

# 階段式魚道の底面傾斜がアユの 遡上特性に及ぼす影響

鬼束幸樹<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・野口翔平<sup>3</sup>・穴戸陽<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail: juichiro@tobata.isc.kyutech.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 (株) 建設技術研究所 大阪本社 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

E-mail: moyamoya\_point\_1816@yahoo.co.jp

<sup>4</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail: siyoh\_6@yahoo.co.jp

高い遡上率を有する魚道を設置するには魚道の適切な幾何学形状の把握が必要となる。既往の研究、各種魚道マニュアルにおける記述では、プール底面の傾斜はほとんど水平である。しかしながら、プールの底面傾斜が遡上率に対して与える影響についてなされた研究および言及はないのが現状である。本実験では魚道のプール底面傾斜と流量を系統的に変化させ、底面傾斜がアユの遡上特性に及ぼす影響について検討した。その結果、最も遡上率が高い値を示したのは、プール底面を上流側に下り傾斜に設置した場合であった。これは、プール底面を上流側に下り傾斜に設置することにより、アユの休憩場所が上流側に近づく遡上経路が短くなったためであると考えられる。

**Key Words :** pool-and-weir fishway, bottom slope, ayu, migration rate

## 1. はじめに

種々の人間活動によって河川に生息する魚類が影響を受けることがある。人間の暮らしのための開発による魚類の生活に必要な環境の減少、水質の悪化、またダムや堰等の設置による河川の連続性の遮断、流量の減少により魚類の生活は脅かされる。河川に生息する魚類には、その営みを全うするために河川を移動するものが多い。産卵場へ向かう、洪水時に下流へ流された後もとの場所へ戻る等、移動は様々な目的をもって行われる。アユ(*Plecoglossus Altivelis Altivelis*)やサケのように河川と海を往復する生活環を持つ生物にとって、ダムや堰等の河川横断施設は彼らの分布や生活に決定的な影響を及ぼすことがある。アユは、河川の中流から上流に遡上し、そこで成長するが、遡上が妨げられれば十分な成長をすることができず、その水系における個体群は衰弱してしまう恐れがある。そのため、改善手法の一つとして魚類の河川縦断方向の移動を容易にするため魚道の設置が提案される。

魚道において高い遡上率を確保するためには、魚道の幾何学条件の把握が必要である。わが国において最も高い設置率を有するのは階段式である。そのため、階段式魚道における幾何学形状に関する研究も多くなされてきた。

久保田<sup>1)</sup>はプール長を変化させてイワナの遡上率を計測し、プール長がイワナの体長の2倍以上の時に遡上率が高くなることを示した。林田ら<sup>2)</sup>はプール長、プール水深をそれぞれ変化させてウグイの遡上実験を行い、プール長とプール水深との比が1から離れるにつれて遡上率が増加するが、比が1に近い場合は遡上率が低くなることを示した。和田<sup>3)</sup>は片側切欠き付階段式魚道において、プール長を3.0m、プール水深を0.4、0.8および1.2mの3通りに変化させてアユの遡上実験を行った結果、水深の減少に伴って遡上率が増加することを発見した。浪平ら<sup>4)</sup>はプール間落差またはプール長を変化させてウグイの遡上実験を行った結果、魚道内に低流速域を確保、あるいは隔壁からの落下流を減勢すると遡上率が高くなることを示した。

現在、魚道の設計指針を示したものとして、「魚の

「よりやすい川づくりの手引き」<sup>5)</sup>, 「よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針」<sup>6)</sup>, 「最新魚道の設計」<sup>7)</sup>, 「農業水利施設の魚道整備の手引き」<sup>8)</sup>などが挙げられ, 魚道の最適な幾何学形状が提示されている. 以上のようにこれらの設計指針において階段式魚道のプールの底面はほぼ水平であることが前提となっている. しかし, 階段式魚道におけるプール底面がほぼ水平が適切かどうかを確認した研究は見あたらない. 鬼東ら<sup>9)</sup>はプール内における魚の休憩場所と遡上すべき切欠きとの距離が短いほど遡上率が高いことを示した. そのため, プール底面の傾斜角度を変化させることによって休憩場所を制御することが出来れば, 魚の遡上率を向上させる可能性が期待される.

本研究では, 片側切欠き付階段式魚道において, 底面傾斜が遡上率の増加にはたす役割を検討するため, 底面傾斜および流量を系統的に変化させて, アユの遡上特性に及ぼす影響を解明した.

