

## 2.2.6 水産

### (1) 研究開発領域の定義

漁獲量が世界的に横ばいとなり、養殖生産量が漁獲量を超え、養殖生産の重要性が高まっている。本領域では、効率的で持続可能な養殖生産技術の確立が極めて重要である。ここでは、養殖生産における重要な研究開発領域として、魚介類の育種（品種改良）、飼料開発および魚病・寄生虫対策を中心に概説する。

### (2) キーワード

ゲノム予測、ゲノム編集、代理親魚、不妊魚、代替飼料、ニュートリショナルプログラミング、魚病耐性、DNA ワクチン、寄生虫ワクチン

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

国連によると、世界人口は2020年に77億9,480万人であるが、2050年には97億人、2057年には100億人を越えると予測されている<sup>1)</sup>。このような人口増加の状況を考えると、土地利用に限界がある農業や畜産業による食料生産だけでは不十分であり、漁業生産は極めて重要である。世界の漁業生産<sup>2)</sup>をみると、漁獲量は1960年に3,476万トン、1990年代に9,000万トン台まで増加するが、それ以降はほぼ横ばいとなり、2018年には9,758万トンであった。一方、養殖生産量は1960年に211万トン、1990年に1,728万トンであったものが、2018年には1億1,451万トンに増加して漁獲量を大きく上回った。世界の漁業生産における養殖生産の重要性が高まっており、漁獲から養殖へのシフトは世界的な大きな潮流となっている。

日本の人口は1億2,600万人（2020年2月）であるが、今後、2053年には9,924万人、2065年には8,808万人に減少すると予測されている<sup>3)</sup>。漁業生産<sup>4)</sup>をみると、1984年に生産量は最大となり、1,282万トン（漁獲量1,161万トン、養殖生産量121万トン）であった。その後、漁獲量は2019年には320万トンと大きく減少し、養殖生産量は91万トンと微減で推移している。

このような状況下で、養殖生産を持続可能なものとして展開して、養殖生産量・生産額を増加させていくためには、従来の経験ベースのノウハウに加え、サイエンスベースの新たな技術開発が不可欠である。

#### [研究開発の動向]

日本は養殖総生産量こそ多くはないが、養殖対象魚種は極めて多岐にわたっており、養殖産業そのものの歴史も諸外国に比べると長いため、研究面でも先進的な取り組みが多い。例えば、マダイやトラフグを用いたゲノム編集関連のプロジェクトは注目に値する<sup>5)</sup>。魚類のゲノム編集技術は、ゼブラフィッシュやメダカを用いて開発されてきたが、食用海産魚を用いた取り組みは海外では殆ど行われておらず、日本が他国をリードしているといえる。実際にはミオスタチン遺伝子のノックアウトによるダブルマッスル養殖魚の作出は実用化にかなり近いレベルにまで研究が進んでいる。日本発のモデル魚であるメダカを用いた先駆的研究が、そのまま有用海産魚へと応用されてきた点が大きな原動力となっている。

代理親魚を利用した世代の加速や、凍結生殖細胞を駆使した魚類遺伝子資源の保存に関する研究は、基盤となる基礎研究から応用研究まで一貫して日本主導で進められた先駆的研究事例であり、現在も大きな優位性を保持している。一方、養殖対象魚のゲノム解読研究における中国の台頭は著しい。すでにゲノム解読を終えた魚種も多く、現在も夥しい数の養殖対象魚種のゲノムが解読されるべく、多くのプロジェクトが進行中

である<sup>6)</sup>。

ノルウェーにおけるタイセイヨウサケに関するプロジェクトは産官学が連携し、本種の養殖技術に関する幅広い研究が進められている。その筆頭はゲノミックセレクションを駆使した育種である。一方で、ノルウェーではタイセイヨウサケの生産量の多さおよび養殖対象集団が高度に育種されているという背景から、逃亡魚の環境へのインパクト（天然集団の遺伝的攪乱、天然集団との競合等）も大きな社会問題になっている。この逃亡魚の問題を解決すべく、種苗の不妊化も大きな研究対象になっている。これら一連の研究は、産業界が大きなスポンサーになっているため、そのデータの詳細が見えづらいという側面もあるが、論文ベースとしてはdead end遺伝子のノックアウトによる不妊サケの生産に成功している<sup>7)</sup>。不妊魚は卵と精子を生産できないため、不妊サケはCRISPR/Cas9を受精卵一粒ずつに注入することによって生産されている。これらのゲノム編集魚作出時に同遺伝子のRNAを同時に顕微注入することによる妊性のある親個体の生産が試みられている。

