

総説 **Review**

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

巖島 怜^{1)*}・佐藤 辰郎¹⁾・西田 健人²⁾・真砂 祐貴²⁾・坂田 知謙²⁾・島谷 幸宏³⁾

1) 九州大学 持続可能な社会のための決断科学センター 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 W-2 1008 号

2) 九州大学大学院 工学府 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 W-2 1008 号

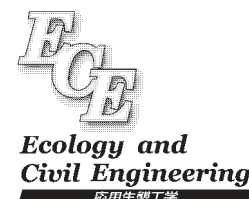
3) 九州大学大学院 工学研究院 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 W-2 1008 号

Rei ITSUKUSHIMA^{1)*}, Tatsuro SATO¹⁾, Kento NISHIDA²⁾, Yuki MASAGO²⁾, Tomonori SAKATA²⁾, Yukihiro SHIMATANI³⁾: Existing knowledge about step-pool structures and their application to river engineering in mountain rivers. *Ecol. Civil Eng.* 19(2), 165–180, 2017

1) Department of Decision Science for sustainable society, Kyushu University, W-2 1008, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

2) Graduate School of Engineering, Kyushu University, W-2 1008, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

3) Faculty of Engineering, Kyushu University, W-2 1008, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan



Abstract: Here, we review existing knowledge about step-pool structures in mountain rivers with reference to their morphology, process of formation, destruction, hydraulic function, restoration, and ecological function. First, we present the constructive factors of step-pool structures and their appearance, focusing on channel bed profile. Second, we summarize the processes driving the formation and destruction of step-pools, concentrating on current and sedimentation. The untidune and keystone theories are discussed as the key concepts of step-pool formation in relation to the installation of artificial step-pool structures. Third, with reference to previous studies, we discuss the relationship between step-pool structures and river course characteristics. Fourth, we describe the law of resistance and velocity in a mountain river. Finally, with reference to their ecological function, we discuss the use of step-pool structures in restoration projects. Based on earlier studies of step-pool structures, we discuss future issues and propose studies to technologize and standardize step-pool structures for river improvement and restoration.

Key word: step-pool, mountain river, morphology, hydraulics, restoration

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（長谷川 1988）。一方、山地部では、豪雨による山腹崩壊、土石流、地すべりによる土砂災害、溪流河道への異常土

砂堆積、洪水による溪流河岸浸食に伴う災害、地震による山腹崩壊に伴う岩屑流れ災害、噴火による火砕流およびその後の土石流に伴う災害が発生している（山本 2014）。これらの災害対策として、砂防ダム、コンクリート流路工などが経済的で有効な工法として日本国内の山地河川で広く採用されてきた。これらの河川改修や砂防堰堤の建設は、土砂災害や水害の防止に貢献する一方、生物生息場の消失、平常時の流量減少、洪水時の構造物

2016年1月10日受付, 2016年11月13日受理

*e-mail: itsukushima@civil.kyushu-u.ac.jp

に作用する流体力の増大等、治水、利水、環境、維持管理に課題を有している。

河川環境の観点から、国土交通省は1990年に『多自然型川づくり』について」通達を発出し、1997年には河川法が改正され、河川管理の目的に河川環境の整備と保全が追加された。その後、多自然川づくりに関する技術的、学術的知見が集積され、2008年に中小河川に関する河道計画の技術基準（国土交通省 2008）が制定された。当該基準の解説である多自然川づくりポイントブックⅢ（多自然川づくり研究会 2011）では、山間地のセグメント M から自然堤防帯のセグメント 2 河道（山本 2010）が対象とされているが、扇状地から自然堤防帯に相当するセグメント 1 及び 2 における事例や研究成果が大部分を占めており、山地溪流を対象としたものはほとんどみられない。中流域の「多自然川づくり」の概念に基づく河川改修技術は事例が蓄積されているが、山地河川については学術的、技術的知見が不足しており、環境に配慮した河川改修および自然再生技術が確立されていないのが現状である。一方、治水や維持管理の観点では、美しい山河を守る災害復旧方針（国土交通省 2014）に急流河川の災害復旧方針について記載がみられる。急流河川では、河川改修の際に粗度の大きい巨礫を除去し、河岸にコンクリートを整備することで流速が増加し、河床の洗掘を助長して被災することも考えられる。したがって、急流河川の災害復旧において、河道内に巨礫がみられる場合には、河床安定の効果を期待して、それらの巨礫は取り除かず、現地に存置することとされている。このように災害復旧に際し、治水、利水、環境の観点から現状の河床形態を保全する理念がある一方、用地の制限、急流河川を対象とした技術の未成熟から、コンクリートによる河床・河岸を保護する従来型の改修を行う事例が多い。

山地河川における自然再生及び環境に配慮した河川改修技術が未発達である理由として、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実現する技術がないことが挙げられる。一方、自然状態での山地河川では、落差のある step と下流河床が洗掘された pool からなる step-pool と呼ばれる河床形態がよく観察される。これは巨礫や巨石が河川横断方向に並ぶことで step 状になり、step と step の間が洗掘され、pool 状を呈しているものである。このような形状が河川縦断方向に連続して形成され、階段状の河床を形成する（権田ほか 2008）。Step-pool 構造の河道形成における重要な機能の一つは

流れの抵抗となることであり（Chin 2005）、洪水時、流れは step を乗り越え、緩勾配の pool 部に落ち込んで、擾乱により洪水流のエネルギーが消散される（Abrahams et al. 1995）。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。

本稿は、近年増加する山地河川及び急流河川を対象とした災害復旧や自然再生に際し、step-pool 構造を用いた改修技術を構築するための基礎的知見の提供を目的とし、step-pool 構造に関する基本的な特徴、河道特性との関係、物理特性、生息場としての機能及び河川改修の適用事例について国内外の既往の研究成果を体系的に整理し、今後の研究課題を示したものである。

2. Step-pool の基本的な特徴

2.1 山地河川における step-pool の出現傾向

本稿で対象とする山地河川は、主に山本（2010）のセグメント区分におけるセグメント M に該当し、土砂生産源に近く、多様な流路形態、流れ場、粒度分布を有するのが特徴である。Montgomery & Buffington（1997）は、Washington 及び Oregon における現地調査から、山地河川は 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、カスケード、step-pool、平坦河床、瀬淵、砂堆・砂漣、基岩）に細分化されると報告した（永山ほか 2015 も参照）。これらのリーチタイプは河川縦断方向に遷移する傾向が見られるが（Fig.1）、各タイプの出現は局所的な場の土砂輸送能力と供給量のバランスに影響を受け、オーバーラップしながら出現する。Step-pool は上記リーチタイプの一つで、山地河川を代表する河床形態である（Fig.2）。一般に河川横断方向に巨石や巨礫が集積して形成される step と、その下流河床が洗掘された pool が交互に連続して出現する河床形態である（Chin 2005；権田ほか 2008；Waters & Curran 2012）。日本では階段状河床または階段状河床波（芦田ほか 1984）と呼称される場合もあるが、本稿では step-pool を使用する。長谷川・上林（1996）は step について、step 構成礫が河川横断方向に直線的に並び pool の掘れが比較的小さい礫列（リブ）と、step 礫が円弧状に並び pool 部が掘れて滝壺が形成されている礫段として区別している。両者の成因については後述するが、形成時の流れの条件に関係し、両者は混在して出現するものである。

Step-pool の発生領域は、対象地域における供給土砂

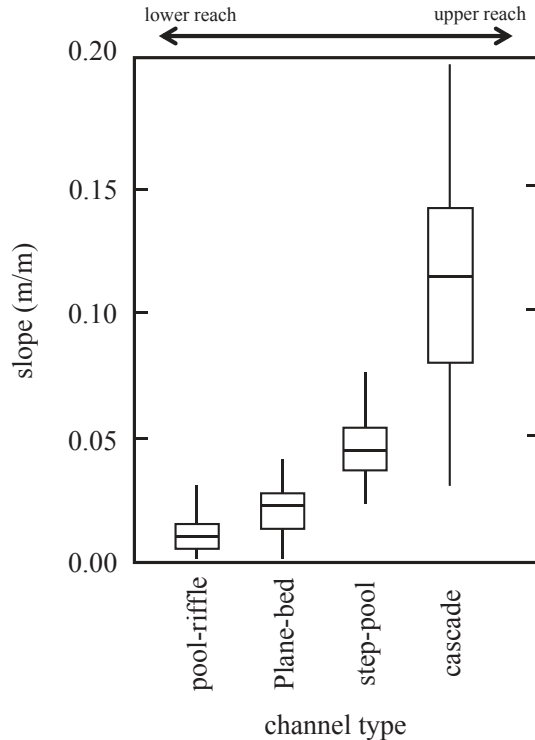


Fig. 1. Composite slope distribution for channel reaches; boxes represent inner and outer quartiles; vertical lines represent inner and outer tenths. (summarized from Montgomery & Buffington 1997)
 各リーチタイプに出現する勾配の分布図。箱は第1四分位点と第3四分位点を、縦線は上位および下位から10番目の値を示す (Montgomery & Buffington 1997 を一部改変)。

