

図1 広島湾におけるアマモ場の調査地点（赤字1～4）

①広島県廿日市市阿品，②広島県江田島市沖，③広島県江田島市深江，④山口県周防大島町逗子



図2 砂泥中の間隙水を採取する採水器

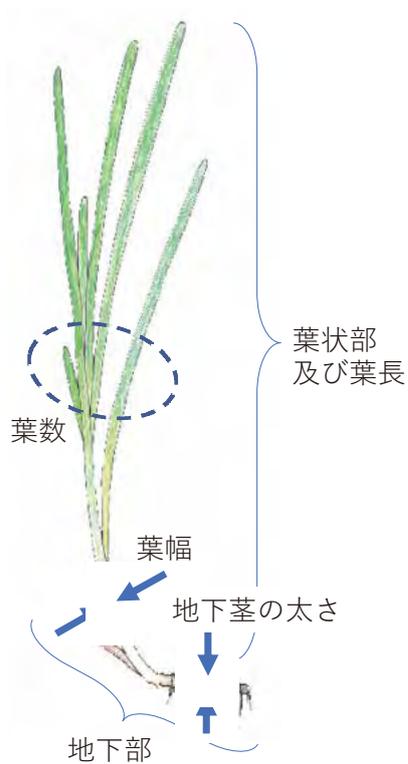


図3 アマモ草体の計測部位

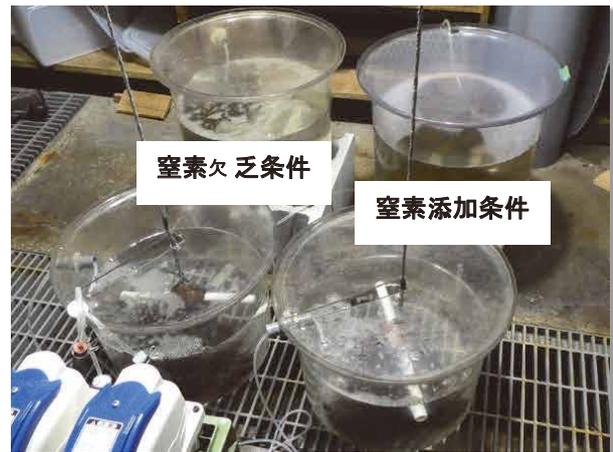


図4 クロメ藻体の栄養塩操作実験

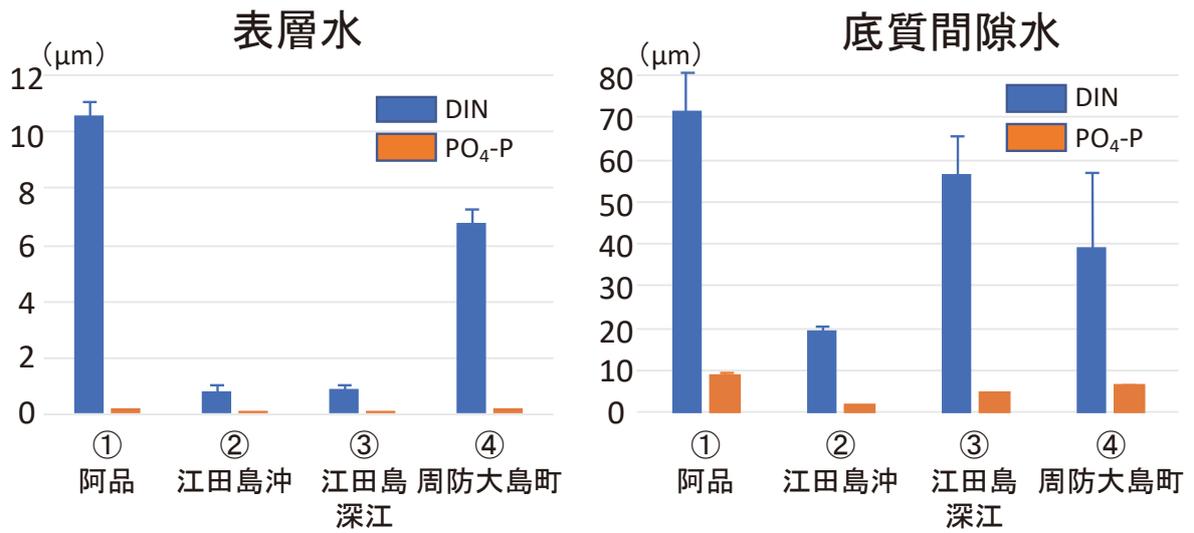


図5 広島湾の各調査地における表層水（左）と底質間隙水（右）のDIN濃度とPO₄-P濃度

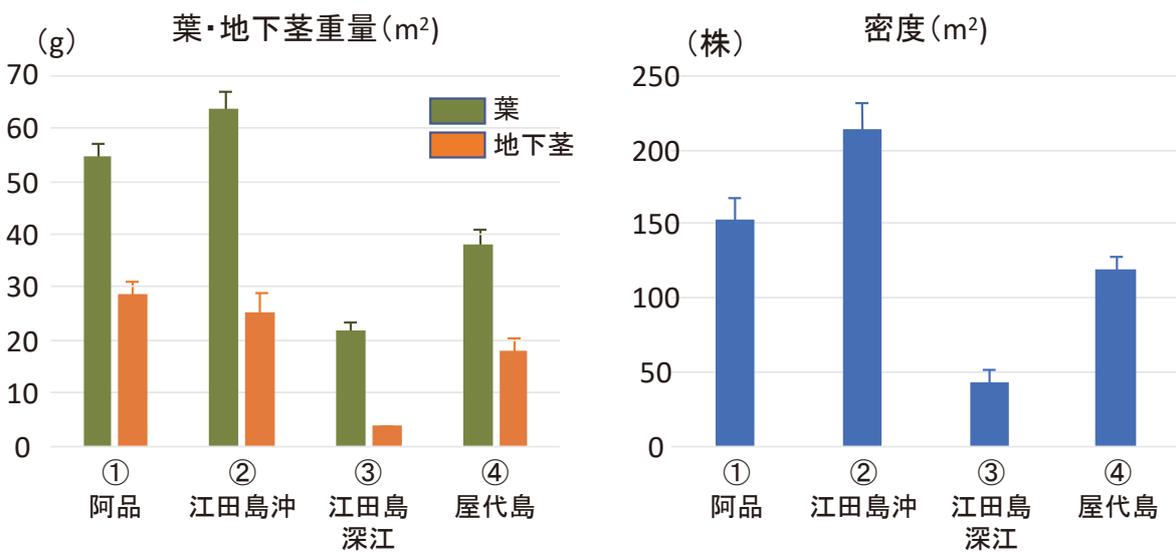


図6 広島湾の各調査地におけるアマモ重量（左）と成育密度（右）

