

原著論文

海水陸上養殖におけるサツキマスの最適給餌条件

今井 智*1・佐野広明*2・権名康彦*3

Optimal feeding conditions for Amago salmon *Oncorhynchus masou ishikawae* in land-based seawater aquaculture.

Satoshi IMAI, Hiroaki SANNO and Yasuhiko SHIINA

Controlling maturity and suppressing feed costs are major issues in the salmon farming industry. In this study, the effects of lipid content and feeding rate on growth and maturation were investigated to determine the optimal feeding conditions for Amago salmon improve productivity and control maturation in land-based seawater aquaculture. In feeding experiments with diets containing 20.3, 16.0 and 11.7% lipid contents, fish fed a 16% lipid content diet exhibited good growth, suppressed male maturation, and had higher muscle fat contents. In addition, by comparing the growth of groups fed at rates of 1.0, 1.5 and 2.0% of their body weight/day and satiety conditions using commercially available diets with close to optimal lipid content, we found that the group with restricted feeding conditions at a rate of 2.0% body weight/day maximized their body weight, and the coefficient of variation for the body weight was minimal. These results suggest that the optimal feeding conditions for Amago salmon is to feed with a lipid content of approximately 16% at the feeding rate of 2.0% body weight/day.

キーワード：脂質含量, 給餌率, 成熟

2022年12月5日受付 2023年8月31日受理

サツキマス (*Oncorhynchus masou ishikawae*) は我が国の固有種で, 本州東海地方以南の太平洋側に分布する, 世界最南限の降海型サケ科魚類である (坪井 2014)。本種は秋から冬にかけて海水適応能を発達させるスモルト変態を行い (Nagahama *et al.* 1982), 水温が低い冬期の海域を利用して成長する生態を持つ (海野ら 2001)。このことから, 我が国で行われている冬期海面でのサケ科魚類養殖の生産サイクルと生活史が適合しており (養殖ビジネス編集部 2019), 新たな養殖対象種として期待されている。また, サツキマスは希少で, 高値で取引される高級魚であるため, 海面養殖に比べて施設のイニシャルコストやランニングコストが高む閉鎖循環式陸上養殖

(以下, 陸上養殖) の対象としても有望である。

サケ科魚類養殖において成長促進は他魚種の養殖と同様に重要な課題である。しかし, サケ科魚類では最適な成長スピードで飼育を行わないと成熟個体が出現する。成熟魚の出現は成長の鈍化 (McClure *et al.* 2007) や感染症の発症リスクを高め (St-Hilaire *et al.* 1998), 製品としての品質の低下 (Aksnes *et al.* 1986) を引き起こす。特に, 陸上養殖において, 高い確率で成熟魚が出現することが問題視されている (Good and Davidson 2016)。また, サケ科魚類養殖における飼料代の生産コストに占める割合は非常に高く, 飽食条件で給餌が行われている我が国の海面ギンザケ (*O. kisutch*) 養殖における飼料代は,

*1 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所 養殖部門生産技術部 宮古庁舎
〒027-0097 岩手県宮古市崎山4-9-1

Production Engineering Division, Aquaculture Research Department, Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, Miyako, Iwate 027-0097, Japan

E-mail: imai_satoshi60@fra.go.jp

*2 マルハニチロ株式会社中央研究所 リサーチ二課

*3 マルハニチロ株式会社事業企画部

生産経費の70%を超える(熊谷 2015)。そのため、飼料コストの削減は産業上重要な課題である。サケ科魚類では淡水飼育下の種苗生産工程において、飼育水温と魚体重の組み合わせにおける最適な給餌量が明らかになっている(Leitritz 1959)。しかし、海水飼育時の最適な給餌率については、タイセイヨウサケ(*Salmo salar*)とニジマス(*O. mykiss*)の知見に限られる(Austreng *et al.* 1987)。

一般的に飼料への脂質添加によりサケ科魚類の成長が高まることが知られている(太田ら 1979, Johansen *et al.* 2003)。しかし、飼料への脂質添加量が多すぎると成長停滞などの悪影響を与えること(竹田ら 1975, 竹内ら 1978, Takeuchi *et al.* 1991, Silverstein *et al.* 1999, Ogata and Shearer 2000)、成熟の開始を誘発すること(Hillestad *et al.* 1998)が指摘されている。タイセイヨウサケでは、筋肉中の脂質含量は増加しないが、成熟率が高まる飼料中の脂質含量が明らかにされている(Hillestad *et al.* 1998)。また、飼料中の脂質含量が少ない飼料を用いている場合でも、摂餌量が多く総摂取エネルギーが高い場合には高脂質含量の飼料を与えた場合と同様に成熟が開始することが知られている(Norrgård *et al.* 2014)。

このため本研究では、サツキマスの海水飼育時における成長と成熟へ与える要因として、飼料中の脂質含量および給餌率に着目し、サツキマスの成長促進と成熟抑制を両立する最適な給餌条件を定めることを目的とした。まず、脂質含量の異なる飼料を用いた飼育試験を実施し、脂質含量が成長と成熟へ与える影響を検討した。さらに、得られた最適な脂質含量に近い市販飼料を用いて、異なる給餌率を設定した飼育試験を実施し、最適な給餌率を検討した。

材料と方法

試験 1

配合飼料中の適正脂質含量の検討 飼料中の脂質含量の違いが成長と成熟へ与える影響を調べるため、脂質含量の異なる EP 飼料(エクストルーデッドペレット)を用いた給餌試験を、(国研)水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所(当時)屋島庁舎内において2018年12月13日から2019年4月19日までの127日間、自然日長下で行った。試験終了時期は、地域市場におけるニーズの高い4月下旬を目途とした。

試験用 EP 飼料の脂質含量は、国内で市販されているサーモン養殖用飼料に相当する20.3%(以下、高脂質飼料)、高脂質より低い16.0%(以下、中脂質飼料)、中脂質より低い11.7%(以下、低脂質飼料)の3種類とし、マルハニチロ(株)中央研究所において試験専用 EP 飼料を製造した。脂質量の配合が減る区については、小麦粉の配合量を調整して代替した(表1)。EP 飼料の粒径は6mmとした。試験期間中、同一の飼料を与える区と

