

戦略プロポーザル

次世代育種・生物生産基盤の創成(第2部)

～育種支援技術、生産プロセス研究の推進による、
高品質水畜産物の高速・持続可能な生産～

STRATEGIC PROPOSAL

Building strong foundations for the transformative
research in next generation breeding &
bioproduction (Part 2)

-Research to build up the foundation and technologies that facilitate
effective breeding and production process management for high quality,
sustainable, and accelerated production in aquaculture and animal
husbandry-

研究開発戦略センター(CRDS)は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握(俯瞰)、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。
<http://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルにおける「生物生産」とは、微生物・細胞、植物、動物などの生物を用い、低価値な資源（糖、無機塩類、光、二酸化炭素、飼料など）から、育種・生産プロセス（培養、栽培、飼育養殖）を通じ、高付加価値の物質や生物体自体を目的産物（食料、燃料、化成品、素材、医薬品、生物的ツールなど）として生産することを指す。本戦略プロポーザルは、効率的な育種、生産プロセス研究を行うための体系的な方法論創出に向けて、具体的な研究テーマや研究推進体制などに関する諸方策を提案するものである。またプロポーザル作成にあたり、研究の背景や基盤、想定される産業などの違いから①微生物・細胞、②動物（水畜産）、③植物（作物）の3分野をそれぞれ第1～3部として分割して発刊することとした。第2部では水畜産分野を中心として取り扱い、マグロやウシなどの産業動物を品質、持続性や経済性の向上を達成して生産可能な水畜産の実現を目指す。

品質、持続性や経済性の全てを向上させるためには、育種の観点では大型化、高成長、高飼料効率、耐病性、耐寄生虫といった有用な形質を有する品種の創出が必須である。また生産プロセスの観点からは、低環境負荷かつ飼料効率の高い飼料や、成長・飼料効率や得られる産物の品質が高く死亡率が低い飼育養殖手法の開発が求められる。この実現には産業動物自体を対象とした研究開発を行うことが不可欠であるが、産業動物は一般的に大型でライフサイクルが長く、飼育養殖に要するスペースや飼料コストが大きいことが関連する研究活動を阻害する大きな要因となっている。

このような状況を打開するための戦略として、本戦略プロポーザルではモデル生物における生殖工学、行動メカニズム解析などの基礎研究成果の産業動物への橋渡しや、産業動物生産現場のノウハウのメカニズム解明を通じ、優良品種創出の加速、飼育養殖法開発改良の効率化を目指すことを提案する。そのために取り組むべき具体的な研究開発課題を以下に示す。

課題1：育種、品種改良支援基盤技術開発

- (1) 産業動物を対象とした生殖工学の推進による研究加速およびコスト低減
- (2) ゲノム情報を利用した育種手法開発、有用形質のメカニズム解明

産業動物の研究推進にあたり、実務面で最も大きな障害は前述のようにライフサイクルの長さや飼育養殖スペースの広さに起因する高コストである。この障害を軽減し、育種を加速するための支援技術として、産業動物における代理親/借り腹、配偶子の体外培養、保存技術開発を推進する。これにより世代交代加速を実現、育種に要する期間を短縮し、短期間で優良品種創出や個体、系統保存コストの低減を実践する。また、近年急速に技術が向上、普及しつつある次世代シーケンサーを用いて産業動物のゲノム情報を大量に取得し、ゲノム情報に基づく育種手法の開発、実践を行う。これにより有用形質を支配する遺伝子の特定や、形質予測手法の高精度化の推進を可能とし、効率的な育種の実現に貢献する。

課題2：生産プロセス（飼育、養殖）開発改良基盤研究

- (1) 飼料開発
- (2) 行動メカニズム解明推進、制御技術の開発

（3）ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング

上記（1）～（3）の研究開発により、飼育養殖手法の開発改良を推進、課題1の研究に必要な生物集団の調達や、生産物の高品質化、生産プロセスの持続性、経済性向上に関する研究を支援する。飼料開発においては、単に栄養要求を充たす、飼料効率の向上といったことだけではなく、持続可能な資源の利用、積極的な摂食行動を誘起することで給餌労力や食べ残しによる汚染の低減なども含めた達成を目指す。行動メカニズムに関しては前述の摂食に加えて、繁殖、忌避などの行動、関連した現場ノウハウのメカニズム解明を行う。繁殖メカニズム理解の深化は通年の生物生産への応用に直結する研究であり、忌避メカニズム研究はストレスや怪我による死亡の防止に繋がる他、近年意識が高まる **Animal Welfare** を実現する飼育養殖法を開発する、といった観点でも重要である。また、ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング研究を通じ、親世代、あるいは胎児や新生児、稚魚の栄養環境が成長後の形質に及ぼす影響を明らかにする。これにより持続的に調達可能な天然資源を飼料とした生産法の開発、より効率的な高品質産物の生産に貢献する。

これらの研究開発課題の遂行には、従来のモデル生物や産業動物自体をその候補として、適切な生物をモデルとした基礎研究、そしてその成果の実装に向けた橋渡し、実証研究を長期的な展望に基づき推進することが必要である。しかし前述の飼育養殖期間、スペース、コストなどの要因から、個々の研究室スケールでこのような研究に継続的に取り組むことはもはや困難な状況である。そのためわが国における橋渡しは停滞傾向にあり、様々な優れた基礎研究シーズを有しながらもその成果を社会実装に結びつけることが困難になっている。

研究開発を効率的に推進するためには、産業動物の飼育養殖設備を中核として、その基礎、橋渡し研究に必要な機材を集約した橋渡し研究拠点の整備が必要不可欠である。そしてこの拠点をプロジェクト制の一過性のものとせず、長期的に持続可能なものとするためには、その成果を積極的に商業生産へと導出、その利益の一部を研究開発に還元することで将来的に自立可能な研究エコシステムの構築を目指すことが重要である。

このような橋渡し研究拠点の整備は産業動物の品種改良、飼育養殖手法の開発改良を単に促進するだけでなく、基礎研究から加工流通までを含めた商業生産、マーケティング、知財戦略などの多様なバックグラウンドを有する人材の交流、シーズとニーズのマッチングの場ともなりうる。そのため水畜産分野に関する広い視野を兼ね備えた人材育成、輩出の場としても重要である。

Executive Summary

What is bioproduction?

Bioproduction is a research field which covers the whole process of that living organisms produce various types of products, such as materials for food, pharmaceutical products, biofuels, biological tools, bio-plastics. Extraction and purification processes are needed in certain types of products, while the living organisms themselves are often used as they are. Breeding and production process management are the key points in the research field.

Why bioproduction is important for us?

The bioproducts mentioned above are made from low cost materials, such as light, CO₂, inorganic salts, starch, and feed crops. Certain products can be produced by bioproduction with far lower cost than by chemical synthesis. Not only cost effective, bioproduction is regarded as environment friendly and more sustainable. Here we propose research strategies to promote the bioproduction research, particularly to build up the guiding principle for effective breeding and production process management in a systematic way. As the research background, current issues and relevant industries vary among the types of organisms used, our proposals are divided into three parts. The first one argues the bioproduction by microorganisms and cultured cells, the second is for fishery and animal husbandry, and the third part refers to agriculture (mainly plants).

Background and present state

In our long history, humans have benefitted from aquaculture and livestock. In the light of recent environmental pollution and decreasing natural fish stocks, the liability for these industries have been increasingly intensified. Research and technological development are expected to contribute for the improvement of sustainability, quality, and economic efficiency in aquaculture and animal husbandry. From the aspect of breeding, larger, fast growing, highly feed efficient, and disease/parasites tolerant/resistant varieties have to be established, to meet these goals. Research in production management could contribute to develop environmentally friendly, highly efficient feeding stuff and management methodology to bring higher quality and lower mortality. Such research and development have to be done with using actual farm animals/fishes, not only on model organisms like mice and zebra fishes.

Current Issues

In general, above mentioned farm animals/fishes have longer life cycle than model organisms commonly used in labs, meaning longer time is required to establish a new variety by breeding, as generation turn over takes longer duration. In addition, these animals require more space to rear and higher cost of feeding, resulting in increasing the difficulties to conduct research on real farm animals/fishes.

Proposed research strategy

To meet the immediate demand to advance the breeding and production process management, here we propose following two research strategies.

Theme 1: To accelerate the breeding speed and efficiency in real farm animals/fishes

(1) To advance reproduction related technologies, such as surrogate parent, in vitro culture of gametes, techniques for preserving gametes and fertilised eggs, aiming to shorten breeding time in farm animals/fishes.

(2) To advance the breeding methodology by applying genomic information and uncovering the genomic/molecular mechanisms underlying desired traits. Such effort would promote the development of advanced methods for the prediction of traits based on genomic information.

Theme 2: Research and development on state-of-the-art technology in production process management

(1) Development of cost effective and environmentally friendly feeding stuff. It is important to minimise the left-over feeding stuff in aquaculture to prevent water pollution.

(2) Promotion of basic and applied research on mechanisms that affect animal behaviour to develop technologies that enable effective control on farm animals/fishes. For example, uncovering the mechanisms that stimulate eating behaviour might contribute to improve feeding efficiency and to shorten the culturing duration. It is inevitably important to develop applicable technologies to real farm animals/fishes, in an industrial scale.

(3) To develop efficient feeding technology by taking advantages from nutritional programming. This technology takes advantage from the naturally existing metabolic plasticity which has narrow opening window and could affect the metabolic characteristics of whole life of animals. The technology could open a new door to establish sustainable and environmentally friendly feeding methodology.

The above-mentioned research strategy could be only effective when a proper translational research system is implemented. Appropriate model organisms have to be set to conduct any research activities, with enhancing the accumulated knowledge based on model organisms in experimental labs.

With the considerably longer life cycle and larger rearing space and high cost feeding stuff required, at this moment, it is getting more and more difficult to conduct the truly translational research by each single laboratory. To conquer these difficulties, we would strongly recommend to establish an integrative research centre for basic and translational research, where rearing and culturing facility for livestock/fishes, various analytical instruments are provided for the research community. In order to maintain such integrative research centre in an economically sustainable way, it is crucial to actively apply the research outcomes onto the commercial production and to pass-on the profit from the industry to

research activity.

Such an integrative translational research hub could also promote the communication between various types of stakeholders who are related to basic research, commercial production including food processing, marketing, and intellectual properties. Such communication would facilitate to build up a strong foundation of aquaculture and livestock research and development.

目次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	3
2-1. 現状認識および問題点	3
2-2. 社会・経済的效果	7
1) SDGs、バイオエコノミーへの貢献	7
2) 新品種創出、生産プロセス改良による水畜産業の競争力向上	7
3) 地方創生に向けた産業振興、技術伝承	8
2-3. 科学技術上の効果	9
1) 産業動物、非モデル生物研究の加速、橋渡し研究促進	9
2) モデル生物の改良、新たなモデル系の創出	10
3) 生物資源保全、絶滅防止への貢献	10
3. 具体的な研究開発課題	12
4. 研究開発の推進方法および時間軸	17
4-1. 推進方法	17
4-2. 時間軸	19
付録1. 検討の経緯	21
付録2. 国内外の動向	25
付録3. 専門用語説明	32

1. 研究開発の内容

本戦略プロポーザルにおける「生物生産」とは、微生物・細胞、植物、動物などの生物を用い、低価値な資源（糖、無機塩類、光、二酸化炭素、飼料など）から、育種・生産プロセス（培養、栽培、飼育養殖）を通じ、高付加価値の物質や生物体自体を目的産物（食料、燃料、化成品、素材、医薬品、生物的ツールなど）として生産することを指す。本戦略プロポーザルは、効率的な育種、生産プロセス研究を行うための体系的な方法論創出に向けて、具体的な研究テーマや研究推進体制などに関する諸方策を提案するものである。またプロポーザル作成にあたり、研究の背景や基盤、想定される産業などの違いから①微生物・細胞、②動物（水畜産）、③植物（作物）の3分野をそれぞれ第1～3部として分割して発刊することとした。第2部では水畜産分野を中心として取り扱い、マグロやウシなどの産業動物を品質、持続性や経済性の向上を達成して生産可能な水畜産の実現を目指す。

本戦略プロポーザルでは育種による優良品種創出や飼育養殖など生産プロセス開発改良を高速化するための基礎、橋渡し研究の基盤整備を通じ、品質、持続性や経済性を向上させた水畜産業の推進を提言する。具体的な研究開発課題は次の通りである。

課題1：育種、品種改良支援基盤技術開発

- (1) 産業動物を対象とした生殖工学の推進による研究加速およびコスト低減
- (2) ゲノム情報を利用した育種手法開発、有用形質のメカニズム解明

育種を加速するための支援技術として、産業動物における代理親/借り腹、配偶子の体外培養技術開発を推進する。これにより世代交代加速を実現、育種に要する期間を短縮、低コスト化し、短期間での優良品種創出を実践する。また、近年急速に技術が向上、普及しつつある次世代シーケンサーを用いて産業動物のゲノム情報を大量に取得し、ゲノム情報に基づく育種手法の開発、実践を行う。これにより有用形質を支配する遺伝子特定の推進や、高精度での形質予測を可能とし、効率的な育種の実現に貢献する。

課題2：生産プロセス（飼育、養殖）開発改良基盤研究

- (1) 飼料開発
- (2) 行動メカニズム解明推進、制御技術の開発
- (3) ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング

上記(1)～(3)の研究開発推進により、飼育養殖手法の開発改良を行い、課題1の研究に必要な生物集団の調達や生産物の高品質化、生産プロセスの持続性、経済性向上に関する研究を支援する。飼料開発においては、単に栄養要求を充たす、飼料効率の向上といったことだけではなく、持続可能な資源の利用、積極的な摂食行動を誘起することで給餌労力や食べ残しによる汚染の低減なども含めた達成を目指す。行動メカニズムに関しては前述の摂食に加えて、繁殖、忌避などの行動、関連した現場ノウハウのメカニズム解明を行う。繁殖メカニズム理解の深化では産業動物の通年の生産手法開発を行う。忌避メカニズム研究ではストレスや怪我による死亡を防ぎ、近年意識が高まる **Animal Welfare** を実現する飼育養殖法を開発する。また、ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング研究を通じ、親世代、あるいは胎児や新生児、稚

魚の栄養環境が成長後の形質に及ぼす影響を明らかにする。

これらの研究開発課題の遂行に向けて、マグロ、ウシなどそれぞれの産業動物生産における解決すべき問題点を共有し、従来のモデル生物や産業動物自体をその候補として、適切な生物をモデルとした基礎研究、そしてその成果の実装に向けた実証研究を長期的な展望に基づき推進する。そのために産業動物の飼育養殖設備を中核とした、基礎、橋渡し研究に必要な機材を集約した橋渡し研究拠点の整備を行う（図1-1）。またこの拠点を長期的に持続可能なものとするために、その成果を積極的に商業生産へと導出、その利益の一部を研究開発に還元することで将来的に自立可能な研究エコシステムの構築を目指す。

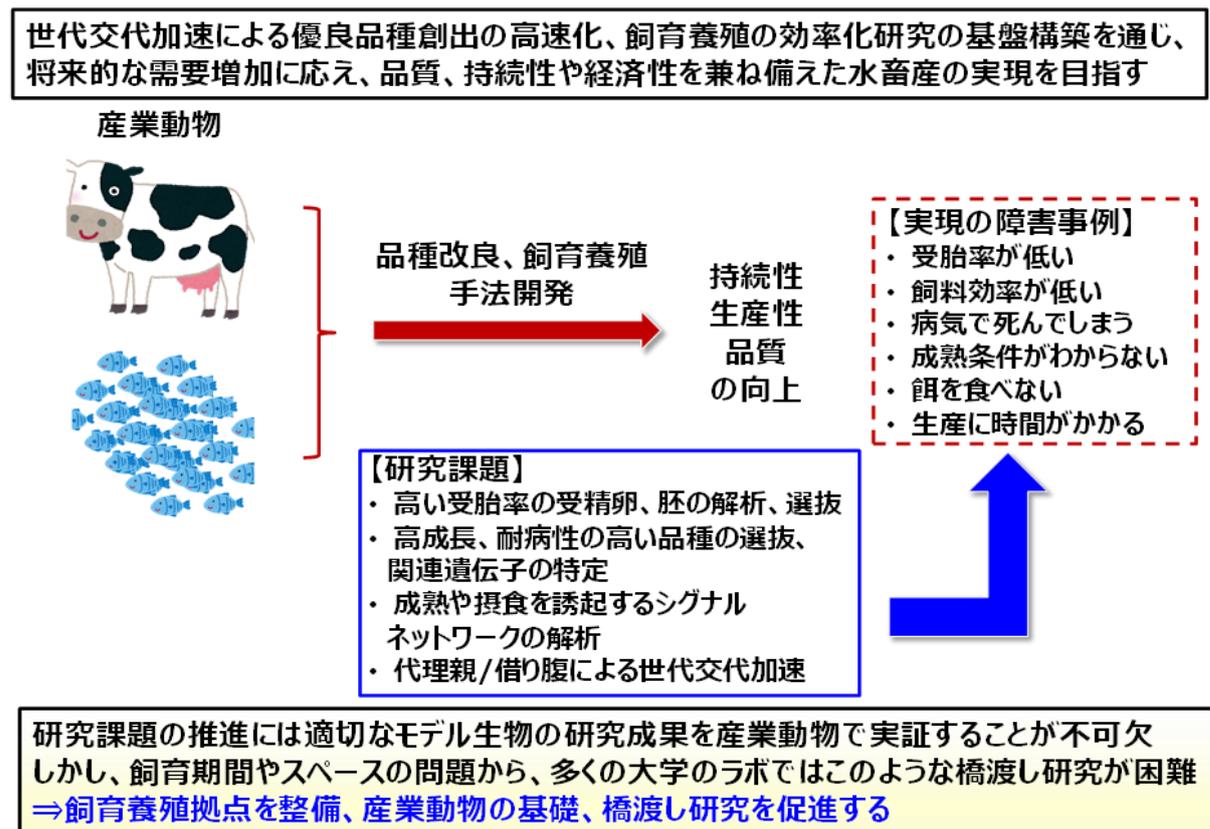


図1-1 橋渡し拠点整備による品種改良、飼育養殖手法開発の加速

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

世界人口は当面増加し続けると予想されており、2050年には90億人を突破するとされる¹⁾。また、人口増大、経済成長に伴う食生活の変化により水畜産物に代表される動物性タンパク質の需要はさらに増加することが予想されている。水畜産はこのような食料としての観点のみならず、各国の食、伝統行事といった文化、地方における産業基盤としても重要であり、今後も維持、拡大が望まれる。

水産分野に関して現状を述べると、近年では世界的に養殖生産量が漁業による漁獲量を上回るようになり（図2-1）、比較的価格帯の高い魚種を中心に養殖種数は増加している。近年では孵化から採卵までの全ライフサイクルを人工飼育下で行う完全養殖もサケ、マダイ、トラフグ、クロマグロ、ウナギ、ブリなどの魚種で達成されている。完全養殖の達成は水産資源管理、持続可能性への貢献という観点の他に、育種・品種改良の基盤となる集団の維持、陸上養殖の実現、トレーサビリティシステムの確立など様々な点で基盤的かつ重要な要素である。しかし、対象種の生態を詳細に研究する必要があることから完全養殖可能な魚種の割合は小さく、そのうち商業的に成立するものはさらに限られる。このような背景から、海産魚では産業種が非常に多様であるにもかかわらず、商業実績のある育種事例はノルウェーにおけるアトランティックサーモンやわが国におけるマダイ（近畿大学）²⁾などごくわずかである。これらはおよそ30年の歳月をかけて、主に成長速度の観点から選抜育種、固定されたものであり、アトランティックサーモンやマダイの場合では成長速度がほぼ2倍にまで上昇、飼料効率も向上した系統が創出されている。

次に、畜産の中でも市場規模が大きく、産業・環境面で関心、影響が特に大きいと考えられるウシに関して述べる。ウシでは現在人工授精法が広く普及しており、わが国においては乳牛や肉牛の98%以上は人工授精、あるいは胚移植により生産されている³⁾。人工授精のメリットとしては、一度に多数の雌に受精可能であり、品種改良を大きく加速させることができること、関連技術である精子凍結により安価・簡便に輸送可能であることが挙げられる。また、ウシは取引価格が高く、個体、系統管理も比較的容易であったことから早期から育種・品種改良が行われてきており、水産分野に先駆けて選抜育種などの取り組みが行われてきた。また、ウシ同様に重要な家畜であるブタに関しては食料としての用途のみならず、生理学的、解剖学的にマウスやラットと比較してヒトにより近いといったこともあり、ゲノム編集技術などを活用した疾患モデル、ヒト化臓器の生産検討といった先端研究が行われている。一方、ブタはウシと比較して人工授精効率が低いことからウシほど人工授精が普及していないといった問題もある。水畜産分野全体に共通することであるが、この例のようにある種の動物や家畜で既に確立している技術であっても、他の種で万能に利用できるわけではなく、必要に応じて動物種個々の生殖技術を確立することには大きな意義がある。

また、水畜産分野では共通して、生産プロセスへの積極的なIoT活用、ドローンなどの導入によるスマート化が世界的に行われている。わが国においても既に多数のプロジェクトが進行、民間資本の参入も進んでいることから詳細は割愛するが、他の分野と比較して労働人口の減少、高齢化が進行傾向にある⁴⁾水畜産分野では労働人口やノウハウの維持という観点で特に重要である。またスマート化は、単に作業を省力化するだけでなく、高品質の生産データを自動で取得し、データ駆動型の研究開発を行うための基盤となるといった面での意義も大きい。

水産産分野が抱える問題点を挙げると、水産分野では現在の漁獲強度を維持すると多くの水産資源が崩壊することが懸念されている（図2-2）。そのため天然水産資源の維持に向けた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が、わが国の状況を振り返ると、水産分野の2017年度養殖生産量は約100万トンと世界の養殖生産量の1%程度に過ぎない⁵⁾。加えて、国内の沿岸における養殖適地はすでに飽和しており、大きな技術革新がない限り今後大幅に養殖面積が拡大することは期待できないとされる。このような現状下で、わが国が養殖生産量、生産額を増加させていくためには、従来の経験ベースの養殖業のノウハウに加え、サイエンスベースの新たな技術開発が不可欠である。また、既存の養殖業では、排泄物に由来するN（窒素）、P（リン）の放出量が多いことから水質汚染が課題となっている他、養殖魚の逃亡による天然魚の遺伝的攪乱といった問題も危惧されており、持続的養殖を展開していくうえでも育種や生産プロセスに関する新たな技術開発が求められている。育種・品種改良においては遺伝的背景を把握、管理できる生物集団の確保が大前提となるため、特に完全養殖の手法が確立している種数が少ない水産分野においては完全養殖手法開発による育種対象魚種の拡大は重要である。

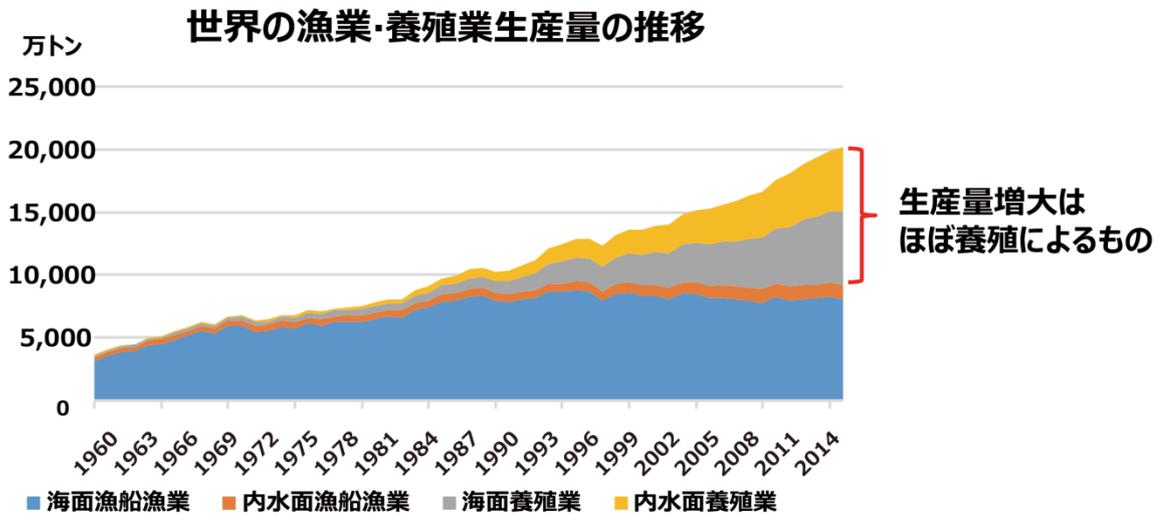


図2-1 世界の水産資源の推移
（水産庁公表データ⁶⁾を基にCRDS作成）

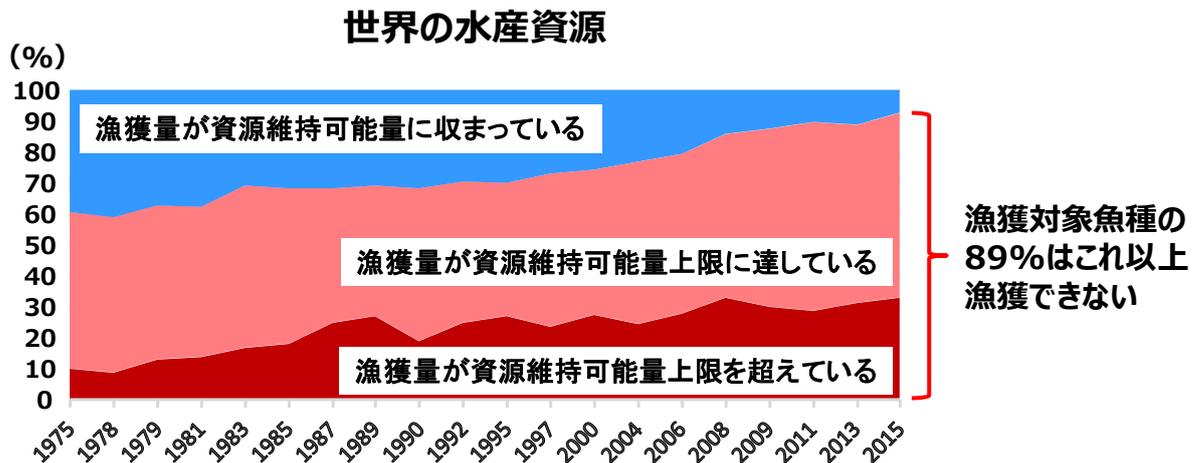


図2-2 世界の主要水産資源量評価

（FAO「THE STATE OF THE WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE」⁷⁾データを基にCRDS作成）

