

多様な水生生物の遡上・降河可能な魚道の提案

PROPOSAL OF FISHWAY TO FACILITATE THE UPSTREAM AND DOWNSTREAM MIGRATION OF DIADROMOUS AQUATIC ANIMALS

安田陽一¹・大津岩夫²・浜野龍夫³・三矢泰彦⁴

Youichi YASUDA, Iwao OHTSU, Tatsuo HAMANO, and Yasuhiko MIYA

¹正会員 工博 助教授 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

²正会員 工博 教授 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

³農博 助教授 水産大学校生物生産学科 (〒759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)

⁴農博 教授 長崎大学環境科学部環境科学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

Recently, the authors proposed fishways which have a stepped channel of a trapezoidal cross section for the migration of freshwater shrimps and crab. This paper presents a proposal of the fishway with a channel slope of 19 degrees ($\tan \alpha = 0.344$) to enable fishes, which have prominent jumping and swimming abilities, to migrate to upstream and downstream habitats. On the proposed fishway for freshwater shrimps and crabs, a small gabion is placed at regular intervals of two steps in order to decay the flow velocity and to make a small pool for the rest. Experiments show that fish (Ayu) can migrate to upstream and downstream of fishway even if the channel slope of the fishway is 19 degrees, and the velocity field and the air-concentration distribution at downstream portion of the fishway are clarified. Also, changes in the number of fish (Ayu) migrating upstream via the fishway during a 24-hour period are shown.

Key words : fishway, migration, diadromous aquatic animal, gabion, stepped channel, drop structure

1. まえがき

日本の河川には、川と海を遡上・降河する遊泳魚類(アユなど)、底生魚類(ハゼ・ウナギなど)、甲殻類(テナガエビ類・ヌマエビ類・モクズガニ)などが多く生息することから、河川を横断する構造物に多様な水生生物の遡上・降河可能な魚道を設けることは、河川環境を考える上で重要なことである。

従来の考え方では、深いプールを有する階段式魚道を設けることが多く、それは遊泳力の高いアユなどを対象に設計したものだった。この形式の魚道では、側壁が鉛直であるため、甲殻類や底生魚類にとって遡上・降河が困難である。また、平水時の流量の小さい中小河川に設置する魚道としては、勾配 10% で傾斜は緩やかであり深いプールを備えるために、規模が大きすぎ、さらに出水時において土砂がプール内に堆積しやすいなど検討の余地がある。

昨年のシンポジウムで著者らが提案した魚道¹⁾は、長崎県や沖縄県で、あるいは島嶼で一般的に見られる「平水時の流量の少ない中小河川」の河川構造物に付設することを想定した甲殻類に配慮した魚道である。すなわち、魚道の流路が4cm程度の段差を有する階段状水路で、エビ・カニが水際を歩行しながら遡上・降河することに配慮するため、側壁が45度に傾いている。室内および野外実験の結果、水路の

傾斜角度19° から45° までの範囲でエビやカニの遡上・降河が認められた。傾斜角度19度では、モクズガニの稚ガニ、テナガエビ類・ヌマエビ類の稚エビが多数遡上した^{1,3)}。また、産卵のために海に向かうモクズガニの成体が提案魚道の設置によって落差工や砂防堰堤の頂部から落下することなく安全に降河することが可能となった²⁾。さらに、ゴクラクハゼ、ヨシノボリ類、カワアナゴの稚魚、イシマキガイ・カワナナ、水生昆虫の幼虫などの遡上も認められた^{2,3)}。

