

逃避行動を利用したサケ稚魚遊泳速度の簡易測定法

虎尾 充^{*1}, 宮本真人¹, 小林美樹²

¹北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,

²北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場道南支場

A simple method for measuring the swimming speed of salmon fry using escape behavior

MITSURU TORAO^{*1}, MAHITO MIYAMOTO¹ and MIKI KOBAYASHI²

¹ Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Eniwa, Hokkaido 061-1433*,

² Donan Research Branch, Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Yakumo, Hokkaido 043-0402, Japan*

We attempted to establish a simple swimming speed measurement method (escape measurement method) for chum salmon fry by video recording escape behavior and analyzing it. Fry were placed in a circular test tank, and sound stimuli were provided twice at 10-second intervals to induce escape behavior. A video recording of the swimming behavior was taken with a digital camera, from which the burst speed and cruise speed were measured by video analysis using free software. The measured burst speed ranged from 70 cm/s to 110 cm/s (18-22 fork length/second, FL /s), and the cruising speed was 10-22 cm/s (2-4 FL/s). A strong positive correlation was found between swimming speed measured by the escape measurement method and the stamina tunnel method, suggesting that the escape measurement method is a valid measure of the swimming speed of salmon fry. The apparatus used in this measurement method is very simple, and it is expected to be applied to various investigations in the future.

キーワード：映像解析, サケ稚魚, 種苗性, 巡航速度, 逃避行動, 突進速度

サケ *Oncorhynchus keta* は、北太平洋において最も重要な漁業対象種の1つであり、北日本においても主に沿岸の定置網や河川捕獲によって漁獲される重要な水産資源である。日本における主産地のひとつである北海道では、サケ資源の多くが孵化放流事業によって維持されていると考えられている (小林, 2009; Nagata *et al.*, 2012; Miyakoshi *et al.*, 2013; Kitada, 2014)。サケの沿岸漁獲量は1970年代から2000年代前半に大幅に増大しており、これは北太平洋の海洋環境がサケにとって好適であったことに加えて (Beamish and Bouillon, 1993), 種苗生産技術の向上や適期放流による生残率の向上など孵化放流事業の成果であると考えられている (Kaeriyama, 1998; 小林, 2009; 関, 2013)。しかし最近、北海道では放流数に大き

く変化はないにもかかわらず、サケ来遊資源は減少傾向にあり (Miyakoshi *et al.*, 2013), 資源変動要因の解明と早急な対策が求められている。

サケの孵化放流魚の生残率を高めるためには、健康な稚魚を環境が良好な時期に放流する「健苗育成・適期放流」が重要であり (関, 2013), 変化しつつある海洋環境に対応して、放流されるサケ稚魚の質 (種苗性) を評価し飼育技術を再検証することは、資源回復と安定化に向けた対策の1つと考えられる。これまでサケ稚魚では、生化学的指標や海水適応能など様々な指標によって種苗性が評価され (中野・白旗, 1988; 関, 2013), 遊泳速度もサケ放流種苗の状態を反映する指標の1つとして用いられている (例えば, Mizuno *et al.*, 2008; Misaka *et al.*, 2014)。

一般に海産魚類の新規加入量は初期減耗率によって決定され、その主要因は被食と考えられている (Bailey and Houde, 1989)。多くの魚種では捕食者に対する武器を持たないので、遊泳能力は捕食者の攻撃を避け生き残るための主要な要素である (Plaut, 2001)。放流されたサケ稚魚でも、河川内での他の魚類による捕食 (久保, 1946; 正田ら, 1959; Fresh and Schroder, 1987; 鷹見・長澤, 1996) や、降海後の沿岸域では海鳥や魚類による捕食が確認されている (Scheel and Hough, 1997; 鷹見・青山, 1997; Nagasawa, 1998; Sturdevant *et al.*, 2009; 宮腰ら, 2013)。そのため、サケ放流種苗の被食回避特性としての遊泳速度の把握は重要と考えられる。

魚類の遊泳速度の定義は様々であるが、大きく分けて3つのカテゴリーに大別される (Beamish, 1978)。すなわち、無氣的呼吸によって20秒以内に限って泳げる最大速度である突進速度 (burst speed)、20秒から200分間遊泳可能で最後は疲労する長時間遊泳速度 (prolonged swimming speed)、疲労することなく200分以上泳げる持続遊泳速度 (sustained swimming speed) である。魚類の遊泳能力測定では臨界遊泳速度 (critical swimming speed: Brett, 1964) が最も一般的だが (Plaut, 2001)、その他にも1~数秒間持続する最大遊泳速度と定義される突進速度 (Blaxter, 1969) や長時間遊泳速度のうち測定時間を60分とした最大遊泳速度 (巡航速度, cruising speed: Brett, 1964) が測定されることも多い。遊泳速度の測定には様々な装置や手法が考案されており (Tsukamoto *et al.*, 1975; Beamish, 1978; 塚本, 1991)、種苗性評価指標としてのサケ稚魚の遊泳速度測定では、走流性を利用したウォータートンネル (小林・大熊, 1983; 大熊ら, 1998: 以下, スタミナトンネル法) が多く用いられてきた。スタミナトンネル法は種苗生産現場でのサケ稚魚の突進速度の測定を目的に開発され、簡便で種苗性の評価に関して精度の高い方法と考えられるが、専用の実験装置や多量の実験用水が必要なため使用場所が制限される。一方, Masuda *et al.* (2002) はマサバ仔魚を入れたピーカーにおもりをぶつけて音刺激を与えて逃避行動を誘起し、撮影した映像の解析によって突進速度と巡航速度を測定した。また、同様の方法でマアジ仔稚魚の被食回避能力や魚種間での遊泳力を比較し議論している (Masuda, 2006)。Masudaら (2002) の方法は非常に簡便であり、特殊な実験装置は必要とせず実験場所の制限も少ない。同様の方法をサケ稚魚の遊泳速度の測定に用いることが出来れば、種苗生産現場や野外調査においても遊泳力測定が可能となり、応用範囲の拡大が期待される。

本研究では、サケ稚魚の逃避行動の撮影と映像解析による遊泳速度測定法 (以下, 逃避測定法) の確立を試み

た。また、逃避測定法とサケ稚魚で一般的に用いられるスタミナトンネル法で測定した突進速度および巡航速度を比較し、サケ稚魚遊泳速度測定法としての逃避測定法の有効性を検証した。

