

様式 8

河川基金助成事業

「山地河川における step-pool 構造の形成要因と
河道・流域条件の関係に関する研究」

助成番号：2018-5311-011
東京工業大学環境・社会理工学院
助教 巖島 怜

2018 年度

目次

1. はじめに	1
2. 方法	3
2.1 研究対象地.....	3
2.2 現地調査.....	5
2.3 step 形成要因の分類.....	6
2.4 統計解析.....	7
3. 結果	8
3.1 源頭部における河床形態の出現特性.....	8
3.2 Step-pool 構造と河道特性の関係.....	13
4. 考察	16
4.1 河床形態の遷移と縦断勾配.....	16
4.2 Step 構造と規定要因.....	18
4.3 Pool 構造と規定要因.....	20
4.4 急勾配河川における河道改修技術への応用.....	20
5. 結論	21
参考文献	22

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、降雨流出水の運搬等重要な役割を担っている¹⁾。一方で、豪雨による土石流災害、溪流河道への土砂堆積、噴火による火砕流災害対策として、砂防ダムやコンクリート構造の流路工などが経済的で有効な工法として広く採用されてきた。これらの工法は災害対策に貢献しているが、生物生息場の消失など環境面で課題を残している²⁾。³⁾ 自然状態の山地河道では、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^{4),5)}。環境劣化した山地河川の再生、環境配慮型の河川改修、生態系の保全のためには、河道地形形成への理解が不可欠である。

山地河川の河道地形を理解するために、河道の特徴が類似した区間に分類することは有効な方法である。Rosgen(1996)は、河川の縦断、横断、平面形状から流呈を分類し、起伏が大きく浸食や堆積が盛んな河床勾配 4-10%の河道を type A, 更に急勾配で起伏が大きい勾配 10%以上の河道を type A+に分類している⁶⁾。また、Montgomery & Buffington (1997) は山地河道を分類し、Colluvial (崩積), Alluvial (沖積), Bedrock (基岩) のセグメント及び、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) に細分化し、これらのリーチタイプは河川縦断方向に遷移することを示した⁷⁾。また、山地河川におけるユニットスケールの縦断勾配に伴う河床形態の遷移は、Waters & Curran (2012)や Wohl (2013)が報告しており^{8),9)}、河床勾配が 10%を超える領域では、step が卓越することが指摘されている¹⁰⁾。さらに、Halwas and Church (2002) は山地河川のなかでも、河床勾配が 10-54%の非常に急勾配な河道の河床形態と河床勾配の関係を調べている¹¹⁾。山地河川のなかでも、源頭部は人為的影響が極めて少なく、土砂供給も盛んであることから、河道形成メカニズムを調べるうえでは重要な河道区間である。しかし、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^{12),13)}及び土砂動態のモニタリング¹⁴⁾に関する研究がみられるものの、出現する河床形態に関する知見は step-pool 河道とは異なり極めて少ない。源頭部は土砂供給量を支配する地質や植生、気候帯の影響によって、河床形態と勾配の関係が大きく異なると考えられるため、様々な地域での知見の蓄積が必要である。

山地河川の河床形態のなかでも、step-pool 構造は落差緩和、洪水のエネルギー減勢及び河床・河岸の安定に寄与することが知られている^{15),16)}。洪水時に流れは step を乗り越え、緩勾配の pool 部に落ち込み、擾乱により洪水流のエネルギーが消散される^{17),18)}。また、step-pool は山地河道における一つの河床形態であるため、その構造的特徴は種々の河道特性量と密接な関係があることが指摘されている。Step 間隔が河床勾配の増大に伴い減少することは複数の研究事例で報告されている^{19),20)}。Santa Monica Mountains における 464 組の step-pool の観測結果から、波長:波高=10:1 が支配的であり、源流部で 7:1, 下流域で 17:1 であることが示されている²¹⁾。Judd (1964) は step 間隔と河床勾配の関係に着目し step 間隔、河床勾配、step 高の比が概ね一定程度の値をしめすことを提案している²²⁾。Grant et al. (1990) はこの関係が生じる理由として、落差の大部分が step で解消されている場合、step 高が一定であれば河床勾配の増加に伴い step 間隔が減少するためと説明している¹⁰⁾。加えて、Step は一般に巨礫や巨石によって構成されており、その構造は構成礫の粒径によって大きく異なる。Step 構造と構成礫の間には密接な関係があることが知られており、構成礫の 50%粒径及び 90%粒径などが step 高の規定要因として用いられている^{23),24)}。Step-pool の出現領域のなかでも 5-10%程度の河床勾配を中心に現地観測や水理模型実験による研究が進め

られている。現地観測として、Step-pool 河道の流速や抵抗特性に関する研究^{18), 25-29)}、出水前後の地形変化や洪水時の安定性に関する研究^{30), 31)}、が行われている。また、step-pool の形成や破壊、抵抗特性、土砂輸送との関係を調べるため、水理模型実験を用いた研究も多く行われている³²⁻³⁹⁾。

Step の形成メカニズムは、流水の作用に起因するもの (Hydraulic controls)、粒子間の相互作用によって生じるもの (granular interaction)、大規模な洪水でも移動しない keystone や倒木等に礫が堆積し形成する random driver に起因するものの 3 タイプに大別される⁴⁰⁾。流水の作用に起因する step の形成には、反砂堆の延長で step が形成されるとするモデル^{41), 42)}、step が流水のエネルギーを最も効率よく減勢させるように配列するという最大抵抗モデル¹⁵⁾、上流に位置する step によって生じる跳水が下流に移行し、下流側の step が形成されるとする cascade モデル⁴³⁾などが含まれる。granular interaction model は粒子間の相互作用によって force chain が生じることで step が形成される jammed state hypothesis に基づいている^{35), 44)}。Jammed state の評価には、step 幅と粒径の比が用いられている。Random driver model では、通常の洪水では移動しえない巨石や流木が洪水時に礫を捕捉することで step が形成されるとするモデルである^{31), 45)}。形成要因によって、step 構造が異なると考えられることから、河道特性や流域条件と step-pool 構造の関係を調べる際には、形成要因毎にその関係を調べるのが重要である。

山地河川の step-pool 構造に関する知見の蓄積がみられるものの、山地河道の自然再生、環境に配慮した災害復旧及び河川改修技術は確立していない。その理由として、急勾配な山地河川が有する流水のエネルギーに対し、河床や河岸の安定化や落差の緩和を、コンクリートを用いずに実現する技術がないことが挙げられる。Step-pool 構造は落差の緩和やエネルギー減勢に大きな役割を果たしており、急勾配河川における環境に配慮した河川改修の重要な要素技術となりうる。また、step-pool だけでなく、侵食及び堆積の平衡状態を保つ山地河道の自律形成機構を知るうえで、河床形態の出現特性を理解することは重要である。しかし、砂防堰堤より上流部に位置する源頭部では、アクセスの困難さなどから、出現する河床形態及びその特性に関する知見が得られていない。そこで、本研究は、山地河川の自律形成機構の解明及び山地河道における自然再生技術の構築に貢献するため、砂防堰堤等の人為的影響が極めて少ない源頭部を対象に、(1) 河床形態の出現特性を明らかにすること、(2) step-pool 構造と河道特性及び流域条件の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 研究対象地

源頭部を含む山地河川の河道特性や生物相は、地質による影響を顕著に受けることが指摘されていることから^{46),47)}、単一の地質帯を流下する山地河川を対象に調査を行った。地質の形成過程から火山岩、深成岩、堆積岩の3種に大別し、それぞれ、流紋岩、花崗岩、及び砂岩を対象に調査河川を選定した。

2.1.1 背振山地

花崗岩地帯として、九州北部の福岡県及び佐賀県に位置する背振山地の河川源頭部を対象とした。背振山地の山体は主として白亜紀の花崗岩類から構成される浸食残丘地形である⁴⁸⁾。尾根や急崖には硬い花崗岩の基盤が露出するものの、中腹以下では強風化花崗岩となっており、花崗岩の風化による真砂土の土砂生産が活発な地域である。調査を実施した、福岡県側の山地は、断裂の多い白亜紀花崗岩地帯であり^{49),50)}。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自然河道で調査を行った(図2.1)。

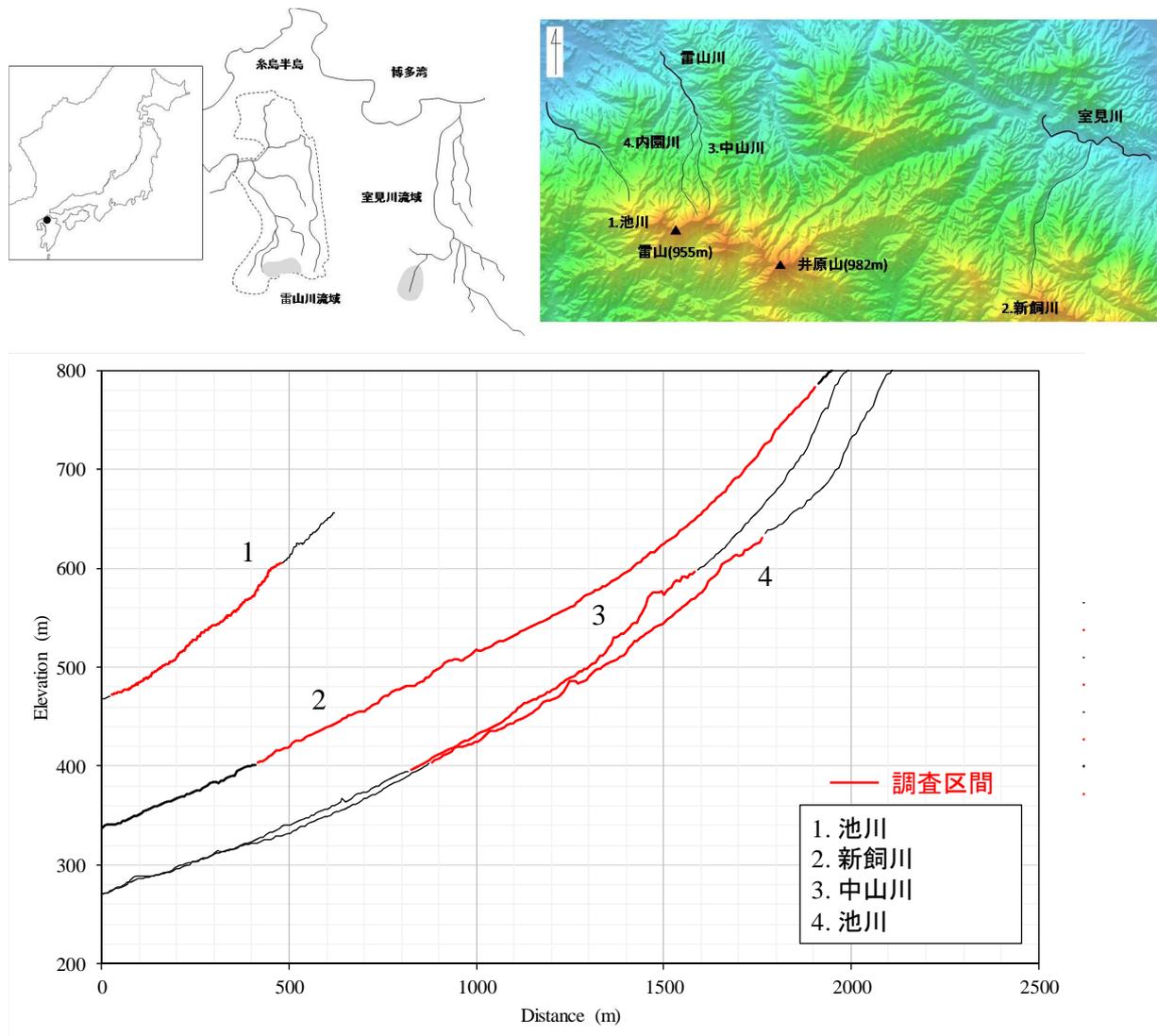


図 2.1 研究対象地 (背振山地)

2.1.2 丹沢山地

流紋岩地帯を流下する河川として、丹沢山地の河川源頭部を対象に調査を行った。丹沢山地は、伊豆小笠原弧北端部が本州弧に衝突付加して形成されている伊豆衝突帯（南部フォッサ・マグナ地域）の最前線に位置しており⁵¹⁾、丹沢山地を形成する火山岩類は、かつての伊豆小笠原弧の火成活動に伴うものと解釈されている⁵²⁾。約100万年前に、伊豆小笠原弧北端部が本州弧に衝突することで隆起し形成された山地である^{53), 54)}。丹沢山地の流紋岩地帯を流下する河川の支川を対象とした（図2.2）。

