

階段式魚道における流量変化に伴う プール毎の流況およびウグイの遡上行動

FLOW AND UPSTREAM MIGRATING BEHAVIOR OF *LEUCISCUS* *HAKONENSIS* AT EACH POOL OF POOL-AND-WEIR FISHWAY ACCOMPANYING DISCHARGE CHANGE

浪平 篤¹・後藤眞宏²・小林宏康³

Atsushi NAMIHIRA, Masahiro GOTO and Hiroyasu KOBAYASHI

¹正会員 農修 農村工学研究所 施設資源部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)
² 農博 農村工学研究所 施設資源部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)
³ 農博 農村工学研究所 企画管理部研究調整役 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

Measurement of flow structure and observation of upstream migrating behavior of *Leuciscus hakonensis* at 3 pools of the pool and weir type fishway accompanying discharge change were conducted, using a full-size hydraulic model. Main results are shown as follows ; 1) Suitable flow condition for upstream migration of fishes in the pool and weir type fishway is that the flow over upstream side wall is plunging to the bottom of pool along the wall. 2) The flow velocity of the main current in the uppermost pool is larger than that of other pools at plunging flow, therefore, for the *Leuciscus hakonensis* in this pool, it is more difficult not only to migrate upstream but also to stay in an fixed place.

Key Words : Pool-and-weir fishway, flow structure, *Leuciscus hakonensis*, upstream migrating behavior

1. 緒論

近年の魚道の研究では、①構造諸元または水理条件と魚道内流況の関係や、②構造諸元または水理条件と魚類の遡上率の関係に着目したものだけでなく、③魚道内流況と魚類の遡上行動の関係に着目したもの^{例えは1)～5)}が増えつつある。このことは、魚類は魚道内の微妙な流況の変化に対応して遊泳するため、適切な魚道の設計には③の把握が必要⁴⁾との考えに基づいている。

さて、魚道には数多くのタイプがある⁶⁾が、我が国の農業用取水堰における魚道として最も採用数が多いのは階段式である⁷⁾。階段式魚道についても上記③の研究が行われており^{1), 4)}、プール内における魚類の遡上特性が明らかにされつつある。

しかしながら、これらの研究^{1), 4)}では、Ⅰ)単一のプールが観測対象である、Ⅱ)実験条件として流量を変化させた観測ケースが少ない等、残された課題もある。Ⅰ)については、同一形状のプールが連続した魚道では、上流側から3つ程度以降のプールで流況がほぼ一定とみなせる⁸⁾ことから、上流から1～3つ目までのプールを対象とした観測も必要と考えられる。Ⅱ)については、農

業用取水堰では一定量を取水するため河川水位が一定となるようなゲート操作が望まれているが、それは現実的には困難であり、魚道への流量も一定に保たれないことから、流量を変化させた場合の評価も必要と考えられる。

そこで本研究では、階段式魚道の実物規模水理模型を用いて、流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動の違いを実験的に調査する。

2. 魚道内流況の計測方法

(1) 水理模型

実物規模の階段式魚道の水理模型(図-1)を屋内に設置した。図-1のプール水深 H 、プール間落差 ΔH 、隔壁厚さ D 、プール長 L は、表-1のように設定した。

表-1のうち、勾配 $\Delta H/(D+L)$ は $1/10 \sim 1/20$ が適切である^{6), 9)}、 H は 0.4m 、 0.8m 、 1.2m の比較では 0.4m が最適であった^{6), 9)}、 ΔH は隔壁天端における流速特性より $0.1 \sim 0.2\text{m}$ がよい^{6), 9)}、 D は隔壁天端における魚類の遡上特性より $0.2 \sim 0.3\text{m}$ がよい^{6), 9)}という既往の実験結果をもとに定めた。 L はこれらの値から自動的に定まった。隔壁天端は、越流水が剥離しにくく、他の形状と比べてアユの

