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

令和６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

目　次

１． 本事業の目的および実施概要 ･･･ 1

２． 令和５年度成果報告
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 ････････････････････ 5
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 ･･････････････････ 15
イ． 栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明 ･･････････････････ 23
ウ． 栄養塩類等の水質環境が藻場の生物生産力等に及ぼす影響の解明 ･･････････････ 31
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 ･･･ 36
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 ･･･ 42
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･･････････････････････ 50
３）栄養塩類管理方策の検討 ･･･ 59

Ⅱ. 東京湾
１）栄養塩類等の水質環境の変化が閉鎖性内湾のベントス等の低次生態系に
及ぼす影響の解明 ･･･ 68
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 ･･･ 86
３）栄養塩類管理方策の検討 ･･･ 100

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 ･･･ 106
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 ･･･ 120
３）栄養塩類管理方策の検討 ･･･ 130

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 ･･････････････ 160

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，本業務では，国立研究開発法人水産研究・教育機構，国立大学法人，公立大学法人，県，一般社団法人から組織される研究機関が，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し，適切な栄養塩類管理の検討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

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

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

② 河口および周辺海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明

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

イ．栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明

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

ウ．栄養塩類等の水質環境が藻場の生物生産力等に及ぼす影響の解明

藻場は重要な漁場環境であるが，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。また変遷する藻場植生が磯根生物等の植食動物へ与える影響も解明し，一次生産者および動物類を含む藻場生産力の評価を行う。

２）栄養塩類等の水質環境が小型魚類の生産量に及ぼす影響の解明

ア．栄養塩類等の水質環境が小型魚類の餌料環境に及ぼす影響の解明

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

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

とした動物プランクトンの飼育実験等を行う。

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

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

イ．水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の解明

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

３）栄養塩類管理方策の検討

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

Ⅱ．東京湾

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

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

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

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

３）栄養塩類管理方策の検討

東京湾全体の栄養塩動態とノリ漁場等の局所海域における栄養塩環境との関係を検討することを目的に，選定した数値モデルの実装を行う。数値モデルの駆動に必要となる，栄養塩等の観測データ，栄養塩の起源や動態に関わる外洋環境，陸域負荷，気象・海象場の情報，およびノリ漁場等における栄養塩に関わる情報を継続して収集整理する。数値モデルを用いたプロトタイプ計算を試行し，栄養塩の起源を踏まえた栄養塩管理方針の検討課題を整理する。専門家で構成される検討委員会は，年 2 回開催する。

Ⅲ．伊勢・三河湾

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

伊勢・三河湾における栄養塩類等の水質環境の変化が動・植物プランクトン等の低次生態系に与える影響を明らかにするために，既存の海洋観測資料および生物試料を収集・整理・分析し，動物プランクトンと植物プランクトンの群集構造の季節・経年変動を解析して，そ

の変動に影響を及ぼす外的な環境要因および内的要因について比較検討する。また，湾内の栄養塩類等の水質環境に影響を及ぼす外洋からの循環関係を評価するために，湾内外の循環構造や栄養塩動態を評価するモデルを検討する。

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

近年，アサリ等の二枚貝類は各生活段階において，好適餌料となる植物プランクトンのサイズや種の変化が起こることが明らかになってきた。現状の海洋研究では，餌料環境の評価にはクロロフィル値を用いることが多い。しかし，クロロフィル値は植物プランクトン総量を示すのみで，そのサイズ・種組成は分からない。さらに，餌料環境により変化するアサリの生理状態に関する詳細な指標は開発されていない。本課題では，三河湾において，アサリ資源状況や栄養塩や餌料等の環境要因に関する現地調査を行い，アサリ資源量に及ぼすそれらの関連を検討する。さらに現地調査より得られた試料等を用いて，メタバーコーディングによる種組成解析を用いた餌料環境評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針の検討を行う。

伊勢・三河湾を対象海域として，栄養塩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管理方策を検討する。このため，専門家で構成される検討委員会を年２回開催する。

Ⅳ．栄養塩類供給技術の開発・実証・高度化

藻類養殖場における生産力低下の原因解明と栄養塩供給手法の開発

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

課題番号：Ⅰ－１）－ア ①
課題名：瀬戸内海西部海域における二枚貝餌料環境の変動要因解明

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

【方法】

（1）植物プランクトン組成に影響を与える環境要因の検討

ア）水産技術研究所廿日市庁舎の地先海域における観測

今年度は，二枚貝の餌として重要と考えられる珪藻類の組成に影響を与える環境要因を抽出するため，珪藻類の組成および環境因子の短期変動を広島湾の一定点にて調べた。 2023 年 5 月から 8 月にかけて週に一度，水産技術研究所廿日市庁舎地先に設定した Stn. A（図 1）において，表層，1 m 層，中層（水深の半分）および底層の採水と多項目水質計による水質の鉛

直観測を行った。採水試料は研究室に持ち帰り，各種珪藻類の検鏡と栄養塩濃度分析に供した。

イ）広島湾および備後灘における観測

珪藻類の組成に影響を与える環境要因を抽出するため，環境の異なる広島湾と備後灘で，珪藻類の組成と環境因子を調査した。2023 年 5，8 および 10 月に，広島湾の 6 定点および備後灘の 6 定点（図 2）において，原則として表層，1，3，5 および B-1 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，各種珪藻類の検鏡と栄養塩濃度分析に供した。なお，2024 年 1 月中旬に備後灘で観測を行ったが，対をなす 2024 年 2 月上旬の広島湾における試料の分析が処理の都合上終了してないため（2024 年 2 月 22 日現在），本稿では 2024 年 1 月および 2 月の観測結果は割愛する。

（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

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。2023 年 6 月から 8 月にかけて週に一度，広島市水産振興センターにより採取された広島湾の 4 定点（図 3）における表層の海水試料を譲り受けた。試料は研究室内に持ち帰り，各種微小珪藻類の生物量の分析に供した。微小珪藻類は直径が数 μm であることから検鏡での同定が不可能であるため，先行研究で開発した微小珪藻類 6 種（*Cyclotella* sp. 1～3，*Skeletonema menzelii*，*Chaetoceros tenuissimus* および *Minidiscus comicus*）を検出する定量 PCR の系でそれぞれの生物量を調べた。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 4 定点における観測値を平均して用いた。

イ）各種植物プランクトンの栄養成分の分析

今年度は，マガキ D 型幼生にとって餌料価値が高いと判断された微小珪藻類の *Cyclotella* sp. 1（後述），過去に圧倒的に優占していた珪藻類の *Skeletonema* 属，近年優占度が増加した珪藻類の *Leptocylindrus* 属および *Pseudo-nitzschia* 属について栄養成分を調べた。*Cyclotella* sp. 1 は 2021 年の 7 月に広島湾から単離したもの，*Skeletonema* 属については 2021 年 7 月に広島湾から単離した *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex，*Leptocylindrus* 属については 2023 年 5 月に広島湾から単離した *Leptocylindrus danicus*，*Pseudo-nitzschia* 属については 2023 年 7 月に広島湾から単離した *Pseudo-nitzschia* sp.の培養株を用いた。水温 23℃, 光量子束密度 60 μmol/m^2/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，Lowry 法によるタンパク質の定量（Yamasaki et al., 2019），フェノール硫酸法による中性糖の定量（McKelvy and Lee, 1969），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。

【結果】

（1）植物プランクトン組成に影響を与える環境要因の検討

ア）水産技術研究所廿日市庁舎の地先海域における観測

図 4 に 2023 年 5 月から 8 月の Stn. A における表層および底層の水温，塩分，DIN，DIP および DSi の変動を示す。水温は表底層ともに期間を通して上昇傾向であった。塩分は 7 月 4 日から 16 日にかけて表底層ともに低下し，同時に底層の DIN，表底層の DSi の大きな増加が確認された。その後，8 月 7 日から 16 日にかけては表底層の DIN および DIP の大きな増加が確認された。DIP については，底層の値が大潮期に高くなる傾向を示した。7 月の塩分低下時に表層の DIN の増加が確認されなかった原因としては，このタイミングで珪藻類が増加しており（後述，図 5），それらによる消費が考えられた。また，8 月 7 日から 16 日にかけては塩分の低下は起こっていないが，大潮期でかつ強風が吹いていたことから（14～15 日の最大風速 9～10 m/s，広島地方気象台），ここでの DIN および DIP の増加は，鉛直混合に伴う底質からの供給によるものと考えられた。

図 5 に 2023 年 5 月から 8 月の Stn. A の表層における各種珪藻類の細胞密度の変動を示す。今年度，Stn. A で優占した珪藻類は *Skeletonema* 属，*Chaetoceros* 属，*Pseudo-nitzschia* 属および *Leptocylindrus danicus* であった。7 月 4 日から 16 日にかけての塩分低下のタイミングで（図 4），*Pseudo-nitzschia* 属および *L. danicus* が大きく増加した。その後，8 月 16 日に DIN および DIP が増加した（図 4）後に，*Skeletonema* 属の大きな増加が確認された。7 月の塩分低下時には DIN は大きく増加したものの DIP の大きな増加は確認されず（図 4，底層の値から判断），ここでは *Skeletonema* 属の大きな増加は起こらなかったことから，DIP が *Skeletonema* 属の増殖を制限した可能性が考えられた。今後，現場個体群への DIN および DIP の添加試験や，各種珪藻類の培養株を用いて DIN および DIP 濃度等に対する増殖応答を調べることで，各種珪藻類の増殖を制限する要因を検討する予定である。

イ）広島湾および備後灘における観測

図 6 に 2023 年 5，8 および 10 月に広島湾および備後灘の表層にて確認された珪藻類の組成を示す。5 月の観測の結果，広島湾では *Cerataulina* 属および *Dactyliosoren* 属が優占したが，備後灘では Stn. B4 を除き *Eucampia* 属が優占した。その後，8 月の観測では，広島湾では *Pseudo-nitzschia* 属や *Chaetoceros* 属，備後灘では *Skeletonema* 属が占める割合が多くなった。10 月に入ると，広島湾では *Skeletonema* 属，備後灘では *Chaetoceros* 属が優占した。表 1 に，広島湾および備後灘における各月の水柱当たりの栄養塩濃度を示す。各観測における DIN，DIP および DSi の値はそれぞれ 1.78～3.97 μM，0.05～0.83 μM および 5.31～39.62 μM の範囲であった。出現した珪藻類との関係を見ると，*Skeletonema* 属が優占した 8 月の備後灘および 10 月の広島湾では DIP が高いという点が共通していた。広島湾および備後灘における四季の観測は，本年度までで通算 3 ヵ年実施した。今後，全ての観測データの統計解析等を行い，珪藻類の組成に影響を与える環境因子を抽出する予定である。

（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 7 に 2023 年 6 月から 8 月に広島湾の表層にて確認された各種微小珪藻類の組成を示す

（図は各微小珪藻類の DNA コピー数の全定点平均値により作成）。今年度，広島湾で優占した微小珪藻類は *Cyclotella* sp. 1，*Cyclotella* sp. 2，*Skeletonema menzelii* および *Chaetoceros tenuissimus* の 4 種であった。7 月 3 日から 7 月 24 日までの期間は *Cyclotella* sp. 1，*Cyclotella* sp. 2，および *S. menzelii* が優占したが，それ以外の期間は *C. tenuissimus* が優占した。

図 8 に各種微小珪藻類の DNA コピー数と Settlement index との関係を示す。今年度優占した 4 種のうち，*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ほど，その後の着底の成功率が高かったことを意味し，*Cyclotella* sp. 1 がマガキ D 型幼生の好適な餌であることが示唆された。

イ）各種植物プランクトンの栄養成分の分析

図 9 に各珪藻類に含まれるタンパク質および糖の濃度を示す。タンパク質濃度については，*Cyclotella* sp. 1 と *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex が同程度あり，*Pseudo-nitzschia* sp.はその半分程度，*Leptocylindrus danicus* は五分の一以下であった。また，糖濃度については，*Cyclotella* sp. 1 が最も高く，*Pseudo-nitzschia* sp.，*L. danicus*，*S. marinoi-dohrnii* complex の順で続いた。よって，*Cyclotella* sp. 1 のタンパク質および糖の濃度が今回分析した 4 種の中で最も高かったという結果は，*Cyclotella* sp. 1 がマガキ D 型幼生の好適な餌であるという現場観測から得られた結果を支持するものであった。一方，*L. danicus* のタンパク質濃度が他種よりも著しく低かったことから，本種の餌料価値は高くない可能性が考えられた。

表 2 に各珪藻類に含まれる脂肪酸の組成を示す。植物プランクトンの餌料価値の指標として，n-3 系や n-6 系の脂肪酸が注目されている。珪藻類は n-6 系の脂肪酸が極端に少ないが，n-3 系の脂肪酸を多く含有することが報告されており（Hikihara et al., 2020），同様の傾向が本研究でも確認された。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，*Cyclotella* sp. 1 は他の種に比べパルミチン酸の割合が高くミリスチン酸の割合が低いなど，同じ珪藻類でも種により脂肪酸組成が大きく異なることが示された。

今後，今回の分析結果の再現性を確認するとともに，今回取り扱わなかった種についても栄養成分の分析を進め，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リストの作成を目指す。また，各種植物プランクトンを餌料とする二枚貝の飼育試験の準備を進めており，そうした飼育試験の結果と栄養成分の分析結果を総合することで，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予定である。

【謝辞】

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

【参考文献】

浜口昌巳．一次生産の変化と有用種の関係 (二枚貝)．水産総合研究センター研究報告, 34, 33–47, 2011.

Hikihara R., Yamasaki Y, Shikata T, Nakayama N, Sakamoto S, Kato S, Hatate H, Tanaka R. Analysis of phytosterol, fatty acid, and carotenoid composition of 19 microalgae and 6 bivalve

species. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 29, 461–479, 2020.

Matsubara T, Yamaguchi M, Abe K, Onitsuka G, Abo K, Okamura T, Sato T, Mizuno K, Lagarde F, Hamaguchi M. Factors driving the settlement of Pacific oyster *Crassostrea gigas* larvae in Hiroshima Bay, Japan. *Aquaculture*, 563, 738911, 2023.

McKelvy J. F, Lee Y. C. Microheterogeneity of the carbohydrate group of *Aspergillus oryzae* α-amylase. *Archives of biochemistry and biophysics*, 132, 99–110, 1969.

Tanaka R, Uchida K, Ishimaru M, Ito M, Matsumoto N, Taoka Y, Hatate H. Effect of seawater reared on the nutritional composition and antioxidant activity of edible muscle in smoltified landlocked masu salmon (*Oncorhynchus masou masou*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 200–208, 2018.

Yamasaki Y, Ishii K, Hikihara R, Ishimaru M, Sato F, Taga S, Kishioka M, Matsunaga S, Shikata T, Abe M, Kato S, Tanaka R, Murase N. Usefulness of the euglenophyte *Eutreptiella eupharyngea* as a new diet alga for clam culture. *Algal Research*, 40, 101493, 2019.

山下亜純. 豊後水道東部沿岸域における植物プランクトン群集の変動機構に関する研究. 愛媛県農林水産研究所水産研究センター研究報告, 1, 57–91, 2013.

