

人工岩石を用いた滝つぼ形成実験に関する予察的報告

A Preliminary Experiment of Plunge Pool Formation Using Artificial Rock

井口 達也*・関口 智寛**

Tatsuya IGUCHI* and Tomohiro SEKIGUCHI**

I はじめに

滝（遷急点）の直下には、いわゆる滝つぼが形成されることが多く、滝に関する論文中に滝つぼについての記載が数多く認められる（たとえば Philblich, 1970; Alexandrowicz, 1994; Lamb *et al.*, 2007）。滝つぼのサイズ、形状、発達速度は多様性に富み、滝つぼを持たない滝が存在する一方で（たとえば Young, 1985）、ダムの直下において4年間で深さ 50 m の滝つぼが形成されたとの報告もある（Thomas, 1976）。このような滝つぼの多様性の要因を明らかにし、滝つぼの形成プロセス、形状、サイズ、形成速度とその規制因子の関係を定性的・定量的に評価することは、滝という地形全体の理解を深める上で重要な課題である。

天然の滝つぼでは（1）原地形の復元が困難であること、（2）滝つぼの形成には時間がかかること、（3）侵食営力の定量的評価が困難であること、（4）連続観測には限界があることが多い。このため、現地調査だけから形成プロセスの全体像を把握し、形状、サイズ、形成速度とその規制因子の関係を評価することには限界がある。

そこで本研究では、滝つぼの形成プロセス理解の一助とするため、滝つぼの人工岩石の侵食実験に取り組むことにする。水路実験では現地スケ-

ルの現象の再現が困難であるというデメリットはあるものの、各種の条件をコントロールしやすく、連続観測が容易であるというメリットは大きい。今回は人工岩石を二種類の方法で作成し、人工岩石の作成法による実験への影響に注目する。また、流量・落差が滝つぼに与える影響の評価を試みる。

II 実験

本研究では、落差 h から落下する水を人工岩石に作用させて、滝つぼを発達させた。実験には整流槽、水路部、低水槽、およびポンプ・送水パイプからなる循環水路（第1図）を用いた。滝つぼで起こる現象を二次元化し、観察や計測を簡便にするため、水路部の幅を 3 cm（長さ 49 cm、高さ 98 cm）とした。水路部は厚さ 5 mm の透明アクリル板製であり、水路側方から地形や水流を観察することができる。水路部は整流槽と流出溝でつながれており、これらの相対的な鉛直位置を変えることで、落差（流出溝から人工岩石の初期地形面までの鉛直距離、第1図）を調節した。また、低水槽から整流槽へと水を送るポンプにはスライダックを取り付け、ポンプにかかる電圧を変化させることで送流量を調整した。

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

** 筑波大学陸域環境研究センター

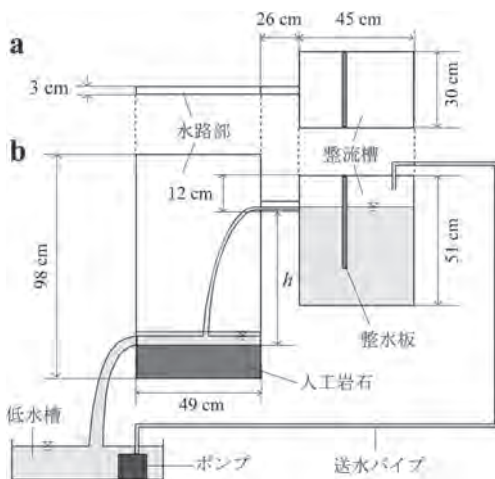
侵食実験に用いる試料として、本研究では Sunamura (1973, 1994), 戸田 (1990) などを用いられた人工岩石を採用した。この人工岩石は、砂とポルトランドセメント、水を混合し、静水中で十分な期間静置して固結させて作られるもので、砂とセメントの混合比を変えることで強度をコントロールできる (たとえば戸田, 1990)。本研究では中央粒径 0.2 mm の豊浦標準砂とポルトランドセメントを用い、砂：セメントの重量比を 100 : 1 とした。戸田 (1990) の実験では、この重量比で形成した人工岩石の一軸圧縮強度は 1000 gf/cm² であった。砂とセメントを乾燥状態で十分に混ぜ合わせた後、砂の 1/3 の重量の水を

