

片側切り欠き付き階段式魚道におけるアスペクト比および流量が 魚の遡上特性に及ぼす影響

Effects of aspect ratio and discharge on fish migration characteristics in pool-and-weir fishway with one-sided notch

鬼束幸樹*・秋山壽一郎**・飯國洋平***・木内大介****・高橋康行*****

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yohei IIGUNI, Daisuke KIUCHI and Yasuyuki TAKAHASHI

*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)

**Ph.D 九州工業大学教授, 工学部建設社会工学科

***学 (工) 九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻

****修 (工) 東亜建設工業 (〒102-8451 東京都千代田区四番町 5)

*****学 (工) 西条市役所 (〒793-8601 愛媛県西条市明屋敷 164)

Fishways are the river constructions which give fish a help of migration. Although a lot of types of fishway are suggested, most of fishways installed in Japanese rivers belong to the pool-and-weir fishway with alternate notch type. Recently, Nakamura pointed out that the migration rate in the pool-and-weir fishway with one-sided notch is high in comparison with that in the pool-and-weir fishway with alternate notch. However, characteristics of fish migration in pool-and-weir fishway have not been investigated, so that the design of pool-and-weir fishway is quite difficult. In this study, the trajectories of migrating fish were recorded with two sets of digital video cameras and also velocity measurements were conducted in the pool-and-weir fishway with one-sided notch, with changing both of aspect ratio (=pool length / flow depth) and flow discharge.

Key Words: pool-and-weir fishway, one-sided notch, aspect ratio, migration

1. はじめに

治水および利水目的でダムや堰が河川に設置されているが、これらの構造物は河川水位を縦断方向に分断するため、魚類等の河川縦断方向の移動が阻害される。特に、アユやヨシノボリのような通し回遊魚にとって、こうしたハビタットの分断は種の絶滅をも意味する。そこで、分断された水位を滑らかに接続あるいは落差を小さく分割し、魚の遡上および降下が可能になるように魚道が設置される。

魚道は水理構造の違いからプールタイプ、ストリームタイプ、オペレーションタイプ等に分類され、中でもプールタイプは階段式、バーチカルスロット式、潜孔式に分類される。さらに、階段式は全面越流型、部分越流型、アイスハーバー型、ノルウェー型に分類される¹⁾。このように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全面越流型の一つである交互切り欠き付き階段式魚道である。この魚道は、プールと隔壁で構成されるが、隔壁

上部の一部を切り欠きとし、流下方向に連続的に配置された隔壁の切り欠き位置を右岸側および左岸側に交互に配置している。

魚の遡上に影響を与えるものとして、隔壁形状、流量、アスペクト比(プール長/水深)、切り欠きの有無とその位置などが挙げられる²⁾。Wada³⁾は切り欠きのカット角を様々に変化させ、魚の遡上率を調査した。その結果、切り欠きのカット角を 45° 程度とした場合が最も遡上率が高くなることを示した。ダム水源地環境整備センター²⁾はさらに角を滑らかにカットした R 型を推奨している。高嶋・中村⁴⁾および中村ら⁵⁾は、交互切り欠き付き階段式魚道を実験室に作成し、アユを放流して遡上状況をビデオ撮影するとともに、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、切り欠きからプール内に落下する流れを避けながら遡上していることを述べた。ただし、彼らの実験では流量やアスペクト比を固定しており、彼らの得た結論が他の条件でも成立するかどうか

か不明である。林田ら⁹⁾は階段式魚道のアスペクト比を系統的に変化させて、プール内のウグイの挙動を観察した。その結果、プール内で休憩場所が多い方が遡上数が増加することを示した。ただし、彼らの対象とした魚道の隔壁には切り欠きがついていない。2005年3月に国土交通省河川局⁷⁾が公表した「魚がのぼりやすい川づくりの手引き」によると、水路幅の17～20%程度の切り欠きを設けることが推奨されている。切り欠きがある場合とない場合とでは、プール内の流況が劇的に異なるため、林田ら⁹⁾の知見が片側切り欠き付き魚道でも常に成立するとは考えにくい。

上記のように、切り欠きのない、あるいは交互切り欠き付き階段式魚道における遡上特性については幾分研究がなされている。しかし、中村¹⁾は切り欠きは交互切り欠きよりも片側切り欠きの方が望ましいと述べている。ところが、これを実証した研究はほとんどない上、片側切り欠き付き階段式魚道において、流量およびアスペクト比を系統的に変化させ、遡上特性に及ぼす影響を検討したものは皆無といっている。本研究は、片側切り欠き付き階段式魚道において、流量およびアスペクト比を系統的に変化させ、流速測定を行うとともに魚の挙動の撮影を行い、水理特性と魚の遡上特性との関係を検討したものである。

2. 実験条件および実験装置

実験に用いた階段式魚道は長さ L_x が0.4m、幅 B が0.4m、高さ L_y が0.4mの亚克力製プールを5つ連結させたもので、平均傾斜角度は1/12である。図-1に模式図($x-y$ 平面)を示す。階段式魚道において魚の遡上に影響を与えるものとして、水位落差、粗度の有無、アスペクト比、隔壁形状および切り欠き位置などが挙げられる²⁾。本実験では、流量 Q を0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4 ℓ/s と系統的に変化させ、さらにプール水深を変えることによってアスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta y)$ を0.67, 1.0, 2.0, 3.0と4段階に変化させ、その他の諸量はほぼ固定した。ここに、 Δy は越流水深である。切り欠きの形状はWada³⁾の推奨する傾斜角 60° のR型にし、切り欠き率は国土交通省河川局⁷⁾が推奨する0.17～0.2の範囲内にある0.2を採用した。切り欠き位置は、片側切り欠き(one-sided notch)と交互切り欠き(alternate notch)の2種類があるが、片側切り欠きを用いた。ここに、 x は流下方向、 y は鉛直上向き、 z は横断方向の座標である。

