

# 勾配1/5の階段式魚道における 流況とウグイの遊泳行動

FLOW STRUCTURE AND SWIMMING BEHAVIOR OF *LEUCISCUS*  
*HAKONENSIS* AT POOL-AND-WEIR TYPE FISHWAY WITH SLOPE 1/5

浪平 篤<sup>1</sup>・後藤真宏<sup>2</sup>・小林宏康<sup>3</sup>

Atsushi NAMIHARA, Masahiro GOTO and Hiroyasu KOBAYASHI

- <sup>1</sup>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)  
<sup>2</sup>正会員 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)  
<sup>3</sup> 農博 農村工学研究所 企画管理部防災研究調整役 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

There is the case to have to make the slope of the fishway steeper than the standard range, according to the geographical features condition. In this research, measurement of flow structure and observation of swimming behavior of *Leuciscus hakonensis* at the hydraulic model of the pool and weir type fishway with slope 1/5 were conducted. Main results are shown as follows; 1) Ascending rate of this species in TYPE C which has short pools in flowing direction is higher than in TYPE B which has big steps between each pools when the overflow depth equals 5~10 cm, ascending rate of this species over 9~10 cm in TYPE B is higher than in TYPE C when the overflow depth equals 15~20 cm. 2) The difference of flow structure doesn't necessarily greatly influence ascending rate of this species. 3) About this species, it is necessary to select TYPE B or C corresponding to the assumed range of the overflow depth.

**Key Words :** Pool-and-weir type fishway with slope 1/5, flow structure, *Leuciscus hakonensis*, swimming behavior

## 1. 緒論

階段式魚道は、我が国の農業用取水堰における魚道として採用数が最も多く<sup>1)</sup>、設計方法も最も纏められている<sup>2)</sup>。本型式では勾配は1/20~1/10が適切といわれているが<sup>2)</sup>、地形条件によっては1/10より急勾配にせざるを得ない場合も存在する。このような勾配に適した魚道はこれまでに開発されておらず、階段式等の既存の型式で対応せざるを得ない。

さて、前述の階段式魚道における適切な勾配の評価は、遡上実験の結果<sup>3)</sup>に基づいている。この実験では、近年重視されつつある魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係<sup>例えば4)~8)</sup>は観測されておらず、1/10より急勾配にすることで魚類の遊泳行動がどのような影響を受けるかは未解明である。階段式を急勾配にする場合には、標準的な勾配に対し、①プール間の落差を大きくする方法と、②プール長さを短くする方法があり、それぞれの方法における魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係の解明が、本型式で急勾配に対応する際に必要になると考えられる。

そこで本研究では、実物規模の水理模型実験により、前述①と②の方法によって急勾配にした階段式魚道における流況およびウグイの遊泳行動を調査する。そして、急勾配にした場合の問題点とその対策について検討する。

## 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のプール数N、プール深さH、プール間落差 $\Delta H$ 、隔壁厚さD、プール長さLについては、既報<sup>8)</sup>で対象とした標準的な勾配1/10のTYPE Aをもとに、 $\Delta H$ を2倍にして急勾配1/5としたTYPE B、 $(L+D)$ を0.5倍にして急勾配1/5としたTYPE Cを設定した(表-1)。隔壁天端は、全てのタイプで、越流水が剥離しにくく、他の形状と比べてアユの遡上率も高い<sup>9)</sup>円弧形状<sup>10)</sup>である。

模型では、プール部分の側壁をアクリル窓とし、N個のプール全てを観測できるようにした。これは、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

