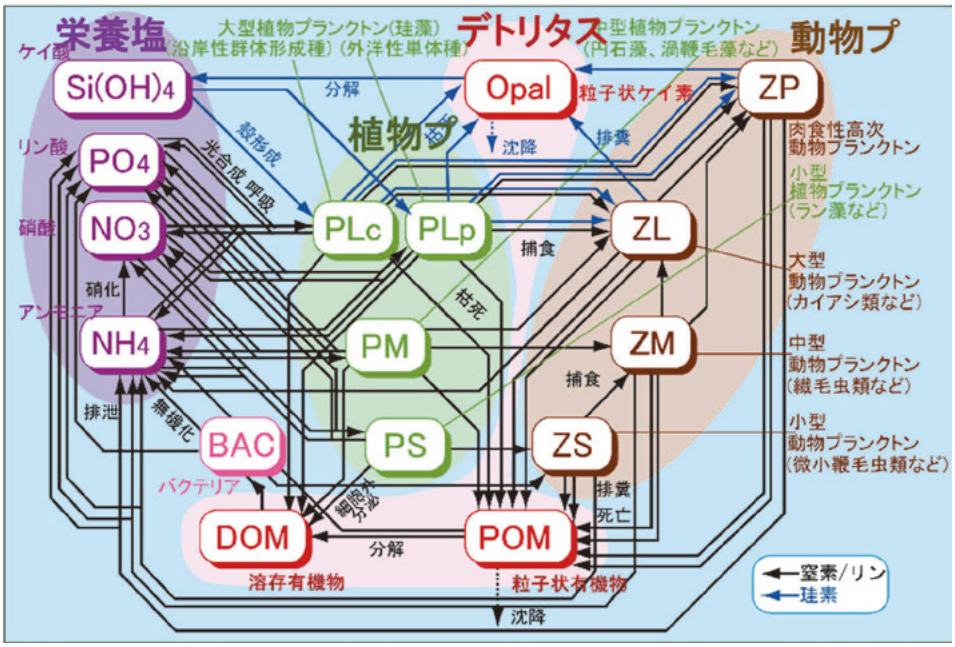

図 1　eNEMURO タイプの複雑な生態系モデルの模式図。状態変数は，紫の栄養塩 4 種，緑の植物プランクトン 4 種，茶色の動物プランクトン 4 種，赤のデトリタス 3 種があり，主な物質フローは底層との物質交換，光合成，捕食，分解などである。

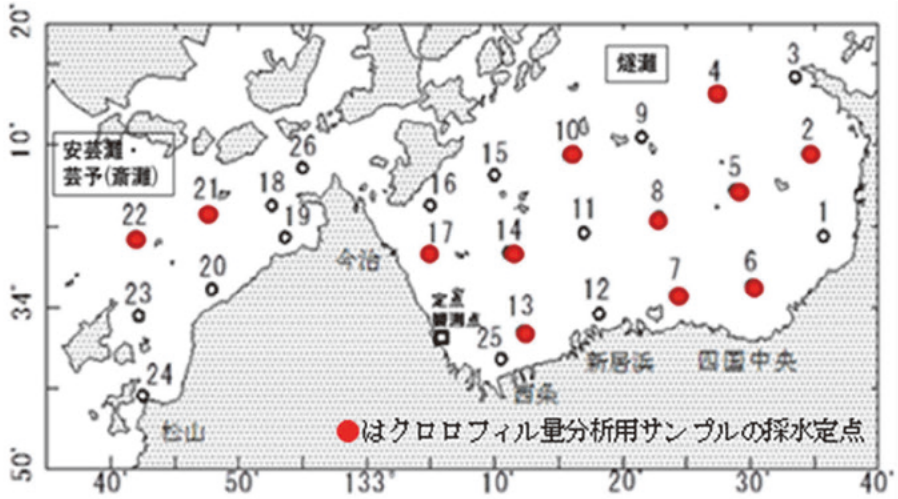

図 2　燧灘における浅海定線観測の観測点

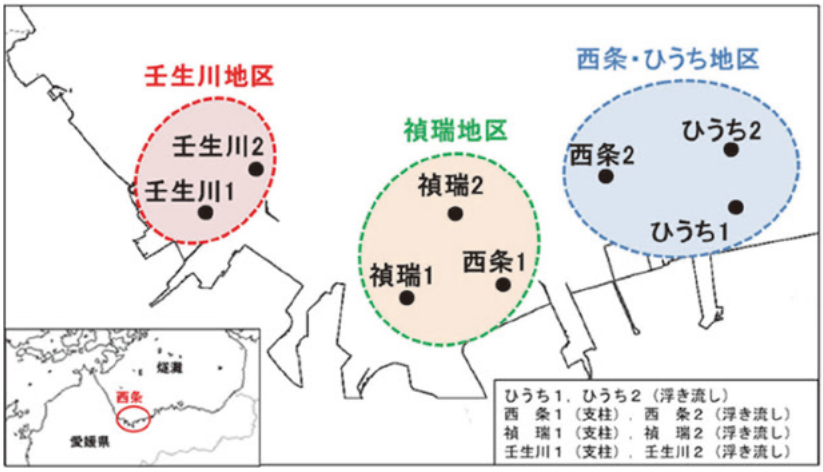

図 3 西条沿岸におけるノリ養殖漁場の観測点

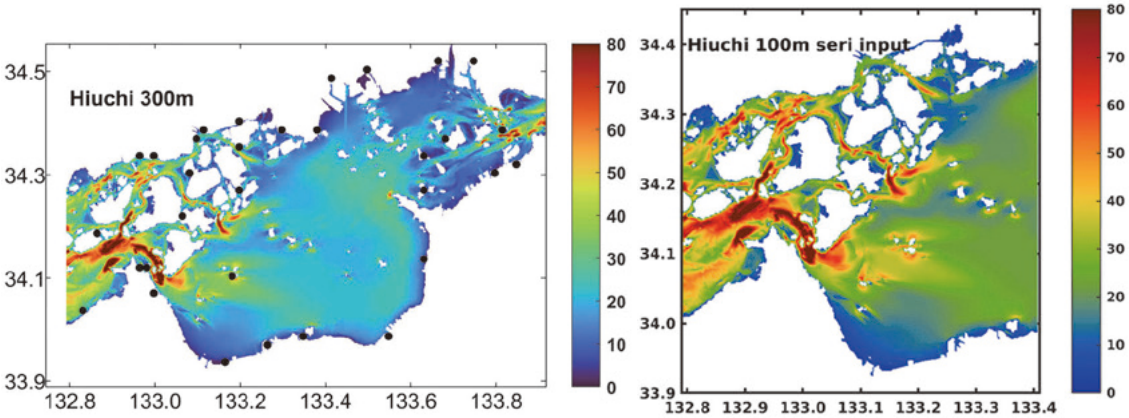

図 4　モデルの領域と水深分布（色，単位 m）。（左）300m 水平解像度のモデル，（右）100m 水平解像度のモデル。左の図面にある点は検潮所の位置である。

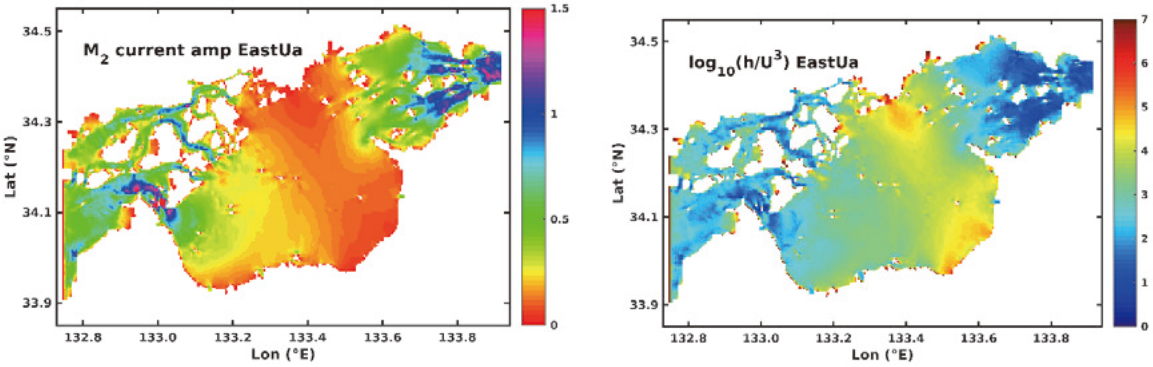

図 5　中解像度モデルから得られた（左）M_2 潮流の振幅（m/s），(右)　水深と潮流振幅 3 乗の比の対数値。

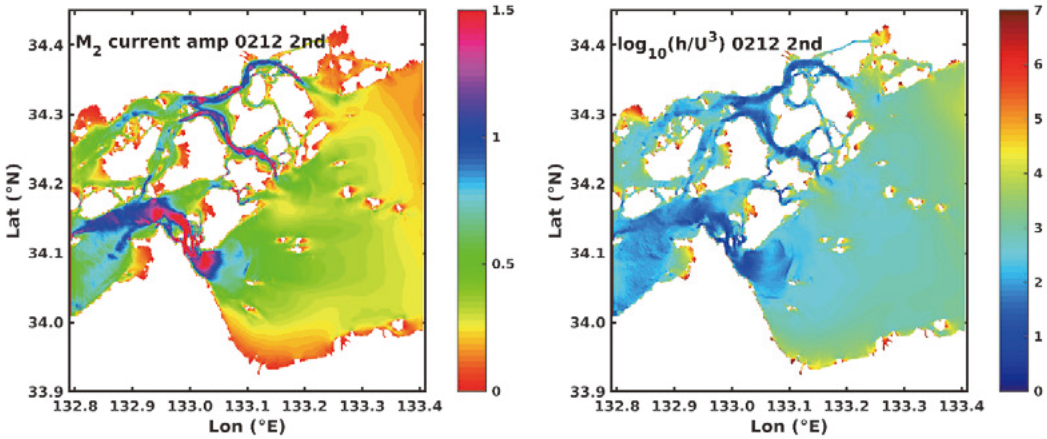

図 6　高解像度モデルから得られた（左）M_2 潮流の振幅（m/s），(右)　水深と潮流振幅 3 乗の比の対数値。

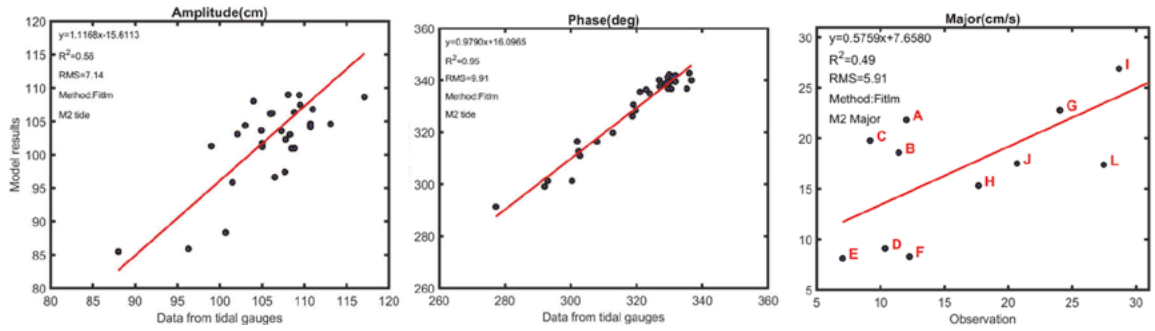

図 7　モデル領域内の験潮所における M_2 潮汐の振幅（左，cm），位相（中，度），燧灘で観測された M_2 潮流の振幅（右，cm/s）の比較。潮流の観測点は図 5 を参照すること。

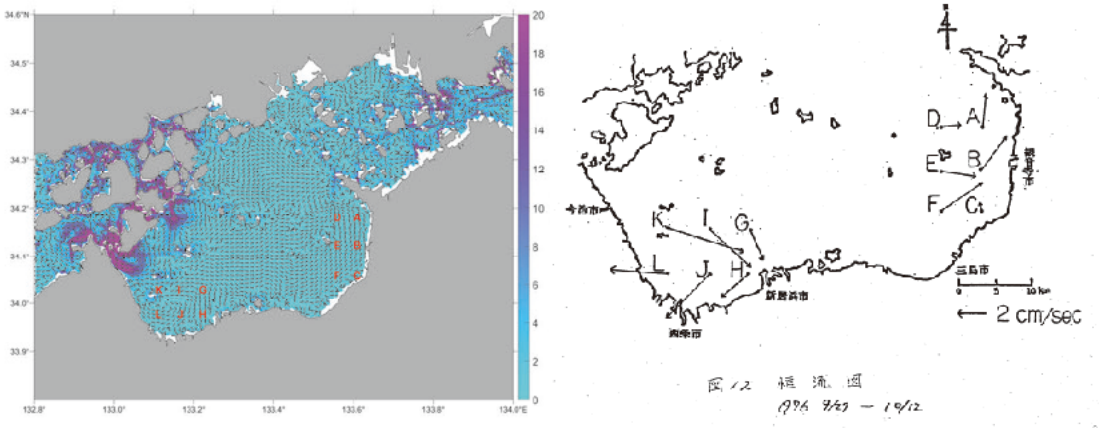

図 8（左）潮汐残差流（色が流速（cm/s），矢印は方向を示す）と（右）観測データ。

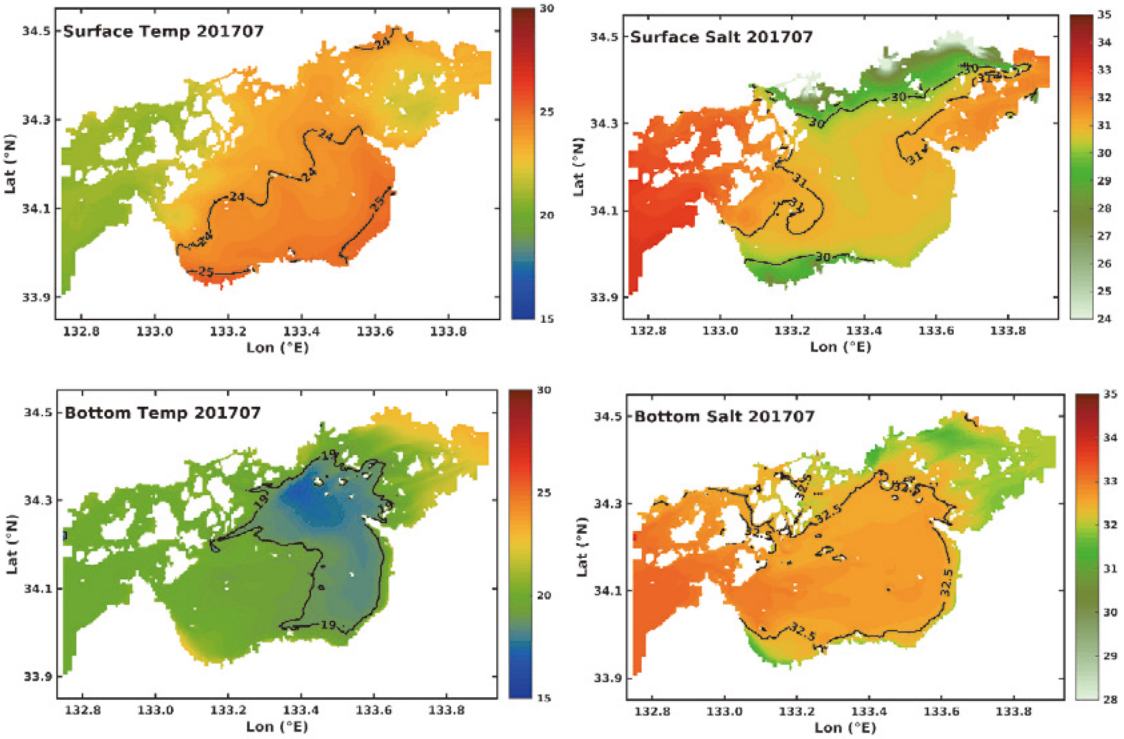

図 9　中解像度モデルの水温と塩分の 7 月の計算結果。（左上）表層水温，（右上）表層塩分，（左下）底層水温，（右下）底層塩分。

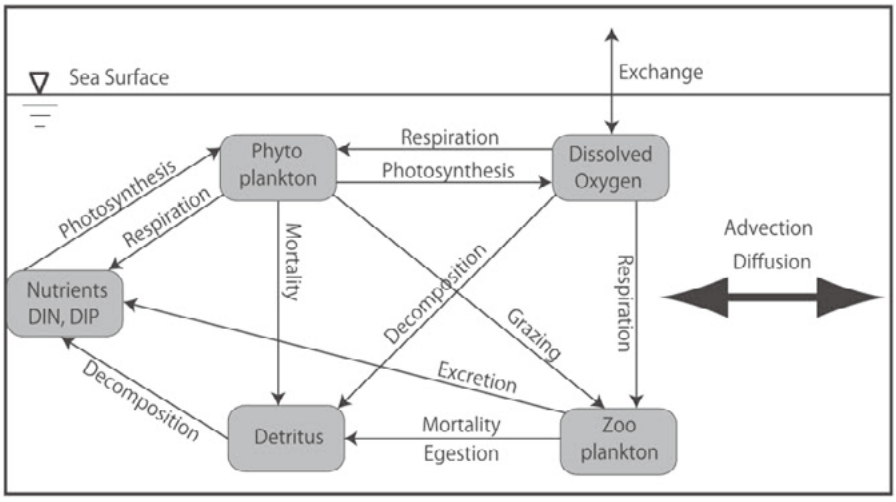

図 10　低次生態系モデルの模式図。状態変数は栄養塩（DIN, DIP），植物プランクトン，動物プランクトン，デトリタス，溶存酸素（DO）などがあり，主な物質フローは移流と拡散，海面における酸素フラックス，植物プランクトンの光合成，呼吸，死亡と被摂食，動物プランクトンの摂食，呼吸，分泌と排泄，デトリタスの分解などである。

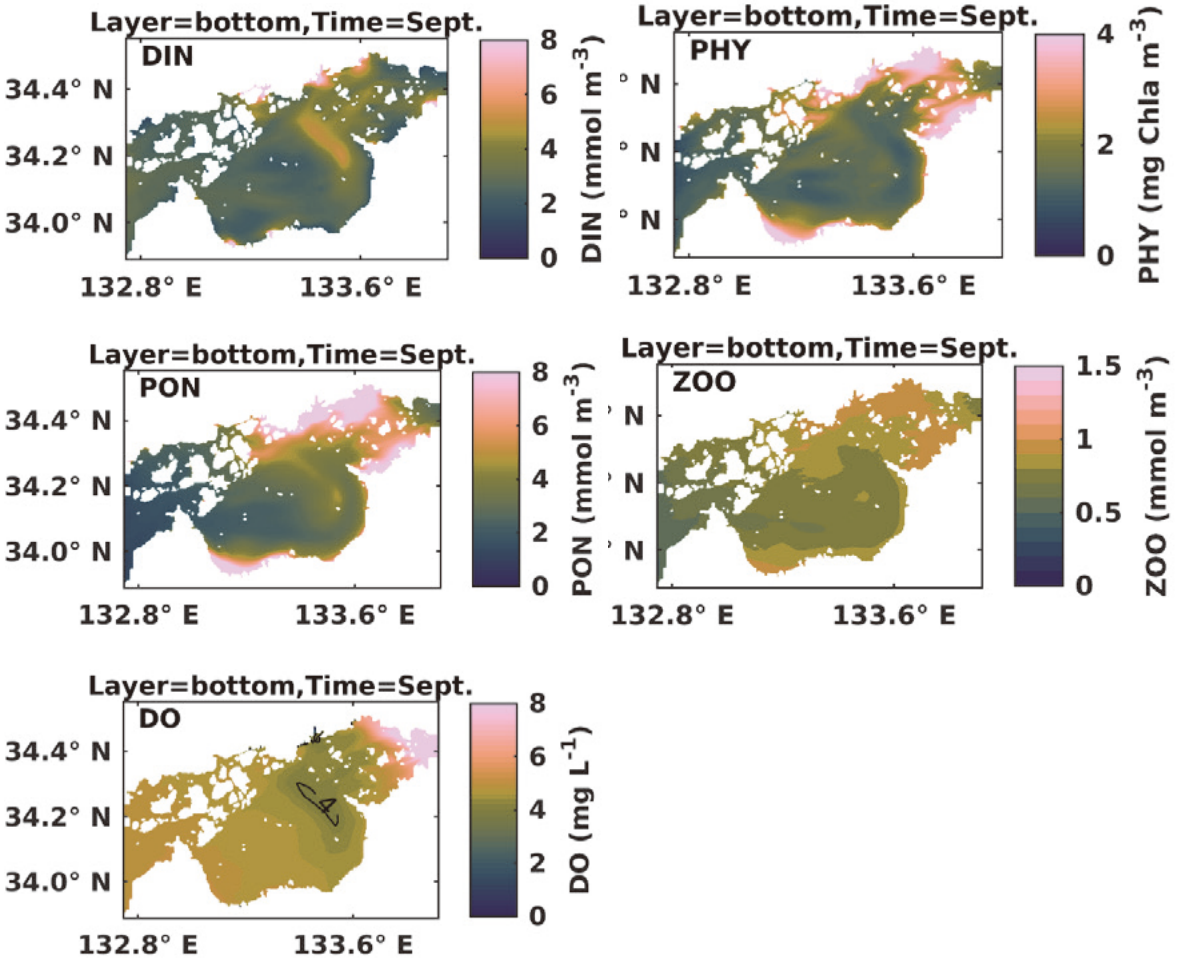

図 11　中解像度の低次生態系モデルで得られた底層における 9 月の栄養塩濃度，植物プランクトン，動物プランクトン，デトリタス，DO の水平分布。東部に存在する DO 濃度の低い分布を確認できる。

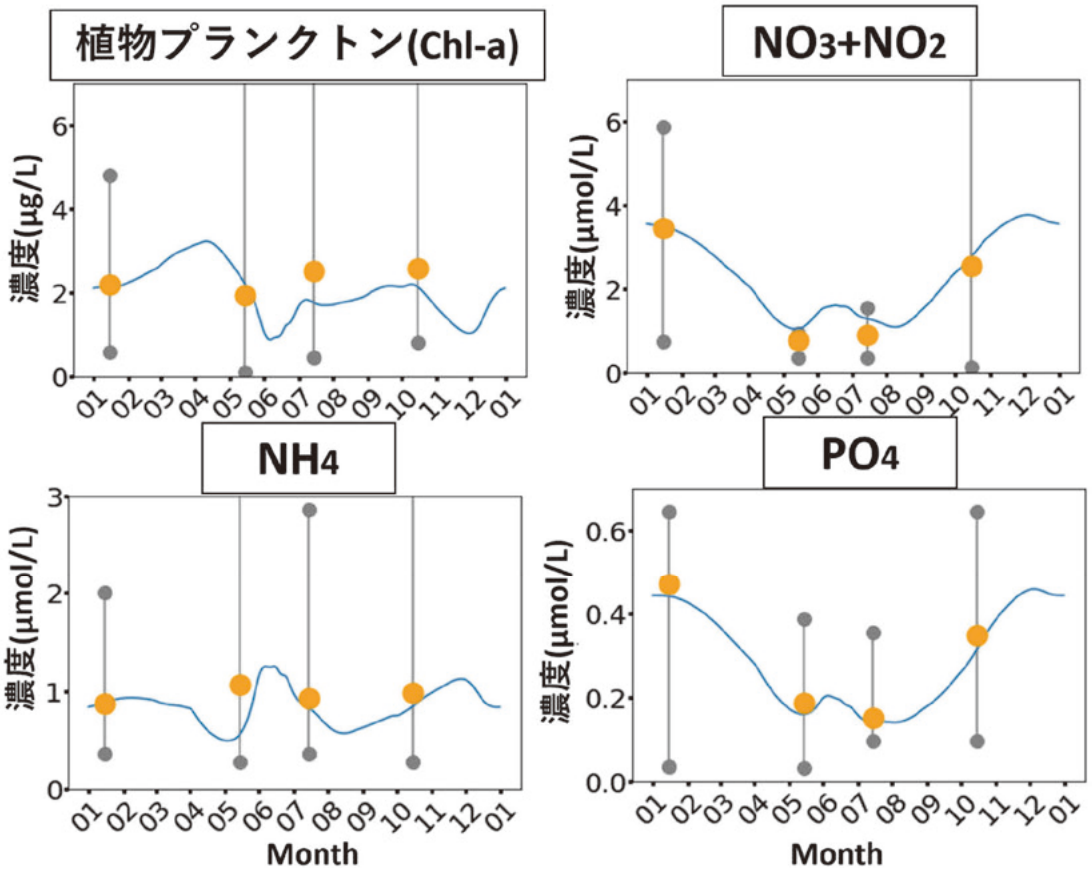

図 12　複雑な低次生態系モデルで得られた燧灘南西部における栄養塩濃度（NO3+NO2, NH4, PO4）および Chl.a 濃度濃度の季節変化（青線：モデル計算値，オレンジ丸：観測された季節別平年値，灰丸：観測値の最小値と最大値）

課題番号：Ⅱ－１）

課題名：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

水産研究・教育機構 水産技術研究所
高田宜武，西本篤史，丹羽健太郎
水産研究・教育機構 水産資源研究所
田所和明，奥村　裕
千葉県水産総合研究センター
石井光廣，速水啓介，林 俊裕，小山智行，渡邉晟也，尾崎真澄，田中美帆，西脇土歩
神奈川県水産技術センター
岡部　久，赤田英之

【背景・目的】

近年の東京湾の漁業生産は，沖合での漁船漁業，アサリなどの貝類漁業，ノリ養殖のいずれにおいても低下傾向にある。これは，底質の悪化，貧酸素水塊の発生，青潮などの湾内の海洋環境の変動による影響に加え，近年では秋冬季の水温上昇，海水の栄養塩濃度，黒潮系暖水などの影響も指摘されている。このような環境の変化は生態系のさまざまな段階に波及し，ノリの色落ち，アサリの餌料不足による肥満度の低下だけでなく，動物プランクトンおよびベントス群集が変化している可能性が高いと考えられる。これらの動物群は底生魚介類の餌となり，生態系内では一次生産と高次生産をつなぐ低次生産者としての役割を果たしている。これらの動物プランクトンおよび底生魚類を含むベントスの群集組成や密度の変化を知ることによって，東京湾の環境変化が漁業生産に与える影響をより深く理解することができると考えられる。

そこで本課題では，海洋環境の変動が東京湾における低次生態系へ及ぼす影響を明らかにするために，メソ動物プランクトン，埋在性マクロベントスおよび底生魚類に焦点を当て，これらの群集構造の季節変動および経年変動を調べ，環境変動の影響の把握を目的とする。今年度は，昨年度と同様に環境要因と生物採集の調査により現状の把握を行うとともに，以前に実施された調査の標本およびデータについて再解析を進め，現状と比較することによって群集構造の変化を把握するとともに，環境の影響についても検討を進めた。

【方法】

(1) 動物プランクトン群集

神奈川県と千葉県の浅海・沿岸定線のうちそれぞれ 4 点，計 8 点（図 1）を調査定点として選び，ノルパックネットを用いて海底直上から海面までの鉛直曳きで動物プランクトンを採集した。ネットの目合いはこれまで使用してきた 335μmm に加え，今年度からは小型の動物プランクトンを採集する目的で 100μmm のものも使用した。採集時期は千葉県では通年，神奈川県では 5 月～11 月である。今年度，神奈川県については 2017 年，2020 年～23 年 7 月，千葉県については 2022 年 5 月～2023 年 9 月のサンプルについて種レベルでの個体数の計数

を完了した。分析が完了したデータのうち神奈川県については 2017 年と 2020 年，千葉県については 2022 年 5 月～2023 年 9 月の期間の 335μmm 目合いのデータを用いて，クラスター解析によって群集解析を行った。解析には種レベルのカイアシ類，枝角類，ヤムシ類の個体数を用いた。個体数は対数変換して用いた。用いた類似度指数は Bray-Curtis，クラスタリングは Ward 法である。

(2) ベントス群集

国総研が 2002 年から 2003 年に実施した東京湾広域環境調査の結果を入手し（国土技術政策総合研究所　ウェブページ)，データ項目などの検討を行い，現状との比較に利用可能なデータを抽出した。これらの操作で得られたデータを 20 年前の状況を示す過去データとし，本事業で千葉県が実施した下記の野外調査で得られたデータを現状データとして比較解析を行った。

野外調査では，千葉県水産総合研究センター東京湾漁業研究所の東京湾調査・指導船「ふさなみ」（以下ふさなみ）を活用し，東京湾内での環境調査および生物相調査を行った。調査は湾内定点 12 ヶ所において，季節変化を考慮して 2 か月ごとに定期的に行った（図 2)。環境調査では，水質センサーを用いて深度，水温，塩分，pH，DO を計測し，表層採水により持ち帰った資料から栄養塩およびクロロフィル量を求めた。底質については，強熱減量および粒度組成を求めた。生物調査は，スミスマッキンタイヤ型採泥器を用いて底質を 0.1m^2 採泥し，1mm のふるいの残渣を 10%中性緩衝ホルマリンで固定したのち，外注分析によりベントス類の同定・個体数の計数および湿重量の群集データを得た。

調査で得られたデータは，国総研の既往調査地点（図 2）のデータと合わせて，個体数および湿重量のデータによる生物群集解析を行なった。今回の調査は 12 地点で隔月に行なっており，2022 年 5 月～2023 年 9 月に実施した 12 地点 9 回分の調査データを解析に用いた。比較のために前回の調査地点から，今回の調査地点と地理的に近く水深がほぼ同等の 12 地点を抽出した。さらに，湾内を 4 地点ずつの 3 区域（北部，中部，南部）に分けて湾内の空間的な違いを比較した。また，1 年を 4 季節（冬：1-3 月，春：4-6 月，夏 7-9 月，秋：10-12 月）に分けて季節的な違いを比較した。

単変量による比較では，総個体数，総重量（湿重 g)，種数，シンプソン多様度（1/D）について，期間，区域，および季節のそれぞれを固定効果とした 3 元配置分散分析を行った。種数，シンプソン多様度は個体数を元に求めた指数を使用した。この時，あらかじめ群間の分散のばらつきを抑えるため，総個体数と総重量ではデータを対数変換（log(x+1)および log(x+0.01))に，種数とシンプソン多様度では平方根変換(sqrt(x))にて変換し，Levene-test にて確認した。

多変量による生物群集解析は日本海区水産研究所（2018）のプロトコルに従ったが，小サンプルによる偏りを減らすため個体数ではサンプル当たりの総個体数が 2 個体，湿重量では総重量が 0.001g より大きいサンプルのみを用いた。各々のデータは，値の大きい分類群の影響を軽減するために対数変換（log(x+1)）したのち，サンプル間の Bray-Curtis 類似度を求め，nMDS による二次元配置をおこなうとともに，PERMANOVA によって期間，区域，および季節による群集組成への影響を検定した。群集組成の違いを具体的に示すため，調査期間（前回データと今回データ）による群集組成の指標種を IndVal 法によって求めた。区域による組

成の違いが大きいため，解析は3区域別々に，個体数データを用いて行った。

さらに，環境と群集組成との関係を見るために，3地域ごとにdbRDAをおこなった。応答変数として先に用いた個体数ベースのサンプル間Bray-Curtis類似度，説明変数としてベントス群集を採集した同時期同地点で得られた，表層水のChl-*a*濃度（CHAs，μg/L），底層水のpH(PHb)，溶存酸素量(DOb，mg)，底質の中央粒径値(MGS，mm)を用いた。だたし，CHAsとMGSは分布の偏りが大きかったため，平方根変換した値を用いた。これら4変数の最大のVIF（分散拡大要因）の値は3.04であり，多重共線性の問題は少ないと判断した。

(3) マウンド効果：底生魚類群集

東京湾東岸の棚状もしくはマウンド状の浅海域で毎月桁網を曳網し，有用魚介類の出現状況を把握した。また，同海域で2月に1度水質，底質，底生生物調査を行い，海底地形及び水深の異なる地点における溶存酸素量，中央粒径，強熱減量，底生生物等を把握した。

東京湾の東岸の富栄養化の影響が強い北側から「養老川河口」，人工岸壁前面に広がる棚状の浅海域である「五井」，岸壁から離れたところに出来たマウンド状の浅場「北袖マウンド」の貧酸素水塊の波及がみられる海域を調査海域に設定した。調査点は,「養老川河口」,「五井」は水深約5 m，10 m及び15 mの3地点とした（五井10 mは今回追加)。「北袖マウンド」の調査点は，2018年から調査を実施しているマウンド上の水深約10 m，マウンド下の水深約15 mに加え，マウンドから岸側に向かってマウンド同水深となる北袖マウンド岸水深約10 mを設定した。合計9地点にて調査を実施した（図3，図4，表1)。

環境調査（水質，底質および底生生物）は調査船ふさなみを用いて2か月に1回の頻度で行い，2023年5月29日，7月20日，9月14日，11月15日及び2024年1月29日の計5回行った。水質観測は，多項目水質計（Model 6600またはProDSS，ザイレムジャパン）を海面から海底直上約0.5 mまで0.1 m/sの速度で降下し，水深，水温，塩分，溶存酸素量（以下DO)，酸化還元電位（Eh，以下ORP）等を鉛直観測した。また，採泥はスミス・マッキンタイヤ式採泥器（採泥面積0.1 m2，離合社）を用いて，各調査点で2回行い，底質分析と底生生物分析試料を採取した。底泥のORP（Eh）はポータブルORP計（HM-40P，東亜ディーケーケー）を用いて，船上で毎回測定した。底質は毎回強熱減量と粒度分析を測定した。生生物試料は，目合1 mmのふるいで濾し，残渣を底生生物（マクロベントス）の対象とした。水産有用種は個体ごとの大きさと湿重量を測定し，その他の生物は種もしくは分類群ごとの個体数と合計湿重量を測定した。

桁網調査は，2023年4月25日，5月30日，7月26日，9月15日，10月24日，11月9日，12月14日及び2024年1月25日に計8回行った（表2)。4月25日はソリネットを曳網し，養老から五井まで調査を実施した。調査は「ふさなみ」で行った。各調査点で桁網（図5，網口幅1.2 m，高さ0.4 m，長さ8 m，目合16節）を船速約3ノットで30〜60秒曳網した。曳網距離は，曳網開始時と終了時のGPS位置情報から算出した。採集物から船上で試料生物を全数拾い出し，採集地点ごとに氷蔵した状態で実験室に持ち帰り凍結した。試料とする生物は，魚類，甲殻類，貝類，イカ・タコ類，ナマコ類とした。試料は解凍後に可能な限り種まで同定し，種もしくは分類群ごとに個体数を計数した。加えて，有用魚介類とハタタテヌメリは，破損個体を除き，個体ごとに大きさ（魚類，イカ・タコ類，ナマコ類は全長，甲殻類は全長，体長または全甲幅，貝類は殻長または殻高）と湿重量を測定した。