それぞれの実験条件を表-1に示す。末尾の数字はアスペクト比を意味しており、アスペクト比が0.67, 1.0, 2.0, 3.0の時は、それぞれ07, 10, 20, 30と表記する。なお、1回の遡上実験に用いた時間は約20分で、実験終了後は

表-1 実験条件

$Q(\ell/s)$	2.4	2.0	1.6	1.2	0.8
Aspect0.67	Q2.4one07	Q2.0one07	Q1.6one07	Q1.2one07	Q0.8one07
Aspect1	Q2.4one10	Q2.0one10	Q1.6one10	Q1.2one10	Q0.8one10
Aspect2	Q2.4one20	Q2.0one20	Q1.6one20	Q1.2one20	Q0.8one20
Aspect3	Q2.4one30	Q2.0one30	Q1.6one30	Q1.2one30	Q0.8one30

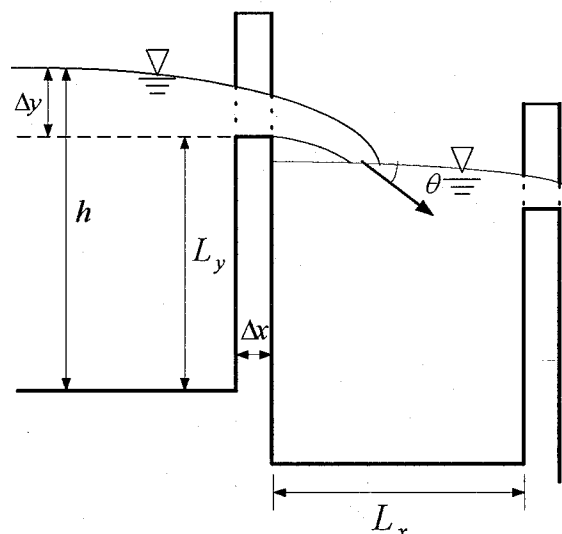


図-1 模式図($x-y$ 平面)

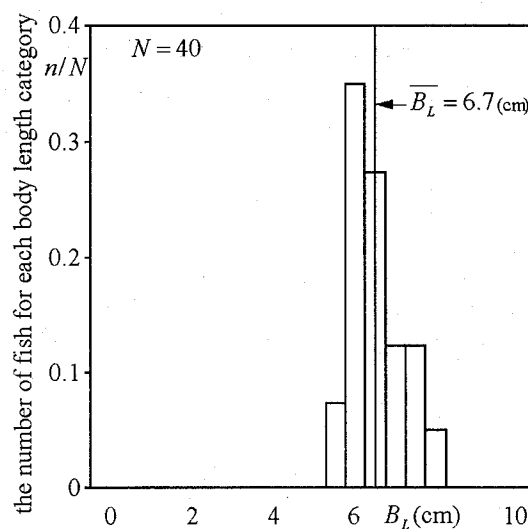


図-2 体長のヒストグラム

魚を数時間休憩させて次の実験を行った。実験魚にはアユを用いることを試みたが、長期間の飼育が困難なためアユを用いた実験を断念し、今回は純淡水魚であるオイカワを用いた。図-2に実験に用いたオイカワの成魚40匹の体長 B_L をヒストグラムで示した。体長の平均値 $\overline{B_L}$ は約6.7cmであること、体長のばらつきがそれほどないことが

理解される。

前野・小川⁸⁾はVOF法を用いて切り欠きのない全面越流型階段式魚道の数値計算を行い、上流から3番目以降のプール内流況が一定となることを明らかにした。そこで、本研究では以下の計測を上流から4番目のプールで行った。計測項目は魚の挙動の撮影および流速測定である。ハイビジョンカメラを用いてプールの側面および底面の2方向から魚の挙動を20分間同時撮影した。続いて、魚をプール内から排除した状態で3次元電磁流速計を用いて流下方向 x 、鉛直上向き y 、横断方向 z にそれぞれ6点のメッシュをとった合計216点において、流速3成分を0.05s間隔で51.2s測定した。 x 、 y 、 z 方向の時間平均流速を U 、 V 、 W とする。

3. 実験結果および考察

(1) 遡上率および遡上成功率

遡上率を次式のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{単位時間あたりに遡上した魚数}}{\text{プールに入れた魚数の初期値}} \quad (1)$$

図-3に各流量の遡上率を示す。いずれの流量においても、アスペクト比が増加すると遡上率が高くなる傾向があると判断される。また、流量の増加に伴い遡上率が増加し、流量が 1.6 l/s の時にほとんど全てのアスペクト比でピークを示している。流量が 1.6 l/s を越えると遡上率は減少傾向にある。これは、遡上に適した流量が存在することを示唆している。

魚は流速の速い流れを見つけると遡上欲が湧くことが知られている⁹⁾。これを呼び水効果という⁹⁾。流量が 0.8 l/s でアスペクト比が0.67のケースおよび流量が 2.4 l/s でアスペクト比が0.67のケースでは遡上率がゼロになっている。落下流の流脈幅が小さく、落下流速も小さいために、呼び水効果が低く、魚の遡上欲がわかなかったことが一因と考えられる。これについては、後に考察する。

