

令和6年度豊かな漁場環境推進事業のうち
海域特性に応じた赤潮・貧酸素水塊、栄養塩類対策推進事業

(2) 栄養塩類不足による漁業被害への対策技術 の開発・実証・高度化 報告書

令和7年3月

国立研究開発法人 水産研究・教育機構
国立大学法人 香川大学
国立大学法人 愛媛大学
国立大学法人 広島大学
公立大学法人大阪 大阪公立大学
公立大学法人 福井県立大学
兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター
岡山県農林水産総合センター水産研究所
山口県水産研究センター
徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課
香川県水産試験場
愛媛県栽培資源研究所
一般社団法人 全国水産技術協会
千葉県水産総合研究センター
神奈川県水産技術センター
愛知県水産試験場
三重県水産研究所
国立大学法人 東京大学
国立大学法人 三重大学
大塚テクノ株式会社

目 次

1. 本事業の目的および実施概要	1
2. 令和6年度成果報告	4
I. 瀬戸内海	
1) 栄養塩類等の水質環境が沿岸海域の漁業生産に及ぼす影響の解明	
ア. 栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の餌となる微細藻類等に及ぼす影響の解明	
① 瀬戸内海西部海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明	4
② 河口および周辺海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明	16
イ. 栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明	23
ウ. 栄養塩類等の水質環境が藻場の生物生産力等に及ぼす影響の解明	29
2) 栄養塩類等の水質環境が小型魚類の生産量に及ぼす影響の解明	
ア. 栄養塩類等の水質環境が小型魚類の餌料環境に及ぼす影響の解明	
① 栄養塩減少等による植物プランクトン組成の変化が動物プランクトンに及ぼす影響解明	34
② 兵庫県海域における栄養塩が動物プランクトン等を含む生態系に及ぼす影響解明	41
イ. 水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の解明	49
3) 栄養塩類管理方策の検討	59
II. 東京湾	
1) 栄養塩類等の水質環境の変化が閉鎖性内湾のベントス等の低次生態系に及ぼす影響の解明	74
2) 閉鎖性内湾の栄養塩類等の水質環境が二枚貝類や海藻の生産に及ぼす影響の評価手法の開発	93
3) 栄養塩類管理方策の検討	107
III. 伊勢・三河湾	
1) 栄養塩類等の水質環境の変化が閉鎖性内湾の動・植物プランクトン等の低次生態系に及ぼす影響の解明	116
2) 閉鎖性内湾の栄養塩類環境が二枚貝類や海藻の生産に及ぼす影響のモニタリング等の評価手法の開発	127
3) 栄養塩類管理方策の検討	136
IV. 栄養塩類供給技術の開発・実証・高度化	
藻類養殖場における生産力低下の原因解明と栄養塩供給手法の開発	155

本事業の目的および実施概要

【事業の目的】

近年、瀬戸内海、東京湾、伊勢・三河湾などの内湾を中心として二枚貝や小型魚類等の水産資源の減少やノリ等の色落ちなど生産力の減少が顕著となっており、栄養塩類不足等の水質環境の変化が生態系へ及ぼす影響が懸念されている。瀬戸内海では貧栄養化による漁業生産の低迷が指摘されており、これまでの調査・研究により栄養塩類不足と漁業生産との因果関係が明らかになりつつある。今後、さらなる因果関係の検証を行うとともに、栄養塩類管理方策の検討が求められている。また、東京湾や伊勢・三河湾においても栄養塩類不足が懸念され始めており、栄養塩類が低次生態系に及ぼす影響の解明や栄養塩類管理方策の検討が求められている。

そこで、瀬戸内海、東京湾および伊勢・三河湾をフィールドとして調査・研究を実施することにより、栄養塩類が一次生産を通じてより高次の水産資源に与える影響を調査するとともに、海域特性に応じた適切な栄養塩類管理方策の検討・策定・提供に資することを目的とする。

【事業の内容】

瀬戸内海、東京湾および伊勢・三河湾において各種調査・研究を実施し、栄養塩類が一次生産を通じてより高次の水産資源に与える影響を調査する。これにより、栄養塩類等の水質環境について、水産資源との関係やそれに及ぼす影響の解明等を行うとともに、海域ごとの特性に応じた栄養塩類管理方策の検討・策定・発信を行う。各課題の実施概要は以下に示す通りである

I. 瀬戸内海

1) 栄養塩等の水質環境の変化が二枚貝の生産に及ぼす影響の解明

A. 栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の餌となる微細藻類等に及ぼす影響の解明

① 瀬戸内海西部海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明

栄養塩等の水質環境の変化が二枚貝の餌となる植物プランクトンの組成に及ぼす影響を明らかにするため、瀬戸内海西部海域において、植物プランクトンの発生状況等を調べる。また、これまでに瀬戸内海で優占した記録がある植物プランクトンの生理・生態特性を室内試験等で調べる。さらに、海域で発生する植物プランクトン組成の違いが二枚貝の生産に及ぼす影響を明らかにするため、瀬戸内海で優占履歴のある植物プランクトンの栄養成分分析や、それらを餌料とした二枚貝類の飼育試験等を行う。

② 河口および周辺海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明

河口干潟からその沖合域にかけて、栄養塩濃度とナノ植物プランクトンの出現動態、およびナノ植物プランクトン現存量と二枚貝浮遊幼生の出現量をモニターすることで、栄養塩から二枚貝幼生に至る連関を明らかにする。また、調査海域に優占するナノ植物プランクトンを単離し、培養試験により栄養塩濃度に対する増殖応答を明らかにすることで、栄養塩環境の変化に伴う二枚貝浮遊幼生の餌料環境変動を検証する。

イ. 栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明

岡山県海域のカキ養殖漁場において有機態を含む栄養塩類、クロロフィル a 濃度等の漁場環境とマガキの育成状況を調査するとともに、必要に応じて餌料環境の異なる水槽での飼育試験を実施する。これらの結果から、栄養塩類とマガキの成長との関係、成長に影響を与える指標を明らかにする。

ウ. 栄養塩類等の水質環境が藻場の生物生産力等に及ぼす影響の解明

藻場は重要な漁場環境であり、近年の水質環境の変化により、その衰退や構成種の変遷などが問題となっている。藻場を衰退させる要因は複雑であり、栄養塩を中心とした水質環境が藻場生産力に与える影響はよく分かっていない。藻場が衰退していく要因は様々であると考えられ、藻場の生産力と栄養塩環境との関わりを解明する。また変遷する水質環境が藻場

生態系を通して磯根生物等の植食動物へ与える影響も解明し、一次生産者および動物類を含む藻場生産力の評価を行う。

2) 栄養塩類等の水質環境が小型魚類の生産量に及ぼす影響の解明

ア. 栄養塩類等の水質環境が小型魚類の餌料環境に及ぼす影響の解明

① 栄養塩減少等による植物プランクトン組成の変化が動物プランクトンに及ぼす影響解明

栄養塩等の水質環境の変化による植物プランクトン組成の変化が動物プランクトンに及ぼす影響を明らかにするため、瀬戸内海で優占した記録がある複数の植物プランクトンを餌料とした動物プランクトンの飼育実験等を行う。

② 兵庫県海域における栄養塩が動物プランクトン等を含む生態系に及ぼす影響解明

本課題では、兵庫県の瀬戸内海海域において、栄養塩等の海洋環境の変化が海洋生態系を通じて最終的に高次生物へどのような影響を及ぼすのか、そのメカニズムを解明する。そのために、現在最もデータセットが不足している動物プランクトンデータの充実を図りながら、栄養塩から高次生物に至る生物生産過程をモデル等により包括的に解析する。

イ. 水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の解明

燧灘および備讃瀬戸における調査船調査や漁獲物調査などにより、動物プランクトンおよび小型魚類の種組成、分布、食性、繁殖などの情報を整理する。また、当該海域のプランクトンや小型魚類などの炭素・窒素安定同位体比に基づいて、食物網のネットワーク構造を可視化し、海域間や過去と比較する。さらに、小型魚類の生態モデルの開発に努め、当該海域における栄養塩、餌料環境および小型魚類生産の変遷とそれらの関連性について考察を進める。

3) 栄養塩類管理方策の検討

燧灘を対象とした、栄養塩循環の解明と、ノリ養殖とカタクチイワシに対応する栄養塩管理方法の検討に資する2種類の3次元低次生態系モデルを開発する。1つ目は、高解像度の流動モデルとNPDZタイプのシンプルな低次生態系モデルを結合し、ノリ養殖が展開される水深の浅い沿岸域における栄養塩濃度の経年変動と陸上からの栄養塩負荷の管理方法について検討する。2つ目は、低解像度の流動モデルと多種類のプランクトンを取り扱うことができるeNEMUROタイプの複雑な低次生態系モデルを結合し、カタクチイワシ餌料として重要な動物プランクトンの変動特性を理解し、カタクチイワシ資源変動との関連性について検討する。以上の知見を踏まえて栄養塩類管理方策の検討を行う。専門家で構成される検討委員会は、年2回開催する。

II. 東京湾

1) 栄養塩類等の水質環境の変化が閉鎖性内湾のベントス等の低次生態系に及ぼす影響の解明

閉鎖性内湾である東京湾において、海洋環境の変動が低次生態系へ及ぼす影響を明らかにするために、マクロベントスおよびメソ動物プランクトンの群集構造の季節・経年変動を、これまでに採集された試料および新たにサンプリングして得られた試料を用いて明らかにする。さらに栄養塩類や底質等の環境要因や外洋との関係を検討することで、それらの変動要因について比較検討を行う。

2) 閉鎖性内湾の栄養塩類等の水質環境が二枚貝類や海藻の生産に及ぼす影響の評価手法の開発

東京湾における栄養塩等の水質環境が、漁業生産を支える低次生産（二枚貝類の餌料藻類や海藻）に及ぼす影響を調べるため、水質および低次生産の簡便なモニタリング手法の開発を行う。また、既存のモニタリング手法について、複数の手法を組み合わせるなどして改めて検討を行う。

3) 栄養塩類管理方策の検討

東京湾全体の栄養塩動態とノリ漁場等の局所海域における栄養塩環境との関係を検討することを目的に、プロトタイプ数値モデルの実装と改良を継続する。数値モデルの駆動に必要なとなる、栄養塩等の観測データ、栄養塩の起源や動態に関わる外洋環境、陸域負荷、気象・海象場の情報、およびノリ漁場等における栄養塩に関わる情報を継続して収集整理する。プロトタイプモデルを用いたシミュレーションを通して実用モデルへ向けた方針を整理し、栄養塩の起源を踏まえた栄養塩管理方針の検討課題を整理する。専門家で構成される検討委員会は、年2回開催する。

III. 伊勢・三河湾

1) 栄養塩類等の水質環境の変化が閉鎖性内湾の動・植物プランクトン等の低次生態系に及ぼす影響の解明

伊勢・三河湾における栄養塩類等の水質環境の変化が動・植物プランクトン等の低次生態系に与える影響を明らかにするために、既存の海洋観測資料および生物試料を収集・整理・分析し、動物プランクトンと植物プランクトンの群集構造の季節・経年変動を解析して、その変動に影響を及ぼす外的な環境要因および内的要因について比較検討する。また、湾内の栄養塩類等の水質環境に影響を及ぼす外洋からの循環関係を評価するために、湾内外の循環構造や栄養塩動態を評価するモデルを検討する。

2) 閉鎖性内湾の栄養塩類環境が二枚貝類や海藻の生産に及ぼす影響のモニタリング等の評価手法の開発

近年、アサリ等の二枚貝類は各生活段階において、好適餌料となる植物プランクトンのサイズや種の変化が起こることが明らかになってきた。現状の海洋研究では、餌料環境の評価にはクロロフィル値を用いることが多い。しかし、クロロフィル値は植物プランクトン総量を示すのみで、そのサイズ・種組成は分からない。さらに、餌料環境により変化するアサリの生理状態に関する詳細な指標は開発されていない。本課題では、三河湾において、アサリ資源状況や栄養塩や餌料等の環境要因に関する現地調査を行い、アサリ資源量に及ぼすそれらの関連を検討する。さらに現地調査より得られた試料等を用いて、メタバーコーディングによる種組成解析を用いた餌料環境評価手法の開発とアサリ生理状態の指標開発に向けた遺伝子解析を行う。また、海藻（ノリなど）の窒素安定同位体比に着目し、簡便なモニタリングツールとしての有効性を検討するとともに、中・長期的なモニタリングを試みる。

3) 栄養塩類管理方策の検討

「豊かな海」に必要な栄養塩供給を把握して管理することによって、「きれいな海」において漁業資源の増大と持続的な維持を可能とし、さらに、適切な栄養塩類の配分による安定した生態系の維持と生産量の最大化を可能とする方策の検討を行う。

伊勢・三河湾を対象海域として、栄養塩類濃度と各魚種の資源量変動の関係性について生態系モデルを用いて検討する。資源量を増大させる栄養塩類管理方策を検討する。このため、専門家で構成される検討委員会を年2回開催する。

IV. 栄養塩類供給技術の開発・実証・高度化

藻類養殖場における生産力低下の原因解明と栄養塩供給手法の開発

播磨灘及び紀伊水道沿岸のワカメ等藻類養殖漁場において、海水中の栄養塩濃度等の現場観測を行うとともに、生産状況との比較解析により、海域の栄養塩濃度と藻類養殖の生産力との関係を明らかにする。また、これらの結果をもとに効果的な栄養塩供給手法を検討し、コスト計算や周辺海域への影響等を評価の上、安価で実用的な栄養塩供給手法の開発を目指す。

課題番号：I－1）－ア ①

課題名：瀬戸内海西部海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明

水産研究・教育機構 水産技術研究所

松原賢，岡村知海，伴広輝，鬼塚剛

水産研究・教育機構 水産大学校

山崎康裕

山口県水産研究センター内海研究部

畑間俊弘，茅野昌大

福井県立大学

浜口昌巳

【背景・目的】

瀬戸内海西部海域では，アサリを始めとする二枚貝の生産量が減少している。その原因として，高水温等に加え，餌となる植物プランクトンの組成の変化が指摘されている（浜口，2011）。例えば，珪藻類については，二枚貝の生産が豊かであった 1980 年代前半頃までは *Skeletonema* 属の優占度が高かったが，1980 年代後半以降は *Skeletonema* 属の優占度が低下し，*Chaetoceros* 属，*Pseudo-nitzschia* 属，*Leptocylindrus* 属の優占度が増加する傾向が確認されている（山下，2013）。また，最近の研究では，広島湾におけるマガキの着底の成否には浮遊幼生の餌となる特定の珪藻類の発生の多寡が影響を与えることが示唆され（Matsubara et al., 2023），成貝のみならず浮遊幼生期の餌料環境も，二枚貝生産の変動要因となることが指摘されている。このように，海域で発生する植物プランクトン組成は二枚貝の生産に影響を与えると考えられるが，植物プランクトン組成の変化を引き起す原因は瀬戸内海では解明されていない。また，瀬戸内海で発生する各植物プランクトンの餌料価値については不明な点が多く，植物プランクトン組成の変化が二枚貝に与える影響については科学的な知見が乏しい。そこで本課題では，瀬戸内海における植物プランクトン組成に影響を与える環境要因を明らかにするため，現場観測や各種植物プランクトン培養株を用いた室内試験等を行う。また，各種植物プランクトンの二枚貝に対する餌料価値を明らかにするため，各植物プランクトンの栄養成分の分析や，それらを餌料とした二枚貝の飼育試験等を行う。得られる成果を総合し，浮遊幼生から成貝に至るまでの餌料環境の観点から二枚貝の生産に好適な環境条件を提示し，適切な栄養塩管理等に資することを目的とする。

【方法】

(1) 植物プランクトン組成に影響を与える環境要因の検討

ア) 水産技術研究所廿日市庁舎の地先海域における観測

Skeletonema 属，*Chaetoceros* 属，*Pseudo-nitzschia* 属および *Leptocylindrus* 属の出現動態に影響を与える環境要因を抽出するため，各珪藻類の細胞密度および環境因子の短期変動を広島湾の一定点にて調べた。2024 年 5 月から 8 月にかけて週に一度，水産技術研究所廿日市庁舎地先に設定した Stn. A（図 1）において，表層，1 m 層，中層（水深の半分）および底層の採

水と多項目水質計による水質の鉛直観測を行った。採水試料は研究室に持ち帰り、各珪藻類の検鏡と栄養塩（溶存無機態窒素：DIN，溶存無機態リン：DIP，溶存態ケイ素：DSi）の分析に供した。

イ）各種珪藻類の光量子束密度に対する増殖応答の把握

瀬戸内海における珪藻類組成の変化要因を明らかにするための基礎資料として、本年度は *Skeletonema* 属，*Chaetoceros* 属および *Leptocylindrus* 属の光量子束密度に対する増殖応答を室内試験で調べた。試験には，2021 年 7 月に広島湾より分離した *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex，2019 年 10 月に広島湾より分離した *Chaetoceros socialis*，2023 年 5 月に広島湾より分離した *Leptocylindrus danicus* を用いた。いずれについてもピペット洗浄法により株を確立し，抗生物質処理は施していないが，継代培養中および試験中にバクテリアの増殖による白濁等は確認されなかった。培地については，*S. marinoi-dohrnii* complex および *C. socialis* については改変 SWM-3 培地（塩分 25）を，*L. danicus* についてはメタケイ酸ナトリウムを添加したダイゴ IMK 培地（塩分 25）を用いた。試験区は光量子束密度 15，40，125，250，500 および 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の 6 段階設定し，試験に先立ち 25℃，各光量子束密度条件下（明暗周期 12 hL : 12 hD）で 10 日以上各珪藻類の馴致培養を行った。そして，対数増殖期にあるそれぞれの培養株を培地に接種し，馴致培養と同様の水温，光条件下で増殖速度（ μ ，divisions/day）を調べた。得られた増殖速度から次式により各パラメータ値を求めた。

$$\mu = \mu_m \times (I - I_0) / ((K_s - I_0) + (I - I_0))$$

ここで， μ_m は最大増殖速度（divisions/day）， I は光量子束密度（ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）， I_0 は増殖速度に対する光量子束密度の閾値， K_s は増殖速度に対する光量子束密度の半飽和定数（ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）である。各パラメータ値の算出には，グラフ作成・データ解析ソフト Origin（Origin Pro 2025, OriginLab, Massachusetts, USA）を用いた。

ウ）各種珪藻類の溶存無機態窒素濃度に対する増殖応答の把握

上述のイ）と同様の目的で，*Skeletonema* 属，*Chaetoceros* 属および *Leptocylindrus* 属の窒素濃度に対する増殖応答を室内試験で調べた。本試験では，国立環境研究所より購入した *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex の無菌株（NIES-323）および *Chaetoceros socialis* の無菌株（NIES-3713）と，イ）と同じ *Leptocylindrus danicus* の培養株を用いた。試験に先立ち，*S. marinoi-dohrnii* complex は 25℃，増殖が飽和する光量子束密度 125 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ （明暗周期 12 hL : 12 hD）の条件下で，窒素源無添加の改変 SWM-3 培地（塩分 25）にて増殖が停止するまで飢餓培養した。*C. socialis* は光量子束密度を増殖が飽和する 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ とし，他は *S. marinoi-dohrnii* complex と同様の条件で飢餓培養を行った。*L. danicus* については窒素源無添加のダイゴ IMK 培地（塩分 25，特注品）にメタケイ酸ナトリウムを添加したのを用い，他は *S. marinoi-dohrnii* complex と同様の条件で飢餓培養を行った。そして，飢餓培養したそれぞれの培養株を，硝酸ナトリウムにて DIN の濃度を 1，4，6，12，29，56，112 および 222 μM に調整した各培地に接種し，飢餓培養と同様の水温，光条件下で増殖速度（ μ ，divisions/day）を調べた。得られた増殖速度から次式により各パラメータ値を求めた。

$$\mu = \mu_m \times S / (K_s + S)$$

ここで、 μ_m は最大増殖速度、 S は培養開始時の DIN 濃度 (μM)、 K_s は増殖速度に対する DIN 濃度の半飽和定数 (μM) である。各パラメータ値の算出は、イ)と同様に行った。なお、イ)で用いた培地の基礎海水は広島湾で採取した天然海水を用いたが、本試験では低濃度の DIN 条件を達成するため、人工海水を基礎海水として用いた。

(2) 植物プランクトンの二枚貝に対する餌料価値の検討

ア) 広島湾におけるマガキ浮遊幼生餌料観測

マガキ D 型幼生 (以降、幼生) にとって餌料価値が高い植物プランクトンを検討するため、幼生の餌となる微小な珪藻類 (以降、微小珪藻類) の発生量とマガキの着底の成否との関係を広島湾で調べた。2024 年 6 月から 8 月にかけて週に一度、広島市水産振興センターにより採取された広島湾の 3 定点 (図 2) における表層の海水試料を譲り受けた。試料は研究室内に持ち帰り、各種微小珪藻類の生物量の分析に供した。昨年度の結果、広島湾における主要な微小珪藻類は *Cyclotella* sp. 1, *Skeletonema menzelii* および *Chaetoceros tenuissimus* の 3 種であったことから、これらの生物量について先行研究で開発した定量 PCR の系で調べた。また、マガキの着底の成否は、次式により Settlement index (I , Matsubara et al., 2023) を算出して評価した。

$$I = S_d / D_d$$

ここで、 S_d は調査 10 日後のマガキの着底数、 D_d は調査当日のマガキの D 型幼生数であり、広島市水産振興センターから譲り受けた 3 定点における観測値を平均して用いた。そして、各微小珪藻類の生物量との相関関係を調べた (Spearman の順位相関係数による)。

イ) 各種植物プランクトンの栄養成分の分析

今年度は、連鎖群体を形成する *Chaetoceros* 属である *Chaetoceros socialis* と微小珪藻類の *Skeletonema menzelii*, *Chaetoceros tenuissimus* および *Chaetoceros neogracile* について栄養成分を調べた。連鎖群体を形成する *Chaetoceros* 属は瀬戸内海で長期的に優占度が増加した珪藻類、微小珪藻類は前述の通り、二枚貝の浮遊幼生の餌となる珪藻類である。*C. socialis* は (1) - イ) で用いた広島湾産株、*S. menzelii* は 2021 年の 7 月に広島湾から分離した培養株、*C. tenuissimus* は国立環境研究所より購入した NIES-3715 株、*C. neogracile* は水産研究・教育機構 ジーンバンク事業・センターバンクより配布を受けた株である。水温 23°C 、光量子束密度 $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、明暗周期 12 hL : 12 hD の条件下で、メタケイ酸ナトリウムを添加した塩分 25 のダイゴ IMK 培地に各種培養株を接種し、通気培養を行った (培養器はガラス容器、液量は 7 L)。そして、対数増殖期後期にある細胞を回収し、二段階の遠心分離 ($3,500 \text{ rpm}$, 20 分, 4°C → $15,000 \text{ rpm}$, 5 分, 4°C) により各種の細胞ペレットを得た。細胞ペレットは -80°C で凍結した後、凍結乾燥および各種溶媒による抽出を経て、フェノール硫酸法による中性糖の定量 (McKelvy and Lee, 1969), Lowry 法によるタンパク質の定量 (Yamasaki et al., 2019), ガスクロマトグラフ法による脂肪酸組成の分析 (Tanaka et al., 2018) に供した。

ウ) *Cyclotella* sp. 1 と *Chaetoceros neogracile* を用いたアサリ稚貝の給餌試験

本年度は、*Cyclotella* sp. 1 の餌料価値を評価するための飼育試験を行った。1 回目の給餌試験 (同一の *in vivo* クロロフィル蛍光値での給餌) は、平均殻長が $4.06 \pm 0.52 \text{ mm}$ のアサリ稚貝

