

令和5年度養殖業成長産業化技術開発事業

報告書 (概要版)

令和6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

魚粉含量が異なる3種類の基本飼料(魚粉70%、30%、20%)を作製し、基本飼料7に対して植物性原料(大豆油粕)または動物性原料(チキンミール)を3の割合で配合した飼料をブリ及びマダイ稚魚に給餌して採糞し、消化率を測定したところ、ブリ及びマダイともに魚粉含量20%および30%の基本飼料でも消化率測定が可能であることがわかった。また、チキンミールで魚粉含量30%に比べて20%の基本飼料で消化率が低くなる傾向が見られた。高水温(27℃)と低水温(15℃)で飼育したマダイ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。27℃、15℃共にフェザーミールを除く動物性原料の投与によって胆汁分泌が確認された。植物性原料については、27℃ではコーングルテンミール投与区でのみ胆汁分泌が確認された。また、15℃では全ての植物性原料で胆汁が分泌されたが、動物性原料投与区に比べて応答が短期間でかつ遅れる傾向にあったことから、動物性原料のほうが植物性原料よりも消化を誘導する能力が高いと考えられた。無魚粉飼料を給餌したマダイ肝臓の遺伝子発現解析では、低水温期に免疫関連の抑制やタンパク質分解の促進など代謝変化が示唆され、代替飼料改良のための生理指標として活用できるのではないかと考えられた。

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

魚粉配合量30%の低魚粉飼料に摂餌促進効果の期待できるイカゴロに脱カドミウム処理をしたイカマリン、カツオペプチド等をそれぞれ0.5%添加した飼料を作製し、水温が低下し始める11月よりこれらの飼料をマダイ及びブリに給餌し摂餌や成長を調べた。マダイでは、カツオペプチドを添加した飼料では摂餌量が増加し市販飼料(魚粉含量50%)と同等の成長を示した。他の飼料では摂餌量は市販飼料と同等であったが、成長は劣った。ブリでは、市販飼料(魚粉含量55%)に比べていずれの試験飼料も摂餌量が

少なく成長が劣った。またブリでは水温により効果のある誘因物質が異なる傾向があり、1月中旬までと1月下旬以降で最も摂餌量の多かった飼料が異なっており、1月下旬以降に摂餌量が多かった試験飼料は市販飼料に近かった。水温により摂餌誘引物質を使い分けることで効果を高められる可能性が示唆された。25℃及び15℃で飼育したマダイ及びブリを用いて栄養素の消化吸収率を調べた。マダイでは25℃に比べて15℃において消化率が高かった。ブリでは25℃と15℃で消化率はほとんど変わらず、水温の影響は見られなかった。腸管における消化酵素活性を調べたところ、腸の後半部分では低温で活性が低くなる傾向がみられた。

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(DHA、及びn-3高度不飽和脂肪酸(n-3 LC-PUFA))含量の異なる魚粉主体飼料でブリを飼育した。成長はDHA(n-3 LC-PUFA)の添加量に伴い改善され、適水温期のn-3 LC-PUFA要求量である2%あるいは3.1%よりも多い添加量の試験区で最大成長が得られ、低水温期にはn-3 LC-PUFAの要求量が高まることが示唆された。摂餌量は試験区間で差はなく、DHAの添加により飼料効率が改善された。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を混合した魚粉主体飼料で、11月から12月にかけて3週間ブリを飼育したところ、添加量に伴い成長がやや改善する傾向が見られたが明確な差異は確認できなかった。これは水温が十分に下がりきらなかった時期に実施した影響の可能性が示唆されたため、水温が最も低くなる2月頃に再検討を行う必要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

11月から6月にかけて無魚粉飼料でマダイを飼育して、定期的にサンプリングを行いコレステロール及び胆汁酸の代謝を解析した。平均体重は、ほとんどの期間で無魚粉区が対照区(魚粉46%)よりも有意に低かった。また、増重率、日間成長率および飼料効率は最低水温期に無魚粉区で対照区より有意に劣っていた。さらに、飼料効率は水温上昇期にも有意に劣っていた。血清の総コレステロール濃度は、ほとんどの期間で無魚粉区が対照区よりも有意に低かった。肝臓のコレステロール合成関連酵素の遺伝子発現量の変化から、低水温期にコレステロール合成が活性化していることが示唆された。一方、胆汁酸合成関連酵素の遺伝子発現量は試験期間を通して低く推移したことから、無魚粉飼料給餌による胆汁酸合成の抑制および水温上昇によっても胆汁酸合成や脂質利用性は継続して抑制されたことが示唆された。低水温期におけるマダイへの無魚粉飼料給与はコレステロール代謝を強く攪乱すると考えられた。

