

水産育種研究戦略

－水産育種研究の今後の進め方について－

平成 25 年 3 月

独立行政法人 水産総合研究センター

目次

1. 趣旨	1
2. 水産育種技術開発の現状と課題	2
(1) 育種技術開発の現状	2
(2) 育種を推進する体制の現状	6
(3) 育種を推進する上での課題	7
3. 水産育種の推進方向と推進方策	9
(1) 育種における基本的な考え方	9
(2) 育種目標	10
(3) 育種の推進方策	11
(4) 育種品種の普及促進	13
(5) 育種推進体制の整備	14
4. あとがき	16
用語解説	17

1. 趣旨

世界人口の増加や気候変動等による農作物の供給面での不安を背景に、食料確保をめぐる環境は厳しさを増しており、水産物においても全世界的に需要が増大している。しかし、世界の漁業生産はここ 20 年間 9,000 万トン前後で頭打ち状態が続き、特に海洋から漁獲できる量はすでに限界に達しているといわれている。一方、不足しがちな需要の多い魚類の漁業生産を補うものとして世界的に養殖生産量が増加する傾向にある。2010 年の FAO の報告書によれば、世界の養殖業の生産量は、2000 年の 3,240 万トンから 2008 年の 5,250 万トンへと 60% 以上成長し、2012 年には世界の食用魚介類消費の 50% 以上は養殖業で生産されると予測されている。このように養殖業は、今や世界で最も急速に成長している動物性タンパク質供給産業となっている。特に食料不足問題を抱える内陸の発展途上国においては、変温動物で基礎代謝が少なく牛・豚・家禽よりも飼料転換効率が高い淡水魚の養殖が、効率の良い動物性タンパク質の生産手法として注目されており、食料としての動物性たんぱく質を安定して確保する手法としての養殖の重要性は急速に増している。

我が国の周辺海域は世界的にも海洋生物資源が豊富な海域であるが、近年の漁業・養殖業生産量は国内の水産物需要の 6 割前後を満たすに留まっており、4 割は海外からの輸入に頼っている。1985 年のプラザ合意により世界規模でドル高是正が行われて以降、円高を背景に水産物輸入が急増したこと、長引くデフレや多様な食材・食品が安価で小売販売される流通の定着等の影響により、国内の漁業・養殖業の経営状態は長らく厳しい状況下にある。このままでは、国内の漁業・養殖業の生産能力が更に弱まり、食料自給率の低下に拍車がかかることが懸念される。このため、2012 年（平成 24 年）3 月に閣議決定された「水産基本計画」においても、減少傾向にある魚介・海藻類の自給率の向上が重要な目標とされており、2022 年（平成 34 年）の我が国水産物の自給率の目標を魚介類（食用）で 70%、海藻類で 73%としている。この目標を達成する上で、計画的かつ安定的な生産が可能な養殖業は大きな役割を担っている。

国内で養殖される水産物の多くは国内で消費されていることから、養殖生産力を維持・発展させることは、食料自給率向上に有効である。さらに、市場を海外に求めることで利益率を向上させ、ひいては国内養殖産業の規模拡大を通じて雇用の創出にもつながることが期待される。しかし、現状では我が国の養殖業は、飼餌料の確保や疾病対策などの生産コストの上昇や輸入水産物との競争により、その経営は厳しい状況にある。そこで、養殖業が直面している多くの課題を技術的に解決するため、養殖対象生物を遺伝的に改良することにより、養殖生産にとって都合のよい形質を強化した品種や消費者の嗜好に合った品種を人為的に作出することを目指す。

「育種」が改めて注目されている。育種を通じて生産コストの低減や消費の拡大を図ることにより、我が国養殖業の生産力の維持・向上や国際競争力の強化、関連産業の活性化をもたらすことが期待される。

我が国では、観賞魚であるニシキゴイやキンギョの育種には歴史があり、その育種技術は世界的に高いレベルにある。しかしながら、食用種については、養殖の歴史が短いこともあり、速く成長するマダイや耐病性のヒラメやニジマスなど、具体的に品種を作出した事例は限られている。これは、従来、育種が主に継代飼育を通じた優良形質を持つ系統の選抜や、優良形質を持つもの同士の交配により行われてきたため、新品種の作出に膨大な時間、施設、人手、資金を必要とすることに起因している。

こうした中で、近年はゲノム研究の展開を背景に DNA マーカーや遺伝子連鎖地図作成、表現型解析手法の開発をはじめとする育種基盤技術の整備が急速に進むとともに、主要な養殖対象種について育種の前提となる完全養殖技術が逐次確立しつつあり、魚種によっては、品種作出を従来の方法より短期間で実施できる環境が整いつつある。そのため、育種は様々な水生生物の生産技術の安定化、増産、品質向上に大きく貢献することが改めて期待されるようになってきている。

育種による実用品種の作出までには継続した研究開発が必要であり、試験研究体制はもとより、実用品種の実証試験を実施し、確立した養殖品種の種卵・種苗の供給を含め産業界に受け渡すための産学官の一体的な体制づくりと取組みが不可欠である。そこで、我が国として、育種により新しい養殖品種を作出し、その優位性を実証して普及させるための戦略について、育種の技術開発およびそれを取り巻く現状を踏まえつつ、具体的な育種目標や関係機関の役割分担と連携・協力等を含めて取りまとめた。

2. 水産育種技術開発の現状と課題

(1) 育種技術開発の現状

1) 選抜育種・交雑育種技術：

コイ・フナ類やマス類などでは容易に 1 対 1 交配が可能なおから、我が国においても水産総合研究センターの前身の 1 つである水産庁淡水区水産研究所を中心に古くから交雑育種や選抜育種が行われてきた。特に第 2 次大戦後に、耐病性、成長率などの形質について選抜が行われた。また、異なった近交系同士や異なる種を交配した雑種が成長力や生存力が強いという雑種強勢をねらって、コイの品種間の交配やサケ・マス類の種間交雑に関する研究などの交雑育種研究も行われてきた。

