

令和7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8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7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	24
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	33
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	38
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	44
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	53
3) 栄養塩類管理方策の検討	65
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	82
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 ①	104
栄養塩類管理方策の検討 ②	126
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	126
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	136
3) 栄養塩類管理方策の検討	146
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	165

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】

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。

II. 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。

III. 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

A. 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。

Ⅰ. 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養殖場等の漁場区における栄養塩環境との関係を検討することを目的に、プロトタイプ数値計算モデルの改良を継続し、数値モデルの駆動に必要な外洋環境、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。また、染料数値モデルを用いた漁場区への起源別の栄養塩供給

ポテンシャルを評価し、栄養塩供給を変化させる栄養塩管理施策の効果を推算するとともに、湾全体の水質環境に及ぼす影響を検討する。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の評価するために、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，富山瑛弘，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）広島湾における観測

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にて調べた。2025年の6月23日、6月30日、7月7日、7月17日、7月22日、7月28日および8月4日に、広島湾に設定した Stn. H2, H4, KH1～4（図1）において、表層、1 m 層、2 m 層、3 m 層および 5 m 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。また、気象庁が公表している 2025 年 6 月から 8 月における広島市の全天日射量と合計降水量のデータも解析に使用した。

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、*Skeletonema* 属、*Chaetoceros* 属および *Pseudo-nitzschia* 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。*Skeletonema* 属および *Chaetoceros* 属については、昨年度は広島湾産の *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex および *Chaetoceros socialis* のいずれも有菌株を用いたが、今年度は国立環境研究所より購入した *S. marinoi-dohrnii* complex 無菌株（NIES-323）、*Chaetoceros debilis* 無菌株（NIES-4079）および *C. socialis* 無菌株（NIES-3713）を用いた。また、*Pseudo-nitzschia* 属については、2024 年 9 月に広島湾より分離した *Pseudo-nitzschia* sp.を用いた。本種については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、改変 SWM-3 培地（塩分 25）を用いた。試験区は光量子束密度 15, 40, 125, 250 および 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の 5 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/d）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/d）、 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。得られた μ_m および K_s の値から、低基質濃度に対する親和性の指標である affinity index（ $\alpha = \mu_m / K_s$ ）を求めた。

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、*Chaetoceros debilis* 無菌株（NIES-4079）の窒素濃度に対する増殖応答を室内試験で調べた。試験に先立ち、*C. debilis* を 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。そして、飢餓培養した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/d）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。

エ）各種珪藻類の溶存無機態リン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 marinoi-dohrnii* complex（NIES-323）、*Chaetoceros debilis*

(NIES-4079) および *Chaetoceros socialis* (NIES-3713) のリン濃度に対する増殖応答を室内試験で調べた。試験に先立ち、*S. marinoi-dohrnii* complex および *C. debilis* 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、リン源無添加の改変 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、他は上記 2 種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、リン酸二水素ナトリウムにて DIP の濃度を 0.14, 0.23, 0.47, 2.35, 4.72 および 9.39 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/d) を調べた。得られた増殖速度から、ウ) と同様の方法で各パラメータ値を求めた。

オ) 様々な光量子束密度条件下における *Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属の二者混合培養

イ) の結果から、*Skeletonema* 属は低光量子束密度に対する親和性が高く、弱光条件下ほど他種に対する競争優位性が高いという仮説が考えられた。そこで、本仮説の検証のため、様々な光量子束密度条件下で *Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属の二者混合培養を行った。試験には *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex (NIES-323) と *Chaetoceros debilis* (NIES-4079) を用いた。培地については、改変 SWM-3 培地 (塩分 25) を用いた。試験区は光量子束密度 15, 40, 125 および 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の 4 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、対数増殖期にある培養株を初期密度が両種同程度となるよう培地に接種し、馴致培養と同様の水温、光条件下で混合培養して各種の細胞密度の変化を調べた。

(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。(1) のア) の調査で得られた Stn. H4, KH1~2 (図 1) の表層海水試料を各種微小珪藻類の生物量の分析に供した。昨年度までの結果、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)。なお、今年度の解析は 2023 年度および 2024 年度のデータも含めて実施した。

イ) 各種植物プランクトンの栄養成分の分析

今年度は、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex (NIES-323), *Chaetoceros socialis* (NIES-3713), *Leptocylindrus danicus* および *Chaetoceros neogracile* について栄養成分を調べた。*L. danicus* は 2023 年の 5 月に広島湾から分離した培養株、*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℃、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 rpm, 20 分, 4℃→15,000 rpm, 5 分, 4℃）により各種の細胞ペレットを得た。細胞ペレットは-80℃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。分析した 4 種はいずれも、今年度でサンプル数 n=3 を達成した。

ウ) *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex と *Leptocylindrus danicus* を餌とするアサリ稚貝の飼育試験

今年度は、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex と *Leptocylindrus danicus* の餌料価値を比較するための飼育試験を行った。試験には上記の栄養成分分析に供した、*S. marinoi-dohrnii* complex (NIES-323) および *L. danicus* の培養株を用いた。本試験では、事前に顕微鏡画像に基づき両種の細胞の体積比を算出し、給餌体積が同一となるよう両種の細胞密度を調整して給餌した。

1 回目の給餌試験は、平均殻長が 2.46 ± 0.09 mm のアサリ稚貝を用いて実施した。試験区は、*S. marinoi-dohrnii* complex 給餌区および *L. danicus* 給餌区の計 2 給餌区とした。試験区ごとに 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℃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。試験開始時の *S. marinoi-dohrnii* complex および *L. danicus* の給餌密度はそれぞれ 4.0×10^4 および 1.4×10^4 cells/mL とした。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。また、翌日の給餌前に *in vivo* クロロフィル蛍光値の測定を行い、残餌量の参考値とした。なお、培養が不安定となり、*L. danicus* の給餌密度を 0.6×10^4 (1 回)、 1.0×10^4 (1 回)、および 1.2×10^4 cells/mL (2 回) に設定した場合は、給餌体積が等しくなるよう *S. marinoi-dohrnii* complex の給餌密度を減じた。

2 回目の給餌試験は、平均殻長が 4.51 ± 0.25 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 2 給餌区とした。試験区ごとに 500 mL のろ過海水と 5 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℃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。試験期間中の *S. marinoi-dohrnii* complex および *L. danicus* の給餌密度は、それぞれ $6.0 \sim 7.0 \times 10^4$ および $1.2 \sim 1.4 \times 10^4$ cells/mL とした。給餌、換水および給餌密度の調整は 1 回目の試験と同様の方法で行った。

これら 2 回の給餌試験は 20 日間実施し、試験 20 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。

【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) 広島湾における観測

図 2 に、2025 年 6 月から 8 月の広島市における全天日射量および合計降水量の変動を示す。調査開始日の 6 月 23 日周辺は一日あたり 30 mm 程度の降水があり、全天日射量は $15 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ を下回った。しかし、6 月 26 日に全天日射量は $25 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ 以上に上昇し、その後 7 月 14 日および 18 日の一時的な低下を除き、調査最終日前日の 8 月 3 日まで $20 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ 以上の日が続いた。

図 3 に、各観測日の表層における水温、塩分、DIN および DIP を示す。表層水温は 6 月 23 日から 7 月 7 日にかけて全点平均値で 23.7℃から 29.1℃まで上昇した。7 月上旬に表層水温が 30℃付近に達するのは、過去の観測例（2018～2020 年は 7 月下旬～8 月上旬：Matsubara et al., 2023）と比較して異例の早さである。表層塩分は 6 月 23 日から 6 月 30 日にかけて低下したものの、河口付近の定点でも 19.8 という値を維持していた。広島湾の河口付近では夏季の表層塩分が 10 未満となる年が多い（Matsubara et al., 2023）ことを踏まえると、今年度は河川水の流入が少なかったと推察された。表層 DIN は 7 月 7 日に観測された 4 μM 、表層 DIP は 6 月 23 日に観測された 0.09 μM が最高値であり、2018～2020 年の夏季の観測例（表層 DIN 最高値 30～45 μM 、表層 DIP 最高値 0.3～0.7 μM ：Matsubara et al., 2023）と比較して非常に低かった。

図 4 に、各観測日の表層における各珪藻類の細胞密度を示す。*Skeletonema* 属は調査開始日の 6 月 23 日には全点平均値で 1000 cells/mL を超えるブルームを形成しており、6 月 30 日までそのブルームは継続したが、7 月 7 日以降は急激に減少し、7 月 22 日には未検出となった。*Chaetoceros* 属は 6 月 23 日から 6 月 30 日にかけて増加し、全点平均値で 1000 cells/mL を超えるブルームを形成したが、その後減少傾向となった。*Pseudo-nitzschia* 属は 6 月 23 日から 6 月 30 日にかけて比較的高密度で確認されたが、*Chaetoceros* 属と同様に 7 月 7 日以降は減少傾向となった。*Leptocylindrus* 属は他の珪藻類と異なり、6 月 23 日から 7 月 17 日まで増加傾向を維持した。

Skeletonema 属は 6 月 23 日にはすでにブルームを形成していたことから、全天日射量が低かった 6 月 21 日から 6 月 23 日（図 2）にかけて増殖したことが考えられ、本属は弱光条件下でもブルーム形成可能であることが示唆された。一方、*Chaetoceros* 属が増加した 6 月 23 日から 6 月 30 日は全天日射量の増加時期と一致しており（図 2）、本属のブルーム形成には、高い光量が必要であることが示唆された。こうした現場動態の特徴は昨年度も観測されており、*Skeletonema* 属は *Chaetoceros* 属よりも弱光環境下で優占しやすいことが考えられた。

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、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis*, *Pseudo-nitzschia* sp. および *Leptocylindrus danicus* の光量子束密度-増殖速度曲線を示す（*L. danicus* については昨年度のデータを再計算した）。 α の値が *S. marinoi-dohrnii* complex で最も高かったことから、本種の低光量子束密度に対する親和性が最も高い（＝弱光耐性が高い）ことが示された。

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、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros debilis* および *Chaetoceros socialis* の DIN 濃度-増殖速度曲線を示す（*S. marinoi-dohrnii* complex および *C. socialis* については昨年度の成果を引用、 α についてはいずれの種も今年度計算）。 α の値は *S. marinoi-dohrnii* complex で最も高かったことから、本種の低 DIN 濃度に対する親和性が最も高い（＝低 DIN 耐性が高い）ことが示された。

エ) 各種珪藻類の溶存無機態リン濃度に対する増殖応答の把握

図 7 に、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros debilis* および *Chaetoceros socialis* の DIP 濃度-増殖速度曲線を示す。 α の値は *C. debilis* で最も高かったことから、本種の低 DIP 濃度に対する親和性が最も高い（＝低 DIP 耐性が高い）ことが示された。

オ) 様々な光量子束密度条件下における *Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属の二者混合培養

図 8 に、各光量子束密度条件下で混合培養した *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex と *Chaetoceros debilis* の細胞密度の変化を示す。光量子束密度 15 および 40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ における最高細胞密度は *S.*

marinoi-dohrnii complex が *C. debilis* を上回ったが、125 および 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では *C. debilis* が *S. marinoi-dohrnii* complex を上回った。このことから、*S. marinoi-dohrnii* complex は、弱光条件下ほど他種に対する競争優位性が高いことが示された。

今年度実施したイ)～エ)の室内試験の結果、*Skeletonema* 属は *Chaetoceros* 属をはじめとするほかの珪藻類よりも、弱光・低 DIN 耐性が高いことが示された。播磨灘では、1980 年代前半に透明度の上昇(=水中光量子の増加)と DIN および DIP の低下が観測されており、これらの要因が *Skeletonema* 属の優占度の低下を引き起こした可能性が指摘されてきた。DIP については、1990 年代に 1970 年代の水準まで回復したものの *Skeletonema* 属の優占度の再増加は起こらなかったことから (Nishikawa et al., 2010)、DIP の低下が *Skeletonema* 属の優占度を直接低下させたとは考え難い。DIN については、上述の通り *Skeletonema* 属はほかの珪藻類よりも低 DIN 耐性が高いことから、DIN の低下も *Skeletonema* 属の優占度を直接低下させたとは考え難い。一方、透明度の上昇が *Skeletonema* 属の優占度を低下させた可能性が考えられた。すなわち、透明度が低かった 1980 年代前半までは、弱光耐性が高い *Skeletonema* 属は他種に対して競争優位性が高く、優占していた。しかし、透明度の上昇に伴い水中光量子が増加するとその優位性が失われ、優占度が低下したことが考えられた。このことは、オ)の二者混合培養の結果からも支持された。今後は、透明度の長期観測データ等から、瀬戸内海の水中光量子量がどの様に変化したかを解析する予定である。

(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 9 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、*Cyclotella* sp. 1 の DNA コピー数と Settlement index との間で有意な正の相関が確認された。このことは、*Cyclotella* sp. 1 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高かったことを示唆し、*Cyclotella* sp. 1 がマガキ D 型幼生の餌として好適である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 10 に各珪藻類の中性糖およびタンパク質含量を示す。市販されており、二枚貝種苗生産等で広く活用される *Chaetoceros neogracile* と比較すると、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros socialis*, *Leptocylindrus danicus* の中性糖およびタンパク質含量はいずれも低かった。*C. neogracile* を除いた三種についてみると、中性糖含量は *L. danicus* で有意に高く、一方タンパク質含量については *L. danicus* で低い傾向が確認された。

表 1 に各珪藻類に含まれる脂肪酸の組成を示す。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。このほか、栄養成分として重要なドコサヘキサエン酸を見ると、*S. marinoi-dohrnii* complex および *L. danicus* で高い傾向であった。

ウ) *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex と *Leptocylindrus danicus* を餌とするアサリ稚貝の飼育試験

図 11 に、1 回目および 2 回目の試験結果を示す。1 回目の給餌試験の結果、試験終了時の *Leptocylindrus danicus* 給餌区におけるアサリ稚貝の平均殻長は、*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex 給餌区より有意に小さかった。また、2 回目の飼育試験でも、有意ではないが試験終了時

の *L. danicus* 給餌区におけるアサリ稚貝の平均殻長が *S. marinoi-dohrnii* complex 給餌区より小さかった。このことから、*L. danicus* は *S. marinoi-dohrnii* complex よりもアサリ稚貝に対する餌料価値が低いことが明らかとなった。この原因として、*L. danicus* のタンパク質含量が低いこと、比較的大型の珪藻であるためアサリ稚貝にとって好適な餌料サイズでなかったことが考えられたが、今後さらなる検討が必要である。フランスの大西洋沿岸域をフィールドとした最近の研究で、マガキの餌として *Skeletonema* 属が好適であり、*Leptocylindrus* 属は不適であることが示された (Gangnery et al., 2025)。 *Leptocylindrus* 属の優占度が高い環境は二枚貝にとって不適である可能性が高く、瀬戸内海における本属の優占度の増加は、餌料環境の悪化を示している可能性がある。

【謝辞】

(2) -ア) で用いた広島湾における 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】

- Gangnery A, Tania H, Stéphane P. Long-term monitoring data shed light on in situ feeding preferences in bivalves: a taxonomic and trait-based approach to phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 764, 53-74, 2025.
- 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.
- Nishikawa T, Hori Y, Nagai S, Miyahara K, Nakamura Y, Harda K, Tanda M, Manabe T, Tada K. Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts* 33, 417-427, 2010.
- 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 広島湾における観測定点

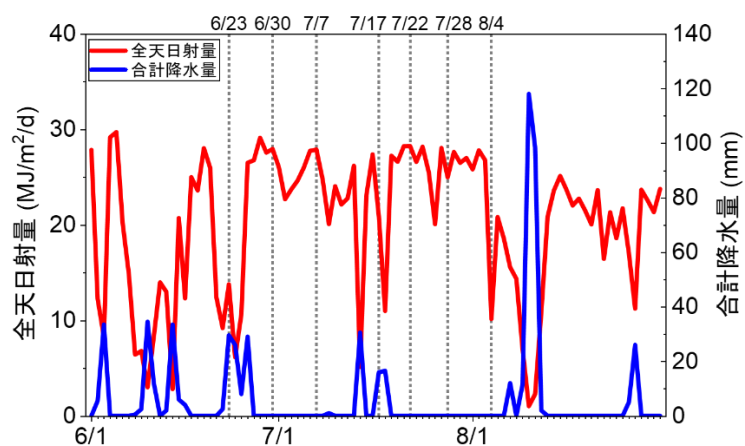


図2 2025年6月から8月の広島市における全天日射量および合計降水量の変動
(破線は観測日を示す参照線)

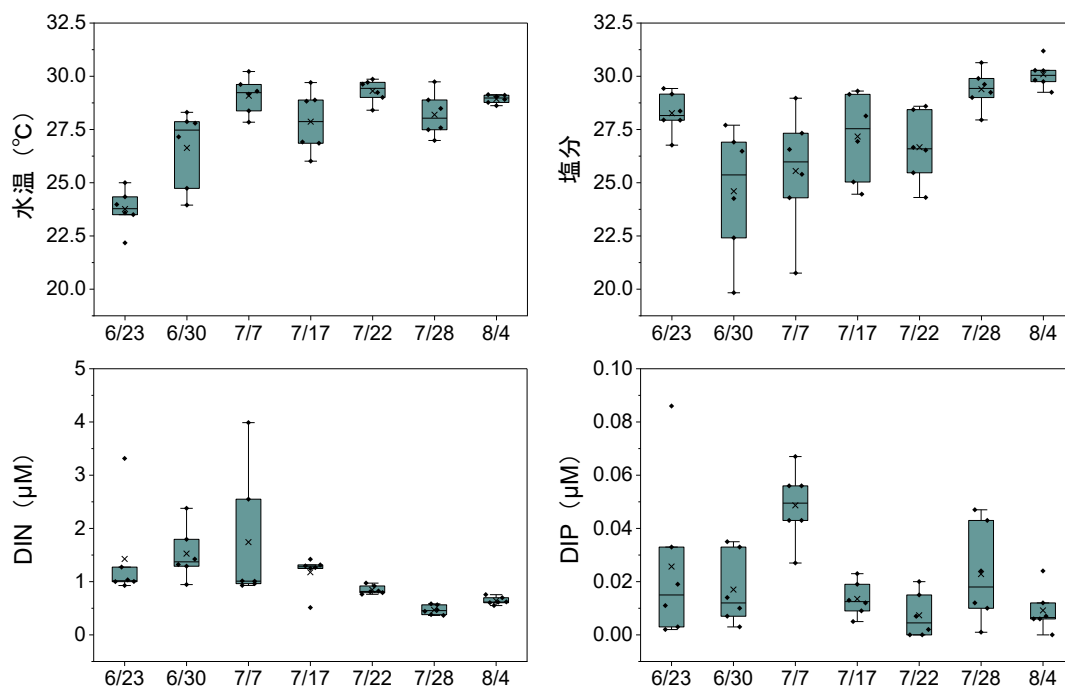


図3 各観測日の表層における水温、塩分、DIN、DIP
(6定点の観測値から作成した箱ひげ図、×：全定点平均値)

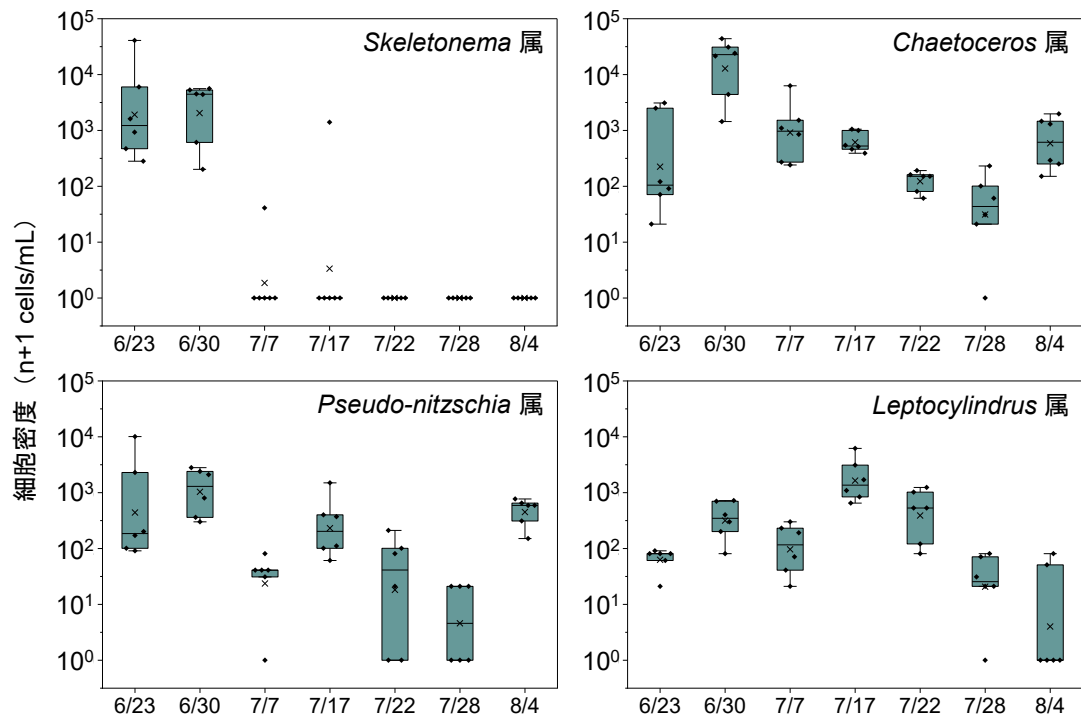


図4 各観測日の表層における各珪藻類の細胞密度
(6 定点の観測値から作成した箱ひげ図, ×: 全定点平均値)

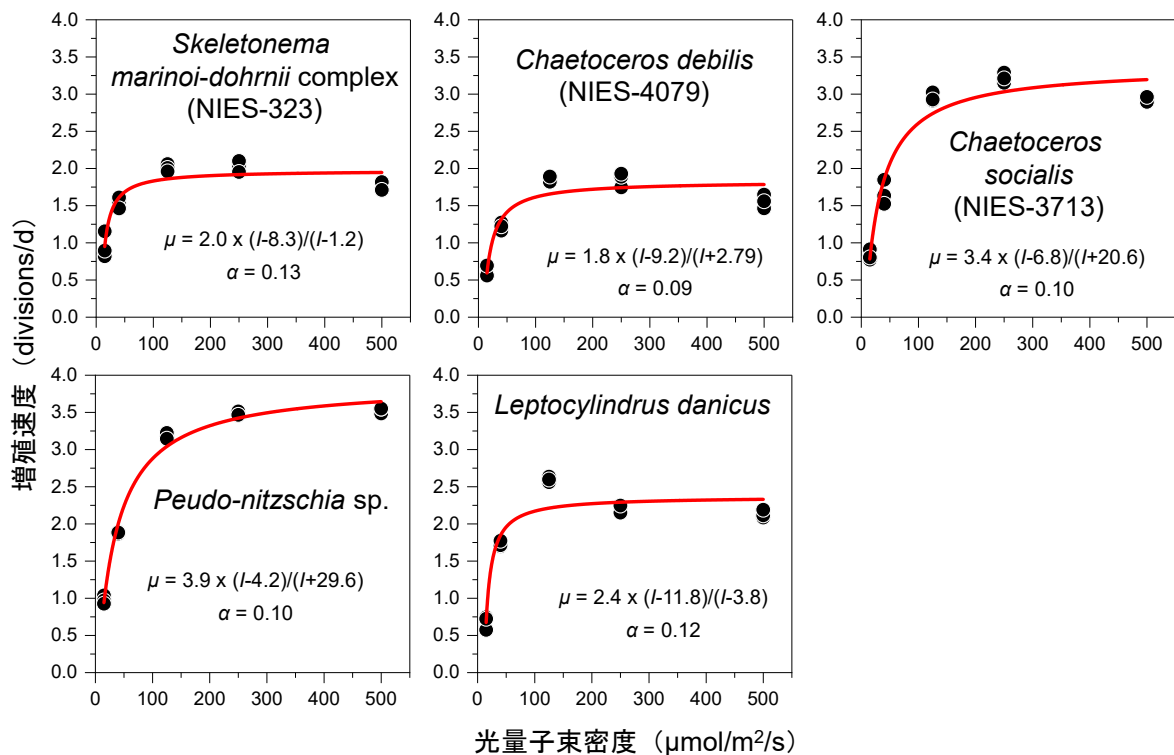


図5 *Skeletonema marinoi-dohrnii complex*, *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis*, *Pseudo-nitzschia sp.*, *Leptocylindrus danicus* の光量子束密度-増殖速度曲線

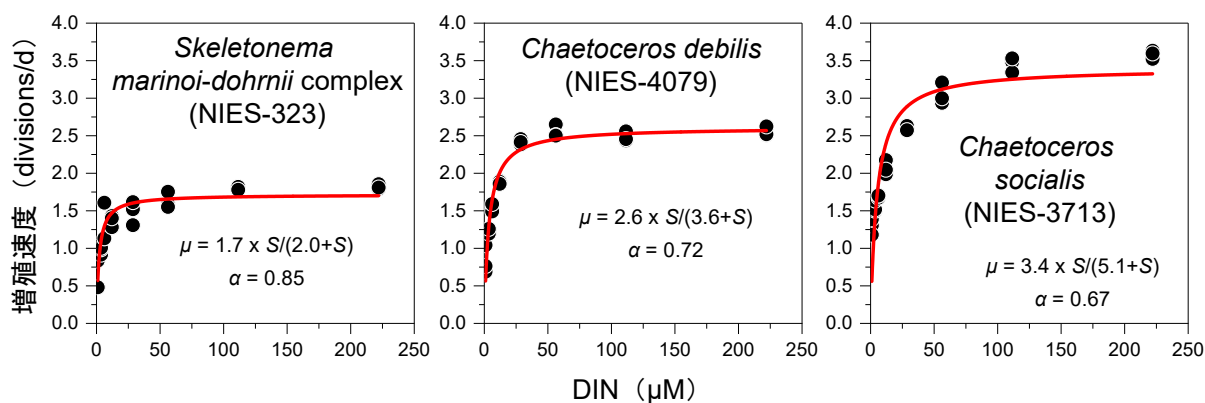


図6 *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis* の DIN 濃度-増殖速度曲線

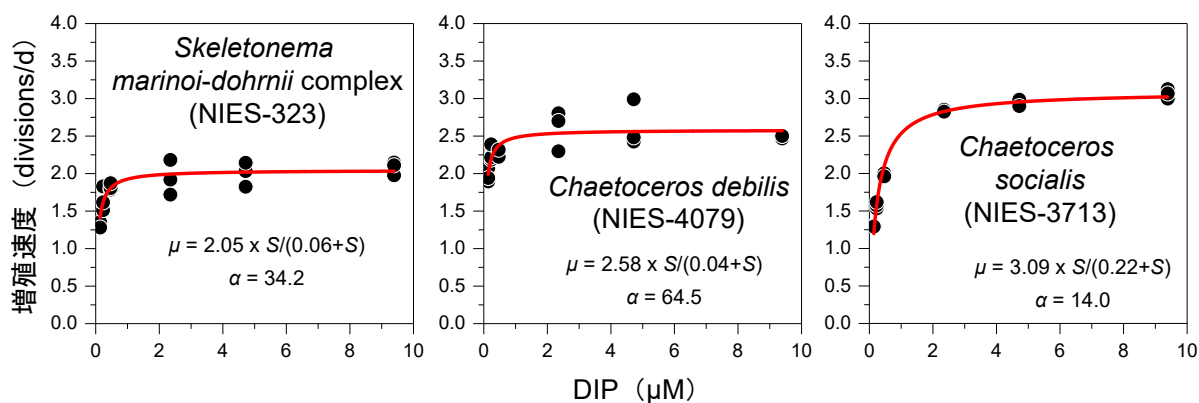


図7 *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex, *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis* の DIP 濃度-増殖速度曲線

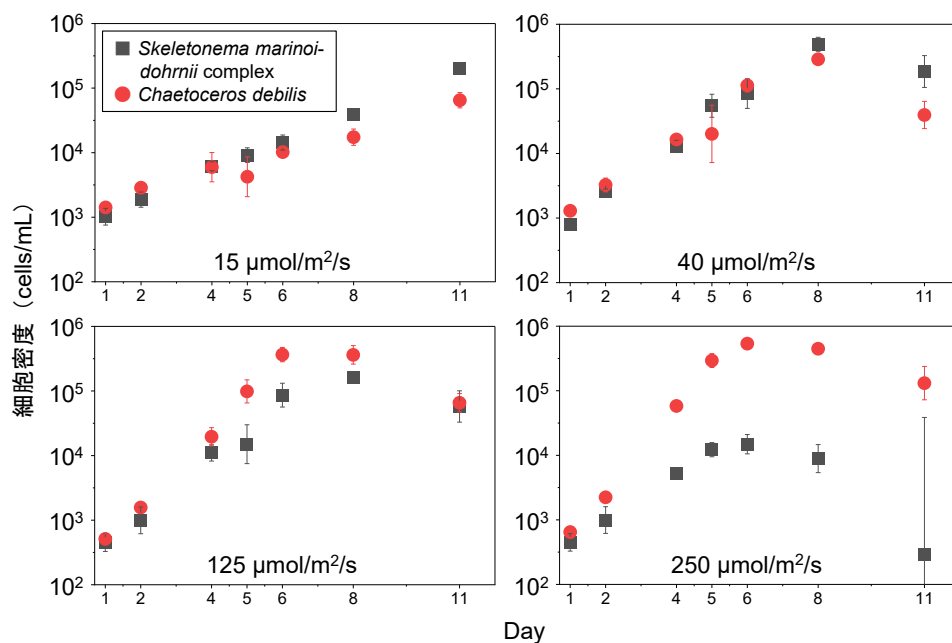


図8 各光量子束密度条件下で混合培養した *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex と *Chaetoceros debilis* の細胞密度の変化

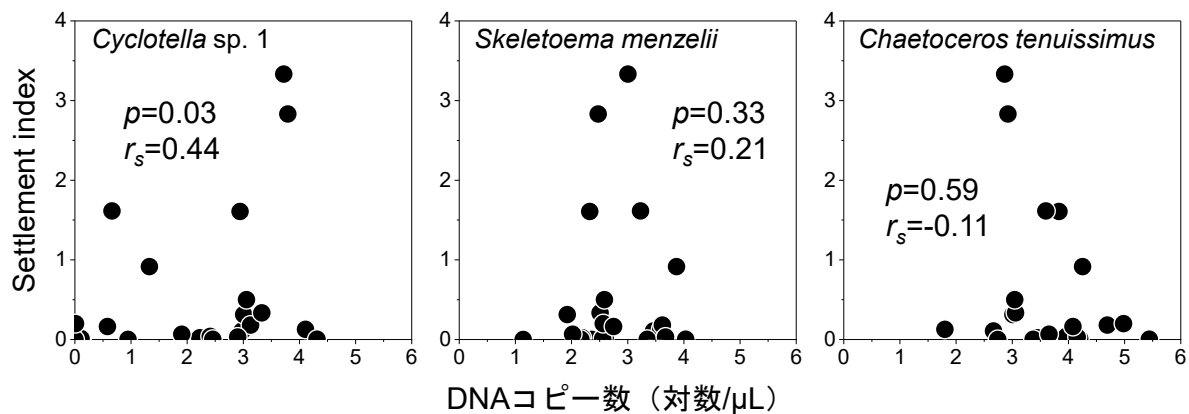


図9 各微小珪藻類の DNA コピー数と Settlement index との関係

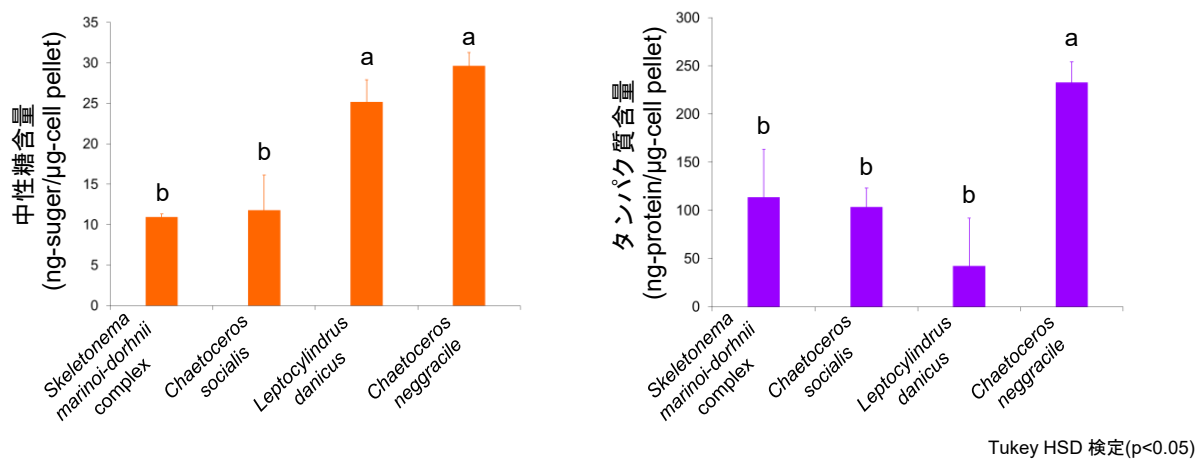


図10 各珪藻類の中性糖 (左) およびタンパク質含量 (右)