表 1. 試験飼料の一般成分組成 (%)

| 項目 | 高脂質飼料 | 中脂質飼料 | 低脂質飼料 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| 湿物換算値 ※()内は乾物換算値 | | | |
| 水分 | 3.9 | 3.7 | 11.0 |
| 粗たんぱく質 | 46.8 (48.7) | 46.6 (48.4) | 43.7 (49.1) |
| 粗脂肪 | 20.3 (21.1) | 16.0 (16.6) | 11.7 (13.1) |
| 粗繊維 | 0.4 (0.4) | 0.3 (0.3) | 0.4 (0.4) |
| 粗灰分 | 9.3 (9.7) | 10.2 (10.6) | 8.5 (9.6) |
| 可溶無窒素物 | 19.3 (20.1) | 23.2 (24.1) | 24.7 (27.8) |
| 使用原料の組成 (%) | | | |
| 魚粉 | 58.0 | 57.0 | 56.0 |
| 大豆油粕 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| コーングルテンミール | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 小麦粉 | 14.0 | 19.0 | 24.0 |
| α -スターチ | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| 魚油 | 9.5 | 7.0 | 4.0 |
| 大豆油 | 5.0 | 3.5 | 2.5 |
| Panaford-P | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 第一リン酸カルシウム | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| ビタミン・ミネラル化合物 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 可消化エネルギー量(kcal/kg) | 4,270 | 4,000 | 3,595 |

して高脂質区、中脂質区、低脂質区を設けた。また、前半2か月間は低脂質飼料を与えた後に、後半2か月間は高脂質飼料を与える切換区を設けた。

給餌量は1.5%魚体重/日の制限給餌とし、各月の測定で得られた飼育魚の体重から1か月ごとに補正した。給餌は週6日とし1日1回、手撒きにより行った。週1日の無給餌日についても、成長率を計算する際の試験日数として含めて計数した。なお試験期間中、すべての試験区で残餌はなかった。

飼育試験は1,200Lの円型FRP水槽(実水量1,000L)を用いた。水質変化による成長や成熟への影響を防ぐため、注水しながら飼育水の循環ろ過を行う半閉鎖循環飼育を採用した。各試験区の飼育水槽には500Lの生物濾過槽(飼育前に硝化細菌等を含むろ過細菌を定着させたカキ殻を原料とするろ材120L)、循環ポンプ(34.7L/分、飼育水槽50回転/日)、紫外線殺菌装置を設置して、飼育排水をろ過して再利用するとともに、1分間に5Lの新たなろ過海水をUV殺菌して飼育水槽へ加えた(4.8回転/日)。飼育水温は生物濾過槽に設置した海水冷却器、およびヒーターで12°Cに保った。

供試魚は屋島庁舎内で継代したサツキマス親魚から採卵し、同所で種苗生産した1歳の種苗(平均体重 \pm 標準偏差; 115.4 \pm 17.3g)を用いた。各試験区100尾を試験に供し、VIソフトタグ(Northwest Marine Technology, Shaw Island, WA, 米国)を眼の後方の視認可能な透明な組織内に装着することで個体識別した。

試験終了まで1か月に一度の頻度で全個体に2-フェノキシエタノール麻酔(300ppm)を施し、尾叉長と体重を計測し、肥満度(式1)、瞬間成長率(Specific

Growth Rate, 式 2) を算出した。

$$\text{肥満度} = \text{体重} / \text{尾又長}^3 \times 1000 \quad (\text{式 1})$$

$$\text{瞬間成長率} (\% \text{day}^{-1}) = 100 \times ((\ln W_t - \ln W_0) / d) \quad (\text{式 2})$$

W₀: 前回測定時の体重 (g), W_t: 測定時の体重 (g), d: 試験日数

各月の測定時に各試験区からランダムに 16 尾を取り揚げて性別と生殖腺重量 (g) を測定し、雌雄別に生殖腺体指数 (GSI) を算出した (式 3)。成熟状況は、Oppedal *et al.* (1997) を参考に、雌では GSI が 0.30 以上、雄では 0.18 以上を成熟とみなした。さらに、試験開始時、2 か月後および試験終了時には筋肉中の脂質含量を測定するため、取上げた 16 尾を個別にフィーレ加工し冷凍保存した。この冷凍サンプルの中から、試験区毎に雌雄 4 個体のフィーレから皮と骨を除いた筋肉サンプルを調製し、ソックスレー法による脂質含量測定を行った。

$$\text{生殖腺体指数(GSI)} = \text{生殖腺重量} / \text{体重} \times 100 \quad (\text{式 3})$$

試験 2

適正脂質含量配合飼料における給餌率の検討 EP 飼料の給餌率の違いが成長と成熟へ与える影響を調べるため、飼育試験を屋島庁舎内において 2019 年 12 月 23 日から 2020 年 4 月 23 日までの 124 日間、自然日長下で行った。

試験区は、飼育魚体重量の 1% 量を与える区 (1% 量区)、1.5% 量を与える区 (1.5% 量区)、2% 量を与える区 (2% 量区)、および飽食量を与える区 (飽食区) を設けた。試験飼料には試験 1 の中脂質区の脂質含量に最も近い市販のサーモン養殖用 EP 飼料 (粗脂肪 17.0% 量, 粗たんぱく質 43.0%) を用いた。

供試魚は試験 1 と同様に、屋島庁舎で種苗生産した 1 歳のサツキマス種苗 (平均体重 ± 標準偏差; 271.4 ± 30.7g) を用い、各試験区 54 尾の筋肉中に個体識別用のマイクロチップ (1.4 φ × 8.0mm, 三卯養魚場) を挿入して用いた。水槽や水温等の飼育条件は、試験 1 と同様とした。

給餌は週 6 日とし 1 日 1 回、手撒きにより行った。飽食区以外の給餌量は、各月の測定で得られた飼育魚体重量を用いて 1 か月ごとに補正した。飽食区では、供試魚

