河川遡上期のウキゴリ類の遊泳能力に関する 基礎実験

SWIMMING CHARACTERISTICS OF GOBY DURING THE UPSTREAM RIVER MIGRATION PERIOD

矢田谷健一¹・泉 完²・東 信行³・丸居 篤⁴
Kenichi YATAYA, Mattashi IZUMI, Nobuyuki AZUMA and Atsushi MARUI

¹正会員 農修 株式会社建設技術研究所 東北支社 (〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1)

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

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

⁴農博 弘前大学・准教授 農学生命科学部 地域環境工学科 (〒036-8561 弘前市文京町3)

In order to understand the swimming characteristics and swimming ability of demersal fish, swimming experiments were conducted using Goby (*Gymnogobius urotaenia* sp.) during the upstream river migration period. Our observations were as follows: 1) at a flow velocity of 17 cm/s and higher, Gobies adhered to the bottom using the suction cups on their ventral fins, and showed repeated advancement and adherence; 2) the body length of Gobies is between 3–4 cm, and their average swimming speed was found to be 56–107 cm/s, which is 16–31 times the body length; 3) a swimming-curve-formula defining the relationship between swimming speed and swimming time was obtained; and 4) at flow velocities of 44 cm/s and 53 cm/s, we frequently observed Gobies flowing down in exhaustion during advancement.

Key Words : Goby (*Gymnogobius urotaenia*), Swimming ability, Swimming speed, Swimming distance, fishway

1. はじめに

河川に取水堰や頭首工などの河川横断構造物が設けられると、魚類等の河川内移動が阻害され、生息場所の分断や流れ分布の制約が生じる^{1) 2)}。このため、日本各地の河川では、アユや遡河性サケ科魚類などの漁業対象魚種の遡上を目的とした魚道設計が進められてきた³⁾。しかしながら、サケ科魚類の遡上を目的としたプールタイプ魚道において、通し回遊性のカジカ属魚類やウキゴリ属魚類が全く利用できていない事例が報告されており⁴⁾、多様な魚種の河川移動に対応した魚道の設計が求められている。

このような中で、国土交通省は、2005年に「魚がのぼりやすい川づくりの手引き（以下、手引きと称す）」⁵⁾を公表し、魚道設計にあたり、魚道内の最大流速は、対象魚とする魚種のうち最も遊泳能力の弱い魚の突進速度以下とすることを基本とした。同様に、「頭首工の魚道設計指針」⁶⁾では、魚道設計流速は、魚道上り口付近～魚道内～魚道下り口付近において想定される遡上経路の

全線にわたって、設計対象魚種の中で最も遊泳能力が低い魚種の突進速度以下とすることを謳っている。こうした社会的ニーズと基準類の整備を受け、近年では、緩勾配バイパス式魚道や側壁に傾斜をつけた魚道等、遊泳能力が弱い魚類や甲殻類に配慮した魚道の開発、整備、評価も進められている^{7) 8) 9)}。しかし、緩勾配タイプの魚道は、その構造上、必要スペースとコストが従来からの魚道に比べて大きくなるため、対象箇所の制約によっては採用できないことも考えられる。

また、手引きでは、魚道の設計流速設定に必要となる魚種の遊泳能力に関する知見が現状では乏しいため、水路実験等による新しい知見の集積の必要性も課題として挙げている。ここで、魚種の遊泳能力に関する研究をレビューすると、Blaxter¹⁰⁾は、1～5秒間遊泳できる最大遊泳速度を突進速度と定義し、その速度は標準体長（以下、体長と称す）の10倍程度が一般的な目安とされている。また、日本に生息する淡水魚種の遊泳能力に関する研究としては、例えば、塚本・梶原¹¹⁾や梨本¹²⁾などの実験研究があり、近年では、ウグイやオイカワ、アユ、カワムツ、キンブナの突進速度が体長の10倍を大きく上回るこ

