横断勾配を有する粗石魚道の流れと 魚の挙動について

松木 越¹・青木 宗之²・福井 吉孝³・櫻井 龍太郎⁴

¹正会員 埼玉県 県土整備部 河川砂防課 (〒330-9301 埼玉県さいたま市浦和区高砂3-15-1)

²正会員 東洋大学准教授 理工学部 都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: aoki037@toyo.jp

³正会員 東洋大学名誉教授 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

⁴学生員 東洋大学大学院 理工学研究科 都市環境デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

横断勾配を有する粗石魚道で実魚(ウグイ)を用いた模型実験を行い、横断勾配のない模型の粗石魚道で行った既往の研究結果と比較した。4パターンの流量で実験を行った結果、横断面内で生起する流速の値の範囲が広いことや、実魚を用いた挙動実験における遡上率から、横断勾配を有する粗石魚道の優れた点が示された。既往の研究において、魚道全断面で高流速となり遡上率が非常に低かった流量 $Q=22.2$ (l/s)でも、魚道に横断勾配を設けることで横断方向に多様な流速場が形成され、水深が小さい水際部でウグイが休息できる場所を提供することができた。しかし、水深が小さい場所でウグイの停留時間が長くなることは、外敵に捕食される危険性が増す。

Key Words : model experiment, fish behavior, *Tribolodon hakonensis*, rocky ramp fishway, transverse slope, run up ratio

1. はじめに

(1) 研究背景

我が国には、非常に多くの魚道があり、その中でも階段式魚道が圧倒的に多い¹⁾。全断面粗石魚道も多く^{1),2),3)}、景観、環境の面からは他の魚道に対して優れているといわれており、1) 魚道入口の幅が広いので、魚が魚道入口を見つけやすい、2) 魚道の一部が破損したとしても機能は低下しない、3) 魚道出口が広く魚が鳥や他の魚に捕食されにくいという特性を持ち²⁾、魚の遡上に対しても十分機能を発揮する。Katopodis *et al.*⁴⁾は、自然の岩を用いた粗石魚道(nature-like fishways)は魚道入口が見出しやすいことなど粗石魚道の優れた点を指摘している。ただ、粗石魚道は、魚道勾配を大きくすると流速が大きくなってしまいうため、それを抑えるために、規模(魚道延長)が大きくなってしまふ。また、流量が大きくなると、当然魚道内は高流速になり、魚は、突進速度を発揮しても、一気に遡上することが困難になってしまう。そのような場合には、粗石の下流(裏側)で休憩しながら、機を見て遡上を試みるものの、下流へと押し戻されてしまうケースが多くなる。著者ら⁵⁾は、そのような場合の遡上率を向上させるために、粗石の配置密度を変えたり、

魚道の中に魚が休憩できる領域を設けたりした模型実験を行った。その結果、魚道横断方向の中間部の粗石を高くし、粗石背後に休憩できる領域を設けることで、大きな流量の時でも、遡上効率を維持できることを見出した。ただ、ある流量に対して、横断方向に水深はほぼ一定で、流速分布の形も上流から下流まで類似形であった。

魚は遊泳、遡上行動においては、魚種、そしてその生育度に合わせて、水質や、水温、流れの変動に敏感であるが、主として、流速、水深の影響が大きい。

一方、魚道の底面を縦断方向のみでなく、横断方向にも勾配を持たせることにより、横断面内での水深が変化する。横断面内で水深が一定でなくなるにより、ある流量に対して、断面内に種々の流速、水深を生起させることが出来る。これが斜面式魚道であり、板垣ら⁶⁾は低流量時にも有効性を発揮する、柏井ら⁷⁾は遊泳力の強い魚にも、弱い魚にも効果的であると述べており、横断方向に勾配を有する魚道(斜路式魚道)の機能を明らかにするための有効な研究がなされてきている。しかし、生起する流れに対しての研究が主となっている傾向があり⁸⁾、我が国の河川を対象にしての魚の挙動を含めての研究は、多いとは言えない。そのため、横断勾配を有する粗石魚道の現地への適用に当たっては、実験等を行い、

