

階段式魚道の切欠き角度が魚の遡上特性に及ぼす影響

EFFECTS OF GRADIENT ANGLE OF NOTCH IN POOL-AND-WEIR FISHWAY ON MIGRATION RATE

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・森悠輔³・関強志³・松田孝一郎⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yusuke MORI, Tsuyoshi SEKI and Koichiro MATSUDA

¹正会員 博(工) 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)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

³学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Wada pointed out that the recommended value of the gradient angle of notch in pool-and-weir fishway is 60 degree. However, there is no measurement at the angle more than 60 degree. In this study, gradient angle of notch in a pool-and-weir fishway was changed in the range from 46 to 82 degree. The migration rates of ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, were obtained with the aid of two sets of digital video cameras. It was found that the migration rates of ayu take the highest value when the gradient angle of notch is between 55 to 64 degree, irrespective of the flow velocity. The migration rates are controlled by the falling velocity from the notch, the distance between the falling flow and orientation area and the angle of fish and falling flow.

Key Words : Pool-and-weir fishway, gradient angle of notch, migration rate

1. はじめに

河川にダムや堰等が建設されると魚類等の遡上や降下が困難になるため、一般に魚道が併設される^{1)~13)}。国内で採用例が最多の階段式魚道において、魚の遡上が困難なものが存在する。高い遡上率を確保するには魚道の適切な幾何学形状の把握が必要である。階段式魚道において魚の遡上率に大きな影響を与えると推定される幾何学条件は、プール長¹⁾、切欠きの斜面距離²⁾、切欠き形状²⁾、切欠き率³⁾、プール水深⁴⁾、プール間落差⁴⁾等である。

久保田¹⁾はプール長を系統的に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安定的に高くなることを示した。林田ら⁴⁾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に近い場合はプール内に高速な循環流が生じるために遡上率が低い、比が1から離れるにつれてプール下流域あるいは水面付近に低流速域が生じるために遡上率が高いことを解明した。浪平ら⁵⁾はプール間落差またはプール長のみを変化させてウグイの遡上実験を行った。その結果、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。Wada²⁾は切欠きの

斜面距離を0.9, 0.6, 0.3mに変化させてアユの遡上実験を行い、斜面距離が短いほど遡上率が増加することを示した。鬼束ら³⁾は魚道幅に対する切欠き幅の比を0.1~0.7に変化させてアユの遡上実験を行い、比が小さいほど遡上率が高くなることを示した。

一方、切欠き形状の変化が魚の遡上率に及ぼす影響を検討した研究は少ない。Wada²⁾は階段式魚道の切欠き形状を直角型、傾斜型、突出型、丸型に変化させてアユの遡上実験を行った。その結果、アユの遡上率が直角型および突出型では2~4%なのに対し、傾斜型および丸型形状では50~85%に達することを示した。また、傾斜型において水位落差が一定で切欠き角度を15~60°に変化させた遡上実験、および切欠きの斜面距離が一定で切欠き角度を6~44°に変化させた遡上実験を行い、切欠き角度の増加に伴う遡上率の増加を確認した。ところが、切欠き角度が60°以上の実験を行っておらず、60°が最適な角度かどうかは不明である。また、切欠きから落下する流速をほぼ一定にしているため、上記の結論が異なる流速でも適用可能かどうかは不明である。

本研究では、階段式魚道の切欠き角度および流量を系統的に変化させてアユの遡上実験を行い、遡上率に及ぼす切欠き角度および流量の影響を解明した。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示すプール長 $L_x=0.9\text{m}$ 、プール幅 $B=0.8\text{m}$ 、プール底面から切欠き天端までの高さ $H_t=0.9\text{m}$ 、プール底面から切欠き下端までの高さ $H_u=0.7\text{m}$ の3つのプールを隔壁厚 $\Delta x=0.2\text{m}$ 、落差 $\Delta y=0.15\text{m}$ で連結させた木製の階段式魚道を実験に用いた。ただし、左岸側壁は撮影のために透明なアクリル板で作製した。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。プール間落差 Δy および隔壁厚 Δx を固定し、切欠き角度 θ のみを変化させるため、式(1)、(2)を用いて切欠き底面の y 座標 y_b を決めた。

