗岩山地河川源頭部の河床勾配と出現する河床形態の特徴を調べ、山地河川において落差緩和や洪水時のエネルギー減勢に大きな影響を及ぼす階段状河床形態の構造を支配する要因について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 対象河川

源頭部を含む上流の特性は地質による影響が顕著であることから¹⁴⁾、同一地質を流下する河川を対象とした。花崗岩山地での源頭部に位置する3河川を対象とした(図-1)。人為による土砂動態の影響を避けるため、砂防堰堤や護岸が設置されていない河道で調査を行った。

(2) 現地調査

対象河川の落差緩和に寄与する河床形態を滝, cascade (石礫が不規則に連続して堆積する河床形態), step 及び早瀬の4種に分類し(図-2)、河床形態毎に河道法線の延長と比高差を計測した。また、落差緩和に寄与しない pool 及び平瀬については、河道法線の延長のみ計測した。更に、階段状河床形態を構成する step 構造の特徴を調べるため、step 高, step 幅, step 間隔, 構成礫の長径及び短径, 左岸及び右岸の傾斜角を測定した。距離及び角度の計測には Leica DISTO X310 を用いた。

(3) step の形成要因の分類

形成要因に着目して step 構造とその支配要因の関係を調べるため、対象となる step の断面の移動限界粒径を算出し、step 構成礫径の最大値が移動限界粒径よりも大きい step を keystone 型, 小さい step を反砂堆型とした。構成礫径は計測した長径と短径を用い、2軸幾何平均により算出した。藤田ら(1999)は、階段状河床の波長は5年確率程度の流量に対応する階段状河床形の波長に一致するとしており¹⁵⁾、本研究では、移動限界粒径の算出対象とした流量の生起確率を5年とした。流量は福岡県公表の降雨強度式に基づき、合理式により計算した。流出係数は0.7, 流下時間はクラークヘン式¹⁶⁾を用いた。また、移動限界粒径の算定には岩垣の式¹⁷⁾、流速は山地河川を対象とした実験に基づく Comiti et al. (2009) の流速公式¹⁸⁾、粗度係数は浅野ほか(2012)が示した山地河川の粗度係数の平均的な値である0.20とした¹⁹⁾。

(4) 統計解析

step 高と step 構成礫の最大径の関係を調べるため、単相関分析を行った。単相関分析には、Pearson の積率相関係数を用いた。次に、step 構成礫径に影響を及ぼす要因を調べるため、step 構成礫の最大径を目的変数に、step 幅, 生起流量5年確率における摩擦速度(重力加速度, 河床勾配及び径深の積の二乗根により算出), 左右岸の斜面傾斜の最小値及び最大値, 50m 区間の河床勾配を説明変数として重回帰分析を行った。説明変数の選択はステップワイズ法により行い、AIC (赤池情報量規準) が最小値となる変数群を対象として解析を行った。

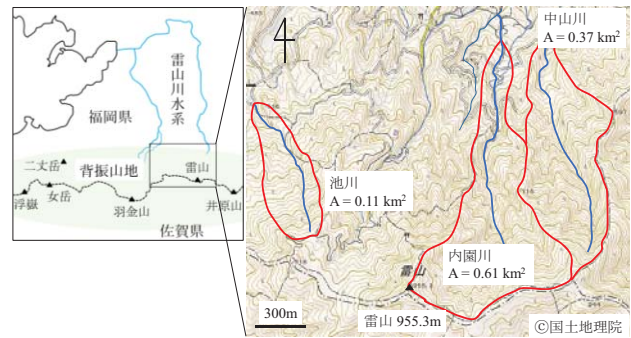


図-1 対象河川位置図



図-2 河床形態の分類

また、各河床形態が出現した河床勾配の多重比較を行った。Bartlett 検定の結果、不等分散であることから、Kruskal-Wallis 検定を行い、有意差が認められた場合、Steel-Dwass 検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。