遡上成功率を次式のように定義する。

$$\text{遡上成功率} = \frac{\text{遡上に成功した魚数}}{\text{遡上に挑んだ魚数}} \quad (2)$$

図-4に各流量の遡上成功率を示す。遡上率ほどの明確な傾向は見られないものの、アスペクト比の増加に伴い遡上成功率が高くなっている。またアスペクト比0.67の時に遡上成功率が高い例があるが、これは遡上に挑む魚の数が少ないために生じたものと考えられ、データの信頼性は低い。

(2) 遡上開始前の休憩場所の特性

遡上には遡上欲のわく適度な流速と休憩場所が必要である⁹⁾と中村は述べている。ここでは、休憩場所について

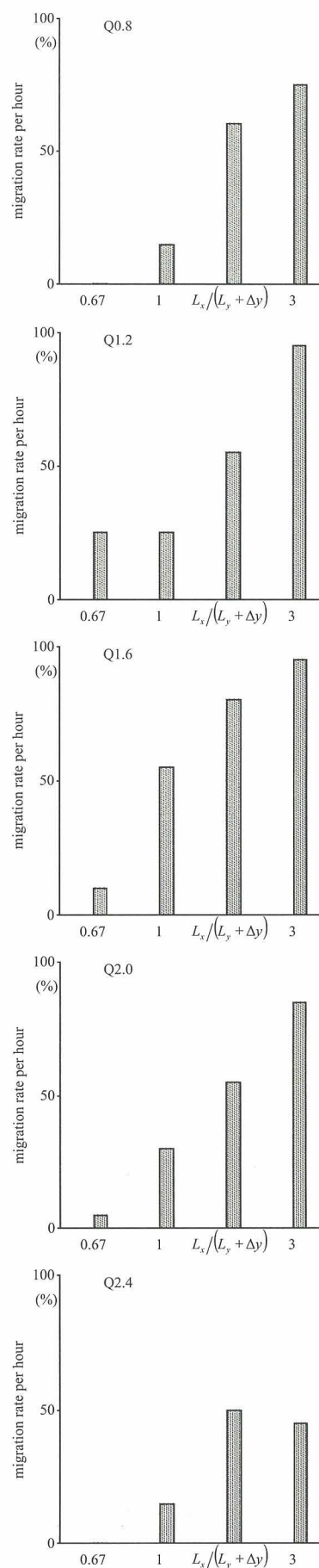


図-3 各流量におけるアスペクト比と遡上率の関係

