

課題番号：1) -イ-③

瀬戸内海の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響の評価

水産研究・教育機構 水産技術研究所

浜口昌巳，阿保勝之，松原 賢，鬼塚 剛，岡村知海

【背景・目的】

本研究課題ではまず，最新の浅海定線のデータを加え，既存のデータを用いて瀬戸内海全体でアサリ・ハマグリ等の二枚貝の生産と海洋や栄養塩環境との関係を解析することになっていたが，これについては本事業の最初の3年間で終了した。そのため，昨年度からは，二枚貝の生産と栄養塩類の関係を詳細に調べるための調査・研究に特化した。

本課題では，これまでの研究例が少ないアサリやマガキの浮遊幼生期の餌となる植物プランクトンについて，次世代シーケンサー等の新しい技術を活用してその生態調査を調べている。これまでの結果では，広島湾のマガキ浮遊幼生は，10 μ m 以下の2種類のナノプランクトンを餌としている可能性が高まった。

そこで，本年度は引き続きマガキやアサリ浮遊幼生期の餌を探索する技術開発を行うために，広島湾のアサリの主要な産卵期である秋にアサリ浮遊幼生の餌生物の調査も開始する。

さらに，二枚貝養殖が盛んな播磨灘北西部において，栄養塩動態や餌料環境に影響を及ぼす要因について数値シミュレーションを用いて解析する。

【方法】

1) 餌生物検出技術開発のための広島湾での試料採取と分析

広島湾の海洋環境調査は5月19日，6月17～18日，6月29～30日，7月6～9日，7月12～13日，7月27～30日，8月9～10日，8月13日，8月23～24日，10月15日，11月1～3日，1月28日に実施し，AAQによる海洋観測，採水して植物プランクトンの培養，サイズ組成，アサリ・マガキの浮遊幼生調査を行った。これに加えて，海水中の微細藻類の metabarcoding 解析に用いるため広島市水産振興センターや広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター水産研究部の調査試料を活用した。採取した海水試料はフィルター分画した後，様々な方法で培養し，増殖が見られた種については単離培養した。これらのいくつかは種苗生産したマガキ浮遊幼生を用いて捕食するかどうかを確認した後，遺伝子解析により種を同定した。遺伝子解析は昨年度と同様に 18SrRNA から 28SrRNA までの領域 4.5Kbp を PCR 増幅して塩基配列を決定して行った。これらの調査研究の流れを図1に示す。

2) マガキ幼生餌候補種の特異的 qPCR の構築とその検証

昨年度は，マガキ幼生の餌候補として *Cyclotella choctawhatcheeana* 近縁種と *Cyclotella striata* の 18SrRNA から 28SrRNA までの領域 4.5Kbp を PCR 増幅して遺伝子情報を得て，Internally transcribed spacer 領域(以下，ITS とする)を標的として qPCR 用の PCR プライマーと dual-labeled probe (以下，DLP とする)を設計した。今年度も1)で培養が成功し，マガキ浮遊幼生を使った実験で捕食することを確認した種，加えて，既存種でサイズからマガキ浮遊幼生の餌となる可能性があるの *Chaetoceros tenuissimus* と *Skeletonema menzelii* についても PCR プ

ライマーと DLP を設計した。これらについては検量線を作成して、sloop, 増幅効率, 決定係数等を調べた。

3) qPCR を用いた野外試料の調査方法の標準化

現在, 他事業では環境 DNA 検出用に qPCR の系を作成しているが, その際に現在投稿中の論文で検討した海水試料から抽出した DNA 中の阻害物質の検出方法や, 検出限界 (LOD) や定量限界 (LOQ) の設定は, 本課題で使用する qPCR でも使用可能である。そこで, それらの情報をもとに, マガキ浮遊幼生の餌生物検出用の qPCR も標準化を図った。

4) 二枚貝養殖漁場の栄養塩動態に関する数値シミュレーション

課題 1)-イ-①を担当する兵庫県と共同で播磨灘北西部の二枚貝養殖漁場における栄養塩動態に関する数値シミュレーションによる解析を行い, 陸域および隣接海域からの栄養塩供給が漁場の栄養塩動態に与える影響を解析する。今年度は三次元物理-低次生態系結合モデルの改良を行い, 海域の栄養塩濃度や餌料濃度の再現性の向上を図るとともに, 二枚貝漁場への窒素供給源を明らかにした。

【結果および考察】

1) 餌生物検出技術開発のための広島湾での試料採取と分析

2020 年は広島湾では 7 月後半まで大規模産卵が確認できず, 採苗不良が懸念されたが 7 月最終週から一転して採苗が好調となり, 養殖に必要な量が確保できた。しかしながら, この間, マガキ浮遊幼生の好適な餌生物と推定される *Cyclotella choctawhatcheeana* およびその近縁種は散発的に出現し, 昨年, 一昨年と比較するとこれらが高密度となるまで増殖しなかった。海水試料の培養により, 新たに 2 種類の餌候補となる *Cyclotella spp.* (仮称 *Cy. miyajimaense*) と *Minidiscus comicus* (いずれも図 2) が単離されたのでその分析を行った。