以上の結果から、原料ごとの低水温期の消化誘導性が明らかになり、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とともに、飼料中DHA量の調整により低水温期のブリの成長を改善できる可能性が示された。さらに、低水温期に無魚粉飼料を給餌すると胆汁酸の代謝が抑制されることがわかり、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よう給餌量の適正化を進める必要がある。

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により広まりつつあるが、未だ生産効率が低いことが問題となっている。配合飼料に関しては、民間各社から各種販売されているが、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、特に人工種苗では腹身のトロに相当する腹部可食部が薄くなる「腹薄」現象の軽減が喫緊の課題となっている。人工種苗や配合飼料の普及には、腹薄になりにくい配合飼料の開発に向けた幽門垂の肥大メカニズム解明など、基礎的な知見の集積を進め腹薄の軽減技術を開発することが必要である。

上記より、本中課題ではクロマグロの「腹薄」の発生メカニズムの解明と、「腹薄」軽減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

新たに非破壊による腹薄の評価手法を確立するため、超音波画像診断装置による評価手法を検討した。従来の腹薄評価用に撮影した体軸断面の画像データを使用して、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）を調べた。腹部筋肉厚・脊椎骨比と従来の腹薄の指標の一つである腹腔面積比（腹腔面積/全断面面積）との間には負の相関が認められ、腹薄の指標として使用できることが分かった。また、超音波画像診断装置による測定値と実測値を比較したところ、誤差は 0.4 mm であった。

まき網で採捕され、モイストペレット（以下、MP）を給餌して養成された天然種苗由来クロマグロの幽門垂を含む内臓重量を測定するとともに、腹薄の程度を評価した。MP 給餌により腹薄の症状は認められなかったものの、幽門垂が肥大傾向にあることが明らかになった。このため、MP の給餌は幽門垂の肥大要因の一つとなる可能性が示された。

今後は、超音波画像診断装置による撮影件数を増加させ本装置による腹薄の評価手法の妥当性を検証するとともに、人工種苗の腹薄に MP の給餌が影響しているのかについてもさらに詳細を明らかにする必要がある。

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、異なる種類の飼餌料が幽門垂など内臓重量に及ぼす影響や採取した幽門垂を用いて遺伝発現解析を実施した。

生餌及び 3 種類の市販の配合飼料が幽門垂など内臓の肥大に及ぼす影響を明らかにするため、クロマグロ稚魚（体重 0.7g）160 尾を 1 kL 水槽に収容し、魚体重が 6g になるまで 14-20 日間給餌した。生餌区では、摂餌不良による生残及び成長の停滞が発生した。試験終了時の内臓重量比は生餌区が有意に低く、配合飼料は有意に高かった。さらに、3 種の配合飼料区間では、有意差が認められた。3 種の配合飼料は物性、原料組成が異なることから、いずれかの要因が内臓重量に影響を及ぼしている可能性が示された。

飼餌料の違いによる幽門垂等の内臓重量への影響を明らかにするため、クロマグロ稚魚（体重 2.5g）100 尾を 4kL に収容し、生餌、市販飼料、非加熱魚粉を用いた試作飼料を用いて、10 日間の給餌試験を行った。飼餌料の違いにより幽門垂および内臓重量比が異なる傾向が確認された。さらに、各飼餌料に対する消化管の生理学的な応答を明らかにするために、網羅的な遺伝子発現解析を実施した。その結果、肥大傾向にある幽門垂では細胞増殖の活性が高く、脂質代謝の活性が低いことが示唆され、これらの応答が幽門垂肥大と関連している可能性が考えられた。

今後は、加熱魚粉と非加熱魚粉を同じ方法で造粒した試作飼料を用いて飼育試験を実施することにより、配合飼料の原料がクロマグロの腹薄の原因となる内臓肥大へ及ぼす影響について、より詳細な調査が可能となると考えられる。