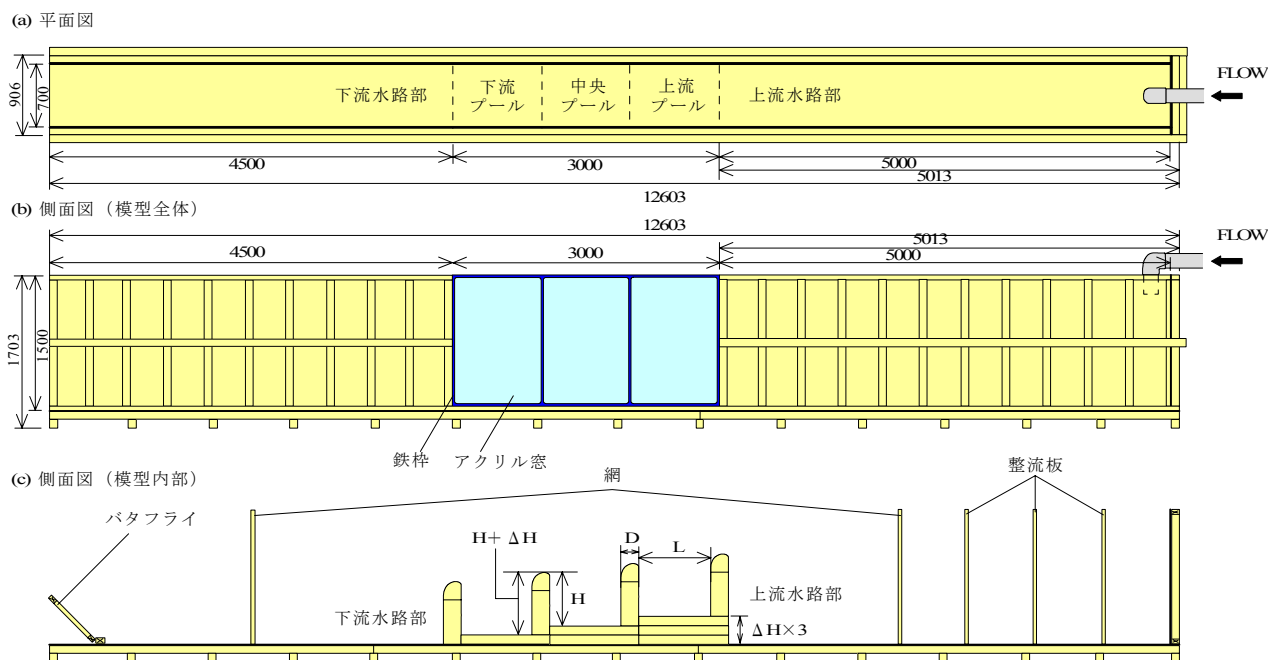


図-1 水理模型の概要(単位: mm)

遡上率も高い⁹⁾円弧形状¹⁰⁾とした。プール数は、1. のI)の課題に対応すべく、3とした。

なお、魚道内の横断方向における遡上行動の観測は気泡や光の反射の影響等により困難なため、林田らの実験⁴⁾と同様、隔壁には切り欠き部を設けず横断方向に同一形状とし、流れが卓越すると考えられる縦断面に投影される行動に着目することとした。

(2) 実験条件

実験条件として、最上流の隔壁に対する越流水深を表-2の4ケース設定した。これは、越流水深すなわち流量の変化に伴って形成される様々な魚道内流況に対する魚類の遡上行動の違いを調査するためである。

(3) 計測方法

流速分布および水面形状は中央縦断面で計測した。これは、隔壁が横断方向に同一形状の階段式魚道を用いた鬼束の実験¹¹⁾では、縦断面の流速は横断方向にほとんど差がなく、中央縦断面を代表とみなせたことによる。

