

## 魚油添加飼料の給餌がサケ稚魚の遊泳力発達と捕食回避に与える効果

虎尾 充<sup>1</sup>, 宮本真人<sup>1</sup>, 小林美樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,

<sup>2</sup>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

Effects of diet supplemented with fish oil on the swimming ability development and predation avoidance for chum salmon fry

MITSURU TORAO<sup>\*1</sup>, MAHITO MIYAMOTO<sup>1</sup> and MIKI KOBAYASHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Eniwa, Hokkaido 061-1433*,

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

We examined the effect of fish oil supplementation on the development of swimming speed in chum salmon fry. The effect of fish oil supplementation on the repression of salmon fry predation was also verified. The cruising speed measured by video analysis of escape behavior was significantly increased in the fish oil supplemented group 26 days after emergence when the average fork length was 4.3 cm. The results of the predation test showed that 1) if there was no difference in body size and swimming speed, there was no difference in predation rate; 2) the predation rate was higher when the body size was relatively smaller, and the swimming speed was lower due to fasting; 3) diet supplemented with fish oil reduced the decrease in swimming speed during fasting, and the predation rate was also lower. These results indicate that the feeding of fish oil-supplemented diets may repress the decrease in swimming ability and predation of salmon fry when their nutritional status declines after release.

キーワード：栄養状態, 巡航速度, 絶食, 突進速度, 被食, フィードオイル

遡河回遊魚であるサケ *Oncorhynchus keta* は、日本では秋から冬にかけて河川を遡上し、河床の砂礫を掘って産卵床を形成し産卵する。受精卵は産卵床内で孵化し、孵化した仔魚は卵黄嚢の吸収をほぼ終わると産卵床内から浮上し降海する。浮上後のサケ稚魚は、比較的流れの緩やかな微生物環境を利用しながら（長谷川ら, 2011; 卜部, 2015）、一定期間河川内に滞在し摂餌・成長する（佐野・小林, 1953; 小林・石川, 1964; 小林ら, 1965; 小林・原田, 1968; 埴山・佐藤, 1979; 宮腰ら, 2012; Kasugai *et al.*, 2013）。

北海道ではサケの人工孵化放流が積極的に行われ、毎年、約10億尾の稚魚が河川に放流されている。サケ稚魚の河川での滞在期間は、一般的には数日~10日間程度の短期間である（小林・石川, 1964; 眞山ら, 1983; 虎尾

ら, 2010; Hasegawa and Takahashi, 2013）。しかし、流程の長い河川を降下するサケ稚魚の中には1ヶ月程度河川に滞在する個体もあり（Kasugai *et al.*, 2013）、降河中に栄養状態が低下する個体もみられる（水野・三坂, 2012; 清水ら, 2016）。

河川内でのサケ放流魚の減耗は、魚類による被食が大きな要因となっていると考えられる。サケ稚魚の河川内での捕食者として、カジカ類やアメマス、サクラマスなどのサケ科魚類、ウグイ類、ウキゴリ類などが知られる（久保, 1946; 疋田ら, 1959; Fresh and Schroder, 1987; 鷹見・長澤, 1996）。また、河口域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（Wood 1987; Scheel and Hough, 1997; 長澤・埴山, 1995; 鷹見・青山, 1997; Kawamura and Kudo, 2000; Nagasawa, 1998;

Sturdevant *et al.*, 2009; 宮腰ら, 2013)。捕食される稚魚の特徴として、体サイズの小さな個体 (Taylor and McPhail, 1985; Hargreaves and LeBrasseur, 1986; Duffy and Beauchamp, 2008; Hasegawa *et al.*, 2021) や、状態の悪い個体が被食されやすい (Tucker *et al.*, 2016) とされる。本道において放流されたサケ稚魚のうち、どの程度が被食によって減耗するのか、具体的な研究事例はほとんど無い。しかし、放流後の被食減耗を軽減することは、放流魚の回帰率を高める上で重要と考えられる。

サケを含め、多くの魚種では捕食者に対する武器を持たないので、優れた遊泳力を持つことが捕食者の攻撃を避け、生き残るための主要な要素になる (Plaut, 2001)。そのため、放流するサケ稚魚の遊泳力の向上、あるいは栄養状態の低下などによる被食リスクを防ぐための飼育・放流方法の開発が必要である。サケ稚魚では、給餌飼料に油脂を添加することで魚体中の脂質の蓄積量を増加させ、絶食耐性を向上させることが可能である (Akiyama and Nose, 1980; 村井ら, 1983)。また、サケ稚魚の種苗性指標の1つとして遊泳速度が用いられるが、給餌飼料に綿実油を添加することで遊泳速度が向上した事例もある (Misaka *et al.*, 2014)。サケの増殖事業では、タラ肝臓から抽出した精製魚油 (フィードオイル) を配合飼料に添加して給餌する場合もあるが、サケ稚魚の遊泳力の発達に与える影響は分かっていない。また、絶食耐性や被食回避に与える影響も不明である。

本研究では、サケ稚魚に魚油添加飼料を給餌し、遊泳力の発達に与える影響を調べた。また、遊泳速度や体サイズが被食に及ぼす影響、および魚油添加による被食低減の効果を検証した。

