

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

水産研究・教育機構 水産資源研究所

田所和明，奥村 裕

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。これらの動物群は高次の魚介類の餌となり、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、メソ動物プランクトンおよび埋在性マクロベントスに焦点を当て、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

神奈川県および千葉県の浅海・沿岸定線のうち、それぞれ4点、計8点（図1）を調査定点とした。ノルパックネット（口径45cm、目合い100 μ mおよび335 μ m）を用い、海底直上から海面まで鉛直曳きにより動物プランクトンを採集した。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。335 μ m目合いのネットで採集したサンプルについては、神奈川県では内湾域の3測点（2d, 7, 12）を対象に2017年～2025年のサンプル、湾岸の1測点（27d）を対象に2015年5月～2025年9月のサンプルの分析を完了した。千葉県については、2022年5月～2024年3月までのサンプルの分析を完了した。100 μ m目合いのネットで採集したサンプルについては、千葉県では2023年5月～2024年3月、神奈川県では2023年7月～11月に採集したサンプルの分析を完了した。分析は、検鏡により種レベルで個体数を計数する方法で行った。

(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、昨年度までの本事業で千葉県が実施した下記の野外調査によるデータを現状データとして比較解析を行った。

国総研は東京湾内 20 定点（図 2）において 2002 年 7 月から 2003 年 7 月まで毎月 1 回の底生生物の採集調査を 13 回行った。調査では、スミスマッキンタイヤ型採泥器を用いて底質を 0.1m² 採泥し、1mm のふるいの残渣を 10%中性緩衝ホルマリンにて固定したのち、外注分析により底生生物の同定・個体数の計数および湿重量の測定を行い群集データとした。千葉県による野外調査では、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 2022 年 5 月～2025 年 3 月までの 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国総研調査と同様の手法によりベントス類の群集データを得た。

調査で得られたデータは、国総研および千葉県の調査データを合わせて、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。両者の群集データについて種同定の精度などの調整を行ったのち、日本海区水産研究所（2018）のプロトコルに従い群集多変量解析を行った。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 0.01g 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、k-medoid によるクラスター分けを行った。クラスター数はシルエットの極大値により決定した。各クラスターの特徴を示すため IndVal による指標種とシルエット幅の上位 1/3 に含まれるサンプルの平均的種組成を示し、湾内の底生生物群集の地域的な比較と 20 年間の比較を行った。主に湾の中央軸付近の湾奥部の地点で総個体数の少ないサンプル（20 年前：34 サンプル、現在：79 サンプル）があり、解析に含めることができなかった。総湿重量でも同様（20 年前：41 サンプル、現在：64 サンプル）であった。

また、環境要因の影響を検討するため、予備的な解析として 20 年前の国総研による調査と今回の調査で近接している調査地点のペア（船橋沖 T01 と CFb、および盤洲沖 T12 と CBB、図 2）を 2 組選び、dbRDA を行って群集組成の違いが環境変数によって説明可能かどうか検討した。説明変数として同月同地点で得られた環境変数のうち 7 変数（表層海水中の溶存酸素、NH₄、NO₂、NO₃、PO₄ 濃度、底層水温、底質強熱減量）を選び、応答変数としては個体数を用いたサンプル間の Bray-Curtis 類似度を用いた。今回、環境変数については変数変換せず、VIF は求めたものの、多重共線性回避のための変数選択は行わなかった。

【結果】

(1) 動物プランクトン群集

<335μm 目合いサンプルの解析>

本目合いでは、*Oithona davisae* や *Microsetella norvegica* といった小型種は定量的に採集できないため、比較的大型の種を対象に解析を行った。今回は 2023 年～2025 年の 6 月のデータを用い、海洋環境と動物プランクトン群集との関係を検討した。2023 年および 2024 年は塩分が高く、外洋水の比率が高い傾向にあった。一方、2025 年は塩分が低く、外洋水の影響は比較的弱かった。その結果、2025 年には外洋種の出現が少ない一方で、沿岸種である *Acartia (Acartiura) omorii* の現存量が多く認められた。また、昨年度実施したクラスター解析による 2015 年～2024 年の群集変動の検討では、2020 年 5～6 月に外洋性群集が湾奥まで出現しており、外洋水の強い影響が示唆された。今後は、全調査期間を通じて海洋環境と動物プランクトン群集との関係を包括的に解析する予定である。

<東京湾と瀬戸内海・伊勢湾との比較>

100 μ m 目合いのノルパックネットを用い、海底直上から表層まで鉛直曳きで採集したサンプルについて、種レベルで個体数を計数した。本目合いでは小型種も定量的に採集可能である。季節変動を検討するため、春（4～5 月）、夏（7 月）、秋（10～11 月）、冬（1～2 月）のサンプルを対象に解析を行った。東京湾は 2023～2024 年、伊勢湾は 2024 年、瀬戸内海は 2018～2019 年に採集したサンプルを用いた。測点ごとの種レベル個体数データを用いてクラスター解析を行った結果、群集は 6 つのグループに区分された（図 3）。季節遷移のパターンは海域間で異なっていた。瀬戸内海ではグループ 1～4 が出現し、群集は明瞭な季節遷移を示した。いずれのグループにおいても *Paracalanus orientalis* が最も多く出現した。概ね、春はグループ 2、夏はグループ 3、秋はグループ 1、冬はグループ 4 が卓越し、明瞭な季節変動が認められた。伊勢湾では、冬～春にグループ 5、夏～秋にグループ 6 が出現した。両グループとも *O. davisae* が最も多く出現した。東京湾では、春にグループ 6、夏にグループ 4・5・6 が出現し、秋以降は概ねグループ 2 が卓越した。

次に、炭素量に換算した現存量について比較した（図 4）。瀬戸内海では、概ね全域で冬～春に *Calanus sinicus* が高い現存量を示した。*Paracalanus orientalis* も周辺域で比較的高い値を示した。夏～秋には *M. norvegica* が比較的高い値を示した。伊勢湾では、*A. omorii*、枝角類、*P. orientalis* がそれぞれ春、夏、秋に高い現存量を示した。冬季は全体の現存量が低下するものの、*A. omorii* および *P. orientalis* は出現していた。東京湾では周年 *O. davisae* が出現し、特に夏～秋に高い値を示した。一方、冬～春には *A. omorii* も比較的高い現存量を示した。

以上のように、瀬戸内海および伊勢湾では、水産資源の餌料として重要な *C. sinicus* や *P. orientalis* が高い現存量を示した。一方、東京湾では餌料価値が相対的に低いと考えられる *O. davisae* が卓越しており、餌環境としては必ずしも好適ではない可能性が示唆された。

<年代間の比較>

1980 年代（1986～1987 年）と 2020 年代（2023～2024 年）の比較を行った（図 5）。1980 年代のデータは Ito and Nishida（2015）、2020 年代のデータは本事業において千葉県水産技術センターが採集したものを用いた。採集方法は、1980 年代が北原式定量ネット（口径 22.5 cm、目合い 100 μ m）、2020 年代がノルパックネット（口径 45cm、目合い 100 μ m）と異なる。ただし、いずれも目合いは 100 μ m である。調査月は、1980 年代が 2 月、7 月、8 月、10 月、12 月、2020 年代が 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月、11 月である。いずれの年代においても、多くの季節で *O. davisae* が優占した。1980 年代では 2 月に *A. omorii* が多く出現し、2020 年代では 9 月に *Parvocalanus crassirostris*

が多く出現した。また、両年代とも動物プランクトンの個体数は夏季（7～8月）に最も多く、その大部分を *O. davisae* が占めた。*O. davisae* の現存量は、いずれの季節においても年代間で顕著な差は認められなかった。さらに、7月については1940年代の知見（Yamazi 1955）も加え、1980年代および2020年代との比較を行った。1940年代の調査でも100 μ m 目合いの北原式定量ネットが用いられている。その結果、いずれの年代でも *O. davisae* の現存量が最も高かったが、群集組成には明瞭な違いが認められた。1940年代には *P. orientalis*, *A. omorii*, *M. norvegica* なども多く出現していたが、1980年代にはそれらが減少し、2020年代にはほとんど出現しなかった。2020年代では、それ以前より口径の大きいノルパックネットが用いられているため、プランクトンの逃避は相対的に少ないと考えられる。一方、*O. davisae* は非常に小型であるため、ネット間の採集効率の差は小さいと推測される。したがって、*O. davisae* の現存量は年代を通じて大きく変化していないと考えられた。また、*A. omorii* などの比較的大型の種では採集効率に差が生じる可能性はあるものの、採集効率が高いと考えられるノルパックネットを用いた2020年代においてもほとんど採集されていないことから、ネットの違いのみでは説明できないと判断された。*O. davisae* は水質汚濁の指標種とされることから、水質変化に伴う顕著な変動が予測された。しかし、汚濁が進行していなかったと考えられる1940年代、汚濁が進行していた1980年代、そして水質が改善した2020年代の間で大きな差異は認められなかった。このことから、汚濁以外にも東京湾で *O. davisae* が卓越する要因が存在する可能性が示唆された。さらに、*P. orientalis* および *A. omorii* は水産資源の餌料として重要なカイアシ類であることから、2020年代の餌料環境は過去と比較して必ずしも良好ではない可能性が示唆された。

(2) ベントス群集

個体数による解析では、266分類群による363サンプルについて、群集組成に基づき11のグループにクラスター分けをすることができた（図6）。11のグループには、各々10～66サンプルで構成された。特に個体数が多いのは群集a1と群集a5の2グループであり、逆に4グループでは（群集a10、群集a7、群集a4、群集a9）個体数が少なかった。20年前と現在の両方に認められるグループが多いが、20年前しか見られないグループ（群集a3）や20年前に多く認められるグループ（群集a5、群集a6）、逆に現在で多く見られるグループ（群集a7、群集a9、群集a11）があった。

そのうち群集a1は両期間とも船橋沖で主に見られる群集で、イワホリガイ類（ウスカラシオツガイ）・イソギンチャク目・*Polydora* 属・エゾカサネカンザシ・モノドロクダムシ属などを指標種とし、これらの個体数が多く、総種数も総個体数も多い群集であった。また、群集a8は20年前の中の瀬で主に見られる群集であり、*Eunice* 属・カザリゴカイ科・ケンサキスピオ・クモヒトデ類などを指標種とし、これらの個体数も多く、総種数も総個体数も多い群集であった。群集a5と群集a6は20年前の東京港から葛西沖から川崎沖までの湾西部に主に見られる群集で、群集a5はシノブハネエラスピオとイトエラスピオを主体とする個体数が多いが構成種の少ない単純な群集、群集a6はイトエラスピオやスクシカギゴカイが多く占めるが、*Nephtys* 属・*Euchone* 属・*Gyptis* 属などを指標種とする、個体数も種類数も中程度の群集であった。一方群集a7と群集a9は現在の湾奥部に主に見られる群集で、シノブハネエラスピオを主体とするものの種数も個体数も少ないという特徴を示した。また群集a11は現在の湾東部の木更津から富津沖に主に見られる群集で、カタマガリギボシイソメを指標種とし個体数も種類数も中程度の群集であった。

シノブハネエラスピオ・イトエラスピオ・スベスベハネエラスピオ・*Polydora* 属を含むスピオ

科のゴカイ類は主に懸濁物食もしくは堆積物食者とされており、東京湾全体では 20 年前も現在もこれらを含む群集が卓越していた。一方、カタマガリギボシイソメ・*Eunice* 属・*Gyptis* 属、また指標種として選択はされていないクシカギゴカイを含むサシバゴカイ目およびイソメ目のゴカイ類の多くは肉食（捕食および腐肉食）を行うとされ、現在では群集 a8 と群集 a11 の主な構成種であるが 20 年前と比較して出現が限定されていた。

湿重量による解析では、270 分類群による 371 サンプルについて、群集組成に基づき 10 のグループにクラスター分けをすることができた（図 7）。10 のグループは各々 19~77 のサンプルで構成され、個体数での結果と同様に 20 年前と現在の両方に認められるグループが多いが、20 年前に多く認められるグループ（群集 w2, 群集 w9）、逆に現在で多く見られるグループ（群集 w7, 群集 w8）があった。

このうち、総湿重量の大きなグループは群集 w6, 群集 w9, 群集 w2 であり、特に群集 w9 は種数も多かった。逆に総湿重量小さなグループは群集 w4, 群集 w3, 群集 w1 であった。群集 w2 はシノブハネエラスピオ・クシカギゴカイ・スベスベハネエラスピオなどを指標種とし、特にシノブハネエラスピオの湿重量が卓越する群集で、20 年前の東京港から葛西沖から川崎沖までの湾西部および千葉沖と現在の木更津沖北側に主にみられる群集であった。群集 w6 はイワホリガイ科（ウスカラシオツガイ）・ホンビノスガイが卓越する群集で、指標種にはこの両種や他の二枚貝類に加え *Polydora* 属・イソギンチャク目などが含まれた。両期間とも船橋沖にみられた。群集 w7 は *Glycera* 属を指標種とする群集で現在の木更津から富津にかけての湾東部に主にみられた。また、群集 w8 は *Mediomastus* 属を指標種とする群集で、木更津沖以南の地点でみられた。群集 w9 はカザリゴカイ科・*Eunice* 属・カキクモヒトデ・ラスバンマメガニ・クシノハクモヒトデなどを指標種とする群集で、20 年前の中の瀬で主にみられた。

このように、東京湾の底生生物群集は個体数でも湿重量でも 20 年前から変化があり、全体的により総個体数や総湿重量の小さい群集へと変化した。20 年前と現在では調査地点数と位置が若干異なるため厳密な比較は難しいが、船橋沖など群集組成の変化の少ない地域もあった。また、全体的にはゴカイ類の卓越する群集であるが、船橋沖と中の瀬では両期間とも他の地点と異なっており種数の多い群集（船橋沖は群集 a1 と群集 w6, 中の瀬は群集 a8 と群集 w9）が見られた。これら以外に総種数の多い群集（群集 a2 と群集 a6）、総湿重量の大きい群集（群集 w2）は、20 年前に比べて現在では出現頻度が減る傾向にあった。さらに、ゴカイ類のうち懸濁物食性および堆積物食性の種類よりも、肉食性の種類を含む群集の減少傾向が認められ、個別の種について食物網などの生物要因や環境要因との関連をより詳細におこなうべきかもしれない。

湾奥の船橋沖の調査地（T01 と CFb）についての dbRDA では、31 サンプルの解析を行った（図 8a）。7 変数の VIF 最大値は 2.62 であり、変数間の相関は低いといえた。dbRDA は有意（ $p < 0.05$ ）となり、7 環境変数によって全体の 37.4%の説明がなされた。dbRDA の第 1 軸の固有値は 1.279 となり 1 を上回り、第 2 軸は 0.590 であった。dbRDA の二次元配置図では、現在のサンプルが左下、20 年前のサンプルが右上に位置した。第 1 軸には底層水温（TMPb）、第 2 軸には表層 NH₄ 濃度（NH₄s）が強く寄与した。また、20 年前と現在を分ける右上から左下方向には表層 NH₄ 濃度（NH₄s）と表層 NO₃ 濃度（NO₃s）の影響が強く認められた。

より湾口に近い盤洲沖の調査地（T12 と CBB）についての dbRDA では 30 サンプルの解析を行った（図 8b）。7 変数の VIF 最大値は 7.16 であり、やや大きいため結果の解釈には慎重を期す必要があった。dbRDA そのものは有意（ $p < 0.05$ ）となったが、7 環境変数によって全体の 32.9%の

説明がなされたのみで、dbRDA の第 1 軸の固有値も 0.613, 第 2 軸は 0.558 となり 1 を上回ることがなかった。しかし、dbRDA の二次元配置図では、両期間のサンプルがほぼ第 1 軸に沿って分離し、現在のサンプルが位置する正方向には表層 NO₂ 濃度 (NO₂s) が、20 年前のサンプルが位置する負方向には表層 NH₄ 濃度 (NH₄s) が強く寄与した。また、第 2 軸の正方向には強熱減量 (Ild) が強く寄与した。

これら二組の地点の栄養塩に関連する変数は、地点間で異なる季節変化を示した (図 9)。20 年前と現在とで平均レベルの異なる変数が dbRDA において大きく寄与する傾向が認められた。しかし、群集組成は期間による違いとともに季節変化も大きく、特に季節変化については環境変数では説明しにくいと考えられた。今回の解析では底質に関連する変数が強熱減量のみであり、水質に関連する変数も表層水の値であるため、説明力が乏しかった可能性がある。dbRDA の解析例で表層 NH₄ 濃度の寄与が認められたが、benthic-pelagic coupling (Griffiths et al. 2017) の視点を含め表層水の水質と底質埋在性のベントス群集とが関連する機構について検討する必要がある。

沿岸域の有機物負荷とベントス群集についての Pearson-Rosenberg モデルでは、有機物付加の進行とともにベントス種数が減少するが逆に生物量が増加する局面が示されている (Grall & Chauvaud 2002)。かつての東京湾がこの局面にあったとすると有機物負荷の減少とともに種数が増加すると予想されるが、本調査の結果とは一致しない。東京湾の底引網で得られる魚類を主とする群集データによると、ここ数十年で種組成の変化とともに (Kodama et al. 2024)、個体サイズの分布が大型生物に偏るトップヘビー型となっており (Xie et al. 2022)、食物網を介してベントスへの影響も変化したと予想される。

【参考文献】

- Itoh H, 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.
- Grall J, Chauvaud L. Marine eutrophication and benthos: the need for new approaches and concepts. *Global Change Biology*, 8, 813-830, 2002.
- Griffith JR, et al. The importance of benthic-pelagic coupling for marine ecosystem functioning in a changing world. *Global Change Biology*, 23, 2179-2196, 2017.
- Kodama K et al. Remarkable shifts in the megabenthic community structure over four decades in Tokyo Bay, Japan, in relation to environmental variations. *Marine Environmental Research*, 200, 106640, 2024.
- 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, 2024)
- Xia S, et al. Multidecadal changes in the demersal community structure in an urban bay: shift from a bottom- to a top-heavy pyramid. *Progress in Oceanography*, 203, 102767, 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.

