

令和 4 年度生研支援センター研究開発構想
「我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化」
調査報告書

令和 5 年 5 月



目 次

I. はじめに	3
1. 背景と目的	3
2. 調査概要	5
(1) 調査方法	5
a. 企画委員会	5
b. 分科会	6
c. 文献等の調査	8
(2) 文献等の調査からみた国内外の研究開発動向	13
a. 国内の研究開発動向	13
b. 海外の研究開発動向	18
(3) 分科会における議論と課題の整理（横断的課題区分）	24
II. 研究開発の方向性	25
1. 水産物生産の安定化、効率化、多様化、分散化	25
(1) 採捕漁業	26
a. 漁業管理	26
b. 沿岸管理（nature-based solution (NbS; 自然を基盤とした 解決策）による沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築）	32
c. 環境把握（モニタリング）のための基礎・基盤技術	36
(2) 水産養殖	37
a. 遺伝的改良による育種	38
b. 養殖飼料と給餌技術	41
c. バイオセキュリティと疾病管理	45
d. 養殖システム	50
e. 無給餌養殖（海藻養殖、二枚貝養殖）	55
(3) 新規水産物開発	56
a. 培養魚肉（細胞水産業のうちの細胞性産物）	56
b. 3Dプリンティング	58
c. その他	60
2. 水産物流通の安定化、効率化、多様化、分散化	60
(1) 情報付き流通	60
(2) 生産側を強化する生産、流通、消費のあり方	62
(3) 地産地消	62
(4) 生産・消費のマッチング	62
3. 環境負荷の低減	63
(1) 廃棄物(Food loss/waste)の低減	63
a. 未利用魚、魚あらの活用	63

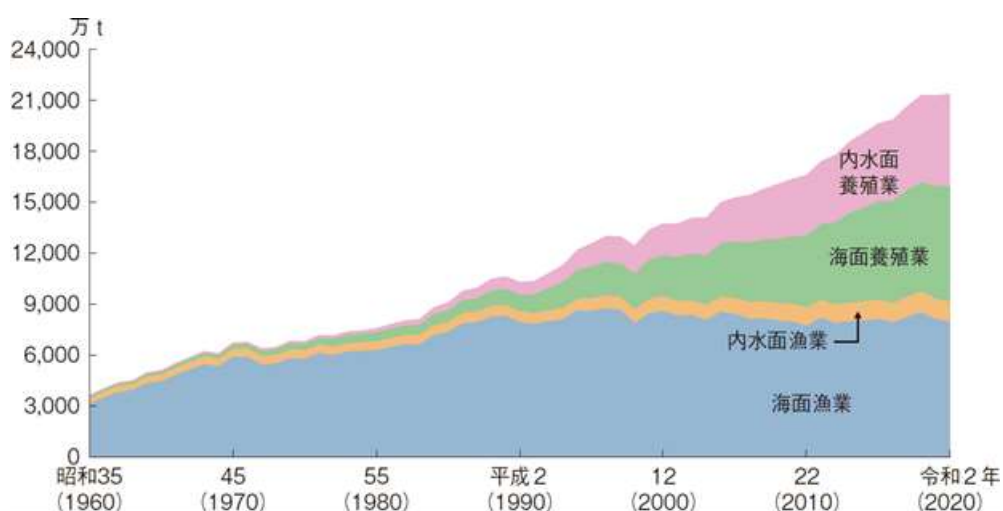
b. 温室効果ガス排出量低減と水産物鮮度保持の両立	64
(2) 温室効果ガスの排出量削減（カーボンニュートラル）	65
(3) 海洋汚染、その他の環境負荷低減	66
4. ICT（AI、DX、データ連携、ロボティクスを含む）の活用	66
(1) スマート漁業・養殖業	67
(2) 流通・消費のICT化と生産とのデータ連携	68
(3) 自動化、ロボティクス	68
5. 地域振興、漁村振興	69
(1) 沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築	69
(2) 地域振興、漁村振興	69
6. 生産者・消費者行動に関する社会技術研究	70
(1) 生産行動・判断に関する社会経済研究、マーケティング	70
(2) 新規水産物の社会受容性	71
7. 「食品」としての水産物研究	71
(1) 美味しさ、健康、安全性などの食品価値の追求	72
(2) 水産物の性状、物性	72
III. まとめ	74
III-1 我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化のための提言	74
III-2 今後の実施が期待される研究開発課題	77
III-3 付帯意見	81
III-4 おわりに	82
IV. 謝辞	82
V. あとがき	83

I. はじめに

1. 背景と目的

世界の漁業と養殖業を合わせた生産量は増加し続けており、2020年の漁業・養殖業生産量は2億1,402万トンとなった。国連食糧農業機関（FAO）は、今後も、世界の漁業・養殖業生産量は増加し続けるものと予測しているのに対して、我が国の漁業・養殖業生産量は縮小しており、2020年の生産量はピーク時の3分の1程度まで減少し、食用魚介類の自給率についても59%（重量ベース：R3概算値）と海外への依存が大きくなっている。

他方、世界の人口は、2022年11月に80億人を突破した。国際連合がまとめた「世界人口予測2022」報告書によると、2080年代にはピークの104億人となるとされており、今後、世界の食料需要が増大していくことが見込まれる。さらに、ロシアのウクライナ侵攻を背景とした国際的な原材料価格の上昇や円安、また、新型コロナウイルスの流行に伴う国際的な物流の混乱、地球温暖化やこれに伴い世界各地で頻発する異常気象や大規模な自然災害など、食料の安定供給に影響を及ぼしかねない問題が頻発しており、こうした状況を背景に、我が国の食料安全保障の確保が重要な課題となっている。



出典：令和3年度水産白書

図 I-1-1 世界の漁業・養殖業生産量の推移

こうした中、我が国は、領海を含めた「排他的経済水域 EEZ」の面積が約 447 万平方キロと、国土面積の約 12 倍の広さを有し、世界で 6 位の水域の利用が可能である。また、水産物は、古くから我が国の食生活に取り入れられ、現在でもタンパク質供給源の約 40% を占めており、その供給を支える水産業の強靱化は、我が国の食料安全保障上、非常に重要である。

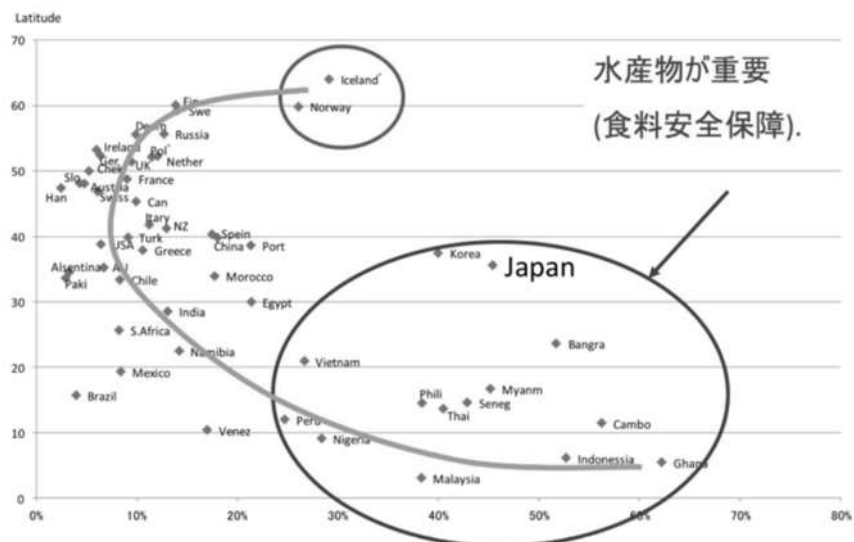
しかし、近年は、食卓に馴染みの深いサンマやサケ、イカなど、これまで獲れていた魚が獲れなくなり、逆に、これまで獲れていなかった魚が獲れるといった状態が何

年にもわたり継続するという状況が起きている。また、人口減少に伴う漁業就業者の減少や高齢化など、水産物を安定的に供給する基盤が揺らいでいる状況にある。

表 I-1-1 排他的経済水域の面積と国土面積

	排他的経済水域(含:領海)		国土		排他的経済水域/国土面積(%)
	面積	順位	面積	順位	
アメリカ	762	1	963	3	79.1%
オーストラリア	701	2	769	6	91.2%
インドネシア	541	3	189	15	286.2%
ニュージーランド	483	4	27	73	1788.9%
カナダ	470	5	997	2	47.1%
日本	447	6	38	60	1176.3%

出典：生物多様性国家戦略の見直しに関する懇談会 第2回会合資料



出典：日本の水産資源・漁業の未来—国際的議論と国内の課題—（東京大学 牧野光琢教授） <https://ippjapan.org/archives/1896>

図 I-1-2 タンパク質供給源としての水産物の割合

縦軸は各国の首都の緯度、横軸はタンパク質の供給源のうち水産物の割合。
日本は、タンパク質供給源の40%強が水産物となっており、世界的に見ても高い割合となっている。

一方、世界の研究論文をみると、リスク強靱化 (resilience) や食料安全保障 (food security) に関する文献数が増加しており、世界的な関心事項となっているのに対して、日本においては、これらの研究分野の文献数は増加しているものの、その数は少なく、世界におけるランクはそれぞれ14位および19位と低位にある。このことから、我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化のための研究の推進は喫緊の課題と考えられる。

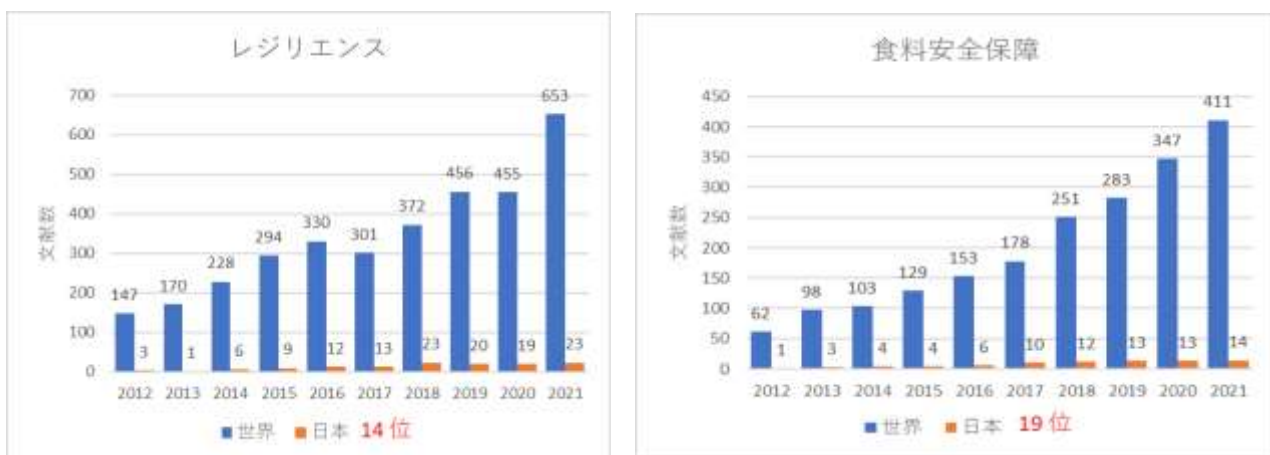


図 I-1-3 レジリエンス、食料安全保障に関する世界と日本の研究文献数の推移

本報告は、食料安全保障の観点から、水産業に係る研究開発動向を調査・分析し、漁業および養殖業の国内生産力の強化やサプライチェーン全般において水産物の安定供給を確保するための研究開発の方向性を見出し、水産業におけるイノベーションを促進するための研究開発構想を提案するものである。

2. 調査概要

(1) 調査方法

a. 企画委員会

a-1. 設置

研究開発構想の策定のための検討事項や取りまとめに対して専門的立場から、助言・ご意見を得るため、外部有識者8名（表 I-2-1）からなる「令和4年度生研支援センター研究開発構想企画委員会」を設置した。

表 I-2-1 企画委員会 委員名簿

氏名	所属・役職	備考
芦田 慎也	マルハニチロ株式会社 中央研究所 所長	
近藤 孔明	丸紅株式会社中部支社 副支社長	
塩谷 格	株式会社ニッスイ 中央研究所 所長	
東海 正	東京海洋大学 学術研究院 教授	委員長
中田 薫	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 理事	
中山 一郎	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 理事長	
八木 信行	東京大学大学院農学生命科学研究科 教授	

a-2. 企画委員会の内容

企画委員会では、以下のことについて助言、意見、提案を求めた。

- イ) 課題検討のための分科会の構成及びそのメンバーに関すること
- ロ) 各分科会での議論の論点整理に関すること
- ハ) 分科会での議論を踏まえた総合討論及び研究開発構想の提言案の取りまとめに関すること
- 二) その他、研究開発構想の策定に関すること

a-3. 企画委員会の開催

2022年11月24日に第1回企画委員会を、2023年3月8日に企画委員会事前打合せを、2023年3月20日に第2回企画委員会を開催した。

b. 分科会

b-1. 構成と内容

企画委員会での議論を踏まえ、以下の3つの分科会を開催した。また各分科会においては、図I-2-1の論点を中心に話題提供と議論を行った。

- イ) 持続可能な水産養殖生産の強靭化 (分科会1)
- ロ) 生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靭化 (分科会2)
- ハ) 水産業におけるサプライチェーンの強靭化 (分科会3)



図 I-2-1 分科会構成

b-2. メンバー

各分科会のメンバーは表 I-2-2 のとおり。

表 I-2-2 分科会 メンバー名簿

持続可能な水産養殖生産の強靱化（分科会 1）

氏名	所属・役職
釜石 隆	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産技術研究所 病理部長
菊池 潔	東京大学水産実験所 教授
佐藤 秀一	福井県立大学海洋生物資源学部 教授
征矢野 清	長崎大学 海洋未来イノベーション機構 環東シナ海環境資源研究センター 教授
中西 照幸	株式会社ゴトー養殖研究所 中央研究所 取締役副社長
中山 一郎	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 理事長
萩原 篤志	長崎大学水産学部 特定教授
廣野 育生	東京海洋大学 学術研究院海洋生物資源学部門 教授
吉崎 悟朗	東京海洋大学 学術研究院海洋生物資源学部門 教授

生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靱化（分科会 2）

氏名	所属・役職
伊藤 進一	東京大学 大気海洋研究所 教授
小埜 恒夫	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター海洋環境部 主幹研究員
菊地 淳	国立研究開発法人 理化学研究所 環境資源科学研究センター チームリーダー
斎藤 克弥	一般社団法人 漁業情報サービスセンター システム企画部長
高須賀 明典	東京大学大学院 農学生命科学研究所 教授
中田 薫	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 理事
堀 正和	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター 社会・生態系システム部沿岸生態系暖流域グループ長
牧野 光琢	東京大学 大気海洋研究所 教授
水上 陽介	オーシャンソリューションテクノロジー株式会社 代表取締役
渡部 諭史	国立研究開発法人 水産研究・教育機構水産技術研究所環境・応用部門 沿岸生態システム部 部長

水産業におけるサプライチェーンの強靱化（分科会 3）

氏名	所属・役職
潮 秀樹	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
大石 太郎	東京海洋大学 学術研究院海洋政策文化学部門 准教授
岡崎 恵美子	東京海洋大学 産学・地域連携推進機構 客員教授
酒井 純	一般社団法人 食品需給研究センター 理事
杉崎 麻友	特定非営利活動法人 日本細胞農業協会 理事
鈴木 敏之	国立研究開発法人 水産研究・教育機構水産技術研究所環境・応用部門・部門長
濱田 奈保子	東京海洋大学 学術研究院食品生産科学部門 教授
古川 英光	山形大学 工学部機械システム工学科 教授
松井 隆宏	東京海洋大学 学術研究院海洋政策文化部門 准教授
八木 信行	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授

※五十音順

b-3. 分科会の開催

各分科会を下記のとおり開催した。

- イ) 分科会 1 2023 年 2 月 6 日 (月) 13:00～17:00
- ロ) 分科会 2 2023 年 2 月 24 日 (金) 14:00～17:00
- ハ) 分科会 3 2023 年 2 月 21 日 (火) 13:30～17:00

c. 文献等の調査

c-1. 主要論文誌

論文検索には、クラリベイト・アナリティクスが提供する研究情報プラットフォーム「Web of Science ; WOS」を利用した。

課題の大分類（分科会テーマ）毎に、表 I-2-3 の検索単語を用いて、最近 10 年間の文献数の動向を調査した。

表 I-2-3 水産分野の検索に用いた英単語

研究分野	検索単語
1. 養殖に関連する分野	
1-1 養殖魚の育種に係る技術	breed* OR race AND fisheries OR aquaculture

1-2 養殖魚のバイオセキュリティに係る技術	biosecurity OR disease OR vaccin* AND fisheries OR aquaculture
1-3 養殖魚の飼料に係る技術	feed* OR fodder AND aquaculture
1-4 養殖システムに係る技術	"*culture system" OR "*culture equipment" OR "recirculating aquaculture system" OR "offshore aquaculture" AND fisheries OR aquaculture
1-5 養殖に関するその他の課題 (完全養殖)	"full-life cycle aquaculture" OR "complete aquaculture"
1-5 養殖に関するその他の課題 (種苗生産)	"seed* produc*" OR "produc* seed*" OR reproduct* OR gonad* OR spawn* OR hatch* OR vitellogen* OR maturat* OR fertillizat* AND aquaculture
1-5 養殖に関するその他の課題 (海藻養殖)	seaweed OR algae AND *culture OR farming OR cultivat* OR produc* AND fisheries OR aquaculture
1-5 養殖に関するその他の課題 (IoT, AI, GX, smart)	IOT OR AI OR GX OR DX OR digital OR smart AND aquaculture
2. 漁業に関連する分野	
2-1-1 環境モニタリング技術と データ連携	monitor* AND environ* AND fisheries OR ocean* OR marine
2-1-2 環境変化の影響評価と変 動予測	change* AND environ* AND fisheries OR ocean* OR marine environ. sci., marine freshwater biol., geoscienc. Maitidisci., ecology, oceanograph, fisheries で絞り込み
2-1-3 生態系・資源変動モデ ル・漁業管理 (海洋生態系)	ecosystem OR "ecological system" AND model* AND fisheries OR ocean*
2-1-3 生態系・資源変動モデ ル・漁業管理 (漁業資源評価、資源変動)	"stock assessment*" OR "fishery resources" OR "marine resources" OR "aquatic resources" AND fisheries
2-2-1 生態系機能の評価と沿岸 生態系の創造・強化	coast* OR littoral OR seashore AND ecosystem* OR "ecological service*" OR "ecosystem service*" AND fisheries OR aquaculture
2-2-2 沿岸生態系に係るその他 の課題	coast* OR littoral OR seashore AND ecosystem* "ecological system*" AND integrity OR conservation OR preservation OR maintenance OR protect* OR prevention
2-3 漁業に関するその他の課題 (資源管理)	

	"resource management" OR "resource administration" OR "fisheries management" AND fisheries
2-3 漁業に関するその他の課題 (資源生態・特性)	physiologic* OR ecological* OR behavior* AND character* OR deiposition OR propert* AND fisheries OR "aquatic organism*" OR "fisher* organism*"
2-3 漁業に関するその他の課題 (IoT, AI, GX, smar)	IOT OR AI OR GX OR DX OR digital OR smart AND fisheries
3. サプライチェーンに関連する分野	
3-1-1 需給マッチング	supply AND demand AND match* OR adjust* OR control* AND fisheries OR aquaculture OR seafood* OR "aquatic product*" OR "marine product*"
3-1-2 流通・保管 (食品流通)	distribution OR circulation OR currency OR logistics AND food* OR seafood* OR "marine food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*" AND fisheries OR aquaculture OR marine
3-1-2 流通・保管 (保管、貯蔵、冷蔵、冷凍)	stor* OR preserv* OR *keeping OR custody OR reserv* OR refrigerat* OR freez* OR "cold storage" OR "cold preservation" AND food* OR seafood* OR "marine food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*" AND fisheries OR aquaculture OR marine
3-1-3 加工	process* OR brew* OR ferment* AND food* OR seafood* OR "marine food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*" AND fisheries OR aquaculture OR marine
3-1-4 サプライチェーンに係る その他の課題 (水産関係)	"supply chain*" OR "value chain*" OR "food chain*" AND fisheries OR aquaculture OR seafood* OR "marine food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*"
3-1-4 サプライチェーンに係る その他の課題 (IoT, AI, GX, smar)	IOT OR AI OR GX OR DX OR digital OR smart AND "supply chain*" OR "value chain*" OR "food chain*"
3-1-4 サプライチェーンに係る その他の課題 (IoT, AI, GX, smar) (水産関係)	IOT OR AI OR GX OR DX OR digital OR smart AND "supply chain*" OR "value chain*" OR "food chain*" AND fisheries OR aquaculture OR seafood* OR "marine food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*"
3-2-1 培養魚肉	"cell* agriculture" OR "cell* aquaculture" OR "cell-based meat" OR "culture* meat" OR "lab-based meat" OR "in-vitro meat" OR "clean meat" OR "artificial meat" AND fish* OR marine OR seafood* OR "marine

	food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*" OR "fish meat*"
3-2-1 培養魚肉 (培養肉)	"cell* agriculture" OR "cell* aquaculture" OR "cell-based meat" OR "culture* meat" OR "lab-based meat" OR "in-vitro meat" OR "clean meat" OR "artificial meat"
3-2-2 水産物代替品に係るその他の課題	alternat* OR substitut* OR analogue* R fake OR artificial seafood* OR "marine food*" OR "aquatic product*" OR "marine product*" OR "fisher* product*" OR "fish meat*" "FoodScience Technology", "Fisheries", "Marine Freshwater Biology", "Nutrition Dietetics" で絞り込み

c-2. プロジェクト研究

プロジェクト研究の検索には、(株) バイオインパクトが運営する研究データベースサイト「日本の研究.com」を利用した。2012年以降国内で実施している、あるいは実施中の大型プロジェクト研究（1,000万円以上/年）を検索対象とし、課題の大分類（分科会テーマ）毎に分類した。

c-3. 海外の研究開発動向

米国と欧州（EU）における水産分野の研究開発動向について、下記の研究プログラムのうち2018年以降に実施または公募されている課題を対象とした。

①米国

資金 出資 機関	研究プログラム	概要	予算
NIFA	Small Business Innovation Research (SBIR)	<ul style="list-style-type: none"> 米国のベンチャー、中小企業を支援するため研究開発費用を補助し、技術開発を支援する研究資金プログラム 中小企業庁がプログラム全体を統括するが、プログラムの実施は各省庁が個別に行う 資金対象者：ベンチャー・中小企業(委託契約) 	1億8千万ドル ※2023年度 ※NIFAが出資するSBIR全体の合計値
NOAA	NOAAが主体となる調査プログラム	NOAAが主体となって調査等を行うプログラム	18億ドル ※2023年度 ※本研究分野に関連するプログラムの金額の合計値
	Marine Fisheries Initiative (MARFIN)	海洋漁業に関する科学的な研究開発を行い、持続可能な漁業資源管理に貢献することを目的とした研究資金プログラム	250万ドル ※2022年度 ※NOAAが出資す

		<ul style="list-style-type: none"> •NOAA の漁業管理事務局が予算を割り当て、漁業関連の研究プロジェクトに資金提供を行う •資金対象者: 研究機関(補助金) 	る MARFIN 全体の合計値
	Small Business Innovation Research (SBIR)	<ul style="list-style-type: none"> •米国のベンチャー、中小企業を支援するため研究開発費用を補助し、技術開発を支援する研究資金プログラム •中小企業庁がプログラム全体を統括するが、プログラムの実施は各省庁が個別に行う •資金対象者: ベンチャー・中小企業(委託契約) 	1千5百万ドル ※2023年度 ※NOAA が出資する SBIR 全体の合計値

※NIFA : National Institute of Food and Agriculture

※NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

②欧州 (EU)

研究プログラム	概要	予算
Horizon2020 (FP8)	<ul style="list-style-type: none"> •欧州連合が 2014 年から 2020 年までの 7 年間にわたって実施した研究・イノベーションプログラム •欧州連合加盟国や非加盟国の研究者や企業などが参加し、科学技術の進歩やイノベーションの促進を目的としている 	748 億ユーロ
Horizon Europe (FP9)	<ul style="list-style-type: none"> •Horizon 2020 の後継プログラムであり、2021 年から 2027 年までの 7 年間に予定されている •幅広い分野に対する資金提供を行い、主な研究分野は、気候、エネルギー、モビリティ、食料、健康、セキュリティとしている •学術研究以外にも、企業や政府などの実践的な取り組みを支援するための枠組みも設けられている 	955 億ユーロ
環境・気候行動プログラム LIFE	<ul style="list-style-type: none"> •環境と気候変動対策のための資金提供プログラム •欧州の付加価値を備えたプロジェクトに協調融資することにより、EU の環境および気候政策と法律の実施、更新、開発に貢献することを目的としている 	543 億ユーロ

(2) 文献等の調査からみた国内外の研究開発動向

a. 国内の研究開発動向

a-1. 文献調査の結果

a-1-① 論文数ランキング

WOSにより日本と海外における水産分野の過去20年間の論文数を調査し、10年間ごとに比較した。(表I-2-4~6)

諸外国の論文数ランクを通覧すると、民間企業における研究開発活動など論文数に現れない部分があるとはいえ、論文数ランクは、ほぼ世界における各国の水産業の漁獲量の順位を示しているように見える。

養殖分野の論文数は漁業分野と比べ少ないものの増加率は大きく、とりわけ中国の養殖分野の研究の伸びが著しいことが見てとれる。近年、養殖生産は漁業生産と比べて著しく伸びており、また、中国が世界における養殖生産の著しい伸びをけん引していることから、論文数(研究開発力)が各国の水産分野における産業力を示しているとみることできる。

日本における論文数は倍増していたが、その増加率は外国と比較すると低く、日本のランクは9位から13位に下がった(表I-2-4)。漁業分野および養殖分野に限ってみてもその傾向は同様であった。なお、この間の日本のその他分野も含めた全論文数のランクは5位(2003-2012年)から6位(2013-2022年)に下がった。このことは、水産分野の研究開発において世界における日本のプレゼンスが後退していることを示しており、今後は、日本の水産分野への研究開発投資を増やす必要があることを示唆している。

表I-2-4 水産分野論文数ランキング
(Fisheries & Aquacultureで検索)

順位	2003-2012年(水産分野)		2013-2022年(水産分野)	
	国・地域	論文数	国・地域	論文数
1	アメリカ	8,210	アメリカ	16,056
2	カナダ	2,894	中国	10,874
3	オーストラリア	2,647	オーストラリア	6,169
4	イングランド	1,989	カナダ	5,434
5	スペイン	1,731	スペイン	4,504
6	フランス	1,520	イングランド	4,209
7	ノルウェー	1,392	ブラジル	3,989
8	中国	1,369	ノルウェー	3,793
9	日本	1,348	インド	3,478
10	ブラジル	1,145	フランス	3,443
11	イタリア	1,089	イタリア	2,903
12	スコットランド	1,033	ドイツ	2,730
13	ドイツ	957	日本	2,632

