

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26450336

研究課題名（和文）下流域に生息する小型通し回遊魚の遊泳能力解析と魚道設計への適用

研究課題名（英文）Ability for swimming analysis of the small consecutive wandering fish in the downstream of the river area and application to a fishway design.

研究代表者

泉 完（IZUMI, MATTASHI）

弘前大学・農学生命科学部・教授

研究者番号：60132007

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ハゼ科魚類のシロウオ・ウキゴリやワカサギなどといった小型の通し回遊魚を対象とした魚道の設計技術の向上に資するため、これら魚類の遊泳能力に関する遊泳実験を行ったものである。その結果、これらの魚の魚道設計に必要な水理要因である流速条件に対応した遊泳速度、遊泳可能距離との関係を我が国で初めて明らかにした。遊泳能力の解析結果は、緩勾配タイプ魚道の粗度配置と水理条件、あるいは、隔壁を有するプールタイプ魚道の水理条件を決定するための一つの指針として適用できる。

研究成果の概要（英文）：To contribute to the design technology of fishways for small migratory fish, such as ice goby (*Leucopsarion petersi*), pond smelt (*Hypomesus nipponensis*), and goby (*Gymnogobius urotaenia* sp.), the authors conducted a field swimming experiment to determine the swimming ability of these fish. Results show that the relation between the swimming speed and the swimming distance corresponding to the velocity condition of the required hydraulic factor for fishway design was clarified for the first time nationally. The analysis results of the swimming ability of these fish are available as a guideline for the hydraulic design of mild slope-type and a pool-type fishways with partitions.

研究分野：地域環境工学・計画学

キーワード：河川横断工作物 魚道 小型回遊魚 遊泳能力 魚道設計

### 1. 研究開始当初の背景

河川工作物の魚道は、河川に生息する生物相の水域ネットワークを維持・保全するための極めて重要な施設である。魚道設計に際しては魚の突進速度と巡航速度が重要な指標で、アユ・ウグイ・アブラハヤ・オイカワ・ヤマメ稚魚などの遊泳能力に関する数々の新たな知見が得られている（例えば、泉ら（2006））。一方、下流域ではシロウオのみならずヨシノボリ、ウキゴリやワカサギ、イトヨなどといった小型の通し回遊魚が生息している。しかし、これら魚種の泳力に関する研究がなされておらず、現状では経験に依存した技術で設計している。

したがって、これまでの研究実績に基づいてこれら魚種の泳力を解明し、科学的根拠によるより高度な魚道設計への具体的指標を提案する必要性が明かとなった。

### 2. 研究の目的

ハゼ科魚類のシロウオ・ヨシノボリ・ウキゴリやワカサギ・イトヨをはじめとする小型の通し回遊魚は、日本の河川に広く生息している。魚類相の河口から上流への連続性を保持し、小型回遊魚の生息場環境を保全・維持するため河川横断構造物には魚道が設けられている。しかし、現状でのこれら小型通し回遊魚に対する魚道設計は、経験的技術に依存しており、科学的根拠による高度な魚道整備が必要である。したがって、本研究は小型通し回遊魚の遡上環境を整える上で必要な遊泳能力について詳細に検討・解析し、下流域における魚道設計技術の向上に資するものである。

### 3. 研究の方法

対象とした小型通し回遊魚を現地で供するため、フィールド的現地観測として河川水をそのまま実験装置に通水し、長方形管内に流速を与え一定距離の遊泳時間を計測する方法を採用した。研究対象とした魚は、青森県内の下流河川域から遡上する小型回遊魚のシロウオ・ワカサギ・ウキゴリ類である。

#### (1) 実験場所

実験場所については、図-1 に示すようにシロウオの実験は、青森県二級河川の蟹田川河口から約 550m 上流の河川敷内である。また、ワカサギ・ウキゴリ類の実験は、青森県一級河川の岩木川（流路延長約 112km）で場所は日本海に面する十三湖河口から約 11km 上流に位置する芦野頭首工左岸の河川敷内である。実験はいずれも対象魚の遡上時期に管内流速を変化させて行った。

#### (2) 実験装置および実験方法・項目

実験装置は、供試魚のサイズに応じて遊泳に影響のない内径横 5.0cm×縦 4.0cm と内径横 5.0cm×縦 3.0cm、長さ 80~350cm の長方形透明アクリルパイプで余水吐と整流板のあるマンメーター付きの貯水槽に接続され、他に供試魚を長方形パイプ内に挿入する傾