の量と質、流量レジーム等の条件により、地域毎に差異があるものと考えられるが、既往研究では発生領域を区分する指標として河床勾配が取り上げられている。前述の Montgomery & Buffington (1997) の研究では、step-pool は勾配 0.03~0.065 の区間で卓越する。Grant et al. (1990) は、Oregon の 2 山地河川を対象に河床勾配 0.005~0.173 の領域で step-pool の発生領域を調べた結果、勾配が 0.02 より急で河床材料が堆積傾向にある場所で発生することを報告している。また、Whittaker & Jaeggi (1982) は河床勾配が 0.075 以上で、反砂堆の形成条件が満たされたときに step-pool が形成されることを報告している。国内における発生領域の研究事例として、権田ほか (2008) が 0.02 以上、三國谷・知花 (2011) が 0.025 以上、小玉・中村 (1997) が 0.04~0.05 としている。

Step-pool の発生領域は上記のように場所毎に異なる。これは、step-pool の形成要因となる土砂供給や水理条件

が地域的に差異が大きいためと考えられる。既往文献で報告されている発生領域の下限値である 0.02 は、権田ほか (2008) が提唱している山地河川の境界と一致しており、山本 (2010) のセグメント区分における扇状地河川の上限值 0.017 と概ね一致する。従って、河床勾配 0.02 以上が step-pool 発生領域の目安と考えられる。

2.2 Step-pool の基本構造と名称

Fig.2 に step-pool 構造の平面形及び縦断形を示す。また、既往研究で使用されている構造に関する定義についても併せて記載した。Step-pool の構造を示す物理量として、step 高 (H_s)、pool 深 (H_p)、落下高 (H_{max})、step-pool の間隔 (L) が代表的に用いられている。Step-pool の間隔は、① step 構成礫間の水平距離、② pool 最深部の水平距離、③ step 構成礫間の斜面長の 3 つの定義が提案されている。

Step-pool の種類はその構成物によって、巨礫や巨石といった堆積物によって構成されるもの、岩盤河床が浸食、洗掘され形成されるもの、倒木 (large woody debris) に上流から供給された礫等が捕捉され形成されるもの (Log step) の 3 種類に分類される。最も一般的なものは堆積した巨礫や巨石による step である (Hayward 1980)。Step を構成する礫径は様々であるが、礫~巨石 (64 mm より大) が大部分である (Chin 2002)。Step-pool は岩盤河床でも形成される (Duckson & Duckson 1995, 2001; Wohl 2000)。岩盤河床で生じる step-pool では pool の面積や河床に対する凹凸の程度が小さいといった形態的特徴があり (Faustini & Jones 2003)、抵抗力に対する掃流力の比が小さい傾向にあることが指摘されている (Wohl 2000)。森林流域では、倒木が河道形成の一端を担っており、log step が形成される (Keller & Swanson 1979; Marston 1982; Jackson & Sturm 2002; Faustini & Jones 2003)。岩盤または倒木からなる step の形態的及び機能的特徴は礫で構成された step と類似している (Wohl et al. 1997; Curran & Wohl 2003)。一方、土砂供給が制限されている山地溪流において、倒木の供給が無い場合には、土砂堆積空間が減少し、物理環境の多様度が低下することが報告されている (Faustini & Jones 2003)。

3. Step-pool の形成と破壊

3.1 形成過程

本節では、山地河川における step の形成について、土砂及び流況の観点から既往研究についてまとめた。Step-pool の形成は、反砂堆が発達し形成されるという

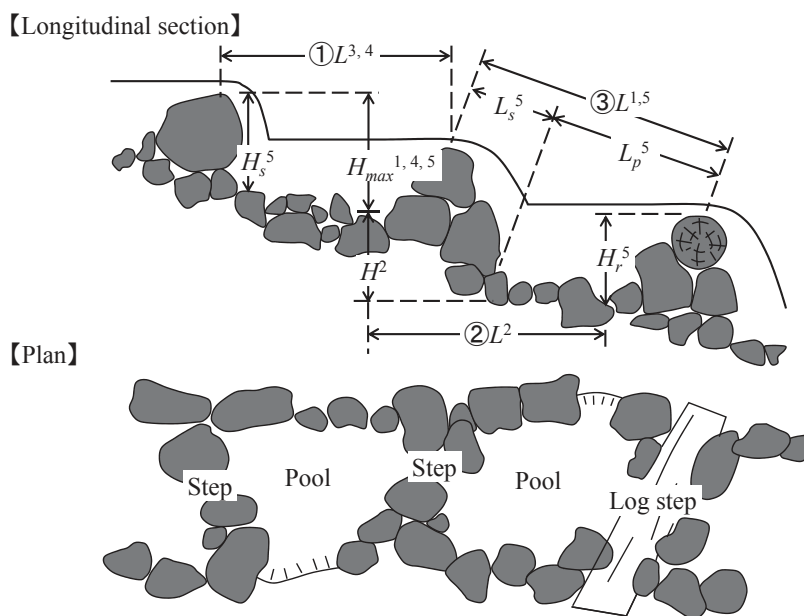


Fig. 2. Schematic longitudinal section and plan of a step-pool channel unit (summarized from Zimmermann & Church 2001). L : step-pool unit wavelength (“crest to crest” or “pool to pool” length), H : total drop (of the bed) between pools, H_{max} : total drop (of the bed) between step and pool, H_r : residual pool depth, H_s : step height, L_s : step length, and L_p : pool length 1 = Abrahams et al. (1995), 2 = Chin (1998; 1999a), 3 = Grant et al. (1990), 4 = Wohl et al. (1997), 5 = Zimmermann & Church (2001). Step-pool 構造の縦断・平面図と各名称 (Zimmermann & Church 2001 を一部改変). L : step-pool の波長 (峰間又は pool 間の距離), H : 落下高 (Pool 間の高さの差), H_{max} : 落下高 (step と Pool 間の高さの差), H_r : pool 深さ, H_s : step 高, L_s : step 長さ, L_p : pool 長さ 1 = Abrahams et al. (1995), 2 = Chin (1998; 1999a), 3 = Grant et al. (1990), 4 = Wohl et al. (1997), 5 = Zimmermann & Church (2001).

仮説 (反砂堆理論) 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 step が形成されるという仮説 (keystone 理論) が提案されている. Step-pool の形成が反砂堆形成の延長であることを確認した事例として、芦田ほか (1984) の水理模型実験や Chartrand & Whiting (2000) の現地観測が挙げられる. 芦田ほか (1984) は、混合砂を敷詰めた実験水路に通水を行い、step-pool が形成され安定である条件として、(a) 河床材料が混合砂である、(b) 流れが射流である (反砂堆の形成条件)、(c) 初期河床において、平均粒径よりも大きい砂礫の流砂運動が起こる (活発な分級現象の発生条件)、(d) 最大径が停止する (河床形の安定条件) ことを挙げている. Chin (1999b) や Chartrand & Whiting (2000) は、現地観測から得られた step-pool 間隔と礫径のデータを用いた結果、step-pool の構造的特徴 (間隔、波長、礫径) とフルード数の関係が反砂堆の形成領域に合致することか

ら、反砂堆の形成が step 構造の条件であることを主張している.

一方、Zimmermann & Church (2001) は step の形成が通常の洪水では移動しない keystone が河道に残り、河床を移動してきた礫が keystone 背後に瓦状に重なることによるものであり、反砂堆形成とは異なるメカニズムであることを主張している. また、Weichert et al. (2008) は水理模型実験によって step の形成過程を調べ、反砂堆は step の形成に寄与しないが、step 形成時の水理量は反砂堆形成領域に合致することを明らかにした. 一方、反砂堆及び step-pool は共に最大抵抗を示す河床形態であり、河道条件の違いによって反砂堆や step になりうることを説明している.

その他、step-pool の形成条件について言及した研究として、流れの状態に着目した長谷川・上林 (1996)、河床材料の粒径集団に注目した竜澤ほか (1998) を紹介す

る。長谷川・上林（1996）は、step-pool の成因として射流水面上に現れる定常斜め交錯波を挙げており、反砂堆波長と斜め交錯波波長が一致した場合に step-pool 状の河床波（礫段タイプ）が発達することを指摘している。河床波の成長段階で砂礫のかみ合わせが十分でない場合や水面波が2次元である場合はリップ（礫列タイプ）が支配的となるとした。竜澤ほか（1998）は step-pool 河道（礫段・礫列混在）の河床材料の粒度分布が Talbot 式で表される曲線（Talbot 型）であることに着目し、Talbot 型分布とそうでない粒径集団を用いて水理模型実験を行った結果、Talbot 型分布の粒径集団でのみ典型的な階段状河床形が形成され易いことを確認した。Talbot 式は、コンクリートの骨材などの混合材料の締まり易さ、すなわち最大密度を与える粒度分布の理想型を表す曲線として Talbot が提示したものである（赤井 1957）。

また、step 形成後の安定性について Johnson et al. (2015) は水理模型を用い step-pool に細粒分の通砂を行い、細粒分の流入によって河床の粗さが減少する一方、step 構成礫の移動性が向上し、小粒径～中粒径の材料が剥離し河床が粗粒化することで step の安定性が增大することを確認している。

反砂堆理論による step-pool 形成のためには、流送土砂と特定の水理条件が必要であり、step 構成礫の粒径によっては、生起確率が小さいイベントでも形成されうる。一方、keystone 理論では洪水時に流下されない大径の構成材料の存在が条件となるため、極めて頻度の小さい洪水や山腹崩壊による keystone の供給が必要である。山地河道では、低頻度の出水や山腹崩壊は同一の場所で起こり得るため、step-pool の形成において反砂堆理論と keystone 理論は同所的に発生しうると考えられる。

