

溪流における淵・瀬 (ステップ・プール) の形成機構とその設計指針

Formation mechanism of step-pool systems in steep rivers
and guide lines for the design of construction

長谷川 和義* ・ 上林 悟**

By Kazuyoshi HASEGAWA and Satoru KANBAYASHI

Present paper describes the origin of step-pool systems that is found in authors' flume experiments with gravel beds, and proposes guide lines for design of them basing on the formation mechanisms. Step-pools are generated due to the interaction of antidunes and three-dimensional surface waves (diagonal cross waves) on supercritical flow. When wave lengths of the antidunes and the water surface waves coincide with each other, the two dimensional undulation of antidunes turns out to be three dimensional one gradually and then the surface waves begin to be amplified. Through the sorting of bed material, the steps become strong in structure. Therefore, it is possible to consider that the generation condition of step-pools is the coincidence of wave lengths of antidunes and surface waves. By using the knowledge, guide lines for artificial construction of them is proposed.

Key words: step-pool, antidune, diagonal cross wave, sorting, design

1. はじめに

山地河川、扇状地河川など急流河川には形態的に特徴のある階段状の河床が発達しており、従来から溪流の淵・瀬として認識されてきた。これらの淵・瀬は優れた景観要素となっているほか、種々の水棲生物に良好な生息環境を提供している。自然を生かした川づくりを企図する場合、もっとも重視すべき対象の一つであろう。最近では人工的にこれを作りだす試みがなされており、水理学的に合理的な設計指針が必要になっている。

溪流河川の形態に関する研究は、地形学、地質学、林学などの分野で進められてきた。最近は、生物相を含めた淵瀬の分類など環境学的研究が盛んになっているほか、河川工学、水理学分野においても関心が広がっている。長谷川¹⁾、長谷川ら^{2) 3) 4)}は、山地河川の河床が成因の異なる複数の形態を有しているものと考えてきた。水深の5倍程度の波長をもつ小規模波についてみても、礫が横断方向に一列に並び階段的なタイプのリブと、礫が円弧状に並びプール部の明確なステップ・プールが識別できる。前者の成因については、Whittaker & Jaeggi⁵⁾や芦田・江頭ら⁶⁾の研究があり、反砂堆の発生と分級によるものであることが確かめられている。最近、鈴木ら⁷⁾は、リブ河床がもたらす流

* 正会員 工博 北海道大学助手 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同 上)

体抵抗に関して詳しい解析をおこなっている。これに対し、後者に関する研究は必ずしも多くない。長谷川ら⁸⁾ 9) 10) は、射流に乗った定常水面波がその成因と考え、基礎実験を進めてきた。江頭・芦田・澤田¹¹⁾ ら、澤田・芦田¹²⁾ は、発達した階段状河床（本論文でいうステップ・プールと考えられる）が土砂流出をコントロールする機能に関して興味深い解析をおこなっている。本論文は、河川環境の上でも土砂流出の上でも重要な意味を持つステップ・プールに焦点を絞り、現地観測で知られた形態的特徴と、礫床実験によって明らかになった成因について述べようとするものである。ついで、形態観察と形成条件から人工淵瀬の設計に必要な指針を提案するものである。

2. ステップ・プールの形態的特徴

ステップ・プールの形態的な特徴については、すでに前述の研究で詳しく調べられているが、淵瀬の設計の観点から簡単にふり返しておく。写真-1は、豊平川水系白水川で認められたステップ・プールのひとつである。洪水時に形成されたものと考えられ、撮影時には完全に水が引けた状態であった。プールを形成するステップ礫は、大礫でほぼ1層、小礫で2～4層になって円弧状に並び、短軸を鉛直方向に向けていることが多い。礫どうしのかみ合いがしっかりしており、容易には崩れない。ステップの形成時に淘汰され、水流の抗力に対抗しうる大きさと配置をもったもののみが残ったのであろう。プール部には砂層とこれを覆う大小の礫が存在し、澤田らの指摘する砂礫の貯留効果が顕著に認められる。また、これらの砂礫は、魚類の生息に好適な場を提供しているものと推定される。図-1に示す例は、豊平川水系薄別川に合流する小川におけるステップ・プールである。この川は、流域面積 10.8km^2 、流路長 7.0km の典型的な山地河川であり、平均河床勾配が 0.102 とかなりきつくステップ・プールの発達が著しい。ステップ間の平均長は 4.2m であり、平均ステップ高は 0.58m で、表層砂礫の粒径個数分布の 84% 径 0.54mm にほぼ等しい。プール部にはヤマメが生息していて釣り人の格好の対象になっている。図-1の区間の河床勾配は 0.119 であり、同区間の谷脚間に見た平均流路幅は 16m ほどである。図中、白く抜けている部分がステップ・プールのプール部であり、礫の円弧状のつながりによって形成されるこの河床の特徴がよく現れている。



