

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

UPSTREAM MIGRATING ROUTE OF JUVENILE AYU
IN A MODIFIED LARINIER PASS FISHWAY

和田 清¹・小出水 規行²・石川 雅朗³・中村 俊六⁴
Kiyoshi WADA, Noriyuki KOIZUMI, Masa-aki ISHIKAWA 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 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)

³正会員 工修 木更津高専・助教授 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東2-11-1)

⁴正会員 工博 豊橋技術科学大学・教授 建設工学系

Larinier pass fishway has herringbone patterned baffles only floor, the both sides of the channel being kept smooth. The Larinier pass was modified for juvenile ayu, the formation of resting pools at close intervals and timber baffles with a slit on both sides. The fishway was experimentally installed to investigate biological evaluation in a hydraulic laboratory and on a divergent weir in Sendai river in Tottori Prefecture. The lower velocities take place along both sides to guide juvenile ayu. Local velocities are in the range of sustained speeds or in the range of their burst speed that cannot be maintained for a long time. It is pointed out for juvenile ayu that the formation of resting pools at close intervals should be provided to sustain upstream migrating route.

Key Words : Fish passage, modified Larinier pass, ayu, upstream migrating route, migrating speed

1. はじめに

魚類にとって流れの不連続性は移動の障害の原因であり, この障害を取り除く手段が魚道である¹⁾. 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, 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. ストリーム型は, 流れに広範囲の流速分布を生じさせて遡上可能な経路を提供するものである. 最近では, 粗石付き斜曲面と舟通し型などを組み合わせた全断面魚道も考案され²⁾, 人工早瀬風の河川景観を創出しながら, 平水時だけではなく増水時にも魚道として機能する特徴をもっている. つまり, 増水時には粗石付き斜曲面が主役, 平水時の主役は副魚道としての舟通し型などで, 斜曲面はその副魚道への集魚設備として脇役に回るように工夫されたものである. 低落差の堰で, 急勾配に設置する必要がなければ, 増水時に流木・ゴミ・転石などをあまり気にする必要のない舟通し型は, メンテナンスが容易で, 今後適用例が増加するものと思われる.

フランスで発達した舟通し魚道は, 舟を通す中央部に多量の水を流すために, 底部に阻流板を付けて

中央部へ流れの集中を生じさせ, 両側の柔らかい流れの部分で魚類の移動経路として提供するものである. 舟通し型には, 阻流板として鉄板などの薄い材料だけでなく, 角材のような太い部材を利用した魚道(ラリーニア型舟通し)が実用化されている²⁾. 著者の一人は, この舟通し魚道を基本形として, 遡上経路の連続性をより確保するために, 阻流材の両側岸にスリットの導入, 経路に隣接したユニットごとの休憩プールなどの修正を加えた魚道(以下, 「修正ラリーニア型舟通し魚道」と呼称する)を考案して実用化した³⁾.

本研究は, 修正ラリーニア型舟通し魚道を取り上げて, 魚道内に生じた流れ場の特性が, 稚アユの遡上量や遡上速度・経路などの遡上行動とどのように関わっているかを室内実験を通して明らかにするとともに, 実河川に修正ラリーニア型舟通し魚道を設置して, 稚アユの遡上状況を把握したものである.