## 試料及び方法

### 魚油添加飼料がサケ稚魚の遊泳力の発達に与える影響

試験に用いたサケ稚魚は、2013年10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から得た。2013年12月に発眼卵で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 (現道東センター) の浮上槽に収容し、浮上まで管理した。2014年1月30日に浮上した稚魚をアトキンス式水槽 (長さ3.26 m × 幅0.33 m × 高さ0.33 m) 2本に2,000尾ずつ収容し飼育を開始した。飼育水には曝気した地下水 (水温9.5℃) を掛け流しで使用した。浮上後4日目の2月3日から給餌を開始した。2つの飼育区のうち一方を魚油添加飼料群 (以下、魚油添加群とする) とし、市販のサケ稚魚用配合飼料 (アルファクランブルEX ます1号および2号, 日本農産工業株式会社) に養殖水産動物用の魚油 (フィード

オイル, 栄研商事株式会社) を外割3%の割合で添加した飼料を与えた。残りの一方を対照群とし、魚油を添加しない配合飼料を与えた。魚油添加群, 対照群ともに給餌率は3.5%とした。

浮上後4, 8, 16, 21, 26, 36, 42日目の計7回、魚油添加群と対照群の遊泳力を比較するため、逃避測定法 (虎尾ら, 2020) により遊泳速度を測定した。音刺激に反応して逃避行動をとるサケ稚魚を撮影し、映像解析によって突進速度と巡航速度を測定した。逃避測定法では、突進速度は収容直後からの10秒間に記録された最大の遊泳速度、巡航速度は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/秒) と定義され、これに従った。遊泳速度の測定には魚油添加群と対照群それぞれ10個体を用い、撮影終了後、麻酔して尾又長と体重を測定した。

### 被食試験によるサケ稚魚の食われやすさに関わる要因の検証

1. 流速付加飼育が被食に及ぼす影響 飼育水槽に水中ポンプを設置し、流速を付加することでサケ稚魚の遊泳力を向上させる飼育 (エクササイズトレーニング) を試みた。2011年12月に標津川で採卵されたサケ受精卵を道東支場の浮上槽に収容し、稚魚の浮上まで管理した。浮上した稚魚はアトキンス式水槽2本に2,000尾ずつ収容し飼育用水 (9.5℃) を掛け流して飼育した。一方を流速付加飼育群 (以下、流速付加群とする) とし、水槽内に水中ポンプ2基 (Hydor koralia8, Hydor社製) を設置し、日中 (9~18時) のみ15分間隔で5分間ずつ稼働させて水槽中に流速を付加して飼育した。他方は対照群とし、飼育水を掛け流して飼育した。給餌は、両群とも市販のサケ用配合飼料 (EXます1号および2号, 日本農産) を給餌率3.5%で与えた。

45日間の飼育後、2012年6月1, 3, 5日に流速付加群と対照群について、逃避測定法に従い各群15個体の突進速度と巡航速度を測定した。遊泳速度の測定後、サケ稚魚を麻酔し尾又長と体重を測定した。さらに、対照群の左腹鰭と流速付加群の右腹鰭を切除して標識を施し、被食試験に用いた。

被食試験には水深40 cmに設定した500 L 角型FRP水槽 (外寸690 × 1490 × 580 mm) を用いた (Fig. 1 A)。FRP水槽の中央部には約70cmの流木に水色のマーキングテープ (長さ約30cm) を多数打ち付けたサケ稚魚の隠れ場所 (Fig. 1 B) を設置した。麻酔から覚醒した標識魚が遊泳していることを確認した後、対照群と流速付加群各15個体を同時にFRP水槽に収容し、約20時間馴致した。馴致後、道東支場で飼育したアメマス3個体を捕食魚としてFRP水槽へ投入し、被食試験を開始した。試験開始1, 3,

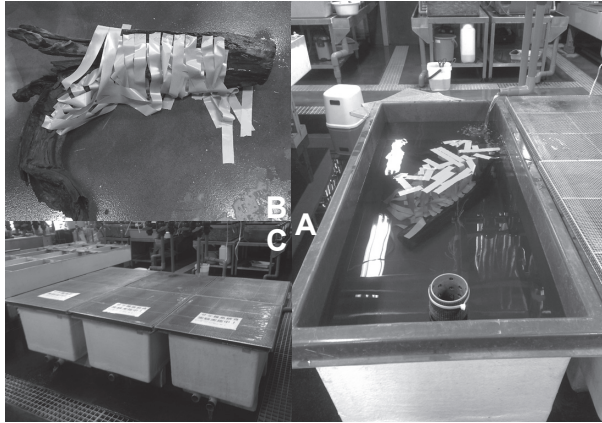


Fig.1 Equipment used for the predation test for chum salmon fry. (A) The tank is constructed of FRP (690 × 1490 × 580 mm). (B) Object set up in the tank as hiding places for fry. (C) Three water tanks for the predation test.

