

デニール式およびスティーブパス式魚道 における流れ場の特性と稚アユの遡上行動

MIGRATORY BEHAVIOR OF JUVENILE AYU RELATED TO
FLOW FIELDS IN DENIL AND STEEPPASS FISHWAYS

和田 清¹・東 信行²・中村 俊六³

Kiyoshi WADA, Nobuyuki AZUMA and Shunroku NAKAMURA

¹正会員 工博 岐阜高専・助教授 建設工学専攻科 (〒501-04 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 弘前市文京町3)

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

Portable Denil and steepass fishways (0.3m wide, 0.3m deep) were experimentally installed on a divergent weir in Okitsu river. For ascended fishes to exit of the fishways, the number of fish in Denil were six times as many as ones in steepass and the mean body size in steepass were greater than ones in Denil. The fishes tend to choose the region of weak secondary flow and to ascend in upward secondary flow more than downward one in steepass that contain much air bubble. The Denil fishways have the advantage of slower flow region without air bubbles for small fishes. It is pointed out for the juvenile ayu that flow directionality related to secondary flow and vortex scale have an effect on ascending behavior in the fishways.

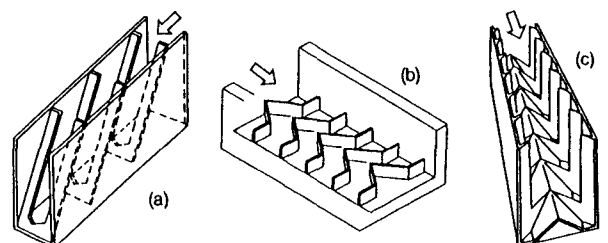
Key Words : Upstream migration, fish passage, Denil, Alaska steepass, ayu, spiral flow

1. はじめに

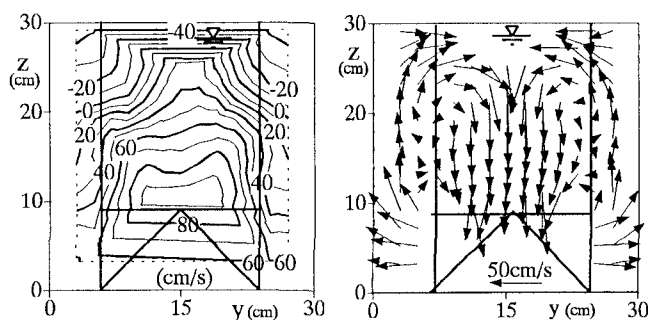
近年, 河川魚類などの回遊路を確保するために, 種々の遡上用の魚道が新設され, また既設魚道についても改善策が施されている. どのようなタイプを選定するかは, 現実の複雑な条件下で検討するのが一般的であるが, とりわけ, 上流および下流の水位変動があまり大きくなく, 低落差の条件下では, 小型で安価なタイプとして, デニール式をはじめとするストリーム型魚道があげられる. これらのタイプは, 増水時に流水や転石などが流入する場合が少なくないのでメンテナンスの必要頻度は高くなるけれども, 特に魚道のない堰や既設魚道の改善策が十分ではない堰において, 稚アユの遡上期に限定して仮設魚道を設置するような場合には, これらのタイプはきわめて有効な手段となっている¹⁾.

ストリーム型は, 流れに広範囲の流速分布を生じさせることによって遡上可能な経路を提供するものであり, 図-1のようにデニール式, スティーブパス式, 舟通し型, 粗石付き斜曲面などが考案され, 多くの現地河川に設置されている. これらは, 基本的に長方形水路内に設けられた阻流板などによって