プール内の水平方向および鉛直方向流速成分は、各方向に0.1mピッチで、東京計測社製三次元電磁流速計SF-5113(本体部)・SPT-200-10Z(検出部)を用いて計測した。但し、水面近傍および構造物近傍については0.05mピッチとした。隔壁の上側の水平方向流速成分は、水平方向に0.05mピッチ、鉛直方向に0.02mピッチで、東京計測社製プロペラ流速計SA-1101PR-S(本体部)・SAT-350-20S(検出部)を用いて計測した。流速データは60秒間の平均値を記録した。

なお、水面近傍では、電磁流速計の計測対応範囲外の条件となり、データを得られない箇所も生じた。隔壁の

表-1 水理模型の諸元(単位: m)

勾配	H	ΔH	D	L
1/10	0.4	0.1	0.2	0.8

表-2 実験条件

ケース名	越流水深(m/s)	単位幅流量(m^2/s)
CASE 1	0.05	0.021
CASE 2	0.10	0.064
CASE 3	0.15	0.127
CASE 4	0.20	0.190

上側のみプロペラ式流速計を用いたのも、同様の理由により電磁流速計では計測できなかったためである。

水面形状は、水平方向に0.05mピッチで、0.1mm読みポイントゲージを用いて計測した。水面形状の変化が激しい場合は、0.02~0.03mピッチとした。水面高さの変動が大きい箇所では、60秒間の変動の中間値を計測した。

3. ウグイの遡上行動の観測方法

(1) 対象魚

対象魚はウグイ(*Leuciscus hakonensis*)とした。ウグイは魚道の対象とされることは多くないが、全国の河川で上流から下流まで比較的広範囲に生息しており、代表的な遊泳魚の一種として考えられることから選定した。

実験に使用したウグイの体長および体重を図-2に示す。体長と体重の測定は、実験期間(8月下旬~9月下旬)に週1回程度、任意に選んだ個体を対象に行ったが、同期間中、測定値の傾向に大きな変化は見られなかった。なお、

これらのウグイは栃木県鹿沼市の養魚場より購入したもので、購入後は屋内の水槽にて飼育した。

一般に、魚類が瞬間的に出すことのできる最大の遊泳速度は突進速度と呼ばれ、その目安は紡錘形の魚類では体長の10倍程度といわれている¹²⁾。これに基づくと、図-2より、本研究で使用したウグイの突進速度の目安は0.9～1.2m/s程度と考えられる。

(2) 実験時のタイムスケジュール

ウグイの遡上活動は17:00～19:00にかけて活発であるという報告⁶⁾を参考に、本研究では16:00～19:00を対象として、水理模型(図-1)の左岸側のアクリル窓より魚道内のウグイの動きをデジタルビデオカメラにより撮影した。遡上率の測定は、翌日の朝に行うこととした。実験におけるタイムスケジュールの詳細および遡上率の測定方法を表-3に示す。

表-3における15:00～16:00の状態は、静水中にて飼育されたウグイを流水に慣らすため設けた。予備実験により、慣らすための時間を3時間とした場合と1時間とした場合で、ウグイの遡上行動および遡上率にほとんど違いが見られなかったことは確認している。遡上率を翌8:00に測定したのは、予備実験の際に、観測終了後の19:00以降の暗中(後述3.(3))にウグイの遡上を目視により確認できたことから、夜間の遡上も評価するためである。

(3) 実験時の環境条件の設定および観測方法

実験では、14:00～19:00の間は1時間毎に、そして翌8:00に、計測範囲0～50°の水温計を用いて水温を観測した。また、ミノルタ社製デジタル照度計T-1を用いて、予備実験を行った8月中旬の晴天時に屋外で観測した照度変化にほぼ合致するよう、屋内の照度を調整した。このときの屋内の照度変化を図-3に示す。なお、屋外での16:00以前の照度は7000lxを越えていたが、屋内の照明設備では3000lx程度より明るくすることは不可能であったので、この値を最大とした。このため、遡上行動の観測を開始していない16:00以前については、屋外よりかなり暗い条件である。また、19:00以降については、火災報知器等の消せない灯りのため1lx未満だが0lxではない。