とが実験によって明らかにされている^{13), 14), 15), 16)}。しかしながら、遊泳能力が弱いとされるハゼ科・カジカ科などの底生魚⁴⁾の遊泳能力に関する科学的見地に基づいた知見は、シロウオの実験研究¹⁷⁾を除いてほとんどなく、底生魚を対象とした魚道の設計流速を定めるためには、模型を使った遡上実験^{18), 19), 20)}を実施する他は、既往の近似事例を参考にするか技術者の経験に頼らざるを得ないのである。

以上のことから、本研究では、魚道設計に資する底生魚の遊泳特性および遊泳能力に関する知見を得ることを目的とし、遊泳能力の弱い底生魚の代表として、河川遡上期の小型のウキゴリ類を対象とした遊泳実験を行った。

2. 実験方法

(1) 供試魚

供試魚には、青森県一級河川岩木川河口から11km地点に位置する芦野頭首工直下流で採捕されたウキゴリ類を用いた。同水系では、ウキゴリ *Gymnogobius urotaenia* の他に、確認個体数はわずかであるがスミウキゴリ *Gymnogobius petschiliensis* が確認されており、シマウキゴリ *Gymnogobius opperiens* については確認の記録がない²¹⁾。本実験に供試した個体は体サイズが小さく、厳密な同定が困難であったことから、ウキゴリとスミウキゴリを区別せずにウキゴリ類と称して供試した。

図-1 供試魚の体長分布

ここで、ウキゴリの生活史について整理すると、川の産卵場で孵化した仔魚は一度海に入り、そこで2~3ヶ月間滞留して全長2.0cmとなり、再び川に戻って遡上し、下流から中流までのそれぞれの棲息場に棲みつくと考えられている²²⁾。実験地点である岩木川下流域では、毎年概ね6月~8月にかけてウキゴリ類の活発な遡上が見られ、実験には河川を遡上してきた当歳魚を用いるものとした。本実験で供試したウキゴリの個体数は71尾である。また、供試魚の体長分布は図-1に示すとおり3cm台が主であり、平均体長は3.4cmである。なお、実験に際して供試魚の利用は一度きりとし、再利用は行わなかった。

(2) 実験場所と実験日および実験装置

本研究では、泉ら¹⁷⁾の実験のようなスタミナトンネル（管水路）を用い、供試魚を採捕した河川の水を直接通水させて使用する野外実験を採用した。実験場所は、供試魚を採捕した地点の上流側に位置する芦野頭首工左岸である。実験日は、2014年6月28~30日と7月19~20日の計5日間で、集中的に実施した（表-1）。

実験装置の概要を図-2に示す。実験装置は、余水吐と整流板を付設したマノメーター付の貯水槽（幅35cm・高さ30cm・長さ55cm）、スタミナトンネル、挿入用傾斜スタンドパイプ、フレキシブルホース、流速調節用コック2連で構成されている。貯水槽とスタミナトンネルは架台の上に水平に設置され、スタミナトンネルの脇には目盛付の白色板がある。スタミナトンネルは透明ア

表-1 実験日と実験条件

実験月日	実験番号	天気	水温 (℃)	供試魚 (尾)			
				2cm 台	3cm 台	4cm 台	計
2014/6/28	Run.1	晴れ	24.6	2	8	0	10
2014/6/29	Run.2	曇り	24.3	0	9	1	10
2014/6/30	Run.3	曇のち晴	25.5	2	14	0	16
2014/7/19	Run.4	晴れ	23.4	0	5	0	5
2014/7/20	Run.5	晴れ	23.5	3	26	1	30
計				7	62	2	71

図-2 実験装置の概要

クリル製長方形パイプで、その内寸は、幅5.0cm、高さ3.0cm、長さ230cmである。パイプ断面の高さと幅の寸法はウキゴリの遊泳に支障がない大きさである^{23), 24)}。また、スタミナトンネル上端部から下流側40cmの地点に二軸電磁流速計（ACM-250；アレック電子、測定精度±2%、センサー部φ5mm）が据付けられ、スタミナトンネルの断面中心部の流速がリアルタイムに計測できるようになっている。

