

水位落差の大きな階段式魚道に設置された スロープが遡上率に及ぼす効果

EFFECTS OF SLOPE ATTACHED TO WEIR ON MIGRATION RATE IN POOL- AND-WEIR FISHWAY

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・浦 勝³

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA and Masaru URA

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

²正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

³正会員 工博 九州工業大学名誉教授

A slope with 45 degree against a horizontal line was attached on the first weir in a pool-and-weir fishway, which is located beside of a large weir in the Onga River, to allow fishes migration. The observation of migrating fishes at the fishway with a digital video camera and velocity measurements with a 3-D electromagnetic current meter were carried out after the improvement. It was found that the migration rate near the side wall is larger than that at the central region of the fishway, because instantaneous velocity near the side wall is smaller than that at the central region of the fishway, irrespective of that the time averaged velocity of both regions are almost same and also the eddy scale around the fish is larger than the body length of the migrating fishes.

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

1. はじめに

堰が河川に設置されると、その上下流の水位が不連続となるため、水生生物の河川縦断方向の移動が困難となる。特に回遊魚には河川縦断方向の移動が種の存続を決定づけるため、これを可能とすることは河川生態系のバランスを保つことにもつながる。堰によって生じた水位落差をなめらかに接続あるいは水位落差を分割し、魚の遡上および降下を助けるものが魚道である。

魚道は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⁾。さらにプールタイプは、階段式、バーチカルスロット式および潜孔式に分類される。階段式の代表例として、全面越流型、部分越流型、アイスハーバー型、ノルウェー型などが挙げられる。近年、ストリームタイプの一種である標準デニール式やスティープパス式など様々な魚道が提案され²⁻⁴⁾、実際に施工された例も存在するが、我が国の既設魚道の多くは階段式魚道である。そのため、階段式魚道の水理特性と魚の遡上特性との関係が精力的に研究されている⁵⁻⁷⁾。

Rajaratnam *et al.*⁸⁾は階段式魚道における流れのパター

ンがplunging flowとstreaming flowの2種類あることを指摘した。前者では、落下流がプールに落下した後に下流側隔壁の底面付近まで到達し、下流側隔壁に流れがぶつかすることで流向を上方に変えて、さらに、水面付近に到達した流れの一部が上流方向へと戻っていく。後者では、隔壁を越流した流れがそのまま水面付近を流下して次の隔壁上を流れていく。両パターンで流れで形成される渦の回転方向が異なる。Rajaratnam *et al.*⁸⁾は幾何学形状および水理条件によって流れのパターンが変化することを実験的に解明し、前野ら⁹⁾および前野・小川¹⁰⁾はこれに関する数値解析を行い、流れの再現に成功した。高須ら¹¹⁾はstreaming flowよりもplunging flowの方が魚の遡上が期待できると述べている。

高橋・中村⁶⁾は潜孔付き階段式魚道において、隔壁を越流して次のプールへと落下する水脈中を游泳遡上するアユの遡上経路を観察し、側壁付近における遡上数が隔壁中央付近における遡上数よりも高いことを発見したが、原因の特定には至っていない。佐合ら¹²⁾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。彼らはこの原因を示すことはできなかったが、桜井ら¹³⁾は底面がフラットおよび粗石付き階段式魚道において、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における時間平均流速は、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指摘した。房前ら¹⁴⁾は、矩形断面開水路流における魚の遡上経路を観察すると共に3次元電磁流速計を用いて横断面内の流速を測定し、水路隅角部を魚が遡上する頻度が高いことを発見した。この理由として隅角部付近の時間平均流速が他の領域よりも低速であることを挙げている。以上のように、魚が遡上経路を選択する場合、平均流速が低い領域を優先的に選択することが指摘されている。

