

1 報文種類： 総説 Review

2

3 表題：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

4 title：Existing knowledge about step-pool structures and their application to river

5 engineering in mountain rivers

6 簡略表題：Step-pool の既往知見と研究課題

7

8 著者名・所属

9 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
10 幸宏³⁾

11 1) 九州大学 持続可能な社会のための決断科学センター, 2) 九州大学大学院 工
12 学府, 3) 九州大学大学院 工学研究院

13 Rei Itsukushima¹⁾, Tatsuro Sato¹⁾, Kento Nishida²⁾, Yuki Masago²⁾, Tomonori Sakata
14 ²⁾, Yukihiro Shimatani³⁾

15 1) Department of Decision Science for sustainable society, Kyushu University, W-2

16 1008, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan, 2) Graduate School of

17 Engineering, Kyushu University, W-2 1008, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka,

18 819-0395, Japan, 3) Faculty of Engineering, Kyushu University, W-2 1008, 744,

19 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

20

21 責任著者：巖島 怜

22 住所：福岡県福岡市西区元岡 744 番地 W-2 1008 号

23 (W-2 1008, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan)

24 電話番号：092-802-3419, Fax:092-802-3438, email:

25 itsukushima@civil.kyushu-u.ac.jp

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

40
41 **Keyword:** step-pool, mountain river, morphology, hydraulics, restoration

42

43

1. はじめに

44 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
45 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
46 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
47 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，
48 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
49 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
50 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
51 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
52 の消失，平常時の流量減少，洪水時の構造物に作用する流体力の増大等，治水，
53 利水，環境，維持管理に課題を有している．

54 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
55 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
56 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
57 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
58 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
59 （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
60 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
61 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，
62 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」
63 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
64 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
65 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，
66 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
67 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

68 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
69 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、
70 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
71 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、
72 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
73 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・
74 河岸を保護する従来型の改修を行う事例が多い。

75 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
76 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
77 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
78 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
79 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
80 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
81 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
82 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
83 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）、
84 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
85 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
86 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
87 に配慮した河川改修の重要な要素技術となりうる。

88 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
89 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
90 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
91 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
92 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形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

118 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
119 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)
120 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
121 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
122 田ほか (2008) が 0.02 以上、三國谷・知花 (2011) が 0.025 以上、小玉・中村
123 (1997) が 0.04~0.05 としている。

124 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
125 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。
126 既往文献で報告されている発生領域の下限值である 0.02 は、権田ほか (2008)
127 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
128 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
129 以上が step-pool 発生領域の目安と考えられる。

130

131 2.2 Step-pool の基本構造と名称

132 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
133 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
134 理量として、step 高 (H_s)、pool 深 (H_r)、落下高 (H_{max})、step-pool の間隔 (L)
135 が代表的に用いられている。Step-pool の間隔は、①step 構成礫間の水平距離、
136 ②pool 最深部の水平距離、③step 構成礫間の斜面長の 3 つの定義が提案されてい
137 る。

138 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
139 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
140 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
141 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
142 (Hayward 1980)。Step を構成する礫径は様々であるが、礫~巨石 (64 mm より

143 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
144 & Duckson 1995; 2001; Wohl 2000). 岩盤河床で生じる step-pool では pool の面積
145 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
146 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
147 (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
148 形成される (Keller & Swanson 1979; Marston 1982; Jackson & Sturm 2002; Faustini
149 & 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
150 成された step と類似している (Wohl et al. 1997; Curran & Wohl 2003). 一方, 土
151 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
152 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
153 & Jones 2003).

154

155

3. Step-pool の形成と破壊

156

3.1 形成過程

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

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 Chartland & 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 Chartland & Whiting (2000)

168 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
169 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
170 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。

171 一方、Zimmerman & Church (2001) は step の形成が通常の洪水では移動しな
172 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
173 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
174 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
175 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
176 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
177 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
178 ことを説明している。

179 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
180 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)
181 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
182 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
183 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
184 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 次元的である
185 場合はリブ（礫列タイプ）が支配的となるとした。竜澤ほか (1998) は step-pool
186 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
187 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
188 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
189 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
190 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
191 が提示したものである（赤井 1957）。

192 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

193 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
194 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
195 化することで step の安定性が増大することを確認している。

