

(1) トラウトサーモン共同研究事業

桑野 晓（企画・先端研究部）
仲野 大地・安田 政一（海洋資源研究センター）

1 目的

福井県では平成27年から大型円形生簀等を使用したニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) の海面養殖が行われており、400トンの生産目標を掲げ「ふくいサーモン®」として販売されている。淡水で1年近くかけて育成された種苗は、海水温が低下する冬から春までのおよそ半年間は海面で養殖されて出荷される。淡水から海水に移行させる海水馴致の技術がトラウトサーモン養殖を成功させるための大きな課題のひとつであり、馴致時のストレスはその後の成長や生残に影響を与えて生産量を大きく左右するといわれている。

そこで、この課題の解決を図るため、令和2年度から福井中央魚市株式会社（以下、「中央魚市」という）、国立大学法人東京大学、学校法人東洋大学、公立大学法人福井県立大学および福井県水産試験場等で「サケマス養殖技術共同研究コンソーシアム」を結成し、共同研究を実施している。

共同研究では、①サケマスの海水馴致時ストレスマーカーの確立、②海面養殖の効率性に影響を与えるストレス要因の探索、③サケマスのストレス軽減につながる育成・馴致技術の開発の3課題に取り組み、日本の環境におけるサケマス類の海水馴致ストレスの評価手法を確立し、海水移行後の生産効率向上を実現する養殖技術の開発を目指している。ここでは、福井県水産試験場が担当した、課題②のうち「海水馴致条件毎の摂餌行動の評価」および課題③のうち「中間育成時の電照コントロールによる育成手法の検討」の結果について報告する。

2 方法

1) 中間育成時の電照コントロールによる育成手法の検討

(1) 供試魚

福井県大野市宝慶寺にある中央魚市の淡水養魚施設（以下、「宝慶寺サーモンベース」という。）でふ化・育成された0歳ニジマス稚魚（リバレンス社由来のスチールヘッド）を令和5年7月23日に活魚車で福井県水産試験場海洋資源研究センター（福井県敦賀市浦底23-1）に搬送した。供試魚の被鱗体長（以下、「体長」または「BL」という）、魚体重（以下、「BW」ともいう）の平均値±標準偏差は、それぞれ 149.87 ± 12.40 mm, 55.2 ± 13.6 g であった（n = 64）。

(2) 海水経験処理

20トンのコンクリート水槽内に1トンのポリカーボネート水槽2基を設置した。20トンの水槽内に淡水をかけ流して注水し、ウォーターバス形式で1トンの水槽の水温変化を防ぐようにした。1トン水槽には300Lの淡水を満たし、水槽が浮かないように20トン水槽の水位を調整した。また、別のポリカーボネート水槽に人工海水マリンソルト（株式会社カイスイマレン）を用いて900Lに希釈したときに塩分20%になるように人工海水を調製し、同様にウォーターバス形式で水温を調整した。

1トンの各水槽に216尾の供試魚を入れ、一方の水槽には前述した人工海水を約100Lずつ10分間隔で添加し、合計で約600Lを添加した。もう一方の水槽には、同様に淡水を約600L添加した。添加終了後から24時間後まで供試魚を1トン水槽内で管理した。塩水を添加した水槽を「海水経験区」、淡水を添加した水槽を「対照区」とした。1トン水槽での管理時は、各水槽に酸素の供給とプロワーによる通気をおこなった。また、定期的に各水槽の水温、塩分、溶存酸素濃度を多項目水質計（YSI Pro2030 DO/EC メーター、ザイレムジャパン株式会社）により測定した。

(3) 試験区の設定

(2) で処理した海水経験区と対照区の供試魚を各100尾ずつコンクリート水槽（3.5×1.8×0.9 m）4面に収容した。各水槽には、自然日長に合わせて電照時間を変化させる自然日長区と1日のうち14時間電照を行う電照区を設定した。つまり、海水経験の有無と自然日長または14時間電照の組み合わせにより、合計4区の試験区を設定した。各試験区名は、「対照区」、「電照区」、「海水経験電照区」および「海水経験区」とした（表1）。収容後は、水量を約4トンに調整して淡水（河川水）をかけ流しで注水し、プロアによる通気を行った。

