

令和4年度漁場環境改善推進事業のうち
栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発

(1) 栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査 報告書

令和5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
兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター
和歌山県水産試験場
香川県水産試験場
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4年度成果報告	7
I. 瀬戸内海	
1) 栄養塩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. 栄養塩等の水質環境が二枚貝等の餌となる底生性の微細藻類に及ぼす影響の解明	9
イ. 栄養塩等の水質環境が二枚貝の生産量に及ぼす影響の解明	
① 播磨灘北西部における陸域からの栄養塩供給が二枚貝養殖漁場の生産力に及ぼす影響の解明	23
② 紀伊水道の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響解明	31
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	38
ウ. 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解明	43
エ. 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	51
2) 栄養塩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	58
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評価	
① 燧灘	69
② 備讃瀬戸	78
3) 栄養塩管理方針の検討	88
II. 東京湾	
1) 栄養塩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	93
2) 閉鎖性内湾の栄養塩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	104
3) 栄養塩管理方針の検討	112
III. 伊勢・三河湾	
1) 栄養塩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	119
2) 閉鎖性内湾の栄養塩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	130
3) 栄養塩管理方針の検討	139

1. 本事業の目的および実施概要

本事業の目的および実施概要

【事業の目的】

近年、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、栄養塩の減少や偏在による生態系への影響が懸念されている。特に、瀬戸内海では貧栄養化による漁業生産の低迷が懸念されており、栄養塩濃度と漁業生産の因果関係についての科学的な検証が喫緊の課題となっている。また、平成 27 年 10 月に施行された改正瀬戸内海環境保全特別措置法では、瀬戸内海における栄養塩類の減少、偏在等の実態の調査、それが水産資源に与える影響に関する研究に努めることとされており、瀬戸内海における栄養塩類の管理の在り方についての検討が求められている。さらに、東京湾および伊勢・三河湾においても栄養塩不足が懸念され始めていることから、栄養塩が低次生態系に及ぼす影響の解明や栄養塩管理方針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、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、適切な栄養塩管理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が沿岸海域の漁業生産に及ぼす影響の解明

ア. 栄養塩等の水質環境が二枚貝等の餌となる底生性の微細藻類に及ぼす影響の解明

潮間帯および潮下帯において底生性の微細藻類および各種環境要因の現場観測を行い、得られたデータから底生性の微細藻類の動態に影響を与える環境要因を抽出する。また、実環境中および研究室内で培養試験を行うことで栄養塩等が底生性の微細藻類の生産等に与える影響を調べる。以上の現場観測および培養試験の結果を総合して水質等の環境要因が底生性の微細藻類の動態に及ぼす影響を明らかにする。

イ. 栄養塩等の水質環境が二枚貝の生産量に及ぼす影響の解明

① 播磨灘北西部における陸域からの栄養塩供給が二枚貝養殖漁場の生産力に及ぼす影響の解明

播磨灘北西部沿岸海域（姫路～赤穂市）では、二枚貝養殖漁業（マガキ、アサリ）が盛んである。本研究では貧栄養化が課題となっている播磨灘で、偏在的に生産性の高い当海域の漁場環境特性（陸域からの栄養塩供給及び餌料環境等）を明らかにすることによって、兵庫県の瀬戸内海域における今後の栄養塩管理のあり方を考える材料とする。本研究では、漁場の物質循環のうち陸域から漁場への栄養塩供給及び餌料環境に焦点をあてた調査とする。

② 紀伊水道の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響解明

海域における栄養塩等の水質環境が二枚貝の生産性に及ぼす影響を解明するため、二枚貝漁場周辺海域における栄養塩・餌料等の水質等環境調査を実施するとともに、アサリ等二枚貝を用いた飼育試験を実施する。これらの調査により得られた栄養塩濃度や餌料環境、二枚貝の成長量等のデータを解析し、海域の栄養塩動態と二枚貝の生産性との関係を把握する。

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

これまでの浅海定線調査や環境省のデータなどを活用し、瀬戸内海のアサリ、ハマグリなどの二枚貝漁場をモデル海域として栄養塩類と二枚貝生産量の関係を解析する。これにマガキを加え最新の調査手法を用いた各種二枚貝類浮遊幼生等の餌の調査研究を進めて、瀬戸内海の二枚貝の生産に及ぼす栄養塩の影響を評価する。

ウ. 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

近年の瀬戸内海の栄養塩環境の変化が藻場（アマモ場・岩礁性藻場）の低次生産、餌料供給機能、有用水産生物の育成機能に及ぼす影響を、既往データの収集と解析、現地調査および操作実験等により明らかにする。低栄養塩化が進む沿岸生態系における藻場の意義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環境について提言を行う。

エ. 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

栄養塩等の水質環境が瀬戸内海における低次生物生産の質および量に及ぼす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休眠期細胞密度の分布や植物プランクトン群集のサイズ組成等について調査を行う。また、優占する珪藻類の生理・生態特性等について培養試験で調べる。これらの成果から、水質環境が珪藻類の出現種や発生量および植物プランクトン群集のサイズ組成に与える影響を検討する。

2) 栄養塩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

湾・灘における餌料生物の時空間変動を調べる。そのことによって対象水域の餌料環境の特性を明らかにし、さらに年代間や海域間における変動傾向を明らかにする。また種毎の餌料生物の重要性の差異を明らかにするために、小型浮魚の胃内容物調査を行い、得られたデータを活用することで、数値生態系モデル等によって栄養塩および低次生態系の時空間変動について解析する。

イ. 環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の評価

① 燧灘

燧灘の海洋環境調査および小型魚類の卵仔魚、成熟・産卵などの調査を進め、過去の調査結果と比較しながら、海洋環境と加入豊度との関連性を検証する。また、農林水産統計のデータベースや既往知見等を利用し、小型浮魚の漁獲量と海洋環境条件の関係などの経年変異を調べる。さらに、既存の生態モデルに使われている生物特性のパラメータを精査し、必要に応じてその情報を飼育実験等により更新する。最終的に得られた情報を統合し、燧灘カタクチイワシを主体とした魚類生産と貧栄養化の関係について考察を進める。

② 備讃瀬戸

備讃瀬戸およびその周辺海域でのイカナゴを代表種として扱い、農林水産統計のデータベースや既往知見等を利用し、イカナゴの漁獲量と海洋環境条件の関係などの経年変化を調べる。さらに、構築する生態系モデルに適用する生物特性のパラメータを収集、精査し、最終的に得られた情報を統合し、備讃瀬戸のイカナゴをモデルケースとした魚類生産と貧栄養化の関係について考察を進める。

3) 栄養塩管理方針の検討

平成30年度から令和2年度にかけて、博多湾をモデルケースとして、現地調査および既往データを活用して内湾漁業生産管理モデルを構築し、下水処理場からの負荷量を変化させた感度解析を行い、博多湾の栄養塩管理に基づく望ましい漁業、養殖業のあり方を検討した。検討結果については、委員会を年2回開催し、専門家の助言を反映させた。