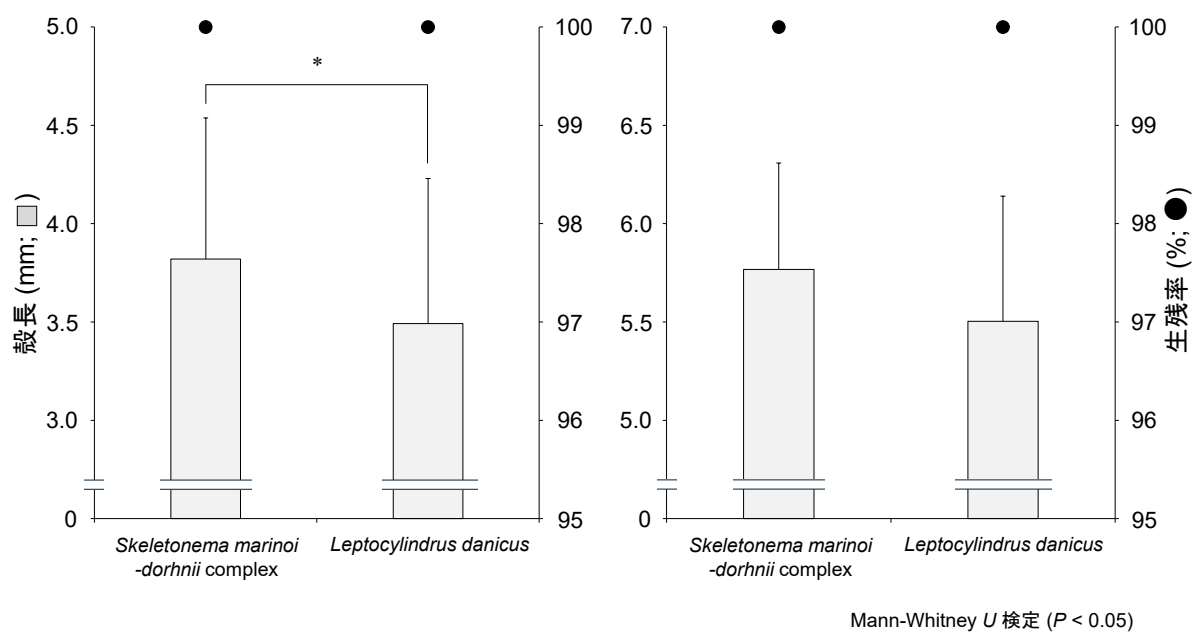


図11 1回目 (左) および2回目 (右) の飼育試験の結果

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 <i>marinoidohrnii</i> complex	Chaetoceros <i>socialis</i>	Leptocylindrus <i>danicus</i>	Chaetoceros <i>neogracile</i>
		炭素数:二重結合数	分類				
ドデカン酸	ラウリン酸	C12:0		0.07 ± 0.06	0.60 ± 0.35	0.07 ± 0.06	0.10 ± 0.00
トリデカン酸		C13:0		0.03 ± 0.06	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
テトラデカン酸	ミリスチン酸	C14:0		14.67 ± 0.75	19.87 ± 2.71	22.00 ± 5.24	15.93 ± 0.42
テトラデセン酸	ミリストレイン酸	C14:1		0.03 ± 0.06	0.07 ± 0.06	0.07 ± 0.12	0.13 ± 0.06
ペンタデカン酸		C15:0		0.80 ± 0.10	0.27 ± 0.12	0.27 ± 0.25	0.43 ± 0.06
ヘキサデカン酸	パルミチン酸	C16:0		8.23 ± 0.25	5.03 ± 0.45	6.03 ± 2.61	7.10 ± 0.60
ヘキサデセン酸	パルミトレイン酸	C16:1		14.20 ± 0.66	9.37 ± 1.99	24.87 ± 1.79	20.03 ± 3.02
オクタデカン酸	ステアリン酸	C18:0		0.13 ± 0.06	0.17 ± 0.12	0.27 ± 0.12	0.30 ± 0.00
オクタデセン酸	オレイン酸	C18:1	n-9	0.20 ± 0.10	0.27 ± 0.06	0.33 ± 0.15	0.50 ± 0.00
バクセン酸		C18:1	n-7	0.00 ± 0.00	0.33 ± 0.40	0.37 ± 0.29	0.10 ± 0.17
オクタデカジエン酸	リノール酸	C18:2	n-6	0.77 ± 0.06	0.33 ± 0.06	1.33 ± 0.40	0.97 ± 0.06
オクタデカトリエン酸	γ-リノレン酸	C18:3	n-6	0.00 ± 0.00	0.20 ± 0.20	0.07 ± 0.12	0.60 ± 0.10
オクタデカトリエン酸	α-リノレン酸	C18:3	n-3	0.17 ± 0.15	0.00 ± 0.00	0.13 ± 0.12	0.00 ± 0.00
イコサン酸	アラキジン酸	C20:0		0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.17	0.00 ± 0.00
イコサトリエン酸	エイコサトリエン酸	C20:3	n-6	0.00 ± 0.00	0.07 ± 0.12	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
エイコサテトラエン酸	アラキドン酸	C20:4	n-6	0.00 ± 0.00	0.90 ± 0.61	0.63 ± 0.60	2.47 ± 0.40
イコサペンタエン酸	エイコサペンタエン酸	C20:5	n-3	19.03 ± 1.20	45.07 ± 4.91	19.30 ± 4.80	26.93 ± 1.86
ドコサヘキサエン酸		C22:6	n-3	3.57 ± 0.55	0.30 ± 0.30	5.23 ± 1.50	2.13 ± 0.15
その他				38.1	17.2	18.9	22.3
合計 (%)				100.0	100.0	100.0	100.0

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連関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11月の満潮時に毎月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1m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200Lの海水を $50\mu\text{m}$ 目合いのプランクトンネットですく過濃縮し，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に関わる株化と種同定

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）において優占する小型植物プランクトンについて非珪藻類を主な対象種として分離，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

に基づいて 10^{-0} ~ 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。株化できた種については，細胞形態とメタバーコーディング法 (18S RNA D512-D978 領域) による種同定を行った。また昨年度に引き続き，環境 DNA 解析 (18S RNA D512-D978 領域) による植物プランクトンの出現状況を把握した。

(3) リアルタイム PCR による小型珪藻 2 種の季節出現変動

珪藻 *Chaetoceros tenuissimus* およびクリプト藻 *Teleaulax amphioxeia* に特異的なプライマーを用い，本調査域に出現する小型植物プランクトンの培養株を用いてその特異性を確認した。各観測時に得られた海水試料 50 mL ($< 10 \mu\text{m}$ 画分) を GF/F フィルターを用いて濾過し，フィルターを DNeasy PowerSoil Pro Kit にて DNA 抽出を行い，試料液 ($100 \mu\text{L}$) とした。PCR 反応液 ($25 \mu\text{L}$) に TB Green Premix Ex Taq II を $12.5 \mu\text{L}$ ，ROX Reference Dye 0.5 μL ，Primer premix 5 μL ，滅菌水 2 μL ，および試験サンプル 5 μL を混合，調整した。リアルタイム PCR の反応条件は 95°C で 30 秒間の初期変性の後， 95°C で 5 秒間， 60°C で 30 秒間の 2 ステップ PCR を 40 サイクル行った。全反応終了後，融解曲線分析を行い，増幅産物の特異性を確認した。各標的種の生物量を算出するため，十分に増殖した各種の培養液のクロロフィル蛍光値を測定した後，全量を GF/F フィルターで濾別，DNA 抽出を行い，DNA 原液とした。これを 10 倍から 10,000 倍希釈したものを標準液として用い，Ct 値と蛍光値の検量線を作成した。

(4) 二枚貝浮遊幼生の給餌試験

Stn. Y2 において，9 月から 11 月の観測時にプランクトンネット ($50 \mu\text{m}$ 目合い) を用いて適量の海水を濃縮し，プランクトン画分の粒子を得た。これより二枚貝浮遊幼生をパスツールピペットにより拾い上げ，4 mL 容ウェルプレートに 3~4 個体ずつ単離した。これに無給餌，珪藻の *Skeletonema dohrnii*，*Cyclotella atomus*，*Chaetoceros tenuissimus*，プラシノ藻の *Micromonas pusilla*，*Teleaulax amphioxeia* を単種で給餌する試験区を設定した。飼育海水中の Chl a 濃度が数 $\mu\text{g}/\text{L}$ となるように毎日給餌を行い，試験は 21 日間行った。

【結果】

(1) 定期観測による水質および Chl a 濃度の推移

2025 年調査における水温は $15.2\sim 30.9^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり，2023 年，2024 年に比べ 1°C 程度高い水温帯で推移した。また塩分は $28.7\sim 31.7$ で推移し，2023 年，2024 年のように低い塩分が観測されることなく観測を通じて高い傾向にあった (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。3 ヶ年を通して夏季に栄養塩濃度が高く，低水温期に低い典型的な河口域の特徴を示し，Chl a 濃度が高くなる夏季から秋季にかけて DIN 濃度を主体に低濃度が観察される傾向が認められた。2025 年は塩分が低かったこともあり，夏季から秋季にかけて 3 ヶ年の中で DIN が最も低濃度で推移した。

各定点における Chl a 濃度 (全 Chl a 濃度および $< 10 \mu\text{m}$ -Chl a 濃度) の推移を図 4 に示す。2025 年度の Chl a 濃度として，各定点共に秋季の 9 月~10 月に高く，全期間の濃度として全 Chl a 濃度は $1.1\sim 10.8 \mu\text{g}/\text{L}$ ， $< 10 \mu\text{m}$ -Chl a 濃度は $0.29\sim 4.0 \mu\text{g}/\text{L}$ の範囲にあった。3 ヶ年の傾向として， $< 10 \mu\text{m}$ -Chl a 濃度は全 Chl a 濃度に比べてその変動幅が小さかった。また比較的低水温・低栄養塩濃度

期には小型植物プランクトンの割合が高くなり、高水温・高栄養塩濃度期に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。

(2) 定期観測における二枚貝浮遊幼生および着底貝の推移

2025 年度における二枚貝浮遊幼生は過去の 2 ヶ年と同様に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 5,360 inds/m³ (BS15 : 10 月), 8,240 inds/m³ (Y2 : 6 月), 56,960 inds/m³ (B : 9 月), が検出された (図 5)。いずれの定点においてもホトトギスガイがその多くを占めていたが、2025 年はアサリ浮遊幼生も観測期間を通じて出現し、10 月 20 日には 50%程度を占めた。

3 ヶ年の観測から、ホトトギスガイ浮遊幼生は夏季から秋季に出現密度が高く、またフルグロウン期幼生である殻長 180 μm < の出現割合も同様の傾向があった (図 6)。この浮遊幼生の成長ないし生残率は Chl a 濃度が高くなる夏季から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改めて示唆された。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) が新規加入している一方で、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)。この傾向は 3 ヶ年に共通して見られ、着底時に何らかの問題が生じているのか、着底後に捕食圧の増加や高温期をむかえるなど、その後に何らかの理由で生残できていない。今後はこの要因を検証課題としたい。

(3) 小型植物プランクトンの栄養塩応答の解明に関わる株化と種同定

定点 Y2 (図 1) で得られた試料海水から植物プランクトンを単離した結果、珪藻を含め、プラシノ藻類とクリプト藻類の培養株を得た。これらについては 18S 領域のメタバーコーディング解析により、プラシノ藻は *Micromonas pusilla*, *Microglona uva-maris*, クリプト藻は *Teleaulax amphioxeia* と同定された。昨年度までに珪藻培養株として取得している *Skeletonema dohrnii*, *Minidiscus spinulatus*, *Chaetoceros tenuissimus*, *Chaetoceros calcitrans*, *Cyclotella atomus* を含め、次年度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 3 ヶ年に亘り環境 DNA 解析 (18S 領域) により小型植物プランクトンの出現種を調べた。その結果、夏季の高水温期には珪藻類が卓越する明瞭な傾向を示し、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)。培養株の作成時に分離されてくるプランクトン種から、高水温期に優占するのは以下に示す通り小型キートケロス属の *C. tenuissimus*, それ以外の季節には、珪藻類として *S. dohrnii*, *M. spinulatus*, *C. atomus* が、非珪藻種としてプラシノ藻 *Micromonas pusilla* やクリプト藻 *Teleaulax amphioxeia* 等が主な出現種と考えられた。

(4) リアルタイム PCR による小型珪藻 2 種の季節出現変動

珪藻 *Chaetoceros tenuissimus* についてリアルタイム PCR により 3 ヶ年の出現動態を解析した結果、いずれの定点においても 7 月から 9 月の高水温期に最大生物量を示し、低水温期には少ない極めて明瞭な出現パターンが認められた。これより *C. tenuissimus* は本調査海域の高水温期における最大優占種である可能性が示され、高水温期には浮遊幼生の重要な餌料生物になっている可能性が示唆された (図 8)。またクリプト藻 *Teleaulax amphioxeia* は明確な季節変動は認められないものの、春季および冬季に生物量が多くなる傾向が認められた (図 8)。

(5) 二枚貝浮遊幼生の給餌試験

観測期間を通じてホトトギスガイ幼生の割合が高かったことから、試験に用いた浮遊幼生は本

種である確率が高い。試験は計5回実施しているが、クリプト藻の *T. amphioxeia* と珪藻の *C. atomus* を与えた試験区では安定した生残率を示すと共に、着底稚貝にまで成長する試験区が認められた（表1）。これよりこれら2種は浮遊幼生の生残と成長にとって好餌料である可能性が高い。プラシノ藻の *Micromonas pusilla* と珪藻の *C. tenuissimus* も比較的生残が良かったが、珪藻の *S. dohrnii* はいずれの試験区でも良好な生残・成長は認められなかった。ただし、無給餌区でも成長は見られないものの生残性が良いケースも認められるため、次年度は実験デザインを再考し検証を行う予定である。

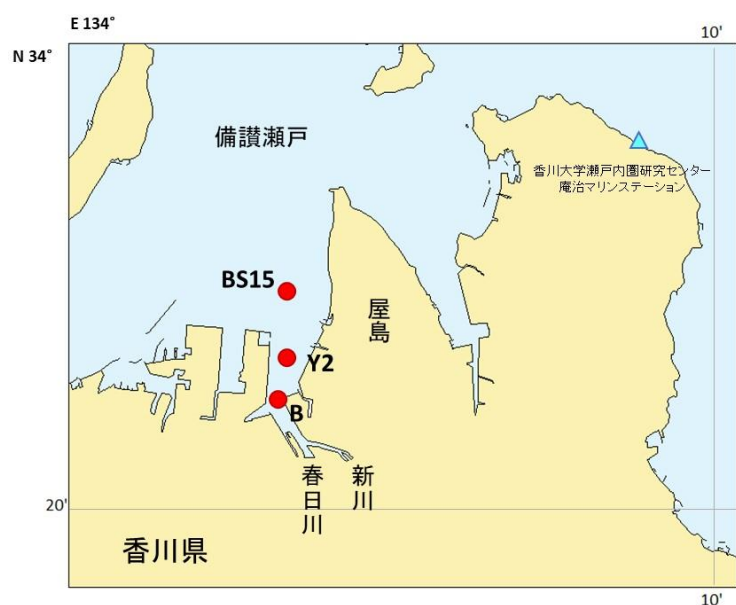


図1 観測定点

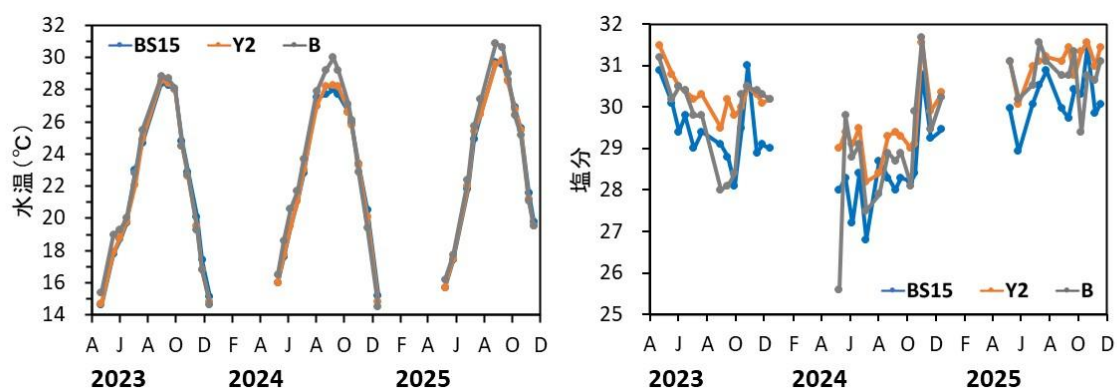


図2 各定点における水温と塩分の推移

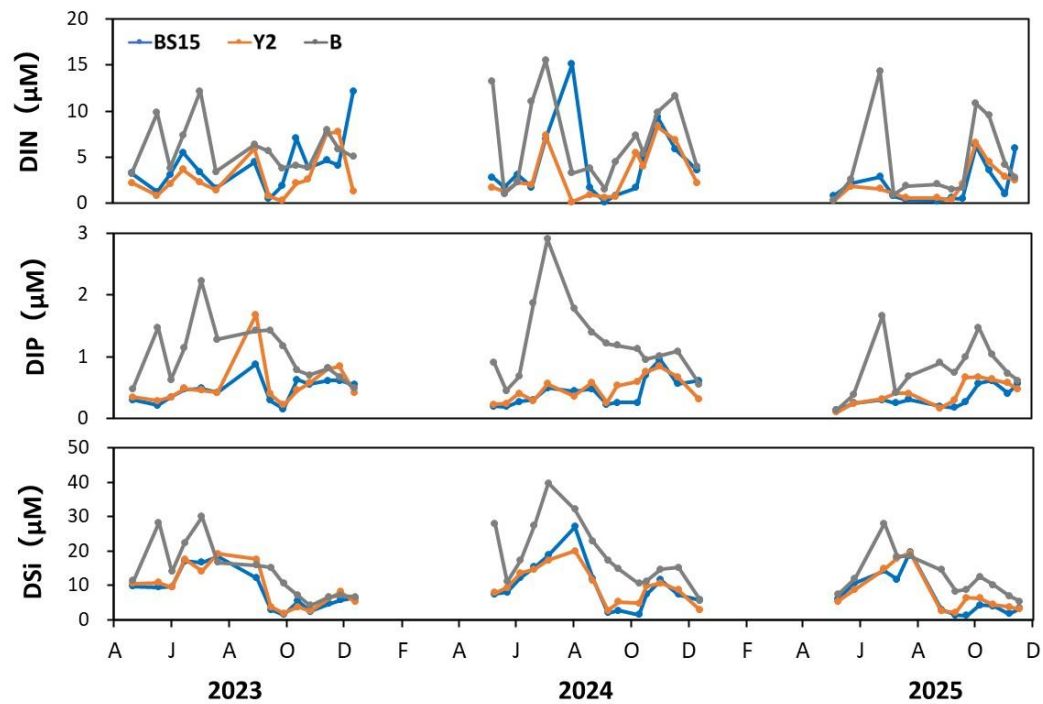


図3 各定点における栄養塩濃度の推移

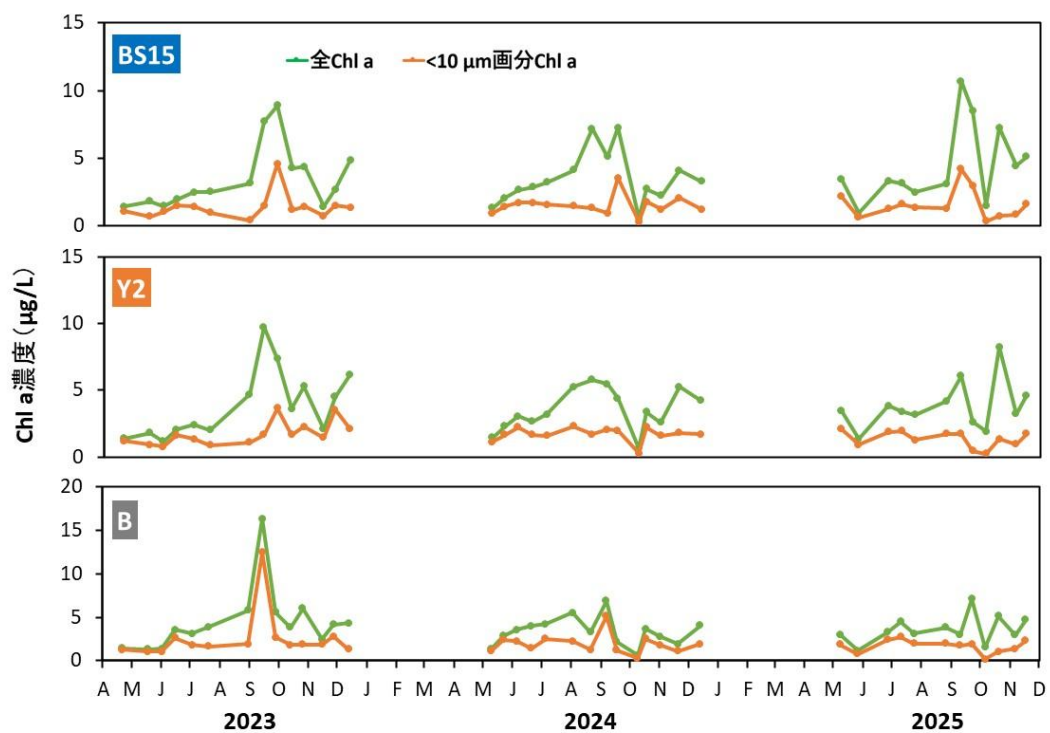


図4 各定点における全 Chl a 濃度と<10 μm 画分の Chl a 濃度の推移

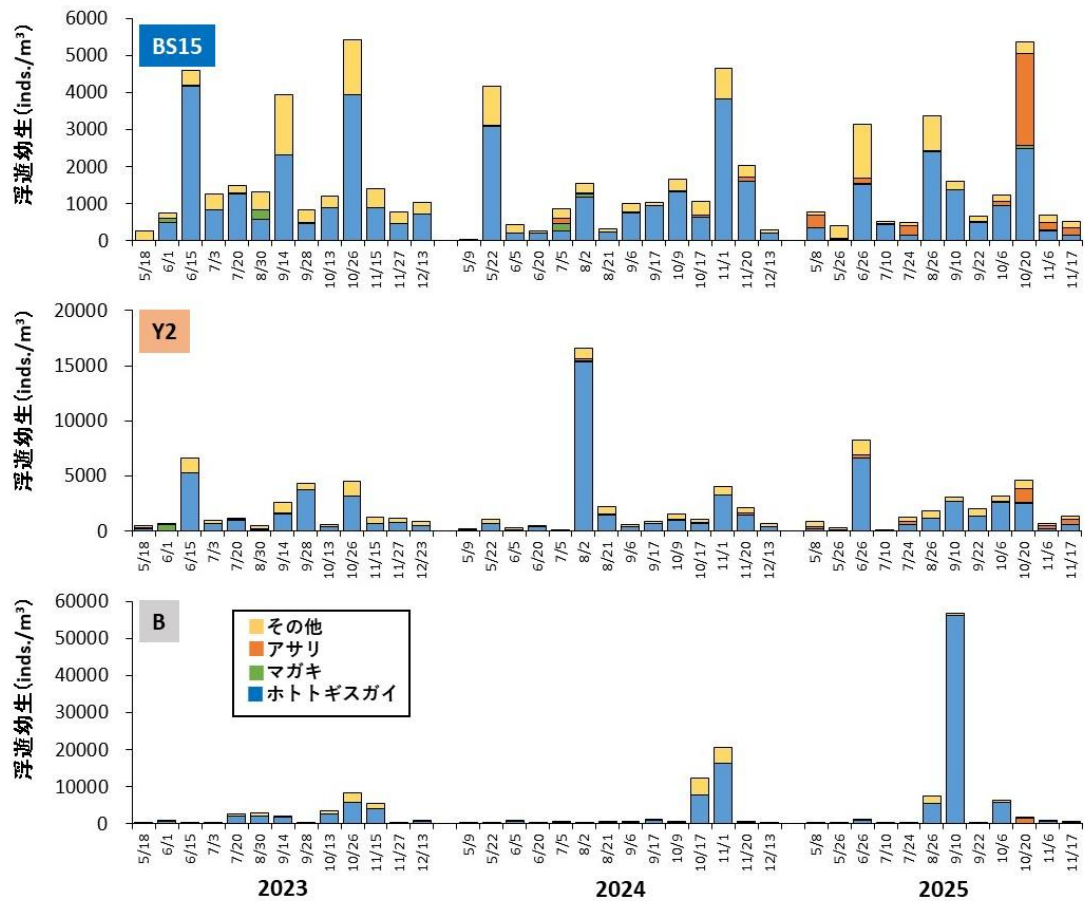


図5 各定点における二枚貝浮遊幼生の出現密度

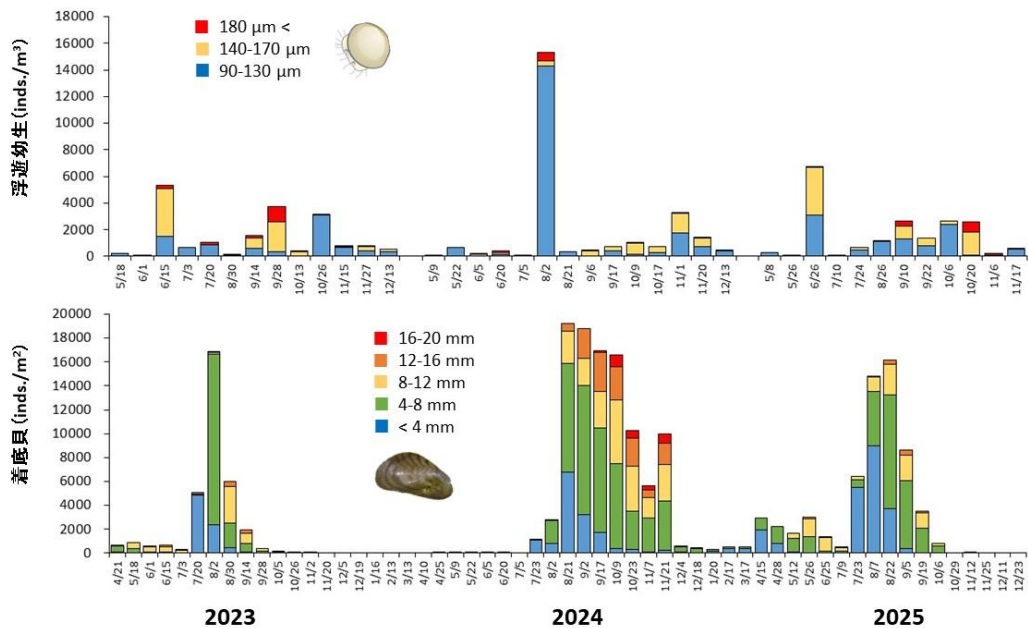


図6 定点 Y2 で検出されたホトトギスガイ浮遊幼生のサイズ組成と定点 B におけるホトトギスガイの着底状況

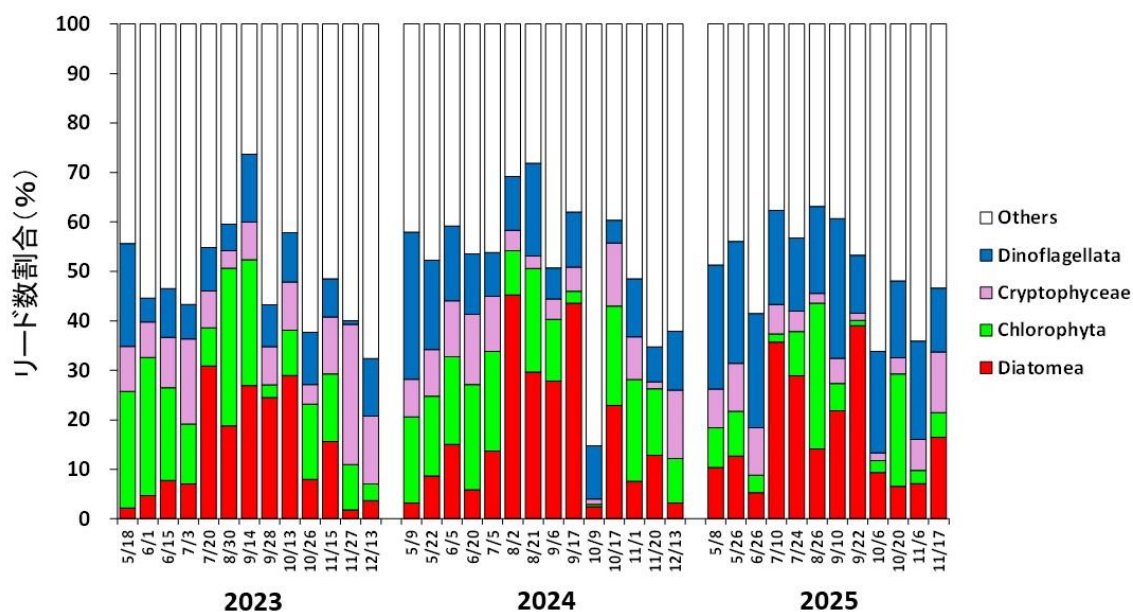


図7 環境DNA解析から得られた定点Y2における植物プランクトン相

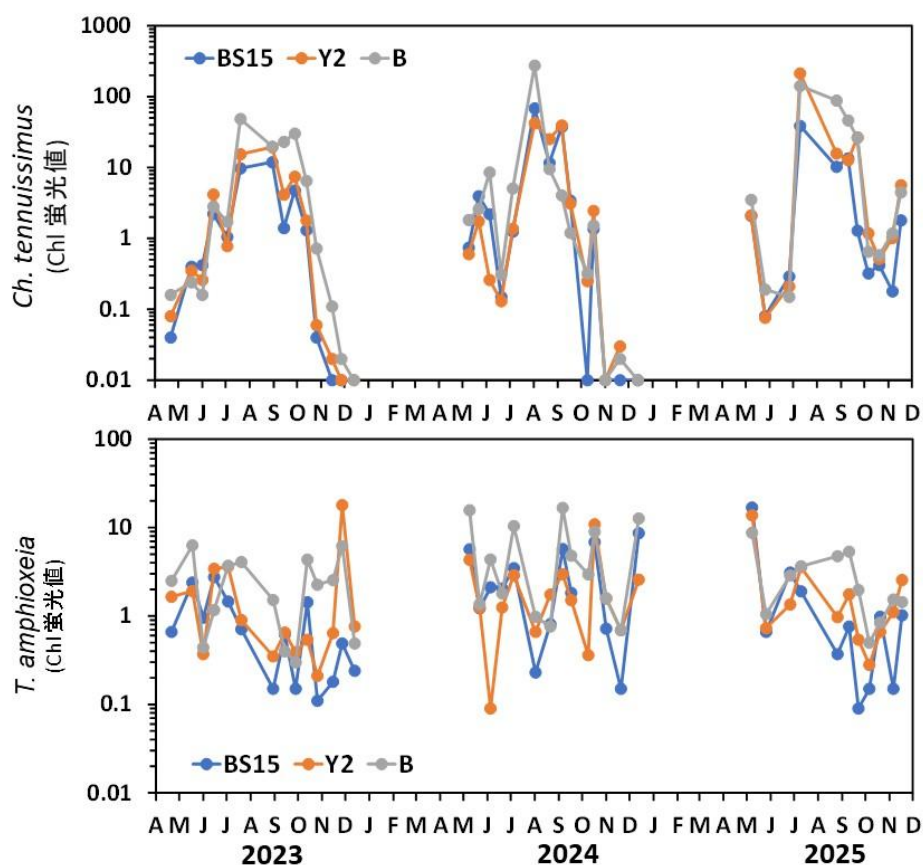


図8 定点Y2における*C. tenuissimus*と*T. amphioxieia*の出現動態（リアルタイムPCR解析による）

表 1 給餌試験による浮遊幼生の生残・成長性

試験期間	温度	無給餌
9/22-10/17 (21日間)	28.5℃	○
10/6-10/27 (21日間)	25.5-28.5℃	×
10/20-11/10 (21日間)	25.5-24.2℃	○
11/6-11/26 (21日間)	22.4-24.2℃	▲
11/17-12/8 (21日間)	22.4℃	○

◎: 着底稚貝まで成長
 ○: 試験終了時まで生残
 ▲: 2週間程度の生残
 ×: 1週間以内に死滅

試験期間	温度	<i>Skeletonema</i>	<i>Cyclotella</i>	<i>Ch. tenuissimus</i>	<i>Micromonas</i>	<i>Teleaulax</i>
9/22-10/17 (21日間)	28.5℃	▲	◎	▲	▲	◎
10/6-10/27 (21日間)	25.5-28.5℃	▲	◎	◎	×	▲
10/20-11/10 (21日間)	25.5-24.2℃	○	○	▲	○	◎
11/6-11/26 (21日間)	22.4-24.2℃	▲	○	▲	○	○
11/17-12/8 (21日間)	22.4℃	▲	○	○	○	○

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
上仲慶和，高木秀蔵，角田成美，古村振一，小野博行

【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。一昨年に過去 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）。また，今年度は昨年度作成したマガキに関する水温別成長予測モデルの整合性を検証した。さらに，屋内水槽でカキを飼育し，水槽内の栄養塩類等の水質環境がカキの成長に与える影響について検証した。

【方法】

（1）カキ養殖漁場モニタリングと栄養塩類等とマガキの成長との関係

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 6 年度の 10 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 7 年度の調査結果を用いてモデルの精度を検証した。

（2）水質環境の違いがカキの成長に与える影響（水槽試験）

本試験では，（1）の調査において 8 月下旬および 9 月下旬に採取したマガキを供試した。採取

後は試験開始まで無給餌で養成し、10月3日を試験開始日（0日目）とした。試験開始時に全重量および殻高を計測し、全重量の平均値が概ね等しくなるよう50個体ずつ7群に分けた。このうち1群は初期軟体部重量の測定に供し、残る6群を各試験区に割り当てた。試験区は、養殖海域における水質環境の再現を目的として、水温3段階（低水温帯 18℃、中水温帯 21℃、高水温帯 24℃：10～11月平均水温を想定）と給餌量2段階（多給餌区、少給餌区）を組み合わせた計6区とした。各区に1群（50個体）を収容し、10月から翌1月までの116日間飼育した。試験開始日10月3日（0日目）、10月28日（25日目）、11月28日（56日目）、12月19日（77日目）に各グループの全重量および殻高を計測し、1月27日（118日目）に軟体部重量を測定した。餌料には *Tetraselmis* sp. 及び *Chaetoceros gracilis* を用い、クロロフィル a 濃度および PON 濃度が、多給餌区でそれぞれ 6.5µg/L および 4µM、少給餌区で 2µg/L および 2µM とした。さらに、週 1～2 回採水し、クロロフィル a 濃度および形態別窒素濃度（PON 等）を測定した。併せて、各水槽における斃死個体についても毎日確認し、試験期間を通じて生残状況を記録した。

【結果】

（1）カキ養殖漁場モニタリングと栄養塩類等とマガキの成長との関係

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 4.5±1.8, 5.2±3.4, 4.0±1.6, 5.8±1.8 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 47.1±10.3, 28.8±6.0, 33.4±7.6, 38.8±8.4g となった。殻高は 6 月にそれぞれ 35.2±5.5, 36.3±7.8, 36.0±6.6, 38.8±4.5mm であったが、9 月にはそれぞれ 80.4±9.8, 58.8±7.1, 68.3±7.1, 70.4±8.7mm, 12 月にはそれぞれ 88.7±8.2, 70.7±6.5, 74.7±11.9, 79.1±9.0mm となった。軟体部重量は 6 月に 0.8±0.4, 0.6±0.5, 0.6±0.2, 1.1±0.5g であったが、10 月には 6.8±1.5, 3.9±1.1, 2.4±1.0, 3.9±0.9g となった。12 月には 9.3±2.3, 6.1±2.2, 5.9±1.6, 8.7±2.6g 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 4.1±4.0, 2.7±1.0, 2.8±1.1, 5.7±3.0µg/L であった（図 3）。形態別窒素濃度のうち、TN 濃度はそれぞれ 20.2±12.9, 15.1±3.4, 16.5±4.5, 20.7±3.7µM であった（図 4 (a)）。PON 濃度はそれぞれ 4.4±5.6, 3.7±3.2, 2.1±2.9, 3.7±2.7µM であった（図 4 (b)）。

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 6 月中旬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 10～11 月平均水温はそれぞれ 21.9±3.5, 20.7±4.0, 22.0±3.6℃であった。なお、牛窓沖の平均水温は 22.5±3.4℃（平年値 21.0±2.7℃）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、摂餌料量も増える（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℃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 月の軟体部重量の水温別成長予測モデルを図 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 7 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 2.3 ± 2.5 , 2.1 ± 2.2 , 3.3 ± 0.9 , $4.6 \pm 2.4 \mu\text{M}$, 10~11 月における水温は, St.1・2, 3, 4 の順にそれぞれ 21.9 ± 3.5 , 20.7 ± 4.0 , $22.0 \pm 3.6^\circ\text{C}$ であり, 12 月の軟体部重量の推定値はそれぞれ 12.9, 12.6, 12.6, 17.0g, 実測値との差は $-8.1 \sim -4.4\text{g}$ となった (図 7 (b))。推定値が実測値を上回った要因として, 今年度瀬戸内海において発生した, 夏季の高水温に起因すると考えられるマガキの大量斃死の影響が挙げられる。一般に, マガキは大型個体ほど斃死しやすいとされ (森他 1965), 斃死によって大型個体が間引かれ, 生残個体が小型化した結果, 例年よりも実測値が低下した可能性が考えられる。本モデルでは, 10~11 月の平均水温を説明変数としており, 夏季の水温は考慮していない。来年度は, 高水温がマガキの生理応答に及ぼす影響を考慮し, モデルの精度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。

(2) 水質環境の違いがカキの成長に与える影響 (水槽試験)

前述のとおり本試験では, 18°C (多給餌), 18°C (少給餌), 21°C (多給餌), 21°C (少給餌), 24°C (多給餌), 24°C (少給餌) の 6 区を設定した。水槽内のクロロフィル a 濃度の期間中の平均値は順に, 8.3 ± 4.2 , 2.2 ± 0.5 , 8.4 ± 2.8 , 2.0 ± 0.3 , 8.0 ± 2.6 , $1.8 \pm 0.3 \mu\text{g/L}$ となった (図 8)。TN 濃度の平均値はそれぞれ 53.0 ± 5.8 , 43.5 ± 8.7 , 55.4 ± 7.6 , 50.0 ± 9.9 , 48.4 ± 8.3 , $43.5 \pm 8.9 \mu\text{M}$ であった (図 9 (a))。PON 濃度の平均値はそれぞれ 1.9 ± 0.4 , 2.3 ± 0.4 , 2.5 ± 0.3 , 4.9 ± 1.4 , 3.0 ± 0.6 , $3.2 \pm 1.0 \mu\text{M}$ であった (図 9 (b))。また, 各水温設定区の水温は概ね目標としていた平均水温 (10~11 月) の再現ができた (図 10)。

試験終了時の各試験区における軟体部重量の平均値はそれぞれ, 2.1 ± 1.1 , 1.5 ± 0.4 , 2.1 ± 0.6 , 1.4 ± 0.5 , 1.9 ± 0.8 , 1.4 ± 0.6 であった (図 11)。各水温帯において餌料条件間の軟体部重量を比較した結果, すべての水温帯で多給餌区では少給餌区より有意に高い値を示した ($p<0.05$)。一方で, 同一餌料条件で水温間の成長量を比較したところ, 有意差は認められなかった。また, 各試験区における飼育期間中の生残数の推移を図 12 に示す。試験終了時の生残数を水温条件間で比較した結果, 有意な差が認められた (χ^2 検定, $p<0.05$)。特に高水温区 (24°C) では斃死個体が多く, 生残数は 18°C 区および 21°C 区と比較して有意に低下した。一方で, 餌料条件間による生残数への明確な差は認められなかった。

今年度は, 水温および餌料条件の違いがマガキの成長量に与える影響を検証した。各水温帯における餌料条件間の軟体部重量を比較した結果, 21°C 設定区において多給餌区と少給餌区の重量差が最も大きくなった。マガキの成長量は摂餌による同化量と, 呼吸や成熟による代謝量との余剰分により規定されると考えられる。同化量および代謝量の指標となる濾過水量および酸素消費量は, 水温上昇に伴い増大する傾向が報告されており (赤繁他 2005), 高水温帯 (24°C) で最大, 低水温帯 (18°C) で最小になると考えられる。しかし, 本試験の結果から, 同化量と代謝量の余剰分については中水温帯 (21°C) で最大となる可能性が示された。以上のことから, マガキの成長予測の精度向上を図るためには, 水温と餌料量の相互作用を考慮する必要があると考えられる。来年度は, 水温および餌料条件の影響をより定量的に評価するため, 自然環境に近い餌料条件の再現および PON 濃度制御の精度向上を図るとともに, エネルギー収支の整理を進めることで, より漁場環境に即したマガキ成長に必要な窒素量の推定を目指す。

【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および濾過水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.

