

S-16 : 次世代海洋食料生産システム
研究委員会

報告書

2021年3月

公益社団法人日本船舶海洋工学会

目次

| | |
|----------------------------|----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. 研究委員会の概要..... | 2 |
| 2.1 組織..... | 2 |
| 2.2 委員会開催履歴..... | 2 |
| 3. 海洋食料生産の国内外情勢の調査と課題..... | 3 |
| 3.1 はじめに..... | 3 |
| 3.2 海外の養殖戦略..... | 3 |
| 3.3 日本の養殖戦略..... | 3 |
| 3.4 まとめ..... | 4 |
| 4. 沖合養殖技術..... | 5 |
| 4.1 はじめに..... | 5 |
| 4.2 沖合養殖プロジェクト..... | 5 |
| 4.3 沖合養殖の現状のまとめと今後..... | 6 |
| 5. 深層水利用技術..... | 8 |
| 5.1 はじめに..... | 8 |
| 5.2 人工湧昇流の研究開発..... | 9 |
| 5.2.1 塩分..... | 9 |
| 5.2.2 潮流・海流..... | 9 |
| 5.2.3 波力..... | 9 |
| 5.2.4 動力を用いた湧昇装置..... | 9 |
| 5.3 まとめ..... | 10 |
| 6. おわりに..... | 11 |
| 参考文献..... | 12 |

1. はじめに

世界では、1人あたりの水産物供給量が20kg/年に迫り、人口も増加していることから、水産物需要が急増している¹⁾。現在、急増する水産物供給量をまかなっているのは主に養殖生産である。しかし、沿岸域では、養殖に適した海域の狭隘化や環境汚染等の問題が発生し、養殖海域の拡大は困難である²⁾。一方で、陸上養殖や沖合養殖では、高い設備コスト、オペレーションコストなどが課題となっている^{3,4)}。今後は、良質で安価な配合飼料の確保も養殖生産拡大のボトルネックになると予想される。さらに、海外への輸出を見越した場合は、海外へのマーケティングや流通、品質管理、労働環境の改善や環境影響評価等による認証の取得も重要となる。そこで、本研究委員会では、日本を含めた各国の水産物生産量の増大に向けた戦略を調査することによって現在の課題を整理し、船舶海洋工学分野で貢献できる技術課題を抽出することを目的とした。そこで、以下の項目を実施した。

- 主に文献調査によって、国内外の海洋食料生産システムに対する戦略を調べる。
- 上記を取り纏めて、海洋食料生産システムの現状と今後の課題を整理する。
- 船舶海洋工学分野が貢献できる技術課題を抽出し、現状技術のレビューを行う。

2. 研究委員会の概要

2.1 組織

本研究委員会のメンバーは、表 2.1 のとおりである。第 4 回委員会では、学生オブザーバ 1 名が参加した。

表 2.1 研究委員会メンバー

| 役職 | 氏名 | 所属 |
|-----|-------|---------------------------------|
| | 石黒 泰大 | (株) IHI・技術開発本部総合開発センター |
| | 大内 一之 | (株) 大内海洋コンサルタント |
| 委員長 | 北澤 大輔 | 東京大学生産技術研究所大規模実験高度解析推進基盤 |
| | 清水 真之 | (株) IHI・技術開発本部総合開発センター |
| | 多部田 茂 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻 |
| | 段 烽軍 | キャノングローバル戦略研究所 |
| | 中溝 和馬 | 三菱造船(株) 事業戦略推進室 |
| | 西 佳樹 | 横浜国立大学大学院工学府 |
| | 吉田 毅郎 | 東京大学生産技術研究所機械・生体系部門 |
| | 吉本 治樹 | ジャパンマリユナイテッド(株) 海洋・エンジニアリング事業本部 |

2.2 委員会開催履歴

本研究委員会は、3 年間で計 5 回開催した。委員会の日時、場所、出席者数、主な議題を表 2.2 に示す。

表 2.2 委員会開催履歴

| 回 | 日時 | 場所 | 出席者数 | 主な議題 |
|---|-------------------------------------|----------------------------|------|--|
| 1 | 平成 30 年 11 月 14 日(水) 10:00~12:00 | 東京大学 生産技術研究所 C 棟ラウンジ | 3 | ・ 研究委員会の目的 ・ 海洋食料生産の現状 ・ 自由討論 |
| 2 | 平成 31 年 2 月 19 日(火) 13:30~15:30 | 東京大学 生産技術研究所 E 棟ラウンジ | 7 | ・ 研究委員会の目的 ・ 海洋食料生産の現状 ・ 人工湧昇流 ・ 自由討論 |
| 3 | 令和元年 5 月 21 日(火) 10:00~12:00 | 東京大学 生産技術研究所 An-405 | 8 | ・ 沖合養殖・陸上養殖の現状 ・ 人工湧昇流 ・ 今後の方針 |
| 4 | 令和元年 11 月 20 日(水) 10:00~12:00 | 東京大学 生産技術研究所 C 棟ラウンジ | 8 | ・ 養殖の現状 ・ 人工湧昇流 ・ 今後の方針 |
| 5 | 令和 3 年 3 月 15 日(月) 10:00~12:00 | オンライン | 9 | ・ 養殖に関する情報交換 ・ 報告書の確認 |