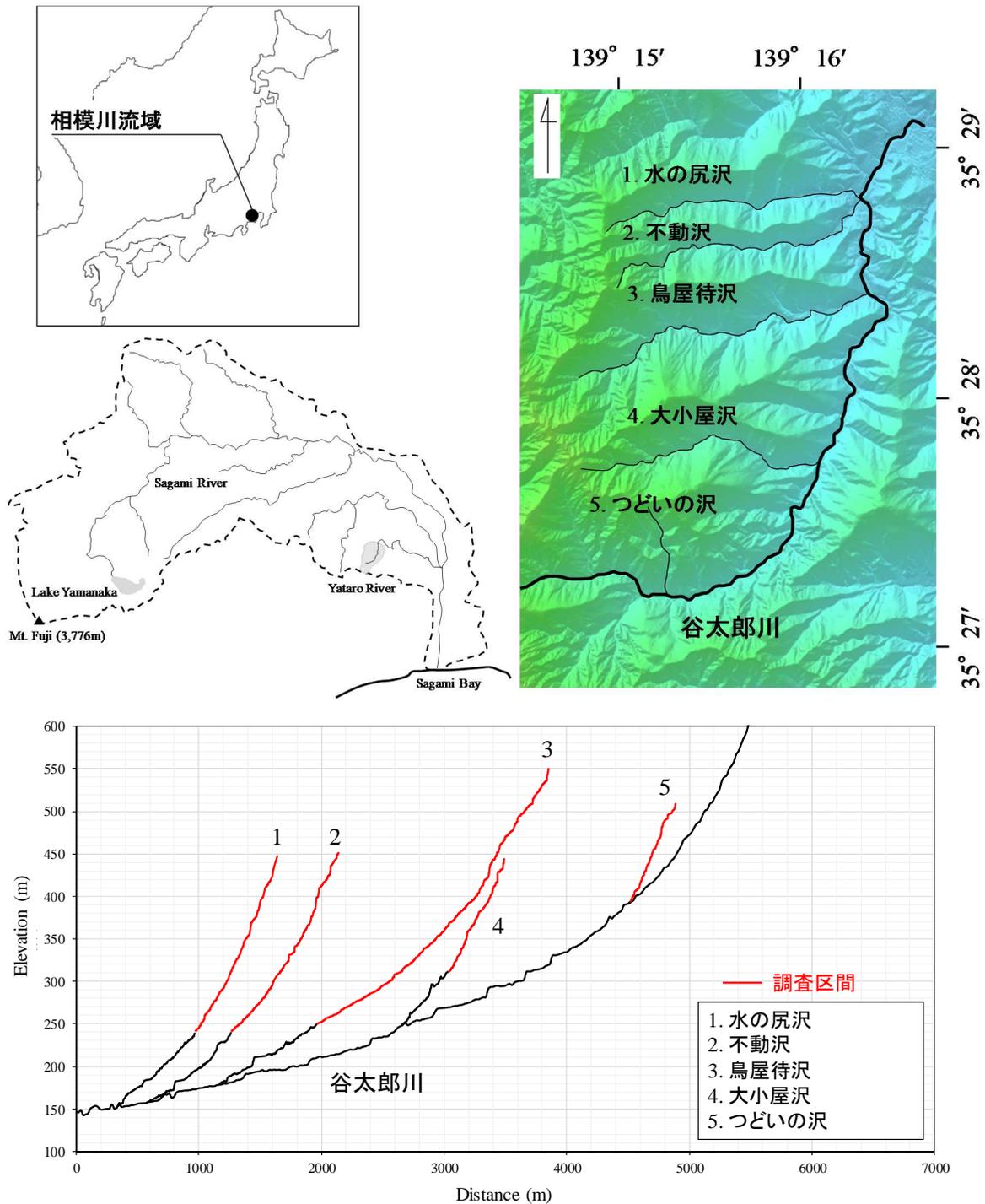


図 2.2 研究対象地（丹沢山地）

2.1.2 関東山地

砂岩地帯を流下する河川として、関東山地に属する多摩川水系秋川の河川源頭部を対象に調査を行った。関東山地にはジュラ紀から古第三紀の付加体及び変性相が広く分布しており、三波川帯、秩父帯、四万十帯に区分される⁵⁵⁾。対象とした秋川の支川は、関東山地南部に広く分布する四万十帯小仏層群に位置している⁵⁶⁾。小仏層群は白亜紀に形成され、主に砂岩頁岩互層、砂岩からなる単調な岩相を示している^{57), 58)}。他の山地と同様に、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自然河道で調査を行った(図 2.3)。

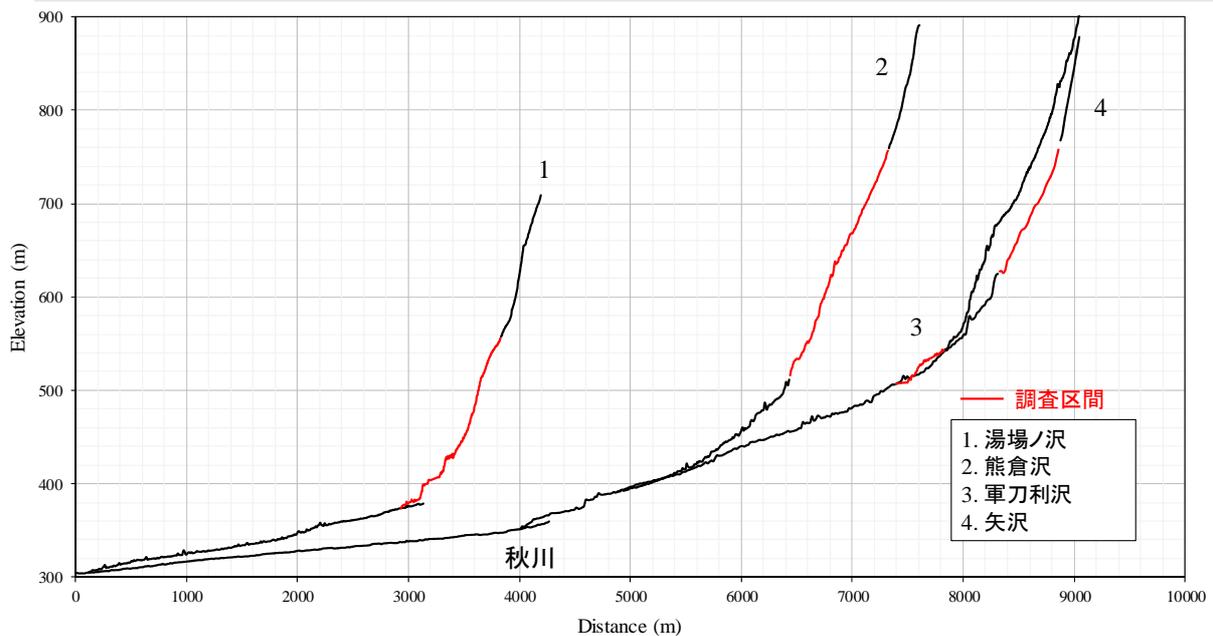
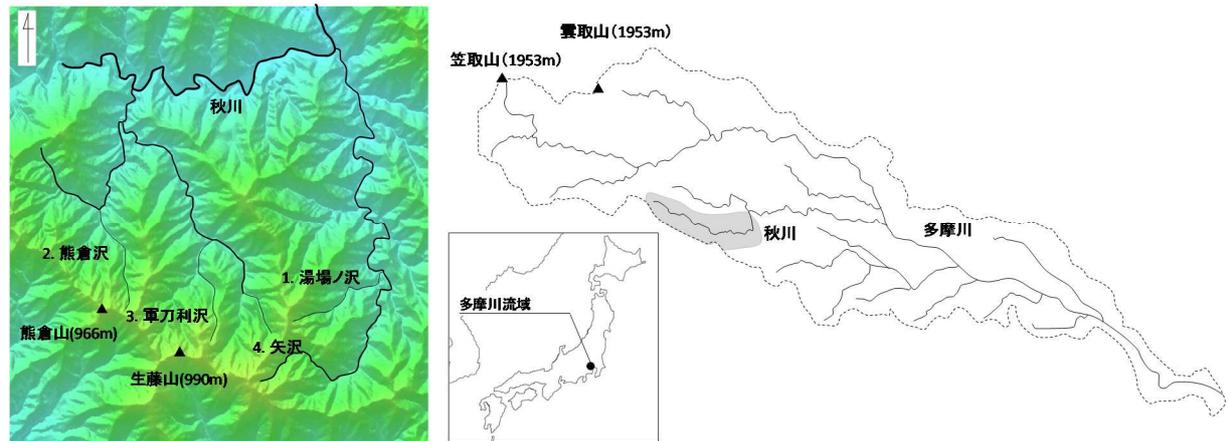


図 2.3 研究対象地 (関東山地)

2.2 現地調査

調査対象区間に出現する河床形態を滝, cascade (石礫が不規則に連続して堆積する河床形態), 岩盤型 cascade, step, pool, 早瀬, 平瀬の 7 種に分類し(図 2.4), 河床形態毎に河道法線の延長, 河道幅と比高差を計測した。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。Pool 部は、水面幅及び長さに加え、pool 深さ及び堆積深を縦断方向に 3 箇所流心で計測を行った。堆積深は長

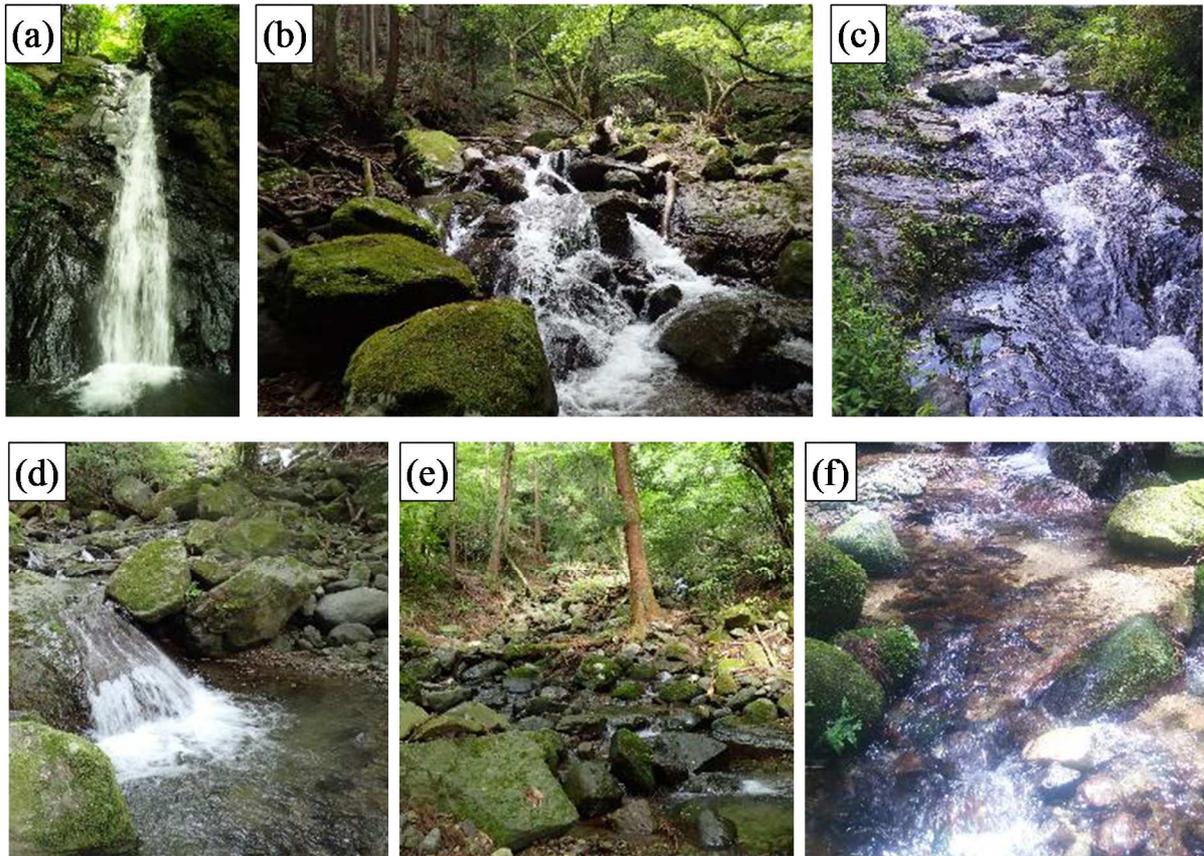


図 2.4 河床形態の分類 (a) 滝, (b) cascade, (c) 岩盤型 cascade, (d) step 及び pool, (e) 早瀬, 及び (f) 平瀬

