

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KT0006

研究課題名（和文）生態系生態学と数理最適化の融合による複合型内湾養殖漁業の高度化

研究課題名（英文）Enhancing multi-species aquaculture in an inner bay through the integration of ecosystem ecology and mathematical optimization

研究代表者

坂巻 隆史（Sakamaki, Takashi）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60542074

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：1) 志津川湾の粒状有機物の化学組成の季節サイクルや湾奥から湾口部にかけての空間的な分布特性、湾内海域や養殖場内で底層へと沈降する有機物の量や化学組成を明らかにした。2) 同湾のカキ養殖において付着生物除去のために行われている温湯処理のカキ生育促進と有機物沈降による底層環境への影響軽減の効果を現場実験により定量化した。さらに、養殖カキの個体成長モデルのパラメータを同湾での調査・実験結果に基づいて決定し、それを用いて海域の餌料濃度や付着生物量に応じた付着物除去効果の変化を明らかにした。3) 数理最適化アルゴリズムを構築し、環境容量の中でカキ養殖の生産を最大化するための施業サイクルを探索した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無給餌養殖漁業における付着物対策や生産サイクルの修正などの取り組みが、海域・養殖場内の有機物フローに有意に作用し、養殖生産性の改善や底層環境へのインパクト軽減につながることを定量的に示された。また、志津川湾での調査に基づき本研究が提示する環境容量の中での養殖漁業の生産効率最大化へのアプローチは、他海域にも適用可能と考えられる。さらに本成果は、海域における物質動態の調査、養殖生物と付着生物の関係についての生態学的な調査・実験・モデル化、数理最適化など幅広い研究アプローチを組み合わせで生み出された。多くの研究分野が、一次生産業の持続性・生産性向上に貢献可能であることを示している。

研究成果の概要（英文）：1) Seasonal cycles of the chemical composition of particulate organic matter (POM) in Shizugawa Bay, and spatial distribution characteristics from the inner bay to the mouth of the bay, were elucidated. The fluxes and chemical composition of POM sinking to the bottom layer in the bay area and within aquaculture facilities were also clarified. 2) The effects of removing fouling organisms on cultivated oysters' growth and POM settling flux were quantified through field experiments. Additionally, parameters for the individual growth model of cultured oysters were determined based on surveys and experimental results in the bay. Using these models, changes in the effectiveness of attached organism removal according to variations in feed concentration and fouling biomass were revealed. 3) A mathematical optimization algorithm was developed to explore operation cycles for maximizing oyster aquaculture production.

研究分野：生態工学，水環境工学

キーワード：生態学的環境容量 無給餌養殖 マガキ 温湯処理 付着物除去 志津川湾

## 1. 研究開始当初の背景

内湾における養殖漁業は、地域の漁業者の暮らしを支えるだけでなく、世界的な天然漁業資源の減耗が伝えられる中で食糧供給プロセスとしての重要性も増している。海藻や二枚貝などの無給餌養殖は、餌の投入を行わず海域が供給する栄養塩や植物プランクトンなどを栄養・餌料として養殖生物を生産している。そのような養殖漁業では、海域が生産する量～環境容量～を超えて生産を行うことは不可能である。しかし、環境容量の定量は容易ではなく、養殖種の集中や過密化が内湾の環境悪化や養殖生産性の低下を引き起こす事例は少なくない。海域の環境容量を評価したうえで、その中でいかに無駄なく効率的に生産を行うかが、無給餌養殖の持続性そのものにも関わる重要な課題といえる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、以下の3点を主な目的とした。

複数種の養殖漁業が行われる志津川湾において、生産基盤としての海域の栄養塩・有機物動態や養殖生物各種の資源要求を明らかにする。そして、複合養殖の配置などの適正を明らかにする。

限られた環境容量の中で無給餌養殖生産を最大化するための施業方法の一つとして、付着物除去をとりあげ、その養殖生産性向上や有機物沈降を通じた底層環境への影響の軽減などの効果を定量化する。

環境容量の制約と季節変動的な環境変動がある中で、無給餌養殖の生産量を最大化するための養殖生物の投入・収穫のタイミングを求めるための数理最適化アルゴリズムの構築し、最適生産サイクルを明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、宮城県南三陸町志津川湾を対象とし、野外調査・実験と各種の解析を実施した。特に解析の段階では、養殖生物の個体成長モデルの同湾マガキ養殖への適用と、それを交えた数理最適化による最適生産サイクルの導出に取り組んだ。