また、畜産分野においてはわが国では輸入穀物飼料に過度に依存しており、飼料価格高騰や後述の受胎率の低下に伴い仔牛価格は近年高騰傾向にある⁸⁾。これは研究、産業の両面へ大きな負担となっている。さらに現在わが国では大量に脂肪を廃棄するような肥育が肉牛で行われている他、牧場の開発や温室効果ガス排出による環境への影響懸念も世界的に強まっており、このような畜産の現状はSDGsに合致しているとは言い難い。この他に、畜産分野で近年顕在化している問題として、特に乳用牛を母牛とした場合の人工授精受胎率が大きく低下していることが挙げられる（図2-3）。畜産動物の出産頭数（ウシ:通常一頭）は最大数千万から数億に達する魚類の産卵数と比較して圧倒的に少ない。さらにウシの場合は人工授精実施後、着床しなかった場合は次の人工授精実施まで一か月ほど空ける必要があり、その期間の餌代などがかさんでしまうため、受胎率の低下は生産現場の経済を大きく圧迫する。この要因として、これまで乳量生産性を重視した飼育法、品種改良が進められ、乳量生産性が飛躍的に向上したことのトレードオフとして繁殖力が低下したこと、温暖化による暑熱ストレスの増大などが推測されている。これはわが国限定ではなく、米国などにおいても同様の問題が生じており⁹⁾、世界的な懸念となっている。畜産分野においても、持続的な畜産を展開していくためにはこのような課題に対応する最先端の生殖工学、育種や生産プロセスに関する研究開発を進めることが不可欠である。

わが国におけるウシ人工授精受胎率推移

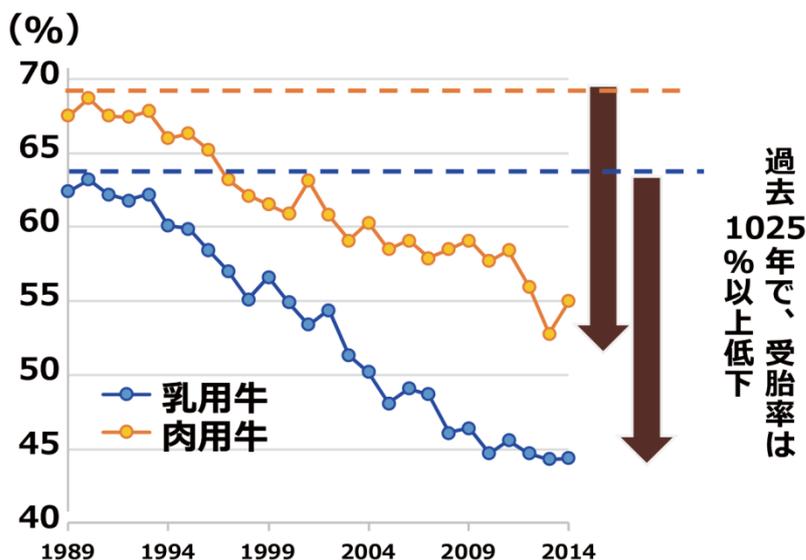


図2-3 わが国におけるウシ人工授精受胎率の推移
 (一般社団法人 家畜改良事業団による統計データ¹⁰⁾を基にCRDS作成)

このように、水畜産分野にはSDGsの観点にも沿った大きな変革が求められている。わが国においてもこれは例外ではなく、品質や生産性を向上させつつ、この変革に対応できる研究開発を行うことが必要である。

このような背景を受け、水産分野における育種関連研究では、成長速度、飼料効率、耐病性の向上に向けた育種基盤整備（水槽設備や、育種に必要な集団、ゲノム情報などの確保）、育種の加速、低コスト化がトレンドとなっている。近年では次世代シーケンサーの普及によりゲノム解

読コストが低下したことから、ゲノム情報に基づく成長速度、耐病性などの観点で優良形質系統の予測・選抜育種(ゲノム育種)、また実装には倫理、規制整備などの課題はあるものの、CRISPR/Cas9に代表されるゲノム編集を用いた育種も行われるようになってきている¹¹⁾。天然水産資源が崩壊しつつあり、養殖の重要性が国際的に高まっているにも関わらず新たな養殖適地開発の余地が少ないわが国においては、単位面積当たりの生産量向上に関わるこれらの技術開発は必須であり、飼料効率の向上は排泄物による富栄養化・水質汚染を減らすためにも重要である。生産プロセスに関しては、育種の基盤となる完全養殖の効率化、対象魚種の拡大などに向けた研究開発がトレンドである。わが国においては2018年に漁業権規制緩和が行われたことにより養殖産業への参入障壁が低下したことも追い風になると考えられる。

畜産分野においてもおおよそ同様で、育種関連研究では成長速度、飼料効率、耐病性の向上に向けた育種基盤整備、育種の加速、低コスト化がトレンドである。この他、繁殖力に関する基盤的研究、授精効率の高い受精卵の生産、選抜方法の開発が行われている。生産プロセスに関しては、育種や前述のニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング研究を通じた、飼料効率向上などの有用形質の発現研究が行われている。牛肉は食用肉の中でも特に生産の環境負荷が高いことに対する懸念が世界的に高まっており、わが国は必要な飼料の大部分を輸入に依存しているため、フードマイレージの観点からもこの点を改善し、国産の草資源などで生産可能になることへの期待は大きい。

水畜産分野に関連するわが国の技術的優位性としては、近年輸出額が連続して増加傾向である和牛に代表される、高い商業価値を有する品種を創出する品種改良技術や、近畿大学が世界で初めて成功したクロマグロ養殖技術など、水畜産現場における高い技術やノウハウの蓄積が挙げられる。また、これらを支える基盤的な技術、知見となる生殖工学、生殖細胞研究なども世界的にも高い水準にある。

一方、わが国における問題点としては、基礎研究分野では産業動物を対象とした研究が敬遠され、モデル生物を対象とした研究に移行する傾向が見られる。この要因としては、水畜産分野研究は、モデル生物と比較して研究に必要な集団を維持するためのコスト負担が大きく、研究にも長い時間を要するものが多いという構造的問題を抱えていることが挙げられる。加えて、モデル生物で明らかとなった事象を産業動物で検証しても学術的な評価を受けにくい傾向にあり、成果指標として主に論文が用いられることが多いアカデミアで産業動物を対象とした基礎研究にはインセンティブが働きにくい。逆に現場に近い応用分野では短期間で生産者、消費者へ貢献することが主な成果指標となり、メカニズム研究がおろそかになっていることが問題視されている。その結果、わが国における基礎と現場の乖離はかつてないほどに大きくなり、優れた研究成果の現場での実証実装、生産現場における興味深い現象のメカニズム解明といった双方向の橋渡しは停滞傾向にある。さらに、近年の学際化や、次世代シーケンサー、質量分析装置など実験機材の高額化などの要因も相まり、ライフサイエンスは全体としてビッグサイエンス化の様相を呈している。水畜産領域もまた同様であるが、わが国は産官学のいずれにおいても、ビッグサイエンス化に対応できる規模の研究エコシステムが存在せず、また実装のための学術的基盤整備、現場ノウハウのメカニズム解明などの橋渡しを支援することを目的としたファンディングや評価体制もほとんどない。このような背景により、技術的優位性や優れた研究シーズを有しながらも体系的な研究推進が困難な状況となっている。

このような状況を打破し、基礎科学の進展と、現場への実装促進を両立するためには、国がイ

ニシアチブをとって水畜産などの実学における学術的基盤整備の重要性を積極的に発信、研究エコシステムの整備を行い、今後の研究の方向性を明確に示すことが必須である。

2-2. 社会・経済的効果

1) SDGs、バイオエコノミーへの貢献

これまでも述べてきたように、本領域が水畜産業を通じた食料生産に大きく関わっていることは議論を俟たない。一方、水産業においては、乱獲による水産資源の減少、養殖の推進に伴う水質汚染や、選抜育種された魚が生け簀から脱走し天然個体と交雑し遺伝子攪乱が起こるといった問題が生じている。また畜産業の場合でも、特に牛肉生産の場合には環境負荷が大きいこと、非可食部位の牛脂が産業廃棄物として処理されており、持続可能な生産という観点で問題を抱えていることもまた事実である。そのためより環境負荷の低い昆虫、藻類、微生物・細胞培養による代替タンパク質生産も提案されているが、これらも研究がスタートしたばかりのものが多く高コストである上、水畜産は各国の歴史・文化・産業に深く根付いたものであるため、水畜産によるタンパク質を完全に代替することは当面困難であると予想される。水畜産においても、研究開発により商品価値を損なわずにこれらの問題にアプローチする余地は大いに残されている。例えば、第3章で述べる増肉係数（1kg 成長するのに必要な餌の量:低い方が効率が良い）の低下を志向した育種、品種改良はわが国においてもマダイなどで既に実績があり、生産プロセス改良の点ではニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティングといった手法を用いることで飼料効率を向上させることも和牛や一部の魚類で可能となっている。他にも摂食行動のメカニズム解明は飼料開発に役立つだけでなく、食べ残しによる水質汚染を防ぐことに繋がる。

また 2009 年 OECD 発行の「The Bioeconomy to 2030」によると、バイオテクノロジーが貢献する市場、バイオエコノミーの規模は 2030 年には最大で OECD 加盟国の GVA（粗付加価値）の 2.7%、1 兆ドル強（健康・医療産業 2590 億ドル:25%、農林水産業 3810 億ドル:36%、製造業 4220 億ドル:39%）に達するとされる¹²⁾。一方、同レポートでは 2003 年におけるバイオテクノロジー関連民間企業の研究開発投資額の内訳は、健康・医療産業がその大半を占め 87%、農林水産業 4%、製造業 2%、その他 7%であるとされ、OECD が予測する産業構造と現況には大きな乖離が存在することが指摘されている。水畜産業におけるバイオテクノロジーの活用事例として動物の育種、品種改良や繁殖が筆頭に挙げられており、その他には診断や疾病の治療などのへの活用が期待されている。このような背景から本戦略プロポーザルの推進は SDGs、バイオエコノミーの観点からも重要である。

2) 新品種創出、生産プロセス改良による水畜産業の競争力向上

動物の育種、生産技術に関する研究開発成果は、関連産業における競争力に直結する。生物体自体の品質や生産量が大きく影響する水畜産業では特にその影響は顕著である。具体例としては、水産業界ではノルウェーにおける国を挙げてのアトランティックサーモンに関する育種、生産プロセス研究成果が成功例として世界的に認識されている。研究の結果、成長速度が高く、増肉係数が低い系統が創出され、生産プロセスも高度にシステム化、自動化が行われ大規模集約化にも成功している。ノルウェーにおける水産物輸出総額は 2012 年には 6900 億円、2017 年には 1 兆 2500 億円と 5 年でほぼ倍増しており¹³⁾、ノルウェーの主要輸出産業の一角を形成している（1

ノルウェークローネ=13.2円で計算)。その原動力は、メダカやゼブラフィッシュといったモデル魚種ではなく、アトランティックサーモン自体をターゲットとした基礎、橋渡し研究が行われてきたことが主要因であると目されている。

わが国の状況に目を向けてみると、水畜産物の輸出額は2012年が合計約2000億円(水産:1698億円、畜産:295億円)、2017年が合計約3400億円(水産:2750億円、畜産:626億円)と、5年でおおよそ1.7倍に増大している(図2-4)。一方、わが国においては従来産業動物を研究対象としていた研究室においても、その対象をモデル生物に移行する傾向がみられ、産業動物研究基盤の脆弱化が懸念されている(2-3で後述)。こういった背景もあり、わが国においては水産業におけるノルウェーのように産業動物の育種、生産プロセスに関する基礎、橋渡し研究が戦略的に行われているとは言い難い状況である。裏を返せば、産業動物の育種、生産プロセス研究を戦略的に進めることで、わが国の水畜産業の輸出には大きく伸びる余地がある。

また、水畜産物の生産に関連して、近年では単純な品質、生産性向上のみならず、Animal Welfare、天然資源に配慮した生産を目指す傾向が特に欧州を中心として見られる。さらに、これらのブランド化、認証制度化に向けた取り組みが行われている。本戦略プロポーザルの推進は、これらにマッチした生産という意味でも重要であり、今後も世界市場において付加価値の維持向上を目指すためには必須の研究開発となる。

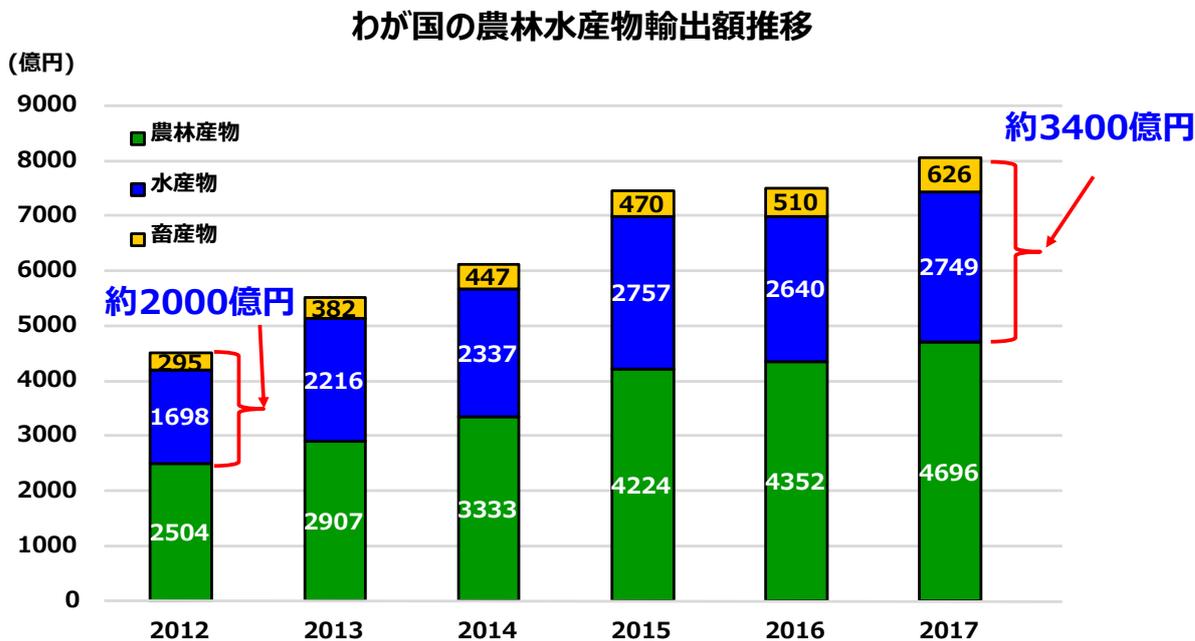


図2-4 わが国における農林水産物輸出額推移
(農林水産省公表データ¹⁴⁾を基にCRDS作成)