表I-2-5 漁業分野論文数ランキング
(Fisheriesで検索)

順位	2003-2012年(漁業分野)		2013-2022年(漁業分野)	
	国・地域	論文数	国・地域	論文数
1	アメリカ	6,433	アメリカ	12,265
2	中国	2,223	オーストラリア	4,528
3	オーストラリア	1,979	カナダ	4,189
4	イングランド	1,694	イングランド	3,274
5	スペイン	1,073	中国	2,939
6	フランス	1,056	スペイン	2,658
7	日本	918	フランス	2,321
8	ノルウェー	857	ブラジル	2,129
9	ブラジル	759	ノルウェー	1,898
10	イタリア	696	イタリア	1,756
11	ドイツ	688	ドイツ	1,681
12	スコットランド	636	インド	1,673
13	メキシコ	529	日本	1,587

表I-2-6 養殖分野論文数ランキング
(Aquacultureで検索)

順位	2003-2012年(養殖分野)		2013-2022年(養殖分野)	
	国・地域	論文数	国・地域	論文数
1	アメリカ	2,038	中国	8,397
2	中国	911	アメリカ	4,500
3	カナダ	790	スペイン	2,117
4	オーストラリア	765	ノルウェー	2,102
5	スペイン	731	オーストラリア	2,020
6	ノルウェー	617	インド	2,004
7	日本	469	ブラジル	1,998
8	イタリア	452	カナダ	1,513
9	インド	441	イタリア	1,353
10	スコットランド	438	フランス	1,268
11	ブラジル	423	イングランド	1,194
12	イングランド	388	ドイツ	1,194
13	メキシコ	323	日本	1,164

a-1-② 漁業分野における各領域の研究開発動向

漁業分野の各領域（モニタリング、海洋環境変化、海洋生態系・モデル、漁業資源変動・評価、水産資源管理、沿岸生態系機能・評価、沿岸生態系保全、スマート漁業）における、日本と海外の過去10年間の論文数増加率を比較するとともに、世界における日本の論文数ランキングを示した（図I-2-2）。

日本の漁業分野における各領域の論文数増加率は、海外と比べ比較的高いか同等であるものの、その中でスマート漁業分野のそれは低い。論文数ランキングからみると、日本の漁業資源変動・評価およびスマート漁業分野の順位は8、9位にあるが、沿岸関係（沿岸生態系機能・評価、沿岸生態系保全）に関しては論文数が増加しているものの世界ランクとしては低い状況である。

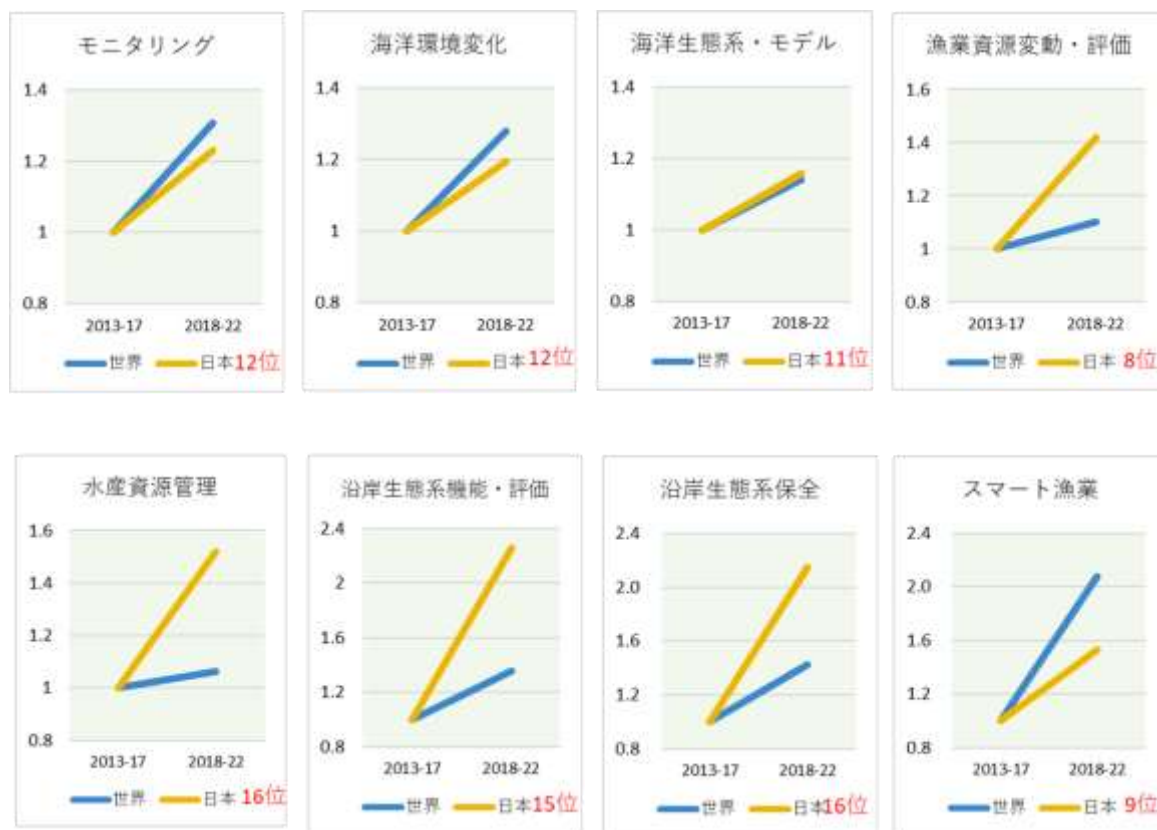


図 I-2-2 日本と海外における漁業各領域の論文数増加率の比較

また、養殖分野の各領域（育種、養殖飼料、バイオセキュリティ、養殖システム（陸上・沖合養殖）、種苗生産、海藻養殖、スマート養殖）における、日本と海外の過去10年間の論文数増加率を比較するとともに、日本の論文数ランキングを示した（図I-2-3）。

日本の養殖分野における各領域の論文数増加率は、海外と比べて育種では高く、また種苗生産では同等とみなせるが、それ以外は低い。論文数ランキングからみると、種苗生産と海藻養殖の世界ランクはいずれも8位と高く、日本の得意領域であることが伺えるものの、他の領域は非常に低い。特に、最近世界的にも注目されている養殖飼料およびバイオセキュリティ領域の低迷が目立つ。これらの領

域は、民間企業による商業ベースの取組も多く、研究成果は、その商業的価値に応じて特許化あるいは秘匿化される場合もあることから、この結果から、即日本における研究が少ないと結論付けることはできないものの、諸外国と比較してアカデミアの論文数が少ないことも事実である。かつて、日本は養殖先進国であったが、現在、世界の養殖生産量の急増と比較してその生産は停滞している。養殖飼料やバイオセキュリティ領域を含め、国が研究開発を支援・けん引することが、日本の養殖業の強靱性の強化と発展に寄与するものと考えられる。



図 I-2-3 日本と海外における養殖各領域の論文数増加率の比較

最後に、サプライチェーンの各領域（需給マッチング、水産食品加工、水産食品流通、貯蔵・冷蔵・冷凍、食品分野全般のスマートサプライチェーン）における、日本と海外の過去10年間の論文数増加率を比較するとともに、日本の論文数ランキングを示した（図 I-2-4）。なお、日本における水産分野のみのスマートサプライチェーン関係の論文は極めて限られており、増加率で示すことができなかったため、スマートサプライチェーン全体の論文数増加率を示したうえで、10年間分の水産分野におけるスマートサプライチェーン関係の論文数の推移を示した。

日本のサプライチェーンにおける各領域の論文数増加率は海外と比べ低く、論文数ランキングも比較的低い。需給マッチング、流通および保蔵（貯蔵・冷蔵・冷凍）領域の論文数増加率はマイナスであったが、これは、前述の養殖分野と同様に、これら領域の研究開発が民間企業中心に行われていることによるものかもしれない。また、スマートサプライチェーン分野全般の論文は増加しているとは

いえ、世界におけるランクは 41 位と極めて低く、水産分野に限っては論文がほとんどないのが現状であり、国の支援が必要な研究領域であると思料される。

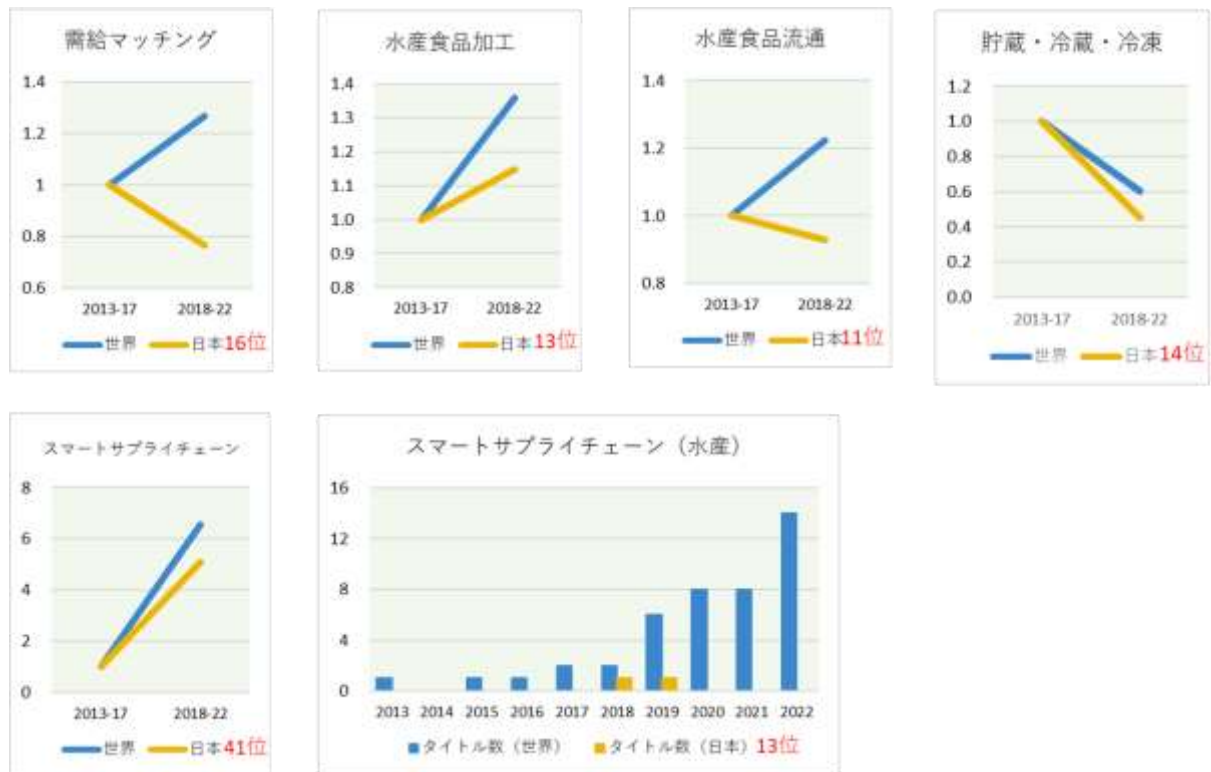


図 I -2-4 日本と海外におけるサプライチェーン各分野の論文数増加率の比較

a-2. 国内大型プロジェクト

日本において 2012 年以降に国のファンドで実施された水産関連のプロジェクト研究（約 1,000 万円以上／年）の状況を示した（図 I -2-5）。

養殖分野のプロジェクト研究（79 課題）が最も多く、次いで漁業分野（56 課題）、サプライチェーン分野（33 課題）の順であった。養殖分野では、約半数が魚類養殖にかかる種苗生産、飼育技術、および環境技術等に関連するもので、これらは海面養殖先進国の日本¹⁾がフロントランナーとして研究開発を進めてきた領域である。次いで、育種、飼料、システム関連が多く、水産防疫に関するプロジェクト数は少なかった。漁業分野では、環境、モニタリング、沿岸生態系などのプロジェクトが平均的に実施されていた。サプライチェーン分野では、その他の課題として分類した品質管理や安全・安心、消費安定化等に関連するプロジェクトがほとんどであり、少数だが流通・保管、水産物代替品に関連するプロジェクトが実施されていた。

研究資金の提供元をみると、分野毎に特徴があることが分かる。養殖分野では、7 割以上のプロジェクトが農林水産省（MAFF）および生物系特定産業技術研究支援センター（BRAIN）からの予算により実施されており、1 割強の課題が文部科学省（MEXT）および科学技術振興機構（JST）からの予算で実施されていた。漁業分

野では、4割弱の課題が日本学術振興会（JSPS）、3割強の課題が環境省（MOE）の予算で実施されていたことが特徴であり、農林水産省関係からの予算は2割程度であった。サプライチェーン分野では、半数程度が農林水産省関係の予算によっており、他の分野と比べ経済産業省（METI）、内閣府（CAO）および厚生労働省（MHLW）予算が多いことが特徴である。

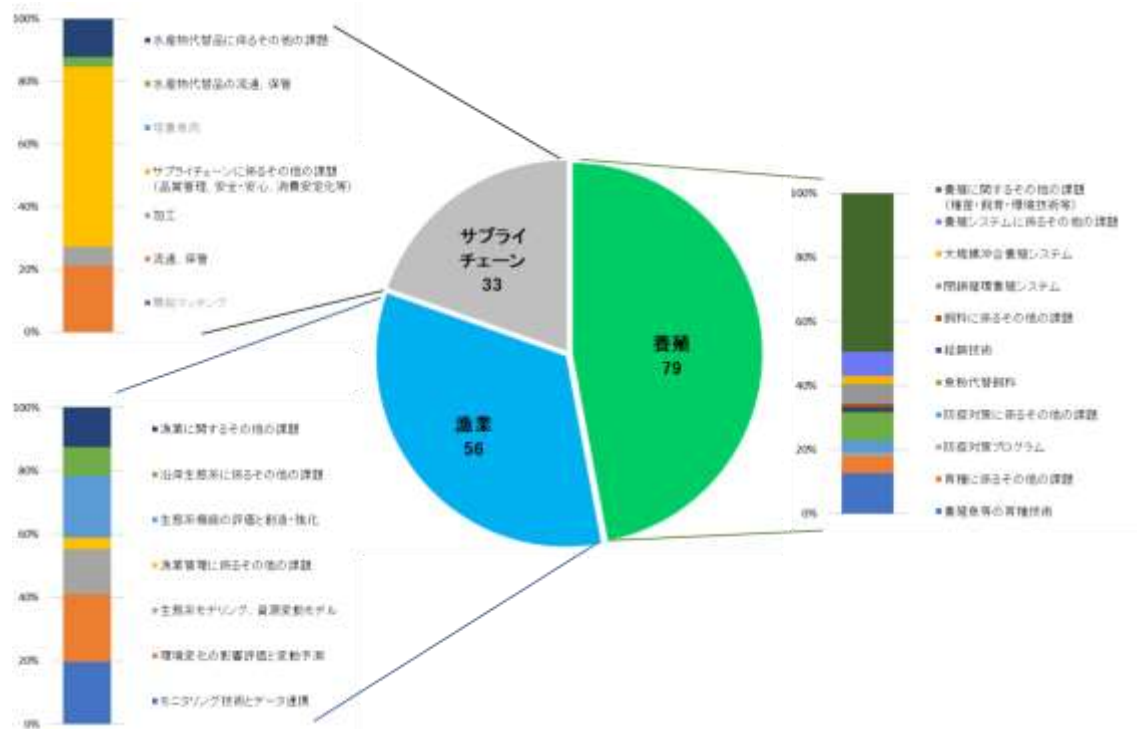


図 I-2-5 水産関連の各研究分野における大型プロジェクト実施状況

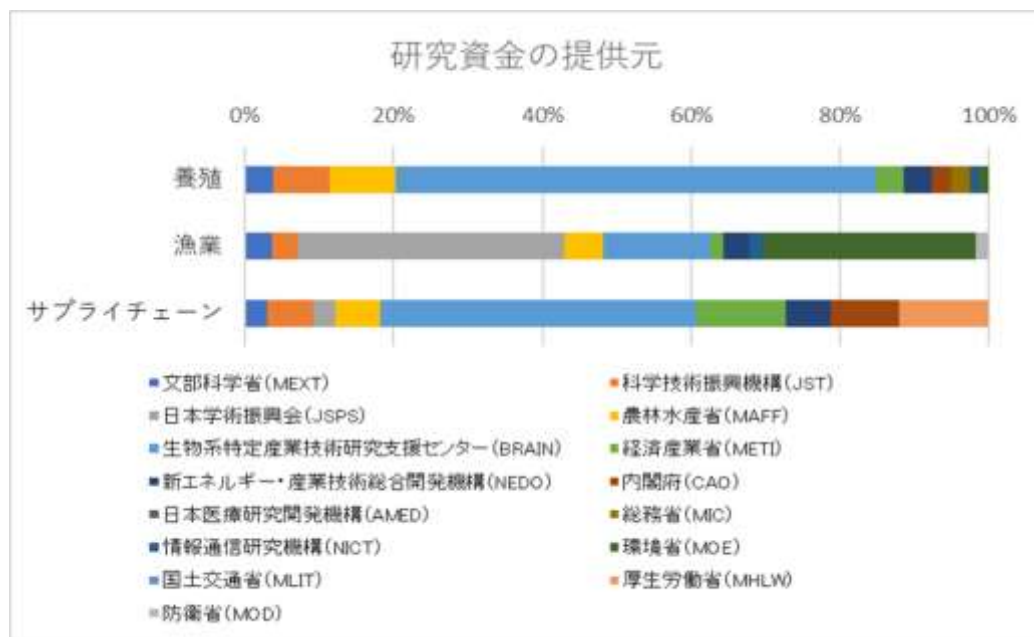


図 I-2-6 大型プロジェクトの研究資金提供元

1) 農林水産省「養殖業の持続的発展」、平成25年度水産白書

b. 海外の研究開発動向

b-1. 米国

米国では、水産養殖研究については、2022年に国家科学技術会議(National Science and Technology Council ; NSTC)の水産養殖分科会において「A NATIONAL STRATEGIC PLAN FOR AQUACULTURE RESEARCH」が策定され、また、漁業や海洋生態系関連については、NSTCの海洋科学分科会において、2018年に「SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR AMERICA'S OCEANS:A DECADAL VISION」が、また2022年には、具体的なアクションが更新された「OPPORTUNITIES AND ACTIONS FOR OCEAN SCIENCE AND TECHNOLOGY 2022-2028」が策定されている。

これら戦略やビジョンを踏まえた研究開発の動向を把握するため、NIFAが行うSBIRプログラムとNOAAが行うMARFIN及びSBIRプログラム等を対象に、2018年以降に実施または公募されているプログラムを調査した。

結果は、表I-2-7のとおりであり、養殖関連では応用研究以降のステージのプロジェクト、また生態系アプローチによる持続可能な漁業管理関連では基礎研究ステージのプロジェクトが多くみられた。

表I-2-7 米国におけるフェーズ別水産分野の研究課題数

大項目	基礎研究	応用研究	実証	実装	その他
①持続可能な水産養殖生産の強靱化	4(1)	24(8)	11(2)	2	-
②生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靱化	15	8(1)	4	-	9
③水産業におけるサプライチェーンの強靱化	-	2	2	-	2

()内は無給餌養殖関係で内数

また、養殖関連では「養殖飼料と給餌技術」と「養殖システム」に関するプロジェクトが、生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靱化関連では「漁業管理」「Nature-based Solutionによる生態系保全」に関するプロジェクトが多くみられたので、これらにおける主な研究プロジェクトを以下に例示する。

【主な研究プロジェクト】

(養殖飼料と給餌技術)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
<NIFA> 応用研究 SBIR Phase I 2022 \$174,255	水産養殖のための多価不飽和脂肪酸の異種合成	コーンシロップと無機栄養素から大量の油を生成する酵母を開発し、これらの油を大豆タンパク質と必須アミノ酸と組み合わせて、多価不飽和脂肪酸の異種合成による国内水産養殖用のクリーンで持続可能な飼料を開発する。

< NIFA > 応用研究 SBIR Phase I 2021 \$100,000	収量増加のための大型紅藻カギケノリの育種改良	気候変動の重大な原因であるメタン排出量を 90% 以上削減できる家畜飼料用材料の藻類候補（カギケノリ）を選択的に育種。高収穫が望める基盤を育成し、商業的実現性を高めメタンの排出量削減に熱心な農業関連企業への導入コスト削減を目指す。
< NIFA > 応用研究 SBIR Phase I 2020 \$100,000	廃棄物から主要な水産飼料原料へ	マグロの加工廃棄物と大豆および綿実ミールを加工処理し、栄養価が高く費用対効果の高い水産養殖飼料のための魚粉代替品を開発。

(養殖システム)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
< NIFA > 応用研究 SBIR Phase II 2021 \$649,651	ノリとダルスのための海藻養殖システムの開発	種苗生産と養殖技術を改良し、ノリとダルスの種子生産と養殖生産のための栽培基質を開発。紅藻・褐藻の養殖に適するシステムは、業界の持続可能性と効率を高め、高価な紅藻を、魚介類および海藻養殖などの既存の養殖産業に容易に組み込むことが可能となる。
< NIFA > 応用研究 SBIR Phase I 2020 \$100,000	藻類の増殖速度と収量を大幅に向上させる新しいミキシング技術等の開発	藻は自然環境に大量栽培に適した場所が少ないため、「Growth Enhancing Mixing Spectrum」(GEMS) と呼ばれる流体混合技術を用いた低エネルギー養殖技術を開発。微細藻類は CO2 を捕捉し、陸上植物よりも急速に成長するため、CO2 の回収と、環境、経済、社会に利益をもたらす再生可能なバイオ製品への変換の可能性はある。
< NIFA > 実証研究 SBIR Phase I 2018 \$100,000	クロマグロ稚魚の人工繁殖、孵化および生産技術	太平洋クロマグロの養殖は天然魚に依存しており、天然資源に対する漁業圧力の高まりのため持続可能性が無い。そこで、再閉鎖循環システムの間接孵化場で概念実証研究を実施し、短期間で受精卵と幼魚を生産し、マグロの養殖システムを確立する。

(漁業管理)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
< NOAA > 基礎研究 MARFIN 2021 \$504,310	米国南大西洋地域における稚魚の調査と漁獲指標の開発	南大西洋における連邦政府が管理する魚種の稚魚の個体数(加入)と分布の年間推定値を提供する。稚魚の個体数指標の開発に役立つとともに、生息地の情報や対象種の成長、繁殖、個体群の動態などが明らかになる。

< NOAA > 基礎研究 MARFIN 2019 \$503,858	漁業非依存型 の深海性スナ ッパー類およ びグルーパー 類調査の拡大	南大西洋地域における種の豊富さ、年齢組成および生活史データを提供するため、長期にわたる漁業非依存型の深海性スナッパーおよびグルーパーの調査を地域規模に拡大し実施。
< NOAA > 実証研究 SBIR Phase I 2022 \$150,000	漁業監視のた めのマルチモ ーダルコンピ ュータビジョ ンシステム	大量のデータを収集する監視技術（カメラとセンサーの統合システム）を使用して、商用漁船に搭載された魚を数えて分類するための特殊なコンピュータービジョンシステムのプロトタイプを作成する。

（自然を基盤とした解決策(Nature-based Solution; NbS)による沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築）

事業概要	研究課題	目的・取組概要
< NOAA > 2023 \$167,377	気候情報を考 慮した漁業評 価と管理戦略 の開発	気候変動が海洋資源、漁業、それらに依存する事業や地域社会に与える影響に対処するため、気候に関する情報を提供し、海洋変化や海洋資源への影響、また、影響を軽減し最良の漁業管理戦略を提供するシステムを確立。
< NOAA > 2023 \$166,046	洋上風力発電 が魚類、漁業、 生態系に与え る影響を評価	地域の保護された資源、漁業、および重要な生息地に対する洋上風力発電プロジェクトの影響を最小限に抑え、漁業産業および関連する沿岸コミュニティへの悪影響を減らすことを目指す。
< NOAA > 応用研究 SBIR Phase I 2022 \$149,921	水生生態系に おける溶存ガ スとその同位 体種のリアル タイム監視	沿岸および海洋環境で生成および循環され、気候変動に大きな役割を果たしている海洋生態系における溶存温室効果ガス(N ₂ O と CH ₄ およびそれらの同位体)を定量化するための、現場で展開可能なリアルタイムの現場システム全体の実証を行う。

b-2. 欧州 (EU)

欧州(EU)では、2021年に「strategic guidelines for a more sustainable and competitive EU aquaculture for the period 2021-2030」が策定され、この戦略をもとに EU 諸国において各国の国家戦略が策定されている。

EU が出資する研究開発プログラムは様々あるが、特に水産分野に関係が深いと思われる、Horizon 2020 (FP8)、Horizon Europe (FP9)、環境・気候行動プログラム (LIFE)、の3つのプログラムを対象に、研究開発動向を調査した。

結果は、表 I-2-8 のとおりであり、EU 全体の支援策を対象としたこともあり、分野や研究ステージの偏りはなく、全般的にプロジェクトが実施されていた。あえて言えば、養殖関連では、応用研究以降のステージが多く、生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靱化関連については、広いステージでプロジェクトが実施されている状況がみられた。

表 I-2-8 EU におけるフェーズ別水産分野の研究課題数

大項目	基礎研究	応用研究	実証	実装	その他
① 持続可能な水産養殖生産の強靱化	3	8	7	2	-
② 生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靱化	6	4	5	4	-
③ 水産業におけるサプライチェーンの強靱化	1	4	2	3	-

また、養殖関連で多かった応用・実証ステージと生態系アプローチによる持続可能な漁業の強靱化に関するプロジェクトのうち、主な研究プロジェクトを以下に例示する。

(遺伝的改良による水産生物の育種)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
Horizon 2020 基礎研究 2019～ 6,355 千 EUR	ゲノム機能アノテーションによる欧州水産養殖の推進	EU の養殖業において最も重要な 6 魚種について、ゲノム機能と遺伝子型から表現型への予測の利用法についての理解を深めるため、魚の全ゲノムの制御機構を理解し、感染症などの重要な問題に対処し、持続可能で収益性の高い養殖生産を実現。包括的なゲノム機能アノテーションマップを作成するために必要な数千のサンプルを収集、膨大かつユニークなデータリソースを、魚類生物学および養殖学研究のために解析し、生物学的解釈を実施

(養殖飼料と給餌技術)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
<LIFE> 応用研究 2019～ 2,251 千 EUR	飼料用魚粉・大豆粕の代替となる昆虫タンパク生産パイロットプラント	世界の動物性タンパク質に対する需要は増加傾向にあり、大豆生産のための森林破壊や養殖飼料のための乱獲によって環境に悪影響が及ぶ。また、温室効果ガスの排出量の増加、生物多様性の喪失、有機廃棄物の増加などをもたらすため、魚粉や大豆ミールに代わる昆虫タンパク質を生産するための資源として、バイオ廃棄物の利用を促進する技術を開発。

Horizon 2020 応用研究 2018～ 6,180 千 EUR	ヨーロッパにおけるグリーン養殖の強化	陸地と野生魚に対する養殖魚の飼料による負荷を減らすため、水産養殖や動物副産物、新興原料(例えば微細藻類や昆虫)を含む、革新的で持続可能な餌の配合を開発
--	--------------------	---