3) 腹薄発生の軽減技術の開発

人工配合群（人工種苗に配合飼料を給餌）と、天然生餌群（天然種苗に生餌を給餌）の肋骨・体幅比（最大肋骨間距離／断面の最大体幅）と肋骨・脊椎比（最大肋骨間距離／最大肋骨間距離の中間点から脊椎骨の中心点までの距離）を CT 画像から測定・算出し、比較した。天然生餌群に比べ人工配合群は腹薄傾向が大きく、また肋骨・体幅比と肋骨・脊椎比ともに、人工配合群が天然生餌群よりも大きい傾向がみられた。以上より、肋骨・体幅比及び肋骨・脊椎比により腹薄を評価できる可能性が示された。

曳縄サイズのクロマグロに配合飼料を給餌した場合に腹薄になるのかを明らかにするため 4 か月間の給餌実験を行った。クロマグロ天然種苗（平均 600 g）を海上生簀 2 基に収容し、一方には生餌（生餌区）を、他方には配合飼料（配合区）を給餌した。配合区は生餌区に比べて腹部筋肉面積比が低く、腹腔面積比は高く、さらに内臓重量比も配合区のほうが高くなり、配合区で典型的な腹薄の症状となることがわかった。本調査により天然種苗由来でも 600 g 程度のクロマグロに配合飼料をすると腹薄になることが明らかになった。一方で、過去の研究では 3000 g の天然種苗に配合飼料を給餌しても腹薄にならなかったことから、600～3000 g の間に腹薄を回避・軽減可能なサイズが存在することが推定された。

今後は、肋骨の評価手法を高度化するためさらに検体数を増やして解析を進める。さらに得られた CT 画像を 3 次元化して立体的な肋骨形状の差を明らかにする。ま

た、人工種苗を対象に、段階的に生餌から配合飼料へ切り替える試験を実施し、成長段階と配合飼料給餌、腹薄の関係について明らかにする。

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。養魚飼料としての適切な利活用のためには候補菌種に関して詳細な生物学的特性を明らかにし、それを踏まえた上で生産技術や利用技術の開発を進める必要がある。本研究の目的は水素細菌飼料の開発であり、いくつかの候補に関して、ガス培養による生産技術や養魚飼料としての利用技術の開発に取り組んでいる。それに加えて、生物学的特性解明、新規利活用法及び新たな候補菌種の探索など基盤的研究も進めている。

【主な成果と今後の見通し】

1) 単細胞飼料候補細菌の成分・生産特性の解明

この課題では水素細菌 *Hydrogenophilus thermoluteolus* TH-1 を用いて生物機能解明や利活用法の高度化に取り組んでいる。本株は至適増殖温度 52°C 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もつ上、培養条件によっては PHB（ポリ β ヒドロキシ酪酸）の合成・蓄積が誘導されることが知られている。PHB はバイオプラスチックの一種としての利用が期待されている物質ではあるが、水素細菌を飼料として利用する場合には過度の PHB 蓄積はタンパク質含量の相対的低下、すなわち飼料価値の低下の原因となる。そのため、これまでに、TH-1 株において PHB 合成系の遺伝子破壊株を作製し、蓄積機構の解明とその制御手法の開発を進めてきた。本年度は、PHB 合成遺伝子の破壊株における網羅的な代謝物分析（メタボローム）を実施し、代謝改変による新たな物質生産の可能性を検討した。

メタボローム解析からは、PHB 合成抑制の結果として、破壊株に特徴的な物質の蓄積も認められた。その候補物質の中には医薬品等に用いられる有用成分もあり、こうしたものは副産物として収益性の改善対策としての利用が望まれる。引き続きこうした解析は続けるが、より積極的な収益対策として遺伝子組換えによる新規遺伝子の導入とそれによる有用物質生産の研究もあわせて進めている。

このように、水素細菌における変異株作製とそれを用いた代謝制御研究を進めているが、そのためには、遺伝子操作技術自体も高度化していく必要がある。特に TH-1 株は高温性であるため、大腸菌などで汎用される既存の技術をそのまま適用することはできない。この課題では TH-1 株での遺伝子操作技術を開発しており、将来的には高温性水素細菌の菌体量産や副産物生産による収益性改善などへの遺伝子組換え技術の活用につながることを期待される。

2) 単細胞飼料原料の養魚飼料としての利用技術の開発

この課題では、水素細菌の養魚飼料としての利活用法開発に取り組んでいる。これまでに海

洋性水素細菌である *Hydrogenovibrio marinus* MH-110 を用いて、実験室規模での菌体の培養生産、菌体の成分分析、短期の給餌飼育などを行ってきた。今後、より産業利用を意識して研究を進めていくことになるが、生産や加工法の開発としては省力化やコスト対策、そして飼料利用の面では成分調整や給餌飼育による評価を進めていくことになる。本年度は、生産面では低コスト化のための培養培地の改良を、飼料利用に関しては菌体の加工法をそれぞれ検討した。