令和4年度は、同様の検討として燧灘のカタクチイワシおよび備讃瀬戸のイカナゴを対象として、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を行い、資源量が増大する栄養塩管理方策を検討する。専門家で構成される検討委員会は、年2回開催する。

Ⅱ. 東京湾

1) 栄養塩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

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) 栄養塩管理方針の検討

東京湾におけ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収集整理する。また、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ための数値モデルの枠組みを検討し、栄養塩の起源を踏まえた栄養塩管理方針の検討を行う。専門家で構成される検討委員会は、年2回開催する。

Ⅲ. 伊勢・三河湾

1) 栄養塩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

栄養塩等の水質環境が動物プランクトンおよび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ことを目的とし、既存の海洋観測資料を収集・解析することで、湾内外の循環構造や栄養塩動態を評価するためのモデルを検討する。さらに、既存および新たに得られた生物試料と海洋観測データの収集、整理および分析を行い、動・植物プランクトン等の群集構造とその季節・経年変動を調べ、物理・化学環境との関係を解析する。

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

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

3) 栄養塩管理方針の検討

平成30年度から令和2年度にかけて博多湾を、令和3年度からは備讃瀬戸をモデル海域として、栄養塩濃度とイカナゴの資源量の関係の解析に着手し、委員会を年2回開催し、専門家の助言を反映させた。

令和4年度は、同様の検討として伊勢・三河湾を対象海域として追加し、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を行い、資源量が増大する栄養塩管理方策を検討する。専門家で構成される検討委員会は、年2回開催する。

2. 令和4年度成果報告

課題番号：I－1）－ア

課題名：栄養塩等の水質環境が二枚貝等の餌となる底生性の微細藻類に及ぼす影響の
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
香川大学農学部
一見和彦，山口一岩

【背景・目的】

近年，我が国沿岸域ではアサリを始めとする二枚貝の水産資源が減少しており，その要因の一つとして餌料生物の不足が指摘されている。二枚貝の餌料生物として，水柱に浮遊する植物プランクトンに加え，潮間帯・潮下帯に生息する底生性の微細藻類が重要であると考えられる。これらのうち植物プランクトンについては，瀬戸内海沿岸の各府県等の観測結果から，栄養塩濃度の低下に伴い，とりわけ浅海域において減少している可能性が指摘されている。一方，底生性の微細藻類については，出現種やその現存量に関する基礎的な情報すら不足しており，栄養塩を始めとした環境変化に対する応答は不明である。そこで本課題では，底生性の一次生産者に焦点を当て，既往の観測データを解析すると共に，潮間帯・潮下帯に生息する優占種の増殖特性および底生性微細藻類の付着特性等を把握する。さらにミクロコズム試験等の現場培養試験，定期および短期集中型のフィールド観測を実施することで，栄養塩等の水質環境が底生性の微細藻類の動態に及ぼす影響を解明し，二枚貝等の餌料環境を保つための適正な栄養塩管理モデルの構築に資することを目的とする。

【方法】

（1）潮間帯の底生微細藻現存量に関する既存データの解析

香川県高松市の新川河口干潟の一定点（Stn.B：図1）において，1993年から本事業終了時の2022年に亘り実施されてきた底生微細藻現存量（表層堆積物中のChl *a* 含量）の観測データを用い，底生微細藻類現存量の変動傾向と環境因子との関連について解析した。

（2）底生性微細藻類の栄養塩応答の解明

ア）調査干潟の栄養塩濃度（干潟直上水）

H30年度から今年度にかけて，新川河口干潟（図1）において毎月1回の頻度（2022年1月から3月は欠損）で干潮時の海水（干潟縁辺部の水深約30 cm地点）を採取し，DIN，DIPおよびDSi濃度を測定し，底生微細藻の現存量に対する影響を検証した。

イ）溶存態無機窒素濃度に対する底生珪藻の増殖応答試験

調査干潟の優占種として単離された底生珪藻 *Nitzschia traheaformis* を用い，以下の半連続培養を実施した。0.6 μM の NH_4 を含む人工海水に NH_4 を添加し，0.6 μM （無添加区），2.6 μM ，4.6 μM ，11 μM ，51 μM の5段階濃度の試験区を作成した。これらに予備培養した試験藻を初期細胞密度として30～50 cells/mLとなるように接種後，20°C，220 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ （14：10 LD）で5日間培養を行った。培養開始から24時間経過するごとに各試験区の細胞密度を計数すると

共に、培養液の 75% を抜き取り、同量の培地を添加した。したがって、試験藻が 2 分裂／日の速度で増殖すれば、理論上、同じ細胞密度を維持することとなる。

(3) 底生性微細藻類の付着力に影響を与える環境因子の解明

懸濁物食者である二枚貝にとって、底生性微細藻類が基質から剥がれ、再懸濁されやすい環境が好適な餌料環境であると考えられる。これまでの観測結果から、底生性微細藻類の付着力は海域の DIN 濃度に影響を受ける可能性が示されたので、室内試験で検討した。試験には 2022 年 4 月に丸石干潟（図 2）から単離した *Navicula* sp. を用いた。まず、水温 20°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、*Navicula* sp. を DIN 濃度 1, 10, 50, 200 μM に調整した塩分 30 の改変 SWM-3 培地に接種した（培養器は試験管、液量は 5 mL。初期密度は蛍光光度計による蛍光値で 4~7 の範囲になるよう調整）。毎日、蛍光光度計で蛍光値を測定した後に各試験管から上清を 4.9 mL 回収し、新たに各 DIN 濃度の培地を 4.9 mL 加える半連続培養を行った。各栄養塩濃度条件下における細胞増加率が安定したタイミングで、各試験管から回収した上清の蛍光値が 3 程度になるよう調整したものを 1 mL ずつ 48 ウェルプレート（4 ウェル）に分注し、1 時間上記条件で静置培養した。そして、2 ウェルについては 10 回のピペッティングによる攪拌後に培養液を全量回収し、残り 2 ウェルについては未攪拌で静かに培養液を全量回収した。その後、各ウェルの底面に付着した細胞密度を計数し、次式により付着率（A, %）を算出した。

$$A = D_m/D_n \times 100$$

ここで、 D_m は攪拌したウェルにおける細胞密度（cells/well）、 D_n は未攪拌のウェルにおける細胞密度（cells/well）である。細胞密度の計数は、オールインワン蛍光顕微鏡（BZ-X800, Keyence, 大阪, 日本）で各ウェルの写真を撮影し、画像データを画像解析ソフト Fiji（<http://fiji.sc/>）に取り込み、cell count 機能により行った（ $n=3$ ）。