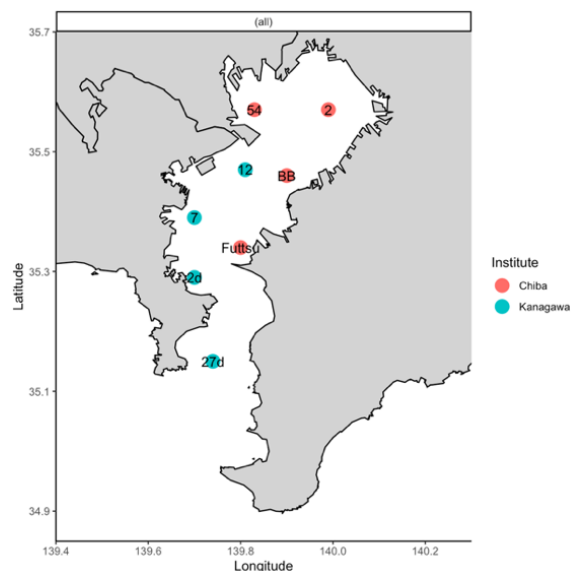


図1 動物プランクトンの採集点。青点赤点はそれぞれ神奈川県と千葉県で採集を実施。

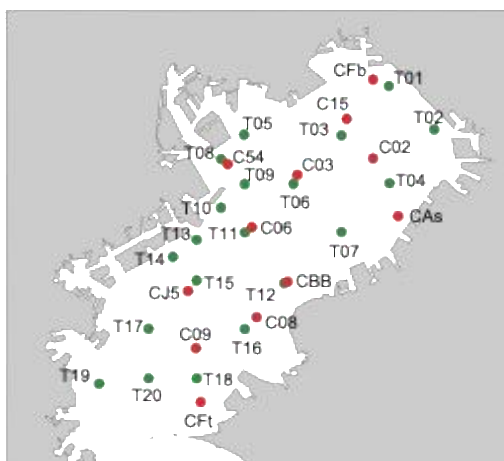


図2 ベントス調査地点図。緑丸が2002-2003年の国総研による東京湾広域環境調査の20点と赤丸が千葉県による12点。

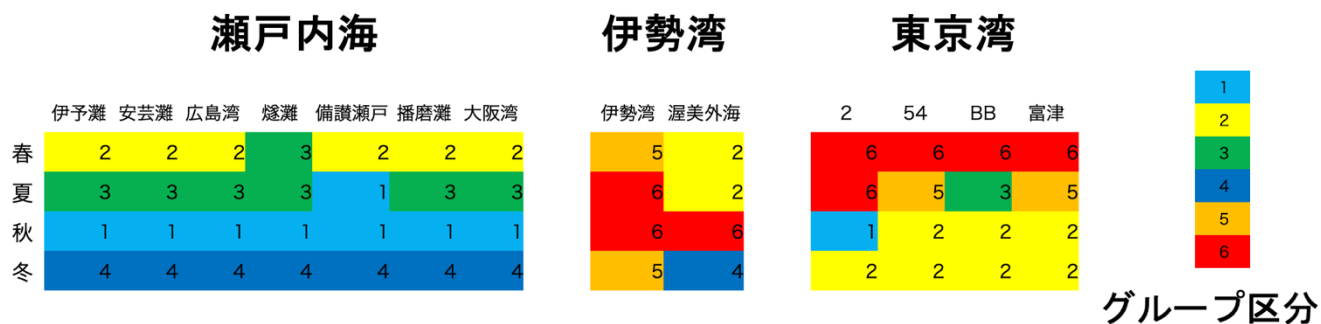


図3 瀬戸内海，伊勢湾，東京湾で出現する各グループ。

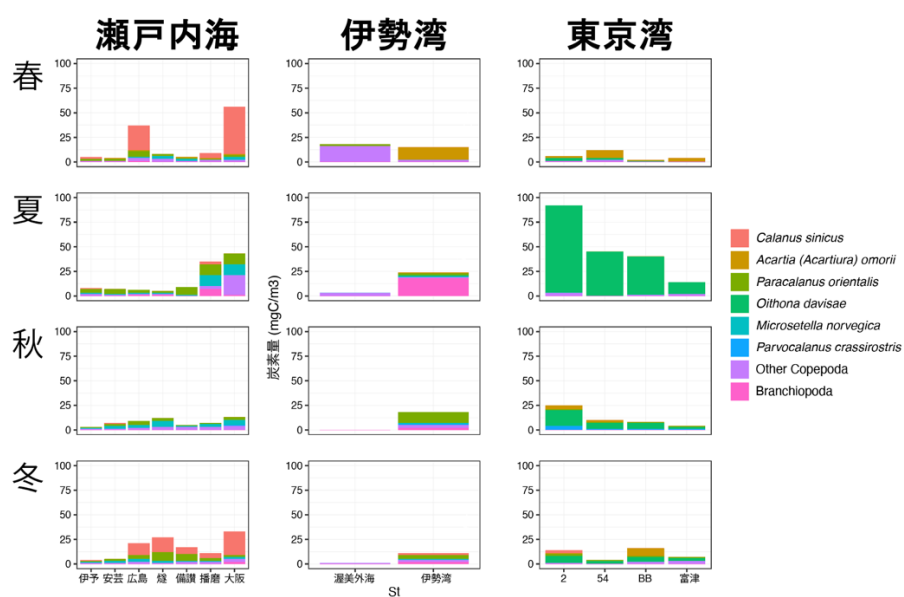


図 4 炭素量での動物プランクトンの組成の海域間の比較

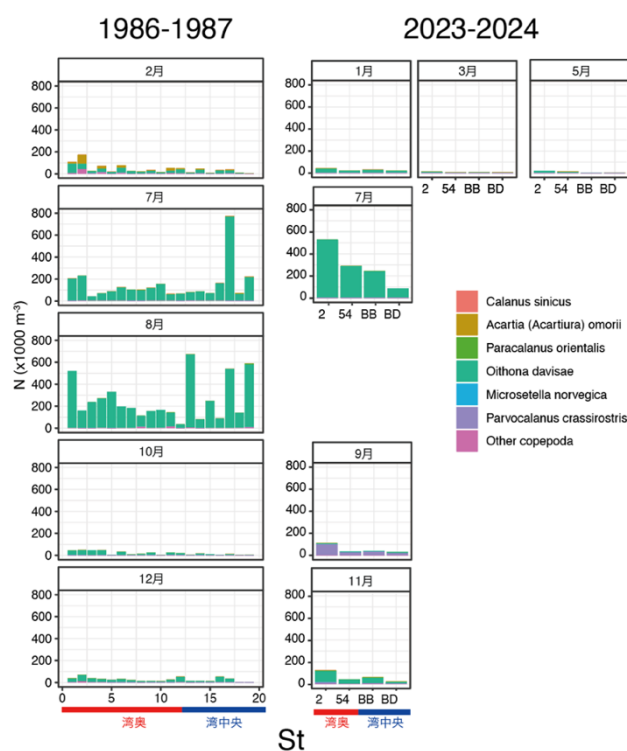


図 5 東京湾における動物プランクトン組成の 1980 年代と 2020 年代の比較

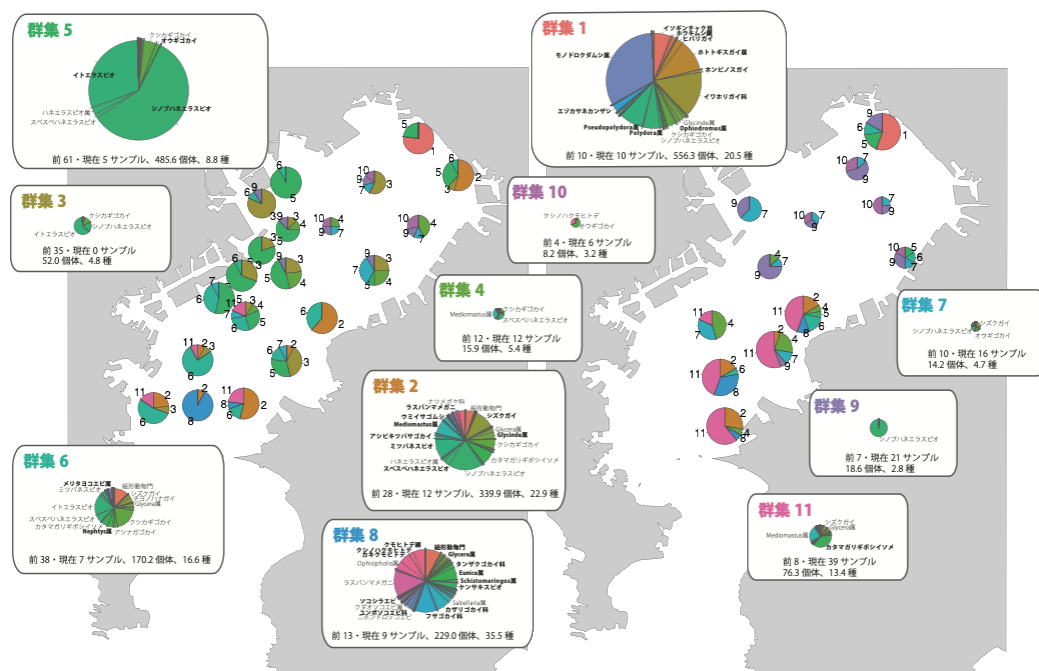


図6 個体数によるベントス群集の 11 グループへの類別結果と、各グループのシルエット値の上位 1/3 の地点の平均的種組成。左が 2002～2003 年の国総研調査、左が 2022～2025 年の千葉県調査。地図上の円のサイズはサンプル数で、その地点で得られたサンプルの群集の類別組成を示す。群集組成の円のサイズは総個体数の平均で、個体数による種組成を示す。各群集の IndVal による指標種（分類群）を太字で記す。

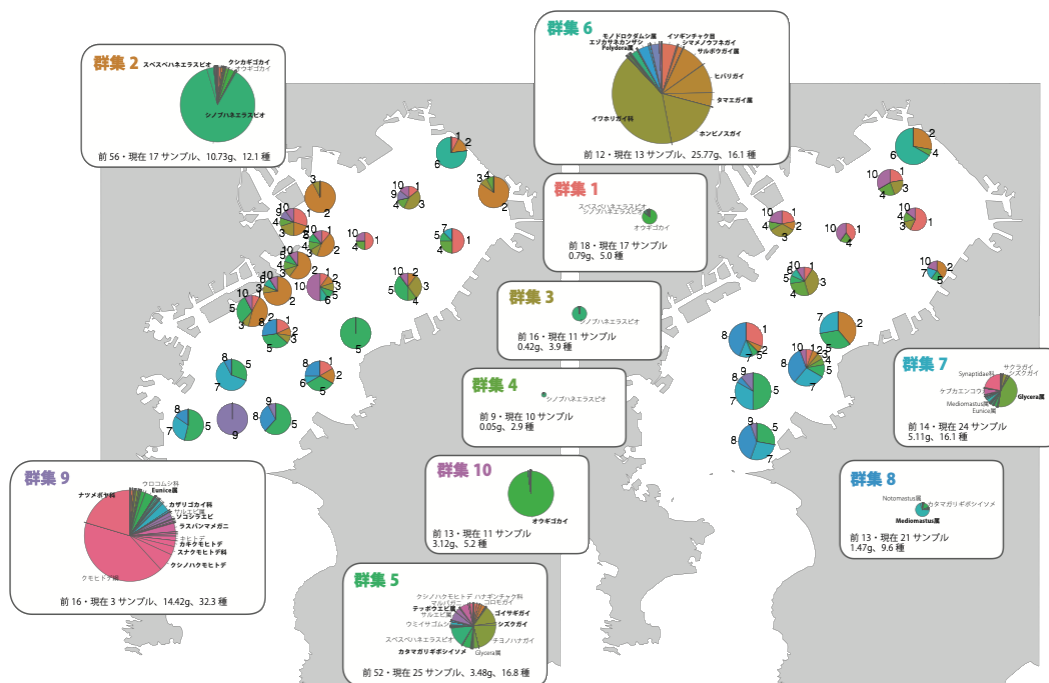


図7 湿重量によるベントス群集の 10 グループへの類別結果と、各グループのシルエット値の上位 1/3 の地点の平均的種組成。左が 2002～2003 年の国総研調査、左が 2022～2025 年の千葉県調査。地図上の円のサイズはサンプル数で、その地点で得られたサンプルの群集の類別組成を示す。群集組成の円のサイズは総湿重量の平均で、湿重量による種組成を示す。各群集の IndVal による指標種（分類群）を太字で記す。

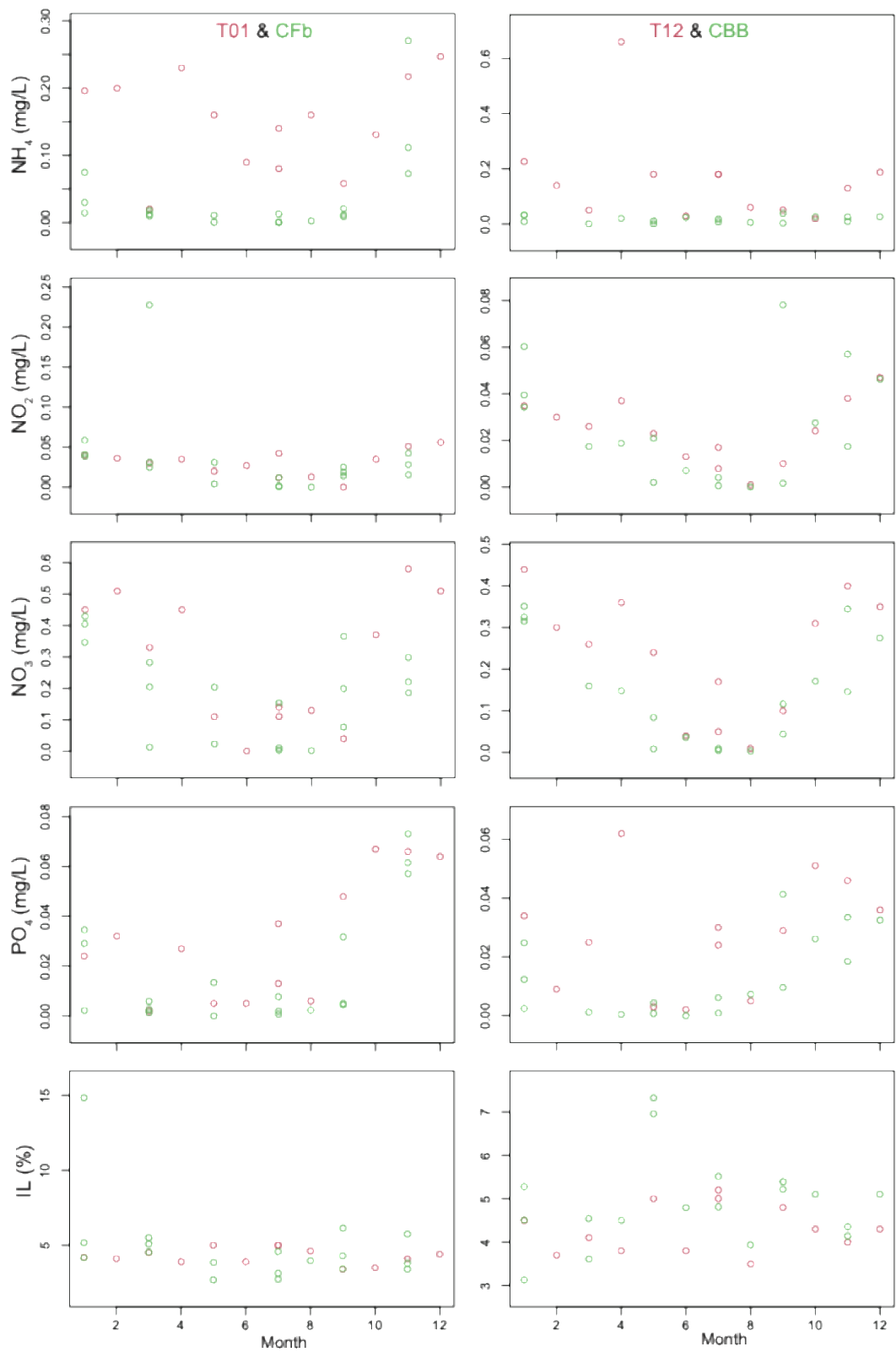


図9 船橋沖 (T01 と CFb) および盤洲沖 (T12 と CBB) の栄養塩に関連する dbRDA で使用した環境変数の季節変化。赤丸が 20 年前，緑丸が現在

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，高田宜武，南部亮元，藤野くるみ，井上誠章

水産研究・教育機構 水産資源研究所

日高清隆，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

深山義文，石井光廣，久保賢二，宇都康行

神奈川県水産技術センター

岡部久，赤田英之

【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。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、特に湾口部では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と考えられる。以上のことから、ノリの窒素安定同位体比などを用いた栄養塩の供給源モニタリングの手法を確立し、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バーコーディング解析および検鏡による情報の収集を行うと共に、炭素・窒素安定同位体比の手法を組み合わせることで、栄養塩環境の指標としてのアサリ食性について、より信頼性の高い情報を提供することを目的とする。

【方法】

(1) ノリ状況調査

・サンプリング：

神奈川県の主要な 2 漁場、金沢および走水地区にて生産される乾燥板ノリ試料を、漁業者から直接、定期的に購入・収集した。ノリ漁期の開始は 11 月もしくは 12 月と遅いことから、本報告書（令和 7 年度）では、昨年度までに収集した試料について、炭素・窒素安定同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ ）分析に基づいて行った解析結果を報告する。試料の前処理ならびに分析方法については、令和 5 年度報告書を参照されたい。

令和 7 年度は、ベイズ推定による混合モデルを用いて、陸域⇔外洋の寄与率推定を実施した。本解析は伊勢・三河湾課題にて実施してきたが、東京湾課題では、検体数が少ないことを理由に

行ってこなかった。今回、伊勢・三河湾課題において、漁業地区ごとに、各共販の検体数を1枚ずつに減らして解析を行ったところ、モデルの収束が良くなり、推定結果もある程度妥当であろうと考えられたことから、東京湾についても同様の解析を実施した。解析に用いるエンドメンバーは、陸水、東京湾水、外洋中層水とし、以下の条件にて設定した。