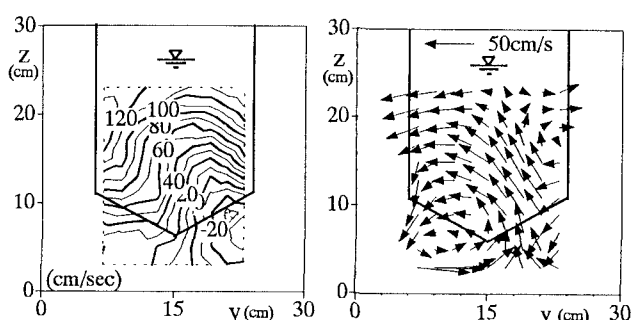
流れの集中と緩い水流を生じさせる構造なので, 水路内に生じる螺旋渦流が強い場合には魚類の遡上を阻害することになる. スティーブパス式などは欧米のサケ・マス科魚類の成魚を対象とした魚道であり, American shadやblueback herringの成魚にPITタグをつけて, タイプの異なる魚道の遡上量を比較検討する試みも行われている²⁾. しかしながら, これらの形式がもつ螺旋渦流の水利特性を, わが国固有の稚アユなどの小型魚類との関連で詳細に調査した事例はきわめて少ないのが現状であり, 単に遡上量の比較だけではなく魚類の遡上行動を流れの場の特性と関連づけて議論することは重要である.



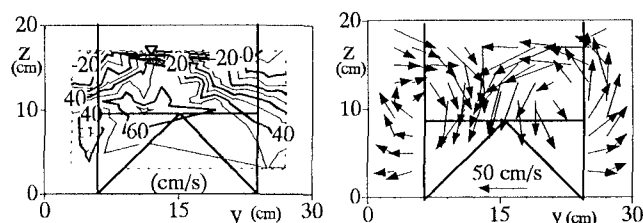
(a)デニール式 (b)舟通し型 (c)スティーブパス式
図-1 代表的なストリーム型魚道



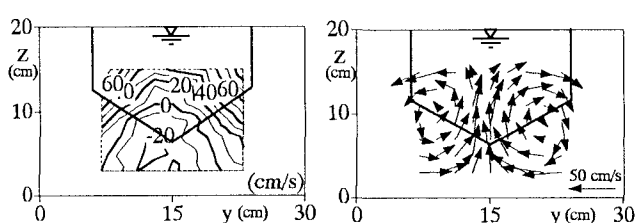
(a) 主流速成分：U (b) 2次流ベクトル：V,W
図-2 スティープパス式の流速分布
($Q_{D+S}=0.044 \text{ m}^3/\text{s}$ ：流量が多い場合)



(a) 主流速成分：U (b) 2次流ベクトル：V,W
図-4 デニール式の流速分布
($Q_{D+S}=0.044 \text{ m}^3/\text{s}$)



(a) 主流速成分：U (b) 2次流ベクトル：V,W
図-3 スティープパス式の流速分布
($Q_{D+S}=0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ ：流量が少ない場合)



(a) 主流速成分：U (b) 2次流ベクトル：V,W
図-5 デニール式の流速分布
($Q_{D+S}=0.018 \text{ m}^3/\text{s}$)

本研究は、稚アユを対象にして、水路内に生じた螺旋渦流の強さやスケール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明らかにするために、電磁流速計（3方向計測用）などによる流れ場の計測と、実河川における稚アユを用いた遡上実験を行ったものである。魚道の形式としては、阻流板によって生じる流速分布が対照的なデニール式とスティープパス式を取り上げて、両者の違いを吟味しながら稚アユの遡上行動について比較検討した。

2. ストリーム型魚道の流れ場の特性

(1) 水理実験の概要

ストリーム型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、岐阜高専内の水理実験室内において、鋼製のデニール式とスティープパス式の各魚道ユニット（幅30cm×高さ30cm×全長90cm）を並列に5組連結し、勾配1/5、全長4.5mに設置して行われた。流速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-300P、時定数0.5s）を用いて、2cm×2cmのメッシュ間隔で底面に垂直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、SH-2）を使用した。計測時間は90sであり、すべてのデータはデータレコーダに記録し信号処理された。なお、魚道内の流量は、両形式を合わせた合計流量 Q_{D+S}

が0.044および0.018 m^3/s の2通りについて行った。

(2) 水面変動

各魚道内の等流区間を見出すために、サーボ式水位計を断面中央に設置し、流れ方向に阻流板の間隔（13-15.5cm）ごと移動しながら水面変動の計測を行った。さらに、その等流区間内の3測線について横断方向の水面形状を5cm間隔で測定した。

