

令和6年度養殖業成長産業化技術開発事業

報告書 (概要版)

令和7年3月

養殖業成長産業化技術開発共同研究機関

(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收特性と代謝への影響の水温別評価

昨年度ブリおよびマダイ稚魚で確立した低魚粉飼料に適した基本飼料（魚粉 20%）7 に対して各種飼料原料 3 の割合で混合した飼料を用いて、適水温および低水温における各種原料の消化吸收率を調べた。マダイでは適水温、低水温ともに、植物原料のほうが動物原料よりもタンパク質消化吸收率が高い傾向があった。ブリにおいては、適水温では牛肉骨粉が大豆油粕に比べて有意に低いタンパク質消化吸收率であった他は、原料間に有意差はなかった。水温間で比較すると、コーングルテンミールのタンパク質消化吸收率は低水温時に有意に劣ることが明らかとなった。高水温（25℃）と低水温（15℃）で飼育したブリ稚魚に強制的に飼料原料を単独で投与（強制給餌法）した後、胆のう重量を測定すると共に腸内容物を採取した。適水温ではフェザーミールを除く原料で胆汁の分泌が確認されたが、低水温では牛肉骨粉とチキンミール以外の原料の胆汁分泌は弱かった。ドコサヘキサエン酸（DHA）含量の異なる飼料で飼育したブリの遺伝子解析では、DHA 含量の増加に伴い、コレステロール、ステロイド脂質生合成が安定化し、脂肪酸など積極的な代謝が行われていることが示唆された。

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 30%飼料において摂餌が低下する水温 20℃以下で摂餌促進効果がみられた原料（カツオペプチド、スパイスミックス）を添加した魚粉 15%の試験飼料を 11 月以降の低水温期にマダイおよびブリに給餌してその効果を検討した。マダイではカツオペプチドを添加した飼料の摂餌量は、市販飼料よりも増加し、成長も市販飼料と同等であった。一方、スパイスミックスを添加した飼料および無添加飼料は、市販飼料よりも摂餌量、成長ともに劣った。ブリでは、水温下降期にはいずれの試験飼料も市販飼料よりも摂餌量が少なかったが、水温が低下しほぼ一定となった期間は、無添加区以外の摂

餌量はほぼ同じであった。市販飼料に比べて試験飼料の成長は劣った。魚粉 15%飼料を給餌したブリの消化管より抽出した消化酵素を用いて、適水温 (23℃) と低水温 (16℃) における消化酵素活性を測定した。また、適水温 (25℃) および低水温 (16℃) で飼育したブリを用いて魚粉 15%飼料の消化吸収率を調べた。ペプシン活性は低水温で低くなる傾向がみられ、トリプシン活性は幽門垂において同様に低水温で有意に低くなった。リパーゼ活性は前腸において低水温で有意に高くなった。適水温と低水温においてタンパク質と脂質の消化吸収率に大きな差はなかった。

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

水温が下降し始める 10 月から 1 月にかけて、ドコサヘキサエン酸含量 (DHA) が一定で、魚粉含量の異なる飼料 (魚粉 10-50%) によりブリを飼育した。飼育開始 4 週間では平均体重に試験区間に有意差はなかったが、8 週後から魚粉 40%と 10%で有意差が見られ、12 週目には魚粉 40%、50%、30%、20%、10%の順で優れた成長を示した。飼料効率に試験区間に有意差はなかったが、平均体重と同じ順序であった。また、摂餌量も飼育成績と同様の傾向であったことから、飼料中の魚粉量の低下に伴う飼育成績の低下は、摂餌量の低下が一つの原因であると考えられた。低水温期の脂質代謝を改善することが期待される添加物、および添加物中の有効成分と考えられた精製品を混合した魚粉主体飼料で、11 月から 12 月にかけて 6 週間ブリを飼育したところ、添加物を加えた試験区で成長がやや改善する傾向が見られた。一方、有効成分と考えられた精製品を添加した試験区では、対照に比べ成長が劣る傾向が見られたことから、精製品のみの添加では負の影響があると考えられた。

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

適水温期に魚粉飼料および無魚粉飼料で馴致したマダイに、各種飼料原料を強制的に投与して胆汁酸代謝に及ぼす影響を調べた。無魚粉飼料で馴致したマダイでは、魚粉飼料で馴致した魚に比べて胆汁の分泌量が少ないことが示唆され、その影響は大豆粕で顕著であった。無魚粉飼料給餌により適水温期においても胆汁酸代謝に多くの悪影響が認められたことから、低水温期ではさらに胆汁酸代謝が悪化すると推察された。胆汁酸代謝を改善する効果を持つと推察されるコレステロールを含む原料を混合した無魚粉飼料で、低水温期にマダイを給餌飼育してその効果の確認を行った。コレステロール添加飼料の給餌により、血漿中のコレステロール濃度の上昇やコレステロール合成遺伝子の発現量の低下など、血清成分や遺伝子発現量を変動させることはできたが、成長や飼料効率に対する改善効果は見られなかった。

