

ハイブリット式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験

A STUDY ON UPSTREAM MIGRATION OF JAPANESE DACE IN A POOL-TYPE FLOW OF A HYBRID-TYPE SCALE MODEL FISHWAY

泉 完¹・工藤 明²・東 信行³・佐藤 正一⁴

Mattashi IZUMI, Akira KUDO, Nobuyuki AZUMA and Shoichi SATO

¹正会員 農博 弘前大学・助教授 農学生命科学部 地域環境科学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

²正会員 農博 弘前大学・教授 農学生命科学部 地域環境科学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

³正会員 農博 弘前大学・助教授 農学生命科学部 生物生産科学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

⁴スガノ農機株式会社 (〒300-0405 茨城県稲敷郡美浦村間野天神台300)

In order to investigate behavioral characteristics of Japanese dace(*Leuciscus hakonensis*) in a Hybrid-type fishway(width 0.8m,slope1/10) consisted of a rectangular notch(b=0.2m) at the center wall and a triangular type weir at the either wall (1:7), the liberation experiment was carried out in the flow condition of pool-type.And,the relationship between behavioral of Japanese dace and flow characteristic was examined. As the result,it was confirmed that Japanese dace tended to ascend through both the notches and the orifices,and well utilized region where the flow velocity is small by comparing in the excellence flow of overflow and flow from the orifices. Therefor,it was proven that behavioral characteristics of the Japanese dace were closely related to flow condition in the pool-type flow.

Key Words : Hybrid-type fishway, Japanese dace, liberation experiment, pool- type flow

1. はじめに

近年、河川環境を保全するため魚類等の生態系を維持する立場から、農業用取水堰に設置される魚道環境を川の流れの一部として整備する考え方が重要視されている¹⁾。各種魚道形式のうち、上流水位の変動に応じてプールタイプの流れからストリームタイプの流れに流況が変化する、いわゆる「ハイブリット式(複合式)」と呼ばれる形式がある²⁾。本形式の特徴は、三角堰型傾斜隔壁を持ち、中央部が流れの速いストリームタイプの場合でも、両側壁近傍では三角堰型傾斜隔からの流れが落下流れになり、流量変動に対して機能できるとされている³⁾。

このような中で、著者らは中央部に長方形の切り欠きを持つ三角堰型傾斜隔壁タイプのハイブリット式(複合式)魚道(以下、ハイブリット式と呼ぶ)に関して水理模型実験を行い、越流形態や流量係数、流速分布特性について実験的に考究してきた^{4),5)}。しかしながら、魚道の水理特性と合わせ、既往の報告事例^{6)~8)}のように水の

流れと魚類の行動特性との関係を明らかにすることが必要である。

そこで、本報告はとくにこのタイプの魚道におけるプール内の魚類の行動特性を把握することを主目的にして、プールタイプの流況で引き続き魚類の放流実験を行い、水の流れと魚類の行動について考察したものである。

2. 実験装置と供試魚、および実験方法

(1) 実験装置

魚道の水理実験水路は、高さ 0.5m、幅 0.8m の上流水水平水路(長さ 0.8m)と魚道部(長さ 6.0m)、および下流水水平水路(長さ 2.0m)からなっており、上流部には JIS 四角堰と整水槽、下流部には水位調節用のゲートが取り付けられている。また、魚道水路に流入する水流は循環形式になっている。実験に用いた魚道の隔壁形状は、図-1 に示すように、中央部が長方形、両サイドが 1:7 の傾斜した三角堰型隔壁になっており、潜孔を両傾斜隔

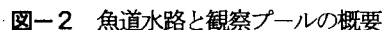
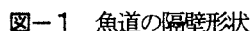


表-1 実験条件とウグイの個体数

Run	FL/B	実験流量 (ls)	実験日	個体数	体長の範囲 (cm)	平均 (cm)	SD (cm)
1	0.96	7.71	1999.8.26	10	4.5~10.0	6.3	±1.9
2	0.46	7.71	1999.8.27	27	4.5~10.0	5.8	±1.7

壁の下方に側壁から離し2つ設けられたタイプである。切り欠きの越流断面は、厚さが0.036mの台形断面で、潜孔部の入り口形状は切り口角度 $\alpha=1.57\text{rad}(90^\circ)$ である。また、魚道勾配は1/10である。隔壁間隔は、プール水平長PLと水路幅Bとの比が $PL/B=0.96(PL=0.764\text{m}$ 、隔壁数7)と $PL/B=0.46(PL=0.364\text{m}$ 、隔壁数14)の2種類である。