## 2. 実験装置および実験条件

図-1 に本実験で用いた魚道の概要を示す. わが国において, 比較的设置率が高い魚道は片側切欠き付階段式魚道である. したがって, 本実験においても同魚道を採用した. 各諸元はプール長  $L=0.7\text{m}$ , 魚道幅  $B=0.6\text{m}$  の4つのプールを隔壁厚  $\Delta x=0.15\text{m}$ , 落差  $\Delta y=0.15\text{m}$ , 切欠き幅  $\Delta z=0.12\text{m}$  としている. これらの値は「魚ののぼりやすい川づくりの手引き」<sup>5)</sup>によって提示されているものを参考にした. ここでプール番号は下流から上流に向かって昇順とし, 流下方向に  $x$  軸, 鉛直上向きに  $y$  軸, 横断方向に  $z$  軸をとった. また, 図-2(a)~(c)のように第2プールの底面傾斜を水平(Horizontal), 下流側隔壁の底面から  $40^\circ$ の上り傾斜(Up slope), 下流側切欠きの天端から  $40^\circ$ の下り傾斜(Down slope)の3つに変化させた. これらの傾斜は, プール長  $L$  と水深  $h$  との比がおおよそ1となるような魚道<sup>3)</sup>を想定して設定した.

表-1 に実験条件を示す. 3つの各底面傾斜において流量  $Q$  を  $1\sim 9\text{l/s}$  の範囲で5通りに変化させた合計15ケースの実験を1回ずつ行った. 越流は切欠き部のみであり, 越流流速がアユの巡航速度~突進速度 ( $0.32\sim 0.80\text{m/s}$ ) を網羅するように流量を変化させ, 流量変化が遡上率にあたる影響を検討した.

第2プールに平均体長  $\bar{B}_t$  が  $80\text{mm}$  ( $\sigma=10\text{mm}$ ) のアユ  $N=30$  個体を挿入し, 5分間馴致させた後, 第2プールの左岸側および上部に設置した2台のカメラで30fps, 30分間の撮影を開始した. なお, アユは採餌の時間および実験時間を統一させている個体群の中からランダムに選び, 各実験で異なる個体を使用した. また, 水温は

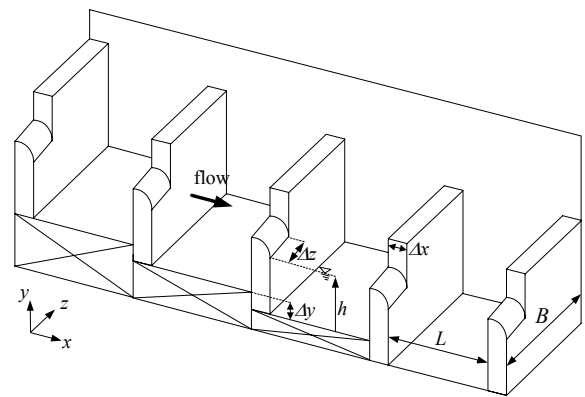


図-1 実験に用いた魚道の概要

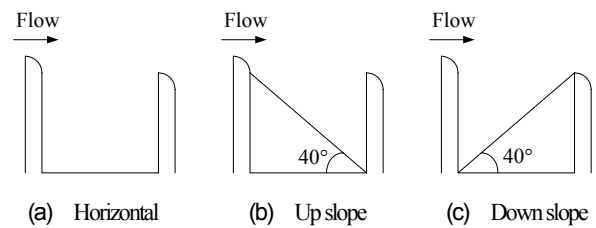


図-2 底面傾斜の概要

表-1 実験条件

$Q(\text{l/s})$	shape of bottom slope		
	Horizontal	Up slope	Down slope
1	H-Q1	U-Q1	D-Q1
3	H-Q3	U-Q3	D-Q3
5	H-Q5	U-Q5	D-Q5
7	H-Q7	U-Q7	D-Q7
9	H-Q9	U-Q9	D-Q9

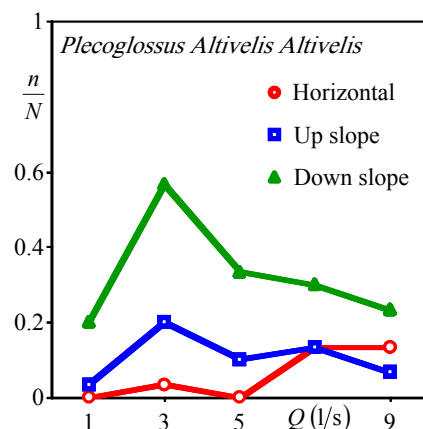


図-3 流量および各底面傾斜と遡上率との関係

$18^\circ\text{C}$ <sup>10)</sup>とし, 実験開始の1時間前に採餌した. 撮影後, 第2プールの全アユの遊泳位置および魚向を10sごとに解析し, また, 遡上数をカウントした. 魚向は  $x-y$  平面において  $x$  軸負の方向を  $0^\circ$ として鉛直上向きに  $0\sim 180^\circ$ , 鉛直下向きに  $0\sim -180^\circ$ とした.