海産魚については、近畿大学が、天然魚と比較して成長速度に優るマダイ人工種苗の作出を目的として、1964 年から天然マダイの若齢魚を飼育し、そのうちの成長の速い個体を選抜して産卵親魚にまで養成する取り組みを開始した。このようにして選抜された親魚を用いた継代飼育は 25 年以上繰り返し行われ、成長の速い品種（近大系マダイ）が作出された。

現在、近大系マダイは西日本各地を中心に広く養殖されている。また、成長のよいマダイ

と赤色の退色が少ないチダイを交配して、天然魚のような赤色を帯び、チダイよりも成長の速い形質を備えた雑種「マチダイ」も作出している。水産総合研究センターでは、ブリ類においては寄生虫抵抗性、マス類においては高水温や低魚粉飼料への適応性、ヒラメにおいては連鎖球菌症抵抗性ならびに高水温・低酸素適応性などの選抜育種に取り組んでいる。また、過去には早熟アマゴの系統も開発した。

各県の公設試験研究機関においても水産庁事業等により、パーマークが明瞭なアマゴ（岐阜県）、速く成長する形の美しいマダイ、エドワジエラ症抵抗性のヒラメ（兵庫県）、速く成長するヒラメ（鳥取県）、連鎖球菌症耐性のニジマス（長野県）、速く成長するマツカワ（北海道）などが開発されたが、系統が維持されているものは少ない。

魚類以外の養殖対象種では、アコヤガイについて真珠品質の改善を目標に、貝殻真珠層の色や厚み、炭酸脱水素酵素の活性を指標とした選抜育種や、耐病性や高水温耐性を目標に、血清蛋白の量や貝殻を閉じる力(閉殻力)を指標とした選抜育種が三重県、愛媛県、長崎県により進められている。また、赤変病については、抵抗性が強いとされている中国等のアコヤガイと、抵抗性が弱いとされている国内産のアコヤガイの交雑や、閉殻筋の赤変具合と血球による選抜が有効であることが三重県、愛媛県、長崎県により確認されている。ノリについては、主としてスサビノリやアサクサノリを用いて、高水温耐性（佐賀県）、低塩分耐性（福岡県）、低栄養塩耐性（熊本県）等の経済形質に関する選抜育種や両種の種間交雑が行われてきた。現在ノリ養殖に用いられている主要品種はスサビノリ種の中の一変種であるナラワスサビノリであるが、長年の選抜により遺伝的多様性が減少しているとみられ、選抜育種による効果が出にくくなっている。また、スサビノリとアサクサノリの種間交雑も試みられているが、発生の異常により生残率が極めて低く、実用化された品種は少ない。更に、食用種ではないが、養殖用の餌料生物の生産については、高水温（35℃）でも活発に増殖する微細藻類（キートセロス、ナンノクロロプシス、パブロバ、フェオダクチラム、イソクリシス、テトラセルミス）やワムシ類については、選抜育種された品種がすでに実用化されている。

海外においては、ヨーロッパでは、古くから、体表面にほとんど鱗を持たない突然変異を選抜し、ラインゴイ、カガミゴイ、カワゴイといった調理しやすいコイの品種が養殖されており、総称してこれらはドイツゴイと呼ばれている。これを基に、観賞魚としてのニシキゴイの品種にもその遺伝形質がとり入れられた。米国では 30 数年にわたって、速く成長することを指標にニジマスの選抜が行われ、ドナルドソンニジマスとして利用されている。また、ソ連（現ロシア）でもチョウザメの種間雑種（ベステル）が食用として開発された。また、ノルウェーにおいては大西洋サケを用いて、計画的な育種プログラムを実施し、生産量を拡大させている。

2) 染色体操作による育種技術：

我が国では、「かき小町」（マガキの同質3倍体、広島県）や信州サーモン（ニジマスとブラントラウトの異質3倍体、長野県）のように同質3倍体、異質3倍体を利用した地域特産種の作出、雌性発生による耐病性系統の固定（ヒラメリンホシスチス病抵抗性家系の作出（神奈川県）、アユの冷水病抵抗性家系の作出（岐阜県、広島県等）の研究が推進されている。また、ヒラメでは、既にメダカ等で実績のある、第一卵割阻止型雌性発生による、完全同型接合型のクローンが作出された（鳥取県等）。

海外では染色体操作による育種は日本ほど大規模に行われたことはなく、イギリスにおいてテラピアで雄性発生を用いてYY個体（超雄）を作出し、この個体の精子を用いて全雄生産を行う研究、アメリカにおいてニジマスで雄性発生を用いてクローン魚を作出し、これらクローン間の遺伝的特性の差異を調べた研究がある。カキにおいては3倍体作出の研究が行われ、カナダ、アメリカでは3倍体カキが実用化され、市場に流通している。最近中国において、4倍体のコイが作出された。

3) DNA マーカーによる選抜育種技術：

我が国では、実現性が高く効率的な新規育種法とされている。安定した種苗生産、家系作成が可能なヒラメ、トラフグ、ブリ、ニジマス、アユ等でDNAマーカーの開発ならびに高密度な遺伝子連鎖地図が作成されている。さらに、種苗生産技術が開発途上であるニホンウナギ、クロマグロ、および種苗生産技術が安定化しつつあるクエにおいても遺伝子連鎖地図の作成が進められている。これまでにニジマスにおける伝染性脾臓壊死症（IPN）耐性や、ヒラメにおけるリンホシスチス病耐性、アユにおける冷水病耐性、トラフグやブリ類における雌雄判別などのDNAマーカーが続々と開発され、マーカー選抜育種によって作出したリンホシスチス耐性のヒラメや冷水病耐性のアユの養殖用種苗が販売されている。ノリにおいては、高水温耐性に関して発現量の異なる遺伝子群（HSP等）を発見するなど、マーカーを用いた選抜育種への基礎的知見が集積されつつある。また、水産総合研究センターでは、ブリ類の寄生虫抵抗性や、ヒラメの連鎖球菌症抵抗性のマーカー選抜育種に取り組んでいる。