(2) 実験に用いた供試魚

本実験では、プール内の水の流れに対する魚類の行動特性の把握を主目的にしているので、実験に用いた供試魚は、遡上意欲と魚道水路の大きさを考慮して、現地魚道の遡上調査で魚道を遡上し採捕された小型の魚を用いた。供試魚の魚種としては、多少の水質変動に対しても耐えられる遊泳魚のウグイ (*Leuciscus hakonensis*) を選定した。ウグイはコイ科に属し、水生昆虫や付着藻類を食べる雑食性の魚で (川那部ら、1989)、青森県では魚道を利用する主要魚種の一つである。したがって、本実験で用いた供試魚は、実際の魚道を遡上した、いわゆる遡上経験のあるウグイとなる。

ウグイは、放流実験前の 1999 年 8 月 24 日に青森県内の二級河川赤石川に設置された赤石第 2 頭首工魚道で採捕されたものから比較的活発な個体を選定し、実験日まで水槽で飼育された。表-1 は、実験条件とウグイの個体数を示したものである。実験は、1999 年 8 月 26 日と 1999 年 8 月 27 日の 2 日に分けて行われたが、2 日目の実験では供試魚の個体数を多くするため、1 日目の実験用いた模型水路での遡上経験のある個体数も含め用いることにした。実験番号をそれぞれ Run1、Run2 とし各実験における供試魚の個体数は、それぞれ 10 個体と 27 個体である。平均体長は、それぞれ 6.3cm(SD=±1.9cm) と 5.8cm(SD=±1.7cm) で体長 10cm 以下の小型の個体である。

また、平均体重は4.8gと3.3gである。

(3) 実験方法

放流実験は、両日とも日中の 11:00～15:30 の間で行われた。放流時間はウグイの遡上意欲を考慮して、1 日あたり 11:00～13:00、13:30～15:30 の 2 回に分け、それぞれ 2 時間とした。観察プールは 両実験とも魚道中央部プール (Run1: 第 3 プール、Run2: 第 8 プール) とし、また、水流は上述のとおり循環しているので、ウグイが循環水路に迷入しないよう上・下流が網で仕切られてある (図-2 参照)。

ウグイは 図-2 に示すように、Run1 で最下流部の第1 プールに、Run2 では行動個体数が多く観察できるよう配慮して、観察プール直下流の第3 プールに静かに放流され、図-2 に示された観察プールの上方、および右岸側にそれぞれビデオカメラを設置し、プール内のウグイの行動を撮影、記録した。

本実験での水理条件は、切り欠きのみから越流するプールタイプ流れで、これまでの研究(泉ら、1999a)から流況が比較的良好な実験流量 $Q=7.71\text{ l/s}$ である。プール間の水位差 Δh は、Run1 で 4.1 cm 、Run2 で 8.2 cm 、切り欠き上の水深は両条件とも 3.5 cm 程度である。また、実験時間における魚道水路の水温は、8月26日 $23.0^{\circ}\text{C}\sim 23.6^{\circ}\text{C}$ 、8月27日 $23.4^{\circ}\text{C}\sim 24.1^{\circ}\text{C}$ の範囲で、ウグイが採捕された河川水温とほぼ同じ 23.0°C 前後である。なお、放流実験時間中において、人影がウグイの行動に影響を与えることを配慮して無人状態で撮影を行った。

3. ウグイの行動特性の整理方法

側方に設置したビデオ記録から遡上したウグイの各個体の行動を観察した結果、複数重なり合って個体ごとの水深方向における行動の確認が困難であったので、ここでは主としてプール上方に設置されたビデオ記録によるプール平面でのウグイの行動を調べることにした。そして、各実験日とも撮影記録にもとづいて、観察プールに遡上し、さらに上流プールへ遡上したウグイのうち、そ

表-2 供試魚の隔壁通過経路

遡上経路	Run1	Run2
切り欠き→切り欠き	9	8
切り欠き→潜孔	3	3
潜孔→潜孔	11	4
潜孔→切り欠き	4	2
合 計	27	17

の行動がビデオ画像で確認でき、さらに体長も確認できる個体について、その遡上経路およびプール内の遊泳時間と遊泳場所を調べることにした。このとき、一度観察プールを通過したウグイが魚道水路の下流へ降下し、再び観察プールを通過し遡上して行くことも考えられるので、ここではこのような行動をした個体も遡上した個体のカウント数に入れることにした。

