

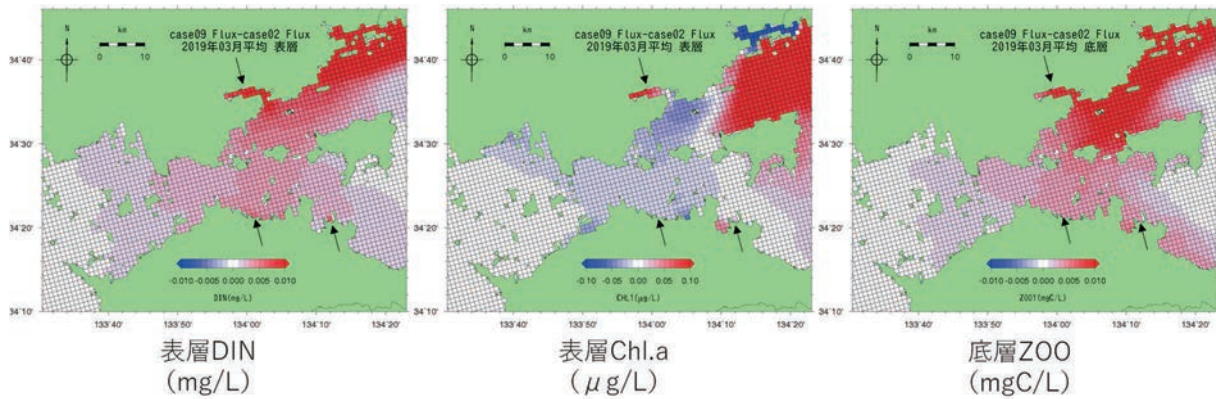


図 14 case02 からの増減の平面分布 (case09, 2019 年 3 月 : 管理運転終了月)

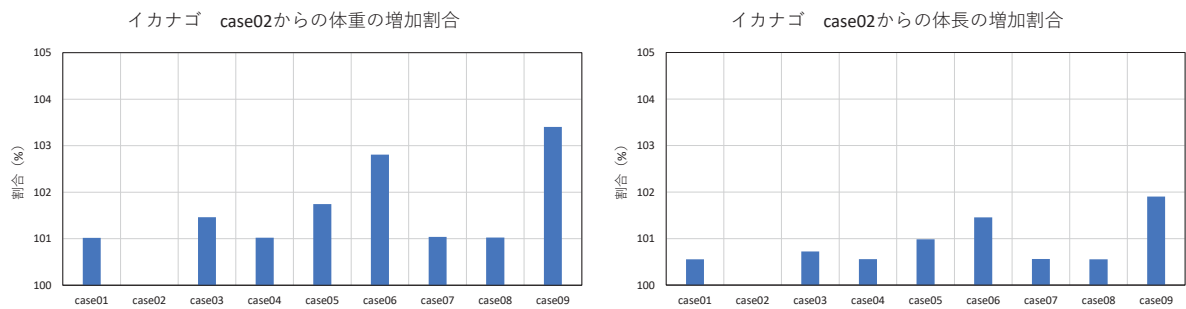


図 15 case02 を 100%としたときのイカナゴの体重・体長の増加割合

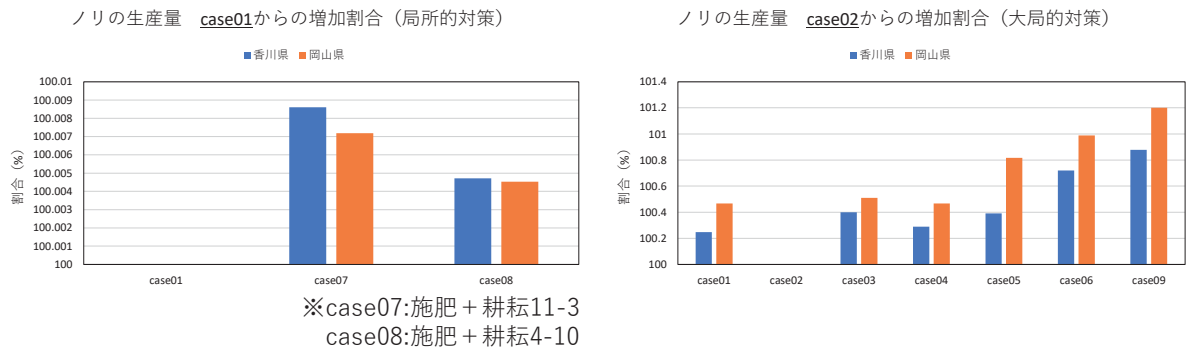


図 16 case02 を 100%としたときのノリの生産量の増加割合

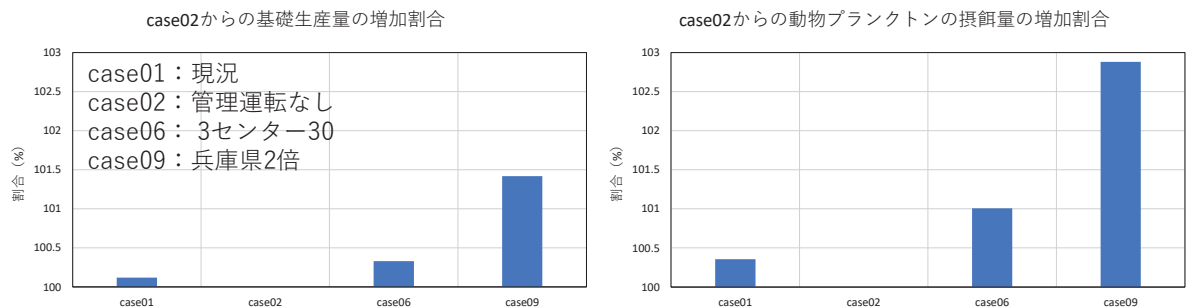


図 17 case02 を 100%としたときの基礎生産量・動プラ摂餌量の増加割合

課題番号：I－3)

課題名：栄養塩管理方針の検討

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

【背景・目的】

本調査では「豊かな海」に必要な栄養塩供給を把握して管理することによって、「きれいな海」において漁業資源の増大と持続的な維持を可能とし、さらに、適切な栄養塩の配分による安定した生態系の維持と生産量の最大化を可能とする方針の検討を行うものである。そのため、平成30年度から令和2年度までは博多湾をモデル海域として、現地調査及び文献調査によってデータを収集し、モデルを用いた栄養塩管理方策を検討した。博多湾の検討については、令和2年度で当初想定した成果をまとめた。引き続き博多湾以外の湾・灘について、必要な資料・データの収集による栄養塩の挙動や漁業実態の把握を行い、既存の物質循環モデルを対象海域に当てはめ、対象海域における物質循環の実態を把握することとなった。さらに、既存の生態系モデルとの統合を図り、漁業資源を含めた生態系を構成する生物の動態を再現し、栄養塩供給の変化等に伴う漁業生物の変動を予測する内湾漁業生産管理モデルの構築を、本事業における他課題「2 水質環境や餌料環境と小型浮魚生産量との因果関係の評価」において実施した。本課題では栄養塩管理モデルによって栄養塩と漁業生産との関係性を明らかにし、下水処理施設の季節別管理運転等による漁業への効果について検討を行い、栄養塩管理方針をとりまとめる。

令和4年度は、燧灘と備讃瀬戸をモデル海域として、燧灘のカタクチイワシと栄養塩の関係ならびに備讃瀬戸のイカナゴと栄養塩の関係について栄養塩管理モデルの構築し、生態系モデルを用いて栄養塩濃度と各魚種の資源量の変動について検討した。その結果を踏まえ瀬戸内海における栄養塩管理方針をとりまとめた。

【方法】

(1) 検討委員会の開催

燧灘および備讃瀬戸海域のモデル構築ならびに栄養塩管理方針を検討するにあたり、専門的な立場からのご意見をいただくために、水産分野の専門家8名（検討委員会メンバーは以下の通り）により構成される検討委員会を設置した。

検討委員会は、12月及び2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 特任教授）

- ・ 中田喜三郎（名城大学 特任教授）
- ・ 反田實（兵庫県立農林水産技術センター 技術参事）
- ・ 中村元彦（愛知県水産試験場漁業生産研究所 主任）
- ・ 藤田弘一（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）
- ・ 山本昌幸（香川県水産課漁業調整室 室長補佐）

【結果】

（1）検討委員会の開催

検討委員会を次の通り開催し、委員より栄養塩の管理方針について専門的な立場からのご意見を伺った。得られたご意見は、課題「2 水質環境や餌料環境と小型浮魚生産量との因果関係の評価」におけるモデル構築における参考とするとともに、栄養塩管理方針に反映させた。

1) 第1回検討委員会（令和4年10月3日開催）

第1回検討委員会で示した資料に対する主な指摘事項等は下記の通りである。

- ・ （中田委員）ネットプランクトンの計算値は実際と比較してどうなのか。春のブルームだけが再現されている状態でいいのか。
- ・ （反田委員）イカナゴはある程度底質を認識しているため、最下層にいらなくても夏眠に入ると考えられる。（モデルにおけるイカナゴ夏眠の条件設定に関わって。）
- ・ （山田委員）計算の現況再現と感度解析の条件は近い条件にするべきではないか。
- ・ （山田委員）T-N、T-P が低めに計算されている。事業場からの排水等、陸からの負荷が入っていない可能性があるのではないか。
- ・ （鈴木委員）備讃瀬戸では、栄養塩管理運転するなら、東西の境界の条件の影響が大きいと考えられる。将来的な検討するならば、境界条件を変化させるなどした方がいい。
- ・ （松田委員長）施肥や海底耕耘は沿岸のノリなどで地域的な効果がある。広域的には栄養管理運転による栄養塩管理等が必要であり、それぞれ手法、特徴と、その根拠を示す必要があるのではないか。
- ・ （反田委員）施肥や海底耕耘と管理運転は次元が違う話だと考えられる。今一度効果のスケールなどを検討してほしい。

2) 第2回検討委員会（令和5年2月14日開催）

第2回検討委員会で示した資料に対する主な指摘事項等は下記の通りである。

- ・ （松田委員長）栄養塩管理方針については、検討して分かった結果と方針を分けて記述し、管理方針だけが独立しても内容が分かるようにした方がよい。
- ・ （鈴木委員）結論が湾灘別の処理施設の管理運転になっているが、処理施設の管理運転をすることが最終目的ではない。現状の栄養塩濃度と環境基準の類型指定の状況も一致していない。海域の栄養塩濃度を上げる対策は下水処理施設だけの問題ではない。
- ・ （反田委員）効果として、ノリの生産量が0.008%増加やイカナゴの体重が0.02%増加

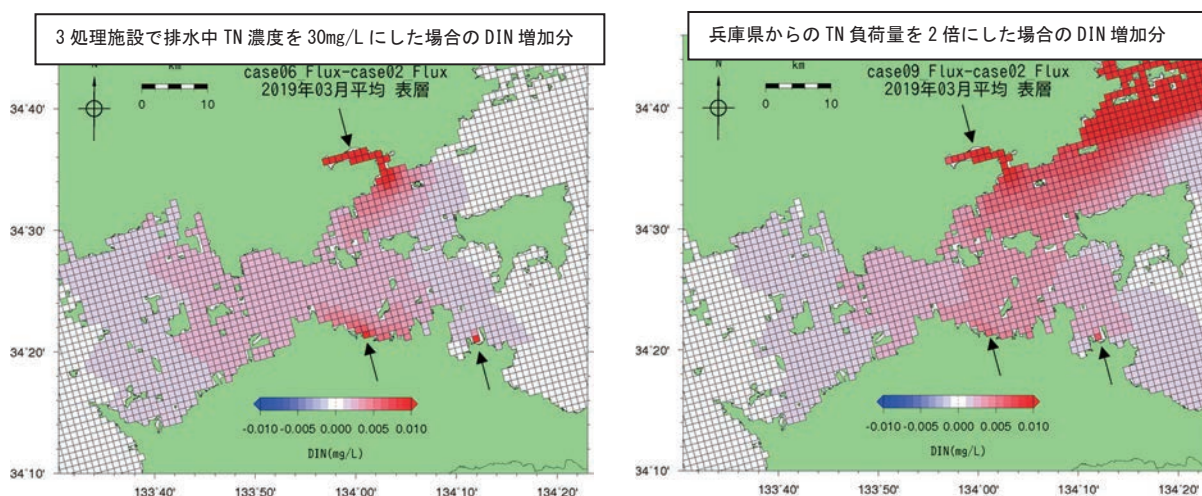
するとあるが、どの程度の効果なのか分かりにくい。ノリの色落ちを防ぐにはこれくらい出さないとダメという表現の方が分かり易く、将来に向けて参考になる。

