

令和7年度養殖業成長産業化技術開発事業

報告書 (概要版)

令和8年3月

養殖業成長産業化技術開発共同研究機関

概 要

(1) 飼餌料コスト低減対策

ア ブリ類及びマダイ用高効率飼料の開発

【目的】

近年、養殖生産の世界的な増大による需要増から主要な飼料原料である魚粉の価格が高騰し、養魚飼料価格も上昇している。飼料費用が給餌養殖の生産コストの6～7割を占めており、国内の養殖業者は厳しい経営状況となっている。そのため、生産コスト削減につながる、より低価格な飼料の開発が養殖業界から求められている。低価格化のために大豆粕などの代替原料を多く配合した飼料は、水温が高い時期は養殖魚の活性も高く、嗜好性と成長に遜色ないが、低水温下では嗜好性と成長が劣ることが課題となっている。

本課題では、低水温下でも養殖魚の利用性が高く成長の良い代替飼料原料の使用で価格を抑えた飼料の開発を目的とする。養殖重要種であるブリとマダイを用い、代替原料の消化性を水温別に評価するとともに、飼料配合と給餌量の適正化及び脂質代謝の改善を行うことで低水温下でも成長効率の優れる低魚粉飼料及びその利用技術を開発する。

【主な成果と今後の見通し】

1) 飼料及び原料別の消化吸収特性と代謝への影響の水温別評価

これまでの検討により、マダイやブリでは低水温下でコーングルテンミール (CGM) の消化吸収性が著しく低下し、適水温に比べて水温の影響を強く受ける原料であることが確認されていることから、CGM 含量の異なる試験飼料を用いて、低水温下におけるマダイの飼育試験を実施した。対照飼料として魚粉主体の飼料 (FM) を使用し、CGM 含量の異なる3種類の無魚粉飼料 (CGM5%、CGM20%、CGM40%) を作製した。CGM5 区の体重は試験期間を通じて FM 区と同等であり、CGM40 区よりも有意に高い値であり、CGM20 区の体重は FM 区および CGM40 区の間値を示した。タンパク質、脂質の消化吸収率は CGM40 区において他の区よりも有意に低かった。肝臓および直腸の遺伝子発現を解析したところ、これまでに報告されているように無魚粉飼料給餌によるコレステロール合成系遺伝子発現の亢進がみられたが、一部の遺伝子では CGM 含量の低下に伴い FM 区と同定で減少しており、生理状態の改善が示唆された。

2) 摂餌促進と給餌量適正化による低水温下の成長改善効果の評価

昨年度、魚粉 15%飼料において低水温期に摂餌促進効果がみられたカツオペプチドの添加量を変えた試験飼料 (無添加、0.3%、0.5%) を水温が 20℃を下回る冬季にマダイおよびブリに長期間給餌して最適添加量を検討した。マダイでは試験前半は水温が 17℃を超えていたため、試験区間で摂餌量に差が見られなかったが、水温が 16℃を下回るようになると 0.3%、0.5%添加区で市販飼料、無添加区よりも良かった。成長及び増肉係数は 0.3%区が無添加区および 0.5%区よりも優れていた。ブリでは水温 18℃までは市販区で摂餌量が多かったが、18℃以下になると無添加区以外は同等の摂餌量となった。成長は 0.3%区が最も良かった。以上のことから、ブリおよびマダイの両魚種において、

カツオペプチドを 0.3%添加することで良好な飼育成績が得られた。

ブリにおける消化吸収率を調べたところ、適水温期では摂餌誘引物質添加区で低くなる傾向が見られた。ブリの後腸における消化酵素活性は、アミラーゼおよびトリプシン活性は 0.5%区で有意に低くなった。一方、ペプシンおよびリパーゼ活性は 0.5%添加区で高くなった。

3) 飼料中ドコサヘキサエン酸含量の最適化による低水温下の成長改善効果の評価

昨年度までに決定した DHA・LC-PUFA 量を含む条件でのさらなる低魚粉飼料化のため、魚粉 (FM) 含量 10%あるいは 20%とし、代替タンパク質源として濃縮大豆タンパク質 (SPC) またはチキンミール (P) 加えた飼料、さらにそれらにコーヒー粕 (CG) を添加した飼料を作製した (試験区表記 FM10: 魚粉 10 とし SPC で代替、FM10 CG: FM10 飼料に CG 添加、FM10P: チキンで代替したことを示す)。これらの飼料を用いて水温が低下し始める 10 月から飼育試験を行った。試験終了時の成長は対照の FM50 区が最も良く、次いで FM10P 区で、FM10CG 区・FM20CG 区・FM20P 区がほぼ同等であった。魚粉 10 あるいは 20%飼料で対照区に比べて成長が劣る原因として摂餌量の少なさが考えられた。コーヒー粕の添加によって成長が改善されたことからコーヒー粕は低水温時のブリ用飼料の有用な添加剤になり得ると考えられた。

4) 低水温下における無魚粉飼料のコレステロール代謝と成長への影響評価

無魚粉飼料から魚粉飼料へ切り替えることで無魚粉飼料の給与期間を適正化し、低水温期における無魚粉飼料の悪影響を予防もしくは改善することを目的として、秋季あるいは冬季に魚粉飼料に切り替える区と無魚粉飼料を継続給餌する切り替えなし区を設定して影響を比較した。平均体重は試験区間で有意差はなかったが、終了時の体重は切り替えなし区で最も小さかった。通期の飼料効率冬季切り替え区が秋季切り替え区よりも有意に高く、切り替えなし区はその中間であった。血漿成分では試験中盤でタンパク質やグルコース濃度に秋季切り替え区と切り替えなし区で有意差がみられた。冬季切り替え区のコレステロール濃度は、魚粉飼料への切り替えにより秋季切り替え区と同等まで回復した。試験期間中の 100 g の増体に必要な魚粉量を計算したところ、冬季切り替え区では秋季切り替え区の半分未満であった。冬季に魚粉飼料に切り替えることにより、魚粉使用量を半減させるとともにステロール代謝の悪化と成長低下を抑制できることが明らかになった。

