原著論文 ORIGINAL PAPER

水田水域における淡水魚の双方向移動を保証する小規模魚道の試作と実験

鈴木正貴¹⁾・水谷正一²⁾・後藤 章²⁾

1) 東京農工大学大学院連合農学研究科 〒183-8538 府中市幸町3-5-8

2) 宇都宮大学農学部 〒321-8505 宇都宮市峰町350

Masaki SUZUKI¹⁾, Masakazu MIZUTANI²⁾ and Akira GOTO²⁾: Trial Manufactures and experiments of small-scale fishways to ensure both upward and downward migration of freshwater fishes in the aquatic area with paddy fields. *Ecol. Civil Eng.* 4(2), 163-177, 2001.

1) Doctoral Course in Agricultural Science, The United Graduate School, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwaicho, Fuchu 183-8538, Japan

2) Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Minemachi, Utsunomiya 321-8505, Japan

Abstract: In 1999 the Environment Agency, Japan released the red list of brackish and freshwater fishes, in which the number of the Threatened fishes amounted to 110. One of the reasons why many fishes became endangered is implementation of land consolidation project in the paddy field area. This project aimed at reducing labor requirement in farming activities. However, watercourse networks have been disconnected by drop structures in the canals and elevation gap between outlets of paddy fields and drainage canals, which resulted in aggravation of the inhabiting environment of fishes. Therefore, it is eagerly required to reconnect watercourse networks by some artificial measures. In this connection this research was carried out to develop small-scale fishways for restoring damaged condition. In this research two kinds of fishes, *Misgurnus anguillicaudatus* and *Oryzias latipes*, were selected as sample fishes. Those are usual freshwater fishes in paddy field area of Japan, and *Misgurnus anguillicaudatus* represents a demersal fish, whereas *Oryzias latipes* represents a pelagic fish. Two types of small-scale fishways, named Cascade-M type and Chidori-X type, were developed and laboratory experiments were conducted to examine whether the developed small-scale fishways ensure upward and downward migration of sample fishes or not under the different conditions of inclination and flow rates. The result obtained were as follows; 1) the Cascade-M type fishway enabled upward and downward migration of *Misgurnus anguillicaudatus* (crawling type and swimming type), 2) Chidori-X type fishway enabled upward and downward migration of *Misgurnus anguillicaudatus* (swimming type) and *Oryzias latipes*, 3) Upward migration of *Misgurnus anguillicaudatus* became active in night time compared to day time, and 4) *Oryzias latipes* shows stronger rheotaxis compared to *Misgurnus anguillicaudatus*.

Key words: Japanese killifish, mud loach, migration, paddy field, small-scale fishway

2001年5月1日受付, 2001年12月3日受理

1) e-mail: suzukim@enu.mine.utsunomiya-u.ac.jp

研究の背景と目的

近年、水田（一時的水域）—小水路（一時的水域あるいは恒久的水域）—河川（恒久的水域）といった水域ネットワーク内を生活史の場として巧みに利用している魚種の存在が明らかにされている（斉藤ら 1988）。こうした魚種の中には、ドジョウ (*Misgurnus anguillicaudatus*) やメダカ (*Oryzias latipes*) などの淡水魚が含まれており、農事暦に対応して上記の3つの異なる水域を機能的に利用している (Naruse et al. 1996; 田中 1999, 2001; 細谷 2000; 片野ら 2001)。どちらも、童謡の歌詞になるなど親しみのある身近な魚種である。しかし、平成11年に環境庁（現、環境省）が公表した汽水・淡水魚類のレッドリストの絶滅危惧Ⅱ類に、絶滅の危険が増大している種としてメダカが掲載され話題となった。この他にも、同様な生活史を持つアユモドキ (*Leptobotia curta*) は、国の天然記念物に指定されるほど生息数が減少している（湯浅ら 1989; 片野 1997）。

こうした事態が進行した原因の一つに、全国の水田地帯の約6割で完了した圃場整備事業があげられる。圃場整備事業は、水田における水管理の簡便化や農業機械の導入など農業従事者に対し様々な恩恵をもたらした。しかし、他方で冬水の流水停止、水尻や排水路末端の落差の形成、水路のコンクリート化などにより水域ネットワークの分断を生みだし、魚類の生息環境の悪化を招いている（斉藤 1997）。筆者等は、1996年より栃木県河内町西鬼怒川地区において圃場整備の進行と合わせて魚類の生息調査を行っている。そして、圃場整備事業後にドジョウやフナ類 (*Carassius* sp.) の生息数が減少していることを明らかにした（水谷 2000）。藤岡（1998）は、こうした魚類の生息数の減少は、魚を餌とする高次捕食者のチュウサギの生息にも影響を与えることを報告している。

近年、圃場整備と生態系の保全を両立させるために工学的な手法による対応が求められるようになった（斉藤 1997）。その一つとして、片野（1998）や端（1999, 2000）は、圃場整備によって分断された水域ネットワークを「魚道」によって再構築することを提案している。魚道と言え、一般河川の堰や砂防ダムなどに設けられた魚道が思い浮かぶ。最近では、魚類生態学者と土木技術者が協力して、遡上効率の高い魚道を目指した研究がすすめられている（例えば中村 1995）。

水田地帯に魚道を設置しようとするれば、以下の様な点に留意しなければならない。まず、対象となる魚種が、ドジョウやフナ類、メダカといった体長が150 mm以下

の体サイズの小さい魚である。そして、水尻や排水路に設置するから、魚道内の水量は少なく、その規模は小さい。さらに、水田地帯という特殊な環境から、魚道の管理者は農業従事者になると考えられる。こうした農業従事者の手間を考慮して、魚の移動する灌漑期のみに設置し、非灌漑期には取り外せるような移動が容易なものであることが望ましい。また、構造が単純で、材料なども入手しやすく安価であることは、普及の面で欠かせない条件となる。

以上のような性格を持つ魚道を「小規模水田魚道」と称することにした。そして、本研究は、魚類の遡上効率がよく、安全に降下できる小規模水田魚道の開発を目的として、試作と実験を行った。

研究方法

1. ドジョウ（底生魚）の遡上行動の観察

水田に遡上する魚種は、その遡上形態によりドジョウなどの底生魚とメダカ・フナ類といった遊泳魚に大別さ

Fig. 1. Drop structure for observing upward migration of *Misgurnus anguillicaudatus*.

