

未来につなぐさけ漁業推進事業 (閉鎖循環型サケ卵管理システム実証試験)

松谷 紀明¹

目 的

サケ稚魚の適期放流に向け、低水温用水に起因する成長遅滞解消のため、閉鎖循環型サケ卵管理システムを用いた加温飼育により、発眼期までの期間を短縮できることを実証する。

材料と方法

(1) 試験場所

新深浦町漁業協同組合笹内川サケふ化場（笹内川サケふ化場）

(2) 供試卵

奥入瀬川鮭鱒増殖漁業協同組合サケふ化場において 2017 年 12 月 8 日に採卵したサケの受精卵 53 万粒を笹内川サケふ化場に運搬して試験に使用した。

(3) 閉鎖循環型サケ卵管理システム

壁面に断熱材（ダウ化工株式会社製 スタイロフォーム IB 25mm）を貼り付けた増収型アトキンス式ふ化槽 2 基（2 間槽 1 基、1 間槽 1 基）、200L コンテナ（三甲株式会社製 ジャンボックス #200）、マグネットポンプ（イワキ社製 レイシーRMD-551）、空焚き防止機能付き 1kW チタンヒーター（イワキ社製 レイシーSHI-1KW-100V）、サーモコントローラー（イワキ社製 レイシーTC-101）、エアープンプ（マルカン社製 ニッソーサイレントβ-120）、予め硝化細菌を付与したセラミック製ろ材 40L（太平洋セメント社製 パワーハウスベーシックソフトタイプ微酸性 S サイズ）で構成され、最下段で加温された飼育水がポンプにより最上段の濾過槽へ送られ、高低差で受精卵が収容された水槽へ注水される（図 1）。

(4) 試験区及び対照区の設定条件

試験区（閉鎖循環式区）では、循環システムのアトキンス式ふ化槽 A～E 区に受精卵計 44 万粒収容し、水温 12.7℃に設定した。なお、検卵時に沢水との温度差を小さくするため、検卵の 3 日前から 11.7℃、10.7℃、9.7℃設定とし、段階的に降温させた。検卵後は、検卵翌日から 11.7℃、12.7℃に設定し、段階的に昇温させた。同様に、池散布時に沢水との温度差を小さくするため、池散布の 3 日前から 11.4℃、10.4℃、9.5℃設定とし、段階的に降温させた。対照区（かけ流し式区）は、沢水かけ流し式の増収型アトキンス式ふ化槽に受精卵 9 万粒収容した。

注水量は、試験区 40ℓ/分、対照区 40ℓ/分とした。試験区において、飼育水の白濁など水質悪化の兆候がみられた場合には、適宜換水を行った。

それぞれの水槽に自記式水温計（Onset 社製 TidbiTv2）を設置し、10 分毎に水温を観測した。日平均水温は、1 日の水温を平均して求めた。発眼までの積算水温を 240℃・日、検卵までの積算水温を 330℃・日、池散布までの積算水温を 430℃・日として、試験区と対照区の飼育日数について比較した。

発眼卵の平均重量は、100 粒の重量を平均して求めた。

試験期間中の溶存酸素量は HACH 社製 HQ30d、アンモニア態窒素濃度はアンモニア性窒素試薬セット（HACH 社製 HACH1389）、亜硝酸態窒素濃度は亜硝酸試薬（HACH 社製 HACH0596）、硝酸態窒素濃度は硝酸性窒素試薬セット（HACH 社製 HACH1088）をそれぞれ使用し、ポータブル吸光光度計（HACH 社製 DR900）を使って適宜測定した。積算電気量は、簡易型電力量表示器（朝日電器株式会社製 エルパ EC-03EB）を使って 1 日 1 回観測した。