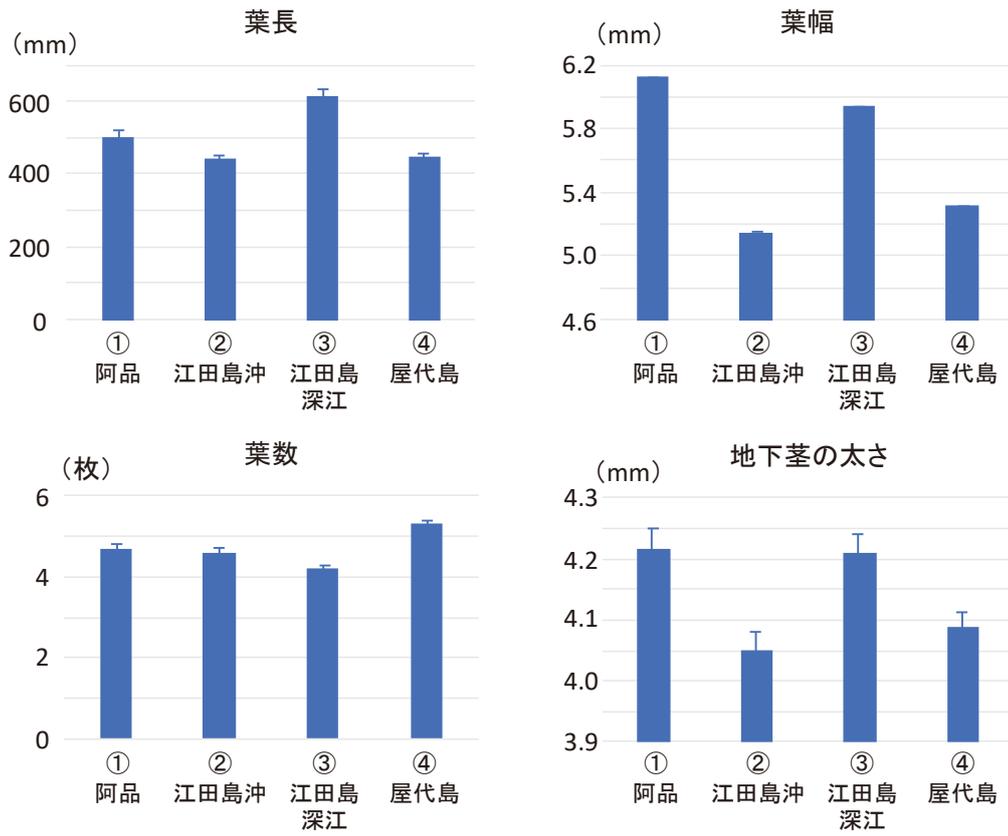


図7 広島湾の各調査地におけるアマモ草体の形態的特徴

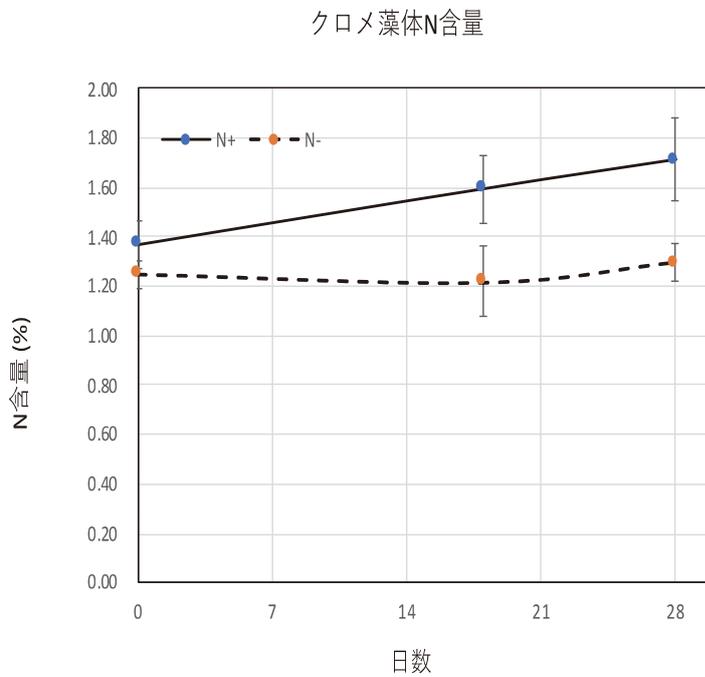


図8 培養実験によるクロモ藻体内のN含量

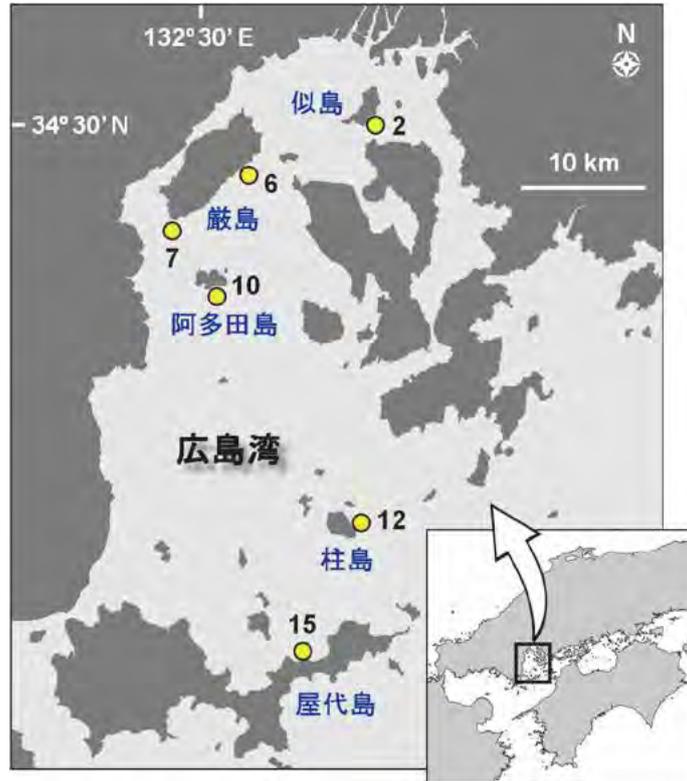


図9 広島湾におけるノコギリモク藻場の調査定点

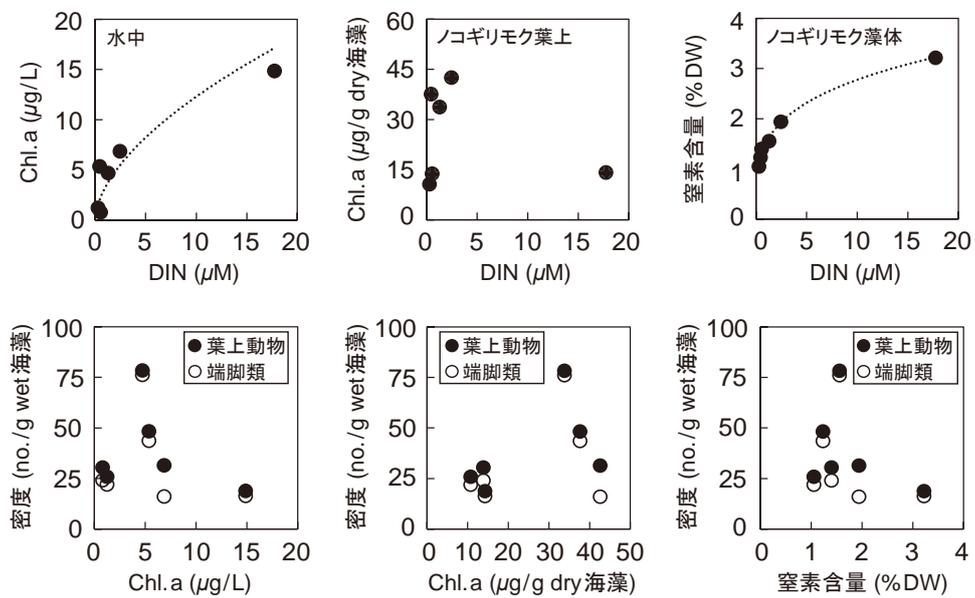


図10 ノコギリモク藻場におけるDINと一次生産者，一次消費者の量的関係。上段：DIN濃度と水中クロロフィルa量（左），葉上クロロフィルa量（中），藻体窒素含量（右）の関係；下段：水中クロロフィルa量（左），葉上クロロフィルa量（中），藻体窒素含量（右）と全葉上動物密度および葉上端脚類密度の関係