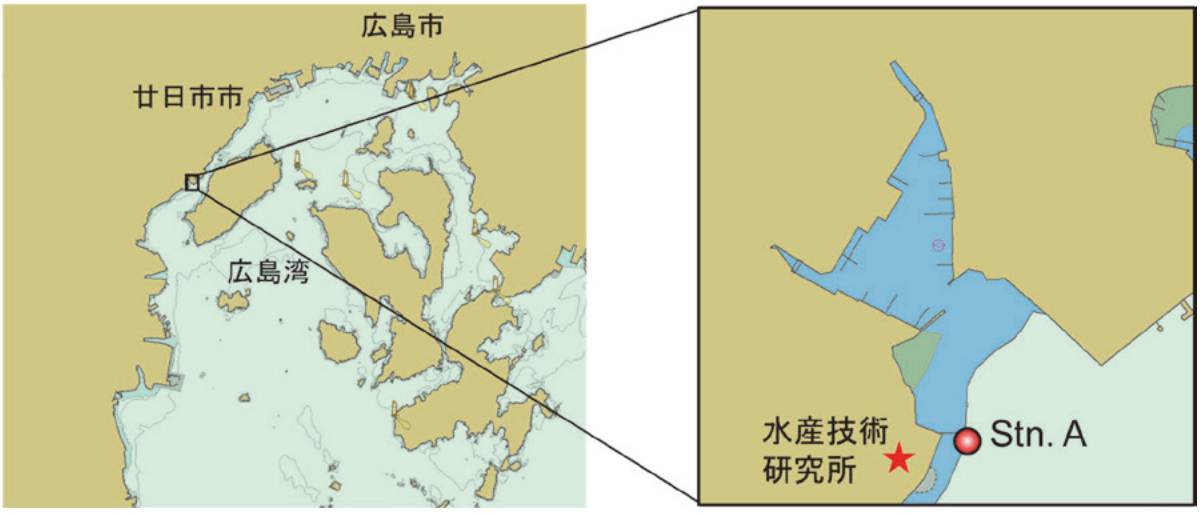

図 1　水産技術研究所廿日市庁舎地先における観測定点

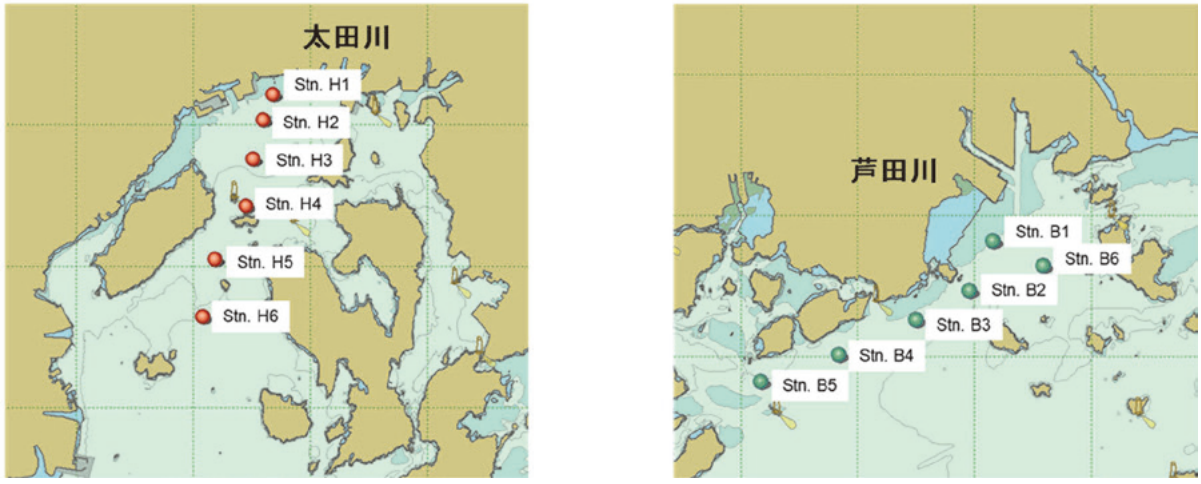

図 2　広島湾（左）および備後灘（右）における観測定点

図 3　マガキ浮遊幼生餌料観測定点

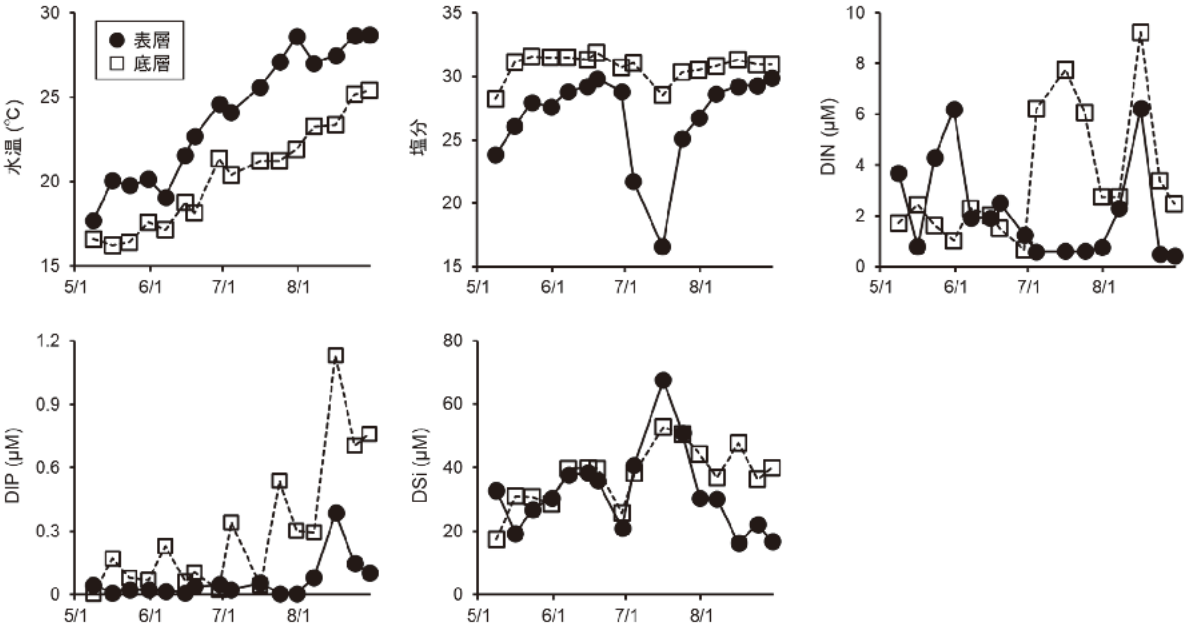

図 4　2023 年 5 月から 8 月の Stn. A における表底層の水温，塩分，DIN，DIP，DSi の変動

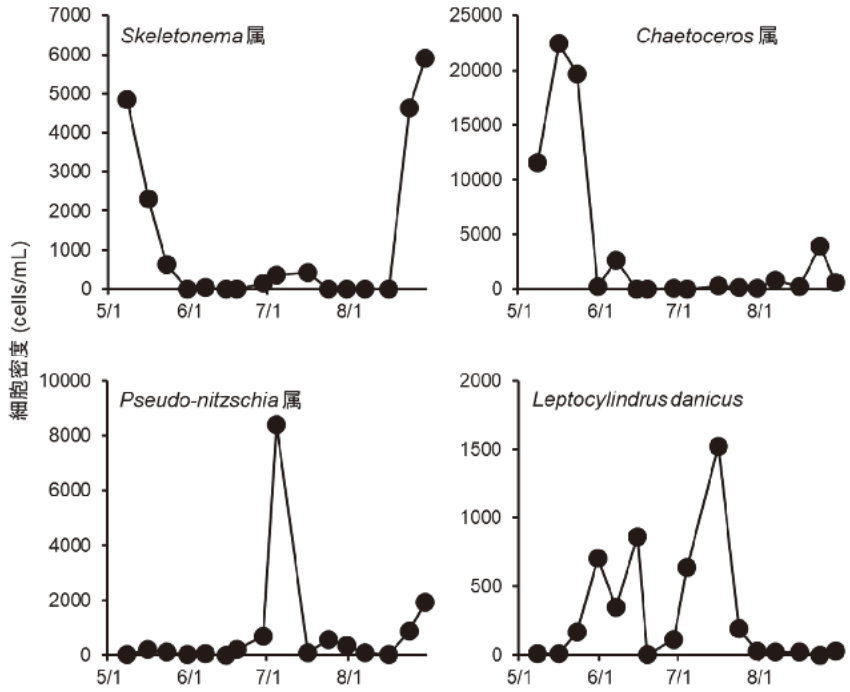

図 5　2023 年 5 月から 8 月の Stn. A の表層における各種珪藻類の細胞密度の変動

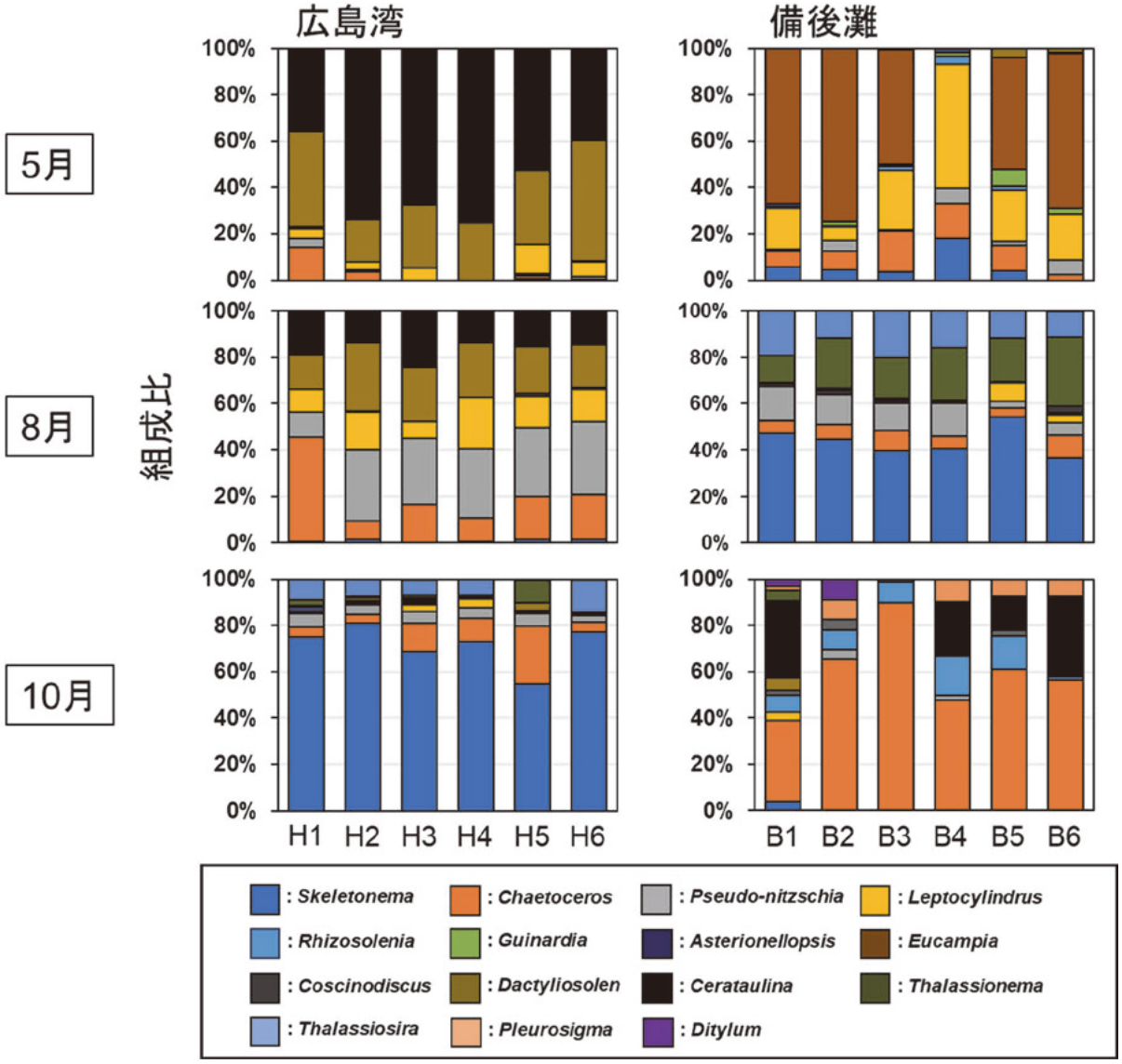

図 6　2023 年の 5，8 および 10 月における広島湾および備後灘の各定点における珪藻類組成（表層における観察結果）

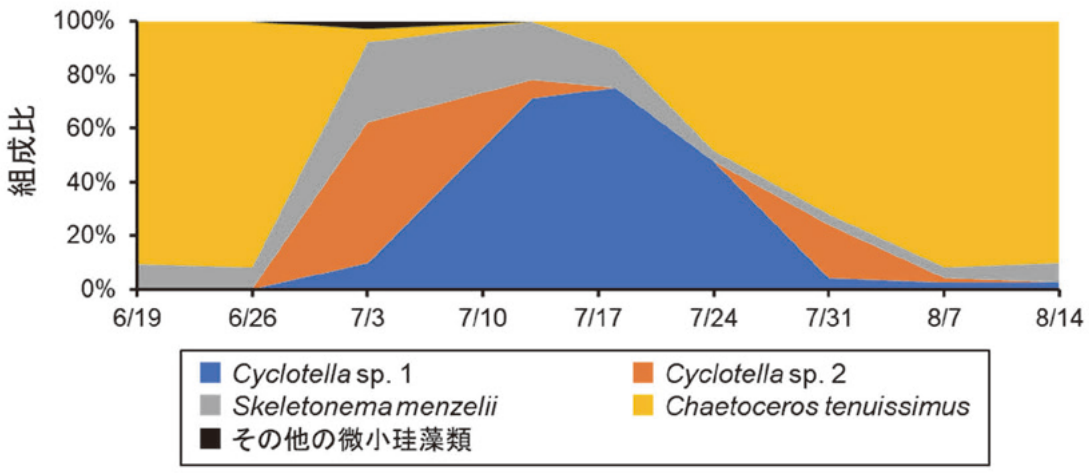

図 7　2023 年 6 月から 8 月の広島湾の表層における微小珪藻類組成（全定点平均値で作成）

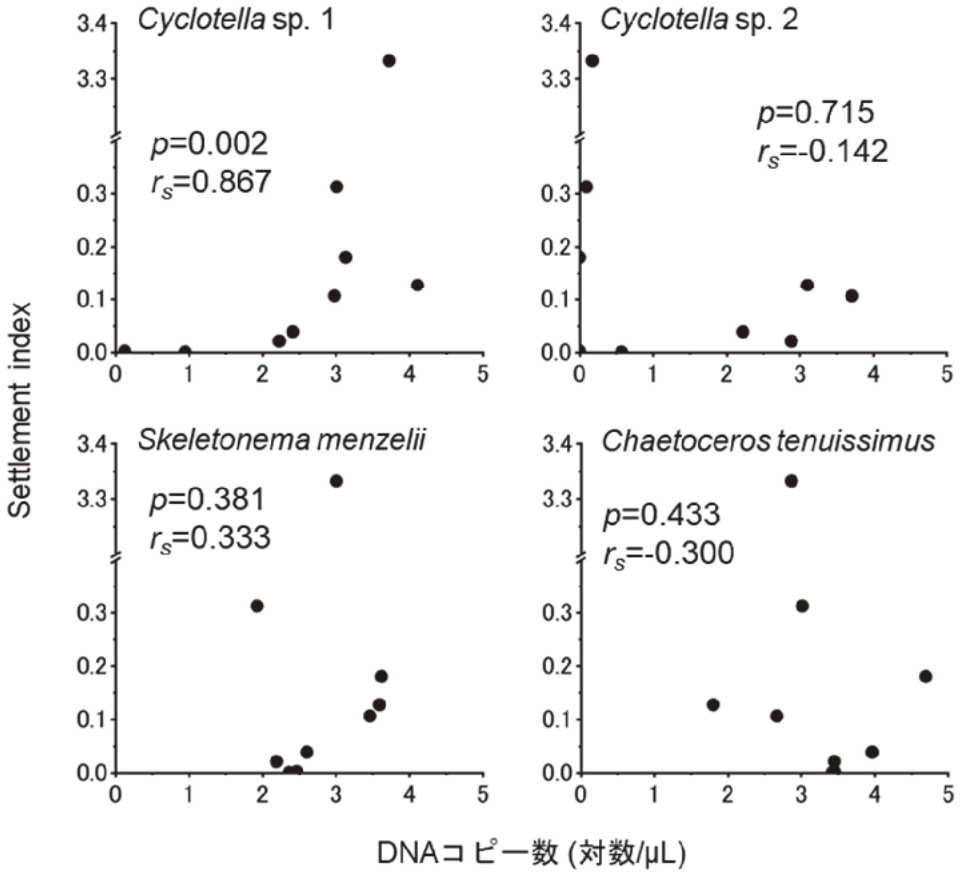

図 8　各種微小珪藻類の DNA コピー数と Settlement index との関係

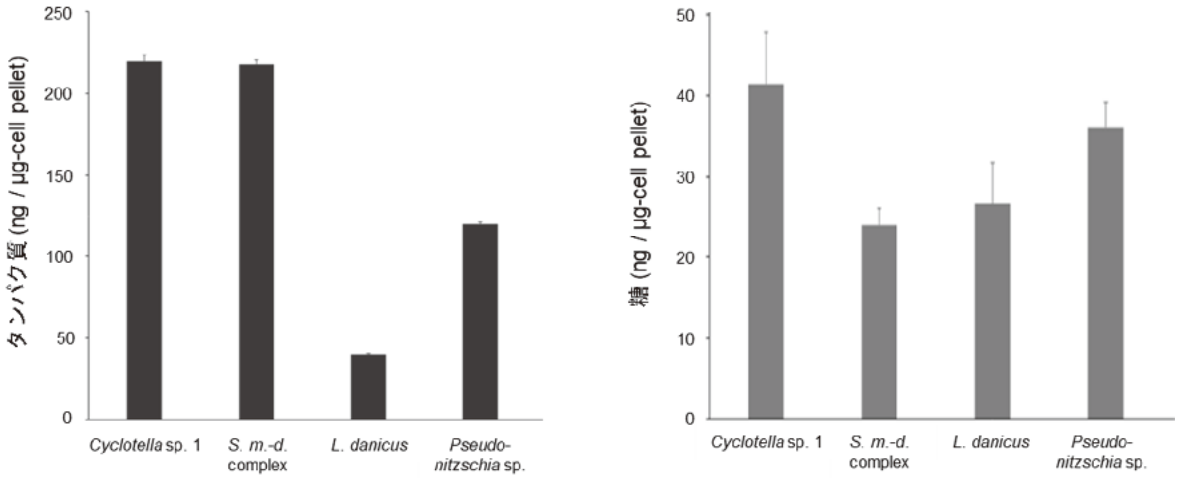

図 9　各珪藻類に含まれるタンパク質（左）および糖（右）の濃度

表 1　広島湾および備後灘における各月の水柱当たりの栄養塩濃度（μM，全定点平均値）

	広島湾			備後灘		
	5月	8月	10月	5月	8月	10月
DIN	3.83	2.34	2.83	1.78	3.97	3.61
DIP	0.19	0.12	0.40	0.05	0.83	0.52
DSi	25.23	24.12	15.28	6.44	39.62	5.31

表 2　各珪藻類に含まれる脂肪酸の組成

系統名	慣用名	記号		*Cyclotella*	*Skeletonema*	*Leptocylindrus*	*Pseudo-nitzschia*
		炭素数:二重結合数	分類	sp. 1	*m.-d.* complex	*danicus*	sp.
テトラデカン酸	ミリスチン酸	C14:0		7.6	17.8	25.7	14.8
テトラデセン酸	ミリストレイン酸	C14:1		0.0	0.2	0.2	0.0
ペンタデセン酸		C15:1		0.0	0.0	0.0	0.3
ヘキサデカン酸	パルミチン酸	C16:0		22.7	6.2	5	7.1
ヘキサデセン酸	パルミトレイン酸	C16:1		18.4	10	22.8	21.3
オクタデカン酸	ステアリン酸	C18:0		0.4	0.1	0.2	0.3
オクタデセン酸	オレイン酸	C18:1	n-9	0.1	0.3	0.2	0.2
バクセン酸		C18:1	n-7	0.4	0.1	0.7	0.9
オクタデカジエン酸	リノール酸	C18:2	n-6	0.1	1.1	1.1	0.4
オクタデカトリエン酸	γ-リノレン酸	C18:3	n-6	0.2	0.0	0.0	0.3
オクタデカトリエン酸	α-リノレン酸	C18:3	n-3	0.0	0.3	0.0	0.2
エイコサジエン酸	エイコサジエン酸	C20:2	n-6	0.0	0.0	0.0	0.0
エイコサテトラエン酸	アラキドン酸	C20:4	n-6	0.0	0.0	0.0	0.6
イコサペンタエン酸	エイコサペンタエン酸	C20:5	n-3	24.7	17.4	17.7	28.6
ドコサヘキサエン酸		C22:6	n-3	5.1	3.4	3.5	1.8
その他				20.3	43.1	22.9	23.2
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 μm）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 12 月の満潮時に毎月 1〜2 回の頻度で以下の観測を実施した。ビルジポンプを用いて 1 m 深の海水を採取し，多項目水質計（CTD）にて水温と塩分を，また海水試料中の栄養塩濃度と全 Chl a 濃度および< 10 μm 画分の Chl a 濃度を測定した。二枚貝浮遊幼生については 200 L の海水を 50 μm 目合いのプランクトンネットでろ過濃縮し，アサリ，ホトトギスガイ，マガキ，その他の二枚貝について出現量を測定した。各種とも顕微鏡下で殻長の測定を行い，成長過程もモニターした。なおアサリとホトトギスガイについては，調査干潟（定点 B：図 1）での着底量についても観測期間を通じて干潮時に観測を行った。

（2）小型植物プランクトンの栄養塩応答の解明

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

得られた海水を< 10 μm に分画し，栄養塩類を強化した試料海水を用いて終点希釈法に基づいて 10^0～10^{-5} まで順次希釈した。これを現場海水温，光量子量 100 μmol/m^2/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。得られた培養株は電子顕微鏡（SEM）による観察に加え，メタバーコーディングによる 18S 領域ないし 28S 領域の塩基配列解析から種の同定を行った。なお，今年度は環境 DNA 解析（18S 領域）による植物プランクトンの出現状況も概観した。

（3）リアルタイム PCR 法による小型植物プランクトンの現場動態解明

次年度以降に調査海域に出現する優占種の季節変動と経年変動を明らかにする目的で，(2) で得られた優占種の培養株を用い，リアルタイム PCR 法による優占種の検出法を検討した。また夏期の調査干潟に優占していると考えられ，すでに培養株を得ている小型 *Chaetoceros* についてリアルタイム PCR 法による検出を試みると共に，今年度に得られた優占種株について特定領域の塩基配列から適切なプライマーを設計し，検出の可否を検証した。

【結果】

（1）定期観測による現場モニター

調査期間中の水温は 14.6～28.8℃の範囲にあり，塩分は梅雨時期から夏期にかけて低下する典型的な河口域の変動を示した（図 2）。

栄養塩濃度の推移を図 3 に示す。DIN（NH^4 + 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。定点 Y2，DS15 の DIN 濃度は 5 月および 9 月に 1 μM 以下の濃度が検出されたが，それ以外の観測月は概ね 2～7 μM 程度で推移した。各栄養塩濃度のモル比を算出したところ（図 3），N/P はほぼ全試料でレッドフィールド比の 16 を下回り，Si/N もその多くが 1 を上回っていることから，本調査海域は窒素が植物プランクトン増殖の制限要因になり得ることが明らかとなった。

各定点における Chl a 濃度の推移を図 4 に示す。各定点共に高水温期の 9 月を最大とした一山型の季節変動を示し，1.15～16.4 μg/L の範囲にあった。この傾向は全 Chl a 濃度と< 10 μm 画分の Chl a 濃度に共通して認められた。これらを大型・小型の植物プランクトン組成比として表すと（図 5），5 月から 7 月は小型植物プランクトンの割合が 40～80%と高く，8 月および 9 月は大型植物プランクトンが 50～80%程度で優占し，10 月以降はまた小型植物プランクトンの割合が増加する比較的明瞭な傾向が認められた。

二枚貝浮遊幼生の出現傾向を概観すると，浮遊幼生の総数として 6 月に 6,000 inds/m^3 程度が検出された後，7 月および 8 月は低密度で推移し，9 月から 11 月にかけて再び 3,000～8,000 inds./m^3 の密度で検出された（図 6）。いずれの定点においてもアサリおよびマガキの浮遊幼生はほぼ検出されず，ホトトギスガイがそのほとんどを占めていた。ホトトギスガイ浮遊幼生の殻長サイズから 90～110 μm を初期幼生，120～160 μm を中期幼生，170～210 μm を着底間近の後期幼生とすると，6 月に多くの中期・後期幼生が，7 月に低密度ながらも後期幼生が検出されており（図 7），これらの着底が 7 月下旬から 8 月にかけて定点 B で稚貝（殻長 : < 5 mm）や亜成貝（殻長 : 5-10 mm）として検出されたと考えられる（図 7）。8 月下旬から 10 月中旬にかけても多くの中期・後期幼生が検出されているが，この期間は Chl a 濃度が高かった時期と概ね一致しており（図 4），浮遊幼生の成長・生残に好適な餌料環境であった可能性が

示唆される。多くの中期・後期幼生が検出されている一方で，9 月以降は定点 B で稚貝の着底がほぼ認められなかった（図 7）。着底したもののその後に何らかの理由で生残できなかったか，そもそも着底時に何らかの問題があったのか，現時点では不明であり，今後の検証課題としたい。

（2）小型植物プランクトンの栄養塩応答の解明

定点 Y2（図 1）で得られた試料海水を終点希釈法に基づいて希釈，インキュベートした結果，最も高い希釈区で増殖してきた植物プランクトンは珪藻であった。これらを分離，株化し，電子顕微鏡（SEM）による形態観察とメタバーコーディングによる 18S 領域，28S 領域の塩基配列解析から種同定を行った結果，5 月から 7 月に得られた優占種は *Skeletonema donii* および *Minidiscus spinulatus*，8 月・9 月の高水温期には *Chaetoceros tennuissimus* および *Chaetoceros calcitrans*，10 月以降は *Cyclotella atomus* と *Skeletonema donii* であった（図 8）。

また環境 DNA 解析（18S 領域）により植物プランクトンの出現状況を概観し，図 8 に上位にランクされる検出種を示した。7 月から 9 月の高水温期に珪藻類が卓越していることは試料海水のインキュベート，分離作業により得られた結果と一致するが，これ以外の時期には珪藻以外のいわゆる鞭毛藻類が卓越している可能性が示唆された。今年度に実施した小型植物プランクトンの分離法は，試料海水に栄養塩類を添加した好適な条件で行っているため，増殖速度に勝る珪藻類が卓越しやすい状況になっていた可能性が高い。小型の鞭毛藻類は二枚貝浮遊幼生の好適な餌料生物であると考えられることから，来年度はこれら珪藻以外の培養株作成も併せて実施していく予定である。

（3）リアルタイム PCR 法による小型植物プランクトンの現場動態解明

（2）で得られた珪藻優占種の培養株を用い，特定領域の塩基配列から適切なプライマーを設計し，リアルタイム PCR 法による検出の可否を検証した。しかしながら，*Skeletonema donii*，*Minidiscus spinulatus*，*Cyclotella atomus* のいずれも検出できない，あるいは他種との区別が明確にできなかった。これらの種については引き続き来年度も検証を重ねていく。一方で *Chaetoceros tennuissimus* および *Chaetoceros calcitrans* についてはおおよそ検出が可能となり，*C. tennuissimus* は 7 月から 9 月の高水温期に高い細胞密度で出現し，*C. calcitrans* は本調査海域では比較的マイナー種である可能性が示された（図 9）。来年度以降も（2）で得られた小型珪藻と鞭毛藻類について適切なプライマーの検証を行い，優占種の現場動態を明らかにしていく予定である。