3.2 形成・破壊流量

Step-pool の形成、破壊を引き起こす流量規模については現地観測、水理模型実験を中心として知見が集積されている。Grant et al. (1990) は French Pete Creek における観測で、step 破壊を引き起こす流量の生起確率は 25～50 年程度であり、礫の噛み合わせによる移動限界の上昇を考慮すると上限の 50 年が妥当としている。Chin (1998) は California の Santa Monica Mountain において step を構成する最大礫径が移動可能な流量の生起確率を算出し、多くの step が 5～100 年程度で破壊されることを示した。彼は、step 構成礫径によって破壊に至る流量が異なり、1 m 以上の巨石で構成される step は 100～200 年確率の出水でも安定であることを指摘した。また、Lenzi (2001) は Italy の Rio Cordon において生起確率 5

年程度の小出水と生起確率 30～50 年規模の 2 洪水の前後で step-pool 河道の地形を調べた結果、小出水では最大抵抗となるように step-pool が構築されたのに対し、生起確率 30～50 年出水では供給土砂によって step-pool が破壊され、step 高と step 長の比で表される先鋭度 (steepness) が大きく減少することを明らかにした。同様の現象として、Madej (2001) は step が破壊される大出水において、大量の土砂供給によって河床の起伏度が低下し、その後、中小出水によって堆積土砂が流下することで step が再構築されることを示した。この現象は 2003 年の Rocky Mountain (Colorado) での大出水後も確認されている (Rathburn et al. 2013)。Molnar et al. (2010) は 2007 年に Switzerland で発生した生起確率約 50 年の洪水の前後で step-pool 構造を比較し、最大規模の step を含む 60% の step が移動し、広範囲にわたる河床の低下を報告している。国内で現地観測により step 破壊流量を調べた事例として、中村ほか (2008) が挙げられる。中村ほか (2008) は、千曲川源流部の河川の洪水時前後の step-pool 区間の縦断形を調べ、生起確率 7 年及び 15 年の洪水で step の破壊と再形成を確認した。

次に、水理模型実験によって step の破壊流量を調べた事例を紹介する。水理模型実験では、土砂供給の有無によって、step の破壊流量が異なることが示されている。Whittaker & Davies (1982) は、土砂供給がない場合は生起確率 100～1000 年の規模の出水で step が破壊され、一方、Hayward (1980) は土砂供給がある場合には 10～25 年程度の生起確率の出水で step-pool が埋没することを示した。芦田ほか (1987) は step-pool の形成・破壊流量を調べ、破壊流量は形成流量よりもかなり大きくなっており、この傾向は形成流量が大きいほど顕著であることを示した。その理由を、形成流量が大きいほど、河床表面に形成されるアーマ・コートの粒度分布が一様分布に近くなるためとしている。Step-pool の破壊流量は個々の構成礫を対象にしたものが多く、礫の噛み合わせや重ね合わせを考慮したものでないため、過少評価の可能性が高い (Grant et al. 1990)。しかし、step の破壊流量について、個々の礫を対象とした場合と群体としての step の破壊流量を比較した研究はみられない。

形成・破壊流量の観測結果は、降雨の強度や波形が異なる複数の地域を対象としたものであり、流量の生起確率は場所毎に大きく変化するものと考えられる。また、土砂供給の量や質、河道地形等の要因も大きな影響を及ぼすと考えられ、これらの要因も踏まえた破壊、形成のメカニズムを明らかにすることが必要である。

4. Step 構造の規定要因

4.1 Step 構造と構成材料の関係

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。Chartrand & Whiting (2000) は Idaho の 100 リーチで step 構造と構成礫の粒径の関係を調べ、step 高は step 構成礫の 50 % 粒径 (以下、 $x\%$ 粒径を D_x と記載する。) 及び D_{84} と有意な相関があり、 D_{50} の 1~1.5 倍であることを示した。Italy の Rio Cordon の河川では step 高は D_{90} の 2 倍程度である (Billi et al. 1998)。芦田ほか (1984) は混合砂を実験水路に敷詰め通水した結果、階段状河床形 (step-pool) の波高は、アーマ・コートの平均粒径の 0.8 倍程度であることを明らかにした。Step 高と構成礫径の関係は上記の通り報告されているが、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。Step を構成する礫径は上流の供給土砂の量や質、掃流力等の水理量と関係が強く、同一河道内でも蛇行特性や平面、横断形状といった要因によって水理特性や堆積現象が異なるためと考えられる。

また、倒木により形成された step-pool についても step 構成材料と step 高の関係が調べられている。Wohl et al. (1997) は、Montana において step 高と step を形成する倒木の直径に有意な正の相関があることを示した。Curran & Wohl (2003) は Washington において step 高とリーチ内に存在する倒木の直径の間には相関関係は無いが、規模の大きな step を形成している材料として倒木が一般的であることを示した。

一方、step 長と構成材料の関係について研究事例は少ない。step 構成礫と step 間隔に正の相関関係を認める現地観測結果 (Wohl et al. 1997; Chartrand & Whiting 2000) に対し、Israel や California を対象とした調査では両者の間に相関関係は見られなかったことが報告されている (Wohl & Grodek 1994; Chin 1999a)。

step 構造とその構成材料の関係は対象地の地質、気象といった自然条件や形成過程と密接に関係するものと考えられる。特に生産土砂の量と質に大きく影響する地質によって構成礫の形態やサイズが異なるため、step 構造が変化するものと考えられる。自然条件や形成過程を類型化し、調査研究を行うことで、構成材料と step 構造の関係がより明瞭になるものと考えられる。

4.2 Step 構造と河道特性の関係

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。Step-pool 構造に影響を及ぼす河道特性量として、河床勾配、河道幅 (step-pool 区間における平均的な河道幅) 及び active channel width (支配的な流量によって形成される河岸の幅) が抽出され、関係が調べられている。最も頻繁に調べられているのが step 間隔と河床勾配及び河道幅の関係であり、事例として少数であるが pool 深と河床勾配の関係についても報告がある。

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 (例えば、Heede 1972; Wohl et al. 1997)。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 であった (Chin 1999a)。Judd (1964) は step 間隔と河床勾配の関係に着目し、式 (1) を提案している。

$$L = K/CS^Z \quad (1)$$

ここで、 L : step 間隔、 S : 河床勾配、 K : 河床高、 C 、 Z : 定数である。この関係式は汎用性が高いものの定数は地域的な偏差が大きく、様々な数値が提案されている。Whittaker (1987) は New Zealand における 26 の step-pool を対象に $L = 0.311/S^{1.188}$ を示している。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。また、Wohl & Grodek (1994) は乾燥地 Israel の Nahel Yael 川流域における河床勾配と step 間隔の関係を調べ、河床勾配の増大に伴い step 長が減少するが、勾配が 0.2 を超えると一定値となることを示した。一方、Abrahams et al. (1995) は米国及び英国の 18 の step-pool を対象に step 間隔と河床勾配の関係を調べ、step 間隔は河床勾配の増加に伴い減少するが、その変化は段階的であることから、この関係式に懐疑的な考察を行っている。

また、蛇行特性や瀬淵の配列が流量や河道幅の関数で示されるという研究成果に基づき (Leopold & Wolman 1957; Keller & Melhorn 1978)、step 間隔を示す指標である波長と河道幅の関係について複数の研究報告がみられる。多くの河川において step-pool の間隔は河道幅の 1~4 倍であることが報告されている (Grant et al. 1990)。河道幅と step 間隔の関係について、Chin (1999a) は、active channel width と step 間隔の相関係数が 0.01~0.22 と低いことを報告している。一方、流量と step 間隔には正の相関関係がみられ、active channel width は流量に従って増加することから、active channel width と step 間隔は無関係でないことを指摘している (Chin 1999a)。

Pool 深は土砂堆積の空間や水生生物の生息場として重要な指標である。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。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。

また、上記の河道特性と step-pool 構造の関係は自然的攪乱によって変化する。Gomi et al. (2003) は、勾配が 0.25 未満の地滑りによる攪乱が大きい区間では step 間隔と勾配が有意な関係にある一方、倒木の供給が多い区間では倒木が step の配置に影響を及ぼすため、step 間隔と勾配が対応しないことを明らかにした。一方、Washington の倒木が多い区間の step-pool 河道では、倒木によって pool の間隔が減少することが報告されている (Montgomery et al. 1995)。Furbish et al. (1998) は河道特性と step-pool 構造の関係に地域的な差異が大きく、同一河川内でも一致しない要因として、山地河川で不規則に出現する粗粒分で構成される州や洪水時にも動かない巨岩や岩河床の存在を挙げている。

河道特性は流域地質によって異なり (須賀 1992)、特に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が指摘されている (田代・辻本 2015)。山地河道である step-pool の構造はその影響を顕著に受けると考えられる。しかし、地質の違いと step-pool 構造に関する研究はほとんど行われていない。Duckson & Duckson (1995) は Oregon の 160 の step-pool を観測し、pool の形状を 15 のタイプに分類し地質との関係を調べた。彼らは、岩質によって pool 形状が変化し、玄武岩及び安山岩では楕円形、安山岩では正方形、漂礫土 (氷河により運搬された碎屑物) では長方形が卓越することを明らかにした。

また、流況調節や河道の直接改変といった人為的影響によって、step-pool の構造は変化すると考えられるが、研究事例は少ない。人為的な流況改変による step-pool 構造の変化に関する報告として、Wohl & Dust (2012) はダム放流によって年間最大流量が 1.5 倍に変化した河川において step-pool 河道の河床材料の粗粒化や pool 体積の増加を示したが、流量増加に伴う step-pool 河道の応答の予測は困難であることを付言している。