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が明らかになり、消化生理に基づいた効率的な飼料を作製する基盤情報が得られた。また、摂餌誘引に効果のある原料が明らかになり、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。飼料中の DHA を適正化することで、低水温期において魚粉 30%の低魚粉飼料でも魚粉飼料と同等の飼育成績が得られることが明らかになったが、さらなる低魚粉化には摂餌の改善が必要なが示唆された。さらに、馴致飼料の違いにより各種原料の胆汁酸代

謝に対する影響が異なることがわかり、今後の飼料配合の改良で考慮すべき新たな情報も得られた。

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とともに、効率的に飼料が利用されるように給餌量の適正化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、クロマグロ人工種苗と配合飼料の普及が必須である。クロマグロ人工種苗は安定的な採卵技術の開発、種苗生産・沖出し後の飼育技術の開発が進んでいるが、低い生産効率が普及の足枷となっている。クロマグロ用の配合飼料は民間各社から販売されているが、配合飼料の給餌により幽門垂などの内臓が肥大すること、特に人工種苗では幽門垂の肥大に関連して発生する「腹薄」現象（腹身のトロに相当する腹部可食部が薄くなる）の軽減が喫緊の課題となっている。クロマグロの腹薄を軽減、防除するには腹薄になりにくい配合飼料を開発する必要があるが、なぜ配合飼料の給餌により幽門垂が肥大するのか明らかになっていない。このため、幽門垂の肥大メカニズムの解明を進めるとともに、現状で入手可能な生餌と、配合飼料の2種を効率的に使用することにより腹薄を軽減する技術を開発する必要がある。

上記より、本中課題ではクロマグロの「腹薄」の発生メカニズムを解明するとともに、「腹薄」を軽減可能な給餌技術を開発することを目的とする。

【主な成果と今後の見通し】

1) 腹薄の発生要因の解明

昨年度の成果により腹薄の評価指標として、腹部筋肉厚・脊椎骨比（＝体側面から上部腹腔までの長さ／体側面から脊椎までの長さ）が有効であることを明らかにした。超音波画像診断装置によりそれらの部位をどの程度の精度で測定可能かを調べたところ、実測値との誤差は0.81 cmであった。これら一連の研究成果から、超音波画像診断装置により非破壊により腹薄の程度を評価する新しい手法を開発した。

モイストペレット（以下、MP）給餌が腹薄に及ぼす影響を明らかにするため、まき網で採捕され養成された天然由来養殖クロマグロ、および人工由来養殖クロマグロの出荷魚を対象に調査を行った。その結果、両群においてMP給餌により幽門垂の肥大は認められなかったものの、人工由来養殖クロマグロでは天然由来養殖クロマグロと比較して腹薄傾向であった。このことからMPの給餌により人工由来養殖クロマグロでは腹薄傾向になる可能性が示唆された。一方で、幽門垂の肥大と腹薄との関連性を見出すことができなかったことから、成熟など他の要因により腹薄が引き起こされた可能性もある。そのため、引き続き調査、解析を行う予定としている。

幽門垂に関する基礎的知見を得るため、鳥取県の境港に水揚げされるまき網で漁獲されたクロマグロを対象に調査を行った。その結果、幽門垂は成長とともに重量が大きくなるが、体重に対する重量比は小さくなることが分かった。また、幽門垂に含まれる粗脂肪含量は8.0～39.5%で、人工クロマグロ（20～65%）と比較すると低いことが明らか

となった。これらの知見は幽門垂の肥大とも関連する可能性があることから、引き続き調査、解析を行うこととしている。

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。

配合飼料の原料の加熱の影響を明らかにするために、加熱魚粉と非加熱魚粉をタンパク質原料とする2種類の試験飼料をクロマグロ稚魚（体重 5.8 g）に12日間給餌した。加熱魚粉区では、非加熱魚粉区と比較して内臓重量比が増加し、腹部筋肉面積比が低下するなど、原料の加熱処理が、内臓肥大および腹薄の要因の1つであることを明らかにした。

配合飼料の原料の粒度の影響を明らかにするために、生餌を対照区として、加熱魚粉、異なる粒度の非加熱魚粉（粗目・粉末）で調整した試験飼料をクロマグロ稚魚（体重 3.8 g）に給餌した。今回の試験では、粒度の違いによる内臓肥大への明瞭な違いはみられなかったが、飼育実験の実施可能なクロマグロ稚魚が摂餌可能な飼料の粒径や、飼料の製造方法などの制約により、原料の粒度が試験飼料に反映されなかった可能性が考えられた。生餌、加熱魚粉飼料および非加熱魚粉飼料を比較すると、これまでと同様に、加熱魚粉では内臓が肥大し、非加熱魚粉では、加熱魚粉と比較して内臓の肥大が抑制された。摂餌後の消化管の内容物重量の動態や分子量分布は、給餌する飼餌料により異なり、加熱魚粉では、生餌や非加熱魚粉と比較して、多量の内容物が短時間で腸管内へ流入することを明らかにした。

幽門垂肥大と関連する生理学的な変化を明らかにするために、原料の加熱の影響の飼育実験を対象として、幽門垂等の消化管組織の網羅的遺伝子発現解析を実施した。幽門垂肥大が見られた加熱魚粉区では、コレステロール生合成関連の遺伝子群の発現が増加しており、令和5年度試験（生餌、市販配合、非加熱魚粉飼料）と類似した傾向を示した。また、一部の消化管ホルモン遺伝子（Ghrelin, GIP, Pyy）の発現が幽門垂サイズと相関する傾向が見られたことから、幽門垂肥大と関連することが示唆された。