### (1) 海域での観測

本研究の対象フィールドとした志津川湾の粒状有機物の化学組成の季節サイクルや湾奥から湾口部にかけての空間的な分布特性を明らかにするために、湾内複数地点における季節サンプリングを実施した。さらに、湾内海域およびマガキ養殖場内で底層へと沈降する粒状有機物のフラックスと脂肪酸をはじめとする化学組成を明らかにするため、セディメントトラップによる沈降有機物の季節サンプリングも実施した。併せて、湾奥河口付近で河川水流入に対する植物プランクトンの応答や、夏季の底層貧酸素水塊の発生状況等についても、各種観測機材の設置により調査を実施した。

### (2) カキ養殖における温湯処理（付着物除去）実験

志津川湾内のカキ養殖場で行われている付着生物除去とそれによるカキの生育促進のための温湯処理の諸効果を定量的に評価するため、現地実験を実施した。ここでは、2019年9月に温湯処理されたカキ養殖の垂下ロープ上のカキを、対照区のものとおわせて、約5か月の間に経時的に採取した。併せて、養殖場の底層へ沈降する有機物をセディメントトラップで捕捉・採取した。カキについては、その成長・成育に関する各種指標および脂肪酸等の生体分子組成を測定した。沈降有機物については、有機炭素量として定量した。それらを温湯処理区と未処理の対照区の間で比較し、処理の効果を評価した。

あわせて、漁業者への聞き取りなどに基づいて、志津川湾における実際のマガキ養殖の条件下で、温湯処理の費用（燃料費、人件費、CO<sub>2</sub>排出）と処理に伴う生産量増大の便益（出荷量の増大）を見積もった。

### (3) 個体成長モデルによる付着物除去効果の一般化

生物個体成長モデル（Dynamic Energy Budget モデル）と1-boxの有機物収支モデルを連結

し、志津川湾における養殖カキの個体成長の再現を試みた。DEBモデルのパラメータについては、基本的に既往文献の値を使用し、そのうえで志津川湾におけるカキの飼育実験やサンプリングデータへ適合させるために若干の調整を実施した。それらのモデルを用い、カキ養殖における付着イガイ除去の効果を一様化するため、海域のカキの餌料としての粒状有機物の濃度と養殖カキに付着するイガイの密度を広く振った条件下(POC濃度0.015~1.5mg/L, 0.1~100個体/カキ個体に相当)で、付着イガイ除去の有無による養殖カキの成長を比較した。

#### (4) カキ養殖における施業サイクルの最適化

海域の環境容量の中でカキ養殖の生産効率を最大化するための種ガキ投入や収穫量を決定変数、カキの収穫量を目的関数とした最適化問題を構築し、最適なスケジュールを導出するアルゴリズムを構築した。その際養殖カキの成長過程の再現には、上述の個体成長モデル(DEBモデル)と1-boxの有機物収支モデルを連結したものをを用いた。

## 4. 研究成果

(1) 志津川湾における観測から、特に、本課題におけるその後の研究につながる知見として、以下の2点が得られた。

湾奥部で温暖期を中心に植物プランクトンに由来する脂肪酸濃度が湾中・湾口よりも高い傾向にあり、河川を通じた栄養塩供給の影響と考えられた。しかし、各種無給飼養が行われている湾中から湾奥にかけての海域の中で、粒状有機物の量的・質的な空間的变化は、当初想定されたほど大きくなく、季節変化と比べて小さかった(図-1)。

湾内で実施した底層環境の空間分布調査から、湾中から湾奥の一部海域(養殖区域を含む)の底層で夏季に貧酸素水塊の発生が認められた。地形の影響が大きいと推察されるが、養殖漁業も含めて海域底層への有機物負荷の削減が望まれる状況といえる。

