

階段式魚道における落下流と表面流の発生特性 とウグイの遊泳行動

林田寿文¹ 本田隆秀² 萱場祐一³ 島谷幸宏⁴

¹正会員 建設省土木研究所 河川環境研究室 研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 建設省土木研究所 河川環境研究室 交流研究員 (同上)

³正会員 工博 建設省土木研究所 河川環境研究室 主任研究員 (同上)

⁴正会員 工博 建設省土木研究所 河川環境研究室 室長 (同上)

治水・利水を目的とした河川構造物による河川の分断化がおき、その対策として魚道が設置されている。その中で階段式魚道が最も実績があり、研究も多く行われている。階段式魚道はプール規模・流量変化により、プール内流況が大きく変化し、大きく2つに分けて、表面流(Plunging Flow)、落下流(Streaming Flow)状態を形成することが過去の研究で確認されている。一方、隔壁頂部形状の変化により、魚の遡上率に強い影響を受けることも確認されている。本研究ではウグイの遊泳行動と流況がこの隔壁頂部の形状(丸型・斜型 45°・斜型 30°)とプール規模(プール水深・プール延長)に関連していることを示した。

Key words: fish way, pool-and-weir, plunging flow, streaming flow, flow pattern

Flow velocity distribution, swimming behavior, *Leuciscus Hakonensis*

1. はじめに

階段式魚道の設計上の注意事項として、①隔壁頂部における水脈が剥離せず安定する構造であること(図-1) ②表面流が発生しないこと③隔壁頂部より突入する水脈の流速が、魚類の突進速度より大きくならないことなどが挙げられている。^{1)~5)}

近年ではこれらの問題点を軽減させた隔壁形状として標準越流頂近似タイプが考案され、使用されている。しかし現状は、未だ様々なタイプの隔壁形状が用いられていることが多い。その中で隔壁頂部形状の変化により、魚の遡上率が大きく影響を受けることが過去の研究⁶⁾で確認されているが、魚類の遊泳行動と流況に関連付けて十分に研究されている訳ではない。

また、プール規模(形状)や隔壁頂部の形状、流量変化等の要因により、表面流(Plunging Flow)、落下流(Streaming Flow)のいずれかが魚道内に形成され^{3) 4) 5) 7)}(図-2)、隔壁に沿って水が流下する落下流が、魚道として魚類の遡上にとって好ましい流況とされてきた。しかしながら、どのような要因により落下流が

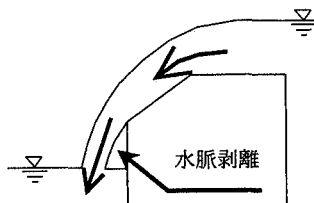
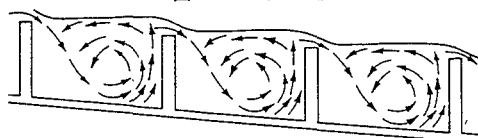
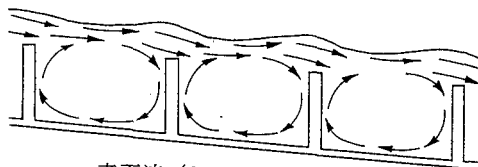


図-1 水脈の剥離



落下流 (Plunging Flow)



表面流 (Streaming Flow)

図-2 流況の状態

形成されるのか、そして、魚類の遡上にとって何故、落下流が好ましいのか、といった基礎的な研究^{8) 9) 10)}は十分行われていない。

本研究では、以上を背景として、次の2点について実験を行い、階段式魚道の設計、評価手法の向上に資することを目的とした。

- ①階段式魚道のプール内流況、プール規模、隔壁頂部形状の関係を明瞭にする。
- ②魚道として好ましいとされる隔壁頂部形状により形成されるプール内流況とウグイの遊泳行動の関係を把握するとともに①で得られた流況に対する魚の遡上行動を考察する。

2. 実験方法

(1) 実験施設及び測定方法

実験施設の概要を図-3、4に示した。施設は幅60cmの二次元水路に厚さ20cmの隔壁2個及び1つのプールからなり、プール延長(L)、プール水深(H)、隔壁形状を変化させることが出来る。隔壁間落差は10cmで固定とした。測定は水路中央部の流速を5~10cmメッシュで三次元流速計により計測した。