2. 対象魚道の流れ場の特性

(1) 水理実験の概要

修正ラリーニア型舟通し魚道の流れ場の特性を明

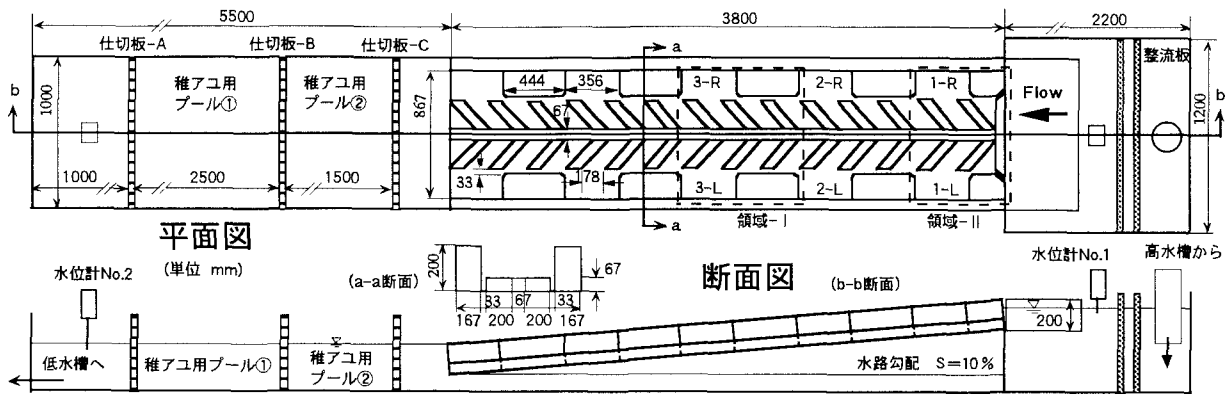


図-1 修正ラリーニア型舟通し魚道の実験装置（室内実験）

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、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）を並列に5組連結し、勾配1/10、全長3.8mに設置して行われた。その平面図を示せば、図-1のようである。流速測定にはセンサー部が球形（直径2cm）の3次元電磁流速計（アレック電子製、ACM-300P、時定数0.5s）を用いて、水深方向2cm間隔で主要な断面内の計測を行った。また、水面変動測定にはサーボ式水位計（ケネック製、SW-301）を使用し、水平面内9cmの格子間隔で計測された。計測時間は60sであり、すべてのデータはパソコンに直接入力して処理された。なお、魚道内の流量は0.351および0.036m³/sの2通りについて行った。

(2) 平均水位の空間分布

サーボ式水位計のデータから、ほぼ等流とみなせる区間（図-1中、領域I）における、阻流材のない底面を基準としたときの時間平均水位の空間分布を表したものが図-2である。同図は流量が多い場合（ $Q=0.351\text{m}^3/\text{s}$ ）であり、阻流材が点線で併記されている。舟通し魚道は、斜め阻流材に直交して流れる性質を利用して、中央部に速い流れを集中させ、両側に流れの柔らかい部分を生じさせる特徴を持っているので、中央の阻流材直上では水位が低いこと、斜め阻流材の上流側では水位が高く、斜め阻流材同士の間では低くなっていることがうかがえる。また、側壁の両側には水位の高い領域が上下に連続して形成されているので、魚道本体に直角な横断方向の水面形状は、中央部で下がり側壁付近では盛り上がる凹型である。さらに、この領域に隣接した休憩プール内では下流側ほど水位は高く、プール上下流間では4cm程度の水位差が生じている。また、水衝部の休憩プール下流側に比べて、水裏部にあたる上流側は水位変動は穏やかで、水面が盛り上がる側壁両側の領域（遡上経路）に進入しやすい空間を提供している。なお、流量が少ない場合には、休憩

