

プールタイプ魚道におけるオイカワの跳躍遡上と水理特性との関係

Relationship between behaviors of jumping migration of Zakko Platypus and hydraulic characteristics in pool-and-weir fishway

鬼束幸樹*・秋山壽一郎**・山口秀和***

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA and Hidekazu YAMAGUCHI

*博 (工) 九州工業大学工学部建設社会工学科助教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**Ph.D 九州工業大学工学部建設社会工学科教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***修 (工) 北九州市 (〒803-8510 北九州市小倉北区大手町 1-1)

A pool-and-weir fishway was constructed beside of a large weir in the river, which is located at the northern part of Kyushu Island. In this fishway, all migrating fishes do not swim in the water flow running above the weir but are jumping in the air. Behaviors of jumping fishes whose name is Zakko Platypus are recorded by a digital video camera and three components of velocity in the first pool were measured with a 3-D electromagnetic current meter. It was found that almost fishes were jumping near the side-wall due to the velocity of the falling flow running above the weir near the side-wall is slower than that at the center of the channel. The initial speed of the migrating fishes is in proportion to the body length of migrating fishes.

Key Words: pool-and-weir fishway, burst speed, field measurements, migration

1. はじめに

治水および利水を目的とした堰の設置によって、その上下流の水位が不連続となるため、水生生物にとっての移動が困難になる。特に回遊魚にとって、不連続な水位落差の存在は死活問題につながるため、魚道が設置される。

魚道は、その水理構造の違いによって、プールタイプ、ストリームタイプおよびオペレーションタイプに分類される¹⁾³⁾。プールタイプは、複数のプールによって構成される魚道で、プール間に落差が設けられている。ストリームタイプは、水路内の流れに急激な流速分布をつけることで、それぞれの魚種に適した流速の遡上経路を与える魚道である⁴⁾⁶⁾。オペレーションタイプは、人為的な操作が必要な魚道である。近年、様々な魚道が提案されているが、我が国の既設魚道の多くは、プールタイプ魚道である。ところが、プールタイプ魚道の中には、魚の遡上がほとんど不可能となっているものが多く存在するといわれている²⁾。これは、魚の遡上特性を考慮せずに魚道の設計をしてきたために生じたものであるが、この背景には魚の遡上特

性がほとんど解明されていないという事実がある。この反省から、魚の遡上特性と水理量との関係が精力的に研究されている⁷⁾¹⁵⁾。

中村ら⁷⁾は、潜孔付きプールタイプ魚道を実験室に作成し、アユを放流して遡上状況を観察するとともに、電磁流速計およびプロペラ流速計を用いてプール内の流速分布を測定した。その結果、潜孔から流れ出る高速な流れをアユは避けながらプール内を上流方向に泳ぎ、潜孔付近に到着すると一気に潜孔内に突入することを明らかにした。高橋・中村⁸⁾は、中村ら⁷⁾が用いた水路において、隔壁を越流して次のプールへと落下する水脈中を遊泳遡上する魚の遡上経路を観察し、側壁付近で遊泳遡上する率が高いことを発見した。佐合ら⁹⁾は、岡山県の吉井川に建設された大田原堰魚道において、プールの底面に粗石がなくフラットな場合、粗石を点在させた場合および粗石を密に充填させた場合のアユの遡上数を調べ、遡上数が最も多いのが粗石を点在させた場合であり、粗石を密に充填させた場合およびフラットな場合の順に遡上数が低下することを明らかにした。彼らはプール内の流速を計測しなかったため、

この原因を示すことはできなかったが、桜井ら¹⁰⁾は底面がフラットおよび粗石付きプールタイプ魚道において、プロペラ流速計および電磁流速計を用いて流速測定を行い、粗石付きの場合の底面付近の流速は、フラットなものに比べて極端に低流速であること示し、そこが魚の休憩場所になるために遡上率が向上することを明らかにした。房前ら¹¹⁾は、矩形断面水路における魚の遡上経路を観察するとともに3次元電磁流速計を用いて横断面内の流速を測定した。その結果、水路隅角部を魚が遊泳遡上する頻度が高いことを発見し、この理由として隅角部付近の流速が他の領域よりも低速であることを挙げている。久保田¹²⁾は、プール長を系統的に変化させてイワナの遡上数を調べた結果、イワナが遊泳遡上するためには、体長の2倍程度の助走距離が必要と述べた。また、林田ら¹³⁾は、プール内の水深とプール長との比(=アスペクト比)を系統的に変化させたプールタイプ魚道において、3次元電磁流速計を用いた流速測定を行い、アスペクト比の変化による流れのパターンの変化を明らかにした。

このように魚の遊泳遡上に関する知見はある程度存在するが、統一的な見解は得られなかった。そこで、中村²⁾は、既往の研究を参照し、魚の遊泳に関する3つの定理を提案した。第1定理は「魚はその体長相当分の長さしか流れを認識できない」であり、魚は体から少しでも離れた領域の流速を感知できないとされている。第2定理は「魚は突撃、逃避、急流遡上などの緊急時以外には普通筋を使わない」であり、通常は疲労が蓄積しない血合筋を使って遊泳するが、遡上時には普通筋を使って、突進速度で遊泳することを意味する。第3定理は「魚の尾の振幅は体長の1/2を越えない」であり、魚が遊泳するには魚の体長の1/2程度の水路幅が必要であることを意味する。