また、各個体についてプール内に遡上してきた時間を初期値にして、1秒ごとの遊泳行動を観察し、上流プールへ遡上していくまでのプール内で遊泳した時間を計測した。そして、遊泳場所については、プールを横断方向8、流下方向4の32メッシュ(8×4=32)に区切って、1秒ごとに各個体が移動した区域の軌跡をたどり、それぞれの区域の総遊泳時間を計測した。

4. 観察結果と考察

(1) 隔壁通過経路と遊泳時間

中村ら⁹⁾が指摘するように、供試魚としたウグイの遊泳力や行動については当然のことながら個体差があり、一定の行動をとるわけではないが、ここで観察プールを通過し上流へ遡上した個々の個体の隔壁部の通過経路を調べた。延べ遡上個体数は、表-2に示すように Run1で27個体、Run2では17個体であった。

隔壁部の切り欠きと潜孔の通過経路を次の4パターン、①下流隔壁切り欠きから上流隔壁切り欠き、同様に②切り欠きから潜孔、③潜孔から切り欠き、④潜孔から潜孔、に分類して切り欠きと潜孔の延べ遡上回数を調べると表-2に示されるように、それぞれ31回と27回であり、ウグイは切り欠きと潜孔ともに利用して遡上していることがわかる。また、同一個体が切り欠き、潜孔を交互に利用する場合も少なくなかった。潜孔を有するアイスハーバー型階段式魚道における魚類の現地遡上調査^{10),11)}によれば、ウグイは切り欠きと潜孔の両方を遡上していることが知られているので、この点興味深い。

観察プールを遡上していく過程で、プール内に遊泳(休憩)している時間を調べると、隔壁間隔が長い Run1で5秒～305秒(平均45秒)、Run2では3秒～54秒(平均16秒)の範囲で、プール内を直進的に遊泳し数秒で遡上する個体や、遊泳時間が長く数分間も同一場所に留まってから遡上する個体も観察された。また、隔

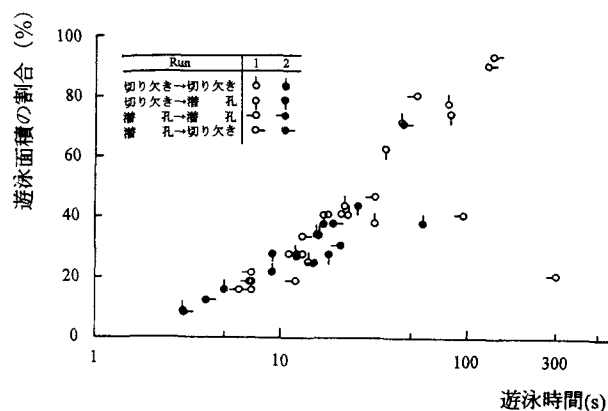


図-3 供試魚の遊泳面積率と遊泳時間

壁間隔が短い Run2 では Run1 に比較して平均遊泳時間が短くなっている。これは、後述するプール内の流況が関係しているものと推察される。ただ、両ケースとも20秒以内の短時間に遡上していく個体数が50%～80%で多数を占めていた。

つぎに、各個体が遊泳時間内にプール内を平面的にどのように行動しているのかどうかを各4パターンについて個々の個体が1秒ごとに移動した軌跡をもとにして、32メッシュに区切った各領域内で遊泳した場所(総メッシュ数)とプールメッシュ数(32)との割合で示し、プール内の遊泳時間との関係で調べた。図-3は、これらの関係を示したものである。当然のことながら、水流および各メッシュ内の遊泳時間(休憩時間)との関係もあるが、この図から遊泳時間が長くなるほどプール内を面的に行動している傾向がわかる。また、遊泳時間が30秒以上ではプール内の約50%を越える範囲を遊泳する傾向にある。

なお、遊泳時間が約300秒と長時間にもかかわらず、遊泳範囲が20%と小さい個体があるが、これは上述したように数分間同一場所に留まってから遡上した個体である。このような個体は観察プールを、いわゆる「休憩の場」として利用したと考えることができ、各個体で行動特性が異なることがわかった。

