

階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動

THE FLOW PATTERN OF THE POOL-AND-WEIR-FISHWAY IN THE POOL AND THE SWIMMING BEHAVIOR OF LEUCISCUS HAKONENSIS

林田寿文¹・本田隆秀²・萱場祐一³・島谷幸宏⁴

Kazuhumi HAYASHIDA, Takahide HONDA, Yuichi KAYABA, and Yukihiro SHIMATANI

¹ 正会員 建設省土木研究所 河川環境研究室 技官 (〒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

³ 正会員 工修 建設省土木研究所 河川環境研究室 主任研究員

⁴ 正会員 工博 建設省土木研究所 河川環境研究室 室長

It depends on flow patterns formed in pool-and-weir fishways whether fishes succeed in the access to upstream or not. However we had not focused on the relationship between the flow patterns and the swimming behaviors which is a key element concerning about the fish accessibility. As a result, although the pool-and-weir fishways have been installed in many weirs, we could not have evaluated the efficiency. With these backgrounds, eight two-dimensional flow patterns were formed by changing the pool length and pool depth, and swimming behaviors was observed in each flow patterns in this research. It was confirmed that there are three obvious swimming routes to access a upstream pool, and significantly it was certain that one route is more successful to access than the other routes. The result shows that the flow patterns in the pool could provide a fundamental element concerning about fish accessibility and that we have to design the pool length and depth to keep the successful route.

Key Words : fishway, pool-and-weir, the swimming behavior, *Leuciscus hakonensis*

1. はじめに

既存の魚道研究の多くは、魚道形状と遡上率との関係¹⁾、魚道形状と魚道内の流況パターン²⁾を扱っており、魚道内に形成される独特の流れに対して魚類がどのような遊泳行動をとるかに関する研究^{3), 4), 5), 6)}は、十分に行われていない。しかし、魚は魚道内の微妙な流況に対応し、遊泳、遡上するため、魚道内の流況と遊泳行動について十分把握しなければ適切な魚道設計は困難であると考えられる。

本研究では魚道で使用実績の多い、プール式魚道を対象とし、プール内の流況と魚類の遊泳行動との関係を実験的に検討した。

2. 実験内容

(1) 実験施設の構造

実験施設は図-1・2に示すように、幅 60cm の二次元水路に階段式魚道構造の一部を再現した幅 20cm の隔壁 2 個及び、1つのプールからなる。プール延長 (L)、水深 (H)、を変化させることが出来る施設である。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

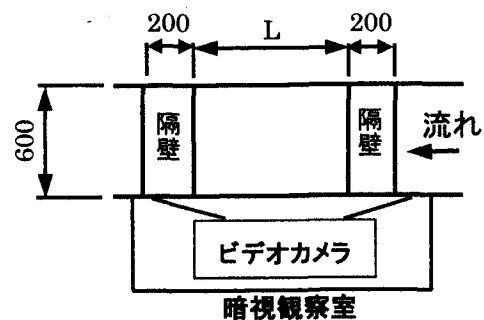


図-1 実験施設平面図(単位:mm)

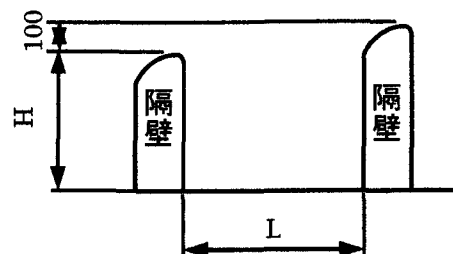
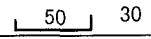
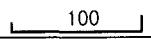
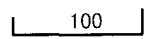
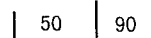
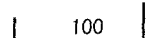
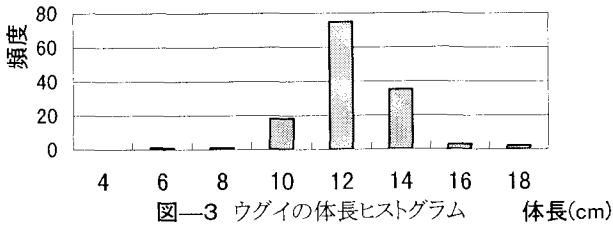


