

エビと底生魚を魚道上流端からダム湖に誘導する新手法の検討

浜野龍夫^{*1†}・福泉 拓^{*1*2}・荒木 晶^{*1}・竹下直彦^{*1}・渡邊敏晃^{*3}・横田源弘^{*3}

A novel upper terminal edge of a fishway designed to enhance migration of shrimp and benthic fish

Tatsuo Hamano^{*1†}, Hiromu Fukuizumi^{*1*2}, Akira Araki^{*1}, Naohiko Takeshita^{*1}, Toshiaki Watanabe^{*3}, and Motohiro Yokota^{*3}

To develop a new economic and effective fishway which allows the migration of diadromous shrimps and benthic fishes over dams, devices at the upper terminal edge of an experimental fishway with a trapezoidal cross-section (maximum width 30 cm and floor width of 10 cm) were studied. The atyid shrimp *Caridina leucosticta* and gobiid fish *Rhinogobius* sp. CB actively migrated when a stream current of 5.0 l/min was passed over the fishway. The current without a hydraulic jump from a pipe promoted animals to reach the upper terminal edge through the splash zone of the water inlet and successfully passed over the fishway. 30–70 % of the test animals effectively passed over the fishway when the terminal edge of the fishway was constructed of two isosceles triangles.

1 はじめに

一生の間に海と川を往来しなければ生活史を全うできないウナギ *Anguilla japonica* やモクズガニ *Eriocheir japonica* などの通し回遊性の動物は、ダムにより回遊経路が遮断されると、その河川上流域の個体群は衰退してしまう¹⁻³⁾。西日本の河川には、通し回遊性の遊泳性の魚類であるアユ *Plecoglossus altivelis altivelis* のために魚道が設けられていることが多いが、水際を遡上する甲殻類や底生魚類に対しては、必ずしも機能的ではない。そこで、甲殻類や底生魚類にも配慮した魚道の開発が行われ⁴⁻⁶⁾、すでに長崎県や山口県下には設置されている^{9,10)}。ダムの建設により衰退した、上流域の通し回遊性生物の個体群の復元には、このような魚道の設置が有効だが、既設のダムの一部を切って魚道を設置すると莫大な工費が必要となる。そこで、ダム堤の上をまたぐ簡便な魚道を架設するのが得策と考える

が、その魚道の最頂部から水を流した場合は、ダム湖側にも水が流れ下ることになる。ところが、魚類や甲殻類は流れに逆らって上流へ行こうとする性質（正の向流性、または走流性と称される）が強いため^{7,9,11,12)}、ダム下から遡上してきた生物は、魚道最頂部からダム湖側へ下り降りにくいと考えられる。このため、産業的重要種であるモクズガニについては、稚ガニを魚道上流端から湖面へ落下させるための手法が検討された⁸⁾。その実験では、魚道に流す「魚道維持水」とは別に、「噴射水」を魚道上流端へ当てて、稚ガニを水勢で落としたり、上流端の床面の構造を変えてカニを落とすことが試みられた。その結果、噴射水を使わなくても、魚道上流端の床面を水平な三角形にするだけで、カニがよく落下することが明らかになった⁸⁾。本研究では、エビ類や底生魚類を落下させる方法を提案することを目的としたが、モクズガニでの実験結果を踏まえ、噴射水は使わないことにし、魚道維持水の性状と魚道上流端の

2003年10月27日受付. Received October 27, 2003.

*1 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University, Shimonoseki, Yamaguchi 759-6595, Japan).

*2 現所属: (財) 広島市水産振興協会 (Hiroshima City Marine Products Foundation, 8-5-1 Shoko-Center, Nishi, Hiroshima 733-0833, Japan).

*3 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University, Shimonoseki, Yamaguchi 759-6595, Japan).

† 別刷り請求先 (Corresponding author: Phone, +81-832-86-5111; Email, hamano@fish-u.ac.jp)

構造に関する3室内実験(実験Ⅰ～Ⅲ)を行った。なお、エビ類としてミゾレヌマエビ *Caridina leucosticta*, 底生魚類としてシマヨシノボリ *Rhinogobius* sp. CB を実験個体として使用した。いずれも、西日本の河川には普通に分布する種類である。ミゾレヌマエビは比較的大きな河川の中下流域に多産し、通し回遊性(両側回遊性)の生活史を持つ¹³⁾。シマヨシノボリは中流域の平瀬に多く、通し回遊性(両側回遊性)の生活史を持つが、ダム湖やため池と流入河川との間を回遊して一生を淡水域で過ごす陸封性のものもある^{14,15)}。

2 実験Ⅰ～Ⅲに共通する材料と方法

本研究では3室内実験(実験Ⅰ～Ⅲ)を実施した。まず、エビや魚が遡上しやすい流量を明らかにするために、昼夜の両方で、魚道維持水の流量を変えてエビや魚を遡上させる実験を行った(実験Ⅰ)。その結果決定した流量の魚道維持水を、出水管の本数と先端のノズルの形状を変えて魚道上流端へ流し、維持水の着地点付近で、エビや魚を魚道から落下させる実験を実施した(実験Ⅱ)。さらに、この実験で良い結果であった出水管数とノズル形状を用いて魚道維持水を噴射し、魚道上流端の床面の構造を変えて、エ

ビや魚を落下させる実験を行った(実験Ⅲ)。ここでは実験Ⅰ～Ⅲに共通の材料と方法について説明する。

2.1 実験装置

実験魚道は、モクズガニの実験のために製作したもの⁸⁾を流用した(Fig. 1)。この魚道はアクリル製である。斜路の勾配は 20° で、その先は水平となっている。魚道の両側壁は 45° の角度で外側へ広がっており、どの部分の断面も台形状である。魚道の幅は約30 cmで、魚道の先端部は、側壁として垂直に立てたアクリル板を立てて、先端に向かって最終的に床面の幅10 cmになるように側面の斜面を狭め、生物が上流端の中央に集まりやすいようにした。魚道表面には、浜野ら⁴⁾の実験魚道と同様に、エビの歩脚先端がかりやすいように、ポリウレタン製のスポンジを厚さ5 mmになるように切ってシリコンシーラントで貼った。魚道の流水出口は、ポリエチレン製のネット(目合い 2×2 mm)でふさいだ。魚道上流端(Fig. 1のD)から落下した個体は、直下に設置したポリエステル製のネット(Fig. 1のE)に入るようにした。