4. 実験結果および考察

(1) 実験期間と水温

実験は8月下旬～9月下旬に行った。CASE 1～4のそれぞれで実験回数は3, 3, 3, 4で、使用したウグイの総尾数は127, 131, 130, 142であった。水温は23.0～28.5℃であった。なお、1回の実験でウグイの40尾程度しか使用しなかったのは、1尾毎の遡上行動を捉えられないほどプール内に同時に多数が存在するのを防ぐためである。

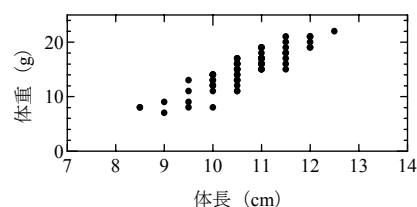


図-2 実験に使用したウグイの体長と体重

表-3 実験時のタイムスケジュール

時刻	内容
14:00	水理模型へ所定の越流水深(表-2)で通水開始。このとき、下流水路部と下流プールとの水位差が、プール間落差(0.1m)と比べて十分に大きくなるようバタフライゲートを調整。
15:00	下流水路部の網より上流側に30～50尾程度のウグイを放流。
16:00	下流水路部と下流プールとの水位差が、プール間落差と等しくなるようバタフライゲートを調整し、遡上行動の観測を開始。
19:00	遡上行動の観測を終了。
翌8:00	通水終了。水理模型内の全ての箇所にいるウグイの数を数え、総数(A)に対する上流水路部にいた数(B)の割合(=B/A×100)を遡上率とする。

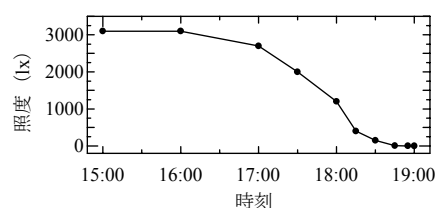


図-3 実験時の照度変化

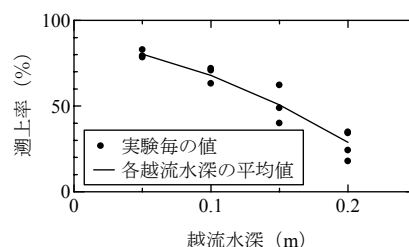


図-4 遡上率の観測結果

(2) 各越流水深における流況と遡上行動

CASE 1～4の遡上率(表-3)を図-4に示す。なお、遡上率を求めた対象は130尾程度と少なく(4.(1))、また、実験模型はプールが3段しかない(2.(1))。このため、この遡上率は全ての階段式魚道に対して普遍的に当てはまる値ではなく、本研究で用いた水理模型において越流水深毎(表-2)の遡上の容易性の比較するための指標である。

魚道内流況とウグイの遡上経路を図-5に示す。図-5の矢印は各測定位置の流速ベクトルであるが、隔壁の上側では水平方向成分のみの表示である(2.(3))。ウグイの遡上経路は、各プールから上流側のプールまたは上流水路部への移動が明確な映像として捉えられた場合のものである(2.(1))。ただし、気泡の影響によりウグイの遡