魚道を議論する上で、魚の遊泳特性をふまえることは必要不可欠である。中村¹⁾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、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、第3定理は「魚の尾の振り幅は体長の1/2を越えない」である。また、魚の突進速度 V_{fb} は体長 B_L の10倍程度と知られている。

$$V_{fb} = 10B_L \quad (1)$$

Ura *et al.*¹⁵⁾は中村の定義した魚の遊泳に関する定理および既往の研究を参照し、階段式魚道において魚の遡上を容易にするためには、次の4つの条件を満たすことが必要であると述べている。①プールに落下する流速が魚の突進速度より小さいこと、②隣接するプール間の水位差が0.15m以下であること、③プール内の流れがplunging flowに属していること、④落下流の落下点付近における瞬間流速は、流下方向かつ鉛直下向きであること。

浦ら¹⁶⁾は北部九州を流れる一級河川に設置された階段式魚道において、魚が遊泳遡上を全くせずに跳躍遡上に挑んでいる状況を現地調査し、上述の①～④の内、①、③および④の条件を満たすものの、②を満たしていないために魚が遊泳遡上を諦め、跳躍遡上に挑んでいることおよび跳躍遡上率が極めて低いことを指摘した。残念ながらこの魚道は②を改善することが容易ではない。そこで浦らは、②を満たさない条件下で魚の遡上を可能にする簡易改善案を室内実験に基づき検討した。その結果、隔壁上に傾斜角45°のスロープを設置することを提案した。本研究は浦らが提案したスロープを現地魚道に実際に施工し、その効果を検討したものである。

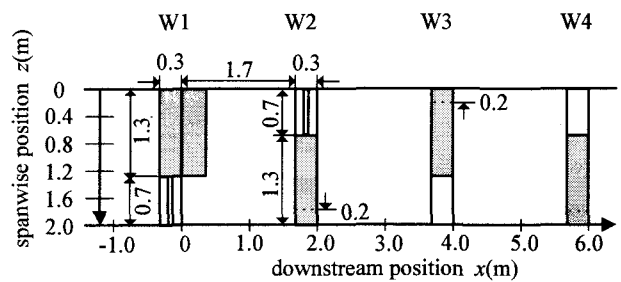


図-1(a) 対象魚道の平面図(貯水池から第3プールまで)

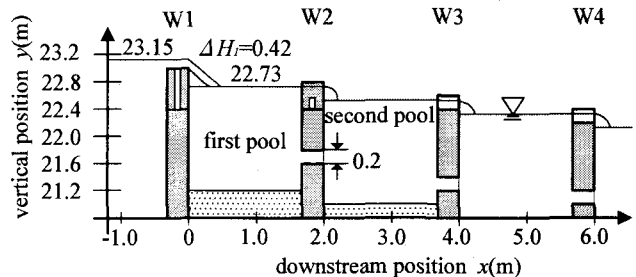


図-1(b) 対象魚道の側面図(貯水池から第3プールまで)

2. 対象魚道におけるスロープの設置と計測

(1) 対象魚道の状態とスロープの設置

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、階段式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図を図-1に示す。第1プール始点から流下方向に x 軸を、第1プールの底面から鉛直上向きに y 軸を、プール左岸側から右岸方向に z 軸をとり、プール長を L 、プール幅を B 、プール水深を 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。ただし、第1隔壁および第2隔壁にはそれぞれ0.6mおよび0.4mの角落としが挿入されているので、結果として第1隔壁は天端高が23.0mの全面越流型階段式魚道となっている。第1隔壁を除く全ての隔壁には切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 upstream 側の貯水位が23.0mになるように、また、出水時には貯水位が23.1mとなるように可動堰が操作される。平水時には第1隔壁の天端高(23.0m)と貯水位