さ 1m の鉄杭を貫入させて貫入深を堆積深とした。距離及び角度の計測には Leica DISTO X310 を、step 構成礫の礫径は、レベルスタッフ及び巻き尺にて行った。Step 構成礫径は計測した長径及び短径から、 $\text{粒径}=(\text{長径} \times \text{短径})^{1/2}$ により、粒径に換算した。

2.3 step 形成要因の分類

Step-pool の形成過程は、3つの理論が提案されている。第一に流水の作用に起因するもの (HC: Hydraulic controls), 第二は偶発的要因 (RD: Random driver model) によるもので、通常の洪水では移動し得ない巨石や流木が洪水時に礫を捕捉することで step が形成されるというモデル, 第3は粒子間の相互作用によって force chain が生じることで step が形成される jammed state hypothesis に基づくもの (GI: granular interaction model) である。このうち、流水の影響で形成される step と偶発的要因による step は step 構成礫が洪水時に流下するか否かで区別可能である^{59), 60)}。本研究では、礫によって構成される step について、最大径が移動可能なものを HC 型, 移動し得ないものを RD 型と定義した。

HC 型と RD 型の区分を行うため、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⁶¹⁾、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⁶²⁾を用いた。また、移動限界粒径の算定には岩垣の式⁶³⁾, 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⁶⁴⁾, 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⁶⁵⁾。上記に加え, jammed state か否かも step 構造に重要な影響を及ぼすため, その程度を示す指標を設定した。Golly et al., 2019 及び Zimmermann et al., 2010 を参考に, 当該研究では, step 幅と step 構成礫の平均粒径の比を jammed state として用いた。目安として 5 以下であれば, high jamming state, 5 より大を low jamming state と考えられる。

2.4 統計解析

Step 構造と河道特性及び流域条件の関係を調べるため, step 高を目的変数に, step 構成礫の最大値, 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, 移動限界粒径及び jammed ratio 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。更に pool 構造の特性量と河道特性の関係を調べるため, 単相関分析を行った。pool 構造の特性量として, pool 長, pool 幅, pool の縦横比, 平均水深, 最大水深, pool 体積, 最大堆積厚及び平均堆積率を用いた。また, 河道特性として, 河床勾配, pool 上流の step 高及び step 幅と pool 幅の比を用いた。単相関分析には, Pearson の積率相関係数を用いた。

また, 山地毎に各河床形態が出現した河床勾配の多重比較を行った。まず, Bartlett 検定を実施し, 不等分散である環境要因は Kruskal-Wallis 検定を, 等分散である環境要因に対しては一元配置分散分析を行った。Kruskal-Wallis 検定を実施し, 群間に差異が有為と認められた場合, Steel-Dwass 検定を行った。一元配置分散分析の結果, 群間に差異が有為と認められた場合は, Tukey の HSD 検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。上記の統計解析は統計解析ソフト R によって行った。

3. 結果

3.1 源頭部における河床形態の出現特性

3.1.1 各河床形態が河道区間の延長に占める割合

各山地の調査河川について、出現した河床形態が調査対象区間の延長に占める割合を図 3.1 に示す。分類した河床形態のうち、岩盤型 cascade 及び平瀬は、河道区間の延長や標高差に占める割合が小さいため、その他として分類した。

花崗岩の山地河川では、調査対象延長 L=4,066m のうち cascade、早瀬及び pool の割合が多く、それぞれ、28.7%、28.1%、及び 25.3%であった。一方、大きな落差を示す step 及び滝の割合はそれぞれ、8.5%及び 8.0%であった。各河床形態が河道延長に占める割合は河川によって傾向が異なり、最も急勾配な河川である内園川では、早瀬の割合が他の河川と比べて低く（17.8%）、cascade が河道の多くを占めていた（41.9%）。一方、調査区間内で河床勾配が最も緩やかな新飼川では、pool（37.0%）及び早瀬（34.5%）の割合が多かった（図 3.1(a)）。流紋岩の山地河川では、調査対象延長 L=4,149m のうち早瀬が最も多く区間全体の 28%を占めており、次いで、pool が 20%、cascade が 16%であった。一方、step 及び滝の延長割合はそれぞれ、5%、8%であった。調査区間が長く河床勾配が小さい鳥屋待沢で pool や早瀬の延長の割合が他の河川と比べて大きいものの、調査した河川間で各河床形態の延長の傾向は大きく変らなかった（図 3.1(b)）。砂岩の山地河川では、調査対象延長 L=2,728m のうち pool が最も多く区間全体の 38%を占めており、次いで、早瀬が 20%、cascade が 18%であった。一方、step 及び滝の延長割合はそれぞれ、8%、5%であった。花崗岩の河川と同様に、河床勾配の比較的小さい湯場ノ沢及び軍刀利沢で早瀬や pool の割合が大きく、河床勾配の大きい矢沢及び熊倉沢で cascade の割合が大きい傾向にあった（図 3.1(c)）。

次に、河床形態の出現特性と河床勾配の関係について、各河床形態が延長に占める割合と河床勾配の関係を図 3.2 に示す。

花崗岩の山地河川では、河床勾配 10-25%程度の勾配が小さい領域で早瀬及び step の延長割合が高く、河床勾配が 25%程度以上を超えると cascade 及び滝が卓越していた。特に、河床勾配が 30-40%の区間では、cascade が卓越しており、cascade のみで構成される河道区間がみられた。一方、step は河床勾配 10-30%程度の区間で確認されているが、河道延長に対する割合は小さかった。花崗岩の河川では、縦断勾配に伴って、各河床形態の延長に占める割合が変化することが確認された（図 3.2(a)）。流紋岩の山地河川では、花崗岩の河川と同様に河床勾配が 30%程度未満の領域で早瀬及び step の延長割合が高い結果となった。しかし、花崗岩の河川とは異なり、勾配が大きい領域でも早瀬及び pool の延長割合が高い結果となった。また、cascade の出現する勾配も花崗岩の河川と比べると小さく、延長割合も低い傾向にある。一方、step はいずれの河床勾配でも広く確認されているが、河道延長に対する割合は小さかった（図 3.2(b)）。砂岩の山地河川でも河床勾配の増加とともに早瀬や pool の延長割合が減少する傾向が確認された。特に、河床勾配が 10%未満の領域では、早瀬が卓越する傾向がみられた。花崗岩や流紋岩の河川では河床勾配の増加に伴い、早瀬及び pool の延長割合が増加し、cascade の延長割合が増加していたが、砂岩の河川では、河床勾配 20%程度の領域では、pool と cascade の両者の延長割合が高い河道区間がみられた（図 3.2(c)）。