3. 海洋食料生産の国内外情勢の調査と課題

3.1 はじめに

国内外の海洋食料生産システムに対する戦略を調べるため、文献調査を行った。各国の養殖に対する戦略をインターネット上で検索し、最も新しいと思われる戦略を抽出した。一方、国連食糧農業機関（Food and Agriculture Organization）等でも今後の養殖業を展望する資料が散見されたが、必ずしも最新の情報を提供していないと思われたため、ここでは各国の戦略に焦点を当てた。ただし、すべての国の戦略を抽出できたわけではない。たとえば、養殖によるエビの生産量が多い東南アジアや、今後成長が見込まれる中南米は含まれていない。一方、今回調査の対象とした国々は、沿岸、沖合における海面養殖や陸上閉鎖式循環養殖の積極的な普及を目指しているため、これらの国々の戦略は、日本の今後の戦略と親和性が高いと考えられる。具体的な調査方法としては、各国で掲げている数値的目標を極力抽出し、この目標を達成するための戦略を要約した。

3.2 海外の養殖戦略

いくつかの主要な国で策定されている養殖戦略を調査した。参考とした文献は以下の通りであるが、詳細は割愛する。

- オーストラリア：National Aquaculture Strategy, September 2017⁵⁾
- カナダ：National Aquaculture Strategic Action Plan Initiative (NASAPI) 2011 – 2015⁶⁾; Aquaculture Development Strategy 2016-2019⁷⁾
- 中国：The Thirteenth Five-year Plan for National Fishery Development⁸⁾, Several Opinions on Accelerating Green Development of Aquaculture (per. comm.)
- 欧州連合：Aquaculture in the EU⁹⁾; Summary of the 27 Multiannual National Aquaculture Plans¹⁰⁾
- ノルウェー：Roadmap for the Aquaculture Industry¹¹⁾
- ニュージーランド：The New Zealand Government Aquaculture Strategy¹²⁾
- アメリカ：National Strategic Plan for Federal Aquaculture Research (2014-2019)¹³⁾; Marine Aquaculture Strategic Plan FY 2016-2020¹⁴⁾

3.3 日本の養殖戦略

日本では、2020年7月に水産庁によって養殖業成長産業化総合戦略が取りまとめられた¹⁵⁾。この総合戦略は、養殖業の全体像の理解を深め、成長産業化の取組方向と将来めざす姿等のビジョンを共有し、実現にむけた取り組みを考える内容となっている。日本の養殖業は、海面養殖業が中心となっており、2018年頃の生産量は約100万トン、算出額は約5,100億円となっている。これらのうち、海面魚類の生産量は約4分の1、生産金額は約50%である。魚類養殖業は、支出に占める配合資料代の割合が6～7割を占め、漁労収支がほぼ均衡している状態であり、これを脱却するためには、収入増加又はコスト削減を実現する必要がある。研究開発としては、養殖魚の鮮度保持や加工技術の機械化、品質の見える化などの加工・流通に係わる技術開発に加えて、閉鎖循環式陸上養殖、沖合養殖技術等の開発が行われている。さらに、選抜育種などの育種、魚粉の代替タンパクとして植物性原料、動物性原料

を用いた配合飼料の研究の促進も必要とされている。そこで、戦略としては、生産・加工・流通・販売の各段階が連携、連結し、マーケット・イン型養殖業に転換することが掲げられている。ブリ、マダイ、クロマグロ、サケ・マス類、新魚種の2030年の生産目標をそれぞれ24万トン、11万トン、2万トン、3～4万トン、1～2万トンとしており、現在からの増加分のほとんどは輸出向けとしている。

3.4 まとめ

将来的な生産量の数値目標を概観すると、世界の養殖生産量が年間に5～8%程度増加しているのを鑑み、同様の増加を想定した値を設定している国が多い。また、生産量ではなく、生産金額で目標値を示している。各国での生産量と生産金額から養殖魚の単価を計算すると、概ね400～600円となっている。生産量の目標については、日本でも、いくつかの魚種に限定されているが、2030年の生産目標値が現在の概ね2倍となっており、今後も国内外で養殖産業のさらなる発展が予想される。

養殖産業の発展に向けた戦略は、各国で様々であるが、大きく分けると①海域使用許可や規制、②環境影響評価やバイオセキュリティ、③技術開発、④人材育成とアウトリーチが挙げられている。①については、養殖のために海域を使用するにあたって、多くの海域利用者とどのように調整して、許可を与えるかという問題であり、各国の戦略においても冒頭に掲げられている場合が多い。②には、養殖魚からの排泄物が周辺の環境や生態系に及ぼす影響を最小化し、持続可能な養殖を可能とすること、また寄生虫による魚病の発生や、養殖魚の逃亡による生態系の攪乱を防止することなどが含まれる。③については、育種、配合飼料の開発に加えて、陸上閉鎖循環式養殖、沖合養殖に係わる技術開発、およびIoT、AI等を活用した生産性の向上などが挙げられる。最後に、④は、養殖に携わる人材の育成に加えて、社会への周知を促進し、海洋養殖に対する国民の理解の増進を進めることが挙げられる。

これらの戦略の中で、船舶海洋工学が貢献できる技術としては、沖合養殖や、配合飼料確保のための深層水利用技術などが挙げられる。4章と5章ではこれらの技術の現状についてレビューする。