#### ・ゲノム編集

CRISPR/Cas9を利用したゲノム編集技術は、マダイ、トラフグ、クロマグロなどの養殖対象魚に適用され、ミオスタチン遺伝子の機能を完全に欠損し、筋肉量（可食部量）が大きく増大したマダイが得られている<sup>8)</sup>。このマダイは、通常のマダイと同じように餌を食べるが、食べた餌を効率よく利用して筋肉量が増えることが明らかとなっている<sup>9)</sup>。2020年8月現在、第4世代が得られており、量産化が可能な段階まで進んでいる。成熟までの期間がマダイよりも長いトラフグや、魚体サイズが大きいために陸上水槽で飼育できないクロマグロでは、ゲノム編集第2世代以降に関する情報を得るのに時間がかかるが、マダイと同様に短期間での品種改良効果が得られることが予想される。日本におけるゲノム編集魚の取り扱いに関する関係省庁の基本方針が決まり、流通・販売に向けて具体的な運用が検討されている。ゲノム編集は従来の技術と比較して極めて効率の良い品種改良の手法であり、スピーディーな進展が期待される。

#### ・ゲノム予測

家系記録を用いずに、小規模なリファレンス集団を作成し、その表現型とゲノム情報を統合し、目的形質に寄与している遺伝子座を同定した後に、選抜を行う“ゲノム予測”の水産への応用も進みつつある。本法が水産養殖分野での育種の正攻法としては重要な位置を占めるものと期待される<sup>10)</sup>。さらに、これらのゲノム情報を駆使した選抜と発生工学技法の組合せによる世代の加速は今後の育種の切り札になるものと世界的に注目されている<sup>11)</sup>。

#### ・代替飼料

養殖生産を持続可能なものとするためには、養魚用飼料の調達是最重要課題の一つである。魚粉は、タンパク質および必須アミノ酸含量が高く、不消化成分が少なく、抗栄養因子の問題がないことから、配合飼料の主要原料として使用されているが、世界的な魚粉需要拡大による価格高騰が養殖経営を圧迫する大きな要因となっている。これに対して、高品質な養魚飼料の安定供給を目指して、魚粉代替源の探索が様々な動物性原料および植物性原料について行われている。日本では海水養殖魚のタンパク質要求量が高いことから、大豆粕が配合されるようになっている。脂肪酸に関しては、多くの海産無脊椎動物が長鎖多価不飽和脂肪酸を生合成可能であることが明らかになった<sup>12)</sup>。一部の動物種ではDHA生産が可能であることも報告されており、これらの生物試料としての養殖生産への利用も今後の大きな可能性を秘めている。

新規代替源の検索、廃棄食材の利用、昆虫、微生物あるいは組織培養などによる代替原料の生産、低魚粉に対応可能な養殖魚の品種改良など、持続可能な養殖の実現に向けた取り組みが継続されている。

#### ・魚病対策

魚病対策としてワクチン開発が精力的に行われているが、ワクチン利用における問題点は、その投与方法である。養殖魚の場合、一匹当たりの単価が家畜と比べて安いと、ワクチンを一匹ずつ手作業で注射するのは、人件費が制約要因になる。そこで、魚体をワクチン溶液へと浸漬することで体内へとデリバリーするための研究が進展している。このアプローチは以前から試されてはいたが、最近になって抗原の体内への取り込み機構が明らかにされ<sup>13)</sup>、当該分野の研究加速が期待されている。

また、いわゆる環境 DNA の技術を用いた魚病のアラートシステムの構築も進んでいる。これは環境水中の病原体由来 DNA を PCR で検出するものであり、魚病の発症前に感染リスクのアラートを出すことが可能になる技術として期待されている<sup>14)</sup>。