- (山田委員) 結論がイカナゴの生産量に引っ張られているが、負荷量をこれくらい増やすと、こういう海域の変化があることを示すだけでも将来に繋がる。
- (松田委員) 感度解析の結果を絡めて説明できるとよいのではないかな。

(2) シミュレーション結果から考えられた栄養塩増加による海域の変化

備讃瀬戸において栄養塩濃度を増加させる対策として、岡山県側 1 箇所、香川県側 2 箇所の下水处理施設からの負荷量の増加や、漁業者ができる施肥・海底耕耘、隣接する兵庫県からの負荷量増加などを想定して、シミュレーションモデルを用いて 9 ケースの計算を行った。その結果、下記の結果が得られた。

- 表層 DIN は、兵庫県からの TN 濃度を 2 倍にした場合が最も影響範囲が広く、次いで 3 処理施設で T-N 濃度を 30mg/L とした時の影響範囲が広がった。
- 処理施設別にみると、岡山県の岡東浄化センターの T-N 濃度を 25mg/L としたケースと香川県の香東川浄化センターの TN 濃度を 25mg/L とした場合の影響範囲が広がった。
- 下水处理施設からの栄養塩類の負荷量の増加に伴って、イカナゴの体重・体長も増加した。
- 施肥・海底耕耘は、特に香川県側におけるノリの生産量の増加に効果があった。



※図中の矢印は処理施設の位置を示す

(3) 栄養塩増加による漁業生産への波及効果

負荷量を増加させることで海域の栄養塩濃度が増加する。これによりノリやイカナゴの生産量にどの程度の効果が期待できるかを試算した結果の例を図 1、図 2 に示す。岡山県の 1 箇所、香川県の 2 箇所の処理施設から排水する TN 濃度を 2 倍の 30mg/L に増加させると、ノリの生産量は 0.5% 増加、イカナゴの生産量(イカナゴの体重)は 1.8% 増加すると試算された。また、ノリ養殖施設等で冬季(計算期間は 11 月～翌年 3 月の 151 日間)に毎日 600 kg/日の TN 負荷量で施肥を行い、備讃瀬戸の東西の海域で 1,100 kg/日の TN 負荷量となるような海底耕耘を 1 週間に 1 回の割合で冬季の間毎週実施(11 月～翌年 3 月に計 21 回)するという条件を設定すると、ノリの生産量は 0.008% 増加、イカナゴの生産量(イカナゴの体重)は 0.02%

増加すると試算された。

下水処理施設にける栄養塩負荷量の増加対策と比較して、施肥や海底耕耘による効果は限定的である。しかし施肥や海底耕耘は漁業者自らが実施できる対策であり、ノリ養殖漁場の直近で実施することで局所的には有効な対策であると考えられる。



図 1 処理施設の負荷量を現在の2倍にした場合



図 2 施肥・海底耕耘を行った場合

(4) 栄養塩管理方針

1) 下水処理施設の管理運転

前述のように、下水処理施設の管理運転によって広域的に海域の栄養塩濃度の増加効果が期待でき有効な対策である。処理場から放出された栄養塩類が植物プランクトンや動物プランクトンの増加につながることで、より広い海域の魚類相にも波及する可能性がある。ただし、栄養塩濃度の増加分としては処理施設の直近では DIN で 0.01mg/L 程度、処理施設から離れた海域では 0.005mg/L 程度であるため、ノリ養殖に効果がある範囲としては処理施設に近い海域に限られると考えられる。

備讃瀬戸のように潮流の速度が速い海域では環境基準を超えるようなことは生じにくいと考えるが、海域の環境基準は超えない範囲で栄養塩負荷の増加を行う必要がある。また、下水処理施設の管理運転は、濃度調整の自動化ができず手間がかかる。このため、対象とする漁業生物の生活史を踏まえ、成長や再生産で栄養塩類が必要な時期にその濃度を効果的に増加させることが必要である。

2) 施肥・海底耕耘

下水処理施設の管理運転に比べて、施肥や海底耕耘によって栄養塩濃度を増加させることができる範囲は限定的であり、効果も局所的なものとなる。しかし、これらの対策は漁業者自らが実施できる対策であり、効果も自身で実感できるものであることから、漁場内やその

直近で実施する対策として有効である。

3) その他の対策（漁場位置）

下水処理施設における管理運転と合わせて、ノリについては養殖場の位置を栄養塩の濃度に合わせて変更することも視野に入れる必要がある。管理運転を強化しようとする際に、施設への流入水の栄養塩濃度が低い場合には排水中の濃度を十分に上げることが不可能となる。このような場合には、養殖場を排水口の近傍に移動させる等の工夫によって漁業生物の生産性を高めることが必要となる。

4) 栄養塩を増加させるための全体計画の作成

下水処理施設の管理者と漁業者が十分に協議し、必要とする漁業生物の生産量や漁場配置および管理運転計画等を組み合わせた全体計画を作成し、これを実行することによって漁業生物の増産を図ることが重要である。また、瀬戸内海の場合は、湾灘間の海水の移動量も多いため、特定の湾灘が単独で対策に取り組んでも効果が限定的になる場合がある。そのため、隣接する湾灘で連携して対策の内容や時期を決めて実施することが重要となる。

栄養塩の循環を適切に管理するために海域および周辺地域（集水域）において実施すべき方策は、海域の地理的・地形的条件、海域の利用状況、周辺地域の経済・社会活動の状況等によって大きく異なる。そのため、それぞれの海域ごとに海域・陸域一体となった効率的かつ効果的な栄養塩の円滑な循環を可能とする望ましい管理方策を策定し、これに基づき、行政、地域住民、漁業者、事業者および研究者等が連携して豊かで健全な海域の構築に向けた総合的な取組を実施する必要がある。

(5) 備讃瀬戸における栄養塩管理方策の提案

備讃瀬戸のノリ養殖業、イカナゴ漁の生産性を高めるためには、以下に示す栄養塩の管理方策が必要と考えられる。

- ① 岡山県の1箇所（岡東浄化センター）、香川県の2箇所（香東川浄化センター、鴨部川浄化センター）の下水処理施設においてTN負荷量を2倍程度に高める。また、周辺の海域で環境基準を超過していないかモニタリングを行い、徐々に他の水処理センターに管理運転を拡大する。
- ② 効果は限定的であるものの、漁場内やその直近などでは手軽に実施できる施肥や海底耕耘を講じる。
- ③ 特定の施設や場所における負荷量の増加だけでなく、長期的な取り組みとしては環境基準の類型指定の見直しなど、海域の栄養塩濃度を高める取り組みを幅広く多面的に進める。

課題番号：Ⅱ－１）

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

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

千葉県水産総合研究センター

岩崎晶知，石井光廣，林 俊裕，島田裕至，小山智行，高山雄彦，渡邊晟也

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、マクロベントスおよびメソ動物プランクトンに焦点を当て、これらの群集構造の季節変動および経年変動を調べた。現状を把握するため、環境要因と生物採集の調査を行うとともに、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することによって現状と比較し、環境変動の影響の検討を行った。

【方法】

(1) 既往データの検討

東京湾における動物プランクトン群集およびベントス群集の動態に関するこれまでの研究のレビューを行い、問題点の整理を行った。具体的には、神奈川県水産技術センターがこれまでに採集した、既存の動物プランクトン試料について種レベルで現存量を調べることで、季節・経年的な変動について検討した。また、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、解析をおこなった。

(2) 動物プランクトン群集

野外調査では、神奈川県所属の漁業調査指導線船「江ノ島丸」と「ほうじょう」および、千葉県所属の調査船「ふさなみ」を活用し、東京湾内での環境調査およびノルパックネット（口径 45 cm, 目合 0.335 mm）による動物プランクトンの採集を行った。採集は海底直上から表面までの鉛直曳きで行った。

神奈川県側の調査では湾口部 2 定点、湾内 15 定点の計 17 定点において、5 月から 11 月に毎月 1 回行っており、その内、湾奥から湾口までの計 4 ヶ所を本分析対象として選定した。

（図 1）。サンプルは採集後直ちに、ホルマリンの濃度が 5% となるように調整して固定し、実体顕微鏡による検鏡で種別個体数の算定を行った。

千葉県側の調査では湾内定点 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 1）。サンプルは採集後直ちに、ホルマリンの濃度が 5% となるように調整して固定した。固定したサンプル、水産研究・教育機構塩釜庁舎にて整理作業が進められた。これらの標本は今後実体顕微鏡による検鏡で種毎の個体数を計数する標本として供される。

さらに東京湾におけるこれまで行われてきた動物プランクトン研究について文献調査を行った。

(3) ベントス群集

野外調査では、千葉県所属の調査船「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 1）。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 0.1 m² 採泥し、1 mm 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、ベントス類の同定個体数の計数および湿重量の測定を行なった。

調査で得られたデータは、国総研の既往調査地点（図 1）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。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 0.001 g より大きいサンプルのみを用いた。各のデータは、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 による二次元配置と K-medoids 法によるクラスター分離をおこなった。また、得られたクラスターおよび調査期間（既往データと本調査データ）による指標種を IndVal 法によって行なった。

【結果】

(1) 既往データの検討

国総研の東京湾広域環境調査では、2002 年 7 月から 2003 年 7 月まで毎月 1 回、東京湾内の 20 地点において、環境調査と生物群集調査を実施していた。そのうち、ベントス群集調査の結果と関連する環境調査項目について比較可能であると判断し、データの抽出を行なった。また、この過去データと比較するために、12 地点においてベントス群集の現状調査を行うこととした。したがって、20 地点の過去データおよび 12 地点の現状データを比較解析可能な

データセットの整理を行った。

(2) 動物プランクトン群集

事業の初年度であるため、東京湾におけるこれまで行われてきた動物プランクトン研究について文献調査を行った。東京湾では戦後すぐから、動物プランクトンの調査が進められており、Yamazi (1955) は 1948 年に 7 月に東京湾全域で調査を行うことで、種毎の地理的分布を示した。カイアシ類の主要種としては、*Oithona davisae*, *O. similis*, *Acartia omorii*, *Paracalanus parvus* s.l., *Microsetella norvegica* が報告され、地理的には湾奥に *O. davisae*, *Acartia omorii*, 湾中央から湾口にかけて *P. parvus* s.l. と *M. norvegica* が多く分布することが示されている。1948 年は沿岸部の埋め立てや富栄養化が進む前の海洋環境下での動物プランクトンの分布を示していると考えられる。

さらに埋め立てや富栄養化が進んだ 1980 年代(1986~87 年)においても東京湾全域での調査が行われている(Ito and Nishida, 2015)。本研究では地理的な変動に加え、夏~冬(7 月, 8 月, 10 月, 12 月, 2 月)の季節的変動についても調べられている。主要種については概ね Yamazi (1955) と同様であったが、種組成に季節的な遷移があることを明らかにした。すなわち、冬~春は *A. omorii*, *Centropages abdominalis*, 夏は *Pseudodiaptomus marinus* と *A. omorii*, 夏~秋は *P. parvus* s.l. と *Temora turbinata* が指標種として示された。また 1948 年と 1986 年の 7 月の主要種の現存量を比較すると、*O. davisae* では湾全域で増加しているのに対し、*A. omorii*, *P. parvus* s.l., *M. norvegica*, および *O. similis* は減少することが示された。一般に *O. davisae* は富栄養化した海域で卓越することが知られていることから、富栄養化が進行していた 80 年代の海洋環境を反映して、増加した可能性がある。