(2) プールタイプにおけるプール内流況⁹⁾と遊泳場所

魚道の構造に起因する水理特性、すなわちプール内流況と魚類の行動特性を把握することは、非常に重要である。そこで、プールタイプ流れにおけるプール内流況と個体の遊泳場所との関係を検討した。

魚道プール内の流速分布は、前報の実験⁹⁾で、三軸電磁流速計(アレック電子製:ACM-300)を用い、三軸方向成分(W:横断方向、U:流下方向、V:深さ方向)の流速(サンプリング間隔10Hzで100個)が求められている。図-4(a),(b)は、それぞれ本実験の水理条件におけるプール内流況について、各三方向の平均流速を用いて3次元合成ベクトル流速分布で概括的に示したもの

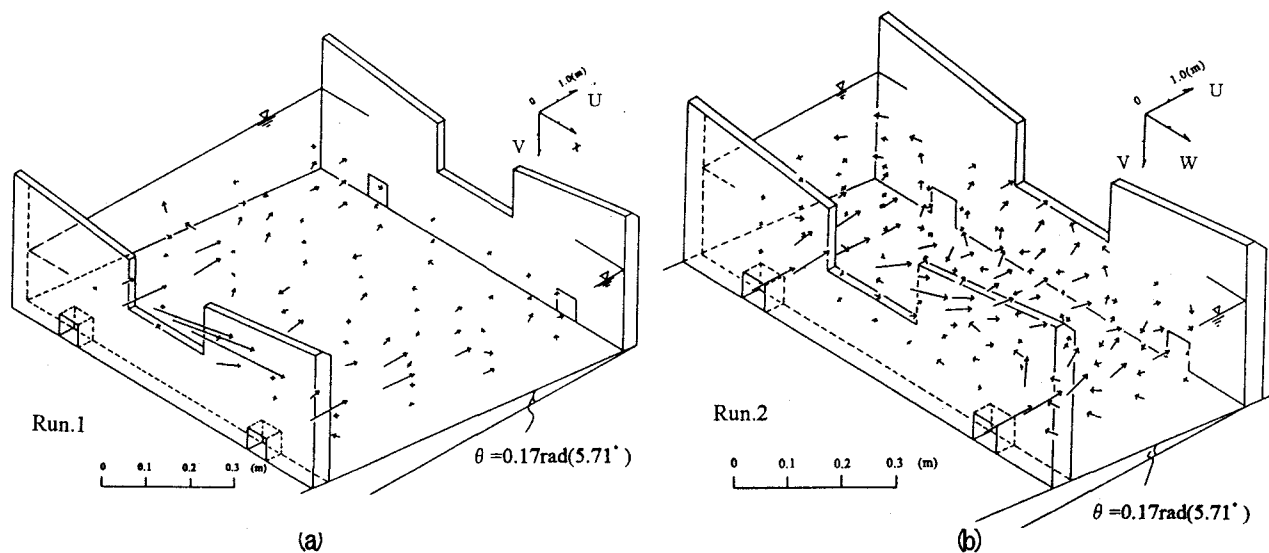


図-4 3次元合成ベクトル流速分布

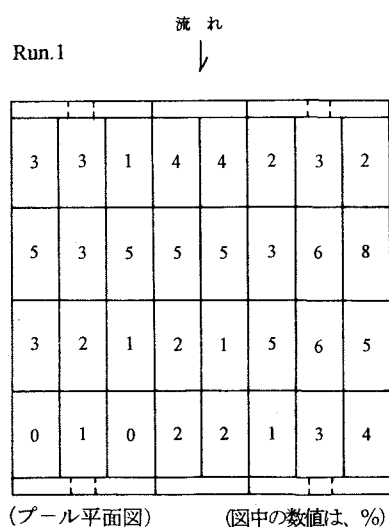
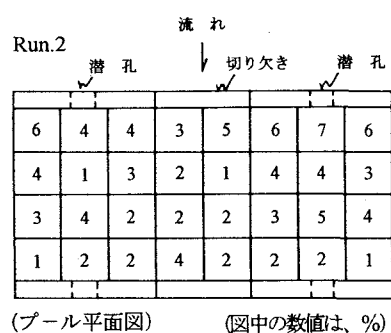