*なお、ここで東京湾水と表記した水は、特定の水塊を指すのではなく、陸水および外洋中層水から供給される栄養塩の希釈、枯渇を表現するために採用した。

【エンドメンバー】

- ・陸水：DIN > 500 $\mu\text{g/L}$ の条件下で採取したノリの $\delta^{15}\text{N}$
- ・東京湾水：200 $\mu\text{g/L}$ < DIN < 350 $\mu\text{g/L}$ の条件下で採取したノリの $\delta^{15}\text{N}$
(但し、東京湾外湾に位置する、大佐和地区のノリは除く)
 - *東京湾内湾において、湾奥の主要な流入河川からの出水に伴う栄養塩供給イベントがない場合、DIN 濃度は 200~300 $\mu\text{g/L}$ であることから、上記の設定とした。
- ・外洋中層水：伊勢湾口水深 100m から採取した海水中の硝酸態窒素 $\delta^{15}\text{N}$ (Waku et al. in prep), およびノリによる同化の際の濃縮係数(-2.4‰) (Watanabe et al. 2016)から算出
 - *外洋表層水の DIN 濃度は極めて低く、窒素供給源として無視できると考え、本解析からは除外した。

なお、DIN 濃度として、千葉県試料についてはノリ収集週および前週の平均値、神奈川県試料についてはノリ収集月および前月の平均値を採用した。本報告書では、現在、DIN 情報の収集ならびに解析を終えている、令和4年度漁期について報告する。解析方法の詳細については、伊勢・三河湾課題報告書も併せて参照されたい。

(2) アサリ食性調査

栄養塩環境の指標としてのアサリ食性に着目し、以下の作業仮説を立てアサリ食性解明に取り組んだ。

【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。

食性研究の手法として、古くは消化管内容物の検鏡による直接観察に始まり、近年まで炭素・窒素安定同位体比分析の手法が広く用いられてきた。最近では、メタバーコーディング解析の手法が普及し、海産無脊椎動物の食性解析にも使われ始めている。本課題ではこれら複数の手法を組み合わせ、相補的に補強することで、栄養塩環境の指標としてのアサリ食性の有効性を高い信頼性に基づいて示すことができると期待される。

千葉県内のアサリ主要3漁場（北部、盤洲、富津。なお、北部漁場は潮下帯であり、他は潮間帯）において、2か月ごと（奇数月）に干潟・浅場調査を実施し、アサリ、環境水および底質試料を採取した。

- ・炭素・窒素安定同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ ）を用いた餌料源分析

アサリの $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 分析には、個体の状態や部位による違いを考慮し、閉殻筋だけを用いた。餌料源候補（エンドメンバー）としては、水中の有機懸濁物（POM: particulate organic matter）、および正の走光性を利用して単離を試みた底生性微細藻類（MPB: microphytobenthos）を採用した。また、2025年3月からMPBの単離方法の改善を行うと共に、データのクオリティーチェックを進めた。

【MPB の単離方法の検討】

- ① LED ライト下から自然光下に変更
- ② 時間を当日夕方まで or 翌朝までから、翌夕までに変更
- ③ 金属製バットからプラスチック製のバットに変更
- ④ 単離途中でガラスビーズが干出しないように、加える食塩水を増量

【MPB データのクオリティーチェック】

昨年度までは CN 比 8 以下としたが、今年度は下記の 3 つの条件に変更した。

- ① CN 比による精査

レッドフィールド比 (C:N:P = 106:16:1) に基づき、CN 比=6.25±3 に限定

- ② 底質のクロロフィル a 濃度

5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下の底質から採取した MPB 試料については、十分な MPB が含まれていないものとみなし、データから除去

- ③ N 量

元素分析の結果、N 量が 0.02mg に満たないものは、単離できていないとしてデータから除去。また、検鏡時に線虫などのコンタミが多くみられる試料があったことを踏まえ、N 量 0.08mg 以上のものは動物のコンタミとみなし、同じくデータから除去

ベイズによる同位体混合モデルを用いて、アサリの餌料源解析を実施した。濃縮係数は、アサリ閉殻筋を用いた先行研究に基づき、 $\delta^{13}\text{C}$: 1.9‰, $\delta^{15}\text{N}$: 4.6‰ (Yokoyama & Ishihi 2006) とした。解析には R パッケージの MixSIAR を用いた。なお、久津間地区の POM は、沖合水(St.8 : 千葉県沿岸定線)を採用した。

・顕微鏡観察に基づくアサリ餌料生物の群集解析

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質の調査を実施している。令和 6 年度は海水と底質の検鏡計数により生物組成を定量的に明らかにした。今年度 (令和 7 年度) はアサリの餌料生物を解明する目的で、消化管内容物を検鏡計数した。2023 年 11 月から 2024 年 11 月の奇数月 (1, 3, 5, 7, 9, 11 月) に市川、金田、久津間、富津の 4 地点で採集したアサリを用いた (金田は 2024 年 5 月開始)。昨年度までの予備的なアサリ消化管の検鏡作業により、胃は空胃が多く未処理では計数が困難であったため腸を対象とした。中性ルゴールで固定したアサリから消化管 (腸) を取り出して複数個体をまとめて重量を測定した。市川は小型個体で構成され、腸の取り出しが困難であったため、2024 年 5 月を除いて全軟体部を使用した。消化管および全軟体部の有機物をハイターで除去し、蒸留水で内容物を洗浄後、永久プレパラートを作製して観察した。顕微鏡下で同定可能な水準で分類し細胞を計数し、湿重量 (cells / mg [wet weight]) あたりの細胞数 (細胞密度) を算出した。出現種の生態型 (浮遊と底生) と生息地 (海水・淡水など) についても識別した。この計数データを用いて 4 地点の微細藻類群集の特徴を整理した。細胞密度は解析期間の平均値 (平均組成)、生態型と藻類および属組成 (珪藻と渦鞭毛藻) は解析期間の合算値 (全体組成) を使用した。加えて、アサリ消化管内容物と海水および底質の微細藻類組成と比較した。

・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

【定期調査】

R6 年度と同様に、2 か月ごとの定期調査で得られた試料を対象として、DNA メタバーコーディング (DNA-MB) 解析を実施した。5 月から 11 月にかけて、3 定点 (市川、金田、富津) において採集したアサリ、環境水、砂泥試料について、珪藻特異的ユニバーサルプライマー (rbcL 領域) を用いて珪藻属組成を解析した。

得られた環境水、アサリ消化管、砂泥中の珪藻属組成データを基に、アサリ消化管と環境水中の珪藻属組成類似度 (アサリ-水中類似度)、ならびにアサリ消化管と砂泥上の珪藻属組成類似度 (アサリ-砂泥類似度) を算出し、その経月変化を解析した。

【大潮における連続調査】

潮間帯では、潮汐周期に伴い餌料環境が大きく変動することが想定される。そこで、潮間帯に生息するアサリの消化管中と環境中 (海水中、砂泥上) の珪藻属組成の経時的变化を明らかにするため、2025 年 10 月 8 日の大潮時に久津間の潮間帯において連続調査を実施した。

調査は 8:00 から 16:00 まで行い、1~2 時間間隔で定点においてアサリ、海水、砂泥を採集した。10 時から 12 時の間は定点が干出状態にあったため、この時間帯には最寄りの冠水域から海水を採水した。

採集試料について珪藻特異的 DNA-MB 解析に基づいて珪藻属組成を算出した。得られた属組成データを基に、SIMPROF 解析に基づくクラスター解析を実施した。

【結果】

(1) ノリ状況調査

ノリの $\delta^{15}\text{N}$ と DIN 濃度について、漁業地区別・時期別に整理を進めることで、栄養塩 (特にリン) の乏しい東京湾水に、陸水あるいは外洋中層水が付加されることで、ノリの $\delta^{15}\text{N}$ と DIN 濃度がどのように変化するかを可視化した (図 1)。

ベイズ推定による混合モデルを用いて、陸水と外洋中層水の寄与率推定を行った (図 2)。漁業地区ごとに比較すると、東岸の千葉県海域では、湾奥の市川と湾中部の金田にて、陸水が 5 割近く寄与しているのに対して、富津、大佐和と湾口に近づくにつれて、陸水の寄与が低下すると共に、外洋中層水の寄与が増加した。西岸の神奈川県海域では、緯度の近い、金沢と富津、走水と大佐和にて類似した傾向を示したが、東岸の大佐和で見られたほど高い外洋中層水の寄与は確認できなかった。

漁業地区別・時期別の推定結果を見ると、いずれの漁業地区においても陸水の寄与が同期的に変化し、1 回汐から 4 回汐にかけて増加。5 回汐以降、9 回汐にかけて低下した。この同期的な変動から、湾奥の主要な流入河川からの栄養塩供給が、東京湾全域に効いていることが示唆された。また、外洋中層水の寄与が比較的大きな大佐和地区においても、外洋中層水の寄与率が時間的に変化しており、特に、4 回汐、5 回汐で高い傾向が確認できた。この時期は、陸水の寄与が最も高い時期とも一致している。今後、令和 5 年度および 6 年度試料についても同様の解析を進めることで、更なる比較・検討を進める計画である。

(2) アサリ食性調査

- ・炭素・窒素安定同位体比を用いた餌料源分析

アサリの $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 分析は、市川地区を除く 3 地区にて、2025 年 7 月試料まで終了した (市川地区のみ 2025 年 7 月の途中)。現在までのアサリ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 値の平均値は、漁業地区別に以下

の通りである。いずれの地区についても、季節的な変動（夏場に $\delta^{13}\text{C}$ が上昇し、冬場に低下）がみられるが、特に、市川地区において標準偏差が大きい。そこで、市川地区については、5&7&9 月と 11&1&3 月の 2 季に分けて以降の解析を行った。

市川 $\delta^{13}\text{C} : -16.7 \pm 1.5 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 13.3 \pm 1.0 \text{ ‰}$ (N = 111)

5&7&9 月 $\delta^{13}\text{C} : -15.6 \pm 0.7 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 13.7 \pm 1.0 \text{ ‰}$ (N = 57)

11&1&3 月 $\delta^{13}\text{C} : -17.9 \pm 1.1 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 13.0 \pm 0.8 \text{ ‰}$ (N = 54)

金田 $\delta^{13}\text{C} : -15.5 \pm 0.5 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 14.3 \pm 0.7 \text{ ‰}$ (N = 87)

久津間 $\delta^{13}\text{C} : -16.0 \pm 0.4 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 15.5 \pm 0.7 \text{ ‰}$ (N = 112)

富津 $\delta^{13}\text{C} : -15.4 \pm 0.7 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 15.3 \pm 0.6 \text{ ‰}$ (N = 137)

底生性微細藻類の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 分析は、2025 年 11 月試料まで終えており、値のクオリティーチェックを進めた。以下に、旧条件（CN 比 8 以下）で求めた MPB の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 値（2023 年 5 月から 2025 年 1 月まで）と、上記の新条件で求めた MPB（2023 年 5 月から 2025 年 11 月まで：2025 年 3 月に実施した単離方法の改善後の試料を含む）の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 値を併記した。両者を比較すると、いずれの海域でも、MPB の $\delta^{13}\text{C}$ 値が上昇し、先行研究で報告されている MPB の $\delta^{13}\text{C}$ 値に近づけることが出来た。この結果から、以後の解析では、令和 6 年度報告書で検討を行った SOM ではなく、MPB の値を用いた。

なお、市川地区については、上記の通り、5&7&9 月と 11&1&3 月の 2 季に分けて解析を行っており、MPB についても季別の値を算出した。しかし、5&7&9 月の MPB の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 値が、同時期の POM の $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 値と類似した値を取ったことから、底質上に沈殿した植物プランクトンがコンタミした可能性を考慮し、11&1&3 月の MPB の値を採用し、解析を進めた。また、富津地区では、アサリの $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 値が餌料源候補を囲った枠の中に納まらなかった（図 3）ことから、MPB の単離方法を改善した 2025 年 3 月以降の値のみを以後の解析に用いた。なお、図 3 に表示しているエンドメンバーには、濃縮係数（Trophic enrichment factor or Discrimination factor, $\delta^{13}\text{C} : 1.9\text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N} : 4.6\text{ ‰}$ ）を加えたものが表示されていることに留意されたい。

	旧条件		新条件
市川	: $-19.5 \pm 2.0 \text{ ‰}$, $9.5 \pm 3.0 \text{ ‰}$ (N = 7)	→	$-15.7 \pm 2.2 \text{ ‰}$, $7.7 \pm 3.6 \text{ ‰}$ (N = 4)
金田	: -21.8 ‰ , 5.2 ‰ (N = 1)	→	$-14.9 \pm 3.2 \text{ ‰}$, $10.1 \pm 2.9 \text{ ‰}$ (N = 4)

久津間 : $-18.4 \pm 1.7 \text{ ‰}$, $7.9 \pm 2.7 \text{ ‰}$ (N = 5) → $-16.3 \pm 2.9 \text{ ‰}$, $8.7 \pm 1.9 \text{ ‰}$ (N = 7)

富津 : $-19.7 \pm 0.8 \text{ ‰}$, $4.7 \pm 0.8 \text{ ‰}$ (N = 3) → $-15.1 \pm 1.1 \text{ ‰}$, $8.5 \pm 0.5 \text{ ‰}$ (N = 2)

以上のデータに POM のデータを加えて、ベイズ推定によるアサリの餌料源推定を行い、浮遊系(POM)と底生系(MPB)の寄与割合を、地先別、および月別に整理した（図 4）。まず、地先別に寄与率を比較すると、湾奥の市川地区では、特に 11&1&3 月に、浮遊系が 8 割近く寄与していることが明らかになった。湾中部の金田地区では、浮遊系と底生系の寄与がほぼ半々であった。ただし、金田地区と直線距離で 5km ほどしか離れていない久津間地区では、再び浮遊系の寄与率が上昇し、6 割以上となった。更に湾口部に近い富津地区では、再び浮遊系と底生系の寄与が同程度であった。これらのことから、河口に近く、栄養塩濃度の高い市川地区では浮遊系が優占し、河口から離れ、栄養塩濃度が低くなるにつれて、底生系の寄与が相対的に高まるものの、河口から離れた地区においても、小河川が流入することで、栄養塩環境が改善し、浮遊系の寄与が高まるという構図が示唆された。

漁業地区ごとの時系列推移をみると、いずれの地区においても、冬季に浮遊系の寄与割合が上昇し、夏季に底生系の寄与割合が上昇する傾向が確認された。また、年によって、浮遊系⇔底生系の寄与割合が異なり、例えば、令和5年の夏季は、令和6年の夏季に比べて、底生系の寄与が高く出ている傾向も確認できた。但し、これらの推定結果は、今後、エンドメンバーのデータを追加することによって変わることから、更なる詳細な記述、比較は避けることとする。

・顕微鏡観察に基づくアサリ餌料生物の群集解析

細胞密度に基づき調査地点ごとの生物量を比較（図 5A）。アサリ消化管の生物量は久津間で多く、市川で少ない。消化管内容物の生物量の季節変化は市川を除き5月に最も高くなる（図 5B）。久津間と富津では概ね秋から春へと増加し、夏から秋にかけて減少した。アサリ消化管内容物における微細藻類の浮遊と底生の構成比は、全体的に底生の割合が高かった（図 6A）。アサリは硬い珪藻のガラス質の細胞壁を粉々にするため（Houki et al. 2018）、底生珪藻と比較して薄い細胞壁を持つ浮遊珪藻は検鏡で同定できないほど粉碎されたと考えられる。よって、本研究では浮遊を過小評価している可能性が高い。その中でも市川と富津は比較的浮遊の割合が高かった。藻類（高次分類群）レベルでの組成比は、どの地点も珪藻の割合が高く（図 6B）、昨年度の環境中（海水と底質）の結果一致していたが、有機物処理の過程で多くの微細藻類が消失すると考えられる。よって、珪藻を過大評価している可能性を否定できないため、結果の取り扱いには注意が必要である。

市川の珪藻と渦鞭毛藻の属の組成について、全体の組成では浮遊珪藻 *Thalassiosira* が高い割合を占めた（図 7A）。*Thalassiosira* は浮遊珪藻の中でも比較的細胞壁が強固なため、消化管内でも同定可能な断片が残されていた。季節別では2024年7月のアサリは検鏡で同定できる断片が含まれていなかった（図 7B）。同時期の海水と底質ではともに小型単細胞性 *Thalassiosira* sp. が優占しており、消化管では形態が残らないほど粉々になったと推察される。他の月は海水で *Thalassiosira* が優占したときは消化管でも本属が優占する傾向を示した。一方、消化管で底生珪藻 *Catenulla* や *Fallacia* が優占しても底質の組成とは一致しなかった。金田におけるアサリ消化管の全体組成は底生珪藻 *Catenulla* が優占した（図 8A）。季節別でも *Catenulla* が優占する試料が多かったが、海水や底質とは一致しなかった（図 8B）。*Catenulla* は群体で砂に着生しほとんど運動しない珪藻で、粘液によってバイオフィルムを形成することが多い。こうした特徴から *Catenulla* は消化管内で分解されにくいと推察される。久津間のアサリ消化管の全体組成は、金田と同様に *Catenulla* や底生珪藻が優占した（図 9A）。季節別でも通年 *Catenulla* は出現し、季節ごとに優占属が変化した（図 9B）。消化管の属組成は全体でも季節ごとでも海水や底質と類似しないが、*Thalassiosira* が環境中で卓越した時（2023年11月と2024年1月）は消化管と共通していた。富津におけるアサリ消化管の全体組成では、市川に類似して浮遊珪藻 *Thalassiosira* が優占した（図 10A）。その他は底生珪藻 *Amphora* や *Cocconeis* が優占した。季節別では、海水で *Thalassiosira* が優占すると概ね消化管でも *Thalassiosira* が優占または出現した（図 10B）。海水と底質で底生珪藻 *Navicula* の割合が高いが、アサリではあまり出現せず、属組成はやや海水と類似する傾向を示した。

これらの結果をもとに、昨年度の海水と底質の結果を踏まえて、アサリ消化管における全体と地点ごとの微細藻類群集の特徴を整理する。消化管内容物の主たる微細藻類は底生珪藻であったが、海水や底質と組成が常に一致するわけではなかった。市川は海水の平均生物量が4地点で最も多かったが、アサリ消化管では最も少なかった。海水では浮遊珪藻 *Skletonema*、底質では