森 勝義・今井丈夫・豊島清明・臼杵 格，1965：松島湾におけるカキの大量斃死に関する研究Ⅳ・性成熟及び産卵に伴うカキの生理的活性と糖原量の変化，東北水研研報，25，49-63

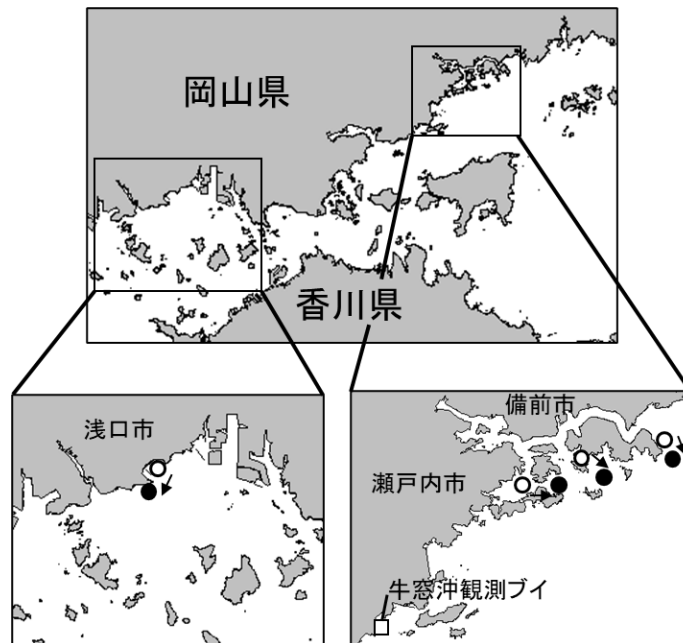


図1 調査漁場 (○抑制漁場, ●養成漁場)

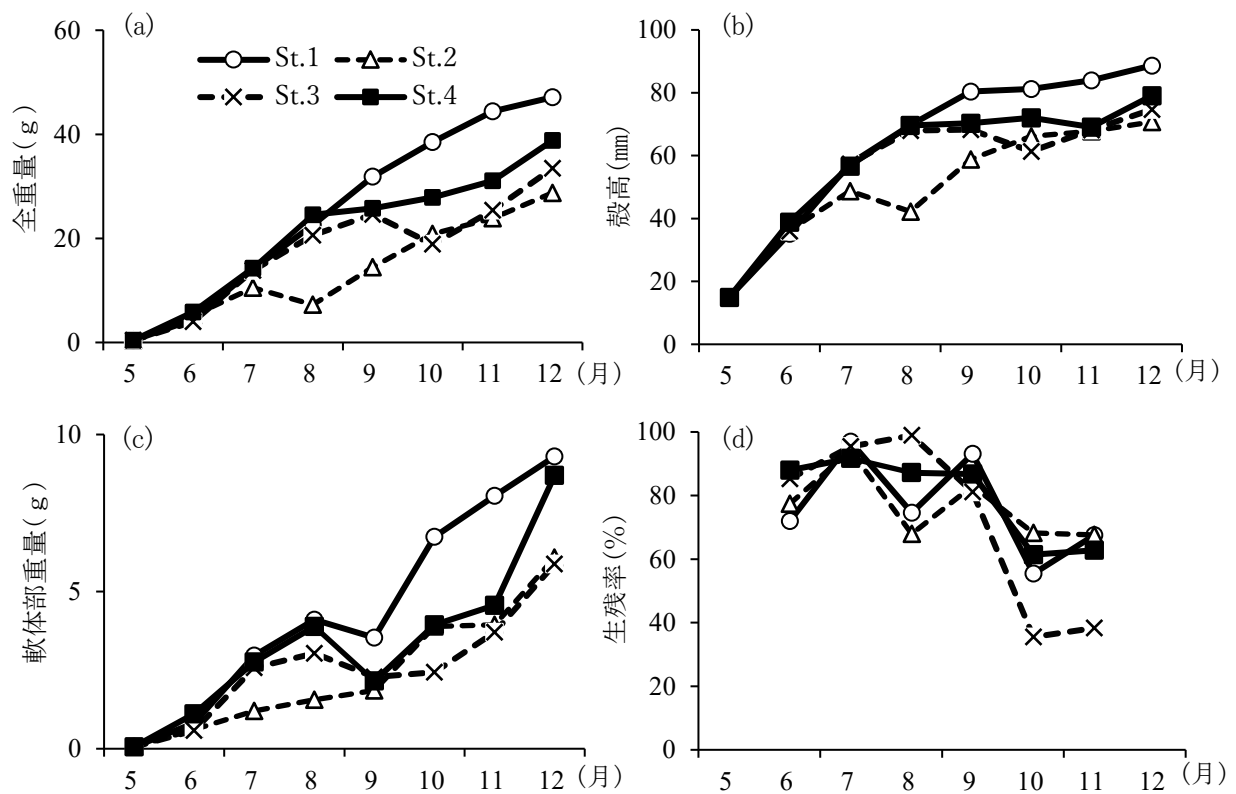


図2 令和7年度の各漁場におけるマガキの成長状況
(a)全重量, (b)殻高, (c)軟体部重量, (d)生残率

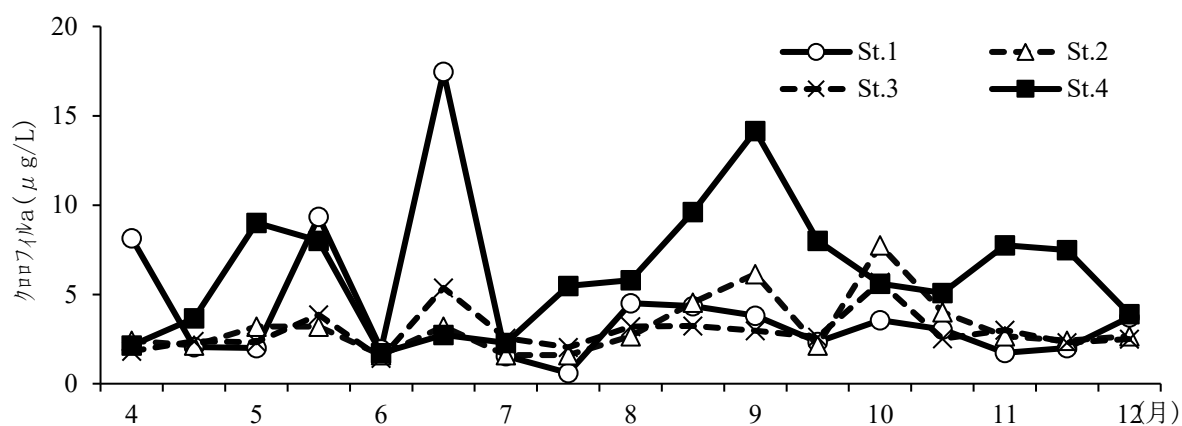


図3 令和7年度の各漁場におけるクロロフィルa濃度の推移

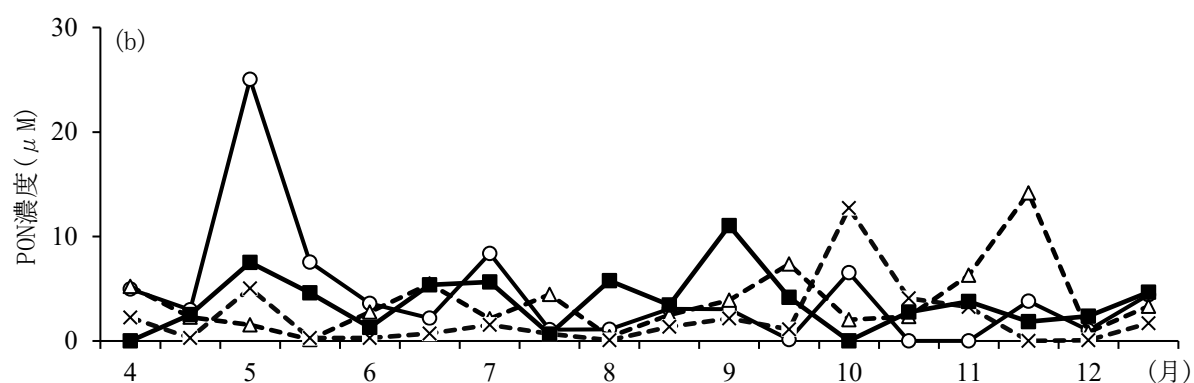
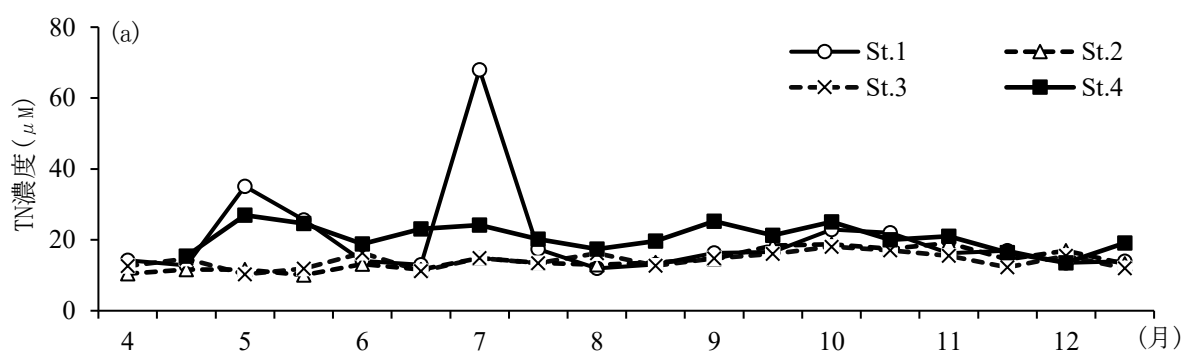


図4 令和7年度の各漁場における形態別窒素濃度の推移

(a) TN 濃度, (b) PON 濃度

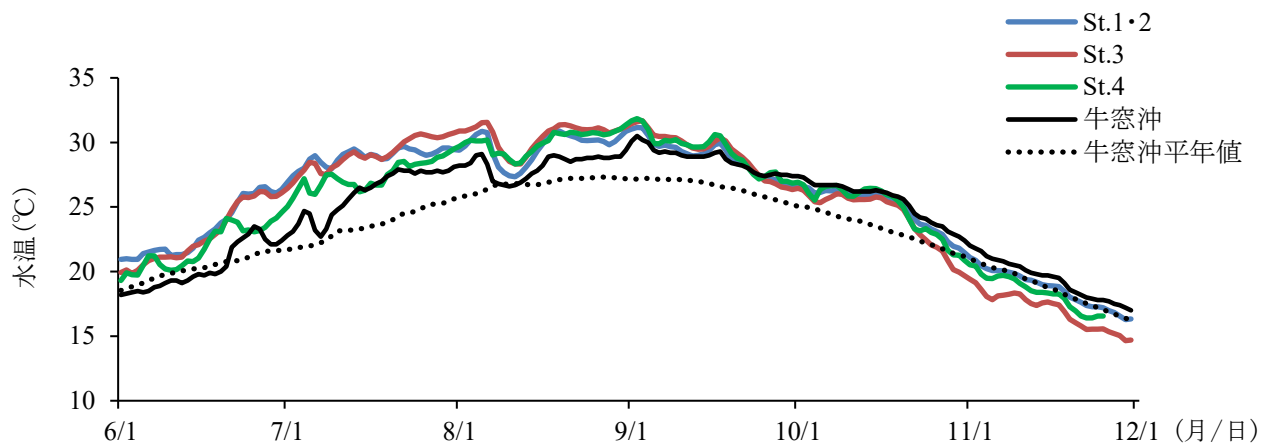


図5 令和7年度の各漁場における水温（2m層）の推移

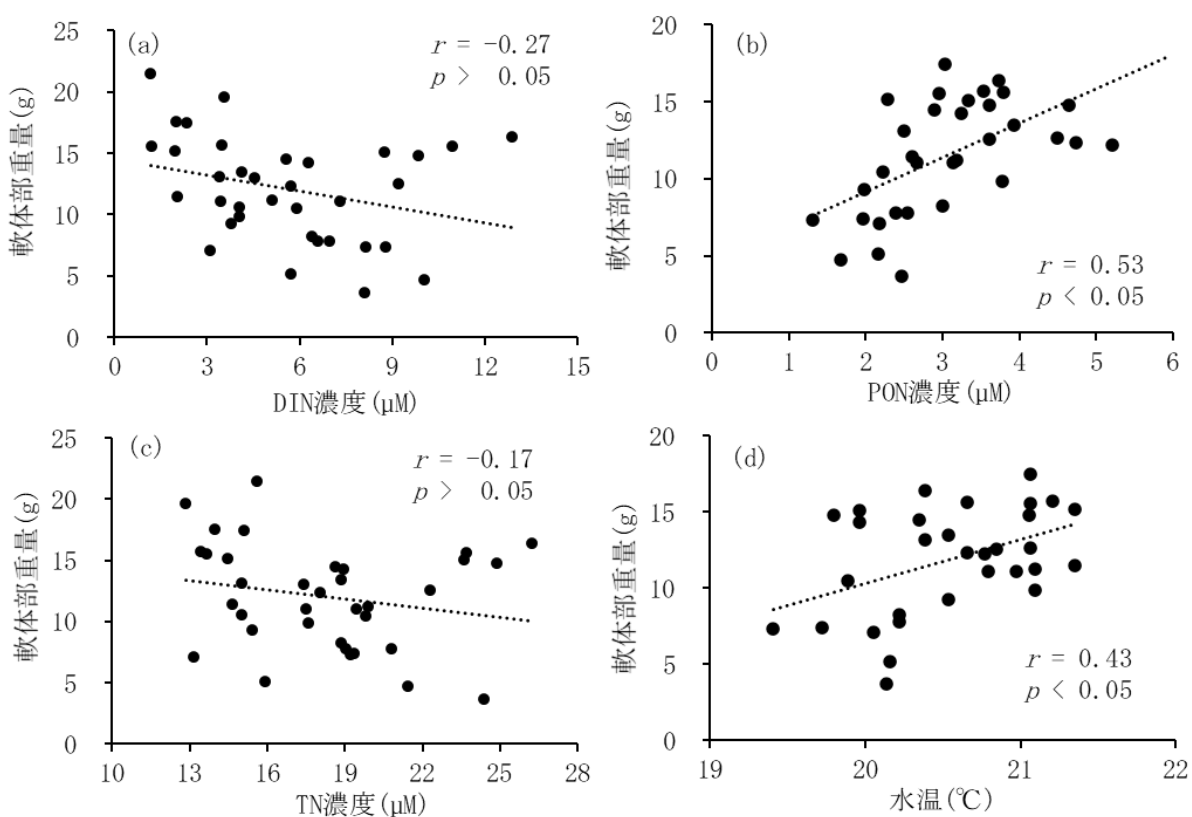


図6 形態別窒素濃度（9～11月）、水温（10～11月）と軟体部重量（12月）の関係

(a) DIN, (b) PON, (c) TN, (d) 水温

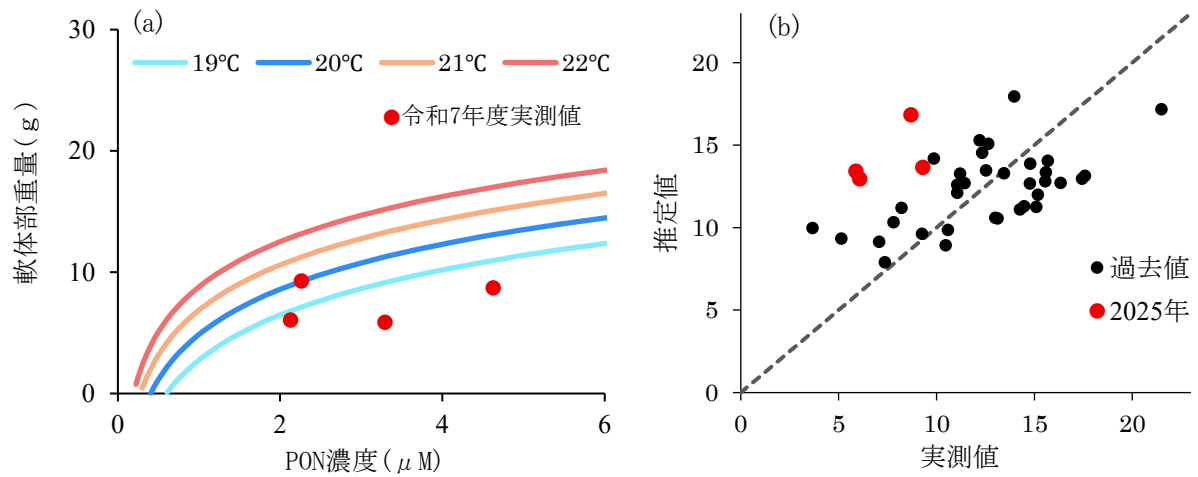


図7 12月の軟体部重量の重回帰モデル
(a) 水温別成長予測モデル, (b) 推定値と実測値

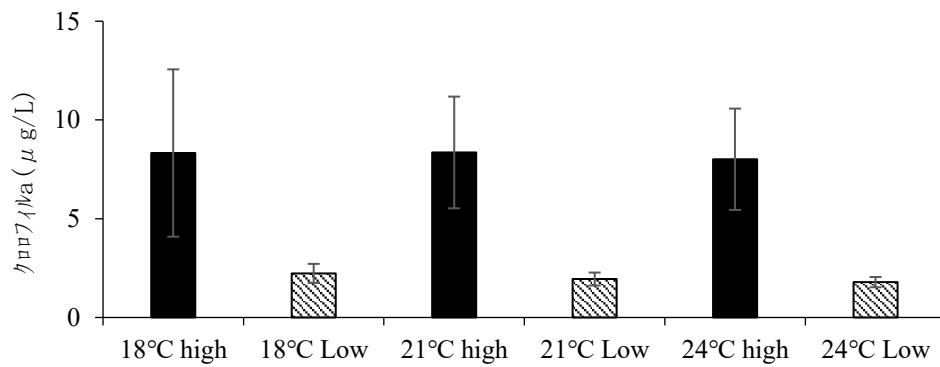


図8 試験区ごとの平均クロロフィル a 濃度

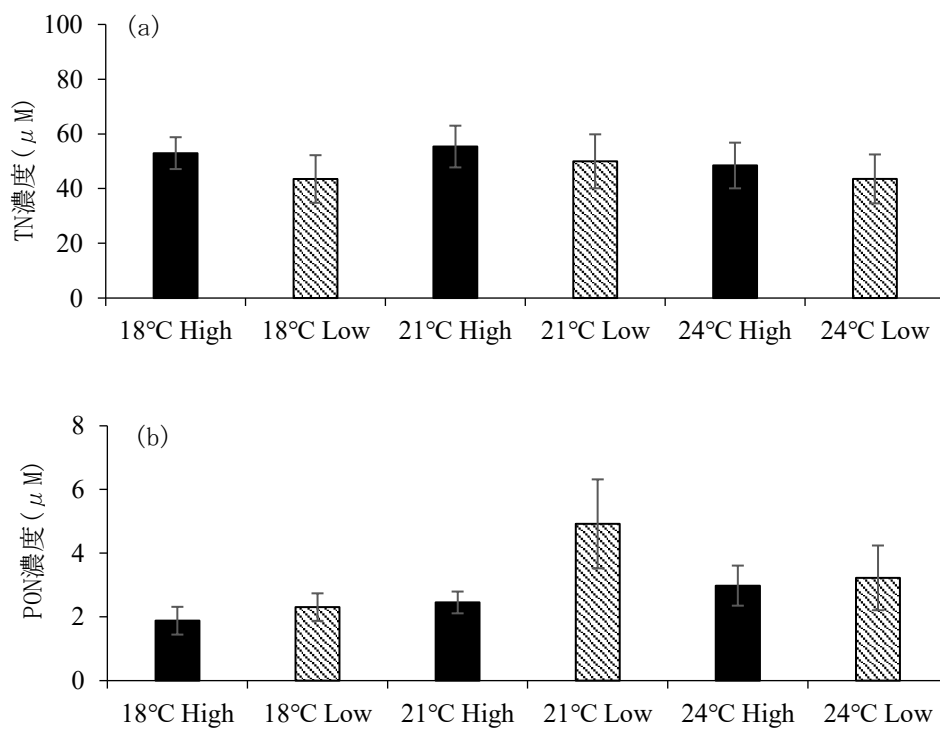


図9 試験区ごとの(a)平均 TN 濃度, (b)平均 PON 濃度

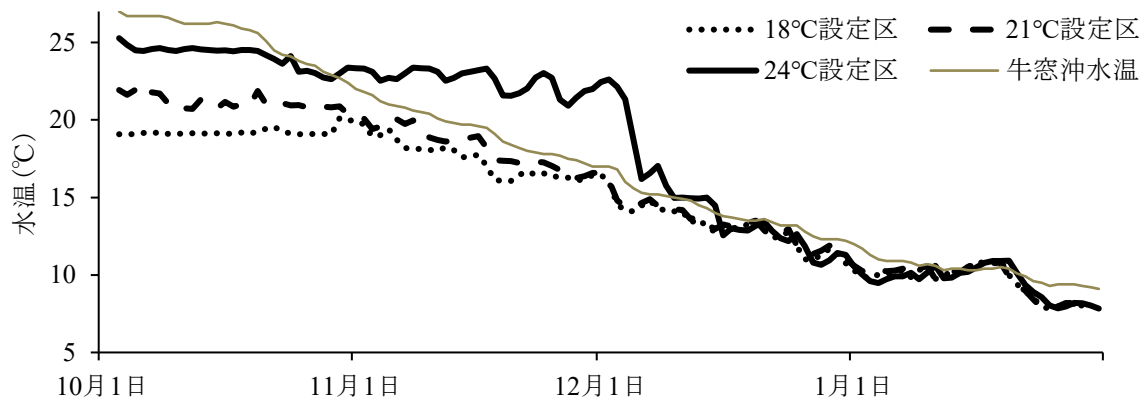


図 10 設定区ごとの水温の推移

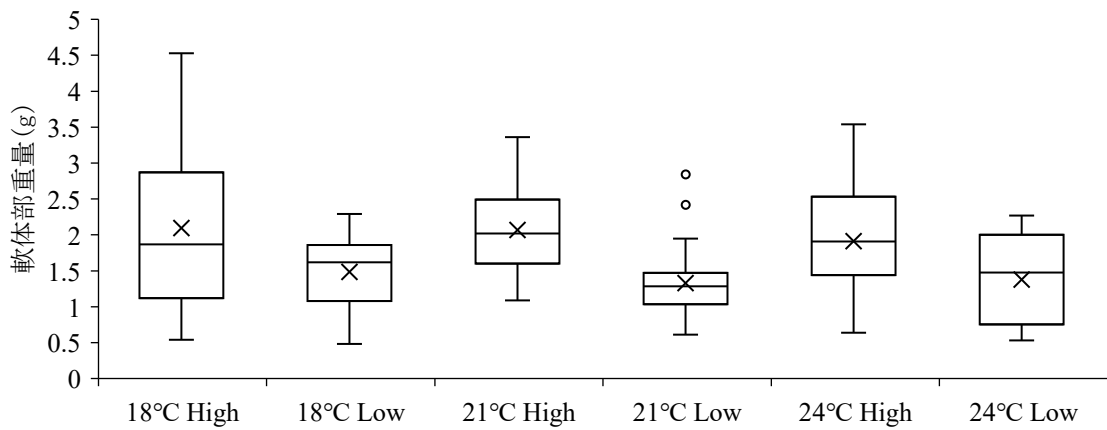


図 11 試験区ごとの軟体部重量の比較

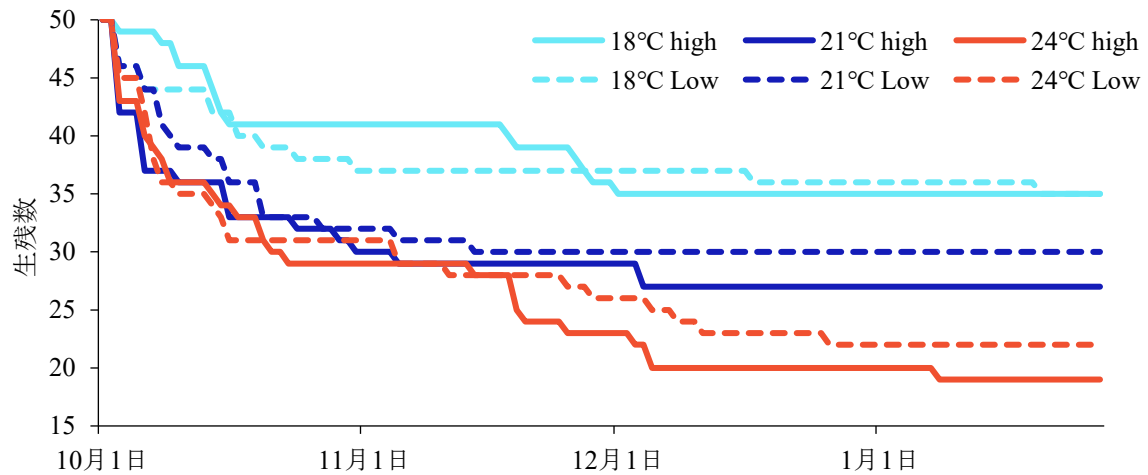


図 12 試験区ごとの生残数の推移

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、様々な生態系機能として産業上重要な魚介類の産卵場や稚仔期の生息場、あるいは餌生物供給の場などの機能を有している。特に最近では、気候変動の要因のひとつである温室効果ガスの二酸化炭素を吸収貯留するブルーカーボンの機能も注目されている。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環境要因のひとつは海水中の栄養塩等である。栄養塩濃度の低下は、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、栄養塩等の環境が藻場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、海水中の栄養塩等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、栄養塩等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栄養塩等の水質環境が藻場の現存量及び維持に与える影響評価、②栄養塩低下が藻場の磯根生物に及ぼす影響評価の2つを大きな柱としている。

本年は、①栄養塩等の水質環境が藻場の現存量及び維持に与える影響評価として、温帯性のホンダワラ属海藻と亜熱帯性ホンダワラ属海藻の発芽が栄養塩濃度により受ける影響を評価するための実験を行った。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したアワビへの影響を評価した。

【方法】

①栄養塩等の水質環境が藻場の現存量及び維持に与える影響評価

本研究では、温帯性ホンダワラ属褐藻アカモクおよび亜熱帯性ホンダワラ属ヒイラギモクを対象として、栄養塩濃度の違いが発芽に及ぼす影響を比較した。まずアカモクについて、山口県周防大島町屋代島沿岸において2025年5月に成熟藻体を採集した。採集した藻体は屋外に設置した2トン水槽へ搬入し、実験に供するまでの間、屋外から取水した砂ろ過海水を連続的に掛け流し畜養管理を行った。畜養期間中は藻体の成熟状況を観察し、生殖器床表面に放卵が確認された個体を選別した（図1）。

放卵が確認された生殖器床を有する藻体を選別し、90μm および 400μm の異なるサイズの網を段階的に用いて卵を選択的に回収した。これにより大型の夾雑物や小型の珪藻を除去し発芽実験

に供する卵を精製した。採取した卵はスポイトを用いて、各実験区に設置した基質ブロック上へ播種した（図 2-A）。実験区は 30 リットル容量のパンライト水槽にろ過海水を満たして作製し、栄養塩条件として窒素添加区、天然海水区、低窒素区の 3 区を設定した。各区の溶存無機窒素 (DIN) 濃度は、窒素添加区で $37.8\mu\text{M}$ 、天然海水区で $4.8\mu\text{M}$ 、低窒素区で $1.1\mu\text{M}$ と設定した。すべての実験区は止水条件下で管理し、培養期間中の水交換は行わなかった。3 基のパンライト水槽は屋外の 2 トン水槽内に設置し、水槽周囲に砂ろ過海水を掛け流すことで間接的に水温を制御した。これにより、各実験区の水温は地先海域の天然環境とほぼ同等に維持された。光条件は屋外自然光とし、雨水除けの透明なアクリル板を設置したのみで、特別な遮光操作は行わなかった。培養は数週間継続し、その後、各基質ブロック上に形成された発芽体数を実体顕微鏡下で計数した。発芽数はブロック表面 1cm^2 当たりの個体数として算出した（図 2-B）。

次に、亜熱帯性ホンダワラ属ヒイラギモクについて同様の実験を行った。今後の気候変動による海水温の上昇と瀬戸内海に生じている低栄養塩が与える影響を調べるため、現在の瀬戸内海よりも南方域に生育しているヒイラギモクを選定した。ヒイラギモク成熟藻体は愛媛県愛南町沿岸において 8 月に採集した。採集後は研究室へ持ち帰り、生殖器床から卵を放出させた後、アカモクと同様に $90\mu\text{m}$ および $400\mu\text{m}$ の異なるメッシュサイズの網を用いて卵を選択的に採取した。その後の培養管理はアカモクと同様である。また、ヒイラギモクは亜熱帯性種であるため、研究所地先水温が生育に与える影響を考慮した。培養は数週間継続し、その後、各基質ブロック上に形成された発芽体数を計数した。発芽数はブロック表面 1cm^2 当たりの個体数として求め、栄養塩濃度条件の違いが両種の初期発芽に与える影響を比較評価した。

②一次生産を介した植食動物への影響評価

本実験では、山口県周防大島町沿岸で採取した褐藻クロメを用い、窒素含有量の異なる海藻クロメ餌料を作出し、クロアワビ稚貝及び幼貝に対する給餌試験を行った。

クロメは 30L 容量のパンライト水槽に収容し、止水の天然ろ過海水環境下で培養した。処理区は 2 区設定し、ひとつは栄養塩を添加しない窒素欠乏条件で培養することで低窒素含有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た高栄養塩条件で培養し、高窒素を含有するクロメ餌料を作出した。培養期間中の水温は 20°C に維持し、水質悪化を防ぐため水替えは 1 週間に 1 回の頻度で行った。照明条件は明期 12 時間、暗期 12 時間 (12L:12D) の周期とし、光環境を一定に保った。

このようにして作出した窒素含有量の異なるクロメ餌料をクロアワビ稚貝・稚貝に給餌した。クロアワビ稚貝・幼貝は、窒素添加区、天然海水区、窒素欠乏区の 3 区にそれぞれ 12 個体ずつ、合計 36 個体を供試した。実験結果の成長指標として殻の縦横のサイズ及び湿重量を測定し記録した（図 3）。これらの測定値をもとに、栄養塩環境により影響を受けた海藻餌料中の窒素含有量の違いがクロアワビの成長に及ぼす影響を比較評価した。

【結果】

①栄養塩等の水質環境が藻場の現存量及び維持に与える影響評価

異なる栄養塩濃度条件下において、瀬戸内海に多く分布する温帯性ホンダワラ属アカモクの卵を発芽させた結果、ブロック上 1cm^2 当たりの発芽数は天然海水区で最も多く、平均 79（標準偏差 ± 50 ）であった。次いで窒素添加区が 61（標準偏差 ± 23 ）、低栄養塩区が 44（標準偏差 ± 27 ）

であった（図 4）。天然海水区と窒素添加区の間では、天然海水区の発芽数がやや多い傾向を示したものの、有意差は認められなかった。一方、低栄養塩区の発芽数は天然海水区と比較して有意に低く、低栄養塩条件が温帯性ホンダワラ類の発芽数に影響を及ぼすことが示唆された。

次に、亜熱帯性ホンダワラ属ヒイラギモクにおいて同様の実験を行った結果、ブロック上の 1 cm²あたりの発芽数は天然海水区で 28（標準偏差±9）、低栄養塩区で 25（標準偏差±10）、窒素添加区で 14（標準偏差±8）であった（図 5）。窒素添加区の発芽数は他の実験区と比較して有意に少なかった。一方、低栄養塩区と天然海水区の間には有意差は認められず、亜熱帯性ホンダワラ類では、貧栄養環境下でも発芽が大きく阻害されない可能性が示唆された。

以上より、温帯性種であるアカモクでは低栄養塩条件が発芽数の減少に関与する一方、亜熱帯性種であるヒイラギモクでは低栄養塩の影響が比較的小さいことが示された。ただし、本結果は予備実験段階のものであり、サンプルの採取時期や藻体の成熟度の違いにより傾向が変動し、発芽数には比較的大きなばらつきが認められた。今後はサンプル数を増やすとともに、次年度も同様の条件で実験を実施し、結果の再現性および種間差の妥当性について検証を進める予定である。

②一次生産を介した植食動物への影響評価

本実験では、含有窒素量の異なるクロメ海藻を餌料としてクロアワビ稚貝に給餌し、その成長を比較した。その結果、湿重量ならびに殻の縦横長の成長率の平均値は、窒素添加区および天然海水区で高い傾向を示し、窒素欠乏区では低い傾向が認められた。しかしながら、各試験区内で個体差が大きく、統計的に有意な差は確認されなかった（図 6）。これらの結果は、貧栄養条件下のクロメは窒素含量が低下し、餌料としての質が低下することで、アワビ稚貝の成長に影響を及ぼす可能性を示唆した。