(養殖システム)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
Horizon 2020 実証研究 2023 3,311 千 EUR	循環型水産養殖システムにおける魚の将来の生産の保護	循環型水産養殖システム(RAS)による魚の養殖のため、水中の栄養塩類を減らし、有害な細菌や寄生虫の数をコントロールすることで水質を改善するための新技術を開発。また、最適な味を実現するための理想的な飼育条件を決定するための官能的・機器的な方法を設計。
Horizon 2020 実証研究 2020～ 6,724 千 EUR	持続可能で強靱かつ革新的な欧州水産養殖のための新技術開発	魚類、軟体動物、微細藻類の生産を拡大・多様化するため、技術的に有利で弾力性があり持続可能な新しいソリューションを開発し検証。
Horizon 2020 実証研究 2018～ 6,218 千 EUR	多栄養段階統合養殖のための高度管理システム	多栄養段階統合養殖(IMTA)を通じて、EU の産業とそのパラダイムシフトを推進し、環境に優しく効率的で高収量の欧州産業への道を切り開くため、現場での長期的な自律監視に必要なスマートシステムとともに、新しいセンサーとデータソースを開発・配備。

(漁業管理)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
Horizon 2020 実証研究 2018～ 6,945 千 EUR	効率的で規制に準拠した環境に優しい漁業部門のためのスマート漁業技術の開発	EU の漁業部門向けに、資源効率の最適化、魚類資源評価のための自動データ収集の改善、漁業規制遵守の証拠提供、生態系への影響軽減を目的に、光学技術と水中音響技術に基づいたまき網漁業の漁獲前のサイズと種の認識のためのシステム、魚のサイズ推定と種認識のための音響アルゴリズムを開発。
Horizon Europe 応用研究 2021～ 7,000 千 EUR	科学に基づく海洋空間計画の改善と海洋保護区の設定	沿岸・沖合・深海の海洋生態系が、急速に変化する環境に対応するため、深海の移動種を含む生態系のつながりを考慮し、生態系固有の自然動態を維持する必要性を考慮したアドホックな革新的柔軟社会生態学的管理の設計を行う。

Horizon Europe 実装研究 2021～ 10,000 千 EUR	持続可能な漁業のための検査・管理を支えるデジタル化	小規模漁業、遊漁船、長距離漁業の監視と管理、漁具の電子マーキング、データの標準と保護、データへの遠隔アクセス及び自動データ交換プロトコルの促進、連続エンジン出力監視など、漁船に適用される新しい技術的ソリューションを開発
--	---------------------------	---

(自然を基盤とした解決策(Nature-based Solution; NbS)による沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築)

事業概要	研究課題	目的・取組概要
Horizon 2020 実装研究 2021～ 7,919 千 EUR	持続可能漁業と健全な海洋生態系のための環境中心の管理	気候、海洋、生物地球科学、生物、漁業のデータセットを共通の規格とフォーマットで提供し、相互にマッピングレイヤーを通じて利用でき、生態系モデリングと海洋空間計画シミュレーションが可能な EcoScope Platform を活用した管理手法の実装
Horizon Europe 実証研究 2022～ 3,000 千 EUR	地域密着型のビジネスモデルへ：海洋再生型養殖	近海や沖合において、海藻林の生息地やその他の海洋生息地の修復・再生を行う、養殖の一形態である「再生型海洋養殖」の技術的・運営的実現可能性を実証。また、再生可能な海洋養殖の実施のための法律、規制、基準に関する課題と障壁を特定し解決策の提案などを行う。
Horizon Europe 実証研究 2022～ 3,000 千 EUR	海洋および沿岸の生態系の回復と気候変動影響からの回復力の向上	カキ礁、ケルプの森、湿地、塩湿地など、沿岸の回復力を高める自然ベースのソリューションによる、海洋・沿岸生態系の回復について実証を行う。土壌侵食とその沿岸地域への影響による海洋生態系の圧迫など、様々な圧力と気候変動への適応について体系的に検討。

(3) 分科会における議論と課題の整理（横断的課題区分）

分科会では、養殖、漁業およびサプライチェーンの3分野に分けて今後の研究開発の方向性に関する議論を行ったが、分野間を跨る課題が多くあったことから、課題区分の横串を意識した横断的な視点で見直し、さらに食料安全保障に対するリスクに対応するよう研究開発の方向性を整理し、この整理に基づき提言をまとめた（表 I -2-9）。

表 I -2-9

食料安全保障に対するリスク	横断的な課題区分（提言の視点）	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 食料供給量の減少 ・ 温暖化/高温化/異常気象 ・ 自然災害 ・ 資源変動 ・ 労働力不足/後継者不足 ・ 国際環境への対応 ・ 知的財産の流出 ・ 疾病/病害虫 	1. 水産物生産の安定化、効率化、多様化、分散化	(1) 採捕漁業 a. 漁業管理 b. 沿岸管理 c. 環境把握（モニタリング）のための基礎・基盤技術 (2) 水産養殖 a. 遺伝的改良による育種 b. 養殖飼料と給餌技術 c. バイオセキュリティと疾病管理 d. 養殖システム e. 無給餌養殖（海藻養殖、二枚貝養殖） (3) 新規水産物開発 a. 培養魚肉 b. 3Dプリンティング c. その他
<ul style="list-style-type: none"> ・ 需要変化 ・ 食料供給量の減少 ・ 国際環境への対応 ・ 温暖化/高温化/異常気象 ・ 自然災害 ・ 資源変動 	2. 水産物流通の安定化、効率化、多様化、分散化	(1) 情報付き流通 (2) 生産側を強化する生産、流通、消費のあり方 (3) 地産地消 (4) 生産・消費のマッチング
<ul style="list-style-type: none"> ・ 食料供給量の減少 ・ 温暖化/高温化/異常気象 ・ エネルギー不足 ・ 国際環境への対応 	3. 環境負荷の低減	(1) 廃棄物(Food loss/waste)の低減 a. 未利用魚、魚あらの活用 b. 温室効果ガス排出量低減と水産物鮮度保持の両立 (2) 温室効果ガス排出削減（カーボンニュートラル） (3) 海洋汚染、その他の環境負荷低減
<ul style="list-style-type: none"> ・ 人口減少/高齢化 ・ 労働力不足/後継者不足 ・ 温暖化/高温化/異常気象 ・ 資源変動 	4. ICT（AI、DX、データ連携、ロボティクスを含む）の活用	(1) スマート漁業・養殖業 (2) 流通・消費のICT化と生産とのデータ連携 (3) 自動化、ロボティクス
<ul style="list-style-type: none"> ・ 食料供給量の減少 ・ 地域の衰退/疲弊 	5. 地域振興、漁村振興	(1) 沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築 (2) 地域振興、漁村振興
<ul style="list-style-type: none"> ・ 需要変化 ・ 国際環境への対応 	6. 生産者・消費者行動に関する社会技術研究	(1) 生産行動・判断に関する社会経済研究、マーケティング (2) 新規水産物の社会受容性
<ul style="list-style-type: none"> ・ 需要変化 ・ 品質変化 	7. 「食品」としての水産物研究	(1) 美味しさ、健康、安全性などの食品価値の追求 (2) 水産物の性状、物性
	8. 支援システム	(1) 情報基盤の整備 (2) 体制、法整備、標準化

II. 研究開発の方向性

1. 水産物生産の安定化、効率化、多様化、分散化

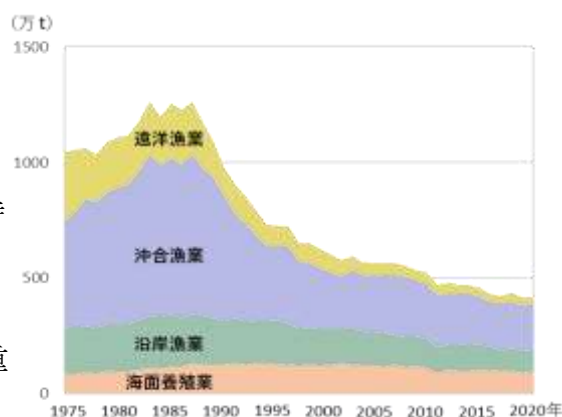
我が国の漁業・養殖業生産量は縮小しており、令和2（2020）年の生産量はピーク時の3分の1程度まで減少した（図II-1-1）。食用魚介類の自給率は昭和39年度の113%をピークに減少し、令和3年度には59%（重量ベース：概算値（海藻類は69%））となり^{1) 2)}、水産食料の海外依存が大きいことを示している。海外依存が大きくなっている状況は、我が国が関与できない事由により供給が減少する可能性もあり、食料の不足のみならず、輸入を含めた水産食品価格の高騰をまねく恐れがあるなど、食料安全保障の観点から極めて大きなリスクと考えられる。

また、我が国周辺の水産資源の状況を見ると¹⁾、MSYベースの評価が行われた17魚種26系群では、MSY水準より資源量が少ないものが69%であり、「高位・中位・低位」の3区分による評価が行われた42魚種61系群では、資源水準が中位から低位に評価される魚種系群が多くの割合（82%）を占めている（図II-1-2）。このような状況を改善し、我が国周辺の水産資源を維持・増大することが水産食料の供給不足リスクを回避するための喫緊の課題である。

さらに、温暖化や海洋熱波、異常気象などに伴う自然災害、労働力や後継者不足、福島第一原発事故に伴う我が国水産物に対する他国の輸入制限措置等は、水産物の安定的な生産を阻害するリスクである。その他にも、漁業・養殖業に係る生産技術や水産加工技術等に関する知的財産の国外流出は我が国水産業の国際競争力を弱め、感染症や寄生虫病の発生は水産養殖業に大きなダメージを与えるなど、水産業の発展にとってのリスクとなる。これらのリスクを事前に把握し、適切に対応するためにも研究・技術開発が望まれる。

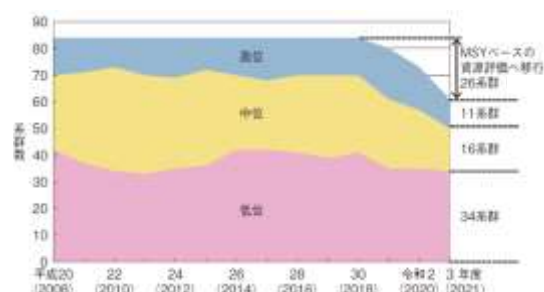
1) 令和3年度水産白書

2) 農林水産省「令和3年度食料需給表」令和4年8月



図II-1-1 日本の海面漁業・養殖業生産量の推移

（資料：農林水産省「漁業・養殖業生産統計」）



図II-1-2 我が国周辺資源水準の状況（「高位・中位・低位」3区分による資源評価）

(1) 採捕漁業

a. 漁業管理

自然の恵みであり、鉱物資源とは異なり自律的に再生可能な水産資源は、適切な管理によって永続的に利用できる性質を持つ。このような天然資源に依存する漁業を適切に管理することは、水産食料の安定供給を可能にするための重要な課題である。

我が国も批准している国連海洋法条約では、最大持続生産量（Maximum Sustainable Yield, MSY）を実現することのできる水準に漁獲対象種の資源量を維持または回復することと規定しており、これに基づく、水産資源管理が 2019 年より行われているが、資源量等の調査結果が資源管理に反映されるまでには最短で 2 年かかるため、生産量が短期間で大きく減少する不漁等への対応が必ずしも十分にできないなど、近年の地球温暖化などの地球規模の環境変化の影響もあり、環境変動とその水産資源への影響を過去のデータをベースに予測することが困難になりつつある。

こうした中、日本学術会議では、2017 年に「我が国における持続可能な水産業の在り方—生態系アプローチに基づく水産資源管理—」¹⁾を提言し、基礎・基盤的な研究として、海洋モニタリングの継続と生物資源変動予測モデルの構築の必要性を取り上げた。また、FAO が発表した「世界漁業・養殖業白書 2022」²⁾で新たに提唱されたブルー・トランスフォーメーションにおいても、持続可能な漁業を推進するためには、海洋生態系の生物多様性を保全しつつ、生態系サービスを利用する「生態系アプローチ型」の水産資源管理が必要とされている。

これら水産資源管理のためには、関連する環境情報や漁業情報の正確な把握とそれらの膨大なデータを統合して、資源評価や資源管理、漁業生産活動に活用することが課題である。また、広域に回遊する漁業資源は国際的に管理されており、関係国と連携した資源変動予測や管理が望まれる。さらに、漁獲性能の向上や混獲防止などの漁業技術も、漁業者の減少や高齢化に対応し、今後の持続可能な漁業生産の安定化・強靱化のために必要である。

1) 日本学術会議食料科学委員会水産分科会 「わが国における持続可能な水産業の在り方—生態系アプローチに基づく水産資源管理—」 2018 年 8 月 17 日

2) 国連食糧農業機関 (FAO) 「The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) 2022」 2022 年 6 月

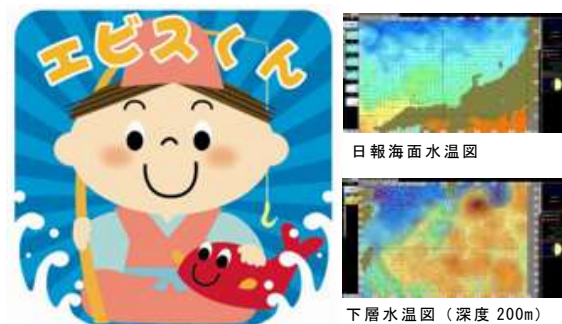
a-1. 生態系・漁業情報の収集と統合

【現状】

生態系アプローチは水域の物理・化学・生物学的環境の精密で正確な把握が基盤となる。我が国では、モニタリング調査による海洋環境と生物資源のデータの蓄積が 100 年以上にわたり存在し、その継続が海洋環境と生物資源の変動

予測を行うために重要である。これまで、海洋モニタリングは主に調査船等を用いて行われてきたが、近年では、急速な技術向上がみられる衛星や海洋観測ブイ、自律型無人潜水機（AUV）等を活用し取得した海中情報と、漁船や商船から得られる情報をIoTにより統合し人工知能(AI)を活用して解析することで、詳細に海洋をモニタリングすることが可能となってきた。こうした技術革新により、水産資源管理の基盤となる海の見える化・デジタルツイン化の実現が期待される。

また、漁業はこれまで漁業者の勘と経験に頼ることが多かったが、最近では、「衛星リモートセンシングデータ」、「漁場データ」、「操業データ」などの情報を統合し、AIを用いて出漁日や漁場を予測する「トリトンの矛」¹⁾（オーシャンソリューションテクノロジー（株））、「エビスくん」（図Ⅱ-1-3（一社）漁業情報サービスセンター）など漁船漁業を支援するシステムが民間企業や自治体の研究機関、漁業関係団体等から提供されており、燃油の削減や漁場探索時間の短縮などの効果も検証されている。



図Ⅱ-1-3 漁業向け 海象・気象情報サービス「エビスくん」
（（一社）漁業情報サービスセンターHPより）

これら収集されたデータは漁獲効率の向上や操業コストの削減などに

よる経営の安定化や担い手確保に有効であることに加え、資源評価・管理の高度化に活用されるとともに、水産フードチェーンの構築による水産物の高付加価値化、水産業の振興による離島や過疎地域の人口流出防止、カーボンニュートラルへの貢献等への波及も期待される。

また、日本の沿岸には多くの海洋観測ブイが設置されており、それらのネットワーク化によるデータ連携も進められている。

【今後の研究開発の方向性】

生態系・漁業情報のデジタル化を加速し、さらに多くの情報をより正確に把握するため、異分野で開発されるデジタル関係の最新技術を漁業分野へ導入し高度化を図るための技術開発とともに、得られる膨大なデータを効果的に統合し分析するシステム構築のための研究が必要である。また、このような膨大なデジタル情報を活用することにより、より高精度の漁場形成予測や、赤潮検知システム、異常気象・海況検知システムなどへ応用する実用的な研究の進展も期待される。さらに漁業分野以外のセクターと連携することにより生物多様性保全や洋上風力等の再生可能エネルギーなどと漁業・養殖業の共生の実現にも役立てることが期待される。

なお、漁業者等から、漁業情報を効率的に収集するためには、得られた情報

から生まれる経済価値が広く認知される必要があることから、水産 DX（デジタルトランスフォーメーションの略）の経済価値に関する研究の推進も必要である。

- 1) OCEAN SOLUTION TECHNOLOGY 「トリトンの矛」 <https://www.ocean5.co.jp/service/>
- 2) 一般社団法人漁業所法サービスセンター 「エビスくん」
<https://www.jafic.or.jp/service/ebisukun/>

a-2. 生態系アプローチ型資源管理に向けた生態系モデリング、資源動態モデルの構築

【現状】

近年、地球温暖化が進行し、それに伴う異常気象等も各地で増加している。海洋においても海水温の上昇や海流の流路の変化などが観測され、海洋生物の生息域や回遊経路の変化などが多数報告されるようになった。水産物の安定供給のためには、こうした変化に対応し、漁業資源の変動を予測することが重要となってくるが、このためには、水産業の現状分析と生態系評価を行い、その結果に基づき、水産資源の回復とその利用のあり方、海洋生態系の構造と機能の復元などの将来ビジョンと目標を定め、気候変動や海洋モニタリングデータ、漁業情報など膨大なビックデータを統合・解析する海洋生態系モデルを構築することが必要となる。

海洋生態系に基づく資源変動の考え方として、Harden-Jones(1968)¹⁾は図Ⅱ-1-4のような資源変動の全体像を示しており、生残率は成長率を変数とする



図Ⅱ-1-4 資源変動の全体像 (F. R. Harden Jones (1968)より伊藤氏作図)

表Ⅱ-1-1 各種生態系モデルの特性 (伊藤進一教授の資料より)

	NEMURO FISH	NEMURO SAN	ECOPATH ECOSIM ECOSPACE	EcoOcean	OSMOSE +size based	Atlantis	MICE
環境変動	○	○	△	○	○	○	△
卵仔魚輸送	○	○	△	○	○	△	△
生残	—	○	○	○	○	○	○
索餌回遊	○	○	△	○	○	△	△
成長	○	○	—	○	○	○	○
成熟	○	○	—	○	○	○	○
産卵回遊	○	○	△	○	○	△	△
再生産	—	○	○	○	○	○	○
漁獲影響	—	○	○	○	○	○	○
密度効果	—	○	○	○	○	○	○
種間競合	—	△	○	○	○	○	○

関数で表され、初期生活史における成長²⁾や、索餌回遊と産卵回遊³⁾などが鍵とした。これまで、多くの生態系モデルに関する研究が^{4)~8)}行われており、海洋生態系モデルの要素として、環境変動、漁獲圧、回遊、輸送、成長などが挙げられているが、輸送以外の要素については、まだ改善が必要である。

全体的には生態系モデル開発は複雑化する方向で進んできているが、それぞれ一長一短がある(表Ⅱ-1-1)。このため、むしろ中程度の複雑さのモデルを複数用いてアンサンブル化を図り、それぞれのモデルのもつ欠点をカバーした解析値や予測値を得る方向性がとられるようになりつつある。

また、海洋生態系モデルを使って資源変動を再現するために必要な①個体が経験している環境、②個体が摂餌している餌、③個体の回遊経路、④個体の生残率、⑤個体の再生産の状況などの各観測要素については、近年では、①では微小なセンサーを生体に接着し計測するバイオリギング⁹⁾、②③では耳石の安定同位体比などの自然標識(ナチュラルタグ)¹⁰⁾、①②③では眼球水晶体¹¹⁾や脊椎骨¹²⁾などの自然標識、④⑤では環境DNA^{13, 14)}や環境RNA¹⁵⁾などの技術開発が進んでおり、世界で精力的に研究が進められている。

さらに、資源管理には、気候変動の影響や母性効果(親の状態が子供の量や質に影響する)、捕食者-被食者関係、同じ栄養段階にある潜在的競合者との種間相互作用など生態系ベースの考え方を取り込む必要がある。しかしながら、気候変動に伴う環境変動に生物がどのように反応し、その結果どのような現象が起こるかというプロセスや生物学的なメカニズムの理解については未だ不明点が多い。他方で、マイワシとカタクチワシの再生産関係と密度効果の判別などで多くの検証、研究が行われている。

【今後の研究開発の方向性】

各種の生態系モデルが提唱されているが、生態系は非常に複雑であることから、現在進みつつある中程度の複雑さで再現性の良いモデルのアンサンブル化とその高度化の研究を進める必要がある。

また、海洋生態系の再現性を高めるためには、観測で埋めるべき要素が多く、特に個体の経験の検出や生残・再生産を推定する観測の重要性は高い。ただし、観測には多くの時間とコストがかかるため、研究開発を加速するためにも、モデル構築に必要な分布、生残、再生産、生態系の把握に必要な自然標識や環境DNA・RNAなどの生体情報の取得・活用に関する研究を進めるとともに、これらモニタリングの自動化を進めることが重要な研究開発要素となる。

さらに、環境変化を踏まえた漁業管理のステップとして、気候変動に伴う海洋変化や、生物学的メカニズムを根拠とした資源変動の予測を行い、さらに順応的管理を行うという経路を確立する必要がある。これまで、水産資源の量的評価に重点が置かれてきたが、母性効果等の生残確率に関わる要素や資源の年齢構成や生き残り状況など資源の健康診断のような質的な評価を行うための研

究が必要である。さらに、生態系における種間相互作用の解明に向け、特に餌を巡る競合についてさらに研究を重ねる必要があり、非水産重要種を含む生態系の構成要素を包含するモニタリングと構成要素の量的関係を把握するための手法開発などの研究が必要である。

- 1) Harden Jones, F. R. 1 Fish Migration. 1968 Edward Arnold, London, UK. 325 pp.
- 2) Anderson, J. T. A review of size dependent survival during pre-recruit stages of fishes in relation to recruitment. 1988 Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science 8, 55-66.
- 3) Moulton, F. R. (Ed.) . The Migration and Conservation of Salmon. 1939 American Association for the Advancement of Science, Lancaster, PA.
- 4) Ito S., M. J. Kishi, Y. Kurita, Y. Oozeki, Y. Yamanaka, B. A. Megrey and F. E. Werner, 2004, Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model, Fish. Oceanogr., 13, Suppl. 1, 111-124.
- 5) Rose, K.A., J. Fiechter, E. N. Curchitser, K. Hedstrom, M. Bernal, S. Creekmor, A. Haynie, S. Ito, S. Lluch-Cota, B. A. Megrey, C. Edwards, D. Checkley, T. Koslow, S. McClatchie, F. Werner, A. MacCall, 2015, Demonstration of a fully-coupled end-to-end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current. Prog. Oceanogr., 138, 348-380.
- 6) Guo C., S. Ito, Y. Kamimura, P. Xiu, Evaluating the influence of environmental factors on the early life history growth of chub mackerel (*Scomber japonicus*) using a growth and migration model. 2022. Prog. Oceanogr.
- 7) S. Watari, H. Murase, S. Yonezaki, M. Okazaki, H. Kiyofuji, T. Tamura, T. Hakamada, Y. Kanaji, T. Kitakado. Ecosystem modeling in the western North Pacific using Ecopath, with a focus on small pelagic fishes. 2018 MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, 617-618 295-305.
- 8) E. Plagányi, J. Bell, R. Bustamante, J. Dambacher, D. Dennis, C. Dichmont, L. Dutra, E. Fulton, A. Hobday, E. Putten, F. Smith, A. M. Smith and S. Zhou. Modelling climate-change effects on Australian and Pacific aquatic ecosystems: a review of analytical tools and management implications. 2011 *Marine and Freshwater Research* 62(9) 1132-1147.
- 9) Y. Aoki, T. Kitagawa, H. Kiyofuji, S. Okamoto and T. Kawamura, Changes in energy intake and cost of transport by skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) during northward migration in the northwestern Pacific Ocean. 2017 DSR Part II. 140. 83-93.
- 10) T. Sakamoto, K. Komatsu, K. Higuchi, T. Ishimura, T. Setou, Y. Kamiura, C. Waranabe and A. Kawabata. Combining microvolume isotope analysis numerical simulation to reproduce fish migration history, 2018 *Methods in Ecology and Evolution* 10 (1), 59-69.
- 11) Harada Y., S. Ito, N. O. Ogawa, C. Yoshikawa, N. F. Ishikawa, M. Yoneda and N. Ohkouchi, Compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids in eye lenses as a new tool to reconstruct the geographic and trophic histories of fish. 2022 *Frontiers Mar. Sci.*, 8, Article 796532.
- 12) J. Matsubayashi, Y. Umezawa, M. Matsuyama, R. Kawabe, W. Mei, X. Wan, A. Shimomae and I. Tayasu. Using segmental isotope analysis of teleost fish vertebrae to estimate trophic discrimination factors of bone collagen. *Limnology Oceanography: Methods*. 2018 *Methods*. 17(2). 87-96.
- 13) Wong M. K., S. Nobata, S. Ito and S. Hyodo, Development of species-specific

- multiplex real time PCR assays for tracing the small pelagic fishes of North Pacific with environmental DNA. 2022 Environmental DNA, (online).
- 14) Yu Z., S. Ito*, M. K. Wong, S. Yoshizawa, J. Inoue, S. Itoh, R. Yukami, K. Ishikawa, C. Guo, M. Ijichi and S. Hyodo, Comparison of species-specific qPCR and metabarcoding methods to detect small pelagic fish distribution from open ocean environmental DNA. 2022 PLoS ONE, 17(9)
- 15) K. Miyata, Y. Inoue, Y. Amano, T. Nishioka, M. Yamane, T. Kawaguchi, O. Morita and H. Honda. Fish environmental RNA enables precise ecological surveys with high positive predictivity. Ecological Indicators, 128. 107796 Density-dependent egg production in chub mackerel in the Kuroshio Current system. 2021 Fisheries Oceanography, 30(1). 38-50.

a-3. 漁業技術

【現状】

漁業者の高齢化や漁業就業者数の減少が進んでいることから、漁業の省力化や効率化は喫緊の課題である。また、IUU (Illegal、Unreported、Unregulated；違法・無報告・無規制) 漁業や、漁獲対象以外の生物種まで一網打尽に採捕する漁法などは、海洋の生物多様性を低下させる大きな要因とみなされており、国際漁業管理機関や環境保護団体等から漁具・漁法の改善が求められている。これらの国内・国際情勢への適切な対応は、我が国の漁業を存続させていく上で大きな課題であることから、漁船や漁具・漁法などの漁業技術の改善が進められている。例えば、沿岸・沖合漁業においては漁場予測システム、魚群探知・データ転送システム、漁具の動きの可視化、漁労用スマートスーツの開発、自動カツオ釣り機などのロボットの導入などが進められ、定置網漁業においては入網把握システム、魚種選別システム、自動網掃除ロボット、急潮予測システムの開発などが行われている¹⁾。また、混獲防止のため、マグロ延縄漁業における海鳥の混獲を防止する改良漁具の開発²⁾や底曳網では、小さなサイズや漁獲が禁止されている生物種などの混獲を回避するための二段式改良網の開発³⁾などが行われている。