(2) 実験内容

a) 隔壁形状、プール規模、越流水深と流況特性との関係に関する実験

この実験は2つの実験シリーズより構成される。

①実験シリーズ1：越流水深、プール規模を変化させた実験

越流水深、プール規模とプール内流況の関係を把握するため、隔壁形状を標準越流頂タイプ（以下丸型とする）に固定し、プール延長と水深を表-1、越流水深を表-2のように変化させ全27ケースの実験を行った。越流水深は5cm・10cm・15cmに変化させた。

②実験シリーズ2：隔壁形状、プール延長、プール水深を変化させた実験

本シリーズでは隔壁形状、プール規模とプール内流況との関係を把握するため、越流水深を10cmに固定し、隔壁形状を図-5、プール延長とプール水深を表-1のように変化させて全27ケースについて実験を行った。隔壁形状は丸型、45°タイプ（以下45°とする）、30°タイプ（以下30°とする）の種類である。

③実験シリーズ1及び2における条件の設定について

隔壁頂部形状が魚の遡上率に影響を及ぼすことは和田の研究^{8) 9)}で報告されている。本実験ではこの研究から遡上率が異なるとされる3タイプの形状を参考に選定し実験に用いた。

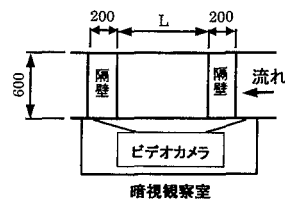


図-3 実験施設平面図 (単位: mm)

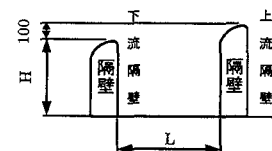


図-4 プール部断面図 (単位: mm)

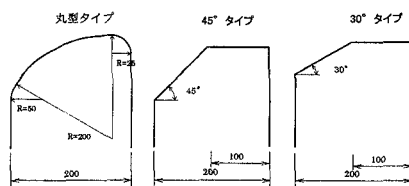


図-5 隔壁形状 (単位: mm)

表-1 実験ケース

プール延長	50cm	100cm	200cm
プール水深			
20cm	○	○	○
50cm	○	○	○
80cm	○	○	○

表-2 実験ケース (越流水深の変化)

隔壁形状	丸型
越流水深	
5cm	○
10cm	○
15cm	○

表-3 実験条件

供試体の平均体重	20.5 g
供試体の平均体長	11.4 cm
実験時刻	15時~19時
水温	25~30℃
実験時の照度	曇り 0~4500lx 晴れ 0~25000lx

越流水深については、柏井ほか³⁾が水理的に落下流を形成しやすい隔壁形状として提案した、丸型の越流水脈を比較的安定させる10cmと設定した。また、この

水深は和田の実験⁶⁾で比較的遡上率の良好な水深でもある。本実験ではこれらの報告を鑑み10cmの水深を基準とし、水深を±5cm変化させた計3パターンの条件において実験を行った。

b) ウグイの遊泳行動に関する実験(隔壁形状:丸型、越流水深:10cm、表-1の9ケース)

ウグイの遊泳行動を把握するため、それぞれプール内にウグイを各ケース15尾程度放流し、遊泳行動を観察した。実験条件は表-3に示す。観察時間は和田の実験等による日周期行動報告²⁾から活動ピークをはさむ15~19時とした。遊泳行動の観察は目視、ビデオカメラで行った。