図-1 実験場所

斜型スタンドパイプと流速調節用バルブ、フレキシブルホースから構成されている。実験水を直接河川から取水し、ホースの出口から河川へ流下するシステムになっている。図-2、図-3 はそれぞれシロウオ、ワカサギ・ウキゴリ類の実験装置の全景である。

また、供試魚はスタンドパイプから挿入され、両端に目合い 2mm~5mm の仕切網が施された長さ 230cm (シロウオについては 350cm) の区間を遊泳できるようになっている。遊泳区間では長方形パイプの底面に目盛付きの白色版が取り付けられている。



図-2 実験装置の全景 (シロウオ)



図-3 実験装置の全景  
(ワカサギ・ウキゴリ類)

実験に用いた水は、図-2 のように河川から

直接水中ポンプで貯水槽に給水され、余水吐で一定水位に保持しながら、スタミナトンネル末端に接続されているフレキシブルホースの出口から再び下流河川へ流下する「かけ流し」システムになっている。

実験の際には、パイプ内を満流状態で貯水槽の水位を実験中一定とした。他に気象条件と河川水温を測定した。

実験は、初期流速を与えた状態で供試魚を1尾ずつスタンドパイプから挿入した後、供試魚が上流へと前進すると同時に出口部下流コックを一気に開放した。長方形パイプ上流から40cmの地点に二軸電磁流速計（φ：5mm，センサー一部の長さ：2.5cm，ACM250）を設置し、流速計指示計を後述するようにリアルタイムで録画しているの、指示値が一定になった時点で定常と判断し、その時点から開始して、供試魚が力尽きて流された時点を終了時点とした。

供試魚の遊泳速度の測定は、長方形パイプの上方にデジタルビデオカメラを設置して、供試魚の遊泳行動を撮影・録画した。また、供試魚のサイズは遊泳の際のストレスを考慮して遊泳後にパイプ末端部で採捕し、測定した。

これに加えてシロウオの実験では、遊泳限界流速を調べるための実験も実施した。遊泳限界流速については、シロウオが前進できず対地速度がゼロになった時点の流速値を計測した。このときの供試魚の遊泳域の流速を遊泳限界流速値と定義した。

### (3) 供試魚

シロウオは、蟹田川河口付近の実験場所から約300m下流の「梁」で採捕された個体を用いた。また、ワカサギ・ウキゴリ類は、実験場所の岩木川下流域で採捕された個体を使用した。

### (4) 管内代表流速の算定方法

管内の代表流速値の算定方法については、実測流量を求めているので、通水断面積から供試魚の流れに直交する最大横断面積分を差し引いた面積で断面平均流速を求め、これを管内代表流速値とした。なお、ウキゴリ類はおもに管水路の底部を遊泳したので、断面平均流速に泉ら(2013)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。

## 4. 研究成果

研究対象とした小型の通し回遊魚であるハゼ科魚類のシロウオ・ウキゴリ、およびワカサギの遊泳能力について、以下の知見を新たに得ることができた。

### (1) シロウオの遊泳能力について

計測したシロウオは144尾、平均体長4.3cmで、管内代表流速は28~64 cm/sである。遊泳限界流速に関する実験では156尾、平均体長4.3cmで、設定流速は80~150 cm/sであ

る。実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は10.1~16.4℃である。

表-1は、代表流速を10 cm/sに区分して突進速度（5秒以内で突進遊泳した遊泳速度を突進速度と定義）と遊泳時間である。表のようにシロウオの平均突進速度は、体長の20

表-1 突進速度と遊泳時間

管内代表 流速	遊泳距離		突進速度		遊泳時間	
	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差
(cm/s)	(cm)		(cm/s)		(s)	
35	103	61	73	15	2.5	1.0
45	89	50	90	15	1.9	1.0
55	42	59	79	13	1.5	1.5
62	16	12	74	8	1.3	0.7

倍の速度に相当する約80 cm/sであった。また、30~60 cm/s台の流速条件別に突進速度を調べると40 cm/s台の流速で最も速い90 cm/s（偏差；15 cm/s）である。これは、シロウオが一気に遊泳する際に、遊泳能力を最大に発揮する選好流速があることを示唆している。

