

◆ 生態ネットワーク特集 ◆

階段式魚道における3つの流況に対するウグイの遊泳行動

林田寿文* 本田隆秀** 萱場祐一*** 島谷幸宏****

1. はじめに

流域や河川の開発に伴い、河川横断工作物による魚類の生息水域環境の分断化により、生態系ネットワークが分断、縮小し、生態系の健全な機能が低下していると考えられる。そのため、生態系ネットワークの保全・復元が強く求められている。その保全・復元手法として、日本の河川では明治中期頃^{1),2)}から魚道が設置されている。現在に至るまで、様々なタイプの魚道が導入・設置されており、中でも階段式魚道の使用実績が多いのが現状である。

その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 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も大きくならないことなどが挙げられている³⁾⁻⁷⁾。

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⁸⁾で確認されているが、魚類の遊泳行動と流況に関する付けて十分に研究されている訳ではない。

また、プール規模や隔壁頂部の形状、流量変化等の要因により、表面流、落下流のいずれかが魚道内に形成され^{5),6),7),9)}(図-1)、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、どのような要因により落下流が形成されるのか、魚類の遡上にとって何故、落下流が好ましいのか、といった基礎研究^{10),11),12)}は十分ではない。



図-1 流れの状態

Swimming Behavior of Japanese Daces Based on Three Flow Patterns in the Pool-and-Weir Fishways

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隔壁頂部形状の変化により階段式魚道で発生するプール内流況とウグイの遊泳行動の関係を把握し考察する。

2. 実験施設

実験施設の概要を図-2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できるものである。隔壁間落差は10cmで固定とした。流速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。

3. 隔壁形状、プール規模、越流水深の変化による流況特性に関する実験

3.1 実験内容

この実験は2つの実験シリーズより構成される。

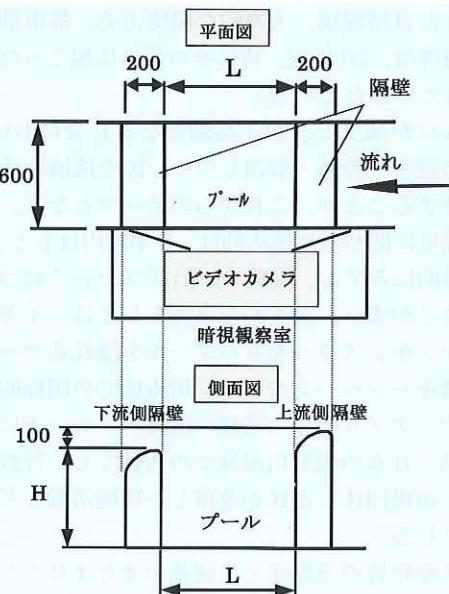


図-2 実験施設図 (単位:mm)

①実験シリーズ1：越流水深、プール規模の変化

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、プール規模を変化

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-3、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3種類である。

尚、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),11)}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。

越流水深については、柏井ほか⁵⁾が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⁸⁾で比較的遡上率の良好な水深でもある。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。

3.2 流況特性に関する実験結果及び考察

3.2.1 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-4～6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-4 以下、落下流とする）

隔壁頂部からの水脈が上流隔壁、プール底面、下流隔壁に沿って流下した。プール全体に時計回りの循環流が形成され、中央部には流向が不均一で低流速域の空間が形成された。

流況パターンII（図-5 以下、表面流とする）

上流隔壁からの水脈はプール表層を水平に流下し、下流隔壁沿に降下後、プール底面を上流隔壁側へ流れた。プール底面中央で減勢し、プール上手の中層から底層には流れの遅い空間が形成された。プール下手側に反時計回りの循環流が形成された。

流況パターンIII（図-6 以下、斜め流とする）

上流隔壁頂部からの水脈は、斜め45°方向にプールに突入し、底面付近に到達後、プール下手の底面に沿い流下し、下流隔壁へ流れる。プール下手には時計回りの循環流、上流隔壁背面には