上述のように遊泳遡上する魚の挙動と水量との関係は徐々に明らかにされており、魚の遊泳特性を考慮した魚道の設計も近年行われるようになった¹⁴⁾。ところが、現地魚道の観察によれば、流脈中を遊泳遡上する魚だけでなく、空中を跳躍して遡上する魚も多く存在する¹⁵⁾。したがって、魚道を設計する際には、跳躍遡上特性も考慮する必要があると考えられる。しかし、現在のところ跳躍遡上に関する知見はほとんど得られていないのが現状である。本研究は、河川に設置されたプールタイプ魚道において、魚の跳躍遡上状況をデジタルビデオカメラで撮影するとともに3次元電磁流速計を用いてプール内の流速測定を行い、魚の跳躍遡上特性を解明したものである。

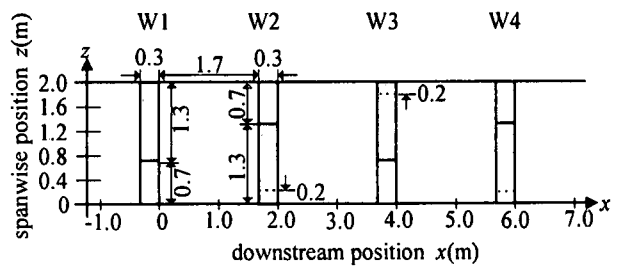


図-1(a) 魚道平面図 (第1～第4隔壁間)

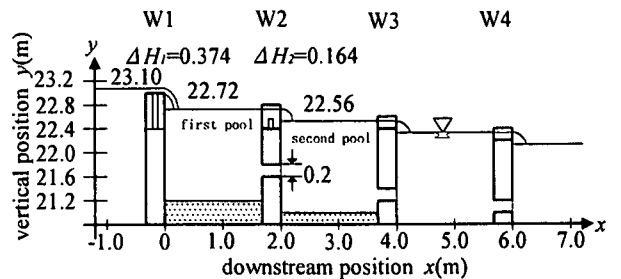


図-1(b) 魚道縦断面図 (第1～第4隔壁間)

2. 対象魚道の状況および現地計測方法

2.1 対象魚道の状況

北部九州を流れるある一級河川の河口から33km地点に落差3.6mの可動堰が設置されている。この可動堰の右岸側は、幅 $B=2.0\text{m}$ 、長さ $L=1.7\text{m}$ のプールが18個設置されており、いわゆるプールタイプ魚道が形成されている。プール間に設置されたコンクリート隔壁の厚さは0.3mである。上流側から3つ目までのプールの平面図および縦断面図を図-1に示す。流下方向に x 軸を、鉛直上向きに y 軸を、横断方向に z 軸をとり、プール長を L 、プール幅を B 、水深を H とする。第1隔壁(W1)の天端高は河口の水位を基準にすると23.0mであり、それ以降の隔壁の天端高はそれぞれ0.2mずつ低くなっている。隔壁の天端には幅0.7mの切欠きが左右交互に設置されている。切欠き深さは第3隔壁(W3)以下では0.2mであるが、第1隔壁(W1)と第2隔壁(W2)ではそれぞれ0.6mおよび0.4mである。第1隔壁を除く全ての隔壁には切り欠き部の反対側において、天端から0.7m下に $0.2 \times 0.2\text{m}$ の正方形の潜孔がある。

灌漑期(5月20日～10月5日)において、平水時には魚道の上流側での貯水位が23.0mになるように可動堰が操作され、出水時には貯水位が23.1mとなるように操作される。第1隔壁の天端高は23.0mであり、灌漑期の平水時における貯水位と一致しているが、幅0.7m、深さ0.6mの切り欠きを右岸側に有しているため、切り欠き部の天端の高さが22.4mであり、原理的には切り欠き部で

表-1 測定条件

	Observation-1	Observation-2
Date	2000.6.2	2000.6.2
Initial time of observation (h, m, s)	13:29'37	16:00'48"
Sampling time(s)	116	53
Number of fishes	22	14

0.6m(=23.0-22.4m)の越流水深を有する流れが生じ、魚道としての役割を果たすことが期待される。しかし実際は、魚道の上流側からの取水に重点が置かれ、第1隔壁の切り欠き部には天端高と同じレベルまで角落としが入れられる。結果として第1隔壁は天端高が23.0mの全面越流型魚道となっている。従って、平水時は貯水位が天端高と一致しているため魚道へ流入する流量がほとんどなく、出水時のみ魚道に水が流入する状態となっている。

非灌漑期には、貯水位が22.5mになるように可動堰が調整される。第1隔壁の角落としを除去すれば第1隔壁の切り欠き部において越流水深が0.1mの流れが生じるが、実際には角落としが除去されることはなく、平水時のみならず、多少の出水があっても魚道に流れが流入することはない、魚道として機能していない。