海外では、ノルウェーにおいてマーカー選抜育種で作出した伝染性脾臓壊死症（IPN）耐性の大西洋サケの養殖用種苗が販売されている。

4) 遺伝子組換えによる育種技術：

我が国では、遺伝子組換え技術による育種研究として、アマゴやテラピア等において成長ホルモン遺伝子導入魚などについて研究されてきた。しかしながら、消費者の遺伝子組換え食品に対する警戒感や、環境(生物多様性)への影響を評価する手法の開発や知見の蓄積が不十分な背景があり、組換え体の利用に関する研究開発は海外の先進国に比べ進んでいない。むしろ、組換え体の作出研究より、組換え体の環境安全性の評価技術に関する研究

に重点が置かれてきた。海外では、遺伝子組換え技術を利用して成長ホルモン遺伝子を導入した速く成長する魚を育種する研究開発が行われており、大西洋サケを対象に米国・カナダで、ギンザケを対象にカナダで、コイを対象に中国で、ティラピアを対象にイギリス・イスラエル・バングラディシュ等で取組まれている。このうち、遺伝子組換え大西洋サケについては、米国において食品としての利用の申請が出され、2012年12月に仮承認されている。また、観賞魚として蛍光蛋白質遺伝子を導入した光るゼブラフィッシュが米国や台湾で市販されており、光るメダカも台湾で市販されている。

5) 突然変異育種技術：

最近では、自然には低い頻度でしか起こらない突然変異を、化学物質を用いて人為的に高頻度で起こさせて、優良な品種の選抜を行う育種技術が開発され、トラフグ、アマゴ、キンギョ等有用種での応用が始まっている。

6) 細胞工学による育種技術：

ノリにおいては、染色体操作以外の細胞工学による育種技術として、葉状体間の形質の違いによる個体選抜ではなく、同一葉状体上の細胞間の耐性の違いに着目した細胞レベルでの選抜技術の開発が進められている。この技術は、ノリ葉状体のプロトプラスト化により細胞壁を除去した裸の単細胞に環境負荷をかけて選抜する方法である。さらに異種間のプロトプラストを融合させる細胞融合を用いた新たな形質導入技術の検討が進められている。

7) ゲノム情報の利用：

育種基盤の整備に貢献するものとしてゲノム情報の蓄積や遺伝子の機能解析、親子判定等を行うゲノム研究が挙げられる。独立行政法人や大学、県が中心となって推進してきた主要な海産養殖魚であるヒラメ、トラフグ、ブリ類に加え、これまで育種が想定できなかったニホンウナギ（水産総合研究センター増養殖研究所）やクロマグロ（近畿大学、水産総合研究センター）についても完全養殖達成を機に、育種研究へのゲノム情報の応用が期待されている。魚類以外の生物においてもアコヤガイ（沖縄科学技術研究基盤整備機構（現沖縄科学技術大学院大学））、スサビノリ（北海道大学、かずさDNA研究所、水産総合研究センター中央水産研究所）、アメリカムラサキウニ（ウッズホール研究所、沖縄科学技術研究基盤整備機構（現沖縄科学技術大学院大学））、カタユレイボヤ（京都大学、遺伝学研究所、沖縄科学技術研究基盤整備機構（現沖縄科学技術大学院大学））等でゲノム情報が蓄積されている。

海外においても魚類としては最も早くトラフグとミドリフグ（ケンブリッジ大学、サンガー研究所、シンガポール大学）の全ゲノム解析が行われ、その後、大西洋タラ（Norfima：ノルウェー、Ocean Science Center：カナダ）、コイ（北京ゲノム研究所：中国）、ヒラメ（北京ゲノム研究所：中国）の全ゲノム解析および遺伝子地図の作成が行われた。国際プロジェクトとして、米国と中国が主導する Genome 10K（1万種ゲノム決定計画）が進行しており、

魚類をはじめとした様々な生物種のゲノム情報を収集、報告されている。新しい研究分野であり、今後も、国内外で様々な生物種においてゲノム情報が蓄積されるものと予想される。

8) 育種に関する周辺基盤技術：

育種に利用する遺伝資源の保存や作出した有用品種や育種素材の保存・復活のため、精子をはじめとする生殖細胞の保存技術の開発が必要である。これについては、冷凍保存した精巣から個体を作成する技術の開発が東京海洋大学で始まっている。また、作出した品種を知的財産として保護するためや、飼育施設から逃避した場合に野生生物への遺伝的影響を抑えるために、不妊化技術の開発も必要である。不妊化技術は雑種不妊や、染色体操作による3倍体化等で一部の魚種ではすでに確立している。さらに、不妊化した親魚に、遺伝的に異なる種の配偶子をつくらせる、いわゆる「借り腹」技術が東京海洋大学により近年確立された。不妊化技術と関連して将来的に育種に大変有用となる周辺基盤技術として注目されている。

(2) 育種を推進する体制の現状

(独立行政法人)

現在、水産総合研究センターでは、基盤研究から応用・実証研究までを、海外を含む外部の研究機関とも連携して行っており、ブリ、ヒラメ、トラフグ、サケ・マス類等での育種研究を進めている。これらは、連鎖地図の作成やマーカー選抜育種、突然変異を利用した育種手法の開発、遺伝子組換え魚の安全性評価手法の開発、耐病性等の評価手法の開発と多岐にわたっている。また、微細藻類やワムシ類については、育種によって作出された系統をジーンバンク事業で公開し、有償で配布する体制が確立されている。ノリにおいても基礎的な培養技術から先端的な育種技術開発および新品種作出研究、さらに育種研究を効率的に進めるためのノリの共生細菌に関する試験研究や、ノリの遺伝子発現解析やマーカー開発等の支援技術の開発を実施している。

(公設試験研究機関)

都道府県水産試験場等の公設試験研究機関では、飼育施設を有していることもあり、これまでの育種研究を通じて淡水魚(サケ科魚類)や貝類(マガキ、トリガイ)、ノリ等で地域特産種(食味向上、大型化、貝殻模様)を開発してきた経緯がある。しかし、研究開発予算の減少により、育種研究に従事する担当者や施設が少なくなっており、そのため、他機関との連携による研究開発の推進も容易ではなくなっている。このことは、新規品種の開発や開発した家系の保存も含めて我が国の育種研究の継続性に大きな影響を与えている。

(大学)

