

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

STUDY ON STREAM-TYPE FISHWAYS BASED ON UPSTREAM MIGRATING BEHAVIOR OF JUVENILE AYU

和田 清¹・東 信行²・小出水 規行³・中村 俊六⁴

Kiyoshi WADA, Nobuyuki AZUMA, Noriyuki KOIZUMI and Shunroku NAKAMURA

¹正会員 工博 岐阜高専助教授 建設工学専攻科 (〒501-0495 岐阜県本巣郡真正町上真桑2236-2)

²正会員 農博 弘前大学助教授 農学生命科学部生物生産科学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

³正会員 農博 豊橋技術科学大学助手 建設工学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

⁴正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 建設工学系 (同上)

The portable Denil, Steeppass and Larinier pass fishways were installed to investigate biological evaluation in the hydraulic laboratory and on the diversion weir in Okitsu river. In these fishways, the hydraulic resistance and circulation cells are controlled by obliquely arranged fins and baffles. Relationships between flow conditions and fish behaviors were discussed based on the number of fish passed, ascending route, and swimming speed of upstream migrating juvenile Ayu (*Plecoglossus altivelis*) as they passed through three type fishways. The lower velocities took place along both sides for Larinier pass and bottom regions for Denil and Steeppass to guide juvenile Ayu. Our findings suggested that for juvenile Ayu the spatial size of the secondary circulation cells related to fish body length and turbulent intensity had an effect on migrating behavior of the fish, the formation of resting pools at close intervals should be provided to sustain upstream migrating route.

Key Words : Fishways, Denil, Steeppass, Larinier pass, Ayu, upstream migrating route

1. はじめに

近年, 河川整備において生態系への配慮が推進されており, 魚道は, 魚類生息場の改善策として重要な支援施設のひとつとなっている。

低落差の堰に仮設魚道を設置するような場合には, 小型で急勾配に設置可能なタイプとして, 標準デニール式をはじめとする, ストリーム型魚道が多く用いられている。このような人工早瀬風の魚道では激しい乱れを伴うことが必至であり, 乱流場における魚類の遡上行動を明らかにする必要がある。ストリーム型魚道は通過断面内で広範囲の流速分布をもつことが特徴であり, 標準デニールは阻流板の配置によって水面へ, ステイプパスは底面へ, さらに舟通し魚道では水路中央部へ流れの集中を生じさせ, その反流として生じた緩い流れの領域を魚類の遡上経路として提供しようとするものである。したがって, 主流方向の流速分布だけではなく, 阻流板の配置によって生じた螺旋渦流のスケールや乱れの強さを含む3次元的な流れの構造が, 魚類の遡上行動と

密接に関わっている。

本研究は, 低落差の堰に仮設用として設置された3種類のストリーム型魚道: 標準デニール, ステイプパス(ファトウ型)および舟通し魚道(修正ラリーニア型)を取り上げて, 現地仮設実験および室内実験結果から, 螺旋渦流の卓越する流れ場が稚アユの遡上行動に及ぼす影響, 特に遡上経路, 遡上速度, 休憩時間などの観点から考察したものである。

2. ストリーム型魚道の流れ場の特性

(1) 水理実験の概要

魚道の流れ場の特性を明らかにするために, 室内実験による詳細な水理計測を行った。実験は, 岐阜高専の水理実験室内において, 鋼製のステイプパス式魚道ユニット(幅30cm×高さ30cm×長さ90cm)を直列に5組連結し, 勾配1/5, 全長4.5mに設置して行われた¹⁾。標準デニール式魚道は, 鋼製と透明アクリル製のユニット(幅30cm×高さ30cm×長さ90cm)を2種類, 直列に4組連結して,