次に、クロアワビ幼貝に対して同様に異なる窒素含量のクロメを給餌した結果、湿重量および殻の縦横長の成長率はいずれの試験区においてもばらつきが大きく、窒素添加区、天然海水区、窒素欠乏区の間で有意な差は認められなかった（図 7）。給餌量についても計測を試みたが、クロアワビは海藻を削り取って摂食するため海藻片が飛散し、厳密な摂餌量の把握は困難であった。それでも測定できた範囲では給餌量に大きな差は確認されなかった。

稚貝に比べ幼貝で成長差が明瞭に現れなかった要因として、稚貝に比べて幼貝は舌歯が発達しており、餌海藻中の窒素量（アワビにとっての栄養）が低い場合には摂食量を増やすことで栄養不足を補償できる可能性が考えられる。すなわち、体サイズが大きくなることで不足分を多食によって補えるため、幼貝よりも稚貝の方が餌料中の窒素含量の影響を受けやすいと推察された。さらに、藻場の減少が指摘される瀬戸内海において、貧栄養化により磯根生物の餌要求量が増大すれば、藻場への摂食圧が高まり、藻場衰退を加速させる可能性も示唆された。本実験は次年度も継続し、より詳細な検討を行う予定である。

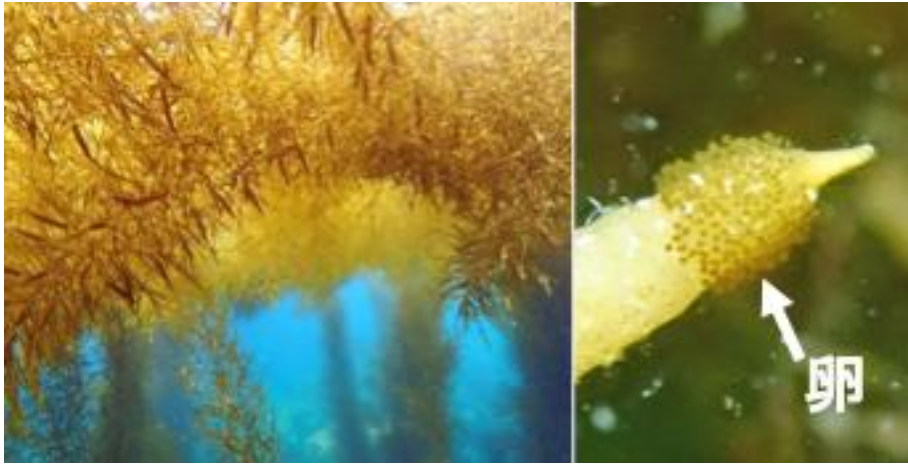


図1 温帯性ホンダワラ属アカモクの藻体と生殖器床上の卵

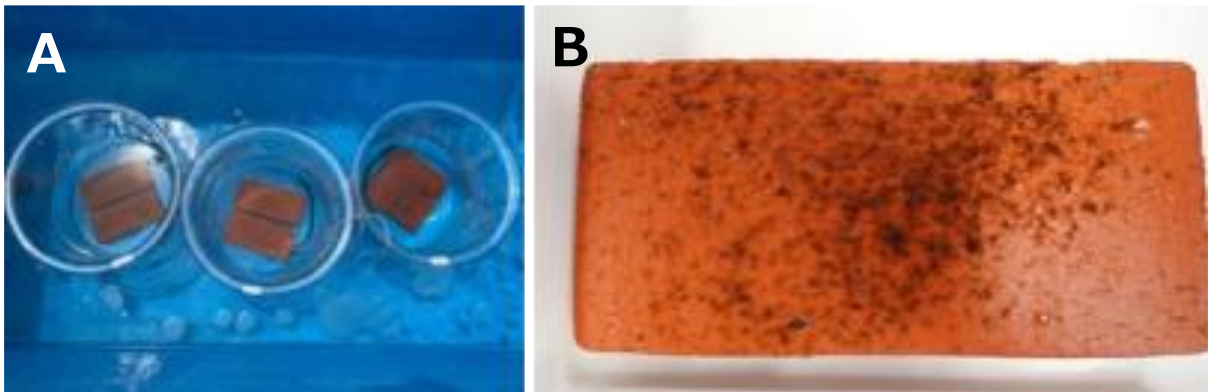


図2 異なる栄養塩濃度下での発芽実験 (A) と、ブロック上に発芽したホンダワラ (B)。



図3 アワビ稚貝のプラスチックカップを使用した給餌試験とサイズ計測のイメージ

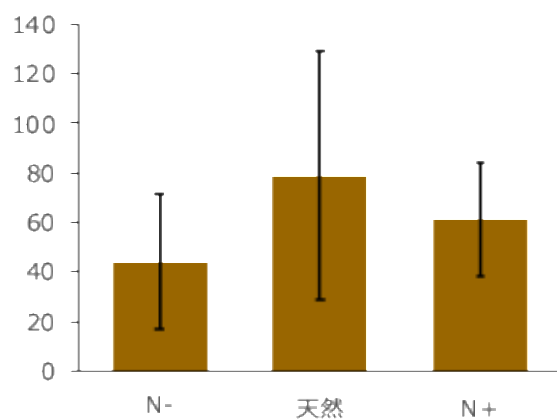


図 4 ブロック上 1cm² 内のアカモク卵の発芽数

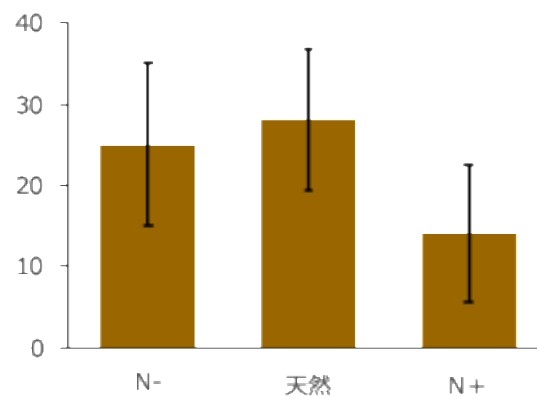


図 5 ブロック上 1cm² 内のヒイラギモク卵の発芽数

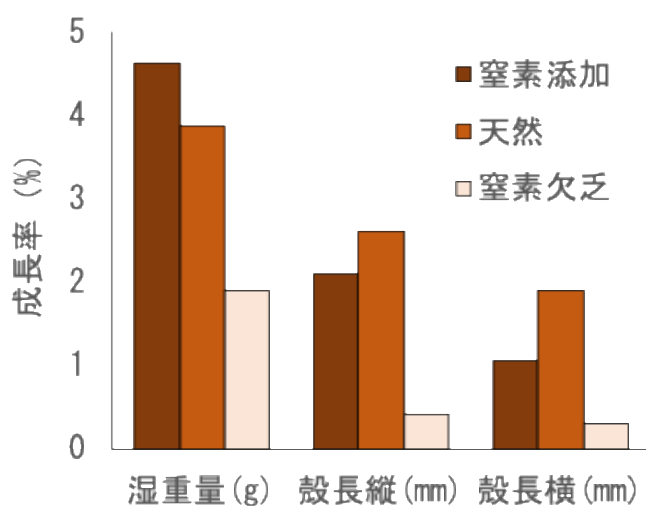


図 6 クロアワビ稚貝における異なる窒素含有海藻を餌とした成長率

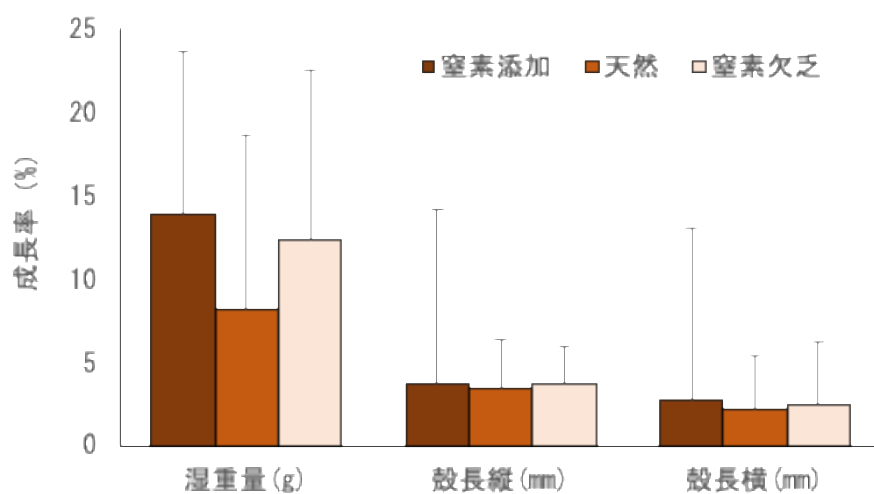


図 7 クロアワビ幼貝における異なる窒素含有海藻を餌とした成長率

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，その餌となりえる植物プランクトンの種組成が変化していることが考えられる（Nishikawa et al. 2010）。しかし，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科学的な知見が乏しく，植物プランクトン種組成の変化が瀬戸内海の現場海域においてどのように動物プランクトンへ影響しているのかは不明である。

珪藻類は，瀬戸内海で最も優占する植物プランクトン群である（帰山ら, 2019）。珪藻類の細胞は，その種ごとに異なるサイズと形状をもつため，動物プランクトンの摂餌性に影響している可能性がある。本研究では，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おこない，各種植物プランクトンに対する摂餌応答等を評価する。

【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。2025 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，カラヌスを全 142 個体入手でき，そのうち成体（CVI期）と幼生（<CV期）はそれぞれ 91 個体，51 個体であった。

本試験ではカラヌスの飼育水温を 17 °C とした。これは，播磨灘におけるカラヌスの出現時期の現場水温に合わせて，昨年度の飼育時（20 °C）よりも低い条件に設定した。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 μm 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。外側の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 17 °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。カラヌスの成体飼育時には，市販の珪藻 *Thalassiosira weissflogii* 濃縮液（Reed Mariculture, SJ, USA）およびバイオクロミスパウダー（クロレラ工業，東京，日本）を餌として使用した。珪藻 *T. weissflogii* とバイオ

クロミスパウダーは、それぞれ 5 万–10 万 cells/mL および 1 万–10 万 cells/mL となるように毎日給餌した。カラヌスの幼生に対しては、珪藻 *Chaetoceros neogracile* (25 万 cells/mL) とミドリムシ *Eutreptiella eupharyngea* (1 万 cells/mL) を主軸とする餌料系列で飼育した。バイオクロミスパウダーはごく少量 (100 cells/mL) 添加した。珪藻 *T. weissflogii* については、ノープリウス期の幼生の飼育時には給餌せず、コペポダイト期の幼生の飼育時に給餌した (1 万 cells/mL)。水替えは 3–4 日に 1 回おこなった。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) パラカラヌスの摂餌選択性の評価

当研究室では昨年度までの研究において、*Paracalanus orientalis* (パラカラヌス) の室内飼育系を確立している。パラカラヌスの摂餌選択性を評価するために、本種を試験用植物プランクトン種の混在した環境で飼育した。本飼育実験では、パラカラヌスの室内飼育系により得られた成体メスの個体を対象におこなった。パラカラヌスに与える植物プランクトンとして、瀬戸内海に優占する珪藻の *Skeletonema marinoi-dohrnii* comple, *Chaetoceros socialis*, および *Leptocylindrus danicus* を用意した。各種珪藻の給餌密度は、一般的に赤潮とよばれる密度 (10×10^3 cells/mL)、およびそれより低い密度 (1×10^3 cells/ml) の 2 条件を設けた。3 種の珪藻は混在させた群集のかたちで、パラカラヌス 1 個体とともに飼育水 6 mL 分の入った 10 mL 容バイアル瓶に封入した。ブランクとして、パラカラヌスの非存在下で植物プランクトンのみを封入したバイアル瓶を用意した。パラカラヌスはローテーターを用いて穏やかに攪拌しながら一定時間飼育した。給餌前後のバイアル瓶内の残餌量を測定し、パラカラヌス個体ごとの濾水速度・摂餌速度を算出した (Frost, 1972)。

【結果】

(1) カラヌスの飼育成績

飼育開始時に幼生 (>C4 期および C5 期) だった 51 個体のうち、16 個体が成体期のオスに、4 個体が成体期のメスに成長し、飼育 6 日目にはオスが 44 個体、メスが 67 個体となっていた (表 1)。飼育 6 日目における成体の性比 (オス:メス) はおよそ 2:3 であり、成体メスが成体オスとの交配によって次世代の受精卵を産むには十分な環境となっていた。しかし、飼育 10 日目には成体および幼生のすべての個体が死亡していた。

カラヌスの卵は、成体の全滅する前にその飼育水槽から計 1006 粒採集できた。その卵から孵化したノープリウス幼生 (NI) は計 396 個体得られ、結果的な孵化率は 39%となった。本飼育中に得られた NI 幼生のうち、177 個体を対象に飼育を継続させた。その結果、コペポダイト期 (CI) に至った幼生は計 145 個体確認されており、NI→CI変態率は 82%となった。一方、CI 幼生から成体期 (CVI) に至った個体は 1 個体しか確認されておらず、CI→CVI変態率は非常に低かった (1%) (図 1)。

今年度に適用したカラヌスの飼育法については、天然由来の個体の生残性の悪さ (表 1)、および次世代における成体への最終的な変態率の低さ (図 1) を考慮すると、カラヌスにとって適したものではなかったと考えられる。今年度は、昨年度に利用しなかった市販餌料 (*T. weissflogii* 濃縮液およびバイオクロミスパウダー) を併用した。市販餌料は主に死細胞であり、カラヌスの飼育水槽内において細胞同士の接着した細胞塊が多く残存していた。また、両細胞の添加されたカラ

ヌス飼育水の水質は目視レベルで悪く、表層には細胞由来と思われるオイリーな汚れが確認された。市販餌料の *T. weissflogii* とバイオクロミスには生物における必須脂肪酸の EPA または DHA をそれぞれ多量に有している。本実験ではカラヌスに必須脂肪酸、特に DHA を十分量供給するために各餌料を利用したが、これによってカラヌスの飼育環境を著しく損ねた可能性がある。今年度よりも高いカラヌス飼育成績の得られた昨年度では、自家培養された珪藻 *Chaetoceros neogracile* およびミドリムシ *Eutreptiella eupharyngea* を併用していた。本実験でも、これらの餌を主軸とした（市販餌料をほとんど使用しない）ノープリウス幼生飼育時には、多くの個体がコペポダイト期に変態できていた（図 1）。今後のカラヌス飼育では、上述の 2 種餌料のみを用いることとする。

今年度におけるカラヌスの飼育では、最終的に得られた 1 個体の次世代成体は形態学的にオスだと判明した（図 2）。昨年度はカラヌス飼育で得られた成体の性比は極端にメスへ偏っていたため（オス/メス = 2 個体/134 個体）、次世代オスの出現は特筆すべき結果の一つである。今年度は餌種を変えた他にも、カラヌスの飼育水温を 17 度まで下げた。カラヌスは現場海水の水温が 20℃ を超えると再生産能を低下させることが報告されている（Uye, 1988）。今年度に設定した比較的低い水温がカラヌスの生殖生理に何らかの形で作用した可能性がある。そのため、今後のカラヌス飼育においては餌種にあわせて水温も管理する必要がある。

(2) パラカラヌスの摂餌選択性の評価

各種珪藻に対する成体メスによる摂餌速度は、その餌密度に応じて異なる傾向を示した。餌密度の高いとき (10×10^3 cells/mL), *Skeletonema* と *Chaetoceros* に対する摂餌速度は *Leptocylindrus* 摂餌時よりも有意に高かった (Dunn's test) (図 3)。*Skeletonema* と *Chaetoceros* の両者間では摂餌速度に有意差は認められなかった。一方、餌密度の低いときは (1×10^3 cells/mL), 摂餌速度は 3 種の珪藻種間で同等であった ($p > 0.05$)。

餌密度に応じたパラカラヌスの摂餌性の変化を解釈するために、濾水速度についてはまず、珪藻 3 種を合算させた植物プランクトン群集に対する値を計算することとした (図 4A)。その結果、本群集は低い密度時のほうが高い密度時よりも有意に多く濾水されていた (Mann-Whitney U test)。濾水速度は、カイアシ類が餌を完全に除去できた水の量を反映している。既報より、多くのカイアシ類は周囲の餌密度の低いときに濾水活動を積極的に起こなって効率的に餌を捕食することが知られている (Frost, 1972)。これは、本実験における植物プランクトン群集への濾水速度の結果と一致するものであった。次に、この濾水速度を各種珪藻に対する個々の濾水速度と比較した。餌密度の高いときは、*Skeletonema* または *Chaetoceros* に対する濾水速度は群集に対する結果と同等であった (図 4B)。一方、*Leptocylindrus* に対する濾水速度は群集の場合よりも極端に減少していた。この結果は、パラカラヌスが摂餌時に 3 種の混在する水を濾過する際に *Leptocylindrus* に対しては濾過しない、つまり選択的に拒絶している可能性を示唆している。*Leptocylindrus* の細胞はほかの 2 種よりも大きいサイズ、高い連鎖性を有しており、パラカラヌスの摂餌に適していないと考えられる。ところが、餌密度の低い条件における濾水速度は、どの珪藻種に対しても群集に対する結果と有意な差が認められなかった (図 4C)。パラカラヌスの濾水能が高くなる餌密度の場合は、餌種ごとの摂餌選択性がみられにくくなることが判明した。本実験では、興味深いことに、*Chaetoceros* に対しては 3 種のなかで唯一、群集よりも高い濾水速度を示した。*Chaetoceros* 属のような棘毛の発達した細胞は、細胞塊形成時に低密度となって水中で高抵抗性を示すことが報告されている (Laurenceau-Cornec et al., 2015)。そのため、本実験における *C. socialis* の群体粒子

は、パラカラスの捕食時に作り出される局所的な摂餌流に流されやすかった可能性がある。*C. socialis* は、本実験で供試した珪藻 3 種のなかでもパラカラスによって比較的摂餌されやすいものであるかもしれない。

瀬戸内海における植物プランクトンの長期観測によると (Nishikawa et al. 2010; 帰山ら, 2019), 近年の瀬戸内海では *Skeletonema* 属に代わって *Chaetoceros* 属が優占する傾向にある。本実験では、パラカラスの成体メスは赤潮発生時・非発生時を想定した細胞密度の *Skeletonema* と *Chaetoceros* に対して摂餌選択性を示さないことが判明した (図 3, 4)。本実験結果を考慮すると、瀬戸内海に生息するパラカラスは優占珪藻種の変化の前後で同程度の摂餌量を達成できていると考えられる。瀬戸内海における *Paracalanus* 属の現存量は長期にわたって一定の水準で推移しており、*Calanus* 属などの他種カイアシ類と比べると比較的安定している (Yoneda et al., 2022)。これは、パラカラスの *Skeletonema* と *Chaetoceros* に対する摂餌性に大差がないことが関係しているかもしれない。一方で、珪藻はその種によって脂肪酸などの栄養組成が異なることが報告されている (Dunstan et al., 1993)。瀬戸内海におけるカイアシ類および珪藻種の関係性を正しく理解するには、各種珪藻を餌としたカイアシ類の飼育成績まで評価する必要がある。また、近年の瀬戸内海において減少傾向にあるカラナス (Yoneda et al., 2022) に対しても本実験と同様の試験をおこない、珪藻種に対する摂餌性をパラカラスと比べる必要がある。

【参考文献】

- Dunstan, G. A., Volkman, J. K., Barrett, S. M., Leroi, J-M, Jeffrey, S. W., 1993. Essential polyunsaturated fatty acids from 14 species of diatom (Bacillariophyceae). *Phytochemistry* 35, 155–161.
- 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.
- 帰山秀樹, 本田恵二, 長谷川尋士, 宮川昌志, 吉松定昭, 多田邦尚, 2019. 播磨灘南部における植物プランクトン群集構造の長期変動と 増殖特性の関係 (*Skeletonema* 属を例に) . 沿岸海洋研究 56, 79–85.
- Nishikawa, R. G., Wagner, M. M., Teegarden, G. J., Boudreau, C. A., Durbin, E. G., 2001. Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts* 33, 417–427.
- Uye, S., 1988. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory. *Hydrobiologia*, 167, 285–293.
- 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.

表 1. *Calanus sinicus* の天然個体の飼育成績.

発達段階	性別	個体数		
		0日目	6日目	10日目
>C4期	-	20	1	0
C5期	-	31	19	0
C6期(成体)	オス	28	44	0
	メス	63	67	0

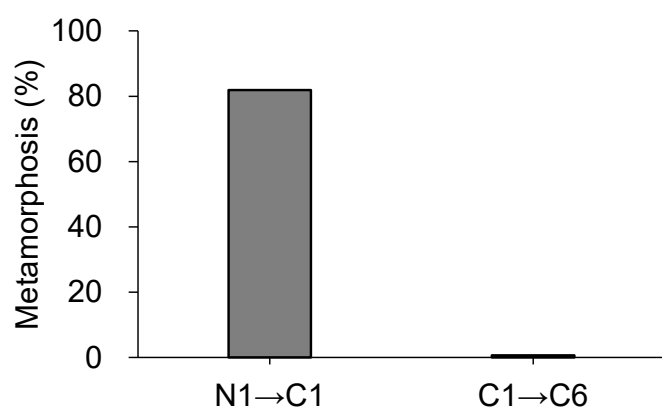


図 1. 室内飼育された *Calanus sinicus* の次世代幼生の各発達段階における変態率. N1, C1, および C6 はそれぞれノープリウスI期 (幼生期), コペポダイトI期 (幼生期), およびコペポダイトVI期 (成体期) を示している。

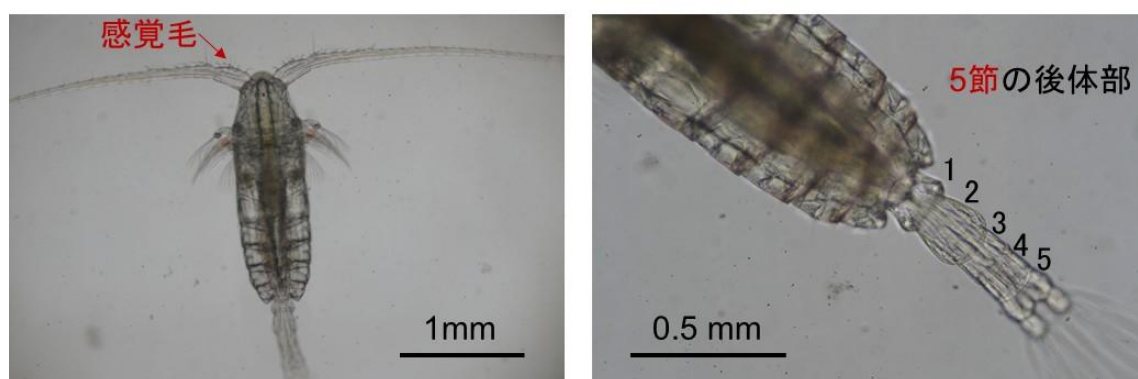


図 2. 室内飼育によって得られた次世代の *Calanus sinicus* 成体。本個体は形態的特徴からオスであると判別された。

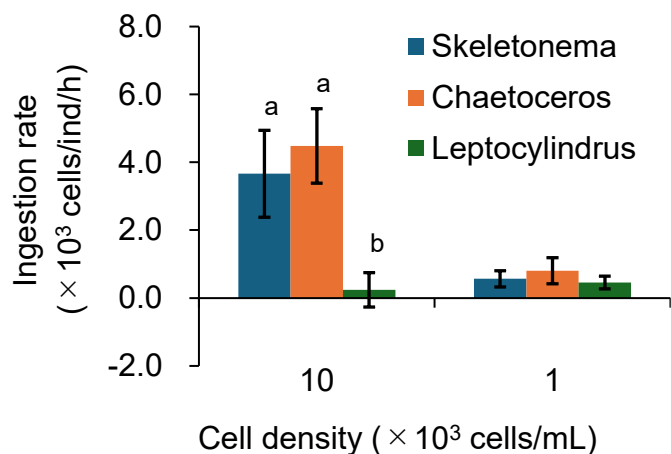


図 3. 細胞密度の異なる各種珪藻に対する *Paracalanus orientalis* の摂餌速度.

棒グラフ上部に記載のアルファベットは、各密度下における珪藻 3 種の間で有意差の認められたことを示す (Dunn's test, $a > b, p < 0.05$)。

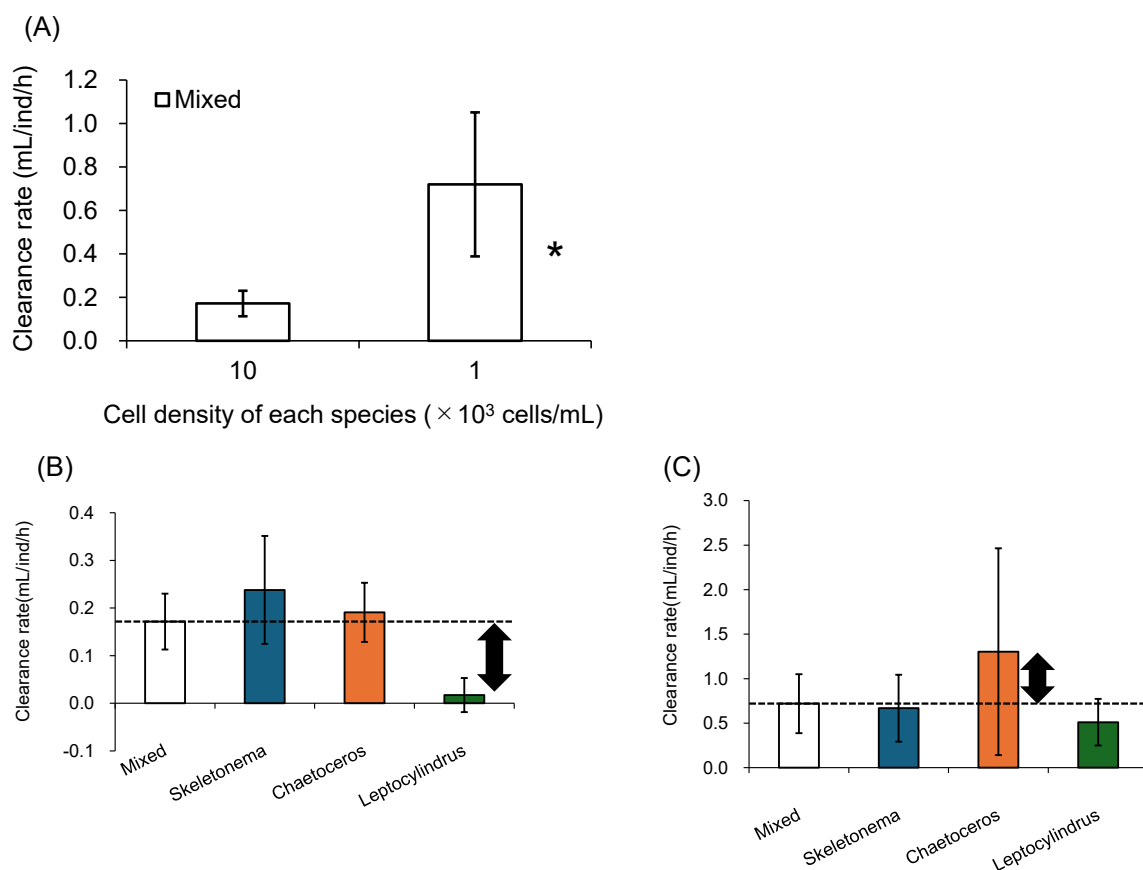


図 4. 植物プランクトン群集または各種珪藻に対する *Paracalanus orientalis* の濾水速度.

(A) 珪藻 3 種を合算させた群集としての濾水速度の比較. 濾水速度は細胞密度条件の間で有意差が認められた (Mann-Whitney U test, $p < 0.05$). (B) 10×10^3 cells/mL の細胞密度下における珪藻 3 種の合算値, または各種珪藻に対する濾水速度の比較. (C) 1×10^3 cells/mL の細胞密度下における珪藻 3 種の合算値, または各種珪藻に対する濾水速度の比較. 図中の矢印は、対照の珪藻 3 種の合算値に対して極端に異なる傾向を示した箇所の差分を示している.

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、栄養塩濃度の低下に伴う海域の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

1) 瀬戸内海東部海域における植物プランクトン群集構造の解析

瀬戸内海東部海域に設けた6定点（播磨灘3定点，大阪湾2定点，紀伊水道1定点，図1）において、2020年4月～2025年3月にかけて毎月1回、計360サンプルの植物プランクトンデータを解析に供した。R言語を使って植物プランクトン群集のクラスター解析を行い、各クラスターグループの指標種を算出（Dufrene & Legendre 1997）するとともに、RDA解析を行った。

2) *Calanus sinicus* の正確なバイオマス推定方法の検討

Calanus sinicus は、イカナゴやカタクチイワシなどの餌生物として最も重要なカイアシ類で、出現個体密度は小さいものの、瀬戸内海で出現するカイアシ類の中では体サイズが大きく、バイオマスでは優占種となっている（Nishikawa et al. 2023）。そのため、そのバイオマスを推定するためには、1個体当たりのバイオマスを正確に見積もる必要がある。ここでは、2012年4月～2021年12月の毎月月上旬に播磨灘3定点において丸特ネット（目合335 μ m）を用いて採集し、2～3%ホルマリンで固定したネットサンプルのうち、*C. sinicus* の出現が多かった月のサンプルを分析に供した。*C. sinicus* の出現が見られた水温8.0～21.8 $^{\circ}$ Cの範囲において、5段階の異なる水温下で出現したコペポディッド（CI～CV）および成体（CVI）を发育段階別に前体部長を各10個体以上測定し、各发育段階における水温と体長の関係式を求めた。

(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-高次生態系モデルの構築に向け, 本年度は昨年度に構築した低次-高次生態系モデルのプロトタイプを播磨灘海域に適用した。播磨灘海域への適用にあたっては, 生物機能群を 30 群に区分し, 外部変数 (水温, 栄養塩濃度) の時系列変化を入力条件として, 各機能群の動態を解析した。解析期間は 1975 年から 2019 年とした。モデルの検証は, 既往知見および観測値とモデル計算結果との比較により実施した。本解析では, 長期的な生態系変動に対するモデルの再現性および機能群間相互作用の妥当性を評価した。

【結果】

(1) 既往データの整理, 解析

1) 瀬戸内海東部海域における植物プランクトン群集構造の解析

瀬戸内海東部海域における植物プランクトン群集は, 7 つのクラスターグループに分けることができた (図 2)。クラスターグループ 2 および 4 は珪藻の出現細胞密度が大きく, 両グループの指標種はそれぞれ *Skeletonema*, *Leptocylindrus*, *Thalassiosira* および *Pseudo-nitzschia*, *Chaetoceros* 等であった。また, クラスターグループ 3 は *Prorocentrum*, *Scrippsiella* 等の渦鞭毛藻, グループ 7 は *Chattonella ovata*, *Chattonella antiqua* 等ラフィド藻が指標種であった。それ以外のグループ 1, 5, 6 は珪藻が主体であったが, いずれの種も細胞密度が小さく, 指標種は算出できなかった。RDA 解析の結果から, 珪藻の細胞密度の大きいグループ 2 および 4 は, 低水温から高水温まで広範な水温下で出現し, 低栄養塩濃度下で出現していることが明らかとなった (図 3)。これらの解析結果は, 貧栄養化が進行した瀬戸内海東部海域における植物プランクトン群集の出現動態をよく反映した結果であると考えられた。

2) *Calanus sinicus* の正確なバイオマス推定方法の検討

C. sinicus の前体部長は, CI~CVI 期の全ての発育段階において, 出現水温との間に負の相関があり, 水温の上昇とともに有意に小さくなった (図 4)。各発育段階における前体部長と水温の関係を表 1 に示した。各発育段階の *C. sinicus* の体長は, 20℃以上の高水温期に出現する個体の体長は, 10℃以下の低水温時に比べ 11.7~24.3%小さく, 発育段階が進むほどその減少率は大きくなった。本研究から得られた各発育段階の体長-水温の関係式を用いて, *C. sinicus* の発育段階別出現

個体数の計数と出現時の水温を測定することによって、既存の体長－炭素重量換算式 (Uye 1982) を用いて、*C. sinicus* のより精度の高いバイオマス推定が可能となった。

(2) 海洋観測調査

本報告では、新たに 2025 年 1 月～2025 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。

2025 年 1 月～2025 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 6.7～96.0 個体/L、大阪湾 2 定点で 2.9～269.3 個体/L、播磨灘 3 定点で 8.0～96.8 個体/L、備讃瀬戸 2 定点で 6.7～119.0 個体/L の範囲で変動した (図 5)。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 2025 年の年平均値で 82.2～88.2% を占めた。2025 年は、平均値 (2020 年 4 月～2024 年 12 月) と比較して、これら優占 3 属の出現密度が平均を下回る定点が多かった。特に、*Microsetella* の出現密度はいずれの定点においても平均値の 1/2 程度またはそれ以下であった。また、大阪湾、紀伊水道を除く播磨灘、備讃瀬戸の定点では *Oithona* の出現密度も小さかった。

2025 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 3989～21320 個体/m³、大阪湾 2 定点で 5487～82182 個体/m³、播磨灘 3 定点で 5442～54037 個体/m³、備讃瀬戸 2 定点で 6367～86281 個体/m³ の範囲で変動した (図 6)。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。大阪湾や紀伊水道では *Oithona* 属の出現密度が高く、備讃瀬戸では *Paracalanus* 属の出現密度が高かった。

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、2025 年の各湾・灘におけるカイアシ類バイオマスは、紀伊水道 1 定点で 4.1～34.9 mgC/m³、大阪湾 2 定点で 5.4～62.4 mgC/m³、播磨灘 3 定点で 7.0～43.5 mgC/m³、備讃瀬戸 2 定点で 3.2～51.6 mgC/m³ の範囲で変動した (図 7)。2025 年は、平均値に比べて全ての定点で *C. sinicus* のバイオマスが大きく、特に備讃瀬戸ではその傾向が顕著であった。

(3) モデル解析

本年度 (R7 年度) は、昨年度 (R6 年度) に構築した播磨灘低次－高次生態系モデルのプロトタイプを基盤として、モデル構造の妥当性および複数生物機能群の再現性について包括的な検証を実施した。

本モデルは、栄養塩－植物プランクトン－動物プランクトン－プランクトン食魚類－魚食性魚類までを連結した食物網構造を有し、植物プランクトン 4 機能群、動物プランクトン 4 機能群、イカナゴを含む高次生物を含めた計 30 機能群で構成されている。また、各機能群には食物組成および水温依存性が組み込まれており、植物プランクトンについては栄養塩応答性を考慮した定式化を行っている。

まず、播磨灘生態系の定常状態を解き、栄養段階と資源量の関係に基づく Prebal 診断を行い、モデルの生態系構造の妥当性を評価した (図 8)。その結果、P/Q 比は全機能群で適切な範囲に収まり、EE 値も 1 未満となるなど、生態系ピラミッド構造として合理的な特性が確認された。また、各機能群の資源量は栄養段階の上昇に伴って対数的に減少する傾向を示し、食物網構造の整合性が確認された。

次に、1975 年から 2019 年までの水温および栄養塩 (DIN, DIP) を外部駆動力 (図 9) として非

定常シミュレーションを実施し、モデル計算値と既往の観測値、推定値、届出値との比較による検証を行った。その結果、イカナゴ資源量および漁獲量に加え、カタクチイワシ、ヒラメ、マダイ、サワラ等の中次から高次栄養段階にわたる複数魚種について、長期的な経年変動傾向を概ね再現した(図 10)。さらに、一次生産者である植物プランクトンの現存量についても再現性を確認した。相関係数および RMSPE による定量評価においても一定の再現精度が確認され、モデルによる多機能群の動態再現が可能であることが示された。

これらの結果より、R6 年度に構築したプロトタイプモデルに対し、多数の生物機能群を対象とした検証が完了し、低次生物から高次生物までを統合的に表現可能な低次－高次生態系モデルとしての妥当性が確認された。本モデルは、今後の播磨灘生態系の応答メカニズム解析および資源評価に向けた基盤モデルとして位置づけられる。

【参考文献】

- Dufrene M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecol Monogr*, 67, 345–366, 1997
- 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.
- Uye S. Length-weight relationship of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 149–158, 1982.