スタンドパイプから挿入された供試魚は、スタミナトンネル上端部に設けられた仕切網まで遊泳できるようになっており、力尽きて流された個体は、スタミナトンネル下端部の仕切網位置から採捕できる。

(3) スタミナトンネル内のウキゴリ類の遊泳行動

本実験に先立って予備実験を行い、スタミナトンネル内におけるウキゴリ類の遊泳行動の観察を行った。スタミナトンネル内の流速を概ね20~30cm/sとした状態で個体を挿入すると、ウキゴリ類は腹鰭の吸盤を用いてスタミナトンネル底面に吸着した。その後、尾鰭を振動させて上流側に向かって突進行動（以降、前進と称す）を起こし、再び底面に吸着し、以降、前進と吸着を繰り返した（図-3）。但し、挿入後に吸着した状態のまま一向に前進しない個体もいた。これらの個体については、徐々にスタミナトンネル内の流速を上げていくと、促されるように前進することが確認された。宮園・戸松¹⁹⁾は、粗石付斜路式魚道の模型実験において、ウキゴリ類と同じハゼ科のカワヨシノボリの遡上行動を観察し、カワヨシノボリが吸盤で水路底に張りつきながら流れに抵抗し、胸鰭で水路底を押しつけるように移動していくことを報告している。一方、本研究では、予備実験から本実験を通して、供試したウキゴリ類のうち胸鰭を用いて前進した個体は確認されず、前進時にはすべて尾鰭を振動させる遊泳形態をとった。

(4) 実験項目と実験方法

予備実験時のウキゴリ類の遊泳行動を踏まえ、スタミナトンネル内の初期流速は概ね20cm/s~30cm/sとし、底面に吸着するごとに流速を増大させるものとした（図-3）。この際の設定流速値は、全供試一律とし、電磁流速計の読み値で20cm/s、30cm/s、40cm/s、50cm/s、60cm/s、70cm/s、80cm/s、90cm/sの8段階とした。但し、1段階分流速を上げても吸着しつづける個体もあり、この場合は吸着した状態のまま流速を段階的に増大させるものとした。そして、前進行動を起こした際の吸着地点から前進後の吸着地点までを1ステップと位置づけ、その間の遊泳時間と遊泳距離を計測した。なお、流速が定常状態になる前に前進をはじめる個体があり、この場合は、二軸電磁流速計によって流速が定常状態となった時点を確認し、その時点・地点から遊泳時間と遊泳距離の計測を開始した。さらに、供試魚が力尽きて下流方向に

流された際の流速を記録した。

実験時のスタミナトンネル内の流れは満流状態とし、出口部のコックによって流速を調節した。また、供試魚の遊泳時間・遊泳距離の測定および流況把握のために、スタミナトンネル上方にデジタルビデオカメラ（SONY製：HDR-CX420）を設置して、供試魚の遊泳行動と二軸電磁流速計のモニターを同時撮影した。

供試魚の体長・体高・体幅は、遊泳の際のストレスを考慮して遊泳後に計測した。また、あらかじめ実験装置出口部において、設定流速値ごとに流量観測を行い、二軸電磁流速計の読み値と断面平均流速の関係を調べた。

(5) 遊泳速度の整理方法

本実験では、遊泳距離を遊泳時間で除して求めた対地速度に後述する管内代表流速を加えた値を遊泳速度とした。突進速度は、Blaxter¹⁰⁾によって1~5秒間遊泳できる最大遊泳速度と定義されているが、本実験では、遊泳時間が1秒に満たない前進行動も多く確認されたことから、突進速度ではなく単に遊泳速度と称して整理するものとした。

なお、泉ら^{25), 26)}はプールタイプ魚道を遡上する魚が、1秒に満たない短い時間で隔壁部を通過する事例を報告しており、魚が魚道を遡上できるかどうか判断する上では、本実験の整理方法も参考になると考えられる。

