

魚道設計のための小型淡水魚の
遊泳能力の研究

2018

矢田谷 健一

目 次

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査 | 4 |
| 2.1 既往知見と調査の目的 | 4 |
| 2.2 調査対象魚道の概要 | 6 |
| 2.3 調査項目と調査方法 | 10 |
| 2.4 調査結果 | 16 |
| 3. 小型淡水魚の遊泳能力の測定 | 25 |
| 3.1 対象魚種の選定 | 25 |
| 3.1.1 選定の考え方 | 25 |
| 3.1.2 小型通し回遊魚の選定 | 26 |
| 3.1.3 水田を含む水域ネットワークを利用する淡水魚の選定 | 27 |
| 3.1.4 対象魚種の特徴と生活史および遊泳能力に関する既往知見 | 28 |
| 3.2 実験場所と実験装置 | 31 |
| 3.3 供試魚と実験方法 | 38 |
| 3.3.1 ワカサギ | 38 |
| 3.3.2 ウキゴリ類 | 41 |
| 3.3.3 ドジョウ | 48 |
| 3.4 実験結果と考察 | 51 |
| 3.4.1 遊泳速度等の整理方法 | 51 |
| 3.4.2 ワカサギ | 54 |
| 3.4.3 ウキゴリ類（実験 A） | 62 |
| 3.4.4 ウキゴリ類（実験 B） | 69 |
| 3.4.5 ドジョウ | 76 |
| 3.4.6 各魚種の遊泳能力の比較 | 85 |
| 3.4.7 魚道設計に資する遊泳能力に関する指標の考案 | 87 |

| | |
|-------------------------|----|
| 4. 総括 | 92 |
| 4.1 小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査 | 92 |
| 4.2 小型淡水魚の遊泳能力の測定 | 93 |
| 5. おわりに | 96 |
| 引用文献 | 99 |

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程分布の制約が生じる(棗田・瀬谷, 2012; 岩崎・吉村, 2012)。このため、日本各地の河川では、主に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の設置が進められてきた。また、近年では、水田を含む水域ネットワークの復元を目的とした水田魚道(小規模魚道)の研究・設置も試みられている(例えば, 端, 1999; 鈴木ら, 2000)。

ここで、我が国の河川や水路に設置されている主要な魚道形式である、プールタイプ・水路タイプ魚道の設計における一般的なポイントを遡上魚の視点に立って述べれば、①魚道上り口がわかりやすい、②魚道内へ容易に進入できる、③魚道水路内を容易に通過できる、④通過後に取水口等へ迷入しない、⑤外敵に襲われにくい、ことが挙げられ、これに加えて維持管理の容易さが大切となる。魚道は“魚類等の通り道”という性質上、上り口から下り口までの連続性を欠くことが許されず、上記したポイントのすべてが不可欠となる。しかし、研究者の立場から考えた場合、これらを総じてテーマに取り上げることは既設魚道のモニタリング検証以外には難しく、多くの場合それぞれを独立して考究し、未知な問題の解明に努めざるを得ない。そこで、本研究では上記したポイントのうち、③の“魚道水路内通過の容易さ”を研究の対象とした。

魚道水路内の設計にあたっては、魚道内の水理特性と魚類等の挙動を検証すると同時に、魚類等の遡上能力、すなわち魚であれば遊泳能力を把握することが非常に重要となる。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」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、農林水産省農村振興局監修(2015)の「頭首工の魚道設計指針」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。

魚類の遊泳に関する研究は，塚本・梶原（1973）によれば 19 世紀末に始まったとされ，その後の成果は，Beamish(1978)や板沢・羽生（1991），Videler（1993）等によって詳しくまとめられている．魚類の遊泳速度は，前述した発揮できる最大速度とされる突進速度（burst speed）と，ある程度長い時間持続できる巡航速度（cruising speed）に分けられることが多く，計測時間は研究者個々によって異なるものの，一般的には突進速度で数秒間（1～5 秒），巡航速度は 60 分間とされている（Blaxter, 1967）．これらの速度は，魚の体長と尾鰭の振動数に起因すると考えられており，Bainbridge（1958）や梨本（1980），泉ら（2012, 2013）によって研究が行われている．しかし，力学的観点から得られた尾鰭の振動数と遊泳速度の関係式を魚道設計へそのまま適用することは難しく，一般的には魚道設計には用いられていないことが実状である．そのため，一応の目安として示された，突進速度は標準体長（以後“体長”または“BL”と称す）の 10 倍/s，巡航速度は体長の 2～4 倍/s という指標（Bainbridge 1958；Blaxter, 1967）が現在では広く認知されている．このような突進速度と巡航速度に関する研究は，日本産淡水魚においても少なからず行われている．白石（1955）はアユ *Plecoglossus altivelis* を対象に，ガラス管内での遊泳速度を計測し，体長 4cm 前後の魚では流速 113cm/s が堪えられる最大限度だと予想しており，小山ら（1967, 1969）はアユの遊泳に関する過去の報告をまとめ，遊泳する際の適当な流速は 50～120cm/s，最高流速は 120～220cm/s 程度としている．また，実験によってニジマス *Oncorhynchus mykiss* やヒメマス *Oncorhynchus nerka* の遊泳速度と遊泳特性を検討し，流速によって遊泳速度が変化する等の知見を得ている．塚本・梶原（1973）は海水魚を含む数種の遊泳能力を計測し，遊泳速度と遊泳時間の関係に加えて，その評価方法として遊泳能力指数を提案している．また，近年では，ウグイ *Tribolodon hakonensis* やオイカワ *Opsariichthys platypus*，アユ，カワムツ *Candidia temminckii*，キンブナ *Carassius auratus* ssp.2 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（泉ら，2006, 2007, 2009；鬼束ら，2008a, 2009）．一方で，社会的ニーズや前述の基準類の整備を受け，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るが，

遊泳能力が弱いとされるハゼ科等の小型淡水魚の遊泳能力に関する科学的見地は、泉ら（2013, 2017）のシロウオ *Leucopsarion petersii* の研究を除いてほとんどない。下田ら（2003）が示した、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という事例報告からも、遊泳能力が弱いと考えられる小型の淡水魚の遊泳能力を把握することが、今後の魚道設計の進展に資すると考えられる。

そこで本研究では、まず、我が国の既設魚道の9割以上を占める代表的な形式である階段式魚道（中村, 1995）を対象に現地調査を行い、ウキゴリ類等を中心とした小型の淡水魚の遡上困難な水理条件を調べ、既設魚道の流速に関わる課題を明らかにした。そして、体長概ね10cm以下の淡水魚を小型淡水魚と定義し、ウキゴリ類を含む3種の淡水魚を対象にスタミナトンネル（管水路）による現地遊泳実験を行うことで、対象魚の遊泳能力を検証し、さらに実験から得られた知見の魚道設計への適用方法について検討した。

2. 小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査

2.1 既往知見と調査の目的

魚道の機能を今後さらに向上させていくためには、実験的研究や魚道内流況の解析に加え、実河川に設置された魚道のモニタリング調査等を行い、現場の課題を魚道の研究・計画・設計へフィードバックすることが極めて重要である。

既設魚道の実地調査事例は、代表的なものとして長良川河口堰における魚道を遡上した魚類等の採捕調査報告（住谷ら，2002）がある。また，金子ら（1997）は，秋川を対象とした調査によって簡易デニール式魚道はゴミや落下物による閉塞が激しかったことを指摘した。竹内ら（1995）は，山口県のアイスハーバー型魚道を対象に遡上調査を行い，プール間落差が30cm程度であれば，落下流速が200cm/sを上回っていても稚アユは遡上可能であることを調べた。さらに，泉ら（2010）は，青森県の階段式魚道を対象とした調査によって，ハゼ科底生魚が吸盤を利用して隔壁下流面を垂直に移動した後，流速100cm/s以上の切欠き天端を直進して遊泳する割合が多いことを調べた。

一方，今後の魚道設計の進展のためには，既設魚道を遡上できていない魚類等の存在について着目した研究が必要と考えられるが，こうした研究事例は少ない。このような中で，冒頭で述べたように下田ら（2003）は，サケ科魚類の遡上を目的とした北海道のプールタイプ魚道において，通し回遊性のカジカ属，ウキゴリ属魚類が全く利用できていないことを調べた。しかしながら，対象魚道の構造や水理条件は明らかにされておらず，どのような条件下で遡上障害が生じているかは明らかになっていない。

そこで，本章では，既設魚道において魚類の採捕調査，水中ビデオカメラ撮影調査，流速分布調査を実施し，河川遡上期の小型ウキゴリ類等の遡上実態を調べるとともに，魚が遡上に失敗して流下する越流部付近における水理条件を明らかにした。

なお，調査対象とした魚道は切欠きを有するプール間落差0.2mの全面越流型階段式魚道である。我が国の既設魚道の9割以上は階段式魚道とい

われており（中村，1995），そのプール間落差は 0.2～0.3m が多い（安田，2011）ことから，調査対象魚道と類似した幾何構造を有する魚道は，全国に多数存在するものと考えられる．

2.2 調査対象魚道の概要

調査を行った魚道は、青森県一級河川岩木川に設置されている頭首工の左岸側に付設された全面越流型階段式魚道である。本頭首工は、河口から約11kmに位置し、岩木川河口から一つの河川横断構造物である。

図2-1～図2-3に調査対象魚道の概要図を示す。また、図2-4～図2-7に、調査対象魚道の現況写真を示す。魚道は全長12m、標準幅4.0m、階段間隔3.0m、プール間落差0.2m、隔壁厚0.4m、隔壁数6基のコンクリート製である。プール底面部は水平で阻柱が4基設置されており、下流側プール底面から隔壁天端（非切欠き部）までの高さは0.95mである。また、隔壁には切欠き（幅2.0m、切欠き高0.15m）が施されている。隔壁の形状は、切欠き部、非切欠き部ともに面取りがない長方形断面である。なお、最上流端隔壁を除く隔壁の非切欠き部底面には縦0.1m×横0.2mの潜孔がある。

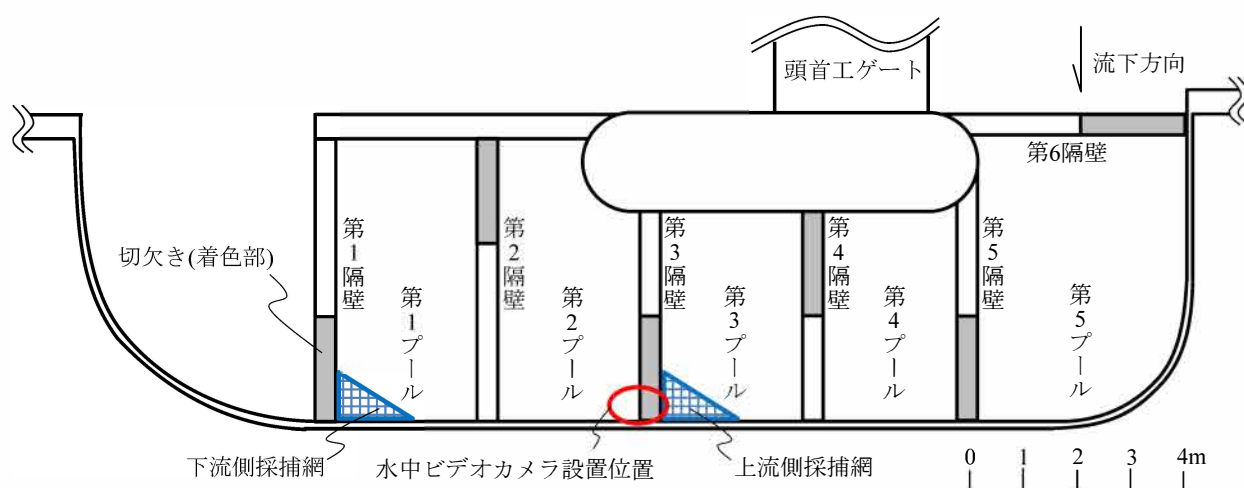


図 2-1 調査対象魚道の全体概略平面図

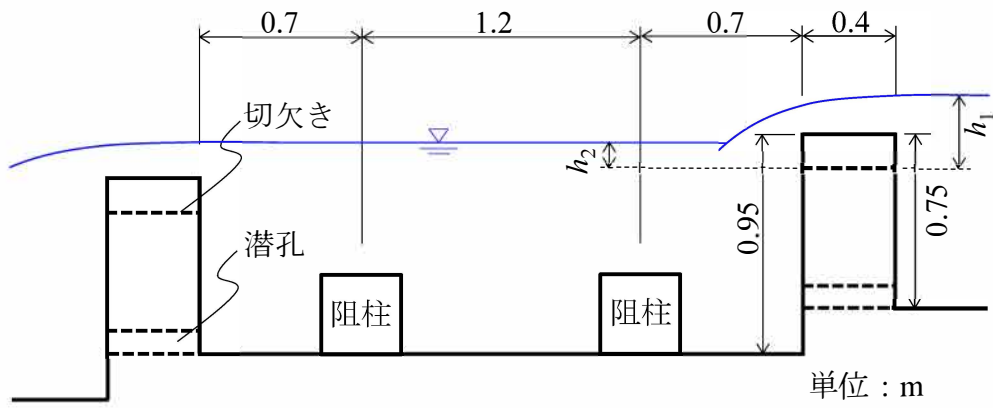


图 2-2 鱼道纵断面图 (第 2 隔壁 ~ 第 3 隔壁)

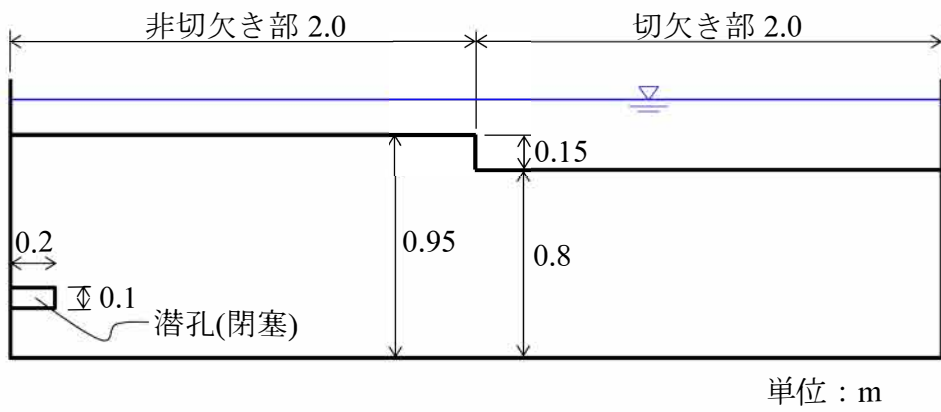


图 2-3 鱼道横断面图 (第 3 隔壁下流面)



図 2-4 調査対象魚道全景（下流側から望む）



図 2-5 調査対象魚道上り口



图 2-6 調査対象魚道下り口



图 2-7 頭首工全景

2.3 調査項目と調査方法

調査にあたっては、当該河川の小型淡水魚の代表として、ウキゴリ類に着目し、河川遡上期のウキゴリ類の魚道遡上実態を捉えることを主目的とした。調査は、ウキゴリ類の遡上期にあたる 2016 年 7 月 16 日～18 日の短期間に集中的に実施した。本調査の項目は 1) 採捕調査、2) 流速分布調査、3) 水中ビデオカメラ観測調査の 3 項目に分けられる。また、それぞれの調査時には、第 3 隔壁切欠き部上流側の越流水深 h_1 (図 2-2) を測定した。

(1) 採捕調査

下流河川から魚道上り口に進入する魚類と、プール間落差 20cm の隔壁部の遡上に成功する魚類について、魚種、個体数、体長の差異を調べるために、魚道入口部と魚道中間部に採捕網を設置し（以降、それぞれを下流側採捕網と上流側採捕網と称す）、採捕調査を行った（図 2-1）。採捕には三角籠網（目合い 5mm×4mm）を用いた（図 2-8, 図 2-9）。その口径寸法は、下流側採捕網が幅 0.85m×高 0.40m、上流側採捕網が幅 0.75m×高 0.54m であり、いずれも“かえし”が設置されている。

第 1 プール内水位は、下流河川からの背水を受け、第 1 隔壁周りの流況が安定していたことから、第 1 プール内への進入条件は魚類にとって支障がない条件と判断し、下流側採捕網は、第 1 隔壁直上流に設置した。上流側採捕網は、下流側河川水位の影響を受けない最下流端プールに相当する第 2 プール上流側の第 3 隔壁直上流に設置した。なお、採捕時の第 3 隔壁潜孔部は閉塞状態であった。採捕網の横断方向設置位置については、佐藤ら（2003）の階段式魚道における採捕調査結果よりウキゴリ類の 8 割以上が切欠き側を遡上したこと、さらには魚類が主に側壁沿いを遡上すること（高嶋・中村，1984；竹内ら，1995；泉ら，2002；鬼束ら，2012；青木ら，2015）を踏まえ、採捕網を切欠き側側壁部に密着させるものとした（図 2-1）。調査は 2016 年 7 月 16 日に実施した。両採捕網の設置は同時刻ではなく交互に行うものとし、

下流側採捕網は 8 : 30 ~ 10 : 30, 12 : 30 ~ 14 : 30, 上流側採捕網は 10 : 30 ~ 12 : 30, 14 : 30 ~ 16 : 30 の計 4 時間ずつ網入れし, 2 時間おきに引き上げた。採捕した魚類のうち, ヨシノボリ類・ウキゴリ類については属レベル, 他については種レベルでの同定を行い, 体長を測定した後, 速やかに放流した。ここで, 本水系ではシマウキゴリ *Gymnogobius opperiens* の確認記録はなく, スミウキゴリ *Gymnogobius petschiliensis* についても確認個体数はわずかであり (東ら, 2005), 採捕されたウキゴリ類の大多数はウキゴリ *Gymnogobius urotaenia* であると考えられる。なお, 下流側採捕網で採捕した個体は第 2 プールに放流し, 上流側採捕網で採捕した個体は魚道の上流河川に放流するものとした。また, 調査開始から調査終了時点にかけて, 2 時間おきに河川水温を計測した。



図 2-8 採捕調査に使用した三角籠網（下流側採捕網）



図 2-9 採捕調査に使用した三角籠網（上流側採捕網）

(2) 流速分布調査

上流側採捕網を設置した第3隔壁切欠き部周りの流速分布を調べるために、流速測定を2016年7月18日の10時から11時30分を実施した。測定には、三軸電磁流速計（ACM-300；アレック電子）を用いて、三軸方向成分（X：横断方向，Y：流下方向，Z：深さ方向）の流速を時定数5sで観測した。さらに、流れが卓越するY方向成分については、サンプリング間隔10Hzで10秒間データレコーダに記録させ、流速変動の指標として標準偏差を計算した。測定位置は、後述する水中ビデオカメラのレンズ位置から側壁の間の概ね中央を計測するものとし、側壁から一律15cmの位置を対象として、計24点で観測した。また、切欠き部の越流形態を調べると、下流水深 h_2 （図2-2）は上流側の越流水深 h_1 の2/3以下で、完全越流状態であった。このことから、階段式魚道越流部の流速の目安として一般的に用いられる(1-1)式（農林水産省農村振興局，2015）によって、限界水深で流下する断面平均理論流速を算出し、観測値との比較を行うものとした。

$$V_s = \sqrt{(2/3)gh_1} \quad (1-1)$$

ここで、 V_s ：断面平均理論流速， h_1 ：隔壁天端からの上流側越流水深である。

加えて、下流側採捕網を設置した第1隔壁切欠き部においても、側壁から50cmの位置の切欠き天端中心部の流速を鉛直方向に計4点観測した。

(3) 水中ビデオカメラ観測調査

切欠き部周りの魚類の遊泳行動を調べることを目的とし、水中ビデオカメラ2台（以降、それぞれ切欠き天端カメラ、切欠き背面カメラと称す）による水中映像撮影を2016年7月17日に行った。

切欠き天端カメラ（WG-M2；RICOH製）は、第3隔壁の切欠き天端上に据付け、視野を固定した状態で側壁方向を20分間撮影・録画した（図2-10）。切欠き背面カメラ（SY7000DVR；EYOYO製）は、第3隔壁切欠き部の直下流プール内に据付け、切欠き部の越流水脈と水脈下部の緩流域を10時20分から60分間撮影・録画した（図2-10）。

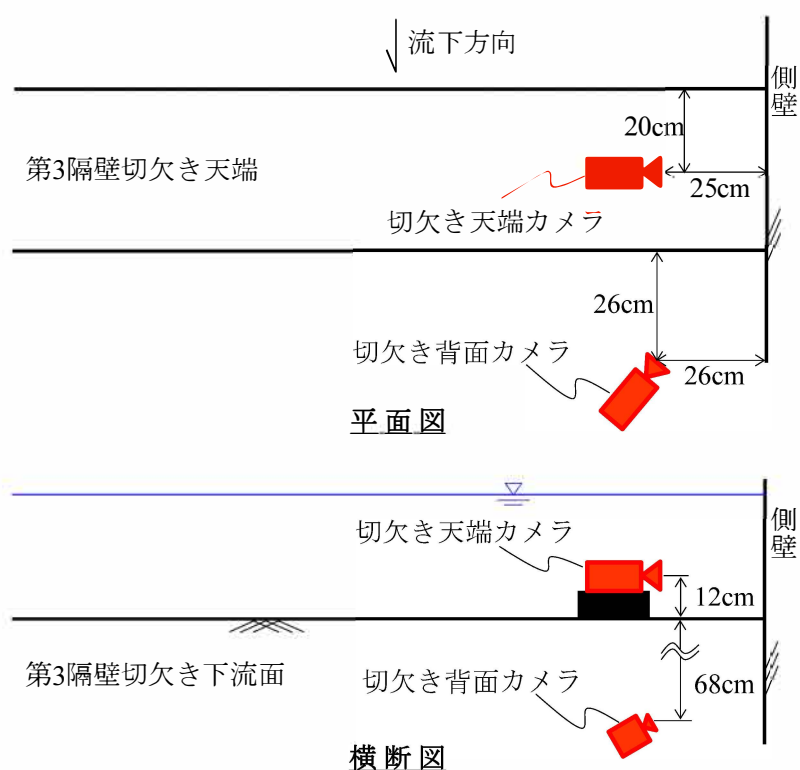


図 2-10 水中ビデオカメラ設置図

2.4 調査結果

(1) 採捕調査結果

調査日の天気は晴れ後くもりで、河川水温は 22.5~24.5℃であった。表 2-1 に採捕された魚類の個体数、体長の平均値、最大値、最小値、標準偏差を示す。採捕魚は 11 種類合計 3,023 尾で、このうちウキゴリ類が 2,845 尾となり、全体の 94%を占めた。そこでウキゴリ類に着目すると、下流側の採捕数が 2,787 尾であるのに対し、上流側の採捕数は 58 尾と少なく、下流側の 2%だった。魚道全幅を対象とした採捕ではないことから、隔壁全体の通過数や遡上率の評価はできないが、後述する水中ビデオカメラ撮影によって遡上できずに流下する小型魚が確認されたことから、多数のウキゴリ類が魚道入口部に進入するものの、第 3 隔壁部を遡上できた個体はわずかであったことが示唆される。ここで、佐藤ら (2003) が、本調査魚道の対岸側に設置された概ね同構造の階段式魚道において採捕調査を行っていることから、この結果を引用する。佐藤らの調査では、魚道最下流部隔壁（下流側河川水位の影響を受けた潜り越流状態）における三角籠網によるウキゴリ類の採捕数は、30 分間で 811 尾（平均体長 3.8cm）にのぼった。その一方で、同日に魚道上流端全幅に設置された敷き網で採捕されたウキゴリ類は 26 時間合計でわずか 15 尾であり、その 8 割以上が切欠き側で採捕された。佐藤らの調査結果と今回の採捕調査結果から、本研究で対象とした左岸側魚道においても大多数のウキゴリ類が魚道上流端まで到達できていないものと推察される。