加えて更に混ぜ合わせた上で、水路部下部に充填して押し固めた。

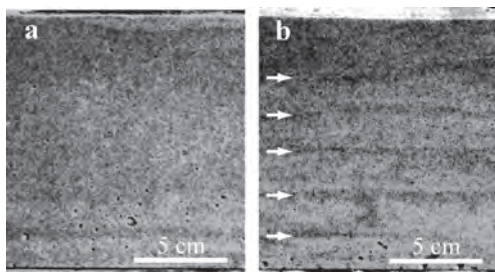
今回の実験には、一度に砂・セメント・水の混合物を流し込んで作成した試料 (以後、試料 A とよぶ) と、厚さ 2 ~ 3 cm 毎数回に分けて水平に充填した試料 (試料 B) の二種類を用いた (第 2 図)。試料 A には多くの気泡が混入する傾向があった (第 2 図 a)。一方、試料 B 中の気泡は比較的少なかったが、数回に分けて混合物を充填した際の境界部に、周囲と比べて暗色を示す 2 ~ 3 mm の薄層が観察された (第 2 図 b)。いずれの試料についても、人工岩石の強度が安定するとされる 1ヶ月以上の期間 (戸田, 1990)、静水中に安置した。実験に供する際には、人工岩石表面を成形して平滑な初期地形面を作った。実験開始時の試料の厚さは 16 cm もしくは 6 cm であった。

試料 A を用いて、流量と落差の組み合わせを変えて計 4 回の実験 (Runs A1-A4) を行った (第 1 表)。この際、流量 Q は 267 cm³/sec, 464 cm³/sec, もしくは 527 cm³/sec とし、落差 h は 45 cm もしくは 65 cm とした。また、試料 B を用いた実験 (Run B1) では、 $Q = 527$ cm³/sec, $h = 25$ cm とした。いずれの実験においても研磨剤は投入しなかった。また、滝つぼの発達にともなって生じる砂は低水槽に堆積し、滝つぼの発達には影響を及ぼさない。

実験の際、水路側方に固定したデジタルカメラを用い、一定時間おきに通水を停止して滝つぼの形状を撮影したほか、必要に応じて通水状態で撮影を行った。通水を止めたのは、水流の影響を除



第 1 図 実験装置の概略図：
(a) 平面図, (b) 側面図



第 2 図 人工岩石の特徴：(a) 試料 A, (b) 試料 B. b 中の矢印は暗色薄層を示す

第 1 表 実験条件
試料 A・B については本文参照のこと

Run	試料	砂：セメント	試料の厚さ cm	落差, h cm	流量, Q cm ³ /sec
A1	試料 A	100 : 1	6	65	267
A2	試料 A	100 : 1	16	65	464
A3	試料 A	100 : 1	6	65	527
A4	試料 A	100 : 1	16	45	527
B1	試料 B	100 : 1	16	25	527

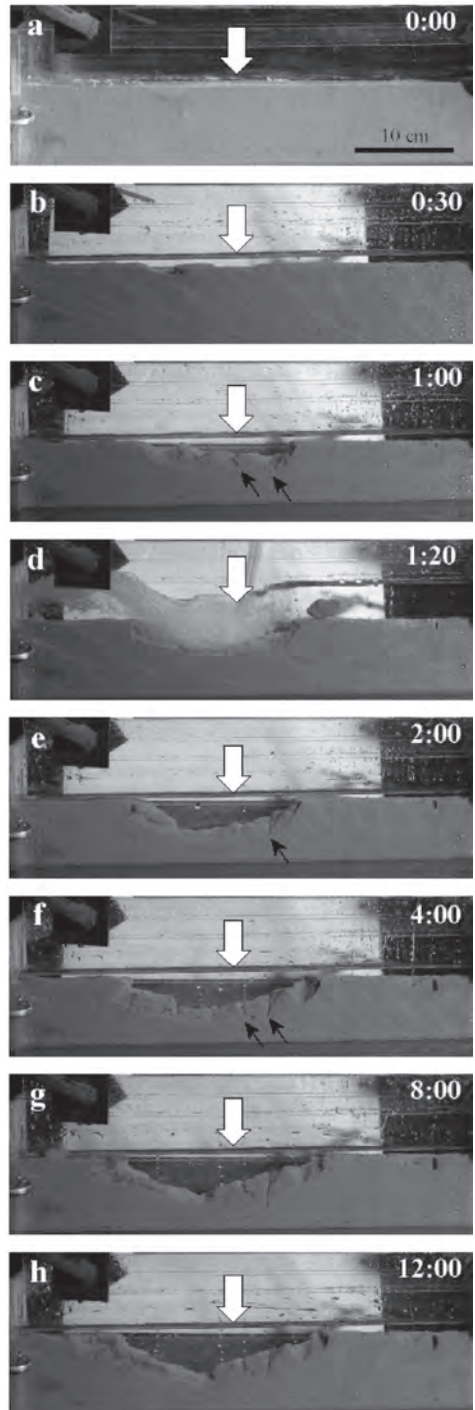
くことで、地形面をより明瞭に撮影するためである。滝つぼの形状がほぼ変化しなくなるか、コンテナの底面が露出した時点で実験終了とした。