196 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
197 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
198 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
199 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
200 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
201 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
202 うると考えられる。

203

204 3.2 形成・破壊流量

205 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
206 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
207 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、
208 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
209 る。Chin (1998) は California の Santa Monica Mountain において step を構成する
210 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
211 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、
212 1m 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
213 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
214 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
215 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、
216 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
217 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

218 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
219 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
220 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
221 Mountain (Colorado) での大出水後も確認されている (Rathburn et al. 2013)。Molnar
222 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
223 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
224 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
225 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
226 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
227 び 15 年の洪水で step の破壊と再形成を確認した。

228 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
229 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
230 ている。Whittaker & Davies (1982) は、土砂供給がない場合は生起確率 100~1000
231 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
232 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
233 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
234 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
235 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・
236 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
237 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
238 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
239 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
240 量を比較した研究はみられない。

241 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
242 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

243 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
244 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
245 必要である。

246

247

4. Step 構造の規定要因

4.1 Step 構造と構成材料の関係

249 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
250 によって大きく異なる。Chartrand & Whiting (2000) は Idaho の 100 リーチで step
251 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%
252 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
253 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
254 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
255 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
256 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、
257 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
258 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、
259 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
260 積現象が異なるためと考えられる。

261 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
262 係が調べられている。Wohl et al. (1997) は、Montana において step 高と step を
263 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)
264 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
265 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
266 ことを示した。

267 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

268 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
269 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
270 見られなかったことが報告されている (Wohl & Grodek 1994; Chin 1999a).

271 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
272 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
273 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
274 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
275 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.

276

277 4.2 Step 構造と河道特性の関係

278 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
279 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
280 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
281 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
282 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
283 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
284 報告がある.

285 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
286 ている (例えば, Heede 1972; Wohl et al. 1997). Santa Monica Mountains におけ
287 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
288 部で 7:1, 下流域で 17:1 であった (Chin 1999a). Judd (1964) は step 間隔と河
289 床勾配の関係に着目し, 式 (1) を提案している.

$$290 \quad L = K / C S^z \quad (1)$$

291 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
292 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

293 ている. Whittaker (1987) は New Zealand における 26 の step-pool を対象に $L = 0.311$
294 $/S^{1.188}$ 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
295 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
296 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)
297 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,
298 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
299 ことを示した. 一方, Abrahams et al. (1995) は米国及び英国の 18 の step-pool
300 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
301 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
302 行っている.

303 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
304 果に基づき (Leopold & Wolman 1957; Keller & Melhorn 1978), step 間隔を示す指
305 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
306 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
307 et al. 1990). 河道幅と step 間隔の関係について, Chin (1999a) は, active channel
308 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
309 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
310 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
311 いる (Chin 1999a).

312 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.
313 Chartrand & Whiting (2000) の Idaho での観測結果では, pool 深は河床勾配が増
314 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
315 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
316 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
317 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

318 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。

319 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。
320 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
321 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
322 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
323 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
324 隔が減少することが報告されている (Montgomery et al. 1995)。Furbish et al. (1998)
325 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
326 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
327 水時にも動かない巨岩や岩河床の存在を挙げている。

328 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
329 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
330 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、
331 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 &
332 Duckson (1995) は Oregon の 160 の step-pool を観測し、pool の形状を 15 のタイ
333 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、
334 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
335 れた碎屑物) では長方形が卓越することを明らかにした。

336 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
337 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
338 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
339 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
340 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
341 測は困難であることを付言している。

342

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 は広く受けいれられており, 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

368 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
369 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。
370 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
371 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
372 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
373 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
374 にした。Wohl & Thompson (2000) は Colorado の St. Louis Creek における融雪出
375 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
376 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
377 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
378 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
379 れとなっていることを報告している。

380 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、
381 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
382 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
383 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
384 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。

385 D'Agostino & Michelini (2015) は、Italy 北部の step-pool 河道を対象に、現地観
386 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
387 た。その結果、Jarrett (1984) 及び Bathurst (1985) が提示した式で予測値と実
388 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。

389 D'Agostino & Michelini (2015) は、各々の式は異なる流量条件、河道構造を対象
390 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
391 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。
392 これらの抵抗則は、自然河川で観測されたもの (Jarrett 1984; Bathurst 1985;

393 Kaufmann 1987; Comiti et al. 2007; Kaufmann et al. 2008), 現地観測と水理模型実験
394 から得られたもの (Lee & Ferguson 2002) である. Yochum et al. (2012) は, step-pool
395 河道は多様度が高く, 抵抗を表現する単一の式は存在しないが, 粒径は普遍性
396 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
397 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
398 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
399 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).