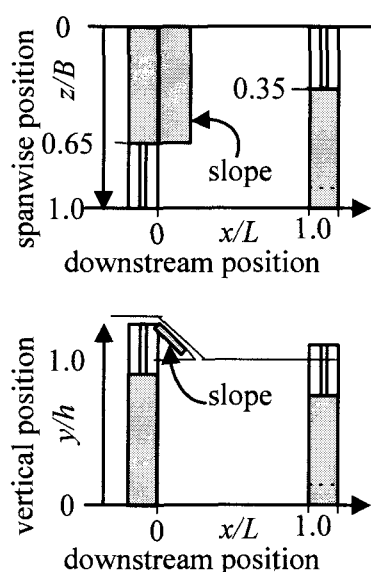


図-2 対象魚道の第1プール

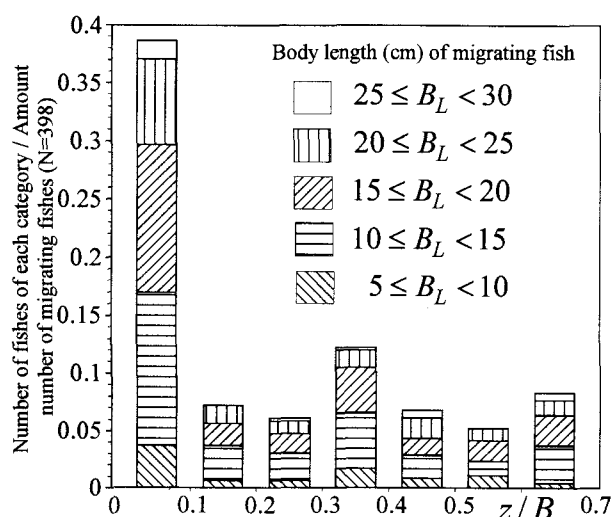


図-3 第1隔壁における遡上場所と遡上数

(23.0m)とが一致しているため魚道へ流入する流量がほとんどなく、出水時のみに魚道に水が流入する状態となっている。ただし、出水時に貯水位が23.1mとなり第1プールに水が流入している場合でも、浦ら¹⁶⁾による平成12年6月2日の観測では貯水位と第1プールとの水位落差 ΔH_1 が0.37mもあるために魚の遡上がほとんど不可能となっていた。この魚道は第2隔壁以下での遡上は容易であるが、第1隔壁での遡上が困難なため、ここがボトルネックになっている。そこで、浦ら¹⁶⁾の提案したスロープを第1隔壁に平成14年10月22日に著者らが取り付け、第1プール付近の模式図を図-2に示す。スロープは長さ0.56m、幅0.7m、厚さ0.01mであり、 x 軸と y 軸とで構成される角度 θ_{xy} が 45° になるように切欠き部($0.65 < z/B < 1.0$)を除く領域($0 < z/B < 0.65$)に設置されている。

(2) 現地計測

平成15年7月7日における貯水位は23.15mで、越流水深 H_0 は0.15m($=23.15\text{m}-23.0\text{m}$)であり、貯水位と第1プールとの水位落差 ΔH_1 は0.42mであった。この日の天候は晴れで、日中気温は $24^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 、水温は 22°C 、日照時間は2.5時間であった。デジタルビデオカメラを用いた遡上観測と電磁流速計を用いた流速測定を行った。なお、第1プールに落下する水流によって気泡が発生していたが、水面付近で挙動するだけでそれほど水中まで気泡が進入していなかった。同じ幾何学形状の魚道でもスケールの大小で気泡の有無が決定されることが考えられるが、本魚道のスケールは一般的な魚道のものであり、同様なスケールの魚道では同様に気泡が発生すると考えられる。

第1隔壁の上方にデジタルビデオカメラを設置して約93分間遡上状況を録画した。録画後にビデオをコマ送りすることで、第1隔壁上の $x=0$ を遡上する魚種、魚の遡上数、横断方向位置を解析した。

3次元電磁流速計を用いて第1プール内において、 x 方向に4点、 y 方向に5点、 z 方向に4点の格子点である80点において流速3成分を計測した。計測間隔、計測時間はそれぞれ0.1sおよび40.96sとした。なお、 x 、 y 、 z 軸方向の瞬間流速を $\vec{u} \equiv U + u$ 、 $\vec{v} \equiv V + v$ 、 $\vec{w} \equiv W + w$ 、時間平均流速を U 、 V 、 W 、変動成分を u 、 v 、 w 、乱れ強度を u' 、 v' 、 w' とした。このプローブの検出部は直径が約14mmの球形であるが、プールのスケールと比較すると1/100程度であり、検出部による流れのかく乱は、室内実験と同程度と考えられる。