幽門垂肥大における細胞レベルの生理学的な応答を明らかにするために、生餌または市販飼料をそれぞれ給餌した個体を対象として、幽門垂のシングルセル遺伝子発現解析を実施した。その結果、幽門垂を構成する細胞のうち13種類の細胞集団を特定することができた。さらに、市販飼料区（幽門垂肥大化）において、消化管ホルモンを産生する細胞群では、器官の発達や細胞増殖に関連する遺伝子群の発現が増加していることが明らかとなった。以上のことから、幽門垂組織におけるシングルセル解析の有効性が示された。

仔稚魚期の腹薄の発生時期の解明に向けた調査手法の確立においては、沖出し前の全

長 50 mm以下の個体をホルマリン固定後に内臓重量を測定することにより、内臓重量比の算出が可能となることを明らかにした。今後は、異なる餌料系列で飼育した個体の内臓重量比をこの手法により算出することにより、腹薄の発生時期の解明が可能となる。

3) 腹薄発生の軽減技術の開発

昨年度までの調査により曳縄サイズ（体重約 500 g）のクロマグロに配合飼料を給餌すると腹薄になるが、まき網サイズのクロマグロ（体重約 2～3 kg）に配合飼料を給餌しても腹薄にならないことが明らかになっている。これらの結果から、ある一定サイズまで生餌で飼育すれば、腹薄を軽減できる可能性があることが示唆された。そこでクロマグロの腹薄を軽減・防除する給餌方法を開発するため、人工クロマグロを一定のサイズまで生餌で飼育し、それ以降は配合飼料とする、という新たな餌料系列の仕組みを考案し、飼育試験を実施している。令和 6 年に生産した人工クロマグロを用いて、体重 500、1000、1500、2000、2500、3000 g までの各ステージまでは生餌を給餌し、それ以降は配合飼料へ切り替える試験を実施している。これまでに 2000 g サイズまで切り替え試験を完了しており、生残・育成ともに順調に進んでいる。本試験は令和 7 年の秋まで継続的に飼育し、試験終了時に腹薄の程度を評価する予定としている。

腹薄が肋骨の形状や腹腔内での位置関係に及ぼす影響を明らかにするため、腹薄が顕著な人工由来養殖クロマグロに配合飼料を給餌した個体（以下、人工配合魚）と、腹薄の影響のない天然由来養殖クロマグロに生餌を給餌した個体（以下、天然生餌魚）を対象に CT 撮影を行い、解析を行った。解析では、それぞれ約 20 kg の大型個体と約 1 kg の小型個体を選び、解析対象とした。その結果、肋骨・体幅比（肋骨間距離が最大となる値を断面の最大体幅で除した値）と肋骨・脊椎比（一對ごとの肋骨間距離の中間点から脊椎骨の中心点までの距離を肋骨間距離で除した値）ともに人工配合魚が天然生餌魚よりも大きくなっていた。この結果は、大型個体、小型個体で共通の結果であり、腹薄魚で特有の腹腔上部が広がる現象と大きく関連しているものと推察された。次に、3D 化した CT 画像から一對の肋骨の末端と肋骨基部間の中間点から基部までの角度を計測したところ、大型個体では第 4 肋骨以降、小型個体ではすべての肋骨で人工配合個体が天然生餌個体よりも大きくなることを明らかにした。以上より、肋骨・体幅比及び肋骨・脊椎比、肋骨の角度により、腹腔の形状に大きく関係する肋骨の形状の評価が可能となる。

(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開発

【目的】

養魚飼料の主要な原料である輸入魚粉の供給不安や価格高騰が問題視されるようになってから久しい。天然由来である魚粉に依存した養魚飼料の現状から脱却し、今後も養殖業が持続的発展を続けていくためには養魚飼料の低魚粉化技術の高度化とともに新規飼料原料の開発が急務である。本課題では無機物（水素、酸素、二酸化炭素及び無機塩類）から有機物（菌体）を合成できる独立栄養生物としての性質を持つ水素細菌類を新規飼料原料の有力な候補と考え、その利活用を目指している。水素細菌はこれまで飼料としての使用実績が乏しい上、ガス培養など特殊な生産技術が必要であるものの、集約的生産が可能であること、菌種を選べば倍加時間が速いこと及びタンパク質含量が高く養魚飼料向きであること、などの利点がある。本研究においては、水素細菌を養殖飼料として利用するための技術を開発することが主目的であり、そのための前提となる量産技術開発や将来に向けた生産技術の高度化に関しても相互に連携しながら研究を進めている。

【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

本課題は水素細菌を養魚飼料として生産・利用するための技術開発を進めている。これまでに実験室規模ではあるが、水素細菌の連続通気培養系を用いて、菌体の成分特性や養殖魚への短期給餌飼育による消化吸收特性の解析などを進めてきた。昨年度までに、潤沢とは言えないまでも、*Hydrogenovibrio marinus* MH-110 については継続的に菌体サンプルが生産できるようになったことや、*Hydrogenophilus thermoluteolus* TH-1 など菌種によっては有機培養で代用できることもあり、本年度は、こうした菌体をサンプルとして 6 週間の給餌試験を行った。