実験は室内で行い、エアコンで気温を調整することによって水温を $22 \pm 2^\circ\text{C}$ に収まるようにした。実験魚道に流した水は、水道水を汲み置いて一日以上強く曝気したもの

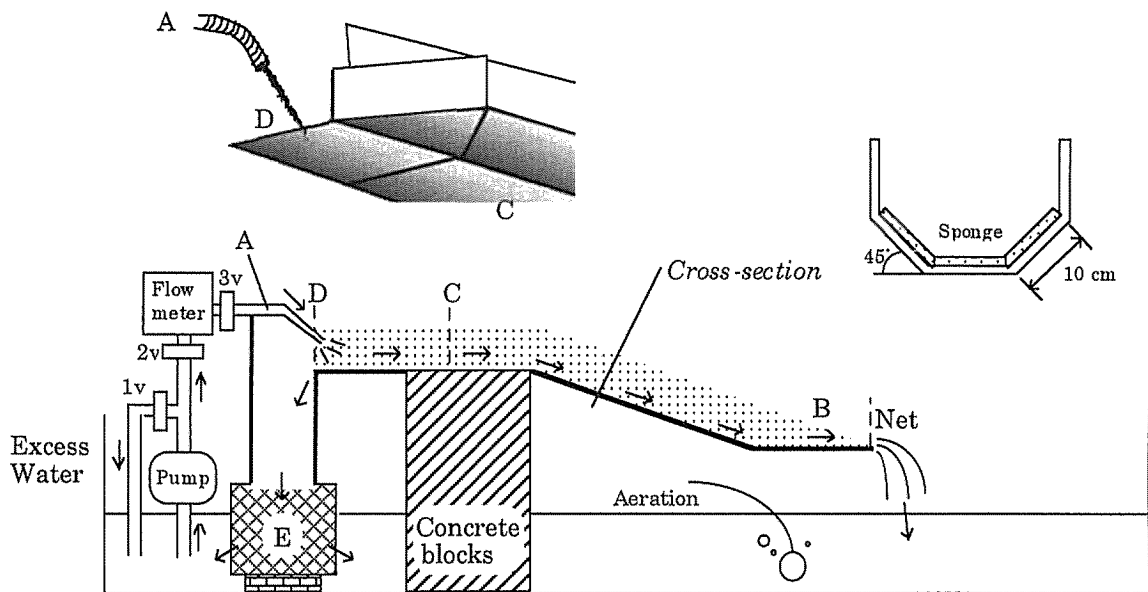


Fig. 1. A schematic illustration of the experimental fishway used. The slope section has a 20° slope. Sponge (dotted area), a three-dimensional mesh structure, was used to assist climbing. The fishway was put on concrete blocks in a large tank. Arrows show the direction of flow. A is a nozzle through which the maintenance water was pumped into the fishway. Experiment I was carried out between B-C. Experiment II and III were done between C-D and test individuals which successfully passed over the terminal edge D fell into the net E. B-C, 40 cm; C-D, 20 cm. Left top is the terminal edge in Experiment III-A. Shadowed area indicates the sponge floor. The right side wall of the fishway is not shown.

である。実験に際しては、魚道の下貯水槽よりポンプで水を汲み上げ、魚道維持水として魚道上流端の上方 (Fig. 1のA) から流した。なお、魚道維持水の着地点を細かく調節するために、導水管の先端に長さ30 cmの金属製の螺旋管 (内径11.8 mm) を取り付けた。流量は、導水管の途中に設置したデジタル流量計により確認した (誤差 ± 0.5 l/min)。なお、維持水はできるだけ下流方向に流れるように配慮したが、それでも魚道外への落水 (Fig. 1のEに落ちる) が約1 l/min程度は生じていた。

2.2 実験個体

実験個体には、天然のミゾレヌマエビとシマヨシノボリを使用した。ミゾレヌマエビは、山口県川棚川にてタモ網を用いて採集し、抱卵雌を除いた約600個体を実験に使用した。平均全長は23.8 mm (最小21.6 mm~最大24.9 mm) であった (N=60)。シマヨシノボリは山口県西田川と木屋川にてタモ網を使用して採集した約500個体を使用した。平均全長は30.5 mm (最小23.9 mm~最大40.2 mm) であった (N=60)。

両種共に、実験に使用しないときには、エアレーションを施した12 lの水槽と57 lの水槽に分けて入れ、海産種苗用初期餌料ラブ・ラバ (林兼産業 (株) 製) を毎日与えて蓄養した。1~3日に1回、飼育水の半分を換水した。また、同一個体の連続使用を避けるため、一度実験に使用した個体は別に用意した水槽で2日間以上は休ませた。なお、この飼育水槽は、実験魚道と同じ室内にあるため、実験魚道内の水温とほぼ同じ水温であった。

3 実験 I : 遡上に適した流量と実験時間帯の決定

3.1 材料と方法

魚道維持水を流し、魚道下端 (Fig. 1のB) に供試個体50個体を同時に置き、そこから斜路を遡上して上流水平部の通過点 (Fig. 1のC) を通った個体を「遡上成功個体」とみなした。魚道維持水の流量を0, 2.5, 5.0, 7.5, 9.5 l/minの5条件にして実験を実施した。これらの流量をあらかじめ求めておいた流量 (X, l/min) と流速 (Y, cm/sec) の回帰式を用いて流速に換算すると、それぞれ0, 32.5, 44.3, 60.2, 77.0 cm/secになる。維持水は2本のノズルから流し、螺旋管の先端にはモクズガニの実験で使用した散水用の高圧ノズルを取り付けた⁹⁾。ノズルから噴射された魚道維持水は即座に床面の幅に広がり、床面と側面の境