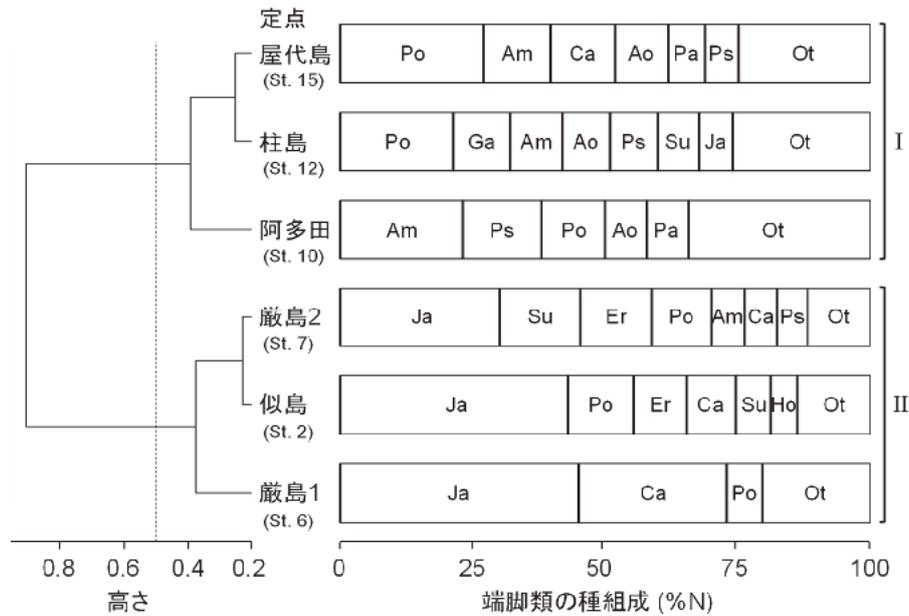


図 11 ノコギリモク葉上の端脚類の種組成とクラスター分析によるデンドログラム. Am : ラモンドヒゲナガ; Ao : ユンボソコエビ属; Ca : ワレカラ属; Er : イソホソヨコエビ; Ga : ニホンソコエビ; Ho : ヒメチビマルヨコエビ; Ja : カマキリヨコエビ属; Pa : トゲホホヨコエビ属; Po : ドロノミ属; Ps : アゴナガヨコエビ属; Su : ニセヒゲナガヨコエビ属; Ot : その他

図 12 ノコギリモク葉上の端脚類の食性型組成. SF : 懸濁物食者; S/D : 懸濁物/堆積物食者; DF : 堆積物食者; GR : 植食者; CA : 肉食者

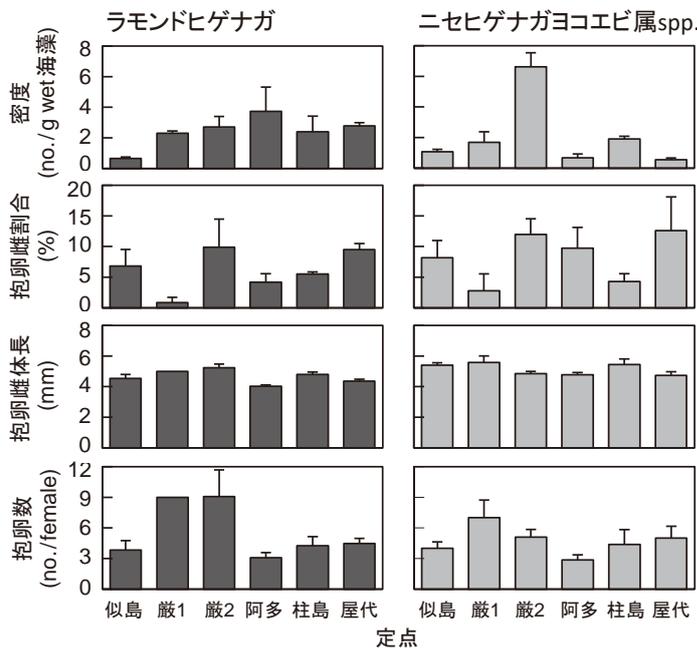
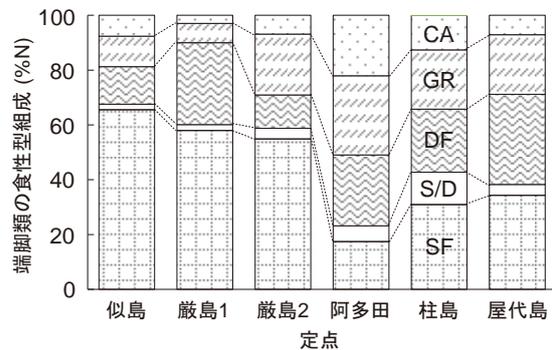


図 13 ノコギリモク葉上の植食性端脚類の密度と雌の成熟状態. エラーバーは+SEを示す

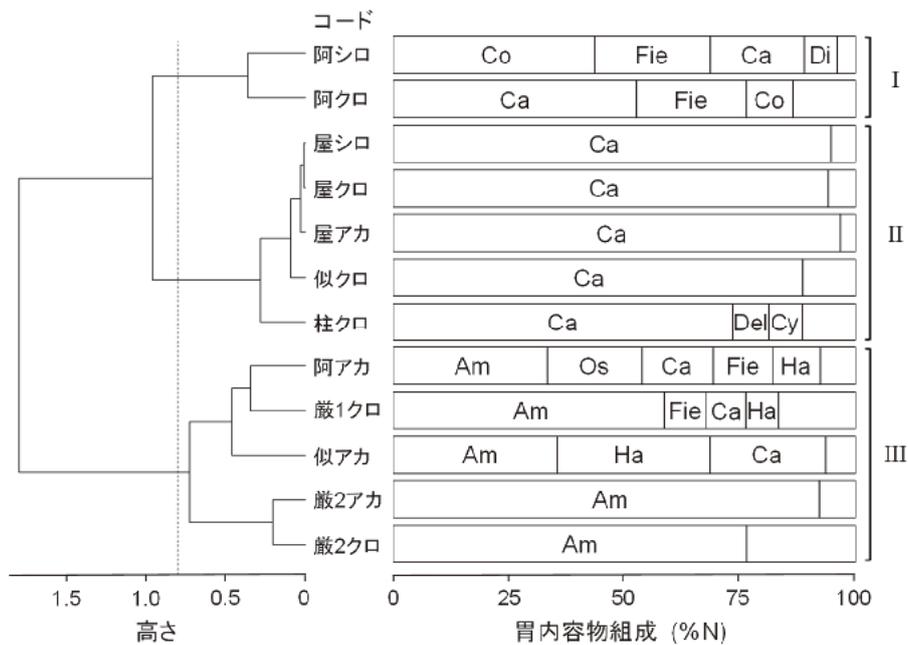


図14 メバル類稚魚の胃内容物組成とクラスター分析によるデンドログラム. コードは定点および種を示す (似: 似島; 巖: 巖島; 阿: 阿多田島; 柱: 柱島; 屋: 屋代島; アカ: アカメバル; クロ: クロメバル; シロ: シロメバル). Am: 端脚類; Ca: カラヌス類; Co: オタマボヤ類; Cy: キクロプス類; Del: 十脚類幼生; Di: ミジンコ類; Fie: 魚卵; Ha: ハルパクチクス類; Os: 貝虫類; 空欄: その他

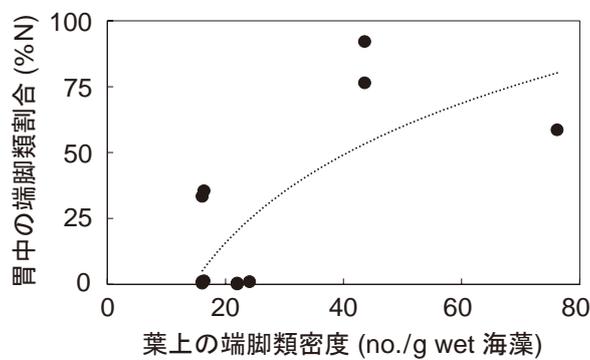


図15 ノコギリモク葉上の端脚類密度とメバル類稚魚による摂食割合の関係

課題番号：1) -エ

課題名：栄養塩等の水質環境が植物プランクトン等の低次生産に及ぼす影響の解明

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，阿部和雄

【背景・目的】

近年の瀬戸内海における漁業生産低迷の要因として、貧栄養化等の環境変化に伴う植物プランクトン等の低次生産の低下が指摘されているが、生産の質（種組成やサイズ組成）がどのように変化したか未だ不明な点が多い。植物プランクトンのうち、餌として重要な珪藻類については、播磨灘 (Nishikawa et al., 2010) や大阪湾 (多田ほか, 2012) で長期的に *Skeletonema* 属の優占度が低下したことが報告されているが、その原因は不明である。また、植物プランクトンのサイズ組成が長期的にどのように変化したか、情報がほとんどない。本研究では、栄養塩等の水質環境が珪藻類の出現種および発生量に与える影響を明らかにするために、環境の異なる複数海域で各種珪藻類の発生状況等を調べ、海洋観測データとの関係を解析する。また、優占する珪藻類の生理・生態特性について培養試験等で調べる。さらに、水質環境が植物プランクトン群集のサイズ組成に与える影響について、各種培養試験等で検討する。