4. 沖合養殖技術

4.1 はじめに

養殖は、静穏域である沿岸域を中心として発展してきたが、今後の世界の水産物需要の増大に対応するためには、沖合域の利用が必要になると予想される。通常、沖合域は、陸からの距離によって定義される。例えば、米国では沿岸から3~200マイルの海域で行う養殖を「offshore」での養殖と定義していた¹⁶⁾。一方、日本で養殖が行われている海域のマップを見てみると、沿岸から距離が近い場所でも、波浪や流れが比較的大きい場所では実質的に養殖を行うことが難しい。ノルウェーでも、海洋環境が厳しい海域での養殖技術の開発を目指して、「Exposed」と呼ばれるプロジェクトが行われている¹⁷⁾。いずれにせよ、世界では沖合養殖への期待が高まっている¹⁸⁾。沖合養殖の利点としては^{4,19)}、人間活動の影響を直接的に受ける沿岸域に比べて水質が良く、汚染が少ないこと、水温等の水質が安定しており、流れが比較的速いため、新鮮な海水が提供されやすいことが挙げられる。さらに、他の海域利用者との競合が少ないため、海域の選択において自由度が高い。その結果、水温等の面で最適な海域を選択しやすく、大規模な養殖も展開しやすい。その他、寄生虫による魚病の発生の軽減、養殖設備等への生物付着の減少が見込まれることから、魚の健全で早い成長や増肉係数の向上が期待される。一方、沖合養殖では、オペレーションとメンテナンスの環境が厳しい。また、加工、市場、輸送などのインフラまでの距離が遠い。さらに、強い風、速い流れ、高い波浪に対応するために設備費がかかる。したがって、技術的に解決すべき課題も多く存在する。ここでは、世界の沖合養殖技術のこれまでの経緯をレビューする。

4.2 沖合養殖プロジェクト

1980年代後半、日本では海洋牧場や沖合養殖プロジェクトが実施された²⁰⁻²⁴⁾。1987~1993年に実施された海洋牧場プロジェクトでは、マダイ、クロソイ、ヒラメの音響馴致システムに関する実証実験が行われた。1988~1993年には、南方系と北方系の魚を対象として、沖合養殖プロジェクトが展開された。TLP型やジャッキアップ型の海上ステーションが建設され、給餌装置などが搭載された。海外では、大型生簀の研究開発が始められた。スウェーデンでは、7mの波高に耐えられて6,000m³の容積を持つFarmoceanと呼ばれる生簀が開発され⁴⁾、ロシアでは深さ方向に位置を変えられるSADCOと呼ばれる生簀の開発が始まった²⁵⁾。

1990年代に入ると、米国で沖合養殖プロジェクトが展開された。スパーを活用したSeaStation、AquaSparや球型の生簀等²⁶⁾、給餌機²⁷⁻²⁸⁾の開発が行われ、現在は給餌機や大型浮沈式生簀を含むシステムとして、パナマ沖でのコビアの養殖への適用などが検討されている。また、これとは別に、使い古した石油・ガスプラットフォームを利用し、スタッフが常駐して養殖を行うプロジェクトも検討された²⁹⁾。プラットフォームのデッキ上のタンク内で稚魚から中間魚まで成長させた後、プラットフォーム近傍の4つの生簀に移動し、出荷サイズまで飼育する方式であった。米国では、2007年頃に、沖合3~200マイルの海域で沖合養殖の海域使用許可を得ることなどを目的とした沖合養殖法案が準備された³⁰⁻³¹⁾。沖合養殖を促進するにあたって、海域使用許可のプロセスが不明確であること、環境への影響や環境容量が不明確であること、研究、技術開発のインフラが欠如していること、国民の

理解が不十分であること等の課題があったため、これらを解決するための施策が提案された。日本では、2007～2009年に沖合沈下式養殖プロジェクトが実施され、多くの沈下式生簀に含まれる魚に対して、陸上からの遠隔操作で自動給餌できる装置を搭載したバージ船が開発された。さらに、2008～2012年のクロマグロ養殖効率化事業では、大型浮沈式生簀の開発³²⁾に加えて、給餌システム、網洗いロボット、死魚回収ロボット、盗難防止システム、環境モニタリングシステム、魚体長計測システム等の多くの周辺技術が開発された。

2010年代に入ると、世界各国で沖合養殖プロジェクトが開始された。韓国では、自然環境条件が厳しくなると自動的に沈下する生簀の開発が行われた³³⁾。済州島の沖合で養殖を行う場合のシミュレーションも行われた³⁴⁾。2015年からは、スマート漁業管理システムの研究開発が開始され、2016年にプラットフォームの開発、2018年にボラを対象に実証研究が開始された。今後、釜山広域市と慶尚南道固城郡に大規模なスマートフォームクラスターが構築される。自動給餌装置、魚類成長遠隔測定装置、飼育環境・水中映像のリアルタイム監視システム、制御装置、気象観測装置、モバイル機器と水中ドローンとを連動した技術開発となる予定である。ノルウェーでは、これまで静穏で深く、低い水温を持つフィヨルド海域という自然環境のアドバンテージを背景として、沿岸養殖を発達させてきたが、養殖に適した海域が狭隘化している。そこで、沖合養殖に向けた検討が開始され、2015年にはEXPOSEDと呼ばれるプロジェクトが開始された¹⁷⁾。大型の生簀や複数の飼育スペースを内包した船舶型の構造物などが建造され、実証実験が進められている。1つの設備で1万トン程度の生産能力を有するものもある。一方、中国でも、大規模な養殖施設が開発されるようになってきた。前述のノルウェーの大型生簀も中国の造船所で建造された。様々な種類の養殖魚を対象として、様々な形式のプラットフォームが建造され、実証実験が始まっている。ノルウェーと同様に、1つの設備が持つ生産能力が数千トン～数万トンに及ぶものもある。日本では、大規模沖合養殖システムのプロジェクトが実施された。ノルウェーや中国で開発されているような超大型の設備ではないが、大型生簀を複数並べて自動で給餌するシステムの研究開発が進められている。また、小規模養殖システム用に、可変深度型生簀等の開発が行われ、ICT技術とともに養殖業のスマート化が図られている³⁵⁻³⁶⁾。