III 結果

どの実験条件においても水の落下点付近で人工岩石が侵食され、滝つぼ状の地形が形成された。以下、各実験に共通して観察された滝つぼの形成プロセスについて、Run A2（第3図）を例に述べる。実験開始直後には、人工岩石表面の砂粒子が流水により少しずつはぎ取られて侵食が進行し、水の落下地点付近から落下点より数 cm 下流側にかけて滝つぼが形成されはじめた（第3図 b）。侵食が進むにつれて滝つぼ表面に長さ数 mm 程度のクラックが現れ、その周辺が選択的に侵食されてクラックが拡大した（第3図 c、矢印）。さらに侵食が進むと、クラックを起点として人工岩石のブロックが剥がれ去った（第3図 d、第4図）。ここでは、このような現象をブロック状剥離と呼ぶことにする。ブロック状剥離が発生した箇所で侵食が進むと、ブロック状剥離のきっかけとなったクラックの延長上に再びクラックが出現し（第3図 e-f、矢印）、場合によってはそれをきっかけとして再度ブロック状剥離が発生した。以上のような水流による砂粒子の剥離、クラックの発達、ブロック状剥離によって侵食が進み、滝つぼのサイズが増していった（第3図 a-g）。滝つぼが十分に発達すると、その形状、サイズはほとんど変化しなくなった（第3図 g-h）。

このような滝つぼの形成プロセスは全実験で共通していたものの、滝つぼの発達方向や、実験終了時の滝つぼの形状は異なった。第5図には各実験で観察された滝つぼの縦断面形トレースの時間変化を示す。本研究で観察された滝つぼは多かれ少なかれ三次元的な形状を示したため、第5図には地形面最浅部のトレースを用いた。

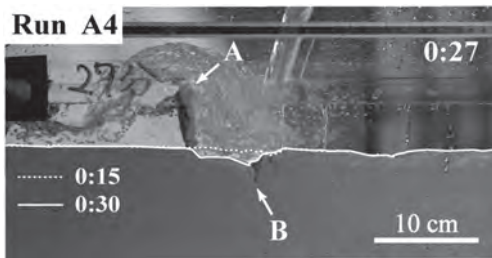
試料 A を用いた Runs A1-A3（第5図 a-c）



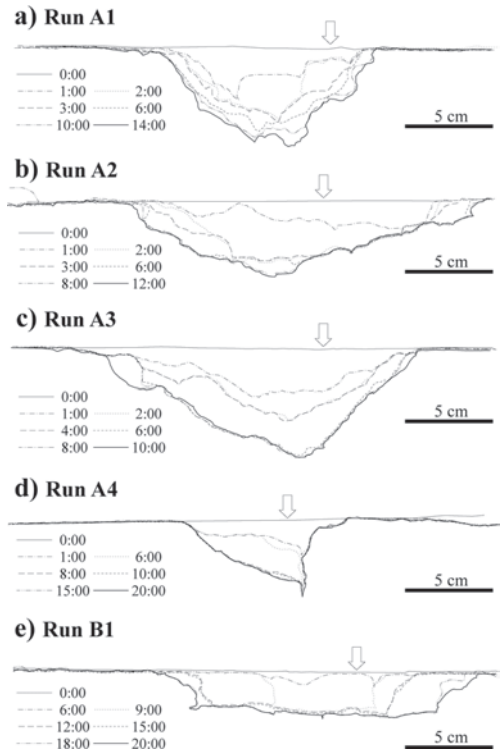
第3図 Run A2 実験結果
白抜き矢印は水の落下地点を、黒矢印はクラックを示す。また、右上の数字は経過時間を示す。

では、様々な方向のクラックが出現し、時間とともに滝つぼの幅、深さともに増加した。実験終了時の滝つぼは下に凸な半円形から逆三角形の縦断面形状を示し、最深部は水の落下地点の下流側数 cm に位置した。

