

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

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・松田孝一郎³・藏本更織⁴・野口翔平⁴

¹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

²正会員 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

³東洋建設株式会社大阪本店 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4丁目1-1)
E-mail: matsukou.61@hotmail.co.jp

⁴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: K.saori0607@gmail.com

河川にダムや堰等の構造物が設置されると、魚の遡上が困難になる。そのため、水位落差を分割あるいは滑らかに接続し、魚類の遡上および降下を可能にする魚道の設置が必要となる。和田は、プール水深を3通りに変化させてアユの遡上実験を行い、水深の減少に伴い、遡上率が高くなることを解明した。しかしながら、流量変化の影響を考慮していない上に、遡上の原因についても言及していない。本研究では、プール水深及び流量を系統的に変化させ、アユの遡上実験を行なった。その結果、プール水深の減少に伴い遡上率が高くなるが、流量が少ない時および多い時に遡上が困難になることが判明した。また、魚が上流側方向を向いて定位している場合、遡上率が高くなることが判明した。

Key Words : Pool-and-weir fishway, depth of pool, migration rate, *Plecoglossus altivelis altivelis*

1. はじめに

ダムや堰等の河川横断構造物によって生じる水位落差は、魚の遡上および降下を妨げる。そのため、水位落差を分割あるいは滑らかに接続し、魚類の遡上および降下を可能にする魚道の設置が必要となる。我が国の既設魚道の9割以上は階段式魚道である^{1,2)}。階段式魚道を設計する上で、適切な勾配、プール間落差、プール長、プール水深等の情報が必要となる。

鬼束ら³⁾は切欠き角度及び流量を系統的に変化させ、アユの遡上実験を行った。その結果、流量に関わらず切欠き角度が約55°~62°の場合に遡上率が高くなることを解明した。また、潜孔を隔壁の片側または交互に設置し、潜孔内流速を系統的に変化させてアユの遡上実験を行った⁴⁾。その結果、遡上率の向上および速やかにアユを遡上させるには交互潜孔よりも片側潜孔の方が適切であることを解明した。更に、鬼束ら⁵⁾は階段式魚道の切欠き率および流量を系統的に変化させてアユの遡上実験を行った。その結果、切欠き率が0.1~0.2の場合に遡上率が高くなることを解明した。これらの研究により、階段式魚道の切欠き角度、潜孔設置位置および切欠き率の適切な幾何学形状が解明された。一方、階段式魚道のプー

ル部分における適切な幾何学形状は解明されていない。プール部分の形状を構成する要素の一つに、プール水深が挙げられる。2005年に国土交通省河川局が発表した「魚ののぼりやすい川づくりの手引き」⁶⁾にはプール水深に関しては、「プール水深が深すぎると鉛直方向の渦流が発生し、魚が遡上方向を見失う場合があるため留意する。また、浅すぎると減勢効果が低下するため、適切な流況及び流速に留意する。」と記されている。しかしながら、推奨される定量値は示されていない。

プール水深を変化させて魚の遡上率を求めた研究をレビューする。林田ら⁷⁾は切欠きの無い全幅越流型階段式魚道において、越流水深を0.1mに固定した状態で水深およびプール長を変化させ、15尾のウグイを用いた遡上実験を行った。その結果、プール上流側隔壁の底面隅角部付近における落下流の流向変化が少ない場合、また、底面付近の流速が減勢されている場合に遡上数が増加することを解明した。真山⁸⁾は全幅越流型階段式魚道において、水深を0.3m~1.5mに変化させて体長が約650mmのサケを用いた遡上実験を行い、水深が0.75mの時に遡上率が最大になることを示した。ただし、全幅越流型は流量が少ない場合に越流水深が低くなると共に落下流の流脈幅が小さくなるために設計には推奨されておらず、切欠

きの設置が推奨されている。

和田⁹⁾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。しかし、流量を固定しており、流量の変化に対する影響を考慮していない上、遡上率の変化が生じる原因についても言及していない。

浪平¹⁰⁾は階段式魚道において流量を4通りに変化させてウグイの遡上実験を行なった。その結果、斜め流を含まない落下流状態が、ウグイの遡上に適していることを発見した。しかし、プール水深の変化に対する影響を考慮していない上、流量変化に伴うプール毎の流況および魚の遡上行動の違いは明らかになっていない。