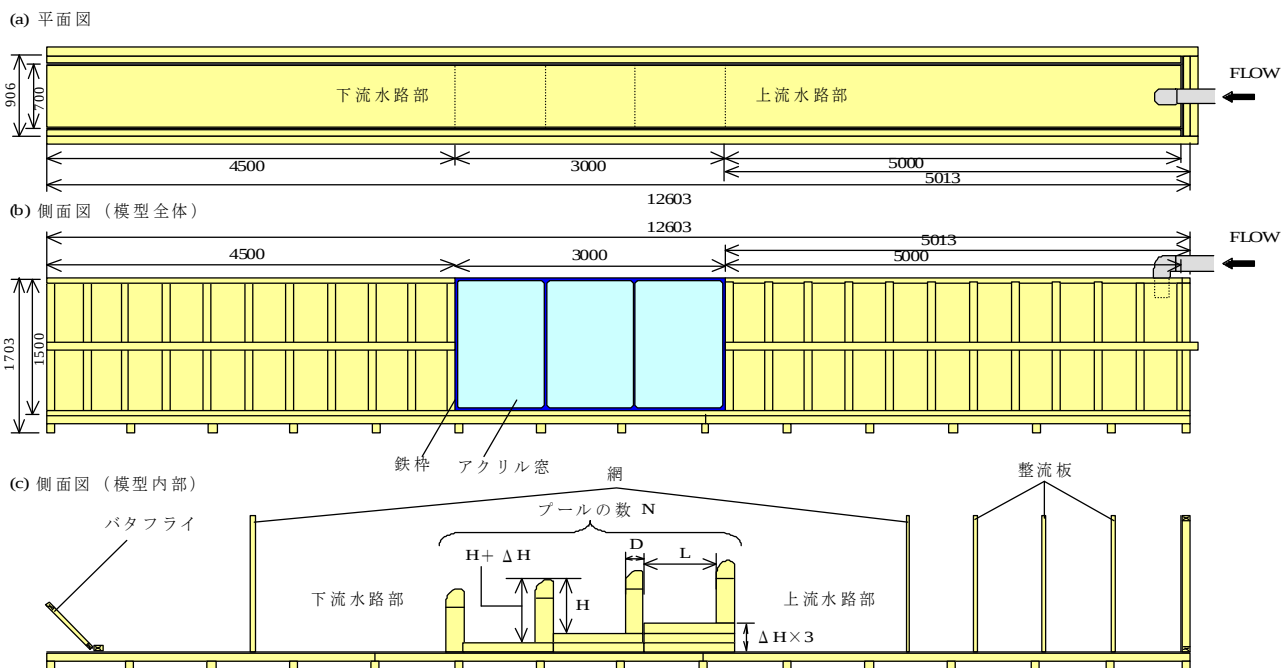


図-1 水理模型の概要(単位: mm)

降のプールで流況がほぼ一定とみなせる<sup>11)</sup>ことから、上流から1~3つ目までを含む複数のプールにおいて遊泳行動を観測すべきと考えられるためである。

なお、魚道内の横断方向における遊泳行動の観測は気泡や光の反射の影響等で困難なため、林田らの実験<sup>5)</sup>やTYPE Aを対象とした既報<sup>9)</sup>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た。そして、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した。

## (2) 実験条件

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。

## (3) 計測方法

流速分布は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)および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、水面形状は0.1mm読みポイントゲージを用いて、ともに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<sup>12)</sup>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。計測点の位置、間隔、サンプリング方法等については、既報<sup>9)</sup>を参照されたい。

## 3. ウグイの遡上行動の観測方法

### (1) 対象魚

対象魚は、既報<sup>9)</sup>同様、ウグイ(*Leuciscus hakonensis*)とした。実験に使用したウグイの体長および体重を図-2に

表-1 水理模型の諸元(単位: m)

| タイプ    | 勾配   | N | H   | ΔH  | D   | L   |
|--------|------|---|-----|-----|-----|-----|
| TYPE A | 1/10 | 3 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.8 |
| TYPE B | 1/5  | 3 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.8 |
| TYPE C | 1/5  | 6 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |

※) TYPE Aについては既報<sup>9)</sup>から引用した

表-2 実験条件

| ケース    | 越流水深(m/s) | 単位幅流量(m <sup>2</sup> /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                    |

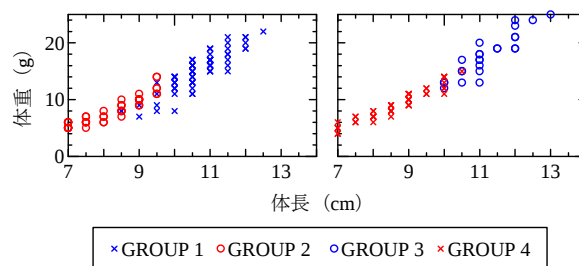


図-2 実験に使用したウグイの体長と体重

示す。体長と体重の測定は、実験期間(8月上旬~11月上旬)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。

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<sup>13)</sup>。これに基づく、図-2より、本研究で使用したウグイの突進速度の目安は

GROUP 1および3で0.95～1.25m/s程度、GROUP 2および4で0.70～1.00m/s程度と考えられる。

## (2) 実験時のタイムスケジュールおよび照度設定

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<sup>2)</sup>を参考に、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(上流水路部に到達した尾数÷全投入尾数)の測定は、翌日の朝に行った。この間の屋内の照度は図-3のように設定した。実験時のタイムスケジュールおよび照度設定の詳細については、既報<sup>8)</sup>を参照されたい。