$$y_b = -(x + \Delta x)^n \times \Delta x^{1-n} + H_t \quad (1)$$

$$\tan \theta = \left. \frac{dy_b}{dx} \right|_{x=0} = -n \quad (2)$$

n を変化させることで、図-1中の切欠き下端の点 $a(0, H_u)$ と切欠き天端の点 $b(-\Delta x, H_t)$ との間の切欠き底面高さ y_b が変化し、式(2)によって点 $a(0, H_u)$ における切欠き角度 θ が算出される。図-2に式(1)、(2)で得られる切欠き角度別の切欠き形状を示す。

表-1に示すように、切欠き角度 θ を $46 \sim 82^\circ$ の範囲で5通り、流量 Q を $1 \sim 17 \ell/\text{s}$ の範囲で6通りに変化した合計30ケースの実験を行った。ケース名は切欠き角度 θ と流量 Q を表し、例えば64Q5は $\theta=64^\circ$ 、 $Q=5 \ell/\text{s}$ を意味する。上流から2番目のプールに平均体長 $\bar{B}_L$ が 65mm のアユ100尾を挿入して流水を開始した。目視で定常を確認した後、遡上防止用ネットを切欠きから除去すると共に、側壁および水路上部に設置した2台のカメラで30Hz、30分間の撮影を開始した。撮影後、遡上数と100尾のアユの遊泳位置、魚向を解析した。

x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ9、9、7のメッシュで構成される合計567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 軸方向の時間的流速 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、流速測定時に魚道にアユを入れていない。

3. 実験結果および考察

(1) 流量および切欠き角度と遡上率との関係

遡上率を次式のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (=100)} \quad (3)$$

図-3 に流量 Q に対する遡上率 n/N の変化を切欠き角度 θ ごとに示す。概略的には切欠き角度 θ が $55 \sim 64^\circ$ の時に高い遡上率を示し、これらの角度よりも低い場合 (46°) および高い場合 ($73 \sim 82^\circ$) では全流量で遡上率は低い傾向にある。したがって、流量に関わらず、切欠き角度 θ が $55 \sim 64^\circ$ が最適値と判断

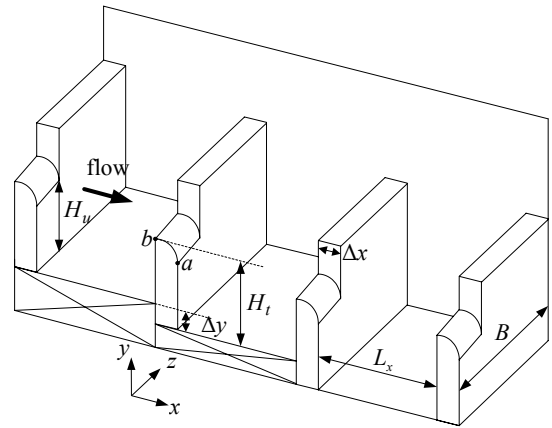


図-1 実験に用いた魚道の概略図

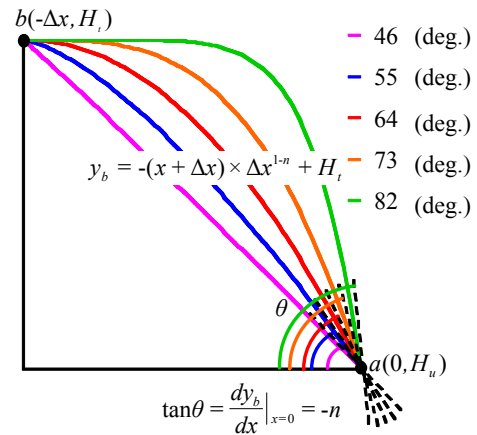


図-2 切欠き角度と切欠き形状

表-1 実験条件

$\theta(\text{deg.})$ $Q(\ell/\text{s})$	46	55	64	73	82
1	46Q1	55Q1	64Q1	73Q1	82Q1
3	46Q3	55Q3	64Q3	73Q3	82Q3
5	46Q5	55Q5	64Q5	73Q5	82Q5
9	46Q9	55Q9	64Q9	73Q9	82Q9
13	46Q13	55Q13	64Q13	73Q13	82Q13
17	46Q17	55Q17	64Q17	73Q17	82Q17