界までを覆い、その状態で流れ下っていた。

また、天然の河川においては、エビ類はふつう夜間に遡上を行うが^{11,16)}、条件によっては昼間も遡上することが知られている¹⁷⁾。実験時の観察の利便を図るには昼の実験が好ましいことから、実験生物の昼夜における遡上活性を比較するために、本実験は昼夜の両方で行った。なお、夜間の観察には、エビの行動パターンにほとんど影響がないことが確かめられている弱い赤色光を用いた¹⁸⁾。実験開始後10, 20, 30分後の遡上個体数を計測した。

実験は2002年9月3~6日の期間に行った。実験時間は、昼は10~17時、夜は20~2時の間であった。なお、実験期間中の魚道表面における昼の照度は、遮光ガラスを通して入る光、および室内天井蛍光灯によって72~110 lxであり、夜は0 lxであった。

3.2 結果と考察

甲殻類 (エビ・カニ) および底生魚類の場合、落差を伴った所では流速が小さくなっている箇所、主に水際、に沿って遡上してくる⁹⁾。本実験でも、魚道床面の水際を遡上しはじめる個体が多かった。ヨシノボリは、流量が小さい時は特に決まった遡上経路を辿ることはなく、魚道床面のあらゆる場所を遡上していたが、流量が大きい時、特に9.5 l/minの条件ではエビと同様に水際を遡上する個体が多かった。

経時的な遡上成功個体数を比較すると、エビは実験魚道へ放流後ただちに遡上を開始するものが多く、遡上成功個体の多くが最初の10分間で遡上したものだ。このことは、昼夜共に特に多数の遡上成功個体を得ることができた流量2.5, 5.0, 7.5 l/minの時に顕著で、その遡上率 (開始10分間での遡上成功個体数/30分間での遡上成功個体数) を算出したところ、0.46~0.93 (平均0.71) だった。それに対して、ヨシノボリでは0.06~0.67 (平均0.32) であり、実験時間内に渡って遡上が行われていた (Table 1)。

30分間の遡上成功個体数を魚道維持水の流量別にみると、昼夜両方でエビは流量2.5, 5.0, 7.5 l/minの時に、供試個体の66~86%、ヨシノボリは流量2.5, 5.0 l/minの時に、56~72%という高い頻度だった。また、それぞれの時間帯 (昼あるいは夜) で30分間の遡上成功個体頻度が最高であった流量は、昼にエビを用いて行った実験を除くと、流量5.0 l/minに設定した時で、頻度は72~82%だった。昼にエビを用いて行なった実験でも、5.0 l/minの時の遡上成功個体の頻度は80%と高かった (Table 1)。このことから、ミゾレヌマエビおよびシマヨシノボリ共に良く遡上

Table 1. Temporal change of the frequency % (number) of atyid shrimp *Caridina leucosticta* and gobiid fish *Rhinogobius* sp. CB successfully passing C (Fig. 1) in the fishway. Fifty individuals were used in each trial.

Species	Time	Water quantity (l /min)	Time elapsed		
			10 min	20 min	30 min
<i>C. leucosticta</i>	Daytime	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		2.5	80 (40)	86 (43)	86 (43)
		5.0	68 (34)	72 (36)	80 (40)
		7.5	52 (26)	66 (33)	76 (38)
		9.5	2 (1)	6 (3)	8 (4)
	Nighttime	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		2.5	48 (24)	58 (29)	66 (33)
		5.0	52 (26)	74 (37)	82 (41)
		7.5	34 (17)	52 (26)	74 (37)
		9.5	10 (5)	18 (9)	20 (10)
<i>R. sp. CB</i>	Daytime	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		2.5	12 (6)	36 (18)	56 (28)
		5.0	16 (8)	52 (26)	72 (36)
		7.5	2 (1)	8 (4)	32 (16)
		9.5	8 (4)	20 (10)	36 (18)
	Nighttime	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		2.5	20 (10)	46 (23)	60 (30)
		5.0	48 (24)	60 (30)	72 (36)
		7.5	16 (8)	28 (14)	42 (21)
		9.5	6 (3)	14 (7)	22 (11)

する魚道維持水量は5.0 l/minであると判断した。浜野ら⁴⁾は、エビ類が遡上しやすい魚道の条件として、勾配50°以下、流速65 cm/secを提案している。これを本実験の結果と照らし合わせてみると、勾配が20°、流速は44.3 cm/sec（流量5.0 l/min）であり、この条件を満たしている。ミゾレヌマエビは両側回遊性エビ類の中でも、遡上能力は低いと考えられているエビである⁴⁾。実際に魚道を設置する場合には、設置場所周辺に生息する生物の中で、遡上能力が最も低い生物にも適応できる魚道を設計することが望ましい。よって、遡上能力の低い生物が多数生息している下流域に魚道を設置する場合、今回の結果は有効な情報となる。

昼夜での30分間の遡上成功個体数の比較（エビおよびヨシノボリの時間帯ごとの合計遡上成功個体数）では、エビは昼：夜=125：121で、ヨシノボリは昼：夜=98：98であり、両種共に昼夜の遡上数に有意差はなかった（二項検定、 $P_s > 0.05$ ）。モクズガニの場合は、天然の河川において稚ガニが日中に遡上する様子が観察されることは稀であるが、実験では、勾配、水温、流速の条件が揃えば、昼夜に関係なく活発に遡上することが分かっている⁷⁾。適切な条件が整えば、エビやヨシノボリもモクズガニのように昼夜に関係なく遡上するのであろう。照度に着目してみると、実験中、試しに晴天の屋外で夕暮れ時に草陰で測定した照度が150 lx以上であったのに対し、「昼」と定義して行なっ