水路側面に魚類の遊泳行動が観察できるよう暗視観察室及び観察窓を設けた。魚の遊泳行動を把握するため、観察窓には10cm間隔メッシュを施した。

3. 実験結果及び考察

(1) 隔壁形状、プール延長及び水深、越流水深と流況特性との関係に関する実験結果

a) 流況の分類

本実験結果は、3つの流況に分類することができる。図6~8はプール形状・越流水深を固定、隔壁形状のみの変化により、代表的な3つの流況が確認されたケースである。

流況パターンⅠ(図-6 以下、落下流と呼ぶ): 隔壁頂部からの水脈が上流隔壁、プール底面、下流隔壁に沿って落下し、プール内で時計回りの流れを形成する。

流況パターンⅡ(図-7 以下、表面流と呼ぶ): 隔壁頂部からの水脈がプール表面を走ってプール内に反時計回りの流れを形成する。

流況パターンⅢ(図-8 以下、斜め流と呼ぶ): 隔壁頂部からの水脈が越流水脈が隔壁背面に沿って鉛直下方に落下せず、プール内に落下する流れを形成する。水脈の上側には時計回りの流れが形成され、下側には反時計回りの流れが形成される。

b) 各流況の発生状況

図-9、10は縦軸にプール水深、横軸にプール延長として、実験結果をa)で分類した落下流・表面流・斜め流をプロットしたものである。

実験シリーズ1の結果を図-9に示す。越流水深5cm・10cmでは全ケースとも落下流となり5cmのケースを省略した。越流水深15cmでは斜め流が5ケース、落下流が2ケース、表面流が2ケースとなった。これらから流況はプール延長だけでなく、越流水深にも支配されていることがわかる。

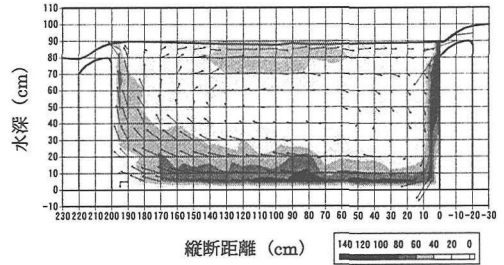


図-6 流速コンター図(落下流)

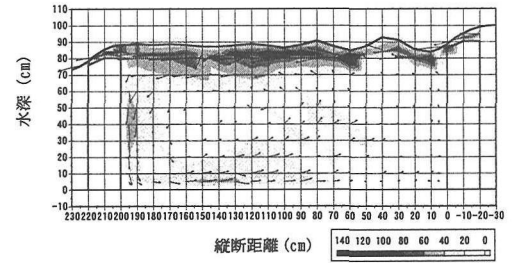


図-7 流速コンター図(表面流)

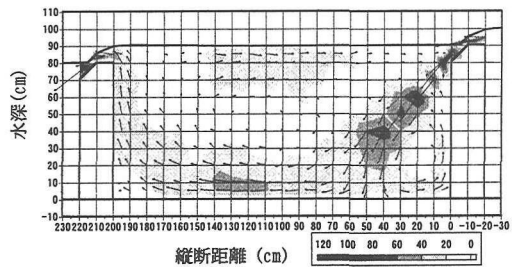


図-8 流速コンター図(斜め流)

実験シリーズ2の結果を図-10に示す。隔壁形状が45°の場合斜め流が6ケース、表面流が3ケースに、隔壁形状が30°の場合落下流が1ケース、表面流が8ケースになり、プール内流況が隔壁形状により大きく影響を受けることがわかる。

落下流及び表面流の発生する遷移状態はRajaratnamほか⁹⁾により、以下の(A)式が与えられている。

$$C_b = Q / (b S L^{3/2} \sqrt{g}) = 0.22 \sim 0.31 \quad (A)$$

(平均的には0.25)

ここに、 C_b : 実験で得られた定数(無次元流量)、 Q : 流量(m³/s)、 g : 重力加速度、 S : 勾配($\Delta h/L$)、 b : 水路幅、 L : プール長、 Δh : 隔壁間落差