を用いて実施した。試験区は、対照区（無給餌区）、*Cyclotella* sp. 1 給餌区および *C. neogracile* 給餌区の計 3 給餌区とした。試験区ごとに 1000 mL のろ過海水と 20 個体のアサリ稚貝を収容した 1000 mL 容ビーカーを 3 つずつ用意した。供試稚貝の入ったビーカーは 25 °C に設定したウォーターバスに静置し、その他の飼育条件は、止水、連続暗期及び微通気とした。*C. neogracile* の給餌密度は 80000 cells/mL に固定し、この時の *in vivo* クロロフィル蛍光値 (18000 Relative Fluorescence Unit) と等しくなるよう *Cyclotella* sp. 1 の給餌密度 (113400 cells/mL) を設定した。給餌と換水は 1 日 1 回実施し、塩分 30 のろ過海水で給餌密度を調整した飼育水と全換水した。

2 回目の給餌試験（試験区ごとの飽食給餌）は、平均殻長が 3.08 ± 0.12 mm のアサリ稚貝を用いて実施した。試験区は 1 回目の試験と同様の計 3 給餌区とした。給餌区ごとに 500 mL のろ過海水と 20 個体のアサリ稚貝を収容した 500 mL 容ビーカーを 3 つずつ用意した。供試稚貝の入ったビーカーは 25 °C に設定した冷凍機付インキュベーターに静置し、その他の飼育条件は、止水、連続暗期及び微通気とした。*Cyclotella* sp. 1 と *C. neogracile* の初期給餌密度は乾燥重量ベースで等量になるよう考慮し、それぞれ 96000 cells/mL および 60000 cells/mL に設定した。給餌と換水は 1 日 2 回実施し、塩分 30 のろ過海水で給餌密度を調整した飼育水と全換水した。また、翌日の 1 回目の給餌前に *in vivo* クロロフィル蛍光値（残餌量の推定値）の測定を行った際に、蛍光値がろ過海水と同等の蛍光値まで低下していた場合は、前日の給餌密度から 25 % 高くして給餌した。

これら 2 回の給餌試験は 30 日間実施し、最終日（31 日目）にデジタル顕微鏡を用いてアサリ稚貝の殻長測定および生残個体数の確認を実施した。一方、ビーカーごとにまとめたアサリ稚貝の軟体部乾燥重量の測定は、以下の手順で実施した。試験終了後、500 μ m の目合いのふるいにかけてビーカーごとにアサリ稚貝をガラス製の小瓶に回収し、70 %エタノールで固定した。次に、固定液を除いたアサリ稚貝の試料に 3 mL の 4 M 塩酸を添加して反応が収束するまで静置し、稚貝の殻を完全に溶解した。その後、軟体部はイオン交換水で十分に洗浄し、遠心分離 (2300 $\times$ g, 10 min, 4 °C) して洗浄水を除去した。この洗浄操作は 2 回繰り返した。最後に、洗浄した軟体部はアルミ皿に載せ、低温乾燥機を用いて 50 °C で乾燥した。なお、試料の重量は一定時間ごとに電子天秤を用いて秤量し、重量の測定値が変動しなくなった時点の重量を軟体部乾燥重量とした。

【結果】

(1) 植物プランクトン組成に影響を与える環境要因の検討

ア) 水産技術研究所廿日市庁舎の地先海域における観測

図 3 に 2024 年 5 月から 8 月の Stn. A における表層および底層の水温、塩分、DIN、DIP、DSi および水中光量子束密度の変動を示す。水温は表底層ともに期間を通して上昇傾向であった。表層塩分は 6 月 21 日から 7 月 3 日にかけて 9 まで低下し、その後 7 月 10 日には 22 まで回復したものの、7 月 19 日には再び 18 まで低下した。これら表層塩分の低下時には、表底層の DIN、底層の DIP および表層の DSi の増加が確認された。表層 DIP については昨年度同様、塩分低下に伴う上昇は確認されなかった。水中光量子束密度の変動パターンは表層と底層で類似していた。表層光量子束密度については、6 月 21 日から 7 月 19 日までの期間は 1000 μ mol/m²/s 以上の値が観測されず、梅雨時期（広島県：6 月 20 日ごろ梅雨入り、7 月 21 日ご

る梅雨明け)の全天日射量の低下が反映されていた。一方、7月23日以降の表層光量子束密度は8月2日を除き、 $1000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上の値が観測された。

図4に2024年5月から8月のStn. Aの表層における各種珪藻類の細胞密度の変動を示す。*Skeletonema* 属、*Chaetoceros* 属、*Pseudo-nitzschia* 属および *Leptocylinndrus danicus* のうち、数 $10\ \text{cells}/\text{mL}$ 以下の低密度から数 $1000\ \text{cells}/\text{mL}$ 以上の高密度に至るまでの明確なブルーム形成プロセスが把握できたのは *Skeletonema* 属および *Chaetoceros* 属であった。*Skeletonema* 属については6月14日から7月3日にかけて、*Chaetoceros* 属については7月23日から8月21日にかけての増加が確認された。*Skeletonema* 属の増加時期は表層塩分の低下時期と一致しており、出水に伴う DIN や DSi の供給が増殖のトリガーとなったことが示唆された。また、6月21日から7月3日までの期間の表層光量子束密度は $124\sim 647\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と低かった(図3)にも関わらず増加したことから、*Skeletonema* 属は低光量子束密度条件下でもブルームを形成できることが確認された。一方、*Chaetoceros* 属の増加時期は表層塩分の回復期に一致しており、*Skeletonema* 属の増加時期のような DIN や DSi の供給が増殖のトリガーとなったとは考え難い。*Chaetoceros* 属の増加時期の他の特徴としては表層光量子束密度が高かったことが挙げられる。*Chaetoceros* 属は DIN や DSi の潤沢な供給がなくとも、高い光量子束密度が得られればブルーム形成に至る可能性が考えられた。

イ) 各種珪藻類の光量子束密度に対する増殖応答の把握

図5に、各光量子束密度条件下における *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros socialis* および *Leptocylinndrus danicus* の増殖速度を示す。増殖が飽和した光量子束密度は *S. marinoi-dohrnii* complex および *L. danicus* については $125\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, *C. socialis* については $250\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。*S. marinoi-dohrnii* complex, *C. socialis* および *L. danicus* の I_0 はそれぞれ 9.6, 12.6, および $12.5\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と計算され、*S. marinoi-dohrnii* complex は他種よりも低光量子束密度条件下で増殖可能であることが確認された。また、 K_s はそれぞれ 15.9, 19.5, および $18.4\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と計算された。

ウ) 各種珪藻類の溶存無機態窒素濃度に対する増殖応答の把握

図6に、各 DIN 濃度条件下における *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros socialis* および *Leptocylinndrus danicus* の増殖速度を示す。*S. marinoi-dohrnii* complex, *C. socialis* および *L. danicus* の増殖速度に対する DIN 濃度の半飽和定数 K_s はそれぞれ 2.0, 5.1 および $0.7\ \mu\text{M}$ と計算された。今回設定した最低の DIN 濃度である $1\ \mu\text{M}$ における増殖速度は *C. socialis* の 1.3 divisions/day が最も高く、*L. danicus* の 1.0 divisions/day が続いた。*S. marinoi-dohrnii* complex については 0.8 divisions/day と最も低く、他種よりも低 DIN 濃度条件下における増殖能が低いことが確認された。

本年度実施した室内培養試験の結果から、*Skeletonema* 属は *Chaetoceros* 属や *Leptocylinndrus* 属よりも低光量子束密度条件下で増殖可能であるが、低 DIN 濃度条件下では増殖速度が低い可能性が示唆された。瀬戸内海の透明度は長期的に上昇しており、一方で DIN 濃度は低下している。低光量子束密度と高 DIN 濃度という組み合わせが、過去の *Skeletonema* 属の圧倒的な優占を支えたのかもしれない。今後は、光量子束密度と DIN 濃度を多段階で組み合わせた条件下で室内試験を行う予定である。また、今年度取得した *Leptocylinndrus danicus* に関するデータは無菌株のものではないため、無菌株を確立したうえで、再試験を行う予定である。

(2) 植物プランクトンの二枚貝に対する餌料価値の検討

ア) 広島湾におけるマガキ浮遊幼生餌料観測

図 7 に各微小珪藻類の DNA コピー数と Settlement index との関係を示す。*Cyclotella* sp. 1, *Skeletonema menzelii* および *Chaetoceros tenuissimus* のうち、*C. tenuissimus* の DNA コピー数と Settlement index との間で有意な負の相関が確認された。このことは、*C. tenuissimus* が豊富な環境で D 型幼生期を過ごしたマガキはその後の着底の成功率が低かったことを示唆し、*C. tenuissimus* はマガキ D 型幼生の餌として好適ではない可能性が考えられた。

イ) 各種植物プランクトンの栄養成分の分析

図 8 に各珪藻類に含まれる中性糖およびタンパク質の濃度を示す。ここでは、昨年度の分析結果も併せ、合計 8 種の珪藻類の結果について示す。今年度分析した、連鎖群体を形成する *Chaetoceros socialis* の中性糖濃度は 8 種の中で最低、タンパク質濃度は下から 2 番目であり、本種の餌料価値は高くない可能性が考えられた。このことから、瀬戸内海では連鎖群体を形成する *Chaetoceros* 属の優占度の上昇により、餌料環境が栄養学的に悪化した可能性が考えられた。微小珪藻類の *Skeletonema menzelii*, *Chaetoceros tenuissimus* および *Chaetoceros neogracile* の中性糖濃度は昨年度分析した *Cyclotella* sp. 1 の 50~70%程度であったが、タンパク質濃度はいずれも *Cyclotella* sp. 1 を上回っていた。市販されており、二枚貝種苗生産等で広く活用される *C. neogracile* の値を基準とすると、*Cyclotella* sp. 1, *S. menzelii* および *C. tenuissimus* の餌料価値は低くないと考えられた。しかし、現場観測の結果からは、*C. tenuissimus* は幼生の餌として好適でない可能性が示された(図 7)。我々は飼育試験により、長い刺毛を有する *C. tenuissimus* は幼生に捕食されにくい傾向を確認している。*C. tenuissimus* は栄養学的には餌料価値は低くないものの、形態的特徴から幼生の餌としてあまり機能していないことが考えられた。

表 1 に各珪藻類に含まれる脂肪酸の組成を示す。中性糖およびタンパク質濃度の場合と同様、昨年度の分析結果も併せ、合計 8 種の珪藻類の結果について示す。表中の「その他」は未同定の脂肪酸になるので、より正確な組成を把握するにはそれらの同定を進める必要があるが、同定された脂肪酸について組成比が高いものはミリスチン酸、パルミトレイン酸、エイコサペンタエン酸で概ね共通していた。ただし、*Cyclotella* sp. 1 はミリスチン酸の割合が低くパルミチン酸の割合が高いという、他種と異なる特徴が確認された。現段階で脂肪酸組成のみから各珪藻類の餌料価値を決定することはできないが、各珪藻類を餌とする飼育試験の結果等と総合的に解析し、餌料価値が高い珪藻類の脂肪酸組成の特徴を今後解析する予定である。

ウ) *Cyclotella* sp. 1 と *Chaetoceros neogracile* を用いたアサリ稚貝の給餌試験

図 9 および図 10 に、1 回目および 2 回目の試験結果を示す。1 回目の給餌試験(同一の *in vivo* クロロフィル蛍光値での給餌)の結果、*Cyclotella* sp. 1 給餌区のアサリ稚貝の平均殻長は、*C. neogracile* 給餌区や無給餌区より有意に大きくなった。また、*Cyclotella* sp. 1 給餌区のアサリ稚貝 1 個体あたりの平均軟体部乾燥重量は 3 給餌区のなかで最も重くなったものの、*C. neogracile* 給餌区との有意差は認められなかった(図 9)。ただし、同一の *in vivo* クロロフィル蛍光値で給餌した場合、両種間の 1 細胞あたりの *in vivo* クロロフィル蛍光値が大きく異なるため、実際には *Cyclotella* sp. 1 の給餌重量が *C. neogracile* より圧倒的に多かったと考えられる。一方、2 回目の給餌試験(試験区ごとの飽食給餌)の結果、*Cyclotella* sp. 1 給餌区のアサリ稚貝の平均殻長は、*C. neogracile* 給餌区と同程度であり、両給餌区間に有意差は認められ

なかった。これに対して、アサリ稚貝 1 個体あたりの平均軟体部乾燥重量は *C. neogracile* 給餌区で最も重くなり、*Cyclotella* sp. 1 給餌区との間に有意差が認められた (図 10)。ただし、試験区ごとに飽食給餌を行った本給餌試験では、総給餌細胞数と両種細胞の乾燥重量の関係から推計すると、*C. neogracile* の給餌重量が *Cyclotella* sp. 1 より多くなったと考えられる。よって、両種の餌料価値は、概ね同等であると推察された。

以上の結果より、*in vivo* クロロフィル蛍光値の大小だけでは、現場の餌料環境を正確に推測するための指標にならないことが示唆された。したがって、現場に出現する主要な植物プランクトンの餌料価値を評価するためには、乾燥重量もしくは体積を基準とした比較検討が必須であると考えられた。

【謝辞】

(2) -ア) で用いた広島湾における表層海水、D 型幼生数およびマガキ着底数のデータは、広島市水産振興センターより譲り受けた。この場を借りて、深く御礼申し上げる。

【参考文献】

- 浜口昌巳. 一次生産の変化と有用種の関係 (二枚貝). 水産総合研究センター研究報告, 34, 33–47, 2011.
- Matsubara T, Yamaguchi M, Abe K, Onitsuka G, Abo K, Okamura T, Sato T, Mizuno K, Lagarde F, Hamaguchi M. Factors driving the settlement of Pacific oyster *Crassostrea gigas* larvae in Hiroshima Bay, Japan. *Aquaculture*, 563, 738911, 2023.
- McKelvy J. F, Lee Y. C. Microheterogeneity of the carbohydrate group of *Aspergillus oryzae* α -amylase. *Archives of biochemistry and biophysics*, 132, 99–110, 1969.
- Tanaka R, Uchida K, Ishimaru M, Ito M, Matsumoto N, Taoka Y, Hatate H. Effect of seawater reared on the nutritional composition and antioxidant activity of edible muscle in smoltified landlocked masu salmon (*Oncorhynchus masou masou*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 200–208, 2018.
- Yamasaki Y, Ishii K, Hikihara R, Ishimaru M, Sato F, Taga S, Kishioka M, Matsunaga S, Shikata T, Abe M, Kato S, Tanaka R, Murase N. Usefulness of the euglenophyte *Eutreptiella eupharyngea* as a new diet alga for clam culture. *Algal Research*, 40, 101493, 2019.
- 山下亜純. 豊後水道東部沿岸域における植物プランクトン群集の変動機構に関する研究. 愛媛県農林水産研究所水産研究センター研究報告, 1, 57–91, 2013.

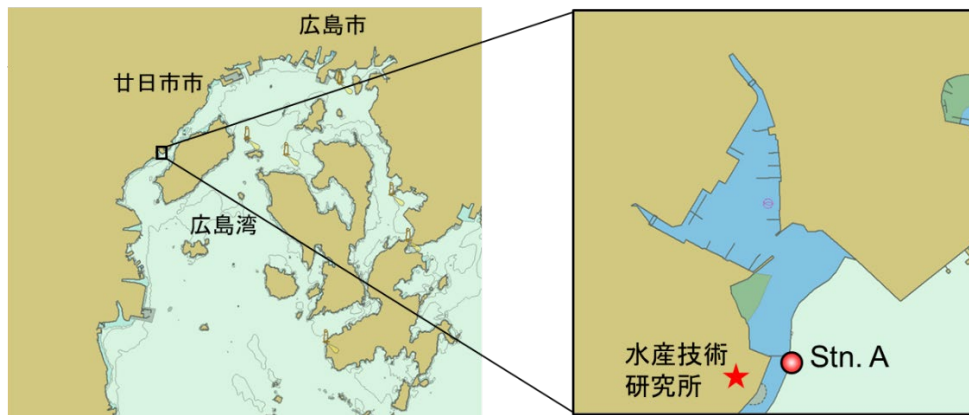


図1 水産技術研究所廿日市庁舎地先における観測定点



図2 マガキ浮遊幼生餌料観測定点

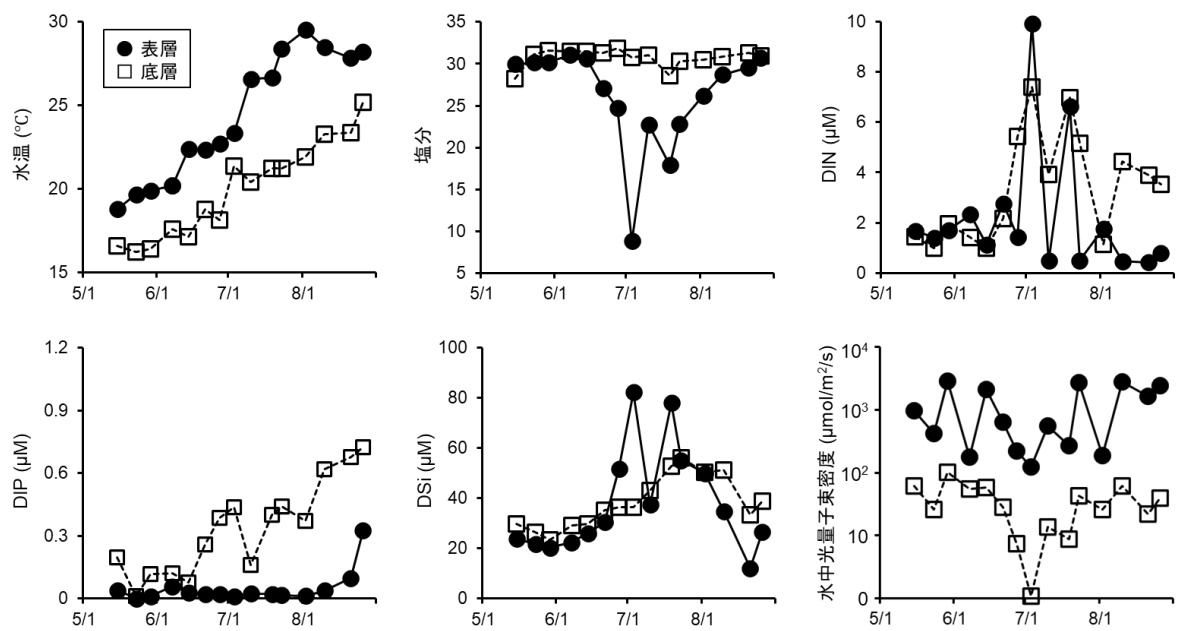


図3 2024年5月から8月の Stn. A における表底層の水温，塩分，DIN，DIP，DSi，水中光子束密度の変動

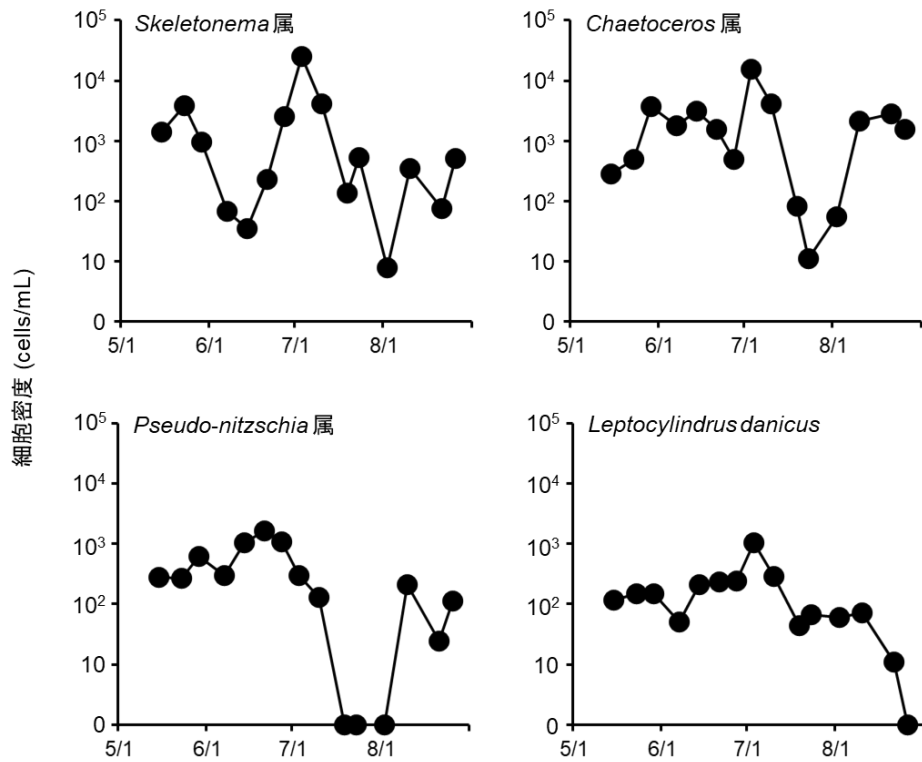


図 4 2024 年 5 月から 8 月の Stn. A の表層における各種珪藻類の細胞密度の変動

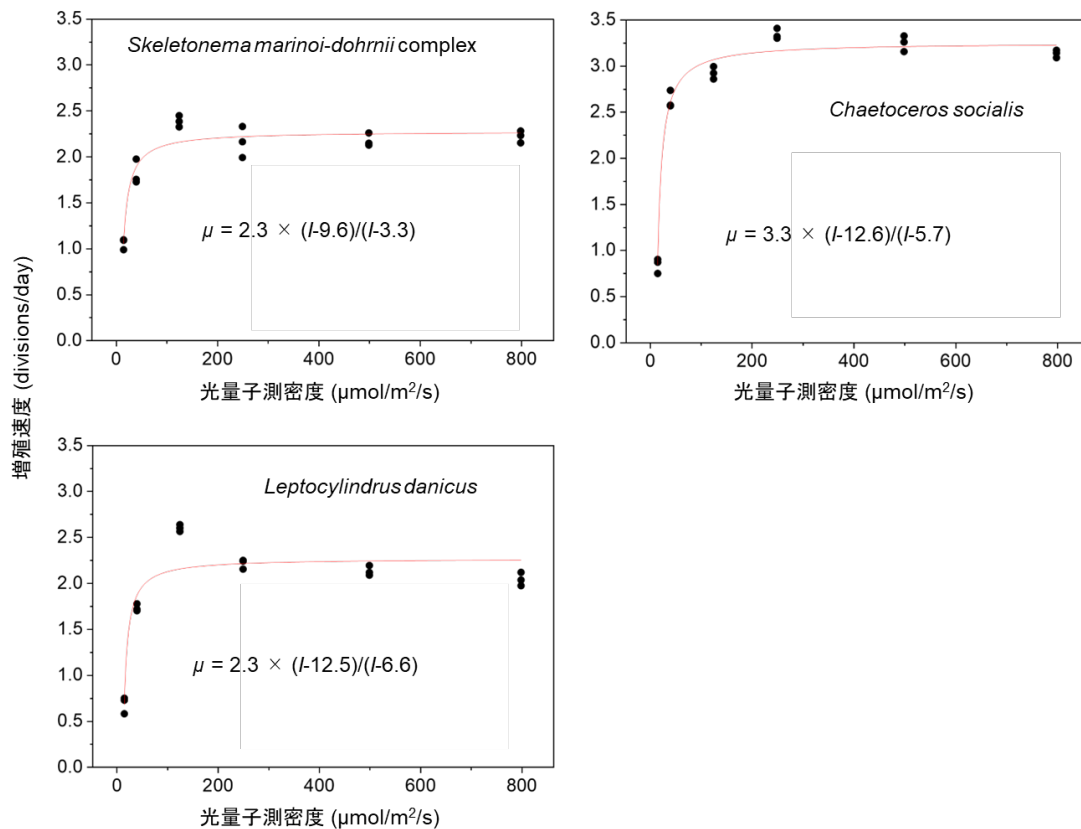


図 5 各光子束密度条件下における *Skeletonema marinoi-dohnii* complex, *Chaetoceros socialis* および *Leptocylindrus danicus* の増殖速度