3) 地方創生に向けた産業振興、技術伝承

水畜産業はその産業の特性上、他の産業と比較して広大なスペース、豊富な水、森林資源を要する。そのため、それらの資源が豊富である地方部において、その気候、土壌、水質などの各地方の特色を生かした基盤産業となりえる。また、現在わが国においては農林水産業全般において労働人口の減少、高齢化といった問題が生じており、生産現場でこれまで培ってきたノウハウが途絶えてしまうことが懸念される。本戦略プロポーザルの推進により、水畜産物の育種、品種改

良による優良品種創出や、基礎研究成果の実証と現場ノウハウ解明の両方向からの橋渡し促進による生産プロセス改良を通じ、関連産業の競争力を維持向上させ地方創生に貢献することが期待される。

2-3. 科学技術上の効果

1) 産業動物、非モデル生物研究の加速、橋渡し研究促進

分子生物学、生化学などの比較的ミクロなスケールでの生物学はこれまでモデル生物を主に用いて行われてきた。動物領域においてはマウスやラット、メダカやゼブラフィッシュなどが中心であり、これらの動物は飼育が容易で入手しやすく、ライフサイクルも早いことからゲノム配列や遺伝子情報などの研究基盤が高度に整備されている。その一方で、ウシ、ブタ、マグロなどの大型産業動物の多くは、近年研究が敬遠され、関連学部学科においても研究対象をモデル生物へ移行する傾向にある。その要因として、一般に産業動物研究はモデル生物研究と比較して、

- ①飼育方法、繁殖効率の点から、研究に十分な生物集団を調達、維持すること自体が難しいケースがある
- ②研究に要する期間が長く、飼育スペースや飼料コストなど、飼育のコストが研究費用を圧迫する
- ③研究プロジェクトの期間内（多くは5年以内）では大きな目標にチャレンジできない
- ④モデル生物で確認された事象を産業動物で実証しても学術的評価を受けにくい
- ⑤モデル生物ほどゲノムデータなどの基盤情報が蓄積しておらず、研究効率が悪い

といった問題を構造的に抱えていることが挙げられる。

具体例を述べると、マグロは産卵まで3~5年ほどを要し、成魚の飼育には直径40m×深さ20mほどのサイズの生簀が用いられる。さらに、現状マグロを含め多くの魚類では配偶子（特に卵子）の保存方法が確立していないため、システムを維持するためには個体として飼育する必要があり、その維持コストが高く労力を要するものとなっている。畜産も同様であり、ウシも妊娠まで14か月、出産まで24か月を要し、さらに魚類と大きく異なり基本的に一回の出産における出産頭数は1頭である。さらに近年では受胎率が低下傾向にあるため、実験に必要な頭数を揃えること、そのための親世代を維持するためのコストは研究現場の大きな負担となっている。これらの問題を解決するための研究開発が産業動物の研究推進には必須であると考えられる。

医療、創薬の分野においては近年、マウスなどのモデル生物と、ヒトとの乖離が広く認識されるようになり、特に米国を中心としてヒト細胞を対象にした研究や橋渡し研究に注力する潮流が出てきている。しかしゲノム編集技術、次世代シーケンサーが登場した今現在においても、産業動物の基礎研究や、現場ノウハウ、暗黙知のメカニズム解明といった橋渡し研究は他の分野と比較し大きく遅れているのが現状である。本戦略プロポーザルの推進により、第3章で述べる世代交代加速、代理親/借り腹技術などの技術が進めば、飼育に要する期間、スペース、コストの大幅な圧縮が見込める。これにより、非モデル生物である産業動物研究や、モデル生物の知見の橋渡しが進み、育種、生産基盤整備が進むものと考えられる。また得られた成果を積極的に産業へ繋ぐことで、このような研究を推進する機運がさらに高まることが期待される。

2) モデル生物の改良、新たなモデル系の創出

前述のように、哺乳動物領域におけるモデル生物としては、現在マウスやラットが広く用いられているが、これらのモデル生物と、ヒトの場合における結果の乖離が大きな問題として広く認識されている。その乖離を埋めるため、近年ではヒト由来サンプルを用いた研究や、ブタやサルなど、生理学的、解剖学的にヒトにより近い動物が用いられる傾向にある。その反面、これらの動物はマウスやラットと比較し飼育に要するスペースが大きく、飼育期間も長いため、扱いやすい動物とは言い難い。昨今では *Animal Welfare* へ配慮した飼育環境整備も大きな負担となっている。関連して科学知見の蓄積、データ基盤も整備が遅れている。そのため、近年では特にブタを中心として小型の系統を育種しモデルとして活用する動きが見られる。これらは必要な飼育スペースが小さく、成長が早い、餌代が少なく済むといったメリットがあり、今後このような動きはさらに加速するものと推測される。

また、水畜産分野に共通の研究の障害として、研究に適した生物集団の確保が困難であるといったことが挙げられる。例えば、多くの魚類において精子は保存可能であるものの、卵子の保存は困難なことが多い。そのため遺伝的背景が明確な生物集団を維持するためには、それらを個体として飼育し続ける必要があり、多大な費用、労力を要する。また、畜産分野においても同様に、モデル系統は基本的に存在せず、多くの研究は肉牛、乳牛などの生産システムを利用した研究を行っている。そのため、遺伝的背景がまちまちであったり、生産者により飼育環境が大きく異なり品質のぶれが大きいことが研究の障害となっている。第3章で述べる生殖工学研究が発展することで、生殖細胞系列の保存、配偶子の *in vitro* 生産、その後の生育などが汎用的なものとなれば、遺伝的背景の明確な生物集団の維持、調達が容易となり、新たな実験モデル構築に貢献する。

3) 生物資源保全、絶滅防止への貢献

本戦略プロポーザルが推進する研究アプローチは、絶滅が懸念される動物種の保護にも有効である。第3章で研究課題として述べる生殖工学がより汎用的なものとなれば、個体数が減少した動物に関して、生殖細胞系列を保存したり、これを利用した配偶子生産や近縁種を代理親とした繁殖が可能になる可能性がある。また、繁殖、摂食、忌避などの行動メカニズムの解明、制御が進めば、効率的な繁殖条件の把握、自発的な摂食を誘起する飼料開発、飼育養殖時におけるパニックによる怪我・死亡の減少などにより、飼育効率を向上させることにも繋がるのが期待される。また水産分野では現状完全養殖が可能な魚種も限られているため、生産プロセス研究の推進は対応魚種の拡大による養殖推進、天然水産資源の維持への貢献という意味でも重要である。

参考文献

- 1) World Population Prospects 2017 (2019年2月25日アクセス)
<https://population.un.org/wpp/>
- 2) 村田修 「海水養殖魚の品種改良に関する研究」『近畿大学水産研究所報告』1998年6, 1-101, (2019年2月26日アクセス)
<https://ci.nii.ac.jp/els/contents110000224176.pdf?id=ART0000608806>
- 3) 戸田昌平 「牛の雌雄生み分け技術」『独立行政法人農畜産業振興機構月報「畜産の情報」』2017年6月号 (2019年2月25日アクセス)
<https://lin.alic.go.jp/alic/month/domefore/2017/jun/wadai.htm>
- 4) 独立行政法人労働政策研究・研究機構 産業別就業者数の推移(第一次～第三次産業)1951年～2017年年平均 (2019年2月26日アクセス)
<https://www.jil.go.jp/kokunai/statistics/timeseries/html/g0204.html>
- 5) 農林水産省 海面漁業生産統計調査 (2019年2月25日アクセス)
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031791472&fileKind=0>
- 6) 水産庁 世界の漁業・養殖業生産量の推移 (2019年2月25日アクセス)
http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h29_h/trend/1/other/2-3-01.xlsx
- 7) FAO 「THE STATE OF THE WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE」 (2019年2月25日アクセス) <http://www.fao.org/state-of-fisheries-aquaculture>
- 8) 農林水産省 肉用子牛取引価格の推移 (2019年2月25日アクセス)
http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h27/h27_h/trend/part1/other/P146_d2_3_21_01.xls
- 9) H.D.Norman, J.R.Wright, S.M.Hubbard, et al.” Reproductive status of Holstein and Jersey cows in the United States” *Journal of Dairy Science* 92, 7,(2009): 3517-3528
- 10) 一般社団法人家畜改良事業団 受胎調査成績 (2019年2月25日アクセス)
<http://liaj.or.jp/giken/hanshoku/jyutai.html>
- 11) Kenta Kishimotoa, Youhei Washiob, Yasutoshi Yoshiura, et al.” Production of a breed of red sea bream *Pagrus major* with an increase of skeletal muscle mass and reduced body length by genome editing with CRISPR/Cas9.” *Aquaculture* 495 (2018) DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.05.055
- 12) 「The Bioeconomy to 2030」 (2019年2月25日アクセス)
<https://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf>
- 13) ノルウェーにおける水産物輸出 (2019年2月25日アクセス)
<https://nokkeltall.seafood.no/>
- 14) 農林水産省平成29年農林水産物・食品の輸出実績(確定値) (2019年2月25日アクセス)
http://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/e_info/attach/pdf/zisseki-104.pdf

3. 具体的な研究開発課題

マグロやウシなどの産業動物を品質、持続性や経済性の向上を達成して生産可能な水畜産の実現のためには、育種による優良品種創出、飼育養殖などの生産プロセス開発改良を高速化するための基礎、橋渡し研究の基盤整備が重要である。取り組むべき研究開発課題として、以下の2つを提案する。

課題1：育種、品種改良支援基盤技術開発

- (1) 産業動物を対象とした生殖工学の推進によるコスト低減、研究加速
- (2) ゲノム情報を利用した育種手法開発、有用形質のメカニズム解明

課題2：生産プロセス（飼育、養殖）開発改良基盤研究

- (1) 飼料開発
- (2) 行動メカニズム解明推進、制御技術の開発
- (3) ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング

課題1：育種、品種改良支援基盤技術開発

- (1) 産業動物を対象とした生殖工学の促進によるコスト低減、研究加速

モデル生物における生殖工学成果の橋渡しを通じ、産業動物研究推進の実務上で大きな障害となる、広い飼育スペースや長い飼育期間、飼料コストに起因するハンドリングの悪さ、高コスト問題を解消する。

関連した研究シーズを述べると、代理親/借り腹技術、早期成熟技術、*in vitro*(体外)における配偶子生産、保存、選抜技術、などがある。

代理親/借り腹はすでに水畜産においていくつかの実績がある技術である。現在は乳牛を母牛として人工授精により受精卵移植を行い、付加価値の高い和牛を生産するといった手法が一般的に行われている。この概念を応用、拡張し、発生初期に始原生殖細胞、生殖幹細胞を移植し、産業価値が高いが成熟に時間がかかり飼育しにくい大型種の配偶子を、近縁の飼育しやすい小型種を代理親として生産させる試みが水産分野を中心に行われている。具体事例として、成長は早い産業価値が低いクサフグを代理親として産業価値の高いトラフグの配偶子を生産する試みなどがある¹⁾。この場合、トラフグは成熟に雄は2年、雌は3年を要するが、クサフグは適切な条件下で雄は9か月、雌は1年で成熟可能であり、トラフグで配偶子を生産する場合と比較して1年以上短縮することが可能である。この他にもニジマスを使ってキングサーモンを生産するといった試みもある。この拡張を行うことで、成熟までの期間が長く、広大な飼育スペースを要するマグロなども、短期間、省スペースで生産可能となり、特にアカデミアにおける研究開発を加速するものとして期待される。また、早期成熟に関しては、メダカにおいて生殖幹細胞の性別決定に関わる *foxl3* という遺伝子をノックアウトすることで、雌個体の卵巣において通常の成熟時期よりも早い発育段階で機能的な精子が作られることが明らかにされており²⁾、この現象のマダイやトラフグでの応用に向けた研究も行われている。

in vitro(体外)における配偶子生産としては、ドナーとなる個体から始原生殖細胞 (Primordial Germ Cell; PGC) や生殖幹細胞 (精原細胞、卵原細胞) を採取、培養することで精子や卵子の生産を行う研究が行われている。モデル動物であるマウスでは、PGC から成熟卵子を産生するのみならず³⁾、ES細胞や人工多能性幹 (Induced Pluripotent Stem; iPS) 細胞から PGC 様の細胞を

分化させ、体外培養により卵子を生産することに成功している⁴⁾。このような生産、培養技術はわが国の研究者が世界に先駆けて確立しており、他国の追随を許さぬ状況にある。この技術が他の産業動物へと拡張できれば、これまで数年単位の時間を要する成熟を待つて研究を行っていたところ、大幅に時間を短縮しつつ大量の研究材料取得に繋げることが可能になり、研究が飛躍的に進むことが期待される。また、卵子は細胞サイズが大きく、細胞サイズの小さな精子と比較して一般的に凍結などによる保存が困難である。一方、PGC や生殖幹細胞は細胞サイズが小さく、凍結保存などが可能であると考えられており、PGC や生殖幹細胞からの配偶子生産は品種の保存という観点からも確立が望まれる技術である。