次に、下流側と上流側で採捕されたウキゴリ類の体長分布を比較した（図 2-11）。なお、下流側採捕網で採捕されたウキゴリ類の体長は、無作為に選んだ計 407 個体を対象に計測したものである。平均体長は、下流側の採捕個体の 3.5cm（ $n=407$ ）に比べて上流側の採捕個体が 3.6cm（ $n=58$ ）とわずかに大きく、有意な差が見られた（ t 検定、 $p<0.05$ ）。また上流側採捕網では、体長 3.1cm 以下の個体がまったく確認されず、

体サイズの小さな個体は，特に遡上の制約を受けているものと考えられる．

ウキゴリ類に次いで採捕数が多かったワカサギ *Hypomesus nipponensis* について着目すると，下流側と上流側で採捕数に大きな差はなかった．体長を比較すると，上流側採捕網では，4.1cm以下の個体がまったく確認されず（図 2-11），ウキゴリ類と同様に体サイズの小さな個体については，遡上の制約を受けている可能性がある．

なお，採捕調査期間における第3隔壁切欠き部の越流水深 h_1 は，概ね 30cm 程度であったが，頭首工のゲート操作が要因と考えられる魚道内の流量低下が 14:00 頃から徐々に生じ，16:30 時点の越流水深 h_1 は 22.5cm まで低下した．上流側採捕網による 16:30 時点の採捕数が，12:30 時点に比べて極端に増加した要因は，遡上魚の日周期特性（佐藤ら，2003）の他に，上記の越流水深低下に伴う流速低減による効果も考えられる．

最後に，上流側採捕網のみで採捕されたカジカ中卵型 *Cottus sp.* にも着目したい．本種は遊泳能力が弱い魚とされており，第3隔壁切欠き部の遡上を確認されたことは興味深い．

表 2-1 採捕魚種と採捕数および標準体長

| 魚種 | 下流側採捕網 | | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|----------|-----|-----|------|
| | 採捕数(尾) | | | 標準体長(cm) | | | |
| | 10:30 | 14:30 | 合計 | 平均 | 最大 | 最小 | S.D. |
| ワカサギ | 6 | 48 | 54 | 4.4 | 5.3 | 3.7 | 0.3 |
| ウグイ | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| モツゴ | 6 | 0 | 6 | 3.1 | 3.4 | 2.9 | 0.2 |
| ビワヒガイ | 4 | 0 | 4 | 3.3 | 3.4 | 3.1 | 0.1 |
| ニゴイ | 12 | 9 | 21 | 3.5 | 4.1 | 2.9 | 0.3 |
| ヨシノボリ類 | 2 | 0 | 2 | 5.0 | 5.1 | 4.8 | 0.2 |
| ヌマチチブ | 2 | 0 | 2 | 4.1 | 4.2 | 4.0 | 0.1 |
| ウキゴリ類 | 1,870 | 917 | 2,787 | 3.5 | 4.3 | 2.6 | 0.3 |
| マハゼ | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| カジカ中卵型 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| ヌマガレイ | 4 | 8 | 12 | 4.5 | 6.7 | 3.0 | 1.2 |
| 合計 | 1,906 | 982 | 2,888 | | | | |

| 魚種 | 上流側採捕網 | | | | | | | 上下流合計 採捕数(尾) |
|--------|--------|-------|-----|----------|------|------|------|-----------------|
| | 採捕数(尾) | | | 標準体長(cm) | | | | |
| | 12:30 | 16:30 | 合計 | 平均 | 最大 | 最小 | S.D. | |
| ワカサギ | 4 | 65 | 69 | 8.8 | 12.3 | 4.2 | 2.1 | 123 |
| ウグイ | 1 | 0 | 1 | 12.4 | 12.4 | 12.4 | - | 1 |
| モツゴ | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | 6 |
| ビワヒガイ | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | 4 |
| ニゴイ | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | 21 |
| ヨシノボリ類 | 0 | 1 | 1 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | - | 3 |
| ヌマチチブ | 1 | 3 | 4 | 4.4 | 5.2 | 4.0 | 0.6 | 6 |
| ウキゴリ類 | 3 | 55 | 58 | 3.6 | 4.2 | 3.2 | 0.2 | 2,845 |
| マハゼ | 0 | 1 | 1 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | - | 1 |
| カジカ中卵型 | 0 | 1 | 1 | 3.4 | 3.4 | 3.4 | - | 1 |
| ヌマガレイ | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | 12 |
| 合計 | 9 | 126 | 135 | | | | | 3,023 |

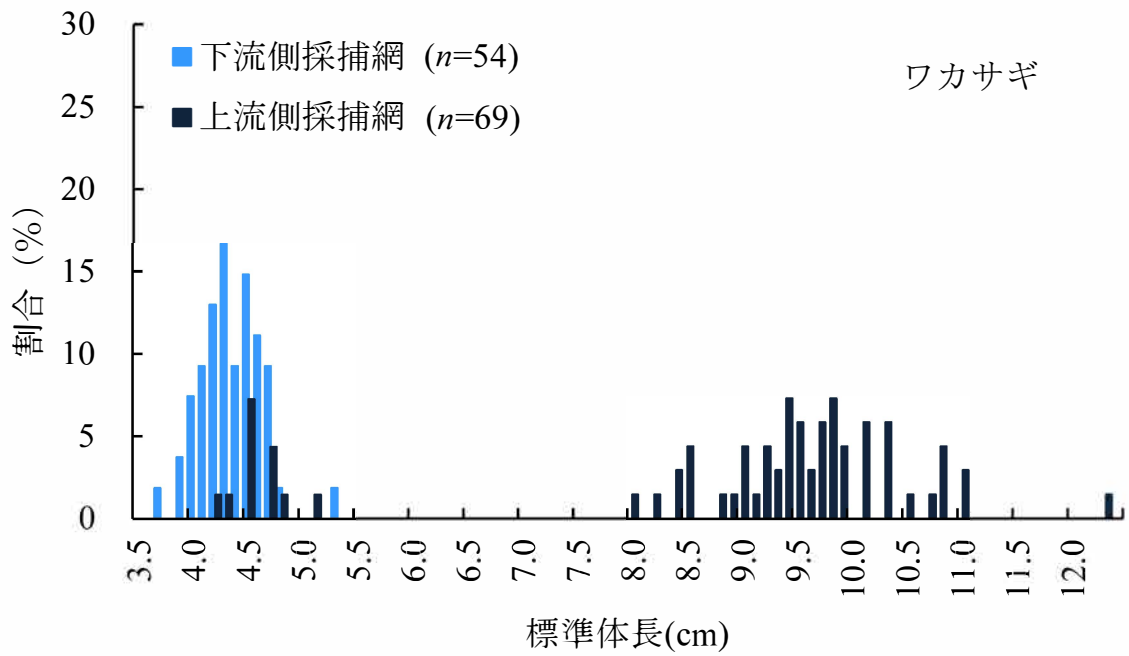
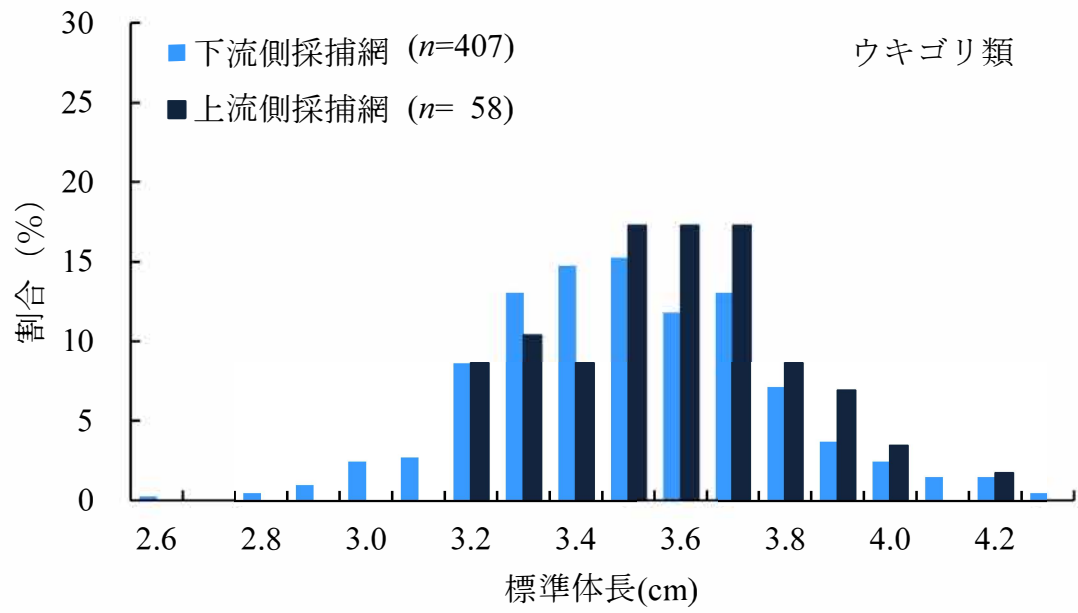


図 2-11 採捕魚の標準体長組成

(2) 隔壁切欠き部の流況

流速分布調査開始時点と終了時点の第3隔壁切欠き部の越流水深 h_1 は、それぞれ 30.0cm と 31.1cm で、調査期間中に水位の大きな変動は見られなかった。図 2-12 に、第3隔壁切欠き部周りの Y-Z 成分合成流速ベクトルと X-Y-Z 成分合成流速コンターの重ね図を示す。また、図 2-13 に、Y-Z 成分合成流速ベクトルと Y 成分流速標準偏差コンターの重ね図を示す。両図は左岸側壁から、15cm の位置の流況を示している。切欠き部天端の流速は 120~220cm/s であり、このうち天端底面近傍の流速は 140~150cm/s で上層部に比べて標準偏差が高い。切欠き下流側では表面流が卓越し、水脈の流速は 200cm/s を上回っている。一方、切欠き部下流側の越流水脈下部には比較的緩流な空間が形成されている。次に、越流部の断面平均理論流速 V_s を (1-1) 式によって求めると約 140cm/s となり、理論値に比べて観測値の方がやや速い結果となった。これは上流側プールの表面流が完全に減勢しないまま切欠き部に到達し、越流部の流速を加速させているためであると考えられる。

一方、第1隔壁上の流れは、前述のように下流からの背水を受ける水理条件であった。この隔壁切欠き部天端の底面から 2.5cm と 5.0cm の流速は、それぞれ 2cm/s と 15cm/s であった。体長 3cm 台のウキゴリ類が吸盤を利用して吸着と前進を繰り返す行動が困難になる流速は 40~50cm/s であるから [3.4.3 ウキゴリ類 (実験 A) より]、第1隔壁切欠き部の流速は、ウキゴリ類の遡上に支障を与える条件ではなかったものと考えられる。

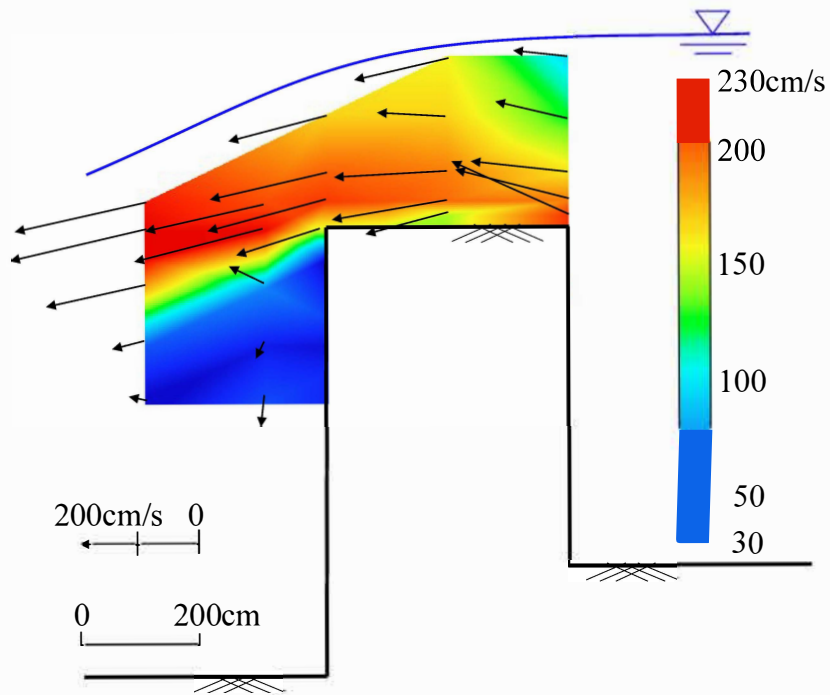


図 2-12 2次元流速ベクトルと3次元流速コンター

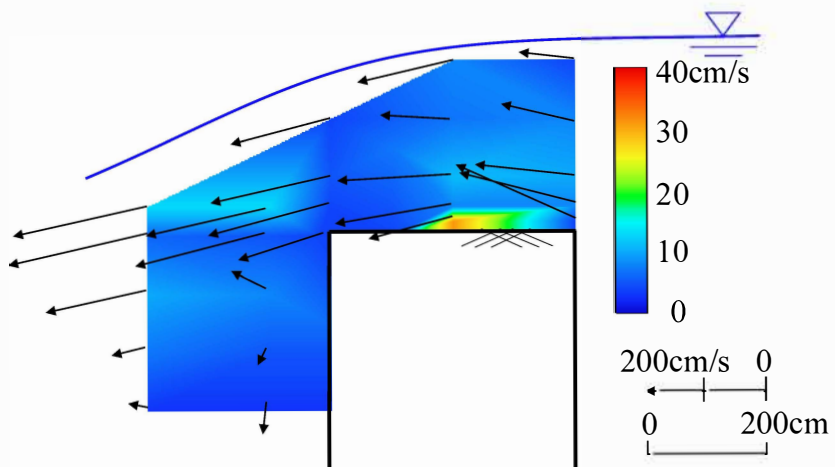


図 2-13 2次元流速ベクトルとY成分流速標準偏差

(3) 切欠き部周りの遡上魚の遊泳行動

水中ビデオカメラ撮影期間における第3隔壁切欠き部の越流水深 h_1 は 28.5～31.5cm であり，流速分布調査実施時と同程度であった。

水中ビデオカメラ映像から視認できた個体の行動，魚種，体長を分類し，表 2-2 に整理した。魚道内の流水は濁りが強く視認範囲には制約があり，確認できた個体数は 10 尾にとどまった。また，映像による魚種の厳密な同定は困難であったことから，“遊泳魚”と“底生魚”に区分した。個体の行動については，“遡上を試みて視野外へ移動 (Case1)”，“遡上を試みて流下 (Case2)”および“上流側から流下 (Case3)”に分類した。このうち Case1 については，映像内では流下が確認されないものの，切欠き部の通過成功有無は確認できていない。表 2-2 に示した分類 1-B-1 は，ワカサギと考えられる遊泳魚が越流水脈背面から，水脈へ突進したものである。一方，分類 1-B-2，2-A は，魚影，体サイズ，採捕調査から得られた魚類相を踏まえると，ウキゴリ類である可能性が高い。そこで，これらの個体の遊泳行動を模式化し，XYZ 成分合成流速コンター図との重ね合わせを行った（図 2-14）。1-B-2 の個体は，切欠き背面上端部に定位した。これは，腹鰭の吸盤を用いて吸着している状態であると考えられる。その後，越流水脈に突進し，切欠き天端底面付近を遊泳して上流側へ姿を消した。この遊泳行動は，泉ら（2010）の階段式魚道における底生魚の遊泳行動観察結果と一致する。一方，2-A の個体は，切欠き天端カメラによって撮影した個体であることから，切欠き背面部における行動は不明であるが，切欠き天端下流端部から越流水脈に突入後，前進できずに，即時に流下した。このことから，確認個体数が少ないものの，ウキゴリ類と考えられる小型魚にとって，前項で示した切欠き部越流水脈の流況は，容易に遡上できる環境ではないものと推察される。

表 2-2 水中ビデオカメラ確認個体の分類

| 個体の行動 | 確認カメラ | 魚種 | 体長 | 確認個体数 | 分類 | | | | | |
|--------------|-------|-----|---------|--|---------|--|--|--|--|-----|
| Case1 | B | 遊泳魚 | 5-10cm | 4尾 | 1-B-1 | | | | | |
| 遡上を試みて視野外へ移動 | B | 底生魚 | 5cm未満 | 1尾 | 1-B-2 | | | | | |
| Case2 | A | 不明 | 5cm未満 | 3尾 | 2-A | | | | | |
| 遡上を試みて流下 | B | 遊泳魚 | 5-10cm | 1尾 | 2-B | | | | | |
| Case3 | A | 遊泳魚 | 10-15cm | 1尾 </tr <tr> <td>上流側から流下</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>3-A</td> </tr> | 上流側から流下 | | | | | 3-A |
| 上流側から流下 | | | | | 3-A | | | | | |

A:切欠き天端カメラ, B:切欠き背面カメラ

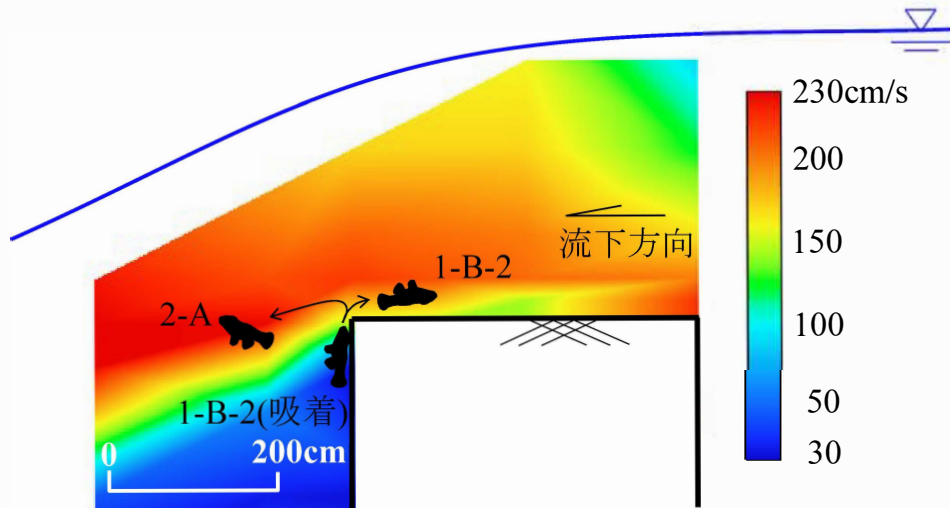


図 2-14 小型魚の遊泳行動の模式図

(4) 調査結果のまとめ

青森県一級河川岩木川の既設全面越流型階段式魚道を対象とし、河川遡上期のウキゴリ類等の小型淡水魚の遡上実態を調べるために、採捕調査、切欠き部の流速分布調査および水中ビデオカメラ観測調査を行った。この結果、プール間落差 20cm、面取りが無い厚さ 40cm の切欠き部において、越流水深 30cm 前後の水理条件では、体長 5cm 未満のウキゴリ類等の遡上が困難であるものと考えられた。水中ビデオカメラ観測結果より、ウキゴリ類と考えられる底生魚が切欠き天端下流端部から越流水脈に突入後、前進できずに即時に流下したことから、切欠き天端の流速 120cm/s～220cm/s が、ウキゴリ類の最大遊泳速度（突進速度）を上回っていることが遡上困難となる主要因であると考えられる。

鬼束ら（2008b）は、階段式魚道のプール間落差と流量を系統的に変化させたオイカワおよびカワムツの遡上実験によって、国土交通省河川局（2005）の水位落差の推奨値である 10～20cm の範囲では遡上が容易であったことを示しているが、本調査で対象としたウキゴリ類のように、より小型の淡水魚にとっては、プール間落差 20cm は遡上困難な条件であることが示唆された。これは、今後の魚道設計にあたり、これまで以上に小型淡水魚へ配慮した設計を行うことの重要性を示すものであり、魚道の設計流速等の指標となる小型淡水魚の遊泳能力の把握が必要であることを示唆するものである。

3. 小型淡水魚の遊泳能力の測定

3.1 対象魚種の選定

3.1.1 選定の考え方

突進速度等の遊泳能力は、遊泳型および体長が同一でも魚種によって異なることがわかっており（塚本・梶原，1973；鬼東ら，2009），魚種ごとにそれぞれ遊泳能力を解明していくことが望まれる。しかしながら，日本産淡水魚全魚種を対象に遊泳実験を行うことは現実的には困難であり，実験対象魚種を絞り込むことが必要である。そこで本研究では，次の理由から，小型淡水魚のうち“通し回遊魚”と“水田を含む水域ネットワークを利用する魚類”に着目した。はじめに，通し回遊魚についてである。森（1999）は，河川横断構造物による魚類への影響について，川と海を行き来する生活史を持つ通し回遊魚に対して特に著しい影響を及ぼすことを言及しており，通し回遊魚は自然河川に設置する魚道設計にあたって特に重要な対象魚となり得る。次に，水田を含む水域ネットワークを利用する魚類についてである。齋藤ら（1988）は，水田や小水路などの一時的水域を繁殖の場として利用している魚種が多数存在することを明らかにした。その一方で，水尻や排水路末端の落差の形成が，水域ネットワークの分断を生み出し，魚類の生息環境の悪化を招いているとの指摘がある（片野ら，2001）。こうした中，近年では，水田魚道（小規模魚道）を用いた水域ネットワークの復元が試みられており（例えば，端，1999；鈴木ら，2000；佐藤ら；2008）。水田魚道設計に資する水域ネットワークを利用する魚類の遊泳能力把握が重要であると考えた。

なお，具体的な対象魚種の選定にあたっては，実験対象フィールドとする青森県一級河川岩木川水系に生息し，実験に必要な尾数を確保できる魚種を選定するものとした。

3.1.2 小型通し回遊魚の選定

本論冒頭で述べたとおり，体長概ね 10cm 以下の淡水魚を小型淡水魚と定義し，我が国の主な通し回遊魚のうち，河川遡上期の体長が概ね 10cm 以下の魚種の河川遡上期と体長を整理した（表 3-1）．表に示した小型通し回遊魚のうち，科学的見地に基づいた遊泳能力の知見は，アユ（例えば 鬼束ら，2009）とシロウオ（泉ら，2013，2017）を除いてほとんどない．そこで本研究では，表 3-1 のうち，岩木川水系に生息し，実験に必要な尾数を確保可能な魚種として，“ワカサギ”と“ウキゴリ類”を実験対象魚種に選定した．

表 3-1 日本の主な小型通し回遊魚の河川遡上期と体長

| 回遊型 | 和名 | 成魚の 平均体長 (cm) | 河川遡上期 の体長 (cm) | 河川 遡上期 |
|-------|----------|---------------------|----------------------|-----------|
| 遡河回遊型 | ワカサギ | 6～11 | 6～11 | 1～5月 |
| | シラウオ | 5～10 | 5～10 | 2～5月 |
| | イトヨ | 8 | 8 | 2～3月 |
| | シロウオ | 5 | 5 | 春 |
| 降河回遊型 | ウナギ | 100 | 5～6 | 10～6月 |
| | ヤマノカミ | 16 | 2～3 | 4～5月 |
| | アユカケ | 20 | 2～3 | 春 |
| 両側回遊型 | アユ | 10～30 | 7～8 | 3～7月 |
| | シマヨシノボリ | 7 | 1.5～2.0 | 7～10月 |
| | チチブ | 8 | 0.8～1.0 | 秋 |
| | ウキゴリ | 9(全長) | 2以上(全長) | 夏 |
| | ボウズハゼ | 12 | 3 | 3～5月 |
| | カジカ小卵型 | 17 | 2程度 | 2～7月 |
| | エゾハナカジカ | 25 | 1.1～1.4 | 5～6月 |
| | カンキョウカジカ | 12～17 | 1.3～1.6 | 5～6月 |