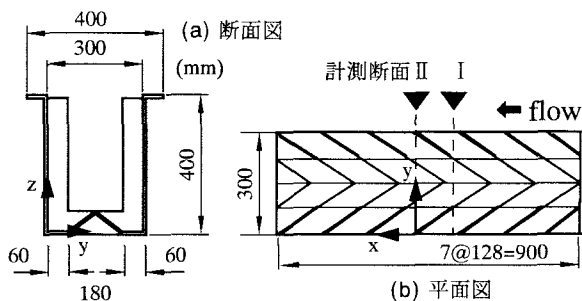


図-1 スティープパス式魚道

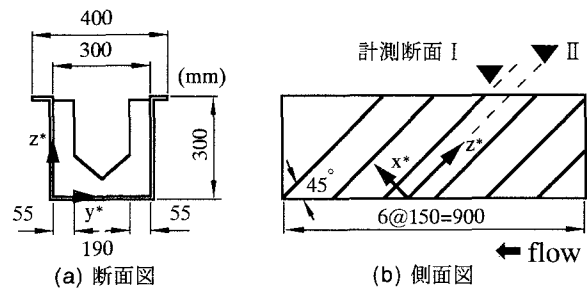
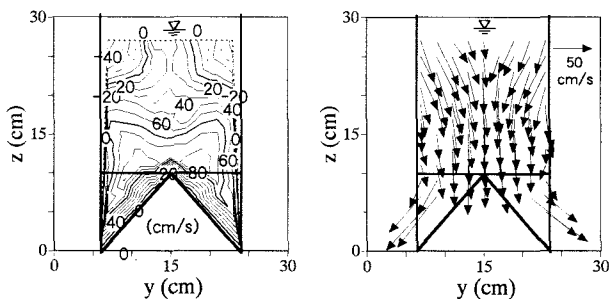
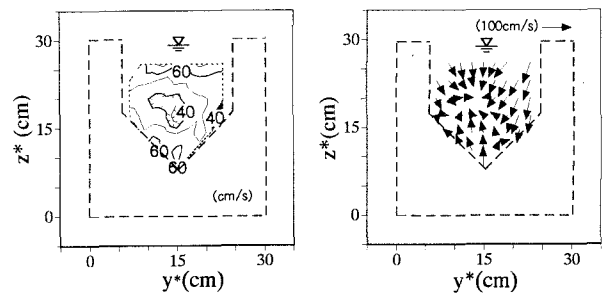


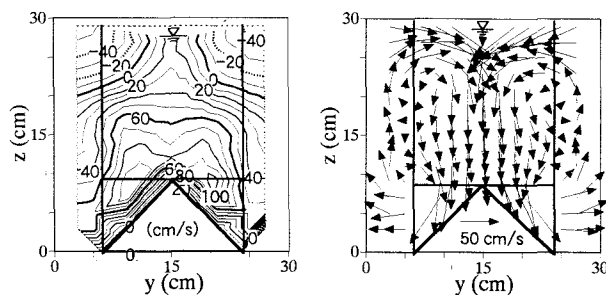
図-4 標準デニール式魚道



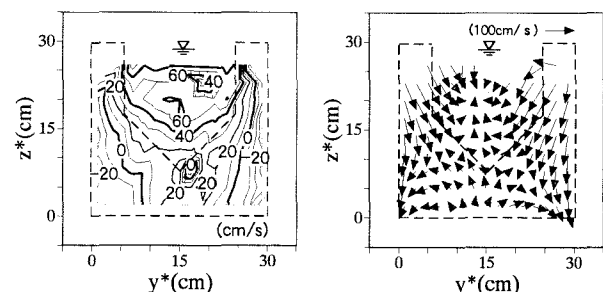
(a) 主流速: U (b) 断面流速: V, W
図-2 最小通過断面 I (スティープパス式魚道)



(a) 阻流板直交成分: U^* (b) 断面流速: V^*, W^*
図-5 最小通過断面 I (標準デニール式魚道)



(a) 主流速: U (b) 断面流速: V, W
図-3 中間断面 II (スティープパス式魚道)



(a) 阻流板直交成分: U^* (b) 断面流速: V^*, W^*
図-6 中間断面 II (標準デニール式魚道)