2.2 対象魚道の緊急改善

灌漑期の平水時には魚道に水がほとんど流入しないので、河川流量が平水時よりも増加したときしか魚の遡上は望めない。灌漑期において降雨があった翌日に、対象魚道を観察すると、貯水位が23.1mとなっており、第1隔壁から第1プールへの流れが生じていた。出水時における貯水位は23.1mとなるように可動堰によって調整されているため、このときの状況は出水時の典型的な状況といえる。現地計測の結果、貯水位と第1プール水位との落差は0.51mあった。我が国においてプールタイプ魚道の水位落差は0.2m以下に設計されることが多く⁷⁾、また、ドイツ水資源・農業土木協会¹⁰⁾によれば、水位落差の推奨値は0.15mであることから、対象魚道の水位落差は極めて大きいといえる。そこで、第1プールの水位を極力上昇させて貯水位との水位落差を縮小するために、第2隔壁の潜孔を塞ぐとともに第2隔壁の切り欠き部に高さ0.2mの角落としを入れた¹⁵⁾。こうした緊急改善後の貯水位および第1、第2プールの水位を図-1中に示した。貯水位と第1プールとの水位落差は0.37mであり、推奨値の0.15mよりはかなり大きな値であった。

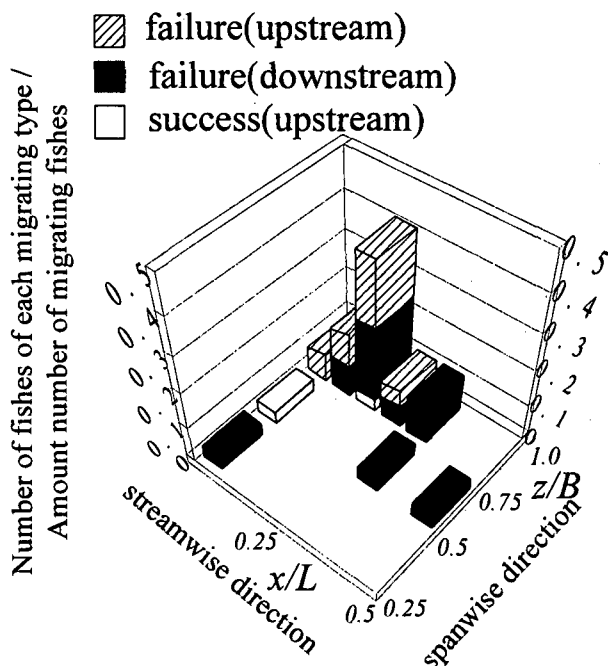


図-2 跳躍開始場所

2.3 跳躍遡上の撮影方法と流速計測方法

緊急改善を行った後の目視観察の結果、第1プールへと落下する水脈中を遊泳遡上する魚が全く観察されず、遡上を試みる魚(すべてオイカワ)の全部が跳躍遡上の形態をとっていることがわかった。そこで、第1プールの側岸にデジタルビデオカメラを設置し、跳躍遡上の様子を2回撮影した。撮影条件を表-1に示した。両撮影とも撮影間隔は1/30sである。撮影後、動画をパソコンに取り込み、bmpの静止画像に変換し、オイカワが水面から飛び出す位置(x_{f0} , y_{f0} , z_{f0})およびその軌跡を追跡し、水面から飛び出す初速度($\tilde{u}_{f0}$, $\tilde{v}_{f0}$, $\tilde{w}_{f0}$)および跳躍最高点(y_{fp})を算出した。添字 f は魚(fish)に関する諸量で、添字0は初期値であることを示す。なお、今回撮影されたオイカワの体長 B_L は $5\text{cm} < B_L < 20\text{cm}$ であり、平均的には12cm程度であった。

ビデオ撮影を行った日に、第1プールにおいて3次元電磁流速計を用いた流速計測を行った。サンプリング間隔を0.33s、サンプリング時間を169sとし、 x 方向に6点、 y 方向に5点、 z 方向に4点の計120点における流速3成分を計測した。 x , y および z 軸方向の瞬間流速を $\tilde{u} = U + u$, $\tilde{v} = V + v$ および $\tilde{w} = W + w$ とする。大文字は時間平均流速を、小文字は変動成分を、 $\sim$ は瞬間値を示す。総測定時間は10時間に及んだが、この間第1隔壁における越流水深がほぼ一定であったため、第1プールの流況はほとんど変化していないと考えられる。

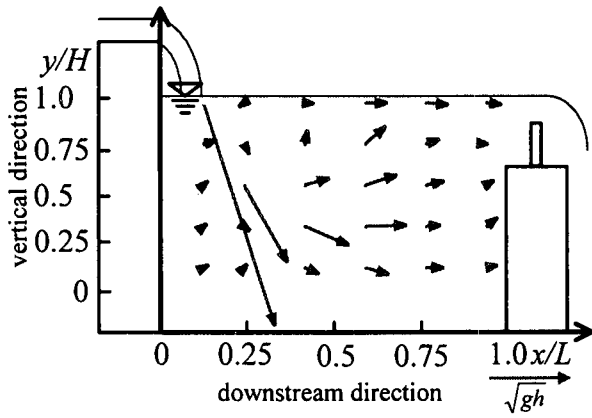


図-3(a) $\sqrt{gh}$ で無次元化された $z/B=0.5$ の鉛直断面内の
流速ベクトル(U, V)