塚本（1993），道津（1955）をもとに作成

3.1.3 水田を含む水域ネットワークを利用する淡水魚の選定

斉藤ら（1988）は、京都府下の水田地帯を対象に、魚類が恒久的水域から水田等の一時的水域へどのように移動し、繁殖するかについて調査を行っている。この結果、調査水域から見出された 23 種の魚類のうち、ドジョウ *Misgurnus anguillicaudatus*、アユモドキ *Parabotia curta*、スジシマドジョウ *Cobitis*、ギンブナ *Carassius auratus langsdorfii*、ナマズ *Silurus asotus*、タモロコ *Gnathopogon elongatus*、オイカワ *Opsariichthys platypus* の 7 種が一時的水域によく進入し、これらのうちオイカワを除く 6 種は、産卵のために一時的水域を利用したと報告している。また、一時的水域を生息の場もしくは繁殖の場として利用する代表的な種には、他にもメダカ *Oryzias latipes*、*Oryzias sakaizumii*（細谷，2000）やイトヨ *Gasterosteus aculeatus*、タナゴ類（端，1998）がいる。

本研究では、上記した魚種のうち、岩木川水系に生息する“ドジョウ”を実験対象魚種に選定した。ドジョウは、ほぼ日本全国に分布する重要な食用魚で（川那部ら，2001）、我が国の水田環境を代表する典型的な魚種のひとつである。また、ドジョウは、新潟県佐渡トキ保護センターにおいて人工増殖が図られているトキ *Nipponia nippon* の主要な餌資源でもあり（佐藤ら，2008）、水田魚道の対象魚種として取り上げられる事例が多いことから（例えば鈴木ら，2004；佐藤ら，2008）、ドジョウの遊泳能力の解明は、今後の水田魚道設計に資すると考えた。

3.1.4 対象魚種の特徴と生活史および遊泳能力に関する既往知見

(1) ワカサギ

ワカサギはキュウリウオ科の遡河性回遊魚で，国内ではおもに島根県以北の本州日本海側と北海道の河川湖沼に自然分布している（川那部ら，2001；久下，2006）．本種は，内水面漁業上重要な魚種で，2015年度の漁獲量は全国で1,419tである（農林水産省経済局統計情報部，2015）．国内のワカサギには生活史の相違から，遡河回遊型と陸封型があるが，これら両型の形態的，生理的な差は認められず，あっても大きなものではないと考えられている（宇藤・坂崎，1987）．なお，北海道の石狩川では30km以上も遡上するとされている（川那部ら，2001）．最近では，岩手県閉伊川における遡河回遊型ワカサギの調査から，産卵期の遡上が水温10℃を越えると開始されること，さらには，耳石中のSr：Ca比による回遊履歴の解析によって，産卵期のみならず成長に応じて淡水域と海水域を交互に回遊することも明らかにされている（Sasaki，2003；佐々木，2006）．また，琵琶湖流入河川におけるワカサギの遡上実態調査（井出ら，2002）によれば，“やな”による遡上阻害がみられ，堰堤状の河川横断構造物の落差が23cm程度では遡上できず，横断構造物下流では卵が過密状態になり，死卵の割合が多かったとの知見がある．このような産卵密度の上昇に伴う再生産効果の低下は，主要な産卵場であった斐伊川において産卵群の遡上がほとんど見られなくなった宍道湖においても報告がある（松本，1994）．

以上のことから，ワカサギの再生産環境を保全するためには，産卵場の保全のみならず，良好な産卵場までの遡上経路の確保が重要と考えられ，ワカサギの遊泳能力を解明することは，横断構造物等による遡上経路分断が生じた場合の魚道設計・河道修繕にあたって有益な情報となる．しかしながら，これまでにワカサギの遊泳能力に関する研究事例はほとんどみられない．

(2) ウキゴリ類

ウキゴリはハゼ科の両側回遊魚で、北海道、本州、九州に分布している。また、同属には形態が似たシマウキゴリ、スミウキゴリがいる（川那部ら，2001）。3種ともにハゼ科特有の吸盤状の腹鰭を有し、底面部に吸着しながら移動できる点が、ワカサギ等の遊泳魚と大きく異なる特徴である。

ウキゴリの生活史については、道津（1955）が詳しくまとめているので、この一部を以下に引用する。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。

上記のとおり、体長が小さい幼魚期に河川を遡上する生活史を持つことから、魚道設計にあたって特に留意が必要な種の一つと考えられるが、これまでにウキゴリ類の遊泳能力に関わる科学的見地はない。

(3) ドジョウ

ドジョウは、水田や小水路などの一時的な水域を繁殖の場として利用している（斉藤ら，1988；田中，1999，2001）。また，ドジョウが水田を繁殖・未成魚以下の成育の場としてだけでなく，灌漑期間を通じた生息の場として利用しており，当歳魚も水田－排水路間を行き来することがわかっている（皆川ら，2006；鈴木ら，2004）。一方で，水尻や排水路末端の落差の形成などにより水田を含む水域ネットワークの分断を生み出し，ドジョウ等の魚類の生息環境の悪化を招いている（片野ら，2001）。こうした中，佐藤ら（2008）は，成熟魚の産卵のみならず，未成魚の出水時の避難遡上など，様々な体サイズのドジョウが生活環を通して水田を利用するために遡上することが可能な水田魚道構造を模索する必要性を述べている。

一方，ドジョウの遊泳能力に関する研究・報告としては，体長 5～7cm 台のドジョウを対象とした実験（加藤ら，2005）および，6cm 程度のドジョウを対象とした実験（大友，2007）があり，流速と遊泳時間の関係を明らかにしている。しかし，水田魚道の速い流れ場の設計指標となる流速条件別の前進可能距離については明らかになっておらず，体長 5cm 未満の稚魚期のドジョウ（久保田ら，1965）にいたっては，遊泳能力に関する知見自体が極めて少ない。

3.2 実験場所と実験装置

実験には、管内流速設定が可能で魚類の遊泳時間と遊泳距離を測定できるスタミナトンネル(魚類の耐久力等の遊泳能力を計測するための管水路の一般的名称)を用いた。既往の遊泳能力に関する実験の多くは、室内実験が主であったが(例えば、Bainbridge, 1958; 鬼束ら, 2009), 本研究では、供試魚へのストレスを可能な限り抑え、自然条件下に近い条件で遊泳能力を計測するために、供試魚採捕地点近傍の野外で実験を行うものとし、自然河川水を通水して用いた。

実験場所は、青森県津軽平野を貫流する一級河川岩木川の河口から11km地点に位置する芦野頭首工の左岸側高水敷である(図 3-1, 図 3-2)

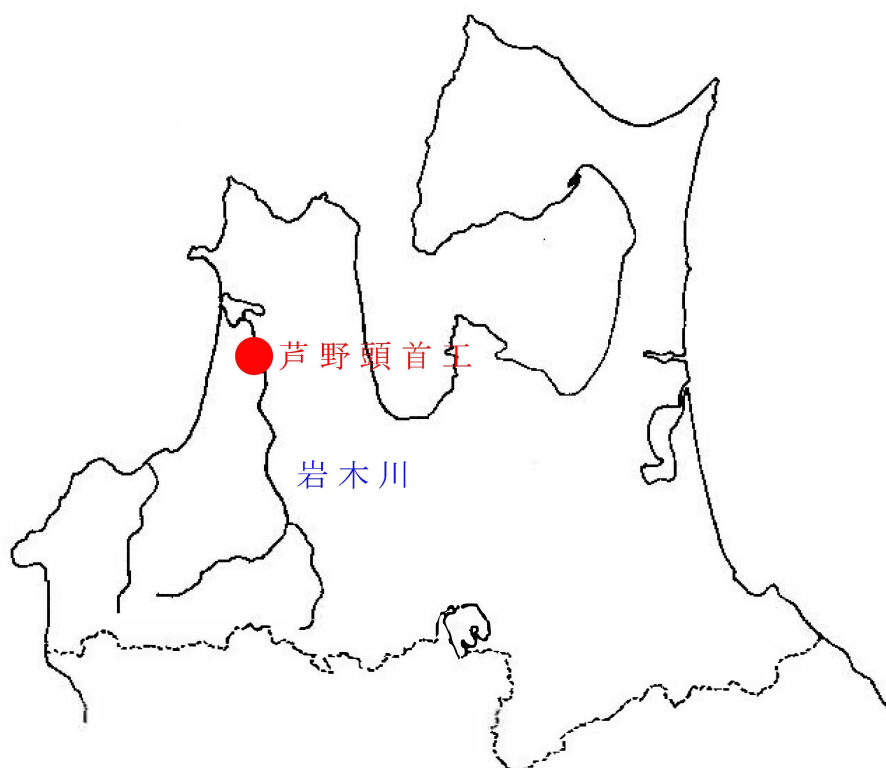


図 3-1 実験場所位置図

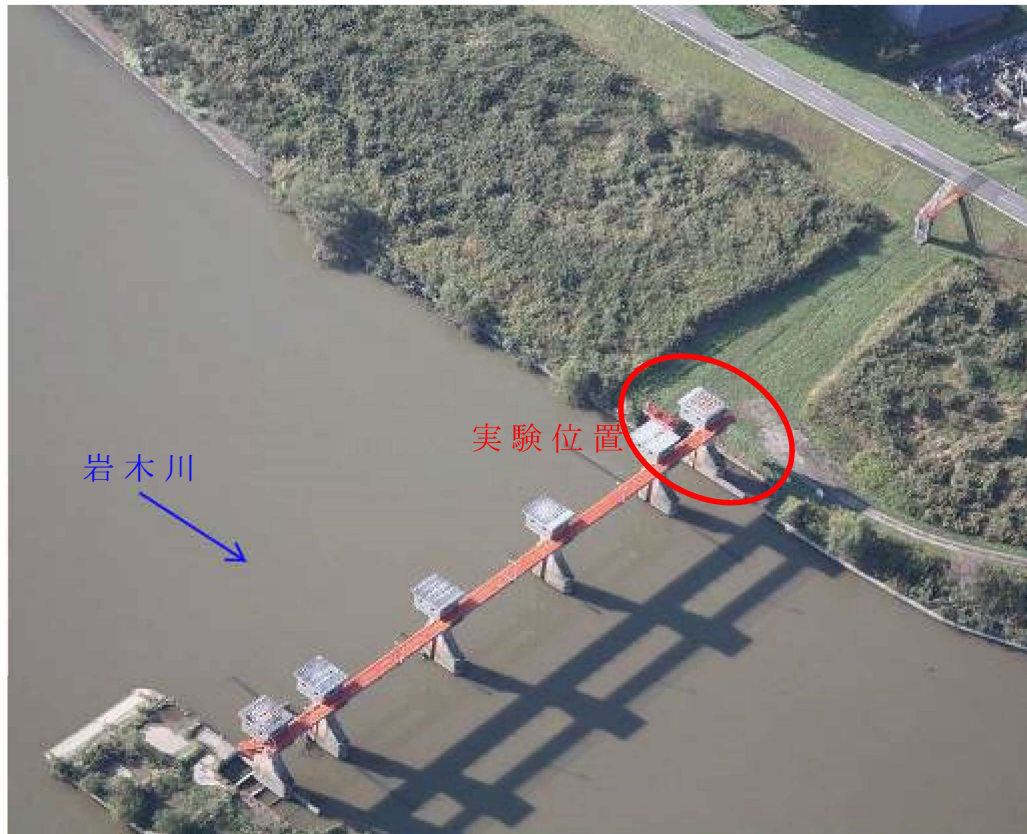


図 3-2 実験場所全景（写真提供：齋藤裕氏）

実験装置の概要を図 3-3 に示す。また、実験装置の写真を図 3-4～図 3-9 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付の貯水槽（幅 35cm・高さ 30cm・長さ 55cm）、スタミナトンネル、供試魚を挿入するための傾斜型スタンドパイプ、フレキシブルホース、流速調整用コックで構成されている。実験装置は、河川からポンプで貯水槽へ給水し、余水吐によって貯水槽水位を一定にした状態でスタミナトンネル内に通水できる構造となっている。スタミナトンネル内の流水は、流速調整用コックが付設されたフレキシブルホースを経て、河川へ還元される。流速調整用コックは、下流側コックと上流側コックの 2 連で構成され、下流側コックによってスタミナトンネル内の流速を任意の定常値にあらかじめ設定した上で、上流側コックによって自在に流速を変化させることができる。

スタミナトンネルは架台の上に水平に設置され、その脇には供試魚の遊泳距離を計測するための目盛付の白色板がある。スタミナトンネルは透明アクリル製長方形パイプで、その内寸は、幅 5.0cm、高さ 3cm もしくは 4cm、長さ 230cm である。パイプ断面の高さと幅の寸法は、供試魚の遊泳に支障がない大きさである（久保田ら、2000；泉ら、2012）、なお、パイプ高は 3cm を基本としたが、2015 年以降のワカサギの実験においては、他に体高の高い魚種を実験に供したため、高さ 4cm を採用している。また、ワカサギとウキゴリ類の実験に際しては、スタミナトンネル上端部から 40cm の位置に二軸電磁流速計（アレック電子製：ACM-250、測定精度 $\pm 2\%$ 、センサー部 $\phi 5\text{mm}$ ）が据付けられており、スタミナトンネル内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。傾斜型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。また、供試魚の遊泳時間・遊泳距離の測定およびスタミナトンネル内の流速把握のために、スタミナトンネル上方にデジタルビデオカメラ（SONY 製：HC90 もしくは 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。

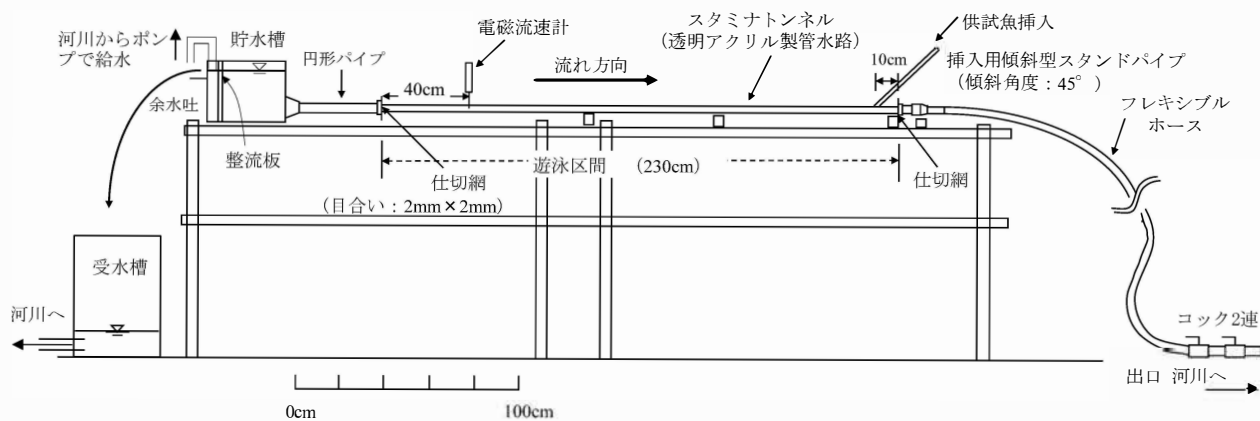


図 3-3 実験装置の概要



図 3-4 実験装置全景



図 3-5 マノメータ付貯水槽



図 3-6 スタミナトンネル（幅 5.0cm × 高さ 3cm）



図 3-7 傾斜型スタンドパイプ



図 3-8 流速調整用 2 連コック



図 3-9 2 軸電磁流速計

3.3 供試魚と実験方法

3.3.1 ワカサギ

(1) 供試魚

供試魚には，芦野頭首工の下流にて採捕されたワカサギを用いた（図 3-10）．岩木川河口部に位置する十三湖にはワカサギが生息しており（塩垣，1982），採捕地点である芦野頭首工下流では，毎年概ね5月上旬から産卵のための遡上が見られ，実験には産卵のために遡上してきた個体を用いた．また，予備調査によって，採捕したワカサギを翌朝まで生け簀に存置すると，ストレスによって極端に衰弱することを確認したことから，実験には，当日採捕された個体を用いた．なお，実験に際して1個体の供試は1回のみとした．



図 3-10 実験に供試したワカサギの例

(2) 実験方法と実験条件

実験期間は2014年、2015年および2016年の5月上中旬とし、合計9回行った。実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は11.4～13.4℃である。実験に供試したワカサギは体長5～9cm台の82尾で、このうち計測できた個体は65尾である（表3-2）。

遊泳実験の設定流速は80～130cm/sの範囲の中で5ケースとし（表3-2）、下流側コックの開度によって管内の流速をあらかじめ設定流速値に合わせた。供試魚挿入時には、上流側コックによって流速を概ね30cm/sに調整した上で、1尾ずつ傾斜型スタンドパイプから挿入し、供試魚が上流へ前進すると同時に上流側コックを速やかに開放した。

さらに、デジタルビデオカメラ撮影画像から、供試魚の遊泳時間と遊泳距離を計測した。計測開始時点は、二軸電磁流速計指示値によって判断したスタミナトンネル内の流速が一定になった時点とし、供試魚が力尽きて流された時点を計測終了時点とした。なお、上流側コック解放から流速が一定になるまでの時間は、設定流速の値によって異なるが、1s未満の短時間である。

供試魚の体長計測は、遊泳の際のストレスを考慮して遊泳後に行った。また、あらかじめ実験装置出口部において、設定流速値ごとに容積法による流量観測を行い、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。

表 3-2 実験日と実験条件（ワカサギ）

| 実験 月日 | 実験 番号 | 天 気 | 供試個体 | | 計測個体（尾） | | | | | 計 |
|-----------|----------|--------|------|----------|---------|------|------|------|------|----|
| | | | （尾） | 平均体長(cm) | 5cm台 | 6cm台 | 7cm台 | 8cm台 | 9cm台 | |
| 2014/5/6 | Run.1 | 晴れ | 7 | 7.0 | - | 3 | - | 1 | - | 4 |
| 2014/5/11 | Run.2 | 晴れ | 3 | 6.9 | - | 2 | 1 | - | - | 3 |
| 2015/5/6 | Run.3 | 晴れ | 7 | 6.8 | 1 | 2 | 1 | - | - | 4 |
| 2015/5/7 | Run.4 | 晴れ | 11 | 7.1 | - | 3 | 4 | 1 | - | 8 |
| 2015/5/8 | Run.5 | 晴れ | 10 | 6.9 | - | 6 | 2 | 1 | - | 9 |
| 2015/5/11 | Run.6 | 晴れ | 8 | 7.5 | - | 1 | 3 | - | - | 4 |
| 2016/5/6 | Run.7 | 曇り | 13 | 8.3 | - | - | 4 | 2 | 5 | 11 |
| 2016/5/7 | Run.8 | 曇りのち晴れ | 16 | 7.9 | - | 1 | 9 | 5 | 1 | 16 |
| 2016/5/10 | Run.9 | 曇り | 7 | 7.5 | - | - | 4 | 2 | - | 6 |
| 計 | | | 82 | 7.4 | 1 | 18 | 28 | 12 | 6 | 65 |

| 実験 月日 | 実験 番号 | 設定流速（cm/s） | | | | | 水温 （℃） |
|-----------|----------|------------|----|-----|-----|-----|-----------|
| | | 80 | 90 | 100 | 110 | 130 | |
| 2014/5/6 | Run.1 | | | ○ | ○ | | 11.5 |
| 2014/5/11 | Run.2 | | ○ | | | | 13.4 |
| 2015/5/6 | Run.3 | | | | ○ | | 12.4 |
| 2015/5/7 | Run.4 | | | | | ○ | 12.8 |
| 2015/5/8 | Run.5 | | | ○ | ○ | | 11.4 |
| 2015/5/11 | Run.6 | | | ○ | ○ | | 13.4 |
| 2016/5/6 | Run.7 | ○ | | | | | 11.8 |
| 2016/5/7 | Run.8 | ○ | | | ○ | | 11.5 |
| 2016/5/10 | Run.9 | ○ | | | ○ | | 12.4 |

3.3.2 ウキゴリ類

(1) 供試魚

供試魚には，芦野頭首工直下流で採捕されたウキゴリ類を用いた（図 3-11）．岩木川水系では，ウキゴリの他に，確認個体数はわずかであるがスミウキゴリが確認されており，シマウキゴリについては確認の記録がない（東ら，2005）．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．

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．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．

ウキゴリ類はワカサギと異なり，腹鰭の吸盤を用いて底面に吸着する特性を持つことから，実験は後述のとおり実験 A と実験 B の 2 ケースに分けて行った．両実験で遊泳能力を計測した個体の体長は図 3-12 に示すとおり 3cm 台が主であり，「2. 小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査」において採捕されたウキゴリ類と同程度の体サイズである．



図 3-11 実験に供試したウキゴリ類の例

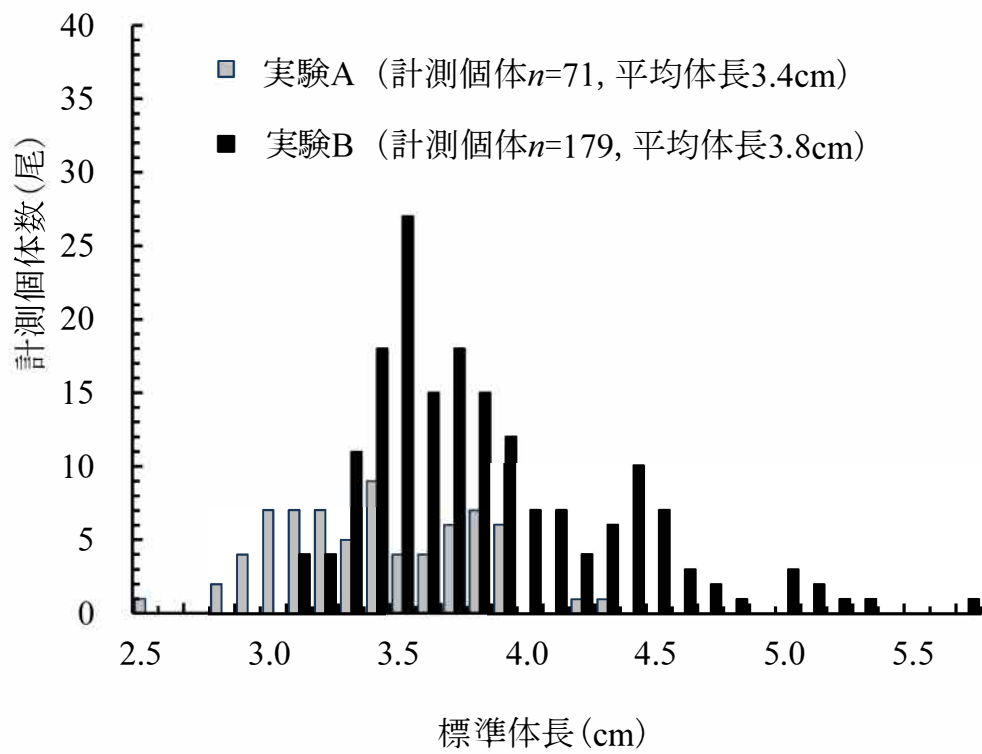


図 3-12 計測個体の体長分布 (ウキゴリ類)

(2) 実験方法と実験条件

1) スタミナトンネル内のウキゴリ類の遊泳行動観察（予備実験）

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 3-13）．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（2003）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，予備実験から後述する本実験を通して，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．