図-1 既往研究⁹⁾における模型魚道（横断勾配なし）概略図

表-1 実験ケース一覧

Run	横断勾配 i_y	粗石密生度 λ_r	流量 Q (l/s)	供試魚 BL (cm)
1-1	-	0.16	2.2	9.0
1-2			4.7	
1-3			8.8	
1-4			22.2	
2-1	1/5	0.16	2.2	9.0
2-2			4.7	
2-3			8.8	
2-4			22.2	

その効果や課題を予め明確にする必要がある。

(2) 研究目的

本研究では、実魚を用いたの模型実験を行い、横断勾配を有する粗石魚道の基本的な特性を明らかにするとともに、横断勾配のない粗石魚道との、遡上率、遡上経過時間、遡上経路等における相違について考え、横断勾配を有する粗石魚道の優れた点について確認するとともに、今後の現地小河川や魚道への適用を考える。

2. 模型水路における水理実験および実魚を用いた挙動実験概要

(1) 実験概要

まず、本研究の結果（Run2）は、横断勾配のない粗石魚道において同様の方法で実験を行った既往研究⁹⁾の結果（Run1）と比較を行う。既往研究では、図-1のような魚道を用いて実験を行っている。

実験ケースを表-1に示す。実験における流量 Q は、既往研究⁹⁾において遡上率が高かった $Q=2.2, 4.7, 8.8$ (l/s)と、非常に低かった $Q=22.2$ (l/s)の計4パターンで行った。

挙動実験における実験供試魚には、多くの魚道で対象魚となるアユ⁹⁾ (*Plecoglossus altivelis altivelis*)と同様の流れ性を持ち、日本全国に広く分布する回遊魚のウグイ¹⁰⁾ (*Tribolodon hakonensis*)を用いた。実験に用いたウグイの体長 BL は7.6~11.0 (cm) (平均体長は $\overline{BL}=9.0$ (cm))、体高は2.5 (cm)程度であった。実験は3月~6月に行い、

図-2 模型魚道（横断勾配あり）概略図

図-3 模型魚道（横断勾配あり）写真 (Run2-1: $Q=2.2$ (l/s))

実験時の水温は 20 ± 4 (°C)であり、ウグイの遊泳に問題はない。なお、既往研究⁹⁾ (Run1)におけるウグイの体長 BL は7.2~11.2 (cm) (平均体長は $\overline{BL}=9.3$ (cm))、水温は 20 ± 4 (°C) (実験時期：3月~6月)であり、本研究 (Run2)における実験条件と大きな相違はない。

実験には図-2、図-3のような模型魚道を用いた。粗度要素として用いた疑似粗石は、直径5.0 (cm)、高さ2.5 (cm)の発泡スチロール半球（以下、粗石と呼ぶ）である。粗石密生度 λ_r を以下の式で定義した。

$$\lambda_r = \frac{A_r}{A_f} \quad (1)$$

ここで、 A_r ：粗石が占める面積(m²)、 A_f ：魚道床の面積(m²)である。なお、比較のために既往研究⁹⁾と同様に λ_r を0.16とし、流速低減効果がある千鳥配列¹⁰⁾ (図-2 c)で粗石を設置するとともに、粗石の配置には魚の遊泳に十分な間隔^{11) 12)}を確保した。また、Run1, Run2ともに $x=0$ (cm)を魚道下流端とした。

挙動実験では、はじめに模型魚道を設置した水路の下流部を横断ネット（上流側 $x=100$ (cm)と下流側 $x=150$ (cm)の2箇所）で区切り、一定流量 Q (l/s)を通水した。

図-4 断面平均水位 (x :Run1:402.5(cm), Run2:602.5(cm))