図-5 供試魚の遊泳区域の時間割合

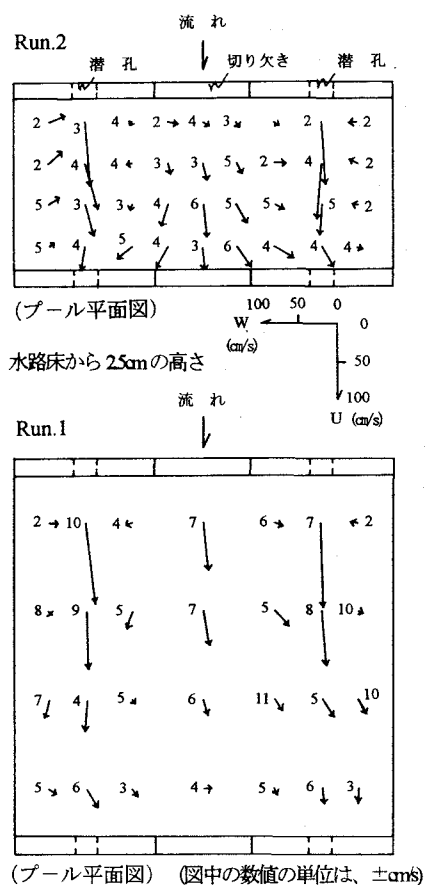


図-6 2次元合成ベクトル流速分布

である。

流況の特徴としては、中央部切り欠きからの越流水脈による落下流れ、潜孔からの流出水流が卓越し、潜孔が側壁から離れているので、プール長が短いと両側壁では上流へ向かう流れを形成する。また、この両側壁近傍や隔壁の底部区域では、切り欠き越流水流や潜孔流出水流の卓越流に比較して、魚が休息できると思われる流速の

小さい領域が見られる。また、本実験の水理条件のように同一流量でも、プール長が短いと越流水脈がもぐり流を形成し、下段の隔壁への影響が見られる。これに対し、プールが長いと落下流れ（越流水脈の落下エネルギー）に対するプール内の水クッション部容量が大きいため、全体として穏やかな流れになっており、このことが供試魚にとって比較的居心地の良い条件であると判断され、上

述した遊泳時間に差異が見られてくるものと推測される。ただ、潜孔の出口下流付近の流下方向のベクトル流速は水位差が大きいほど速いので、これもまた遡上までの時間と関係しているものと思われる。

そこで、これらの流速分布特性とウグイの遊泳場所との関係を、各実験条件別に休息に利用したと考えられる供試魚を除く全個体について、各区域内で遊泳した総遊泳時間を求め、全個体数のプール遊泳時間の総和との割合で調べた。図-5は、これらの関係を示したものである。ただ、この割合は各区域に供試魚が数秒間遊泳して留まっている場合とプール内を移動するために利用した時間の両方を含んでいる。したがって、プール内で局部的に休憩している区域とプール内を移動する区域に厳密に分類して議論することはできないものの、Run1、Run2 ともおおむねこの図から、供試魚は上流部隔壁近傍と両側壁近傍の区域を選好して遊泳している傾向が顕著に見られている。

そこで、側面からのビデオ記録によると、ウグイは水面付近より下層部付近を遊泳する個体が多く観察されているので、いまだ底面から 2.5cm の下層における U-W 方向（プール平面）の2次元ベクトル流速分布を遊泳場所に重ね合わせてみた（図-6）。図中にはベクトルに対応した流速変動の指標の一つである標準偏差（カッコ内数値）も一部示した。この標準偏差は、U方向とW方向の各流速成分の標準偏差の絶対値を合成して求めたもので、合成流速の乱れ強度に相応すると考えられる。符号と単位は±、cm/s である。

図に示されるように、両隔壁条件とも上流部隔壁よりの供試魚がよく遊泳している区域は切り欠きからの落下水流とその背面、また、両側壁区域ではその流速が 10cm/s~30cm/s 程度と比較的小さくなっている。とくにプール間隔が短い Run2 の両潜孔の側壁側の流れは、両潜孔からの流水による影響で上流方向への流れを形成しており、供試魚はこの流れに対して向かう正の走流性を示し遊泳する個体が多数観察された。なお、Run1 で両側壁よりのプール中央付近の合成流速の標準偏差が±7cm/s~±10cm/s とやや大きくなっている。ただ、平均流速は小さいので、これは潜孔からの水流に流れが引きずられ変動しているためであると考えられる。