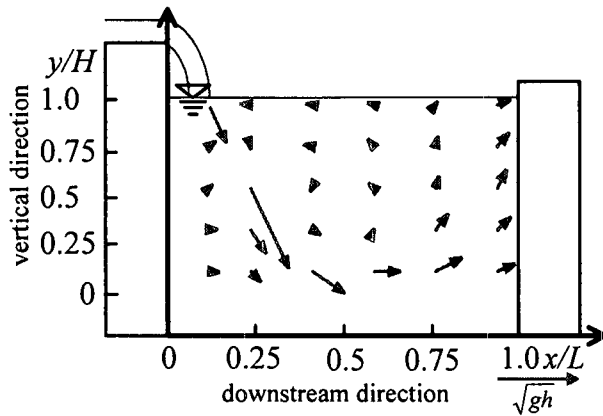


図-3(b) $\sqrt{gh}$ で無次元化された $z/B=0.95$ の鉛直断面内の
流速ベクトル(U, V)

3. 計測結果および考察

3.1 跳躍開始位置の特徴と流況との関係

Observation-1 および Observation-2 におけるオイカワの跳躍開始位置をまとめて図-2 に示す。上流側に跳躍して遡上に成功したものを白、上流側に跳躍したものの遡上に失敗したものを斜線、下流方向に跳躍して遡上に失敗したものを黒で示し、跳躍開始位置を流下方向に7分割、横断方向3分割して表示している。縦軸は各分割範囲内で跳躍した尾数を総跳躍尾数で割った値である。同図より、プールの中央断面よりも左岸付近から跳躍する割合が高いことおよび跳躍開始場所が下流であるほど跳躍方向が下流向きになる率が高いことがわかる。前者の特性を検討するには、プール内の水理特性を明らかにしなければならない。図-3 にプール中央断面($z/B=0.5$)および左岸側壁付近($z/B=0.95$)の $x-y$ 断面における流速ベクトル(U, V)を示す。なお、流速は貯水位と第1プールの水位との間の

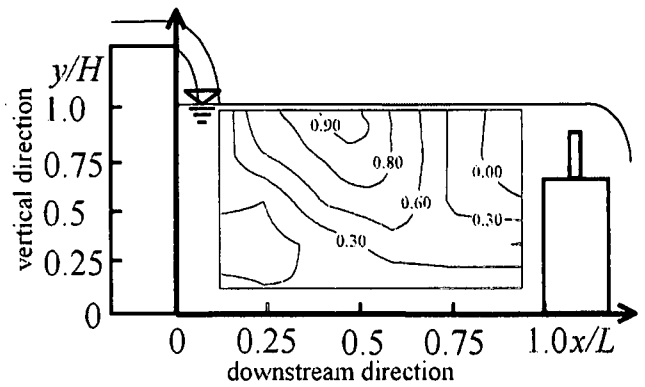


図-4 $z/B=0.95$ の鉛直断面内の逆流率 I_u

水位落差 $h=0.37\text{m}$ で構成される $\sqrt{gh}$ ($=190\text{cm/s}$)によって基準化されている。流速を無次元化することで、浦ら¹⁵⁾の行った模型実験の結果と直接比較することが可能となる。図-3より落下流の流速は、水路中央断面では $3\sqrt{gh}$ 程度で左岸側壁付近では $\sqrt{gh}$ 程度であることがわかる。この相違は、水路中央付近の落下流は自由落下するのに対し、側壁付近の落下流は側壁に付着しながら落下するので壁面摩擦によって落下流が減速したために生じたと考えられる。遊泳遡上する際も水路中央よりも側壁付近での遡上数が多いという高橋・中村⁹⁾の結果も同様な理由によるものと考えられる。一方、右岸側壁付近における流速も減速されるので魚の跳躍遡上が期待されるが、図-2よりほとんど魚が跳躍遡上していないことがわかる。浦ら¹⁵⁾は第1隔壁の右岸付近が切り欠き部に角落としを挿入した複雑な構造となっているため、流れがかき乱されて複雑な流速分布になっていることが明らかにしている。したがって、右岸側壁付近では流れが複雑なため、遡上数が左岸に比べて少なくなっていると考えられる。

次に、オイカワが遊泳遡上を諦め、跳躍遡上に挑んだ原因を考察する。魚は流れに対して逆向き方向に進む正の走流性がある魚と、流れに対して順方向に進む負の走流性がある魚および走流性のない魚に分類される。オイカワには正の走流性があるので遊泳遡上する場合のみならず跳躍遡上する場合も、水中では落下流に対して逆向きに遊泳するものと考えられる²⁾。魚の跳躍速度は現在のところ定式化されていないが、遊泳遡上する場合の突進速度 V_B については、魚の遊泳時間と遊泳フォームに依存することが Katopodis¹⁷⁾によって指摘され、定式化されている。しかし、突進速度 V_B は魚種、水温、体長、遊泳時間などに依存することが小山¹⁸⁾によって指摘されているため、いかなる条件でも Katopodis¹⁷⁾の式が使用できるとは言い難い。現在