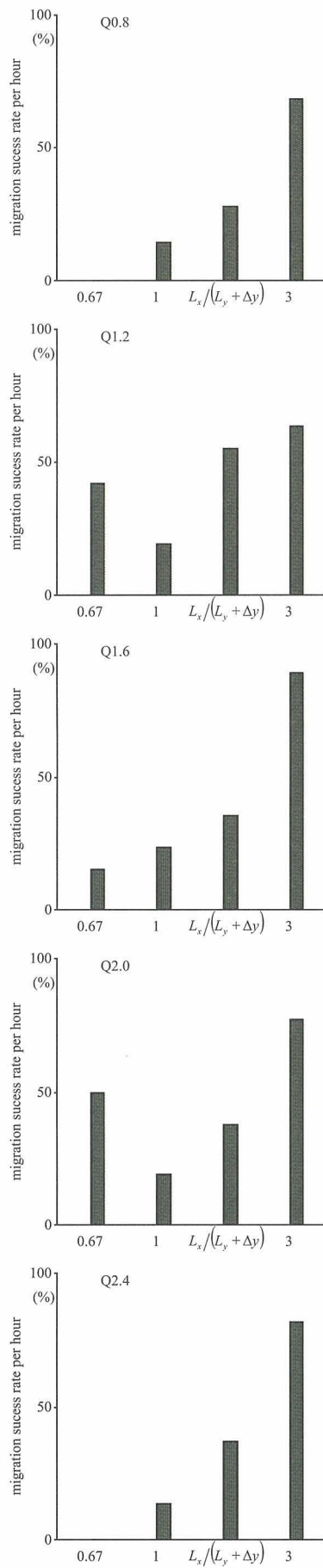


図4 各流量におけるアスペクト比と遡上成功率の関係

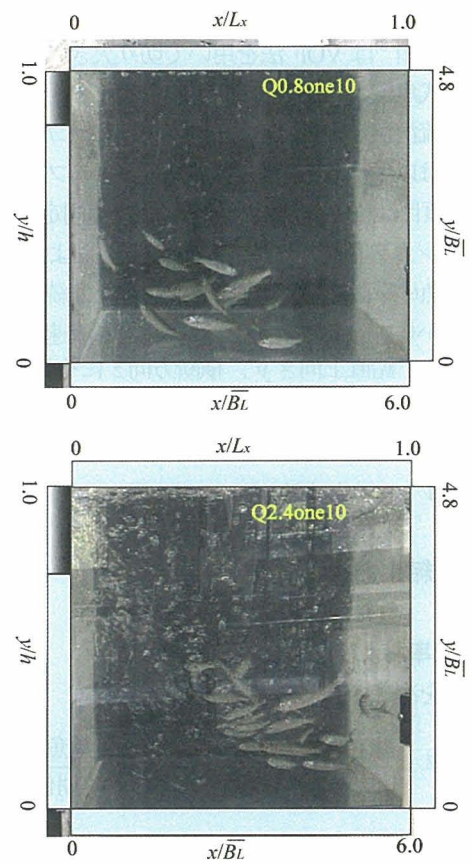


図-5(a) 流量による休憩場所の違い

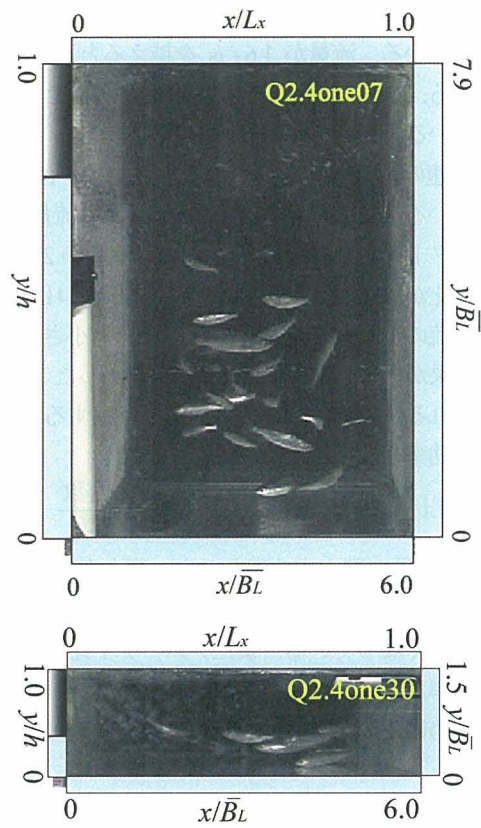


図-5(b) アスペクト比による休憩場所の違い

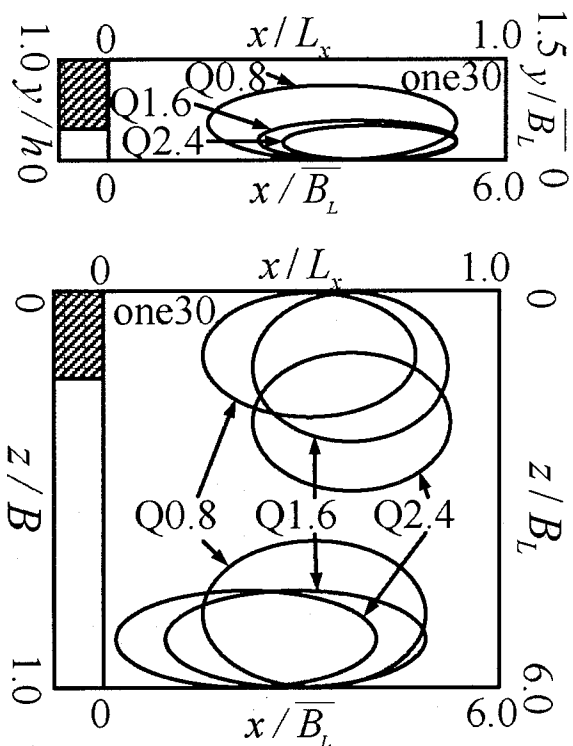


図-6(a) 魚の休憩場所(アスペクト比3.0)

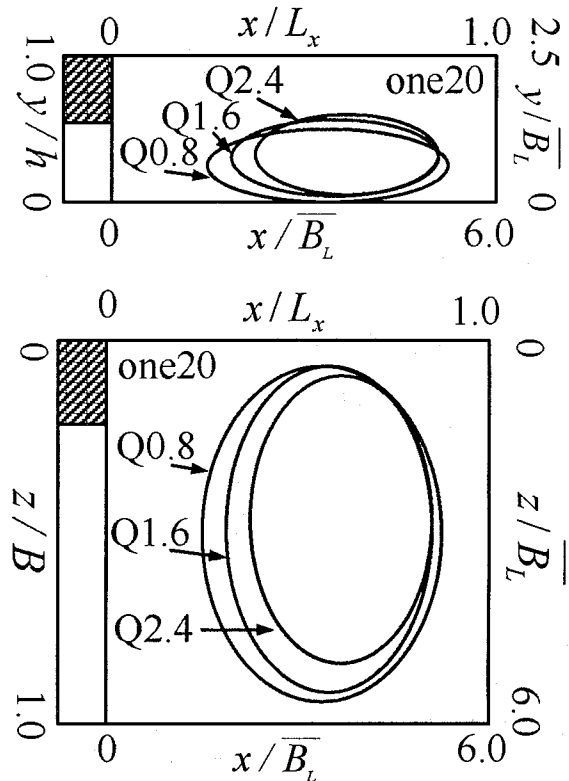


図-6(b) 魚の休憩場所(アスペクト比2.0)

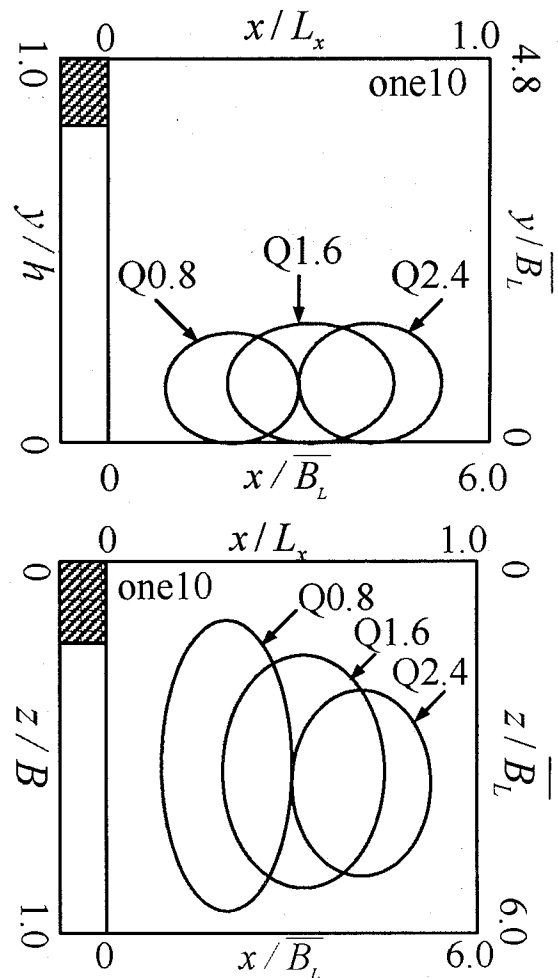


図-6(c) 魚の休憩場所(アスペクト比1.0)