3. 計測結果および考察

(1) 遡上数および遡上位置

遡上に挑んだ魚数は458で遡上に成功した魚数 N は398であり、遡上率(=遡上に成功した魚数/遡上に挑んだ魚数)は87%に達する。浦ら¹⁶⁾および鬼束ら¹⁷⁾は、スロープを設置する前では跳躍遡上の遡上率が7%であることを報告しており、スロープ設置による飛躍的な遡上率の向上が証明された。なお、遡上率については、遡上に成功した魚数を第1プールに遡上してきた魚数で割る方法も考えられるが、現実的に第1プールに遡上してきた魚数をカウントすることが極めて困難なことや、現地観測に要した9時間の間、第1プールの水面付近でしばしば目撃される魚数がほとんど変化しなかったことから、第1プールで遡上を待機する魚数はそれほど変化しないと判断され、上述の2つの定義から算出される遡上率は本測定ではほぼ同様と考えられる。

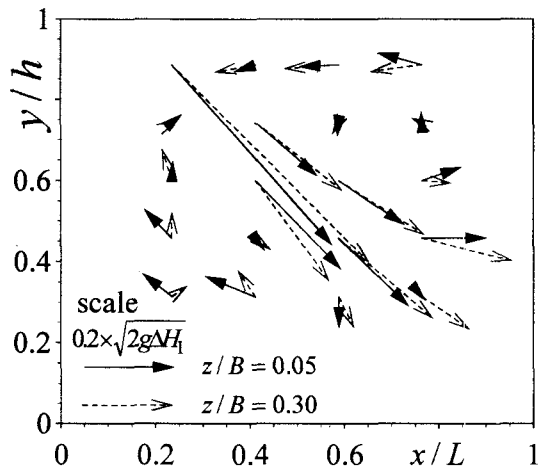


図-4 第1プールにおける時間平均流速ベクトル

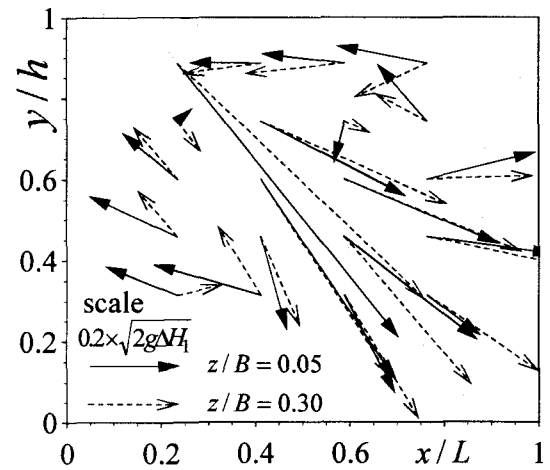


図-5 第1プールにおける最大流速ベクトル

主な遡上魚はフナ(10~30cm), オイカワあるいはアユ(8~20cm), ヨシノボリ(10cm程度)であり, 体長 B_L が8cmから30cmの魚が遡上に成功した. 図-3に各体長 B_L の遡上数の横断方向変化を示す. いずれの体長の魚についても, 左岸側壁付近での遡上数が極めて多い. 高橋・中村⁶⁾もアユを対象とした研究で同様な報告をしているが, 原因については言及していない. 一方, 粗石付き魚道を観測した佐合ら¹²⁾, 桜井ら¹³⁾の研究結果や矩形断面水路において魚の遡上位置を観測した房前ら¹⁴⁾の研究結果から, 魚は低流速領域を選択的に遡上することが示唆されている.