一方、沖合養殖とは少し異なるが、沿岸域を中心として海上での閉鎖循環式、あるいは半閉鎖循環式の養殖システムについても検討がなされている。陸上の閉鎖循環式養殖システムに比べて、設備費はかかると思われるが、魚の最適水温に適合した海域を選択できることなどから、ランニングコストを軽減できることが期待される。シンガポールではバージ船を用いて、太陽光発電を活用した海上での閉鎖循環式養殖システム、ノルウェーではサケジラミや養殖魚の逃避の問題に対応するために卵型の海上の半閉鎖循環式養殖システムの研究開発を進めている。広大な海洋空間を有効に利用する取り組みとして注目されている。

4.3 沖合養殖の現状のまとめと今後

世界の沖合養殖については、1980年代に数1000m³の容積を持つ大型生簀の開発から始まり、その後給餌機なども含めたシステム化が行われてきた。近年は、情報技術の発達に伴って、IoT、デジタルツイン、AI等を活用したスマート化が図られつつある。併せて大規模化も進められているが、従来の養殖システムを拡張して、複数の大型生簀と給餌設備等を組み合わせる大量生産を行う戦略と、超大型の養殖システムで、数10万m³の容積を持つ生簀または構造物を有し、一つの設備で10,000トン程度の生産を目指す戦略とに大別される。

一方、沿岸域、沖合域に関わらず、海上の半閉鎖循環式、閉鎖循環式の養殖システムの開発も進められており、今後沖合に展開して海洋空間を有効に活用する事例が発生する可能性がある。沖合養殖システムには様々な課題があり（図 4.1）、今後も活発に研究開発が行われていくものと予想されるが、システム化を進めていくことも重要となる。また、大規模化を進めるにあたって、特に超大型の養殖システムの場合は、船舶海洋工学で貢献できる技術があると期待される。

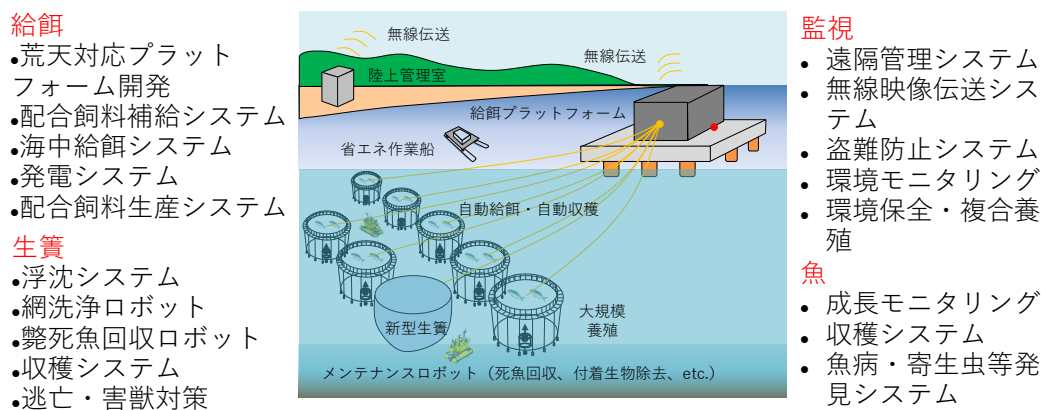


図 4.1 沖合養殖システムの研究開発課題

また、米国で使い古された石油・ガスプラットフォームを利用して養殖を行った事例を紹介したが、今後は洋上風力発電などの海洋再生可能エネルギー産業との連携も進められる可能性がある。欧州では、2011～2015年にマーメイドプロジェクトが実施され、洋上風力発電と養殖の共存に関するケーススタディが実施された³⁷⁾。このプロジェクトでは、場所の選択、養殖種の選択、発電機的设计、養殖施設的设计について、理論的な分析や提案が行われた。水深が浅い河口、風が強い浅い沿岸、流れが遅い深海、深海の4つのタイプのサイトを対象として、海域管理の政策、海域の物理特性（風速、潮流、波浪など）、その物理特性に基づいて風車や養殖を行う可能性、養殖向けの生態系特性、利害関係者の意見や海域開発の制限と難点などの社会的な要因が取り纏められた。この設計案は利害関係者に説明され、合意がなされるまで改良された。さらに、近年の環境への意識の高まりに応じて、沖合養殖においても排泄物を有効に活用する方法が模索されている。複合養殖はその一例であり³⁸⁾、環境調和型の沖合養殖システムの実現が望まれている。

5. 深層水利用技術

5.1 はじめに

近年、海面水温が上昇傾向にあり、栄養塩不足による表層での一次生産力の低下が懸念されている。一次生産力が低下すると、養殖魚のための配合飼料の供給が十分にできなくなる。これまで用いられてきた魚油、魚粉に代替するものとして、植物タンパクや昆虫等の利用が検討されている。また、大型藻類は、多くの魚類が直接的に摂取することは少ないが、魚類の飼料として有効であることは知られている³⁹⁾。一方で、これらの植物タンパクや昆虫を用いた飼料生産では、最終的には不飽和脂肪酸等の不足している成分を付加する必要があるため、動物タンパクの安価な供給も期待されている。