【方法】

(1) 水質環境が珪藻類の出現種および発生量に与える影響の検討

ア) 広島湾および備後灘における低次生物生産調査

これまでの瀬戸内海広域における珪藻休眠期細胞の分布調査の結果から、栄養塩濃度が大きく違わないにも関わらず、広島湾では *Skeletonema* 属が優占し、備後灘では *Skeletonema* 属ではなく *Chaetoceros* 属が優占する傾向が確認された。そこで本年度は、両海域において海洋観測を実施し、*Skeletonema* 属が優占する環境特性を把握することで、瀬戸内海で *Skeletonema* 属の優占度が低下した原因を検討する。2021年4, 8, 10月に、広島湾の6定点および備後灘の6定点(図1)において、原則として表層, 1, 3, 5, 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。定点は河川水の流向を考慮して設定した。採水試料は研究室に持ち帰り、植物プランクトン組成の検鏡と栄養塩濃度分析に供した。また、多項目水質計で得られた水中光強度の値から、次式により消散係数 (k , m^{-1}) を求めた。

$$I_z = I_0 \times e^{-kz}$$

ここで、 I_z は深度 z m における水中光強度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)、 I_0 は表層の水中光強度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) である。消散計数の算出にはグラフ作成・データ解析ソフト Origin (Origin Pro 2022, OriginLab, Massachusetts, USA) を用いた。なお、2022年1月に広島湾で観測を行ったが、対をなす備後灘での観測が2022年3月に延期され未実施のため(2022年2月22日現在)、本稿では2022年1月および3月の観測結果は割愛する。

イ) 様々な光強度および塩分条件下における珪藻類の発芽・増殖試験

瀬戸内海において *Skeletonema* 属が優占していた 1970 年代は透明度が低い傾向であった (Nishikawa et. al., 2010)。そこで本年度は、光強度が各珪藻類の発芽・増殖に与える影響を調べた。併せて、昨年度同様に塩分が発芽・増殖に与える影響も調べた。試験には 2021 年 5 月に広島湾で採取した海底泥を用いた。海底泥を、塩分 5, 10, 15, 20, 25, 30 の 6 段階の条件に調整した改変 SWM-3 培地に懸濁し、20°C, 光量子束密度 10, 40, 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 明暗周期 12 hL : 12 hD の条件下で培養した。そして、培養 6 日後の泥懸濁液中における各珪藻類の細胞密度を調べた。

(2) 水質環境が植物プランクトン群集のサイズ組成に与える影響の検討

これまでの観測結果から、瀬戸内海では負荷削減に伴い、播磨灘や燧灘で長期的にマイクロプランクトン (>20 μm) の優占度が低下し、ナノプランクトン (2~20 μm) の優占度が上昇している可能性が示された。本年度は、マイクロプランクトンとして珪藻類 *Skeletonema* sp. の培養株、ナノプランクトンとして珪藻類 *Cyclotella* sp. の培養株を用いて、窒素濃度がマイクロプランクトンおよびナノプランクトンの増殖に与える影響を室内試験で調べた。試験には 2021 年 7~8 月に広島湾より分離した *Skeletonema* sp. および *Cyclotella* sp. を用いた。いずれも有菌株であるが、継代培養中および試験中に細菌の増殖による白濁等は確認されなかった。25°C, 光量子束密度 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 明暗周期 12 hL : 12 hD の条件下で *Skeletonema* sp. および *Cyclotella* sp. を窒素源無添加の改変 SWM-3 培地 (塩分 20) にて増殖が停止するまで飢餓培養した。そして、飢餓培養したそれぞれの培養株を、硝酸ナトリウムにて DIN の濃度を 5, 15, 25, 55, 105, 205 μM に調整した改変 SWM-3 培地 (塩分 20) に接種し、飢餓培養と同様の水温、光条件下で増殖速度 (μ , divisions/day) を調べた。得られた増殖速度から次式により増殖速度に対する DIN の半飽和定数 K_s (μM) 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 は培養開始時の栄養塩濃度 (μM) である。半飽和定数の算出にはグラフ作成・データ解析ソフト Origin (Origin Pro 2022, OriginLab, Massachusetts, USA) を用いた。

【結果】

(1) 水質環境が珪藻類の出現種および発生量に与える影響の検討

ア) 広島湾および備後灘における低次生物生産調査

図 2 に 2021 年 4, 8, 10 月の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。4 月の観測の結果、広島湾では Stn. H6 を除き *Skeletonema* 属が優占したが、備後灘では Stn. B1 を除き *Leptocylindrus* 属が優占した。また、8 月の観測の結果では、広島湾では全ての定点で *Skeletonema* 属が優占したが、備後灘では *Chaetoceros* 属や *Leptocylindrus* 属が優占した。10 月の観測では両海域ともに *Skeletonema* 属および *Thalassiosira* 属が優占したが、4 月および 8 月の観測結果から、備後灘よりも広島湾のほうが *Skeletonema* 属の優占しやすい海域である可能性が考えられた。表 1 に各月の両海域における各定点、各層の栄養塩濃度の平均値を示す。DIN は両海域ともに、4 月が最も低く、DIP は 10 月、8 月、4 月の順に高かった。ま

た、DSiは両海域ともに、8月、10月、4月の順に高かった。DINは8月の広島湾で16.81 μM と高い値が観測されたが、4月および10月は備後灘の方が高い値を示した。DIPは各月とも、両海域で近い値を示した。一方、DSiは常に広島湾で高い値を示した。図3に、各月の広島湾および備後灘の各定点における消散係数を示す。4月の広島湾ではStn. H6以外の5定点で0.3を上回っていたが、備後灘で0.3を上回っていたのはStn. B1, B3, B4の3点であった。また、8月の広島湾では全ての定点で0.8を上回っていたが、備後灘ではほぼ全ての定点で0.5を下回っていた。10月は広島湾のH3で1.0と高い値を示し、それ以外の定点で備後灘に比べて消散係数が明確に高いということにはなかったが、4月および8月の観測結果から、備後灘よりも広島湾のほうが濁度の高い海域であることが考えられた。図4に、各月の広島湾および備後灘の各定点における塩分の鉛直断面を示す(Stn. B6の結果は割愛)。いずれの月においても、備後灘よりも広島湾の方が河川水の影響がより広範囲に及んでいることがわかる。備後灘に流入する一級河川の芦田川の河口開口部には河口堰が設けられている。この堰により海域に流入する河川水量が制限されているため、備後灘では濁度が低く、また塩分が低下しにくい可能性が考えられた。こうした土木工事に伴う沿岸環境の変化も、出現する植物プランクトン種に影響を与える可能性が考えられ、今後情報収集を行う予定である。

イ) 様々な光強度および塩分条件下における珪藻類の発芽・増殖試験

図5に各光強度、塩分条件下で海底泥を6日間培養した後に確認された*Skeletonema*属および*Chaetoceros*属の細胞密度の割合を示す。本試験ではこれらの他、*Thalassiosira*属や*Asterionellopsis*属等の出現も確認されたが、ここでは優占していた*Skeletonema*属および*Chaetoceros*属の結果を示す。光量子束密度10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ での試験では珪藻類の発芽がほとんど確認されなかったため、ここでは結果を割愛する。光量子束密度40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ での試験の結果、いずれの塩分条件下でも*Skeletonema*属が概ね80%以上と優占した。一方、光量子束密度300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ での試験の結果、塩分10~25の条件下では*Chaetoceros*属の優占度が40~50%程度まで増加した。このことから、水柱光強度が低い環境下では常に*Skeletonema*属が優占して発芽・復活するが、水柱光強度が高い環境下では出水時に*Skeletonema*属のみではなく、*Chaetoceros*属も活発に発芽・増殖することが示唆された。以上のことから、透明度の上昇が*Chaetoceros*属の優占度を増加させ、*Skeletonema*属の優占度低下の一因となったことが考えられた。ア)で述べた通り、濁度が高い傾向の広島湾では*Skeletonema*属が優占し、濁度の低い備後灘では優占しない傾向が確認された。また、瀬戸内海ではないが、高濁度である有明海でも*Skeletonema*属が優占する傾向が確認されている(松原ほか, 2018)。海域で優占する珪藻類の種組成には、水質環境のみでなく光環境が強く影響を与えていることが考えられ、今後も現場観測、室内試験、文献の収集等により検討を進める予定である。