今回の著者らの提案は、甲殻類の専用魚道から底生魚類も利用可能な魚道へと進み、さらに汎用性を高めるために、遊泳魚類の遡上を可能とする工夫を魚道に加えるに至ったことである。すなわち、台形断面の階段状提案魚道に石を詰めた透過性の網状の籠(本報で蛇籠と呼ぶ)(写真-1)を等間隔に付設する案である。それは永続的な構造物である必要はなく、各河川で対象となる遊泳魚の遡上時期が生態観察から明らかになれば、遡上期に一時的に設置する簡便な着脱可能な構造物である。蛇籠の付設によって、魚道上に滞留部と側壁近くの流水部が形成され、流れの一部が網状の籠を通り抜けることにより、流水部での水面の乱れを大きくすることなく流下できる。その結果、アユ(全長5cm~10cm程度)やカワムツ(全長2cm~5cm程度)などの遊泳魚類の遡上が

可能となった。なお、24時間のアユの遡上観測に基づき時間ごとの遡上固体数の変化を示した。参考のため、エビ(ヤマトヌマエビ)・カニ(モクズガニ)の遡上個体数の日周変化の実験結果についても示した。また、実験データとして、この魚道直下流部での流速特性および空気混入の分布状態の一例を示し、遊泳魚類に対する提案魚道の有効性を確認した。

2. 多様な水生生物(甲殻類・底生魚類・遊泳魚類)が遡上・降河可能な魚道の提案

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、主に水際に沿って歩行しながら遡上する¹⁾。

このことから、甲殻類および底生魚類に配慮した魚道の基本構造は台形断面の階段状水路とした(図-1)^{1) 3)}。すなわち、流路を階段状水路としたので、流れの流脈が乱された状態で魚道下流側の流れに接続し、流量が小さくとも魚道の入口が見つかりやすい。この場合、魚道上の流れによって魚道の側壁が濡れた状態となり、流速が適度に減勢される^{4) 9)}。さらに、側壁近くで流速が小さくなるように、かつ側壁で歩行しやすいようにするため側壁を傾かせる。ただし、サギ類などがとまって捕食されることがないように側壁の傾斜角度を 45° 程度にする。このことによって、魚道入口の側壁近くの流速が小さく、甲殻類および底生魚類などの水生生物が入口に近づき易くなり、側壁近くの水面から浮上することが可能となる。その後、魚道の水際に沿って遡上し、天端に到達したときに再び水中に潜り込むことが可能となる。なお、側壁の表面は歩行しやすいように粗面(実験では、耐水性のサンドペーパー100番から120番程度のもの)とした(実務設計ではコンクリートの表面を竹箒で引っかく程度でよい)。

平水時の流量が小さい中小河川に設置する魚道として提案していることから、流量 Q を毎秒3~20 m^3/s の範囲で想定すると、魚道の流路は4cmの段差を有する階段状水路とし、その水路の鉛直落差高は100cm程度とする。なお、100cm以上の落差がある場合は、休息がとれるようにプールの設置が望まれる。階段状水路となっている幅 B については60cmとし、側壁は傾斜角度 45° とする。傾いた側壁の水平長さについては20cm以上あることが望ましい。水路の傾斜角度については角度が小さいほど遡上しやすいが、 19° から 45° であれば、遡上・降河が可能である。

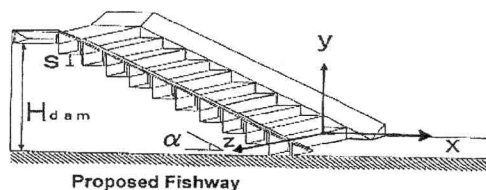


図-1 台形断面を有する階段状魚道模型図
(特許出願番号：特願 2000-304601)

甲殻類および底生魚類に配慮した魚道で遊泳魚類の遡上・降河を可能にするためには、流路の流速をさらに減勢させ、魚道の途中で休息がとれるようにプールの形成が必要である。なお、魚道は遡上・降河するための通路であり、捕食の危険にさらされる可能性も高い。このため、速やかに遡上・降河させることが必要である。このことから、魚道内のプールで魚が定住してしまう状況は極力避けるようにし、休息出来る最小限度のプールとなるような工夫が必要である。そこで、甲殻類、底生魚類の他に、遊泳魚類にも配慮した魚道を提案する(写-1)。ただし、平水時の流量が小さい中小河川に設置することを前提とする。