図1 瀬戸内海東部海域における海洋観測定点位置図

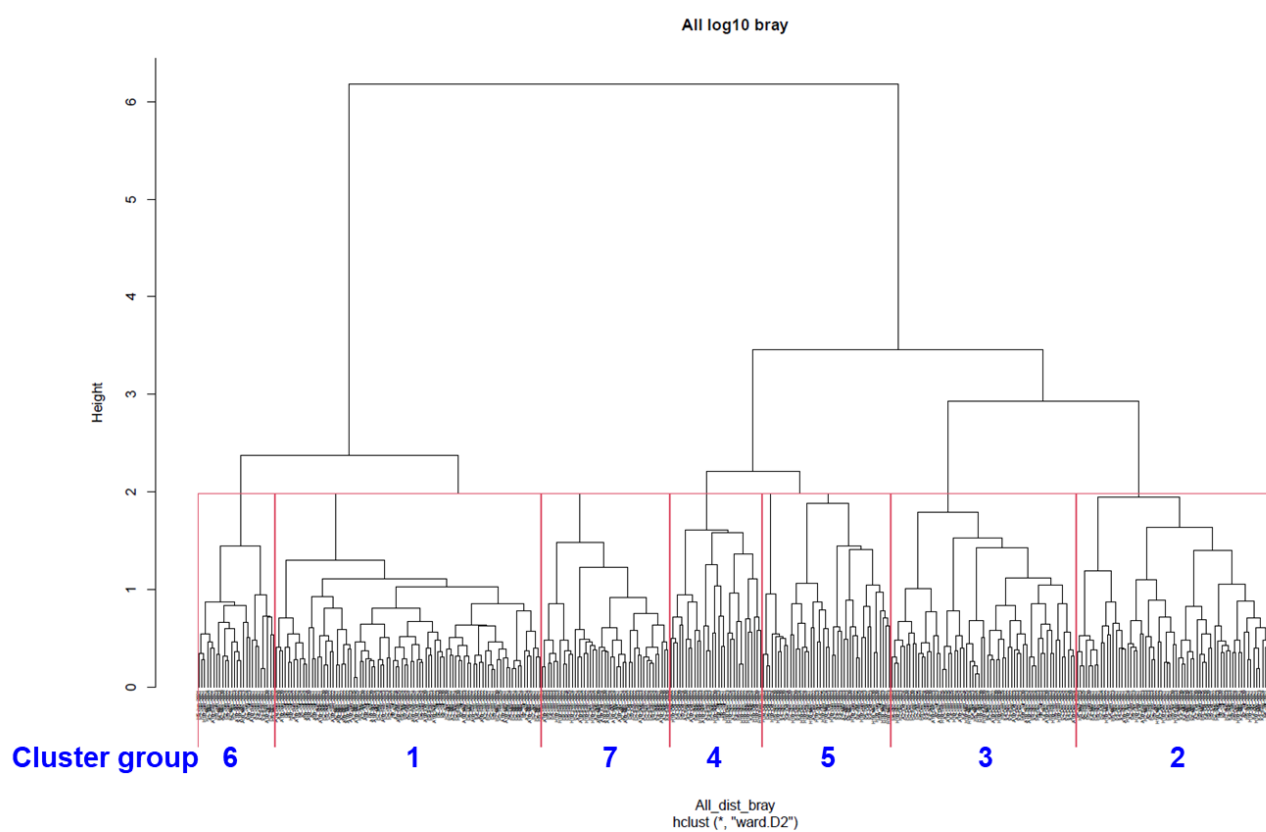


図2 瀬戸内海東部6定点における植物プランクトン群集のクラスター解析結果

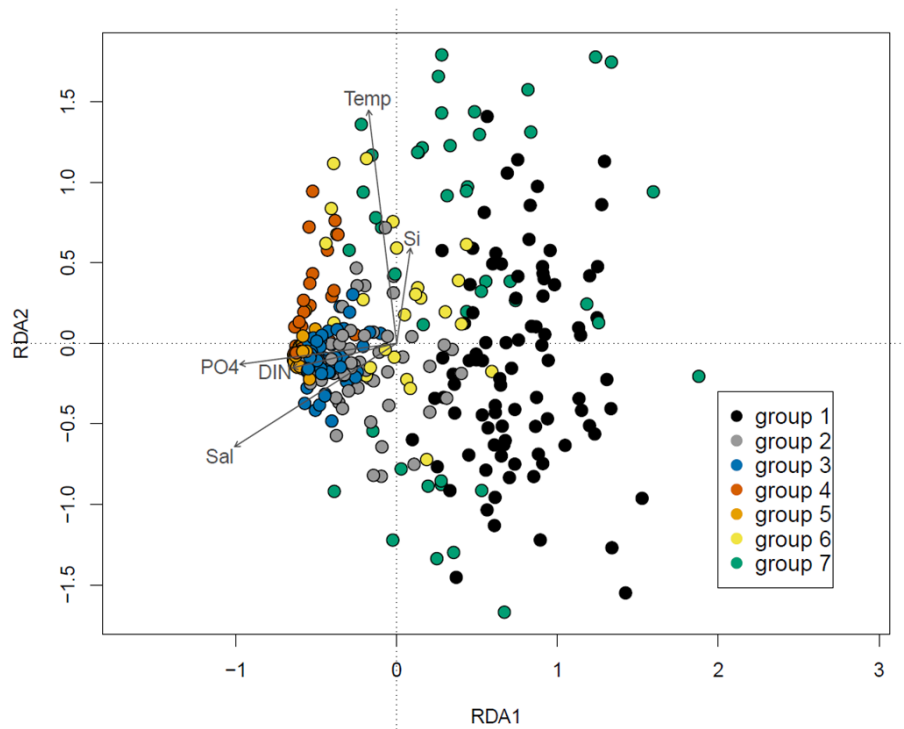


図3 瀬戸内海東部6定点における植物プランクトン群集のRDA解析結果

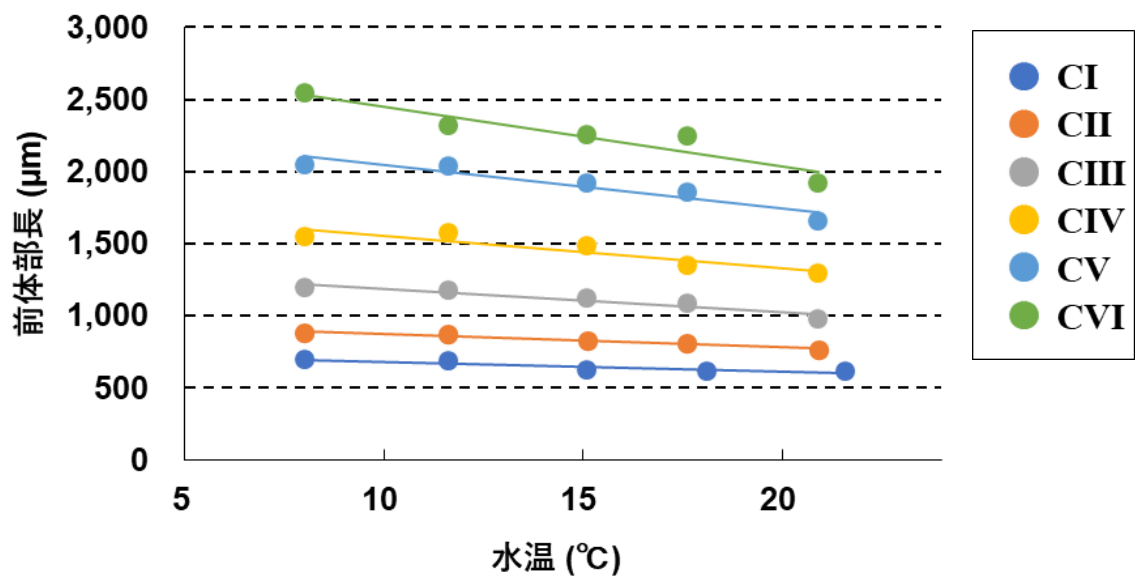


図4 *Calanus sinicus* の発育段階別前体部長－水温の関係

表 1 *Calanus sinicus* の発育段階別平均体長と水温の関係式

発育段階	水温－前体部長関係式	決定計数(r^2)
CI	$PL = 756 - 7.14 T$	0.67
CII	$PL = 970 - 9.58 T$	0.60
CIII	$PL = 1359 - 16.86 T$	0.68
CV	$PL = 1783 - 22.69 T$	0.62
CVI	$PL = 2362 - 31.04 T$	0.66
CVI♀	$PL = 2869 - 41.56 T$	0.54
CVI♂	$PL = 2999 - 43.25 T$	0.74
CVI♂	$PL = 2610 - 35.28 T$	0.73

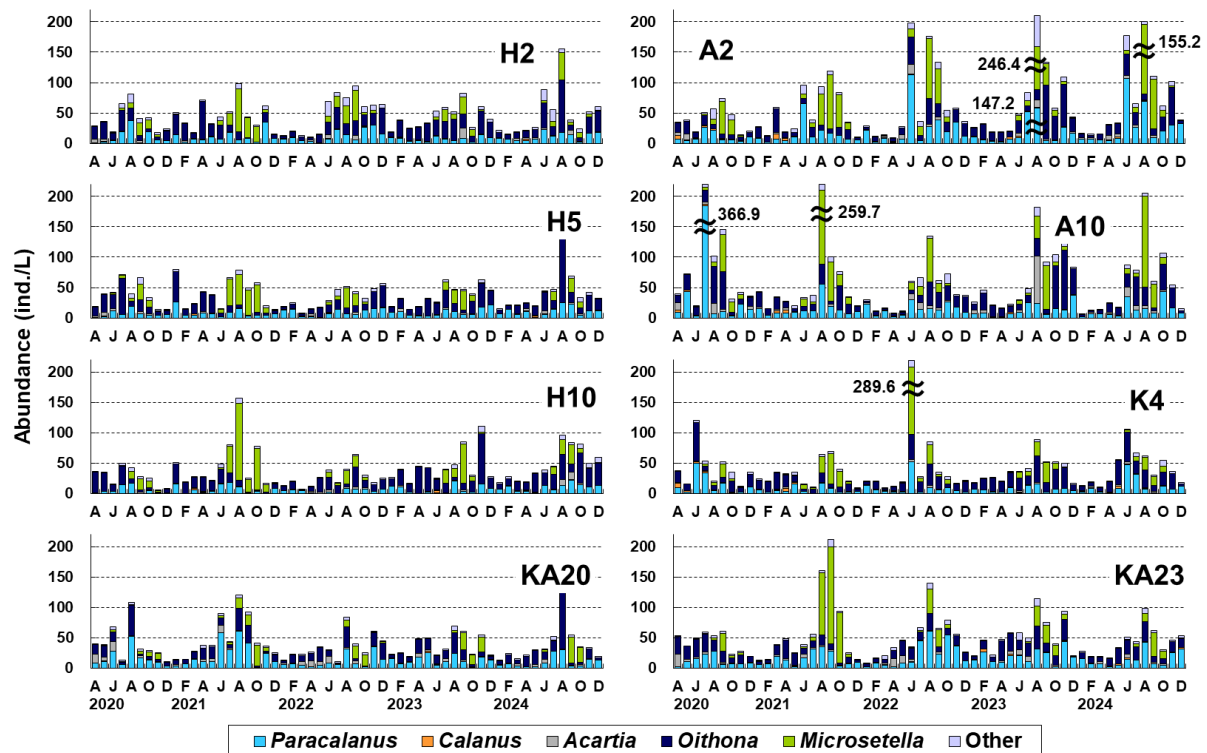


図 5 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類ノープリウス幼生の出現密度 (2020 年 4 月～2025 年 12 月)

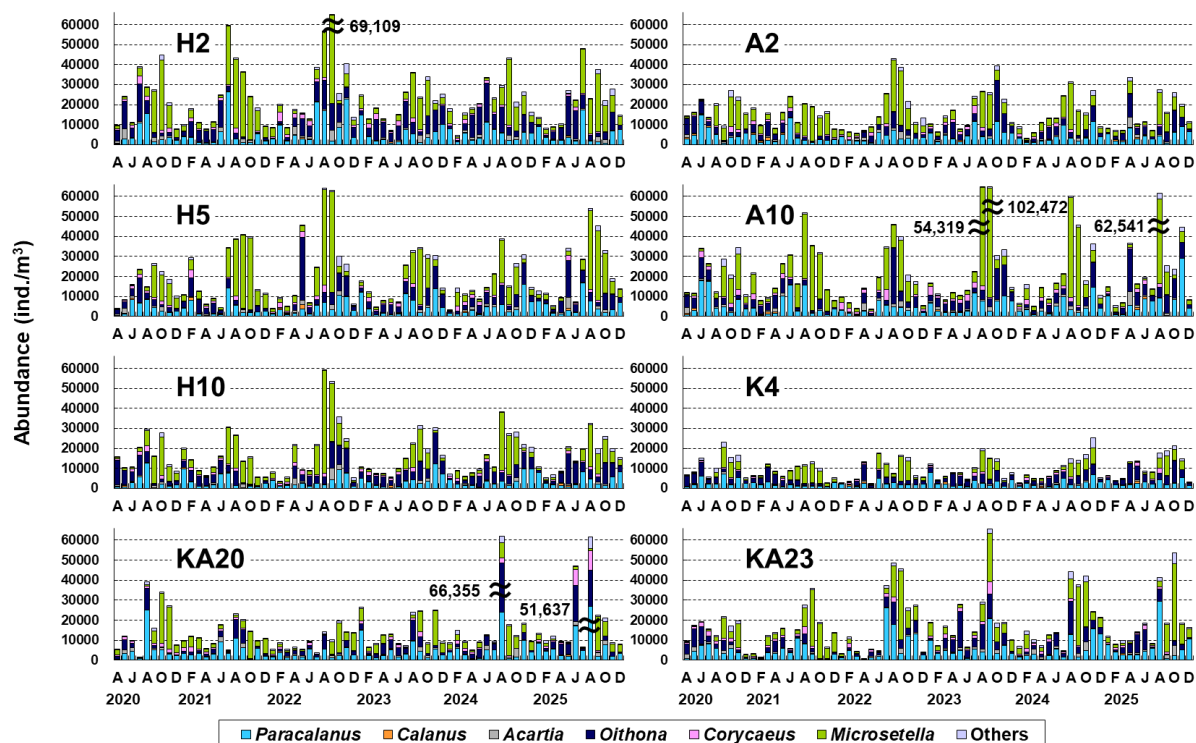


図6 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類（コペポディッド期以降）の出現密度（2020年4月～2025年12月）

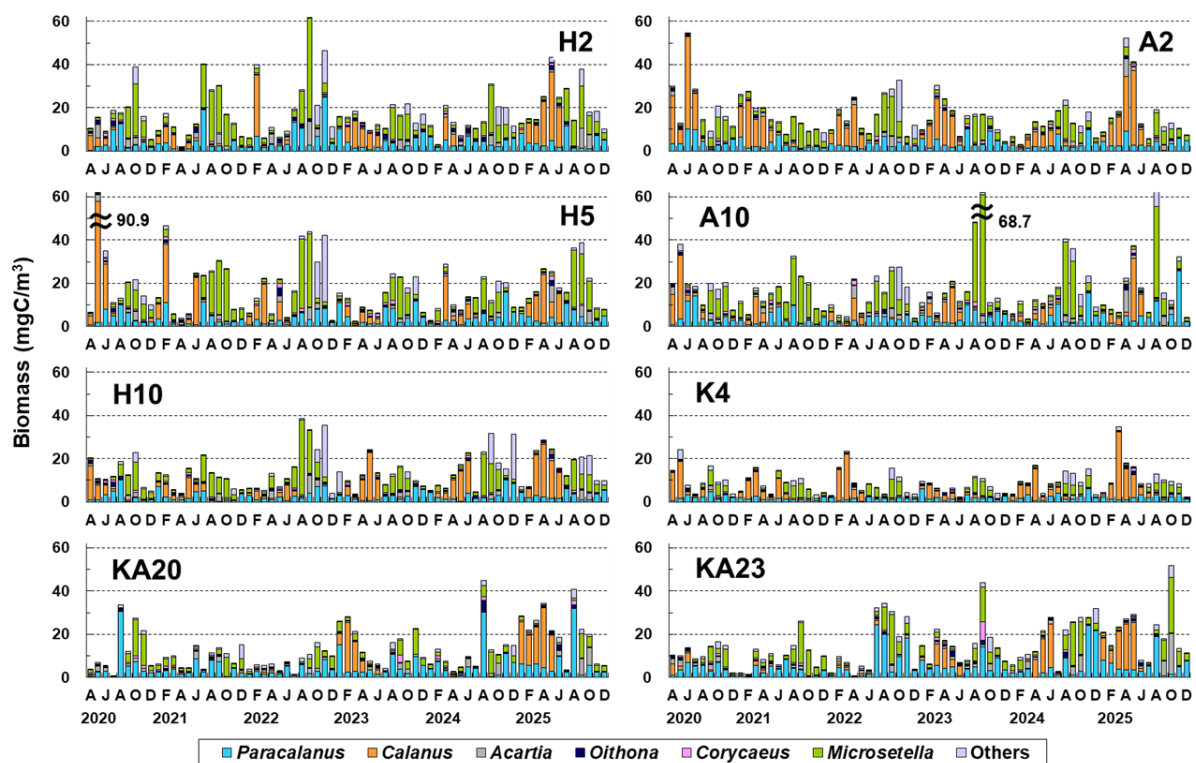


図7 瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類（コペポディッド期以降）のバイオマス（2020年4月～2024年12月）

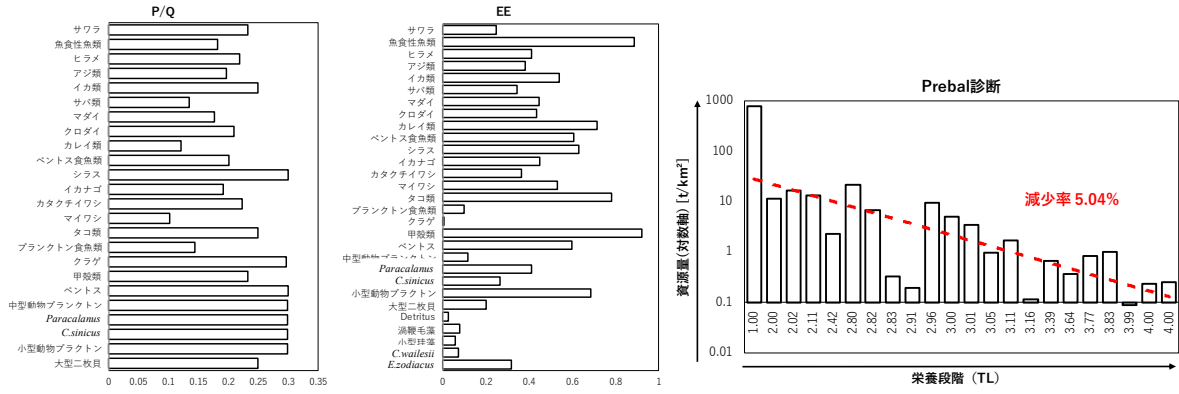


図8 播磨灘低次-高次生態系モデルにおける P/Q, EE の設定値および Prebal 診断結果 (P:生産量, Q:摂食量, EE:全死亡のうち、漁獲と被食が占める割合)

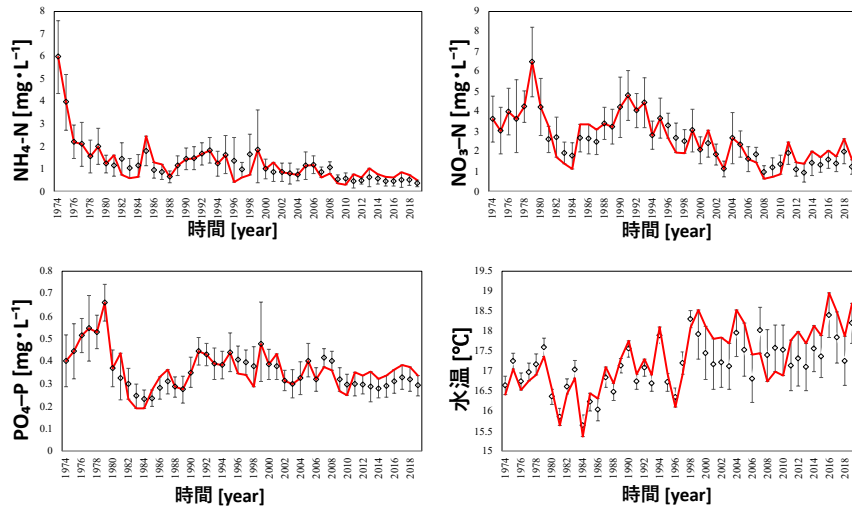


図9 播磨灘低次-高次生態系モデルで設定した外部環境 (赤ライン：設定値，◇：観測値（観測値），黒線：観測値の標準偏差)

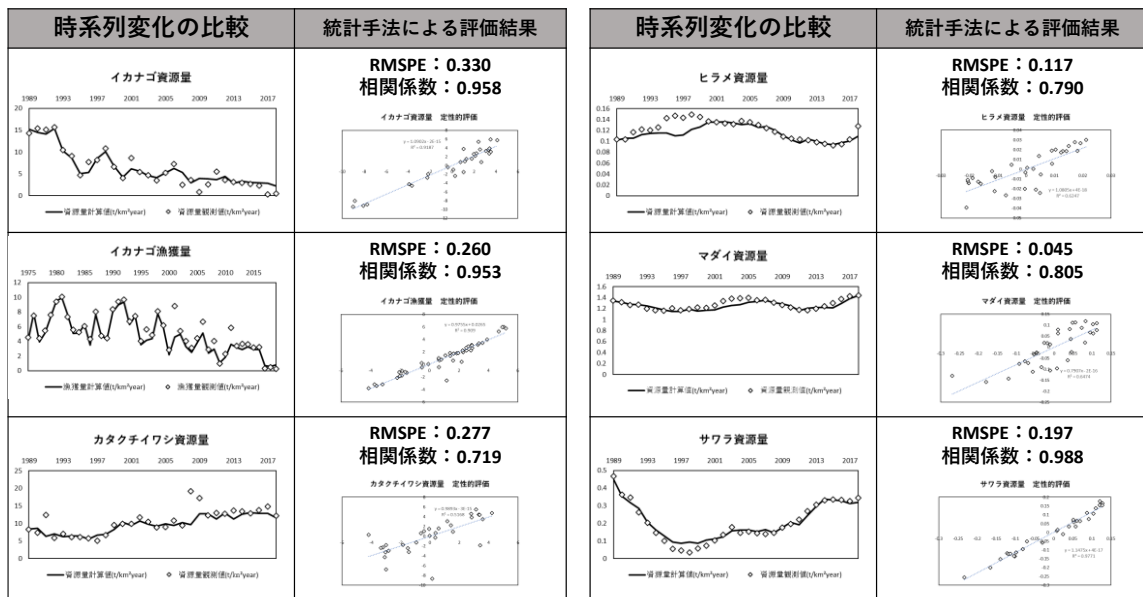


図10 計算値と既往知見の比較 (ライン：計算値，◇：観測値・届出値・推定値)

課題番号：I－2）－イ

課題名：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

水産研究・教育機構 水産技術研究所

米田道夫，中村政裕

水産研究・教育機構 水産資源研究所

岡崎雄二，田所和明，河野悌昌，高橋正知

香川県水産試験場

植田悠太，長谷川尋士，小川健太

広島大学

富山 毅

福井県立大学

山本昌幸

【背景・目的】

近年，瀬戸内海ではカタクチイワシやイカナゴなどの小型魚類の漁獲量の減少が顕著となっており，貧栄養化等の環境変化に伴う漁業生産の低迷が懸念されている。カタクチイワシをはじめ，多くの魚類は動物プランクトンを餌料として利用しているため，栄養塩等の水質環境が小型魚類の生産量に及ぼす影響を評価するには，動物プランクトンを介した水質環境と対象種の生産量の因果関係を明らかにすることが重要である。Yoneda et al. (2022) は約 20 年間に及ぶ定点調査などの解析結果から，燧灘におけるカタクチイワシの加入量の低迷には，動物プランクトンの種組成や現存量の変化が起因していることを明らかにした。これにより，①燧灘では栄養塩低下などの影響により生態学的栄養段階や捕食－被食関係が変化している可能性があること，②餌のプランクトンの質・量的変化が小型魚類の再生産機構に影響を及ぼしている可能性があること，などの新たな課題が見出された。そこで本課題では，燧灘および備讃瀬戸を主対象として，まず，調査船調査，漁獲物調査，既往知見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，漁獲量（加入量），食性，繁殖などの情報を整理する。次に，プランクトンや小型魚類などの炭素・窒素安定同位体比（SI）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（2000 年代）との類似点や相違点などを明らかにする。さらに，カタクチイワシやイカナゴなどの小型魚類の再生産機構について，栄養塩や餌料生物を含む生息環境を考慮した生態系モデルの開発に努めるとともに，野外調査や飼育実験等により必要なパラメーターの抽出および改良を進める。最終的に，生態系モデルなどを利用しながら，燧灘および備讃瀬戸における栄養塩，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。

今年度は，まず燧灘のカタクチイワシおよび備讃瀬戸のイカナゴについて，卵・仔稚魚・親魚調査，餌料環境調査，漁獲物調査などから，それら魚種の卵・仔魚・親魚や動物プランクトンの出現状況，漁獲量（加入量）の経年変化などの情報を整理した。さらに，加入低水準期におけるカタクチイワシの初期成長に及ぼす影響を調べた。次に，瀬戸内海の動物プランクトンの群集構造および主要なカイアシ類の時空間変動を調べた。また，燧灘における餌生物とカタクチイワシの窒素・炭素 SI を調べ，既往知見（銭谷ほか，2013）と比較した。最後に，イカナゴの再生産モデ

ルに必要なパラメーター等を取得するため、瀬戸内海と仙台湾で採取されたイカナゴを用いて、飼育実験により夏眠期における代謝と卵生産のエネルギー配分を調べた。なお、仙台湾のイカナゴは近年漁獲量が急激に減少し、2019年以降ほとんど漁獲がないこと、その要因として高水温化や餌環境の変化などが指摘されている（石川・田所, 2025）。

【方法】

(1) 燧灘のカタクチイワシおよび備讃瀬戸のイカナゴにおける卵・仔稚魚調査、餌料環境調査、漁獲物調査

燧灘のカタクチイワシについて、4～9月において丸特ネット、ノルパックネット、ボンゴネットなどを用いて卵仔魚調査および餌料環境調査などを行った。仔稚魚の発生月別漁獲加入尾数（加入尾数）を推定するため、漁獲された仔稚魚の耳石日齢解析から各発育段階の平均体長（体重）と日齢を求め、仔稚魚の漁獲量から各発生月の総個体数を推定した（Fujita et al., 2021）。成長解析には、2020～2024年に漁獲されたカタクチイワシ仔稚魚（加入魚）に加えて、ボンゴネットで採集した仔魚も利用した。さらに、2015～2019年の成長率等のデータを加えて（Yoneda et al., 2025a）、低水準期間（2015～2024年）における水温による成長への影響を補正した相対成長率（成長率／経験水温で予測される成長率）を求め（Akai et al., 2024）、初期生残指数（加入尾数／仔魚密度）および餌料指数（カイアシ類ノープリウス幼生密度／仔魚密度）との関係を混合効果モデルにより評価した。

備讃瀬戸のイカナゴについて、7月および12月に空釣りこぎを用いて親魚調査を行った。夏眠期のイカナゴの密度減少に及ぼす夏季水温の影響を調べるため、2016～2025年の各年における7月と12月の親魚密度から減少割合を求め（減少割合＝1－（12月密度／7月密度））、8～9月の屋島湾の平均水温との関係を調べた。なお2017年については7月にデータ欠測があったため、解析に含めなかった。

(2) 動物プランクトンの群集構造解析および燧灘の生態学的栄養段階の検証

2012～2022年1～12月（2021年除く）に瀬戸内海の計14定点（紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸、燧灘（愛媛、香川、広島）、広島湾、周防灘、伊予灘（大分、愛媛）、豊後水道（大分、愛媛）、関門海峡）において、ノルパックネット、丸特A、Bネット（口径45 cm、目合335μm）のいずれかで採取された動物プランクトン各種の現存量（1曳網当たり個体数）を調べた。さらに、クラスター解析により動物プランクトン群集を区分けし、海域別、動物プランクトン種別に現存量の時空間変異を調べた。

2015～2017年6月、2023年5月、2024年6月に燧灘で採取されたカタクチイワシ親魚から、筋肉、胃・腸内容物、卵巣、精巣を摘出した。各組織を凍結乾燥・脱脂処理を行った後、窒素・炭素SIを分析した。

(3) イカナゴの夏眠期における代謝と卵生産のエネルギー配分

2018年4月に瀬戸内海（斎灘）および仙台湾から採取されたイカナゴ0才魚を飼育水槽に収容し、自然日長・水温下において約3%体重/日の配合飼料を与えて実験前まで馴致させた。夏季に3つの異なる水温区（高水温区（28℃）、自然水温区、低水温区（23℃））を設け、各水槽には夏眠床を設置した。7月、瀬戸内海と仙台湾のイカナゴを各処理区に収容し、実験を開始した。実験開始時、夏眠前期（8～10月；成熟開始前）、夏眠後期（12～2月）に区別し、計10回の標本採集を行った。イカナゴの栄養蓄積度合いを調べるため、夏眠前～夏眠後期に採集されたイカナゴの一

部標本（計 136 個体、瀬戸内海＝80 個体；仙台湾＝56 個体）について、体部の脂質含有量をクロロフォルム・メタノール抽出法にて、タンパク質含有量をプロテインアッセイラピッドキット（株式会社富士フイルム和光純薬）を用いてそれぞれ推定した。脂質含有量およびタンパク質含有量に及ぼす体サイズ、実験経過日数、海域の影響を混合効果モデルで評価し、得られたモデルを用いて、全個体（計 285 個体、瀬戸内海＝140 個体；仙台湾＝145 個体）の脂質含有量とタンパク質含有量を推定した。夏眠期間において体長は増加しないことが示唆されているため（Kuzuhara et al., 2019）、エネルギー指標と体長の関係に基づいて、各実験時期における個体のエネルギー量を推定した。また、夏眠期におけるエネルギーの変動傾向の把握を容易にするため、瀬戸内海と仙台湾のイカナゴの体長範囲が重複する体長 85mm を標準サイズとして推定値や減少割合を示した。卵黄形成後期～吸水・排卵個体の雌魚計 111 個体（瀬戸内海＝53 個体；仙台湾＝58 個体）について、重量法（Akai and Yoneda, 2021）により孕卵数を推定した。卵生産とエネルギー量の関係を調べるため、夏眠前期と夏眠後期における脂質由来のエネルギー量に基づいて、消費エネルギー量を次のように求めた：消費エネルギー量＝体長から予測される夏眠前期エネルギー量推定値－夏眠後期エネルギー量；エネルギー量＝脂質含有量×生殖腺除去体重×39.5 J/g。さらに、排卵卵を有する雌魚計 63 個体（瀬戸内海＝33 個体；仙台湾＝30 個体）について、排卵卵の卵体積（mm³）および油球体積（mm³）を計測し、卵黄体積（mm³）を次のように求めた：卵黄体積＝卵体積－油球体積。

【結果】

(1) カタクチイワシとイカナゴの野外調査と加入量（漁獲量）の動向

2025 年の燐灘カタクチイワシについて、2024 年とは異なり、4 月から 6 月まで卵、仔魚の出現は低かったが、7 月から 8 月に急増した（図 1a, b）。カイアシ類密度（親魚の餌）は、4 月から 6 月において平年値よりも高かったが、6 月中旬以降には低く推移した（図 1c）。主要カイアシ類の出現状況から、5 月は *Calanus sinicus*（カラヌス）の出現割合が過去 6 年間で最も高かったことが示された（図 1d）。当該海域におけるカタクチイワシの 5 月と 6 月の発生群（主要発生月）について、仔稚魚の漁獲尾数（加入尾数）は約 29.4 億尾であり、2011 年以降の低水準期間において 3 番目に高かった（図 2）。一方、燐灘のカタクチイワシの肥満度は、カラヌスの出現状況と密接な関係があり、カラヌスが多い時期には肥満度も高くなることが示されている（米田ほか, 2024）。2025 年は 5 月にカラヌスが多く出現し、かつ、カタクチイワシの肥満度も例年に比べて高かったことが確認されている（植田, 私信）。飼育実験から、餌を豊富に与えて太った雌魚は、餌を制限して痩せた雌魚に比べて、卵質の良い卵を産み、その仔魚の成長や飢餓耐性も優れることが示されている（Yoneda et al., 2022）。しかしながら、今年の 5 月の加入尾数は前年に比べてやや増加したものの、依然として低い水準で推移していた。

2020～2024 年の成長解析から、摂餌開始から 5 日齢までの加入魚の成長率は、ボンゴネットで採取された仔魚の成長率に比べて有意に高かった。これは 2015～2019 年に調査された結果（Yoneda et al., 2025a）と一致しており、コホート内では高成長個体が加入に寄与していたと考えられた。2015～2024 年の低水準期間における解析から、加入魚の成長率と水温には有意な正の関係が認められ（図 3a）、水温が高くなるほど成長率も増加することが示された。一方、水温による成長への影響を補正した加入魚の相対成長率は、生残指数とは負の関係、餌料指数とは正の関係を示した（図 3b）。成長率と生残指数における負の関係は、成長の遅い個体に対して捕食などによる強い選択圧（トップダウン効果）が働き、生き残った個体が高成長に偏った結果である可能性

が示されている (e.g. Robert et al., 2007)。実際に、燧灘のカタクチイワシにおいて過去 2 番目に加入の低かった 2017 年級群でも、同様の傾向が報告されている (Yoneda et al., 2025a)。さらに、捕食圧の増加に伴って個体群密度が低下すると、個体当たりの餌量が相対的に増加し、成長が促進される可能性がある。一方、相対成長率と餌料指数との正の関係は、餌料環境が良好であれば、同じ水温条件下でも標準的に予測される成長率を上回る可能性を示している。以上の結果から、近年の低加入水準期間における初期成長は、捕食圧（トップダウン効果）と餌料環境（ボトムアップ効果）の双方の影響を受けている可能性が示唆された。天然海域の魚類資源は、通常、餌料環境と捕食圧の双方の影響を常に受けていると考えられるが、本調査結果は、資源水準が低迷している状況では、両者の効果がより顕在化する可能性を示している。