デニール式魚道の横断方向の水面形状は、中央部で盛り上がり阻流板の位置する側壁付近では下がる凸型の形状をしている。流量が多い場合（ $Q_{D+S}=0.044 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では、中央部の水深は時間平均値で26cm、側壁付近は23cmであり3cm程度の水位差が生じていた。一方、スティープパス式の水面形状は側面付近で盛り上がり中央部で低下する凹型で、デニール式の場合とは逆の水面形状である。また、スティープパス式の水面付近では気泡混入が著しい。流量が多い場合の中央部の平均水深は27.5cm、側壁付近では33cmとなり、デニール式の約2倍の水位差（5.5cm）が生じており、阻流板の形状や配置によって流況を大きく変化させていることがわかる。

(3) 主流成分と2次流の流速分布

横断方向の水面形を計測した同位置において、断面内の3次元的な流速分布を測定した。図-2(a),(b)は流量が多い場合のスティープパス式における流下方向主流速成分（U）のコンターと、下流側を見た横断方向の2次流（V, W）ベクトルを示

したものである。流速は60 s 間の時間平均値を用いた。同図(a)から、中心軸における主流速は底層で速く水面付近で遅い傾向が見られるが、側壁の阻流板近くの分布形はより複雑で上部に逆流域が生じている。また、同図(b)の2次流のベクトルを見ると、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2次流が生じていることがわかる。この場合、(2)で述べたように、横断方向の水面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おり、中央の下降流領域では水面の低下が、側壁の上昇流領域では水面の上昇が安定的に形成されていることと対応している。図-3は流量が少ない場合($Q_{D+5}=0.018 \text{ m}^3/\text{s}$)の結果を示したものである。水深が浅いために流速分布に若干偏りが見られるが、主流速は底層で速く上層で遅いステープパス式魚道の特徴を示している。また、2次流ベクトルの状態も中央で下降流、阻流板背後で上昇流を示す一組の2次流が生じていることがわかる。

一方、デニール式については図-4に示したように、流量が多い場合には、主流速は底層で遅く上層で速い傾向が見られるもののその分布形は非対称で、2次流の分布形も反時計回りの渦流が卓越している。また流量が少ない場合(図-5)には、主流速の分布形はほぼ対称で、中央で上昇流、側壁側で下降流を示す、ステープパス式とは逆の対照的な2次流が生じていることがわかる。流量が少ない場合には中央の水面付近の主流速は2次流の上昇流の流速オーダーとほぼ同じなので、中央で高く側壁側で低い凸型の水面勾配が形成される。流量が多くなるとこの上昇流よりも大きな主流速が水面付近に形成されるので上昇流が拘束あるいは抑え込まれる状態になる。その結果、対称的な2次流よりは一方の渦流が卓越した状態がむしろ安定となり、上述の非対称な分布形を示したものと推察される。なお、中心軸上における主流速の鉛直分布は、Katopodisの実験式³⁾とほぼ一致することが確認されている。

ストリーム型魚道内における流れ場については、 $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値解析も行われている⁴⁾。横断面内の軸対称性、反流領域、凹凸状の水面勾配など異なる点もみられるが、主流速の分布形状や2次流のベクトル方向については概ね一致している。

3. 稚アユを用いた仮設魚道の遡上実験

(1) 遡上実験の概要

仮設魚道は、静岡県清水市を流れる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。仮設魚道の遡上実験実施状況は写真-1、設置状況は図-6のようであり、

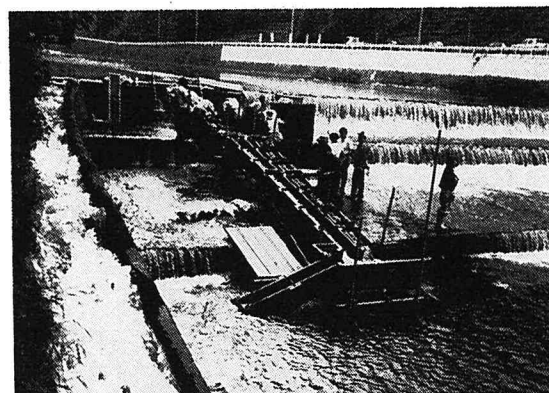
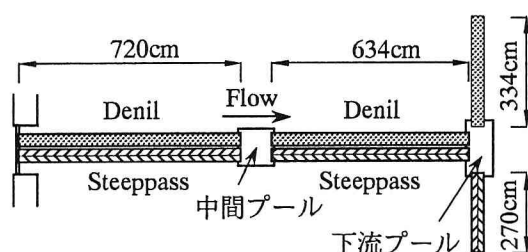
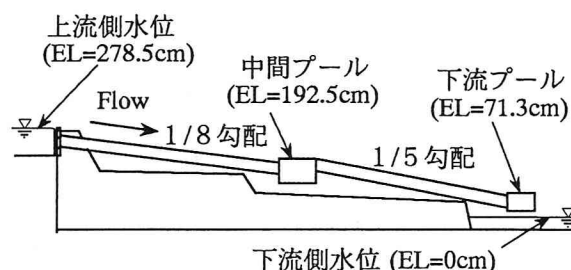