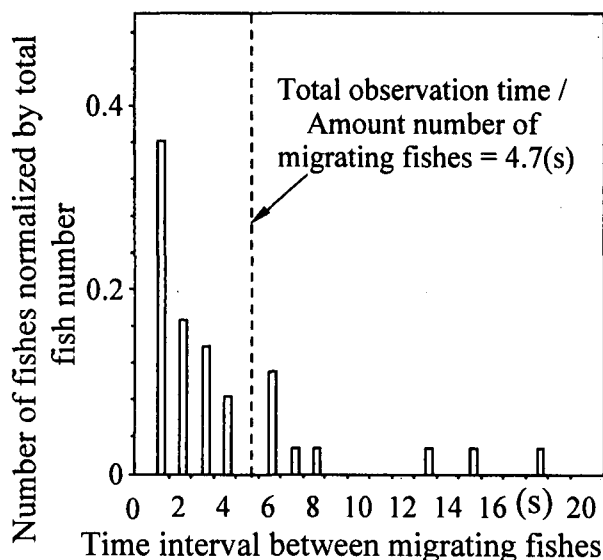


図-5 跳躍開始時間間隔と跳躍数との関係

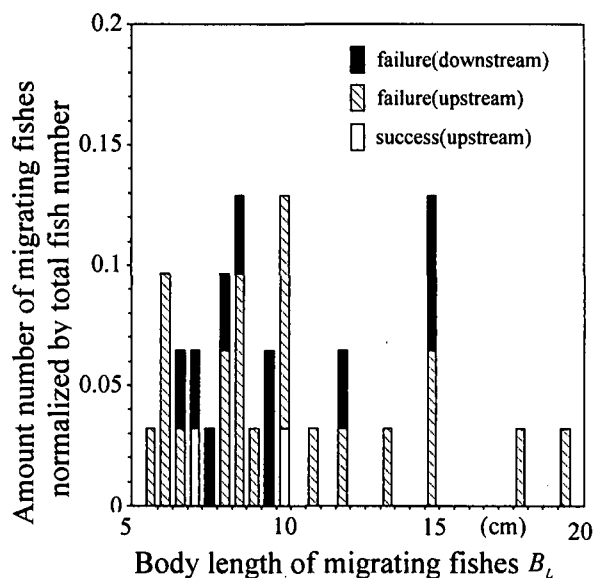


図-7 オイカワの体長と遡上結果との関係

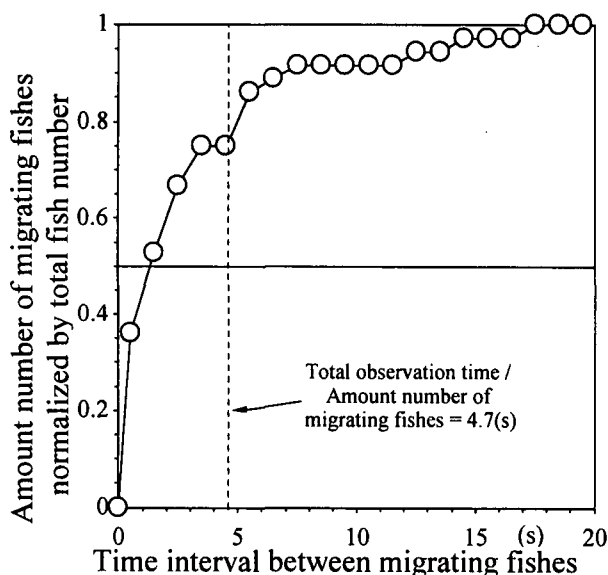


図-6 跳躍開始時間間隔と累積跳躍数との関係

のところ、魚の突進速度 V_{JB} は上述の様々なパラメータの影響を受けるものの、体長 B_L の 10 倍程度の速度が目安として用いられている²⁾。

$$V_{JB} = 10B_L \text{ (cm/s)} \quad (1)$$

今回観察されたオイカワの平均体長は 12cm であり、平均的な突進速度 V_{JB} は 120cm/s なので、 $V_{JB} / \sqrt{gh} = 0.63$ となる。図-3 より水路中央断面だけでなく、左岸側壁付近の断面においても落下流速がオイカワの突進速度を超えていることが観察される。そのため、オイカワは遊泳遡上を諦めて跳躍遡上に挑んだものと考えられる。

図-2 により、跳躍位置が下流になるに従って下流方向

に跳躍する割合が多くなっていることが観察された。オイカワの走流性および魚の遊泳に関する第 1 定理を考慮すると、跳躍方向は水面付近の瞬間的な流向の逆向きと考えられる。そこで、側壁付近の断面 ($z/B = 0.95$) における x 方向流速の逆流率¹⁹⁾ I_u を図-4 に示す。

$$I_u = \frac{1}{T} \int_0^T (i) dt \quad (\text{if } \tilde{u} < 0 \text{ then } i = 1 \text{ else } i = 0) \quad (2)$$