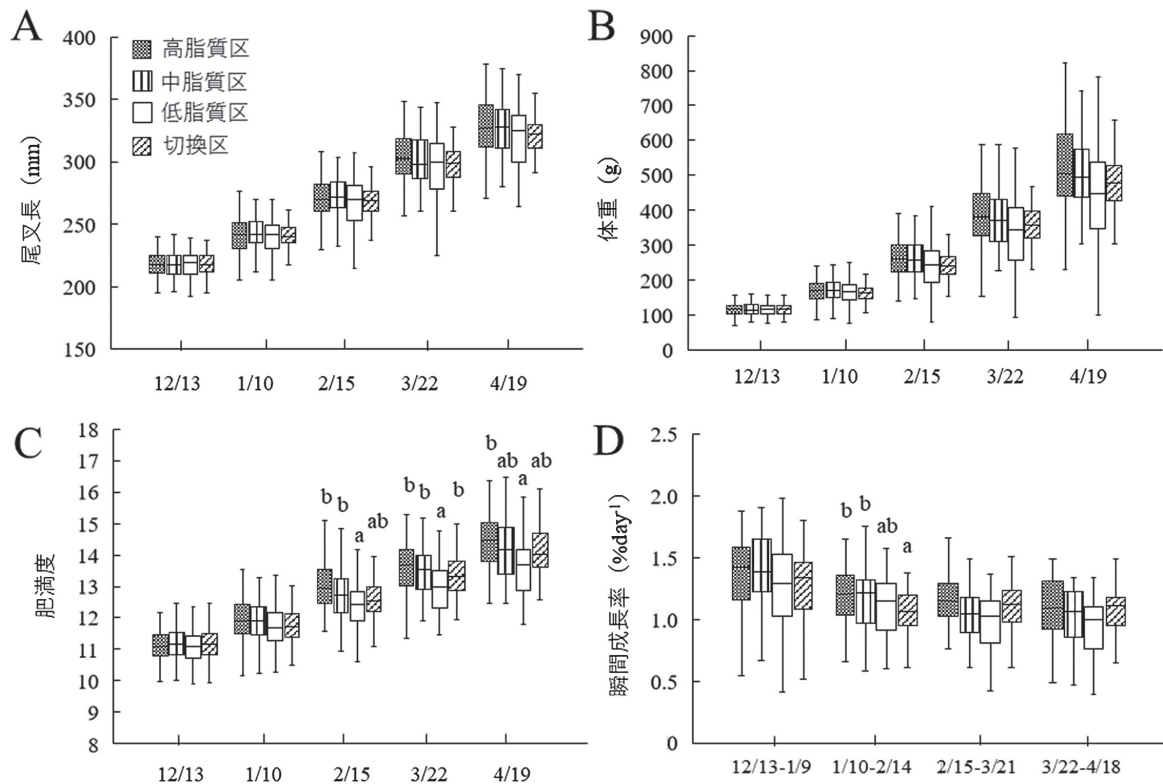


図 1. 異なる脂質含量の飼料を与えたサツキマスの成長

A: 尾又長 B: 体重 C: 肥満度 D: 瞬間成長率

* 異なる小文字のアルファベットは測定日ごと、または飼育期間ごとの試験区間の有意差を示す (Steel-Dwass 検定, $\alpha = 0.05$)。

A ~ C はボンフェローニ補正により $\alpha = 0.01$, D は $\alpha = 0.0125$ 。

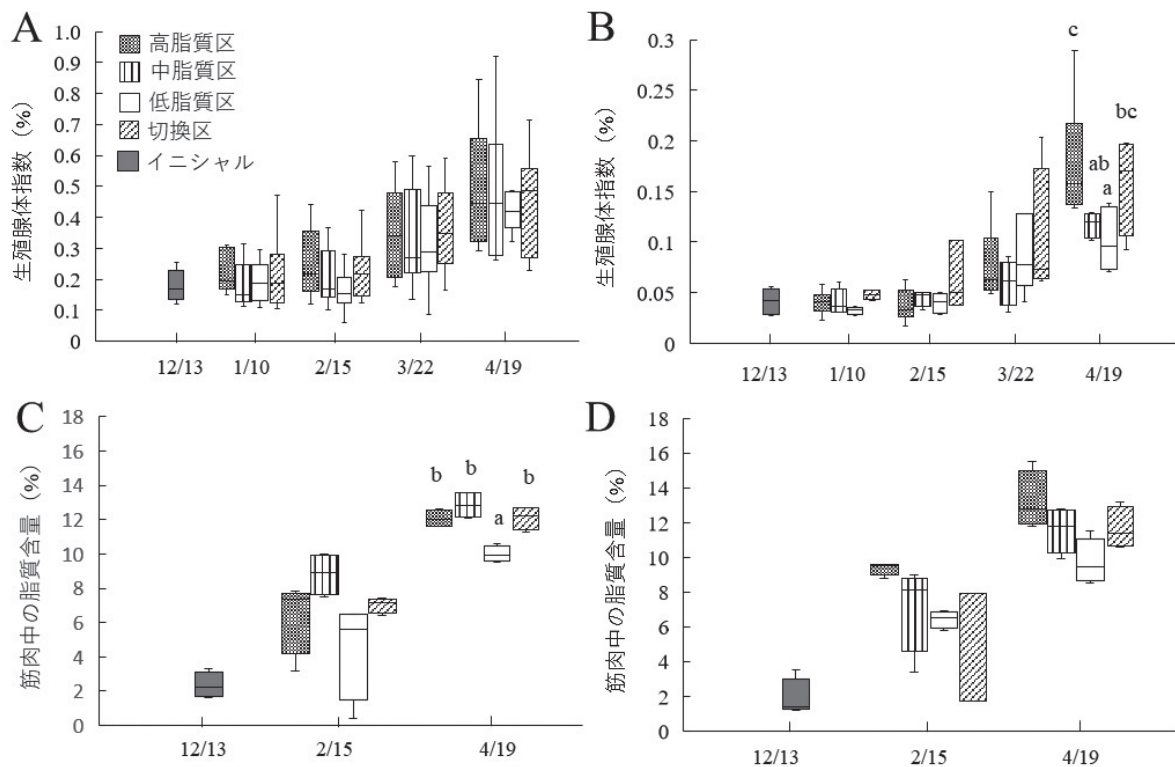


図2. 異なる脂質含量の飼料を与えたサツキマスの生殖腺体指数と筋肉中の脂質含量
 A: 雌の生殖腺体指数 B: 雄の生殖腺体指数 C: 雌の筋肉中の脂質含量 D: 雄の筋肉中の脂質含量
 * 異なる小文字のアルファベットは測定日ごとの試験区間の有意差を示す (Steel-Dwass 検定, $\alpha=0.05$).
 A・B はボンフェローニ補正により $\alpha=0.0125$, C・D は $\alpha=0.025$.