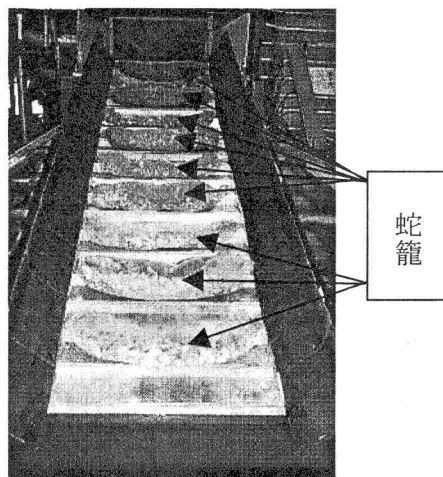


写真-1 遊泳魚類の遡上に配慮した魚道模型
(図-1の魚道に蛇籠を取り付けた)
(特許出願番号：特願 2000-399278)

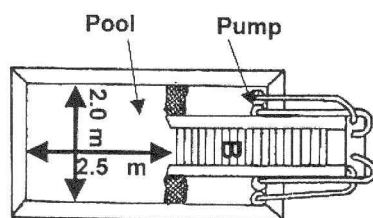
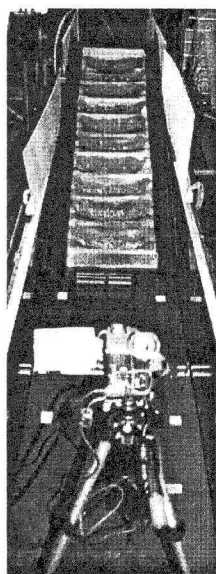
- 1) 基本は甲殻類および底生魚類に配慮した魚道(図-1)である。
- 2) 遊泳魚類が頻繁に遡上する時期(アユは、3月下旬から5月の間)は限られていることから、この期間のみ遊泳魚類に対しても有効になる構造とする。
- 3) 遡上中に遊泳魚が休息できるようにプールを確保する。
- 4) 遡上し易くするため、魚道上の両側に十分な水深が確保できるようにする。
- 5) 魚道上に設置された物体によって、流れが跳ね上がらないようにするため、魚道上に透過性の物体を等間隔に設置する。すなわち、網状の籠(実験の場合、網戸の網)に石(平均径2~3cm程度の玉砂利)をつめた蛇籠状の物体(蛇籠と呼ぶ)を階段状水路上に2段ごとに設置する。なお、蛇籠内の空隙率は約33%である。
- 6) 大きい蛇籠の両脇から越流する流れの流速を減衰させるため、小さい蛇籠(中央部の高さ4cm程度)と大きい蛇籠(中央部の高さ8cm程度)を交互に魚道上に設置する。このことによって、大きい蛇籠から越流する流れが小さい蛇籠に衝突し、適度に流速を減衰することが可能となる。

3. 遊泳魚類に配慮した魚道の実験

遊泳魚類の遡上実験は、魚道を幅 2m、流下長さ 2.5m のプールに接続した場合(図-2)と 80cm の水路幅、流下長さ 15m を有する長方形断面水路に設置した場合(写真-2)で行った。

流量 Q を毎秒 3~20 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の範囲で想定し、魚道の水路は 4cm の段差をもつ階段状水路とし、その水路の鉛直落差高さは 88cm とした。また、魚道水路の傾斜角度は 19° (約 34% 勾配) とした。階段状水路となっている幅 B については 60cm とし、側壁の傾斜角度は 45° とした。なお、側壁面は粗面とし、耐水性のサンドペーパー100 番のものを使用した。

遡上実験に用いたアユは、山梨県水産技術センターから提供を受けた種苗生産されたアユである。なお、遡上実験ではアユの全長が 5~10cm のもの(平均約 7cm)を対象とし、約 200 尾放流し、遡上状況をデジタルビデオ(夜間は赤外線ライトを併用)を用いて 24 時間の遡上観察を行った。さらに、魚道下流部の流速および空気混入率を調べるため、電磁流速計(計測技研製)および透過光式ボイド率計(東京計測製)を用いた。