水面付近の値に着目すると、 $x/L < 0.5$ の範囲において下流方向に逆流率 I_u が増加していることが認められるため、この領域では下流に行くほど逆流になっている時間が長いといえる。したがって、跳躍する瞬間に逆流を認知するオイカワの割合が高くなるので、下流方向に跳躍したオイカワの割合が下流方向に高くなっていると考えられる。

3.2 跳躍遡上魚の追従性

魚が遊泳遡上する場合、ある魚が遊泳遡上に挑むと、周囲の魚もそれに誘発されて遡上を開始するといった追従性があることが、中村²⁾によって報告されている。しかし、跳躍遡上に関する特性は現在あまり解明されていない。

Observation-1 および Observation-2 の遡上開始時間間隔、すなわち、魚が水面から空気中に跳躍遡上を開始する時刻と次に魚が跳躍遡上を開始する時刻の差を 1s ごとの範囲でまとめ、それぞれの範囲における跳躍数を全跳躍数で割った頻度分布を図-5 に示す。同図には総撮影時間を遡上に挑んだ総尾数で割った時間(4.7s)を点線で示している。仮に、オイカワがランダムに遡上を開始しているのであれば、4.7s を中心とした正規分布となるはずである。図-5 より跳躍間隔が短いほど跳躍数が多く、オイカワはランダムに

跳躍を開始していないことが伺われる。図-6 に跳躍間隔と総尾数で無次元化された累積跳躍数の関係を示す。跳躍するオイカワの約 50%が前のオイカワの跳躍後 1s 強以内に跳躍している。また、オイカワがランダムに跳躍を行っている場合は 4.7s で 50%の無次元跳躍数となるはずであるが、観測値は 75%にも達している。これらのことから、少なくともオイカワに関しては、遊泳遡上する魚だけでなく、跳躍遡上する魚についても追従性があることが示唆された。

3.3 オイカワの体長と遡上率との関係

オイカワの体長 B_L を 0.5cm 刻みに分類し、オイカワの体長 B_L と遡上結果との関係を図-7 に示す。白い部分は上流方向に跳躍して遡上に成功したもの、斜線の部分は上流方向に跳躍したものの遡上に失敗したもの、黒い部分は下流方向に跳躍して遡上に失敗したものを表す。体長 B_L が 7cm 以下のオイカワは遡上に成功していないがそれ以上の体長のオイカワについては、体長 B_L と遡上の結果との間に明確な相関は認められない。体長が大きいほど年齢の高いオイカワであることを意味するが、跳躍方向は体長と相関がないので、跳躍方向に関してはオイカワの学習効果がないと考えられる。また、下流方向に跳躍した率が多いことから、オイカワは水中から予め着地点を目視で確認していないことが示唆される。

3.4 オイカワの体長と跳躍初速度との関係

魚の突進速度 V_{JB} については Katopdis¹⁷⁾の式および式(1)のようにある程度解明されているが、跳躍速度についてはほとんど解明されていない。跳躍速度は x , y , z 方向の成分で構成されるが、 x および z 方向の跳躍速度は跳躍中ほぼ一定であり、跳躍初速度と同様と考えられる。 y 方向の跳躍速度 $\tilde{v}_y$ については、重力の作用によって時々刻々変化するが、ここでは跳躍初速度の鉛直方向成分 $\tilde{v}_{y0}$ について議論する。図-8 にオイカワの体長 B_L と跳躍を開始する際の鉛直方向初速度 $\tilde{v}_{y0}$ との関係を示す。鉛直方向初速度 $\tilde{v}_{y0}$ はオイカワの体長 B_L に比例する傾向が認められる。両者の関係が第一近似として線形関係にあると仮定すると次式が求められる。

$$\tilde{v}_{y0} = 20B_L \text{ (cm/s)} \quad (3)$$

遡上が成功するかどうかは鉛直方向の移動距離だけでなく、水平方向の移動距離にも関係する。そこで、水平および鉛直方向速度によって構成される跳躍初速度 $\sqrt{\tilde{u}_{x0}^2 + \tilde{v}_{y0}^2}$ とオイカワの体長 B_L との関係を図-9 に示す。