の摂餌が観察できなくなり残餌が生じるまで給餌し、毎日の給餌量を把握した。残餌は給餌終了から1時間後に水槽内から除去した。なお、試験期間中、飽食区以外の試験区では残餌はなかった。

試験期間中の全数測定は試験1と同様に行い、体重のばらつきを評価するための変動係数(式4)を算出した。さらに、試験期間中の総給餌量と増重量より増肉係数を求めた(式5)。

$$\text{変動係数 (\%)} = \text{体重の標準偏差} / \text{体重の平均値} \times 100 \quad (\text{式 4})$$

$$\text{増肉係数} = \text{期間給餌量} / \text{期間増重量} \quad (\text{式 5})$$

統計解析 尾叉長、体重、肥満度、瞬間成長率、生殖腺体指数、筋肉中の脂質含量について試験区間を比較する解析にはKruskal-Wallis検定を行い、post-hoc testとしてSteel-Dwass検定を行った。統計ソフトはエクセルアドインソフトStatcel4 (OMS出版、埼玉)を用い、いずれも $\alpha=0.05$ で検定を行った。有意水準の補正はBonferroni法により行った。

結果

試験1

配合飼料中の適正脂質含量の検討 試験期間を通じた各区の生残率は、高脂質区98%、中脂質区96%、低脂質区94%、切換区100%であった。試験終了時の尾叉長、体重は試験区間で差は認められなかったが、肥満度は高脂質区が最も大きく、続いて中脂質区、切換区、低脂質区の順となった(図1A, B, およびC)。瞬間成長率は、高脂質区と中脂質区の2カ月目(1/10～2/14)において低脂質区と比較して有意に高かった。試験飼料から得られる可消化エネルギーの量に対応して瞬間成長率が高い傾向は続き、切換区へ与える飼料が低脂質から高脂質に切り換わる3か月目(2/15～3/21)からは試験終了まで低脂質区で最も低くなった(図1D および表1)。

GSIは雌雄ともに、すべての試験区で経時的に高まった。雌では、試験終了時にはすべての試験区で成熟個体($GSI>0.30$)が出現し、有意差は認められないものの低脂質区でGSIは低かった(図2A)。雄では高脂質区およ

表 2. 異なる給餌率で飼育したサツキマスの増肉係数の比較

| 飼育期間 | 12/23-1/26 | | | | 1/27-2/27 | | | |
|-----------|------------|--------|--------|-------|-----------|--------|--------|-------|
| | 飽食区 | 2%量区 | 1.5%量区 | 1%量区 | 飽食区 | 2%量区 | 1.5%量区 | 1%量区 |
| 総給餌量 (g) | 10,638 | 10,573 | 7,856 | 5,207 | 10,803 | 11,376 | 7,663 | 4,364 |
| 平均給餌率 (%) | 2.6 | - | - | - | 2.3 | - | - | - |
| 増肉係数 | 1.19 | 1.15 | 1.20 | 1.20 | 1.39 | 1.52 | 1.31 | 1.54 |

| 飼育期間 | 2/28-3/23 | | | | 3/24-4/22 | | | |
|-----------|-----------|-------|--------|-------|-----------|-------|--------|-------|
| | 飽食区 | 2%量区 | 1.5%量区 | 1%量区 | 飽食区 | 2%量区 | 1.5%量区 | 1%量区 |
| 総給餌量 (g) | 8,860 | 8,638 | 5,522 | 2,762 | 9,181 | 7,311 | 4,304 | 1,838 |
| 平均給餌率 (%) | 2.5 | - | - | - | 3.2 | - | - | - |
| 増肉係数 | 1.85 | 1.39 | 1.48 | 1.61 | 3.02 | 1.58 | 1.42 | 1.40 |

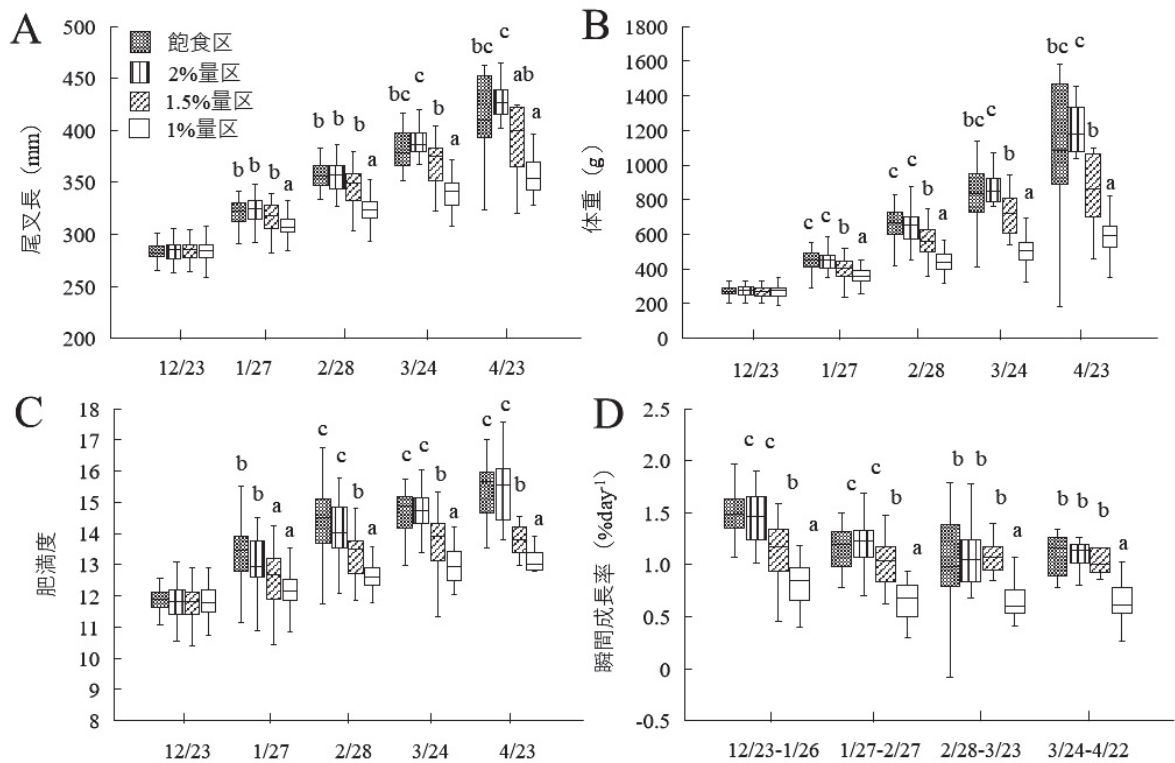


図 3. 異なる給餌率で飼育したサツキマスの成長

A: 尾叉長 B: 体重 C: 肥満度 D: 瞬間成長率

* 異なる小文字のアルファベットは測定日ごと, または飼育期間ごとの試験区間の有意差を示す (Steel-Dwass 検定, $\alpha=0.05$)。A ~ C はボンフェローニ補正により $\alpha=0.01$, D は $\alpha=0.0125$ 。

び切换区で有意に高く成熟個体 (GSI>0.18) が出現したが、中脂質区と低脂質区では成熟個体は出現しなかった (図2B)。

筋肉中の脂質含量は、いずれの試験区も雌雄ともに試験期間を経て増加した。試験終了時の雌では低脂質区で他の試験区と比較して有意に低く、雄においても同様の傾向が認められた (図2C および D)。

