

# V字溝型魚道の流況特性 —原型と模型からの経験—

## FLOW CHARACTERISTICS OF FISHWAY WITH A V-SHAPED DITCH —EXPERIENCES FROM PROTOTYPE AND PHYSICAL MODEL—

安田陽一<sup>1</sup>・大津岩夫<sup>2</sup>・高橋正行<sup>3</sup>

Youichi YASUDA, Iwao OHTSU, and Masayuki TAKAHASHI

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 博士(工学) 助手 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)

Recently, the authors proposed the fishway with a V-shaped ditch for the migration of multi-aquatic animals. In Ainoura River of Nagasaki Prefecture, the proposed fishway has been settled at the low drop weir for water supply. The weir located at the most downstream of the river was obstacle to the migration of aquatic animals. The settlement of the fishway is significant for the preservation of ecosystem around the weir. This paper presents flow characteristics of the fishway with a V-shaped ditch settled at the weir in Ainoura River. Also, an hourly change of number of the upstream migration for aquatic animals at the upstream of the fishway has been shown. Further, field measurements on velocity and air-entrainment have been compared with experimental results in 1/6 scale model, and the relation between prototype and physical model has been discussed.

*Key words: fishway, weir, migration, shrimp, crab, demersal fish, swimming fish*

### 1. まえがき

最近, 著者らは約 35%勾配の V 字溝型魚道を提案し, 6 分の 1 の縮尺模型(写真-1)を用いて, 出水時の提案魚道の安全性および通常時の魚道内の流況特性を実験的に明らかにした<sup>1)</sup>. 提案魚道は, 2:1 勾配の側面と 2:1 勾配の越流面との交線を中心に隔壁が等間隔に設置された 35.4 %勾配の魚道(写真-1)であり, 魚道が設置されていない固定堰の構造を変えずに, 護岸の斜面を利用して魚道が設置できる特徴を持っている.

長崎県佐世保市を流れる相浦川の最下流部において佐世保市が管理する落差 2.0 mの取水堰(写真-2)があり, 魚道が設置されていない. この取水堰はかつて農業用の堰に取水池をさらに増設した構造を有している.

この堰に魚道整備することは, 相浦川に生息する淡水域の水生生物ばかりでなく通し回遊性の水生生物の遡上・降河<sup>2)</sup>を可能にするためにも極めて重要な意味を持つ. なお, 魚道整備の前提条件として佐世保市内の水道水の確保から取水池から越流した水量を利用すること, 魚道が治水上の障害にならないこと, 取水池の構造を改良しないこと, 施工が短期的かつ経済的であることが挙げられていた. また, 10 分の 1 勾配の魚道の設置は困難な状況となっていた. 魚道整備の前提条件を満足する魚道として, 著者らの提案した V 字溝型魚道が採用され, 平

成 17 年 5 月に魚道整備が完了した(写真-3).

ここでは, 施工された魚道内の流況特性を明らかにした. すなわち, 原型の流況の観察, 魚道内の空気混入量, 流速, 水深, 流量の現地計測を行った. また, 6 分の 1 の縮尺模型実験で得られた流況と原型の流況との比較を行い, 通常時の流況特性について検討を加え, 縮尺模型と原型との類似点と相違点を示した. さらに, 提案魚道を遡上・降河する水生生物の種類を調べ, 提案魚道の適用性を示した. なお, 遡上調査時期は 9 月に行った. 9 月は通し回遊性の甲殻類が稚エビとなって遡上する時期であり, 提案魚道の設置によって稚エビが遡上・降河できるのかを調査するのに適切な時期である.