以上の結果から、原料ごとの低水温期の消化誘導性や消化吸収率に基づき考案した無魚粉飼料により魚粉飼料と同等の飼育成績が得られた。また、摂餌誘引物質を適正量添加することにより低水温期でも良好な飼育成績が得られることがわかり、低水温期に摂餌を向上させるための手がかりが得られた。飼料中 DHA 量の調整による低水温期のブリ用飼料の魚粉削減量は 30%までであると考えられた。さらに、低水温期に魚粉飼料を給餌することで無魚粉飼料給餌による胆汁酸代謝の悪化を抑制できることがわかった。

今後は、原料の特性や脂質代謝を考慮した配合組成による低水温期に適した低魚粉飼料開発を進める必要がある。

(1)飼餌料コスト低減対策

イ クロマグロの「腹薄」の発生要因の特定と軽減技術の開発

【目的】

持続的なクロマグロ養殖の推進には、人工種苗と配合飼料の普及が不可欠である。本種の人工種苗については、安定的な採卵技術や種苗生産・沖出し後の飼育技術などの技術開発が進展しているものの、以降の生産効率の低さが普及の妨げとなっている。一方、クロマグロ用配合飼料は民間企業から市販されているが、給餌によって幽門垂などの内臓が肥大し、特に人工種苗では、その肥大に伴って腹部可食部が薄くなる「腹薄」が発生することが重大な課題となっている。

クロマグロの腹薄を軽減・防除するためには、腹薄が生じにくい、すなわち幽門垂の肥大しにくい配合飼料の開発が必要である。しかし、配合飼料の給餌により幽門垂が肥大する原因は明らかになっていない。そこで、本研究では幽門垂肥大のメカニズムを解明するとともに、現状入手可能な生餌と配合飼料を効果的に組み合わせることで腹薄を軽減する給餌技術の開発を目指す。

以上より、本中課題ではクロマグロにおける「腹薄」発生のメカニズム解明と、その軽減が可能な給餌技術の開発を目的とする。

【主な成果と今後の見通し】

1) 腹薄の発生要因の解明

昨年度までの成果により、クロマグロの腹薄には幽門垂の肥大が関連していること、特に人工種苗でその影響が大きい可能性が示された。幽門垂の肥大は生餌給餌に比べて配合飼料給餌で最も顕著であり、生餌主体のモイストペレット（以下、MP）でも軽度の肥大が認められた。今年度は種苗の由来と腹薄との関係を明らかにするため、同一の餌料（MP）を給餌し、天然種苗と人工種苗とでどのような違いがあるのかを調査した。その結果、天然種苗では腹薄が認められなかった一方、人工種苗では軽度の腹薄傾向が確認され、腹腔形状も横方向に拡張するなどの歪な形状になることが確認された。これらの結果から、人工種苗の腹薄には幽門垂肥大以外の要因が関与している可能性が示唆された。

通常、クロマグロ種苗の飼育では、生餌や配合飼料を飽食給餌するが、その際に腹部が膨満することが観察されている。この腹部の膨満が腹腔の形状変化や腹薄に関係している可能性を検証するため、1 g サイズの稚魚ヘイカナゴミンチを飽食給餌し、空胃時との比較を行った。その結果、飽食給餌により胃の面積比および腹腔面積比がともに拡大し、腹腔形状にも変化が生じることが明らかとなった。以上の結果から、クロマグロの腹薄発生には、配合飼料による幽門垂肥大に加え、飽食給餌に伴う腹部膨満が関与し

ている可能性が高いと推察された。今後は、飽食給餌による腹部膨満と腹薄との関係について、引き続き調査・解析を実施する予定である。

2) 配合飼料給餌に伴う内臓肥大メカニズムの解明

配合飼料の給餌によるクロマグロの幽門垂などの内臓の肥大のメカニズムを解明するため、異なる原料を用いて作製した配合飼料が幽門垂など内臓重量に及ぼす影響を調査するとともに、採取した幽門垂を用いて遺伝子発現解析を実施した。配合飼料の原料の処理条件の影響を明らかにするために、凍結乾燥機を用いた非加熱魚粉、食品用の乾燥機で 40-60℃で乾燥させた低温乾燥魚粉、オートクレーブで加熱した加熱魚粉および輸入魚粉をタンパク質原料とする 4 種類の試験飼料をクロマグロ稚魚（体重 1.6g）に 11 日間給餌した。非加熱魚粉およびオートクレーブによる加熱魚粉では、輸入魚粉と比較して成長が優れ、幽門垂重量比が有意に低いことから、腹薄の原因となる内臓肥大を低減可能な飼料の原料として有効である可能性が明らかになった。

幽門垂肥大が生じやすい飼料の特性を把握するため、幽門垂肥大の傾向が異なる輸入魚粉飼料（輸入区）、非加熱魚粉飼料（非加熱区）、生餌（生餌区）の給餌試験サンプルを用いて、摂餌後の経時的な消化吸收動態を比較するとともに、幽門垂における代謝応答の変化を解析した。消化吸收動態の解析では、幽門垂肥大が顕著な輸入区において、胃から腸への内容物移行及び消化酵素遺伝子発現の応答が早い一方で、脂質の消化吸収は遅れる可能性が示唆された。代謝応答の解析では、コレステロール生合成経路の遺伝子群の発現が輸入＞非加熱＞生餌の順に高い傾向を示した一方、血中総コレステロール濃度は輸入＜非加熱＜生餌となり、輸入区では飼料由来コレステロールの利用性が低い可能性が示唆された。以上より、幽門垂肥大が生じやすい飼料特性として、①胃から腸への内容物移行は早い一方で脂質の消化吸収が遅延する可能性、②飼料由来コレステロールの利用性が低い可能性、の 2 点が考えられた。

仔稚魚期の腹薄の発生時期の解明では、餌料用ふ化仔魚から配合飼料と生餌へそれぞれ切り替えた魚体重 1 g の沖出しサイズのクロマグロ稚魚では、腹薄の指標となる内臓肥大は発生していないことを明らかにした。これまで小型水槽を用いた飼育試験において、試験終了時の 10 g 前後では、給餌する飼餌料により、内臓重量比が異なることから、体重 10g までには、腹薄の要因の 1 つである内臓肥大が発生していると推定された。