Experimental Setup

図-2 魚道を 2m x 2.5m のプールに接続した場合(ただし、魚道に蛇籠が設置されていない状態を示す)

写真-2 魚道を 80cm 水路に設置した例
(水路傾斜角度 19°)

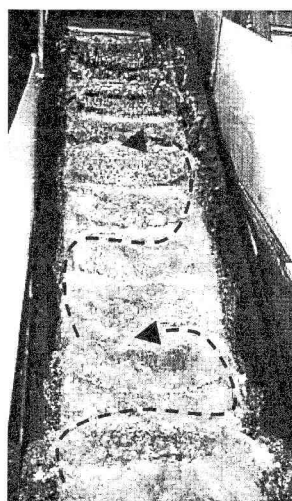


写真-3 毎秒 11 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の流況

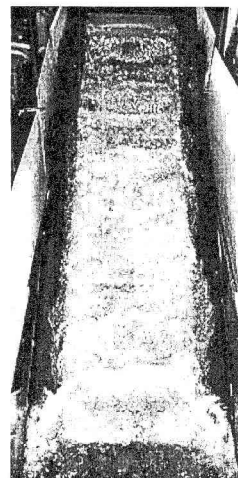


写真-5 毎秒 20 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の流況

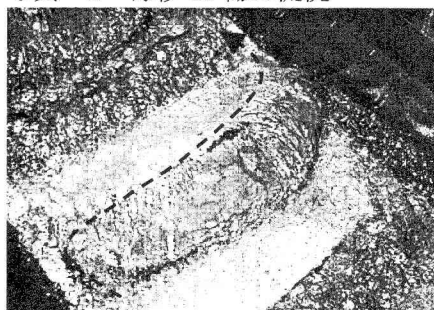


写真-4 毎秒 11 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の流況(プールの形成状況)

↑
アユの
遡上
経路



写真-6 毎秒 5 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の流況

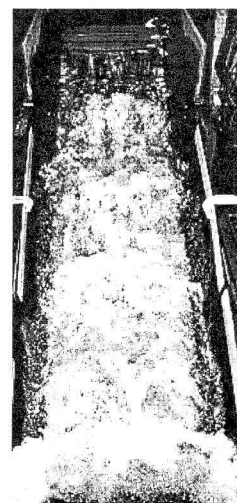


写真-7 毎秒 38 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の流況

4. 遊泳魚類に配慮した魚道上の流況

遊泳魚類に配慮した魚道上の流況を写真-3から写真-7に示す。

毎秒 10 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ から毎秒 20 $\frac{\text{リットル}}{\text{秒}}$ の間では、蛇籠に浸透する流れ、蛇籠を乗り越える流れ、および蛇籠の両脇からの流れが観察される(写真-3~5)。また、大きな蛇籠によって潜り込み流れが常に形成され、休息可能なプールが確保される(写真-4)。さらに、蛇籠の両脇や小さな蛇籠周辺で常に遡上可能な流速[遊泳魚の全長(cm) x 10/時間(s)]となっている。このことから、アユの遡上は十分可能なものと考えられる。

毎秒 10 ㎎ よりも小さくなると、大きな蛇籠を乗り越える流れが観察されなくなる(写真 - 6)。この場合、蛇籠に浸透する流れおよび蛇籠の両脇からの流れが観察される。なお、流量が毎秒 3 ㎎ よりも大きい状態であれば、大きな蛇籠で常にプールが形成される。

毎秒 20 ㎎ より大きくなると、最上流部から大きな蛇籠での潜り込み流れが観察されなくなる。毎秒 38 ㎎ の場合(写真 - 7)、潜り込み流れが形成されなくても、大きな蛇籠の直上流部の底面近くでは流速が非常に小さく、休息可能な空間が確保されている。ただし、提案する魚道上で潜り込み流れが形成される場合を対象とする。