400

401 5.2 step-pool 構造と土砂動態

402 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
403 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
404 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
405 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
406 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
407 る研究が行われている.

408 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
409 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
410 連続観測した結果, 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
411 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
412 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
413 径 10cm 以下の土砂を洪水時に捕捉した結果, 5mm 以下の粒子は洪水初期に,
414 5mm 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
415 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 &
416 Wohl (1998) は, Colorado における step-pool を含む山地河川で Helley-smith 採
417 取器によって掃流砂を直接捕捉し, 掃流砂に関する物理量として, せん断力,

418 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，
419 山地河川の土砂流送は多数の物理量に関連する複雑な現象であることを説明し
420 ている．

421 Step-pool における土砂輸送を研究した事例として，Whittaker & Davies (1982)
422 は山地河川の土砂流送能力は流量や河床勾配だけでなく，pool の埋没の程度に
423 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
424 土砂流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)
425 は Rio Cordon において 10 年間土砂流送量を計測した結果，年最大流量程度の出
426 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
427 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
428 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
429 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
430 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
431 多い河道で移動限界掃流力が大きいことを示した．

432 Marion & Weirich (2003) は山地河川の土砂流送において，不均一粒径で構成
433 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
434 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
435 る SST (size selective transport) 理論 (Shields 1936) のいずれが発生しているか
436 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
437 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．

438 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)
439 は Canada の Spruce creek において 40～256mm の 196 個の粒子に PIT タグを埋め
440 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
441 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
442 式化に関する研究も近年行われている．Sinnakaudan et al. (2010) は Malaysia の

443 山地河道における観測データから D_{50} が 2.00~147.43mm の粒径に適合する掃流
444 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
445 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
446 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。

447

448

6. 生物生息場としての特徴・評価

449 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
450 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
451 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
452 る。Milner & Gilvear (2012) は、step-pool, 岩盤河床, 平坦河床, 瀬淵の 4 種類
453 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
454 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
455 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.
456 (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
457 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
458 の多様性の指標を提案している。Dupuis & Friele (2006) は、Canada の Yark 川
459 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
460 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
461 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
462 床, 平坦河床, 瀬淵) 毎に採取し、step-pool はコカゲロウ科の *Alainites muticus*
463 及び *Baetis rhodani*, カワゲラ目の *Leuctra inermis* 及び *Brachyptera risi* で特徴づけ
464 られる特異な場であることを示した。

465 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
466 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
467 (*Oncorhynchus masou ishikawae*) 当歳魚が成長に伴って“たまり”から淵尻、淵

468 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
469 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
470 ラマス (*Oncorhynchus masou masou*) についても報告がある (久保田ほか 2001)。
471 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
472 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
473 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 &
474 Kaeriyama (1995) や柳生 (2009) の研究事例が挙げられる。Nakano & Kaeriyama
475 (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
476 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
477 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
478 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
479 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
480 おいて生起確率 100~200 年の洪水の前後でイワナの個体数を調査し、step-pool
481 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
482 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
483 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、
484 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
485 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
486 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
487 ラタカゲロウ (*Epeorus curvatulus*) やフタバコカゲロウ (*Cloeon dipterum*) がよ
488 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
489 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
490 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、
491 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
492 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

493 学的区分に関係があることを明らかにした。

494

495 7. Step-pool の河川改修への適用事例

496 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，
497 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
498 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
499 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．

500 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，
501 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
502 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
503 設計を行っている (Lenzi 2002)．Comiti et al. (2009) は，山地河川の縦断形を
504 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，
505 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
506 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
507 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
508 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
509 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.
510 (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
511 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
512 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
513 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
514 (*Oncorhynchus kisutch*) 及びノドキリマス (*Oncorhynchus Clarki*) の個体数が増
515 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
516 ルワイフ (*Alosa pseudoharengus*) に PIT タグを埋め込んで追跡した結果，40%
517 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.