浮遊珪藻 *Thalassiosira* が優占し、アサリ消化管では *Thalassiosira* と底生珪藻が優占した。金田は海水の生物量が少なかったが、アサリでは多かった。海水では浮遊珪藻 *Pseudo-nitzschia*、底質では底生珪藻 *Navicula* が優占したのに対し、アサリ消化管では *Catenulla* などの底生珪藻が優占した。久津間では海水の生物量は中間程度で、アサリ消化管ではやや多かった。海水では浮遊珪藻 *Chaetoceros*、底質では底生珪藻 *Navicula* が優占したが、アサリ消化管では *Catenulla* など底生珪藻が優占した。富津は海水の生物量は中間だったが、アサリ消化管はやや少なかった。海水では浮遊珪藻 *Thalassiosira*、底質では底生珪藻 *Navicula* が優占したが、アサリ消化管では底生珪藻と浮遊珪藻 *Thalassiosira* が優占した。

・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

【定期調査】

各月、各地点における DNA-MB の結果を図 11 に示す。環境水およびアサリ消化管においては、いずれの地点・時期においても、基本的に浮遊性珪藻が優占していた。特に、多くの試料で *Chaetoceros* spp. が優占し、*Minutocellus* spp. や *Cyclotella* spp. が優占する場合も認められた。底生珪藻がアサリから検出される場合もあったが、本年度においてはその頻度は高くなかった。

アサリ-水中類似度およびアサリ-砂泥類似度を、図 12a,b にそれぞれ示す。アサリ-環境水類似度は、全体として比較的高く推移した。一方、摂食に不適と考えられる珪藻属が優占した場合や、消化管からの検出属数が少ない場合には、類似度が低下した。また、これらの調査時には、試料解剖の際に空胃個体が多く確認された。アサリ-砂泥類似度は、環境水との類似度と比べて概して低かった。特に、5 月や 11 月のように砂泥上で底生珪藻が優占する時期には、類似度は極めて低い傾向を示した。一方、7 月のように砂泥中で浮遊珪藻が優占した場合には類似度が高くなる傾向が認められた。

【大潮における連続調査】

連続調査で得られた試料を対象とした DNA-MB に基づく珪藻属組成と、クラスター解析の結果を図 13 に合わせて示す。アサリ消化管内容物組成は採集時刻ごとにまとまり、アサリの餌料が時間的に変化していることが示された。冠水時に採集されたアサリは、同時刻の環境水と同一クラスターに属していたほか、胃内容物も充実しており、PCR の成功率も高かった。一方、干出時およびその前後に採集されたアサリは、砂泥と同一クラスターに属する傾向が認められた。しかし、これらの個体では空胃個体が多く、PCR 不良も頻発した。

【図表】

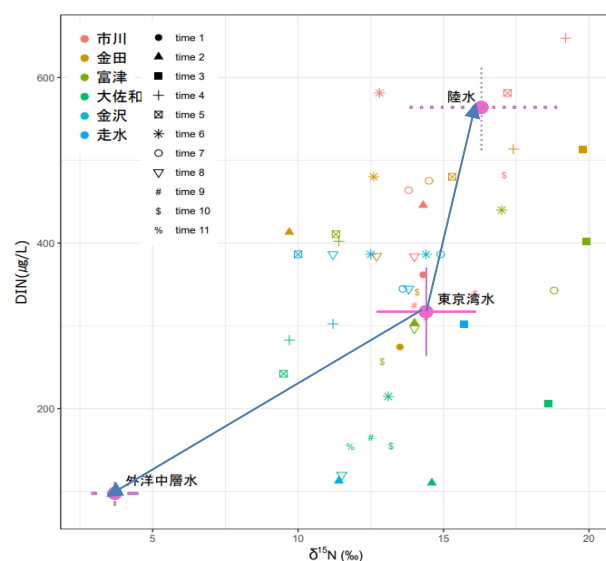


図 1 漁業地区別・共販別のノリ $\delta^{15}\text{N}$ および DIN 濃度のプロット

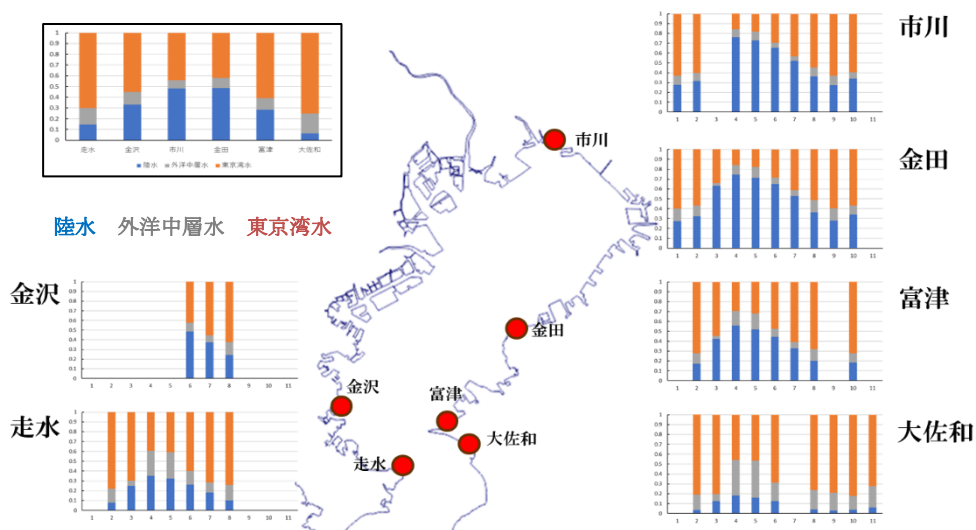


図 2 漁業地区別のノリ窒素供給源の推移

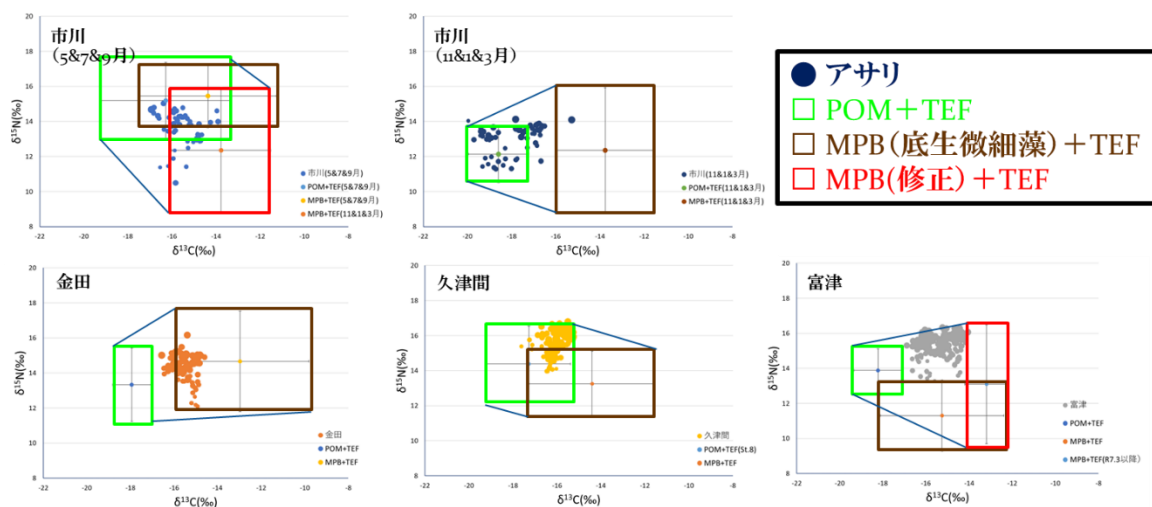


図 3 漁業地区別のアサリ同位体比および餌料源候補のプロット

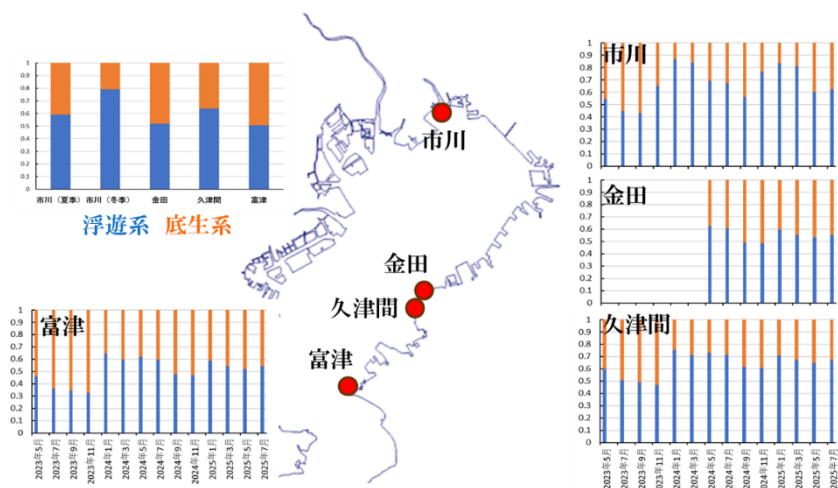


図4 漁業地区別・月別のアサリ餌料源推定

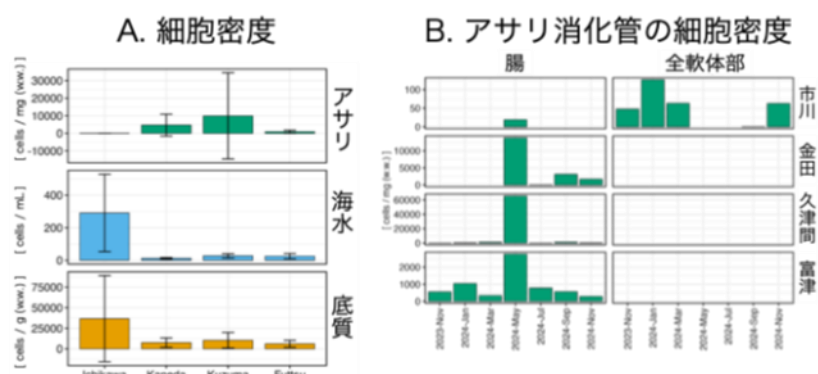


図5 A) アサリ消化管および海水と底質の平均細胞密度。B) 月ごとの各地点におけるアサリ消化管の細胞密度。2024年7月の市川はデータなし。

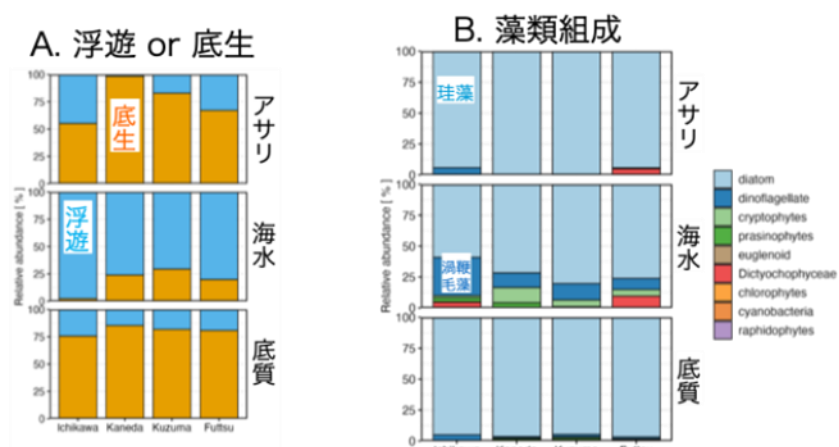


図6 アサリ消化管における各地点の A) 浮遊と底生微細藻類の割合、および B) 藻類の割合。

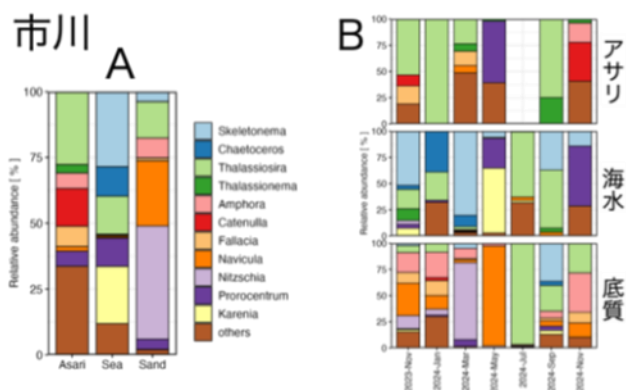


図 7 市川における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合。A) 1 年間の合算で平均組成，および B) 月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属（5%以上出現）を示す。

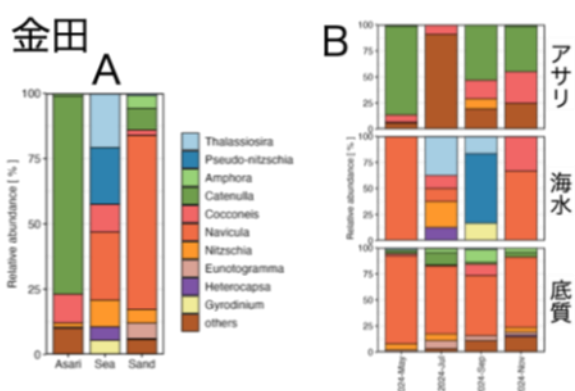


図 8 金田における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合。A) 1 年間の合算で平均組成，および B) 月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属（5%以上出現）を示す。

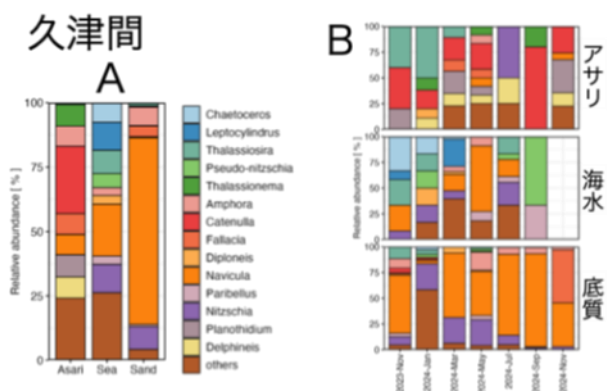


図 9 久津間における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合。A) 1 年間の合算で平均組成，および B) 月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属（5%以上出現）を示す。

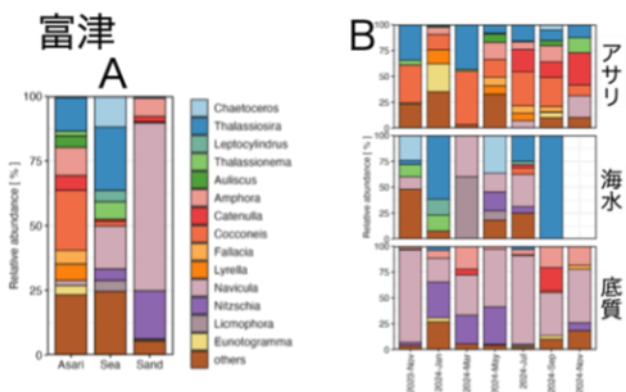


図 10 富津における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合。A) 1 年間の合算で平均組成，および B) 月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属（5%以上出現）を示す。

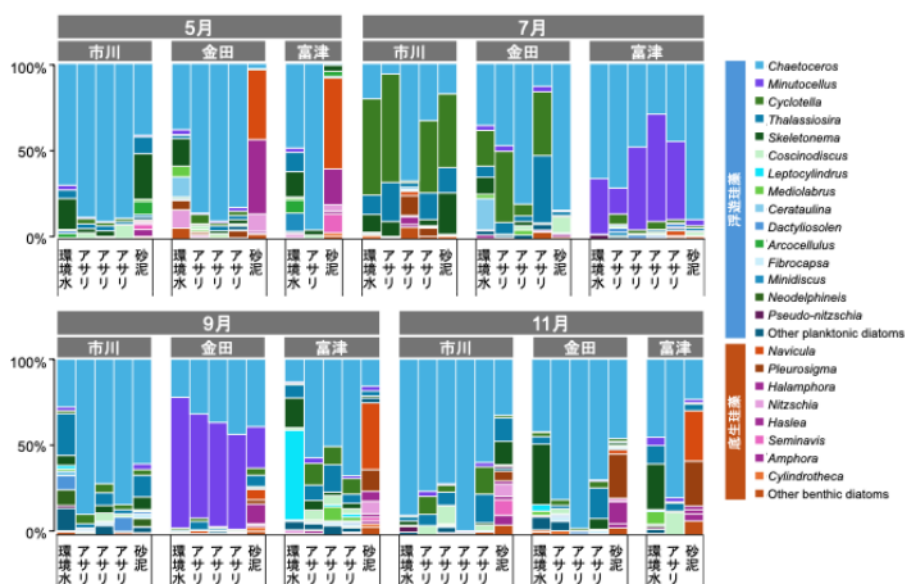


図 11 月別・地区別の DNA メタバーコーディングの結果

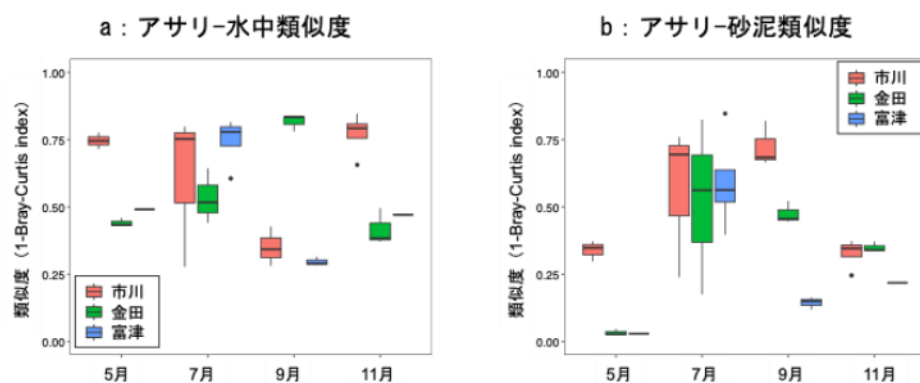


図 12 月別・地区別のアサリ-水中類似度 (a), およびアサリ-砂泥類似度

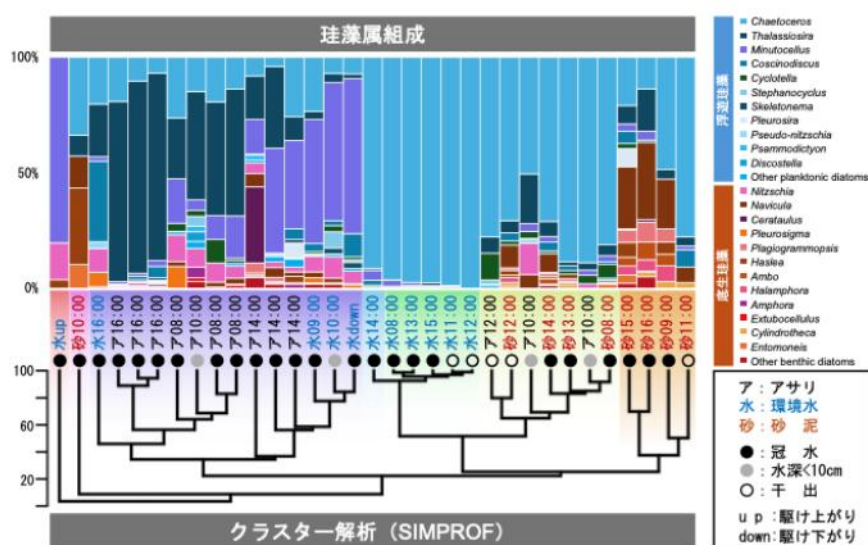


図 13 連続調査におけるアサリ消化管中，環境水中，砂泥上の DNA メタバーコーディングに基づく珪藻属組成と，属組成の類似度に基づくクラスター解析結果

課題番号：Ⅱ－３）①

課題名：栄養塩管理方策の検討

千葉県水産総合研究センター

速水啓介，石井光廣，宇都康行，牧広樹，森川恵理，尾崎真澄，原田貴大，西脇土歩

東京大学大学院新領域創成科学研究科

佐々木淳

水産研究・教育機構水産技術研究所

渡部諭史

【背景・目的】

東京湾は海岸線のほとんどが埋め立てられ，流域人口が日本の人口の 24 %を占める都市型内湾である。1960 年代に著しく富栄養化し，赤潮，青潮，貧酸素水塊などが頻発した。その後，負荷量の削減などの努力により水質が徐々に改善されているが，現在でも底質には多くの有機物が堆積しており，春から秋に貧酸素水塊が発生し多くの底生生物が死滅しているほか，2021 年には青潮による魚介類のへい死被害が発生するなど，富栄養の状態が続いている。