本研究は片側切欠き付階段式魚道において、プール水深および流量を系統的に変化させて、アユの遡上特性を解明したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に実験に用いた木製の片側切欠き付階段式魚道の模式図を示す。左岸側壁は撮影のために透明なアクリル板で作製した。プール長 L_x を0.9m、プール幅 B を0.8m、隔壁厚 Δx を0.2m、切欠き幅 Δz を0.15m、落差 Δy を0.15mに設定した。ここで、プール番号は下流から上流に向かって昇順とする。表-1に示すように、プール水深 h を0.2~0.8mの範囲で4通り、流量 Q を3~11(l/s)の範囲で5通りに変化した合計20ケースの実験を行った。ケース名はプール水深 h と流量 Q を表し、例えば20Q5は $h=0.2\text{m}$ 、 $Q=5\text{(l/s)}$ を意味する。

実験には平均体長 \bar{B}_L が70mmのアユを50尾用いた。なお、遊泳型および体長が同一であれば、魚種が異なっても遊泳能力が等しい¹¹⁾ので、本研究はアユ以外の魚種にも適応できると考えられる。

第2プールにアユ50尾を放流して流水を開始した。なお、水温は17℃に設定した。目視で定常を確認した後、切欠きに設置した遡上防止用ネットを除去すると共に、第2プールの側壁および上部に設置した2台のカメラで30fps、30分間の撮影を行った。撮影後、第2プール内の全アユの遊泳位置および魚向を10sごとに解析すると共に、遡上数および降下数を計測した。魚向は $x-z$ 平面内において x 軸方向を0°とし、反時計回りを正とした。

x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ7、9、7点のメッシュで構成される合計441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。なお、流速測定時には魚道にアユを放流していない¹¹⁾。

3. 実験結果および考察

(1) 遡上特性の解明

遡上率を次式のように定義する。

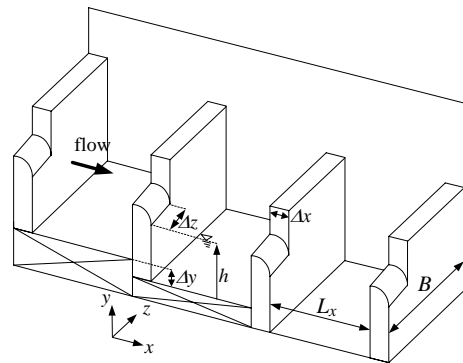


図-1 実験に用いた魚道の概略図

表-1 実験条件

Q (l/s) \ h (m)	0.2	0.4	0.6	0.8
3	20Q3	40Q3	60Q3	80Q3
5	20Q5	40Q5	60Q5	80Q5
7	20Q7	40Q7	60Q7	80Q7
9	20Q9	40Q9	60Q9	80Q9
11	20Q11	40Q11	60Q11	80Q11