3. 結果

(1) 源頭部に出現する河床形態と河床勾配の関係

急勾配な源頭部における河床形態の出現特性を調べるため、対象河川の標高差に占める各河床形態の落差の割合と河床勾配の関係を図-3(a)~(c)に示した。図中の河床勾配は下流端から約 50m 区間毎の値であり、区間内に

出現した河床形態の落差の合計値を区間内の標高差で除したものが縦軸である。

内園川では、step が標高に占める割合は河床勾配が 0.1～0.2 の領域で卓越しており、勾配の増加とともに減少する傾向が見られた。また、早瀬は全体に占める割合が小さいものの、step と同様に勾配の増加とともに減少しており、河床勾配 0.3 を超えるとその割合は極めて小さくなる傾向がみられた。一方、cascade は勾配が小さい領域では割合が低く、勾配の増加に伴って割合が増加し、河床勾配が 0.3～0.4 の領域で卓越するが、0.4 を越えると再び減少する傾向が見られた。滝は緩勾配領域ではみられず、勾配が 0.4 を越えると、cascade の減少に伴い増加する傾向がみられ、最も勾配が急な区間では、落差の大部分が滝によって緩和される結果となった(図-3(a))。

中山川でも内園川と同様の傾向が確認されたが、内園川とは異なり、勾配が 0.1～0.25 の領域では、step と cascade による落差緩和が同程度であり、両者の河床形態が混在する河道区間が多くみられた。また、早瀬については、内園川と同様に河床勾配が 0.1～0.2 の領域で見られ、勾配が 0.3 を超過すると標高に占める割合は極めて小さくなった。一方、勾配が 0.3 より急な領域では、滝により落差の大部分が緩和されていた(図-3(b))。

池川においても、他の 2 河川と河床勾配と河床形態の出現特性は概ね類似していたが、河床勾配が 0.25～0.3 の領域で step による落差の割合が再度上昇し、河床勾配 0.4 を超過する領域でも標高差の 30%程度を step が占める傾向がみられた(図-3(c))。

(2) step 高に影響を及ぼす要因

図-4 は対象とした 3 河川で確認された step の step 高と構成礫の最大径の関係を、反砂堆型と keystone 型のタイプ別に示したものである。反砂堆型の step では、step を構成する礫の最大径と step 高の間に有意な正の相関が確認され、最大礫径の増加に伴う、step 高の増加が確認された。また、step 高は最大礫径の 76 %程度であった。一方、keystone 型の step では、構成礫径の最大値と step 高についても反砂堆型と同様に正の相関がみられたが、その関係は反砂堆型と比して弱かった。特に、最大礫径が 150 cm まででは、構成礫径の増加に伴う step 高の増加がみられたが、150 cm を超過すると構成礫径と step 高の間に明瞭な関係はみられなかった。

次に、step 構成礫の最大径を目的変数に、河道特性値及び斜面勾配を説明変数として重回帰分析を行った結果を表-1 に示す。反砂堆型の step 構成礫の最大径を目的変数としたステップワイズ重回帰分析の結果、最終的に重回帰モデルに取り込まれた説明変数は、step 幅及び摩擦速度であり、いずれも正の関係がみられた。一方、keystone 型の step 構成礫の最大径を目的変数とした場合、

step 幅、斜面傾斜の最小値、河床勾配が選択され、いずれも正の関係がみられた。

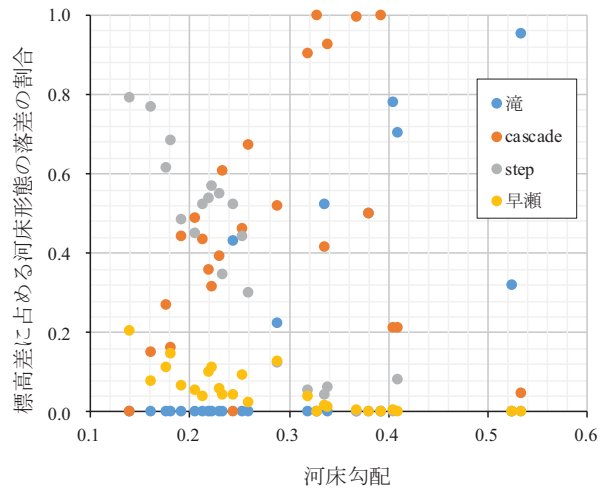


図-3(a) 河床形態と河床勾配の関係 (内園川)