8時間後に目視でサケ稚魚の尾数を確認し、生残率が50%を下回った時点で試験を終了した。試験時間は最大で24時間とした。被食試験の終了後、捕食されなかったサケ稚魚の魚体測定と標識の確認を行い、各群の被食率(捕食尾数/収容尾数×100)を求めた。なお、試験に用いたアメマスの尾叉長はそれぞれ17.5 cm, 19.5 cm, 14.9 cmであった。

2. 絶食が被食に及ぼす影響 2013年の4月と5月の2回、絶食群と給餌群の遊泳速度測定と被食試験を行った。1回目の試験は、2012年9月に標津川で採卵されたサケ受精卵から得た稚魚を用いた。同年11月に道東支場の浮上槽に収容し、翌年1月に浮上した稚魚をアトキンス式水槽で飼育用水を掛け流して飼育した。給餌は、市販のサケ用配合飼料(EXます1号および2号, 日本農産)を給餌率3.5%で与えた。稚魚の平均尾叉長が約5.5 cm, 平均体重が約1.5 gに達した2013年3月19日から絶食試験を開始した。先ず、アトキンス式水槽に稚魚を約400尾ずつ分収し、一方は継続して給餌率3.5%で給餌飼育し(給餌群), 他方は給餌を止め絶食群として、それぞれ20日間飼育した。次に、絶食20日目の2013年4月8日に逃避測定法で給餌群と絶食群各12個体の突進速度と巡航速度を撮影後、サケ稚魚を麻酔して尾叉長と体重を測定した。その後、給餌群の右腹鰭と絶食群の左腹鰭を切除し、翌4月9日には既述の方法で被食試験を行った。同様に、2回目の試験は2012年12月に標津川で採卵されたサケ受精卵から得た稚魚を用いて行った。2013年5月1日に稚魚を約1,000尾ずつアトキンス水槽2本に分収し、一方を給餌群, 他方を絶食群とした。絶食開始後15日目の2013年5月15日に遊泳速度測定と被食試験を行った。なお、被食試験は1回目と2回目ともに実験水槽を各3セットずつ作成して行った(Fig.1 C)。

### 3. 魚油添加飼料の給餌が絶食時の被食に与える影響

前述の2013年10月に採卵されたサケ受精卵から得た稚魚を用いて、対照群と魚油添加群の絶食後の遊泳速度測定と被食試験を行った。各群ともに浮上後40日目(両群とも、平均尾叉長5.1 cm, 平均体重1.2 g)の2014年3月11日から絶食させ、絶食後7, 14, 21, 30日目の計4回、逃避測定法による突進速度と巡航速度の測定、および被食試験を行った。実験方法はいずれも既述と同様とし、遊泳速度の測定はそれぞれで各群20個体ずつ行った。また、被食試験は1回につき水槽3セットを用い、各水槽へのアメマス投入数を1尾とした。使用したアメマスの尾叉長は、21 cm, 31 cm, 47.5 cmであった。

統計解析 実験1の流速付加群と対照群, 実験2の絶食群と給餌群, 実験3の魚油添加群と対照群の尾叉長, 体重, 遊泳速度の平均値の差は、ウェルチの*t*検定で検定した。また、それぞれの被食試験における被食率の差は、マンテル・ヘンツェル法で検定した。

## 結果

### 魚油添加飼料がサケ稚魚の遊泳力の発達に与える影響

浮上後4日目のサケ稚魚は平均尾叉長3.6 cm, 平均体重0.34 gで肥満度は7.2であった。浮上後42日目には、対照群の体サイズは5.3 cm, 1.4 g, 肥満度9.2, 魚油添加群は5.2 cm,

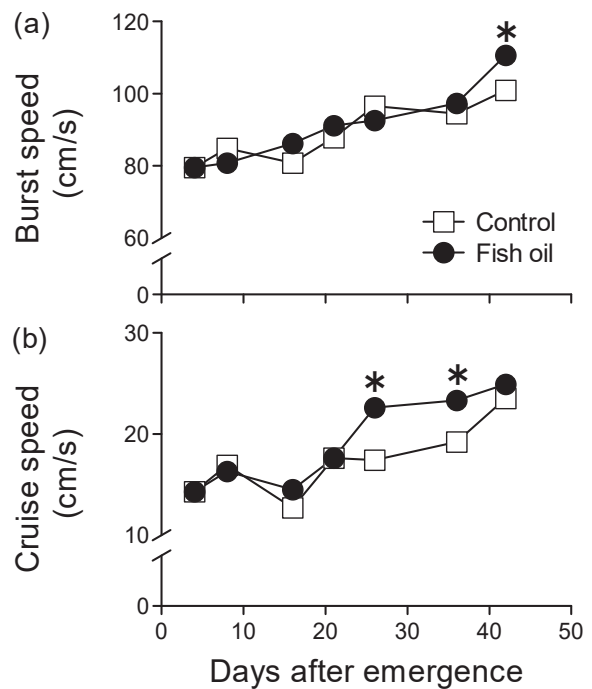


Fig.2 Development of (a) burst, and (b) cruise swimming speeds in the control (open square) and fish oil supplemented (solid circle) groups. Asterisks indicate significant differences (Welch's *t*-test,  $P < 0.05$ ).

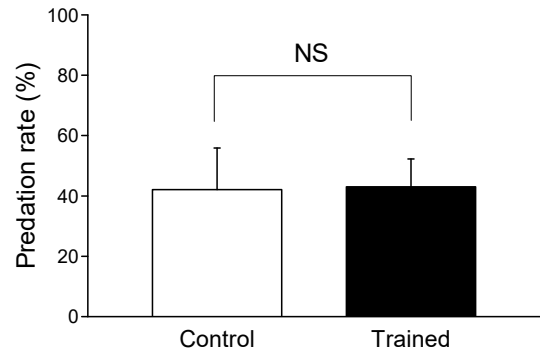
**Table 1** Comparison of mean fork length, body weight, and condition factor between the fish oil supplemented group and the control group. There was no statistically significant difference in any of the values between both groups (Welch's *t*-test,  $P > 0.05$ ).