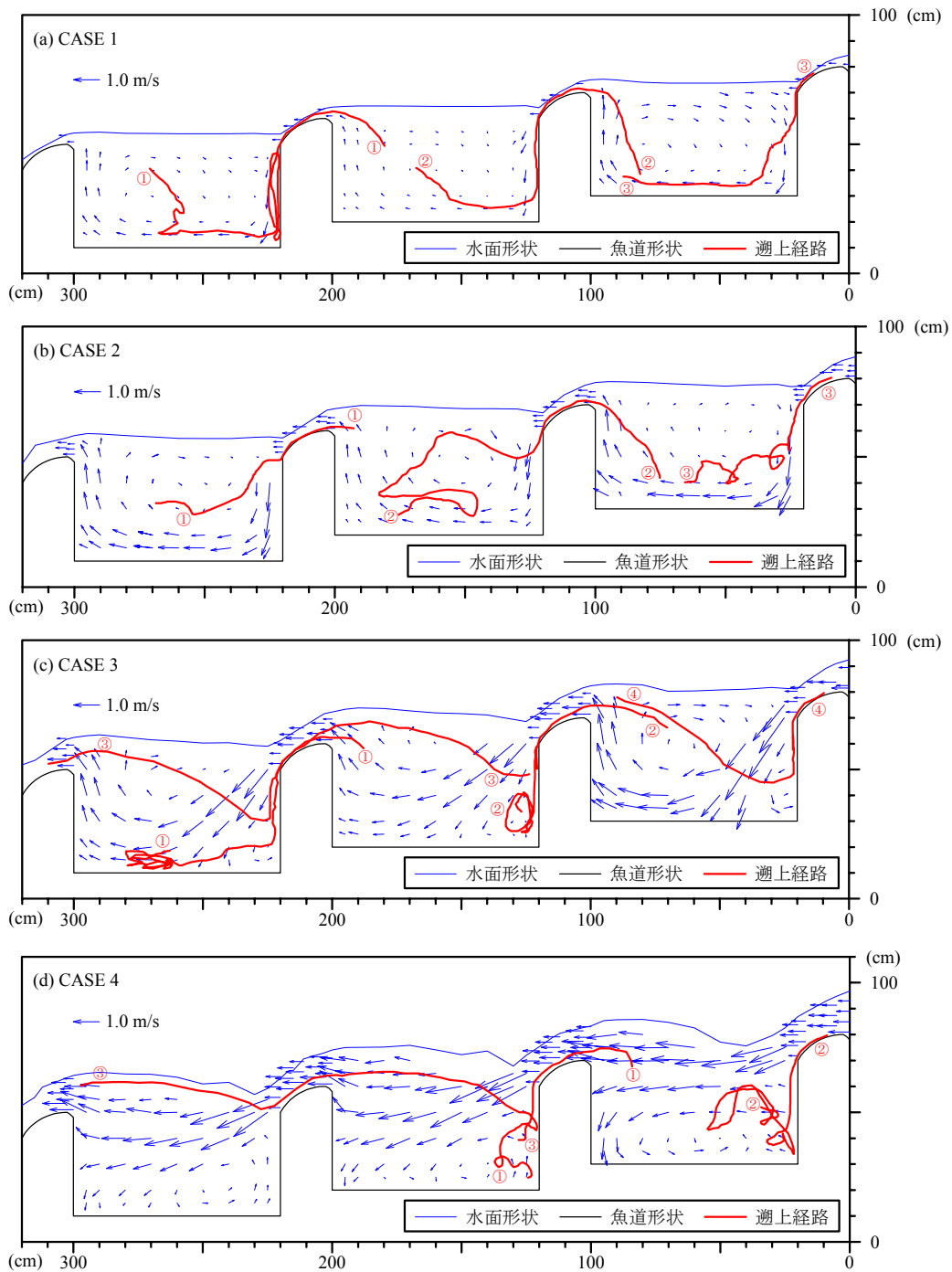


図-5 魚道内流況とウグイの遡上経路

上が明確には捉えられなかった場合も、ほぼ同様の経路であったことは確認している。また、複数尾が連続して遡上する場合も、ほぼ同様の経路であった。

a) CASE 1

魚道内流況(図-5(a))としては、全てのプールにおいて、上流側隔壁からの越流水は上流側隔壁、プール底、下流側隔壁に沿って進み、プールの中央では時計回りの大きな渦が形成された。このような流れは落下流(Plunging Flow)と呼ばれる。上流プールの主流は $0.2 \sim 0.6 \text{ m/s}$ であるのに対し、下流プールで $0.2 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 、中央プールで $0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}$ となった。中央プール以降で上流