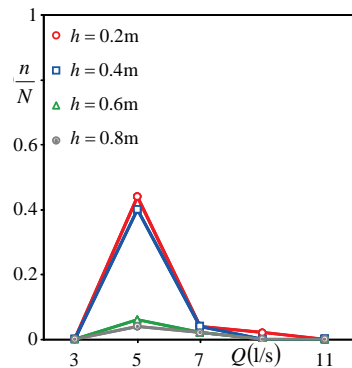


図-2 流量および水深変化と遡上率との関係

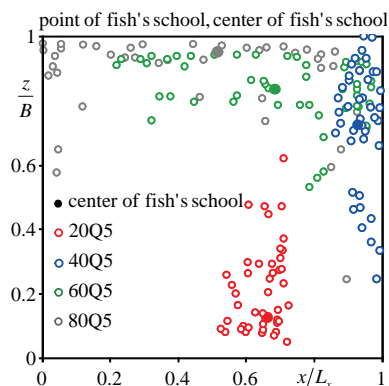
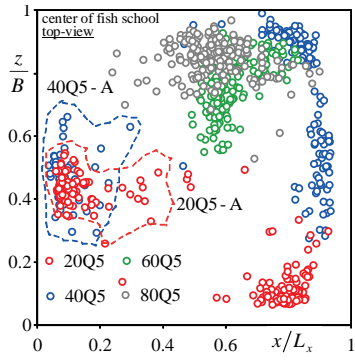
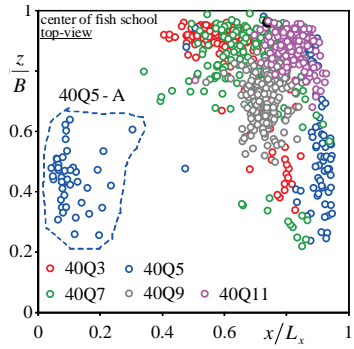