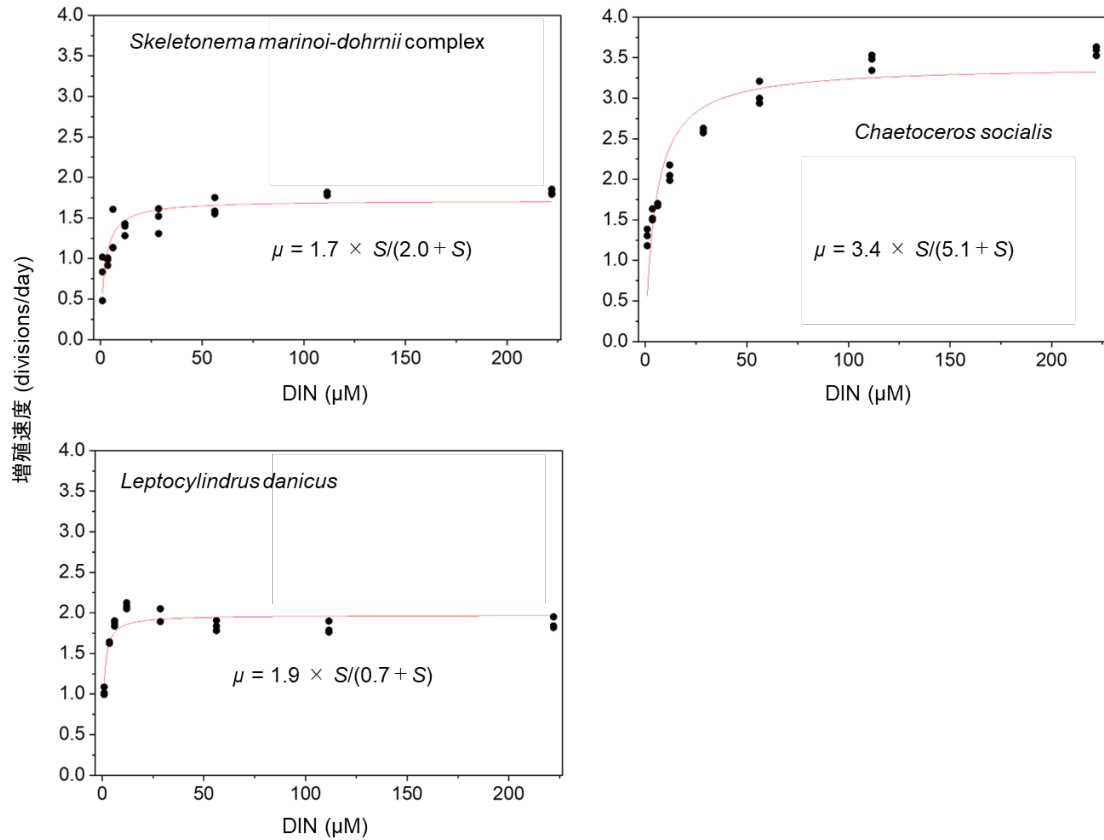


図6 各 DIN 濃度条件下における *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros socialis* および *Leptocylindrus danicus* の増殖速度

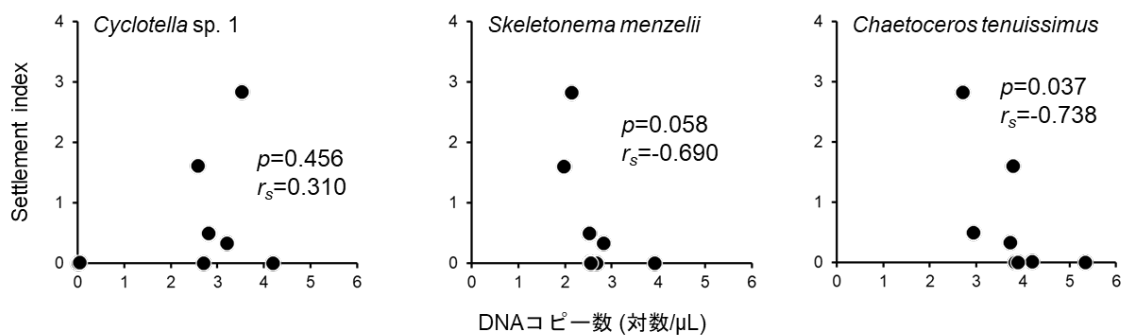


図7 各微小珪藻類の DNA コピー数と Settlement index との関係

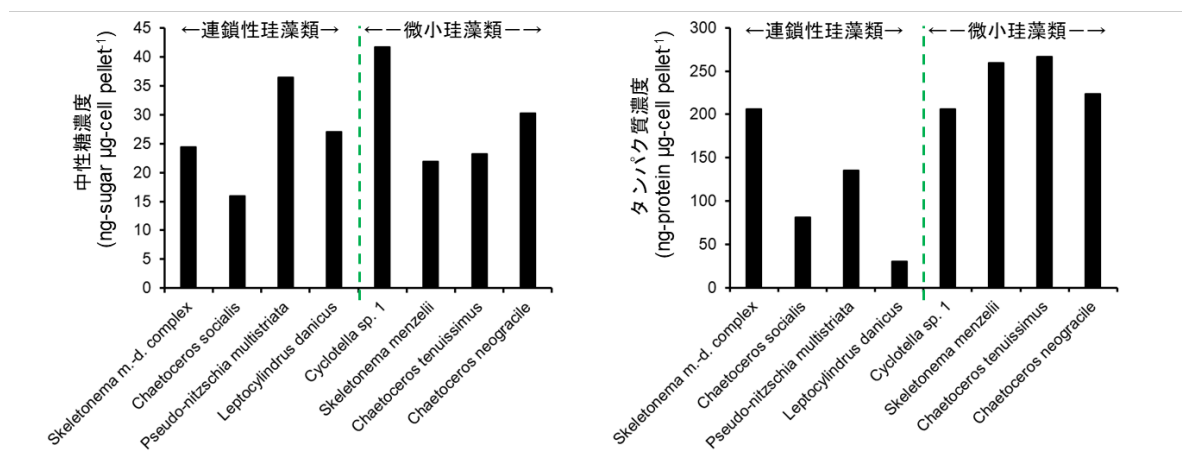


図8 各珪藻類に含まれる中性糖（左）およびタンパク質（右）の濃度

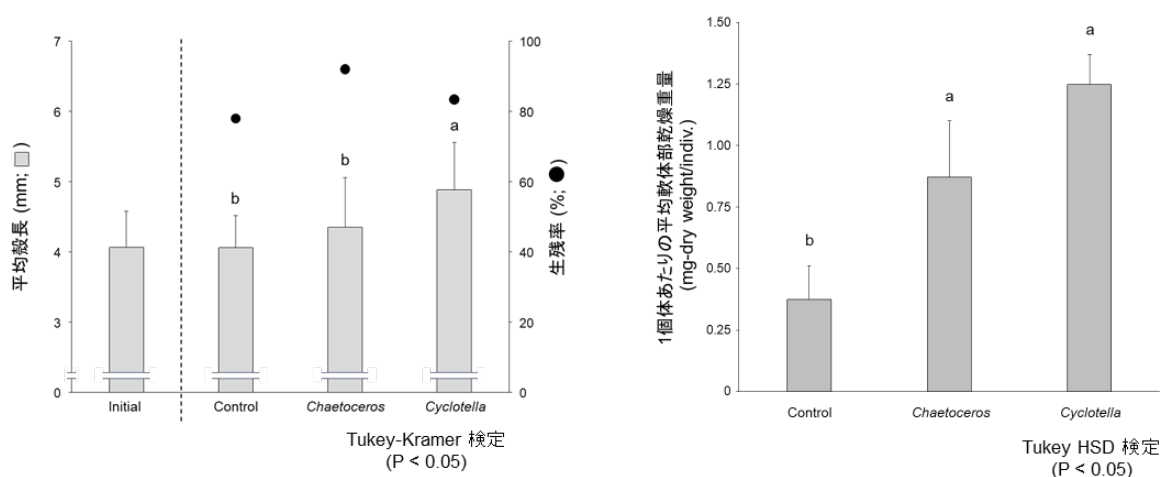


図9 1回目の飼育試験の結果（左：試験終了時の殻長および生残率，右：軟体部重量）

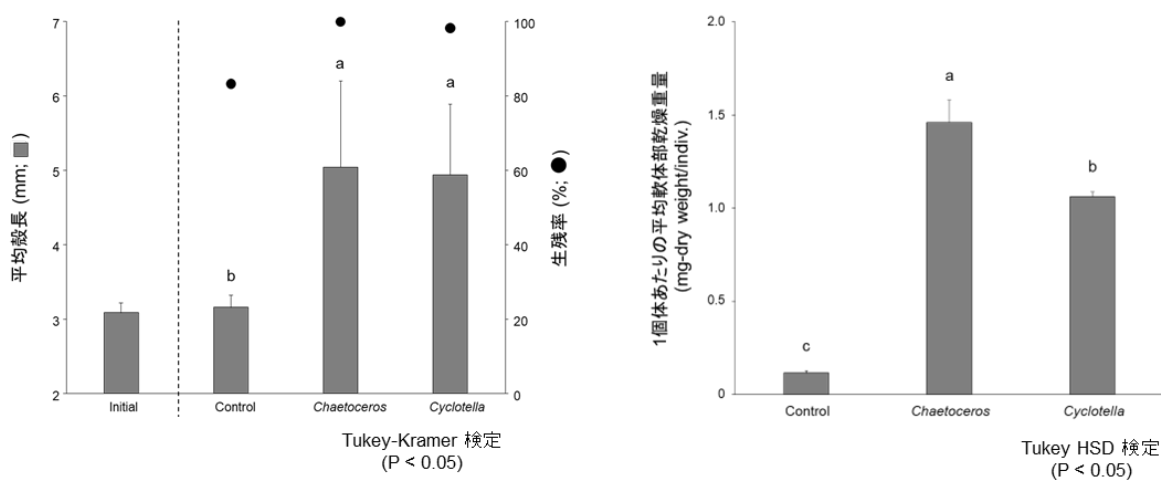


図10 2回目の飼育試験の結果（左：試験終了時の殻長および生残率，右：軟体部重量）

表1 各珪藻類に含まれる脂肪酸の組成

系統名	慣用名	記号		Skeletonema marinoi-dohrnii complex	Chaetoceros socialis	Pseudo-nitzschia multistriata	Leptocylindrus danicus	Cyclotella sp.1	Skeletonema menzelii	Chaetoceros	
		炭素数: 二重結合数	分類							tenuissimus	neogracile
ドデカン酸	ラウリン酸	C12:0		0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
テトラデカン酸	ミリスチン酸	C14:0		17.8	23.0	14.8	25.7	7.6	12.7	21.1	15.8
テトラデセン酸	ミリストレイン酸	C14:1		0.2	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.3	0.1
ペンタデセン酸		C15:1		0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ヘキサデカン酸	パルミチン酸	C16:0		6.2	5.5	7.1	5.0	22.7	8.9	3.7	7.1
ヘキサデセン酸	パルミトレイン酸	C16:1		10.0	11.6	21.3	22.8	18.4	14.2	7.5	18.6
オクタデカン酸	ステアリン酸	C18:0		0.1	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3
オクタデセン酸	オレイン酸	C18:1	n-9	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.6	0.2	0.5
バクセン酸		C18:1	n-7	0.1	0.8	0.9	0.7	0.4	0.6	0.6	0.3
オクタデカジエン酸	リノール酸	C18:2	n-6	1.1	0.3	0.4	1.1	0.1	0.7	0.3	0.9
オクタデカトリエン酸	γ-リノレン酸	C18:3	n-6	0.0	0.4	0.3	0.0	0.2	0.0	0.5	0.7
オクタデカトリエン酸	α-リノレン酸	C18:3	n-3	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
イコサトリエン酸	エイコサトリエン酸	C20:3	n-6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
エイコサテトラエン酸	アラキドン酸	C20:4	n-6	0.0	1.6	0.6	0.0	0.0	0.0	2.8	2.1
イコサペンタエン酸	エイコサペンタエン酸	C20:5	n-3	17.4	39.4	28.6	17.7	24.7	28.0	30.4	27.1
ドコサヘキサエン酸		C22:6	n-3	3.4	0.0	1.8	3.5	5.1	4.4	1.9	2.0
その他				43.1	16.5	23.2	22.9	20.3	29.3	30.5	24.5
合計 (%)				100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

種名に下線があるものは微小珪藻類、それ以外は連鎖性の珪藻類

課題番号：I－1）－ア ②

課題名：河口および周辺海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明

香川大学農学部
一見和彦，山口一岩

【背景・目的】

西日本の沿岸域ではアサリを主体に二枚貝類の資源量が大きく減少しており，東日本でもすでに同様の兆候が出はじめている。二枚貝資源量の減少要因として，栄養塩濃度の低下に伴う餌料環境の劣化，温暖化による水温上昇・捕食者の増加などが挙げられているが，その主要因は未だ特定されていない。

本課題では，二枚貝が浮遊幼生として一定期間を過ごす海域の餌料環境が劣化している可能性を主体に，干潟から沖合域にかけて栄養塩濃度，小型植物プランクトン（ $<10\mu\text{m}$ ）を対象とした Chl a 濃度，二枚貝浮遊幼生（アサリ，ホトトギスガイ，マガキ，その他）の出現量，および着底貝の現存量をモニターし，これらの動態を解析することで栄養塩から二枚貝に至る関連性を明らかにすることを目的とする。また，餌料生物の現場動態を明らかにする目的で以下の試験を実施する。調査海域に優占し，浮遊幼生の餌料候補となる小型植物プランクトンを単離して培養株を作成し，メタバーコーディングにより種の同定を行う。得られた優占種株について培養試験により栄養塩応答を調べることで，河口から沖合域に至る栄養塩環境から，潜在的に良好な増殖が見込まれる海域範囲を推測すると共に，リアルタイム PCR 法により各種の出現量について，その季節変動や水平分布を解析することで現場海域における出現状況を明らかにする。

以上を総合的に解析し，栄養塩環境の変化が二枚貝浮遊幼生の餌料環境をどのように変え，浮遊幼生の生残・成長，および着底に影響を及ぼすか明らかにすることを目的とする。

【方法】

(1) 定期観測による現場モニター

香川県高松市の新川河口干潟上から沖合域にかけて 3 定点（定点 B，Y2，BS15：図 1）を設置し，浮遊幼生の出現期にあたる 5 月から 12 月の満潮時に毎月 1～2 回の頻度で以下の観測を実施した。ビルジポンプを用いて 1 m 深の海水を採取し，多項目水質計（CTD）にて水温と塩分を，また海水試料中の栄養塩濃度と全 Chl a 濃度および $<10\mu\text{m}$ 画分の Chl a 濃度を測定した。二枚貝浮遊幼生については 200 L の海水を $50\mu\text{m}$ 目合いのプランクトンネットですろ過濃縮し，アサリ，ホトトギスガイ，マガキ，その他の二枚貝について出現量を測定した。各種とも顕微鏡下で殻長の測定を行い，成長過程もモニターした。なおアサリとホトトギスガイについては，調査干潟（定点 B：図 1）での着底量についても観測期間を通じて干潮時に観測を行った。

(2) 小型植物プランクトンの栄養塩応答の解明

次年度以降に栄養塩濃度に対する詳細な増殖応答試験を行うため，調査海域の一定点（定点 Y2：図 1）で優占する小型植物プランクトンの分離，株化を行った。すなわち，得られた

海水を $<10\ \mu\text{m}$ に分画し、栄養塩類を強化した試料海水を用いて終点希釈法に基づいて $10^0\sim 10^5$ まで順次希釈した。これを現場海水温、光量子量 $100\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (12 : 12 LD) で4~7日間インキュベートし、増殖してくる小型植物プランクトンの観察を行った。最も高い希釈区で増殖してきたプランクトン種を当該観測日の優占種と仮定し、マイクロピペット法により分離、培養株を作成した。昨年度は珪藻類を主体に単離、株化を進めたが、今年度は鞭毛藻類を主な対象種として培養株の作成を行った。また昨年度に引き続き、環境DNA解析(18S領域)による植物プランクトンの出現状況を概観した。

(3) 二枚貝浮遊幼生および植物プランクトンの脂肪酸組成分析

2024年7月から9月にかけて、定点Y2にてビルジポンプにより1m深の海水を $330\ \mu\text{m}$ のメッシュに通して採取した。この試料海水を $10\ \mu\text{m}$ およびGF/Fフィルターを用いて分画し、 $10\ \mu\text{m}$ 以上および以下の懸濁粒子を捕集した。また同様にビルジポンプで採取した海水を $100\ \mu\text{m}$ 目合いのプランクトンネットを用いて5~10分間濃縮して捕集し、プラスチックボトルに入れて持ち帰った。この試料から二枚貝浮遊幼生をパスツールピペットで単離し、脂肪酸分析に供した。

単離した浮遊幼生試料(数100個体/試料)を凍結乾燥後、ヘキサン、三フッ化ホウ素/メタノール溶液(15% v/v)を添加し、 100°C で2時間加熱することで脂肪酸を抽出すると共にメチルエステル化した。この分析サンプルを減圧濃縮後、ガスクロマトグラフ質量分析により脂肪酸組成を分析した。

【結果】

(1) 定期観測による水質およびChl a濃度の推移

2024年度調査における水温は $14.5\sim 30.0^\circ\text{C}$ の範囲にあり、塩分は $25.6\sim 31.7$ で推移し、2023年と比較して低い傾向にあった(図2)。

栄養塩濃度の推移を図3に示す。DIN($\text{NH}_4 + \text{NO}_{2+3}$)、DIP、DSiのいずれも河川に最も近い定点Bで濃度が高かった。一次生産者の制限因子になりうるDIN濃度は、定点Y2、DS15で8月および9月に $1\ \mu\text{M}$ 以下の濃度が検出されたが、それ以外の観測月は概ね $2\ \mu\text{M}$ 以上で推移した。

各定点におけるChl a濃度(全Chl a濃度およびサイズ分画-Chl a濃度)の推移を図4に示す。2024年度のChl a濃度として、各定点共に高水温期の7月~9月に高く、全期間の濃度として $0.61\sim 7.25\ \mu\text{g}/\text{L}$ の範囲にあった。この傾向は全Chl a濃度と $<10\ \mu\text{m}$ 画分のChl a濃度に共通して認められた。また $10\ \mu\text{m}$ 前後のChl a濃度として、5月~7月および10月周辺には小型植物プランクトンの割合が高く、8月前後の高水温期は大型の植物プランクトンの割合が高くなる明瞭な傾向が認められた(図4)。

(2) 定期観測に二枚貝浮遊幼生および着底貝の推移

2024年度における二枚貝浮遊幼生は初夏と秋季に出現密度が高く、3定点の最大出現密度としてそれぞれ $3,820\ \text{inds}/\text{m}^3$ (BS15 : 11月)、 $16,560\ \text{inds}/\text{m}^3$ (Y2 : 8月)、 $20,720\ \text{inds}/\text{m}^3$ (B : 11月)、が検出された(図5)。いずれの定点においてもアサリおよびマガキの浮遊幼生はほぼ検出されず、ホトトギスガイがそのほとんどを占めていた。

2ヶ年の観測から、ホトトギスガイ浮遊幼生は6月ないし7月と9月~11月に出現密度が高く、またフルグロウン期幼生である殻長 $180\ \mu\text{m}$ 以下の出現割合は6月と9月~10月に高くな

る傾向があった（図 6）。この浮遊幼生の成長ないし生残率は Chl a 濃度が高くなる初夏および秋季に高くなる傾向が見られることから、Chl a 濃度の高低が浮遊幼生の成長と生残率に寄与している可能性が示唆された。また、6 月～7 月にフルグロウン幼生が出現した直後となる 7 月～8 月に多くの稚貝（殻長：<4 mm）が新規加入していた。一方で、秋季もフルグロウン幼生を含む多くの浮遊幼生が出現しているにもかかわらず、稚貝の新規加入は認められなかった（図 6）。着底時に何らかの問題が生じているのか、着底はできたものの、捕食圧の増加など、その後に何らかの理由で生残できなかったか、現時点では不明であり、今後の検証課題としたい。

（2）小型植物プランクトンの栄養塩応答の解明

定点 Y2（図 1）で得られた試料海水を終点希釈法に基づいて希釈、インキュベート後に珪藻以外の植物プランクトンを単離した結果、得られた植物プランクトン種はクリプト藻類とプラシノ藻類であり、それぞれ 2 株ずつ株化が出来た。現時点で種名まで同定できておらず、次年度の課題としたい。またこれらの株を用いて、昨年度に珪藻培養株として取得している *Skeletonema donii*, *Minidiscus spinulatus*, *Chaetoceros tenuissimus*, *Chaetoceros calcitrans*, *Cyclotella atomus* と共に増殖に関する栄養塩応答の解明を進める予定である。

また昨年度に引き続き、環境 DNA 解析（18S 領域）により植物プランクトンの出現傾向を調べたところ、夏季の高水温期から 10 月初旬まで珪藻類が卓越しており、その他の期間にはクリプト藻、プラシノ藻、渦鞭毛藻の存在割合が高いことが示された（図 7）。

（3）二枚貝浮遊幼生および植物プランクトンの脂肪酸組成分析

EPA の含有率が高い珪藻の必須脂肪酸組成比 DHA/EPA は値が低く、渦鞭毛藻などは DHA 含有率が高いため組成比は高い値を示すことが知られている。浮遊幼生の主要な餌料と考えられる小型植物プランクトンの画分となる懸濁粒子（<10 μm ）と大型植物プランクトン（10 μm <）画分の DHA/EPA を調べた結果、大型の 10 μm <画分の懸濁粒子は 1 以下を示し、小型の <10 μm 画分の懸濁粒子は 1 をわずかに上回る値を示した（図 8）。以上は、大型の粒子は EPA を脂肪酸の主成分とする珪藻が多くを占めること、浮遊幼生の餌料と考えられる小型粒子は珪藻と鞭毛藻類が混在していることを示唆するものである。一方で、二枚貝浮遊幼生の DHA/EPA はすべての観測試料で 1.5 を上回り、DHA 含有量が高かった（図 8）。

本観測は 7 月～9 月の高水温期に実施しているが、以上の結果は、この期間は珪藻類が卓越している中で、浮遊幼生は餌料生物として渦鞭毛藻、クリプト藻、プラシノ藻などの非珪藻を主に摂食している可能性が示唆するものである。浮遊幼生の体内で DHA が変換・生成される可能性も考えられるが、マガキ幼生においては DHA 合成経路が確認されておらず（Da Costa Gonzalez Fiz et al., 2015）、またマガキ幼生に DHA 含有率の高いハプト藻と EPA 含有率の高い珪藻を摂餌させた実験によると、餌生物の脂肪酸組成が浮遊幼生の脂肪酸組成に反映されることが示されている（Rico-villa et al., 2006）。以上より、浮遊幼生の餌料生物として珪藻以外の小型植物プランクトンにも焦点を当て、詳細な検証が行っていく必要がある。