518 2012). また, Bilby & Likens (1980) は step-pool 河道内における流木が砂やシル
519 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
520 らかにした.

521 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
522 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).
523 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
524 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
525 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
526 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
527 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
528 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
529 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
530 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.

531 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
532 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
533 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
534 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
535 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
536 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
537 る直径 1m 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
538 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
539 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,
540 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.

541 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
542 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

543 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
544 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
545 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。

546

547 8. 河川技術への応用と検討課題

548 8.1 導入に際し配慮すべき事項

549 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
550 項は下記の通りである。

551 (1) step-pool 構造の適用範囲

552 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
553 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
554 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
555 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
556 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
557 や水理条件を考慮し導入の可否を判断する必要がある。

558 (2) 反砂堆理論と keystone 理論の設計への導入

559 河川の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
560 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
561 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
562 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
563 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
564 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
565 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
566 step-pool 構造とすることが適当である。

567 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

568 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
569 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
570 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
571 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、
572 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
573 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。

574 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
575 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、 $H/L/S=1\sim 2$
576 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
577 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
578 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
579 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
580 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
581 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
582 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
583 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
584 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
585 る。

586 （3）粒度構成と step 構造

587 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
588 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
589 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
590 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
591 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
592 設定することが重要である。

593 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
594 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
595 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
596 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
597 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
598 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
599 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
600 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
601 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
602 能性を適切に評価することが重要である．

603

604 8.2 技術の確立に向けた今後の課題

605 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
606 必要である．今後の技術構築に向けた課題を以下に記す．

607 （1）法線の設定

608 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
609 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
610 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
611 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
612 現地観測の事例も少なく，今後の研究課題である．

613 （2）河道幅の設定

614 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
615 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
616 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
617 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

618 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
619 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つては、縦断
620 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
621 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
622 となる。

623 (3) 河岸の粗度

624 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
625 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
626 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
627 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
628 見の蓄積が必要である。

629 (4) 破壊に至る外力とそのメカニズム

630 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
631 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
632 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
633 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
634 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
635 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。

636 (5) 生態系への影響と設計手法

637 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
638 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
639 って、step-pool 構造の導入に際し、対象箇所の生物相を把握し、それらの生活
640 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、
641 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
642 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

643 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
644 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。

645

646

まとめ

647 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
648 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
649 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
650 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
651 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
652 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
653 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
654 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
655 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
656 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には注意
657 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
658 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。
659 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
660 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、
661 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、
662 これに伴う流路工の整備などの人為影響を受けている。国内では、人為影響を
663 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
664 後の研究が必要と考えられる。

665 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
666 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
667 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

668 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。
669 **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
670 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
671 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。

672

673

摘要

674 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
675 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
676 理し, 河川技術への応用可能性について示した。

677 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
678 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
679 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
680 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,
681 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
682 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
683 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
684 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。

685 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
686 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
687 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
688 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
689 し, 今後必要となる研究を示した。

690

引用文献

692 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

693 施工 50 (12) :44-47.

694 Aberle J. & Smart G.M. (2003) The influence of roughness structure on flow
695 resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research* 41: 259-269.

696 Abrahams A.D., Li G. & Atkinson J.F. (1995) Step-pool streams: adjustment to
697 maximum flow resistance. *Water Resources Research* 31: 2593-2602.

698 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.

699 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.
700 京大防災研究所年報 27 B-2:341-353.

701 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
702 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.

703 Ashida K., Takahashi T. & Sawada T. (1976) Sediment yield and transport on a
704 mountainous small watershed. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute,*
705 *Kyoto University* 26: 119-144.

706 Bathurst J.C. (1985) Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers. *Journal of*
707 *Hydraulic Engineering* 111: 625-643.

708 Bilby R.E. & Likens G.E. (1980) Importance of organic debris dams in the structure
709 and function of stream ecosystems. *Ecology* 61: 1107-1113.

710 Billi P., D'Agostino V., Lenzi M.A. & Marchi L. (1998) Bedload, slope and channel
711 processes in a high-altitude torrent. *Water Resources Publications*: 15-38.

712 Blizard C.R. & Wohl E.E. (1998) Relationships between hydraulic variables and
713 bedload transport in a subalpine channel, Colorado Rocky Mountains, U.S.A.
714 *Geomorphology* 22: 359-371.