(4) 潮間帯—潮下帯における微細藻類群集の現場動態

ア) 広島県廿日市市の干潟域における観測

2022 年 4 月から 12 月にかけて月に一度、丸石干潟における干潟観測と、ポンツーン（図 2）における表層水の観測を行った。干潟における観測項目は、泥温、水位 5 cm および 50 cm 時の干潟直上水の水温、塩分、栄養塩濃度、表層 0~5 mm の干潟堆積物および水位 50 cm 時の干潟直上水における微細藻類の現存量（Chl *a* 濃度）、サイズ組成および生物組成とした。ポンツーンの表層水における観測項目は水温、塩分、栄養塩濃度とした。干潟堆積物は 10 mL シリンジをカットして作成した小型コアで採取した。水位 5 cm 時の干潟直上水およびポンツーン表層水はバケツで、水位 50 cm 時の干潟直上水は干潟上にシリコンチューブを設置してハンドポンプで吸引することで採取した。干潟の泥温は棒状温度計で測定し、干潟直上水およびポンツーンの表層水の水温、塩分はポータブル水質計（YSI, Pro30）で、栄養塩濃度はオートアナライザー（BL TEC, QuAAtro 39）で測定した。干潟堆積物は分析に先立ち、ろ過海水に懸濁後に静置して上清と沈殿物に分けた。そして上清についてサイズ分画（0.2~2, 2~10, 10~20, >20 μm ）後に Chl *a* 濃度の測定に供し、微細藻類の種組成を光学顕微鏡観察により調べた。干潟直上水における微細藻類の現存量、サイズ組成および生物組成は上清と同様の方法で調べた。

イ) 潮下帯に生息する底生性微細藻類の現場動態

志度湾の Stn. S (図 1: 水深約 6 m) において今年度も底生微細藻類の生物量とその動態に
関与する環境因子について観測を行った。原則として毎月 1-2 回の頻度で水温および水柱光
量子量の測定と、マルチプルコアラーにより表層海底泥の採取を行った。蛍光顕微鏡を用い
て表泥試料中 (0-0.5 cm 深) の底生珪藻の生息密度を測定し、その季節変動を検証した。また
堆積物 0-1 cm 深の間隙水中栄養塩濃度 (DIN, DIP および DSi) を測定し、海底到達光量と共
に、底生珪藻生物量の季節変動との関連性を検証した。以上について 5 ヶ年分の観測データ
を解析し、底生珪藻の生息量変動に最も影響を及ぼす環境因子を推察した。

(5) 底生性微細藻類の餌料としての重要性検証

新川河口干潟の Stn. B (図 1) において四季 (1 月, 4 月, 7 月, 10 月) の頻度で干潮時に
表層堆積物を採取し、250 μm 目合いの篩を通過した堆積物粒子に分画した。これらをプラス
チック容器に分注した後、底生微細藻の走光性を利用して捕集し $\delta^{13}\text{C}$ 値の測定に供した。得
られた底生珪藻を主体とする底生微細藻の $\delta^{13}\text{C}$ 値と、調査干潟でこれまでに得られているそ
の他の一次生産者 (植物プランクトン, アマモなど) およびアサリの $\delta^{13}\text{C}$ 値を比較すること
で餌料源としての底生微細藻の重要性を検証した。

【結果】

(1) 潮間帯の底生微細藻現存量に関する既存データの解析

1993 年から 2022 年における観測の中で、2015 年から 2017 年の 3 年間には Chl *a* 現存量の
明らかな減少が認められたものの、観測期間を通して Chl *a* 含量 (底生微細藻の現存量) は瀬
戸内海の沿岸部に認められる水柱 Chl *a* 濃度の減少といった明らかな傾向は見られなかった
(図 3)。30 年間の各月における Chl *a* 含量を平均化すると、春期と夏期に Chl *a* 含量が高く、
梅雨期には Chl *a* 含量が幾分低下する二山型の季節変動が認められた (図 4a)。したがって Chl
a 現存量は原則的に温度と光量子量に制御されていることが示唆された。一方で、1990 年代
から一定期間ごとにその季節変動を概観すると、1993 年から 2014 年までは春期と夏期に Chl
a 含量が高い二山型の季節変動が認められたが、Chl *a* 含量が低かった 2015 年から 2017 年に
加え、2018 年以降も夏期の増殖が制御されている明瞭な傾向が認められた (図 4b)。温度や
光量には明確な関連性が見られなかったことから、栄養塩の濃度変動を含め、今後の検討課
題としたい。

(2) 底生性微細藻類の栄養塩応答の解明

ア) 調査干潟の栄養塩濃度 (干潟直上水)

今年度の観測結果を含め、過去 5 ヶ年の栄養塩濃度を図 5 に示す。河口干潟における干潮
時の観測であることから各栄養塩とも沿岸域に比べ高い濃度が検出されているが、DIN 濃度
は 1.3~170 μM の範囲で変動し、秋期から冬期に向けて濃度が高くなり、春期に大きく低下
する明瞭な傾向が認められ、夏期にも散発的に低濃度が観測された。DIP 濃度は 0.5~11.0
 μM で変動し、夏期から冬期にかけて濃度が高く、DIN と同様に春期に大きく低下してい
た。DSi 濃度は 12.0~186 μM で推移し、DIP と同様に夏期から冬期にかけて濃度が高く春期
に大きく低下していた。これら 5 ヶ年の観測値について DSi/DIN と DIN/DIP の濃度比の関
係を見ると (図 5)、その多くが Si/N が高く N/P が低い領域にプロットされることから、調
査干潟域では基本的に DIN が増殖の制限因子になると考えられる。これより 5 ヶ年に得ら

れた DIN 濃度と表層堆積物 Chl *a* 含量の季節変動を並列すると（図 6），春期における Chl *a* 含量の増加と DIN 濃度の低下は同調しており，冬期の DIN 濃度が春期の Chl *a* 含量の多少を制御しているようにも見受けられる。R3 年度までに行った室内培養系による増殖応答試験の研究成果から，底生珪藻は植物プランクトンに類似する低い半飽和定数を有することが明らかとなり，年間を通して高い栄養塩濃度が維持されている河口干潟では栄養塩による増殖律速は受けないことが推察されたが，以上の観測結果は，河口干潟においても栄養塩濃度の変動により底生微細藻の現存量が制限を受ける可能性を示唆するものである。

イ）溶存態無機窒素濃度に対する底生珪藻の増殖応答試験

各 NH₄濃度区における細胞密度の推移を図 7 に示す。0.6 μM～4.6 μM の試験区においては，実験開始時の初期密度（30～50 cells/mL）から 1 日経過後に 150 cells/mL 前後にまで増殖し，75%/日の培地交換率で培養を継続したその後も同等の細胞密度が維持されていることから，いずれの試験区においても 2 分裂/日程度の速度で増殖していたことを示している。一方，11 μM および 51 μM の試験区では明らかな細胞密度の増加が認められたことから，両試験区では低濃度区に比べ増殖率が高いことを示している。上述したように，バッチ培養にて得られた底生微細藻の半飽和定数は植物プランクトンのそれに類似する低い値であることが明らかとなったが，現場環境を模倣した連続培養系では，より高い DIN 濃度で底生微細藻の生物量が制御される可能性が示唆された。