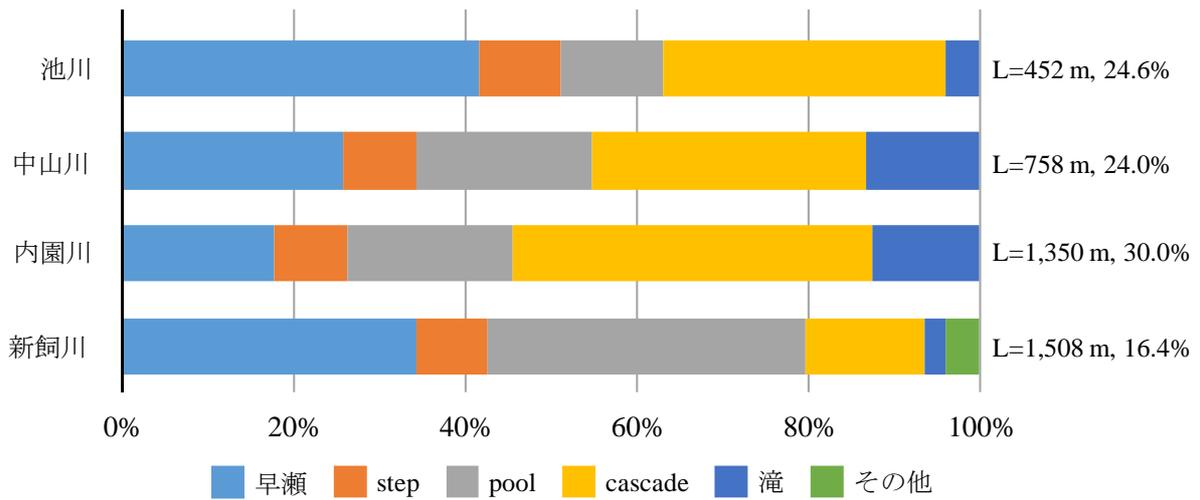


図 3.1 (a) 花崗岩山地河川の河道延長に占める河床形態の割合

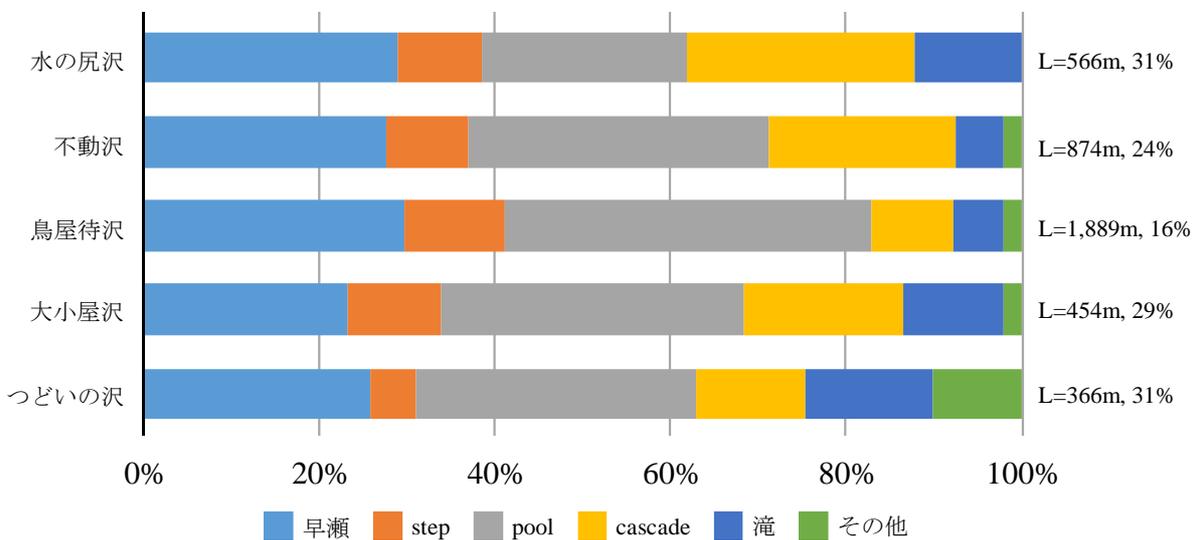


図 3.1 (b) 流紋岩山地河川の河道延長に占める河床形態の割合

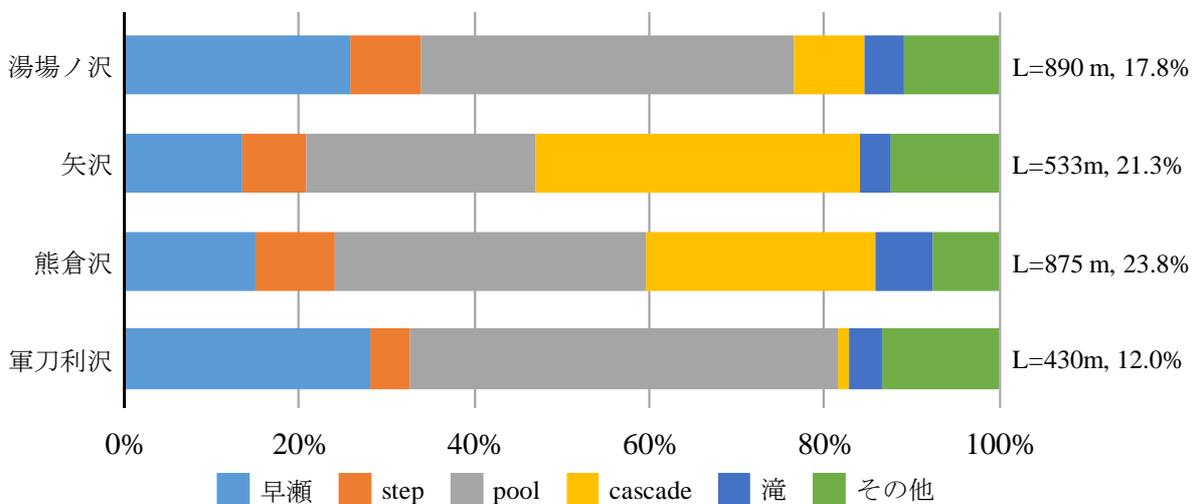


図 3.1 (c) 砂岩山地河川の河道延長に占める河床形態の割合

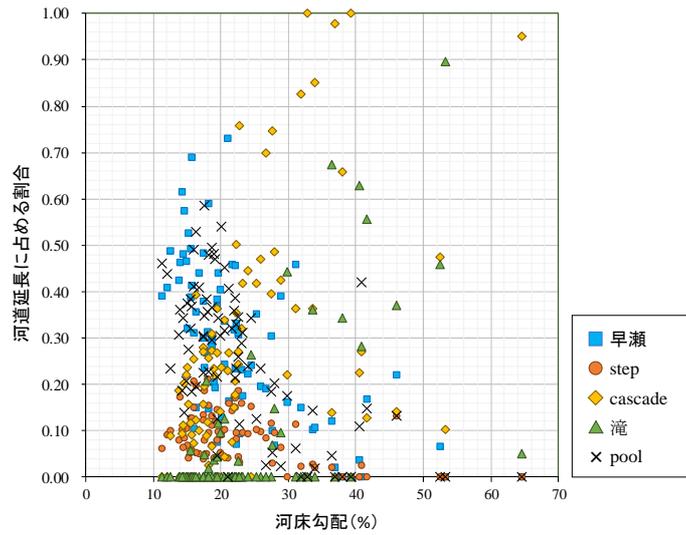


図 3.2 (a) 各河床形態が河道延長に占める割合と河床勾配の関係（花崗岩山地）

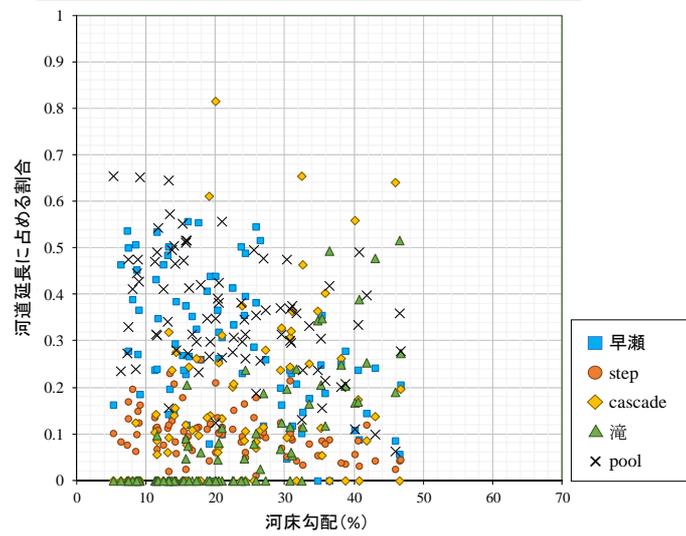


図 3.2 (b) 各河床形態が河道延長に占める割合と河床勾配の関係（流紋岩山地）

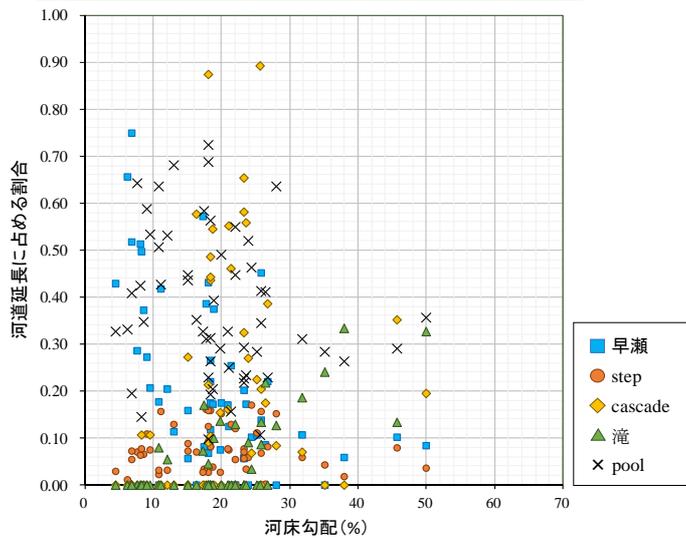


図 3.2 (c) 各河床形態が河道延長に占める割合と河床勾配の関係（砂岩山地）

3.1.2 各河床形態の比高差が標高差に占める割合

次に、各河床形態が標高差に占める割合と河床勾配の関係を図 3.3 に示す。延長に占める割合とは異なり、いずれの山地においても、比高差の大きい step, cascade, 滝によって標高差の多くが占められる結果となった。

花崗岩の山地河川では、河床勾配が 10-30%程度の領域で、step によって標高差の多くが占められており、河床勾配 20%程度までは早瀬が占める割合も 20-30%程度と比較的大きい、一方、河床勾配が 20%程度を超えると step の割合が減少し、cascade の占める割合が増加していた。さらに河床勾配が大きくなると、落差の大部分は滝で占められていた (図 3.3(a))。

一方、流紋岩の山地河川では、花崗岩で確認された河床勾配の増加に伴う step から cascade への優占する河床形態の遷移は確認されず、両者とも河床勾配 10-20%の区間で卓越していた。また、河床勾配の増加に伴って滝の割合が増加する点や、低勾配領域で早瀬が比較的多くの標高差を占めている点は花崗岩の河川と類似していた (図 3.3(b))。

砂岩の山地河川では、河床勾配 10%未満の区間で早瀬が卓越する傾向にあり、標高差に占める早瀬の割合は他の山地と比較して大きい。一方で、河床勾配の増加に伴う河床形態の遷移は、他の山地と比べて不明瞭であり、河床勾配 20-30%程度で滝の落差が優占的な河道区間がみられた。また、流紋岩の河川と同様に、step と cascade が優占する河床勾配に明瞭な違いはみられなかった (図 3.3(c))。

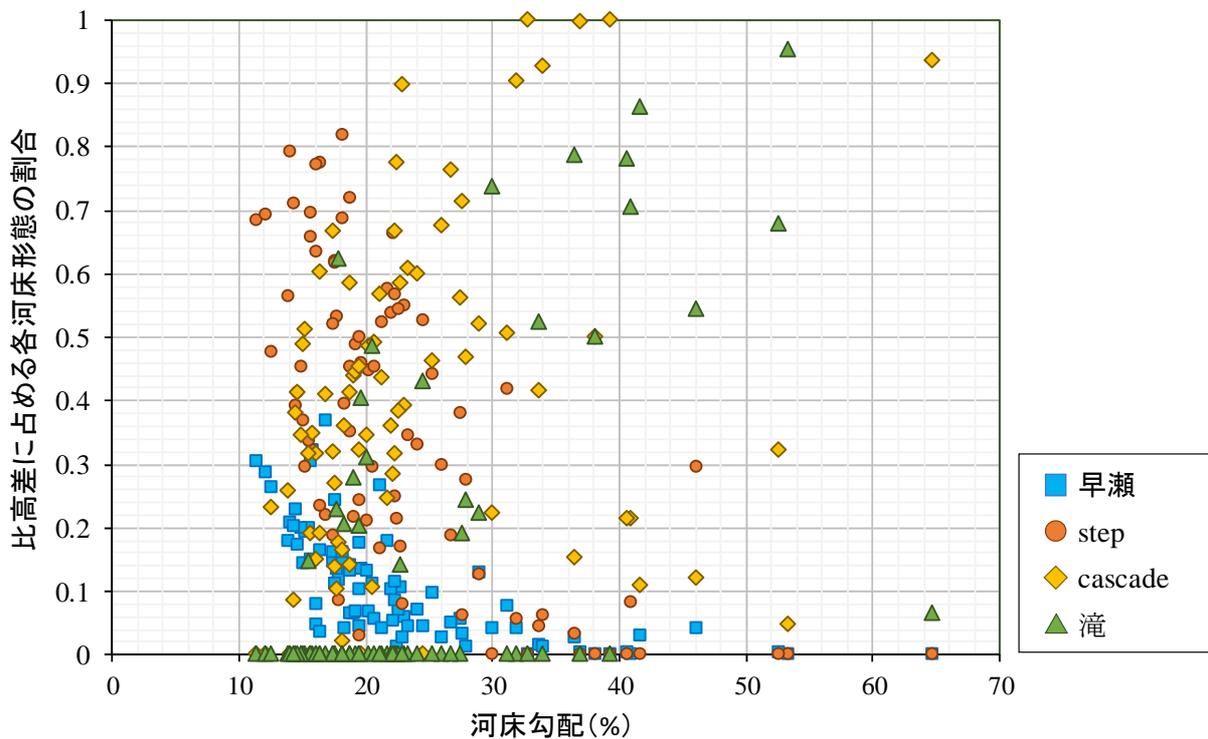


図 3.3(a) 各河床形態が河道区間の標高差に占める割合と河床勾配の関係 (花崗岩山地)