2) マガキ幼生餌候補種の特異的 qPCR の構築とその検証

本年度新たに見つかった 2 種を加え, 合計 6 種となったマガキ浮遊幼生餌候補生物それぞれと, 抽出した DNA 中の阻害物質検証用の外挿用内部標準の qPCR 用の PCR プライマーと DLP を設計した (表 1)。これらの適正反応温度を設定した後, qPCR を行ったところ, いずれも slope が -3.6~3.1, 増幅効率が 0.85-1.10, 決定係数が ≥ 0.98 という条件を満たしており (表 2), 問題なく使用できることが明らかとなった

3) qPCR を用いた野外試料の調査方法の標準化

今回, 広島湾で周年採取した海水試料から抽出した DNA で含まれる阻害物質やマトリクス効果を判定したところ, 夏場の試料で約 30%, 冬場の試料では約 70% の阻害効果があることが判った。そのため, 海水試料中の餌候補生物の定量分析の際には, 先ずは, 阻害物質の検討を行った後に, 検出系の LOD や LOQ を決めてからという図 3 に示す流れで分析を進めるのが良いと考えられる。以降, この手法により顕微鏡観察することなく, マガキ浮遊幼生の餌生物の定量分析を行うことが出来るようになったので, 次年度はマガキの採苗予測などに応用可能である。また, この qPCR 系を用いてアサリの浮遊幼生出現時期の広島湾の海水を調べたところ, 一部の海域で *Skeletonema mentzelii* が検出された。

4) 二枚貝養殖漁場の栄養塩動態に関する数値シミュレーション

播磨灘北西部の二枚貝養殖場における餌料環境を解析するため, 昨年度に作成した三次元物理-低次生態系結合モデルの改良を行った。昨年度の計算結果では, 相生湾沖や西播漁

場における Chl.a 濃度分布の再現性が悪かった。今年度は、計算領域を加古川周辺まで東側に拡大するとともに、工場排水からの栄養塩供給についても可能な限り考慮した（図 4）。主な陸域負荷源からの負荷量を図 5 に示した。北部沿岸における各負荷源からの負荷の寄与率は、河川と工場がそれぞれ約 40%，下水処理場が約 20%であった。なお、北東部では工場が約 50%と寄与率が大きかった。

2018 年 9 月～12 月の表層における塩分、DIN 濃度および Chl.a 濃度の計算例を図 6 に示した。ここでは、課題 1-イ-①で兵庫県が実施した播磨灘北西部沿岸域の水質調査の実施日に合わせて計算結果を示した。表層塩分は、河川流量の変化に対応して揖保川、千種川の河口付近で低濃度となっており、調査結果と一致していた。Chl.a 濃度は、負荷量が大きい揖保川～市川の周辺海域で高濃度となっており、その影響範囲は DIN よりも大きく、二枚貝養殖場のある北西部海域まで波及していた。この Chl.a 濃度の分布傾向は、兵庫県が実施した調査結果と概ね一致していた。計算領域を広げるとともに、可能な限り工場排水を考慮することにより Chl.a 分布の再現性を向上させることができた。これにより、北東部海域における栄養塩供給が北西部のカキ養殖場へ波及することが確認できた。北東部沿岸には流入負荷の大きい河川、下水処理場や工場が集中しており、供給された栄養塩を利用して植物プランクトンの生産性が高い。北東部海域で生産された植物プランクトンが北西部に波及することにより、二枚貝養殖場における餌料環境が良好に保たれていると考えられる。