れる。一般河川の頭首工や堰に設けられた魚道の設計対象魚種は、アユやサケ・マス類といった商品価値が高く、遊泳能力に長けた魚種である。これらの魚種の遡上行動については多くの研究報告がある。しかし、本研究の対象魚であるドジョウなどの遡上・降下行動についての研究報告は少ない。たとえば、遡上形態の類似するシラスウナギ (*Anguilla anguilla*) に対応した魚道の設置例が欧米にある (Goseet et al. 1996)。そこでまず、排水路の末端落差部にブロックを用いた階段落差工を設置して、ドジョウの遡上行動を把握するための現場観察を行った (Fig. 1)。観察には、昼夜を通して撮影できる CCD カメラを使用し、ビデオテープに録画して、後で再生する方法を用いた。1998 年の 6 月 19~20 日、26~27 日及び 7 月 10~11 日に 17 時から 17 時までの 24 時間で観測を行った。Martin (1990) らの記録方法を参考にして、映像に捉えたドジョウ 1 尾毎に移動追跡を行い、移動経路と移動時間を記録した。

2. 実験装置の製作

まず、実験魚道を設置するための装置を製作した。Fig. 2 に示すような魚道部分の付け替えが可能で、流量や勾配を変化しうる流水循環型の構造とした。魚道の流

量は、装置上部に設けた三角堰で作成した H-Q 曲線から求め、Table 1 のように 6 段階の流量を設定した。また、実験開始前と開始後に水温、電気伝導度 (EC)、pH 及び溶存酸素濃度 (DO) を測定した。測定には、東亜電波工業株式会社製の EC 計 (CM-14P)、pH 計 (HM-12P)、DO 計 (DO-14P) をそれぞれ使用した。使用した水は栃木県河内町西鬼怒川地区の湧水と宇都宮市清原地区の地下水である。遡上実験における水質の変動幅は、EC が $14.9 \sim 23.3 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、pH が $6.64 \sim 7.87$ であった。DO の測定値は $1.60 \sim 6.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ の範囲であり、供試魚の遡上能力を妨げることはなかったと考えられる。また、水温は $14.9 \sim 29.3^\circ\text{C}$ で推移しており、魚の行動が活発化する水温域であった。さらに、水田周辺に生息する魚の行動には昼間と夜間とで違いがある (齊藤ら 1988) ことから、本研究でも昼と夜に区別して実験した。夜間と昼間の照度については、夜間がほぼ 0 Lux で、昼間は $600 \sim 700 \text{ Lux}$ であった。装置を屋内に設置したため、昼間の照度は屋外と比較すると低い値で推移した。

3. 供試魚の選定と取り扱い

実験に使用した供試魚には、遊泳形態の違いから底生魚としてドジョウを、遊泳魚としてメダカを用いた。ど

Fig. 2. Structure of an experimental equipment.

Table 1. Flow size classification used in experiments.

Flow ($\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$)	210	315	420	525	630	840
Expression	I	II	III	IV	V	VI

ちらも入手しやすい魚種である。とくに、メダカは体サイズの小さな魚種であり、魚類の遊泳能力は体サイズに影響を受けることから、小型魚種の代表種に成り得ると考えた。ドジョウは栃木県河内町・小川町の河川で採捕された個体を使用した。メダカは栃木県真岡市西沼の農家が河川の自生魚を採捕して、人工繁殖した個体を使用した。供試魚の取り扱いについては、採捕したものを水槽で飼育・管理し、その後、短い期間内で実験に使用するよう努めた。再利用は二回までとし、再利用を行う際は、次の実験との時間間隔を十分に空けて使用した。実験開始前に、ドジョウについては全ての個体の体長を測定した。メダカについては測定時に及ぼすストレスを考慮して体長測定は行わず、おおよそ体長が20~30 mmの個体を選定して実験に使用した。実験終了後、使用済みの供試魚を数日間飼育して、遡上・降下行動の際に生じるダメージの有無を検討した。

4. 魚道の試作と予備実験

まず遡上最盛期にあったドジョウを対象として、遡上行動の観察結果を参考にしながら複数の魚道を試作した。供試魚の遡上の様子は、目視とCCDカメラによる撮影によって観察した。さらに、魚道の上部にはトラップを仕

掛けて、遡上魚を採捕できるようにした。Naruseら(1996)は、ドジョウの遡上が春先は昼間に多く、夏になると夜間に多くなると述べている。一方で、藤咲ら(2000)の調査によれば、ドジョウは夜間に遡上することが多いという。試作段階に使用した供試魚は、藤咲ら(2000)の調査地区で採捕されたものであったことから、遡上実験は夜間に行うことにした(実験期間:1999年5月26日~6月14日)。

5. 試作魚道の評価実験

供試魚の遡上が確認された2つのタイプの魚道(カスケードM型、千鳥X型)について、魚道内の流量や設置勾配を変えて、本格的な遡上実験を行った(実験期間:1999年6月15日~9月22日)。実験内容をTable 2に示す。供試魚には底生魚としてドジョウを、遊泳魚としてメダカを使用した。CCDカメラの撮影対象範囲は、カスケードM型魚道では魚道全体、千鳥X型魚道では魚道全体を撮影する事が困難であったためFig. 3に示すように背水の影響を受けていない下流部のプールのみとした。また、千鳥X型魚道では、観察の便宜上、各プールに0から14と番号を付け、隔壁については下流から順に測定ポイントA, B, Cと呼ぶことにした。カスケードM型

Fig. 3. Observation point of Chidori-X type.