一方で現在では再び栄養塩濃度が低下しており、その影響で動物プランクトンの群集構造が変化している可能性がある。それを明らかにするために、本年度から採集を始めたサンプルの分析を進めている。ただし現在使っているプランクトンネットの目合は 0.335mm と大きいため、*O. davisae* や *M. norvegica* といった小型の動物プランクトンはすり抜けており、それらの変動について評価することは出来ない。今後は 0.1mm メッシュの網地を用いたサンプリングも検討する必要がある。

神奈川県側の調査で、2017 年 5~9 月および 2020 年 5~11 月の間に湾奥から湾口までの 4 地点で採集された動物プランクトンの種別個体数分析を行った。2017 年 8 月から黒潮は大蛇行期に入り、現在も継続しているためこれら両年を対象期間とした。2020 年 5~11 月サンプルの総個体数および種数を図 2 に示した。総個体数は *A. omorii*, *Calanus sinicus* などの出現により 5 月~6 月に湾奥部の地点ほど多かったが、7 月以降は減少した。特に 7 月~9 月に湾口の St. 27d に比べて湾奥の地点で総個体数が少なかった。上記 2 種の他に、*E. tergestina*, や *P. parvus* s.l. が主要種として多く出現した。両年の 5~9 月で出現した黒潮指標種を見ると(表 1)、両年とも出現した黒潮指標種のうち総出現個体数の上位 5 種は同じ種であり、全体の 89% (2017 年) および 83% (2020 年) を占めた。また、両年の測点別出現数を比較すると全 4 地点で 2017 年より 2020 年の方が多かった(図 3)。*Oncaea venusta*, *Paracalanus aculeatus* などの黒潮指標種は総個体数に占める割合は高くないが、湾口の St. 27d で個体数が最も多く、調査月により湾奥部にまで出現したことから、湾外からの黒潮系暖水の流入を指標する可能性があると考えられる(図 4)。主要種出現状況の地理的、季節的变化について

は、今後の複数年でのサンプル分析結果を基に検討していく予定である。

(3) 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、20 地点 13 か月分の調査で、230 分類群からなるベントス群集が確認されていた。2022 年 5 月に開始した今年度の調査（以後、今回と呼ぶ）とはほぼ 20 年間の隔たりがあり、その間に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認められた（表 3）。今回は 12 地点で隔月に行なっており、5・7・9 月に実施した 12 地点の調査結果によると、101 分類群からなるベントス群集が確認され、そのうち 77 分類群は 20 年前の回目の調査でも確認されていた分類群である。サンプル数が前は 260、今回は 36 と大きく異なるので、単純に 2 つの調査期間で得られた種数の大小を比較ができない。そこで、前回の 260 サンプルからランダムに 36 サンプルを抽出して総種数を求めることを 999 回繰り返し、その平均と分散から、今回の種数が有意に異なるかを調べた。計算には群体性の種を除いたデータ（前回 226 種）を用いたところ、 105.8 ± 15.7 (permutation mean $\pm$ SD) 種を得、今回の種数（100 種）は有意に少ないとは言えなかった ($p = 0.356$, normal approx.)。ただし、この評価には、採集地点および季節の違いは考慮していない。

単純に前回の 260 サンプルと今回の 36 サンプルについて、サンプル毎の総個体数および多様度指数（種数、シャノン多様度の指数、シンプソン多様度の逆数、最優占種占有率の逆数）の平均をウェルチの一元配置分散分析で比較した（表 3）。総個体数の対数変換値 ($\log(x+1)$) では前回は有意 ($p < 0.05$) に高く、多様度指数では種数でのみ有意差が認められ前回の種数が多かった。湿重量でも同様で、湿重量の対数変換値 ($\log(x+1)$) について前回は有意 ($p < 0.05$) に高く、多様度指数では種数でのみ有意差が認められ前回の種数が多かった。

個体数について月ごとの検討を行ったところ（表 3）、5 月では前回 20 サンプルと今回 12 サンプルを比較すると、多様度指数に有意差はないものの、総個体数の対数変換値では前回は有意に高かった。7 月の前回 40 サンプル（2002 年と 2003 年）と今回 12 サンプルを比較すると、多様度指数および総個体数の対数変換値に有意差はなかった。9 月の前回 20 サンプルと今回 12 サンプルを比較すると、多様度指数に有意差はないが、総個体数の対数変換値では前回は有意に高かった。

同様の月毎の検討を湿重量について行ったところ（表 3）、5 月、7 月、9 月について多様度指数および総湿重量の対数変換値について有意差は見られなかった。ただし、前回 9 月の総湿重量で大きな SD が認められたのは、一つの地点で大型のビノスガイモドキが採集された影響であろうと思われる。

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 245 サンプルについて、250 分類群による群集組成の類似度を求め、nMDS および K-medoids 法によるクラスター分離をおこなった。nMDS の二次元配置では、ストレス値が 0.213 となり二次元での表現にはやや慎重になるべきものの、今回の 19 サンプルが配置図の周辺部に位置する傾向があり（図 5）、前回のサンプルとは全体的に群集組成が異なる傾向があることを示している。また、K-medoids により認識された 7 グループの群集は、二次元配置上で重なりはあるものの大きく異なる位置を占めている。湿重量ベースの群集データにおいて、総重量が 0.001 g より大きい 261 サンプル 254 分類群による群集組成についても、同様に今回の 25 サンプルが nMDS 二次元配置図の

周辺部に位置する傾向があり，前回のサンプルとは全体的に群集組成が異なる傾向があることが見てとれた。

群集組成の違いをより詳細に見るために，5月，7月，9月のサンプルについて月毎に比較を行った。7月の湿重量による nMDS 二次元配置以外では，ストレス値が 0.2 未満となり，二次元配置による解釈に大きな無理はないといえた。6つの nMDS の配置図全てにおいて(図 6)，今回のサンプルは前回のサンプルの周辺部に位置する傾向があり，群集組成に違いがあることが示された。群集組成の違いがどの分類群に表れているかを具体的に示すために，個体数による解析について，前回と今回で比較して IndVal により有意 ($p < 0.05$) となった指標種を抽出した(表 4)。すべての場合において指標種が抽出でき，中でもイトエラスピオ(*Prionospio pulchra*)とクシカギゴカイ(*Sigambra tentaculata*)は前回の 5，7，9月の指標種として抽出された。今回のサンプルでは 3 カ月とも指標種となった種類はいないが，ナガオタケフシゴカイ(*Praxillella pacifica*)が 7 月と 9 月の指標種となっているが，この種は前回のデータではタケフシゴカイ科として同科の他種とまとめて計数されていた可能性がある。

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)。今回，限られたサンプルからの結果であるが，20 年前のベントス群集と比較し，密度の低下と群集組成の変化が認められた。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。

【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 2017年および2020年の5～9月に出現した黒潮指標種一覧。黄色地が上位5種

科	種			
アカルチア	<i>Acartia negligens</i>	黒潮種		両年出現
カラヌス	<i>Canthocalanus pauper</i>	黒潮種		両年出現
カラヌス	<i>Cosmocalanus darwini</i>	黒潮種		両年出現
カラヌス	<i>Mesocalanus tenuicornis</i>		黒潮外側種	両年出現
カラヌス	<i>Nannocalanus minor</i>	黒潮種	黒潮外側種	両年出現
カラヌス	<i>Undinula vulgaris</i>	黒潮種		両年出現
クラウソカラヌス	<i>Clausocalanus arcuicornis</i>		黒潮外側種	2017のみ出現
クラウソカラヌス	<i>Clausocalanus furcatus</i>	黒潮種		両年出現
クラウソカラヌス	<i>Clausocalanus mastigophorus</i>	黒潮種		両年出現
クラウソカラヌス	<i>Ctenocalanus vanus</i>		黒潮外側種	両年出現
ユウカラヌス	<i>Eucalanus subcrassus</i>	黒潮種		2017のみ出現
ルシクチア	<i>Lucicutia flavicornis</i>	黒潮種		両年出現
パラカラヌス	<i>Acrocalanus gracilis</i>	黒潮種		両年出現
パラカラヌス	<i>Acrocalanus longicornis</i>	黒潮種		両年出現
パラカラヌス	<i>Paracalanus aculeatus</i>	黒潮種		両年出現
スコレスリックス	<i>Scolecithrix danae</i>	黒潮種		両年出現
オイトナ	<i>Oithona plumifera</i>	黒潮種		両年出現
オンケア	<i>Oncaea venusta</i>	黒潮種		両年出現
サフィリナ	<i>Copilia mirabilis</i>	黒潮種		2017のみ出現

宮本ら(2015): 黒潮域のカイアシ類の地理分布と群集構造. 海洋と生物 37(5).

表2 ベントス調査にて前回から学名もしくは和名の変更などのあった分類群の新旧対照表

新門	綱	目	科	学名	和名	旧学名もしくは和名
環形動物門	ゴカイ綱	サシバゴカイ目	カギゴカイ科	<i>Sigambra phuketensis</i>	クシカギゴカイ	<i>Sigambra tentaculata</i>
環形動物門	ゴカイ綱	イトメ目	ギボシイトメ科	<i>Scoletoma longifolia</i>	カタマカリギボシイトメ	<i>Lumbrineris longifolia</i>
環形動物門	ゴカイ綱	スビオ目	スビオ科	<i>Paraprionospio patiens</i>	シノブハネエラスビオ	<i>Paraprionospio</i> sp. (A型)
環形動物門	ゴカイ綱	スビオ目	スビオ科	<i>Paraprionospio coora</i>	スベスベハネエラスビオ	<i>Paraprionospio</i> sp. (CI型)
節足動物門	甲殻綱	ヨコエビ目	トノクダムシ科	<i>Sinocorophium</i> sp.	チュウゴクトノクダムシ属	<i>Corophium</i> sp.
節足動物門	甲殻綱	クマ目	ナギサクマ科	Bodotriidae	ナギサクマ科	ボドトリア科
節足動物門	甲殻綱	クマ目	クマ科	Diastylidae	クマ科	デアスティリス科
原索動物門	ヒメボヤ綱	ヒメボヤ目	ナツメボヤ科	Ascidiidae	ナツメボヤ科	アスキシア科
原索動物門	ヒメボヤ綱	マボヤ目	シロボヤ科	Styelidae	シロボヤ科	スチエラ科
原索動物門	ヒメボヤ綱	マボヤ目	フクロボヤ科	Molgulidae	フクロボヤ科	モルグラ科
脊椎動物門	硬骨魚綱	スズキ目	ハゼ科	<i>Acentrogobius virgatus</i>	スズハゼ	<i>Acentrogobius flaumii</i>

表3 前回および今回のサンプル毎のベントス類の総個体数, 総湿重量, およびそれらを元にした多様度指数の平均と標準偏差, および Welch-ANOVA による平均値の違いの検定結果。