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（超流水深の変化）

		隔壁形状	
		丸型タイプ	
越流水深	5cm	○	
	10cm	○	
	15cm	○	

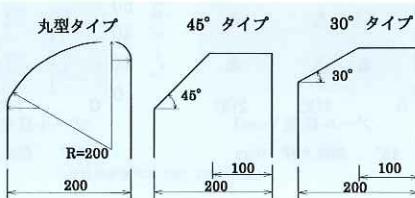


図-3 隔壁形状（単位：mm）

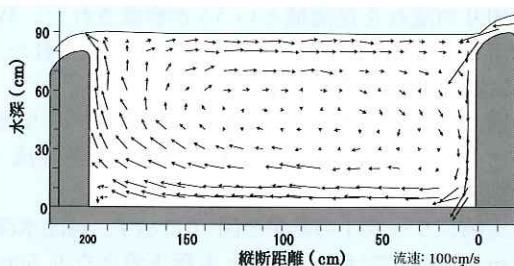


図-4 落水流の状態

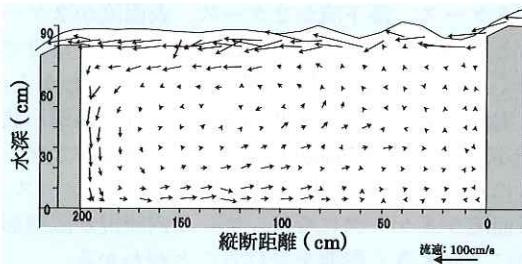


図-5 表面流の状態

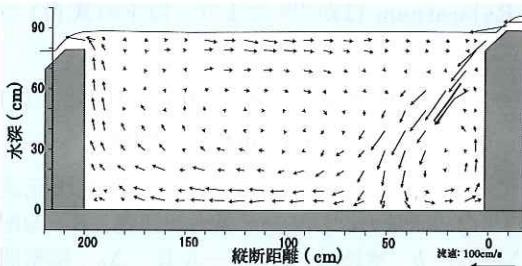


図-6 斜め流の状態

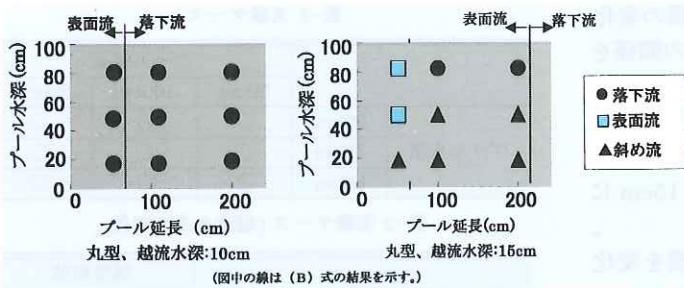


図-7 プール規模に対する流況パターン(越流水深別)

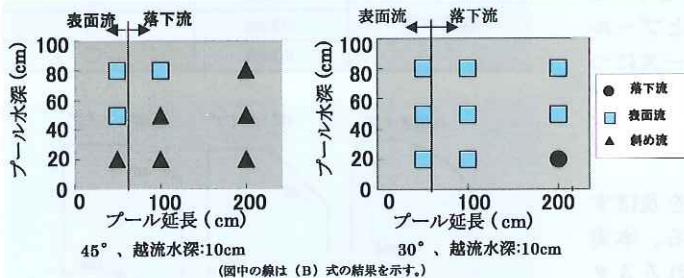


図-8 プール規模に対する流況パターン(隔壁形状別)

反時計回りの循環流(以下、斜め流における半時計周りの流れを逆流域といふ)が形成された。時計回りの循環流には流れの遅い空間が形成された。

3.2.2 各流況の発生状況

図-7、8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3.2.1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-7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。

実験シリーズ2の結果を図-8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¹⁰⁾により、以下の式(1)が与えられている。

$$C_b = Q / (b S L^{3/2} \sqrt{g}) = 0.22 \sim 0.31 \quad (1)$$

(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(m^3/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

式(1)は、次の関係で示すことができる。

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

式(2)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 m^3/s (越流水深10cm)0.068 m^3/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-7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210cm以上で落下流、以下で落下流になることを示している。

図-8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、ナイフエッジ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。

4. ウグイの遊泳行動に関する実験

隔壁形状、プール延長、プール水深を変化させた結果、階段式魚道内には、3つの流況が発生した。従来は斜め流も落下流の1つとされてきたが、今回、遊泳行動の把握を行うことを考慮し、斜め流も1つの流況であると考える。

4.1 実験内容

ウグイの遊泳行動を把握するため、ウグイをプール内に各ケース15尾放流し観察した。実験に使用したウグイの体長は図-9示す。遊泳行動特性の解析は目視、ビデオカメラ撮影で行った。観察時間は和田の実験等による日周期行動報告⁴⁾から活動ピークをはさむ15~19時とした。