¹ 地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所

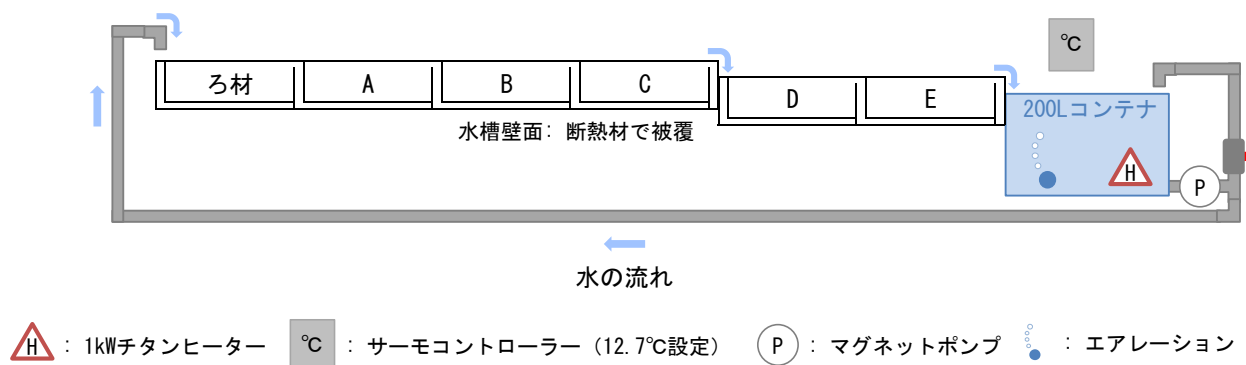


図 1. 笹内川サケふ化場における閉鎖循環型サケ卵管理システム概要

結 果

試験開始後（以下、同じ）4 日目に閉鎖循環式区において飼育水が白濁する現象が生じたため、換水した。また、14 日目に緩やかに攪拌し、ミズカビ病により形成された卵塊を除去した。20 日目に再度、緩やかに攪拌し卵塊を除去した後に換水した。その後、25 日目、30 日目及び 34 日目に換水した。なお、下流部の 200L コンテナ内でエアレーションを行ったが、システム内における気泡の滞留は観察されなかった。かけ流し式区においては、20 日目、30 日目及び 38 日目に緩やかに攪拌した。かけ流し式区においては、ミズカビ病による卵塊の形成がみられなかった。

池散布までの平均水温は、閉鎖循環式区が 11.9℃、かけ流し式区が 7.4℃であり、閉鎖循環式区の方が高い水温で推移した（表 1、図 2）。

発眼の目安となる積算水温 240℃・日への到達日は、閉鎖循環式区が 20 日目、かけ流し式区が 32 日目であり、12 日短縮された。閉鎖循環式区の検卵は、30 日目に積算水温 366℃・日で行った。かけ流し式区の検卵は、45 日目に積算水温 340℃・日で行った（表 1、図 3）。検卵を行った積算水温が閉鎖循環式区とかけ流し式区で異なるため、便宜的に 330℃・日に達した日で比較すると、閉鎖循環式区では 17 日短縮された（表 1、図 3）。閉鎖循環式区は、検卵後に再び閉鎖循環型サケ卵管理システムに收容し、38 日目に積算水温 455℃・日で池散布した。一方、かけ流し区は、58 日目に積算水温 431℃・日で池散布した。池散布を行った積算水温が閉鎖循環式区とかけ流し式区で異なるため、便宜的に 430℃・日に達した日で比較すると、閉鎖循環式区では 22 日短縮された（表 1、図 3）。

発眼卵の平均重量は、閉鎖循環式区が 0.26g、かけ流し式区が 0.24g であった（表 1）。

発眼率は閉鎖循環式区が 95%、かけ流し式区が 96%であり、同等であった（表 1）。

溶存酸素量は、閉鎖循環式区が 12.78mg/L から徐々に減少し、最低値は 7.02mg/L となった一方、かけ流し式区は、試験期間中 12~14mg/L 台であった（図 4）。

閉鎖循環式区のアンモニア態窒素濃度は、試験序盤は 0mg/L 台で推移し、20 日目に 1mg/L を超えて以降増加し、28 日目に試験期間中で最高値となる 24.6mg/L に達した。その後、検卵に伴う換水により 1.9mg/L となったが、再度増加し、池散布前には 14.0mg/L となった（図 5）。アンモニア態窒素濃度は、12 日目を除き、水産用水基準¹⁾である 0.01mg/L よりも高い値で推移した。

閉鎖循環式区の亜硝酸態窒素濃度は、試験開始当日である 0 日目に 0.01mg/L であったが、2 日目から 14 日目の間は 0.07~0.35mg/L の間を推移し、16 日目は 0.57mg/L に増加し、20 日目に試験期間中で最高値となる 1.71mg/L に達した。その後、22 日目に 0.82mg/L に減少し、24 日目から 38 日目の間は 0.02~0.35mg/L の間を推移した（図 6）。亜硝酸態窒素濃度は、試験開始当日と検卵に伴う換水を行った 30 日目