### (4) 注目動向

#### [新展開・技術トピックス]

- ・未成熟なニジマスの精巣から A 型精原細胞を採取して培養・増殖させて三倍体ニジマス稚魚の雌雄に移植し、2 年後に得られた卵および精子の人工授精によって作出されたニジマスが正常に発育して成熟することが報告された<sup>15)</sup>。この技術は絶滅危惧種の保全に利用できるだけでなく、優良な養殖魚の生産にも応用可能である。代理親魚を用いることでクロマグロのような大型の親魚を用いることなく小型魚を用いてクロマグロの生産を可能とするもので今後の展開が期待される。
- ・ゲノム編集関連では、早期成熟に関するマダイおよびトラフグを用いた応用研究プロジェクトが進んでいる。この研究ではトラフグの成熟を早めるために、1 年で成熟するクサフグを代理親魚としてトラフグの代わりに用いる技術も利用している。様々な新しい技術の組み合わせにより、養殖生産効率を高めようとする注目すべきプロジェクトである。
- ・ゲノム育種関連では、様々な魚種において実用可能な「高度ゲノム情報を利用した選抜育種法」を構築し、選抜育種の効率化と普及を目指すプロジェクトが進行している。寄生虫耐性に関連する遺伝子が同定されたように、ゲノム情報に基づく育種を実用化するための研究が加速しており、今後の進展が期待できる。
- ・寄生虫症は一般的にワクチンによる予防は困難であるが、一部培養が可能な寄生虫（スクーチカ）ではワクチン開発が始まり、水族館などで効果が得られている。培養ができないハダシでは DNA ワクチン開発や耐性系統の確立により一定の成果が見られ始めている。粘液胞子虫については飼育用水の紫外線処理での予防効果が確認された。ペコ病に対しては薬剤による治療が可能であることが示された。住血吸虫では生活環の解明による予防対策が確立された。これは長年の課題であった寄生虫対策の新しい展開であり、今後の技術開発が期待される。
- ・近年魚の消費量が急増して価格が高騰したため、新しい養殖対象魚種の探索が行われ、ご当地サーモン養殖や、スマ養殖などの技術開発が行われている。また、従来は対象とならなかったアカムツ（ノドクロ）やギンダラの種苗研究も開始している。また、漁獲量が減少し、モロッコなど海外からの輸入量が減少して価格が上昇しているマダコに関しても日本・スペインなどで技術開発が進行している。このような魚種の安定生産技術を確立していくことは重要である。

## 2.2

### 俯瞰区分と研究開発領域 バイオエコノミー

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・水産研究・教育機構「SH“U”N project : Sustainable, Healthy and “Umai” Nippon seafood project (サステナブルでヘルシーなうまい日本の魚プロジェクト)」  
日本で漁獲されている水産物を「資源評価」・「海洋生態系」・「漁業管理」・「社会経済的な状況」の4つの評価軸により総合評価し、健康と安全・安心に関する情報をあわせて提供することにより、消費者が水産物を購入する際の判断材料となる情報を発信している。総合的な情報を提供することで、水産エコラベルの認証作業など持続的な水産物利用に向けた科学情報活用の推進も期待している。
- ・農水省「ゲノム編集技術を活用した農作物品種・育種素材の開発」：ゲノム編集魚を含むゲノム編集作物の安全性検証技術に関するプロジェクト。
- ・ノルウェー「大規模水圏養殖研究プログラム (HAVBRUK2)」：2016年～2025年の予定で実施されており、年額約15億円を予定している。基礎研究から産業での応用、社会的課題までを含む大規模なプログラム。
- ・中国「Aquatic 10-100-1,000 Genomics Program」：ゲノミクスベースの研究を集約的に進めるプロジェクト。10種類の養殖魚をゲノム育種し、100種類の魚種で全ゲノムを解読し、1,000種類の魚種でトランスクリプトームデータを取得することを目指している。

## (5) 科学技術的課題

日本におけるゲノム編集研究は先駆的な事例が多く見受けられるが、今後はノックアウトのみではなく、アミノ酸の配列置換と分子構造と機能の予測により、ゲノム編集でノックアウト以外の育種を進めていくことも重要である。これにはタンパク質工学的な研究を充実させ、少数のアミノ酸置換により、タンパク質の機能を増強、改変する基礎研究が必要となる。このような基盤情報を充実させ、ゲノム編集で個体へと応用していくことが大切である。

ゲノム編集された魚について、環境省などは導入された細胞外で加工した核酸またはその複製物が残存していないことを確認すれば遺伝子組換え生物には該当しないと扱う方針を発表した。ゲノム編集等の操作をされた魚が成熟しない、つまり子孫を残すことができないとすれば、その扱いに関する制限は最小限にできる可能性がある。魚類を成熟させない、つまり不妊化あるいは不稔化させる方法には、三倍体化する方法や成熟に関わる遺伝子の機能をノックアウトする方法などがある。単純に不妊化あるいは不稔化してしまうと次世代を残せなくなり、作出した品種が途絶えてしまうため、可逆的な不妊化あるいは不稔化技術を開発する必要がある。卵質や受精率を低下させずに可逆的な成熟抑制を行うことができる技術開発が必要である。