次に、ネットで区切った部分にウグイを 10 (尾) 放流し、水温および流況に対する馴致時間を 30 分間設け、上流側 $x=100$ (cm) のネットのみを開放した。その後、ウグイの挙動を多機能カメラ (ライブラリー製、ひまわり GE60) を用いて無人状態で 30 分間撮影し、実験終了後に遡上数の確認、動画の解析を行った。なお、挙動実験は Run ごとに 3 回以上行い、一度実験に用いたウグイは、二度以上使用しないため実験終了後に別の水槽に移した。なお、模型実験で流れの相似則と実魚のスケールを合わせることは困難である。しかし、強い走流性を持つアユやウグイなどの魚類の挙動は流速に大きく影響を受けるため、実河川で生じている流速を考慮して実験を行うことで、状況に合った基本的な魚の遊泳特性の把握は可能とされている¹³⁾。また、魚はその体長相当分の長さしか流れを認識できない¹⁴⁾。そのため、本実験の装置、流れの条件下において、横断勾配を有する粗石魚道の流れと魚の挙動を実験水路で捉えることが可能だといえる。

また、水深はポイントゲージ (ケネック製, PH-102) , 流速は二次元電磁流速計 (ケネック製, VM2001) を用いて測定した。なお、流速計の検出器の電極長さ (約 2(cm)) を考慮し、水深 2.5(cm) 未満では測定しなかった。流速は、流下方向 (x 方向) の流速 u (cm/s) , それと y 方向に直交する流速 v (cm/s) を測定した。なお、挙動実験時の目視確認で、ウグイの遊泳深度が魚道床から 2 (cm) であったため、流速の水深方向の測定位置は魚道床から 2 (cm) とした。これは、青木ら¹⁵⁾と同様であった。

(2) ウグイの遊泳速度

ウグイ遊泳速度を以下の式で定義した¹⁰⁾。

$$u_m = u_r - (-u) = u_r + u \quad (2)$$

ここで、 u_m : 魚の遊泳速度 (cm/s) , u_r : 見かけの魚の移動速度 (cm/s) , u : その場の流速 (cm/s) である。

〔凡例〕 ▨ 未測定部分 ○ ● 粗石 (破線: 水没) 水際
 $V(\text{cm/s}) = \sqrt{u^2 + v^2}$ 160 140 120 100 80 60 40 20 0

図-5 魚道中流部での合成流速 V コンター図 (魚道床から 2 (cm))

さらに既往の研究^{5), 16), 17), 18)}から、ウグイの遊泳速度の内、巡航速度 $v_c = 2 \sim 4 \times BL$ (cm/s) , 突進速度 $v_b = 10 \times BL$ (cm/s) 以上として検討を行った。

3. 模型水路における水理実験および実魚を用いた挙動実験結果

(1) 水理模型実験

a) 水深

Run1 および Run2 おける、魚道内の横断方向の断面平均水深を図-4 に示す。流量の小さい ($Q=2.2$ (l/s)) Run1-1, Run2-1 (図-4 a) と流量の大きい ($Q=22.2$ (l/s)) Run1-4, Run2-4 (図-4 b) でそれぞれ比較すると、深い所では Run2 の水深が Run1 の約 2 倍であった。

横断勾配を設けることによって、横断勾配の無い魚道

における大きい流量 (Run1-4 : $Q=22.2(\text{l/s})$) の場合と同等の水深を, 小さい流量 (Run2-1 : $Q=2.2(\text{l/s})$) でも創出することが可能となった. また, Run2 では, Q の増加に伴い水際が左岸 ($y=50(\text{cm})$) 側に移動し, $Q=22.2(\text{l/s})$ (Run2-4) のとき魚道全体が水に浸かった.

b) 流速

Run1 および Run2 における, 魚道中流域の合成流速 V のコンター図を図-5 に示す. Run2-1 (図-5 a)), Run2-4 (図-5 b)) における流速を見ると, 横断方向に多様な流速場が形成されていることが分かる. Run2-4 に比べて Run1-4 (図-5 c)) では, 水位が粗石の高さを上回ったことで, 全体的に高流速域を形成している.

(2) 実魚を用いた挙動実験

a) 遡上率

遡上率 $R_r^{[15]}$ を次式で定義した.

$$R_r = \frac{F_C}{F_T} \times 100 \quad (3)$$

ここで, F_C : 遡上に成功した魚の個体数, F_T : 実験に使用した魚の個体数である.