Table 2. Contents of experiment.

Type	Cascade-M		Chidori-X
Name of sample	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	<i>Oryzias latipes</i>	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>
Number of sample	50	50	100
Slope	10°, 20°, 30°	10°	10°
Flow size	I, II, III, IV, V	I, III, V, VI	I, III, V, VI
	12hours	1hours	1hours
Time	Day time (7:00~19:00)	Day time	Day time
	Night time (19:00~7:00)		

魚道では、魚道内中央部に1mの測定区間を設けて、発砲スチロールの小破片が測定区間を流れるのに要する時間を計測して、区間の平均表面流速を求めた。千鳥X型魚道は、中村ら(1987)の例に習って、3番プールを対象に流下方向を20mm×20mm、水深方向を10mmのメッシュに区切り、(株)KENEK製VP12002次元流速計を使用して格子点の流速を測定した。

なお、ドジョウについては、遡上しなかった個体と完全に遡上した個体の平均体長について、Mann-Whitney U-testを用いた有意差の検定を行った。

Fig. 4. Classification of upward migration of *Misgurnus anguillicaudatus*.

結果

1. ドジョウの遡上行動の観察結果

観察結果から遡上行動を分類したものが、Fig. 4である。ドジョウの遡上行動は、大きく「移動」と「休憩」に分けられた。一般に、魚の持つ筋肉は血合筋と普通筋の2種類に分けられる。血合筋は酸素の供給があれば持続可能であり、他方で普通筋は瞬間的に大きな力を発揮するが持続せず休憩を要する。魚は普段、血合筋のみ使用し、急流の遡上などの緊急時には普通筋を併用する(中村 1995)。特に底生魚は遊泳魚に比べ血合筋が少なく、遡上時の普通筋にかかる負担が大きい。ドジョウの遡上で休憩が必要になるのはこうした理由によるものと考えられる。体長組成と休憩時間には、Table 3に示すように関連がみられなかった。移動については、まず通過した場所が設置したブロック上と、周囲の土もしくは枯れ草が積もる斜面上とに分けられた。遡上のために通過した場所をさらに注意して観察すると、枯れ草やブロックの固定のために使用した杭などの「引っかかり」を利用して遡上する個体が多くみられた(Table 4)。体長の大きな個体については、観察したブロックの落差が3cmの場所を匍匐して遡上が可能だった。しかし、上流側の落差8cmの場所では、引っかかりを利用して遡上する個体以外は、遡上が確認できなかった。

以上の観察結果から、ドジョウの遡上行動について、1) 休憩が必要となること、2) 遡上の際には引っかかりが必要であること、が明らかとなった。

2. 魚道の試作と予備実験の結果

1) 試作した魚道の構造

前述したドジョウの遡上行動の観察から、引っかかりとなる突起物をスロープ上に設置する方法で複数の魚道を試作した。Fig. 5に試作した魚道構造を示す。①は適当な大きさの石を並べたもの、②は市販品の人工芝を敷いたもの、③はこの両者を組み合わせたものである。現場の設置を考慮し、資材の調達が容易な人工芝や石を使

Table 3. Relationship between rest time and body length (*Misgurnus anguillicaudatus*).

Body length (mm)	Rest time (min)									Total
	0	~0.5	~1	~2	~3	~4	~9	~10	10~	
50~60	5	3	0	0	0	1	0	0	3	12
70~90	16	1	0	1	0	1	0	0	1	20
100~110	5	1	2	1	0	0	0	0	2	11
120~130	2	1	0	0	0	1	0	1	3	8
Total	28	6	2	2	0	3	0	1	9	51

Table 4. Number of *Misgurnus anguillicaudatus* using stake for upward migration.

Using stake	Body length (mm)				Total
	50~60	70~90	100~110	120~130	
Yes	12	16	6	6	40
No	4	5	5	5	19

Fig. 5. Fishways for experiment.

- ①: Rocks tied by strings on bed.
- ②: Bed covered with artificial grass.
- ③: Rocks tied by strings and bed covered with artificial grass.
- ④: Columns built on bed.
- ⑤: Columns built on bed with rope.