715 Chartrand S.M. & Whiting P.J. (2000) Alluvial architecture in headwater streams with
716 special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms*
717 25: 583-600.

- 718 Chin A. (1998) On the stability of step-pool mountain streams. *The Journal of*
719 *Geology* 106: 59-69.
- 720 Chin A. (1999a) The morphologic structure of step-pools in mountain streams.
721 *Geomorphology* 27: 191-204.
- 722 Chin A. (1999b) On the origin of step-pool sequences in mountain streams.
723 *Geophysical Research Letters* 26: 231–34.
- 724 Chin A. (2002) The periodic nature of step-pool mountain. *American Journal of*
725 *Science* 302: 144-167.
- 726 Chin A. (2003) The geomorphic significance of step-pools in mountain streams.
727 *Geomorphology* 55: 125-137.
- 728 Chin A. (2005) Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in*
729 *Physical Geography* 29: 275-296.
- 730 Comiti F., Andreoli A. & Lenzi M.A. (2005) Morphological effects of local scouring
731 in step-pool streams. *Earth Surface Processes and Landforms. Earth Surface*
732 *Processes and Landforms* 30: 1567-1581.
- 733 Comiti F., Mao L., Lenzi M.A. & Siligardi M. (2009) Artificial steps to stabilize
734 mountain rivers: A post-project ecological assessment. *River Research and*
735 *Applications* 25: 639-659.
- 736 Comiti F., Mao L., Wilcox A., Wohl E.E. & Lenzi M.A. (2007) Field-derived
737 relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of*
738 *hydrology* 340: 48-62.
- 739 Curran J.H. & Wohl E.H. (2003) Large woody debris and flow resistance in step-pool
740 channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology* 51: 141-157.
- 741 D’Agostino V. & Michelini T. (2015) On kinematics and flow velocity prediction in
742 step-pool channels. *Water Resources Research* 51: 4650-4667.

- 743 Duckson D.W. & Duckson L.J. (1995) Morphology of bedrock step pool systems.
744 Water Resources Bulletin 31: 43-51.
- 745 Duckson D.W. & Duckson L.J. (2001) Channel bed steps and pool shapes along Soda
746 Creek, Three Sisters Wilderness, Oregon. *Geomorphology* 38: 267-79.
- 747 Dupuis L. & Friele P. (2006) The distribution of the Rocky Mountain tailed frog
748 (*Ascaphus montanus*) in relation to the fluvial system: Implications for
749 management and conservation. *Ecological Research* 21: 489-502.
- 750 Faustini J.M. & Jones J.A. (2003) Influence of large woody debris on channel
751 morphology and Dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western
752 Cascades, Oregon. *Geomorphology* 51: 187-200.
- 753 Ferguson R. (2007) Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams.
754 *Water Resources Research* 43: W05427.
- 755 Franklin A.E., Haro A., Castro-Santos T. & Noreika J. (2012) Evaluation of
756 nature-like and technical fishways for the passage of alewives at two coastal streams
757 in New England. *Transactions of the American Fisheries Society* 141: 624-637.
- 758 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
759 積み落差工の設計. 土木学会論文集 F 66 : 490-503.
- 760 Furbish D.J., Thorne S.D., Byrd T.C., Warburton J., Cudney J.T. & Handel R.W. (1998)
761 Irregular bed forms in steep, rough channels. 2. Field observations. *Water Resources*
762 *Research* 34: 3649-3659.
- 763 Grant G.E. (1997) Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a
764 new hypothesis. *Water Resources Research* 33: 349-358.
- 765 Grant G.E., Swanson F.J. & Wolman M.G. (1990) Pattern and origin of stepped-bed
766 morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon. *Geological*
767 *Society of America Bulletin* 102: 340-352.