	前回			今回			Welch-ANOVA
	N	Mean	SD	N	Mean	SD	P
全サンプル	260			36			
個体数							
種数		10.9	10.3		6.9	9.2	0.02
シャノン		4.8	4.7		3.8	4.7	0.26
シンプソン		3.5	3.1		2.8	3.3	0.28
最優占種占有率		2.2	1.5		1.7	1.7	0.14
総個体数*		229.2	348.5		41.0	70.2	<0.001
湿重量							
種数		11.3	10.3		7.4	9.3	0.03
シャノン		2.8	1.9		2.3	2.6	0.26
シンプソン		2.1	1.4		1.7	1.8	0.18
最優占種占有率		1.6	0.8		1.3	1.1	0.06
総湿重量*		5.2	10.3		2.4	4.4	0.005
5月	20			12			
個体数							
種数		12.6	12.8		6.3	6.6	0.09
シャノン		5.0	5.7		4.0	3.6	0.55
シンプソン		3.5	3.7		3.0	2.4	0.63
最優占種占有率		2.2	1.7		2.0	1.1	0.61
総個体数*		189.6	246.4		19.9	27.5	0.001
湿重量							
種数		13.2	13.3		6.3	6.6	0.06
シャノン		2.6	1.5		1.8	1.2	0.08
シンプソン		2.0	1.0		1.4	0.8	0.08
最優占種占有率		1.6	0.6		1.2	0.6	0.10
総湿重量*		6.0	6.7		3.4	6.7	0.31
7月	40			12			
個体数							
種数		10.4	11.1		8.6	11.9	0.64
シャノン		5.2	5.3		4.4	6.0	0.69
シンプソン		3.8	3.7		3.2	4.4	0.66
最優占種占有率		2.4	1.7		1.9	2.2	0.53
総個体数*		183.7	364.2		69.7	95.8	0.39
湿重量							
種数		10.4	11.1		10.3	12.0	0.96
シャノン		2.5	1.8		2.8	2.5	0.76
シンプソン		1.9	1.3		2.1	1.8	0.88
最優占種占有率		1.6	1.0		1.5	1.2	0.70
総湿重量*		3.9	6.2		2.5	3.0	0.28
9月	20			12			
個体数							
種数		9.6	10.8		5.8	8.8	0.29
シャノン		3.7	5.8		3.2	4.5	0.79
シンプソン		2.7	4.3		2.3	2.9	0.76
最優占種占有率		1.6	1.7		1.3	1.5	0.64
総個体数*		372.9	505.8		33.5	65.5	0.01
湿重量							
種数		9.6	10.8		5.8	8.6	0.27
シャノン		2.6	2.6		2.3	3.5	0.84
シンプソン		2.0	1.9		1.7	2.4	0.73
最優占種占有率		1.5	1.2		1.1	1.3	0.41
総湿重量*		7.5	24.1		1.4	2.4	0.28

* $\log(x+1)$ 変換値で検定

表4 ベントスについて、個体数データにより 5, 7, 9 月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

指標種	期間	IndVal 値	p	出現回数
5 月 N=24*				
イトエラスピ ^o オ	前回	0.889	0.003	16
クシカギ ^o コ ^o カイ	前回	0.779	0.018	17
スベ ^o スベ ^o ハネエラスピ ^o オ	前回	0.667	0.022	12
タンザ ^o クコ ^o カイ科	今回	0.450	0.036	4
7 月 N=39*				
クシカギ ^o コ ^o カイ	前回	0.803	0.006	31
イトエラスピ ^o オ	前回	0.731	0.007	24
カタマカ ^o リキ ^o ボ ^o シイソメ	今回	0.701	0.007	23
クビ ^o ナガ ^o スガ ^o メ	今回	0.332	0.050	6
<i>Chaetozone</i> 属	今回	0.298	0.038	5
<i>Anaitides</i> 属	今回	0.250	0.040	2
ミナミシロカ ^o ネコ ^o カイ	今回	0.250	0.040	2
ナガ ^o オタケフシコ ^o カイ	今回	0.250	0.038	2
ケヤリ科	今回	0.250	0.045	2
ニホント ^o ロソコエビ ^o	今回	0.250	0.033	2
9 月 N=19*				
クシカギ ^o コ ^o カイ	前回	0.855	0.018	16
シノブ ^o ハネエラスピ ^o オ	前回	0.839	0.027	14
イトエラスピ ^o オ	前回	0.783	0.021	12
<i>Gyptis</i> 属	前回	0.643	0.050	9
ナガ ^o オタケフシコ ^o カイ	今回	0.600	0.010	3
<i>Mediomastus</i> 属	今回	0.519	0.046	5

* 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。

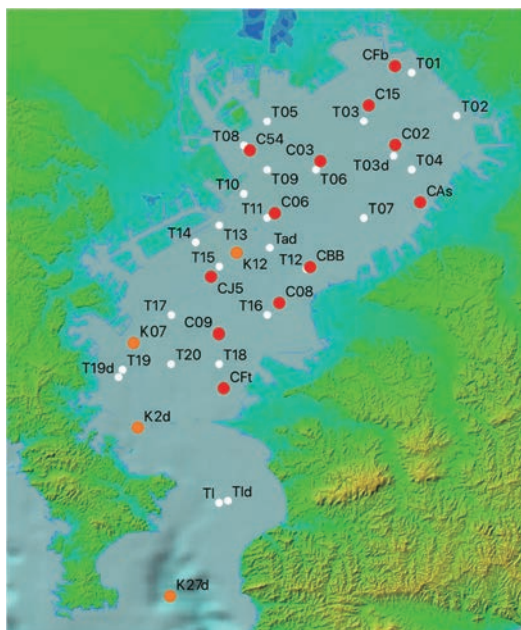


図1 調査地点。T で始まる 20 地点が 2002 年から 2003 年にかけての国総研の東京湾広域環境調査の地点。K で始まる 4 地点が動物プランクトンの解析で用いた神奈川県による調査地点、C で始まる 12 地点が千葉県の調査船による調査地点

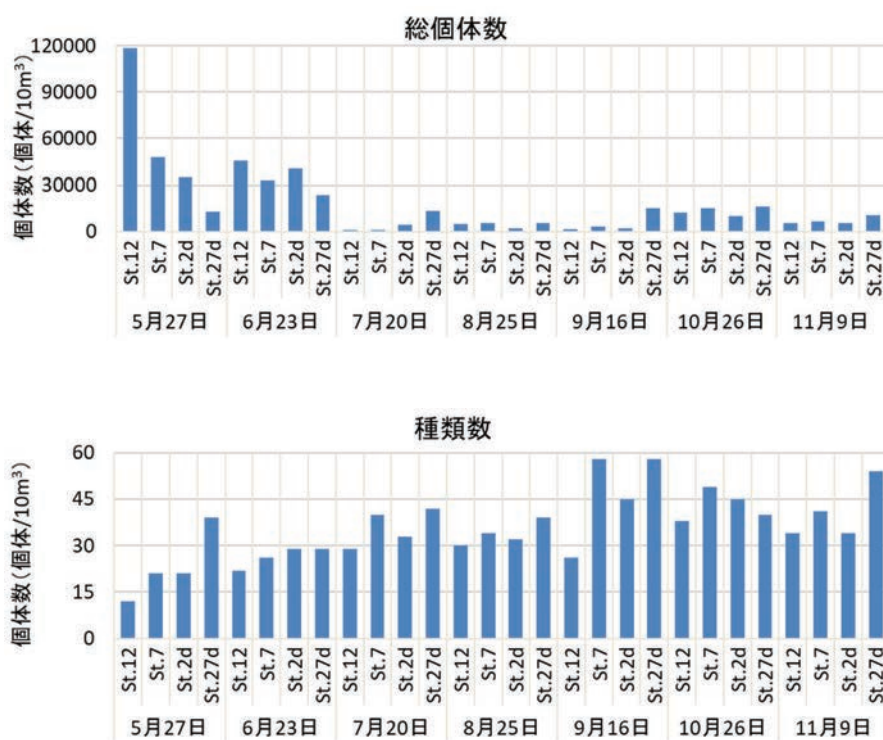


図2 2020年5～11月動物プランクトンサンプルの総個体数および種数

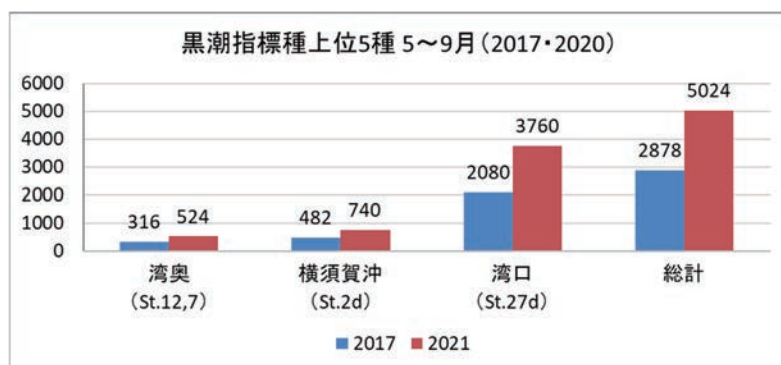


図3 2017年および2020年の黒潮指標種上位5種の測点別出現数

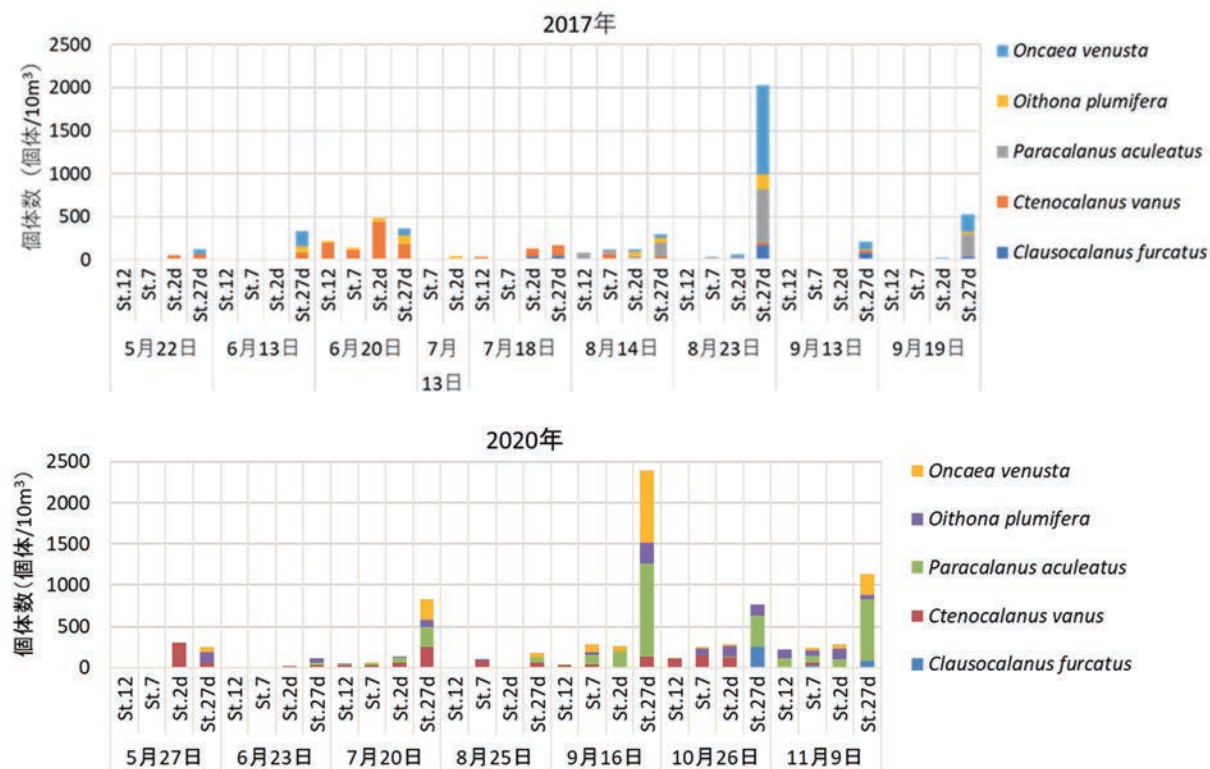


図4 2017年および2020年の黒潮指標種上位5種の月別地点別個体数

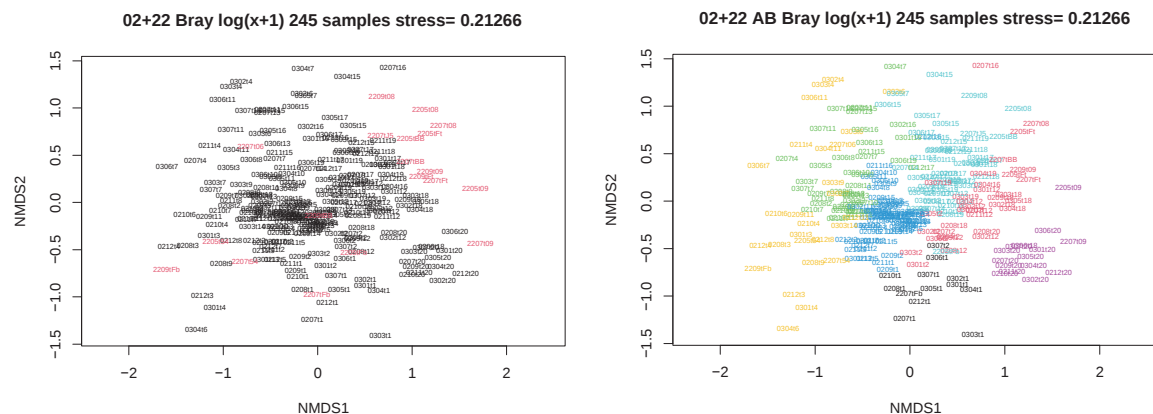


図5 ベントス調査について、個体数をもとにした245サンプル250分類群によるnMDS二次元配置図。左は前回と今回で色分け。右はK-medoidにより認識された7グループによる色分け。サンプルの略称は最初の2文字が西暦下二桁、次の2文字が採集月、最後の2文字もしくは3文字が採集地点名（St*からSを除いたもの）