用した。しかし、いずれもドジョウの遡上が確認できなかった。

底生魚の遡上を考慮した魚道に、粗石を等間隔に斜面上に張り付けた粗石付き魚道と呼ばれるものがある。この魚道の問題は粗石を設置する際、その配置は経験に頼

ることが多く、期待された効果が得にくいことにある。そこで、柏井ら(1998)は、魚道内の粗度形状を幾何学的にして、その配置と水理特性の関係を整理している。この実験を参考にして、④のように丸い木杭を等間隔に並べる魚道を試作した。しかし、低流量の条件下でドジョウが滑り落ちる様子が観察され、ドジョウのような匍匐による遡上には適さないと思われた。また、⑤のように木杭の間にロープを絡ませてみたが、遡上を確認することはできなかった。

2) カスケードM型魚道の構造

以上の問題をふまえて、魚道底面全体に流れに対して垂直な粗度を設けることを考えた。すなわち、魚道の底面に細い角材を等間隔に張り付けた魚道を製作し予備実験を行ったところ、ドジョウの遡上を確認した。続いて、市販されている角材を用いて、そのサイズと設置間隔を変えた遡上実験を行った。その結果、目視による行動観察から、4 mm×4 mmの角材を30 mm間隔に並べた構造が適当であると思われた。このタイプを魚道内を流れる水の様子からカスケードM型魚道と名付けた(Fig. 6)。

3) 千鳥X型魚道の構造

カスケードM型魚道は、魚道内の水深が10~20 mmと浅いため、底生魚に適していると考え、ドジョウのみを対象とした。しかし、小規模水田魚道を利用する魚種は底生魚に限らない。そこで、遊泳魚の遡上も考えて試作したのが、千鳥X型魚道である(Fig. 6)。魚道内を流れる水の様子と下流からみて隔壁が交差していることからこの名称とした。従来の切り欠き部を持つプールタイプの魚道に対して、低流量でも越流部の水深を確保するために、隔壁の形状を台形にした。

3. カスケードM型魚道の評価実験結果

1) ドジョウの完全遡上と完全降下の個体数

CCDカメラの映像から得られた遡上と降下の個体数をTable 5に示す。ただし、ここでいう遡上数は、魚道最上部を通過した個体数であり、降下数は遡上後に魚道最下部へ降下した個体数としている(以下、前者を「完全遡上個体数」、後者を「完全降下個体数」という)。勾配が

Fig. 6. Developed Small-scale Fishway.

Table 5. Number and ratio of downward migrations to upward migrations in full-length moved fishes in each experiment (*Misgurnus anguillicaudatus*).

Slope	Flow size	I		II		III		IV		V	
	Time	Day	Night	Day	Night	Day	Night	Day	Night	Day	Night
10°	Number of upward migrations	24	41	27	57	36	37		22		69
	Number of downward migrations	12	24	15	43	15	24		14		49
	Ratio of downward migrations to upward migrations	0.50	0.59	0.56	0.75	0.42	0.65		0.64		0.71
20°	Number of upward migrations	2	49		0						
	Number of downward migrations	2	35		0						
	Ratio of downward migrations to upward migrations	1.00	0.71								
30°	Number of upward migrations	1	11		0						
	Number of downward migrations	1	11		0						
	Ratio of downward migrations to upward migrations	1.00	1.00								

10°の場合、夜間において流量Ⅵまで完全遡上個体が確認された。一方、勾配が20°、30°では、流量Ⅰの条件で遡上可能であったが、流量Ⅱ・夜間で完全遡上個体が見られなかった。また全体的に昼間に比べて夜間に遡上数が増える傾向が認められた。さらに、完全降下個体数を完全遡上個体数で除した完全（降下／遡上）比をみると、夜間では昼間に比べてドジョウが一度遡上して再び降下するといった、活発な双方向の移動が認められた。

2) ドジョウの途中遡上個体数の経時変化

魚道の最下部から40 cm 上流部に基準線を設定し、この基準線を遡上する個体数を途中遡上個体数とした。この途中遡上個体数の経時変化について、夜間に水路勾配を10°に固定して流量を増加させた場合と、流量Ⅰの状態勾配のみを変えた場合について検討した。前者の場合、途中遡上個体数の経時変化に一定の規則性は見出せなかった。後者の結果を Fig. 7 に示す。水路勾配が急に

Table 7. Comparison of body length of full-length moved fishes with that of incompletely moved fishes in Cascade-M type. unit: mm

Slope	Flow size	Time	Body length of full-length moved fishes		Body length of incompletely moved fishes	
			(mean $\pm$ S. D.)	n	(mean $\pm$ S. D.)	n
10°	I	Day	96.7 $\pm$ 15.2	10	89.1 $\pm$ 21.5	40
10°	I	Night	92.2 $\pm$ 11.1	19	86.8 $\pm$ 14.2	31
10°	II	Day	86.2 $\pm$ 9.4	13	75.3 $\pm$ 12.4	37
10°	II	Night	91.3 $\pm$ 12.6	15	89.1 $\pm$ 12.8	35
10°	III	Day	84.3 $\pm$ 16.1	27	82.1 $\pm$ 15.3	23
10°	III	Night	85.9 $\pm$ 14.2	16	80.0 $\pm$ 20.4	44
10°	IV	Night	76.0 $\pm$ 14.4	4	78.4 $\pm$ 12.9	46
10°	V	Night	91.5 $\pm$ 13.9	16	78.3 $\pm$ 14.1	34
20°	I	Night	99.8 $\pm$ 14.6	14	100.2 $\pm$ 15.7	36
30°	I	Night	73.8 $\pm$ 5.1	4	85.4 $\pm$ 17.7	46

Mann-Whitney U-test; **: significant at 0.01 level, *: 0.05 level

個体の体長分布を示す。完全遡上個体の体長は、魚道最上部のトラップで実験終了時に採捕された個体の体長である。遡上しなかった個体の平均体長と完全遡上個体の平均体長については、勾配 10°・流量 I・夜間、勾配 10°・流量 II・昼間、勾配 10°・流量 V・夜間の条件で完全遡上個体の平均体長が大きいという結果が得られた。

5) 魚道内の流量と流速

表面流速の測定結果を Fig. 8 に示す。いずれの勾配においても、流量の増加に伴って表面流速が速くなった。同一流量の条件下では流量 III より大きくなると、勾配 10° と 20° の流速に差がほとんどみられないのに対して、勾配 30° ではわずかながら流速が増加していた。遡上実験で、ドジョウは勾配 10° のすべての設定流量で遡上がみられ、勾配 20°、30° では流量 I でしか遡上を確認できなかった。つまり、急勾配による流速の増加で、遡上中のドジョウの胴体部が魚道底部から離れ、その結果、引っかかりが得られず遡上不可能になったと推察される。

6) 降下によるダメージ

実験終了後、実験に使用したドジョウを数日間水槽で飼育した。飼育中、視認による外傷の有無は認められず、

Fig. 8. Relationship between flow size and surface velocity in Cascade-M type.