材料と方法

供試魚 2012年12月に (一社) 根室管内さけ・ます増殖事業協会の標津川採卵場で採卵されたサケ授精卵を北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場道東支場の立体式孵化器に収容し、浮上まで管理した。2013年4月1日に浮上したサケ稚魚を、アトキンス式孵化水槽 (長さ3.26m×幅0.33m×水深0.21m) に収容し市販のサケ稚魚用配合餌料 (EXます1号および2号, 日本農産) で給餌飼育を開始した。給餌は飽食量 (給餌率約3%) を与えた。飼育用水には曝気した地下水 (水温約9.5℃) をかけ流しで使用した。

遊泳速度の測定方法 遊泳速度は、2013年4月2日 (浮上後1日目)、4月9日 (浮上後8日目)、4月16日 (浮上後15日目)、4月23日 (浮上後22日目)、4月30日 (浮上後29日目)、5月10日 (浮上後39日目)、5月15日 (浮上後44日目)、5月22日 (浮上後51日目) の計8回、無作為に抽出した12個体について、飼育室内に設置した装置を用いて、逃避測定法とスタミナトンネル法で測定した。

逃避測定法による遊泳速度測定

1. **撮影方法** 逃避測定法に用いた遊泳速度測定装置の模式図をFig.1に示した。実験水槽として、市販の不透明なポリエチレン製たらい (トンボたらい56型, 新輝合成株式会社製) を用いた。実験水槽上方にカメラ用三脚を設置しデジタルカメラ (PENTAX Optio WG-1 GPS,

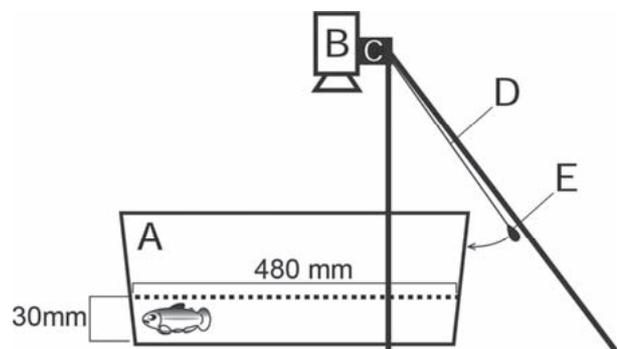


Fig.1 Schematic illustration of the measuring apparatus for burst and cruise speeds with the escape measurement method: A, polyethylene basin; B, digital camera; C, tripod; D, nylon line (750 mm long); E, sinker (20 g weight).

HOYA株式会社製)を取り付けた。デジタルカメラは水準器を用いて水平になるように設置した。また、実験水槽全体が映るようにデジタルカメラのズーム機能で画角を調整した。稚魚の逃避行動を誘起する音刺激を与えるため、三脚から長さ75cmの糸で釣り用のおもり(20g)を吊り下げ、おもりが実験水槽の外壁面に当たるように調整した。これらの機材を設置した後、実験水槽に飼育水槽と同じ飼育用水を注入した。供試魚の鉛直方向の逃避行動を制限するため、実験水槽の水深は稚魚の体高の3~5倍程度に相当する3cmとした。実験水槽の水深3cm高における観察水面の直径は48cmであった。撮影者の動作が供試魚の行動に影響を与える危険を避けるため、撮影操作はデジタルカメラのワイヤレスリモートコントローラー(PENTAX O-RC1, HOYA株式会社製)で行った。三脚に取り付けたデジタルカメラで動画撮影(avi形式, 640メガピクセル, 30フレーム/秒)を開始したのち、飼育魚用の柄付きネットを用いて飼育水槽から実験水槽にサケ稚魚を移動した。実験水槽へ稚魚を収容してから10秒後に、三脚から吊り下げたおもりを実験水槽外壁面から50cmの距離から振り子のように外壁面にぶつけて音刺激を発生させた。同様に、1回目の音刺激から10秒後に2回目の音刺激を与えた。2回目の音刺激から10秒後(稚魚投入30秒後)に撮影を終了した。撮影終了後、サケ稚魚は麻酔し尾叉長と体重を測定した。

2. 映像の解析 実験水槽へのサケ稚魚の収容直後と2回の音刺激に対する逃避行動を撮影した映像から、突進速度と巡航速度を解析した。本測定法では、突進速度を収容直後からの10秒間に測定された最大の遊泳速度と定義した。また、疲労によって遊泳力が低下する2回目の音刺激後(稚魚収容後20秒経過後)の10秒間の平均遊泳速度(cm/s)を巡航速度と定義した。

映像解析には、映像の座標位置から距離を測定し移動速度を計算するWindows用のフリーソフトウェア「運動くんfor Windows 2.0」(<http://www.vector.co.jp/download/file/win95/edu/fh537268.html>, 2020年3月31日)を使用した。本ソフトウェアを用いて撮影した動画を読み込み、映像画面上の供試魚の吻端部分をクリックすることで座標を記録した。測定間隔は3フレーム(約0.1秒)ごととし、得られた座標間の距離から速度を算出した。

スタミナトンネル法による遊泳速度の測定 逃避測定法で測定された突進速度と巡航速度の有効性を検証するため、サケ稚魚の遊泳速度の測定に用いられることの多いスタミナトンネル法(小林・大熊, 1983)によって突進速度と巡航速度を測定した。Fig.2にスタミナトンネル法に用いた装置の模式図を示した。

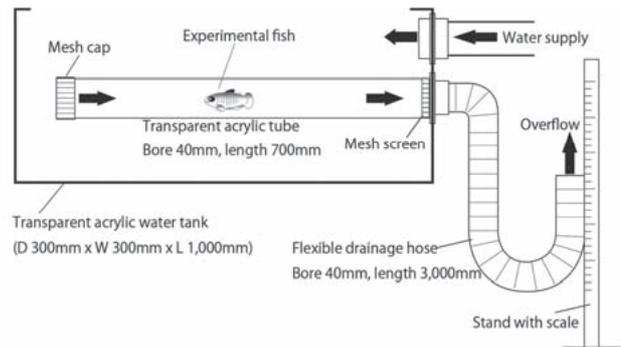


Fig.2 Schematic illustration of the water tunnel apparatus for measurement burst and cruise speeds of chum salmon fry.