【今後の研究開発の方向性】

漁業の省力化や効率化は、漁業者の減少・高齢化への対応のために必須である。他の分野において自動化や無人化、カーボンニュートラル化が進められているが、これら他分野で開発された技術を漁業にあった形で適用していくことが重要である。また、漁船漁業や定置網漁業の効率化のため、海況・漁場予測モデルのさらなる高度化、漁具および入網魚可視化、魚種選別システムの高速化・正確性の向上等の技術開発と検証、魚群の行動解析と誘導技術の開発、自動釣り機等のロボットの高度化などが必要である。

また、国際情勢を常に意識して対応を図ることが漁業の持続性の維持のために求められている。特に国際的な環境意識の高まりに留意する必要がある。こ

のため、混獲魚種等の行動特性を詳細に把握するための調査研究や混獲防止技術の高度化のための技術開発を進めることが重要である。

- 1) 水産庁「水産新技術の現場実装推進プログラム」
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/dai26/siryoushi.pdf>
- 2) 清田雅史・横田耕介「マグロ延縄漁業における混獲回避技術」2010、Nippon Suisan Gakkaishi, 76(3), 348-361
- 3) 京都府農林水産技術センター海洋センター「底曳網漁業の混獲削減に向けた技術開発」平成 25 年 10 月 季報第 106 号、1-12

a-4. 国際管理

【現状】

マグロ・カツオ類、サケ・マス類、サンマなどの高度回遊性資源については我が国周辺から外国水域や公海域に広く分布・回遊する。このため、関係国が協力してこれら資源の管理を行うための国際機関を設けているほか、2 国間での協議も行われている。関係国は、水産資源管理が科学的根拠に基づいて行われるよう、対象資源の調査や偶発的に混獲される海鳥や海亀などの調査を継続して実施しており、これらの調査結果をもとに関係国間で協議、交渉して適切な管理方法が検討されている。

【今後の研究開発の方向性】

科学的根拠に基づく適切な資源評価による国際合意が行われるよう、今後とも継続して調査・分析を行うことが極めて重要である。このためにも、国際資源についても生態系モデルの活用や調査方法・時期の改善、評価技術の向上などによる、国際交渉に耐え得る、より迅速で確かなカウンター研究が必要である。

b. 沿岸管理 (nature-based solution (NbS ; 自然を基盤とした解決策) による沿岸域の生態系保全と生物生産基盤の再構築)

前述の日本学術会議の提言において、沿岸資源に関しては沿岸生態系の保全と回復の重要性が取り上げられている。

沿岸域は海域と陸域が隣接しており、海洋の中で最も生産力が高い生態系であるとともに、自然、社会、経済システムの相互作用が顕著であることから、人間活動に起因する種々の物理・化学的要因により急速に疲弊し、漁業資源も減少しており、水産業にとっての生物生産基盤の崩壊が進みがちである。このため、沿岸生態系の修復を図り、持続的な沿岸漁業が可能な生態系を復元、さらには新たに創造して、生物生産基盤の再構築を行うことが急務である。そのためには、沿岸域の栄養塩循環の状態など、生態系機能を正しく評価するとともに、沿岸域の生態系への負荷が比較的小さいと考えられる無給餌養殖や沿岸生態系の保全と回

復技術等についての基盤的研究や、地域社会との関係に関する社会経済学的研究が重要である。

b-1. 沿岸生態系の保全・創造

【現状】

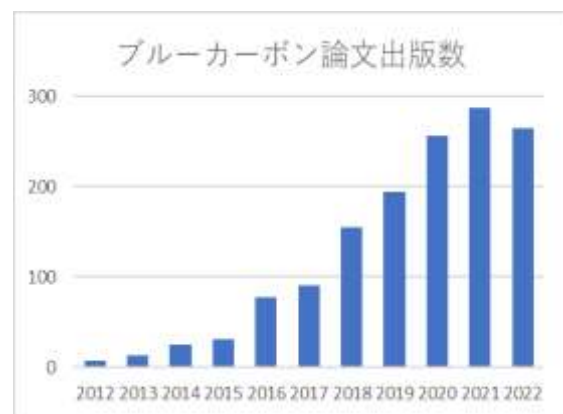
多様な機能を有する沿岸生態系は、近年、温暖化等の環境変化や人為的な環境改変の影響による劣化が懸念されており、種々の要因による藻場の衰退（磯焼け）や貧栄養化などが進み、それらに伴う、ウニ、アワビ等のいわゆる磯根資源の減少も報告されている。しかし、沿岸環境や磯根資源に関するデータは地域限定的なものに留まっており、全国的な集約はなされていない。



<https://www.taiyoko-kakaku.jp/archives/10295.html>

図Ⅱ-1-5 ブルーカーボン生態系

他方、沿岸域のブルーカーボン[※]生態系は二酸化炭素（CO₂）を吸収・固定することで、最近特に注目されており（図Ⅱ-1-5）、「blue carbon」¹⁾を用語として使っている論文は2010年までは少ないが、近年、特に2016年以降急激に増加している（図Ⅱ-1-6）。また、海外では、2015年12月に第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）でパリ協定が採択され、さらに、2017年6月の国連海洋会議（UNOC）において、マングローブ、潮汐湿地等のブルーカーボン生態系や関係生態系を保護していくことが国連加盟193か国による全会一致で合意されている。日本では、2017年2月に「ブルーカーボン研究会」が設立され、その検討・研究によりブルーカーボンの有用性が認められ、2020年7月には、国土交通省の認可法人として「ジャパンプルーエコノミー（JBE）技術研究組合」が設立され、科学技術的な根拠、数値、経済価値などの調査研究が進められている。



図Ⅱ-1-6 ブルーカーボンに関する論文数
 (Web of Scienceにおいて“blue carbon”で検索
 2022年は10/17まで)

日本では、2017年2月に「ブルーカーボン研究会」が設立され、その検討・研究によりブルーカーボンの有用性が認められ、2020年7月には、国土交通省の認可法人として「ジャパンプルーエコノミー（JBE）技術研究組合」が設立され、科学技術的な根拠、数値、経済価値などの調査研究が進められている。

また、大型プロジェクト研究としては、藻場の再生・拡大に関する研究プロジェクトが農林水産技術会議予算で2022年度に始まり、GI（グリーンイノベーション）基金でも2023年度から開始予定となっている。さらに、ブルーカーボンのバイオマスとしての活用に関する研究がNEDOのムーンショット予算で開

始され、JST 予算においても 2023 年度から藻場の CO₂ 貯留源としての科学的検証研究が開始されている。また、海外でも大型海藻養殖に関する研究が進められている。

さらに、沿岸域の活用に向け、環境負荷が小さいと期待される無給餌養殖（海藻養殖や二枚貝養殖）や、魚類養殖と無給餌養殖を組み合わせた多栄養段階統合養殖（Integrated Multi-Trophic Aquaculture: IMTA）などが注目されており、東南アジアを中心に IMTA が実践されている。日本においては、ノリやワカメなどの海藻養殖やホタテやカキなどの二枚貝養殖は古くから盛んに行われてきたが、これらと魚類養殖を組み合わせた複合養殖に関しては過去に実験的研究が行われたが、商業レベルでの実施には至っていない。

※) ブルーカーボン (blue carbon) とは海域で吸収・貯留される炭素のことで、2009 年に国連環境計画 (UNEP) によって定義された。

【今後の研究開発の方向性】

磯根資源の増強を考えるためには、まず沿岸環境データと磯根資源のデータを収集し、ローカルな環境・資源データを統合して全体像を把握することが重要である。

ブルーカーボンに関しては、現在、藻場の CO₂ 貯留源としての科学的検証やバイオマスとしての活用の可能性等の基礎研究や、藻場の再生・拡大に関する大型プロジェクトが展開されているが、沿岸域の栄養塩循環に関する知見は限られている。このため、海藻養殖と藻場造成などの沿岸生態系の再生活動が、栄養塩をめぐって競合しないよう、栄養塩循環に関するデータ収集と漁業・養殖業への正負の影響の把握、沿岸域の環境収容力算定、海洋肥沃化のための栄養塩の添加等のに関する研究や技術開発が重要なテーマとして早急に求められると考えられる。

また、沿岸域では、洋上風力発電など再生可能エネルギー施設の建設が数多く計画されており、その漁礁・人工藻場としての活用等も提案されているが、それらの漁業・養殖業や生態系への影響については十分解明されていないため、洋上風力発電施設の生態系への影響把握、漁業・養殖業生産の増大に資する技術・研究開発が必要である。

さらに、海洋酸性化など沿岸環境の変化に関する具体的な情報も不足していることから、海洋酸性化対策研究として水産資源の生産力向上も見込めるアルカリ化研究や海洋肥沃化等に関する基礎研究が重要である。科学的根拠を持った対策を講じるため、我が国としての知見を集積することが必要である。

1) Nellemann, C., et al.: Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. 2009. United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland

b-2. 地域振興

【現状】

我が国では人口減少や高齢化により、沿岸地域の過疎化・衰退が急激に進行している状況が顕著にみられる。

沿岸地域（浜）は、地域（津々浦々）により社会的条件も、取り巻く陸・海の生態系も様々であり、地域の振興を図るための万能の解決策は存在しない。このため、コミュニティ・レジリエンスを強化するための施策の組み合わせを検討し、地域としての意思決定を科学的に支援する仕組みである「浜の工具箱」^{*)}を活用する取り組みが進められている。

また、ブルーカーボンの取り組みを持続的に社会実装する仕組みとして、ジャパンブルーエコノミー技術研究組合（JBE）により、カーボンクレジットを活用して企業からの資金を還流する「J ブルークレジット」に関する社会実験が進められている。

^{*)} 浜の工具箱とは、日本各地のさまざまな沿岸漁業に対して、「地域が直面している課題は何か」、「どのような工夫ができるのか」、「どんな効果が期待できるのか」、「具体事例はどこにあるのか」を検討・整理するための仕組み。

【今後の研究開発の方向性】

漁業は重労働で安定した収入を得られないというイメージを転換し、漁業に関連した仕事を生業とする者を増やし、地域漁業の振興につなげていくことが重要である。このためにも、デジタル技術分野と連携し、漁業の自動化・省力化に向けた研究を推進することが必要である。

併せて、地域の漁業者や地域コミュニティ、地域自治体などの関係者で協働し、これら関係者で実施できる漁業効率化、水産物販売、藻場造成、放流事業などの成功事例を作る（道具をそろえる）ことが重要であると考えられる。

また、沿岸域の利用には、漁業者だけでなく多様な利害関係者が関与しており、効果的に管理するためには、水産業や環境の側面からのみならず、浜ごとで違う地域のデータや地域間比較などを通じた、海と人の関係の一般理論化も重要なテーマであり、経済学や心理学、社会科学研究なども取り入れた学際的研究が必要であると考えられる。例えば、沿岸生態系の活用方法を評価する「グリーン（ブルー）ツーリズム研究」など、利害関係者に well-being^{*)} を与える研究は漁村地域の振興策の一つとして意義があると考えられる。

なお、地域での藻場造成などの取り組み事例は非常に多いが、事業報告書やメディアへのリリースなどで終わっている例が多く、科学的に事業の結果を検証した研究が少ないのが現状である。事業に関わった研究者は成果を世界に公

表していくことが重要である。

※)個人の権利や自己実現が保障され、身体的、精神的、社会的に良好な状態にあることを意味する概念（厚生労働省）

c. 環境把握（モニタリング）のための基礎・基盤技術

【現状】

生態系アプローチの基盤は水域の物理・化学・生物学的環境の精密で正確な把握にある。我が国では、100年以上にわたるモニタリングにより海洋環境と生物資源のデータ蓄積があり、その継続が生物資源の変動予測を行うための基盤として重要である。近年では、環境を測定するセンシング技術、環境及び漁業データを扱うIoTを活用したデジタル技術、それらの情報を統合し人工知能（AI）を使って解析する技術などが急速に進歩しているが、一方で、令和3年4月から6月に開催された水産庁の「不漁問題に関する検討会」においては、対象とされた漁業種すべてが気候変動の影響を受けているが、今後の気候変動の影響は過去とは違ったものになるかもしれないとの懸念が示された¹⁾。

スルメイカや多獲性浮魚類においては、海洋と魚類双方の長年の多角的モニタリングデータにより、生態系ベースのモデル構築と将来予測を行った事例があり（技術会議の温暖化プロジェクト研究）、環境変動が対象魚の生残・成長に与える影響を、そのメカニズムを含めて理解されてきている。一方、回遊性高次捕食者や底魚類については、生態系ベースのアプローチを適用するにはデータが不足しており、特に磯根資源については地域的なデータはあるものの全国的には十分ではない現状にある²⁾。

ビッグデータの活用に関しては、海洋と資源に関するデータを収集・統合し再帰型機械学習による資源や生態系の未来予測は進みつつある。

（「1. (1) a-1 生態系・漁業情報の収集と統合」、「1. (1) a-2 生態系アプローチ型資源管理に向けた生態系モデリング、資源変動モデルの構築」の項を参照。）

【今後の研究開発の方向性】

気候変動の影響を予測するためには、沿岸資源や底魚資源、国際資源など十分に予測モデルの構築が進んでいない資源の生態系モデルの構築に必要な「観測事項」を明確化し、戦略的な観測を行ってモデル構築に必要なピースを埋める調査研究を行うとともに、これらモデルを活用し、資源変動のメカニズムを把握して気候変動による影響を予測するための研究を進めることが必要である。また、観測には時間と労力が必要なため、観測の自動化技術、船舶搭載型モニタリングシステム、高精度センサー、自動観測ブイの開発研究等が重要である。

一方、気候変動の安定化指標と同様にプラネタリーバウンダリーの各項目に

についてのティッピングポイント（転換点）を予測する技術が求められている³⁾ことから、海洋観測、海洋生態系研究、人口や産業などの人間社会にかかる統計等をデータ統合しサイバー空間において安定性解析などを行う、デジタルツインによるフィードバックシステムの開発を進めることが期待される。

また、水生生物のマルチオミクス解析（DNA 解析、RNA 解析、蛋白・ペプチド解析、代謝産物解析）から対象生物が経験した環境の推測や生物の生理状態の把握が可能であり、重要な研究要素になると考えられる。

- 1) 不漁問題に関する検討会「不漁問題に関する検討会とりまとめ～中長期的なリスクに対して漁業を持続するための 今後の施策の方向性について～」令和 3 年 6 月
- 2) Ito, K., Xu, X. and Kikuchi, J. Improved Prediction of Carbonless NMR Spectra by the Machine Learning of Theoretical and Fragment Descriptors for Environmental Mixture Analysis. 2021. *Anal. Chem.* 93, 6901-6906.
- 3) 気候変動対策推進のための有識者会議報告書. 令和 3 年 10 月
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kikouhendoutaisaku/pdf/houkokusyo.pdf>

(2) 水産養殖

我が国の養殖生産量は 1988 年をピーク（143 万トン）として 2003 年頃まで概ね 130 万トン～140 万トンで推移した後に緩やかに減少し、2018 年には 103 万トンとなっている。漁船漁業（漁獲）による生産量が減少した結果、2000 年以降生産量全体に占める養殖生産量の割合は 2 割弱で推移している。（養殖業成長産業化総合戦略 2021 年）

内水面養殖の生産量は 1980 年代以降減少し、近年下げ止まり、概ね横ばいで推移し、2021 年は養殖生産量全体（海面＋内水面）の 3.4%に相当する（内水面養殖収穫量の約 6 割はウナギ養殖）。（令和 3 年 漁業・養殖業生産統計）

水産物の国内需要は人口減少・高齢化社会の中で長期的に減少が見込まれ、国内需要のみでは我が国の養殖生産量は漸減を辿ることになる。我が国の水産物の消費動向を見ても多くの品目で軒並み減少傾向にあるが、マグロ、サケ、ブリの消費量は維持もしくは増加している。また、水産物輸入量は長年の減少傾向からここ数年 200 万トン以上の水準で横ばい傾向にあり、サケ・マス類、マグロ・カジキ類、エビが上位を占めている。（令和 2 年財務省「貿易統計」）

他方、農林水産省からは、農林水産物・食品の輸出拡大実行戦略（令和 4 年 12 月改訂）において、2025 年輸出目標 1,867 億円（ブリ 542 億円、タイ 193 億円、ホタテ貝 656 億円、真珠 379 億円、錦鯉 97 億円）、対 2019 年実績 70%増の養殖事業拡大の方針が打ち出され、養殖業は国内需要を対象とする生産からの転機を迎えている。また、生態系および海洋資源のレジリエンスの面から、世界的潮流である養殖生産の拡大を図っていくことが望まれる。さらに、ロシアのウクライナ侵攻に起因する世界的な流通の混乱やエネルギーコストの増加の影響、地球温暖化や世界人口の増加による食料危機などが想定されるなか、養殖に関する取り

組みを強化することが重要と考えられる。

a. 遺伝的改良による育種

養殖対象種の遺伝的改良（育種）は、養殖の生産効率を高め、環境負荷を軽減し、環境変化に適応するための重要な手段である。水産資源の保全と養殖の拡大を両立させる技術として注目される完全養殖の実用化のためにも、人工種苗を対象とした育種は欠かせない。一般に育種には長期間を要するため、生産効率の向上に加えて、気候変動への対応や消費動向なども考慮した目標の設定や、ゲノム情報を用いた新たな育種技術やゲノム編集技術の利用も視野に入れて、育種研究の基盤強化を図る必要がある。

a-1. 育種目標

【現状】

水産育種の目標としては、飼養管理上の特性の改良、環境適応性の改良、経済的特性の改良、耐病性の改良などがあげられる¹⁾。これらの中には、高成長性や耐病性のように、長年にわたって精力的に改良に取り組まれてきた目標（形質）もあれば、近年の温暖化等の環境変化に伴って重要性が増している目標も含まれる。近年の品種改良の代表例としては、ノルウェーによる大西洋サケの高成長性、耐病性、品質（肉の赤味・脂質の入り）の改良があげられ、その成功を受けて、他のサケ類、ティラピア、エビ類、海産魚などへの展開が進みつつある。日本では、マダイで近畿大学、ブリではニッスイが高成長性、ヒラメでは東京海洋大学が耐病性（リンホシスチス病）の改良に成功している。また、トラフグでは長崎県・東京大学がゲノム予測により高成長性・早熟性・耐病性の改良に取り組んでいるほか、水産研究・教育機構がブリ等でゲノム予測による改良に着手している。さらに、リージョナルフィッシュ（株）は、ゲノム編集により、筋肉の発達を抑えるミオスタチンの遺伝子を働かなくすることで可食部が増加した「肉厚マダイ」²⁾や、食欲を抑えるホルモンのレプチンを働かなくした「高成長トラフグ」を開発している。

養殖業成長産業化総合戦略³⁾および同行動計画⁴⁾には、育種等種苗改良の推進に関わる研究開発課題として、高成長性、低魚粉配合飼料で成長が良い、耐病性、高温耐性、貧栄養耐性の各系統の選抜のほか、国内外の市場においてニーズが高い魚種（市場ニーズに合った付加価値の高い系統）等の新規開発があげられている。一方、農林水産省による食料の安定供給に関するリスク分析においては、労働力不足とともに、温暖化が魚介類、海藻類の生産や漁場環境に大きな影響を及ぼす重要なリスクであると評価されている⁵⁾。

【今後の研究開発の方向性】

高成長性（体型を含む）および耐病性は対象種を問わず重要性が高い形質で

あり、これまでの技術的な蓄積を活用して、引き続き重点的に改良を進めるとともに、温暖化リスクに対処するため、環境変動に対する頑強性の付与に取り組むことが重要である。

国内外の市場ニーズが高い魚種等の新規開発については、輸出の強化もまた国内養殖業の強靱化への一つの道筋であることから、ノルウェーの大西洋サケ（アトランティックサーモン）に匹敵するような「日本のアトラン」をつくるという高い目標をもって、戦略的に対象種を選定し、改良を進めることが重要である。多様な魚種から候補種を選ぶこと自体が重要な研究課題であり、市場調査や社会科学分野の専門家を交えた検討が求められる。一方で、日本の水産業の特徴である魚種の多様性を活かすためには、多様な魚種の育種を小規模であっても継続することが重要であり、そのような育種を効率化するための研究が必要である。

また、食料安全保障の観点から、将来の国内向けタンパク源としての淡水魚についても、魚種を絞って増産に向けた改良を行うことが重要である。

a-2. ゲノム情報を利用した育種を効率的に進めるための技術開発

【現状】

次世代シーケンサーの登場により、水産育種でもゲノム情報の取得が進み、ゲノム情報を利用した育種研究や、開発された技術の実際の育種への応用が開始されている。欧州の養殖先進国では、従来型の個体選抜から、畜産育種に用いられている最良線形不偏予測法（BLUP法）を経て、現在はそのゲノム版であるゲノム予測に基づく選抜に移行しつつある⁶⁾。これに対して、日本では近大マダイに代表される従来型の個体選抜から、マーカーアシスト選抜へと向かう一方で、ゲノム編集では世界で唯一、開発された魚の食品としての販売が開始されている。BLUP法やゲノム予測では、個体のもつゲノム全体と環境に着目し、多数の個体（集団）を扱うのに対して、マーカーアシスト選抜やゲノム編集では、特定の遺伝子に着目し、少数個体（少数の家系）を取り扱う点に特徴がある。

日本の水産育種は、海産魚養殖の実績が豊富なこと、種苗生産や生殖操作で先端的な技術をもっていることなどが特長である。一方、課題としては、BLUP法やゲノム予測で必要となるデータサイエンス分野の人材不足や、集団（多数の家系）の作出に必要な施設が整っていない点があげられる。

魚類の育種においては、家畜に比べて世代時間が長いことが育種の加速化に向けたボトルネックとなっている。また、生簀内における個体の重要な表現型の計測の多くを人手に頼っている点も、育種の効率化を妨げる要因となっている。さらに、育種推進上の課題として品種の保存管理があげられ、穀物ではシードバンク、畜産では卵や精子の凍結保存が行われているのに対し、魚類では飼育を継続することで系統を残すため、感染症や天災（台風など）で系統が失

われるリスクがある。また、品種育成者の権利保護も重要な課題であり、水産庁により優良系統の保護等に関するガイドライン⁷⁾が公表されたことを受けて、品種や育種素材の海外への流出を防止するための制度の確立や、そのための技術開発が必要である。

【今後の研究開発の方向性】

養殖規模の大きな魚種を対象としてゲノム予測法による選抜育種を導入するとともに、それ以外の多様な魚種の育種を効率的に継続するために、小規模な BLUP 法などのゲノム情報を利用した育種の導入に向けた研究を進める必要がある。

また、生簀内で個体の重要な表現型を自動計測する技術（フェノタイピング）は、育種の効率化に直結するため、各種のセンシングや画像処理、深層学習等を用いた高速フェノタイピング技術の開発が重要である⁸⁾。

未熟な生殖細胞（始原生殖細胞や精原細胞・卵原細胞）を仔魚（オス、メス）から単離し、別の魚（代理親）に移植して、目的とする生殖細胞を作出する技術が、様々な魚種で構築されつつある⁹⁾。この技術を利用することで、世代時間の短縮や品種の永久保存・流出防止が実現できる可能性がある。

遺伝資源の維持には、作出した品種・系統の保存とともに、野生の魚を育種素材として保存することも必要であり、代理親の利用を含めて、遺伝資源の保存のための技術開発を進めることが重要である。

さらに、品種育成者の権利保護強化のため、不妊化技術等の品種の流出防止技術の開発とその汎用化（多魚種への適用）や、将来的な法制度設計に向けたデータ収集などを進めることも必要である。

a-3. ゲノム編集

【現状】

FAO による「ゲノム編集とアグリフードシステム」¹⁰⁾には、魚類へのゲノム編集の適用例として、リージョナルフィッシュ（株）が開発した「肉厚マダイ」と「高成長トラフグ」が紹介されている。この2例は、農産物を含めても、これまでに上市された数少ないゲノム編集食品であり、魚類のゲノム編集において日本が突出した状況にあることを端的に示している。

水産育種にゲノム編集を適用する場合の利点としては、初期投資が少なく済むこと、不妊化系統を作出できる可能性が大きいこと、日本では世界に先駆けて食品として届出された実績があることなどがあげられる。一方、課題としては、ターゲット遺伝子が少なく、その開発に長期間を要すること、単一遺伝子をターゲットとするゲノム編集では改良を継続できないこと、近交弱性が出やすいと考えられること、当面は陸上の閉鎖養殖での利用に限られることなどがあげられる。

【今後の研究開発の方向性】

ゲノム編集のターゲットとなる遺伝子の探索をさらに進めるとともに、ゲノム編集を利用した不妊化系統の作出や、ゲノム予測による選抜育種で目的とする形質を改良した後で、さらに改良を加えるためにゲノム編集を利用する研究が期待される。

さらに、水産分野のゲノム編集に関する世界的な動向や国民理解の調査・分析など、ゲノム編集水産物の理解促進に向けた研究も重要である。作物育種分野では、内閣府 SIP 事業で類似の研究やウェブサイトによる情報発信¹¹⁾、中学高校向けの教材開発などを実施しており、これと連携した取組が望まれる。

- 1) 独立行政法人水産総合研究センター, 2013. 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－.
http://www.fra.affrc.go.jp/publications/manuals/Strategy_of_breeding_research.pdf
- 2) Kato, K., 2023. Breeding studies on red sea bream *Pagrus major*: mass selection to genome editing. *Fisheries Science*, 89, 103-119.
- 3) 水産庁, 2021. 養殖業成長産業化総合戦略 (2021年7月改訂).
https://www.jfa.maff.go.jp/j/saibai/yousyoku/seityou_senryaku.html
- 4) 養殖業成長産業化推進協議会, 2022. 養殖業成長産業化行動計画.
https://www.jfa.maff.go.jp/j/saibai/yousyoku/seityou_19.html
- 5) 農林水産省, 2022. 食料の安定供給に関するリスク検証 (2022).
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/ampo/risk_2022.html
- 6) 細谷将・菊池潔, 2016. これからの水産育種: ゲノム予測による新たな育種の取り組み. *水産育種*, 46, 1-14.
- 7) 水産庁, 2023. 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.
<https://www.jfa.maff.go.jp/j/saibai/yousyoku/attach/pdf/yyuuryou-61.pdf>
- 8) Fu, G. and Yuna, Y., 2022. Phenotyping and phenomics in aquaculture breeding. *Aquaculture and Fisheries*, 7, 140-146. doi.org/10.1016/j.aaf.2021.07.001
- 9) Yoshizaki, G. and Yazawa, R., 2019. Application of surrogate broodstock technology in aquaculture. *Fisheries Science*, 85, pages 429-437.
- 10) FAO, 2022. Gene editing and agrifood systems. Rome.
<https://doi.org/10.4060/cc3579en>
- 11) 最新育種ネットワーク (代表機関: 農研機構), バイオステーション,
<https://bio-sta.jp/>

b. 養殖飼料と給餌技術

養殖対象魚類の大半は肉食性であることから魚類養殖を始めとする給餌養殖にとり飼料と給餌は大きな課題である。養殖事業支出の6~7割を餌代が占め、天然魚類資源を原料とする魚粉と魚油を輸入に大きく依存することに起因する輸入数量の不安定さ、近年では価格高騰に加えて、給餌残渣による環境への影響などの問題を抱えている。さらに、養殖業に欠かせない種苗生産においても仔魚用餌料の確保は今後の養殖生産の拡大にとり重要課題となる。