Run1, Run2 における挙動実験結果 (遡上率 R_r) を図-6 に示す. 横断勾配のない Run1 においては, $Q=4.7(\text{l/s})$ をピークに遡上率が低下傾向を示し, $Q=22.2(\text{l/s})$ で全4パ

図-6 挙動実験結果 (遡上率 R_r)

図-7 ウグイの遡上軌跡図

図-8 ウグイの遡上距離 x と魚道下流端 $x=0$ (cm)からの遡上時間 t_s

ーンの中で最低の $R_p=7.0$ (%)となった。これは、流量の増加により、主な遡上箇所である側壁付近の流速も大きくなり ($10 \times \overline{BL}$ (cm/s)以上), ウグイが突進速度を発揮しても遡上できなくなったことが要因である⁹⁾。横断勾配のないRun1と比べると、横断勾配を有するRun2の方が4パターン全てで高い遡上率を示した。Run1で遡上率の低かったRun1-4 ($Q=22.2$ (l/s))と比較しても、横断勾配を有するRun2-4の方が高い R_p (=10.0 (%))を示した。なお、 t 検定を行った結果、各ケースにおける R_p の平均値に有意な差は見られなかった。しかしながら、既述のとおり横断勾配のないRun1に比べて横断勾配のあるRun2の R_p は上回っていることは事実である。また、横断勾配を設けることでRun2がRun1に優れている内容は、後述のとおりである。これらより、実験回数を増やし繰り返し実験を行うことで、Run2における R_p はRun1に比べて有意に上回るものだと考えられる。

図-9 ウグイの遡上経路 x, y と実験経過時間 t

b) 遡上軌跡

Run1 および Run2 の挙動実験における、ウグイの遡上軌跡図を図-7 に示す。ここで、実線が実験時間内に遡上に成功したウグイの遡上軌跡で、破線が遡上に成功しなかったウグイの遡上軌跡を表しており、実験開始位置 ($x = -100$ (cm)) から魚道下流端 ($x = 0$ (cm)) まで遡上してこなかったウグイについては図示していない。なお、凡例「fish21-3」は、「Run2-1 における No.3 のウグイ」を意味しており、その他の凡例も同様である。

Run1 と比較して遡上率が高かった Run2 においては、流量 Q の増加により水際が左岸 ($y=50$ (cm)) 側へ移動した結果、ウグイの遊泳可能範囲が拡大した。Run2-1において、ウグイは水深の大きい右岸側を主に選好して遡上した。このとき、遡上にかかった時間は $24 \sim 673$ (s)と幅広く、ウグイが選好した流速は $V=30 \sim 80$ (cm)であり、魚道内で休みながら好きな流速場を選好して遡上ができたと考えられる。Run2-4において、ウグイは遡上開始直後には流速の大きい右岸側を選好したが、次第に流速の小さい左岸側へ移動し、休憩するような挙動を示した。これは、Run2-3 ($Q=8.8$ (l/s))でも同様であった。それに対し、Run1-1では体高よりも水深が小さい部分を遊泳するウグイもいて、Run2-1と比較して遊泳に適した水深¹⁹⁾が確保できていなかった。また、Run1-4において、ウグイは主に周囲に比べて流速が小さい側壁付近を遡上するものの、途中で押し流される挙動を示した。

ここで、ウグイの縦断方向の存在位置 x (cm)と魚道下流端 $x=0$ (cm)からの遡上時間 t_s (s)との関係について、横断勾配のないRun1-4を図-8 a)に、横断勾配のあるRun2-4を図-8 b), c)にそれぞれ実験1回分を示す。横断勾配がないRun1-4 (図-8 a))では、ウグイが実験開始直後1~15(s)までは勢い良く遡上したが、 $x=400 \sim 600$ (cm)前後で多くのウグイが押し流される挙動を示した。一方、横断勾配があるRun2-4では、横断勾配がないRun1-4と同様に、ウグイが実験開始直後には勢い良く遡上し、途中で押し流される挙動を示した (図-8 b))。しかし、その後はRun1-4と比べて魚道内でウグイが停留している時