試験2

適正脂質含量配合飼料における給餌率の検討 試験期間中の生残率は、1%量区が92.3%、1.5%量区が97.4%、2%量区が97.4%、飽食区が100%となり、給餌率の違いにより差はなかった。飽食区の1か月間の平均給餌率は、2.3~3.2%となり (表2)、日々の給餌量は試験区の中で最も多かった。

試験終了時の尾叉長、体重、肥満度ともに、飽食区と2%量区が最も大きく、続いて1.5%量区、1%量区の順となった (図3A, B, およびC)。試験期間中の体重における瞬間成長率は、試験開始1カ月目 (12/23~1/26) から飽食区と2%量区で有意に成長が良く、続いて1.5%量区、1%量区の順となった。この傾向はその後も続くが、試験開始3カ月目 (2/28~3/23) では1.5%量区の成長率

が飽食区と2%量区と同等になった (図3D)。また、変動係数で体重のばらつきを見ると、飽食区で最も大きく、続いて1%量区、1.5%量区となり、2%量区で最も小さく、その差は試験期間が長くなるほど広がった (図4)。

試験終了時には、雌ではすべての試験区で成熟個体 (GSI>0.30) が出現し、有意差はないが給餌率が低いほど成熟を開始した個体が多かった。雄では、唯一飽食区で成熟個体 (GSI>0.18) が出現した (図5)。

1か月ごとの増肉係数は、試験区間で傾向が認められなかったが、4か月間の試験期間の増肉係数は、飽食区で最も大きく1.53、次いで1%量区が1.43、2%量区が1.38、1.5%量区が1.37であった (表2)。

考察

養殖にとって成長は最も重要な要素である。そのため、魚種ごとに成長に適した飼料の開発が進められている。魚類では利用可能なエネルギー源として飼料に脂質を多く必要とする (竹内 2009)。サケ科魚類では脂質の添加量が多いほど成長が良い傾向が認められている (太田ら 1979, Johansen *et al.* 2003)。消化吸収の高い脂質を用いて飼料中の可消化エネルギー含量を増加させることにより、タンパク質の代謝エネルギーへの利用が抑制され、結果的に飼料中のタンパク質量を減じることが可能となる。これは、脂質によるタンパク質節約効果 (protein sparing effect) と呼ばれている (竹内 2009)。本研究においても、小麦粉を用いて脂質含量の異なる飼料間でタンパク質量を代替した飼料を給餌した場合、飼料中の脂質含量が多いほど成長が良く、既往知見と一致した。

また、本研究では低脂質飼料から高脂質飼料に切り換えた切换区において、切り換え後に成長が高まった。これは摂取エネルギーの改善による補償成長と考えられ、タイセイヨウサケ (Johansen *et al.* 2001, Rørvik *et al.* 2018)

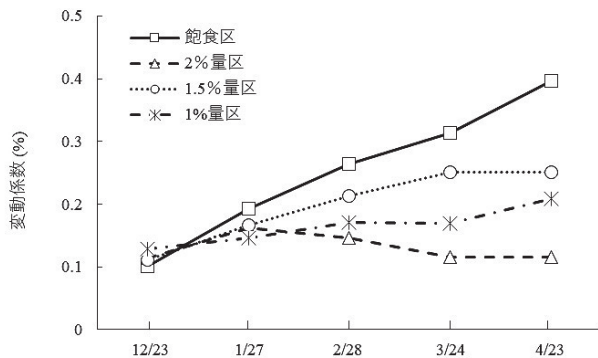


図4. 異なる給餌率で飼育したサツキマスの体重の変動係数

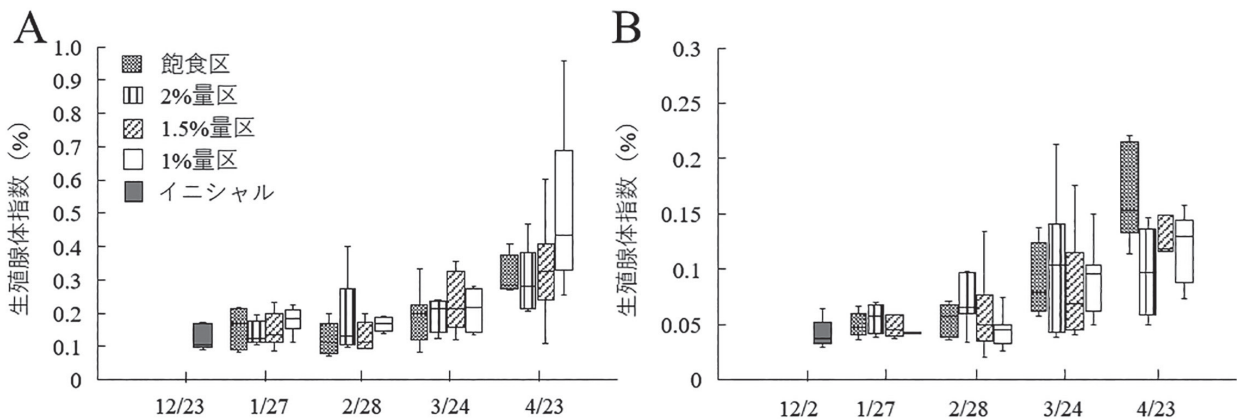


図5. 異なる給餌率で飼育したサツキマスの生殖腺体指数 (GSI)

A: 雌の生殖腺体指数 B: 雄の生殖腺体指数

* ボンフェローニ補正により $\alpha=0.0125$ 。

でも認められている。一方、過剰な脂質の添加は、成長停滞など養殖魚に悪影響を与えることが知られている(竹田ら1975, 竹内ら1978, Takeuchi *et al.* 1991, Silverstein *et al.* 1999, Ogata and Shearer 2000)。本研究における飼料中の脂質含量(11.7~20.3%)の範囲では、体重の1.5%量の給餌条件において成長停滞は認められなかった。