使用したコンクリート水槽は窓のない屋内に設置してあるため、各水槽には蛍光灯による照明を施し、実際の日の出・日没時間に合わせて定期的に点灯時間を調整して自然光の代わりとした。加えて、電照区ではLEDランプ（ハタヤ社 LEW-5 全光束 810Lm）2個を設置し、それぞれ設定した日長時間に合わせて点灯した（図1,2）。なお、隣の試験水槽に光が漏れないよう、各水槽の横および前面に遮光幕を設置した。

表1 試験区の条件

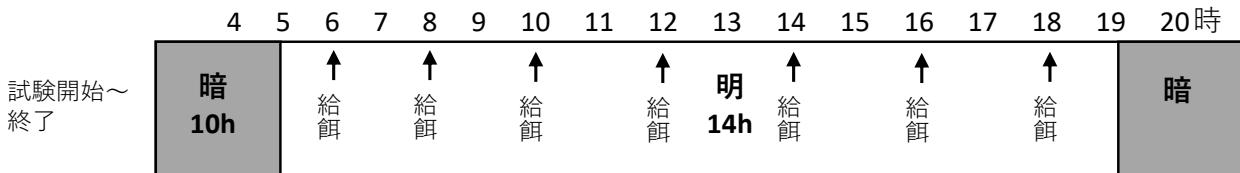
| | 対照区 | 電照区 | 海水経験電照区 | 海水経験区 |
|----------|------|--------|---------|-------|
| 電照コントロール | × | 14時間電照 | 14時間電照 | × |
| 海水経験 | × | × | ○ | ○ |
| 尾数 | 100尾 | 100尾 | 100尾 | 100尾 |

（4）飼育管理

飼料は、市販のマス用配合飼料（フィード・ワン（株）鱒パフクリーン d3～d5）を魚の成長に応じて与えた。給餌は、電照区では6～18時のあいだ2時間おきに計7回、対照区では同様に8～16時のあいだに計5回、自動給餌器（福伸電機製 PFX-60LS）を使用して、できるだけ水底に食べ残しが出ないよう適宜給餌量を調整しながら毎日行った（図2）。

各水槽は、原則15回転/日以上の換水率となるよう河川水を注水し、底部排水とした。底掃除は、餌の食べ残しが多かった時以外は行わなかった。また、全ての試験水槽には、自動式水温記録計（HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger）を設置し、水温を1時間毎に記録した。また、多項目水質計（YSI Pro2030 DO/EC メーター、ザイレムジャパン株式会社）により平日の8時半頃と16時の給餌直後に水温と溶存酸素量を測定した。

【14時間電照区】



【対照区】

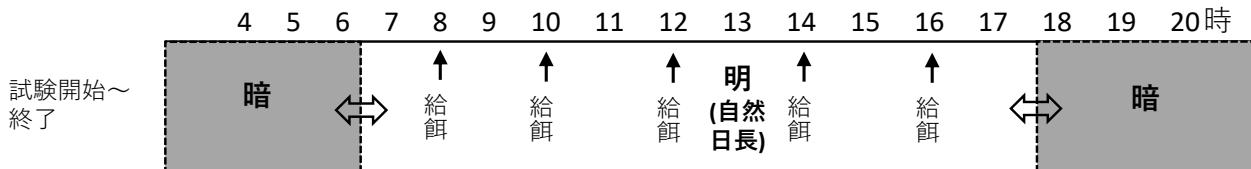


図1 各試験区の電照条件設定

（5）試験魚の測定

令和6年8月20日、9月24日、10月24日および11月28日に各試験区の供試魚にFA100（物産アニマルヘルス株式会社）を用いて麻酔処理をした後、各試験区の約50-60尾の体長と魚体重を測定した。また、各試験区の全数の計数と総重量を測定した。試験終了時には、各試験水槽内の生残魚を計数し、生残率を求めた。また、Feed Conversion Ratio（以下、「FCR」という）を次式により算出した。

$$(FCR) = (\text{総給餌量}) / (\text{試験終了時の魚総重量} + \text{期間中の斃死魚総重量} - \text{試験開始時の魚総重量})$$

共同研究機関である東京大学の分析用の標本を採取するため、測定時には各試験区から毎回6尾をランダムに選択して鰓を採取した。そのため、毎回の測定時に6尾ずつ各試験区の飼育個体数が減少した。この減少分について、生残率の計算から除いた。