間が長く、再度遡上を試みるウグイもいた（図-8 c）．ここで、実験時間（30 分）内に遡上に成功しなかった fish24-2 について、魚道内での遡上経路（ x (cm), y (cm)）と、そのときの実験経過時間 t (s) の関係を図-9 に示す．魚道進入直後は、流速が大きく、水深の深い右岸（ $y=0$ (cm)）側をウグイが遡上したが、その後は、流速が小さく水深の浅い左岸（ $y=50$ (cm)）側を選好し、 $y=40$ (cm) の付近で長い時間停留していた．

fish24-2 は、実験時間 30 分以内に遡上に成功しなかったが、魚道の途中で停留（休憩）することで、結果的には実験終了直後に遡上しきることができた．Run2-4 においては、実験時間 30 分経過後も引き続き多機能カメラでの撮影を無人状態で 1 時間続けた場合、fish24-2 のように遡上しきるウグイが現れた．この傾向は、Run2-3 でも同様で、横断勾配のない Run1 よりも顕著であった．このときウグイが魚道内で停留していた点の水深は 1 (cm) 程度で、短時間ではあったが体高の約半分が水面より上に出ている状態だった．この地点は、水深が浅いため電磁流速計による測定が出来ていないが、非常に流速が小さく、突進速度以上の流速場を遡上することが困難になったウグイの休憩場所となっていたと考えられる．

横断勾配を設けることで、水深が浅く流速も小さい左岸側は休憩場所としての機能を十分に果たしており、実験時間を延長すると遡上しきるウグイが現れ、Run2-4 では、遡上率が上昇した（ $R_f=26.6\%$ ）．ただ、魚道内（特に水深が浅いところ）に停留する時間が長くなると、鳥類などの外敵に捕食される可能性が高くなるため、改善の余地があると言える．

4. まとめ

アユと同様に、強い走流性を持つウグイを用いて模型水路で実験を行い、横断勾配のある場合とない場合の結果を比較し、以下の知見が得られた．

- 1) t 検定の結果、Run1 および Run2 での遡上率 R_f に有意差は見られなかった．しかし、魚道床に横断勾配のある Run2 は、横断勾配のない Run1 に比べて、4 パターン全ての流量で高い遡上率 R_f を示し、横断勾配を設けた方が優れていた．なお、繰り返し実験を行うことで、Run1 に比べて Run2 の遡上率 R_f は有意に上回るものだと考えられる．
- 2) Run2 では、横断勾配があることにより横断方向の水深が一定ではなくなり、一断面内で多様な水深が生じた．Run2 において、低流量のケースで Run1 よりも高い遡上率を示したのは、低流量でもウグイが遡上するのに適した流速域と十分な水深が右岸（ $y=0$ (cm)）側に確保できたためであると考えられる．

- 3) $Q=8.8, 22.2$ (l/s) の Run2-3, Run2-4 においては、高流速に押し流されてしまうウグイが多かった．一方、水深が浅く流速も小さい左岸側で休憩しながら遡上していくウグイもいた．
- 4) Run2-3, Run2-4 においては、低流速域が左岸側に拡大したことで、ウグイが遊泳、停留のために選好する領域が魚道内に広がった．その結果、そこでの停留時間が長くなり、実験時間内に遡上しきらないウグイもいた．

5. 課題と展望

- 1) 魚道内停留時間が長くなると、鳥類や他の魚類等の外敵に捕食される可能性が高くなる³⁾ため、この点については、配慮、改善の余地がある．改善の方法として、横断勾配 i_b を変化させ、低流速域の拡大を抑えることや、横断方向に粗度を変化させる方法が考えられる．
- 2) 横断勾配を有する粗石魚道は、多様な流速域を提供できるので、遊泳能力の異なる多種の魚に対して有用であることが推測できる．この点については、さらに検討を進めていく．