飼料中の脂質含量が成熟に与える影響については、サケ科魚類では体脂肪の蓄積が成熟開始の引き金となる可能性が示唆されてきた(Simpson 1992; Hillestad *et al.* 1998; Silverstein *et al.* 1997, 1998, 1999; Shearer *et al.* 2006; Norrgård *et al.* 2014)。筋肉中に蓄積されなかった脂質は、内臓脂肪として体内に蓄えられる(竹田ら1975, 韓・古市1995, Ogata and Shearer 2000)。脂肪細胞からレプチンが分泌され、体内エネルギーの貯蔵量を生殖系に伝える役割を果たし、魚類の成熟開始のタイミング決定に直接的な影響を与えることが近年明らかとなった(Ohga *et al.* 2021)。本研究では、異なる脂質含量の飼料を給餌した場合、飼料中の脂質含量が多いほど、筋肉中の脂質含量が高い傾向を示した。さらに、試験終了時のGSIを見ると、雌ではすべての区で成熟を開始した個体(GSI>0.30)が出現したが、低脂質区では低い傾向にあった。雄では高脂質区で有意に高く成熟個体(GSI>0.18)が出現したが、中脂質区と低脂質区では成熟個体は出現しなかった。このことから、脂質含量が多い飼料を給餌するほど、体内に脂肪が蓄積しやすく、既往試験の通り成熟が進むことがわかった。

雄では、中脂質区と切換区で筋肉中の脂質含量が同程度であったが、GSIは高脂質飼料を与えた切換区で高く、成熟個体が出現した。これは、タイセイヨウサケを用いた研究(Hillestad *et al.* 1998)において、脂質含量の高い飼料(30%量)を与えると筋肉中の脂質含量は増加しないが、成熟率は高まった結果と一致する。これらのことから、サツキマスでは、脂質含量20%量の高脂質飼料の摂取は、体内の脂質蓄積に影響し短期間で雄の生殖腺の発達を促す可能性が示唆された。

一方、雌では卵サイズに代表される繁殖形質は、繁殖年齢以前の0+齢の体サイズと負の相関を示す(Kikko *et al.* 2008)。つまり、1+齢で本試験を開始するまでの成長が、既に卵巣の発達に影響しており、試験区間の成熟状況に差が認められなかった可能性が考えられた。このため、飼料中の脂質含量が雌の成熟に与える影響については、更なる研究が必要である。

サケ科魚類養殖では、成熟によって生産物の品質(Aksnes *et al.* 1986)や生産性(McClure *et al.* 2007)の低下が引き起こされることから問題となっている。一方、生産物の品質はフィード中の脂肪分、筋肉の色、テクスチャーによって評価され(Sigurgisladdottir *et al.* 1997)、一般的に脂質含量の高い生産物が良いとされる(Mørkøre *et al.* 2001)。特に成熟に向かう雄は体サイズが大きいことが知られており(Simpson 1992, Leclercq *et al.* 2010)、

大型に成長しやすい雄の成熟を抑制しながら筋肉中の脂質含量を高める技術が望まれている。海水での養殖期間の長いタイセイヨウサケでは、早春に給餌制限を行うことで成熟を抑制できることが知られている(Thorpe *et al.* 1990, Rowe and Thorpe 1990)。しかし、サツキマスのように飼育期間が半年未満の短い種では、制限給餌を行うと商品サイズが小さくなり、生産物の価値が下がる懸念がある。本研究では、成長が良く、特に雄の成熟を抑制しながら筋肉中の脂質含量を高めることが可能な脂質含量16.0%の飼料がサツキマスの海水養殖には適していると考えられた。

また、最適脂質含量に最も近い市販のEP飼料(17.0%)を用いて、最適給餌率について検討した結果、給餌量が多いほど成長が速く、体サイズが大型化した。実験1と2では供試魚の年齢は同じでも体サイズに違いがある。しかし、ほぼ同一の給餌条件である実験1の中脂質区と実験2の1.5%量区の瞬間成長率は同程度の範囲に示されている。タイセイヨウサケとニジマスにおける最適給餌率は、体重150-600gと幅広い範囲においても同一条件であることが示されている(Austreng *et al.* 1987)。このため、本研究における種苗の体サイズによる最適給餌率への影響は無視できると仮定した。

体重の大小差は飽食区で最も大きく、続いて1%量区、1.5%量区となり、2%量区で最も小さかった。タイセイヨウサケでは給餌時に飼料を独占する個体には成熟魚が多いこと(Kadri *et al.* 1996)、ニジマスでは給餌量を制限すると個体の摂餌機会が均一ではなく成長が不均一になること(Jobling and Koskela 1996)が示されている。このように飽食区では大型魚と小型魚の摂餌状況が個体間で大きく異なったため、成長がさらに不均一となり、一部の大型化した個体が成熟に向かったと考えられた。一方で、2%量区では個体の体格差は少なく、全ての個体が出荷サイズである尾叉長400mm、体重1kgを超えた。このことから、飼育重量の2%量の給餌量は飼育個体に飼料が十分に行き渡る適切な給餌率であったと推察された。

本研究において、試験終了時の雌の成熟状況を見ると、1%量区においてGSIが高い傾向であった。雌の成熟開始には一定の体サイズ到達や成長率の経験が必要(Kadri *et al.* 1995, Morita and Fukuwaka 2006, Morita and Nagasawa 2010)であることが一般的に知られている。しかし、本研究における1%量区の雌の体サイズは、設けた試験区の中で最も小さく、既往知見で示されている成長と成熟開始の関係とは一致が認められなかった。これについては、今後サンプル数を増やすなどして検討を加えることが必要である。一方、雄では飼料中の脂質含量が低い場合でも、給餌率が高く、総摂取エネルギー量が高い場合には高脂質飼料を摂取した場合と同等に成熟率が高まること(Norrgård *et al.* 2014)がタイセイヨウサケで示されている。本研究では、有意差は認められなかったが、総摂取エネルギー量が高い飽食区において雄のGSIが高い傾向が示されており、既往知見を支持する結果が得ら

れている。さらに、異なる脂質含量の飼料を体重の1.5%を与えた際に、高い可消化エネルギーを摂取する高脂質区において雄のGSIが有意に高まったことから、総摂取エネルギー量と雄のGSIが高まる関係はサツキマスにおいても矛盾しないと考えられた。

これらの結果から、EP飼料を用いてサツキマスを養殖するには、脂質含量が約16%の飼料を用い、飼育重量の2%量を給餌することが成熟の抑制と成長促進を両立し、さらに個体間のばらつきの低減に繋がる最適な給餌条件であると考えられた。

飼料コストの削減はサケ科魚類養殖において産業上重要な課題である。本研究での最適な給餌率である2%量区において、試験期間を通じて使用した飼料積算量は飽食区に比べて4.0%の削減量に留まった。さらなる削減に向けて、決められた給餌量を与える際の回数(Sun *et al.* 2016)についても検討が必要である。また、2%量区の増肉係数から、魚体が大きく成長する4カ月目において与えた飼料が効率的に利用されていないことが明らかとなった。これは、成長にともなう体サイズの変化によって最適な給餌量は変化する(Austreng *et al.* 1987, Handeland *et al.* 2008)可能性が考えられた。