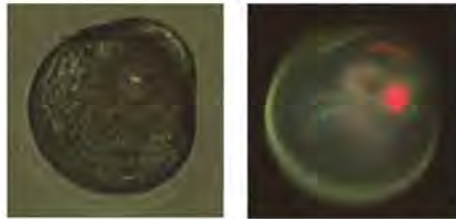
今年の調査や研究の流れ



マガキ浮遊幼生の出現期に広島湾で海水試料を採取して様々な方法で培養。狙いは数 μm の小型種

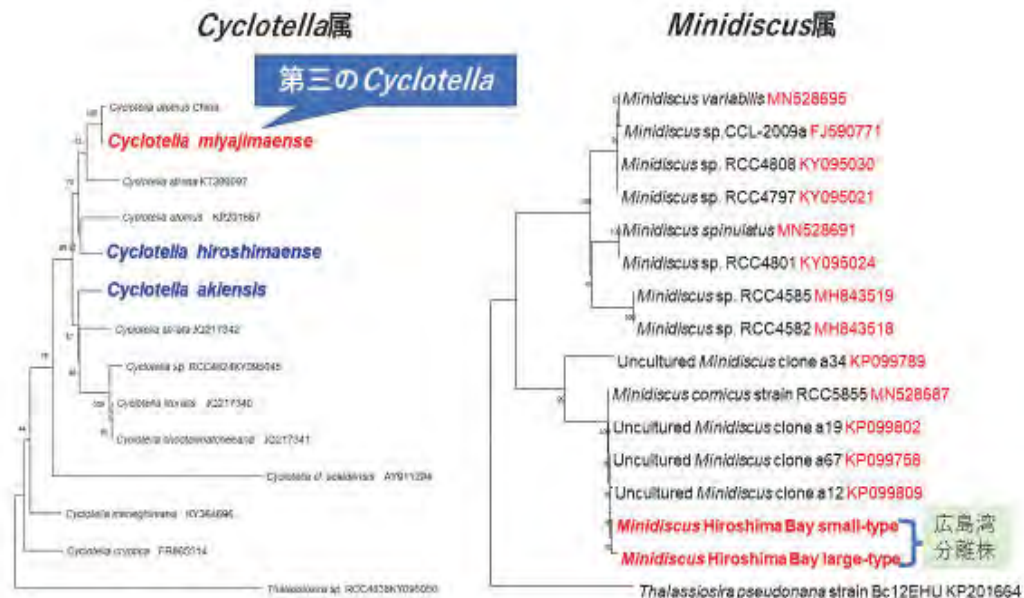


培養できたものから暫時、当所で種苗生産によって得た
マガキ浮遊幼生に捕食させ、食べるものを選択



これまでの2種に加え、新たに2種、既存種2種が見つかった。

図 1. 本年度のマガキ浮遊幼生調査や研究の概要



今年度、広島湾で分離された新たなマガキ浮遊幼生
餌候補2種

図2. 今年度新たに見つかったマガキ浮遊幼生の餌生物候補2種の系統解析結果

表 1 これまでに設計したマガキ浮遊幼生餌候補生物の DLP や PCR プライマー

Target species	Target Gene	Abbreviations for primers and probes	Nucleotide sequences 5' – 3'	Reaction temperature °C	Amplicon size (bp)
<i>Cyclotella akiensis</i>	ITS	CyAki-P	5'-GGCCCAACGCAGTCTTGACCACCTGGGT-BHQ1	65.0	97
		CyAki-F	CACTGGTGTCTGGGGCCCGC		
		CyAki-R	CCGCAACCGCATCGGGCC		
<i>Cyclotella hiroshimensis</i>	ITS	CyHiro-P	FAM-ACAAGCTCGGCCGGCCTTCCAGACGG-BHQ1	65.0	126
		CyHiro-F	CGTGGCAACGATTGTGTAGATGCAC		
		CyHiro-R	CAAGAAGCGGGCTTCTCCATCTCC		
<i>Cyclotella miyajimaense</i>	ITS	CyMiya-P	Cy5-TGGCGTCTGAGGCTCACGCT-BHQ3	64.0	105
		CyMiya-F	GTGAAATGAGAGTGGACTTCG		
		CyMiya-R	GAGGAGTCCACCGGTGCT		
<i>Minidiscus comicus</i>	ITS	MiniCo-P	FAM-TGGTAACTCGGTGGGCCCCAGCT-BHQ1	66.0	114
		MiniCo-F	GGCACCTGGCACCAACCTTACA		
		MiniCo-R	GTTATTAGTTTGGTTCAGTTTGGGCGGT		
<i>Chaetocerus tenuissimus</i>	ITS	ChTen-P	Cy5-CAGGCTGCTTCGGCGCATGCCT-BHQ3	65.0	100
		ChTen-F	TCCAACGCTATCATGCTTGGCC		
		ChTen-R	TAGCTTGCCTACGGGTGTGTATG		
<i>Skeletonema mentzelii</i>	ITS	SkMen-P	Cy5-CCTGAGCGCCTTCAGTGAACGGCCT-BHQ3	65.0	90
		SkMen-F	TCTGGCTTGTGGCTTGTAGGC		
		SkMen-R	GATGAGGTACATTCATCCGGACCCG		

表 2 設計した DLP や PCR プライマーの評価結果

Group	Target Species or Species complex	Gene	Sloop	Efficiency	R ²	DNA polymerase
Diatoms	<i>Cyclotella akiensis</i>	ITS	-3.491	0.934	0.999	A,B
	<i>Cyclotella hiroshimensis</i>	ITS	-3.365	0.982	0.999	A,B
	<i>Cyclotella miyajimaense</i>	ITS	-3.411	0.964	0.999	A,B
	<i>Minidiscus comicus</i>	ITS	-3.418	0.961	0.999	A,B
	<i>Chaetocerus tenuissimus</i>	ITS	-3.391	0.972	0.999	A,B
	<i>Skeletonema mentzelii</i>	ITS	-3.433	0.956	0.999	A,B
Internal standard	<i>Crassostrea zhanjiangensis</i>	COI	-3.460	0.945	0.998	A,B
	<i>Ammodytes hexapterus</i>	CYTb	-3.480	0.970	0.996	A,B