このような課題に対し、鉛直循環装置によって深層水を汲み上げ、表層で栄養塩を拡散することによって、一次生産を活発化させる方法の実現が期待され⁴⁰⁾、実海域実験が行われてきた(図 5.1)。最初に実海域で行われた取り組みとして、富山湾に設置された「豊洋」による深層水の汲み上げがある⁴¹⁾。豊洋は、深度 250m の海水を 1 日に 26,000 トン汲み上げ、表層水 52,000 トンと混ぜて表層に放出するもので、1989～1990 年に実海域実験が実施された。さらに、深度 200m から 1 日に 10 万 m³ を汲み上げる海洋肥沃化実海域実験装置「拓海」の開発が行われ、2003 年 7 月に相模湾中央部に設置された⁴²⁻⁴³⁾。約 4 年間にわたって実証実験が行われ、台風の直撃を含む荒天の実海域で稼働実績を残すことができた。ハード面では当初の目標が概ね達成された。近年は、海底山脈の実海域実験⁴⁴⁾や、再生可能エネルギーを用いた人工湧昇流の研究開発も行われている⁴⁵⁻⁴⁶⁾。また、これらの効果のモニタリング、シミュレーション技術も進展してきている⁴⁷⁻⁴⁹⁾。深層水を汲み上げる以外にも、鉄散布等を用いて海洋を肥沃化するプロジェクトが実施されてきた⁵⁰⁾。また、これら海洋における栄養塩の散布技術においては、船舶海洋工学が貢献できる余地が大きいと考えられるため、ここでは、これまでに実施または提案されている人工湧昇流発生装置について、塩分差、潮流、波力、別途動力を利用するものに分けて概観する。

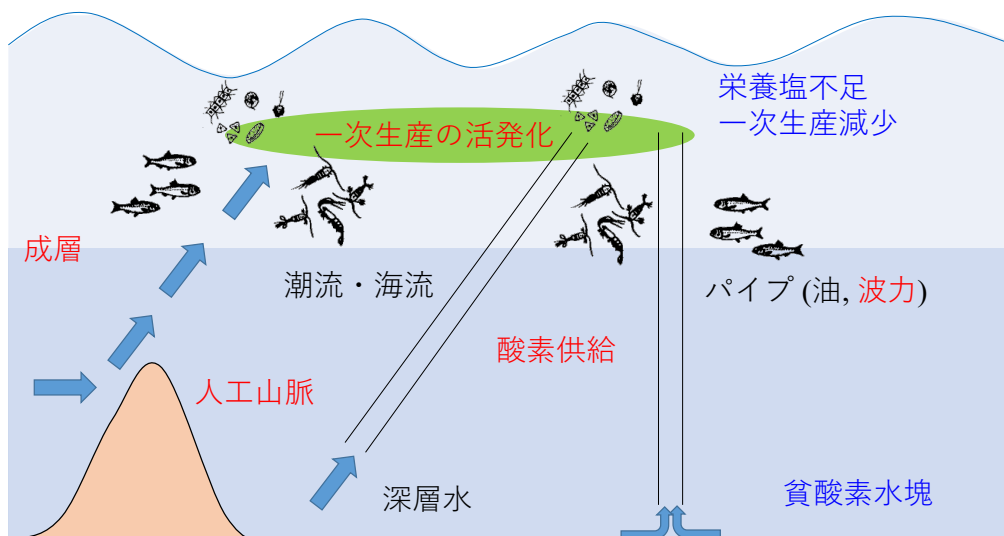


図 5.1 様々な人工湧昇流発生装置

5.2 人工湧昇流の研究開発

5.2.1 塩分

塩分を用いた人工湧昇流の先駆的な研究として、Stommel et al. (1956)⁵¹⁾による研究が挙げられる。熱帯地方などでは海表面の塩分が高くなっている。長いチューブによって構成される装置を海水中に設置すると、チューブ内の高塩分水は沈降する。その結果、深層水はゆっくりと上昇するが、このサイクルは永久的に行われる。水槽実験では、理想的な実験条件が続く間は沈降水を再現することができた。この原理を用いて、直径 0.3m、長さ 280m のポリ塩化ビニル製の柔軟なパイプがマリアナ海溝に設置され、湧昇実験が行われた⁵²⁾。その結果、212 m/day の湧昇速度が得られた。この装置を発展させて、さらに永久塩噴水の実験を行い、湧昇速度が 7mm/s で 3 日間継続することが示された⁵³⁾。1つのパイプから 45m³/day の流量が得られた。複数のパイプを用いたシステムを展開することにより、より大きな効果が得られると期待される。

5.2.2 潮流・海流

潮流・海流を利用したものとして、人工山脈以外に、長いパイプを傾斜させて設置させた方式がある⁵⁴⁾。水深 200~300m の深層水を汲み上げて 30-50m に放出する装置を開発した。この装置は、ブイ、収縮拡張チューブ、長いパイプから構成される。初歩的な実験と解析からプロトタイプを作成した。