(A)式は、次の関係で示すことができる。

$$L = Q^2 / (C_b b \sqrt{g \Delta h})^2 \quad (B)$$

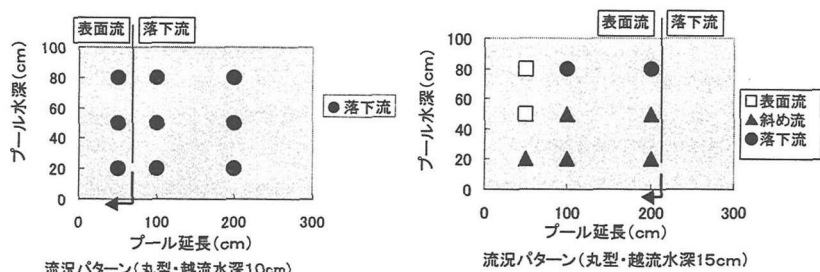


図-9 プール規模に対する流況パターン（越流水深別）
（図中の線は（B）式の結果を示す。）

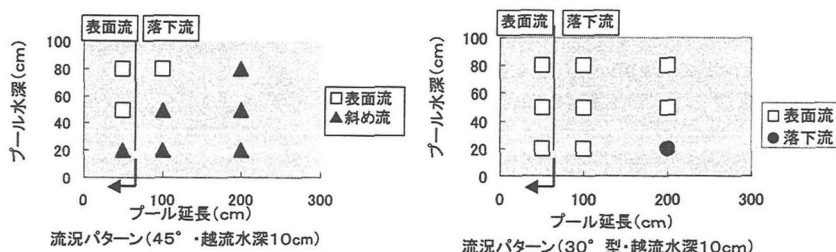


図-10 プール規模に対する流況パターン（隔壁形状別）
（図中の線は（B）式の結果を示す。）

（B）式に本実験条件である隔壁間落差 $\Delta h=10\text{cm}$ 、水路幅 $b=60\text{cm}$ 、流量 $Q=0.012\text{m}^3/\text{s}$ （越流水深 5cm ） $0.037\text{m}^3/\text{s}$ （越流水深 10cm ） $0.087\text{m}^3/\text{s}$ （越流水深 15cm ）、また C_b を平均的な値の 0.25 として、それぞれを代入すると、プール長 L が求められる。

図-9の左図は約 60cm 以上で落下流、以下で表面流が発生し、右図ではプール延長 200cm 以上で落下流、以下で落下流になることを示している。

図-10はプール延長が約 60cm 以上で落下流、以下で表面流になることを示している。

本実験は2つの隔壁からなるプールという最も単純な構造で行ったが、本来の魚道ではプールが連続しているため、この水面形の乱れは下流に伝播し助長され表面流になりやすいと考えられる。

このように、従来魚道を設計する際、簡便に用いられる計算式の結果と異なり、隔壁頂部の形状に大きく影響を受けることがわかった。

(2) 実験内容b)における遊泳行動の結果

ここでは、遡上回数が比較的多いケース（以下、多いケースとする）と比較的少ないケース（以下、少ないケースとする）の2ケースを示す。

a) 多いケースのプール内流況及び、ウグイの遊泳特性（図-11）

① 流況

上流隔壁、底面に沿って流れるが、プール中間で減勢

し、プール下手半分では穏やかな一様流が形成された
② 遊泳行動

Aで群をなし自由遊泳した。以下の3つの経路をたどり遡上した。

経路1 AからBに移動した個体は底面に腹部を付けるようにCへ移動した。Cで頭部を下降流に押され姿勢を崩し、定位したままAまで流下した。

経路2 底面より 10cm 程度の中層AからをD、Eへ移動し隔壁沿いの下降流に遭遇した。流れに頭部を向け定位し隔壁沿いを遡上した。頭部を下降流に押され姿勢を崩し遡上に失敗、流下することがあった。

経路3 表層～中層Gで循環流に定位しながら後退した個体は、Hで下降流に尾部を押されるように頭部を流れに向け、隔壁沿いに遡上を試みた。流れに押し戻され遡上に失敗、流下するケースがあった。