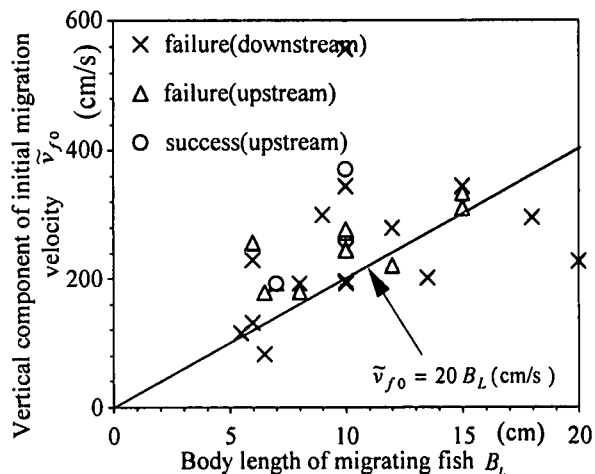


図-8 オイカワの体長と鉛直方向跳躍初速度との関係

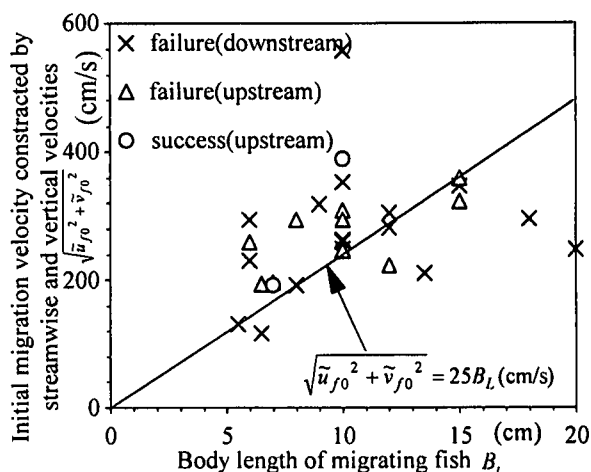


図-9 オイカワの体長と跳躍初速度との関係

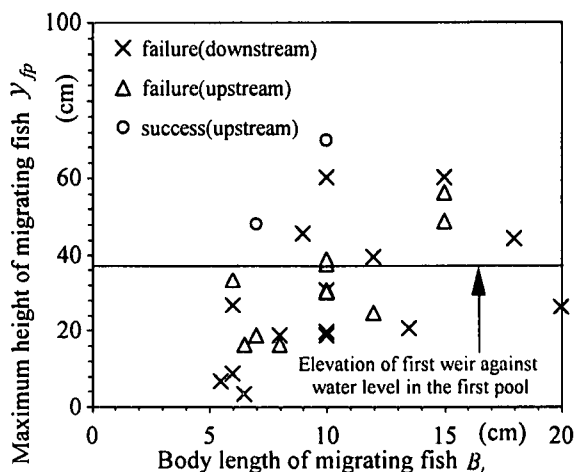


図-10 オイカワの体長と最高跳躍高との関係

す。跳躍初速度 $\sqrt{\tilde{u}_{x0}^2 + \tilde{v}_{y0}^2}$ と体長 B_L は比例関係にあるため、両者の関係を第1次近似として線形関係にあると仮定すると、次式が得られる。

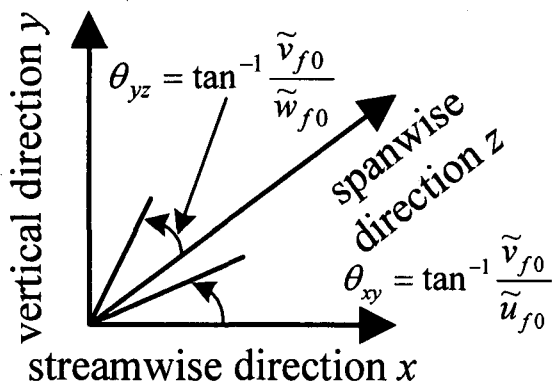


図-11 角度の定義

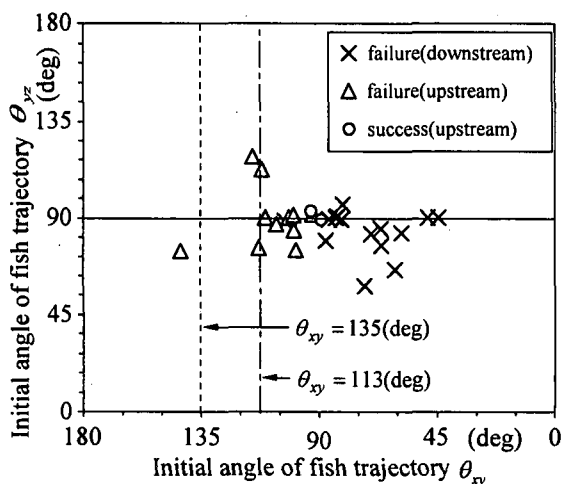


図-12 オイカワの跳躍方向

$$\sqrt{\tilde{u}_{f0}^2 + \tilde{v}_{f0}^2} = 25B_L \text{ (cm/s)} \quad (4)$$

図-8 および図-9 より鉛直方向跳躍初速度および跳躍初速度は体長 B_L に比例することが明らかとなった。

図-10 にオイカワの体長 B_L と最高跳躍高 y_{fp} との関係を示す。図中には、貯水位と第1プールとの水位落差 h を実線で示している。 $y_{fp} < h$ の場合は、当然遡上は不可能である。 $y_{fp} \geq h$ でなおかつ跳躍方向が上流側にもかかわらず、遡上に失敗しているのは、飛距離が足りずに第1隔壁の天端に到達できなかったためである。体長が 7cm 以下のオイカワのほとんどは跳躍高さが不足している。体長が小さいと遊泳力も小さいので、跳躍初速度が不足したものと考えられる。

3.5 オイカワの跳躍方向の特性

図-11 のように x 軸と y 軸とによって構成される角度を θ_{xy} 、 y 軸と z 軸によって構成される角度を θ_{yz} と定義する。図-12 に跳躍角度 θ_{xy} と θ_{yz} の関係を示す。多くのオイカワが直角上向きに近い角度で跳躍していることがわ