- 768 Gomi T., Sidle R.C., Woodsmith R.D. & Bryant M.D. (2003) Characteristics of
769 channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska.
770 *Geomorphology* 51: 225-242.
- 771 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
772 造の形状及び分布特性. 新潟大学農学部研究報告 61: 67-93.
- 773 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.
- 774 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.
- 775 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
776 成機構とその設計指針. *水工学論文集* 40: 893-900.
- 777 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
778 理特性と底生動物の関係. *水工学論文集* 47: 1111-1116.
- 779 Hayward J.A. (1980) Hydrology and stream sediments from Torlesse Stream
780 catchment. *Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute Special Publication* 17.
781 New Zealand: Lincoln College.
- 782 Heede B.H. (1972) Influences of a forest on the hydraulic geometry of two mountain
783 streams. *Water Resources Bulletin* 8: 523-530.
- 784 Inoue M. & Nakano S. (1999) Habitat structure along channel-unit sequences for
785 juvenile salmon: a subunit-based analysis of in-stream landscapes. *Freshwater*
786 *Biology* 42: 597-608.
- 787 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
788 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)*
789 71 : II_397- II 403.
- 790 Jackson C.R. & Sturm C.A. (2002) Woody debris and channel morphology in first-
791 and second-order forested channels in Washington's coast ranges. *Water Resources*
792 *Research* 38 (9) : 16-1 to 16-14.

- 793 Jarrett R.D. (1984) Hydraulics of high-gradient streams. *Journal of Hydraulic*
794 *Engineering* 110: 1519-1539.
- 795 Johnson J.P.L., Aronovitz A.C. & Kim W. (2015) Coarser and rougher: Effect of fine
796 gravel pulses on experimental step-pool channel morphodynamics. *Geophysical*
797 *Research Letters* 42: 8432-8440.
- 798 Judd H.E.* (1964) A study of bed characteristics in relation to flow in rough,
799 high-gradient natural channels. Unpublished PhD thesis, Utah State University,
800 Logan.
- 801 Kaufmann P.R. (1987) Channel Morphology and Hydraulic Characteristics of
802 Torrent-Impacted Forest Streams in the Oregon Coast Range, USA. PhD
803 Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.
- 804 Kaufmann P.R., Faustini J.M., Larsen D.P. & Shirazi M.A. (2008) A
805 roughness-corrected index of relative bed stability for regional stream surveys.
806 *Geomorphology* 99: 150-170.
- 807 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
808 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
809 回北海道開発技術研究発表会：技 12.
- 810 Keller E.A. & Melhorn W.N. (1978) Rhythmic spacing and origin of pools and riffles.
811 *Geological Society of America Bulletin* 89: 723-730.
- 812 Keller E.A. & Swanson F.J. (1979) Effects of large organic material on channel form
813 and fluvial processes. *Earth Surface Processes* 4: 361-380.
- 814 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
815 対応する河床勾配の階層性－. *鳥取地質学会誌* 1: 53-63.
- 816 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.
- 817 国土交通省 (2014) 美しい山河を守る災害復旧基本方針.

- 818 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,
819 ヤマメ当歳魚の生息数, 移動分散および成長. 日本水産學會誌 67: 703-709.
- 820 Lamarre H. & Roy A.G. (2008) The role of morphology on the displacement of
821 particles in a step-pool river system. *Geomorphology* 99: 270-279.
- 822 Lee A.J. & Ferguson R.I. (2002) Velocity and flow resistance in step-pool streams.
823 *Geomorphology* 46: 59-71.
- 824 Lenzi M.A. (2001) Step-pool evolution in the Rio Cordon, northeastern Italy. *Earth*
825 *Surface Processes and Landforms* 26: 991-1008.
- 826 Lenzi M.A. (2002) Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic
827 step-pool morphology features in northern Italy. *Geomorphology* 45: 243-260.
- 828 Lenzi M.A., D'Agostino V. & Billi P. (1999) Bedload transport in the instrumented
829 catchment of the Rio Cordon. Part I. Analysis of bedload records, conditions and
830 threshold of bedload entrainment. *Catena* 36: 171-190.
- 831 Lenzi M.A., Mao L. & Comiti F. (2006) When does bedload transport begin in steep
832 boulder-bed streams? *Hydrological process* 20: 3517-3533.
- 833 Leopold L.B. & Wolman M.G. (1957) River channel patterns: braided, meandering
834 and straight. *Geological survey professional studies of rivers* 282-B: 39-85.
- 835 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
836 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:
837 83-88.
- 838 Madej M.A. (2001) Development of channel organization and roughness following
839 sediment pulses in single-thread, gravel bed rivers. *Water Resources Research* 37:
840 2259-2272.
- 841 Mao L., Uyttendaele G.P., Iroumé A. & Lenzi M.A. (2008) Field based analysis of
842 sediment entrainment in two high gradient streams located in Alpine and Andine