【結果】

(1) 動物プランクトン群集

分析期間が千葉県と神奈川県では異なることから，今回はそれぞれの県を分けて解析を行った。クラスター解析によって，いずれの県も 3 つのグループに区分された。それぞれのグループの出現は季節的および地理的に変動した(図 6)。千葉県の湾奥(St. 54)～湾中央(St. BB)では，明確な季節変動を示し，2022 年の 5 月にグループ 1 が出現した後，7 月にグループ 2 へ移行し，その後 11 月～3 月にはグループ 1 が出現し，5 月以降にグループ 2 へ移行し 9 月にグループ 3 が出現した。一方で湾口(St. Futtsu)では 2022 年 7 月～9 月にグループ 3 が出現したが，それ以外は概ねそれ以外の定点と同様の変動を示した。

神奈川県では年によって変動パターンが異なった。2017 年は，湾奥西(St. 12)と湾中央西（St. 7）で 5 月にグループ 1 が出現し，それ以降は概ねグループ 2 へ移行した。湾口部(2d)では 8 月前半・後半にグループ 3 が出現した。湾外（27d）では 5 月はグループ 1 が出現したが，それ以降は 7 月後半にグループ 2 が出現した以外はグループ 3 が出現した。2020 年何れの観測点も同様の変動を示し，5 月～6 月の間グループ 1 月が出現した後，7 月以降に概ねグループ 3 へ移行した。

各グループの上位種についてみると。個体数は両県ともにグループ 1 で最も多く，グループ 2，3 がそれに続いた（表 3)。最も多く出現した種は両県ともにグループ 1 では *Acartia (Acartiura) omorii* で，*Calanus sinicus* も多く出現した。*Paracalanus orientalis*（これまで 広義の *P. parvus* とよばれていたもの)も千葉のグループ 1 と神奈川のグループ 3 で高い個体数を示したが，全てのグループで上位 10 種に含まれていた。以上のカイアシ類はイワシ類等の水産資源の重要な餌料である。またミジンコの仲間である枝角類も多く出現した。

次に海洋環境と各グループの出現状況について検討した。今回は現時点で利用可能な表面の水温と塩分と各グループの関係を検討した（図 7)。グループ 1 は最も低い温度帯で出現し，両県ともに 23℃以下でに出現した。グループ 2 と 3 は 18℃～28℃の広い範囲で出現したが，両者の出現に明確な傾向は見いだせなかった。塩分に関しては各グループの出現を特徴づける傾向は見いだせなかった。グループ 2 と 3 はいずれもグループ 1 よりも高い水温帯で出現したが，グループ 3 は湾口，湾外で多く出現する傾向が見られたため，黒潮に由来する群集と推測された。

今後はさらに分析を進め群集の経年的な変動および海洋環境との関係について解析を進める予定である。

(2) ベントス群集

国総研の東京湾広域環境調査（以後，前回と呼ぶ）では，東京湾内の 20 地点において，2002 年 7 月から 2003 年 7 月まで毎月 1 回計 13 回，環境調査と生物群集調査を実施していた。20 年後の 2022 年に開始した本調査（以後，今回と呼ぶ）の結果と比較するにあたり，種名もしくは和名の変更などの分類学上の進展のある分類群があり，解析上で必要な分類群の統廃合を行なった（表 4)。

今回の調査で，168 分類群からなるベントス群集が確認され，そのうち 125 分類群は 20 年前の前回の調査（20 地点分）でも確認されていた分類群である。168 分類群の内訳は，軟体

動物が 27，多毛類が 74，節足動物が 49，その他が 18 であった。

前回の 12 地点 156 サンプルと今回の 12 地点 108 サンプルの 3 元配置分散分析の結果では，総個体数と種数について，期間と区域が有意(P<0.05)となり（表 5），交互作用を含めて他の要因は有意とならなかった。総重量は区域と季節のみが有意，シンプソン多様度では期間，区域，季節の主効果のみ有意となった。図を見ると（図 8），いずれの数値も北部から南部に向かって上昇，前回より今回が減少，冬春より夏秋で減少，という大きな傾向がある。しかし，総個体数では季節の変化が顕著ではなく，総重量では期間の違いが顕著でない。一方，夏期の北部中部での無生物サンプルの増加が顕著であり，対応して湿重量の減少が特徴的であった。これは，北部中部で夏期に大型の生物が死滅する傾向は前回も今回も変わらないが，夏秋期の期間による違いが総重量よりも総個体数で顕著なのは，今回は小型の生物も死滅していたことを示唆している。

個体数による群集解析では，総個体数が 2 個体より大きい 193 サンプルについて，263 分類群による群集組成の類似度を求めた。nMDS による二次元配置では（図 9），ストレス値が 0.225 とやや大きいため，単純に配置図から解釈を求めず，以下の PERMANOVA による仮説検定結果の解釈に用いた。期間，区域，季節を要因とする 3 元の PERMANOVA では，各主要因と期間 x 区域の交互作用が有意となった（表 6）。二次元配置図をみると，両期間とも右上から左下にかけて順に，南部，中部，北部の地点が部分的に重なりながら配置されており，特に南部では，両期間の重なりが少なく群集組成の違いが際立っている。一方，全体的に季節による違いは配置図では明瞭でない。

湿重量による群集解析では，総湿重量が 0.01g より大きい 200 サンプルについて，268 分類群による解析を行った。期間，区域，季節を要因とする 3 元の PERMANOVA では，個体数ベースの解析と同様に各主要因と期間 x 区域の交互作用が有意となった（表 6）。nMDS による二次元配置では，ストレス値が 0.249 と個体数ベースの解析より大きくなり，二次元表示に向かない結果となった。

群集組成の違いをより詳細に見るために，個体数データについて区域に分けて比較したところ，前回と今回のそれぞれの群集を特徴付ける指標種を求めることができた（表 7）。このうち前回の指標種であるイトエラスピオ（*Prionospio pulchra*），クシカギゴカイ（*Sigambra tentaculata*），スベスベハネエラスピオ（*Paraprionospio coora*），クシノハクモヒトデ（*Ophiura kinbergi*），ラスバンマメガニ（*Pinnixa rathbuni*）などは，今回の調査でも出現しているものの採集個体数が大きく減少した種類である。

群集組成と環境要因との関係を 4 変数による dbRDA で調べた結果（図 10），3 地域とも有意な回帰が得られたが，固有値が 1 より大きい軸はいずれも 1 軸のみであった。有意(P < 0.05, permutation = 999)な変数は北部では中央粒径値(MGS)のみ，中部と南部では表層クロロフィル濃度(CHAs)以外の 3 変数が有意となった。この解析によって dbRDA は可能だが，MDS の 2 次元配置を的確に表現するためには今回用いた環境変数では情報不足であることを示唆している。今回調査による環境データの揃った地点数が少ないため，詳細な比較にはデータ増やす必要がある。

東京湾は，長期的に栄養塩濃度の低下と秋冬期の水温上昇が継続して観測されており，ノリの色落ちなど漁業生産の低下との関連も指摘されている（石井 2019）。しかし，近年でも赤潮および貧酸素水塊の発生があり，ベントス群集の衰退が植物プランクトンの生産を消費

できなくなり，赤潮などの頻発を招くという「負のスパイラル」状態が指摘されている（片野ほか 2019)。夏期にほぼ無生物となる地点が北部中部に多く，20 年前のベントス群集と比較して密度の低下と群集組成の変化が認められた。また，湾内には強い環境傾度があるため地域に分割して解析することが有効であること，底質の粒度組成がベントス群集と関連が深いことが確認された。今後さらに環境要因との関連を精査し，環境要因の指標となる種の抽出などを行う予定である。

(3) マウンド効果：底生魚類群集

調査結果については，底層 DO（mL/L)，底泥の中央粒径（μm）と強熱減量（%)，桁網採集生物の種数の推移を項目ごとに報告する。2023 年の桁網採集生物は別表に示した。

水質（底層 DO）について，各調査点別月変化を図 11 に示した。養老川河口では，3 地点とも 9 月に低下した。過去と比べて，夏季に大きく低下した。五井では，5 m では，夏季でも大きな減少はみられなかった。15 m では，過去と比べても概ね変化はなかった。北袖では，マウンド上では 9 月から低下し，マウンド下では 7，9 月に低下した。過去と比べても概ね変化はなかった。

底質の中央粒径は 2023 年 5 月 29 日，強熱減量は 2023 年 5〜11 月までの 4 か月の平均を用いた（図 12)。各調査地点における水深と底質の中央粒径及び強熱減量（IL）の関係をみると，中央粒径は負の相関，強熱減量は正の相関がみられた。その中で，中央粒径は北袖マウンド上（271 μm）と五井 10 m（286 μm）で高く，強熱減量は北袖マウンド上（2.5%）と五井 10 m（1.9%）で低い傾向であった。一方，北袖マウンド岸（中央粒径 75 μm，強熱減量 6.7%）は同水深と傾向が一致した。これは各地点の傾斜の影響が大きいことが考えられる。

桁網採集生物の種数及び密度の推移について（図 13，14)，養老川河口では，2023〜2024 年の種数及び密度は 5 m 及び 10 m で 9 月以降に高い傾向であった。9 月以降ホンビノスガイが高密度で入網したことが要因であると考えられる。7 月には 15 m で無生物状態になった。五井では，2023〜2024 年の 5 m における種数及び密度は 2022 年以前より低かったが，無生物となることはなかった。15 m では貧酸素の影響が強い 7 月に無生物状態となり，9 月も種数及び密度が 5m より低かった。北袖マウンドでは，2023〜2024 年のマウンド上における種数及び密度は 7 月に低下し，その後増加した。マウンド下では，7 月に種数及び密度が低下し，11 月まで低い状況が継続した。

【参考文献】

石井光廣．東京湾における水質の長期変動と水産生物への影響．海洋と生物，41，129-135，2019.

Itoh H. and Nishida S. Spatiotemporal distribution of planktonic copepod communities in Tokyo Bay where *Oithona davisae* Ferrari and *Orsi dominated* in mid-1980s, J. Nat. Hist., http://dx.doi.org/10.1080/00222933.2015.1022617, 2015.

片野俊也，梅澤有，野村英明，風呂田利夫．特集号発刊に寄せて：東京湾の過去・現在・未来，海洋と生物，41，115-117，2019.

国土技術政策総合研究所．2002-2003 年東京湾広域環境調査．

https://www.ysk.nilim.go.jp/kankyo/tokyo/data2002/, (accessed on Dec. 27, 2022)
日本海区水産研究所. Rによる群集組成の解析. http://jsnfri.fra.affrc.go.jp/gunshu/, 2018. (accessed on Dec. 27, 2022)
Yamazi I. Plankton investigation in inlet waters along the coast of Japan-XVI. The plankton of Tokyo Bay in relation to the water movement. Publ Seto Mar Biol Lab., 4, 285-309, 1955.

表 1　マウンド効果：桁網調査点位置と水深

調査点名		緯度	経度	水深m
養老河口	5m	N35° 32.81′	E140° 03.89′	5.8
	10m	N35° 32.88′	E140° 03.67′	10.1
	15m	N35° 32.97′	E140° 02.69′	12.3
五井	5m	N35° 31.72′	E140° 02.77′	5.7
	10m	N35° 31.75′	E140° 02.85′	10.3
	15m	N35° 31.81′	E140° 02.56′	15.2
北袖マウンド	上	N35° 29.15′	E139° 59.23′	10.8
	下	N35° 29.25′	E139° 59.29′	13.2
	岸	N35° 28.78′	E140° 02.85′	10.3

表 2　マウンド効果：桁網調査の実施状況

調査日	養老川河口			五井		北袖マウンド	
	5m	10m	15m	5m	15m	上	下
2023/4/25	○	○	○	○	○	-	-
2023/5/30	○	○	○	○	○	○	○
2023/7/26	○	○	○	○	○	○	○
2023/9/15	○	○	○	○	○	○	○
2023/10/24	○	○	○	○	○	○	○
2023/11/9	○	○	○	-	○	○	○
2023/12/14	○	○	○	○	○	○	○
2024/1/25	○	○	○	○	○	○	○

○：実施、 - ：未実施

※4 月はソリネットを曳網

表 3　動物プランクトン：各県，各グループの上位 10 種の平均個体数（N/haul）。赤字は主要なカイアシ類，青字は枝角類を示す。

千葉県

グループ1		グループ2		グループ3	
Acartia (Acartiura) omorii	1856	Acartia (Acartiura) omorii	368	Aidanosagitta crassa	360
Evadne nordmanni	920	Aidanosagitta crassa	242	Temora turbinata	106
Paracalanus orientalis	563	Pseudevadne tergestina	117	Paracalanus orientalis	81
Pleopis polyphemoides	247	Oithona davisae	35	Acartia (Acartiura) omorii	64
Calanus sinicus	215	Pseudodiaptomus marinus	25	Acartia (Odontacartia) erythraea erythrae	49
Centropages abdominalis	106	Paracalanus orientalis	6	Flaccisagitta enflata	41
Ditrichocorycaeus affinis	100	Penilia avirostris	6	Paracalanus aculeatus aculeatus	18
Aidanosagitta crassa	82	Acartia (Acanthacartia) sinjiensis	5	Ditrichocorycaeus affinis	11
Oithona davisae	19	Ditrichocorycaeus affinis	3	Acartia (Acanthacartia) sinjiensis	10
Oithona longispina	3	Labidocera rotunda	2	Oithona davisae	8
その他	13	その他	3	その他	71
Total N/haul	4124	Total N/haul	813	Total N/haul	820

神奈川県

グループ1		グループ2		グループ3	
1 Acartia (Acartiura) omorii	22408	Penilia avirostris	7872	Paracalanus orientalis	1505
2 Pseudevadne tergestina	3464	Acartia (Acartiura) omorii	1146	Penilia avirostris	1238
3 Calanus sinicus	1894	Pseudevadne tergestina	873	Pseudevadne tergestina	760
4 Paracalanus orientalis	876	Aidanosagitta crassa	562	Aidanosagitta crassa	370
5 Evadne nordmanni	420	Pseudodiaptomus marinus	488	Acartia (Acartiura) omorii	230
6 Ditrichocorycaeus affinis	173	Paracalanus orientalis	145	Calanus sinicus	183
7 Pleopis polyphemoides	116	Ctenocalanus vanus	116	Ditrichocorycaeus affinis	170
8 Aidanosagitta crassa	107	Calanus sinicus	70	Paracalanus aculeatus aculeatu	164
9 Pseudodiaptomus marinus	66	Ditrichocorycaeus affinis	60	Oncaea venusta	126
10 Ctenocalanus vanus	63	Labidocera rotunda	27	Ctenocalanus vanus	71
その他	277	その他	127	その他	629
Total N/10 m-3	29863	Total N/10 m-3	11486	Total N/10 m-3	5446

赤字：主要なカイアシ類
青字：主要な枝角類

表 4　ベントス：前回から学名もしくは和名の変更などのあった分類群，および解析のために修正もしくは統合した分類群の新旧対照表

新 綱	科	学名	和名	旧 学名もしくは和名	操作
ﾆﾏｲｶﾞｲ綱	ﾏﾙｽﾀﾞﾚｶﾞｲ科	*Mercenaria mercenaria*	ﾎﾝﾋﾞﾉｽｶﾞｲ	ﾋﾞﾉｽｶﾞｲﾓﾄﾞｷ	新分類群に統合
ﾆﾏｲｶﾞｲ綱	ｲﾜﾎﾘｶﾞｲ科	*Petricola* sp.*cf.lithophaga*	ｳｽｶﾗｼｵﾂｶﾞｲ	ｲﾜﾎﾘｶﾞｲ科	旧分類群に統合
ｺﾞｶｲ綱	ｶｷﾞｺﾞｶｲ科	*Sigambra phuketensis*	ｸｼｶｷﾞｺﾞｶｲ	*Sigambra tentaculata*	新分類群に変更
ｺﾞｶｲ綱	ｷﾞﾎﾞｼｲｿﾒ科	*Scoletoma longifolia*	ｶﾀﾏｶﾞﾘｷﾞﾎﾞｼｲｿﾒ	*Lumbrineris longifolia*	新分類群に変更
ｺﾞｶｲ綱	ｽﾋﾟｵ科	*Paraprionospio patiens*	ｼﾉﾌﾞﾊﾈｴﾗｽﾋﾟｵ	*Paraprionospio* sp. (A 型)	新分類群に変更
ｺﾞｶｲ綱	ｽﾋﾟｵ科	*Paraprionospio coora*	ｽﾍﾞｽﾍﾞﾊﾈｴﾗｽﾋﾟｵ	*Paraprionospio* sp. (CI 型)	新分類群に変更
ｺﾞｶｲ綱	ｶｻﾞﾘｺﾞｶｲ科	Ampharetidae	ｶｻﾞﾘｺﾞｶｲ科	*Amphicteis sp.*	上位分類群に統合
甲殻綱	ﾄﾞﾛｸﾀﾞﾑｼ科	*Sinocorophium* sp.	ﾁｭｳｺﾞｸﾄﾞﾛｸﾀﾞﾑｼ属	*Corophium* sp.	新分類群に変更
甲殻綱	ｲｼｸﾖｺｴﾋﾞ科	*Photis* sp.	ｲｼｸﾖｺｴﾋﾞ科	ｸﾀﾞｵｿｺｴﾋﾞ	上位分類群に統合
甲殻綱	ﾅｷﾞｻｸｰﾏ科	Bodotriidae	ﾅｷﾞｻｸｰﾏ科	ﾎﾞﾄﾞﾄﾘｱ科	新分類群に変更
甲殻綱	ｸｰﾏ科	Diastylidae	ｸｰﾏ科	ﾃﾞｨｱｽﾃｨﾘｽ科	新分類群に変更
甲殻綱			ｶﾆ亜目のﾒｶﾞﾛﾊﾟ期幼生	ｶﾆ亜目のﾒｶﾞﾛﾊﾟ期幼生	解析から除外
ﾎﾔ綱	ﾅﾂﾒﾎﾞﾔ科	Ascidiidae	ﾅﾂﾒﾎﾞﾔ科	ｱｽｷｼﾞｱ科	新分類群に変更
ﾎﾔ綱	ｼﾛﾎﾞﾔ科	Styelidae	ｼﾛﾎﾞﾔ科	ｽﾁｴﾗ科	新分類群に変更
ﾎﾔ綱	ﾌｸﾛﾎﾞﾔ科	Molgulidae	ﾌｸﾛﾎﾞﾔ科	ﾓﾙｸﾞﾗ科	新分類群に変更
硬骨魚綱	ﾊｾﾞ科	*Acentrogobius virgatulus*	ｽｼﾞﾊｾﾞ	*Acentrogobius flaumii*	新分類群に変更

表 5　ベントス：総個体数，総湿重量，種数，シンプソン多様度の 3 元配置分散分析の結果（P 値）。固定効果として期間（2002-2003 年と 2022-2023 年），区域（北部，中部，南部），季節（春，夏，秋，冬）を用い，総個体数と総重量はデータを対数変換（log(x+1)，log(x+0.01)），種数とシンプソン多様度では平方根変換(sqrt(x))した。Levene-test の結果も合わせて示す。

要因	自由度	総個体数	総重量	種数	シンプソン多様度
期間	1	< 0.001	0.133	< 0.001	< 0.001
区域	2	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
季節	3	0.301	< 0.001	0.056	< 0.001
期間 x 区域	2	0.831	0.969	0.934	0.356
期間 x 季節	3	0.708	0.989	0.978	0.823
区域 x 季節	6	0.330	0.297	0.512	0.547
期間 x 区域 x 季節	6	0.966	0.759	0.873	0.628
Levene-test	23/240	0.902	0.727	0.895	0.503

表 6　ベントス：群集組成に対する 3 要因（期間，区域，季節）の PERMANOVA による結果。

	個体数ベース		湿重量ベース	
	自由度	P 値	自由度	P 値
期間	1	0.0001	1	0.0001
区域	2	0.0001	2	0.0001
季節	3	0.0001	3	0.0001
期間 x 区域	2	0.0008	2	0.0008
期間 x 季節	3	0.3424	3	0.0811
区域 x 季節	6	0.0857	6	0.0596
期間 x 区域 x 季節	6	0.7187	6	0.4741
残差	169		176	

表 7　ベントス：個体数データをもとに北部，中部，南部における群集組成を前回と今回で比較した場合に有意（$p < 0.05$）となった IndVal 指標種。多くの指標種が抽出された場合は，上位 5 種までを列挙

指標種	期間	IndVal 値	p	出現回数
北部 N=54*				
ｲﾄｴﾗｽﾋﾟｵ	前回	0.563	0.0148	23
ﾎﾝﾋﾞﾉｽｶﾞｲ	今回	0.473	0.0004	10
ﾓﾉﾄﾞﾛｸﾀﾞﾑｼ属	今回	0.467	0.0002	7
ﾋﾊﾞﾘｶﾞｲ	今回	0.333	0.0008	5
Anaitides 属	今回	0.267	0.0058	4
ﾎﾄﾄｷﾞｽｶﾞｲ	今回	0.266	0.007	6
中部 N=59*				
ｲﾄｴﾗｽﾋﾟｵ	前回	0.754	0.0006	32
ｸｼｶｷﾞｺﾞｶｲ	前回	0.665	0.0024	36
ｽﾍﾞｽﾍﾞﾊﾈｴﾗｽﾋﾟｵ	前回	0.568	0.009	34
ﾐﾂﾊﾞﾈｽﾋﾟｵ	前回	0.389	0.028	17
Gyptis 属	前回	0.366	0.0082	15
ｶﾀﾏｶﾞﾘｷﾞﾎﾞｼｲｿﾒ	今回	0.458	0.0076	24
Eunice 属	今回	0.267	0.0056	7
ｶｻﾞﾘｺﾞｶｲ科	今回	0.250	0.007	6
ｺﾉﾊｼﾛｶﾞﾈｺﾞｶｲ	今回	0.222	0.008	4
Heteromastus 属	今回	0.167	0.0254	3
南部 N=80*				
ｸｼｶｷﾞｺﾞｶｲ	前回	0.812	0.0002	56
紐形動物門	前回	0.743	0.0002	58
ｲﾄｴﾗｽﾋﾟｵ	前回	0.540	0.0004	27
ｸｼﾉﾊｸﾓﾋﾄﾃﾞ	前回	0.393	0.0008	21
ﾗｽﾊﾞﾝﾏﾒｶﾞﾆ	前回	0.386	0.0038	21
ｶﾀﾏｶﾞﾘｷﾞﾎﾞｼｲｿﾒ	今回	0.488	0.0184	50
Mediomastus 属	今回	0.430	0.033	39
ﾆﾎﾝｴﾗﾅｼｽﾋﾟｵ	今回	0.267	0.0002	8
ｸﾁﾍﾞﾆﾃﾞｶﾞｲ	今回	0.265	0.0146	16
ｵﾄﾋﾒｺﾞｶｲ科	今回	0.200	0.0026	6

＊ N は解析に用いたサンプル数。サンプル当たりの総個体数が 2 以下のサンプルは解析から外したため，調査地点数よりも解析サンプル数は少ない。

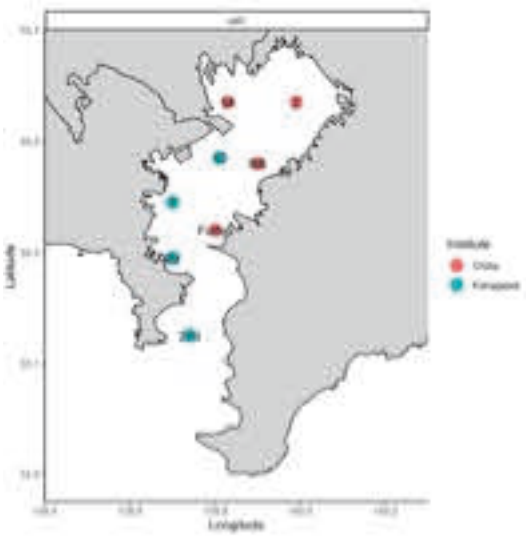

図１　動物プランクトン：各県の浅海・沿岸定線から本事業で動物プランクトンを採集する観測点として選んだ定点。青点赤点はそれぞれ神奈川県と千葉県で採集を実施した定点。

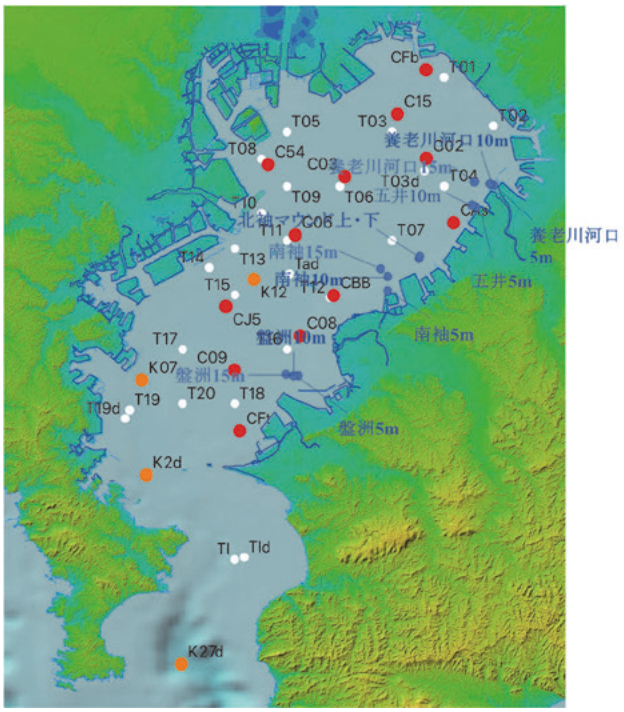

図２　ベントス：調査地点。T で始まる 20 地点（白）が 2002 年から 2003 年にかけての国総研の東京湾広域環境調査の地点。K で始まる 4 地点が動物プランクトンの解析で用いた神奈川県による調査地点（橙），C で始まる 12 地点が千葉県によるベントスの調査地点（赤），青丸が千葉県による底生魚類の調査地点

図 3　マウンド効果：調査点図

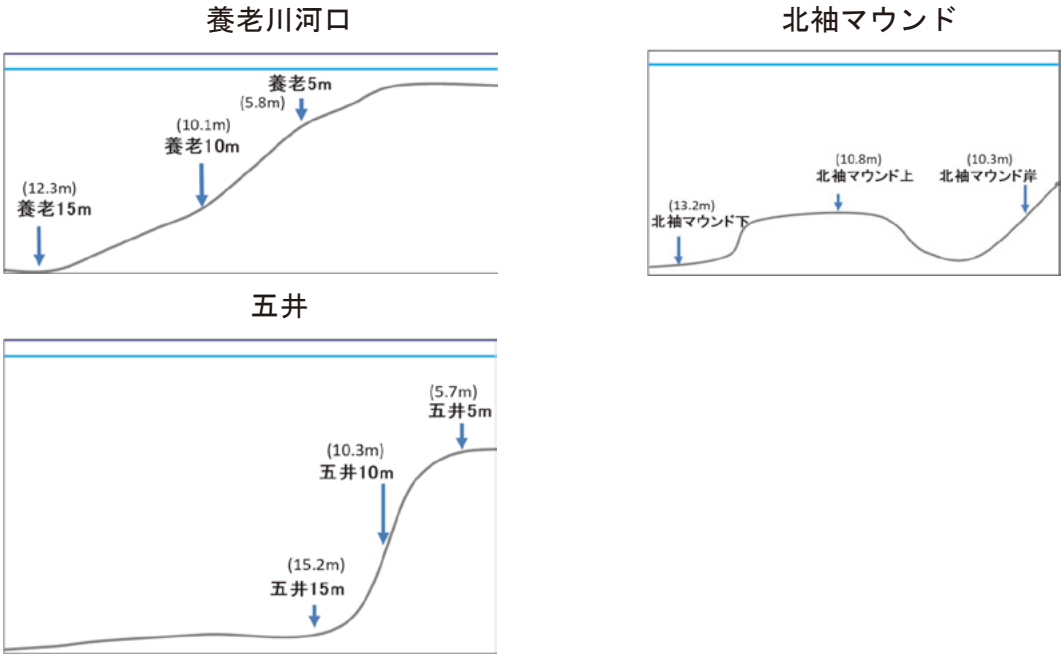

図 4　マウンド効果：調査点プロフィール図．()は実水深

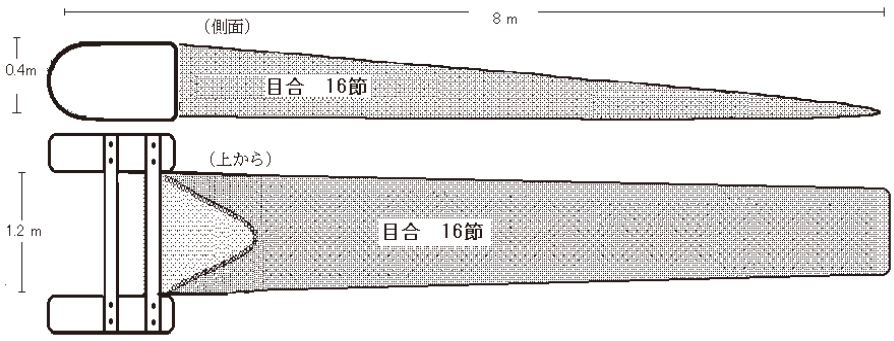

図 5 マウンド効果：桁網

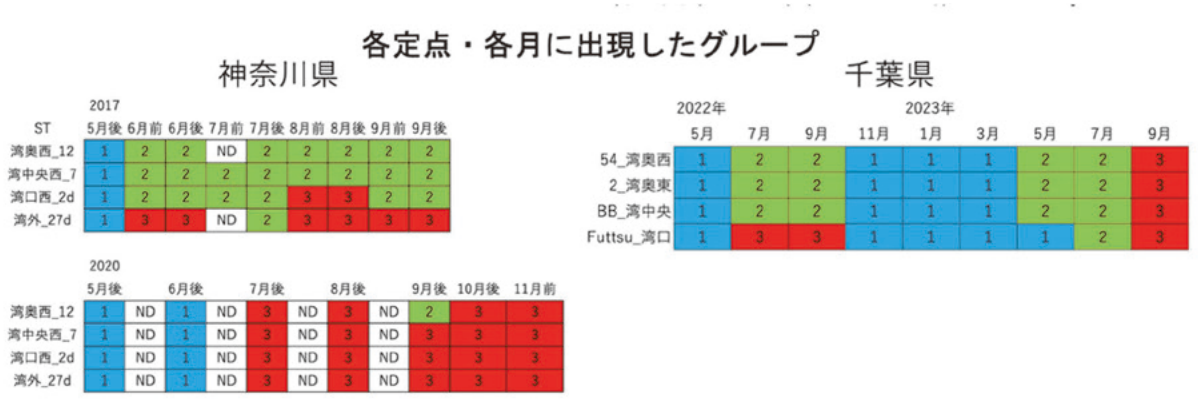

図 6　動物プランクトン：両県の各定点で出現した動物プランクトンのグループ。青，緑および赤のセルはそれぞれグループ 1，2，3 を示す。

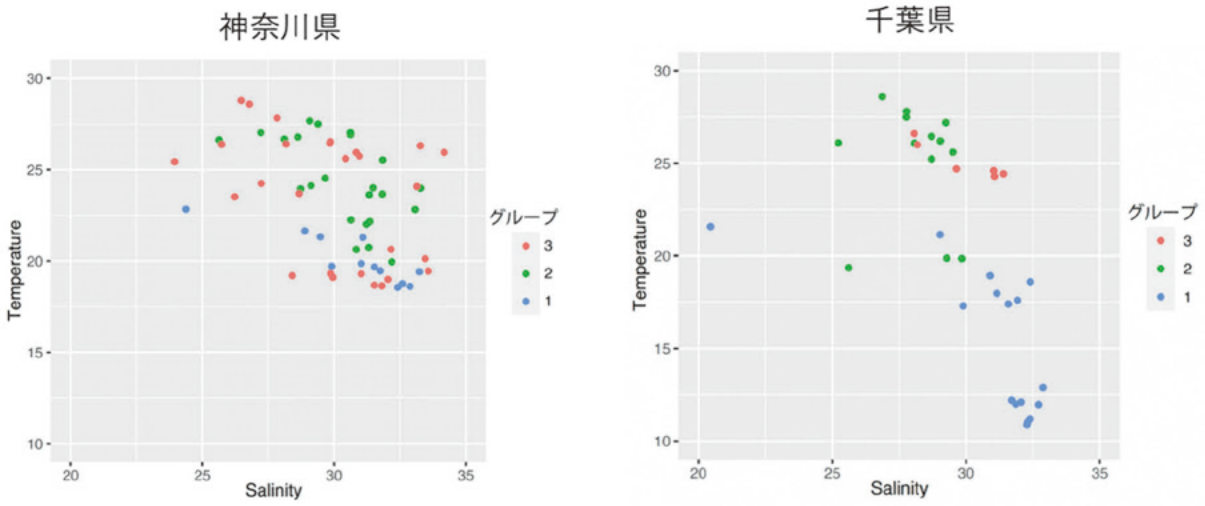

図 7　動物プランクトン：両県の出現した動物プランクトンのグループと表面水温，塩分との関係。

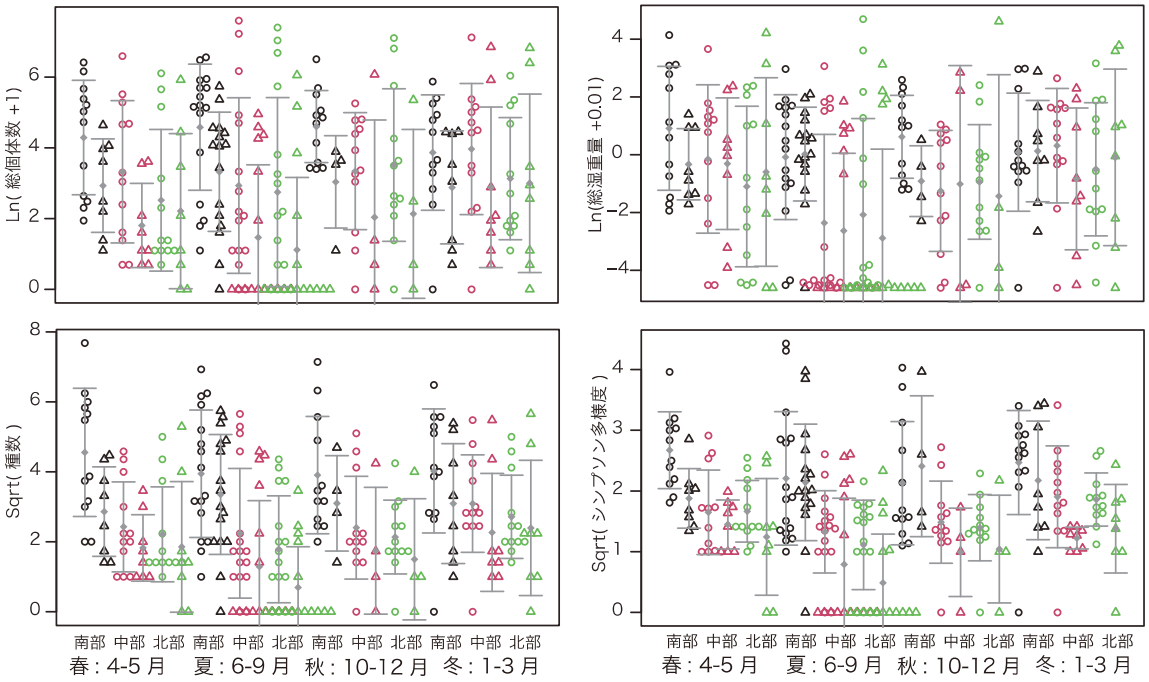

図 8　ベントス：ベントス群集の総個体数，総湿重量，種数，シンプソン多様度（逆数）についての，期間（丸：前回，三角：今回），区域（黒：南部，赤：中部，緑：北部），季節別の平均（±標準偏差）。総個体数と総重量は対数変換（log(x+1) および log(x+0.01)），種数とシンプソン多様度は平方根変換（sqrt(x)）した値。分散分析の結果は表 B3。