た実験時の室内の魚道表面の照度は72~110 lxであった。一般に夜行性と考えられているエビ類でも、この程度の照度であれば遡上行動が解発されるのかもしれない。

以上のことから、後に続く実験ⅡおよびⅢでは、魚道中の流量を5.0 l/minに設定して、実験は昼に行えば良いと判断した。

4 実験Ⅱ：魚道維持水の性状

4.1 材料と方法

魚道上流端に到達した実験個体をそこから落下させるには、魚道維持水の着地点を越えさせなければならない。そこで、出水管のノズルの数と散水用的高圧ノズルの有無について、パターンを変えて、生物が通過しやすい維持水の性状を求める実験をした。魚道維持水の流量を5.0 l/minとし、実験は昼に実施した。実験を行ったのは次の4パターンである（Fig. 2）：(A) 出水管1本から直接水を流す（ノーマル1）、(B) 出水管2本から直接水を流す（ノーマル2）、(C) 出水管の先端に散水用的高圧ノズルを取り付けたもの1本から水を流す（高圧1）、(D) 出水管の先端に散水用的高圧ノズルを取り付けたもの2本から水を流す（高圧2）。これらの魚道維持水の入射角度は40~55°だった。

この実験では、魚道上流端から落下する個体を観察する

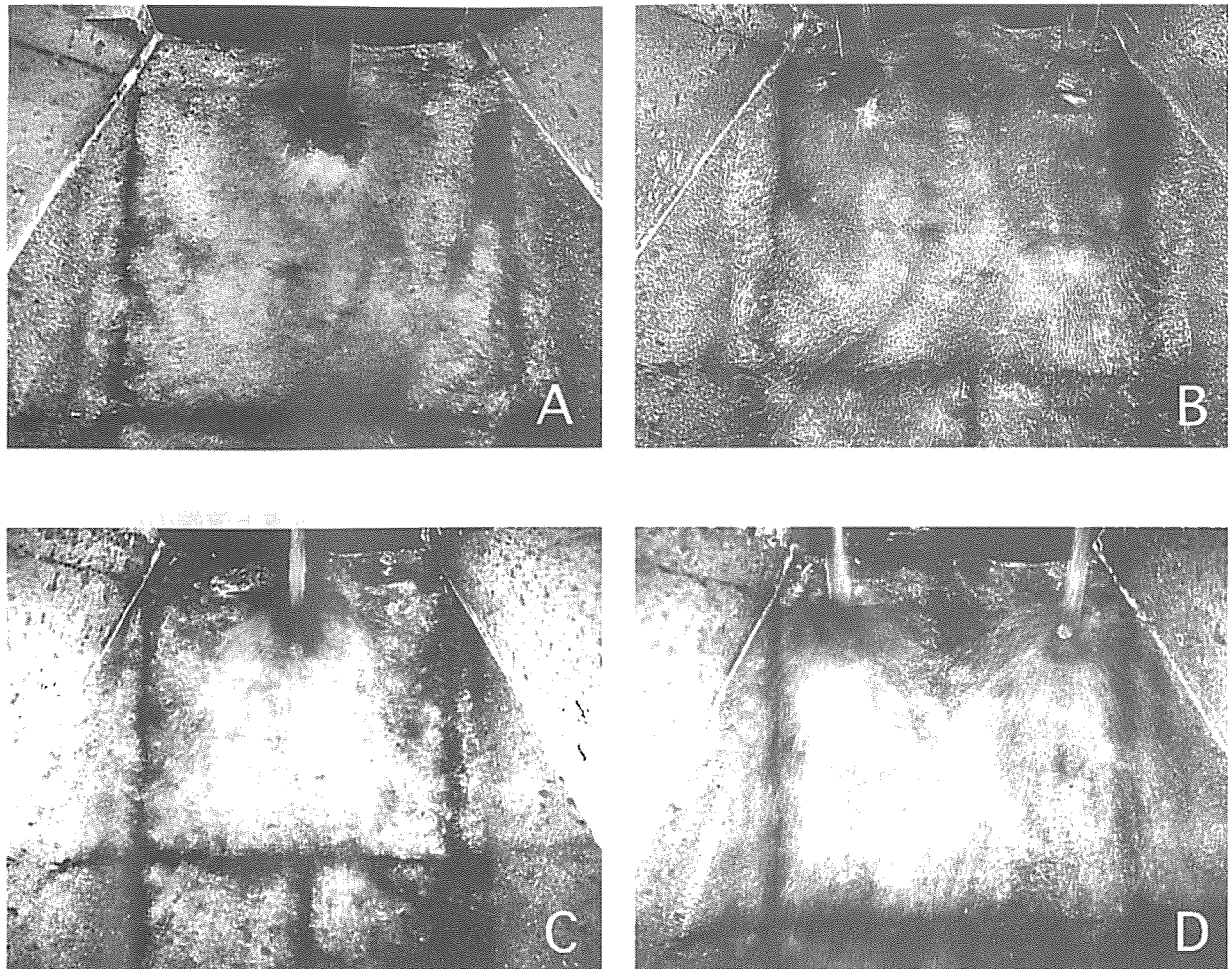


Fig. 2. Patterns of the splash zones at the terminal edge of the fishway with different tips of pipes and numbers of pipes. A, a pipe with no nozzle; B, two pipes without nozzles; C, a pipe with a high pressure nozzle 1; D, two pipes with high pressure nozzles. Bright areas show the splash zone.