5.2.3 波力

波力ポンプを用いた湧昇効果については、理論的に検討されている⁵⁵⁾。波浪がパイプを通過することによって湧昇が生じる。パイプ長は波浪の波長の半分を必要とする。波長 100m の波浪の場合、湧昇速度は 15.6cm/s と試算された。波力を用いた人工湧昇流装置として、ハワイ沖で湧昇装置の流体性能が調べられた⁵⁶⁾。人工湧昇装置は、直径 4m のブイ、直径 1.2m、長さ 300m の長いパイプ、流量調整バルブから構成される。ハワイ沖の不規則波から湧昇装置が受ける流体力をモデル化した。その結果、ハワイ沖の不規則波で 0.95 m³/s の湧昇性能が得られた。2008 年には、オアフの北側で人工湧昇装置の実験が行われた⁵⁷⁾。実験は、海洋環境からの負荷によってポンプが損傷し、17 時間のみ行われた。その間に、深度 300m より 45 m³/h の速度で汲み上げられた。波力ポンプを利用した人工湧昇装置の水槽実験では、実物に換算して 5~360 m³/h の湧昇が可能であり、湧昇効率は波の谷とパイプ上端の距離に依存することが示された⁵⁸⁾。さらに、近年は効率を向上するために新たな装置が考案されている⁵⁹⁻⁶⁰⁾。

5.2.4 動力を用いた湧昇装置

相模湾で実験が行われた拓海のように、動力を用いた人工湧昇流発生装置として、エアリフト方式の装置がある⁶¹⁾。柔軟なパイプを用いた湧昇装置であり、直径 3m のパイプで 0.03 m³/s の空気を用い、深度 300m の深層水を 4 m³/s でくみ上げることができた。このような装置は OTEC としても使用できる可能性がある。続いて、エアリフトポンプとエアバブル

スクリーンを用いた人工湧昇流発生装置の実験が行われた⁶²⁾。室内実験から、エアバブルスクリーンを用いた方法が望ましいとの結果が得られた。さらに、エアリフトポンプを用いた人工湧昇流発生装置の実海域実験が実施され、湧昇の効率はパイプ径や空気注入方法に依存することが示された⁶³⁾。さらに、この方法について、オペレーションと空気注入について考察を行い、より効率化するためのノズルの形状や空気流量について検討が行われた⁶⁴⁾。

5.3 まとめ

以上のように、人工湧昇流発生装置は様々な方式が考案され、水槽実験や実海域実験によって湧昇速度などの知見が得られてきている。水の汲み上げ量と栄養分の濃度から、栄養分の汲み上げ量が分かる。すべての栄養分が利用された場合の植物プランクトンの生産量が分かると、二酸化炭素の固定量が計算され、食物連鎖ピラミッドにより、魚類の生産量を推定できる。今後は、湧昇速度や一次生産力の変化にとどまらず、配合飼料となる小魚の生産を検証する必要があり、船舶海洋工学のより一層の貢献が期待される。

6. おわりに

本研究委員会では、国内外の水産物生産量の増大に向けた戦略を調査することによって現在の課題を整理し、船舶海洋工学分野で貢献できる技術課題を抽出することを目的とした。世界各国の戦略からは、今後検討すべき事項として、海域使用許可や規制、環境影響評価やバイオセキュリティ、技術開発、人材育成等が挙げられている。この中で、養殖に適した沿岸海域が海域使用の稠密化や環境問題を背景として狭隘化していることから、沖合養殖が注目を浴びている。沖合養殖においては、従来の養殖システムを拡張して、複数の大型生簀と給餌設備等を組み合わせたシステムを目指す場合と、超大型の養殖システムで、数 10 万 m^3 の生簀または養殖スペースを有し、一つの設備で 10,000 トン程度の生産を目指す場合、また海洋空間を有効に活用し、海上で閉鎖式循環養殖を目指す場合などが見られた。いずれの場合においても、船舶海洋工学で蓄積されてきたプラットフォームの技術が貢献できるものと期待される。また、世界で養殖生産が大きく増加しているため、今後は配合飼料を安価に確保する技術が必要となる。配合飼料の生産については、これまでは魚粉が用いられてきたが、海洋の低次生産に依存しており、今後の安定的な確保については疑念が持たれている。植物タンパクや昆虫などの動物を用いた配合飼料の生産も検討されているが、不飽和脂肪酸を付加する必要があるなど、さらなる研究開発が必要とされている。一方、今後は気候変動によって海洋の成層が強化され、深層の栄養塩の湧昇が減少し、一次生産力の低下によって魚粉の確保がますます困難になることが懸念される。海洋深層水の利用に関する研究は以前から行われてきたが、広く普及している技術は少なく、現在中国等で活発に研究されている状況を鑑みると、今後研究開発を行う余地は十分にあると思われ、船舶海洋工学が貢献できる分野であると期待される。