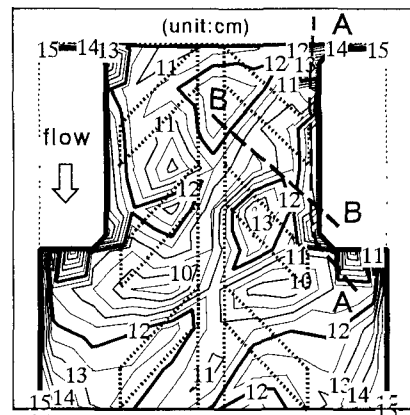


図-2 平均水位の空間分布（領域I）

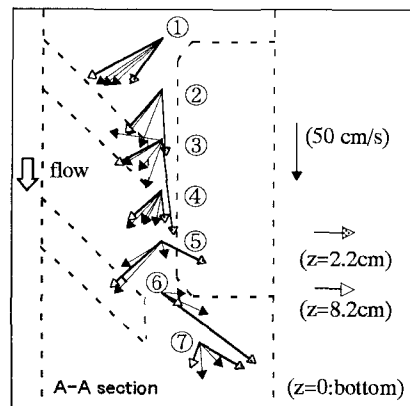


図-3 (a) 平均流速の水平分布（A-A断面）

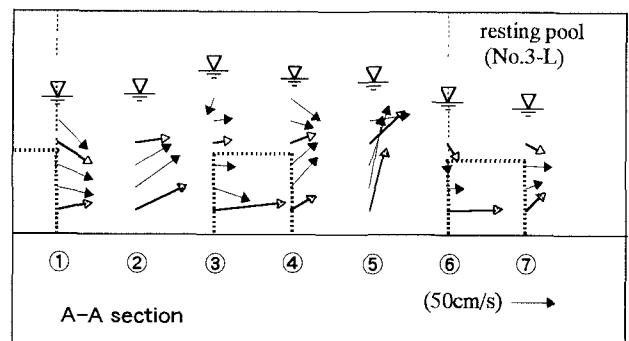


図-3 (b) 平均流速の鉛直分布（A-A断面）

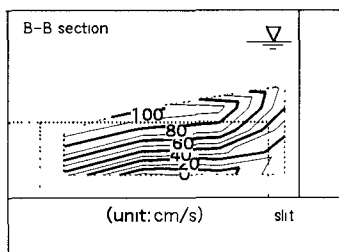


図-4 (a) 主流速 (B-B断面)

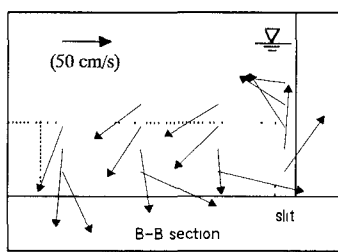


図-4 (b) 2次流 (B-B断面)

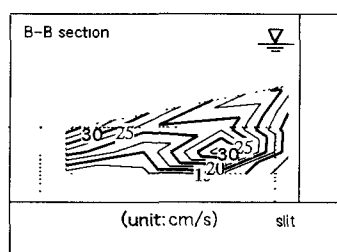


図-4 (c) 乱れ強度 (B-B断面)

プール内の水位変動の減衰は小さく、その結果、全体の水面形は阻流材の配置に強く影響を受けることになる。逆に流量が増加すると、阻流材の配置に加えて休憩プールの間隔に水面形が影響を受けるので、水面形は左右の対称性をほぼ保持しながら上下に非対称な分布となる。

(3) 平均流速の3次元分布

上述した平均水位の空間分布 (図-2) の図中において、左岸の側壁に生じた水位の高い領域 (A-A) と斜め阻流材間 (B-B) の2断面の3次元的時間平均流速分布を示せば、図-3 (a),(b) および図-4 (a),(b) のようである。また、B-B断面における流れの乱れ強度の分布を図-4(c) に示した。

図-3(a) はA-A断面において鉛直方向2cm間隔で計測された流速値を重ね合わせた平面図であり、白抜き矢印はそれぞれ底面 ($z=2.2\text{cm}$) と水面付近 ($z=8.2\text{cm}$) を示している。同図から、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当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あり、阻流材に直交する流れが卓越することがわかる。同地点における鉛直断面図を示した図-3(b) から、上述したスリット底部を通過する速い流れ (図中③⑥) や、側壁に斜めに当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)。

一方、B-B断面における主流速 (U) と2次流 (V, W) の分布を示せば図-4(a) (b) のようである。斜め阻流材の天端では、 1m/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、スリット部を通過した後の主流速は、この段落ち部の流速と同程度であり、側壁付近では阻流材の約2倍の高さの水深がある。さらに、2次流の分布を見ると、流れに平行な中央の阻流材に近づくほど斜め阻流材の背