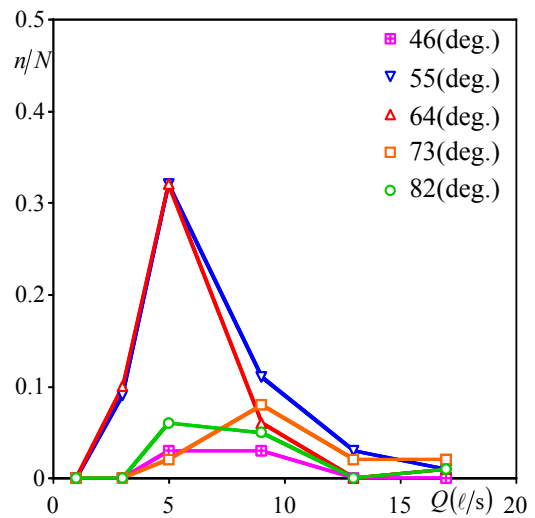


図-3 流量および切欠き角度と遡上率の関係

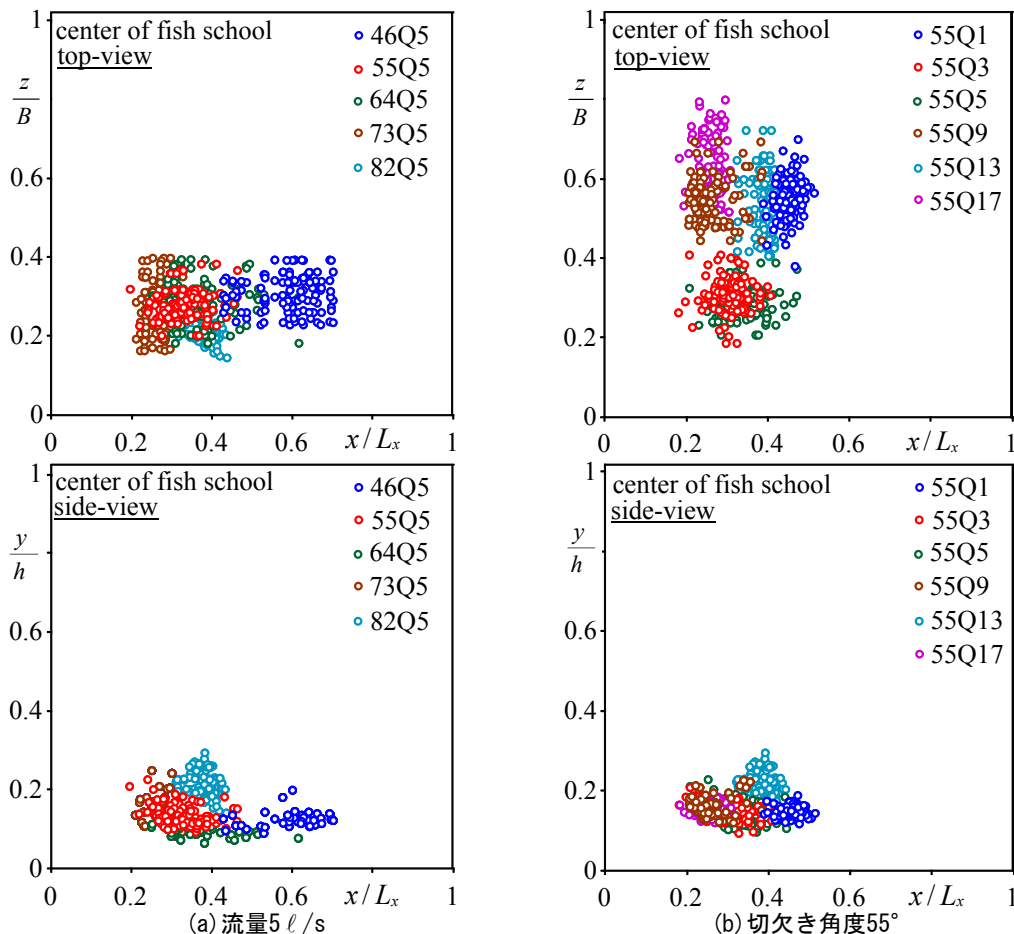


図-4 瞬間魚群重心の移動状況(上図: $x-z$ 水平断面, 下図: $x-y$ 鉛直断面)