DNA polymerase A: SsoFast Probes Supermix with ROX, B: iQ Multiplex Powermix

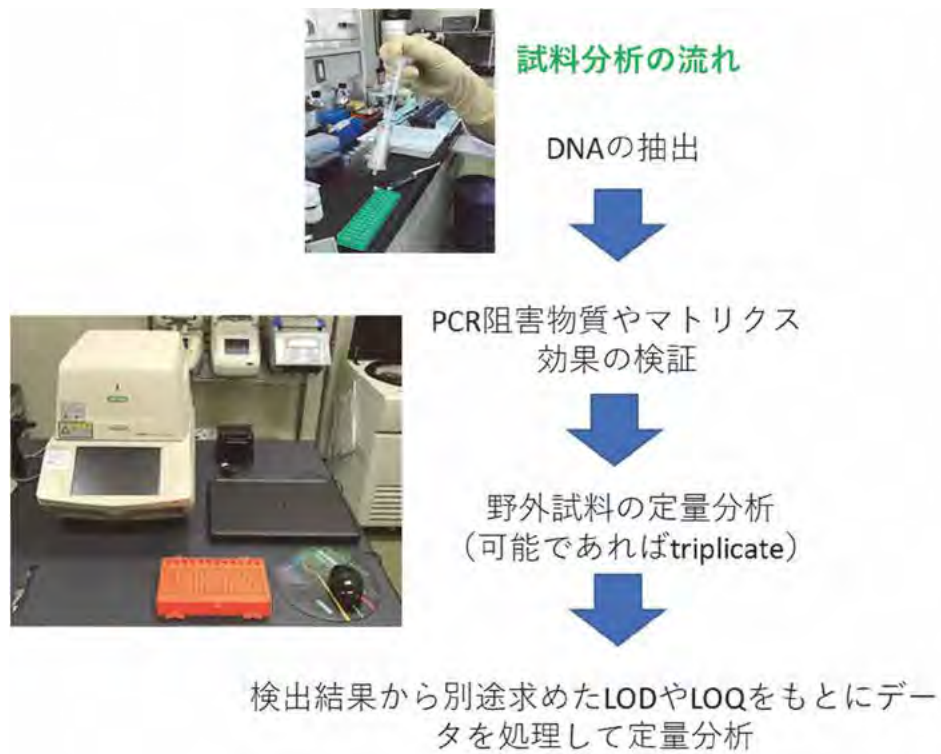


図3. マガキ浮遊幼生の餌候補生物の qPCR による検出手順

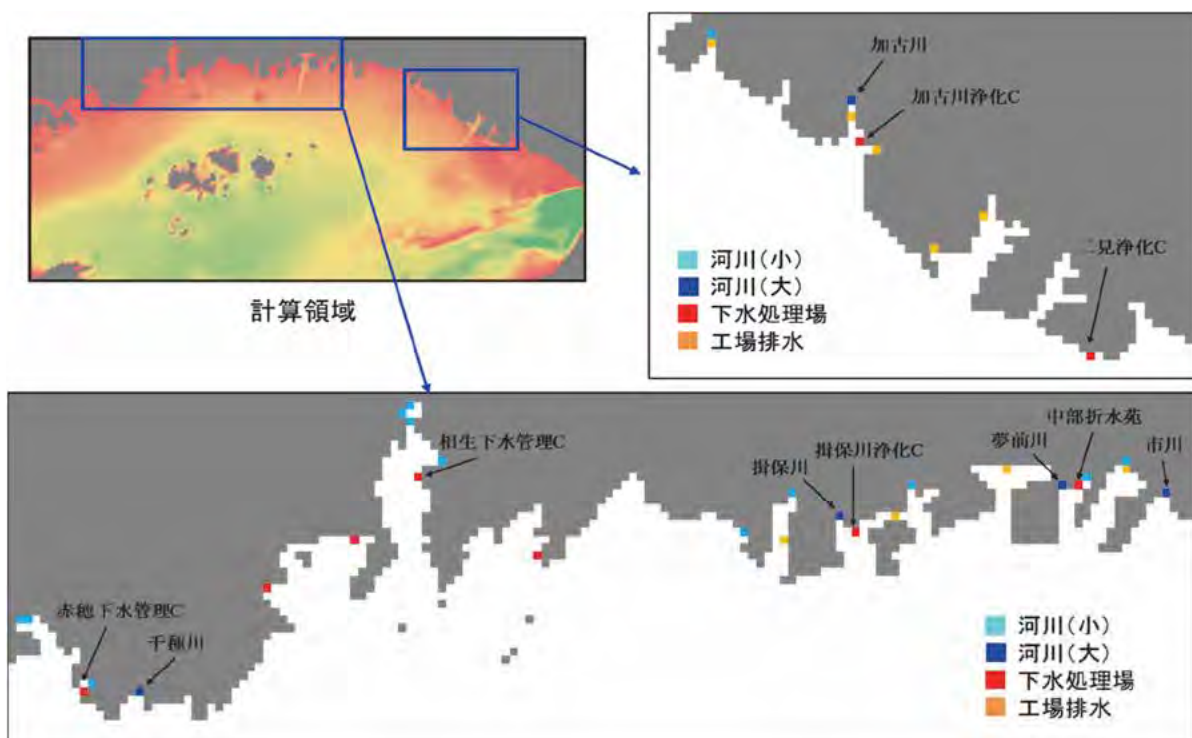


図4. 計算領域および主な陸域負荷源

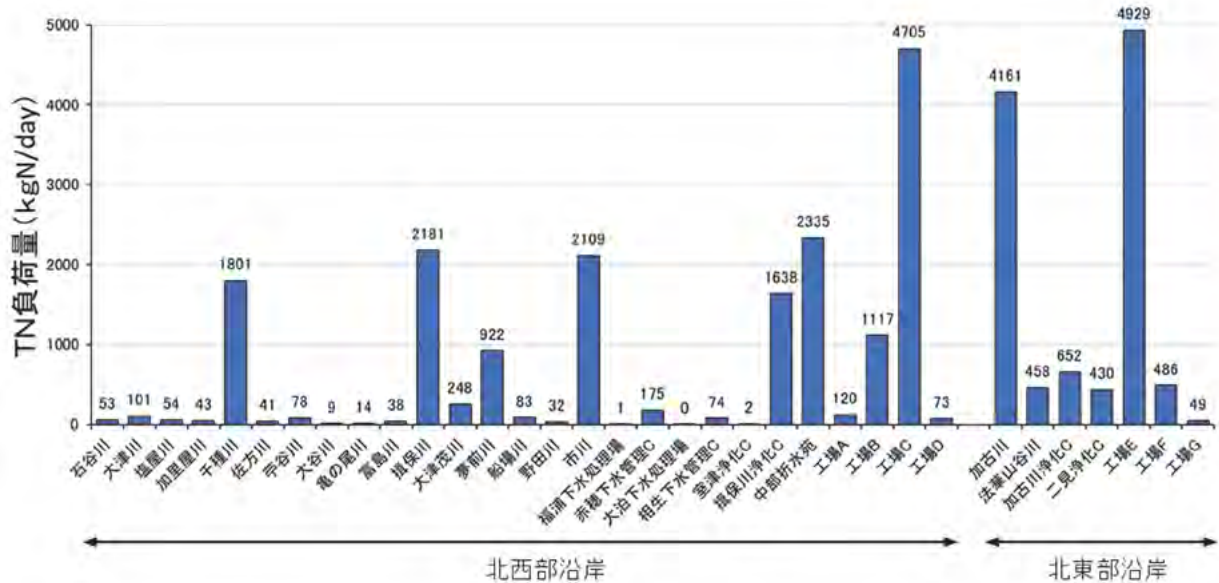


図5. 陸域からの負荷量（計算期間の平均値）

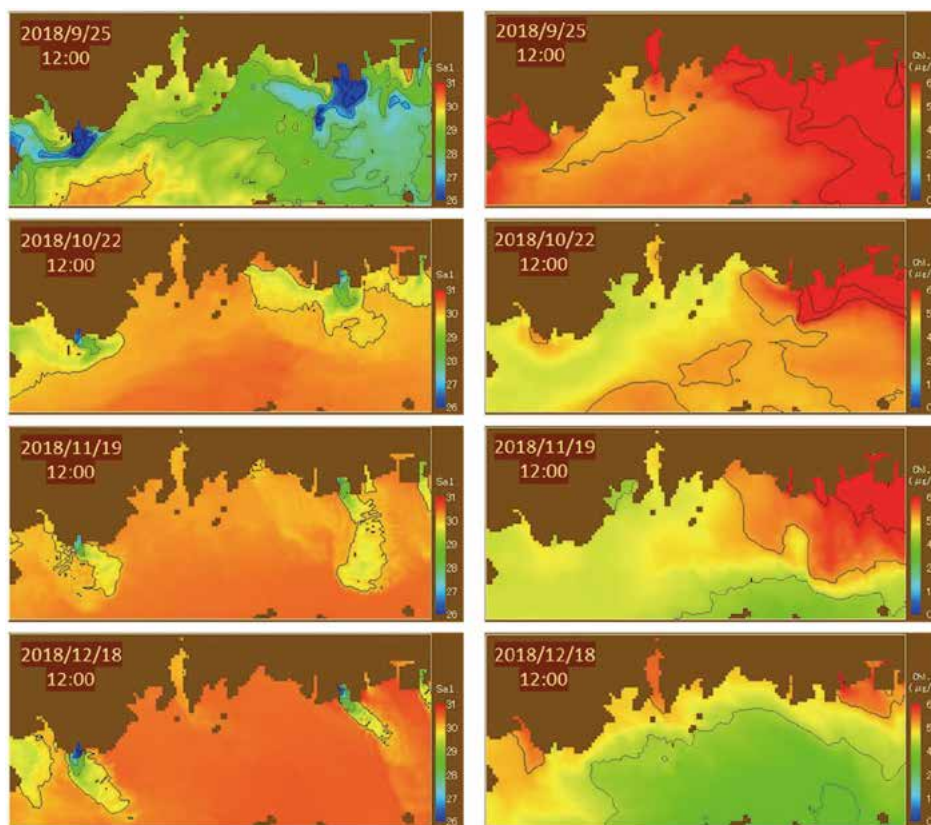


図6. 表層の塩分（左図）および Chl.a 濃度（右図）の計算結果

課題番号：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，首藤宏幸

【背景・目的】

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、生態系サービスとして産業上重要な魚介類の産卵場や稚仔期の生息場、あるいは餌料供給の場など様々な機能を有している。藻場を構成するこれら海産植物の成長を支えるものは海中の栄養塩である。近年、瀬戸内海の貧栄養化が進み、養殖のノリやワカメの色落ちや成長量低下の被害だけではなく、生態系を底支えする一次生産者の基礎生産力の低下とそれによる漁業への影響も懸念されている。海水中の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が衰退していく。また餌料としての一次生産物の量・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、藻場の生物生産と栄養塩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、藻場生態系の主要な構成者のうち、一次生産者（アマモ、ホンダワラ類、カジメ類等の大型海草と海藻、葉上微細藻類）、葉上小型甲殻類等の餌料生物（