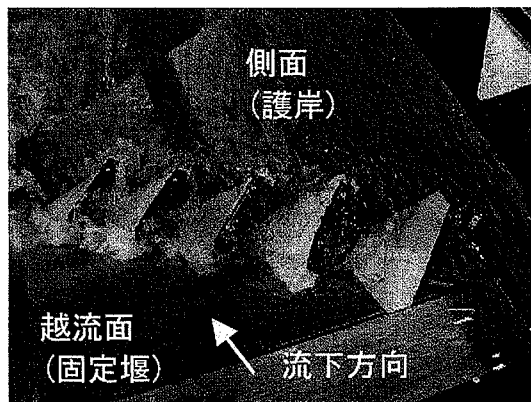


写真-1 V字溝型魚道の6分の1縮尺模型  
(原型で換算すると, 限界水深  $d_c=9.78\text{cm}$  に相当)

## 2. 施工されたV字溝型魚道の特徴

写真-4 は長崎県佐世保市が管理する取水堰に V 字型溝型魚道が施工されている状況を示す。V 字溝型魚道は総落差 2 m, 隔壁間の落差 20 cm, 隔壁突出部(写真-4(a))の横断方向の幅 60 cm, 高さ 20 cm, 厚み 10cm, 三角形形状の隔壁部(写真-4(a))天端の横断方向の幅 160 cm, 天端の厚み 10 cm, 越流面の勾配 1 : 1 を有するものである。なお, 側壁の傾斜面について, 甲殻類の遡上・降河に配慮して<sup>3)~6)</sup>コンクリート表面の凹凸が 2 mm 程度の粗さで仕上げてある。

平成 16 年 12 月から施工が始まり, 平成 17 年 5 月に竣工した。この取水堰から 1 日当たり 5,000 m<sup>3</sup>(毎秒 58 l)の取水がなされ, 取水された水は浄化施設を経由して佐世保市内に給水されている。佐世保市は長崎県内においても雨量が少ない箇所であり, 水資源の確保は必要不可欠である。このことから, 魚道本体の施工は, 取水池から取水できる状態で実施された。

取水池から越流する流れを魚道へ流入させるために, 取水池を囲む壁について, 写真-3, 4(b)に示されるように, 20 cm のかさ上げがなされている。このことから, 通常時に魚道から越流する流量は 150 から 400 l/s となる。

写真-4 に示されるように, 魚道を取り囲む越流面と側壁の外側は階段になっていて, 出水時に流れを減勢させる機能<sup>7)</sup>を有している。また, 上流側に位置する階段(堰越流面と向かい合う階段)では, 土砂吐き用の角落し(写真-3)から通常時でも越流する流れが見られることから, 出水時には角落しおよび堰から越流する流れが減勢されるようになっている。

## 3. 魚道および魚道周辺の流況の説明

通常時および小出水時の魚道および魚道周辺の流況を写真-5 に示し, 魚道に流れ込む流量規模を限界水深の大きさで表している。なお, 魚道上流端が越流底面幅  $b = 4$  m, 高さ 20 cm, 側壁勾配 2 : 1 ( $m = 2$ )の切り欠き部となっているため, 切り欠き部の断面で限界水深  $dc$  を測定した。

限界水深  $dc = 5.8$  cm の場合(通常時において流量が少ない場合), 写真-5(a)に示される流況となる。この場合, 隔壁天端から越水する流れは見られず, 隔壁間に形成されるプール内では気泡の混入が水面近くのみ認められる程度である。また, 魚道から流下する流れに気泡が含まれているため, 魚道からの流れが呼び水の役割<sup>4), 5)</sup>を果たしている。

限界水深  $dc = 10.5$  cm の場合(通常時において流量が多い場合), 写真-5(b)に示されるように, 隔壁天端から越水する流れが見られ, 第 7 隔壁が水没した状態となる。また, 隔壁間のプール内右岸側で気泡混入が多く見られる。この場合, 角落し(写真-3)からの越流量が大きくなるが, 堰直下流側の跳水の

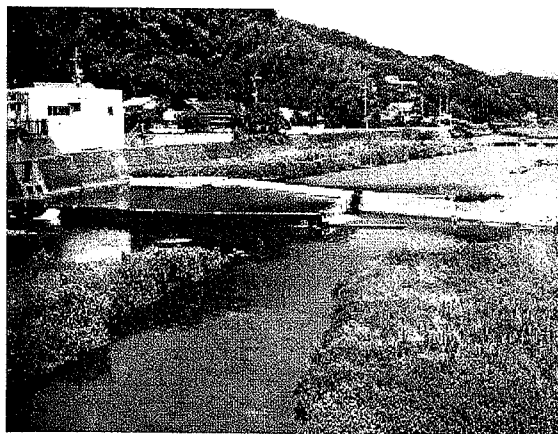


写真-2 魚道整備前の取水堰の状況



写真-3 魚道整備後の状況(2005 年 9 月)