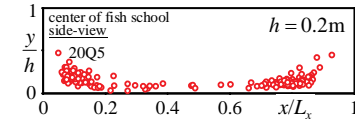
図-3 魚の瞬間定位位置と重心位置



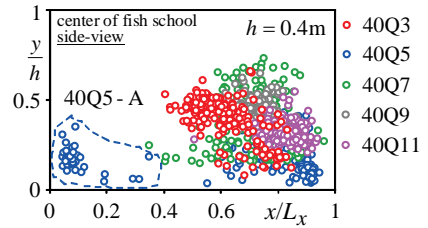
(a) $Q=5l/s$ 水平断面



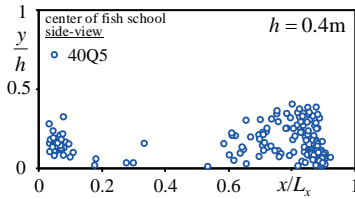
(f) $h=0.4m$ 水平断面



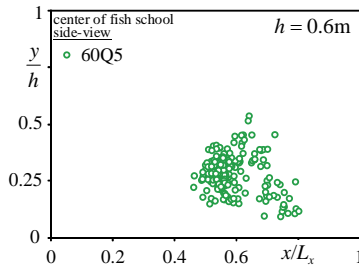
(b) 20Q5 鉛直断面



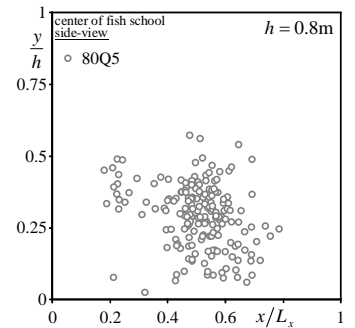
(g) $h=0.4m$ 鉛直断面



(c) 40Q5 鉛直断面



(d) 60Q5 鉛直断面



(e) 80Q5 鉛直断面

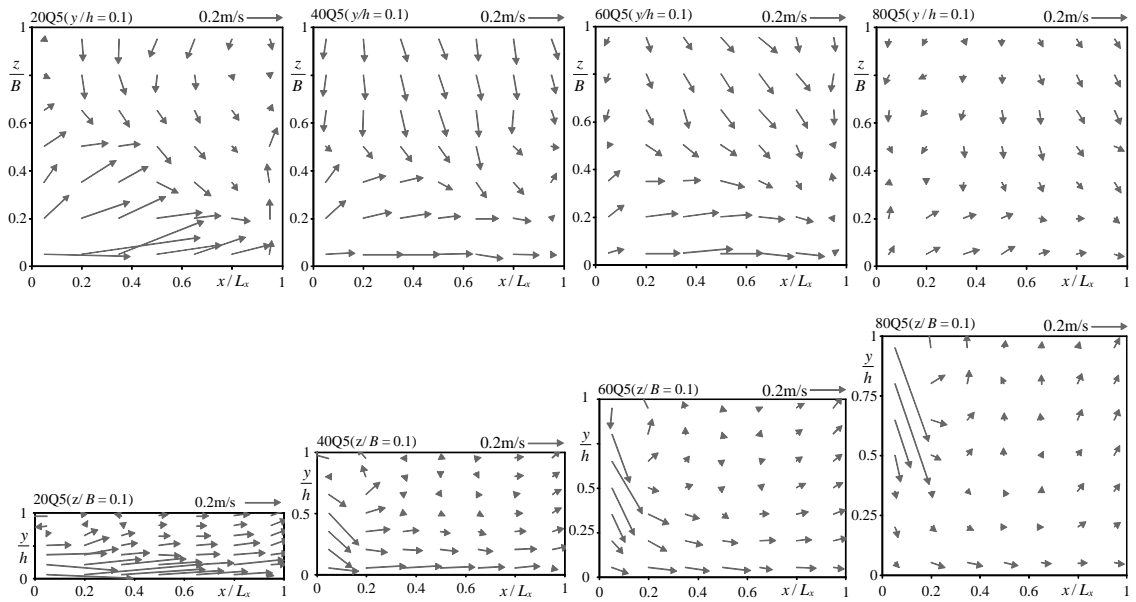
図-4 瞬間魚群重心の移動状況

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (= 50)} \quad (1)$$

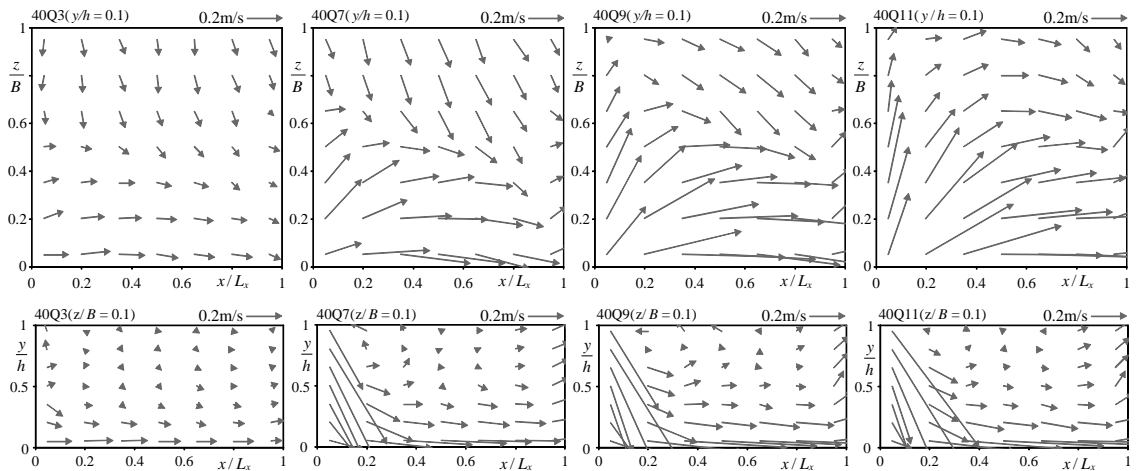
図-2 に流量 Q と遡上率 n/N との関係を示す。大凡全ての流量において水深の増加に伴い遡上率が低下している。いずれのプール水深 h でも流量 Q が $5(l/s)$ の時に遡上率が最大となっている。特に遡上率が高いのはプール水深 h が $0.2m$ および $0.4m$ で流量 Q が $5(l/s)$ の時(20Q5 および 40Q5)である。したがって、遡上に適したプール水深は $0.2 \sim 0.4m$ 程度である。和田⁹⁾が示した通り、水深減少に伴い、遡上率が高くなっている。しかし、流量が少ない時および多い時に遡上が困難になる。

a) アユの定位場所とプール内流況

図-3 に流量 Q が $5(l/s)$ における全プール水深の水平断面内 ($x-z$) における瞬間的な魚の定位位置とその魚群の重心位置を示す。全てのプール水深において大凡特定の領域に魚が定位していることが伺える。図-4 (a) ~ (e) に流量 Q が $5(l/s)$ における全プール水深の、図-4 (f) ~ (g) にプール水深 h が $0.4m$ で全流量の鉛直断面内 ($x-y$) および水平断面内 ($x-z$) における $10s$ ごとの魚群の重心位置を示す。なお、水深が同一の場合には図面を統合している。鉛直断面に着目すると、いずれのケースにおいても、魚群重心が大凡半水深以下に位置することがわかる。一方、水平断面に着目すると、20Q5 および 40Q5 のケースを除くと、魚群が下流側隔壁近くの若干左岸寄りにおける特定の場所で定位していることが理解される。20Q5 および 40Q5 のケースについては魚群重心位置が大凡 2