される。これは、Wada²⁾の推奨値 60° とほぼ同値である。

一方、詳細に観察すると、いずれの切欠き角度 θ でも中間的な流量時(3~9 l/s)に遡上率が最大値となっている。中村¹⁰⁾は魚の遡上に必要な条件として、遡上を誘発する適切な流速と休憩場所を挙げている。以下では遡上率を決定している要因を調べる。

(2) アユのプール内の休憩場所

図-4(a)に流量 Q が 5 l/s で切欠き角度 θ の異なる(46~82°)ケースについて、図-4(b)に切欠き角度 θ が 55° で流量の異なる(1~17 l/s)ケースについて、鉛直断面($x-y$)および水平断面($x-z$)における 10s ごとの魚群の重心位置を示す。ここに、 h は水深である。各ケースにおける重心位置の時間変化よりも、ケース間の差違の方が比較的大きい。そのため、時間平均された遊泳位置をアユの休憩場所とみなしてよいと判断される。

プールの鉛直断面($x-y$)および水平断面($x-z$)を各 10 分割して得られる各 100 メッシュ内の尾数を 10s ごとにカウントし、時間平均尾数 n' を算出した。図-5 に切欠き角度 θ が 55° における休憩場所 n'/N のコンターを示す。流量 Q の変化に関わらず、鉛直断面($x-y$)内のアユの休憩場所は底面付近である。一方、水平断面($x-z$)においては、55Q1 の最小流量

を除くと流量 Q の増加に伴い休憩場所が切欠きから離れていく。これは流量 Q の変化に伴い選好場所が変化することを示唆する。

図-6 に落下流のプール底面での付着点とアユの時間平均重心位置との水平距離 L の流量 Q に対する変化を切欠き角度 θ 別に示す。遡上率が高いケース(55Q5, 64Q5)では $L/\bar{B}_L$ が 1.5~3 程度で、アユは比較的付着点付近で休憩している。そのため、落下流の刺激を受けやすく、また、遡上経路に近いために遡上が誘発されたと推定される。しかし、46Q5, 46Q9 といった遡上率の低いケースでも付着点付近で休憩している場合がある。したがって、付着点と休憩場所との距離だけでは遡上率を説明できない。

(3) 流向および魚向と遡上率との関係

図-5 と同様の切欠き角度 $\theta (=55^\circ)$ について、図-7 に合成流速ベクトルおよび魚向をそれぞれ青色、赤色で示す。遡上率の低い低流速ケース(55Q1)では魚向がランダムである。遡上率の高い中流速ケース(55Q3, 55Q5, 55Q9)では魚向が切欠き方向を向く傾向がある。一方、遡上率の低い高流速ケース(55Q13, 55Q17)では切欠き方向を向くものと、右岸側壁方向を向くものが見られる。以上より、遡上率は休憩時の魚向による影響を受けると推察される。