一方，海水中の栄養塩濃度の低下（貧栄養化）による水産生物，漁業生産に影響が出始めている。ノリは，2000 年ごろからリン不足による落ちが漁期後半にみられるようになっている。アサリ稚貝の秋冬季減耗は，餌料不足が要因の 1 つと考えられており，実際に植物プランクトンの指標となるクロロフィル a 濃度の長期的な低下に伴い，稚貝の肥満度は低下傾向がみられている。

東京湾では，秋冬季の水温上昇，貧栄養化などの長期的な環境変動が水産生物に大きな影響を与えることが懸念される。秋冬季の水温上昇はノリ漁期の短縮化，暖海性種の湾内進入など生物の分布が変化し，成層期及び貧酸素水塊発生期の長期化など海洋構造の変化と併せて複次的に影響することが考えられる。貧栄養化は，ノリの色落ち，植物プランクトンの減少など一次生産の低下のほか，透明度の上昇による藻場の拡大などに影響し，複合的な要因により漁業生産にも影響を与えていると考えられる。そのため，東京湾沿岸の 1 都 2 県漁業協同組合連合会は，漁業生産が増加する豊かな東京湾を要望している。

東京湾の漁業に大きな影響を与えている貧酸素水塊は，これまでに海底へ蓄積した多量の有機物を起源としており，根本的な解決にはこれを取り除く必要があるが，容易ではない。これまでの調査から，貧酸素水塊とうまく付き合いながら漁業生産を継続していくため，貧酸素水塊の影響軽減策として，浅場やマウンドの活用が有効と考えられる。そこで，将来的なマウンド造成へ向け，浅場やマウンド上で生物の多様性が維持される理由を明らかにすることを目的に，マウンド上の調査点を新たに設定し，各地点と比較検討を行った。

また，栄養塩類が減少傾向である東京湾において，沖合がやや貧栄養化した海であっても干潟浅海域でアサリ等二枚貝類やのり養殖等の漁業生産が継続できるよう，局所的な栄養塩類の供給源を把握し有効利用することが重要である。そのため，今年度から，先行知見で有用性が示唆された海草藻場について，その生態系機能を把握することを目的に，干潟における底質等の環境調査を実施した。

【方法】

(1) マウンド効果

東京湾東岸の棚状もしくはマウンド状の浅海域で東京湾調査・指導船「ふさなみ」を用いて、2 か月に 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、底生生物の分布等を把握した。また、桁網を曳網し、有用魚介類の出現状況を把握した。

浅場やマウンド上で生物の多様性が維持される仮説として①周囲に傾斜があること及び②周囲より 3～4 m 浅い構造であることを想定した。そこで、水質、底質、底生生物の調査における調査海域は人工岸壁前面に広がる棚状の浅海域である「五井」の水深約 5, 10, 15 m 地点及び岸壁から離れたところにマウンド状の浅場がある「北袖」のマウンド上 1（水深約 10 m, 斜面に近いマウンド）、マウンド上 2（水深約 10 m, 斜面から離れたマウンド）、マウンド上 3（水深約 10 m, 高低差の小さい斜面に近いマウンド）、マウンド上 4（水深約 8 m, 他のマウンドと独立した水深の浅いマウンド）、マウンド下（水深約 13 m）、北袖岸（水深 10 m, マウンド上と同水深であり周囲の高低差が小さい）の 2 海域 9 地点を対象とした（図 1, 2, 表 1）。桁網調査における調査海域は「五井」の水深約 5, 10, 15 m 地点及び「北袖」のマウンド上 1, マウンド下に加えて、調査点の中で北部であり河口に位置する「養老川河口」の水深約 5, 10, 15 m 地点の 3 海域 8 地点を対象とした（図 1, 2, 表 1）。

水質、底質、底生生物の調査は東京湾調査・指導船「ふさなみ」で 2025 年 9 月、11 月及び 2026 年 1 月に行った（現時点で 9, 11 月は分析済み）。水質観測は、多項目水質計（Aqua TROLL 500, 環境システム）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の試料を採取した。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。底質は調査ごとに強熱減量と中央粒径を測定し、中央粒径はレーザ回折式粒子径分布測定装置（SALD-2300, 島津製作所）を用いて測定した。生物試料は、目合 1 mm のふるいで濾し、ふるいに残った底生生物（マクロベントス）を分析対象とした。水産有用種は個体ごと湿重量を測定し、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 2025 年 6 月 9 日、6 月 20 日、9 月 24 日、11 月 10 日、11 月 26 日、12 月 17 日及び 2026 年 1 月 29 日に計 7 回行った（表 2）。

各調査点で桁網（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。船上で採集物から試料生物を全数拾い出し、採集地点ごとに氷藏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、有用魚介類とハタテヌメリは、破損個体を除き、個体ごとに大きさ（魚類は全長及び体長、甲殻類は全長、体長または全甲幅、貝類は殻長または殻高、イカ・タコ類、ナマコ類は全長）と湿重量を測定した。

(2) 干潟浅海域の漁業生産向上

木更津市中里地先（以降 木更津, 2025 年 10 月 7 日, 2026 年 2 月 5 日）、富津干潟（以降富

津，2025 年 9 月 19 日，2026 年 1 月 26 日），木更津市金田地先（2026 年 2 月 6 日）で，高水温期と低水温期の年 2 回，底質等の環境調査を実施した。いずれの海域においても，コアマモ繁茂の有無に応じて調査点を設定した（コアマモ有 3 点，コアマモ無 3 点の計 6 点）。底質の調査は，底質表面の強熱減量，底質深さ 10cm の酸化還元電位 ORP（ポータブル ORP 計 ORPHM-40P，東亜ディーケーケー），底質表面の粒度組成（レーザ回折式粒子径分布測定装置 SALD-2300，島津製作所），底質表面から深さ 5cm までのクロロフィル a・フェオ色素濃度（紫外可視近赤外分光光度計 V750iRM，日本分光）を測定した。栄養塩類調査は，表層水及び底層水の栄養塩類濃度（栄養塩類自動分析装置 QuAAtro39，ビーエルテック）と底質深さ 10cm の間隙水の栄養塩類濃度を測定した。また，生物調査として，20 cm 四方の底質を全量採取し，目合 1 mm のふるいに残ったアサリ等を計測した。また，コアマモの繁茂状況を定量するため，生物を採取した 20 cm 四方の中のコアマモを全量採取し，株数及び乾燥重量を測定した。

今回は，分析が終了した高水温期（9・10 月）の結果を報告する（粒度組成は未分析のため除く）。

【結果】

（1）マウンド効果

調査結果については，底層 DO (ml/L)，底泥の中央粒径 (μm) 及び熱減量 (%), 餌料生物として重要なマクロベントスである多毛綱の分布密度及び種数，桁綱採集生物の種数の推移を項目ごとに報告する。

水質（底層 DO）について，各調査点の結果を図 3 に示した。9 月の北袖岸周辺が 2.5 ml/L をわずかに下回り 2.46 ml/L であることを除き，今回の調査点で底層 DO が 2.5 ml/L 以下となることはなかった。11 月の結果を比較すると，五井 5 m，10 m 地点及びマウンド上 4 で底層 DO が高く，水深が浅い地点の溶存酸素が高い結果となった。

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の関係を図 4 に示した。各地点の中央粒径は，水深が深くなるほど小さくなる傾向がみられた。北袖岸が 39～135 μm とシルトから細砂に分類されるのに対し，同水深のマウンド上 1 やマウンド上 3 では 173～270 μm 以上の細砂から中砂であり，北袖岸に比べて中央粒径が大きかった。マウンド間で比較した場合，最も水深の浅いマウンド上 4 が最大で 337～356 μm の中砂であった。一方，強熱減量は，水深が深いほど大きい傾向があった。11 月の北袖岸が 7.69 %であるのに対し，同水深のマウンド上 1 やマウンド上 3 では 3 %前後と小さかった。マウンド間で比較した場合，大きな差異は無かった。これらのことから，マウンド上の各地点や五井 10 m は底質環境が良好に保たれたが，同じ水深帯の北袖岸の底質環境は良くなかったことから，底質環境を良好に保つためには，斜面に隣接していることが構造的に重要と考えられた。

多毛綱の分布密度及び種数について図 5 に示した。五井とマウンド上で比較すると，マウンド上の全ての地点は五井 5 m 及び 10 m 地点よりも水深が深い，9 月調査の分布密度は同等程度か上回る結果となった。同じく 9 月調査の種数についても，五井 10 m よりもマウンド上の方が多く，特にマウンド上 4 は五井 5 m よりも種数が多いことから，マウンドの有用性が改めて示唆された。マウンド上と北袖岸を比較すると，マウンド上は北袖岸よりも分布密度が高いことに加え，種数も多かった。このことは底質環境の結果と同様に，周囲よりも水深が浅い構造の重要性を示唆していた。マウンド間で比較すると，マウンド上 2 とマウンド上 3 との比較では大きな差異は

無かったが、マウンド上1は、水深が深い分布密度がマウンド上2やマウンド上3と比較して高く、11月は種数も多くなった。この結果はマウンド上1がマウンド上2、3よりも傾斜に近い位置にあることの重要性を示唆していると考えた。マウンド上4は9月、11月共に他の地点よりも種数が多く、11月についてはヤリブスマという小型の多毛綱が多く分布したことで分布密度も高かった。マウンド上4については、底層 DO や底質環境の結果と同様に、他のマウンド上よりも水深が浅い水深に位置することの重要性を示唆していた。

今年度の調査結果から、マウンド上1やマウンド上4が北袖岸と比較して、中央粒径が大きく、強熱減量が低く、多毛綱の分布密度及び種類が高かった理由として、①傾斜に隣接していること及び②周囲よりも3~4m浅い構造であることの効果を示唆していると考えられた。

桁網採集生物の種数及び密度の推移について図6及び図7に示した。また、2025年の桁網採集生物の種類、個体数について別表に示した。2022年まではソリネットを用いたが、ソリネットでは採集できなかった有用魚介類の入網を狙い、2023年からは桁網を用いて調査を実施した。桁網の導入により、新たにイシガレイ、イネゴチ、シログス、シログチ、メイトガレイ等の魚類が確認され、採集物も稚魚主体から幼魚・成魚主体へと変化した。

2025年の調査結果は、多くの地点で5~9月に種数及び密度の低下がみられ、10月以降徐々に増加する傾向がみられた。養老川河口は河川水が流入するため、他地点よりも貧酸素水塊の影響を受けづらい傾向がみられるが、2025年は約5m地点と約15m地点で種数及び密度が減少した。採集生物としては、アサリ、サルボウガイ、ホンビノスガイ等の有用二枚貝類が多く確認された(別表)。五井は、約5m地点、約15m地点ともに5~9月の種数及び密度の減少がみられ、浅場・深場ともに貧酸素水塊の影響を受けていたことが推察された。採集生物としては約15m地点で他地点よりも多くのマダコが確認されたが、生物全体の個体数の合計は他地点よりも少なかった。北袖は4月にはマウンド上下とも20種以上の生物が採捕されたが、5月以降急減し、貧酸素水塊の影響を受けたことが推察された。採集生物については、マウンド上下ともにハタタテヌメリが特に多く、魚類、甲殻類、巻貝類の個体数の合計は他地点よりも多かった。以上の結果から、2023年以降の桁網調査によって大型魚類の入網が確認されたものの、夏季には生物が減少することが明らかになった。この原因としては、移動能力のない生物が貧酸素水塊の影響を受けて死亡した、もしくは移動能力のある魚類などがより溶存酸素の多い場所へ逃避したためと推察される。

今後は、調査回数を重ねて上記の結果が確かであることを確認し、差異が小さい地点に代わり新たな調査点(例：造成が容易な小さいマウンド等)を加えて調査を継続し、マウンド造成の提案に向けた検討を行う。

(2) 干潟浅海域の漁業生産向上

調査海域及び調査点図を図8、9に示した。コアマモの繁茂状況は、木更津は高密度で富津は低密度であった。

底質の強熱減量は、木更津、富津ともにコアマモ有の方が高く、ORPは、木更津、富津ともにコアマモ有の方が低かった(図10)。

間隙水の溶存態無機窒素(DIN)の平均値は、木更津コアマモ有 1,241 µg/L、コアマモ無 1,655 µg/L、富津コアマモ有 851 µg/L、コアマモ無 859 µg/L と、底層水の平均値(木更津 267 µg/L、富津 530 µg/L)と比較して木更津はコアマモの有無に関わらず約5倍、富津は約1.5倍高濃度だった(図11左)。間隙水のリン酸態リン(DIP)の平均値は、木更津コアマモ有 292 µg/L、コアマ

モ無 486 $\mu\text{g/L}$, 富津コアモ有 286 $\mu\text{g/L}$, コアモ無 102 $\mu\text{g/L}$ と, 底層水の平均値 (木更津 54 $\mu\text{g/L}$, 富津 90 $\mu\text{g/L}$) と比較して木更津はコアモの有無に関わらず約 6~8 倍, 富津はコアモ有が約 3 倍高濃度であったが, コアモ無では差が無かった (図 11 右)。

底質中の植物プランクトンの指標となるクロロフィル a 濃度は, 木更津はコアモ有の方が高い傾向がみられ, 富津は差がみられなかった (図 12 左)。デトリタスの指標となるフェオ色素濃度は, 木更津はコアモ有の方が高く, 富津は差がみられなかった (図 12 右)。

アサリ分布密度は, 木更津のコアモ有は 4,967 Inds./ m^2 , 富津のコアモ有は 1,500 Inds./ m^2 と, いずれもコアモ有の方が高く, コアモ無と比較して木更津は約 2 倍, 富津は約 10 倍高密度であった (図 13)。殻長組成から, コアモ有では木更津, 富津ともに殻長 11 mm 未満の稚貝が多く, 特に富津で顕著であった (図 14)。また, 殻長 27 mm 以上の成貝が両調査点で確認された。

コアモ有の底質の強熱減量が高く ORP が低かったこと, また, フェオ色素濃度が高かったことから, コアモ有の方が有機物量の多い底質環境であることが推測された。間隙水の栄養塩類測定結果から底質には豊富な栄養塩類が含まれることが確認されたが, 底質からの栄養塩類の溶出については不明な点が多いことから, 今後は底質からの溶出速度の算出について, 算出方法を含めて検討したい。

コアモ有では稚貝が多くみられ, 特に富津ではその割合は 83 %と, コアモ無の 13 %に比べて高かったことから, コアモによる稚貝の蛸集効果が示唆された。加えて, 木更津, 富津ともに成貝が確認されたことから, コアモ場は稚貝の集積場だけではなく, 成貝まで生育可能な場であると考えられた。