(a) $y/h=0.1$ における水平断面内の流速ベクトル・ $z/B=0.1$ における鉛直断面内の流速ベクトル ($Q=5l/s$)



(b) $y/h=0.1$ における水平断面内の流速ベクトル・ $z/B=0.1$ における鉛直断面内の流速ベクトル ($h=0.4m$)

図-5 流速ベクトル

カ所に存在し、魚群が下流側隔壁に近い場所だけでなく、上流側隔壁に近い場所でも定位していることが伺える。目視によって後者のアユが遡上を試みるものがほとんどであることが確認された。そのため、20Q5 および 40Q5 のケースにおける上流側隔壁付近の定位状況をそれぞれパターン A と呼称し、変数やケース名の後に「A」を付加して示す。

図-5(a)に流量 Q が $5(l/s)$ の場合の $y/h=0.1$ における水平断面内 ($x-z$) の流速ベクトルと、 $z/B=0.1$ における鉛直断面内 ($x-y$) の流速ベクトルを流量別に示す。水平断面内の流速ベクトルより、全ての水深で上流側切欠きから下流側切欠きに向かって比較的高速な流れが観察さ

れ、その値が水深の増加に伴って減少していることが伺える。また、この高速領域以外のプール内の流速は比較的低速である。一方、鉛直断面内の流速ベクトルより、低水深では底面付近に、高水深では落下流の流入部付近に高速流が観察され、それ以外の領域では極端に流速が遅くなっている。

図-5(b)にプール水深 h が $0.4m$ の場合の $y/h=0.1$ における水平断面内 ($x-z$) の流速ベクトルと、 $z/B=0.1$ における鉛直断面内 ($x-y$) の流速ベクトルを流量別に示す。水平断面内の流速ベクトルより、全ての流量で上流側切欠きから下流側切欠きに向かう高速流が観察され、その左岸側のプールでは流速が減少していることが伺える。

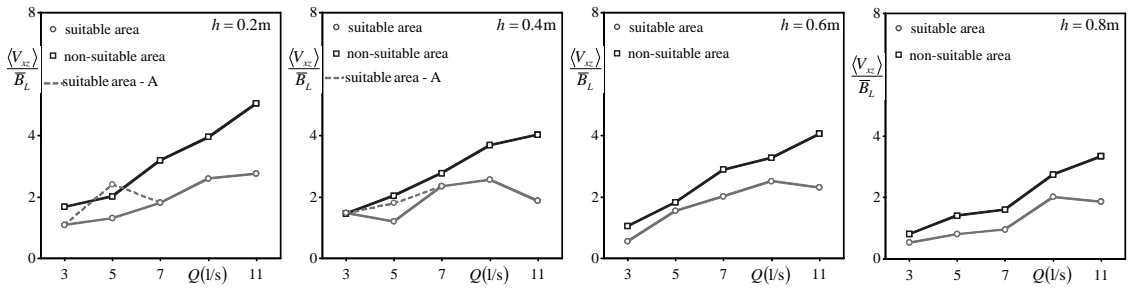


図-6 流量と魚の定位・非定位場所の流速との関係

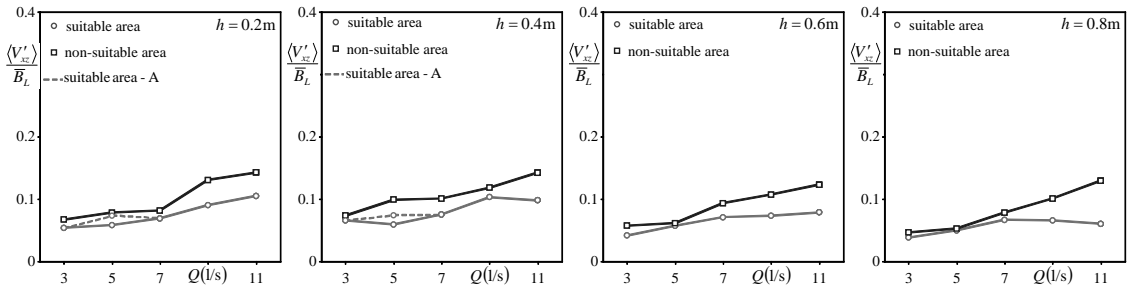


図-7 流量とアユの定位・非定位場所の乱れ強度との関係

また、鉛直断面内の流速ベクトルより、落下流の流入部付近および底面付近で高速流が観察される。なお、今回の実験ではストリーミングフローは発生せず、全てプランジングフローであった。