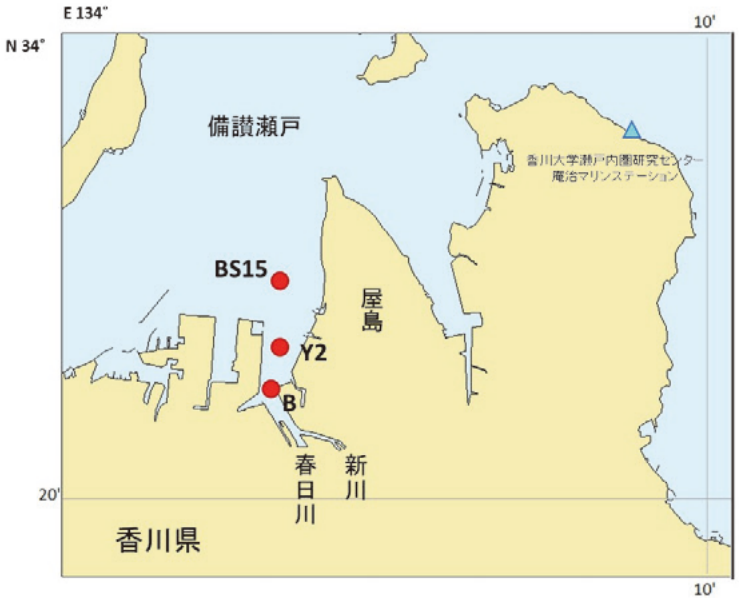

図 1　観測定点

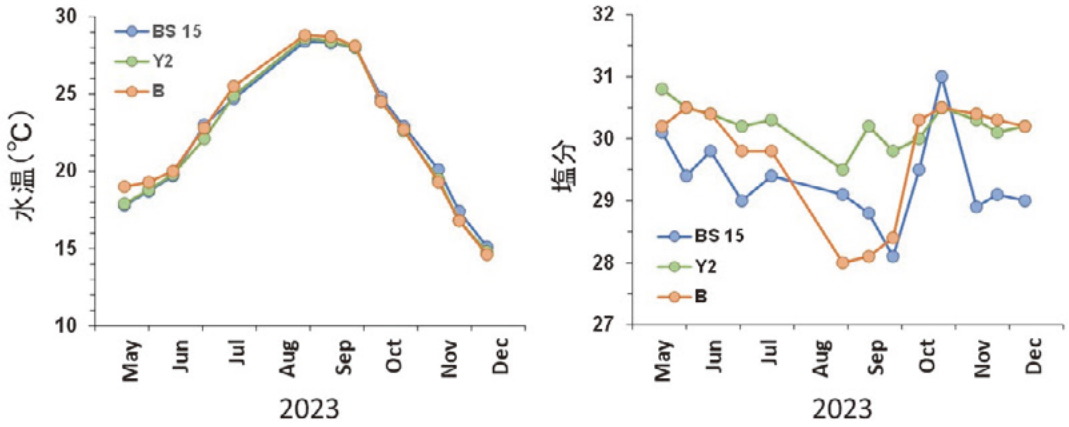

図 2　各定点における水温と塩分の推移

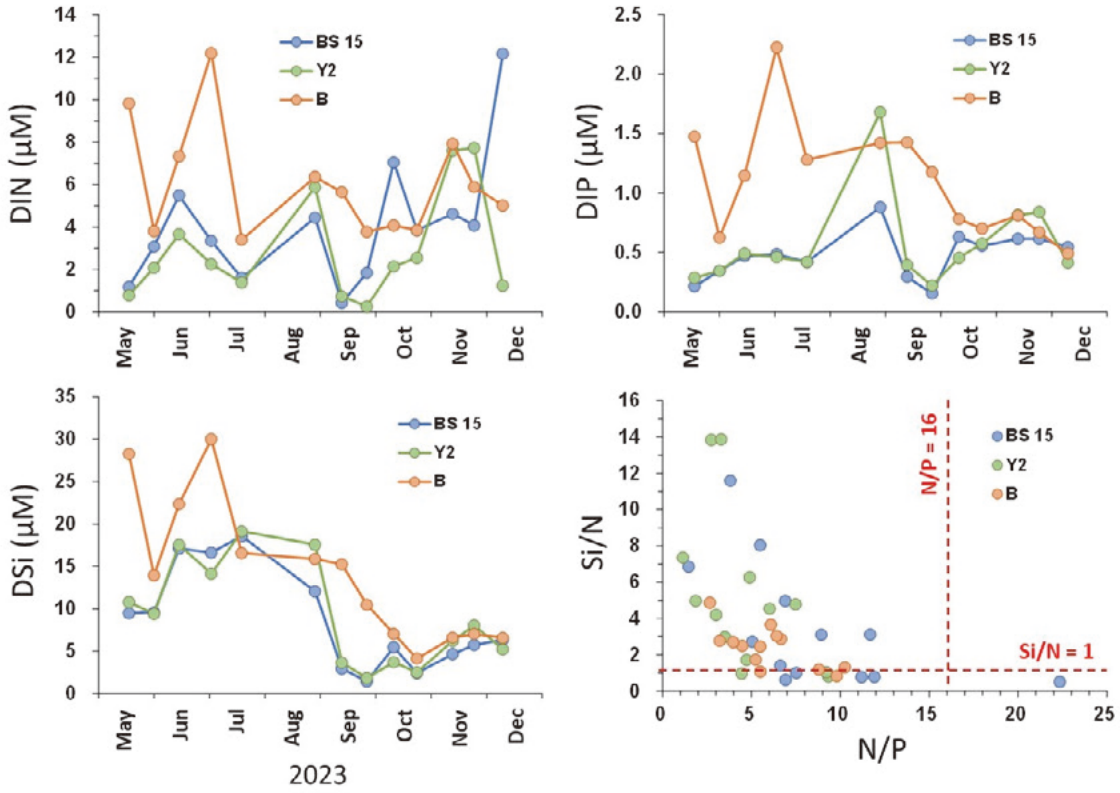

図 3　各定点における栄養塩濃度の推移と栄養塩の存在比（モル比）

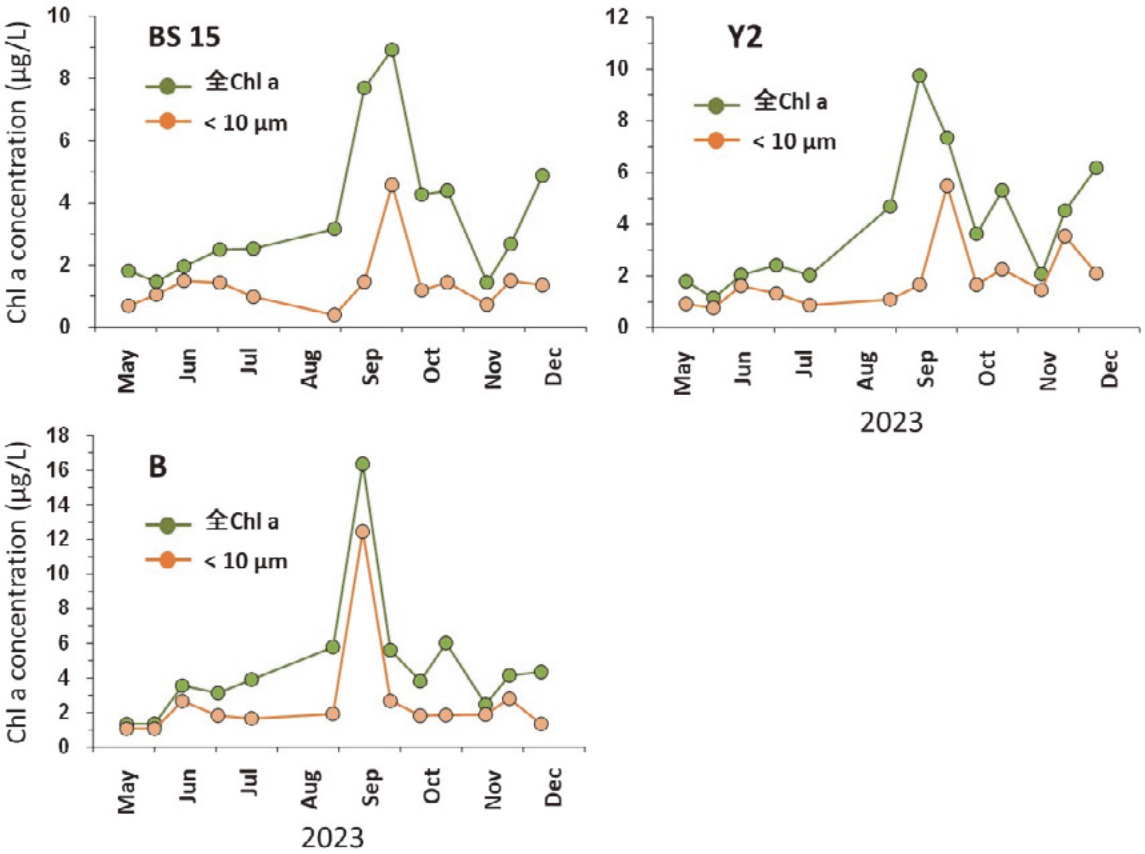

図 4　各定点における全 Chl a 濃度と< 10 μm 画分の Chl a 濃度の推移

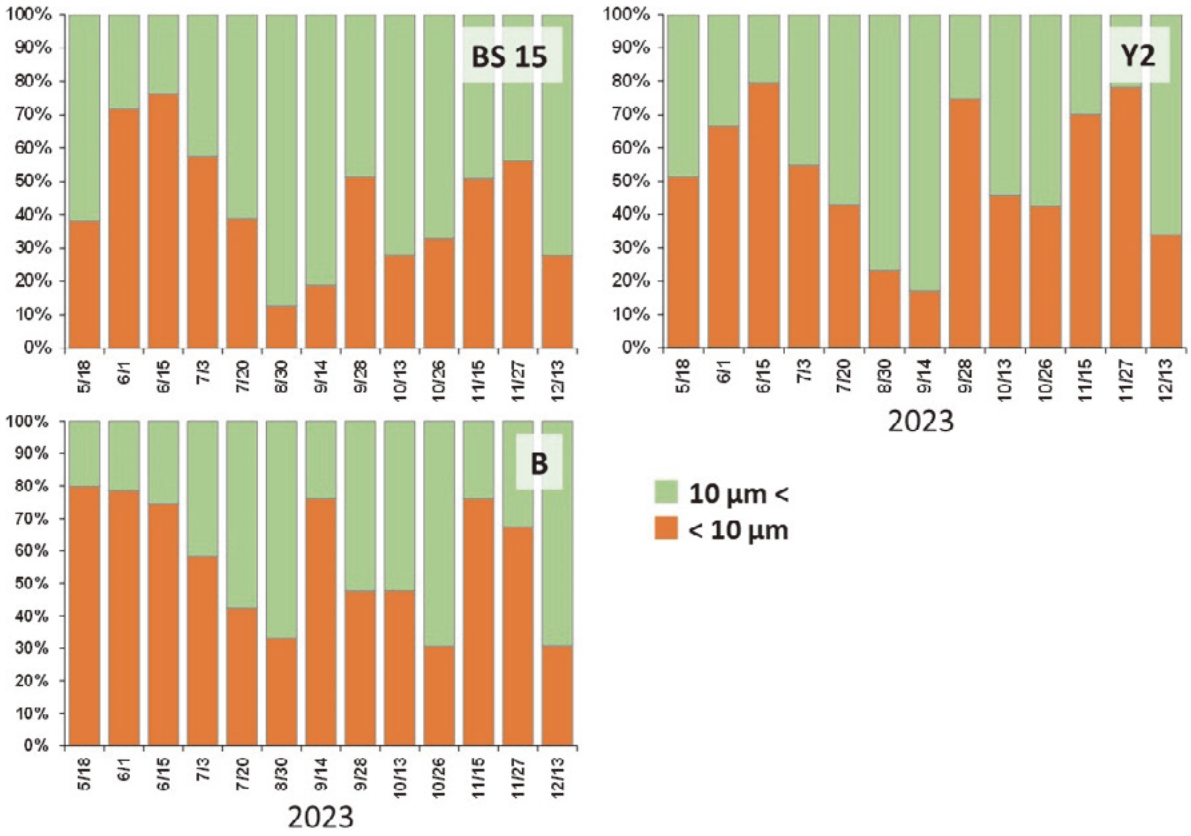

図 5　各定点における Chl a 濃度のサイズ組成比の推移

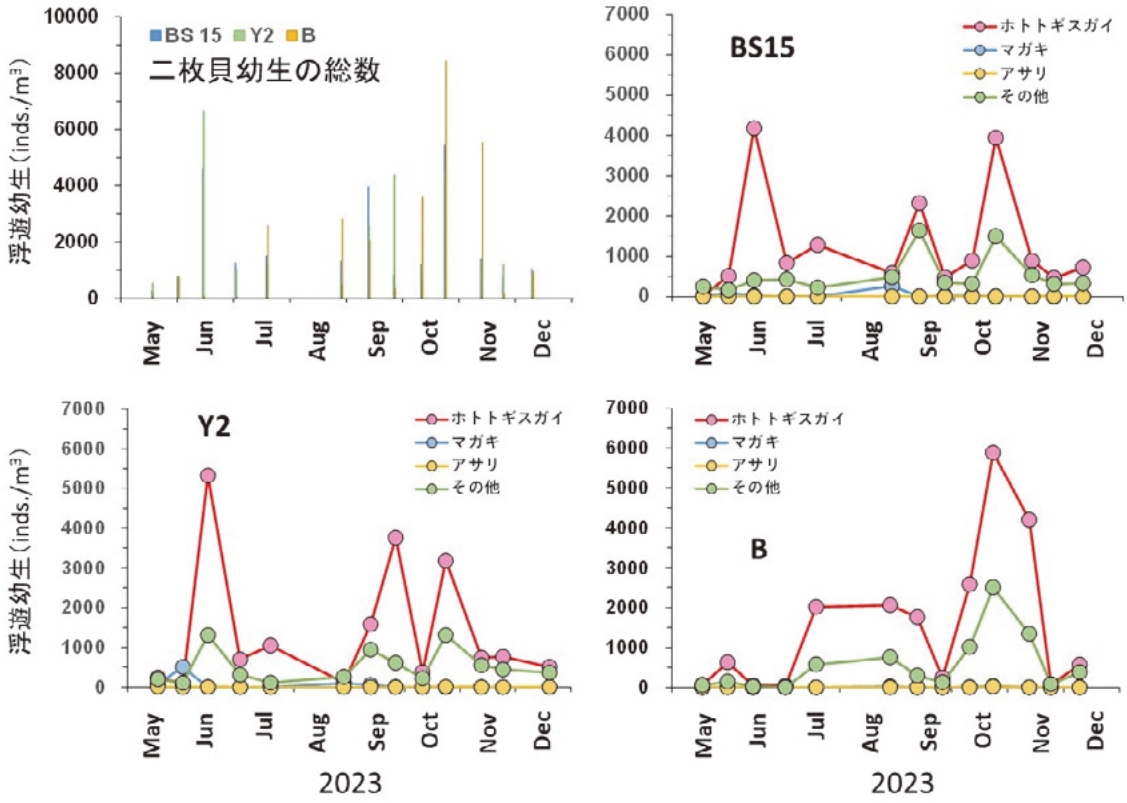

図 6　各定点における二枚貝浮遊幼生の出現密度

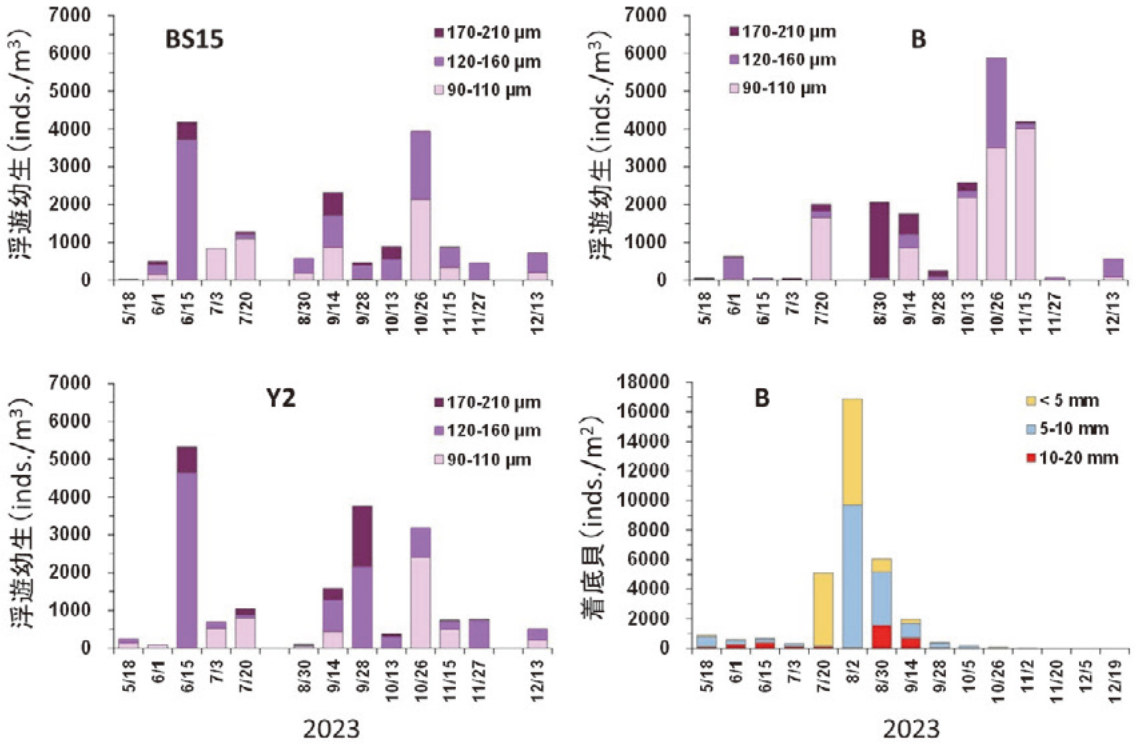

図 7　各定点で検出されたホトトギスガイ浮遊幼生のサイズ組成と定点 B における
ホトトギスガイの着底状況

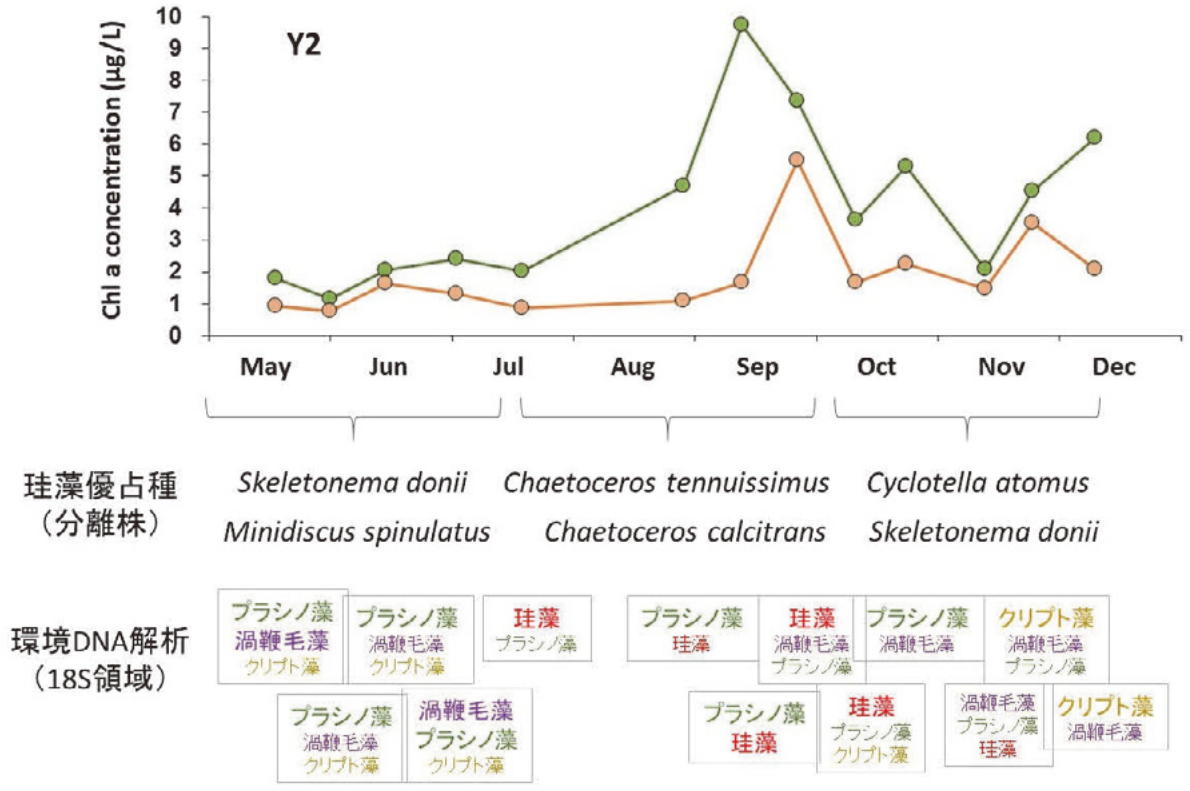

図 8　定点 Y2 で分離・株化された小型珪藻類と環境 DNA 解析から得られた植物プラン
クトン相

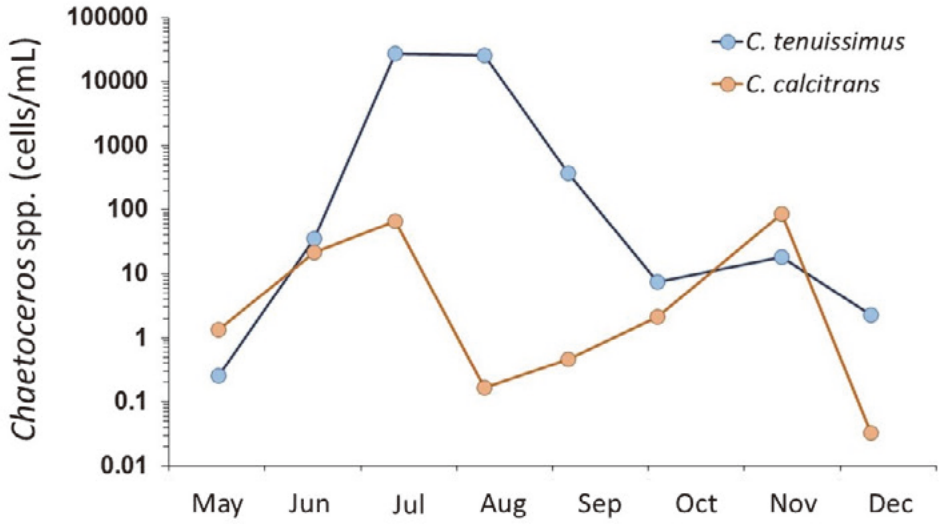

図 9　リアルタイム PCR 法による小型 *Chaetoceros* 2 種の出現状況

課題番号：Ⅰ－１）－イ
課題名：栄養塩類等の水質環境が二枚貝等の生産量に及ぼす影響の解明

岡山県農林水産総合センター水産研究所
乾　元気，高木秀蔵，角田成美，林　浩志

【背景・目的】

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

本課題では岡山県内のカキ養殖漁場においてマガキの湿重量，身入り度等の成長状況とクロロフィル *a* 濃度，有機態を含む栄養塩類等の漁場環境を調査するとともに，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。また，栄養塩濃度の異なる海域で1980 年代から採取している過去の試料も含めて，動物プランクトンの組成，サイズ等を調べ，栄養塩類との関係を調査する。今年度はカキ漁場のモニタリング調査を実施するとともに，過去 8 年間のデータを用いてマガキの成長との関係を調査した。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），各試験筏にコレクター5 枚を取り付けた垂下連を 10 本ずつ垂下した。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 がどの定点かは明記しない。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。5～12 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，軟体部重量を測定した。また，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，形態別の窒素濃度を分析した。

さらに，平成 27～令和 4 年度の 8 年間に同様の方法で取得したデータを用いて，マガキの成長との関係を調査した。

（2）餌料環境の違いがカキの成長に与える影響（水槽試験）

マガキは，（1）の調査で 8 月 21 日に採取し，試験開始まで所内に養成したものを試験に供した。9 月 16 日から 0.5kL 円形水槽に個体ごとに分けたマガキ 150 個体を収容し，250L のろ過海水が 1 日 3 回換水するようにかけ流し，10 日間馴致した。9 月 27 日に全重量，殻高を計測し，楠木ら（1994）の方法にならい，全重量の平均値が概ね一致するように 30 個体ずつ 5 グループに分けた。内 1 グループは軟体部重量を測定し，残る 4 グループは多給餌，少給餌

の 2 区を設定し，各区 2 グループずつ飼育した（開始 0 日目）（図 2）。10 月 25 日（28 日目），11 月 25 日（49 日目）に各グループの全重量，殻高を計測するとともに，各区で 1 グループずつ軟体部重量を計測した。なお，飼育中の水温は 20℃とし，餌料には *Chaetoceros gracilis* を用い，馴致期間及び少給餌区は約 6,000cells/mL，多給餌区は約 60,000cells/mL となるように給餌した。また，週に 1〜2 回採水し，クロロフィル *a* 濃度，形態別の窒素濃度を分析した。

【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

今年度の各定点におけるマガキの全重量，殻高，軟体部重量の推移を図 3 に示した。9 月以降に各地区で成長に差が見られ，いずれの項目についても St.1，2 が St.3，4 に比べて高い傾向があった。各定点のクロロフィル *a* 濃度，形態別窒素濃度の推移を図 4，5 に示した。クロロフィル *a* 濃度の平均値±標準偏差は St.1~4 の順にそれぞれ 5.7±3.5，4.3±3.2，2.9±2.0，6.1±4.7μg/L であり，St.1，2，4 で高い傾向が見られた。TN（全窒素）濃度はそれぞれ 16.0±4.0，15.5±4.1，14.4±3.3，18.8±3.1μM であり，St.4 で高い傾向があった。PON（粒状態有機窒素）濃度はそれぞれ 4.0±2.2，3.0±1.6，1.6±2.0，3.7±2.0μM であり，St.1，2，4 で高い傾向があった。DIN（溶存態無機窒素）濃度はそれぞれ 1.9±2.5，1.1±1.4，2.7±1.8，3.7±2.1μM であり，St.4 で高い傾向があった。マガキの成長が良好であった St.1，2 では，他の定点と比べてクロロフィル *a* 濃度，PON 濃度が高い傾向があった。

8 年間の月ごとの軟体部重量の平均値の推移を図 6 に示した。9 月以降に定点ごとに差がみられ，2 月の軟体部重量は St.4，1，2，3 の順で高い傾向があった。クロロフィル *a* 濃度，PON 濃度の月ごとの平均値の推移を図 7，8 に示した。クロロフィル *a* 濃度の年平均値はそれぞれ 5.2±0.9，3.9±0.7，3.2±0.5，6.6±1.3μg/L，PON 濃度の年平均値は 3.6±0.5，3.1±0.7，2.2±0.4，4.7±0.6μM となり，いずれも St.4，1，2，3 の順で高い傾向があった。PON 濃度とクロロフィル *a* 濃度の関係を図 9 に示した。両者は有意な正の相関（$p<0.05$）を示し，PON 濃度が高いほどクロロフィル a 濃度は高かった。2 月の軟体部重量とクロロフィル *a* 濃度，PON 濃度の関係を図 10 に示した。いずれも有意な正の相関（$p<0.05$）を示し，カキの成長と植物プランクトン，栄養塩類に由来する PON との関係が示唆された。

（2）餌料環境の違いがカキの成長に与える影響（水槽試験）

水槽内のクロロフィル *a* 濃度は多給餌区，少給餌区でそれぞれ 6.4~20.8，0.5~2.1μg/L で推移し，飼育期間中の平均値は 9.8±4.8，1.1±0.5μg/L であった（図 11（a））。クロロフィル蛍光量についても飼育期間中を通じて多給餌区が少給餌区を上回って推移した（図 11（b））。TN 濃度はそれぞれ 17.3〜22.1，12.2〜17.7μM で推移し，平均値は 19.7±1.8，15.6±1.6μM であった（図 12（a））。PON 濃度はそれぞれ 0.7〜5.3，0.2〜2.0μM で推移し，平均値は 1.9±1.3，1.1±0.6μM であった（図 12（b））。マガキの全重量は 0 日目に 11.5±2.9g，多給餌区では 27，48 日目にそれぞれ 12.2±2.7，13.3±3.5 g，少給餌区ではそれぞれ 12.4±3.5，11.9±2.9g，殻高は 0 日目に 55.2±6.5mm，多給餌区で 58.7±7.2，59.7±10.0mm，少給餌区で 59.1±9.0，56.1±8.2mm であり，全重量，殻高に成長は見られなかった（図 13）。一方，軟体部重量は 0 日目に 0.8±0.3g，多給餌区では 27，48 日目に 1.8±0.5，2.0±0.9 g，少給餌区では 1.1±0.6，1.2±0.6g であり，多給餌区で重量が増加する傾向が見られた（図 14（a））。身入り度（軟体部重量/全重量）は，0 日目に 6.6±2.0%であったが，多給餌区で 48 日目に 15.1±3.8%となった（図 14（b））。49 日目

の各区の軟体部は，多給餌区では軟体部が白濁していたのに対し，少給餌区では色が抜け，水っぽい様子であった（図 15)。また，多給餌区において殻の成長が見られた個体もあったため（図 16)，48 日目まで飼育した同じグループの個体について，斃死した個体を除いて全重量，殻長を比較した。全重量は，多給餌区では 0，27，48 日目にそれぞれ 11.1±2.8，12.2±3.0，13.3±3.4 g，少給餌区ではそれぞれ 11.8±2.9，11.9±3.0，11.9±2.9g となり，多給餌区では 48 日間で 2.2±1.9g 増加した（図 17 (a)。殻高は，多給餌区では 0，27，48 日目にそれぞれ 55.0±9.3，57.8±9.4，59.7±10.0 ㎜，少給餌区ではそれぞれ 54.4±8.4，55.9±8.4，56.0±8.2mm となり，多給餌区では 48 日間で 4.7±4.8mm 成長した（図 17（b))。

今年度の試験では，クロロフィル *a* 濃度，PON 濃度に差をつけて 48 日間飼育した結果，多給餌区で軟体部重量の増加し，身入り率が向上する等マガキに成長が見られた。一方で，同期間（9〜11 月）養殖現場では軟体部重量が約 5.0g 増加し（図 2(c))，身入り率は約 20%に達しており，飼育したマガキは養殖現場のものほど成長しなかった。(1）で軟体部重量と相関があったクロロフィル *a* 濃度は同期間に 4.5±4.0μg/L であり，水槽中の濃度の方が上回っていた（図 4）一方で，PON 濃度は 3.3±2.0μM と水槽中の濃度の方が下回っていた（図 5(b))。また，養殖現場には多様な植物プラントンが生息する（西川 2019）が，今回の試験では単一の種のみの給餌であった。これらのことから，PON 濃度や植物プランクトンの組成がカキの成長に影響した可能性が考えられた。

【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.

楠木豊，平田貞郎. 3 種の微細藻類のカキへの餌料価値.広島県水試報告，18，27-34，1994.

西川哲也.播磨灘における海洋環境と植物プランクトンの長期変動解析.沿岸海洋研究，56，73〜78，2019.