給餌方法については、養殖事業者の作業軽減や適切な量とタイミングでの給餌による育種の効率化とともに、給餌残渣の削減が目指されている。

b-1. 成魚飼育用餌料

【現状】

植物性原料への代替を推進する上での問題・課題としては、①特に肉食性海産魚における必須栄養素の不足や摂餌性の著しい低下、②栄養素や摂餌誘引物質の添加、酵素処理などのコスト増大に伴う持続可能性の低下を招く可能性、③陸地資源への負荷増大や家畜用飼料との争奪激化等が挙げられる。

低・無魚粉飼料を開発する上での課題としては、①魚粉・魚油代替原料の価格高騰(濃縮大豆タンパク質等)、②利用可能な動物性飼料原料の減少(BSE 発生後)、③合成ヒスチジンの添加が認可されていないこと、④摂餌誘引物質の価格高騰、⑤高品質の南米産魚粉の入手可能量の変動(アジミール, アンチョビミール)が挙げられる。

【今後の研究開発の方向性】

魚粉・魚油への依存を引き下げる課題に対しては、養魚飼料原料として持続可能な資源の選択肢拡大^{1) 2) 3) 4)}、および栄養代謝機構⁵⁾の解明とこれに基づく飼料設計⁶⁾に関する技術開発が重要となる。

良い養魚飼料の特性としては、①摂餌が活発である、②生残率が高い、③成長が早い、④効率が良い(増肉係数が低い)、⑤価格が安い(増肉単価が低い)、⑥環境負荷が少ない、⑦安全・安心であることが挙げられる。

養魚飼料の低魚粉化を指向した研究が進められているが、人の食料・畜産飼料・バイオエネルギー原料との競合が生じることから、これからの養殖飼料として究極的に望まれる特性は、①陸上の飼料原料を使用しない、②水圏由来の飼料原料を使用する、③地球温暖化問題に対抗可能、④環境負荷の少ない、⑤健康な魚を生産する、⑥魚の味を調整する、⑦養殖加工残滓を利用する、⑧流通・販売負荷に耐える魚の育種が可能なこと等となる。

- 1) 佐藤秀一(福井県立大学 海洋生物資源学部 教授), 植物性飼料原料の栄養価改善に及ぼすエクストルージョン温度条件の影響. 2020年, 日本水産学会大会講演要旨集
- 2) 奥村卓二(水研機構 水産技術研究所養殖部門生理機能部 部長) 他, 地球規模の食料問題の解決と人類の宇宙進出に向けた昆虫が支える循環型食料生産システムの開発のサブプロジェクト3: 由来水産・畜産飼料開発. ムーンショット型農林水産研究開発事業(令和2年から実施中)
- 3) 研究開発代表者: 佐藤 秀一(福井県立大学 海洋生物資源学部 教授), 将来の動物性たんぱく質供給を支える次世代養魚飼料の開発. 未来社会創造事業 令和3年度研究開発終了報告(令和元年~令和4年)
- 4) 水産研究・教育機構(旧増養殖研究所), 水素細菌を原料とする純国産養魚飼料開発. 令和2年度養殖業成長産業化技術開発事業 報告書(令和3年3月)
- 5) 研究代表者 村下幸司(水産研究・教育機構, 水研機構(南勢), 主任研究員), 魚類腸管における栄養素認知とその消化誘導機構の解明: 栄養素認知に関わる遺伝子欠損魚の性状解析. 2018-2022: 科研費
- 6) 小川順(京大院農・応用生命), 有田誠(慶大薬・理研), 畑中晃昌(日本水産), 他, 資源循環型養殖餌料の開発. 未来社会創造事業(平成31年度~令和2年度)

b-2. 仔魚飼育用餌料

【現状】

仔魚の消化管は単純な管状構造であり、成魚のような強力な消化能力はないため、仔魚は配合飼料をほとんど消化できず、摂餌さえ困難を伴う場合がある。このため、仔魚用配合飼料の開発には稚魚以降と全く異なる知見や飼料成形技術が必要になる。なお、稚魚は魚粉などを主原料とする配合飼料をある程度消化可能である。また、ウナギの例に見られたように、仔魚用飼料の開発に困難が伴う魚類が存在する。

これらの特徴を持つ仔魚の飼育に用いられる餌料には次のような問題・課題が存在する。

- ・ 養殖生産を拡大する上で、ワムシやアルテミア等の餌料系列で種苗生産を行えない場合に、新規の餌料生物を用いた餌料系列の導入が必要となる。背景として、ワムシの次の餌料生物として用いられるアルテミアは天然資源で100%輸入、また海産魚類の必須脂肪酸であるドコサヘキサエン酸（DHA）やエイコサペンタエン酸（EPA）などの高度不飽和脂肪酸の含量が低いことがある。
- ・ 種苗生産の根幹であるワムシの量産技術の開発が推進されてきたとはいえ、養殖場では毎年数回の培養不調が発生している。
- ・ 餌料生物の培養や購入に要するコストは配合飼料の購入費用に比べて低いものの、さらなる低コスト化の余地が残されている。
- ・ 餌料生物のワムシやアルテミアを生きたカプセルとみなしてDHAなどの栄養を強化する研究が進んできたが、さらなる高付加価値化を目指した研究の余地が残されている。

【今後の研究開発の方向性】

養殖生産の拡大に対応できるよう、新規餌料系列の導入に向け、大型ワムシの育種^{1) 2)}や、カイアシ類、アミ類等の量産技術の開発に加えて、実用性の高い微粒子飼料の開発のための研究が望まれる。

ワムシは仔魚用飼料としての研究³⁾が進んでいるが、その安定供給に向けて、ワムシの機能性向上、優良株の育種、保存技術の開発が求められる。

また、低コスト化に向け、AI・IT・ロボット等を活用して培養と給餌の自動化や培養状況をモニタリングする技術の研究開発が期待される。

さらに、餌料生物の高付加価値化に向け、仔魚の摂餌や健康を増進させる取り組みが重要であり、腸管免疫の発達促進に関する研究が一つの方向性となる。具体的なテーマとしては、プロバイオティクスやプレバイオティクスの投与による養殖対象種の健康増進、腸管が発達する仔魚から稚魚の腸管免疫系の発達促進、ワムシの健康度と活力の向上による捕食者の摂餌促進が挙げられる。

- 1) 推進リーダー：虫明敬一（平成 28～29 年度）、玄浩一郎（平成 30 年度）、水産庁委託事業「クロマグロ養殖用の高機能、高効率餌料の技術開発事業」
- 2) Kazuhide Tsuneizumi, Mieko Yamada, Hee-Jin Kim, Hiroyuki Ichida, Katsunori Ichinose, Yoshitaka Sakakura, Koushirou Suga, Atsushi Hagiwara, Miki Kawata, Takashi Katayama, Nobuhiro Tezuka, Takanori Kobayashi, Masahiko Koiso, Tomoko Abe, "Application of heavy-ion-beam irradiation to breeding large rotifer", *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2021, 10.1093/bbb/zbaa094
- 3) 萩原篤志（長崎大学 水産学部 特定教授）、海産ワムシ類の遊泳行動制御と仔魚用餌料としての性能評価．科研費（2020 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日）

b-3. 大量生産技術

【現状】

「みどりの食料システム戦略」で示された「養魚飼料の全量を環境負荷が少なく給餌効率の良い配合飼料給餌への転換」を実現し、養殖生産の拡大を図るためには、魚粉・魚油代替飼料原料の大量生産が必須である。

昆虫の飼育は大学やベンチャー企業¹⁾、あるいは既存企業による新規事業としての取り組みが行われているが、日本においては未だ大規模生産の成功事例が出現していない状況である。

【今後の研究開発の方向性】

昆虫、ゴカイ、ヨコエビ、藻類、単細胞・タンパク質等代替飼料原料の量産化技術と事業化に向けた研究に加えて、事業主体となる企業育成を促進することが重要である。

1) 株式会社 Buzcycle（バズサイクル、大分県中津市、2020 年 9 月 25 日設立）主要事業：ミルワーム繁殖

b-4. 給餌技術

【現状】

成魚の給餌には、餌の量やタイミングが育成に大きく影響すること、過剰な餌やりや食べ残しがコスト増と海洋汚染の原因になるといった問題がある。

直近では、作業軽減を目的とした AI や自動給餌技術を組み合わせた取り組みが進められ、民間企業により海面養殖用¹⁾と陸上養殖用²⁾の自動給餌システムが開発・実用化されている。

【今後の研究開発の方向性】

海面養殖用や陸上養殖用に限らず、自動給餌技術の高度化は作業省力化と魚の育成の両面において重要課題であることから、養殖事業者の高齢化や就労者の減少の予測を踏まえ、AI や ICT, IoT 技術を用いて給餌作業の機械化・効率化（省力化）を一層進めて完全自動化を目指す。

沖合養殖システムにおいては、浮沈式生簀における AI を用いた養殖魚観察

と連動した完全自動給餌技術、および沿岸から離れた沖合において給餌を行うために必要となる自動化・省エネルギー化に関する技術開発が重要である³⁾。

- 1) AI 等を用いた魚の食欲に合わせた給餌. 株式会社ニッスイホームページ
- 2) AI 技術を活用した陸上養殖向けスマート給餌機の開発. ウミトロン株式会社
プレスリリース (2022 年 4 月 6 日)
- 3) 征矢野清 (長崎大学 海洋未来イノベーション機構 教授/機構長), 水産の将来を考える
次世代養殖戦略会議の設立. 養殖ビジネス 2020 年 12 月号 p.44-48, 2021 年 1 月号
p. 65-68

c. バイオセキュリティと疾病管理

養殖水産動物の疾病対策は、環境管理、養殖管理、疾病管理で構成されており、諸々の研究の推進と法制度の整備が図られているが、海外からの感染症の侵入や国内での感染症による被害が継続して発生している。水産物貿易のグローバル化が進展する状況において、感染症の出現と拡大を引き起こす可能性が一層高まっており、「バイオセキュリティと疾病管理」は食料安全保障上、重要な事項となっている。

多品種少量生産の特徴を持つ我が国の水産養殖においては、全ての養殖魚種と疾病に対して水産用医薬品、特にワクチンが承認・販売されている状況ではない。また、過去の抗菌性薬剤による治療からワクチンによる予防への転換が図られたものの、適正かつ効率的な水産用医薬品の使用は依然として重要なテーマであり、刻々と変化するバイオセキュリティと疾病管理面の問題を踏まえて、法規制に必要なレギュラトリーサイエンスの推進と科学的知見の集積が求められている。

c-1. 魚類防疫体制・養殖漁場環境保全の充実策

【現状】

我が国の水産防疫については、持続的養殖生産確保法に基づく国内防疫、および水産資源保護法に基づく輸入防疫に基づいて体制が構築されている。2016 年には水産防疫の拡充策として防疫対象疾病の拡大等が図られ、2021 年の養殖業成長産業化総合戦略において魚病対策の方向性が示されるとともに、魚病対策促進協議会において具体策の検討が行われ、魚病対策における獣医師参画の具体化などの充実策がとられたところである。

かかる状況において、沖合養殖システムでは、過去に経験した魚病発生や人工飼料と給餌の課題等を克服して複数の実証試験が行われてきている。沖合養殖の利点とされる養殖生産量を一層大規模化するためには、良好な養殖漁場環境の維持に関する知見の蓄積が重要である。また、閉鎖循環式陸上養殖 (RAS: Recirculating Aquaculture System) については、世界的な取り組み拡大とあいまって、外部環境への影響に関する知見の蓄積が求められるところである。

【今後の研究開発の方向性】

海水面養殖や閉鎖・半閉鎖系システムによる養殖、比較的高密度での飼育に対しては、防疫と疾病対策の観点から、養殖環境の維持に関する研究と知見の蓄積を進め、その成果に基づいた適切な規制基準の設定が望まれる。沖合養殖が進んでいるノルウェーでは、養殖法¹⁾に基づくライセンス制度や、食料生産・食料安全等に関する法律²⁾ および汚染への防護と廃棄物に関する法律³⁾ により、魚類の防疫管理が行われており、我が国の法規制を検討する上での参考になるものと思われる。

また、適切な養殖漁場の環境管理に繋がるレギュラトリーサイエンス研究⁴⁾に加えて、近年、環境 DNA 解析や海洋流体モデルを用いて病原体の拡散予測を行うことが可能になっており、これを用いた研究を進め、魚病流行予測、発症時期予測、投薬タイミングの設定、消毒、生簀の配置変更などの防疫体制を総合的かつ科学的に構築することが期待される。

なお、養殖生産現場対策として、養殖業者に対する魚病の体系的な教育と水産防疫行政のエキスパートの育成も重要となる。

1) ノルウェーの養殖法 (Aquaculture Act 2006 年 1 月発効)

2) ノルウェーの食料生産・食料安全等に関する法律 (Act of 19 December 2003 no.124 relating to food production, food safety, etc.)

3) ノルウェーの汚染への防護と廃棄物に関する法律 (Act of 13 March 1981 no.6 relating to protection against pollution and relating to waste)

4) 代表機関：国立研究開発法人 水産研究・教育機構，研究開発責任者：伊藤 尚史（水産技術研究所 病理部），主要養殖魚の重要疾病のリスク管理技術の開発（小課題 1：病原体が不明な水産動物疾病の診断法と防除法の開発，小課題 2：新たな清浄性管理手法の確立に資する養殖管理技術の開発）．安全な農畜水産物安定供給のための包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業（令和元年度～3 年度）

c-2. ワクチン開発

【現状】

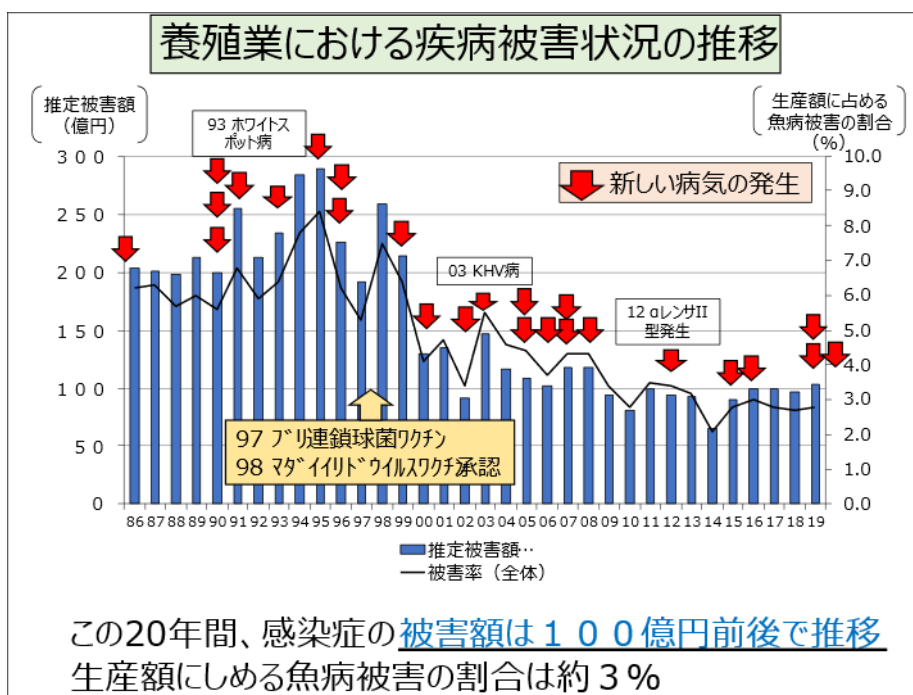
ワクチン開発が望まれている疾病が多数存在¹⁾している一方で、この 10 年余り新規疾病に対する水産用ワクチンの実用化が行われていない。日本で承認されているワクチンは、ホルマリン等を利用した不活化ワクチンのみであり、海外で使用されているものの、日本では開発・承認されておらず、使用の要望が高いものも存在する。

令和 2 年度水産用医薬品要望調査において、ワクチンを含む水産用薬に対する要望が把握された。その中で、ワクチンに関しては、ブリ属のノカルジア症、マダイのエドワジエラ症、淡水ニシン目の伝染性造血器壊死症 [IHN]・冷水病（細菌性冷水病）[BCWD]・ β 溶血性レンサ球菌症、クロマグロの α 溶血性レンサ球菌症・マダイイリドウイルス病・レンサ球菌症などに対する要望が出されている。

【今後の研究開発の方向性】

不活化ワクチンのみでは予防に限界があり、細胞内で増殖するウイルスに対しては、ヒト用よりも早く水産用薬において開発・承認された DNA ワクチンや、ヒト新型コロナ用として技術開発が進んだ RNA ワクチン、アジュバント、および生ワクチンの開発が望まれる²⁾。その基盤強化策としては、産学連携による研究開発が推進される仕組みが重要となる。

他方で、ワクチン開発に時間を要すことを踏まえて、カナダ³⁾を初め欧米で取り入れられているオートジーナスワクチン⁴⁾の仕組みを日本においても構築することはワクチン不在の疾病に対して迅速かつ有力な予防策となり得る。オートジーナスワクチンは、原則として疾病が発生した養魚場から分離した細菌やウイルスを抗原として製薬企業がワクチンを製造し、獣医師の指導の下に使用が許可される仕組みである。被害が大きく緊急に予防対策が必要な魚類疾病に対して迅速に対応できる特徴がある。



図Ⅱ-1-6 釜石隆 水産研究・教育機構 病理部長

2022年度研究開発構想 分科会1資料 (2023年2月6日)

- 1) 令和2年度水産用医薬品要望調査 (農林水産省), p.6, 魚種別、疾病別の医薬品の要望
- 2) 中西照幸 (ゴトー養殖研究所, 副社長), 水産用ワクチンの基礎知識と世界の市販ワクチン. 養殖ビジネス 2021年3月, p.44-52.
- 3) VB-GL-3.13:Guideline for Autogenous Veterinary biologics
[http://www.inspection.gc.ca/animals/veterinary biologics/guidelines-forms/eng/1299160285341/1320704254070](http://www.inspection.gc.ca/animals/veterinary%20biologics/guidelines-forms/eng/1299160285341/1320704254070)
 このサイトの「Guidelines for veterinary biologics」の項
- 4) 中西照幸 (ゴトー養殖研究所, 副社長), オートジーナスワクチンの特徴と海外におけるガイドライン. 養殖ビジネス 2021年4月, p.49-55.

c-3. 安全かつ簡便なワクチン接種法の開発

【現状】

水産用ワクチン接種の多くは養殖場において人海戦術で実施され、専ら一匹ずつの接種であるため、接種に労力と時間を要するとともに魚に負担がかかるという課題がある。

【今後の研究開発の方向性】

連続注射器の改良、経口投与やスプレー接種など注射以外での投与方法の研究を進めて自動接種機を開発し、安全かつ簡便なワクチン接種による接種の効率化や針刺し事故の防止が図られることが期待される。

また、注射ユニットの小型化・ポータブル化により小型船への積載が実現されると、省力化と安全確保に繋がることが期待される。

c-4. 欧米の法制度の研究と行政手続きの柔軟な運用

【現状】

多品種少量生産の特徴を持つ我が国の水産用医薬品に関しては、臨床試験の実施困難性と医薬品企業の収益性の問題から、養殖量が少ない魚種に対する水産用薬、特にワクチンの開発が進まないという問題がある。

他方で、欧米においては Minor Use and Minor Species (略称：MUMS (マムス)。牛・豚・ニワトリなどに比べて生産規模の小さな、羊やアヒルなどの動物を指す。魚類も対象とされている。)の疾病および生産規模の大きな動物 (major animal species) の希少疾病に対する動物用医薬品の開発を法的に促進する制度¹⁾が存在する。

【今後の研究開発の方向性】

この手法は、ヒトのオーファンドラッグ法をモデルに作成されている。希少疾病薬の開発を簡素化する一方で、承認後における安全性と有効性の監視を厳格化することにより医薬品開発を促す制度であり、日本においても同制度の導入の検討が望まれる。

数年前から、動物用医薬品対策事業の希少疾病等用動物用医薬品実用化促進事業において、養殖魚が対象とされ、希少動物又は希少疾病の治療等に用いられる動物用医薬品等の安全性試験及び有効性試験等が支援対象とされている。水産用医薬品の研究開発を促進させるため、同事業のさらなる展開を期待する。

《参考情報》

医療用医薬品においては、海外で承認された薬が日本で開発・承認されるまでの期間が長期となる現象がドラッグ・ラグ問題として取り上げられ

ている。2010年4月に薬価制度として「新薬創出・適応外薬解消等促進加算」が試行的に導入されるとともに、厚生労働省は「医療上の必要性の高い未承認薬・適応外薬検討会議」を設置し、製薬企業による未承認薬・適応外薬の開発促進を図ってきている。

1) The Minor Use and Minor Species Animal Health Act of 2004

c-5. 水産用医薬品の適用外使用の適切な運用

【現状】

多品種少量生産の特徴を持つ我が国の水産養殖においては、全ての養殖魚種と疾病に対して水産用医薬品が承認・販売されておらず、魚種魚病によっては治療薬がない問題がある。

水産用ワクチンについては、原則として魚種ごとに承認される承認制度のため、同じ病原体による魚病であっても別の魚種にワクチンを接種することができない。

【今後の研究開発の方向性】

水産用医薬品や水産用ワクチンが揃っていない問題については、承認済の水産用医薬品やワクチンの他魚種における有効性・安全性データを蓄積し、科学的データに基づいた獣医師による適用外処方の実施を可能とすることが望まれる。具体的には、水産用医薬品については、休薬期間の設定の根拠になる薬剤の残留に関するデータの集積を進め、薬剤代謝データベースとして整えることが期待される。最終的に各魚種と薬剤の組み合わせでデータを揃えると許可外の薬剤などでの休薬期間の設定が可能となる。

また、魚種により水産用ワクチンを用いることができない課題については、承認されている魚種と免疫反応が類似する他の魚種における反応についての科学的データおよび安全性・有効性データの集積等の研究が重要となる。同一魚病に対するワクチン接種の拡大が可能になると、現在接種が承認されていないマイナー魚種の被害低減、マイナー魚種が病原体のリザーバーや新たな変異株の発生源となることの防止、病原体の拡散防止等が効果として期待される。

c-6. 甲殻類、藻類および貝類の疾病管理策

【現状】

脊椎動物の生体防御機構は先天性免疫および後天性免疫の二つの免疫機構により自己と非自己を認識し、異物の排除が行われているのに対し、エビ、カニ、貝に代表される無脊椎動物は、食細胞による異物処理システムとレクチンや抗菌性タンパク質などの先天性免疫（Innate Immunity）のみで、後天性免疫（Acquired Immunity）が存在しないため、一般的に疾病治療が困難とされてきた。

他方で、日本においてはクルマエビの耐病性品種の育成と管理に関する技術開発が行われてきている。

また、アコヤガイに感染症を引き起こす病原体の解明¹⁾などの研究が実施されたものの、甲殻類、藻類および貝類の疾病管理分野における研究が少ない状況である。

【今後の研究開発の方向性】

無脊椎動物の免疫記憶が存在することが分かってきており、訓練免疫(Trained immunity)あるいは自然免疫記憶という呼び方で研究²⁾が行われている。今後、これらの研究が推進されることが期待される。

また、日本のクルマエビ養殖において、ホワイトスポット病に対するSPF(Specific pathogen free)種苗の開発³⁾が行われており、耐病性に優れた種苗開発の取組みも期待される。

1) 研究代表者：釜石隆（独立行政法人水産総合研究センター，養殖研究所・病害防除部，主任研究官）他，アコヤガイ感染症の病原体の解明．科研費（2002－2004）

2) Netea et al., Defining trained immunity and its role in health and disease, 2020 Nature Review Immunology 20, pages 375-388 (2020)

3) 研究総括者：浜野かおる（瀬戸内海区水産研究所），ウイルスフリー・クルマエビ家系の作出に関する技術開発及びその普及．平成 25～27 年度（2013～2015）農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業

d. 養殖システム

日本では海水面養殖が中心であるが（内水面養殖は 2021 年全養殖生産量の 3.4%）、養殖業成長産業化総合戦略によると、海水面養殖は、海面利用制度と技術水準および投資の面から、沿岸養殖場の拡大による生産量増大に限界があると考えられている。したがって、今後は、沖合養殖とともに近年世界的に注目されており日本においても拡大の兆候が現れている閉鎖循環式陸上養殖システム(RAS)を含めた陸上養殖の重要性が増すと予測される。なお、将来課題とされている世界のタンパク質不足を回避するためには、日本の内水面養殖の復活も補助手段となることが期待される。

d-1. 沖合養殖システムの高度化

【現状】

改正漁業法（令和 2 年 12 月 1 日施行）により海面利用の制度面の手当てが施されたが、交通やレジャー、エネルギー開発や他産業による活用など様々な利用が広がる状況において、沿岸養殖場の拡大による生産量の増大は現実的ではない。このため、潮の流れが速く、利用が難しい沖合漁場での比較的大規模な養殖に関する技術開発が進められてきている^{1) 2) 3) 4)}。

また、沖合養殖を養殖生産拡大の一つの柱とすることが望ましい理由として、

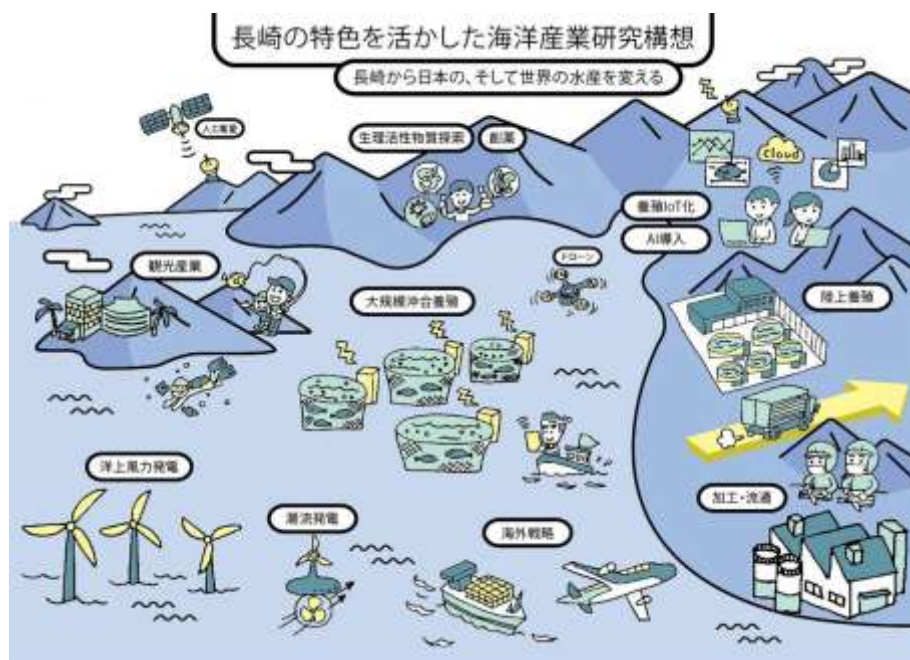
環境への配慮が重要な時代を迎えていることが挙げられる。海水交換の悪い内湾域での養殖では、残餌や糞などの分解能力が低く、病原体や赤潮プランクトンが発生する原因となるが、沖合養殖ではその可能性が低下する。