また死亡する個体もなかったことから、降下時のダメージは受けなかったと判断した。

4. 千鳥X型魚道の評価実験結果

1) ドジョウの完全遡上個体数と体長分布

流量と完全遡上個体数の関係を Table 8 に示す。ドジ

Table 8. Number of full-length moved fishes in Chidori-X type in each experiment (*Misgurnus anguillicaudatus*).

Flow size	I	III	V	VI
1	15	13	9	7
Experiment No. 2	5	8	30	3
3	2	8	20	5
Average	7.3	9.7	19.7	5.0

Table 9. Comparison of body length of full-length moved fishes with that of incompletely moved fishes in Chidori-X type. unit: mm

Flow size	Body length of full-length moved fishes			Body length of incompletely moved fishes	
	(mean $\pm$ S. D.)	n		(mean $\pm$ S. D.)	n
I	79.4 $\pm$ 13.5	22	>*	73.2 $\pm$ 15.8	278
III	77.4 $\pm$ 8.2	29	>**	70.5 $\pm$ 13.2	271
V	77.8 $\pm$ 15.4	59	>*	72.8 $\pm$ 15.2	241
VI	94.0 $\pm$ 16.9	15	>**	81.6 $\pm$ 15.1	285

Mann-Whitney U-test; **: significant at 0.01 level, *: 0.05 level

ヨウは流量VIまで遡上が確認された。流量VIは製作した試験装置の最大吐出量であったため、これ以上の流量条件では実験できなかった。単純に完全遡上個体数を比較してみると、流量Vの条件下で遡上数の増加がみられた。CCDカメラで撮影した映像から、下流の測定ポイントA (Fig. 3 参照) を通過した途中遡上個体数の経時変化を調べた。すると、流量Vでは他の流量に比べて実験開始後の短時間に、途中遡上個体数が多いことが分かった。流量Vの条件では、供試魚の遡上を促す何らかの誘発要因が形成された可能性がある。

体長分布については、各流量において、完全遡上個体の平均体長が遡上しなかった個体の平均体長よりも有意に大きいという結果が得られた (Table 9)。

2) ドジョウの途中 (降下/遡上) 比の経時変化

測定ポイントAを通過した途中 (降下/遡上) 比の経時変化を Fig. 9 に示す。同一条件で行った3回の実験の平均値である。実験開始後から1時間程度は、測定ポイントAを越えて遡上する個体数が降下する個体数を上回って推移した。その後は、遡上した個体が再び降下するようになり、比率が1の付近を推移して、双方向移動が行われていることがわかった。一方、最大設定流量である流量VIでは、実験開始から途中遡上数に対して途中降下数が低く推移したが、実験終了時近くになって途中降下数が増加した。

3) ドジョウのプール内の待機時間

3番プールを対象にして、各流量条件における遡上お

Fig. 9. Relationship between a ratio of downward migrations to upward migrations in incompletely moved fishes and elapse time in Chidori-X type (*Misgurnus anguillicaudatus*).

よび降下個体のプール内平均待機時間を測定した結果を Table 10 に示す。ここでいう待機時間とは、プール内に侵入してから出ていくまでに要した時間であり、休憩あるいは次の行動に備えている状態を指す。遡上では、魚道内の流量が増加するにつれて平均待機時間が短縮した。他方で降下する個体の多くは流れに身を任せて流下していて、こうした降下の形態は流量の大小に関係なく観察された。

4) ドジョウの遡上経路と待機場所

CCDカメラの映像から、隔壁を遡上する経路に4つのパターンがあることが分かった (Fig. 10)。遡上経路の選好性は、Fig. 11 に示すように流量が増加するにつれて越

Table 10. Relationship between flow size and waiting time in Chidori-X type (*Misgurnus anguillicaudatus*).

unit: sec

Flow size	I		III		V		VI	
	(mean $\pm$ S. D.)	n	(mean $\pm$ S. D.)	n	(mean $\pm$ S. D.)	n	(mean $\pm$ S. D.)	n
For moving upward	13.5 $\pm$ 30.6	129	9.7 $\pm$ 12.7	159	7.5 $\pm$ 15.8	298	4.8 $\pm$ 6.1	78
For moving downward	5.5 $\pm$ 10.7	103	2.9 $\pm$ 6.5	123	2.1 $\pm$ 3.1	237	3.5 $\pm$ 7.9	60

Fig. 10. Trail of upward migration and waiting area (*Misgurnus anguillicaudatus*).

Fig. 11. Ratio of trail used in upward migration in Chidori-X type (*Misgurnus anguillicaudatus*).