5. Step-pool 構造の物理的特性

5.1 水理・抵抗特性

Step-pool 構造の河道形成における重要な機能の一つは流れの抵抗となることである (Chin 2005)。洪水時、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 (Ashida et al. 1976; Wilcox et al. 2011)。Chin (2003) は Santa Monica Mountains の Cold Creek において、標高差の 90% 程度が step 高の合計で占められており、エネルギー減勢に大きく貢献していることを示した。流れの抵抗としての機能は step-pool が有する凹凸の形状に起因しており、この形状を先鋭度 (step 高と step 長の比 (H/L)) と定義し、河床勾配との関係を定量化した研究がみられる。また、Wohl & Grodek (1994) は Israel の乾燥地の step-pool 構造を調べ、 H/L と河床勾配 S の関係式として、 $H/L/S^{0.45} = 4.5$ を導いている。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) をとると主張した。Abrahams et al. (1995) が示した $H/L/S$ 値 1 ~ 2 は広く受け入れられており、Wohl & Wilcox (2005) が New Zealand で実施した調査では 0.95 ~ 2.2 であり、Abrahams et al. (1995) の調査結果を支持している。一方、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、特に河床勾配が 0.02 より大きい領域で合致しないことを示し、最大抵抗のみで step-pool 構造が決定していない可能性があることを示唆している。

一方、エネルギー減勢の効果は流量によって異なり、step が埋没する程度の流量になると大きく低下する。流量規模とエネルギー減勢効果を調べた Chin (2003) の研究では、step-pool を通過する流水のエネルギーの低減率は、生起確率 1 年の洪水では 90% であるのに対し、生起確率 72 年の洪水では、27% であることが示された。また、D'Agostino & Michelini (2015) は step-pool 区間のエネルギー減勢効果と水深の関係を調べ、流水のエネルギーの低減率は、pool 部の水深が step 高の 30% で 80%、step 高の 85% で 40% まで低下することを示した。Stuve (1990) は河床勾配約 0.028 の Barvarian Alps における高流量時と低流量時のエネルギーを算出し、低流量時に step-pool 区間でエネルギー減勢効果が大きく、高流量時では、抵抗特性の指標である摩擦係数が流速の 2 乗に反比例しエネルギー勾配と径深に比例するとした Darcy-Weisbach 則

に近づくことを明らかにした. Wohl & Thompson (2000) は Colorado の St. Louis Creek における融雪出水を対象に step-pool 上の流速を計測し, step-pool の形状抵抗や渦の発生によるエネルギー減勢効果は河床で生成する乱れや周面摩擦よりも大きいことを示唆した. Grant (1997) は step-pool がある急勾配河川 (河床勾配 0.01) のフルード数を調べた結果 0.7~1.3 の範囲を 20~30 秒のサイクルで変動し限界流に近い流れとなっていることを報告している.

こうした step-pool 上の顕著なエネルギー減勢効果を定量的に評価するため, step-pool における流速や流れの抵抗を定式化することを目的とした研究が多く行われている. Step-pool 上の流速を水理模型実験や現地観測で測定し, 抵抗則として Darcy-Weisbach 則の摩擦損失係数 f や manning の粗度係数 n の算定式を提案している. これらの研究結果で提案されている流速公式を Table 1 に示す. D'Agostino & Michelini (2015) は, Italy 北部の step-pool 河道を対象に, 現地観測による流速とこれらの式から計算される予測値を比較し適用可能性を評価した. その結果, Jarrett (1984) 及び Bathurst (1985) が提示した式で予測値と実測値の乖離が大きく Aberle & Smart (2003) の式が良く適合することを示した. D'Agostino & Michelini (2015) は, 各々の式は異なる流量条件, 河道構造を対象に構築されたものであり, 特定の式のみを用いて, 流速を予測することは困難としている. Table 2

は既往研究で提示されている抵抗則を整理したものである. これらの抵抗則は, 自然河川で観測されたもの (Jarrett 1984; Bathurst 1985; Kaufmann 1987; Comiti et al. 2007; Kaufmann et al. 2008), 現地観測と水理模型実験から得られたもの (Lee & Ferguson 2002) である. Yochum et al. (2012) は, step-pool 河道は多様度高く, 抵抗を表現する単一の式は存在しないが, 粒径は普遍性が高い指標であることを指摘している. また, 近年ではリーチスケールで step-pool 構造の流水抵抗を形態に基づき評価する簡易な指標として, 直線近似した縦断形と実河床高の標準偏差が提案され, step-pool 河道における抵抗を示す指標として有効であることが報告されている (Yochum et al. 2012, 2014).

5.2 step-pool 構造と土砂動態

山地河川における土砂動態は step-pool 構造の形成や破壊だけでなく, 下流の沖積河道への土砂輸送等重要な役割を担っている. ここでは, step-pool を構成する土砂の動態及び step-pool を流下する土砂の移動の両者について既往の知見を整理した. 急勾配河道は水理現象が複雑であり, 流砂現象が沖積河道と異なるため, 流砂の直接観測を行う基礎的研究や既存の理論の適合可能性を評価する研究が行われている.

山地河道の流砂を直接観測する研究は 1970 年代から行われており, Ashida et al. (1976) は, 日本北アルプス穂高岳の step-pool 部における出水時の掃流砂を連続

Table 1. Velocity formula in steep channel (summarized from D'Agostino & Michelini 2012). U : reach average velocity, R : hydraulics radius, S : channel slope, g : gravitational acceleration, D_x : bed material size for which x % of the material is finer, q : dimensionless unit discharge σ_z : standard deviation of the thalweg depth, $\Delta Z / L_{ss}$: ratio of step height and length.

急勾配河道における流速公式 (D'Agostino & Michelini 2012 を一部改変). U : リーチ平均流速, R : 径深, S : 河床勾配, g : 重力加速度, D_x : 河床材料の x % 粒径, q : 単位幅流量, σ_z : 直接近似した縦断形と最深河床高の標準偏差, $\Delta Z / L_{ss}$: step 高と step 長の比.

Author	Velocity formula	Morphology	Channel slope
Jarrett (1984)	$U = 3.17 R^{0.83} S^{0.12}$	Mountain streams	0.002 - 0.034
Bathurst (1985)	$U = (g R S)^{0.5} [5.62 \log (R / D_{84}) + 4]$	Gravel and boulder bed rivers	0.004 - 0.037
Rickenmann (1991)	$U = 1.3 g^{0.20} S^{0.20} q^{0.60} D_{90}^{-0.40}$	run with solid transport	0.05 - 0.20
Aberle & Smart (2003)	$U = 0.96 g^{0.20} S^{0.20} q^{0.60} \sigma_z^{-0.40}$	Run	0.02 - 0.098
Comiti et al. (2007)	$U = 0.74 q^{0.59} (\Delta Z / L_{ss} / S)^{0.52}$	Predominantly step-pool	0.08 - 0.21
Ferguson (2007)	$U = 1.44 q^{0.60} S^{0.20}$	Wide range in steep channel	0.007 - 0.21
Comiti et al. (2009)	$U = 1.24 q^{0.83}$	Napp and skimming flow regime	0.084 - 0.14
Zimmermann (2010)	$U = 0.58 q^{0.39}$	step-pool	0.03 - 0.23
Rickenmann & Recking (2011)	$U = 1.5471 q^{0.7062} [1 + (q / 10.31)^{0.6317}]^{-0.4930}$	Wide range in gravel - bed river	0.004 - 0.24
Yochum et al. (2012)	$U = q^{0.16}$	step-pool and cascade	0.05 - 0.61

Table 2. Law of resistance in steep channel (summarized from Yochum et al. 2012). f : reach average Darcy-Weisbach roughness coefficient, R : hydraulics radius, D_x : bed material size for which x % of the material is finer, S_f : friction slope, \bar{h} : reach mean of cross-sectional average flow depth, V : reach average velocity, d_{th} : thalweg mean depth, d_{res} : thalweg residual depth, σ_h : standard deviation of the thalweg depth, g : gravitational acceleration, q : dimensionless unit discharge, w_d : wood volume/bank-full channel planform area.

急勾配河道における抵抗則 (Yochum et al. 2012 を一部改変). f : Darcy-Weisbach 則における摩擦損失係数, R : 径深, D_x : 河床材料の x % 粒径, S_f : 摩擦勾配, \bar{h} : 断面平均水深のリーチ平均値, V : リーチ平均流速, d_{th} : 最深河床部での水深, d_{res} : pool 部の水深と下流側の step 部の水深の差, σ_h : 直接近似した縦断面形と最深河床高の標準偏差, g : 重力加速度, q : 単位幅流量, n : マニングの粗度係数, w_d : 倒木の体積 / 河岸満杯流量時の河道面積

Author	Law of resistance	Channel slope
Jarrett (1984)	$n = 0.32s_f^{0.38}R^{-0.16} \quad V = 3.1R^{0.38}S_f^{0.12}$	0.002 - 0.034
Bathurst (1985)	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \log\left(\frac{\bar{h}}{D_{84}}\right) + 4$	0.004 - 0.037
Kaufmann (1987)	$A : \sqrt{\frac{8}{f}} = 0.62 \ln\left(\frac{d_{th}}{d_{res}}\right) \quad B : \sqrt{\frac{8}{f}} = 0.62 \ln\left(\frac{d_{th}}{\sigma_h}\right)^{0.92}$	0.026 - 0.083
Lee & Ferguson (2002)	$\sqrt{\frac{1}{f}} = 1.48\left(\frac{R}{D_{84}}\right)^{1.80}$	0.026 - 0.18
Comiti et al. (2007)	$f = 87.1q^{*-0.50}s_f^{1.83} \quad q^* = \frac{q}{\sqrt{gD_{84}^3}}$	0.08 - 0.21
Kaufman et al. (2008)	$\frac{f}{8} = 1.21d_{res}^{1.08}(d_{res} + w_d)^{0.638}d_{th}^{-3.32}$	0.026 - 0.083

観測した結果, 洪水初期と洪水末期に発生する流砂が存在し, 現象が極めて複雑であるため, 物理的な土砂輸送モデルを用いて現象を再現することが困難であると結論付けた. 沢田・芦田 (1989) は, 岐阜県神通川上流において粒径 10 cm 以下の土砂を洪水時に捕捉した結果, 5 mm 以下の粒子は洪水初期に, 5 mm より大きい粒子は遅れて最大流砂量が発生しており, 土砂の移動形態の相違が階段状流路形態 (step-pool) に支配されていると考察している. Blizard & Wohl (1998) は, Colorado における step-pool を含む山地河川で Helley-smith 採取器によって掃流砂を直接捕捉し, 掃流砂に係する物理量として, セン断力, ストリームパワー, 河床近傍の流速, 平均流速及びフルード数を挙げており, 山地河川の土砂輸送は多数の物理量が関連する複雑な現象であることを説明している.