図-2 プール部断面図(単位:mm)

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。

表-1 実験ケース プール形状の単位: cm

検討ケース	プール形状	魚道勾配
ケース1	20  30	1/7
ケース2	20  30	1/12
ケース3	20  30	1/22
ケース4	50  60	1/12
ケース5	50  60	1/22
ケース6	80  90	1/7
ケース7	80  90	1/12
ケース8	80  90	1/22



(2) 実験内容

a) 実験方法

隔壁間落差は 10cm で固定し、プール延長 (L)、プール水深 (H) を変化させ、表-1 に示すとおり 8 ケースの実験ケースを設定した。表におけるプール形状の左・右は隔壁高さを、中央部は延長を示す。それぞれのプール内流況を把握するため、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。

対象魚種はウグイ (養殖魚) とし、遊泳行動特性は、目視、ビデオカメラ撮影で解析した。

b) 条件の選定

プール式魚道の流況はプール延長・プール水深・隔壁間落差・越流量が重要な要因^{7,8)}である。柏井らは階段式魚道の水理学的特性の調査⁹⁾を行い、プール内に形成される流況を定式化している。本研究ではこの定式化した 4 つの流況パターンが再現できるよう 8 ケースの実験を行った。又、従来の設計では越流部の流速 (水深) が支配要因とされており、越流水深・隔壁間落差を 10cm に設定した。これは、柏井らの実験で越流水脈を比較的安定させる水深であり、また、和田らの実験で比較的遡上率の良かった越流水深、隔壁間落差⁹⁾でもある。

実験に使用した魚の体長は図-3 に示すとおりである。各ケース 15 尾程度実験に用いた。観察時間は和田らの実験等による日周期行動報告⁹⁾から 15~19 時の 4 時間とした。

c) 遡上回数

観察時間内に上流隔壁を遡上した回数を遡上回数と呼ぶ。遡上した魚は上流で捕獲していないため、隔壁を下

る個体もあり、遡上回数は実験尾数より多くなるケースも見られる。移動のしやすさを遡上回数として定義する。

3. 実験結果

(1) ケース 1 のプール内の流況及び、遊泳特性 (図-4)

a) 流況

循環流がプール全体に形成されたが、流速が全体的に速く、低流速域は見られなかった。

b) 遊泳行動

A の中を循環流にのって 10 秒程度流下する。このケースではウグイはプール内に留まることが出来ず、半強制的に半数が下流に流された。残りの半分は B の下降流に入り、C、D あるいはジャンプして F を通過し、遡上した。

(2) ケース 2 のプール内の流況及び、遊泳特性 (図-4)

a) 流況

上流隔壁、底面、下流隔壁に沿って速い流れが形成された。上流隔壁に沿った下降流は底面に激しくぶつかり減勢した。明瞭な循環流は形成されず表層に低流速域が見られた。

b) 遊泳行動

A で群をなし定位した。個体数と比較して定位できる領域が小さいようで、ここから押し出される個体が多かった。以下の 3 つの経路をたどり遡上した。

経路 1 底層 B に押し出された個体は底面に腹をつけるように C へ移動した。底面からの上昇流で頭部が少し上を向くと、遊泳速度が低下し定位したまま A まで後退、又は流下し、ほとんどが遡上に失敗した。

経路 2 中層 D に押し出された個体は E へ移動して隔壁沿いの下降流に遭遇した。頭部を流れに向け定位して隔壁沿いを遡上した。頭部を下降流に押され姿勢を崩して遡上に失敗、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の流れに向け、隔壁沿いを遡上した。流れに押戻されて遡上に失敗、流下することがあった。