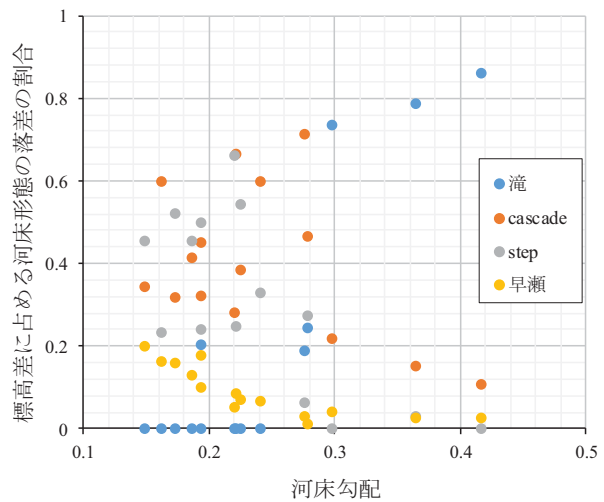


図-3(b) 河床形態と河床勾配の関係 (中山川)

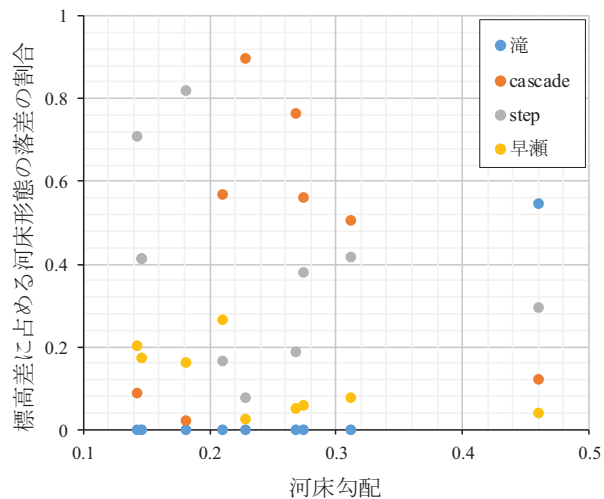


図-3(c) 河床形態と河床勾配の関係 (池川)

(3) step 関連構造と河床勾配の関係

各河川で出現した step は、その下流に早瀬が出現し連続する step-早瀬構造、その下流に pool が出現し連続する step-pool 構造、その下流に pool と早瀬が出現し連続する step-pool-早瀬構造の 3 種がみられた。階段状河床形態は、流れの抵抗として機能しており、step 間隔と step 高の比である先鋭度 H/L は、階段状河床形態の凹凸の形状を示し、抵抗としての機能の程度を表現する指標である。出現した 3 種の step 関連構造の特徴と出現する勾配を調べるため、H/L と河床勾配の関係を構造毎に調べた (図-5)。その結果、step-pool-早瀬構造は、河床勾配が 0.3 までの領域、特に 0.1~0.2 で多く確認された。H/L の値は 3 種の構造のなかで最も低く、最大で 0.4 程度であった。step-早瀬構造は、step-pool-早瀬構造よりも出現する河床勾配の領域が広く、最も勾配が急な区間でも確認された。step-pool 構造は、河床勾配が 0.3 までの領域に集中しているが、step-pool-早瀬構造よりも H/L の値が大きく、0.4~0.8 程度のものが多くみられた。

4. 考察

(1) 源頭部の河床形態の遷移と河床勾配

本研究で対象とした 3 河川で、河床勾配に応じた河床形態の遷移が確認され、勾配が急な上流から下流に向けて、滝、cascade、step と優占する河床形態が変化した。早瀬は、滝や cascade 及び step 等の落差が大きい河床形態の上流でよく見られるため、全ての区間で確認されたが、標高に占める割合は他の河床形態と比較すると小さい (図-3(a)~(c))。