(2) 水質環境が植物プランクトン群集のサイズ組成に与える影響の検討

図6に、各DIN濃度条件下における*Skeletonema* sp.および*Cyclotella* sp.の増殖速度を示す。*Skeletonema* sp.については、105 μM の濃度では試験を実施しなかったが、25 μM で増殖速度は飽和し最大増殖速度4.3 divisions/dayを示した。また、半飽和定数 K_s は1.01 μM と計算された。一方、*Cyclotella* sp.については、205 μM で最大増殖速度3.3 divisions/dayを示し、 K_s は0.78 μM と計算された。両者における K_s の比較から、*Skeletonema* sp.のほうが*Cyclotella* sp.よりも活発な増殖のために高い窒素濃度を必要とすることが示され、負荷削減によりナノプランクトン(*Cyclotella* sp.)よりもマイクロプランクトン(*Skeletonema* sp.)の増殖が強く抑制される

ことが示された。本試験の結果は、負荷削減により植物プランクトン群集のサイズ組成が小さくなったことを示す現場観測結果を支持するものである。

【参考文献】

- Nishikawa T, Hori Y, Nagai S, Miyahara K, Nakamura Y, Harada 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.
- 多田邦尚, 山本圭吾, 一見和彦, 山田真智子, 西川哲也, 樽谷賢治, 山口一岩. 大阪湾の植物
プランクトンの季節・経年変動とその要因. *瀬戸内海*, 64, 75-77, 2012.
- 松原賢, 三根崇幸, 伊藤史郎. 有明海奥部, 塩田川河口域におけるノリ色落ち原因植物プラン
クトンの出現動態. *沿岸海洋研究*, 55, 139-153, 2018.

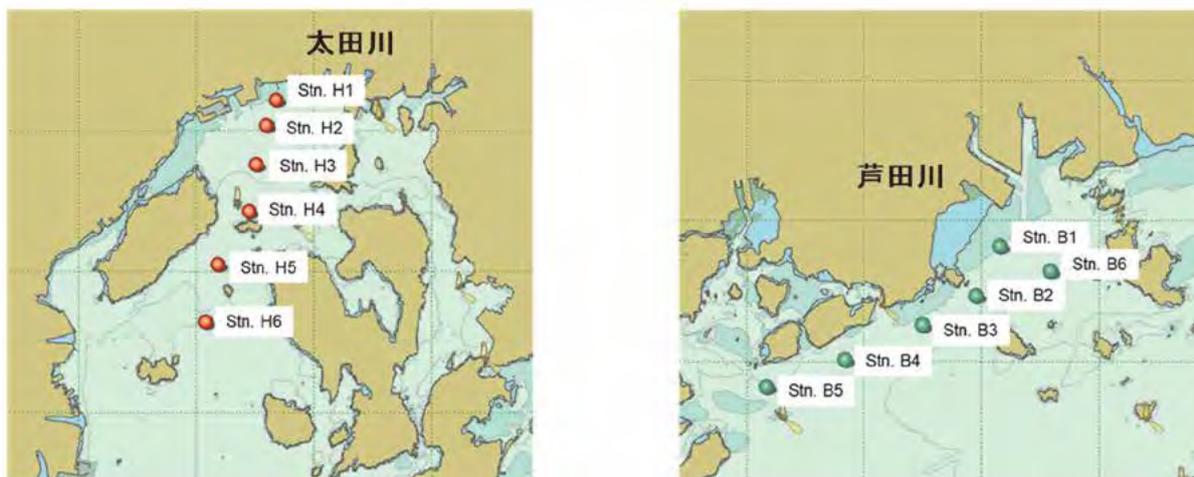


図1 観測定点図 (左：広島湾, 右：備後灘)

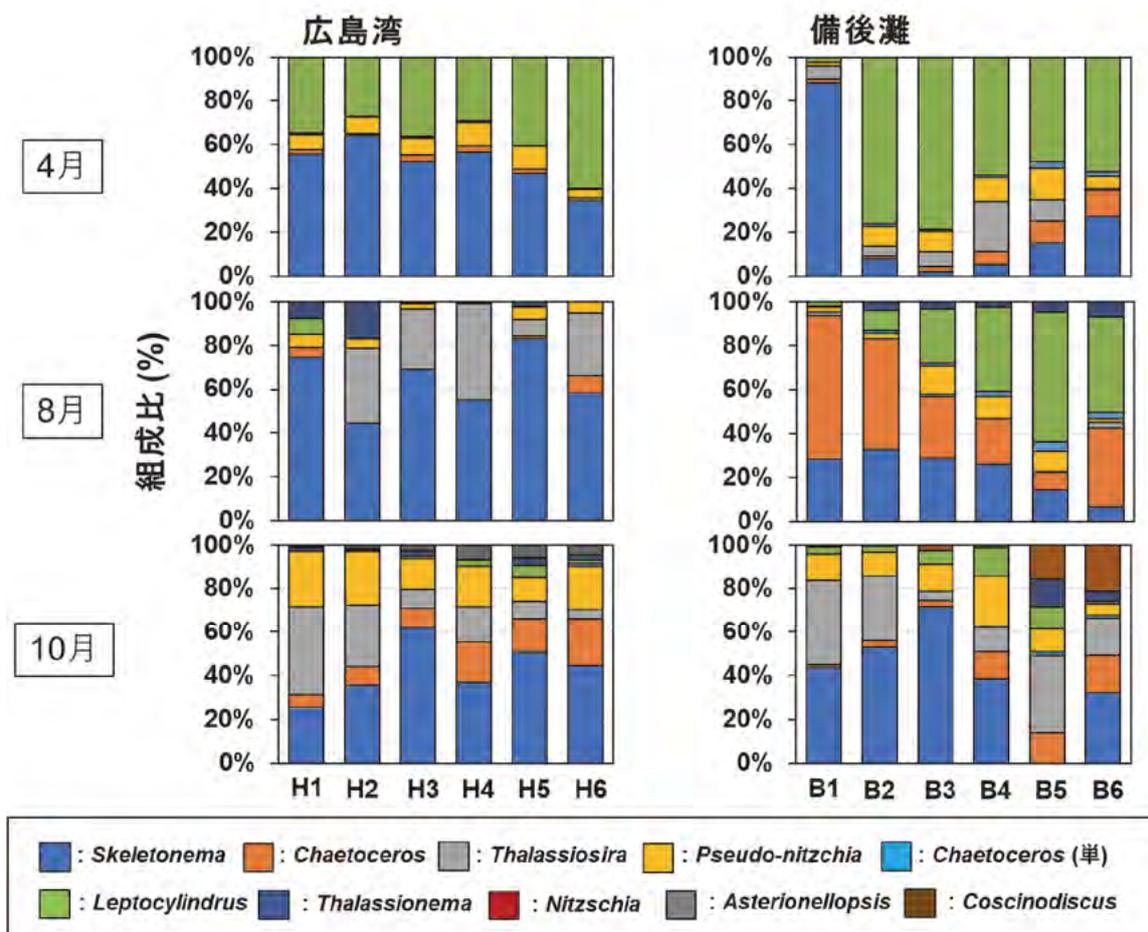


図2 2021年の4, 8, 10月における広島湾および備後灘の各定点における珪藻類組成 (表層における観察結果)