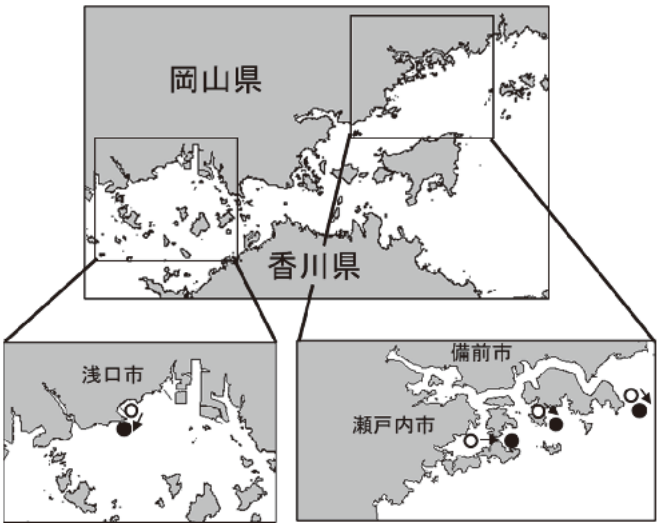

図 1　調査漁場（○抑制漁場，●養成漁場）

図 2　水槽試験の様子

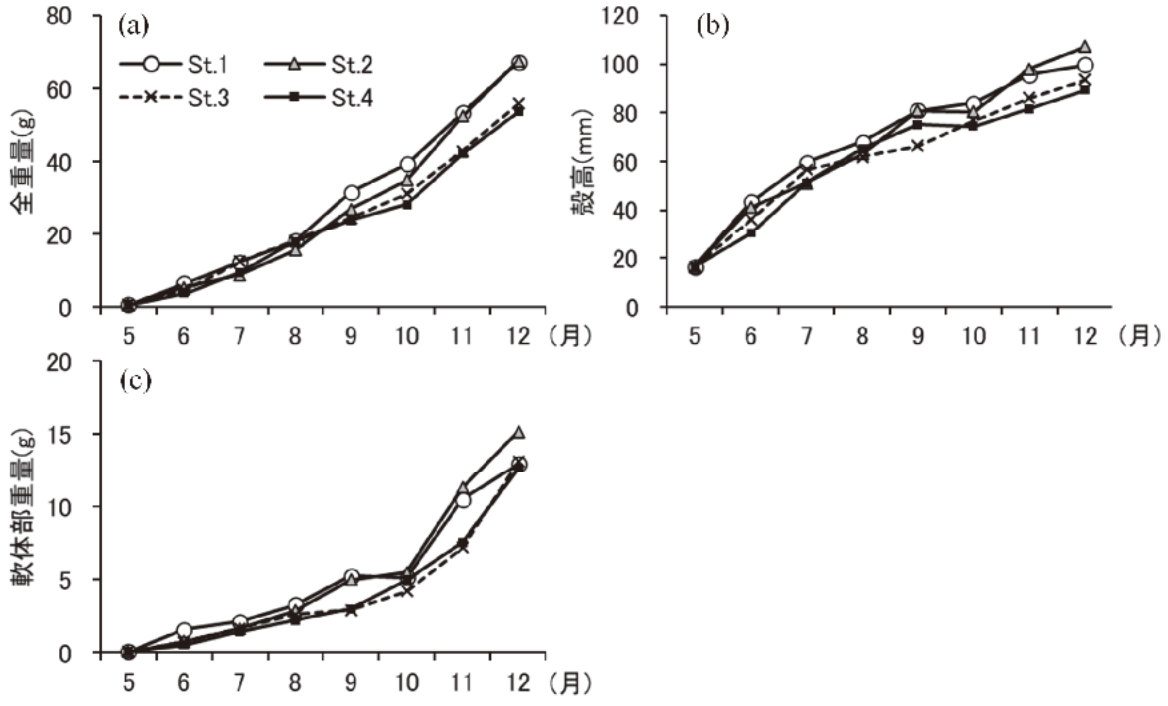

図 3　令和 5 年度の各定点におけるマガキの成長状況
(a) 全重量，(b) 殻高，(c) 軟体部重量

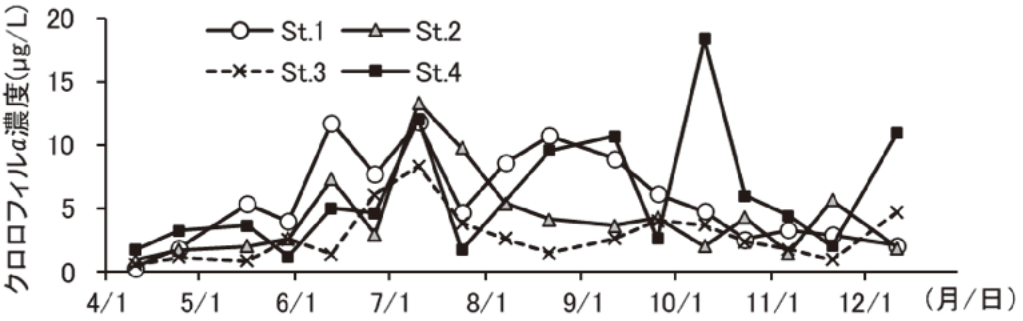

図 4　令和 5 年度の各漁場におけるクロロフィル a 濃度の推移

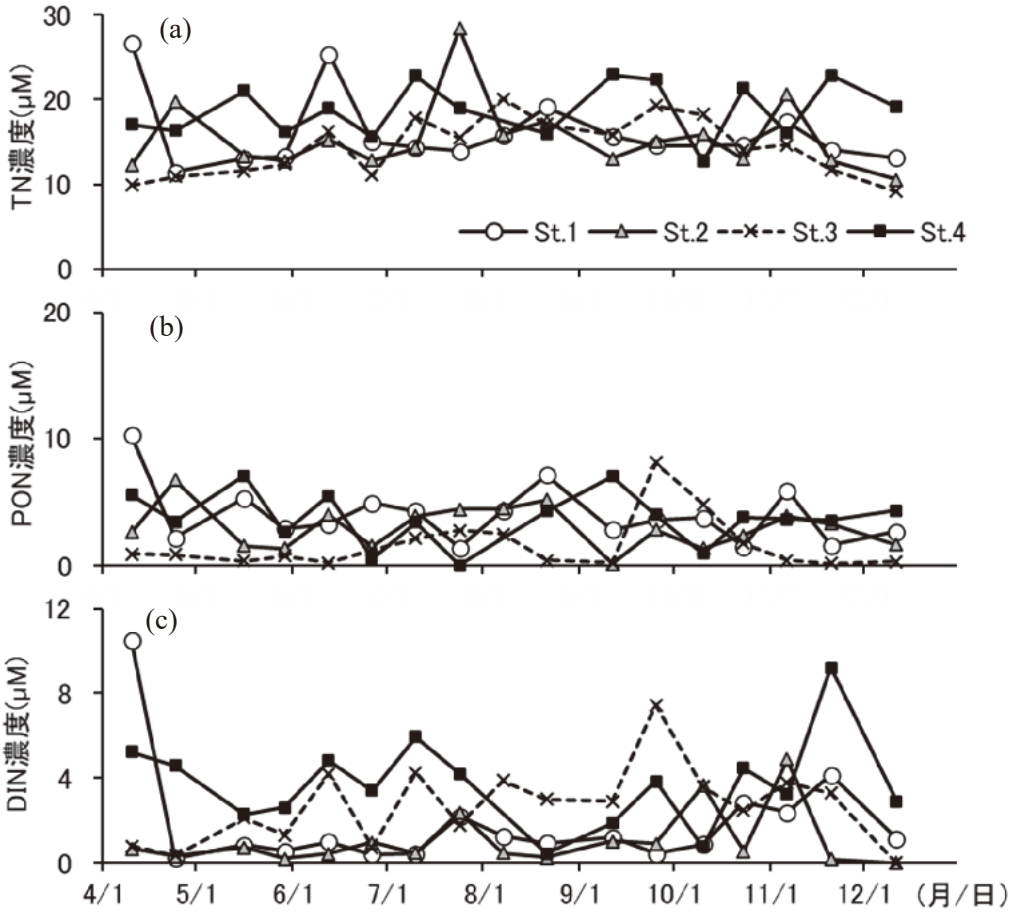

図 5　令和 5 年度の各漁場における形態別窒素濃度の推移
(a) TN 濃度, (b) PON 濃度, (c) DIN 濃度

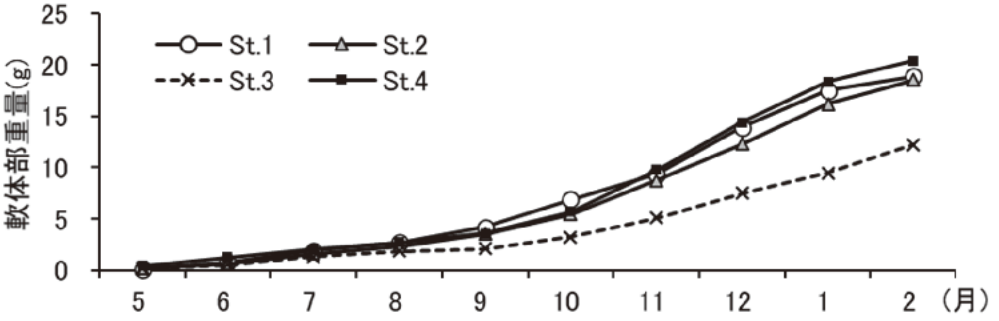

図 6　岡山県海域におけるカキの軟体部重量の推移(月ごとの平均値(8 年間))

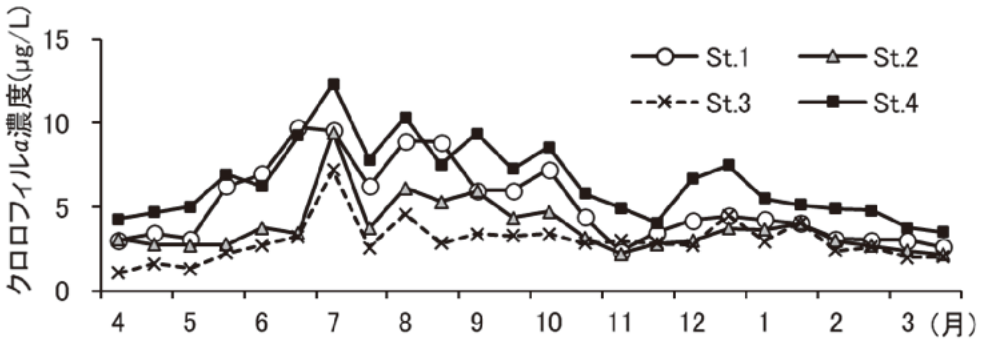

図 7　岡山県におけるカキ養殖漁場のクロロフィル a 濃度の推移
（月ごとの平均値(8 年間)）

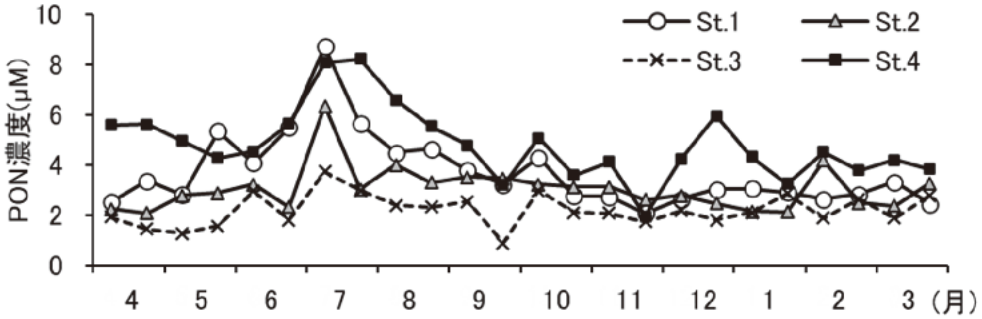

図 8　岡山県におけるカキ養殖漁場の PON 濃度の推移
（月ごとの平均値(8 年間)）

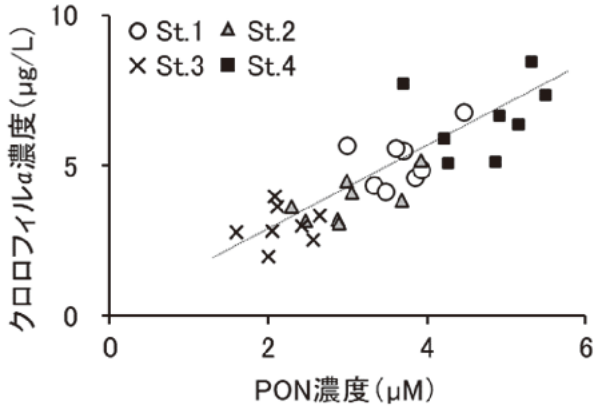

図 9　PON 濃度とクロロフィル a 濃度の関係(年ごとの平均値(8 年間))

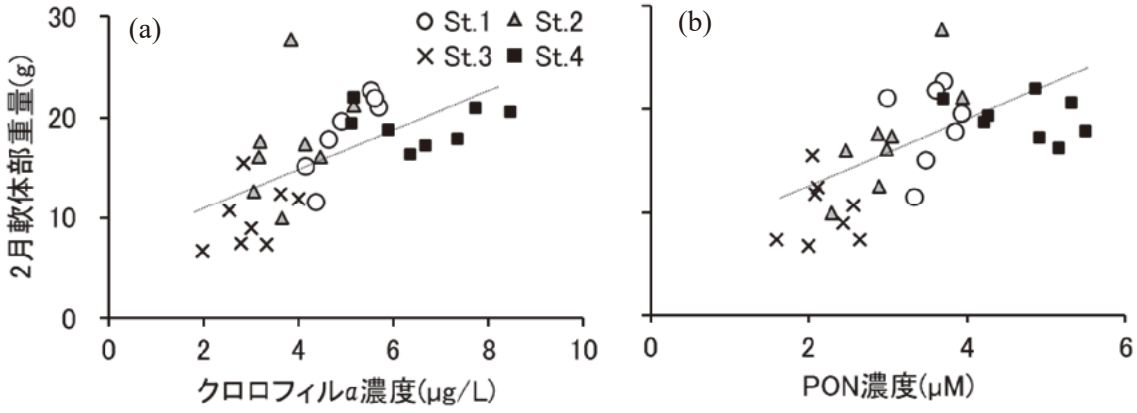

図 10　2 月の軟体部重量と(a)クロロフィル a 濃度，(b)PON 濃度の関係

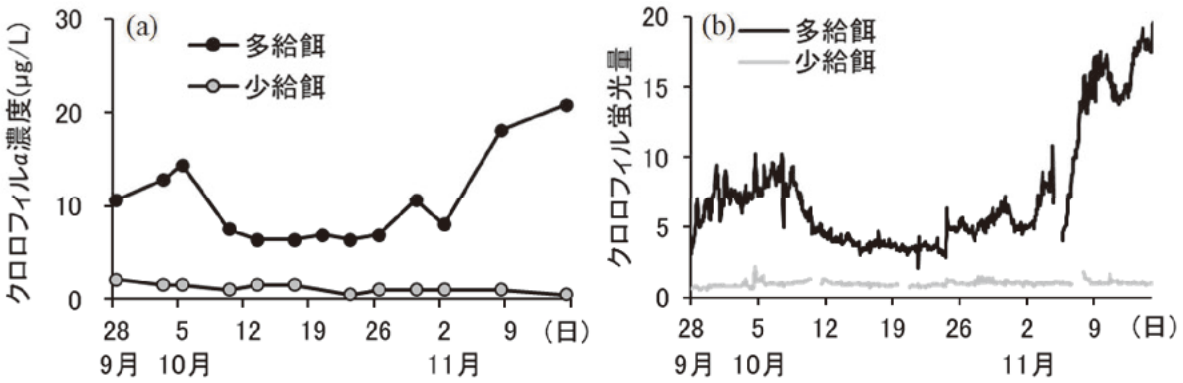

図 11　試験区ごとの(a)クロロフィル *a* 濃度，(b)クロロフィル蛍光量の推移

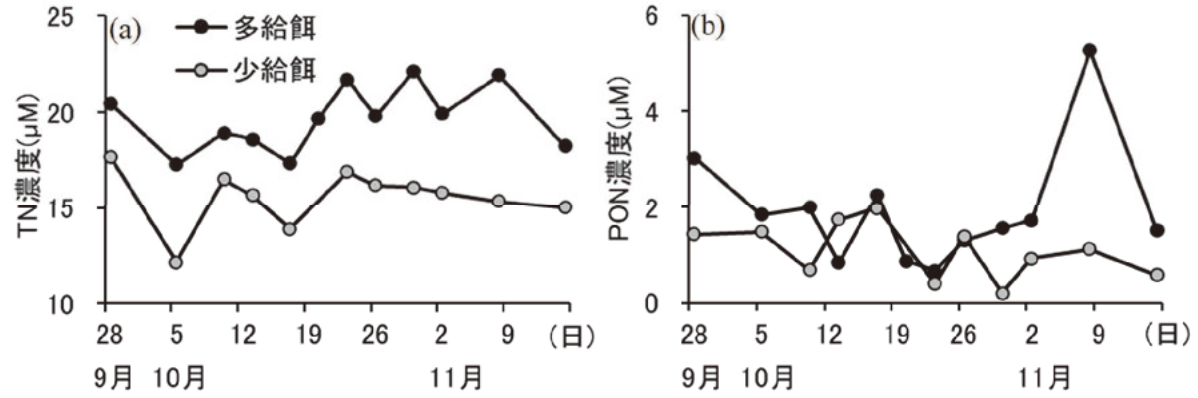

図 12　試験区ごとの(a)TN 濃度，(b)PON 濃度の推移

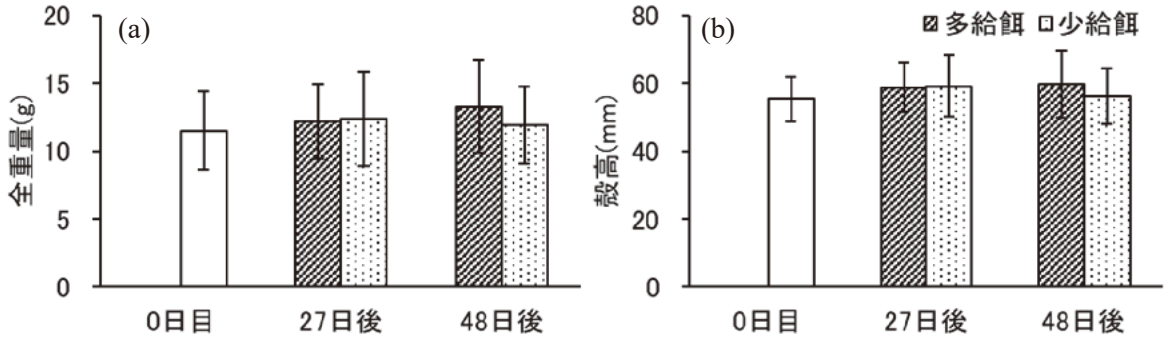

図 13　試験区ごとの(a)全重量，(b)殻高の変化

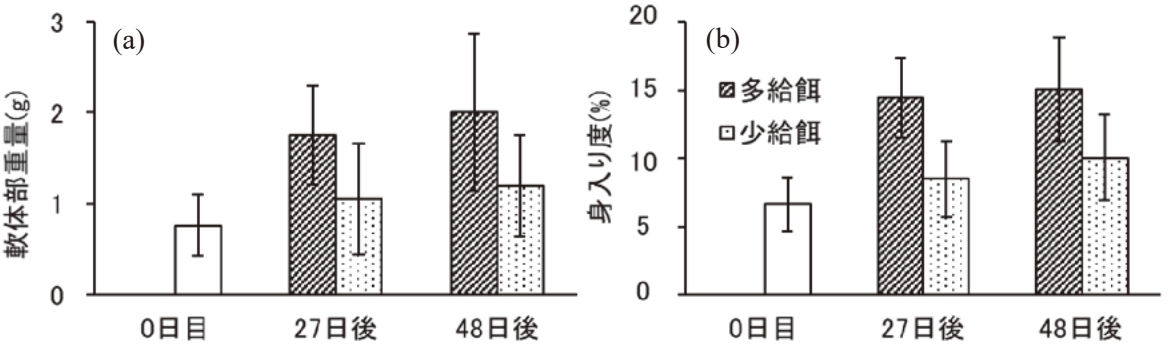

図 14　試験区ごとの(a)軟体部重量，(b)身入り度の変化

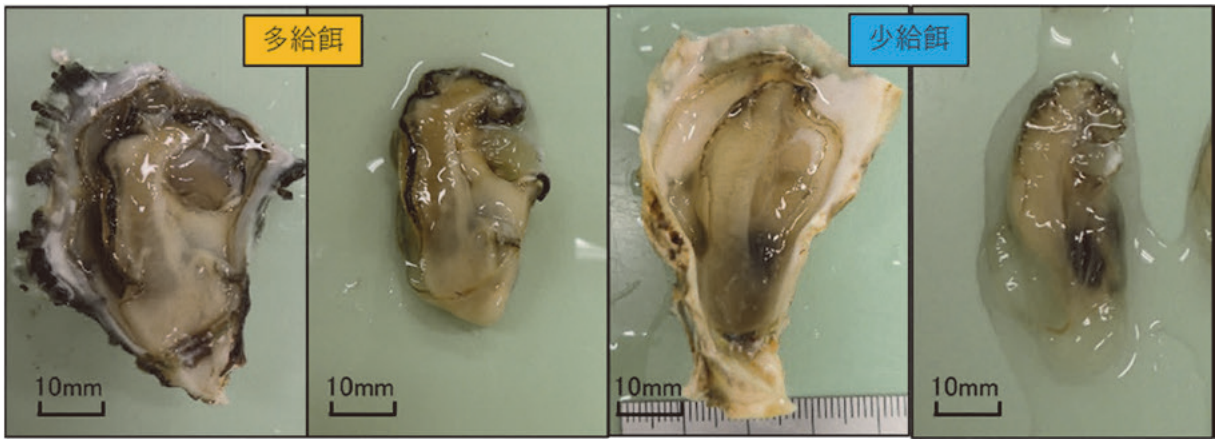

図 15　試験区ごとの軟体部の様子（49 日目）

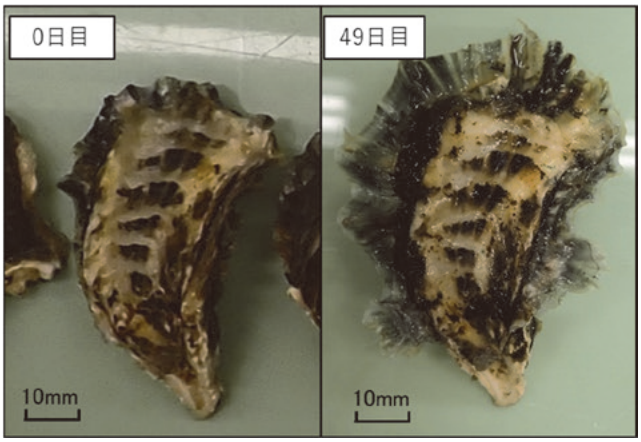

図 16　多給餌区にける殻の成長の様子

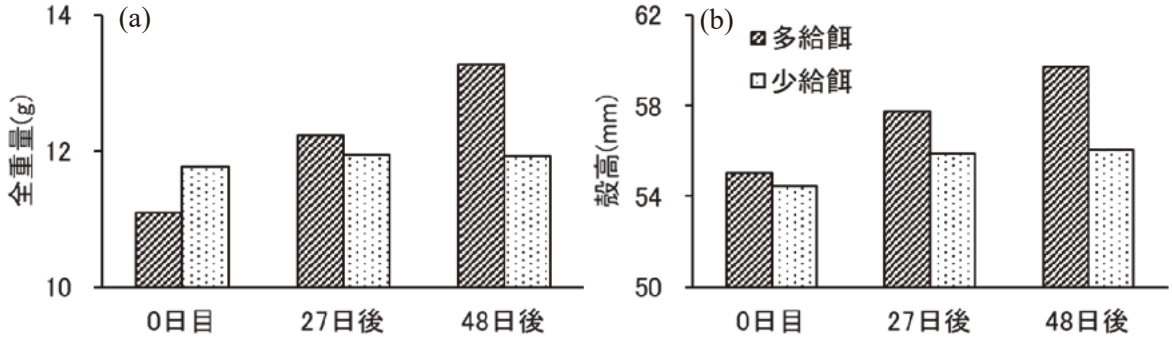

図 17　斃死個体を除いた同一個体の(a)全重量，(b)殻高の変化

課題番号：Ⅰ－１）－ウ
課題名：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

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，生態系を底支えし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・アマモ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，あるいは餌料供給の場などを有している。藻場を構成している大型の藻類やアマモ類の成長を支えるものは海中の栄養塩類である。栄養塩類の濃度の低下は，藻場を構成する一次生産者（海藻・アマモ類や葉上微細藻類）による生産物の量や質的な性状（窒素含量等で評価される餌料価値等）などへの直接的な影響だけではなく，その結果として藻場の物理的な景観構造が貧弱化し生息場としての機能も衰退していく。また餌料としての一次生産物の量や質的な変化が，食物連鎖を通じてより高次の生物生産に影響することも懸念されている。しかし，栄養塩類環境が藻類養殖に与える直接的な影響については多くの知見があるが，海中の栄養塩類の増減が藻場の生物生産や生態系に与える影響との関係を明らかにした知見は世界的にみても極めて少ない。

本課題では，栄養塩類や水温などの海水環境が藻場の一次生産に与える影響と，その影響を受けた藻場が一次生産として植食動物へ与える影響の解明に焦点をあて，①栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価，②一次生産を介した植食動物への影響評価の２つを大きな柱とした。本年は，①の栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価，実験を行うための既往知見の整理と実海域での試験を行った。また，②一次生産を介した植食動物への影響評価では，来年度からスムーズに本格試験を行うために，実験方法の検討を行った。

【方法】

①栄養塩類が藻場の一次生産に与える影響評価

栄養塩等とアマモを中心とした藻場との関係に関する既往知見を整理し，得られた知見を実海域で行う試験の手法検討に活用した。

実海域の調査では，広島湾内の複数箇所を調査点とした。栄養塩類が多いと想定される場所を広島湾奥の広島県廿日市市阿品，栄養塩が少ないと想定される場所を広島県江田島市大黒神島，山口県岩国市柱島，山口県大島郡周防大島とし調査を行った。各調査地点のアマモ場において，船上から海面の表層水を採取し，潜水によりアマモ場内の海水を下層水として採取した。また大起理化工業株式会社（埼玉県鴻巣市）製の土壌用サンプラーを用い，アマモ底質の間隙水を採取した。海水は各５地点採取し，採取した海水は現場で直ちに 0.45μm フィルターで濾過した。得られた表層水・下層水・間隙水を栄養塩類サンプルとし，オートアナライザーを用いて栄養塩類濃度を測定した。

調査地点のアマモ場において潜水を行い，50cm 方形枠を用いて，無作為に設置した５地点

の枠内のアマモを坪刈りした。採取したアマモは実験室に持ち帰り，枠内の株数，草長，葉の数，鞘の幅，地下茎の幅について計測を行った。地上部（葉）の重量と地下茎の重量は，送風定温乾燥機で乾燥の後（60℃/48 時間），重量を測定した。得られた栄養塩類の結果とアマモの形態的特徴との関係について解析を行った。

②一次生産を介した植食動物への影響評価

来年度からのサザエやアワビ類を対象として，異なる栄養塩類濃度で育てた海藻給餌試験をスムーズに開始するため，閉鎖環境での飼育の難しいクロアワビと，餌生物である小型紅藻類について飼育方法の検討を行った。

【結果】

①栄養塩が藻場の一次生産に与える影響評価

栄養塩とアマモ場に関する既往知見を整理した結果，アマモは葉（地上部）と地下茎（地下部）の両方から窒素とリンを吸収しており，その吸収割合は環境やアマモの大きさ，成熟度合によって異なる（Pedersen and Borum 1993 ; Moore and wetzel 2000 ; Touchette and Burkholder 2007）。また，底質中の栄養塩濃度は生物の死骸や排泄物などの分解物を由来とし，同所の海水よりも底質中の栄養塩の方が高く，その濃度は底質に堆積する起源生物の種類や間隙の粒子サイズに依存している（McRoy and Barsdate 1970；Bristow and whitcombe 1971；Fourqurean et al 1992; 2001; Iizumi and Hattori 1982；Short and McRoy 1984；渡辺・仲岡 2000）。アマモは窒素を草体に保持する機能を有している可能性があり，一時的にでも栄養塩供給があれば生存が可能である（Asahi et al. 2016；Park et al. 2013）

各調査地における栄養塩類の解析では，表層水はばらつきが大きかったため，下層水と間隙水についてのみ解析を行った。下層水の DIN 濃度は阿品が最も高く，次に柱島，周防大島，大黒神島の順であった。間隙水の DIN 濃度は下層水と同様に阿品が最も高かった。下層水と間隙水の DIN 濃度は相関（r^2）が強く（0.87〜0.97），下層水の DIN 濃度が高い場所は，間隙水の濃度も高い傾向にあった。また，下層の DIN 濃度よりも間隙水中の DIN 濃度の方が 10 倍程度高い傾向にあった（図 1）。

アマモ草体の形態的特徴では，阿品の葉長が最も長く，地上部の乾燥重量も阿品が最も重かった。方形枠内の株数は柱島が最も多く，地下茎の乾燥重量も柱島が最も重かった（図２）。また，葉が生じる根元である鞘の幅や地下茎の幅は阿品が最も広かった（図３）。

各地の栄養塩類濃度とアマモの形態的特徴を比較すると，DIN 濃度は葉長，鞘幅，地下茎幅，地上部の乾燥重量との相関が高く，リン濃度は葉長，鞘幅，地下茎幅，葉の枚数との相関が高かった（図４）。これらの結果から，海域の栄養塩の濃度はアマモの形態形成に影響を及ぼしていることが示唆された。アマモ場内である下層水と間隙水の DIN 濃度とアマモの形態を比較した結果，DIN 濃度が高い場所において葉長や地上部重量が大きい傾向にあった。つまりこれは DIN が低下することで逆にアマモの地上部が小型化することを示唆しており，海水中の栄養塩とその底質の間隙水の DIN 濃度がアマモ藻場の景観にも影響を与えている可能性があった。

近年，瀬戸内海のアマモ場は葉の長さが短くなり，また多年生から一年生に生活史が変化している場所も確認されている。その多くは水温上昇が要因と考えられているが，栄養塩類

の増減がアマモの形態や生活史に影響に影響を与えている可能性もあり，さらに調査を進めていく必要がある。

②一次生産を介した植食動物への影響評価

クロアワビ稚貝は水質の悪化に弱く，計測時に水槽などの基質から取り出す際にも，強固に基質に吸着した体を剥がしたショックで死亡してしまうほど様々な環境ストレスに対して脆弱である。来年度のアワビ稚貝への給餌試験を行うためには，アワビを個別に長期的に飼育できる手法の開発が必要である。様々な専用の小型水槽や汎用の容器を試し，海水交換が良く基質から剥がしやすい飼育容器を検討した結果，底を抜いたプラスチックカップに網をかぶせることで，アワビを簡単にコップ壁面から剥がすことができ，かつ個体毎に識別して長期的に飼育できることがわかった（図５）。

サザエの餌として好適な小型の紅藻類は，栄養塩管理環境では必須である止水での育成が困難であった。マクサやユカリ，オゴノリなど数種の小型紅藻類を用いて育成方法を検討した結果，サザエの分布海域にも生育している小型紅藻類のマクサを活用し，小型の水流ポンプで適切な水流を水槽内で構築することで，長期的に育成することが可能となった。また餌海藻として窒素含量の異なる藻体の作出にも成功した。来年度は本飼育技術を用いて実験を行う予定である。

【参考文献】

Asahi, T., Ichimi, K., & Tada, K. (2016). Nutrient dynamics in eelgrass (*Zostera marina*) meadow and the variation of nutrient contents of eelgrass. In EMECS 11-Sea Coasts XXVI. Joint conference. Managing risks to coastal regions and communities in a changing world (pp. 84-84).