プールより主流が遅くなったのは、プールによる減勢効果の影響と考えられる。しかし、中央プールより下流プールの方が減勢されておらず、このメカニズムの解明は今後の課題である。なお、図-5(a)の流速ベクトルの形状から、上流プールに突入する主流の水脈は薄く、隔壁に最も近い計測点よりも隔壁に近いところを通過した可能性が高く、その付近の主流はより速いと考えられる。

ウグイの遡上行動(図-5(a))としては、下流および中央プールでは、流速の比較的小さいプールの中央付近で定位していた個体が、一度プール底付近まで潜り、プール底、上流側隔壁に沿って主流を遡った(①, ②)。ここ

で定位とは、林田ら⁴⁾に倣い、流れ方向に頭部を向けてある特性の場所にとどまることを指す。上流プールでは、プール底付近で定位していた個体が、プール底、上流側隔壁に沿って主流を遡った(③)。なお、主流が最も早い上流プールにおける定位は、他のプールとは異なり、休憩しているのではなく、押し流されないように抵抗している様子であった。また、上流プールでは、遡上に失敗することが他のプールより多かった。

遡上率(図-4)は平均値で80%程度に達しており、実験毎の差も小さかった。これは、各プール内の主流は本研究で使用したウグイの突進速度の目安である0.9~1.2m/s(3. (1))の半分以下であり、ウグイにとって主流を遡ることが容易であったためと考えられる。

なお、上流水路部に到達した個体とそうでない個体に明確な身体的特徴は見られなかった。このことは、以降のCASE 2~4においても同様であった。

b) CASE 2

魚道内流況(図-5(b))としては、CASE 1とほぼ同様であり、全てのプールにおいて落下流となった。各プール内の主流の速さの順も、CASE 1と同様であった。しかし、主流はCASE 1より全体的に速くなり、上流プールで0.6~1.1m/s、下流プールで0.4~1.1m/s、中央プールで0.2~0.9m/sとなった。

ウグイの遡上行動(図-5(b))としては、下流および中央プールでは、流速の比較的小さいプールの中央付近で定位していた個体が、上流側隔壁の天端付近に進み、そこから上流側隔壁に沿って主流を遡った(①, ②)。上流プールでは、流速の比較的小さいプールの中央付近で定位していた個体が、押し流されつつも上流側隔壁付近までほぼ直進し、そこから上流側隔壁に沿って主流を遡った(③)。なお、上流プールでは、CASE 1と同様に、定位の様子が他のプールと異なり、遡上に失敗することが他のプールより多かった。

このようにCASE 2では、CASE 1とほぼ同様の流況ではあるが、プール内の主流はCASE 1より速くなり、突進速度の目安程度となる箇所が生じたため、遡上経路を変えることにより主流を遡る距離を短くしたと考えられる。しかし、遡上率(図-4)は平均値で70%程度とCASE 1より若干低下しており、実験毎の差もより開いた。

c) CASE 3

魚道内流況(図-5(c))としては、全てのプールにおいて落下流となった。しかし、CASE 1および2とは異なり、各プールでは、上流側隔壁からの越流水は上流側隔壁に沿わず、プールに対して斜めに突入してプール底に到達した。この主流の下側では反時計回りの小さな渦が、上側では時計回りの大きな渦が形成された。このような流況は斜め流と呼ばれる¹³⁾。本研究でも、この名称を使用する。主流はCASE 2よりさらに速くなったが、各プール内の主流の速さの順は変わらず、上流プールで0.8~1.7m/s、下流プールで0.6~1.5m/s、中央プールで0.4~