Step-pool における土砂輸送を研究した事例として, Whittaker & Davies (1982) は山地河川の土砂輸送能力は流量や河床勾配だけでなく, pool の埋没の程度によっても異なり, pool が完全に埋没している場合に河道浸食能力が最大となり土砂輸送能力が高いことを水理模型実験により示している. Lenzi et al. (1999) は Rio Cordon

において 10 年間土砂輸送量を計測した結果, 年最大流量程度の出水及び低頻度の出水 (生起確率 30~50 年) においても, 掃流砂が発生する流量は, 理論式から求められる河床材料粒径の D_{84} 又は D_{90} の移動限界に相当することから, 土砂輸送には河床材料の最大粒径程度の粒子が非常に重要な役割を果たしていることを明らかにした. Mao et al. (2008) は, Italy の 2 つの山地河道の D_{50} 粒径の移動限界掃流力を比較した結果, step-pool が発達し河道内に倒木が多い河道で移動限界掃流力が大きいことを示した.

Marion & Weirich (2003) は山地河川の土砂輸送において, 不均一粒径で構成された河床では大粒径の材料ほど流されやすいとする EMT (Equal-mobility transport) 理論 (Parker et al. 1982) と, 粒径と限界掃流力が比例関係であるとする SST (size selective transport) 理論 (Shields 1936) のいずれが発生しているかを水理模型実験によって調べた. 実験の結果, SST 理論と EMT 理論は混在しており, 大規模な出水では EMT 現象が卓越する傾向にあることを示した.

近年では土砂の移動を直接観測する研究事例がみられる. Lamarre & Roy (2008) は Canada の Spruce creek

において 40~256 mm の 196 個の粒子に PIT タグを埋め込み洪水後の移動を追跡した結果、EMT 現象が発生し、粒子の移動距離はストリームパワーによって説明されることを示した。こうした土砂輸送の現象の定式化に関する研究も近年行われている。Sinnakaudan et al. (2010) は Malaysia の山地河道における観測データから D_{50} が 2.00~147.43 mm の粒径に適合する掃流砂量式を構築した。また、Lenzi et al. (2006) は礫床急勾配河道を対象に土砂の移動限界を表す指標について、凹凸の多い山地河道では限界掃流力よりも簡易に算出可能な無次元移動限界流量の適用可能性を評価している。

6. 生物生息場としての特徴・評価

Step-pool はその構造内に、水深が小さく流速の大きい step と水深が大きく流速の小さい pool を有し、step から pool への落ち込みで擾乱が発生するなど、多様な水理環境を有しており、生物の生息場（ハビタット）としても機能している。Milner & Gilvear (2012) は、step-pool、岩盤河床、平坦河床、瀬淵の 4 種類のハビタットタイプの流況をポリエチレン製のトレーサーを用いて観測した結果、step-pool で最もトレーサーが捕捉され、step-pool は死水域や渦の効果によって流体の滞留が極めて長い特異な環境であることを示した。また、Wang et al. (2009) は step-pool を有する河道の底生動物の生息密度は、step-pool が存在しない河道の 100 倍程度であることを示し、流速、河床、水深に着目した生息場の多様性の指標を提案している。Dupuis & Friele (2006) は、Canada の Yark 川流域を対象にオガエル (*Ascaphus montanus*) の分布を調査した結果、避難場となる小さな空隙がある step-pool や cascade 河道で多く生息することを明らかにした。また、Milner et al. (2015) は無脊椎動物を河川の生息場 (step-pool, 岩盤河床, 平坦河床, 瀬淵) 毎に採取し、step-pool はコカゲロウ科の *Alainites muticus* 及び *Baetis rhodani*, カワゲラ目の *Leuctra inermis* 及び *Brachyptera risi* で特徴づけられる特異な場であることを示した。

国内では、山地溪流における生物と河道構造の関係について、サケ科魚類や底生動物を対象とした研究が行われている。名越ほか (1988) はアマゴ (*Oncorhynchus masou ishikawae*) 当歳魚が成長に伴って“たまり”から淵尻、淵中央部へと、さらに水深が大きく、流速が速い流心部へ分布を広げることを明らかにした。成長に伴う生息場の変化はイワナ (*Salvelinus leucomaenis*) やサク

ラマス (*Oncorhynchus masou masou*) についても報告がある (久保田ほか 2001)。また、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。採餌環境に着目し、生息適地を調べた事例として Nakano & Kaeriyama (1995) や柳生 (2009) の研究事例が挙げられる。Nakano & Kaeriyama (1995) はイワナの利用頻度が最も高い採餌場は 81~120 cm の淵 (pool) としている。一方、柳生 (2009) はこれよりもかなり浅い場所にイワナが集中しており、step-pool が存在する山地小河川では、水面の大部分が白泡で覆われるか波立っており、複雑な流れ場が水中への視認性を低下させ、捕食者回避として機能していることを指摘している。また、柳生ほか (2007) は天竜川源流部において生起確率 100~200 年の洪水の前夜でイワナの個体数を調査し、step-pool 構造が土砂の流砂エネルギーを緩和させる効果があり、部分的に地形改変を受けない緩流部においてイワナの生存が可能であったことを示唆している。底生動物と山地溪流の河道構造についての調査研究として、長谷川ほか (2003) は、step 構成礫が直線上に並んだ礫列 step と円弧状もしくは楕円状に並ぶ礫段 step の底生動物群集を比較し、水理的・物理的多様性に富む礫段 step で個体数が多く、生息場として優れていることを示した。また、流速が速い step でウエノヒラタカゲロウ (*Epeorus curvatulus*) やフタバコカゲロウ (*Cloeon dipterum*) がよくみられ、流速が遅い pool でエルモンヒラタカゲロウ (*Epeorus latifolium*) やシロハラコカゲロウ (*Baetis thermicus*) がみられるなど、流速の変化に対応した底生動物の棲み分けが存在していることを確認している。張ほか (2010) は、step-pool を流れの状態に基づき、「常流部」、「射流部」、「跳水部」の 3 種に区分し底生無脊椎動物を調査した結果、優占種 8 種のうち 6 種で生息個体数と水理学的区分に関係があることを明らかにした。

7. Step-pool の河川改修への適用事例

Step-pool は急勾配河川におけるエネルギー減勢、落差緩和機能があるため、従来型のコンクリート構造の落差工の代替として期待される。急勾配河川における環境に配慮した河道改修技術は体系化や基準化がなされていないため、導入事例は多くないが、国内外における事例を以下に紹介する。

Italy の Rio Cordon に導入された step-pool 構造を模し

た低砂防堰堤群では、step-pool の形態に関する既往の知見に基づき、step 高と step 構成礫の 90% 粒径の比 (H/D_{90}) を 1~4 の範囲で平均が 2 とし、 $H/L/S$ が 1.1~1.3 となるよう設計を行っている (Lenzi 2002)。Comiti et al. (2009) は、山地河川の縦断形を制御するために導入された、従来型砂防堰堤群と人工的に導入された step-pool、人為改変を受けていないリファレンス区間における CPOM 及び大型無脊椎動物を調査した結果、人工的に導入された step-pool 区間はリファレンス区間に次いで CPOM 保持量、大型無脊椎動物の豊富さ及び多様性が高いことを明らかにした。Yu et al. (2010) は中国南西部において、人工的な step-pool 構造によって修復を行い、底生動物の多様性と生息密度の増加を報告している。Purcell et al. (2002) は、California 州の都市内小河川を開渠化する際に導入された step-pool の自然修復効果を調べ、大型底生無脊椎動物群集の多様性と個体数の増加を明らかにした。Roni et al. (2006) はオレゴン州の森林を流下する河川に巨礫による横断工作物を導入し、水質及び大型無脊椎動物に変化はないが、ギンザケ (*Oncorhynchus kisutch*) 及びノドキリマス (*Oncorhynchus clarki*) の個体数が増加することを示した。Massachusetts では step-pool を模した魚道を設置し、エールワイフ (*Alosa pseudoharengus*) に PIT タグを埋め込んで追跡した結果、40% 程度の個体が設置した魚道を通過したとことが報告されている (Franklin et al. 2012)。また、Bilby & Likens (1980) は step-pool 河道内における流木が砂やシルトを堆積させる要因となり、多様なハビタット形成に貢献していることを明らかにした。

