

滝の更新型移動とフルード数の関係

| | | |
|---------|------|--------|
| 広島大学 | 学生会員 | 米田 直弘 |
| 広島大学 | 正会員 | ○井上 卓也 |
| 寒地土木研究所 | 正会員 | 平松 裕基 |
| 北海道大学 | 正会員 | 泉 典洋 |
| 広島大学 | 正会員 | 内田 龍彦 |

1. はじめに

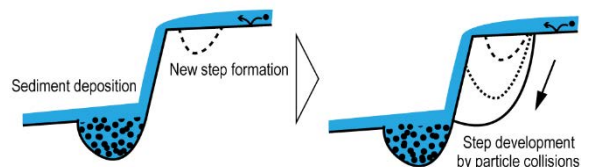
滝またはニックポイントと呼ばれる河床に形成された落差は上流へ移動することが知られている。例えば、台湾にある大安溪という川では、地震によって形成された落差が年間 100m 近く上流へ移動し、それに伴い河床も 10m 以上低下した¹⁾。日本でも同様の現象が発生し、橋脚や構造物の安定性が損なわれる事例が報告されている（図-1）。

滝の大規模な上流移動は、台湾や日本の岩盤が軟質なことに加え、流送される土砂が岩盤に衝突することによって発生する¹⁾。山口らは、滝の大規模な移動メカニズムを把握するために水理模型実験を行い、滝の上流側に新たな滝壺が形成され、それが発達することで滝が大規模に上流移動するという更新型移動説を提案している（図-2）²⁾。更新型移動時に形成される新たな滝壺は、基盤岩上に形成されるサイクリックステップとの類似性が指摘されているものの、波長水深比が周期ステップより 1 オーダー小さいなどの相違もある²⁾。このため、滝の更新型移動がなぜ発生するのかという問いは解明に至っていない。

サイクリックステップは、河川の平均的な流れ場が常流の場合、発生しないことが指摘されている³⁾。また、山口らの更新型移動の実験も、山地河川に形成された滝を想定しているため、射流条件で行われている²⁾。そこで本研究では、滝の更新型移動とサイクリックステップの関係性を把握するために、常流における滝の移動形態を水理実験により調査する。



図-1 河床低下の状況
上: 無加川, 下: 然別川



新しい滝壺の形成と発達により、滝が更新される

図-2 滝の更新型移動の概念図²⁾

2. 実験方法

実験水路は、水路幅 20 cm、水路長 300 cm であり、その内側に幅 5 cm、深さ 7 cm の低水路を設置した（図-3）。実験用水路の河床は、侵食する軟岩河床を再現するために、山口らと同じ低強度のモルタルを使用した²⁾。山口らの実験は、滝の落差 5 cm、滝の角度 45 度、上下流の勾配 0.02、上下流の水深 0.8 cm、上下流のフルード数 1.7 の射流条件で行われた。本研究では、滝の上下流のフルード数を常流（約 0.8）にするために、滝の上下流の勾配を 0.0026 とし、その分低下する無次元河床せん断力を山口らの実験と同じにするため、水深を 6 cm に増加させた。水深 6 cm に対し滝の落差が 5 cm の場合、流れが自由落下状態ではなく、もぐり噴流になるため、水深/落差比が山口らの実験と同じになるように、滝の落差は 37.5 cm とした。



図-3 下流から見た水路

キーワード 滝, 侵食, 河床低下, 周期ステップ

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院先進理工系科学研究科

流量は 1.85 ℓ/s, 給砂材料はアサノ珪砂 3 号とし, 給砂量は 50 g/min とした. 実験は 30 時間実施し, 3 時間ごとに水路上流端を始点として 140~260 cm の区間を 1 cm おきで水位と河床高の計測を行った. 加えて, 実験終了時の河床形状の型を石膏で作製後, iPhone の 3D スキャンアプリを用いて点群データの取得した.