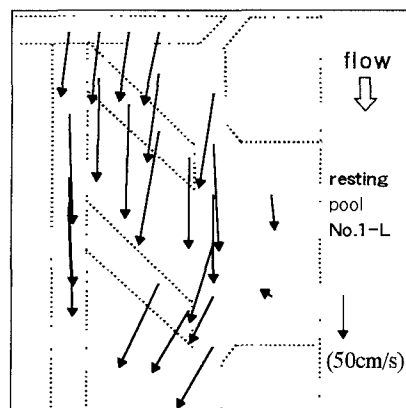


図-5 平均流速の水平分布 (領域II)

後では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、流下方向に対して時計回りの2次流が形成されている。主流の分布には空間的な偏りが生じているので、この2次流は、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していることがわかる。乱れの強さは、図-4(c) からわかるように、スリット側や斜め阻流材の背後の底部では弱く、逆に斜め阻流材の天端付近で大きくなっている。これらのことから、魚類の遡上経路としては、スリット部の底面付近の速い流れを除いた側壁付近の領域が考えられる。なお、斜め阻流材の背後の底部に生じた穏やかな流れの領域も休憩場所として利用する可能性がある。

(4) 魚道出口周辺における流れ場の構造

魚道出口周辺 (図-1中、領域II) の流れは上述した状態とは異なり、中央と斜めの阻流材の交点付近で強い跳水が生じる。この跳水地点は流量によって異なり、流量が少ない場合は上流から1段目、多い場合は2段目の斜め阻流材に発生する。

図-5は阻流材直上 ($z=7.4\text{cm}$) における水平面内の流速分布を左岸側について示したものである。跳水が生じる前では、斜め阻流材に直交する流れは弱く、魚道に平行な流れとなっており、 1m/s を越える速い流れが形成されている。跳水後、穏やかな休憩プールからの流れも加わって、斜め阻流材に直交する流れに変化する様子がうかがえる。

魚類の遡上経路と想定されるスリット部を中心と

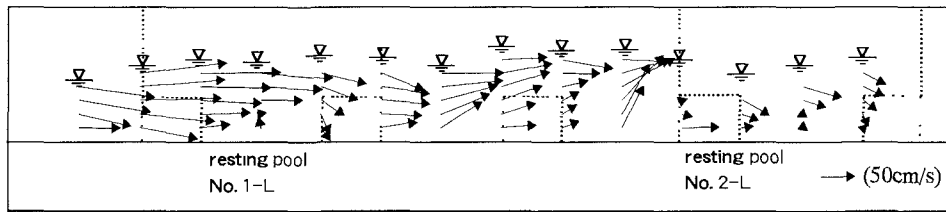


図-6 平均流速の鉛直分布 (領域II)

した平均流速の鉛直断面分布を示せば、図-6のようである。同図から、上流側 (No.1-L) と下流側 (No.2-L) の休憩プール前面では、そのベクトル量に大きな差が生じている。これは魚道出口では流れの射流状態が強いために上流側の休憩プールだけでは十分流れの減勢が行われないことに起因している。下流側プールに進入する直前では、前節で述べたスリット底部の速い流れ、スリット通過後の側壁にあたって生じた上昇流などの形成が見られ、この付近からはほぼ等流とみなせる区間になることがわかる。

3. 稚アユを用いた室内遡上実験

(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を観察するために、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、琵琶湖安曇川に自然遡上した約500尾であり、稚アユのサイズは、体重 $4.04 \pm 0.88\text{g}$ 、体長 $7.51 \pm 0.54\text{cm}$ である。稚アユは魚道水路 (図-1 参照) の下流側のプール①へ投入して絶食状態で約1時間馴致した。その後、金網付き仕切板Bを外して、稚アユの半数程度をプール②に誘導して再び締め切った。仕切板Cを外した時を実験開始時刻とした。1時間半後、仕切板Cを仕切板B側に入れて、魚道入口側へゆっくり移動して空間を狭くしながら稚アユの魚群密度を高めるといふ遡上の引き金効果を人為的に行った。さらに、同様の手順によって流量が少ない場合を行った。