図1 マウンド効果 調査点図

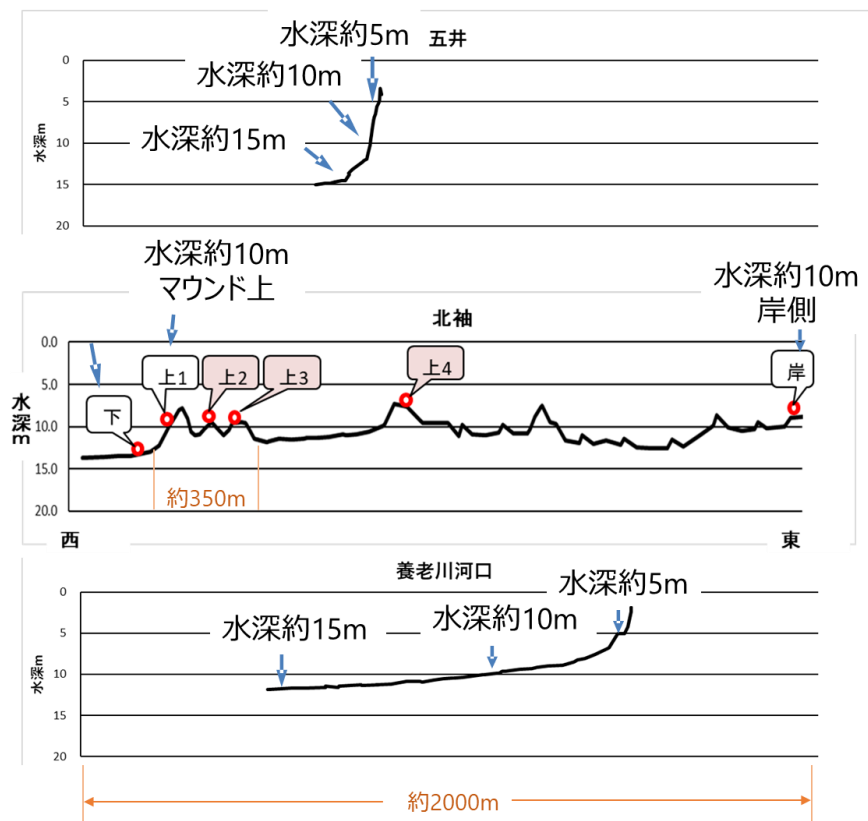


図2 マウンド効果 調査点断面図

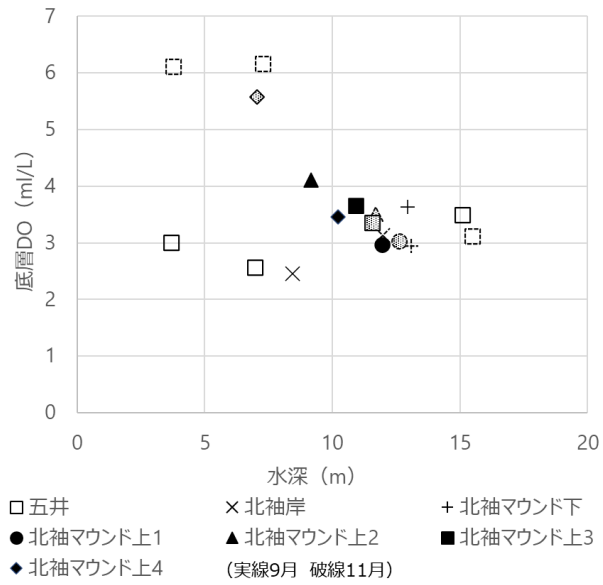


図3 マウンド効果 各地点における底層 DO

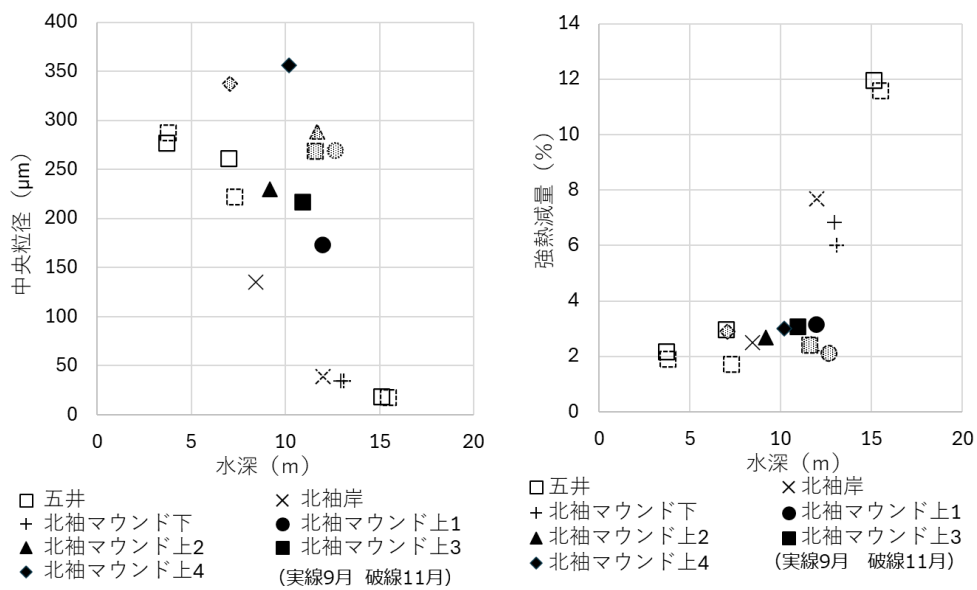
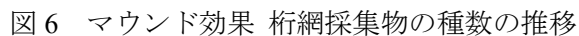
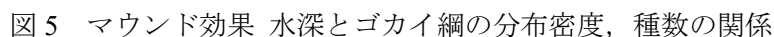


図4 マウンド効果 水深と底質の中央粒径，強熱減量（IL）の関係



- 111 -

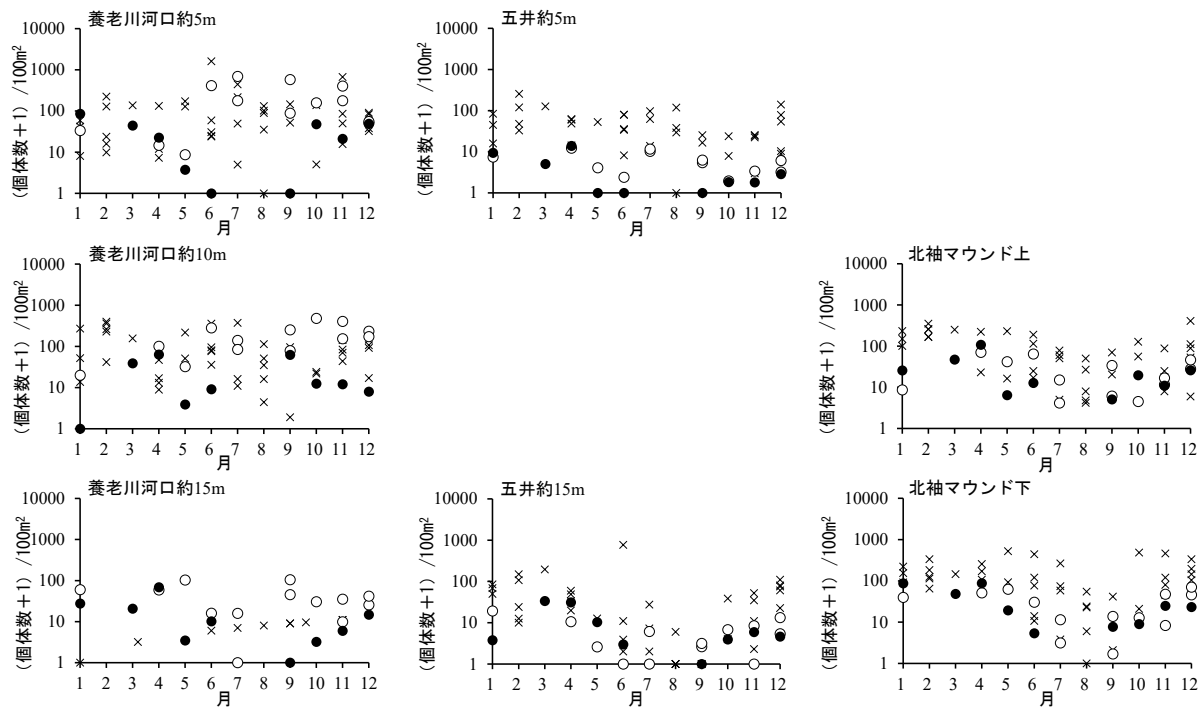


図7 マウンド効果 桁網採集物の密度（個体数+1/100 m²）の推移
 ×：ソリネット（2018～2023年），○：桁網（2023～2024年），●：桁網（2025年）

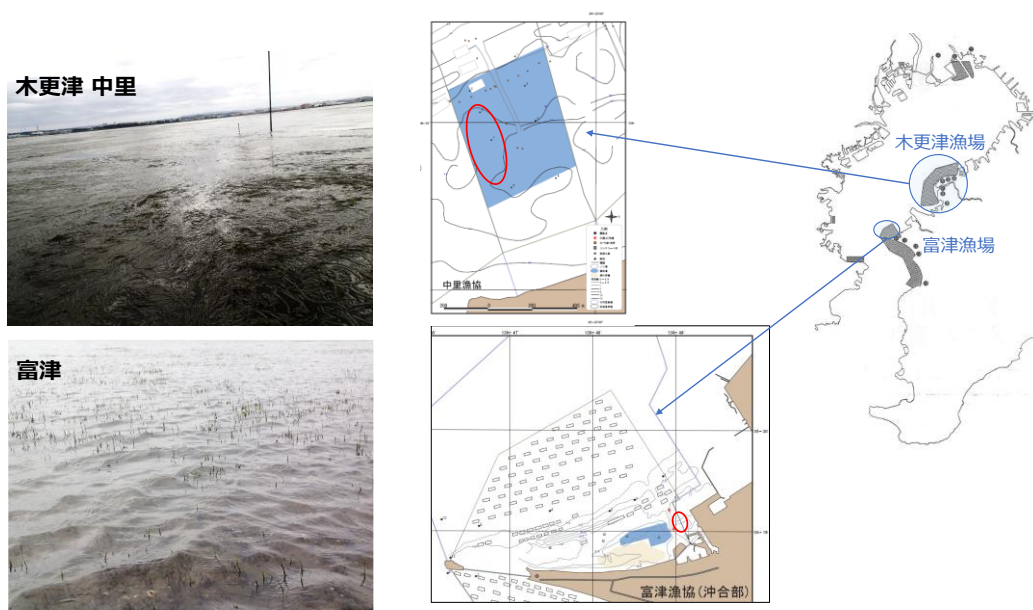


図8 干潟浅海域の漁業生産向上 調査海域

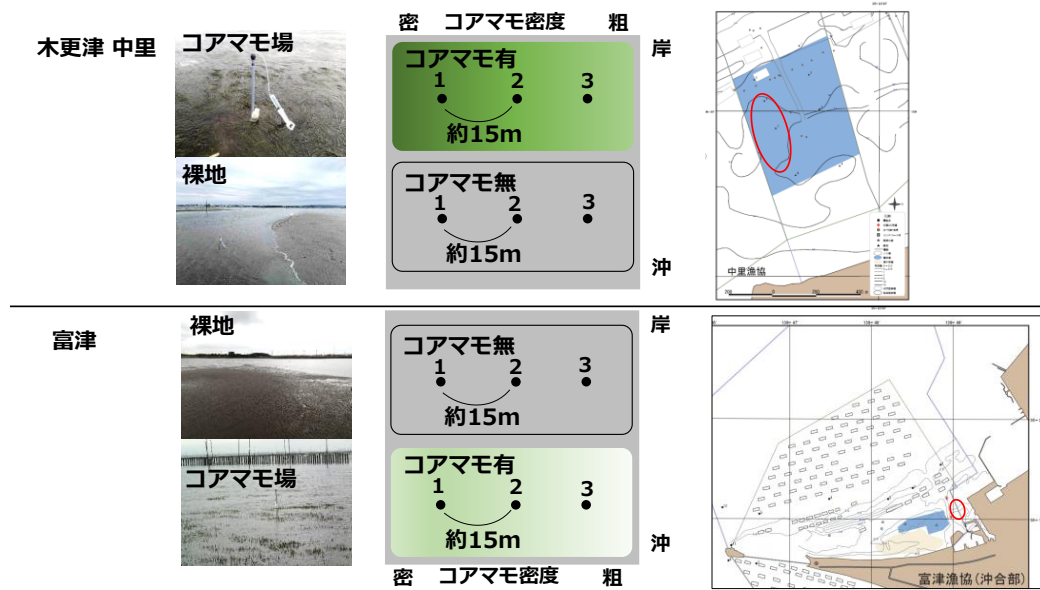


図9 干潟浅海域の漁業生産向上 調査点図

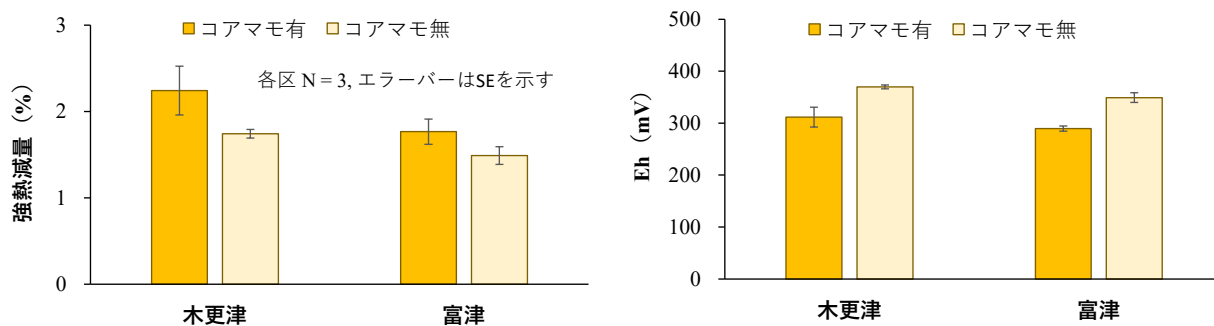


図10 干潟浅海域の漁業生産向上 底質の強熱減量とORP

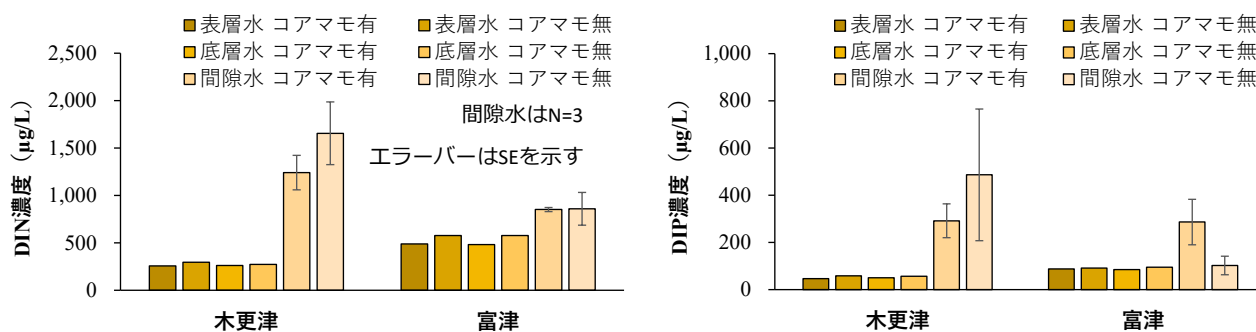


図11 干潟浅海域の漁業生産向上 栄養塩類濃度 (左 DIN, 右 DIP)

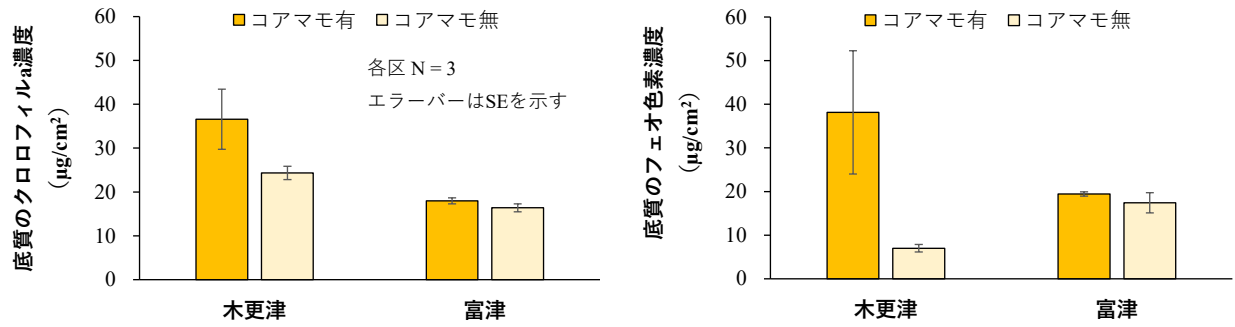


図 12 干潟浅海域の漁業生産向上 底質の色素濃度 (左 クロロフィル a, 右 フェオ色素)

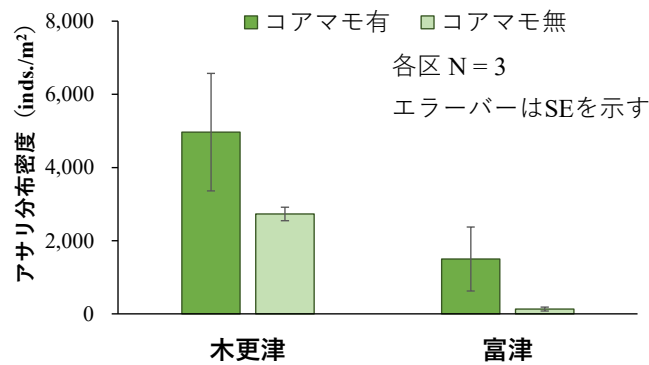


図 13 干潟浅海域の漁業生産向上 アサリ分布密度

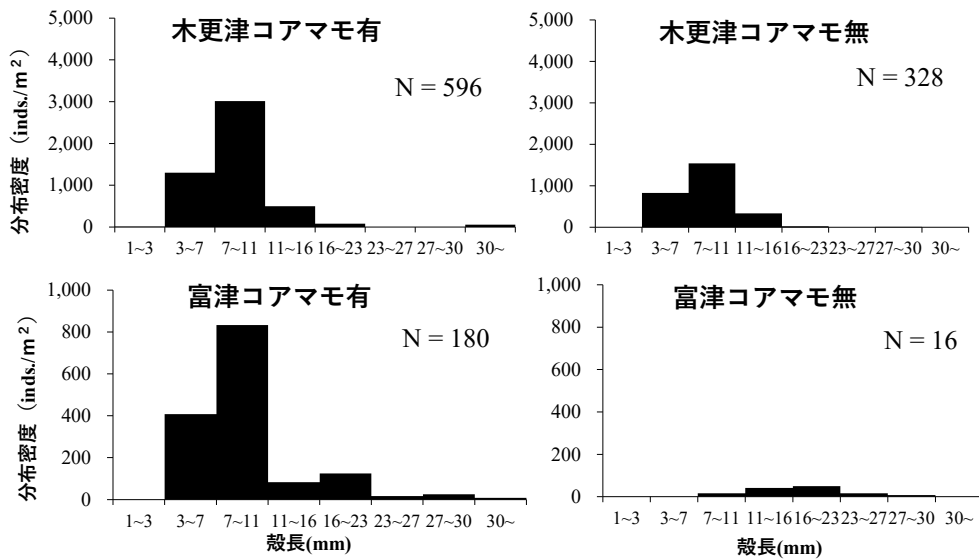


図 14 干潟浅海域の漁業生産向上 アサリ殻長組成

表1 マウンド効果 調査点位置と水深

調査点名		緯度	経度	水深m	水質	採泥	桁網
五井	5m	N35° 31.72′	E140° 02.77′	6	○	○	○
	10m	N35° 31.75′	E140° 02.85′	10	○	○	○
	15m	N35° 31.81′	E140° 02.56′	15	○	○	○
北袖	マウンド上1	N35° 29.19′	E139° 59.16′	10	○	○	○
	マウンド上2	N35° 29.16′	E139° 59.21′	9	○	○	
	マウンド上3	N35° 29.14′	E139° 59.26′	10	○	○	
	マウンド上4	N35° 29.03′	E139° 59.53′	8	○	○	
	マウンド下	N35° 29.25′	E139° 59.29′	14	○	○	○
	岸 10m	N35° 28.78′	E140° 02.85′	10	○	○	
養老川河口	5m	N35° 32.81′	E140° 03.89′	6	○	○	○
	10m	N35° 32.88′	E140° 03.67′	10	○	○	○
	15m	N35° 32.97′	E140° 02.69′	12	○	○	○