勾配1/5, 全長3.6mに設置した²⁾。さらに、舟通し魚道(修正ラリーニア型)については、アルミと木製(阻流材: 6.7cm角)の魚道ユニット(幅87cm×高さ20cm×長さ80cm)を5組連結し、勾配1/10, 全長3.8mに設置して別々に実験が行われた³⁾。流速分布の測定にはセンサー部(球形)の直径が2cmの3次元電磁流速計(アレック電子製, ACM-300, 時定数0.5s)を用い、等流区間において2cm×2cmのメッシュ間隔を基本とした底面に垂直(標準デニールは阻流板に平行: 2cm×3cm)な断面内の計測を行った。計測時間は60sであり、すべてのデータはパソコンに記録して処理された。

(2) スティープパス式魚道(ファトウ型)

スティープパス式魚道ユニットのサイズを図-1に示す。同図において、阻流板で狭くなった最小通過断面およびその間の2断面において3次元的な流速分布の計測を行った。図-2(a)(b)および図-3

(a)(b)は、時間平均化した主流速成分(U : 水路底面と平行)のコンターと、それと直交する断面内の流速ベクトル(V, W)を示したものである。なお、流量は $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ である。

図-2,3(a)から、中心軸における主流速は底部で速く水面付近で遅い分布となっている。また、側壁の阻流板近くの分布形はより複雑で、水面の阻流板背後で逆流域($U < 0$)が生じていることがわかる。さらに、主流と直交する断面内の流速ベクトルは、最小通過断面 I では、全断面内で下降流を形成している。水路幅と一致する断面 II では、中央で下降流、阻流板背後で上昇流を示す一組の対称的な渦流が明瞭に生じている。その結果、横断方向の水面形状は水平ではなく、中央で低く阻流板背後で高い顕著な凹型の水面勾配が生じている。このように、主流速は底面で大きく、有効断面内では下降流が卓越しているので、スティープパス魚道は底面へ流れの集中を生じさせる螺旋渦流の構造であることがわかる。なお、水面付近では減勢による気泡の混入が著しい。

(3)標準デニール式魚道

図-4は標準デニールの魚道ユニットのサイズを示したものである。同図において、斜め阻流板と平行に流速計を挿入し、阻流板内部の最小通過断面Ⅰおよびその中間断面Ⅱにおいて流速分布の計測を行った。図-5(a)(b)および図-6(a)(b)は、阻流板と直交する成分 (U^*) のコンターと、阻流板に平行な断面内の流速ベクトル (V^*, W^*) を示したものである。なお、流量は $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ である。

デニール式魚道は、スティーブパス式とは逆に、断面中央では水面で流速が大きく底部で遅い流速分布をもち、両側壁の阻流板背後で強い下降流が生じる螺旋渦流の構造をしていることが知られている²⁾。図-5(a)からわかるように、阻流板内部の主流速 (U^*) は、水面付近と阻流板V字カット部直上で大きく、その中間領域では 40 cm/s 以下の緩い流れが形成されている。さらに、図-5(b)の阻流板と平行な断面内の流速ベクトルを見れば、水面付近では下降流、阻流板V字カット部直上では上昇流が形成されており、その中間では流速ベクトルのほとんど生じない領域が形成されている。この阻流板に沿う流速成分がほとんどない地点と、緩い主流速の形成地点はほぼ同じ領域で発生しており、阻流板内部への流れの縮流効果によって、阻流板に直交する流れの成分だけが生じる領域がV字部のやや上側に形成されている。阻流板の中間断面の流速分布を示した図-6から、この緩い主流速 (40 cm/s 以下) の領域は、阻流板内部の位置よりもさらに下側に形成されている。しかも、両側の阻流板背後では、強い下降流が同時に形成されているので、中央部の主流速が緩く断面内の流速ベクトルが弱い領域 (阻流板に直交する流れの卓越領域) が、遊泳魚にとって阻流板内部へ進入しやすい遡上経路を提供しているものと考えられる。

(4)舟通し魚道 (修正ラリーニア型)