現状はまだマウスにおける成果に留まっており、多能性幹細胞系の樹立も含めて、他の動物への応用を進めていくことが重要である。また、上述の培養によって得られた卵子や精子は受精、発生、成長し、妊孕性までは確認されているものの、行動や代謝、寿命など、その他の観点からも健全であるかを評価、解明すること、また健全なものを如何に選抜するか、という技術も必須であると考えられる。関連してウシの場合では近年の受胎率低下を受け、移植する受精卵が発生、発育する過程を非侵襲で画像解析し、結果を AI で学習することで移植に適した受胎率の高い高品質の胚を選抜する試みも行われている。

また、これらの技術は次に述べる、ゲノム情報に基づく育種速度を劇的に加速するといった意味でも重要である。特に、*in vitro*(体外)における配偶子生産手法が確立すれば、これまで年単位の期間を要した個体生産のプロセスを介さずに育種・選抜を行うことが可能になり、品種改良の速度は大きく向上することが期待される。

(2) ゲノム情報を利用した育種手法開発、有用形質のメカニズム解明

産業動物のゲノム情報を収集し、ゲノム情報に基づき体長、耐病性、肉質などの形質の高精度予測手法開発により、成熟、その後の評価を待たず、短期間での高精度選抜を可能にする。また、有用形質を支配する遺伝子の特定も並行して行い、予測精度向上に繋げる。

育種・品種改良の目的となる有用形質は様々であるが、水畜産分野の多くの種で共通とされるのは、大型化、高成長速度、高飼料効率、耐病性、耐寄生虫といったものがある。特に、生物体の大型化、高成長といった形質は育種の効果が高く、古典的な選抜育種を含め広く行われてきた。また個体の形質を予測するための手法も個体、系統管理が容易な畜産分野中心に行われており、BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) と呼ばれる家系・血統情報などを元に産出した遺伝的な能力度合い(育種価)に基づく手法がこれまでに開発されてきている。ノルウェーのアトランティックサーモン育種時で用いられたのも BLUP 法であり、その成果として、出荷サイズまでの成長にかかる期間が半減、増肉係数も大幅に低下した系統創出に成功している。

近年では次世代シーケンサーの開発によるシーケンスのコスト低下を受けて、ゲノム配列情報に基づく手法も活用されるようになってきている。マーカーアシスト選抜の成果として、ウイルス感染症であるリンホシスチス病に高い耐性を有するヒラメが創出されている⁵⁾。また BLUP 法にゲノム情報を組み込み発展させた GBLUP (Genomic Best Linear Unbiased Prediction) 法は体長予測などに高い予測精度を発揮する手法として今後の活用が期待されている。一方、現在わが国においては、GBLUP 法の実践に必要な生物集団を維持する研究体制が存在せず、その基盤整備が求められる(4-1も参照)。

ゲノム解読コスト低下により、従来は淘汰、廃棄されていた病気の個体・系統のゲノムデータなども育種を進める上で貴重なデータとして利用されるようになり、水産産分野におけるデータ収集、活用の在り方が大きく変わりつつある。加えてこれらのゲノム上に基づく育種、データ蓄積の推進は、ゲノム配列から形質を予測するのみならず、形質を支配する遺伝子を特定するポジショナルクローニングにも繋がりとあるという点でも重要である。

課題2：生産プロセス（飼育、養殖）改良関連研究開発

（1）飼料開発

飼料開発においては、単に栄養要求を充たす、飼料効率の向上といったことだけではなく、持続可能な資源の利用、積極的な摂食行動を誘起することで給餌労力や食べ残しによる汚染の低減なども含めた達成を目指す。

飼料開発は水産分野において特に大きな課題である。わが国では肉食性の強い養殖魚種が多く、配合飼料には魚粉が広く使われている。魚粉はイワシなどの小型魚類を乾燥、粉状にしたものであり、タンパク質含量が高く、必要な栄養要求性を充たすといったメリットがある。一方、近年では世界的な魚粉需要拡大による天然水産資源の減少、価格の高騰といった問題が生じている⁶⁾。持続可能性の観点から、魚粉を代替した飼料開発は世界的な課題である。一部の魚種に関しては、植物性飼料である大豆粕などへの代替に成功しているが、その利用は限定的である。タンパク質供給源として昆虫を用いる研究も行われており、供給力、経済性などの観点も含めて魚粉の代替となりうるかを見据えて研究開発を行う必要がある。また、養殖対象魚種の多くが、必須脂肪酸として長鎖多価不飽和脂肪酸を要求する。これに関しても遺伝子組み換え植物や、微細藻類などを用いた生産が期待されるが、こちらも昆虫タンパクと同様の課題を乗り越えられるかが焦点である。

加えて、飼料が栄養条件を充たしていることと、その飼料を実際に魚が摂食するかは別の問題である。完全養殖が達成されたウナギの場合でも、仔魚の期間の餌の摂食効率が悪く、食べ残しによる水の汚れが病気の発生を引き起こすなど、生産の大きな負担となっている。次に述べる行動メカニズム解明などと併せた飼料開発が効率的な成長、水質汚染が少ない持続的な生産プロセス開発に重要である。

（2）行動メカニズム解明推進、制御技術の開発

行動メカニズムに関しては前述の摂食に加えて、繁殖、忌避などの行動、関連した現場ノウハウのメカニズム解明を行う。繁殖メカニズム理解の深化では産業動物の通年の生産手法開発を行う。忌避はストレスや怪我による死亡を防ぎ、近年意識が高まる **Animal Welfare** を実現する飼育養殖法を開発する。

特に、完全養殖手法が確立している魚種が少ない水産分野で重要である。例えば繁殖は、年間を通じて生産、調達可能であることに繋がるため産業、学術の両面で貢献度が高い。実際、ニワトリの家畜化に際して、季節繁殖に重要な鍵遺伝子への変異が貢献していることが明らかになっている⁷⁾。この他にもメダカにおいて季節変化に応じて色覚が変化しており、繁殖期には婚期色への嗜好性が上昇するといったことが解明されている⁸⁾。特に飼育養殖対象の種数が多い魚類に

においては成熟や繁殖のメカニズムが分かっていないものも多いため、このようなモデル生物で明らかとなっている知見を実証していくことで、繁殖手法の開発、通年生産へと応用が期待される。

摂食誘起のメカニズム解明は効率的な成長、飼料開発に重要である。前述のウナギの仔魚の例のように、摂食が進まなければ成長効率が悪いだけでなく、食べ残しによる水質汚染や病気の発生を引き起こすため、小まめな水の入れ替えが必要となり、その為にコストや死亡率が上昇する要因ともなる。また、飼料原料として魚粉などの天然源が用いられることも多いが、そのような天然源の供給に依存しない人工飼料開発という意味でも重要である。関連の研究シーズとしては、両生類、魚類に広く保存されるアデノシン嗅覚受容体の発見が挙げられる。魚類は生体内でエネルギー源、DNA や RNA の構成原料となる ATP を匂い物質とし誘引されることが知られていたが、そのメカニズムは長らく不明であった。近年、この ATP が鼻腔内でアデノシンに分解され、生じたアデノシンを嗅覚受容体が受容し摂食行動を誘起することが明らかとなった⁹⁾。魚類にはこのメカニズムが広く保存されて存在していることが明らかとなったため、これを利用した飼料開発などへの応用が期待される。

忌避の事例としては、マグロは養殖中にしばしばパニックを起こし、生簀などに衝突し死亡してしまうといったことが挙げられる。これらは連鎖的に被害を及ぼすことも多く生産上大きな課題である。この原因として、カーライトなどの強力な光を浴びることが明らかとなったため、その対策として不必要な光の遮断、そのような刺激に対して鈍感な系統を育種するといった検討が行われている。

このように、日照や温度などによる物理的シグナルや、匂い物質などの化学的シグナルとそれらが誘起する行動、形質のメカニズム解明、制御は生産プロセスの改良・開発に有効であると考えられる。繁殖率や成長率、生存率を上げるといった観点に加えて、Animal Welfare に配慮した、ストレスの少ない飼育養殖方法の開発という点でも重要である。

(3) ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング

親世代、あるいは胎児や新生児、稚魚の栄養環境が成長後の形質に及ぼす影響を明らかにし、持続的に調達可能な天然資源を飼料とした生産法の開発、より効率的な高品質産物の生産に貢献する。

近年、親世代、あるいは胎児や新生児、稚魚の飼育環境によってエピジェネティックな制御が生じ、成長後の形質にも大きな影響を及ぼすことが明らかになりつつある。水産分野では特に栄養環境の観点から研究が進められており、ニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティングなどと称される。水産の場合では稚魚期に不足していた特定の栄養素の合成系が活性化され続けるという現象が知られている。例えば長鎖多価不飽和脂肪酸の一種である DHA の欠乏飼料で飼育をしたサケでは、DHA 合成にかかわる各種遺伝子群の発現が成魚になった段階でも活性化されており、植物油のみを添加した状態であっても DHA 合成能が通常の個体より高まることが報告されている¹⁰⁾。また畜産の場合はやや異なり、生後初期のウシに高タンパク、高脂肪の代用乳、高栄養飼料を給餌すると、その後は牧草などの粗飼料で飼育しても体重や肉質が向上傾向にあることが報告されている¹¹⁾。このようなニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング研究を推進することで、安価な天然資源を飼料として、より効率的に高品質産物を生産することに貢献することが期待される。

参考文献

- 1) Masaomi Hamasaki, Yutaka Takeuchi, Ryosuke Yazawa, et al. "Production of Tiger Puffer Takifugu rubripes Offspring from Triploid Grass Puffer Takifugu niphobles Parents" *Marine Biotechnology* 19, 6,(2017): 579–591
doi.org/10.1007/s10126-017-9777-1
- 2) Nishimura T, Tetsuya Sato, Yasuhiro Yamamoto, et al., "foxl3 is a germ cell-intrinsic factor involved in sperm-egg fate decision in medaka." *Science*, 349, 6245, (2015):328-331 DOI: 10.1126/science.aaa2657
- 3) Kanako Morohaku, Ren Tanimoto, Keisuke Sasaki, et al. "Complete in vitro generation of fertile oocytes from mouse primordial germ cells." *PNAS* 2016 113 (32) 9021-9026
doi.org/10.1073/pnas.1603817113
- 4) Orié Hikabe, Nobuhiko Hamazaki, Go Nagamatsu, et al."Reconstitution in vitro of the entire cycle of the mouse female germ line." *Nature* 539,(2016):299–303
doi.org/10.1038/protex.2016.065.
- 5) Kanako Fuji, Osamu Hasegawa, Kazumitsu Honda, et al. "Marker-assisted breeding of a lymphocystis disease-resistant Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*)" *Aquaculture* 272, 1–4, (2007): 291-295 doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.07.210
- 6) 水産庁 魚粉価格の推移 (2019年2月25日アクセス)
http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h22_h/trend/1/t1_2_2_2_02.html
- 7) Carl-Johan Rubin, Michael C. Zody, Jonas Eriksson, et al. "Whole-genome resequencing reveals loci under selection during chicken domestication" *Nature* 464, (2010):587–591 doi.org/10.1038/nature08832
- 8) Tsuyoshi Shimmura, Tomoya Nakayama, Ai Shinomiya, et al. "Dynamic plasticity in phototransduction regulates seasonal changes in color perception" *Nature Communications* volume 8, (2017): 412 doi.org/10.1038/s41467-017-00432-8
- 9) Noriko Wakisaka, Nobuhiko Miyasaka, Tetsuya Koide, et al." An Adenosine Receptor for Olfaction in Fish" *Current Biology* 27, 10,(2017):1437-1447.e4
- 10) Clarkson M, Migaud H, Metochis C, et al." Early nutritional intervention can improve utilisation of vegetable-based diets in diploid and triploid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)" *Br J Nutr.* (2017);118(1):17-29. doi:10.1017/S0007114517001842.
- 11) Atsuko Matsubara, Hideyuki Takahashi, Akira Saito, et al." Effects of a high milk intake during the pre - weaning period on nutrient metabolism and growth rate in Japanese Black cattle" *Animal Science Journal* 87,9(2015) doi.org/10.1111/asj.12547

4. 研究開発の推進方法および時間軸

4-1. 推進方法

本戦略プロポーザルで提案する研究を行うにあたり、とるべき推進方法を以下の（1）～（3）の項目で述べる。

（1）水畜産分野における基礎、橋渡し研究推進を志向した研究開発プログラム設立

2-3で述べたように、水畜産分野で主な対象となる産業動物の研究はその飼育コストが大きく、要する期間も長いといった構造的な問題を抱えている。また加えて、現状医療分野を除きライフサイエンス分野のファンディングは全体として、基礎科学分野と実用間近の研究成果の実証に大きく二極化する傾向がみられる。そのため実学における学術的基盤整備の重要性が軽視され、成果が学術的な評価を受けにくく、産業動物の基礎研究のみならず、モデル生物の研究成果の産業動物における実証、現場ノウハウの解明といった双方向の橋渡し研究が敬遠され、停滞する傾向にある。このような背景が近年の水畜産物の好調な輸出にも関わらず、研究現場が疲弊する要因となっていると考えられる。

現状を打破し、効率的な基礎、橋渡し研究を推進するには、2-1で述べたように、まずは国がイニシアチブをとって、水畜産などの実学における学術的基盤整備の重要性を積極的に発信し、対応する研究開発プログラムを整備することが先決である。その際、産業動物のライフサイクルを考慮した長期的なファンディングを柔軟に行えることや、本領域における貢献度を適切に評価するための評価基準の刷新、評価体制づくりを進めることが重要である。