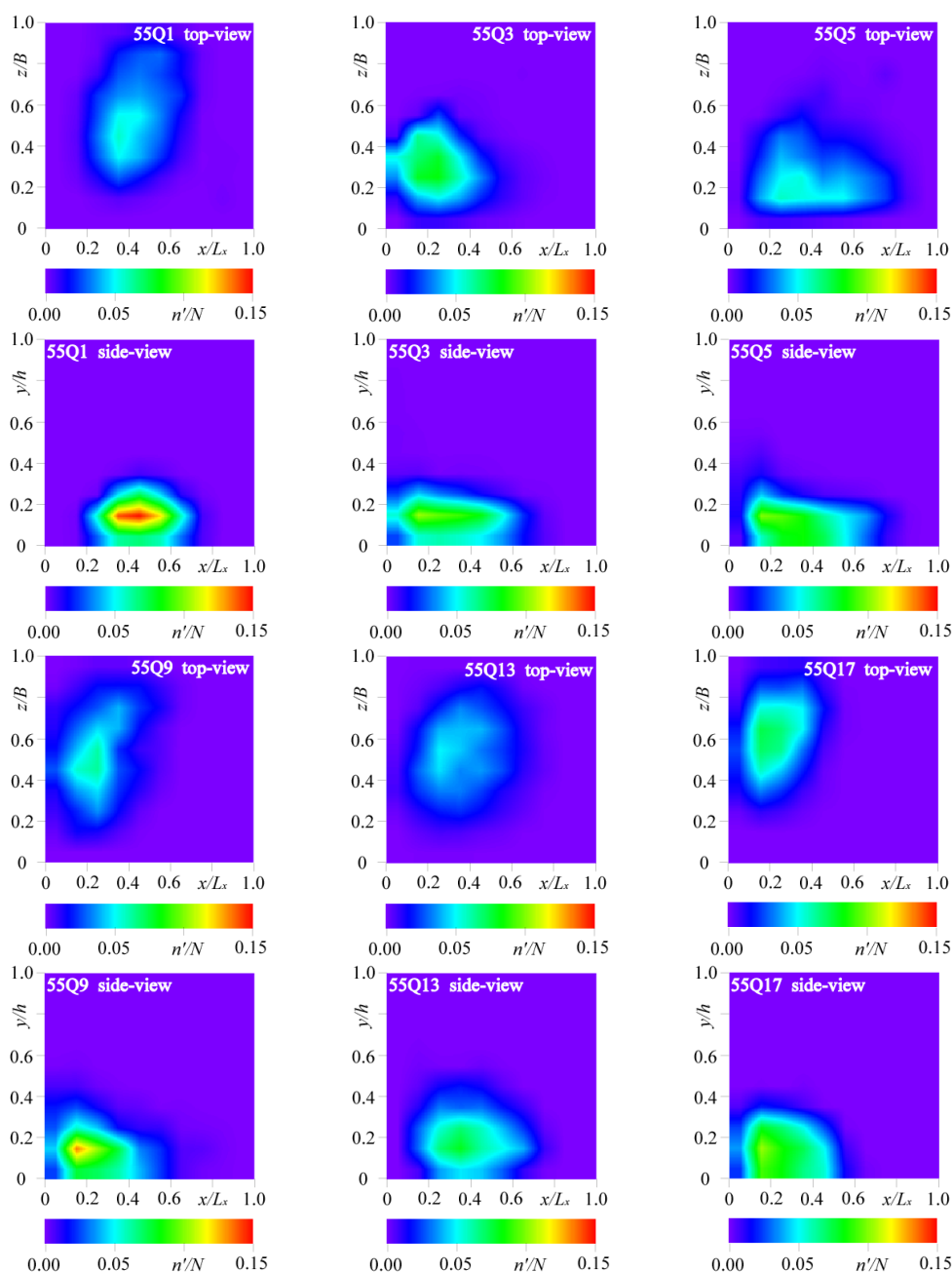


図-5 休憩場所のコンター(上図： $x-z$ 水平断面，下図： $x-y$ 鉛直断面)

図-7に観察される切欠きからの落下流の方向の平均値を算出し，落下流向 θ_w と定義した．図-8に落下流向 θ_w と流量 Q との関係を切欠き角度 θ ごとに示す．落下流向 θ_w は切欠き角度 θ が 64° 以下は流量に対する変化が緩慢で， 73° 以上では高流速で角度が低下している．

図-9に休憩時の空間平均魚向 $\langle\theta_f\rangle$ と流量 Q との関係を切欠き角度 θ ごとに示す．切欠き角度 θ が 55° ， 64° では流量 Q が $5\ell/s$ の時に魚向 $\langle\theta_f\rangle$ が最大値となり，最も落下流向 θ_w に接近する．この時，図-3に示すように高い遡上率を示す．よってこの2ケースについては，魚向が落下流向に最も接近し，遡上が容易になったために遡上率が最大になったと考えられる．一方，切欠き角度 θ が 46° ， 73° ， 82°