写真-1 仮設魚道の遡上実験状況 (静岡県興津川)



(a) 平面図



(b) 断面図

図-6 仮設魚道の設置状況 (静岡県興津川)

水理実験で用いた同スケールの鋼製デニール式とステープパス式の2種類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。主な調査項目は、魚道内中心軸における流速の鉛直分布、稚アユの遡上量、遡上状況などである。流速分布の測定には、直径2cmの現場用プロペラ流速計(コスモ理研製CR-7型)を使用した。

遡上実験は、下流プール内に放した稚アユの群れがどのような遡上行動をしながら、どちらの魚道をより多く利用するかを明らかにするために2回に分けて行われた。ただし、下流プールの入口2ヶ所にはネットを張り稚アユが下流側に逃げないようにされている。第1回目調査(1995年5月26日~28日)では、中間プール入口と魚道出口にトラップを仕掛けて遡上量を定量的に把握し、遡上した稚アユの

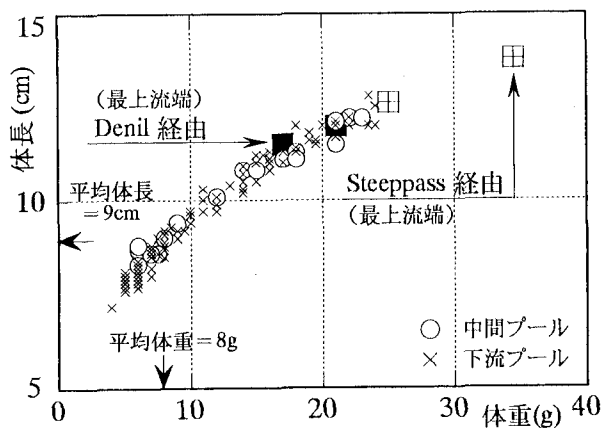


図-7 稚アユのサイズと遡上量 (人工種苗産)

サイズについて検討した。第2回目調査(1995年6月23日)では、中間プールから下流に向かって魚道入口を眺める方向に水中ビデオカメラを計2台設置して、稚アユの遡上状況を撮影・解析した。実験に使用した稚アユは、第1回目調査では静岡県水産試験場人工種苗産を133尾、第2回目調査では琵琶湖安曇川に自然遡上した稚アユ約400尾である。調査期間内における水温は13-22℃の範囲であった。なお、遡上実験では下流プール内に放した稚アユの遡上を促すために、その「引き金」効果として上流側魚道において仕切り板を挿入して流量を変化させたり、下流プールに他の稚アユを投入して魚群密度を高めるなどの工夫を凝らした。

(2) 稚アユのサイズと遡上量⁵⁾

第1回目調査に使用した稚アユ(人工種苗産)の平均サイズは、体重約8g、体長約9cmであった。図-7は、下流プールから中間プール、さらに魚道出口の堰上流端まで遡上した稚アユの体長と体重の関係を示したものであり、図中×印は遡上せず下流プール内に留まった稚アユを表している。同図から、中間プールまで遡上した稚アユは両形式の魚道を合わせて18尾で、そのサイズは平均サイズよりも小さいものから大きいものまで比較的広い範囲に分布していることがわかる。また、魚道出口まで遡上した稚アユ(4尾)は、両魚道とも平均サイズよりも大型のものであったことや、全稚アユの中で最大のサイズがスティープパス式を利用したことが同図からうかがえる。このように、魚道出口までスティープパス式を利用して遡上した稚アユのサイズは、デニール式よりも大きい傾向にあり、一般に稚アユの遊泳速度は体長に比例すると考えられているので、スティープパス式ではある程度の遊泳力をもつ稚アユでないと遡上できないことを示唆しているものと思われる。なお、これらの遡上量の調査期間は、5月27日午後3時から翌日午前7時までの16時間内の結果