水路側面に魚類の遊泳行動が観察でき

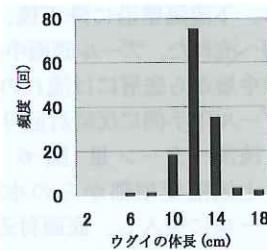


図-9 ウグイの体長

るよう暗視観察室及び観察窓を設けた。魚の遊泳行動を詳細に把握するため、観察窓には10cm間隔メッシュを施した。実験施設はプール長 $L=200\text{cm}$ 、プール水深 $H=80\text{cm}$ 、越流水深 $h=10\text{cm}$ を固定し、隔壁形状を丸型(落下流状態:図-4)、30°(表面流状態:図-5)、45°(斜め流状態:図-6)の3タイプを使用した。

4.2.3 流況におけるウグイの遊泳行動 4.2.1 落下流状態での遊泳行動(図-10)

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。上流プールへの遡上回数は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の内、約半数がEから落下流のFに入ることができた。しかし、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に向いた個体は遡上を試みた。約半数は流れに押し戻され、遡上に失敗した。

4.2.2 表面流状態での遊泳行動(図-11)

プール底層のA、Bで群れを成して定位した。以下、3つの経路から、下流隔壁へ向かった。上流プールへの遡上回数は3回であった。

経路1: Bからプール底面に下流隔壁角Cへ遡上した。そのCから大きく3つの行動パターンに分れた。下流隔壁からの下降流に反応し、偶然、頭部を流れに向け下流隔壁面に張り付くようにD、Eへ遡上した後、そのEで上流隔壁からの表面流に頭部を押され姿勢を崩し、下流隔壁を流下するパターン、その下降流に頭部を押され姿勢を崩しB、Aに戻るパターン、その下降流に反応し頭部を流れに向けCから遡上行動を起こすが押戻されB、Aに戻るパターンであった。

経路2: Bからプール底層20~50cm程度を中層F

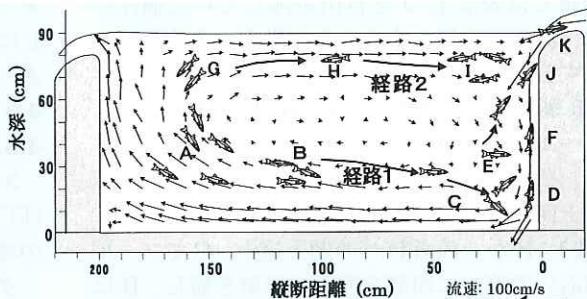


図-10 落下流における遊泳行動

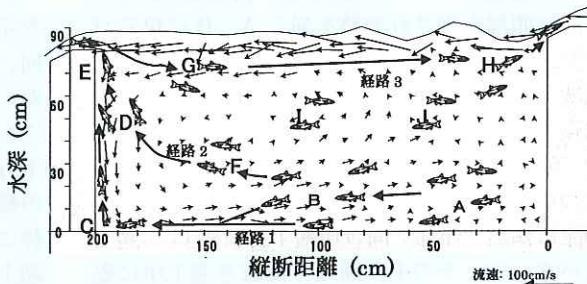


図-11 表面流における遊泳行動

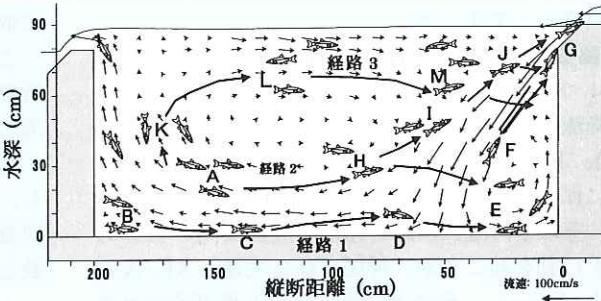


図-12 斜め流における遊泳行動

へ移動した。そのFから大きく2つの行動パターンに分れた。下流隔壁沿いの下降流に反応し、偶然、頭部を流れに向け中層D、表層Eへ遡上した後、そのEで上流隔壁からの表面流に頭部を押され姿勢を崩し、下流隔壁を流下するパターン、その下降流に反応し頭部を流れに向けFから遡上行動を起こすが押戻され失速しB、Aに戻るパターンであった。

経路3: 経路1、経路2のEで表面流により姿勢を崩し、流下しそうになった個体は、表面流に反応し、頭部を流れに向け、尾を激しく振りながらプール内のプール下手の表層Gへ戻る行動が見られた。そのGから大きく2つの行動パターンに分れた。そのまま、表面流沿をHへ遡上するパターン、そのGH間の途中で遡上をやめ、自由遊泳しながらB、Aに戻るパターンであった。また、こ