対象とした河床形態が出現する河床勾配の boxplot を示したものが図-6 である。Kruskal-Wallis 検定では全ての群間に有意な差がみられた ($p < 0.01$)。cascade が出現する河道区間の河床勾配の上限は 0.53 であり、これは、花崗岩の水中安息角 26.7²⁰⁾や崩壊地に残留する表面傾斜角 33.5²¹⁾に近い値となった。cascade は石礫の堆積による形成されるため、これより勾配が急な領域では堆積物が安定せず、滝へと遷移することが示唆された。Montgomery and Buffington (1997) は cascade の発生領域の上限を河床勾配 0.20 程度としているが³⁾、本研究では安息角程度まで発生することが明らかとなった。また、石礫の堆積には川幅の変化や蛇行等が大きく影響するため、cascade の出現特性については、縦断勾配だけでなく、平面形状を含めた分析が必要である。

これまで、階段状河床形態の発生領域について、海外の事例として、河床勾配が 0.03~0.065 の区間³⁾、0.02 より急で河床材料が堆積傾向にある区間²⁾、国内の事例として 0.02 以上²³⁾、0.025 以上²⁴⁾、0.04~0.05²⁵⁾が示されている。本研究では、step-pool は 0.15~0.25 の区間で卓越

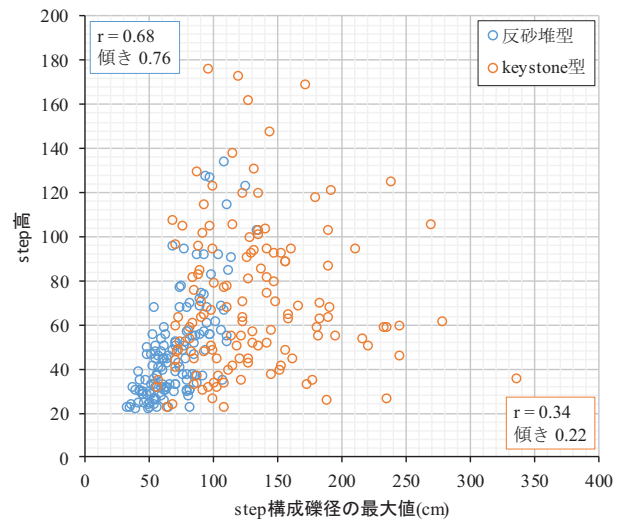


図-4 step 高と step 構成礫の最大径の関係

表-1 step 構成礫の最大径を目的変数とした重回帰分析結果

説明変数	目的変数	
	最大礫径 (反砂堆型)	最大礫径 (keystone型)
step幅	0.21 *	0.32 ***
摩擦速度	0.44 ***	
斜面傾斜の最小値		0.15
河床勾配		0.33 ***
R ²	0.32	0.23
F	31.79 ***	12.57 ***

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

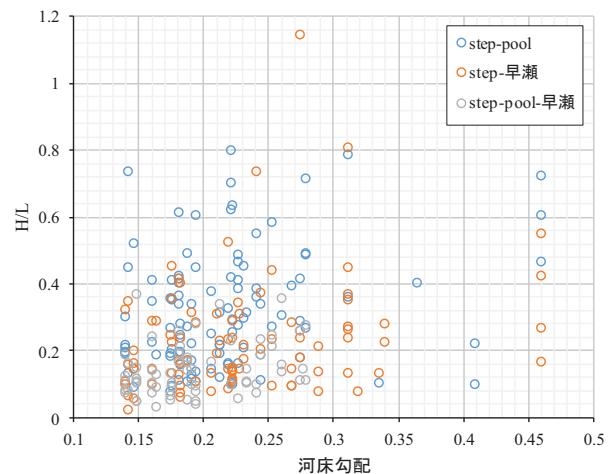


図-5 step 構造の先鋭度 (H/L) と河床勾配の関係

し、0.5 程度の勾配まで確認されており、既往研究と比較して勾配の大きな領域でも step-pool が存在することが明らかとなった。これまで、源頭部を対象に河床形態を調べた事例はみられないことから、step-pool の発生領域について今後の知見の集積が必要である。