謝辞：本研究は、東洋大学井上円了記念研究助成を受けて行った．また、理工学部都市環境デザイン学科学生（当時）の清水典明君、桑原尚志君にご協力いただいた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp.2-88，1995．
- 2) 水野信彦，森誠一：魚の生態からみた魚道の見方，応用生態工学，第3巻，No.2，pp.209-218，2000．
- 3) 常住直人，中達雄，加藤敬：農業利水との調和に配慮した取水堰付魚道の実験的検討，応用生態工学会，第3巻，No.2，pp.179-192，2000．
- 4) C. Katopodis, J.A.Kells and M.Acharya：Nature-Like and Conventional Fishways: Alternative Concepts?, Canadian Water Resources Journal, Vol.26, No.10, pp.211-232, 2001．
- 5) 松木越，青木宗之，菊池裕太，福井吉孝：全断面粗石付魚道の機能増進および修復について，土木学会論文集B1(水工学)Vol.71, No.4, 1_1105-1_1110, 2015．
- 6) 板垣博：魚道の水理特性に関する研究-粗石付きブロック魚道の水理原型実験-，岐阜大学農学部研究報告，No.64，pp.27-33，1999．
- 7) 柏井条介，村岡敏子：多様な魚種を対象とした魚道の遡上実験，土木技術資料，第38巻，No.2，pp.20-25，1996．

- 8) 八田哲郎, 鈴木辰規, 村山久一, 福井吉孝, 萩原国宏: 横断勾配を持つ粗石付き緩斜路魚道について, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.147-152, 1999.
- 9) 篠邊三郎: 頭首工の魚道 上巻(現状編), 笹軽印刷, p.6, 1989.
- 10) 青木宗之, 染井香栄, 小原誠, 吉野隆, 福井吉孝: 間伐材を用いた杭水制の水理機能と魚の生息について, 環境システム研究論文集, 第37巻, pp.19-28, 2009.
- 11) 宮園正敏, 高氏めぐみ, 戸松修: 粗石周辺の水理特性と溪流魚の遊泳行動, 砂防学会誌, Vol.57, No.5, pp.15-24, 2005.
- 12) 宮園正敏, 戸松修: 斜路式魚道における粗石の配置について, 砂防学会誌, Vol.56, No.1, pp.3-12, 2003.
- 13) 青木宗之, 瀬崎薫貴, 福井吉孝: 複断面開水路における流量変化と魚の行動に関する実験的研究, 土木学会論文集G(環境), Vol.69, No.4, pp.166-182, 2013.
- 14) 鈴木興道: 魚の住みやすい川づくりに資する魚類の生息分布とその場の流速, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.21-29, 1998.
- 15) 青木宗之, 向井健朗, 菊池裕太, 松木越: 階段式魚道のプール内における礫の堆積が魚類の行動に及ぼす影響について, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, pp.I_1099-I_1104, 2015.
- 16) 泉完, 山本泰之, 矢田谷健一, 神山公平: 河川における挿入式スタミナトンネルを用いた高速流条件でのウグイの突進速度, 農業農村工学会論文集, 256号, pp.65-66, 2008.
- 17) 泉完, 山本泰之, 神山公平: 高流速条件における現地のスタミナトンネルを用いたウグイの突進速度, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.552-553, 2007.
- 18) 泉完, 矢田谷健一, 東信行, 工藤明: 河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について, 農業土木学会論文, 74(4), pp.573-580, 2006.
- 19) 国土交通省水管理・国土保全局HP: 魚がのぼりやすい川づくりの手引き, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyousakana_tebiki/pdf/print.pdf, p.58, 2005.

(2016.5.26受付)

ON THE FLOW OF A ROCKY RAMP FISHWAY TRANSVERSE SLOPE AND FISH BEHAVIOR TO IT

Koyuru MATSUKI, Muneyuki AOKI, Yoshitaka FUKUI and Ryutaro SAKURAI

In this study, the authors consider fish behavior in a rocky ramp fishway with a transverse slope. As the efficiency of a fishway mainly depends on the structure (shape, bottom slope, ruffle size) and hydraulics (velocity, depth), these matters were inspected using a small open channel.

As the results, 1) in spite of discharge is not so large, higher migration rate is shown. In this case, the region in where the velocity is suited for the run-up of fish, is formed easily. 2) *Tribolodon hakonensis* can find a convenient flow for their migration, and in this case *Tribolodon hakonensis* can take a rest easily for a while in the channel, because flows with various velocities appeared in the cross section of fish way. 3) In addition, total run up time becomes longer. 4) If *Tribolodon hakonensis* stays for a longer time in the fish way, it invites more danger from attack by birds and another fish, in the rocky ramp fishway with transverse slope. 5) Therefore, it needs to consider on the more efficiency and safety for fishway.