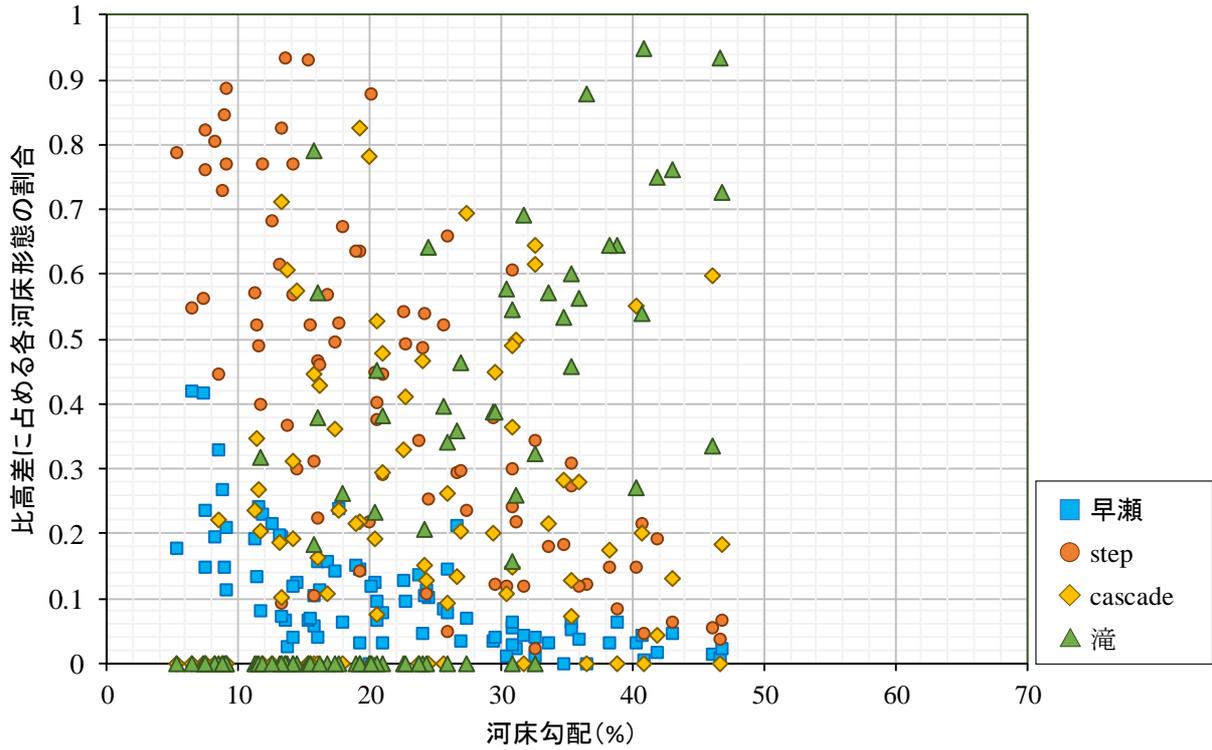


図 3.3 (b) 各河床形態が河道区間の標高差に占める割合と河床勾配の関係（流紋岩山地）

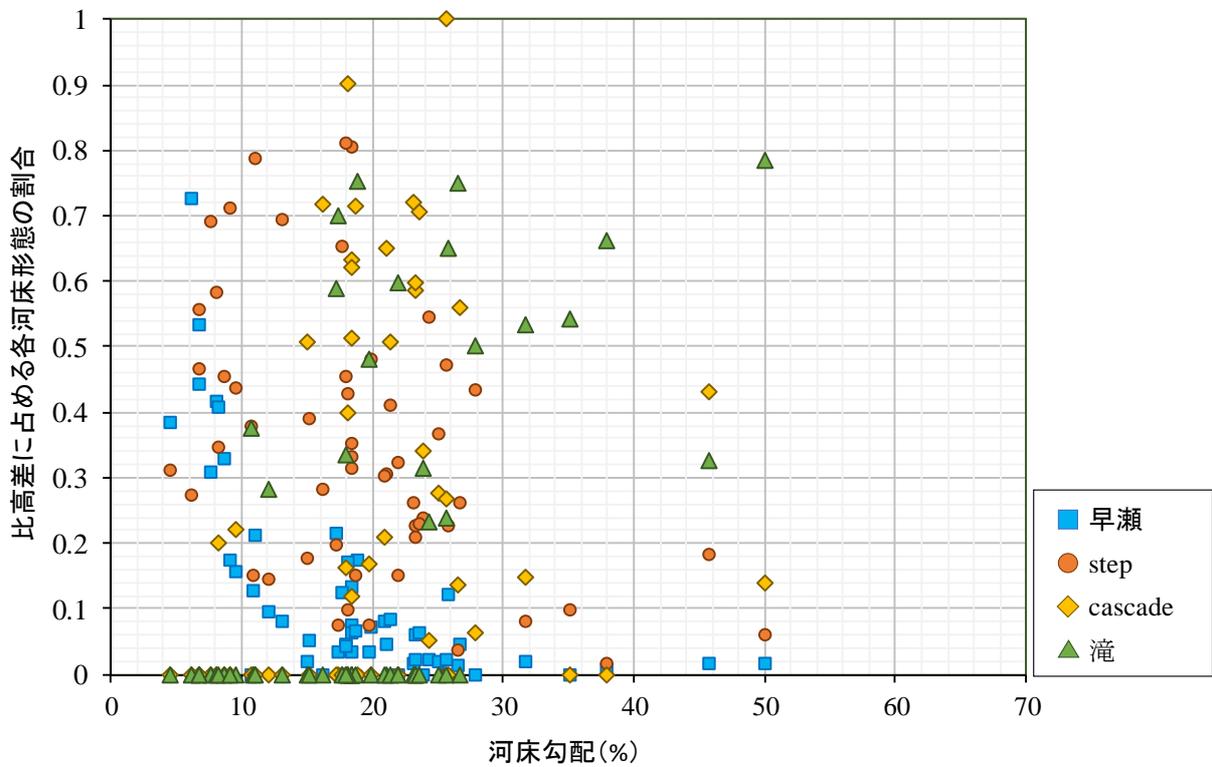


図 3.3 (c) 各河床形態が河道区間の標高差に占める割合と河床勾配の関係（砂岩山地）

3.2 Step-pool 構造と河道特性の関係

3.2.1 Step の構造的特徴とその支配要因

対象とした調査区間で 1,117 個の step が確認された。そのうち、岩盤が露出して落差を形成する基岩型が 122 個、倒木により形成された log step が 18 個存在していた。ここでは、礫から形成される 977 個の step を対象に step 高に影響を及ぼす要因について述べる。

表 3.1 は step 高を目的変数と河道特性要因を説明変数として重回帰分析を行った結果を、全対象地点及び地質別 (HC 型及び RD 型) に示したものである。全対象地点の重回帰分析の結果、構成礫径の最大値、step 幅及び jammed state の指標である jammed ratio (step 幅と構成礫径の平均値の比) が step 高に有為に影響を及ぼす要因として選択された。一方、step 高に影響を及ぼす要因は地質や step の形成過程によって異なる結果となった。花崗岩及び流紋岩の HC 型の step では、構成礫径の最大値、step 幅及び jammed ratio が有為な要因として選択されたのに対し、RD 型では、これらの指標に加え、斜面傾斜の最大値や河床勾配が有為な説明変数として選択された。一方、砂岩は花崗岩や流紋岩の step とは異なり、HC 型の step に対して構成礫径の最大値が選択されておらず、RD 型の step に対して step 幅が選択されない結果となった。

重回帰分析の結果、河床勾配、構成礫の最大径及び step 幅が step 高に影響を及ぼす要因であることから、step 高とこれらの指標の関係地質別に示した (図 3.4~3.6)。花崗岩の河川では、step 高と河床勾配の関係は、step 形成過程によって異なり、HC 型で有為な正の相関がみられたのに対し、RD 型では有為な相関関係はみられなかった。また、step 高と step 構成礫径の最大値及び step 幅は HC 型及び RD 型ともに有為な正の相関がみられた (図 3.4(a)~図 3.4(c))。流紋岩では、花崗岩と異なり、step 高と河床勾配の関係は RD 型で有為な正の相関がみられたが HC 型では確認されなかった。また、花崗岩と同様に step 高と step 構成礫径の最大値及び step 幅は HC 型及び RD 型ともに有為な正の相関がみられた (図 3.5(a)~図 3.5(c))。一方、砂岩では、河床勾配と step 高の関係は、流紋岩と同様に RD 型で有為な正の相関がみられたが HC 型では確認されなかった。また、最大粒径と step 高は両者の step 型で有為な正の相関が確認され、step 幅については HC 型の step で有為な正の相関が確認された (図 3.5(a)~図 3.5(c))。

表 3.1 step 高を目的変数とした重回帰分析結果

説明変数	全調査区間	花崗岩		流紋岩		砂岩	
	step高	HC型	RD型	HC型	RD型	HC型	RD型
		step高	step高	step高	step高	step高	step高
step構成礫径の最大値	0.29 ***	0.51 ***	0.50 ***	0.33 ***	0.17 *		0.47 ***
step幅	0.45 ***	0.29 ***	0.37 ***	0.43 ***	0.56 ***	0.49 ***	
斜面傾斜の最小値							
斜面傾斜の最大値			-1.67 *				
河床勾配	0.09 ***	-0.09	-0.19 *		0.29 ***	0.61 ***	
移動限界粒径			0.23 *	0.09		-0.48 ***	
jammed ratio	-0.35 ***	-0.24 **	-0.34 **	-0.46 ***	-0.32 ***	-0.22	-0.24 *
R ²	0.50	0.49	0.32	0.50	0.63	0.47	0.36
F	241.8 ***	52.14 ***	17.51 ***	45.65 ***	76.77 ***	30.3 ***	19.31 ***

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

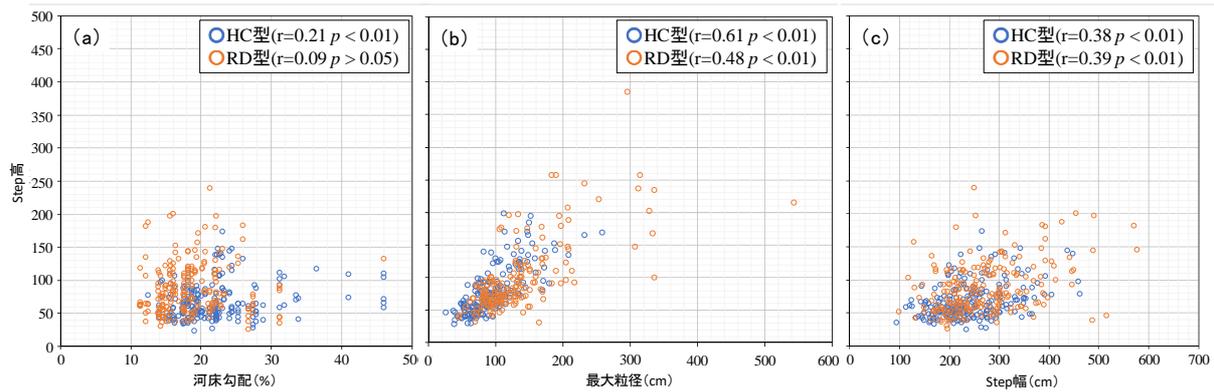


図 3.4 step 高と (a)河床勾配, (b) 最大粒径, (c) step 幅の関係 (花崗岩山地)

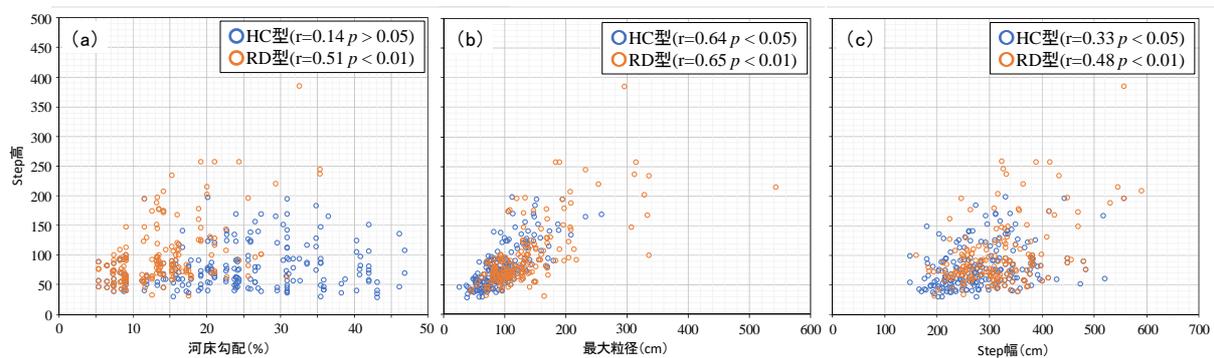


図 3.5 step 高と (a)河床勾配, (b) 最大粒径, (c) step 幅の関係 (流紋岩山地)

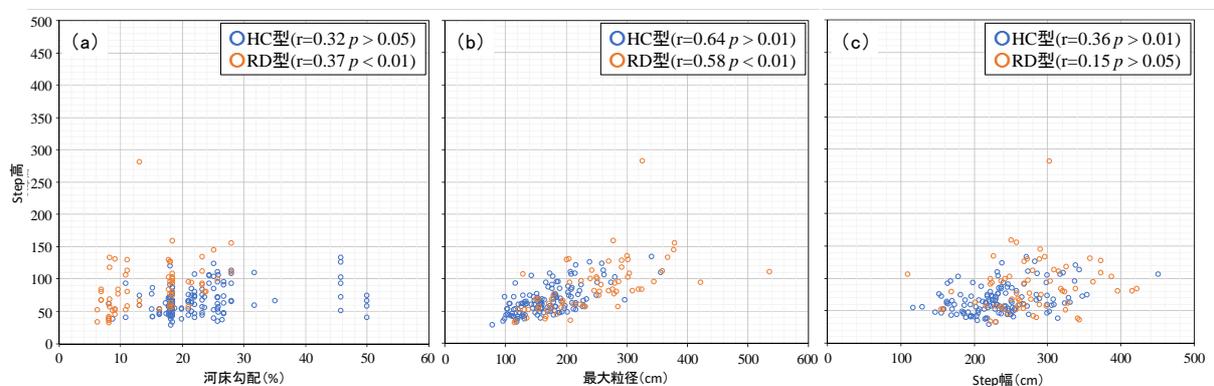


図 3.6 step 高と (a)河床勾配, (b) 最大粒径, (c) step 幅の関係 (砂岩山地)

3.2.2 Step の構造的特徴とその支配要因

Pool の構造的特徴を示す指標と河道特性との相関係数を表 3.2 に地質別に示す。Pool の規模を示す指標である pool 長, pool 幅, 水深は河床勾配の増加に伴って減少し, step 高の増加に伴って増大する傾向が, 各地質に共通してみられた。しかし, その相関関係は地質によって傾向が異なっており, 花崗岩と比べ流紋岩や砂岩で河床勾配と pool の規模や堆積深の程度を示す指標との相関が強い結果となった。一方, step 幅と pool 幅の比は全ての地質で, 多くの pool 構造を示す指標