写真-1 ステップ・プール形状（白水川）

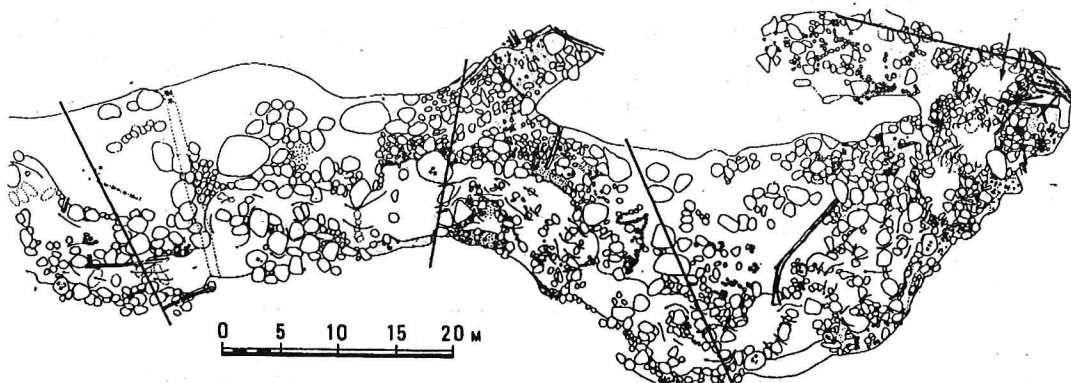


図-1 小川 100m～300m区間の平面形状

注目すべきは、高水時流路幅 16m に対してプール幅が 4～8m 程度であり、幅方向に複数のステッププールが並ぶ複数モードの形態にあることである。後に詳しく述べるように水面波の影響によるものと考えられる。

3. 砂礫床実験によるステップ・プールの成因説明

砂礫床水路実験をおこない、ステップ・プールの発生条件を調べた。長さ 10m、幅 30cm の循環可傾斜水路に、最大粒径 3cm、84% 通過粒径 0.73cm、50% 通過粒径 0.43cm、16% 通過粒径 0.17cm の砂礫を敷き詰め、表-1 のような条件で通水した。当初、上流部に水面波発生のための水切りをおいたが、ほとんど効果がないことが分かったので途中でこれを取り外した。Run-1、Run-2 の実験では通水後まもなく反砂堆が成長し始め、図-2 に示すような 2 次元的な河床波が上流にさかのぼる現象が見られた。クレストから下流にかけての分級の結果、大きめの砂礫が残り河床の起伏が崩れずに保たれた。このときの水面波はやはり 2 次元的であり、水切りによる斜め波をあたえてもその振幅減衰が激しくて河床に対する効果は認めにくい。このまま停水すると 2 次元的な河床起伏が残る。これがリブであることは間違いがないであろう。ただ、自然のものに比較すると波形がなめらかで波高がやや大きいほか、ステップの並びが斜めに傾むく時期があり、見ようによっては水路幅を半波長とするモードのステップ・プールのように映る。一方、Run-4、Run-5 では当初同じように反砂堆が発生したが、この起伏をきっかけとして水面に斜め交錯波が生じ、河床にも 3 次元的な円弧状のくぼみが成長した。これとともに水面が大きく波立ち、大振幅の 3 次元波が生じた。反砂堆の峰部に交錯波の中央の峰が合わるような位相関係にある。この状態を継続すると河床波は減衰に向かうが、反砂堆が再び発生し同様な現象を繰り返す。河床波の成長がピークを迎えたところで停水すると、図-3、4 のような河床形状が認められた。明らかにステップ・プールであろう。リブとの形態上の違いは、砂礫の円弧状の配列に囲まれたプールの存在と、プール部における小粒径砂礫の割合が非常に高くなっていることである。後者の原因は、ステップ・プール