3) 腹薄発生の軽減技術の開発

これまでの研究成果により、人工クロマグロは配合飼料だけで育てると腹薄になる事が明らかとなっている。そこで小課題 3 では、稚魚から幼魚期という養成の初期段階に生餌の給餌期間を設けることで腹薄現象を軽減する、という給餌戦略の有効性の検証を目的に調査を進めている。令和 5 年度に実施した天然魚を対象にした給餌試験では、0.6

kg の天然魚に配合飼料を給餌すると腹薄になるが、3 kg の天然魚に配合飼料を給餌しても腹薄にならないことが明らかとなった。したがって、天然魚が自然海域で育った期間を、人工種苗における生餌給餌期間と仮定すると、人工種苗においても、1～3 kg 程度まで生餌給餌期間を設けることで、腹薄現象を軽減することが可能であることが推測された。そこで令和 6 年 7 月に沖出しした人工種苗を対象に、最大 3 kg までの範囲で、どのサイズまで生餌給餌することで腹薄現象を軽減できるかを明らかにすることを目的に飼育試験を行った。飼育試験ではサイズ段階的に生餌から配合飼料へ切り替え、令和 7 年 9 月に試験魚の取り上げ、解析を実施した。

解析の結果、腹部筋肉面積比（腹部可食部の多寡の指標）は、生餌の給餌期間が長いほど、高くなる傾向があった（スピアマンの順位相関係数： 0.56, $p < 0.05$ ）。腹腔幅・体幅比（腹腔形状の異常の指標）は、生餌の給餌期間が長いほど、低くなる傾向があった（スピアマンの順位相関係数： -0.60, $p < 0.05$ ）。したがって、人工クロマグロ種苗において、稚魚から幼魚期（少なくとも 3 kg まで）に、生餌の給餌期間を設けることで腹薄の軽減が可能であり、腹薄の軽減の効果は生餌の給餌期間が長いほど、高くなることが明らかとなった。

(1)飼餌料コスト低減対策

(ウ)水素細菌を活用した養殖飼料の開発

【目的】

水産飼料の主要原料である魚粉の供給不安・価格高騰が問題となつてから久しい。それに加え、将来的な人口増加に伴う食糧不足、いわゆるプロテイン・クライシスの問題もあり、天然資源に依存せず、かつ食料資源との競合もない養魚飼料原料の開発は、持続可能な養殖業の発展のために必須である。新規の飼料原料候補として、昆虫、微細藻類および細菌類（単細胞タンパク質）などが挙げられ、それぞれ一長一短ある技術であるが、本課題では単細胞タンパク質の一つである水素細菌（水素酸化細菌）を有力であると考え研究開発を進めている。水素細菌は気体水素を酸化することによりエネルギーを獲得する細菌類の総称である。将来性も含めてのことであるが、養殖飼料としての利点としては、まず、硫酸などの無機塩類や二酸化炭素を原料に有機物（菌体）を合成する独立栄養細菌であるため、低コスト化の可能性が挙げられる。また、培養槽で集約的に生産することができ、国内由来株の *Hydrogenovibrio marinus* MH-110 や *Hydrogenophilus thermoluteolus* TH-1 では倍加時間約 1 時間と独立栄養生物としては異例の高増殖能を持ち、量産化に適していると期待される。それに加えて 50%以上の高タンパク含量であることや動物性タンパク質に近い良好なアミノ酸バランスを持つなど、飼料タンパク源としても好適な特性を持つことが明らかになっている。本研究課題では、水素細菌を養魚飼料として利用するための技術開発を目的としているが、そのための前提となる量産化や菌株改良も含め、包括的に研究開発を進めている。

【主な成果と今後の見通し】

1) 養殖飼料としての生産および利用技術の開発

本小課題では水素細菌を生産し、水産用飼料として利用するための技術開発を目的としている。研究開発の方向性としては、菌体培養、加工、配合飼料作製および給餌飼育試験を行い、飼料としての有効性評価を行うとともに、その過程で洗い出された問題点を各工程にフィードバックしながら逐次改善することを考えている。これまで試験用菌体は凍結乾燥法を用いて調製していたが、生産性やコスト面も考慮し、より簡便な加熱乾燥法に変更し、あらためて水素細菌の飼料としての利用性を評価した。

H. marinus MH-110 菌体を加熱乾燥して作製したもの（菌体ミール）をサンプルとして、飼料成分の消化吸收および成長への影響を調べた。マダイ稚魚を用いて短期飼育により菌体タンパク質・脂質の消化吸收率を測定したところ、80%以上であり、その利用性は良好であると考えられた。それに引き続き、飼料中の魚粉由来タンパク質の半分相当を菌体ミールで置き換えた試験飼料を作製し、6週間のマダイ稚魚への給餌飼育試験を行った。飼育期間中、試験魚の摂餌や成長は確認され、飼料として利用可能であると考えられたものの、魚粉主体の対照飼料と比較して、終体重は 2/3 程度であった。成長指標からは、飼料効率は同等であったが、摂餌率は低く、そのことが成長遅滞の原因であると考えられた。なお、消化管組織などには異常は見られなかったが、比肝重量などいくつかの生理指標には対照飼料区との間に差異が見られ、今後検討が必要である。現時点では、成長遅滞の原因としての摂餌性の改善が一番の問題であり、次年度以降は重点的に改善に取り組む予定である。

2) 水素細菌の量産化に向けた生産基盤技術の開発

水素細菌は水素と酸素を燃焼可能な比率で混合した気体（いわゆる爆鳴気）を原料として通気培養する。産業的・量産化のためにはガス供給技術の高度化はコスト面のみならず安全性の面からも必須である。本課題では量産化に向けてハード面を含めた培養方法の改良に取り組んでいる。

この2年間はガス原料の液体培地への効率的な溶解法の開発を焦点に、機器改良に取り組んできた。本年度から、一方で培養槽に通気するガス原料の混合比を爆発限界以下（非爆鳴気）となるように調整して給気しつつ、不足するガス成分を別系統から培地に混合・溶解した上でその培地を槽内に供給する方式を検討している。これにより、給気系の安全性を高めつつ、培養槽内のガス比を菌体増殖に好適な条件に保つことを目指している。