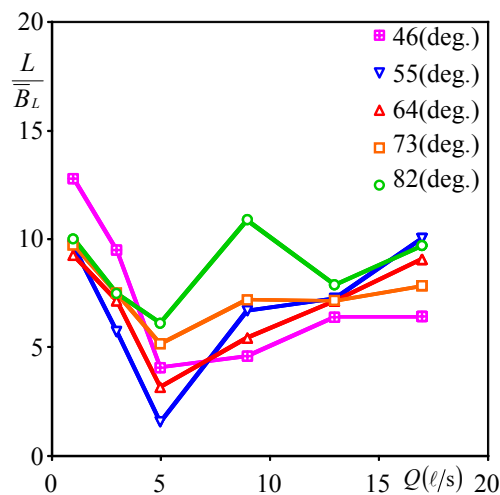


図-6 時間平均魚群重心から落下流付着点までの距離

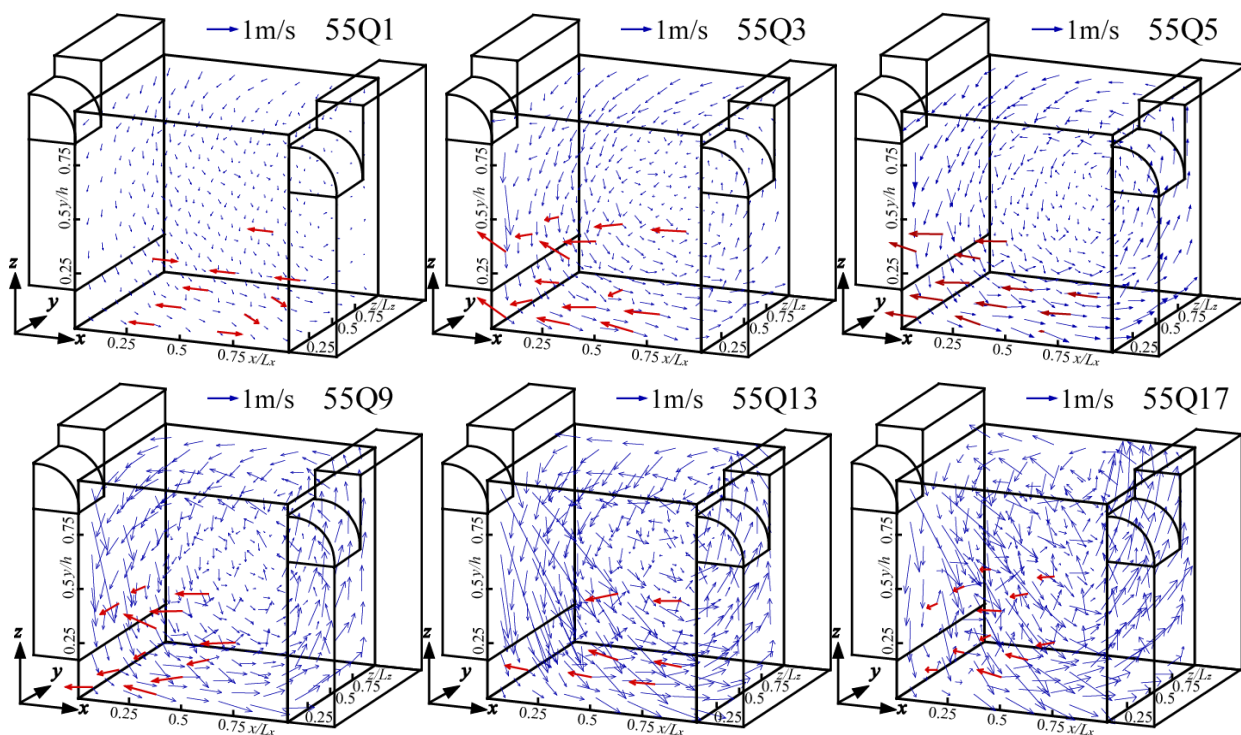


図-7 流速ベクトル(青)と魚向(赤)