（3）底生性微細藻類の付着力に影響を与える環境因子の解明

図 8 に各 DIN 濃度で半連続培養した *Navicula* sp. の付着率および *Navicula* sp. の増加率，そして *Navicula* sp. の増加率と付着率の関係を示す。本試験の結果，DIN 濃度が低くなるほど付着率が高くなり，増加率は低くなる傾向が確認された。また，増加率と付着率との間には有意な負の相関が確認された。以上のことから，DIN 濃度の低下により，*Navicula* sp. の増殖活性が低下すると付着力が高まることが示唆された。

（4）潮間帯一潮下帯における微細藻類群集の現場動態

ア）広島県廿日市市の干潟域における観測

図 9 に 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における丸石干潟の泥温，各干潟直上水およびポンツーンの表層水における水温および DIN の変動を示す（塩分，DIP および DSi はここでは割愛する）。泥温および各水温は季節的な変動を示し，8 月もしくは 9 月に年間最高値，1 月もしくは 2 月に年間最低値を示した。DIN については，水位 50 cm 時の干潟直上水とポンツーンの値は類似していたが，水位 5 cm 時の干潟直上水における DIN は概ね高い値を示した。3 カ年共通して，9 月から 12 月にかけて水位 50 cm 時の干潟直上水とポンツーンの DIN が上昇する傾向が確認された。

図 10 に 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における上清および水位 50 cm 時の干潟直上水における微細藻類群集のサイズ組成と Chl *a* 濃度の変動を示す（水位 5 cm 時の干潟直上水についてはここでは割愛する）。上清よりも直上水で >20 μm サイズおよび 0.2～2 μm サイズの割合が高い傾向が確認された。

図 11 に 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における上清および水位 50 cm 時の干潟直上水における，鞭毛藻類，浮遊性の微細藻類，浮遊性と底生性の両方の性質をもつ微細藻類（ここでは中間と標記する），底生性の微細藻類の割合と，全微細藻類の細胞密度の変動を示す。また，底生性の微細藻類については，科レベルで分類した細胞密度の変動も図 12 に示す。図 11 に

示すように、上清においては 2020 年の 8 月を除き底生性の微細藻類が優占していたが、直上水においては、底生性の微細藻類が優占したのは全 31 ヶ月の観測のうち 9 ヶ月にとどまった。このことから、丸石干潟における二枚貝の餌としては、底生性よりも浮遊性の微細藻類が相対的に重要である可能性が考えられた。図 12 に示すように、科レベルで分類した底生性の微細藻類に着目すると、上清においては *Navicula* 科が優占することがほとんどであったが、直上水においては *Bacillaria* 科 (*Nitzschia* 科) が優占することがほとんどであった。これは *Bacillaria* 科よりも *Navicula* 科の方が付着力が強く、再懸濁されにくいためと考えられた。現場における *Navicula* 科および *Bacillaria* 科の付着力の変動を把握するために、次式により再懸濁指数 (*I*) を算出した。

$$I = D_w/D_t$$

ここで、 D_w は直上水における細胞密度 (cells/mL)、 D_t は上清における細胞密度 (cells/cm²) である。図 13 に、2020 年 6 月から 2022 年 12 月における *Navicula* 科および *Bacillaria* 科の再懸濁指数を示す。*Bacillaria* 科の再懸濁指数の変動に明確な季節性は確認されなかったが、*Navicula* 科については 10~12 月にかけて上昇する傾向が確認された。

底生性の微細藻類の動態に影響を及ぼす環境因子を明らかにするため、2020 年 6 月から 2022 年 12 月までの観測データを用いて、各月の底生性の微細藻類に関する項目 (上清および水位 50 cm 時の干潟直上水における全底生性微細藻類、*Navicula* 科および *Bacillaria* 科の細胞密度、*Navicula* 科および *Bacillaria* 科の再懸濁指数) と環境因子 (干潟直上水の水温、塩分、DIN、DIP、DSi および広島市の月平均全天日射量) の相関関係について Spearman 順位相関係数を用いて調べた。表 1 に有意な関係が認められたもののみ示す。上清の全底生性微細藻類および *Navicula* 科の細胞密度が水温と負の相関、塩分と正の相関を示したが、これは上清における底生性の微細藻類の大半を占める *Navicula* 科が、水温が低く塩分が高い秋冬に増加する傾向 (図 12) を反映したものと考えられた。*Navicula* 科の再懸濁指数は DIN と正の相関を示したことから、環境中の DIN 濃度が低下すると *Navicula* 科が再懸濁されにくくなることが示唆された。このことは室内試験の結果とも一致しており、DIN 濃度の低下は *Navicula* 科の再懸濁量を低下させ、二枚貝の餌料環境を悪化させる可能性が考えられた。直上水の *Navicula* 科の細胞密度は DIN および DIP と正の相関を示した。このうち、DIN との正の相関は、再懸濁量の増加による水中の *Navicula* 科の増加を反映したものと思われた。一方、DIP については上清における *Navicula* 科の細胞密度とも正の相関関係が認められたことから、DIP が丸石干潟堆積物中の *Navicula* 科の増殖を律速している可能性が考えられた。

イ) 潮下帯に生息する底生性微細藻類の現場動態

今年度の観測結果を含め、調査定点における底生珪藻生息密度の 5 ヶ年の季節変動を図 14 に示す。観測結果を集約すると、底生珪藻の生息密度は冬季から春季にかけて高くなる明瞭な傾向が認められた。底生珪藻の生息密度と環境因子の関連について、水温 (水深 5 m) は負の相関関係にあることから、水温は底生珪藻の生息密度に大きく関わっていないと考えられた。また表層泥間隙水の DIN 濃度と生息密度の間にも負の相関関係が見られた。したがって水温と同様に栄養塩濃度は生息密度を制御していないだけでなく、むしろ底生微細藻による栄養塩の取り込みの影響が示唆された。底生珪藻の生息密度と明瞭な正の相関関係が認めら

れた環境因子は海底到達光量であり、潮下帯に生息する底生微細藻類は水柱懸濁粒子の多寡を主とした海底の光量に現存量が制御されていると考えられた。

(4) 底生性微細藻類の餌料としての重要性検証

2022 年 1 月、4 月、7 月、10 月に観測された底生微細藻の $\delta^{13}\text{C}$ 値を、2022 年（毎月観測）に得られた $\delta^{13}\text{C}$ 値と共に図 15 に示す。2022 年に得られた $\delta^{13}\text{C}$ 値も 2021 年と同様に低水温期に低く、高水温期に高くなる明瞭な傾向が認められ、調査干潟域に生息する底生珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ 値は大きく季節変動することが明らかとなった。香川大学がこれまでに測定した調査干潟の沖合域および干潟直上の懸濁物粒子（植物プランクトンとして）の $\delta^{13}\text{C}$ 値は-23‰～-21‰の範囲にあることから、低水温期における底生珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ 値は植物プランクトンのそれに類似しており、高水温期には付着物やアマモなど、付着系の一次生産者のそれに類似するようになっている。水温の上昇に伴う光合成活性の上昇が $\delta^{13}\text{C}$ 値変動の要因と予想されるが、現時点ではその変動要因を明らかにできておらず今後の検討課題としたい。