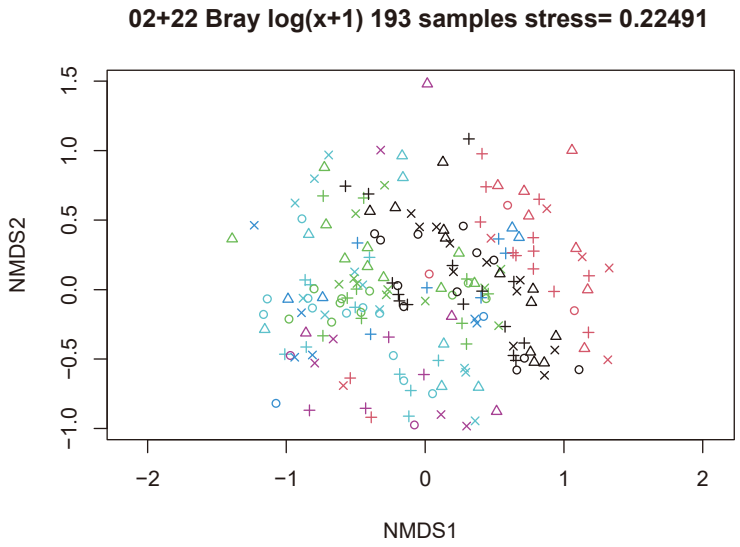

図 9　ベントス：個体数をもとにした 193 サンプル 263 分類群による nMDS 二次元配置図。黒：前回の南部，赤：今回の南部，緑：前回の中部，青：今回の中部，水色：前回の北部，紫：今回の北部。△：春，+：夏，○：秋，×：冬。

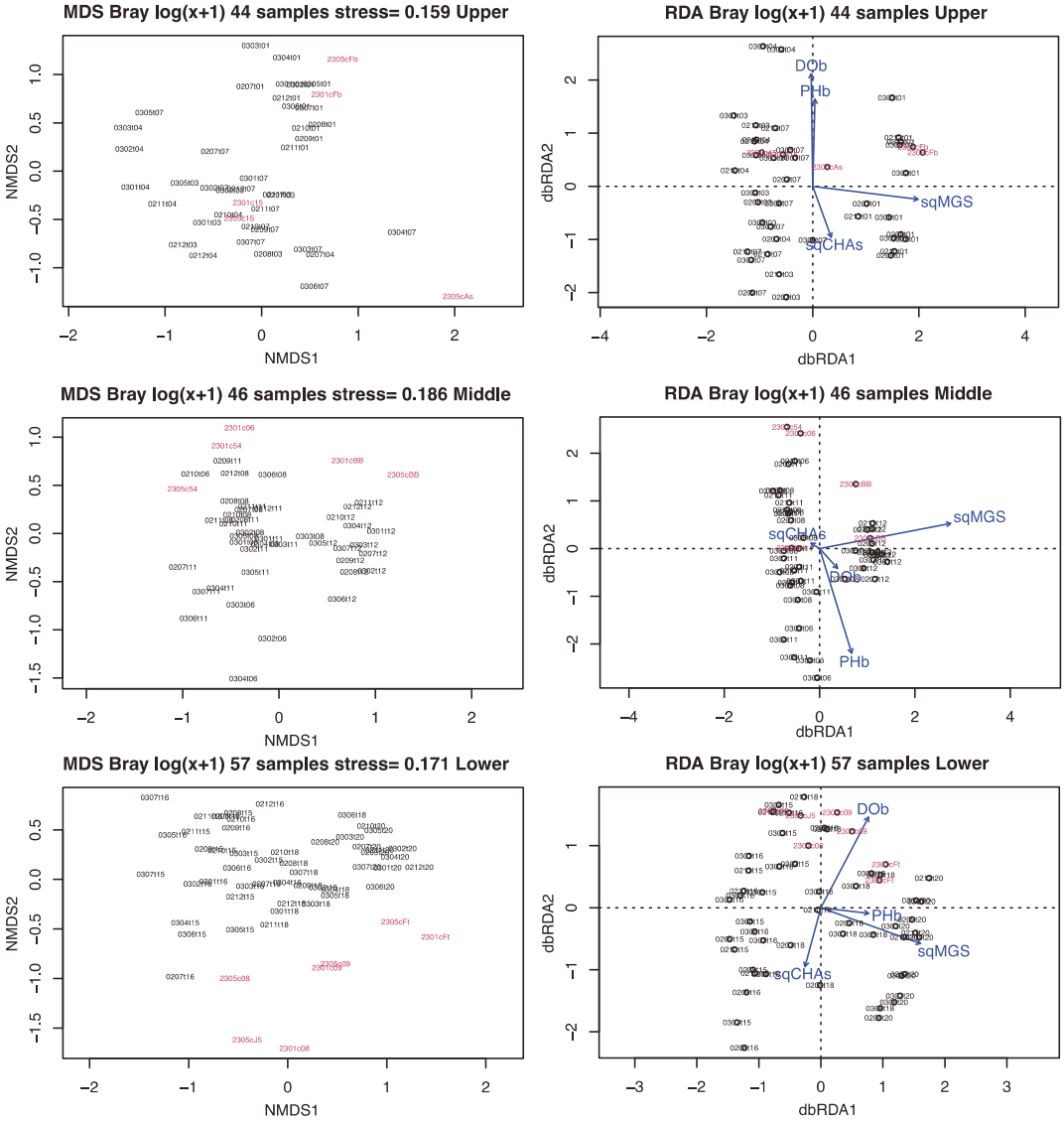

図 10　ベントス：地域ごとにベントス群集組成を dbRDA で 4 環境要因による回帰を行った結果と対応する nMDS 配置図で。上段が北部，中段が中部，下段が下部のサンプルで，左列が nMDS，右列が dbRDA のそれぞれの配置図。図中の黒字が前回，赤字が今回のサンプル。dbRDA の矢印は説明変数とした環境要因（DOb：底層水の溶存酸素量，PHb：底層水の pH，sqCHAs：表層水の Chl-a 濃度の平方根変換値，sqMGS：底質中央粒径値の平方根変換値）。矢印が長いほどその方向に環境要因が利いていることを示す。

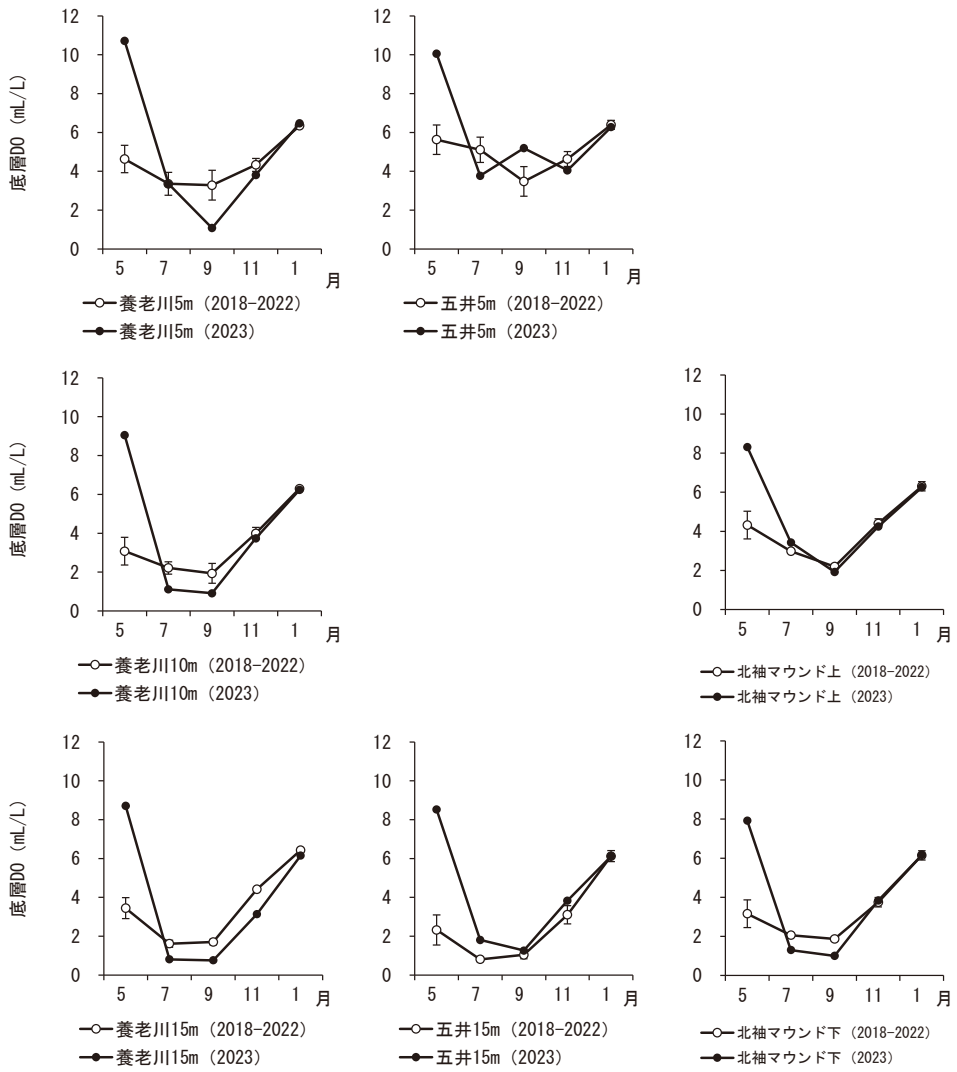

図 11　底層 DO の推移（○：2018～2022 年，●：2023～2024 年）

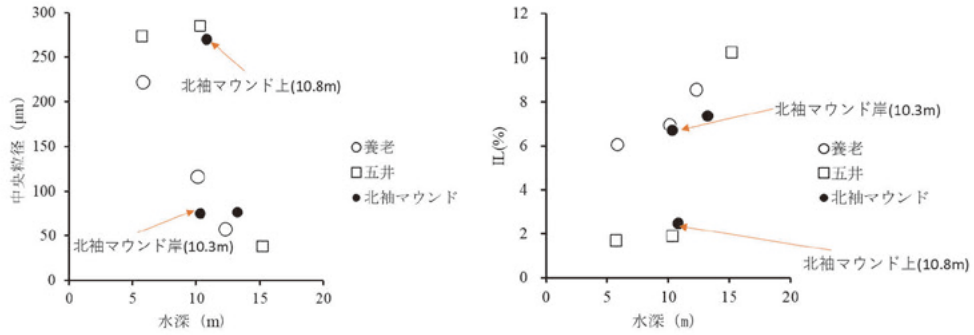

図 12　マウンド効果：水深と底質の中央粒径，強熱減量（IL）の関係

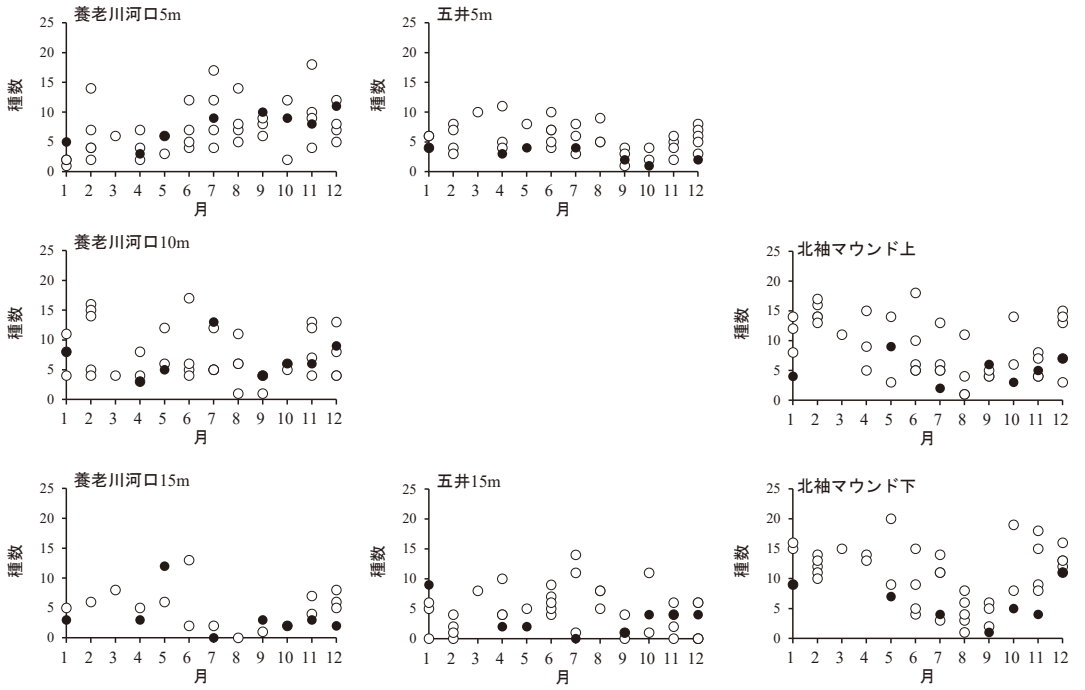

図 13　マウンド効果：桁網採集物の種数の推移（○：2018～2022 年，●：2023～2024 年）

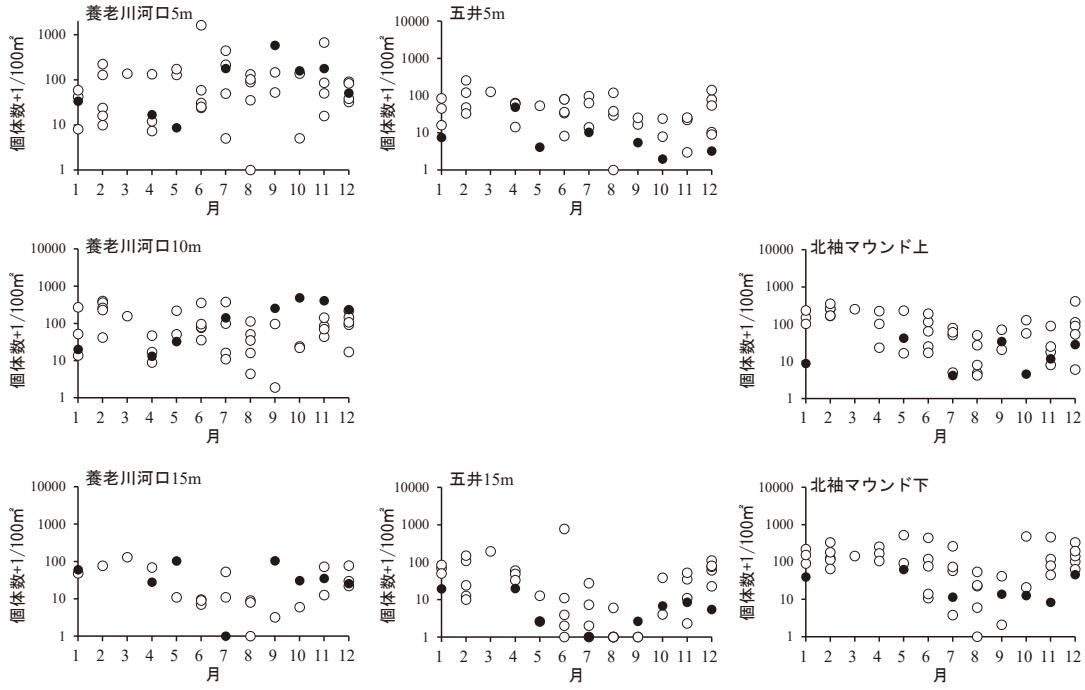

図 14　マウンド効果：桁網採集物の密度（個体数+1/100 ㎡）の推移（○：2018～2022 年，●：2023～2024 年）

別表　マウンド効果：桁網調査で採集された試料生物の個体数（2023～2024 年）

分類	種名	養老川河口			五井		北袖マウンド		合計
		5m	10m	15m	5m	15m	上	下	
魚類（17種）	イシガレイ				1				1
	イネゴチ					2			2
	カワハギ				1		4	1	6
	キララハゼ						8		8
	クサフグ	3	5		6	4			18
	クロダイ	1							1
	シロギス		1			1			2
	テンジクダイ							6	6
	トウゴロウイワシ	1	1						2
	ハタタテヌメリ	1	9	13		15	32	30	100
	ヒガンフグ	1							1
	ヒメハゼ				4	2			6
	ヒラメ	1			1	2			4
	ホウボウ	1							1
	マコガレイ	4	2	12	3	18	5		44
	マゴチ	2	2	1		1	3		9
	マハゼ	11	8	2				1	22
甲殻類（20種）	イッカククモガニ	5	3	2	3	3	6	4	26
	ウミエラカニダマシ						1		1
	エビジャコ	1	3		3		1	1	9
	オオヨコナガピンノ					1			1
	ガザミ	2							2
	カワリイシガニ					1			1
	クモガニ属						1		1
	コイチョウガニ		1	1					2
	サメハダヘイケガニ					1	1	2	4
	サルエビ						1	2	3
	シャコ		1	1		1		10	13
	ジュウイチトゲコブシ		1	1				3	5
	スネナガイソガニ	1	1		1	1	2		6
	ツノナガコブシ		1				1		2
	ヒメガザミ	1						1	2
	ヒライソガニ	1					1		2
	フタホシイシガニ		1	1					2
	ホソウデヒシガニ		1	1					2
	マメガニ属		1	1					2
	マルバガニ						1	1	2
頭足類	コウイカ							1	1
巻貝類（6種）	アカニシ	1	1		3				5
	アラムシロ	3	1						4
	キヌボラ	1							1
	コロモガイ				1		1	1	3
	ツメタガイ	2		1	2			1	6
	バテイラ				1				1
二枚貝類（12種）	アカガイ		6	4			3	3	16
	アサリ	40	1				1		42
	カガミガイ	11	8	7			1	1	28
	ゴイサギガイ	143	2						145
	サクラガイ	2							2
	サルボウ	107	163	2		11	47	51	381
	サルボウ属	5	30					17	52
	トリガイ		35	25		2		62	124
	ホトトギス	2	3				1		6
	ホンビノス	190	600	206		1		9	1006
	ホンビノスガイ	5	8	33					46
	マテガイ	1							1
	合計	550	900	314	30	67	122	208	2191

課題番号：Ⅱ－２）

課題名：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

水産研究・教育機構 水産技術研究所
西本篤史，高田宜武，丹羽健太郎，井上誠章
水産研究・教育機構 水産資源研究所
日髙清隆，山口珠葉，渡辺剛
三重大学
伯耆匠二
千葉県水産総合研究センター
石井光廣，速水啓介，林 俊裕，島田裕至，小山智行，高山雄彦，渡邉晟也

【背景・目的】

東京湾は，その後背地に 3,000 万人を越す人口を抱え，わが国でも有数な富栄養海域として知られている。しかし，主要な流入河川が湾奥部に限られる東京湾では，栄養塩濃度が湾奥から湾口にかけて低下傾向を示し，海域としての一律の評価は難しい。特に，水質総量規制の結果，陸域からの栄養塩供給が減少している中で，沖合の深層水からの栄養塩供給も無視できなくなっている。以上のことから，東京湾における栄養塩の供給源についてのモニタリング手法を確立し，湾内の栄養塩供給源の特性を明らかにするとともに，中・長期的な栄養塩供給源の変動について情報を蓄積していくことが必要である。

二枚貝類の餌料環境の指標として，長らくクロロフィル *a* 濃度が使われてきた。しかし，貧栄養化が注目される中で，微細藻類のサイズ組成や種組成といった餌料価値を決定する詳細な情報の必要性が認識され始めている。本課題では，環境中およびアサリ消化管内に含まれる微細藻類について，メタゲノム解析および検鏡による情報の収集を行う。また，底質のクロロフィル *a* 濃度分析について，改めて試料の採取方法について検証することで，データの精度について検討することを目的とする。

また，陸域からの栄養塩負荷の軽減による養殖ノリの色落ちやノリ養殖漁期の短期化が問題となっていることから，ノリ養殖の効率化に資するノリ養殖場周辺海域の栄養塩環境の評価手法の確立を目指す。

【方法】

(1) 二枚貝状況調査

アサリ漁獲量が大きく低下している現在，アサリの分布密度や肥満度といった従来のモニタリング項目を用いて，漁場としての場の評価を行うことは難しい。そこで，本課題では，アサリの摂餌生態に注目し，以下の作業仮説を立て，閉殻筋を用いた炭素・窒素安定同位体比（以下，$\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$）分析による餌料源推定と，環境中およびアサリ消化管中の珪藻類の検鏡による組成解析を通して，アサリ摂餌生態の指標としての有効性を検証することを試みた。なお，(4) メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発と連携し進めており，そちらも参照されたい。

【作業仮説】：栄養塩条件によって，浮遊系（植物プランクトン）と底生系（底生微細藻類）のアサリ餌料としての寄与割合が変化する。

この仮説の検証を通じて，アサリの食性が海域の富栄養⇔貧栄養の指標として有効であるか否かを検証することを目的とする。

千葉県内のアサリ主要 3 漁場（北部，盤洲，富津：北部漁場のみ潮下帯。他は潮間帯。）において，2 か月ごと（奇数月）に干潟調査を実施し，アサリ，環境水および底質試料を採取した。令和 4 年度に採取したアサリ試料の内，北部漁場については，環境調査の実施エリアと離れた河川内感潮域で採取したものであったため，以後の解析から除外した。また，盤洲漁場の調査点は久津間のみとし，金田ではアサリの採取も含めて実施しなかった。

・環境調査：

クロロフィル a 濃度測定用に，水および底質試料を採取した。底質試料は，ヘッドを切り落とした 2 ml のシリンジを用いて表層約 1 cm の底質を採取し，現場で N,N-ジメチルホルムアミド（DMF: N,N-dimethylformamide）溶液に入れて実験室に持ち帰った。水試料は遮光ボトルに入れて実験室に持ち帰り，その日のうちに GF/F フィルターで濾過（300 ml）し，濾過後のフィルターを DMF 溶液に入れた。これらの DMF 溶液に浸した試料は，クロロフィル a 測定まで，冷凍庫（-20℃）に保管した。クロロフィル a 濃度分析には，10-AU クロロフィル測定装置（Turnerdesigns）を用い，分析方法として Holm-Hansen 法を採用した。

なお，サイズ別クロロフィル a 濃度（micro: 20 ㎛以上，nano: 2 ㎛以上 20 ㎛以下，pico: 0.2 ㎛以下）も併せて分析した。水試料は，20 ㎛（ナイロン製），10 ㎛，2 ㎛，0.2 ㎛（ポリエステル製）目合いのフィルターを順次用いて濾過し，サイズ別の試料とした。底質試料は，塩分 25 程度に作成した NaCl 水を加え，超音波洗浄機（UW-A2 Sharp）を用いて底生微細藻類を分離した。上澄みを水試料と同様に目合いの異なるフィルターで順次濾過し，サイズ別試料とした。濾過後の処理については，上述の通りである。

・同位体を用いた餌料源分析：

$\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ を用いたアサリの餌料源推定を行った。真空凍結乾燥したアサリ閉殻筋を細かく破砕し，クロロフォルム・メタノール混合液，およびメタノールを用いて脱脂した。脱脂後，オーブン（60℃）で再び乾燥し，乾重量 0.8 mg を目安に錫箔に詰め，$\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ 分析に供した。アサリの餌料源候補（エンドメンバー）として，水中の有機懸濁物（POM: particulate organic matter）および単離した底生微細藻類についても $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ 分析に供した。POM 試料として，500 ml×2 枚，計 1L の水を濾過した。底生微細藻類の単離方法については，令和 4 年度報告書を参照されたい。全ての $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ 分析には，元素分析計（vario micro cube）および安定同位体比質量分析計（Isoprime 100）の連結システムを用いた。

対象種であるアサリとエンドメンバー（POM と底生微細藻類）の同位体比，そして二枚貝の閉殻筋を扱った濃縮係数（$\delta^{13}C$：1.9‰，$\delta^{15}N$：4.6‰，Yokoyama & Ishihi 2006）を用いて，ベイズ混合モデルを用いたアサリの餌料源解析を実施した。また，盤洲漁場の POM と

しては，調査時に干潟上で採取した試料ではなく，2019 年に盤洲干潟の沖合で採取した試料を用いた。解析には R パッケージの MixSIAR を用いた。

・餌料環境の指標としての高次捕食者の $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$

今回扱ったアサリは一次消費者の内の 1 つの種に過ぎず，その食性が漁場において優占する有機物の指標として有効か否か定かでない。そこで，移動能力と定着性の高さを併せ持つ高次捕食者（タイワンガザミ）の $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ を用いて，漁場を代表する値の取得を試みた。

(2) ノリ状況調査

千葉県内の主要な 4 漁場（北部，盤洲，富津岬北側，富津岬南側）において生産される乾燥養殖ノリ試料を，ノリ漁期中の共販に併せて，定期的（月に 2 回を目安）に収集した。加えて，課題II 1 ）に参画する神奈川県と連携し，金沢および走水の試料も収集した。

これら乾ノリ試料は，脱脂等の更なる前処理は行わず，細かく破砕し，1.5 mg を目安に錫箔に詰めた。錫箔に詰めた試料は，上述の分析装置を用いて，CN 比（重量）および $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ 分析に供した。なお，ノリ漁期の開始は 11 月と遅いことから，本報告書（令和 5 年度）では，令和 4 年度に収集した試料について $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ 分析結果を報告する。

また，ノリ $\delta^{15}N$ と栄養塩（DIN）濃度との関係を調べるため，千葉県および神奈川県の沿岸定線における栄養塩データを提供頂いた。ノリ $\delta^{15}N$ のモニタリングは 2 週間程度の栄養塩供給源の累積を反映したデータとなることから，スナップショットデータである従来の栄養塩モニタリングでは見落とされてきた情報も検出できる可能性がある。

(3) クロロフィル分析の検討

干潟の生産性や栄養塩供給源としての役割を明らかにするためには，干潟の岸⇔沖方向に対する空間的な機能分化を明らかにする必要がある。そこで，令和 5 年度は，前年に確認した盤洲干潟内におけるクロロフィル a の空間分布（水平及び深さ方向）の再現性を確かめるため，2023 年 3 月 27 日に改めて 2 回目の調査を行った。また，深さ方向のクロロフィル a 濃度の減衰に，光の透過深度が影響している可能性を検証するため，照度計（Onset 社，UA-002）を用いたデータサンプリングも併せて実施した。なお，底質の粒度分析も併せて行い，分析にはレーザー回析式粒子径分布測定装置 SALD-2300（SHIMADZU）を用いた。

(4) メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発

栄養塩濃度の異なる東京湾の 3 定点（北部：市川，中部：久津間，南部：富津）において，2023 年 5 月から 2024 年 1 月にかけて 2 ヶ月に 1 回の頻度で以下の野外調査を実施した。採泥器もしくは徒手にてアサリ稚貝・成貝（殻長約 5〜30 mm）を採集し，万力等で貝殻を破壊したのち即座に 99%エタノール中で固定した。海底表層 1 cm の砂泥を約 10 g を採取し，即座にエタノールで固定した。海底直上の海水（環境水）を 1 L 採取し DNA 分解抑制剤（塩化ベンザルコニウム溶液）を 0.1％の濃度で添加した。環境砂泥をエタノール中で攪拌して得られた懸濁物，環境水中に含まれる懸濁物を GF/F フィルター上に捕集して DNA 抽出まで冷凍保存した。5 月〜11 月のアサリ消化管内容物，環境水，砂泥試料から DNA を抽出した。そのうち，5 月，7 月のアサリ消化管内容物および環境水試料については，葉緑体 psbA 領域

上に設計された微細藻類のユニバーサルプライマー（生物技研）を用いたメタバーコーディング解析を実施し，綱レベル以上の高次分類群組成を算出した。5 月から 11 月の各試料については，rbcL 領域上に設計された珪藻特異的なユニバーサルプライマー（Maitland et al. 2020）を用いてメタバーコーディング解析を実施し，各試料の珪藻の属組成を算出した。

・餌料生物の検鏡

アサリの餌料生物について基礎的な知見を得るために，アサリの消化管内容物と餌料生物を含むと推定されるアサリ生息地の海水および底砂泥（砂）について，検鏡計数に基づく生物組成の調査を実施した。三番瀬（市川），久津間，富津の 3 地点でアサリ及び海水と砂を採集した。調査は 2023 年と 2024 年の奇数月（2023 年 3 月～2024 年 1 月）に実施した。アサリは現地でエタノールまたは中性ルゴールで固定した。海水と砂は実験室に持ち帰ったあと，海水は酸性ルゴールで固定し，砂は冷凍保存した。各試料は含まれる生物の破損や消失を防ぐために固定以外の処理を最小限にして検鏡に用いた。アサリは 5 月，7 月，9 月の 9 試料から胃を取り出し，内容物を検鏡試料とした。しかし，胃内容物を複数回検鏡しても生物をほとんど確認できなかったため，有機物除去を行って珪藻（と一部の渦鞭毛藻）を対象に再度検鏡した結果，5 月の富津でのみ計数できた。海水と砂は 3 月，5 月，7 月の各 8 試料（3 月の富津は欠測）を検鏡した。海水は適宜濃縮後，中和処理して検鏡に用いた。砂は解凍後，30%中性ルゴールで固定し，その懸濁物を検鏡試料とした。顕微鏡下で同定可能な水準で分類し，細胞数を計数して，湿重量または体積あたりの細胞数を算出した。また出現種については生態型と生息地（海水・淡水など）でも分類した。生態型は浮遊種，着生種（運動性のある着生種），付着種（固着して動かない種）に識別した。富津においては，アサリと砂と海水の 3 者間で，珪藻と渦鞭毛藻の組成を属レベルで比較した。アサリは 5 月のみ，砂と海水は 3 ヶ月（3 月と 5 月と 7 月）をまとめたデータを使用した。

【結果】

(1) 二枚貝状況調査

・環境調査：

R5 年 5 月から 11 月までの隔月，計 4 回分の調査で採取した水のクロロフィル a 濃度を漁場間で比べると，北部漁場（34.35±25.29 μg/L）から盤洲漁場（13.24±21.77 μg/L），富津漁場（5.07±4.99 μg/L）へと，湾奥から富津岬にかけて順に低下する傾向がみられた（図-1）。一方，底質のクロロフィル a 濃度は，盤洲漁場（9.58±5.70 μg/cm^3）で最も高く，北部漁場（5.47±4.21 μg/cm^3）および富津漁場（5.92±3.57 μg/cm^3）では相対的に低かった。現時点では，これらの値に統計的に有意な違いは検出されなかったものの（それぞれ，Kruskal-Wallis, χ^2=2.8846，$p > 0.05$，ANOVA, F=0.018, $p > 0.05$），漁場毎に浮遊系と底生系の相対的な重要性が異なることが予想され，湾奥に位置する北部漁場では浮遊系が優占していると考えられる。なお，盤洲漁場については，台風 13 号の通過直後に 9 月の調査を行っており，平常時の状況を反映していない可能性がある。

次に，サイズ別クロロフィル a 濃度を見ると（図-2），北部漁場の浮遊系では，total のクロロフィル a 濃度が赤潮レベル（50 μg/L 以上）を越えた調査月には，ナノプランクトン（2 μm 以上20μm以下）が高い割合を占めた。赤潮が解消すると，僅かにマイクロプランクトン（20

μm以上）の割合が上昇したものの，他漁場に比べてその割合は低かった。一方で，底質の微細藻類を見ると，調査期間を通じてピコサイズ（2 μm以下）の底生微細藻類が占める割合が高い特徴がみられた（37.69±1.22%）。次に，盤洲漁場を見ると，他漁場に比べて，時間変動が大きく，流入河川による影響が検出された。最後に富津漁場を見ると，水中および底質中共に，各サイズクラスの微細藻類を万遍なく確認することが出来た。

アサリの生活史段階に応じて，餌となる微細藻類のサイズクラスや，浮遊系と底生系の寄与割合は変化する可能性があり，こうした漁場毎の餌環境の違いが，アサリの資源動態に反映されるかもしれない。

・同位体を用いた餌料源分析：

アサリ $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ は，北部漁場で $\delta^{13}C$：-14.9±0.2‰，$\delta^{15}N$：13.4±0.5‰（N=13）。盤洲漁場（久津間）で $\delta^{13}C$：-15.8±0.3‰，$\delta^{15}N$：15.6±0.5‰（N=83）。富津漁場で $\delta^{13}C$：-14.8±0.4‰，$\delta^{15}N$：15.3±0.6‰（N=60）であった。ベイズ混合モデルによる餌料源推定の結果，北部漁場および盤洲漁場では，POM の寄与率がそれぞれ 92.5±10.1%，97.5±4.2%と高い割合を示し，水中の植物プランクトンが主要な餌料源であることが示唆された（図-3）。一方で，富津漁場では POM（45.2±22.5%）だけでなく，底生微細藻類の寄与率も高く（54.8±22.5%），水中の植物プランクトンに加えて底生微細藻類も餌利用していることが示唆された（図-3）。これらの推定結果は，クロロフィル a 濃度分析の結果から浮遊系が優占していることが示唆された北部漁場，浮遊系の生産性は低いことが示唆された富津漁場については整合性の採れる結果となった。盤洲漁場については，他事業にて別の期間に実施した同様の餌料源推定では，底生微細藻類の寄与も示唆されており，環境変動が大きい河口干潟では，アサリの餌料源も時期によって大きく変化している可能性がある。