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	
	約5m	約10m	約15m	約5m	約15m	マウンド上	マウンド下
2025/6/9	○	○	○	○	○	○	○
2025/6/20	○	○	○	○	○	○	○
2025/9/24	○	○	○	○	○	○	○
2025/11/10	○	○	○	○	○	○	○
2025/11/26	○	○	○	○	○	○	○
2025/12/17	○	○	○	○	○	○	○
2026/1/29	○	○	○	○	○	○	○

○：実施、 -：未実施

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 (2025 年)

分類	種名	養老川河口			五井		北袖		合計
		約5m	約10m	約15m	約5m	約15m	マウンド上	マウンド下	
魚類 (20種)	アミメハギ					1	10	1	12
	カタクチイワシ						1		1
	カワハギ					2			2
	キララハゼ						4	11	15
	クサフグ	4	1		5	1			11
	クロイシモチ						1		1
	クロダイ					1		1	2
	コショウダイ						1		1
	コモチジャコ							3	3
	シロギス					1	5	5	11
	セミホウボウ		1						1
	テンジクダイ							26	26
	ニベ	1							1
	ハタタテヌメリ	11	16	23	7	21	114	128	320
	ヒメハゼ					1	4		5
	マアナゴ							1	1
	マコガレイ	13	58	54	6	34	32	49	246
	マゴチ	4	4				3	1	12
	マハゼ	16	5	2				3	26
	メイトガレイ	1			2	1	2		6
甲殻類 (16種)	イシガニ	1			2	4	7	3	17
	イッカククモガニ	32	16	13	5	25	54	5	150
	エビジャコ	9	7	2		17	21	19	75
	オニテッポウエビ							4	4
	ガザミ	1	1	1		1		13	17
	ケブカエンコウガニ							7	7
	サメハダヘイケガニ		1			2	1	2	6
	サルエビ	1	1				5	3	10
	シャコ		1	15				31	47
	ジュウイチトゲコブシ							13	13
	テッポウエビ							4	4
	テナガコブシ							12	12
	ヒメガザミ					4	6	17	27
	ヒライソガニ	3			3	6	2	1	15
	ヒラテコブシ	1	1	1		2	2	6	13
	マルバガニ						1		1
頭足類 (3種)	ダンゴイカ		1						1
	テナガダコ							1	1
	マダコ					12	2		14
巻貝類 (6種)	アカニシ	1			7	8	1		17
	アラムシロ	24				1			25
	キヌボラ	12							12
	コロモガイ						13	28	41
	ツメタガイ				1				1
	モミジボラ						1		1
二枚貝類 (9種)	アカガイ	4	1	1			1		7
	アサリ	69	4	1		1	1		76
	カラスノマクラ	3							3
	ゴイサギガイ	2						1	3
	サルボウガイ	23		1		2	6	1	33
	チヨノハナガイ	6	4					1	11
	トリガイ	55	49	22			14	46	186
	ホトトギス	1				5	1	1	8
	ホンビノスガイ	61	71	38					170
合計		359	243	174	38	153	316	448	1731

課題番号：Ⅱ－３）②

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

宇都康行

水産研究・教育機構水産技術研究所

渡部諭史

【背景・目的】

45 年以上にわたり水質総量削減政策が実施されてきた東京湾では、全窒素や全リン等の水質指標が改善されてきたが、アサリの漁獲量やノリの生産量は大きく減少してきている（柿野、2021）。石井（2021）は 2000 年前後と 2012 年前後のリン酸態リンの湾全体での存在量を比較し、中下層では大きく増加した一方、上層では減少したことを示した。栄養塩の偏在の問題とともに上層での栄養塩不足による漁業資源の減少が懸念されている。一方、初夏から秋季にかけて発生する貧酸素水塊の規模は必ずしも縮小したとは言えず、貧酸素水塊や青潮による魚介類のへい死は漁業資源減少の主因の一つと考えられる。

環境省では第 9 次水質総量削減の基本方針から、総量削減から海の豊かさに配慮した、きめ細やかな水環境管理に舵を切りつつあり（中央環境審議会水環境部会総量削減専門委員会、2021）、第 10 次水質総量削減の在り方の検討においてもその方向性が踏襲されている（中央環境審議会水環境部会総量削減専門委員会、2026）。国土交通省水管理・国土保全局下水道部（2023）は下水処理水を活用した栄養塩類の能動的運転管理に関するガイドライン（案）を示している。また、伊勢湾・三河湾では栄養塩類管理の必要性が議論され、栄養塩管理方策の提言が示されている（水産庁、2024）。下水処理の緩和運転を含む様々な方策を組み合わせ、栄養塩の適切な確保による豊かな海の実現と水質保全とのバランスをとり、良好な水環境の創出に向けた、栄養塩管理方策の検討が期待されている。

東京湾においては上層での栄養不足の指摘があるものの、貧酸素等の水質上の課題が未だ深刻であり、栄養塩管理方策の主軸を下水処理の緩和運転に置くことは困難な面があり、その検討には地域毎のよりきめ細やかな効果や影響への配慮に基づく検討が不可欠である。また、藻場・干潟の再生・創出による生物生息場の確保とこれらの場での有機物分解の促進により上層への栄養塩供給を増加させるといった、様々な方策の検討が必要と考えられるが、その効果や影響を検討する際には下水処理放流水等の他の供給源との比較に基づくわかりやすい評価が求められている。

以上の背景を踏まえ、本研究ではこれらの課題の検討に有用な数値モデルシステムを構築し、栄養塩管理方策の検討を行うことを目的としている。令和 4 年度には、外洋影響を含む湾全体の検討と漁場区スケールのきめ細やかな検討が可能な数値モデルの選定に関する検討を行い、物理（流動）モデルとして 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）を、生態系（生物地球化学）モデルとして、ERSEM（Butenschön ら、2016）を、物理モデルと生態系モデルのモデルカプラーとして FABM（Bruggeman・Bolding、2014）を採用することとした。令和 5 年度には、河川水、下水処理水、外洋水のそれぞれを起源とする栄養塩を染料や粒子に見

立て、染料を用いた移流拡散計算と PyLag (Uncles ら、2020) による粒子追跡計算による、栄養塩供給ポテンシャルの推算手法を検討した。令和 6 年度には、下水処理放流水等の境界条件の整備、数値計算の前処理・後処理（プレポスト）ツールの整備を行うとともに、生態系モデルのパラメータチューニング法として、鉛直 1 次元モデル GOTM (Umlauf・Burchard、2005) と ERSEM を FABM で連成させ、パラメータ最適化ツール Optuna (Akiba ら、2019) を用いた計算システムを構築し、それを ERSEM-FVCOM に拡張したプロトタイプシステムを検討した。

令和 7 年度は、河川水、下水処理放流水、外洋水、および干潟・浅場等の底質からの溶出それぞれを起源とする栄養塩供給ポテンシャルを評価するため、染料（DYE）を用いた FVCOM-DYE モデルを拡張する。まず、地下水モジュールを実装することで底質からの溶出による栄養塩供給を模擬し、消滅項を導入することで供給源から各漁場区へ到達する間に植物プランクトンによって消費される栄養塩量を考慮可能なモデルを提案し、栄養塩供給ポテンシャルの評価手法の確立に向けた検討を行う。

【方法】

(1) 地下水モジュールと消滅項を考慮した FVCOM-DYE モデルの構築

FVCOM の地下水機能を拡張し、海底からの栄養塩溶出フラックスを DYE 計算に導入した。底泥間隙水から水柱への栄養塩（DIN）供給フラックスを間隙水の DIN 濃度と上向き流速の積として計算する手法を実装した。間隙水の DIN 濃度と流速は干潟・浅場における溶出試験等を対象とした既往研究に基づき検討した (Kuwae ら、1998、2003 ; Usui ら、1998)。具体的な対象としては、栄養塩供給が期待される木更津のコアマモ場と、広域からの溶出が想定される湾奥中央の底質域を選定することとした。一方、下水処理水等の栄養塩供給起源から放流された栄養塩が対象とする漁場区に到達するまでには植物プランクトンにより栄養塩の消費が起り、到達までの時間が長いほどその影響は大きいと想定される。この過程は複雑であるが、栄養塩不足の懸念が特に指摘される冬季を前提として、この過程を簡易的に考慮するための 1 次の消滅項を実装した。消滅項の速度を規定する係数の設定に際しては、冬季の東京湾における一次生産の文献値と表層 DIN 濃度から半減期を推定することとし、いくつかのケースを設定した感度分析を取り入れることとした。

(2) 起源別の栄養塩供給ポテンシャル評価手法

河川水、下水処理放流水、底質溶出（地下水モジュール）、および外洋水を対象として、対象とする漁場区における起源別の栄養塩供給ポテンシャルを定量的に評価する手法を検討した。基本的には各供給源から放流される栄養塩を染料に見立て、供給源別の栄養塩の移流拡散過程を計算するものであるが、時系列の計算結果に対し適切な時間スケールで平均化することで、供給源別の栄養塩濃度と栄養塩寄与率を空間分布として評価できるようにした。これにより、東京湾の任意の海域において、起源別の栄養塩供給ポテンシャル評価が可能となるとともに、指定した漁場区における起源別の栄養塩濃度と寄与率を把握することが可能となる。また、線形性の仮定から、例えば、下水処理場の緩和運転による栄養塩濃度の上昇に伴う栄養塩供給の増分については再計算をすることなく、緩和による増分の寄与を評価することが可能となった。

以上の評価は栄養塩の保存則が成立することを仮定したもので、栄養塩供給ポテンシャルの上限値を評価していると考えられる。この評価を実際の過程に近づけるため、(1) で述べた植物プランクトンによる栄養塩消費を模擬した消滅項を有効にして半減期をパラメータとした計算を行

い、消滅項の考慮の有無や半減期の影響の評価を行った。

ところで、栄養塩濃度が高くても流速が小さい場合には十分な栄養塩が供給されているとは言えない状況が生じうる。このような滞留域においては濃度のみを用いた評価は不十分な可能性がある。濃度と流速の積で表現される栄養塩フラックスを指標とする方策が考えられるが、フラックスの値が同一であっても濃度と流速の組み合わせによってその意味は異なる。対象とする海藻等によっても指標は異なると考えられることから、本研究では要注意海域の抽出を目的とした簡易な手法として、パーセンタイル順位差（PRD）を採用することとした。PRD は濃度のパーセンタイル順位からフラックスのパーセンタイル順位を引くことで求めるもので、例えば、表層全格子（全ノード）の中で、対象としたノードの濃度順位が 80 パーセンタイル（上位 20%）で、フラックス順位が 30 パーセンタイルとすると、その順位差は 50 パーセンタイルと計算され、相対的に濃度値が流速より大きく、滞留域である可能性が示唆されるノードと評価される。パーセンタイル順位差マップを作成することで、東京湾における滞留域の可能性が程度と合わせて抽出・評価できると考えられる。

（3）数値計算条件の概要

図 1 に示す通り、栄養塩に見立てた染料（DIN 相当濃度、 $\mu\text{mol/L}$ ）供給は、12 の河川水（荒川、隅田川、江戸川、多摩川、鶴見川、真間川、海老川、養老川、小櫃川、小糸川、村田川、花見川）、6 つの下水処理放流水（芝浦、砂町、有明、葛西、森ヶ崎、木更津）、外洋水（開境界）、および底質溶出（木更津コアモモ場）の合計 21 メンバーで構成した。各供給源の DIN 濃度は実測値を参考に設定し、下水処理放流水については東京都下水道年報等の自治体の年報を参照し、年間値を使用した。物理場の計算は 2021 年 1 月を対象とし、下水処理放流水については 2001 年から 2003 年と 2021 年から 2023 年を対象として、経年影響についても検討した。

（4）栄養塩管理方策検討委員会の開催

東京湾における水産資源や水環境に係る課題について協議し、栄養塩管理方針の検討を進めていくため、専門家で構成される検討委員会を年 2 回開催した。

【結果】

（1）起源別染料濃度と寄与率の平面分布

2021 年 1 月の月平均表層染料濃度（DIN 相当、 $\mu\text{mol/L}$ ）の起源別コンターマップを図 2 の上側 3 段に示す。全起源合計（All）は湾奥北西部で $100 \mu\text{mol/L}$ 以上の高濃度となり、湾口に向かって減少する。起源別では、荒川（ $60 \mu\text{mol/L}$ 以上）、江戸川、森ヶ崎（ $40 \mu\text{mol/L}$ 以上）の寄与が大きく、外洋水（OBC）は湾口部の富津岬以南において支配的であるが $4 \mu\text{mol/L}$ 程度以下と値としては低くなっている。1 級河川の河川水や東京都の主要な下水処理放流水は河口や放流口だけでなく湾全体への寄与が大きい様子が確認される。一方、中小河川の河川水や木更津の下水処理放流水は河口や放流口周辺に集中した分布を示している。木更津のコアモモ場の溶出（Groundwater）の寄与は小さいが局所的には有意な値を持っている。

図 2 の下側 3 段は同じ結果を寄与割合（%）で示したものである。全起源合計（All）は全域で 100%となっており、起源別はそれぞれの起源による寄与の空間分布を示している。湾口付近では外洋水の影響が顕著であり、東京湾の東岸は 1 級河川や東京都の下水処理場から離れていることもあり、養老川や小櫃川といったローカルの中小河川の寄与が大きい様子が確認される。さらに、木更津の下水処理水もローカルには貢献が大きく、木更津コアモモ場からの溶出の寄与も確認で

きるレベルとなっている。栄養塩不足の懸念が高い東京湾南部の房総半島側ではローカルの供給源の寄与の重要性が認識される。この結果は海区毎のきめ細やかな栄養塩供給対策がローカルには有効であることを示唆するものである。

(2) 漁場区における起源別の染料濃度と寄与率

三番瀬、木更津、富津岬北側、富津岬南側の4漁場区を対象として、起源別の染料濃度とその寄与率(%)を図3に示す。濃度の最上段は全起源の和で、漁場毎の栄養塩濃度ポテンシャルを表している。下端は起源別の寄与を示しており、各漁場における寄与割合の高い栄養塩供給源の特定や評価に有用であり、三番瀬では海老川(25%)、森ヶ崎(21%)、芝浦(14%)が主要な寄与源であり、下水処理放流水が全体の約50%を占めている。木更津では森ヶ崎(16%)、小櫃川(14%)、花見川(12%)の順に寄与が大きい。富津岬北側と南側は基本的には木更津と類似した起源別寄与になっているが、富津岬南側では外洋水の影響が最大の21%となっている点が特徴的である。一方、富津岬の南側は北側と比較して濃度が顕著に低下しており、相対的に外洋水の影響が大きくなっているといえる。これらの結果を用いて各供給源の染料濃度を上昇させた場合の各漁場区における濃度や寄与の変化を計算することが可能であり、施肥や下水処理場の緩和運転による効果のポテンシャルを簡易的に見積もるのに便利である。なお、これらの結果は河川流量が相対的に少ない冬季のポテンシャル評価であることに留意する必要がある。

(3) 消滅項(半減期)を考慮した栄養塩供給ポテンシャルの変化

これまでと同様の計算に消滅項を考慮した検討を行った。冬季を想定した半減期124日のケースでは、全濃度は4-7%程度の減少に留まるが、半減期を10日とした場合は40~50%程度の大きな減少となった。一方、起源別寄与割合(%)の変化分の空間分布を図4に示すが、各海区における起源別の寄与割合の変化は数パーセント程度に留まった。木更津下水処理放流水を見ると木更津およびその南側の海域では寄与割合が上昇しており、これは半減期を考慮することでより近傍の供給源の寄与が高まることを意味するが、その差は数パーセント程度であることを示している。半減期を考慮することで染料濃度は顕著に小さくなる場合があるが、起源別の寄与割合への影響は軽微であることを示しており、これは本研究で提示した栄養塩供給ポテンシャル評価結果の堅牢性を示唆していると考えられる。ただし、本検討では冬季を想定し、栄養塩消費速度が空間一様であることを仮定していることに留意する必要がある。

(4) 下水処理の高度化による影響(20年前と現在の比較)

20年前から現在の東京都下水処理放流水の変化による起源別の染料濃度寄与割合(%)の変化の例を図5に示す。森ヶ崎の寄与割合は湾奥から湾口にかけて広範囲で7-10%低下しており、高度処理の進展が湾全体の栄養塩供給構造を変化させたことが空間的に確認される。一方で、芝浦・砂町などの他の処理場の寄与率は微増しており、森ヶ崎の大幅な削減に伴い他の発生源の相対的な割合が若干増加したことを反映している。特に中小河川や小規模な下水処理水の寄与割合がこの20年で若干高まっていると評価でき、このことはそれぞれの海区におけるローカルな取り組みにおいて、近隣の栄養塩供給源を用いた栄養塩増加対策の有効性が若干高まっていることを示唆している。

(5) パーセンタイル順位差(PRD)による栄養塩滞留域の評価

これまでと同様の計算において、染料濃度と染料濃度フラックスのパーセンタイル順位差(PRD)を全計算格子点について算出した結果を図6に示す。PRDが正の海域は、濃度順位がフラックス順位よりも高い、すなわち濃度が高いにもかかわらずフラックスが小さい滞留域を意味する。逆

に PRD が負の海域は、流速が大きく栄養塩の通過が卓越する領域である。湾奥北西部の三番瀬周辺および木更津沿岸部で PRD が 30-50 パーセントイル程度の正值を示し、これらの海域は栄養塩の滞留域である可能性が示唆された。一方、湾中央や湾口部では PRD が負値となり、栄養塩は速やかに輸送される様子が確認される。PRD が大きい海域は、栄養塩濃度が高いにもかかわらず栄養塩不足が起こりやすい可能性がある一方、近傍の供給源を用いた栄養塩管理の効果が発現しやすい可能性がある。

(6) 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 7 年 9 月 24 日および令和 8 年 1 月 27 日に開催した。両日とも、八木宏防衛大学校教授、山崎明人東日本信用漁業協同組合連合会監事を外部専門家として招聘し、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である。水産庁、東京大学、千葉県水産総合研究センター、神奈川県水産技術センター、水産研究・教育機構。

栄養塩管理においては有効性と水質等への負の影響を考慮する必要があるが、有効性に関しては実現可能性を考慮する必要がある。きめ細やかな水環境管理への流れがあるなか、漁場区毎に近隣で可能な対策を検討することおよびその効果を全体の中で相対化することの重要性が議論された。特に水産への貢献が期待されるコアマモ場の創出による栄養塩溶出フラックスや近隣の小規模な下水処理放流水のポテンシャルを把握することは有用であり、本委員会での検討内容を踏まえ、上記 (1) から (5) 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.
- 柿野純. 東京湾の環境とアサリ漁業 40 年. 青娥書房, 2021.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部. 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). 2023.
- 中央環境審議会水環境部会総量削減専門委員会. 第 9 次水質総量削減の在り方について (答申). 2021.
- 中央環境審議会水環境部会総量削減専門委員会. 第 10 水質総量削減 (検討中). 2026.
- 東京都下水道局. 下水道年報. 各年度.
- Akiba, T. Sano, S., Yanase, T., Ohta, T. Koyama, M. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework, arXiv: 1907.10902, 2019.
- 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. Atmos. Oceanic Technol., 20, 159-186, 2003.
- Butenschön, M., Clark, J., et al.: ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels. Geosci. Model Dev., 9, 1293-1339, 2016.
- Kuwae, T., Hosokawa, Y., Eguchi, N. Dissolved inorganic nitrogen cycling in Banzu intertidal sand-flat, Japan. Mangroves and Salt Marshes, 2, 167-175, 1998.
- Kuwae, T., Kibe, E., Nakamura, Y. Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an intertidal sandflat in Tokyo Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57, 929-940, 2003.