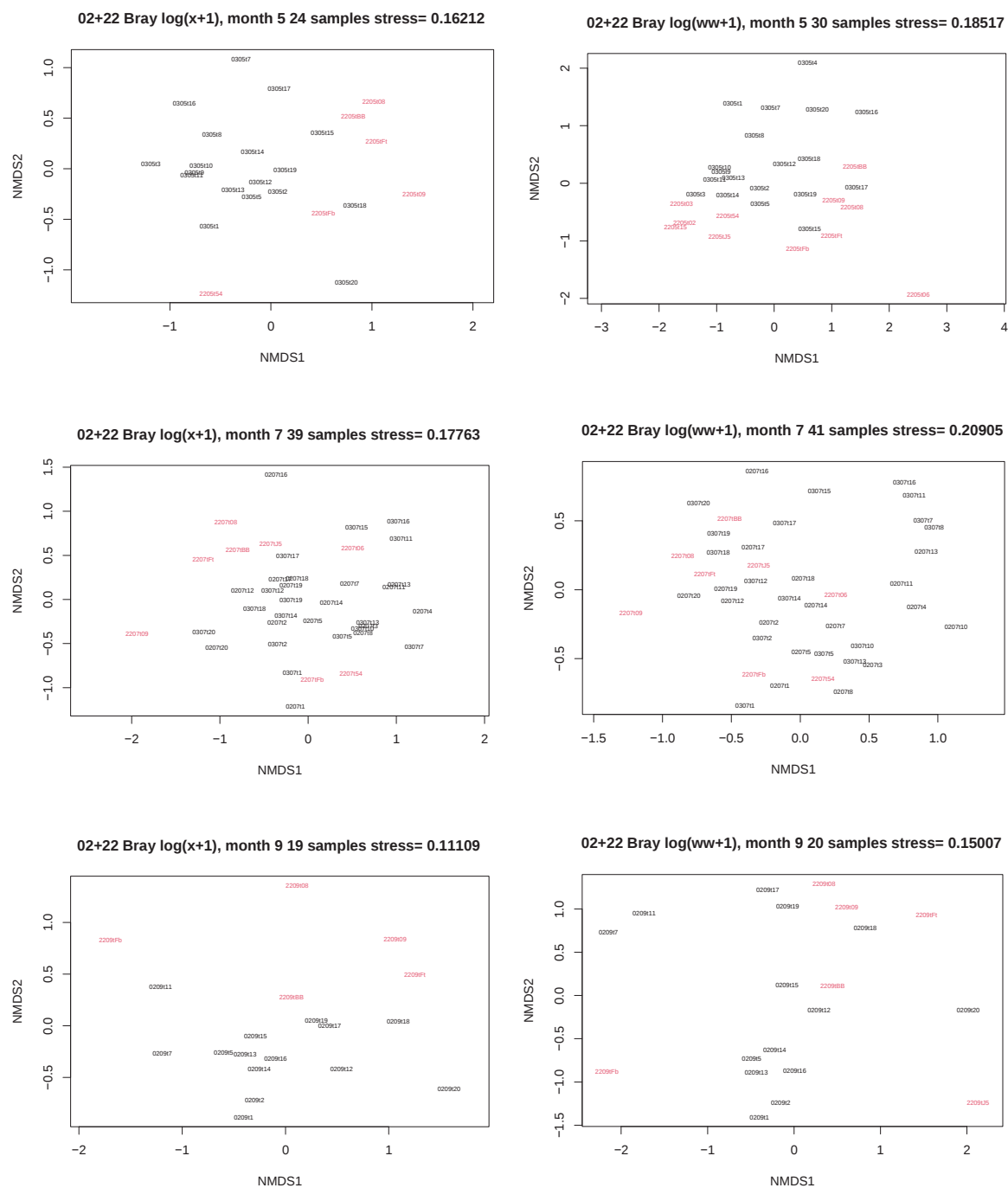


図6 月毎のベントス群集組成を nMDS 配置図で比較したもの。上段が 5 月，中段が 7 月，下段が 9 月のサンプルで，左列が個体数，右列が湿重量をもとに解析したもの。図中の黒字が前回，赤字が今回のサンプルである

課題番号：Ⅱ－２)

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

水産研究・教育機構 水産技術研究所
西本篤史，井上誠章，高田宜武，丹羽健太郎

水産研究・教育機構 水産資源研究所

渡辺 剛

千葉県水産総合研究センター

岩崎晶知，石井光廣，林 俊裕，島田裕至，小山智行，高山雄彦，渡邊晟也

【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，わが国でも有数の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明瞭な低下傾向を示し，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の相対的な供給が大きくなっている。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

千葉県内のアサリ主要 3 漁場（北部，盤洲，富津）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。なお，盤洲漁場では，久津間地区での干潟調査に加えて，金田地区にてアサリの採取も実施した。

実験室に持ち帰ったアサリ試料について，殻長，殻高，殻幅，軟体部湿重量を測定し，肥満度を算出した。また，炭素・窒素安定同位体比（以下， $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ ）分析用に，前・後閉殻筋を切り出した。切り出した閉殻筋は，真空凍結乾燥機を用いて乾燥させた後，クロロホルム・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，オープン

(60℃) にて再び乾燥させ，乾燥重量 0.8 mg を目安に錫箔に詰め， $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 分析に供し

た。 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 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。

また、盤洲漁場の久津間地区において、アサリの餌料源候補 (エンドメンバー) の 1 つである底生微細藻類について、以下の方法で分離作業を試みた。まず、実験室に持ち帰った底質表層試料をバットに薄く敷き、 $64\ \mu\text{m}$ メッシュのプランクトンネット、人工海水で湿らせたガラスビーズを重ね、蛍光灯下に 3 時間程度置いた。底生微細藻類の正の走光性を利用することで、ガラスビーズ層へ底生微細藻類を移動させる手法である。その後、ガラスビーズを回収し、人工海水を加えて、超音波洗浄機にかけた。上澄み海水を GF/F フィルターを用いて濾過し、フィルターをオーブン (60°C) で 2, 3 日乾燥させた。更なる脱炭酸などの処理は行わず、錫箔に詰め、上述の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 分析に供した。他の主要 2 漁場の底生微細藻類については、次年度以降、順次、データサンプリングを進めて行く計画である。なお、もう 1 つのエンドメンバーである水中の粒状有機懸濁物 (POM : particulate organic matter) の同位体比については、以前、漁場環境改善推進事業の他課題で得たデータを引用した。以上、2 つのエンドメンバーの同位体比が揃っている久津間地区において、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。なお、解析には R パッケージの MixSIAR を用いた。

微細藻類の検鏡用試料として、現場でアサリおよび環境水試料を、それぞれエタノール固定およびルゴール固定し、実験室に持ち帰った。令和 4 年度では、5 月、7 月、9 月に採取した環境水試料に含まれる微細藻類について検鏡作業を進めた。まず、実験室に持ち帰った環境水試料に濃縮作業を行った後、顕微鏡下で同定作業を行った。得られた群集データを用いて、生育場所および生態型に基づいて整理するとともに、漁場別・月別の群集データを用いて Bray-Curtis の非類似度指数を算出し、クラスター解析に供した。

(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、ノリ漁期中の 11 月から 3 月にかけて、定期的 (月に 2 回を目安) に乾燥養殖ノリ試料を収集した。加えて、課題 II-1) に参画する神奈川県と連携して、東京湾西岸の湾口側に位置する、柴および走水の試料を採取することとしており、漁期中の試料を 2 月末にまとめて収集する予定である。

これら乾ノリ試料は、脱脂等の前処理は行わず、細かく破砕し、 $1.5\ \text{mg}$ を目安に錫箔に詰めた。錫箔に詰めた試料は、元素分析計 (vario MICRO cube) および安定同位体質量分析計 (Iso Prime 100) の連結システムを用いて、CN 比 (重量) および $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 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、令和 4 年度に収集した試料のうち、千葉県において漁期の初期 (11 月から 12 月) に採取された乾ノリ試料のみ $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 分析に供した。また、本事業の検討委員である藤原先生から、2010 年 1 月、2011 年 1 月、2013 年 3 月の各 1 汐分、計 3 汐の同位体比データを提供頂き、10 年前と現在との比較に用いたので、併せて報告する。

(3) クロロフィル分析の検討

干潟内での水平的な空間バリエーション、深さ方向の濃度勾配、干出後の時間経過に伴う変化、以上 3 点に着目して、千葉県の盤洲干潟において、大潮干潮時に底質試料を採取した。まず、水平的な空間バリエーションに着目し、盤洲干潟の岸から干潟縁辺部にかけて、岸・沖方向に 4 地点 (岸側から、サイト 1, 2, 3, 4 とする) を選定した。この 4 地点は優占する

生物種が異なることから、餌料環境も異なることが想定される（サイト 1, 2: ホソウミナナ, サイト 3: アサリ, サイト 4: イボキサゴやバカガイ）。各地点は約 300 m 離れており、最も沖側に位置するサイト 4 は干潟の縁辺部に配置した。なお、サイト間における底質の物理的な違い（粒度組成および強熱減量）を把握するため、干出時に、各地点で深さ別に底質試料を併せて採取した。また、サイト 2 に照度計を設置し、サンプリング期間中の照度データも採取した。

各地点において、深さ 5 cm までは 1 cm 刻み（0-1 cm, 1-2 cm, 2-3 cm, 3-4 cm, 4-5 cm）、干出時に限って、深さ 10-11 cm の底質も追加する形で、3 本ずつ採取した。なお、サンプリングは、干出前、干出直後、干出中（1, 2 回）、再冠水後の複数回実施し、合計 354 本の底質試料を採取した。

これらのクロロフィル *a* 分析用試料のサンプリングには、2 ml シリンジ（内径 3 mm）の外筒を筒先近くで切り取ったものを用い、現場で、10 ml のジメチルホルムアミド（DMF）の入ったチューブに入れ、保冷剤入りのクーラーボックスに入れて実験室に持ち帰った。その後、分析までは、-20℃の冷凍庫にて保管し、クロロフィル *a* を抽出・保存した。クロロフィル *a* 分析には、蛍光光度計 10-AU クロロフィル測定装置（Turner designs 社製）を用いた。

粒度分析用にも 2 ml のシリンジを使用した。但し、強熱減量分析用には底質の量が足りないため、50 ml のシリンジを使用した。これらの底質分析用の試料は固定せずに実験室に持ち帰り、分析作業まで、-20℃の冷凍庫にて保存した。粒度分析には、レーザー回折式粒子径分布測定装置 SALD-2300（SHIMADZU）を用い、中央粒径および淘汰度を求めた。