なお、世界の水産物需要が拡大傾向にあることを背景として沖合養殖システムの大型化を進める動きがあり、ノルウェー⁵⁾と中国⁶⁾が先行している。

【今後の研究開発の方向性】

養殖システムは、育種、飼料・給餌、バイオセキュリティ・疾病管理の他に、浮沈式生簀・各種モニタリング等の多岐に亘る技術に海洋工学技術を組み合わせたものであり、個々の要素技術のみならず統合されたシステムの研究が重要である。特に、沖合に頻繁に行くことが困難なこと、沖合では人手による作業が制限されること、さらには水中の養殖動物を管理する必要があることなどの制約条件を念頭に置いて、自動化・省力化・ロボット・IoTなどの技術分野との連携が重要と考える。また、沖合特有の問題である電力等エネルギー源の確保も重要な研究開発の対象となる。

沖合養殖の事例



図Ⅱ-1-7 長崎大学の養殖を基軸においた総合海洋産業
(次世代養殖戦略会議のビジョン)

- 1) マリノフォーラム 21 沖合養殖パイロットファームプロジェクト 奥尻・熊本・愛媛 (1988～1993年度)
- 2) 日鉄エンジニアリング、他 (大規模沖合養殖システム実用化コンソーシアム), 大規模沖合養殖システム実用化研究(「知」の集積と活用の場による革新的技術創造促進事業)(うち「知」の集積と活用の場による研究開発モデル事業、2017～2020年度)
- 3) 研究開発代表者： 中山一郎 東京大学生産技術研究所 リサーチフェロー, 日本型持続可能な次世代養殖システムの開発 (未来社会創造事業 (2021～2025年))

- 4) 征矢野清（長崎大学 海洋未来イノベーション機構 環東シナ海環境資源研究センター長 教授，次世代養殖戦略会議 会長），室越章（長崎大学 海洋未来イノベーション機構 次世代養殖戦略会議 コーディネーター），長崎大学による「次世代養殖戦略会議」の設立，アクアネット 2020年9月 p.52-56
- 5) Ocean Farm 1 gets new licences - Fish Farmer Magazine
- 6) 中国養殖船がASC取得 キグチ国内向けに年産3700トン．みなと新聞（2023年2月10日）

d-2. 沖合養殖システムを支える生産体制

【現状】

沖合養殖システムは、初期投資の他、稚魚から成魚への養殖に複数年を要するものが多く、稚魚の購入から成魚販売での現金回収までに長期を要するため、沖合養殖事業には大規模な投資が必要である。

【今後の研究開発の方向性】

沖合養殖システムの特長である大規模な投資規模と長期に及ぶ投資回収期間の課題に対しては、経営基盤の強化が欠かせない。

一般的には統合化による事業拡大と効率化による経営基盤の強化が対策とされる。小規模形態が多いところでは、①種苗生産、②中間生産、③出荷までの生産の分業化と協業化により地域全体で新たな養殖形態を再構築する一方で、分業化された各事業の技術高度化と生産性向上を図るとともに、投資回収期間の短縮により安定した経営基盤を構築する方法が選択肢の一つとして挙げられる。

これらを踏まえて、沖合養殖の生産体制を総合的・体系的に分析した経営学・経済学的研究が進められることが求められる。

d-3. 陸上養殖システムの高度化およびコスト課題

【現状】

将来の食料危機と海洋資源の枯渇への対応として、陸上養殖が水産養殖の主流の一つに成り得るものとして注目されている。気候変動に起因する環境の不安定さが増すと予測から、環境に影響されない養殖システムの必要性が世界的に重視されているものと考えられる。また、陸上養殖は海面利用と比べて立地制約が少ないことから未使用土地資源の活用も期待される。

現在、日本においては、陸上養殖（対象：新たな養殖方式を取り入れた内水面養殖）については、周辺環境への影響懸念等を背景に、実態把握のため、2023年4月から届出が必要とされている。なお、ウナギの養殖業は2015年から許可制となっている。

陸上養殖には、かけ流し式、閉鎖循環式、半閉鎖循環式があるが、全般的な課題は次の通りであり、これら課題に対応するため、大規模化によるコスト低減¹⁾や再生可能エネルギー利用などを取り入れたサステナブル性向上²⁾等の実証が試みられている。

- ・高密度飼育を可能とする水処理・餌・種苗の技術改善
- ・資本面での公的支援がほとんどなく大規模化が困難
- ・既存の流通経路を持たない生産者による市場開拓
- ・大量消費する電気代への対応
- ・陸上養殖に関する法規制が未整備
- ・陸上養殖経験者が少ないこと
- ・設置する土地の環境（地下水等）、他

【今後の研究開発の方向性】

初期投資と電気代等の経費を賄い、持続可能な経営として成り立つ陸上養殖を実現するため、大規模化による大量生産が可能となるよう、魚種の選定から、水処理、環境負荷の少ない効率的な飼料と給餌、省エネ技術など、陸上養殖を構成する各要素技術を異分野とも連携しながら様々組み合わせることで最適化するよう、総合的に研究開発を進めることが重要である。

また、併せて、陸上養殖が環境に及ぼす影響に関する調査研究を進めデータを蓄積することも重要となる。

陸上養殖の事例

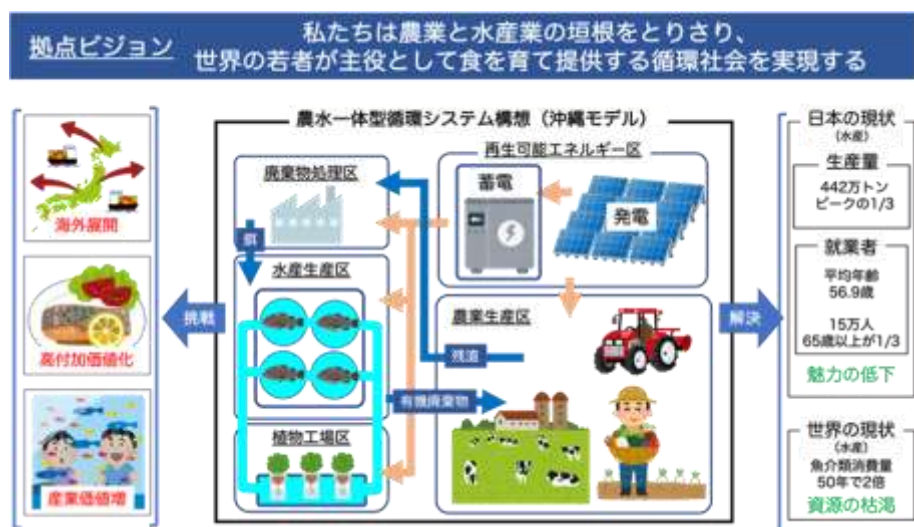


図 II -1-8 琉球大学等による資源循環型共生社会実現に向けた農水一体型サステイナブル陸上養殖プロジェクト

- 1) 三菱商事とマルハニチロがアトラン陸上養殖. みなと新聞 (2022年6月30日)
- 2) プロジェクトリーダー: 竹村明洋 琉球大学 理学部 教授, 資源循環型共生社会実現に向けた農水一体型サステイナブル陸上養殖プロジェクト (JST 共創の場形成プログラム (COI-NEXT))

d-4. 養殖システムに関する標準化

【現状】

ノルウェーでは養殖業における規格化・標準化が進んでおり¹⁾、海面養殖場

2)、海面養殖が環境に与える影響のモニタリング³⁾、陸上養殖場⁴⁾などいくつかの標準規格が策定されている。

養殖業に関する国際規格は、ISO/TC 234 FISHERIES AND AQUACULTURE において定められているが、その事務局は Standers Norway（ノルウェーの標準化機関の一つ）である。

【今後の研究開発の方向性】

日本は ISO/TC234 の参加メンバーであり、国際標準に関する会議で検討される国際標準規格に日本の意見が反映されるよう、標準化に向け研究開発を加速するとともに、そのためのデータを収集することが期待される。

他方、海外メーカーは、日本において養殖事業を行うことによって、台風の影響も受ける荒い環境の下で沖合養殖を行うノウハウを蓄積することを考えていると推測される。これに成功すると、その技術を以って東南アジアで同システムを展開することが可能となることから、日本としては、ノルウェー、中国等に先んじて日本海域での沖合養殖システム技術を確立し、東南アジアで展開すること（デファクトスタンダード化）を視野に入れるべきである。

- 1) 金子 貴臣（元(国研)水産研究・教育機構 中央水産研究所 研究員), ノルウェーにおける最先端養殖技術 -現在と将来-. 水産振興 ONLINE, 620号, 2020年2月
- 2) NS9415: Marine fish farms - Requirements for site survey, risk analyses, design, dimensioning, production, installation and operation
- 3) NS9410: Environmental monitoring of benthic impact from marine fish farms
- 4) NS9416: Landbased aquaculture farms for fish - Requirements for risk analyses, design, execution, operation, user handbook and product data sheet

d-5. 内水面養殖

【現状】

内水面養殖の生産量は 1980 年代以降減少し、近年下げ止まり概ね横ばいで推移している。令和 3 年漁業・養殖業生産統計によると、令和 3 年の内水面養殖業の収穫量は、ウナギ、ニジマスの収穫量が増加したことから、前年に比べて 3,767t (+13.0%) 増加の 3 万 2854t であった。

魚種別の生産量の割合は、ウナギ 62.9%、ニジマス 12.7%、アユ 11.9%、コイ 6.3%、その他 6.2%となっている。

【今後の研究開発の方向性】

将来課題とされている世界のタンパク質不足を回避するには日本の内水面養殖の復活も一つの補助手段と考えられる。このため、食料危機の回避対策に相応しい魚種の研究、現状の生産技術の維持および養殖環境の維持・整備が重要となる。

e. 無給餌養殖（海藻養殖、二枚貝養殖）

【現状】

我が国では、古くからノリやワカメなどの海藻養殖、ホタテやカキなどの二枚貝養殖が各地で盛んに行われており、これら海藻類と二枚貝類の養殖生産量は全養殖生産量の約7割を占めている。これらは、成長に必要な養分を自然界から供給される無給餌の養殖であり、給餌養殖と違って残餌や排泄物由来の有機物、無機栄養塩類を放出することがないため、環境負荷の小さい養殖として、近年注目されている。

しかし最近では、海藻養殖については栄養塩不足によるノリの色落ちや温暖化による養殖可能期間の短縮に伴う生産量の減少など、環境変化の影響が顕在化してきている。このため、ノリやワカメにおいて高温耐性品種が開発されているほか、環境を制御できる陸上養殖システムにおいて、海藻を養殖する試みを進めている企業も出てきている。また、植食動物による食害も深刻であり、食害生物の駆除を含め対策技術の開発と適用が必要である。

また、養殖が盛んな二枚貝については、貧酸素、低塩分、高水温などによる斃死が問題となっており、近年では、特にホタテの垂下養殖において爆弾低気圧や台風の影響による斃死がしばしば観察されており、漁場環境改善技術や垂下方法の改良などの対策技術の研究が行われている。さらに、沿岸環境の変化に伴う天然資源の減少が顕著なアサリ等では、環境改善技術に加え、天然稚貝の採集技術や垂下養殖技術の開発などが進んでいる。

また、魚類養殖と海藻養殖を組み合わせた養殖システム「アクアポニックス」は、環境負荷の少ない効率的な養殖として注目されている。琉球大学では、2021年に資源循環型共生社会に向けた農水一体型陸上養殖「海藻養殖サステイナブル陸上養殖拠点（COI-NEXT）」を開始した。

海藻養殖¹⁾は、ブルーカーボン生態系、海洋の肥沃化やアルカリ化とともに、世界でも注目され²⁾、研究・技術開発が進められている。日本においてもNEDOのムーンショット事業で海洋植物のバイオマス活用のプロジェクトが進行中である。

(→「1. (1)-b-1 沿岸生態系の保全・創造」の項を参照。)

【今後の研究開発の方向性】

海藻養殖や二枚貝養殖は、その生育に給餌の必要がないうえ、その生育により、沿岸域の水域環境や生物の生育環境の改善となる。特に海藻養殖は、昨今、地球規模での課題となっている二酸化炭素の吸収源となることから、その拡大に向け、積極的な研究・技術開発を進めることが重要である。

このため、養殖生産を行う地域の特性を把握するための詳細な観測が可能な環境モニタリング技術の開発とそのデータを活用した環境収容力の推定方法、さらに、それを踏まえ養殖開始時期や場所を決定するための研究が必要である。

また、海藻や貝類は、成長後に移動することが難しいため、気候変動や異常気象に伴って生じる、高水温や栄養塩不足などの環境変化に適応できる品種の開発を進めるとともに、沿岸の波や流れを予測し環境変化を緩和する研究や養殖設備の耐久性強化研究などに取り組むことが重要である。

また、複合養殖システムを設計し、効果的に展開するためには、システム内での栄養塩循環を把握し適切なバランスに保つための研究開発に加え、産業経済性も併せて研究することが必要である。

さらに、養殖海藻の食用以外への利用拡大に向け、土壌改良剤や海藻肥料としての農業利用や、飼料・工業製品の原材料などへの展開も考えられることから、他産業と連携した研究開発を進めることが重要である。

(→「1. (1)-b-1 沿岸生態系の保全・創造」参照。)

- 1) UNESCO-IOC: Integrate Ocean Carbon Research - A summary of Ocean research, and Vision of Coordinated Ocean Carbon Research and Observations for the Next Decade. (2021)
- 2) 第6回グリーンイノベーション戦略会議 WG2021.1.21 資料 (NEDO-TSC)

(3) 新規水産物開発

採捕漁業は、天然の資源に依存し、また沿岸の漁港を拠点とすることから、気候変動や自然災害などの影響を受けやすく、水産物の安定供給面において脆弱な面がある。また、陸上養殖を含む水産養殖は、採捕漁業に比べて安定して水産物を供給することができるが、寄生虫や感染症などによる魚病発生のリスクがあるほか、電力をはじめとするエネルギー供給も課題である。また、採捕漁業と養殖のみでは、世界で将来的に増加することが見込まれている水産物需要に十分に対応できなくなる可能性もある。

このため、未利用水産物や水産加工残渣（魚あら）など、現在、多くを利用されていない資源のアップサイクルや新たな技術開発による、漁業（採捕漁業、養殖）によらない水産物代替品の生産手法の確立等により、新たなタンパク質供給源としていくことも期待される。

a. 培養魚肉（細胞水産業のうちの細胞性産物）

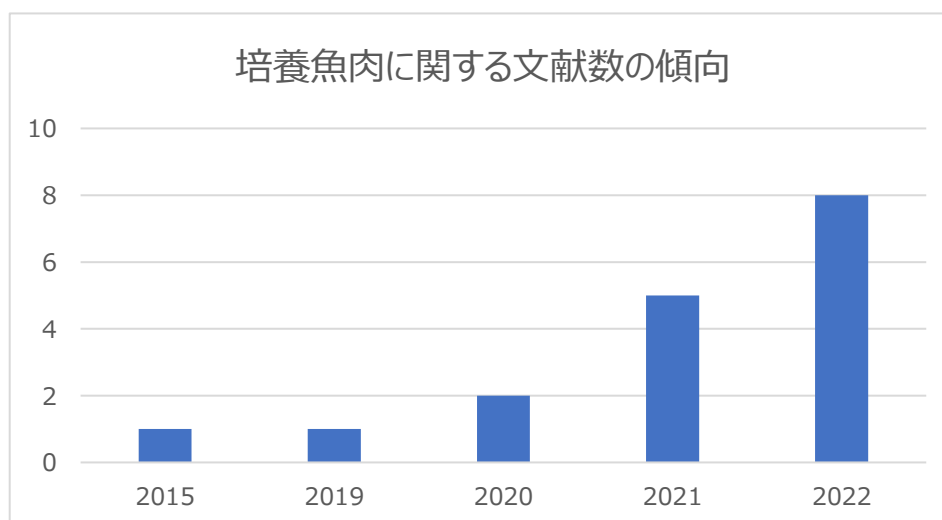
細胞水産業には、細胞性産物と非細胞性産物があるが、このうち細胞性産物とは培養した細胞自体が生産物であり、「培養魚肉」と呼称されることも多い。細胞性産物は、①生物個体から細胞を採取、②体外でも細胞が生育できる培養条件で培養し、③至適条件にて大量培養し、細胞を生産、④立体組織化技術を用いて成形し、⑤製品として提供される。

【現状】

培養肉や培養魚肉の研究開発が盛んになりつつあり、藻類を用いて培養液をリサイクルするなど、低コスト化や環境負荷の低減に向けた研究成果が創出されつつある。魚介類細胞の培養について、Rubio ら¹⁾は、(a)魚類は低酸素環境によく適応しているため低酸素耐性が高い可能性があること、(b)魚類は細胞内緩衝能力が高いため、乳酸などの酸性代謝産物の存在下でも pH の変化を緩和できる可能性があること、(c)魚類細胞の培養条件は通常、典型的な生息環境を反映しており、培養温度は 15~30℃であるため、必要なエネルギー量が小さいことから、バイオリアクターの設計条件が緩やかであり、哺乳類由来細胞よりも魚類由来細胞の方が培養に適している可能性があることを指摘している。

培養魚肉に関する文献数は非常に少ないが、近年、急増しており、今後、研究開発はより盛んになるものと考えられる(図 II-1-9)。例えば、日本においては、北里大学海洋生命科学部において、ニホンウナギ培養肉開発に関わる基礎的研究が行われている³⁾。

海外において既に 30 社以上が起業(表 II-1-1)して商品化を競っているが、基礎的な科学的知識の基盤が不十分であるため、技術の発展が阻害される恐れがあることも指摘されている²⁾。なお、日本においても、一正蒲鉾(株)、マルハニチロ(株)及び培養肉のスタートアップであるインテグリカルチャー(株)の 3 社から、魚類の筋肉細胞の培養技術の確立に向けて共同研究開発を行うことが発表されている⁴⁾。



Web of Science において、[cellular agriculture × (fish or marine)] or cell-based seafood or cell-based fish or cell-cultured fish or cell-cultured seafood で検索

図 II-1-9 培養魚肉に関する文献数の傾向

表 II-1-1 海外における培養魚肉のスタートアップ

企業名	国	備考
ブルーナル(Blue Nalu)社	米国	サーモンとマグロに特化した細胞培養
フォーシー社	イスラエル	培養ウナギ

アバント・ミーツ社	中国	培養魚肉切り身
ショーク・ミーツ (Shiok Meats) 社	シンガポール	エビ、カニ、ロブスター肉の培養
ワイルドタイプ (Wildtype) 社	米国	寿司に最適な細胞培養サーモン
セル AG テック社	カナダ	
フィンレス・フーズ (Finless Foods) 社	米国	細胞培養クロマグロ
Bluu Seafood 社	ドイツ	培養魚製品フィッシュボール、フィッシュフィンガー

【今後の研究開発の方向性】

FAO は、SOFIA2022 において「鶏肉、牛肉などの培養肉と同様に、細胞培養による魚肉生産は、水産食品生産のゲームチェンジングテクノロジーとなる可能性がある。」と言及しており、培養魚肉は、今後、注力すべき技術分野の一つであると考えられる。培養魚肉は、哺乳動物の培養肉と共通する技術的課題が多いが、その一方で培養魚肉特有の技術的課題も存在する。このような培養魚肉特有の技術的課題を中心として基礎研究の推進が期待される。具体的には、細胞培養技術は基礎・医学研究を中心に発展してきたため、哺乳動物の細胞の知見は多いものの魚介類の細胞培養の知見が少ない。培養魚肉に向けた魚介類の細胞株の蓄積が少ないことから、食材原料としての魚介類のセルバンク構築が急務である。また、現状では哺乳動物と同じ成分の培養液を使用しているが、これが培養魚肉にとって最適な組成であるか不明であり、それぞれの魚介類の培養細胞に応じた最適な組成の培養液の確立が望まれる。なお、培養魚肉は培養肉に比べて低温環境での培養が可能である可能性があるため、環境に与える負荷は比較的小さいものの、藻類利用による培養液のリサイクル⁵⁾など一層の環境負荷低減の取り組みが必要である。

培養魚肉のような新奇食品は、国内外における法規制を考慮して研究開発を進める必要がある。特に欧州連合 (EU) は食品に対する法規制が厳しく、輸出することを考慮すれば、外国における研究機関との共同研究や、外国研究機関を通じて法規制当局の動向を探る等、法規制の動向を把握しつつ、研究開発を行うことが望まれる。

b. 3D プリンティング

3D プリンティングは、立体造形を活かした独自の技術として、製品の試作など製造業などにおいて発展しつつある。この 3D プリンティングの水産食品への応用は、未利用魚などを原料とした食品材料を、複雑な形状の新たな食品に造形することができる。

【現状】

3Dプリンティングの方式としては、これまでインクジェット式、シリンジ式、スクリーン式、レーザー式などが研究開発されている。この中で、レーザー式は局所加熱することが可能であり、新たな食感や味を創り出すことができる注目される技術である⁶⁾。食品インクは、ゲル状のもの、粉体など、3Dプリンティング方式との組み合わせで研究開発がなされている。既にAstra Food Plan(株)、(株)グリーンエースなどから食品の粉体が市販され、株式会社鈴廣蒲鉾本店からはすり身パウダーが市販されるなど、食品インクとして利用できる可能性のある材料が入手しやすくなっている。コンテンツとしては、3Dプリンティング方式で製作した寿司などが発表され、マスメディアなどで取り上げられている。



図 II-1-10 3D プリンターで出力した寿司

【今後の研究開発の方向性】

3Dプリンティングによる水産物（代替品）の製作は、新しい食を創出する可能性を秘めており、サプライチェーンの革新や地域振興に資することが期待される。また、未利用魚や魚あらを活用したアップサイクル技術として食品廃棄物（food waste）の削減に繋がることも期待されることから、3Dプリンターの技術高度化のための研究開発を継続するとともに、未利用魚や魚あらの粉体化技術や保存技術など材料となる食品インクの性状の研究などを推進することが望まれる。また、新しい食としての社会受容性に関する社会技術研究やコンテンツ開発も同時に重要である。

3Dプリンティングも、培養魚肉と同様に、国内外における法規制を考慮して研究開発を進める必要がある。



図 II-1-11 3D プリンターによる未利用魚や魚あらのアップサイクル

c. その他

その他の新規開発としては、高度不飽和脂肪酸などの水産物に特有な栄養素を生産する技術や、細胞からタンパク質や脂質などを生産する非細胞性産物生産技術に関する研究などが挙げられる。

- 1) Rubio, N, et al., “Cell-Based Fish: A Novel Approach to Seafood Production and an Opportunity for Cellular Agriculture” FRONTIERS IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS, Vol.3 No.43 (2019)
- 2) Potter, G (Potter, Greg), et al., “A More Open Approach Is Needed to Develop Cell-Based Fish Technology: It Starts with Zebrafish”2022. ONE EARTH, Vol.3 No. 1, pp.54-64
- 3) 科研費データベース ニホンウナギ培養肉開発に関わる基礎的研究
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-20K06232/>
- 4) 一正蒲鉾ホームページ <https://contents.xj-storage.jp/xcontents/AS00463/cc323d30/23e7/47bd/8ef8/1c270b673898/20220830090818046s.pdf>
- 5) 原口裕次(東京女子医科大学 先端生命医科学研究所)“藻類・動物細胞による共生リサイクル培養を用いた三次元組織作製の試み”第2回細胞農業会議 東京 2019年3月9日
- 6) <https://newswitch.jp/p/30749> レーザーで食感や味を最適化「でんぷん3Dプリンター」が面白い【動画あり】
- 7) 月刊アクアネット(2019年2月号)「魚あらの収集と再生利用」

2. 水産物流通の安定化、効率化、多様化、分散化

生産、加工・流通、販売、消費にいたる水産物流通においては、各段階でそれぞれリスクを抱えており、リスクが顕在化するとボトルネック効果によりプロセスの「流れ」の停滞が起きる。例えば、温暖化や異常気象、自然災害、それに伴う資源変動などは、生産段階においては安定生産を阻害し、加工流通段階においては原材料不足やロジスティクス連鎖の停滞など起こし、モノが消費者に届かない、つまり、水産食料の供給不足をもたらすことになる。また、消費者の嗜好の多様化などによる水産物への需要の減少傾向は、水産物の流通の川上にあたる生産側での停滞を引き起こすであろう。さらに、商品認証など海外マーケットによる要求は水産物の流れを妨げるリスクではあるが、それに対応することで、輸出が促進され、我が国水産物の経営基盤が強化されると考えられる。

これまでの水産物流通は、水産物の動きを中心に据えたプロダクトアウトの要素が強く、付加価値を付ける機能が弱かったと思われる。これからは、消費者のニーズをとらえて各段階で水産物の価値を高めるマーケットイン的発想の研究開発が望まれる。

(1) 情報付き流通

水産物は、漁獲方法や養殖方法、産地、鮮度、魚種などの様々な情報を含んで

おり、品質管理や安全・安心などのための認証やトレーサビリティには、これらの多くの情報が付加されることが望まれる。

【現状】

日本において水産物の流通は、多段階で経路が長く、取り扱う種類が多いうえ、水産物特有の商慣習もあるため、情報付きの流通が進んでいない状況にある。その中であって、水産資源の持続性や環境に配慮し、FAO 水産委員会が採択したガイドラインに沿って生産された水産物を消費者が選択的に購入できるよう商品にラベルを表示する水産エコラベル認証やトレーサビリティの仕組みがある。水産エコラベルは IUU 漁業や密漁による水産物の流通問題への有効な対策と考えられる。また、個別の水産物に関する情報の付加ではないが、国立研究開発法人水産研究・教育機構が「SH”U”N (Sustainable, Healthy and “Umai” Nippon seafood) プロジェクト」を行っており、魚種ごとに資源状況や漁獲方法などの情報、健康と安全・安心などに関する情報を Web サイトに公表している。¹⁾

また、水産物に付加する情報の収集のため、検査技術や品質評価技術の開発も進められている。東京電力福島第一原子力発電所事故の後、水産物の放射線をリアルタイムで計測する機器が開発²⁾された。また、AI による鮮度評価³⁾、交流高電界殺菌技術⁴⁾、パルスパワーによるアニサキス殺虫技術⁵⁾などが報告されている。また、マトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析法 (MALDI-TOF MS) を用いた、食中毒原因菌であるセレウス菌の識別・同定法が報告されている⁶⁾。

【今後の研究開発の方向性】

認証の普及やトレーサビリティ向上に向けて、水産物の情報付き流通のための検査技術や品質評価技術のさらなる向上、情報プラットフォームの新規技術開発が望まれる。例えば、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) のプロジェクトである「スマートフードチェーンプラットフォーム」において開発した、トレーサビリティ情報として輸送経路や輸送時の温度等の情報を取得し、ブロックチェーン技術を用いて記録する「スマートフードチェーン」⁷⁾や、そのためのツールである RFID (radio frequency identification) タグの開発といった取り組みを水産物に応用することなどが考えられる。

1) 国立研究開発法人水産研究・教育機構 Web サイト <http://sh-u-n.fra.go.jp/>

2) 複雑形状食品の放射能検査装置の開発

https://www.jst.go.jp/fukkou/result/event/pdf/20140220_bunkakai3-3.pdf

3) 日刊水産経済新聞 (2021年12月16日)「AIでシラウオ価値自動判定機が鮮度評価」

4) Uemura, et al. Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuum-packed fish in water. 2017. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 81(4), 762-767.