陸上養殖は、飼育環境の制御により成長に適した環境の創出と維持が可能である。サーモンの陸上養殖では、淡水で飼育したスマルト種苗を海水へ移行する際に水温が上昇すると雄の成熟を招くことがタイセイヨウサケを用いた研究で知られている(Imsland *et al.* 2014, Martinez *et al.* 2023)。このため本研究では、水温変化が成熟に影響することを防ぐため、供試するサツキマスのスマルト種苗生産終了時から飼育試験時にかけて水温は12°Cで一定に固定した。しかし、飼料中の脂質含量の試験と給餌率の試験の双方において、雌雄ともに経時的な成熟の進行が認められた。一方、水温以外に、光周期の長日化がサケ科魚類の成熟に影響することが知られている(Takashima and Yamada 1984, Duncan *et al.* 1999, Fjelldal *et al.* 2011)。そのため、本研究において採用した自然日長の光周期は、試験開始時の短日(12月)から春分の日を挟み長日化へ向かう過程にあった。そのため、この長日化が、供試魚の成熟の進行を招いた可能性が考えられる。今後はサツキマスの海水養殖において春以降の成熟進行を抑制する光周期条件の解明が行われることが、陸上養殖における高度な成長と成熟管理を達成する上で望まれる。循環式を利用した陸上養殖では、飼育の進行にともなう飼育系内への汚濁負荷源の蓄積を低減し、水質を長期間安定化させることが課題として挙げられる。本研究から得られたサツキマスの最適給餌条件は、水槽内に発生する残餌量や排泄物量の低減による水質の安定化、また増肉係数の低減による生産コストの圧縮に寄与する知見になると考えられる。今後は、飼育魚の摂餌活性に合わせて給餌を自動的かつ最適に行えるAIを活用した給餌技術も今後必要になると考えられる。

謝 辞

本研究は生研支援センター「[知]の集積と活用」による研究開発モデル事業(「革新的技術を集約した次世代型閉鎖循環式陸上養殖生産システムの開発と日本固有種サクラマス類の最高級ブランドの創出」)の支援を受けて行った。本事業の採択にあたり(国研)水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所屋島庁舎の山本義久グループ長(当時、現水産大学校)には申請書の取り纏めにご尽力いただいた。本研究を実施するにあたり東京大学大学院農学生命科学研究科の金子豊二教授(当時)には測定項目について有益なご助言をいただいた。本研究を進めるにあたり(国研)水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所屋島庁舎の手塚信弘グループ長(当時、現宮津庁舎)、赤松一枝氏、大西富三氏には飼育作業のお手伝いをいただいた。また、本論文をとりまとめるにあたりマルハニチロ(株)増養殖事業部の濱崎祐太氏、(国研)水産研究・教育機構水産技術研究所宮古庁舎の清水大輔グループ長、東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科の遠藤雅人准教授には有益なご助言をいただいた。ここに記し深謝する。

文 献

- Aksnes A, Gjerde B, Roald SO (1986) Biological, chemical and organoleptic changes during maturation of farmed Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture*, **53**, 7-20.
- Austreng E, Storebakken T, Åsgård T (1987) Growth rate estimates for cultured Atlantic salmon and Rainbow trout. *Aquaculture*, **60**, 157-160.
- Duncan N, Mitchell D, Bromage N (1999) Post-smolt growth and maturation of out-of-season 0+ Atlantic salmon (*Salmo salar*) reared under different photoperiods. *Aquaculture*, **177**, 61-71.
- Fjelldal PG, Hansen T, Huang T (2011) Continuous light and elevated temperature can trigger maturation both during and immediately after smoltification in male Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, **321**, 93-100.
- Good C, Davidson J (2016) A review of factors influencing maturation of Atlantic salmon, *Salmo salar*, with focus on water recirculation aquaculture system environments. *J world aquac soc.*, **47**, 605-632.
- 韓 慶男・古市政幸 (1995) 飼料脂質含量がトラフグの成長、飼料効率および体成分に与える影響。九大農学芸誌, **50**, 25-29.
- Handeland SO, Imsland AK, Stefansson SO (2008) The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture*, **283**, 36-42.