菌体培養に関して、実験室に設置した 10L ジャーファーメンターを用いて行っており、ガス原料はボンベにより供給し、また無機塩類を用いた培養液に関しては試薬グレードの製品を純水に溶かして調製している。本年度は生産コスト低減のための取組として、無機塩類の培養液の製造方法の見直しを行った。培養液改良は添加物の最小化や天然水の利用による低コスト化を検討しているが、今のところ *H. marinus* MH-110 に関しては通常の培養液を用いた場合と遜色ない生産性を確認している。

生産した菌体の加工法に関しては、高圧蒸気滅菌や成分分画を試み、成分分析とマダイ稚魚を用いた短期の飼育試験により問題点の洗い出しを進めている。いずれの加工処理においても未加工の菌体と比較してある程度の改善は図られているが、魚粉主体の飼料と比較して飼育成績は劣るため、代替飼料原料として利用するにはさらなる改良が必要であると考えられた。

3) 産業化に向けた生産技術および生産体制の確立

水素細菌の産業的量产にとって必要な菌株の条件としては、高増殖で生産性が良いこと、人為的に培養可能で取り扱いが容易であること、および栄養価や有用物質生産能を持つなど経済的に生産に見合う性質を有すること、などが挙げられる。本課題では、このような条件を満たす水素細菌の探索を行っている。また、こうした条件を満たす菌株として *H. marinus* MH-110 を有力な候補として培養のスケールアップなど産業的生産に向けた検討を始めている。

H. marinus MH-110 に関しては、中課題2) と共同で生産や利用研究を進めており、これまでに検討した培養槽の規模拡大や連続培養法の適用に引き続き、原料ガスの有効利用のための培養システムの改良を行った。

また、この課題では新規水素細菌株の探索も進めている。課題担当機関において分離・保管されていた菌株等の特性解析を進め、そのうちいくつかの菌株ではカロテノイド合成やグリコーゲン蓄積など特徴的な性質をもつものも含まれていた。こうした新規水素細菌の産業利用のためには、今後さらなる特性評価を進め、適材適所の有効な利用方策を考えることが重要である。

今後に向けて

このように、各課題とも担当機関ごとの特長を生かして水素細菌の量产化や養魚飼料化に向けた取り組みを進めている。水素細菌の産業的な利活用のためには、生産の担い手となる企業等の参入が不可欠である。本事業の実施期間中にいくつかの企業からの訪問や問い合わせを受け、技術紹介を行ってきた。こうした取組を通じ、今後、研究協力の輪がさらに広がることを期待している。

(2) 新たな技術（ゲノム育種値）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ている。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ものの、その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。このため、国産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、ゲノム育種技術によって国内の海面養殖形態に適した海水高成長サーモン系統の開発を行う。また、育種産物の精液の凍結保存と利用・評価手法の高度化や社会実装に向けた情報収集を行う。

【主な成果と見通し】

小課題 1) ニジマスの海水高成長育種

系統間交配により令和 2 年度に作出した基礎集団について、昨年度より継続して実施している海水飼育の成長試験を終了し、生残率や試験終了時の体重を交配区別に評価した。その結果、淡水飼育時に比べて海水飼育時に体重のばらつきが大きくなる傾向が見られた。また、遺伝解析によって、海水飼育時の体重の遺伝率を推定した。

系統間交配により令和 3 年度に作出した基礎集団について、本年度より海水飼育試験を開始し、45 日経過時の生残率は 8 割以上であった。本試験は令和 6 年 5 月まで試験を継続する予定である。

令和元年度及び令和 2 年度に作出した基礎集団の一部については、遺伝的多様性を考慮し、2 年級群を統合した形で選抜第 1 世代を作出した。具体的には、雌 28 個体及び雄 38 個体を用いて 468 交配区を作出した。このうち初期発生状況が良好な 396 交配区を混合して継続飼育した。なお、育種シミュレーションにより、今年度行った基礎集団 2 年級群を混合した場合では、選抜第 1 世代では体重の増加が見られないが、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、基礎集団から家系情報とゲノム育種値に基づいて選抜した親魚で総当たり交配を行い、113 交配区からなる選抜第 1 世代を作出した。