水産系の大学・学部等において、マイクロサテライトマーカーを用いたマーカー選抜育種の研究や遺伝子組換え魚の作出と特性評価、始原生殖細胞を用いた代理親魚、連鎖地図の

作成等の研究開発が行われている。基盤的研究や技術開発が中心であるが、一部では、選抜・交雑育種によって作出した品種（マダイ等）を販売している事例（近畿大学）や、独立行政法人や公設試験研究機関と連携して具体的な育種を行っている事例（東京海洋大学：アユ、ヒラメ、トラフグ、東京大学：トラフグ）がある。この他、育種に関する研究として、倍数体の出現機構の解明、遺伝子機能の解析、性決定機構の解明、温度耐性に関する遺伝的研究、配偶子や細胞の凍結保存に関する研究等が行われている。

（民間企業）

日本においては、漁場管理制度上、一般に民間企業が単独で海面養殖を営むことが困難であるため、一部の貝類（交雑による耐病性のアコヤガイ）や藻類（モズク）を除くと企業による育種は殆ど行われていない。しかしながら、最近では独立行政法人、大学、公設試験研究機関と連携して、ヒラメの耐病性に関する育種（品種の作出）に取り組む事例が見られる。速く成長するブリの開発に取り組んでいる企業もある（ニッスイ）。また、海外においてサケ・マス類の養殖事業を手がけている企業においては、海外での養殖対象種について、抗病性、肉質、体型などによる選抜が行われている。ノリにおいては、耐病性を持つ品種（協和発酵）が開発され、品種登録されている。

（海外）

1996年にEU、ノルウェー、カナダを中心に「SALMAP」というサケ科魚類に関するゲノム解析を中心とした育種研究を目的としたワーキンググループが発足し、複数の大学や公的研究機関がEUの研究資金を取り育種研究開発を進めた。その後プロジェクトは「SALMAP」、「SALGENE」、「Genome Atlantic」、「Genome Canada」と体制を変えて、カナダ農務省を中心とした複数の関係機関から研究予算を獲得して、現在まで研究を進めている。それら研究資金により、大西洋サケ、ヨーロッパスズキ、大西洋タラなどの育種のための研究拠点を置き、ゲノム解析や遺伝子地図の作成と耐病性魚や速く成長する魚の選抜育種、表現型の解析技術の開発、自動化された飼育技術の開発を行っている。米国においては、農務省（USDA）がニジマスを中心にサケ科魚類の育種のためのゲノム情報インフラ整備を行ってきたが、ここ数年、アメリカ海洋大気局（NOAA）や商務省（DOC）と協調し、海産魚類を中心とした養殖研究に力を入れている。また、中国においては、ゲノム解析や遺伝子地図を作るセンター（BGI:北京ゲノム研究所）を深圳におき、中国水産科学研究院の7カ所の研究所を中心に魚種と表現型別に研究所を設定し、コイ、ヒラメ、エビ類等の育種研究および育種素材の開発を国家戦略として進めている。

（3）育種を推進する上での課題

1) 品種育成者の権利保護の問題

魚類等の作出物の知財保護の法整備について考えることは、育成者の権利を保護する上で重要である。植物では、種苗法により作出品種は法的に保護され、水産生物ではノリ等の藻類に適用される。しかし、植物以外の水産生物は、同法の対象とはなっていない。このため、魚類等の植物以外の品種の権利保護については、特許の取得による手段しかないのが現状である。

2) 研究開発者の減少

大学を含めた研究機関において、育種研究に専従できる担当者が少なくなっている。とりわけ公設試験研究機関では、育種担当者の異動と試験場の統合などで、研究開発者の確保が困難となっている。

育種研究は、遺伝学をベースに幅広い研究領域の研究者を必要とする。例えば、育種を効率的に行うためには、経済的形質を決定する遺伝子座の探索に連鎖解析という手法を用いる必要がある。連鎖解析とは、目的とする遺伝子の機能や産物などを無視し、その染色体上の位置のみに焦点をあてて、目的形質とマーカーとの連鎖により遺伝子を見つけていく手法である。この連鎖解析を行うためには、量的形質の解析を行う遺伝統計学が必要で、これを熟知した研究者の配置が必要である。水産分野において、遺伝統計学を主研究とした研究者は少なく、育種研究を進める上で、研究者の獲得が課題となっている。また近年、次世代シーケンサーの活用により、連鎖解析に用いる DNA マーカーをゲノムワイドに探索できるようになった。次世代シーケンサーで得られるゲノム情報から、育種に有効な DNA マーカーを選別するためには、生命情報学分野の解析が必要であり、この分野の研究者の獲得もしていかなければならない。

3) 継続した研究予算の獲得

育種による実用品種の作出までには 10 年単位の長い時間が必要であるが、長期間にわたる継続的な試験研究費の交付制度は整備されておらず、研究期間の終了と共に育種成果物の維持が困難となっている。育種研究の継続と成果物の維持管理を行うため、長期継続が可能な研究基金の設置が課題となっている。また、近年、ゲノム情報を利用した育種技術も紹介されており、ゲノム研究領域の研究資金の獲得も視野に入れて、育種研究を進めていく必要がある。

4) 飼育施設の整備

育種開発には、ベースとなる遺伝資源や作出した品種を継続して保存する施設が必要となるが、未だ設置されていない。また、育種対象種は高温性から低温性、海産から淡水産

など多岐にわたることから、一つの施設で全ての系統保存を行うことはできない。多岐にわたる水産生物を飼育、保存するためには、複数の飼育・保存管理施設の設置が必要である。現実的な対応策として、水産総合研究センターの施設の有効利用も選択肢とする必要がある。

5) 研究協力体制の整備

効率的な育種研究の推進、ならびに育種により作出した品種を普及させるためには、水産総合研究センターや大学等の研究開発機関、養殖現場を持つ都道府県の公設試験研究機関、民間企業および養殖業者の連携協力が必要である。このためには以下の様な連携協力の流れが必要とされる。