突進速度は、供試魚を飼育水槽から透明なアクリル製の測定管(内径40mm, 長さ700mm)に入れ流速2cm/sで5分間馴致させた後、測定した。馴致後に排水口の排水口を毎秒約1cmずつ下げて水をオーバーフローさせることで測定管内に流速を生じさせ、稚魚が測定管後方のメッシュスクリーンに接触し遊泳不能となった時点での落差から流速を求め、突進速度とした。

スタミナトンネル法による巡航速度は、任意の流速におけるサケ稚魚の遊泳可能時間を示す遊泳曲線を作成して求めた。供試魚を測定管内に収容し流速2cm/sで5分間馴致させた後、2.8~83.0cm/sの間の任意の7段階の流速で遊泳させ、各流速段階での遊泳可能時間(秒)を測定した。測定は各流速段階で3個体ずつ行った。得られた流速と遊泳時間から関係式(遊泳曲線)を求め、3,600秒(60分)間の遊泳が可能な流速を算出して巡航速度とした。遊泳速度の測定後にサケ稚魚を麻酔し、尾叉長と体重を測定した。

遊泳速度は毎秒あたりの遊泳距離(cm/s)およびこれを尾叉長で除した対体長比(FL/s)で示した。逃避測定法とスタミナトンネル法で測定されたサケ稚魚の突進速度と巡航速度について、それぞれ相関関係を検証した。

最大遊泳速度の出現頻度分布と音刺激後の移動距離の推移 逃避測定法における突進速度と巡航速度の定義の妥当性を検証するため、測定した全個体(96検体)の最も速い突進速度が検出された時間、および時間の経過に伴う最大遊泳速度と遊泳距離の変化を、実験水槽への収容直後の10秒間、1回目の音刺激後の10秒間、2回目の音刺激後の10秒間に分けて記録した。

逃避測定法における実験水槽の直径が遊泳速度へ与える影響の検証 逃避測定法において、実験水槽の直径の違いがサケ稚魚の遊泳速度に影響を与えるかどうかを検証するため、2014年3月7日に標津川産のサケ稚魚を用いて、50型、56型、75型の3つの大きさのポリエチレン製たら

Table 1 Burst and cruise speeds of chum salmon fry measured using escape measurement method.

Date of experiment	Days after emergence	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Burst speed		Cruise speed	
				cm/s	FL/s	cm/s	FL/s
Apr. 2, 2013	1	3.50 ± 0.11	0.38 ± 0.07	70.3 ± 3.7	20.1 ± 1.6	14.8 ± 1.9	4.2 ± 0.6
Apr. 9, 2013	8	3.89 ± 0.21	0.49 ± 0.05	75.2 ± 7.4	19.4 ± 1.8	10.2 ± 3.7	2.6 ± 0.9
Apr. 16, 2013	15	3.92 ± 0.25	0.64 ± 0.12	83.9 ± 5.5	21.4 ± 1.4	14.5 ± 5.2	3.7 ± 1.3
Apr. 23, 2013	22	4.34 ± 0.21	0.77 ± 0.09	89.8 ± 9.0	20.7 ± 2.2	16.6 ± 8.0	3.8 ± 1.8
Apr. 30, 2013	29	4.44 ± 0.25	0.77 ± 0.12	91.5 ± 10.1	20.6 ± 2.1	17.1 ± 6.4	3.8 ± 1.4
May 10, 2013	39	4.77 ± 0.28	1.03 ± 0.18	92.5 ± 9.4	19.4 ± 1.5	19.6 ± 5.9	4.1 ± 1.3
May 15, 2013	44	4.94 ± 0.36	1.06 ± 0.20	105.8 ± 11.0	21.5 ± 2.4	20.8 ± 7.9	4.2 ± 1.5
May 22, 2013	51	5.62 ± 0.60	1.67 ± 0.58	109.6 ± 10.8	19.7 ± 2.6	22.3 ± 7.3	4.0 ± 1.4

いを実験水槽として遊泳速度を測定した。それぞれの実験水槽の水深3cm高における観察水面の直径は42cm, 48cm, 61cmであった。それぞれ12個体を用いて突進速度と巡航速度を測定し、3つの実験水槽間で統計的有意差があるかについて、Steel-Dwass法で検定した。

結果

逃避測定法による遊泳速度 逃避測定法によって測定した突進速度と巡航速度をTable 1に示した。測定に用いたサケ稚魚は浮上直後の体サイズが平均尾叉長 3.50 ± 0.11 cm, 平均体重 0.38 ± 0.07 gであった。飼育51日目には 5.62 ± 0.60 cm, 1.67 ± 0.58 gまで成長した。浮上直後(尾叉長3.5 cm)に測定された突進速度は、70cm/sであった。その後突進速度は、浮上後29日目(尾叉長4.4cm)まで成長とともに92cm/sまで向上した。浮上後39日目(尾叉長4.8 cm)で一時的に突進速度の上昇は90cm/s台で停滞したが、浮上後44日目(尾叉長5.0cm)で106cm/sまで急速に上昇し、孵化後51日目(尾叉長5.6cm)には110cm/sとなった。この間、突進速度の体長比は、およそ20FL/sでほぼ一定であった。

巡航速度は浮上直後(尾叉長3.5cm)で15cm/sを示した後、浮上後8日目(尾叉長3.9cm)には一時的に10cm/sに低下した。その後は緩やかに上昇し22日目(尾叉長4.3 cm)には17cm/sとなった。29日目(尾叉長4.4cm)には17cm/sで一時的に停滞したが、39日目以降に巡航速度は上昇し51日目(尾叉長5.6cm)には22cm/sとなった。巡航速度を体長比で見ると、浮上直後に4.2FL/sと比較的速い速度を示した後、8日目に2.6FL/sまで一時的に低下した。その後は、3.7~4.2FL/sの範囲にあった。