図 3-13 予備実験におけるウキゴリ類の行動模式図

2) 実験 A

予備実験結果を踏まえ、前進と吸着を繰り返す遡上行動が可能な限界流速の把握を主目的とする遊泳実験を行った。この実験を、実験 A と称す。

実験期間は 2014 年の 6 月～7 月とし、合計 5 回行った。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 3-3）。なお、本実験に供試し、遊泳速度等を計測したウキゴリ類の個体数は 71 尾である。

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 20～30cm/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 3-14）。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た個体があり、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。流速の変化開始から定常状態になるまでの時間は 0.2s 未満と極めて短時間であり、これらの個体も区別せずに遊泳能力の整理を行った。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。なお、実験は 1 尾ずつ行うものとした。

実験時のスタミナトンネル内の流れは満流状態とし、ワカサギの実験と同じく流速調整用コックによって流速を変化させた。供試魚の体長は、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。

表 3-3 実験日と実験条件（ウキゴリ類実験 A）

| 実験月日 | 実験番号 | 天気 | 水温 (°C) | 計測個体（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 |

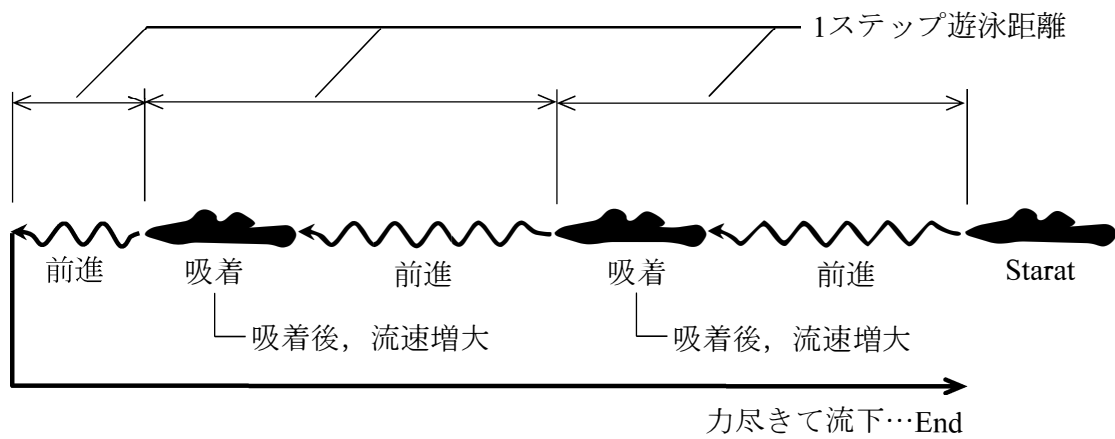


図 3-14 供試魚の遊泳行動と流速操作の模式図（ウキゴリ類実験 A）

3) 実験 B

前述の実験 A は、ウキゴリ類の前進と吸着を繰り返す遡上行動ができる限界流速の把握が主目的であり、1回の供試中に流速を変動させている。このため、一定流速条件下におけるウキゴリ類の遊泳可能な時間や前進可能な距離等は明らかにできない。以上のことから、吸盤を利用した前進行動が困難な流速条件下におけるウキゴリ類の遊泳能力を明らかにするために、概ね流速 50cm/s 以上の複数の流速条件下で遊泳実験を行うものとした。この実験を実験 B と称す。実験の基本条件として、ワカサギの遊泳実験と同じく 1 回の供試中の設定流速は変動させないものとした。

実験期間は 2015 年の 7 月～8 月とし、合計 6 回行った。実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は 23.3～26.7℃である。なお、実験 B で供試したウキゴリの個体数は 189 尾で、このうち計測できた個体は 179 尾である（表 3-4）。

遊泳実験の設定流速は 50～130cm/s の範囲の中で 7 ケースとし、下流側コックの開度によってあらかじめ管内の流速を設定流速値に合わせた。その上で実験では、まずスタミナトンネル内の流速を上流側コックによって約 20cm/s に調節し、供試魚を 1 尾挿入して、徐々に流速を増加させた。そして供試魚が自発的に上流側に泳ぎはじめるのを見計らって速やかに上流側コックを解放した。さらに、デジタルビデオカメラ撮影画像から、供試魚の遊泳時間・遊泳距離を計測した。計測開始時点は、二軸電磁流速計指示値によって判断したスタミナトンネル内の流速が一定になった時点とし、供試魚が力尽きて流された時点を実験終了時点とした。供試魚の体長は、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、設定流速値ごとに容積法による流量観測を行い、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。

表 3-4 実験日と実験条件（ウキゴリ類実験 B）

| 実験 月日 | 実験 番号 | 天 気 | 供試個体 | | 計測個体（尾） | | | |
|-----------|----------|-------|------|----------|---------|------|------|-----|
| | | | （尾） | 平均体長（cm） | 3cm台 | 4cm台 | 5cm台 | 計 |
| 2015/7/19 | Run.1 | 曇り | 4 | 3.6 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| 2015/7/20 | Run.2 | 曇り時々晴 | 90 | 3.6 | 82 | 6 | 0 | 88 |
| 2015/7/21 | Run.3 | 曇りのち晴 | 36 | 3.6 | 32 | 1 | 0 | 33 |
| 2015/7/22 | Run.4 | 曇り時々晴 | 4 | 3.7 | 3 | 1 | 0 | 4 |
| 2015/8/17 | Run.5 | 曇り時々晴 | 22 | 4.6 | 1 | 13 | 7 | 21 |
| 2015/8/19 | Run.6 | 曇り時々晴 | 33 | 4.3 | 3 | 26 | 1 | 30 |
| 計 | | | 189 | 3.8 | 124 | 47 | 8 | 179 |

| 実験 月日 | 実験 番号 | 設定流速（cm/s） | | | | | | | 水温 （℃） |
|-----------|----------|------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----------|
| | | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 130 | |
| 2015/7/19 | Run.1 | ○ | | | | | | | 24.7 |
| 2015/7/20 | Run.2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | 24.4 |
| 2015/7/21 | Run.3 | ○ | | | ○ | ○ | | | 25.1 |
| 2015/7/22 | Run.4 | | | ○ | | | | ○ | 25.4 |
| 2015/8/17 | Run.5 | | | | ○ | ○ | ○ | | 26.7 |
| 2015/8/19 | Run.6 | | ○ | | | ○ | ○ | | 23.3 |

3.3.3 ドジョウ

(1) 供試魚

実験には，岩木川流域のつがる市稲垣町水田地帯で採捕された体長3～6cm 台のドジョウを2日間育養して用いた（図 3-15）．久保田ら（1965）は，ドジョウの成長段階について，体長15～50mmを稚魚期，50～80mmを幼魚期，そして80mm以上のものを成魚と区分しており，本実験の供試魚の成長段階は稚魚期から幼魚期に相当する．なお，供試魚の利用は一度きりとし，再利用は行わなかった．



図 3-15 実験に供試したドジョウの例

(2) 実験方法と実験条件

ドジョウは、水田魚道を遡上する際、流況に応じて遊泳型と匍匐型の遡上行動をとることが知られているが、本研究では、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（鈴木ら、2001）、遊泳型を対象とした。

実験は2013年7月14日～15日に行った。実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は19.4～20.3℃である。なお、実験に供試したドジョウは162尾で、このうち計測できた個体は71尾である（表3-5）。

実験では、ワカサギの実験やウキゴリ類の実験Bと同じく、一定流速条件でのスタミナトンネル内を遊泳するドジョウの遊泳時間と遊泳距離を計測した。実験時のスタミナトンネル内の流れは満流状態とし、貯水槽の水位を実験中一定として、出口部のコックによって流速を調節した。設定流速は下流側コックで調節し、断面平均で概ね15cm/s、30cm/s、45cm/s、60cm/sの4ケースとした。30cm/s以下の流速条件では、管内流速を定常状態として供試魚を一尾ずつスタミナトンネルに挿入して遊泳時間・遊泳距離を計測し、供試魚が力尽きて流された時点を終了時点とした。一方、設定流速45cm/s以上の流速条件では、予備実験時に定常状態で供試魚を挿入すると流れをうまく捉えられずそのまま流下する個体が多く見られたことから、上流側コックをある程度閉塞させて流速を概ね10cm/sに設定して供試魚を傾斜型スタンドパイプから挿入し、供試魚がその流れに定位し、自発的に上流に泳ぎはじめるのを見計らって速やかに上流側コックを解放した。そして傾斜型スタンドパイプの水位が一定になった時点を定常状態と判断し、その時点から遊泳時間・遊泳距離の計測を開始し、供試魚が力尽きて流された時点を終了時点とした。また、供試魚の体長は、遊泳の際のストレスを考慮して遊泳後に計測した。なお、ドジョウの実験においては、二軸電磁流速計を据付けていないことから、下流側コックの調節と実験装置出口部での容積法による流量観測を繰り返すを行い、スタミナトンネル内の断面平均流速を任意の値に設定した。

表 3-5 実験日と実験条件（ドジョウ）

| 実験 月日 | 実験 番号 | 天気 | 供試個体 | | 計測個体（尾） | | | |
|-----------|----------|----|------|----------|---------|------|--------|----|
| | | | （尾） | 平均体長(cm) | 3cm台 | 4cm台 | 5,6cm台 | 計 |
| 2013/7/14 | Run.1 | 晴れ | 45 | 4.3 | 3 | 15 | 4 | 22 |
| 2013/7/14 | Run.2 | 曇り | 30 | 4.2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2013/7/14 | Run.3 | 曇り | 35 | 4.1 | 10 | 15 | 1 | 26 |
| 2013/7/15 | Run.4 | 晴れ | 35 | 4.2 | 3 | 6 | 2 | 11 |
| 2013/7/15 | Run.5 | 晴れ | 17 | 4.7 | 1 | 8 | 3 | 12 |
| 計 | | | 162 | 4.3 | 17 | 44 | 10 | 71 |

| 実験 月日 | 実験 番号 | 設定流速（cm/s） | | | | 水温 （℃） |
|-----------|----------|------------|----|----|----|-----------|
| | | 15 | 30 | 45 | 60 | |
| 2013/7/14 | Run.1 | | ○ | | | 20.3 |
| 2013/7/14 | Run.2 | | | | ○ | 20.1 |
| 2013/7/14 | Run.3 | ○ | | | | 20.0 |
| 2013/7/15 | Run.4 | | | ○ | | 19.4 |
| 2013/7/15 | Run.5 | | ○ | | | 19.8 |

3.4 実験結果と考察




3.4.1 遊泳速度等の整理方法

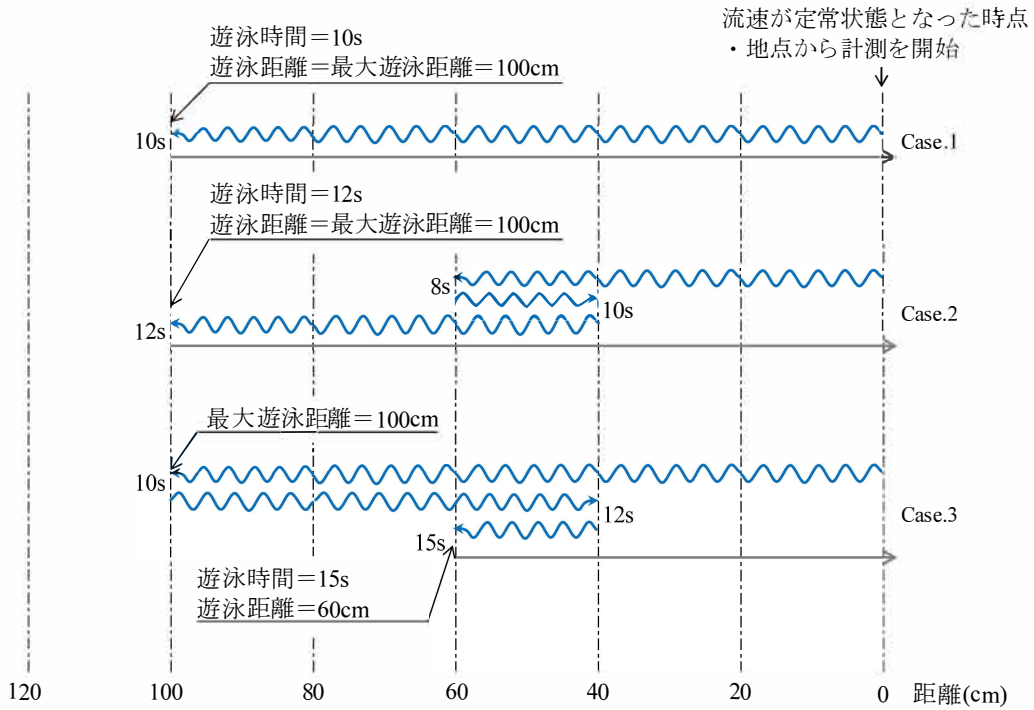
(1) 遊泳速度の算定方法と最大遊泳距離の定義

供試魚の遊泳速度は、計測終了時点までに前進した距離（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て算定した（図 3-16）。なお、供試魚の中には、図 3-16 の Case.2 や Case.3 のように遊泳行動中に 1 回もしくは複数回後退する個体が確認された。このうち、Case.3 のように力尽きて流下した時点（図中の 60cm 地点の 15s）よりも以前に、より上流側へ到達した個体については、計測開始地点から供試魚が到達した最も上流側地点までの距離を最大遊泳距離と定義し、遊泳距離とは別途整理した（図中の 100cm）。一方、Case.1 や Case.2 のように、供試魚が力尽きて流下した地点が、到達した最も上流側地点である場合、最大遊泳距離と遊泳距離は同値とした。

また、突進速度は冒頭で述べたとおり 1～5 秒間持続できる最大遊泳速度とされているが、本実験では遊泳時間が 1 秒に満たない個体もあることから、突進速度ではなく単に遊泳速度と称して整理した。なお、泉ら（2002, 2004）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、本実験によって得られた遊泳速度も指標になると考えられる。

1. 遊泳時間・遊泳距離・最大遊泳距離の計測

-  : 遊泳しながら前進
-  : 頭部を上流側に向けて遊泳しながら後退
-  : 力尽きて流下



2. 遊泳速度の算定

$$\text{遊泳速度} = \text{遊泳距離} / \text{遊泳時間} + \text{管内代表流速}$$

図 3-16 各諸量測定 の概念図と遊泳速度算定の流れ

(2) 遊泳速度と遊泳時間の関係の整理

塚本・梶原（1973）は，魚類の任意の遊泳速度と各遊泳速度における遊泳持続時間（遊泳時間）を図にプロットすると，多くの魚種では遊泳速度と遊泳時間に曲線的な関係があることを見出し，これを遊泳曲線と称して整理している．さらに，塚本らは，遊泳曲線を（2-1）式によって表している．

$$Vt^k = a \quad (2-1)$$

ここで， V ：遊泳速度（cm/s）， t ：遊泳時間（s）， a ：1秒間持続できる遊泳速度の理論値， k ：定数（ $0 < k < 1$ ）である．本実験においても，各魚種の遊泳速度と遊泳時間には曲線的な関係が見られたことから，（2-1）式を用いて実験対象3魚種の遊泳速度と遊泳時間の関係を整理し，とりまとめるものとした．

3.4.2 ワカサギ

(1) 管内代表流速と計測個体数

本実験に用いた管内の流況は、壁面付近の流速が摩擦抵抗のため中心部に比べて遅くなっており、この管内の流速鉛直分布は泉ら（2013）によって整理されている（図 3-17）。本図は、各測定点の流速 U_x を断面平均流速 U_m で除して無次元化した鉛直分布図である。但し、ワカサギの遊泳位置には鉛直方向・水平方向ともに偏りがみられなかったことから、遊泳速度算定に用いる管内代表流速には、断面平均流速を用いた。なお、同一の設定流速条件でも、各供試の管内代表流速には若干の差異（標準偏差 $\pm 0\sim 4\text{cm/s}$ ）がある。

実験に用いた供試魚の中には挿入後に前進せず、定位する個体があった。魚道を魚が遡上していくためには、前進することが必要との考えから、前進せずに定位した個体は計測個体数に計上しなかった。設定流速別の計測個体数を表 3-6 に示す。全計測個体数は 65 尾であり、このうち体長 6,7cm 台の個体が 46 尾を占める。

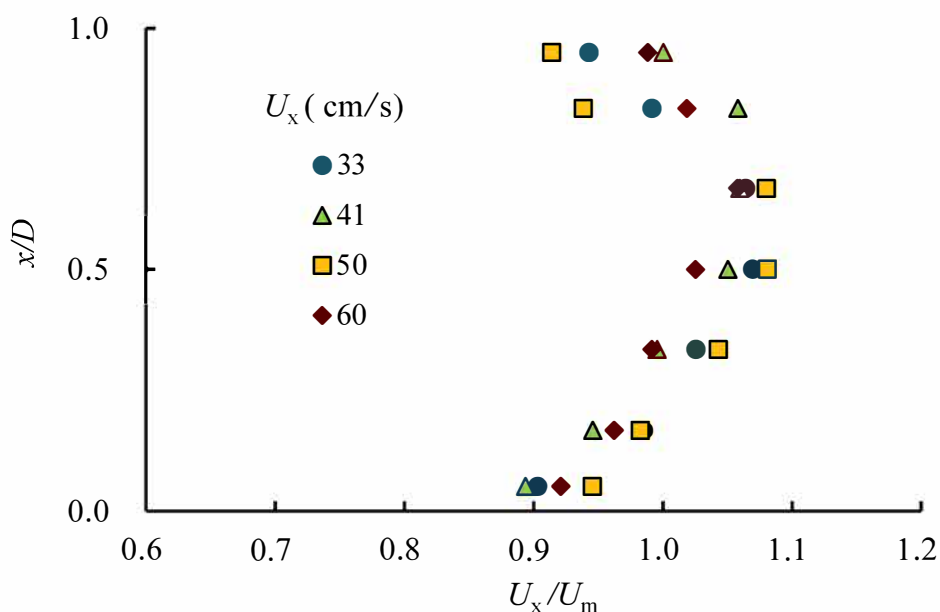


図 3-17 管内流速分布図（泉ら，2013 より引用）

表 3-6 実験流速条件と計測個体数（ワカサギ）

| No. | No1 | No2 | No3 | No4 | No5 | 計 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 設定流速 (cm/s) | 80 | 90 | 100 | 110 | 130 | |
| 管内代表流速平均値 (cm/s) | 79 | 88 | 100 | 110 | 128 | |
| 全計測個体 (尾) | 26 | 3 | 8 | 19 | 9 | 65 |
| 体長6,7cm台の計測個体 (尾) | 17 | 3 | 8 | 11 | 7 | 46 |

(2) 体長と遊泳速度の関係

図 3-18 は、計測個体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 (Blaxter, 1967; 塚本・梶原, 1973), 本実験で供試した個体の体長分布の範囲では、いずれの流速条件においても体長と遊泳速度との間に明瞭な関係はみられなかった。また、ほとんどの計測個体が、突進速度の一般的な目安である $10BL/s$ を上回る速度で遊泳した。

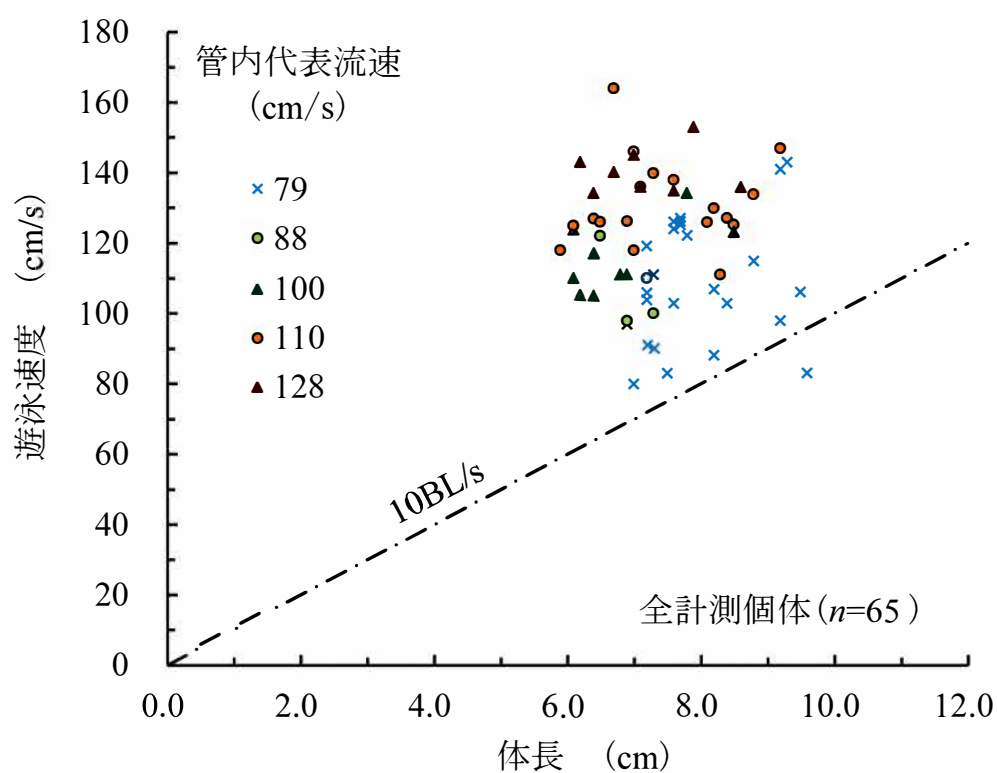


図 3-18 体長と遊泳速度の関係 (ワカサギ)

(3) 流速と遊泳速度の関係

以降では、体サイズが小さく、計測個体数の多数を占める体長 6, 7cm 台（平均体長 7.0cm, 標準偏差 ± 0.5 cm）の計測個体について結果を整理する。図 3-19 は、管内代表流速別に遊泳速度の平均値および標準偏差を整理したものである。本実験における体長 6, 7cm 台のワカサギの平均遊泳速度は 107~141cm/s で、この速度は 15BL/s~20BL/s に相当した。さらに、管内代表流速 88cm/s 以上の条件では、流速が増加するとともに、遊泳速度が増加する傾向がみられた。このように、遊泳速度が 10BL/s を大きく上回ることで、流速に応じて遊泳速度が変化する傾向は、ウグイ（泉ら, 2006）やオイカワ（泉ら, 2007; 鬼束ら, 2008a）と一致する。魚類は測線と呼ばれる器官によって水流の変化を感じ取ることができるが、これに加えて視覚を用いて対地速度を調整している可能性がある。

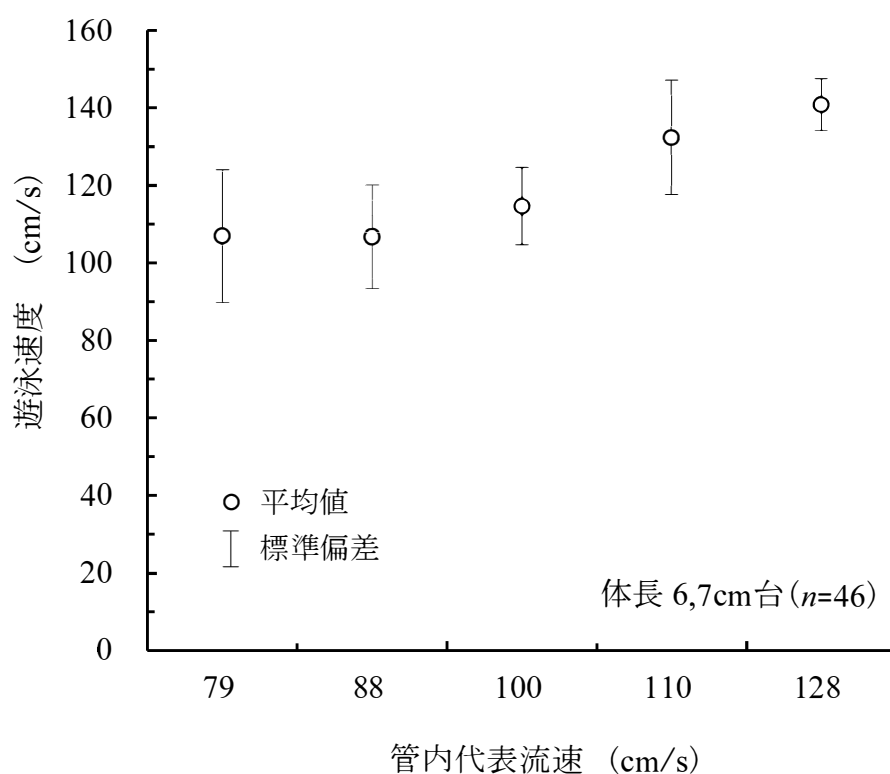


図 3-19 管内代表流速と遊泳速度の関係（ワカサギ）

(4) 遊泳速度と遊泳時間の関係

図 3-20 は、体長 6, 7cm 台のワカサギを対象とし、遊泳速度と遊泳時間との関係を両対数で示したものである。図のとおり、ワカサギの遊泳速度と遊泳時間との間には曲線的な関係がみられる。そこで体長 6, 7cm 台のワカサギについて、最小自乗法によって (2-1) 式の a 値および k 値を求めた。その結果、 $a=130\text{cm/s}$ 、 $k=0.12$ となった。