流水深の深い側壁から越流水深の浅い中央部へ移動した。特に、中央部を遡上するドジョウの多くは、隔壁の縁に体を引っかけるようにして遡上していることが目視によって観察された。また、待機場所には、隔壁の非越流部直下や側壁直下などの流速の小さい場所を利用していた。

5) メダカの完全遡上個体数

次にメダカを用いた実験結果を述べる。

Table 11 は、完全遡上個体数を流量条件毎に示したものである。全体の傾向として、流量増に伴い遡上数の減少がみられた。流量Ⅴまでは遡上個体が確認されたが、流量Ⅵになると3回の実験すべてで遡上が確認できなかった。この流量では、CCD カメラの映像から、遡上しようとするが流れに押し戻される様子が確認された。

魚道内に設けた3箇所の測定ポイントにおける途中（降下／遡上）比を Fig. 12 に示す。流量Ⅵでは、下流部

Table 11. Number of full-length moved fishes in Chidori-X type in each experiment (*Oryzias latipes*).

Experiment No.	Flow size		
	I	III	V
1	14	1	5
2	11	9	8
3	10	13	7
Average	11.7	7.7	6.7

Fig. 12. Ratio of downward migrations to upward migrations in incompletely moved fishes in three observation points (*Oryzias latipes*).

の測定ポイントAを往来するのみで、測定ポイントB、Cには一尾もたどり着けていない。それ以外の流量では、測定ポイントA、B、Cのいずれの観測点においても途中（降下／遡上）比が低い値を示しており、一度遡上を始めると、途中で降下する個体が極めて少ないことが分かった。

6) メダカの10分間平均遡上プール数の経時変化

実験開始時から10分毎の各プール内個体数を計測して求めた、遡上個体の10分間平均遡上プール数の経時変化を Fig. 13 に示す。流量条件Ⅰ、Ⅲで、実験開始後20分で遡上したプール数が最も多くなり、その後は減っていることが分かる。遡上魚は、最初は勢いよく遡上して、時間が経つとその勢いが低下する。流量Ⅴになると、実験開始後30分から40分にかけて、10分間平均遡上プール数が増加するが、これは一部の活発な遡上個体によるものと考えられる。以上から、小流量では実験開始初期に活発な遡上行動がみられ、流量が増加すると遡上に要する時間が長くなる傾向を示した。

7) メダカの遡上経路と待機場所

CCD カメラの映像から得たメダカの遡上経路と待機場

Fig. 13. Average number of pools in upward migrations with elapse time in Chidori-X type (*Oryzias latipes*).

所をFig. 14に示す。プールの隔壁を遡上する個体のほとんどが、側壁寄りの越流水深が深い場所を選択していた。まれに、プール間をジャンプして遡上する個体も確認された。待機場所の面積は、魚道内の流量が増加するにつれて縮小した。

魚道内の流速分布を測定した結果のうち、魚道底部から水深 20 mm の流速分布をベクトル表示したものを Fig. 15 に示す。プール内では、水が渦状に流れていることがわかる。また、魚道底部から水深 20 mm で、かつ流速が $5 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 未満である測定点の分布を調べると、メダカが待機していた場所とおおよそ一致していた。

8) 降下によるダメージ

ドジョウとメダカについて、実験終了後、使用した供試魚を数日間水槽で飼育した。飼育中、視認による外傷

Fig. 14. Trail of upward migration and waiting area (*Oryzias latipes*).

の有無は認められず、また死亡する個体も無かったことから、降下時のダメージは受けなかったと判断した。

考 察

1. 流量および設置勾配と供試魚の遡上・降下行動の関係

1) カスケードM型魚道について

底生魚を対象としたカスケードM型魚道では、設置勾配と魚道内の流量を変えて、ドジョウの遡上・降下行動

Fig. 15. Flow Velocity and direction above 20 mm from bottom in Chidori-X type.

の観察を行った。その結果、設置勾配 10° で流量 V まで遡上が確認された。魚道幅が 30 cm であったことから、単位幅当たりの流量は $21\text{ ml}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ である。さらに、魚道内の流量変化に対応して、匍匐型と遊泳型の遡上行動を使い分けていた。匍匐型に比べ遊泳型は遡上時間が短く、すべての遡上個体が遊泳型であった流量 V では、完全遡上個体数が非常に多かった (Table 5)。つまり、匍匐型よりも遊泳型の方が、ドジョウにとって遡上に要する労力が軽い遡上形態であると推察される。

次に、 20° 、 30° といった急勾配においても、流量が少なければ遡上が可能であることを確認した。いずれの場合も匍匐型の遡上で、魚道底部の突起に体を引っかけるようにして遡上していた。しかし、流量が増加すると流速が大きくなることから、ドジョウの胴部と魚道底部が離れ、引っかかりを得ることができず遡上不可能になると推察された。

勾配 10° ・夜間の同一条件下の設定流量 I 、 II 、 V で、完全遡上個体の平均体長が遡上しなかった個体の平均体長より大きかった。流量 II 、 V では、この関係が有意であることから、体サイズと遡上能力の関係が示唆された。カスケードM型魚道におけるドジョウの遡上効果を体サイズの観点から考慮する必要がある。

2) 千鳥X型魚道について

底生魚と遊泳魚の遡上を考慮した千鳥X型では、底生魚であるドジョウについて、設置勾配 10° で実験装置の最大吐出量である流量 VI まで遡上が確認された。流量 VI では、実験開始後3時間近くになって、降下する個体が多くみられた。プール内での平均待機時間が流量の増加に伴って短時間になることから、一度遡上しても、魚道内で待機できずに降下してしまうものと考えられる。このことは、プール内での待機を考慮した隔壁間隔やプール水深の確保が重要であることを示している。

設定した全ての流量条件において、ドジョウは完全遡上個体の平均体長の方が遡上しなかった個体の平均体長よりも大きかった。この結果から、ドジョウの遡上能力の大小には体サイズが関係していることが示唆された。したがって、実用的な魚道の設計に際しては、体サイズからみたドジョウの遡上可能性を考慮しなければならない。