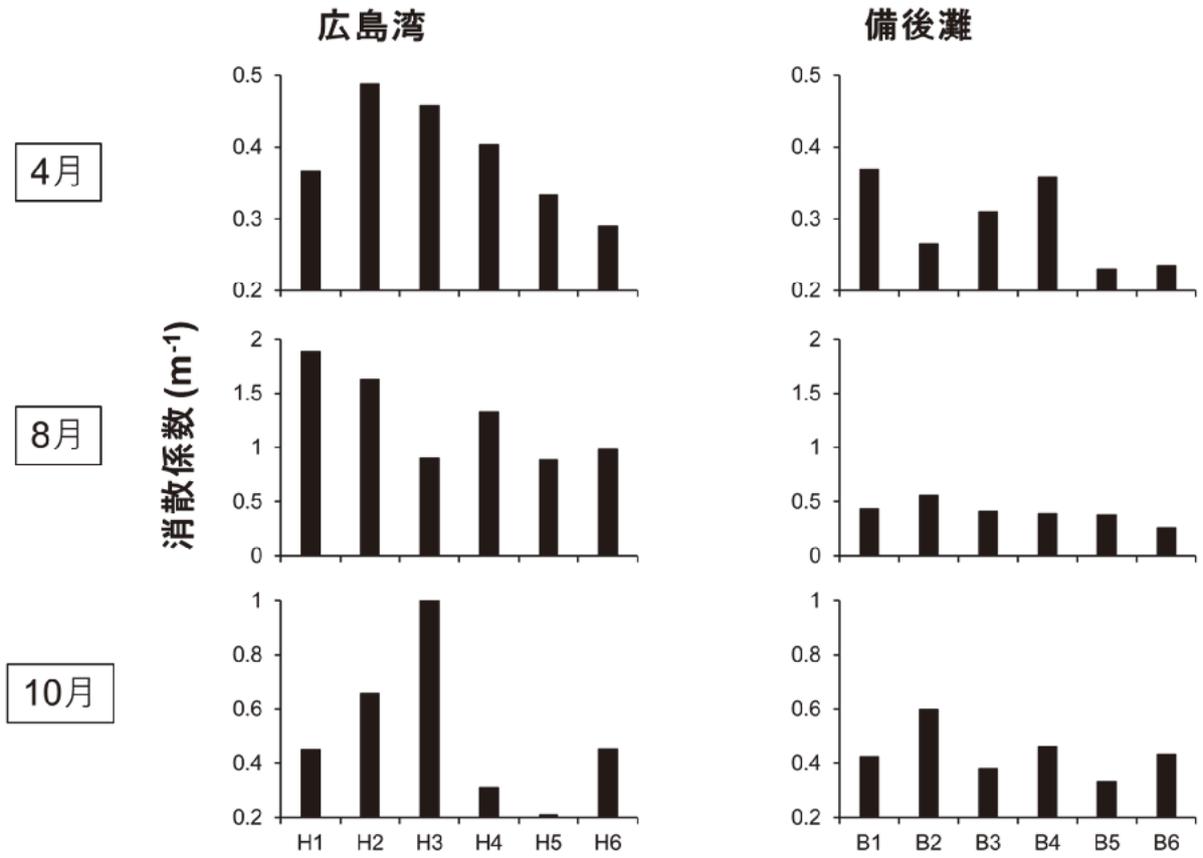


図3 2021年の4, 8, 10月における広島湾および備後灘の各定点における消散係数

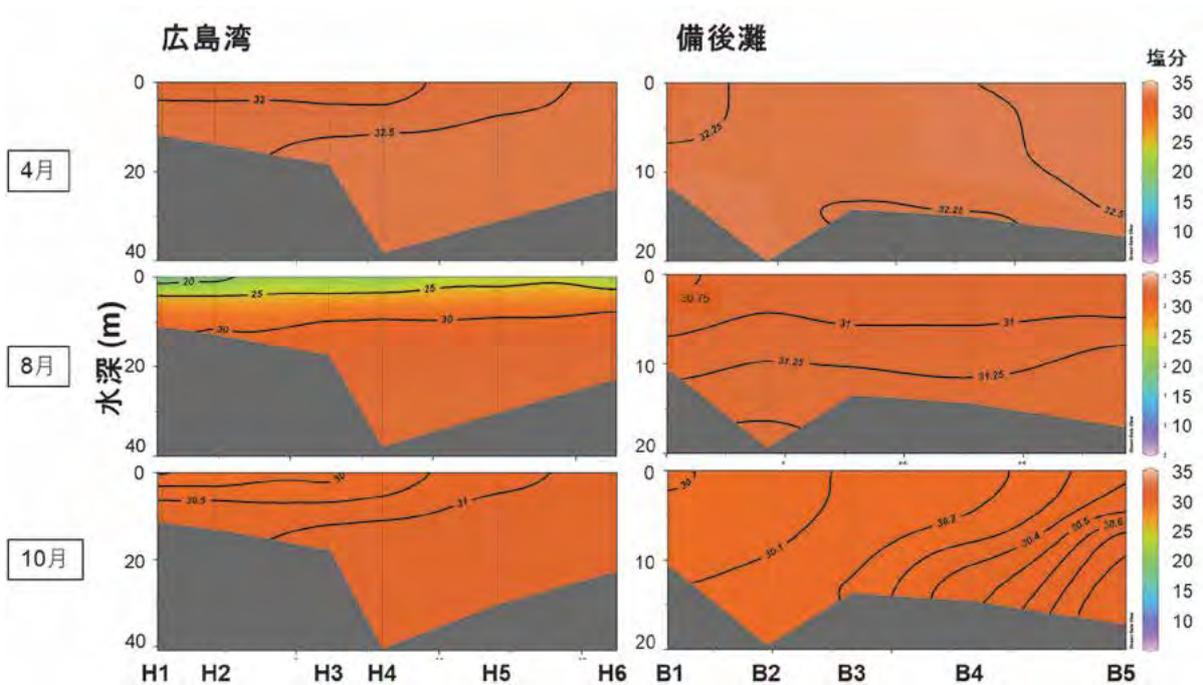


図4 2021年の4, 8, 10月における広島湾および備後灘の各定点における塩分の鉛直断面

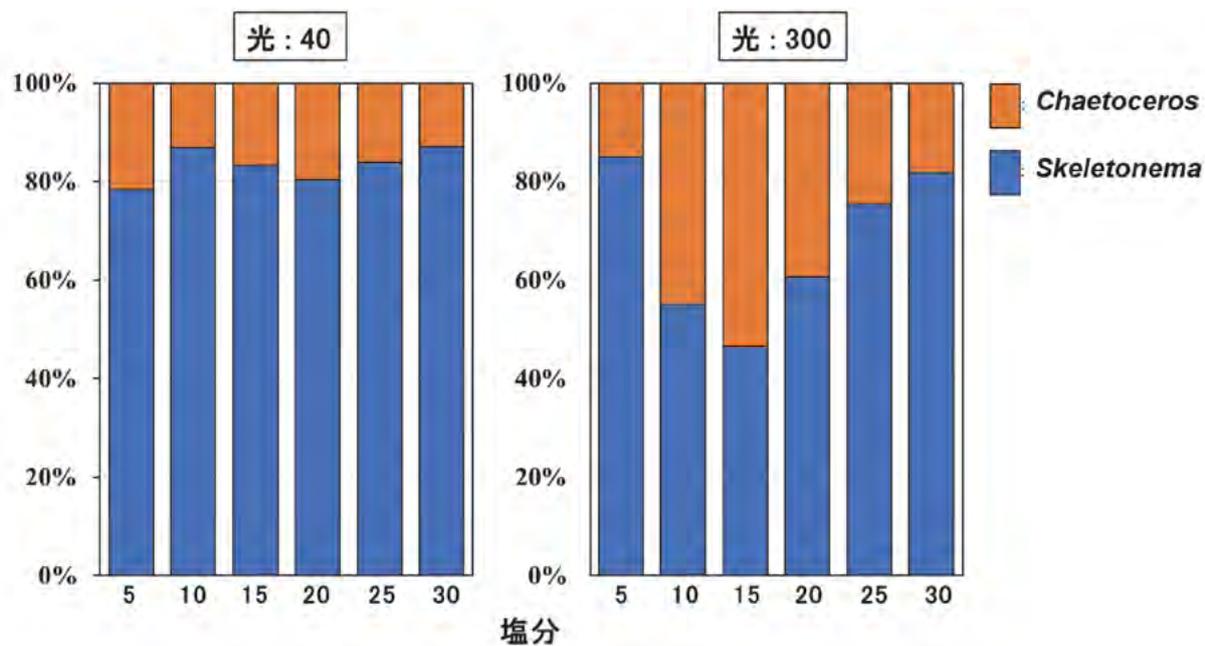


図5 各光強度，塩分条件下で海底泥を6日間培養した後に確認された珪藻類の割合

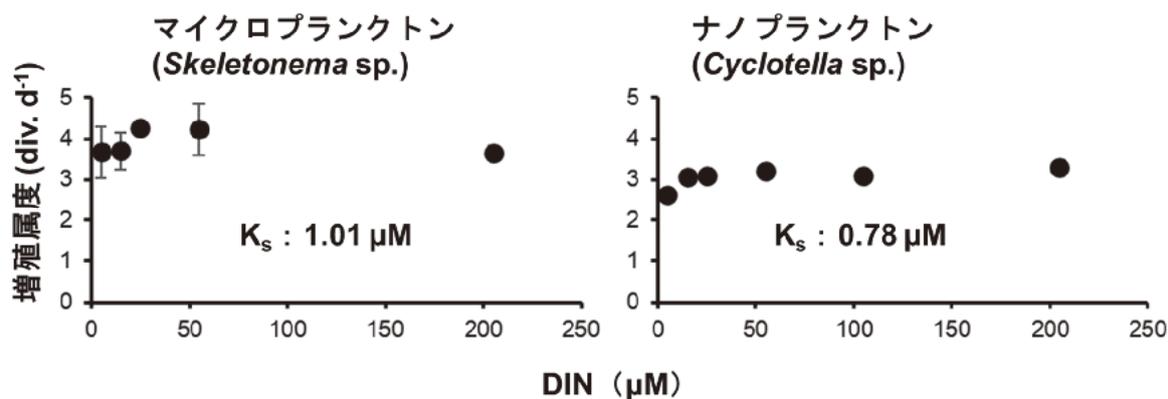


図6 各DIN濃度条件下における *Skeletonema* sp.および *Cyclotella* sp.の増殖速度

表1 広島湾および備後灘における各月の栄養塩濃度(μM)

	広島湾			備後灘		
	4月	8月	10月	4月	8月	10月
DIN	0.75	16.81	3.27	1.53	2.59	9.13
DIP	0.12	0.62	0.83	0.15	0.55	0.95
DSi	8.71	64.31	32.70	5.50	23.01	16.47

課題番号：2) -ア

課題名：栄養塩等の水質環境が小型浮魚の餌料環境に及ぼす影響解明

水産研究・教育機構 水産資源研究所塩釜庁舎

田所和明，岡崎雄二

愛媛大学・沿岸環境科学研究センター

吉江直樹，郭新宇

【背景・目的】

近年，瀬戸内海では漁獲量がトレンド的に減少している。その原因の一つとして1980年代以降の栄養塩濃度低下に伴う，生物生産の低下が考えられている。しかしながら，両者の間の詳しい関係は明らかになっていない。動物プランクトンは直接的な水産資源の餌であるため，水産資源との関係を検討することによって詳細な変動メカニズムを明らかにできると考えられる。また瀬戸内海は海洋学的特性の異なる，幾つもの海域（灘）によって構成されているため，海洋環境および低次生態系についてもそれぞれに特性を明らかにした上で，水産資源との関係を明らかにする必要がある。

そこで，本課題ではプランクトン食性でありまた瀬戸内海の重要な水産資源となっているカタクチイワシをはじめとした，小型浮魚類と動物プランクトンの関係に着目して課題を進める。そのために瀬戸内海全域において動物プランクトンおよび海洋環境の動態を観測によって調べ，小型浮魚類との関係を検討する。さらに過去の資料および試料を掘り起こし解析することで1980年代～2010年代末までの餌料プランクトン環境の変動について検討を行う。このことによって動物プランクトンの生産速度，バイオマスおよび群集構造の中・長期的な変遷を明らかにする。さらに，小型浮魚類の胃内容物調査などから小型浮魚の摂餌生態を調べ，餌として重要な動物プランクトンを特定する。このことによって，小型浮魚類の変動の鍵となる餌料環境の変動を明らかにすることができる。最終的に，得られた情報を統合し，低次生産環境と小型浮魚生産量の因果関係をデータ解析や生態モデル等により評価する。

【方法】

(1) 餌料プランクトンの分析