を除き、水産用水基準²⁾である0.03mg/Lよりも高い値で推移した。

閉鎖循環式区の硝酸態窒素濃度は、試験開始当日の0.21mg/Lから22日目の9.8mg/Lまで増加傾向を示し、28日目まで6.4~9.8mg/Lの間を推移した。その後、検卵に伴う換水により0.38mg/Lとなったが、再度増加し、池散布前には10.8mg/Lとなった(図7)。硝酸態窒素濃度は、22日目、28日目及び36日目以降に水産用水基準³⁾である9mg/Lよりも高い値となった。

池散布までの積算電気量は、ヒーターが185kWh、ポンプが100kWhであった(図8)。積算電気料金は、1kWh=22円で計算すると、ヒーターが4,070円、ポンプが2,200円であり、合計6,270円であった。

表 1. 笹内川サケふ化場における閉鎖循環型サケ卵管理システム実証試験結果

	閉鎖循環式区	かけ流し式区
親魚捕獲河川	奥入瀬川	奥入瀬川
採卵年月日	2017年12月8日	
平均水温(°C)	11.9	7.4
発眼年月日(積算水温240°C・日)	2017年12月28日	2018年1月9日
積算水温330°C・日到達年月日	2018年1月4日	2018年1月21日
検卵年月日	2018年1月7日	2018年1月22日
検卵時積算水温(°C・日)	366	340
平均卵重量(g)	0.26	0.24
発眼率(%)	95	96
積算水温430°C・日到達年月日	2018年1月13日	2018年2月4日
池散布年月日	2018年1月15日	2018年2月4日
池散布時積算水温(°C・日)	455	431