東北集団については、基礎集団の中で一部出現した 0+スモルトの海水飼育生残個体から選抜第 1 世代を作出したが、取水事故により大部分を失う結果となった。なお、継続飼育している基礎集団から選抜した 1+スモルト群を親魚として次年度に選抜第 1 世代をする計画であるため、全体計画に支障はない。

全国集団については、全国基礎集団の中から体重のゲノム育種値の上位個体及び北海道基礎集団の雌を親魚に用いた総当たり交配により、404 交配区からなる選抜第 1 世代を作出

した。また、育種シミュレーションにより次世代以降の体重の期待値を計算した結果、各世代で十分な体重の増加が予想された。

サツキマスについては、基礎集団のうち海面生簀での飼育を経験した大型・中型個体を親魚に用いて120交配区を作出した。今後、ゲノム情報を用いて近親交配家系を除去したものを選抜第1世代として飼育する予定である。

小課題3) 精液の凍結保存と利用・評価手法の高度化

解冻後精子の評価手法の検討として、活性酸素種レベルを指標とした精子の生理状態を検討した結果、受精能力・発生能力の指標にはならないことが明らかになった。受精に必要な精子数を分析した結果、1つの卵を受精するのに必要な最低減の精子数は系統間で異なることが分かった。また、凍結精子は新鮮精子よりも受精能力に劣り、十分な受精成績を得るためには 300×10^4 精子/卵が必要であることが分かった。

水産用イソジン®溶液の精子への影響評価と消毒法を比較した結果、有効ヨウ素濃度1～10ppmでは影響はないが、50ppmでは精子運動率が低下し、精子運動能には影響することが明らかになった。しかし、受精後に行う消毒法の比較では、吸水前消毒法と従来法では同等の発生成績であった。このため、今後は凍結精子を用いた受精においても吸水前消毒法の使用が可能であることが明らかになった。

小課題4) 社会実装に向けた情報収集及び選抜育種集団の小規模実証試験

「水産分野における優良系統の保護等に関するガイドライン（令和5年3月）水産庁」及び「養殖業における営業秘密の保護ガイドライン（令和5年3月）」を参考資料とした勉強会を行なった。本事業で開発される優良系統に適した保護対策を検討した結果、原則的には事業成果物（無体物及び有体物）は事業コンソ内で秘匿すること、無体物は営業秘密や限定提供データとして法的に保護すること、有体物は実証試験などで外部提供する場合には契約による保護に加えて、全雌化などの生物学的な保護を併用するという一次案をまとめた。

本事業成果の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）を調査した結果、本事業の育種目標（海水高成長サーモン系統の開発）は現状の生産現場のニーズに合致していることが分かった。一方で、実証試験については、そもそも実施可能な養殖場（特に内水面養殖場）が想像以上に少ないことが明らかとなり、今後は調査範囲を拡大して情報収集する必要があることが分かった

以上のように、ニジマス、サクラマス、サツキマスの各魚種において、当初の計画どおり、基礎集団から選抜第1世代を作出した。また、育種シミュレーションを実施し、次世代以降においても十分な育種効果が期待できることを示した。凍結精子を用いた受精技術については、各種の条件検討が進み実用技術へと近づいた。また、優良系統の保護対策案や実証試験に向けた今後の検討方針が固まった。

今後は、育種集団の継続的な維持管理と選抜交配により育種効果を徐々に積み上げていくこと、育種産物の普及に向けた凍結精子の利用・評価手法の高度化をさらに進めること、優良系統の維持管理体制の構築や実証試験の実現に向けた情報収集を行う必要がある。

(2) 新たな技術（ゲノム育種）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、機構が保有する親魚の中から、成長の良い個体、ハダムシ抵抗性の高い個体、両形質について優れた個体をそれぞれ 20 尾以上選抜し、各群について近親交配を可能な限り回避した総当たり交配を行って次世代(G_1)を育成した。育成した G_1 の一部をハダムシ抵抗性の評価のため、ハダムシの感染試験に供した結果、試験魚間で寄生したハダムシの個体数は大きく異なった。また、ゲノム選抜に利用するゲノム情報として、 G_0 と G_1 の 1,967 個体についてゲノム多型解析を行い、11,735 座の一塩基多型 (SNP) 情報を得た。 G_0 のうち成長に関する体重と尾叉長の情報及びハダムシ抵抗性の情報がある 1,640 個体について、ゲノム情報を利用して遺伝的能力を予測する GBLUP 法で遺伝的パラメータ (遺伝率) を推定した。その結果、各形質の遺伝率はいずれも 0.36~0.45 であり、遺伝的改良が可能であることが示された。また、シミュレーションにより、体重を遺伝的にどの程度改良できるか試算した結果、集団の上位 20%, 10%, 5%, 1% をそれぞれ選抜した場合、次世代は親世代の 107~113% となることが示唆された。