H. marinus MH-110 に関しては、魚粉主体（FM50%）の飼料を対照とし、魚粉タンパク質の 4 割を菌体原料で代替した試験飼料を作製した。マダイ稚魚を 6 週間給餌飼育したところ体重増加は確認されたものの、対照飼料と比べて成長は劣った。その主な原因は摂餌への影響であり、改善が必要と考えられた。組織観察では消化管などに特に異常は見られなかったが、体成分分析では脂質含量の低下が確認された。

また、*H. thermoluteolus* TH-1 菌体を用いて魚粉の 5 割を置き換えた飼料においても、期間中の体重増加は確認されたものの、こちらも魚粉主体の対照飼料と比べて成長は遅滞した。今後養魚飼料として利活用を進めるためには、菌体原料の加工・調整法などに改良を加え、摂餌性や利用性の改善を進める必要がある。

2) 量産化に向けた生産基盤技術の開発

この課題では、菌体の産業的生産を視野に入れ、量産化のために必要な技術開発を進めている。菌体の生産性を高めるためには、高速かつ高密度で増殖させることが望ましく、そのための最適な条件を維持できる培養システムの開発が望まれる。これまでに、本事業において水素細菌の連続通気培養系を確立し、増殖特性の解析に用いてきた。良好な対数増殖を維持するため、継続的に制御すべき培養条件として重要なものは、pH や温度のほか、原料ガスの培養液中の濃度が挙げられる。連続通気培養においては、培養液に混合気を吹き込み、溶解させることにより、菌体増殖に必要なガス原料を供給する。高増殖のためにはガス供給は

多いほど良い反面、培養液に溶解しなかった過剰のガスは利用されずに系外に排出されることになる。生産性と収益性を両立させるためには、給気したガス原料を効率的に溶解させ、菌体生産に利用することが重要である。本年度は、量産技術開発の一つとして、原料ガスの効率的な利用促進の観点から、培養機器の改良を行い、ガス溶解の効率化に取り組んだ。

給気ガスを効率よく培養液に溶解するシステムを考案し、ジャー培養機に装着して溶存酸素濃度を指標としてガス溶解度への効果を確認した。攪拌数 400-800rpm の条件下で k_La 値（ガス溶解度の指標）は 30-60% 向上しており、培地へのガス吸収速度は改善するものと推察された。続いて、水素細菌 *H. marinus* MH-110 の培養において本システムの有効性を検討したところ、ガス溶解速度が水素細菌の増殖速度の律速となる条件下において、菌体増殖の倍加時間が短縮することが確認された。これらの結果はガス利用の向上に資する知見であると考えており、今後はさらなる高度化や実証を続けていく予定である。

3) 飼料候補細菌の成分・生産特性の改良および高度化

この課題では水素細菌の生産や利用に関して生物学的視点から、生産性の向上、成分蓄積制御および収益性改善のための有価物生産に取り組んでいる。これまで二つの方向性をもって研究を進めており、一つは水素細菌のもつ代謝特性を解明し、本来持つ生物学的な機能を最大限に引き出して利活用することであり、もう一つは遺伝的改良が比較的容易であるという微生物の利点を生かした遺伝子組換えやゲノム編集（GM 技術）の利用である。

この課題で対象としている水素細菌 *H. thermoluteolus* TH-1 は至適温度 52℃での倍加時間は約 1 時間であり、独立栄養生物としては異例の高増殖能を持ち、またバイオプラスチックである PHB を合成することが知られている。PHB の過度の蓄積は養殖用飼料としての価値を低下させると考えられ、現在、蓄積制御や PHB に代わる有価物生産に向けた基盤研究に取り組んでいる。また、本年度から TH-1 の水素利用の効率化に関しても検討を開始した。水素細菌の生産にとって、単位水素あたりの菌体生産量を向上させることは生産性やコストダウンにとって重要な課題である。水素濃度、酸素濃度および菌体増殖の関係を検討したところ、通常の通気培養で用いられる水素濃度（70-80%）より低い濃度（10%）においても菌体増殖が確認され、また、酸素濃度が低いほど水素の単位量当たりの菌体生産が向上することが明らかになった。こうした知見は生産性の向上に資するだけでなく、可燃性である水素の取り扱いの面からも有用な知見になると考えられる。

GM 技術の開発に関しては、ゲノム編集技術の高度化に取り組んでいる。TH-1 は高温性の細菌であることから大腸菌などで汎用される手法がそのまま利用できるとは限らず、利用できるベクター、選択培地およびレポーターアッセイなど基盤的な技術についても再検討する必要がある。耐熱性のベクターやレポーター検索など個別の技術的課題を解決しつつ、多重遺伝子破壊に向けた無マーカー変異株作製法の開発など、将来に向けた技術開発を進めている。

(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く、海外産サーモンの輸入量が大きく増加した。その一方で、国産サーモンについては、10年ほど前からニジマスやサクラマス類の海面養殖が始まったが、生産量は伸び悩んでいる。この原因としては、国内では海水温の低下する冬季の約半年間しか海面養殖できないことや、淡水で飼育した種苗を海水に移行した時に死亡や成長停滞が生じてしまう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、ゲノム選抜技術によっ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て、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などを行う。