- Hillestad M, Johnsen F, Austreng E, Åsgård T. (1998) Long-term effects of dietary fat level and feeding rate on growth, feed utilization and carcass quality of Atlantic salmon. *Aquac Nutr.*, **4**, 89-97.
- Imsland AK, Handeland SO, Stefansson SO (2014) Photoperiod and temperature effects on growth and maturation of pre- and post-smolt Atlantic salmon. *Aquac. Int.*, **22**, 1331-1345.
- Jobling M, Koskela J (1996) Interindividual variations in feeding and growth in Rainbow trout during restricted feeding and in a subsequent period of compensatory growth. *J. fish biol.*, **49**, 658-667.
- Johnsen SJS, Ekli M, Stangnes B, Jobling M (2001) Weight gain and lipid deposition in Atlantic salmon, *Salmo salar*, during compensatory growth: evidence for lipostatic regulation? *Aquac. Res.*, **32**, 963-974.
- Johnsen SJS, Sveier H, Jobling M (2003) Lipostatic regulation of feed intake in Atlantic salmon *Salmo salar* L. defending adiposity at the expense of growth? *Aquac. Res.*, **34**, 317-331.
- Kadri S, Metcalfe NB, Huntingford FA, Thorpe JE (1995) What controls the onset of anorexia in maturing adult female Atlantic salmon? *Funct Ecol.*, **9**, 790-797.
- Kadri S, Mitchell DF, Metcalfe NB, Huntingford FA, Thorpe JE (1996) Differential patterns of feeding and resource accumulation in maturing and immature Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture*, **142**, 245-257.
- Kikko T, Harada Y, Takeuchi D, Kai Y (2008) Interpopulation variation in egg size of fluvial White-spotted charr *Salvelinus leucomaenis*. *Fish. Sci.*, **74**, 935-937.
- 熊谷 明 (2015) 第2章海面養殖 ギンザケ. 養殖ビジネス臨時増刊号「2015年版よくわかる!日本の養殖業」(秋元 理編). **52**, 66-70.
- Leclercq E, Taylor JF, Hunter D, Migaud H (2010) Body size dimorphism of sea-reared Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): Implications for the management of sexual maturation and harvest quality. *Aquaculture*, **301**, 47-56.
- Leitritz E (1959) Trout and Salmon Culture (Hatchery Methods). *Calif. Dept. Fish and Game, Fish. Bull.*, **107**, 169p.
- Martinez EP, Balseiro P, Stefansson SO, Kaneko N, Norberg B, Fleming MS, Imsland AKD, Handeland SO (2023) Interaction of temperature and feed ration on male postsmolt maturation of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*, **562**, 738877.
- McClure CA, Hammell KL, Moore M, Dohoo IR, Burnley H (2007) Risk factors for early sexual maturation in Atlantic salmon in seawater farms in New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Aquaculture*, **272**, 370-379.
- Morita K, Fukuwaka M (2006) Dose size matter most? The effect of growth history on probabilistic reaction norm for salmon maturation. *Evolution*, **60**, 1516-1521.
- Morita K, Nagasawa T (2010) Latitudinal variation in the growth and maturation of Masu salmon (*Oncorhynchus masou*) parr. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **67**, 955-965.
- Mørkøre T, Vallet JL, Cardinal M, Gomez-Guillen MC, Montero P, Torrissen OJ, Nortvedt R, Sigurgisladdottir S, Thomassen MS (2001) Fat content and fillet shape of Atlantic Salmon: Relevance for processing yield and quality of raw and smoked products. *J. food sci.*, **66**, 1348-1354.
- Nagahama Y, Adachi S, Tashiro F, Grau EG (1982) Some endocrine factors affecting the development of seawater tolerance during the parr-smolt transformation of the Amago salmon, *Oncorhynchus rhodurus*. *Aquaculture*, **28**, 81-90.
- Norrgård JR, Bergman E, Greenberg LA, Schmitz M (2014) Effects of feed quality and quantity on growth, early maturation and smolt development in hatchery-reared landlocked Atlantic salmon *Salmo salar*. *J. Fish Biol.*, **85**, 1192-1210.
- Ogata HY, Shearer KD (2000) Influence of dietary fat and adiposity on feed intake of juvenile red sea bream *Pagrus major*. *Aquaculture*, **189**, 237-249.
- Ohga H, Ito K, Kakino K, Mon H, Kusakabe T, Lee JM, Matsuyama M (2021) Leptin is an important endocrine player that directly activates gonadotropic cells in teleost fish, chub mackerel. *Cells*, **10**, 3505.
- 太田 亨・高木 徹・小田島玲子・寺尾俊郎 (1979) ギンザケ (*Oncorhynchus kisutch*) の成長と脂質におよぼす飼料脂質の影響. 北大水産彙報, **34**, 294-300.
- Oppedal F, Taranger GL, Juell J-E, Fossecidengen JE, Hansen T (1997) Light intensity affects growth and sexual maturation of atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolts in sea cages. *Aquat. Living Resour*, **10**, 351-357.
- Rowe DK, Thorpe JE (1990) Suppression of maturation in male Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr by reduction in feeding and growth during spring months. *Aquaculture*, **86**, 291-313.
- Rørvik K-A, Dessen J-E, Åsli M, Thomassen MS, Hoås KG, Mørkøre T (2018) Low body fat content prior to declining day length in the autumn significantly increased growth and reduced weight dispersion in farmed Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Aquac. Res.*, **49**, 1944-1956.
- Shearer K, Parkins P, Gadberry B, Beckman B, Swanson P (2006) Effects of growth rate/body size and a low lipid diet on the incidence of early sexual maturation in juvenile male spring Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Aquaculture*, **252**, 545-556.
- Sigurgisladdottir S, ØTorrissen O, Lie Ø, Thomassen M, Hafsteinsson H (1997) Salmon quality: Methods to determine the quality parameters. *Rev. fish. Sci. Aquac.*, **5**, 223-252.

- Silverstein JT, Shimma H, Ogata H (1997) Early maturity in Amago salmon (*Oncorhynchus masu ishikawae*): an association with energy storage. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **54**, 444-451.
- Silverstein JT, Shimma H, Ogata H (1998) Effects of growth and fatness on sexual development of Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) parr. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**, 2376-2382.
- Silverstein J, Sheare KD, Dickhoff WW, Plisetskaya EM (1999) Regulation of nutrient intake and energy balance in salmon. *Aquaculture*, **177**, 161-169.
- Simpson AL (1992) Differences in body size and lipid reserves between maturing and nonmaturing Atlantic salmon parr, *Salmo salar* L. *Can. J. zool.*, **70**, 1737-1742.
- St-Hilaire S, Ribble C, Whitaker DJ, Kent M (1998) Prevalence of Kudoa thyrssites in sexually mature and immature pen-reared Atlantic Salmon (*Salmo salar*) in British Columbia, Canada. *Aquaculture*, **162**, 69-77.
- Sun G, Liu Y, Qiu D, Yi M, Li X, Li Y (2016) Effects of feeding rate and frequency on growth performance, digestion and nutrients balances of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquac. Res.*, **47**, 176-188.
- Takashima F and Yamada Y (1984) Control of maturation in masu salmon by manipulation of photoperiod. *Aquaculture*, **43**, 243-257.
- 竹田正彦・示野貞夫・細川秀毅・梶山英俊・会所建志 (1975) ハマチの成長, 飼料効率および体成分に及ぼす飼料のカロリー・蛋白質比の影響. 日水誌, **41**, 443-447.
- 竹内俊郎・横山雅仁・渡辺 武・荻野珍吉 (1978) ニジマス飼料の最適エネルギー・タンパク質比. 日水誌, **44**, 729-732.
- Takeuchi T, Shiina Y, Watanabe T (1991) Suitable protein and lipid level in diet for fingerlings of red sea bream *Pagrus major*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 293-299.
- 竹内俊郎 (2009) 4. 魚類の栄養と栄養素に対する要求 4.3 脂質. 改訂魚類の栄養と飼料 (渡邊 武編), 恒星社厚生閣, 東京, 115-135.
- Thorpe JE, Talbot C, Miles MS, Keay DS (1990) Control of maturation in cultured Atlantic salmon, *Salmo salar*, in pumped seawater tanks, by restricting food intake. *Aquaculture*, **86**, 315-326.
- 坪井潤一 (2014) さげます情報 サケ科魚類のプロファイル- 12 サツキマス・アマゴ, **8**, 38-41.
- 海野徹也・清家 暁・大竹二雄・西山文隆・柴田恭宏・中川平介 (2001) 耳石微量元素分析による広島県太田川サツキマスの回遊履歴の推定. 日水誌, **67**, 647-657.
- 養殖ビジネス編集部 (2019) 新規参入が相次ぐ海面トラウトとご当地サーモン全国マップ. 養殖ビジネス臨時増刊号「よくわかる! ジャパンサーモン養殖」(秋元 理編), **56**, 18-20.