本年度はこの方式において必要な機器改良と運用条件の検討を行い、気体原料の供給と菌体培養に好適なガス濃度の維持が支障なく行われていることや、実際に本システムを用いて *H.marinus* MH-110 株が良好に増殖することを確認した。本年度の結果を含め、これまでの研究成果については、利活用や社会実装を促進するため、今後技術資料として取りまとめることを考えている。

3) 飼料候補細菌の成分・生産特性の改良および高度化

本小課題では、飼料原料としての効率的生産や成分調整および収益性改善のための副産物（有価物）生産などを目的として、水素細菌の生物機能の解明と利活用に取り組んでいる。研究対象としては、高温性の水素細菌 *H. thermoluteolus* TH-1 を使用しており、ガス原料利用効率化、栄養価の乏しい長鎖の炭化水素 PHB 蓄積の抑制あるいは代謝改変による有価物生産への応用を検討している。それに加えて、ゲノム編集など GM 利用の基盤技術の高度化にも取り組んでおり、将来を見据えた技術開発を行っている。

本年度は PHB 蓄積制御のための代謝機構の精査を行った。合成遺伝子のノックアウト実験系を用いた解析から、これまで知られていた PHB 合成経路（合成遺伝子 *phaA* および *phaB* 依存）以外にもバイパスとなる合成経路が存在する可能性が示唆された。得られた知見をもとに PHB 合成機構のさらなる解明を進め、蓄積抑制と飼料価値向上につなげたい。それに加えて、現在、PHB の分解経路の解析や、PHB とは物性の異なる共重合ポリマーの生産研究も並行して進めている。

水素細菌 *H. thermoluteolus* TH-1 は至適生育温度 52℃かつ微好気性の微生物であり、これまで大腸菌などで利用されてきた GM 技術をそのまま適用しにくい性質を持っている。そのため、耐熱性を持ち酸素非依存条件においても使用可能なレポーター遺伝子の選定や改良を行っている。本菌種は飼料利用以外にも化成品合成などでも注目されている有用微生物である。本事業で得られた成果が波及し、飼料タンパク生産に加えて新たな産業創出につながることに期待している。

(2) 新たな技術（ゲノム育種価）を用いた優良系統の作出

ア サーモン養殖推進技術開発

【目的】

近年、我が国では生食用サーモンの人気が高まり、海外産サーモンの輸入量が大きく増加している。一方、国産サーモンについては、約 10 年前からニジマスやサクラマス類の海面養殖が始まったものの、生産量は伸び悩んでいる。その要因として、国内では海水温が低下する冬季の約半年間しか海面養殖ができないことや、淡水で飼育した種苗を海水へ移行する際に死亡や成長停滞が生じることなどが挙げられる。このような背景から、海面養殖サーモンの生産現場では、海水適応能が高く、短期間の海水飼育でも大きく成長する優良系統が求められている。

本中課題では、ニジマス、サクラマス、サツキマスを対象に、ゲノム選抜技術を用いて国内の海面養殖に適した海水高成長サーモン系統の開発を行う。また、将来の社会実装を見据え、凍結精子の保存・利用技術の高度化や、優良系統の保護方針の作成等を行う。

【主な成果と今後の見通し】

小課題 1) ニジマスの海水高成長育種

令和 5 年度に作出したニジマス育種集団 A (NA) 選抜第 1 世代について、昨年度から継続して海水飼育試験を実施した。海水飼育後体重のゲノム育種価を指標に、基礎集団と NA 選抜 1 世代の世代間比較を行った結果、世代あたりの遺伝的改良度は約 24%と推定され、本育種手法による高い改良効果が示唆された。令和 7 年 12 月には NA 選抜第 2 世代を作出した。NA 選抜第 1 世代の海水飼育個体及び令和 3 年度に作出した基礎集団 (R3 基礎集団) から、海水飼育後体重のゲノム育種価や血縁関係、成熟状況等を考慮して親魚を選んだ。雌親魚 36 個体、雄親魚 36 個体を交配に用い、計 190 交配区を作出した。一部の交配区からは商用集団を作出した。

令和 6 年度に作出したニジマス育種集団 B (NB) 選抜第 1 世代については、昨年度から継続して淡水飼育試験を実施した。令和 7 年 6 月までは成長促進のため加温飼育(約 13~14℃)を行い、その後は通常水温(約 10℃)で飼育した。淡水飼育試験の終了時(令和 7 年 11 月)における平均体重は 209 g であった。令和 7 年 12 月から海水飼育試験を開始し、50 日経過時の生残率は 98.6% (627/636 個体) であった。本試験は令和 8 年 5 月まで継続する予定である。

小課題 2) サクラマス類の海水高成長育種

北海道集団については、令和 5 年度に作出した北海道育種集団 A (HA) 選抜第 1 世代及び令和 6 年度に作出した北海道育種集団 B (HB) 選抜第 1 世代の海水飼育試験を開始した。両育種集団は、令和 8 年度に親魚養成を行い、配偶子を提供して全国集団に統合予定である。

全国集団については、令和 5 年度に作出した全国育種集団 A (ZA) 選抜第 1 世代のスモルトを用いて、3 種類の海水飼育試験(陸上水槽飼育、海面生簀飼育、高水温耐性試験)を実施した。海水飼育時の成長形質に関するゲノム育種価や血縁関係をもとに親魚を選抜し、雌雄各 52 個体を用いて 682 家系からなる ZA 選抜第 2 世代を作出した。また、ゲノム育種価上位個体の 1 対 1 交配により、商用集団を作出した。このほか、令和 6 年度に作出した全国育種集団 B (ZB) 選抜第 1 世代のスモルト 473 個体と、海面養殖に使用されている民間系統種苗 54 個体を用いて海水飼育試験を開始した。

サツキマスについては、全国育種集団 A (SA) 選抜第 1 世代の海水飼育時の成長形質のゲ

ノム育種価を指標に親魚を選抜し、雌雄各 25 個体を用いて 325 家系からなる SA 選抜第 2 世代を作出した。また、要因交配集団 B (SB) 選抜第 3 世代のスマルト 400 個体を用いて、海水馴致試験を行った後、海面生簀での海水飼育試験を開始した。