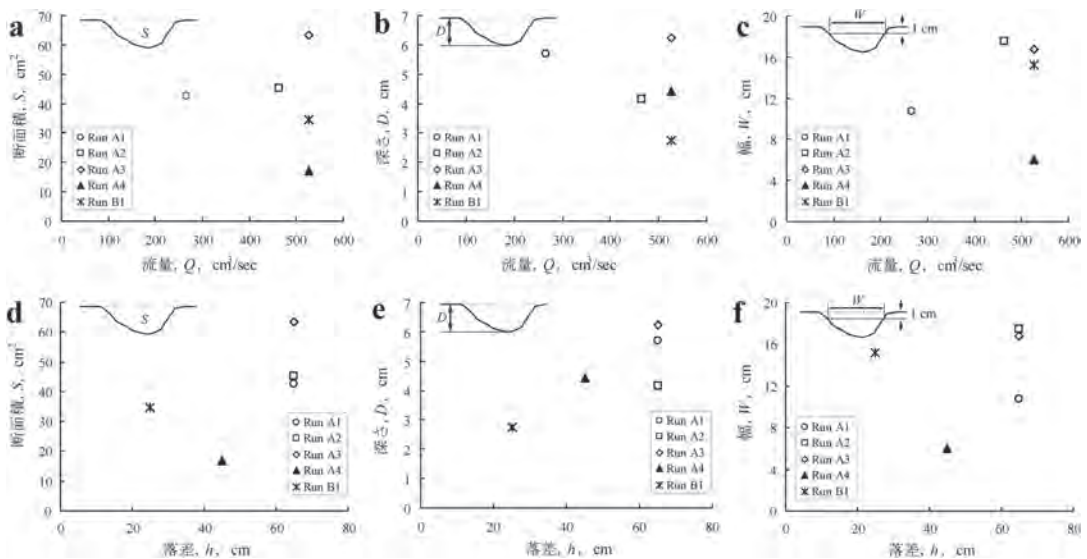
同じく試料 A を用いた Run A4 (第 5 図 d) では、水の落下点付近に大きな鉛直クラックが出現し、それを起点とするブロック状剥離が繰り返された。この際、クラックより下流側でブロック状剥離がおき、クラックの上流側はあまり侵食され



第 4 図 ブロック状剥離の瞬間
矢印 A は剥がれ去った人工岩石を、
矢印 B はブロック状剥離のきっかけ
となったクラックを示す。



第 5 図 滝つぼ地形の時間変化



第 6 図 流量・落差と滝つぼの諸元の関係: 流量と (a) 断面積, (b) 深さ, (c) 幅の関係, および
落差と (d) 断面積, (e) 深さ, (f) 幅の関係。

なかった。実験開始1時間後以降、滝つぼの幅はほとんど変化せず、下刻のみが進んだ。最終的には逆レの字型の滝つぼが形成され、その最深部は水の落下点とほぼ一致した。

試料Bを用いたRun B1（第5図e）では、実験開始9時間後に、滝つぼの最深部が試料充填時に生じた暗色薄層まで達すると、それ以降には暗色薄層付近に生じた水平クラックでのブロック状剥離が起こり、滝つぼが発達した。その間下刻はほとんどおこらず、滝つぼの幅のみが増加した。最終的には底面がほぼ水平な台形状の滝つぼが形成され、その底面は暗色薄層とほぼ一致した。

各実験で最終的に形成された滝つぼの断面積 S 、深さ D 、幅 W と流量 Q 、落差 h の関係について検討したが、滝つぼの諸元と流量 Q 、落差 h の間に明瞭な相関関係は見られなかった（第6図）。ただし、滝つぼの幅の計測を容易にするため、本研究では滝つぼの幅の代表値として初期地形面下1 cmにおける値を用いた。

IV 考察

上述したように、本実験で観察された滝つぼの最終的な形状は、試料の充填方法によって異なり、試料Bを用いた実験（第5図e）では、ほぼ水平な底面を持つ台形状の滝つぼが発達した。まず、この要因について考えたい。

Run B1 で形成された滝つぼの水平底面は、人工岩石充填時に生じた暗色薄層（第2図b）とほぼ一致したことから、暗色薄層部は周囲よりも強度が大きく、それ以深への下刻を妨げたものと考えられる。おそらく暗色薄層部分では周囲よりもセメントの含有率が高く、そのために周囲よりも暗い色を示し、人工岩石の強度が大きかったのであろう。また、暗色薄層部とそれ以外で強度が異なるため、その境界が弱線となって水平クラックが形成されやすかったものと推測される。