考察する。遡上実験を観察した結果、ほとんどの魚がある場所に集合して定位しており、その集団から時折遡上に挑んでいることが観察された。そこでビデオ撮影された動画から代表的な休憩状況をキャプチャーした。図-5(a)は同一アスペクト比($L_x/(L_y + \Delta y) = 1.0$)で流量が異なった場合($Q = 0.8, 2.4 \text{ l/s}$)の休憩場所を示したもので、 x - y 平面の例を示したものである。なお、座標 x , y は水深 h , プール長 L_x でそれぞれ無次元化するとともに、オイカワの平均体長 $\overline{B_L}$ でも無次元化して表示した。同一アスペクト比であっても流量が異なると休憩場所が異なることが理解される。その他のアスペクト比についても同様の結果を得た。図-5(b)は同一流量($Q = 2.4 \text{ l/s}$)でアスペクト比が異なった場合($L_x/(L_y + \Delta y) = 0.67, 3.0$)の休憩場所を示したもので、 x - y 平面の例を示している。同一流量であってもアスペクト比が異なると休憩場所が変化している。以上のように観察された休憩場所を求めるため、 x - y 平面および x - z 平面について各ケースで30枚程度の画像解析を行った。休憩場所の平均値を図-6(a)~(d)に示した。まず、流量変化に伴う休憩場所の変化に着目する。流量の増加に伴い休憩場所が流下方向に移動していることが観察される。また、アスペクト比 0.67 を除く、いずれの場合においても流量の増加に伴い休憩場所の領域が小さくなっていることがわかる。アスペクト比 0.67 の場合、休憩場所の面積は流量の増加に伴い鉛直方向に拡大している。これは流量が 0.8 l/s の時は隔壁部からプール内へ落下する流脈幅が小さく、流速も小さいために魚が落下流に気付

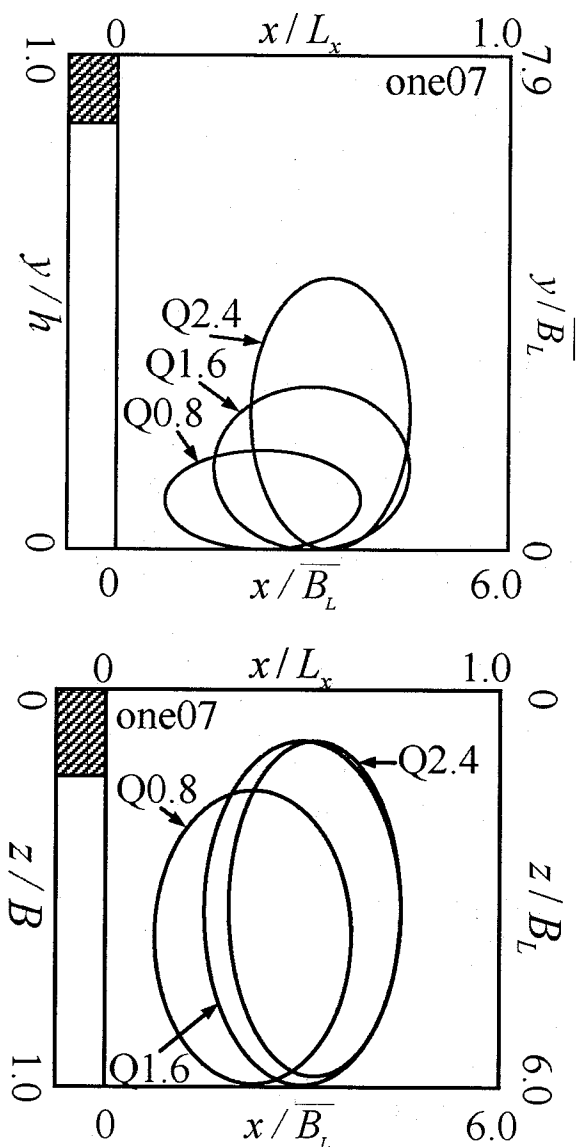


図-6(d) 魚の休憩場所(アスペクト比0.67)

かずに流速がほとんどない底面付近をゆっくりと遊泳している。オイカワは流れと逆向きに定位あるいは遊泳するといった正の向流性の性質を有しているが、流量が0.8 l/sの時は図-5(a)に見られるように、プール内の流速がかなり小さくオイカワは流れを感知しないために、定位するときの体の向きはそれぞれ異なる。一方、流量の増加に伴い、落下流からの流れをオイカワが感知するため、同一の方向を向いて定位していることが図-5(b)から確認できる。

続いて、アスペクト比の変化に伴う休憩場所の変化について着目する。アスペクト比が増加すると、比較的底面付近で定位する傾向にある。図-5(b)で観察されるように、流量が多い場合、底面に腹部を付着させる個体も確認された。これは、腹部を底面に付着させることで摩擦を得て定位しようと試みたものと考えられる。また、アスペクト比

が3.0の場合、 $x-z$ 平面では休憩場所が2つ見受けられた。これは、切り欠きからプールに流入してくる流れに流されないように必死に遊泳する魚と流れの弱いところに避難している魚がそれぞれの領域に定位しているからである。