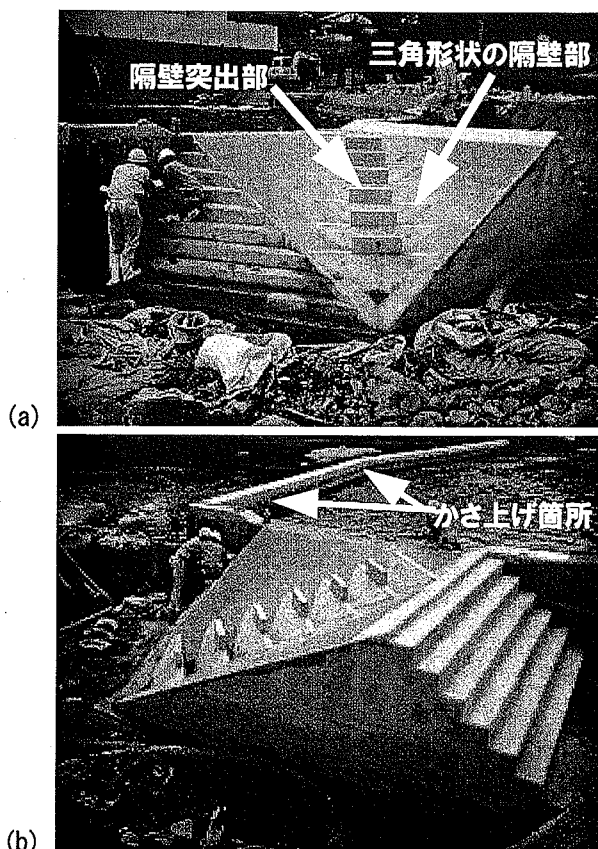
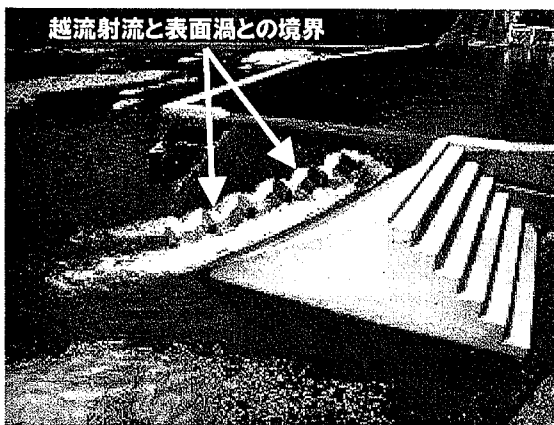
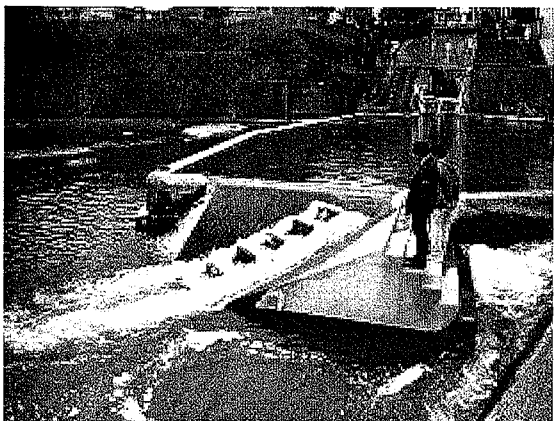


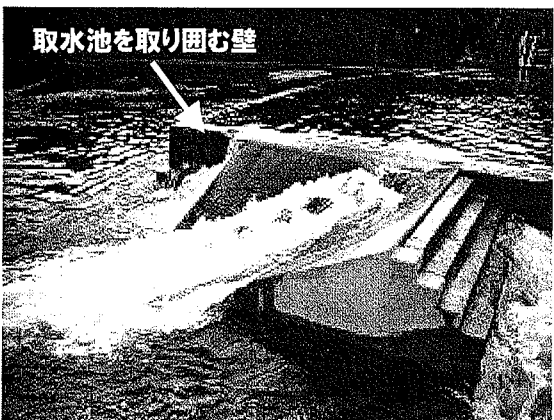
写真-4 V字溝型魚道の施工状況  
(平成 17 年 4 月の撮影)