3. 実験結果と考察

(1) 水温と管内水理特性・管内代表流速

実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は23.4~25.5℃である（表-1）。

本実験で用いた管内の流速分布は、泉ら¹⁷⁾によって計測されており、壁面の摩擦抵抗のため下層側と上層側の流速が中層部に比べて遅くなっている。ウキゴリ類はおもに底から1cm以下の底面近傍を遊泳したことから、遊泳速度算定に用いる管内代表流速は、魚の頭部近傍の流速とするために、実測流量を管路断面積で除した断面平均流速に、泉ら¹⁷⁾によって得られている鉛直方向流速分布による底面から約5mm地点の補正率を乗じて求めた（表-2）。

図-3 供試魚の遊泳行動と流速操作の模式図

表-2 スタミナトンネル内の設定流速値

設定流速値 No.	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8
電磁流速計読み値(cm/s)	20	30	40	50	60	70	80	90
断面平均流速(cm/s)	19	29	38	48	58	68	78	87
管内代表流速(cm/s)	17	26	35	44	53	62	71	80

(2) 体長と遊泳速度の関係

図-4は、供試魚すべてを対象に体長と遊泳速度の関係を整理したものである。魚類の体サイズと遊泳速度との間には正の相関があるとされているが^{10), 11)}、本実験で供試した個体の体長分布の範囲では、いずれの流速条件でも体長と遊泳速度との間に明確な関係はみられなかった。この要因として、本実験の供試魚の体長分布の幅が2cm未満（標準偏差0.4cm）と小さいことが考えられ、体長と遊泳速度の関係を明らかにするためには、より体サイズの大きい個体を使った実験値の集積が必要と考えられる。

(3) 遊泳特性

以降では、計測数が多く得られた体長3cm台の供試魚について結果を整理する。

図-5、図-6、図-7は、設定流速別に1ステップの遊泳速度と遊泳時間、遊泳距離の平均値および標準偏差を整理したものである。図-5より、1ステップの平均遊泳速度は56～107cm/sで、体長の16～31倍に相当する。また、流速が増加するとともに遊泳速度が大きくなる傾向が認められ、このように流れ場に応じて遊泳速度を変化させる特徴は、ウグイ¹³⁾やオイカワ^{14), 15)}と一致する。一方、1ステップの平均遊泳時間は0.6～2.9秒で、流速が増加するとともに、遊泳時間は短くなった（図-6）。同様に、1ステップの遊泳距離も流速が増加するとともに短くなる傾向が認められ（図-7）、供試魚は流速条件に応じ、吸盤を利用して1ステップの遊泳時間・遊泳距離を巧みに調整しているものと考えられる。

(4) 遊泳速度と遊泳時間の関係

図-8は、1ステップの遊泳時間と遊泳速度の関係を示したものである。個体によるばらつきがみられるものの、遊泳速度が増加するとともに遊泳時間が指数曲線的に短くなる傾向が認められる。塚本・梶原¹¹⁾は、こうした魚類の遊泳速度と遊泳時間の関係を(1)式によって整理している。

$$Vt^k = a \quad (1)$$

ここで、 V ：遊泳速度（cm/s）、 t ：遊泳時間（s）、 a ：一秒間持続できる遊泳速度の理論値、 k ：定数（ $0 < k < 1$ ）である。そこで体長3cm台の計測数 $n = 145$ について、(1)式の a 値および k 値を最小自乗法によって求めた。その結果、 $a = 80$ 、 $k = 0.19$ となった。

(5) 供試魚流下時の流速

図-4 体長と遊泳速度の関係

図-5 管内代表流速と遊泳速度の関係

図-6 管内代表流速と遊泳時間の関係

図-7 管内代表流速と遊泳距離の関係

図-9は、供試魚が力尽きて下流方向に流された際の管内代表流速を整理し、各設定流速における流下個体数のヒストグラムと累積相対度数をまとめたものである。なお、吸盤によって吸着した状態から流下した個体や前進中に頭を反転させて流下した個体は除いている。流速35cm/s以下の条件で流下した個体は10%と少なかったが、流速44cm/s、53cm/sの条件で、前進中に力尽きて流下する個体が顕著に多く、流速53cm/sまでに流下した個体の割合は、78%に上った。