2021 年と 2022 年に得られた底生珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ 値の季節変動に、2012 年～2014 年に調査干潟で得られたアサリの $\delta^{13}\text{C}$ 値を加えて図 15 に示した。両者の変動を概観すると、水温の上昇と共にアサリの $\delta^{13}\text{C}$ 値も上昇しているのが見て取れ、年間を通して底生性の微細藻類がこれら二枚貝の主要な餌料源になっていると推察された。

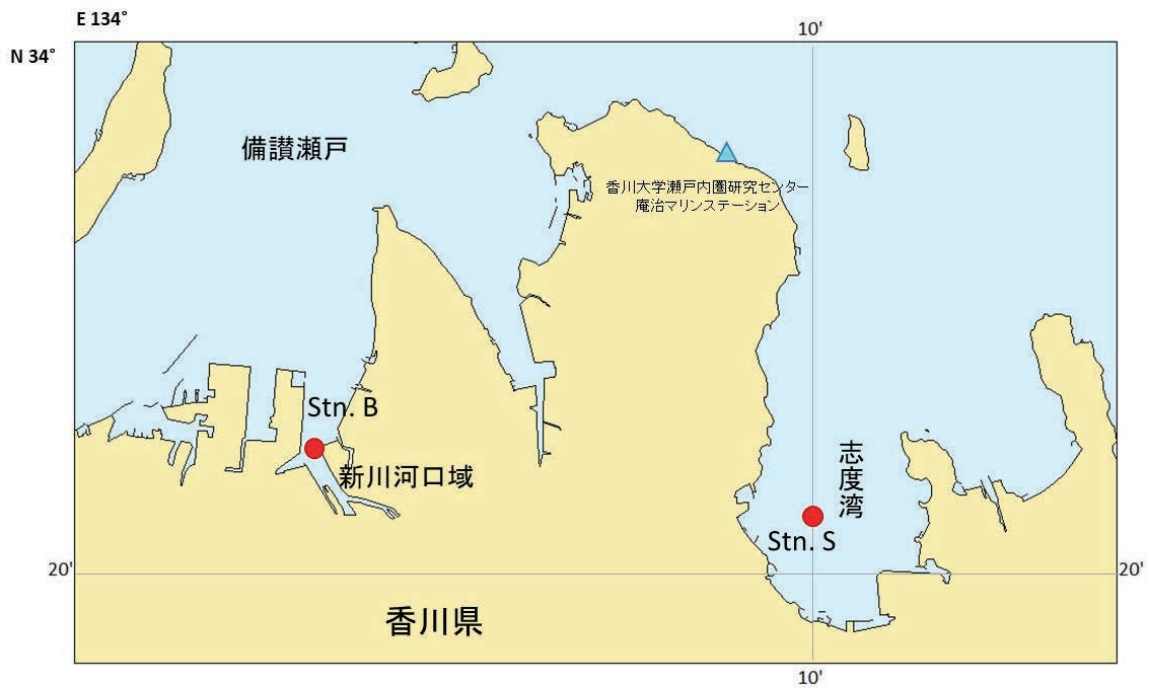


図1 観測を実施した潮間帯および潮下帯の定点

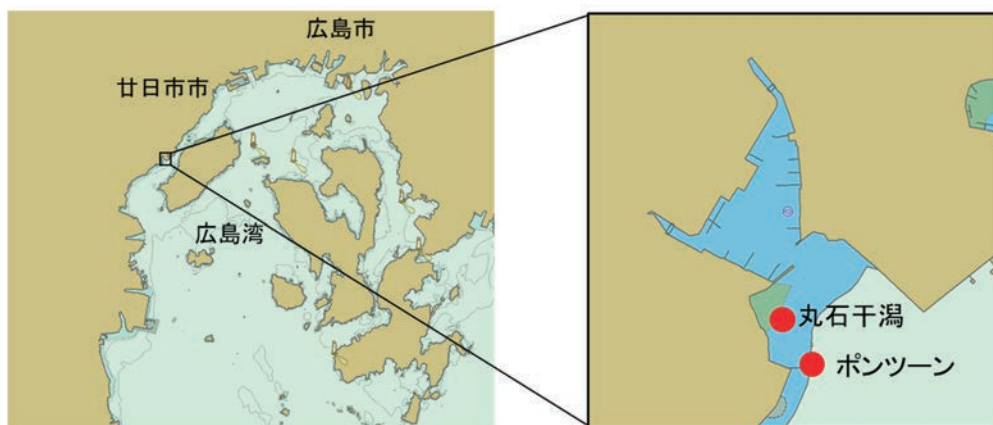


図2 広島県廿日市市の観測定点

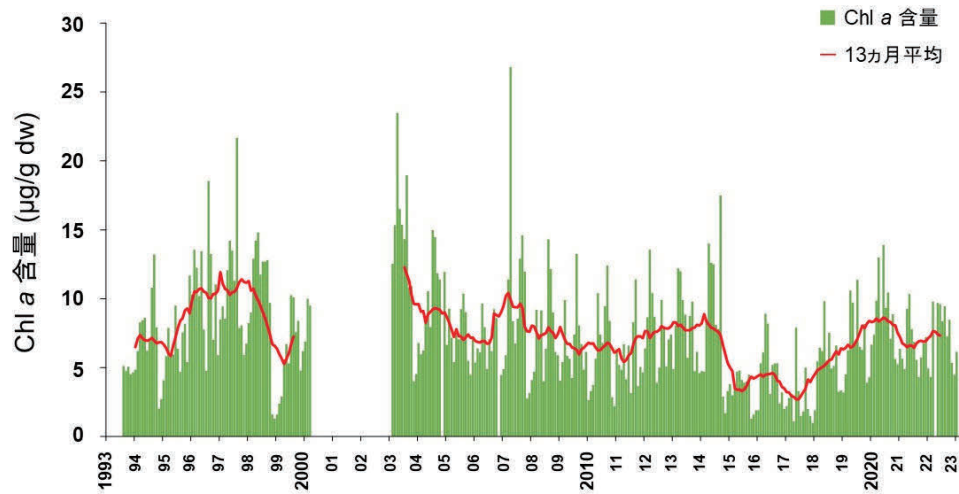


図3 新川河口干潟 (Stn. B) における表層堆積物中の Chl *a* 含量の経年変動