今後，アサリおよびエンドメンバーのデータを蓄積し，餌料源推定の精度を上げることで，結果が大きく変わる可能性がある。また，盤洲漁場については，流入河川である小櫃川河口から離れた金田地区での調査等も必要となってくるだろう。

・餌料環境の指標としての高次捕食者（ワタリガニ）の $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$

地先資源であるタイワンガザミの $\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ を見ると，北部漁場では，一次消費者であるアサリと高次捕食者であるタイワンガザミ（$\delta^{13}C$：-13.8±0.7‰，$\delta^{15}N$：16.4±0.8‰）の間に，食う・食われるの関係を見ることが出来た。つまり，水中のクロロフィル a 濃度の高い北部漁場では，浮遊系からアサリ，そしてタイワンガザミへと，浮遊系を起点とした食物連鎖が優占していることが示唆された。一方，盤洲漁場および富津漁場では，タイワンガザミの $\delta^{13}C$ がそれぞれ-12.7±0.7‰および-12.9±0.7‰と，アサリに比べて 2‰から 3‰高く，一次消費者であるアサリが使っている餌料源とは別の餌料源，例えばアマモやアオサなどが，各漁場の主要な有機物源として寄与している可能性が示唆された。この事実は，現場の微細藻類による基礎生産が高い海域（北部漁場）と低い海域（盤洲・富津漁場）では，その後の有機物フローも含めて大きな影響を与えている可能性を示唆するものである。

(2) ノリ状況調査

2022 年度漁期（2022 年 11 月から 2023 年 4 月にかけて）のノリ試料（N=74）を分析した結

果，湾奥（市川）から富津岬以南（大佐和）にかけて，ノリ $\delta^{15}N$ が低下する傾向が確認された（図-4）。また，神奈川県海域の金沢および走水では，緯度的に対応する東岸の富津，大佐和に比べて，極端に高い値を持つ試料がないという特徴があった。$\delta^{13}C$・$\delta^{15}N$ 分析は，1つ 1 つのデータが持つ情報は限られ，検体数を重ねる中で全体としての傾向を把握するものである。今後は，より多くのノリ試料を分析して行く必要があるが，以下では，手持ちのデータから推察されることについて考察する。

ノリ $\delta^{15}N$ と DIN 濃度との関係を整理した結果（図-5），東京湾全体および市川地区において，統計的に有意な相関が見られ（$p < 0.05$），DIN 濃度が高いほどノリ $\delta^{15}N$ も高い傾向が確認された。湾奥に位置し栄養塩供給源に近い市川地区では，栄養塩の減少（消費）に伴い，ノリ $\delta^{15}N$ が低下しているものと考えられる。逆に，最も南に位置する大佐和地区では，DIN 濃度が高いほどノリ $\delta^{15}N$ が低い傾向が確認された。この事実は，大佐和地区では外洋由来の栄養塩がノリの窒素源として寄与している可能性を示唆した。東京湾の中部に位置する金田および富津地区では，市川地区でみられたような 20‰近い値から，大佐和地区でみられたような 10‰近い値まで，幅広いノリ $\delta^{15}N$ を取ることから，人為由来の栄養塩と外洋由来の栄養塩が複雑に寄与しているものと推察される。

ノリ $\delta^{15}N$ を時系列（図-6）に並べると，2 回汐（11 月下旬）に金田地区で特に低い値を取り，外洋由来の窒素の供給が示唆される。3 回汐（12 月上旬）になると，東京湾内湾における DIN 濃度が大きく上昇し，それに合わせて金田地区だけでなく，富津地区および大佐和地区まで $\delta^{15}N$ が高くなり，人為由来窒素の広範における波及が示唆される。この波及は，水の栄養塩データからは読み取れず，ノリ $\delta^{15}N$ を扱うことの 1 つの利点と言えるだろう。しかし，4 回汐（12 月下旬）になると，富津，大佐和および走水でノリ $\delta^{15}N$ が大きく低下していることから，人為由来の栄養塩の波及とほぼ時を同じくして，外洋由来の栄養塩が波及したことが示唆される。6 回汐（1 月下旬）から 7 回汐（2 月上旬）にかけて，富津地区のみノリ $\delta^{15}N$ が上昇したことは，富津地区周辺から栄養塩供給があったと考えられる。

(3) クロロフィル分析の検討

深さ方向に対する底質クロロフィル a 濃度の減衰率を比較した結果，岸サイトにおいて調査日の異なる 2 回の調査の間で大きな違いが確認され（図-7），1 回目の調査よりも 2 回目の調査において，より深くまでクロロフィル a 濃度が高く保たれていた。クロロフィル a 濃度の減衰と底質の中央粒径との間には統計的に有意な相関（$p < 0.05$）があることから，2 回の調査の間で底質の物理環境が変化し，底質の中央粒径が粗大化したものと考えられる。このように，底質の物理環境の変化に応じて，底生系の生産性に大きく影響していることが明らかになったと共に，この事実は間隙水中の栄養塩の挙動とも密接に関連してくることが予想されることから，栄養塩供給源としての干潟の機能にも繋がる知見と考えられる。

なお，照度については，極岸から沖までのいずれのサイトにおいても，深さ 0~1cm で既に 0 Lux となり，今回用いたロガーでは検出できなかった。安価なロガーを用いて，底質中の光度を測定することは困難であった。今後は，底質中の間隙水の栄養塩等を分析することで，干潟の岸⇔沖方向の機能分化について，情報を蓄積していく計画である。

(4) メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発

psbA プライマーを用いたメタバーコーディング解析の結果を図-8 に示す。5 月の久津間および富津，7 月の市川および久津間については，アサリ消化管内容物，環境水ともに珪藻が最も優占したほか，緑藻や藍藻も多くの試料から検出された。一方，7 月の富津については，環境水とアサリ消化管において藍藻が高い割合で検出され，多くの試料で珪藻の割合を大きく上回っていた。しかしながら，サイズ別クロロフィル a の結果（1）では，本調査月・地点において，藍藻が画分されるピコプランクトン由来のクロロフィル a 濃度は決して高いとは言えなかった。このことから，本プライマーに基づくメタバーコーディングでは，藍藻を含む様々な微細藻類を検出できるというメリットがあるものの，分類群間の増幅効率の違いなどにより，藍藻の割合が過大評価され，真核微細藻類の割合が過小評価されている可能性が考えられた。そこで，以降の解析では，珪藻特異的プライマーである rbcL プライマーに基づく詳細な解析を実施することとした。

5 月から 11 月にかけての隔月調査によって採取した各調査地点の環境水，アサリ消化管，砂泥中から検出された浮遊珪藻と底生珪藻の割合と珪藻属組成を図-9 に示す。 いずれの調査月，場所においても環境水とアサリ消化管からは浮遊珪藻が優占していたことから，アサリ稚貝・成貝は基本的に浮遊系一次生産に強く依存していると推察された。11 月の久津間においては，環境水およびアサリ消化管中の底生珪藻の割合が比較的大きかったことから，底質が環境水中に巻き上げられやすい条件下では，底生系への依存が高まることも示唆された。また，アサリ消化管中の珪藻属組成は，環境砂泥ではなく，環境水中の組成に類似する傾向にあった。

図-9 から，環境水とアサリ消化管内容物のデータのみを抽出したグラフを図-10 に示す。前述の通り，調査期間を通して，アサリの消化管内容物組成は環境水中の組成と類似する傾向にあったが，5 月の富津，9 月の久津間および富津のように，アサリの消化管内容物組成と環境水中の組成があまり類似しない場合も認められた。このような不一致が生じた際には，環境水中のみに *Chaetoceros* 属が高い割合で検出されていることから，アサリが大型の群体を形成する *Chaetoceros* 属に対して負の摂餌選択性を有している可能性も考えられた。

・餌料生物の検鏡

海水と砂から出現した藻類の生息地はいずれも海産種が主体で，5 月の久津間の砂で一部淡水種が出現した（図-11A）。海水では浮遊種が主体で，砂では着生種と付着種が優占することがわかった（図-11B）。例外的に三番瀬の 7 月の砂では浮遊種が優占した。計数で出現した高次分類群の生物組成から，基本的には海水と砂ともに地点や月によらず，珪藻が優占していたが（図-12A），海水の三番瀬 5 月や久津間 3 月では渦鞭毛藻やユーグレナ藻が優占した。沿岸のモニタリングではユーグレナ藻やクリプト藻などが短期間で急激に卓越することが確認されており，多様な藻類をアサリ餌料候補と想定したほうが良いかもしれない。生物組成で優占し属や種まで分類可能な珪藻と渦鞭毛藻について，属で細胞数をまとめた組成を図-12B に示した。いずれかの試料で 5%以上出現した属は *Prorocentrum*（浮遊種）を除き他は珪藻だった。*Skeletonema* から *Leptocylindrus* までが浮遊種，*Navicula* から *Paribellus* までは着生種である。海水も砂も測点ごとに組成が異なり，月ごとに割合が変化しているため，属の組成は地理的に異なる可能性が高く，季節でも変化していると考えられる。海水は「その他」の割合が低く，少ない属（概ね 1 属か 2 属）が大部分を占めていた。これに対し，砂は

三番瀬を除いて「その他」の割合が高く，多様な属で構成されていた。三番瀬は海水 5 月の *Prorocentrum* や，砂の 3 月と 5 月の *Amphora*，7 月の *Thalassiosira* といった単一属が優占する傾向が示された。また，三番瀬の 7 月砂で浮遊種が多かったのは *Thalassiosira* が優占したためである。アサリ胃内容物の組成について，5 月富津のアサリについて報告する。生息地と生態型はアサリでは海産の着生種が優占した（図-13A と 3B）。生物組成については珪藻が優占し（図-13C），*Navicula* が豊富に含まれていた（図-13D）。富津におけるアサリと砂と海水の 3 者で，珪藻と渦鞭毛藻の組成を属レベルで比較した（図-14）。砂と海水でアサリと一致した属は同数だった。しかし，一致したのは着生種（*Prorocentrum* を除く）で，アサリだけから出現した属も着生種（*Fallacia* と *Gomphonemopsis*）を多く含んでいた。この結果を見る限り，5 月富津のアサリに関しては底質由来の生物の摂餌割合が高いと考えられるが，同一地点では季節の影響も大きいと推察されるため，今後データを蓄積していく必要がある。

【図表】

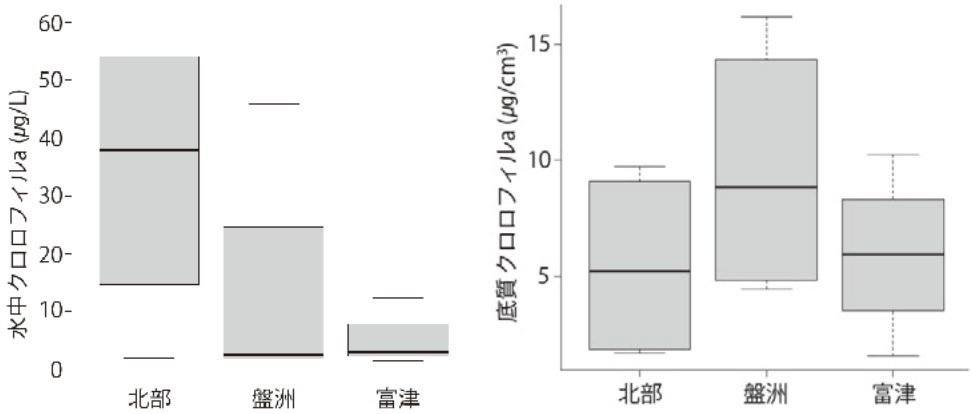

図-1 漁場別の水質および底質中クロロフィル a 濃度

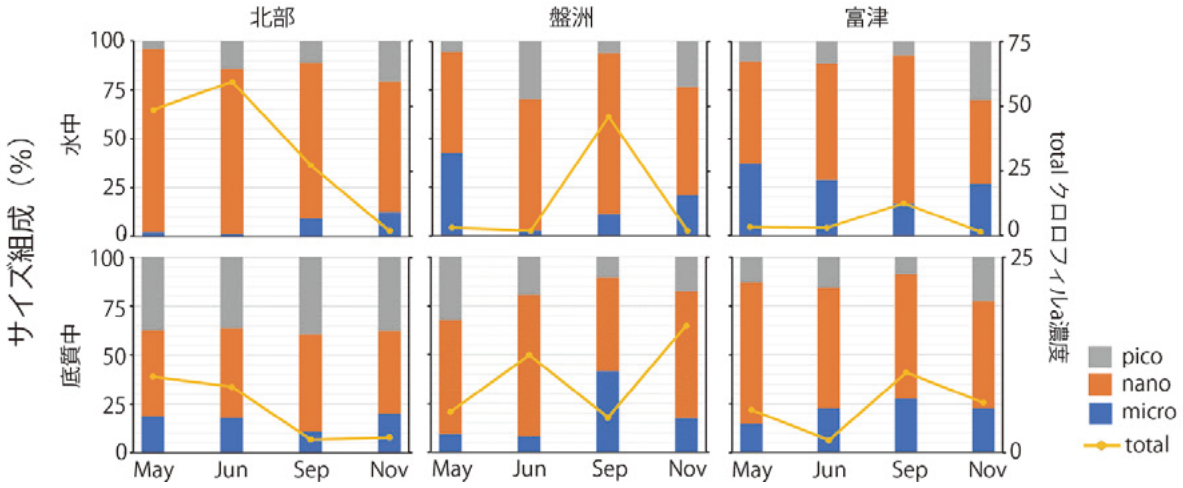

図-2 水中および底質中におけるクロロフィル a 濃度

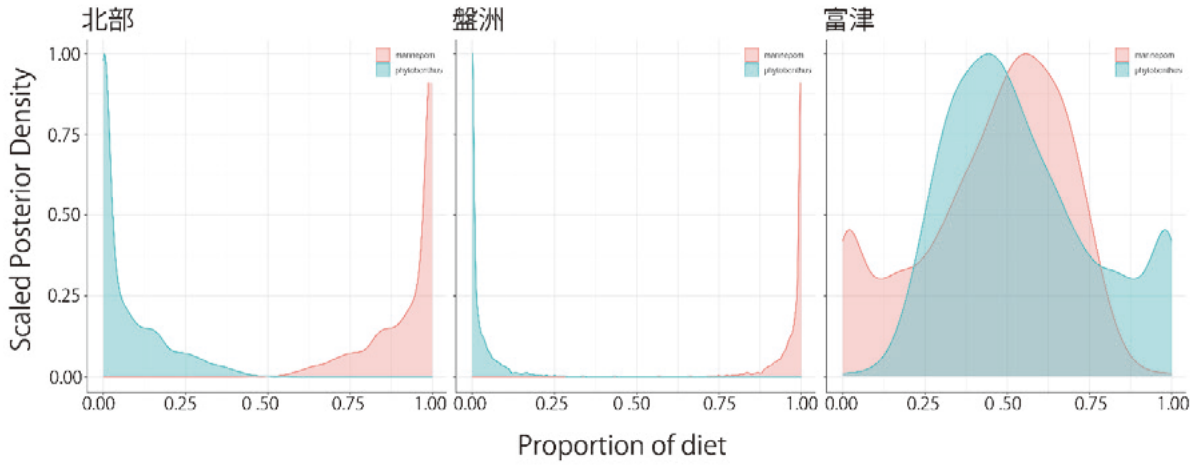

図-3　令和 5 年度時点でのベイズ混合推定モデルを用いたアサリ餌料源推定結果
赤：POM，緑：底生微細藻類

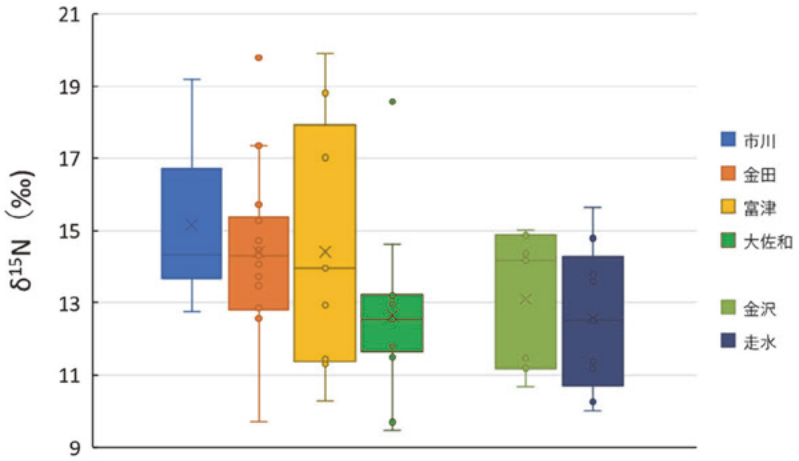

図-4 東京湾におけるノリの窒素安定同位体比

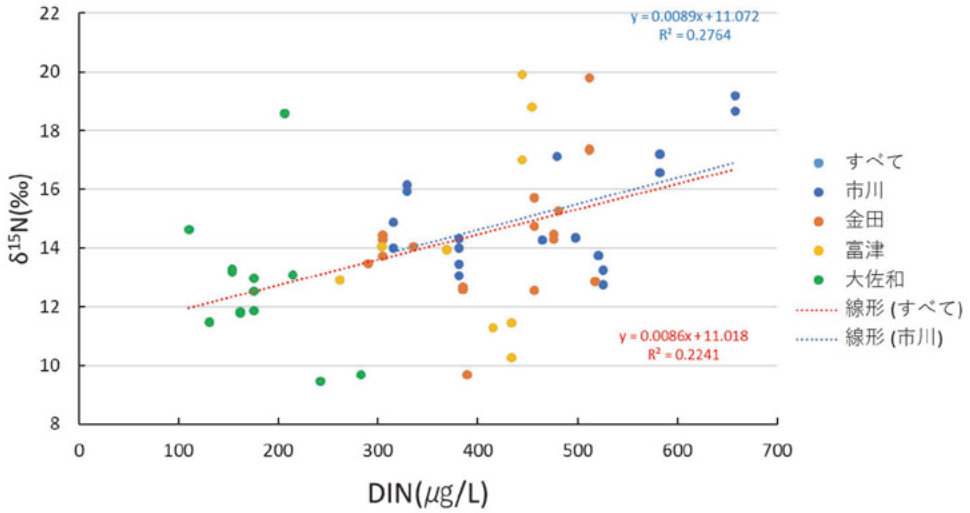

図-5 東京湾東岸のノリ漁場におけるノリの窒素安定同位体比と DIN との相関

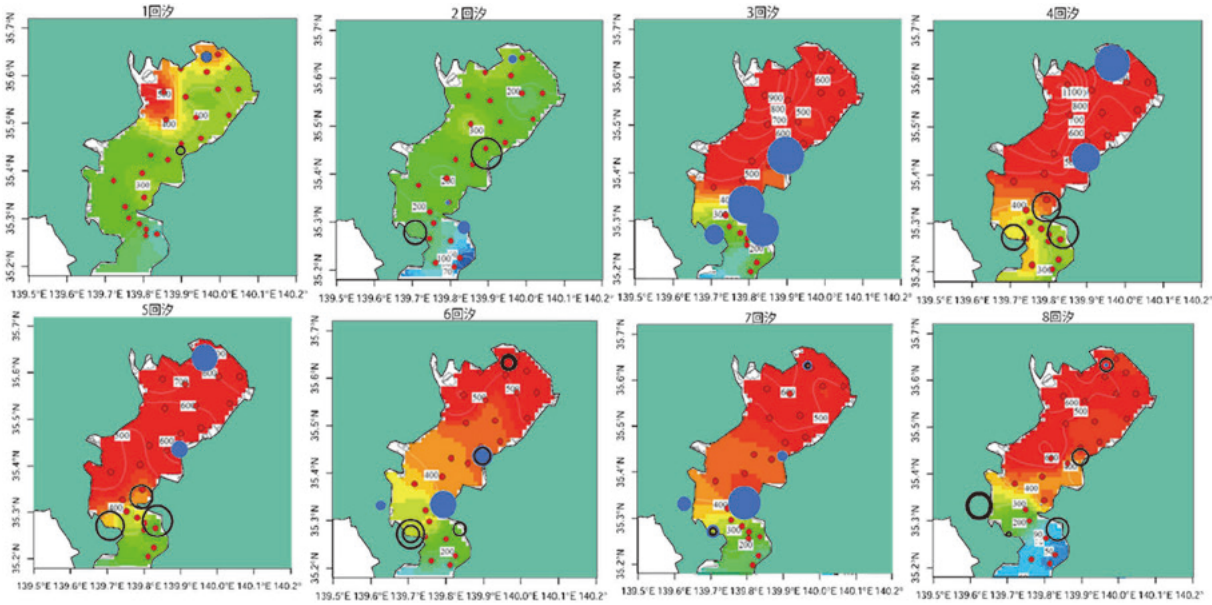

図-6 東京湾におけるノリの窒素安定同位体比と DIN の時系列変化

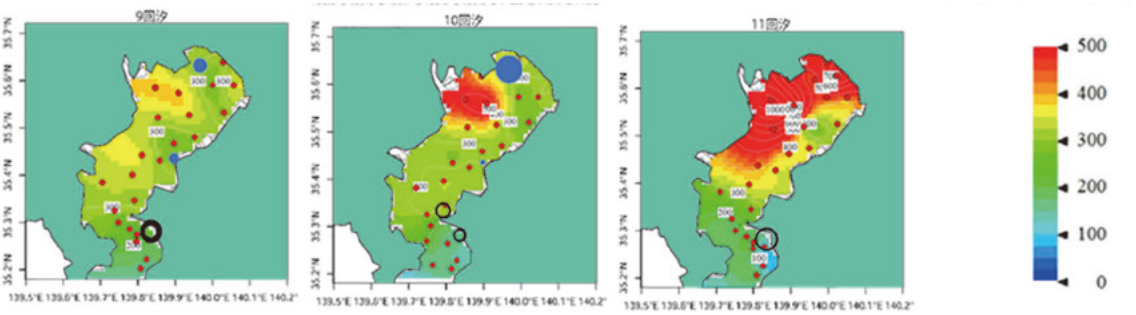

図-6 つづき　東京湾におけるノリの窒素安定同位体比と DIN の時系列変化

ノリ窒素安定同位体比の平均値よりも大きい試料は青色のバブル，小さい試料は中抜きのバブルで示し，バブルのサイズは平均値からのズレの大きさを示す。DIN 濃度については，ノリ共販日に対して半月ほど前の千葉県のり海況速報を一部改変して引用。

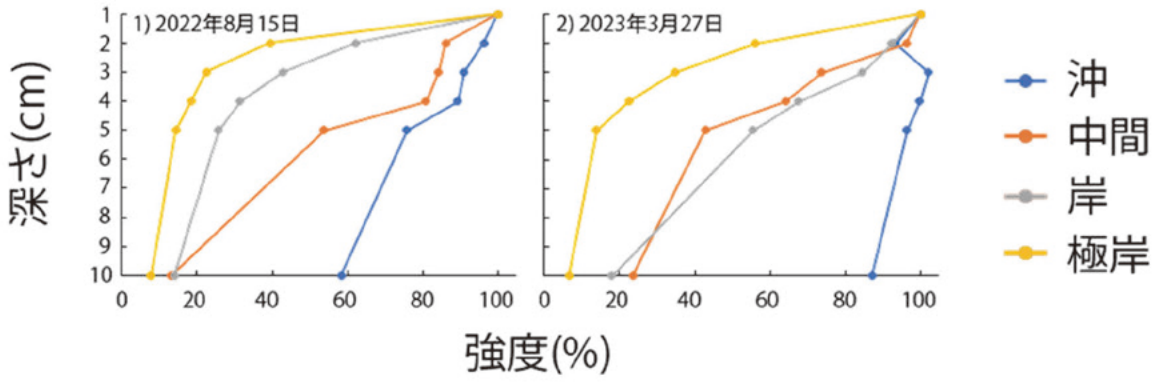

図-7 盤洲干潟における底質クロロフィル *a* 濃度の空間分布

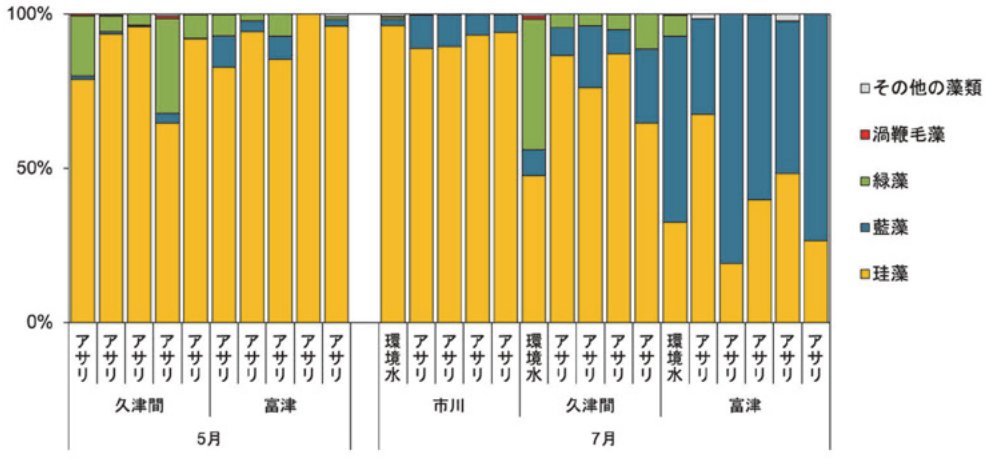

図-8 psbA プライマーを用いたメタバーコーディング解析結果

綱レベル以上の高次分類群組成を示す。１本のバーは１試料中の DNA リード数の組成を示す。

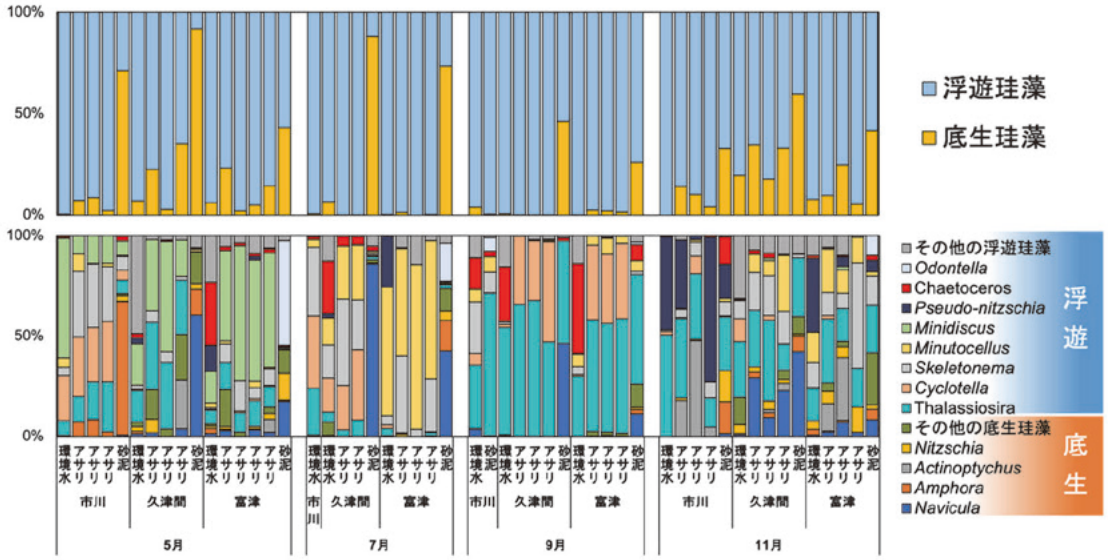

図-9 rbcL プライマーを用いたメタバーコーディング解析結果（隔月調査）

各調査月，各調査地点の環境水，アサリ消化管内容物，砂泥中の浮遊珪藻および底生珪藻の割合（上図），珪藻各属の割合（下図）を示す。珪藻各属の生活型については Round et al. (1990)に基づいて区分した。

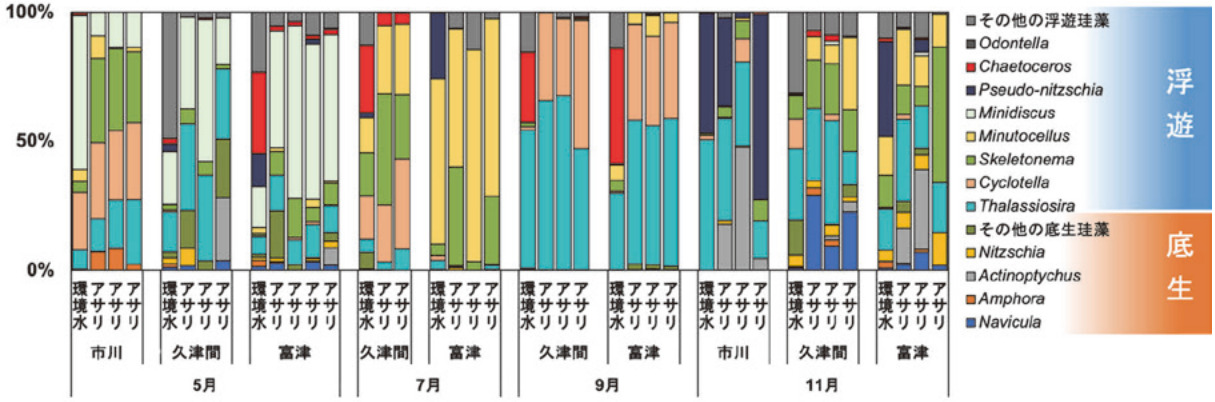

図-10 rbcLプライマーを用いたメタバーコーディング解析結果（環境水とアサリの比較）

図-9 から環境水とアサリのデータのみを抽出して示す。

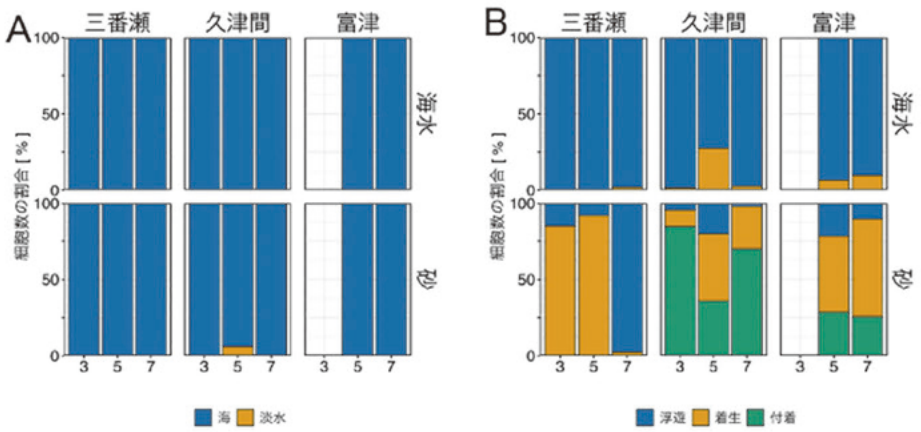

図-11　海水と砂から出現した微細藻類の A）生息地と B）生態型。

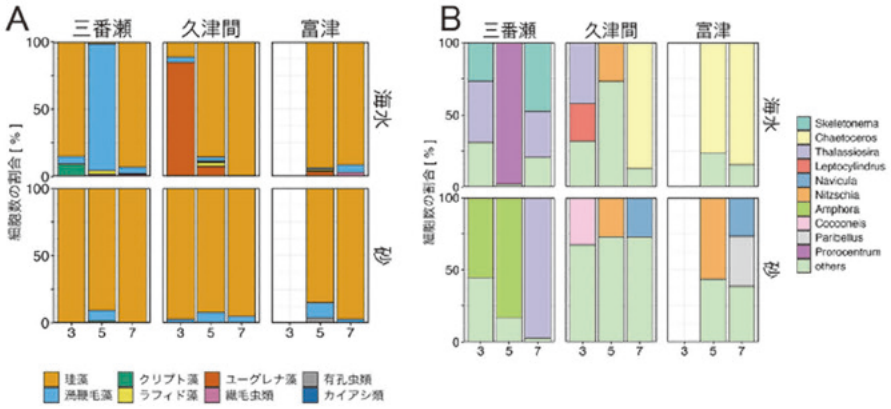

図-12　海水と砂から出現した A）高次分類の生物組成と B）優占属（5%以上出現）の割合。

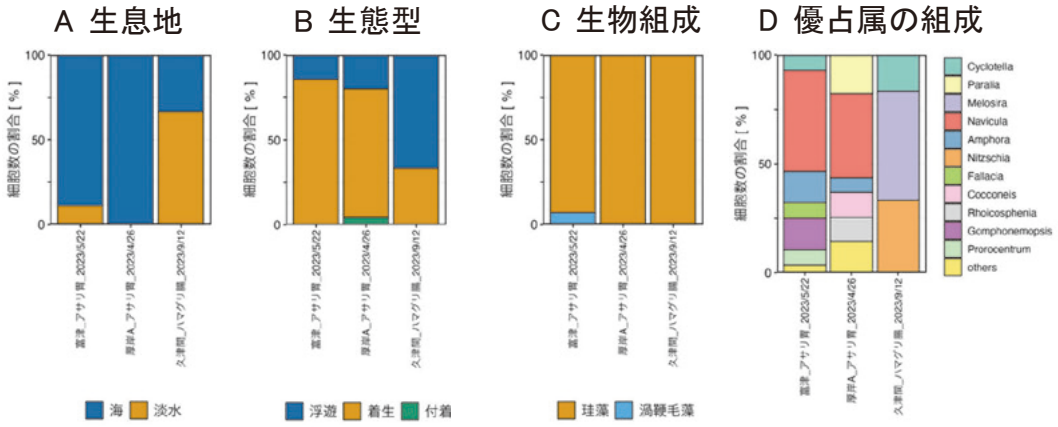

図-13　富津 5 月アサリ胃から出現した A）微細藻類の生息地，B）生態型，C）高次分類の生物組成，D）優占属（5%以上出現）の割合。

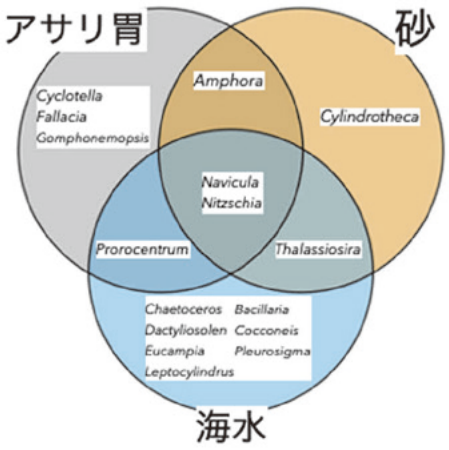

図-14　富津におけるアサリと砂と海水の 3 者で，珪藻と渦鞭毛藻の組成を属レベルで比較。

課題番号：Ⅱ－３）
課題名：栄養塩管理方針の検討

東京大学大学院新領域創成科学研究科
佐々木淳
千葉県水産総合研究センター
石井光廣
水産研究・教育機構水産技術研究所
渡部諭史

【背景・目的】

東京湾では 40 年以上にわたり水質総量削減に取り組まれ，全窒素や全リン等の水質指標で見た水質が改善されてきたが, 2000 年前後から冬季の養殖ノリの色落ち現象が顕在化する等，栄養塩の減少による漁獲量の減少が懸念されている。一方，夏季から秋季に見られる貧酸素水塊の規模は必ずしも縮小したとは言えず，栄養塩についても上層では減少したが中下層では増加しているとの指摘もある（石井，2021）。湾内における栄養塩の時空間的な偏在が強まっていることが懸念されており，上層における栄養塩の確保と水質保全とのバランスの達成と良好な水環境の実現に向けた，栄養塩管理方策の検討が期待されている。