【主な成果と見通し】

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、昨年度より継続して淡水期の成長試験を実施した。令和6年5月までは成長促進のため加温飼育(約12℃)を行った後、通常水温(約10℃)で飼育した。淡水成長試験の終了時(令和6年11月)、試験魚590個体の平均体重は307gであった。令和6年12月より海水期成長試験を開始し、31日経過時の生残率は99.7%であった。本試験は令和7年4月まで継続する予定である。

令和6年12月からニジマス育種集団 B (NB) 選抜第1世代の作出を行った。令和3年度に作出した基礎集団(R3基礎集団)や静岡ドナルドソン系などから雌親魚33個体、雄親魚34個体を交配に用い、265交配区を作出した。交配に用いる親魚を選ぶ上では、R3基礎集団の遺伝解析を行い、海水飼育時の体重のゲノム育種価を推定し、参考にした。育種シミュレーションにより、NB選抜第1世代では体重の大きな増加が見られないが、NB選抜第2世代以降に十分な体重増加が予測された。

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、数世代の海水飼育を経験したサクラマス(海水高成長個体)から北海道育種集団 B (HB) 選抜第1世代を作出した。HB選抜第1世代は、令和5年度に作出した北海道育種集団 A (HA) 選抜第1世代と共に、令和7年度から令和8年度にかけて海水飼育試験と親魚養成を行い、全国集団に統合予定である。

東北集団については、親魚候補に疾病や形態異常、性比の偏りが生じたため、選抜第1世代作出を見送り、全国育種集団 B (ZB) 選抜第1世代に統合した。このような計画変更を行ったが、早期統合によるメリット(ZBの多様性増加や研究の効率化など)もあるため、本小課題全体の研究推進には問題ない。

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世代のスマルト1,600個体を選抜し、海水飼育試験を開始した。今後は令和7年4~6月まで陸上水槽

及び海面生簀で飼育し、令和 7 年秋に ZA 選抜第 2 世代を作出予定である。この他、4 つの親魚群（海面養殖用の民間系統、北海道集団由来の海水高成長個体、全国基礎集団の 2 歳魚、東北基礎集団の 1+春スモルト個体）から、雌雄各 115 個体を用いた総当たり交配を行い、1,189 家系からなる全国育種集団 B（ZB）選抜第 1 世代を作出した。

サツキマスについては、全国育種集団 A（SA）選抜第 1 世代のスモルト 400 個体を用いて、海面生簀での海水飼育試験を開始した。また、要因交配集団 B（SB）の海水飼育個体を親魚に用いて SB 選抜第 3 世代を作出した。

小課題 3) 精液の凍結保存と利用・評価手法の高度化

解凍後精子の評価手法の検討として、凍結前の新鮮精液を用いて精子のパラメーター（精子濃度、精子生残率、精子 ATP 含量、マロンジアルデヒド（MDA）量）と精漿のパラメーター（pH、電気伝導率、酸化還元電、精漿浸透圧）と凍結解凍後の精子運動率との相関を検討した。繁殖期終了後でも凍結解凍後精子の運動率は良好であったため、解凍後精子の評価に資すると考えられる顕著な相関を示すパラメーターは得られなかった。

短期的な冷蔵保存が可能な期間を明らかにするため、異なる希釈条件（無希釈、2 倍、4 倍）において保存後 3、7、15、23 日における人工授精成績を調査した。また、人工授精では精子賦活化液（塩基性）を用いた乾導法、吸水前消毒法（中性・塩基性等張液）についても検討した。その結果、受精には塩基性の環境が適していること、精液を 4 倍希釈し冷蔵保存することによって、約 3 週間にわたって精子の受精能力を維持できることが示された。

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 5 年度に作成したサーモン優良系統の保護方針に関する一次案を更新し、最終案を取りまとめた。また、計画を前倒しして、中課題イ「複数形質に優れたブリの開発システムの構築」で検討中の「(仮)ブリ優良人工種苗供給コンソーシアム」を参考にして、そのサーモン版となる「サーモン社会実装コンソーシアム案 ver. 1」を作成し意見交換を開始した。

社会実装や実証試験の参考になるような先行事例（例：民間業者等の実施しているサーモン海面養殖事業）を情報収集するため、ニジマスは中部・西日本エリア、サクラマスは北海道エリア、東北エリア及びそれ以外の 3 エリア、サツキマスは四国エリアを対象に調査を行った。調査結果は、小課題 1)～3) の研究計画の立案にも活用された。

以上のように、令和 6 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、選抜第 1 世代の育成や新たな育種集団の作出を行った。また、育種シミュレーションを実施し、次世代以降の育種効果を予測した。希釈冷蔵精子の性能評価やサーモン優良系統の保護対策案の策定などにより、社会実装に向けた準備も着実に進んだ。次年度以降は、育種集団の選抜交配を進めて育種効果を徐々に積み上げていくこと、冷蔵精子及び凍結精子の活用方法をさらに高度化すること、社会実装や実証試験に向けて養殖現場の情報収集や社会実装コンソーシアム案の検討を進める必要がある。