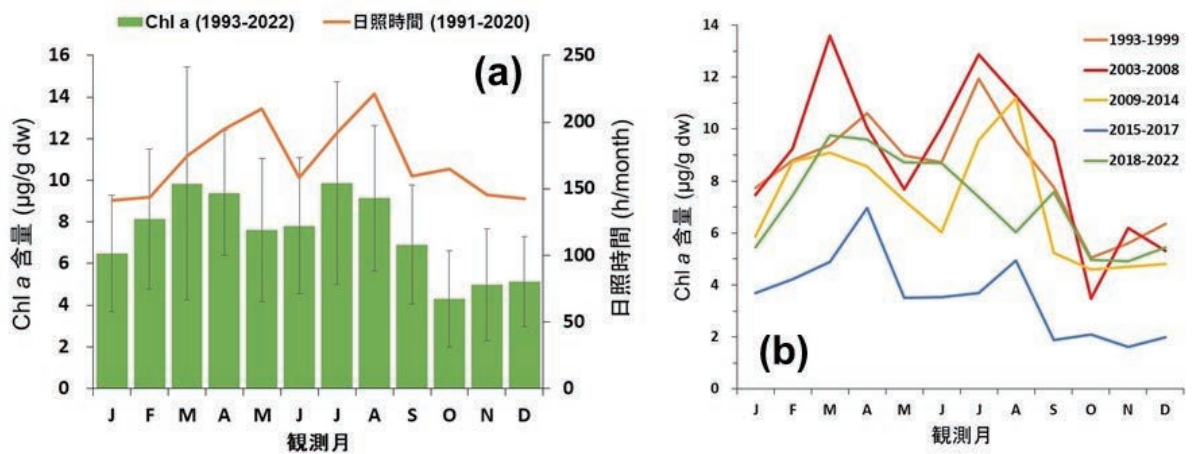


図4 観測月ごとの Chl *a* 含量，日照時間 (a) および期間ごとの Chl *a* 含量の季節変動 (b)

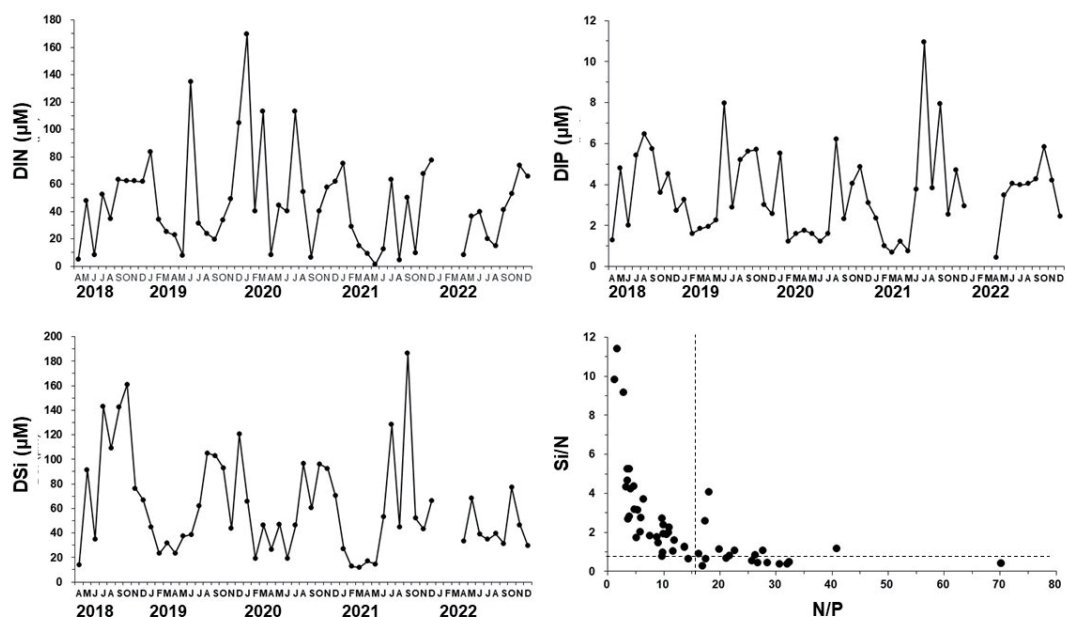


図5 新川河口干潟 (Stn. B) における干潮時の海水中の DIN 濃度, DIP 濃度, DSi 濃度およびその組成比 (モル濃度)

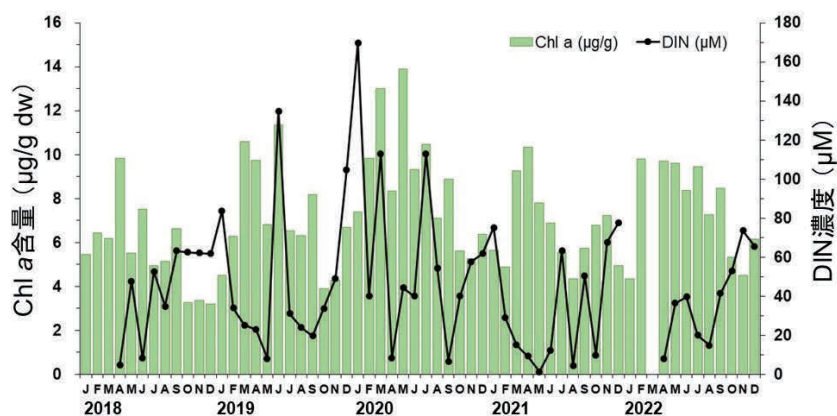


図6 2018年～2022年における Chl *a* 含量と DIN 濃度 (Stn. B)

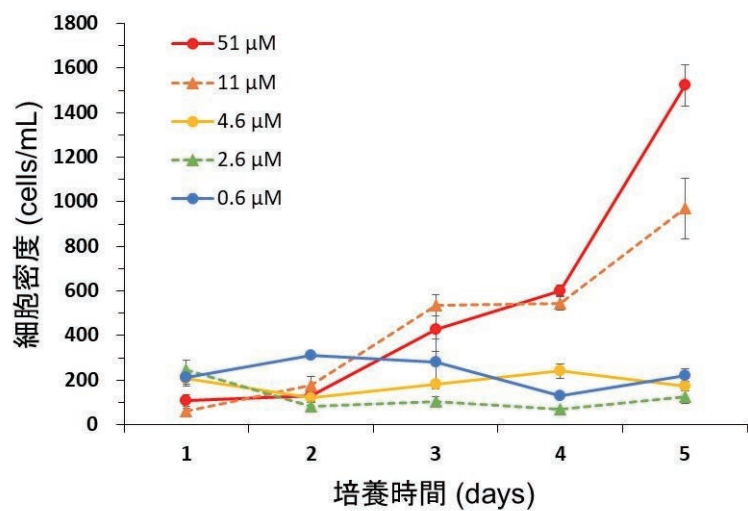


図7 連続培養による *Nitzschia traheaformis* の増殖過程 (20°C, 220 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (14 : 10 LD))