図-4と図-5を比較すると、パターンA以外では、アユの定位場所は比較的低速であることが推定される。

b) アユの定位場所および非定位場所の水量量の比較

アユが瞬間的に存在している場所をアユの定位場所と定義する。アユの定位場所(suitable area)および非定位場所(non-suitable area)における流速を、441点で得られた流速から空間補間を用いて求め、各瞬間でそれぞれを空間平均した後に時間平均し、空間時間平均流速の水平断面内合成値を算出した。ただし、パターンAについてはその他の定位場所と分離して解析した。図-6に流量 Q と定位場所および非定位場所の空間時間平均流速の水平断面内合成値 $\langle V_{sc} \rangle$ を平均体長 \bar{B}_L で除した値との関係を示す。なお、魚の体長で無次元化を行なう事により、体長が異なる魚や、他の研究との比較が可能となる。^{3,4,5,12)}パターンAを除くと、アユの定位場所の流速が非定位場所の流速よりも遅い。また、アユの定位場所の流速が体長倍流速で3以下となっている。体長倍流速が4以下では普通筋を使用せずに疲労が蓄積しないため¹³⁾、アユは好んでこれらの領域を選択して定位していると考えられる。一方、パターンAについては比較的高流速域にアユが定位している。

図-7に流量 Q と定位場所および非定位場所の空間時間平均乱れ強度の水平断面内合成値 $\langle V'_{sc} \rangle$ を平均体長 \bar{B}_L で除した値との関係を示す。パターンAを除くと、全ケ