【結果】

(1) 二枚貝状況調査

東京湾では、高度経済成長期の埋め立てによる干潟の減少等によって、アサリの漁獲量が激減した。その後も漸減傾向にあったものの、2000 年代に入って、カイヤドリウミグモの大発生もあり、東京湾におけるアサリ漁獲量は底を打った。その後、近年に至るまで、アサリ漁獲量に回復の兆しは見られていない（鳥羽 2017）。現在、北部地区では、たとえ稚貝が湧いたとしても、頻発する青潮のたびに大量斃死が起き、まとまった漁獲に結び付いていない。また、南の富津地区は稚貝の加入量が最も少なく低迷している。一方北部地区と富津地区のアサリは、比較的アサリの分布密度が高い盤洲地区と比較して肥満度が高い傾向がみられアサリの分布密度や肥満度といった従来から用いられてきた指標だけを用いて、現在の東京湾における環境勾配を捉えることは難しく、異なるモニタリング指標が必要である。

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 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 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る。

【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）のアサリの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、アサリの食性の海域の貧栄養化の指標としての有効性を検証することを目的とする。

まず、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 分析の結果について報告する。上述の主要 3 漁場、4 地点で採取されたアサリの $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ は、値の幅が狭く、いずれの地点でも類似した値を取った ($\delta^{13}\text{C}$: -17.3‰ ~ -14.2‰ ; $\delta^{15}\text{N}$: 13.6 ~ 16.3‰) (図 1)。ただし、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ とともに、地点間で統計的に有意な違いが検出され (Kruskal-Wallis 検定, $p < 0.05$)、 $\delta^{13}\text{C}$ では、北部漁場と盤洲漁場の金田地区の組み合わせを除いて、いずれの地点間でも統計的に有意な違いが検出された (Steel-Dwass 検定, $p < 0.05$)。一方で、 $\delta^{15}\text{N}$ では、北部漁場において他地点とは統計的に有意に異なり (Steel-Dwass 検定, $p < 0.05$)、低い値を取った。

一方で、同じく上述の主要 3 漁場、4 地点で採取された POM の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ を見ると、地点内および地点間で、値が大きくばらついた ($\delta^{13}\text{C}$: -26.3‰ ~ -13.9‰ ; $\delta^{15}\text{N}$: 6.4‰ ~ 12.7‰) (図 1)。 $\delta^{13}\text{C}$ は、地点間で統計的に有意な違いが検出され (Kruskal-Wallis 検定, $p < 0.05$)、北部漁場と盤洲漁場の久津間地区の間で、統計的に有意な違いが検出された (Steel-Dwass 検定, $p < 0.05$)。但し、 $\delta^{15}\text{N}$ に地点間で統計的に有意な違いは検出されなかった (ANOVA, $p > 0.05$)。

底生微細藻類の $\delta^{13}\text{C}$ は、浮遊藻類の $\delta^{13}\text{C}$ に比べて数‰高いことが知られている (伊藤・掛川 2008)。盤洲漁場の久津間地区、1 地区にて、分離・測定している底生微細藻類の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ を見ると、大きく値がバラつき ($\delta^{13}\text{C}$: -24.6 ~ -10.5‰ ; $\delta^{15}\text{N}$: 5.3 ~ 12.9‰)、 $\delta^{13}\text{C}$ についても低い値をとることがあった。底生微細藻類の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ については、データのクオリティチェックの必要性を認識しているところであるが、現状、手段を確立出来ておらず、手持ちのデータをそのまま使用し、ベイズ混合モデルによる餌料源推定を行った。

ベイズ混合モデルによる餌料源推定の結果、現時点で、きれいに推定することが出来ないものの (図 2)、仮に寄与率を計算すると、盤洲漁場の久津間地区におけるアサリの餌料源としては、植物プランクトンが 66.6%、底生微細藻類が 33.4% 寄与していると推定された。今後、他地区の底生微細藻類のデータサンプリングを進め、モデルの推定精度を改善していく必要がある。

同位体比分析による餌料源分析だけでは、推定結果に確証を得ることが難しい。そこで、環境中およびアサリ消化管内容物に含まれる微細藻類について、検鏡を行うこととした。令和 4 年度は、三番瀬、久津間、富津の 3 地区にて、5 月、7 月、9 月に採取した環境水中に含まれる微細藻類の検鏡を実施した。その結果、合計 24 種の微細藻類が確認された。生育場所および生態型に基づいて整理した結果、ほぼすべての種が海産種であったが、小櫃川河口に位置する久津間地区では、淡水産の微細藻類も確認された。また、久津間地区では、着生型や付着型の微細藻類も他地点に比べて多く確認された。これは、当該地区の環境水は、大潮干潮時に盤洲干潟上にて採水していることから、干潟上の藻類が巻き上がり、採取されていることによるものと考えられる。微細藻類の群集組成について、Bray-Curtis の非類似度指数を用いたクラスター解析を行うと、盤洲漁場の久津間地区と北部漁場の三番瀬地区は、それぞれ異なるクラスターに配置され、富津地区が両クラスターに分かれて配置された。このように、東京湾では、季節的な要因よりも、地理的要因に基づいて、微細藻類の組成が異なることを確認できた。今後、アサリ消化管内容物の検鏡を進めることで、環境中の微細藻類の種組成の違いが、アサリの食性に及ぼす影響について確認する必要がある。

(2) ノリ状況調査

海藻類の $\delta^{15}\text{N}$ は、海域における人為的窒素負荷の程度を表す指標として利用され、人為負

荷が強い海域程、高い値の $\delta^{15}\text{N}$ を取ることが知られている（小林&藤原 2015）。東京湾における 2010 年から 2012 年にかけての各 1 汐分の結果を見ると、北部から富津北地区まで 11~20‰と陸起源窒素の代表的な値となっていた。一方、富津南地区では外洋起源の窒素 ($\delta^{15}\text{N}$ ~6‰) に近く、陸起源の窒素よりも外海起源の窒素の方が利用されていることが示唆された（図 3）。つまり、東京湾の内湾域（富津岬と観音崎を結ぶラインよりも北側のエリア）では、広く陸起源の窒素が波及していたことが示唆される。2010 年代の 3 年間のノリ $\delta^{15}\text{N}$ データを詳細に確認すると、最も古い 2010 年において、盤洲漁場から富津北漁場にかけてのノリ $\delta^{15}\text{N}$ が、特に高い値を取っていた。これは、長期的なノリ $\delta^{15}\text{N}$ の低下傾向を捉えていたのか、あるいは漁期中のノリ $\delta^{15}\text{N}$ の変化を捉えていたのか定かでない。これを確認するためには、まずは、漁期を通じたノリ $\delta^{15}\text{N}$ の分析が必須である。

本事業において、今年度はまず、漁期前半の 11 月および 12 月に採取したノリの $\delta^{15}\text{N}$ を分析した。その結果だけを見ても、漁期中に、ノリ $\delta^{15}\text{N}$ が大きく変化することを確認した。特に、盤洲地区では、12 月 2 日に水揚げしたノリ $\delta^{15}\text{N}$ が 12.9‰だったのに対して、12 月 13 日にはノリ $\delta^{15}\text{N}$ が 19.8‰まで急上昇した（図 3）。ノリの刈り取りまでの間隔を、およそ 2 週間と仮定すると、11 月後半から 12 月前半にかけて、何らかの水環境の変化があったと推察される。そこで、千葉県ノリ海況速報にて、表層の DIN 濃度を確認したところ、この時期に東京湾内湾表層の DIN 濃度が急上昇していた。この DIN 濃度の上昇は、出水によるものと推察されるが、今後、ノリ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ の蓄積に併せて、栄養塩濃度についての情報も収集し、ノリ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ の変動を駆動する要因について、検討を進めていく必要がある。

なお、令和 4 年度ノリ漁期の初期に確認されたノリ $\delta^{15}\text{N}$ の変動幅は、10 年前に観測されたノリ $\delta^{15}\text{N}$ の変動幅内に収まっていることから、東京湾におけるノリ $\delta^{15}\text{N}$ は、ここ 10 年間で大きく変化していないことが示唆される。今後、漁期を通じた分析結果を見て、改めて検討する必要は残るが、我が国における主要な内湾域である伊勢湾では、ノリ $\delta^{15}\text{N}$ がここ 10 年で大きく低下している。このことから、海域によって、無機態窒素の供給状況の変化に違いがあることが示唆された。

2010 年代のノリ $\delta^{15}\text{N}$ の分析結果において、外洋起源の窒素の寄与が明瞭に検出されていた富津南漁場の天羽地区では、現在ノリ養殖が行われておらず、乾ノリ試料を採取することが出来なかった。次年度以降、わかめ等の他の海藻類で代替することで、富津南漁場における窒素供給源のモニタリング体制の構築を検討したい。

(3) クロロフィル分析の検討

クロロフィル *a* 濃度の分析は、水中および底質中の微細藻類による生産力を測る手法として、広く用いられてきた。水中のクロロフィル分析が、水深方向の分布まで含めて詳細に実施されてきた一方で、底質のクロロフィル *a* 分析については、一部の研究（Montani et al., 2003 & 2006）を除き、底質の表層 1 cm 程度のクロロフィル *a* 濃度だけが測定され、場の生産力の指標として用いられてきた。しかし、その値が、本当に場の生産力を代表しうるのか否かについては、十分に検証されているとは言い難い。そこで、干潟内でのクロロフィル *a* 濃度の水平的な空間分布や、深さ方向のクロロフィル *a* 濃度の分布、更には時間経過に伴うクロロフィル *a* 濃度の変化を調べ、クロロフィル *a* 分析用の底質試料のサンプリング手法について検討を行った。

盤洲干潟の岸・沖方向に配置した 4 地点で、クロロフィル *a* 濃度を比較した。まず、2 ml シリンジ（内径 3 mm）の有効性についてであるが、サイト付近でランダムに採取したトリプリーケート間で、クロロフィル *a* の値に大きなバラツキは見られなかったことから、十分、代表性は確保されていると考えられる。それを踏まえて、サイト間でクロロフィル *a* 分析結果を比較すると、従来の方法、つまり表層 1 cm のクロロフィル *a* 濃度では、最も沖合に位置する地点を除いて、サイト間でクロロフィル *a* 濃度に大きな違いは検出されなかった（図 4）。しかし、深さ方向のクロロフィル *a* 濃度分布を確認すると、岸側の 2 点と沖側の 2 点では傾向が大きく異なり、前者では深さ方向に急激に減衰する傾向が確認された一方で、沖側の点では、深さ方向にクロロフィル *a* 濃度が高いまま保たれていることが確認された。そこで、各地点の底質分析結果を確認したところ、岸側の 2 地点に比べて、沖側の 2 地点の中央粒径が粗い傾向が確認された。1 つの可能性として、底質の粒子が粗いために深い場所まで光が届くことで、高いクロロフィル *a* 濃度が維持されていることが考えられる。但し、粒度の違いによる海水の浸透の違いによる影響なども考えられ、今後、更なる検証が必要と考えられる。なお、最も沖側の点で、表層 1 cm のクロロフィル *a* 濃度が低かったのは、干潟の縁辺部にあたる当該地点は碎波帯に位置し、底質が安定しないためと考えられる。こうした底質のクロロフィル *a* 濃度の鉛直分布の違いは、干潟上での生物分布を規定している可能性もあり、追試験を含めた更なる情報の蓄積が必要であろう。

【参考文献】

- 伊藤絹子・掛川 武 (2008) 河口汽水域を利用する魚類の食物源 水産学シリーズ 159:70-84
- 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.
- Montani S., Magni P., Abe N. (2003) Seasonal and interannual patterns of intertidal microphytobenthos in combination with laboratory and areal production estimates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 249:79-91
- Magni P., Montani S. (2006) Seasonal patterns of pore-water nutrients, benthic chlorophyll *a* and sedimentary AVS in a macrobenthos-rich tidal flat. *Hydrobiologia* 571: 297-311
- 鳥羽光晴 (2017) アサリ資源の減少に関する議論への再訪 日本水産学会誌 83(6) 914-941.