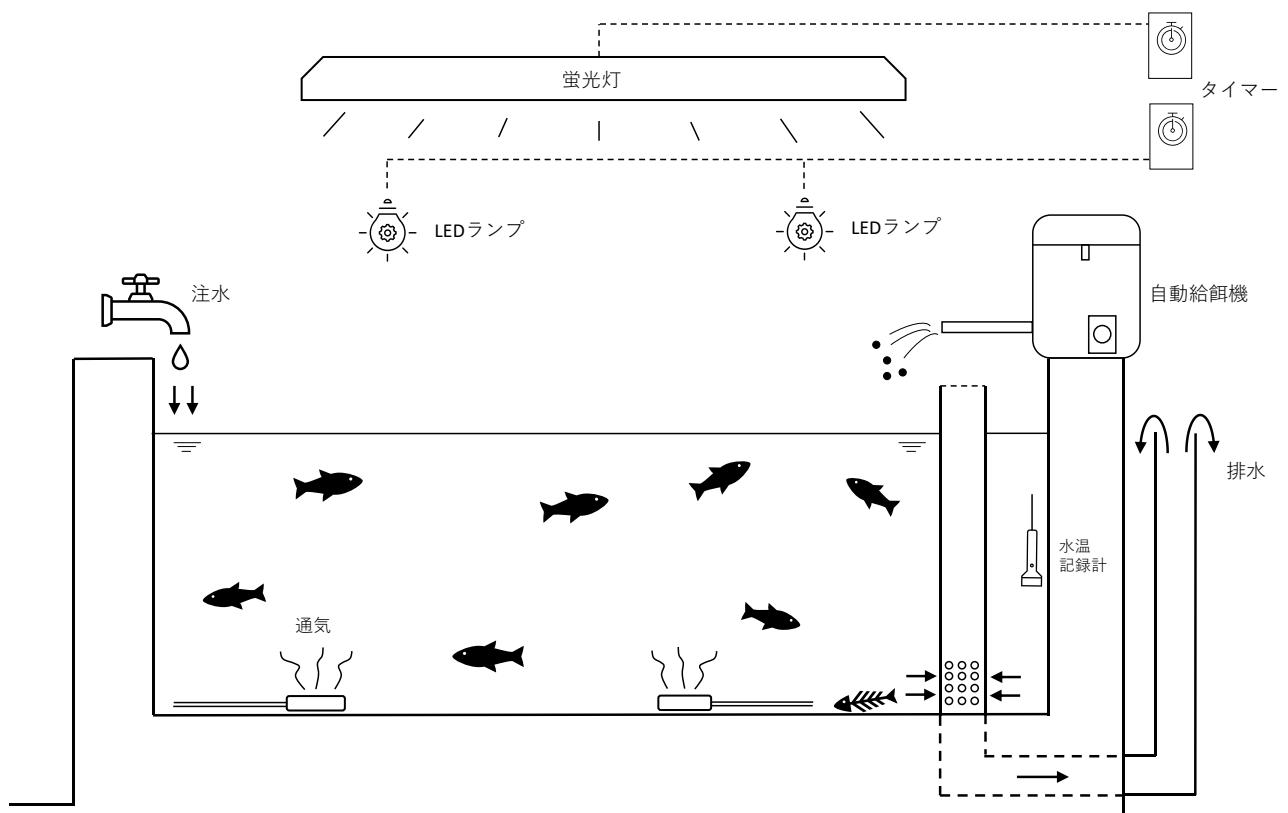


図2 試験水槽の模式図

2) 海水馴致条件毎の摂餌行動の評価

これまでの試験結果から、中間育成における電照は高水温期の日中を避けて給餌することができ、給餌率を上げることで種苗の大型化が見込めるものの、一方で海水適応能が低くなることが示唆されている。令和5年度の試験結果から、海水温が14°C以下の条件で海水馴致すれば電照による大きな影響はみられなくなるものの、降雪や人員手配の関係上、海水温が14°C以下にならない11月下旬から12月上旬に沖出しを行いたいというのが養殖現場の実情である。各構成員の研究成果からも稚魚期の海水経験が海水適応能の向上に有効であることが明らかになったことで、令和6年度は種苗の大型化を見込める中間育成時の電照と海水適応能を高める稚魚期の海水経験を組み合わせた種苗を用いて、海水馴致後の生残率および摂餌率から海水適応能を評価した。また、養殖現場で実施可能な海水馴致手法の検討として、種苗の輸送に使用する活魚トラックに海水を注水することで海水馴致を行う海水馴致手法（以下、「トラック馴致」という）の評価も行った。