暗色薄層は、砂・セメント・水混合物を数回に

分けて充填した際の境界部に存在した。このことから、混合物を充填して押し固めた際に、間隙水とともにセメントが人工岩石の表面に流出し、表層にセメント粒子が集積して暗色薄層を形成したものと考えられる。

試料Bの暗色薄層の存在が滝つぼの形状や形成プロセスに影響したのに対し、多くの気泡の存在が確認された試料Aでは、気泡の有無による系統だった影響は見られなかった。したがって人工岩石中の気泡の影響は、暗色薄層の影響と比べて十分に小さいと判断できる。

本実験では、クラックの存在が滝つぼの形成プロセスや最終形状に強く影響をおよぼした。たとえば、本研究の全実験において、クラックが観察されるようになると、クラック付近で選択的侵食とクラックを基点とするブロック状剥離が起こった（第3図）。また、Run A4（第5図d）では落下地点付近に大きな垂直クラックが観察され、クラック下流側でのみブロック状剥離が続いたために、特徴的断面形状の滝つぼが形成された。

では、クラックは実験開始前から存在していたのだろうか、それとも落下する水の衝撃により実験中にクラックが形成されたのだろうか。戸田（1990）の人工岩石侵食実験では類似するクラックが報告されており、クラックは実験開始前に形成されたと考えられている。一方、同様の人工岩石を用いて海食崖の侵食実験を行った Sunamura（1973, 1994）ではクラックは形成されていない（砂村、私信）。これらを踏まえると、クラックが落水の影響によって形成されたとは考えにくく、実験前から存在していたものと推測される。つまり、クラックが初成的に存在した場所では人工岩石の強度が小さいため選択的な侵食を受けてクラックが露出し、結果としてブロック状剥離へとつながったのであろう。クラックの形成には、人工岩石充填時に容器（水路部）に生じた歪みや、人工岩石作成後、実験準備中に加わった衝撃などが寄与したと考えられる。

以上述べてきたように、本実験で観察された滝つぼは、試料内の層状構造や試料内に初成的に存在したクラックに左右されたと考えられる。本研究において滝つぼの諸元と流量・落差とに明瞭な相関関係を見いだすことができなかったのは、層構造やクラックによる人工岩石内の強度不均一性が影響したためと考えてよいだろう。

本研究の結果は、自然界においても滝つぼの形状やサイズに地層やクラックをはじめとする地質構造が強く影響し得ることを示唆する。したがって、滝つぼに対する理解を深める上で、流量・落差といった水理パラメータや研磨剤の影響だけではなく、岩石強度やその不均一性（層状構造やクラック等）の影響についての知見を積み重ねる必要がある。そのような観点に立って実験を行う場合、内部の強度不均一性を制御した人工岩石をいかにして作成するかが重要な課題になる。

V 結論

本研究の結果から、地層やクラックといった地質構造が滝つぼの形状やサイズに強く影響することが示唆された。今回の実験では流量・落差と滝つぼの諸元に明瞭な関係は認められず、これは人工岩内に意図しない強度不均一性が存在したためと考えられる。本研究の問題点を改善した上で、今後のさらなる研究が望まれる。

謝辞

本研究を行うにあたっては、陸域環境研究センターの飯島英夫氏にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 戸田真夏 (1990): 流水による岩盤侵食に及ぼす割れ目の影響 - 室内実験による研究 - . 筑波大学大学院博士課程地球科学研究科, 平成元年修士論文, 69p.
- Alexandrowicz, Z. (1994): Geologically controlled waterfall types in the Outer Carpathians. *Geomorphology*, **9**, 155-165.
- Lamb, M. P., Howard, A. D., Dietrich, W. E. and Perron, J. T. (2007): Formation of amphitheater-headed valleys by waterfall erosion after large-scale slumping on Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, **119**, 805-822.
- Philblich, S. S. (1970): Horizontal configuration and the rate of erosion of Niagara Falls. *Geological Society of America Bulletin*, **81**, 3723-3732.
- Sunamura, T. (1973): Coastal cliff erosion due to waves - Field investigations and laboratory experiments. *Journal of Faculty of Engineering, University of Tokyo*, **32**, 1-36.
- Sunamura, T. (1994): Rock control in coastal geomorphic process. *Transactions Japanese Geomorphological Union*, **15**, 253-272.
- Thomas, H. H. (1976): *The Engineering of Large Dams*. Wiley, London, 818p.
- Young, R. W. (1985): Waterfalls: form and process. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.* **55**, 81-95.

(2008年7月3日受付, 2008年8月1日受理)