① 水産総合研究センターや大学等の研究開発機関においては、効率的な育種を行うためにDNA マーカーの開発、連鎖解析の実施、分子生物学的手法を用いた新規育種技術の開発等の育種研究の基盤技術の開発と育種素材（基本となる品種）の作出に努め、これを都道府県の公設試験研究機関等に供与する。

② 公設試験研究機関は、提供された技術と育種素材を基に地域に適応した品種の作出に努め、民間企業および養殖業者へ提供する。

③ 民間企業および養殖業者は、提供された品種を基に市場用品種を作出する。

以上の様な流れを形成するためには、国の育種プロジェクト研究への共同参画など研究開発段階から、普及段階まで、役割の分担や成果の活用について予め、どのようにしていくかを各組織の社会連携部局を通じて情報交換を行えるような体制の整備が必要である。

3. 水産育種の推進方向と推進方策

近年、鮮魚を代表とする水産物は、健康によい食品として国際的に認められ注目されており、わが国でも食の安全・安心に対する国民の要求が高まるなか、国際競争力を確保しつつ、安全・安心な水産物の持続的な供給体制を確保することがますます重要な課題となってきた。

本戦略では、飼いやすい、成長がよい、病気に強い、低コスト等を育種目標として定め、ゲノム情報の活用や繁殖技術、育種技術の開発を産学官一体となって強力に推進することにより、この課題に取り組んでいく事を明確に方向付け、それに向けて適切な推進方策をとっていく。

(1) 育種における基本的な考え方

給餌養殖では魚粉価格の高騰による飼料価格の上昇が経営の安定を脅かし、無給餌養殖である貝類、海藻類についても生産物価格の低下等により厳しい経営状況が続いている。そこで養殖技術開発の対象種として、全国レベルでは、産業規模が大きいもの、多くの地域で

生産されているものを中心に魚類ではブリ類、ヒラメ、ハタ類、ニホンウナギ、クロマグロ、サケ・マス類を、海藻ではノリを、無脊椎動物ではアサリ・カキ等の二枚貝、クルマエビ等を重点的に取り上げることが適当である。育種品種の実用化についても、これらの中から、養殖現場のニーズや基盤技術の整備状況を踏まえ優先順位を付けて順次取り組んでいく。一方、地域の特産種については、日照時間や環境が異なることから、ある1カ所で作出した品種を地方に導入しても成功するとは限らない。したがって、公設試験研究機関を中心に地域の環境にあった品種を作出していくことが必要である。

何世代にもわたって目的形質を持った個体を選別していくには、その対象種が完全養殖できること、雌雄一つがいでの交配が可能になることが必要である。また、育種の成果が実用化レベルで発揮できるようにするには、今後多くの周辺技術の開発と投資が必要となる。その投資を継続的に引き出すには、なるべく早い時期に、作出した養殖品種を実証試験に供し、市場での評価をもって期待した効果を得られることを養殖業界や消費者に示す必要がある。そのため、実用化に近いものを優先して、品種作出を急ぐ必要がある。

(2) 育種の目標

水産生物の種類と強化する形質を決める育種目標を作ることは水産育種を進める上で極めて重要となる。しかし、我が国の養殖業においては、ブリ、マダイなど一部の魚種を除き、多種類・少量生産が特徴であり、全ての種に適合するような共通した具体的目標は少ない。したがって、育種により強化を図る目標については、個々の種類ごとに詳細に定めることとし、ここでは基本的な目標を以下の4項目に整理して示す。

1) 飼育管理上の特性の改良

飼育管理に係る労力の軽減や飼育期間の短縮、必要とする飼餌料の低減など生産コストの低減に貢献する形質を改良する。速く成長する（出荷までの期間短縮）家系、高餌料効率家系、飼育管理が容易な（性格がおとなしい、刺激に対して敏感に反応しない）家系の作出など。

2) 環境適応性の改良

食料の安定供給のため、地球温暖化や、それに伴う気温や海水温の変化といった環境の変化などの比較的長期の環境変動や、飼育環境の予期せぬ激変に適応する形質を改良する。高水温耐性家系、低酸素耐性家系の作出など。

3) 経済的特性の改良

生産者の収入の向上や、消費者の需要に応えるため、付加価値の付く形質を改良する。大型化や高産肉性家系、健康増進や鮮度保持などの機能性成分高含有家系、見栄えの良

い家系、食味の良い家系の作出など。

4) 抗病性の改良

生産コストの低減や安定生産、消費者の安心に応えるため、薬剤使用量の低減を目的に抗病性を改善する。ウイルス性、細菌性、寄生虫性疾患等に対する抵抗性を改良した抗病性家系の作出など。

(3) 育種の推進方策

水産生物の育種を進めていくには、養殖の対象種となる水生生物の遺伝情報に基づいたDNAマーカー開発、新規育種手法開発、表現型（形質）の評価手法や形質と遺伝情報を結びつける手法の開発等を行っていく必要がある。また、配偶子等の保存法や不妊化技術の開発、選抜を可能とする繁殖技術と飼育技術、耐病性においては疾病の診断技術と耐病性評価技術の開発など周辺の支援技術の開発も必要である。さらに、ゲノム情報や遺伝子機能を解析する施設、系統や選抜個体等を飼育する施設、耐病性等の表現型を解析する飼育施設の整備も必要である。また、ゲノム研究が進展したからといって、すべての育種研究がゲノム研究の成果のみをもって進むわけではなく、今後も従来の選別や交雑育種研究と組み合わせて実施していかなければならない。したがって、長期的な視点に立った育種技術および周辺の支援技術の研究開発や人材育成を含む計画的な研究推進体制の整備が必要である。

1) 基盤技術の開発

DNAマーカーを用いて育種を進めていくためには、DNAマーカーの情報は不可欠であり、これを押さえることによって、マーカー選抜育種研究をリードできる。戦略的にマーカー選抜育種法の開発を推進するには、養殖対象種毎のDNAマーカーの情報を効率よく抽出する必要がある。このため、基盤技術開発として、マイクロサテライトマーカーの他、1塩基多型などの新しいDNAマーカーの探索を行うと共に、解析自体を高速化する技術開発も行う。また、現在、遺伝子組換え技術を用いて優良な家系を作出する研究や、遺伝子組換えを行わずに遺伝的な変異を人為的に挿入して優良な家系を迅速に作出する新規の研究が行われており、前者の研究は海外ではすでに実用化レベルに達している。我が国においても、これらの研究推進と技術開発を進める必要があり、そのために、新たな育種基盤技術や、新規不妊化技術等、周辺基盤技術の開発が必要である。