(a)



(b)



(c)



(d)

写真-5 魚道および魚道周辺の流況

通常時の流況：

(a)  $dc = 5.8$  cm の場合、(b)  $dc = 10.5$  cm の場合、

小出水時の流況：

(c)  $dc = 13$  cm の場合、(d)  $dc = 25$  cm の場合

形成によって、流速が短区間で減勢される。このことから、魚道から越流する気泡混入した流れが流速変動を伴った流れとなるため、遡上する遊泳魚にとって角落しからの流れよりも魚道からの流れが認識されやすくなるものと思われる。

限界水深  $dc = 13$  cm の場合、取水池を取り囲む壁から越水するようになる(写真-5(c))。また、魚道を通る流れに多量の気泡が混入し、遊泳魚が遡上するには困難な状態になっている。一方、水際が確保されていることから底生魚、甲殻類、貝類が遡上・降河できる状態<sup>3)~8)</sup>が保たれている。角落し(写真-3)から越流する流れについては、堰直下流で強制跳水が形成され、流速が短区間で減勢される。

$dc = 25$  cm の場合、堰から越流した流れが形成されている。この場合、魚道隔壁の右岸側で気泡混入を伴う跳ね上がった流れが形成される。また、堰と向き合った状態で設置された階段と堰越流面との間で水深規模の渦が形成され、堰直下流側の流速が短区間で減勢される(写真-5(d))。

#### 4. 魚道内の気泡混入に関する検討

6分の1縮尺模型の魚道内の流況を写真-6に示す。写真-6(a)、(b)は原型規模に換算した限界水深  $dc$  が  $12.4$  cm の場合、 $25.5$  cm の場合を示し、写真-5(c)、(d)の流況に対応する。なお、原型規模に換算した限界水深が  $dc = 9.8$  cm の流況については写真-1に示され、写真-5(b)に対応している。

魚道内の流況は一般的に、魚道の形状および寸法を表す無次元量、重力の影響を表すフルード数、粘性の影響を表すレイノルズ数、および表面張力の影



(a)



(b)

写真-6 6分の1縮尺模型の流況

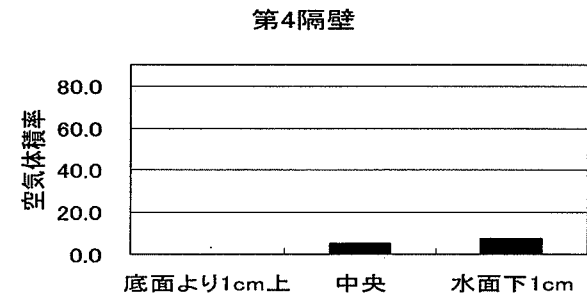
(a) 原型に換算した限界水深が  $12.4$  cm の場合

(b) 原型に換算した限界水深が  $25.5$  cm の場合

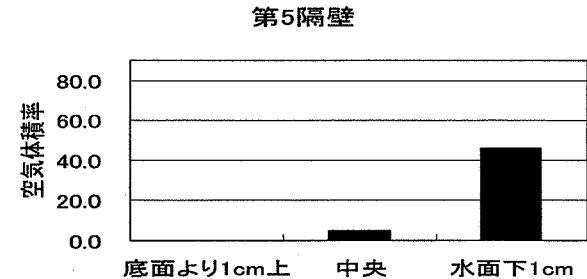
響を現すウェバー数によって変化する。なお、魚道内の流れは水と空気(気泡)によって構成されていることからウェバー数  $We = V(\rho_w d / \sigma_w)^{1/2}$  ;  $d$  = 代表水深,  $V$  = 代表流速,  $\rho_w$  = 水の密度,  $\sigma_w$  = 水と空気との間で生じる表面張力]の影響を受ける。さらに  $We$  はフルード数  $Fr = V/(gd)^{1/2}$  とレイノルズ数  $Re = Vd/(\mu_w/\rho_w)$  ;  $\mu_w$  = 水の粘性係数]によって表現される<sup>9)</sup> [ $We = Fr^{1/3} Re^{2/3} \{g\mu_w^4/(\sigma_w^3 \rho_w)\}^{1/6}$ ]。模型と原型との間では  $g\mu_w^4/(\sigma_w^3 \rho_w) = \text{const.}$  のため、フルードの相似則で検討した魚道内の流況について、原型と模型との違いが粘性(レイノルズ数)の影響によって生じる可能性があるものと推論される。