（2）研究エコシステム基盤整備（人材育成、産官学連携の促進、知財戦略含む）

水畜産分野での研究に必要な生物集団の維持、調達確保のための大型水槽や牧場の保有にはそれ相応の維持費が必要であり、研究のみを目的としてそれらを維持し続けるのは経済的負担が大きい。今後はモデル生物を用いた基礎研究と、橋渡し研究で研究機能を分担することが必須である。橋渡し拠点では実験用の生物集団維持と、産業的な活用（商業生産、コンサルティング、観光利用など）を両輪で行えることが持続的な研究開発基盤構築には重要である。加えてライフサイエンス分野全体の潮流である学際化、設備機材の高額化を考えると、その効率的な研究推進には飼育養殖施設を中核として設備機材を集約した研究拠点整備が求められる（図4-1）。その際重視することとして、個別の研究の寄せ集めとするのではなく、前項で述べた産業動物における基礎、橋渡し研究の体系的な推進、成果の積極的な産業化により将来的には自立可能な研究エコシステム構築を目指す必要がある。また水畜産の研究現場で先端科学と生産現場の乖離が懸念される中、分野全体の幅広い視野を有する人材の育成輩出や産官学連携という観点でも有効である。実際、水産分野で成功例とされ注目を集めるノルウェーでは、水産分野の中核的な研究機関 Nofima（ノルウェー食品・漁業・水産養殖研究所）において、育種、養殖生産のみに留まらず、マーケティング、加工流通などにおける研究開発や、民間企業を対象としたコンサルティングも行っており、ノルウェーにおける競争力の大きな原動力となっている。

また水畜産分野で共通して、その知財戦略は重要である。世界的に高い評価を受け、年々その輸出額が増大傾向である和牛も、その流出事例がしばしば発生しており、オーストラリアでは和牛との交配品種が「WAGYU」として商標登録され、その生産量はもはやわが国の和牛生産量を

大きく上回っている。今後水産でも育種、品種創出が進むと考えられるが、同様の問題が生じることは想像に難くない。研究成果を適切な経済に結び付けるためにも、早期から産業化や知財戦略を見据えこれを支援するための体制が望まれる。

このような研究エコシステム基盤整備により人材育成、産官学連携を促進、研究活動全体の推進、底上げを図ることが重要である。

(3) ELSI/RRI への取り組み

2-1で述べたように、水畜産は食料供給として大きな役割を果たす一方で、その天然資源減少や環境負荷などの観点から持続性への懸念は強く、大きな変革が求められている。このような背景から近年欧州を中心として、環境負荷、資源管理、Animal Welfareなどに配慮した形での生物生産管理に関心が高まっている。具体例としては持続可能な漁業で漁獲、加工、流通されていることを示すMSC (Marine Stewardship Council:海洋管理協議会) 認証、養殖業においても同様にASC (Aquaculture Stewardship Council:水産養殖管理協議会) 認証制度が設けられ普及しつつある。畜産分野でも2000年代前半におけるOIE (国際獣疫事務局) の主導的な活動によりAnimal Welfareの概念が大きく普及している。OIEにはわが国も加盟しており、農林水産省により畜種ごとに「アニマルウェルフェアの考え方に対応した飼養管理指針」が作成されている。一方、これらの活動はいずれも欧州を発端としたものであり、わが国においては生産性や品質向上ばかりに注力し、これらの観点からの取り組みが遅れがちであることが指摘されている。また、育種、品種改良を行った産業動物が飼育養殖環境から逸脱した場合、野生動物と交雑し遺伝的攪乱や生物多様性への影響が生じるうることも大きな懸念材料である。このような事態を未然に防ぐためには、陸上動物の場合はウシの飼育で見られるようなGPSによる個体管理や、一部の魚類で行われる遺伝的に不妊の系統の創出手法開発といったことが重要である。今後は水畜産業において将来あるべき姿を考え、その実践に何らかのインセンティブが生じる形で研究開発に取り組むことを促していく仕組みを整備することが必要である。

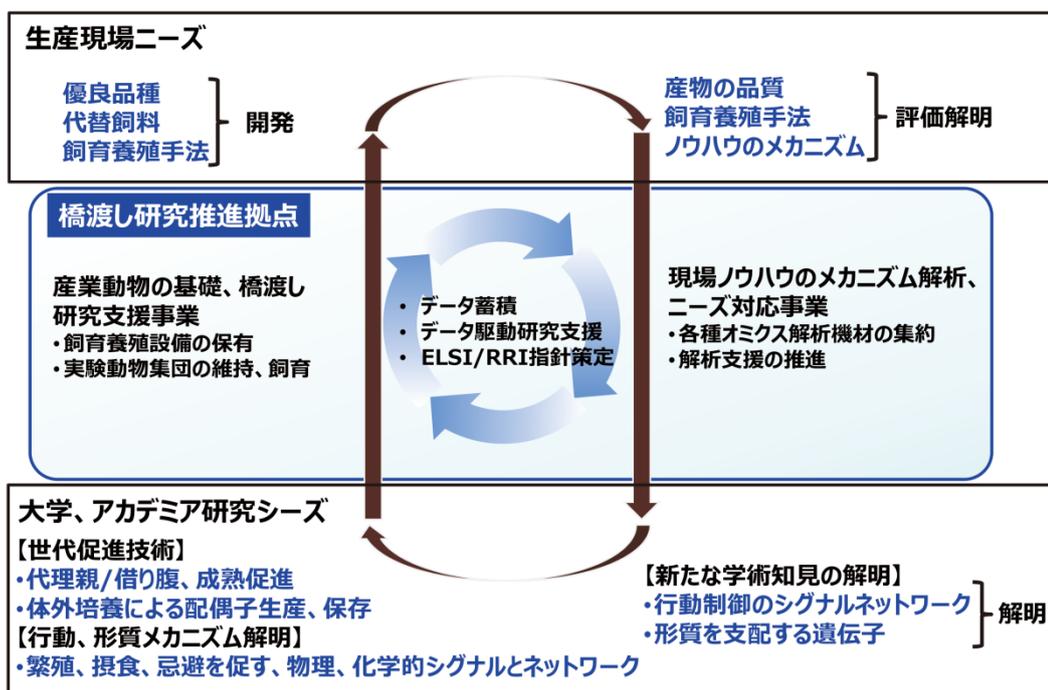


図4-1 拠点整備による基礎、社会実装双方向の橋渡し推進

4-2. 時間軸

まずは、4-1-(1)及び(2)で述べた、産業動物における学術基盤整備に向けたファンディング及び研究エコシステムの整備を早急に開始する。ただし、開始前にモデル生物研究における先行事例などの棚卸を行い、適切なモデル生物で推進すべき研究と、産業動物を対象に行うべき基礎、橋渡し研究を明確にし、共有する必要がある(図4-2)。研究エコシステムもそれらを反映しつつ、汎用性、拡張性が高いものが求められる。研究開始後は、研究加速、コスト削減効果など他の課題への波及効果が高く、知財戦略上も重要であると考えられる産業動物を対象とした生殖工学の推進を優先する。また並行して、手法として確立しつつあり高い効果が望めながらも、その実践に時間を要するゲノム情報を利用した選抜育種(ゲノム予測)も、商業生産実績創出に向けて早期に開始すべきである。そのマイルストーンは、生殖工学においては短期的にはウシ、マグロなどの大型で商業価値の高い動物種における代理親/借り腹による配偶子生産や、受精率の高い高品質な配偶子の選抜方法確立、さらに将来的には *in vitro* (体外) 培養による配偶子培養技術の確立である。また、ゲノム予測については、ノルウェーのアトランティックサーモンに相当するような、高い成長率、飼料効率、品質、耐病性を兼ね備えた優良品種を水畜産の分野で創出することである。

課題2の生産プロセス関連としては、完全養殖可能な魚種が少なく養殖時の死亡率も高い水産分野では、その基盤となる行動メカニズム解明推進、制御技術の開発が飼料開発などへの波及効果も大きく優先すべき研究開発であると考えられる。前述のATPによる魚類の摂食行動誘引などの事例から、嗅覚のメカニズムなどは多くの種で共通のところが多いと考えられるため、まずは問題の行動のメカニズム解明に適切なモデル生物で研究後、その成果を大型の産業種で検証すべきである。一方、飼育技術自体は確立した種が多く、死亡率も低い畜産分野においては、持続可能で製品価値も高い生産プロセスに繋がりうるニュートリショナルプログラミング/代謝インプリンティング研究を優先して進めるべきである。こちらは既存の研究成果から、生物種により得られる結果が異なってくることが予想されるため、ウシなど目的の産業動物を対象とした研究を積極的に推進することが求められる。課題2のマイルストーンとしては、水産分野では研究成果に基づき、完全養殖可能な種数が増えること、養殖時における死亡率が低下、成長効率が向上すること、従来飼料と同等以上の成長性を示す、魚粉使用量を削減あるいは完全に代替した飼料の開発などが挙げられる。畜産分野においては、輸入飼料を削減、フードマイレージを低下させつつも、持続性や生産性を向上、従来と同等以上の市場価値を有する産物を生産させる。

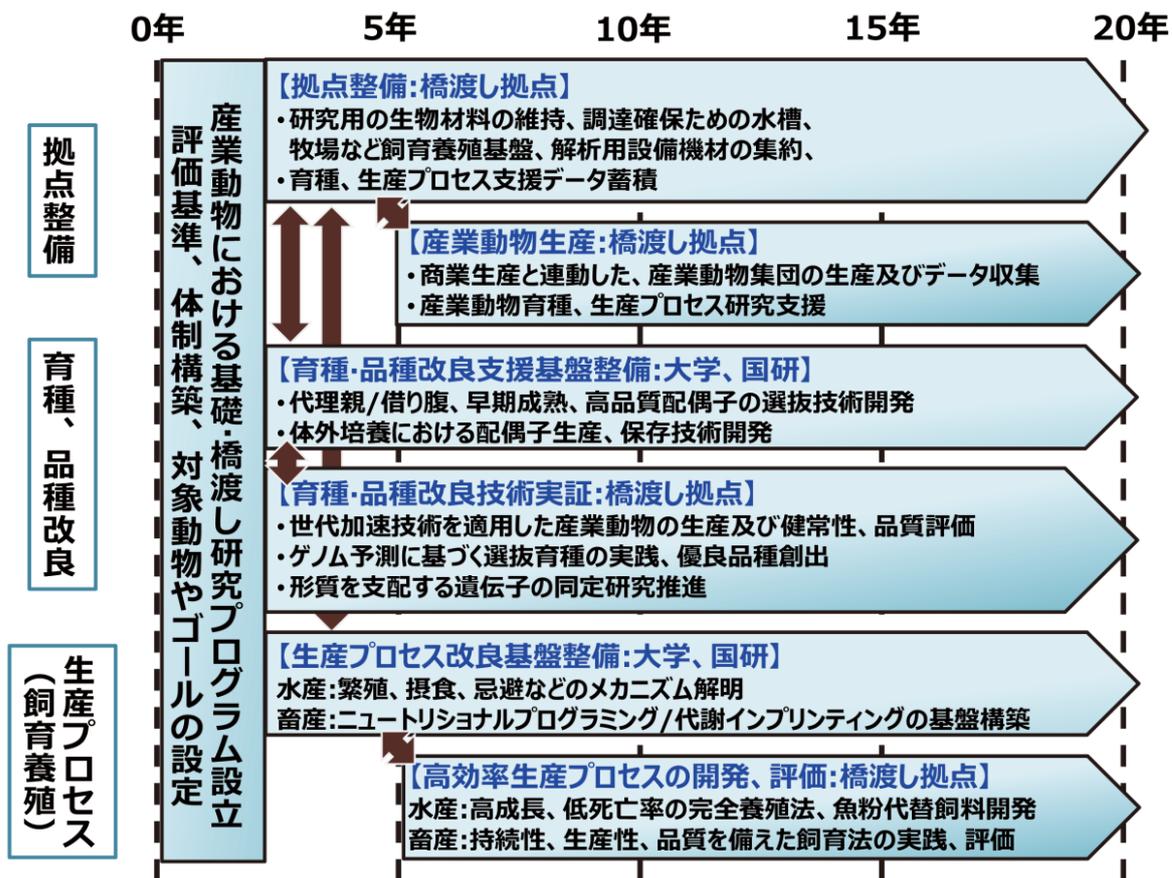


図4-2 研究開発の時間軸

付録1. 検討の経緯

JST 研究開発戦略センター（CRDS）ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは、グリーン・ホワイトバイオ分野の俯瞰調査をもとに研究開発の俯瞰図（図5-1）を作成した。これら一連の俯瞰調査活動を通じた検討の結果、平成30年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補として「次世代育種・生物生産基盤の創成」をCRDS戦略スコープ2018策定委員会において指定し、平成30年5月にCRDS内に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいてプロポーザル作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程においてプロポーザルの方向性を検討するため、以下の有識者へのインタビュー・意見交換を実施した。その上で、生体分子・生命システム設計研究開発に関してCRDSが構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（詳細後頁）。