Usui, T., Koike, I., Ogura, N. Tidal effect on dynamics of pore water nitrate in intertidal sediment of a eutrophic estuary. J. Oceanogr., 54, 205-216, 1998.

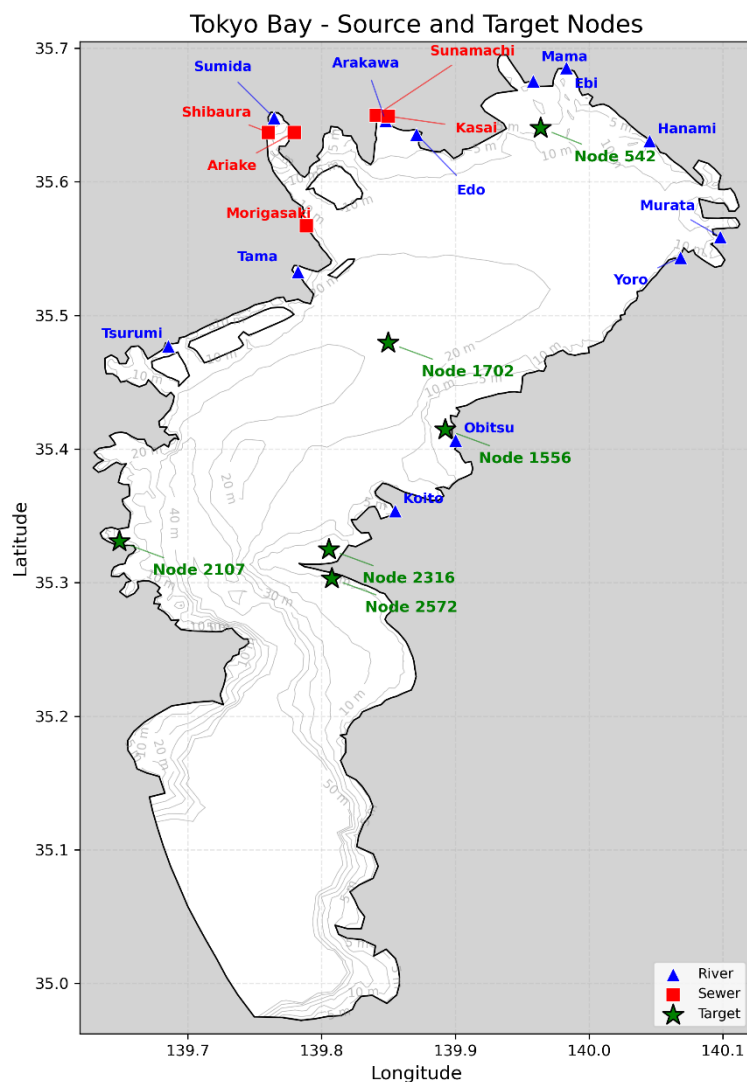


図 1 東京湾における本研究で対象とした河川水（赤）および下水処理放流水（青）。孤 Node の整数は計算格子におけるノード番号を示す。

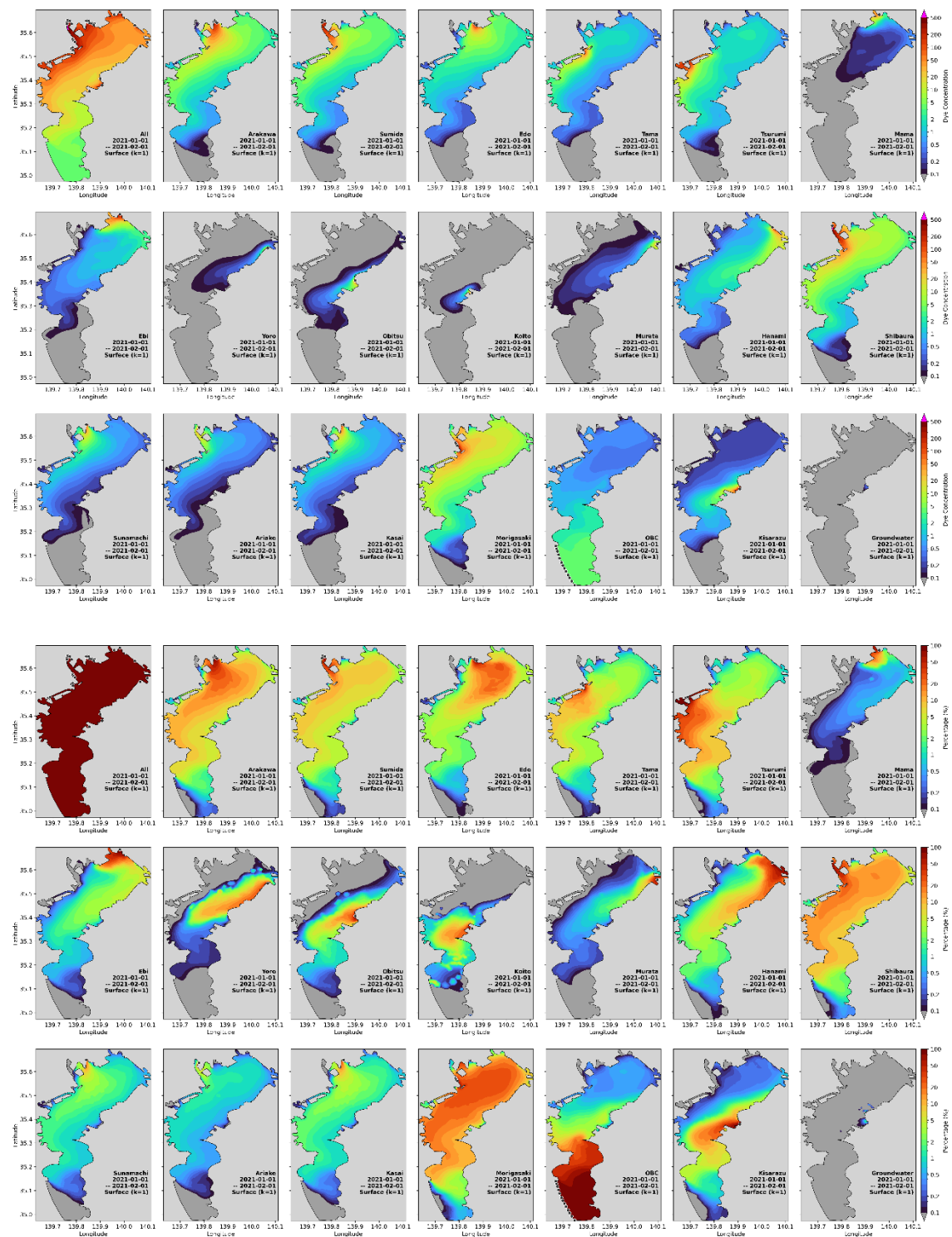


図2 2021年1月の月平均起源別表層染料濃度分布 (DIN 相当、 $\mu\text{mol/L}$) (対数スケール、上側3段) と寄与割合 (%) (対数スケール、下側3段)。それぞれ、上段：全発生源 (All)、荒川、隅田川、江戸川、多摩川、鶴見川、真間川、中段：海老川、養老川、小櫃川、小糸川、村田川、花見川、芝浦、下段：砂町、有明、葛西、森ヶ崎、外洋水 (OBC)、木更津、木更津コアモ場溶出。

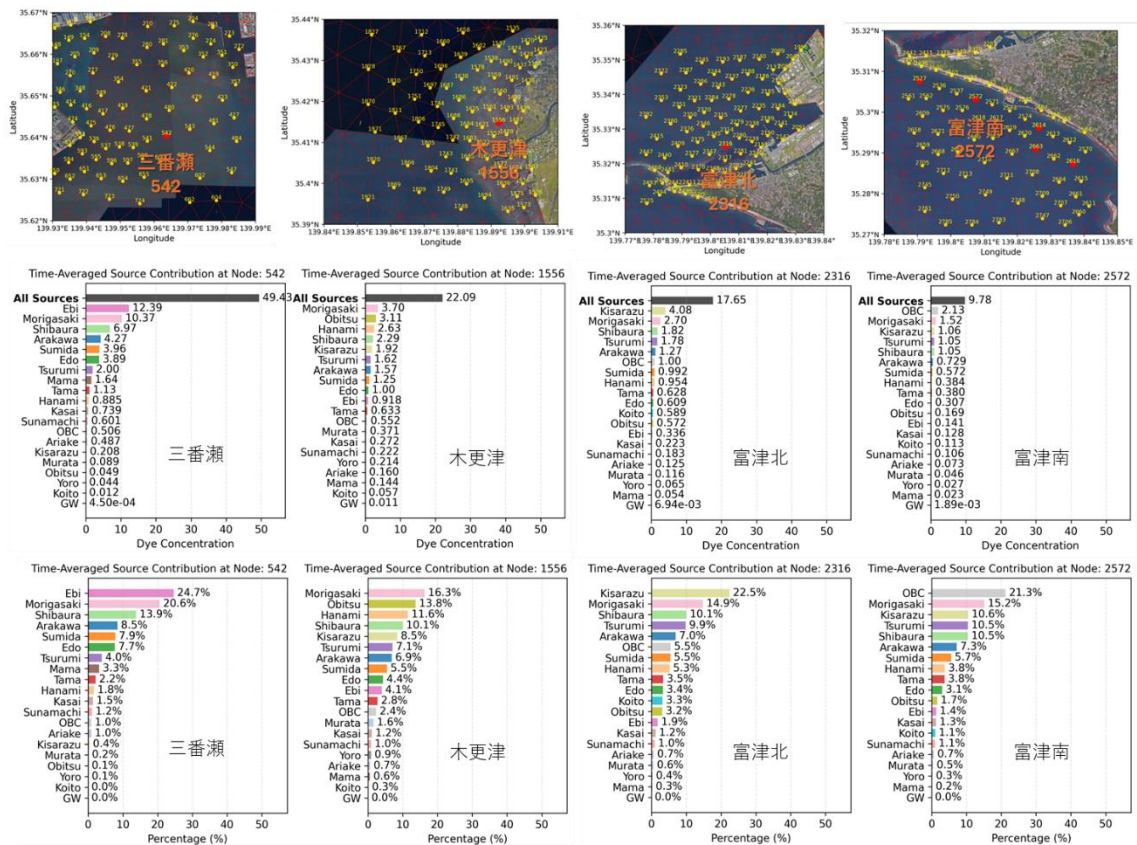


図3 三番瀬、木更津、富津岬北側、富津岬南側の4漁場区を対象とした、2021年1月月平均の起源別の染料濃度（中段）と寄与率（%）（下段）。

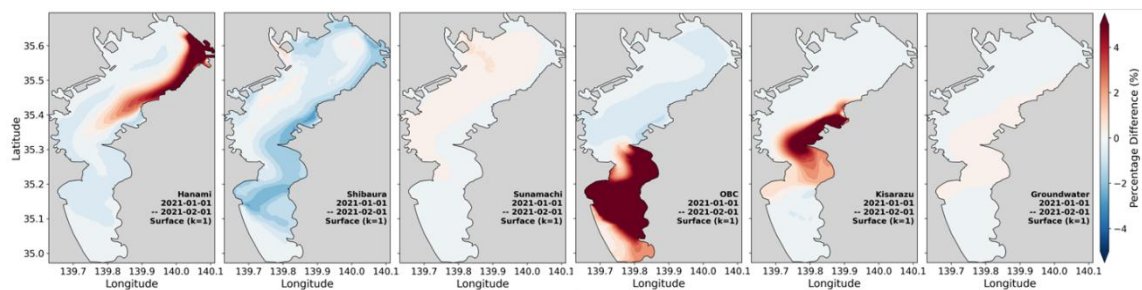


図4 消滅項（半減期）10日とした場合の2021年1月平均の表層における染料濃度寄与割合（%）の変化分。森ヶ崎、芝浦、外洋水、木更津下水処理放流水、木更津コアモ場の溶出を対象とし、青側は寄与が減少することを意味する。

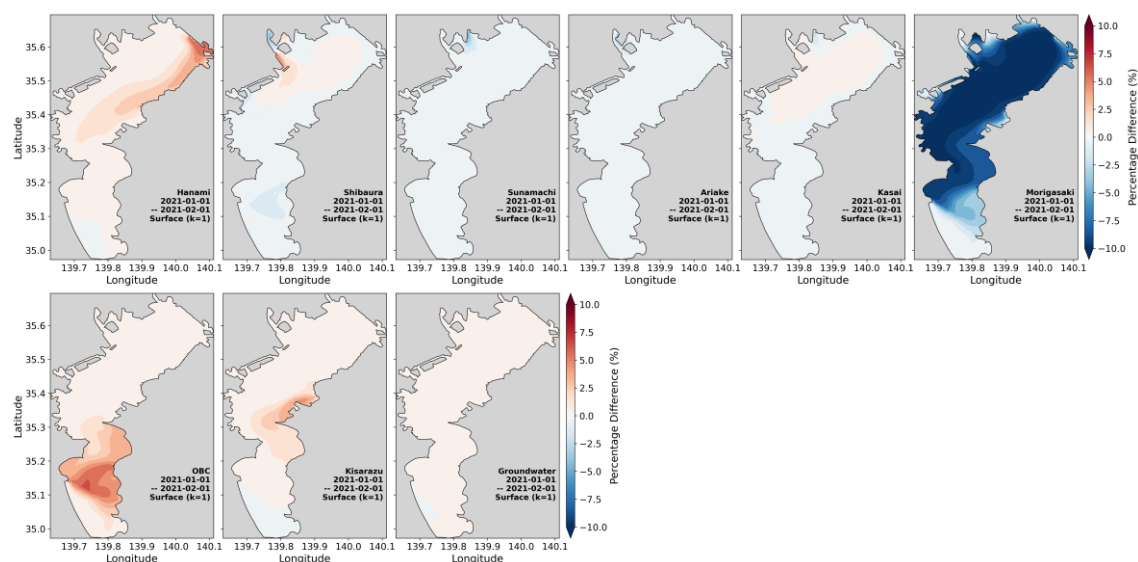


図5 20年前と現在の東京都下水処理放流水の変化による起源別染料濃度寄与割合(%)の変化。赤色側は寄与割合の増加を青色側は寄与割合の減少を示す。

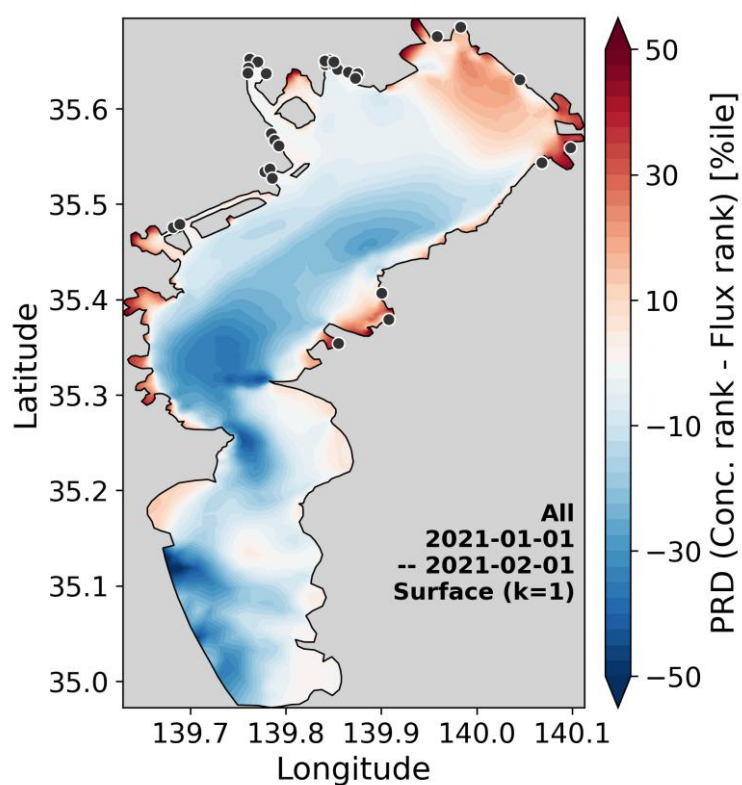


図6 パーセンタイル順位差($PRD = PR(\text{濃度}) - PR(\text{フラックス})$)のコンターマップ。正(赤)は濃度が高い割にフラックスが小さい栄養塩滞留域、負(青)は流速が大きく栄養塩が通過する領域を示唆する。