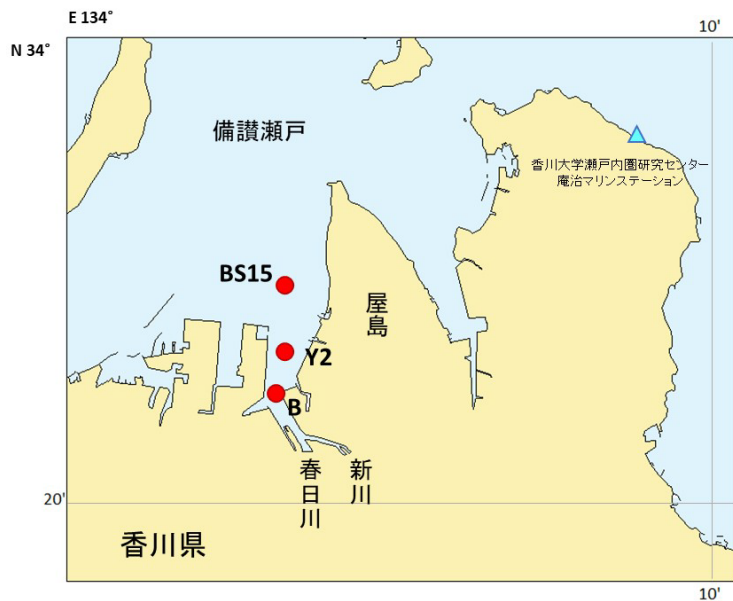


図1 観測定点

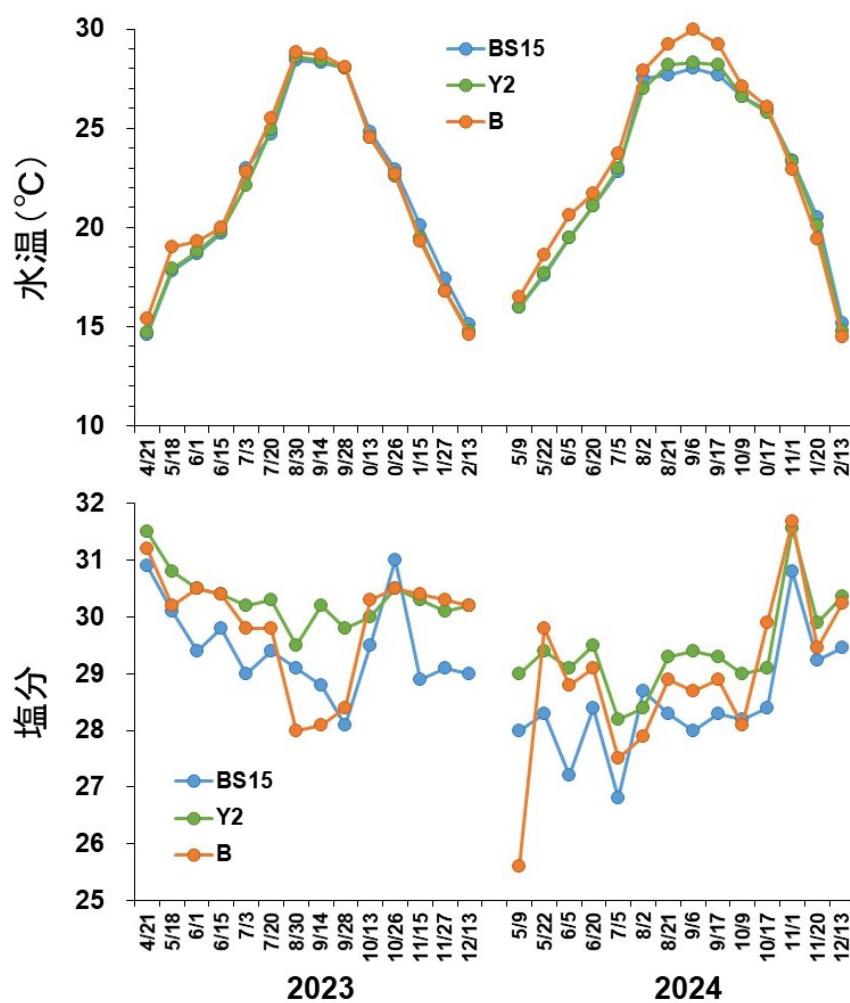


図2 各定点における水温と塩分の推移

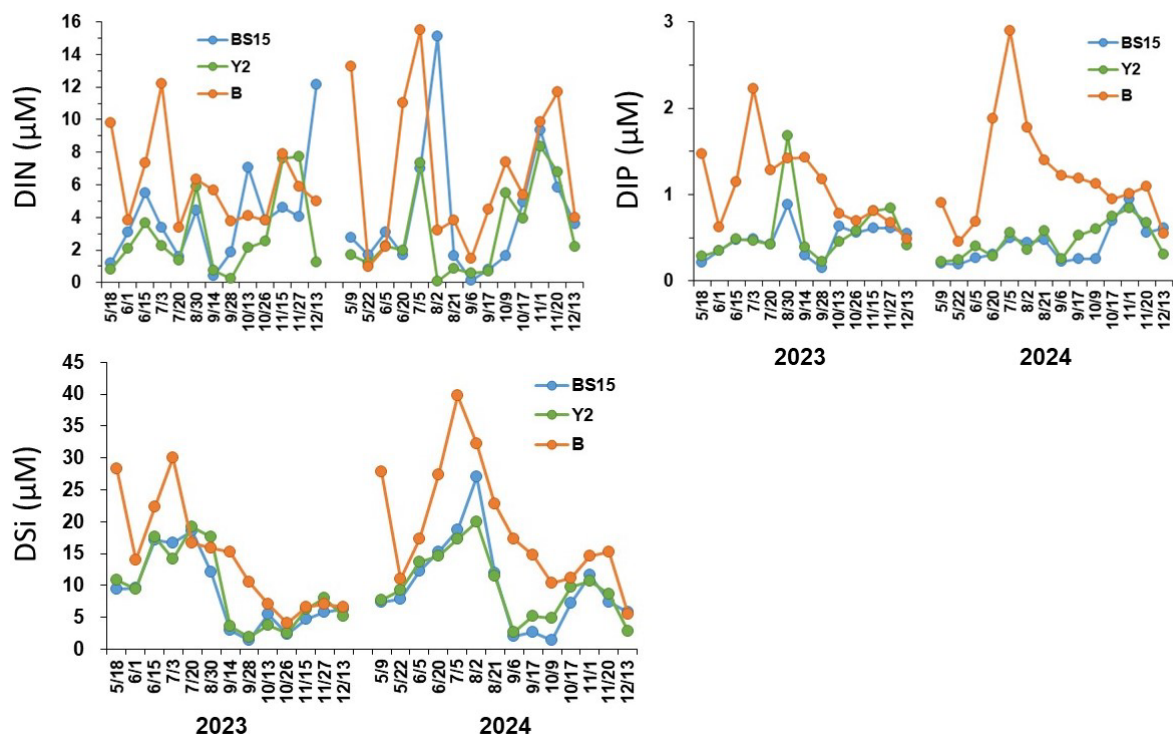


図3 各定点における栄養塩濃度の推移

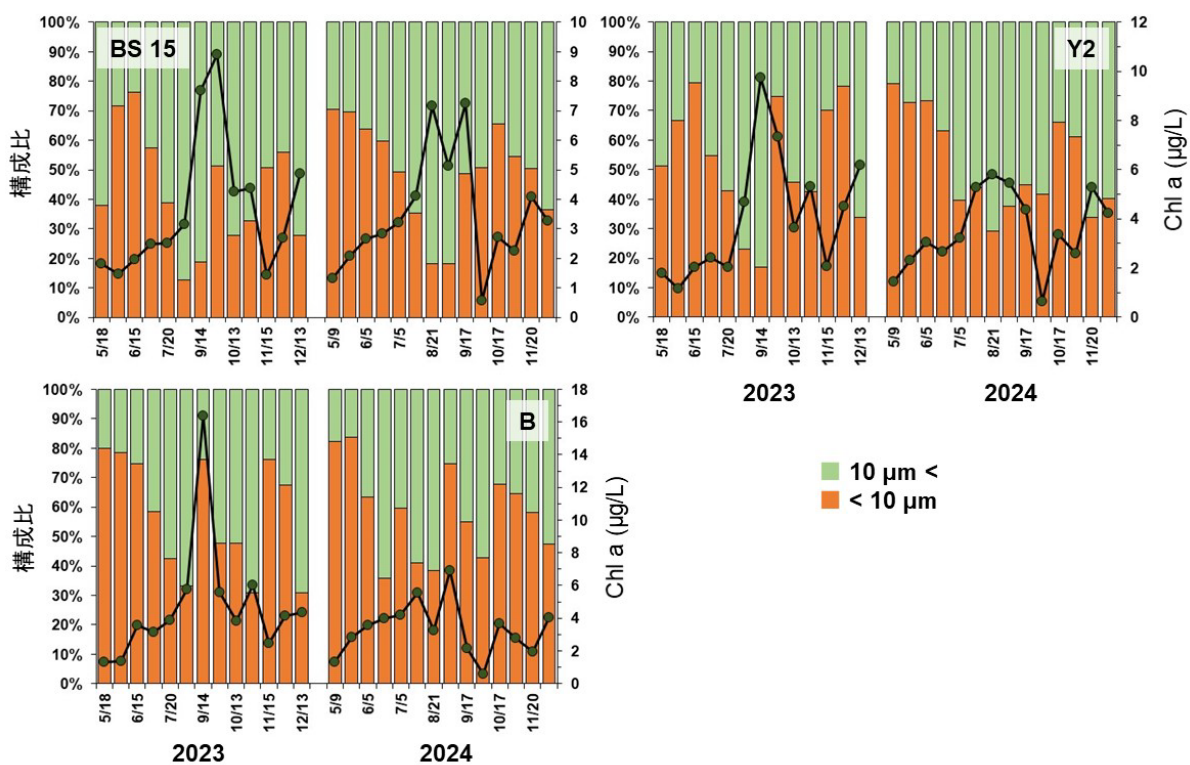


図4 各定点における全 Chl a 濃度と< 10 μm 画分の Chl a 濃度の推移

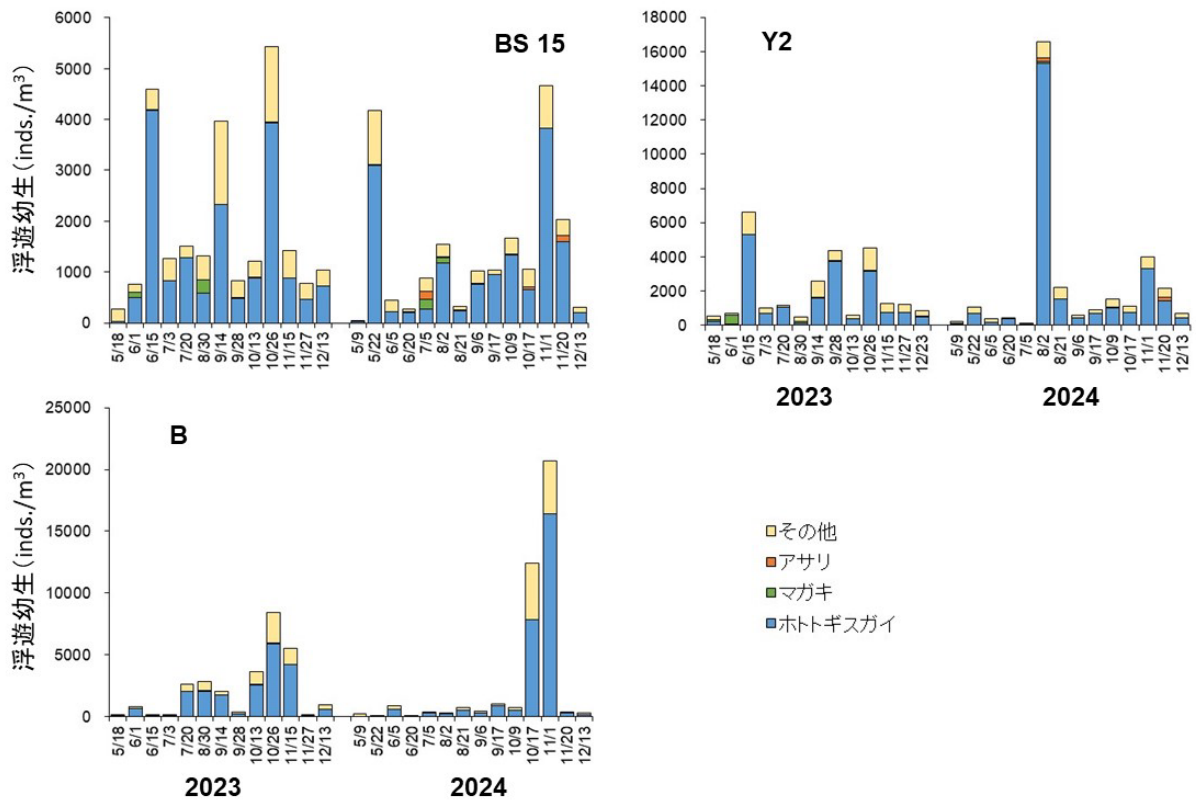


図5 各定点における二枚貝浮遊幼生の出現密度

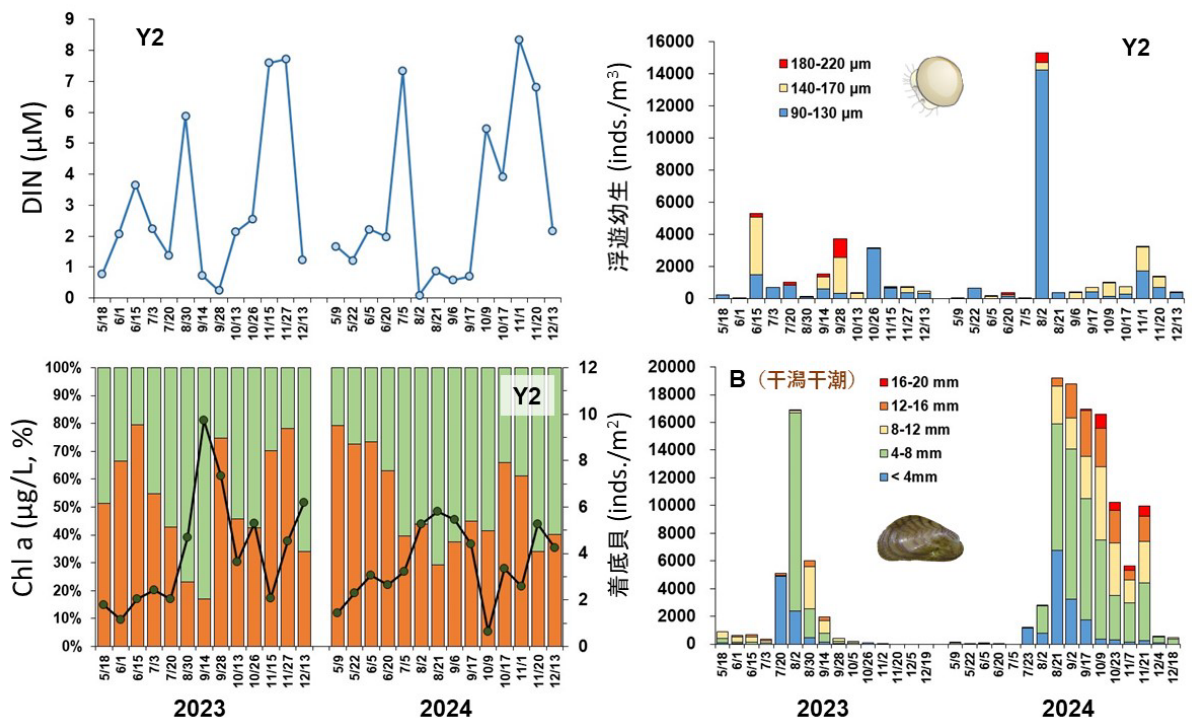


図6 各定点で検出されたホトギスガイ浮遊幼生のサイズ組成と定点 B におけるホトギスガイの着底状況

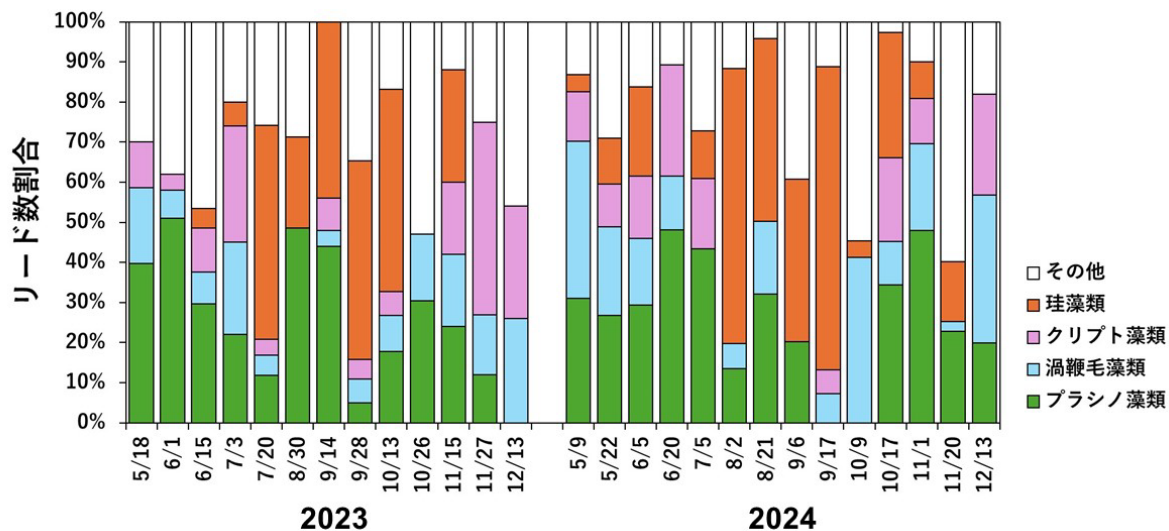


図7 定点 Y2 で分離・株化された小型珪藻類と環境 DNA 解析から得られた植物プランクトン相

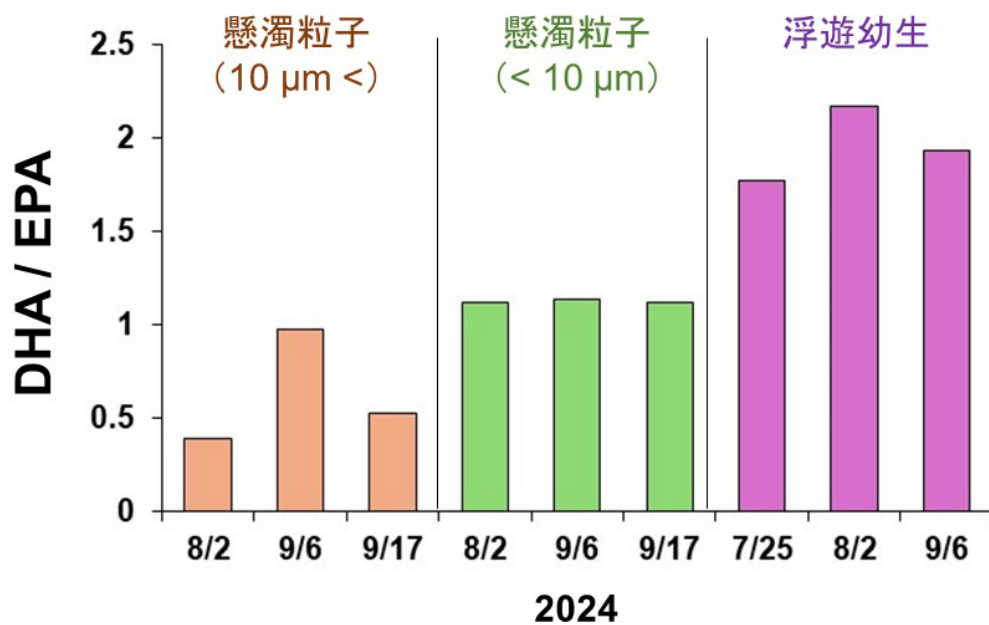


図8 定点Y2における懸濁粒子と浮遊幼生のDHA/EPA

課題番号：I－1）－イ

課題名：栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明

岡山県農林水産総合センター水産研究所

乾 元氣，高木秀蔵，角田成美，富山瑛弘，林 浩志

【背景・目的】

近年、瀬戸内海では海域の栄養塩濃度が低下しており，食物連鎖を通じて高次の生物の成長等に影響を与えていることが指摘されている（反田他 2014）。岡山県海域においても，養殖ノリの色落ち被害のほか，養殖ガキの身入り不良が頻発している（村山他 2018）。貝類の成長と栄養塩類等の水質環境との関係については不明な点が多く，海域の適切な栄養塩管理が求められる中，両者の関係を明らかにすることは重要である。

本課題では岡山県内のカキ養殖漁場においてマガキの湿重量，身入り度等の成長状況とクロロフィル *a* 濃度，有機態を含む栄養塩類等の漁場環境を調査し，本県の養殖漁場における栄養塩類等とマガキの成長との関係や成長に影響を与える指標を明らかにする。昨年度までに過去 8 年間のデータを用いて漁場環境とマガキの成長との関係を調査し，粒状態有機窒素（PON）濃度が指標となる可能性が示唆された（乾他 2024）。今年度はマガキの成長に関するモデルを作成し，マガキの良好な成長に必要な窒素量について検討した。

【方法】

岡山県備前市日生町地先，瀬戸内市邑久町地先，浅口市寄島町地先の各漁場に設置されている養殖筏のうち，4 台（St.1~4）をモニタリング用の筏（以下，試験筏）とし（図 1），5 月上旬に各試験筏にコレクター 5 枚を取り付けた垂下連を垂下した。なお，コレクターの種苗は前年に岡山県で採苗されたものであり，売り上げ等への影響を考慮して St.1~4 がどの漁場かは明記しない。通常の養殖過程に準じて，試験筏は 5~9 月は抑制漁場に，10 月以降は養成漁場に移動させた。6~12 月までの間，毎月下旬に 1 本ずつコレクターを回収し，無作為にマガキ 30 個体を選出して全重量，殻高，軟体部重量を測定するとともに，4~12 月上下旬に各試験筏の設置場所の水深 2m から海水を採取し，クロロフィル *a* 濃度，形態別の窒素（溶存態無機窒素（DIN），PON，全窒素（TN））濃度を分析した。各漁場間の比較には Kruskal-Wallis 検定，Scheffe の多重比較を用いた（エクセル統計（株）社会情報サービス社製）。また，牛窓沖観測ブイと St.2~4 の試験筏で 30 分に 1 回，水深 2m における水温を測定した。

平成 27~令和 5 年度の 9 年間に同様の方法で取得したデータを用いて，各期間の形態別の窒素濃度とろ過水量，酸素消費量，生殖線の発達等に影響を与える水温についてマガキの軟体部重量との関係を調査し，重回帰分析モデルを作成した（エクセル統計）。なお，St.1 の水温は St.2 のデータを用いた。また，令和 6 年度の調査結果を用いてモデルの精度を検証した。

【結果】

今年度の各漁場におけるマガキの全重量，殻高，軟体部重量の推移を図 2 に示した。全重量は 6 月に St.1~4 の順でそれぞれ 7.4 ± 2.7 ， 6.6 ± 2.6 ， 4.2 ± 2.0 ， 4.3 ± 1.9 g（平均値±標準偏

差)であったが、徐々に増加し、12月にはそれぞれ 79.7 ± 13.9 , 64.9 ± 11.3 , 41.5 ± 5.9 , 54.0 ± 11.1 g となった。殻高は6月にそれぞれ 46.3 ± 4.7 , 45.5 ± 6.6 , 36.0 ± 5.7 , 36.8 ± 5.0 mm であったが、St.3を除いて9月までの成長が良く、9月にはそれぞれ 93.1 ± 10.9 , 81.4 ± 9.1 , 59.3 ± 8.8 , 74.3 ± 7.9 mm, 12月にはそれぞれ 106.9 ± 11.9 , 100.0 ± 8.9 , 78.6 ± 8.1 , 83.9 ± 8.4 mm となった。軟体部重量は6月に 1.4 ± 0.5 , 1.0 ± 0.6 , 0.6 ± 0.3 , 1.0 ± 0.4 g であったが、10月には 2.6 ± 0.7 , 4.8 ± 1.1 , 2.6 ± 0.7 , 4.3 ± 1.2 g となった。10~12月は成長が良く、12月には 21.5 ± 3.9 , 17.6 ± 2.9 , 10.6 ± 1.6 , 14.0 ± 3.3 g となった。