Days after emergence	Group	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Mean condition factor
4	Initial	3.60 ± 0.11	0.34 ± 0.04	7.20 ± 0.54
8	Control	3.77 ± 0.13	0.38 ± 0.07	7.11 ± 0.73
	Fish oil	3.78 ± 0.09	0.40 ± 0.03	7.43 ± 0.52
16	Control	4.12 ± 0.11	0.56 ± 0.05	8.01 ± 0.40
	Fish oil	4.14 ± 0.11	0.55 ± 0.07	7.71 ± 0.51
21	Control	4.33 ± 0.15	0.69 ± 0.08	8.47 ± 0.63
	Fish oil	4.33 ± 0.17	0.67 ± 0.08	8.19 ± 0.36
26	Control	4.52 ± 0.20	0.74 ± 0.09	7.95 ± 0.34
	Fish oil	4.50 ± 0.13	0.71 ± 0.09	7.75 ± 0.63
36	Control	5.01 ± 0.16	1.12 ± 0.10	8.91 ± 0.36
	Fish oil	5.01 ± 0.21	1.12 ± 0.12	8.88 ± 0.55
42	Control	5.34 ± 0.19	1.41 ± 0.17	9.20 ± 0.48
	Fish oil	5.18 ± 0.21	1.26 ± 0.20	9.01 ± 0.65

1.3 g, 肥満度9.0となった (Table 1)。尾叉長, 体重, 肥満度には対照群と魚油添加群で有意差は認められなかった (ウェルチの検定,  $P > 0.05$ )。飼育期間中の遊泳速度の変化をFig. 2に示した。浮上後4日目の突進速度は, 79.5 cm/秒であった。その後, 浮上後8日目から36日目まで両群とも突進速度は大きくなり90 cm/秒を超えたが, 両群間で有意差は認められなかった。浮上後42日目に対照群で100.9 cm/秒, 魚油添加群で110.6 cm/秒と魚油添加群で約10%高くなり, この時点で有意差が認められた ( $P < 0.05$ )。巡航速度は, 浮上後4日目には14 cm/秒であった。その後, 浮上後21日目 (尾叉長4.3 cm) までは両群とも17~18 cm/秒で差は無かったが, 尾叉長4.5 cmを超えた浮上後26日目と36日目には魚油添加群で有意に大きくなった ( $P < 0.05$ )。浮上後42日目には, 対照群の巡航速度も大きくなり, 有意差は認められなくなった。

**被食試験によるサケ稚魚の食われやすさに関わる要因の検証**

**1.流速付加飼育が被食に及ぼす影響** 浮上後45日間の飼育後, 対照群は尾叉長5.7 cm, 体重1.7 g, 肥満度9.2まで



**Fig. 3** Predation rates between trained and untrained chum salmon fry in a tank with white-spotted charr. No statistically significant difference was found (Mantel-Haenszel test,  $P > 0.05$ ).

成長した (Table 2)。一方, 流速付加群は, 尾叉長5.6 cm, 体重1.5 g, 肥満度8.7であった。対照群と流速付加群で尾叉長に有意差はなかったが, 体重と肥満度は流速付加群で有意に小さかった ( $P < 0.05$ )。突進速度は対照群で90 cm/秒, 流速付加群で84 cm/秒, 巡航速度はそれぞれ15 cm/秒, 13 cm/秒で, 突進速度と巡航速度の平均値はいずれも流速付加群で小さかったが, 有意差は認められなかった ( $P > 0.05$ )。被食試験の結果は, 対照群の被食率が42.1 ± 13.8%, 流速付加群は43.0 ± 9.2%で (Fig. 3), 有意な差は認められなかった (マンテル・ヘンツェル法,  $P > 0.05$ )。

**2.絶食が被食に及ぼす影響** 給餌群と絶食群の体サイズと遊泳速度の測定結果をTable 3に示した。4月に実施した1回目の絶食試験後には, 給餌群の尾叉長は6.4 cm, 絶食群は5.7 cm, 体重と肥満度はそれぞれ2.5 gと1.3 g, 9.2と6.8であった。5月に実施した2回目の絶食試験後では, 給餌群の尾叉長は5.0 cm, 絶食群は4.7 cmであった。体重は給餌群で1.0 g, 絶食群で0.7 g, 肥満度はそれぞれ7.8と6.5であった。2回の絶食試験後の体サイズは, いずれも絶食群で有意に小さかった (ウェルチの検定,  $P < 0.05$ )。遊泳速度のうち突進速度は, 1回目の試験では給餌群で114.9 cm/s (体長比17.8 FL/s), 絶食群では97.4 cm/s (体長比17.1 FL/s) であった。2回目の試験では, 給餌群で100.7 cm/s (体長比20.1 FL/s), 絶食群では82.2 cm/s (体

**Table 2** Comparison of mean body size and swimming speed of chum salmon fry in exercise training and non-training groups. Asterisks and bold italics indicate statistically significant differences (Welch's *t*-test,  $P < 0.05$ ).