(1) 供試魚

1) 中間育成した0歳ニジマス稚魚（リバレンス社由来のスチールヘッド）を令和6年12月12日に活魚トラックで福井県水産試験場企画・先端研究部に各試験区60尾を搬入した。

なお、共同研究機関である東京大学および福井県立大学が海水馴致前、海水馴致4日後、14日後、28日後に各試験区6尾をランダムに選択して鰓と血液を採取した。そのためサンプリングにより飼育尾数が試験期間中に減少した分については生残率の計算から除いた。

(2) 試験区

1) 同様に対照区、電照区、海水経験電照区、海水経験区の4試験区を設けた。

(3) 海水馴致条件

トラックの活魚槽へ海水を注水し、2時間かけて淡水を海水に置換した。定期的に各水槽の水温、塩分を多項目水質計（YSI Pro2030 DO/EC メーター、ザイレムジャパン株式会社）により測定した（図3、4）。海水注水前

の水温は 11.0°C、トラック馴致終了後の水温は 14.7°C であった。

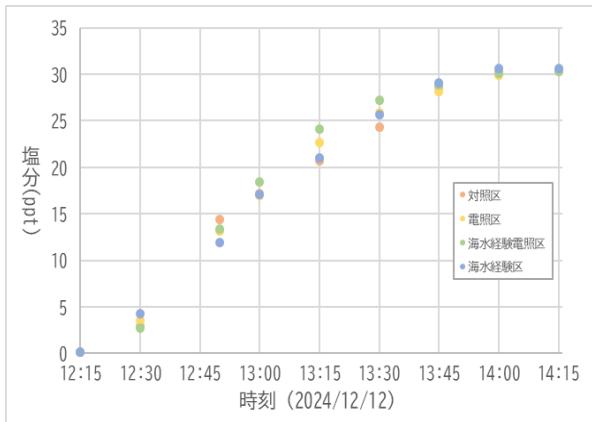


図3 トラック馴致の塩分推移

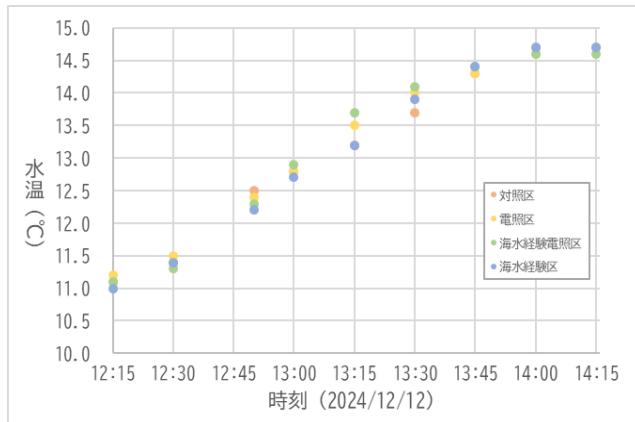


図4 トラック馴致の水温推移

(4) 飼育管理および評価方法

海水馴致完了後、10トンの組立式FRP水槽（水量6トン）4面に各試験区54尾を収容した。

原則15回転/日以上の換水率になるようにろ過海水をかけ流して注水し、飼料はサーモンEP日本海d6（フィード・ワン（株））を1回/日の頻度で飽食給餌し、残餌を計数して摂餌量を算出した。

海水馴致から2週間後までの生残率および平均摂餌率から海水適応能を評価した（以下、海水馴致試験という）。なお、平均摂餌率は次式から算出した。

$$\text{平均摂餌率} (\%) = (\text{摂餌量} / \text{終了時の総魚体重}) \times 100 / \text{給餌日数} (12\text{日})$$