メダカについては、流量 VI になると完全遡上個体が見られず、遡上に限界があることが確認された。このことは、流量増に伴う10分間平均遡上プール数の減少という実験結果からも説明された。これらのことから、メダカが遡上不可能となる流速が存在すると考えられる。

次に、メダカがプール内で待機していた場所の平均流速がおおよそ $5\text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ であったことについて検討する。魚の遊泳速度には突進速度と巡航速度があるといわれる (塚本ら 1973)。突進速度については、血合筋と普通筋を使用した俊敏な動きをする際に数秒間持続できる速度であるという。また、巡航速度は、血合筋のみを使用しておおよそ60分は持続できる速度であるという (塚本 1993)。紡錘型の魚種について、標準体長を $BL(\text{cm})$ とすれば、その巡航速度は $2\sim 4\cdot BL(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ であるといわれている (中村 1995)。供試魚に用いたメダカの標準体長が $20\sim 30\text{ mm}$ であったことを考えると、今回の実験からメダカはおおよそ巡航速度で待機していたと考えられる。

2. 遡上・降下によるダメージ

魚道の機能は、遡上可能であることはもちろん、降下の際に与えるダメージについても考慮する必要があるが、一般河川の魚道の降下魚対策については未だ不十分であると指摘されている (水野 2000)。今回、試作した2つの魚道では、供試魚が実験中に魚道内で遡上と降下を繰り返しており、また、実験後の飼育による観察でも降下によるダメージはみられなかった。したがって、カスケードM型魚道、千鳥X型魚道のどちらも接触傷のようなダメージを与えない魚道であることが確認された。

3. 遡上誘発要因と遡上行動特性

カスケードM型魚道の昼夜別遡上実験結果から、ドジョウの遡上数は昼間に比べ夜間に多い傾向を得た。この傾向は、河川から水田へ遡上するドジョウの現場採捕調査結果でも確認されており (藤咲 2000)、今回の実験結果は、これを裏付けるものとなった。さらに、実験開始後の短時間にドジョウの盛んな遡上行動がみられ、水流の発生によって遡上行動が促される可能性が示唆された。

今回の実験では、メダカはドジョウと異なる遡上行動をみせた。実験結果で述べたように、千鳥X型魚道内の測定ポイントA、B、Cにおける途中 (降下/遡上) 比の値が、メダカはドジョウに比べて低かった。このことから、メダカはドジョウと比べて正の走流性が強く、一旦遡上すると降下しにくい傾向があると考えられた。

4. 実用化に向けて残された課題

カスケードM型魚道において、ドジョウは遊泳型と匍匐型の遡上行動を行ったことから、遊泳魚の遡上の可能性についても検討する必要がある。

メダカがある流量条件で遡上しなかったこと、および体サイズの大きなドジョウが遡上する傾向にあることから、千鳥X型魚道については、設計諸元 (流量、設置勾

配, 幅, 隔壁の短辺と長辺の長さおよび間隔)と, 越流部の流速およびプール内の流速の関係を把握することが必要であると思われる。現在, 設計諸元を入力して魚道内の流速分布を計算するプログラムの作成を行っている。こうした水理学的な検討を通じて, 遡上魚の突進速度や巡航速度を考慮した魚道の細部設計への道が開けると考えられる。

流量がある程度以上になると, カスケードM型, 千鳥X型の両魚道は, 魚道内の流速の増加によって, その機能を十分に果たせない可能性がある。実際に魚道を設置する際には, 余水吐や排水口を併設するなどの工夫により, 流量を一定値以下にして流速の増加を防ぐ必要があると思われる。

まとめ

本研究から以下のような結果を得た。

カスケードM型魚道では,

- 1) ドジョウの双方向移動を可能とすることが確認された。
- 2) ドジョウの遡上行動では, 匍匐型と遊泳型の2通りを確認した。
- 3) 急勾配化および流量増に伴う流速の増加が, ドジョウの遡上行動を困難にしていると推察された。

千鳥X型魚道では,

- 1) ドジョウとメダカの双方向移動を可能とすることが確認された。
- 2) ドジョウは, 流量増に伴い遡上が困難になることを確認した。
- 3) メダカは, 魚道の単位幅流量が $28 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ で遡上不可能となった。
- 4) メダカは, $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の巡航速度で待機していることが確認された。

また, 魚種別にみると,

- 1) ドジョウの遡上行動の誘発要因として, 水流の発生が推察された。
- 2) ドジョウの双方向移動は, 昼間に比べ夜間に活発化した。
- 3) メダカはドジョウと比べて強い正の走流性を持つことが確認された。

謝 辞

本研究を進めるにあたって, 多くの方々の協力を得た。

栃木県河内農業振興事務所, 河内町役場の方々には, 様々な面で便宜を図って頂いた。河内町西下ヶ橋集落在住の加藤昭寿氏, 真岡市西沼地区在住の大瀧盛氏には供試魚を提供して頂いた。栃木県水産試験場の方々には多くの助言を頂き, とくに中村智幸研究員(現, 水産庁中央水産研究所研究員)には実験方法, 実験結果の検討についてアドバイスを頂いた。また, 宇都宮大学水利・水文学研究室的佐々木誉氏, 葛西真琴氏, 嶋田喜之氏, 杉原知加子氏には, 実験の準備や供試魚の管理, 現場での採捕調査など, 研究全般にわたって協力して頂いた。ここに記して深く感謝の意を表す。