Date	Group	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Mean condition factor	Burst speed		Cruise speed	
					cm/s	FL/s	cm/s	FL/s
Jun. 2012	Control	5.70 ± 0.35	<b><i>1.72 ± 0.35</i></b>	<b><i>9.21 ± 0.85</i></b>	90.3 ± 22.5	15.9 ± 4.0	14.6 ± 6.3	2.6 ± 1.1
	Trained	5.58 ± 0.28	* <b><i>1.52 ± 0.24</i></b>	* <b><i>8.67 ± 0.64</i></b>	84.3 ± 23.8	15.1 ± 4.1	13.2 ± 4.9	2.4 ± 0.9

Table 3 Mean body size and swimming speeds of chum salmon fry for each fasted experiment. Asterisk and bold italics indicate Welch's *t*-test statistical significance ( $P < 0.05$ ).

Date	Group	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Mean condition factor	Burst speed		Cruise speed	
					cm/s	FL/s	cm/s	FL/s
Apr. 2013	Fed	<b><i>6.41 ± 0.42</i></b>	<b><i>2.45 ± 0.49</i></b>	<b><i>9.19 ± 0.71</i></b>	<b><i>114.9 ± 19.4</i></b>	17.8 ± 2.8	<b><i>9.9 ± 5.1</i></b>	<b><i>4.6 ± 1.8</i></b>
	Fasted	* <b><i>5.70 ± 0.44</i></b>	* <b><i>1.30 ± 0.37</i></b>	* <b><i>6.81 ± 0.54</i></b>	* <b><i>97.4 ± 15.9</i></b>	17.1 ± 2.6	* <b><i>4.0 ± 2.2</i></b>	* <b><i>3.5 ± 0.9</i></b>
May, 2013	Fed	<b><i>4.99 ± 0.30</i></b>	<b><i>0.98 ± 0.17</i></b>	<b><i>7.83 ± 0.75</i></b>	<b><i>100.7 ± 20.8</i></b>	<b><i>20.1 ± 3.6</i></b>	<b><i>16.9 ± 7.5</i></b>	<b><i>3.4 ± 1.4</i></b>
	Fasted	* <b><i>4.65 ± 0.29</i></b>	* <b><i>0.66 ± 0.14</i></b>	* <b><i>6.48 ± 0.58</i></b>	* <b><i>82.2 ± 20.9</i></b>	* <b><i>17.7 ± 4.4</i></b>	* <b><i>13.6 ± 4.9</i></b>	* <b><i>2.9 ± 1.1</i></b>

長比17.7 FL/s)であった。巡航速度は、1回目の試験では給餌群で9.9 cm/s(体長比4.6 FL/s),絶食群では4.0 cm/s(体長比3.5 FL/s)であった。2回目の試験では、給餌群で16.9 cm/s(体長比3.4 FL/s),絶食群で13.6 cm/s(体長比2.9 FL/s)であった。突進速度と巡航速度の平均値は、いずれも給餌群に比べ絶食群で小さく、1回目の試験の突進速度(体長比 FL/s)を除き、すべてに有意差が認められた(ウェルチの検定,  $P < 0.05$ )。被食試験の結果は、1回目の給餌群の平均被食率が8.3%,絶食群が29.2%であった(Fig. 3)。2回目の被食試験においても、給餌群の平均被食率19.9%に対して絶食群では41.7%と、絶食群で有意に高かった(マンテル・ヘンツェル法,  $P < 0.05$ )。

3. 魚油添加飼料の給餌が絶食時の被食に与える影響  
市販の配合飼料を給餌した対照群と、魚油添加配合飼料を給餌した魚油添加群を、それぞれ30日間絶食させた結果、両群ともに尾叉長・体重・肥満度が低下した(Table 4)。絶食7, 14, 21および30日目の対照群と魚油添加群間で体サイズに関連する測定項目を比較したところ、いずれも有意差は認められなかった。突進速度は、対照群に比べて魚油添加群で平均値が高い傾向があり、絶

Table 4 Changes in body size of the fish oil supplemented group and the control group during the fasting test. There were no significant differences in fork length, body weight, and condition factor between the two groups (Welch's *t*-test,  $P > 0.05$ ).

Days after fasting	Group	Mean fork length (cm)	Mean body weight (g)	Mean condition factor
0	Control	5.34 ± 0.19	1.41 ± 0.17	9.20 ± 0.48
	Fish oil	5.18 ± 0.21	1.26 ± 0.20	9.01 ± 0.65
7	Control	5.13 ± 0.17	1.02 ± 0.11	7.48 ± 0.36
	Fish oil	5.14 ± 0.32	1.00 ± 0.17	7.35 ± 0.68
14	Control	5.18 ± 0.27	0.99 ± 0.17	7.03 ± 0.53
	Fish oil	5.13 ± 0.28	0.96 ± 0.15	7.02 ± 0.42
21	Control	5.21 ± 0.25	0.95 ± 0.16	6.74 ± 0.88
	Fish oil	5.08 ± 0.36	0.91 ± 0.21	6.81 ± 0.47
30	Control	5.10 ± 0.33	0.86 ± 0.18	6.36 ± 0.40
	Fish oil	5.08 ± 0.30	0.85 ± 0.16	6.44 ± 0.47