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

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、上記①で育成された G_1 をノカルジア症の感染試験に供した。試験では、浸漬法での攻撃後 10 日目以降に著しく死亡が増加し、死亡魚はノカルジア症に典型的な症状を呈していた。最終的な累積死亡

数は 2,340 尾、生残尾数は 20 尾となり、全個体からゲノム多型解析に必要な DNA サンプルを採取した。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。

一方、ウイルス性腹水症について耐病性の情報が得られる感染試験法を確立するため、51、60、75 及び 102 日齢の稚魚を用いて感染条件を検討した。10⁷TCID₅₀/mL のウイルス液を含む海水で飼育する浸漬法では、51 日齢で 8 日後の死亡率が 83%であったが、60 及び 75 日齢ではそれぞれ 43 及び 6.7%であり、成長に伴って感受性が低下するものの、50~60 日齢であれば浸漬法による感染試験が有効であることが確認された。

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

凍結精子作成に用いられる凍害防御剤ジメチルスルホキシド (DMSO) について、ペレット法での最適な濃度を検討した結果、終濃度 1、5、10、15、20%で添加した場合の解凍後の平均運動率は 0.7~46.5%であり、終濃度 10%が最も良好であった。また、凍結方法の影響を検討するため、ペレット法では 100、300、500µl/粒で、ストロー法では 500µl/本の条件下で凍結精子を作成した結果、解凍後の平均運動率はペレット法でそれぞれ 61.7、58.5、55.5%、ストロー法で 57.8%と同等であった。さらに、卵一つあたりに必要な精子の量を把握するため、新鮮精液を 10~10 万倍まで希釈し、卵 10g (約 10,000 粒) に添加して受精率を測定した結果、1 万~10 万倍で受精率が低下した。このため、ブリの卵 1 粒の受精に必要な精液量は新鮮精液換算で 0.00001µl/粒以上と考えられた。

一方、親魚の成熟調査について、大分県で令和 6 年 1 月に 2 歳魚を調査した結果、いずれも未熟な状態であった。今後、産卵期である 4~5 月に向け、愛媛県と大分県で毎月調査を行う予定である。

小課題 2) ブリ優良系統の国内管理体制の構築

国内外の優良系統の管理体制について情報を収集したところ、海外のサーモン等では血縁交配した卵を販売してそれ以上の育種ができないような対策が行われていた。また、ブリの親魚養成や種苗生産を行っている 4 県と、ブリの優良系統の利用と管理について意見交換し、国内管理体制の構築に向けた協議会について概ね理解が得られた。なお、ブリの育種については、表現型選抜を計画している県があったものの、ゲノム解析に基づく育種は現状では困難との意見が多かった。今後、国内管理体制の構築を検討する協議会の設立を進めることになったため、協議のたたき台となる資料案を作成した。

(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、近年の資源状態は歴史的最低水準にある。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 ヶ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。これらの成果により、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

本課題は国内で管理されている複数のクロマグロ継代系統について、ゲノム情報を用いた多様性調査により近交の程度を明らかにするとともに、異なる遺伝的組成を持つ 2 系統の交配試験を実施し、低下した多様性を回復させる系統管理技術を開発することを目的とする。本年度は、水産研究・教育機構（以下、水研機構）が有する 2 系統について多様性調査を行い、系統内における近交の程度を把握すると同時に系統間の遺伝的組成を比較した。その結果、世代を重ねるごとに当該系統の多様性は低下し、近交度は上昇していることが確認された。また、各世代の多様性指標値は継代時の交配関与尾数と関連があり、水研機構保有の 2004 系統では 1 個体の雌と 2 個体の雄で継代が行われた第 4 世代で多様性指標値が有意に低下し

ていた。また、系統間の比較解析により、各系統の遺伝的分化の程度が確認され、遺伝的組成の類似度が明らかになった。

今後は、異なる遺伝的組成をもった 2 系統を実際に交配させ新系統を作出し、得られた新系統と既存系統の比較飼育試験により多様性の回復が養殖適性に与える効果を検証する必要がある。