スタミナトンネル法による遊泳速度の測定 スタミナトンネル法による突進速度と巡航速度の測定結果をTable 2に示した。実験に用いたサケ稚魚は、浮上時には平均尾

叉長 3.45 ± 0.16 cm, 平均体重 0.39 ± 0.01 gから、51日目には 5.46 ± 0.25 cm, 1.31 ± 0.17 gとなった。突進速度は、浮上時の21cm/sから51日目の53cm/sまで一貫して上昇した。浮上後51日目(尾叉長5.5cm)の突進速度の向上は顕著であった。突進速度の体長比は6.2~9.8 FL/sの範囲で、浮上から22日目(尾叉長4.4cm)までは、突進速度の体長比は6 FL/s台であったが、尾叉長が5.0cm近くになった44日目以降に向上し8.5~9.8FL/sを示した。

スタミナトンネル法による巡航速度を求めめるため、測定して得られた遊泳曲線をFig.3に、得られた遊泳曲線の関係式に3,600秒を代入して計算された巡航速度をTable 3に示した。求められた巡航速度は1.7~8.1cm/sの範囲であった。浮上直後と8日目の巡航速度は2.3cm/sであったが、15日目に一時的に1.7cm/sに低下した。その後、22日目、29日目には4.5~5.0cm/sを示した。39日目以後に顕著に上昇し6.5~8.1cm/sを示した。体長比では0.4~1.6 FL/sの範囲であった。

逃避測定法とスタミナトンネル法で得られた遊泳速度の比較 逃避測定法とスタミナトンネル法で測定された突進速度の間には、強い有意な相関が認められた (Fig.4; $r = 0.953$, $P < 0.001$)。また、巡航速度でも有意な相関が認められた (Fig.4; $r = 0.909$, $P < 0.05$)。

Table 2 Burst speed of chum salmon fry measured using the stamina tunnel method.

Date of experiment	Days after emergence	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Burst speed	
				cm/s	FL/s
Apr. 2, 2013	1	3.45 ± 0.16	0.39 ± 0.01	21.4 ± 2.1	6.2 ± 1.1
Apr. 9, 2013	8	3.66 ± 0.19	0.38 ± 0.08	22.7 ± 4.7	6.2 ± 1.4
Apr. 16, 2013	15	4.17 ± 0.21	0.55 ± 0.11	26.6 ± 3.6	6.4 ± 0.8
Apr. 23, 2013	22	4.43 ± 0.20	0.68 ± 0.10	30.8 ± 7.1	6.9 ± 1.4
Apr. 30, 2013	29	4.42 ± 0.27	0.64 ± 0.12	33.3 ± 8.1	7.5 ± 1.7
May 10, 2013	39	4.99 ± 0.34	0.98 ± 0.34	39.3 ± 12.7	7.9 ± 2.4
May 15, 2013	44	4.94 ± 0.28	0.82 ± 0.14	42.3 ± 14.7	8.5 ± 2.7
May 22, 2013	51	5.46 ± 0.25	1.31 ± 0.17	53.4 ± 13.0	9.8 ± 2.2

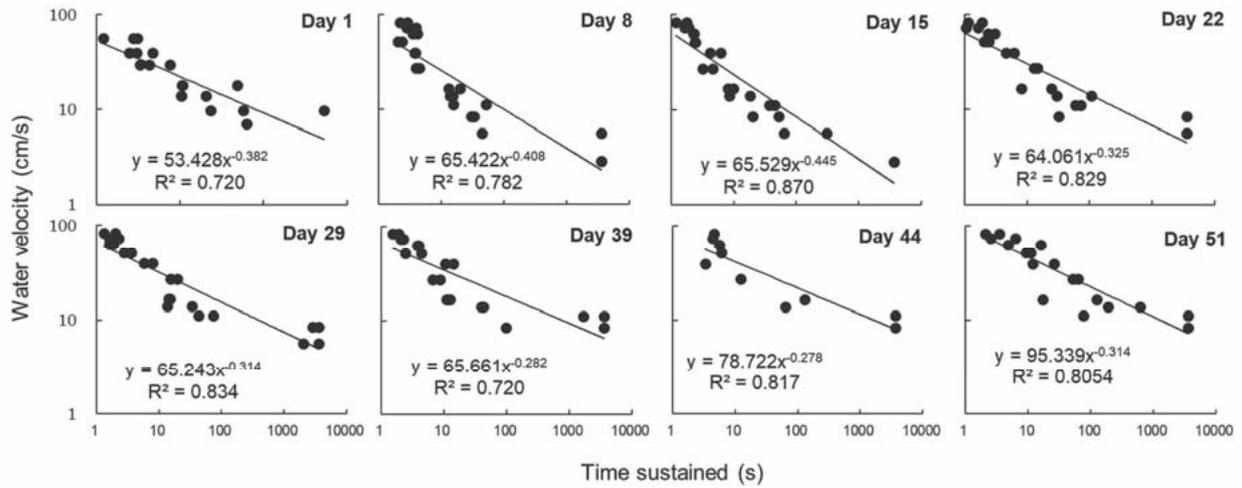


Fig.3 Relationship between swimming duration of chum salmon fry and water velocity estimated using the stamina tunnel method. The day in each figure shows the number of days after emergence.

Table 3 Cruise speed of chum salmon fry measured using the stamina tunnel method.

Date of experiment	Days after emergence	Mean fork length	Mean body weight	Cruise speed	
				cm/s	FL/s
Apr. 2, 2013	1	3.76 ± 0.14	0.36 ± 0.05	2.3	0.6
Apr. 9, 2013	8	3.83 ± 0.16	0.44 ± 0.07	2.3	0.6
Apr. 16, 2013	15	4.05 ± 0.22	0.53 ± 0.10	1.7	0.4
Apr. 23, 2013	22	4.45 ± 0.24	0.69 ± 0.13	4.5	1.0
Apr. 30, 2013	29	4.55 ± 0.24	0.69 ± 0.13	5.0	1.1
May 10, 2013	39	4.90 ± 0.23	0.99 ± 0.15	6.5	1.3
May 15, 2013	44	4.95 ± 0.23	0.87 ± 0.11	8.1	1.6
May 22, 2013	51	5.34 ± 0.44	1.22 ± 0.34	7.3	1.4

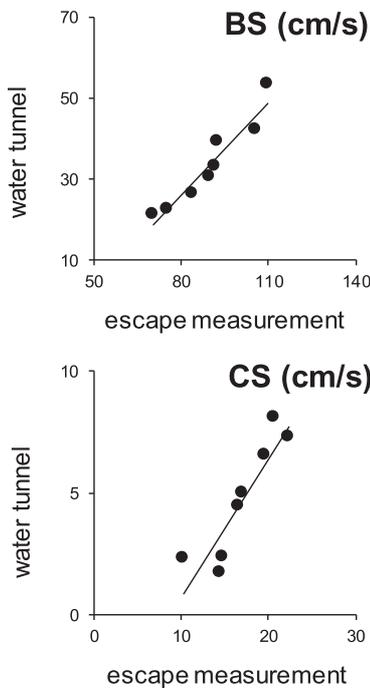


Fig.4 Relationship between burst and cruise speeds (BS, CS) measured using the escape measurement method and a simple water tunnel apparatus.