Bristow, J. M., & Whitcombe, M. (1971). The role of roots in the nutrition of aquatic vascular plants. American Journal of Botany, 58(1), 8-13.

Fourqurean, J. W. & Y. Cai, 2001. Arsenic and phosphorus in seagrass leaves from the Gulf of Mexico. Aquatic Botany 71: 247–258.

Fourqurean, J. W., Zieman, J. C., & Powell, G. V. N. (1992). Relationships between porewater nutrients and seagrasses in a subtropical carbonate environment. Marine Biology, 114, 57-65.

Iizumi, H., & Hattori, A. (1982). Growth and organic production of eelgrass (*Zostera marina* L.) in temperate waters of the Pacific coast of Japan. III. The kinetics of nitrogen uptake. Aquatic Botany, 12, 245-256.

McRoy, C. P., & Barsdate, R. J. (1970). Phosphate absorption in eelgrass. Limnology and Oceanography, 15(1), 6-13.

Moore, K. A., & Wetzel, R. L. (2000). Seasonal variations in eelgrass (*Zostera marina* L.) responses to nutrient enrichment and reduced light availability in experimental ecosystems. Journal of experimental marine biology and ecology, 244(1), 1-28.

Park, S. R., Kim, Y. K., Kim, S. H., & Lee, K. S. (2013). Nitrogen budget of the eelgrass, Zostera marina in a bay system on the south coast of Korea. Ocean Science Journal, 48, 301-310.

Pedersen, M. F., & Borum, J. (1993). An annual nitrogen budget for a seagrass Zostera marina population. Marine Ecology-Progress Series, 101, 169-169.

Short, F. T., & McRoy, C. P. (1984). Nitrogen uptake by leaves and roots of the seagrass *Zostera marina* L. Bot. Mar. 27: 547-555.

Touchette, B. W., & Burkholder, J. M. (2007). Carbon and nitrogen metabolism in the seagrass, *Zostera marina* L.: environmental control of enzymes involved in carbon allocation and nitrogen assimilation. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 350(1-2), 216-233.

渡辺雅子・仲岡雅裕．2000．アマモの分布と生産に影響を与える環境要因・生物学的要因．海洋と生物 22:533-541.

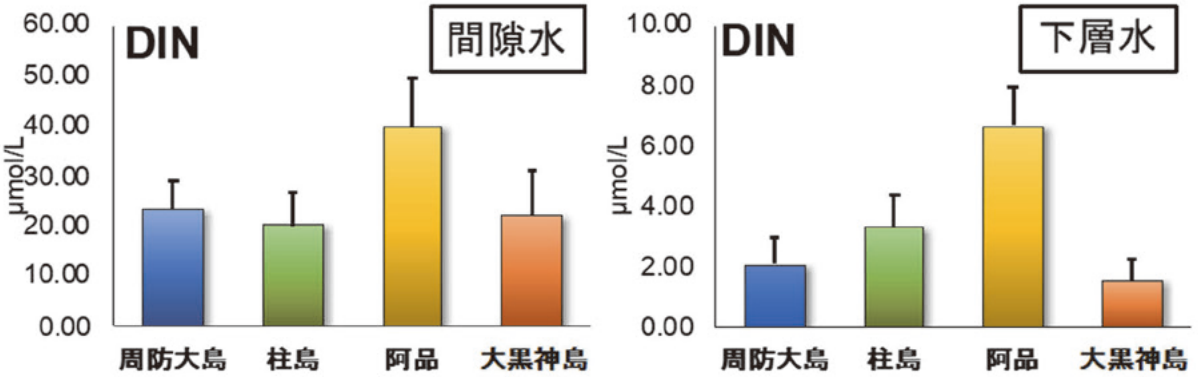

図 1　各調査地における間隙水と DIN 濃度（左：間隙水，右：下層水）

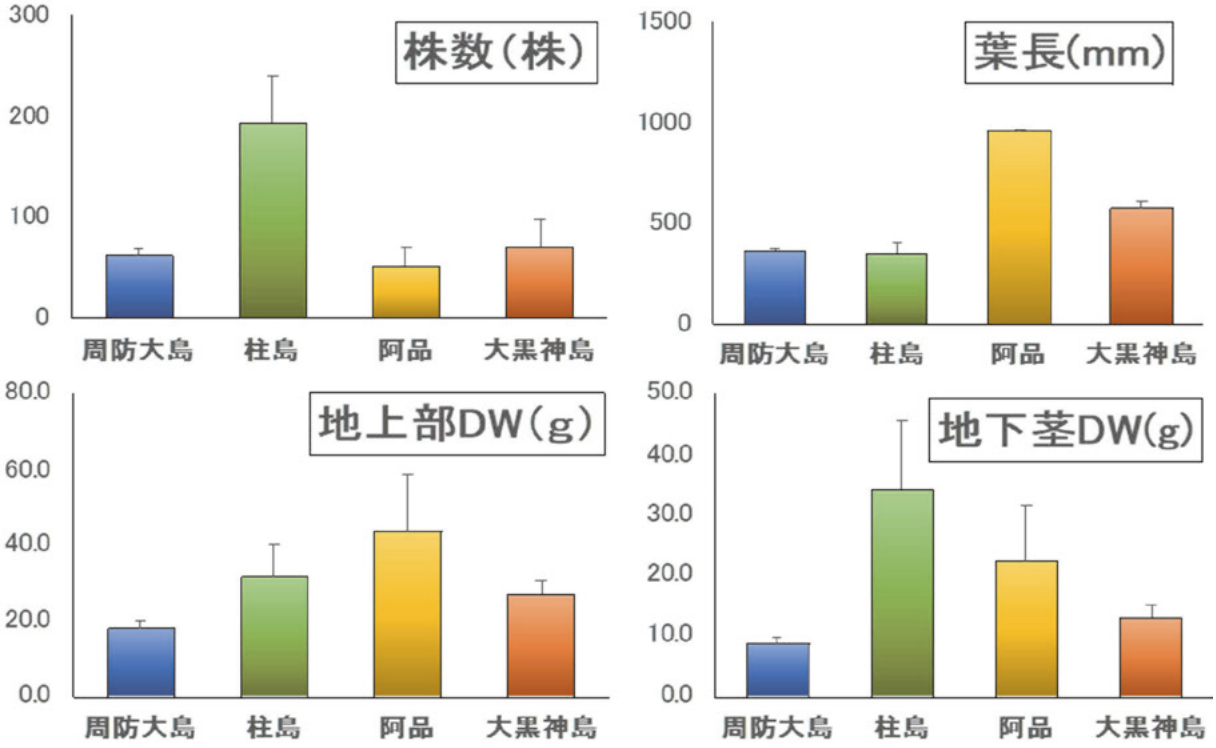

図 2　各調査地におけるアマモの形態的特徴

（左上：株数，右上：葉長，左下：地上部重量，右下：地下茎重量）

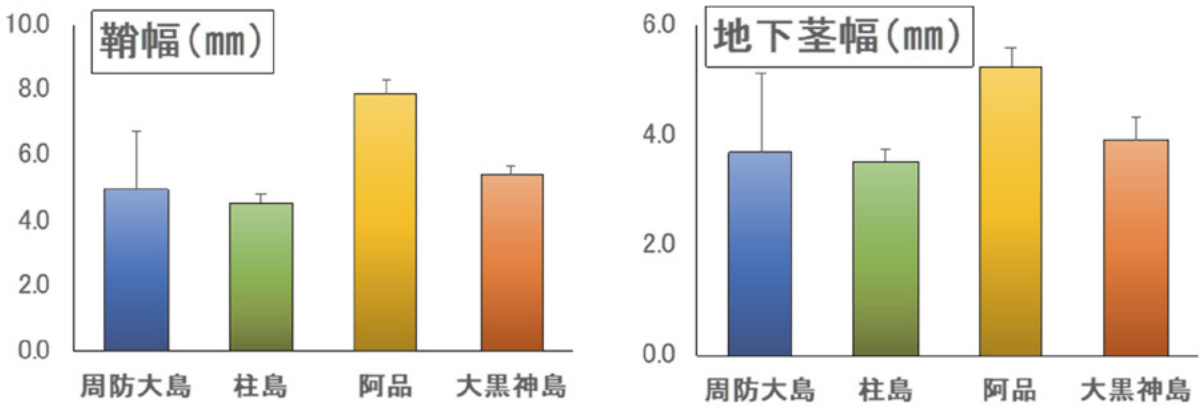

図３　各調査地におけるアマモの形態的特徴（左：鞘幅，右：地下茎幅）

形態	採水	PO_4	DIN
葉長	下層	−0.14	0.80
	間隙水	0.86	0.93
鞘幅	下層	0.83	0.49
	間隙水	0.77	0.98
地下茎幅	下層	0.01	0.87
	間隙水	0.75	0.99
地上部DW	下層	−0.49	0.89
	間隙水	0.58	0.76

形態	採水	PO_4	DIN
株数	下層	−0.52	−0.14
	間隙水	−0.61	−0.55
枚数	下層	0.83	0.49
	間隙水	0.06	0.66
地下部DW	下層	−0.63	0.43
	間隙水	−0.21	0.02
付着物DW	下層	−0.32	−0.07
	間隙水	−0.73	−0.49

図４　各調査地の栄養塩類濃度とアマモの形態的特徴との相関関係（r^2）
DIN 濃度は葉長，鞘幅，地下茎幅，地上部重量との相関が高い

図５　プラスチックカップを利用したアワビ稚貝の個別飼育法

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，鬼塚剛

【背景・目的】

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

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

【方法】

（1）カラヌス目カラヌス科の飼育法の検討

魚類の餌として最重要と考えられるカラヌス目カラヌス科（Yoneda et al., 2022）を得るため，2023 年 7 月に紀伊水道（表層 23.7 °C，底層 20.3 °C）にて採集された動物プランクトン群集を兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センターより分与していただいた。動物プランクトン群集は水産大学校まで運搬し，研究室内にて維持した。本群集よりカラヌス科に属するカイアシ類（*Calanus* sp.，以後カラヌス）の雌個体を単離し，6 穴プレート内で維持していると，その個体より卵の放出および幼生の孵化が確認された。

ア） カラヌスの餌料系列の検討

カラヌスは成体期における前体部長が 2.0–2.8 mm になる大型のプランクトン種であり（Zhang et al., 2005），室内培養系での報告例が非常に乏しい。本試験では，カラヌスにおける幼生期–成体期の間の大きなサイズギャップを考慮した餌料系列が重要であると考え，個体の発達に合わせて給餌する微細藻類種を変更した（表 1）。カラヌスがノープリウス幼生期・コペポダイト幼生期に至った際は細胞の小さい *Isochrysis galbana*（ハプト藻）および *Chaetoceros neogracile*（珪藻）を餌に用い，成体期の餌には *I. galbana* の代わりに *Eutreptiella eupharyngea* を用いた。*C. neogracile* はカラヌスの発達段階に共通する餌料として用いた。カラヌスは孵化直後～コペポダイト幼生期の間は 6 穴プレート内で飼育し，成体期では 2 L 容のプラスチックビーカーの中で飼育した。各個体は水温 20 °C，塩分 30–33 の環境のもと，成体期に至るまで飼育した。カラヌスへの給餌は毎日おこない，飼育海水の交換は 1–2 日に 1 回おこなった。

イ）カラヌス成体への一日あたりの適正給餌量の検討

成体期に至ったカラヌスへ *C. neogracile* の単一種を給餌する場合の必要餌量を検討した。6 穴プレートを 4 枚用意し，それぞれに細胞密度が 1 万 cells/mL, 10 万 cells/mL, 50 万 cells/mL, および 100 万 cells/mL となるように *C. neogracile* を添加した。各プレートの 5 つの穴にそれぞれカラヌス成体を個別に収容し，24 時間放置した。24 時間後，飼育水中の残餌およびカラヌスから排泄された糞を計数し，それぞれの結果から細胞の摂餌速度（cells/ind/h）および排泄速度（feces/ind/h）を算出した。各プレートの 1 つの穴にはカラヌスを入れない条件で放置し，細胞の摂餌速度を算出する際のブランクとした。6 穴プレートはシェーカー（PSU-2T; Biosan, Riga, Latvia）を用いて 150 rpm の速度で揺らし，*C. neogracile* を水中に常に懸濁させた。

（2）他種カラヌス目の飼育法の検討

2023 年 6 月に山口県秋穂湾で山口県水産研究センターの協力のもと簡易プランクトンネット（目合い 100 µm）を用いて動物プランクトン群集を採集した。動物プランクトン群集は水産大学校まで運搬し，研究室内にて維持した。本群集よりカラヌス目パラカラヌス科に属する *Paracalanus orientalis*（Ueda et al., 2022; 以後，パラカラヌス）を単離した。本種の同定は株式会社日本海洋生物研究所の古澤一思氏のもとでおこなった。

パラカラヌスの培養時，*I. galbana* と *C. neogracile* の併用給餌を毎日おこなった。*I. galbana* と *C. neogracile* は細胞数が 2:1 となる一定の比率で，パラカラヌスの培養密度に従って量を調節しながら給餌した（総数 30–120 万 cells/mL）。パラカラヌスへの給餌量は，前日に給餌した各種藻類の残り具合を基に変更した。パラカラヌスは水温 20 °C，塩分 30–33 の海水 4–5 L の中で個体群の状態で可能な限り長期間維持した。この間, 水替えは 3–4 日に 1 回おこない，すべての個体をプランクトンネットにより濾して新しい培養液に再収容した。パラカラヌスの個体群の状態を評価するために，培養液中の各発達段階（ノープリウス幼生，コペポダイト幼生，成体雌，成体雄）の個体，および残餌を毎日計数した。パラカラヌスの個体はその形態の違いをもとに識別した。

（3）試験用植物プランクトン培養株に対するカイアシ類の摂餌性の評価

（2）より確立したパラカラヌスの成体期を対象に，瀬戸内海に生息する各種植物プランクトンを餌とした給餌試験をおこなった。本試験用の餌料として，広島湾にて単離された微細藻類 *Chaetoceros socialis* (Csoci; 2019 年 10 月単離)，*Cyclotella* sp.（CA3; 2021 年 7 月単離），*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex（Sm-d; 2021 年 7 月単離），*Pseudo-nitzschia* sp.（Pn; 2023 年 7 月単離），*Leptocylindrus danicus*（Ld; 2023 年 5 月単離）を用意した。また，パラカラヌスへの通常培養時の主な餌である *I. galbana*（Iso）も，本試験において参考餌料として用意した。各区へ給餌する細胞の量は，クロロフィル蛍光量が一定となるように調節した（Iso の場合，129 万 cells/mL）。24 穴プレート数枚の中にパラカラヌスを各区 5 個体ずつ個別に収容し，そこに各藻類種を添加した後に 6 時間放置した。6 時間後，飼育水中の残餌を計数し，パラカラヌスによる摂餌速度（cells/ind/h）を算出した。各区にはカラヌスを入れずに藻類のみ添加された穴を一つ用意し，カラヌスの飼育水と同様に放置することで，細胞の摂餌速度を算出する際のブランクとした。24 穴プレートはシェーカー（PSU-2T; Biosan, Riga, Latvia）を用いて 150 rpm の速度で揺らし，各種細胞を水中に常に懸濁させた。

【結果】

（1）ア）カラヌスの餌料系列の検討

本試験でカラヌスの室内飼育に挑戦した結果，総数 27 個体を成体期まで成長させることに成功した。27 個体すべてが成体期に移行するまでにおよそ 1 か月の飼育期間を要した。カラヌスの個体を成体期まで成長させた本試験の餌料系列は，今後のカラヌス飼育時の参考となる。

成体の性別を外部形態より判別すると，27 個体すべて雌であった（図 1）。本試験では雄が一個体も得られなかったことから，雌より受精卵が得られず，カラヌスの継代ができない結果となった。複数のカイアシ類種において個体群中の性比が雌に偏ると報告されている（Kiørboe, 2006）。カイアシ類の雄の出現率が減少する要因の一つとして高水温ストレスが指摘されている（Lee et al., 2003）。カラヌスは高温に弱く， 20 °C を超えて 22.6 °C になると生殖腺の発達や卵の発生に異常をきたす（Uye, 1988）。本試験で用いたカラヌスの親は初夏の比較的高い水温の時期に採集されたものであり，そのストレスを引き継いでいた可能性がある。次年度以降，カラヌスの室内飼育系を立ち上げる際は，低水温期の冬から春先までに採集された親個体を用いる必要がある。

（1）イ）カラヌス成体への一日あたりの適正給餌量の検討

成体期のカラヌスに給餌する *C. neogracile* の密度が増加すると，カラヌスの摂餌速度は有意に増加した（Tukey test, $p < 0.05$）（表 2）。細胞密度が 100 万 cells/mL の時に摂餌速度は最大値となった。カラヌスの排泄速度も細胞密度の増加とともに高くなる一方（Tukey test, $p < 0.05$），50 万 cells/mL と 100 万 cells/mL の給餌区間で有意な差は認められなかった。以上より，成体期のカラヌスへ *C. neogracile* のみを給餌する場合は，少なくとも 100 万 cells/mL の細胞密度を毎日維持する必要があると分かった。しかし，この給餌条件を長期間維持するには，*C. neogracile* の培養時に到達できる密度が低すぎる（およそ 500 万–600 万 cells/mL）。次年度以降では，カラヌスには *C. neogracile* だけでなく，細胞の大きい *E. eupharyngea* も併用する方法を検討する。その際は，カラヌスの排泄速度において 100 万 cells/mL 給餌時と有意差のなかった 50 万 cells/mL の密度を *C. neogracile* の最大給餌量とし，*E. eupharyngea* との併用によって *C. neogracile* の必要量をどれだけ減らせるか検討していく。

（2）他種カラヌス目の飼育法の検討

パラカラヌスは天然海域より単離してから現在（2024 年 2 月 19 日）に至るまでの 189 日間，室内培養系にて維持できた（図 2）。パラカラヌスの密度を発達段階に分けると，ノープリウス幼生の個体群への加入，およびその後のコペポダイト幼生期へのピークの移行が計 7 回ずつ確認された。パラカラヌスの個体群は試験期間中常に増加し続けることはなく，周期変動を示していた。個体群動態のパターンより，室内培養系を開始してから 7 代目のコホートが形成されていることが分かった。パラカラヌスは成体については，ノープリウス幼生とコペポダイト幼生に比べて低い密度で推移するものの，各時期に途絶えず一定数出現していた。パラカラヌスの長期にわたる培養成績を考慮すると，本試験で設定した培養条件は本種の個体群を維持するのに適していると考えられる。次年度以降も引き続き，本研究課題の「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」の解明に本種を実験対象として利用していく。

（3）試験用植物プランクトン培養株に対するカイアシ類の摂餌性の評価

パラカラヌスの成体に対して，各種植物プランクトンを給餌した時の摂餌速度を比較した（図 3）。その結果, パラカラヌスは Sm-d 区と Pn 区にて摂餌速度が高く（Tukey test, $p < 0.05$），それらの値は参考餌料の Iso 区と有意差が認められなかった。一方，CA3 区および Ld 区では Sm-d 区と Iso 区よりも有意に低い摂餌速度となり，Csoci 区においては摂餌速度が負の値を示すほど摂餌されていなかった。以上より，カイアシ類の摂餌の仕方はその餌となる植物プランクトン種によって異なることが実証された。植物プランクトン種に対するカイアシ類の摂餌選択性，あるいは植物プランクトン種を摂餌したカイアシ類の個体発生および卵生産能が明らかにできれば，一次生産者として着目すべき鍵種を絞り込むことができ，ひいては瀬戸内海における生態系モデルの高度化につながる可能性がある。次年度以降も引き続き，各種植物プランクトンを餌としたパラカラヌスの飼育実験を行っていく。次年度では，幼生期から始まる個体の飼育も行い，植物プランクトン種が個体の発生に及ぼす影響も評価していく予定である。また，本試験の結果を受けて，パラカラヌスがなぜ *S. marinoi-dohrnii* complex を最もよく摂餌し，*C. socialis* を摂餌しなかったのかという疑問が残っている。次年度では，パラカラヌスの飼育試験において測定項目を増やし（e.g. 糞の排泄性，摂餌行動），植物プランクトン種による摂餌性の違いを多角的に評価していく。

【参考文献】

Lee, H-W., Ban, S., Ikeda, T., Matsuishi, T., 2003. Effect of temperature on development, growth and reproduction in the marine copepod *Pseudocalanus newmani* at satiating food condition. Journal of Plankton Research. 25, 261–271.

Kiørboe, T., 2006. Sex, sex-ratios, and the dynamics of pelagic copepod populations. Oecologia. 148, 40–50.

Ueda, H., Itoh, H., Hirai, J., Hidaka, K., 2022. *Paracalanus orientailis* n. sp. (Copepoda, Calanoida), formerly referred to as *P. parvus* in Japanese coastal waters. Plankton and Benthos Research. 17, 221–230.

Uye, S., 1988. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory. Hydrobiologia. 167–168, 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.

Zhang, G-T., Sun, S., Zhang, F., 2005. Seasonal variation of reproduction rates and body size of *Calanus sinicus* in the SouthernYellow Sea, China. Journal of Plankton Research. 27, 135–143.