各漁場のクロロフィル *a* 濃度の推移を図3、形態別窒素濃度の推移を図4に示した。クロロフィル *a* 濃度の平均値は St.1~4 の順にそれぞれ 12.3 ± 27.4 , 4.3 ± 3.1 , 2.4 ± 1.3 , 9.8 ± 11.3 $\mu\text{g/L}$ であり、St.1, 4 が St.3 より高かった ($p < 0.05$)。TN 濃度はそれぞれ 17.4 ± 7.2 , 13.1 ± 3.1 , 14.6 ± 5.1 , 38.0 ± 5.2 μM であり、St.4 が St.2, 3 より高かった ($p < 0.05$)。PON 濃度はそれぞれ 4.6 ± 4.5 , 2.7 ± 1.5 , 1.0 ± 0.9 , 4.4 ± 4.0 μM であり、St.3 がその他の漁場より低かった ($p < 0.05$)。DIN 濃度はそれぞれ 3.2 ± 4.4 , 1.5 ± 1.6 , 3.6 ± 2.3 , 6.1 ± 3.9 μM であり、St.3 は St.2 より高く、St.4 は St.1, 2 より高かった ($p < 0.05$)。

牛窓沖と各漁場における6~12月の日平均水温の推移を図5に示した。牛窓沖は9月まで概ね平年並みに推移したが、それ以降は平年を上回って推移した。一方、各漁場の水温は、全期間を通じて牛窓沖の平年値を上回って推移した。St.1・2, 3, 4 の平均水温はそれぞれ 23.1 ± 5.5 , 23.9 ± 5.3 , 23.4 ± 5.9 $^{\circ}\text{C}$ であった。なお、牛窓沖の平均水温は 22.8 ± 4.7 $^{\circ}\text{C}$ (平年値 21.8 ± 4.5 $^{\circ}\text{C}$) であった。

平成27~令和5年度(9年間)の9~11月のDIN, PON, TN濃度および10~11月の水温の平均値と12月の軟体部重量の関係を図6に示した。9~11月のPON濃度と12月の軟体部重量は有意な正の相関を示した ($p < 0.05$)。一方、同期間のDIN, TN濃度と軟体部重量には相関はなかった。また、10~11月の水温と12月の軟体部重量は有意な正の相関を示した。産卵期(6~8月)以降のろ過水量は水温が高いほど多く、摂餌量も増える(赤繁他 2005)。また、日生海域では生殖組織へのエネルギーの分配割合が 23°C 以上で徐々に高まる(小林 2012)。これらのことから、産卵期以降に軟体部重量の成長が良くなる秋季(図2(c))には、PON濃度と水温が軟体部重量に影響を与えることが示唆された。

有意な正の相関があった9~11月の平均PON濃度および10~11月の平均水温を説明変数とした12月の軟体部重量のモデルを図7に示した ($p < 0.01$)。関係式は、 $y = 5.4 \log(x_1) + 41.2 \log(x_2) - 118.6$ (y : 軟体部重量, x_1 : PON濃度, x_2 : 水温) となった。令和6年度の9~11月における各試験筏の平均PON濃度は St.1~4 の順にそれぞれ 4.0 ± 2.7 , 2.7 ± 1.6 , 1.2 ± 0.7 , 3.9 ± 2.1 μM , 10~11月における水温は、St.1・2, 3, 4 の順にそれぞれ 22.4 ± 3.0 , 21.7 ± 3.3 , 22.4 ± 3.3 $^{\circ}\text{C}$ であり、12月の軟体部重量の推定値はそれぞれ 16.8, 14.8, 9.2, 16.6g, 実測値との差は $-2.6 \sim 4.5$ g となった(図7(b))。水温はいずれも9年間の最大値(21.4°C)を上回っており、実測値との差には本年度の水温が影響した可能性が考えられる。また、10~11月の平均水温が9年間の平均値(20.5°C)となった場合、12月の軟体部重量が9年間の平均値(12.4g)を上回るには、9~11月の平均PON濃度が $3.4 \mu\text{M}$ 以上となる必要がある。なお、平成27~令和5年度には身入りが不調となった年度もあり(岩本他 2019)(池田他 2023)、生産が良好であった時期のデータも考慮する必要がある。引き続き調査を行い、他の指標の探索とモデルの精度の向上を図るとともに、本県カキ養殖漁場における必要な窒素量の検討を進める。

【参考文献】

- 反田實，赤繁悟，有山啓之，山野井英夫，木村博，團昭紀，坂本久，佐伯康明，石田祐幸，壽久文，山田卓郎.瀬戸内海の栄養塩環境と漁業.水産技術，7，37-46，2014.
- 村山史康，濱崎正明，山下泰司，草加耕司.モニタリング調査から推定したマガキの身入り不良要因.岡山水研報告，33，29～33，2018.
- 乾 元気，高木秀蔵，角田成美，林 浩志.栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明.令和5年度豊かな漁場環境推進事業のうち海域特性に応じた赤潮・貧酸素水塊、栄養塩類対策推進事業（2）栄養塩類不足による漁業被害への対策技術の開発・実証・高度化報告書，23～30，2024.
- 赤繁 悟，平田 靖，高山恵介，空本季里恵.養殖マガキの酸素消費量の季節変化.日本水産学会誌，71（5），762～767，2005.
- 小林雅人.マガキの成長過程のモデル化に向けた生理的パラメータの検討.横浜商大論集，45（2），147～175，2012.
- 岩本俊樹，村山史康.平成30年度カキ養殖概況.岡山県農林水産総合センター水産研究所資料，2019.
- 池田博明，山下泰司.令和4年度カキ養殖概況.岡山県農林水産総合センター水産研究所資料，2023.

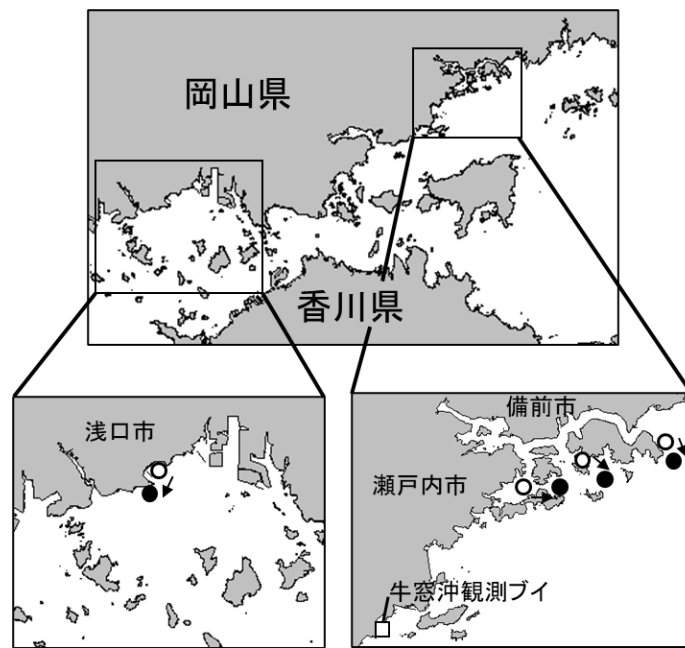


図1 調査漁場 (○抑制漁場, ●養成漁場)

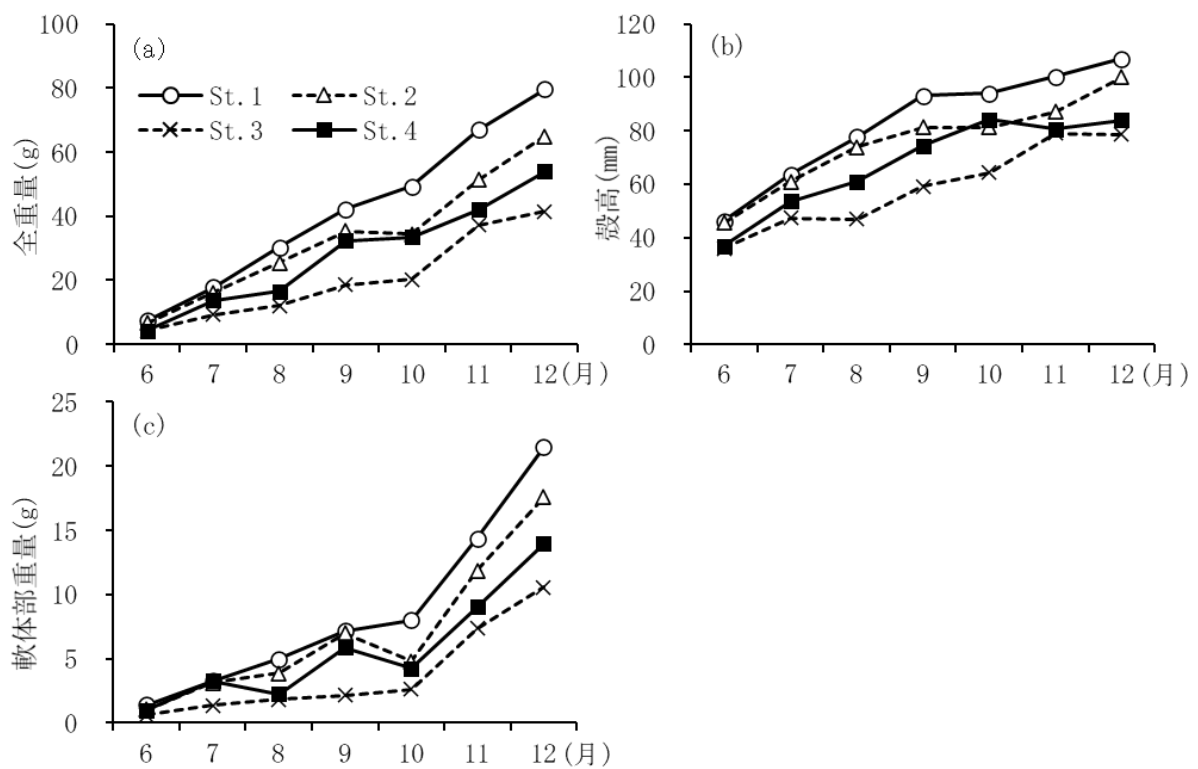


図2 令和6年度の各漁場におけるマガキの成長状況
(a)全重量, (b)殻高, (c)軟体部重量

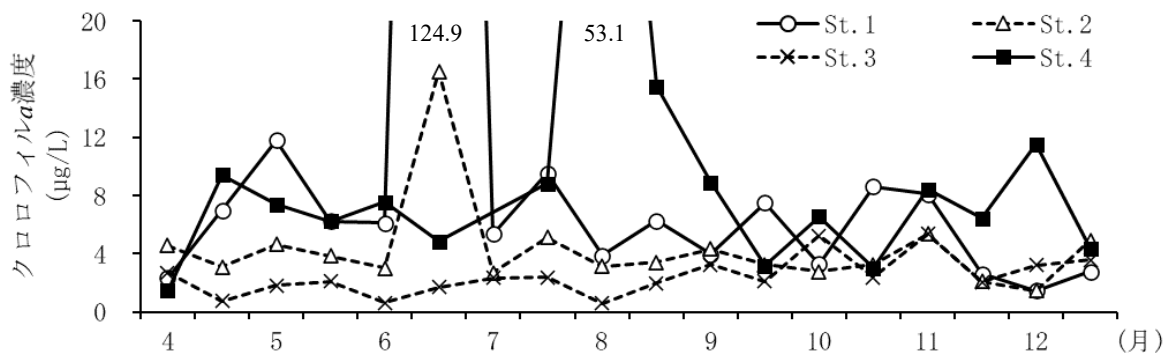


図3 令和6年度の各漁場におけるクロロフィルa濃度の推移

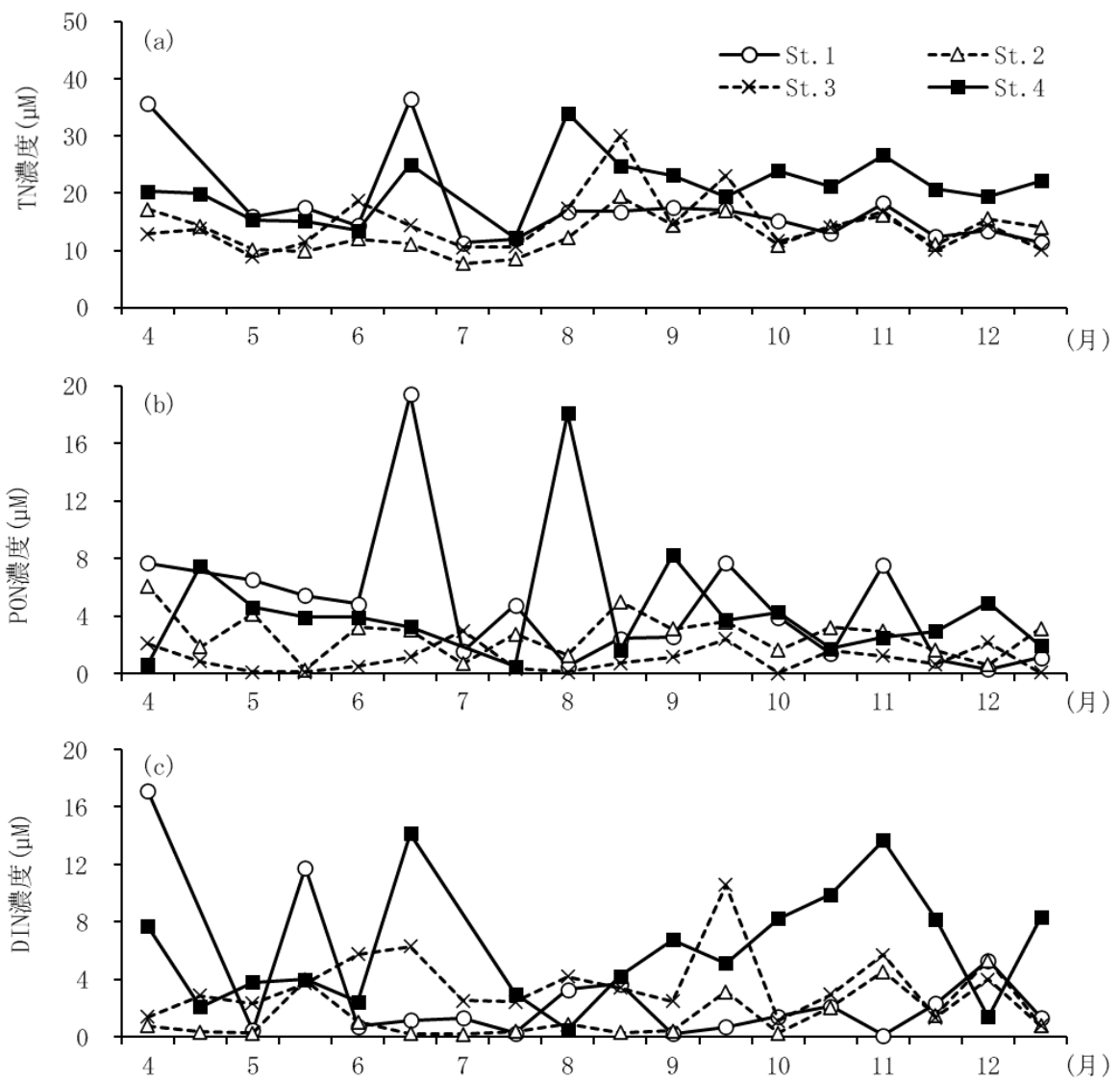


図4 令和6年度の各漁場における形態別窒素濃度の推移

(a) TN 濃度, (b) PON 濃度, (c) DIN 濃度

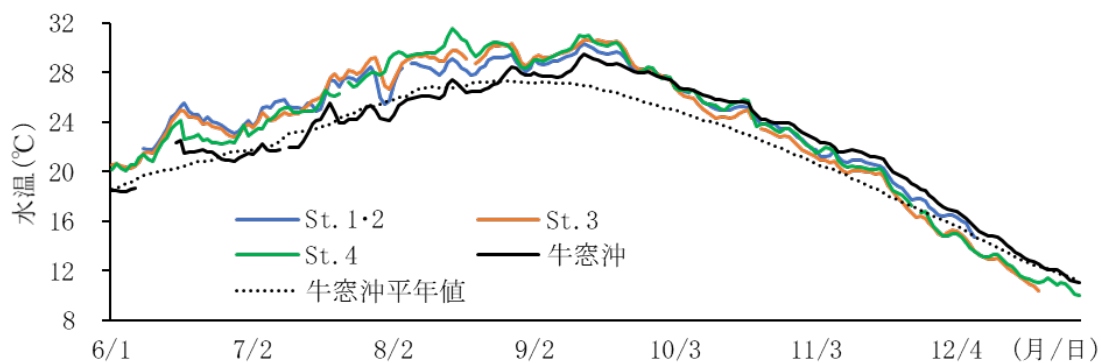


図5 令和6年度の各漁場における水温（2m層）の推移

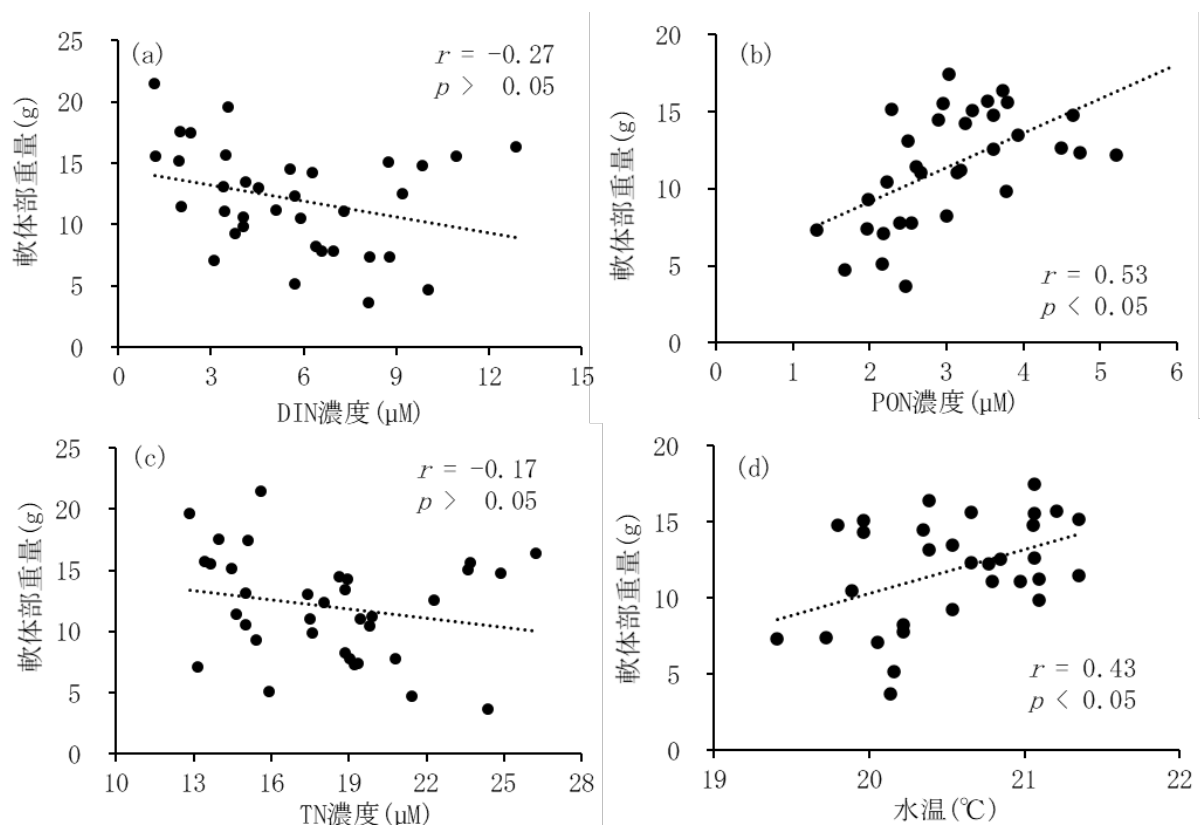


図6 形態別窒素濃度（9～11月）、水温（10～11月）と軟体部重量（12月）の関係
(a) DIN, (b) PON, (c) TN, (d) 水温

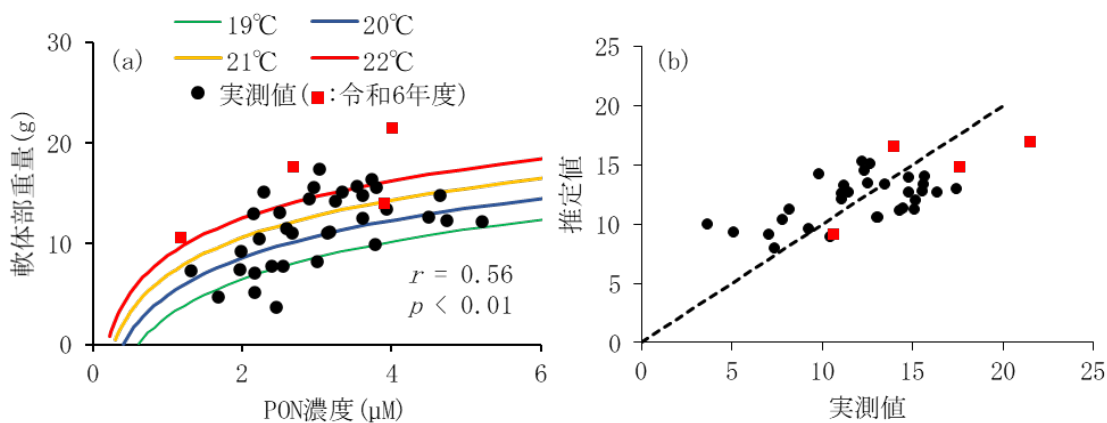


図7 12月の軟体部重量の重回帰モデル
(a) 重回帰モデル, (b) 推定値と実測値

課題番号：I－1）－ウ

課題名：栄養塩等の水質環境が藻場の生物生産力等に及ぼす影響の解明

水産研究・教育機構 水産技術研究所

島袋寛盛，須藤健二

【背景・目的】

近年、瀬戸内海の貧栄養化が進み、養殖ノリやワカメの色落ち、成長不良などの被害が生じている。また生態系を底支えている一次生産者の基礎生産力の低下とそれを介した漁業への影響も懸念されている。海藻・海草類で形成される藻場は、海域の一次生産に寄与するのみならず、様々な生態系サービスとして産業上重要な魚介類の産卵場や稚仔期の生息場、あるいは餌料供給の場などの機能を有している。藻場を構成している大型の藻類や海草類の成長を支えるものは海中の栄養塩類である。栄養塩類濃度の低下は、藻場を構成する一次生産者（海藻・海草類や葉上微細藻類）による生産物の量や質的な性状（窒素含量等で評価される餌料価値等）などへの直接的な影響だけではなく、その結果として藻場の物理的な景観構造が貧弱化し生息場としての機能も衰退していく。また餌料としての一次生産物の量や質的な変化が、食物連鎖を通じてより高次の生物生産に影響することも懸念されている。しかし、栄養塩類環境が藻類養殖に与える直接的な影響については多くの知見があるが、海中の栄養塩類の増減が藻場の生物生産や生態系に与える影響との関係を明らかにした知見は世界的にみても極めて少ない。

本課題では、栄養塩類や水温などの海水環境が藻場の一次生産に与える影響と、その影響を受けた藻場が一次生産者として植食動物へ与える影響の解明に焦点をあて、①栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価、②一次生産を介した植食動物への影響評価の2つを大きな柱としている。

本年は、①の栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価として、アマモおよび亜熱帯性ホンダワラ類の成長と栄養塩類の関係を解明するための調査・実験を行った。また、②一次生産を介した植食動物への影響評価では、作出した窒素含有量の異なる海藻を給餌されたアワビへの影響を評価した。