① DNAマーカーとマーカー選抜育種法の開発

次世代シーケンサーを利用して、信頼性の高いDNAマーカーの開発研究に積極的に取り組む。また、優良形質との関係を調べ、マーカー選抜育種法を開発する。

- ・次世代シーケンサーを用いた魚種毎の DNA マーカーの開発
- ・連鎖地図の作成、量的形質座位 (QTL) 解析、表現型と DNA 多型の相関解析等

② 新規育種手法開発 (新規育種手法、遺伝子組換え手法等)

遺伝子組換えによる有用形質の付加と導入遺伝子の検出技術の開発を行い、安心・安全を求める消費者の要望に応える一方、将来的な気候変動による食料危機に備え、動物性タンパク質の確保に向けた基礎研究を行う。遺伝子組換えは当面の間、観賞魚など人が直接食用にしない魚の開発を念頭に不妊化技術と組み合わせて行い、その技術の向上を目指していく。

- ・新規育種技術開発
- ・遺伝子組換え生物の作出と評価

③ 育種を支援する周辺技術の研究開発

育種を支援する周辺技術の研究開発として最も重要なものは不妊化技術の開発である。特に、環境への遺伝子攪乱の防止、品種の知財保護双方の目的に極めて有効な技術である。現行の雑種不妊化、3 倍体化による不妊化技術では全ての魚種への応用には不十分であり、より普遍的に利用できる新規の不妊化技術が求められている。これらのうち、遺伝的改変による不妊化技術は、現在でも理論的に技術的問題が少なく、最も有力な不妊化技術の候補であるが、これには借り腹技術を用いて系統を維持する必要性が生じる。このことから、多くの魚種に応用可能な借り腹技術の一般化も周辺技術として欠かせない。

- ・養殖対象種の新規不妊化技術の開発
- ・養殖対象種の借り腹技術の一般化

2) 評価法の開発

優良形質を持った家系をつくるには、優良形質を正しく評価する技術が不可欠であり、最適な評価法の開発が必要である。まず主要な対象形質である「速く成長する性質」と「耐病性に関する形質」を中心に評価法の開発を行い、その他の形質評価法の開発にも順次対応していく。

① 速く成長する性質の評価

速く成長する性質の評価法の開発

② 耐病性評価

耐病性評価法の開発

③ その他の形質の評価

3) 家系の開発

開発されたDNAマーカーや新規育種技術を用いて、正しい評価法をもとに優良品種の作出の元となる優良形質を持った家系の作出を行う。海産魚・淡水魚を中心に、速く成長する家系、耐病性家系等の家系の作出を行う。育種素材となるこれらの作出家系は、都道府県の公設試験研究機関、民間等に供与し、地域に適応した品種の作出に利用してもらう。

4) 遺伝資源保存法の開発（作出された魚の保存に対応する）

多くの遺伝資源を保持して、特性評価をしておくことは育種を進める上で重要である。そのため、主要な養殖対象種を遺伝資源対象種とし、優良な個体を生体保存するとともに、施設の関係から、生体保存できない遺伝資源の保存法を開発する。特に、精子・精原細胞の凍結保存を念頭に保存法の高度化をはかり、重要特産品種、希少種の保存を行う。

(4) 育種品種の普及促進

育種により作出した品種を普及させるためには、独立行政法人（水産総合研究センター）や大学等の研究開発機関、養殖現場を持つ都道府県の公設試験研究機関、民間企業および養殖業者の連携・協力が必要である。したがって、育種研究開発段階から役割の分担や成果の活用について、予めどのようにするかを決めておくために、各組織の社会連携部門を通じて情報交換や所要の調整を行える体制の整備が重要である。

また、育種により作出した魚類等の品種（知的財産）の保護のための法整備について考えることは育成者の権利を保護する上で重要である。種苗法により法的に保護されるノリ等の藻類を除き、魚類等主要な水産物の品種に対しては、現在育成者の権利を守る法律がない。それに替わる手段として、特許取得が考えられるが、特許は保護される期間が限られているため、効果は不十分である。魚類等の品種の開発普及意欲を高めるためには、育成者権を守る法整備が将来的に必要と考えるが、それまでの手段として、不妊化技術の開発を含めた多面的アプローチが必要である。

なお、地域特産種として公設試験研究機関や地域の漁業者を軸として育成された品種では、普及のあり方や知的財産権の保護等において、全国的に共通する品種とは異なる地域に配慮した適切な対応が必要である。育種技術により得られた品種を実用化し普及させるには、その産業的受け皿として、人工種苗の生産および中間育成産業を創出・育成しておくことが重要である。さらに、将来的に国内外のマーケティングを行う仕組みも作る必要があるため、育種により作成した品種のブランド化や品質管理基準、トレーサビリティシステムを導入して消費者の安心を確保すること等、販売促進、市場開発といった取り組みも必要となる。

(5) 水産育種推進体制の整備

1) 育種研究の戦略的推進（育種・開発センター）

消費者および生産者の求める様々なニーズに答えた養殖品種を育種で作り出すには、遺伝学はもとより、分子生物学、生理学、病理学、栄養学、環境学等の幅広い分野の研究成果を駆使して取り組んでいなければならない。これらを総合的に研究できる研究施設と研究者を有する十分な体制・施設が必要である。特に育種を効率よく進めて行くには、連鎖解析に必要な大量の DNA マーカーを効率的に得るためや、GWAS 等の新規の分子育種の技術に必要なゲノム解析のために迅速に大量の遺伝子解析ができる体制の整備が必要である。また、人工制限酵素を用いて遺伝子を狙い撃ちでノックアウト出来る TALEN 法などゲノム編集技術が、近年盛んに報告されるようになってきた。この手法は、容易に変異体を作成でき、組換え体に当たらないため、育種の新技術として注目されている。このような新技術をいち早く検証し、新しい育種手法として導入していくことも、重要な課題である。