5. 魚道下流部の流速分布および空気混入分布

遊泳魚類に配慮した魚道上の流れが 2.0 m × 2.5 m のプールに突入したときの流速分布および空気混入分布を図 - 3, 4 に示す。ただし、図中の結果は蛇籠(中央部の高さ 5 cm, 幅 14 cm 程度)を 3 から 4 段間隔に設置した場合(写真 - 8)を示す。

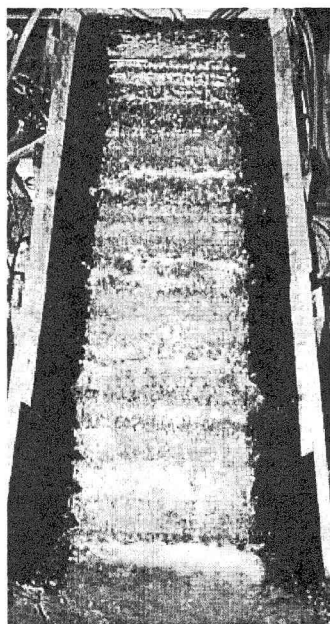
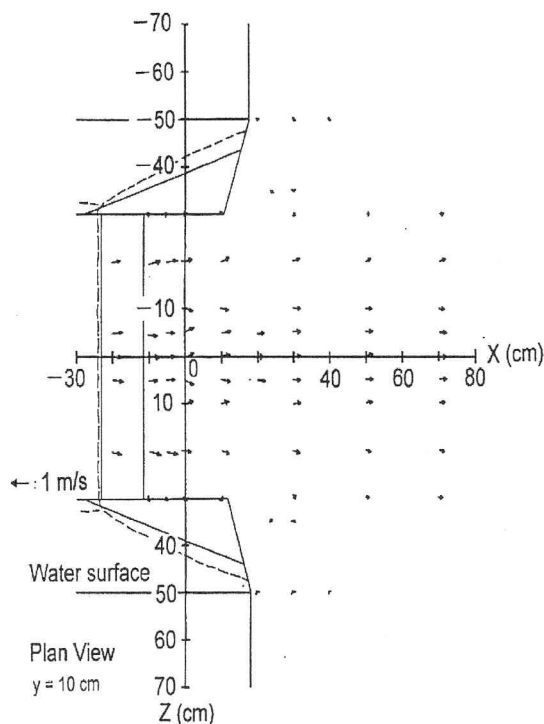


写真 - 8 蛇籠を 3, 4 段おきに設置した時の魚道上の流況

なお、流速の方向とその大きさを示すため、40 ms ごとに測定された X, Z 方向の流速成分を 1 分間計測し、それらの平均値を求め、合成した流速をプロットした(図 - 3)。また、潜り込んだ流れの空気混入の程度を表すために、5 秒間に通過する空气の混入率 $[= \{ \text{空气の量} / (\text{空气の量} + \text{水の量}) \} \times 100(\%)]$ を 1 分間計測し、それらの平均値を求め、平均された空气混入率の等値線を示した(図 - 4)。

魚道からの流れの流速が 50 cm/s 程度以下であり、プールに潜り込んだ流れの流速は十分減衰されている(図 - 3)。また、魚道の入口で、側壁近くの流速が小さいため、遊泳魚類が入口に接近しやすく、遡上し



$\theta = 19^\circ$, $Q = 6.66 \text{ l/s}$, $h_g = 17 \text{ cm}$, $d_c = 2.29 \text{ cm}$, $H_{dam} = 88 \text{ cm}$, $S = 4 \text{ cm}$,
 $h_g/d_c = 7.42$, $H_{dam}/d_c = 38.4$, $S/d_c = 1.75$

図 - 3 魚道下流部の流速分布 (Y=10cm)