本課題において2018年の4月と10月，2019年の2月，4月，7月そして2020年の4月に瀬戸内海全域の30定点で一斉調査を行い，メソ動物プランクトンおよび微小動物プランクトン試料を採集した。メソ動物プランクトンはノルパックネット（口径45cm，目合0.1mm）を用いて，海底直上から表面までの鉛直曳網にて採集した。また微小動物プランクトンはバンドン採水器を用いて全ての観測点で10mから，さらに8観測点で各層（0，5，10，20，30，Bottom）から採集した。採集したメソ動物プランクトンは5%ホルマリン，微小動物プランクトン試料はルゴール液にて固定して，可能な限り低い分類区分で個体数を計数した。微小動物プランクトン，メソ動物プランクトン共に本年度全ての試料についての分析を完了した。

(2) 過去の餌料プランクトンデータの調査と整理

2010年代末と過去を比較するために、文献調査および水産研究・教育機構で過去に採集されたデータの調査を行った。メソ動物プランクトンの現存量については、Uye et al., (1987, 1997) が1979～1980年および1993～1994年に季節毎に年4回の調査を行い報告していることから、論文中の図から数値を読み取りデータを整理した。2007～2011年については、水産研究・教育機構瀬戸内庁舎が同様に季節毎に年4回の調査を行っており（樽谷，私信），そのデータを整理した。微小動物プランクトンについては、Uye et al., (1996)が季節毎に年4回の調査を行い報告していることから、図から数値を読み取りデータを整理した。

(3) 海洋生態系モデルおよびデータ解析

本年度は、栄養塩等の水質環境の変化に対する瀬戸内海の低次生態系応答を調べるために、海洋低次生態系モデル eNEMURO を用いて境界条件を変化させた際の感度解析を行った。一般的に、栄養塩濃度の違いにより、富栄養環境では大型植物プランクトンが優占し、それを小型浮魚の餌料として重要なカイアシ類などのメソ動物プランクトンが直接捕食し、短い食物連鎖により効率よく魚類に物質が伝達される。一方、貧栄養海域では小型植物プランクトンが優占し、従属栄養ナノ繊毛虫、マイクロ動物プランクトンなどを經由し、長い食物連鎖により魚類へ届く物質量は富栄養海域と比べて少なくなる。このような栄養塩環境の違いによる低次生態系の構造変化を表現可能な eNEMURO を用いた。eNEMURO では、栄養塩4群、植物プランクトン4群、動物プランクトン4群、デトリタス3群を予報変数とし、各植物プランクトンには異なる温度依存性と異なる栄養塩濃度依存性を考慮している（図1）。

播磨灘における2000年から2013年にかけての兵庫県海域の浅海定線調査データ（阿保ら2015）とアメダス姫路の気象観測データを用いて、水温、光合成有効放射、底層の硝酸塩濃度およびリン酸塩濃度の気候値を作成し、それらを境界条件としてモデルを駆動した。各種生理パラメータのチューニングを行い、基本的な低次生態系の季節変化を再現したうえで、異なる境界条件を与えた2000年から2013年にかけての経年変動実験を行った。具体的には、1. 底層栄養塩濃度漸減（外部からの栄養塩供給量の漸減に相当）、2. 強制的な表層栄養塩濃度漸減、3. 表層水温漸増（地球温暖化に相当）、4. 底層栄養塩濃度漸減＋表層水温漸増を与えた。