ことが目的であったので、Fig. 1のCから10 cm下流の位置をネットで仕切り、実験個体がFig. 1のCのすぐ下流側から遡上を開始できるようにした。そこに供試個体30個体を同時に置き、遡上して上流端 (Fig. 1のD) から落下した個体数を、実験開始後10, 20, 30分後に計数した。C～D間の距離は20 cmである。魚道上流端の床面構造には、モクスガニを用いた実験で最も適当であるとされた水平な三角形 (大石ら⁸⁾のFig. 5のB) を使用した。

9月7日にシマヨシノボリ、9月24日にミゾレヌマエビを用いて、それぞれ9～12時の間に実験を実施した。また、実験中の照度は実験Iの昼間と同様であった。

4.2 結果と考察

本実験においては、魚道維持水の総流量を5.0 l/minに固定して行なったので、出水管のパターン (出水管の数と高圧ノズルの有無) によって、着地点を含めた魚道床面で

の水勢は大きく異なっていた (Fig. 2)。中でも、高圧ノズルからの水は着地面に強く当たり、飛沫となって広範囲に拡散した (Fig. 2のCとD)。

高圧1では、ヨシノボリでは8個体の落下個体が得られた。しかしながら、多くの個体は魚道維持水の着地点付近で下流へ押し流されていた。また、エビの場合には流れに逆らって遡上する個体そのものがほとんどおらず、その結果、落下個体数は0だった (Table 2)。

出水管を2本にした場合 (ノーマル2および高圧2)、魚道の上流付近に達した実験個体の中で、着地点を避けて着地点と側壁の間隙を通過する個体はスムーズに落下した。しかし一方で、魚道の上流付近で着地点に吸い寄せられるように方向転換する個体も多かった。特にノーマル2でこのような個体が多く、それらは着地点縁辺部で滞留または迷走する時間が長かった。

ノーマル1の場合、着地点に寄っていき縁辺部を迷走す

Table 2. Temporal change of frequency % (number) of atyid shrimp *Caridina leucosticta* and gobiid fish *Rhinogobius* sp. CB that successfully passed over the terminal edge under different conditions of the tip of pipes and number of pipes. All trial was carried out at 5.0 l/min in the daytime. Thirty individuals were used in each trial.

Species	Tip of pipes	No. pipes	Time elapsed		
			10 min	20 min	30 min
<i>C. leucosticta</i>	No nozzle	1	6.7 (2)	20.0 (6)	36.7 (11)
		2	6.7 (2)	20.0 (6)	30.0 (9)
	High pressure nozzle	1	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		2	13.3 (4)	30.0 (9)	30.0 (9)
<i>R. sp. CB</i>	No nozzle	1	20.0 (6)	30.0 (9)	56.7 (17)
		2	20.0 (6)	50.0 (15)	70.0 (21)
	High pressure nozzle	1	6.7 (2)	23.3 (7)	26.7 (8)
		2	30.0 (9)	53.3 (16)	66.7 (20)

る個体は多かったが、ノーマル2に比べてその場で滞留する個体は少なかった。

全ての出水管パターンでの落下個体頻度を比較すると、高圧1は効率が悪く除外できても、他のどの条件が良いのかを判断することは困難である。高圧ノズルはその構造上、実験中に水槽内のゴミが詰まって放水が止まってしまうというトラブルがしばしば発生した。今回の実験で魚道維持水に用いた水は、水道水を頻繁に入れ換えて使用したのだが、周囲からのゴミが多少混入した。ダムや堰に実際にこのような魚道を設置する場合は、河川の水を汲み上げて魚道維持水として使用することから、細かい異物の混入が頻発する恐れがある。ゆえに、高圧ノズルを良好な状態で維持することは困難と考える。効率は不明であるものの、高圧ノズルを使わずともエビ類は魚道上流端から落下した⁹⁾。また、モクズガニも高圧ノズルからの水流がなくても落下した⁹⁾。これらの事項を勘案し、高圧ノズルの使用は実用化には適さないと判断した。

出水管がノーマルの場合、両種共に出水管の数による落下個体数に有意差はなかった（ミゾレヌマエビでは1本：2本=11：9、ヨシノボリでは1本：2本=17：21、二項検定、 $P_s > 0.05$) (Table 2)。総流量は1本でも2本でも同じ（5 l/min）であることから、必要とするエネルギー量にも差はない。しかし、構造が単純な方が設置経費が少なくトラブルも起きにくい。よって、維持水は1本の出水管から流す方が良く考える。

実際に設置する魚道は今回の実験魚道よりも幅が広くなるであろう。本実験での結果を適用するためには、今回用いた実験魚道の幅を1つの単位として考え、実際の魚道ではこれを複数並列した構造にした上で、それに応じて出水管の数もその幅に応じて増やす必要がある。

5 実験Ⅲ：魚道上流端の構造

5.1 材料と方法

モクズガニを用いた実験では、魚道上流端の床面構造は水平な三角形が最も適していた⁹⁾。しかし、モクズガニと今回の実験で使用したミゾレヌマエビやシマヨシノボリとでは、遡上の活性、速度、経路等に大きな違いが見られる。特に、エビは小さな流れの変化を敏感に感じ取りながら遡上することが判明している¹⁰⁾。

そこで、実験個体をよりスムーズに落とすことのできる魚道上流端の床面構造を検討するために、5つのパターンを用意し、落下個体頻度を比較すると共に、魚道上流端での実験個体の動きを観察した。また、実験Ⅱの結果から、ノズルの種類はノーマル1 (Fig. 2のA)で行った。実験に用いた上流端の床面構造パターンは次の通りである (Fig. 3)：(A) 先端に何も付けない、(B) 魚道の床面の幅に合わせた奥行き5 cmの直角二等辺三角形を付ける、(C) Bの奥行きを2倍 (10 cm) にした二等辺三角形を付ける、(D) 床面の幅に奥行き5 cmの合同な二等辺三角形を2つ付ける、(E) Dの二等辺三角形を半分切り取って直角三角形にし、中央が空くように床面の両端に付ける。AとBはモクズガニの実験⁹⁾でも用いられた。また、実験ⅡではBを使用したがる、魚道維持水の着地点の上流側でも滞留および迷走する個体が多かった。このような個体は、上流端での時間のロスが大きく、特に迷走している個体の中には、維持水の噴射で下流へ押し流される個体や自ら下流へ下っていく個体が多かった。実際に魚道が設置された場合には、魚道の中に滞留する生物は水鳥などの被害にあう可能性が高くなる。よって、落下個体数を増やすためには、できるだけ迅速に上流端に到達させることが重要であると