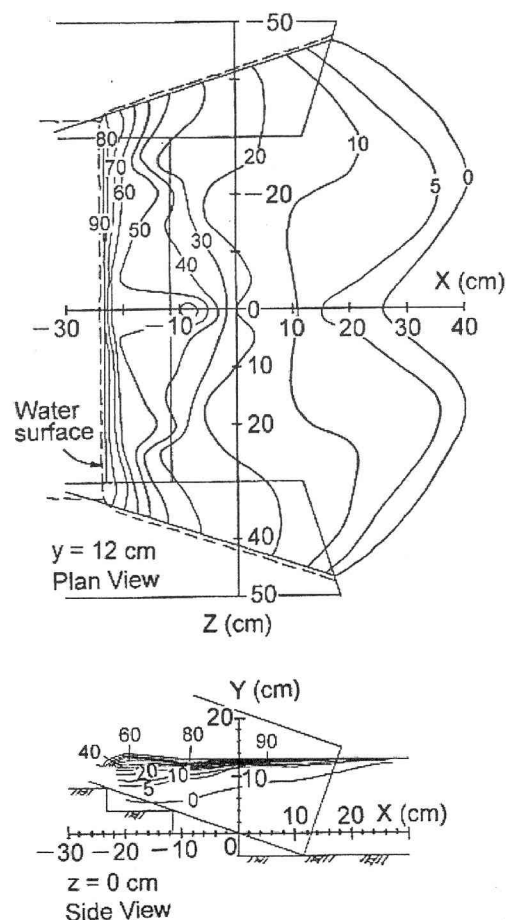


図 - 4 魚道下流部の空気混入分布 (水理条件は図 - 3 と同一)

やすい状態になっていると考える。この場合、魚道からの空気混入した流れがプールに潜り込み、短区間で主流は水面近くに上昇する。また、空気混入した流れは、底面近くまで到達せず水面近くとなり、空気が混入した領域は短区間で終了する(図 - 4)。

このことによって、魚道入口近くの空気混入状況および潜り込み流れの流況が魚を入口まで誘導する役割の一つを果たしていると考ええる。また、提案した魚道からの流れによって、魚道入口の両側から遡上しやすい状態がつくりだされていると考える。

6. 遡上実験の結果

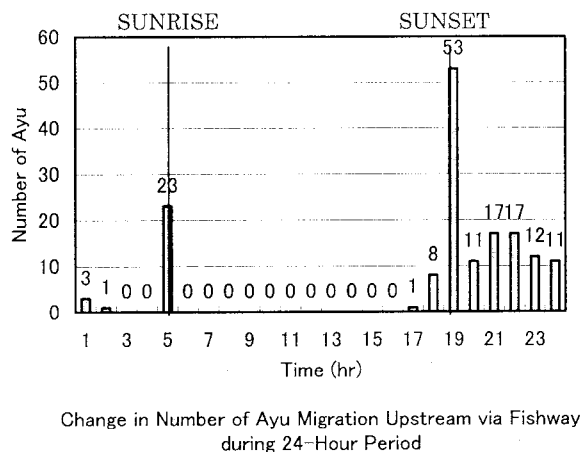
2000年6月21・22日(水温 24℃前後、晴れ)に実施したアユの遡上実験におけるアユの遡上固体数の日周変化を図 - 5(a)に示す。実験では種苗生産されたアユ 200 尾を用いた。6月に実施した実験では蛇籠(中央部の高さ 5cm、幅 14cm 程度)を3から4段間隔に設置した(写真 - 8 参照)。参考のため、ヤマトヌマエビおよびモクズガニの遡上固体数の日周変化を図 - 5(b), (c)示す。