【方法】

①栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価

1) 基礎的知見の解明として、アマモが有する栄養塩類吸収能の解明を行った。アマモは陸上の被子植物を起源とする海産植物で、葉と根の両方から栄養塩類を吸収する。葉と根の吸収特性を解明することは一次生産者としての藻場機能の解明にとって重要な知見となるため、実験室のパンライト水槽に天然ろ過海水を20L満たし、硝酸ナトリウムを添加し海水中の窒素源とした。葉から地下茎までを有するアマモ草体全体をそのまま飼育する区と、地下茎をビニールで覆い、地下茎からは栄養塩類を吸収できないようにしたアマモ草体を飼育する区を設定した。7日間の飼育後の飼育水中の栄養塩類濃度を分析し、その差分からアマモ草体の葉および根からの栄養塩類吸収量を測定した。

2) 底質の間隙水の栄養塩類がアマモの成長に与える影響の解明では、広島湾内の複数箇所を調査点とした。栄養塩類が多いと想定される場所を広島湾奥の広島県廿日市市阿品、同市宮島町とし、栄養塩類が少ないと想定される場所を広島県江田島市沖美町、山口県大島郡周防大島とし調査を行った。各調査地点のアマモ場において、船上から海面の表層水を採取した。また大起理化工業株式会社（埼玉県鴻巣市）製の土壌用サンプラーを用い、アマモ底質の間隙水を潜水により採取した（図 1）。海水は 1 地点ごとに 5 サンプル採取し、採取した海水は現場で直ちに $0.45\mu\text{m}$ フィルターで濾過し、冷却して実験室に持ち帰り栄養塩類濃度を解析した。また調査地点のアマモ場において潜水を行い、各地点において 5 株のアマモを地下茎も含めて採取した。採取したアマモは実験室に持ち帰り葉と地下茎に切り分けた。切り分けた草体は送風定温乾燥機で乾燥の後（ $60^{\circ}\text{C}/48$ 時間）に全窒素量の解析を行った。

3) 栄養塩類が亜熱帯性ホンダワラ類に与える影響評価の予備試験では、2024 年 8 月に愛媛県愛南町において亜熱帯性ホンダワラ属のヒイラギモクの卵を採卵した。栄養塩類の影響を評価する実験区は、パンライト水槽に人工海水を用いた低栄養塩類区、天然ろ過海水を用いた天然海水区、ろ過海水に硝酸ナトリウムを添加した高栄養塩類区をそれぞれ 20L 設置した。海水温は実験所地先の海水をかけ流した 2 トン水槽内に実験水槽を入れることで、実験時は天然海水温と同等とした。各実験区には基質となるレンガを入れ、採集したヒイラギモク卵をレンガ上に播種した。1 ヶ月ほど培養し、栄養塩類量の違いによるホンダワラ発芽量を比較するための予備実験を行った。

②一次生産を介した植食動物への影響評価では、山口県周防大島町で採取したクロメを用い、パンライト水槽において 20L の止水の天然海水環境で培養した。ひとつは栄養塩類を添加しない低栄養塩類環境でクロメを培養し、低窒素のクロメ餌料を作出した。もうひとつは硝酸ナトリウムを添加し高栄養塩類区としてクロメを培養することで、高窒素を含有する餌料を作出した。それぞれの餌料をクロアワビ稚貝に給餌し、成長量等を計測した。

【結果】

①栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価

1) 基礎的知見の解明として、アマモが有する栄養塩吸収能の解明では、窒素を添加した高栄養塩類環境のアマモ草体の方が一日に吸収する栄養塩類量が多く、最大で $7.78\mu\text{mol/g(WW)}/\text{day}$ の DIN を吸収することがわかった。また草体の葉と、根を含む地下茎では、単位重量あたりの吸収量が地下茎の方が葉よりも 1.6-1.7 倍多いことがわかった（図 2）。

2) 底質の間隙水の栄養塩類がアマモの成長に与える影響の解明では、各調査地点で採水した表層水とアマモ底質間隙水の栄養塩類 (DIN) を比較したところ、表層水と間隙水の DIN 濃度には強い相関関係（相関係数 0.94）があることがわかった。また、各地で採集した葉の窒素含有量 (Total-N) と間隙水の DIN 濃度には高い相関関係があることがわかった（図 3）。これは、海域の栄養塩類の低下が草体の窒素含量低下につながることを示しており、栄養塩類の低下はアマモ草体の小型化など藻場景観の変化にも影響を与えることが示唆された。

3) 栄養塩類が亜熱帯性ホンダワラ類に与える影響評価の予備試験では、異なる 3 つの栄養塩類環境条件下において、どの実験区でもヒイラギモクの卵は発芽した（図 4）。これは、亜熱帯性ホンダワラ類は低栄養塩類下でも発芽できることを示唆している。今回の試行実験により、これまで実験の困難であった異なる栄養塩類条件下におけるホンダワラの発芽実験手

法を確立することができた。次年度は本手法を活用して温帯性ホンダワラと亜熱帯性ホンダワラで発芽実験の比較を行う予定である。

②一次生産を介した植食動物への影響評価では、窒素含量の異なるアワビ用の餌料海藻を作出するため、窒素を欠乏させた N 欠区と窒素を継続的に添加した N 添加区に分けクロメ藻体を培養した。培養後のクロメ藻体の窒素含量を解析したところ、N 欠区のクロメの窒素含量は 1.82%, N 添加区の窒素含量は 2.03% となった。また天然海域のクロメの窒素含量は 2.28% であった。これら 3 つのクロメ餌料を、水温 20℃ の条件下で、餌を週に 1 回交換して 1 ヶ月間飼育した (図 5)。その結果、アワビの湿重量では窒素添加区が最も増加し、殻の大きさでは長さも幅も天然区の餌料を与えたアワビの成長も同様に大きかった。窒素欠乏区のクロメを餌料としたアワビはいずれにおいても低成長であった (図 6)。今回餌料として用いた N 添加区と天然区のクロメに含有する窒素量は天然区の方がわずかに多く、実際の成長量ではその 2 つの実験区では大きな差が無かった。今回の結果では、少なくとも海域の低栄養塩類化によって窒素含量が低下した海藻類を餌料としたアワビは成長量も低下する傾向があった。しかし、本年度は夏期の高水温の影響で予定通りにアワビ種苗が入手できずに十分な実験期間が得られなかったこと、また餌となるクロメ餌料も十分に準備できなかったことから、次年度は餌料クロメの作出方法やアワビ稚貝への給餌方法や時期についても改善して実験を継続する予定である。

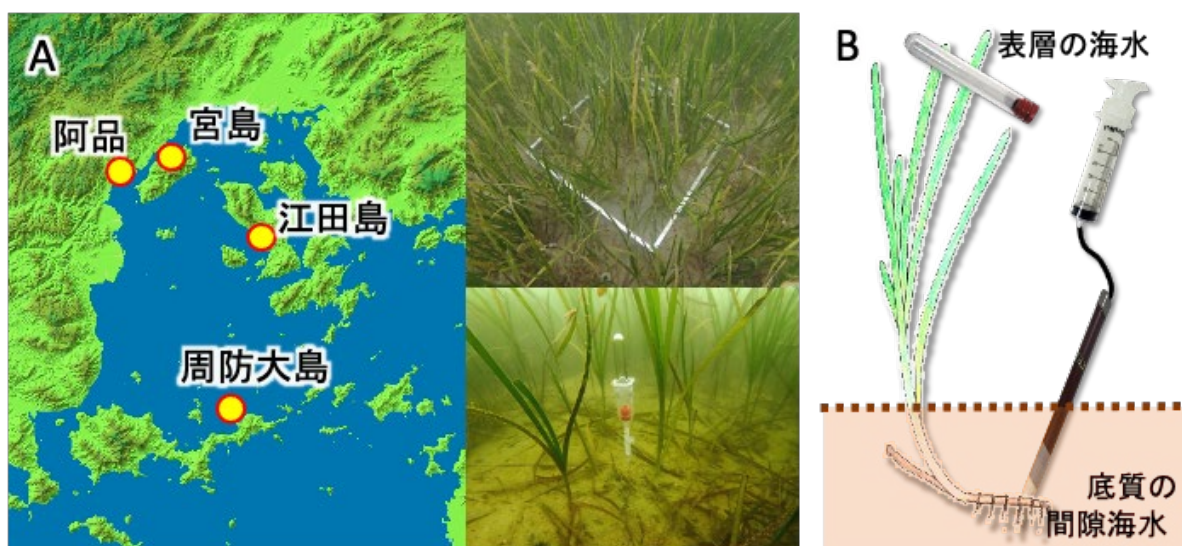


図1 広島湾におけるアマモの調査地および調査の様子 (A) と、調査地における表層水および間隙水の採水イメージ (B)。

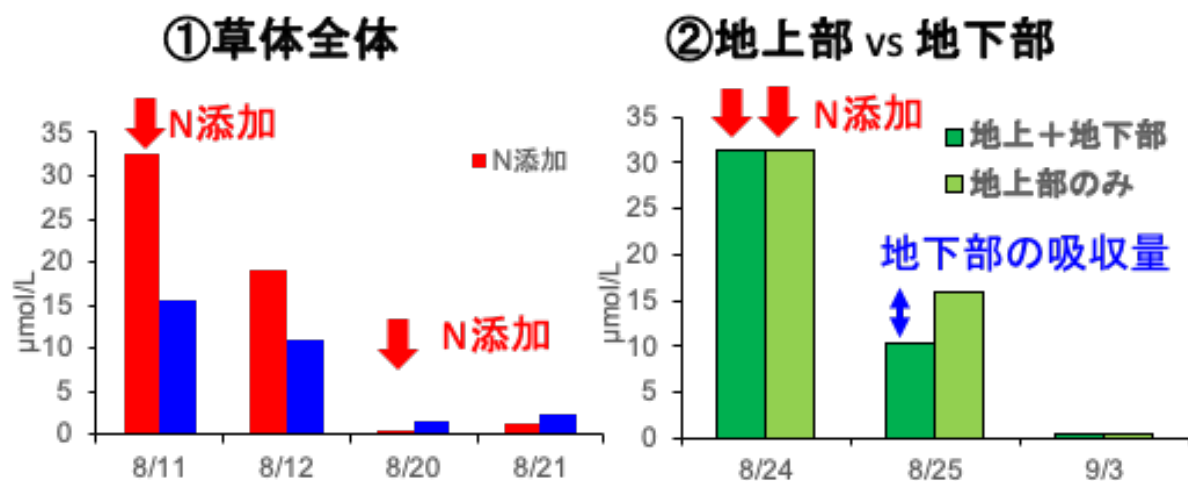


図2 アマモ草体全体の窒素吸収量（左）と葉（地上部）と地下茎（地下部）の栄養塩類吸収量の違い（右）

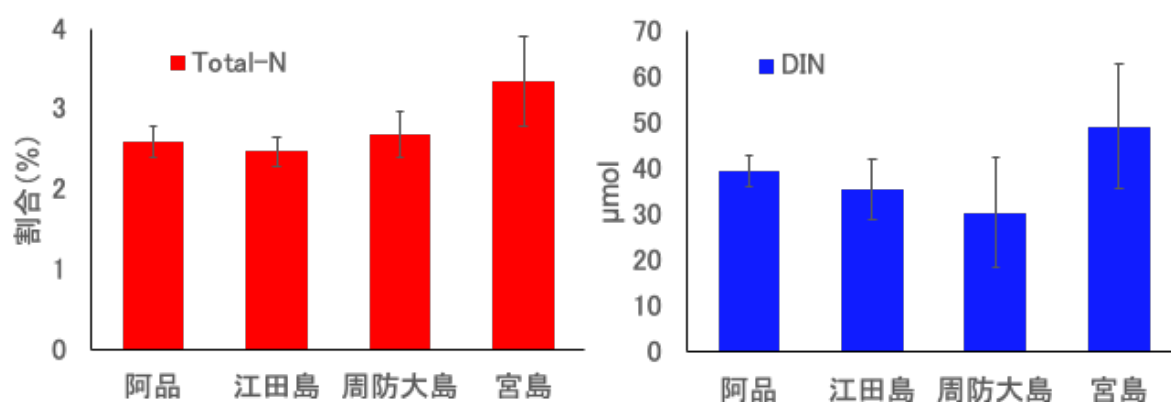


図3 各調査地におけるアマモ草体中の窒素含有割合（左）と底質間隙水の DIN 量

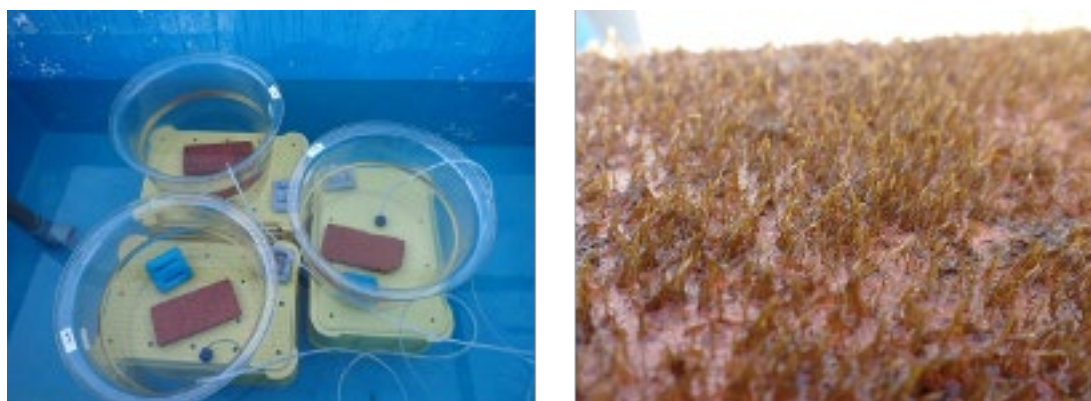


図4 異なる栄養塩類環境でのホンダワラ発芽実験（左），基質のレンガから発芽したヒイラギモクの芽（右）



図5 アワビ稚貝のプラスチックカップを使用した給餌効果試験

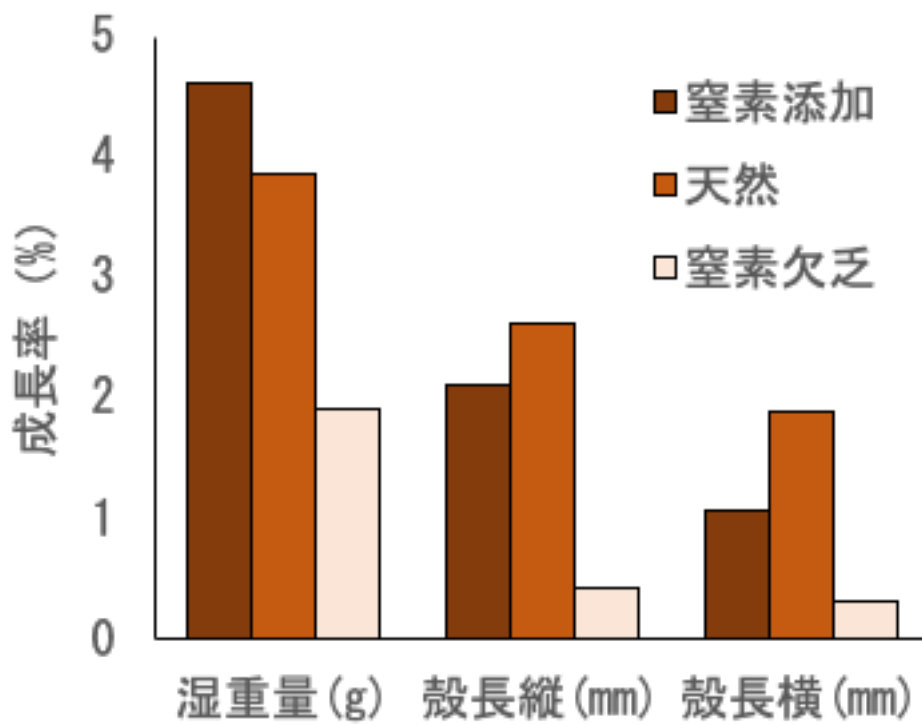


図6 窒素含量の異なるクロメ餌料を与えたアワビ稚貝の成長率

課題番号：I－2）－ア ①

課題名：栄養塩減少等による植物プランクトン組成の変化が動物プランクトンに及ぼす影響解明

水産研究・教育機構 水産大学校

松井英明

水産研究・教育機構 水産技術研究所

松原賢，岡村知海，伴広輝，鬼塚剛

【背景・目的】

近年、瀬戸内海の有用魚類の漁獲量が減少している。その原因として、魚類の餌として重要な種類の動物プランクトンの減少が指摘されている（Yoneda et al., 2022）。そうした動物プランクトンの減少の原因として、餌となる植物プランクトンの組成が栄養塩減少等により変化していることが考えられる。しかし、瀬戸内海で発生する各植物プランクトンの動物プランクトンに対する餌料価値については不明な点が多く、植物プランクトン組成の変化が動物プランクトンの個体発生や個体群動態等に与える影響については科学的な知見が乏しい。

本課題では、瀬戸内海における植物プランクトン組成の変化が動物プランクトンに与える影響を明らかにするため、これまでに瀬戸内海で優占した記録がある植物プランクトンを餌料とした動物プランクトンの飼育試験等を行う。

【方法】

(1) カラヌスの飼育法の検討

魚類の餌として最重要と考えられる *Calanus sinicus*（カラヌス）は、室内培養系での報告例が非常に乏しいため、昨年度に引き続いてカラヌスの継代に挑戦した。2024 年 5 月に兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センターにおける播磨灘への航海に同乗し、カラヌスの観測される海域にて動物プランクトン群集を採集した。動物プランクトン群集は水産大学校まで運搬し、研究室内にて維持した。本群集からカラヌスを検鏡下でスクリーニングし、室内飼育系の種として用いた。このとき、成体期に至った個体を全 59 個体入手でき、そのうちオスは 17 個体であった。

成体期のカラヌスは 10 L 規模の水槽のなかで飼育した。本水槽は 2 層式になっており、内側水槽の底部に 330 μ m メッシュを搭載させることで、メッシュを介してカラヌスが自身の産んだ卵を共食いしないようにした。外側水槽底部に溜まった卵は毎日取り出し、マルチウェルプレート（6 穴）のなかで 20 $^{\circ}$ C のもとでインキュベートした。孵化した幼生は 2 L ビーカー内で飼育した。このうち、成体期に達した個体は 10 L 水槽に戻した。カラヌスの飼育時には、珪藻 *Chaetoceros neogracile*（25 万 cells/mL）およびミドリムシ *Eutreptiella eupharyngea*（1 万 cells/mL）の 2 種を毎日 1 回給餌した。この餌の総量はカラヌス属飼育に関する既報よりも 1 桁多いものであり（Campbell et al., 2001）、十分量の餌をカラヌスが常に摂餌できる餌条件に設定した。成体と幼生の飼育温度は 20 $^{\circ}$ C とし、水替えを 3–4 日に 1 回おこなった。カラヌスの飼育は自然光のもとでおこなった。カラヌスの飼育成績として、水槽内の成体の

数、成体から採集された卵および孵化幼生の数を毎日記録した。

(2) カラヌスの摂餌の機能的応答の評価

カラヌスを含む多くのカイアシ類は、周囲の餌密度に合わせて摂餌速度を変化させることがすでに分かっている (Frost, 1972)。各種餌料に対するカラヌスの摂餌性の違いを正確にとらえるために、その餌密度の影響を評価した。

(1) の飼育で得られた成体期のメス個体を対象に、瀬戸内海に生息する各種植物プランクトンを餌とした給餌試験をおこなった。本試験用の餌料として、珪藻 *Leptocylindrus danicus* (Ld), *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex (Sm-d), および *Chaetoceros socialis* (Cs) の培養株を用意した。また、カラヌスへの通常培養時の主な餌である *C. neogracile* (Cn) も参考餌料として用意した。各種植物プランクトンについて、低密度～高密度の密度調整液 (最大 8 段階) を用意した。マルチウェルプレート内へ個別に収容したメス個体 ($n = 2$) に各種密度の植物プランクトンを一定時間給餌し、それぞれの残餌量を測定した。このとき、カラヌスの非存在下における植物プランクトン液をブランクとして設けた。マルチウェルプレートはシェーカー (PSU-2T; Biosan, Riga, Latvia) のうえで揺らし、植物プランクトンを水中に常に懸濁させた。カラヌスの存在下・非存在下でのそれぞれの植物プランクトンの残量を Frost (1972) の式に当てはめることで、カラヌスの摂餌速度を算出した。各種餌密度のときの摂餌速度をミカエリス・メンテンの速度式に当てはめ、最大摂餌速度および半飽和定数を算出した。また、細胞の連鎖性の影響を評価するため、Cs については培養期間の異なる細胞群を複数種用意し、同様の給餌試験を繰り返しおこなった (合計 3 回分)。

(3) パラカラヌスの摂餌行動の観察

瀬戸内海において個体数の最も多いカイアシ類の一種である *Paracalanus orientalis* (パラカラヌス; Ueda et al., 2022) を対象とした昨年度の研究により、植物プランクトン種によって捕食されやすさの異なる可能性が見いだされた。パラカラヌスの餌種に対する嗜好性はその摂餌行動の違いとしてあらわれると考え、本年度はまずその評価法の確立を試みた。

本実験では、Karaköylü et al. (2009) の方法をもとに、パラカラヌスの摂餌している様子を観察できるか検討した。シアノアクリレート接着剤をつけた毛髪先端にパラカラヌスの成体メスを接着させ、それを海水の入ったシャーレのなかに浸した。このとき、パラカラヌスの各種付属肢が稼働できていることを確認した。パラカラヌスは昨年度より研究室内で継代されている個体を用いた。また、パラカラヌスの餌としては *L. danicus* を用いた。パラカラヌスの無給餌時および給餌時の行動について、デジタルカメラ内蔵型の実体顕微鏡 (Ivesta3; Leica, Wetzlar, Germany) を通して撮影した。

【結果】

(1) カラヌスの飼育成績

カラヌス成体の飼育は最大 128 日間まで継続できた (図 1)。この飼育期間中に計 471 個体の次世代幼生が誕生した。採卵については、一日あたり最大 98 粒を達成できる日があった。しかし、飼育 60 日目を超えるとほとんど産卵しなくなり、そして飼育水槽内の成体の個体数も激減した。本実験で得られた全 134 個体の成体のうち、オスはたった 2 個体のみであり、

個体群の性比が極端にメスへ偏っていた。本実験に用いた現場海水中のカラヌスの性比（オス:メス = 17:42）を考慮すると、本飼育法の何らかの要因によってオスが出現しにくくなった可能性がある。しかし、カラヌスの室内における飼育例はほとんどなく、さらにその飼育法の及ぼす個体の性への影響はまったくわかっていない。海洋におけるカラヌスの研究では、日周鉛直移動などの重要なライフイベントを誘導する要因として光環境が着目されている（Pu et al., 2004）。カラヌスは日中ではなく夜間のあいだに産卵や摂餌をおこなっていることが多数報告されており（Huang et al., 1992; Yoshida et al., 2004; Chen et al., 2012）、室内にてカラヌスを正常に活動させるためには低光量または暗所の条件が必要である可能性がある。カラヌスの成体は $1 \times 10^{-5} \mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ の光刺激に対しても反応すると報告されている（Miljeteig et al., 2014）。今後のカラヌスの飼育法検討の際は、この非常に高い光感度を考慮した光条件を設定する必要がある。

(2) カラヌスの摂餌の機能的応答の評価

カラヌスの成体メスにおける摂餌速度は、本実験に用いたすべての藻類種に共通して、給餌密度の増加に伴って漸近的に高くなった。このときの摂餌速度はすべてミカエリス・メンテン式に近似させることができたため（Ld, $r=0.827$; Sm-d, $r=0.995$; Cn, $r=0.932$; Cs, $r=0.937$ ）、それぞれの関数の解析により得られる最大摂餌速度および半飽和定数をまとめた（表 1）。最大摂餌速度は Sm-d, Cn, Cs, Ld の順に高く、Ld において極端に低い値を示した。そのため、Ld よりも細胞サイズの小さい植物プランクトン種はカラヌスの最大摂餌速度を高める傾向となっていた。最大摂餌速度は細胞の摂餌された量ではなく、その数自体を基に計算されている。そのため、細胞サイズの小さい植物プランクトンはカラヌスの要求量を満たすために多く摂餌されたと考えられる。また、最大摂餌速度は、餌の密度に上限のない条件において計算される理想上の指標であるため、海洋現場でのカラヌスの摂餌状況を再現していない。以上より、本実験で得られた最大摂餌速度からは、植物プランクトン種に対するカラヌスの嗜好性を判断することは難しいと考えられる。