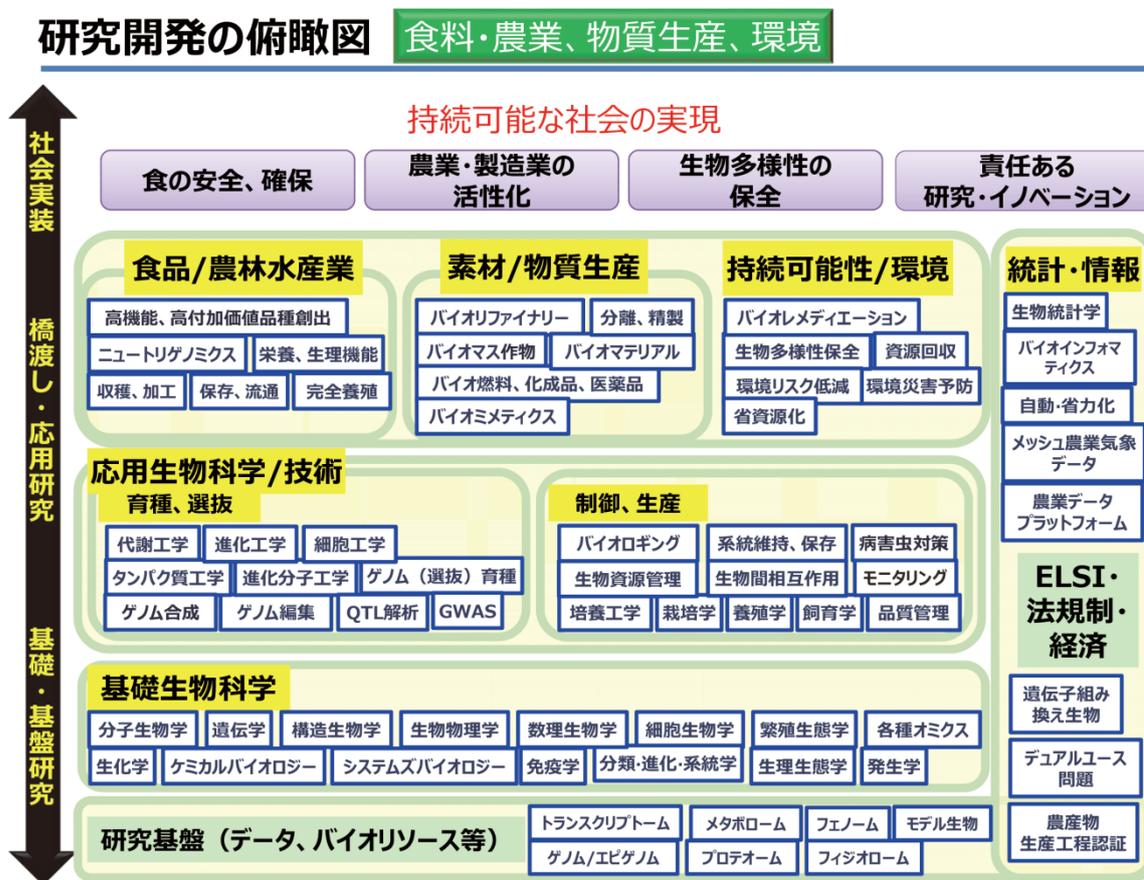


図5-1 グリーン・ホワイトバイオ分野俯瞰図

付録1. 検討の経緯

(1) 有識者インタビュー

本戦略プロポーザルの作成に当たり、関連する研究領域に高い専門性を有する有識者へ個別にインタビューを実施し、研究内容や推進体制、研究シーズなどについて意見を伺った(2018年6月～11月に実施)。

東原 和成(東京大学 大学院農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 教授)

家戸 敬太郎(近畿大学水産研究所 教授)

後藤 貴文(鹿児島大学学術研究院 農水産獣医学域 農学系 教授)

吉崎 悟朗(東京海洋大学 学術研究院 教授)

小林 悟(筑波大学 生命領域学際研究(TARA)センター 教授)

吉村 崇(名古屋大学 トランスフォーメティブ生命分子研究所
大学院生命農学研究科 教授)

林 克彦(九州大学 医学研究院 応用幹細胞医科学講座
ヒトゲノム幹細胞医学分野 教授)

小林 泰男(北海道大学 大学院農学研究科 教授)

山口 良文(北海道大学 低温科学研究所 生物環境部門 冬眠代謝生理発達分野 教授)

尾畑 やよい(東京農業大学 生命科学部 バイオサイエンス学科 教授)

菊池 潔(東京大学大学院 農学生命科学研究科 附属水産実験所 教授)

平尾 雄二(農研機構 畜産研究部門 家畜育種繁殖研究領域 家畜胚生産ユニット
ユニット長)

吉原 良浩(理化学研究所 脳神経科学研究センター
システム分子行動学研究チーム チームリーダー)

篠田 昌孝(ソニーネットワークコミュニケーションズ株式会社 IoT 事業部門
事業推進部 畜産 IoT 課 課長)

森島 輝(日本水産株式会社 中央研究所 大分海洋研究センター 主任研究員)

奥澤 公一(水産研究・教育機構 増養殖研究所 育種研究センター センター長)

山中 賢一(佐賀大学 農学部 動物資源開発学分野 准教授)

吉岡 耕治(農研機構 動物衛生研究部門 病態研究領域 繁殖障害ユニット ユニット長)

出田 篤司(JA 全農 ET 研究所 九州分場 場長)

濱野 晴三(家畜改良事業団 家畜改良技術研究所 副所長/技術・情報部 部長)

菊水 健史(麻布大学 獣医学部 教授)

下司 雅也(農研機構 生物機能利用研究部門 動物機能利用研究領域 領域長)

千本 正一郎(農研機構 生物機能利用研究部門 動物機能利用研究領域
動物機能改変ユニット 上級研究員)

淵本 大一郎(農研機構 生物機能利用研究部門 動物機能利用研究領域
動物機能改変ユニット 上級研究員)

(2) ワークショップ

科学技術未来戦略ワークショップ

「次世代育種・生物生産基盤の創成(動物分野)～データ駆動・ポストゲノム編集時代における課題解決に向けて～」

場所：JST 東京本部別館 2階 A1 会議室(東京都千代田区五番町 7K's 五番町)

日時：2018年11月23日(金) 13:30～18:00

プログラム:

13:30～13:35

開会挨拶：永井 良三 (JST-CRDS 上席フェロー)

13:35～13:45

趣旨説明：山本 秀明 (JST-CRDS フェロー)

13:45～14:45

セッション1 水産関連分野

「魚類養殖研究の現状と課題」

家戸 敬太郎 (近畿大学水産研究所 教授)

「ゲノム情報を利用した水産育種の世界的動向」

菊池 潔 (東京大学大学院 農学生命科学研究科 附属水産実験所 教授)

「魚類育種のための発生工学的支援技術」

吉崎 悟朗 (東京海洋大学 学術研究院 教授)

「魚の嗅覚機能を利用した行動制御技術の開発」

吉原 良浩 (理化学研究所 脳神経科学研究センター システム分子行動学研究チーム
チームリーダー)

15:05～16:05

セッション2 畜産関連分野

「大型家畜のポテンシャルを引き出す代謝インプリンティング」

後藤 貴文 (鹿児島大学学術研究院 農水産獣医学域 農学系 教授)

「深層学習機能を利用した高受胎性牛体外受精卵の生産」

出田 篤司 (JA 全農 ET 研究所 九州分場 場長)

「ライフ on ディッシュ」

林 克彦 (九州大学 医学研究院 応用幹細胞医学講座

ヒトゲノム幹細胞医学分野 教授)

「環境適応機構の解明を通じた次世代育種・生物生産基盤の創成」

吉村 崇 (名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所
大学院生命農学研究科 教授)

16:30～16:50

コメント、総合討論に向けた補足説明

山本 秀明 (JST-CRDS フェロー)

コメンテーターの方々からのコメント

森島 輝 (日本水産株式会社 中央研究所大分海洋研究センター 主任研究員)

奥澤 公一（水産研究・教育機構 増養殖研究所 育種研究センター センター長）

下司 雅也（農研機構 生物機能利用研究部門 動物機能利用研究領域 領域長）

16：50～17：50

総合討論

17：50～17：55

まとめ： 山本 秀明（JST-CRDS フェロー）

17：55～18：00

閉会の挨拶： 永井 良三（JST-CRDS 上席フェロー）

※本ワークショップの詳細は、以下の報告書に記載予定

科学技術未来戦略ワークショップ報告書「次世代育種・生物生産基盤の創成（動物分野）～データ駆動・ポストゲノム編集時代における課題解決に向けて～」（2019年度発行予定）

付録2. 国内外の動向

本戦略プロポーザルに関連する分野の国内外の研究開発の動向（2010年以降～）を記載する。

【海外の研究推進施策、ファンディング】

①米国

・USDA（米国農務省）

（水畜産全般） Animal Production and Protection

USDA傘下の研究所、ARS（Agricultural Research service）において実施される国家プロジェクト（National Project）群の一つである。毎年を通じて実施されており、以下の4つのプログラム群からなる。

#101：食用動物生産（2016年予算 4900万ドル）

- 食用動物の生産性、生産効率の向上及び動物福祉の強化
- 動物のゲノム資源の理解、改良と効果的な利用
- 肉製品の品質測定及び向上

#103：動物衛生（2016年予算 700万ドル）

- バイオディフェンス、抗生物質耐性、人畜共通感染症、呼吸器疾患、寄生虫、BSEなど

#104：獣医・都市昆虫学（2016年予算 2200万ドル）

- 公衆及び軍事衛生昆虫学
- 獣医昆虫学
- ヒアリ、その他の侵襲性害虫

#106：養殖（2016年予算 2800万ドル）

- 選抜育種、ゲノムツール開発
- 飼料開発
- 水産物衛生
- 持続可能な生産システム
- 製品品質と新製品

AFRI（Agriculture and Food Research Initiative）

2014年から開始された農水畜産物共通の研究開発プロジェクト。2018年における予算総額は4億ドルであり、2017年には動物生産、水産養殖分野における橋渡し支援として合計40の研究プログラム（総額1570万ドル）がスタートしている。

②欧州

EU全体のフレームワークプログラムであるHorizon2020では、3つの優先事項、1)「卓越した科学（Excellent Science）」、2)「産業リーダーシップ（Industrial Leadership）」、3)「社会的課題（Social Challenges）」が設けられており、このうちの3)「社会的課題（Social Challenges）」において水畜産関連のテーマが取り上げられている。2019年2月の時点でHorizon2020の枠組みにおいてこれまで支援された水畜産関連プログラム数はそれぞれ100以上に上る。2017年10

月には Horizon2020 の最後の 3 年間（2018～2020）の投資計画が発表されており、新たに発足した関連領域としては以下がある。

（水畜産を含めた食料生産全般） Sustainable Food Security

2018 年にスタートした、持続可能な食料生産、食料安全保障に関する包括的な研究領域である。2018 年の予算規模は 2 億 1875 万ユーロ。研究内容は多岐にわたるが、1) 生態系のポテンシャルを最大限引き出し、高品質で健全な作物や家畜の生産性を向上すること、2) 環境、気候変動に対応可能な食料生産、消費、3) 研究に必要なインフラの整備、4) 的を絞った国際協力、といった分野が主な目標となっている。

（水産） Sustainable European aquaculture 4.0: nutrition and breeding

2018 年にスタートした水産養殖研究領域である。2018 年の予算規模は 1800 万ユーロ。持続可能性、耐病性や飼料効率の向上、気候変動の影響緩和を目指したスマート育種、飼料・養殖法開発といった研究内容が盛り込まれている。

③ ノルウェー

（水産） HAVBRUK2

世界第二位の水産物輸出国であるノルウェーが実施する大規模水圏養殖研究プログラムである。期間は 2016 年～2025 年の予定で実施されており、予算規模は年額約 18 億円（1 億 4500 万ノルウェークローネ）である。プログラムは基礎研究から産業での応用、社会的課題までを一括して含む大規模なものとなっている。

④ 中国

（水産） Aquatic 10-100-1,000 Genomics Program

世界第一位の水産物輸出国である中国が実施する、国家主導の集約的なゲノミクススペース研究プロジェクトである。詳細な予算規模は不明。このプロジェクトでは 10 種類の養殖魚においてゲノム育種を実践し、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。

【わが国の研究推進施策、ファンディング】

・内閣府

SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)

「次世代農林水産業創造技術」

SIP 第一期プロジェクトとして 2013 年度に開始された。期間は 2013 年度～2018 年度、2018 年度予算は 23 億円である。農政改革と一体的に、日本型の超省力、高生産なスマート農業モデルや、新素材開発などによる農林水産物の高付加価値化を実現することにより、農業従事者の所得増大や生活の質の向上、関連産業の拡大、世界的食料問題への貢献を目指す。重点目標としては以下が設定されている。

重点目標①日本型の超省力・高生産なスマート農業モデル

- 水田農業
- 農業データ連携基盤
- 施設園芸
- 育種

重点目標②新素材開発等による農林水産物の高付加価値化

- 次世代機能性食品
- 改質リグニン

「スマートバイオ産業・農業基盤技術」

SIP 第二期プロジェクトとして 2017 年度補正予算により 2018 年度から開始。2018 年度予算は 32 億円である。わが国におけるバイオエコノミー拡大と関連産業の競争力強化のため、バイオとデジタルの融合によるイノベーション基盤構築を目指す。研究開発内容として以下 4 つの領域が設けられている。

- (A) 「健康寿命の延伸を図る「食」を通じた新たな健康システムの確立」
- (B) 「多様なデータの利活用による農林水産業・食品産業の生産性革命・競争力の強化」
- (C) 「生物機能を活用したものづくり」による持続可能な成長社会の実現」
- (D) 「バイオ・デジタル融合イノベーションを創出する研究開発基盤の構築」

・農林水産省

「知」の集積と活用によるイノベーションの創出推進事業

農林水産・食品分野におけるイノベーション創出のため、様々な分野の多様な知識、技術等を結集、スマート農業技術など革新的な技術・商品・サービスの創出や、イノベーション創出に向けた産学連携推進を目指すプロジェクト。2019 年度の予算概算額は 43 億円で、事業は以下の 2 つからなる。

- イノベーション創出強化研究推進事業
- 「知」の集積による産学連携推進事業

水畜産分野に関連するものとして、2018 年度のイノベーション創出強化研究推進事業では、マダコ、マガキの養殖、ウナギの生産技術、和牛ゲノムデータベースの構築に関する課題が採択されている。