アユは、日の出および日の入り時刻に盛んに遡上する行動が認められた[図 - 5(a)]。

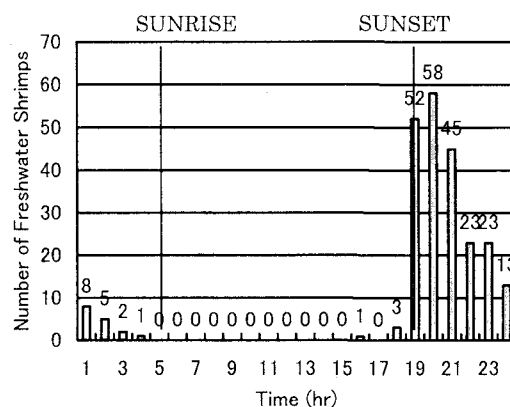
なお、ヤマトヌマエビの遡上実験では、日の入りから遡上し始め、日の出の時間まで遡上行動が認められた[図 - 5(b)]。このことは、徳島県志和岐川での遡上観測結果¹⁰⁾とも一致する。

魚道におけるアユの遡上行動については、魚道からの流れに誘われて魚道入口に進入したアユは、蛇籠の両脇からの流れに向かうように水際近くから遡上し、蛇籠によって形成されたプールで休息しながら、魚道の遡上を完了する(写真 - 3, 4)。

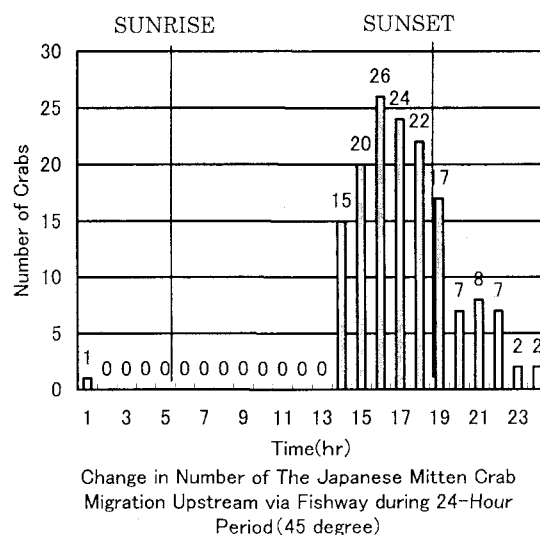
なお、野外においても遊泳魚類の遡上に対する魚道の効果を調べるため、長崎県西彼杵郡大瀬戸町を



a) アユ(200 尾)の遡上結果(水理条件:図 3 と同一)
(2000 年 6 月 21・22 日実施)



b) ヤマトヌマエビ(550 尾)の遡上結果
(水理条件:図 3 と同一)(2000 年 6 月 7・8 日実施)



c) モクズガニの遡上結果(190 尾)(水理条件:傾斜角度を除いて同一)(2000 年 7 月 3・4 日実施)

図 - 5 アユ・ヤマトヌマエビ・モクズガニの遡上固体数の日周変化

流れる雪浦川の上流部に魚道模型を設置した(写真 - 9)。その結果、雪浦川に生息する遊泳魚類であるカワムツ(全長 2~5cm 程度)の遡上を確認した。

これらのことから、甲殻類および底生魚類に配慮した魚道に蛇籠を設置することによって、水路傾斜角度が 19° であれば、遊泳魚類の遡上は可能であることが明らかとなった。

7. まとめ

甲殻類と底生魚類に配慮した魚道に、さらに蛇籠を付設することによって、遊泳魚類の遡上を可能とする魚道を考案した。室内の実験では、アユの遡上行動を観察し、その有効性を確認した。蛇籠が付設された魚道の特長は3点ある。

1. 甲殻類と底生魚類に配慮した魚道は、遊泳魚の遡上をも可能とする流況を呈する。
2. 蛇籠の設置に伴って、蛇籠前方のプール、蛇籠を浸透する流れ、越流する流れ、および両脇からの流れが形成され、場所によって流速の大きさが大きく異なる。このことから、魚の体長によって遡上可能なルートを選ぶことが可能となる。
3. 蛇籠の両脇でまとまった水量が流れるようになり、その結果、十分な水深が確保され、遊泳魚類にとって遡上しやすい状態が作り出される。