小課題 3) 精液の凍結保存と利用・評価手法の高度化

冷蔵精子の利用高度化を目的として、人工精漿で 4 倍希釈して保存した精子について、保存後 3、7、14 日の精子運動活性と吸水前消毒法を用いた人工授精成績を調査した。精子の賦活化には 3 種類の溶液 (pH 無調整等張液、塩基性等張液、D532 精子賦活化液) を用いた。その結果、精子の運動活性は保存後 14 日でも確認されたが、発眼卵は保存後 7 日まで得られたことから、実用上の冷蔵保存期間は 7 日間であることが示された。昨年度は保存後 14 日でも発眼卵が得られたことから、今後、使用したサクラマス系統による影響や人工授精の手順についての検証を行う予定である。

凍結精子についても同様に、前述の 3 種類の溶液を用いた精子運動活性と人工授精成績を調査した。凍結精子の賦活化 15 秒後の運動率において、pH 無調整等張液では精子運動率は数%であったのに対し、塩基性等張液と D532 精子賦活化液では平均 40%前後の精子運動率であった。一方、人工授精における発眼胚は全ての実験群からも得られ、群間での大きな差異は認められなかった。

小課題 4) 社会実装に向けた情報収集及び小規模実証試験

令和 6 年度に作成したサーモン社会実装コンソーシアム案の具体化に向け、魚種・地域を代表するサーモンブランド 32 者を対象にサプライチェーン調査を実施するとともに、一次利用者候補 (親魚養成および種卵生産に対応可能な孵化場や内水面業者、一貫生産業者) へ優良系統に関するニーズ調査を行った。その結果、一次利用者候補の多くが優良系統の利用に関心を示した一方で、性能情報の提供や利用条件の明確化を求めており、社会実装を進める上での重要な課題であることが明らかとなった。今後は、小規模実証試験の飼育データの提供方法や優良系統の契約条件について関係者間で協議を重ね、コンソーシアム案の具体化に向けた検討を進める予定である。

小規模実証試験では、水産研究・教育機構水産技術研究所南勢庁舎の海面生簀において、ニジマスおよびサクラマス育種集団の海面飼育を開始した。海水温 15~16℃、淡水との水温差約 2℃という条件下で、水温合わせや段階的な海水馴致を行わずに海水へ直接移行したところ、海水移行後 2 週間までの死亡率は、ニジマス 2.8% (11/397 個体)、サクラマス 0.7% (3/420 個体) と低く、その多くは鳥害によるものであった。これらの結果から、試験に用いた育種集団は、実践的な海面養殖を想定した条件下において十分な海水適応能を有することが示唆された。本飼育試験は令和 8 年 4 月まで継続予定である。

以上のように、令和 7 年度はニジマス、サクラマス、サツキマスの各魚種において、計画どおり、選抜第 1 世代の育成や選抜第 2 世代の作出を行った。さらに、選抜第 2 世代の一部を用いた商用集団の作出、冷蔵精子や凍結精子の性能評価、一次利用者候補へのニーズ調査、小規模実証試験の開始等を通して、社会実装に向けた準備も着実に進んだ。次年度以降も、ゲノム選抜育種による育種効果の蓄積、精子保存利用技術のさらなる高度化、社会実装に向けた取り組みを継続する予定である。

(2)新たな技術(ゲノム育種価)を用いた優良系統の作出

イ 複数形質に優れたブリの開発システムの構築

【目的】

ブリは我が国における代表的な養殖業の対象種で、国内外で需要が高い。しかし、ブリ養殖では、主に天然の稚魚、いわゆるモジャコを種苗として用いるため、種苗供給が不安定だけでなく、乱獲による天然資源への負荷も懸念されている。しかし、人工種苗は割高で品質も安定しないと考えられており、養殖現場への導入は進まなかった。このため、ブリ養殖を持続的に発展させるには、経済的に価値のある優良形質を持つ人工種苗を作出することで、天然種苗から人工種苗への転換を図ることが不可欠である。

そこで、本中課題では、ゲノム育種技術を活用し、市場ニーズの高い複数の形質に優れたブリを開発するシステムの構築と、有用な系統の保存や管理のため、精子の凍結保存技術を活用した育種産物の管理手法の開発を行う。また、国内養殖業者が広く育種産物を利活用でき、且つ国外流出を防止できる体制の構築を検討する協議会の設立に向け、情報を収集する。

【主な成果と今後の見通し】

小課題1) 有用形質のゲノム育種価推定手法の開発と優良個体群の効率的な普及・管理手法の構築

① 複数形質に優れた優良個体群の作出

今年度は、ゲノム選抜によって昨年度作出した第1世代について、1歳時の成長評価とゲノム育種価の推定を行って選抜手法の有効性を検討するとともに、令和5年度に作出した第1世代から体サイズとハダムシ抵抗性に関する選抜によって第2世代を作出し、各形質の表現型情報とゲノム多型情報を収集した。前者では、成長とハダムシ抵抗性に関する選抜によって作出した6つの交配群(超高成長、高成長、準高成長、両形質、平均、ハダムシ)について18ヶ月齢時の体サイズを測定し、11ヶ月齢時の調査結果と併せて交配区間の成長の違いを分析するとともに、親魚群を含めてゲノム育種価を算出した。その結果、いずれの時点でも超高成長区と高成長区は他の区に比べて成長が良く、育種価も親魚群に対して顕著に高くなっており、ブリの成長についてゲノム選抜が有効であるものと考えられた。また、後者では、全形質に優れた個体、成長に優れた個体、成長が劣る個体、ハダムシ抵抗性と成長に優れた個体からなる4つの交配区を設定したうえで、それぞれに対してR5年級の第1世代からゲノム育種価に基づいて親魚を選抜して71家系からなる1,924個体を作出した。これらについては、0歳時での体サイズ測定とハダムシ抵抗性の評価、及びゲノム多型解析が終了しており、次年度に1歳時での成長評価を行ってゲノム選抜の有効性を確認するとともに、ゲノム育種価予測式を更新する予定である。

② 新規有用形質を親魚群に統合するゲノム選抜技術の開発

今年度は、ノカルジア症耐性に関するゲノム選抜によってR5年級第1世代から耐病性系統と感受性系統を作出し、感染試験を行って形質情報を得るとともに、ゲノム多型解析に必要なDNAサンプルを入手した。また、ウイルス性腹水症(YAV)への耐性について、令和6年度に得た形質情報とゲノム多型情報に基づき、ゲノム育種価予測式を構築した。これらのうち、ノカルジア症の感染試験では、異なる濃度で病原菌 *Nocardia seriolae* に暴露した2試験区(高濃度区: 2.3×10^3 cfu/ml、低濃度区: 2.3×10^1 cfu/ml)を設定し、耐病性系統と感受性系統を混合して35日間飼育した結果、累積死亡率はそれぞれ100及び38.5%となり、183個体の生