(2) 稚アユの遡上量

魚道出口付近を撮影領域としたビデオ画像から、流量が多い場合における稚アユの5分間ごとの遡上量の時間的変化を示したものが図-7である。魚道入口のネットを開放後数分して遡上が確認され、その後間欠的な遡上量の変化を示している。流量が多い場合には、中央に集中する流れが強いために、魚道入口の片側に進入した稚アユは、魚道出口でも同じ側を継続して遡上する傾向にある。また、図中後半において遡上量の急激な増加が見られる。これは、

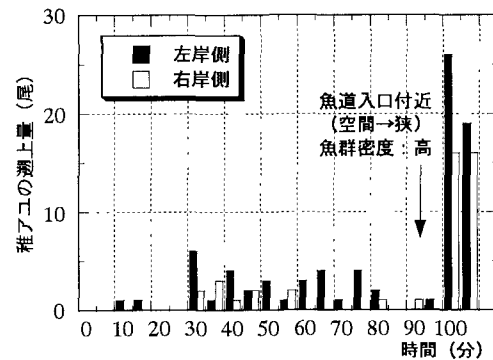


図-7 稚アユの遡上量の時間的変化 (室内実験)

魚道入口のプールの領域を金網で狭くして魚群密度を高くしたことにより生じたものであり、何らかの引き金効果によって十分遡上できる潜在力を秘めていたことがわかる。なお、流量が少ない場合には中央部の流れの集中が弱くなるので、稚アユの遡上経路は側壁に沿った領域だけではなく、中央部や斜め阻流材を乗り越えながら、また左右両側を交差して遡上する稚アユが増加し、全領域が遡上経路として提供されることになる。

(3) 稚アユの遡上経路と平均遡上速度

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-8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間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。

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。多くの遊泳魚の場合、突進速度 (持続時間1秒~数秒) は体長の10倍前後といわれている¹⁾。実験に用いた稚アユの場合、約80cm/sが突進速度と算定される。水平阻流材の天端の流れは、ダムクレストの越流と同じように流線の曲率の影響を無視できず、

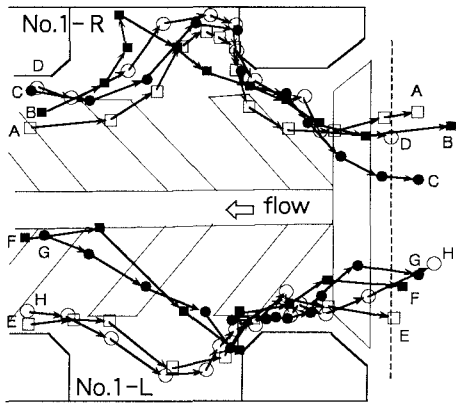


図-8 稚アユの遡上経路 (平面: 領域II)

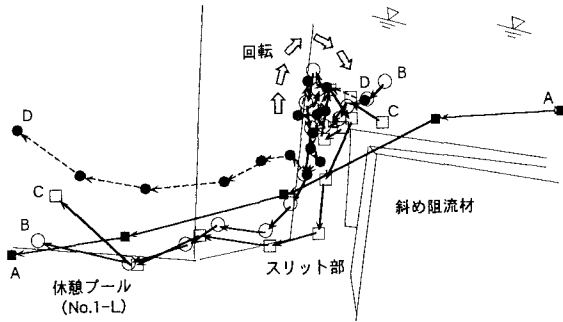


図-10 稚アユの遡上経路 (スリット部断面: 領域II)

越流底部で速く水表面で遅い流速分布となる。また、天端上の乱れはきわめて弱い射流状態となっている。スティーブパス式魚道においても、中央底部の主流速が大きく乱れが少ない領域を、算定される突進速度よりも大きな速度で稚アユが遡上したことが確認されている⁴⁾。このように、稚アユが瞬間的に発揮する最大の遊泳速度は、平均流速の絶対値だけでなく、乱れの状態などの要因も関与しているものと考えられる⁵⁾。