舟通し魚道 (修正ラリーニア型) の流速分布を、左岸側について一例を示せば、図-7(a)(b)のようである。図-7(a)は遡上経路として想定される側壁側のスリット部の水平流速ベクトルを鉛直方向に重ねたものであり、図-7(b)はスリット部の鉛直断面内の流速ベクトルを示したものである。なお、流量は $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$ である。

図-7(a)から、上流側の休憩プールからの流れは、斜め阻流材に向かって流下し (図中①②の地点)、阻流材のスリット部を通過する場合には側壁に沿う底部の速い流れが生じていることがわかる (図中③)。さらに、スリット部を通過した後、底部では側壁に斜めにあたる強い流れが発生しており (図中⑤)、スリット部と側壁端の間 (図中⑥) の底部では下流側の休憩プールに進入する強い流れが生じて

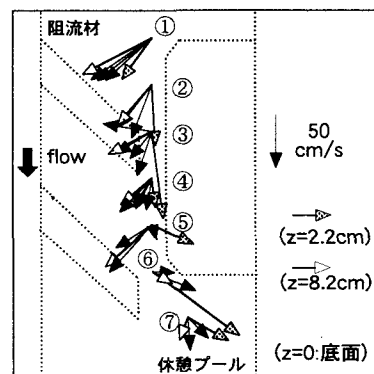


図-7(a) スリット部の水平流速分布 (舟通し魚道)

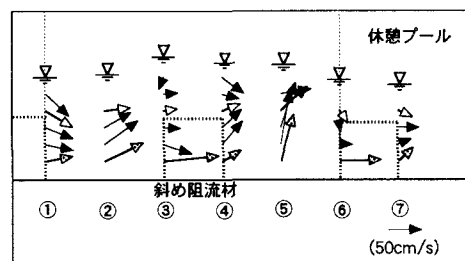
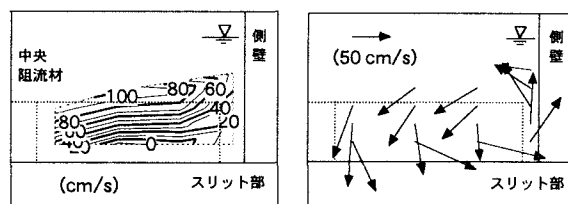


図-7(b) スリット部の鉛直流速分布 (舟通し魚道)



(a) 主流速: U (b) 断面流速: V, W

図-8 斜め阻流材の中間断面 (舟通し魚道)

いる。休憩プール内では穏やかな流れの状態となっている。また、①から⑤の地点の水面付近では、斜め阻流材にほぼ直交する共通した流れが卓越することがわかる。各地点における鉛直断面分布を示した図-7(b)からも、上述したスリット底部を通過する速い流れ (図中③⑥) や、側壁に斜めにあたる流れが強い上昇流を伴っていることがわかる (図中⑤)。また、斜め阻流材の中間断面 (図-7中の⑤と中央阻流材を斜めに横切る断面) における主流速 (U) とそれに直交する流速ベクトル (V, W) の分布を示せば図-8(a)(b)のようである。斜め阻流材の天端では、 1 m/s を越える速い主流が生じている。その背後の段落ち部では底面に近づくにつれて緩い流れとなっている。また、主流に直交する流速ベクトルは、流れに平行な中央の阻流材に近づくほど下向きの強い流れが生じており、スリット側の底部では側壁へ、水面付近では逆に中央に向かう、反時計回りの渦流 (流下方向に対して時計回り) が形成されている。主流の分布には空間的な偏りが生じているので、この渦流は、斜め流下方向に回転した螺旋渦流となって、斜め阻流材の間で発達することがわかる。