写真-1, 5, 6 の流況の比較から、原型の場合(写真-5), 6 分の 1 縮尺模型で形成された流況(写真-1, 6)より気泡混入が多い流況となる。これは、6 分の 1 縮尺模型よりも原型の方が粘性の影響が小さく、流脈が乱れやすくなり、潜り込みおよび跳ね上がりが形成された箇所では気泡混入が生じやすくなったためと考えられる。なお、模型魚道内で見られる気泡の径は、原型規模の場合と同様であると考えられる。

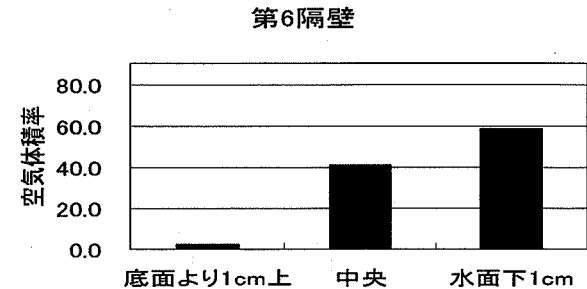
写真-5 (a) の流況(限界水深  $dc = 5.8$  cm の場合: 生



(a) 測定位置の水深  $h = 7.5$  cm



(b) 測定位置の水深  $h = 9.0$  cm



(c) 測定位置の水深  $h = 9.7$  cm

図-1 隔壁左岸側(壁から10cm離れたところ)での空気体積率の水深方向の変化

物調査したときの流況)を対象に、暫定的な手段として径 2 cm, 長さ(高さ) 6.5 cm の円筒を用い、気泡混入による空気体積率[(気泡混入による円筒内の空気の空間体積)/(円筒内の体積)×100 (%)を現地計測した。図-1 は第 4 隔壁から第 6 隔壁までの隔壁左岸側(壁から 10 cm 離れた箇所)の空気体積率を示したものである。図に示されるように、隔壁が下流側に位置するほど気泡混入量が多くなっている。特に第 6 隔壁では、空気体積率が水深の 50% 上部で 40% 以上になっている。水深の 50 % 下方では空気体積率が小さく、気泡混入が遡上経路の阻害にはならないものと考えられる。なお、魚道上流端から 3 番目の隔壁(第 3 隔壁)までは、隔壁周辺の空気体積率は 10 % 未満である。

### 5. 魚道内の流況に関する検討

6 分の 1 縮尺模型実験で示された魚道内の流況特性を原型の場合と比較するために、生物調査と兼ねて流況計測を実施した。流速測定には I 型 2 次元電磁流速計およびピトー管を用いた。水深が 5 cm 未満の場合は流向を定めた上でピトー管によって流速を測定している。また、電磁流速計を用いた場合は平面方向の流速を測定している。