参考文献

- 1) Food and Agriculture Organization of the United States (2020): The state of world fisheries and aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. 244 pp.
- 2) Barg U. C. (1992): Guidelines for the promotion of environmental management of coastal aquaculture development. FAO Fisheries Technical Paper 328.
- 3) Bjørndal T., Tusvik A. (2019): Economic analysis of land based farming of salmon. *Aquaculture Economics & Management*, 23:4, 449-475.
- 4) Svealv T. L. (1988): Inshore versus offshore farming. *Aquacultural Engineering*, 7, 279-287.
- 5) Department of Agriculture and Water Resources (2017): National aquaculture strategy, Canberra, August. CC BY 4.0.
- 6) Canadian Council of Fisheries & Aquaculture Ministers (2010): National aquaculture strategic action plan initiative 2011 – 2015.
- 7) Canadian Council of Fisheries & Aquaculture Ministers (2010): Aquaculture development strategy 2016 – 2019.
- 8) Compilation and Translation Bureau, Central Committee of the Communist Party of China (2016): The thirteenth five-year plan for national fishery development. Central Compilation & Translation Press.
- 9) European Union (2016): Aquaculture in the EU, Tapping into Blue Growth.
- 10) European Union (2016): Summary of the 27 multiannual national aquaculture plans. Luxembourg.
- 11) Federation of Norwegian Industries (2016): Roadmap for the Aquaculture Industry.
- 12) The New Zealand Government (2018): Aquaculture Strategy.
- 13) National Science and Technology Council, Committee on Science, Interagency Working Group on Aquaculture (2014): National Strategic Plan for Federal Aquaculture Research (2014-2019)
- 14) U.S. Department of Commerce, NOAA (2015): Marine aquaculture strategic plan FY 2016-2020.
- 15) 農林水産省(2020): 養殖業成長産業化総合戦略.
- 16) Cicin-Sain B., Bunsick S. M., DeVoe R., Eichenberg T., Ewart J., Halvorson H., Knecht R. W., Rheault R. (2001): Development of a policy framework for offshore marine aquaculture in the 3-200 mile U.S. zone. Center for the Study of Marine Policy, University of Delaware, Newark, DE, 165 pp.
- 17) SINTEF Ocean (2019): Exposed aquaculture operations/ annual report 2019. Center for Research-based Innovation, The Research Council of Norway, 365 pp.
- 18) Gentry R. R., Froehlich H. E., Grimm D., Kareiva P., Parke M., Rust M., Gaines S. D., Halpern B. S. (2017): Mapping the global potential for marine aquaculture. *Nature Ecology & Evolution*, 1:1317–1324.
- 19) Celikkol B., DeCew J., Baldwin K., Boduch S., Chambers M., Fredriksson D. W., Irish J., Patursson O., Rice G., Swift M. R., Tsukrov I., Turmelle C. A. (2006): Engineering overview of the University of New Hampshire's open ocean aquaculture project. *Proceedings of Oceans 2006*, 7 pp.
- 20) 工藤勝宏, 木本, 秀明 (1994) : 大分県の海洋牧場における漁業管理. *水産工学*, 31(2) : 121-126.

- 21) 大谷誠二, 濱忠臣 (1993): 沖合養殖パイロットファーム—マリノフォーラム 21—くまもと一. 西部造船会々報, 86: 259-268.
- 22) 守村慎次, 菊池省吾, 大谷誠二, 田上征志 (1993): 沖合養殖パイロットファームについて. 平成5年度日本水産工学会学術講演会, 111-114.
- 23) 森俊哲, 佐々木達 (1994): 沖合養殖システム“マリノフォーラム21ほっかいどう”の開発. 三菱重工技報, 31(3): 185-187.
- 24) 松原茂樹, 大谷誠二 (1998): 沖合養殖の現状と今後の発展動向—作り育てる漁業—. 日本船用機関学会誌, 33(2): 149-155.
- 25) Bugrov L.(2006): The «SADCO» underwater fish-farming system. Underwater Technology & Ocean World, 1:36-45.
- 26) Scott D. C. B., Muir J. F. (2000): Offshore cage systems: A practical overview. In J. Muir, B. Basurco (eds.), Mediterranean offshore mariculture, Zaragoza: CIHEAM, pp.79-89.
- 27) Fullerton B., Swift M. R., Boduch S., Eroshkin O., Rice G. (2004): Design and analysis of an automated feed-buoy for submerged cages. Aqua. Eng., 32:95-111.
- 28) Turmelle C. A., Swift M. R., Celikkol B., Chambers M., DeCew J., Fredriksson D. W., Rice G., Swanson K.: Design of a 20-ton capacity finfish aquaculture feeding buoy. Proceedings of Oceans 2006.
- 29) C. M. Harmon (2016): Considerations for co-location of aquaculture and ocean energy facilities. Sea Grant Law Fellow Publications, 77.
- 30) 北澤大輔 (2007): 米国における沖合養殖事業の現状調査と OMAE2007 出張報告. 日本船舶海洋工学会若手研究者派遣事業に係る国際学術交流ネットワーク報告書, 7 pp.
- 31) Naylor (2006): Offshore aquaculture legislation. Science, 313 (5792): 1363.
- 32) Kitazawa D., Mizukami Y., Isobe M., Saigo K., Ebisui A., Yanagita K., Hirai Y., Tanaka K., Hosokawa T. (2011): Improvement of the inner structure of the polyethylene pipes for a reliable fish-cage flotation/submersion system. Proceedings of the Aquaculture Europe, 557-558.
- 33) Kim T., Hwang K. S., Oh M. H., Jang D. J. (2014): Development of an autonomous submersible fish cage system. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 39(4): 702-712.
- 34) Lipton D. W, Kim D. H. (2007): Assessing the Economic Viability of Offshore Aquaculture in Korea: An Evaluation Based on Rock Bream, *Oplegnathus fasciatus*, Production. Journal of the World Aquaculture Society, 38(4): 506-515.
- 35) 北澤大輔, 水上洋一, 金平誠, 戸川富喜, 武内要人, 伊藤翔, 潮秀樹 (2015): 閑散期でもギンザケを出荷可能な浮沈式生簀システム. 養殖ビジネス 2月号, 23-26.
- 36) Zhang J., Shimizu H., Nakashima H., Mizukami Y., Yoshida T., Liu L., Kitazawa D. (2020): Water-tank experiment and static numerical analysis of the mooring system of a controllable depth cage. Aquacultural Engineering, 91:102118.
- 37) Carlberg L. K., Christensen E. D. (2015): Go offshore - Combining food and energy production. DTU Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, 45 pp.
- 38) Buck B. H., Troell M. F., Krause G., Angel D. L., Grote B., Chopin T. (2018): State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). Frontiers in Marine Science, 5: Article 165.
- 39) 能登谷正浩 (2002): 海藻醗酵素材と餌料. 日本藻類学会創立 50 周年記念出版, 126-127.
- 40) Lovelock J. E., Rapley C. G. (2007): Ocean pipes could help the earth to cure itself.