- 5) Onitsuka, C (Onitsuka, Chinari) , et al., “Inactivation of anisakis larva using pulsed power technology and quality evaluation of horse mackerel meat treated with pulsed power”, 2022.FISHERIES SCIENCE, vol.88, No.2, pp. 337-344
- 6) 「食中毒を起こす微生物 セレウス菌の迅速検出法の開発に成功」
<https://www.nite.go.jp/nbrc/information/release/20180306.html>
- 7) 「ブロックチェーンを活用したスマートフードチェーンシステムの輸出実証試験を開始」
<https://www.nttdata.com/jp/ja/news/release/2022/060100/>

(2) 生産側を強化する生産、流通、消費のあり方

零細な生産者が多い漁業・養殖業の担い手の確保のためにも、生産者側が安定して十分な収益を得ることができる生産、流通、消費であることが望まれる。そのためには、以下のような取り組みが重要になると考えられる。

- スマート漁業等による漁業の効率化と収益性の向上
- マーケティング等による消費者ニーズの把握
- 消費者ニーズと漁業生産のマッチング

【現状】、【今後の研究開発の方向性】は、「2. (4) 生産・消費のマッチング」、
「4. (1) スマート漁業・養殖業」、「6. (2) 新規水産物の社会受容性」を参照のこと。

(3) 地産地消

生産や流通の小規模分散化や流通における温室効果ガス排出量の削減、あるいは地域振興・漁村振興のための鍵の一つとして、地産地消の推進が挙げられる。その際、単純に昔ながらの地域内流通に回帰するのではなく、過去の良いところを学びつつ、現代にマッチした新たなサプライチェーンに作り替えていくことが必要である。

【現状】、【今後の研究開発の方向性】は、「5. (1) 沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築」、「5. (2) 地域振興・漁村振興」を参照のこと。

(4) 生産・消費のマッチング

水産物の需給のマッチングは、漁業生産者の収益性の向上やフードロス削減の観点から重要である。しかしながら、日本における水産物の流通は、経路が長く多段階であるため、需給のマッチングにある種困難性をもたらしている。

【現状】

ダイレクトに生産・消費をマッチングする方法として、宅急便を利用した「ポケットマルシェ」、「食べチョク」などの利用が拡大してきている。

生産側については、主として人工知能（AI）や、人工衛星の観測データ、画像処理技術、シミュレーション技術などを複合した漁場予測や海況予測に関する研究開発が行われ、既にサービスが提供されているものもある（「4. (1) スマート漁業・養殖業」を参照のこと）。一方、消費側については、（一財）日本気象協会に

よる気象予測データや販売データなどを AI などにより解析することで商品需要を予測し、提供するサービスが実施されている¹⁾。

【今後の研究開発の方向性】

水産物の需給マッチングは、生産側も消費側もデータやシミュレーション技術に一定の蓄積があり、今後は、これに、現在研究が進められている人工知能 (AI) や、人工衛星の観測データ、画像処理技術、シミュレーション技術などを複合した漁場予測や海況予測技術を統合するなど、さらに深化するとともに、生産と消費両者のデータ連携により、より高度な需給のマッチング技術を確立させていくことが考えられる。その際、ベースとなるデータ連携基盤やその予測システムなどは国などの公的機関が担う一方で、これを活用し様々な消費者とのマッチングを行う部分は、民間企業を中心に行われることが望ましい。

また、その他、アルヴィン・ロス氏らはマッチング理論²⁾などにより 2012 年にノーベル経済学賞を受賞しているが、このようなマッチング理論やアルゴリズムも採り入れることができる可能性も考えられる。

1) eco×ロジ プロジェクト 日本気象協会の商品需要予測サービス <https://ecology-jwa.jp/>

2) Neyfakh, Leon. “The Matchmaker: The Harvard economist who stopped just studying the world and began trying to fix it”. (2011年4月3日) Boston Globe

3. 環境負荷の低減

水産業は、薬剤やプラスチック等の使用による環境負荷だけでなく、サプライチェーンの各段階において食品ロス (Food loss/waste)¹⁾ を発生させることで有機物や栄養塩類などを環境中に流出させて環境負荷を与えている面もある。食品ロスは食料供給量を減少させるだけでなく、それを処理するためのエネルギーも必要となる。他方、国際的には安全安心に加え、環境に配慮した商品であることを要求する傾向が強まっている。

これらに対応するため、食品ロス低減や温室効果ガス排出削減によるカーボンニュートラルへの貢献など、水産システムの中で発生するあらゆる環境負荷を低減するための研究の推進が望まれる。

1) FAO 「食料ロスと食料廃棄削減に向けた地球規模の取り組み」、2013年

(1) 廃棄物 (Food loss/waste) の低減

a. 未利用魚、魚あらの活用

漁獲量が少ない、知名度が低い、見た目が悪い等の理由により、漁獲されたが水揚げされることなく廃棄され、あるいは水揚げされたとしても市場に出回らずに廃棄される未利用魚の活用は、今後、予想されている食料不足への対応

として重要である。また、水産加工残渣である魚あらの食料へのアップサイクルも望まれる。

【現状】

食品企業において未利用魚のすり身のゲル化特性を調査するなど、未利用魚の製品への活用の試みがなされている。また、魚食普及推進センター(一般社団法人 大日本水産会)の Web サイトにおける販売支援や常温保存可能なペットフードへの加工など、利活用促進のための取り組みが行われているが、抜本的な対応には到っていない。魚あらは、魚市場や加工場における回収率が 90%以上と高く、主に魚粉として利用されているが、食料へのアップサイクルは殆ど行われていない。

【今後の研究開発の方向性】

未利用魚の利活用においても、通常食用とされている魚介類と同じ輸送コストや保管コストが必要であることから、通常食用とされている魚介類と同じ取り扱いでの利活用を図るには、消費者の理解やエシカル消費への志向を進展させるための社会科学的な研究や未利用魚に含まれる機能性成分など付加価値につながる研究が期待される。

また、未利用魚や魚あらのこれまでとは異なる利活用方法としては、「1. (3)新規水産物開発」に展開していく方向性が挙げられる。3D フードプリンターの食用インクなどへの用途拡大に向け、3D フードプリンター技術の向上や未利用魚・魚あらの効率的な粉体化技術とその保存方法の開発、さらには、未利用魚・魚あら由来の粉体を用いた 3D フードプリンターコンテンツの開発、普及が期待される。

b. 温室効果ガス排出量低減と水産物鮮度保持の両立

生鮮品である魚介類の供給の安定化や輸出拡大、フードロスの低減のためにも、なるべく長期にわたり鮮度を維持する技術が求められる。生鮮品の流通は低温環境(冷蔵、冷凍)によることが基本であるが、温室効果ガス排出量低減の観点から、鮮度を保持しつつも、コールドチェーンを緩和した流通も求められる。

【現状】

急速冷凍やチルド保存、解凍方法などの低温技術が開発され、実用化されている。低温技術については、超音波や高圧の利用などによる新たな凍結・解凍技術の研究開発が行われている¹⁾。低温技術以外では、電圧印可による殺菌や鮮度維持^{2) 3)}、二酸化炭素雰囲気ですべての活魚を睡眠させる鮮度維持⁴⁾などの研究開発が行われ、実用化されているものもある。品質劣化のメカニズムに関するも

のとしては、養殖ブリ血合筋の褐変機序とその進行に関わる諸要因などの研究が挙げられる⁵⁾。

また、日本においては、煙でいぶす、塩や酢に漬ける、発酵させるなどの伝統的な保存方法が各地に伝えられている。

【今後の研究開発の方向性】

今後、凍結・解凍技術などの低温環境（冷蔵、冷凍）による鮮度維持に加え、電圧印可、保存雰囲気、包装技術など、より長期にわたる鮮度維持技術の向上のための研究開発の推進が重要と考えられる。また、煙でいぶす、塩や酢に漬ける、発酵させるなどの伝統的な保存技術は、電気などのエネルギー消費も少なく環境面での負荷も小さいなどのメリットがあるため、これら伝統的保存技術を体系的に整理するとともに、これら効果の科学的検証による他魚種等への利用拡大や作用メカニズムを活用した新技術の開発を進めることも必要である。さらに、生鮮品の品質劣化のメカニズムがこれまで以上に理解されれば、鮮度保持技術の発展に資すると考えられることから、そのための基礎研究も重要と考えられる。

その他、ウイルスであるため食品に適用するには消費者受容性からハードルが高い面はあるものの、バクテリオファージを利用して食品危害微生物を制御する研究⁶⁾も行われており、このような研究により常温でも生鮮品の鮮度維持が可能な技術が確立できれば、ゲームチェンジングにもなり得ると考えられる。

- 1) 月刊養殖ビジネス（2021年2月号）「冷凍・解凍が水産物に与える影響と各種冷凍・解凍技術」
- 2) Uemura, et al. Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuum-packed fish in water. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 2017, 81(4), 762-767.
- 3) 株式会社O's&Tec社ホームページ「氷感S0庫」 <https://www.ostec.co.jp/works/hyokan/>
- 4) 小原昌和・山崎隆義, . 循環回路型の二酸化炭素吸収装置を備えた活魚輸送密閉容器によるイワナの収容. *水産増殖*, 2021, 69(2), 143-152
- 5) 月刊アクアネット（2019年4月号）「養殖ブリ血合筋の褐変機序とその進行に関わる諸要因 pH、リン脂質、成熟、温度、etc」
- 6) アサマ NEWS パートナー2012-3 No. 147 <https://www.asama-chemical.co.jp/PN/P147.PDF>

(2) 温室効果ガスの排出量削減（カーボンニュートラル）

今後、水産業においても、生産（採捕漁業、養殖、新規水産物開発）、流通において、温室効果ガスの排出量を削減し、地球温暖化防止に貢献していかなければならない。特に重要なポイントとしては以下のようなものが考えられる。

- 漁業と協調する洋上風力発電など、再生可能エネルギーの活用
- 沿岸地域における、ブルーカーボンのための藻場の保全や大規模海藻養殖
- 閉鎖循環型陸上養殖における、消費エネルギー量の削減

- 培養魚肉生産における、消費エネルギー量の削減
- 水産物流通における、コールドチェーンの緩和
- 地産地消など、水産物流通における流通経路の短縮

なお、水産業における温室効果ガス排出量の削減にあたっては、カーボンクレジットの活用など、環境負荷低減取引の市場化といった考えを採り入れることが重要である。

【現状】、【今後の研究開発の方向性】は、「1. (1)b-1. 沿岸生態系の保全・創造」、「1. (2)d. 養殖システム」、「1. (3)a. 培養魚肉（細胞水産業のうちの細胞性産物）」、「2. (3) 地産地消」、「3. (1)b. 温室効果ガス排出量の低減と水産物鮮度保持の両立」、「5. (1) 沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築」などを参照のこと。

(3) 海洋汚染、その他の環境負荷低減

【現状】

水産業は海洋汚染の影響を受ける立場であると同時に、養殖で利用される薬剤や有機物、栄養塩類の他、漁業・養殖やサプライチェーンで利用されるプラスチック資材や油などの環境負荷物質を海洋中に放出している立場でもあるが、環境負荷に関する詳細なデータは不足している。

また、海外に魚を販売していく場合、安全・安心に加えて環境への配慮（各種認証適合商品）が強く求められる状況にある。

（「1. (2)b. 養殖飼料と給餌技術」、「1. (2)c. バイオセキュリティと疾病管理」、「1. (2)d. 養殖システム」、 「2. (1) 情報付き流通」の項を参照）

【今後の研究開発の方向性】

海洋環境における負荷・汚染状況を把握するため、負荷物質の挙動と環境浄化力の評価、および生態系への影響評価に関する研究が必要である。また、マイクロ・マクロプラスチックの影響評価、漁業・養殖業資材の環境配慮素材への転換技術やリサイクル技術の開発が必要である。

（「1. (2)b. 養殖飼料と給餌技術」、「1. (2)d. 養殖システム」、「2. (1) 情報付き流通」の項を参照）

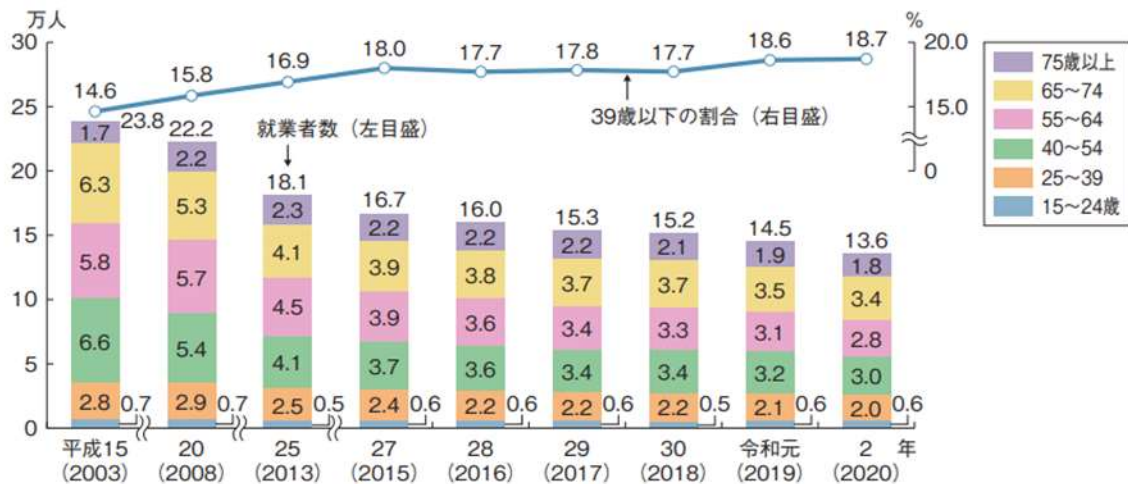
4. ICT（AI、DX、データ連携、ロボティクスを含む）の活用

現在、水産業においては、人口減少や高齢化に加え、新規就労者が少なく後継者不足が深刻化しており、外国人労働者に依存している場合も多くみられる。しかし、コロナ禍により海外との往来が規制されると、労働力を外国人に依存する体制の脆弱性が顕在化した。

また、気候変動や異常気象、それに伴う資源変動により、漁業においては漁獲対象種を探索する労力が増し、養殖業においても海況変化に対応するための環境モニタリ

ングや設備への投資などのコストが増加している。

水産業就業者の減少と深刻な人手不足に対応し、さらに産業構造を低コスト化して収益性を向上させるため、水産サプライチェーンのいずれの段階においても、デジタル技術や DX 化による業務プロセスの最適化、画像センシング技術やロボット技術を活用した自動化等を進めることが重要であり、そのための研究の推進が望まれる。



資料：農林水産省「漁業構造動態調査」（令和元（2019）年以降）、「漁業センサス」（平成15（2003）年、20（2008）年、25（2013）年及び30（2018）年）及び「漁業就業動向調査」（その他の年）
 注：1）「漁業就業者」とは、満15歳以上で過去1年間に漁業の海上作業に30日以上従事した者。
 2）平成20（2008）年以降は、雇い主である漁業経営体の側から調査を行ったため、これまでは含まれなかった非沿海市区町村に居住している者を含んでおり、平成15（2003）年とは連続しない。

図Ⅱ-2-1 漁業従事者の推移（令和3年度 水産白書）

(1) スマート漁業・養殖業

【現状】

採捕漁業においては、漁場予測システムや魚群探知・データ転送システム、漁具の動きの可視化、定置網漁業においては入網把握システム、魚種選別システム、急潮予測システムなど、ICTやAIを活用した取組が進められている。また、養殖業においても、労働力不足への対応や作業の効率化のために、魚の行動解析による自動給餌システムや、環境のリアルタイムモニタリングデータをICTやAIを活用して解析しカキやホタテの垂下場所や深度を調整する養殖支援システムなどが民間企業から提供され始めている。

（「1. (1)a-1. 生態系・漁業情報の収集と統合」、「1. (1)a-3. 漁業技術」、「1. (1)c. 環境把握のための基礎・基盤技術」、「1. (2)b. 養殖飼料と給餌技術」、「1. (2)d. 養殖システム」の項を参照）

【今後の研究開発の方向性】

漁業・養殖業のデジタル化を加速するため、さらに多くの情報源と膨大なデータの効果的な統合システムの構築が必要である。このような情報を活用することにより、赤潮検知システムや異常気象・海況検知システムなどへ応用するための研究開発が期待される。

モニタリングも従来手法の繰り返しや詳細化だけでなく、eDNA や eRNA 等の生命情報の利用など、「質の革新」を図るような研究に取り組むことが重要と考えられる。

(「1. (1)a-1. 生態系・漁業情報の収集と統合」、「1. (1)a-3. 漁業技術」、「1. (1)c. 環境把握のための基礎・基盤技術」、「1. (2)b. 養殖飼料と給餌技術」、「1. (2)d. 養殖システム」の項を参照)

(2) 流通・消費の ICT 化と生産とのデータ連携

流通・消費においても ICT 化は重要であり、特に以下の点について ICT 化が進展していくと考えられる。

- 情報付き流通におけるブロックチェーンなどの活用
- 消費者需要の把握における AI などの活用

さらに、需給マッチングなどのため、これら流通・消費側のデータと生産側のデータを連携させて活用することも望まれる。

【現状】、【今後の研究開発の方向性】は、「2.(1) 情報付き流通」、「2.(4) 生産・消費のマッチング」、「4.(1) スマート漁業・養殖業」を参照のこと。

(3) 自動化、ロボティクス

【現状】

採捕漁業においては、かつお自動釣り機¹⁾や定置網のメンテナンスのための水中ドローン²⁾などが、また、養殖では沖合養殖における遠隔自動給餌システム等が活用されるなど、自動化、ロボット化が進みつつある。一方、加工流通においては、水産物の種類・サイズが多様であることから微調整の効く手作業が基本であり、完全あるいは完全に近い水産加工技術は確立されていないが、画像センシング技術やロボット技術を水産加工へ応用する取り組みは幾つか行われている。一例としては、これまで人の目に頼っていた水揚げ魚種の選別を、AI を利用して自動化する技術などが挙げられる³⁾。

【今後の研究開発の方向性】

採捕漁業や養殖において、自動釣り機や水中ドローン、遠隔自動給餌システムなど、現在自動化・ロボット化が進められている部分については、対象魚種の拡大や更なる技術向上に向け、他分野と連携した一層の研究開発が望まれる。また、環境モニタリングについては、近年めまぐるしく変化する海洋環境や資源変化を把握することで、水産業にかかる様々な課題解決につながる基盤となることから、より多くのデータを効率よく収集することが可能となるよう、早期の自動化が望まれる。さらに、改良品種の表現型の確認やワクチン接種の自動化も、早期の技術開発が望まれる。

他方で、多様な魚種や自然環境を相手にすることによる複雑さにより、現在の

技術では自動化・ロボット化が難しい部分においても、将来的に自動化・ロボット化が可能となるよう、自動化・ロボット化に向けた課題の抽出やデータ収集を進め、他分野と連携した研究体制を構築することが必要である。

その他、「1. (1) 採捕漁業」、「1. (2) 水産養殖」、「4. (1) スマート漁業・養殖業」も参照のこと。

また、加工流通においては、選別や包装に多くの人手を要していることから、多様な種類・サイズ・鮮度の判定に対応可能な画像認識技術や、それをもとに選別し包装を可能とするロボット技術等の開発を、異分野と連携し進めることが望まれる。

- 1) 国立研究開発法人水産研究・教育機構 次世代型かつお自動釣り機の開発～ロボットで魚を釣る～ 第 17 回 成果発表会
<https://www.fra.affrc.go.jp/topics/20200302/01.pdf>
- 2) 一般社団法人 DPCA 「水中ドローンが漁業で大活躍 定置網の点検や網に入る魚調査」
<https://dpcajapan.org/latest-technology/underwater-drone/%E6%B0%B4%E4%B8%AD%E3%83%89%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%81%8C%E6%BC%81%E6%A5%AD%E3%81%A7%E5%A4%A7%E6%B4%BB%E8%BA%8D%E3%80%80%E5%AE%9A%E7%BD%AE%E7%B6%B2%E3%81%AE%E7%82%B9%E6%A4%9C%E3%82%84%E7%B6%B2/>
- 3) 日本経済新聞（2022年7月20日）「魚種選別 処理速度早く 東杜シーテック、今秋実証 来年実用化へ」

5. 地域振興、漁村振興

水産業は地域（漁村）の基幹的な産業であり、地域の多面的機能の発揮にも大きな役割を担っている一方で、地域住民による多様な生き物の生育環境の保全や水質の維持、水揚げされた魚の消費など地域に多くを支えられている。しかし、我が国では人口減少や高齢化により、漁村地域の急激な過疎化・衰退の進行が顕著にみられ、地域の維持が困難な状況にある。このため、地域振興、漁村振興は食料安全保障の観点からも極めて重要な課題である。

沿岸地域（浜）は、地域（津々浦々）により、社会的条件も取り巻く陸・海生態系も様々であり、地域振興を図るための万能策は存在しない。このため、漁業関係者だけでなく、全ての関係者を取り込んだ学際的な社会経済的研究の推進が望まれる。

(1) 沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築

「1. (1)b-1. 沿岸生態系の保全・創造」、「1. (1)b-2. 地域振興」の項を参照。

(2) 地域振興、漁村振興

【現状】

地域活性化のための活動として「海業*」という言葉が使われ始めた。海の守り人として沿岸・漁村地域に住む漁業者や住民の力を結集して、漁業の振興だけでなく、地域のサステナビリティあるいはレジリエンスを高めていくとい

う発想が今後重要になる。

(「1. (1)b-1. 沿岸生態系の保全・創造」、「1. (1)b-2. 地域振興」の項を参照)

*海や漁村の地域資源の価値や魅力を活用する事業であって、国内外からの多様なニーズに応えることにより、地域のにぎわいや所得と雇用を生み出すことが期待されるものをいう(水産庁資料「海業支援パッケージ(令和4年度版)」より)。

【今後の研究開発の方向性】

地域のにぎわいと雇用創出に向け、地域の特性を生かした、ブルーツーリズムを推進し、漁業との相乗効果を生み出すとともに、それらの社会経済効果の検証を社会・経済学面から行うことが必要である。

また、未活用の資源を活用した3Dプリンティング技術等は、新たな産業振興策として期待できることから、これら新技術を活用した、地域ブランド開発の試みなどに取り組むことも考えられる。

(「1. (1)b-1. 沿岸生態系の保全・創造」、「1. (1)b-2. 地域振興」、「1. (3) 新規水産物開発」の項を参照)

6. 生産者・消費者行動に関する社会技術研究

科学技術の進展により、新たに開発された食材・食品が、社会に受け入れられる(パブリック・アクセプタンス)取り組みを進めることが重要である。また、環境意識の高まりなど国際的な需要動向にも対応する必要がある。

さらに、これらに加え、採捕漁業における出漁判断や養殖における収穫判断など生産行動においても、消費者ニーズや海外ニーズに合わせた経営判断が必要であることから、生産者・消費者行動、国際動向への対応等に関する社会技術研究の推進が望まれる。

(1) 生産行動・判断に関する社会経済研究、マーケティング

【現状】

海の情報と消費者サイドの情報の可視化が進みつつあり、将来は消費者ニーズに合わせた漁獲量の最適値が見いだせるようになる可能性がある。また、養殖業においては、品質や量に関する消費者ニーズを把握し、収穫時期や給餌方法を柔軟に変える取り組みが行われ始めている。

(「1. (1)a-1. 生態系・漁業情報の収集と統合」、「1. (1)b. 沿岸管理」の項を参照)

【今後の研究開発の方向性】

資源管理を漁業活動にどのようにつなげるか、漁獲量の増加だけでなく「漁

業を管理」して水揚げ金額や漁業経営につなげる経済学的研究が必要である。

漁業者の心理や行動経済学的なナレッジをもとに政策的に誘導するための社会科学的な研究が重要である。

また、水産物は畜産に比べ、水消費（仮想水）、土壌劣化、温室効果ガス排出量などの観点から環境負荷が小さいと言われている。しかしながら、生産方法が異なるため、定量的な比較が困難な側面もある。このような環境負荷について、定量化、可視化する研究により、エシカルな消費としての魚介類の消費促進を促していくことも考えられる。

（「1. (1)a-1. 生態系・漁業情報の収集と統合」、「1. (1)b. 沿岸管理」の項を参照）

(2) 新規水産物の社会受容性

【現状】

魚粉代替飼料による養殖魚、培養魚肉、3Dフードプリンターについては、それぞれの研究開発に付加する形で消費者アンケート等による社会受容性に関する研究が行われている。また、新奇食品に対する社会受容性全般に関しては、新奇食品を食べることをためらったり、避けたりといった行動、いわゆる「フードネオフォビア」に対する研究¹⁾が一部で行われているが、広く認知された研究領域となるには至っていない。

風評被害に対する研究としては、経済的損失といった経済学上の研究の他、社会心理学からの研究²⁾も行われている。

【今後の研究開発の方向性】

水産物に限らないが、将来的に食料不足が懸念される状況において、魚粉代替飼料による養殖魚や培養魚肉、3Dフードプリンターなどの新奇食品に対するフードネオフォビアに関する研究の広がりが求められる。但し、これらの研究においては、「食べたくないものを無理やり食べさせようとしている」という誤解を招かないことにも留意が必要である。

1) 地頭所里紗「消費者行動研究分野におけるフード・ネオフォビア概念の検討」2016『関西実践経営』, 51, 61-77

2) 平石界、他「風評被害の心理基盤：リスク認知バイアスと評価的条件づけの2ステップ仮説」2019 科学研究費補助金成果報告書（2018）

https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16H03728seik

7. 「食品」としての水産物研究

水産物の消費拡大のためには、「安全性」や「品質」に加え、「美味しさ」や「健康

効果」などの要素も重要である。これらが十分に満足されるものでないと、食品として水産物サプライチェーンに乗らず、消費者まで届く食品供給量が不足する可能性もある。

このため、水産物の「食品」としての価値の追求や、食材そのものが持つ特性の研究が重要である。

(1) 美味しさ、健康、安全性などの食品価値の追求

【現状】

魚介類の国内での消費量が減少し続ける中、魚介類の食品としての魅力を高めるための一つの取り組みとして、魚由来の不飽和脂肪酸の健康への効果や魚を中心とした食生活における健康への効果、練り製品の脂質代謝への効果¹⁾といった魚介類と健康との関連性を追究する研究が、食品企業や大学等で行われている。また、水産物に限らず食品全般を対象に、「おいしさ」のメカニズム、「おいしさ」の計測、可視化などに関する研究が企業や大学等で行われている。