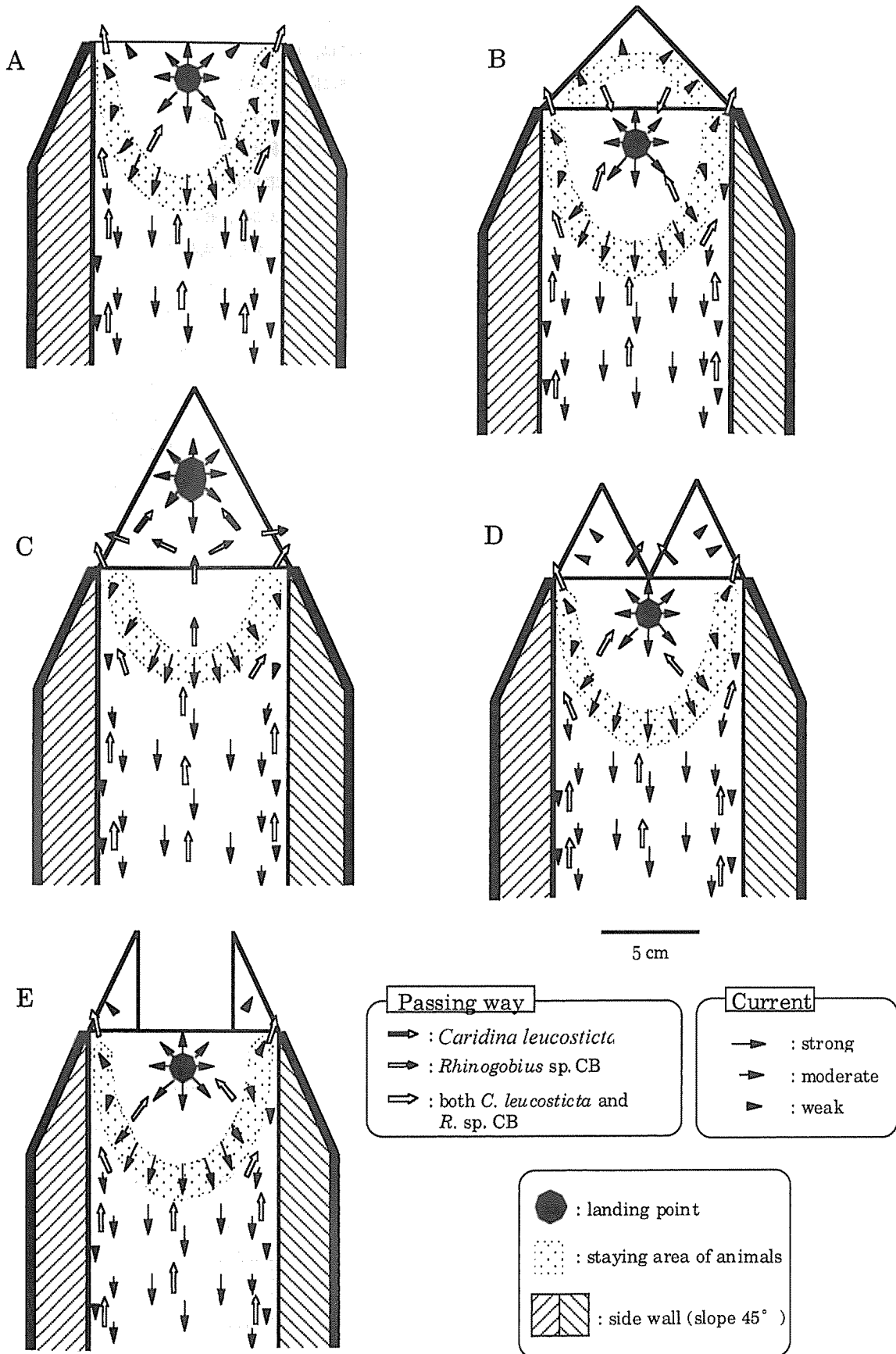


Fig. 3. Structure patterns of the terminal edge of the fishway and migration patterns of animals around the landing point of the maintenance water for each terminal edge structure, A-E, examined.

考えた。そこで、維持水の着地点上流側へ回り込むスペースを狭める構造としてCを提案し、このパターンに限っては維持水の着地点を張り出した三角形の上に置いた (Fig. 3のC)。さらに、回り込むスペースを狭めるのではなく、回り込んでいる過程で個体を落下させる構造としてDとEを考案した。なお、本実験ではAをコントロールとした。

実験Ⅱと同様に、ネットで仕切った位置に供試個体30個体を同時に置き、実験開始後10, 20, 30分後に落下個体数の計測を行った。なお、魚道上流端周辺での実験個体の動きは、目視およびデジタルカメラで観察し記録した。

実験は、10月24・25日の10~16時に行った。また、実験中の照度は実験Ⅰの昼と同様であった。

5.2 結果と考察

本実験で試行した5つの床面構造の全てで、両種共に魚道維持水の着地点の下流側に半輪状の生物滞留帯が形成されていた。落下場所については、全実験シリーズで着地点の縁辺部に沿って魚道の両サイドに進み、そこから落下していく個体が多かった。しかし一方で、床面構造の違いによっていくつかの特徴的な行動も観察できた (Fig. 3)。

AおよびBでは、エビとヨシノボリ共に前述したような行動が観察された。ただし、Bでは、着地点の上流側にも生物滞留帯が形成された (Fig. 3のA, B)。

Cでは、エビは着地点の縁辺部に沿って魚道の両サイドに達した後、さらに着地点の方向へ進み、そのまま迷走する個体が観察された。一方、ヨシノボリは魚道水平部の流芯を遡上してきた個体が、生物滞留帯を越えて着地点の直前まで進み、そこから左右に急転換して落下する個体が多数いた (Fig. 3のC)。

Dでは、特にエビでは2つの三角形の間に多く落下した。このときには、Bの時と同様に、魚道の両サイドから着地点の上流側に回り込んできた個体が落下することが多かった (Fig. 3のD)。しかし、同様の意図をもって考案したEではこのような個体は少なかった (Fig. 3のE)。