(3) 流れ場の影響

魚の遊泳速度には巡航速度 V_{jc} と突進速度 V_{jb} の2つがある¹⁾。前者は1時間以上持続できる速度で、後者は数秒しか持続できない速度である。一般に、巡航速度 V_{jc} は次式で与えられる¹⁾。

$$V_{jc} = (2 \sim 4)B_L \quad (3)$$

ただし、 B_L はcm単位で、 V_{jc} はcm/s単位である。一方、突進速度 V_{jb} は次式で求められる。

$$V_{jb} = 10B_L \quad (4)$$

実験魚のオイカワの平均体長 B_L が約6.7cmであるので、式(3)より巡航速度 V_{jc} は約13.4cm/s、式(4)より突進速度 V_{jb} は約67cm/sとなる。魚は長時間定位、休憩するために、流速が巡航速度 V_{jc} 以下の領域を多く必要とする。図-7は流量 Q が2.4 l/s時の3次元流速ベクトルをアスペクト比別に示したものである。アスペクト比の増加に伴い、落下流の影響が底面まで及んでいることがわかる。魚は流速の速い流れを見つけると遡上欲が湧くことが知られている⁹⁾。この呼び水効果⁹⁾によって、アスペクト比が増加するに伴い遡上率および遡上成功率が高くなること、休憩場所が底面に集中することが明らかとなった。アスペクト比の増加に伴い落下流の影響がプール全体に及び、呼び水効果⁹⁾が高まるため、魚は流れを見つけやすくなり遡上率および遡上成功率が上がったと考えられる。

(4) 流速ヒストグラム

魚に遡上欲がわくには巡航速度 V_{jc} 程度の流速が周囲にある必要がある。そこで、プール内の流速を評価するために、合成速度 V_v を求めた。

$$V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (5)$$

216点の計測点から得られた V_v を突進速度 V_{jb} で割った無次元流速のヒストグラムを、流量別に図-8に示した。

いずれの流量においても、アスペクト比が増加するに伴い巡航速度 V_{jc} 以上の流速を有する領域が増えている。これはアスペクト比が増加するにつれて、呼び水効果⁹⁾が増加することを意味する。そのため、アスペクト比が増加するに伴い遡上率および遡上成功率が高くなったと考えられる。

(5) 遡上の軌跡

図-9に流量が2.4 l/sにおけるアスペクト比ごとのオイ

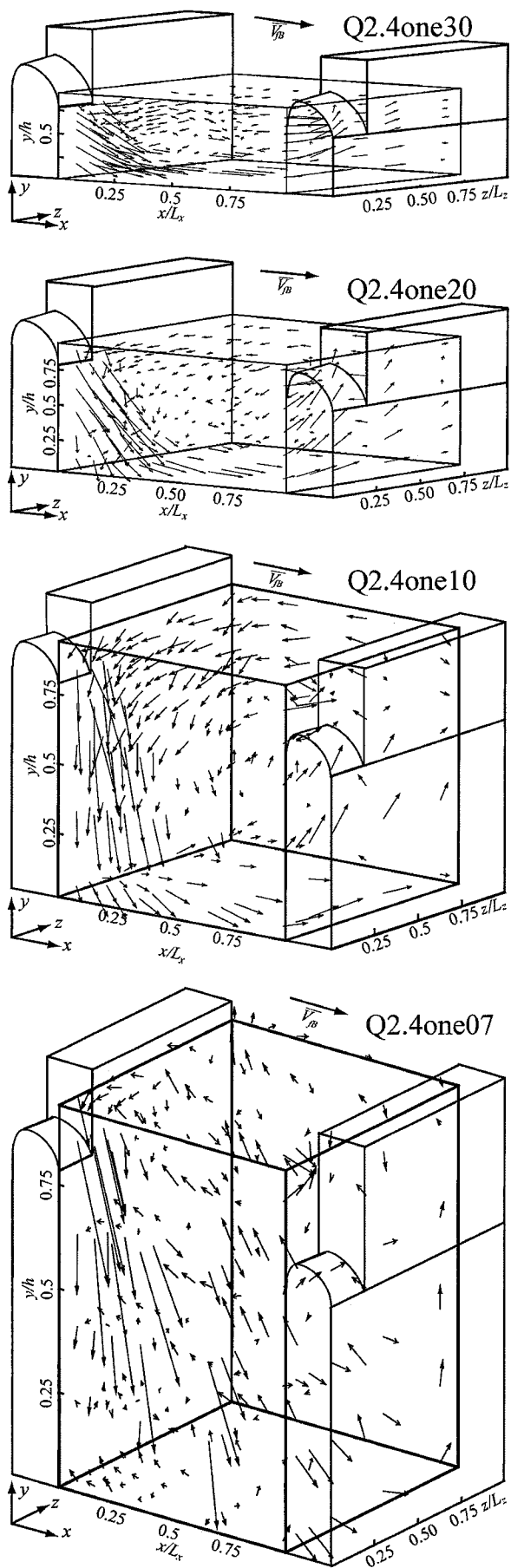


図-7 流速ベクトル($Q=2.4 \ell / s$)