3 時間おきに計測した水位と河床高から, フルード数 Fr を以下の手順で算出した. まず水位 H と河床高 z から水深 $h (= H - z)$ と河床勾配 S を出し, マニングの流速公式から流速 $V (= n^{-1}h^{2/3}S^{1/2})$ を算出し, $Fr = V/\sqrt{gh}$ より求めた. ここで, g は重力加速度, n はマニングの粗度係数である. マニングの粗度係数は, 殆ど侵食の起きていない区間 (150 ~ 160 cm) における断面を矩形と仮定し, この区間における平均流量が実験で与えた流量と一致するように逆算した.

3. 実験結果と考察

フルード数 0.8 の常流条件においても滝は上流へ移動した (図-4). また, 水路中央部の河床地形の時間変化を見ると, 初期の滝の肩付近からその上流側に新しい滝壺 (ステップ) が連続的に形成され, これが鉛直方向に穿入することによって, 滝は上流移動した (図-5). このことから, 常流条件においても更新型移動が発生することが確認された.

Izumi et al.の理論解析によると, 岩盤上のステップは, フルード数 1 以下の常流条件では発生しないことが指摘されている³⁾. それにも関わらず, 本研究実験でステップを伴う滝移動が起きた理由を考察する.

図-6 に示すフルード数の縦断図によると, 上流端から 150~160 cm における平均フルード数は 0.8 であり, 流れは常流であるが, 160~195 cm におけるフルード数は 1 を超えており, 流れが射流であることが分かる. なお, フルード数の値に縦断的なばらつきがあるのは, 測量間隔が 1 cm と小さいため, 水位と河床高の値が 1 mm 違うと河床勾配 S が大きく変化するためである.

一般に滝のような落差の上流側が常流の流れ場では, 落差の肩付近で限界水深 (フルード数が 1) が現れ, その上流側は低下背水を受けるもののフルード数 1 以下 (常流) となる. 図-6 に示したように落差の上流側でフルード数が 1 を超えるという, 水理学の常識に一見反するような結果は, 自由落下流れ特有の圧力勾配の影響によって引き起こされる. 水路に平行な運動量の保存を仮定し, 重力と摩擦力を無視すると, 次のような関係が成り立つ.

$$m_w V_{lip} - m_w V_{x=L} = (P_{x=L} A_{x=L} - P_{lip} A_{lip}) \Delta t \tag{1}$$

ここで, m_w は流体の質量, V , P , A は図-7 に示す断面における流速, 圧力, 断面積である. 落差の肩の流路断面は, その下側の境界において空気と接触しているため, 断面内の圧力は静水圧ではなく, ほぼ大気圧になる. したがって, 式(1)は次のように変形される.