一方、観察プールを休息に利用したと考えられる供試魚について調べてみると、上流隔壁直下流の隅の流速の小さい区域に留まっていることがわかり、休息の場として流速の小さい、いわゆる「淀み域」を利用することがわかった。

以上のことから、本形式の隔壁形状では供試魚は上流隔壁の直下流部、すなわち中央部切り欠きからの落下水脈の背面付近と両側壁付近（潜孔が側壁から離れているので）の領域をよく利用していることがわかり、これらの領域は3次元合成ベクトル流速分布で示されるように切り欠き越流水流や潜孔流出水流の卓越流に比較して、

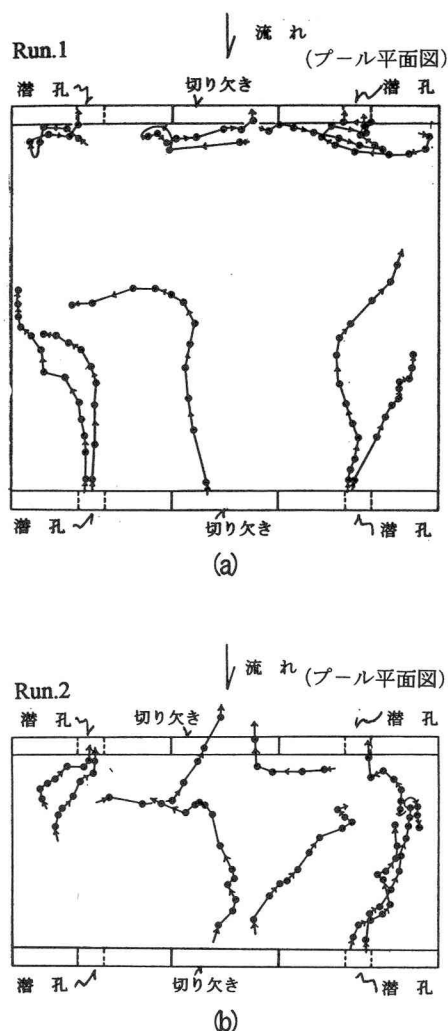
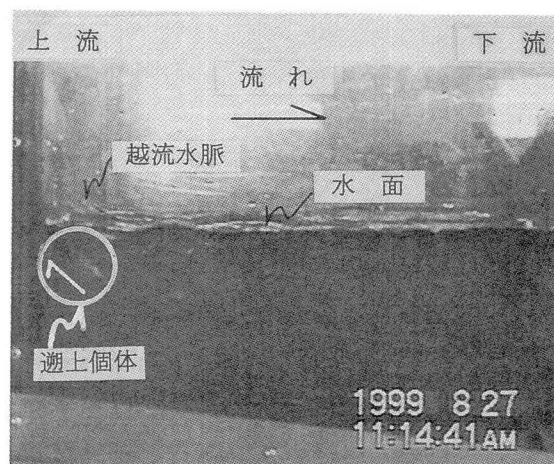


図-7 供試魚の遡上軌跡の1例



上流隔壁の切り欠きを遡上する個体
(側面方向から記録)

写真-1 切り欠きから遡上する供試魚(Run2)

流速が小さい流れ場である。このように、魚類の行動特性は、プール内の流況（流れ場）と密接に関係している

ことがわかった。

つぎに、プール内に遡上してきた個体が流れとの関係でどこへ遊泳していくのか、また、上流プールへ遡上していくときにどのような経路で遊泳していくのかを数秒間で直ちに遡上していく個体を除き調べた。図-7(a)、(b)は、それぞれ観察プール内に遡上してきた個体について、遡上後と上流プールへの遡上前の1~3秒間の軌跡を約0.2秒間隔でたどった1例である。図に示すようにプール内に遡上してきた個体の中で、とくに潜孔を通過してきた個体は、いずれもその通過した潜孔が位置する側の側壁近傍方向へと遊泳していく行動を示し、中央部切り欠きを通過してきた個体も両側壁部のいずれかの方へと遊泳していくケースが多く観察された。

一方、上流プールへ遡上していく場合で切り欠きを遡上する個体は、中村ら⁹⁾によるアユの実験と同様、写真-1に示すように落下水流の背面から越流水脈の中を遊泳し、潜孔を遡上する個体は潜孔からの流出水流に向かって一度定位して水流の中を遊泳していくケースや潜孔出口の両側面から潜孔の隅角部を遊泳していくケースが確認された。