日本では、宮崎県山附川における災害復旧の際に巨石を存置し、step-pool を再生し、植生回復や魚類密度をモニタリングした事例がある (劉ほか 2012)。その他、岩手県元町川 (阿部 2009)、北海道網走川 (村椿ほか 2008)、福岡県岩岳川 (福留ほか 2010) を対象に step-pool 構造、或いは構造が類似した分散型落差工が導入されており、宮崎県山附川の事例では導入後の生物相の変化についてモニタリングが実施されている。長谷川・上林 (1996) は、step-pool の発生実験から、step-pool 創出のための設計指針として step 礫の配列法を提案している。一方、実際の河川への導入を前提とし、step-pool の構造を検討した事例として数馬田・林田 (2012) や巖島ほか (2015) が行った水理模型実験の事例があり、いずれも減勢工としての step-pool の機能を認めている。

これらの河川技術への応用のうち、福岡県岩岳川の事例は、導入した step (礫段) の波長、波高が反砂堆理論

に基づく長谷川 (2005) の研究成果と一致していた (福留ほか 2010)。その後のモニタリングにおいて、計画高水時の流速で安定するサイズの礫径であっても河床に載って浮いた状態の巨礫は移動すること、礫段の一部が脱落しても上流からの供給があれば当初の状態に復元することが明らかとなっている。一方、宮崎県山附川の事例は、被災後の河道内にある直径 1 m 以上の巨石を存置することで、洪水時の巨石による礫の捕捉によって step の形成を促す工法であり、keystone 理論に基づいたものである。施工後の生起確率 10 年程度の洪水後に、step の破壊と形成や $H/L/S$ 値の増大が確認され、流水への抵抗が大きくなる安定した step 構造への遷移が報告されている。

国内外を含め step-pool を活用した自然再生、災害復旧の事例は近年施工されたものが多く、事後経過について技術的、科学的知見が不足している。技術確立のためには、洪水時の step-pool の安定性や河道の変化だけではなく、生物生息種の変化や遡上環境としての評価が必要である。物理環境及び生物の両者について長期間モニタリングを行い、設計技術へ反映させることが求められる。

8. 河川技術への応用と検討課題

8.1 導入に際し配慮すべき事項

既往研究及び導入事例から、step-pool 構造の導入に際し配慮すべき主要な事項は下記の通りである。

(1) step-pool 構造の適用範囲

Step-pool 構造は河床勾配 0.02 程度以上の山地河道で形成されるため、当該範囲が一般的な適用区間と考えられる。一方、step-pool 構造は高いエネルギー減勢機能と落差緩和機能を有するため、山地河道以外でもコンクリート構造の落差工の代替として活用できると考えられる。しかし、緩勾配な箇所を設置すると、供給土砂の堆積による pool の埋没等の可能性があるため、現地の土砂供給や水理条件を考慮し導入の可否を判断する必要がある。

(2) 反砂堆理論と keystone 理論の設計への導入

河川其自然再生や災害復旧の際に step-pool 構造を導入する場合、反砂堆理論と keystone 理論のいずれを設計に適用するかは、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 keystone 理論に基づき、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。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、反砂堆理論に基づき、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である。

両者の理論に基づく河道設計法の確立のためには、形成過程の差異が step-pool の構造的特徴に及ぼす影響について、知見を蓄積する必要がある。対象とする河道の土砂流送能力と step 構成礫の最大径の関係を調査することで、形成過程による構造的差異を定量的に評価することは可能と考えられる。また、keystone 理論を採用する場合には、存置する礫の量と質の決定の仕方が重要となるが、その方法について体系的な知見はみられない。存置した礫のエネルギー減勢効果や河床及び河岸保護能力についても知見の集積が必要である。

また、反砂堆理論による step-pool の導入に際し、step 高、step 間隔、pool 深等の構造を決定する必要がある。Step 高と step 間隔については、 $H/L/S=1\sim 2$ という関係から、導入場所の勾配に応じて決定することが可能である。Pool 深は、step からの流水の落下高や供給土砂量に支配されることから、導入以降の出水によって形状が変化することを前提に決定する必要がある。しかし、step-pool における流砂現象は、研究途上であることから、技術構築のためには、掃流砂量の定式化や流送土砂が step-pool 構造に及ぼす影響等の研究が必要である。また、構成礫の配置については、長谷川・上林 (1996) や福留ほか (2010) に具体的な方法が記載されている。これらの配置による step-pool 構造の有効性や汎用性を評価するため、導入箇所の長期的なモニタリングや複数の河道条件を想定した水理模型実験や数値計算による河床変動等の安定性を評価する必要がある。

(3) 粒度構成と step 構造

最大粒径と step 構造の間には強い関係がある。災害復旧後に河岸に存在する最大粒径程度の礫を存置した山附川の事例では、自然の営力によって step-pool 構造の発達がみられる。また、福岡県岩岳川では、洪水時の流体力を考慮して設置した最大径の礫 (力石) は、step の一部が破壊されても留まり step の再形成に貢献している。従って、step-pool 構造を導入する場合に最大粒径を適切に設定することが重要である。

芦田ほか (1987) が水理模型実験により観察した step-pool の発生条件として混合粒径であることが挙げられる。これまで、step-pool 構造を用いた河川自然再生事例は、step 構成礫が混合粒径で構成されており、礫の噛み合わせや重ね合わせによって、洪水への強度が上がっていると考えられる。しかし、step 構成礫の噛み合わせ

や重ね合わせを考慮した破壊流量について技術に応用可能な理論・経験式はみられない。Step-pool を活用した河川改修や自然修復の技術確立のためには流れの状態に対する工学的評価が必須となる。従って、Table 1; 2 で紹介した流速公式及び抵抗則は重要な知見である。但し、河床勾配や step 構成礫の粒径など適用範囲が限定されているため、対象とする場での公式の適用可能性を適切に評価することが重要である。

8.2 技術の確立に向けた今後の課題

Step-pool による河川改修技術を構築するためには、汎用性の高い設計指針が必要である。今後の技術構築に向けた課題を以下に記す。

(1) 法線の設定

現況河道を拡幅する場合には、step-pool 河道が維持されるような法線の設定が重要となる。湾曲の程度を過度に大きくした場合には、掃流力の低下によって step が埋没する可能性もある。一方、直線河道では、step 構成材のうち細粒分が抜け落ち、強度低下することも懸念される。法線と step の関係については現地観測の事例も少なく、今後の研究課題である。

(2) 河道幅の設定

洪水流量、河床勾配、河床材料に対応した河道幅の設定が原則となるが河道幅を必要以上に拡幅した場合、土砂堆積による step-pool の埋没等の影響が想定される。一方で、河道幅を広くとることで土砂堆積が進行し、溪畔林が形成されることが期待できる。山地河川の再生においてにおいて、河道幅を拡幅した場合に生じる現象について、長期間モニタリングを行った事例はみられず、今後の調査研究が必要である。また、土砂供給量が少ない河川にあっては、縦断的にある場所で局所的に拡幅し、土砂堆積をさせることで、洪水時に土砂の供給を促し、下流の step-pool 構造の破壊、再形成を可能とするような工夫が必要となる。

(3) 河岸の粗度

河岸の側壁の粗度は step の形成に重要な影響を及ぼすと考えられる。コンクリート三面張り河道で step-pool を形成する際には、河岸の粗度を上げる措置が必要となる。また、設定すべき粗度は当該地点の河床勾配、河道の平面・横断形状によって異なるため、これまでの導入事例の分析や水理模型実験による知見の蓄積が必要である。

(4) 破壊に至る外力とそのメカニズム

Step-pool の破壊現象は水理模型実験で確認されたものが多く、実際の河道でそのメカニズムを観察した事例は多く見られない。Step の破壊により河床低下や平坦

化が報告されているため、河道に導入した step が破壊した際には、河床低下や平坦化に伴う掃流力の増大により護岸等の河川構造物が被災することが想定される。導入箇所及びその下流の堤内地の土地利用や河川構造物の状況を踏まえ、設計時に想定する外力を適切に設定することが重要である。

(5) 生態系への影響と設計手法

本稿では、step-pool 構造内における底生動物の棲み分けや、サケ科魚類が成長段階毎に異なる場所を利用することを明らかにした研究事例を紹介した。従って、step-pool 構造の導入に際し、対象箇所での生物相を把握し、それらの生活史を踏まえ、多様な生息環境が創出されるよう配慮する必要がある。例えば、pool 部の容積を生物の観点から設計するなどである。また、step-pool 構造は急勾配河川で用いられるコンクリートの落差工の代替として機能するため、導入により遡上環境の大幅な改善が期待される。環境改善によって遡上が期待される種を対象に、遡上可能な落差や流速を設計に反映させることも必要である。

まとめ

本稿では、山地河道において特徴的な step-pool 構造に関する既往の知見を形態論、形成・破壊過程、水理学的機能、自然再生（生息場としての機能）を中心に要約した。研究は米国、欧州、日本を中心に展開されており、再生事例としてこれらの国に加え、近年中国において導入がなされている。1990～2000年代では step-pool の構造と河道特性の関係の定式化や形成・破壊のメカニズムについて多くの研究がなされており、2000年代からは step-pool における流砂現象や流速の定式化に関する研究が盛んに行われている。山地河道は地形や土砂動態が複雑で流量の増減が急激に生じることから、普遍的な理論の構築には更なる研究が必要と考えられる。また、これらの研究は気候、地質、表層被覆の条件が異なる場所で行われていることから、他地域へ理論を導入する際には注意が必要である。特に、日本は場所毎に気候帯、地質が大きく異なるため step-pool の形成や破壊に関する条件や構造そのものが大きく異なることが考えられる。日本の大部分が属するアジアモンスーン地域に関する研究事例や地質の違いによる step-pool 構造の相違に関する知見も少なく今後の研究が必要である。また、日本の山地河川は土砂災害防止のための砂防堰堤や治山のための堰堤の設置、これに伴う流路工の整備などの人為的影響を