本研究では数値モデルを用いた栄養塩管理方策の検討を行うことを目的とし，2022 年度に選定した流動モデル FVCOM（非構造格子有限体積法コミュニティ海洋モデル, Chen ら, 2003）と生物地球化学モデル ERSEM（Butenschön ら，2016）を，モデルカプラーFABM（Bruggeman & Bolding, 2014）を用いて連成させた計算システムのプロトタイプを，2023 年度と 2024 年度で構築する。2023 年度は流動場の計算をベースに染料計算と PyLag（Uncles ら，2020）を用いた粒子追跡計算システムの構築を行う．河川水，下水処理水，外洋水それぞれを起源とする栄養塩を染料や粒子と見立て，漁場区等の着目海域における栄養塩濃度と河川水等の起源別の寄与割合や着目海域への軌跡・時刻歴を把握する手法を構築する。さらに，FVCOM 開発チームによってマサチューセッツ湾を対象に開発された, ERSEM-FVCOM 計算システム（UK-FVCOM WEB）を東京湾に移植し，2020 年を対象に周年の試計算を行う。

【方法】

（1）FVCOM を用いた流動場および染料計算のプロトタイプ構築

流動場の再現性向上を意図し，風速場の時空間分布に関わる情報を収集する。また，下水処理水の境界条件を設定するため，東京都区部，千葉県，木更津市の下水処理水の流量・水質情報を収集する。

2022 年度に選定した FVCOM を用い，流動場の再現計算を行う。境界条件として，主要な河川の毎日の流量，気温，短波放射，風速場等の毎時の気象場，HYCOM（Naval Research Laboratory，2014-2024）を用いた湾口の水温・塩分等を境界条件として与え，2020 年の再現計算を行う。さらに，ノリ養殖における栄養塩不足が指摘される冬季に着目し，2020 年 1 月および 2021 年 1 月を対象に，東京都区部や木更津市等の下水処理水を考慮した流動場の計算を行う。これらの冬季の流動計算結果を用い，河川水，下水処理水，外洋水それぞれを起源

とする，栄養塩（溶存無機態窒素（DIN）を対象）の移流拡散を模擬した染料計算を行う。染料は全層から一様に放流するものとし，移流拡散方程式の線形性を利用し，起源別の計算結果を重ね合わせることで，対象漁場区における染料濃度の起源別の寄与割合を求める。さらに，1 月末の染料濃度計算値を初期値として再度 1 月の染料計算を実施するといった，繰り返し計算により，定常的な時系列解を探索する。

（2）粒子追跡計算システムの構築と染料計算との比較

染料計算では困難な，起源別栄養塩の移流拡散の軌跡や時刻歴の把握を目的として，FVCOM の計算結果を用い PyLag によるオフライン粒子追跡計算を行う。各粒子の移動速度は FVCOM の流速計算値を粒子位置で内挿して与え，各粒子の拡散は FVCOM の渦動拡散係数の計算値を用いたランダム過程を導入することで表現する。各起源から放流する粒子の個数は，流量と染料濃度の積である染料フラックスに比例させることで決定する。一方，染料計算における連続放流を適用することはコスト面で困難なため，粒子の適切な放流方法を検討する。さらに，対象漁場区へ到達する粒子の軌跡と時刻歴を把握するため，粒子の移動を時間を遡って追跡する，後方追跡計算の活用を検討する。

（3）ERSEM-FVCOM による試計算

FABM を用いた ERSEM と FVCOM のマサチューセッツ湾を対象とした連成計算システムを東京湾に移植する。同システムの問題点を調査・修正し，2020 年の東京湾を対象とした境界条件構築に係る前処理スクリプトを構築し，周年の試計算を行う。また，計算結果の大規模 netcdf ファイルを対象とする後処理スクリプトを構築し，解析環境を整備する。

（4）栄養塩管理方針検討委員会の開催

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計算システムを構築し，計算結果を活用した栄養塩管理方針の検討を行うために，専門家で構成される検討委員会を年 2 回開催する。

【結果】

（1）FVCOM を用いた流動場および染料計算のプロトタイプ構築

国土交通省モニタリングポストの高品質なデータセットを構築し，観測値との比較を通した精度の向上に取り組み，湾奥の検見川沖から湾央の川崎人工島を含め，全体として観測値との整合性の向上を図ることができた。風速場の時空間分布の考慮は必ずしも精度向上に至らず，次年度への課題とした。

染料計算では風系場の特徴が異なる 2020 年と 2021 年の 1 月を対象として（図 1 左），河川水や外洋水に加え，東京都区部や木更津市の下水処理水を起源とする DIN に見立てた染料フラックスの境界条件を適用し（図 1 右），三番瀬，木更津，富津の各漁場区を対象とした（図 2），起源別の染料濃度の時系列を求めた。1 月の 1 か月分の計算を初期条件を更新しながら 3 回繰り返すことで，定常的な時系列に漸近する様子が把握できた。

（2）粒子追跡計算システムの構築と染料計算との比較

予備検討から FVCOM による 10 分間隔の流れ場の計算値を PyLag への入力に用いることが適切と判断した。2020 年と 2021 年の 1 月を対象とし，計算コストに配慮しながら十分な粒子数を確保するため，表層放流を採用することとし，染料フラックスの相対的に小さい河川水と下水処理水の粒子数を標準値の 70 倍とし，それらの計算結果を 1/70 倍することで標

準値に戻した。計算効率に配慮しながらできるだけ連続放流に近い状態を模擬するため，5 分，60 分，360 分，720 分のそれぞれの時間間隔で粒子を放流した計算を実施し，精度と計算コストのバランスから 60 分間隔での放流を採用することとした。

図 3 に 2020 年 1 月と 2021 年 1 月の三番瀬，木更津，富津の各漁場区に到達する起源別粒子数の時系列を示す。三番瀬においては近隣河川である海老川，真間川の影響が比較的大きいが，荒川，江戸川，隅田川の河川水や森ヶ崎下水処理水の寄与も顕著であった。木更津では 2020 年は近隣の小櫃川の影響が大きく，1 月 13 日頃から荒川，隅田川等の影響が強くなる様子が見られた一方，2021 年は全体に荒川，隅田川等の主要河川の影響が顕著で，風系場の相違（図 1 左）によると思われる，年による変動の大きい結果が得られた。さらに，三番瀬，木更津ともに森ヶ崎下水処理水をはじめとする下水処理水の寄与も顕著であった。このように計算値は 1 か月の時間スケールでは風系場等に起因する表層流動場に大きく左右され，近隣河川の影響だけでなく，遠方の主要河川や下水処理水の影響も大きいことが示唆された。

図 4 上に 2020 年 1 月の富津における，染料と粒子追跡の計算結果の比較を示す。ただし，計算結果は主要な起源を対象にグループ分けして見やすくした（図 3 右に粒子追跡計算による起源別の元の計算値を示す）．両者の時系列は定量的には相違が大きいものの，染料濃度と粒子数のピークの時期や起源が主要な河川水と東京都区部の下水処理水（特に森ヶ崎下水処理水）である点で整合している。1 月 9 日の粒子数に着目すると，荒川の寄与が大きい結果が得られた。図 4 左下は 1 月 8 日に荒川河口の表層と中層から放流された粒子が 1 月 10 日に到達する位置を示しており，赤点が 1 月 10 日 0 時における各粒子の到達点，青線は各粒子の軌跡を示している。富津に到達した粒子は表層放流のみであり，染料計算では全層から放流しているのに対し，粒子計算では表層放流としたことが計算結果の相違の一因であると考えられる。次に，寄与の大きい荒川および森ヶ崎下水処理水と近隣の小糸川および小櫃川の河川水それぞれの到達粒子数と到達時間の時系列を図 4 右下に示す。粒子数で見れば，荒川・森ヶ崎の寄与が圧倒的に大きいが，到達時間で見ると小糸川・小櫃川が数日程度であり，荒川・森ヶ崎と比べて約 1/10 の時間スケールであることが示唆された。

定常的な北風系が連吹した 2020 年 1 月 17 日までの約 6 日間と，直前に北風系から南西風に風向きが急変した 2021 年 1 月 7 日までの約 6 日間に着目し，それぞれ図 5 の左および右に富津に到達した粒子の 143 時間前の位置（赤丸）と到達までの軌跡を 4 時間間隔で示した。2020 年の 3 つの結果（図 5 左）は類似しており，北風系連吹時の定常的な流動状態が示唆される。一方，2021 年の 3 つの結果（図 5 右）は富津に到達する粒子の 143 時間前の位置が大きく変動しており，風系場の変動に敏感なことが見て取れる。ここで検討した短時間スケールでは風系場の変動等による流況変動によって，対象漁場区へ達する栄養塩の起源が大きく変動することを示唆している。実際，木更津市下水処理水（木更津市 WEB）による盤州干潟沿岸への影響を見たところ，風系場に依存した流れ場の南北成分が卓越し，冬季は北風系が連吹する傾向にあることから，盤州北部への栄養塩供給頻度は小さいことが示唆された。

以上のように染料計算と粒子計算を組み合わせることで，各漁場区における保存物質と仮定した栄養塩濃度の起源別の寄与割合や軌跡・到達時間を知ることができ，漁場区における栄養塩供給方策を検討する上で有用な手法となりうることが示唆された。一方，両者の計算法の結果を直接的に比較できるようにするため，計算コストを考慮しながら最適な放流方法等を確立することが今後の課題である。

（3）ERSEM-FVCOM による試計算

FVCOM を用いた 2020 年の東京湾周年計算を行い，1 時間間隔の水位，流速ベクトル，渦動粘性・拡散係数，水温等の ERSEM の駆動に必要な物理場の情報を netcdf ファイルとして出力し，これをオフラインで入力することで ERSEM による水質・生態系場の試計算を行った。ERSEM では生成・消滅項に関わる従属変数の時間変化（速度）が計算され，その速度情報は FABM を介して FVCOM に受け渡され，FVCOM によって移流・拡散・生成・消滅項に係る時間積分が行われた。その計算結果の情報は再び FABM を介して ERSEM に受け渡され，次の時間ステップの計算に向けた速度情報を更新する連成計算を行った。連成計算に用いた FVCOM はオリジナルの FVCOM に FABM ベース生態系モデルの時間積分機能が追加されたもので，マサチューセッツ湾に適用されたモデルを FVCOM 開発チームより入手し，試計算を進めながら課題を挙げ，開発チームの協力を得て東京湾への適用に必要な修正を行った。

図 6 に計算結果のスナップショットを示すが，ERSEM-FVCOM による周年計算は高い安定性を有し，定性的には妥当な挙動が得られたと考えているが，モデル係数値の選定等を含め，次年度の課題として再現性の向上に向けた検討を継続する。

（4）栄養塩管理方針検討委員会の開催

専門家で構成される検討委員会を令和 5 年 9 月 15 日および令和 6 年 2 月 2 日に開催した。両日とも，八木宏防衛大学校教授，山崎明人千葉県漁業協同組合連合常務理事を外部検討委員として迎え，栄養塩管理の検討に資することを目的とする数値モデルシステムの構築と計算結果について検討を行った。その他の参加機関は以下の通り。水産庁，東京大学，千葉県水産総合研究センター，全国水産技術協会，水産研究・教育機構。

リンをはじめとする栄養塩の管理について検討するにあたっては，陸域からの供給，底質起源の溶出，外洋からの供給といった，外洋や流域を含む湾全体が関わる複雑な物質循環過程の中で，栄養塩の起源に留意する必要がある。さらに，湾全体の物質循環過程とノリ漁場等の局所的な海域との関係を漁業サイドからの具体的なニーズを考慮しつつ検討していく必要がある。このため，このような多重時空間スケールを有する現象の解析に有効な数値モデルや解析手法を模索した。委員会での検討内容は，上記（1）から（3）の成果に反映された。

【参考文献】

石井光廣：貧酸素水塊の発生による栄養塩供給，月刊海洋，53(9), 489-494, 2021.

木更津市 WEB: https://www.city.kisarazu.lg.jp/shisei/shingikai/kaigiroku/toshi/1002623.html

Bruggeman, J., Bolding, K.: A general framework for aquatic biogeochemical models, Environmental Modelling & Software, 61, 249–265, 2014.

Butenschön, M., Clark, J., …, Torres, R.: ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels, Geoscientific Model Development, 9(4), 1293–1339, 2016.

Chen, C., Liu, H., Beardsley, R.C.: An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries, J. Atmospheric and Oceanic Tech., 20(1), 159-186, 2003.

Naval Research Laboratory: Global Ocean Forecast System (GOFS) 3.1 [Dataset], 2014-2024. https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis

UK-FVCOM WEB: https://github.com/UK-FVCOM-Usergroup/uk-fvcom
Uncles, R. J., Clark, J. R., Bedington, M., Torres, R.: “On sediment dispersal in the Whitsand Bay Marine Conservation Zone: Neighbor to a closed dredge-spoil disposal site” in Marine Protected Areas: Evidence, Policy and Practise, ed Robert Clark and John Humphreys (Elsevier Inc.), 2020.

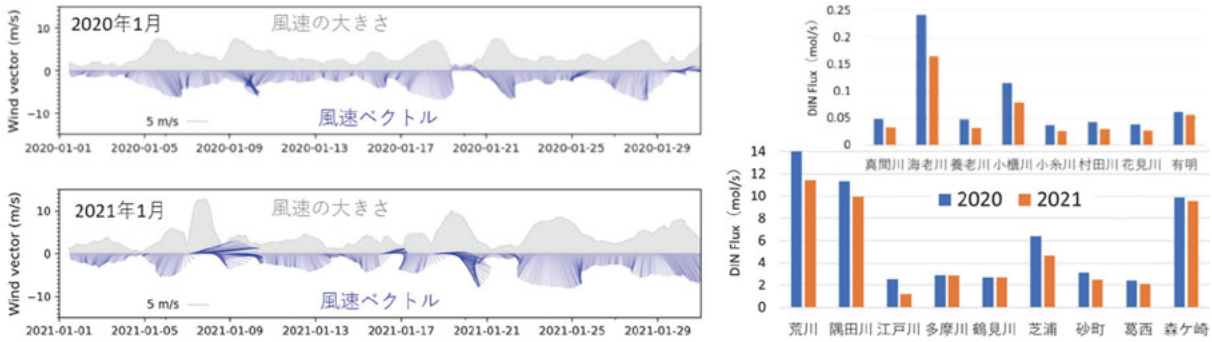

図 1　2020 年 1 月と 2021 年 1 月における，気象庁千葉測候所における風速場（左）と河川水および下水処理水の平均 DIN フラックス（mol/s）（右）

図 2　三番瀬（左），木更津（中），富津（右）における染料濃度着目点（赤丸）と粒子カウント領域（ポリゴン）。国土地理院地図を基に追記。

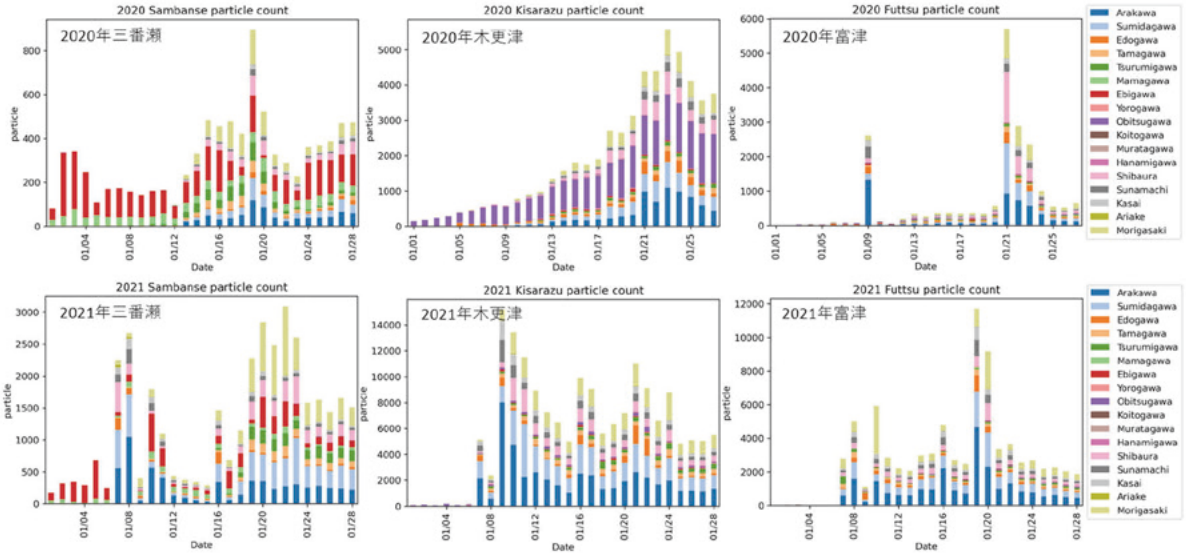

図 3　三番瀬（左），木更津（右），富津（右）における，2020 年 1 月（上）と 2021 年 1 月（下）の起源別到達粒子数の時系列

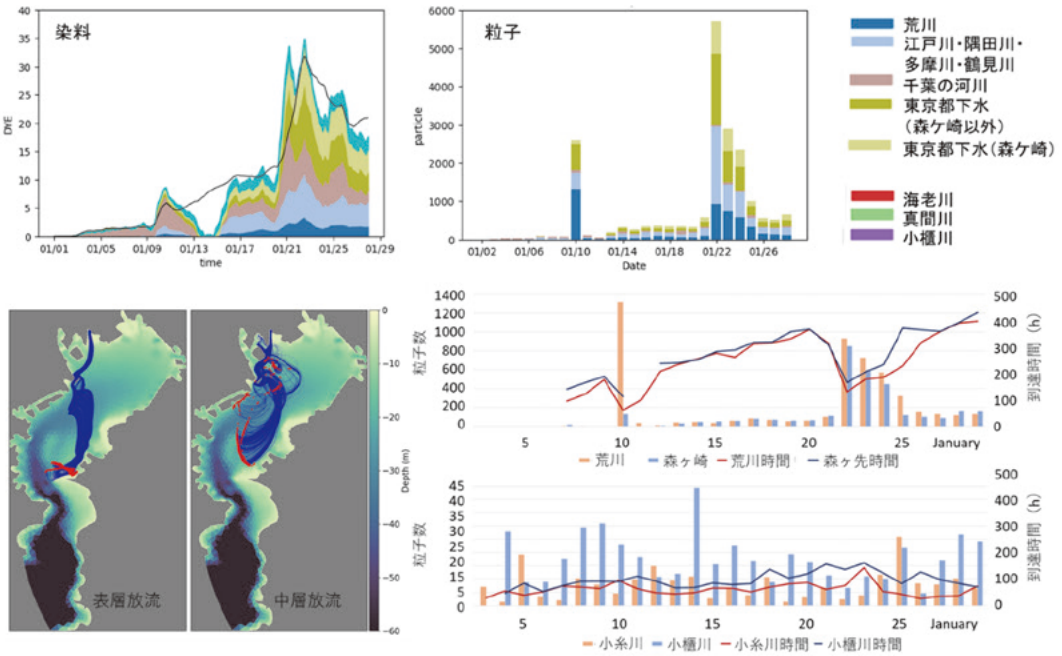

図 4　2020 年 1 月の富津における染料濃度（左上）と粒子数（右上）の起源別（一部集約）の時系列の比較。左下は 1 月 8 日に荒川から放流された粒子が 1 月 10 日に到達する位置（赤点）と軌跡（青線）で，左は表層放流，右は中層放流の結果．右下は富津における遠方の荒川河川水と森ヶ崎下水処理水（上側）および近隣の小糸川と小櫃川の河川水を起源とする粒子数と平均到達時間（h）の時系列。

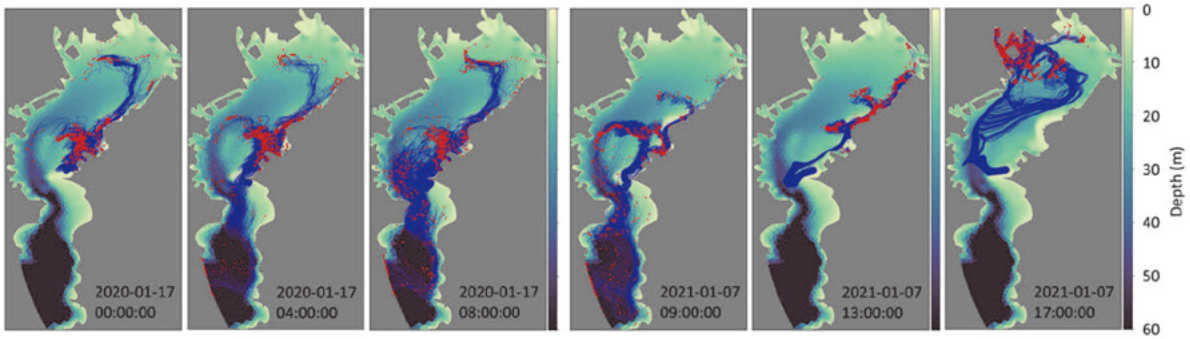

図 5　2020 年 1 月 17 日 0 時・4 時・8 時（左）と 2021 年 1 月 7 日 9 時・13 時・17 時（右）に富津に到達した粒子の 143 時間前の位置（赤丸）と到達までの軌跡

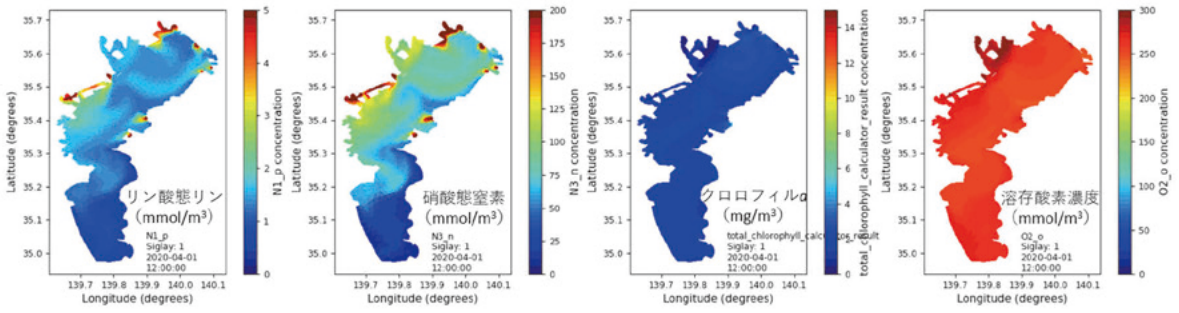

図 6　ERSEM-FVCOM による 2020 年の周年計算における，
表層水質計算結果のスナップショット（2020 年 4 月 1 日）

課題番号：III－１）

課題名：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

水産研究・教育機構 水産資源研究所
寒川清佳，青木一弘，渡辺剛，横内一樹，堀正和（社会・生態系システム部）
筧茂穂，田所和明（海洋環境部）
愛知県水産試験場
柘植朝太郎，石田俊朗，二ノ方圭介，河住大雅，大澤博（漁場保全グループ）
中島廉太朗，中野哲規，加藤毅士（海洋資源グループ）

【背景・目的】

伊勢・三河湾ではノリ，アサリ，イカナゴを始めとする水産資源生産量の減少や低迷が顕著になっている。その要因として，貧栄養化等の環境変化にともなう低次栄養段階に位置する動・植物プランクトン等の生物生産の低下が指摘されている。しかし，それらが環境変化にどのように応答して変化しているかは未解明な点が多い。また，湾内の栄養塩類等の水質環境の変化に外洋水が与える影響が考えられるが，外洋と湾内の循環関係についてはよく分かっていない。本課題では，栄養塩動態等に影響を与える外洋からの循環関係を評価し，栄養塩類等の環境変化が動物プランクトンや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する。

【方法】

伊勢・三河湾で定期的な現地調査と自動観測ブイによる連続観測を実施して，栄養塩類等の水質環境および動・植物プランクトンについて現況を把握するとともに，過去の観測と比較してそれらが時間的・面的にどのように変化しているのかを把握する。また，既存の海洋観測資料および生物試料の収集，整理，分析を行い，動物プランクトン群集と植物プランクトン群集の季節的な変化および経年的な変化を解析して，その変動に影響を及ぼす要因について比較検討する。さらに，外洋からの循環関係を評価するために，昨年度収集した既存の海洋観測資料を解析することで，湾内外の循環構造および栄養塩動態を評価するモデルのフレームワークを決定する。評価モデルの候補として，ボックスモデルや診断モデル等を検討する。

（1）水質環境と動・植物プランクトンに関する定点観測の実施

伊勢・三河湾の愛知県沿岸域において，概ね月 1 回以上の調査を実施し，水温，塩分，溶存酸素などの観測を行うとともに，主な環境指標である窒素，リンやクロロフィル *a* の分析を行う（図 1)。試水を検鏡して，植物プランクトンの細胞数密度，およびその構成を把握する。また適宜，プランクトンネット等により動物プランクトンを採集する。さらに自動観測ブイ 3 基を用いて連続観測を行い，三河湾内の水質環境について時間的な変化を把握する。

（2）水質環境が動・植物プランクトンの組成や量に与える影響の検討

（2）-1 植物プランクトン群集の類型化と水平分布および経年変化

伊勢・三河湾の植物プランクトン群集について，これまでクロロフィル *a* 濃度に基づき栄養塩濃度の低下にともなう植物プランクトン現存量の低下が指摘されてきた。しかし，量的な変化だけでなく質的（群集組成）な変化も生じていると推察される。栄養塩等の海洋環境の変動と植物プランクトンとの関係の解析に先立ち，植物プランクトン群集全体の季節および経年変動を捉えるために，クラスター解析によって群集の類型化を行い，その類型化グループ（以下グループ）の水平的な分布様式と経年的な変化を整理した。各グループは指標値（細胞密度，種数，多様度指数，均一性指数）と，グループの代表種（指標種と優占種）によって特徴づけた。これらの結果に基づき，伊勢湾・知多湾・三河湾における植物プランクトン群集の季節および経年的な変化を明らかにする。解析にあたっては事前に植物プランクトンの分類データ等を整理して解析データを作成した。

（2）-2 動物プランクトン群集の変動に影響を及ぼす要因について

今年度は，三河湾における動物プランクトン群集の季節・経年変化を明らかにするため，昨年度から今年度にかけて長期的な観測試料の収集と整理を行い，分析試料の選出とクラスター解析による群集の類型化を行った。昨年度に続き，愛知県による浅海定線等の改良型ノルパックネット（335μm 目合，口径 45cm）曳網で得られた 1978 年から 2023 年によるホルマリン固定試料の整理を行い，試料の状態確認及び分析試料と付随資料の整理を行った。今年度は，三河湾における長期変化の分析を行うための測点を選出し（P27 ; 図 2），昨年度に分析を行った 2 通年（2006 年と 2020 年）の間で部分的に分析を行った。計数された全分類群について水柱積算値を算出した（inds. m^{-2}）。優占した 2 分類群（カイアシ類と枝角類）については，種レベルでの分析を行い，Bray-Curtis 類似度指数を使用したクラスター解析による類型化を行った。類型化された各グループの特性と季節的な年変化および環境変化との関係について解析した。

また環境との比較では，観測項目にある全リン（TP）から溶存無機態リン（DIP）を差し引いた粒子状有機態リン（POP）を算出した。粒子状有機態窒素（PON）も同様に，全窒素（TN）から溶存無機態窒素（DIN）を差し引いて算出した。環境要因との比較には，ネットの曳網測点（P27）の近隣で，水質環境観測を行っている測点（K5）のデータセットを用いた（図 2）。

（3）湾内の循環構造や栄養塩動態評価モデルの検討

（3）-1　MOVE-jpn を用いた伊勢湾・三河湾の循環構造の経年変動の解析

伊勢湾・三河湾の循環構造の経年変動を明らかにするために，気象庁が提供する海洋モデル MOVE-jpn の出力値を用いた粒子追跡実験を行った。公開版 MOVE-jpn（2008～2019 年）のデータをダウンロードし，伊勢湾・三河湾およびこれらの外海域の水温，塩分，流速データを抽出した。4 次精度 RungeKutta 法および等密度面への流入を実装した粒子追跡モデルを構築した。伊勢湾湾口部に 3 次元的に 114 個の粒子を配置し（図 3），1 ヶ月間粒子追跡を行った（図 4）。日別に粒子を放流・追跡し，三河湾への粒子の流入数の経年変化を明らかにした。また，初期配置における栄養塩濃度から三河湾への栄養塩供給ポテンシャル（三河湾へ流入した粒子について，初期位置時の栄養塩濃度を積算したもの）の経年変化も見積もった。

（3）-2 診断モデルによる流入量の推定

伊勢・三河湾の循環構造の経年変動を明らかにするために，診断モデルによる海水流入量の推定を行った。モデルの基盤には Princeton Ocean Model（Blumberg and Mellor, 1987)の Z 座標系コードの診断モードを使用した。計算領域は伊勢・三河湾を含む領域（図 5；東経 136.2-137.5°,北緯 34-35.1°）で，水平解像度は 0.01°，鉛直解像度は 40m 以浅で 1m，深化するほど徐々に大きくなり 2000m 深で 500m とした。対象期間は 2006-2009 年と 2019-2021 年とし，春季（3-5 月)・夏季（6-8 月)・秋季（9-11 月)・冬季（12-2 月)の平均的な水温・塩分場を，観測点における鉛直分布のデータを 3 次元的に内外挿することで算出した。加えて，Japan Oceanographic Data Center の四日市港防波堤における海上風データを用いて算出した海面風応力および，国交省水文水質データベースの計算領域内の 1 級河川流量を用いた淡水フラックスによりモデルを駆動した。また，解析に気象庁アメダスの名古屋局の雨量データも使用した。

伊勢湾南部断面と三河湾湾口断面（図 5）における湾外水流入フラックスおよび，伊勢湾南部断面では近年減少が著しい DIP の流入フラックスを計算した。DIP の流入フラックス算定では，伊勢湾南部断面（図 5）近傍の 3 点における表層・底層の観測値を内外挿し，鉛直断面の DIP 分布を算出した。

【結果】

（1）水質環境と動・植物プランクトンに関する定点観測の実施

① 伊勢湾における全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度の推移（図 6）

全窒素：比較年中最低の水準で推移しており，ほとんどの期間が水産用水基準における水産 1 種（全窒素≦0.3mg/L）の濃度水準であった。また，8 月上旬と 10 月中旬は比較年と比べて特に濃度が低く，0.2mg/L を下回っていた。全リン：全体的には比較年と同等か低めで推移しており，多くの月で水産 1 種(全リン≦0.03mg/L)の濃度水準であった。また，全窒素と同様，8 月上旬と 10 月中旬は特に濃度が低く，0.02mg/L を下回っていた。クロロフィル *a*: 8 月上旬から 11 月中旬にかけて比較年よりも低く推移した。その他は比較年と同程度だった。また，5 月から 7 月以外はアサリの生育に必要であると考えられる 10μg/L（青山・蒲原 2022）を下回っていた。

② 知多湾における全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度の推移（図 7）

全窒素：8 月中旬に大きな濃度上昇があり，降雨に伴う DIN 濃度の上昇によるものであった。その他は 2022 年度と同様，比較年と同等か低く推移した。全リン：6 月上旬，8 月中旬に大きな濃度上昇があり，6 月上旬は *Heterosigma akashiwo* とクリプト藻類の複合赤潮の発生，8 月中旬は降雨に伴う DIP 濃度の上昇に伴うものであった。その他は比較年と同等か低く推移した。クロロフィル *a*：6 月上旬に *H. akashiwo* とクリプト藻類の複合赤潮の発生に伴う大きな濃度上昇があった。6 月中旬，7 月中旬から 8 月中旬， 12 月中旬は比較年よりも低かった。また，2022 年度よりも 10μg/L を下回る月が多かった。

③ 渥美湾における全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度の推移（図 8）

全窒素：6 月上中旬に大きな濃度上昇がみられ，6 月上旬は記録的豪雨に伴う DIN 濃度の上昇および *H. akashiwo* とクリプト藻類の複合赤潮の発生，6 月中旬は小型鞭毛藻と *Skeletonema* spp.の複合赤潮によるものであった。その他は比較年と同等か低い水準で推移した。全リン：5 月上旬と 6 月上中旬，11 月中旬に濃度上昇がみられ，5 月上旬は降雨に伴う

DIP 濃度の上昇，6 月上旬は記録的豪雨に伴う DIP 濃度の上昇および *H. akashiwo* とクリプト藻類の複合赤潮, 6 月中旬は小型鞭毛藻と *Skeletonema* spp.の複合赤潮, 11 月中旬は *A. sanguinea* 赤潮の発生によるものであった。その他は比較年よりも低めか同等の水準で推移した。クロロフィル *a*：6 月上旬，11 月中旬に大きな濃度上昇がみられ，6 月上旬は *H. akashiwo* とクリプト藻類の複合赤潮の発生，11 月中旬は *A. sanguinea* 赤潮の発生に伴うものあった。7 月中旬から 8 月中旬にかけてと 12 月上旬，中旬は比較年より低かった。その他は比較年と同等か低めで推移した。また，10μg/L を下回る月も多かった。