表1. カラヌスの餌料系列

カラヌスの発達段階	使用した餌料種 （細胞サイズ μm）
N幼生期	*Isochrysis galbana* (5–6μm), *Chaetoceros neogracile* (6–8μm)
C幼生期	*I. galbana*, C. *neogracile*, *Tetraselmis tetrathele* (13–15μm)
成体期	C. *neogracile*, *T. tetrathele*, *Eutreptiella eupharyngea* (35–70μm)

表2. 各給餌密度の*C. neogracile* に対するカラヌス成体の摂餌性
（n = 5; Tukey test, a>b>c, p < 0.05）

給餌密度 （$\times 10^4$ cells/mL）	摂餌速度 （$\times 10^4$ cells/ind/h）	糞粒生産速度 （number/ind/h)
1	-	$28^{b} \pm 31$
10	$2.6^{c} \pm 0.7$	$59^{b} \pm 59$
50	$14.8^{b} \pm 2.1$	$134^{ab} \pm 91$
100	$20.5^{a} \pm 1.0$	$182^{a} \pm 58$

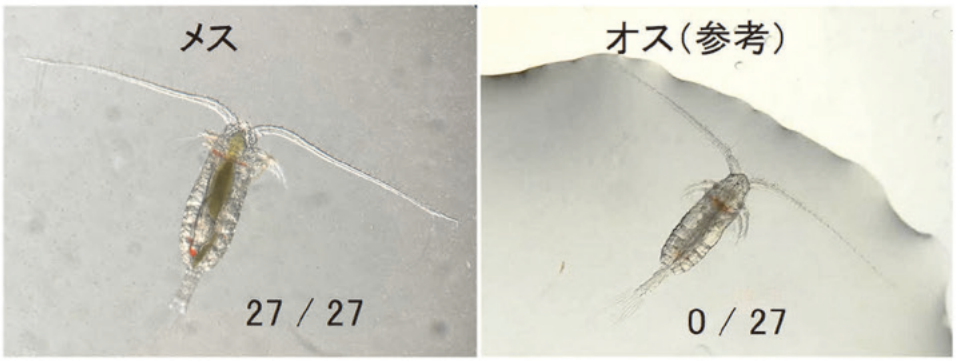

図1. 本試験で確認されたカラヌスの成体の形態とその性比

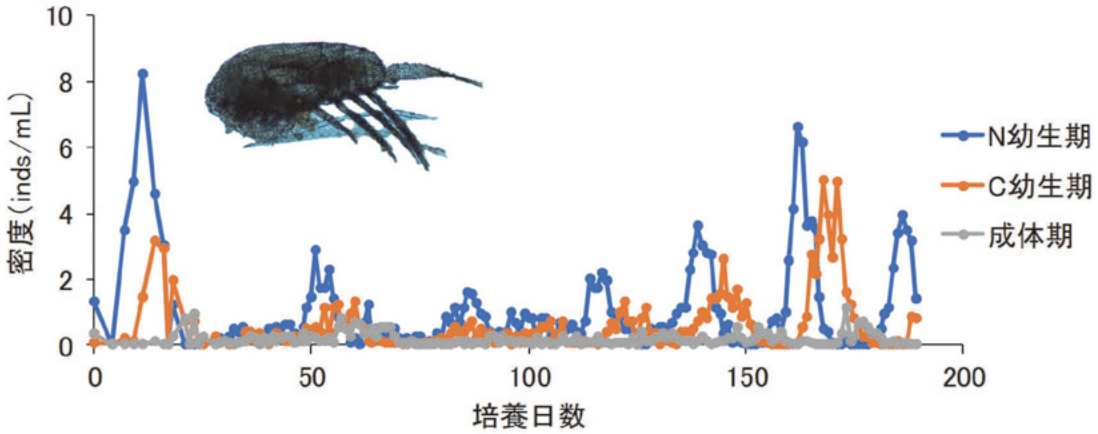

図2. *Paracalanus orientalis* の室内培養系における個体群の動態

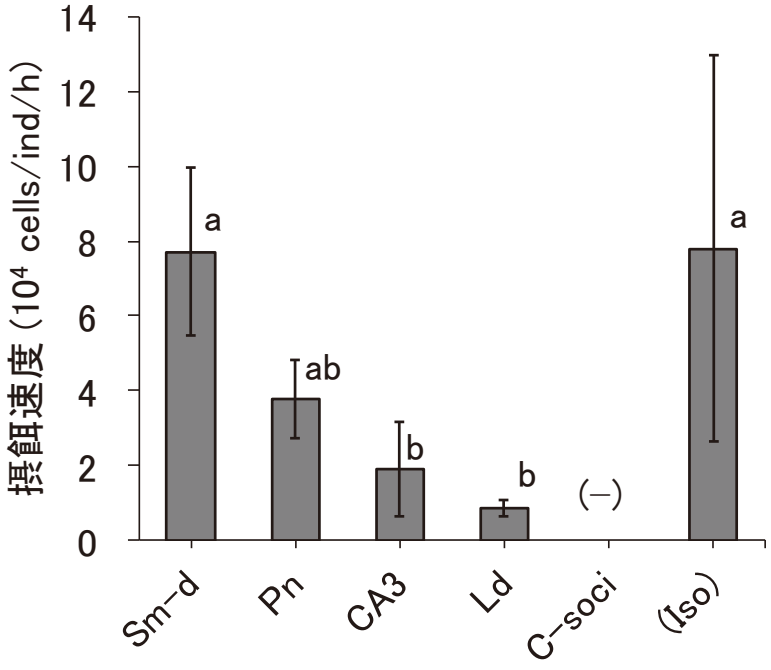

図3. 各種植物プランクトンに対するパラカラヌスの摂餌性.
C-sociのみ負の値を示した.（n = 5, Tukey test, $p < 0.05$）

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，肥後翔太，堀部倭子
大阪公立大学
相馬明郎

【背景・目的】

兵庫県の瀬戸内海海域では，1990 年代半ば頃を境に漁船漁業による漁獲量が減少に転じ，その要因として，海域の栄養塩濃度の低下に伴う貧栄養化が指摘されるようになった。栄養塩濃度の変化は，食物網を介して，低次生物から高次生物に至る海洋生態系全体の動態に影響を及ぼしていると考えられる。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，兵庫県の瀬戸内海海域において，貧栄養化に伴う海洋生態系の応答メカニズムを解明し，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

これまでに兵庫県の瀬戸内海海域で実施された動物プランクトンに関連する調査について，未解析のデータセットについて整理した。今年度は，2020 年 4 月～2023 年 3 月の 3 か年，県予算で下記(2)と同様の内容で実施した海洋観測結果について，(2)で得られた結果と併せてとりまとめた。

(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 and/or 30 m または B-1 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してろ過し，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 20 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，*Calanus sinicus* はろ水量

が 200 L に最も近くなるまで分割し，分割サンプル中に出現した全個体について，コペポディッドI〜V期および成体毎に計数した。

(3) モデル解析

兵庫県の瀬戸内海海域における，低次生物から高次生物に至る食物網を表現する低次ー高次生態系モデル（仮称）の構築に向け，今年度はモデルの概念設計を行った。モデルの概念設計として，モデルで表現する(1)食物網を構成する生物機能群（生物），(2)各機能群の食物組成，(3)各生物機能群の水温応答性を考慮する仕組みとその定式化について検討した。さらに，各生物機能群の食性ならびに各栄養塩，水温に対する応答性についての定式化手法について検討した。

【結果】

(1) 既往データの整理，解析

(2)の結果と併せて下記(2)に示した。

(2) 海洋観測調査

今年度は，2020 年 4 月〜2023 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平均的な季節変動，海域間または定点間の差異について明らかにした。

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 8.3〜212.0 個体/L，大阪湾 2 定点で 7.9〜475.2 個体/L，播磨灘 3 定点で 6.3〜157.1 個体/L，備讃瀬戸 2 定点で 8.3〜212.0 個体/L の範囲で変動した（図 2)。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 属が調査期間 3 か年（2020 年 4 月〜2023 年 3 月）の平均値で 85%以上を占めた。また，*Paracalanus* および *Oithona* は周年出現したが，瀬戸内海において *Microsetella* の再生産は主に 5〜11 月の間であることが知られており（Uye et al. 2002），1〜4 月の間（2021 年 1 および 3 月の KA23 定点を除く），全定点で *Microsetella* のノープリウス幼生の出現はなかった。播磨灘の 3 定点と紀伊水道では *Oithona* の占める割合が比較的大きかったが，大阪湾 2 定点と備讃瀬戸では *Paracalanus* の占める割合が一番大きかった。また，備讃瀬戸西部の KA20 定点では他の定点に比べて，*Microsetella* の占める割合が小さく，*Acartia* の割合が比較的大きかった。

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 2234〜23071 個体/m^3，大阪湾 2 定点で 3592〜112690 個体/m^3，播磨灘 3 定点で 3300〜89997 個体/m^3，備讃瀬戸 2 定点で 674〜65482 個体/m^3 の範囲で変動した（図 3)。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 属が調査期間 3 か年の平均値で 80%以上を占めた。中でも播磨灘，大阪湾では *Microsetella* の占める割合が 40%以上と大きかった。また，この両海域では沖合域に比べて沿岸域や湾奥部の密度が大きかった。備讃瀬戸では *Paracalanus* の占める割合が大きく，30%以上を占めた。紀伊水道は，他海域に比べて出現密度が小さかった。

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ー炭素重量換算式（Uye 1982, Nishikawa et al. 2023）を用いてバイオマスを推算した結果，各海域のカイアシ類バイオマスは，紀伊水道 1 定点で 2.9〜27.4 mgC/m^3，大阪湾 2 定点で 3.8〜75.7 mgC/m^3，播磨灘 3 定点で 2.0〜96.8 mgC/m^3，備讃瀬戸 2 定点で 0.4〜44.3 mgC/m^3 の範囲で変動した（図 4)。出現個体密度の結果と比較して，バイオマスでは *Oithona* の占める割合が低下し，代わって *Calanus*

sinicus の占める割合が増大した。特に，大阪湾 A2 定点，紀伊水道 K4 定点では，本種の占める割合が 40%を上回った。一方，備讃瀬戸では本種の占める割合が 10%前後と小さかった。備讃瀬戸では，*Paracalanus* の占める割合が約 40%で，本種の占める割合が最も大きかった。播磨灘 H2，H5 定点および大阪湾 A10 定点では，バイオマスの平均値が比較的大きく，これらの定点と播磨灘沖合の H10 定点では，*Microsetella* の占める割合が最も大きく 30%以上を占めた。

C. sinicus は，瀬戸内海東部海域において，個体数は少ないものの，バイオマスではカイアシ類の主要な構成種であり，特に，夏眠前のイカナゴが盛んに摂餌を行う 3〜6 月において，イカナゴの主要な餌生物であるとともに（橋口ほか 2021），この時期のカイアシ類バイオマスの多寡を決定する最重要種である（Nishikawa et al. 2023）。本種の出現個体密度は，0〜1174 個体/m^3 の範囲で変動し，1〜7 月は全発育段階の合計個体数が 100 個体/m^3 を上回ることが多かったが，8〜12 月は出現個体数が少なく，明瞭な季節性を示した。瀬戸内海東部海域における本種の分布密度は，大阪湾で大きく（定点 A2：平均 203.0 個体/m^3），次いで播磨灘，紀伊水道の順となり，備讃瀬戸の KA20，KA23 定点の平均値はそれぞれ 24.5，31.3 個体/m^3 で他の海域に比べて小さかった（図 5）。飼育実験から，本種は水温が 7〜20℃の範囲では卵のふ化率が 70%以上であるものの，22.6℃下では 20%まで低下することが報告されている（Uye 1988）。このことから，Uye (2000) は，水温が 23℃を超える条件下では *C. sinicus* の個体群が熱ストレスを受け，バイオマスが減少することを指摘している。近年，瀬戸内海東部海域では夏季水温の上昇により（Nishikawa et al. 2014），紀伊水道を除く 3 海域の最高水温が底層においても 25℃を上回るようになり（図 6），瀬戸内海東部の各海域では *C. sinicus* の個体群がかろうじて越夏できる状態であると推察される（Nishikawa et al. 2023）。特に，備讃瀬戸では KA20 定点において 4 か年のうち 3 か年で底層の最高水温が 28℃を上回っていたことから（図 6），瀬戸内海東部海域でも特に高水温の影響を受けており，その結果，他海域に比べて *C. sinicus* の出現密度が小さいことが考えられた。一方，紀伊水道では他の海域に比べて夏季の最高水温が低く，調査期間中その値が 25℃を上回る年もなかった。また，Uye（2000）も紀伊水道が *C. sinicus* の生息に適した海域であることを指摘している。しかしながら，本調査結果から，紀伊水道はカイアシ類バイオマスに占める *C. sinicus* の割合は大きいものの，瀬戸内海東部海域の中でバイオマスの値自体は大きくはなかった（図 4）。これは，水温だけでは各海域における *C. sinicus* の分布密度の差異を説明できないことを示唆している。本調査において *C. sinicus* の分布密度の高かった大阪湾は，他海域に比べてクロロフィル a 濃度が高かった（図 7）。次年度以降は，水温に加えて他のどのような要因が *C. sinicus* の各海域の分布密度に影響を及ぼしているのか，さらにデータを蓄積しながら詳細に検討する。

(3) モデル解析

播磨灘の低次ー高次生態系モデル構築において，高次生態系の解析には Ecopath with Ecosim モデル (EwE モデル，図 8) を活用することとした。また，低次生物のうち植物プランクトンの生理生態については，従来の生態系モデルに比べて，堆積物ー水生態系における植物プランクトン生活環と栄養塩の相互関係を解析する Ecosystem Model for Aquatic Geologic Integrated Network on Life cycles of Phytoplankton (EMAGIN-L.P.)モデル（Sohma et al. 2022，図 9）の知見を活用し，EwE モデルにおいて 4 つの植物プランクトン機能群を設定した。また，動物プランクトンについてはイカナゴやカタクチイワシ等の餌生物としての重要性と 1 個体当たりの

バイオマスを考慮し，*C. sinicus*＞*Paracalanus*＞その他中型種（*Acartia* 等）＞*Oithona* の 4 機能群に区分した。植物プランクトン 4 機能群の成長速度は栄養塩・水温に，動物プランクトン 4 機能群の成長速度は水温に応答する定式化を行った。また，他の生物機能群の成長速度についても水温に基づく定式化を行った。これらに加え，播磨灘の低次生態系における栄養塩循環の仕組みを明らかにするため， EMAGIN-L.P.を活用し，生物代謝による DIN 生成・消費，流動による DIN 輸送についても解析した（古川・相馬 2022）。本解析では，4 つの Case（表 1）を比較することで，DIN 濃度の変動メカニズムを分析した（図 10）。Case A は 2000 年代前半の播磨灘，Case B〜D は，2000 年代前半の播磨灘において河川からの DIN 流入量，大阪湾の DIN 濃度，二枚貝の 3 要因が，施策によって過去最高レベルまで上昇した場合を設定した。本解析の結果，河川からの DIN 流入量増加，大阪湾の DIN 濃度上昇，二枚貝の増加は，全て播磨灘の DIN 濃度を上昇させ，3 要因の中で最も効果が大きかったのは大阪湾の DIN 濃度上昇であった。一方，大阪湾奥部では依然として富栄養化現象がみられることから，播磨灘と大阪湾両者に鑑みた栄養塩管理の必要性が示唆された。また，河川からの DIN 流入量増加の効果は限定的だが，兵庫県沿岸域における表層 DIN 濃度を上昇させることから，養殖海苔の色落ちを軽減する可能性が示された。さらに，河川からの DIN 流入量増加，大阪湾の DIN 濃度上昇は植物プランクトン濃度を上昇させたが，二枚貝の増加は上昇させなかった。すなわち，二枚貝増殖は，赤潮発生を抑制しつつ，水産資源向上を導く可能性が示された。

【参考文献】

橋口晴穂，西川哲也，魚住香織，古澤一思，森敦史，今尾和正，反田實．播磨灘におけるイカナゴ当歳魚の胃内容物重量指数の経年的低下とその要因．水産海洋研究, 85, 24–32, 2021.

古川桃子アンナ，相馬明郎．生態系モデルを用いた播磨灘における貧栄養化対策の評価―河川，大阪湾，二枚貝に関わる施策の効果とそのメカニズム―．土木学会論文集, 79 (17), 2023.

Nishikawa T, Hori Y, Nagai S, Miyahara K, Nakamura Y, Harada K, Tada K, Imai I. Long-term (36-year) observations on the dynamics of the fish-killing raphidophyte *Chattonella* in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan. J. Oceanogr., 70, 153–164, 2014.

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.

Sohma A, Imada R, Nishikawa T, Shibuki H. Modeling the life cycle of four types of phytoplankton and their bloom mechanisms in a benthic–pelagic coupled ecosystem. Ecological Modelling, 467, 109882, 2022.

Uye S. Length-weight relationship of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 149–158, 1982.

Uye S. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory. Hydrobiologia, 167, 285–293, 1988.

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

Uye S, Aoto I, Onbe T. Seasonal population dynamics and production of *Microsetella norvegica*, a widely distributed but little-studied marine planktonic harpacticoid copepod. J. Plankton Res., 24, 143–153, 2002.

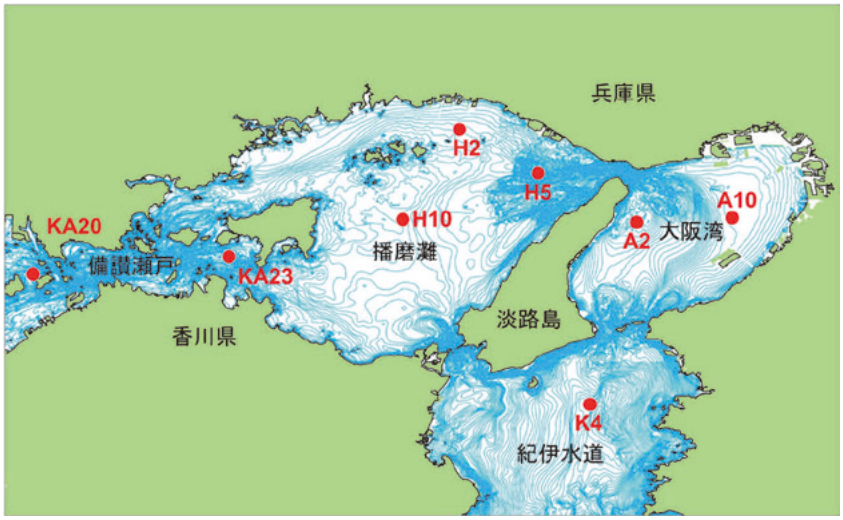

図 1　瀬戸内海東部海域における
海洋観測定点位置図

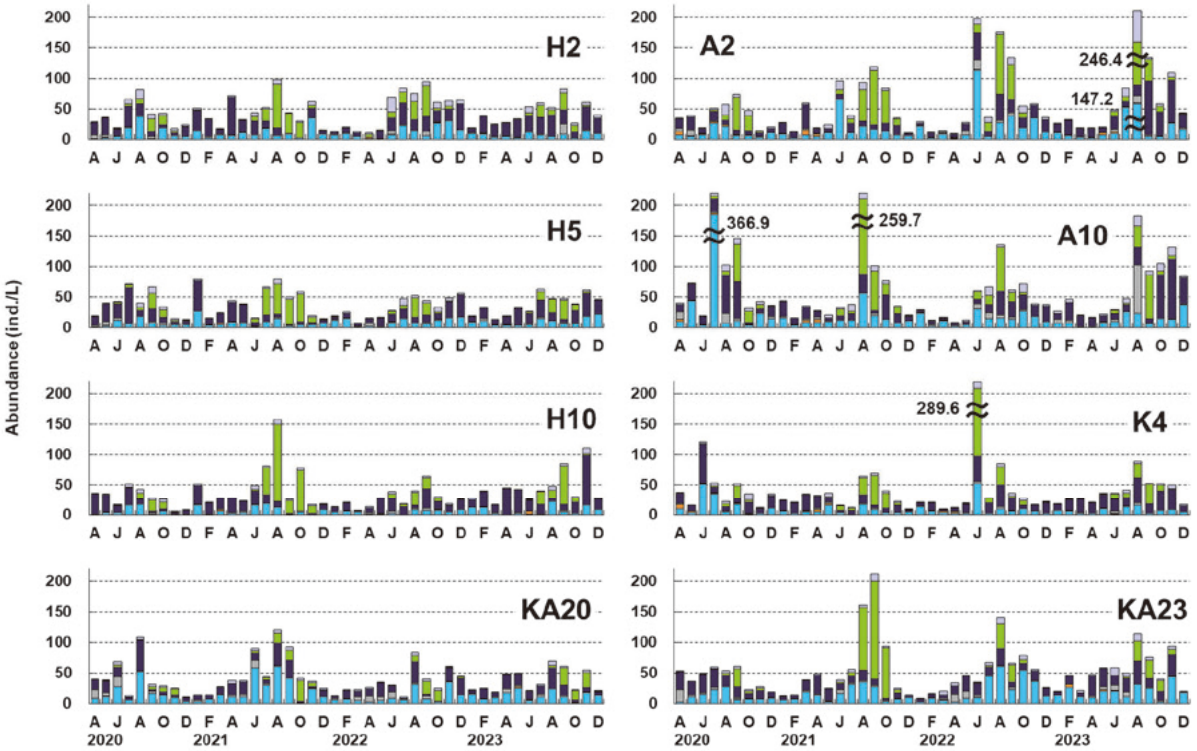

図 2　瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類ノープリウス幼生の出現密度
（2020 年 4 月～2023 年 12 月）

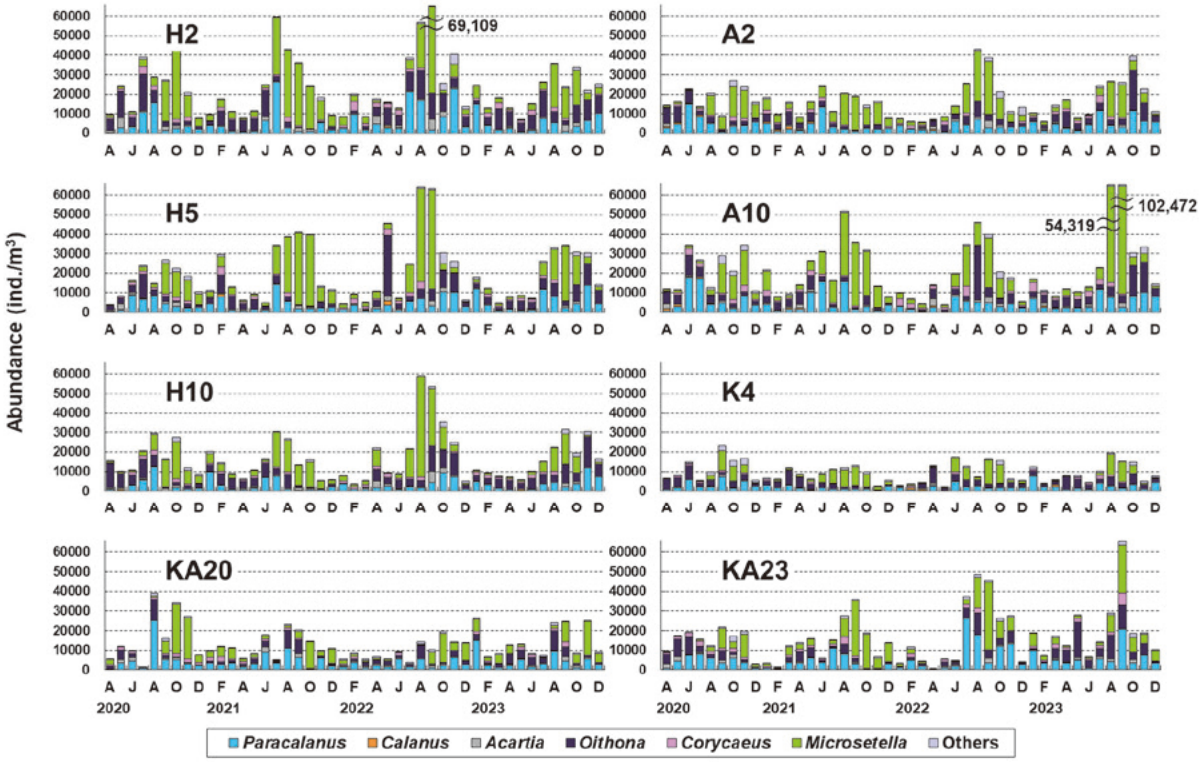

図 3　瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類（コペポディッド期以降）の出現密度
（2020 年 4 月～2023 年 12 月）