(2) プール内の流速分布

図-4に $\sqrt{2g\Delta H_1}$ で無次元化した $z/B=0.05, 0.3$ における時間平均流速ベクトル(U, V)をそれぞれ実線および点線で示す. 速度 $\sqrt{2g\Delta H_1}$ は貯水位における接近流速水頭をゼロと近似したときの第1プールへの落下流速を表す. 両者ともplunging flowの形態に属していることがわかる. したがって, Ura *et al.*¹⁵⁾の提唱した条件③を満たす. 落下流の影響を最も受ける $x/L=0.24$, $y/h=0.89$ の点に着目すると, 左岸側壁付近の断面($z/B=0.05$)における落下流速は1.62m/sで, スロープ中央付近の断面($z/B=0.3$)における落下流速は1.87m/sである. 既往の研究によれば, 式(1)を利用すると $z/B=0.05$ および0.30の断面ではそれぞれ体長が16cmおよび19cm以下の魚が遡上不可能という結論に達する. しかし, 図-3に示したように16cm以下の魚が遡上に成功しており, 8~16cmの体長を有する魚の遡上を説明できない. 一方, 図-3より $z/B=0.05$ 付近の断面の遡上数が0.30付近の断面の遡上数より遙かに多いが, 両断面の落下流速の差は1割程度であり, この流速差によって魚の遡上数

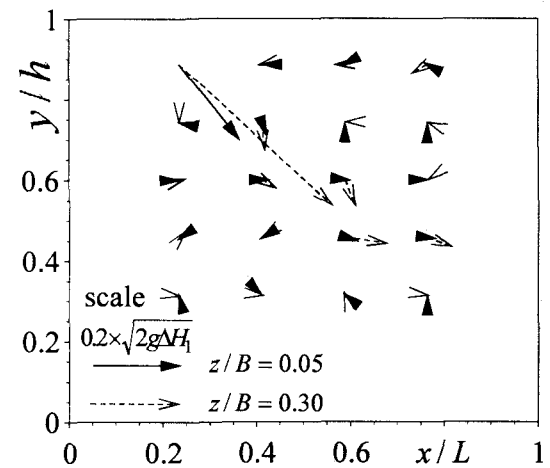


図-6 第1プールにおける最小流速ベクトル

の相違を説明するのはいささか無理がある. 以上のことから, 既往の研究¹⁾のような時間平均流速に基づく考察では魚の遡上を十分に説明することは困難と考えられる.

そもそも魚は時間平均流速を認識しているとは考えにくく, むしろ瞬間的な流速を感じているものと考えられる. そこで, $\tilde{u}, \tilde{v}$ で構成される流速 $\tilde{s} \equiv \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}$ について, 最大流速 $S_{\max}$ および最小流速 $S_{\min}$ を以下のように定義した.

$$S_{\max} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T (\tilde{s} \times i) dt \{ \text{if } \tilde{s} > (S + 2s') \text{ then } i = 1 \text{ else } i = 0 \} \quad (2)$$

$$S_{\min} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T (\tilde{s} \times i) dt \{ \text{if } \tilde{s} < (S - 2s') \text{ then } i = 1 \text{ else } i = 0 \} \quad (3)$$

両定義において標準偏差 s' (乱れ強度)の2倍をしきい値とした理由は, しきい値を大きくした場合, データ数が極めて少なくなり信頼性が低下するからである. なお, 最大流速および最小流速の算出で用いられるデータ数は, それぞれ総データ数の約2.5%であり, 十分なデータ数とはいえないが, データのヒストグラムは正規分布に近い分布をしていた. 図-5および図-6に $\sqrt{2g\Delta H_1}$ で無次元化した $z/B=0.05, 0.3$ における最大流速 $S_{\max}$ および最小