30分間の落下個体頻度は、エビではAとDで70.0%、ヨシノボリではCで53.3%、Eで43.3%という高い値が得られた (Table 3)。しかし、両種で共通して高い落下個体頻度が得られた構造はない。そこで、それぞれの構造における両種の落下個体数の和をとって、比較することにした。こうして得られた値の中で、最も値が大きかった構造はDであった。このことを確認するために、Dに限ってのみ同様の実験を反復したところ、ミゾレヌマエビで50%、シマヨシノボリで40%という高い落下個体頻度が再び得られたことから、エビ類や底生魚類にとってはDの構造が良いと判断した。

Bの構造はモクズガニを用いて行なった実験で最も有効であったが⁸⁾、エビやヨシノボリでは有効性が示されなかった。この原因としては、生物によって、正の走流性が解発される流速の閾値が異なる点、および、遡上生態が異なる点が挙げられる。エビやヨシノボリは水際や流れの弱い場所を遡上するため、常に体に流れを感じながら遡上する¹¹⁾。十脚甲殻類では第一触角で流れを感じ¹⁹⁾、魚類では側線で流れを感じるため²⁰⁾、エビやヨシノボリでは水深が浅くても流れを感じる事ができ、また、正面から流れを受けて遡上する。そのため、維持水の放射状の流れが着地点の上流側にまで広がるBの構造では、エビやヨシノボリは着地点上流で着地点方向から来る流れを感じてしまい、縁辺部で滞留または迷走したと考えられる。これに対し

Table 3. Temporal change of the frequency % (number) of atyid shrimp *Caridina leucosticta* and *Rhinogobius* sp. CB that successfully passed over the fishway under different structure patterns of the terminal edge. Structure patterns A-E are shown in Fig. 3. All trials were carried out at 5.0 l/min on daytime from a pipe without high pressure nozzle. Thirty individuals were used in each trial.

Species	Structure patterns of the terminal edge	Time elapsed		
		10 (min)	20 (min)	30 (min)
<i>C. leucosticta</i>	A	33.3 (10)	53.3 (16)	70.0 (21)
	B	16.7 (5)	23.3 (7)	23.3 (7)
	C	10.0 (3)	36.7 (11)	36.7 (11)
	D	43.3 (13)	66.7 (20)	70.0 (21)
	E	13.3 (4)	20.0 (6)	20.0 (6)
<i>R. sp. CB</i>	A	13.3 (4)	16.7 (5)	20.0 (6)
	B	6.7 (2)	16.7 (5)	26.7 (8)
	C	20.0 (6)	46.7 (14)	53.3 (16)
	D	0.0 (0)	6.7 (2)	30.0 (9)
	E	10.0 (3)	26.7 (8)	43.3 (13)

て、カニは、水際や飛沫域ばかりでなく、水から出て飛沫のかからないような陸上をも遡上する^{7,8)}。水深が浅い場合には、立ち上がると第一触角が水から出てしまうため、方向を見失うことが多いのではないか。また、側面から流れを受けながら遡上するため、左右の第一触角が上流側と下流側に分かれ、両触角間のわずかな距離のために流向や流速が急激に変化するような複雑な局所流がある場所では、水中であっても、方向を見失う場合があるのであろう。これらの理由から、Bの構造における着地点方向から来る流れを感じるができず、カニは遡上を続けたと考察される。Dの構造ではこのようなエビやヨシノボリの行動がこの構造の有効性を引き出すことになり、結果として高い落下個体頻度が得られた。モクズガニではDの構造は試されていないが、このカニはエビ類よりも運動能力が高いと考えられていることから⁷⁾、Dのような構造をとってもBと同じ程度の効果は期待できると考える。

6 総合論議

本実験で使用した生物よりも流れの緩やかなところや下流に生息する種類、たとえば同属の種類について考えると、ミゾレヌマエビが河川の中下流に生息するのに対し、ヒメヌマエビ *C. serratirostris* では感潮域の直上の流れの緩慢な所に生息する¹³⁾。また、シマヨシノボリの同属種であるゴクラクハゼ *R. giurinus* は、シマヨシノボリほど吸盤の吸着力が強くない、流れの無い場所に多い²¹⁾。こうした種類は、ここで実験に供した種類より運動能力が劣ると予想される。よって、このような種類についても遡上させる必要がある場所に魚道設置を行うときには、ここで提案した構造で良いかどうか、検証実験を実施すべきである。

魚道の頂上部に達した生物をダムや堰をまたいで上流側に降ろす手法については次の二つの方法が試行的に用いられている：(1) 堰やダムより上方にプールを設け、そこに生物を遡上させてからプールの水を抜いて上流側へ落とす方法；(2) 魚道を遡上してきた生物を、横断壁面と剝離流で遡上を阻害し、落とし穴から上流側へ落とす方法（登り落ち漁の原理）²²⁾。しかしながら、本研究で考案した手法は、(1) や (2) と較べて、安価に設置でき、しかも構造が単純であるため維持管理が容易であるので、費用対効果の点では優れている。

ここでは魚道の基本構造には触れなかったが、これについては既に様々な研究がなされている^{4-8,23)}。斜路の構造では、甲殻類や底生魚類の遡上に効果的である台形断面の階段式魚道に、蛇籠を等間隔で配置することで、遊泳魚類の遡上も可能になることが報告されている⁶⁾。架設式にした場合は特に、魚道の入り口がダムや堰の下流側に張り出してしまい、生物が入り口を発見しにくいということが懸念される。しかし、これについても研究は進んでおり、張り出した魚道の周りに巨礫を扇状に配置することや²³⁾、夜間に遡上を行なうエビ類については、連続光を嫌う性質を利用して、水中ライトを使って誘導する試みが行われている¹⁰⁾。このようにすでに明らかにされている魚道の基本構造に則り、これに本研究で提案した魚道上流端の床面構造と魚道維持水の性状を組み合わせた架設式魚道の開発を行えば、多様な生物に機能する魚道を安価に設置できると考える。