## 4. 実験結果および考察

### (1) 実験期間と水温

実験は8月上旬～11月上旬に行った。各タイプ(表-1)における各ケース(表-2)の実験回数と使用したウグイの総尾数を表-3に示す。実験期間中の水温は17.0～28.5℃であったが、同一タイプにおける同一ケースで水温の違いによる遡上率および遡上行動の変化はみられなかった。

### (2) TYPE Bにおける流況と遊泳行動

TYPE Bにおけるウグイの遡上率を図-4(a)、魚道内流況とウグイの遡上経路を図-5に示す。図-5の流速ベクトルは、既報<sup>8)</sup>同様、隔壁の上側では水平方向成分のみの表示である。ウグイの遡上経路は、各プールから上流側のプールもしくは上流水路部への移動が明確に捉えられた場合のものである。気泡の影響により明確に捉えられなかった場合や、複数尾が連続して遡上する場合、さらにはグループ(図-2、表-3)が異なっても、ほぼ同様の経路であった。なお、図-5では各プールの下側にプールの名称を、上側にそのプールの流況形態を記載した。このときの流況形態の分類方法は、林田ら<sup>14)</sup>に従った。

プール内の流況(図-5)は、越流水深(表-2)の増加に伴い、落下流から斜め流、プールによってはさらに表面流へと変化した。このとき、CASE 2～4ではプール毎に流況形態が異なり、プール2は他のプールより斜め流や表面流が発生しやすかった。また、TYPE A<sup>8)</sup>と同様、落下流および斜め流の場合の主流の速度は、3つのプールの中でプール1が最も速く、プール2が最も遅くなった。

ウグイの遡上経路(図-5)としては、プール内が落下流の場合は、主流に沿って遡上するパターンが多かった。CASE 1～2で斜め流となったのはCASE 2のプール2のみだが、このケースでは主流に沿うように遡上した。一方、CASE 3～4で斜め流および表面流の場合は、主流の下側に生じる小さな渦の周辺で走流性のため下向きまたは下流向きに定位し、そこから向きを変えて遡上するパターンが多かった。ただし、この経路では、向きを変えられ

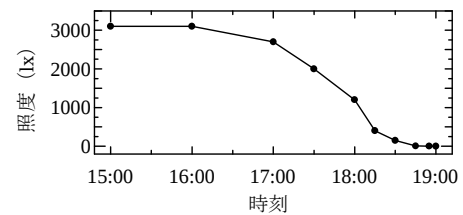


図-3 実験時の照度

表-3 実験回数と使用したウグイの総尾数

| タイプ    | グループ    | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 | CASE 4 |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| TYPE B | GROUP 1 | 5 208  | 6 211  | 5 184  | 4 182  |
|        | GROUP 2 | 3 160  | 3 168  | 3 143  | 3 129  |
| TYPE C | GROUP 3 | 4 219  | 3 167  | 3 159  | 2 133  |
|        | GROUP 4 | 4 229  | 4 218  | 3 131  | 2 102  |

※) 各ケースの左側は実験回数、右側はウグイの総尾数

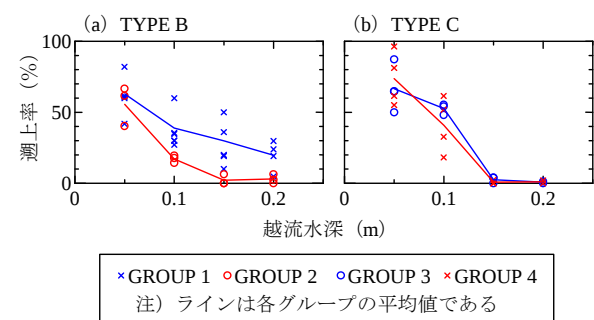


図-4 遡上率の観測結果

ず下流側のプールへ押し流されることも少なくなかった。斜め流となったプールにおける遡上経路がCASE 1～2とCASE 3～4で異なったのは、前者ではプール内の主流の最大速度が0.5m/s程度、後者では0.9～2.1m/s程度で、前者のみGROUP 1、2(図-2、表-3)の突進速度の目安(3. (1))よりも小さいことが原因と考えられる。