1.4m/sとなった。

ウグイの遡上行動(図-5(c))としては、下流プールでは、プール底付近で定位していた個体が、上流側隔壁付近までほぼ直進し、そこから隔壁に沿って上昇して主流を遡った(①)。同様の経路で遡上する個体は、中央プールでも観測された。中央プールでは、主流の下側の小さな渦が形成される付近で、走流性のため下向きまたは下流向きに定位していた個体が、そこから向きを変えて主流と渦との境界付近を通り、上流側隔壁を越えた(②)。同様の経路で遡上する個体は下流および上流プールでも観測された。しかしながら、この経路では、向きを変えるときに押し流されてしまう場合も少なくなかった。一方、一気に2つのプールを遡上する個体も観測された。具体的には、下流水路部から遡上した勢いを維持して上流側隔壁付近に進み、定位することなく一気に隔壁を越えて中央プールに入り、さらに、その勢いを維持して同様に上流プールに入ろうとした(③)。

なお、全てのプールにおいて、定位は休憩しているのではなく、押し流されないように抵抗している様子であった。特に上流プールでは、押し流されてしまう個体も観測された。押し流されそうになった後に、プールの中央を通して上流側隔壁付近に進んで隔壁を越える個体も、僅かではあるが観測された(④)。

このように、CASE 3では、各プール内の主流が突進速度の目安を大幅に超えたこと、下向きまたは下流向きに定位しなければならない流況となったこと等から、遡上が困難となり、遡上率(図-4)はCASE 2よりさらに低下するとともに、実験毎の差がより開いたと考えられる。

d) CASE 4

魚道内流況(図-5(d))としては、CASE 1~3とは異なり、全てのプールにおいて、上流側隔壁からの越流水がプール底に到達せず下流側隔壁を通過する流れである、表面流(Streaming Flow)となった。各プールの中央では、半時計回りの大きな渦が形成された。主流はCASE 3より速くなったが、プール間の差は小さくなり、上流プールで0.8~1.8m/s、下流および中央プールで0.8~1.6m/sとなった。

ウグイの遡上行動(図-5(d))としては、中央および上流プールでは、上流側隔壁付近における主流の下側で、走流性のため下向きまたは下流向きに定位していた個体が、そこから向きを変えて主流と渦との境界付近を通り、上流側隔壁を越えた(①, ②)。同様の経路で遡上する個体は、下流プールでも観測された。しかしながら、この経路では、向きを変えるときに押し流されてしまう場合も少なくなかった。一方、一気に2つのプールを遡上する個体も観測された。具体的には、下流水路部から遡上した勢いを維持して上流側隔壁付近に進み、定位することなく隔壁を越えて中央プールに入り、さらに、その勢いを維持して同様に上流プールに入ろうとした(③)。

なお、全てのプールにおいて、定位は休憩しているの

ではなく、押し流されないように抵抗している様子であり、押し流されてしまう個体も観測された。

このように、CASE 4ではCASE 3と比較して流況が大きく変化した。遡上経路はほぼ同様であった。一方、遡上率(図-4)は全体的にCASE 3より大きく低下した。従って、流れの形態に関する遡上の困難さはCASE 3と大きく変わらないが、主流がより速くなったため、遡上できない個体がCASE 3より増加したと考えられる。

(3) 遡上に適した流況および遡上行動観測時の注意

階段式魚道では、一般に、表面流状態、および、落下流と表面流の遷移状態は避けるべき流況であるといわれている¹⁴⁾。このことは、階段式魚道ではプール内の減勢効果が期待されていること、また、多くの魚類は走流性を持ち、プール内では水面より底部に集まること^{1)、4)}等が根拠である¹⁴⁾。

一方、本研究で観測したウグイの遡上行動から、落下流状態であってもCASE 3のような斜め流は、表面流状態と同様に避ける方がよいと考えられる。このことは、ウグイに限らず走流性をもつ浮遊魚一般に対して当てはまる可能性は高い。ここで、CASE 2と3の越流水深の差は0.05mである。河川ではこの程度の水位変動は頻繁に生じる。よって、遡上魚を主な対象とする場合には、上流側のプールに横溢流式の余水吐を設ける⁹⁾ことが有効な対策であると考えられる。