表-1 移動床実験の水利条件

Run	Q(l/s)	I(勾配)	U(m/s)	h(cm)	Fr
1	18.95	1/13.5	1.22	5.18	1.711
2	27.47	1/15.7	1.43	6.42	1.798
3	22.05	1/19.1	1.05	6.97	1.27
4	18.04	1/13.6	1.16	5.17	1.634
5	17.79	1/13.6	1.07	5.53	1.453

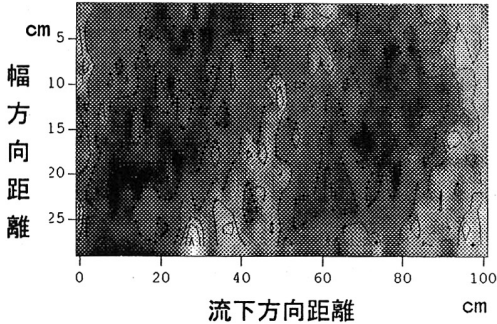


図-2 Run-1 に現れたリブ形状

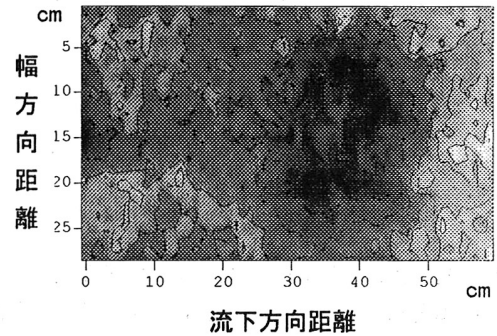


図-3 Run-4 に現れたステップ・プール形状

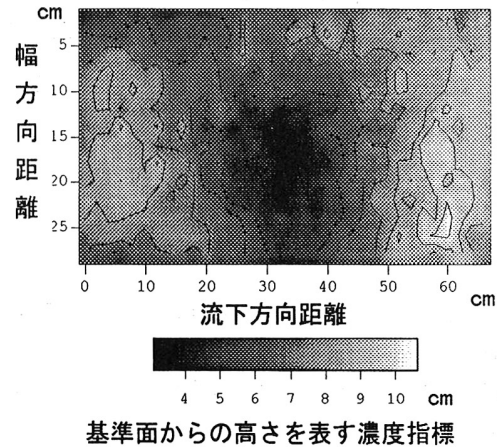


図-4 Run-5 に現れたステップ・プール形状

の波高がリブよりも大きく、流れの剥離が強まって細粒分がたまりやすくなることにある。

Run-1、2とRun-4、5における条件の違い、すなわちリブとステップ・プールの分ける条件の違いは、前者が「水面の斜め交錯波の波長と反砂堆の波長が異なっている」のに対し、後者が「水面の斜め交錯波の波長と反砂堆の波長がほぼ等しい」というところにある。前者の場合、反砂堆が発生した後、これに強制される2次元的水面波のために水面固有の斜め交錯波が減衰させられ、反砂堆のみが残る。後者の場合、反砂堆による強制水面波に水面固有の斜め交錯波が同調して大きく成長するため、河床がこの水面波の影響を受けて3次的に再構成されるものと解釈できる。河床波が3次元化すると水面波の干渉がますます強まり、水面振幅が水深程度かそれ以上に大きくなる。しかし、その状態は長く続かず、せいぜい数分程度で河床波は消滅に向かう。いったん平坦状態に戻った後に再び反砂堆の成長が始まり、同様な現象を繰り返すもののようである。したがって、特に後者の場合、どの段階で水が引くかによって河床形態が変わることになる。以上の結果は、これまでの著者らの固定床実験から推定される事柄をほぼ裏付けるものである。しかし、水面の斜め交錯波の発生が反砂堆河床をきっかけにして起こり、斜め交錯波の波長が反砂堆の波長に一致した場合にのみ大きく成長して河床に反作用をおよぼすという知見は、移動床実験において初めて見いだされたものである。