魚道周辺の流況の解析とアユの進入経路の観察から、考案した魚道にアユの遡上を促す3つの効果があることが判明した。

1. 魚道からの流れに誘われ、アユが魚道の入口へと導かれる。
2. 魚道の入口を探り当てたアユは進入口下流の水際近くから魚道に進入し、主として蛇籠の両脇から遡上する。
3. 蛇籠によって形成されたプールで休息しながら遡上し、すみやかに遡上を完了する。

野外実験によっても、カワムツの遡上が確認され、遊泳魚類の遡上に対する魚道の効果が明らかになった。

以上のことから、平水時の流量が小さい中小河川に設置された河川横断構造物において、ここで提案した魚道が有効であることを示した。すなわち、多様な水生生物の遡上・降河が可能な魚道を提案することができ、中小河川の生態系保全に貢献できると考える。

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、長崎県大瀬戸土木事務所、大瀬戸町役場、ならびに山梨県水産技術センターの多大なる協力を得た。また、日本大学理工学部の後藤浩助手、高橋正行助手、学部4年石塚倫朗氏、斎藤玲美氏、村上昌史氏、山口和正氏、学部3年森淳氏、長崎大学環境科学部3年の伊藤詠子氏、伊東和博氏、江口佳樹氏、久保田優子氏、澤田英祐氏の協力を得た。ここに記して謝意を申し上げる。

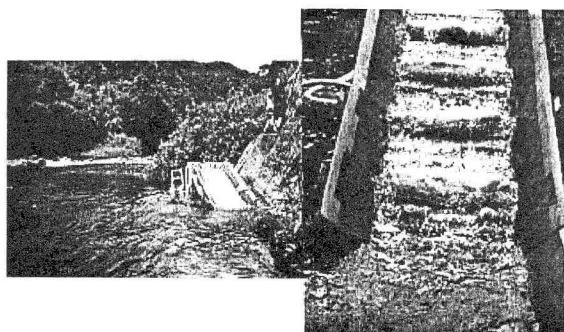


写真-9 雪浦川に設置された魚道模型
(2000年9月2・3日実施)

参考文献

- 1) 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、第6回河川技術に関する論文集、土木学会水理委員会河川部会、pp.149～154、2000。
- 2) 三矢泰彦、安田陽一、浜野龍夫、勝俣亮介：甲殻類魚道の基本条件と提案、日本甲殻類学会第38回大会、P34、p.54、2000。
- 3) Yasuda, Y., Ohtsu, I., Hamano, T., and Miya, Y.: A Proposed Fishway to Facilitate the Upstream and Downstream Migration of Freshwater Shrimps and Crabs, *Proc. 29th IAHR Congress*, Theme B3, Beijing, 2001 (to be published)
- 4) Yasuda, Y., and Ohtsu, I.: Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels, *Proc. 28th IAHR Congress*, Graz, Austria, Session B14 (CD-ROM), 1999。
- 5) 安田陽一、高橋正行、大津岩夫：階段状水路の流水抵抗、*水工論文集*、土木学会、第44巻、pp.527-532、2000。
- 6) 安田陽一、大津岩夫：階段状水路設置による堰直下潜り込み流れの逆流域短縮効果、第5回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会河川部会、pp.141～146、1999。
- 7) Yasuda, Y., and Ohtsu, I.: Characteristics of Plunging Flows in Stepped Channel Chutes, *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zurich, Session of Internal flow features, Balkema, Rotterdam, pp.147-152, 2000。
- 8) 高橋正行、安田陽一、大津岩夫：階段状水路における Skimming Flow のエネルギー減勢、*水工論文集*、土木学会、第45巻、pp.415～420、2001。
- 9) Yasuda, Y., Takahashi, M., and Ohtsu, I.: Energy Dissipation of Skimming Flows on Stepped Channel Chutes, *Proc. 29th IAHR Congress*, Theme D2, Beijing, 2001 (accepted paper)
- 10) 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*、日本甲殻類学会誌、No.21、pp.1-13、1992。

(2001. 4. 16 受付)