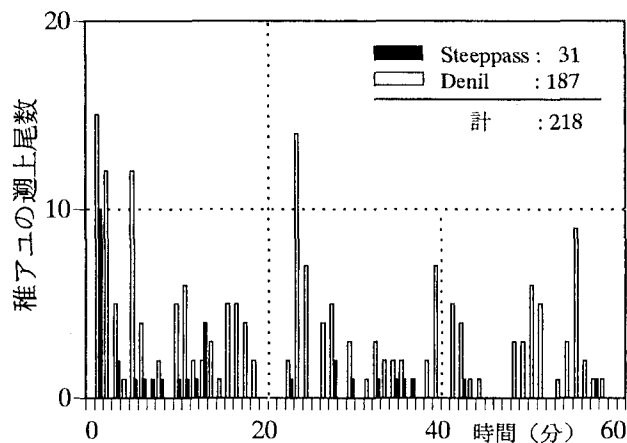


図-8 稚アユの遡上量の時間変化 (琵琶湖産)

であり、魚道出口までの遡上率は3%、中間プールまでは17%と低い遡上率であったことがわかる。

一方、図-8は、琵琶湖産の稚アユを用いた遡上実験の結果であり、ビデオ解析によって求めた稚アユの遡上量の時間変化を示したものである。同図から、下流プールに放流した直後の数分間は両魚道とも中間プールまでの遡上量は大きく変化しないが、その後、スティープパス式では1~2尾程度の間欠的な遡上が観察されるのに対して、デニール式では数尾以上の継続的な遡上が見られる点が大きく異なっている。さらに、デニール式では20~30分おきに遡上量が増加するピークが存在するように見受けられる。6月23日の午後3時から4時の1時間の観察では、デニール式：187尾、スティープパス式：31尾となり、デニール式を利用した稚アユの遡上量はスティープパス式のほぼ6倍に達したことがわかる。さらに、中間プールまでの遡上率は合計で50%を越えており、高い遡上率であった。

このように、スティープパス式を利用した稚アユのサイズはかなり大きいこと、遡上意欲が旺盛な琵琶湖産の稚アユですらデニール式よりもかなり遡上率が低かったことなどから、遊泳力の小さい稚アユにとってはスティープパス式を遡上するのは容易ではなく、これは、両形式がもつ流れ場の水理特性の差異が大きく関っているものと考えられる。

(3) 稚アユの遊泳位置

2.でも述べたように、各魚道内の流速分布は3次元的に変化し、横断面内では1対の2次流を形成して、主流の集中に伴って下流方向に螺旋流として流れていることがわかった。このような流況下のどこを遡上経路として利用しているかを明らかにするために、ビデオ解析から底面に垂直な断面内の遊泳位置を示したものが図-9と図-10の(a)、両図(b)は稚アユの遡上状況を捉えたビデオ画像の一例である。ただし、同図は歪んだビデオ画像において稚アユの

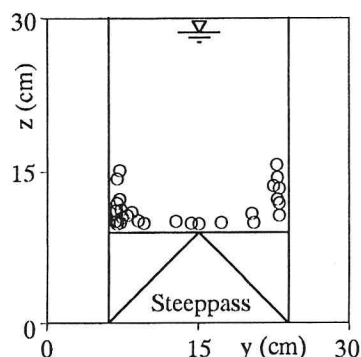


図-9 (a) 稚アユの遊泳位置 (スティーブパス式)

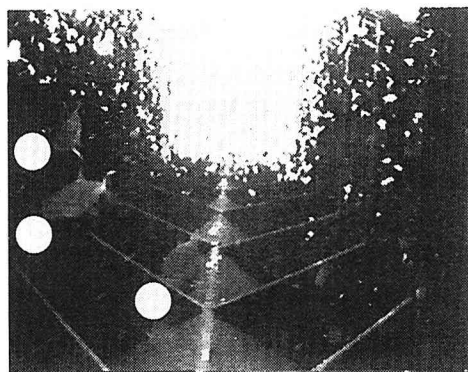


図-9 (b) 稚アユの遡上状況 (スティーブパス式)