4. 実験結果にもとづくステップ・プールの発生条件

反砂堆波長と水面波長の一致を条件にして、ステップ・プールの発生条件を導く。反砂堆波長については、林¹³⁾の発生領域区分線のうち $C = 0$ の線の上に実測データがよく載ることを利用して、波長とフルード数の関係を次式であらわす。

$$Fr^2 = \frac{\coth(kh)}{kh} \approx \frac{1}{(kh)^2} + \frac{1}{3} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

ここに、 Fr = 平均流速に関するフルード数、 λ = 反砂堆の波長、 h = 平均水深。

水面波長は、3次元Airy波の定常波長とフルード数の関係式を用いる。実験によれば、かなり大きな振幅をもつ斜め交錯水面波に対してもこの関係が成り立っているようである。

$$Fr^2 = \frac{\beta h \tanh(\beta h)}{(kh)^2} \approx \frac{\alpha \beta h}{(kh)^2} \quad \alpha = 0.83, \beta h = \sqrt{(kh)^2 + (lh)^2}, l = \frac{2\pi n h}{B} \quad (2)$$

ここに、 B = 水路幅、 n = 斜め交錯波における横断方向波長の水路幅を基本にしたモード数。

式(1)、(2)の波数が等しいものとしてこれを消去し、まずフルード数と水深の関係式を求めると次式になる。

$$Fr^2 = \frac{-\alpha^2 \left\{ 1 - \frac{2}{3}A \right\} \pm \alpha \sqrt{\frac{4}{9}A - \frac{4}{3} + \alpha^2}}{2\{\alpha^2 A - 1\}} \quad A = \left(\frac{2\pi n h}{B/n} \right)^2 \quad (3)$$

上式は、 $A = 1/\alpha^2$ において特異点をもっており、 A のこの値に対してフルード数は無限大までの広い値をとるようになる。

次に、Manning式、ないしはHey式の近似式を用いてフルード数を表すと、それぞれ以下の二つの式になる。

$$Fr^2 = \frac{h^{\frac{1}{3}} I}{g N^2} \quad Fr^2 = \left\{ 6.5 \left(\frac{h}{3.5 d_{84}} \right)^{\frac{1}{4}} \right\}^2 I \quad (4)$$

ただし、 N = Manning粗度係数、 d_{84} = 粒径個数分布における84%粒径、 I = 河床勾配

式 (3) および式 (4) からフルード数を消去すると、反砂堆波長と水面波長が一致する場合の水深を求めることができる。これを用いて様々な河床勾配に対するステップ・プール発生時の単位幅流量を知ることが可能になる。ただし、式 (3)、(4) から水深に関する陽な解は得られないので数値的に解くことが必要になる。その際、式 (3) のプラス記号に対応する一つの解が得られるが、その値は、式 (3) の特異点における水深

$$h=0.192B/n \tag{5}$$

とほとんど同じ値を示す。したがって、ステップ・プール発生条件としては式 (5) の水深さえ満たせばよいことになる。式 (4) の平均流速式は、この水深を実現する流量を求めるためにのみ用いられる。図-5は、このようにして求めたステップ・プール発生条件を、実験水路の場合について描いたものである。抵抗則としてManning式を用いている。図中の $n = 1, 2, 3$ の線は、それぞれ水面波の横断方向波長が水路幅の $1/n$ の場合の発生条件に対応している。流量が小さい場合に、小規模ステップ・プールの並列することが分かる。一方、無次元限界掃流力を0.05とすることによって河床砂礫の移動限界を求めると、Manning式、Hey近似式使用の場合にそれぞれ次式になる。

$$\text{Manning 式: } q=(0.05\times1.65)^{\frac{3}{5}}N^{-1}I^{-\frac{7}{6}}d_{84}^{\frac{5}{3}}, \text{ Hey 近似式: } q=(0.05\times1.65)^{\frac{7}{4}}\times3.5^{-\frac{1}{4}}6.5\sqrt{g}I^{-\frac{5}{4}}d_{84}^{\frac{3}{2}} \tag{6}$$