(3) ケース 3 のプール内の流況及び、遊泳特性 (図-4)

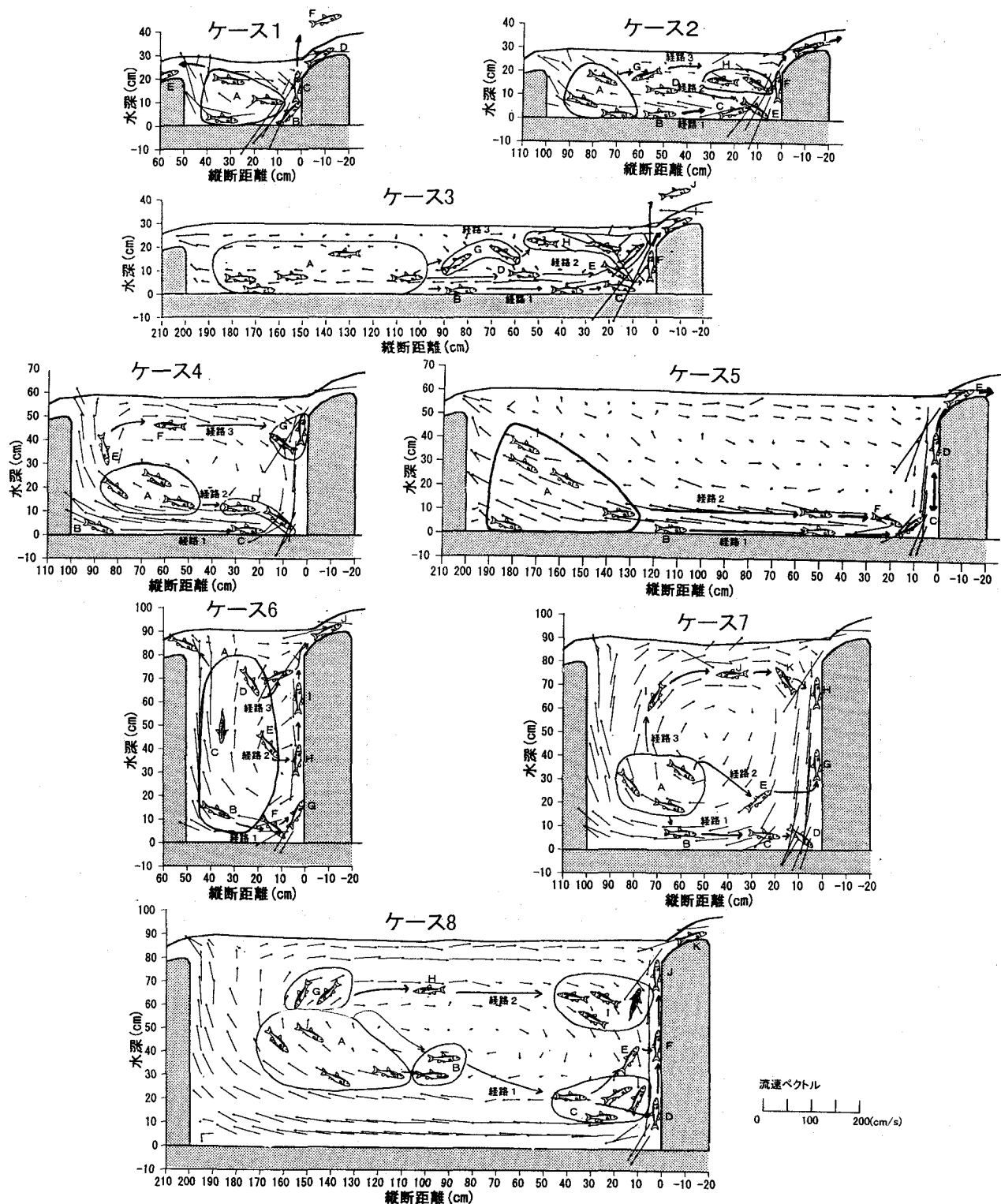
a) 流況

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様流が形成された。

b) 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。



図—4 プール内の流況及び、遊泳特性

経路2 底面より10cm程度の中層Aから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の流れに向け、隔壁沿いに遡上を試みた。流れに押戻され遡上に失敗、流下するケースがあった。