摘 要

環境庁が1997年に発表した汽水・淡水魚レッドリストに, 絶滅危惧Ⅱ類としてメダカが掲載されて話題となった。メダカは, 河川(恒久的水域)と一時的な水域(水田や小水路)の間を移動して, これらの水域を効果的に利用している。また, ドジョウなども同様な生活史を持つ。これらの生息数が減少している理由の一つとして, 圃場整備事業があげられる。圃場整備事業は, 農業従事者に対して作業時間の短縮や省力化といった様々な恩恵を与えている。一方で冬水の流水停止, 水尻や排水路末端の落差形成など水域ネットワークを分断して, 魚類の生息環境の悪化を招いている。そこで, 工学的な手法による淡水魚類への配慮が求められるようになった。本研究は, 水域ネットワークの再構築の一手段として小規模水田魚道の試作と実験を行ったものである。

魚道の試作にあたって, 供試魚にドジョウ(底生魚)とメダカ(遊泳魚)を選び, ドジョウについてはあらかじめ遡上行動を観察した。その結果, ドジョウは遡上中に休憩し, 遡上の際には引っかかりを利用することが分かった。この結果を参考にして魚道の試作を行い, 供試魚を用いた予備実験を行った。そして, カスケードM型魚道と千鳥X型魚道と称する2つのタイプを開発した。また, この2つの魚道について設置勾配や流量を変えた遡上実験を実施し, 以下の結果を得た。1) カスケードM型魚道は, ドジョウ(匍匐型, 遊泳型)の遡上・降下行動を可能とする。2) 千鳥X型魚道は, ドジョウ(遊泳型)とメダカの遡上・降下行動を可能とする。3) ドジョウの遡上は, 夜間に活発化する。4) メダカはドジョウに比べて正の走流性が強い。

引用文献

- 藤岡正博 (1998) サギが警告する田んぼの危機. 「水辺環境の保全—生物群集の視点から—」(江崎保男・田中哲夫編). pp. 35-51. 朝倉書店, 東京.
- 藤咲雅明 (2000) 小河川・農業用水路・水田系における魚類の生息とその環境条件に関する研究. 東京農工大学大学院連合農学研究科博士論文.
- Gosset C., Larinier M., Porcher P.J. & Travade F. (1996) 魚道及び降下対策の知識と設計. (リバーフロント整備センター翻訳・編). pp. 204-215. リバーフロント整備センター, 東京.
- 端憲二 (1999) 小さな魚道による休耕田への魚類遡上試験. 農業土木学会誌 **67**: 497-502.
- 端憲二 (2000) 田圃につける小さな魚道. 応用生態工学会誌 **3**: 231-234.
- 細谷和海 (2000) メダカの生息状況と保護. 水環境学会誌 **23**: 7-11.
- 柏井条介・野仲典理 (1998) 水路式魚道の粗度とアユの遡上に関する調査. 土木研究所資料.
- 片野修 (1997) 希少淡水魚の現状 9 アユモドキ. 「日本の希少淡水魚の現状と系統保存」(細谷和海・長田芳和編). pp. 194-204. 緑書房, 東京.
- 片野修 (1998) 水田・農業水路の魚類群集. 「水辺環境の保全—生物群集の視点から—」(江崎保男・田中哲夫編). pp. 67-79. 朝倉書店, 東京.
- 片野修・細谷和海・井口恵一郎・青沼佳方 (2001) 千曲川流域の3タイプの水田間での魚類相の比較. 魚類学雑誌 **48**: 19-25.
- Martin P. & Bateson P. (1990) 行動研究入門—動物行動の観察から解析まで—. (粕谷英一・近雅博・細馬宏通訳, 1990). 東海大学出版会, 東京.
- 宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦 (1976) 「原色日本淡水魚類図鑑」pp. 241-244., pp. 273-275. 保育社, 大阪.
- 水野信彦 (2000) 魚の生態からみた魚道の見方. 応用生態工学会誌 **3**: 209-218.
- 水谷正一 (2000) ドジョウの水田への遡上. 「農村と環境 16」(農村環境整備センター編). pp. 70-76.
- 中村俊六・高島信博・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 **55**: 933-938.
- 中村俊六 (1995) 魚道のはなし—魚道設計のためのガイドイン—. 山海堂, 東京.
- Naruse M. & Oishi T. (1996) Annual and daily activity rhythms of loaches in an irrigation creek and ditches around paddy fields. Environmental Biology of Fishes **47**: 93-99.
- 斉藤憲治・片野修・小泉顕雄 (1988) 淡水魚の水田周辺における一時的水域への侵入と産卵. 日本生態学会誌 **38**: 35-47.
- 斉藤憲治 (1997) 淡水魚の繁殖場所としての一時的水域. 「日本の希少淡水魚の現状と系統保存」(細谷和海・長田芳和編). pp. 194-204. 緑書房, 東京.
- 田中道明 (1999) 水田周辺の水環境の違いがドジョウの分布と生息密度に及ぼす影響. 魚類学雑誌 **46**: 75-81.
- 田中道明 (2001) 水田とその周辺水域に生息するドジョウ個体群の季節消長. 環境動物昆虫学会誌 **12**: 91-101.
- 塚本勝巳・梶原武 (1973) 魚類の遊泳速度と遊泳能力. 水産土木 **10**: 31-36.
- 塚本勝巳 (1993) 河川魚類の生理生態. 「河川生態環境工学」(玉井信行・水野信彦・中村俊六編). pp. 74-78. 東京大学出版会, 東京.
- 湯浅卓雄・土肥直樹 (1989) 岡山県における水田及び水田に類似した一時的水域で産卵する淡水魚群—アユモドキを中心として—. 淡水魚保護 **2**: 120-125.