④ 各湾代表点における主要なプランクトンの消長

今年度の各湾代表点における主要なプランクトンの消長とその構成割合を図 9 に示す。今年度，細胞密度が高かったケイ藻類の 4 種（*Skeletonema* spp.，*Chaetoceros* sp(p).，*Leptocylindrus danicus*，*Pseudo-nitzschia* spp.）および，その他の藻類の 2 種（*H. akashiwo*，クリプト藻類）を選定し，細胞密度の変動とその構成割合を解析した。全ての測点で多くの期間，*Skeletonema* spp.や *Chaetoceros* sp(p).といったケイ藻類が優占しており，*L. danicus* も恒常的にみられた。*H. akashiwo* は，クリプト藻類と同様にケイ藻類の衰退時に優占種となった。構成割合をみると，*Skeletonema* spp.が占める割合がどの湾においても大きいが，その程度は湾毎に差があった。伊勢湾は *Skeletonema* spp.と *Chaetoceros* sp(p).がほぼ同等の割合だったが，渥美湾は *Skeletonema* spp.が周年大部分を占め，知多湾はその中間だった。また，クリプト藻類や *L.danicus* が占める割合は伊勢湾，知多湾で大きかった。加えて，*Pseudo-nitzschia* spp.は伊勢湾で少なかった。

⑤ 考察

今年度の伊勢・三河湾の全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度は，赤潮発生時や降雨による出水時を除けば，比較年よりも低く推移していた。蒲原ほか（2021）は，アサリ資源の維持には全リン濃度を 1998～2006 年度の水準とする必要があるとしているが，今年度の全リン濃度は 1998～2006 年度どころか，濃度が低下した 2010 年代の年平均を超えることも少なく，アサリ資源の回復のためには栄養塩類が不足していると考えられた。また，伊勢湾では全窒素で 0.2mg/L，全リンで 0.02mg/L を下回る月があった。その採水時には透明度が 10m を超える測点があった等，湾外水の関与が示唆されるが，湾外水の特徴である高塩分や高透明度といった条件を満たさない測点もあり，この要因については今後解析を行う必要がある。

伊勢・三河湾ともに多くの期間において *Skeletonema* spp.が優占していた。一方，その程度は湾毎に差があった。大阪湾においては，*Skeletonema* 属が 1970 年代後半以降多くの期間において 50%以上を占めていたが，1990 年代後半以降 *Chaetoceros* 属，*Leptocylindrus* 属などの割合が増加する傾向が見られており（多田ほか 2012），播磨灘においても，植物プランクトン優占種が *Skeletonema* 属から *Chaetoceros* 属に変化し，その要因として DIN 濃度の低下が指摘されている（Nishikawa et al. 2010）。今回の解析結果において，栄養塩類濃度が低い伊勢湾においては *Chaetoceros* sp(p).や *L. danicus*，クリプト藻類の割合が大きく，栄養塩類濃度の低下が植物プランクトン組成に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

（2）水質環境が動・植物プランクトンの組成や量に与える影響の検討

（2）-1 植物プランクトン群集の類型化と水平分布および経年変化

植物プランクトン群集データを整理し，伊勢・三河湾から出現した 132 分類群，2000 年～

2020 年の 3999 試料を用いて解析を行った。クラスター解析の結果，5 グループに分類された。指標値（細胞密度，種数，多様度指数，均一性指数）から，5 グループは次のように特徴づけられた：グループ 1 は細胞密度が高く多様度が低い，グループ 2 は細胞密度が低く多様度は中間，グループ 3 は細胞密度も多様度も中間，グループ 4 と 5 は細胞密度が中間で多様度が高い。優占種（図 10）と指標種分析の結果（表 1）から各グループの代表種は，グループ 1 は Skeletoname, グループ 2 は Nitzschia, グループ 3 は渦鞭毛藻, グループ 4 は Thalassiosira, グループ 5 は Chaetoceros とした。各湾のグループの構成は経年的に変動している傾向が示されたので，月ごとに分割して変化を確認した。このうち，夏（6 月）を例に挙げると（図 11），伊勢湾は 2000-2004 年までグループ 3（緑色，渦鞭毛藻）で構成されたが，2005-2008 年からグループ 1(赤色，Skeletonema)とグループ 3 になり，2009 年からはグループ 4（オレンジ色，Thalassiosira）も加わったが，2014 年からはグループ 3 が無くなり，2016 年以降はほぼグループ 4 のみ（一部グループ 2 青色）で構成された。知多湾では 2000-2006 年までグループ 1 とグループ 3 で構成されていたが，2007 年以降グループ 4 が加わり，徐々にその割合が増加して, 20013 年からはグループ 3 が消えグループ 4 とグループ 1 で構成された。渥美湾では 2000-2008 年までグループ 1 と 3 と 4 の 3 グループで構成され，2009 年以降グループ 2 が加わり，2016 年にグループ 1 が消え，2017 年にグループ 3 も無くなり，2020 年にはグループ 2 のみで構成されるようになった。このように季節（月）で構成するグループに経年的な変化が見られ，湾ごとに異なる変動パターンを示すことが明らかになった。次に，各月ごとに 2000〜2020 年のグループの水平分布を図示した。例えば，先程例に挙げた夏（6 月）を見てみると（図 12), 2004 年と 2010 年と 2017 年のように全体が同じグループで構成される年もあれば，2008 年 と 2012 年と 2018 年と 2020 年のように湾ごとに異なるグループで構成されることもあり，こうした水平的な構成グループの相違は栄養塩などの海洋環境の変化を反映していると推察された。

最後に各湾の代表点における年月ごとのグループの遷移を調べた（図 13)。ここでは知多湾の地点 K5 の結果を紹介する。2000-2004 年ごろまで夏にグループ 1（Skeketonema，赤色），秋冬または春にグループ 3（渦鞭毛藻，緑色）が出現し，間を埋めるようにグループ 4（Thalassiosira，オレンジ色）というパターンであった。2005 年以降夏のグループ 1 と 4 はあまり変わらないものの，グループ 3 に代わってグループ 2（Nitzschia，青色）やグループ 5（Chaetoceros，水色）の頻度が増加した。グループ 2 は細胞密度が低く，栄養要求の低い Nitzschia（Pseudo-nitzschia を含む）で構成されておいり，栄養塩環境の変化に伴い植物プランクトン組成が変化してきていると考えられる。グループ 2 の出現頻度の増加は伊勢湾（地点 N9）や渥美湾（地点 A7）でも同様の傾向が示された。こうした全域で類似の傾向と湾ごとに異なる変動パターンがあることがわかった。

（2）-2 動物プランクトン群集の変動と影響を及ぼす要因について

2006 年〜2020 年の間で抽出した 93 試料を用いて，三河湾における動物プランクトン群集の長期変化を解析した。動物プランクトン群集を分類群毎に比較すると，カイアシ類が冬から春に優占し，夏に枝角類（ミジンコ類）が優占した（図 14)。カイアシ類の水柱積算値の年平均は，分析期間中で 2017 年に最も高く（22,543 inds. m^{-2}），2013 年に最も低かった（7,038 inds. m^{-2}）（図 15)。一方で，ミジンコ類の年平均は 2013 年に最も高く（66,077 inds. m^{-2}），2017 年に最も低かった（72 inds. m^{-2})。カイアシ類とミジンコ類ともに，2006 年は分析期間中 2 番

目に低かった（カイアシ類 9,378 inds. m^{-2}，ミジンコ類 1,154 inds. m^{-2}）。月別には，カイアシ類は全ての年で 4〜5 月に高く，分析期間中では 2017 年 5 月に最も高く（159,137 inds. m^{-2}），次いで 2015 年 4 月に高かった（94,979 inds. m^{-2}）（図 16）。ミジンコ類は全ての年で 7〜8 月に高く，分析期間中では 2013 年 7 月に最も高く（423,526 inds. m^{-2}），次いで 2013 年 8 月に高かった（269,589 inds. m^{-2}）（図 17）。

クラスター解析による類型化の結果，三河湾の甲殻類プランクトン群集（カイアシ類と枝角類）は 6 つのグループに分かれた（A〜F 群集；図 18a）。A 群集と B 群集はそれぞれ 2010 年 11 月と 2015 年 7 月の 1 試料のみから構成された。C 群集は主に 2010 年の春〜夏と 2020 年の 9 月の 4 試料から構成され，D 群集は 2017 年以前の春〜初夏の 4 試料から構成された。E 群集はミジンコ類の *Penillia aviostris* が代表種となる 40 試料から構成され，2006〜2008 年は夏〜冬に出現したが，2015 年以降は主に晩夏〜仲秋と出現期間が短くなった。F 群集は内湾性カイアシ類の *Acartia* (*Acartiura*) *omorii* が代表種となる 43 試料から構成され，2013 年以前は冬〜春に出現したが，近年は晩秋〜初夏と出現期間が長くなった。甲殻類プランクトン群集の季節的な変化は分析期間の前半と後半の年で変化し，ミジンコ類が優占する群集の時期が短くなり，カイアシ類が優占する群集の時期が長くなった。

E 群集はさらに有意に 5 つの群集に分かれた（E-1〜E-5；図 18b）。E-1 群集は 2013 年以前は 6〜7 月に出現していたが，2015 年以降は 7〜8 月と出現時期が遅くなった。E-4 群集は，2007〜2013 年に出現していたが，2015 年以降は出現しなくなった。E-5 群集は 2015 年を最後に出現しなくなった。これらの結果より， 2013〜2015 年頃を境に近年は季節的な群集の変化が遅くなること，また夏から秋に出現していた群集が近年はいなくなることが明らかになった。F 群集はさらに有意に 8 つの群集に分かれた（F-1〜F-8；図 18c）。2006〜2010 年は冬から春にかけて，F-8 群集，F-7 群集，F-2 もしくは F-3 群集と推移していたが，2015 年以降は F-8 群集の出現期間が春まで伸びた。また 2013 年は他の年と比べて大きく異なり，F-8 群集の代わりに F-4 群集と F-5 群集が出現した。これらの結果から，今年度分析した期間中で，2013 年は群集構造がが大きくシフトし，近年は冬〜春の一様化が進んでいることが明らかになった。

2006 年，2013 年，2017 年と群集パターンが変化する特徴的な年が明らかになったため，これらの年について環境要因との比較を行った。ノリや植物プランクトン等が利用する無機態の栄養塩（DIN と DIP）を全窒素と全リン（TN と TP）から除いた，粒子状有機態（PON と POP）との比較も行った。2006 年は，PON 濃度は低くなく，DIN・DIP・POP 濃度は高く，クロロフィル *a* 濃度も高いことから，カイアシ類とミジンコ類の餌環境は十分だったと考えられる。しかし，水温が海面・海底直上ともに低かったため，休眠卵が孵化するのに十分な水温まで達しなかったことが出現数の減少につながった可能性がある。群集が大きく変化した 2013 年は，湾内の塩分が高く，栄養塩濃度（DIN と DIP）が低かった。また雨量が少なく，矢作川の流量と栄養塩流量が低かった。これらの結果から，2013 年は雨量が少なく，陸側から知多湾（三河湾西部）に流れ込む河川水と栄養塩が減少したため，湾内の栄養塩濃度が低く且つ塩分が下がらなくて，群集の形成に影響を与えたと考えられる。また 2013 年は，好的な環境になると単為生殖で爆発的に増加するミジンコ類が極端に多く，PON が激減した年と一致するため，ミジンコ類にとって好適な環境が形成され，捕食圧効果で PON が大幅に減ったと考えられる。2017 年は，現在まで継続している黒潮大蛇行が始まった年にあたり（8 月

から），今年度の MOVE-jpn 解析結果より，三河湾への DIN 流入ポテンシャルは 2014〜2017 年は高く，2018 年以降に減少し，黒潮離岸距離とよく対応したとの結果がでた（後述(3)-1 より）。2015 年と 2017 年はカイアシ類が多かった年にあたり，また群集の一様化が進んだ期間と一致するため，黒潮大蛇行前の期間はカイアシ類が豊富で一つの群集が優位になる環境が形成されていたと考えられる。以上のことから，陸（河川）と外洋からの流入の変化が，湾内の海洋環境変化を引き起こし，三河湾における動物プランクトン群集の季節変化と年変化に影響を与えていることが示唆された。

（3）湾内の循環構造や栄養塩動態評価モデルの検討

（3）-1　MOVE-jpn を用いた伊勢湾・三河湾の循環構造の経年変動の解析

三河湾への日別の流入粒子数を月別に集計した結果，粒子の流入は 7〜9 月に多く，その他の月で少ないという季節変動を呈したものの，明瞭な経年変動は見られなかった（図 19）。三河湾への DIN の流入ポテンシャルは 2009 年後半〜2013 年にかけて低く，2014〜2017 年に 2008 年〜2009 年前半と同様に高い時期が継続し，2018〜2019 年は減少した（図 20 赤線）。粒子が持つ栄養塩濃度として使用した三重県水産研究所による浅海定線調査の測点 18 における表層および底層の DIN 濃度は 2010〜2013 年に 6□mol/L 程度で低め傾向であり，2014・2015 年に 10□mol/L を越えて高濃度となったものの，それ以降減少傾向にあった。この DIN 濃度の経年変動の影響を受けて三河湾への DIN の流入が 2018 年以降低くなっていた。三河湾への DIN 流入ポテンシャルについて，海上保安庁による大王埼における黒潮離岸距離と比較したところ，2018 年以降の黒潮離岸距離が 200km を越える時期と三河湾への DIN 流入が低下した時期がよく対応していた（図 20 緑線）。黒潮が離岸している時期には湾口部の流れが停滞しやすく，湾口部の外あるいは下層からの栄養塩供給が低下するとともに，湾口部における光合成で栄養塩濃度が低下した海水が湾内に流入することで，湾内への栄養塩の供給が低下している可能性が考えられた。

（3）-2 診断モデルによる流入量の推定

伊勢湾南部断面における湾外水流入フラックス（図 21）は，BOX モデルを用いて算出された結果（筧ら,2005）と同オーダーであり，またその季節変動パターンも類似していた。2006-2009 年と 2019-2021 年を比較で，春季と秋季の流入パターンの変化が捉えられた。2006-2009 年では，断面西部においても湾外水の流入がみられるが，2019-2021 年では殆どみられなかった。そのことは DIP 流入フラックスの変化にも影響しており，断面西側の春季・秋季フラックスが激減した（図 22）。その一方，断面東部の湾外水流入量は増加したが，春季の DIP 流入フラックスは微増で，秋季は顕著な差異はみられなかった。その要因は，流入水の DIP 濃度の減少である。春季・秋季において，湾外水流入が東偏した要因として，海洋構造の変化が挙げられる（図 23）。2006-2009 年では，密度水平勾配の東西差はあまり大きくなかったが，2019-2021 年では西部上層に大きな密度の水平勾配がみられた。そのことは湾内水流出を西側に偏らせ，補償流である湾外水流入が東部に偏った一因と考えられる。密度の水平勾配が西に偏った一因として風系の変化が挙げられる（図 24）。風ベクトルが南向き寄りに変化したことで，低密度な湾内水（河川希釈水）が西岸沿いに分布するようになり，河川フロントがより西岸寄りに形成されるようになったと考えられる。

三河湾湾口において，伊勢湾南部の様な湾外水流入パターンの変化は確認できなかったが

（図 25）,湾外水の流入フラックスが増加している可能性がある。

【参考文献】

青山裕晃，蒲原聡．伊勢・三河湾の年代別栄養物質濃度の水平分布について．愛知水試研報, 27, 37-40, 2022.

筧茂穂，藤原建紀，山田浩且．伊勢湾における栄養塩現存量と収支の季節変化．海の研究, 14, 527-540, 2005.

蒲原聡，芝修一，鶴島大樹，鈴木輝明．三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連．水産海洋研究, 85, 69-78, 2021.

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.

Blumberg AF, Mellor GL. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps NS, Ed., *Coastal and Estuarine Sciences*, Book 4, American Geophysical Union, 1-16, 1987.

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 from1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*, 33, 417-427, 2010.

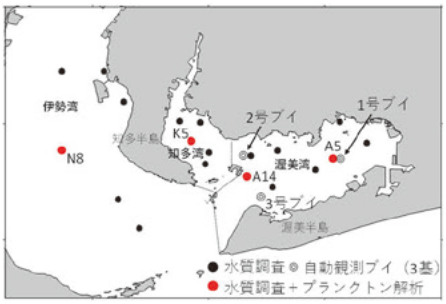

図 1　定点観測の海域と測点図

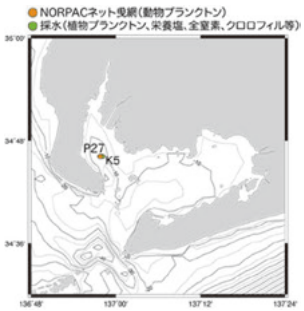

図 2　三河湾の長期変化分析用の動物プランクトンと水質環境等調査海域と測点

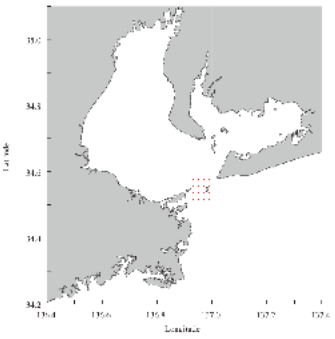

図 3　粒子の初期配置。鉛直方向には 3m ごと配置した。

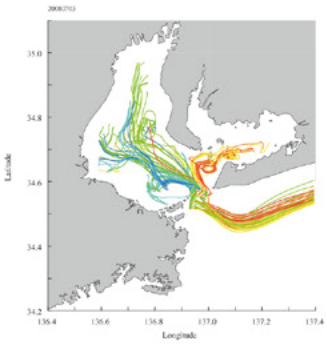

図 4　1 ヶ月間粒子追跡を行った粒子の軌跡。暖色ほど初期配置の水深は浅く，寒色ほど初期配置の水深が深くなる。

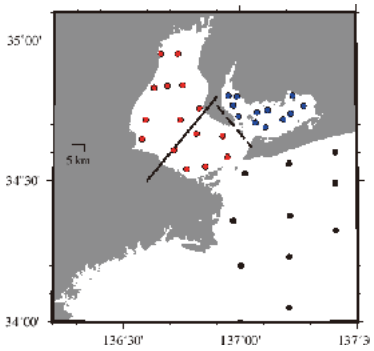

図 5　診断モデルの計算領域と測点

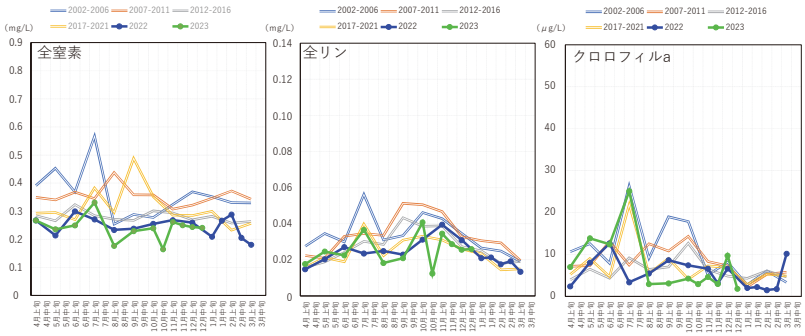

図 6　伊勢湾における全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度の推移

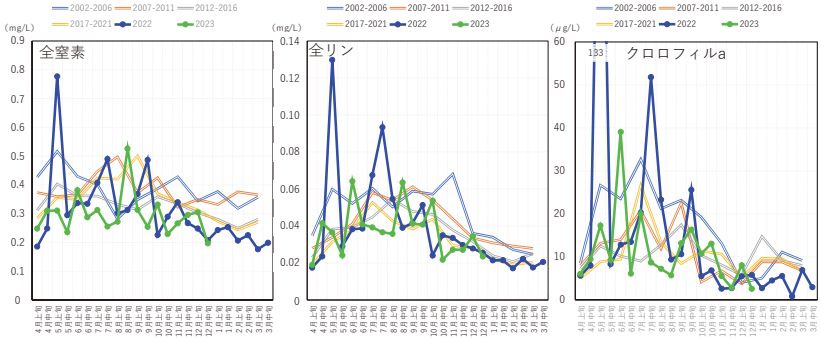

図 7　知多湾における全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度の推移

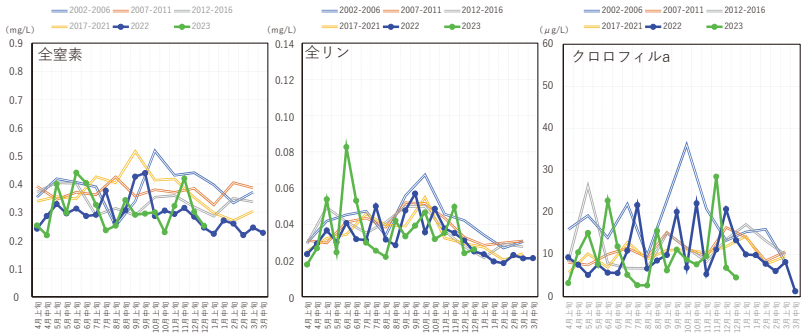

図 8　渥美湾における全窒素，全リン，クロロフィル *a* 濃度の推移

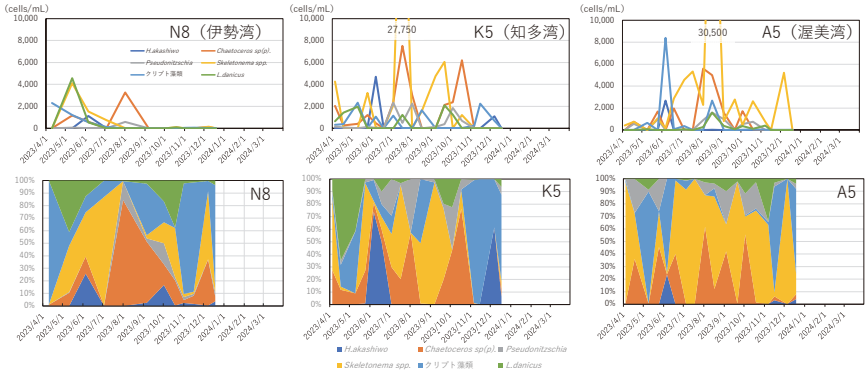

図 9　伊勢湾（N8）・知多湾（K5）・渥美湾（A5）における主要なプランクトンの消長（上段：細胞密度，下段：割合）

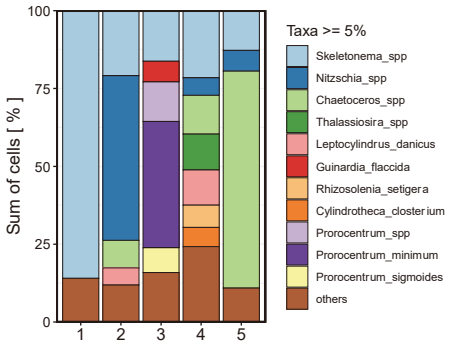

図 10　各グループの構成分類群．出現割合が 5%以上の分類群を示す．

表 1　指標種分析で選抜された各グループの指標種．

グループ	種　名	指標値	p値
1	*Skeletonema* spp.	0.51	0.001
2	*Pseudo-nitzschia*spp.	0.57	0.001
3	*Noctiluca scintillans*	0.21	0.001
	Ceratium furca	0.21	0.001
	Prorocentrum sigmoides	0.21	0.001
4	*Thalassiosira*spp.	0.24	0.001
5	*Chaetoceros* spp.	0.52	0.001

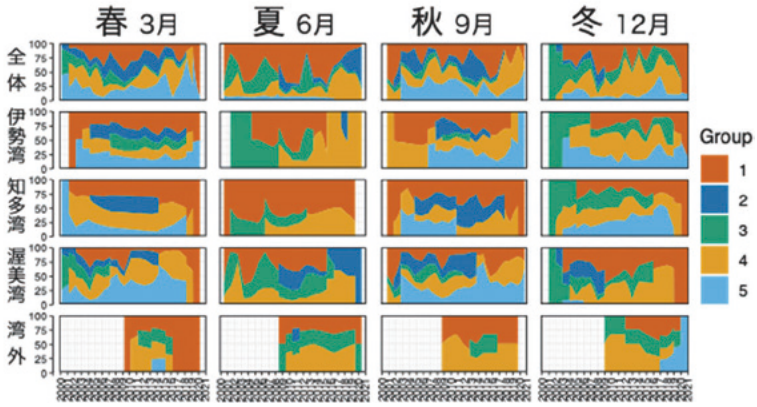

図 11　湾ごとのグループの経年変化。春 3 月，夏 6 月，秋 9 月，冬 12 月を示す。

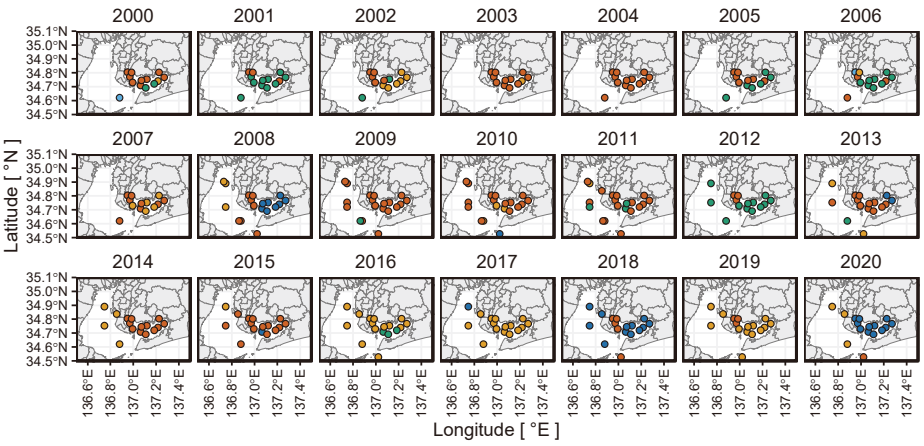

図 12　グループの水平分布の経年変化。夏 6 月を示す。

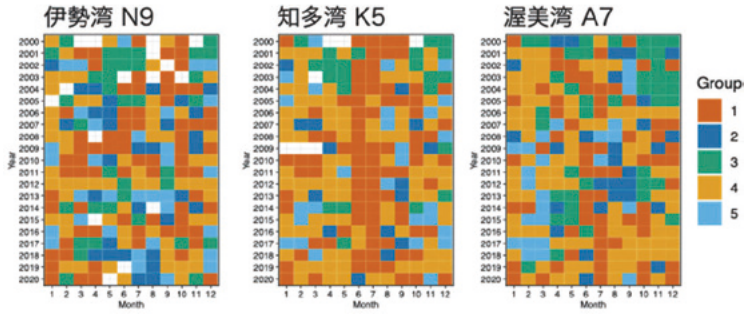

図 13　湾の代表点におけるグループの遷移。伊勢湾 N9 地点，知多湾 K5 地点，渥美湾 A7 地点の結果。

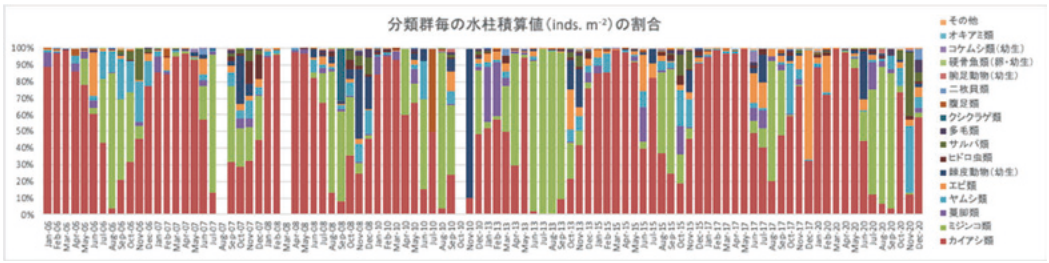

図 14　三河湾における動物プランクトン群集の長期変化

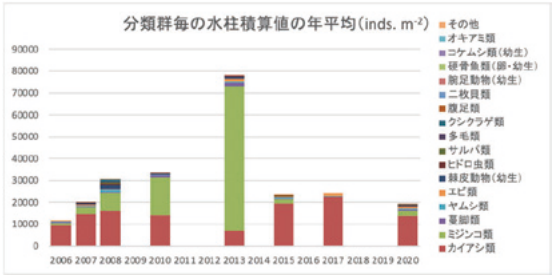

図 15　三河湾における動物プランクトン群集の年平均

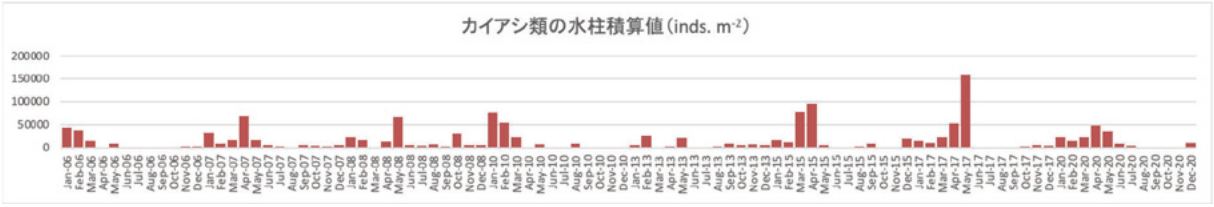

図 16　三河湾におけるカイアシ類の長期変化

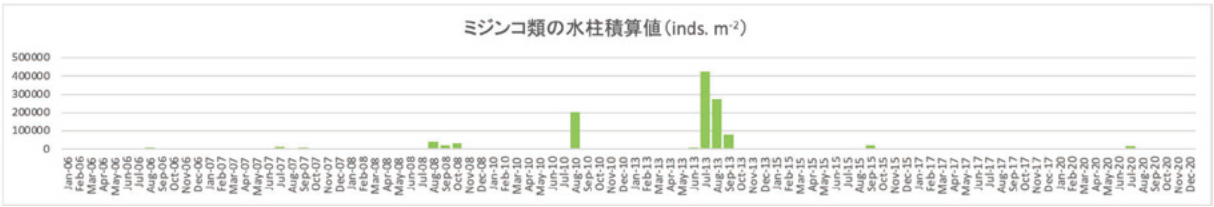

図 17　三河湾における枝角類（ミジンコ類）の長期変化

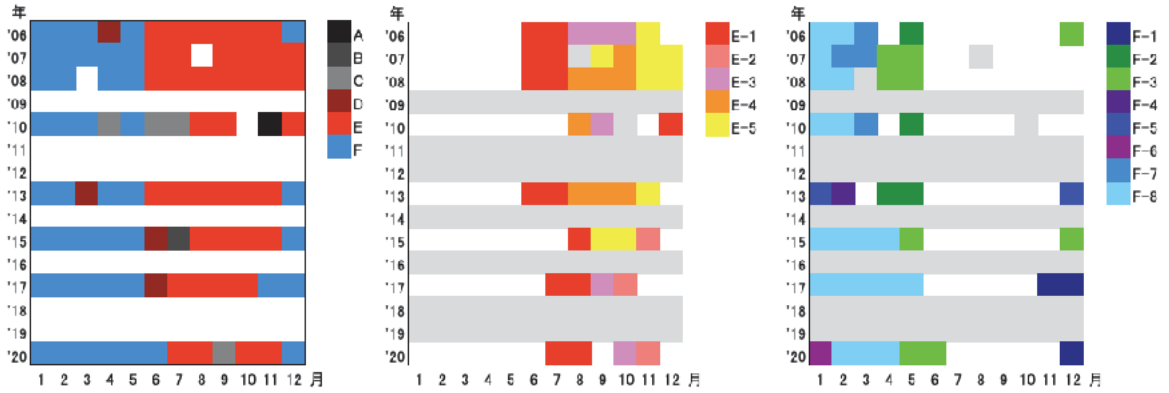

図 18　甲殻類プランクトン（カイアシ類とミジンコ類）群集の類型化による季節・年変動。左から順に，全ての群集 A〜F の 6 グループ(a)，E 群集の 5 グループ(b)，F 群集の 8 グループ(c)