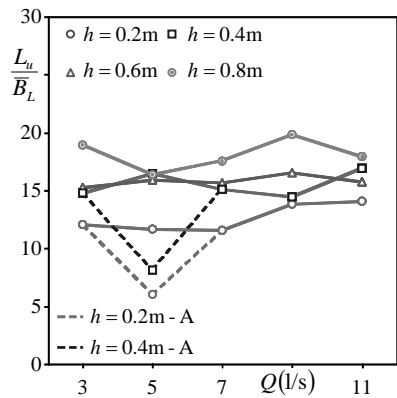


図-8 魚群重心から上流側切欠きまでの距離

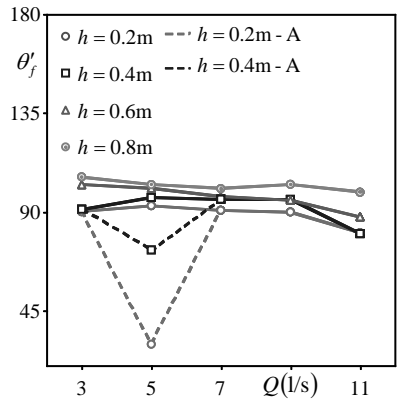


図-9 魚向の標準偏差

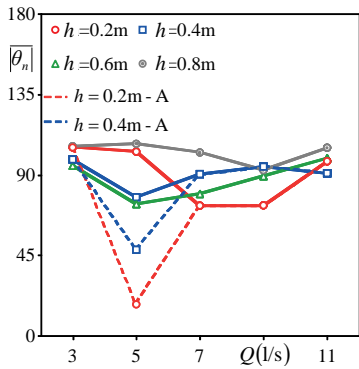


図-10 魚向と上流側切欠き方向との角度差

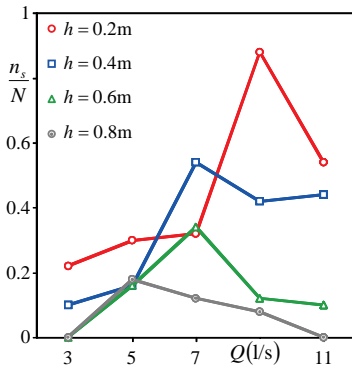


図-11 流量および水深と降下率との関係

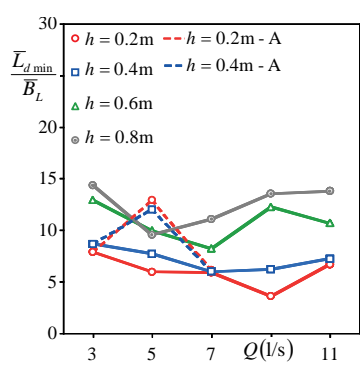


図-12 魚群から下流側切欠きまでの最小距離

ースにおいて、アユの定位場所の乱れ強度が非定位場所の乱れ強度よりも小さい。したがって、アユは体長倍流速が3以下の低流速で、かつ、乱れの少ない領域を選好して定位していることが明らかとなった。一方、パターンAについては、比較的乱れ強度の大きな領域に定位している。これは、アユが高流速域に定位しているためである。

c) 定位場所から上流側切欠きまでの距離

図-8 に流量 Q とアユの定位場所から上流側切欠き中央までの距離の平均値 \bar{L}_n を平均体長 \bar{B}_L で除した値 $\frac{\bar{L}_n}{\bar{B}_L}$ との関係を示す。パターンA以外の場合では、上流側切欠きまでの距離が体長の約15倍以上となっている。一方、パターンAでは体長の8倍以下となっている。したがって、魚群から上流側切欠きまでの距離が近い方が、遡上率が高くなることが明らかとなった。

d) 魚向と遡上率との関係

図-9 に流量 Q と魚向の標準偏差 θ'_f との関係を示す。パターンAを除くと魚向の標準偏差は流量および水深によって大きな影響を受けない。これは、アユが定位しているときに様々な方向を向いており、その状況が流量や水深によって大きな影響を受けないことを意味する。一方、パターンAにおける魚向の標準偏差 θ'_f は著しく低い。これは、パターンAにおける多くのアユが類似の方向を向いて定位していることを表す。

アユの瞬間存在位置と上流側切欠き中央とを結ぶ線と瞬間魚向との角度差を θ_n と定義する。図-10 に流量 Q と角度差 θ_n の絶対値の空間時間平均値 $|\theta_n|$ との関係を示す。パターンAにおける角度差 $|\theta_n|$ はその他の場合と比較して小さな値を示している。これは、パターンAにおけるアユが上流側切欠き方向を向いていることを表している。

以上のことから、定位している多くのアユは下流側隔壁付近をランダムな方向を向いて遊泳している。この場合、上流側切欠きとの距離が遠いため、落下流を発見することができずと考えられる^り。一方、パターンAのアユは上流側切欠きからの距離が近く、落下流からの高速流を発見し、魚向をそらえた状態で上流側隔壁方向を向きながら定位している。アユには正の向流性があるた

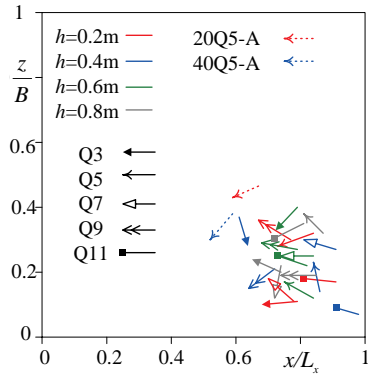


図-13 下流側切欠き付近の魚向

め、しばしば遡上を試みていると考えられる。

(2) 降下特性の解明

降下率を次式のように定義する。

$$\text{降下率} = \frac{\text{降下した尾数 } n_s}{\text{実験に用いた尾数 } N (= 50)} \quad (2)$$

図-10 に流量 Q と降下率 n_s/N との関係を示す。水深 h の増加に伴い降下率は低下傾向を示している。また、降下率のピーク位置が水深の増加に伴って低流速側に移行していることがわかる。