③ まとめ

上流部の流れは乱れるがプール底部に越流水脈が水叩き状態となり減勢し、遡上しやすくなり遡上回数が多くなっていると考えられる。

b) 少ないケースのプール内の流況及び、ウグイの遊泳特性（図-12）

① 流況

上流隔壁沿い、底面沿いの流れは途中で減勢され、プール上手～中間に循環流、下手には比較的一様な流れが下流隔壁に向かって形成された。

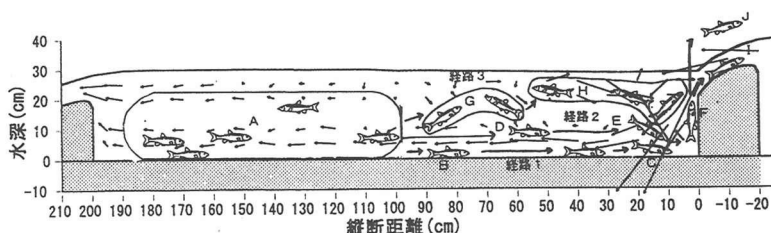


図-11 プール内流況及び、ウグイの遊泳行動（遡上回数多いケース）

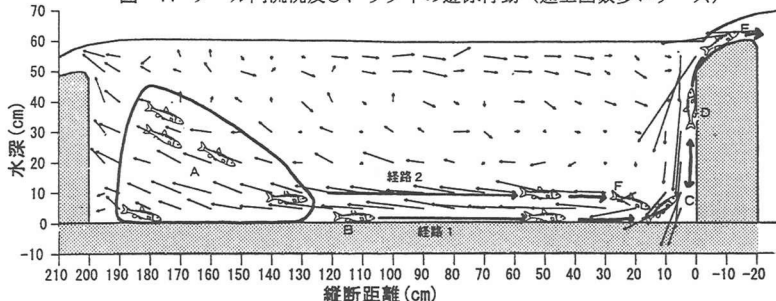


図-12 プール内流況及び、ウグイの遊泳行動（遡上回数少ないケース）

②遊泳行動

Aで群れをなし定位した。以下の2つの経路をたどり遡上を試みた。

経路1 AからBに移動した個体は底面に腹部をつけるように短時間でCまで移動しようとした。多くの個体は遊泳速度が低下し、定位したままAまで後退、又は流下し、遡上に失敗した。

経路2 底面より10～20cm程度上層をAからFへ速い速度で移動した。Fで下降流に遭遇すると頭部を流れに向け定位し、隔壁に沿ってD、Eと遡上した。

③まとめ

強い下降流が生じ、中層に比較的一様な流れが形成できず遊泳空間が出来ずウグイの遡上回数が少なくくなっていると考えられる。

以上のように典型的なパターンを例に挙げた。階段式魚道のプール内におけるウグイの行動特性を以下にまとめる。

定位：プール内の中底層で、流速がある程度遅い（60cm/s程度以下）空間に定位する。循環流の規模が大きい場合、循環流の内側に分布する流向・流速が一様でない低流速空間をウグイは利用せず、流向が比較的一様な空間に定位する。

遡上経路：ウグイは、上記定位空間から遡上を開始し、上流隔壁背面沿いの水脈（以下、下降流とする）に進入し隔壁沿いに遡上する。

遡上に失敗するパターン：2タイプの失敗パターンが見られた。

I：遡上経路における下降流から底面流への突然の流向の変化する空間において、頭を流れに向けることが出来ない場合。

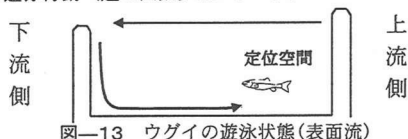


図-13 ウグイの遊泳状態（表面流）



図-14 ウグイの遊泳状態（斜め流）

II：局所的な上昇流、下降流といった乱れによって遊泳力が一瞬低下し、姿勢が崩され押し戻される場合。

このように、ウグイはプール規模の変化による、異なった流況に順応し遊泳行動（定位、経路）をとると考えられる。

参考までに、表面流状態（図-7）、斜め流状態（図-8）のプール内におけるウグイの遊泳行動を観察した。

表面流でのウグイはプール中央から上流隔壁にかけての中底層部に定位した（図-13）。そのウグイの姿勢は下流を向き、その定位空間から遡上行動を起こした。ウグイは頭部を流れに向けながら下流隔壁側へ移動し、下流隔壁沿いの下降流に突入した。しかし、ウグイは流向が一様でない下流隔壁頂部付近で流向の突然の変化に対応出来ず姿勢を崩し、再び元の定位空間に移動し定位した。このウグイの下流方向へ向かう行動は、本来川の上流へと魚が遡上する行動とは正反対の向きである。ウグイはプール全体の流れが把握できない状態にあり、逆方向へ遡上行動を起こしたものと考えられる。