また、射流の限界線は、Manning式、Hey式に対応してそれぞれ以下のように表される。

$$\text{Manning 式: } q=N^2g^{\frac{9}{2}}I^{-\frac{9}{2}}, \text{ Hey 近似式: } q=(6.5^2I)^{-3}\sqrt{g}(3.5d_{84})^{\frac{3}{2}} \tag{7}$$

図にはこれらの条件線が同時に描かれている。描線の右側が移動状態および射流状態になる。実験値は、Run-1、4、5が発生条件の線の近傍にあり、Run-2、3ははずれている。Run-1を除き、実験結果がこの条件線で説明できることが分かる。条件線の最も近くにあるRun-1においてステップ・プールの発生を見なかったことに関しては、今のところ理由が定かではない。図-6は、幅16m、84%礫径56cmの小川を想定して描いた発生条件線である。ただし、抵抗則にはHey式の近似式を用いている。河床勾配が0.119なので、 $n = 1$ であればステップ・プール発生に $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ほどの流量が必要になる。測量時のステップ・プールは、植生帯の年輪判定から見て1981年の出水によって形成されたようであり、降雨資料からピーク流量を推定すると $40\sim60\text{m}^3/\text{s}$ ほどになる。上の値に比して1オーダーほど低い。しかし、 $n = 2$ のケースが起こったものと考えると $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ 、さらに、 $n = 3$ のケースでは $Q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ となってオーダー的に合う。

ところで、このようにして得た発生条件は一本の線であり、決まった勾配に対してただ一つの発生流量が対応することになって、ステップ・プールがいかにも起こりにくい現象のように映る。しかし、条件として反砂堆波長と水面波長が完全に一致する必要はない。両者がある程度ずれている場合に、ちょうど群波の発生

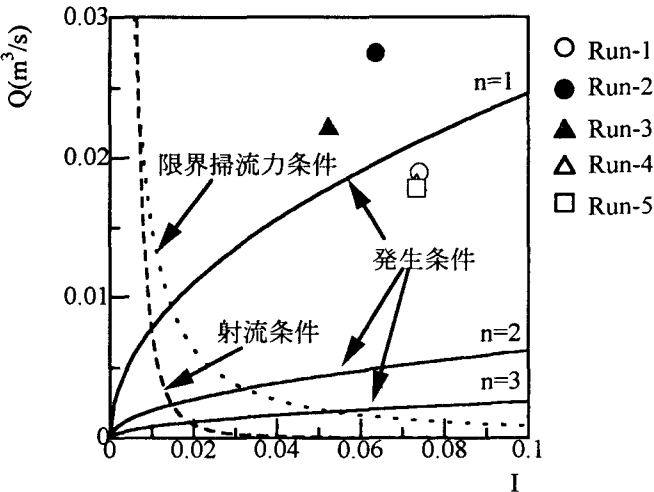


図-5 実験水路に対する
ステップ・プールの発生条件

と同じように波頂の重なる範囲でステップ・プールの発生が起こり、位相が逆になるところで水面波が止むことが実験において認められた。このような長周期の変化は、実際の山地河川でも観察される。洪水時にハイドログラフが急激に立ち上がり、部分発生流量条件に達した時点で次々に形成、分級をおこし、砂礫のかみ合わせが十分になったものが減水後に残存するのであろう。この条件に至らない場合や、減水のタイミングが合わない場合に反砂堆河床、すなわちリブが取り残されるものと考えられる。