備讃瀬戸（高松・庵治地区）のイカナゴ漁獲量について、2025 年は 18 トンであり、2024 年の 8 トンよりも僅かに増えたが、1991 年からの漁獲動向と比べると、極めて低い水準に陥っていることが明らかになった（図 4）。備讃瀬戸で実施された夏季（7 月）と冬季（12 月）のイカナゴ親魚調査について、香川県水産試験場（2013～2025 年）および水産機構（2016～2025 年；2017 年 7 月欠損）による 2025 年の親魚密度は昨年と同様に極めて低い水準であった（図 5）。7 月の親魚密度は 0.7 尾／回（香川水試）と 1.4 尾／回（水産機構）であり、昨年をやや上回ったが、12 月では 0 尾／回と 0.01 尾／回で過去最低となった（図 5）。備讃瀬戸（屋島湾）の夏季（8～9 月）の平均水温は 28.5℃であり、昨年を上回り（27.4℃）、2013 年以降で過去最高となった（図 6a）。夏・冬季の親魚調査から求めた減少率と備讃瀬戸の夏季水温の関係には有意な正の関係が認められ（図 6b）、2025 年の減少率はこれまでで最も高い 0.99 であった。なお、2025 年 1～2 月のイカナゴ仔魚調査について、標本がほとんど採取されなかったという結果が得られており、2026 年の備讃瀬戸におけるシンコ漁の動向に注視する必要がある。

（2）瀬戸内海の動物プランクトン群集と燧灘のカタクチイワシと餌生物の関係

瀬戸内海の動物プランクトン群集について、調査期間において出現した種数は、カイアシ類で 235 種（カラヌス目＝151 種、キクロプス目＝75 種など）、ヤムシ類で 23 種、枝角類で 7 種の計 265 種に及んだ。クラスター解析の結果、3 つの生物群集に区別された（図 7）。クラスター 1 には（出現数の多い順から）カラヌス、*Paracalanus orientalis*（パラカラヌス）、*Penilia avirostris*（ペニリア）などが、クラスター 2 にはペニリア、*Pseudevadne tergestina*、*Acartia pacifica* などが、クラスター 3 にはパラカラヌス、カラヌス、*Ditrichocorycaeus affinis* などが含まれていた。採集年・月、海域別におけるクラスターの出現状況から、クラスター 1 は豊後水道や紀伊水道において周年認められた。一方、クラスター 2 と 3 は伊予灘から大阪湾の内海で認められたが、両者は出現時期が異なり、クラスター 2 は 8～12 月に、クラスター 3 は 1～7 月にそれぞれ出現した。カラヌスは豊後水道と紀伊水道において周年にわたり高い頻度で出現したが、燧灘、備讃瀬戸、播磨灘では夏から秋に減少もしくは消失していることが示された（図 8）。カラヌスの主な再生産場所は陸棚域であると考えられており、水深の深い水道域は浅い内海域に比べて、生息に好適な環境であることが知られている (Uye, 2000)。一方、燧灘では 2000 年代以降カラヌスの現存量が減少していることが示されているが (Yoneda et al., 2022)、2018 年の冬から春にカラヌスが低い頻度で出現した。このようなカラヌスの高い頻度での出現は、上述したように、2023 年および 2025 年にも認められた。2018 年冬から春のカラヌスの出現状況を見ると、燧灘と隣接する備讃瀬戸や伊予灘でも高かったことから、近年の燧灘におけるカラヌスの現存量は隣接海域からの移入度合いにも影響し

ている可能性がある。

カタクチイワシ親魚の筋肉の SI は、胃内容物や腸内容物に比べて、窒素で約 3‰、炭素で約 1‰高いことが示され（図 9a）、1 栄養段階上昇する際の一般的な SI の上昇値（e.g. Post, 2002）と概ね一致した。一方、卵巣や精巣の SI は、胃・腸内容物に比べて、窒素で 1～2‰、炭素で約 1‰高い傾向が認められた。なお、2023 年 5 月の炭素 SI は、いずれの組織でも他の採集年（6 月）に比べて低い傾向が認められた。同時期の胃内容物にはカラヌスや多毛類の棲管などが認められ、他の採集時期（カラヌス以外のカイアシ類が主体）とは異なる組成であった（図 9b）。燧灘では、カタクチイワシの餌生物であるカイアシ類の SI が春から夏にかけて上昇することに伴い、仔稚魚の筋肉の SI も上昇することが示されている（銭谷ほか, 2013）。一方、SI を用いたトレーサ実験から、カタクチイワシ親魚の卵巣や精巣の SI は、標本採集日から約 2 週間以内に摂食した餌の SI を反映することが示されている（Yoneda et al., 2025b）。胃内容物組成の違いによる影響は不明であるが、2023 年 5 月と他の年の 6 月における同位体比の違いの一因には季節性が影響しているかもしれない。加入低水準期（2015 年以降）におけるカタクチイワシの SI は、加入高水準期（2000 年代）と比較して上昇している傾向がある（米田ほか, 2025）。今後は、近年における主要なカイアシ類に加えて、ホルマリン固定された 2000 年代の標本の SI 分析を進めながら、燧灘における食物網構造の変遷について考察を進めていく必要がある。

（3）イカナゴの夏眠期における代謝と卵生産のエネルギー配分

イカナゴ体部の脂質含有量は体長、相対肥満度、海域、実験の経過日数および海域と経過日数の相互作用において有意な関係が認められ（ $p < 0.01$ ）、実験の経過とともに（夏眠を経るにつれて）相対肥満度が減少し、脂質含有量も減じることが示された。一方、タンパク質含有量は海域と経過日数のみで有意な関係が認められ（ $p < 0.05$ ）、体サイズの影響を受けないことが示唆された（ $p > 0.2$ ）。以上から、夏眠期間中は脂質が主なエネルギー源として代謝や卵生産に利用されるのに対して、タンパク質含有量は体サイズの影響を受けず、海域間における体組成の違いを反映していると考えられた。

夏眠開始における脂質含有量と体長の関係および総エネルギー量と体長の関係は、瀬戸内海が仙台湾よりも有意に低かった（図 10a 上段）。両海域の標準体サイズである体長 85mm において、脂質含有量の推定値は瀬戸内海で 12%、仙台湾で 21%（瀬戸内海の 1.75 倍）であった（表 1）。夏眠前期における脂質含有量と体長の関係（図 10a 中段）および総エネルギー量と体長の関係は、夏眠開始時と同様に瀬戸内海が仙台湾よりも有意に低かったことに加えて、高水温区と自然水温・低水温区において違いが認められた。体長 85mm における瀬戸内海の推定脂質含有量は高水温区で 6%、自然水温区と低水温区で 8%であり、夏眠開始時に比べて前者の脂質含有量は 50%、後者は 33%減少した。同様に仙台湾では、高水温区で 9%、自然水温区と低水温区では 11%であり、夏眠開始時と比べて高水温区で 57%、低水温区で 48%減少し、減少割合は瀬戸内海と比べて大きかった。なお、高水温区について、仙台湾では夏眠前期の 10 月までに、瀬戸内海では夏眠後期の 11 月までに、全ての個体が死亡した。夏眠後期における脂質含有量と体長の関係について、これまでと同様に、瀬戸内海は仙台湾よりも有意に低かった（図 10a 下段）。一方、脂質含有量は自然水温区と低水温区において有意な違いが認められた。体長 85mm における瀬戸内海の推定脂質含有量は自然水温区で 5%、低水温区で 6%であり、夏眠開始時と比べて前者の脂質含有量は 58%、後者は 50%まで減少した。同様に仙台湾では、自然水温区で 6%、低水温区では 7%であり、夏眠

開始時と比べて自然水温区で 71%, 低水温区で 67%まで減少し, 減少割合は瀬戸内海と比べて大きかった。孕卵数と生殖腺除去体重の関係において, 海域と水温区で有意な違いが認められた。同じ海域では, 低水温区の孕卵数は自然水温区に比べて 1.2 倍多かったが, 同じ水温区において, 瀬戸内海の孕卵数は仙台湾に比べて 1.3 倍多かった。夏眠前期から夏眠後期に消費されたエネルギー量に基づいて, 孕卵数との関係を調べたところ, 海域と水温区で有意な違いが認められた (図 10b)。同じ海域では, 低水温区の孕卵数は自然水温区に比べて 1.5 倍多かったが, 同じ水温区において, 瀬戸内海の孕卵数は仙台湾に比べて 2.2 倍多かった。排卵卵の卵黄体積は海域間でのみ有意な違いが認められ, 瀬戸内海は仙台湾の 80%であった (図 10c)。一方, 排卵卵の油球体積は水温区で有意な違いがみられ (低水温区は自然水温区の 1.1 倍), 海域間では有意差は認められなかった。孕卵数と卵サイズの結果を考慮すると, 瀬戸内海のエネルギー量当たりの卵生産は, 仙台湾に比べて, 約 1.8 倍であることが示された。以上の結果から, 瀬戸内海のイカナゴは, 仙台湾の個体と比較して, 限られたエネルギーを代謝や卵生産に対して効率的に利用していることが示された。その一方で, 高水温区 (28°C) では夏眠期間中に全個体が死亡した。近年の瀬戸内海では, 貧栄養化に伴う餌環境の悪化に加えて (e.g. Nishikawa et al., 2020), 特に備讃瀬戸では夏季に水温が 28°Cを上回る日数が増加している。今年度の備讃瀬戸におけるイカナゴ親魚調査の結果を踏まえると, 近年の瀬戸内海はイカナゴの生理的限界に近い環境となりつつある可能性が示唆され, 今後の資源動向を継続的に注視する必要がある。

【参考文献】

- Akai N, Saito M, Yoneda M. Inter-annual variation in the relationship between early growth rate and population survival of the western sand lance *Ammodytes japonicus* in the Seto Inland Sea in western Japan. Fish. Sci. 90, 591–605, 2024.
- Akai N, Yoneda M. Age-related variation in reproductive potential and influence on recruitment of western sand lance *Ammodytes japonicus* in the Seto Inland Sea, western Japan. J. Sea Res. 172, 102036, 2021.
- Fujita T, Yamamoto M, Kono N, Tomiyama T, Sugimatsu K, Yoneda M. Temporal variations in hatch date and early survival of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in response to environmental factors in the central Seto Inland Sea, Japan. Fish. Oceanogr. 30, 527–541, 2021.
- 石川哲郎, 田所和明. 仙台湾のカイアシ類群集の動態とイカナゴ加入との関係. Nippon Suisan Gakkaishi 91, 389–402, 2025.
- Kuzuhara H, Yoneda M, Tsuzaki T, Takahashi M, Kono N, Tomiyama T. Food availability before aestivation governs growth and winter reproductive potential in the capital breeding fish, *Ammodytes japonicus*. PLoS One 14, e0213611, 2019.
- Nishikawa T, Nakamura Y, Okamoto S, Ueda H. Interannual decrease in condition factor of the western sand lance *Ammodytes japonicus* in Japan in the last decade: Evidence for food-limited decline of the catch. Fish. Oceanogr. 29, 52–55, 2020.
- Post DM. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. Ecology 83, 703–718, 2002.
- Robert D, Castonguay M, Fortier L. Early growth and recruitment in Atlantic mackerel *Scomber scombrus*: discriminating the effects of fast growth and selection for fast growth. Mar. Eco. Prog. Ser. 337,

209–219, 2007.

Uye S. Why does *Calanus sinicus* prosper in the shelf ecosystem of the Northwest Pacific Ocean? ICES J. Mar. Sci. 57, 1850–1855, 2000.

Yoneda M, Fujita T, Yamamoto M, Tadokoro K, Okazaki Y, Nakamura M, Takahashi M, Kono N, Matsubara T, Abo K, Xinyu G, Yoshie N. Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. Prog. Oceanogr. 206, 102860, 2022.

Yoneda M, Fujita T, Yamamoto M, Nakamura M, Takahashi, M, Kono N, Tomiyama T. Linking early growth rate and recruitment variability of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the central Seto Inland Sea, Japan. Fish. Oceanogr. (in press) 2025a.

Yoneda M, Katayama S, Yamamoto M, Kono N, Tsuzaki T, Tanaka H. Size-dependent resource allocation to reproduction in Japanese anchovies (*Engraulis japonicus*). Sci. Rep. 15, 15057, 2025b.

米田道夫, 中村政裕, 田所和明, 岡崎雄二, 河野悌昌, 高橋正知, 植田悠太, 宮川昌志, 高砂敬, 吉田 誠, 富山 毅, 山本昌幸. 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. 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, 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所, 広島, 2024, 50–58.

米田道夫, 中村政裕, 田所和明, 岡崎雄二, 河野悌昌, 高橋正知, 植田悠太, 高砂 敬, 吉田 誠, 富山 毅, 山本昌幸. 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. 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, 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所, 広島, 2025, 49–58.

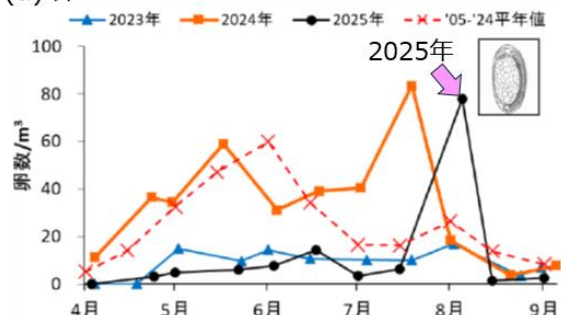
銭谷 弘, 河野悌昌, 亘 慎吾, 塚本洋一. 瀬戸内海燧灘におけるクラゲ・クシクラゲ類, 浮魚類の栄養段階: 炭素・窒素安定同位体比による評価. 水産海洋研究 77, 68–82, 2013.

表1 各実験期間におけるイカナゴ体部の脂質含有量の推定値（開始からの減少割合）*

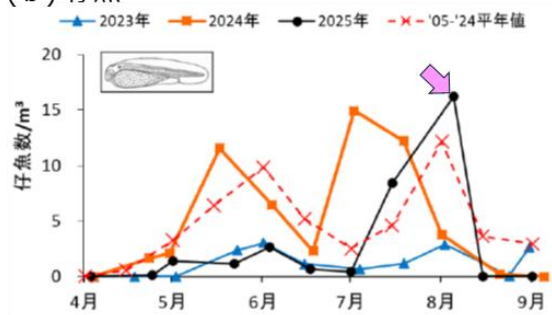
*体長 85mm の個体で推定

	瀬戸内海			仙台湾		
	高水温区	自然水温区	低水温区	高水温区	自然水温区	低水温区
夏眠開始		12%			21%	
夏眠前期	6%	8%		9%	11%	
	(50%)	(33%)		(57%)	(48%)	
夏眠後期		5%	6%		6%	7%
		(58%)	(50%)		(71%)	(67%)

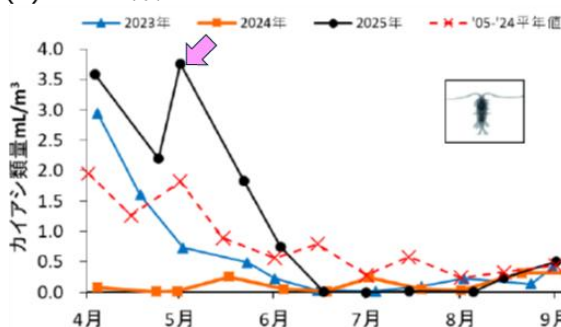
(a) 卵



(b) 仔魚



(c) カイアシ類



(d) 主要カイアシ類 (5月)

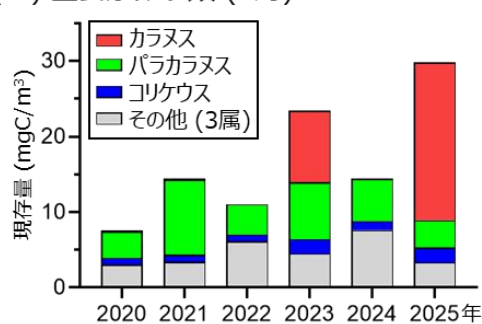


図1. 燧灘カタクチイワシの卵 (a), 仔魚 (b), カイアシ類(c)の月別採集状況および主要カイアシ類(5月)の年別現存量(d)

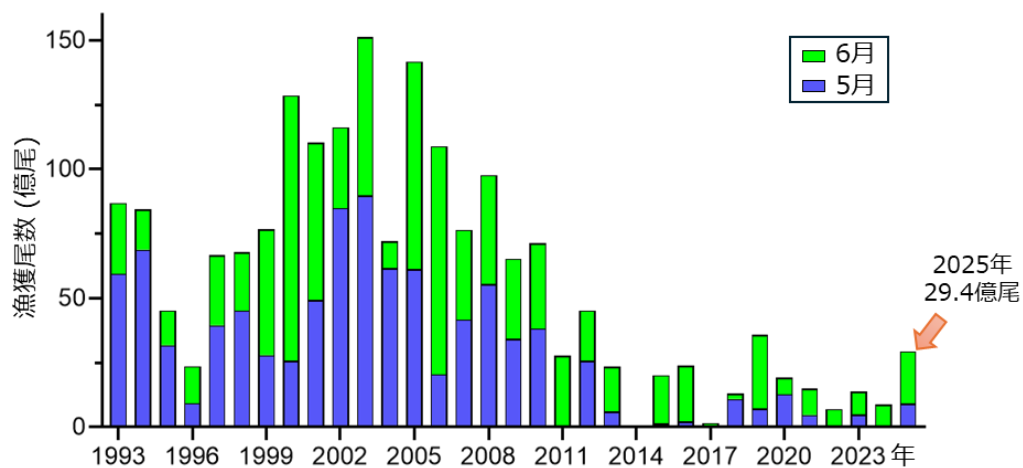
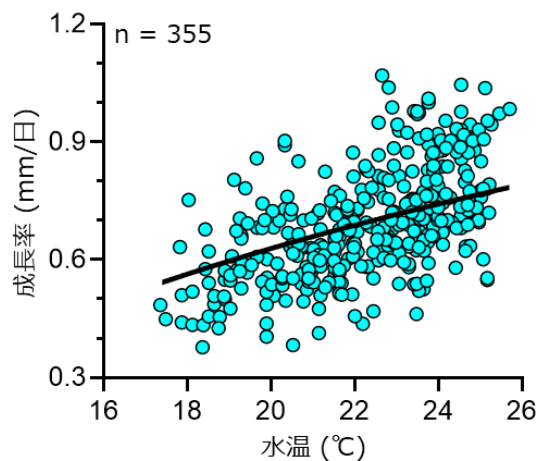


図2. 燧灘カタチイワシ仔稚魚（5, 6月発生）の漁獲尾数の経年変化（1993～2025年）

(a) 成長率と水温の関係



(b) 相対成長率と生残指数の関係

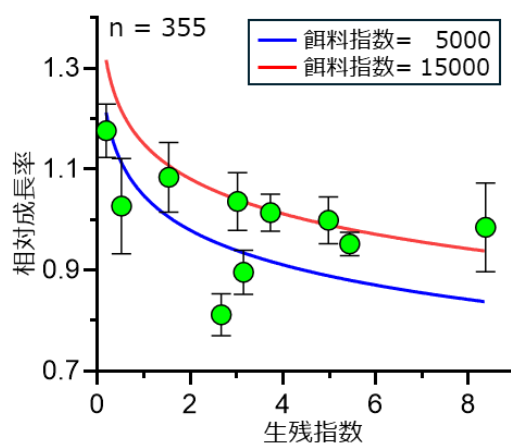


図3. 燧灘カタチイワシの成長率と水温の関係(a)および相対成長率と生残指数の係に及ぼす餌料指数の影響(b)

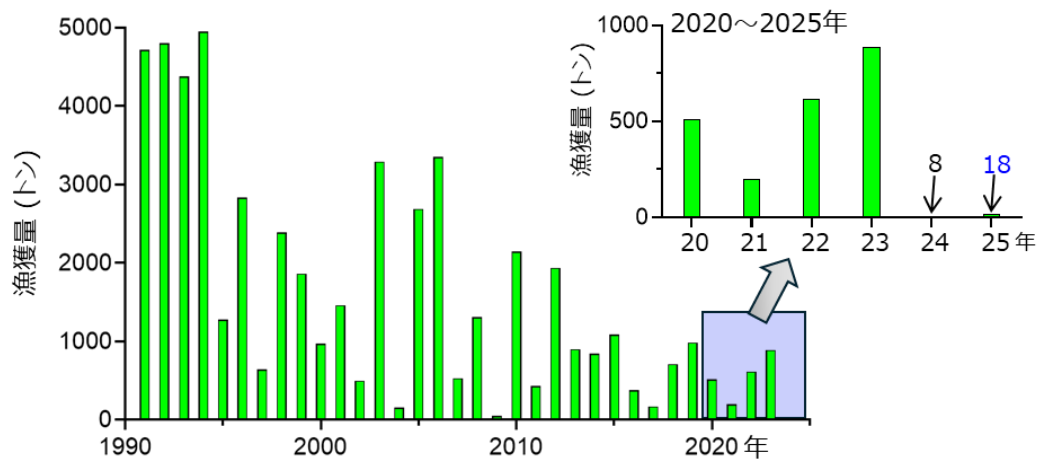


図4. 備讃瀬戸（高松・庵治地区）のイカナゴ漁獲量の経年変化（1991～2025年）

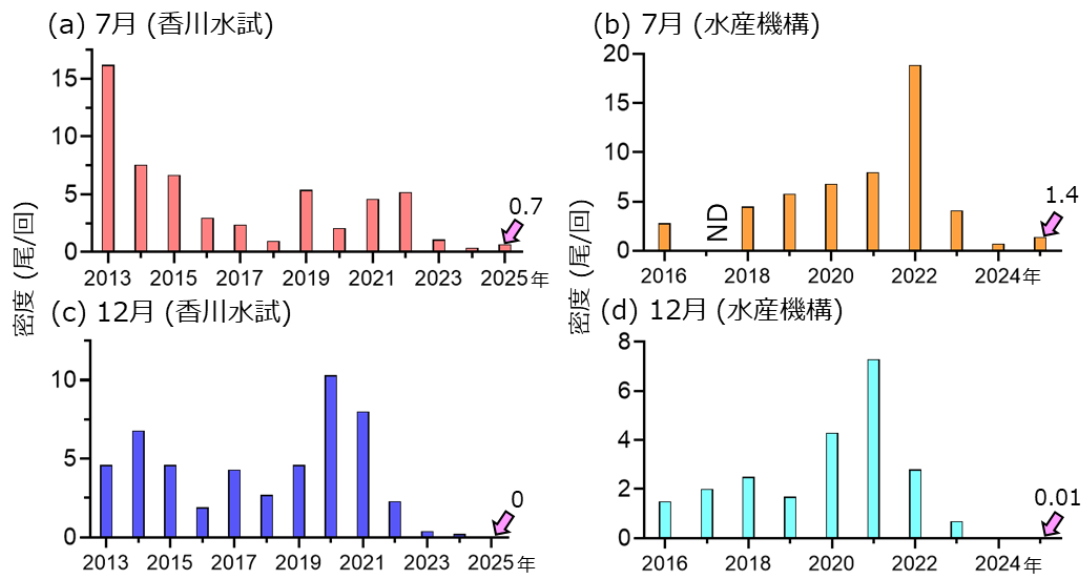


図5. 備讃瀬戸における7月(a, b)と12月(c, d)のイカナゴ親魚調査の経年変化 (香川水試2013～2025年; 水産機構2016～2025年)

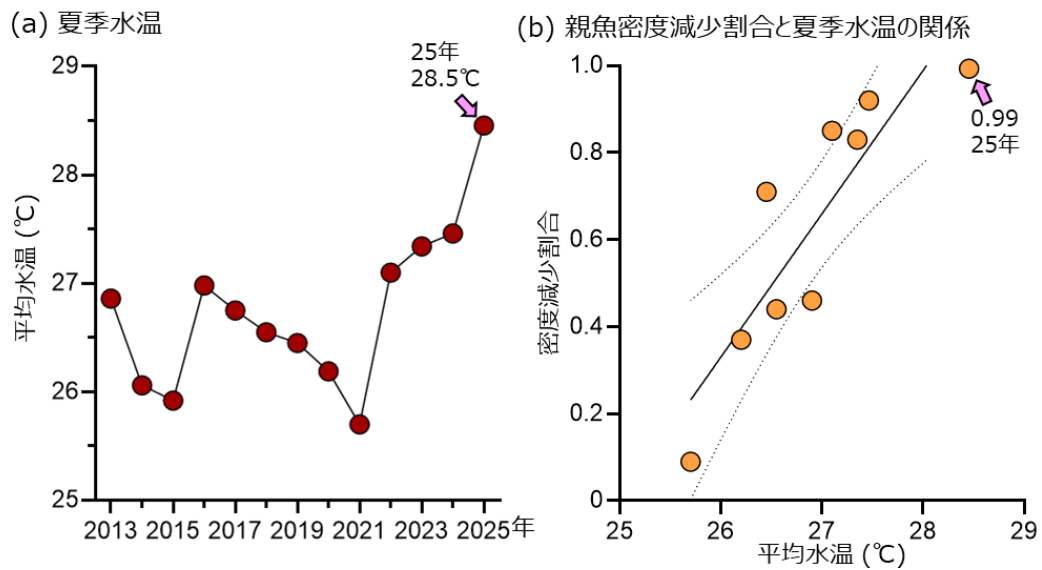


図6. 備讃瀬戸（屋島湾）における夏季(8～9月)平均水温の経年変化(a)および夏眠期におけるイカナゴ親魚の密度減少割合と夏季平均水温の関係(b)

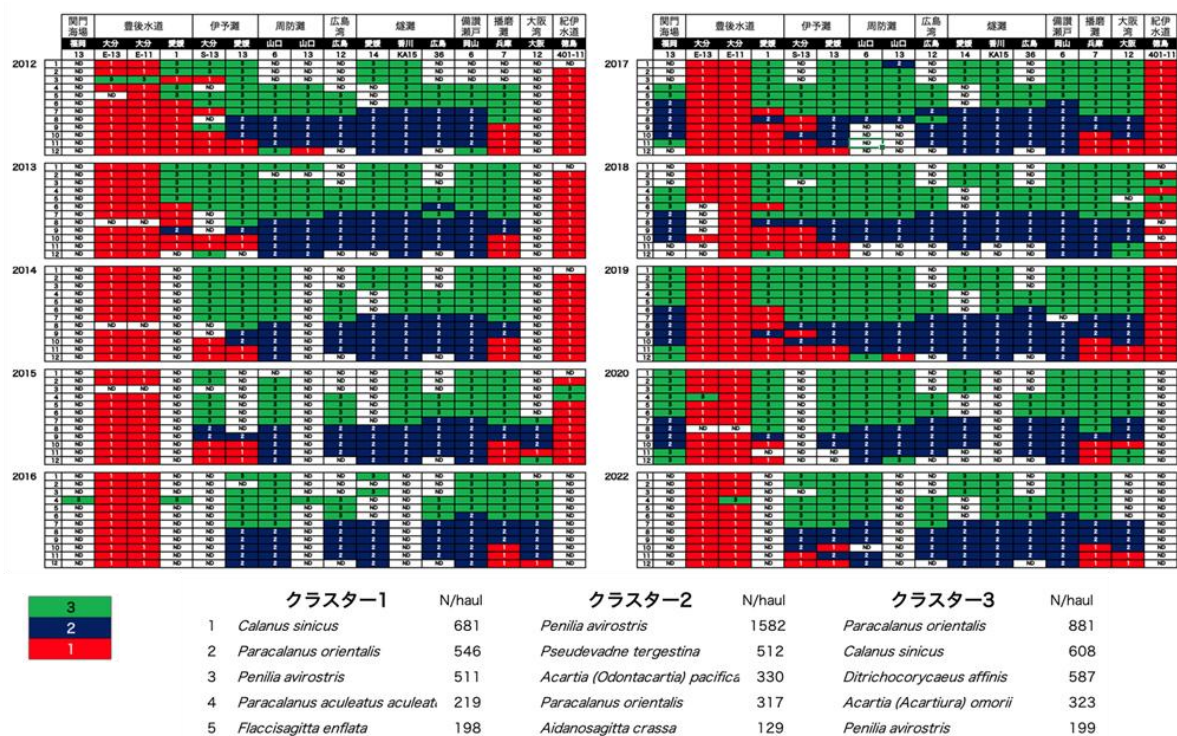


図7. 瀬戸内海における動物プランクトンの群集構造における時空間的変異(2012~2022年(2021年除く))および各クラスターにおいて高い頻度で出現した上位5種の1曳網当たり個体数

● *Calanus sinicus*

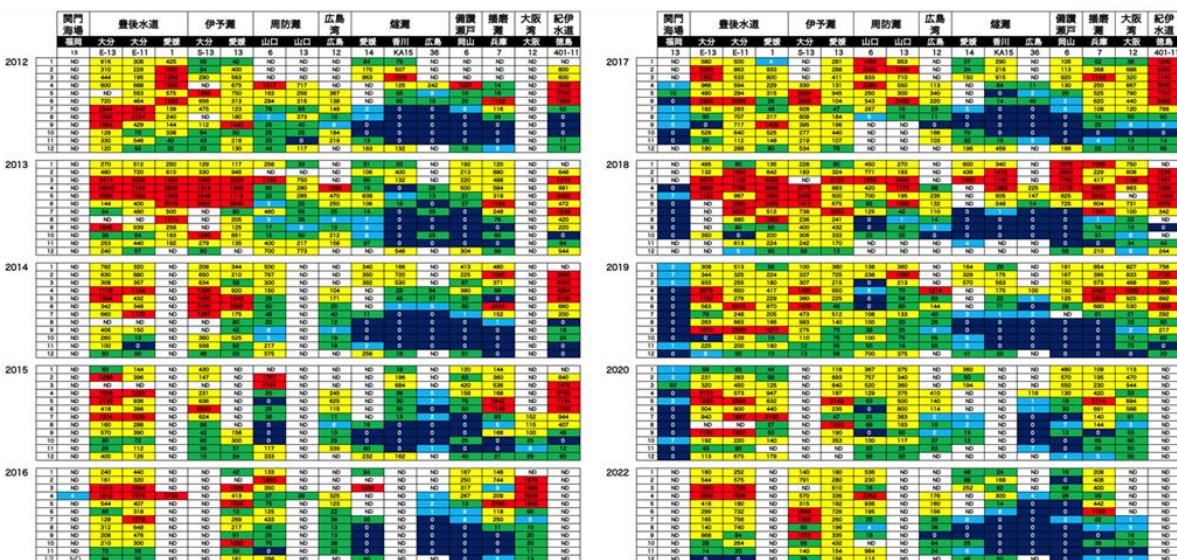
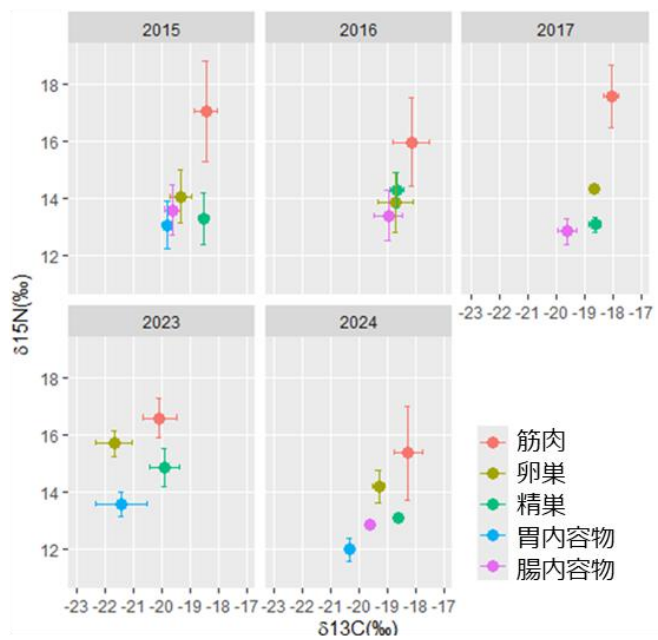


図8. 瀬戸内海における*Calanus sinicus*の1曳網当たり個体数の時空間的変異(2012~2022年(2021年除く))

(a) 各組織の同位体比



(b) 胃内容物組成

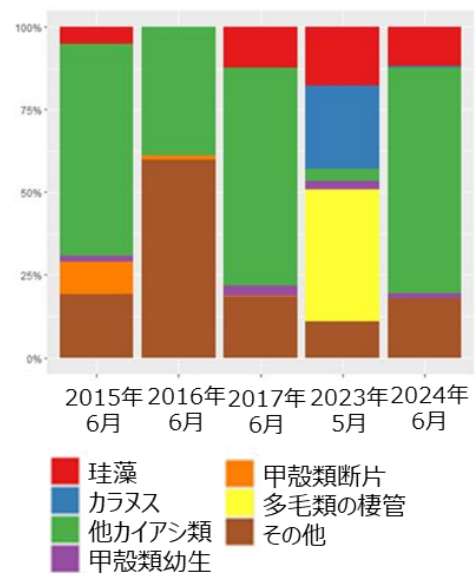
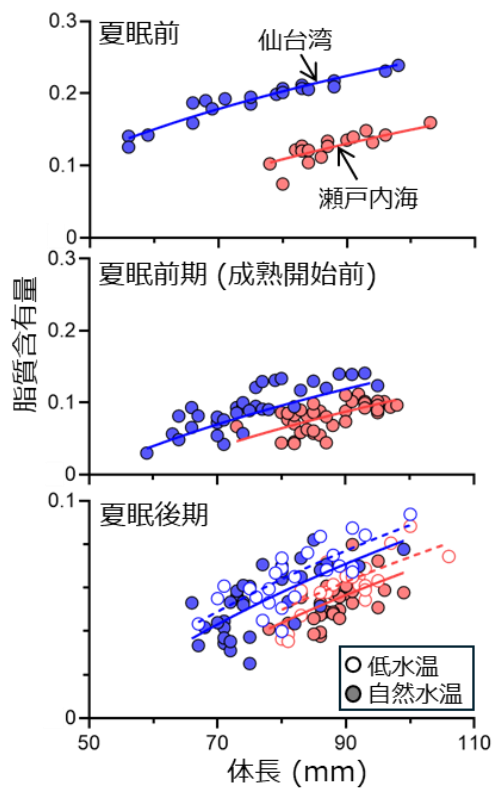
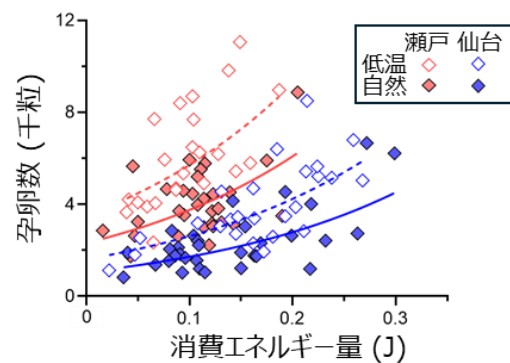


図9. 燧灘カクチイワシ各組織の窒素・炭素安定同位体比 (a) および胃内容物組成 (b, 2015～2017年6月, 2023年5月, 2024年6月)

(a) 脂質含有量と体長の関係



(b) 孕卵数と消費エネルギー量の関係



(c) 卵黄サイズ

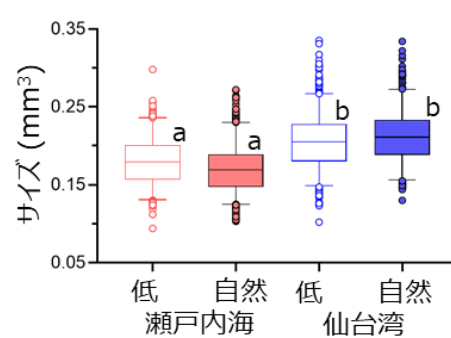


図10. 瀬戸内海と仙台湾のイカナゴの脂質含有量と体長の関係(a), 孕卵数と消費エネルギー量の関係(b)および排卵卵の卵黄サイズ (飼育実験). 夏眠後期は低水温区と自然水温区で有意な相違.