給餌は12月24日まで行い、1日餌止めをして12月26日にFA100（物産アニマルヘルス株式会社）を用いて麻酔処理をした後、全個体の体長と魚体重を計測した。

また、12月26日の測定時にランダムに選んだ各試験区34尾を中間育成手法の由来が判別できるようにダートタグによって標識して10トンの組立式FRP水槽（水量8トン）2面に自然日長で中間育成したものと電照で中間育成したものに分けて収容し、その後の成長や生残率を確認するため飼育を継続した。継続飼育中は、5回/日の頻度で自動給餌器（PFX-60LS-SM、福伸電機株式会社）を用いて残餌が発生しないよう配慮しながら全ての試験区で同じ給餌率（0.8～1.3%）で給餌した。へい死魚はその都度取り上げ、体長と体重を測定し、令和7年1月23日、2月28日に全個体の体長と体重を測定した。引き続き4月上旬まで飼育を継続する（以下、継続飼育試験という）。

3 結果および考察

1) 中間育成時の電照コントロールによる育成手法の検討

(1) 飼育環境

各試験区の水温記録に差はなかったことから、対照区の水温記録を代表値として採用した。毎日の平均水温の推移を図5に示す。飼育期間中の最高水温は、7月26日と9月2日に記録した18.4°C、最低水温は、11月28日の13.4°Cであった。水温は変動しながら飼育期間の後半にかけて低下した。飼育期間全体を通して、サーモンの養殖適水温である10～18°C¹⁾の範囲内にあった。

平日の8時半頃と16時の給餌直後の溶存酸素量を比較したところ、平均して16時の溶存酸素量が8時半頃よりも約0.29～0.39 mg/L低かった。供試魚が16時の給餌時に酸素を消費したことによって溶存酸素量が低下したと考えられる。

飼育期間中の各試験区の16時の溶存酸素量の推移を図6に示す。試験開始後から10月ごろまでは溶存酸素量が緩やかに低下し、11月以降は緩やかに上昇傾向にあった。飼育水中の溶存酸素量が変化した原因として、供試魚の成長による酸素消費量の増加、水温変化による飽和溶存酸素量の変化などが考えられる。飼育期間中の溶存酸素量は変化したが、概ね9～10 mg/Lの範囲にあった。昨年度の同様の試験では、飼育期間を通しての各試験区の平均値は8.0～8.5 mg/Lであり²⁾、今年度は、飼育期間全体を通してさらに十分な溶存酸素量を維持できた。