測定時間ごとの最大遊泳速度の出現頻度分布と音刺激後の移動距離 逃避測定法で遊泳速度を測定した96検体のうち、実験水槽への収容直後に最大遊泳速度が記録された個体（頻度）は85個体（88.5%）、1回目の音刺激後に最大遊泳速度が記録された個体は9個体（9.4%）、同様に2回目以降では2個体（2.1%）であった（Fig. 5）。多くの個体で収容直後の10秒間に最大遊泳速度が記録された。また、実験水槽へのサケ稚魚収容時から、1回目および2回目の音刺激後には、測定された最大遊泳速度、移動距離はともに低下した（Fig. 6）。収容時を1としたときの最大遊泳速度は1回目の音刺激後には平均0.80、2回目の音刺激後では平均0.67まで低下した。また、10秒間の平均移動距離は、収容直後を1としたとき、1回目の音刺激後では0.56、2回目の音刺激後では0.45まで低下した。

逃避測定法における実験水槽の大きさが遊泳速度に与える影響 直径の異なる実験水槽を用いて逃避測定法で測定した突進速度と巡航速度を Table 4 と Fig. 7 に示した。試験に用いたサケ稚魚の平均尾叉長は4.9~5.0 cmで、試験群間で有意差は認められなかった。水深3cmで観察水面の直径が42cm（50型）、48cm（56型）、61cm（61型）の各実験水槽で測定された突進速度の体長比は、それぞれ 20.2 ± 1.8 , 19.7 ± 1.5 , 21.6 ± 2.3 FL/sであった。また、巡航速度の体長比はそれぞれ 4.1 ± 1.1 , 4.8 ± 1.3 , 4.6 ± 0.9 FL/sであった。最も小さい直径42cmの50型水槽による測定で巡航速度の平均値が小さかったが、大きさの異なる3つの実験水槽で測定した突進速度と巡航速度には、統計的な有意差は認められなかった（Steel-Dwass法, $P > 0.05$ ）。

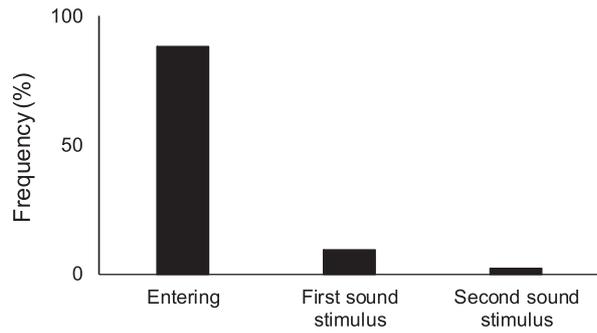


Fig.5 Frequency distribution of appearance in maximum burst swimming speed for chum salmon fry determined using the escape measurement method for each stimulus (n = 96).

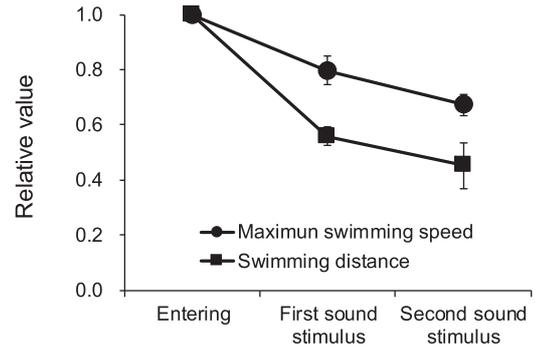


Fig.6 Changes in relative values of maximum swimming speed and swimming distance for chum salmon fry within 10 seconds determined using the escape measurement method.

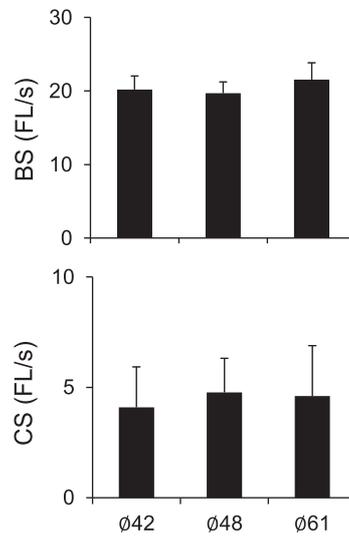


Fig.7 Comparison of burst speed (BS) and cruise speed (CS) measured using the escape measurement method using three different sized tanks. No significant differences were found in swimming speed among tanks (Steel-Dwass test, $P > 0.05$).

Table 4 Burst and cruise speeds of chum salmon fry within tanks of different sizes measured using the escape measurement method.

Type of experiment tank	Inner diameter at Water depth 3cm (cm)	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Burst speed		Cruise speed	
				cm/s	FL/s	cm/s	FL/s
Type 50	42	4.97 ± 0.22	1.08 ± 0.13	100.2 ± 9.4	20.2 ± 1.8	20.2 ± 4.9	4.1 ± 1.1
Type 56	48	4.91 ± 0.42	1.04 ± 0.33	96.4 ± 8.6	19.7 ± 1.5	23.3 ± 6.4	4.8 ± 1.3
Type 75	61	5.03 ± 0.20	1.12 ± 0.16	108.5 ± 13.9	21.6 ± 2.3	23.1 ± 4.1	4.6 ± 0.9