原型規模の限界水深が  $dc = 6$  cm 前後の流況を対象に原型および 6 分の 1 の縮尺模型で得られた流速

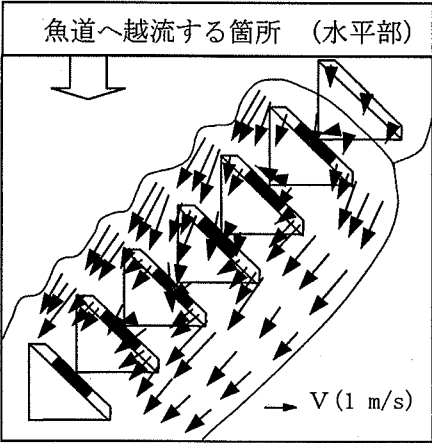


図-2 流速平面ベクトル図(現地測定結果) 原型規模の限界水深  $dc = 5.8$  cm の場合

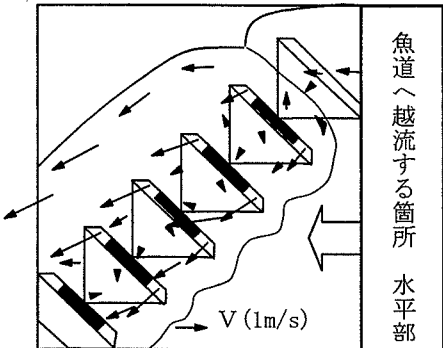


図-3 流速平面ベクトル図(縮尺模型の結果) 原型規模の限界水深  $dc = 6.1$  cm の場合

平面ベクトルを図-2, 3 に示す。なお、測定位置は水深の中央部である。図中の実線は水際および魚道上流端から越流する射流の流れと隔壁の直上流部に形成された表面渦との境界(写真-5(a)参照)を示す。また、図中の流速および限界水深は原型の大きさに換算されている。図に示されるように、模型の流速場は原型の流速場とほぼ同様な結果を示す。プール内の流速は 50 cm/s 以下となり、遊泳魚にとって一時的な休息ができるものと思われる。隔壁突出部の水際側の壁付近(壁から 10 cm 前後)の流れにおいては、流速が 1 m/s 前後となっている(図-2)。なお、隔壁突出部の水際側の壁付近で遊泳魚の遡上が認められている。隔壁突出端部と実線で示した水際との中間近くでは 2 m/s を越える流速となり捕食者(鳥類)が実線で示した水際から隔壁に向えず、かつ気泡混入流れにより魚影が隔壁突出部から見られない状態になっている。

以上のことから、空気混入の状態は原型と模型で異なるが、流速場については同様な結果を示すことが理解される。なお、水深についても模型と原型との違いは認められないことが確認されている。

## 6. V字溝型魚道における生物調査

相浦川の取水堰に設置された魚道を遊泳魚ばかりでなく底生魚、甲殻類が利用することを確認するため、竣工された年(2005 年)の 9 月 2 日, 3 日(大潮)に遡上調査を行った。調査項目は時間ごとの照度、気温、水温、限界水深の変化、1 時間ごとの遡上数の変化および遊泳魚、底生魚、甲殻類、貝類の判別である。甲殻類の遡上・降河は夜間に見られることから、夜間に観測が可能なように赤外線によるビデオ撮影を行った。

図-4, 5 は 1 時間ごとの水温、気温、照度の変化を示す。図-4 に示されるように、調査日には気温および水温ともに高い値を示している。このことから、日中遡上する遊泳魚および底生魚にとって厳しい気温および水温の状態になっていた。なお、夜間においては水温が 29 °C から 28 °C を示す。

図-6 は単位幅流量の時間ごとの変化を示す。なお、単位幅流量  $q$  は簡易的に  $(9.8 \times dc^3)^{0.5}$  から算定している。図に示されるように、19 時までは流量はほぼ一定である。19 時から 2 時までは、時間の経過と共に単位幅流量の値が増加している。限界水深では、5.8 cm から 7.0 cm まで変化することになる。

遊泳魚および底生魚の時間帯ごとの遡上数の変化を図-7 に示す。調査日の水温および気温が高かったため、遡上数は少ないものの、照度が 2000 lx (ルクス) 以上のときに底生魚(体長 3 cm 程度のハゼ)および遊泳魚(体長 10 cm 前後)の遡上が認められた。特に、遊泳魚の場合、照度が急激に減少した段階で遡上してきた。なお、相浦川では 4 月、5 月にアユが遡上することから、遊泳魚の遡上調査をアユの遡上時期に再度実施する予定である。

甲殻類(エビ)の時間帯ごとの遡上数の変化を図-8

に示す。図に示されるように、照度がほぼ 0 lx (ルクス) となる時間帯に全長 6 mm の稚エビや全長 10 cm テナガエビの遡上が認められた。特に、22 時から 23 時の時間帯の遡上が最も多かった。なお、魚道上流端に設置されたビデオ撮影記録から午前 4 時以降に降河するエビが認められた。