3. 対象魚道内における稚アユの遡上行動

(1) 遡上実験の概要

魚道入口のプールに放した稚アユの群れが、どのような行動をしながら対象魚道を遡上するかについて、ビデオカメラを主体とした遡上実験を行った。

スティープパス式および標準デニール式の仮設魚道は、静岡県興津川の農業用頭首工（大向堰：落差2.8m、幅54m）の右岸側角落し部分に設置した。水理実験で用いた同一スケールの魚道が並列に配置され、途中の休憩プール（中間および下流プール）に接続されている。全長は約17mであり、魚道の勾配は、中間プールより上流側は1/8、下流側は1/5である。遡上実験（1995年6月23日）では、中間プールに水中ビデオカメラ2台、魚道出口にはトラップを設置した。稚アユは、琵琶湖安曇川に遡上した稚アユ約400尾（平均体重：約8g、平均体長：約9cm）を用いた。なお、調査期間内における水温は13-22℃の範囲である¹⁾。

標準デニール式については、透明アクリル製の魚道を鋼製ユニットに接続して、水理実験と同一条件で別途、室内遡上実験を行った（1998年7月30日）。3次元的な遡上経路を解析するために、側面および底面から同時にビデオ撮影している。稚アユは琵琶湖姉川に遡上した約300尾（平均体長：7.5±0.6cm、平均体重：4.4±1.2g）を用い、実験中の水温は20℃である²⁾。

さらに、修正ラリーニア型舟通し魚道についても、魚道の直上約2.5mの高さに固定された3台のビデオカメラと、側壁側のスリット部を撮影領域とした水中小型カメラ（直径10mm）を設置して、1998年6月26日（水温18~20℃）に室内遡上実験を行った。実験に使用した稚アユは、琵琶湖安曇川に遡上した約500尾であり、その平均体重4.0±0.9g、平均体長は7.5±0.5cmである³⁾。

(2) スティープパス式と標準デニール式魚道の比較

スティープパスと標準デニールを併設した現地仮設遡上実験結果から、6月23日の午後3時から4時までの1時間の稚アユ遡上尾数の解析では、デニール：187尾、スティープパス：31尾となり、デニールを利用した稚アユの遡上量はスティープパスのほぼ6倍に達したことがわかっている¹⁾。底部流速が大きいスティープパスにおいても、稚アユは魚道の底部付近を多く遡上していることが観察された。また、スティープパスでは、渦流に巻き込まれて方向を見失って阻流板の間に頭を突っ込んだりしながら遡上するものや、左右阻流板の下部に位置する空隙ポケットの間で休憩しながら巧みに遡上するもの、さらに主流速と下降流は大きいものの横断方向の流速が弱い底面の直上を休憩せず一気に遡上した稚ア

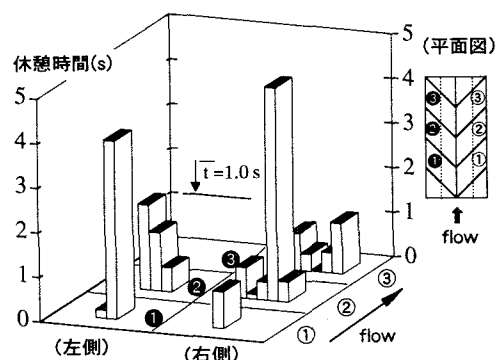


図-9 空隙ポケット内の休憩時間（スティープパス式）

ユなどが観察されている。これらのことから、気泡混入が著しい水面付近は、魚類にとって推進力とはならず、視界の確保や方向認識能力などの観点から、限られた遡上経路を見つけた場合は短時間で遡上できることを示唆しているものと考えられる。

さらに、遡上開始5分以内のデータにおいて、阻流板下部の空隙内（阻流板の間隔4個以内=30~40cm）に入らなかった割合を調べてみると、デニールでは約70%、スティープパスではわずか1尾（3%）であり、スティープパスではほとんど空隙ポケットを経由していることがわかる。図-9は、阻流板に生じたその空隙ポケット内でどの程度休息したかを示したものである。ばらつきは大きいがこの空隙内で平均1sほど休憩したことがわかる。休息しながら体勢を立て直して再び遡上していくためには、遡上経路に隣接した稚アユのサイズ以上の隙間の重要性を示唆しているものと考えられる。