と有為な相関が確認された。Pool 幅に対する step 幅が小さい河川ほど pool の規模や土砂の堆積が増加する傾向が確認された。

表 3.2 pool の構造的特徴と河道特性の関係

	花崗岩			流紋岩			砂岩		
	河床勾配	上流のstep高	step幅/pool幅	河床勾配	上流のstep高	step幅/pool幅	河床勾配	上流のstep高	step幅/pool幅
pool長	-0.13 *	0.26 ***	-0.35 ***	-0.41 ***	0.16 **	-0.43 ***	-0.37 ***	0.28 ***	-0.25 ***
pool幅	-0.12 *	0.23 ***	-0.64 ***	-0.33 ***	0.32 ***	-0.69 ***	-0.24 ***	0.23 ***	-0.60 ***
縦横比	0.03 **	-0.11	-0.33 ***	0.09	0.05	-0.15 **	0.23 **	-0.17 *	-0.22 **
平均水深	-0.15	0.14 *	-0.17 **	-0.26 ***	0.16 **	-0.45 ***	-0.14 *	0.35 ***	-0.18 **
最大水深	-0.14 *	0.14 *	-0.18 **	-0.23 ***	0.17 **	-0.41 ***	-0.12	0.37 ***	-0.21 **
pool体積	-0.16 **	0.20 ***	-0.39 ***	-0.31 ***	0.21 ***	-0.65 ***	-0.29 ***	0.37 ***	-0.24 ***
最大堆積深	0.06	0.05	-0.16 **	-0.15 **	0.16 **	-0.43 ***	-0.05	0.24 ***	-0.20 **
平均堆積率	0.11 *	-0.02	-0.06	0.04	0.16 **	-0.17 **	0.09	-0.01	-0.01

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

4. 考察

4.1 河床形態の遷移と縦断勾配

本研究で対象とした3種の地質からなる山地で、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3.3(a)~(c))。対象とした河床形態が出現する河床勾配のboxplotを地質別に示したものが図4.1(a)~(c)である。Kruskal-Wallis検定の結果、花崗岩の河川ではstepと早瀬の間を除き、各河床形態が出現した河床勾配に有意な差異が確認された($p < 0.001$)。標高差に占める割合と河床勾配の関係では、早瀬とstepは標高差に占める割合は大きく異なるものの、両者ともに河床勾配10-30%の区間で出現頻度が高く、出現する河床勾配に大きな差異が生じなかったものと考えられる(図4.1(a))。流紋岩山地の河川では、Tukey-HSD検定の結果、早瀬及びcascade、早瀬及びstepを除く群間に有意な差がみられた($p < 0.001$)。流紋岩の河川では、花崗岩の河川と異なり、cascadeとstepが出現する河床勾配に明瞭な差異がみられず(図4.1(b))、その結果、step、cascade及び早瀬の出現する河床勾配に有意な差異が確認されなかったものと考えられる。一方、砂岩ではTukey-HSD検定の結果、全ての河床形態の間で出現する河床勾配に有意な差異が確認された(図4.1(c))。砂岩の河川では、早瀬が卓越する河床勾配が10%未満であり、他の地質帯を流れる河川と比べて卓越する河床勾配が小さいため(図3.3(c))、このような結果になったものと考えられる。

本研究の結果、cascadeが出現する河道区間の河床勾配の上限は、花崗岩山地河川で53%、流紋岩山地河川で47%、砂岩山地河川で50%であった。これは、流紋岩の安息角の下限値57%⁶⁶⁾、花崗岩の水中安息角26.7°⁶⁷⁾、崩壊地に残留する表面傾斜角33.5°⁶⁸⁾、流紋岩山地の地すべりを生じた崖の傾斜角35°⁶⁹⁾よりもやや小さい値である。これは、各山地で調査対象とした河道が崩壊後安定した地形であることや流水の影響による河床の安定によるものと考えられる。一方、cascadeが出現する河床勾配は各山地ともに25%程度であり、勾配が30%程度を超えると、堆積物が安定せず、cascadeから滝へと河床形態が遷移するものと考えられる。Montgomery and Buffington(1997)はcascadeの発生領域の上限を河床勾配20%程度としているが、本研究では出現勾配の中央値が24%であり、安息角付近まで発生することが明らかとなった⁷⁾。また、石礫の堆積には河道の蛇行、急縮、急拡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。加えて、山地河川では局所的な土砂の側方流入があるため、土砂供給源に着目した河床形態の分布についても研究が必要である。

これまで、step-pool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⁷⁾、0.02より急で河床材料が堆積傾向にある区間¹⁰⁾、国内の事例として、0.02以上⁷⁰⁾、0.025以上⁷¹⁾、0.04~0.05⁷²⁾が示されている。一方、本研究では、対象とした源頭部の山地河道では、step-poolは10%~25%の区間で卓越し、40%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、源頭部に近い山地河道を中心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。

山地河川の河床形態の構造や出現特性は、地質による影響を強く受けることが指摘されているため^{46), 47)}、地質間で各河床形態の出現する河床勾配について多重比較を行った(図4.2(a)~

(d). その結果，滝，cascade，及び step では地質間の差異はみられなかったが，早瀬では有為な群間の差異がみられ，砂岩の河川で他の地質帯より出現勾配が有為に小さい結果が得られた．砂岩の河川では河床勾配が 10%未満の領域で早瀬が卓越する河道区間が多く，そのため他の山地とは異なる結果となったものと考えられる．

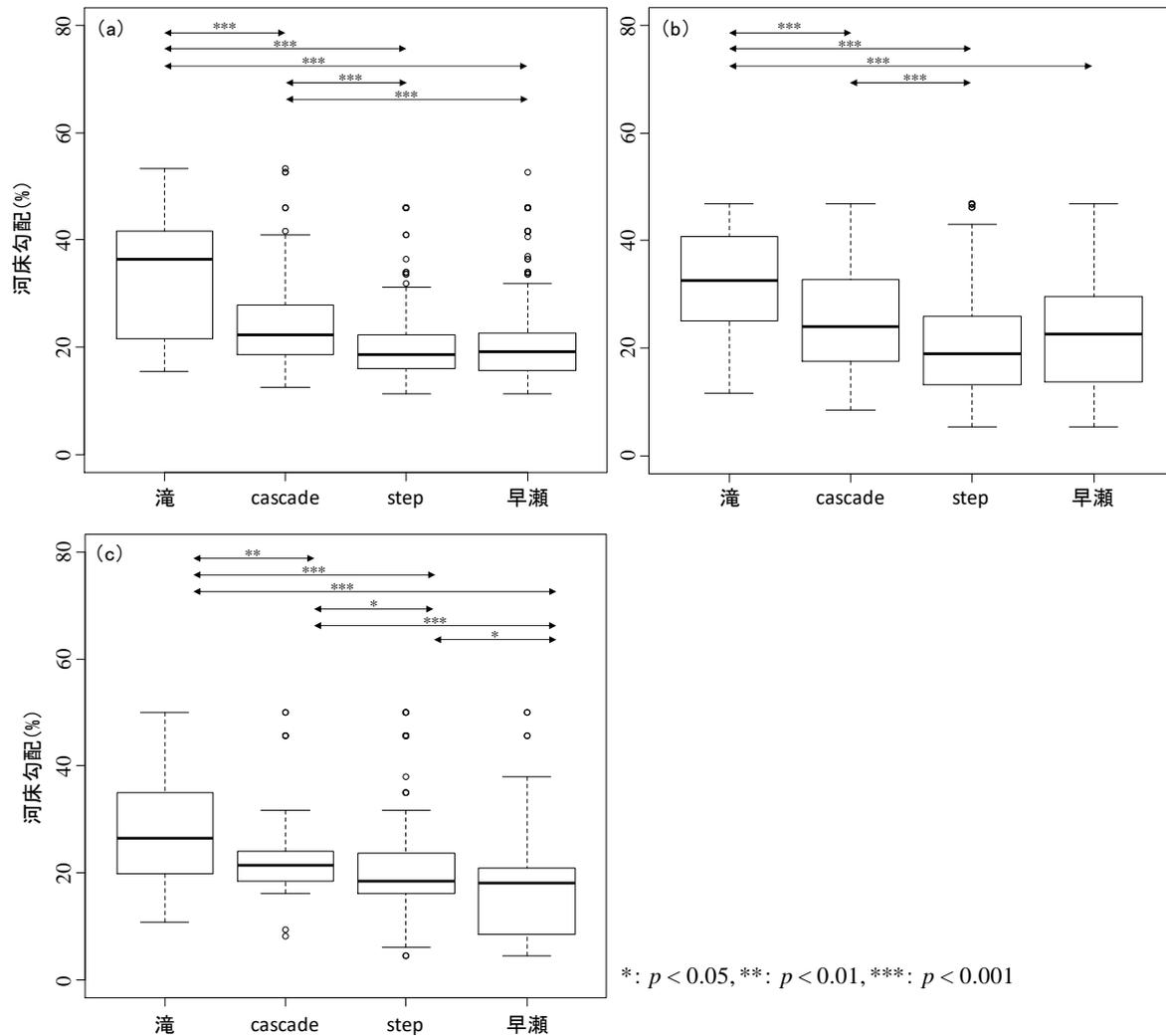


図 4.1 各河床形態が出現する河床勾配の多重比較(a)花崗岩，(b)流紋岩，(c)砂岩

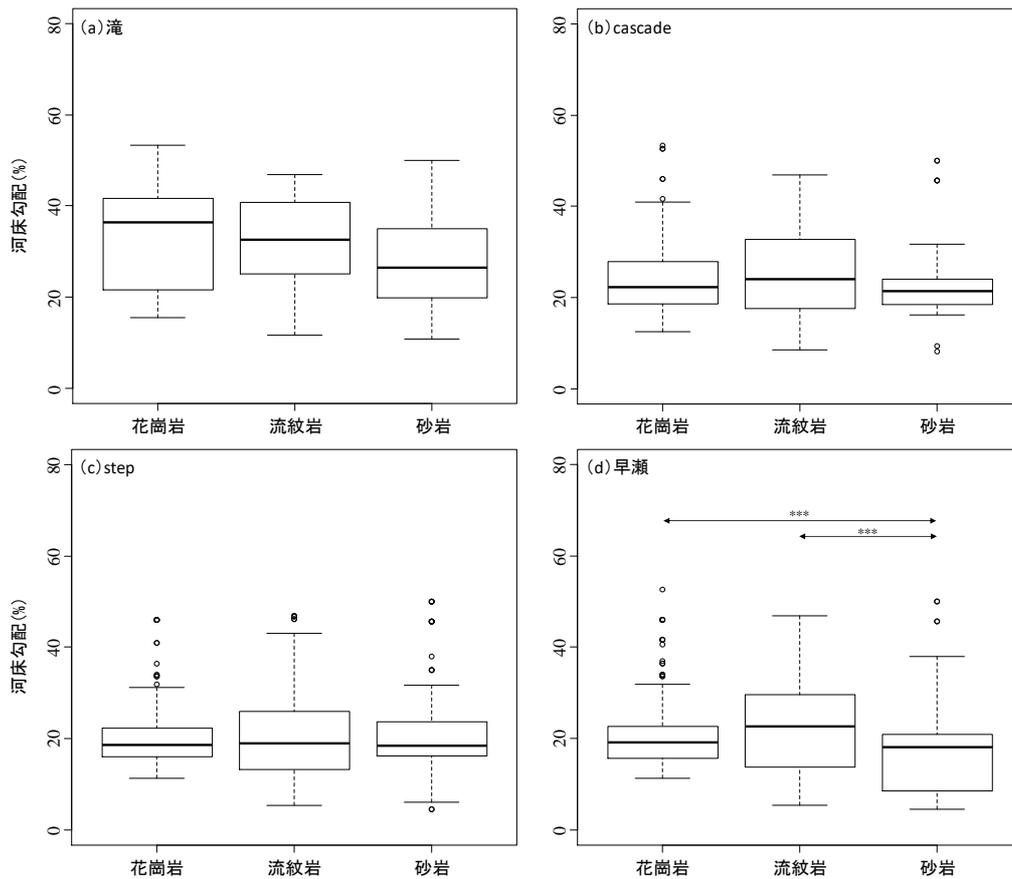


図 4.2 各河床形態が出現する勾配の地質間の比較 (a) 滝, (b) cascade, (c) step, (d) 早瀬

4.2 Step 構造と規定要因

Step 高と河道特性指標の関係を調べた結果, step 構成礫径の最大値, 河床勾配, 縦断 step 幅, jammed ratio などが step 高を規定する要因として選択された (表 3.1). なかでも, step 構成礫径の最大値は, 単相関分析の結果, 全ての地質帯及び全てのタイプの step で有為な正の相関が確認されており, step 高を規定する重要な要因である. 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²⁴⁾, 90% 粒径の 2 倍程度²³⁾, アーマ・コートの平均粒径の 0.8 倍程度⁷³⁾であることが示されている. 本研究で得られた, step 高は step 構成礫径の最大値の, 花崗岩で 40% (HC 型 73%, RD 型 36%), 流紋岩で 59% (HC 型 71%, RD 型 56%), 砂岩で 57% (HC 型 56%, RD 型 57%) であった. 砂岩を除き RD 型の方が, step 構成礫径の最大値に対して小さい step 高となる傾向にあった. これは, RD 型の step が通常の洪水は移動し得ない巨石に洪水で運搬された石礫が堆積することで形成されるため, 最大径に対して step 高が小さいものと考えられる. また, 花崗岩の RD 型では, step 構成礫径の最大値に対して step 高が最も小さい結果となった. これは, 対象とした花崗岩山地が断裂の多い白亜紀花崗岩地帯であり^{49),50)}, 風化に伴いコラストーンと細粒部に分かれることから, 巨石が供給されやすい環境のために生じたものと考えられる. 一方, 洪水の作用で形成される HC 型では, 降水量や流量等の水文・水理現象によって step 高が規定されるため, 地質による差異が生じにくいものと考えられる.