魚道の流速設定や遡上経路の距離設定について言及するためには、一定流速条件において流速とウキゴリが前進できる総距離の関係を把握する必要があるが、本実験ではこれらの解明には至っていないが、体長3cm台のウキゴリ類は、魚の頭部近傍の流速が概ね40～50cm/sを超えると吸盤を使って前進と吸着を繰り返すことが困難になるものと考えられる。泉ら^{25), 27)}は、実際のコンクリート製プールタイプ魚道においてヨシノボリ類・ウキゴリ類と考えられる底生魚が吸盤を使いながら隔壁部を遡上し

ていくことを報告している。また、底生魚の事例ではないものの、現地魚道隔壁での遊泳速度に関する調査研究事例²⁵⁾では、平均体長8.7cmのアユ・ウグイが、距離約20cmの越流部を190cm/s～250cm/sの遊泳速度で通過したことを報告しており、その速度がスタミナトンネル内で計測された遊泳速度¹³⁾と概ね一致することがわかっている。このことから、スタミナトンネルによる実験から得られたウキゴリ類に関する本知見も、魚道設計に際して一つの参考値になると考えられる。ただし、底面の材質・状態によってウキゴリ類の吸着能力には差異が生じることも考えられ、この点は今後の課題である。

4. まとめと今後の課題

魚道設計に資する底生魚の遊泳特性および遊泳能力に関する知見を得ることを目的に、河川遡上期の小型のウキゴリ類を対象とした遊泳実験を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ウキゴリ類は腹鰭の吸盤を用いて底面に吸着し、17cm/s以上の流れ場において、前進と吸着を繰り返した。
- (2) 体長3cm台のウキゴリ類の平均遊泳速度は56～107cm/sで、その速度は体長の16～31倍に相当した。また、流速が増加するとともに遊泳速度が大きくなる傾向が認められた。
- (3) 体長3cm台のウキゴリ類は、遊泳速度が増加するとともに1ステップの遊泳時間が指数関数的に短くなる傾向が認められ、遊泳速度と遊泳時間の関係を表す実験式を得た。
- (4) 体長3cm台のウキゴリ類のうち、流速44cm/s、53cm/sの条件で、前進中に力尽きて流下する個体が顕著に多く、この流れ場では、吸盤を使って前進と吸着を繰り返すことが困難であったと考えられた。

図-8 遊泳時間と遊泳速度の関係

図-9 管内代表流速と流下個体数の関係

今後の課題としては、一定流速条件において、ウキゴリ類が前進できる総距離を明らかにするとともに、ウキゴリ類以外の底生魚の遊泳特性・遊泳能力を解明する必要がある。

また、本実験に用いたスタミナトンネルはアクリル製であり、一般的な魚道に用いられるコンクリートや自然石とは表面粗度が異なる。加えて、魚道は開水路流れであり、気泡を含んだ複雑な流れ場であることが多い。このことから、ウグイ等の事例²⁵⁾のように、遊泳能力が弱い底生魚についても、実際の魚道における遡上行動と水理特性の関係を調べ、スタミナトンネル内での遊泳能力と魚道内での遊泳能力とを比較検証するような実証的研究の集積が必要である。

謝辞：本実験を行うにあたり、岩木川漁業協同組合の齋藤氏にはウキゴリ類の提供で種々お世話いただいた。また、各関係機関、弘前大学農学生命科学部農業水利学研究室の院生・学生諸氏から多大な協力と援助をいただいた。ここに記して心より感謝の意を表します。また、本研究の一部は、平成26年度文科省科学研究補助金基盤研究(C)、平成26年度河川整備基金を受けている。