(3) 標準デニール式魚道：室内遡上実験

図-10は、室内遡上実験における側面のビデオ画像解析から得られた稚アユの遡上経路の一例を示したものである。阻流板の間で渦流に巻き込まれながらも遡上した個体（図中□■）、巻き込まれずにほぼ直進した個体（図中○●）などのパターンに分類される。最小通過断面となる阻流板内部を通過する場合において、その進入位置 z^* （阻流板に沿った斜距離）および進入角度 θ （阻流板と平行：0°）、瞬間最大遡上速度 V_i （ビデオ画像1コマ：1/30s間）の関係を示したものが図-11である。同図からわかるように、ほとんどの個体は阻流板内部への進入角度が40~90°の範囲であり、水路とほぼ平行あるいはやや阻流板底面付近から進入する。これは、渦流に巻き込まれた場合には底面へ押し流されるので、体勢を立て直して底部から再び上昇しオーバーターンして通過することを示している。

また、瞬間最大遡上速度は70~200cm/sである。これは体長(BL)の倍数として表される突進速度⁴⁾（この場合：10BL=75cm/s）に比べて大きな値となっている。突進速度は持続時間の設定によって値が

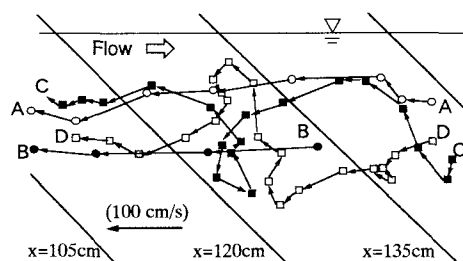


図-10 稚アユの遡上経路（デニール式）

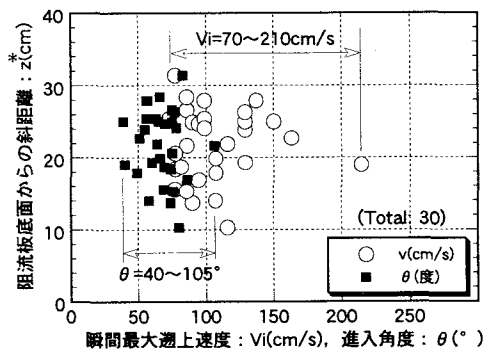


図-11 瞬間最大遡上速度と進入角度（デニール式）

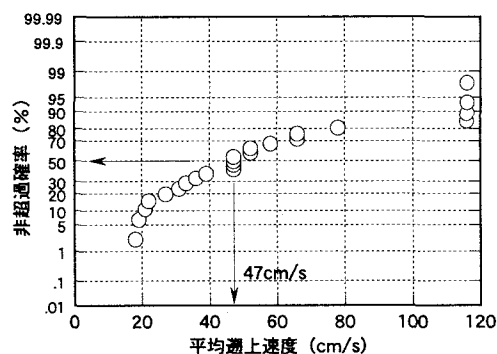


図-12 阻流板間の平均遡上速度（デニール式）

大きく変化するので、一般に用いられている突進速度は1~数秒間持続する速度と理解すれば、図示した瞬間最大遡上速度は1/30s間に魚が発揮する最大の遊泳速度であり、隘路となる最小通過断面の阻流板内部では一気に遡上することがわかる。また、瞬間最大遡上速度が200cm/sを超えて一気に遡上した個体は、 $z^*=20\text{cm}$ 付近を通過しており、この地点は流速分布で述べた阻流板と平行な流速成分が現れない領域($z^*=15\sim25\text{cm}$)とほぼ対応している。

図-12は、阻流板の区間（間隔：15cm）を通過した平均遡上速度 V_m の分布を示したものである。同図から、渦流に巻き込まれず、阻流板に平行な流れが現れない領域を通過した場合が最も速い（ $V_m=116\text{cm/s}$ ）。全体の平均遡上速度は47cm/s程度となる。したがって、デニール式魚道では、この阻流板に直交する流れを突進速度以下に保ちながら、いかに連続して確保するかが重要である。また、阻流板の底部の上流側に生じた鋭角部の隙間に数秒間魚体を密着して休息する個体が観察された。