これらの、ヒトゲノムやイネゲノムの研究で蓄積されてきた最新のバイオテクノロジーを用いて育種研究を推進していくという課題に対し、新しい育種技術開発を先導的に行い、我が国の育種を牽引する戦略的研究施設として「育種・開発センター」の整備が必要である。センターには、選抜育種を行う飼育施設、開発した品種の経済形質等の形質の優劣を、家系や個体毎に評価するための飼育施設が必要である。品種の表現系の正確な評価、継代保存には、1 対1 交配を可能にする高度な繁殖技術、健全な種苗育成技術が必要であり、これらをにう技術力の高い飼育員を恒常的に配置しておく必要がある。

2) 組織的、戦略的な遺伝資源および品種の保存管理（遺伝資源・系統保存・管理センター）

品種開発に必要な遺伝資源や作出した系統の保存には、独立行政法人（水産総合研究センター）が実施している遺伝資源の収集・評価・保存事業（ジーンバンク事業）を活用することも一案である。しかし、現行の実施体制では、微細藻類、細菌、藻類の保存に限られ、魚類等大型の水産生物の品種の保存には限界がある。品種の保存には、生体保存が現時点で最も確実な方法であるが、現行のジーンバンク事業の枠組の中で、魚類の様な大型水産生物の品種を保存、管理するためには、専門の施設として例えば、「遺伝資源・系統保存・管理センター」を設置し、本事業を拡大して活用していくことを検討する必要がある。養殖対象種は高温性のものから低温性のもの、海産から淡水産など多岐にわたることから、一つの施設で全ての品種の形質評価や系統保存を行う事は難しい。戦略魚種を中心としてさまざまな水産生物の育種研究を展開するためには、温暖海域、寒冷海域、淡水域にまたがる複数の管理センターが必要であり、さらに事故により死滅するリスクを分

散するため有望な系統や作出した品種は複数の施設で飼育管理することが必要なことから、日本各地に設置されている水産総合研究センターの施設を有効に利活用する事が望ましい。これらの施設の運営、すなわち、遺伝資源や品種の確実な保存には、育種・開発センターと同様、高度な繁殖技術と健全な種苗育成技術をもつ熟練した飼育管理者を必要とするため、飼育技術者の確保と練度の維持を行う研修機関の併設も望まれる。永続的な系統保存のため、生体保存に代わる方法として生殖細胞の保存や復活方法などの研究部門もセンター内に設置する事が望ましい。海外の育種の研究を行っている多くの研究所がこれらの体制を整え集約的に行っていることから、我国においても早急に体制を整え海外との競争力を高め、我が国の養殖業を保護することが必要である。

3) 研究協力体制の整備

育種研究を効率よく進めるためには、社会ニーズ、流通等の経済的な要因の調査、分析を行い、研究成果の産業界での活用の促進と知的財産（特許，著作権，ノウハウ等）の保護と活用を，組織的かつ積極的に推進しなければならない。そのため、独立行政法人、公設試験研究機関、大学、民間に設置されている社会連携組織間のネットワークの強化を行う。

育種の効率化を進めるために育種研究の成果として得られた、育種方法、固定形質、作出した育種素材、ゲノム情報、ゲノム情報から得られたDNAマーカーなどの育種研究リソースを格納したデータベース（マリンバイオバンク）の構築と、これらの情報の発信を行う施設の整備が必要である。

4) 知財保護と環境への配慮

育種により作出された品種は、知的財産（特許，著作権，ノウハウ等）を有しており、育成者の権利保護を行う必要がある。育種による作出物の保護において、植物では、種苗法が存在し、これにより作出品種は法的に保護されている。しかし、種苗法は、ノリ等の藻類には適用されるが、それ以外の水産物には適用されず、現状では魚類等の主要な水産生物の品種育成者の権利を保護する優れた手段が存在しない。実質的に魚類等の作出品種の育成者権を守るためには、不妊化が有効な手段と考えられる。また、先述のマリンバイオバンクに品種情報（育成者、品種特長等）を登録し、知財所有権等の知財情報の発信を行う事も必要である。

育種を行う上で、環境への配慮も重要な課題である。作出された品種、特に遺伝子組換え等の新しい技術で作出された品種は、自然集団と異なる遺伝組成を持つため、自然集団へ加入すると遺伝子攪乱を生じる。遺伝子攪乱による環境への影響を防ぐためにも、種苗の不妊化が求められるが、あわせて育種品種系統の厳重な管理も重要である。

このように、不妊化は知財保護と環境への配慮双方にとって必要不可欠な育種周辺技術

であることから、新規不妊化技術の開発（3.(3)1)③を参照）を推進していくことが重要と考えられる。さらに、知財保護、環境への配慮双方の面から、遺伝資源・系統保存・管理センターにおいて、もととなる品種系統の厳重な管理、保護を行う必要がある。

4. あとがき

わが国は 130 年にわたる「つくり育てる漁業」の歴史があり、魚介類の種苗生産技術に関しては世界のトップレベルにある。しかし、中国をはじめとする諸外国も、後発ながら育種、養殖技術開発を強力に進めており、低コストを背景に日本市場がさらに脅かされることが危惧されている。このような世界情勢の中、水産総合研究センターは、本水産育種研究戦略に沿って大学、公設試験研究機関、民間との連携を強化し、国際競争に勝利するためにゲノム情報を活用、DNA マーカーによる優良形質を持つ種苗選別技術や繁殖技術、育種技術の開発を強力に推進する。

水産育種研究はオールジャパンで取り組むべき喫緊の課題であり、水産総合研究センターは、この重要な課題推進の中核となり、育種研究とその情報発信を進め、我が国の水産業に高い国際競争力を付加し、かつ安全・安心な水産物を安定的に供給に努めていかなければならない。