- Nature, 449, 403.
- 41) Takahashi M. (2003): Deep ocean water as our next natural resource. Terra Scientific Publishing Company.
 - 42) 大内一之 (2007) : 深層水汲み上げによる海洋肥沃化実験—拓海プロジェクト—. 海洋開発論文集, 23, 11-16.
 - 43) 井関和夫, 大内一之 (2017) : 海洋深層水の富栄養性を利用した海域肥沃化. Deep Ocean Water Research, 18 (3) : 166-167.
 - 44) 鈴木達雄 (2017) : 人工海底山脈による海域肥沃化と国土強靱化の期待. Deep Ocean Water Research, 18(3), 172-173.
 - 45) Pan Y. W., Fan W., Zhang D. H., Chen J. W., Huang H. C., Liu S. X., Jiang Z. P., Di Y. N., Tong M. M., Chen Y. (2016): Research progress in artificial upwelling and its potential environmental effects. Earth Sciences, 59(2), 236-248.
 - 46) Zhang D., Fan W., Yang J., Pan Y., Chen Y., Huang H., Chen J. (2016): Reviews of power supply and environmental energy conversions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 659-668.
 - 47) Williamson N., Komiya A., Maruyama S., Behnia M., Armfield S. W. (2009): Nutrient transport from an artificial upwelling of deep sea water. Journal of Oceanography, 65, 349-359.
 - 48) Oshlies A., Pahlow M., Yool A., Matear R. J. (2010): Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channelling the sorcerer's apprentice. Geophysical Research Letters, 37, L04701.
 - 49) Masuda K., Furuya K., Kohashi N., Sato M., Takeda S., Uchiyama M., Horimoto N., Ishimaru T. (2010): Lagrangian observation of phytoplankton dynamics at an artificially enriched subsurface water in Sagami Bay. Japan Journal of Oceanography, 66, 801-813.
 - 50) Williamson P., Wallace D. W. R., Law C. S., Boyd P. W., Collos Y., Croot P., Denman K., Riebesell U., Takeda S., Vivian C. (2012): Ocean fertilization for geoengineering: A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. Process Safety and Environmental Protection, 90, 475-488.
 - 51) Stommel H., Arons A. B., Blanchard D. (1956): An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain. Deep Sea Research, 152-153.
 - 52) Maruyama S., Tsubaki K., Taira K., Sakai S. (2004): Artificial upwelling of deep seawater using the perpetual salt fountain for cultivation of ocean desert. Journal of Oceanography, 60, 563-568.
 - 53) Tsubaki K., Maruyama S., Komiya A., Mitsugashira H. (2007): Continuous measurement of an artificial upwelling of deep sea water induced by the perpetual salt fountain. Deep-Sea Research I, 54, 75-84.
 - 54) Liang N. K., Hseih C. T., Huang P. A., Li D. J., Chu L. L., Wu C. L. (1978): Artificial upwelling induced by ocean currents – Theory and experiment, 5, 83-94.
 - 55) Kenyon K. E. (2007): Upwelling by a wave pump. Journal of Oceanography, 63, 327-331.
 - 56) Liu C. C. K., Jin Q. (1995): Artificial upwelling in regular and random waves. Ocean Engineering, 22(4), 337-350.
 - 57) White A., Bjorkman K., Grabowski E., Letelier R., Poulos S., Watkins B., Karl D.

- (2010): An open ocean trial of controlled upwelling using wave pump technology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 385-396.
- 58) Fan W., Pan Y., Zhang D., Xu C., Qiang Y., Chen Y. (2016): Experimental study on the performance of a wave pump for artificial upwelling. *Ocean Engineering*, 113, 191-200.
- 59) Zhou S., Fan W., Yao Z., Qiang Y., Pan Y., Chen Y. (2019): Experimental study on the performance of a wave pump for artificial upwelling in irregular waves. *Ocean Engineering*, 189, 106353.
- 60) Yin Z., Zhang H., Ma L., Feng Y., Wang Y. (2020): Hydrodynamic behavior and oxygen transfer performance of a new device utilizing wave energy to transport surface water to deep ocean zones. *Ocean Engineering*, 198, 106819.
- 61) Liang N. K. (1996): A preliminary study on air-lift artificial upwelling system. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 35(2), 187-200.
- 62) Liang N. K., Peng H. K. (2005): A study of air-lift artificial upwelling. *Ocean Engineering*, 32, 731-745.
- 63) Fan W., Chen J., Pan Y., Huang H., Chen C. T. A., Chen Y. (2013): Experimental study on the performance of an air-lift pump for artificial upwelling. *Ocean Engineering*, 59, 47-57.
- 64) Qiang Y., Fan W., Xiao C., Pan Y., Chen Y. (2018): Effects of operating parameters and injection method on the performance of an artificial upwelling by using airlift pump. *Applied Ocean Research*, 78, 212-222.