残日数のデータとゲノム解析用サンプルを得た。また、YAV 耐性のゲノム育種価予測式は、令和 6 年度の感染試験で得られた 977 尾(死亡個体 274 尾、生残個体 703 尾)の生残日数のデータと、それらの GRAS-Di 解析で得た 33,608 座の SNP 情報に基づき、統計ソフトウェア rrBLUP を用いて GBLUP 法によって構築した。その中では、遺伝率は 0.163 と算出され、YAV 耐性に一定の遺伝的影響があることが示された。さらに、遺伝統計ソフトウェア BLUPF90+を用いて、生残と死亡をバイナリ形質とした閾値モデル分析を行ってゲノム育種価を推定した結果、遺伝率は 0.193 と算出され、生残日数に基づく結果を支持していた。今後は、算出したゲノム育種価をもとに試験的に優良家系を育成し、YAV 耐性に対するゲノム選抜の効果をより詳細に検討する予定である。

③ 凍結精子の基盤情報の整備とこれを活用した育種産物普及システムの構築

今年度は、昨年度に引き続き、参画機関である大分県、愛媛県及び鹿児島県と連携して養殖ブリの成熟調査を行うとともに。水産技術研究所及び大分県で人工授精を行って凍結精子の実用性を検証し、ブリ凍結精子の適切な作製方法や使用条件に関するマニュアルを作成した。これらのうち、成熟調査では大分県佐伯市、愛媛県宇和島市及び鹿児島県垂水市の各地先の養殖場の 2 歳魚を対象として、令和 7 年 1 月後半から 6 月中旬にかけて月に 1~3 回、1 回あたり 14~30 尾の成熟度を GSI と生殖器官の組織観察によって調査した。その結果、各海域の成熟盛期は 4 月中旬~下旬であることが示され、鹿児島県では 4 月中旬、愛媛県では同月中下旬、及び大分県では同月下旬が採卵適期と考えられた。また、凍結精子を用いた人工授精では、2 機関を通して 6 尾の雌親を用いた結果、受精率は 12.0~75.1%であり、一定の受精能が確認された。しかし、受精率は卵によって大きく変わる傾向がみられ、今後も引き続き事例を重ねる必要があるものと考えられた。さらに、ブリ凍結精子の作製および使用に関するマニュアルについては、テキストとともに解説動画を作製した。今後、人工受精試験に関する記載を加え、次年度以降公表する予定である。

小課題 2) ブリ優良系統の国内管理体制の構築

今年度は、水産研究・教育機構を事務局、各県の公設試、民間の種苗生産機関、養殖関係者、及び全国海水養魚協会を構成員として昨年度に設立したブリ優良系統の国内管理体制の構築に向けた協議会において、コンソーシアムのルールについて協議し、関係機関で合意されたものを作成した。具体的には、水産研究・教育機構がルール案を作成したうえで、オンライン上で 2 回の協議会を開催し、必要に応じて関係機関との意見交換を行いながら協議会案を取りまとめた。その中では、①コンソーシアムのメンバー、②優良系統の提供方法と数量、③生産データ等の収集に関する取り決め、及び④国外流出防止対策について協議を行った。特に、②に関しては、優良系統の使用目的、提供後の育種方法、希望する提供の形態(凍結精子、受精卵、種苗、親魚候補)と数量についてアンケート調査を行い、具体的な活用体制の構築に向けて意見を収集した。今後、引き続き意見交換を行い、コンソーシアムの設立に向けた準備を進める予定である。

（３）血縁関係を考慮した系統の作出

【目的】

本課題では、天然資源に依存しない人工種苗への転換が進められているクロマグロについては、優良人工種苗の普及に向けた生産システムを構築すること、国産養殖用種苗の供給体制が不安定となっているカンパチについては、遺伝的多様性の確保により人工種苗生産技術を改良することを目的とする。

太平洋クロマグロ（以下、クロマグロ）は、日本周辺を中心に北太平洋に広く分布しているが、近年の資源状態は低水準にある。クロマグロの資源量を適正に管理していくためには、養殖種苗等に用いられる小型魚の漁獲を抑制する必要があるが、未だ本種の養殖は天然種苗に大きく依存している。以上の背景から、天然種苗に依存しない完全養殖技術によって作出された人工種苗の普及・実用化が強く望まれており、人工種苗の生産システムの構築が喫緊の課題となっている。特に、完全養殖の成功以降、生産機関が独自に保有する完全養殖によって継代された系統（以下、継代系統）の多くが継代４～５世代目に達しており、保有する継代系統の遺伝的多様性が低下し、近交弱勢を引き起こすことが懸念されている。また大型陸上水槽を用い本種の成熟・産卵を制御することで、従来よりも２か月早い採卵に成功し、天然種苗と同等に成長する早期種苗の開発に成功しているが、早期種苗の出荷までの養殖魚としての適性については明らかになっていない。

カンパチは、わが国の海面魚類養殖において、ブリ、マダイに次いで生産量が多い最重要種の一つである。本種は主に中国の海南島から輸入された種苗を用いて養殖が行われているが、平成１７年に輸入種苗から大量のアニサキスが検出され、大きな社会問題となった。これを機に人工種苗の生産技術の開発が急速に進み、種苗生産技術は高いレベルに達しているものの、種苗の質や生産個体数は未だ不安定であり、養殖業者からは本種の人工種苗を安定的に供給する体制の構築が求められている。特に本種は生産に用いられる親魚数が少なく、種苗生産において偏った家系組成になっている可能性があり、近交化が進み、近交弱勢を引き起こすことが懸念されている。

以上の背景から、本課題では、中課題アにおいて、天然資源に依らない完全養殖のクロマグロ系統の管理技術および早期種苗を用いた人工種苗の生産システムを構築する。中課題イにおいて、カンパチの親子鑑定の技術開発と親魚候補群の遺伝的多様性を評価する。これら成果により、クロマグロおよびカンパチの血縁関係を考慮した優良な系統の作出技術を構築し、両種の将来に渡って安定的な人工種苗の利用と人工種苗の更なる普及を推進する。