ノルウェーのサケ養殖を中心に発展してきた養殖業の自動化、IoT化は日本の養殖業にとって大きな課題の一つである。これらの基盤技術の大部分は、欧米で構築されたシステムが存在しており、サケ用のものについてはコマーシャルベースでハードと共に流通している。これらを日本の養殖対象魚種や台風にも耐えられるレベルにファインチューニングして実用化するための技術開発が必須である。また、陸上循環養殖についても、コストダウンのための技術開発が重要である。

養魚飼料に関しては、ヨーロッパのサケ・マス養殖ではすでに魚粉を使用しない飼料の利用が可能となっているが、コスト高になるため少量の魚粉を使っているのが現状である。これを可能としている要因のひとつに、サケ・マスの栄養要求特性が日本の海水養殖魚に比べて魚粉の削減に向いていること、養殖対象種が少ないために研究開発から製造までの過程が多魚種を扱う日本よりも単純化できることなどがあげられる。逆に日本の海水魚養殖では、対象魚種の肉食性が強くタンパク質要求が高いこと、ブリ、マダイ、カンパチ、クロマ



グロ、シマアジ、トラフグ、ヒラメなど多種類に対して、それぞれの栄養要求特性に応じて飼料を開発する必要があることなどが問題点と考えられる。魚類の栄養学そのものが欧米を中心にサケ科魚類を対象として発展してきた歴史があるが、日本の海水養殖魚には当てはまらない点も多くあると考えられる。既成概念にとらわれることなく、海水魚向けの配合飼料を低魚粉化しながら開発する必要がある。魚粉代替源としては、植物原料だけでなく、家畜の処理残渣や昆虫などについても検討されてきている。微生物あるいは組織培養などによる代替原料の生産を含め、低コストの原料開発に期待したい。

## (6) その他の課題

新たな養殖技術をサイエンスベースで開発してくために最も必要とされているものは基礎と応用の両者を理解できる人材である。この20-30年間に養殖学研究は極めて細分化し、研究者の分子生物学志向が大きく進んだ。その結果、現場の課題を抽出、解決できる研究者がアカデミアから減少している。本分野で日本が世界をリードしていくためには、最新の分子・細胞生物学、生化学と現場の養殖学を高次元で統合できる人材を教育、輩出していくことが不可欠であり、産官学が連携した長期的な人材養成システムが必要である。

また、研究者の現場からの解離の原因として、研究業績として論文数や競争的資金の獲得が評価指標として広く採用されることが挙げられる。論文数や競争的資金の獲得は客観的な評価指標としては優れているが、論文掲載も競争的資金の獲得も新規性が問われるものであり、養殖の現場で役に立つ養殖対象種を用いた研究であっても、メダカやゼブラフィッシュですでに論文になっていると新規性がないと判断されることがある。論文数や競争的資金の獲得だけでなく、産業への貢献度についても同じような重要性をもって評価できる仕組み作りや、水産分野のような産業に直結している研究では新規性についての新たに判断基準が必要であると感じる。

さらに、養殖対象魚種はその世代期間が長いため、従来の競争的資金の枠組みでは、魚類の世代をまたぐような研究にはなかなか着手できないという問題があった。今後は競争的資金の研究期間を弾力的に、必要に応じて長期化することも実用化を目指すうえで重要である。

ゲノム編集のような新しい遺伝子操作技術の場合、その扱いに関する法整備が間に合わない状況が実際に生まれている。それは日本だけでなく海外でも同様である。各省庁で個別に取り扱うと時間がかかり、国際競争力の低下につながる恐れがあるため、複数の省庁で同時に審議を進めることができるような枠組みを構築する必要がある。