7 要約

ダムの堤頂部をまたぐように架設し、下流から遡上してきた生物をダム湖内に降ろすことができる安価な魚道の開発を目的として、台形断面（幅30 cm、床幅10 cm）の実験魚道を使って、魚道上流端の条件について研究を行った。通し回遊を行うミゾレヌマエビとシマヨシノボリを実験に使った。その結果、魚道維持水の流量を5.0 l/minとしたときに良く遡上した。また、魚道維持水は、上流端の上部から1本の直管で、跳水が少なくなるように魚道床面に当てると、エビや魚がその水際を通過して魚道上流端に到達して落下した。上流端の床面を、合同な二等辺三角形が2つ横に並べて張り出した構造にしたところ、30分間に供試個体の30~70%が、維持水の着地点の周りを通して落下した。

謝辞

本研究を進めるにあたって、懇切なるご指導、ご鞭撻を賜った水産大学校生物生産学科の林 健一教授に心より感謝の意を表す。また、有益な助言をして下さった同水産学研究科（当時）の大石俊介氏、Dr. Chris P. Normanに深く感謝する。

文 献

- 1) 三矢泰彦・浜野龍夫：魚道のないダムが十脚甲殻類の
 流程分布に与える影響. 日本水産学会誌, 54 (3),
 429-435 (1988).
- 2) 浜野龍夫・三矢泰彦・石崎勝義：河川横断工作物がエ
 ビ・カニ類に及ぼす影響とその個体群の復元につい
 て. 河川技術に関する論文集 (土木学会水理委員会河
 川部会), 4, 183-188 (1998).
- 3) 森 誠一：ダムの構造物と魚類の生活. 応用生態工学,
 2 (2), 165-177 (1999).
- 4) 浜野龍夫・吉見圭一郎・林 健一・柿元 皓・諸喜田
 茂充：淡水産 (両側回遊性魚類) エビ類のための魚道
 に関する実験的研究. 日本水産学会誌, 61 (2),
 171-178 (1995).
- 5) 安田陽一・大津岩夫・浜野龍夫・三矢泰彦：エビ・カ
 ニ類に適した遡上水路の提案. 河川技術に関する論文
 集 (土木学会水理委員会河川部会), 6, 149-154
 (2000).
- 6) 安田陽一・大津岩夫・浜野龍夫・三矢泰彦：多様な水
 生生物の遡上・降河可能な魚道の提案. 河川技術に関
 する論文集 (土木学会水理委員会河川部会), 7,
 221-226 (2001).
- 7) 浜野龍夫・勝俣亮介・三矢泰彦・安田陽一：モクズガ
 ニの遡上魚道に関する実験研究. 水産増殖, 50 (2),
 143-148 (2002).
- 8) 大石俊介・浜野龍夫・荒木 晶・林 健一・渡邊敏
 晃・横田源弘：モクズガニの稚ガニを魚道上流端から
 ダム湖に誘導する新手法の検討. 水産大学校研究報
 告, 51 (3), 87-94 (2003).
- 9) 浜野龍夫：淡水産エビ・カニ類に配慮した魚道の提
 案. 月刊海洋/号外 (総特集 甲殻類), 26, 249-255
 (2001).
- 10) 安田陽一・大津岩夫・浜野龍夫・三矢泰彦：多様な水
 生生物の遡上・降河に配慮したスリット砂防堰堤に設
 置する魚道の提案とその効果可能な魚道の提案. 河川
 技術に関する論文集 (土木学会水理委員会河川部会),
 9, 487-492 (2003).
- 11) 浜野龍夫・林 健一：徳島県志和岐川に遡上するヤマ
 トヌマエビの生態. 甲殻類の研究, 21, 1-13 (1992).
- 12) 中村俊六：魚道のはなし. 山海堂, 東京, 1995, 225 pp.
- 13) 浜野龍夫・鎌田正幸・田辺 力：徳島県における淡水
 産十脚甲殻類の分布と保全. 徳島県立博物館研究報
 告, 10, 1-47 (2000).
- 14) 水野信彦：シマヨシノボリ, 日本の淡水魚 (川那部浩
 哉・水野信彦編). 山と溪谷社, 東京, 1989, pp.
 586-587.
- 15) 水野信彦：ヨシノボリ学入門. 淡水魚, 7, 7-13 (1981).
- 16) Hamano, T. and Honke, K. : Control of the migrating
 course of freshwater amphidromous shrimps by light-
 ing. *Crustacean Research*, 6, 162-171 (1997).
- 17) Fievet, E. : Daylight migration of freshwater shrimp
 (Decapoda, Caridea) over a weir during water release
 from the impoundment. *Crustaceana*, 72 (3), 351-356
 (1999).
- 18) Bernardi, N. : Temperature influence upon food inges-
 tion and spontaneous locomotion of the freshwater
 prawn *Macrobrachium acanthurus* (Weigmann, 1836)
 (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae). *Journal of Ther-
 mal Biology*, 15, 33-36 (1990).
- 19) Pardi, L. and Papi, F. : Kinetic and tactic responses.
The physiology of Crustacea, 2, 365-399 (1961).
- 20) 羽生 功：機械的感覚, 新版魚類生理学概論 (田村
 保編). 恒星社厚生閣, 東京, 2000, pp. 252-274.
- 21) 辻 幸一：ゴクラクハゼ, 日本の淡水魚 (川那部浩哉・
 水野信彦編). 山と溪谷社, 東京, 1989, p. 585.
- 22) 和田吉弘：魚道見聞録 ((財) ダム水源環境整備セ
 ンター編). 山海堂, 東京, 2003, 195 pp.
- 23) 安田陽一・大津岩夫・三矢泰彦・浜野龍夫：長崎県河
 通川におけるエビ・カニの遡上に配慮した魚道の効
 果. 河川技術に関する論文集 (土木学会水理委員会河
 川部会), 8, 343-348 (2002).