a) 流況

プール全体に循環流が形成された。上流隔壁、底面、下流隔壁沿い、表層の流速は比較的速い。また、プール中央に低流速域が見られた。

b) 遊泳行動

A及びBで群れをなし定位した。以下の3つの経路をたどり遡上を試みた。

経路1 Bの底面付近から非常に速い速度でCまで移動するが、速い流れに定位したままA又はBまで押戻され遡上に失敗、流下した。

(4) ケース4のプール内の流況及び、遊泳特性(図—4)

経路2 AからDへ比較的ゆっくりと移動し、隔壁沿いの下降流に遭遇した。下降流に頭部を向けて定位し遡上を試みるが、流れに押し戻され定位したまま後退した。

経路3 Aから中層E～表層Fで循環流に定位しながら、後退した個体は、Gで越流水脈に尾部を押されるように頭部を流れに向け、これに定位して隔壁沿いに遡上を試みた。流れに押し戻されて遡上に失敗、流下するケースがあった。

(5) ケース5のプール内の流況及び、遊泳特性(図-4)

a) 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。

b) 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。

(6) ケース6のプール内の流況及び、遊泳特性(図-4)

a) 流況

縦長の乱れた循環流が形成された。静水域は殆どないが上層部が比較的緩やかな流れになっている。下降流は、隔壁沿いに強い流れが生じるが、プール全体でみると上昇流が占める空間が大きい。

b) 遊泳行動

B、Cで群れをなし数秒～数十秒定位した。Aの循環流によってBからC、D、Eと流下し再び、B、Cで数秒～数十秒定位する状態を繰り返した。以下の3つの経路から遡上した。

経路1 Bまで流下した個体が、下降流に反応して頭部を流れに向け、下降流に定位しながら隔壁沿いを遡上した。速い流れに押し戻され遡上に失敗、流下することがあった。

経路2 Eまで流下した個体が、下降流に反応して頭部を流れに向け、定位しながらHから遡上を試みた。ほとんどの個体は途上で遊泳速度が低下し、循環流に取り込まれて流下した。

経路3 Dまで流下した個体が、越流水脈に反応し、頭部を流れに向け、下降流に定位しながら隔壁沿いを遡上した。速い流れに押し戻され遡上に失敗、流下することがあった。

(7) ケース7のプール内の流況及び、遊泳特性(図-4)

a) 流況

プール全体に円形に近い循環流が形成された。循環流のどの位置においても流速が大きく、低流速域はプール中央にわずかに見られるだけであった。

b) 遊泳行動

Aで群れをなし定位した。以下3つの経路から遡上を試みた。

経路1 Aから底面中央下手Bに移動し、一旦定位した後C、Dへ短時間で移動を試みた。ほとんどの個体は途中で遊泳速度が低下し、定位しながら流れに押し戻された。Dに達した個体は速い下降流に頭部を向けることができず遡上に失敗、循環流に取り込まれAまで流下した。

経路2 Aから循環流内Eで一旦定位し、隔壁沿いの下降流に遭遇し頭部を流れに向け、Gで隔壁に腹部を付けてHへ遡上を試みた。ほとんどの個体は途上で遊泳速度が低下し、循環流に取り込まれAまで流下した。

経路3 Aから定位しながらゆっくりと後退した個体がIで頭を斜め下にした状態から下手方向に頭を回転させ、表層Jを通過し、Kまで後退する。越流水脈に尾部を押され、頭部が上を向きHから遡上を試みるが流れに押し戻され遡上に失敗、流下することがあった。