- 843 environments. *Geomorphology* 93: 368-383.
- 844 Marion D.A. & Weirich F. (2003) Equal-mobility bed load transport in a small,
845 step-pool channel in the Ouachita Mountains. *Geomorphology* 55: 139-154.
- 846 Marston R.A. (1982) The geomorphic significance of log steps in forest streams.
847 *Association of American Geographers Annals* 72: 99-108.
- 848 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
849 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.
- 850 Milner V.S. & Gilvear D.J. (2012) Characterization of hydraulic habitat and retention
851 across different channel types; introducing a new field-based technique.
852 *Hydrobiologia* 694: 219-233.
- 853 Milner V.S., Willby N.J., Gilvear D.J. & Perfect C. (2015) Linkages between
854 reach-scale physical habitat and invertebrate assemblages in upland streams. *Marine
855 and Freshwater Research* 66: 438-448.
- 856 Molnar P., Densmore A.L., McArdeell B.W., Turowski J.M. & Burlando P. (2010)
857 Analysis of changes in the step-pool morphology and channel profile of a steep
858 mountain stream following a large flood. *Geomorphology* 124: 85-94.
- 859 Montgomery D.R. & Buffington J.M. (1997) Channel-reach morphology in mountain
860 drainage. *Geological Society of America Bulletin* 109: 596-611.
- 861 Montgomery D.R., Buffington J.M., Smith R.D., Schmidt K.M. & Pess G. (1995)
862 Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research* 31: 1097-1105.
- 863 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
864 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
865 表会：環-18.
- 866 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
867 への活用に向けて～. *応用生態工学会* 18: 19-33.

- 868 名越誠・中野繁・徳田幸憲 (1988) 渓流域におけるアマゴの成長に伴う生息
869 場所および食物利用の変化. 日本水産學會誌 54: 33-38.
- 870 中村和央・眞板秀二・宮本邦明 (2008) 山地小溪流域における階段状河床地
871 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.
- 872 Nakano S. & Kaeriyama M. (1995) Summer Microhabitat Use and Diet of Four
873 Sympatric Stream-dwelling Salmonids in Kamchatkan Stream. Fisheries Science 61:
874 926-930.
- 875 Parker G., Klingeman P.C. & McLean D.G. (1982) Bedload and size distribution in
876 paved gravel-bed streams. American Society of Civil Engineers, Proceedings
877 Journal of the Hydraulics Division 108 (HY4) : 544-571.
- 878 Purcell A.H., Friedrich C. & Resh V.H. (2002) An assessment of a small urban stream
879 restoration project in northern California. Restoration Ecology 10: 685-694.
- 880 Rathburn S.L., Rubin Z.K. & Wohl E. (2013) Evaluating channel response to an
881 extreme sedimentation event in the context of historical range of variability: Upper
882 Colorado River. Earth Surface Process and Landforms 38: 391-406.
- 883 Rickenmann D. (1991) Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep
884 Slopes. Journal of Hydraulic Engineering 117: 1419-1439.
- 885 Rickenmann D. & Recking A. (2011) Evaluation of flow resistance in gravel-bed
886 rivers through a large field data set. Water Resources Research 47: W07538.
- 887 Roni P., Bennett T., Morley S., Pess G.R., Hanson K., Van S.D. & Olmstead P. (2006)
888 Rehabilitation of bedrock stream channels: The effects of boulder weir placement on
889 aquatic habitat and biota. River Research and Applications 22 (9) : 967-980.
- 890 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
891 演会論文集 33: 373-378.
- 892 Shields I.A. (1936) Application of similarity principles and turbulence research to

893 bed-load movement (translated by Ott W. P. & Uchelean J.C.) Soil Conservation
894 Service Cooperative Laboratory California Institute of Technology Pasadena,
895 California.

896 Sinnakaudan S.K., Sulaiman M.S. & Teoh S.H. (2010) Total bed material load
897 equation for high gradient rivers. Journal of Hydro-environment Research 4:
898 243-251.

