

## ウグイの跳躍遡上と循環流に対する行動について

東洋大学大学院 学生員 ○青木 宗之  
 東洋大学工学部 非会員 松岡 大祐, 三谷 浩司  
 東洋大学工学部 正会員 福井 吉孝

### 1. はじめに

階段式魚道やその付帯設備があることによって、魚の遡上環境を悪くしてしまうことがある。例えば、(1)魚道下流入口から水面までの落差  $h_a$  が大き過ぎる場合 (図-1) や、(2)付帯設備の呼び水水路から放出される流れ  $v_p$  が大き過ぎてしまい、魚道下流域に循環流を形成させてしまう場合 (図-2) などである。(1)の状態は、河床低下または魚道の破損や劣化によって生じてしまう現象である。この状態になってしまうと、魚は落差を克服するために跳躍を試みなければならない。また(2)の状態は、通常時にも生じてしまう可能性がある。循環流が魚道下流域に形成されてしまうと、魚がその場所に滞留し続けてしまい、魚道へ進入し難くなってしまうため、遡上率が低下してしまう<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、魚の遡上環境に悪影響を与えてしまう落差  $h_a$  および循環流について着目し、魚の跳躍力の検討および循環流形成条件を見出すことを目的とした。そのために、模型実験を行った。

### 2. 模型実験

水路幅  $B=30(\text{cm})$  の水路において、水理実験および実魚を用いた挙動実験を行った。使用した魚は、平均体長  $BL_1=4.5(\text{cm})$  (以下、ウグイ小) および  $BL_2=8.0(\text{cm})$  (以下、ウグイ大) のウグイ (*Tribolodon hakonensis*) である。体長の違いによる遊泳能力の差異も検討するため、平均体長  $BL$  の異なるウグイを同時には遊泳させていない。実魚を用いた模型実験は、ウグイを30分間流水に馴れさせた後に、その行動をビデオカメラで30分間撮影した。30分間と長時間(5時間)の実験結果には差異がなかったため、ここでは30分間とした。また、ウグイは魚群行動をとるため、個体数を10として実験を行った。なお、魚の学習能力を考慮し、毎回異なる個体を使用した。

水温は  $13\sim 17^\circ\text{C}$ 、水面の照度は  $200\sim 250(\text{lx})$  である。この条件は、著者らの実験において、ウグイが比較的行動的であったことから好条件であると考えている<sup>1)</sup>。

#### (1) 魚の跳躍遡上実験

河床低下または魚道の破損や劣化によって落差  $h_a$  が大きくなったとき、ウグイが克服できる落差  $h_a$  の検討をした。そのため、図-1に示すAの高さを調整し、落差  $h_a$  を変化させた。魚の跳躍遡上実験ケースは表-1に示す通りであり、ウグイ小およびウグイ大はそれぞれ落差  $h_a=5.0, 14.0(\text{cm})$  を克服し、跳躍遡上に成功した。しかし、ウグイ小は  $h_a=6.0(\text{cm})$  を、ウグイ大は  $h_a=16.0(\text{cm})$  を跳躍できなかったため、それぞれ  $5.0\sim 6.0(\text{cm})$ 、 $14.0(\text{cm})\sim 16.0(\text{cm})$  の間で落差  $h_a$  を克服できると言える。ゆえに、ウグイ小およびウグイ大は、それぞれ体長の  $1.11\sim 1.33$  倍、 $1.75\sim 2.00$  倍の落差  $h_a$  までを跳躍できることが分かった。また、水面と魚の飛び出し角度  $\theta$  の関係 (図-3) は  $60^\circ$  とほぼ一定であり、体長による差異は見られなかった。

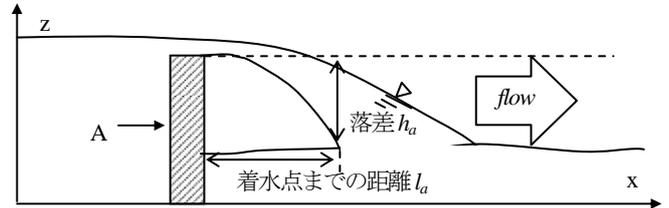


図-1 段落ち流れと剥離現象の簡略図

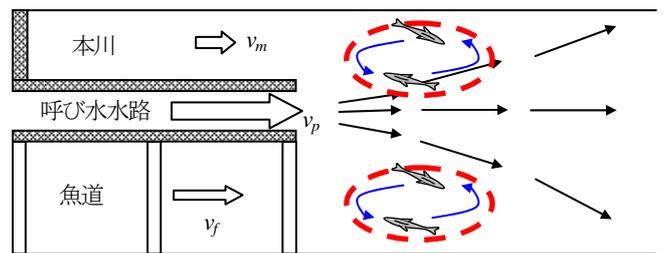


図-2 循環流と魚の行動イメージ

表-1 魚の跳躍遡上実験一覧表

	落差 $h_a$ (cm)	着水点までの距離 $l_a$ (cm)
Case1	2.0	5.0
Case2	5.0	5.0
Case3	6.0	5.0
Case4	8.0	7.0
Case5	10.0	7.0
Case6	12.0	7.0
Case7	14.0	7.5
Case8	16.0	9.5