飼育期間中に大雨によって河川水が濁り、飼育水槽に濁水が流入したことがあったが、供試魚の死亡はなかった。

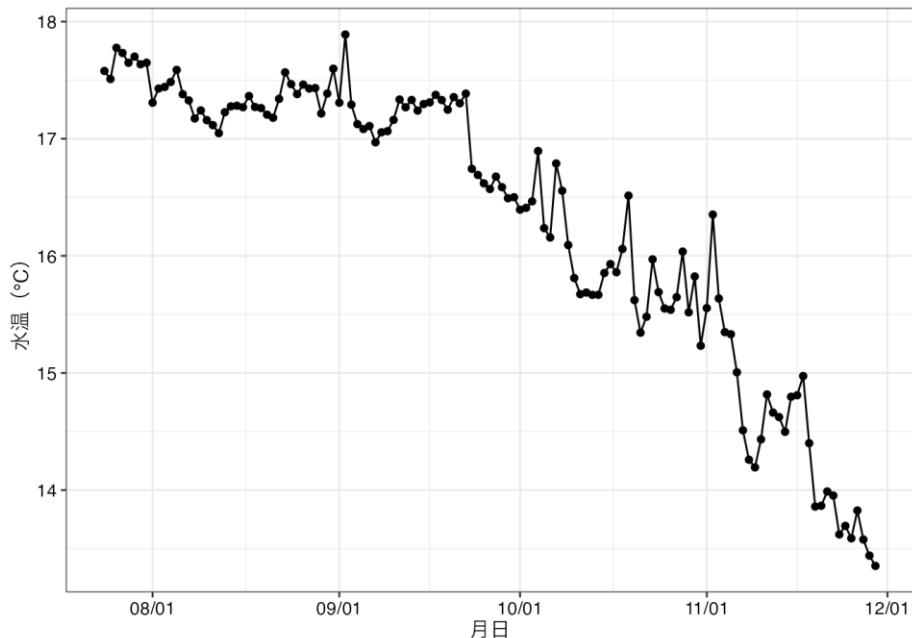


図5 飼育期間中の水温の推移（対照自然日長区）

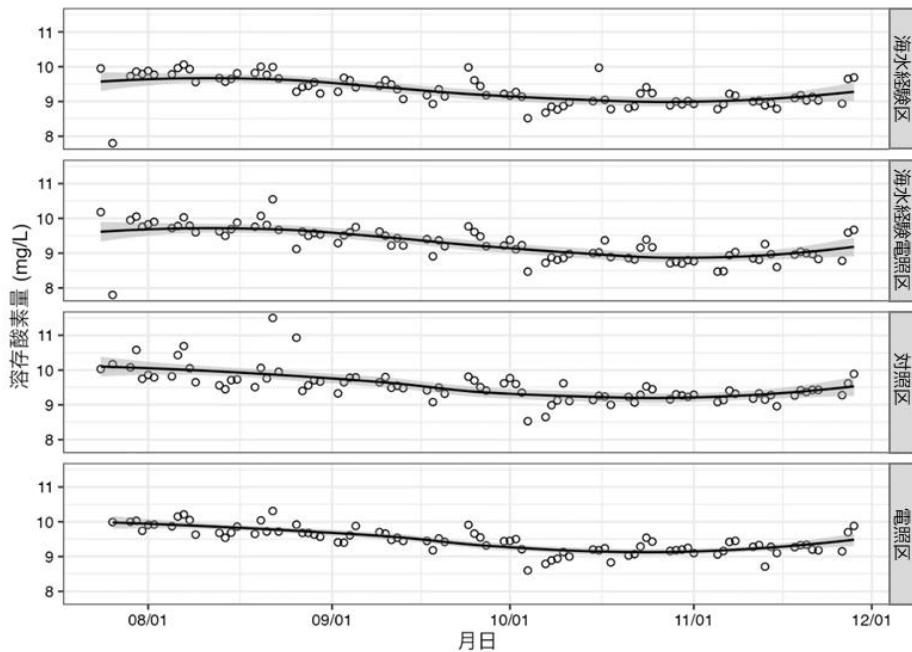


図6 各試験区の16時の溶存酸素量の推移（実線は近似曲線、灰色に塗りつぶした範囲は95%信頼区間を示す

（2）成長と生残

各試験区の飼育結果を表2に示す。体長、魚体重を試験区間で比較したが、いずれの測定日においても有意差はなかった ($p>0.05$, ANOVA)。FCRについては、海水経験区で他の試験区よりもやや低かった。生残率はいずれの試験区でも高かった。

本研究では、海水経験処理・電照が成長（魚体重の増加）に与える影響について試験をおこなった。試験結果から、海水経験、電照による魚体重の増加効果は確認できなかった。昨年度の同様の試験では、同じ給餌量であれば電照下で給餌時刻や回数を変えても、成長への影響がないことが報告されている²⁾。本研究結果から、海水経験も同様に成長に影響を与えないと言える。

中間育成の手法を評価するためには、中間育成期間中の成長だけでなく、海水馴致後の生残や成長も考慮する必要がある。海水経験の有無とこれらの関係についての研究結果を踏まえた評価が求められる。

表2 中間育成の試験結果

| 測定日 | 試験区 | 被鱗体長(mm) | 体重(g) | BMI | 測定数 | FCR | 生残率(%) |
|------------|---------|----------|-----------|------------|-----|------|--------|
| 2024/7/23 | 試験開始時 | 150 ± 12 | 55 ± 14 | 16.1 ± 1.0 | 64 | | |
| 2024/8/20 | 対照区 | 187 ± 19 | 114 ± 30 | 17.0 ± 1.3 | 50 | | |
| | 電照区 | 189 ± 18 | 116 ± 26 | 17.0 ± 1.4 | 50 | | |
| | 海水経験電照区 | 193 ± 12 | 122 ± 21 | 16.8 ± 1.0 | 50 | | |
| | 海水経験区 | 192 ± 11 | 120 ± 19 | 16.8 ± 0.8 | 50 | | |
| 2024/9/24 | 対照区 | 255 ± 25 | 304 ± 72 | 18.0 ± 1.2 | 61 | | |
| | 電照区 | 253 ± 30 | 306 ± 81 | 18.4 ± 1.8 | 60 | | |
| | 海水経験電照区 | 259 ± 17 | 319 ± 57 | 18.1 ± 1.0 | 60 | | |
| | 海水経験区 | 252 ± 16 | 291 ± 49 | 18.0 ± 1.1 | 60 | | |
| 2024/10/24 | 対照区 | 304 ± 37 | 554 ± 153 | 19.0 ± 1.3 | 45 | | |
| | 電照区 | 303 ± 34 | 553 ± 152 | 19.4 ± 1.8 | 45 | | |
| | 海水経験電照区 | 309 ± 25 | 563 ± 115 | 18.6 ± 1.4 | 43 | | |
| | 海水経験区 | 304 ± 19 | 522 ± 90 | 18.4 ± 1.0 | 45 | | |
| 2024/11/28 | 対照区 | 350 ± 43 | 851 ± 231 | 19.4 ± 2.1 | 48 | 1.02 | 98.7 |
| | 電照区 | 350 ± 48 | 891 ± 267 | 20.1 ± 2.2 | 50 | 1.06 | 100.0 |
| | 海水経験電照区 | 358 ± 34 | 916 ± 203 | 19.5 ± 1.5 | 50 | 1.01 | 100.0 |
| | 海水経験区 | 351 ± 31 | 816 ± 185 | 18.5 ± 1.4 | 50 | 0.95 | 100.0 |