## 2.2

### 俯瞰区分と研究開発領域 バイオエコノミー

## （7）国際比較

| 国・地域 | フェーズ    | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|---------|----|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 日本   | 基礎研究    | ◎  | →    | <ul style="list-style-type: none"> <li>海産魚を用いたゲノム編集に関しては、京大と近大、水産教育・研究機構のグループが先駆的な研究を継続している。ミオスタチンノックアウトに関しては、技術的には既に量産可能であるが、ダブルマッスルの表現型を消費者が受容するか、法整備の状況によって今後の方向性が決まってくる。トラフグを中心にゲノム解析も進んでいる。</li> <li>代理親魚を用いた研究は海洋大、北大水産グループが先駆的な研究を継続している。世代加速のための宿主作りについては海産魚、淡水魚共に一世代を半年以下にする研究が始まっている。</li> <li>養魚飼料に関しては扱う魚種の問題もあり、盛んに研究されているものの十分な成果が得られていない。</li> <li>寄生虫の基礎研究では日本は世界のトップレベルを維持。</li> </ul> |
|      | 応用研究・開発 | ◎  | →    | <ul style="list-style-type: none"> <li>クロマグロの人工種苗生産技術に関しては近大水産実験所のグループが世界的にも独走状態にある。種苗の質的改善も進んでおり、民間養殖場への導入も着々と進んでいる。</li> <li>ゲノム編集では、マダイで第4世代、トラフグでも第3世代が得られており応用に向けた取り組みが進んでいる。</li> <li>養魚飼料の低魚粉化はまだ開発途上であるが、魚種別の検討が進められている。飼料原料に昆虫タンパク質を用いようとするベンチャー企業が数社ある。</li> <li>寄生虫対策では、薬剤治療法、DNAワクチン開発、耐性遺伝子マーカーや耐性遺伝子の同定など進展が見られる。</li> </ul>                                                              |
| 米国   | 基礎研究    | ○  | ↘    | <ul style="list-style-type: none"> <li>タイヘイヨウサケ属魚類の養殖事業において人工種苗を放流すると、その放流個体の再生産能力が低下する複数の事例が報告されている（オレゴン州立大）。養殖生産を進めるに際して慎重に検討すべき課題である。</li> <li>ゼブラフィッシュを用いた基礎研究やニジマスを中心に栄養要求に関する研究が行われている。</li> <li>寄生虫研究はニジマスやアメリカナマズなどの淡水魚中心に進んでいる。</li> </ul>                                                                                                                                                     |
|      | 応用研究・開発 | △  | →    | <ul style="list-style-type: none"> <li>民間のThe Center for Aquaculture Technologiesが養殖に必要な育種や魚病診断、不妊魚開発に関する研究を商業ベースで進めている。基礎研究と養殖技術をつなぐ架け橋的研究が業務の中心である。</li> <li>養殖生産が限定的であり、養魚飼料の応用も限られているが、水産用に天然ガスから微生物発酵技術により代替タンパク質の生産を検討するベンチャー企業がある。</li> </ul>                                                                                                                                                    |
| 欧州   | 基礎研究    | ○  | ↗    | <ul style="list-style-type: none"> <li>ノルウェーはあらゆる研究領域において、タイセイヨウサケ（アトランティックサーモン）を用いた基礎研究で他国を圧倒している。ゲノミクスの基礎研究は多くの大学、研究機関が参加しているが、養殖を目指した基礎研究としてはNorwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research（NOFIMA）が主導的役割を果たしている。また、タイセイヨウサケのゲノム編集研究は海洋研究所がゼブラフィッシュ等で開発した技術の応用に成功している。</li> <li>英国のスターリング大学やスペインのラスパルマス大学でニュートリショナルプログラミングの研究が進んでいる。</li> </ul>                                     |