$x, y, z$  軸方向にそれぞれ  $7, 7, 7$  のメッシュで構

成される測定点の内, Horizontal では全 343 点, Up slope では 224 点, Down slope では 231 点において, 3次元電磁流速計を用いて流速 3成分を 0.05s 間隔で 25.6s 計測した. 計測後,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の時間平均流速  $U$ ,  $V$ ,  $W$  および合成流速  $V_V = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$  を算出した. なお, 流速測定時には魚道内にアユを入れていない.

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 流量および底面傾斜と遡上率との関係

遡上率を次式のように定義する.

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (= 30)} \quad (1)$$

ここで, 第2プールから第3プールまで遡上した場合を遡上成功とし, それらを遡上に成功した尾数  $n$  としてカウントした. 飛び跳ねて遡上した個体は観察されなかった. 図-3 に流量  $Q$  に対する遡上率  $n/N$  の変化を底面傾斜ごとに示す. 各ケースで遡上率が大幅に異なることから, 底面傾斜の変化が遡上率に影響を与えることが理解される. また, 全流量  $Q$  において, Down slope の遡上率が他の底面傾斜と比べて高い値を示している. 特に, 流量  $Q$  が 3l/s の時に遡上率が最大となった.

#### (2) プール内流況とアユの定位場所

図-4(a)~(c)に流量  $Q$  が 3l/s の場合の  $z/B = 0.1$  における鉛直断面内 ( $x-y$ ) の流速ベクトルを底面傾斜ごとに示す. 図-4(a)より, Horizontal では上流側切欠き付近の流速が 0.4~0.6m/s であるのに対して, 下流側の流速は 0.1m/s と低速である. また, 図-4(b)の Up slope では傾斜面付近の流速が 1.0~1.2m/s であり, その他の領域の流速よりも速くなっている. 一方, 図-4(c)の Down slope においてはプール内全域において流速が 0.4m/s 以下であり, 他の傾斜と比較して最も低速で安定しているといえる. 遡上する魚類にとって流速が低速であることは好ましく, 遡上率の増加が期待される.

プールの鉛直断面 ( $x-y$ ) および水平断面 ( $x-z$ ) において, 各断面を  $10 \times 10$  の 100 メッシュに区切り, 各メッシュ内の 10s ごとの尾数をカウントし, それらの尾数を実験時間で除した時間平均尾数  $\bar{n}_m$  を算出した. 図-5(a)~(f)に流量  $Q$  が 3l/s の場合における存在率  $\bar{n}_m/N$  のコンターを底面傾斜別に示す. 図-5(a)~(c)の鉛直断面 ( $x-y$ ) に着目すると, すべての底面傾斜においてアユが集中している領域は底面付近である. ただし, その位置は図-5(b)の Up slope では下流側, 図-5(c)の Down slope では上流側の底面付近となっている. 一方, 図-5(d)~(f)の水平断面 ( $x-z$ ) においてアユが集中している領域は, すべての底面傾斜において切欠きから離れたプール左岸側