考 察

本研究ではサケ稚魚の逃避行動を利用した簡便な遊泳速度の測定法（逃避測定法）の確立を試みた。逃避測定法では、Masuda *et al.* (2002) を参考に、特殊な機器を必要とせず様々な使用環境に対応できるように市販のたらいに収容したサケ稚魚に音刺激を与えて逃避行動を誘起し、デジタルカメラで撮影した映像を Windows 用のフリーソフトを用いて解析し突進速度と巡航速度を測定した。多くの遊泳速度測定法では専用の装置が必要になるなど、使用場所が制限される。サケ稚魚の遊泳速度測定で用いられるスタミナトンネル法（小林・大熊，1983）でも専用の測定装置が必要で、水面と排水口の落差によって測定管内に流速を生じさせる仕組みのため大量の用水が必要である。逃避測定法では、一般的な市販のデジタルカメラ、ポリエチレン製のたらい、三脚等があれば撮影ができ、使用機器や撮影場所による制限は少ない。また、実験用水も淡水、海水を問わず、注入する用水の水温を調整することで任意の水温下での測定が可能である。1 個体の撮影は 30 秒間で準備作業を含めても必要な時間は 2 分程度と短く、撮影現場での作業時間の短縮に寄与できる。しかし、映像解析に要する時間は、フリーソフトウェアを用いて行ったものの、習熟しても 1 個体あたり 15 分程度の時間を要し、作業上の課題として残された。今後、稚魚の遊泳行動を自動的に追跡するプログラムや、多個体を同時に撮影した映像で個体別に自動追尾が出来ればさらに効率化が可能となり、現在、関係機関と共同で開発を進めている。

逃避測定法における遊泳速度の定義の妥当性と技術的な問題点について検討する。本研究の逃避測定法では、突進速度を実験水槽へ収容した直後から 10 秒間に測定された最大の遊泳速度と定義した。供試したサケ稚魚では収容直後、およびその後の 2 回の音刺激に反応して遊泳速度が急激に上昇する行動が観察されたが、これらはそれぞれ未知の環境に投入された際の驚愕・逃避行動、および音刺激に対する驚愕・逃避行動を示すものと考えられた。一般的に、突進速度は 1～数秒間持続する最大遊泳速度と定義される（Blaxter, 1969）。逃避行動時には瞬発的に発揮しうる最大の速度で遊泳すると考えられるため、逃避測定法においても、最大遊泳速度が収容直後ないし音刺激直後に検出される可能性が高い。実際にどの段階で最大遊泳速度が出現したかを検出したところ、多くの個体（86%, $n = 96$ ）で実験水槽への収容直後に記録された（Table 4, Fig. 7）。また、その後は 2 回の音刺激によって驚愕・逃避行動が続くため徐々に疲労し、突進速度はほとんどの個体で低下した（Fig. 6）。これらのことから、

本研究で定義した突進速度（収容直後の 10 秒間に記録された最大遊泳速度）は、供試個体が数秒間に限って発揮しうる最大の遊泳速度を示し、充分妥当な値と考えられる。本研究において巡航速度は、2 回目の音刺激後、すなわち、収容から 20 秒経過後の 10 秒間の平均遊泳速度（cm/s）と定義した。Beamish (1978) による遊泳速度の区分では、20 秒から 200 分間遊泳可能で最後は疲労する遊泳速度を長時間遊泳速度と定義している。今回の逃避測定法で、サケ稚魚の実験水槽への収容時から 1 回目および 2 回目の音刺激にかけての平均移動距離を検出したところ（Fig. 6）、相対的な移動距離は 0.56 から 0.45 へと徐々に低下していた。これは音刺激に反応し逃避行動を繰り返すうちに疲労して遊泳速度が低下し、その結果、移動距離も低下したと考えられる。逃避測定法で測定した巡航速度は、連続的な刺激による逃避行動が 20 秒間続いた後の遊泳速度を測定していることになり、これは 20 秒から 200 分間遊泳可能で最後は疲労するという長時間遊泳速度の定義に相当すると思われる。また、本研究で比較対象として測定したスタミナトンネル法による巡航速度（60 分持続遊泳可能な遊泳速度）とも同じ区分に含まれ、定義として矛盾しないと思われる。さらに、逃避測定法とスタミナトンネル法で測定した突進速度および巡航速度には、方法間で有意な強い相関が認められた（Fig. 4）。これは、同じサケ稚魚集団の遊泳速度を測定した場合に、逃避測定法とスタミナトンネル法で同様の傾向を検出できることを示し、逃避測定法はサケ稚魚の突進速度および巡航速度の測定法として妥当といえる。本研究では逃避測定法の技術的な問題点として、実験水槽（たらい）の大きさがサケ稚魚の遊泳速度に与える影響が想定されたため、その検証も行った。尾叉長約 50mm のサケ稚魚を用いて直径 42cm, 48cm, 61cm の実験水槽により遊泳速度を測定したところ、突進速度は 20 cm/s 程度でほとんど差は無かった。巡航速度は最も小さい直径 42cm の実験区で平均値がやや小さかったが、有意差は認められなかった。したがって、逃避測定法において実験水槽の大きさの違いが突進速度および巡航速度に与える影響は小さいと考えられ、特に供試魚の体長の 10 倍を目安とした直径の実験水槽を用いることで影響は排除できると思われる。

逃避測定法による遊泳速度の種苗性指標としての有効性を検討する。逃避測定法とスタミナトンネル法による遊泳速度を比較すると、逃避測定法で測定値が高くなる傾向があった。突進速度の体長比（BL/s）は多くの魚種で 10BL/s 前後であり、サケ科やサバ科の魚種は 10BL/s 以上（塚本・梶原，1973）と報告されている。逃避測定法で測定された突進速度は 20FL/s 前後で、既報に比べてかなり高い。これはスタミナトンネル法を含め、多くの測定法

ではサケ稚魚の走流性を利用して流水中で測定しているのに対し、逃避測定法は止水水中での測定という違いに起因すると推察される。さらに、逃避測定法では、スタミナトンネル法に比べて遊泳速度の測定値の幅が小さかった。逃避測定法で測定された突進速度は最小値が70.3 cm/s, 最大値が109.6 cm/sで、巡航速度は最小値が10.2 cm/s, 最大値が22.3 cm/sであった (Table 1)。一方、スタミナトンネル法による突進速度は最小値が21.4 cm/s, 最大値が53.4 cm/sであり (Table 2), 巡航速度の最小値と最大値はそれぞれ1.7 cm/s, 8.1 cm/sであった (Table 3)。最小値に対する最大値の比を見ると、逃避測定法では突進速度が1.6倍、巡航速度が2.2倍、同様にスタミナトンネル法ではそれぞれ2.5倍と4.7倍であり、スタミナトンネル法に比べて逃避測定法で測定値の幅が小さい。このことは、種苗性評価に用いる際に稚魚のコンディションの違いによる遊泳速度の差が検出されにくいことを示唆しており、今後は飼育条件を変えた測定データを積み重ねることで種苗性指標としての有効性を検証していく必要がある。