5. ステップ・プール創生のための設計指針

溪流にステップ・プールによる淵瀬を新たに設ける場合、次のような手順が設計の一助になるであろう。

- (1) 対象流路の現地測量により、河床勾配、流路幅、河床材料の粒度分布などのデータを入手するとともに、計画雨量にもとづく計画流量を適切な流出予測法で算定する。
- (2) 平均幅 B とモード数 $n(=1, 2, 3, \dots)$ の値を用いて、式(5)から水深 h を求める。ついで、河床表層代表粒径(できれば d_{84})と河床勾配 I をあたえ、Manning式、またはHey式から上述の水深に対する単位幅流量 q を求めて、図-6のような n ごとの q - I 発生条件線を描く。
- (3) この図に平均河床勾配、および設計単位幅流量の交点をプロットし、最も近傍に来るモード数 n を見いだす。
- (4) 設計流量におけるフルード数をManning式、またはHey式から計算し、式(1)を用いて流下方向波数 k 、および波長 λ を求める。
- (5) 流路平面図に流下方向に λ ごとの横断線を引き、また流路幅を n 分割する縦断線を入れる。これらによって作られる格子に、図-7のような格子点を結ぶ斜め交錯線を入れる。斜線をこのように描いた場合、初めの横断線は、2次元反砂堆の谷線になるものと想定している。
- (6) 斜め交錯線上に河床構成材料のうちから大きい粒径の礫を選び、1ないし4段程度に短軸を上に向けてかみ合わせよく並べる。ステップ高は、 d_{84} 礫の中軸径程度が目安である。流れの中央部には、なるべく大きな礫を配置するようにする。このまま固定化を図るのであれば、基礎の固定化を含む必要な工法でそれをおこなう。

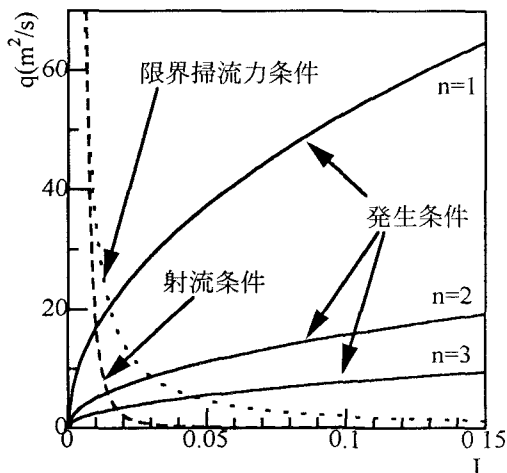


図-6 小川に対するステップ・プールの発生条件

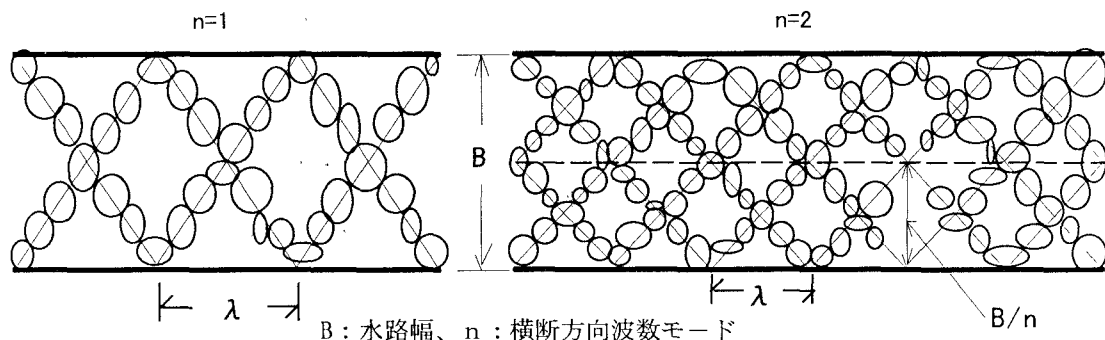


図-7 ステップ礫の配列法 ($n = 1, 2$ の場合)

(7) 固定化しない状態で設計流量をむかえた場合、水面の激しい波立ちとともにプール部が掘れステップ礫のかみ合わせが強固になる場合と、これらの一部が破壊されリブ状のものになってしまう場合が予想される。前者の場合はかなり強固なものになり、通常の流量では破壊されることがないものと考えられる。もとの河床材料の性質次第で、特に細粒分が多い場合に、礫が移動・埋没することも予想される。このような事態を避けるためには固定化が必要かもしれない。