魚道設計上、流速場と遊泳距離との関係を知ることも重要な要因の一つである。図-1は、力尽きて対地速度がゼロになるまで遊泳した中で、定常地点から最も長く泳いだ距離と代表流速との関係である（図中のバーは標準偏差）。流速が10 cm/s台から100 cm/s台へ増加すると、シロウオの遊泳距離は約300 cmから10~20 cmへと短くなっており、流速と遊泳距離との関係が明らかとなった。赤△は突進速度で一気に前進したときで40 cm/s台の流速では90 cmの距離を一気に遊泳することがわかる。シロウオのような小型魚を対象魚とすれば、魚道内の流速範囲のうち少なくとも40 cm/s以下の流速領域を確保できるよう工夫が必要である。

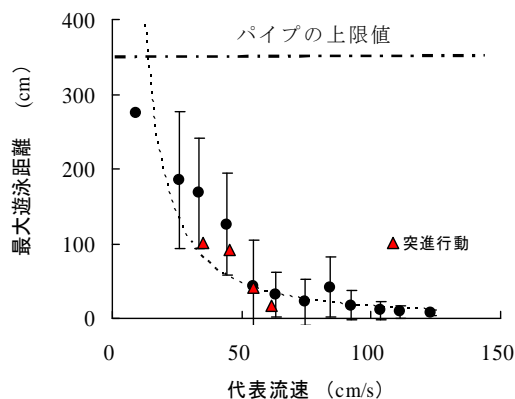


図-1 代表流速と遊泳距離との関係

図-2は、シロウオの遊泳限界流速について、管内流速の設定値と遊泳限界流速値の関係を平均値とその標準偏差値（図中のバー）で示したものである。図中の実線は、遊泳限界



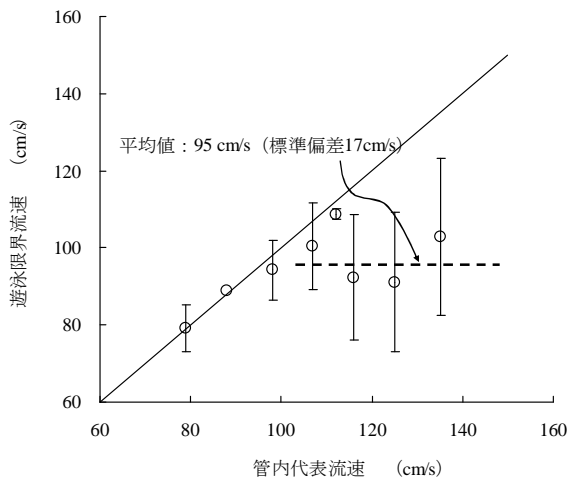


図-2 管内流速と遊泳限界流速との関係

流速値＝管内流速値である。図から管内流速値を 80 cm/s から 150 cm/s へと増大させると遊泳限界流速は大きくなる傾向を示し、同一の管内流速値において個体差もあってばらつきが見られる。また、管内流速値 80 ～ 150 cm/s の平均値で遊泳限界流速値を示すと 95 cm/s (偏差; 17 cm/s) となる。上述した平均突進速度もこの計測値の範囲内に入っていることから、シロウオが泳げない限界流速は、80～110 cm/s 程度であると推測され、突進速度に相当することがわかった。

(2) ワカサギの遊泳能力について

はじめにワカサギはハンドリングに対して非常に弱い魚であることから供試にあたって十分に留意して実施した。ただ、個体差による遊泳意欲やハンドリングの影響もあり、実際に実験で計測できた個体は 86 尾、体長 5.1～9.6cm (平均体長 7.4cm; 偏差 0.9cm) で河川遡上期の比較的小さなサイズである。管内代表流速は 79～146 cm/s である。実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は 10.9～13.4℃である。