5. まとめ

中央部に長方形の切り欠き、両サイドの下方に潜孔を持つ三角堰型傾斜隔壁の形状をしたハイブリット式魚道の水理模型におけるプール内の魚類の行動特性を把握するため、プールタイプの流況で現地魚道を実際遡上した小型のウグイを用い放流実験を行い、魚道構造に起因する水理特性とウグイの行動特性について考察した。その結果、次に述べる知見を得ることができた。

(1) 切り欠きと潜孔の遡上経路については、ウグイは切り欠きと潜孔ともに利用して遡上することがわかった。

(2) プール内の遊泳(休憩)時間は、3秒~305秒の範囲であったが、20秒以下で遡上した個体が多数であった。また、遊泳時間が長くなるほどプール内を面的に行動することがわかった。なお、遊泳時間が長く数分間も同一場所に留まってから遡上する個体は、定位していた区域をいわゆる「休憩の場」として利用したと考えることができ、各個体差で行動特性が異なることがわかった。

(3) 本形式の隔壁形状では、ウグイはプール内の上流隔壁の直下流部すなわち中央部切り欠きからの落下水脈の背面付近と両側壁付近(潜孔が側壁から離れているので)の領域、すなわち切り欠き越流水流や潜孔流出水流の卓越流に比較して流速の小さい領域をよく利用していることがわかり、魚類の行動特性はプール内の流況(流れ場)と密接に関係していることがわかった。

ただ、魚の遊泳速度(遊泳力)は魚の体長にも関係しているので、体長も流れ場に関係すると推察され、この点については今後さらに検討して行きたい。

6. おわりに

本実験では、切り欠きのみから越流するプールタイプ流れの流況でウグイの放流実験を行ったが、ハイブリット式魚道の特性、すなわち流量が多くなり傾斜隔壁から越流する条件の遡上形態をさらに把握する必要がある。傾斜隔壁全面から越流する流れは、プールタイプの流れと比較して、プール内が気泡で白濁する傾向が見られ、水路上方からのビデオ観察から魚類の確認が困難であった。これらの点については、観察方法も含め今後の検討課題でありさらに実験を継続する予定である。

謝辞: 本実験および現地魚道の採捕調査を行うにあたり、弘前大学農学生命科学部農業水利学研究室の学生諸君には多大の協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柏井条介(1998): 魚道設置の意味と設計上の課題, 土木学会誌, Vol. 83, pp. 49~51.
- 2) Ken Bates(1990): RECENT EXPERIENCE IN COST EFFICIENT FISH PASSAGE IN WASHINGTON STATE, Pro of ISF '90 Gifu Japan, Oc.
- 3) C. Gosset, M. Larinier, J. P. Porcher, F. Travade(1996): 魚道および降下対策の知識と設計(中村俊六、東信行監修), p. 115-116, リバーフロント整備センター, 東京.
- 4) 泉 完・工藤 明・相場一文(1999b): 魚道内の越流形態と流量係数について—ハイブリット式魚道に関する研究(I)—, 農業土木学会論文集, No. 204, pp. 21~28.
- 5) 泉 完・工藤 明・相場一文・佐藤正一(1999c): 魚道内の流速分布特性について—ハイブリット式魚道に関する研究(II)—, 農業土木学会論文集, No. 204, pp. 29~38.
- 6) 中村俊六・高嶋信博・木村博(1987): 階段式魚道内の流況に関する実験について, 農業土木学会誌, Vol. 55-10, pp. 933~998.
- 7) 柏井条介・村岡敬子(1996): 多様な魚種を対象とした魚道の遡上実験, 土木技術資料, Vol. 38-2, pp. 20~25.
- 8) 篠邊三郎(1996): 頭首工の魚道・下巻全 311 頁, 笹野印刷, 弘前.
- 9) 和田 清・東 信行・中村俊六(1998): デニール式およびステープパス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動, 水工学論文集, 第42巻, pp. 499~504.
- 10) 泉 完・工藤 明・東 信行(1999a): 三ツ目内頭首工のアイヌハーパー型魚道における魚類の遡上実態とその水理特性, 水工学論文集, 第43巻, pp. 49~53.
- 11) 泉 完・工藤 明・東 信行・高屋大介(1999d): 赤石第2頭首工魚道における魚類等の遡上調査, 農業土木学会平成11年度応用水理研究部会講演集, pp. 15~20.

(2000.4.17 受付)