【主な成果と今後の見通し】

ア．クロマグロ優良人工種苗普及のための生産システムの構築

１）優良人工種苗生産のための系統管理技術の開発

本課題では、継代を重ねた完全養殖系統と多様性に富んだ野生魚由来の新規系統の交配により交配系統を作出し、有害形質の原因となる近交を解消することを第一の目的とする。併せて、交配系統と同時期に作出した従来系統の比較飼育試験により、近交の解消が養殖効率に与える影響を明らかにすることを第二の目的とする。さらに、野生魚由来の新規系統の継代に伴う多様性の変化を定量的に評価することを第三の目的とする。本年度は、前年度に作出した次世代の詳細な DNA 解析、および約 ８ヶ月間にわたる飼育データの解析を実施した。DNA 解析の結果、交配系統において多様性の回復と近交の解消が確認された。また、野生魚由来の新規系統の多様性評価において、天然集団から作出した直後の多様性に富む系統であっ

ても、人為環境下における自然交配では産卵寄与親魚の偏りが生じ、数回の継代で遺伝的多様性の喪失と近交の進行が起こることが示された。飼育試験の結果、交配系統は従来系統を上回る生残性を示す可能性が見出され、成長面においても従来系統より優れることが確認された。以上の成果により、系統間交配が近交弱勢に起因する成長停滞や生残性の悪化を効果的に解消し、クロマグロの養殖効率を向上させる技術である可能性が示された。

今後は、本手法を異なる系統や年級群へ応用し、その再現性を検証するとともに、成長性に優れた hybrid を次代の親魚として活用する等の持続的な系統管理技術を構築する必要がある。

2) 早期種苗を用いた養殖システムの開発

本課題では、早期成熟・産卵誘導技術により早期卵を生産する。併せて、民間養殖漁場に活け入れされた早期種苗について、出荷までの成長、生残等の養殖適性に係る追跡調査を行い、早期種苗の養殖適正を評価することを目的とする。本年度は、次年度における早期卵生産に向け、親魚群を陸上水槽へ搬入し、段階的に長日条件へ移行する環境プログラムを適用することで、早期成熟の誘導を行った。一方、早期種苗の追跡調査では、奄美・沖縄地域の養殖漁場に活け入れされた4群の種苗を対象に、育成1～3年間の成長および生残を評価した。その結果、完全養殖により継代した wild2006-2 系統に由来する早期種苗では、早期種苗と通常期種苗の間で大きな成長差は認められなかった。一方、同様に継代した wild2006-1 系統に由来する早期種苗では、他群と比較して高い成長が認められた。また、死亡率は当該年に発生する疾病の影響を受けて変動するものの、育成2年目以降では夏季にやや上昇する傾向が認められた。

今後は、民間養殖漁場に活け入れされた早期種苗について、引き続き出荷までの成長、生残等を調査し、本追跡調査を通じ早期種苗の養殖適性を明らかにする必要がある。

イ. カンパチ人工種苗の安定生産体制の構築

本課題は、カンパチ養殖集団の近交化の回避のため、親子鑑定技術の利用による養殖集団の家系管理や、親魚候補群の遺伝的多様性の評価を目的とする。今年度は、令和7年度生産種苗の SNP マーカーによる親子鑑定を行った。親子鑑定の結果、自然産卵の際に水槽に含まれていた親魚の全個体のうち、次世代作出に貢献した親魚の割合は、雌親で8%から54%、雄親で65%から100%と、例年どおり雌親のほうが低い傾向にあった。同一の親魚群に由来し、複数の生産回次や種苗生産場所でサンプリングされた種苗について親子鑑定を行った結果、生産回次や種苗生産場所ごとに、次世代作出に貢献した親魚の個体やその寄与率に違いが見られた。一部の機関では、複数年度にわたり次世代の作出に貢献した雌親または雄親の存在が示唆された。1機関の種苗について、表現型情報（全長）を取得したが、家系組成との関連は見出されなかった。今年度の種苗生産においては、いずれの機関においても、形態異常魚はサンプリングされなかった。また、今年度に天然魚を導入された機関について、親魚群の血縁度を評価した結果、個体間の血縁関係は見られず、近交係数も低い傾向が見られた。1機関において、特定の親魚群の継代魚を新たに分析したところ、血縁関係にある単一のグループを形成し、近交係数は高い傾向が見られた。さらに、昨年度整理した課題のうち、「群としての産卵の同調」について課題化を検討したが、施設、人員等の制約により困難と判断した。

今後は、生産種苗の親子鑑定による家系組成の把握や、親魚群の血縁度の評価を継続し、遺伝的多様性に富む親魚群の構成を検討する予定である。親魚群の遺伝構造の経時的変化についても調査する。産卵に関与する雌親の数が比較的少ない傾向にあることから、親魚群の

集団規模や雌雄比の調整について考慮する必要がある。

(4)気候変動等外部要因に適応したノリ養殖等の確立

【目的】

近年ノリ等藻類養殖においては、海水温の上昇や海域の栄養塩不足等の外部要因による生理障害や漁期の短縮化、生長不良・色落ち等により、生産が不安定化している。また高水温を背景とした魚類等による食害の拡大は、すでにノリ等の養殖生産に多大な影響を及ぼしている。このような気候変動等外部要因の変化に対処するため、本課題では、既往研究等で育成された高水温適応のノリ育種素材や野生種等の活用による外部要因の変動に強いノリ有用品種の作出・実用化を進めるとともに、育苗期種苗の環境耐性を強化し、健苗化を促進する技術や不安定な野外環境を回避した陸上養殖・畜養技術の開発を進める。また、養殖漁場における栄養塩環境の実態調査や、外部要因の変動下において藻類養殖を適正に行うためのガイドラインを策定する。さらに、食害の実態把握を行うとともに、原因生物の生態特性に基づいた効果的な食害対策技術開発に資する知見を集積する。これらにより、外部要因に適応した養殖ノリ等の持続的・安定的な生産を目指す。