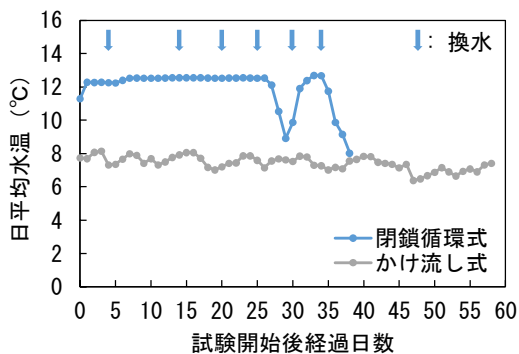


図 2. 日平均水温の推移

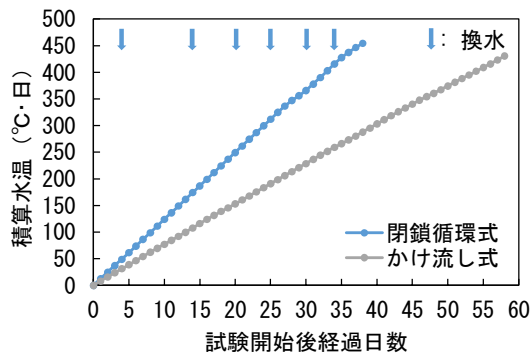


図 3. 積算水温の推移

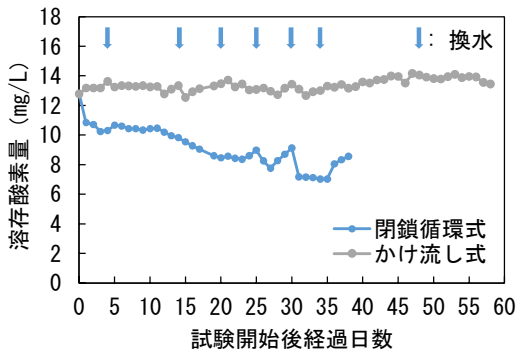


図 4. 溶存酸素量の推移

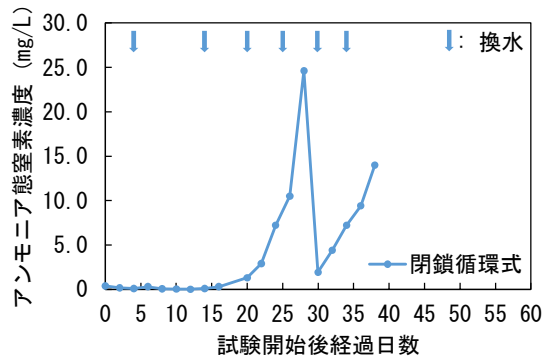


図 5. アンモニア態窒素濃度の推移

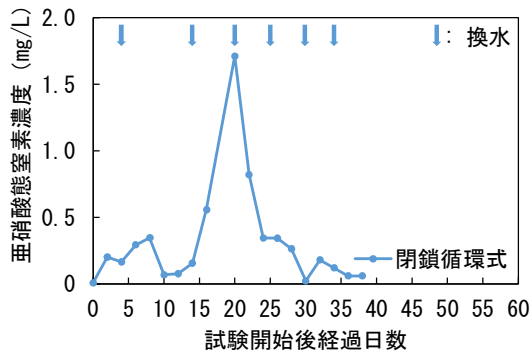


図 6. 亜硝酸態窒素濃度の推移

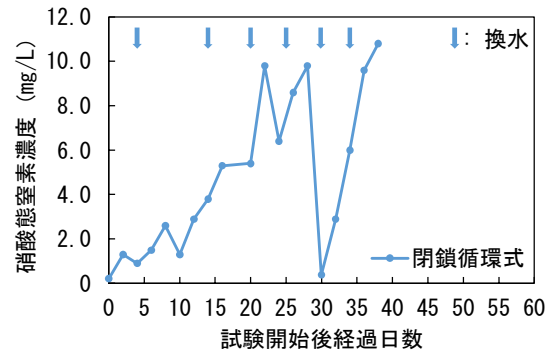


図 7. 硝酸態窒素濃度の推移

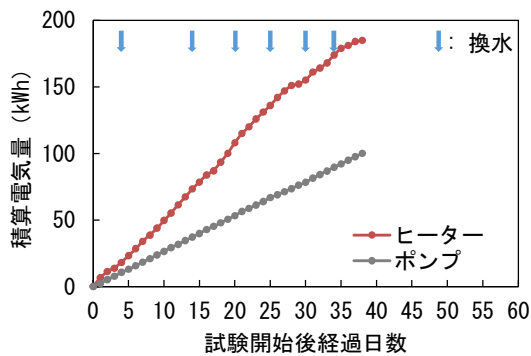


図 8. 積算電気量の推移

考 察

サケ卵の発生速度は水温条件によって大きく変化し、水温が高い程、発生速度がより速い⁴⁾。2015年に内水面研究所において行われた閉鎖循環システムによるサクラマス種苗生産事業⁵⁾では、サケ科魚類であるサクラマス飼育における閉鎖循環システムの有効性が示され、今後、同システムのサケマス類の増殖事業での活用が期待された。特に、同システムは水温制御が可能であり、水温を高めてサケ卵の発生速度を速めることも可能になると考えられた。2016年度に老部川内水面漁業協同組合サケふ化場において行った閉鎖循環型サケ卵管理システム実証試験では、同システムにより発眼期まで管理できる可能性が示され卵管理期間を11～23日短縮されることが示されたほか、溶存酸素量を増やすためのシステム改良等の課題が残された⁶⁾。2017年度は、閉鎖循環型サケ卵管理システムを改良し、低水温用水に起因する成長遅滞が生じている笹内川サケふ化場への同システムの導入を検討し、その実用性を検証した。

笹内川サケふ化場における実証試験の発眼率は、閉鎖循環式区が95%、かけ流し式区が96%と同等であったことから、閉鎖循環型サケ卵管理システムにより発眼期まで管理できる可能性が示された。閉鎖循環式区においては、14日目及び20日目の攪拌時に、ミズカビ病により形成された卵塊が存在したため除去により対処した。一方、かけ流し式区においては攪拌時にミズカビ病による卵塊の形成がみられなかったことから、閉鎖循環型サケ卵管理システムによりミズカビ病の発症リスクが高まる可能性が示唆された。

冬季に水温が低下する沢水を導水している笹内川サケふ化場における実証試験の結果から、閉鎖循環型サケ卵管理システムを用いた加温飼育により、実用規模で発眼期までの期間を短縮できる可能性が示された。沢水の水温は年や時期によって変化するが、12月上旬開始で沢水かけ流し式との比較を行った今回の実証試験では、検卵の目安となる積算水温330℃・日までの日数が17日短縮され、再び同システムに収容