図-3 は体長と遊泳速度の関係について管

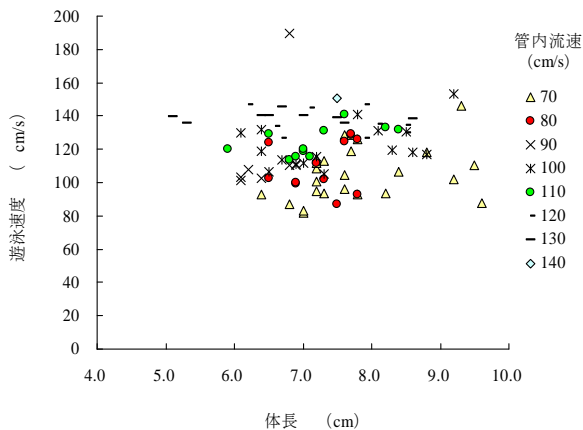


図-3 体長と遊泳速度の関係

内代表流速を 10cm/s 台に区分して示したものである。図から同じ体長でも管内代表流速が速くなると遊泳速度も速くなる傾向にある。ワカサギについても既往の管水路によるウグイ・オイカワ・アブラハヤ (泉ら, 2006, 2007; 泉・矢田谷, 2007) やヤマメ稚魚 (泉ら, 2009), 鬼束ら (2008, 2009) の長方形断面水路での実験結果と一致している。体長と遊泳速度との関係について調べると、70 と 110 cm/s 台の流速条件では体長との間で正の関係が見られるものの他の条件では明瞭な傾向が見られない。この点、今後さらに供試する魚のサイズの大きい個体を使った実験を行って吟味していく必要がある。

図-4 は、体長 6cm 台と 7cm 台のワカサギの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。なお、 $t=3600s$  における遊泳速度については計測していないのでここでは体長の 5.5 倍に相当すると仮定したデータを援用した。管内流速は 79～146cm/s である。一般に、遊泳曲線は (1) 式 (塚本・梶原, 1973) で示されている。

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

$V$ : 遊泳速度 (cm/s),  $t$ : 遊泳時間 (s),  $a$ : 1s 間持続できる遊泳速度 (cm/s),  $k$ : 定数 ( $0 < k < 1$ )

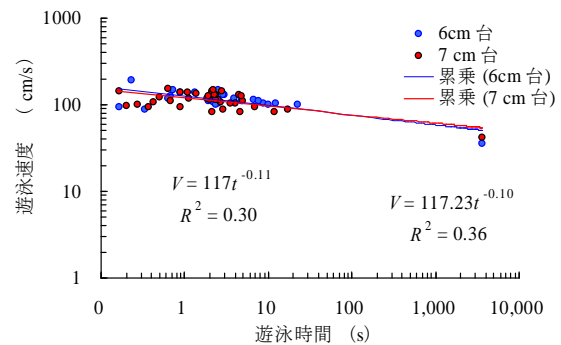


図-4 遊泳速度と遊泳時間の関係

そこで、(1) 式の  $a$  および  $k$  値を最小自乗法で求めた。その結果、図-8 に示すように体長 6cm 台と 7cm 台それぞれ  $a=117$  cm/s,  $k=0.11$ ,  $a=117$  cm/s,  $k=0.10$  であり、遊泳曲線式の係数を得ることができた。体長 6cm 台と 7cm 台の係数  $a$  は同じ値で、このサイズのワカサギの 1 秒間持続できる最大遊泳速度は、約 120cm/s であることをはじめて明らかにすることができた。

図-5 は、シロウオと同様に力尽きて対地速度がゼロになるまで遊泳した中で、定常地点から最も長く泳いだ距離 (最大遊泳距離) と代表流速との関係である。井出ら (2002) のワカサギの遡上実態調査によれば、「やな」のような河川横断構造物がある場合、その構造物の落差が 7cm 程度であれば親魚が遡上でき、23cm 程度以上の落差では遡上できないと報告している。体長サイズにもよるが、ワカサギが遡上できるとした水位差 7cm (井出ら,

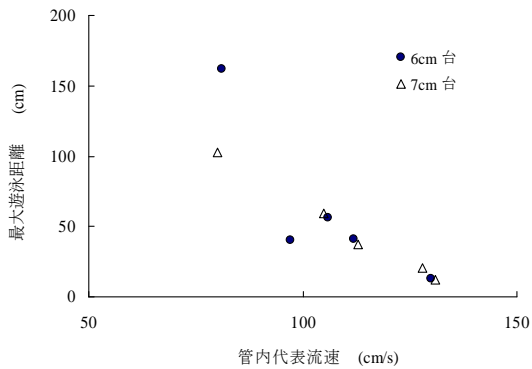


図-5 管内流速と最大遊泳距離との関係

2002) のときの越流水の平均流速は 117 cm/s なので、本実験結果では 110cm/s 程度の流速条件に相当し、この流速条件で体長 6~7cm のワカサギは 40~50cm の距離を遊泳することがわかる。魚道隔壁の越流部など局所的に速い流れ場の距離が 50cm であれば魚が遡上できることも報告されている(泉ら, 2002; 農業農村工学会 (2015), よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針)。小型 (6~7cm 程度) のワカサギを対象魚として魚道を遡上させる観点から、魚道内の速い流速場の流速を少なくとも 100 cm/s 以下にするよう水理設計 (魚道型式も含めた構造設計) にする一つの目安になると考えられる。