(8) ケース8のプール内の流況及び、遊泳特性(図-4)

a) 流況

プール全体に循環流が形成されるが、中央部の低流速域の占める領域が大きかった。

b) 遊泳行動

Aで群れをなし定位した。以下2つの経路から遡上した。

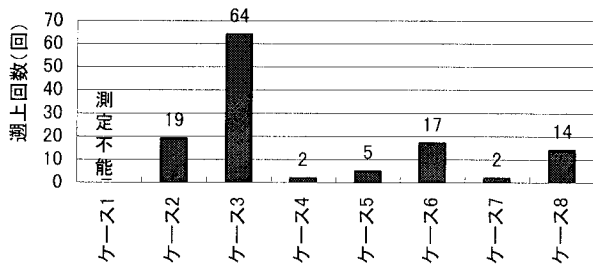
経路1 AからBに群れながら移動した後、Cを通過して上流隔壁沿いの下降流に反応して頭部を流れ方向に向け隔壁に沿ってDから遡上行動を示す個体と、Cで一旦定位し、頭部を流れ方向に向けEから落下流のFに入り遡上した。ほとんどの個体は途中で速い流れに押し戻され遡上に失敗し、C、Aまで流下した。

経路2 循環流に定位しながら後退した個体がGで頭部を斜め下にした状態で頭部を下手方向に回転させ表層Hを通過し、Iまで後退する。越流水脈に尾部を押され頭部が上を向き遡上を試みた。速い流れに押し戻されてAに戻され流下する場合も多かった。

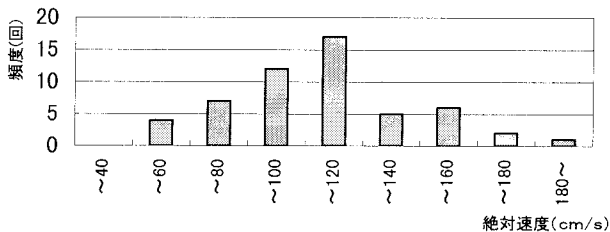
(9) 各ケースの遡上回数

各ケースの遡上回数を図-5に示す。ケース3が最も多く、次いでケース2、6、8、ケース5、4、7の順番となった。ケース1ではプール内での定位や自由遊泳が全く不可能で遡上したとはみなさず、遡上回数は測定不能とした。

4. 考察



図—5 ケース別遡上回数 検討ケース



図—7 ウグイの絶対遡泳速度 (遡上時)

定位空間、遡上経路には特徴があり、遡上経路上で遡上失敗する場合にも典型的なパターンが見られた。但し、定位空間におけるウグイの群れ密度等は考慮しない。

(1) 定位空間の特性

定位空間はプール内の下流域の中層～底層部或いは底層部に分布している。

図—6 は定位空間内流速別面積ヒストグラムを示したものである。その定位空間は0～60cm/sの流速範囲に分布していることが分かる。

この定位空間における流速は本実験で用いたウグイの体長の2～4倍程度以下となっており、既往の研究¹⁰⁾で定義される巡航速度の値とほぼ一致する。

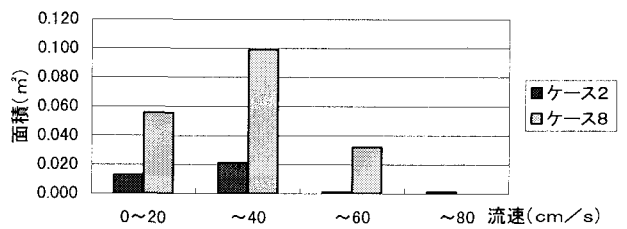
循環流の規模が大きい場合、循環流の内側に低流速空間が分布するが、ウグイはこの空間をほとんど利用しない。これは、流向が空間的に変化し、安定した定位状態が得られないためと考えられる。また、中層～表層付近は比較的流速が小さく、流向も安定しているが、夕方照度の低下する時まで利用されない。言い換えれば、視覚の効く時間帯は鳥類の捕食等の影響により、魚類が潜在的に忌避する空間であると考えられる。