また、step に関連する 3 種の河床形態では、step-早瀬構造、step-pool 構造、step-pool-早瀬構造の順に出現する河床勾配の中央値が大きく、Steel-Dwass による対比較で

は、step-pool-早瀬構造が出現する河床勾配の平均値は他の2種が出現する勾配と比較して有意に小さかった ($p < 0.05$)。step 高と step 間隔の比である H/L が大きい場合、step 間隔に対して落差が大きく、河床が洗掘されるため step-pool 構造が発達し、逆に H/L が小さい場合は洗掘するエネルギーが小さいため、step-早瀬構造が卓越するものと考えられる。step 下流の洗掘エネルギーは、step 高に大きく依存すると考えられるため、形成要因による影響は小さいと推察される。また、河床勾配が小さい領域では、step 高に対する step 間隔が長く、step からの落差によって形成される pool の下流に早瀬を伴う構造が卓越する。本研究では、これら3種の河床形態を規定する要因として、河床勾配と H/L を取り上げ、説明を行っているが、step-pool 形成後の土砂の再堆積によって pool が埋没し、step-早瀬構造となっている可能性もあり、この3つの河床形態は step 形成後の経過時間や局所的な土砂堆積について考慮する必要がある。

(2) step 構造の支配要因と改修技術への応用

step 高と step 構成礫の最大径の関係は、反砂堆型と keystone 型で異なり、反砂堆型では、step 高と step 構成礫の最大径の間に有意な正の相関がみられたのに対し、keystone 型では両者の関係は弱かった (図-4)。また、重回帰分析の結果、反砂堆型の step 構成礫の最大径は摩擦速度と正の関係があり、keystone 型の構成礫の最大径は、河床勾配が大きいほど増加することが明らかとなった。河床勾配は流程を示す指標であり、河床勾配が大きい領域は源頭部に近く、山腹から供給される巨石の径も大きくなると考えられることから、keystone 型の step 構成礫の最大径と河床勾配の間に有意な正の相関がみられたと推察される。以上より、反砂堆型の step 形成には、出水時に step 構成礫の最大径が流送及び堆積することが必要であること、また、形成要因の相違を判定するうえで、生起確率5年の移動限界摩擦速度は有効であることが示された。一方、step 構成礫の最大径は keystone 型及び反砂堆型の両者で step 幅と有意な正の相関がみられた。これは構成礫の最大径が step 幅を規定する要因となっており、step 構造を考えるうえで、構成礫の最大径が重要な指標であることを示唆している。

step 高と構成礫径の関係を調べた事例として、step 高は step 構成礫の 50% 粒径の 1~1.5 倍⁸⁾、90% 粒径の 2 倍程度⁹⁾、アーマ・コートの平均粒径の 0.8 倍程度¹⁰⁾であることが示されているが、粒径集団のどの材料と関係が強いかについて統一した見解はみられない。本研究では、step 形成要因に着目し、形成要因毎に step 構成礫径に影響を及ぼす要因が異なることを明らかにした。今後、形成要因毎に河道特性との関係を調べることで、step-pool 構造の支配要因について明瞭で汎用性の高い知見が得ら