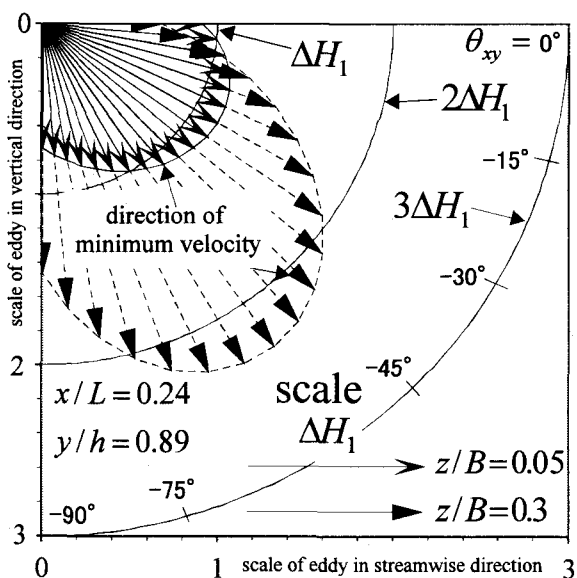


図-7 落下流の落下点付近における平均渦スケール

流速 $S_{\min}$ をそれぞれ実線および点線で示す。両者とも流速ベクトルが第4象限に属しているため、Ura *et al.*¹⁵⁾の条件④を満たす。 $x/L=0.2$, $y/h=0.89$ の断面における最大流速 $S_{\max}$ は、 $z/B=0.05$ では約2.35m/s, $z/B=0.3$ では約2.24m/sとなっている。式(1)を利用すると、最大流速発生時に突進速度が上回る魚は体長 B_L が約23cm以上となる。一方、 $x/L=0.24$, $y/h=0.89$ の断面における最小流速 $S_{\min}$ は、 $z/B=0.05$ では約0.65m/s, $z/B=0.3$ では約1.37m/sとなっており、時間平均流速は両断面で1割程度しか差がないが、式(3)で定義される最小流速は5割もの差が生じている。式(1)より最小流速発生時ににおいて、 $z/B=0.05$ の断面では体長6.5cm以上、 $z/B=0.3$ の断面では体長13.7cm以上の魚の突進速度が落下流速を上回ることがわかる。

(3) 渦スケール

$z/B=0.05$ の断面では最小流速が0.65m/sとなることが示されたが、中村¹⁾の定義した魚の遊泳に関する第1定理を考慮すると、落下流の瞬間流速が魚の突進速度を下回るだけでなく、瞬間流の渦スケールが魚の体長スケール以下の必要がある。現在のところ、式(3)で定義される最小流速の渦スケールを算出する方法は確立されていない。そこで、平均渦スケールを算出して最小流速の渦スケールを概算する。 x 軸と y 軸とによって構成される θ_{xy} 軸方向の瞬間流速を $\tilde{u}_{xy} \equiv U_{xy} + u_{xy}$ と定義する。

$$\tilde{u}_{xy} = \tilde{u} \sin \theta_{xy} + \tilde{v} \cos \theta_{xy} \quad (4)$$

すると、 θ_{xy} 軸方向の平均渦の長さスケール L_{xy} は次式で表される。

$$L_{xy} \equiv U_{xy} \int R(\tau) d\tau \quad (5)$$

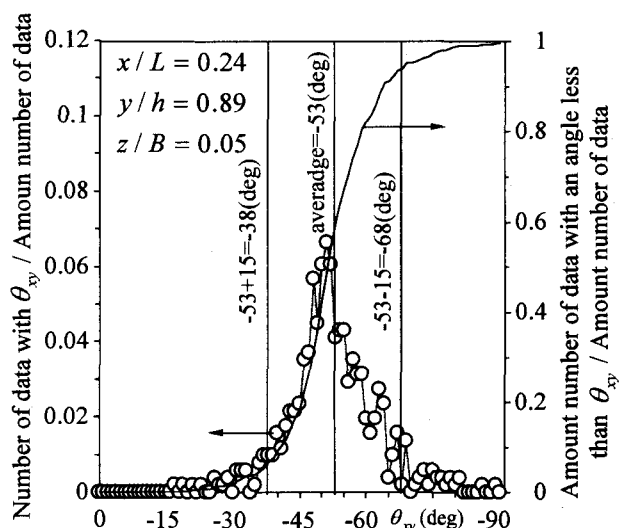


図-8(a) 落下流の落下点付近における瞬間流速の流向 ($z/B=0.05$)