Step-pool 構造は, 流水に対する抵抗として作用し, 河岸や河床の安定を図る機能がある^{15),16)}. Step-pool 構造の抵抗としての機能を示す指標として, 凹凸の形状を先鋭度 (step 高と step 長の比

(H/L) と定義し、河床勾配との関係が示されている。Abrahams et al. (1995) は水理模型実験によって step-pool は最も安定した形態、即ち、抵抗が最大となる配列に発達することを明らかにし、 $H/L/S$ は一定の値 (1~2) をとると主張している¹⁵⁾。図 4.3 は、既往研究で明らかにされている $H/L/S$ 値^{15), 24), 74-77)} と本研究で得られた結果の比較を示したものである。既往研究で得られている H/L と S の関係は勾配が 20% 未満がほとんどであり、 $H/L/S$ 値 1~2 の領域に plot が集中している。一方、当該研究で得られた、 H/L と S の関係では、同一の勾配に対してより大きな H/L が得られている。Chartrand & Whiting (2000) は Idaho の河川の現地調査結果が、Abrahams et al. (1995) が示した数字よりもより広範囲であることを示しており、本研究の調査結果を支持している²⁴⁾。本研究では、勾配が急な源頭部を対象としており、step 構成礫の供給が上流からだけでなく、山腹崩壊に伴う側方流入も多く、そのために、洪水によって運搬されるよりも大きな石礫によって step が形成されているため、 $H/L/S$ が既往研究の値よりも大きくなっていると考えられる。本研究で得られた $H/L/S$ の値は概ね 0.5~4.0 である。

源頭部では、step に関連する構造として、step 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 種の存在が明らかにされている⁵⁹⁾。これらの河床形態が発達する過程として、step 間の距離が長い河床勾配が小さい領域では、流水のエネルギーが河床を scour して pool を形成するが、step 間隔が長いため、洗堀された pool 部の下流端と次の step との間に距離があり、その区間が早瀬として形成されるためと考えられる。一方、Step 間隔が短くなると、流水のエネルギーによって形成される pool の長さと step 間隔が同程度となり、早瀬を伴わない step-pool が形成される。さらに、step 間隔が短くなると、下流の step が干渉し、pool の形成が不十分な step-早瀬河道が形成されるものと考えられる。この現象は、step の間に生じる洗堀孔が step 間の距離に強く影響される”geometric interference”^{32), 78)}に起因するものと考えられる。また、geometric interference の発生は、河床勾配と強い関係があることが明らかにされている^{78), 79)}。既往研究では、河床勾配が 2% 以上で、step 間距離が長い場合は、geometric interference”の発生が抑制され⁸⁰⁾、勾配が 2%~4% で sill が存在する場合に洗堀孔の発達を抑制される”morphodynamic interference”が生じることが指摘されている⁸¹⁾。本研究で対象とした勾配 10% を超える源頭部の研究はみられないが、源頭部においても step 関連構造に geometric interference が寄与していることは明白である。

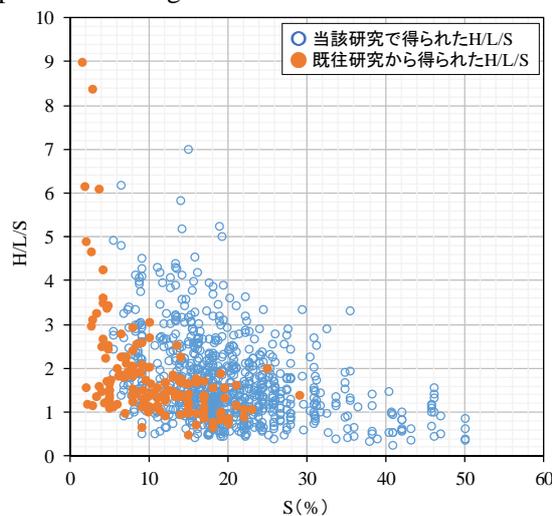


図 4.3 当該研究で得られた $H/L/S$ と既往研究の結果の比較

4.3 Pool 構造と規定要因

Pool 部は生物の生息空間として重要であることが指摘されており、その規模は生物群集構造や生息量に影響を及ぼしている。Inoue & Nakano (1999) は魚食性魚類が生息しない河川では、サクラマスは幼魚、成魚共に水深が大きく流速が遅い pool 部に多く生息していることを明らかにした⁸²⁾。Nakano & Kaeriyama (1995) はイワナの利用頻度が最も高い採餌場は 81~120cm の淵 (pool) としている⁸³⁾。また、pool は、aquatic organisms に洪水中の refuge としての機能があることが明らかとされており^{84),85)}、平常時及び洪水時の両者において重要な空間である。従って、pool の形態に及ぼす河道特性要因を把握することは重要である。しかし、step に関する研究事例が多いのに対し、pool 部の構造及びその規定要因に着目した研究は少ない。Chartrand & Whiting (2000) の Idaho での観測結果では、pool 深は河床勾配が増大すると減少する傾向がみられた²⁴⁾。これは勾配が急となると、step 高と step 間隔の比が河床勾配に漸近するという結果とも一致する。Comiti et al. (2005) は自然の step-pool と砂防堰堤によって勾配をコントロールされた河道の pool の形状を比較した結果、両者に大きな差異はなく、step 及び人工構造物に関わらず pool の形状は水流の落下高によって規定されることを示した⁸⁶⁾。

これらの研究は河床勾配が 5%~10% の程度で得られたものであり、本研究で対象とした河床勾配 1/10 程度以上の源頭部とは異なる領域の結果である。しかし、当該研究においても、全ての山地で pool の規模を示す指標である pool の長さ、幅及び堆積と上流の step 高に正の相関関係がみられている。また、河床勾配の増加と pool の規模は負の相関関係があり (表 3.2)、Chartrand & Whiting (2000) の観測結果を支持する結果となった。

4.4 急勾配河川における河道改修技術への応用

山地河川の河床形態のなかでも step-pool 構造は、落差の緩和、エネルギー減勢機能、河床及び河岸の安定の観点から、自然再生や河川改修の要素技術として着目されてきた。しかし、源頭部を含めた山地河川の河床形態の出現特性や step-pool 構造と流域条件及び河道特性の関係が未解明であることから、山地河道の環境に配慮した河道改修技術は体系化が為されていない。本章では、本研究で得られた知見から山地河道の河川改修技術に応用可能な知見を述べる。非常に急勾配な源頭部では、step-pool 構造だけでなく、滝や cascade が落差を緩和する河床形態として頻繁に出現している。特に cascade は川幅が広く土砂の堆積空間としても重要であることから、急勾配河道における土砂災害防止を含めた河川改修に際し、有効な河床形態である。これまで、step-pool 構造を中心に山地河道に関する研究が行われてきたが、cascade や滝の減勢効果や土砂堆積機能についても研究を実施し、土砂管理も含めた山地河道の河川改修技術を確立する必要がある。また、step-pool 構造と河道特性の関係については、形成過程によって相関の強い要因が異なることから、河川の自然再生や災害復旧の際に導入する場合にどの理論に基づく step を導入するかは重要な問題である。災害復旧等、大規模な洪水や山腹崩壊により、河道内に巨石が多数存在する場合は、巨石を存置することで改修後の中小洪水による礫の補足によって step-pool 形成が期待できる。また、河道の急縮部では、河岸の粗度を上げるなど jammed state を創出することで step を形成させることも可能である。一方、上流からの供給土砂が step を形成するに充分でない場合や、洪水時に step の破壊・再形成といった河床変動を許容し難い場合は、Hydraulic control model に基づき、計画対象の洪水に対して移動しない step-pool 構造とすることが適当と考えられる。

5. 結論

本研究は、山地河川の自律形成機構の解明及び山地河道における自然再生技術の構築に貢献するため、砂防堰堤等の人為的影響が極めて少ない複数の地質の山地源頭部を対象に、(1) 河床形態の出現特性を明らかにすること、(2) step-pool 構造と河道特性及び流域条件の関係を明らかにすることを目的としたものである。得られた知見を以下に要約する。

- ・本研究で対象とした花崗岩、流紋岩及び花崗岩の山地河川では、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。河床勾配に応じた河床形態の遷移は地質によって差異があり、花崗岩で step と cascade が卓越する河床勾配が明瞭に異なるのに対し、流紋岩では両者が混在していた。

- ・既往研究では、階段状河床形態の発生領域は、河床勾配 2~5%程度とされてきたが、本研究では、step-pool 構造は 15~30%の区間で卓越し、50%程度の勾配まで step-pool が存在することが明らかとなった。

- ・step 高とその支配要因である河道特性の関係は、流水によって形成される HC 型と偶発的要因で形成される RD 型で異なり、HC 型の step 高が step 構成礫径の最大値や step 幅と正の相関があるのに対し、RD 型の step 高は、これらに加え河床勾配と正の相関関係がみられた。

- ・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-pool 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、地質や気候帯別の更なる知見の集積が必要である。

参考文献

- 1) Milliman, J.D., Syvitski, J.P.M. (1992) Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*, Vol.100, pp.525-544.
- 2) 中村太士 (1992) : 環境問題に対する砂防の視点と今後の課題, 砂防学会誌, Vol. 45, pp.29-37.
- 3) Bombino, G., Zema, D.A., Denisi, P., Lucas-Borja, M.E., Labate, A., Zimbone, S.M. (2019) Assessment of riparian vegetation characteristics in Mediterranean headwaters regulated by check dams using multivariate statistical techniques. *Science of the Total Environment*, Vol.657, pp.597-607.
- 4) Hallet, B. (1990) Spatial self-organization in geomorphology: from periodic bedforms and patterned ground to scale-invariant topography. *Earth Science Reviews*, Vol.29(1-4), pp.57-75.
- 5) Phillips, C.B., Jerolmack, D.J. (2016) Self-organization of river channels as a critical filter on climate signals. *Science*, Vol.352(6286), pp.694-697.
- 6) Rosgen, D.L. (1996). Applied River Morphology. Wildland Hydrology, Pagosa Spring, CO.
- 7) Montgomery, D.R., Buffington, J.M. (1997) Channel-reach morphology in mountain drainage. *Geological Society of America Bulletin*, Vol.109, pp.596-611.
- 8) Waters K.A. & Curran J.C. (2012) Investigating step-pool sequence stability. *Water Resources Research*, Vol.48, W07505.
- 9) Wohl, E. (2013) Mountain Rivers Revisited. Water Resources Monograph Book 19. American Geophysical Union. pp. 1-573.
- 10) Grant G.E., Swanson F.J., Wolman M.G. (1990) Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, Vol.102, pp.340-352.
- 11) Halwas, K.L., Church, M. (2002) Channel units in small, high gradient streams on Vancouver Island, British Columbia. *Geomorphology*, Vol.43(3-4), pp.243-256.
- 12) 今泉文寿, 土屋智, 逢坂興宏 (1992) : 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.
- 13) 大川侑里, 金折裕司, 今岡照喜 (2012) : 白垂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.
- 14) 藤田正治, 澤田豊明, 水山高久 (2003) : 山地流域における濁度変化と土砂動態, 水工学論文集, Vol.47, pp.739-744.
- 15) Abrahams A.D., Li G., Atkinson J.F. (1995) Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance. *Water Resource Research*, Vol.31, pp.2593-2602.
- 16) Chin, A. (2005) Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, Vol.29, pp.275-296.
- 17) 芦田和男・高橋保・澤田豊明 (1976) : 山地流域における出水と土砂流出 (5), 京都大学防災研究所年報, Vol.19, B-2, pp.345-360.
- 18) Wilcox A.C., Wohl E.E., Comiti F., Mao L. (2011) Hydraulics, morphology, and energy dissipation in an alpine step-pool channel. *Water Resource Research*, Vol.47, W07514.
- 19) Heede, B.H. (1972) Influences of a forest on the hydraulic geometry of two mountain streams. *Water Resource Bulletin*, Vol.8, pp.523-530.