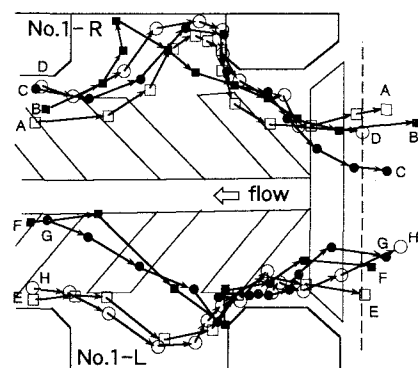


図-13 稚アユの遡上経路（舟通し魚道）

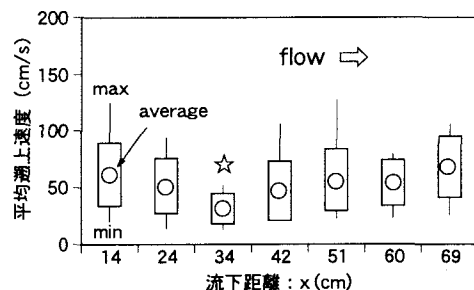


図-14 上流区間の平均遡上速度（舟通し魚道）

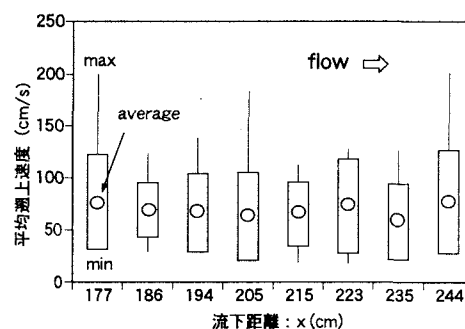


図-15 下流区間の平均遡上速度（舟通し魚道）

(4)舟通し魚道（修正ラリーニア型）：室内遡上実験

スティーパスおよびデニール式魚道の遡上実験結果から、遡上経路に隣接した小刻みな休憩場所の配置の重要性が示唆された。修正ラリーニア型では、稚アユは、休憩プールで十分休んでから再び遡上するグループと、プールに立ち寄り体勢を立て直してすぐに遡上するグループに大別できる。図-13は、後者のグループについて、魚道出口付近の稚アユの遡上経路を0.2秒間隔のベクトル量（遡上速度）で表示したものである。流速分布でも述べたように、この阻流材天端直上の流れは、1m/sを越える速い流れが形成されている。流量が多いと中央に集中する流れが強いために、両側壁に沿って遡上した後、休憩プールの上流側へ一気に進入する。中には斜め阻流材背後の緩い領域に入った後、斜め阻流材を乗り越えて休憩プールに向かうものも見られる。その後、遡上速度は遅くなるものの側壁端と斜め阻流材のスリット部を巧みにすり抜けながら、最後に上流端の水平阻流材を乗り越えて遡上する。

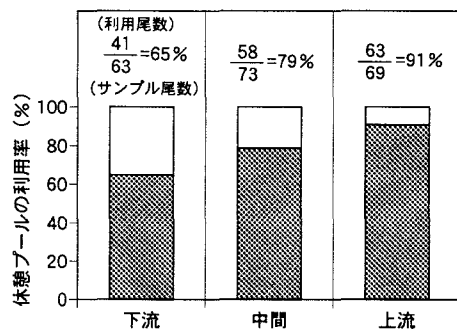


図-16 休憩プールの利用率 (舟通し魚道)