かる。オイカワは正の走流性があるため落下流に対して逆向きに跳躍遡上すると考えられる。図-3 より落下流が $\theta_{xy} = 6^\circ$ で流入しているので、正の走流性を考慮するとオイカワは $\theta_{xy} = 113^\circ$ 程度の角度で跳躍することになる。

実際に跳躍する位置は第1隔壁を越流した流れが第1プールに落下した位置ではなく、それより多少下流側のため、 $\theta_{xy} = 113^\circ$ 以下の角度で跳躍したものと考えられる。

また、角度 θ_{yz} に関しては 90° が最も効率よく跳躍遡上できる角度であるが、跳躍遡上に成功した2尾の角度 θ_{yz} はほぼ 90° であるのに対し、跳躍遡上に失敗した魚の θ_{yz} は 90° からかなり離れたものもある。落下流が第1プールに落下した水面付近では流れの方向がランダムに変動しているため、正の走流性のあるオイカワが誤った角度で跳躍したものと考えられる。

4. おわりに

水位落差が 0.37m あるプールタイプ魚道において、魚の遡上状況を観察した結果、遊泳遡上をする魚は全くおらず、すべての魚（全部オイカワ）が跳躍遡上に挑んでいた。この原因を探るために、デジタルビデオカメラを設置してオイカワの跳躍軌跡を撮影するとともに3次元電磁流速計を用いて流速計測を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 隔壁を越流して次のプールへと落下する落下流速よりも魚の突進速度が遅い場合、魚は遊泳遡上を諦めて、跳躍遡上に挑む。
- (2) 側壁付近では壁面摩擦のために落下流速は減速されるため、水路中央断面における落下流速より低速である。そのため、側壁付近での跳躍数が水路中央断面のものよりも多い。
- (3) 落下流が落下するとその周囲の流れの方向がランダムに変動するため、正の走流性のある魚はランダムな方向に跳躍する。
- (4) 跳躍初速度は魚の体長に比例し、オイカワの場合は体長の25倍程度の速度である。そのため、最高跳躍高も魚の体長に比例する。

謝辞：現地計測を行うに当たり便宜を図っていただいた国土交通省九州地方整備局遠賀川河川事務所に謝意を表す。九州工業大学名誉教授の浦 勝先生には研究の方針を左右する貴重なご提案を多数いただいた。現地計測に協力いただいた当時本学大学院生の藤井智也(日鉄鉦コンサルタント)、木田宜慶(日本鋼管)、山田弘明(大本組)、河東礼(九

州地方建設局)および当時本学学生の常松智博(本学大学院)の諸氏に謝意を表す。当時本学学部生の八木圭一(UMG)および播磨慎也の両氏には計測および解析に協力いただいた。また、貴重な文献をお送りいただいた日本大学の安田陽一助教授に謝意を表す。

参考文献

- 1) 廣瀬利雄・中村中六: 魚道の設計, 山海堂, pp.5-26, 1991.
- 2) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, pp.42-49, 1995.
- 3) 中村俊六: 魚道の設計, 水工学に関する夏期講習会, A-6-1~A-6-24, 1991.
- 4) Rajaratnam, N. and Katopodis, C.: Hydraulics of Denil fishways, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, pp.1219-1233, 1984.
- 5) 和田清, 東信行, 中村俊六: デニール式およびスティーブ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, 1998.
- 6) 辻本哲郎, 泉倫光, 山本貴章: ストリーム型魚道の流れの構造について, 水工学論文集, 第40巻, pp.731-736, 1996.
- 7) 中村俊六, 高島信博, 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.
- 8) 高橋信博, 中村俊六: 魚道内のアユの挙動に関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp.353-358, 1984.
- 9) 佐合純造, 本多卓志, 大木孝志, 田中直也: 太田原堰におけるアユの遡上実験報告, 水工学論文集, 第42巻, pp.493-498, 1998.
- 10) 桜井力, 柏井条介, 佐々木國隆, 岡崎克美, 進藤邦雄, 岡本俊策: コンクリートブロックを用いた粗石式魚道の水理特性および遡上特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.1197-1202, 2000.
- 11) 房前和朋, 島谷幸宏, 萱場祐一, 傳田正利: 礫河床における魚道の遊泳速度に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp.1117-1122, 1997.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 安田陽一, 大津岩夫, 三矢泰彦, 浜野龍夫: 長崎県河通川におけるエビ・カニの遡上に配慮した魚道の効果, 河川技術論文集, 第8巻, pp.343-348, 2002.
- 15) 浦 勝, 山口秀和, 鬼束幸樹, 秋山壽一郎: 水位落差の大きな魚道の流況改善について, 水工学論文集, 第47巻, pp.769-774, 2003.
- 16) ドイツ水資源・農業土木協会(中村俊六訳): 多自然型魚道マニュアル, 山海堂, pp.72-811, 1998.
- 17) Katopodis, C.: Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants, *International Conference of Fishway 90 in Gifu*, 1990.
- 18) 小山長雄: アユの生態, 中公新書 505, 中央公論社, 1978.
- 19) Nezu, I. & Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.

(2003年4月18日受付)