また、落下流状態のときは、最上流のプールでは他のプールと比べて主流が速く、ウグイの定位も困難であり、遡上に失敗する場合も他のプールより多かった。このことから、既往の研究のうち、複数あるプールのうち中央の1段を対象とした魚類の遡上行動の観測^{1)、5)}は、一般性の高い評価ではあるが、安全側の評価となってしまう。むしろ、プールが1段しかない実験モデルでの観測⁴⁾が危険側の評価となり、設計等で利用できると考えられる。

5. 結論

本研究では、階段式魚道の実物規模水力模型を用いて、流量を変化させた場合の流況の計測、魚類の遡上行動の観測を、複数のプール内を対象に行った。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 階段式魚道内の流況としては、斜め流を含まない落下流状態が、ウグイの遡上に適している。
- (2) 落下流状態のときは、最上流のプールでは他のプールと比べて主流が速く、ウグイの定位も困難となり、遡上に失敗する場合も他のプールより多かった。
- (3) (2)より、魚類の遡上行動を観測する場合は、複数プールがある場合の最上流のプール、もしくは、プールが1段しかない実験モデルを対象にすれば危険側の評価となり、設計等で利用できると考えられる。

- (4) 今後の課題として、異なる構造諸元の階段式魚道についても、流量変化に伴うプール毎の流況および魚類の遡上行動の違いを調査する必要がある。

謝辞：水力模型の作成にあたっては、農村工学研究所農村技術支援チームの野口克行氏に多大なご協力をいただいた。また、本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「流域圏における水循環・農林水産生態系の自然共生型管理技術の開発」の一部として行った。ここに記して、心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高嶋信博, 中村俊六: 魚道内のアユの挙動に関する実験的研究, 水力講演会論文集, 第28巻, pp.353-358, 1984.
- 2) 和田 清, 東 信行, 中村俊六: デニール式およびステーパーバ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, pp.499-504, 1998.
- 3) 和田 清, 小出水規行, 石川雅朗, 中村俊六: 修正ラリーニア型舟通し魚道の流れ場と稚アユの遡上経路, 水工学論文集, 第43巻, pp.983-988, 1999.
- 4) 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巻, pp.1191-1196, 2000.
- 5) 泉 完, 工藤 明, 東 信行, 佐藤正一: ハイブリッド式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.131-136, 2000.
- 6) ダム水源環境整備センター: 最新 魚道の設計—魚道と関連施設—, 信山社サイテック, 1998.
- 7) 農業土木学会: 農業土木工事図譜 第4集 頭首工編, 農業土木学会, pp.14-41, 1990.
- 8) G. S. Kumar and H. Nago and S. Maeno and T. Hoshina: Hydraulics of ice harbor type fishway, *Proceeding of the International Symposium on Fishway '95 in Gifu*, 79-86, 1995.
- 9) 和田吉弘: 言いたい放題 魚道見聞録, 山海堂, pp.48-77, 2003.
- 10) 柏井条介, 村岡敬子, 田中和浩: 階段式魚道の水利特性, 土木技術資料, 第36巻(11), pp.32-37, 1994.
- 11) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 木内大介, 川良典彰: 階段式魚道におけるプランジングフローとストリーミングフローの発生条件に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.817-822, 2005.
- 12) ダム水源環境整備センター: 魚道の設計, 山海堂, 1991.
- 13) 林田寿文, 本田隆秀, 萱場祐一, 島谷幸宏: 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, 環境システム研究論文集, 第28巻, pp.333-338, 2000.
- 14) 高須修二, 箱石憲昭, 村岡敬子, 田中和浩, 尾寄佳史: 階段式魚道の水利特性に関する研究, 水工学論文集, 第38巻, pp.351-356, 1994.