することにより池散布前の 430℃・日までの日数が 22 日短縮された。

閉鎖循環式区において 4 日目に飼育水の白濁が発生した。同様の飼育水の白濁は 2016 年度の実証試験 1 回目においては 4 日目、実証試験 2 回目においては 2 日目に発生した⁶⁾。白濁の発生タイミングは、2016 年度及び 2017 年度に共通して飼育開始序盤であった。発生原因として、潰卵由来の卵内物質の溶出、バクテリアの増殖が考えられたが、原因の特定には至らなかった。2017 年度の実証試験においても換水により対処したが、白濁の発生抑制方法については課題が残された。

2016 年度の実証試験⁶⁾からのシステムの変更点として、2017 年度の実証試験では下流部に 200L コンテナを設置し、コンテナ内にエアレーション機能を導入した。一般に、サケマスの卵管理期においては、気泡を含んだ水を使用することにより、ふ化槽の底網に気泡が滞留し、通水の妨げとなるため、気泡を含まない水が適している。エアレーションの導入により気泡の滞留が危惧されたが、2017 年度の実証試験ではシステム内における気泡の滞留は観察されなかった。2017 年度の実証試験における溶存酸素量は、閉鎖循環式区において時間経過に伴って低下し、最低値は 7.02mg/L となった。サケマス類の稚魚の健全な成長を確保するためには最低でも溶存酸素量を 5mg/L 以上に保つことが重要とされている⁷⁾。仮に、卵管理期に同基準を当てはめた場合、2017 年の実証試験は酸素不足ではないと考えられた。

閉鎖循環式区におけるアンモニア態窒素濃度は、12 日目を除き、水産用水基準¹⁾である 0.01mg/L よりも高い値となった。アンモニア態窒素は、飼育水中では非乖離アンモニア(NH₃)とアンモニウムイオン(NH₄⁺)の 2 種類の状態で存在している。難脂溶性のアンモニウムイオンの毒性はさほど強くないが、脂溶性である非乖離アンモニアは容易に細胞に取り込まれて細胞機能に障害を引き起こす⁸⁾。サケ稚魚に及ぼすアンモニアの影響については未だ十分に解明されていない⁹⁾が、アンモニア態窒素濃度を低く抑えることが健苗性の向上につながると考えられた。また、溶存酸素の低下に伴ってアンモニアの毒性が強くなる¹⁾ことに留意が必要である。

閉鎖循環式区における亜硝酸態窒素濃度は、試験開始当日と検卵に伴う換水を行った 30 日目を除き、水産用水基準²⁾である 0.03mg/L よりも高い値で推移した。亜硝酸は、淡水魚では、亜硝酸イオンが体内に入りやすく、血液中のヘモグロビンと結合して酸素の運搬を阻害し呼吸障害(メトヘモグロビン血症)を引き起こしやすくなる⁸⁾。また、亜硝酸は低酸素条件によって毒性が強まる²⁾ことに留意が必要である。

閉鎖循環式区における硝酸態窒素濃度は、22 日目、28 日目及び 36 日目以降に水産用水基準³⁾である 9mg/L よりも高い値となった。硝酸の毒性はアンモニアや亜硝酸よりも低いとされているが、高濃度となる場合は楽観できない⁸⁾。一般に、硝酸は自然界では嫌氣的環境で働く脱窒細菌によって窒素と水に分解され水中に放出されるが、システム全体が好氣的環境である閉鎖循環飼育では意図的に嫌氣的環境をつくらなければ脱窒反応は進まないため、飼育水中には飼育日数に比例して硝酸が増加していく⁸⁾。2017 年度の実証試験に用いた閉鎖循環型サケ卵管理システム内には嫌氣的環境が組み込まれていないため、時間経過に伴う硝酸態窒素濃度の増加がみられており、硝酸態窒素濃度の増加を抑えるためには脱窒システムの導入または換水、半循環飼育の検討が必要となる。

閉鎖循環式サケ卵管理システムのランニングコスト試算の結果、受精卵計 44 万粒を 38 日目の池散布まで平均水温 11.9℃で管理した場合の積算電気量は、ヒーターが 185kWh、ポンプが 100kWh であり、電気料金の目安として 6,270 円と試算された。費用対効果を明らかにするためには、閉鎖循環型サケ卵管理システム導入による回帰親魚の回帰率へ及ぼす影響を調べる必要があるが、調査は容易ではない。ふ化場における費用対効果がプラスとなる条件として、システム導入により雌親魚の回帰が 4 尾増えれば(2,500 粒/尾×4 尾×0.7 円/粒)、ランニングコスト以上の効果があったものとみなされると試算された。