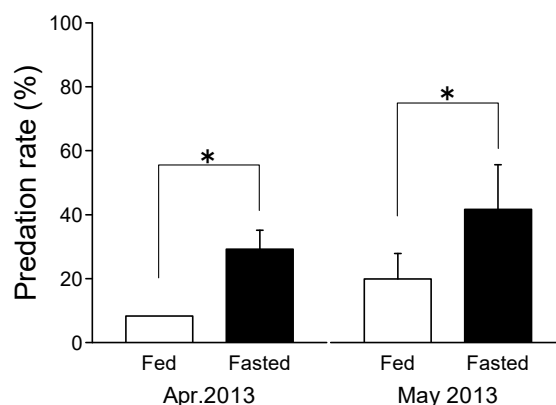


Fig. 4 Predation rates between fed and fasted chum salmon fry in a tank with white-spotted charr. Asterisk indicate statistical significance (Mantel-Haenszel test,  $P < 0.05$ ).

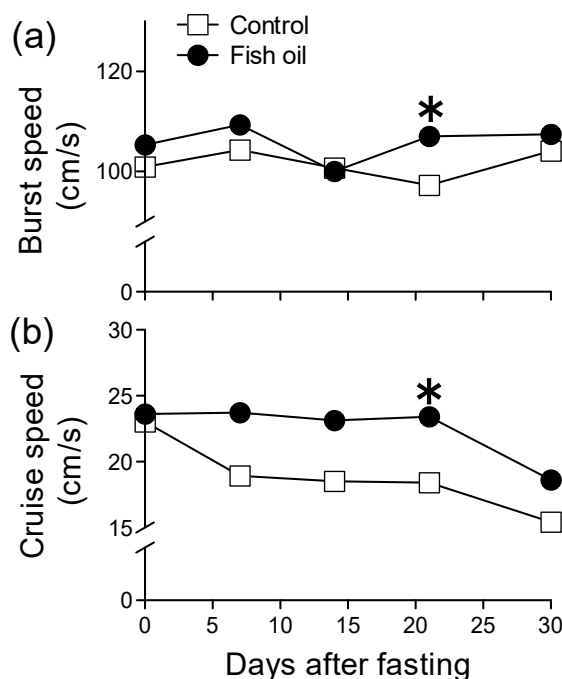


Fig. 5 (a) burst and (b) cruise speeds of the fish oil supplemented (solid circle) and control (open square) groups during the fasting test. Asterisks indicate a significant difference between the two groups (Welch's *t*-test,  $P < 0.05$ ).

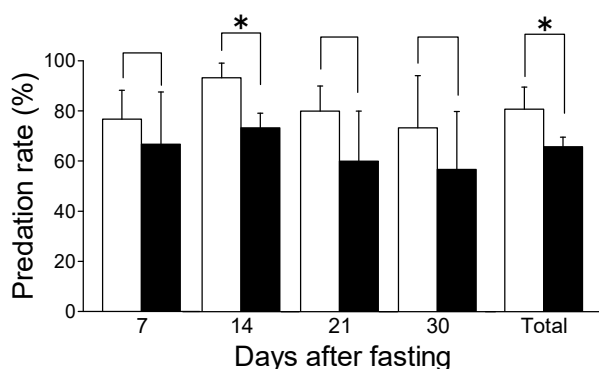


Fig. 6 Comparison of the predation rate between the fish oil supplemented group (solid bar) and the control group (open bar) during the fasting. Asterisks indicate a significant difference between the two groups (Mantel-Haenszel test,  $P < 0.05$ ).

食21日目では魚油添加群が有意に高かった (Fig. 5)。両群ともに突進速度が絶食に伴って低下する傾向は見られなかった。一方、巡航速度は対照群で絶食7日目にかけて低下した。その後は安定したものの、30日目にはさらに低下した。魚油添加群の巡航速度は21日目まで低下が見られなかったが、30日目には低下した。巡航速度の平均値はいずれの測定回でも対照群に比べて魚油添加群で常に高く、絶食21日目には有意差が認められた。絶食7, 14, 21, 30日目に被食試験を行ったところ、対照群と魚油添加群の被食率は、それぞれ絶食7日目が76.7%と66.7%、絶食14日目が93.3%と73.3%、絶食21日目が80.0%と60.0%、絶食30日目が73.3%と56.7%で、いずれも魚油添加群で被食率が低く、14日目には有意差が認められた (Fig. 6)。4回の被食試験での平均被食率は対照群が80.8%、魚油添加群が65.8%で、魚油添加群の被食率が有意に低かった。

## 考 察

浮上後4日目から42日目までの間、サケ稚魚に市販の配合飼料と魚油添加飼料の給餌を行い、遊泳力の発達に与える影響を検証した。魚油添加群では、尾叉長が4.3 cmとなった浮上後26日目以降に巡航速度が顕著に向上した。本研究で用いた逃避測定法では、巡航速度を「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)」と定義している。サケ稚魚の単位時間当たりの移動量(運動活性)が大きいと巡航速度が高くなりやすいことから、魚油添加飼料の給餌がサケ稚魚の運動活性を向上させたといえるかも知れない。増殖事業の現場担当者からは、魚油添加によってサケ稚魚の動きが良くなるとの声も聞かれ、魚油添加によるサケ稚魚の運動活性向上の効果を定量化出来たと考えられる。一方、サ