ウグイの遡上率(図-4(a))は、越流水深(表-2)の増加とともに低下した。グループ(図-2、表-3)同士を比較すると、CASE 1では大きな違いがなかったが、CASE 2～4ではGROUP 2はGROUP 1より20～30%程度低くなった。これは、CASE 1ではプール内の主流の最大速度が0.7m/s程度、CASE 2～4では1.5～2.3m/s程度で、後者のみGROUP 2の突進速度の目安(3. (1))を大幅に超えたことが原因と考えられる。

### (3) TYPE Cにおける流況と遊泳行動

TYPE Cにおけるウグイの遡上率を図-4(b)、魚道内流況とウグイの遡上経路を図-6に示す。各図の詳細はTYPE Bに関するものと同様である。

プール内の流況(図-6)は、越流水深の増加に伴い、落下流から表面流へと変化した。しかし、TYPE Bとは異なり、流況形態は全てのプールで同じであった。落下流の場合の主流の速度は、6つのプールの中でプール1が最も速く、プール2が最も遅くなり、プール3～6では大き

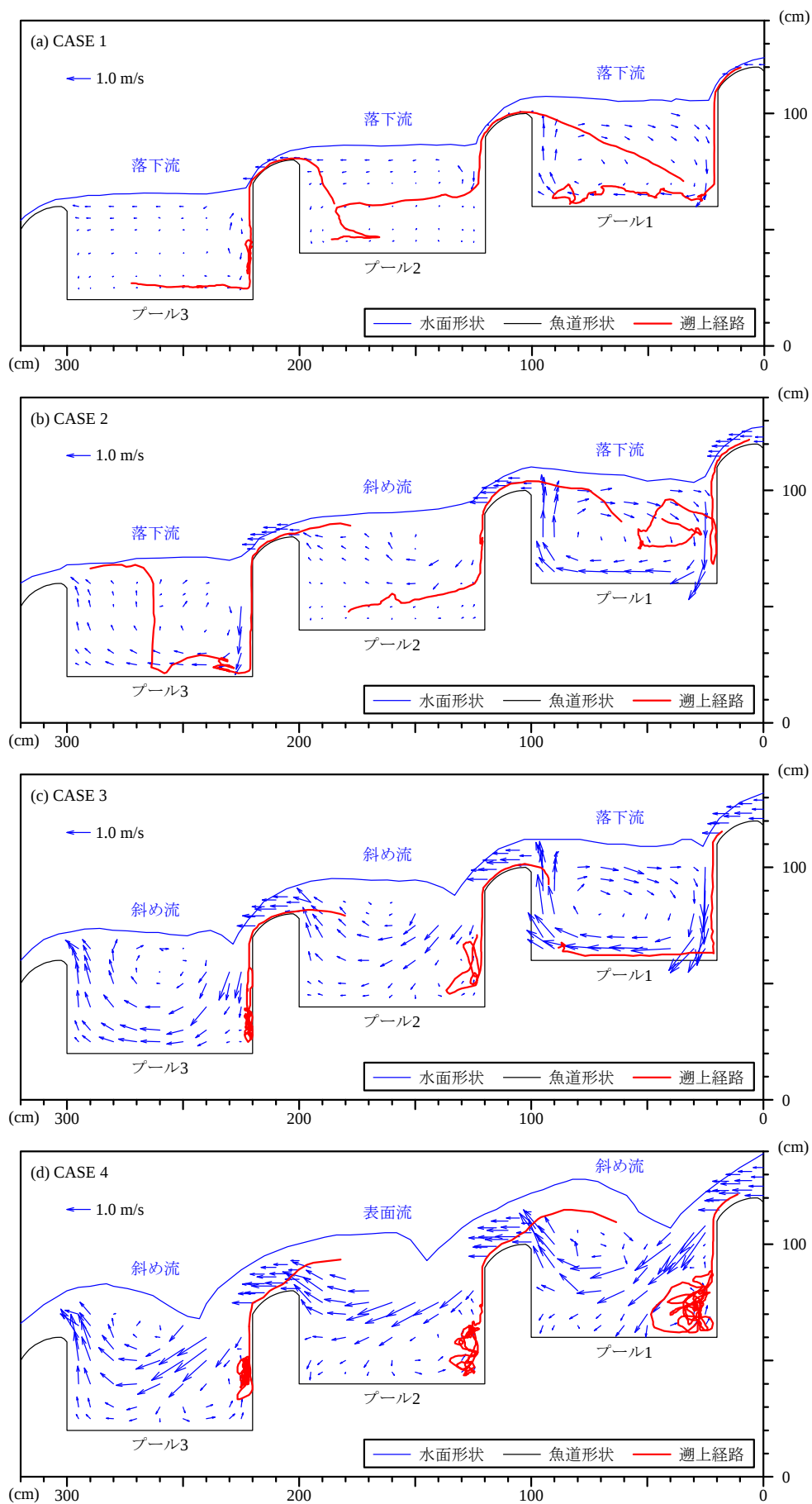


図-5 TYPE Bにおける魚道内流況とウグイの遡上経路

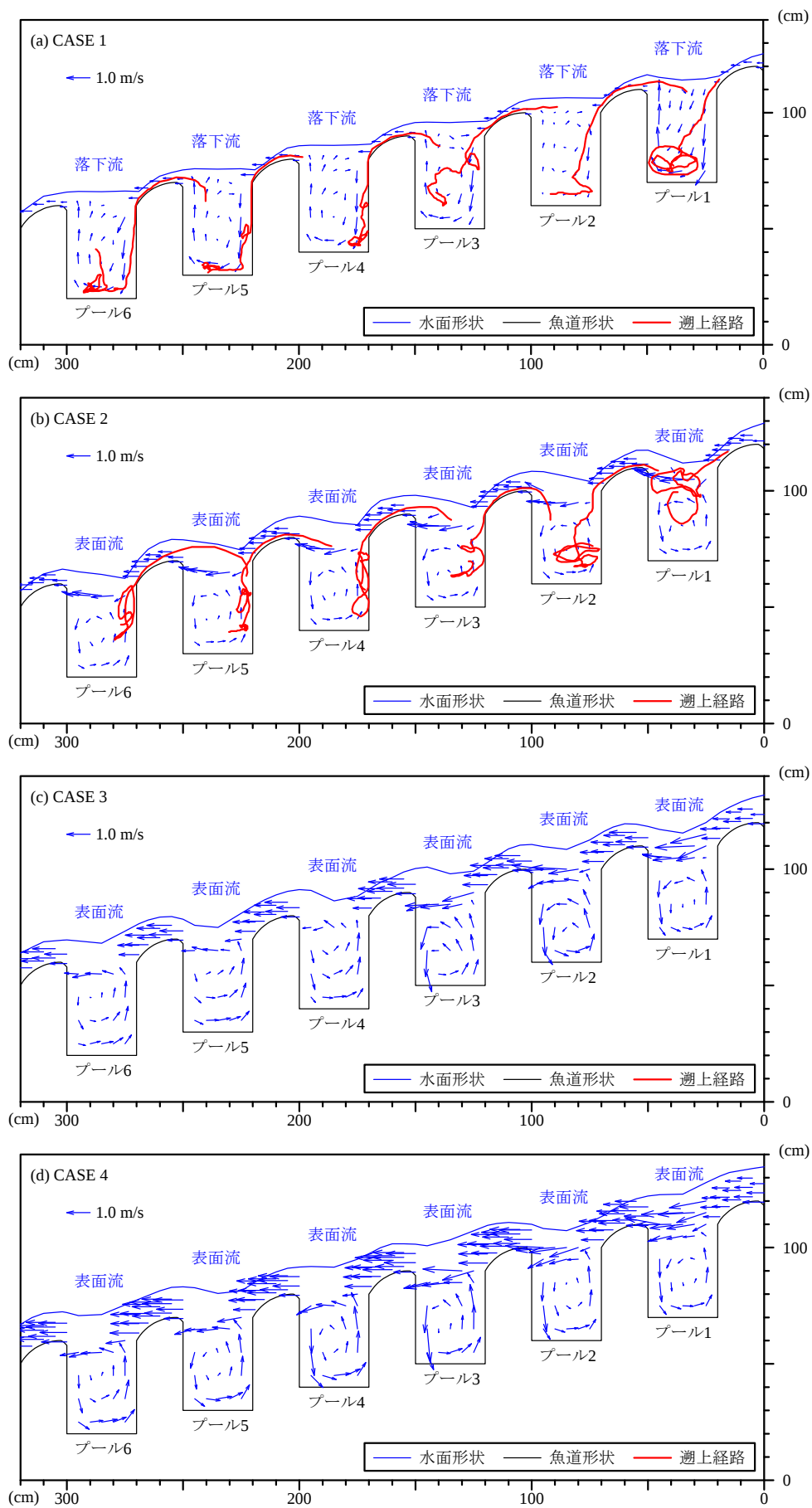


図-6 TYPE Cにおける魚道内流況とウグイの遡上経路

な違いは見られなかった。このことは、TYPE A<sup>®</sup>、TYPE B(4. (2))と合致している。なお、表面流となったCASE 2～4のうちCASE 3～4では、図-6からは判読できないが、下流側のプールほど水しぶきが多く、魚道内で流水は減勢されておらず、流下に伴って加速されているように観察された。