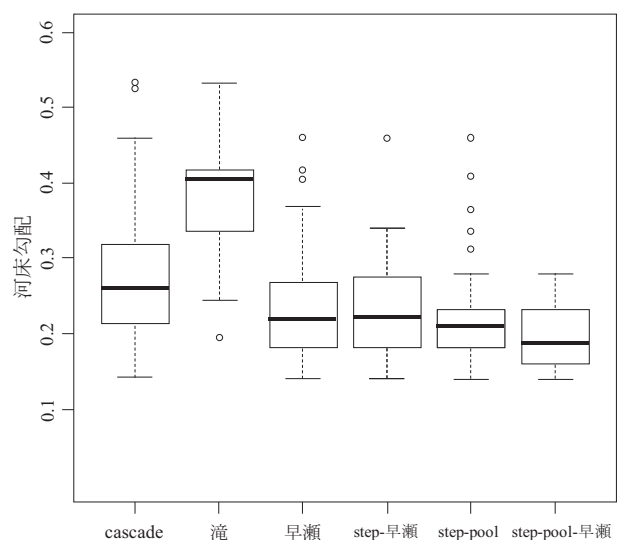


図-6 各河床形態が出現する河床勾配

れると考えられる。

近年 step-pool 構造は河床の安定、落差の緩和機能を有することから、山地河川の自然再生や災害復旧の際の要素技術として注目されているが導入のための技術体系化はなされていない。大規模水害時には、keystone となる巨石の供給も想定されることから、現地の条件を踏まえ、反砂堆型と keystone 型のいずれの step を導入するかは設計に際し重要な課題となる。本研究の成果で得られた、keystone 型と反砂堆型の区分に基づく step 構成礫径と河道特性の関係は災害復旧や自然再生に際し、導入すべき step 構造を考えるうえで重要な知見となり得る。

5. 結論

- (1) 花崗岩山地河川の源頭部では、河床勾配に応じた河床形態の遷移が確認され、勾配が急な上流から下流に向けて、滝、cascade、step 及び早瀬と変化した。
- (2) 既往研究では、階段状河床形態の発生領域は、河床勾配 0.02~0.05 程度とされてきたが、本研究では、step-pool 構造は 0.15~0.25 の区間で卓越し、0.5 程度の勾配まで step-pool が存在することが明らかとなった。
- (3) 階段状河床形態として、step-pool、step-早瀬、step-pool-早瀬の3種が存在し、河床勾配や step 間隔と step 高の比である H/L によって構造が異なることを示した。
- (4) step 高と step 構成礫の最大径の関係は、反砂堆型と keystone 型で異なり、反砂堆型の step 構成礫の最大径が摩擦速度と正の関係があり、keystone 型の構成礫の最大径は、河床勾配と正の相関関係がみられた。
- (5) 本研究で得られた、河床形態の遷移と河床勾配の関係や step 構造の支配要因は、土砂の崩壊特性、降雨流出特性によって大きく異なると考えられるため、地質や気候帯別の知見の集積が必要である。