上記のとおり、本事業において閉鎖循環型サケ卵管理システムを用いた加温飼育により、発眼期までの期間を短縮できることが実証された(図 9)。実証試験に用いたシステムによって目的は果たされたが、今後の改良の方向性として、アンモニア態窒素濃度、亜硝酸態窒素濃度、硝酸態窒素濃度を低く抑える手法

の検討及び低酸素条件によってアンモニア及び亜硝酸の毒性が強まることから、溶存酸素量を増やすための手法を検討することにより、健苗性の向上に資すると考えられた。また、笹内川ふ化場における実証試験では発眼率の大幅な低下がみられなかったものの閉鎖循環型サケ卵管理システムにはミズカビ病の重症化リスクを高める可能性があること、ろ材に起因すると推察される卵膜軟化症の症状が確認された事例¹⁰⁾があることから、健苗性、生産性、安定性が求められるサケふ化場への技術普及に向けて対策を検討する必要がある。

最後に、本事業は発眼期までの期間の短縮を期したものであったが、将来的に浮上期までの期間を短縮できれば、適期放流割合の向上や大型化につながると期待される。

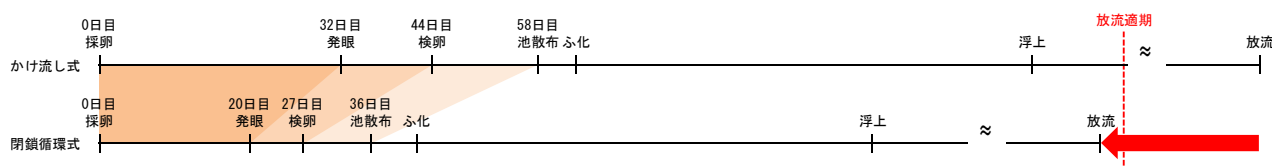


図 9. 閉鎖循環型サケ卵管理システムを活用した飼育期間短縮の概念図

謝 辞

本事業にご協力いただきました新深浦町漁業協同組合、奥入瀬川鮭鱒増殖漁業協同組合の皆様には感謝申し上げます。

文 献

- 1) 日本水産資源保護協会 (2013) 53) アンモニア態窒素. 水産用水基準第 7 版 (2012 年版), 63-65.
- 2) 日本水産資源保護協会 (2013) 25) 亜硝酸態窒素. 水産用水基準第 7 版 (2012 年版), 44.
- 3) 日本水産資源保護協会 (2013) 24) 硝酸態窒素. 水産用水基準第 7 版 (2012 年版), 43-44.
- 4) 倉本 勉・有馬健一・川上伸一・清水直人・中渡晃雄・長谷川麻里・平間真一・守山健一・世継一恵・安田冬季・安田美智代・広井 修 (1988) サケ卵の発生と双体奇形の出現. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 42 号, 59-73.
- 5) 長崎勝康 (2020) 閉鎖循環システムによるサクラマス種苗生産事業. 平成 27 年度青森県産業技術センター内水面研究所事業報告, 91-95.
- 6) 松谷紀明 (2021) 未来につなぐさけ漁業推進事業 (閉鎖循環型サケ卵管理システム実証試験). 平成 28 年度青森県産業技術センター内水面研究所事業報告, 61-67.
- 7) 野川秀樹・八木沢 功 (2011) さけます類の人工ふ化放流に関する技術小史 (飼育管理編). 水産技術, 3 (2), 67-89.
- 8) 山本義久・森田哲男・陸上養殖勉強会 (2017) アンモニアの毒性と防除方法. 循環式陸上養殖 飼育ステージ別 (国内外) の事例にみる最新技術と産業化, 緑書房, 48-53.
- 9) 野川秀樹・八木沢 功 (1994) サケ稚魚の適正な飼育環境. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 48 号, 31-39.
- 10) 松谷紀明 (2021) 未来につなぐさけ漁業推進事業 (閉鎖循環型サケ卵管理システムにおけるろ材の検討). 平成 29 年度青森県産業技術センター内水面研究所事業報告, 60-65.