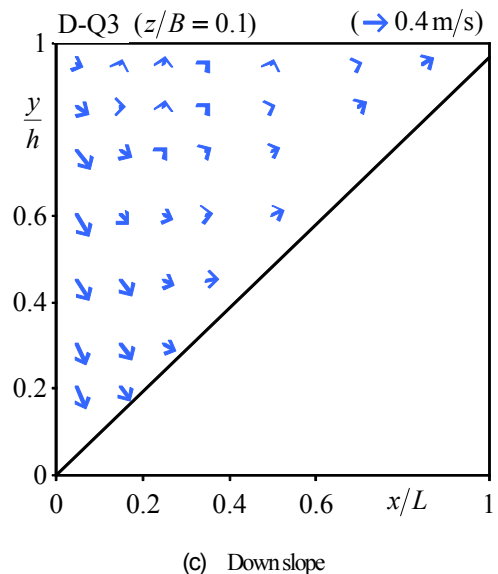
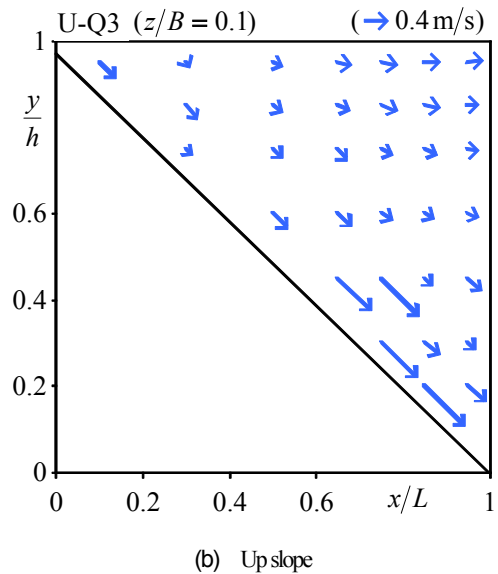
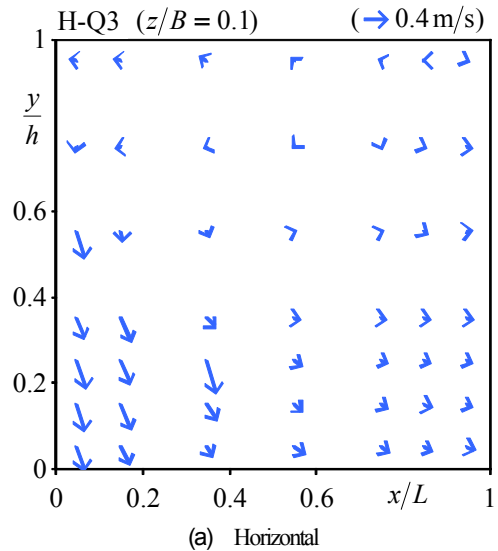