### (3) ウキゴリ類の遊泳能力について

実験で計測した個体は 299 尾で供試魚の体長は 2.5~5.7cm, 平均体長 3.6cm である。実験時の天気は晴れまたは曇りで、河川水温は 20.2~26.7°C である。

ウキゴリ類については、全くの未知であるのではじめに予備実験を行ってウキゴリ類の遊泳行動を観察した。観察からパイプ内の流速を概ね 20~30cm/s とした状態で個体を挿入すると、一気に遊泳したのちに吸盤で吸着し、その後再度上流へと泳ぎ出す行動をとった。吸盤吸着時の際は、流速を増大させると促されるように前進し、前進と吸着を繰り返すことがわかった (パターン 1)。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。この点に関して本実験では、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。

一方、上述したようにパイプ内の流速を 20~30cm/s の状態で挿入し、泳ぎ始めると同時に流速を 50~90cm/s の高速流の範囲に設定するとウキゴリ類は一気に前進したのちに力尽きて流されることがわかった (パターン 2)。

そこで、設定流速の条件については予備実験時のウキゴリ類の遊泳行動を踏まえ、以下の 2 パターンとした。パターン 1 ではパイプ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た。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。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。

パターン 2 では初期流速を 20cm/s~30cm/s とし、40 cm/s~120cm/s までの範囲で 9 段階とした。前進行動を起こした地点から力尽きて流される直前の地点までの遊泳時間と遊泳距離を計測した。

図-6 はパターン 1 の体長と遊泳速度の関係を示したものである。図から同じ体長でも管内代表流速が速くなると遊泳速度も速くなる傾向にある。いま、管内代表流速 60cm/s で体長と遊泳速度との関係を見ると正の関係が認められる (図中の点線)。

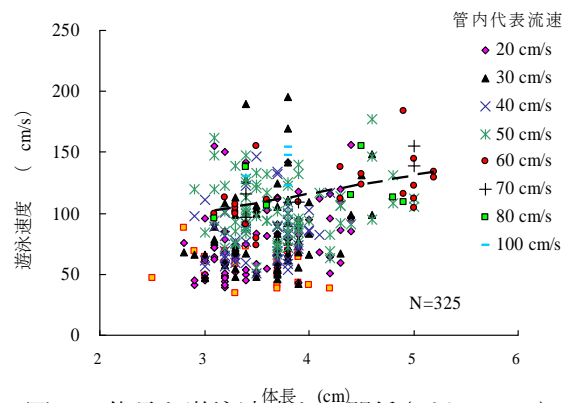


図-6 体長と遊泳速度との関係 (パターン 1)

図-7 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 13% と少なかったが、流速 44cm/s, 54cm/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、75% に上った。体長 3cm 台のウキゴリ類は、魚の頭部近傍の流速が概ね 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。

つぎに、図-8 はパターン 2 の体長と遊泳速度の関係を示したものである。パターン 1 と同様に管内代表流速が速くなると遊泳速度も速くなり、管内代表流速 60cm/s で体長と遊泳速度との関係を見ると正の関係が認められる (図中の点線)。ここで、パターン 1

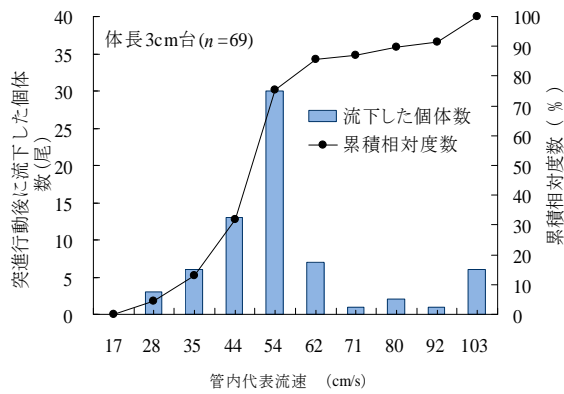


図-7 流速と流下個体数との関係 (パターン 1)