899 Stuve P.E. (1990) Spatial and temporal variation of flow resistance in an alpine river.
900 Hydrology in mountainous regions. I-hydrological measurements; the water cycle.
901 Publication 193, Wallingford: International Association of hydrological Sciences:
902 307-314.

903 須賀堯三 (1992) 川の個性 河相形成のしくみ. 鹿島出版会, 東京.

904 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
905 工学 18: 35-45.

906 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
907 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.

908 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
909 特性と階段状河床形の形状特性. 水工学論文集 42: 1075-1080.

910 Wang Z., Melching C., Duan X. & Yu G. (2009) Ecological and hydraulic studies of
911 step-pool systems. Journal of Hydraulic Engineering 135: 705-717.

912 Waters K.A. & Curran J.C. (2012) Investigating step-pool sequence stability. Water
913 Resources Research 48: W07505.

914 Weichert R.B., Bezzola G.R. & Minor H.E. (2008) Bed morphology and generation
915 of step-pool channels. Earth Surface Processes and Landforms 33: 1678-1692.

916 Whittaker J.G. (1987) Sediment transport in step-pool streams. In Thorne C.R.
917 Bathurst J.C. & Hey R.D. editors, Sediment transport in gravel-bed rivers,

- 918 Chichester: Wiley: 545-579.
- 919 Whittaker J.G. & Davies T.R.H. (1982) Erosion and sediment transport processes in
920 step-pool torrents. Recent developments in the explanation and prediction of erosion
921 and sediment yield. International Association of Hydrological Sciences 137: 99-104.
- 922 Whittaker J.G. & Jaeggi M.N.R. (1982) Origin of step-pool systems in mountain
923 streams. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the
924 Hydraulics Division 108: 758-773.
- 925 Wilcox A.C., Wohl E.E., Comiti F. & Mao L. (2011) Hydraulics, morphology, and
926 energy dissipation in an alpine step-pool channel. Water Resource Research 47:
927 W07514.
- 928 Wohl E.E. (2000) Substrate influences on step-pool sequences in the Christopher
929 Creek drainage, Arizona. Journal of Geology 108: 121-129.
- 930 Wohl E.E. & Dust D. (2012) Geomorphic response of a headwater channel to
931 augmented flow. Geomorphology 138: 329-338.
- 932 Wohl E.E. & Grodek T. (1994) Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert,
933 Israel. Geomorphology 9: 117-126.
- 934 Wohl E.E. Madsen S. & MacDonald L. (1997) Characteristics of log and clast
935 bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. Geomorphology 38:
936 267-279.
- 937 Wohl E.E. & Thompson D.M. (2000) Velocity characteristics along a small step-pool
938 channel. Earth Surface Processes and Landforms 25: 353-367.
- 939 Wohl E.E. & Wilcox A. (2005) Channel geometry of mountain streams in New
940 Zealand. Journal of Hydrology 300: 252-266.
- 941 山本晃一 (2010) 沖積河川 ―構造と動態―. (財) 河川環境管理財団・企画,
942 技報堂出版, 東京.

- 943 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
944 財団・企画, 技報堂出版, 東京.
- 945 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:
946 111-118.
- 947 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
948 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.
- 949 Yochum S.E., Bledsoe B.P., David G.C.L. & Wohl E. (2012) Velocity prediction in
950 high-gradient channels. *Journal of Hydrology* 424-425: 84-98.
- 951 Yochum S.E., Bledsoe B.P., Wohl E. & David G.C.L. (2014) Spatial characterization
952 of roughness elements in high-gradient channels of the Fraser Experimental Forest,
953 Colorado, USA. *Water Resource Research* 50: 6015-6029.
- 954 Yu G.A., Wang Z.Y., Zhang K., Duan X. & Chang T.C. (2010) Restoration of an
955 incised mountain stream using artificial step-pool system. *Journal of Hydraulic*
956 *Research* 48: 178-187.
- 957 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
958 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:
959 1-7.
- 960 Zimmermann A. (2010) Flow resistance in steep streams: An experimental study.
961 *Water Resources Research* 46: W09536.
- 962 Zimmermann A. & Church M. (2001) Channel morphology, gradient stresses and bed
963 profiles during flood in a step-pool channel. *Geomorphology* 40: 311-27.
- 964 (*印を付した文献は直接参照していない)
- 965