

◆ 河川生態特集 ◆

階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動

林田寿文* 本田隆秀** 萱場祐一*** 島谷幸宏****

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

2.1 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。隔壁間落差は10cmで固定した。プール延長(L)、水深(H)を変化させることができる施設である。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。

2.2 実験内容

2.2.1 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。

魚道勾配は本検討ケースの場合、隔壁間落差が固定されているためプール延長により決定される。したがって魚道勾配はプール延長50cmでは1/7、100cmでは1/12、200cmでは1/22となる。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。

The Swimming Behavior of *Leuciscus Hakonensis* in Fishways

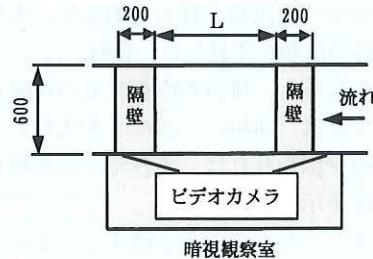


図-1 実験施設平面図 (単位: mm)

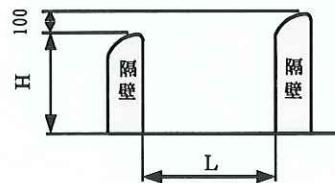


図-2 プール部断面図 (単位: mm)

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 50 30	1/7
ケース2	20 100 30	1/12
ケース3	20 200 30	1/22
ケース4	50 100 60	1/12
ケース5	50 200 60	1/22
ケース6	80 50 90	1/7
ケース7	80 100 90	1/12
ケース8	80 200 90	1/22

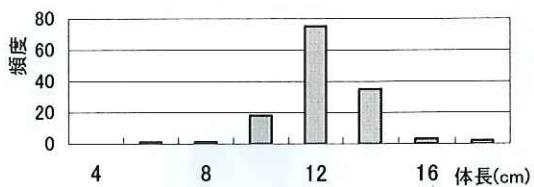


図-3 ウグイの体長ヒストグラム

2.2.2 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²⁾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。また、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、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。

2.2.3 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より、考察した。

3. 実験結果(図-4)

3.1 ケース1のプール内の流況及び、遊泳特性

3.1.1 流況

激しい流れの循環流がプール全体に形成され、低流速域は見られなかった。

3.1.2 遊泳行動

ウグイはプール内に入れるとすぐに、激しい循環流に取り込まれ、自由遊泳や定位は出来ない状態に陥った。そして、プール内に入れた直後、すべての個体が下流または上流へ逃避、流下した。数回、ウグイをプール内に入れる事を試みたが、すべてが同じ結果となり、遊泳行動の把握は行えなかった。

3.2 ケース2のプール内の流況及び、遊泳特性

3.2.1 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わずかに見られる程度であった。

3.2.2 遊泳行動

Aで群をなし定位した。ウグイの定位できる空間に比べ、プールに入れた個体数が多く、ここから押し出される様に遡上、流下する行動が見られた。

遡上数は19回であったが、流下する個体も見ら

れた。遡上は以下の3つの経路により遡上した。

経路1 底層Bに押し出された個体は底面に腹を付けるようにCへ移動した。そこから頭部を流れに向けることができた個体は、遡上行動を起こしたが数は多くなかった。その他の個体は底面からの上昇流で頭部が少し上を向き、遊泳速度が低下しどんどんの個体が遡上に失敗した。

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。経路1と比較すると、遡上試みた個体は下降流のFに進入し易く、約半数が遡上し成功したが、残りは流れに押され遡上に失敗しAに戻された。

経路3 表層～中層Gで下流を向いて、上流側に後退していった個体は、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。しかし、流れに押戻されて遡上に失敗し、流下する個体がほとんどであった。

3.3 ケース3のプール内の流況及び、遊泳特性

3.3.1 流況

水脈は上流隔壁、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。

3.3.2 遊泳行動

Aで群をなし自由に遊泳した。すべての経路で、下降流に容易に進入でき、群れで遡上する個体も見られた。遡上回数は64回と一番多い結果となった。

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ながらも、遡上行動を起こした内、半数以上が遡上に成功した。

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。そこから、遡上を試みた個体は、流れに頭部を向け容易に下降流に進入し、ほとんどが遡上に成功した。経路1よりも遡上成功数は多かった。