魚道出口周辺において、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示したものが図-9である。同図から、前述した突進速度(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、 $x=40\text{cm}$ 付近では、両岸ともにその速度差が小さくなっている。この地点は、図-8に示した遡上速度が遅くなる、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区間で、スリット部を流下する強い流れ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、下流側のように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。

図-10は水中カメラの画像から1/15秒ごとの稚アユの遡上軌跡を重ねたものである。同図から、斜め阻流材を乗り越えて画面を横切って休憩プールに進入する個体、スリット部を前進しながらプールに

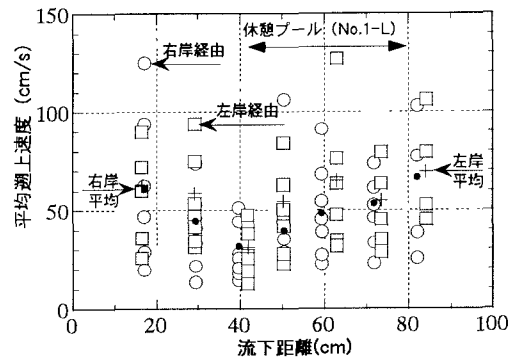


図-9 稚アユの平均遡上速度

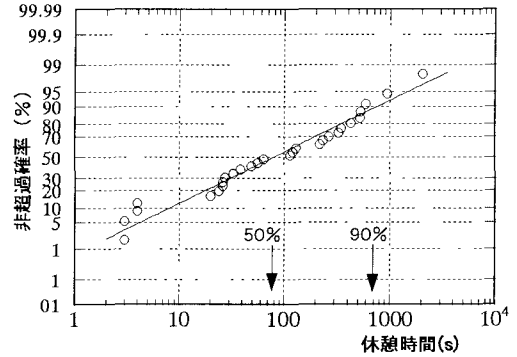


図-11 プールの休憩時間

遡上する個体が見られる。この場合、スリット部通過時には、上下に移動あるいは時計回りに回転しながら遡上している様子がうかがえる。これは前述したように、斜め阻流材の背後においてスリット側の底部では側壁、水面付近では逆に中央に向かう時計回りの螺旋渦流が形成されており、稚アユはこの渦流に身を任せながら巧みに遡上したものと推察される。また、側壁のスリット部を通過する場合には、流速の大きいスリット底部を除いてその上部から水面に至る比較的広い範囲を遡上しており、逆に休憩プールへの進入位置は底面付近を多く利用しており、水面に浮上することはない。

(4) 休憩プールの滞留時間

上述したように、最上流部のスリット側の流れは十分に減勢されていないので、休憩プール内で休んでから再び遡上するグループも数多く見られた。この休憩プールを3秒以上利用した個体群について、その滞留時間をビデオ画像から求めて図示したものが図-11である。同図から、稚アユの休憩プールの滞留時間の分布は、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。全体の平均滞留時間は1分30秒程度であり、全体の90%は10分以下で遡上したことになる。このように、稚アユの個体によって平均遡上速度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. 現地河川における仮設魚道実験

(1) 仮設実験の概要

1998年5月1～6日の期間、鳥取県千代川の大口堰（河口から13km上流）の左岸側に仮設魚道を設置して、稚アユの遡上状況を把握するための現地実験を行った。魚道はすべて木製であり、長さ80cm、幅90cm、高さ40cmのユニットを20組連結して設置した。室内実験で用いた阻流材よりも1.5倍大きいサイズ（阻流材：10cm角）で、途中の中間プール（1.8m×2.9m×0.4m）を含めた全長は20.3mである。なお、中間プールより上流側の勾配は1/9.6、下流側は1/6.5である。ただし、室内実験では斜め阻流材3組ごとに1組の休憩プールを挿入したが、現地実験では中間プールと上流端の間（7.4m）に1組の休憩プールのみを設置し、スリット部を設けない条件、稚アユの遡上にとって室内実験よりも過酷な条件を設定して行った。主な調査項目は、プロペラ式および電磁流速計による流速分布、トラップを用いた稚アユの遡上量、ビデオによる遡上状況の観察である。実験に使用した稚アユは、和歌山県にて採取・育成された海産系の約500尾（体長：8.3±1.4cm）である。河川水への馴致は行わず直接魚道の中間プールに放流して遡上実験（1998年5月4日10:00-17:00、晴天）を行った。実験中の魚道内流量は0.14～0.15m³/s、水温は16～22℃の範囲であった。