【主な成果と今後の見通し】

ア 気候変動等の環境変化に適応したノリ養殖品種の開発

- ・水産研究・教育機構が開発した育種素材 6C（スサビノリ）を元株とし、室内試験において高水温下での高生長性が確認されている 6C 選抜 1-1 株について、有明海における現地養殖試験を行った。6C 選抜 1-1 株の 11 月～翌年 1 月初めの秋芽網期の葉長は、対照株 U-51 と比較し、有意に大きかった。年内生産を中心とした漁期前半の高収量性が示唆され、漁期の短縮化が懸念される現状において安定生産への寄与が期待される。今後は現場普及へ向けて、高水温耐性の再現性の検証を行う。（課題ア 4）

- ・熊本県が保有する高温耐性株 AH 株から選抜した高生長の AH2 株（スサビノリ）の現場普及に向けて、漁場における養殖試験を行った。AH2 株の生長は、対照株（生産者が使用している株）と同程度であった。室内培養では AH2 株の標準品種（U51）に対する高生長性が得られており、引き続き養殖試験等による特性評価を進める。（課題ア 1）

- ・スサビノリと比較し、高温に強いことが明らかとなった佐賀県産のタネガシマアマノリについて、養殖への導入に向けた採苗に係る諸特性（殻孢子・単孢子の放出）と貧栄養塩耐性を調べた。殻孢子の放出は塩分 25、水温 20～24℃で最も多かった。また、単孢子の放出は 23℃で最大となり、葉長が大きい株ほど放出量が多くなった。貧栄養下における色落ち耐性は、産地によって異なっていたが、宇久産のタネガシマアマノリはスサビノリより高かった。（課題ア 3）

- ・水産研究・教育機構が保有するスサビノリ株およびそれらから高水温選抜等を行った育種素材株を対象に、全ゲノム情報を取得するとともに、色落ちに関連する多数の候補遺伝子から最も低栄養塩耐性の指標となる遺伝子の絞り込みを行った。得られたゲノム情報から、一塩基多型（SNP）サイトを検出しクラスタリングを行ったところ、株間の系統関係を反映したクラスターが得られた。また、栄養塩制限下で発現量が顕著に高かった遺伝子を 3 つ特定した。これらの遺伝子をマーカーとして使用することにより、貧栄養耐性株（色落ちのしにくい株）の効率的な選抜に資することができると考えられる。（課題ア 6）

イ 気候変動等の環境変化に適応したノリ養殖生産技術等の開発

・育苗期種苗の環境耐性を強化するバイオステイミュラント（BS）技術については、技術の高度化をはかるための基礎情報として、高水温ストレスを緩和する BS を活用した際の、ノリ種苗の遺伝子発現の特徴について明らかにした。また貧栄養ストレスを軽減する BS 候補探索を目的として、21 種の有機態窒素の効果を試験した結果、グリシン、メチオニン等 12 種の物質で効果があった。これらの物質に浸漬したノリ種苗は、貧栄養条件下では一時的に生長が抑制されたが、栄養塩条件が改善すると、対照区を上回る生長を示した。BS については、室内での基礎実験を経たのち、現場での応用実験も検討する。（課題イ 1）①）

・ノリ陸上蓄養・養殖に資する技術の開発を最終目標に、異なる光条件下で育てたノリの色調およびそれに伴う色素量の変化を、本来保有する色調が異なる 2 つのノリ株を比較する形で調査した。その結果、青色光の照射により、赤色系色素のフィコエリスリンの増加が共通して認められた。今後は同様の研究を進め、陸上養殖におけるノリの品質向上や色調改善技術に繋げる。（課題イ 1）②）

・有明海漁場において、満潮時と干潮時の栄養塩環境を比較した。熊本県の緑川・白川河口域の沖合域のノリ漁場の表層 DIN 濃度は、満潮時には低かったが、干潮時には河川水がノリ漁場にまで到達し、栄養塩環境が改善することが明らかとなった。現在、ノリ漁場の栄養塩環境のモニタリングは満潮時を中心に行われているが、実際は漁場の栄養塩濃度は短期的に変動している可能性がある。低塩分水のノリ網への接触は、アカグサレ病等の病害を進行させるとして一般に生産者が警戒しているが、ノリ網の管理の方法によっては、干潮時の栄養塩を有効に活用できる可能性がある。（課題イ 2）①）

・ノリ・ワカメ等海藻類の養殖にあたっては、漁場への栄養塩供給力と海藻の栄養塩消費量（またそれらに相互に関連する水温・光量・流速といった環境要因）のバランスが適正である必要がある。海藻類の適正養殖可能数量の考え方を示した「海藻類の適正養殖可能数量推定ガイドライン（案）」を作成した。（課題イ 3））

ウ 食害対策技術の開発

・AI による物質検出モデル（YOLOv5s モデル）により、漁場で撮影された画像上で食害魚クロダイを検出する技術を確立した。今後は被写面積を補正することにより、出現頻度をより精緻に把握し漁場間の比較等を行うことにより、クロダイの出現状況の正確かつ迅速な把握と出現特性の解明を進め、現場漁場における防除対策へ繋げる。（課題ウ 1））

・瀬戸内海域のノリ漁場周辺においてクロダイの生態的特性の解明を行った。クロダイの主要な餌は二枚貝類やカニ類であり、養殖ノリに依存しているのは特定の個体であることを明らかにした。また、養殖ノリを食べるクロダイは沿岸の岩礁域や人工構造物とノリ漁場との間を行き来しており、水中ドローンの調査により夜間はこれら沿岸域の構造物をねぐらにしていることを明らかにした。今後は、これらの知見を、食害を起こすクロダイの効率的な駆除技術の開発に繋げていく。（課題ウ 2）、3））

・岡山県下漁場で生産者が防護網による食害対策を施した場合の効果を生産量、生産額等を指標として定量評価した。12 月～翌年 1 月の生産期間において、防護網を施した場合の生産枚数は、無対策の場合に比べ 4～52 倍、また生産額は防護網を施した場合 250～290 万円/1 区画（ノリ網 10 枚）であったのに対し、無対策区では 5～76 万円/ 1 区画であった。（課題ウ 5））

・本課題のこれまでの成果をとりまとめ、生産者や一般向けのパンフレットを作成した。（課題ウ 全課題）