経路3 表層～中層Gで下流を向いて、上流側に後退していった個体は、Hで下降流に尾部を押されながらも、頭部を流れに向ける事ができた個体は遡上を試みた。しかし、半数程度は流れに押戻され遡上に失敗するケースがあった。

3.4 ケース4のプール内の流況及び、遊泳特性

3.4.1 流況

プール全体に循環流が形成され、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、プール中央に流向の不均一な低流速域が見られた。

3.4.2 遊泳行動

A 及び B で群れをなし定位した。遡上行動はプール中央の低流速域を利用せず、経路 1、2 での遡上行動はほとんど同じ結果となつた。共に遡上回数は少なく、全体でも遡上回数は 2 回であった。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、上流隔壁下端部の流向の変化に対応できず、すべての個体が遡上に失敗した。

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。経路 1 と同じく下降流に頭部を向けようとするが、流向変化に対応できず、ほとんどが遡上に失敗した。

経路 3 A から中層 E～表層 F で下流を向いて、上流側に後退していった個体は G で越流水脈に尾部を押された個体は、頭部を流れに向けることができずにはほとんどが遡上に失敗した。

3.5 ケース 5 のプール内の流況 及び、遊泳特性

3.5.1 流況

上流隔壁と底面に沿った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。プール中央部にはかなり広い空間で流向の不均一低流速域が見られた。