生残率：サンプルとして採取した尾数（6尾×4回=24尾）を除いて計算した

2) 海水馴致条件毎の摂餌行動の評価

(1) 飼育環境

令和6年12月13日から令和7年2月28日までの午前10時の水温記録を図7に示す。海水馴致試験期間中の水温は、14.7~12.4°Cの間で変動した。継続飼育試験期間の2月7日からは寒波の影響等で養殖適水温である10~18°Cを下回る日が続いた。

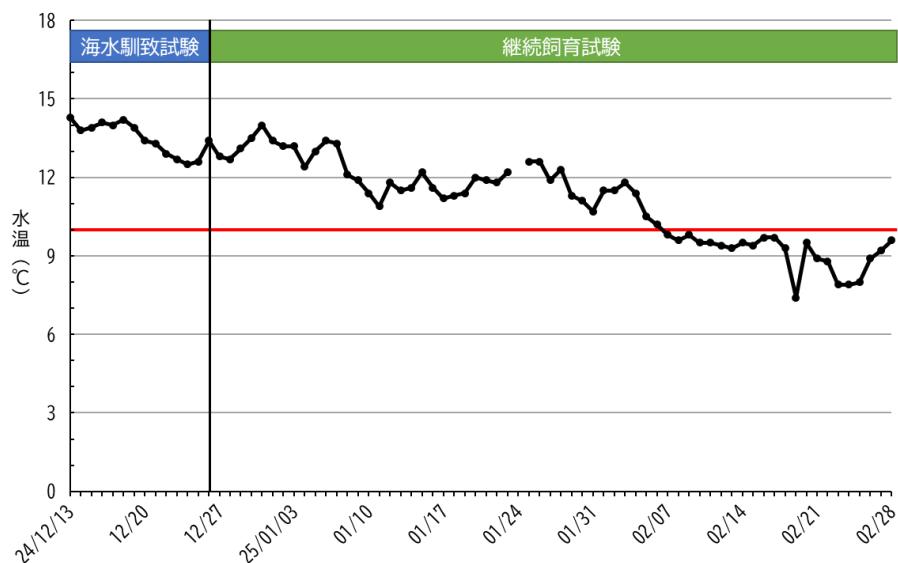


図7 飼育期間中の海水温の推移（午前10時）

(2) 海水適応能の評価

海水馴致試験における生残率と平均摂餌率を図8に示す。

生残率は、全ての試験区で100%であり2時間のトラック馴致の有効性が確認できた。

平均摂餌率は、対照区が 0.57%、海水経験区が 0.56%とやや高く、次いで海水経験電照区が 0.47%、電照区が 0.38%と最も低かったものの有意差はなかった ($p>0.05$, ANOVA)。これまでの試験結果から電照条件下で育った中間育成魚は海水馴致直後に摂餌率が低くなる³⁾ ことが確認されているが、稚魚期に海水経験処理を施すことによって海水馴致直後の摂餌率の低下をある程度和らげる効果が示唆された。