図-4  $z/B = 0.1$  における鉛直断面内の流速ベクトル

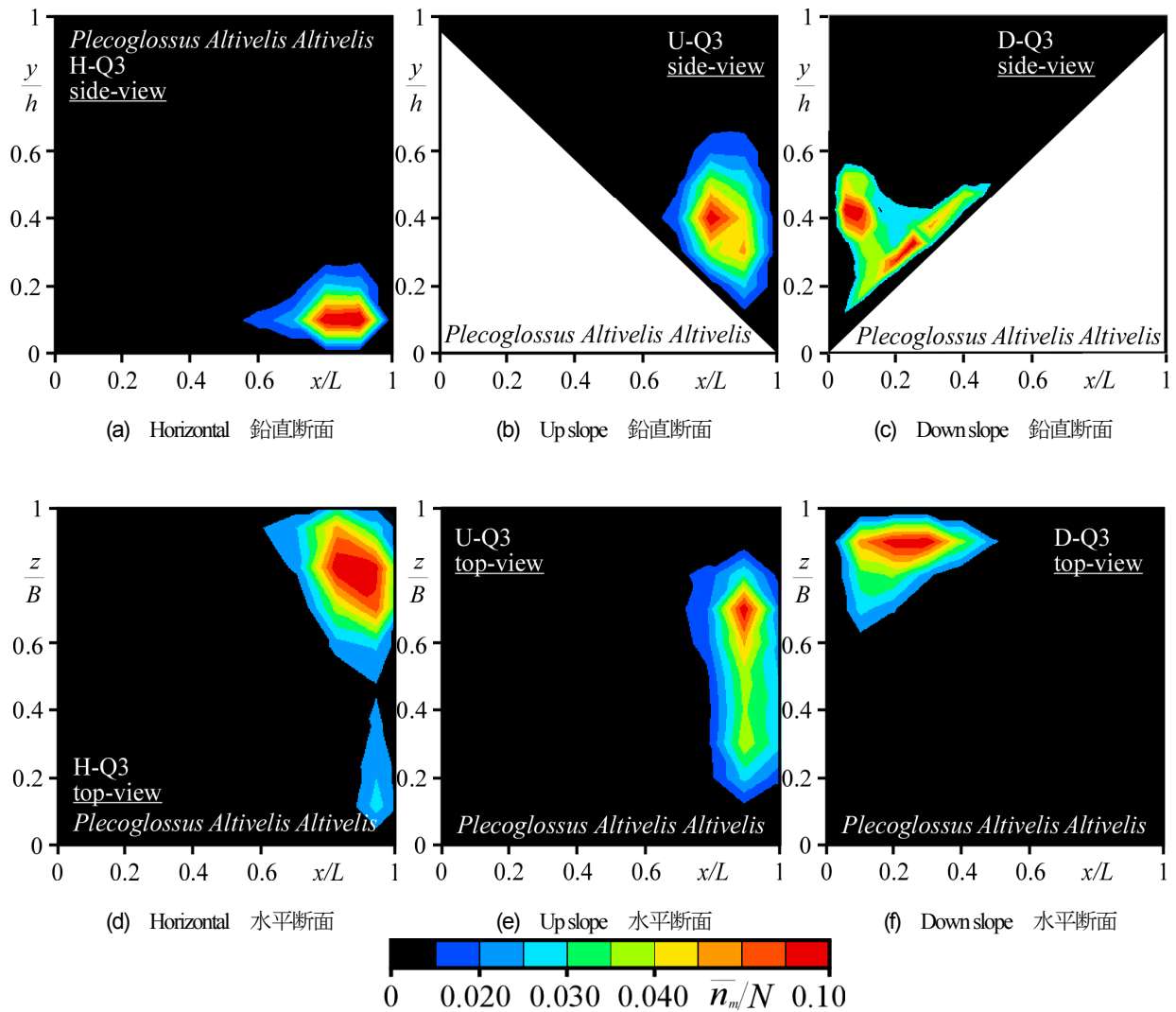


図5 アユの存在率コンター

であった。これは、右岸側壁付近の流速が切欠きからの流れの影響を受けて高速なため、アユが右岸側を避けているからである。実験中の観察により、アユの存在率  $\bar{n}_m/N \geq 0.01$  の場所で多く遊泳する様子が確認できた。ここで、この場所をアユの休憩位置と定義する。アユは休憩と遡上を繰り返すため休憩位置と切欠きの距離が近ければアユの遡上が誘発されることが予測される。

### (3) アユの向流性と遡上率との関係

図6 に流量  $Q$  に対する、各底面傾斜における魚群の重心位置から上流側切欠きまでの距離  $L_n$  を平均体長  $B_L$  で除した値 ( $L_n/B_L$ ) を示す。すべての流量で Down slope における魚群の重心位置から切欠きまでの距離が、他の底面傾斜より低い値となっている。これは、アユの魚群が切欠きに近いことを示しており、遡上が誘発されやすいことを示唆している。

図-7(a)~(c)に流量  $Q$  が 3l/s の場合の各底面傾斜の休憩

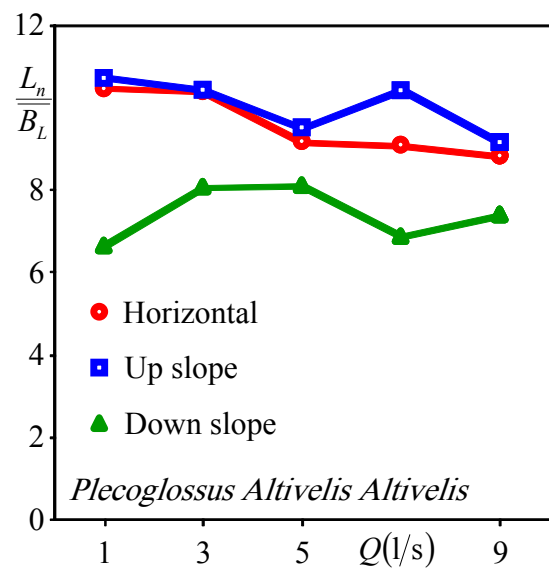


図6 流量および魚群の重心位置から切欠きまでの距離との関係

位置における3次元流速ベクトルを示す。図中の水色部分は、アユの休憩位置を  $x$ - $y$  断面、 $x$ - $z$  断面、 $y$ - $z$  断面にそれぞれ投影したものであり、緑色部分は、切欠きおよび切欠き直下を示している。図-7(a)より、Horizontalの休憩位置においては右岸から左岸へ向かう流れが存在する。一方、図-7(b), (c)より青丸で示している部分に着目すると Up slope, Down slope においては、切欠きおよび切欠き直下から休憩位置への流れが存在することが確認される。多くの魚には流れに逆らって遊泳する性質、すなわち、「正の向流性」があることが知られている<sup>1)</sup>。Horizontal では、右岸側から左岸側へのプール横断方向の流れが存在するため、アユは右岸側付近を通過して切欠きに向かう。ところで、プール右岸側付近における流速は高速である。さらに、休憩位置が切欠きから遠い下流側底面付近であるため、アユが遡上する際に高速流域を遊泳する距離が長くなり、遡上率が低くなったと考えられる。一方、Down slope では、アユが切欠きからの流れを認識し、正の向流性によって直接切欠きに向かう可能性が高くなると考えられる。また、休憩位置が切欠きから近い上流側付近であるため、遡上率が高くなったと考えられる。