【今後の研究開発の方向性】

魚介類の食品としての魅力を高めることで、今後も魚介類の国内消費拡大や輸出促進が期待されるため、機能性成分の探索やその作用機構、また、安全性に関するデータの収集などの協調領域は大学や公的な研究機関が中心となり、機能性成分を用いた新たな商品の開発などの競争領域は食品企業が中心となって、それぞれ進めることが望まれる。

1) Kazunari Kadokura, et.al, Effect of fish paste products “Hanpen” intake in Sprague-Dawley rats, 2020. Food Science and Nutrition, 8(6), 2273-2279

(2) 水産物の性状、物性

【現状】

水産物の性状、物性を把握することで、新たな保存方法が開発され効率的な輸送・販売が可能となったり、新たな活用法に展開することが期待される。また、水産物には、特有の臭いやぬめり、小骨などがあり、これが水産物消費の拡大につながる要因となっている面もある。すり身のゲル化特性など魚類タンパク質の特性やこれら特性を活用した加工方法に関する研究が食品企業や大学等で行われている。また、魚類の悪臭や異臭の原因に関する研究等も行われている。

【今後の研究開発の方向性】

水産物の性状、物性に関する研究は、新しい水産物由来製品の開発や魚介類の国内消費あるいは輸出の拡大における知識基盤となることから、魚類たんぱく質の基本的な特性や魚特有の臭い・ぬめりなどの発生機構等の協調領域は大学や公的な研

究機関が中心となり、また、小骨を分解して食べやすくする等の商品化に向けた競争領域は食品企業が中心となって、それぞれ研究開発を進めることが望まれる。特に、新規水産物開発の一つとして有望な3Dフードプリンターにおける食品インクとしてのゲルや粉体の性状は、加工特性や味に直結することから重要と考えられる。

Ⅲ. まとめ

Ⅲ-1 我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化のための提言

水産物は、栄養面、健康面で優れた一面を持ち、また、自律的に再生可能で、水消費、土壌劣化、温室効果ガス排出量などの観点から環境負荷が小さいと言われており、今後予想されるタンパク質不足に対する持続可能なタンパク質の供給源として有力である。

他方、近年では、ロシアのウクライナ侵攻を背景とした国際的な原材料価格の上昇や円安、また、新型コロナウイルスの流行に伴う国際的な物流の混乱、地球温暖化やこれに伴い世界各地で頻発する異常気象や大規模な自然災害など、食料の安定供給に影響を与えかねない問題が頻発し、我が国の水産業においても、人口減少に伴う漁業就業者の減少や高齢化、これまでにない不漁が頻発するなど水産物を安定的に供給する基盤が揺らいでいる状況にある。

今こそ、水産業の安定化・強靱化を高める研究開発を一層強化し、我が国の水産業におけるリスク強靱性を高め、食料安全保障を強化することが求められている。

また、このためには、同時に、水産業のカーボンニュートラルや水産物の健康への効果等に関する研究、さらにはこれらの研究成果の普及を通じた国民の水産物に対する理解の増進、そして国民の水産物消費に対する啓発といった一連の学際的な研究を進めることも重要である。

1. 漁業生産の安定・強靱化を高める基盤研究の推進

気候変動、資源変動、国際情勢など、内水面・沿岸域から海面全域で営まれる漁業を取り巻く自然・社会環境は目まぐるしく変化している。それらの変化に柔軟に対応し、水産食料の持続的な安定供給を確保するためには、漁業資源の適切な管理および沿岸域の生態系保全と水産生産基盤の再構築のための研究開発を強力に推進する必要がある。

資源管理については、究極目標である生態系アプローチによる資源管理の実現に向け、短・中期的には、海洋生態系と水産生物の生体機能を迅速かつ正確に把握するための新規手法に関する基盤的研究や技術開発が重要である。また、環境や漁業の様々な情報を取得しデータ化するためのセンシング技術や漁業の ICT 化、得られた膨大なデータを連携・統合し漁業の効率性・収益性の飛躍的な向上につなげるためのビッグデータ解析や DX 化研究、AI やデジタルツインを活用した分析が必要である。

沿岸域については、資源状況と水域環境の情報が限られており、まずはそれらの情報を収集・統合して沿岸生態系の全体像を把握することが肝要である。特に、漁場造成や沿岸域を利用した増養殖を推進するために、環境収容力と栄養塩循環の解明が重要である。

2. 今後の水産生産力向上の機軸となる養殖生産の技術基盤の強化と関連する研究開発の推進

環境への配慮が求められる中において、沿岸養殖については、環境負荷低減技術の開発が望まれる。また、沿岸養殖地域の拡大が限界にある状況において、さらに我が国の生産基盤を拡大していくためには、日本に適した沖合養殖システムや陸上養殖システムの高度化が重要であるが、この分野は世界的にも注目され競争の激しい分野であるので、海洋工学、AI、ロボティクスなど異分野と連携したスピード感のある研究の推進が求められる。

また、ゲノム予測に基づく選抜育種の導入、生簀内でのフェノタイピング技術の開発、生殖操作等を利用した世代時間の短縮や品種の保存・流出防止のための技術開発により優良な魚種を育成・確保することが重要である。なお、育種等種苗改良の研究基盤強化のためには、遺伝資源を維持することが不可欠である。

併せて、食料・畜産飼料・バイオエネルギー原料との競合及び輸入依存などの課題に対応し、環境と資源維持に配慮した仔魚・稚魚・成魚用の新規飼料開発と適時適切な給餌が可能となる技術を進めるとともに、めまぐるしく変化する環境に対応し、これに伴い発生する可能性のある未知の疾病にも対応できるよう、迅速なワクチン開発を可能とする基礎的研究の推進、環境DNA解析や海洋流動モデルなどを用いた予測技術の開発により、バイオセキュリティ体制を拡充することが望まれる。

3. 新規水産物開発の推進

再生医学研究と融合した培養魚肉や微細機械システム工学と融合した3Dフードプリンターなど異分野を融合した学際的な研究を推進し、科学技術イノベーションを実現していくことが必要である。

4. 水産物流通の安定・強靱化を高める基盤研究の推進

水産物の安全・安心の確保、風評被害の軽減、輸出拡大のためには、認証等の普及やトレーサビリティの確保が必要であり、品質管理技術や検査技術の向上とともに、その後の情報付き流通に関する研究開発が不可欠である。

また、水産物は、多くが生鮮品として流通することから鮮度保持が課題となっており、供給の不安定さ、食品ロスの増加のみならず生産者の収益を不安定なものにしている。このため、水産物鮮度保持についての革新的な研究開発が必要であるが、環境配慮の観点から、温室効果ガスの排出削減にも資する研究とすることが求められる。また、併せて、各地に伝わる伝統的保存技術の体系的整理とその科学的検証による他魚種等への利用拡大や新技術への応用、生鮮品の品質劣化のメカニズム解明のための基礎研究も重要と考えられる。

さらに、生鮮品であれ加工品であれ、消費者が求める水産物を供給していくことが持続可能な水産物の基盤となる。このため、水産養殖における育種の対象種の絞り込みなどにおいては、どのくらい日本や世界で売れるかといった社会学的なマーケティング

ングを含めた研究が重要である。さらに、安全性のみならず、健康、美味しさなどの食品価値を高めるための研究開発や、臭いや骨など消費拡大の障害となっている要因の解決に向けた研究も重要である。

5. 環境負荷低減に資する研究の推進

持続可能な水産業の確立を目指し、生産規模の拡大や生産効率の向上を目指すためには、環境負荷や食品ロス、廃棄物問題と環境修復を同時に解決していくことが重要であり、温室効果ガス排出の低減、ブルーカーボンのための多様な海藻養殖、未利用魚の利用などを複合した研究開発のアプローチが求められる。

6. ICT等の先端技術の活用にあ資する研究開発の推進

近年、急速に進展するICTやDX、AIなどの異分野と連携し、これら分野で開発された技術を水産業に効果的に応用するような研究開発を進めることが不可欠である。その際、生産や流通、消費の各段階で創生された情報をデータ連携してAI等で分析し、採捕漁業における供給の不安定さへの対応や需給のマッチング、情報付き流通に革新をもたらすための基盤構築など、水産業全体を革新するよう研究開発を進めることが重要である。また、人手不足に対応するため、多様な種類・サイズの水産物にも対応できる画像センシング技術やロボット技術の革新による自動化が急務である。

7. 地域振興を図るための関連産業との連携体制

水産業は、沿岸地域とのかかわりの深い産業であることから、水産業の振興を図るためには、個々の経営の収益性の拡大や安定化を図るだけでなく、新産業の創出等による地域振興が必要である。このため、観光や健康増進、健康寿命延伸に関する産業などとの連携を促す総合的なコミュニティデザイン(地域振興)に関する研究も重要である。

III-2 今後の実施が期待される研究開発課題

横断的な課題区分		研究開発分野・課題例
1. 水産物生産の安定化、効率化、多様化、分散化	(1)採捕漁業 a. 漁業管理	漁業・海洋関連のデジタルデータの漁業の効率化等への活用
		漁業関連データの経済価値評価に関する研究
		環境変動に対する生物学的メカニズムの解明
		生態系ベースの生物学的メカニズムを取り込んだ生態系・資源変動モデルの構築・高度化
		漁業の効率化・省力化と環境に配慮した漁業技術の高度化研究
		資源評価の迅速化、正確化に向けた評価技術の高度化
	(1)採捕漁業 b. 沿岸管理	沿岸（磯根）資源の全体理解のための総合的評価
		ネガティブエミッション技術を活用した水産生産基盤の再構築
		養殖生産と漁場造成の両立を目指した環境収容力の算定と栄養塩循環の再構築
		複合養殖による沿岸域活用の効率化・高度化
		風力発電等の再生可能エネルギー施設の漁業・生態系への影響解明とそれを活用した資源増大技術
	(1)採捕漁業 c. 環境把握のための基礎・基盤技術	地域コミュニティで実施できる漁業を活用した地域振興策の事例検証および社会・経済的観点からの学際的研究
		モニタリング観測の効率化、自動化、高精度化
		生態系の把握に必要な生体情報（ナチュラルタグ、環境 DNA、環境 RNA、マルチオミックス解析）の取得、活用に関する研究開発
	(2)水産養殖 a. 遺伝的改良による育種	漁業・環境・生態系・人間社会統計情報等の連携データベース構築とデータ駆動型研究による最適解の提供（プラネタリーバウンダリーのティッピングポイントの予測）
		高成長、耐病性のさらなる改良
		環境変動に対する頑強性の付与
		輸出強化のための戦略的な魚種の選定とその改良
		日本の水産業の多様性を活かす多種小規模育種の効率化
		国内向けタンパク源としての淡水魚養殖のための魚種の絞り込みとその改良
		水産育種におけるゲノム予測法の導入に向けた技術開発（リファレンスゲノム決定、多数個体のゲノム決定、データ解析・予測ソフトウェア開発、多群飼育技術など）
生簀内での稚魚・成魚の表現型の自動取得（フェノタイピング）技術の開発		
生殖細胞の代理親への移植による世代時間の短縮、品種保存（ジーンバンクを含む）、品種の流出防止技術の開発とその汎用化（多魚種への適用）		

(2)水産養殖 b. 飼料と給餌技術	魚粉代替飼料原料の選択肢拡大に関する研究開発	
	魚油代替原料の探索研究	
	栄養代謝機構の解明に基づくとともに優れた特性を備えた飼料の研究開発	
	人の食料・畜産飼料・バイオエネルギー原料と競合しない究極的に望まれる飼料原料の研究（陸上飼料原料を使用しない、水圏由来の使用原料を用いる、環境負荷が少ないなど）	
	大型ワムシの育種研究（アルテミアや孵化仔魚の代替） ・重イオンビーム育種で大型化したワムシの継体培養により元のサイズに回帰する問題の解決 ・更なる大型化のための選抜育種、分子育種の新技法開発	
	培養の難易度が高いカイアシ類、アミ類等の量産技術開発	
	ワムシを代替するような実用性の高い微粒子人工配合飼料の研究開発	
	仔魚飼育用餌料としてのワムシの安定供給と保存に関する研究（より確実な安定生産を可能とするワムシの機能向上、優良株の育種、保存技術の開発）	
	仔魚用の餌料生物培養の低コスト化技術の開発（AI・ICT・ロボット等の活用による培養・給餌の自動化や培養状況をモニタリングする技術の開発と実装による省人化と安定培養技術の高度化）	
	仔魚飼育用餌料における餌料生物の高付加価値化に関する研究 ・養殖対象種の健康を増進させるプロバイオティクスやプレバイオティクスの投与 ・腸管が発達する仔魚から稚魚の腸管免疫系の発達を促進させる餌料 ・摂餌を促進させるワムシの健康度と活力を向上させる餌料	
	成魚飼料原料の量産化技術およびコスト低減技術の開発	
	太陽光発電・風力発電などの自然エネルギーとの組合せによる工場生産技術およびコスト低減のための省エネルギー技術の開発	
	AI 導入自動給餌機の一層の機能高度化	
	沖合養殖における長距離搬送技術と遠隔操作機能を備えた水中自動給餌機の開発	
	農業との連携による技術開発 ・代替飼料原料として大豆等植物性原料および昆虫の大量飼育生産	
	水産養殖分野の研究開発に対する社会受容を促す研究（ゲノム編集による養殖育種、魚粉魚油の代替飼料の利活用）	
	(2)水産養殖 c. バイオセキュリティと疾病管理	養殖漁場の環境管理技術の高度化
	環境 DNA 解析および海洋流体モデルを用いて環境中の病原体の動態に着目した防疫対策の研究	
	DNA/RNA ワクチンの研究開発および開発に必要なガイドラインの作成	
	適切なアジュバントの開発研究	
生ワクチン認可への検討に必要な研究		
オートジーナスワクチンの導入と法的整備に関する研究		
連続注射器の改良として保定法や注射針を用いない接種方法の開発		
注射以外の投与方法の開発（経口法の改良と新手法、浸漬法改良、経鰓、経腸など）		
欧米の Minor Use and Minor Species Animal Drug 制度の研究と導入		
海外ワクチン、海外水産用医薬品の日本における開発推進策の検討		

		<p>獣医師による適切な適用外処方と休薬期間の設定を可能とする薬剤代謝データベースの作成</p> <p>市販ワクチンの魚種拡大のためのデータの集積</p> <p>訓練免疫 (Trained immunity) の概念に基づいた新たな魚介類の疾病予防法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エビなど無脊椎動物への”ワクチン”の開発促進 ・獲得免疫機能が未熟な仔稚魚に対する防御能の付与方法の開発 ・免疫賦活剤やプロバイオチックスの再評価と適正な活用法の開発 <p>エビ類における耐病性家系の作出技術の開発</p>
	(2) 水産養殖 d. 養殖システム	<p>日本の海洋環境に適した沖合養殖システムの開発</p> <p>沖合養殖システムを構成する関連技術の高度化</p> <p>分業化される各分野 (種苗生産・中間生産・出荷までの生産) の技術の高度化と実証研究</p> <p>分業化される各分野 (種苗生産・中間生産・出荷までの生産) の経営・財務に関する研究</p> <p>RAS の経済性向上に資する技術開発 (大型化、高効率システム化)</p> <p>適切な排水管理を含む自然環境に及ぼす影響の最小化と適切な規制の在り方に関する研究</p> <p>電力等エネルギー対策と持続可能性の高い陸上養殖のシステム構成に関する技術開発</p> <p>水産対象動物の成長と耐病性を高める飼育法に関する研究</p> <p>日本が主導すべき国際標準テーマに関する研究</p> <p>食料危機の回避に適した魚種の種苗研究</p> <p>内水面養殖技術を維持する研究</p> <p>工学・海洋工学との連携による技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ AI, IoT, ICT, DX を取り入れた養殖システムおよび同要素技術の高度化 ・ 洋上風力発電施設/小型潮流発電を利用した沖合養殖システムの駆動 ・ 風力・自然エネルギーを利用した陸上養殖システムの駆動や配合飼料原料の工場大量生産
	(2) 水産養殖 e. 無給餌養殖 (海藻養殖、二枚貝養殖)	<p>環境モニタリングによる沿岸域の地域特性 (環境収容力、海洋特性等) の把握と地域特性を活かした無給餌養殖システムの高度化</p> <p>地域特性に適した複合養殖のシステム設計と産業経済性に関する研究</p> <p>環境変化や異常気象に対応した新品種の開発、海洋変化予測技術の高度化、養殖施設の耐久性強化等の適応技術・研究開発</p> <p>養殖海藻のバイオマス活用に関する他産業との連携研究</p>
	(3) 新規水産物開発	<p>食用魚介類のセルバンクの構築、細胞水産業における培養条件の最適化</p> <p>水産物 (代替品) の加工に適した方式の 3D フードプリンターや食品インクの開発、食品コンテンツの開発</p>
2. 水産物流通の安定化、効率化、多様化、分散化		<p>水産エコラベルの仕組みを応用した認証システム、水産物の検査技術、品質評価技術、ブロックチェーンや RFID タグなどを活用した情報プラットフォーム</p> <p>生産・消費のマッチング</p>
3. 環境負荷の低減		未利用魚や魚あらを活用したアップサイクル技術

	電圧印可、保存雰囲気、包装技術などによる鮮度保持技術
	海洋環境における負荷物質の挙動と環境浄化力の評価、生態系への影響評価
	マイクロ・マクロプラスチックの影響評価、漁業・養殖業資材のリサイクル、環境配慮型素材への転換技術
4. ICT (AI、DX、連携、ロボティクスを含む) の活用	モニタリング技術の「質の革新」による高度化
	生産から加工・流通過程における、手作業を代替できる画像センシング技術やロボット技術など自動化技術
5. 地域振興、漁村振興	ブルーツーリズム等の新産業・新サービスの創出、地域ブランドコンテンツの開発と社会経済効果の検証
6. 生産者・消費者行動に関する社会技術研究	消費者ニーズに合わせた漁獲・養殖生産判断とその経営・経済学的研究
	フードネオフォビアに対する研究、水産物の風評被害に関する研究
	水産物生産における環境負荷の定量化、可視化
7. 「食品」としての水産物研究	美味しさ、健康、安全性、調理の簡便化などの食品価値の追求に関する研究、水産物の性状、物性に関する研究

Ⅲ-3 付帯意見

研究や技術開発の円滑な推進、並びに開発成果の社会への定着を確実にを行うためには、様々な政策的な支援が不可欠である。この項では、研究や技術開発をサポートし社会実装を促進するために必要な政策的課題について付帯意見として付記する。

1. 情報基盤の整備

我が国の経済発展と社会課題の解決の両立を目指す「Society 5.0」の実現に向け、水産科学においてもデータサイエンスの推進が喫緊の課題であるが、水産分野においては育種のためのゲノム・表現型情報や赤潮情報、漁業情報などが目的や研究分野ごとに構築されているのが現状である。生産から加工・流通、消費までの横のつながりをスムーズにするためにも、各分野の膨大なデータを蓄積、整理・統合し、課題解決のために活用できる「情報基盤」の整備が急務である。特に、水産分野が対象とする情報は、地球規模で変化する気象や海洋等に関するものであることから大容量で洋上でもアクセスが容易な「通信インフラ」を整備する必要がある。これらは、個々の企業での実施は困難であることから、国家事業として推進することを期待する。また、我が国を取り囲む「海」は水を通じて境界なく世界につながっており、気象や海の観測は地球レベルで行われている。また、その観測データには国境がない。我が国としてのデータポリシーを明確にした上で、国際的な連携の促進が望まれる。

2. 水産ジーンバンクの構築と研究成果の円滑な社会実装に向けた総合的な取組の展開

日本においては水産育種や種の保全、ゲノム研究の基盤となる水産分野のジーンバンクが極めて脆弱である。ジーンバンクは国益、公益の観点から国家戦略として整備すべきものであり、この整備により関連分野の研究の進展が期待できる。また、研究開発の推進のための産学官連携を促す研究実施体制の整備も重要である。

また、研究開発成果のスムーズな社会実装に向け、新たに開発された技術の実社会での活用に向けた柔軟でスピード感のある制度改善やルール作り、開発技術の補助支援メニューへの取り込みや国際標準化・基準化など、国としての総合的な取組が必要である。

Ⅲ-4 おわりに

水産業には水産物を国民に安定供給するという使命があり、食料安全保障のために、自然や社会環境の様々な変化に柔軟に対応できる強靱性を備える必要がある。本報告書では、食料安全保障の観点から、水産業に係る研究開発の動向を分析し、水産物の国内生産力を強化して安定供給を確保するための研究開発の方向性について調査、検討した。

我が国の漁業・養殖業生産量は、かつては世界第一位を誇っており、それらの生産技術を支える研究や技術開発についても世界の第一線を走っていたと認められる。しかし、ここ数十年の間に水産物生産量と水産食料自給率は激減し、水産分野論文数ランキングの世界比較においても、そのランキングが低くなっている状況が認められ、世界における水産日本のプレゼンスは損なわれるのではないかと懸念される。この状況のままでは、世界人口が増加しタンパク質需要が増加することが見込まれる将来において、水産物の安定供給を確保することは困難となるのではないかと危惧される。加えて、地球温暖化やこれに伴う海洋変化、海洋汚染など水産をめぐる状況がめまぐるしく変化し、環境配慮や国際的な漁業規制など社会的な制約も多い中で、我が国の水産業を強靱化するためには、産学官がそれぞれの役割を果たしつつ密に連携して研究開発を推進することが重要である。

今後、本報告書の内容を農林水産省をはじめとした政府機関等に説明するとともに、公益社団法人日本水産学会とも連携して広く公表することで、水産科学に関わる産学官の関係者内で今後の水産研究の方向性についての共有が図られることを期待する。

IV. 謝辞

本調査あたり、研究開発構想の調査結果の取りまとめをご指導いただいた企画委員会委員の大学、研究機関、企業の方々ならびに、分科会にご参加いただきました有識者の皆様に、心より感謝申し上げます。

V. あとがき

水産研究が中長期的に取り組むべき内容について、多くの課題を取り上げて現状分析と議論を行い、研究開発の構想を提言として本報告書に取りまとめることができた。

世界では水産物の需要が増して水産業が成長産業として伸びているのに対して、日本では国民一人当たりの水産物の消費が減少することや漁業生産量や生産金額が減少してきている。また、地球温暖化などの環境問題への対応や不安定な世界情勢の中での食料安全保障に向けても、水産業の成長産業化と強靱化が大きな課題となっている。こうした課題のブレークスルーのためにも、科学技術と研究開発に大きな期待が寄せられている。

我が国の研究推進においては、例えば、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議において広い分野において大きな目標を定め、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発が推進されるなど、野心的なイノベーションの創出を目指した戦略がとられている。農林水産研究全体についても、我が国の豊かな食と環境を守り発展させ、農林水産業の国際競争力の強化につなげていける研究イノベーション創出を目指して、研究開発の重点事項や目標を定めた「農林水産研究イノベーション戦略」が農林水産技術会議によって毎年度策定されている。しかしながら、このイノベーション戦略の中では、水産業は農林水産業の中のひとつとしてまとめられ、「漁業・養殖業をめぐる情勢」が示された後、水産研究の重点政策として「漁業・養殖業におけるカーボンニュートラルへの貢献」と「スマート水産業」が示されているだけである。水産業は、他の農業分野と同様に自然の生態系に基づく産業であり、特に海洋生態系やそこに生息する生物を扱い、そしてその多くが食品として鮮度低下が著しいことなど、異なる面も持つことから、水産研究ではさらに広い専門領域を取り扱うことになる。一方で、本報告書の「はじめに」で報告したように、水産研究の各領域において、世界では論文数が急激に伸びているのに対して、日本での論文数の伸びはそれほどでもなく、相対的に日本の水産研究が存在感を失いつつあるようにも見える。こうしたことから、水産研究のより一層の活性化を図り、また水産業とその関連分野におけるイノベーション創出のために、採捕漁業から水産養殖、そして水産物流通と環境負荷低減について、水産研究の開発構想を取りまとめることになった。

漁業と養殖業、流通の三つの分科会を設けて議論していく中で、相互に関連する内容が多岐に渡り、分科会を跨いで議論すべき事項が多いことが改めて認識された。そうした事項は本報告書の中でも他をページの参照を示した。このことは、水産をトータルのシステムとしてみる必要性を示唆してくれている。また、水産業や水産研究の発展のためには、法令の制定や規制緩和、あるいは国の方策としての支援が必要なが多いことも度々議論となった。こうしたことについても、提言の最後に付記した。

企画委員会と分科会の中で、成長産業化には効率化を目指して産業の大規模化や集約化が必要なのか、あるいは小規模のままでも多様性を残しながら地域に根差し、何

らかの連携、協力を取りながら持続性のある水産業として維持していくのか、こうした議論が度々顔を覗かせた。水産業を集約化して規模を大きくして競争力を持った組織なりで、国際的な競争にも打ち勝つ道での成長産業化もあるだろう。一方で、我が国が持つ多様な水産業、漁業、養殖業のあり方をもとに、地域の得意とするところを活かし、多様な形態を持って規模は小さくても特異な産業として育てることもまた地域振興と相まって Well-being な成長産業のひとつを生み出すことにもなるだろう。この議論は研究の進め方にも関連するところがある。国際的な競争に打ち勝ち、世界の中で標準となるためには、研究テーマを絞って研究資金と人材を集中する、いわゆる「選択と集中」による大規模な研究プロジェクトが欠かせない。一方で Eroom の法則を持ち出すまでもなく、研究が高度に進展した中で更なる深化を目指すには、必要な研究資金は莫大なものとなっていく。研究資金の規模は小さくても、研究の多様性を保つ中から、まったく異なる視点での新たな研究の芽が生み出されることも考えられる。水産の食文化などが似通った東南アジアに向けて、世界標準とは異なる視点での先端的な研究成果を生み出し、そこから世界をリードする道筋もあるだろう。研究者が各自の視点で研究を進めるためにも、本報告書を大いに利用してもらいたい。

研究における専門性が高まりかつ高度化されている中で、研究者は自らの専門に集中せざるを得ないが故に、全体の中での自身の研究の位置付けを見失いがちである。本報告書では、研究者が専門分野の最先端を目指すための情報を得ることもでき、また報告書全体を通読することで、水産研究全体の中での自身の研究の位置付けを認識でき、さらには他分野との連携の可能性に気づくことができるだろう。それによって、それぞれの研究の発展が全体として水産研究の大きなイノベーションにつながることを期待したい。

謝辞でも示したが、企画委員会の委員、特に分科会の委員とメンバーには、それぞれのテーマにおける話題提供やコメントをいただき、議論が展開されていった。あらためて御礼申し上げたい。また、生物系特定産業技術研究支援センターの伊藤、前田、宮田、小林の各氏には、資料のとりまとめや委員会や分科会での多様な意見、様々な議論をその都度とりまとめていただいた。それによって委員会での議論が進められて、研究開発構想としての提言とりまとめと本報告書の完成に至った。ここに深く感謝する。

研究開発構想企画委員会
委員長 東海 正