謝辞：本研究は公益財団法人河川財団の運用する河川基金の助成を受けた。

参考文献

- 1) 長谷川和義：山地河川の形態と流れ，水工学シリーズ 88-A-8, 1-22, 1988.
- 2) 池田宏，伊勢屋ふじこ，小玉芳敬：ダム上流の河床勾配変化—侵食性平衡勾配から堆積性平衡勾配へ—，応用生態工学，Vol.2, pp.113-123, 1999.
- 3) Montgomery, D. R. and Buffington, J. M.: Channel-reach morphology in mountain drainage, *Geological Society of America Bulletin*, Vol.109, pp.596-611, 1997.
- 4) 長谷川和義，上林悟：溪流における瀬・淵（ステップ・プール）の形成機構とその設計指針，水工学論文誌，Vol.40, pp.893-900, 1996.
- 5) 福留脩文，有川崇，西山穩，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，土木学会論文誌 F, Vol.66, 490-503, 2010.
- 6) Chin, A. and Wohl, E.: Toward a theory for step pools in stream channels, *Progress in Physical Geography*, Vol. 29, pp.275-296, 2005.
- 7) 巖島怜，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適用，応用生態工学，Vol.19, pp.165-180, 2017.
- 8) Chartrand, S. M. and Whiting, P. J.: Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.25, pp.583-600, 2000.
- 9) Billi, P., D'Agostino, V., Lenzi M. A. and Marchi, L.: Bedload, slope and channel processes in a high-altitude torrent, *Water Resources Publications*, pp.15-38, 1998.
- 10) 芦田和男，江頭進治，安東尚美：階段状河床形の発生機構と形状特性，京大防災研究所年報，Vol.27 B-2：pp.341-353, 1984.
- 11) 今泉文寿，土屋智，逢坂興宏：荒廃溪流源頭部の砂礫堆積地における土石流の発生と流動過程の観測，砂防学会誌，Vol.55, pp.50-55, 2002.
- 12) 大川侑里，金折裕司，今岡照喜：白亜紀防府花崗岩体で発生した土石流の分布と性状，応用地質，Vol.52, pp.248-255, 2012.
- 13) 藤田正治，澤田豊明，水山高久：山地流域における濁度変化と土砂動態，水工学論文誌，Vol.47, pp.739-744, 2003.
- 14) 田代喬，辻本哲郎：流域地質からみた河床材料と底生動物，応用生態工学，Vol.18, pp.35-45, 2015.
- 15) 藤田正治，道上正規，澤田豊明：階段状河床の洪水による変形に関する現地調査，水工学論文誌，Vol.43, pp.725-730, 1999.
- 16) 井口昌平：コウ水の到達速度に関するいわゆる Rzih の公式と Kraven の表の由来について，土木学会誌 42-1, pp.25-27, 1957.
- 17) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文誌，Vol.41, pp.1-21, 1956.
- 18) Comiti, F., Mao, L., Lenzi, M. A. and Siligardi, M.: Artificial steps to stabilize mountain rivers: A post-project ecological assessment, *River Research and Applications*, Vol.25, pp.639-659, 2009.
- 19) 浅野友子，星野晋一郎，内田太郎，秋山浩一：山地河川における水の流れとマニングの粗度係数の実測，砂防学会誌，Vol.65, pp.62-68, 2012.
- 20) 田中茂：豪雨による砂質斜面の崩壊機構，新砂防，Vol.22, pp.3-9, 1956.
- 21) 西畑勇夫：山地の崩壊と地質，地形および雨量との関係について，土木学会論文誌，Vol.100, pp.9-14, 1963.
- 22) Grant, G. E., Swanson, F. J. and Wolman, M. G.: Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon, *Geological Society of America Bulletin*, Vol.102, pp.340-352, 1990.
- 23) 権田豊，岡崎達也，西井洋平，川邊洋：山地河川における step-pool 構造の形状及び分布特性，新潟大学農学部研究報告，Vol.61, pp.67-93, 2008.
- 24) 三國谷隆伸，知花武佳：河床構造に着目した山地河川のサブセグメント区分と河床材料粒径の規定要因，河川技術論文誌，Vol.17, pp.131-136, 2011.
- 25) 小玉芳敬，中村圭吾：三朝町小鹿溪谷の河床縦断形について—河相と対応する河床勾配の階層性—，鳥取地質学会誌，Vol.1, pp.53-63, 1997.

(2018.5.31 受付)

APPEARANCE CHARACTERISTICS OF RIVER BED CONFIGURATION AND CONTROLLING FACTORS OF STEP-POOL STRUCTURE IN A GRANITIC HEADWATER CATCHMENT

Rei ITSUKUSHIMA and Tatsuro SATO

The objective of this work was to investigate the relation between river-bed gradient and river bed configuration in a granitic headwater catchment. Further, we investigated the relationship between the step structure and controlling factors such as river course characteristics or slope angle of river bank. As a result of field survey, the transition of river bed configuration (transition of waterfall, cascade, step, and riffle from the upstream to the downstream) according to the river bed gradient was observed. The relation between the step height and maximum diameter of the step construction gravel was different between the antidune type and keystone type. In case of antidune type, maximum diameter of the step construction gravel was positively related with friction velocity. Whereas, maximum diameter of the step construction gravel of keystone type increased with the increment of river-bed gradient and step width.