の経路では表層 I、J を自由遊泳していた個体が偶然、表面流に侵入することが出来、上流隔壁へ遡上する行動も見られた。

4.2.3 斜め流状態での遊泳行動(図-12)

プールの底層 A、B で群れを成し定位した。その A、B から以下の経路を辿った。上流プールへの遡上回数は 2 回であった。

経路 1: B から底面 D への遡上途中、C でプール底面沿いの流れに頭部を押され姿勢を崩し、B に戻る個体が見られた。D に辿りついた個体は大きく 2 つの行動パターンに分れた。上流隔壁からの下降流に頭部を押され姿勢を崩し A、B に戻るパターン、その下降流に頭部を押され姿勢を崩し、逆流域 E に取込まれるパターンであった。その E に取込まれた個体は頭部を下流隔壁側に向けた姿勢で、定位しては流される行動を繰り返し、大きく 3 つの行動パターンに分れた。上流隔壁からの下降流に偶然、頭部を向け中層 F、表層 G へ遡上するパターン、その FG 間の下降流を遡上中に姿勢を崩し、再度、逆流域に取込まれるパターン、姿勢を崩し、その逆流域から押出され A、B に戻るパターンであった。

経路 2: A から中層 H へ移動した個体は、そこから 4 つの行動パターンに分れた。上流隔壁からの下降流に反応し、偶然、頭部を流れに向け上流隔壁 I、J、G へ遡上するパターン、姿勢を比較的の水平に保ち、その H で定位し、自由遊泳するパターン、その下降流に反応し頭部を流れに向け H から遡上行動を起こすが、押戻されて失速し M、A に戻るパターン、その下降流に反応し頭部を流れに向け H から遡上行動を起こすが、その下降流に頭部を押され姿勢を崩し、上流隔壁角の逆流域 E に取込まれるパターンであった。その逆流域 E に取込まれた個体は経路 1 における逆流域内の行動パターンと同様であった。

経路 3: A から中層 K へ流下し、表層 L、M へ移動した。その M に辿りついた個体は大きく 4 つの行動パターンに分れた。上流隔壁からの下降流に頭部を向け表層 J、G へ遡上するパターン、姿勢を比較的の水平に保ち、その M で定位し、自由遊泳するパターン、その下降流に反応し頭部を流れに向け M から遡上行動を起こすが押戻されて失速し M、A に戻るパターン、その下降流に反応し頭部を流れに向け M から遡上行動を起こすが、その下降流に押され姿勢を崩し上流隔壁角の逆流域 E に取込まれるパターンで

あった。その逆流域 E に取込まれた個体は経路 1 における逆流域内での行動パターンと同様であった。

4.3 3 流況に対する遊泳行動の考察(図-13)

4.3.1 魚道内の指定した空間への進入

3 つの流況において、グレーの 30cm × 30cm 枠(以下、グレー枠)を上流隔壁の上部に指定し、その場所へ到達した個体の延べ回数をカウントした。

グレー枠は上流への遡上を成功させる時、必ず通過する空間である。

グレー枠上部の数字が到達した個体の延べ回数を示す。その結果、落下流で 384 回、表面流で 356 回、斜め流が 264 回という結果になった。落下流が一番多く、表面流、斜め流と続く。落下流ではグレー枠に到達した個体の内、過半数の個体が遡上行動を起こし到達した。表面流では底層、中層の緩やかな流れを自由遊泳していた個体がグレー枠にたまたま進入した個体が数多くいたのに対し、遡上行動を起こして進入した個体はごくわずかであった。斜め流ではグレー枠に進入した個体は遡上行動を起こし、グレー枠に到達したものの、逆流域に取り込まれ、遡上に失敗する個体が数多くいた。

このように、グレー枠に到達した時、ウグイの行動が、どのような状態にあるかという差で、上流への遡上回数に違いが出たと考えられる。

次に、表面流では、下流側にもグレー枠を設定し、カウントを試みた。その結果、下流側の進入回数は 1,013 回となり、上流側に比べ、約 3 倍の数となった。

これはウグイが下流を上流と考え、遡上行動を起こしたためであると考えられる。この他に、下流側グレー枠付近で上流隔壁からの流れが時間的に大きく変化し姿勢を崩しやすい点、上流へ遡上するには、定位位置、下流隔壁グレー枠、表層、上流隔壁と、長い経路を辿る必要がある点から、表面流は落下流と比べ、上流への遡上に悪影響を