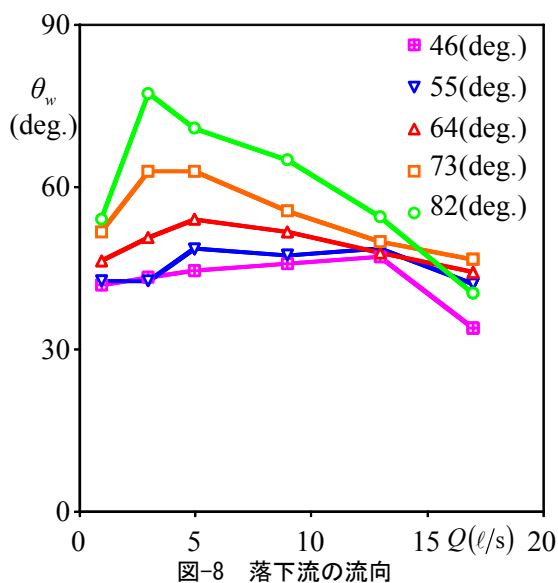


図-8 落下流の流向

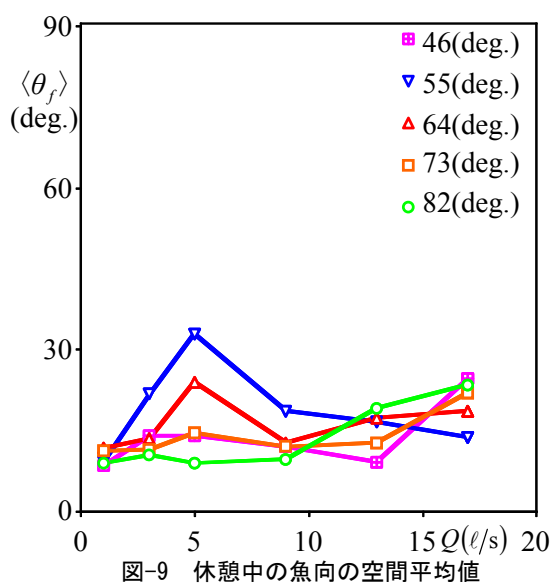


図-9 休憩中の魚向の空間平均値

では流量 Q が 17 l/s の時に魚向 $\langle \theta_f \rangle$ が最大値となる。この時、図-3 に示すように遡上率は低い、この理由を落下流向と魚向との比較だけでは説明できない。そのため、落下流速 V_{VF} と遡上率との関係について検討する。

図-10 に流量 Q と合成落下流速 $V_{VF} / \bar{B}_L$ との関係を示し、魚の突進速度 $V_{fb} / \bar{B}_L = 10$ および巡航速度 $V_{fc} / \bar{B}_L = 2 \sim 4$ を実線で示す。合成落下流速 $V_{VF} / \bar{B}_L$ は全ての切欠き角度 θ で流量の増加に伴い増加し、流量 Q が 8 l/s 以上で突進速度を上回る。したがって、図-8 において切欠き角度 θ が 46° 、 73° 、 82° では流量 Q が 17 l/s

の時に魚向と落下流向が最も近いにも関わらず遡上率が低い原因は、落下流速が突進速度を超えたからと考えられる。一方、遡上率の高い切欠き角度 θ が 55° 、 64° で流量 Q が 5 l/s の場合に注目すると、合成落下流速 $V_{VF} / \bar{B}_L$ が 7 程度となっており、小山¹³⁾ および中村¹⁰⁾ が指摘したように、落下流速が巡航速度以上、突進速度未満であるために遡上が誘発されたと考えられる。

(4) 遡上を誘発および抑制する因子

表-2 に遡上を誘発および抑制する因子をまとめた。青文字の d は付着点付近で休憩していること、青文字の a は魚向が落下流向に近いこと、青文字の v は落下

流速が巡航速度以上、突進速度未満であることを示し、これらの条件を満たしていないものを赤色で示した。d, a, vの全てが青色のケース(55Q3, 55Q5, 64Q3)に着目すると、図-3に示した遡上率の高いケースに該当する。青文字が3つ未満のものは、遡上はするものの遡上率が低いケースに該当する。一方、d, a, vの全てが赤色は流量 $Q=1$, $17\ell/s$ に多く見られ、極めて遡上率の低いケースに該当する。以上より、高い遡上率を満たすには、上記3つの条件をすべて満たすことが必要で、これらの条件が欠けるにつれて遡上率が低下すると考えられる。