以上のことから、日中は底生魚および遊泳魚の遡上が認められ、夜間にはエビの遡上が認められた。特に、全長 6 mm 程度の稚エビが遡上することはエビの生態系保全に重要な役割(6, 8)を果たしている。遡上記録には示されていないがイシマキガイの遡上・降河が時間帯に関わらず認められた。すなわち、遊泳魚ばかりでなく、底生魚、甲殻類、貝類が V 字溝型魚道を遡上することが明らかとなった。また、エビ、ハゼ、イシマキガイが魚道の水際を利用して降河することも確認することができた。

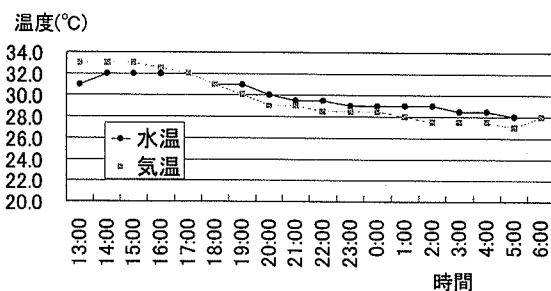


図-4 魚道周辺の時間ごとの温度変化

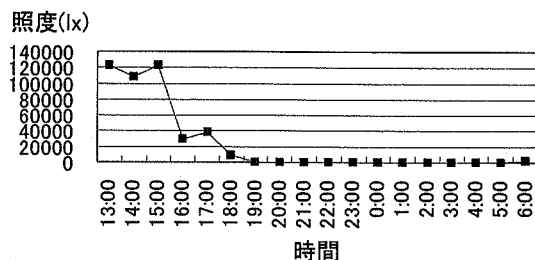


図-5 魚道周辺の時間ごとの照度変化

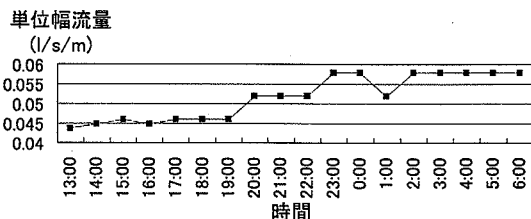


図-6 単位幅流量の時間ごとの変化

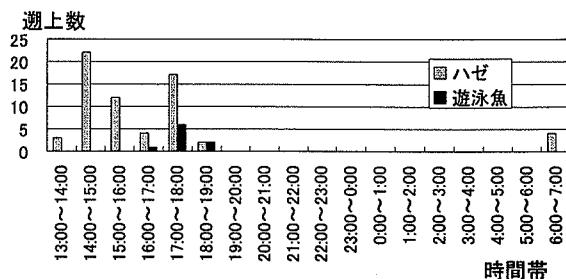


図-7 ハゼおよび遊泳魚の時間帯ごとの遡上数変化

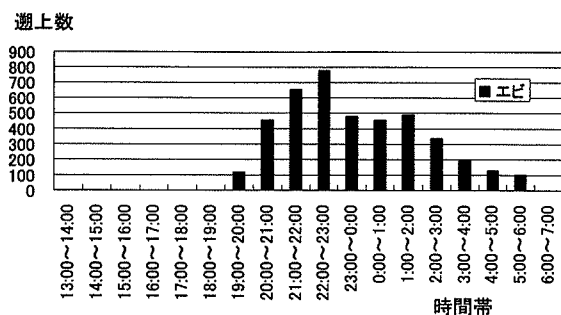


図-8 エビの時間帯ごとの遡上数変化

## 7. まとめ

相浦川の最下流部に位置する取水堰に V 字溝型魚道が施工された。この魚道の流況特性について模型実験で得られた結果と原型との比較検討を行った。また、水生生物の遡上調査を行った。それらの結果を以下にまとめる。