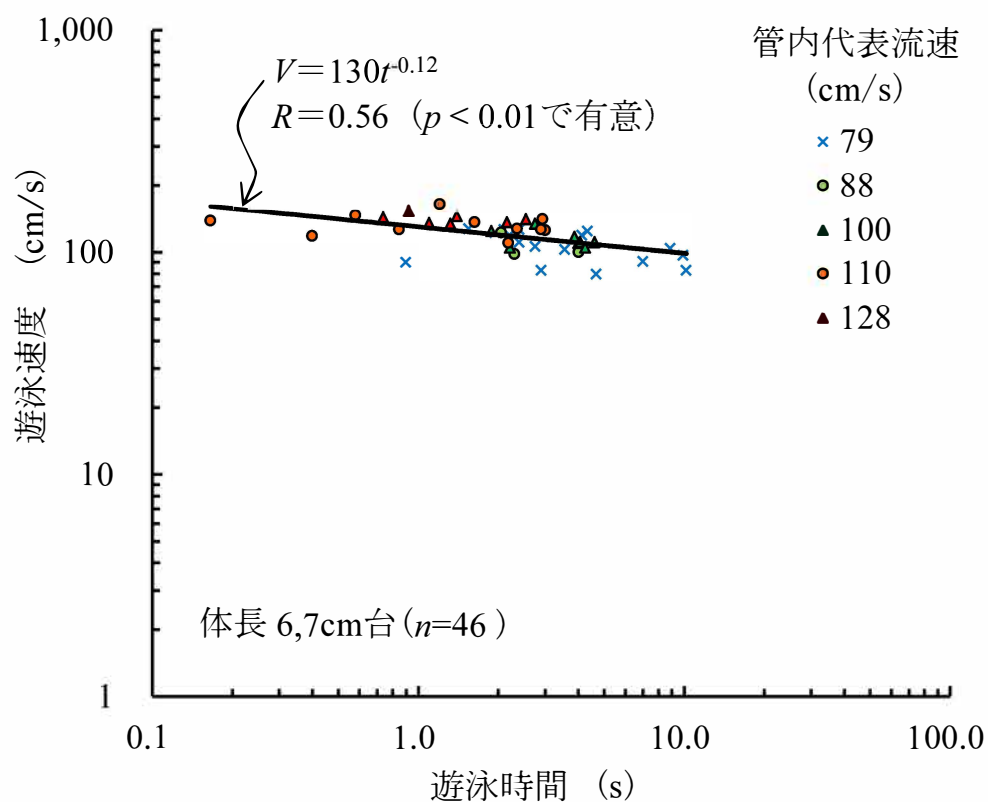


図 3-20 遊泳時間と遊泳速度の関係 (ワカサギ)

(5) 流速と遊泳距離の関係

管内代表流速別に体長 6, 7cm 台のワカサギの最大遊泳距離の平均値と標準偏差を整理した (図 3-21)。最大遊泳距離は流速が増加するとともに減少する傾向にあり, 管内代表流速が 110cm/s 以上の条件では, 最大遊泳距離の平均値が 40cm 未満となり, 長距離の前進が困難であることがわかった。

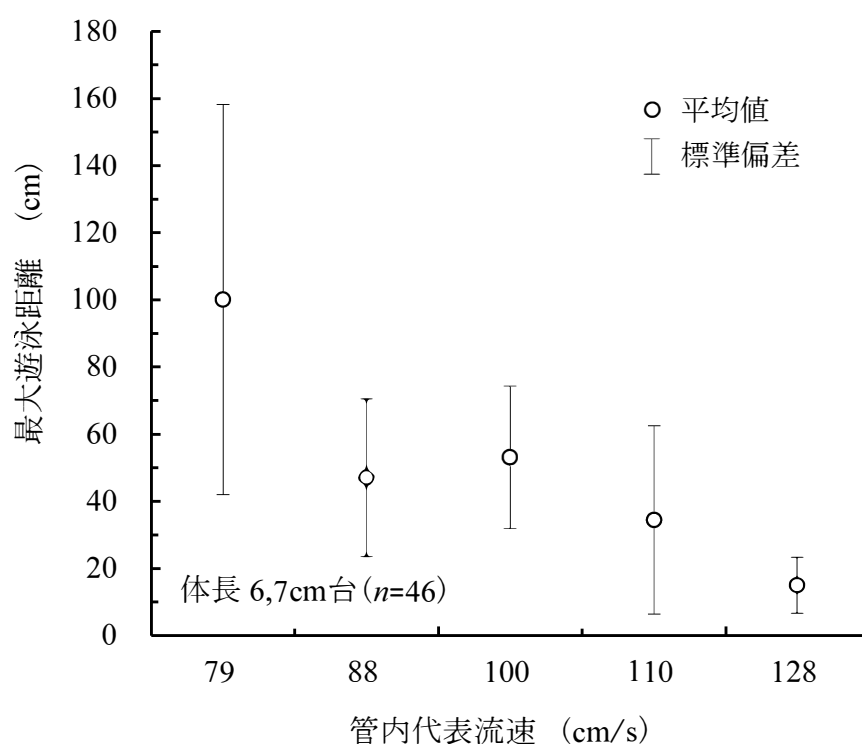


図 3-21 管内代表流速と最大遊泳距離の関係 (ワカサギ)

次に、管内代表流速別に各距離まで到達した供試魚の割合を到達率と称して整理した（図 3-22）。図より、管内代表流速が速くなるに従い、各距離の到達率が低下する傾向にある。特に、管内代表流速 128cm/s の条件では、到達率の低下が著しく、20cm 以上前進した個体の割合は 43% であり、30cm 以上前進できた個体はいなかった。

井出ら（2002）は、堰堤状の河川横断構造物の落差が 23cm 程度では産卵期のワカサギが遡上できなかつたことを報告しているので、本実験結果を踏まえ、これについて考察する。水位差 23cm の越流水脈における流速の目安を、以下の（2-2）式（農林水産省農村振興局，2015）によって求めると 212cm/s となる。

$$U' = \sqrt{2g\Delta h} \quad (2-2)$$

ここで、 U' ：流速， Δh ：水位差である。本実験の到達率の評価から、128cm/s の流速でも 30cm 以上前進できた個体はおらず、落差 23cm（流速 210cm/s 程度と想定）の流れ場は、ワカサギにとって遡上が困難な条件であったと考えられる。

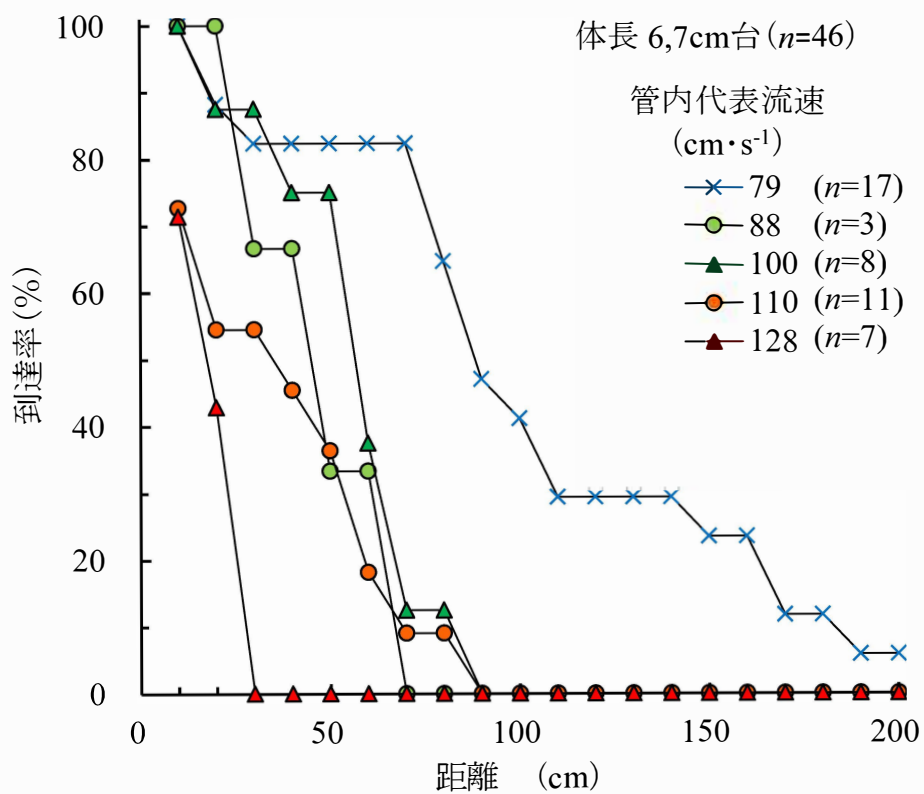


図 3-22 距離と到達率の関係 (ワカサギ)

3.4.3 ウキゴリ類（実験 A）

(1) 管内代表流速と計測個体数

図 3-17 のとおり，スタミナトンネル内の流速は，壁面の摩擦抵抗のため下層側と上層側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，断面平均流速に，鉛直方向流速分布（図 3-17）による底面から約 5mm 地点の補正率を乗じて求めた（表 3-7）．

表 3-7 に，流速条件別の計測個体数を示す．ウキゴリ類を対象とした実験 A は，他の実験（実験 B およびワカサギとドジョウの実験）と異なり，1 尾の供試中において，供試魚が底面に吸着するたびに管内の流速を段階的に増加させている．吸着から次の吸着までを 1 ステップと位置付けて遊泳時間と遊泳距離を計測しており，1 尾の計測回数が複数回となり，表 3-7 に示す全計測数（ $n=161$ ）と表 3-3 の計測個体数（ $n=71$ ）は一致しない．なお，計測数のうち，体長 3cm 台の個体の計測数が最も多く，145 回である．

表 3-7 実験流速条件と計測数（ウキゴリ実験 A）

| 設定流速値 No. | No1 | No2 | No3 | No4 | No5 | No6 | No7 | No8 | 計 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 設定流速(cm/s) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | |
| 管内代表流速(cm/s) | 17 | 26 | 35 | 44 | 53 | 62 | 71 | 80 | |
| 全計測数（回） | 19 | 37 | 28 | 28 | 35 | 11 | 1 | 2 | 161 |
| 体長3cm台の計測数（回） | 15 | 33 | 26 | 26 | 32 | 10 | 1 | 2 | 145 |

(2) 体長と遊泳速度の関係

図 3-23 は，計測個体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．ワカサギの実験と同様に，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 ± 0.4 cm）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．また，ほとんどの計測個体が，突進速度の一般的な目安である 10BL/s を上回る速度で遊泳した．

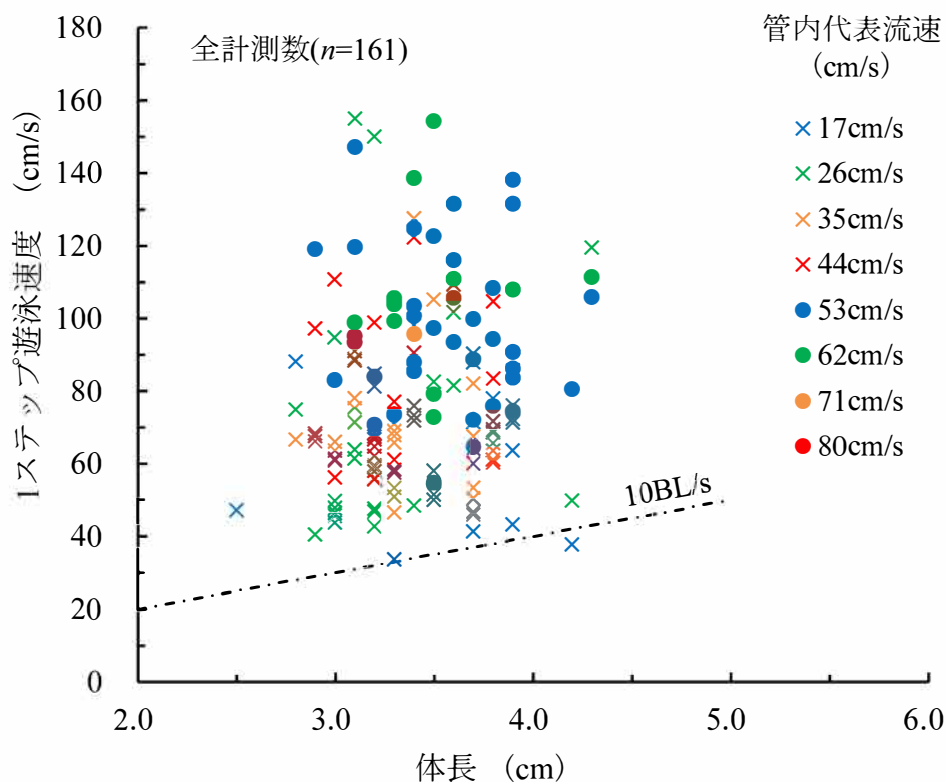


図 3-23 体長と遊泳速度の関係（ウキゴリ類実験 A）

(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（平均体長 3.4cm，標準偏差 ± 0.3 cm）について結果を整理する．図 3-24，図 3-25，図 3-26 は，管内代表流速別に 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 3-24 より，1 ステップの平均遊泳速度は 56~107cm/s で，この速度は 16BL/s~31BL/s に相当する．また，ワカサギと同様に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．次に，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 3-25）．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 3-26），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．

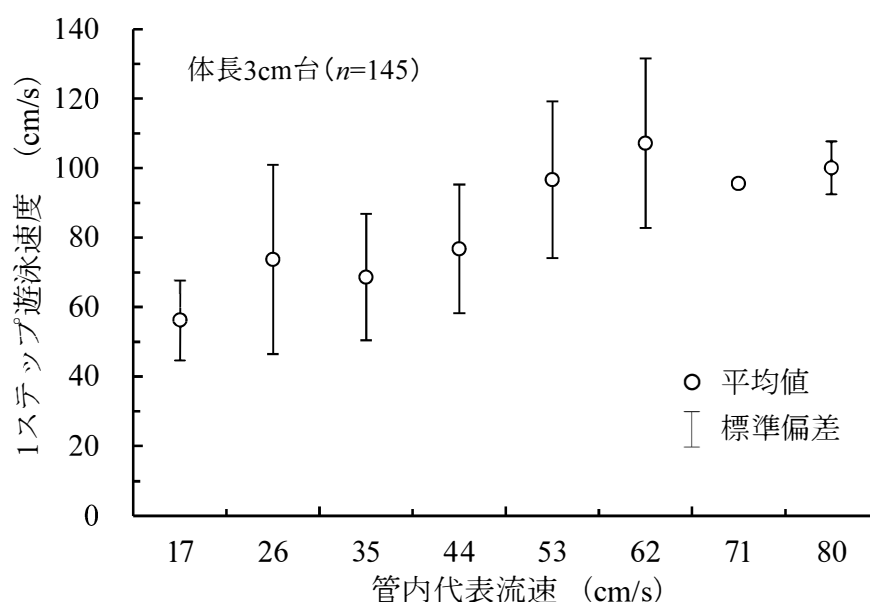


図 3-24 管内代表流速と遊泳速度の関係（ウキゴリ類実験 A）

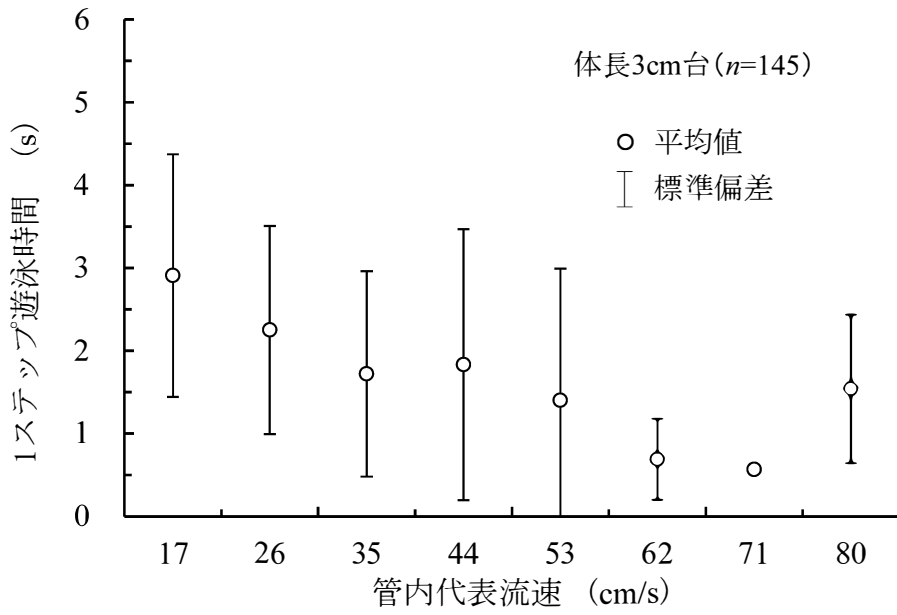


図 3-25 管内代表流速と遊泳時間の関係 (ウキゴリ類実験 A)

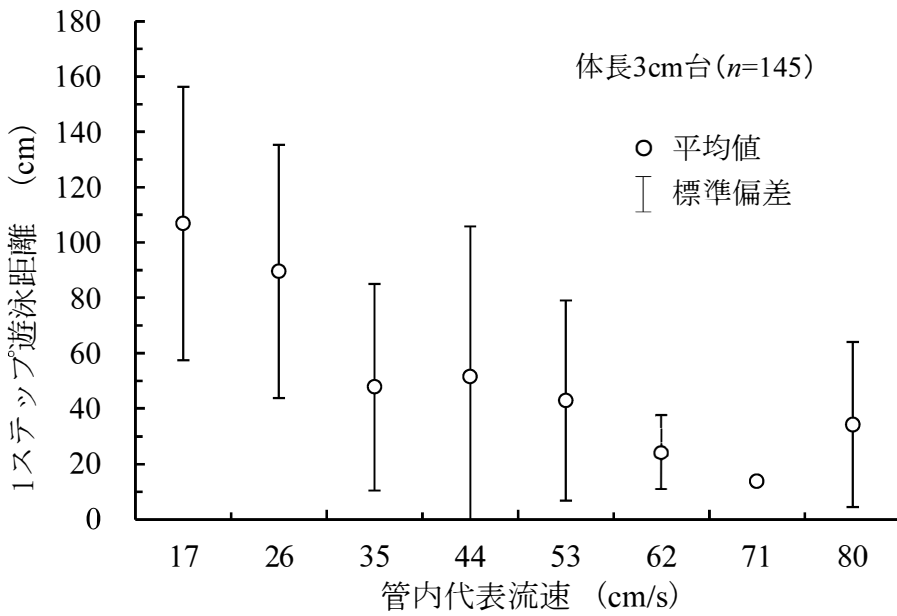


図 3-26 管内代表流速と遊泳距離の関係 (ウキゴリ類実験 A)

(4) 遊泳速度と遊泳時間の関係

図 3-27 は、1 ステップの遊泳時間と遊泳速度の関係を両対数で示したものである。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曲線的に短くなる傾向が認められる。そこで体長 3cm 台の計測数 $n=145$ について、(2-1) 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、 $a=80\text{cm/s}$ 、 $k=0.19$ となった。

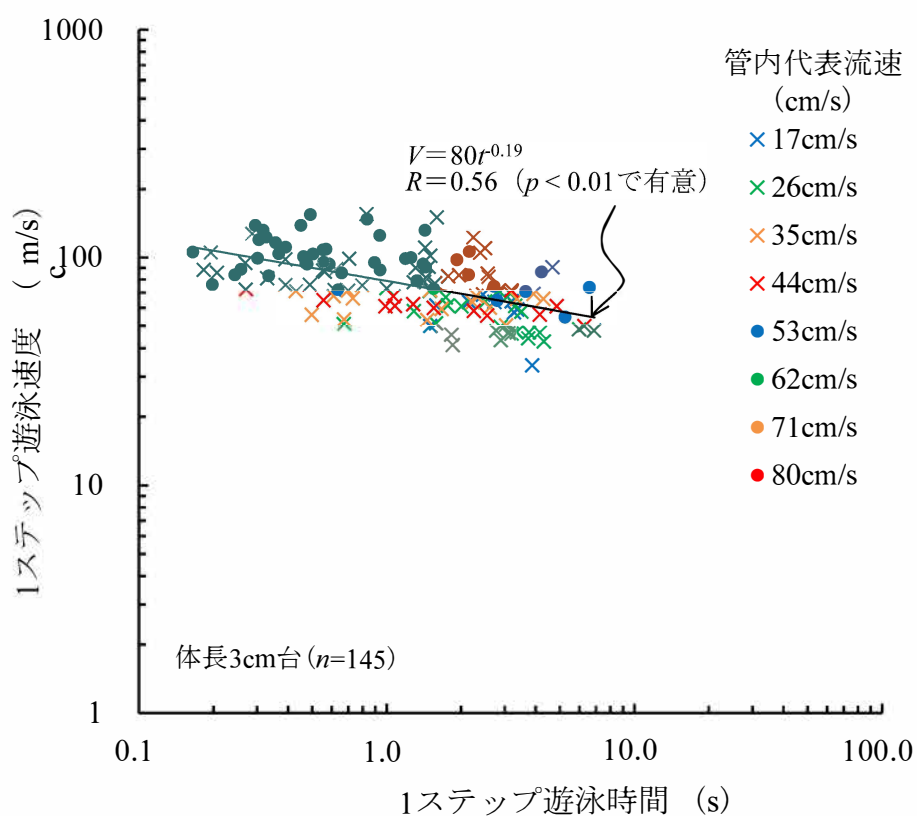


図 3-27 遊泳時間と遊泳速度の関係 (ウキゴリ類実験 A)

(5) 供試魚流下時の流速

図 3-28 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，各管内代表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．

このことから，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（2002，2010）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おり，本知見は，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．