3.5.2 遊泳行動

A で群れをなし定位した。遡上時にはプール中央部を利用せず、底面付近を利用する。以下の 2 つの経路をたどり遡上を試みたが、遡上回数は 5 回であった。

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 まで移動した。そこで、ほとんどの個体が上流隔壁

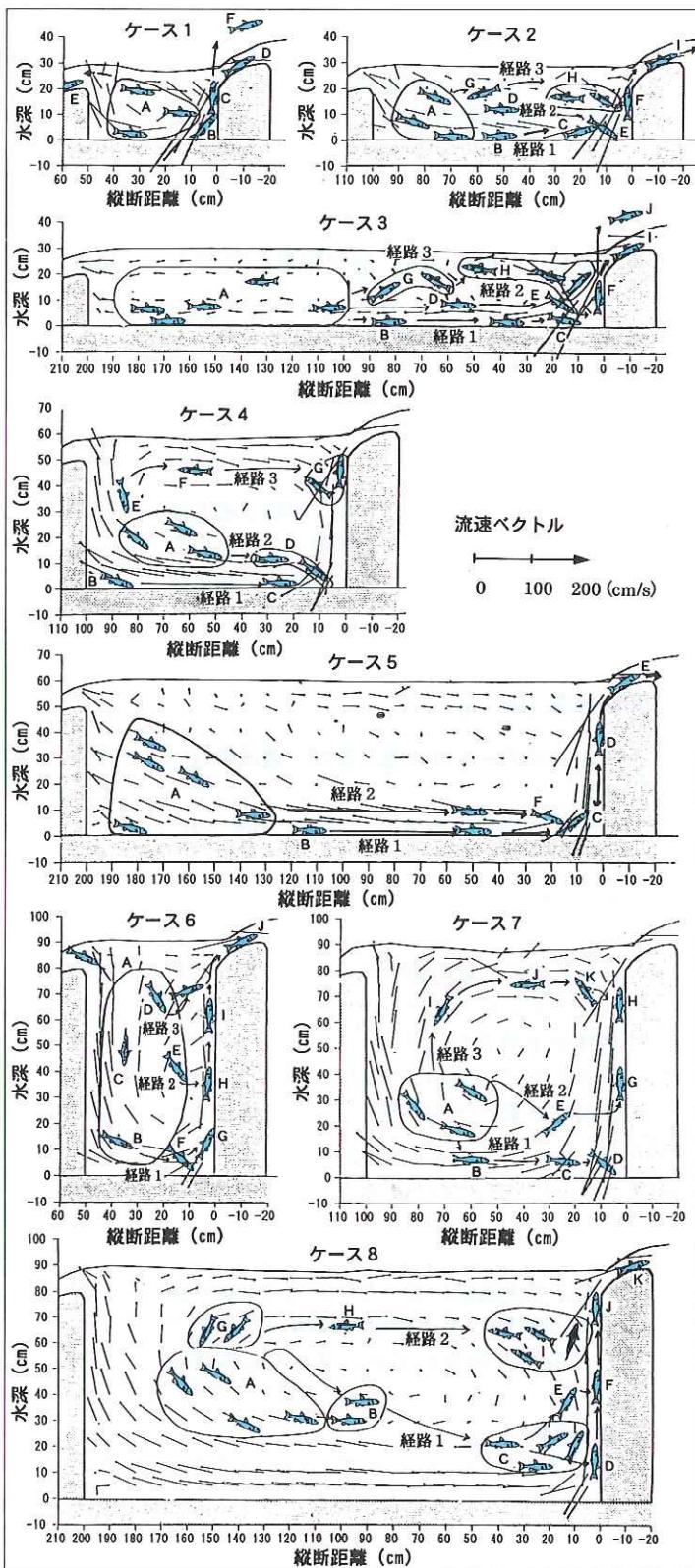


図-4 プール内の流況および、遊泳特性

下端部の流向の変化に対応できず、遊泳速度が低下し A まで流下し遡上に失敗した。

経路 2 底面よりも 10~20cm 程度上層を A から F へ速い速度で移動した。ほとんどの個体が経

路 1 同様遡上に失敗したが、頭部を流れに向けることができた個体は隔壁に沿って D、E と遡上に成功した。

3.6 ケース 6 のプール内の流況及び、遊泳特性

3.6.1 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。強い下降流が隔壁沿いに生じたが、プール全体でみると上昇流が占める空間が大きい。

3.6.2 遊泳行動

B、C で群れをなし鉛直下向きに定位する個体が多かった。A の上向きの循環流によって B から C、D、E と流下した後、再び B、C に戻り定位する状態を繰り返した。遡上面回数は 17 回であり、経路 3 の遡上面回数が他の経路に比べ若干多かった。以下の 3 つの経路から遡上を試みた。

経路 1 B 付近に定位していた個体が、隔壁沿いの下降流に反応して遡上行動を起こした。頭部を流れに向けることができた個体は隔壁沿いに遡上を試みるが、約半数の個体が速い流れに押し戻され遡上に失敗した。

経路 2 E 付近に定位していた個体が下降流に反応して遡上行動を起こした。頭部を流れに向けることができた個体の内、約半数は途中で遊泳速度が低下し、循環流に取り込まれ失敗した。

経路 3 D 付近の個体が下降流に反応し遡上行動を起こした。その内、頭部を流れに向けることができた個体は隔壁沿いに遡上を試みた。約半数の個体が速い流れに押し戻され遡上に失敗した。

3.7 ケース 7 のプール内の流況及び、遊泳特性

3.7.1 流況

プール全体に円形に近い循環流が形成された。循環流はどの位置においても流速が大きかった。流向が不均一な低流速域は、プール中央にわずかに見られる程度であった。

3.7.2 遊泳行動

A で群れをなし定位した。遡上はプール中央部を利用せず、以下 3 つの経路から遡上を試みた。遡上面回数は 2 回と少なかった。

経路 1 A から底面中央下手 B に移動し、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流れに押し戻された。

その中で D に達した個体も速い下降流に頭部を向けることができず、すべてが遡上に失敗した。

経路 2 A から循環流内 E へ移動し、隔壁沿いの下降流に遭遇した個体は、頭部を流れに向けることができず遡上に失敗した。G 付近に進入できても H までの間で、ほとんどの個体が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 に定位していた個体がゆっくりと後退し、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ほとんどが流れに姿勢を崩し遡上に失敗した。

3.8 ケース 8 のプール内の流況及び、遊泳特性

3.8.1 流況

プール全体に循環流が形成され、プール中央部の流向が不均一で低流速域の占める領域が大きかった。

3.8.2 遊泳行動

循環流の上側で流速が遅く、流向が一定の A 付近に定位した。定位位置は中層にあるため底面付近からの遡上は行わなかった。遡上面回数は経路 1 の方が多く 14 回であった。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 を通過し上流隔壁沿いの下降流に頭部を向けようとする個体は、ほとんどの個体が途中で速い流れに押し戻され遡上に失敗した。C でいったんとどまり、その後、頭部を流れ方向に向けようとする個体は約半数が E から落下流の F に入ることができた個体は遡上を試みた。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た。