(2) 遡上経路の特徴

プール内で特定の経路が、遡上経路として利用されている。プール内での相対的な位置関係から分類すると以下に示す3タイプに分類できる。

経路1 底面流内を上流に遊泳し、プール上流端で向きを変え、隔壁沿いの下降流に入り遡上する。

経路2 底面流より流速が小さく、流向が空間的に不均一な低層～中層を移動して隔壁沿いの下降流に入り遡上



図—6 定位空間内流速別面積ヒストグラム

する。

経路3 表面付近の上流隔壁に向かう流れに定位しながら後退し、越流水脈に尾部を押されて反転し、頭部が流れに向き遡上する。

各経路の利用頻度は、**経路2**が最も多く、次いで**経路1**、**経路3**の順である。

また、遡上に失敗するケースとしては、以下の2タイプが見られた。①底面流から下降流に向きを変える時の様に頭を流れに向けることができず遡上できない。②乱れによって姿勢が崩され押し戻される。②のケースは、局所的な上昇流、下降流によって姿勢が崩れ、遊泳力が一瞬低下した場合に生じやすい。

ここで、この知見に基づき遡上経路別に流況と遡上に失敗するケースとの関連を見ると、**経路1**は遡上経路が長く、上流隔壁角での流向の変化が大きいため。一方、**経路2**は遡上経路が比較的短く、かつ、上流隔壁沿い下降流への突入前流速が小さい。つまり、失敗要因から2つの経路を見ると後者の方が、遡上しやすい経路と言える可能性が高い。**経路3**は流向への反応が自発的でないこと、利用時間帯が限定されたことから経路の良否判断が難しいが、遡上経路が短いという点では有利である。

次にこの点と遡上回数との関連を検討する。(i)遡上回数の最も多いケース3、(ii)次に多いケース2、8、(iii)最も少ないケース5、4、7の3つのレベルに分類できる。

(尚、定位が確認されなかったケース1、6はここでは対象としていない。)利用頻度が少なかった**経路3**を考慮しなければ、(iii)のケースでは遡上に最も不利と考えられる底層の経路に遡上が集中している。一方、(i)のケースでは隔壁角付近の流向変化が小さく、また、水脈が減勢されて底面付近の流速が比較的遅くなっていること、から比較的有利な経路となっている。(ii)のケースでは、ケース8が中層からの遡上経路を利用すること、また、ケース2は隔壁角での流向変化が小さいこと、から比較的有利な経路となっている。このように、各実験ケースの遡上経路と遡上回数には、ある程度関連性があると考えられる。

(3) 遡上速度

ケース2～8までの経路1、経路2の水路底面部及び、隔壁沿いを比較的尾の振りが激しい遊泳行動を取った個

体を遡上意志がある個体とみなし、これらの個体全てを対象に絶対遊泳速度を算出した。ビデオにより移動距離と所要時間を測定し、平均速度を求め、その場の流速を加え、絶対遊泳速度とした。結果を図-7に示す。絶対遊泳速度は100~120cm/sにピークを持ち、180cm/sを超えるものもある。なお、隔壁頂部の移動速度は移動が早く、測定できなかったが明らかに、ここで示した絶対遊泳速度より速かった。底面付近や隔壁沿いの移動は個体の突進速度で遡上していることになる。本実験でも速い流れに押し戻されるケースがかなり見られた。

この結果は僅かな流量や隔壁間落差の増加が遊泳行動、遡上率に影響を与えることを示しており、今後、それらによる流況変化と遊泳行動特性の検討が必要である。

(4) プール形状とウグイの遡上

プール形状が正方形に近いケース4、7では速い循環流が生じ、ウグイが循環流に流され、定位・遡上しにくくなっている。

プール長がプール水深に比して長いケース2、3、5、8ではプール上流部と下流部に異なる流況が生じ、下流部にウグイが定位できる空間が生じる。しかし、プール長が長いケースがウグイにとって遡上しやすいわけではなく、流況の特徴が重要である。強い下降流が生じ、中層に遊泳空間が出来ないケース5ではウグイの遡上回数が少なくなっている。一方、上流部の流れは乱れるがプール底部に越流水脈がぶつかり減勢するケース3では最も遡上回数が多く、遡上しやすくなっている。