ケを含めサケ科魚類では魚油の添加による成長率・給餌効率の向上が報告されている (Watanabe and Takeuchi, 1976; 酒本・大橋, 2012)。しかし、本研究では尾叉長・体重・肥満度の体サイズを示す項目には両群間で差が認められず、魚油添加による成長への効果は確認できなかった。酒本・大橋 (2012) は、配合飼料への魚油添加量について外割7% (脂質含量で12%) が最適と述べており、本研究の外割3%では成長への効果が小さかったのかも知れない。今後、遊泳力の発達や成長への効果など目的にあわせた最適な添加量を検討していく必要がある。

本研究では3つの被食試験によって、サケ稚魚の食われやすさに関わる要因を検討した。その結果、1) 体長と遊泳速度に差が無ければ被食率にも差が無い、2) 絶食によって体サイズが相対的に小型化し、遊泳速度が低いと被食率は高い、3) 魚油添加飼料の給餌が絶食時の遊泳速度の低下を軽減し、被食率も低いことが示された。1つ目の流速付加飼育試験では、結果として、対照群と流速付加群の間で遊泳速度に差が認められず、流速付加飼育によって遊泳力を向上させることはできなかった。この理由として、実験中にサケ稚魚が流速の速い場所を避けて比較的緩慢な部分に滞泳している様子が観察されたことから、使用した水中ポンプの能力に限界があり、十分なトレーニング効果が得られなかった可能性が考えられる。しかし、本試験の結果は、体長と遊泳力に差が無ければ被食率にも差がないことを示しており、遊泳力向上効果の可能性を否定するものではないと考えられる。これまで、いくつかの増養殖対象魚種において流速付加飼育(エクササイズトレーニング)が試みられており、適切な流速を与えることで放流後の生残率や飼育中の成長率・餌料効率に向上効果のあることが確認されている (Davison, 1997)。

絶食による被食への影響を検証した2つめの試験では、20日間の絶食によって給餌群に比べて絶食群の体サイズ・突進速度・巡航速度が有意に低下した。また、被食試験の結果においても、給餌群に比べて絶食群で被食率が有意に高く、体サイズと遊泳速度が小さいと捕食されやすいことが示された。浮上後間もないギンザケ稚魚を用いた被食試験では、小型の稚魚は突進速度が小さく捕食されやすいこと (Taylor and McPhail, 1985) が指摘されている。また、海中生け簀を用いたギンザケによるサケ稚魚の被食試験では、小型のサケ稚魚が選択的に捕食されるとともに、ギンザケのサイズによって捕食されるサケ稚魚のサイズが変化することも指摘されている (Hargreaves and LeBrasseur, 1986)。その他にも、野外調査において河川や沿岸域でサイズ選択的な被食を示す研究事例がいくつかあり (Duffy and Beauchamp, 2008 ;

Hasegawa *et al.*, 2021), 捕食されやすさは体サイズとそれに関連した遊泳力が関わっていると考えられる。さらに、サクラマス稚魚においても、捕食・被食関係は体サイズとの関係性が重要であり (Miyamoto and Araki, 2017), 放流する際には、放流場所に生息する捕食魚のサイズを考慮して放流魚の体サイズを決めるべきとの指摘 (Miyamoto and Araki, 2017) があり、放流魚の被食減耗を軽減する上で興味深い。

3つめの魚油添加飼料の給餌効果を調べた試験では、栄養状態の悪化によって遊泳速度が低下することが示された。絶食後の巡航速度は、両群で体サイズに差が無かったにもかかわらず、対象群では顕著に低下する一方、魚油添加群では低下の度合いが小さかった。また、絶食後に行った被食試験では、対照群に比べて魚油添加群で被食率が低く、このことから、魚油添加飼料の給餌が絶食時の遊泳速度の低下を軽減し、被食回避につながったと考えられる。沿岸域で海鳥に捕食されるタイヘイヨウサケ類の稚魚を観察した結果では、体サイズだけでなく、状態の悪い個体が選択的に捕食されるコンディション選択的な捕食が指摘されている (Tucker *et al.*, 2016)。これまで、野外において栄養状態が悪化したサケ稚魚が魚類に選択的に捕食された観察例はない。しかし、魚油を含めた油脂添加は魚体中への脂質蓄積量を増加させる (村井ら, 1983; 酒本・大橋, 2012; Misaka *et al.*, 2014) ことから、魚油添加が栄養状態の低下を軽減し被食率を低減させる可能性がある。

本研究の結果は、浮上後に魚油添加飼料を給餌することで、サケ稚魚の遊泳力が向上するとともに、放流後、サケ稚魚の餌料環境が悪化した場合にも遊泳速度の低下を軽減し、被食減耗を低減できる可能性を示している。今後は、増殖事業の現場で標識放流を行い、魚油添加による被食軽減の効果を実証する必要がある。