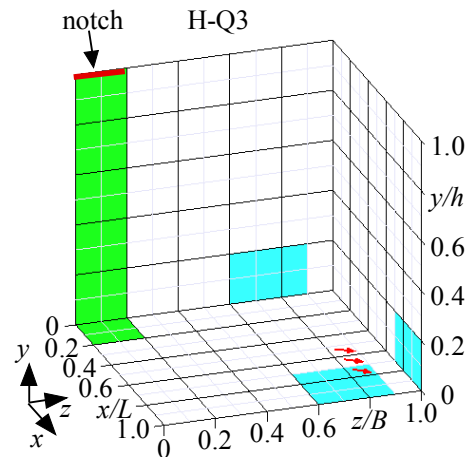
#### (4) 各底面傾斜におけるアユの遡上経路と遡上率との関係

図-8(a)~(c)に各底面傾斜の鉛直断面( $x$ - $y$ )の遡上経路の1例を各流量 $Q$ について示す。図-8(a)のHorizontalの場合ではアユが落下流中を遡上する様子が確認された。また、図-8(b), (c)より、すべての流量 $Q$ において Up slope ではアユが傾斜面に沿って遡上し、Down slope では上流側隔壁沿いを遡上していることがわかる。

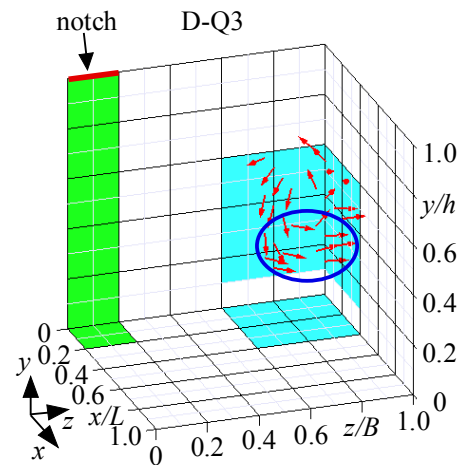
図-9(a), (b)に流量 $Q$ が  $3, 7\text{ l/s}$  の場合の遡上経路の長さ $L_{mr}$ を $\overline{B}_L$ で除した値 $L_{mr}/\overline{B}_L$ と、遡上経路内の流速 $\overline{V}_{mr}$ を $\overline{B}_L$ で除した値 $\overline{V}_{mr}/\overline{B}_L$ との関係を示す。Down slope では他の底面傾斜と比較して遡上経路長における流速が遅いことがわかる。さらに Down slope における遡上経路は、経路長が体長の5倍程度であり、他の底面傾斜よりも短いことがわかる。遡上経路が短くなることによりアユの疲弊が抑制され遡上率が增加することが予測される。

#### (5) 魚向と遡上率との関係

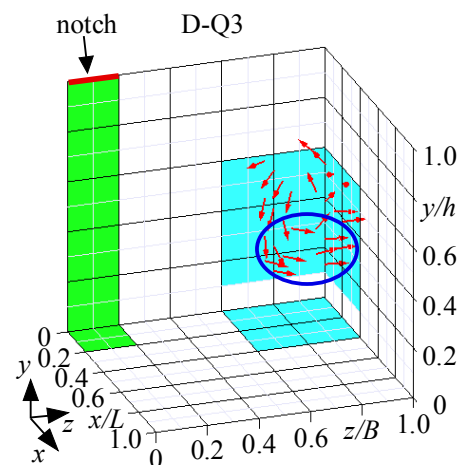
図-10(a)~(c)に流量 $Q$ が  $3\text{ l/s}$  の場合の各底面傾斜の魚向頻度 $n_\theta/N_\theta$ を示す。また、図-11に魚向の定義を示す。図-10(a)において Horizontal では、魚向頻度は $0^\circ$ 付近においてピークを示し、アユの魚向が底面に対して比較的平行に近いことが理解できる。図-10(b)の Up slope では、 $40^\circ$ 付近において高い頻度を示している。これは休憩位置における多くのアユが遡上のために上流側切り欠きを