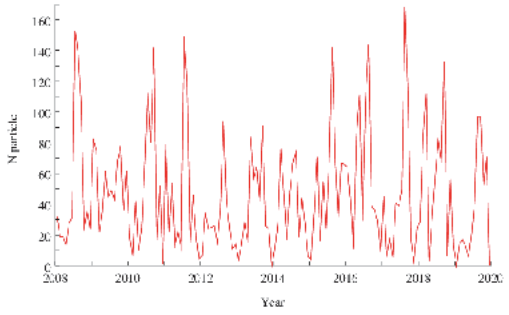

図 19　月別に集計した三河湾への流入粒子数

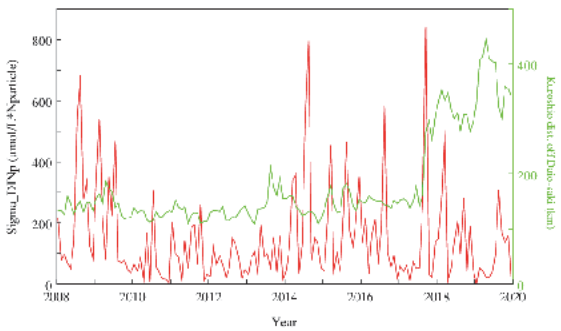

図 20　DIN の三河湾への流入ポテンシャル（赤線）と大王埼における黒潮離岸距離（緑線）

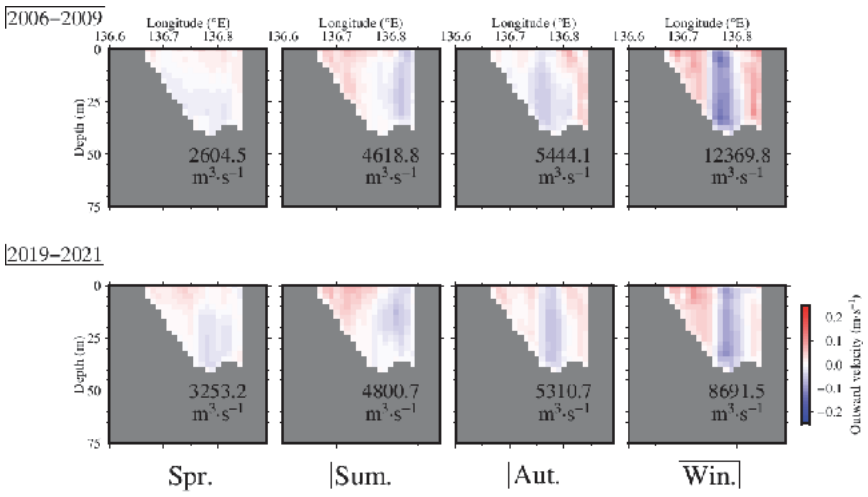

図 21　伊勢湾南部鉛直断面の流速と流入フラックス（各パネルの数字）の季節変動

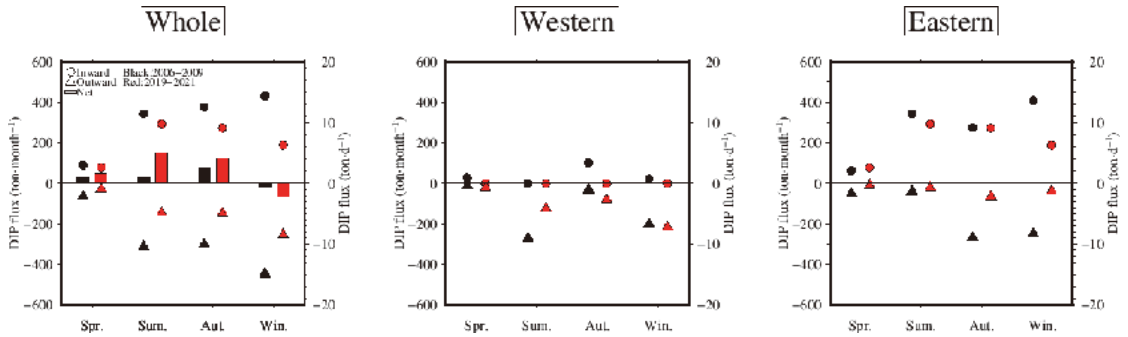

図 22　伊勢湾南部鉛直断面の DIP 流入出フラックスの季節・経年変動

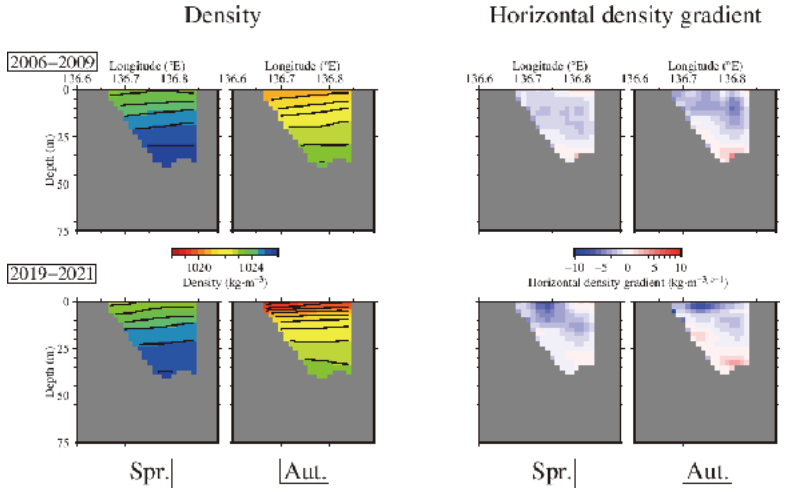

図 23　伊勢湾南部鉛直断面の春季・秋季密度構造の経年変動

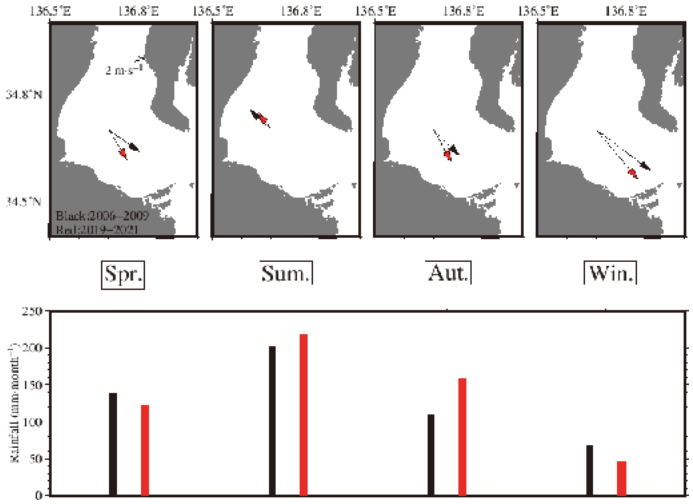

図 24　2006-2009 年と 2021 年の風ベクトルと降雨量の差異

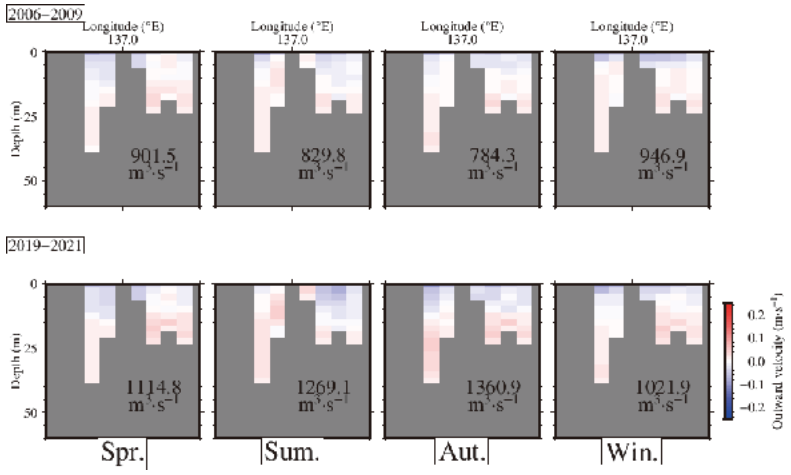

図 25　三河湾湾口鉛直断面の流速と流入フラックスの季節変動

課題番号：III－２）

課題名：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

水産研究・教育機構水産技術研究所：井上誠章，多賀悠子，西本篤史
三重大学 生物資源学部：伯耆匠二
愛知県水産試験場：日比野学，平井玲，和久光靖，澤田知希，中島広人，
進藤蒼，荒川純平，阿知波英明
三重県水産研究所：岩出将英，小林智彦，岡田誠，髙﨑有美子，北川強司

【背景・目的】

アサリ資源は全国的に極めて低い水準にあり，その要因の一つとして沿岸域の栄養塩不足に伴う微細藻類の減少や種組成の変化との関連が示唆されている。餌料に適した植物プランクトン不足はアサリ全生活史における減耗要因となるが，特に飢餓耐性の低い着底初期や稚貝にとっては致命的となり得る。それゆえアサリを含めた二枚貝資源の変動機構の解明には，アサリが曝露された餌料環境とさらにそれに伴う生理状況変化の正確な把握は重要な課題である。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。しかし，現状の海洋研究においては摂餌環境の指標として，植物プランクトン量を反映するクロロフィル値を間接的に用いるしかない。これではアサリが摂餌できる植物プランクトンのサイズや種組成を無視していることになり，クロロフィル値は正確な摂餌環境の指標となっていない可能性がある。本研究では，メタバーコーディングによる微細藻類の網羅的解析と，飢餓への遺伝子応答の網羅的解析による生理的指標の開発により，本種にとっての正確な餌料環境評価手法の開発を目指す。

加えて，三河湾におけるアサリ漁場及びその周辺等においてアサリ現存量や餌料等の環境調査を実施するとともに，海域の栄養塩動態や餌料環境とアサリの資源状況等との関連を検討する。さらに上記で開発された餌料環境評価手法を試験的に実際の漁場におけるアサリに適用し，アサリの資源動態に及ぼす性状変化と餌料・栄養塩環境等との関連を検討する。

また，アサリ同様にノリの色落ちについても，深刻な漁業被害をもたらしている。下水緩和処理運転等の管理施策が検討されているが，そもそも海域における栄養塩供給源の特性が十分には理解されていない。特に，水質総量規制の結果，陸域からの栄養塩供給が減少している中で，栄養塩を含んだ沖合の深層水からの栄養塩供給も無視できないことから，栄養塩の供給源についてのモニタリング手法を確立し，湾内の栄養塩供給源の特性を明らかにするとともに，中・長期的な栄養塩供給源の変動について情報を蓄積していくことを目指す。

【方法】

(1) メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発

三河湾内のアサリ漁場の 2 定点（14 号地，実録沖）に加え，より栄養塩濃度が高いと想定される処理水放出口直近の 1 地点（河口）において，2023 年 5 月から 2024 年 2 月にかけて，以下の通り経月的な野外調査を実施した。採泥器でアサリ稚貝・成貝（殻長約 10～30 mm），海底表層 1 cm の砂泥（環境砂泥）を約 10 g 採集し，即座に 99%エタノール中で固定した。海

底直上の海水（環境水）を 1 L 採取して DNA 分解抑制剤（塩化ベンザルコニウム溶液）を 0.1%の濃度で添加した。環境砂泥をエタノール中で攪拌して得られた懸濁物，環境水中に含まれる懸濁物を GF/F フィルター上に捕集して DNA を抽出した。各月のアサリ消化管内容物，環境水，環境砂泥試料から DNA を抽出し，葉緑体 rbcL 領域上に設計された珪藻特異的なユニバーサルプライマー（Maitland et al. 2020）を用いて 1st PCR を実施したのち，2nd PCR・シーケンシング・ライブラリの作成を行った。決定された各配列について BLAST による相同性検索を行い，配列一致度 95%を基準に微細藻類を属レベルで同定した。また，より高次の分類群組成についても検討するため，R4 年度に採集した試料を含む一部試料については，微細藻類全般のユニバーサルプライマー（psbA 領域）を用いた分析も実施した。

（2）摂餌環境等のアサリ生理状態の指標開発に向けた遺伝子解析

ダウンウェリング水槽（直径 15 cm×深さ 15 cm，底面:500 μm メッシュ）に 1 mm ガラスビーズを厚さ 1 cm で敷き詰め，ろ過海水を 0.5 L/min でかけ流した 6 水槽に，それぞれ稚貝（平均殻長 8.5 mm）を 20 個体ずつ収容した。3 水槽ずつを給餌区（一日あたり *Chaetoceros gracilis* を 5*10 ^ 8 細胞給餌，以下 F 群）と無給餌区（以下 N 群）に設定し，飼育開始 3，5，20 日にそれぞれの水槽から 3 個体ずつ採集した。採集された 18 個体からカラム式キットにより RNA を抽出し，次世代シーケンサーBGISEQ-500 を用いた RNA-seq によりトランスクリプトーム解析を行い，各区の遺伝子発現を網羅的に比較した。

また飼育開始 1, 3, 5, 10, 15, 20 日に両群から任意の 3 個体，合計 36 個体を採集し qPCR 測定用のサンプルとした。RNA-seq の解析から F 群と N 群の遺伝子発現量が有意に異なると判断された遺伝子（DEG）の 7 遺伝子 thioredoxin (*TrX*), heat shock protein 22 (*HSP22*), ependymin related protein-1 (*EPDR1*), defensin (*DFSN*), big defensin (*BDFSN*), C-type lectin (*CLEC*) および hydramacin (*HydM*) に注目し，qPCR を用いて経時的な遺伝子発現の変化を計測した。

（3）三河湾におけるアサリ漁場及びその周辺等における現地調査

三河湾内におけるアサリ漁場の計 11 地点（福江湾，六条潟，蒲郡水神，東幡豆，吉田，丙，味沢実録境，実録（沖），味沢，14 号地，古布）において（図-1），枠取り（25cm×25cm）により各地点 3 回底泥を採取し，目開き 2mm または 4mm のふるいによりアサリを選別し，個体密度，殻付き湿重量による現存量を求めた。ただし，吉田，丙，味沢実録境の 3 地点では，稚貝採捕用のジョレンを用い定面積分採捕した。採捕したアサリの殻長を計測し，うち各地点 30～60 個体について肥満度及び群成熟度を求めた。環境調査として，海水中及び底泥中のクロロフィル a 量（DMF 抽出＋蛍光光度計による測定），栄養物質濃度（全窒素，全リン，硝酸・亜硝酸態窒素，アンモニア態窒素，リン酸態リン）の測定を行った。なお，栄養物質濃度試料の GF/F フィルターによる濾過等の前処理を行った後，測定は三洋テクノマリン株式会社に委託した。試水は，各地点において 1 回ずつ海底上 30 cm 程度（干出している場合には干潟前面の膝丈程度の水深）で採水した。現地調査は，各地点とも春（5 月），夏（8 月），秋（10-11 月）及び冬（1 月）に実施した。また，R3 年度から実施している先行調査の結果も利活用し，データを取り纏めた。

（4）海藻（ノリなど）の窒素安定同位体比を用いた窒素供給源モニタリング

漁期中，定期的に開かれる共販にて入手した乾燥板ノリ試料の窒素安定同位体比（以下，$\delta^{15}N$）をモニタリングした。方法の詳細は令和 4 年度報告書を参照されたい。なお，ノリ漁期の開始は 11 月と遅いことから，令和 5 年度は令和 4 年漁期試料を分析した。加えて，本事業の検討委員である藤原先生から提供頂いた西三河地区のアオサ類（令和 5 年 2 月採取）も分析した。また，愛知県と三重県から栄養塩データを提供頂き，DIN 濃度とノリ $\delta^{15}N$ の関係を整理した。前者は共販の前週と前々週の平均値。後者は共販月と前月の平均値を変数とした。

【結果】

（1）メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発

2022 年 7，10 月，2023 年 1，5，6，7 月の各試料中の微細藻類高次分類群組成（psbA プライマー使用）を図-2 に示す。珪藻，藍藻，緑藻，渦鞭毛藻など様々な藻類が検出されたが，いずれの試料においても珪藻が最も優占していた。2023 年 1，5，7，9，11 月の各試料中の浮遊珪藻と底生珪藻の割合と，珪藻属組成（rbcL プライマー使用）を図-3 に示す。いずれの調査月においてもアサリ消化管中には浮遊珪藻が優占していた。これらの調査月のうち，環境水中に *Thalassiosira* 属，*Skeletonema* 属，*Minutocellus* 属が優占していた 1，7，11 月においては，アサリの消化管内容物組成と環境水中の組成は類似していた。一方，環境水中に *Chaetoceros* 属，*Cerataulina* 属が優占していた 5 月，9 月においては，アサリの消化管内容物組成と環境水は類似していなかった。2023 年 5〜9，11 月の，河口を含む各調査点の環境水と環境砂泥中の浮遊珪藻と底生珪藻の割合と珪藻属組成（rbcL プライマー使用）を図-4 に示す。いずれの調査月においても，環境水中の珪藻属組成は調査点間で大きく異ならなかった．一方，砂泥中の珪藻属組成については調査点間でやや異なる調査月もあった。

（2）摂餌環境等のアサリ生理状態の指標開発に向けた遺伝子解析

RNA-seq において合計で 67,733 の unigene が検出され，そのうち 6093 unigene が 3，5，20 日の飼育期間において，N 群と F 群の比較で少なくとも一度は発現量が統計的に有意異なる発現変動遺伝子（DEG）と判定された。これら 6093 unigene の DEG のパスウェイ解析では，3，5，20 日の飼育期間に共通して，多くの unigene が ECM-receptor interaction と Focal adhesion pathway に分類された。これより両パスウェイの遺伝子群は飢餓に対して特徴的な発現変化をすると判断された。さらに qPCR による解析では 7 遺伝子中 4 遺伝子（*EPDR1*，*HSP2*，*TrX* および *DFSN*）において統計的に有意な時系列変化が見られた。qPCR から得られた遺伝子発現の時系列変化より，4 遺伝子すべての発現レベルは絶食 1 日目には低かったが，3 日目から急速に上昇し，*EPDR1* は 5 日目，*HSP22* と *TrX* は 10 日目，*DFSN* は 15 日目にピークとなり，ピーク後は急速に低下して 20 日目には低い値になった。今後，摂餌環境の指標開発のためには，これら 4 遺伝子の発現パターンと異なる遺伝子を，飢餓に特徴的な ECM-receptor interaction および Focal adhesion pathway に分類された DEG より抽出する必要がある。

（3）三河湾におけるアサリ漁場及びその周辺等における現地調査

各地点における季節ごとのアサリ肥満度について図-5 に示した。平均肥満度は地点間で有

意な差がみられ，一色干潟に位置する吉田，丙及び味沢実録境での肥満度は低い傾向（年間平均 : 11.0-12.4）であり，福江湾では年間通じて高かった（年間平均 : 17.8）。これらの傾向は前年度と同様であった。一方で，今年度のこれらの地点における夏の平均肥満度は 10.2 と前 2 年（11.1, 11.9）と比較しても特に低かった。各地点における調査時期ごとのアサリ現存量について図-6 に示した。全体的な傾向として，現存量は冬から夏にかけて増加し，秋から冬に減少する傾向がみられた。一方で 2023 年の上記 3 地点においては，夏から秋における現存量の平均変化率は 61%と，前 2 年の 112%及び 118%に対し夏の減少傾向が顕著であった。本来は成長による現存量の増加が見込める時期ではあるが，それ以上に個体密度の減少が影響していた。この 3 地点では 3 年間の調査期間中に徐々に現存量が低下する傾向もみられており（図-6），慢性的に肥満度が低いことにより減耗リスクが高くなり，特に今夏の低い肥満度は減耗に影響した可能性が考えられる（曽根ほか，2019 ; 服部ほか，2021）。漁獲量が高水準であった 90 年代や 2000 年代の夏季の肥満度（15-20 程度）と比べると（日比野・下村，2020），2023 年夏の肥満度はかなり低い水準であり，資源回復や再生産を制限している要因の一つと考えられる。アサリ漁場における全窒素（TN）と全リン（TP）の関係と海水クロロフィル *a* 濃度の季節変化を図-7 に示した。海水クロロフィル *a* 濃度は，春から夏に高く秋には顕著に低下した。夏には TN 濃度に対する TP 濃度は高く，地点間の差も大きくなった。各年の秋から冬の現存量の変化量と同年の TN，TP 及び海水クロロフィル *a* 濃度の各平均値の関係を図-8 に示した。相関係数を検討したところ，秋冬季の現存量変化と水質 3 項目はいずれも正の値を示した（TN: r=0.19，TP: r=0.27，Chl-*a*: r=0.32）。海水クロロフィル *a* 濃度の相関を季節別に検討すると，夏のクロロフィル *a* 濃度と秋冬季の現存量変化に有意な正の相関（r=0.39, p<0.05）がみられた。三河湾においてアサリの再生産成功率が高くなる要因として，夏のクロロフィル *a* 濃度が高いことが示されており（日比野，2023），夏の基礎生産が高くアサリの濾水速度も大きくなる（磯野・中村，2000）時期にアサリが十分に摂餌できる環境が重要であると考えられた。以上から，三河湾においてアサリの漁獲資源形成は，漁場の栄養物質濃度及び餌料濃度と関連していることが示唆された。また，一色干潟では 2021 年以降に秋冬季減耗が軽減されてきた一方で，夏の低肥満度が継続しており，今後は夏季も含めた餌料環境の評価や栄養塩管理の検討が重要であることが示唆された。

（4）海藻（ノリなど）の窒素安定同位体比を用いた窒素供給源モニタリング

栄養塩の波及範囲を考慮し，伊勢湾の三重県海域，愛知県海域，三河湾の知多地区，西三河地区，以上 4 海域に分けて，ノリ $\delta^{15}N$ と DIN との関係を整理した。

・伊勢湾三重県海域

平成 21 年当時，ノリ $\delta^{15}N$ と DIN 濃度は無相関で，DIN 濃度に依らず，いずれの地先でもノリ $\delta^{15}N$ は高かった（但し，和具・菅島を除く）（図-9）。一方で，近年，ノリ $\delta^{15}N$ と DIN 濃度との間に統計的に有意な正の相関が見られ，DIN 濃度が高いほどノリ $\delta^{15}N$ も高かった（p < 0.05）。近年のデータを地先別に見ると，湾奥から湾口にかけて DIN 濃度が低下し，それに伴いノリ $\delta^{15}N$ も低下する明瞭な傾向がみられた（図-10）。これらの結果は，H21 年当時は，人為起源の高い $\delta^{15}N$ を持つ窒素が様々な濃度で各地先の近くから供給され，ノリ生産に寄与していたのに対して，近年では各地先からの栄養塩供給が先細り，主要な栄養塩供給源であ

る湾奥の木曽三川への依存度が高まっていると考えられる。

この傾向から逸脱する試料については，他の栄養塩供給源の寄与が疑われ，例えば，下振れしている試料は全て菅島地区のノリに該当し，外洋水由来の栄養塩の寄与が示唆される。但し，DIN 濃度は 40~80 μg/L と低く，その寄与は湾の内側にまでは及ばないことも当該海域の特徴と言える。次に上振れしている点を見ると，DIN 濃度の高いサンプルとしては桑名地区が相当し，木曽三川以外の栄養塩供給源の寄与が推察される。後述する伊勢湾愛知県海域におけるノリ $\delta^{15}N$ を見ると，三重県海域に比べて高いことが見て取れることから，桑名地区で上振れしている試料については，愛知県側から栄養塩が波及しているものと考えられた。一方，DIN 濃度が低いエリアでノリ $\delta^{15}N$ が上振れしているサンプルとしては，伊勢地区や松阪地区が確認出来る。こうしたノリについては，木曽三川由来の栄養源が乏しい中で，緩和処理運転による地先からの栄養塩供給を捉えている可能性があり，今後，精査が必要と考える。

・伊勢湾愛知県海域

三重県海域で確認した DIN 濃度とノリ $\delta^{15}N$ の間の回帰直線に比べて，ノリ $\delta^{15}N$ が高い値を取ったことから，上述の通り，伊勢湾の愛知県海域では，木曽三川とは異なる，より高い $\delta^{15}N$ を持つ窒素供給源の存在が強く示唆された。1 つの可能性として，湾奥にある製鉄所由来の排水が考えられるが, 湾口部に近い野間地区においても高い DIN 濃度と高いノリ $\delta^{15}N$ が検出されていることから，製鉄所由来の栄養塩だけでなく，各地先における下水処理場由来の栄養塩の寄与の可能性も排除できない。

・三河湾西三河海域

ノリ $\delta^{15}N$ と DIN 濃度とは無相関であった。これは伊勢湾三重県海域における平成 21 年当時のノリ $\delta^{15}N$ を説明する際に述べた通り，人為由来の高い $\delta^{15}N$ を持つ窒素が，様々な濃度で複数の場所から供給されていることを示唆するものと考えられる。そこで，藤原先生から御提供頂いたアオサ試料を分析した結果（図-10），衣崎・丙地区の養鰻池や肥料工場周辺において特に高い $\delta^{15}N$ が確認され，当該海域における栄養塩供給源が，矢作川からの流入水や河口にある下水処理センターだけでないことが示唆された。

・三河湾知多海域

知多海域の中でも，漁場が大井以南の南側に限られることもあり，地理的に明瞭な傾向はみられなかった。但し，篠島や師崎といった湾口部では，一部，外洋由来の栄養塩の寄与が示唆された。

【参考文献】

服部宏勇・松村貴晴・長谷川拓也・鈴木智博・黒田拓男・和久光靖・田中健太郎・岩田靖宏 日比野学（2021）愛知県内アサリ漁場における秋冬季のアサリ肥満度の変動と減耗. 愛知水試研報，26，1-16.

日比野学（2023）三河湾一色干潟におけるアサリの資源変動要因．黒潮の資源海洋研究，24，115-120.

日比野学・下村友季（2020）水産系モニタリングデータの収集と利活用．海洋と生物，246，49-55.

磯野良介・中村義治（2000）二枚貝による海水濾過量の推定とそれにおよぼす温度影響の種間比較．水環境学会誌，23，683-689.

曽根亮太・和久光靖・石田俊朗・宮脇大・山田智（2019）六条潟におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* の秋季減耗要因について．水産海洋研究，83，252-259.

小林志保・藤原建紀 (2015) 安定同位体比を用いたノリ漁場への窒素供給源の推定. 海洋と生物 37 (3) 269-273.

Maitland, VC, Robinson, CV, Porter, TM, Hajibabaei, M. Freshwater diatom biomonitoring through benthic kick-net metabarcoding. Plos one, 15, e0242143, 2020.

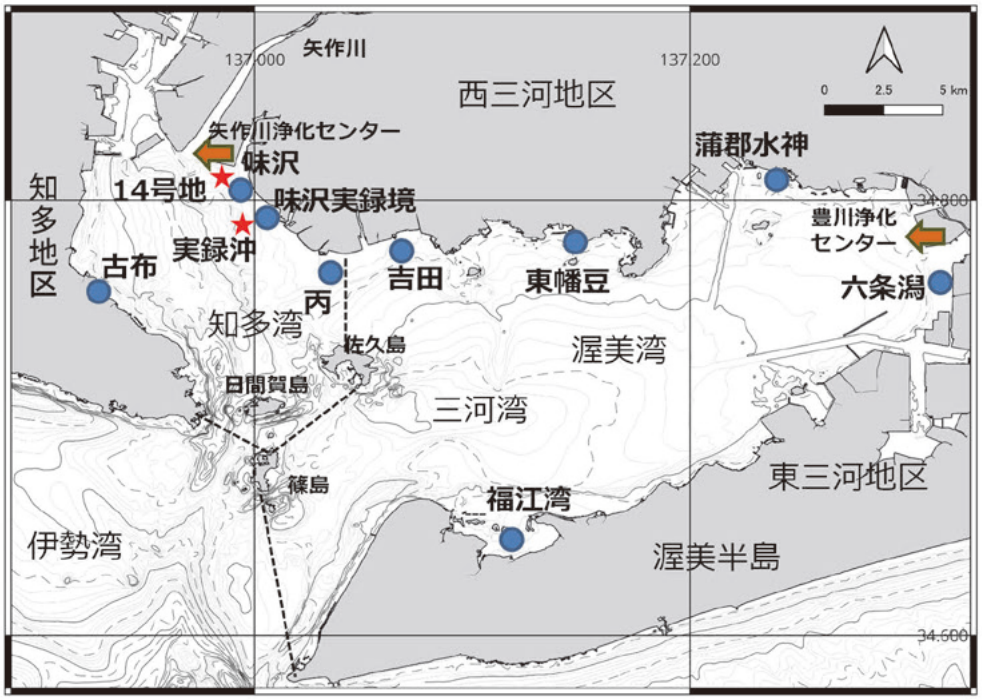

図 1 調査地点図（★地点はメタバーコーディング試料採取地点を示す）

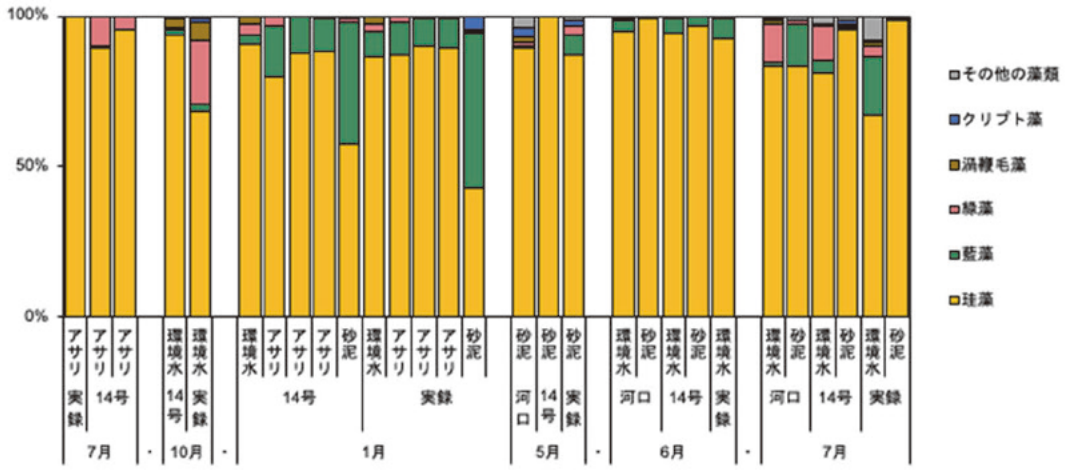

図 2 psbA プライマーを用いたメタバーコーディング解析結果
綱レベル以上の高次分類群組成を示す。1 本のバーは 1 試料中の DNA リード数の組成を示す。

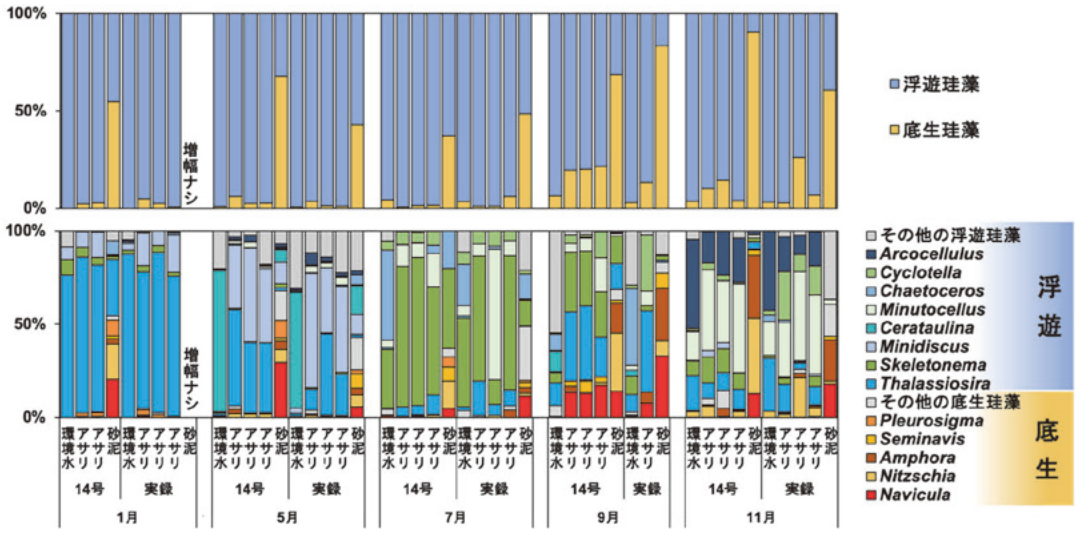

図 3 rbcL プライマーを用いたメタバーコーディング解析結果

各調査月，各調査地点の環境水，アサリ消化管内容物，砂泥中の，浮遊珪藻および底生珪藻の割合（上図），珪藻各属の割合（下図）を示す。珪藻各属の生活型については Round et al. (1990)に基づいて区分した。

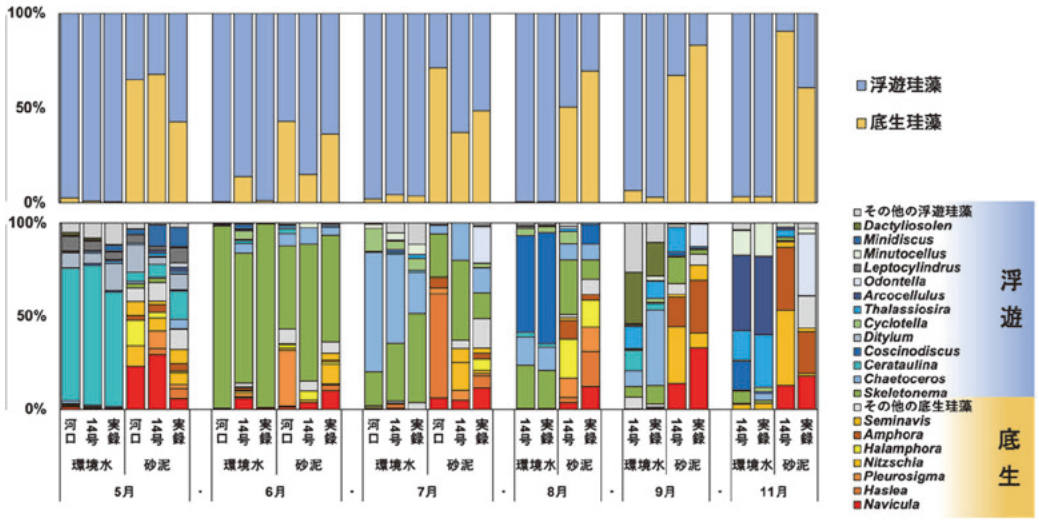

図 4 rbcL プライマーを用いたメタバーコーディング解析結果（調査点間比較）

各調査月，各調査地点の環境水，アサリ消化管内容物，砂泥中の，浮遊珪藻および底生珪藻の割合（上図），珪藻各属の割合（下図）を示す。

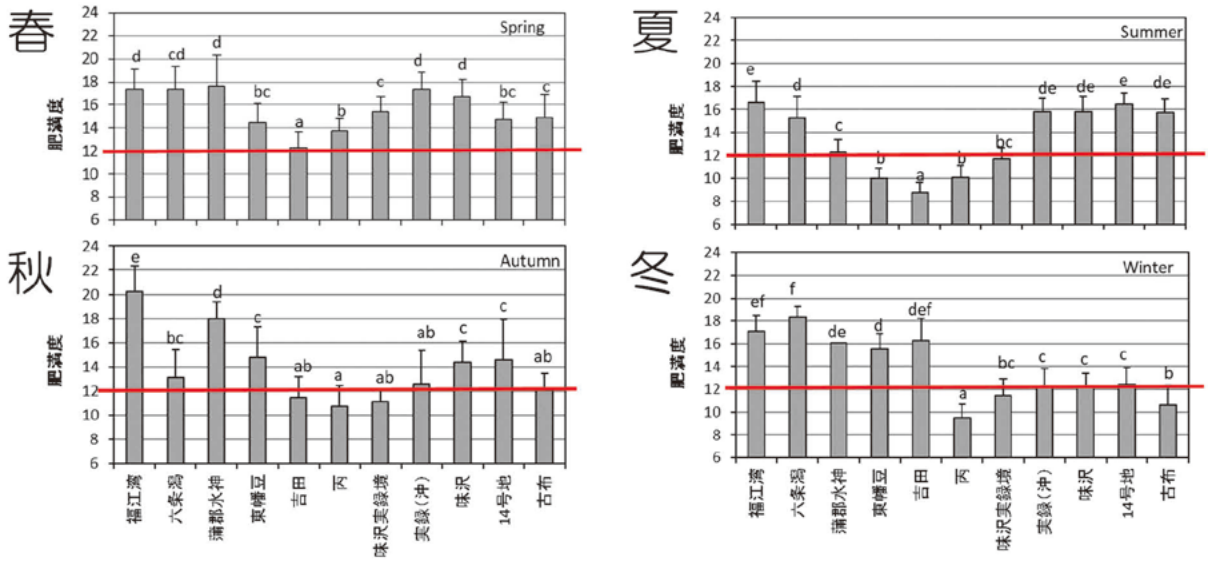

図 5 各地点におけるアサリ平均肥満度（縦棒は標準偏差）
異なるアルファベットは地点間の有意差を示す（TukeyHSD,P<0.05）

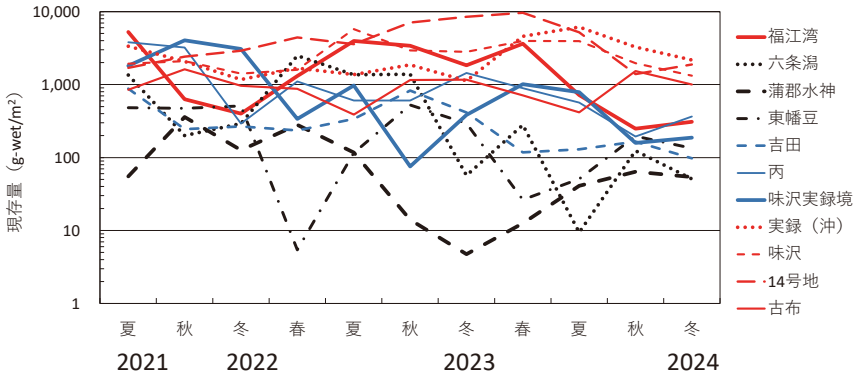

図 6 各地点におけるアサリ現存量（g-wet/m^2）の季節変化

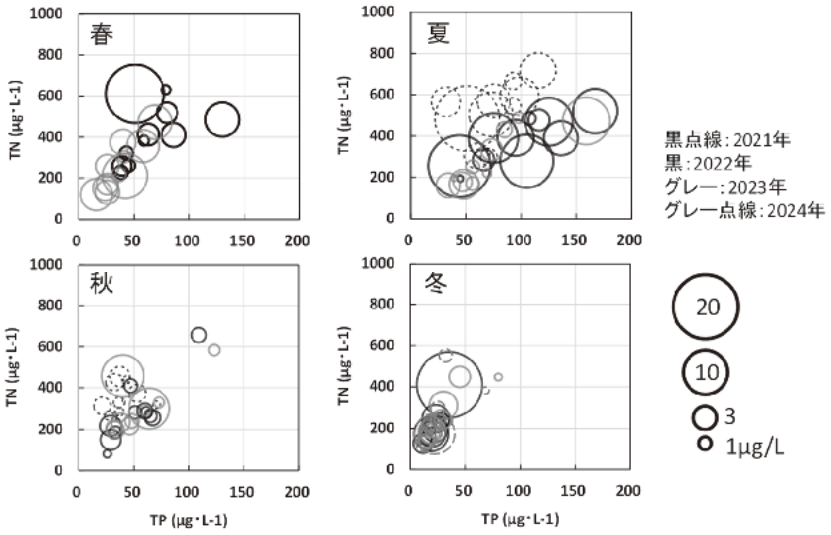

図 7 アサリ漁場における全窒素（TN）と全リン（TP）の関係と海水クロロフィル a 濃度の季節変化（円の大きさがクロロフィル a 濃度の高さに比例する）異なるアルファベットは地点間の有意差を示す（TukeyHSD,P<0.05）