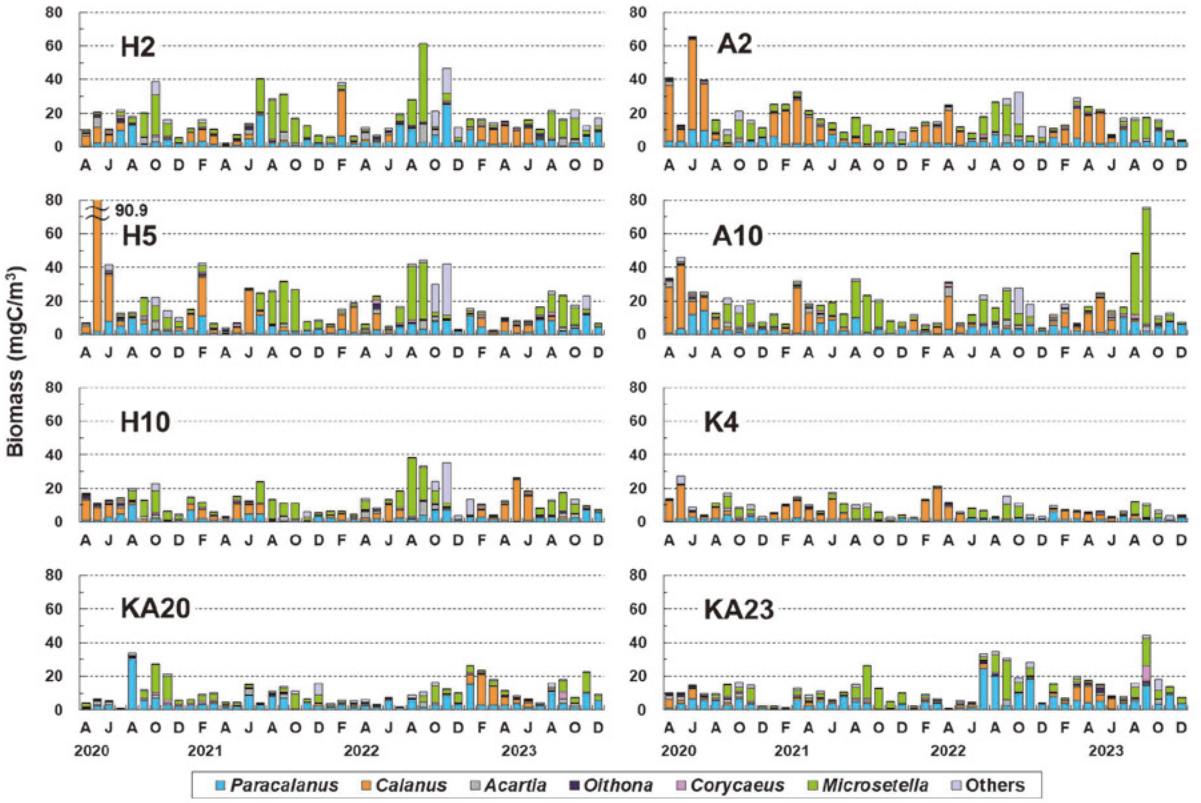

図 4　瀬戸内海東部海域におけるカイアシ類（コペポディッド期以降）のバイオマス
（2020 年 4 月～2023 年 12 月）

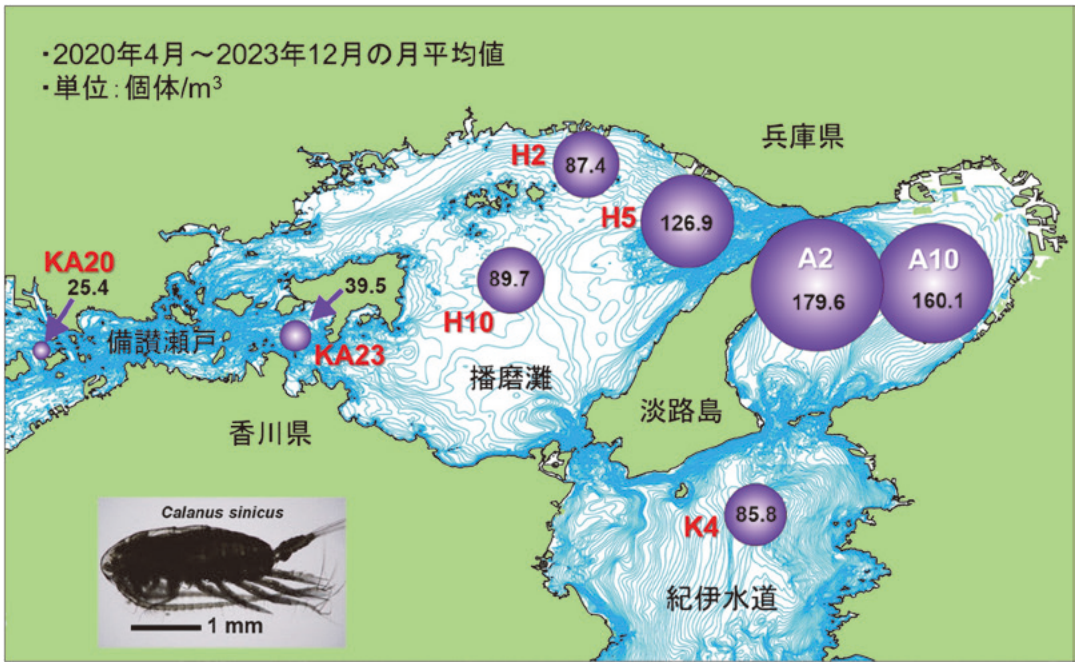

図 5　瀬戸内海東部海域における *Calanus sinicus* の分布密度
（2020 年 4 月～2023 年 12 月の平均値）

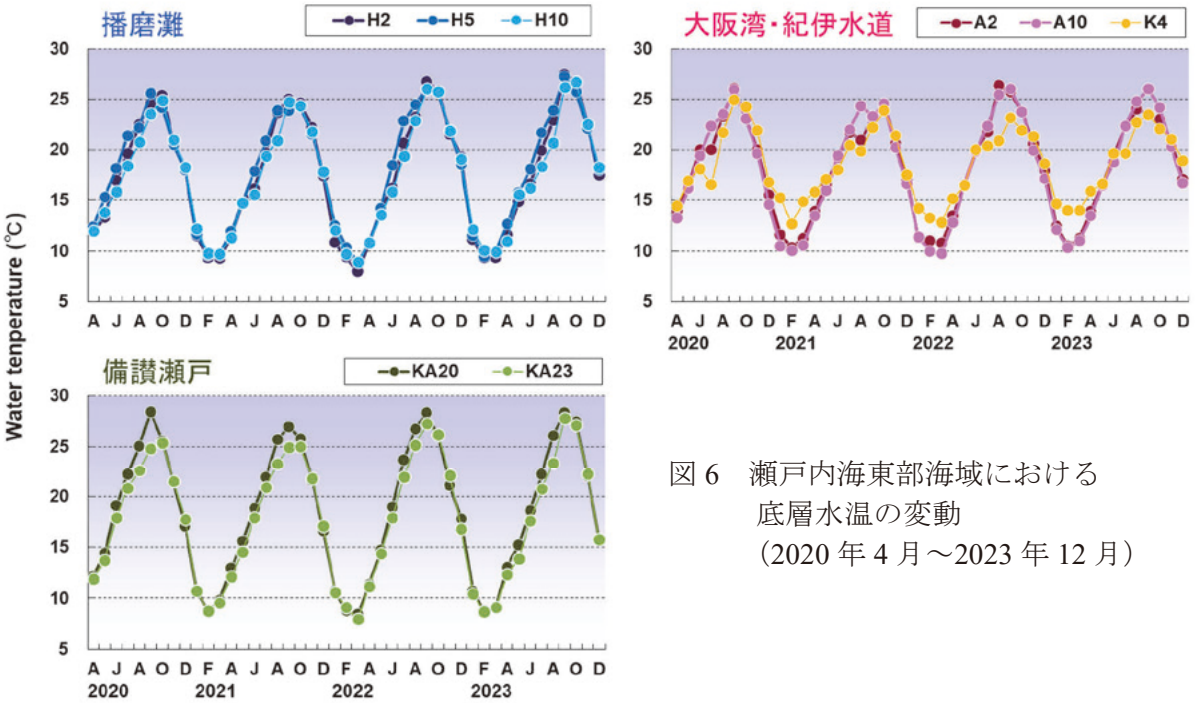

図 6　瀬戸内海東部海域における
底層水温の変動
（2020 年 4 月～2023 年 12 月）

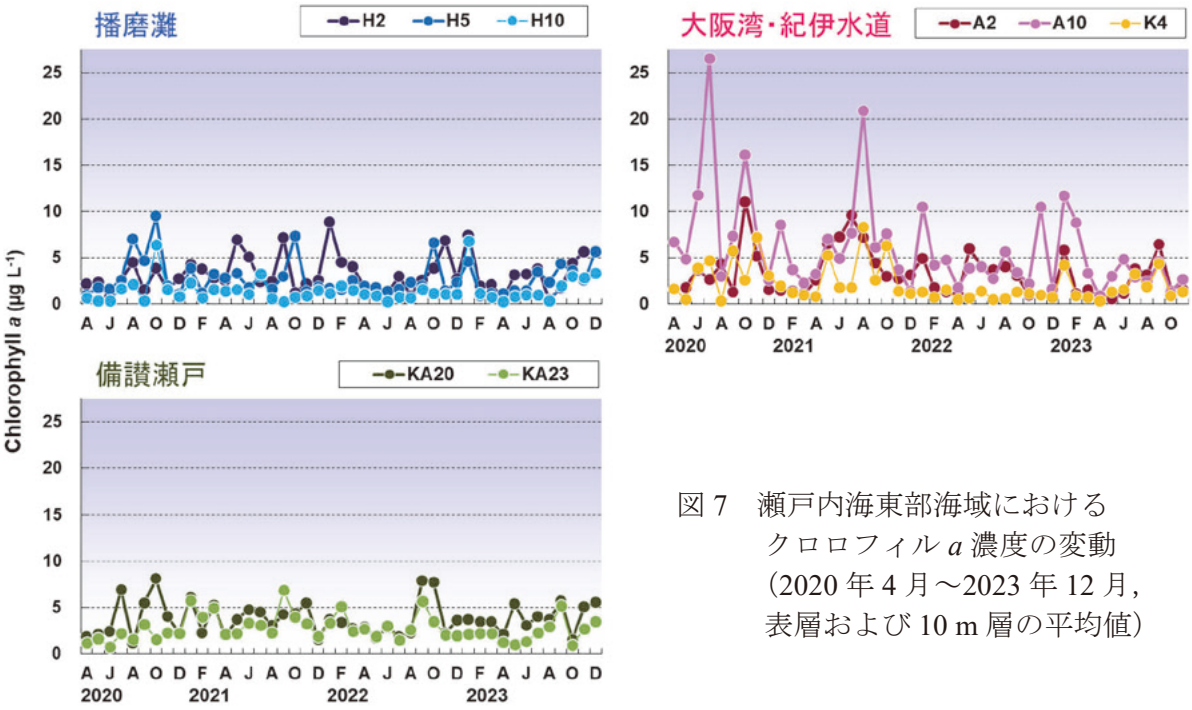

図 7　瀬戸内海東部海域における
クロロフィル *a* 濃度の変動
(2020 年 4 月～2023 年 12 月,
表層および 10 m 層の平均値)

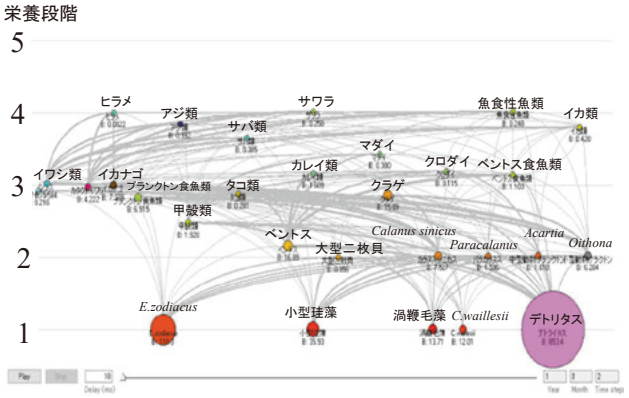

図 8 Ecopath with Ecosim モデルの概念図

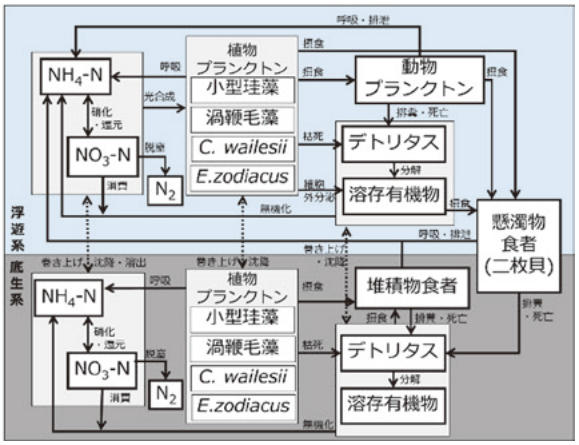

図 9 EMAGIN-L.P.の窒素循環図

表 1　解析ケース

解析ケース	モデルの設定
A(標準)	入力値に2000～2004年のデータを使用し、2000年代の播磨灘を再現した検証済みのケース
B(河川)	ケースAを基準とし、市川・加古川・揖保川からのDINが流入する計算BOX⑤、⑨(図-2)における河川からのDIN流入量を約6倍に設定 (この設定により、播磨灘全体における河川からのDIN流入量は、ケースAの約4.5倍になった)
C(大阪湾)	ケースAを基準とし、大阪湾のDIN濃度を2倍に設定
D(二枚貝)	ケースAを基準とし、播磨灘における二枚貝の現存量を10倍に設定

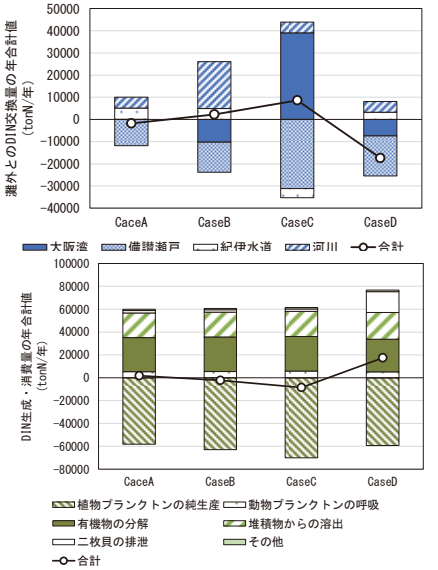

図 10　播磨灘外との DIN 交換量の年合計値(上)と灘内の DIN 生成消費量の年合計値(下)

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
田所和明，岡崎雄二，河野悌昌，高橋正知
香川県水産試験場
植田悠太，宮川昌志，高砂 敬，吉田 誠
広島大学
冨山 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をはじめとする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，燧灘およびその周辺海域を対象として，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，カタクチイワシを含めた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，燧灘およびその周辺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。

今年度は，まず燧灘および備讃瀬戸におけるカタクチイワシやイカナゴの卵仔稚魚調査，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）の経年変化などに関する情報を整理した。次に，当該海域における生態学的栄養段階に関する知見を整理するとともに，プランクトンや小型魚類の炭素・窒素安定同

位体比の分析を進めた。さらに，飼育実験により小型魚類の成長率と水温の関係や体組織における炭素・窒素安定同位体比のターンオーバーや濃縮係数などを調べるとともに，野外調査に基づく耳石日輪解析などから，生態モデルを構築するための生物パラメターを取得した。本稿では，燧灘および備讃瀬戸のカタクチイワシとイカナゴに関する調査結果，瀬戸内海の海域別の動物プランクトンの群集構造および燧灘カタクチイワシの初期成長の時間的変化とその緒要因について報告する。

【方法】

(1) 燧灘および備讃瀬戸におけるカタクチイワシとイカナゴの卵仔稚魚調査，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)。Zenitani et al. (2007) に従って，ボンゴネットに基づく仔魚の調査結果から 5 月と 6 月の日間生残率を推定した。

備讃瀬戸のイカナゴについて，7 月および 12〜2 月に空釣りこぎ，ボンゴネットなどを用いて親魚調査および仔稚魚調査などを行った。12 月の親魚調査について，親魚密度，1 才魚の成熟率，年齢毎の平均体重などを求め，Akai and Yoneda (2021) に従って年齢別産卵量指数を推定した。さらに，2008〜2023 年 2〜5 月のシンコ（仔稚魚）漁獲量（高松・庵治地区のイカナゴ込網漁業）と産卵量指数との関係を調べた。

(2) 動物プランクトン群集構造

2020 年 1〜12 月において，瀬戸内海の灘・湾，水道の計 10 定点（大阪湾，播磨灘，燧灘，広島湾，伊予灘，周防灘，豊後水道（大分と愛媛），関門海峡）で採取された動物プランクトン各種の現存量を調べるとともに，クラスター分析による群集構造解析を行い，海域別，動物プランクトン種別（*Calanus sinicus* と *Paracalanus orientalis*）に現存量の時空間変動を調べた。

(3) 燧灘カタクチイワシの初期成長

2002〜2006 年（加入高水準期）および 2013 年，2015〜2019 年（低水準期）の 5〜7 月にパッチ網漁船で採取されたカタクチイワシ加入魚（5，6 月発生）を用いた。加入高水準期の平均加入尾数は 116 億尾/年，平均初期生残指数（加入尾数/仔魚密度）は 65，一方，加入低水準期では 19 億尾/年（高水準期の 16%），2（同 3%）であった。標本の耳石輪紋間隔の読み取りにより，摂餌開始後 15 日までの日間成長率を推定した。日間成長率と経験水温の関係について，線形混合効果モデルを用いて加入水準間で比較した。初期成長の変動要因を調べるため，Fujita et al. (2021)，Yoneda et al. (2022) で示された各採集年の 5 月と 6 月の仔魚密度，カイアシ類ノープリウス幼生密度，カイアシ類現存量密度（冷水出現 4 種 (*Calanus sinicus*，*Corycaeus affinis*，*Oithona similis*，*Oncaea scottodicarloi*)と温水出現 4 種（*Microsetella norvegica*，*Paracalanus parvus*，*Centropages abdominalis*，*Acartia omorii*）を区別），雌親魚の肥満度を引用した。さらに，各採集年の平均水温，雌親魚の平均体重から，個体当たり総産卵数（相対バッチ産卵数×産卵頻度×期間（5〜6 月），銭谷ら, 1988）を求め，5〜6 月の総産卵数から個体

あたり総産卵数を割ることで，当該年における総雌産卵個体数を推定した。ノープリウス幼生密度とカイアシ類密度について，仔魚密度と総雌産卵個体数でそれぞれ割ることにより，仔魚と親魚の個体当たりの餌密度を推定した。ヒートマップおよびクラスター分析による時系列解析により，成長率に及ぼす諸要因の影響を調べた。

【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

燧灘のカタクチイワシについて，2023 年 4〜5 月におけるカイアシ類密度（親魚の餌）は平年に比べて数倍高かったが，6 月以降は平年と同様に低位で推移した（図 1 左）。2023 年の親魚の肥満度は過去 5 年で最も高かった（図 1 右）。カタクチイワシは産卵期の餌条件（給餌条件）によって，肥満度も速やかに変化することが知られている(Yoneda et al. 2022)。このため，2023 年の高肥満度は 4〜5 月の高いカイアシ類密度を反映したものであると考えられた。一方，2003 年からの 21 年間の肥満度は有意に減少した（R^2=0.21，$p<0.05$）。カタクチイワシの銘柄別共販量について，チリメン（仔魚）は 2020 年から漁獲なしが続いていた（図 2 左上）。その一方で，カエリ（稚魚）の共販量は概ね平年並みであったが（図 2 左下），小羽（稚・幼魚）の共販量は 2011 年以降で最も高かった（図 2 右上）。近年，カタクチイワシ仔稚魚（加入魚）の漁獲量が減少・低迷していることから，特に 2020 年以降，単価の高いチリメンよりも，発育の進んだ（個体当たりの体重が増える）カエリや小羽を選択的に漁獲するという，いわゆる質よりも量を稼ぐ漁業スタイルへの転換が進んでいることが窺えた。2001〜2005 年と 2016〜2020 年における仔稚魚の漁獲（加入）尾数とボンゴネット採集に基づく日間生残率（ふ化後約 2 週間）の関係には有意な正の相関が認められた（R^2=0.69，$p<0.001$，図 3）。しかし，2021 年以降では，日間生残率に拘わらず仔稚魚の加入尾数は低い傾向が認められ，特に，2023 年 5 月と 6 月では日間生残率が非常に高かったが（89.3%，75.1%），加入尾数はそれぞれ 4.8 億尾と 9.0 億尾であった。この原因として，近年チリメンを選択的に漁獲しなくなったことによる仔稚魚漁獲量に基づく加入尾数推定の過小評価，ふ化後 2 週間以降における減耗の増大（例：捕食者によるトップダウン効果）などが影響している可能性が窺えた。

備讃瀬戸のイカナゴについて，高松・庵治地区のイカナゴ込網漁業（香川県総漁獲量の約 80%）によるフルセ（親魚）の漁獲量は，1990 年以降，3〜1983 トンの範囲で大きく変動したが，2014 年以降は 200 トン未満で推移し，2023 年は 3 トンであった（図 4 左）。シンコ（仔稚魚）の漁獲量は 1990 年代前半には 4500 トンを超える年も認められたが，その後減少し，2016 年以降は 1000 トン未満で推移し，2023 年は 887 トンであった（図 4 右）。2008〜2023 年の冬季親魚調査（12 月）に基づいた年齢別産卵量指数について，2009〜2014 年には 12 以上の高い年が連続で出現したが，2015 年以降には（2021 年を除いて）10 未満となり，2023 年は 0.2 で過去最低となった（図 5 左）。2009〜2023 年のシンコ漁獲量（2〜5 月）と産卵量指数（前年 12 月）の関係には有意な正の相関が認められ（R^2=0.40，$p<0.05$），2016 年以降では産卵量指数，漁獲量ともに低迷していることが示された（図 5 右）。シンコ漁獲量と産卵量指数の間に有意な関係があることは播磨灘でも認められており，当該海域でも近年の産卵量指数とシンコ漁獲量は減少・低迷していることが報告されている (魚住・西川, 2023)。シンコ漁獲量と産卵量指数の関係式に基づいた 2024 年のシンコ漁獲量推定値は 0.05 トンであった。香川県水産試験場および水産研究・教育機構による 2024 年 1〜2 月のイカナゴ仔魚調査におい

ても，仔魚の採集個体数は過去最低となっていることから，2024 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） 動物プランクトンの時空間変動

各定点で採取された動物プランクトンの種組成と現存量をクラスター解析した結果，4 つのグループに分けられた（図 6 上）。グループ 1 には *Paracalanus orientalis* や *Calanus sinicus* などが優占種であり，総現存量が 2 番目に高い群集，グループ 2 にはミジンコ類（*Penilia avirostris*, *Pseudevadne tergestina*）や *C. sinicus* が優占種であり，総現存量が最も高い群集，グループ 3 にはミジンコ類，*P. orientalis* が優占種であり，総現存量が 3 番目に高い群集，グループ 4 には *Acartia omorii* や *P. orientalis* が優占種であり，総現存量が最も低い群集であった。各湾灘・水道の月別群集グループの出現状況から，大阪湾から周防灘の瀬戸内海では類似した季節遷移が認められ，冬～初夏（1～6 月）まではグループ 1 が，夏（7～9 月）はグループ 3 が，秋以降（10～12 月）ではグループ 1 もしくは 2 がそれぞれ出現した（図 6 下）。豊後水道では東西で動物プランクトン群集の出現状況が異なり，大分側ではグループ 2 が周年出現したが，愛媛側では 2～6 月に（瀬戸内海と同様の）グループ 1 の出現が観察された。一方，関門海峡では，他の海域とは異なり，1～5 月（3 月除く）と 11～12 月にグループ 4 が出現し，6～10 月にはグループ 3 が出現した。

C. sinicus 現存量の地理的・季節変動から，大阪湾～周防灘では冬～春に多く出現し，夏以降に現存量が減少する傾向が認められた（図 7 上）。特に，瀬戸内海中央の備讃瀬戸，燧灘，広島湾では夏季に現存量が大きく減少した。一方，豊後水道では本種は周年にわたり多く出現したが，関門海峡では周年にわたり現存量は極めて少なかった。*C. sinicus* の主要な生息域は水温 25℃以下の太平洋の陸棚域（外海）であると考えられていることから (Uye 2000)，外海からの影響を受けにくく，かつ，夏季に高水温に見舞われる瀬戸内海中央では，他の海域に比べて，夏季における現存量の減少がより顕著になっているのかもしれない。*P. orientalis* 現存量の地理的・季節変動は，いずれの海域でも周年にわたって出現したが，燧灘と広島湾では夏に減少する傾向が認められた（図 7 下）。

（3）カタクチイワシの初期成長の時間的変異とその要因

線形混合効果モデルによる解析の結果，成長率は水温と加入水準に有意な影響を受けていることが明らかになった（水温：$p<0.001$，加入水準：$p<0.05$，図 8）。加入水準に関係なく，加入魚の成長率は水温が上昇するにつれて増加した。しかし，同じ水温において，低水準期の成長率は高水準期の 81%であった。成長率，外的要因（餌密度，水温），内的要因（肥満度，個体群密度）における時系列解析の結果，2 つのグループに分けられた（図 9 上）。グループ 1 にはノープリウス密度，水温，カイアシ類（温水出現種）密度，雌産卵個体数，仔魚密度が選択され，経年的な増加傾向を示した。一方，グループ 2 にはカイアシ類（冷水出現種）密度，雌魚肥満度，成長率が選択され，経年的な減少傾向を示した。この解析結果は，仔魚の環境条件は近年良好であるが（水温上昇とノープリウス密度増加），成長率は減少している，ということを示しており，成長率の変動要因を適切に説明しているとは言い難い。その一方で，近年では，仔魚や親魚の個体群密度が増加していることから，初期成長は個体当たりの餌密度に影響を受けている可能性がある。そこで，仔魚と親魚の個体当たりの餌密度を用いた同

様の解析の結果，経年的な増加あるいは減少の傾向を示す 2 つのグループに区別された（図 9 下）。減少傾向を示すグループ 2 には，仔魚密度当たりのノープリウス密度，雌親魚個体当たりのカイアシ類密度（冷水・温水出現種），雌魚の肥満度，成長率が選択された。このことから，近年では，まず，親魚の餌条件が悪くなることによって，雌魚の肥満度が減少していることが示唆された。Yoneda et al. (2022) では，給餌制限した痩せたカタクチイワシの雌親魚から生まれた仔魚は，飽食条件で太った雌親魚由来の仔魚に比べて，水温や餌条件が同じでも，成長が遅いことが示されている。一方，近年の仔魚の生息環境は，水温が上昇する中で，個体あたりの餌密度が減少していることが示された。水温上昇は個体の代謝等によるエネルギー消費が大きくなるため，高水温下における餌不足は成長の低下を招くことが示されている (Shelley and Johnson, 2022)。これらのことから，近年のカタクチイワシの初期成長の低下には，雌親魚の餌条件と栄養状態の悪化に伴う負の母性効果および発育初期の餌をめぐる種内競合の激化の影響が関与していると考えられた。

【参考文献】

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.

Shelley CE, Johnson DW. Larval fish in a warming ocean: a bioenergetic study of temperature-dependent growth and assimilation efficiency. Mar. Ecol. Prog. Ser. 691, 97–114, 2022.

魚住香織，西川哲也．播磨灘におけるイカナゴ個体群の産卵量指数の低下．日水誌 89, 15−21, 2023.

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.

銭谷 弘，河野悌昌，塚本洋一．夏秋季に瀬戸内海に分布するカタクチイワシの産卵間隔および産卵数に及ぼす水温，肥満度の影響．日水誌 71, 821−823, 2005.

Zenitani H, Kono N, Tsukamoto Y. Relationship between daily survival rates of larval Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and concentrations of copepod nauplii in the Seto Inland Sea, Japan. Fish. Oceanogr., 16, 473−478, 2007.