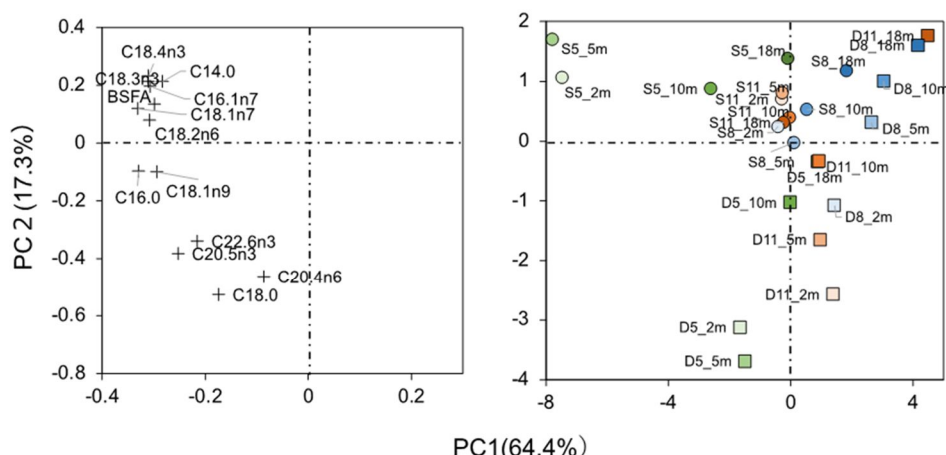


図-1 志津川湾における2020~2021年の3回の季節調査で捉えられた浮遊性・沈降性粒状有機物の脂肪酸組成の変化

(2) マガキ養殖における温湯処理実験では、ムラサキイガイをはじめとする付着物除去がカキの成長を2月の出荷時期の時点(着底から約15カ月後)で約18%高めていた(図-2)。付着生物の除去の結果として、餌の競合が減りカキがより多くの餌を獲得できるようになるためと考えられる。また、付着生物除去は、養殖場内で海底に沈降する排泄物等有機物のフラックスも3割以上削減していることが示された。温湯処理が、カキの養殖生産性向上と環境負荷低減の両方に効果をもたらしていることが示された。

温湯処理による付着物除去の費用は、カキ養殖施設1台(垂下ロープ200本相当)当たり10.7万円と見積もられた。それに対してカキの生産量・出荷額の増分から見積もられた付着物除去の便益は、施設1台当たり37.3万円と見積もられた。これにより処理のB/Cは3.49と見積もられた。

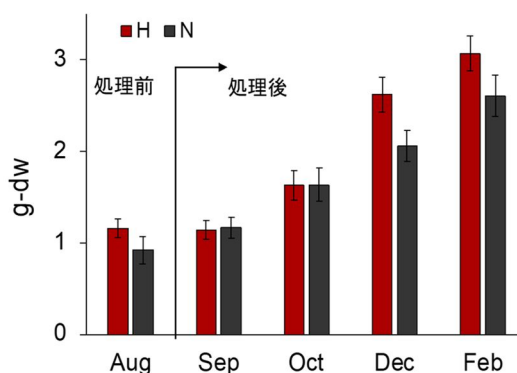


図-2 志津川湾内のマガキ養殖場で実施した温湯処理の効果(H:処理区, N:未処理区)

(3) 生物個体成長モデルと有機物収支モデルを連結により、養殖カキ個体の成長を再現することができた。そして、海域の餌料濃度や養殖カキへの付着イガイ密度の変化に応じて、付着イガイの除去効果も大きく変化することが示された。特に、粒状有機物の平均濃度が比較的 low (POC で約 0.02-0.2 mg/L 程度) かつ付着イガイ密度がより高い(10 個体/カキ個体程度以上)海域で、イガイ除去によるカキの成育向上の効果が相対的に大きくなることが示された(図-3)。付着イガイ除去によるカキ養殖からの底質への有機物負荷削減の効果は、粒状有機物濃度が低い海域ほど相対的に高くなることが示された。