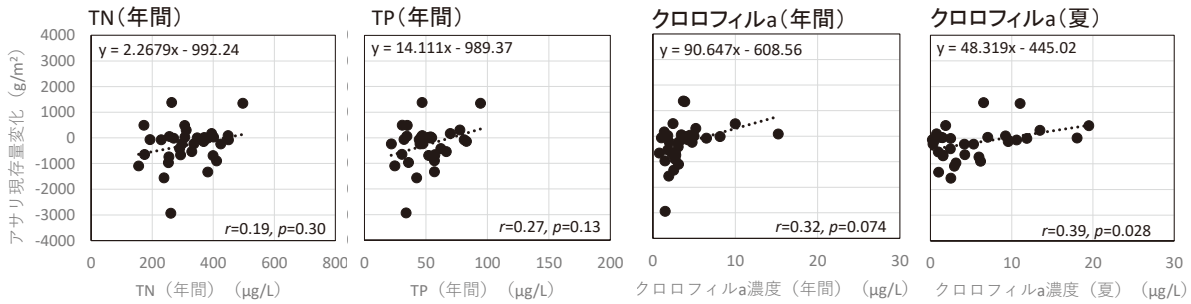

図 8 各地点の秋冬季のアサリ現存量の変化と全窒素（TN），全リン（TP），海水クロロフィル a 濃度（Chl-a）の年平均値，及び夏の海水クロロフィル

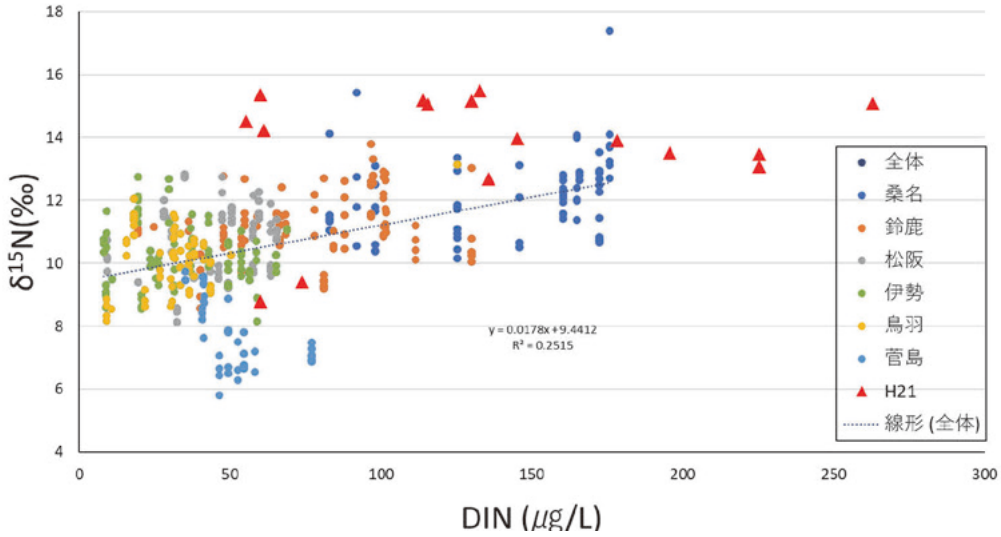

図 9 ノリ窒素安定同位体比と DIN 濃度との相関

図 10　西三河地区におけるアオサ類の窒素安定同位体比の空間分布
平均値よりも高い値は赤色の〇，低い値は白色の〇で表し，〇のサイズは平均値からのズレの大きさを表す。

課題番号：III－３）
課題名：栄養塩類管理方策の検討

一般社団法人　全国水産技術協会
シニア技術専門員　横山雅仁
技術専門員　畑　恭子
技術専門員　池田宗平
調査協力員　小山悠人
調査協力員　持田史佳
調査協力員　児嶋大地

【背景・目的】

近年，伊勢湾・三河湾においては，栄養塩類の減少がノリの色落ちやアサリ，イカナゴ等の漁獲量の減少を招いているとの指摘がある。

これらの指摘を受け，伊勢湾・三河湾では関係県による下水処理場の管理運転の実証試験が行われているが，実証試験に際してのパブリックコメントの結果等をみるに，幅広い関係者の間で栄養塩類の管理の必要性に関する理解の醸成や合意形成を図っていく必要性が残されていることも示唆された。

そのため，関係県等が栄養塩類の管理に向けた取組を進めていく上で，海域における貧栄養化に伴う漁業・養殖業の衰退の実態を整理して，その管理の必要性に係る情報を提供するとともに，今後の栄養塩類の管理の必要性をとりまとめることにより，漁業・養殖業の持続的発展に貢献することが肝要である。

このために，本検討では漁業・養殖業と栄養塩類の関係について情報の収集・整理を行って現状を評価し，関係者の理解の醸成や合意形成に資するために，栄養塩類の管理の必要性に関する知見と情報を取りまとめて提供することを目的とする。

【方法】

（1）漁業と栄養塩類の現状整理

・伊勢・三河湾の漁業生産の推移（主にノリ，アサリ，イカナゴについて）を整理
・陸からの栄養塩類の流入量の変遷，海域の栄養塩類濃度の減少について整理

（2）水産資源と栄養塩類の関係

・栄養塩濃度や負荷量と漁業生産の関係に関する各種の文献を収集・整理
・モデル構築に必要な環境データを収集・整理と数値シミュレーションモデルを用いた検討

（3）現状評価と栄養塩類の必要性に関する提言のとりまとめ

・漁獲量と栄養塩類濃度の関係について現状評価と今後の取り組みに向けて提言をまとめる。

（4）検討委員会の開催

モデル構築ならびに栄養塩管理方針に専門的な立場からのご意見をいただくために，水産

分野の専門 8 名（検討委員会メンバーは以下の通り）からなる検討委員会を設置し，9 月及び 1 月の計 2 回実施した。

＜検討委員会の委員構成＞

・松田治（広島大学名誉教授）
・鈴木輝明（名城大学大学院総合学術研究科　特任教授）
・反田實（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター　技術参与）
・中田喜三郎（名城大学大学院総合学術研究科　特任教授）
・中村元彦（愛知県水産試験場漁業生産研究所　主任）
・土橋靖史（三重県水産研究所　所長）
・山田久（国立研究開発法人水産研究教育機構　フェロー）

【結果】

1　漁獲量・生産量の推移と現状

1.1　伊勢湾・三河湾における漁業の現状について

伊勢湾・三河湾における近年の漁業生産をみると，一定の変化傾向はみられないものの，種ごとにみると特に生活史が湾内に依存している種類ほど顕著な減少傾向がみられる。

ノリ養殖の生産量は減少傾向が続いている。全国一位を誇っていた愛知県のアサリ漁業については，かつては年間 1.5 万 t 程度で安定し国内供給量の中で主要なシェアを維持し「豊かな海」の象徴であったが，2014 年以降は漁獲量が激減している。播磨灘とともに有名な伊勢湾のイカナゴ漁は 2016 年以来禁漁が続いているが，資源の回復がみられていない。

これらの漁獲量の減少の要因については，さまざまな角度から調査研究が行われているが，瀬戸内海では，イカナゴの減少は海域の栄養塩類の減少が主要因であることが示唆されている（図 1，図 2）。伊勢湾においては，高水温等の影響（鵜嵜ほか 2015，中村ほか 2017）が指摘されている他，貧栄養化によりイカナゴの栄養状態が悪化したために再生産力が低下したとの仮説の検証により，貧栄養化がイカナゴ減少の一因である可能性が指摘されている（三重県水産研究所　2021）。

ノリの生産量の減少については栄養塩類の減少により色落ちが発生し，品質低下や漁期の短縮が発生したためと考えられ，更にこれが漁家経営を悪化させ，経営体数の減少にもつながっていると考えられる（第 1 回愛知県栄養塩管理検討会議資料）。また，アサリやイカナゴの漁獲量の減少については栄養塩類の不足による餌料環境の悪化が影響していると指摘されている。このように，海域の栄養塩類の減少が水産動植物の生産量の減少の原因として挙げられている。近年では栄養塩類濃度の低下の問題が新聞等のメディアで報道されることが増えている（図 3~図 5）。一方で，瀬戸内海環境保全基本計画（2022 年）においても指摘されているように，海域における栄養塩類等環境条件の変化に対する生物の応答は複雑であり，解明されていない点が多い。

本章では，伊勢湾・三河湾における水産対象種のうち，栄養塩類濃度低下の影響が指摘されるノリ，アサリ，イカナゴを対象として近年の漁獲量・生産量の推移を整理した。

1.2　伊勢湾・三河湾のノリ，アサリ，イカナゴの漁場

伊勢湾・三河湾の漁業権区域を図 6，図 7 に示す。区画漁業権のうち渥美半島先端と三重県側の鳥羽を結んだ線よりも内側では主にノリの養殖がおこなわれている。同じく伊勢湾・三河湾内の共同漁業権区域内では採貝漁（主にアサリを対象）が行われている。採貝漁業が行われる干潟部は，特に伊勢湾三河湾の湾奥部においては，高度経済成長期に広い範囲で埋め立てが進んだことで，それに伴ってアサリ漁場も減少し漁場が湾奥部から湾中央部に移動している（図 7)。

イカナゴについては，伊勢湾の湾口部が産卵場になっており，孵化した稚魚は湾内を広く回遊する。イカナゴ漁獲のほとんどは「しんこ」と呼ばれる，生まれて半年程度までの稚魚であるため，漁場は伊勢湾全体である（図 8)。

このように，ノリ，アサリ，イカナゴについては，主に湾内で生産されており，湾内の環境から影響を受けているものと考えられる。

1.3　伊勢湾・三河湾のノリ，アサリ，イカナゴの漁獲量，生産量の推移

1.3.1 ノリ

ノリは，伊勢湾・三河湾の沿岸域において広く養殖が行われており，冬季の基幹産業のひとつになっている。愛知県，三重県ともに 9，000t を超える生産量があり，それぞれ全国 7 位，9 位の生産量があった（2019 年時点)。ただし，近年は両県ともに生産量，生産金額は減少傾向にある。

伊勢湾・三河湾における県別のノリの生産量（ノリの生産量（干重量）から生重量換算して生産量を推定した値）の推移を図 9 に示す。2003 年から 2020 年にかけて，愛知県，三重県ともに生産量は半減している。

1.3.2 アサリ

伊勢湾・三河湾における県別のアサリ漁獲量の推移を図 10 に示す。1991 年をピークにその後は減少し 2008 年から 2013 年にかけてやや増加するものの，2014 年から愛知県，三重県ともに大きく減少し 2017 年以降は低水準となっている。

1.3.3 イカナゴ

愛知県，三重県合計のイカナゴ漁獲量の推移を図 11 に示す。1980 年前後に不漁になり，漁獲量の安定化のために資源管理が行われ，その後資源の回復がみられたが，2010 年以降に再び資源量が減少し 2016 年以降は禁漁の措置が続いている。

2　ノリおよびアサリに必要な栄養塩類濃度

ノリについては良好な生育に必要な栄養塩類の濃度，アサリについては減耗が生じる栄養塩類の濃度について文献収集を行い表 1，表 2 に示した。

栄養塩類の濃度と養殖ノリ，アサリ漁業との関連についてこれまでの調査・研究事例を収集した結果，伊勢湾で養殖ノリが良好に生育するのに必要な濃度は DIN（無機態窒素）が 0.1mg/L，DIP（無機態りん）が 0.01mg/L とされている。また，アサリについては

三河湾においてアサリの減耗が生じる TN（全窒素），TP（全りん）の濃度はそれぞれ 0.3mg/L，0.041mg/L であった。なお，ここで示す濃度はアサリが生存できるかどうかのレベルであると考えられ，安定的なアサリの再生産や漁業の成立のためにはより高いレベルの濃度が必要になると考えられる。

なお，より高次生産の生物であるイカナゴについては DIN 濃度と漁獲量は正の相関がみられており（図 2），このメカニズムとしては栄養塩類の濃度低下が動物プランクトンの減少を引き起こし，イカナゴの産卵前（夏季）の肥満度が低下して産卵数が減少するためである可能性が示唆されている（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター 2020）。過年度の水産庁事業においても瀬戸内海の備讃瀬戸において，下水処理場の管理運転がイカナゴの肥満度上昇に繋がる可能性を示唆する結果が得られている（平成 30 年度～令和 4 年度水産庁 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「栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査」）。

3　伊勢湾・三河湾の栄養塩類の現状

3.1　海域の栄養塩類濃度

3.1.1 湾全体の栄養塩類濃度の経年変化

伊勢湾・三河湾における海域の栄養塩類の濃度について，湾全体の平均値を図 10 に示す。湾全体の平均値をみると，伊勢湾，三河湾ともに TN，TP ともに減少傾向が続いている。

これは図 11 に示すとおり，伊勢湾・三河湾の陸域から発生負荷量が減少していることに起因する。2019 年の負荷量は，1979 年に比べて全窒素（TN）は約 4 割減少，全りん（TP）は約 7 割減少している。

3.1.2 漁場周辺の栄養塩類濃度の経年変化

次に，ノリ養殖およびアサリ漁場の近傍の地点の DIN，TN，DIP，TP の推移を図 14~図 17 に示す。DIN については，伊勢湾・三河湾では 0.1mg/L 以上の濃度がノリの良好な生育に必要であるが（表 1），最も湾奥部に位置する「愛知 10」の地点を除いて，直近 10 年はほとんどの調査時に 0.1mg/L を下回っている。DIP については伊勢湾・三河湾ではノリの良好な生育に必要な濃度は 0.01mg/L としているが，湾奥部でも 1980 年代からたびたび下回っており，近年はその頻度が増している。TN，TP についても同様に，アサリの減耗が生じる濃度の目安としてそれぞれ 0.3mg/L，0.04mg/L としているが（表 2），選定した 5 地点のうち，最も湾奥部の「愛知 10」を除いて，直近 10 年はほとんどの調査時にこれらの目安の値を下回るようになっている。また，窒素とりんでは，窒素の方が特に湾奥部において減少傾向が顕著であり，以前はノリやアサリの生育に対してはりんが不足していたと考えられるが，現状では窒素も不足している可能性がある。

3.1.3 水平分布の推移

伊勢湾・三河湾の栄養塩類の表層の DIN，DIP，TN，TP および水温の５年ごとの年度平均値を算出し，DIN，DIP はノリの良好な生育に必要な濃度を満たしているかどうか，TN，TP はアサリの減耗が生じる濃度を超えているかどうか図化したものを図 18~図 22

に示す。

ノリの良好な生育に必要な栄養塩類濃度である DIN 0.1mg/L を上回る範囲は，1983 年から 1987 年頃は，湾中央から湾奥にかけて広範囲に広がっていたが，2018 年から 2020 年平均値では湾奥部の狭い範囲に限定されている。同様にノリの良好な生育に必要な栄養塩類濃度としている DIP 0.01mg/L を上回る範囲は，1978 年から 1982 年頃は伊勢湾のほぼ全域に及んでいたが，2000 年代以降は DIN と同様に湾奥部の一部の範囲に限定されている状況である。

アサリのへい死がはじまる目安である TN 0.3mg/L，TP 0.04mg/L を上回っている範囲も，TN については 2005 年頃までは伊勢湾のほぼ全域に及んでいたが，2000 年代後半からは伊勢湾および三河湾の奥部に限定されている。ただし，2018-2020 年の平均値では，三河湾で 0.3mg/L を上回る範囲がやや拡大している。TP は，TN より目安の値を上回る範囲は狭く，1980 年頃から湾の奥部に限られており，その範囲は現在にかけて縮小が続いている。ただし，三重県の松坂市地先，伊勢市地先などでは TN，TP が目安の値を下回っていても 1980 年～2015 年は比較的多くのアサリが漁獲されたとの情報もあり，漁場によっては栄養塩類濃度と生産量や漁獲量が整合していない場合もみられる点には留意が必要である。

水温については，1978 年から 1982 年頃は 18.0℃から 18.5℃の範囲が湾のほぼ全域に広がっていたが，その後は上昇傾向が続いており 2018 年から 2020 年頃には湾口から湾奥にかけて 19.0℃から 20.0℃となっており，三河湾の湾奥部では 20.0℃以上となっている。表層水温は，湾の全域において 40 年間で概ね 1～1.5℃上昇していると考えられる。

3.2　伊勢湾・三河湾の栄養塩類濃度の推移のまとめ

以上の検討結果から，栄養塩類の濃度や水温の経年変化は以下のようにまとめることができる。

- 負荷量の減少に伴って海域の栄養塩類濃度の低下傾向が続いている。とくに，2000 年代前半頃から大きく低下している。
- 特に伊勢湾，三河湾の湾口寄りの海域では濃度が低く，近年さらに低下したことでノリ，アサリの生育にとって厳しい現状にあるといえる。
- ノリ，アサリの主要漁場近傍の地点に注目すると，伊勢湾では湾奥部の海域を除き，ほとんどの海域でノリ，アサリの生育に必要な濃度を下回っている。アサリのへい死がはじまる窒素とりんの濃度と比較すると，過去にはりんの方が不足していたが，経年変化をみると窒素の方が低下傾向が顕著である。近年は特に三重県の漁場周辺で窒素がノリやアサリの生育に必要な目安の値を下回る頻度が多く，湾内の広範囲で窒素とりんの両方が不足している可能性がある。
- 表層水温については，1978 年から 1982 年頃の平均水温は 18.0℃から 18.5℃の範囲が湾全域に広がっていたが，40 年後の 2018 年から 2020 年頃には湾口から湾奥にかけて 19.0℃から 20.0℃に上昇している。40 年間で約 1～1.5℃上昇しており高温化が進行している。

4　栄養塩類と水環境との関係

4.1　浄化センターからの栄養塩類供給の取り組み

瀬戸内海をはじめとして，栄養塩類を海域に供給する取り組みとして，浄化センターから特にノリ養殖が行われる冬季に排水中の栄養塩類の濃度を高くする管理運転が行われている。伊勢湾・三河湾では，愛知県で 7 箇所，三重県で 5 箇所において実施されている（令和 6 年 1 月時点）（図 23）。

愛知県では 2022 年度から 2 年間，三河湾沿岸 2 か所の浄化センターで放流水中の窒素とりんの濃度を上昇させ，水質やノリ，アサリへの効果を調査する「水質の保全と『豊かな海』の両立に向けた社会実験」を実施している。この社会実験では対象とする実施施設（浄化センター）において県が定める放流水中の窒素とりんの濃度の上限（窒素：10mg/L，りん：1mg/L）を国の規制値（総量規制制度の C 値：業種，排水量，およびに設置時期に応じて事業場ごとに定められた一日に排出できる汚濁負荷量の許容限度を計算する際に用いる排出濃度）の上限（窒素：20mg/L，りん：2mg/L）まで緩和して，放流水中の窒素とりんの濃度を増加させる。なお，2017 年度から 2021 年度まではりんのみ 1mg/L まで増加させたりん増加試験運転を実施していた。社会実験を行った 2022 年度の放流水中のりんの濃度の変化を図 24 に示す。

社会実験中には水質やノリ，アサリへの効果調査が行われた。水質については，放流口直近では濃度の上昇が認められた（図 25）。

ノリに対する効果については，矢作川の放流口周辺で採集されたノリ葉体の色調（黒みを表す L^* 値）や調査した結果，濃度を増加させた 2022 年と過去 5 か年（2017 年～2021 年度）の平均 L^* 値を比較すると 2022 年度の L^* 値の方が低く，色落ちが改善されたことが確認されている（図 26）。

アサリに対する効果については，矢作川において放流口からの距離が異なる 3 地点で調査が行われ，2023 年 3 月時点のアサリ現存量は過去 5 か年の同時期と比べ，全調査地点で多く，特に放流口に近い YA-1 では高水準であった。また，放流口から離れた YA-3 でも肥満度の上昇が確認された。一方，YA-1 の肥満度は 2021 年度まで他の調査地点と比べて高い傾向にあったが，2022 年度は他の調査地点よりも低い傾向がみられた（図 27）。放流口に最も近い地点の肥満度の低下は，アサリが増えて相対的に餌が減少した（密度効果）可能性が示唆されている。

以上のように，放流濃度を上昇させた社会実験においてノリの品質の向上およびアサリの現存量の増加等の効果が認められている。

4.2　陸域負荷と貧酸素水塊や赤潮との関係

栄養塩類の陸域からの発生負荷量は，図 13 に示す通り減少傾向にある。それに伴い海域の栄養塩類濃度も低下している一方で，底層に形成される貧酸素水塊の面積は図 28 に示す通り，年最大値も平均値も若干の増大傾向にある。

貧酸素水塊の形成メカニズムは，海水の成層化による海水の鉛直混合の停滞と，流入した有機物や表層で生産された有機物が沈降し，それが分解される際，底層における酸素消費によるものと考えられている（山室ら 2013，山本ら 2008，宇野木 1993）。

また，愛知県における赤潮の推移を図 29 に示した。愛知県における赤潮発生延べ日数

は，年ごとの変動が大きいが，前述の矢作川浄化センターおよび豊川浄化センターにおける管理運転を開始した 2017 年以降においても赤潮発生日数は減少している。

下水処理場の放流水中の栄養塩類濃度を増加させることで海域の生産性が向上することが考えられるが，それらが伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の規模や赤潮の発生数を増加させる可能性は低いと考えられる。

5　栄養塩類管理方策の提言

伊勢湾・三河湾では，陸域からの負荷量の削減により，海域の栄養塩類濃度が低下傾向を示す中，ノリ，アサリおよびイカナゴの生産量や漁獲量も減少傾向にある。そして，これらの資源には栄養塩類の減少がネガティブな影響を与えている可能性が示唆されている。また，今般，ノリの品質を維持するため，あるいはアサリの生育に最低限必要な栄養塩類濃度をとりまとめたが，現場の観測値をみると，近年は窒素およびりんの両方でこの濃度を下回る状況が頻繁に観察されている。

これらのことから，ノリの色落ちの改善や生産量の増加，海域の一次生産量の増大を通じたアサリの漁獲量の増大や，さらに高次消費者である魚類の漁獲量増大に向けて，栄養塩類の適切な管理による海域の栄養塩類濃度の上昇が必要であることが示唆される。他方で，栄養塩類管理の実証試験に際してのパブリックコメントに見られるように栄養塩類の供給を増加させるためには，栄養塩類の管理に向けた取組の進捗にあわせ，随時幅広い関係者の理解の醸成や合意形成を図りながら，制度面を見直すこと（類型指定の見直し等）も必要である。

本検討においては，伊勢湾・三河湾におけるノリおよびアサリの生産量と栄養塩類の濃度との関係に関する知見を中心に収集整理したが，栄養塩類の変動による水産資源への影響については，特に高次消費者の生物に対しては応答が複雑であり，水温上昇も続く中で解明されていない点も多い。将来的には今回の対象種以外の生物についても栄養塩類の変動が与える影響に関する知見を得て整理していく必要がある。そのため，今後も水産資源や湾内環境について調査研究を継続し，更なる知見の蓄積を図り，陸域からの栄養塩類の供給方法など，具体的な対策の検討に向けて数値シミュレーションを用いた検証を行い，伊勢湾・三河湾の実態に即した適切な栄養塩類の管理方策を検討することが重要である。

また，これらのことを踏まえ，海域の栄養塩類の増加に向けた栄養塩類管理の取組については，愛知県で実施されている「水質の保全と『豊かな海』の両立に向けた社会実験」のように，海域環境の変化をモニタリングして取組の効果や影響を検証しながら進めるという，海域の状況の変化に応じた順応的な取り組みとすることが望ましい。

伊勢湾・三河湾のとくに湾奥部では埋め立てや浚渫により湾奥部の干潟，浅場が失われて，生物の生息場や干潟・浅場が持つ水質浄化機能が失われた経緯がある。そのため，「豊かな海」の実現には，下水処理場などからの栄養塩類の供給のみならず，多くの生物の生息場であり基礎生産を効率的に生物生産に転化する機能を持つ干潟，浅場，藻場等の「生産の場」の維持・再生も重要であるところ，是非ともこれらの取組も併せて進めていただきたい。

6. 数値シミュレーションモデルによる検討

令和 5 年度は，令和 4 年度に引き続きモデルの構築を行った。使用するモデルは EcoPARI（田中ら 2011）をベースに構築したアサリ資源量モデルを用いることとし，計算領域は図 31 に示す領域とした。また，表 3 に示す入力条件についてデータの収集を行った。構築したモデルを使ってアサリの資源量やノリの色落ちを対象として，令和 6 年度以降に感度解析を行う予定である。

【引用文献】

1. 愛知県，2023.第 2 回愛知県栄養塩管理検討会議　資料 2.
2. 愛知県，2022.第 1 回愛知県栄養塩類管理検討会議　資料
3. 愛知県水産試験場，2023，令和 4 年伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況.
4. 愛知県水産試験場，2022，令和 3 年伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況.
5. 愛知県水産試験場 漁業生産研究所，2013.伊勢・三河湾におけるイカナゴの資源管理
6. 江藤拓也， 片山幸恵， 江崎恭志， 2012. 2008 年から 2010 年における福岡湾でのノリ，ワカメ養殖の不作要因について. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 = Bulletin of Fukuoka Fisheries and Marine Technology Research Center 22 33–40.
7. 藤原建紀， 樋口和宏， 藤井智康， 2020. 海産生物の生育に必要な水質 (全窒素・全リン濃度の下限値) の定量化：アサリおよび生物付着板を用いた現地調査. 水環境学会誌 43， 175–182. https://doi.org/10.2965/jswe.43.175
8. 福岡水産海洋技術センター，2011.リン欠乏がノリの生育に与える影響に関する研究
9. 浜口昌巳， 2011. 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 33–47.
10. 萩平将， 2005. ノリ・ワカメ養殖漁場の栄養塩. 徳島水研だより.
11. 堀豊， 望月松寿， 島本信夫， 2008. 播磨灘北部海域におけるノリ色落ちと漁場環境の変遷. 水産海洋研究 72， 107–112.
12. 兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター， 2020. 豊かな瀬戸内海の再生を目指して.
13. 石井光廣， 長谷川健一， 松山幸彦， 2008. 東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因：栄養塩の長期変動および最近の珪藻赤潮発生. 水産海洋研究 72， 22–29.
14. 伊勢湾環境データベース. URL https://www.isewan-db.go.jp/.
15. 蒲原 聡， 2023. アサリ湧く豊かな伊勢湾・三河湾に. 愛知県水産試験場研究報告 47–60.
16. 蒲原聡， 湯口真実， 栗田貴代， 鈴木輝明， 2022. 三河湾豊川河口域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* の発生から見た流域下水道の栄養塩供給効果. 水環境学会誌 45， 181–191. https://doi.org/10.2965/jswe.45.181
17. 蒲原聡， 芝修一， 鶴島大樹， 鈴木輝明， 2021. 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究 85， 69–78. https://doi.org/10.34423/jsfo.85.2_69
18. 蒲原聡， 高須雄二， 湯口真実， 美馬紀子， 天野禎也， 2020. 2018 年度ノリ漁期に

おいて伊勢・三河湾で生産された乾海苔の黒み度への漁場の栄養塩類の影響. 愛知県水産試験場研究報告 1–8.
19. 川口 修, 山本 民次, 松田 治, 橋本 俊也, 2004. 水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明. 海の研究 13, 173–183. https://doi.org/10.5928/kaiyou.13.173
20. 環境省. 水環境総合情報サイト（広域総合水質調査）. URL https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/mizu/kouiki/dataMap.asp.
21. 環境省, 2022 年, 瀬戸内海環境保全基本計画. URL https://www.env.go.jp/water/heisa/law.html.
22. 環境省, 2019. 第９次水質総量削減の在り方について.
23. 倉田恵吉, 2021. イカナゴについて. 三重水産研究所 水産研究所だより 3–7.
24. 小池美紀, 渕上哲, 2013. 溶存態無機リン欠乏がスサビノリ（*Pyropia yezoensis*）に及ぼす影響. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 = Bulletin of Fukuoka Fisheries and Marine Technology Research Center 33–42.
25. 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部, 2023. 栄養塩類の能動的運転管理の効果的な実施に向けたガイドライン（案）.
26. 国分秀樹, 2019. 伊勢湾における栄養塩類と水産資源の長期変動. 土木学会論文集Ｂ２（海岸工学） 75, I_1123-I_1128. https://doi.org/10.2208/kaigan.75.i_1123
27. 松岡 聡, 吉松 定昭, 小野 哲, 一見 和彦, 藤原 宗弘, 本田 恵二, 多田 邦尚, 2005. 備讃瀬戸東部（香川県沿岸）におけるノリ色落ちと水質環境. 沿岸海洋研究 43, 77–84. https://doi.org/10.32142/engankaiyo.43.1_77
28. 三好順也, 髙橋暁, 三島康史, 2012. 備讃瀬戸における栄養塩動態とノリ養殖被害との関係. 陸水学雑誌 73, 199–206. https://doi.org/10.3739/rikusui.73.199
29. 水野知巳, 程川和宏, 竹内泰介, 井上美佐, 2011. 三重県アサリ資源管理マニュアル～伊勢湾のアサリを守り育て活かす～改訂版.
30. 中村元彦, 植村宗彦, 林茂幸, 山田大貴, 山本敏博, 2017. 伊勢湾におけるイカナゴの生態と漁業資源. 黒潮の資源海洋研究 = Fisheries biology and oceanography in the Kuroshio 3–15.
31. 永田 誠一, 名角 辰郎, 中谷 明泰, 2001. 近年の播磨灘主要ノリ漁場の環境調査結果. 兵庫県立水産試験場研究報告 59–73.
32. 農林水産省, 2023. 海面漁業生産統計調査. URL https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html.
33. 水産研究・教育機構水産技術研究所, 2023.3.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 4 年度, https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I032726811
34. 水産研究・教育機構水産技術研究所, 2022.3.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 3 年度, https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I032052370
35. 水産研究・教育機構水産技術研究所, 2021.3.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 2 年度， https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I031351570
36. 水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所， 2020.3.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 平成 31 年度， https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I030377731
37. 水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所， 2019.3.漁場環境改善推進事業「栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査」報告書 平成 30 年度，https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I029596547
38. 反田實， 2020.イカナゴの減少と貧栄養化.アクアネット 2020 年 10 月号 43-49.
39. 東海農政局， 2023. 第 69 次東海農林水産統計年報. URL https://www.maff.go.jp/tokai/tokei/nenpo/69.html.
40. Uchida, M., Ishihi, Y., Watanabe, S., Tsujino, M., Tezuka, N., Takada, Y., Niwa, K., 2023. Trophic state-dependent distribution of asari clam *Ruditapes philippinarum* in Japanese coastal waters: possible utilization of asari stable isotope ratios as a production indicator. Fish Sci 89， 203–214. https://doi.org/10.1007/s12562-022-01663-5
41. 宇野木早苗， 1993. 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版.
42. 鵜崇直文， 日比野学， 澤田知希， 2015. イカナゴ伊勢・三河湾系群の夏眠期における被食状況. 黒潮の資源海洋研究 = Fisheries biology and oceanography in the Kuroshio 93–102.
43. 渡辺 康憲， 川村 嘉応， 半田 亮司， 2004. ノリ養殖と栄養塩ダイナミックス. 沿岸海洋研究 42， 47–54. https://doi.org/10.32142/engankaiyo.42.1_47
44. 山本祐也， 中田喜三郎， 鈴木輝明， 2008. 三河湾における貧酸素水塊形成過程に関する研究. 海洋理工学会誌 14， 1–14. https://doi.org/10.14928/amstec.14.1_1
45. 山室真澄， 石飛裕， 中田喜三郎， 中村由行， 2013. 貧酸素水塊 現状と対策.
46. 田中陽二， 中村由行， 鈴木高二郎， 井上徹教， 西村洋子， 2011. 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築， 港湾空港研究所報告 第 50 巻第 2 号. https://www.pari.go.jp/2011/06/20110520170248.html