(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、昨年度に構築したゲノム予測式を用いて親魚(G_0)のゲノム選抜を行い、新たに G_1 を作出するとともに、昨年度作出した G_1 の形質評価を行ってゲノム予測式を更新した。前者では、 G_0 において①体サイズについて選抜、②体サイズについて弱い選抜、③ハダムシ抵抗性について選抜、④両形質について選抜、及び⑤両形質について平均的な個体の選抜をそれぞれ行った5群から G_1 を作出し、それらのゲノム多型情報を得た。後者では、昨年度作出した G_1 について海上生け簀で自然感染したハダムシの寄生数と1歳時の体サイズを調査してそれぞれ約500個体のデータを得たうえで、これまでに蓄積した既往の生産群のビッグデータと統合してゲノム育種価と遺伝率を算出した。その結果、昨年度作出した G_1 のゲノム育種価は過去の生産群に比べて高い傾向にあり、遺伝的能力が向上していることが示唆された。また、交差検証法によってゲノム育種価による形質予測の精度を検証した結果、体重とハダムシ抵抗性ともに従来 of 血統ベースの育種価より向上していた。これから両形質のゲノム育種価予測が十分に可能で、特にハダムシ抵抗性は遺伝情報のみによる選抜へと早期に移行できると考えられた。

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、ゲノム選抜育種に必要な耐病性に関する情報を得るため、まず上記1)-①

で新たに作出された G₁ をウイルス性腹水症の感染試験に供した。昨年度に選定した条件でウイルス感染を行って 3 水槽で 26 日間飼育した結果、生残率は 56.4~86.9%となり、全体で 703 尾の死亡個体と 272 尾の生残個体のサンプルを得た。今後、家系判別を行って家系間での耐性の違いを確認する予定である。次に、ノカルジア症抵抗性について、昨年度に得た 2,360 尾のサンプルについてゲノム多型解析を行って 1,751 座の SNP 情報を得るとともに、感染試験での個体毎の生残日数を形質情報とするゲノム育種価予測式を構築した。その結果、生残日数における遺伝率から、ノカルジア症に対する抵抗性には一定の遺伝的影響があることが示された。また、予測式の構築に先駆けて予備的に実施した死亡個体の時期別の家系組成の分析では、試験開始後 14 日までと 20 日以降に有意な違いが検出された。今後は、ゲノム育種価をもとに試験的に優良家系を育成し、ゲノム選抜の効果をより詳細に把握することが有効と考えられる。

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、昨年度に引き続き精子の運動活性を指標として簡便かつ長期保存に適した精子の凍結手法を検討するとともに、民間養殖場の親魚の活用に向け、参画機関と連携して養殖場での成熟調査を行った。前者では、現在 10%としている 300 μ l/粒のペレット法で凍結時の精液の終濃度について 20%まで高くしても凍結後の運動活性が変わらないことと、使用時の解凍温度についてペレット法では 4~60℃まで、ストロー法では 22~60℃までの間で運動活性に顕著な差が認められないことを把握した。一方、養殖場での成熟調査では、2+魚を対象とし、大分県では令和 6 年 1~6 月の間に 10 回、計 300 個体について、愛媛県では同年 2~6 月の間に 6 回、計 76 個体について、生殖腺体指数を算出するとともに生殖腺の組織学的観察を行った。その結果、大分県では 4 月下旬が、愛媛県で 4 月中旬から 5 月の間が採卵適期と考えられた。現在、大分県、愛媛県、鹿児島県において令和 7 年の春季に向けた調査を開始しており、2 月以降順次サンプルを入手する予定である。

小課題 2) ブリ優良系統の国内管理体制の構築

今年度は、昨年度に引き続き、国内のブリ養殖関係者のうち、優良系統の一次利用者として親魚養成、採卵および種苗生産を実行し得る者を対象に意見交換を行うとともに、協議会の構成メンバーの選定を行った。それらのうち、意見交換については、公設試 1 者、種苗生産業者 2 者、JV(種苗生産と養殖業者による共同体)1 者及び民間企業(種苗生産から養殖まで一貫して実施できる者)1 者と令和 6 年 5 月から令和 7 年 1 月の間に述べ 6 回実施した。その中では、優良系統提供時に提示されるべき留意事項と、一次利用者とコンソーシアムの間で締結される成果物提供契約 (MTA:Material Transfer Agreement) における罰則についての意見が多く出された。特に、MTA については、国外への流出防止の観点から契約違反した場合の罰則を厳格にすべきとの意見があり、そ

の是非について協議会の中で十分に検討すべきと考えられた。一方、協議会については、これまでに意見交換を行った全ての者から参加の内諾が得られたため、公設試 5 者、種苗生産業者 2 者、JV1 者、民間企業 2 者及び一般社団法人 1 者と当機構を合わせた 12 者をメンバーとした。現在、協議会での検討項目と検討内容についての素案の作成を進めている。

(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及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、クロマグロ及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、完全養殖により継代を重ねた継代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異系交配系統（以下、交配系統）を作出し、生産性低下の原因となる近交弱勢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次世代の継代系統との比較飼育試験により、近交化の解消が成長や生残などの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。本年度は、長崎庁舎の陸上水槽と奄美庁舎の海上生簀で交配系統と次世代の継代系統を作出し、遺伝解析により交配系統の多様性が回復し、近交化が解消されたことを確認した。続いて、比較飼育試験について飼育途中の5か月齢までの調査結果をとりまとめ、近交化の解消された新系統は生残・成長・形態異常（鰓蓋欠損の発