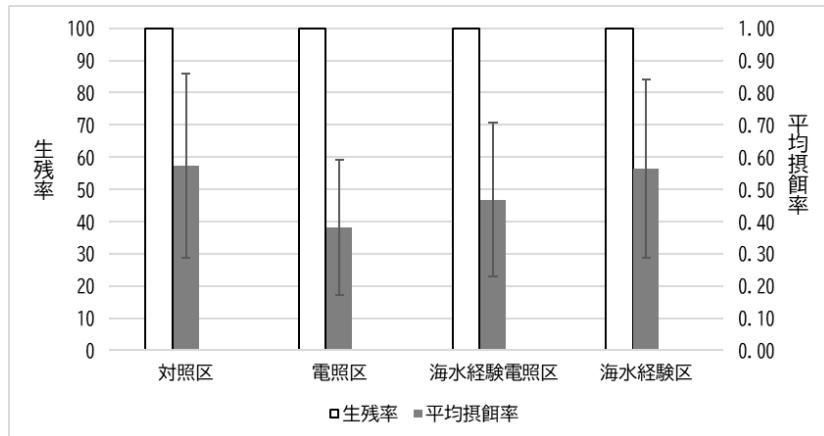


図 8 海水馴致試験における生存率と平均摂餌率

継続飼育試験における測定結果を表 3 に示す。

継続飼育試験開始日の 12 月 26 日にのみ一元配置分散分析において体重の平均値で有意差があった ($p<0.05$) が TukeyHSD 検定では試験区間に有意差はみられなかった。

本試験では、海水経験処理と電照条件を組み合わせて中間育成したニジマスの海水適応能を生存率および摂餌率で評価することを目的としていたが結果としては海水馴致からおよそ 3 ヶ月間では他の中間育成手法との差はみられなかった。

表 3 継続飼育試験の測定結果

| 測定日 | 試験区 | 被鱗体長(mm) | 体重(g) | BMI | 測定数 | FCR | 生存率 (%) |
|------------|---------|----------|-------------|------------|-----|------|---------|
| 2024/12/26 | 対照区 | 385 ± 19 | 1,080 ± 208 | 18.7 ± 1.6 | 34 | | |
| | 電照区 | 382 ± 26 | 1,104 ± 216 | 19.6 ± 2.1 | 34 | | |
| | 海水経験電照区 | 384 ± 20 | 1,097 ± 180 | 19.2 ± 1.3 | 34 | | |
| | 海水経験区 | 376 ± 17 | 978 ± 171 | 18.2 ± 1.6 | 34 | | |
| 2025/1/23 | 対照区 | 408 ± 28 | 1,351 ± 365 | 19.4 ± 2.1 | 28 | 0.99 | 100% |
| | 電照区 | 404 ± 33 | 1,375 ± 398 | 20.2 ± 2.7 | 28 | 1.11 | 100% |
| | 海水経験電照区 | 407 ± 28 | 1,395 ± 354 | 20.3 ± 1.9 | 28 | 1.06 | 100% |
| | 海水経験区 | 399 ± 26 | 1,239 ± 309 | 19.1 ± 2.1 | 28 | 1.03 | 100% |
| 2025/2/28 | 対照区 | 428 ± 35 | 1,586 ± 428 | 19.4 ± 2.2 | 27 | 1.36 | 97% |
| | 電照区 | 426 ± 40 | 1,639 ± 537 | 20.4 ± 2.9 | 28 | 1.35 | 100% |
| | 海水経験電照区 | 428 ± 34 | 1,668 ± 494 | 20.5 ± 2.2 | 28 | 1.31 | 100% |
| | 海水経験区 | 423 ± 34 | 1,526 ± 430 | 19.5 ± 2.0 | 28 | 1.21 | 100% |

生存率：サンプルとして採取した尾数（6尾）を除いて計算した

4 謝辞

本研究は、生物系特定産業研究支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業（開発研究ステージ）」の支援を受けて行った。研究課題名：サケマス類の日本式海面養殖技術の研究開発

5 文献

- 1) 鎌田 淡紅郎 (1974) : 生理と生態. 養魚講座 10 ニジマス. 緑書房, 東京 : 46-70
- 2) 桑野 曜・山田 洋雄・青木 萌子・松宮 由太佳 (2024) : トラウトサーモン共同研究事業. 令和 5 年度福井県水産試験場事業報告 : 11-17
- 3) 田中 直幸・児玉 敦也 (2023) : トラウトサーモン共同研究事業. 令和 4 年度福井県水産試験場事業報告 : 9-16