受けている。国内では、人為影響を受けた山地河道の研究や生物相への影響について研究事例は多くないため、今後の研究が必要と考えられる。

Step-pool 構造は落差を緩和し流水のエネルギーを減勢するため、河川改修の際の落差工、減勢工や自然再生に活用されることが期待される。しかし、人為的に step-pool を技術として確立するためには step 構造（step 高、step 間隔、導入する礫の径等）、河床の安定性、エネルギー減勢効果の検証が必要である。Step-pool に関連する水理現象や流砂について研究が進んでいるものの、実装にあたっては導入場所毎に検討な状況である。実装に必要な基礎的知見の収集や導入後のモニタリング成果を蓄積し技術体系化、基準化が必要である。

摘要

本稿では、山地河道において特徴的な step-pool 構造に関する既往の知見を基本的な特徴、形成・破壊過程、物理的特性及び生息場としての機能を中心に整理し、河川技術への応用可能性について示した。

第1に基本的な特徴について、step-pool の形成要因や発生領域を河床勾配に着目して整理した。第2に形成・破壊過程について形成条件を流れや土砂の状態に着目して説明し、形成・破壊流量について既往の知見を整理した。形成過程については反砂堆理論と keystone 理論があり、両者の過程が混在しており、技術的観点から両者の成因を活用した自然再生、河川改修技術の構築の必要性を指摘した。第3に step-pool 構造と河道特性の関係を step 間隔と河床勾配の関係を中心にまとめた。これらは気候・土砂供給条件などによって地域的な差異が大きく、普遍的な知見の構築には更なる研究が必要であることを指摘した。第4に step-pool に関連する物理的特性について整理を行い、現在提案されている山地河道を対象とした流速公式、抵抗則をまとめた。最後に生物生息場としての機能や自然再生の事例を紹介した。これらを通じ、step-pool 構造のエネルギー減勢及び落差緩和機能が河道改修技術として応用可能性が高いことを指摘し、今後必要となる研究を示した。

引用文献

- 阿部貴之 (2009) 元町川河川等災害関連事業における多自然川づくり. 土木施工 **50**(12): 44-47.
 Aberle J. & Smart G.M. (2003) The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. Journal of Hydraulic Research **41**: 259-269.

- Abrahams A.D., Li G. & Atkinson J.F. (1995) Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research* **31**: 2593-2602.
- 赤井浩一 (1957) 土の粒度配合による締固め特性の変化. *土と基礎* **5**(5):19-22.
- 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* **27 B-2**: 341-353.
- 芦田和男・江頭進治・西野隆之・亀崎直隆 (1987) 階段状河床波の形成・破壊過程における流砂機構. *京大防災研究所年報* **30 B-2**: 493-506.
- Ashida K., Takahashi T. & Sawada T. (1976) Sediment yield and transport on a mountainous small watershed. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University* **26**: 119-144.
- Bathurst J.C. (1985) Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* **111**: 625-643.
- Bilby R.E. & Likens G.E. (1980) Importance of organic debris dams in the structure and function of stream ecosystems. *Ecology* **61**: 1107-1113.
- Billi P., D'Agostino V., Lenzi M.A. & Marchi L. (1998) Bedload, slope and channel processes in a high-altitude torrent. *Water Resources Publications*: 15-38.
- Blizard C.R. & Wohl E.E. (1998) Relationships between hydraulic variables and bedload transport in a subalpine channel, Colorado Rocky Mountains, U.S.A. *Geomorphology* **22**: 359-371.
- Chartrand S.M. & Whiting P.J. (2000) Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 583-600.
- Chin A. (1998) On the stability of step-pool mountain streams. *The Journal of Geology* **106**: 59-69.
- Chin A. (1999a) The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology* **27**: 191-204.
- Chin A. (1999b) On the origin of step-pool sequences in mountain streams. *Geophysical Research Letters* **26**: 231-34.
- Chin A. (2002) The periodic nature of step-pool mountain. *American Journal of Science* **302**: 144-167.
- Chin A. (2003) The geomorphic significance of step-pools in mountain streams. *Geomorphology* **55**: 125-137.
- Chin A. (2005) Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography* **29**: 275-296.
- Comiti F., Andreoli A. & Lenzi M.A. (2005) Morphological effects of local scouring in step-pool streams. *Earth Surface Processes and Landforms. Earth Surface Processes and Landforms* **30**: 1567-1581.
- 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* **25**: 639-659.
- 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* **340**: 48-62.
- Curran J.H. & Wohl E.H. (2003) Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology* **51**: 141-157.
- D'Agostino V. & Michelini T. (2015) On kinematics and flow velocity prediction in step-pool channels. *Water Resources Research* **51**: 4650-4667.
- Duckson D.W. & Duckson L.J. (1995) Morphology of bedrock step pool systems. *Water Resources Bulletin* **31**: 43-51.
- Duckson D.W. & Duckson L.J. (2001) Channel bed steps and pool shapes along Soda Creek, Three Sisters Wilderness, Oregon. *Geomorphology* **38**: 267-79.
- Dupuis L. & Friele P. (2006) The distribution of the Rocky Mountain tailed frog (*Ascaphus montanus*) in relation to the fluvial system: Implications for management and conservation. *Ecological Research* **21**: 489-502.
- Faustini J.M. & Jones J.A. (2003) Influence of large woody debris on channel morphology and Dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. *Geomorphology* **51**: 187-200.
- Ferguson R. (2007) Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resources Research* **43**: W05427.
- Franklin A.E., Haro A., Castro-Santos T. & Noreika J. (2012) Evaluation of nature-like and technical fishways for the passage of alewives at two coastal streams in New England. *Transactions of the American Fisheries Society* **141**: 624-637.
- 福留脩文・有川崇・西山穩・福岡捷二 (2010) 石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計. *土木学会論文集 F* **66**: 490-503.
- Furbish D.J., Thorne S.D., Byrd T.C., Warburton J., Cudney J.T. & Handel R.W. (1998) Irregular bed forms in steep, rough channels. 2. Field observations. *Water Resources Research* **34**: 3649-3659.
- Grant G.E. (1997) Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research* **33**: 349-358.
- 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* **102**: 340-352.
- Gomi T., Sidle R.C., Woodsmith R.D. & Bryant M.D. (2003) Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. *Geomorphology* **51**: 225-242.
- 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* **61**: 67-93.
- 長谷川和義 (1988) 山地河川の形態と流れ. *水工学シリーズ* **88-A-8**: 1-22.
- 長谷川和義 (2005) 河川上流域の河道地形. *日本流体力学会誌* **24**: 15-26.
- 長谷川和義・上林悟 (1996) 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. *水工学論文集* **40**: 893-900.
- 長谷川和義・川村信也・張裕平 (2003) 群別川におけるステップ・プールの水理特性と底生動物の関係. *水工学論文集* **47**: 1111-1116.
- Hayward J.A. (1980) Hydrology and stream sediments from Torlesse Stream catchment. *Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute Special Publication 17*. New Zealand: Lincoln College.
- Heede B.H. (1972) Influences of a forest on the hydraulic geometry of two mountain streams. *Water Resources Bulletin* **8**: 523-530.
- Inoue M. & Nakano S. (1999) Habitat structure along chan-