6. おわりに

ステップ・プールの成因は、射流水面上に現れる定常斜め交錯波であるといえる。しかし、この波は反砂堆河床をきっかけとして現れ、反砂堆波長と斜め交錯波波長が一致した場合に発達して河床を3次元化させる。変形を受けた河床波は、水面波が共振状態に達した時点でむしろ急激に消滅に向かう。成長段階で砂礫の十分なかみ合わせが起これば、河床波はステップ・プールとして残ることになる。しかし、減水のタイミングが合わず3次元河床波が消滅した場合には、当初の河床不安定状態が表に現れ反砂堆河床すなわちリブが再び支配的になる。最近、著者らは、横川ら¹⁴⁾との共同実験において、細砂河床においても全く同様なしくみで3次元河床波の発生することを確かめた。違いは、通常の方法で減水させるとたちまち平坦化してしまうことで、水路下流端の水位を非常にゆっくりと下げることにより形状を保つことができる。これらを勘案すると、ステップ・プールというのは、従来3次元反砂堆と認識されてきた河床波に他ならないように思われる。検討を深め、他の機会に発表したい。

人工的に淵瀬を造る試みが各地で見かけられるが、設計のための指針はほとんど見あたらず、経験を蓄積している段階のようである。水理学的に無理のあるものはやがて壊れる可能性があり、本論文の考えが参考になれば幸いである。

謝辞：この研究は、平成4年～6年度文部省科学研究費補助金・試験研究「最近の移動床水理学研究に立脚した多自然型親水性河道の設計指針の確立」（代表 京都大学村本嘉雄）、ならびに平成7年度文部省科学研究費補助金・一般研究（C）「水面波を成因と考えた溪流のステップ・プール形成に関する研究」の助成を受けておこなわれた。記して関係の方々に深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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、土木学会水理委員会。
- 2) 長谷川和義・藤田睦博・新野康二 (1985) : 山地河川における流れ・流路形態と砂礫の移動、土木学会北海道支部論文報告集、42号、pp. 247-252。
- 3) 長谷川和義・藤田睦博・山田正・平野直樹 (1986) : 山地河川におけるステップ・プールの構造および土砂流出、土木学会北海道支部論文報告集、43号、pp. 265-270。
- 4) Hasegawa, K., Mori, A. and Ishikawa, S. (1990) : Bed topographies and sediment transport during flood in mountainous rivers, Intn. Conf. on River Flood Hydraulics, edited by W. R. White, Hydraulics Research Lim., John Wiley & Sons Ltd. pp. 327-336。
- 5) Whittaker, J. G. and Jaeggi, M. N. R. (1982) : Origin of step-pool systems in mountain streams, Proc., ASCE, Jour. of Hydraulic Div., Vol. 108, No. HY6, pp. 758-773。
- 6) 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、第27号B-2、pp. 341-353。
- 7) 鈴木幸一・栗原崇・山本裕規 (1995) : 山地河道のリブ河床形態と流水抵抗に関する研究、水工学論文集、第39巻、pp. 659-664。
- 8) 長谷川和義・藤田睦博・小野寺正典 (1988) : 定常波を有する流れの河床せん断力、土木学会北海道支部論文報告集、第44号、pp. 323-328。

- 9) 長谷川和義・八木次郎 (1993) : 2次元波状底面の影響を受けた射流における定常水面波と流速分布—ステップ・プールの成因解析—、土木学会北海道支部論文報告集、第 49 号、pp403-408.
- 10) 長谷川和義・富田稔 (1994) : 水面波に同調する河床波上の射流流れに関する実験的研究、土木学会北海道支部 論文報告集、第 50 号、pp. 480-485.
- 11) 江頭進二・芦田和男・澤田豊明・西本直史 (1985) : 山地河道における階段状河床形の形状特性、第 29 回水理講演会論文集、pp. 537-542.
- 12) 澤田豊明・芦田和男 (1989) : 山地溪流における流路形態と土砂流出、第 33 回水理講演会論文集、pp. 373-378.
- 13) Hayashi, T. (1970) : Formation of dunes and antidunes in open channels, Proc. ASCE, Jour. of Hydraulics Div., Vol. 96, No. HY2, pp. 431-439.
- 14) 横川美和・遠藤徳孝・長谷川和義・上林悟 (1995) : 三次元水面波と HCS mimics、1995 堆積学研究会講演要旨.