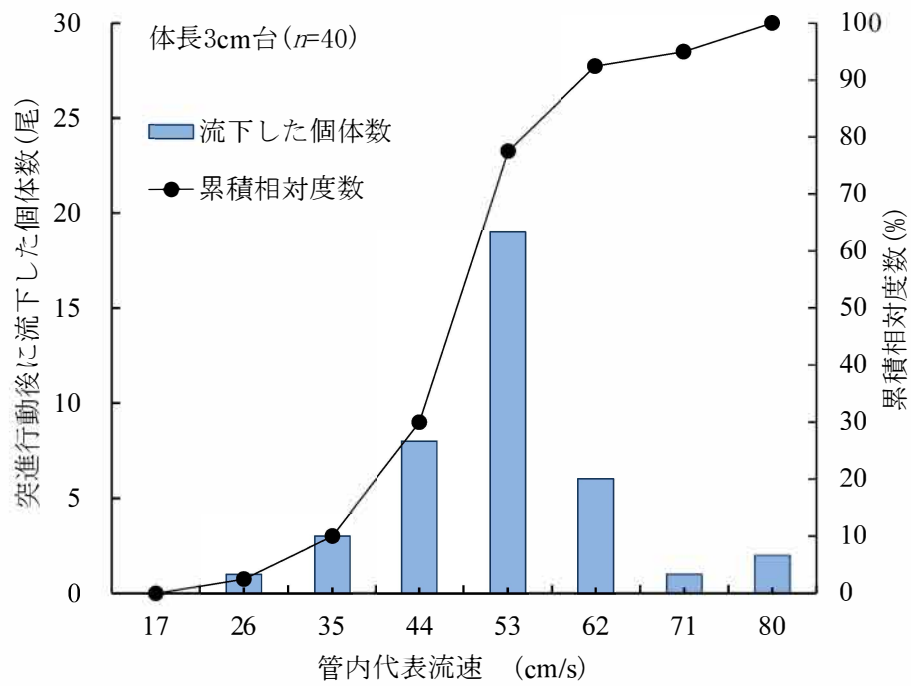


図 3-28 管内代表流速と流下個体数の関係 (ウキゴリ類実験 A)

3.4.4 ウキゴリ類（実験 B）

(1) 管内代表流速と計測個体数

図 3-17 のとおり，スタミナトンネル内の流速は，壁面の摩擦抵抗のため下層側と上層側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，実験 A と同じく，実測流量を管路断面積で除した断面平均流速に，鉛直方向流速分布（図 3-17）による底面から約 5mm 地点の補正率を乗じて求めた（表 3-8）．なお，同一の管内代表流速条件でも，各供試の流速には若干の差異がある（標準偏差 $\pm 3\text{cm/s}$ ）．

管内代表流速 47cm/s の条件では，供試魚の約 20% が前進後に吸盤を用いて底面に吸着した．一方，残りの個体と管内代表流速 66cm/s 以上の供試魚は，前進開始後に底面に吸着することはなく，ワカサギと同様に尾鰭を振動させて一気に前進する遊泳形態をとり，その後，力尽きてスタミナトンネル下流端まで流下した．

管内代表流速 47cm/s の条件で底面に吸着した個体と，スタミナトンネルへ挿入後に前進せずに流下した個体は，計測個体数から除くものとし，設定流速別の計測個体数を整理した（表 3-8）．全計測個体数は 179 尾であり，このうち体長 3cm 台の個体が 124 尾を占める．

表 3-8 実験流速条件と計測個体数（ウキゴリ類実験 B）

| No. | No1 | No2 | No3 | No4 | No5 | No6 | No7 | 計 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 設定流速 (cm/s) | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 130 | |
| 管内代表流速 (cm/s) | 47 | 66 | 74 | 83 | 93 | 113 | 125 | |
| 全計測個体 (尾) | 31 | 40 | 27 | 26 | 34 | 18 | 3 | 179 |
| 体長3cm台の計測個体 (尾) | 30 | 21 | 25 | 24 | 20 | 2 | 2 | 124 |

(2) 体長と遊泳速度の関係

図 3-29 は，計測個体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．実験 A と同様に，本実験に供試した個体の体長分布の範囲では，いずれの流速条件においても体長と遊泳速度との間に明瞭な関係はみられなかった．また，すべての計測個体が，突進速度の一般的な目安である $10BL/s$ を上回る速度で遊泳した．

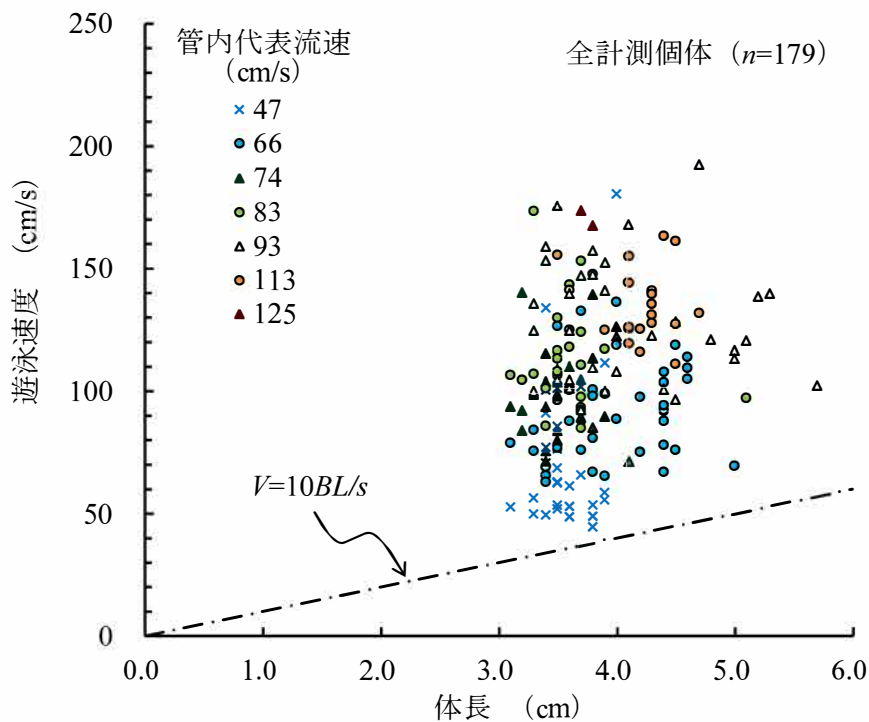


図 3-29 体長と遊泳速度の関係（ウキゴリ類実験 B）

(3) 流速と遊泳速度の関係

以降では、計測数が多く得られ、実験 A でも詳細な評価対象とした体長 3cm 台の計測個体（平均体長 3.6cm，標準偏差 ± 0.2 cm）について結果を整理する．図 3-30 は、管内代表流速別に遊泳速度の平均値および標準偏差を整理したものである．本実験における体長 3cm 台のウキゴリ類の平均遊泳速度は 70~171cm/s で、この速度は 20BL/s~48BL/s に相当する．さらに、管内代表流速が増加するとともに、遊泳速度が増加する傾向がみられた．このように、遊泳速度が 10BL/s を大きく上回ることで、流速に応じて遊泳速度が変化する傾向は、ワカサギの実験やウキゴリ類の実験 A と一致する．

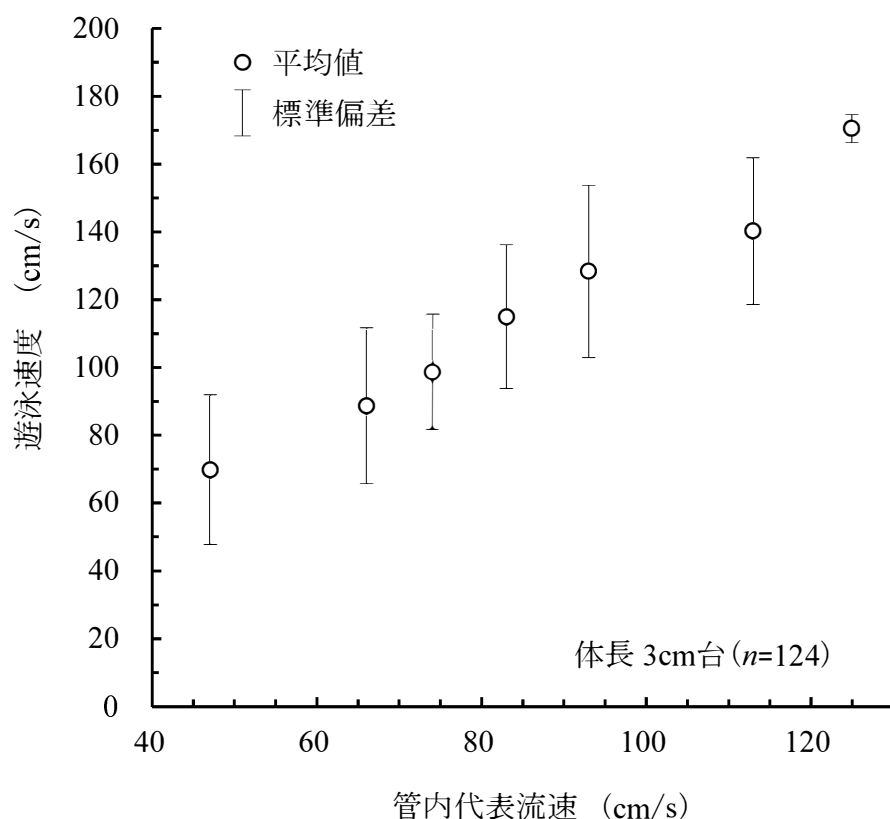


図 3-30 管内代表流速と遊泳速度の関係（ウキゴリ類実験 B）

(4) 遊泳速度と遊泳時間の関係

図 3-31 は、体長 3cm 台のウキゴリ類を対象とし、遊泳速度と遊泳時間との関係を両対数で示したものである。図のとおり、遊泳速度と遊泳時間との間には曲線的な関係がみられる。そこで体長 3cm 台のウキゴリ類について、(2-1) 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、 $a=118\text{cm/s}$ 、 $k=0.24$ となった。本実験値は、吸盤を用いた遡上（実験 A）の吸着と吸着の間の 1 ステップ前進時における $a=80\text{cm/s}$ （図 3-31）に比べて大きく、吸盤の利用が難しい高流速条件下で供試魚はより全力に近い能力を発揮したものと考えられる。

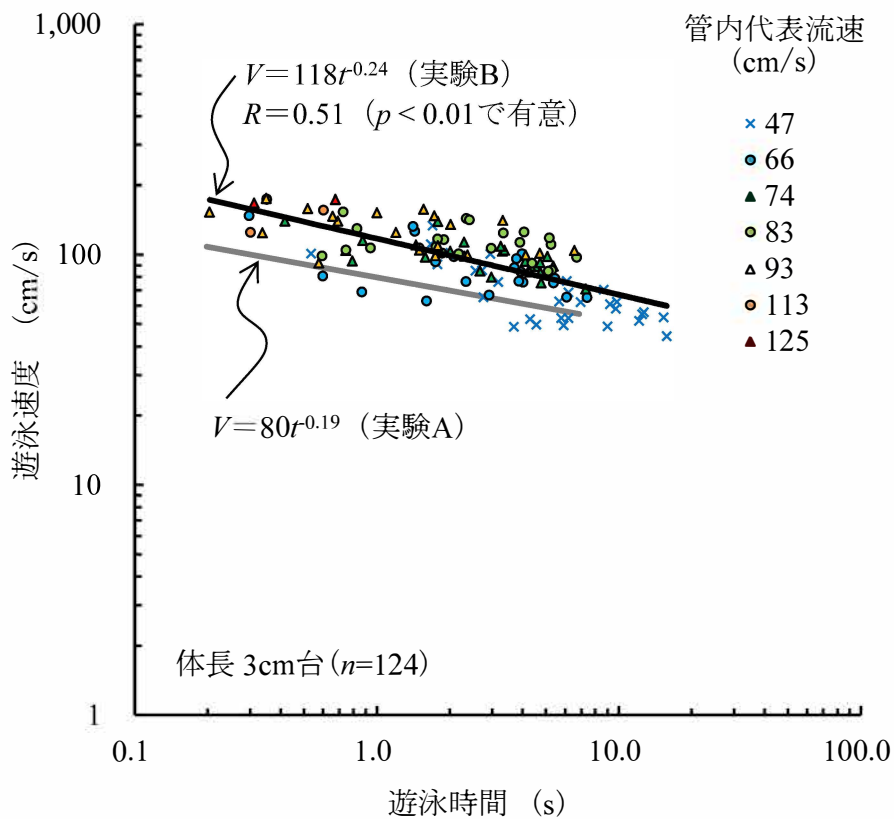


図 3-31 遊泳時間と遊泳速度の関係（ウキゴリ類実験 B）

(5) 流速と遊泳距離の関係

管内代表流速別に体長 3cm 台のウキゴリ類の最大遊泳距離の平均値と標準偏差を整理した (図 3-32)。最大遊泳距離は流速が増加するとともに減少する傾向が認められ、管内代表流速が 113cm/s 以上の条件では、最大遊泳距離の平均値が 40cm 未満となり、長距離の前進が困難であることがわかった。

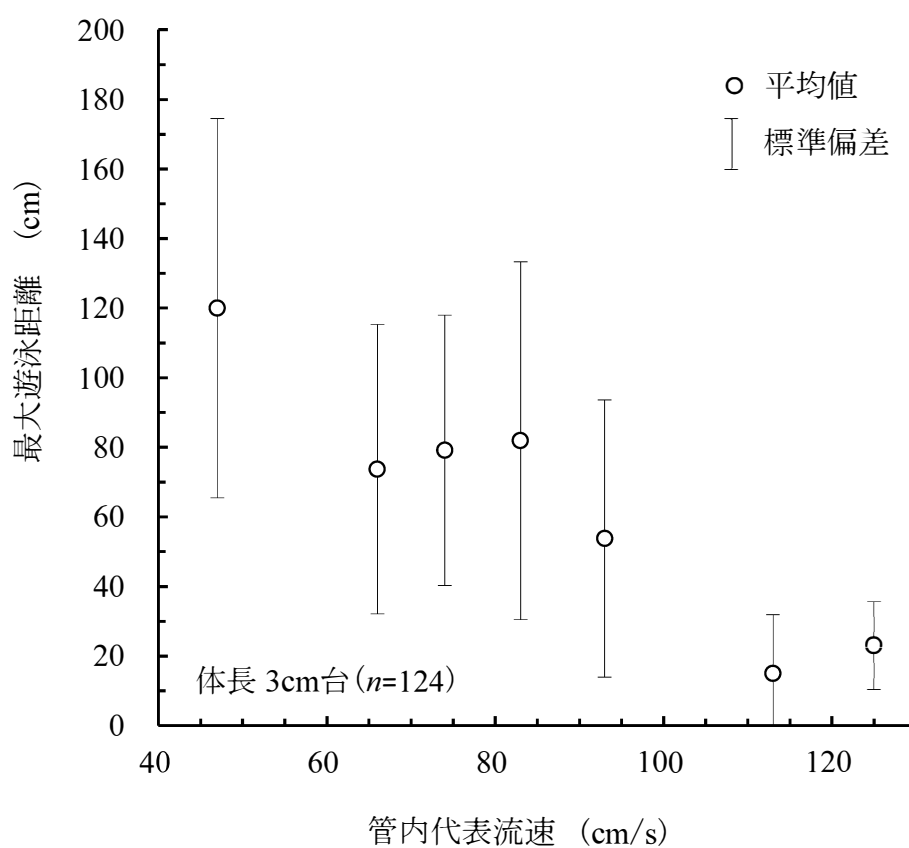


図 3-32 管内代表流速と最大遊泳距離の関係 (ウキゴリ類実験 B)

次に、ワカサギの実験と同様に管内代表流速別に各距離まで到達した供試魚の割合を到達率と称して整理した（図 3-33）。図より、管内代表流速が速くなるに従い、各距離の到達率が低下する傾向にある。特に、管内代表流速 93cm/s 以上になると、到達率の低下が著しく、93cm/s の条件では、75%の供試魚が 30cm まで到達するものの、40cm 以上になると到達率が急激に下がり、50cm まで到達できた個体は 40%であった。その一方で、管内代表流速 83cm/s の条件では、50cm まで到達できた個体の割合は 67%にのぼった。

ここで、本実験結果を踏まえて「2. 小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査」の結果をレビューした上で考察する。2章では、現地魚道調査結果より、プール間落差 20cm、面取りが無い厚さ 40cm の切欠き部において、越流水深 30cm 前後の水理条件では、体長 5cm 未満のウキゴリ類の遡上が困難であることを明らかにした。この切欠き部の天端底面近傍の流速は 140～150cm/s であった。図 3-33 より、流速が 113cm/s の条件では、体長 3cm 台のウキゴリ類のすべてが 30cm 以上前進することができておらず、魚道の現地調査結果と遊泳実験結果は整合する。

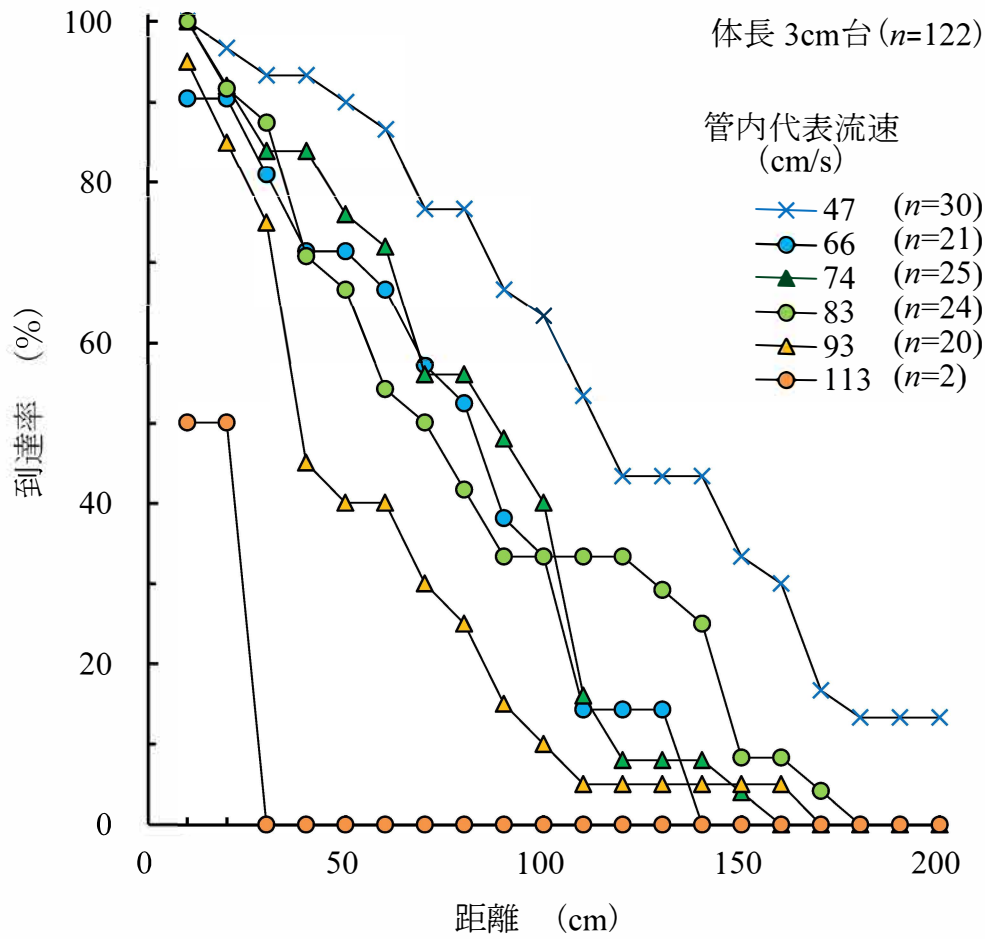


図 3-33 距離と到達率の関係 (ウキゴリ類実験 B)

3.4.5 ドジョウ

(1) 管内代表流速と計測個体数

図 3-17 のとおり，スタミナトンネル内の流速は，壁面の摩擦抵抗のため下層側と上層側が中層部に比べて遅くなっている．ドジョウはおもに底から約 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，体高と体幅から楕円と見立てて求めたドジョウの断面積分を差し引いた管路断面積で実測流量を除した断面平均流速に，鉛直方向流速分布（図 3-17）による底面から約 5mm 地点の補正率を乗じて求めた（表 3-9）．

供試魚全 162 尾のうち，突進行動を示し，計測できた個体数は 71 尾であった．いずれの流速条件においても，傾斜型スタンドパイプ挿入時点から遊泳意欲を示さずにそのまま下流方向へ流下していく個体が確認され，ワカサギとウキゴリ類に比べて，ドジョウは個体ごとに遊泳意欲にばらつきがあった．また，管内代表流速 55cm/s の実験では魚体を振動させるようにして遊泳意欲を示す個体も存在したが，そのすべてが前進できずに流下した．

設定流速別の計測個体数を表 3-9 に示す．全計測個体数は 71 尾であり，このうち体長 4cm 台の個体が 44 尾を占める．

表 3-9 実験流速条件と計測個体数（ドジョウ）

| No. | No1 | No2 | No3 | No4 | 計 |
|-----------------|-----|-------|-----|-----|----|
| 設定流速 (cm/s) | 15 | 30 | 45 | 60 | |
| 管内代表流速 (cm/s) | 15 | 27~28 | 42 | 55 | |
| 全計測個体 (尾) | 26 | 34 | 11 | 0 | 71 |
| 体長4cm台の計測個体 (尾) | 15 | 23 | 6 | 0 | 44 |

(2) 体長と遊泳速度の関係

図 3-34 は、計測個体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。流速条件および各個体の遊泳能力や遊泳意欲の差異によってばらつきがみられるものの、ドジョウの体長と遊泳速度には正の相関がみられ、他魚種の実験 (Blaxter, 1967; Bainbridge, 1958) の結果と同じ傾向が認められた。

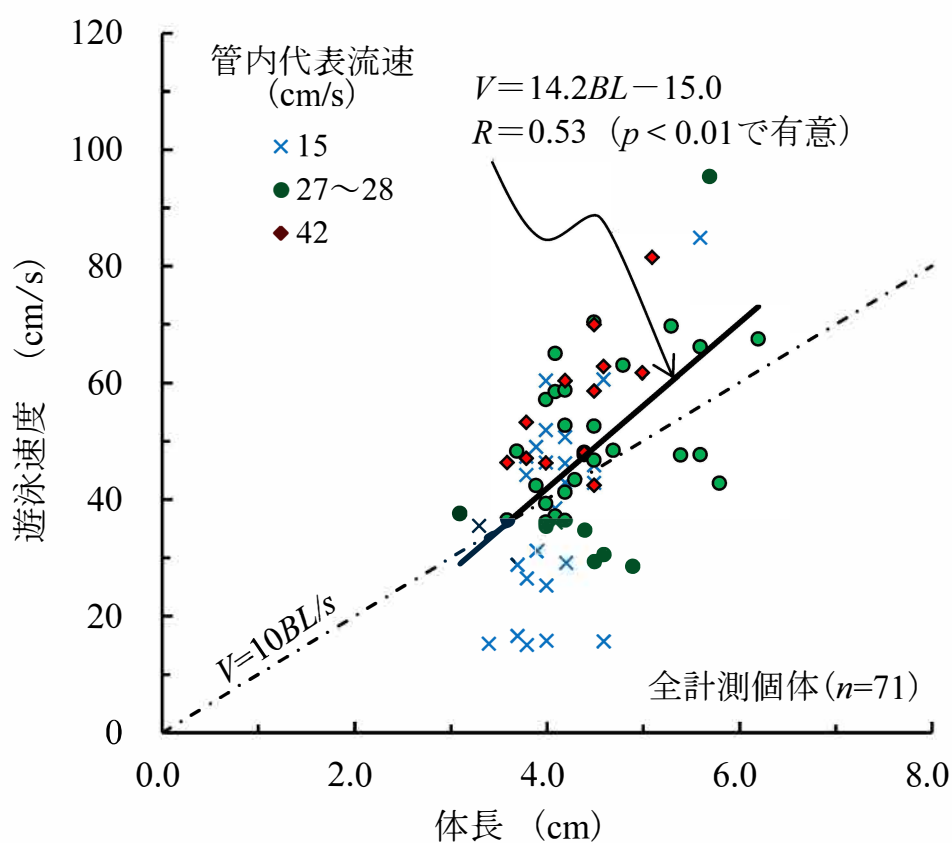


図 3-34 体長と遊泳速度の関係 (ドジョウ)