二次生産者）、藻場に依存性の強い重要魚介類（高次生産者）に焦点をあて、①栄養塩と藻場の一次生産との関係解明、②一次生産を介した食植動物（重要魚介類）との関係解明、③栄養塩の変化が藻場の低次から高次の食物連鎖に与える影響の解明の3つを大きな柱とし、海域における現存量や生産量等に関する既往知見のレビュー、調査による現状評価および過去との比較、また調査・実験による栄養塩濃度の影響の直接的解明を行う。これらの作業を通じて、瀬戸内海の藻場の生物生産力と機能の現状を評価するとともに、藻場の生物生産力を適切に維持するために必要な栄養塩濃度等の海域環境について提言を行う。

本年は、①の栄養塩と藻場の一次生産との関係解明では、海草類のアマモに焦点を当て、アマモ場と栄養塩濃度との関係について調査を行った。②の一次生産を介した食植動物（重要魚介類）との関係解明では、来年度に向けた予備的な実験として魚介類（磯根生物）の餌となるクロメに含有する窒素量に勾配をつけるための試験を行った。③の栄養塩の変化が藻場の低次から高次の食物連鎖に与える影響の解明では、これまでに野外調査で得られたサンプルを分析して、各栄養段階の生物間の関係性を検討した。

【方法】

(1) 栄養塩と藻場の一次生産との関係解明

瀬戸内海の砂泥域における主要な藻場構成種であるアマモ *Zostera marina* を対象として調査を行った。広島湾の湾奥から湾口までの栄養塩の勾配を想定した4箇所を調査点とし、アマモが最盛となる夏期に調査を行った。調査地と調査日は以下の通りである（図1）。調査

地①：広島県廿日市市阿品（2021 年 8 月 24 日）、②：広島県江田島市沖（8 月 25 日）、③：広島県江田島市深江（8 月 25 日）④：山口県周防大島町逗子（8 月 16 日）。

調査地の栄養塩濃度は、表層水は船上からシリンジで採取した海水を 0.2 μ m フィルターで濾過した。これを 5 回繰り返し 1 箇所について 5 つのサンプル数とした。砂泥の底質の間隙水は土壌溶液採水器（大起理化工業株式会社）を用いた。採水器の採水部をアマモの地下茎がある地下 5-10cm ほどに差し込み採水を行った（図 2）。得られた海水は表層水と同様に 0.2 μ m フィルターで濾過し、サンプル数を 5 とした。