## 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

- Akiyama T, Nose T. Changes in body weight, condition factor and body composition of fingerling chum salmon with various sizes during starvation. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquaculture* 1980; 1: 71-78.
- Davison W. The effects of exercise training on teleost fish, a review of recent literature. *Comp Biochem Physiol A* 1997; 117: 67-75.
- Duffy EJ, Beauchamp DA. Seasonal patterns of predation on juvenile Pacific Salmon by anadromous cutthroat trout in Puget Sound. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2008; 137: 165-181.
- 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.
- Hargreaves NB, LeBrasseur RJ. Size selectivity of coho (*Oncorhynchus kisutch*) preying on juvenile chum salmon (*O. keta*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1986; 43: 581-586.
- Hasegawa K, Honda K, Yoshiyama T, Suzuki K, Fukui S. Small biased body size of salmon fry preyed upon by piscivorous fish in riverine and marine habitats. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 4 January 2021 <https://doi.org/10.1139/cjfas-2020-0339>
- 長谷川 功, 大熊一正, 大貫 努. 河川におけるサケとサクラマスの稚魚の定位点選択. 日本水産学会誌2011; 77: 1095-1097.
- Hasegawa K, Takahashi S. Microscale environments along the seaward migration route of stocked chum salmon fry. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2013; 142: 1232-1237.
- 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.
- 埴山雅秀, 佐藤愁一. 十勝川におけるサケ稚魚の成長と食性に関する調査Ⅲ. 1977年, 稚魚の降海移動期と成長および摂餌活動との関係. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1979; 33: 47-73.
- Kasugai K, Torao M, Nagata M, Irvine JR. The relationship between migration speed and release date for chum salmon *Oncorhynchus keta* fry exiting a 110-km northern Japanese river. *Fish. Sci.* 2013; 79: 569-577.
- Kawamura H, Kudo S. Seabird predation on juvenile chum salmon. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Tech. Rep.* 2000; 2: 9-10.
- 小林哲夫, 原田滋. 西別川におけるサケ・マスの生態調査Ⅲ. サケ稚魚の食性と餌料生物相について. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1968; 22: 15-35.
- 小林哲夫, 原田滋, 阿部進一. 西別川におけるサケ・マスの生態調査Ⅰ. サケ稚魚の降海移動並びに成長について. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1965; 19:

- 1-10.
- 小林哲夫, 石川嘉郎. サケ稚魚の生態調査-VIII. 千歳川, 石狩川のサケ稚魚の生長と食性について. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1964; 18: 7-15.
- 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.
- 真山 紘, 関 二郎, 清水幾太郎. 石狩川産サケの生態調査II. 1980年及び1981年春放流稚魚の降海移動と沿岸帯での分布回遊. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1983; 37: 1-22.
- 宮腰靖之, 安藤大成, 藤原 真, 隼野寛史, 永田光博. 網走川におけるサケ稚魚の降河移動. 北海道水産試験場研究報告 2012; 82: 19-26.
- 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.
- Miyamoto K, Araki H. Differentiated predation risk on hatchery-reared juvenile masu salmon by white-spotted charr with different body sizes. *Fish. Sci.* 2017; 83: 245-250.
- 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.
- 水野伸也, 三坂尚行. 5.サケ稚魚の種苗性評価. 「根室南部沿岸調査 (H19-22) 結果報告書」(社)根室管内さけ・ます増殖事業協会, 標津町. 2012; 106-108.
- 村井武四, 平澤康弘, 秋山敏男, 能勢健嗣. 種々の飼料で飼育したシロザケ稚魚の海水中での絶食に対する抵抗性. 養殖研究所研究報告 1983; 4: 79-86.
- 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.
- 長澤和也, 帰山雅秀. 日本沿岸水域における魚類と海鳥類によるサケ幼稚魚の捕食. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1995; 49: 41-53.
- Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance. *Comp. Biochem. Physiol. A* 2001; 131: 41-50.
- 酒本秀一, 大橋勝彦. シロザケ飼料の魚油添加効果-3. *New Food Industry* 2012; 54: 41-49.
- 佐野誠三, 小林哲夫. さけ稚魚の生態調査(2) 標識放流試験に於けるさけ稚魚の移動と成長について. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1953; 8: 71-79.
- Scheel D, Hough KR. Salmon fry predation by seabirds near an Alaskan hatchery. *Mar.Eco.Prog.Ser.* 1997; 156: 35-48.
- 清水智仁, 伴 真俊, 宮内康行, 梅田勝博, 中尾勝哉, 藤井 真, 真山紘. 千歳川を降河するふ化場産および野生産サケ稚魚の栄養状態. *水産技術* 2016; 8: 89-94.
- 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幼稚魚の捕食. 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.
- 虎尾 充, 竹内勝巳, 佐々木義隆, 春日井潔, 村上豊, 永田光博. 当幌川におけるカラフトマス放流魚と野生魚の降河生態. 北海道立水産孵化場研究報告 2010; 64: 7-15.
- 虎尾 充, 宮本真人, 小林美樹. 逃避行動を利用したサケ稚魚遊泳速度の簡易測定法. 北海道水産試験場研究報告 2020; 98: 1-10.
- Tucker S, Hipfner JM, Trudel M. Size-and condition-dependent predation: a seabird disproportionately targets substandard individual juvenile salmon. *Ecology* 2016; 97: 461-471.
- ト部浩一. 十勝川水系札内川における二次流路の環境特性. 北海道立水産試験場報告 2015; 88: 33-42.
- Watanabe T, Takeuchi T. Evaluation of pollock liver oil as a supplement to diets for rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1976; 42: 893-906.
- Wood CC. Predation of Juvenile Pacific Salmon by the Common Merganser (*Mergus merganser*) on Eastern Vancouver Island. I: Predation during the Seaward Migration. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1987; 44: 941-949.