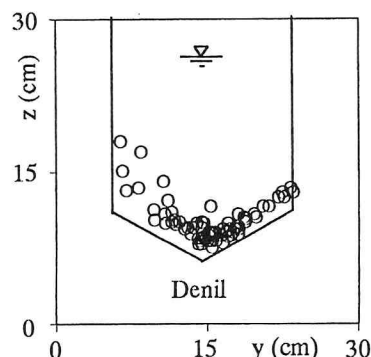


図-10 (a) 稚アユの遊泳位置 (デニール式)

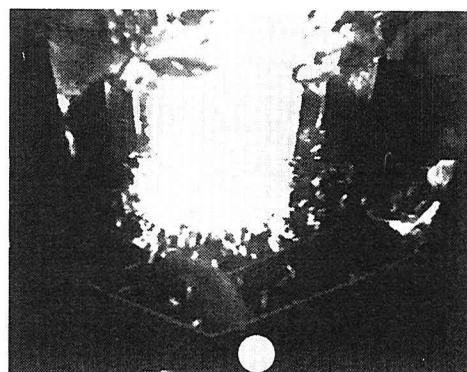


図-10 (b) 稚アユの遡上状況 (デニール式)

先端部分が通過した位置を補正して表示されている。また、両図(b)中、稚アユの先端部を白抜きのお印で表した。同図から、両形式とも平均水深の半分よりも下の阻流板付近を多く遡上している様子がうかがえる。スティーブパス式魚道では、激しい気泡の巻き込みが断面全体に生じており、視界が悪い状態である。遊泳位置は中央よりはむしろ左右の阻流板に偏って遡上をしていた。デニール式魚道では、スティーブパス式に比べて気泡の発生は少なく、主流速が小さく比較的2次流の弱い中央下部のV字に沿って遡上していた。遡上に必要な視界の確保という点では、気泡の巻き込みが少なく底面付近的主流速が弱いデニール式が稚アユにとって有利な水理条件であったと考えられる。

本実験に用いた魚道断面のアスペクト比はほぼ1であるが、アスペクト比が異なる、水深が大きい場合の稚アユの現地遡上実験も別途実施している。その結果によると、水深が十分深くてデニール式ではV字付近を遡上していることが確かめられている。一般に、魚類が表面を浮上して遡上することが希であることなどを考えると、底面付近ほど主流速が弱いデニール式が相対的に優位となることは理解できる。さらに、スティーブパス式の場合、阻流板によって流れを底層へ底層へと逃がす結果、水面付近に生じた流れはきわめて遅く、細かい気泡を含んだ状態となっている。このような気泡が多すぎると泳ごうとするエネルギーが推進力にはならず、しかも視

界の確保などの点から、稚アユは主流速や下降流が大きい下方を遡上することを半強制的に強いられているともいえる。

(4) 稚アユの遡上速度と遡上行動

遡上した稚アユの魚道内の遊泳位置から、底部の流速が速いスティーブパス式においても、稚アユは魚道の底部部分を多く遡上していることが観察された。また、スティーブパス式では、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、阻流板によって生じた左右下部の空隙ポケットの間で休憩しながら巧みに遡上するもの、さらには底面の直上を休憩せず遡上した稚アユなどが観察されている。遡上開始5分以内のデータにおいて、阻流板下部に生じた空隙内（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、デニール式では約70%、スティーブパス式ではわずか1尾（3%）であり、スティーブパス式の場合ほとんど空隙ポケットを経由していることがわかる。図-11は、スティーブパス式において阻流板に生じたその空隙内でどの程度休息したかを時間で示したものである。ばらつきは大きいがどこかの空隙内で平均1sほど休憩したことがわかる。(3)で述べたように、遊泳位置が中央よりも阻流板の左右に偏っていたのは、この空隙内で休憩しながら体勢を立て直して再び遡上していく結果であり、血合筋だけでなく普通筋までも使った突進