斜め流でのウグイは落下流の場合と同じくプール中央から上流隔壁にかけての中底層に定位した(図-14)。ウグイは姿勢が上流を向き、その定位空間から遡上行動を起こした。頭部を流れに向けながら上流側へ移動したウグイは、①プール底面付近の水脈の変化点で姿勢を崩し、元の定位空間に移動し定位する個体と②そのまま上流隔壁付近に到達し、水脈下側の逆流域空間に取り込まれ、鉛直下向きや下流側向きの姿勢で遊泳する個体が見られた。

このように流況の変化に伴い、ウグイはプール全体の流れが把握出来ない状態にあると考えられ、遊泳行動は大きく変化した。今後、階段式魚道だけではなく、様々なタイプの魚道での“流況と魚の遊泳行動の関係”を把握することは重要である。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下のように要約する

- (1) 落下流と表面流の形成条件は、流量、プール水深、プール延長以外に、隔壁形状にも影響する。
- (2) プール内流況は現場で設計上簡便に使用されている計算式の結果と大きく異なり、隔壁頂部の形状に影響を受ける。
- (3) 隔壁形状が丸型の場合、45°、30°と比べ落下流が発生しやすい。
- (4) 魚道内の流況の変化により魚類の行動特性が大きく異なる。

本研究は、階段式魚道のプール内における流況測定を中心に行った。今回の実験で得られたデータを基に、プール内での魚類の遊泳行動を、今後研究する予定である。

《参考文献》

- 1) 住谷昌宏：長良川河口堰の環境対策について、大ダム、No. 157, 1996.
- 2) 廣瀬利雄：最新魚道の設計、ダム水源環境整備センター、信山社サイテック、1998.
- 3) 柏井条介、村岡敬子、田中和浩：階段式魚道の水理特性、土木技術資料、Vol 33, 1994.
- 4) 田中和浩：階段式魚道におけるアユの遡上特性、土木研究所資料第 3386 号、1995.
- 5) 高須修二、箱石憲昭、村岡敬子、田中和浩、尾寄佳史：階段式魚道の水理特性に関する研究、水工学論文集、第 38 巻、1994.
- 6) 和田吉弘：アユの遡上と魚道構造の関係、ダム技術 NO. 39、1990.
- 7) Rajaratnam, N, katopodis, C, and ainali, A : Plunging and streaming flows in pool and weirs fishways, J. Hydraulic Engineering, 117, ASCE.
- 8) 林田寿文、本田隆秀、萱場祐一、島谷幸宏：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動、水工学論文集、第 44 号、pp1191~1196、2000.
- 9) 和田吉弘：長良川のアユづくり、治水社、1993.
- 10) 和田吉弘：人と魚の知恵比べ、岐阜新聞情報センター、2000.

THE CHARACTERISTIC OF THE PLUNGING FLOW AND THE STREAMING FLOW IN THE POOL-WEIR-FISHWAY AND THE SWIMMING BEHAVIOR OF LEUCISCUS HAKONENSIS.

Kazufumi HAYASHIDA, Takahide HONDA, Yuichi KAYABA
And Yukihiro SHIMATANI

To mitigate many impacts, several types of fishway have been developed until now. Among them, pool-and-weir-fishway are the most popular type in Japan, and the number of cases would be over 10,000. The feature of the pool-and-weir-fishway has two just different flow patterns inside the pool; Plunging Flow and Streaming Flow. Although these flow patterns are fundamental factors whether fish succeed in accessing to the upstream or not, it was not made clear how to decide the parameters such as the pool length, pool depth and weir top pattern. In this study, these important parameters which influence these flow patterns were selected, and several patterns of experiments using an actual scale model were done changing parameters in various value in order to develop the way of designing the pool-and-weir-fishway. Furthermore, fish behaviors were observed in these flow patterns, and the features were grasped. This result could be good information to consider the series of the relation; the design of fishway, flow pattern and fish behavior.