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ら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、長日型環境プログラムを既存系統の親魚に適用して早期の産卵誘導を試みたものの、親魚の大量死亡が発生したこともあり、早期卵は生産されなかった。現在、次年度の早期卵生産に向けて、陸上水槽に親魚を搬入し、育成している。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られた早期種苗について、生産 1~2 年の成長、生残を評価した。四国南方では、早期種苗は越冬期に入った育成 1 年目の 12 月には、同時期の通常期の人工種苗の約 2 倍の大きさに成長し、サイズ差を維持したまま 2 年目も成長した。一方で、奄美大島では、育成 1 年目の 12 月の時点で、早期種苗と通常期の人工種苗の大きさには明瞭な違いはなかった。このため、引き続き早期種苗の追跡調査を進める必要がある。

イ. カンパチ人工種苗の安定生産体制の構築

本課題は、国内でカンパチの種苗生産を担う 4 機関が用いている親魚の血縁度を評価し、血縁度が飼育成績に及ぼすリスク評価を行う事を目的とする。本年度は、SNP マーカーによる令和 5 年度生産種苗の親子鑑定および親魚群の血縁度評価を行った。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が比較的少ない (1 から 5 個体) 家系組成となっていることが明らかとなった。一部の機関では、複数年度の産卵に寄与している雌親が存在することが示唆された。親魚群の血縁度を評価した結果、親魚群の個体間で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。またクラスター解析により、4 機関の親魚群の遺伝的な集団構造を明らかにした。

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親魚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。親子鑑定により得られる家系組成データの活用に向け、種苗の成長や生残等の形質評価や家系管理についても検討する必要がある。

(4)地球温暖化に適応したノリ養殖技術の開発

【目的】

近年ノリ養殖においては、海水温の上昇による養殖初期（秋季）のノリ芽の生理的不調を避けるため養殖開始時期を遅らせる等の対策が取られている。しかし、今後温暖化の進行にともなうさらなる養殖期間の短縮による、生産量への多大な影響が懸念されている。また高水温を背景とした魚類等による食害は、すでにノリの生産量に深刻な影響を及ぼしている。本課題では、既往研究等で育成された高水温に適応したノリ育種素材から再選抜した株や、異株・異種間交雑による新規作出株について室内培養や養殖試験等により特性評価を行い、それぞれの海域の漁場環境や産業的ニーズに即した高水温適応等優良品種の作出と実用化を進める。また、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

福岡県では水産技術研究所（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 株の室内培養および養殖試験を行った。その結果 6C1-1 株は基準株 U-51 株よりも高温耐性に優れ、また通常漁期養殖において生長が優れる等、実用的であると評価された。また、福岡県と三重県では既存の女川スサビとそれから選抜した女川 D の養殖試験を行った。年内生産期の水温帯ではいずれも U-51 株よりも優れた生長を示したが、収量性については摘採時により変動が大きく、十分な検証が出来なかった。水技研では、女川 D からさらに選抜した 2 株（女 D 中、女 D 大）について室内培養により特性評価を行い、特に女 D 大において高温下の高生長と障害の軽減を確認した。

熊本県は独自に育成したスサビノリ高水温耐性株 AH 株から選抜した AH2 株について、水温が 23℃以上の 10 月上旬より屋外養殖試験を行い、AH2 株は形態異常が U-51 株より少ないことから高温耐性が認められ、かつ U-51 株と遜色ない生長を示した。

愛知県では、高水温耐性に加え、浮流し漁場の流動環境に適した特性も合わせ持つ株の育成を行っている。前年度までに作出した育種素材の付着力を改善したスサビノリの 6C 愛知株および 4C シゲカズ株、またこれらから選抜した 6C 愛知 II 株および 4C シゲカズ II 株の培養・養殖試験を実施した。これらの株は培養下では基準株 U-51 株よりも高水温耐性に優れていたが、付着力における優位性は必ずしも明瞭ではなかった。

佐賀県では、新たな取り組みとして、高水温に強い野生種（暖海性のダンシサイ）とスサビノリ養殖品種との交雑による新有用株の作出に取り組んだ。昨年度の交雑試験により得た色調の異なる 2 タイプの糸状体について DNA を抽出し、核ゲノムとオルガネラゲノム配列を解析したところ、いずれのタイプもそれぞれの種の親株と同じ結果を示し、交雑は確認できなかった。