(3) 流速と遊泳速度の関係

以降では、稚魚期に相当する体長 4cm 台の計測個体（平均体長 4.3cm, 標準偏差 ± 0.3 cm）について結果を整理する。

図 3-35 は、管内代表流速別に遊泳速度の平均値と標準偏差を整理したものである。平均遊泳速度は 41~57cm/s であり、この速度は 10BL/s~14BL/s に相当する。また、ワカサギやウキゴリ類と同様に、流速が増加するとともに遊泳速度が増加する傾向が認められた。

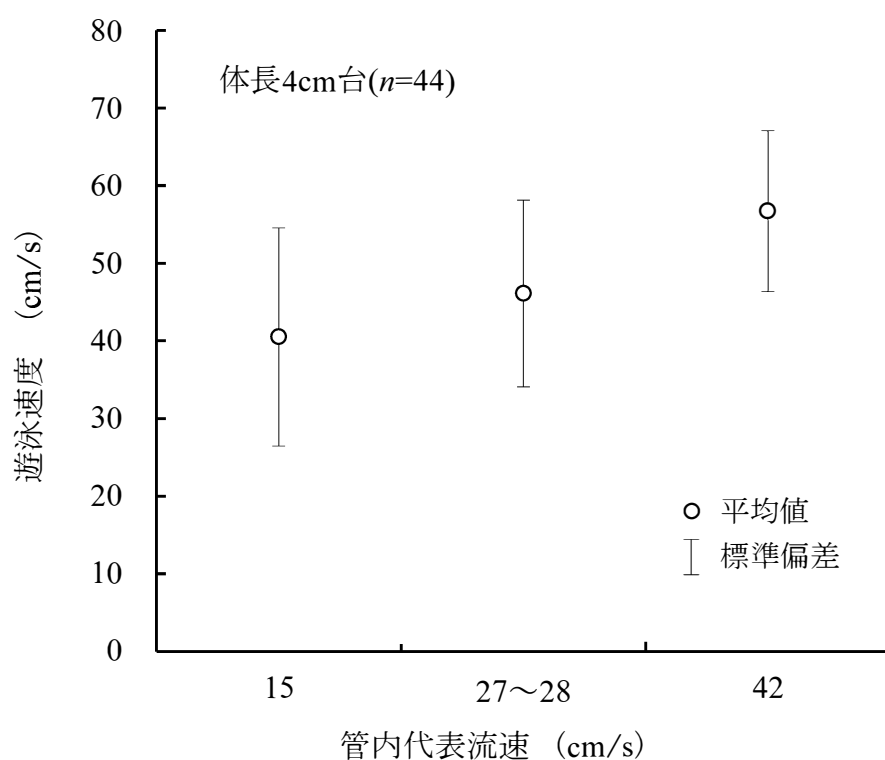


図 3-35 管内代表流速と遊泳速度の関係（ドジョウ）

(4) 遊泳速度と遊泳時間の関係

図 3-36 は、体長 4cm 台の計測個体を対象とし、遊泳速度と遊泳時間の関係を両対数で示したものである。図のとおり、遊泳速度と遊泳時間との間には曲線的な関係がみられる。そこで、体長 4cm 台の 44 尾について、(2-1) 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、 $a=58\text{cm/s}$ 、 $k=0.22$ となった。

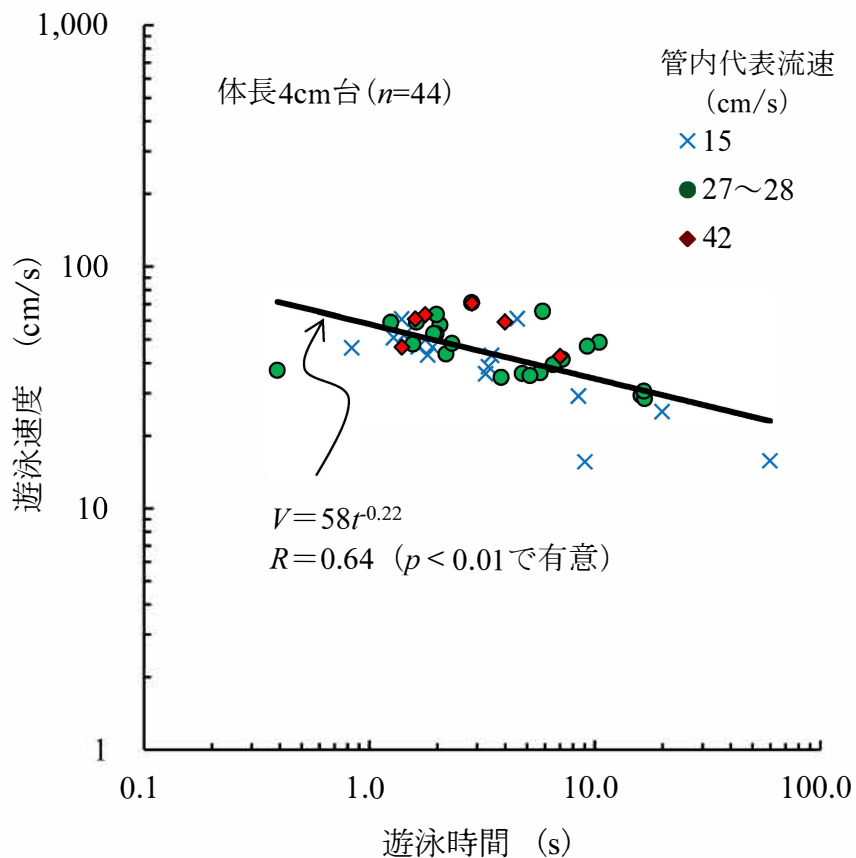


図 3-36 管内代表流速と遊泳速度の関係 (ドジョウ)

図 3-37 は，流速と遊泳時間の関係を体長別に調べるために，本実験結果と加藤ら（2005）および大友（2007）の実験結果とを比較したものである．図中のプロットは遊泳時間の平均値であり，鉛直方向のバーは標準偏差を示している．本図より，体長 4cm 台の計測個体の遊泳時間は，体長 5cm 以上の個体の遊泳時間に比べて短いことがわかる．実験手法の相違等による影響も考えられるが，稚魚期の個体の遊泳能力が幼魚期以上の個体の遊泳能力と比べて相対的に低いことが認められ，水田魚道の速い流れ場の設計に際しては，稚魚期の個体への配慮が特に重要であると考えられる．

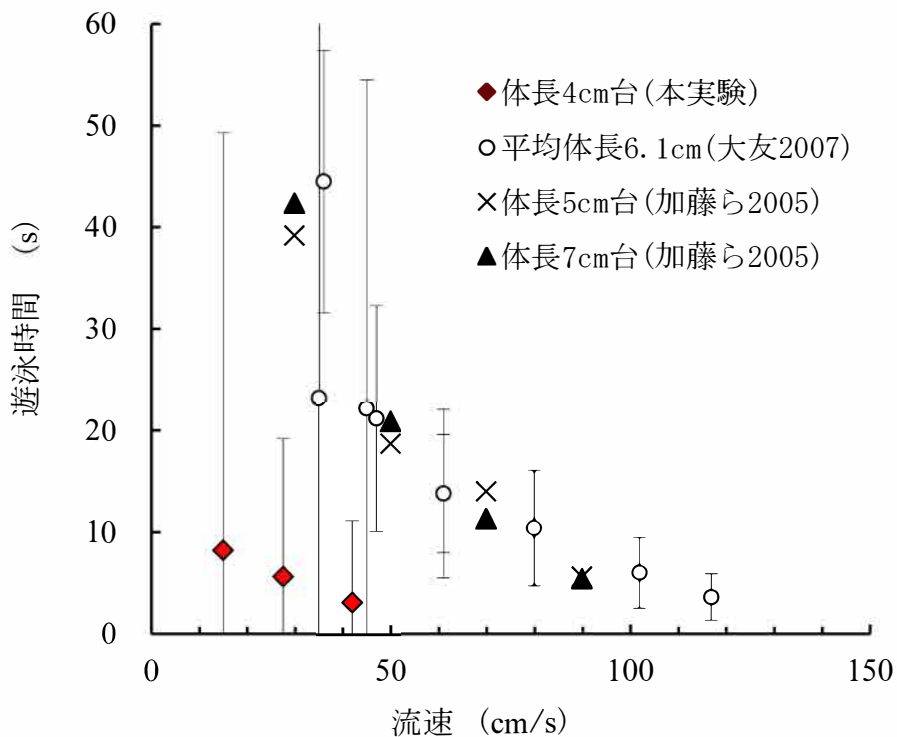


図 3-37 流速と遊泳時間の関係（ドジョウ）

(5) 流速と遊泳距離の関係

管内代表流速別に体長4cm台の計測個体の最大遊泳距離の平均値と標準偏差を整理した(図3-38)。

管内代表流速55cm/sの条件において前進した個体はなく、43～55cm/sが本実験の供試魚が遊泳可能な限界流速であった。また、最大遊泳距離は流速が大きくなるほど短くなり、流速42cm/sの条件では、最大遊泳距離の平均値は43.3cmとなった。

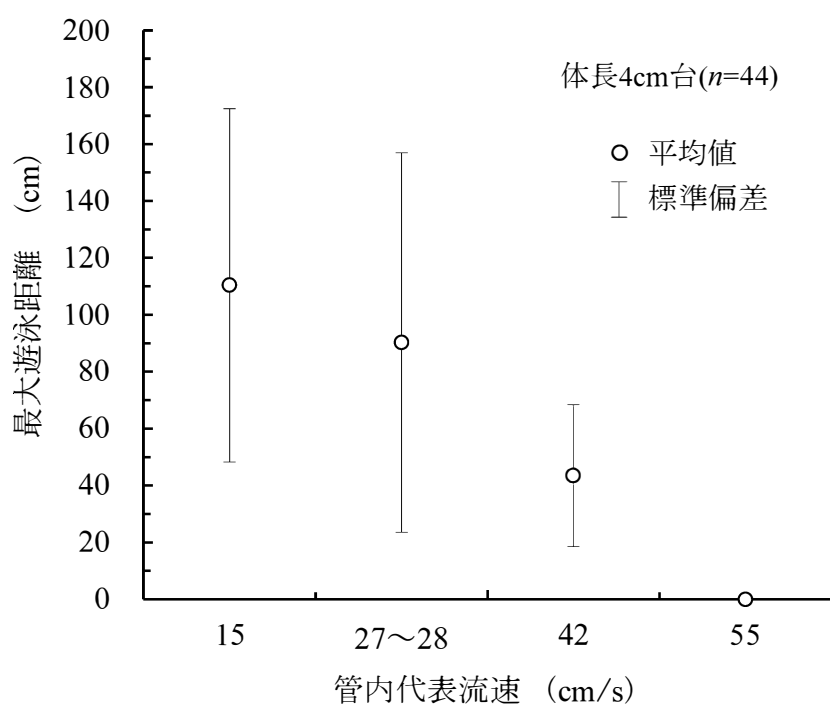


図 3-38 管内代表流速と最大遊泳距離の関係 (ドジョウ)

次に、ワカサギ及びウキゴリ類と同様に、管内代表流速別に、各距離まで到達した供試魚の割合を到達率と称して整理した（図 3-39）。いずれの流速条件においても 9 割以上の供試魚が 10cm 以上遊泳している。また、28cm/s 以下の流速条件では、30cm までは 90% 以上の個体が遊泳しており、これ以上距離が長くなると徐々に到達率が低くなる傾向が見られた。一方、42cm/s の流速条件では、10cm を超える距離になると急激に到達率が低くなり、40cm 以上遊泳した個体は 50% を下回った。

このことから、体長 4cm 台の稚魚期のドジョウを対象に水田魚道設計を行う際に 30cm/s 程度の流れ場を設定する場合は、その流れ場を泳ぎ切るために必要な距離（以下、必要通過距離と称す）を 30cm 以下、40cm/s 程度の流れ場を設定する場合は、必要通過距離を 10cm 以下とすることで多くの個体が遡上可能になると考えられた。

ここで、「農村環境整備センター（2010）：水田魚道づくりの指針」では、代表的な水田魚道の形式である千鳥 X 型魚道（図 3-40）の設計理論の中で、越流部において流速が 30cm/s 以下となる経路を確保することを必要条件としている。また、プール間落差は 9cm 未満とし、隔壁に用いる標準的な堰板厚は 3cm 以下としていることから、必要通過距離は 30cm 未満と判断でき、指針に示される千鳥 X 型魚道の設計諸元は、本実験から得られた稚魚期のドジョウの遊泳能力にも適合していると考えられる。一方、同指針に示されているハーフコーン型魚道等のその他のプールタイプ魚道は、その構造特性から隔壁厚が千鳥 X 型魚道に比べて厚くなる。そのため、これらの魚道設計にあたっては、必要通過距離を踏まえて、魚道勾配を緩くする等によって流速を適切に設定することが重要であると考えられる。

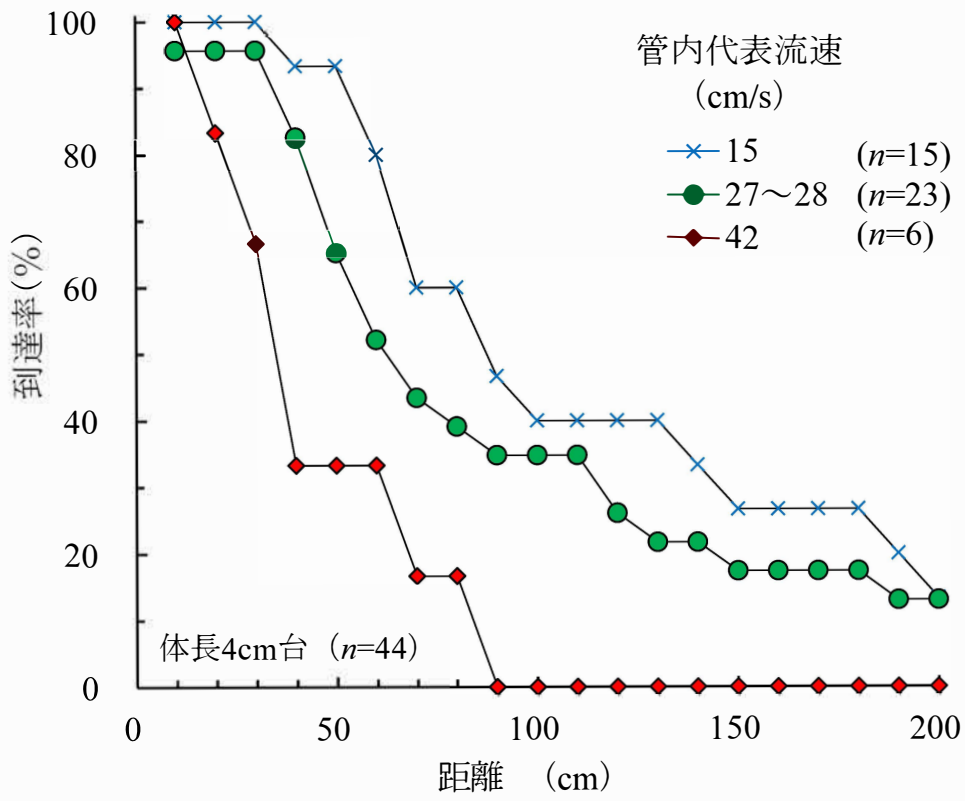


図 3-39 距離と到達率の関係 (ドジョウ)



図 3-40 千鳥 X 型魚道の例（農村環境整備センター，2010 より引用）

3.4.6 各魚種の遊泳能力の比較

塚本・梶原（1973）は，各魚種の遊泳能力を比較するために，（2-1）式によって得られる $t=0s$ から $t=3600s$ までの遊泳速度の積分値を SAI（Swimming Ability Index，遊泳能力指数）と称し，（2-3）式によって表している．

$$SAI = \int_0^{3600} V dt = \int_0^{3600} at^{-k} dt \quad (2-3)$$

そこで，これまでの実験結果の整理から得られた対象 3 魚種の（2-1）式における a 値と k 値を用いて，（2-3）式によって各魚種の SAI 値を求めた．この結果，各魚種の SAI 値は体長 6,7cm 台のワカサギで 19.91×10^4 ，体長 3cm 台のウキゴリ類で 7.83×10^4 ，体長 4cm 台のドジョウで 4.42×10^4 となった．なお，ウキゴリ類の SAI 値は，実験 B に基づいて算出している．

図 3-41 は，塚本・梶原（1973）の結果の一部に泉ら（2013）のシロウオの実験結果と本実験結果の SAI 値をとりまとめたものである．SAI 値によって各魚種の遊泳能力の比較を行うと，体長 6,7cm 台（平均体長 7.0cm）のワカサギは，同じ紡錘型の体型で同程度の体サイズのアユに比べて遊泳能力が劣ることがわかる．また，体長 4cm 台（平均体長 4.3cm）のドジョウの SAI 値は，体長約 7cm のドジョウよりやや小さい値となっており，遊泳能力が相対的に低い．さらに，体長 4cm 台のドジョウは，同程度の体長のウキゴリ（平均体長 3.6cm）と比べて SAI 値が小さく，概ねシロウオと同等の遊泳能力を有することがわかる．

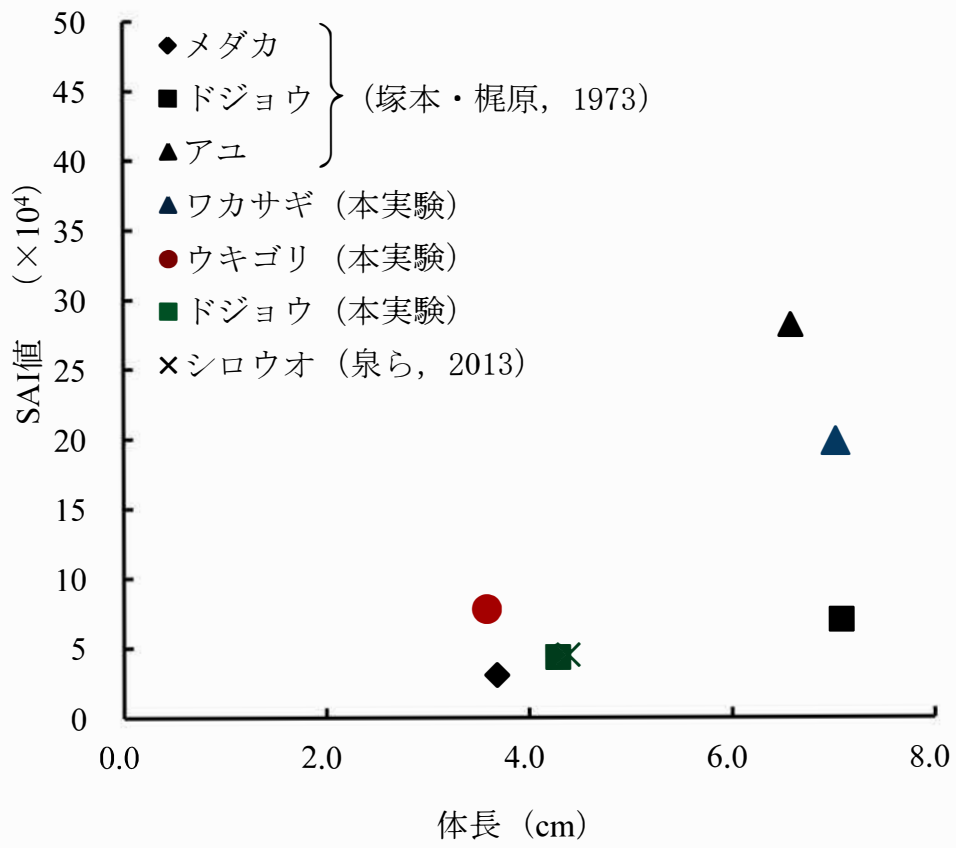


図 3-41 体長と SAI 値の関係

3.4.7 魚道設計に資する遊泳能力に関する指標の考案

(1) 遊泳距離曲線の提案

これまで，魚類の遊泳能力については，主に突進速度に代表される遊泳速度が着目されてきた．しかしながら，魚道の計画・設計に携わる実務者にとって，速度だけの指標では，例えばプールタイプ魚道の隔壁越流部等の高流速域の距離の設定が難しく，経験的に設計が行われていることが実状である．そこで本研究では，魚類の遊泳能力の評価にあたって“距離”の概念を取り入れ，「3.4.5」までに各魚種の平均最大遊泳距離や各距離までの到達率の整理を行った（図 3-21，図 3-22，図 3-32，図 3-33，図 3-38，図 3-39）．

ここでは，到達率よりも簡潔で，魚種間の能力差を比較しやすい流速と前進できる距離の関係を表す指標として“遊泳距離曲線（Swimming distance curve）”を提案する．本実験から得た管内代表流速を縦軸に，各魚種の最大遊泳距離（本項では，魚道設計者がイメージしやすいように，前進可能距離と称す）を横軸にとって図中に実験値をプロットすると曲線的な関係が得られるため，これを両対数グラフとして示した（図 3-42）．さらに，最小自乗法によって近似曲線を求め，これを遊泳距離曲線と称し，実験式（2-4）式を得た．

$$U = bD^{-c} \quad (2-4)$$

ここで， U ：流速（cm/s）， D ：前進可能距離（cm）， b と c は魚種ごとに異なる定数である．図中に示すとおり，ワカサギとウキゴリ類の近似式の有意水準は 1%である．一方，ドジョウの近似式は有意水準 5%であるもののデータにばらつきがあり，実用には今後，実地検証が必要と考えられる．

図 3-42 より，同じ流速条件でも，魚種によって前進可能な距離が異なることがわかる．実験対象 3 魚種のうち，ワカサギ（体長 6,7cm

台)の前進可能距離が最も長く、水田等の止水環境を好むドジョウ(体長4cm台)の前進可能距離が短い結果となった。

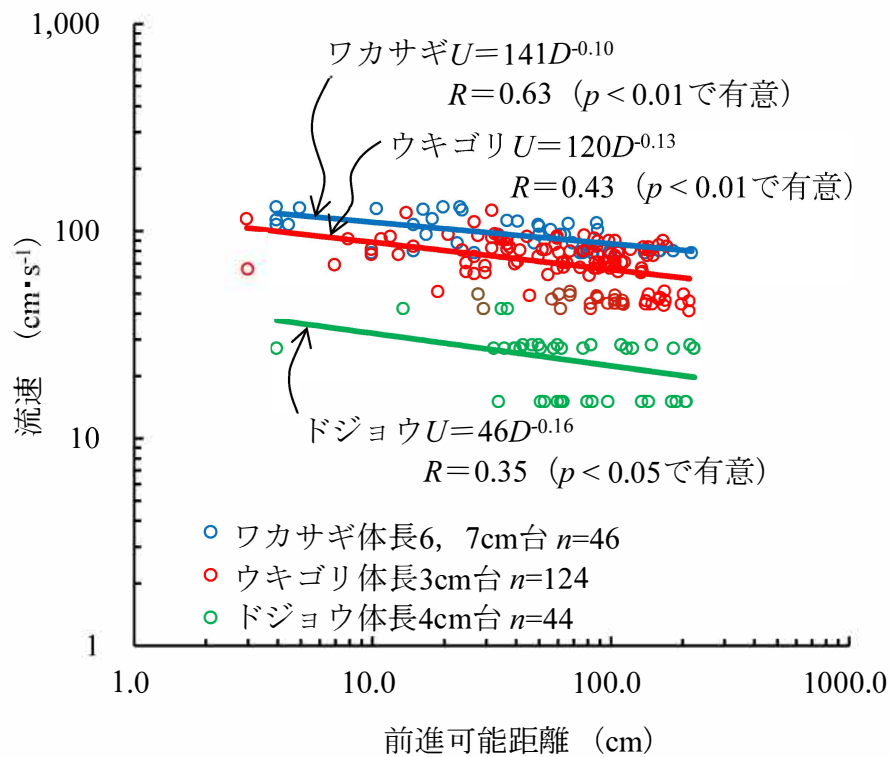


図 3-42 実験対象 3 魚種の遊泳距離曲線

本実験結果のとりまとめとして、表 3-10 に、実験対象 3 魚種の b 値と c 値を示す。また、同表には、本研究のもうひとつの主要成果である (2-1) 式の a 値と k 値および SAI 値も記載した。なお、ウキゴリ類の値については、すべて実験 B の結果に基づいている。