(a) Horizontal



(b) Up slope



(c) Down slope

図-7 休憩位置における3次元流速ベクトル

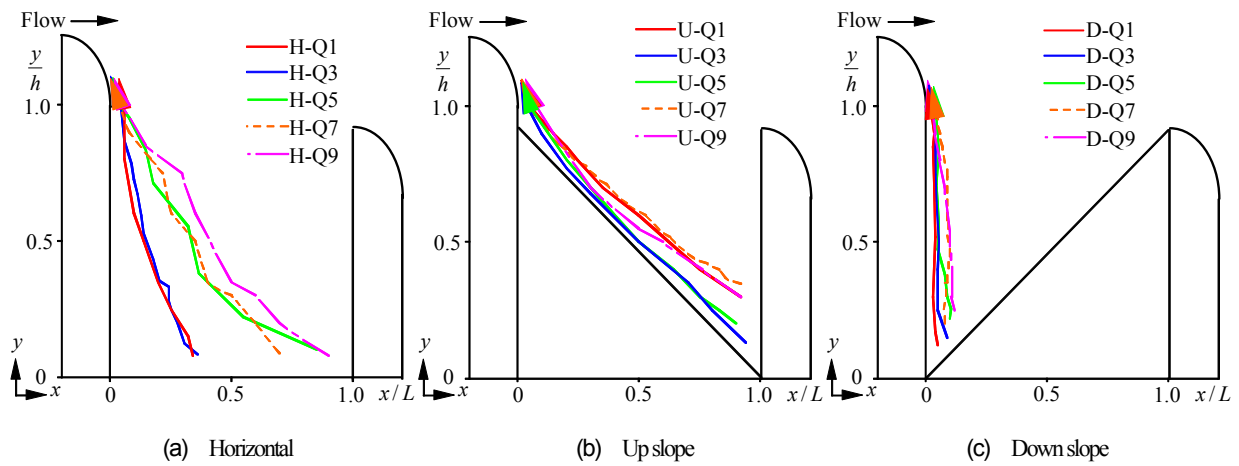


図-8 鉛直断面内における各底面傾斜の遡上経路の1例

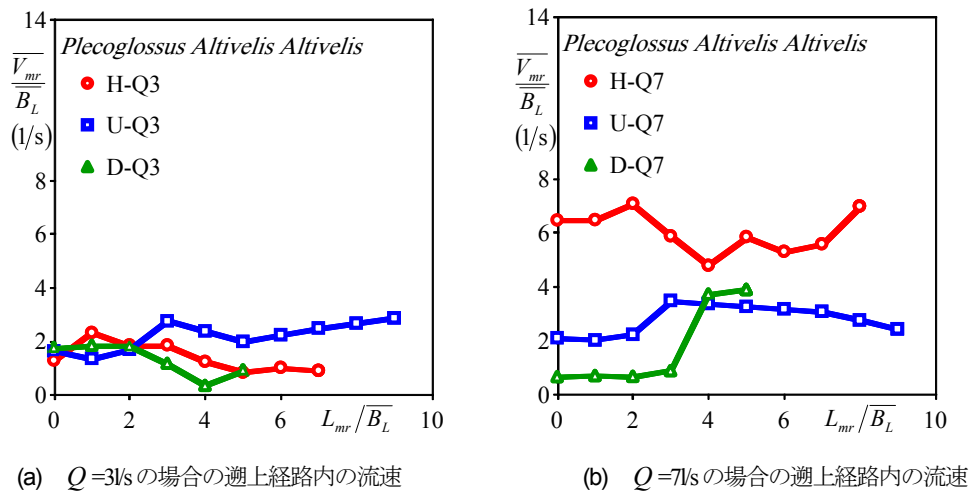


図-9 遡上経路長と経路内の流速との関係

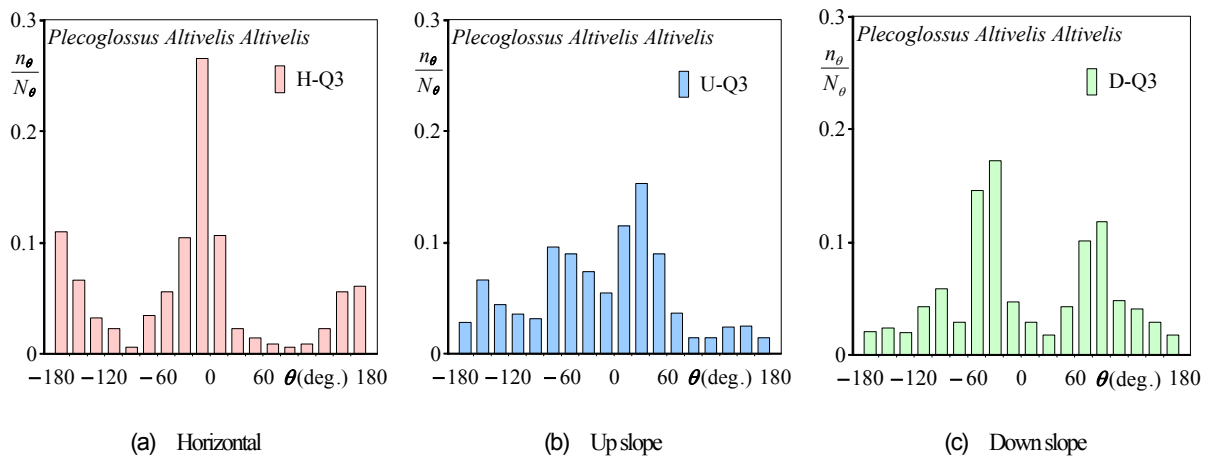


図-10 各底面傾斜における魚向頻度

向いていることを示している。図-10(c)の Down slope では、80~90°付近に高い頻度が観察されるが、これも休憩位置における多くのアユが遡上のために上流側切り欠きを向いていることを示している。また、Down slope では、-40°付近にも高頻度が観察されるが、これは、遡上