遊泳速度に影響を与える主な要因として、水温、塩分濃度、訓練や飼育などがある (塚本・梶原, 1973; Beamish, 1978)。一般的に、持続的な遊泳速度は水温の影響を受けやすく、突進速度は受けにくい傾向があるが (Brett, 1967), 最適な遊泳水温は魚種や発育段階によって異なる (Plaut, 2001)。サケ科魚類では、淡水から海水に移行する時に運動活性や遊泳力が変化すると報告があり (Houston, 1959; Flagg and Smith, 1982; Flagg *et al.*, 1983; Pedersen and Malte, 2004), サケ稚魚では海水移行時に一時的に遊泳能力が低下することが知られている (Houston, 1959)。また、流速の速い流水中で飼育することで魚類の遊泳力を向上させる取り組みも古くから行われている (Brett *et al.*, 1958; Nahhas *et al.*, 1982; Farrell *et al.*, 1990; Azuma *et al.*, 2003; 藤原ら, 2010)。これらの流水トレーニングはサケ科魚類を中心に行われてきたが、遊泳速度が向上した事例がある一方、効果が認められないとの報告もある (Davison 1997)。サケ稚魚では飼料にクエン酸鉄を添加することで遊泳力が向上したとの報告があるが (Mizuno *et al.*, 2008), 遊泳力向上に関わるトレーニングなどの試みはまだ多くない。サケ稚魚は放流後、一定期間河川内に滞在した後、降海し沿岸生活を送る。サケ科魚類では生活史初期に大きな減耗が生じると考えられており (Healey, 1982; Bax, 1983; Farley *et al.*, 2008), 河川降下中や海洋生活初期の小型で遊泳力の低い時期には、被食が減耗要因の1つになると考えられている (Taylor and McPhail, 1985; Hargreaves and LeBrasseur, 1986; Beamish and Neville, 2001; Willette, 2001; Tucker *et al.*, 2016)。増殖事業において、上記のような放流後のサケが経験する水

温や海水移行後の遊泳力の変化など、環境要因および生活上の変化がどのように被食の程度に影響を与えるかは不明な点が多い。遊泳力に着目して、放流されるサケ稚魚の生残を高める飼育・ふ化放流方法の探索はまだ発展途上にあり、種苗性指標としての簡便な遊泳力測定法の開発が求められている。この点で、本研究による逃避測定法は今後の貢献が期待できる。

以上、本研究で検討した逃避測定法は、サケ稚魚の突進速度および巡航速度の測定法として有効であると考えられた。本測定法で用いた装置自体は設置や取り扱いが非常に簡便であるため、今後、種苗生産の現場や野外調査における遊泳速度の測定への応用が期待される。

謝 辞

本研究を行うにあたり、サケ授精卵を提供していただいた一般社団法人根室管内さけ・ます増殖事業協会および職員の方々に感謝いたします。

引用文献

- Azuma T, Noda S, Yada T, Ototake M, Nagoya H, Moriyama S, Yamada H, Nakanishi T, Iwata M. Profiles in growth, smoltification, immune function and swimming performance of 1-year-old masu salmon *Oncorhynchus masou masou* reared in water flow. *Fish. Sci.* 2003; 68: 1282–1294.
- Bailey KM, Houde ED. Predation on eggs and larvae of marine fishes and the recruitment problem. *Adv. Mar. Biol.* 1989; 25: 1–83.
- Bax NJ. Early marine mortality of marked juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) released in Hood Canal, Puget Sound, Washington, in 1980. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1983; 40: 426–435.
- Beamish FWH. Swimming capacity. In: *Fish Physiology*. Vol. VII Locomotion (Hoar WS. and Randall DJ. eds.), Academic Press, New York. 1978; 101–187.
- Beamish R, Bouillon DR. Pacific salmon production trends in relation to climate. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1993; 50: 1002–1016.
- Beamish RJ, Neville CM. Predation-based mortality on juvenile salmon in the Strait of Georgia. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Tech. Rep.* 2001; 2: 11–13.
- Blaxter JHS. Swimming speeds of fish. *FAO Fish. Rep.* 1969; 62: 69–100.
- Brett JR. The respiratory metabolism and swimming

- performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Board Can.* 1964; 21: 1183–1226.
- Brett JR. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. *J.Fish.Res.Board Can.* 1967; 24: 1731–1741.
- Brett JR, Hollands M, Alderdice DF. The effect of temperature on the cruising speed of young sockeye and coho Salmon. *J.Fish.Res.Board Can.* 1958; 15: 587–605.
- Davison W. The effects of exercise training on teleost fish, a review of recent literature. *Comp. Biochem. Physiol. A* 1997; 117: 67–75.
- Farley Jr EV, Moss JH, Beamish RJ. A review of the critical size, critical period hypothesis for juvenile Pacific salmon. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 2008; 4: 311–317.
- Farrell AP, Johansen JA, Steffensen JF, Moyes CD, West TG, Suarez RK. Effects of exercise training and coronary ablation on swimming performance, heart size, and cardiac enzymes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Can. J. Zool.* 1990; 68: 1174–1179.
- Flagg TA, Prentice EF, Smith RS. Swimming stamina and survival following direct seawater entry during parr-smolt transformation of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Aquaculture* 1983; 32: 383–396.
- Flagg TA, Smith LS. Changes in swimming behavior and stamina during smolting of coho salmon. *Salmon and trout migratory behavior Symposium* 1982; 191–195.
- Fresh KL, Schroder SL. Influence of the abundance, size, and yolk reserves of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) on predation by freshwater fishes in a small coastal stream. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1987; 44: 236–243.
- 藤原公一, 臼杵崇広, 北田修一. 成長および流水トレーニングに伴うニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 仔稚魚の遊泳速度の変化. *日本水産学会誌* 2010; 76: 1025–1034.
- Hargreaves NB, LeBrasseur RJ. Size selectivity of coho (*Oncorhynchus kisutch*) preying on juvenile chum salmon (*O. keta*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1986; 42: 581–586.
- Healey MC. Timing and relative intensity of size-selective mortality of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early sea life. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1982; 39: 952–957.
- 疋田豊彦, 亀山四郎, 小林明弘, 佐藤行孝. 西別川に於けるニジマスの生物学的調査. 特に害魚の食性に就いて. *北海道さけ・ますふ化場研究報告* 1959; 14: 91–121.
- Houston H. Locomotor performance of chum salmon fry (*Oncorhynchus keta*) during osmoregulatory adaptation to sea water. *Can. J. Zool* 1959; 37: 591–605.
- Kaeriyama M. Dynamics of chum salmon, *Oncorhynchus keta*, populations released from Hokkaido, Japan. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 1998; 1: 90–102.
- Kitada S. Japanese chum salmon stock enhancement: current perspective and future challenges. *Fish. Sci.* 2014; 80: 237–249.
- 小林哲夫, 大熊一正. サケマス稚魚の体力測定装置について. *北海道さけ・ますふ化場研究報告* 1983; 37: 41–44.
- 小林哲夫. 「日本サケ・マス増殖史」北海道大学出版会, 札幌. 2009.
- 久保達郎. 各種河川魚の鮭鱒稚魚食害に就て. *北海道さけ・ますふ化場研究報告* 1946; 1:51–55.
- Masuda R, Shoji J, Aoyama M, Tanaka M. Chub mackerel larvae fed fish larvae can swim faster than those fed rotifers and *Artemia* nauplii. *Fish.Sci.* 2002; 68: 320–324.
- Masuda R. Ontogeny of anti-predator behavior in hatchery-reared jack mackerel *Trachurus japonicus* larvae and juveniles: patchiness formation, swimming capability, and interaction with jellyfish. *Fish. Sci.* 2006; 72: 1225–1235.
- Misaka N, Mizuno S, Ando D, Koyama T, Teranishi T, Koide N. Effects of cottonseed oil in diets on growth, feed efficiency and health parameters of chum salmon *Oncorhynchus keta* fry. *Sci. Rep. Hokkaido Fish. Res. Inst.* 2014; 85: 25–32.
- Miyakoshi Y, Nagata M, Kitada S, Kaeriyama M. Historical and current hatchery programs and management of chum salmon in Hokkaido, northern Japan. *Rev. Fish. Sci.* 2013; 21: 469–479.
- 宮腰靖之, 永田光博, 安藤大成, 藤原真, 青山智哉. 北海道東部網走沿岸におけるサケおよびカラフトマス幼稚魚の魚類捕食者. *北海道水産試験場研究報告* 2013; 83: 41–44.
- Mizuno S, Misaka N, Teranishi T, Ando D, Koyama T, Araya K, Miyamoto M, Nagata M. Physiological effects of an iron citrate dietary supplement on chum salmon (*Oncorhynchus keta*) fry. *Aquaculture Sci.* 2008; 56: 531–542.
- Nagasawa K. Fish and seabird predation on juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in Japanese coastal waters, and an evaluation of the impact. *N. Pac. Anadr. Fish*

- Comm. Bull.* 1998; 1: 480–495.
- Nagata M, Miyakoshi Y, Urabe H, Fujiwara M, Sasaki Y, Kasugai K, Torao M, Ando D, Kaeriyama M. An overview of salmon enhancement and the need to manage and monitor natural spawning in Hokkaido, Japan. *Environ. Biol. Fish.* 2012; 92: 311–323.
- Nahas R, Jones NV, Goldspink G. Some aspects of sustained training of rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson. *J. Fish Biol.* 1982; 20: 351–358.
- 中野広, 白旗総一郎. サケの健苗性評価について. 日本水産学会誌 1988; 54: 1263–1269.
- 大熊一正, 佐々木正吾, 和田有正, 戸嶋忠良. スタミナトンネルを用いて測定したサケ稚魚の突進速度. さけ・ます資源管理センター研究報告 1998; 1: 45–48.
- Pedersen LF, Malte H. Repetitive acceleration swimming performance of brown trout in fresh water and after acute seawater exposure. *J. Fish Biol.* 2004; 64: 273–278.
- Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance. *Comp. Biochem. Physiol. A* 2001; 131: 41–50.
- Scheel D, Hough KR. Salmon fry predation by seabirds near an Alaskan hatchery. *Mar. Eco. Prog. Ser.* 1997; 156: 35–48.
- 関二郎. さけます類の人工孵化放流に関する技術小史 (放流編). 水産技術 2013; 6: 69–82.
- Sturdevant MV, Sigler MF, Orsi JA. Sablefish predation on juvenile pacific salmon in the coastal marine waters of southeast Alaska in 1999. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2009; 138: 675–691.
- 鷹見達也, 青山智哉. 北日本の沿岸におけるアメマスによるサケ稚魚の捕食. 北海道立水産孵化場研究報告 1997; 51: 57–61.
- 鷹見達也, 長澤和也. 河川におけるアメマスによるサケ稚魚およびサクラマス幼魚の捕食. 北海道立水産孵化場研究報告 1996; 50: 45–47.
- Taylor EB, McPhail JD. Burst Swimming and size-related predation of newly emerged coho salmon *Oncorhynchus kisutch*. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1985; 114: 546–551.
- Tsukamoto K, Kajihara T, Nishiwaki M. Swimming ability of fish. *Bull. Jap. Soc. Scient. Fish.* 1975; 41: 167–174.
- 塚本勝巳. 遊泳生理. (板沢靖男, 羽生 功編)「魚類生理学」. 恒星社厚生閣, 東京. 1991: 539–584.
- 塚本勝巳, 梶原武. 魚類の遊泳速度と遊泳能力. 水産土木 1973; 10: 31–36.
- Tucker S, Hipfner JM, Trudel M. Size- and condition-dependent predation: a seabird disproportionately targets substandard individual juvenile salmon. *Ecology* 2016; 97: 461–471.
- Willette M. Foraging behaviour of juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) and size-dependent predation risk. *Fish. Oceanogr.* 2001; 10 (Suppl. 1): 110–131.