経路 2 A から下流を向いて頭部を下手方向にし表層 G、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いた個体は遡上を試みた。約半数は速い流れに押し戻され、遡上に失敗した。

3.9 各ケースの遡上面回数

各ケースの遡上面回数を図-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、遡上面回数は測定不能とした。

4. 考察

定位空間、遡上面には特徴があり、遡上面経路上で遡上面失敗する場合にも典型的なパターンが見られた。

4.1 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 は定位空間内の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。

ただし、循環流の規模が大きい場合は循環流の内側に低流速で流速ベクトルの不安定な空間が分布し、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。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 2～4BLcm/s(BL は体長(cm))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。

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になり照度が低下する時まで利用されない。言いかえれば、表層付近は、明るい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。

4.2 遡上面経路の特徴

プール内で特定の経路が遡上面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面する。

経路 2 底面流よりも流速が小さい、底層～中層付近を移動し隔壁沿いの下降流に入り遡上面する。ただし、流向が不均一な空間は避ける。

経路 3 表面付近の上流隔壁に向かう流れに下流に頭を向けて後退し、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面する。

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、遡上面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に頭を流れに向けることができず遡上面できない。^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

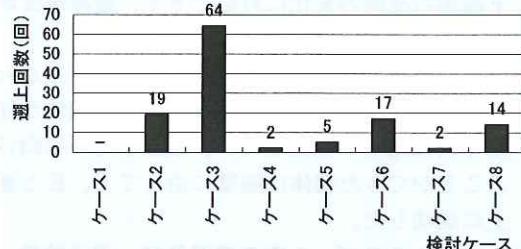


図-5 ケース別遡上面回数

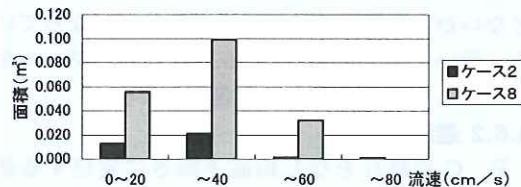


図-6 定位空間内流速別面積ヒストグラム

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面経路別に流況と遡上面に失敗するケースとの関連を見ると、経路 1 は遡上面経路が長く上流隔壁下端での流向の変化が大きい。

一方、経路 2 は遡上面経路が比較的短く、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面しやすい経路と考えられる。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通常の遡上面経路としては良くないが、遡上面経路が短いという点では有利である。

次にこの点と遡上面回数との関連を検討する。(イ) 遡上面回数の最も多いケース 3、(ロ) 次に多いケース 2、8、(ハ) 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(イ)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。(ロ)のケースではケース 8 が中層からの遡上面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。(ハ)のケースでは遡上面に最も不利と考えられる底層の経路に遡上面が集中している。このように、各実験ケースの遡上面経路と遡上面回数にはある程度関連性があると考えられる。

4.3 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れされ定位・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 の場合に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

本研究は遊泳力の比較的強いウグイを用い、魚道の中でも最も使用実績の多い階段式魚道の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 の上層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) プール内に形成される、流速のかなり遅い空間の中でも流速ベクトルの不安定な空間はほとんど定位空間として利用されない。
- (6) 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。
- (7) 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。
- (8) 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。

参考文献

- 1) 和田吉弘：長良川のアユづくり，治水社，1993.
- 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.
- 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設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 卷，1999.
- 6) 和田清ら：デニール式およびスティーピーパ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 卷，1998.
- 7) Rajaratnam. N, katopodis. C, and Mainali.A : Plunging and streaming flows 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 卷，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.
- 10) 塚本勝巳、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.

林田寿文*



建設省土木研究所環境部
河川環境研究室研究員
Kazufumi HAYASHIDA

本田隆秀**



同 河川環境研究室
交流研究員
Takahide HONDA

萱場祐一***



同 河川環境研究室
主任研究員
Yukihiro KAWAYAMA

島谷幸宏****



同 河川環境研究室長、工博
Dr.Yukihiro SHIMATANI