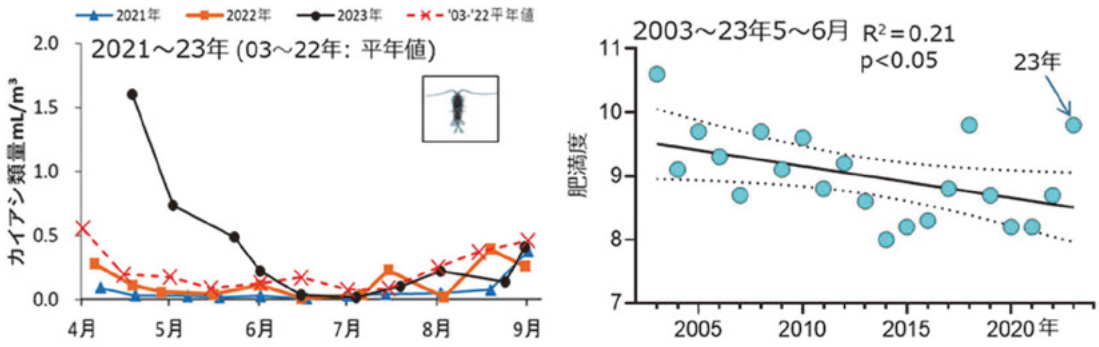

図1．カイアシ類密度(左)とカタクチイワシ親魚肥満度(右，破線95%信頼区間)の変化

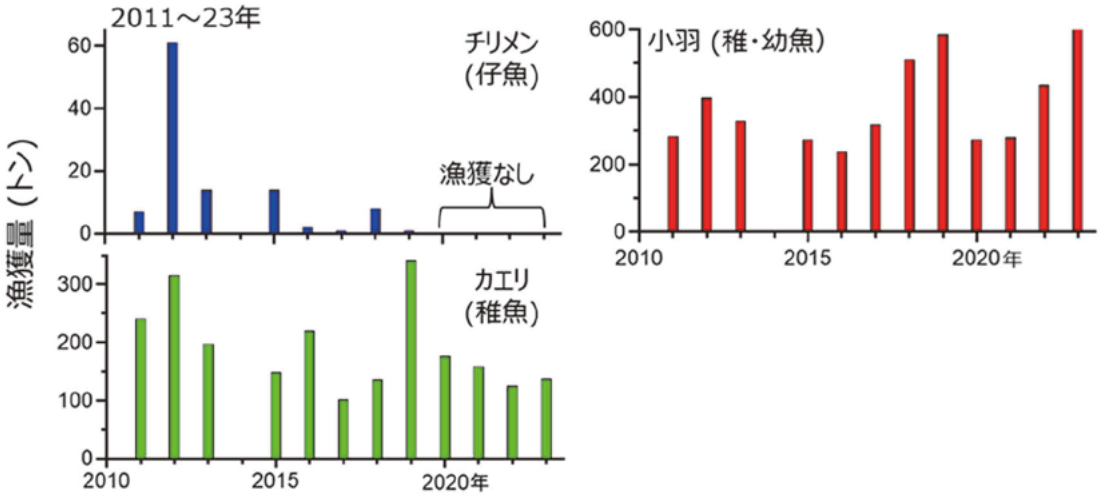

図2．カタクチイワシ銘柄別（チリメン（左上），カエリ（左下），小羽（右上））共販量の変化

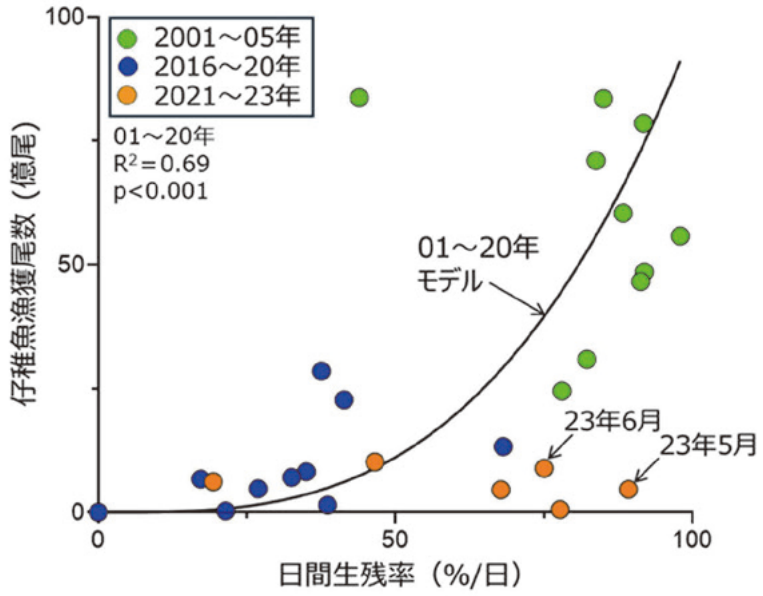

図3．カタクチイワシ仔稚魚漁獲尾数と仔魚期の日間生残率の関係

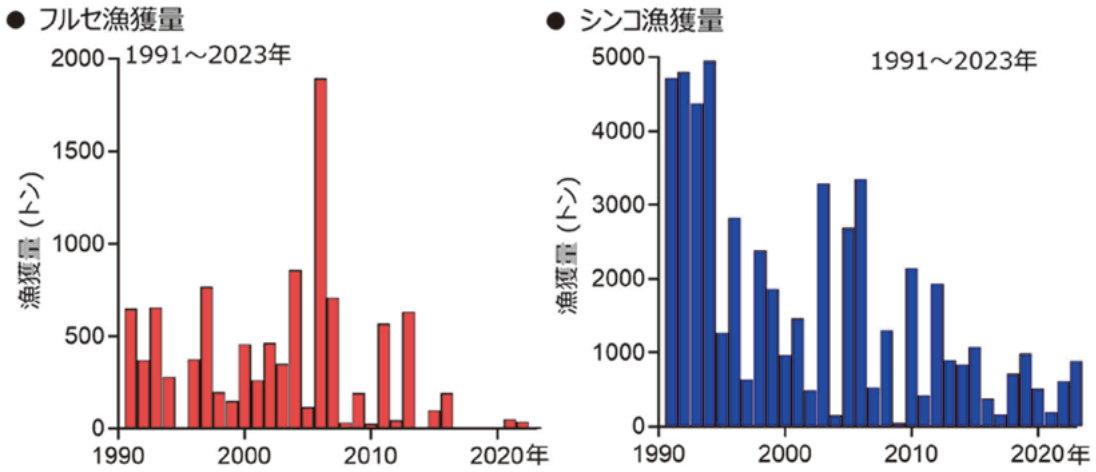

図4．イカナゴの銘柄別（フルセ（左），シンコ（右））漁獲量の変化

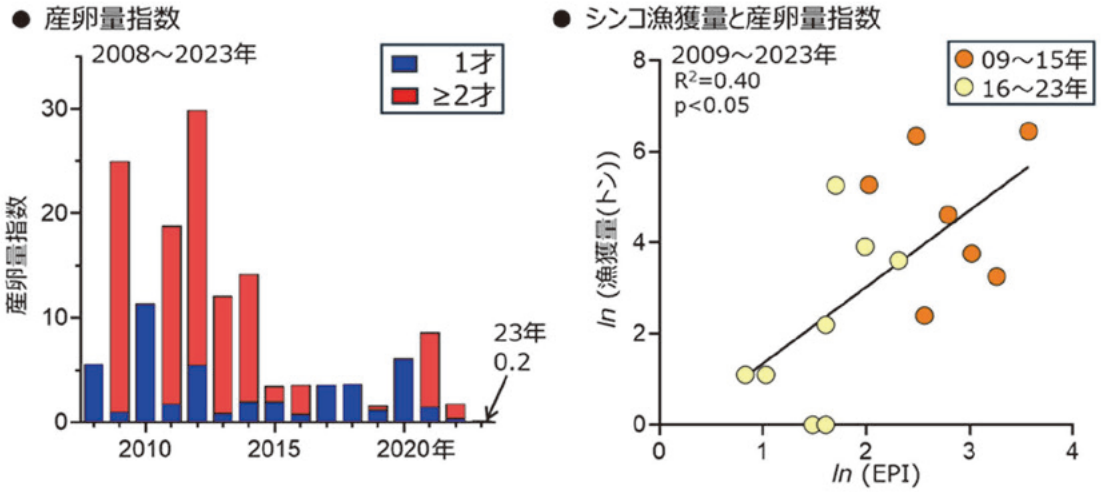

図5．イカナゴの年齢別産卵量指数の変化（左）およびシンコ漁獲量と産卵量指数の関係（右）

● 各グループの動物プランクトン各種の平均現存量

	グループ1		グループ2		グループ3		グループ4	
1	Paracalanus orientalis	624	Penilia avirostris	938	Pseudevadne tergestina	439	Acartia (Acartiura) omorii	34
2	Ditrichocorycaeus affinis	432	Calanus sinicus	623	Paracalanus orientalis	233	Ditrichocorycaeus affinis	26
3	Calanus sinicus	402	Pseudevadne tergestina	336	Acartia (Odontacartia) pacifica	192	Paracalanus orientalis	23
4	Acartia (Acartiura) omorii	235	Flaccisagitta enflata	247	Aidanosagitta crassa	147	Evadne nordmanni	17
5	Penilia avirostris	229	Ditrichocorycaeus affinis	245	Penilia avirostris	132	Centropages abdominalis	10
6	Evadne nordmanni	187	Paracalanus orientalis	225	Ditrichocorycaeus affinis	121	Podon leuckartii	9
7	Paracalanus	76	Acartia (Odontacartia) pacifica	183	Calanus sinicus	70	Paracalanus	9
8	Paracalanus parvus parvus	58	Zonosagitta nagae	112	Acartia (Odontacartia) erythraea erythraea	62	Pleopis polyphemoides	3
9	Aidanosagitta crassa	35	Oncaea venusta	110	Tortanus (Tortanus) forcipatus	61	Paracalanus parvus parvus	3
10	Zonosagitta nagae	31	Temora turbinata	96	Centropages tenuiremis	27	Aidanosagitta crassa	2
		2447		3916		1618		139

● 各湾灘・水道の月別の動物プランクトン群集のグループ区

	福岡_13	大分_E11	愛媛_1	山口_13	愛媛_13	広島_12	広島_36	岡山_6	兵庫_H07	大阪_12
月	関門海峡	豊後水道	豊後水道	周防灘	伊予灘	広島湾	燧灘	備讃瀬戸	播磨灘	大阪湾
1	4	2	2	1	1			1	1	1
2	4	2	1	1	1			1	1	1
3	1	2	1	1	1			1	1	1
4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1
5	4	2	1	1	1	1	4	1	1	1
6	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1
7	3	2	2	1	3	3	3	3	3	3
8	3		2	1	3	3	3	3	3	3
9	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3
10	3	2	2	3	2	3	3	3	2	2
11	4	2		3		3	3	3	2	1
12	4	2	2	1				3	2	1

図6. クラスター解析に基づいて分けられた動物プランクトン群集のグループ（上）と各湾灘・水道の月別出現状況（下）

● *Calanus sinicus*

	福岡_13	大分_E11	愛媛_1	山口_13	愛媛_13	広島_12	広島_36	岡山_6	兵庫_H07	大阪_12
月	関門海峡	豊後水道	豊後水道	周防灘	伊予灘	広島湾	燧灘	備讃瀬戸	播磨灘	大阪湾
1	1	83	44	375	118	ND	ND	480	109	113
2	3	283	98	340	693	ND	ND	570	195	470
3	50	450	125	360	640	ND	ND	550	230	544
4	0	573	947	375	197	410	116	130	420	33
5	3	2550	632	500	2140	140	1	18	2114	694
6	0	900	440	800	235	114	1	30	691	568
7	0	1867	3150	383	47	2	0	0	140	91
8	0	ND	27	213	1250	15	0	7	144	3
9	0	1900	50	ND	190	2	0	13	0	53
10	7	220	140	117	353	37	0	0	65	90
11	0	80	ND	25	ND	93	7	0	28	50
12	0	675	179	50	ND	ND	ND	4	5	50

N/haul
>1000
100-1000
10-100
0-10
0

● *Paracalanus orientalis*

	福岡_13	大分_E11	愛媛_1	山口_13	愛媛_13	広島_12	広島_36	岡山_6	兵庫_H07	大阪_12
月	関門海峡	豊後水道	豊後水道	周防灘	伊予灘	広島湾	燧灘	備讃瀬戸	播磨灘	大阪湾
1	54	203	20	1250	35	ND	ND	520	369	560
2	24	208	66	760	280	ND	ND	473	47	530
3	440	625	183	667	330	ND	ND	825	54	238
4	3	1987	333	538	97	1140	180	270	287	392
5	23	217	456	340	270	1192	10	110	336	763
6	7	173	784	2975	845	361	19	377	446	592
7	23	67	233	700	4	2	2	45	2	65
8	462	ND	5	1454	400	32	660	1387	116	67
9	40	175	50	ND	25	6	0	1413	0	340
10	760	0	167	700	300	13	290	300	0	250
11	35	0	ND	158	ND	48	107	68	3	2063
12	10	88	163	1325	ND	ND	ND	20	20	2550

N/haul
>1000
100-1000
10-100
0-10
0

図7. 各湾灘・水道における*Calanus sinicus*（上）と*Paracalanus orientalis*（下）の月別出現状況

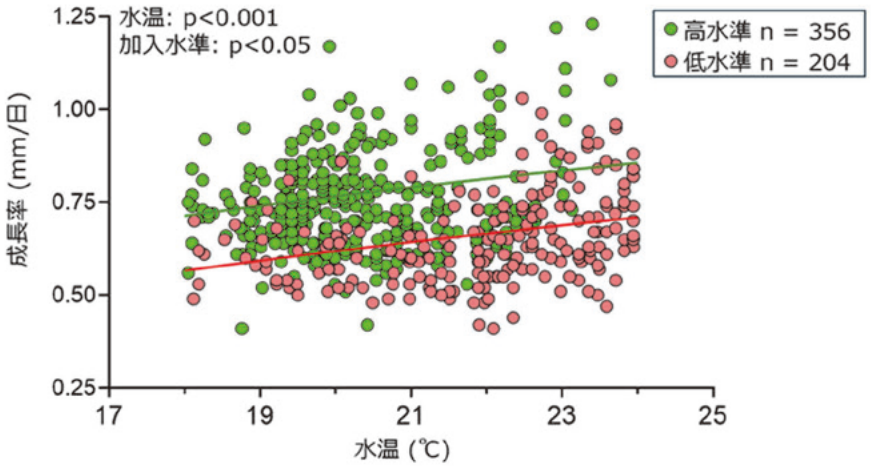

図8．カタクチイワシ高水準期と低水準期における成長率と経験水温の関係

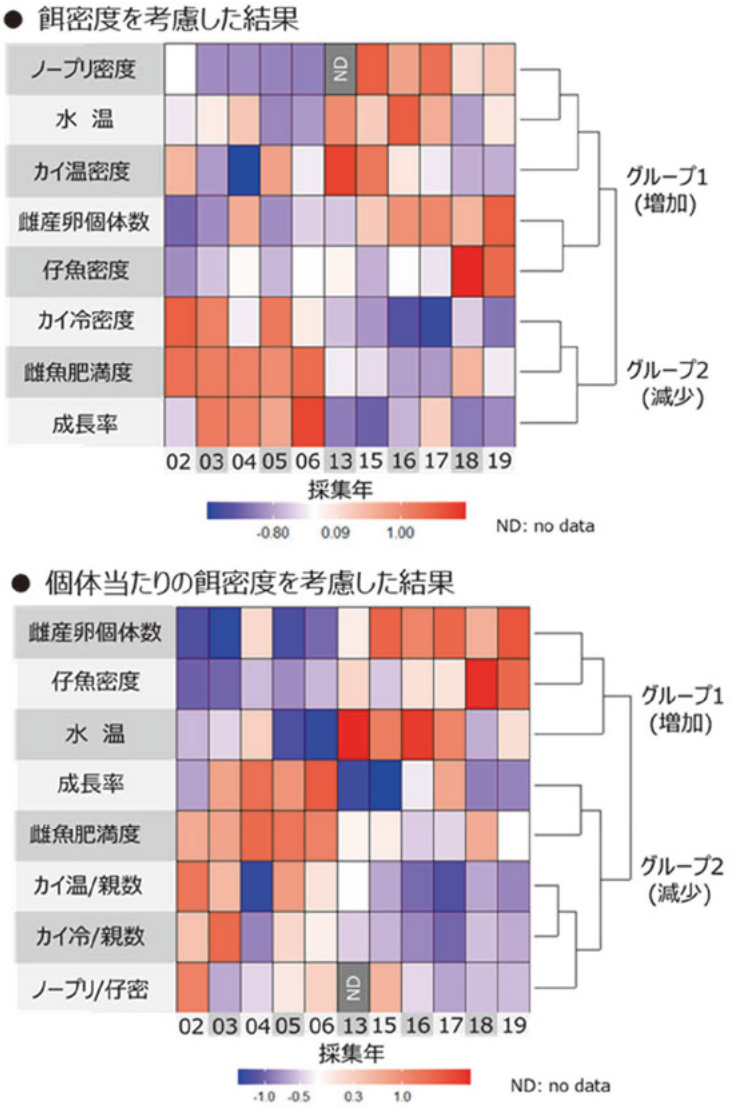

図9．カタクチイワシ仔魚期の成長率とその変動要因の時系列解析の結果（餌密度（上）と個体当たり餌密度（下）を考慮した結果）

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，先端研究学術推進機構，吉江直樹
愛媛県水産研究センター，栽培資源研究所，竹中彰一，槇浩樹
水産研究・教育機構，水産技術研究所，鬼塚剛，阿保勝之

【背景・目的】

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，中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。

【方法】

(1) 瀬戸内海全域モデルをベースに，燧灘を対象とする中解像度（300m）と高解像度（100m）流動モデルを開発する。モデルに必要な境界条件・校正用観測値（地形データ，風応力と熱フラックス，河川流量，側面境界における潮流，残差流，水温と塩分データなど）を準備し，観測値をもとにモデルを校正する。モデルは，基本的には気候値を用いて駆動するが，特定の年にも対応できるように開発する。

(2) 燧灘の中解像度と高解像度流動モデルに NPDZ タイプの生態系モデルを結合させ，オンラインの低次生態系モデルを開発する。下水処理場の管理運転等の栄養塩フラックスを変えたときの影響評価として，TN・TP が環境基準値内であるか，夏の貧酸素水塊が拡大しないか，などを評価する必要があるため，それらを直接的もしくは間接的に取り扱えるようにする。ノリ養殖への影響は，色落ち指標値 L*で評価する。モデルに必要な境境界条件・校正用観測値（1 級・2 級河川，および工場排水からの栄養塩フラックス，栄養塩濃度，植物・動物プランクトンなどの濃度の算出など）を準備し，観測値をもとにモデルを校正する。このうち植物プランクトン群集組成については必要に応じて観測を行う。また，生態系モデルの生理パラメータ調整および校正を行う際には，0 次元もしくは 1 次元の生態系モデルを用いた解析も実施する。

(3) 栄養塩環境の変化に伴う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解析するために，0 次元の eNEMURO タイプの複雑な低次生態系モデル（モデルの概略を図 1 に記す，Yoshie et al., 2011）を燧灘に適用する。モデルを駆動させるための外力及び境界条件として，水温及び底層栄養塩濃度については，環境省広域総合水質データの愛媛 328 測点における季節別観測値をもとに気候値を作成し，日射量及び降水量について

タについては，先の愛媛 328 測点における栄養塩濃度および植物プランクトン現存量の指標である Chl.a 濃度の季節変化が再現されるようにチューニングを行う。

(4) 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 2）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・DO・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と分析を行う。西条市沖にあるノリ養殖漁場 8 定点において（図 3），環境調査として養殖期間中の週に 1 回程度，水温，塩分，DO 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*・a*・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) 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「栄養塩類管理方針検討会」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) 3 次元流動モデルの構築

300m と 100m の水平解像度を有する 3 次元流動モデルについて，それぞれの範囲と水深分布を図 4 に示す。300m の中解像度モデルは燧灘全域を，100m の高解像度モデルはしまなみ海道を中心とする燧灘の西部海域をカバーしている。沿岸域を取り扱う流動モデルにおいては，まず潮汐・潮流を適切に取り扱えるようにすることが重要である。側面境界に与える潮汐と潮流は 1km 解像度を有する瀬戸内海全域の潮汐・潮流モデル（Guo et al., 2013）の結果を利用した。中解像度モデルの M_2 潮流振幅（図 5）には，しまなみ海道と備讃瀬戸における強い潮流と燧灘東部における弱い潮流が認められる。高解像度モデルでは，しまなみ海道における強い潮流を再現しているが，その範囲は中解像度モデルの場合よりも大きくなっている（図 6）。潮流による鉛直混合能力を表す指標である水深と潮流振幅の 3 乗の比（図 5 と図 6）から，海峡部の完全混合と灘部の成層が予想される。

潮汐・潮流の再現性を定量的に評価するため，モデル海域にある験潮所の調和常数と燧灘における潮流の測定結果との比較を行った。M_2 潮汐の振幅について，験潮所と中解像度モデル結果の相関係数は 0.75，誤差の標準偏差は 7.14cm である（図 7 左）。位相について，相関係数は 0.97，誤差の標準偏差は 9.91 度である（図 7 中）。M_2 潮流の振幅について，相関係数は 0.70，誤差の標準偏差は 5.91cm/s である（図 7 右）。潮流観測から得られた残差流（図 8 右）を理解するため，潮汐モデルから得られた残差流（図 8 左）を算出した。燧灘東部の測点 A-F において観測された北上流と燧灘西南部の測点 G-L で観測された時計回りの渦が潮汐モデルの結果にも認められたため，潮汐残差流の性格が強いと考えられる。

潮流モデルの精度を確認してから，中解像度の流動モデルの境界条件に熱フラックス，風応力，河川流量の月平均値など（Chang et al., 2009; Zhu et al., 2019）を導入し，水温，塩分，密度流，吹送流の季節変化を計算した。7 月の表層では，来島海峡周辺の低温域と燧灘東部の高温域が，底層では燧灘東部の低温域がそれぞれ存在する（図 9）。また，低い塩分は河川水の多い燧灘の北部と南西部に認められる（図 9）。

(2) 3 次元 NPDZ-DO タイプの低次生態系モデルの構築

先の流動モデルが正常に駆動していることを確認できたため，次に，図 10 に示す NPDZ-DO タイプの低次生態系モデル（Morimoto et al., 2021）の導入を行った。低次生態系モデルの計算に必要な境界条件は 1 ㎞の瀬戸内海全域を対象とする低次生態系モデルの結果（Leng et al., 2023）を利用した。図 11 に示す低次生態系モデルの初期結果を見ると，栄養塩濃度，植物プランクトン，動物プランクトン，デトリタス，溶存酸素の値は妥当な範囲内にあると考えられた。今後，令和 5 年度の観測結果に合わせて中解像度の流動モデルと低次生態系モデルのチューニングを行い, 高解像度の流動モデルと低次生態系モデルを構築する。

(3) eNEMURO タイプの複雑な低次生態系モデルの構築

0 次元の eNEMURO タイプの複雑な低次生態系モデルによる燧灘西部沿岸域における栄養塩濃度及び Chl.a 濃度の季節変化を図 12 に示す。モデルによる栄養塩類（硝酸と亜硝酸の合計濃度，アンモニア濃度，リン酸濃度）および Chl.a 濃度の計算結果は，観測値の変動幅に納まると共に，季節別平年値と概ね一致していた。今年度は，eNEMURO タイプの複雑な低次生態系モデルを用いて, 燧灘西部沿岸域における低次生態系の季節変化を適切に再現することができた。今後は，先の中解像度の流動モデルとの結合，栄養塩濃度の変化に対する低次生態系応答などの感度実験, このモデルへのノリという植物を導入することなどを検討中である。

(4) 燧灘広域及びノリ養殖場における現地観測

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った 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，愛媛大学で分析した。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った。

(5) 栄養塩類管理方策検討委員会の開催

杉義晴愛媛県漁業協同組合代表理事専務ならびに首藤宏幸元瀬戸内海区水産研究所生産環境部長を外部有識委員とする検討委員会を令和 5 年 8 月 31 日および令和 6 年 1 月 15 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燧灘を対象とする中解像度と高解像度の二つのモデルについて開発状況の説明を行った。低解像度モデルには複雑な生態系モデルを導入し，カタクチイワシの餌になる動物プランクトンの計算をターゲットにする。高解像度モデルにはシンプルな生態系モデルを導入し，燧灘のノリ漁場における栄養塩類管理（下水処理場の管理運転等）の効果評価を目的とする。委員からは，燧灘の漁場環境やノリ養殖の現状および現場ニーズについての情報提供があった。また，モデル開発への要望が述べられ，モデル開発に反映させた。今後，本事業で開発するモデルを活用し，科学的にどのような方策が有効かを検討し，具体的な施策提言に資することが期待される。

参考文献

Chang, P.-H., Guo, X., and Takeoka, H. (2009): A numerical study on the seasonal circulation in the Seto Inland Sea, Japan. Journal of Oceanography, 65, 721-736.

Guo, X., Harai, K., Kaneda, A., and Takeoka, H. (2013): Simulation of tidal currents and nonlinear tidal interactions in the Seto Inland Sea, Japan, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, No. 145, 43-52.

Leng, Q., Guo, X., Zhu, J., and Morimoto, A., (2023): Contribution of the open ocean to the nutrient and phytoplankton inventory in a semi-enclosed coastal sea. Biogeosciences, 20, 4323–4338.

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.

Yoshie, N., X. Guo, N. Fujii, and T. Komorita: 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, 2011.

Zhu, J., Guo, X., Shi, J., Gao, H. (2019): Dilution characteristics of riverine input contaminants in the Seto Inland Sea. Marine Pollution Bulletin. 141, 91-103.