【図表】

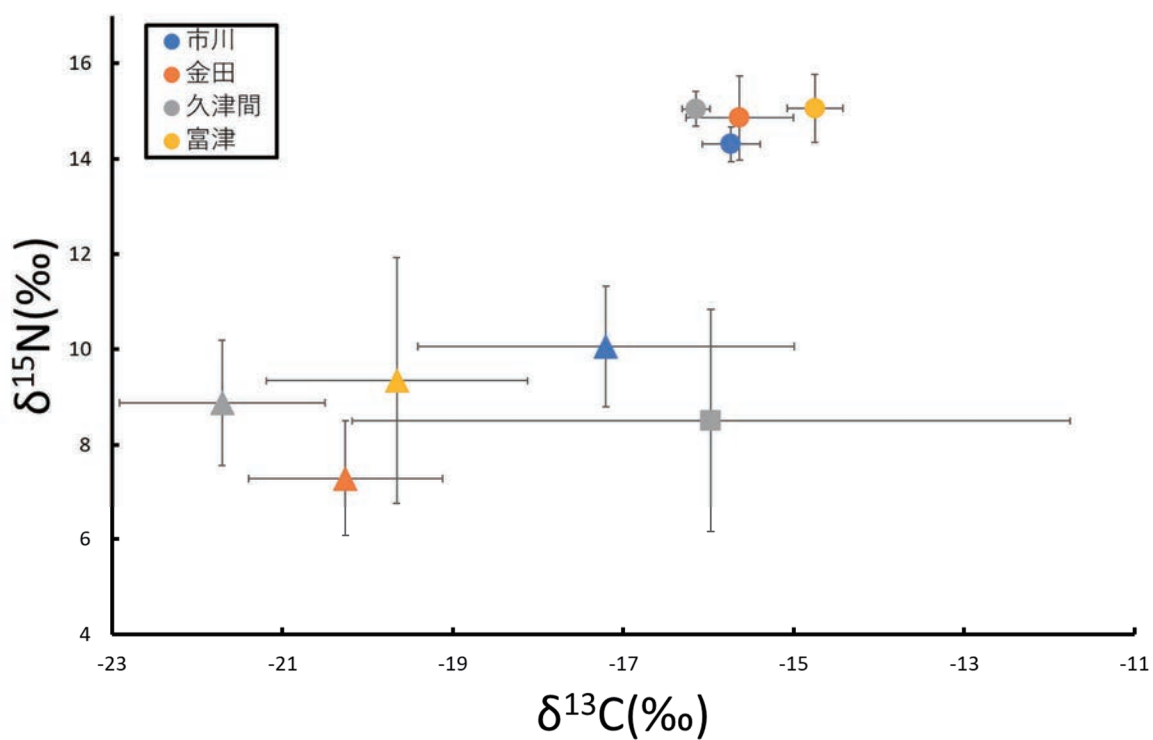


図1 アサリおよびエンドメンバーの CN プロット

○：アサリ，△：POM，□：底生微細藻類

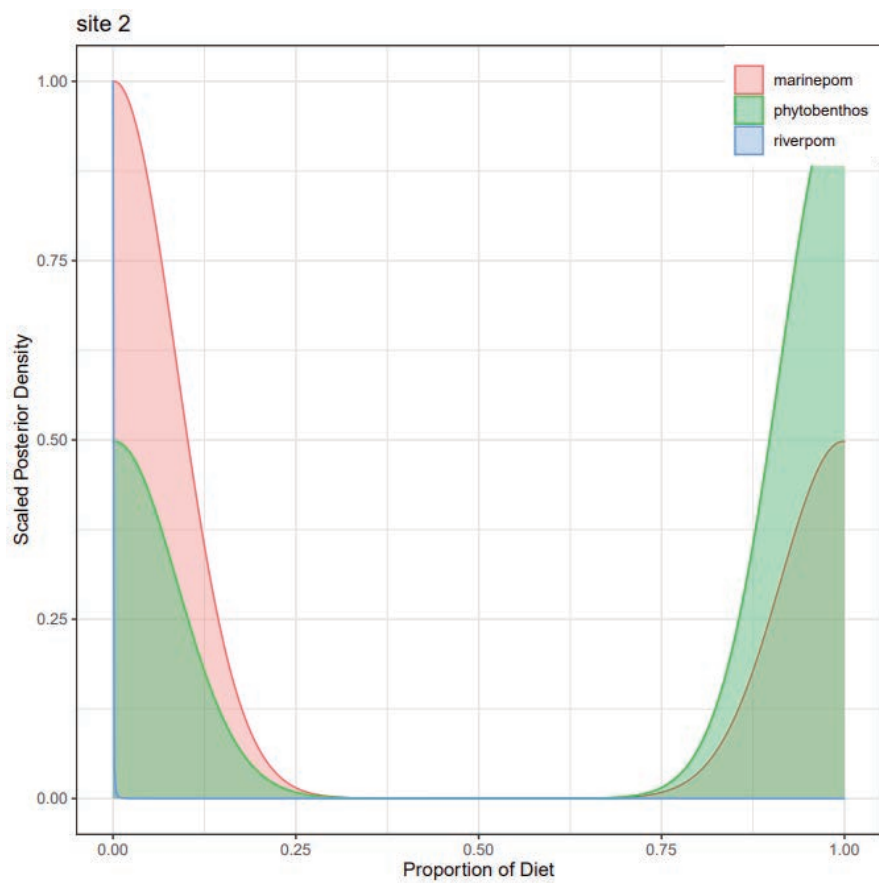


図2 ベイズ混合推定モデルを用いたアサリ餌料源推定結果

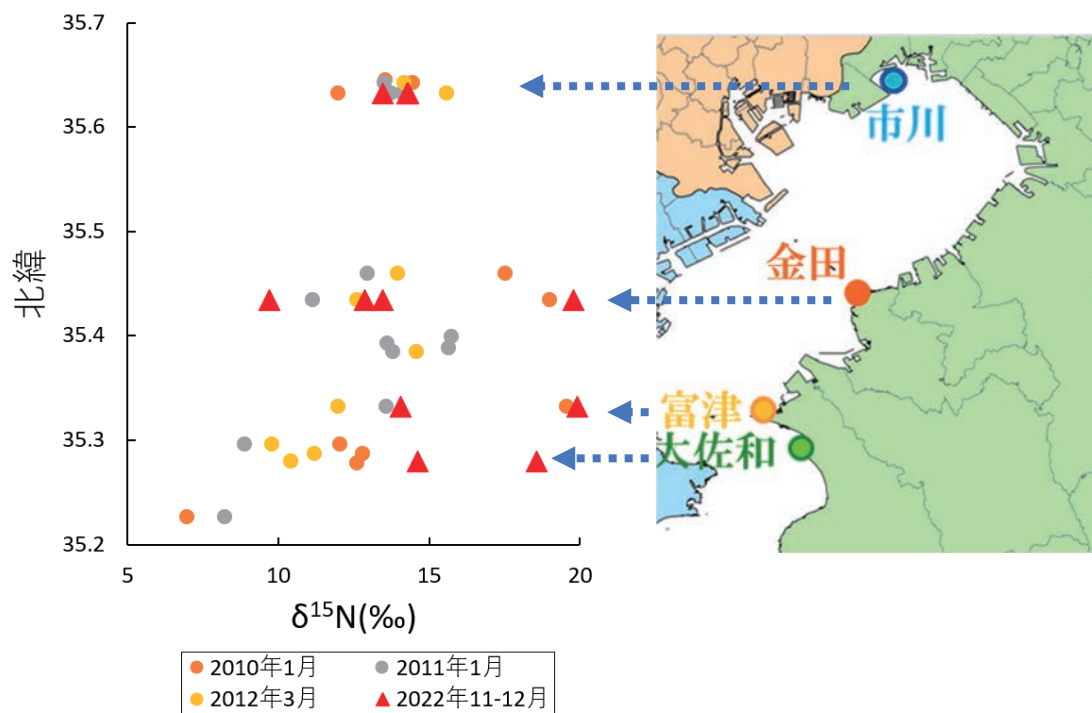


図3 東京湾におけるノリの窒素安定同位体比

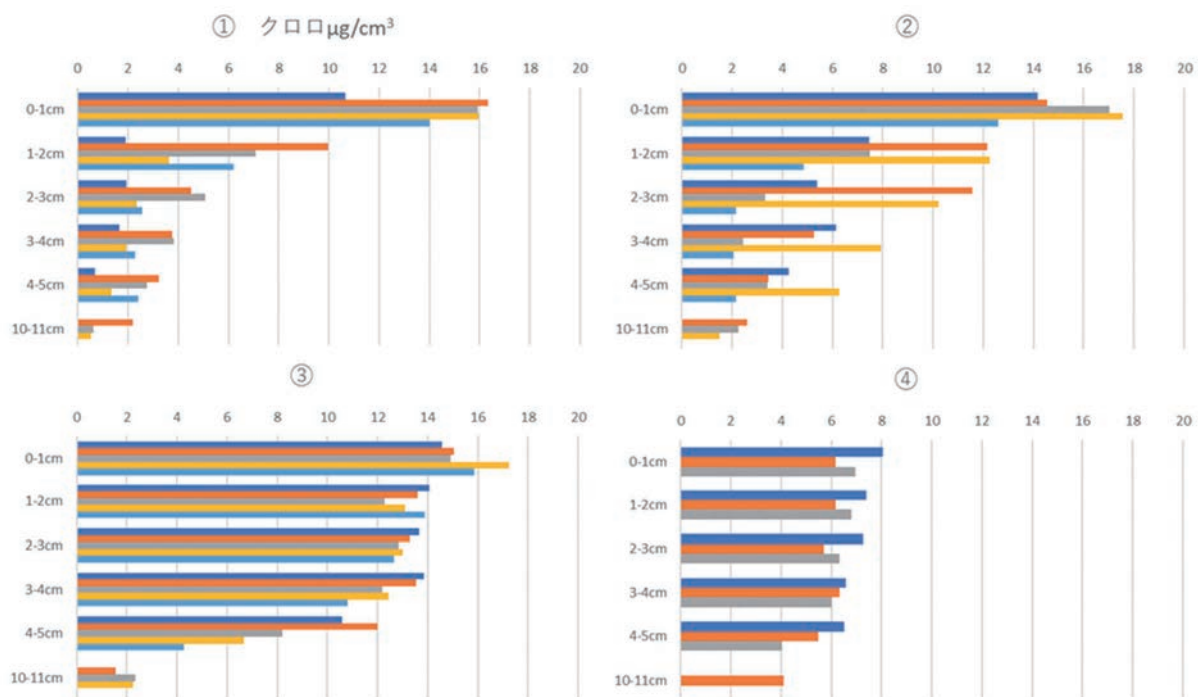


図4 盤洲干潟に岸沖方向に設置した定点での底質クロロフィルa濃度の時空間分布

① 岸方向～④沖方向。色の違いは異なる潮位での採集時間を示す（詳細は省略）。

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】

東京湾は1960年代に著しく富栄養化し、貧酸素水塊の大規模な発生を含む水質汚濁が深刻となった。そこで、1979年に第1次水質総量削減基本方針が策定され、水質改善に取り組まれてきた。その結果、2019年（目標）の窒素およびリンの負荷量は1979年比でそれぞれ54%および72%の削減となり、内湾の水質が改善すると同時に栄養塩濃度は低下してきた。一方、2000年前後からみられるようになった養殖ノリの色落ち現象が近年ますます顕在化する等、栄養塩濃度の低下による漁業資源への影響に対する懸念が強まっている。

東京湾ではリンが一次生産を制限していると考えられるが、表層における無機態リン濃度は既に時期によってはノリの色調低下が生じる $0.25\ \mu\text{M}$ を下回る状態にある。東京湾内に存在するリン現存量には貧酸素下における底質からの溶出起源も多いと考えられており、近年、中下層ではむしろ栄養塩の供給量が増加しているとの指摘もあり（石井，2021）、栄養塩動態は複雑さを増している。また、外洋から東京湾への栄養塩供給の存在や、ノリ漁場等の栄養塩不足の影響を直接的に受ける海域は時空間的に偏在していることに留意した栄養塩管理方針の検討が期待されている。