- nel-unit sequences for juvenile salmon: a subunit-based analysis of in-stream landscapes. *Freshwater Biology* **42**: 597-608.
- 巖島怜・真砂祐貴・池松伸也・島谷幸宏 (2015) Step-Pool 構造による急流都市河川の環境に配慮した河道設計法に関する研究. *土木学会論文集 G (環境)* **71**: II_397-II 403.
- Jackson C.R. & Sturm C.A. (2002) Woody debris and channel morphology in first- and second-order forested channels in Washington's coast ranges. *Water Resources Research* **38**(9): 16-1 to 16-14.
- Jarrett R.D. (1984) Hydraulics of high-gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering* **110**: 1519-1539.
- Johnson J.P.L., Aronovitz A.C. & Kim W. (2015) Coarser and rougher: Effect of fine gravel pulses on experimental step-pool channel morphodynamics. *Geophysical Research Letters* **42**: 8432-8440.
- 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.
- Kaufmann P.R. (1987) Channel Morphology and Hydraulic Characteristics of Torrent-Impacted Forest Streams in the Oregon Coast Range, USA. PhD Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.
- Kaufmann P.R., Faustini J.M., Larsen D.P. & Shirazi M.A. (2008) A roughness-corrected index of relative bed stability for regional stream surveys. *Geomorphology* **99**: 150-170.
- 数馬田貢・林田寿文 (2012) ステップ・プール構造の落差工設計と現場への適用について—良好な河川環境の回復と河床低下対策への可能性—。第 56 回北海道開発技術研究発表会：技 12.
- Keller E.A. & Melhorn W.N. (1978) Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. *Geological Society of America Bulletin* **89**: 723-730.
- Keller E.A. & Swanson F.J. (1979) Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth Surface Processes* **4**: 361-380.
- 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 **1**: 53-63.
- 国土交通省 (2008) 中小河川に関する河道計画の技術基準について。
- 国土交通省 (2014) 美しい山河を守る災害復旧基本方針。
- 久保田仁志・中村智幸・丸山隆・渡邊精一 (2001) 小支流におけるイワナ、ヤマメ当歳魚の生息数、移動分散および成長。日本水産学会誌 **67**: 703-709.
- Lamarre H. & Roy A.G. (2008) The role of morphology on the displacement of particles in a step-pool river system. *Geomorphology* **99**: 270-279.
- Lee A.J. & Ferguson R.I. (2002) Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology* **46**: 59-71.
- Lenzi M.A. (2001) Step-pool evolution in the Rio Cordon, northeastern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* **26**: 991-1008.
- Lenzi M.A. (2002) Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in northern Italy. *Geomorphology* **45**: 243-260.
- 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* **36**: 171-190.
- Lenzi M.A., Mao L. & Comiti F. (2006) When does bedload transport begin in steep boulder-bed streams? *Hydrological process* **20**: 3517-3533.
- Leopold L.B. & Wolman M.G. (1957) River channel patterns: braided, meandering and straight. *Geological survey professional studies of rivers* **282-B**: 39-85.
- 劉義濤・島谷幸宏・山下奉海・佐藤辰郎・池松伸也 (2012) 多自然川づくりによる山地溪流河道の洪水による階段状河床形の変化。河川技術論文集 **18**: 83-88.
- Madej M.A. (2001) Development of channel organization and roughness following sediment pulses in single-thread, gravel bed rivers. *Water Resources Research* **37**: 2259-2272.
- Mao L., Uyttendaele G.P., Iroumé A. & Lenzi M.A. (2008) Field based analysis of sediment entrainment in two high gradient streams located in Alpine and Andine environments. *Geomorphology* **93**: 368-383.
- Marion D.A. & Weirich F. (2003) Equal-mobility bed load transport in a small, step-pool channel in the Ouachita Mountains. *Geomorphology* **55**: 139-154.
- Marston R.A. (1982) The geomorphic significance of log steps in forest streams. *Association of American Geographers Annals* **72**: 99-108.
- 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 **17**: 131-136.
- Milner V.S. & Gilvear D.J. (2012) Characterization of hydraulic habitat and retention across different channel types; introducing a new field-based technique. *Hydrobiologia* **694**: 219-233.
- Milner V.S., Willby N.J., Gilvear D.J. & Perfect C. (2015) Linkages between reach-scale physical habitat and invertebrate assemblages in upland streams. *Marine and Freshwater Research* **66**: 438-448.
- Molnar P., Densmore A.L., McArdele B.W., Turowski J.M. & Burlando P. (2010) Analysis of changes in the step-pool morphology and channel profile of a steep mountain stream following a large flood. *Geomorphology* **124**: 85-94.
- Montgomery D.R. & Buffington J.M. (1997) Channel-reach morphology in mountain drainage. *Geological Society of America Bulletin* **109**: 596-611.
- Montgomery D.R., Buffington J.M., Smith R.D., Schmidt K.M. & Pess G. (1995) Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research* **31**: 1097-1105.
- 村椿健治・羽石功・阪本秀樹 (2008) 網走川河道掘削工事における多自然川づくり—伝統工法を用いた瀬・淵の創出—。第 52 回北海道開発技術研究発表会：環 -18.
- 永山滋也・原田守啓・萱場祐一 (2015) 河川地形と生息場の分類—河川管理への活用に向けて—。応用生態工学会 **18**: 19-33.
- 名越誠・中野繁・徳田幸憲 (1988) 溪流域におけるアマゴの成長に伴う生息場所および食物利用の変化。日本水産学会誌 **54**: 33-38.
- 中村和央・眞板秀二・宮本邦明 (2008) 山地小流域における階段状河床地形の形成・破壊の実態。筑波大学農林技術センター演習林報告 **24**: 1-36.
- Nakano S. & Kaeriyama M. (1995) Summer Microhabitat Use

- and Diet of Four Sympatric Stream-dwelling Salmonids in Kamchatkan Stream. *Fisheries Science* **61**: 926-930.
- Parker G., Klingeman P.C. & McLean D.G. (1982) Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *American Society of Civil Engineers, Proceedings Journal of the Hydraulics Division* **108**(HY4): 544-571.
- Purcell A.H., Friedrich C. & Resh V.H. (2002) An assessment of a small urban stream restoration project in northern California. *Restoration Ecology* **10**: 685-694.
- Rathburn S.L., Rubin Z.K. & Wohl E. (2013) Evaluating channel response to an extreme sedimentation event in the context of historical range of variability: Upper Colorado River. *Earth Surface Process and Landforms* **38**: 391-406.
- Rickenmann D. (1991) Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* **117**: 1419-1439.
- Rickenmann D. & Recking A. (2011) Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research* **47**: W07538.
- Roni P., Bennett T., Morley S., Pess G.R., Hanson K., Van S.D. & Olmstead P. (2006) Rehabilitation of bedrock stream channels: The effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota. *River Research and Applications* **22**(9): 967-980.
- 沢田豊明・芦田和男 (1989) 山地溪流における流路形態と土砂流出. *水理講演会論文集* **33**: 373-378.
- Shields I.A. (1936) Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement (translated by Ott W. P. & Uchelean J.C.) Soil Conservation Service Cooperative Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California.
- Sinnakaudan S.K., Sulaiman M.S. & Teoh S.H. (2010) Total bed material load equation for high gradient rivers. *Journal of Hydro-environment Research* **4**: 243-251.
- Stuve P.E. (1990) Spatial and temporal variation of flow resistance in an alpine river. *Hydrology in mountainous regions. I-hydrological measurements; the water cycle*. Publication 193, Wallingford: International Association of hydrological Sciences: 307-314.
- 須賀堯三 (1992) 川の個性 河相形成のしくみ. 鹿島出版会, 東京.
- 田代喬・辻本哲郎 (2015) 流域地質からみた河床材料と底生動物. *応用生態工学* **18**: 35-45.
- 多自然川づくり研究会 (2011) 多自然川づくりポイントブックⅢ 中小河川に関する河道計画の技術基準; 解説. 公益社団法人日本河川協会, 東京.
- 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義 (1998) 溪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**: 1075-1080.
- Wang Z., Melching C., Duan X. & Yu G. (2009) Ecological and hydraulic studies of step-pool systems. *Journal of Hydraulic Engineering* **135**: 705-717.
- Waters K.A. & Curran J.C. (2012) Investigating step-pool sequence stability. *Water Resources Research* **48**: W07505.
- Weichert R.B., Bezzola G.R. & Minor H.E. (2008) Bed morphology and generation of step-pool channels. *Earth Surface Processes and Landforms* **33**: 1678-1692.
- Whittaker J.G. (1987) Sediment transport in step-pool streams. In Thorne C.R. Bathurst J.C. & Hey R.D. editors, *Sediment transport in gravel-bed rivers*, Chichester: Wiley: 545-579.
- Whittaker J.G. & Davies T.R.H. (1982) Erosion and sediment transport processes in step-pool torrents. Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield. *International Association of Hydrological Sciences* **137**: 99-104.
- 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* **108**: 758-773.
- 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* **47**: W07514.
- Wohl E.E. (2000) Substrate influences on step-pool sequences in the Christopher Creek drainage, Arizona. *Journal of Geology* **108**: 121-129.
- Wohl E.E. & Dust D. (2012) Geomorphic response of a headwater channel to augmented flow. *Geomorphology* **138**: 329-338.
- Wohl E.E. & Grodek T. (1994) Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel. *Geomorphology* **9**: 117-126.
- Wohl E.E., Madsen S. & MacDonald L. (1997) Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology* **38**: 267-279.
- Wohl E.E. & Thompson D.M. (2000) Velocity characteristics along a small step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 353-367.
- Wohl E.E. & Wilcox A. (2005) Channel geometry of mountain streams in New Zealand. *Journal of Hydrology* **300**: 252-266.
- 山本晃一 (2010) 沖積河川 一構造と動態一. (財)河川環境管理財団・企画, 技報堂出版, 東京.
- 山本晃一 (2014) 総合土砂管理計画 流砂系の健全化に向けて. (公財)河川財団・企画, 技報堂出版, 東京.
- 柳生将之 (2009) 山地河川におけるイワナの採餌場所選択性. *魚類学雑誌* **56**: 111-118.
- 柳生将之・中村寛志・宮崎敏孝 (2007) 天竜川水系の山地河川藤沢川における大規模洪水がイワナにおよぼす影響. *日本環境動物昆虫学会* **18**: 169-176.
- Yochum S.E., Bledsoe B.P., David G.C.L. & Wohl E. (2012) Velocity prediction in high-gradient channels. *Journal of Hydrology* **424-425**: 84-98.
- 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* **50**: 6015-6029.
- Yu G.A., Wang Z.Y., Zhang K., Duan X. & Chang T.C. (2010) Restoration of an incised mountain stream using artificial step-pool system. *Journal of Hydraulic Research* **48**: 178-187.
- 張裕平・長谷川和義・志田祐一郎 (2010) 溪流のステップ・プールにおける底生無脊椎動物の生息場類型としての水理学的流れ区分. *応用生態工学* **13**: 1-7.
- Zimmermann A. (2010) Flow resistance in steep streams: An experimental study. *Water Resources Research* **46**: W09536.
- Zimmermann A. & Church M. (2001) Channel morphology, gradient stresses and bed profiles during flood in a step-pool channel. *Geomorphology* **40**: 311-27.

(* 印を付した文献は直接参照していない)