1. 通常時および小出水時の V 字溝型魚道の流況を特徴づけた。また、相浦川の取水堰に設置された V 字溝型魚道の場合、魚道上流端の断面で測定した限界水深の値が 5 cm から 10 cm 程度であるとき、通常時に形成される流況となり、そのときの流況特性を示した。
2. 6 分の 1 縮尺の魚道模型を用いて実験的に明らかにした流況と施工された魚道に形成される流況との比較を行った結果、気泡混入の状態が原型と模型との間で違いが認められた。なお、遡上調査を実施した流況を対象に遡上経路の気泡混入による空気体積率を測定した結果、水深の 50 % 下方では気泡の混入があまり見られないことが示され、気泡混入が遡上の阻害につながることがわかった。
3. 遡上調査時の流況を対象に流速測定を行った結果、隔壁突出部の水際側での脇の流れは遡上可能な流速であり、プール内の流れは休息可能な流速であることを考察することができた。また、6 分の 1 縮尺の模型実験では魚道天端で生じる限界水深が 1 cm 程度になるが、フルードの相似則による模型実験で得られた流速場と現地で計測した流速場とほぼ対応する結果が得られていることが明らかになった。
4. フルードの相似則による 6 分の 1 縮尺模型の実験結果と原型の現地計測結果との間で流速および水深について相似な関係が得られた一方気泡の混入状態に違いが生じたことは、水と空気との間で生じる表面張力の影響を示すウェバー数の影響によるものである。また、魚道内の流れは水と空気で構成され、 $We = Fr^{1/3} Re^{2/3} \{ \mu_w^4 / (\sigma_w^3 \rho_w) \}^{1/6}$  の関係から、気泡混入の違いは粘性の影響を示すレイノルズ数の影響によるものと考察することができた。このことから、気泡混入を含めた魚道内の流況特性を解明する

場合、レイノルズ数の影響が無視できる範囲で模型実験を行うことが重要である。

5. 遡上調査結果から、淡水性の遊泳魚、通し回遊性の底生魚、甲殻類、貝類の遡上が認められた。照度が 0 lx 近くの時間帯(約 10 時間)には合計 4200 尾の稚エビが遡上した。この結果から少なくとも、提案した V 字溝型魚道は対象河川に生息する遊泳魚ばかりでなく、底生魚、甲殻類が遡上できる落差 2.0 m、35 % 勾配を有する魚道であることが評価された。また、甲殻類の中でも登坂能力の弱い全長 6 mm 前後の稚エビが魚道の水際を利用して遡上できていることを遡上記録から確認し、エビの生態系保全において V 字溝型魚道は重要な役割を果たしていることを確かめることができた。

謝辞：本研究を行うにあたり、長崎県建設技術研究センター(NERC)からの研究助成を受けた。また、長崎県県北振興局の多大なる協力を得た。ここに、記して謝意を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 安田陽一、大津岩夫、高橋正行：既設の固定堰に設置する暫定魚道の流況特性、*河川技術論文集(報告)*、土木学会水理委員会河川部会、Vol.10、pp.435-440、2004。
- 2) Miya, Y., and Hamano, T. "The influence of a dam having no fishway on the distribution of decapods crustaceans in the Yukinoura River, Nagasaki prefecture, Japan," *Nippon Suisan Gakkaishi* (Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries), 54 (3), 429-435, 1988 (in Japanese with English abstract).
- 3) 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。
- 4) 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・降河に配慮した魚道の提案、*第 7 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.221-226、2001。
- 5) 安田陽一、高橋正行、大津岩夫、三村進二、原口哲幸：長崎県千綿川に設置された台形断面魚道の特徴と魚道設置の効果、*河川技術論文集(報告)*、土木学会水理委員会河川部会、Vol.11、pp.435-440、2005。
- 6) 安田陽一、大津岩夫、三矢泰彦、浜野龍夫：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、*第 9 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.487-492、2003。
- 7) Mossa, M., Yasuda, Y., and Chanson, H. "Fluvial, Environmental & Coastal Developments in Hydraulic Engineering," A.A. Balkema Publishers, pp.3-15, 67-80, 117-131, 205-221, 2004。
- 8) 安田陽一、大津岩夫、高橋正行、森永正則、三村進二：透過性パイプを用い小段式台形断面魚道の提案とその効果、*河川技術論文集(報告)*、土木学会水理委員会河川部会、Vol.11、pp.441-446、2005。
- 9) 高橋正行、安田陽一、大津岩夫：「階段状水路における空気混入射流の特性に対するレイノルズ数の影響、」*水工学論文集*、土木学会、第 50 巻、CD-ROM、2006。

(2006. 4. 6 受付)