上記において野外養殖を行ったスサビノリ試験株（6C1-1、女川スサビ、女川 D、4C シゲカズ、6C 愛知、4C シゲカズ II、6C 愛知 II）の遊離アミノ酸含量を比較したところ、対照のスサビノリ U-51 株との差は無く、味の面では実用化に問題が無いことが明らかになった。

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、以下 BS）の効果の検証を行った。アルギニン、オルニチンを添加した海水、ならびに共生細菌 *Hyphomonas* sp. LNM10-16 株を懸濁した海水を、単独もしくは併用してノリ幼芽を 24

時間浸漬し、その後貧栄養培地で培養し、生長等を確認した。その結果、アミノ酸浸漬によりノリ幼芽（育苗期種苗）の貧栄養ストレスが軽減されることが明らかになった。一方で、摘採サイズに育った後の効果の持続性は得られなかった。

その他、主産地の有明海において環境データをとりまとめ、近年の少雨傾向がノリの品質に関わる栄養塩環境に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。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。

以上のように、中課題アでは、それぞれの海域（県）において海域での養殖試験や、野外あるいは室内での培養試験を実施し、高水温耐性や生長性等において優れた特性を持つ新品種候補の育成を進め、実用性の高い株も作出された。今後は、特性評価とその結果に基づいた改良や実証試験をさらに進めるとともに、BSの適用等の新技術開発も進め、ノリ養殖における環境耐性の強化をはかる。

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、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。一方、各地の養殖場では食害の実態把握のためにタイムラプスカメラ等を用いた膨大な画像情報が蓄積されている。本課題では、食害魚の生態特性の解明に資するため、これらの画像情報を活用してAIによる食害魚の効率的な判別技術を開発した。またIoT技術を利用した食害発生の実タイム監視を行い、日中のみならず夜間もカモ類がノリを採食していることを明らかにした。

瀬戸内海の養殖場においては、環境DNAの分析とバイオテレメトリによるクロダイの移動パターンの解明を行った。環境DNA調査では水温によるクロダイの活動量の変化や、ノリ養殖場近傍の魚類養殖場への蟄集等を把握した。また、バイオテレメトリでは、ノリ養殖場およびその周辺のクロダイの個体ごとの行動パターンを詳細に把握した。これらの情報に基づき、ノリ養殖場と夜間の定位場所への移動経路等で刺し網による漁獲を試み、一定の漁獲は得られたが少量にとどまった。また前年に引き続き、瀬戸内海および伊勢・三河湾で延縄による漁獲を試みたが、クロダイの漁獲は皆無か少量に終わった。一方、高い環境DNA量が検出された香川県の魚類養殖場ではクロダイの蟄集が確認され、たも網等で選択的かつ効率的な漁獲を行うことが出来た。

既往のデータおよび漁獲されたデータを用いて、クロダイの成長や食性、またノリの採食量などの基礎的なデータを収集した。瀬戸内海（香川県）では2018年前後からクロダイのCPUEが増加傾向にあること、ノリを採食する群としない群があるが、採食しない群においても冬季はアオノリ類等の藻類を多食していること等が明らかとなった。またノリを採食している個体の消化管からは平均で30g程度のノリが検出された。

東京湾では生産者が行っている防除ネットによる食害被害軽減策の効果を高めるため、光による威嚇でさらにクロダイの侵入を防ぐ技術開発を継続し、光の照射方向等、光源の設置方法に工夫が必要であること等が判明した。また、ドローンによる威嚇は、カモ類のみならずクロダイについても放逐に有効であった。

漁獲したクロダイの付加価値を高め、利用を促進してクロダイ資源の抑制につなげることを目的に、東京湾と瀬戸内海で漁獲されたクロダイの一般成分や遊離アミノ酸、呈味成分を分析し、食品としての特性を把握した。その結果、粗脂肪、粗タンパク質、遊離アミノ酸含量などの季節変化から、食品利用に適した旬の時期は秋から冬と考えられた。また、塩麴漬けや昆布締め等の加工品の特性や、ノリを採食している個体と採食していない個体の成分の違い等も評価した。

今後も引き続き、クロダイの生態特性の徹底解明から効率的な漁獲技術の開発を行い、さらにクロダイの消費を拡大することでクロダイ資源の抑制につなげ、ノリの食害被害の軽減を目指したい。