生率の低さ）ともに次世代の継代系統よりも優れている可能性を見出した。

今後は、本年度作出した交配系統の5か月齢以降の飼育試験結果も加え、遺伝的多様性の回復が養殖生産に与える影響を評価するとともに、飼育試験で得られた表現型データと詳細な DNA 情報が得られる全ゲノムシーケンス解析により、各種形質に関わる遺伝マーカーの同定を進める必要がある。

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、短日から長日に切り替える長日処理と、段階的に長日に移行する2つの環境プログラムを異なる既存系統の親魚群に適用することで、2つの親魚群から早期卵を生産した。一方、早期種苗の追跡調査においては、四国南方と奄美大島の養殖漁場に活け入れされた早期種苗について、生産2～3年の成長、生残を評価した。四国南方では、早期種苗は育成当初から育成3年目まで通常種苗よりも大きいサイズを維持したまま成長した。また、早期種苗から育った魚は、育成2年目の夏季において、通常期種苗から育った魚よりも死亡率が低かった。奄美大島では、3年目の夏季に早期種苗で成長の停滞が見られた。一方、育成2年目から3年目にかけての生残率は、通常期種苗よりも早期種苗でやや高かった。

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。本年度は、令和6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、いずれの機関においても、産卵に寄与した雌親の数が比較的少ない（1から5個体）ことが明らかとなった。一部の機関では、複数年度にわたり産卵した雌親の存在が示唆された。1機関の生産種苗について血縁情報を利用して表現型情報（全長）の遺伝率を推定した結果、0.29であった。また、別の1機関において種苗生産時に生じた形態異常魚と正常魚の家系組成を比較したところ、形態異常魚が由来する親魚の多くは、正常魚が由来する親魚と共通しており、特定の親魚への偏りは見られなかった。また、本年度に各機関が保有する親魚群の血縁度を評価した結果、血縁関係にある個体同士のグループが、複数存在する様子が見られた。さらに、人工種苗の更なる普及に向けて生産過程で顕在化する課題について、カンパチの種苗生産を行っている4機関に聞き取り調査を行い、整理した。その結果、「群としての産卵の同調（同一日に親魚群のすべての雌親・雄親が産卵に寄与する）」、「中間育成の漁場の拡大」、「中間育成の人員（業者）の増加」等の課題があがった。

今後は、親魚群の血縁度の評価や遺伝的な集団構造のデータを蓄積し、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。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。また、人工種苗の更なる普及に向けて生産過程で顕在化する課題については、技術開発要素や行政対応が必要な要素などが混在しており、課題化が可能かも含めて引き続き検討が必要である。

(4)地球温暖化に適応したノリ養殖技術等の開発

【目的】

近年ノリ養殖においては、海水温の上昇によるノリ芽の障害や漁期の短縮化、また海域の栄養塩不足による生長不良・色落ち等により、生産量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は、すでにノリの養殖生産に多大な影響を及ぼしている。このような海洋環境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環境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、ノリ等藻類養殖における栄養塩環境の実態調査や、環境変動下において藻類養殖を適切に行うためのガイドライン策定を実施する。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、温暖化の進む環境下における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 ノリ高水温適応素材等を用いた養殖試験等

水産技術研究所（以下水技研）が作出したスサビノリ育種素材 6C 株から選抜を繰り返した 6C 選抜 1-1 株の実用化に向けた養殖試験を有明海漁場で実施した。U51 株を対照品種として選び、有明海で定められた本年度の養殖スケジュールに従って 10 月 18 日から採苗を開始した。採苗時期の水温は 24～25℃以上と適温（23℃未満）を上回っており、水温は 11 月中旬まで平年より高めに推移した。この間、6C 選抜 1-1 株は順調に生育し、形態異常（くびれ）の発生率も U51 の半分程度であり、高水温耐性を有しかつ実用的な株であることが示された。今後、さらなる試験により再現性を確認する必要がある（以上福岡県）。愛知県では、水技研作出の育種素材からの再選抜や愛知県保有株との交雑により、高水温耐性と浮流漁場の流動環境に適した特性（付着力）を合わせ持つ株の育成を行っている。前年までに作出した 6C 愛知株および 4C シゲカズ株は、収穫量に係わる葉の形状に問題があり、これを改良するために再選抜により 6C 愛知 III 株および 4C シゲカズ III 株を作出した。養殖・培養による特性評価の結果、これらの株は元株の高水温耐性、付着力を保持していたが、形状の改善は必ずしも確認できなかったため、再度選抜を行い、糸状体を保存した（以上愛知県）。スサビノリ系統については、その他高水温下で病勢が強くなるアカグサレ病について耐性を持つ株の作出を開始した。本年度は実験系の確立と、元株となる品種（湯の浦、女川、福岡有明 1 号）の耐病性に関する予備試験を実施した（以上福岡県）。また、通常漁期の収穫性を高めることで生産量の安定化をはかることを目的として、生長性の良い品種女川から R5 年度に作出した 育種素材の女川 D 株を漁期水温（12、15、18℃）下で培養し、いずれの温度下でも U51 より良い生長を示すことを確認した（以上水技研）。