ウグイの遡上経路(図-6)としては、プール内が落下流のCASE 1では、主流に沿って遡上するパターンが多かった。表面流のCASE 2では、主流の下側に生じる小さな渦の周辺で走流性のため下向きまたは下流向きに定位置し、そこから向きを変えて遡上するパターンが多かった。しかし、TYPE Bで同様の遡上経路をとった場合とは異なり、向きを変えられず下流側のプールへ押し流されてしまうことは少なかった。これは、TYPE CのCASE 2ではプール内の主流の最大速度が1.0～1.7m/s程度であり、TYPE Bにおける前述の場合よりも小さかったためと考えられる。表面流のCASE 3～4では、遡上できた個体数が非常に少なく、遡上経路を確認できなかった。

ウグイの遡上率(図-4(b))は、越流水深の増加とともに低下したが、TYPE Bとは異なり、グループ(図-2、表-3)間で大きな差はみられなかった。前述のように、CASE 3～4ではGROUP 3、4ともに遡上率はほぼゼロとなった。

#### (4) TYPE BとTYPE Cの比較

TYPE BとTYPE Cの観測結果を比較すると、越流水深が0.05～0.10mのときは、TYPE CではTYPE Bよりも $\Delta H$ が小さいために魚道内の流速も小さく、ウグイの遡上率は高くなった。一方、越流水深が0.10～0.20mのときは、TYPE Cでは流水の減勢効果はほとんどないため遡上できた個体は極めて少なく、体長9～10cm以上の個体であればTYPE Bの方がウグイの遡上率が高くなった。また、これらの遡上率の違いは、魚道内の流況形態(図-5、6)のみによって支配されているわけではなかった。

## 5. 結論

本研究では、階段式魚道のうち、①プール間の落差を大きくして急勾配にするタイプと、②プール長を短くして急勾配にするタイプを対象に、実物規模水理模型における魚道内の流況およびウグイの遡上行動を観測した。その結果、越流水深が0.05～0.10mのときは、②の方がウグイの遡上率は高く、越流水深が0.15～0.20mのときは、体長9～10cm以上の個体であれば①の方がウグイの遡上率が高いことが明らかとなった。また、これらの遡上率の違いは、魚道内の流況形態のみによって支配されているわけではないことが確認された。以上のことから、階段式魚道を急勾配にせざるを得ない場合、ウグイについては、想定される越流水深の範囲に応じて、前述①、

②いずれかのタイプを採用すればよいと考えられる。今後は、他の魚種についても同様であるか確認し、階段式魚道の設計技術の向上につなげたい。

**謝辞：**水理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(平成14～18年度)」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) 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，1990。
- 2) ダム水源地環境整備センター：最新 魚道の設計―魚道と関連施設―，信山社サイテック，1998。
- 3) 原 義文，和田吉弘，宮園正敏：アユを用いた急勾配な階段式魚道に関する実験的検討，*Proceeding of the International Symposium on Fishway '95 in Gifu*，pp.169-173，1995。
- 4) 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，水理講演会論文集，第28巻，pp.353-358，1984。
- 5) 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。
- 6) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，高橋康行：片側切り欠き付き階段式魚道におけるアスペクト比および流量が魚の遡上特性に及ぼす影響，応用力学論文集，Vol.9，pp.865-873，2006。
- 7) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，木内大介，高橋康行，飯國洋平：階段式魚道における切り欠き位置が魚の遡上率に及ぼす影響，水工学論文集，第51巻，pp.1279-1284，2007。
- 8) 浪平篤，後藤眞宏，小林宏康：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，水工学論文集，第51巻，pp.1291-1296，2000。
- 9) 和田吉弘：言いたい放題 魚道見聞録，山海堂，2003。
- 10) 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，第36巻(11)，pp.32-37，1994。
- 11) 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*，pp.79-86，1995。
- 12) 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。
- 13) ダム水源地環境整備センター：魚道の設計，山海堂，1991。
- 14) 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。