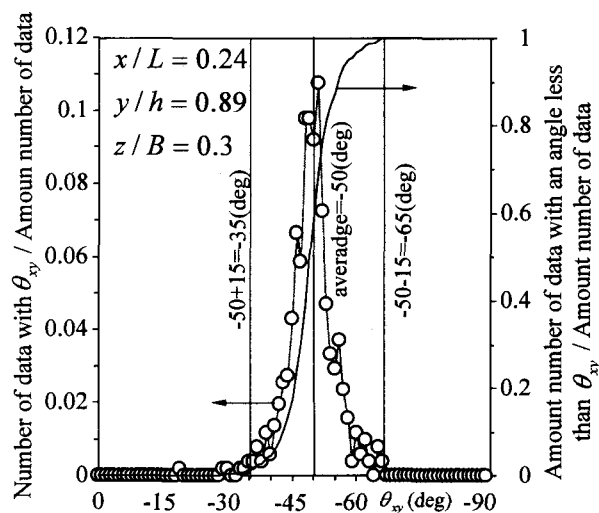


図-8(b) 落下流の落下点付近における瞬間流速の流向 ($z/B=0.30$)

$$R(\tau) \equiv \frac{\overline{u_{xy}(t_0) \times u_{xy}(t_0 + \tau)}}{u_{xy}^2} \quad (6)$$

ここに、 $R(\tau)$ は自己相関係数、 t_0 は基準時間、 τ は遅れ時間、 u_{xy}' は変動成分 u_{xy} の乱れ強度である。図-7に $x/L=0.24$, $y/h=0.89$ の断面における θ_{xy} 軸方向の平均渦スケール L_{xy} を示す。 L_{xy} は水位落差 ΔH_1 で基準化されている。 $z/B=0.05$ および 0.30 の点において、最小流速 $S_{\min}$ の方向における平均渦スケール L_{xy} はそれぞれ $1.08 \Delta H_1$, $2.20 \Delta H_1$ となっている。ここで、平均渦スケールと最小流速の渦スケールがそれぞれの移流速度に依存すると仮定すると、最小流速の渦スケール ℓ_{xy} は次式で算出される。

$$\ell_{xy} = L_{xy} \times S_{\min} / \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

すると、 $x/L=0.24$, $y/h=0.89$ の断面における $z/B=0.05$ および 0.30 の点での最小流速の渦スケールは

それぞれ、18.2cm、67.7cmと算出される。すなわち、これらの長さ以下の体長の魚は、全身で最小流速を感じることができる。したがって、 $z/B=0.05$ の断面において最小流速が発生した瞬間に体長が6.5cm以上の魚に対しUra *et al.*の条件①を満たすので、遡上に挑んだものと推察される。なお、以上の最小渦スケールの計算では、式(7)の仮定を用いているので、厳密なスケールを示していないが、魚の遡上と渦スケールとの関係を探る新たな試みといえる。

(4) 遡上可能角度

これまで最小流速発生時における遡上の可能性について議論し、Ura *et al.*¹⁵⁾の条件①、③および④を満たすことを証明した。ただし、魚は必ずしも最小流速発生時に遡上するとは限らず、本来すべての瞬間流況に対してUra *et al.*の条件を吟味する必要がある。まず、目視により流れが常にplunging flowに属していることを確認したため、条件③は常に満たすといえる。①については、既に考察を述べた。よってここでは、④について議論する。

図-8に $x/L=0.24$ 、 $y/h=0.89$ の断面における $z/B=0.05$ および0.30の点での瞬間流速の流向 θ_{xy} の1度ごとの頻度分布およびその累積率を示す。魚の遡上可能な流向の範囲は現在不明であるが、高橋・中村⁵⁾の図示した階段式魚道におけるアユの遡上開始角度は平均遡上角度から $\pm 15^\circ$ 程度の範囲があるため、この範囲を遡上可能角度と仮定する。すると、図-8(a)の $z/B=0.05$ では $-53^\circ \pm 15^\circ$ 、図-8(b)の $z/B=0.30$ では $-50^\circ \pm 15^\circ$ が遡上可能な流向と判断される。これらの流れの状態が発生する頻度は、図-8の累積率よりそれぞれ87.2%および96.3%となるため、多くの魚が遡上可能と推察される。