プール水深が深いケース6ではプール上部に比較的流れの緩やかな空間が生じ、そこを利用して、ウグイは遡上することが出来る。今回の実験ケースからは勾配が1/7の場合にはプールが深いケース6、勾配が1/12、1/22の場合ではプールが浅いケース2、3がウグイにとって遡上しやすい結果となっている。

5. 結論

本研究は、魚道の中でも最も使用実績の多い階段式魚道における遊泳力の比較的強いウグイで流況に対する遊泳行動実験を行った。実験の結果を以下に要約する。

- (1) プール水深、プール延長によって遡上回数、遡上経路が大きく異なる。
- (2) ウグイの遡上は下降流の水脈に入った時に行われる。
- (3) ウグイが下降流の水脈に入るケースは、経路1の底面流から下降流に遊泳し入るケース、経路2の中層から下降流に遊泳して入るケース、経路3の上流で下流に頭を向けながら上流に流され、偶然下降流に入るケースの3ケースがある。
- (4) 遡上前には流速が60cm/s以下の定位空間で遊泳し、上記遡上経路に向かう。

- (5) 絶対遊泳速度は100~120cm/sにピークを持ち、180cm/sを超えるものもある。
- (6) プール内に形成される流速のかなり遅い空間は殆ど定位空間としては利用されない。
- (7) 遊泳可能な流速場でも流向の突然の変化には対応できず、遡上できない。
- (8) 遡上のしやすさはプール水深、プール延長、越流量、隔壁間落差によって形成される流況と遊泳行動の関係が重要である。
- (9) 以上のように2つの隔壁からなる1つのプールという単純な構造であってもウグイの遊泳行動は流況に対して複雑に対応する。

今後、魚道の検討には水理と魚の行動の両面からの研究が必要である。

「付録」

- ・ 本論文で用いた語を定義する。なおこの定義は一般的に用いられている言葉とは必ずしも一致するものではない。

自由遊泳～ある空間内向きを変え自由に泳ぐ事ができること。

定位～比較的一様な流れの中で、流れ方向に頭部を向けて特定の位置でとまることが出来ること

流下～流れに身を任せて流れ下ること

遡上～自発的に流れの上手方向に動くこと

移動～自発的にある距離を動くこと。

参考文献

- 1) 和田吉弘：長良川のアユづくり，治水社，1993.7
- 2) 柏井・村岡・田中：階段式魚道の水理特性，土木技術資料，Vol33，1994.11
- 3) 中村俊六：階段式魚道模型内でのアユの挙動，International Symposium on Fishway '90 in Gifu，1990
- 4) 竹内義幸：魚道内水理と魚の遡上行動について，International Symposium on Fishway '95 in Gifu，1995
- 5) 和田清ら：稚アユの遡上行動からみた仮説用ストリーム型魚道に関する一考察，河川技術に関する論文集，第5巻，1999.6
- 6) 和田清ら：デニール式およびバティープラス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動，水工学論文集，第42巻，1998
- 7) Rajaratnam.N, katopodis.C, and Mainali.A : Plunging and streaming flow in pool and weirs fishways, J. Hydraulic Engineering 117, ASCE
- 8) 高須ら：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
- 9) 廣瀬利雄ら：最新魚道の設計，ダム水源地環境整備センター，信山社サイテック，1998.6
- 10) 塚本勝己，梶原武：魚類の遊泳速度と遊泳能力，水産土木，VOL. No-1, PP. 31~36, 1973

(1999.9.30受付)