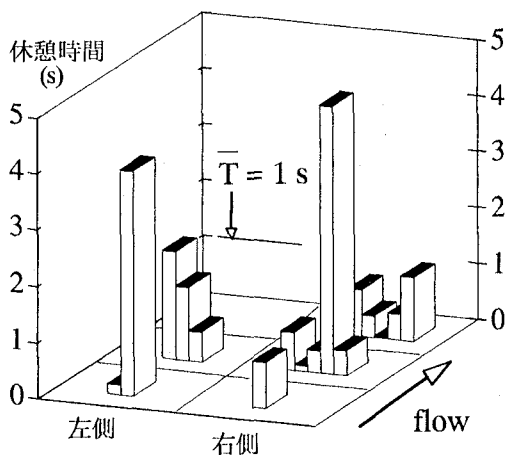


図-11 空隙ポケット内における休憩時間
(スティーパス式)

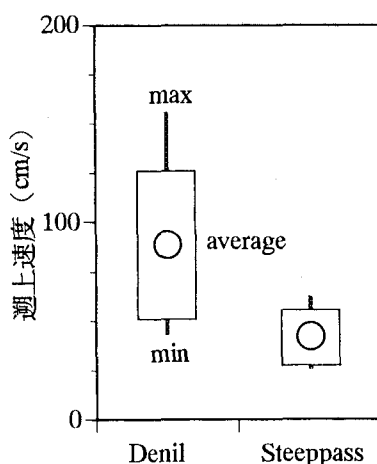


図-12 稚アユの平均遡上速度
(対象領域：阻流板の間隔4個以内)

遊泳によって一気に遡りきってしまうためには、流れの条件として流速の大きさだけでなく、稚アユの体長と渦流のスケールの関係や流れの方向性も重要であることを示唆しているものと思われる。図-12は、図-11などの結果をもとにして両タイプの魚道における稚アユの平均的な遡上速度を比較したものである。デニール式では、遡上速度が速いものから遅いものまで広範囲に分布しており、稚アユの個性に応じて選択可能であるといえる。一方、スティーパス式の場合には、その範囲は狭く、ほとんどが阻流板で囲まれた隙間を巧みに利用しながら遡上する結果、瞬間的な突進速度は速いものの数個の空隙ポケットの区間で考えるとほとんどどこかで休息をするために平均的な遡上速度は遅くなる。これは稚アユの遊泳速度が流況に支配されており、遊泳速度の小さい稚アユにとってはスティーパス式の流れ場の条件はきわめて厳しいといえる。

4. おわりに

本研究では、現地河川にデニール式とスティーパス式のストリーム型魚道を設置して、稚アユの遡上行動について調査するとともに、魚道内の流れ場の詳細な計測を行った。その結果、底部に弱い主流速や2次流が生じるデニール式は、気泡混入が激しいスティーパス式よりも稚アユが多く利用したことなどが示された。しかしながら、視界や流況がよくない条件下でも、スティーパス式では、阻流板下部に生じた空隙ポケットを巧みに利用しながら遡上する稚アユも多くみられた。逆に、阻流板の間に

生じた渦流に巻き込まれて方向を見失い、阻流板の陰に30秒以上とどまっている様子も観察された。底部では下降流をもつ2次流が大きく分かれる部分であるために、激しく体をくねらせ左右に揺さぶられて頭を下に傾けながら遡上している稚アユの状況から、比較的安定した泳ぎが見られたデニール式に比べて、流れはかなり乱れていたと思われる。このように、小型魚の遡上にとって重要なのは、全断面内で支配的な螺旋渦流だけでなく、稚アユの体長スケールの渦構造も重要になると考えられる。

謝辞：現地河川における稚アユの遡上実験に際して、静岡県土木部をはじめ、(財)リバーフロント整備センター、興津川非出資漁業協同組合、静岡県水産試験場の関係機関の方々には多大なご協力を頂いた。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) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，225p.,1995.
- 2) Castro-Santos T. et al.: A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways, Fisheries Research, No.28, pp.253-261,1996.
- 3) Katopodis, C. : A study of the Hydraulic of Denil Fishways, M. Sc. Thesis Univ. of Alberta, 158p.,1982.
- 4) Tsujimoto T.: Numerical analysis for aid to understand the flow structure of stream-type fishways, Proceedings of the International Symposium on Fishways '95 in Gifu, pp.49-56,1995.
- 5) 和田 清・東 信行・真田誠至：ストリーム型魚道の水理特性と遡上量に関する研究，第51回土木学会年次学術講演会，II-24, pp.177-178, 1996.

(1997.9.30受付)