そこで本研究課題では、現地観測データ等を活用し、東京湾における栄養塩に着目した数値モデルシステムを整備し、陸域負荷、底質からの溶出、外洋からの供給等、栄養塩の起源に着目した東京湾の栄養塩環境の現況解析を行う。また、起源別の栄養塩がノリ漁場等の局所海域に及ぼす影響を解析することで、水環境の保全と漁業振興のバランスに配慮した、栄養塩管理方針の検討に資することを目的とする。

【方法】

(1) 数値計算対象候補の整理

栄養塩管理方針を数値計算に基づき検討していくためにはまず、東京湾における栄養塩の動態に関わる、栄養塩の供給源とその移流拡散を含む生物地球化学過程の把握・理解が必要となる。東京湾における栄養塩環境は時間的に大きく変動しており、現状の評価や将来検討に際しては過去における比較対象を設定する。また、空間的には河川水や下水等の流入と湾口を通じた外洋水影響といった、東京湾全体の栄養塩動態の理解に加え、ノリ養殖場といった漁場スケールでの栄養塩動態を把握・理解する。さらに、栄養塩管理方針の検討に資する、計算指標を整理する。

(2) 数値モデルのレビューと候補の提示

東京湾における栄養塩管理方針の検討目的に適切な数値モデルの枠組みとして、栄養塩の陸域からの供給、底質からの溶出、外洋からの供給といった、流域や外洋の影響を含む湾全体が関わる複雑な物質循環過程に加え、栄養塩の起源を考慮したノリ漁場等の局所的な海域との関係の検討にも適した、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の候補を整理する。

(3) 観測データ等の収集・整理

(1) の結果に基づき、計算対象とする年代や生物地球化学過程を踏まえ、数値計算に必要な、初期条件、境界条件、パラメータチューニング、および検証に関わる、気象、海象、河川等の観測データや再解析データの収集・整理を始める。本年度は(4)の検討において基本となる物理場の検討に必要なデータ収集・整理を中心に行う。

(4) 数値モデルの実装とプロトタイプ計算に向けた検討

(2) の検討で候補とした数値モデルを用い、(3) で整理したデータに基づく標準的な初期条件、境界条件を設定し、東京湾における現状の物理場の周年再現を試みる。また、栄養塩に見立てた染料の移流・拡散計算に基づき、冬季の定常的な場を対象として、いくつかのノリ漁場に存在する栄養塩の起源別割合の簡易推定を試みる。さらに、数値計算の枠組みや精度に関わる課題を抽出する。

(5) 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モデルの枠組みを検討し、栄養塩の起源を踏まえた栄養塩管理方針の検討を行うために、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) 数値計算対象候補の整理

数値計算で対象とする年代、空間スケール、および評価検討項目について整理した。対象年代は国総研により実施された東京湾広域環境調査が利用可能で、ノリ養殖における不作の発現傾向が強まった時期に相当する2002年前後と2022年前後を採用し、20年前の過去と現在を比較検討することとした。空間スケールとしては、東京湾全体スケール（以降、湾スケールと略記）における栄養塩の循環と管理方針、および漁場スケールにおける栄養塩の起源別影響と管理方針について検討することとした。前者は栄養塩管理の検討に必須であるが、後者は例えば、三番瀬、木更津、富津といった、空間的特徴の異なるノリ漁場毎の栄養塩の起源とその割合を把握することで、個々の漁場に有効な栄養塩の供給方策やそれによる局所的な水質影響を含む適切な水環境の保全に資するものとして検討対象とした。

湾スケールでは季節変動に加え、河川出水、沿岸湧昇、黒潮水の侵入等のイベント的現象も対象とし、物理場の再現精度を高めることを最初の目標とすることとした。物理場の計算は水環境の数値計算における基盤であり、その精度が生物地球化学過程の再現や栄養塩管理に資する様々な方策検討の精度と信頼性担保の前提となるためである。生物地球化学過程の再現においては、世界標準の先端的な枠組みを採用し、物理モデルと水質・生態系・底質モデルとのカップリング計算を行う方針とした。この枠組みを用い、河川水、下水、外洋水、および底質を起源とする栄養塩の動態を把握し、過去20年を比較した観測データから指摘されている、無機態リン濃度の上層での低下と中下層での上昇傾向（石井，2021）の再現をはじ

め、観測データから抽出される有用な知見の再現性の検討と数値実験に基づく栄養塩管理の方策検討を行う方針とした。

漁場スケールでは 10 m オーダーの計算格子サイズを採用する必要があると判断した。そこで、「冬季の静穏時の平均的な環境下における、対象ノリ漁場における栄養塩供給方策の検討」といったように、対象とする時空間や現象を適切に設定し検討する方針とした。時間スケールとしては 10 日から 1 か月程度を採用し、栄養塩の不足や水質の問題が健在化しやすい静穏時を主な対象とすることとした。空間的には対象とする漁場区を目的に応じて個々に選定し、漁場区を詳細に解像すると同時に対象とする現象を解析するのに必要な空間スケールを格子サイズの拡大を許容しながら確保する方針とした。

施肥等の何らかの方法により対象漁場区における栄養塩供給の効果を評価する際には、供給された栄養塩がその対象漁場区に留まる必要があることから、滞留時間の把握が有効である (Wan et al., 2013)。また、漁場区周辺を起源とする栄養塩供給による水環境への影響を予測評価する際にも、滞留時間の把握は有用な情報となる。一方、対象漁場区における栄養塩の供給源の解析では移流拡散といった物理場に注目した簡易手法から生物地球化学過程を含めた解析手法を適用していく方針とした (Große et al., 2017)。

(2) 数値モデルのレビューと候補の提示

数値モデル候補の検討では世界の先端的な枠組みである、物理モデルと生物地球化学モデルのカップリングにより数値計算を行う方針を採用した (図 1)。モデルカプラーとしては、世界的に広く使われ、多くの要素モデルの選択肢が提供され、成熟度が高く、無償のオープンソースモデルとして開発されている FABM (Bruggeman & Bolding, 2014) を採用することとした。

物理モデルにおいては、外洋の影響を含む湾スケールから漁場スケールまでを検討対象とするため、多重空間スケールをシームレスに扱うことができ、埋立地形を含む複雑な海岸線を精密に再現することに利点のある非構造格子モデルが有効である。FABM の物理モデルとして登録されている非構造格子モデルの中では、有限体積法に基づき質量や運動量の保存則を数値計算においても厳密に満足させることができること、20 年近い実績をもつこと、および開発者との共同研究の実績があることから、FVCOM (Chen et al., 2003) を採用するのが適切であると判断した。FVCOM には物理場の計算結果を用いたオフライン計算が可能な水質・生態系サブモデルが提供されており、滞留時間解析や栄養塩起源別解析等のオフライン計算で必要となる解析コードを作成する枠組みとして用いることとした。一方、FABM の物理モデルに含まれる非構造格子モデルとしては SCHISM (Zhang et al., 2016) も有力候補となり、必要に応じて検討する方針とした。

生物地球化学モデルとしては、詳細な水質・生態系・底質モデルにおける世界標準と位置づけられる ERSEM (Butenschön et al., 2016) を採用することとし、FVCOM 開発チームがマサチューセッツ湾に適用した、ERSEM-FABM-FVCOM システムを入手し、オフライン計算の動作確認を行った。FABM には約 20 種の生物地球化学モデルが登録されており、また、FABM の枠組みにおけるオリジナルの生物地球化学モデル開発が比較的容易であることを踏まえ、必要に応じて他の生物地球化学モデルとのカップリングについても検討する方針とした。

(3) 観測データ等の収集・整理

検討対象の 20 年前の過去と現在の栄養塩濃度を含む、船上水質観測データを千葉県水産総合研究センターおよび神奈川県水産技術センターより、連続水質観測データを国土交通省関東地方整備局より収集した。国土交通省の水文水質データベースに基づく河川流量の推定、および公共用水域水質測定結果に基づく主要流入河川の水質等のデータを収集した。東京都下水道局より、東京都区部の下水放流量および水質データを収集した。東京湾口における水温・塩分場は HYCOM および JCOPE2M による再解析データを収集し、潮位は布良等における実測値や OSU TOXO9-atlas v5 による天文潮を整理した。気象庁の気象官署データおよびアメダスから気象場の情報を収集した。

(4) 数値モデルの実装とプロトタイプ計算に向けた検討

比較的粗い格子 (300 m から 2 km) を作成し、鉛直方向には 30 層を採用し、東京湾全域の 2021 年を対象とした物理場の周年再現計算を行った。初期値は 2021 年 1 月 1 日の平均的な値を空間一様に与えた。境界条件は、湾口における潮位と HYCOM による水温・塩分を与え、気象場は東京の全天日射量、千葉の気温、蒸気圧、相対湿度、風速ベクトル、雲量、露点温度を与え、河川水と下水の流量・水温を与えた。開境界条件においては、断面の各格子における流入・流出を判別し、流入の場合にのみ湾口境界値が適用されるよう、コードを改良した。

国土交通省関東地方整備局の千葉波浪観測塔の表層、中層、底層における水温と塩分の観測値と計算値の比較を図 2 に示す。概ね傾向は再現していると考えられるが、計算結果は特に風速場、河川流量、および湾口における水温・塩分値に敏感であり、気象場の空間分布の考慮、河川の河道を解像することによる河川流入過程の精度向上、湾口における水温・塩分場の高精度化が課題として挙げられた。

以上で構築したモデルを用い、冬季における三番瀬、木更津、および富津を対象とし、河川水および下水から供給された栄養塩を染料に見立てた移流拡散計算に基づく栄養塩起源の簡易解析を行った (図 3)。冬季の平均的な場を対象とするため、2021 年の周年計算結果の 12 月 31 日を初期条件とし、2022 年 1 月の平均的な気象場を外力として 2 か月分の計算を行った。ただし、風速場については観測値を直接与えることで、乱流場の再現性を担保した。計算ではまず、すべての流入源から栄養塩を供給した計算を行い、次に一つの流入源のみ栄養塩濃度を 0 とした計算を行い、前者から後者を差し引くことで、後者の流入源の寄与分を計算した (図 3 右下)。この方法は移流拡散方程式の線形性に基づくが、開境界条件の影響による誤差が含まれることに注意を要する。

木更津、富津における、外洋水、下水、河川水それぞれを起源とする栄養塩濃度の時系列を図 4 に示す。概ね 20 日の時間スケールで定常的状态が得られた。外洋水の寄与を比較すると、富津では 2 割弱、木更津では 1 割強となった。図 5 左に外洋水起源の DIN の寄与割合の平面分布を示すが、富津岬を境として寄与割合が急変する様子が再現された。図 5 右に下水の寄与割合の平面分布と中小河川である海老川および真間川の寄与割合を示す。下水の寄与は内湾全体に広く及んでいることが見て取れる。一方、主要河川の河口からやや離れた三番瀬においては、海老川と真間川の寄与が大きくなっており、近隣の中小河川水や下水影響の重要性が示唆された。本計算結果は物理場の再現性について検討途上であること、生物地球化学過程を無視した計算であることから、定量的に有用な情報とはなっていない。今後は物理場の再現性の向上と生物地球化学モデルとのカップリングを行い、起源別の栄養塩の寄与割合に関する精度向上を図っていく予定である。

(5) 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4年9月30日及び令和5年1月20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の枠組み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(4)の成果に反映された。

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.
- 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.
- Große, F., Kreuz, M., Lenhart, ..., J., Pohlmann, T.: A novel modeling approach to quantify the influence of nitrogen inputs on the oxygen dynamics of the North Sea, *Front. Mar. Sci.* 4:383, 2017.
- Wan, Y., Qiu, C., ..., Coley, T.: Modeling residence time with a three-dimensional hydrodynamic model: Linkage with chlorophyll *a* in a subtropical estuary, *Eco. Modelling*, 268, 93-102, 2013.
- Zhang, Y., Ye, F., Stanev, E.V., Grashorn, S.: Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*, 102, 64-81, 2016.