用語解説

DNA 多型：

染色体の DNA 上の配列において、個体間で異なっている部分。

DNA マーカー：

遺伝子マーカー、遺伝マーカーとも呼ばれる。生物個体の遺伝的性質（遺伝型）、もしくは系統（個人の特定、親子・親族関係、血統あるいは品種など）の目印となる塩基配列。一塩基多型（SNP）、制限断片長多型（RFLP）から、マイクロサテライトまで、様々な種類がある。これらは長さや配列のパターンによって名称が異なる。DNA マーカーは、容易に検出でき、染色体上での位置が特定されていて、多型的な（個体によって違いがある）であることが必要である。これを目印として優用遺伝子を有する個体を選抜することが育種においてしばしば有効になる。

HSP：

熱ショックタンパク質（ねつショックタンパクしつ、ヒートショックプロテイン）英：Heat Shock Protein、HSP）とは細胞が熱等のストレス条件下にさらされた際に発現が上昇して細胞を保護するタンパク質の一群である。ストレスタンパク質（英：Stress Protein）とも呼ばれる。大きさ（分子量）が異なる様々なものがある。

QTL：

量的形質座位（Quantitative Trait Locus、QTL と略す：量的形質遺伝子座ともいう）のこと。身長や体重、乳量など、各個体の形質値が、連続的に変異するとき その形質を量的形質と呼び、量的形質がどのように生物に表現されるかに影響を与える染色体上の DNA 領域のことを QTL(量的形質座位) という。

連鎖解析：

遺伝学の実験で、複数遺伝子間の連鎖関係を調べ、遺伝子間の相対距離を調べて連鎖地図（染色体上の遺伝子の位置情報を示す遺伝子地図の一種）を作成したり、近傍に存在する遺伝子を推定したりする解析法。

次世代シーケンサー：

Next Generation Sequencerを意味するNGSと略される。微量反応系による塩基配列決定を、極めて多数、並列的に行うことを実現した機器および技術。

ゲノム：

"gene（遺伝子）"と集合をあらわす"-ome"を組み合わせた言葉で、生物のもつ遺伝子（遺伝情報）の全体を指す。

マイクロサテライト：

ゲノム DNA の中で、2塩基から5塩基程度の塩基配列の単純な繰り返しからなる部分を言う。繰り返し回数が非常に多型性に富むため、親子鑑定等に用いられる。有用遺伝子の染色体上の位置情報を決定するためにも利用される。

一塩基多型：

SNPs (Single Nucleotide Polymorphisms) と略される。一塩基の置換（点突然変異）によって生じた多型である。ゲノム中に高頻度に分布し多型性が失われることが少ないため、連鎖解析や関連解析に用いられている。

同質3倍体：

同種由来のゲノムセットを3つ持つ生物。魚類では、通常同じ種類同士を交配後、第二極体の放出を阻止して作る。不妊化等の目的に利用される。

異質3倍体：

3倍体で、3つのゲノムセットのうち少なくとも一セットが異なる種のゲノムに由来する生物。魚類では通常異なる種を交雑後、第二極体の放出を阻止して作る。不妊化を通じた成長促進や耐病性の付与の目的に利用される。

GWAS

Genome Wide Association Study (ゲノムワイド関連解析) のこと。特定の形質を有している集団と、一般対象集団との間で、遺伝子多型の頻度に差があるかどうかを統計的に検定して、形質と関連する領域・遺伝子を同定する手法。ゲノムワイド関連解析では、通常、対象生物種の全体を網羅するような数百万カ所の SNP を用いて解析する。

水産育種研究戦略検討会

外部有識者 (50音順)

遠藤 久	水産庁 増殖推進部 研究指導課長
岡本 信明	東京海洋大学 学長
久原 哲	九州大学大学院 農学研究院 遺伝子資源工学部門 遺伝子制御学講座 教授
五條堀 孝	国立遺伝学研究所 副所長・教授
嵯峨 直恆	北海道大学大学院 水産科学研究所長・教授
中山 一郎	水産庁 増殖推進部 参事官
渡部 終五	北里大学 海洋生命科学部 教授

内部委員

和田 時夫	水産総合研究センター 理事
皆川 恵	水産総合研究センター 研究推進部長
馬場 徳壽	水産総合研究センター 中央水産研究所長
飯田 貴次	水産総合研究センター 増養殖研究所長

事務局

鈴木 満平	水産総合研究センター 研究推進部 研究主幹
中田 薫	水産総合研究センター 研究推進部 研究主幹
服部 圭太	水産総合研究センター 研究推進部 研究開発コーディネーター
安藤 忠	水産総合研究センター 研究推進部 研究開発コーディネーター
栗田 潤	水産総合研究センター 研究推進部 研究開発コーディネーター
村上 恵祐	水産総合研究センター 研究推進部 研究開発コーディネーター
小林 敬典	水産総合研究センター 研究推進部 研究開発コーディネーター

ワーキングチーム

佐野 元彦	水産総合研究センター 中央水産研究所 水産遺伝子解析センター長
伊藤 文成	水産総合研究センター 増養殖研究所 業務推進部長
岩本 明雄	水産総合研究センター 増養殖研究所 養殖技術部長
名古屋 博之	水産総合研究センター 増養殖研究所 養殖技術部 育種グループ長
荒木 和男	水産総合研究センター 増養殖研究所 養殖技術部 育種グループ 主幹研究員
岡本 裕之	水産総合研究センター 増養殖研究所 養殖技術部 育種グループ 主任研

究員

正岡 哲治 水産総合研究センター 増養殖研究所 養殖技術部 育種グループ 主任研究員

尾崎 照遵 水産総合研究センター 増養殖研究所 養殖技術部 育種グループ 主任研究員

森 広一郎 水産総合研究センター 増養殖研究所 病害防除部 病原体研究グループ長

吉浦 康寿 水産総合研究センター 増養殖研究所 病害防除部 免疫グループ 主任研究員

本戦略に関する問い合わせ先

〒879-2602 大分県佐伯市上浦大字津井浦

水産総合研究センター 増養殖研究所 上浦庁舎 養殖技術部

TEL : 0972-32-2125 (代) FAX : 0972-32-2293



独立行政法人
水産総合研究センター

〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい 2-3-3
クイーンズタワーB15 階
TEL : 045-227-2600 (代表) FAX : 045-227-2700
<http://www.fra.affrc.go.jp> E-mail: www@fra.affrc.go.jp