課題番号：I-3)

課題名：栄養塩類管理方策の検討

愛媛大学，沿岸環境科学研究センター，郭新宇

愛媛大学，先端研究院，吉江直樹

愛媛県水産研究センター，栽培資源研究所，谷川貴之，喜安宏能
水産研究・教育機構，水産技術研究所，鬼塚剛，阿保勝之，樽谷賢治，児玉真史

【背景・目的】

燐灘を対象に、栄養塩循環の解明およびノリ養殖とカタクチイワシに対応した栄養塩類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、300mの水平解像度を持つ流動モデルとNPDZタイプのシンプルな低次生態系モデルを結合し、ノリ養殖が行われる水深の浅い沿岸域における栄養塩濃度の経年変動および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、同じく300mの水平解像度を持つ流動モデルと、多種類のプランクトンを取り扱えるeNEMUROタイプの複雑な低次生態系モデルを結合し、カタクチイワシの餌料として重要な動物プランクトンの変動特性を把握し、カタクチイワシ資源変動との関連性について検討する。さらに、ノリ生産量の経年変動要因およびノリと植物プランクトンの栄養競合を明らかにするため、海洋環境とノリ生産量との相関解析を実施するとともに、ノリの生物過程を導入した低次生態系モデルを開発し、ノリ漁場における物質循環について検討する。以上の知見を踏まえ、栄養塩類管理方策の検討を行う。

【方法】

(1) ノリ養殖を対象とした3次元NPZDモデルの開発

燐灘を対象とした300m水平解像度の流動モデルに、NPZD型の低次生態系モデル（図1）（Morimoto et al., 2021）を導入し、燐灘、特に燐灘南部のノリ養殖海域における栄養塩濃度の陸起源栄養塩負荷変動に対する応答特性を検討する。陸起源栄養塩負荷変動は、2021年度に燐灘へ直接排出された生活系および産業系の月平均窒素・リン負荷量を対象とする。実施する実験は以下のとおりである。標準実験（Control）には、2021年度に燐灘へ排出された愛媛県内の下水処理場および工場由来の月別実績負荷量（季節別管理運転実施前）を用いる。感度実験では、ノリ養殖期（10月～3月）における陸起源負荷量を段階的に増加させる。具体的には、下水処理場負荷のみをControlの2倍から5倍に増加させるケース（Exp. 1～4）および、下水処理場と工場負荷を同時に2倍から5倍に増加させるケース（Exp. 5～8）を設定する（図2）。これら9つの計算結果を比較し、下水処理施設の管理運用方式の変更がノリ養殖区域の栄養塩濃度に及ぼす影響を解明する。

(2) カタクチイワシ餌料を対象とした3次元eNEMUROモデルの開発

燐灘を対象とした流動モデルにeNEMURO型生態系モデル（図3）（Yoshie et al., 2011）を導入し、燐灘東部におけるカタクチイワシの重要な餌料であるカイアシ類動物プランクトン生物量の経年変動の主な要因を検討した。対象年は、カイアシ類動物プランクトン生物量が高かった2005年、低かった2010年、中程度であった2015年の3年とした。各年のシミュレーションでは、境界条件、気象条件、河川流量、産業系と生活系排水による窒素・リン負荷量、および周辺海域と

の栄養塩交換量などについて、当該年のデータを用いた。計算結果は Yoneda et al. (2022) による燧灘東部のカイアシ類動物プランクトン現存量の観測データと比較し、モデルの再現性を検証した。これら 3 年の結果を比較し、カイアシ類動物プランクトン生物量の年変動の特徴とその背景要因について考察した。

(3) ノリ生産量の経年変動要因の解析およびノリと植物プランクトンの栄養競合の解明に向けたノリ生物過程を導入した低次生態系モデルの開発

現場の要望ならびに管理方策検討委員会での検討を踏まえ、当初の計画には含まれていなかったが、ノリ生産量の経年変動要因とノリと植物プランクトンの栄養競合を明らかにするために、海洋環境とノリ生産量との相関解析を実施すると共に、ノリ生物過程を導入した低次生態系モデルの開発し、ノリ漁場の物質循環について検討する。

相関解析では、ノリ生産量が高く社会経済的・人為的な影響が少ない 1-2 月の収穫量と、栄養塩濃度 (NO_2 , NO_3 , NH_4 , PO_4)、水温、塩分、河川流量（賀茂川）との単回帰分析を行う。なお、栄養塩、水温、塩分は 2018-2024 年度、河川流量は 2001-2024 年度の 1-2 月の平均値を使用する。

モデル開発では、ノリ養殖海域におけるノリと植物プランクトンの栄養塩競合や、下水処理場の管理運転および河川流量変化に伴う陸起源栄養塩供給量変化に対するノリと低次生態系の応答を調べることを目的として、0 次元の eNEMURO モデルにノリ生物過程を陽に導入したモデル eNEMURO-SW を開発する（図 4）。昨年度までに、過去最低のノリ不漁年である 2023 年度の観測に基づいた外力として与え、栄養塩と植物プランクトンの季節変動とノリの現存量の再現が概ねできていた。今年度は、ノリ漁場の非常に浅い環境での活発な再生産を考慮し、海底へ沈降した生物起源粒子の 50% が水柱に還元される過程を導入し、適宜生理パラメータの調整を行う。そして、ノリ生産量がある程度回復した 2024 年度の外力を加え、2022 年 10 月 1 日から 2025 年 3 月 31 日までの 2 年間の漁期を含む連続計算を行い、季節変動だけではなく、経年変動の再現を目指す。また、経年変動が再現できたうえで、不漁年と回復年のノリと植物プランクトンの栄養競合および物質循環の違いについて硝酸塩循環とアンモニア循環に分けて検討する。さらに、下水処理場の管理運転の効果について、栄養塩負荷量を 6 段階（現状×0[管理なし]、現状×1[標準実験]、現状×2、現状×3、現状×4、現状×5）に変えた感度実験から考察する。

(4) 燧灘広域及びノリ養殖海域における現地調査

愛媛県農林水産研究所水産研究センター所属の水産試験船「よしゅう」による浅海定線調査（図 5）として、毎月 1 回、燧灘・安芸斎灘 26 定点の水質調査（水温・塩分・D0・栄養塩等）を行う。また、26 定点のうち 12 定点ではクロロフィル量分析用サンプルの採水を行う。西条市沖にあるノリ養殖漁場 8 定点において（図 6）、環境調査として養殖期間中の週に 1 回程度、水温、塩分、D0 及び栄養塩等の測定を行う。また、定点近傍の養殖網からノリ葉体を採取し、葉体の色調（ $L^* \cdot a^* \cdot b^*$ 値）及びクロロフィル量（SPAD 値）の測定を行う。ノリ葉体の色調等については、測定が可能な大きさとなった 1 月上旬から測定を開始する。

(5) 栄養塩類管理方策検討委員会の開催

瀬戸内海を含む沿岸域の物質循環や環境保全および生物生産に造詣の深い学識者複数名（2 名程度）を構成員とする「栄養塩類管理方策検討委員会」を年 2 回開催し、上記の

数値モデル解析結果を元に栄養塩類管理方策について検討を行う。

【結果】

(1) ノリ養殖を対象とした 3 次元 NPZD モデルの開発

ア) ノリ養殖海域における栄養塩濃度の水平分布と季節変動

これまでに構築した 300m 水平解像度を有する 3 次元流動-NPZD 型低次生態系モデルを用いて、2021 年度を対象とした再現計算を実施した。モデルの外部入力データとして、生活系および産業系由来の窒素・リン負荷量には 2021 年度の実績値を用いた。前年度のシミュレーションでは、DIN 濃度が過大評価され、DIP 濃度が過小評価されるという問題があったが、本年度はモデルのパラメーターを調整することで、これらの問題を概ね改善した。観測データにおいては、各観測点 (S1~S8) で DIN 濃度が 10 月から 12 月にかけて高くなり、1 月から 4 月にかけて低下する傾向が見られた。シミュレーションは 1 月から 4 月の濃度低下をよく再現しており、特に DIN 濃度が 3.5 mmol/m^3 未満となる時期は概ね観測と一致している (図 7)。また、10 月から 12 月に観測された栄養塩濃度の急激な変動は再現できなかったものの、この期間の低い栄養塩濃度の基準値はモデル結果に適切に表れている。DIP 濃度については、観測では 10 月から 12 月に上昇し、1 月から 5 月にかけて低下する傾向が示されたが、シミュレーションはこの変動パターンを概ね再現している (図 8)。

以上より、本モデルはノリの生産に重要な低 DIN 濃度の期間を概ね再現できたと言える。このことから、陸起源栄養塩負荷の増加シナリオに関する感度実験を実施するための基盤が整備されたともいえる。

イ) ノリ養殖海域における陸起源窒素負荷の増加に対する栄養塩濃度の応答

今年度実施した 9 つの実験では、愛媛県が管理する生活系および産業系の窒素負荷量のみが異なり (図 2)、それ以外の条件設定はすべて同一である。標準実験「Control」と比較して、ノリ養殖期 (10 月~翌年 3 月) に陸起源窒素負荷量を増加させた結果、8 つの感度実験において表層 DIN 濃度はいずれも増加した (図 9)。ただし、増加幅には差があった。生活系窒素負荷量のみを増加させた 4 つの感度実験 (Exp. 1~Exp. 4) では、表層 DIN 濃度は 3.5 mmol/m^3 を超えず、生活系窒素負荷の管理だけではノリ生産に必要な栄養塩濃度の回復が困難であることを示唆している。一方、生活系および産業系の窒素負荷量を同時に増加させた 4 つの感度実験では、Exp. 7 および Exp. 8 において表層 DIN 濃度が多くの日で 3.5 mmol/m^3 を超えた。しかし、Exp. 8 では DIN 濃度が過度に高く、最大で約 20 mmol/m^3 に達したことから、富栄養化を引き起こす可能性がある。したがって、愛媛県が管理している生活系および産業系の窒素負荷量を概ね 4 倍に増加させた Exp. 7 が、ノリ養殖期間において表層 DIN 濃度を 3.5 mmol/m^3 以上に維持する有力な選択肢と考えられる。4 月 1 日に陸起源窒素負荷量の増加を停止し、すなわち感度実験の陸起源窒素負荷量が標準実験と同じになった後、感度実験の表層 DIN 濃度は速やかに低下し、概ね 1 か月程度で標準実験の水準に回復した。水平分布を見ると (図 10)、標準実験と比較して感度実験「Exp. 7」で表層 DIN 濃度が顕著に増加した海域は主に燧灘南西部の沿岸域に限られ、その他の海域では DIN 濃度の増加はほとんど見られなかった。この結果は、陸起源窒素負荷量の増加がノリ養殖区域以外の海域に大きな影響を及ぼさないことを示している。

感度実験における DIP 濃度の変化は DIN 濃度の変化と逆の傾向を示した (図 11)。8 つの感度実験すべてで DIP 濃度は低下し、その低下幅は概ね Exp. 1 から Exp. 8 にかけて増加している。4 月 1

日に陸起源窒素負荷量の増加を停止した後、感度実験の DIP 濃度が Control の水準に回復するまでに約 3.5 か月を要した。感度実験では窒素負荷量のみを増加させたため、植物プランクトンは増加した DIN を利用すると同時に DIP も消費し、その結果 DIP 濃度が低下したと考えられる。したがって、陸起源窒素負荷量のみを増加させる管理方法は、海域の DIP 濃度を過度に低下させるリスクがあると考えられる。

以上の感度実験の結果から、生活系および産業系の窒素負荷量の管理運転は、ノリ養殖期の表層 DIN 濃度を高めることが可能である一方で、海域の富栄養化や DIP 濃度の低下を引き起こす可能性もあると考えられる。

(2) カタクチイワシ餌料を対象とした 3 次元 eNEMURO モデルの開発

イ) 陸域起源の窒素・リン負荷量の経年変動に対するカイアシ類動物プランクトンの現存量の応答

観測データ (Yoneda et al., 2022) によると、燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトンの現存量 (5~7 月平均) は、2001 年から 2019 年にかけて顕著な経年変動を示し、その濃度水準から 3 つの期間に区分できる。2001~2005 年は現存量が高く、2006~2010 年は現存量が低下し、低水準を維持した。2011~2019 年は回復傾向を示したものの、2001~2005 年の高水準には達しなかった。そこで、これら 3 つの期間を代表する年として 2005 年、2010 年、2015 年を選定し、それぞれの年の動物プランクトン量について再現実験を実施した。使用したモデルは、前年度に開発した 3 次元 eNEMURO モデルである。3 つの計算では、陸起源生活系および産業系の窒素・リン負荷量をそれぞれの年の値に基づいて設定した。窒素負荷量は 2005 年に最も高く、2015 年に最も低かった (図 12)。

海底上 2 m から海面までの平均におけるカイアシ類動物プランクトン現存量の水平分布を見ると (図 13)、3 つの計算結果において空間分布のパターンは類似している。沿岸域では現存量が多く、燧灘西部の海峡部では少ない。計算結果は、燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトン現存量が 2005 年に最も高く、2010 年に最も低いことを示したが、2015 年に見られた現存量の回復傾向についてはモデルの再現性が十分ではなかった (図 14)。

ウ) カイアシ類動物プランクトン現存量の経年変動に関するメカニズムの解析

3 つの計算においてカイアシ類動物プランクトンの現存量が異なるメカニズムを理解するため、ボトムアップの影響について解析を行った。カイアシ類動物プランクトンは、3 つのサイズの植物プランクトン (PM, PLc, PLp) および自身より小さい動物プランクトン (ZM) を捕食する。3 つの計算において、これら 4 つの変数のうち PLp の生物量が最も多く、次いで PLc、PM、ZM の順に少なくなっている (図 15)。年別に見ると、PLp および PM の生物量は 2005 年に最も低かったのに対し、PLc および ZM の生物量は 2005 年に最も高かった。一方、カイアシ類動物プランクトンの摂食量を見ると、2005 年に最も高く、2010 年と 2015 年はほぼ同程度であった (図 16)。この結果は、捕食対象の生物量が最大でなくても、被捕食量が最大になることがあり得ることを示している。言い換えれば、ボトムアップのメカニズムはカイアシ類動物プランクトンの現存量の経年変動を部分的にしか説明できないため、摂食以外の要因も考慮する必要がある。

また、栄養塩の現存量が 4 種の捕食対象生物に与える影響を検討したところ、2005 年の DIN 濃度が最も高く、DIP 濃度は最も低かった (図 17)。2010 年および 2015 年の栄養塩濃度は概ね同程度であった。

以上より、本年度のシミュレーション結果はボトムアップメカニズムの重要性を示す一方で、カ

イアン類動物プランクトンの摂食対象に対する選好性および物理環境要因への依存性に関する統合的解析が、今後の課題であると言える。

(3) ノリ生産量の経年変動要因の解析およびノリと植物プランクトンの栄養競合の解明に向けたノリ生物過程を導入した低次生態系モデルの開発

ノリ生産量の経年変動要因の解明に向けた相関解析から、ノリ生産量と冬季の河川流量に有意の正の相関関係が認められたが（図 18）、表層水温、表層塩分、栄養塩濃度とは相関関係が認められなかった。冬季の栄養塩濃度は、植物プランクトンとノリに利用つくされ、どの年も非常に低濃度であったため有意な相関が得られなかったと考えられる。一方、河川流量は陸域からの栄養塩供給量の指標であり、この冬季の河川由来の栄養塩供給がノリ生産量を左右していることが明らかとなった。ただし、2018 年以降は、この関係性が不明瞭であり、その要因としては、近年の冬季水温の上昇に伴う藻食魚類の食害の影響の可能性が示唆された。また、下水処理場から栄養塩供給量を増加させる栄養塩管理運転を実施した年と実施しない年とのノリ生産量との関係を比較したところ、栄養塩管理の有無で統計的に有意な違いは認められなかった。そこで、河川由来の栄養塩供給量と下水処理場由来の栄養塩供給量を比較したところ、下水処理場由来の DIN（溶存無機窒素）供給量は河川由来の 0.5～1.0 倍と同程度であったが、河川水では DIN の 90%が硝酸塩であるのに対し、下水処理水では DIN の 90%がアンモニアであるという違いがあった。アンモニアは植物プランクトンに利用されやすく、下水処理水がノリ養殖漁場に到達するまでに植物プランクトンにより利用され尽くす可能性が示唆された。

数値モデル解析では、2023-2024 年度の 2 年間のノリ漁期含む連続計算を行い、植物プランクトン現存量の指標である Chl.a 濃度、栄養塩濃度、ノリ現存量の季節変動と経年変動を再現することに成功した（図 19）。特に、不漁年（2023 年度）と回復年（2024 年度）のノリ収穫量の大きな違いについて概ね再現することができた。このモデルの出力を用いて、ノリの養殖期間（1～3 月）の平均的な窒素循環について解析した。その結果、ノリと植物プランクトンの栄養塩競合については、植物プランクトンによる栄養塩消費量とノリによる消費量の比は、年により変化し（不漁年には 144:1、回復年には 79:1）、植物プランクトンがノリと比べて約 2 桁多く栄養塩を消費していることが明らかとなった（図 20）。回復年では、相対的にノリによる栄養塩消費量が増加し、植物プランクトンと比べてノリが有利な環境になっていたと考えられる。その理由は、回復年では河川からの硝酸塩供給の増加と系外への硝酸塩流出が減少することにより硝酸塩濃度が増加し、栄養塩制限に関する硝酸塩の半飽和定数が大きいノリでは栄養塩制限が緩和され増殖速度が上昇したが、半飽和定数が小さい植物プランクトンでは栄養塩制限がほとんど緩和されず増殖速度がほぼ一定であったためと考えられた。また、栄養塩の供給源について解析したところ、硝酸塩の供給は、河川からの供給量が主体であり、アンモニアの供給は、生物起源粒子の分解と堆積物からの供給が主体であり、下水処理施設からの供給はそれら半分程度と小さいことが明らかとなった（図 20）。

下水処理場の管理運転の効果について、栄養塩負荷量を 6 段階（現状×0 [管理なし]、現状×1 [標準実験]、現状×2、現状×3、現状×4、現状×5）に変えた感度実験を実施した。その結果、現状の管理運転による増産効果は、約 10 トンであり、管理運転により現状の 5 倍の栄養塩供給を行えば不作前の 100 トン程度の水準に回復する可能性が示された（図 21）。ただし、先に述べた通り、これまでの管理運転の有無による河川流量に対するノリ生産量には有意差が認められないことから、このモデルに考慮されていない藻食魚類による食害の影響やノリ養殖漁場への下水処理水中

アンモニアの低到達率の影響があるため、現実にはこの感度実験のようにノリ生産量が増加しない可能性がある。また、現状の 5 倍もの下水処理水を放出することは、水質汚濁防止法や瀬戸内法の総量規制などの法令を遵守することができない可能性があり、ここで示した栄養塩供給量は非現実的な供給量である可能性が高い。

(3) 燧灘広域及びノリ養殖海域における現地観測

浅海定線調査については、水産試験船「よしゅう」の船舶検査期間中であつた 12 月を除き、予定通り毎月 1 回の観測を行い、データを収集した。また、クロロフィル量分析用サンプルの採水を行い、愛媛大学へ送付した。西条市沖のノリ養殖漁場調査については、10 月中旬から週に 1 回木曜日前後に観測を行い、データを愛媛大学に提供した。

(4) 栄養塩類管理方策検討委員会の開催

愛媛県漁業協同組合代表理事専務の岩森雅章氏ならびに広島大学大学院統合生命科学研究科講師の首藤宏幸氏を外部有識委員とする検討委員会を令和 7 年 8 月 26 日および令和 8 年 1 月 16 日に開催した。両日とも委員 2 名に加えて水産庁、愛媛大学、愛媛県栽培資源研究所、水産研究・教育機構が参加し、燧灘における栄養塩類管理方策検討のためのモデル構築および栄養塩類管理の在り方について検討を行った。

委員会では課題担当者より、ノリ養殖を対象とした中解像度 3 次元 NPZD モデル、カタクチイワシ餌料を対象とした中解像度 3 次元 eNEMURO モデル、ノリと低次生態系の競合を対象としたノリを導入した eNEMURO-SW モデルから得られた研究成果について説明を行った。そして、委員からのコメントを受けて、次のような栄養塩管理の方策を提案する。

燧灘南西部におけるノリ色落ちを軽減するためには、現在実施されている下水処理場の管理運転に加えて、管理運転を行う下水処理場を増やすとともに、工場からの負荷量を大幅に増やす必要がある。効果を高めるためには、施肥や海底耕耘など他の栄養塩供給手法も合わせて検討すべきである。

カタクチイワシの餌料である動物プランクトンの現存量と栄養塩濃度の関係が示唆されたが、カタクチイワシ資源に対する栄養塩類管理の効果については不明な点が多い。燧灘における漁業生産を支えている植物プランクトンや動物プランクトン、特にカタクチイワシの餌料として重要な冷水性のカイアシ類と環境要因との関係についてのさらなる調査研究が必要である。

海域環境や低次生態系をめぐる物質循環の変化をモニタリングし、管理方策の効果や海域への影響を検証しながら順応的に取り組む必要がある。また、燧灘の栄養塩環境に対しては、陸域のみならず、隣接する備讃瀬戸、備後灘、安芸灘の影響も考えられることから、これら隣接する湾灘とも連携して栄養塩類の管理方策を検討することが望ましい。

【参考文献】

Morimoto, A., Mino, Y., Buranapratheprat, A., Kaneda, A., Tong-U-Dom, S., Sunthawanic, K., Yu X., and Guo, X. (2021): Hypoxia in the Upper Gulf of Thailand: Hydrographic observations and modeling. *Journal of Oceanography*. 77, 859–877.

Yoneda, M., Fujita, T., Yamamoto, M., Tadokoro, K., Okazaki, Y., Nakamura, M., Takahashi, M., Kono, N., Matsubara, T., Abo, K., Xinyu, G., Yoshie, N., (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.

Yoshie, N., X. Guo, N. Fujii, and T. Komorita (2011): Ecosystem and nutrient dynamics in the Seto Inland Sea, Japan. In Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry Vol.5, Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems, ed. by K. Omori, X. Guo, N. Yoshie, N. Fujii, I. C. Handoh, A. Isobe, and S. Tanabe, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 39-49.

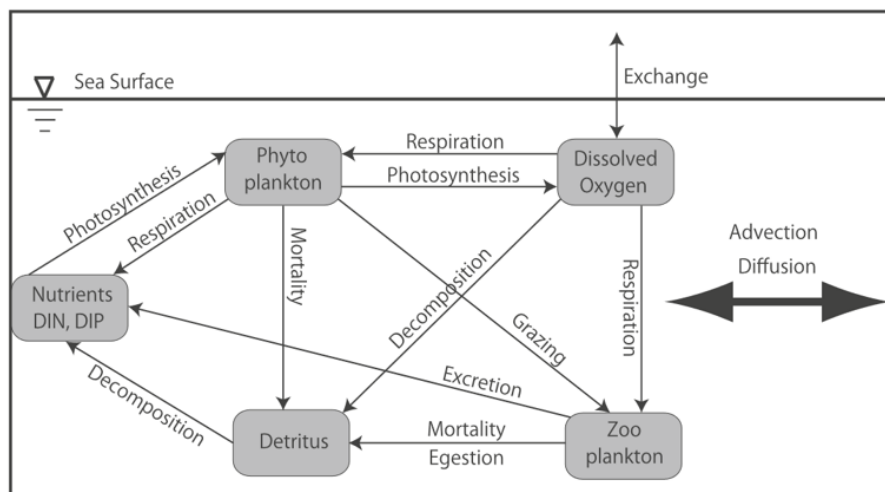


図1 低次生態系モデルの模式図。予報変数は栄養塩濃度 (DIN, DIP), 植物プランクトン, 動物プランクトン, デトリタス, 溶存酸素 (DO) などがある。主なプロセスは移流と拡散, 海面における酸素フラックス, 植物プランクトンの光合成, 呼吸, 死亡と被摂食, 動物プランクトンの摂食, 呼吸, 分泌と排泄, デトリタスの分解などである。

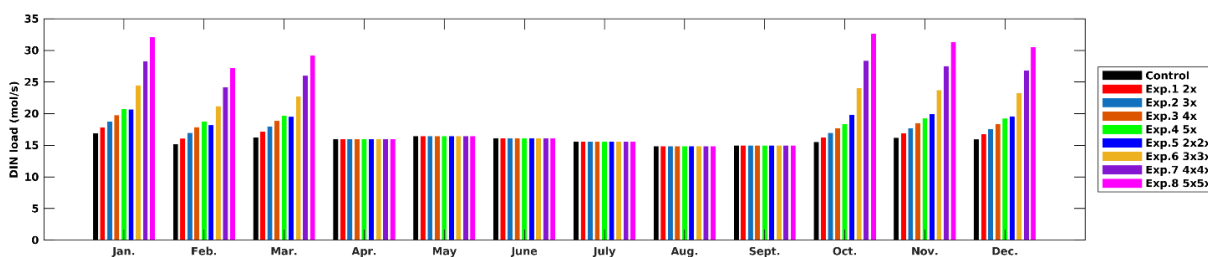


図2 eNEMURO タイプの生態系モデルの模式図。予報変数は, 紫の栄養塩 4 種, 緑の植物プランクトン 4 種, 茶色の動物プランクトン 4 種, 赤のデトリタス 3 種があり, 主な物質フローは底層との物質交換, 光合成, 捕食, 分解などである。

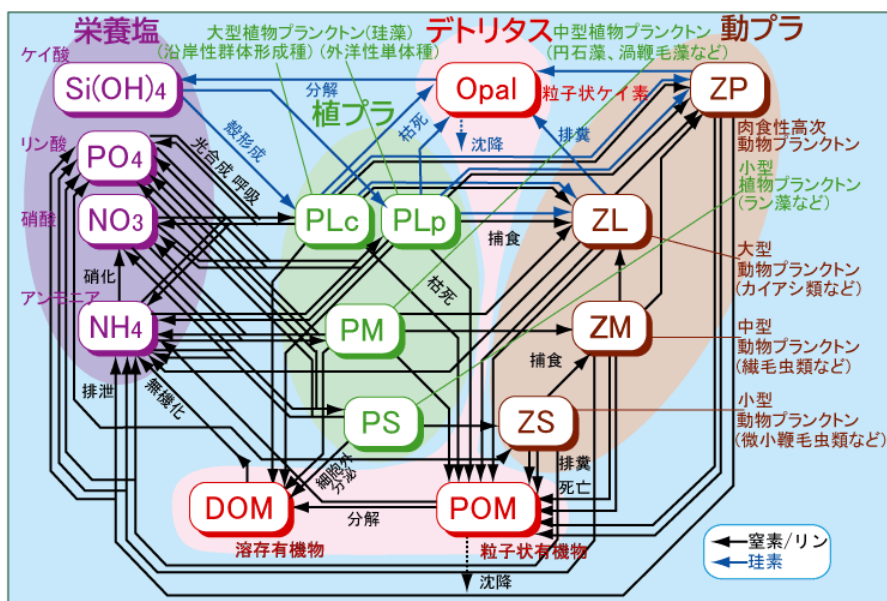


図3 標準実験 (Control) および感度実験 (Exp. 1~8) における燐灘に排出した生活系および産業系の窒素負荷量の月別変化

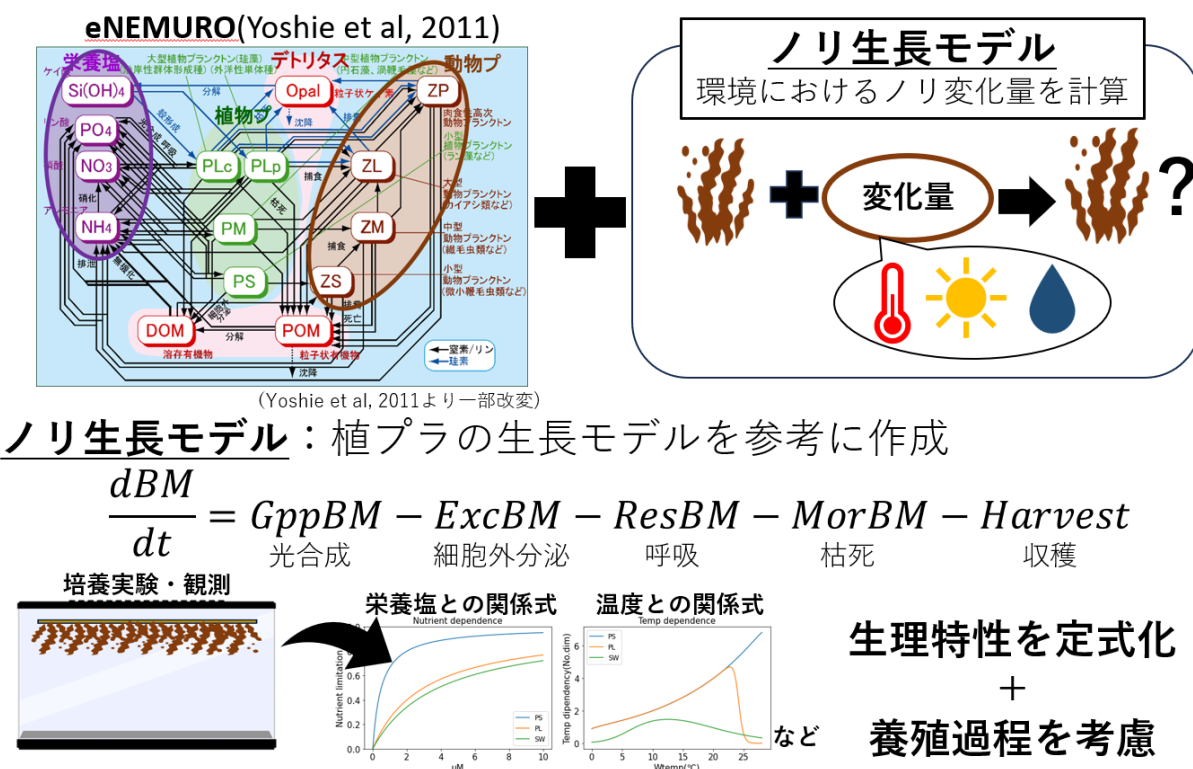


図4 ノリ生物過程を導入した生態系モデル eNEMURO-SW の模式図。ノリの生長は、海洋環境（水温、光量、栄養塩濃度）に応じて変化し、収穫により定期的に減少する過程を考慮している。

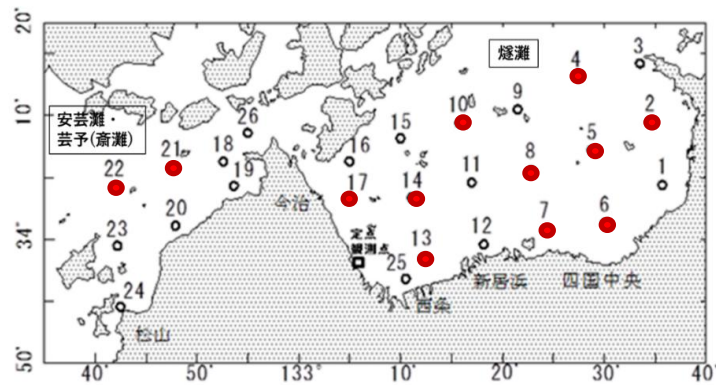


図5 燧灘における浅海定線観測の観測点

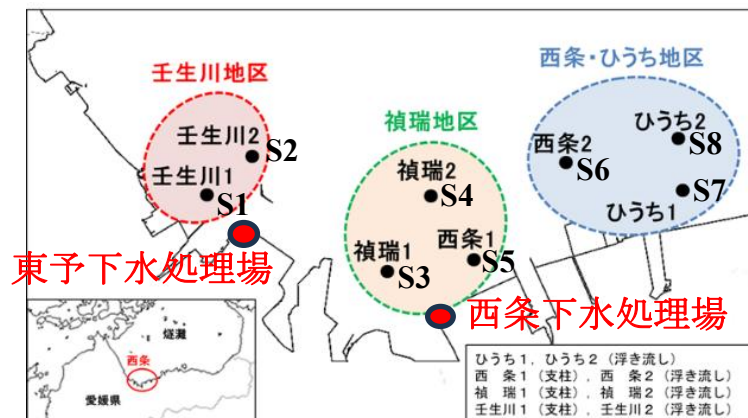


図6 西条沿岸におけるノリ養殖漁場の観測点

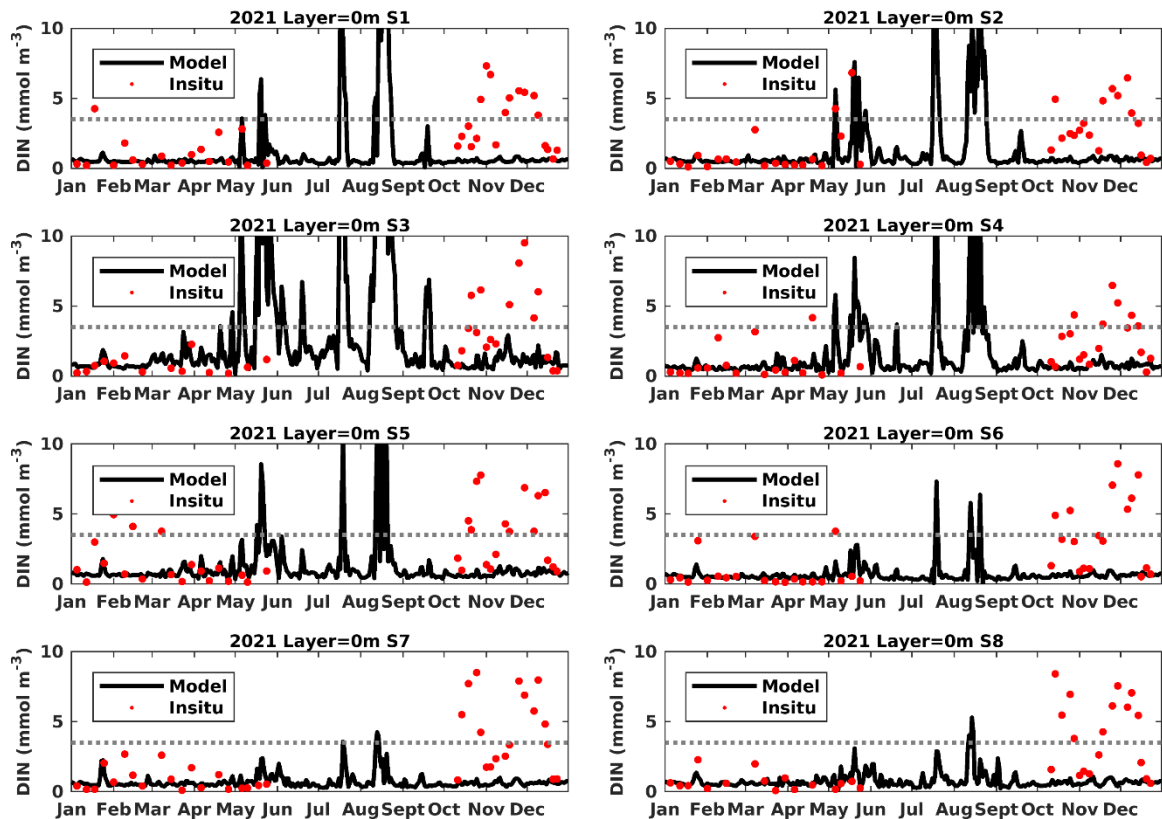


図7 NPZD型モデルを用いて算出した、燧灘南部のノリ養殖区域における観測点(S1～S8)での表層DIN濃度(mmol/m^3)の日平均値の変化を示す。図中の破線($3.5 \text{ mmol}/\text{m}^3$)は、ノリの色落ちの臨界値を表している。観測点の位置は図6に示す。