半飽和定数については、Cn のほうが Sm-d よりも高くなるものの、おおむね最大摂餌速度と類似した傾向を示した（表 1）。特に、Ld の給餌時の半飽和定数は他種の植物プランクトンの場合より 2 桁小さくなっており、極めて低い値となった。カラヌスは植物プランクトン密度の低い条件において、Ld に対しては特に効率的に摂餌できることが明らかとなった。この傾向は、摂餌される細胞の大きさ、およびその連鎖性が関与すると考えられる。本実験における半飽和定数はカラヌスの嗜好性の判断材料になり得ると期待される。

Cs を用いた再試験（第 3 回）では、細胞が 3 連鎖以上の長い細胞群が第 1・2 回よりも多く優占していた（図 2A）。これらの細胞群を同様にカラヌスへ給餌した結果、カラヌスの摂餌速度が第 3 回目の試験において飽和する傾向をまったく示さなかった（図 2B）。そのときに得られた摂餌速度の最大値は、第 1・2 回の試験よりも 2 倍以上もあった。この結果より、同一種の植物プランクトンであっても、その培養状態（細胞連鎖性）によってカラヌスへの摂餌のされかたが異なってしまうことが示唆された。

今後の試験でカイアシ類の摂餌性を評価する際は、植物プランクトン種の高い細胞連鎖性を保持した若い培養液を用意することが求められる。カラヌスへの給餌試験の際も、穏やかな回転のもとで植物プランクトンを懸濁させることで、その細胞連鎖性の崩壊を防ぐ工夫が

必要である。これらにより、海洋現場での植物プランクトン群集により近い環境（低い密度、および高い細胞連鎖性）で試験をおこなっていく予定である。

(3) パラカラヌスの摂餌行動

毛髪先端に接着させたパラカラヌスについて、まずは餌の含まない海水中でみられる付属肢の動きを観察した。その結果、第2触角、大顎、第一小顎、および顎脚において一定の周期・振幅をもって動かす様子が観察された。一方、第一触角、第二小顎、および胸脚はほとんど動かしていなかった。このパラカラヌスに対して Ld の細胞を給餌した結果、パラカラヌスが細胞を摂餌する様子を観察できた。このとき、口器と接続している消化管の入り口が色づく様子も確認できた。パラカラヌスは口器に細胞が近づくと、第二小顎と胸脚をそれぞれ上下に小さく動かしており、この動きによって細胞が急激に吻のもとに吸い込まれていた（図3）。胸脚は瞬間的に一度開閉するのみであったが、第二小顎はその後もしばらくの間動き続けていた。一方、第二小顎と胸脚のうごきが確認されないときは、細胞はそのままパラカラヌスの後方に流されたり、口器周辺を規則正しく回り続けてたりする様子も観察された。パラカラヌスは採餌流をつくって摂餌する *Feeding-current feeder* であることがわかっている（Gonçalves, R. J., Kjørboe, 2015）。第一触角、第二小顎、胸脚を除いた付属肢は共通して、餌の有無に関係なく動いていたことから、規則的な流れの採餌流を常時発生させる部位であることが示唆された。一方、第二小顎と胸脚において観察された小さな動きは、採餌流に流されてきた細胞を吻のもとへ運び入れるための乱流を生み出していると考えられる。また、第二小顎は、その発達した棘毛や動きの方向性を考慮すると、細胞に直接触れて口まで運び入れるのにも寄与している可能性がある。

今年度をとおして、実体顕微鏡を用いたパラカラヌスの摂餌行動の観察は可能であることがわかった。特に、パラカラヌスが比較的大きい細胞の Ld を摂餌できることを直接的に明らかにできた。次年度は、他種の植物プランクトン種でも同様の観察試験をおこない、そのときの第二小顎と胸脚の動きを解析することで、パラカラヌスの嗜好性がより詳細に明らかとなることが期待される。

【参考文献】

- Campbell, R. G., Wagner, M. M., Teegarden, G. J., Boudreau, C. A., Durbin, E. G., 2001. Growth and development rates of the copepod *Calanus finmarchicus* reared in the laboratory. *Marine Ecology Progress Series*. 221, 161–183.
- Chen, M-R., Moison, M., Molinero, J. C., Hwang, J. S., 2012. Assessing the effect of food and light on *Calanus sinicus* swimming behavior through video-recording experiments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 422–423, 14–19.
- Frost, B. W., 1972. Effects of size and concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus pacificus*. *Limnology and Oceanography*. 17, 805–815.
- Gonçalves, R. J., Kjørboe, T., 2015. Perceiving the algae: How feeding-current feeding copepods detect their nonmotile prey. *Limnology and Oceanography*. 60, 1286–1297.
- Huang, C., Uye, S., Onbe, T., 1992. Ontogenetic diel vertical migration of the planktonic copepod

- Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan. II. Late fall and early spring. Marine Biology. 113, 391–400.
- Miljeteig, C., Olsen, A. J., Båtnes, A. S., Altin, D., Nordtug, T., Alver, M. O., Speed, J. D. M., Jenssen, B. M., 2014. Sex and life stage dependent phototactic response of the marine copepod *Calanus finmarchicus* (Copepoda: Calanoida). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 451, 16–24.
- Pu, X-M., Yang, Sun S., Yang B., Zhang, G-T., Zhang, F., 2004. Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. Journal of Plankton Research. 26, 1059–1068.
- Ueda, H., Itoh, H., Hirai, J., Hidaka, K., 2022. *Paracalanus orientalis* n. sp. (Copepoda, Calanoida), formerly referred to as *P. parvus* in Japanese coastal waters. Plankton and Benthos Research. 17, 221–230.
- Yoneda, M., et al., 2022. Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. Progress in Oceanography. 206, 102860.
- Yoshida T., Toda, T., Kuwahara, V. S., Taguchi, S., Ross, O., 2004. Rapid response to changing light environments of the calanoid copepod *Calanus sinicus*. Marine Biology. 145, 505–513.

表 1. *Calanus sinicus* の各種植物プランクトンに対する摂餌性の違い.

	最大摂餌速度 $V_{\max}$ (10^3 cells/ind/h)	半飽和定数 K_m (10^3 cells/mL)
Ld	6	1
Cs	139	154
Cn	269	547
Sm-d	435	532

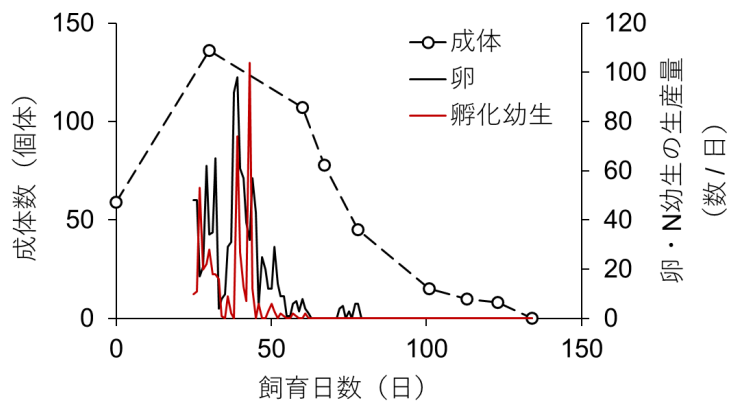


図 1. 室内飼育系における *Calanus sinicus* 成体の生存数および再生産性.
卵およびノープリウス幼生 (N 幼生) の生産量は飼育 25 日目から毎日記録した。

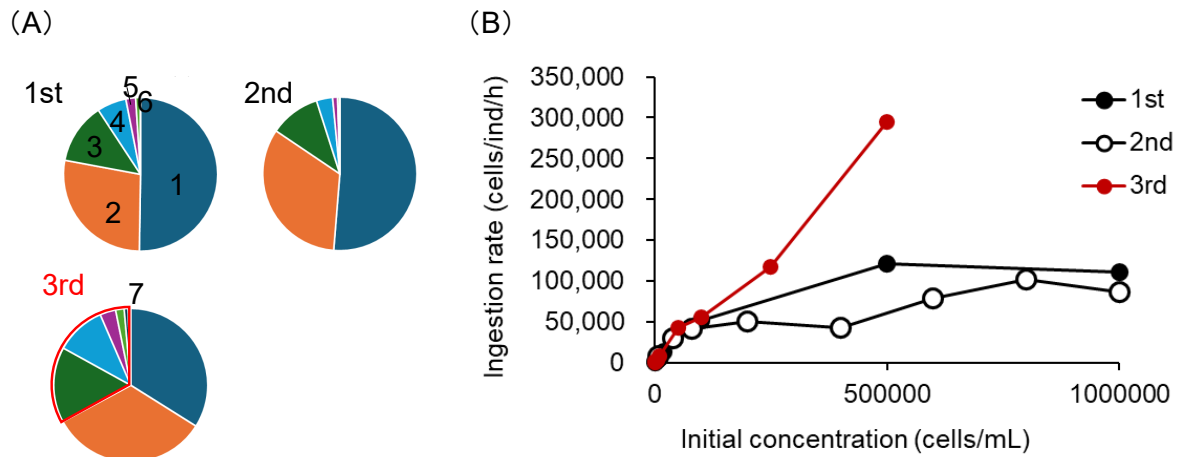


図 2. 異なる細胞連鎖性の *Chaetoceros socialis* に対する *Calanus sinicus* の摂餌応答.
A, 第 1–3 回の重複試験において使用した培養液に占める連鎖数ごとの細胞群 (%). 第 1 回および第 2 回の試験で用いた *C. socialis* の培養液は大半が連鎖のない単一細胞である一方, 第 3 回では 3 連鎖以上の細胞群が多い傾向を示した. B, 第 1–3 回の重複試験における *C. sinicus* の摂餌速度. 第 3 回の試験では, 50 万 cells/mL のときの摂餌速度が第 1 回と第 2 回の結果と比べて 2 倍以上高くなっていた。

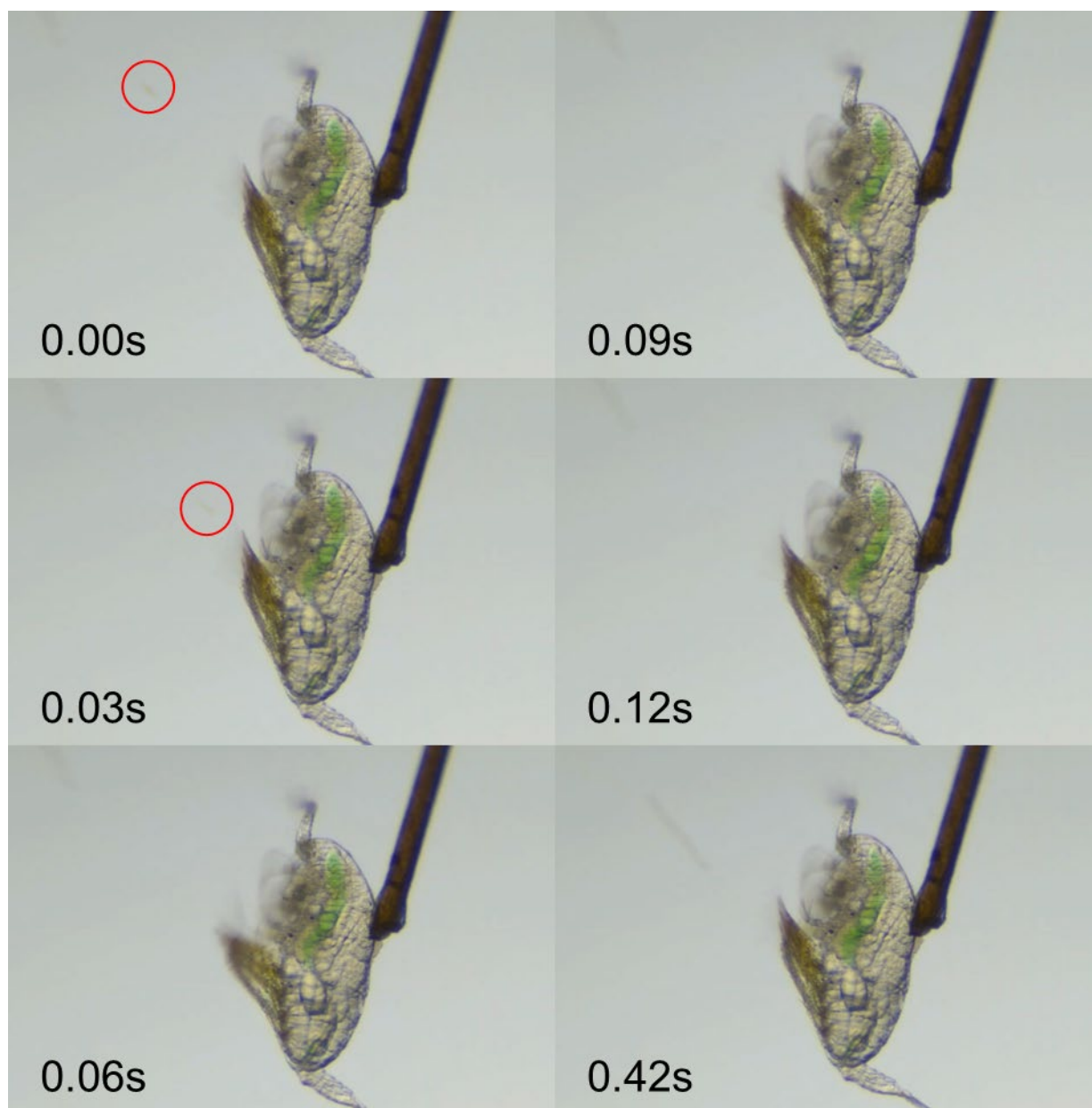


図3. *Leptocylindrus danicus* の細胞に対する *Paracalanus orientalis* の摂餌行動.
時刻は0.00秒から経過した時間(秒)を示しており、赤丸は細胞の位置を示している. 時刻0.06秒の時点で、第二小顎と胸脚がそれぞれ上下に開くとともに、餌が消失した. 胸脚は時刻0.12秒の時点で元の位置に戻り、第二小顎は0.42秒の時点で戻った.

課題番号：I－2）－ア ②

課題名：兵庫県海域における栄養塩が動物プランクトン等を含む生態系に及ぼす影響 解明

兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター

西川哲也，鈴木雅巳，肥後翔太，堀部倭子

大阪公立大学

相馬明郎

【背景・目的】

兵庫県の瀬戸内海海域では，1990 年代半ば頃を境に漁船漁業による漁獲量が減少に転じ，その要因として，海域の栄養塩濃度の低下に伴う貧栄養化が指摘されるようになった。栄養塩濃度の変化は，食物網を介して，低次生物から高次生物に至る海洋生態系全体の動態に影響を及ぼしていることが考えられる。しかし，その影響は定量的にも定性的にも未解明な部分が多い。本研究課題では，瀬戸内海東部の兵庫県海域を中心に，貧栄養化に伴う海洋生態系の応答メカニズムを解明し，海洋環境の変動が水産上重要な生物に及ぼす影響を予測・評価することを目的とする。そのために，イカナゴやカタクチイワシの餌生物であり，現在，最もデータが不足している動物プランクトンに関するデータの充実を図ると共に，数理生態系モデル等の開発・解析により栄養塩から高次生物に至る海洋生態系の包括的な理解を目指す。

【方法】

(1) 既往データの整理，解析

今年度は，兵庫県が播磨灘において月 1 回の頻度で毎月実施している浅海定線調査のネットサンプルを再分析し，瀬戸内海に出現するカイアシ類の中でもイカナゴやカタクチイワシの餌生物として重要だと考えられる *Calanus sinicus*（橋口ほか 2021，Nishikawa et al. 2023，2024）の直近 10 か年の出現状況について解析した。サンプルが保存されている 2012 年 4 月以降の 2021 年 12 月まで約 10 か年のサンプルのうち，以下の（2）と同じ 3 定点（H2，H5，H10，図 1）において得られたサンプルについて，プランクトン分割器でろ水量 200 L に最も近い段階まで分割し，サブサンプル中の *C. sinicus* コペポディッド（CI～CV期）と成体（CVI期）の全個体を発育段階別に計数した。なお，サンプルは丸特ネット（目合 335 μm ）を用いて，水深 30 m（H5，H10）または水深が 30 m 以浅の定点（H2）では海底直上からの鉛直曳きにより採集しているが，*C. sinicus* はコペポディッド CI期においても前体部長が約 600 μm であり（Uye 1988），本ネット採集では *C. sinicus* のコペポディッド期の個体が全て採集できているものとした。

(2) 海洋観測調査

瀬戸内海東部海域に設けた 8 定点（紀伊水道：1 定点，大阪湾：2 定点，播磨灘 3 定点，備讃瀬戸 2 定点，図 1）において，月 1 回の頻度で海洋観測調査を実施した。観測項目は，水温・塩分（CTD），栄養塩濃度（表層，10 m，B-1 m），クロロフィル *a* 濃度（表層，10

m), 植物プランクトン (備讃瀬戸 2 定点を除く 6 定点の表層) および動物プランクトン (カイアシ類ノープリウス幼生, コペポディッド期) の同定と計数とした。カイアシ類ノープリウス幼生は, 表層および水深 5, 10 m の 3 層で海水 10 L を採水し, それらを目合い 41 μm のプランクトンネットで混合ろ過し, 2~3%ホルマリン固定後, 4~16 分割したサブサンプル中のノープリウス幼生を主要な属レベルで同定, 計数した。コペポディッド期以降のカイアシ類は, 目合い 100 μm の改良ノルパックネットを用い, 海底直上からの鉛直曳きにより採集した。2~3%ホルマリン固定後, ろ水量が 25 L に最も近くなるまで分割し, 分割サンプル中のカイアシ類について, コペポディッドI~V期は属レベル, 成体は可能な限り種レベルの同定と計数を行った。また, *C. sinicus* はろ水量が 200 L に最も近くなるまで分割し, 分割サンプル中に出現した全個体について, コペポディッドI~V期および成体毎に計数した。

(3) モデル解析

兵庫県の瀬戸内海海域における, 低次生物から高次生物に至る食物網を表現する低次-高次生態系モデル (仮称) の構築に向け, 今年度は, ①食物網を構成する生物機能群 (生物), ②各生物機能群の食物組成, ③各生物機能群の水温応答性を考慮する仕組みとその関係式, を組込んだ低次-高次生態系モデルのプロトタイプモデルを構築した。また, 本プロトタイプモデルを用い, 各生物機能群の食性ならびに各栄養塩, 水温の変化に対する生態系の応答性能を確認した。

【結果】

(1) 既往データの整理, 解析

1 サンプル中の *C. sinicus* 個体密度は 0~1606 個体/ m^3 の範囲で変動した (図 2)。 *C. sinicus* 個体群の季節変動は, 3 定点 10 年間の平均密度では 1~6 月が 103~293 個体/ m^3 (平均: 185 個体/ m^3) で, 7~12 月の 2~37 個体/ m^3 (平均: 12 個体/ m^3) より高く ($p=0.001$), 明瞭な季節性が認められた (図 3)。発育段階別では, 個体群密度がゼロの月を除き, CI, CII 期の初期個体がほぼ周年いずれかの定点で一定程度出現していたことから (図 2), 本種は播磨灘において再生産していることが示唆された。*C. sinicus* 個体群の年変動は, 高密度期 1~6 月の平均密度で 2017~2019 年が 193~379 個体/ m^3 (平均 308 個体/ m^3) の範囲にあり, その他の年の 81~171 個体/ m^3 (平均 132 個体/ m^3) より高かった ($p=0.04$, 図 2)。

C. sinicus は, 飼育下において水温 7~20°C では卵の孵化率が 70%以上であるが, 22.6°C では 20%まで低下することから, 水温が 23°C を超える環境下では個体群の減少が指摘されている (Uye 1988)。本研究では, 水温が 23°C を上回る 7~10 月の日平均水温と低密度期 (7~12 月) の平均個体群密度の間に負の相関が得られた ($p=0.006$, 図 4)。また, 7~10 月の平均水温が高い年は, 翌年の高密度期初期 (1~2 月) の平均個体群密度も低かった ($p=0.019$, 図 5)。一方, クロロフィル *a* 濃度と個体群密度の間には有意な相関は認められなかった。2017~2019 年の *C. sinicus* の個体群密度が高かった要因として, 2017 年を境に 3~6 月の本種の主要な捕食者であるイカナゴが急減し, トップダウンコントロールが低下したこと, 黒潮の離岸によって夏季に低温の外洋水流入が多かったことが影響した可能性が考えられた。

(2) 海洋観測調査

本報告では, 新たに 2024 年 1 月~2024 年 12 月までの調査結果をとりまとめ, 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類のデータを蓄積した。

2024 年 1 月～2024 年 12 月のカイアシ類ノープリウス幼生の出現密度は、紀伊水道 1 定点で 10.7～105.3 個体/L、大阪湾 2 定点で 5.6～240.8 個体/L、播磨灘 3 定点で 14.9～181.9 個体/L、備讃瀬戸 2 定点で 13.3～173.7 個体/L の範囲で変動した（図 6）。いずれの定点においても *Paracalanus*, *Oithona*, *Microsetella* が優占し、全ての定点でこれら 3 属が 2024 年の平均値で 83.1～89.6% を占めた。2024 年は、平均値（2020 年 4 月～2023 年 12 月）と比較して、播磨灘では優占 3 属のうち *Oithona* と *Paracalanus* の出現密度が大きくなり、*Microsetella* の密度が小さかった。同様の傾向は紀伊水道や備讃瀬戸の KA23 定点でも見られた。一方、大阪湾の A10 定点では *Paracalanus* の出現密度が小さく、*Microsetella* の出現密度が大きかった。

2024 年のカイアシ類コペポディッド期以降の出現密度は、紀伊水道 1 定点で 3012～10109 個体/m³、大阪湾 2 定点で 2674～59943 個体/m³、播磨灘 3 定点で 3495～43454 個体/m³、備讃瀬戸 2 定点で 4797～103970 個体/m³ の範囲で変動した（図 7）。ノープリウス幼生同様、*Paracalanus*, *Oithona*, *Microsetella* の占める割合が大きく、全ての定点でこれら 3 属が年平均値で 80% 以上を占めた。播磨灘の H2, H5 定点では平年値に比べて *Microsetella* の出現密度が小さく、本種の占める割合が低下した。備讃瀬戸の KA20 定点では 8 月に *Oithona davisae* が高密度で出現し、本定点における *Oithona* 属の占める割合が増大し、カイアシ類全体の出現個体数年平均値も平年値を大きく上回った。

カイアシ類コペポディッド期以降の出現個体密度から体長－炭素重量換算式（Uye 1982, Nishikawa et al. 2023）を用いてバイオマスを推算した結果、2024 年の各海域におけるカイアシ類バイオマスは、紀伊水道 1 定点で 2.8～32.0 mgC/m³、大阪湾 2 定点で 3.3～40.9 mgC/m³、播磨灘 3 定点で 2.5～32.6 mgC/m³、備讃瀬戸 2 定点で 2.6～45.0 mgC/m³ の範囲で変動した（図 8）。大阪湾では *C. sinicus* のバイオマスが平年値の 1/2 以下であった。備讃瀬戸では KA20 定点において、*C. sinicus* のバイオマスが小さく、代わって *Paracalanus* 値が高く、全体の約 50% を占めた。これに対して、KA23 定点では *C. sinicus* のバイオマスが大きく、年平均値も平年値を上回った。紀伊水道では、平年値に比べて顕著な差異はなく、2024 年もカイアシ類の総バイオマスの値は他の海域に比べて小さいものの、*C. sinicus* の占める割合は他海域より大きかった。播磨灘では平年に比べて H2, H5 定点において最優占種である *Microsetella* と *C. sinicus* の値が小さく、カイアシ類の総バイオマス年平均値も平年値を下回った。H10 定点では 9 月と 12 月に *C. sinicus* と並んで比較的大型の *Eucalanus* の値が大きく、総バイオマスの平均値も播磨灘の他の 2 定点とは異なり平年値を上回った。

(3) モデル解析

今年度（R6 年度）は、播磨灘海域における、栄養塩－植物プランクトン－動物プランクトン－動物プランクトン食魚類－魚食性魚類までを繋ぐ低次－高次生態系のプロトタイプモデルの構築を行った。本プロトタイプモデルは、昨年度（R5 年度）に示唆された結果に鑑み、次の 3 点に留意して開発した。すなわち、第 1 に、栄養塩と一次生産の関係性を表現するように、植物プランクトンを小型珪藻、渦鞭毛藻、*Eucampia zodiacus*, *Coscinodiscus wailesii* の 4 機能群に区分し、各機能群の生理生態の差異を表現したこと、第 2 に、基礎生産を魚類へとつながり鍵と成り得る動物プランクトンを *C. sinicus*, *Paracalanus*, 中型動物プランクトン、小型動物プランクトンの 4 機能群に区分し、生理生態の差異を表現したこと、第 3 に、播磨灘の重要水産資源であり、近年激減しているイカナゴ資源に特に着目し、その生活史（夏眠）を表現したことである。また、本プロトタイプモデルは、モデル駆動力（外生変数）は、栄養塩

(DIN, DIP) ならびに水温とし、底層 DO は、過去の観測データをもとに、栄養塩と底層 DO 濃度の統計解析の結果を活用することとした。今年度、構築したプロトタイプモデルは、植物プランクトン 4 機能群、動物プランクトン 4 機能群、イカナゴの 9 機能群を含む 28 種とした (表 1)。構築したプロトタイプモデルは、1975 年から 2017 年までの水温並びに栄養塩状況についてモデル駆動力を設定し、解析を行った。解析の結果、本プロトタイプモデルは、植物プランクトン、イカナゴ資源量について、概ね観測値、もしくは届出値を再現した (図 9, 図 10)。また、モデルによる生態系構造の表現の妥当性の 1 指標である Prebal 診断についても、妥当性が示された。しかしながら、他の機能群についての再現性については、検証の実施には至っておらず、来年度 (R7 年度) 以降の課題となる。

【参考文献】

- 橋口晴穂, 西川哲也, 魚住香織, 古澤一思, 森敦史, 今尾和正, 反田實. 播磨灘におけるイカナゴ当歳魚の胃内容物重量指数の経年的低下とその要因. 水産海洋研究, 85, 24–32, 2021.
- Nishikawa T, Watanabe T, Shiotani T, Izumi S, Furusawa K, Tadokoro K. Seasonal copepod dynamics and biomass in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan. Fish. Sci., 89, 331–341, 2023.
- Nishikawa T, Watanabe T, Furusawa K, Tadokoro K. Temporal variations in the copepod community structure during the sand lance fishery season near the Akashi Strait, eastern Seto Inland Sea. Planton Benthos Res 19, 67–76, 2024.
- Uye S. Length-weight relationship of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 149–158, 1982.
- Uye S. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory. Hydrobiologia, 167, 285–293, 1988.