魚道出口付近の上流側および魚道入口の下流側周辺において、横断方向に約10cmごとの測線を設定し、左右の領域における稚アユの平均遡上速度を算出した結果を図-14および図-15に示した。両図から、突進速度（計算値：80cm/s）よりも大きい速度で遡上した個体も見られ、個体間の速度差が大きいことがわかる。さらに、上流側の図-14において、 $x=34\text{cm}$ 付近では、兩岸ともにその速度差が小さくなっている。この地点は、図-13に示した遡上速度ベクトルが小さくなる区間、休憩プールの上流側から側壁端のスリット部を通過する地点で、スリット部を流下する強い流れ（射流）が支配的な領域である。休憩プールに進入した稚アユがさらに上流へ遡上する場合、スリット部からの流れが十分減勢されておらず、この領域は稚アユにとって一種の「ボトルネック」になっていると考えられる。一方、この位置は下流では、図-15の流下距離（ $X=205\text{cm}$ ）に対応しており、上流域で見られたボトルネックは生じていない。流速測定結果によれば、プール内で流れの減勢が十分行われており、魚道入口から2番目の休憩プール周辺であるので、遡上した稚アユの遊泳能力のポテンシャルはまだ十分であるものと考えられる。その結果、休憩プールをあまり利用せず、一気に阻流材直上を遡上する個体が多く見られた。

図-16は、休憩プールを利用した稚アユの遡上量を、上流、中間、下流区域に分けて表したものである。同図から、下流から上流に遡上するにつれて、休憩プールを利用する割合が増加し、ほとんどの稚アユが休憩プールを利用しているのがわかる。この最上流部の休憩プールを3秒以上利用した個体群について、その休憩時間を示したものが図-17である。同図から、稚アユの休憩プールの休憩時間は、ほぼ対数正規分布にしたがうことが想定される。数秒で体勢を立て直してすぐ遡上する個体や、20秒以上から長いものでは30分程度滞留する個体も観察された。全体の平均休憩時間は1分30秒程度であり、全体の90%は10分以下で遡上した。

このように、稚アユの個体によって平均遡上速度

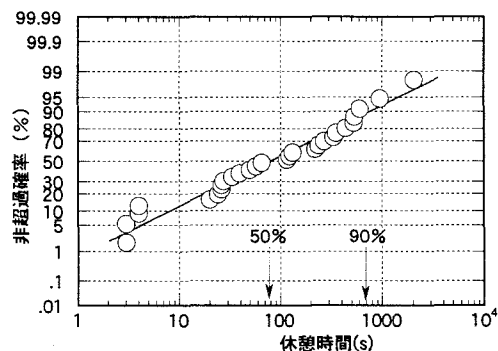


図-17 上流側休憩プールの利用時間 (舟通し魚道)

に大きな差が見られ、休憩プールの利用時間も比較的長いことなどから、移動経路に隣接した休憩プール（待避場所）を小刻みに設置することの重要性を示唆しているものと思われる。

4. おわりに

以上、3種類のストリーム型魚道を取り上げて、螺旋渦流の卓越する流れ場が稚アユの遡上行動に及ぼす影響、特に遡上経路、遡上速度、休憩時間などについて考察した。デニール式やステープパス式魚道では、阻流板の隙間で休憩しながら前進する個体も見られ、遡上経路に隣接した稚アユのサイズ以上の空間の確保が遡上効率を高める場合には必要である。修正ラリーニア型舟通し魚道からは、下流から上流に向かうにつれて休憩プールの利用率が増加し、さらにその時間も長くなっていることから、多種多様な魚種への適用を考える場合、魚類のポテンシャルに応じて休憩場所をきめ細かく配置することの重要性があらためて示唆された。

このように、魚道という自然な河道とは異なる特殊な条件下では、狭くても確実に遡上可能な経路を連続していかに確保するかと同時に、その遡上経路に隣接した適正な大きさの休憩プールを小刻みに配置することが重要である。

参考文献

- 1) 和田 清・東 信行・中村俊六：デニール式およびステープ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巻，pp.499-504，1998.
- 2) 和田 清・高原良将：デニール式魚道における螺旋渦流の構造と稚アユの遡上行動，土木学会中部支部講演概要集，pp.231-232，II-48，1999.
- 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の特性と稚アユの遡上経路，水工学論文集，第43巻，pp.983-988，1999.
- 4) 高橋剛一郎編：山地溪流における自然環境の保全のあり方（砂防学会ワークショップ），砂防学会論文集，No.2，55p.，1991.

(1999.4.26受付)