表 3-10 本実験による対象 3 魚種の遊泳能力評価結果

| 魚種 | 標準体長 | 流速と前進可能距離の関係 | | | 遊泳速度と遊泳時間の関係 | | | |
|-------|---------|--------------|----------|---------------------|--------------|----------|------------------------|---------------------|
| | | $b^{※1}$ | $c^{※1}$ | 適用範囲(cm) | $a^{※2}$ | $k^{※2}$ | 適用範囲(s) | SAI |
| ワカサギ | 6, 7cm台 | 141 | 0.10 | $4 \leq D \leq 220$ | 130 | 0.12 | $0.2 \leq t \leq 10.2$ | 19.91×10^4 |
| ウキゴリ類 | 3cm台 | 120 | 0.13 | $3 \leq D \leq 215$ | 118 | 0.2 | $0.2 \leq t \leq 15.9$ | 7.83×10^4 |
| ドジョウ | 4cm台 | 46 | 0.16 | $4 \leq D \leq 225$ | 58 | 0.2 | $0.4 \leq t \leq 60.4$ | 4.42×10^4 |

※1 (2-4)式の係数

※2 (2-1)式の係数

(2) 魚道設計への遊泳距離曲線の適用案

前述の遊泳距離曲線の魚道設計への適用方法について考察する。ここでは、体長 3cm 台のウキゴリ類を対象とし、プールタイプ魚道の隔壁天端の流速設定を考える。

既設魚道におけるハゼ科底生魚の遡上行動観察結果（泉ら，2010）を踏まえ、ウキゴリ類は吸盤を用いずに隔壁天端を一気に遡上するものと仮定する（図 3-43）。隔壁天端の流れ場を泳ぎ切るために必要な距離 D を 50cm とした場合、(2-4) 式に体長 3cm 台のウキゴリ類の定数 b 値、 c 値を代入することで、隔壁部を遡上可能な流速上限値の目安 $U=72\text{cm/s}$ を得ることができる。魚道の幾何構造設計にあたっては、この流速を上回らないように設計水深やプール間落差を定めれば良い。

一方、ウキゴリ類が吸盤を利用した吸着と前進を繰り返す遡上形態をとるものと想定して魚道内の流速を設定する場合は、図 3-28 より、ウキゴリ類の頭部近傍の流速を概ね 40～50cm/s 未満とする必要があると考えられる。

なお、実際の魚道はスタミナトンネルと異なり、開水路流れで気泡を含んだ複雑な流れ場であることが多い。しかしながら、現地魚道隔壁での遊泳速度に関する調査研究事例（泉ら，2002）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（泉ら，2006）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本研究の知見は、魚道設計に際して一つの指標になることが期待される。今後さらに、現地の魚道等を対象とした水理量と魚類の挙動に関する調査・研究を進展させ、遊泳距離曲線やウキゴリ類が吸着できる上限流速の目安値の実用性について検証していくことが望まれる。

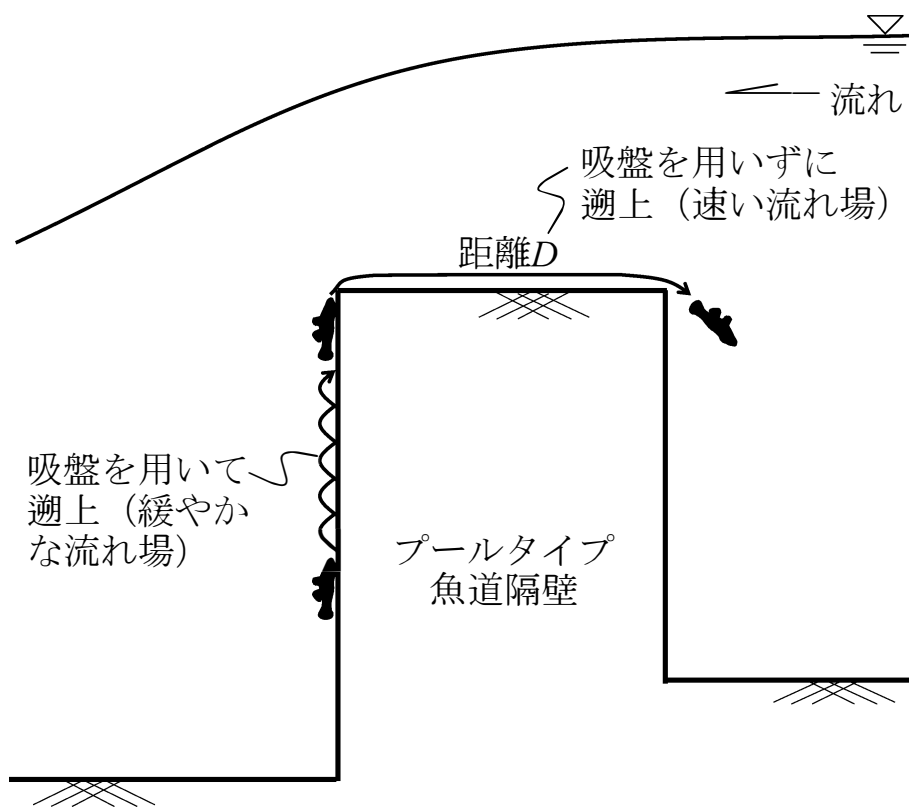


図 3-43 プールタイプ魚道におけるウキゴリ類の遡上模式図

4. 総括

本研究では、大きく分けて「小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査」と「小型淡水魚の遊泳能力の測定」に取り組んだ。以下に、本研究から得られた主な知見を総括する。

4.1 小型淡水魚に着目した魚道遡上の実態調査

岩木川河口から一つ目の河川横断構造物に設置された既設全面越流型階段式魚道を対象に、ウキゴリ類等の採捕調査、切欠き部の流速分布調査および水中ビデオカメラ観測調査を行った。この結果、プール間落差 20cm、面取りが無い厚さ 40cm の切欠き部において、越流水深 30cm 前後の水理条件では、体長 5cm 未満のウキゴリ類等の遡上が困難であることを明らかにした。調査対象とした魚道と類似した幾何構造の階段式魚道は、全国に数多く存在するものと考えられ、小型ウキゴリ類が遡上困難な階段式魚道切欠き部の水理条件を示唆する有用な知見を得ることができた。

4.2 小型淡水魚の遊泳能力の測定

体長概ね 10cm 以下の淡水魚を小型淡水魚と定義し，魚道設計に資する小型淡水魚の遊泳能力を調べることを目的に，ワカサギ，ウキゴリ類，ドジョウを対象として，スタミナトンネルを用いた自然河川水による現地遊泳実験を行った．実験の結果，以下の知見が得られた．

(1) ワカサギ

- 1) 体長 6, 7cm 台のワカサギの遊泳速度は，流速が増加するとともに大きくなる傾向が認められ，流速が 79～128cm/s の際の平均遊泳速度は 107～141cm/s であった．この速度は体長の 15～20 倍/s に相当した．
- 2) 体長 6, 7cm 台のワカサギは，遊泳速度が増加するとともに遊泳時間が曲線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．
- 3) 体長 6, 7cm 台のワカサギの遊泳能力を SAI 値によって評価した結果，同程度の体サイズのアユに比べて，遊泳能力が劣ることがわかった．
- 4) 体長 6, 7cm 台のワカサギの前進できる距離と流速の関係を明らかにした．流速 128cm/s の条件では，20cm 以上前進した個体の割合は 43%であり，30cm 以上前進できた個体はいなかった．

(2) ウキゴリ類

- 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。実験の結果、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た。
- 2) 次に、ウキゴリ類が底面に吸着することが困難な47cm/s以上の高流速条件で遊泳実験を行った。この結果、体長3cm台のウキゴリ類の遊泳速度は、流速が増加するとともに大きくなる傾向が認められ、流速47~125cm/sの際の平均遊泳速度は70~171cm/sであった。この速度は体長の20~48倍/sに相当した。
- 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遊泳時間が曲線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台のウキゴリ類の遊泳能力をSAI値によって評価した結果、同程度の体サイズのシロウオ、ドジョウに比べて、やや遊泳能力が高いことがわかった。
- 5) 体長3cm台のウキゴリ類が吸盤を利用せずに前進できる距離と流速の関係を明らかにした。93cm/sの条件では、75%の供試魚が30cmまで到達するものの、40cm以上になると到達率が急激に下がり、50cmまで到達できた個体は40%であった。

(3) ドジョウ

- 1) 稚魚期に相当する体長 4cm 台のドジョウの遊泳速度は，流速が増加するとともに大きくなる傾向が認められ，流速 15～42cm/s の際の平均遊泳速度は 41～57cm/s であった．この速度は体長の 10～14 倍/s に相当した．
- 2) 体長 4cm 台のドジョウの遊泳時間は，同程度の流速条件における体長 5cm 以上の個体の遊泳時間に比べて短く，稚魚期の個体の遊泳能力が幼魚期以上の個体の遊泳能力と比べて相対的に低いことがわかった．
- 3) 体長 4cm 台のドジョウは，遊泳速度が増加するとともに遊泳時間が曲線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 4cm 台のドジョウの遊泳可能な限界流速は，43～55cm/s であった．
- 5) 体長 4cm 台のドジョウが前進できる距離と流速の関係を調べた．この結果，体長 4cm 台の稚魚期のドジョウを対象として水田魚道設計を行う際に，流れ場の設計流速を 30cm/s もしくは 40cm/s 程度とする場合は，必要通過距離をそれぞれ 30cm 以下，10cm 以下とすることで多くの個体が遡上可能になると考えられた．

(4) 魚道設計に資する遊泳能力に関する指標の考案

実験対象 3 魚種を対象に，前進可能な距離と流速の関係を表す近似曲線を遊泳距離曲線 (Swimming distance curve) と称して整理した．遊泳距離曲線から，例えば体長 3cm 台のウキゴリ類が 50cm 前進可能な流速は，約 72cm/s までであると読み取ることができ，遊泳距離曲線は，今後の魚道設計にあたって高流速域の距離設定等の一指標になることが期待される．

5. おわりに

本研究は、「小型淡水魚の遊泳能力」をテーマに、2013年から2016年の4年間に渡り、既設魚道調査と現地遊泳実験を行ったものである。本研究では、魚類生理学的視点や魚の遊泳運動に対する力学的視点ではなく、“魚道設計のための指標を得る”ことを目的として工学的視点に立って淡水魚の遊泳能力にアプローチした。

私が淡水魚の遊泳能力の研究をはじめたのは、弘前大学農学生命科学研究科の修士課程に入学後しばらく経ってからのことである。入学当初は、既設魚道の水理特性と魚類の挙動に関する調査・実験を行った上で魚道の改善点を提案するような研究構想を描いていた。その最初の現地実験として延長10m程度の粗石付斜路式魚道を対象に、養殖イワナを用いた遡上実験を行ったのである。本魚道は自然石が植え付けられているものの、石高が5cm未満と低く、粗石は水没した状態で、表面流が卓越していた。断面平均流速は3m/s程度であったろうと記憶しているが、私の目からは、魚が休息できるような緩流域は形成されていないように見えた。このことから、当然、イワナは遡上できないものと予想した。しかしながら、魚道上流端に網入れしてから1時間経過後に網を引き上げると、魚道を遡上してきた2尾のイワナが採捕されたのである。これには、本当に驚かされた。「魚は、人間が思っている以上に強い生物だ」という旨を、私の指導教官である弘前大学大学院農学生命科学研究科の泉教授と驚嘆の想いで話し合ったことが思い出される。また、泉教授は、この実験以前に、アイスハーバー型魚道の越流部を遡上する魚の遊泳速度が、従来から言われている突進速度の目安である体長の10倍/sを大幅に上回っていることを明らかにしていた。このような背景のもと、日本産淡水魚の自然状況下における遊泳能力を明らかにしたいと考え、泉教授と私、さらには研究室の仲間との淡水魚の遊泳能力に関する実験がはじまったのである。修士課程では、2年間という時間的制約があり、身近で採捕できるウグイやオイカワ、アユを主な実験対象としていたが、修士論文を取りまとめている段階から、遊泳能力が弱いと考えられる小型淡水魚、特に河川遡上期に体サイズが小さい通し回遊

魚の遊泳能力解明が必要であると考えていた。修士課程修了から約10年が経つが、本研究によって、その一部を明らかにできたものと考えている。しかしながら、今後さらに、通し回遊魚のカジカ属やウナギ（シラスウナギ）等の遊泳能力を解明したいという思いがあることも正直なところである。

本研究の遊泳実験では、できる限り自然条件下に近い状態で遊泳能力を測定するために、現地で採捕された魚を供試し、採捕地点近傍の自然河川水を通水して実験することに拘った。特に通し回遊魚については、河川遡上期の個体を用いたかった。しかし、これを実現させるためには、供試魚の確保が大きな課題であった。この課題を解決してくれた方が、岩木川漁業協同組合の齋藤裕氏である。齋藤氏が採捕した元気な供試魚を提供頂けなければ、本実験は遂行できなかった。気さくでやさしい齋藤氏に深く感謝いたします。また、現地実験にあたっては、その都度、現場へ実験設備を搬入し、組立を行わなければならず、大きな労力を必要とした。さらに、実験は供試魚の挿入や供試魚の挙動観察、流速調整を緊密に連携しながら行わなければならず、1人や2人で遂行できるものではなかった。これに対して精力的に実験に携わってくれた弘前大学農業水利学研究室の学生諸氏（2013年度：清水君，工藤君，古川君，2014年度：清水君，佐藤君，白井君，2015年度：遠藤君，黒坂君，杉本さん，2016年度：杉本さん，柿沼さん，木須君，桜井君）に感謝申し上げます。

最後になりますが、実験および調査計画段階から論文執筆まで、泉教授には親身になってご指導・ご協力頂きました。ご多忙にも関わらず、いつも明るく接して頂き、私のために多くの時間を費やして下さいました。また、弘前大学大学院農学生命科学研究科の東教授には、生態学的視点から多くのご助言を頂くと共に、魚の同定等でもご助力頂きました。さらに、弘前大学大学院農学生命科学研究科の丸居准教授には、公表論文執筆にあたり、本質的なご指摘を含むたくさんのお有益なご助言を頂きました。3人の先生方へ深く感謝申し上げます。そして、仕事が多忙で家に居ることが少ない私が、限られた時間の中で本研究活動に存分にあたれたのは、研究活動を応援してくれた妻のおかげです。泊まり込みの実験・調査の際には、

子供を連れて仙台市からつがる市へ同行してくれ、魚道内の水中カメラ画像の解析にも協力してくれました。また、私が心身的に辛い状態となり論文執筆を諦めそうになった際、私の背中を押してくれました。どうもありがとう。

引用文献

- 青木宗之，向井健朗，菊池裕太，松本 越（2015）：階段式魚道のプール内における礫の堆積が魚類の行動に及ぼす影響について，土木学会論文集 B1(水工学)，71(4)，I_1099-I_1104.
- 東 信行，亀井陽太郎，齋藤 裕，泉 完（2005）：岩木川における未記載魚種の採捕記録，青森自然誌研究，10，71-72.
- Bainbridge, R. (1958) : The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat, *Experimental Biology*, 35, 109-133.
- Beamish, F.W.H. (1978) : Swimming Capacity In Fish physiology, *Academic Press*, 7, London, 101-187.
- Blaxter, J.H.S. (1967) : Swimming Speeds of Fish, *Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, Bergen, Norway, 69-100.
- 道津喜衛（1955）：ウキゴリの生活史，九大農学芸雑誌，15(3)，367-374.
- 端 憲二（1998）：水田灌漑システムの魚類生息への影響と今後の展望，農土誌，66(2)，143-148.
- 端 憲二（1999）：小さな魚道による休耕田への魚類遡上試験，農土誌，67(5)，19-24.
- 久下敏宏（2006）：群馬県におけるワカサギの増殖に関する研究，群馬県水産試験場研究報告，12，1-128.
- 細谷和海（2000）：メダカの生息状況と保護，水環境学会誌，23(3)，135-139.
- 井出充彦，山中 治，片岡佳孝（2002）：琵琶湖流入河川でのワカサギの産卵状況と特性，滋賀県水産試験場研究報告，49，39-49.
- 板沢靖男・羽生功（1991）：魚類生理学，恒星社厚生閣，539-584.
- 岩崎明希人，吉村千洋（2012）：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)，I_685-I_690.
- 泉 完，高屋大介，工藤 明，東 信行（2002）：アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性，農土論集，217，55-63.
- 泉 完，菅原賢治，工藤 明，東 信行（2004）：バーチカルスロット型魚道におけるアメマス現地放流実験，農業土木学会誌，72(7)，45-50.

- 泉 完，矢田谷健一，東 信行，工藤 明（2006）：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，農土論集，244，171-178.
- 泉 完，矢田谷健一，東 信行，工藤 明，加藤 幸（2007）：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，51，1285-1290.
- 泉 完，山本泰之，矢田谷健一，神山公平（2009）：河川における自然誘導式スタミナトンネルを用いた高流速条件での野生魚の突進速度，農業農村工学会論文集，261，73-82.
- 泉 完，神山公平，藤原正幸（2010）：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，269，127-135.
- 泉 完，菊地真弘，加藤 幸，東 信行（2012）：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，278，99-107.
- 泉 完，大田敏貴，東 信行（2013）：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，283，41-50.
- 泉 完，東 信行，丸居 篤，矢田谷健一（2017）：河川遡上期におけるシロウオの突進速度に関する実験，土木学会論文集 G（環境），73(7)，Ⅲ_269-Ⅲ_274.
- 金子義明，和泉 清，土屋十圀，大竹義男（1997）：秋川における魚道の水理特性と遡上効果，水工学論文集，41，265-270.
- 片野 修，細谷和海，井口恵一朗，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(1)，19-25.
- 加藤宗英，水谷正一，鈴木正貴，後藤 章（2005）：小規模魚道の設置諸元を検討するための小型魚類の遊泳能力，農土論集，235，59-65.
- 川那部浩哉，水野信彦，細谷和海（2001）：日本の淡水魚，山と溪谷社，60-627.
- 国土交通省河川局（2005）：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，54-55.
- 久保田哲也，中西 章，谷口政由貴（2000）：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)，48-56.
- 久保田善二郎，久我万千子，岡政 徹，前田達男（1965）：ドジョウの増殖に関する研究-VII，仔魚の放養時期，配合飼料の種類および池の底質が種苗の生産に及ぼす影響について，水産大学校研報，14，59-73.

- 松本洋典（1994）：宍道湖におけるワカサギ資源の変動，島根県水産試験場研究報告，8，171-183.
- 皆川明子，西田一也，藤井千晴，千賀裕太郎（2006）：用排兼用型水路と接続する未整備水田の構造と水管理が魚類の生息に与える影響について，農土論集，244，65-72.
- 宮園正敏，戸松 修（2003）：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)，3-12.
- 森 誠一（1999）：ダム構造物と魚類の生活，応用生態工学，2(2)，165-177.
- 中村俊六（1995）：魚道のはなし，山海堂，p.2.
- 梨本勝昭（1980）：魚の尾の動きと遊泳速度との関係，日本水産学会誌，46(3)，307-312.
- 棗田孝晴，瀬谷政貴（2012）：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)，187-195.
- 農林水産省経済局統計情報部（2015）：漁業・養殖業生産統計.
- 農林水産省農村振興局整備部設計課（2015）：よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針，24-25.
- 農村環境整備センター（2010）：水田魚道づくりの指針.
- 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山本晃義，飯國洋平（2008a）：流速および体長別のオイカワの突進速度，水工学論文集，52，1183-1188.
- 鬼束幸樹，秋山壽一郎，森 悠輔，小林達也，飯國洋平（2008b）：階段式魚道におけるプール間落差と遡上率の関係，応用力学論文集，11，677-688.
- 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山本晃義，渡邊拓也，脇 健樹（2009）：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)，296-307.
- 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，野口翔平，竹内 光（2012）：単独で遊泳するアユの挙動に及ぼす側壁の影響，土木学会論文集 B1(水工学)，68(4)，I_661- I_666.
- 大友芳成（2007）：モツゴ，メダカ，ドジョウの遊泳能力，埼玉農総研研報，7，129-131.

- 小山長雄（1967）：魚道をめぐる諸問題Ⅱ.解説編，木曾三川河口資源調査団（KST），54-68.
- 小山長雄・滝沢達夫、桑名好治・松井正通・宮田渡（1969）：関屋分水路可動堰の魚道設置に関する調査業務委託報告書(2)，建設省旧信濃川工事事務所，1-12.
- 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な水域への侵入と産卵，日本生態学会誌，38，35-47.
- Sasaki, T. , Saruwatari, T. and Watanabe, S.（2003）：Spawnin gEcology of Anad romous Wakasagi,Hypomesus n ppon ous inhabitin gHei River in Iwate,Japans, *Suisanzoshoku*, 51(2), 141-150.
- 佐々木 剛，猿渡敏郎，渡邊清一（2006）：岩手県閉伊川における遡河回遊型ワカサギの回遊履歴，日本水産学会，72(5)，924-926.
- 佐藤 純，泉 完，工藤 明，東 信行（2003）：全面越流型階段式魚道における魚類等の遡上特性－芦野堰右岸魚道を事例として－，平成15年度農業土木学会応用水理研究部会講演集，21-26.
- 佐藤太郎，佐藤 学，稲垣政則，佐藤武信，安実千智，土田一也，三沢眞一（2008）：コルゲート管を用いた水田魚道の設置条件および水田の水管理とドジョウの遡上との関係，農村計画学会誌，26，434-441.
- 下田和孝，中野 繁，小野有五（2003）：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)，15-23.
- 塩垣 優（1982）：青森県産魚類目録，青森県水産試験場報告，1-36.
- 白石芳一（1955）：階段式魚梯におけるそ上アユの生態について，水産増殖，3(1)，31-38.
- 住谷昌弘，長瀬 修，木下昌樹（2002）：長良川河口堰における魚道と魚類の遡上・降下調査について，応用生態工学，5(1)，23-40.
- 鈴木正貴，水谷正一，後藤 章（2000）：水田生態系保全のための小規模水田魚道の開発，農土誌，68(12)，19-22.
- 鈴木正貴，水谷正一，後藤 章（2001）：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，応用生態工学，4(2)，163-177.

- 鈴木正貴，水谷正一，後藤 章（2004）：小規模魚道による水田，農業水路および河川の接続が魚類の生息に及ぼす効果の検証，農土論集，234，59-69.
- 高嶋信博，中村俊六（1984）：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，水理講演会論文集，28，353-358.
- 竹内義幸，池野秀嗣，藤岡 豊（1995）：魚道内水理と魚の遡上行動について，国際魚道会議ぎふ'95 論文集，259-264.
- 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(2)，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，日本環境動物昆虫学会誌，12(2)，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(1)，31-36.
- 塚本勝巳 共著（1993）：河川生態環境工学，東京大学出版会，95-98.
- 宇藤 均，坂崎繁樹（1987）：網走湖産ワカサギの生活史 第3報 降海及び遡河移動について，北海道立水産試験場報告，29，1-16.
- Videler, J.L.（1993）：Fish Swimming *Chapman & Hall, London*.
- 安田陽一（2011）：技術者のための魚道ガイドライン，コロナ社，22-42.