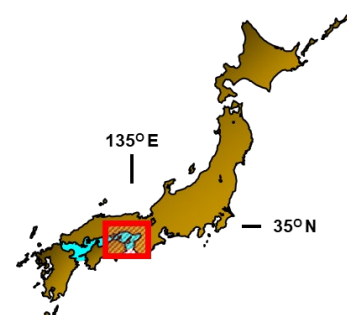


図 1 瀬戸内海東部海域における海洋観測定点位置図

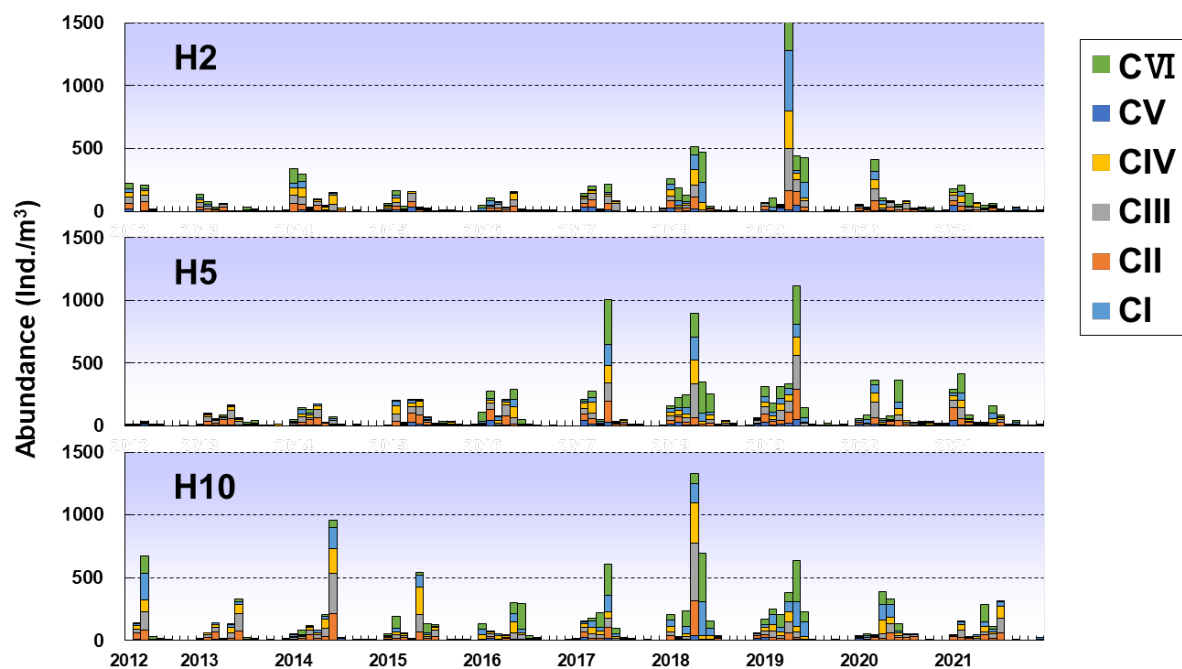


図2 播磨灘3定点における *Calanus sinicus* の出現密度
(2012年4月～2021年12月)

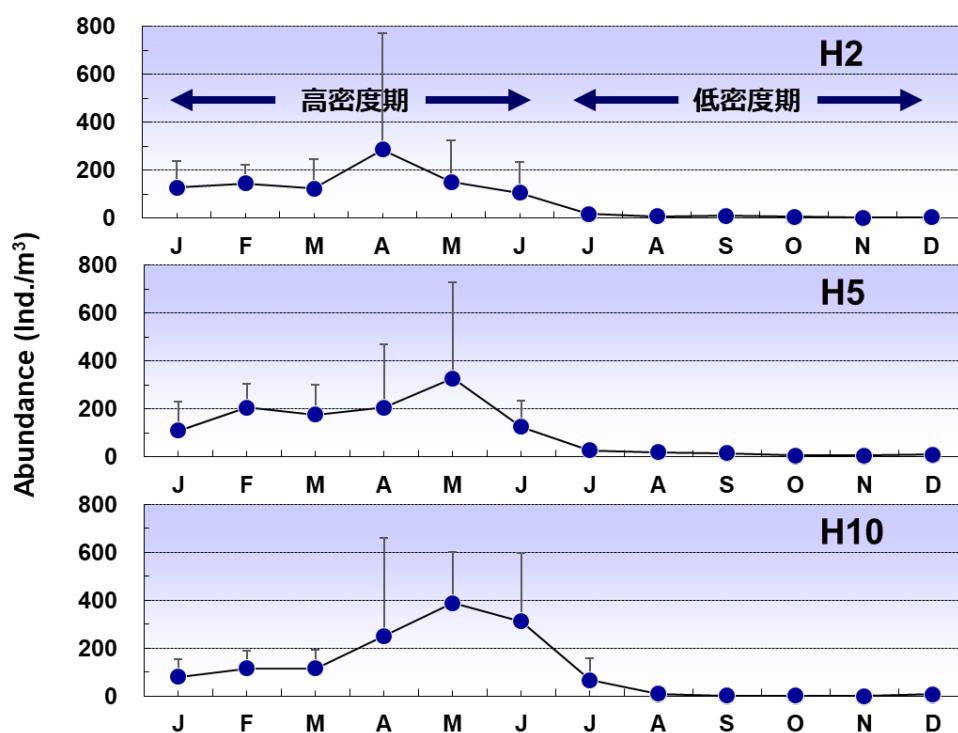


図3 播磨灘3定点における *Calanus sinicus* の月別平均出現密度
(2012年4月～2021年12月の平均値)

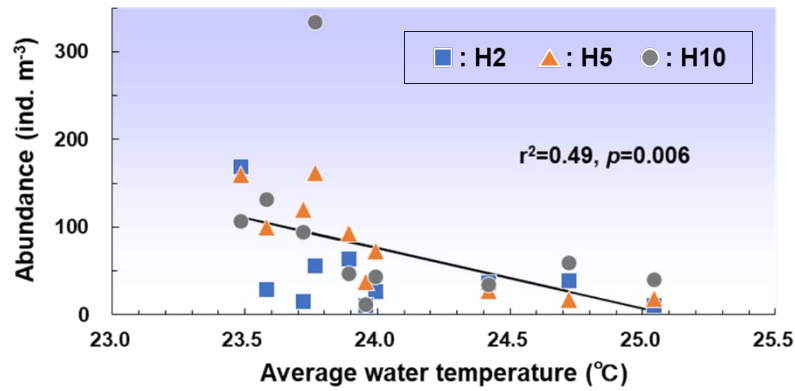


図4 *Calanus sinicus* の平均出現密度（7～12月）と平均水温（明石，7月1日～10月31日の日平均値）の関係

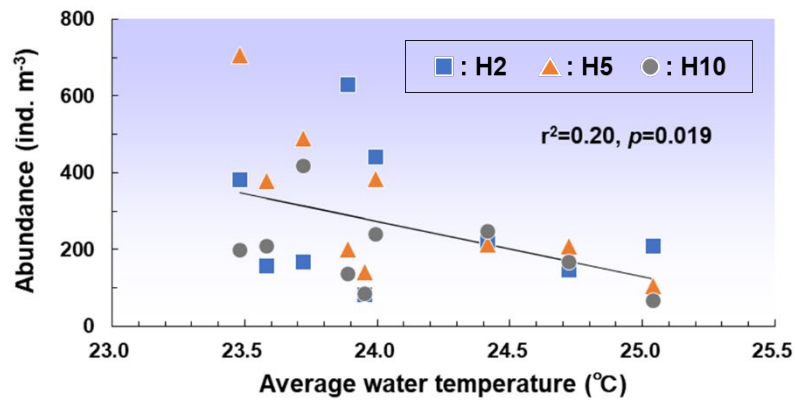


図5 *Calanus sinicus* の平均出現密度（1～2月）と平均水温（明石，7月1日～10月31日の日平均値）の関係

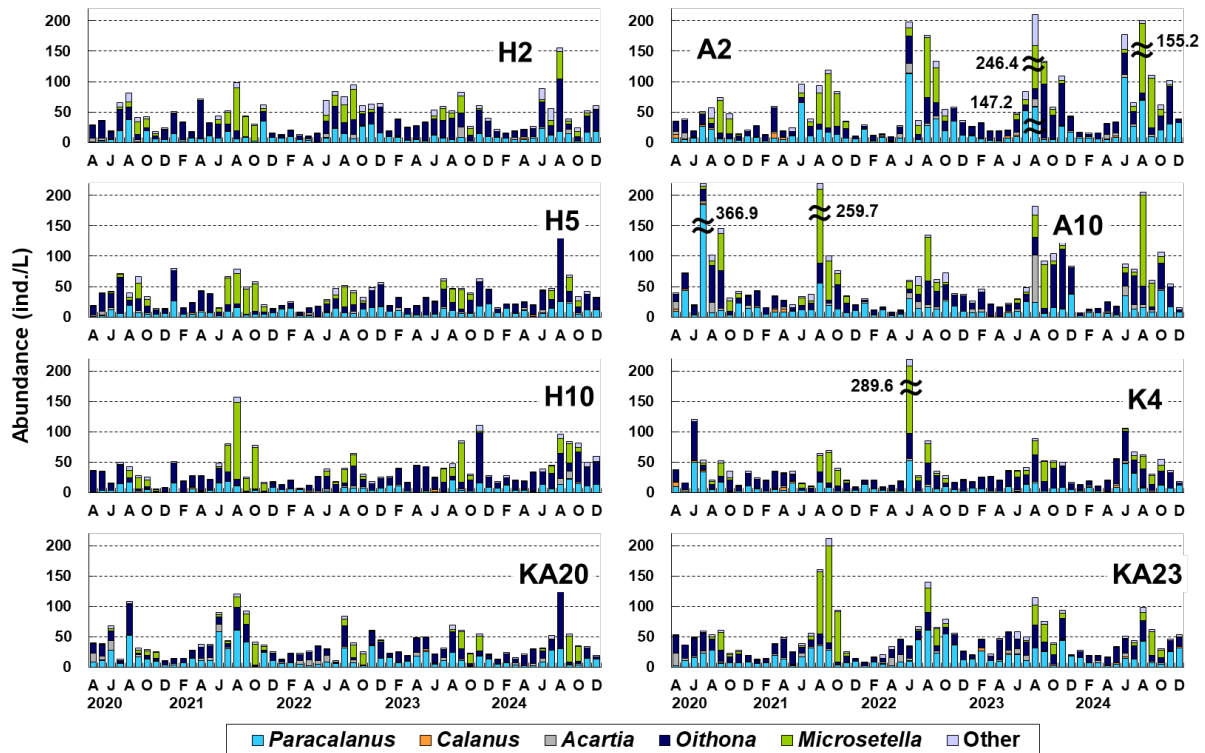


図6 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類ノープリウス幼生の出現密度（2020年4月～2024年12月）

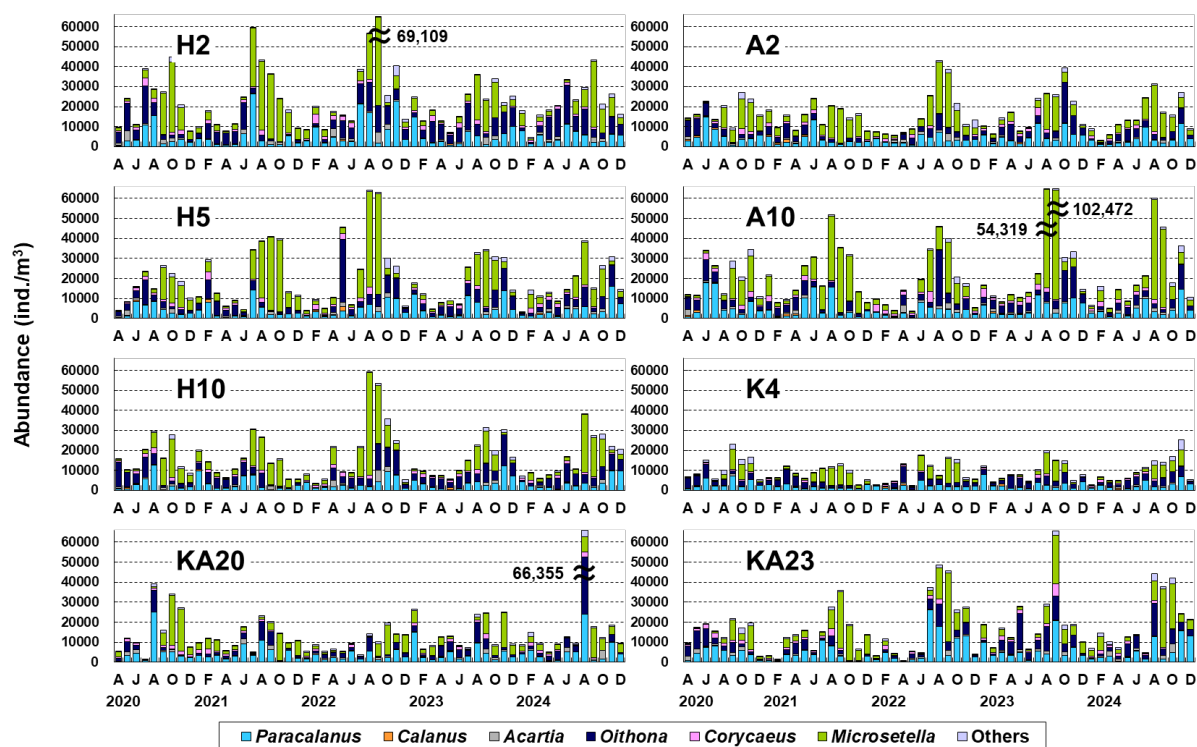


図7 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類（コペポディッド期以降）の出現密度（2020年4月～2024年12月）

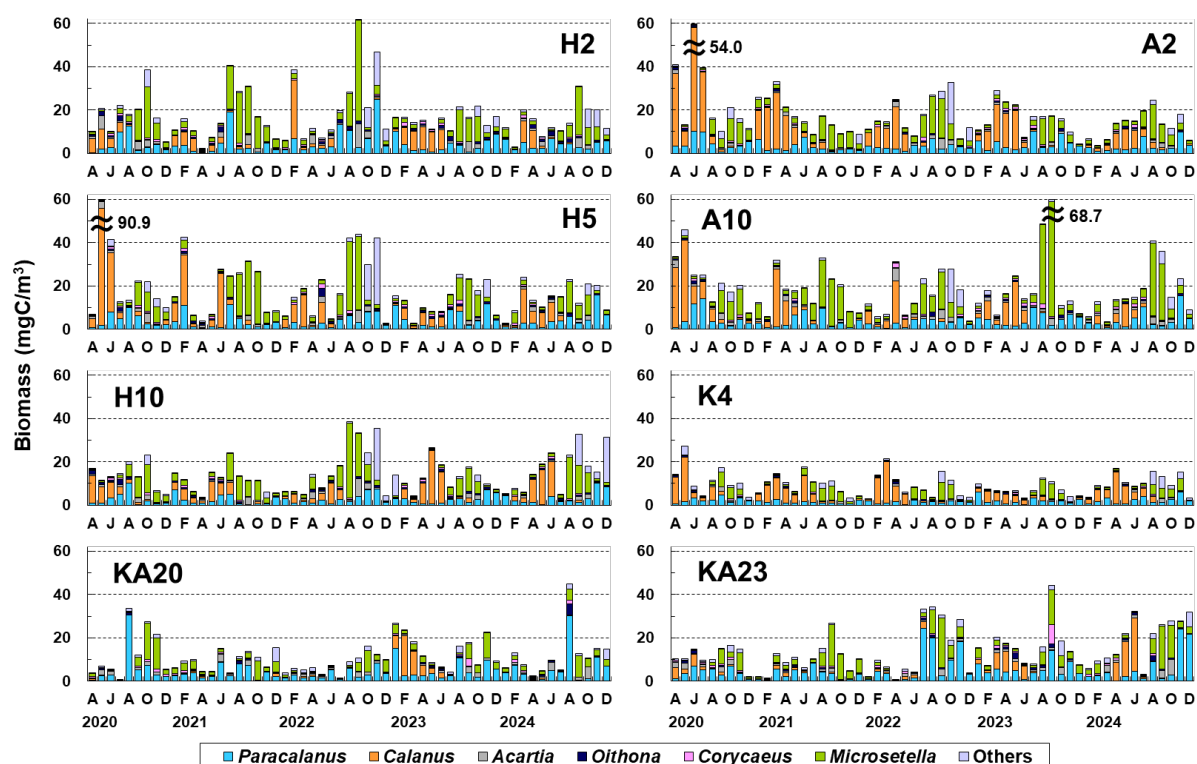


図8 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類（コペポディッド期以降）のバイオマス（2020年4月～2024年12月）

表1 播磨灘低次 - 高次生態系プロトタイプモデルの生物機能群

	生物機能群	特徴
高	No.9 ヒラメ, サワラ	イカナゴの捕食者の内、栄養段階が4以上のもの
	No.8 アジ類, サバ類, マダイ, クロダイ, ベントス食魚類, 魚食性魚類, イカ類	イカナゴの捕食者の内、栄養段階が3~4のもの
	No.7 カレイ類	イカナゴに食性に直接関与しないものの内、栄養段階が3~4のもの
	No.6 マイワシ, カタクチイワシ, シラス	イカナゴの食性に似ており、餌競合が起こりえるもの
	No.5 イカナゴ	
	No.4 プラクトン食魚類, 甲殻類, タコ類, ベントス, 大型二枚貝, クラゲ	イカナゴ食性に直接関与しないもののうち、栄養段階が2~3のもの
	No.3 <i>Paracalanus</i> , 中型動物プラクトン, 小型動物プラクトン	動物プラクトン (<i>C.sinicus</i> 以外)
	No.2 <i>C.sinicus</i>	動物プラクトン (イカナゴの主要餌)
低	No.1 <i>E.zodiacus</i> , <i>C.wailesii</i> , 小型珪藻, 渦鞭毛藻	植物プラクトン

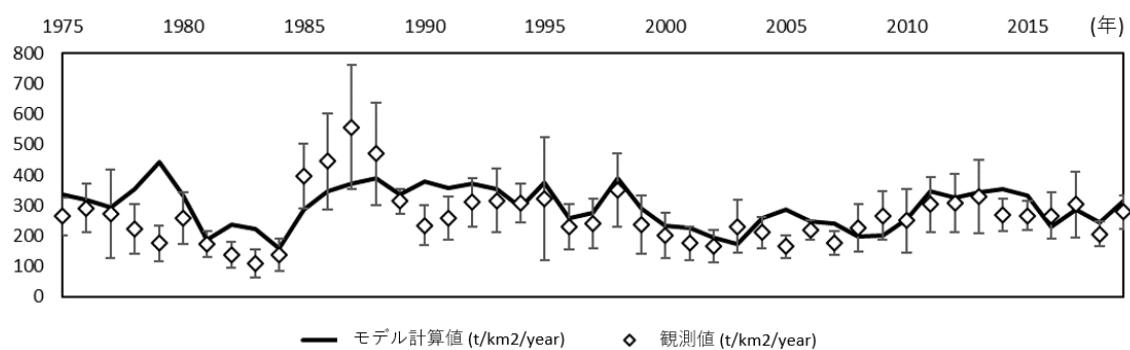


図9 植物プランクトンのプロトタイプモデル計算値と観測値の比較

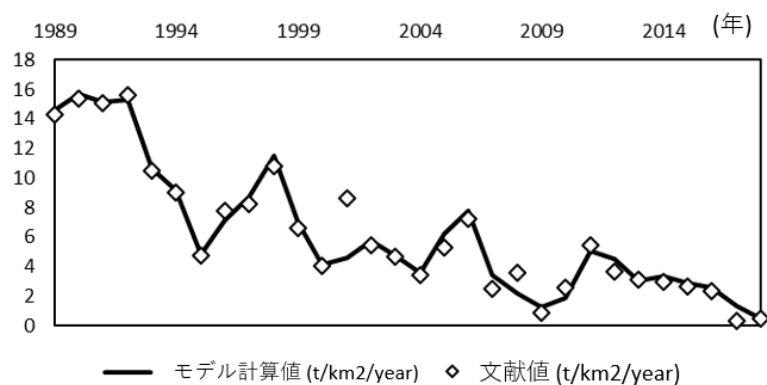


図10 イカナゴ資源量のプロトタイプモデル計算値と文献値の比較