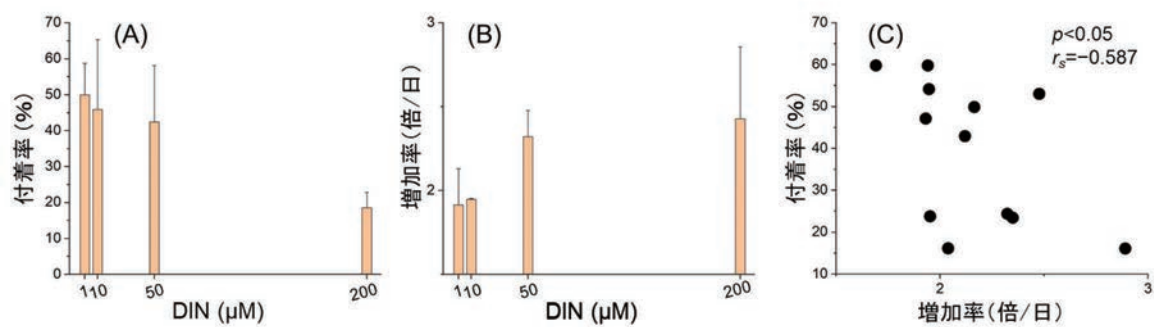


図8 各 DIN 濃度で半連続培養した *Navicula* sp.の付着率 (A), *Navicula* sp.の増加率 (B) および *Navicula* sp.の増加率と付着率の関係 (C)

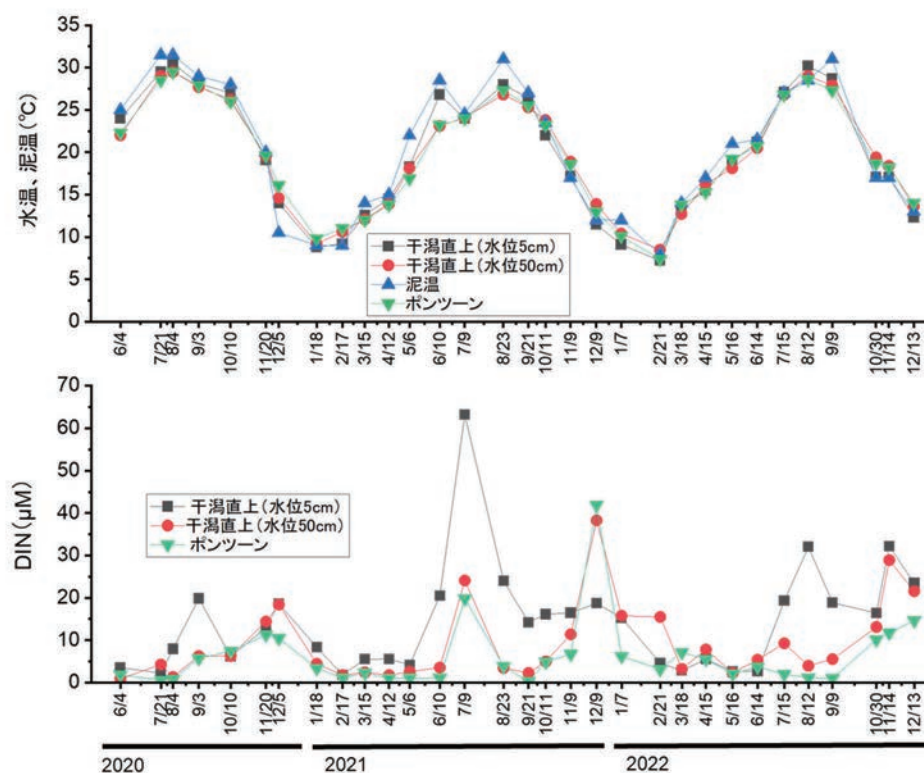


図9 2020年6月から2022年12月の丸石干潟域における水温、泥温およびDINの変動

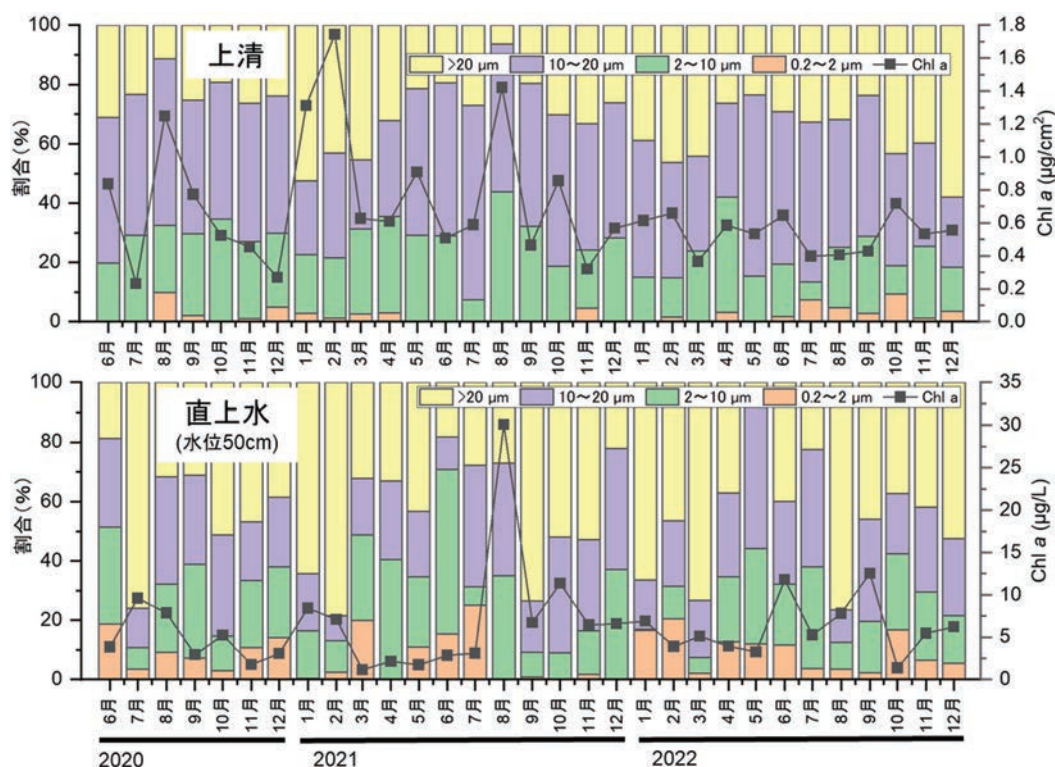


図 10 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における干潟堆積物から得られた上清および水位 50 cm 時の干潟直上水における微細藻類群集のサイズ組成と Chl a 濃度の変動