アマモの植生については、50cm 四方の方形枠を用い、枠内の株数を計測し密度とした。その後、枠内のアマモについて地下茎からすべて採集した。これを各調査地点において 5 枠採集した。採集したアマモは実験室に持ち帰り、葉長・葉幅・葉数・地下茎の太さを計測した（図 3）。また枠内のアマモを地上の葉状部と地下部に分け、ドライオーブン（60℃/24 時間）で乾燥させて重量を計測した。各地の栄養塩の結果とアマモ草体及びアマモ場の特徴から栄養塩濃度とアマモ場の関係について解析を行った。

（2）一次生産を介した食植動物（重要魚介類）との関係解明

近年、瀬戸内海の貧栄養化が進み藻類養殖ではノリの色落ちなどの問題が実際に生じている。天然のカジメ類やホンダワラ類の藻場についても影響が懸念されているが、実際に低栄養塩が原因で藻場が衰退したという報告はない。しかし藻場を利用する有用魚介類の減少は問題となっており、瀬戸内海の低栄養塩化により付着藻類や小型甲殻類の低下、また藻体自体に含まれる窒素やリンの低下など、魚介類の保育場や餌料場としての生態系機能の低下が危惧されている。本課題では、低栄養塩化の藻場の餌料効果を検証するための実験を来年度に予定している。そこで本年は、有用魚介類（サザエ・アワビなど）の餌となるクロメについて、異なる栄養塩環境下で培養し、窒素含量の異なる藻体の作出を試みた。

実験に用いたクロメは、2021 年 3 月 22 日に山口県周防大島町にて採集した。採集したクロメは常温にて持ち帰り、研究所において 2 t の掛け流し水槽で畜養した後、3 月 25 日に屋内の 100L のパンライト水槽に葉状部をおよそ 33g 投入し、栄養塩を投入しない栄養塩欠乏条件と栄養塩を定期的に投入する栄養塩添加条件の 2 つの環境を設定し（図 4）、砂濾過海水の止水化にて実験を開始した。栄養塩添加水槽には 7 日毎に NO_3 濃度が 20 μ M になるように NaNO_3 を添加し、確認のため毎日栄養塩濃度を測定した。また、クロメ藻体中の全窒素含量を適宜分析した。