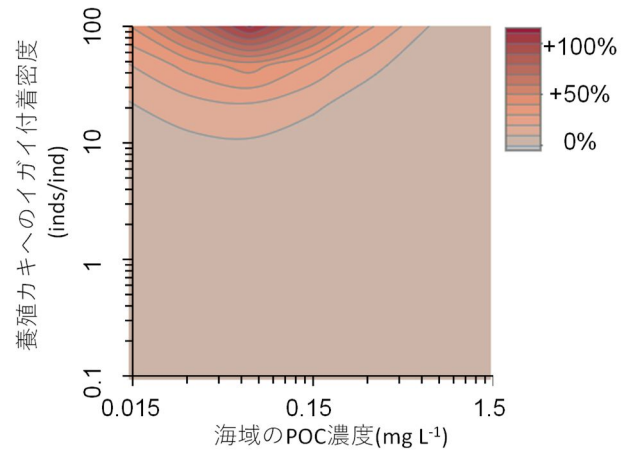


図-3 海域のPOC濃度とイガイ付着密度に応じたマガキ養殖生産性への付着生物除去効果の変化

(4) カキの無給餌養殖生産に適用可能な数理最適化アルゴリズムを構築することができた。現在の志津川湾における養殖の実状をふまえながら、カキの出荷時の個体サイズに最低基準値を設け出荷のタイミングに制約が生じるケース(A)とそのような制約なく出荷するケース(B)について最適条件の探索を行った結果、AではBに比べて出荷量が大きくなる一方収穫不可の期間が生じること、BではAに比べて出荷量と出荷個体のサイズ(品質)が若干低下する一方で継続的な出荷が約束されることを示した。今回の条件下では、Aのケースに比べてBのケースで、総出荷量が約7%低くなる見積りとなった。今後、海域の環境条件や生産性の違いが、あるべき施業サイクルの形にどのように影響するかについての検討が重要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sakamaki Takashi, Zheng Yizhe, Hatakeyama Yuji, Fujibayashi Megumu, Nishimura Osamu	4. 巻 553
2. 論文標題 Effects of spatial scale on assessments of suspension bivalve aquaculture for productivity and environmental impacts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Aquaculture	6. 最初と最後の頁 738082 ~ 738082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aquaculture.2022.738082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 坂巻隆史	4. 巻 64
2. 論文標題 沿岸海域における環境保全と養殖漁業の調和に向けた物質動態研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 用水と廃水	6. 最初と最後の頁 52-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hatakeyama Yuji, Kawahata Tatsuya, Fujibayashi Megumu, Nishimura Osamu, Sakamaki Takashi	4. 巻 254
2. 論文標題 Sources and oxygen consumption of particulate organic matter settling in oyster aquaculture farms: Insights from analysis of fatty acid composition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Estuarine, Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 107328 ~ 107328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecss.2021.107328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujibayashi Megumu, Nishimura Osamu, Sakamaki Takashi	4. 巻 19
2. 論文標題 The Negative Relationship between Fouling Organisms and the Content of Eicosapentaenoic Acid and Docosahexaenoic Acid in Cultivated Pacific Oysters, Crassostrea gigas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Marine Drugs	6. 最初と最後の頁 369 ~ 369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/md19070369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂巻 隆史	4. 巻 45
2. 論文標題 下水道・環境保全・漁業が調和する未来にむけて	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 再生と利用	6. 最初と最後の頁 57-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Sakamaki, Kyohei Hayashi, Yizhe Zheng, Megumu Fujibayashi, Osamu Nishimura	4. 巻 644
2. 論文標題 Effects of oyster age on the selective suspension-feeding and chemical composition of biodeposits: insights from fatty acid analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	6. 最初と最後の頁 75-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3354/meps13359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 畠山勇二, 川畑達矢, 西村修, 坂巻隆史	4. 巻 75
2. 論文標題 内湾のカキ養殖場における沈降有機物の起源と酸素消費速度	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 289-298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 畠山 勇二, 丸尾 知佳子, 西村 修, 坂巻 隆史	4. 巻 79
2. 論文標題 脂肪酸組成分析を用いた養殖カキと付着イガイの摂餌・排泄特性の比較	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 23-25022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-25022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坂巻 隆史, 畠山 勇二, 藤林 恵, 丸尾 知佳子, 西村 修
2. 発表標題 志津川湾の一次生産過程に及ぼす流域からの栄養塩供給の影響
3. 学会等名 25 回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畠山勇二, 丸尾知佳子, 西村 修, 坂巻隆史
2. 発表標題 浅海域の沈降過程における粒状有機物の分解と酸素消費
3. 学会等名 25 回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畠山勇二, 西村修, 坂巻隆史
2. 発表標題 内湾力キ養殖における温湯処理の育成促進と有機物負荷削減の効果
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小笠原央輔, 畠山勇二, 西村修, 坂巻隆史
2. 発表標題 内湾の粒状有機物の沈降過程における酸素消費と化学組成の変化
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畠山 勇二, 丸尾 知佳子, 西村 修, 坂巻 隆史
2. 発表標題 脂肪酸組成分析を用いた養殖カキと付着イガいの摂餌・排泄特性の比較
3. 学会等名 土木学会第60回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	林 俊介  (Hayashi Shunsuke)  (20444482)	法政大学・理工学部・教授   (32675)	
研究分担者	藤林 恵  (Fujibayashi Megumu)  (70552397)	九州大学・工学研究院・助教   (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	Dalhousie University		