(2) 稚アユの遡上量と遡上経路

稚アユ放流後2時間におけるビデオ画像から得られた稚アユの遡上量の時間的変化を示せば、図-12のようである。投入後、十数分後に遡上が確認され、その後も断続的な遡上を確認されている。また、稚アユの群集密度を変化させた後、多少の時間遅れを伴いながら遡上量が増加していく様子が見られる。さらに、小型水中ビデオの観察結果によれば、両側で水面が盛り上がった位置、すなわち上昇流を伴う柔らかい流れの領域に沿って遡上する個体が多く見られた。また、スリット部がないので、側壁近傍の阻流材天端より上部の水面付近の範囲を多く利用していることがわかった。休憩プールの間隔が広くてスリット部がない過酷な条件でも稚アユの遡上を確認された。また、同図において、90分以降に急激に遡上量が増加しているのは、室内遡上実験と同様に、中間プールにおいて仕切板をゆっくり移動して空間を狭くして魚群密度を高めたことによる影響である。なお、魚道出口を通過した稚アユ

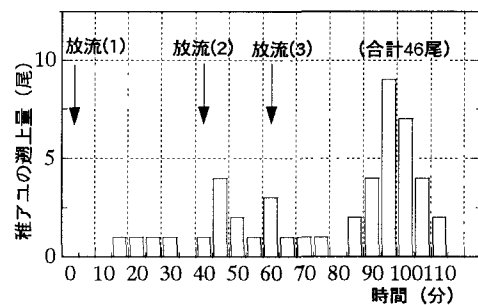


図-12 稚アユの遡上量の時間変化（鳥取県千代川）

が堰上流へと移動せず、上流側に生じた影との境界線で滞留するという、日影に対する一種の忌避行動も認められた。

5. おわりに

以上、修正ラリーニア型舟通し魚道を取り上げて、魚道内に生じた流れ場と稚アユの遡上経路の関係を考察した。デニール式やステープパス式魚道は鉛直方向に大きな速度分布が生じるのに対して、舟通し魚道は斜めに配置した阻流材によって、中央に流れの集中を励起して水平方向に大きな速度分布を発生させる構造である。その結果、側壁側に生じた上昇流を伴う水位の高い、柔らかい流れの領域を稚アユは遡上しながら、休憩プールで体勢を立て直して前進する個体群が数多く見られた。休憩プールの間隔が広くてスリット部がない現地実験結果からも稚アユの遡上は確認されているが、より有効に魚道が機能するためにはスリット部の導入、休憩プールの間隔を狭める必要がある。このように、魚道という特殊な状況下では、狭くても確実に遡上可能な経路の確保と、その経路に隣接した休憩プールの適切な配置が重要となることが明らかにされた。

謝辞： 現地の仮設魚道実験に際しては、鳥取県水産課水産振興係など関係機関のご協力を頂いた。末尾ながら、深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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、砂防学会論文集、No.2、55p.、1991。
- 2) 中村俊六：魚道のはなし、山海堂、225p.、1995。
- 3) 中村俊六：鳥取県千代川大口堰の魚道仮設調査および魚道概略設計報告書、40p.、1998。
- 4) 和田 清・東 信行・中村俊六：デニール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、1997。
- 5) 上西園理恵：魚の遊泳運動に及ぼす乱れの影響に関する基礎的研究、豊橋技術科学大学卒業論文、51p.、1998。

(1998.9.30受付)