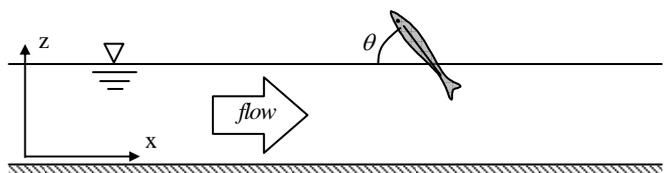


図-3 魚の飛び出し角度  $\theta$  について

つまり、ウグイの跳躍力は体長に比して大きくなるが、飛び出し角度  $\theta$  は変化しない。

また、魚の跳躍運動は以下の式より求めることができる<sup>2)</sup>。

$$h_e = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

ここで、 $h_e$ : 跳躍高さ (cm)、 $v_0$ : 魚の飛び出し速度 (cm/s)、 $\theta$ : 飛び出し角度 (図-3)、 $g$ : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>) である。なお、魚の体型が流線型であることから、魚が受ける空気抵抗は非常に小さいと考え、考慮していない。

魚の跳躍軌跡は放物線であり、最大跳躍高さ  $h_{e\max}$  (cm) は

キーワード ウグイ, 魚道, 呼び水, 跳躍遡上, 循環流

連絡先 〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100 TEL 049-239-1404 E-mail : dd061001x@toyonet.toyo.ac.jp

$$h_{emas} = h_a - BL = \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} \quad (2)$$

で表わされる。ここで、 $h_a$  : 落差(cm),  $BL$  : 魚の平均体長(cm)である。魚は尾びれが水面から出る瞬間まで推進力を使用するため<sup>2)</sup>,  $h_{emas}=h_a-BL$ (cm)とした。

一般に言われている魚の突進速度(魚の体長の10倍の速度)を(2)式の $v_0$ に代入すると、ウグイ小およびウグイ大は、それぞれ5.3(cm)(体長の1.17倍), 10.4(cm)(体長の1.31倍)の $h_a$ を跳躍できることになる。また、跳躍遡上実験より得られた $h_{emas}$ の値を用いて、ウグイ小およびウグイ大の $v_0$ を算出した結果、それぞれ36.15~62.61(cm/s), 125.22~144.59(cm/s)であった。これは、ウグイ小では体長の8.0~13.9倍の速度、ウグイ大では体長の15.7~18.1倍の速度である。この値は、ウグイ小では突進速度と類似しており、ウグイ大では高い値である。以上のことから、ウグイは体長の大小関係なく突進速度以上で遊泳可能であり、遊泳能力は体長に比して高くなる。

また、(2)式の $v_0$ に魚の突進速度を代入することで、魚が跳躍可能な $h_a$ を十分に予測できる。これは、現地魚道にも使用できると考えている。

(2) 循環流形成条件の検討

魚道下流域に循環流が形成されてしまうとき、図-2に示した呼び水流速 $v_p$ 、魚道越流流速 $v_f$ および本川流速 $v_m$ の関係は、 $v_f < v_p$  または  $v_m < v_p$  である。本研究では、観測領域の上流部を二等分に区切られた、 $b_L=b_R=14.65$ (cm)の平行流水路(図-4)を用いた。なお観測領域は、30(cm)×200(cm)であり、魚止めネットで区切られている。また、実験装置の最上流部に堰を設け、左岸側流量 $Q_L$ と右岸側流量 $Q_R$ を変化させた。

循環流の形成条件検討ケースを表-2に示す。 $Q_L:Q_R=1:4.0$ 以上(Run4, 5, 9, 10, 14, 15, 19)のとき、つまり、 $Q_R/Q_L \geq 4.0$ のとき循環流が形成された(図-5の○部分)。これを $b_L, b_R$ それぞれの断面平均流速 $u_m$ で表すと、 $u_{mR}/u_{mL} \geq 3.8$ である(図-6)。

また、循環流が形成されたケースにおいて、ウグイは循環流が形成された領域に約30~50%の確率で存在した。これは、魚の体長の大小に関係なく生じた現象である。循環流が形成された領域は、観測領域の約0.125~0.175倍であることから、ウグイが循環の流形成された領域に存在した確率は高いと言える。つまり、魚は循環流があることにより、上流へ向かって遡上し難くなってしまふことが示唆された。

3. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1)ウグイの跳躍力は体長に比して大きくなる。これは、体長の違いによる遊泳能力に関係し、飛び出し速度 $v_0$ が体長に比して大きくなるためである。
- 2)なお、一般に言われている突進速度以上で遊泳することが可能である。この現象は、体長の大小に関係ないが、遊泳能力は体長に比して高くなる。
- 3)体長の大小を考慮すると、ウグイは体長の約1.11倍の落差 $h_a$ であれば跳躍可能である。
- 4)循環流の形成条件は $u_{mR}/u_{mL} \geq 3.8$ のときである。
- 5)ウグイは、循環流形成箇所によく存在する。なお、この現象は体長の大小に関係なく生じる。そのため、循環流は遡上環境に悪影響を及ぼす。

謝辞：本研究は、東洋大学井上円了記念研究助成金の助成を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

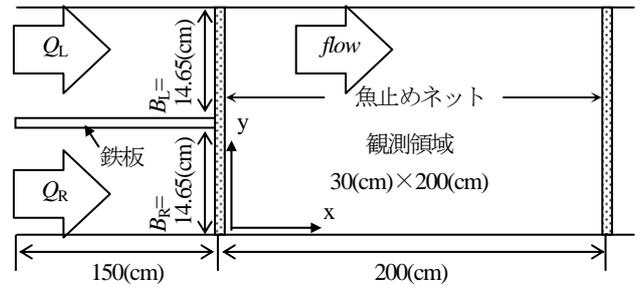
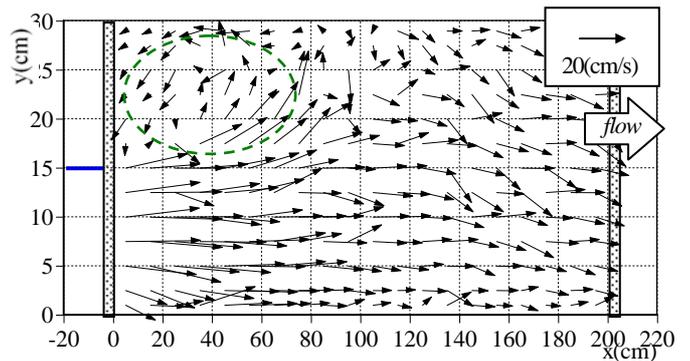


図-4 平行流の実験水路簡略図

表-2 循環流の形成条件検討ケース( $Q_L$ と $Q_R$ の流量配分)

	全流量 $Q$ (l/s)	$Q_L:Q_R$		全流量 $Q$ (l/s)	$Q_L:Q_R$
Run1	2.0	1:1	Run11	8.0	1:1
Run2	2.0	1:1.5	Run12	8.0	1:1.7
Run3	2.0	1:3.6	Run13	8.0	1:2.0
Run4	2.0	1:4.4	Run14	8.0	1:4.2
Run5	2.0	1:8.3	Run15	8.0	1:7.9
Run6	5.0	1:1	Run16	11.0	1:1
Run7	5.0	1:1.4	Run17	11.0	1:1.4
Run8	5.0	1:2.1	Run18	11.0	1:2.8
Run9	5.0	1:4.0	Run19	11.0	1:5.8
Run10	5.0	1:7.1			



Run9 ( $Q_L:Q_R=1:4.0$   $Q=5.0$  (l/s))

図-5 観測領域内の流速ベクトル図 ( $z=2$  (cm))

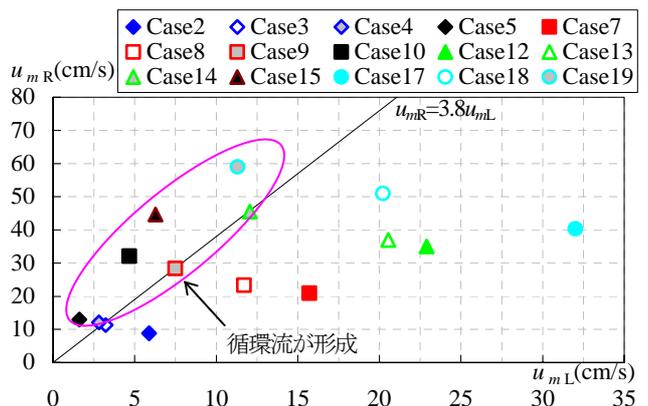


図-6 循環流形成条件

参考文献

- 1)青木, 福井ら：階段式魚道の呼び水が作り出す流れとそれに対する魚の行動, 環境システム研究論文集, 第36巻, pp.457-465, 2008
- 2)C. Gosset ら：魚道及び降下対策の知識と設計, (財)リバーフロント整備センター, pp.56-57, 1996