目視によって降下するアユはパターンAを除いた場合であった。図-3 に示したように、下流側隔壁付近の魚群は横断方向および鉛直方向に移動している。そこで、図-11 に流量 Q と 10s ごとに得られた魚群と下流側切欠きまでの最小距離の平均値 $\bar{L}_{d,\min}$ を平均体長 \bar{B}_L で除した値 $\frac{\bar{L}_{d,\min}}{\bar{B}_L}$ との関係を示す。パターンAを除くと、水深の増加に伴い最小距離が増加している。また、各水深において最小距離が最小となる流量が降下率のピークを示す流量と一致している。図-12 に下流側切欠き付近 ($x/L_x > 0.5$, $z/B < 0.5$) の領域内での魚の平均遊泳位置に平均魚向を矢印で示す。全てのケースにおいて、下流側切欠きに対して尾を向けて魚が遊泳していることが伺える。図-11、図-12 より、魚の降下は、上流側隔壁から下流側隔壁へ

と流れる高速流に乗り、下流に流されていることが原因であることがわかった。

4. おわりに

本研究では、階段式魚道のプール水深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、遡上および降下特性について検討したものである。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) プール水深の減少に伴ってアユの遡上率が高くなった。これは和田⁹⁾の発見と同様である。ただし、流量が少ない時および多い時に遡上が困難になることが判明した。
- (2) アユの遡上が誘発される要因として、①アユの定位場所と上流側切欠きとの距離が近いこと、②魚向が上流側切欠き方向を向いていること、③各魚の魚向が揃っていること、の3条件が必要ながことが解明された。
- (3) 流速が体長倍流速で3以下かつ、乱れの小さい領域を魚群は主として定位している。なぜなら、この状態では普通筋を使用しないので、疲労が蓄積されないからである。ただし、この場合アユは下流側隔壁付近をランダムな方向を向きながら遊泳しており、上流側隔壁からの落下流を発見できないために遡上に挑むことはほとんどない。
- (4) プール水深 h の増加に伴いアユの降下率が低下することが解明された。
- (5) 魚群と下流側切欠きまでの最小距離に近いほど降下率は高くなる。これは、下流側切欠きとの距離が小さくなると上流側隔壁から下流側隔壁へと流れる高速流に乗り、下流に流されているからである。

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)23560610(代表：鬼東幸樹)の援助を受けた。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) (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。
- 3) 鬼東幸樹，秋山壽一郎，森悠輔，関強志，松田孝一郎：階段式魚道の切欠き角度が魚の遡上特性に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp.1297-1302，2010。
- 4) 鬼東幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，寺島大輔：潜孔の設置位置がアユの遡上特性に及ぼす影響，水工学論文集，第55巻，pp.1429-1434，2011。
- 5) 鬼東幸樹，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.1201-1206，2005。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 真山紘：サケ親魚のそ上行動実験，魚と卵，第157号，pp.44-55，1988。
- 9) 和田吉弘：長良川のアユづくり，治水社，1993。
- 10) 浪平篤，後藤真宏，小林宏康：階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動，水工学論文集，第51巻，pp.1291-1296，2007。
- 11) Katopodis, C., *Proc. Of the Int. Symp. On Fishways '90 in Gifu*, pp.19-28, 1990。
- 12) 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。
- 13) 海洋生物環境研究所：新しい遊泳能力測定装置による海産魚類の遊泳能力の評価，1991。

(2012. 8. 22 受付)

EFFECTS OF DEPTH OF POOL IN POOL-AND-WEIR FISHWAY ON MIGRATION CHARACTERISTICS OF AYU

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Saori KURAMOTO, Koichiro MATSUDA and Shohei NOGUCHI

Fishways have been constructed to facilitate migration of fish past dams, waterfalls and rapids. Wada pointed out that the migration rate of ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) was high value when the depth of the pool in a pool-and-weir fishway was shallow. However, in this study, the discharge is fixed. Therefore the influence of the discharge change is not taken into consideration. And the cause of the migration is ambiguous.

In this study, the depth of the pool in a pool-and-weir fishway was changed 0.2, 0.4, 0.6, and 0.8m, and the discharge in each depth was changed 3, 5, 7, 9, and 11 l/s. 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 maximum value when the depth in a pool-and-weir fishway is in the range of 0.2-0.4 m. However the migration rate is low when discharge is a few, or large. And it was found that the migration rates of ayu is high when the fish's angle has gathered.