|    |         |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----|---------|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ノルウェーのサーモン養殖技術の開発は全ての分野で先駆的である。特に養殖用の資材やシステム開発は他の追随を許さない状況にあり、多くの国に導入されている。</li> <li>・魚粉代替として植物性原料を用いた飼料の開発が、各飼料メーカーを中心に進められている (Skretting等)。</li> <li>・ノルウェーでの主要な魚病である寄生虫に対する技術開発では、体表に寄生する寄生虫をレーザーで駆除する技術や生物的防除法が開発されている。</li> </ul> |
| 中国 | 基礎研究    | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> <li>・国家主導でゲノミクススペースの研究プロジェクトが進行中である (Aquatic 10-100-1,000 Genomics Program)。この成果次第では、日本にとって大きな競合国になる可能性がある。</li> <li>・わが国や欧州とは異なり、粗放的な淡水魚を中心に養殖が行われているため養魚飼料に関する動向はつかみにくい。</li> </ul>                                                       |
|    | 応用研究・開発 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> <li>・養殖生産量が急増。大部分は内水面におけるコイ科魚類の養殖であるが、海産魚 (ヒラメやニベの仲間) の養殖量も増加しつつある。</li> </ul>                                                                                                                                                              |
| 韓国 | 基礎研究    | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> <li>・米国留学から帰国した研究者が遺伝子解析などを中心に優れた研究を進めている。</li> <li>・養魚飼料に関する研究レベルは日本と大きく変わらない。</li> </ul>                                                                                                                                                  |
|    | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ヒラメ、ソイ養殖が盛んであり、その周辺技術 (栄養、魚病、繁殖等) に関する研究が進んでいる。</li> <li>・スクーチカ等の寄生虫対策は日本と大差ないレベルにある。</li> </ul>                                                                                                                                       |
| タイ | 応用研究    | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> <li>・民間の養殖会社であるCPフーズがハワイから導入したバナメイエビを始祖集団として独自に育種を進めている。ゲノム情報を駆使した大規模な育種であり、我が国の有用種の最先端育種を凌駕している可能性がある。民間のため戦略の詳細は不明。</li> </ul>                                                                                                            |

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発 (プロトタイプの開発含む) の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## 関連する他の研究開発領域

・農林水産分野における気候変動適応・緩和 (環境・エネ分野 2.2.12)

## 参考・引用文献

- 1) 国際連合 (UN), World Population Prospects, <https://population.un.org/wpp/>
- 2) 水産白書 令和二年版 (水産庁編) 農林統計協会 東京 (2020)
- 3) 内閣府高齢社会白書, [https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2020/zenbun/02pdf\\_index.html](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2020/zenbun/02pdf_index.html)
- 4) 農林水産省、令和元年漁業・養殖業生産統計 [https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka\\_gaiyou/](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/)

gyogyou\_seisan/gyogyou\_yousyoku/r1/index.html

- 5) 家戸敬太郎「ゲノム編集による養殖魚の品種改良—筋肉増量マダいの作出—」『生物工学会誌』97巻 (2019) : 42-45.
- 6) Yingjie L, et al., “China is initiating the Aquatic 10-100-1,000 Genomics Program.” *Science China Life Sciences* 60 (2017) : 329-332.
- 7) Wargelius A, et al., “Dnd knockout ablates germ cells and demonstrates germ cell independent sex differentiation in Atlantic salmon.” *Sci Rep* 6, no. 21284 (2016) : 1-8.
- 8) Woong YH, et al., “Efficient genome editing in zebrafish using a CRISPR-Cas system.” *Nat Biotechnol* 31 (2013) : 227-229. DOI : 10.1038/nbt.2501
- 9) Ansai S and Kinoshita M, “Targeted mutagenesis using CRISPR/Cas system in medaka.” *Biology Open* 3 (2014) : 362-371. DOI : 10.1242/bio.20148177
- 10) Hosoya S, et al., “Assessment of genetic diversity in Coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) populations with no family records using ddRAD-seq.” *BMC Res Notes* 2 (2018) : 1-5.
- 11) Houston RD, Bean TP et al., “Harnessing genomics to fast-track genetic improvement in aquaculture.” *Nat Rev Genet* 21 (2020) : 389-409.
- 12) Kabeya N, et al., “Monroig O. Genes for de novo biosynthesis of omega-3 polyunsaturated fatty acids are widespread in animals.” *Sci Adv* 4 (2018) : eaar6849. DOI : 10.1126/sciadv.aar6849
- 13) Kato G and Fischer U, “A novel antigen-sampling cell in the teleost gill epithelium with the potential for direct antigen presentation in mucosal tissue.” *Frontiers in Immunology* 9 (2018) : 1-12.
- 14) Bastos Gomes G, et al., “Use of environmental DNA (eDNA) and water quality data to predict protozoan parasites outbreaks in fish farms.” *Aquaculture* 479 (2017) : 467-473.
- 15) Iwasaki-Takahashi Y, et al., “Production of functional eggs and sperm from in vitro-expanded type A spermatogonia in rainbow trout.” *COMMUNICATIONS BIOLOGY* 3, no.308 (2020) . DOI : 10.1038/s42003-020-1025-y

## 2.2

俯瞰区分と研究開発領域  
バイオエコノミー