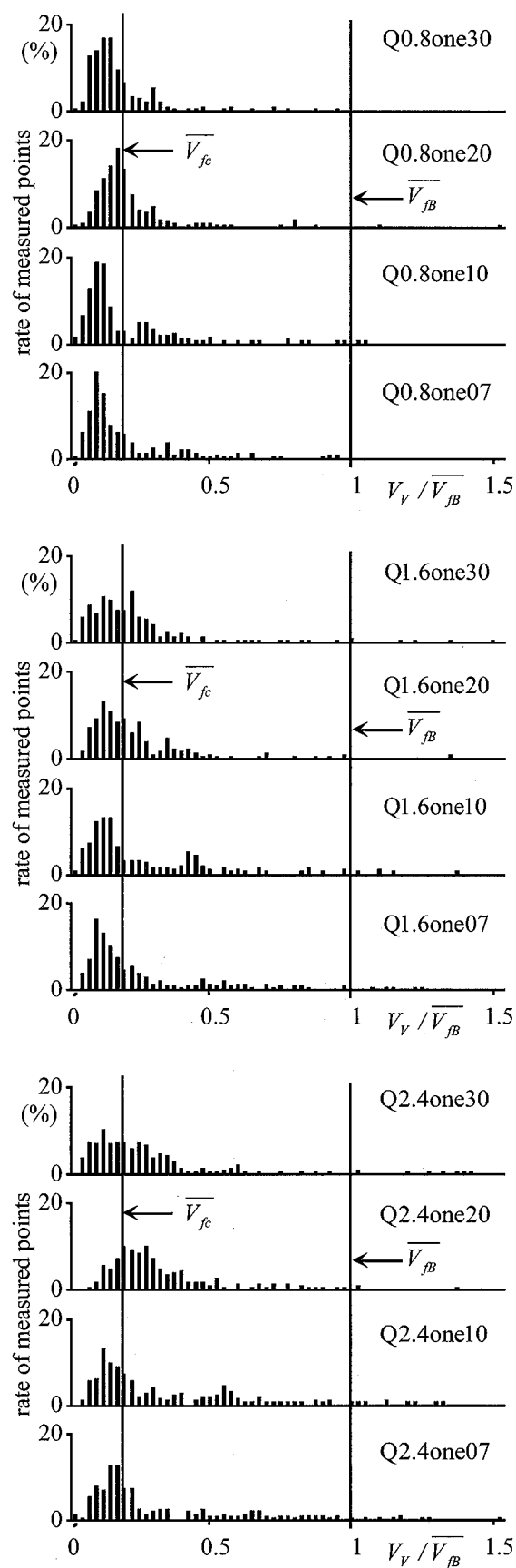


図-8 流速ヒストグラム

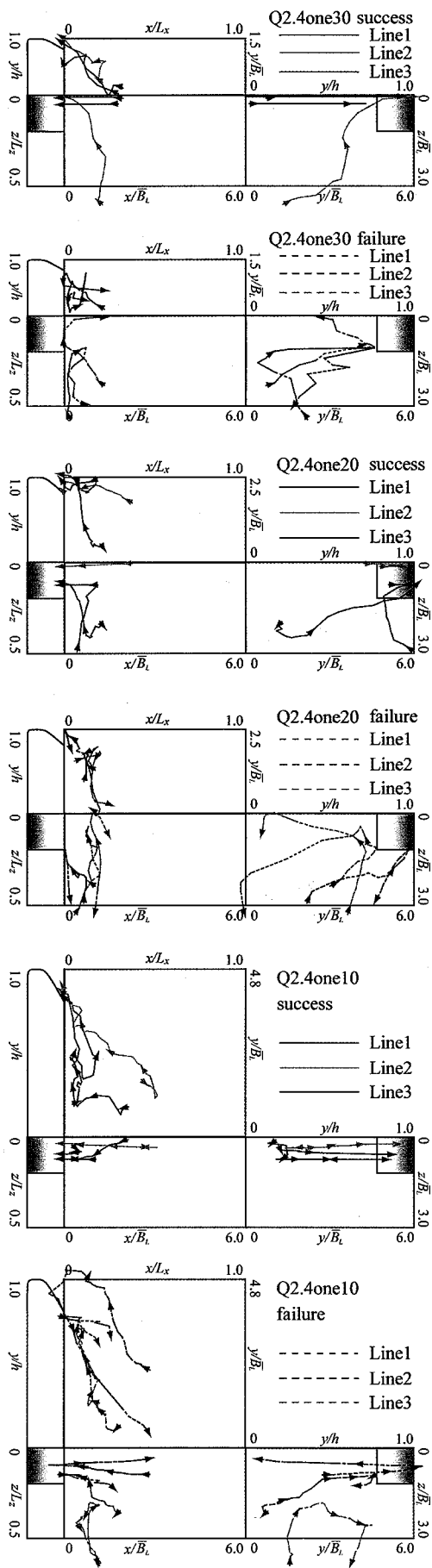


図-9 魚の軌跡($Q=2.4 \ell/s$)