（3）栄養塩の変化が藻場の低次から高次の食物連鎖に与える影響の解明

栄養塩濃度が藻場の生物群集の構造に与える影響を評価するために、2020 年 6 月 18 日～7 月 12 日に、栄養塩環境の異なる広島湾のノコギリモク藻場 6 カ所（湾奥部から湾口部に向かって、似島、厳島 1、厳島 2、阿多田島、柱島、屋代島；図 9）において調査を実施し、栄養塩～一次生産者～一次消費者～二次消費者の関係を解析した。サンプルの分析項目は、水中の栄養塩濃度と Chl. *a* 量、ノコギリモクの藻体窒素含量と葉上 Chl. *a* 量および葉上動物組成、メバル類稚魚の胃内容物組成である。水中およびノコギリモク葉上の Chl. *a* 量は、それぞれ、葉上動物の餌となる植物プランクトンおよび葉上微細藻類の量的指標として、また、ノコギリモク藻体の窒素含量は餌海藻の質的指標として使用した。なお、葉上動物およびメバル類

の胃内容物は分類群レベルで同定したが、葉上動物で最優占する端脚類については、種レベルでの同定とした。

葉上端脚類の種組成とメバル類稚魚の胃内容物組成に関するクラスター分析および PERMANOVA 分析には、R による Vegan パッケージを使用した。

【結果】

(1) 栄養塩と藻場の一次生産との関係解明

各調査地の栄養塩を解析したところ、図 5 のようになった。当初の予定では表層水は湾奥から湾口にかけて DIN が低下していく想定であったが、湾奥の阿品が $10.63 \pm 0.9 \mu\text{M}$ と高い値を示し、次は湾口に近い周防大島町が $6.76 \pm 0.5 \mu\text{M}$ と高く想定のようにならなかった

(図 5)。しかし表層の栄養塩濃度はそのときの天候等に大きく左右されるため、今回の結果も想定内であった。底質間隙水の DIN 濃度は、阿品が $71.82 \pm 10.42 \mu\text{M}$ と最高であったが、次に江田島市深江の $56.38 \pm 10.82 \mu\text{M}$ と高く、次に周防大島町の $39.42 \pm 18.23 \mu\text{M}$ となった(図 5)。断片的に調査する表層水の栄養塩濃度では必ずしもその場の特徴を把握することは困難かもしれないが、底質間隙水の栄養塩濃度はこれまでの有機物の累積である可能性が高く、よりその場の特徴を表せていることが示唆された。

各調査地において坪狩りしたアマモ藻体を計測したところ、草体葉状部は広島県江田島市沖が 63.85g/m^2 と最も高く、次に広島県廿日市市阿品で 54.78g/m^2 となった。また地下茎の重量は阿品で 28.57g/m^2 と最も高かった(図 6)。成育密度は江田島市沖で 213.60株/m^2 と最も高く、次に阿品が 152.80株/m^2 となった。また、各調査地におけるアマモ草体の部位を計測した所、図 7 のようになった。計測項目の中で、特に葉幅と地下茎の太さについては調査地によって大きな違いがあった。

魚類や小型甲殻類などの保育場や餌場としての生態系機能に影響を与えるのは、藻長や葉状部重量、密度など藻場の景観にあたる部分だと考えるが、これらの特徴は表層水・底質の間隙水ともに、栄養塩の変化との関係性は低いと考えられた。しかし、葉幅の大きさや地下茎の太さなど、アマモ草体の質に関する特徴は、底質間隙水の栄養塩の違いと関係があることが示唆された。葉幅や地下茎の太いと、強い波浪時に草体が流失しにくかったり、また食害等で草体上部が消失しても再生産が可能だったり、アクシデント時の藻場生残にとって重要な特徴になる。しかし、どれほどの高い濃度までが有効であるかなどは明らかになっておらず、引き続きのモニタリングが必要である。

(2) 一次生産を介した食植動物（重要魚介類）との関係解明

実験開始時から栄養塩を毎日計測した結果、栄養塩欠乏条件、栄養塩添加条件の両水槽ともに 1-2 日後には NO_3 濃度が低下し窒素欠乏状態になった。窒素添加条件水槽には 7 日ごとに窒素を添加した。添加の回数ごとに、窒素が欠乏するまでの日数が長くなり、藻体自体にも十分に窒素が取り込まれていることが示唆された。また窒素欠乏条件の水槽は、実験期間を通じて窒素が欠乏していたことを確認した。藻体内に含まれる窒素含量を計測したところ、実験終了時の 28 日後にはおよそ 0.3% の窒素含量の差を生じさせることができた(図 8)。来年度はこれらの窒素含量の異なるクロメ藻体を用いてサザエやアワビなどの有用魚介類を飼育することで、低栄養化が藻場の餌料機能に与える影響について調べる予定であ