戦略的プロジェクト研究推進事業

農林水産業・食品産業の競争力強化に向けて、農林漁業者のニーズを踏まえた技術開発の推進、開発技術の農林漁業者・食品事業者の実践及び農林水産業の生産性向上・収益力向上・コスト削減等の実現を目指すプロジェクト。2019年度の予算概算額は31億円で、事業は以下の3つからなる。

- 現場ニーズ対応型研究
- 基礎的・先導的研究
- 食品産業技術課題解決プロジェクト

2018年度時点では現場ニーズ対応型研究事業にて、水産分野における養殖、生産技術に関するプロジェクトが採択されている。

革新的技術・緊急展開事業

わが国の農林水産業・食品産業が持続的に維持、発展するために、農林水産品・食品の輸出や外国産品との差別化、現場の生産性の更なる向上を可能にする技術を生み出し、実装することを目指すプロジェクト。以下の5つのプロジェクトからなる。

- 地域戦略プロジェクト
- 先導プロジェクト
- 経営体強化プロジェクト
- 人工知能未来農業創造プロジェクト
- 技術開発・成果普及等推進事業

このうち、地域戦略プロジェクト、経営体強化プロジェクトにおいてはさらに1) 水田作、2) 畑作・地域作物、3) 野菜・花き、4) 果樹、5) 畜産、6) 林業、7) 水産業の7つの研究分野が設けられており、水畜産分野における育種、生産技術に関する研究開発計画が採択されている。

・文部科学省

グローバル COE プログラム

「クロマグロなどの養殖科学の国際教育研究拠点」

世界をリードする創造的な人材育成を図るため、国際的に卓越した教育研究拠点の形成を重点的に支援、国際競争力のある大学づくりを推進することを目的とする事業。近畿大学水産研究所が前身の「21世紀 COE プログラム」で「クロマグロ等の魚類養殖産業支援型研究拠点」に選定された。近畿大学水産研究所は引き続き、「グローバル COE」の拠点に選定され、「クロマグロなどの養殖科学の国際教育研究拠点」プログラムが2008年度～2012年度にかけて実施された。支援総額は合計約12億円である。研究課題としては1) 斃死防止技術開発、品種改良、2) 配合飼料開発と生け簀設計、3) 生態系への影響評価、環境保全技術開発、病原体の動態解析と予防法確立、4) 水銀量の低減方法、廃棄物からの機能性成分利用、トレーサビリティ手法の開発、5) リスク分析及び高付加価値化戦略策定

国家基幹研究開発推進事業

「海洋生物資源確保技術高度化」

海洋生物資源の安定的・持続的な供給に向けた革新的生産技術開発や、海洋環境、生態系を総合的に解明するための研究開発プロジェクト。期間は2011年度～2020年度（最長）であり、支援総額は1課題年間5億円程度。現在、1）黒潮生態系の変動機構解明、2）生物資源生産力の再生・保全と持続的利用、3）クロマグロの新たな受精卵供給方の開発、の3つの課題が進行中である。

JST-ERATO

「斎藤全能性エピゲノムプロジェクト」

マウスやカニクイザルなどをモデル生物として、生殖細胞のもつエピゲノム制御機構を解明・再構成し、全能性獲得に至るゲノム制御基盤を明らかにすることを旨としたプロジェクト。期間は2011年度～2017年度で、支援総額は約14億円である。1）マウス生殖細胞解析グループ、2）サル生殖工学開発グループ、3）サル初期発生機構解析グループ、4）生殖エピゲノム解析グループの4つの研究グループからなる。

「東原化学感覚シグナルプロジェクト」

「匂い」「味」「フェロモン」といった化学感覚シグナルが情動や行動を引き起こすまでの生体内のメカニズム解明を旨としたプロジェクト。期間は2012年度～2017年度で、支援総額は約12億円である。1）生化学代謝物質解析グループ、2）昆虫・植物化学感覚解析グループ、3）遺伝子バイオインフォマティクス解析グループ、4）受容シグナル情報伝達解析グループ、5）高次脳神経回路解析グループ、6）化学感覚統合的解析グループ、7）脳イメージンググループ、8）動物行動解析グループの8つのグループからなる。

地域イノベーション・エコシステム形成プログラム

「えひめ水産イノベーション・エコシステムの構築」

社会的インパクトが大きく、地域の成長とともに国富の増大に資する事業化プロジェクト推進により、日本型イノベーション・エコシステム形成と地方創成を実現することを目指す。プログラムの一つとして、2017年度に愛媛県と愛媛大学の共同申請が採択された。期間は2017年度～2021年度。

愛媛地域で創出された小型マグロ類「スマ」の完全養殖技術をベースとし、地域の関連機関と連携し事業化・量産化にむけ、産業化に必要な持続生産を可能とする次世代育種、革新的な養殖システムの構築に取り組み、養殖産業としてのブレークスルーに繋げる。

未来社会創造事業

「将来の環境変化に対応する革新的な食料生産技術の創出」

未来社会創造事業探索加速型テーマ「持続可能な社会の実現」領域において2018年度より開始した研究プログラムである。今後の世界人口増加に伴い需要増加が見込まれる動物性タンパク質の供給源を対象に、動物飼育によらない食料生産、動物性飼料に依存しない水畜産、ハイインパクトな食料産業創出に必要な技術開発などの観点から研究開発を行い、食を通じた豊かな暮らし

しの実現、新たな食品産業創出、世界の飢餓撲滅への貢献を目指す。2018年度現在では食肉培養生産システム、陸上養殖システム、飼料開発や魚類の育種などに関する7つの研究テーマが盛り込まれている。

新学術領域研究

「動物における配偶子産生システムの制御」

動物種を越えてPGCやGSC中で機能する細胞自律的な共通メカニズムに注目し、*in vivo*の解析とともに*in vitro*で配偶子産生過程を再現することを目指した研究プロジェクト。研究期間は2013年度～2017年度、配分予定額は12億5720万円である。計画研究テーマとして、1) 配偶子産生システムの制御機構を知る、2) *in vitro*で配偶子産生を再現する、の2項目が設けられている。

「性スペクトラム：連続する表現型としての雌雄」

雌雄を連続する表現型「性スペクトラム」として捉え、雌雄の連続性を検証するとともに、個々の性とその連続性の中に位置付けられるメカニズムの解析を通じた性の再定義を目指した研究プロジェクト。研究期間は2017年度～2021年度、配分予定額は11億4460万円である。計画研究テーマとして、1) 遺伝要因と性スペクトラム、2) 内分泌要因と性スペクトラム、3) 環境要因と性スペクトラム、の3項目が設けられている。

「配偶子インテグリティの構築」

配偶子が形成される過程において、受精能や発生能を保証する機能的な完成度「配偶子インテグリティ」構築のメカニズムを理解、再構築することを目指した研究プロジェクト。研究期間は2018年～2022年、配分予定額は11億8150万円である。計画研究テーマとして、1) インテグリティの再構築、2) インテグリティの予見、3) インテグリティの理解、の3項目が設けられている。

参考文献

- 1) 米国農務省国家プロジェクト (Animal Production and Protection) (2019年2月26日アクセス) <https://www.ars.usda.gov/animal-production-and-protection/>
- 2) 米国農務省 AFRI (2019年2月26日アクセス) <https://nifa.usda.gov/program/agriculture-and-food-research-initiative-afri>
- 3) 米国農務省 AFRIにおける橋渡し研究支援 (2019年2月26日アクセス) <https://nifa.usda.gov/announcement/usda-invests-157-million-research-improve-livestock-and-aquaculture>
- 4) Horizon2020 2018-2020 食料分野研究投資計画 (2019年2月26日アクセス) http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp-1820-food_en.pdf
- 5) ノルウェー HAVBRUK2 (2019年2月26日アクセス) <https://www.forskningsradet.no/no/Utlysning/HAVBRUK2/1254008828787>

- 6) Aquatic 10-100-1,000 Genomics Program
- 7) Yingjie Liu, Pao Xu, Junmin Xu, et al. “China is initiating the Aquatic 10-100-1,000 Genomics Program” SCIENCE CHINA Life Sciences, 60, 3: 329-332(2017) doi.org/10.1007/s11427-016-0273-9
- 8) SIP「次世代農林水産業創造技術」研究開発計画（2019年2月26日アクセス）
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/9_nougyou.pdf
- 9) SIP「スマートバイオ産業・農業基盤技術」研究開発計画（2019年2月25日アクセス）
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/7_smartbio.pdf
- 10) 農林水産技術会議 研究機関が応募できる研究資金（2019年2月26日アクセス）
http://www.affrc.maff.go.jp/docs/research_fund.htm
- 11) グローバル COE プログラム「クロマグロなどの養殖科学の国際教育研究拠点」（2019年2月26日アクセス）
<https://www.flku.jp/gcoe/>
- 12) 文部科学省「海洋生物資源確保技術高度化」（2019年2月26日アクセス）
http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatsu/kaiyou/gaiyou/1343279.htm
- 13) JST-ERATO「斎藤全能性エピゲノムプロジェクト」（2019年2月26日アクセス）
<http://www.jst.go.jp/erato/saitou/>
- 14) JST-ERATO「東原化学感覚シグナルプロジェクト」（2019年2月26日アクセス）
<http://www.jst.go.jp/erato/touhara/index.html>
- 15) 地域イノベーション・エコシステム形成プログラム「えひめ水産イノベーション・エコシステムの構築」（2019年2月26日アクセス）
<http://ecosystem.ccr.ehime-u.ac.jp/>
- 16) 未来社会創造事業「将来の環境変化に対応する革新的な食料生産技術の創出」（2019年2月26日アクセス）
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/sustainable/index.html#theme03>
- 17) 新学術領域研究「動物における配偶子産生システムの制御」（2019年2月26日アクセス）
<http://www.nibb.ac.jp/adventures-in-germline-wonderland/>
- 18) 新学術領域研究「性スペクトラム：連続する表現型としての雌雄」（2019年2月26日アクセス）
<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/sexspectrum/>
- 19) 新学術領域研究「配偶子インテグリティの構築」（2019年2月26日アクセス）
<https://www.gamete-integrity.com/>

付録3. 専門用語説明

用語	説明
Animal Welfare	動物が生活及び死亡する環境と関連する動物の身体的及び心理的状态を指す。指針として「5つの自由」が設けられている。農林水産省平成25年度海外農業・貿易事情調査分析事業報告書によると、その内容は1)飢えと渇きからの自由、2)不快からの自由、3)痛み、怪我、病気からの自由、4)正常な行動を発現するの自由、5)恐怖と苦悩からの自由、からなる。先行する欧州においてはWQ (Welfare Quality:福祉品質) と呼ばれる科学的評価基準を設けブランド化推進の取り組みがある他、わが国においても農林水産省による畜産GAP (Good Agricultural Practice) 認証推進によるAnimal Welfare畜産認証制度の動きが見られる。
育種	生物を遺伝的に改良すること。改良手法としては交配 (同じ品種間)、交雑 (異なる品種間)、突然変異導入などがある。近年ではゲノム情報に基づくゲノム育種や、ツールとしてのゲノム編集も利用されるようになってきている。また育種において特定の有用な形質 (成長速度、耐病性など) を有する品種を選抜、それら同士を繰り返し掛け合わせる育種を選抜育種と呼ぶ。品質、系統情報から遺伝的能力を評価、選抜する方法としてBLUP (Best Linear Unbiased Prediction) の手法が水畜産分野では用いられている。近年ではマーカーを指標に有用形質に関連した染色体領域を持つ個体を選抜するマーカーアシスト選抜、ゲノム情報とBLUP法を組み合わせたGBLUP法 (ゲノム予測) などが選抜に用いられている。
形質	生物が有する性質や特徴を指す。本プロポーザルではその中でも特に遺伝により子孫に伝えられるものを指す (遺伝形質)。育種の目的となる形質としては、生物体の大きさ、色、形などの形態に関するものや、肉質、成長速度、耐病性、繁殖力、行動などの生理的なものがある。
増肉係数/飼料効率	動物の成長効率の評価指標の一つである。 増肉係数：食べた餌の量を増えた体重で割ったもの。動物が単位量 (例えば1kg) 太るために必要な餌の量を表し、生産の観点からは一般的に値が低い方が効率がよいとされる。 飼料効率：増えた体重量を食べた餌の量で割ったもの。単位量の餌で増えた体重を表し、高い方が効率がよいとされる。
配偶子	生殖細胞のうち、接合により新しい個体を作るものを指す。本プロポーザルが対象とする生物種においては基本的には精子、卵子を指す。
フードマイレージ	食料の輸送量 (重量) と輸送距離をかけたもの。食料輸送が環境に与える負荷の指標として用いられる。食料の生産地と消費地が近ければフードマイレージは小さな値となり、逆に遠ければ大きな値となり環境負荷が大きいとされる。わが国は畜産などの飼料の大半を海外に依存しているため、フードマイレージは大きくなる傾向にある。

■作成メンバー■

永井 良三	上席フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
山本 秀明	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
桑原 明日香	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
富田 英美	フェロー	(海外動向ユニット)
鈴木 雅博	副調査役	(プログラム戦略推進室)
相川 順一	JST PM育成・活躍推進プログラム研修生	
島津 博基	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2018-SP-08

戦略プロポーザル

次世代育種・生物生産基盤の創成（第2部）

～育種支援技術、生産プロセス研究の推進による、高品質水畜産物の
高速・持続可能な生産～

STRATEGIC PROPOSAL

Building strong foundations for the transformative research in next generation breeding & bioproduction (Part 2)

- Research to build up the foundation and technologies that facilitate effective breeding and production process management for high quality, sustainable, and accelerated production in aquaculture and animal husbandry -

平成 31 年 3 月 March 2019

ISBN 978-4-88890-636-4

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
ライフサイエンス・臨床医学ユニット

Life Science and Clinical Research Unit,

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/>

©2019 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTA ACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTA ACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTA ACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN 978-4-88890-636-4