- 20) Wohl, E.E., Madsen, S., MacDonald, L. (1997) Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology*, Vol.38, pp.267-279.
- 21) Chin, A. (1999) The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, Vol.27, pp.191-204.
- 22) Judd, H.E. (1964) A study of bed characteristics in relation to flow in rough, high-gradient natural channels. Unpublished PhD thesis, Utah State University, Logan.
- 23) Billi, P., D'Agostino, V., Lenzi, M.A., Marchi, L. (1998) Bedload, slope and channel processes in a high-altitude torrent. *Water Resources Publications*, pp.15-38.
- 24) Chartrand, S.M., Whiting, P.J. (2000) Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.25, pp.583-600.
- 25) Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E.E., Lenzi, M.A. (2007) Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology*, Vol.340(1-2), pp.48-62.
- 26) Wohl, E.E., Thompson, D.M. (2000) Velocity characteristics along a small step-pool channel. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.25(4), pp.353-367.
- 27) Lee, A.J., Ferguson, R.I. (2002) Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology*, Vol.46(1-2), pp.59-71.
- 28) Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., Wohl, E., David, G.C.L. (2014) Spatial characterization of roughness elements in high-gradient channels of the Fraser Experimental Forest, Colorado, USA. *Water Resource Research*, Vol.50(7), pp.6015-6029.
- 29) Torabizadeh, A., Tahershamsi, A., Tabatabai, M.R.M. (2018) Measurement of dimensionless Chezy coefficient in step-pool reach (Case Study of Dizin River in Iran). *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.61, pp.15-25.
- 30) Lenzi, M.A. (2001) Step-pool evolution in the Rio Cordon, Northeastern Italy. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.26(9), pp.991-1008.
- 31) Turowski, J.M., Yager, E.M., Badoux, A., Rickenmann, D., Molnar, P. 2009. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.34(12), pp.1661-1673.
- 32) Lenzi, M.A. Marion, A., Comiti, F., Gaudio, R. (2002) Local scour in low and high gradient streams at bed sills. *Journal of Hydraulic Research*, Vol.40, pp.731-739.
- 33) Weichert, R.B., Bezzola, G.R., Minor, H.-E. (2008) Bed morphology and generation of step-pool channels. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.33(11), pp.1678-1692.
- 34) Comiti, F., Cadol, D., Wohl, E. (2009) Flow regimes, bed morphology, and flow resistance in self-formed step-pool channels. *Water Resource Research*, Vol.45(4), W04424.
- 35) Zimmermann, A., Church, M., Hassan, M.A. (2010) Step-pool stability: Testing the jammed state hypothesis. *Journal of Geophysical Research*, Vol.115, F02008.
- 36) Johnson, J.P.L., Aronovitz, A.C., Kim, W. (2015) Coarser and rougher: Effects of fine gravel pulses on experimental step-pool channel morphodynamics. *Geophysical Research Letters*, Vol.42(20), pp.8432-8440.
- 37) Hohermuth, B., Weitbrecht, V. (2018) Influence of Bed-Load Transport on Flow Resistance of Step-Pool

- Channels. *Water Resource Research*, Vol.54(8), pp.5567-5583.
- 38) Stefano, C.D., Nicosia, A., Palmeri, V., Pampalona, V., Ferro, V. (2020) Dye-tracer technique for rill flows by velocity profile measurements. *Catena*, Vol.185, 104313.
- 39) Giménez, R., Zubieta, E., Govers, G., Campo-Bescos, M.A. (2019) In-situ assessment of the spatial arrangement of step-pool units on eroded rills. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.44(14), pp.2731-2740.
- 40) Golly, A., Turowski, J.M., Badoux, A., Hovius, N. (2019) Testing models of step formation against observations of channel steps in a steep mountain stream. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.44(7), pp.1390-1406.
- 41) Whittaker, J.G., Jaeggi, M.N.R. (1982) Origin of step-pool systems in mountain streams. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol.108, pp.758-773.
- 42) Wohl E.E., Grodek T. (1994) Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel. *Geomorphology*, Vol.9, pp.117-126.
- 43) Allen, J.R.L. (1983) A simplified cascade model for transverse stone-ribs in gravelly streams. *Proceedings of the Royal Society of London*, A385, pp.253-266.
- 44) Church, M., Zimmermann, A. (2007) Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resource Research*, Vol.43(3), W03415.
- 45) Curran, J.C., Wilcock, P.R. (2005) Characteristic dimensions of the step-pool bed configuration: An experimental study. *Water Resource Research*, Vol.41(2), pp.1-11.
- 46) 須賀堯三 (1992) : 川の個性－河相形成のしくみ－, 鹿島出版会, 東京.
- 47) 田代喬・辻本哲郎 (2015) 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, pp.35-45.
- 48) 下山正一・松浦浩久・日野剛徳 (2010) : 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) 佐賀地域の地質, 産業技術総合研究所地質調査所.
- 49) 大和田正明・羽田量一・矢田純・中村舞・小山内康人 (2005) : 新たに見いだされた北部九州, 背振山地西部のグラニュライト相変成岩類, 地質学雑誌, Vol.111, pp.50-53.
- 50) 柚原雅樹・宇藤千恵・小路泰之・川野良信 (2006) : 那珂川上流, 五ヶ山地域の白亜紀花崗岩類に発達する断裂系, 福岡大学理学集報, Vol.36, pp.55-67.
- 51) Taira, A., Tokuyama, H., Soh, W. (1989) Accretion tectonics and evolution of the Pacific Ocean Margins, in Ben-Avraham, Z., ed., *The Evolution of the Pacific Ocean Margins*. New York, Oxford University Press, 100-123.
- 52) Kawate, S., Arima, M. (1998) Petrogenesis of the Tanzawa plutonic complex, central Japan : Exposed felsic middle crust of the Izu-Bonin-Mariana arc. *The Island arc*, Vol.7, pp.342-358.
- 53) Hyodo, H., Niitsuma, N. (1986) Tectonic Rotation of the Kanto Mountains, Related with the Opening of the Japan Sea and Collision of the Tanzawa Block since Middle Miocene. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, Vol.38, pp.335-348.
- 54) 柴正博 (2016) : 伊豆半島は南から来たか?, 化石研究会会誌, Vol.49, pp.35-43.
- 55) 河尻清和 (2012) : 神奈川県域に分布する四万十帯の地質, 神奈川博調査研報, Vol.14, pp.163-174.

- 56) 酒井彰 (1987) : 五日市地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 75pp.
- 57) 牧野泰彦 (1973) : 小仏層群の層序学的ならびに堆積学的研究, 地質学雑誌, Vol.79, pp.299-308.
- 58) 鎌田祥仁・指田勝男・猪郷久義 (1991) : 関東山地南西部に分布する白亜系増富層群, 地質学雑誌, Vol.97, pp.157-169.
- 59) 巖島怜・佐藤辰郎・西田健人・真砂祐貴・坂田知謙・島谷幸宏 (2017) : 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, 応用生態工学会, Vol.19, 165-180.
- 60) 巖島怜・佐藤辰郎 (2018) : 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, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, pp. I_1255-I_1260.
- 61) 藤田正治・道上正規・澤田豊明 (1999) : 階段状河床の洪水による変形に関する現地調査, 水工学論文集, Vol.43, pp.725-730.
- 62) 井口昌平 (1957) : コウ水の到達速度に関するいわゆる Rziha の公式と Kraven の表の由来について, 土木学会誌 42-1, pp.25-27.
- 63) 岩垣雄一 (1956) : 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, Vol.41, pp.1-21.
- 64) Comiti, F., Mao, L., Lenzi, M. A., Siligardi, M. (2009) Artificial steps to stabilize mountain rivers: A post-project ecological assessment, *River Research and Applications*, Vol.25, pp.639-659.
- 65) 浅野友子・星野晋一郎・内田太郎・秋山浩一 (2012) : 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.
- 66) Tuffen, H., Pinkerton, H., McGarvie, D.W., Gilbert, J.S. (2002) Melting of the glacier base during a small-volume subglacial rhyolite eruption: Evidence from Bláhnúkur, Iceland. *Sedimentary Geology*, Vol.149(1-3), pp.183-198.
- 67) 田中茂 (1956) : 豪雨による砂質斜面の崩壊機構, 新砂防, Vol.22, pp.3-9.
- 68) 西畑勇夫 (1963) : 山地の崩壊と地質, 地形および雨量との関係について, 土木学会論文集, Vol.100, pp.9-14.
- 69) Migoń, P., Pánek, T., Malik, I., Hrádecký, J., Owczarek, P., Šilhán, K. (2010) Complex landslide terrain in the Kamienne Mountains, Middle Sudetes, SW Poland. *Geomorphology*, Vol.124(3-4), pp.200-214.
- 70) 権田豊・岡崎達也・西井洋平・川邊洋 (2008) : 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.
- 71) 三國谷隆伸・知花武佳 (2011) : 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, 河川技術論文集, Vol.17, pp.131-136.
- 72) 小玉芳敬・中村圭吾 (1997) : 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.
- 73) 芦田和男・江頭進治・安東尚美 (1984) : 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.
- 74) Curran, J.H., Whol, E.H. (2003) Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology*, Vol.51, pp.141-157.
- 75) Lenzi, M.A., D'Agostino V. Billi, P. (1999) Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon. Part I. Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment. *Catena*,

Vol.36, pp.171-190.

- 76) MacFarlane, W.A., Wohl, E. (2003) Influence of step composition on step geometry and flow resistance in step-pool streams of the Washington Cascades. *Water Resource Research*, Vol.39, pp.ESG3-1-ESG3-13.
- 77) Wohl, E.E., Wilcox, A. (2005) Channel geometry of mountain streams in New Zealand. *Journal of Hydrology*, Vol.300, pp.252-266.
- 78) Lenzi, M.A., Marion, A., Comiti, F. (2003) Interference processes on scouring at bed sills. *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.28, pp.99-110.
- 79) Lenzi, M.A., Mao, L., Comiti, F. (2004). Magnitude-frequency analysis of bed load data in an Alpine boulder bed stream. *Water Resource Research*, Vol.40, W072011-W0720112.
- 80) Gaudio, R., Marion, A., Bovolin, V. (2000). Morphological effects of bed sills in degrading rivers. *Journal of Hydraulic Research*, Vol.38(2), pp.89-96.
- 81) Zanini, S., Comiti, F., Lenzi, A., Marion, A. (2003) Morphodynamic interference on scour holes generated by bed sills in mountain rivers. Proceedings of XXX IAHR Congress, 24-29 August, Thessaloniki, Greece.
- 82) Inoue, M., Nakano, S. (1999) Habitat structure along channel-unit sequences for juvenile salmon: a subunit-based analysis of in-stream landscapes. *Freshwater Biology*, Vol.42, pp.597-608.
- 83) Nakano S., Kaeriyama, M. (1995) Summer Microhabitat Use and Diet of Four Sympatric Stream-dwelling Salmonids in Kamchatkan Stream. *Fisheries Science*, Vol.61, pp.926-930.
- 84) Moore, K.M.S., Gregory, S.V. (1988a) Response of young-of-the-year cutthroat trout to manipulation of habitat structure in a small stream. *Transactions of American Fisheries Society*, Vol.117(2), pp.162-170.
- 85) Moore, K.M.S., Gregory, S.V. (1988b) Summer habitat utilization and ecology of cutthroat trout fry (*Salmo clarki*) in Cascade Mountain Streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, Vol.45(11), pp.1921-1930.
- 86) Comiti, F., A. Andreoli, M.A., Lenzi. (2005) Morphological effects of local scouring in step-pool streams, *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.30, pp.1567-1581.