【結果】

(1) 微小動物プランクトン現存量の年代間の比較

1993～1994年（90年代）と2018～2019年（2010年代末）の微小動物プランクトンの現存量と組成を比較した。その結果2010年代末の現存量は90年代と同等か高い値を示した（図2）。季節別に比較すると秋では両年代でほぼ同程度の現存量を示したが、冬～夏では2010年代末でより高い値を示した。

次に年代間で組成を比較した。分類区分は2010年代末では有鐘繊毛虫(Tintinnids)、無殻繊毛虫(Naked ciliates)、ノープリウス幼生を合計および繊毛虫(Ciliates)の4つに区分したが、90年代では無殻繊毛虫(Naked ciliates)とノープリウス幼生を合計している点が異なる（図3）。しかし2010年代末の結果からノープリウス幼生の現存量は非常に少ないことから、この区分はおおよそ無殻繊毛虫が占めていると考えられた。組成は2つの年代間で大きく異なり、1990年代では有鐘繊毛虫が優占したが、2010年代末では無殻の繊毛虫が優占した。しかし個体数をみると有鐘繊毛虫の個体数に大きな差異は見られない（平均値90年代： $1.79 \times 10^5 \text{ cell m}^{-3}$ ，2010年代末： $2.24 \times 10^5 \text{ cell m}^{-3}$ ）ことから、90年代には無殻繊毛虫の現存

量が非常に少なかったと推測される。しかし、90年代は標本をホルマリンで固定しており、2010年代末のルゴールによる固定に比べると無殻繊毛虫は破損しやすく30~70%が失われることが報告されていることから(Revelante & Gilmartin, 1983), 90年代では破損によって過小評価されている可能性がある。そこで70%が破損したと仮定して90年代の無殻繊毛虫の個体数を推定した。その結果、90年代の無殻繊毛虫の個体数は $2.27\sim 6.40\times 10^5$ cell m^{-3} であったのに対し、2010年代末では $20.2\sim 76.9\times 10^5$ cell m^{-3} と10倍程度高い値を示した。一方で無殻繊毛虫の現存量を比較すると、90年代では $0.5\sim 5.3$ mgC m^{-3} だったのに対し2010年代末は $1.4\sim 5.7$ mgC m^{-3} と同様に高い値を示したが、個体数ほどの差異は生じなかった。小型の個体は一個体あたりの現存量も小さくなることから、2010年代末は無殻繊毛虫の個体数および現存量は多いものの、小型の無殻繊毛虫の組成が高かった可能性が考えられた。

(2) メソ動物プランクトン現存量の年代間の比較

重要な4つの属(*Acartia*, *Calanus*, *Paracalanus*, *Oithona*) およびその他(Others)のカイアシ類について4つの年代(1979~1980年:80年代, 1993~1994年:90年代, 2007~2011年:2000年代末, 2018~2019年:2010年代末)で組成と現存量を比較した(図4)。組成の季節変動を見ると*Paracalanus*と*Oithona*はどの年代もほぼ周年出現していた。*Acartia*も概ねどの年代でも周辺出現した。一方で、*Calanus*は80年代と90年代では周年出現していたが、2000年代末および2010年代末で冬~夏にかけて出現した後、秋には出現しなくなるという季節的な遷移を示した。

次に比較が可能な80年代, 90年代, 2010年代末の現存量について見ると(図5), 80年代, 90年代は共におよそ2010年代末よりも現存量が低い傾向にあり、微小動物プランクトンの結果と一致した。組成では前述の通り80年代, 90年代では周年*Calanus*が出現していたが、2010年代末では*Calanus*は冬から夏にのみ見られ、秋には出現しなくなるという季節遷移を示した。一次生産は主に光, 水温および栄養塩によって律速される。この中で年代間で大きく変わったと考えられるのは栄養塩濃度で、80年代~90年代は2010年代末に比べ非常に高い値を示していた。このことから、80年代~90年代は栄養塩濃度が高い時期であったため、一次生産, とりわけ増殖に栄養塩を必要とするケイ藻の生産を律速する要因となりにくかった可能性がある。そのことで*Calanus*のようなケイ藻などを利用しているメソ動物プランクトンが周年出現していた可能性がある。一方で現存量は栄養塩濃度の高かった80年代, 90年代よりも2010年代末で高い値を示した。この原因については現時点では不明であるが、80年代と90年代はマイワシなどのプランクトン食性の魚類の資源量の多かった時期であることから、それらの捕食圧による影響も考えられた。いずれにしても、季節変動パターンの差異および現存量の変動の要因についてはさらに議論を進める必要がある。

(3) 海洋生態系モデルおよびデータ解析

モデルにより計算された低次生態系の季節変化については、栄養塩濃度, Chl. a 濃度, メソ動物プランクトン現存量, マイクロ動物現存量を、観測値(阿保ほか2015, Hashimoto et al., 1997)と比較したところ、観測された季節変動を現実に近い形で再現していた(図6)。

経年変動実験の結果は、結論から言うと、ケース4の外部からの栄養塩供給量減少と温暖化による水温上昇の両環境変化を与えた際の経年変化が観測された変化に最も近く、硝酸、リン酸, Chl. a 濃度について観測値と有意な相関が認められた(図7)。また、栄養塩濃度が減少傾向にあるにも関わらず、Chl. a 濃度はほとんど減少していないという観測結果を再現

することができた。

ケース毎の結果については、ケース 1 の外部からの栄養塩供給量減少だけでは、メソ動物プランクトンの減少率が過小評価であり、ケース 2 の強制的な表層栄養塩濃度減少では全ての生物の減少率が過大評価であり、ケース 3 の温暖化による水温上昇だけでは栄養塩濃度の減少率が過小評価であった。次に、ケース 1, 3, 4 の結果を比較しながら栄養塩供給量の減少と水温上昇の影響が植物および動物プランクトンに及ぼす影響について考察した。富栄養・低温環境に適応した大型珪藻は、貧栄養化と水温上昇の両影響により減少するが、一方で、貧栄養・高温環境に適応した小型植物プランクトンは、主に水温上昇の影響により増加していた(図 8)。そして、この大型珪藻の減少に伴い、大型珪藻を餌とする小型浮魚の重要な餌料であるカイアシ類が減少していた(図 9)。

本年度の成果をまとめると、海洋低次生態系モデルを用いて播磨灘において観測された低次生態系の季節変化を再現することに成功した。長期的な栄養塩供給の減少にも関わらず、Chl. a 濃度がほとんど減少していないという経年変化を再現し、大型珪藻の減少を小型植物プランクトンの増加により相殺されている可能性を示唆した。そして、この大型珪藻の減少は、小型浮魚の主要な餌料であるカイアシ類の減少を引き起こす要因である可能性を示した(図 10)。

引用文献

- 阿保勝之, 阿部和雄, 中川倫寿, 辻野睦. 瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測 40 年成果(海況の長期変動), 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所, 2015, pp. 256.
- Hashimoto H, Hashimoto T, Matsuda O, Tada K, Tamai K, Uye S, Yamamoto T. Biological productivity of lower trophic levels of the Seto Inland Sea, Sustainable development in the Seto Inland Sea, Japan – From the viewpoint of fisheries, Eds. T. Okaichi and T. Yanagi, TERRA PUB, Tokyo, 1997, 17-58.
- Revelante N, Gilmartin M. Microzooplankton distribution in the Northern Adriatic Sea with emphasis on the relative abundance of ciliated protozoans, *Oceanologica Acta*, 6, 407-415, 1983.
- Uye S, Kuwata H, Endo T. Standing stocks and production rates of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 42, 421-434, 1987.
- Uye S, Nagano N, Tamaki H. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan, *J. Oceanogr.*, 52, 689-703, 1996.
- Uye S, Shimizu T. Geographical and Seasonal Variations in Abundance, Biomass and Estimated Production Rates of Meso-and Macrozooplankton in the Inland Sea of Japan, *J. Oceanogr.*, 53, 529-538, 1997.