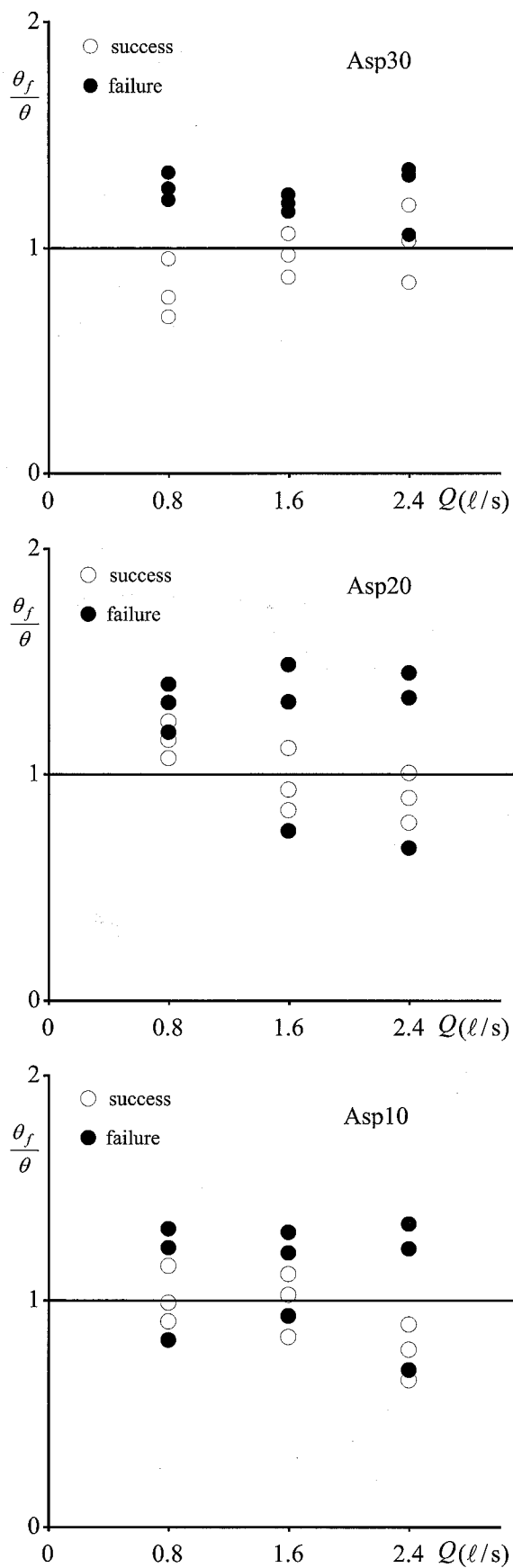


図-10 流量 Q と角度比 θ_f/θ との関係

カワの遡上軌跡を $x-y$, $x-z$, $y-z$ 平面に示す。なお、遡上に成功した3例および失敗した3例をそれぞれ実線および点線で示した。ただし、アスペクト比が0.67の場合は遡上に挑む魚が見られなかったので割愛した。アスペクト比の違いによる遡上軌跡の違いは、遡上に成功したケースおよび遡上に失敗したケース共に確認できなかった。ただし、遡上に成功している魚と遡上に失敗している魚の遡上軌跡はやや異なっていることが認められる。そこで、 $x-y$ 平面上の落下流の向きと x 軸とで囲む角度を θ 、魚の同様な角度を θ_f と定義する。図-10に各アスペクト比における流量 Q と角度比 θ_f/θ の関係を示した。遡上に成功した魚の角度比 θ_f/θ は1.0に近い値となっているが、失敗した魚の角度比は1.0からやや離れた値になっている傾向がある。これは、遡上に成功した魚は落下流の中を逆向きに遡上していたことを意味する。一方、遡上に失敗している魚は落下流の角度とは異なる角度で遡上するため、遡上当初は流れの遅い領域を泳いでいる。ところが、落下流の流脈に到達したときに、急激に流速が変化するために押し流されたものと判断される。この結果は、落下流を避けながら魚は遡上行動するという高嶋・中村⁴⁾および中村ら⁹⁾の指摘と相反する。彼らの実験魚はアユで本実験の実験魚はオイカワであるため、魚種の有する特性の相違から生じたものか否かは現在不明である。今後、アユを用いて同様な実験を行い、検証する必要がある。

4. おわりに

本研究は、片側切り欠き付き階段式魚道において、流量およびアスペクト比を系統的に変化させ、流速測定を行うとともに魚の挙動の撮影を行い、水理特性と魚の遡上特性との関係を検討したものである。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) アスペクト比の増加に伴い遡上率および遡上成功率は増加する傾向にある。
- (2) 流量の増加に伴い休憩場所が流下方向に移動し、休憩場所の領域が狭くなる傾向にある。
- (3) アスペクト比の増加に伴い休憩場所が底面に集中する。これは流速が速いため、オイカワが底面に腹部をつけて摩擦を利用することによって定位を試みているからだと推測される。
- (4) アスペクト比の増加に伴い、落下流の影響が底面まで及ぶようになるため呼び水効果⁹⁾が高まり、プール内で定位していた魚が落下流を発見しやすくなる。これが遡上率および遡上成功率が上昇した一因と考えられる。ただし、本研究ではプール長を一定としているので、アスペクト比の変化に伴い水深も変化している。今後、プール長を変化させて水深を一定とした条件で同様の検討を行いたい。

(5) 遡上に成功する場合は落下流に近い角度で遡上に試みているが、失敗する場合は落下流と異なる角度で遡上を試みている。後者では急激に流速が変化するために対応しきれずに流れに押し流されてしまう。

(6) 本研究ではアスペクト比を変化させる際にプール長を固定し、プール水深のみを変化させている。よって今後はプール長などを変化させた実験を行い、統合的な結論を得たい。

(7) 本研究によって、片側切り欠き付き階段式魚道における魚の行動特性および水理特性が解明された。今後、我が国の多くの魚道に採用されている交互切り欠き付き階段式魚道において同様な実験的研究を行うことによって、両者の差異が明確となる。

謝辞：本実験を行うに当たり、当時本学学部生の畑中弘憲氏の御協力をいただいた。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，1995。
- 2) (財)ダム水源地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) 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。
- 4) 高嶋信博，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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 前野詩朗，小川信：プールタイプ魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第46巻，pp.421-426，2002。
- 9) 小山長雄：魚道をめぐる諸問題Ⅱ，解説編，木曾三川河口資源調査団，1967。

(2006年4月13日 受付)