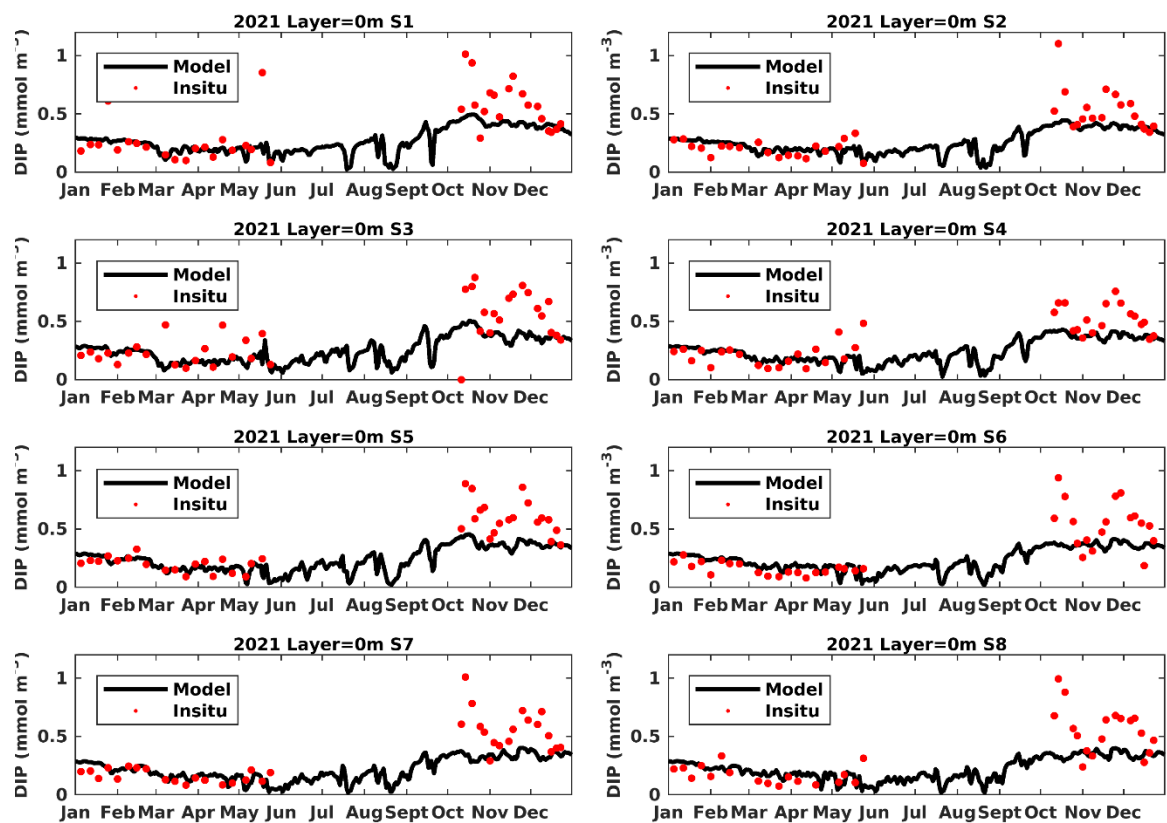


図8 NPZD 型モデルを用いて算出した、燧灘南部のノリ養殖区域における観測点（S1～S8）での表層 DIP 濃度（mmol/m³）の日平均値の変化を示す。観測点の位置は図6に示している。

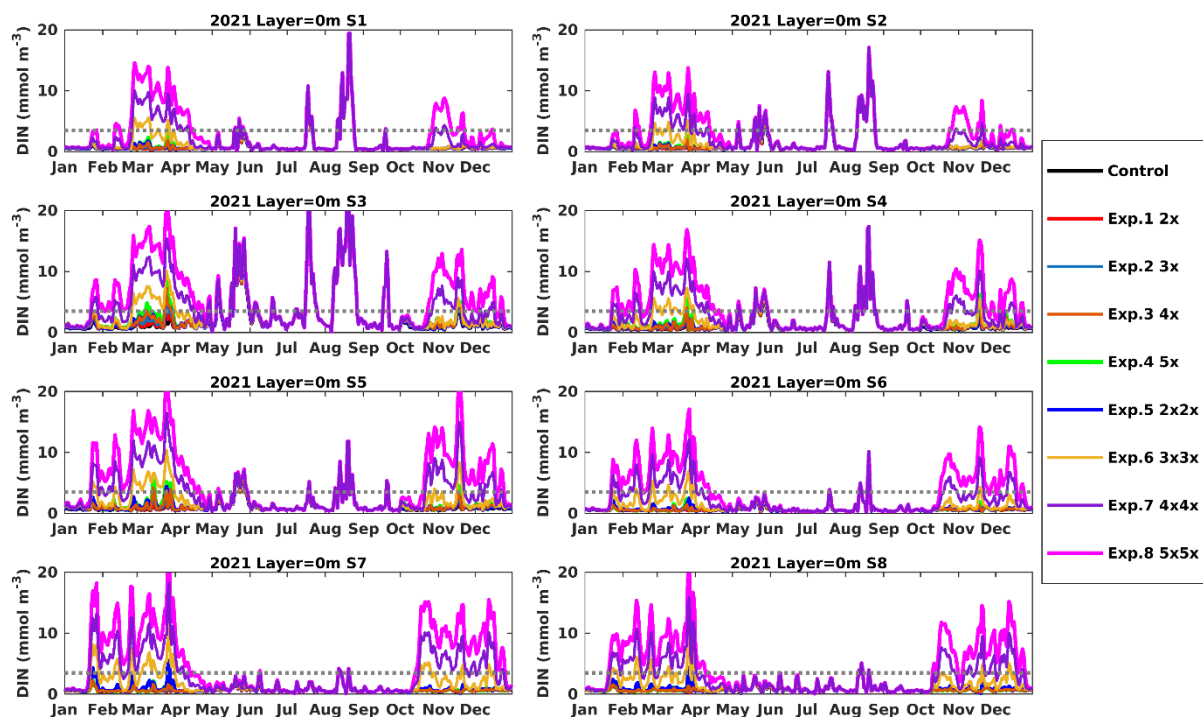


図9 観測点 (S1~S8) における9つのシナリオで求めた表層 DIN 濃度 (mmol/m^3) の日平均値の変化。“Control” および “Exp.1” ~ “Exp.8” の詳細は図3を参照。観測点の位置は図6に示す。

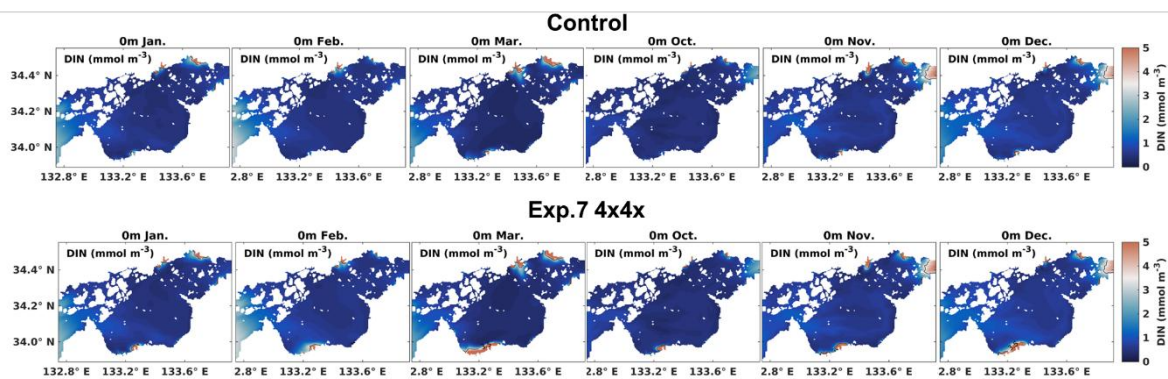


図10 NPZD型モデルを用いて算出した燧灘における表層 DIN 濃度 (月平均値、単位： mmol/m^3) の水平分布を示す。“Control” および “Exp.7” の10月から3月までの結果である。

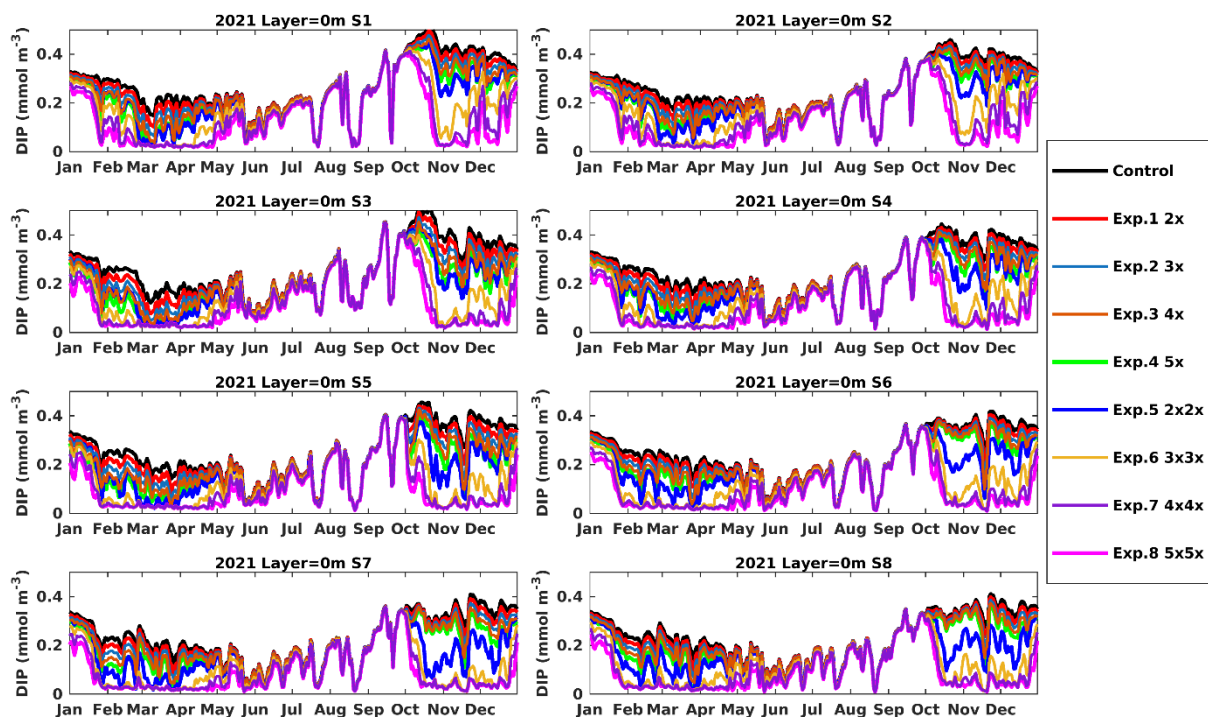


図 11 観測点 (S1～S8) における 9 つのシナリオで求めた表層 DIP 濃度 (mmol/m^3) の日平均値の変化。“Control” および “Exp. 1” ～ “Exp. 8” の詳細は図 3 を参照。観測点の位置は図 6 に示す。

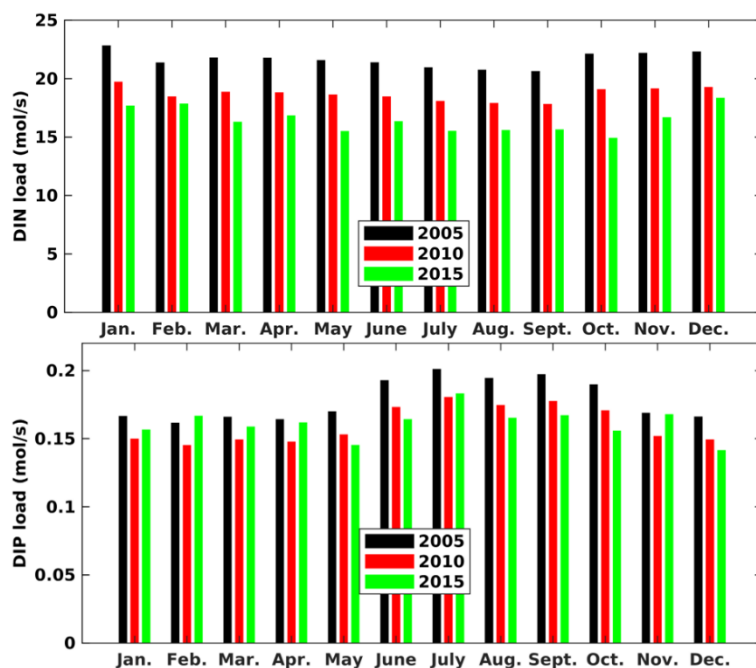


図 12 (上) 3 つの期間に対応する陸起源窒素負荷量 (mol/s) の季節変化。(下) 3 つの期に対応する陸起源リン負荷量 (mol/s) の季節変化。

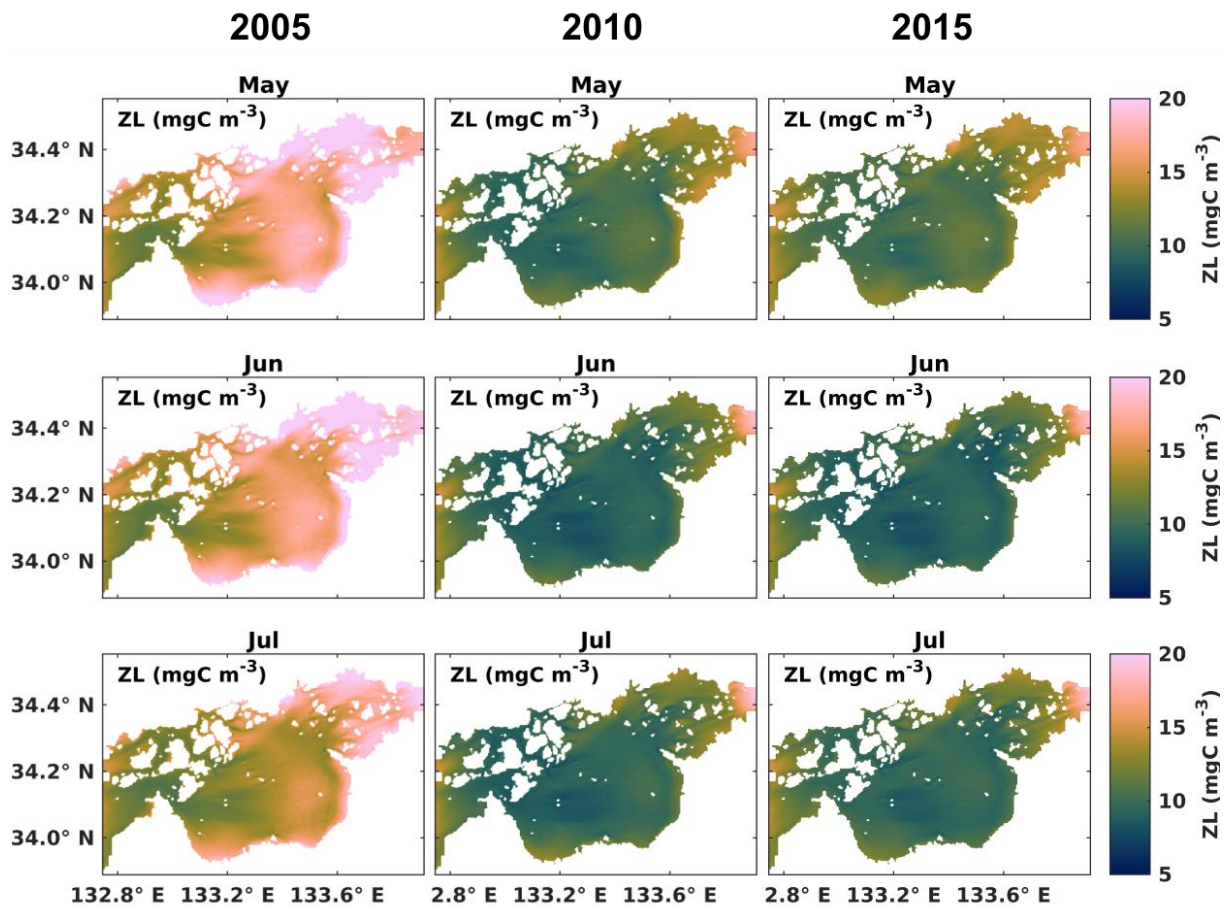


図 13 燧灘におけるカイアシ類動物プランクトンの 3 つの期間の 5 月、6 月および 7 月における生物量 (mg C/m^3) の水平分布。

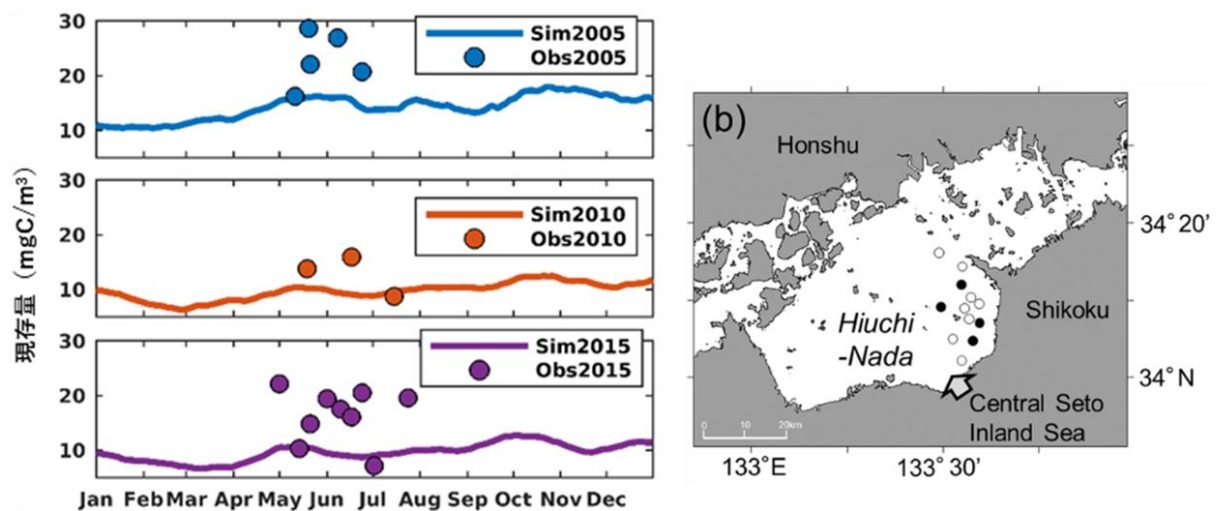


図 14 (左) 燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトンの 3 つの期間における観測値とモデル計算結果の季節変化。(右) カイアシ類動物プランクトンの観測点(白丸, Yoneda et al., 2022)。

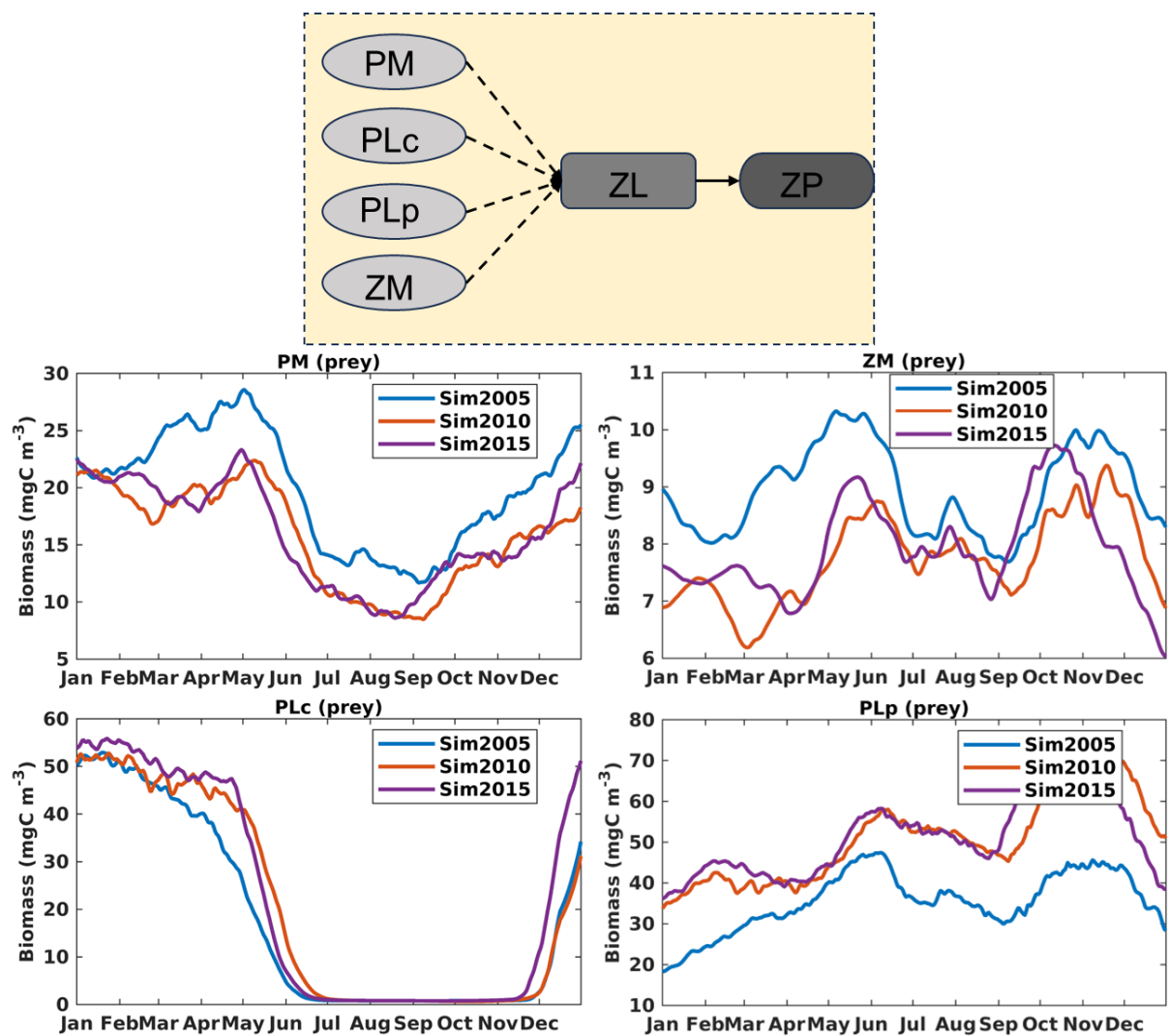


図 15 (上) カイアシ類動物プランクトンの 4 つの摂食対象：小型植物プランクトン (PM)、沿岸性大型植物プランクトン (PLc)、外洋性大型植物プランクトン (PLp)、中型動物プランクトン (ZM)。カイアシ類動物プランクトンの捕食者の一つである肉食性動物プランクトン (ZP)。
(下) 燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトンの摂食対象生物の存在量 (mg C/m³) の 3 期間における季節変化。

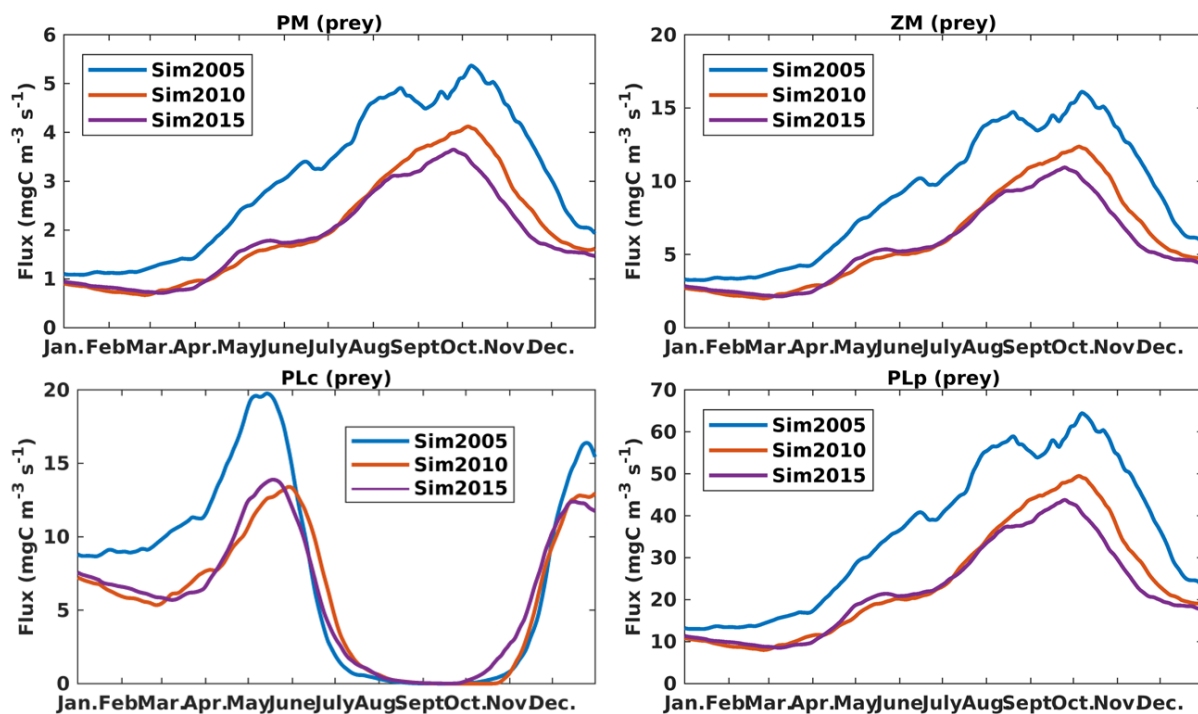


図 16 燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトンの摂食量 ($\text{mg C}/(\text{m}^3 \text{ s})$) の 3 期間における季節変化。

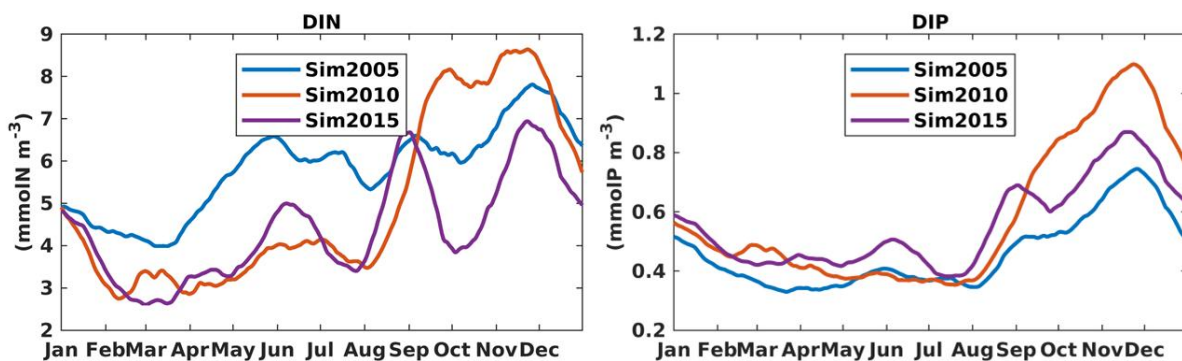


図 17 燧灘東部における DIN および DIP 濃度 (mmol/m^3) の 3 つの期間における季節変化。

1 月,2 月の平均河川流量とノリ生産枚数

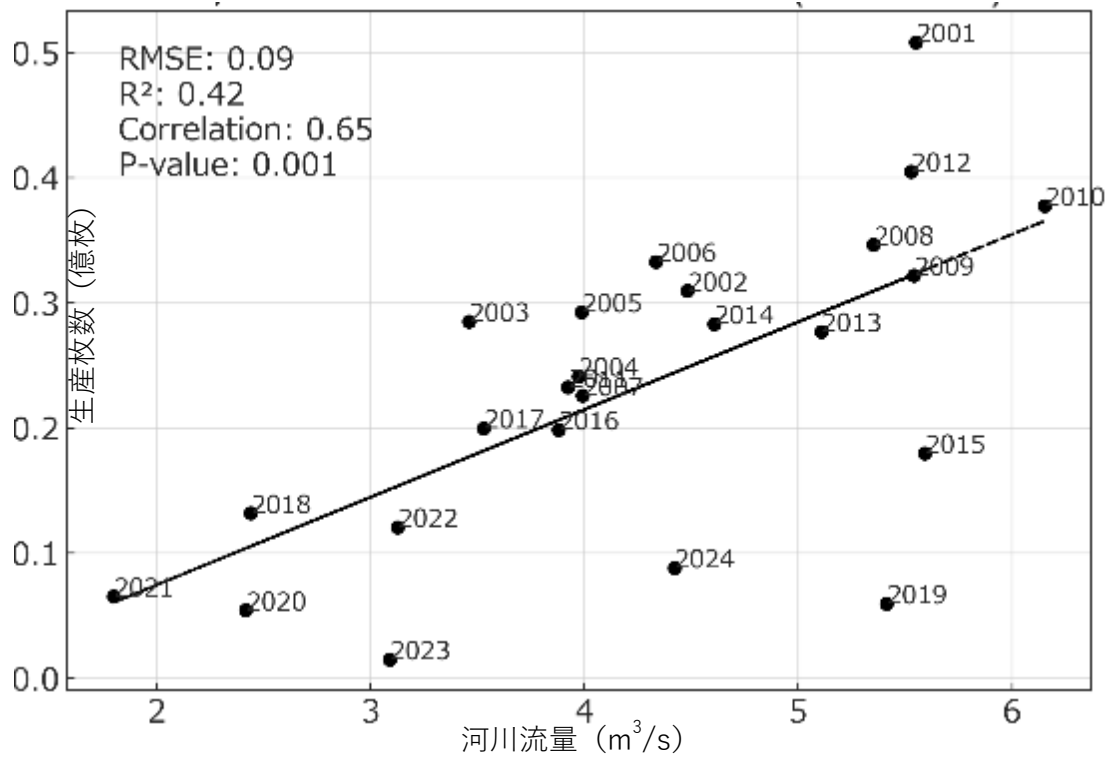


図 18 燧灘におけるノリ生産量と冬季河川流量の関係

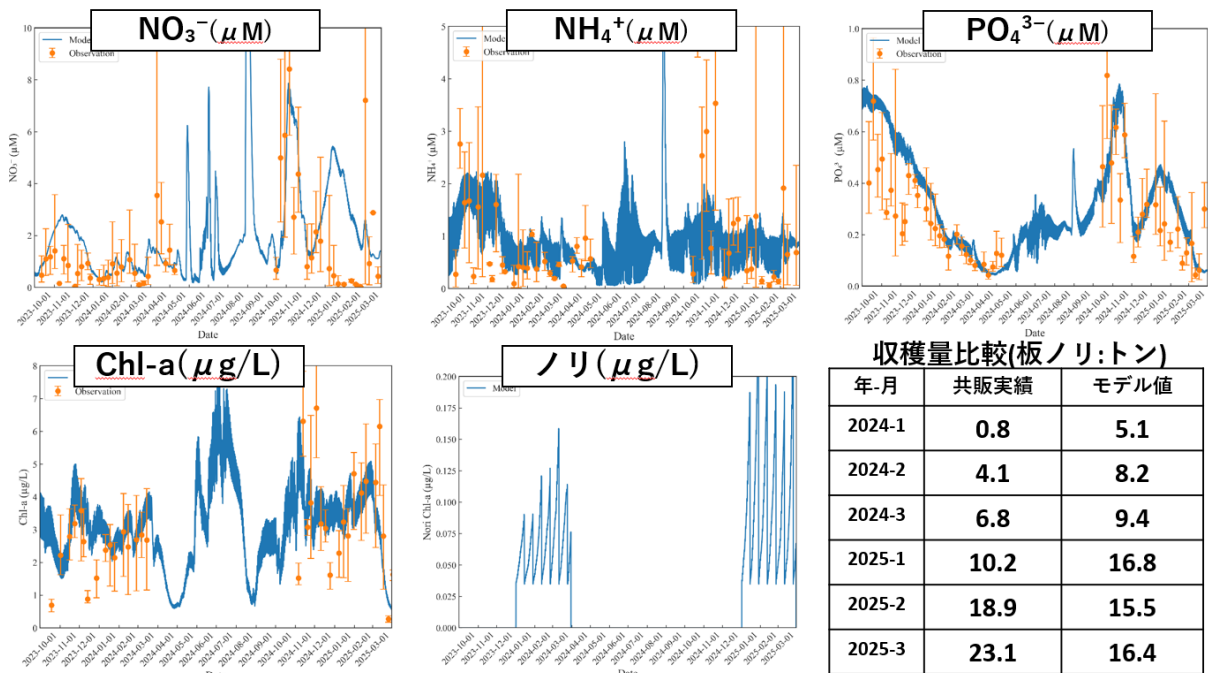


図 19 eNEMURO-SW による低次生態系構成要素とノリ現存量の時間変化(2022 年 10 月 1 日から 2025 年 3 月 31 日)。モデルの出力は青線で、観測値はオレンジの点で示す。

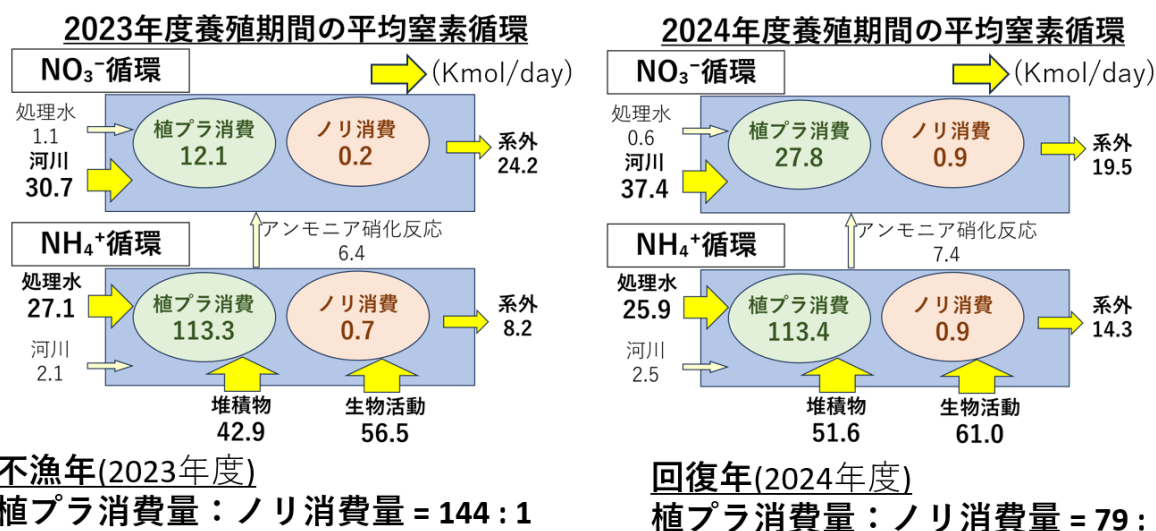


図 20 eNEMURO-SW によるノリ養殖海域の 1 月から 3 月の平均的な窒素循環像(上：硝酸塩循環，下：アンモニア循環，左：不漁年（2023 年度），右：回復年（2024 年度），消費・供給などの Flux の単位は Kmol/day)。

下水処理施設からの栄養塩負荷条件：

× 0.0(管理無し) / × 1.0(現状) / × 2.0 / × 3.0 / × 4.0 / × 5.0

Nori Harvest(DW・ton)

Date	Case 1 × 0.0	Control × 1.0	Case2 × 2.0	Case3 × 3.0	Case4 × 4.0	Case5 × 5.0
2024-1	3.2	5.1	8.2	12.6	16.7	20.4
2024-2	6.1	8.2	11.1	14.3	17.5	20.5
2024-3	5.5	9.4	15.3	21.7	27.9	33.7
合計	14.8	22.7	34.6	48.6	62.1	74.6
2025-1	14.3	16.8	19.3	21.7	24.0	26.1
2025-2	12.1	15.5	19.3	23.1	26.8	30.4
2025-3	10.5	16.4	22.6	28.6	32.2	39.5
合計	36.9	48.7	61.2	73.4	83.0	96.0

図 21 eNEMURO-SW による下水処理施設からの栄養塩負荷量を変化させた感度実験の結果(上：不漁年（2023 年度）のノリ生産量の変化，下：回復年（2024 年度）のノリ生産量の変化，現状の栄養塩負荷量を 0.0～5.0 倍に段階的に変化，単位は乾燥重量 t)。