参考文献

- 1) 森田孝晴, 瀬谷政貴：利根川最下流域に流入する感潮河川最下流部の堰が魚類相に及ぼす影響, 応用生態工学, 15(2), pp.187-195, 2012
- 2) 岩崎明希人, 吉村千洋：横断構造物による河川の分断化が淡水魚の出現確率に及ぼす影響, 土木学会論文集B1(水工学), 68(4), pp. I_685- I_690, 2012
- 3) 財団法人ダム水源地環境整備センター編：魚道の設計, 山海堂, pp5-65, 1991
- 4) 下田和孝, 中野 繁, 小野有五：プールタイプ魚道の設置が北海道の通し回遊魚の流程分布に与える効果, 魚類学雑誌, 50(1), pp.15-23, 2003
- 5) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き, pp.54-55, 2005
- 6) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修：「頭首工の魚道」設計指針, 公益社団法人農業農村工学会, pp.24-25, 2015
- 7) Lonnebjerg, N. : Fishway in Denmark, *Proceedings of the International Symposium on Fishways '90 in Gifu*, pp.253-259, 1990
- 8) 安田陽一, 大津岩夫, 浜野龍夫, 三矢泰彦：多様な水生生物の遡上・降河可能な魚道の提案, 河川技術論文集, 7, pp.221-226, 2001
- 9) 小出水規行：長良川河口堰魚道の遡上魚類群集に関するモニタリングデータの解析, 河川技術論文集, 8, pp.331-336, 2002
- 10) Blaxter, J.H.S. : Swimming Speeds of Fish, *Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in relation to Fishing Techniques and Tactics*, in Bergen, Norway, pp.69-100, 1967
- 11) 塚本勝巳, 梶原 武：魚類の遊泳速度と遊泳能力, 水産土木, 10(1), pp.31-36, 1973
- 12) 梨本勝昭：魚の尾の動きと遊泳速度との関係, 日本水産学会誌, 46(3), pp.307-312, 1980
- 13) 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明：河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について, 農業土木学会論文集, 244, pp.171-178, 2006
- 14) 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明, 加藤 幸：自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験, 水工学論文集, 51, pp.1285-1290, 2007
- 15) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 飯國洋平：流速および体長別のオイカワの突進速度, 水工学論文集, 52, pp.1183-1188, 2008
- 16) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 渡邊拓也, 脇 健樹：河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究～アユ, オイカワ, カワムツ, ギンブナを対象～, 土木学会論文集B, 65(4), pp.296-307, 2009
- 17) 泉 完, 大田敏貴, 東 信行：河川水を用いた遊泳実験によるシロウオの遊泳能力と尾部の動き, 農業農村工学会論文集, 283, pp.41-50, 2013
- 18) 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および遡上特性, 水工学論文集, 44, pp.1197-1202, 2000
- 19) 宮園正敏, 戸松修：斜路式魚道における粗石の配置について, 砂防学会誌, 56(1), pp.3-12, 2003
- 20) 本田隆秀, 浅利修一, 秋野淳一, 高澤浩二, 高島清光, 小林 博：粗石付護床工ブロックの魚道工への適用と治水機能に関する一考察, 土木学会論文集G(環境), 168(7), pp.III_227-III_237, 2012
- 21) 東 信行, 亀井陽太郎, 齋藤 裕, 泉 完：岩木川における未記録魚種の採捕記録, 青森自然誌研究, 10, pp.71-72, 2005
- 22) 道津喜衛：ウキゴリの生活史, 九大農芸雑誌, 15(3), pp.367-374, 1955
- 23) 久保田哲也, 中西 章, 谷口政由貴：砂防施設の斜路式魚道における溪流魚の遡上水理条件, 砂防学会誌, 53(2), pp.48-56, 2000
- 24) 泉 完, 菊池真弘, 加藤 幸, 東 信行：河川水を用いたヤマメ稚魚の尾部の動きと遊泳速度, 農業農村工学会論文集, 278, pp.99-107, 2012
- 25) 泉 完, 高屋大介, 工藤 明, 東 信行：アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性, 農業土木学会論文集, 217, pp.55-63, 2002
- 26) 泉 完, 菅原賢治, 工藤 明, 東 信行：パーチカルスロット型魚道におけるアメマス の現地放流実験, 農業土木学会誌, 72(7), pp.45-50, 2004
- 27) 泉 完, 神山公平, 藤原正幸：全面越流型階段式魚道プール内の流況と魚の遊泳行動, 農業農村工学会論文集, 269, pp.127-135, 2010

(2015. 9. 30受付)