る。

(3) 栄養塩の変化が藻場の低次から高次の食物連鎖に与える影響の解明

広島湾のノコギリモク藻場の栄養塩環境と一次生産者、一次消費者の量的関係を検討した。一次生産者と栄養塩環境の関係については、葉上 Chl. *a* 量（葉上微細藻類量の指標）と DIN 濃度の間に関係は見られなかったものの、水中 Chl. *a* 量（植物プランクトン量の指標）とノコギリモク藻体の窒素含量は、DIN 濃度が高いほど高くなる傾向が見られた（図 10 上）。DIN 濃度の高低が植物プランクトン量や藻体窒素含量に反映した結果と考えられる。一方、一次消費者と一次生産者の関係では、葉上動物の密度と、餌となる植物プランクトンや葉上微細藻類の量、餌海藻の質的指標であるノコギリモク藻体の窒素含量との間に関係は見られなかった（図 10 下）。したがって、餌の質・量は葉上動物密度を左右する主要因とはなっていないと推察される。

そこで、葉上動物の中で最も優占する端脚類について、その種組成を定点間で比較した（図 11）。クラスター分析の結果、端脚類群集には 2 つのグループが検出され、それぞれ、湾奥部の 3 定点（似島、厳島 1 及び 2）と外側の 3 定点（阿多田島、柱島、屋代島）に対応していた。このグループ分けは、今回の調査の DIN 濃度の分布傾向とは一致しなかったが、2016～2018 年の毎月の DIN 濃度の平均値から提示された海域分け（DIN の多い海域：似島、厳島；少ない海域：阿多田島、柱島、屋代島）（吉田ほか未発表）と一致した。端脚類が成熟まで月単位の時間を要することを考えると、スナップショット的な値ではなく平均値に基づく海域分けとの対応が、より妥当なのかもしれない。一方、葉上端脚類を食性によって分類してその組成を見ると、懸濁物食者の割合が湾奥部の 3 定点で多く、それより外側の 3 定点では少なくなっていた（図 12）。これは、“DIN 濃度が高い海域では植物プランクトン量が多く、その結果、それを食べる懸濁物食者の割合が増えてくる”という流れを考えると、DIN 濃度が食物連鎖をとおして葉上動物の組成に影響していることを示唆する結果と言えるのかもしれない。

さらに、海藻を直接食べることができる植食性端脚類の密度と雌の成熟状態を定点間で比較した（図 13）。飼育下では、植食性端脚類の雌の成熟が、餌海藻の窒素含量の低下により抑制される傾向にあることが報告されているが（Sudo & Yoshida 2021）、野外から採集した植食性端脚類からは、ノコギリモクの窒素含量と成熟状態の間にそのような関係は見られなかった。また、密度との関係も見られなかった。一方、葉上微細藻類量と植食性端脚類の密度や成熟状態との間にも関係性は見出されなかった。これらの結果は、餌となるノコギリモクの窒素含量や葉上微細藻類量による植食性端脚類への影響は検出されなかったことを意味する。

次に、藻場の二次消費者であるメバル類稚魚 3 種（アカメバル、クロメバル、シロメバル）の胃内容を調べた（図 14）。クラスター分析の結果、ミジンコ類やカラヌス類、魚卵などを多く食べていた阿多田島のメバル類（Ⅰ）、浮遊性のカラヌス類を専ら食べていた湾口部のメバル類（Ⅱ）、葉上性の端脚類を主食としていた湾奥部のメバル類（Ⅲ）、の 3 つのグループに分けられた。したがって、胃内容物組成でも、湾奥部と、より外側の定点間で違いが見られたことになる。実際、PERMANOVA 分析の結果、胃内容物組成の違いには、魚種ではなく、場所（島）による違いの効果が大きいことがわかった（場所の効果： $P = 0.005$, $R^2 = 0.733$ ；

魚種の効果： $P = 0.146$, $R^2 = 0.123$)。葉上端脚類の分布密度が高い藻場ほどその摂食割合が高かったことから (図 15), この場所間のメバル類稚魚の食性の違いには, ノコギリモクの葉上端脚類密度が重要な要因となっていることが示唆される。したがって, もし栄養塩環境も含めた何らかの要因により葉上動物の密度が大きく変動すれば, メバル類の食性に影響を及ぼす可能性が考えられる。

今回実施した広島湾の藻場調査からは, 植物プランクトン量・葉上微細藻類量およびノコギリモクの藻体窒素含量と, 植食性端脚類を含む葉上動物の密度や成熟状態との間に関係性は見出せなかった。したがって, 低栄養塩環境が食物連鎖をとおしてノコギリモク藻場の動物群集に影響を及ぼしているというデータは得られなかったと言える。おそらく, 海藻葉上では, 多様な種間関係や捕食者による影響が, 餌の影響よりも大きいのであろう。また, 藻体窒素含量があまり低くない (最低でも 1% を越える) というノコギリモク自体の特徴も, それを食べる植食性端脚類への影響が検出されなかった原因の一つなのかもしれない。

【参考文献】

Sudo H, Yoshida G. Effects of a reduction in algal nitrogen content on survival, growth, and reproduction of an herbivorous amphipod. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 539, 151543, 2021.