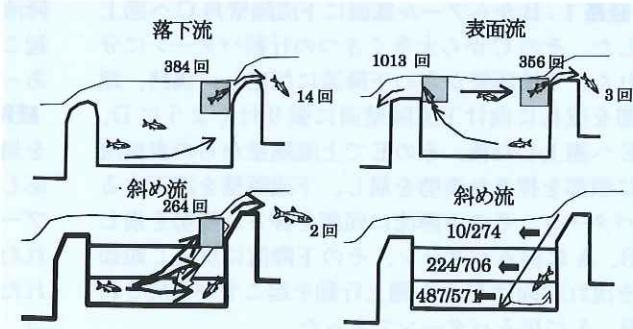


図-13 指定した空間への進入回数

及ぼすと考えられる。

また、斜め流において、遡上を開始した(尾の振りが激しくなった)場所を、底層($H=0\sim30\text{cm}$)、中層($H=30\sim60\text{cm}$)、表層($H=60\sim90\text{cm}$)と区分し、それぞれ、そこから遡上行動を起こしている途中で、逆流域に取り込まれた個体をカウントした。

図中の数字は「取り込まれた個体/遡上行動を開始した個体」を示す。底層から遡上行動を起こした個体の約85%、中層で57%、表層で4%が逆流域に取り込まれた。このように、斜め流も、遡上を試みた個体が、数多く逆流域に取り込まれ、遡上に悪影響を及ぼしていると考えられる。

尚、逆流域に取り込まれた個体のほとんどが遡上に失敗した。また、取り込まれなかつた個体も、流れから押し出され遡上に失敗する個体がほとんどであった。

以上のように、隔壁形状の変化により流況は変化し、ウグイの遊泳行動は大きく変化した。つまり、これまで、階段式魚道の評価や検討事項として提唱されている、対象魚の突進速度や巡航速度を参考にした、魚道内の流速を制御する検討の他に、魚道内で発生し得る流況に対し、連続した魚の動きを把握することも、合理的な魚道設計方法となることが明らかになった。

5. 結論

本研究は、階段式魚道の代表的な流況に対する、ウグイの遊泳行動実験を行った。実験の結果を以下に要約する。

- (1) 落下流と表面流の形成条件には、流量、プール水深、プール延長以外に、隔壁形状が大きく影響する。
- (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る。
- (3) 隔壁形状が 45° 、 30° と比べ、丸型は落下流が発生しやすい。

林田寿文*



独立行政法人土木研究所
水循環研究グループ河川
生態チーム研究員
Kazufumi HAYASHIDA

本田隆秀**



(前) 国土交通省土木研究所
河川環境研究室交流
研究員
Takahide HONDA

(4) 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、隔壁形状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。

- (5) 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。
- (6) 落下流は流向の変化が大きく、姿勢を崩しやすい。
- (7) 表面流はプール下流側への移動回数が多く、遡上面回数が減少する。
- (8) 斜め流は逆流域に取り込まれる個体が多く、遡上面回数が減少する。

今後、3次元の流況に対する遊泳行動の把握や、照度や水温などによる遊泳行動の関係を把握することも魚道の効率的な設計手法になるとを考えられる。

参考文献

- 1) 小暮忠:水産養殖学(下巻), pp.745-767, 豊華房, 1912.
- 2) 加藤精一:魚道及び魚梯, 水産資源保護協会, 1968.
- 3) 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.
- 4) 廣瀬利雄: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.
- 5) 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, Vol33, 1994.
- 6) 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.
- 7) 高須修二、箱石憲昭、村岡敬子、田中和浩、尾崎佳史:階段式魚道の水理特性に関する研究, 水工学論文集, 第38卷, 1994.
- 8) 和田吉弘:アユの遡上と魚道構造の関係, ダム技術, No.39, 1990.
- 9) Rajaratnam.N, katopodis.C, and ainali.A : Plunging and streaming flows in pool and weirs fishways, J. Hydraulic Engineering, 117, ASCE.
- 10) 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, pp.1191~1196, 2000.
- 11) 和田吉弘:長良川のアユづくり, 治水社, 1993.
- 12) 和田吉弘:人と魚の知恵比べ, 岐阜新聞情報センター, 2000.

萱場祐一***



独立行政法人土木研究所
水循環研究グループ河川
生態チーム主任研究員,
工修
Yuichi KAYABA

島谷幸宏****



国土交通省九州地方整備局
武雄工事事務所長, 工博
(前) 河川生態チーム
上席研究員
Dr.Yukihiko SHIMATANI