と 2 では遊泳する水理環境が異なるものの、遊泳速度は 60cm/s の流速条件を例にすれば、概ね体長 3~5cm 台のウキゴリ類の遊泳速度は 100~130cm/s 程度であることがわかる。

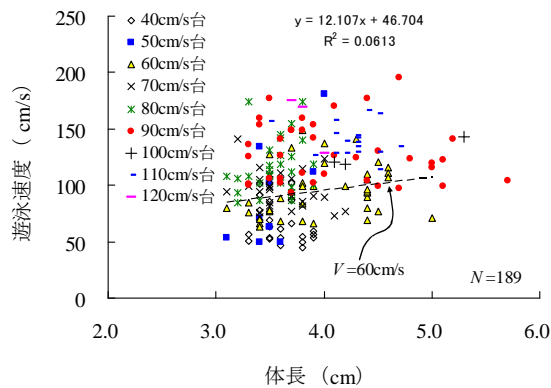


図-8 体長と遊泳速度との関係(パターン 2)

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類が前進できる総距離の関係を把握する必要がある。

図-9 は、体長 3cm と 4cm 台のパターン 2 の実験における力尽きて対地速度がゼロになるまで遊泳した中で、定常地点から最も長く泳いだ距離(最大遊泳距離)と代表流速との関係を示したものである。

前述したように、魚道隔壁の越流部など局所的に速い流れ場の距離が 50cm であれば魚が遡上できることも報告されているので、図から 50cm の距離を遊泳できる流速は約 60~70cm/s である。河川遡上期の小型のウキゴリ類を対象魚とした魚道設計の観点から、魚道内の速い流速場の流速を少なくとも 60~70cm/s 以下にするよう水理設計にする一つの目安になる知見である。

#### (4) 魚道設計への適用

シロウオ、ウキゴリ類、およびワカサギの遊泳能力の解析結果から、これらの魚の魚道設計に必要な流速条件と遊泳可能距離との関係を用いることにより、例えば、緩勾配タ

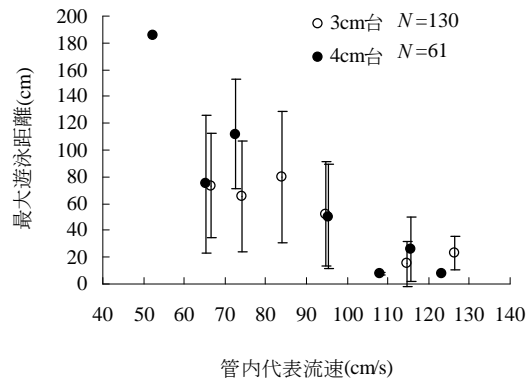


図-9 流速と最大遊泳距離との関係 (パターン 2)

イブ魚道の粗度配置と水理条件、あるいは、隔壁を有するプールタイプ魚道の水理条件を決定するための一つの指針として適用できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[論文発表] (計 1 件)

- ① 矢田谷健一・泉 完・東 信行・丸居 篤 : 河川遡上期のウキゴリの遊泳能力に関する基礎実験, 土木学会 B1(水工学), Vol.72, No.4, I\_1129- I\_1134, 2016. 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① 矢田谷健一・泉 完・東 信行・丸居 篤 : 高流速域における河川遡上期のウキゴリ類の遊泳特性, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演集:[2-1], ハーネル仙台, 仙台市, 2016. 9.
- ② 矢田谷健一・泉 完・東 信行・丸居 篤 : 小型通し回遊魚の遊泳能力についてーワカサギの遊泳速度の測定ー, 平成 27 年度農業農村工学会応用水理研究部会講演集, 65-70, 筑波事務所, 筑波市, 2015. 12.
- ③ 泉 完・東 信行・丸居 篤・矢田谷健一 : 小型通し回遊魚の遊泳能力についてーシロウオの突進速度と遊泳限界流速ー, 平成 26 年度農業農村工学会応用水理研究部会講演集, 1-5, 筑波事務所, 筑波市, 2014. 12.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

泉 完 (IZUMI MATTASHI)  
弘前大学農学生命科学部・教授  
研究者番号: 60132007

##### (2) 研究分担者

東 信行 (AZUMA NOBUYUKI)  
弘前大学農学生命科学部・教授  
研究者番号: 40262977  
丸居 篤 (MARUI ATUSI)  
弘前大学農学生命科学部・准教授  
研究者番号: 80412451