4. おわりに

ある一級河川の階段式魚道において、浦ら¹⁶⁾の提案したスロープを設置し、遡上状況をデジタルビデオカメラで撮影すると共に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) 階段式魚道において魚の遡上に必要な条件は①プールに落下する流速が魚の突進速度より小さいこと、②隣接するプール間の水位差が0.15m以下であること、③プール内の流れがplunging flowに属していること、④落下流の落下点付近における瞬間流速は、流下方向かつ鉛直下向きあること、であるが、浦らの提案した 45° のスロープを取り付けることで②の条件を満たさなくても魚の遡上が可能となることが示された。

(2) 既往の研究では、魚の遡上に必要な条件として、落下流の時間平均流速が魚の突進速度よりも低速であることとされていたが、落下流の瞬間流速が魚の突進速度よ

りも低速かつ渦スケールが魚の体長よりも大きければ、このとき魚は突進速度以下の流速を全身で感じるため、魚の遡上が可能であることが示唆された。これは、時間平均流速のみを取り扱った魚道の設計が必ずしも適しているとは限らず、瞬間的な流況を考慮する必要がある場合もあることを表している。

(3) 浦らの提案したスロープを階段式魚道の隔壁に設置することで落下流の角度が安定するので、走流性のある魚は遡上方向が適切になるために遡上率が向上することが認められた。

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遠賀川河川事務所に謝意を表す。本学大学院生の常松智博、伊瀬知栄人および本学学部生の木内大介、武田雅俊、松本和也の諸氏には現地計測に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp.42-49，1995.
- 2) Rajaratnam, N. and Katopodis, C.: Hydraulics of Denil fishways, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, pp.1219-1233, 1984.
- 3) 和田清，東信行，中村俊六，水工学論文集，第42巻，pp.499-504，1998.
- 4) 辻本哲郎，泉倫光，山本貴章，水工学論文集，第40巻，pp.731-736，1996.
- 5) 中村俊六，高島信博，木村博，第31回水理講演会論文集，pp.783-788，1987.
- 6) 高橋信博，中村俊六，第28回水理講演会論文集，pp.353-358，1984.
- 7) 安田陽一，大津岩夫，三矢泰彦，浜野龍夫，河川技術論文集，第8巻，pp.343-348，2002.
- 8) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A., *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988.
- 9) 前野詩朗，尾上博則，宮内洋介，水工学論文集，第45巻，pp.421-426，2001.
- 10) 前野詩朗，小川信，水工学論文集，第46巻，pp.421-426，2002.
- 11) 高須修二，箱石憲昭，村岡敬子，田中和浩，尾寄佳史，水工学論文集，第38巻，pp.351-356，1994.
- 12) 佐合純造，本多卓志，大木孝志，田中直也，水工学論文集，第42巻，pp.493-498，1998.
- 13) 桜井力，柏井条介，佐々木國隆，岡崎克美，進藤邦雄，岡本俊策，水工学論文集，第44巻，pp.1197-1202，2000.
- 14) 房前和朋，島谷幸宏，萱場祐一，傳田正利，水工学論文集，第41巻，pp.1117-1122，1997.
- 15) Ura, M., Onitsuka, K., Akiyama, J. and Yamaguchi, H., *30th Congress of IAHR, Greece, Theme D*, pp.895-902, 2003.
- 16) 浦 勝，山口秀和，鬼束幸樹，秋山壽一郎，水工学論文集，第47巻，pp.769-774，2003.
- 17) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山口秀和，応用力学論文集，Vol.6，pp.983-990，2003.

(2003. 9. 30受付)