現在、養殖に主に用いられているスサビノリは遺伝的多様性が低く、育種による伸び代が小さい可能性が指摘されている。熊本県産のアサクサノリから選抜した株（倉岳 C）の野外養殖による特性評価を行う（熊本県）とともに、南方系種と考えられる佐賀県産野生種の遺伝子解析による同定と、そのうちのタネガシマアマノリの殻胞子放出能と生長-温度特性の評価を行った（以上佐賀県・佐賀大）。環境変動に脆弱な育苗期のノリの耐性強化を目指し、生物刺激剤（バイオステイミュラント：BS）の効果の検証を行った。ノリ芽における BS の作用機作を遺伝子発現解析により調べるとともに、高温ストレスへの耐性を強化しうる有機態窒素として、昨年度までに明らかになっていたオルニチンに加え、グルタミン、イノシン、リシン、バリンの安定的な効果を確認した（水産機構）。

育種課題に加え、主産地の有明海において、栄養塩の有効利用にかかるノリ養殖手法の改善に資するため、潮汐による水塊構造と栄養塩濃度の分布とその変化について調査を開始した（水技研）。また、酸処理剤として使用される有機酸のモニタリングを行い、海域への残存はないと結論づけられた（水技研・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県）。さらに、海域の栄養塩環境にかかる藻類の適正養殖のあり方を明らかにするため、ワカメ養殖を対象に三陸沿岸、厚岸湾、相模湾で環境モニタリングとワカメの生長調査を開始した。これらから増産に向けて適正養殖可能数量を提示しうるモデルの構築と、養殖漁場環境の維持・改善に資するガイドラインの作成を行う（以上水産機構・岩手県・三洋テクノマリン）。

イ 食害対策手法の開発

ノリ養殖において多大な食害を引き起こすクロダイについては、その資源量の動向やノリの採食に関わる行動特性に不明な点が多く、効率的な漁獲手法も確立されていない。食害の影響が甚大な瀬戸内海では、2010年代後半からクロダイのCPUEが大きく上昇しており（兵庫県・香川県）、特に産卵期前後の3～5月に高いことが明らかとなった（兵庫県）。クロダイの成長特性や食性について明らかにされ、瀬戸内海では周年を通じて底生動物を主な餌にしているが、ノリ漁期には一部のクロダイがノリを多食していること（広島大）、また伊勢・三河湾ではノリ漁場の個体はノリを多食している一方で、沖合域の個体は底生動物を主に食べていた（愛知県）。腸内のノリを分析した結果、クロダイはノリの消化吸収能を持ち（広島大）、食べたノリは食後20-28時間で排泄され始めた（香川県）。瀬戸内海のノリ漁場における環境DNA調査では、ノリ漁期にあたる12月から1月にかけて検出されるクロダイDNAコピー数は減少した（広島大）。岡山県の漁場におけるタイムラプスカメラ画像の解析においては、水温が9℃前後でクロダイの出現はみられなくなり、食害は終息した（岡山県）。

食害の実態把握のために、各地でタイムラプスカメラ等を用いた膨大な量の画像情報が蓄積されている。食害魚の出現特性の解明のため、AIによる画像における食害魚の効率的な判別技術を開発し、本年度は透明度の影響の補正等の改良を行うとともに、他課題への技術提供も行った（水技研・熊本大学）。光による防除対策の開発では、白色光によるクロダイの忌避効果がみとめられた（千葉県）。バイオテレメトリ調査より、ねぐらであることが明らかになった人工構造物周辺で、複数の漁法（脅し刺網、カゴ類、渦刺網）でクロダイの漁獲を試みたが少量に止まった（兵庫県）。一方、クロダイの蛸集が確認された魚類養殖場では釣りやたも網すくいにより、短時間で多数のクロダイを漁獲した（香川県）。

生産者により行われている防護網（ノリ網の下に設置）は、脅し網（ノリ網の間に垂下）や無対策の場合に比べ、クロダイの出現がなく食害もほとんど受けず、生産金額は無対策の場合よりおよそ100万円多く（1区画ノリ網40枚あたり）、約1.6倍であった。労力がかかるが、経費以上の収入が見込まれることが明らかとなった（以上岡山県）。

漁獲したクロダイの付加価値を向上させて利用を促進するため、クロダイの官能特性の評価とマダイとの比較を行った。成分が多く呈味の強い旬（晩秋～冬）には、クロダイはマダイより美味しいと評価され、その要因は遊離アミノ酸含量にあると考えられた。香りも問題なく、適切な料理・加工法の提案によりおいしい魚としてPRできると考えられた（以上千葉県・水技研・岡山県）。また、クロダイの利用状況を明らかにするため、漁獲量の多い愛知県、大阪府、兵庫県において漁協、卸売業者等を対象に聞き取りを行い、生産、流通、消費の状況を把握した。その結果、地域によっては通年にわたり日常的に消費されていること、また旬の冬季には需要が高まり、高値で取引されること等が明らかになった。特に簡便性の高い加工品は、クロダイの利用促進において可能性が高いと考えられた（水大校）。