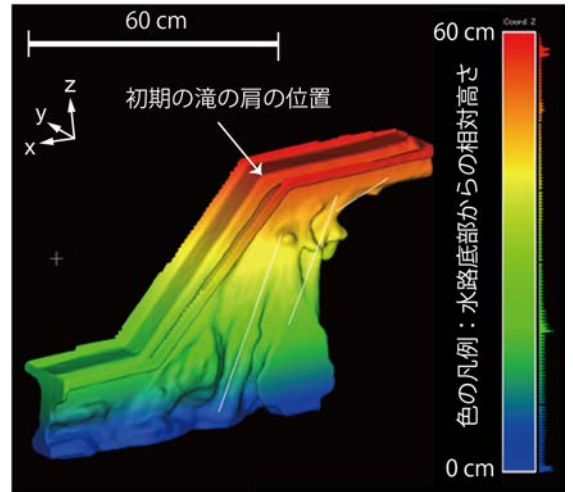


図-4 実験終了後の滝の侵食形状

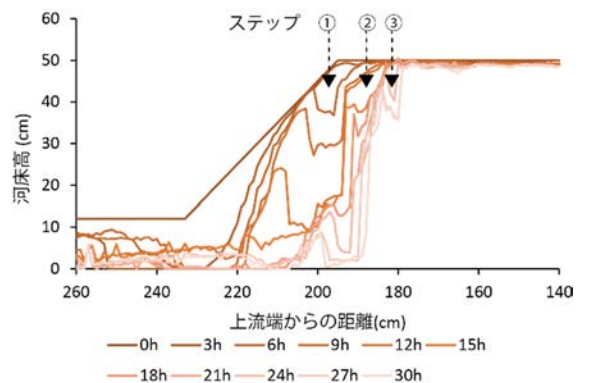


図-5 実験終了後の滝の侵食形状

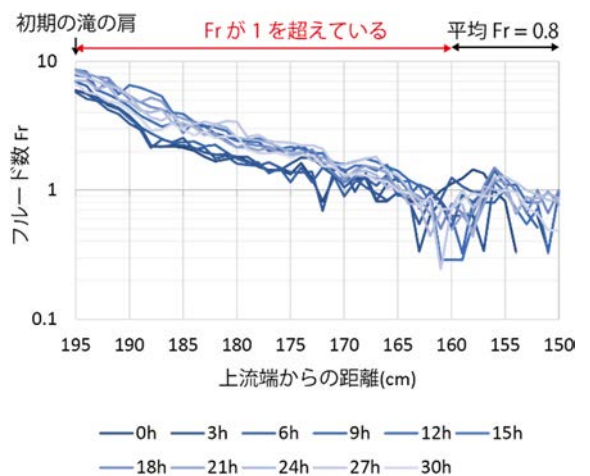


図-6 フルード数の縦断図

$$V_{lip} = V_{x=L} + P_{x=L} A_{x=L} \Delta t / m_w \quad (2)$$

つまり右辺第 2 項の影響で肩に向かって流れは加速することになる。この結果、支配断面は滝の肩より上流側に移動し、肩付近では射流状態になり、ステップが形成される。なお、自由落下流れにおいて、肩に近づくとつれて、流れが加速することは、Rouse の実験と理論によって実証されている^{4)~5)}。

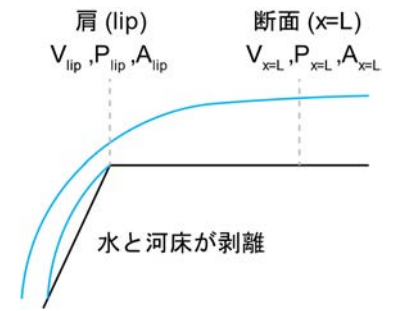


図-7 自由落下流れ

4. まとめ

本研究では、ステップ形成を伴う滝の更新型移動について、水理実験により調査した。従来、上流側の流れが射流の場合に滝の上流側にステップが形成されると考えられていた。しかし、本研究によって、常流の場合でも、法肩付近では圧力勾配の影響で部分的に射流となり、ステップ形成を伴う滝の更新型移動が発生することが示された。このことは、常流条件の河川区間に形成された滝（落差）も上流移動する可能性を示すものであり、今後はそれらを考慮した河川整備を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Cook, K.L., Turowski, J.M., & Hovius, N.: A demonstration of the importance of bedload transport for fluvial bedrock erosion and knickpoint propagation, *Earth Surf. Process. Landf.*, Vol.38, 683–695, 2013.
- 2) 山口進, 井上卓也, 前田育彦, 佐藤大介, 清水康行: 豊平川ニックポイントの現地調査および砂礫流入の再現実験による形状変動の考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_913-I_918, 2017.
- 3) Izumi, N., Yokokawa, M., & Parker, G.: Incisional cyclic steps of permanent form in mixed bedrock-alluvial rivers, *J. Geophys. Res. Earth. Surf.*, Vol.122, 130-152, 2017.
- 4) Rouse, H.: Discharge characteristics of the free overfall, *Civ. Eng.*, Vol. 6, 257– 260, 1936.
- 5) Rouse, H.: Pressure distribution and acceleration at the free overfall, *Civ. Eng.*, Vol. 7, 518, 1937.