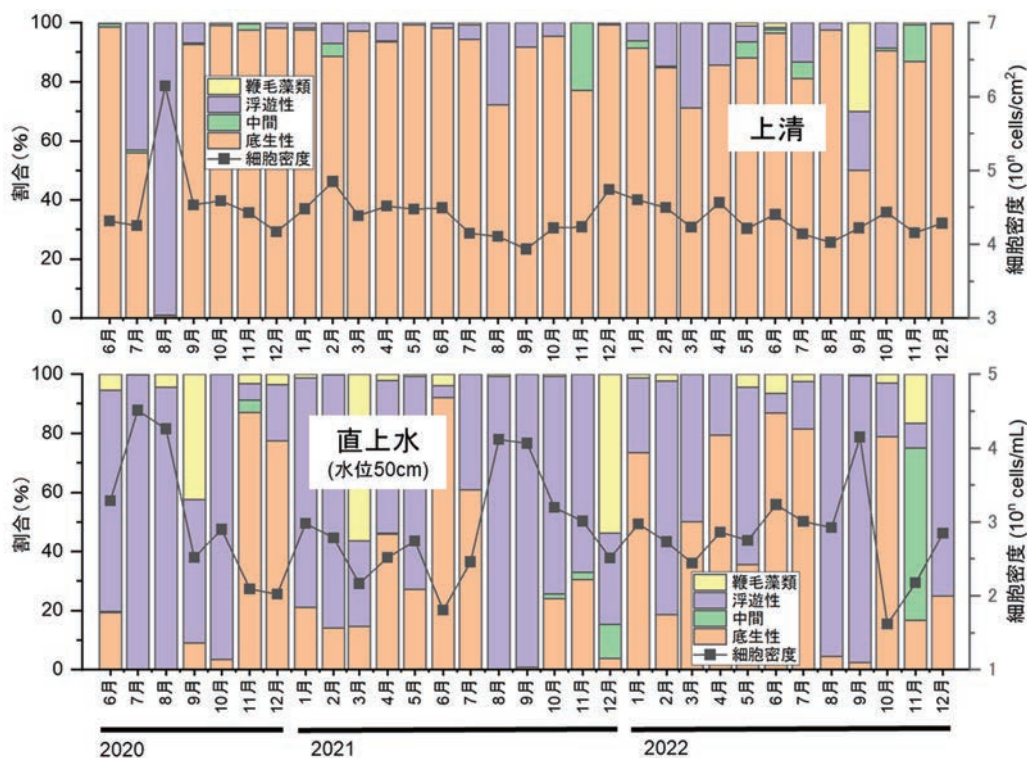


図 11 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における干潟堆積物から得られた上清および水位 50 cm 時の干潟直上水における微細藻類の生物組成と細胞密度の変動

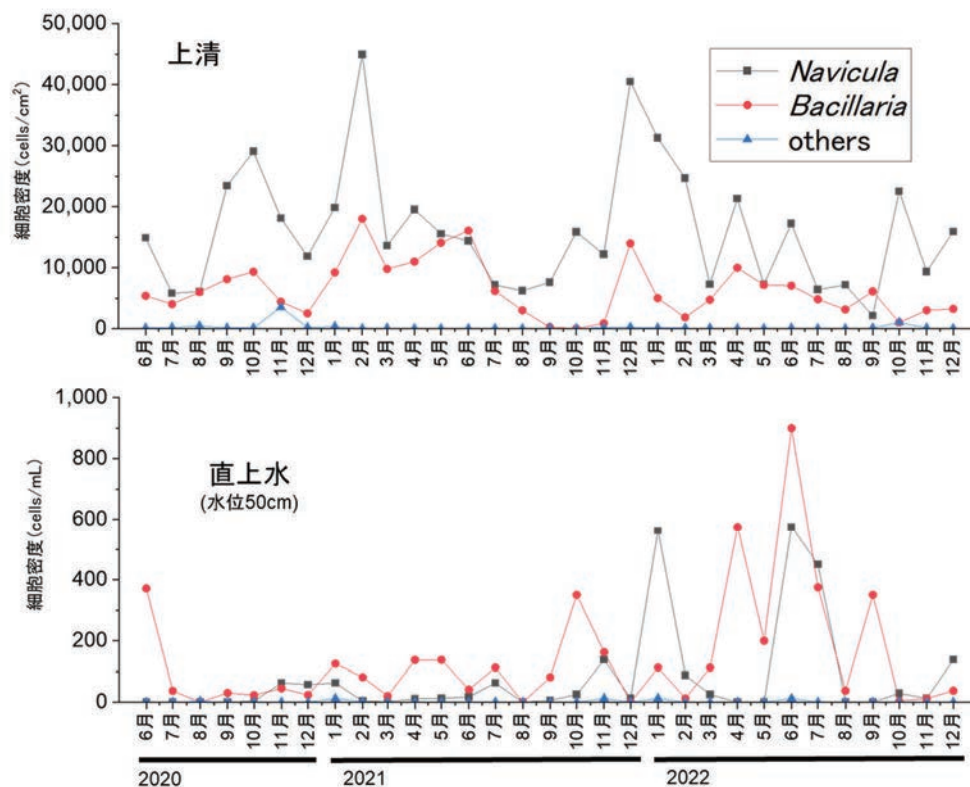


図 12 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における干潟堆積物から得られた上清および水位 50 cm 時の干潟直上水における底生性の微細藻類の細胞密度の変動

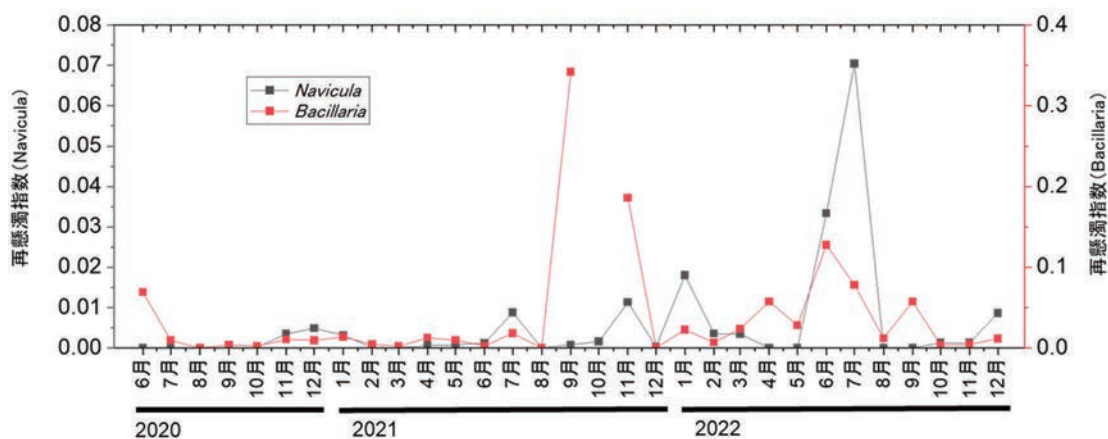


図 13 2020 年 6 月から 2022 年 12 月における *Navicula* 科および *Bacillaria* 科の再懸濁指数

表 1 各細胞密度および再懸濁指数と環境因子との関係

		水温	塩分	DIN	DIP	DSi	日射量
上清	全底生性微細藻類の細胞密度	-0.517	0.488				
	<i>Navicula</i> 科の細胞密度	-0.588	0.576		0.512		
直上水	<i>Navicula</i> 科の細胞密度	-0.434		0.563	0.541		-0.359
	<i>Navicula</i> 科の再懸濁指数			0.486			

数字の記載があるものが有意な相関が確認されたもの