4. おわりに

本研究は、階段式魚道の切欠き角度および流量を系統的に変化させてアユの遡上率を算出し、遡上率に及ぼす切欠き角度および流量の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) 切欠き角度が $46\sim 82^\circ$ の範囲では、流量に関わらず 約 $55\sim 62^\circ$ がアユの遡上に最適である。これは、Wada²⁾の示した推奨値 60° とほぼ同値である。
- (2) アユの遡上が誘発される要因として、落下流の底面付着位置とアユの休憩位置との水平距離が近いこと、休憩中のアユの魚向と落下流の流向が近いこと、落下流速が巡航速度以上、突進速度未満であることなどが明らかとなった。これら3つの条件が満たされたときに最も遡上率が高くなる。一方、上記の条件の1つ以上が満たされない場合はアユの遡上が抑制される。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。また、魚の飼育方法を御教授いただいた(有)アクアシティの花田一氏、榎野川漁業協同組合、北九州市立水環境館に謝意を表す。

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) Wada, Y.: Relation between the ascending path of ayu and fishway structure, *Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan*, pp.445-450, 1990。
- 3) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，森悠輔：階段式魚道における隔壁の切り欠き率が遡上率に及ぼす影響，水工学論文集，第52巻，pp.1201-1206，2008。
- 4) 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，pp.1191-1196，2000。
- 5) 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。
- 6) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性，農業土木学会論文集，No.217，pp.55-63，2002。
- 7) 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・降下可能な魚道の提案，河川技術論文集，第7巻，pp.221-226，2001。

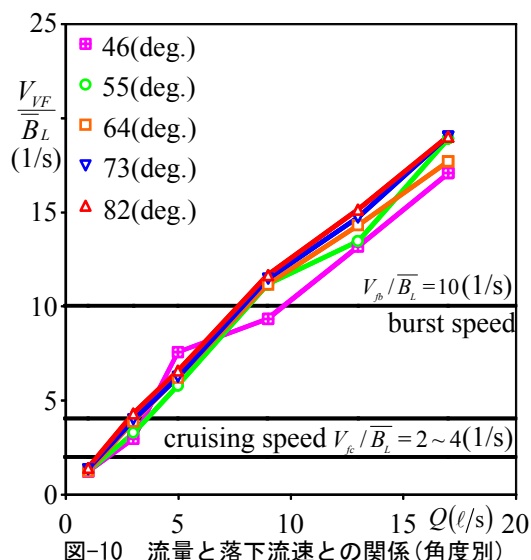


表-2 遡上を誘発および抑制する因子

$\theta(\text{deg.})$ $Q(\ell/s)$	46	55	64	73	82
1	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v
3	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v
5	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v
9	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v
13	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v
17	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v	d, a, v

d: 付着点付近で休憩している。

a: 魚向が落下流向に近い。

v: 落下流速が巡航速度以上かつ突進速度未満。

d: 付着点から遠い位置で休憩している。

a: 魚向が落下流向から遠い。

v: 落下流速が巡航速度未満または突進速度以上。

- 8) 中村俊六，高嶋信博，木村博：実物の魚を用いた河川構造物の模型実験手法について，第31回水理講演会論文集，pp.783-788，1987。
- 9) 泉完，菅原賢治，工藤明，東信行：パーチカルスロット型魚道における水理調査について，農業土木学会論文集，No.228，pp.49-56，2003。
- 10) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 11) 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，河川技術論文集，第9巻，pp.487-492，2003。
- 12) (財)ダム水源地環境整備センター編：信山社サイテック，1998。
- 13) 小山長雄：魚道をめぐる諸問題Ⅱ，解説篇，木曾三川河口資源調査団，1967。

(2009.9.30 受付)