に失敗して U ターンしてきたアユの魚向を表している。

#### 4. おわりに

本研究では、階段式魚道のプールの底面傾斜およ

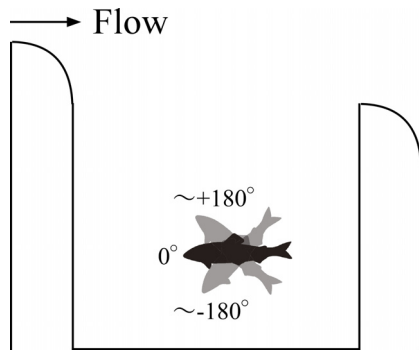


図-11 魚向の定義

び流量を系統的に変化させ、遡上率に及ぼす底面傾斜による影響を検討したものである。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) プールの底面傾斜が水平、上流側に上り傾斜、上流側に下り傾斜の3ケースにおいて、アユの遡上に最も適している底面傾斜は、上流側に下り傾斜である。
- (2) 底面が上流側に下り傾斜のプールでは、アユの休憩位置と切欠きまでの距離が他の底面傾斜よりも短くなる。さらに休憩位置には、切欠きおよび切欠き直下からの流れが存在するため、正の向流性により遡上が誘発されたと考えられる。
- (3) 底面が上流側に下り傾斜のプールでは、遡上経路長が他の底面傾斜よりも短くなる。また、経路内の流速が他の底面傾斜よりも低速なため、遡上率が高くなったと考えられる。
- (4) 底面が上流側に下り傾斜のプールでは、アユが上流側切欠きを向く可能性が高くなるため、遡上する尾数および遡上しようとする尾数が多くなる。

以上は1回の実験に基づいて得られた知見である。

したがって今後は複数回の実験を行った際に同様の結果が得られるかどうかを検討する必要がある。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究(C)26420500（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。

#### 参考文献

- 1) 久保田哲也：砂防施設の魚道における溪流魚の行動と魚道の実態，水工学論文集，第42巻，pp.487-492,1998.
- 2) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第44巻
- 3) 和田吉弘：魚道の設計で知っておきたいこと，応用生態工学，Vol.3, No.2, pp.225-230, 2000.
- 4) 浪平篤，後藤真宏，小林宏康：勾配1/5の階段式魚道における流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第52巻，pp.1189-1194, 2008.
- 5) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，2005.
- 6) 農林水産省農村振興局：よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針，農業土木学会，2002.
- 7) (財)ダム水源環境整備センター編：最新魚道の設計，信山社サイテック，1998.
- 8) 農林水利施設魚道整備検討委員会，農林水産省構造改善局，水産庁振興部：農業水利施設の魚道整備の手引き，農業水利施設魚道整備検討委員会，1994.
- 9) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，藏本更織，野口翔平：階段式魚道におけるプール水深がアユの遡上特性に及ぼす影響，土木学会論文集 G(環境)，Vol.68, No.6, pp.II\_25-II\_31, 2012.
- 10) 平野克己，岩槻幸雄，三村文孝，八木征雄，尾田成幸：岩熊井堰中央魚道におけるアユ遡上について，水産増殖，第44巻，1号，pp.1-6, 1996.
- 11) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.

(2014.6.20 受付)

## EFFECTS OF BOTTOM SLOPE IN POOL-AND-WEIR FISHWAY ON MIGRATION RATE OF AYU, *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Shohei NOGUCHI and Akira SHISHIDO

Understanding appropriate geometric configuration is required when pool-and-weir fishway with high migration rate is set up. Almost its bottom slope is horizontal on existing them and the past study. However, there is no study for effect of the bottom slope in pool-and-weir fishway on migration rate. In this study, effect of bottom slope in pool-and-weir fishway on migration rate of ayu (*Plecoglossus Altivelis Altivelis*) by changing flow velocity and bottom slope was investigated. It was found that the migration rate become high value when the bottom slope was set low toward downstream side wall to upstream one. It is because migration route is short in this bottom slope.