

課題番号：I－2）－イ

課題名：水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の解明

水産研究・教育機構 水産技術研究所

米田道夫，中村政裕

水産研究・教育機構 水産資源研究所

岡崎雄二，田所和明，河野悌昌，高橋正知

香川県水産試験場

植田悠太，高砂 敬，吉田 誠

広島大学

富山 毅

福井県立大学

山本昌幸

【背景・目的】

近年，瀬戸内海ではカタクチイワシやイカナゴなどの小型魚類の漁獲量の減少が顕著となっており，貧栄養化等の環境変化に伴う漁業生産の低迷が懸念されている。カタクチイワシをはじめ，多くの魚類は動物プランクトンを餌料として利用しているため，栄養塩等の水質環境が小型魚類の生産量に及ぼす影響を評価するには，動物プランクトンを介した水質環境と対象種の生産量の因果関係を明らかにすることが重要である。Yoneda et al. (2022) は約 20 年間に及ぶ定点調査などの解析結果から，燧灘におけるカタクチイワシの加入量の低迷には，動物プランクトンの種組成や現存量の変化が起因していることを明らかにした。これにより，①燧灘では栄養塩低下などの影響により生態学的栄養段階や捕食－被食関係が変化している可能性があること，②餌のプランクトンの質・量的変化が小型魚類の再生産機構に影響を及ぼしている可能性があること，などの新たな課題が見出された。そこで本課題では，燧灘および備讃瀬戸を主対象として，まず，調査船調査，漁獲物調査，既往知見などにより動物プランクトンおよび小型魚類の種組成，分布，漁獲量（加入量），食性，繁殖などの情報を整理する。次に，プランクトンや小型魚類などの炭素・窒素安定同位体比（SI）に基づいて，食物網のネットワーク構造を可視化し，海域間や過去（2000 年代）との類似点や相違点などを明らかにする。さらに，カタクチイワシやイカナゴなどの小型魚類の再生産機構について，栄養塩や餌料生物を含む生息環境を考慮した生態系モデルの開発に努めるとともに，野外調査や飼育実験等により必要なパラメータの抽出および改良を進める。最終的に，生態系モデルなどを利用しながら，燧灘および備讃瀬戸における栄養塩，餌料環境および小型魚類生産の変遷とそれらの関連性について考察を進める。

今年度は，まず燧灘のカタクチイワシおよび備讃瀬戸のイカナゴについて，卵・仔稚魚調査，餌料環境調査，漁獲物調査などから，それら魚種の卵・仔魚や動物プランクトンの出現状況，漁獲量（加入量）の経年変化，カタクチイワシ成魚肥満度の変動要因などに関する情報を整理した。次に，瀬戸内海の生態学的栄養段階の検証について，湾・灘海域における動物プランクトンの群集構造解析に向けた各種の現存量の分析を進めるとともに，カタクチイワ

シ体組織 SI のターンオーバーや濃縮係数の実験結果に基づいて、2000 年代における燧灘のカタクチイワシと餌生物の関係などを再検証した。さらに、2023 年 5 月に採取されたカタクチイワシの筋肉と卵巣の SI を 2000 年代のカタクチイワシや餌生物の SI と比較した。最後に、イカナゴの生産性検証のため、飼育実験によりイカナゴの脂質含有量と体サイズの関係、夏眠期の酸素消費量に及ぼす影響を調べた。さらに、既往知見に基づいて備讃瀬戸とその隣接海域である播磨灘のイカナゴにおける夏眠期の酸素消費量を比較した。本稿では、燧灘のカタクチイワシおよび備讃瀬戸イカナゴに関する調査結果、SI に基づく燧灘のカタクチイワシと餌生物の関係、夏眠期のイカナゴの酸素消費量に及ぼす影響について報告する。

【方法】

(1) 燧灘のカタクチイワシおよび備讃瀬戸のイカナゴにおける卵・仔稚魚調査、餌料環境調査、漁獲物調査

燧灘のカタクチイワシについて、4～9 月において丸特ネット、ノルパックネット、ボンゴネットなどを用いて卵仔魚調査および餌料環境調査などを行った。仔稚魚の発生月別漁獲加入尾数（加入尾数）を推定するため、漁獲された仔稚魚の耳石日齢解析から各发育段階の平均体長（体重）と日齢を求め、仔稚魚の漁獲量から各発生月の総個体数を推定した (Fujita et al. 2021)。Zenitani et al. (2007) に従って、ボンゴネットに基づく仔魚の調査結果から 5 月と 6 月の日間生残率を推定した。カタクチイワシの肥満度と餌生物の関係を調べるため、1993～2024 年 5～6 月に採取されたカタクチイワシ成魚（大羽）の肥満度（肥満度＝体重・ 10^6 ／被鱗体長³）の経年変化を調べるとともに、2015～2023 年に採取されたカイアシ類計 6 属（アカルチア、カラヌス、コリケウス、マイクロセテラ、オイトナ、パラカラヌス）の現存量を推定した (e.g. Uye 1982)。

備讃瀬戸のイカナゴについて、7 月および 12 月に空釣りこぎを用いて親魚調査を行った。夏眠期のイカナゴの密度減少に及ぼす夏季水温の影響を調べるため、2016～2024 年（2017 年除く）7 月と 12 月の親魚密度から減少割合を求め（割合＝ $1 - (12 \text{ 月密度} / 7 \text{ 月密度})$ ），8～9 月の屋島湾の平均水温との関係を調べた。

(2) 燧灘カタクチイワシと餌生物の関係（SI に基づく検証）

カタクチイワシの筋肉および卵巣の SI のターンオーバーなどを明らかにするため、SI の異なる 2 種類の配合飼料を用いて、トレーサー実験を行った (e.g. Tanaka et al. 2016; Yoneda et al. in submitted)。標本には人工種苗を用い、40 日齢から SI の低い配合飼料を給餌した後、61 日齢（稚魚期）、81 日齢（未成魚）、131 日齢（成魚）時に SI の高い配合飼料に切り替え、筋肉では 100 日間、成魚の卵巣では 50 日間のモニタリングを行った。その結果、筋肉の半更新時間は发育が進むにつれて遅くなること（稚魚＝7 日；未成魚＝13 日；成魚＝28 日）、実験期間中の筋肉 SI の変動幅（収束値－初期値）も发育に伴って小さくなること（稚魚との割合：未成魚＝0.8；成魚＝0.2～0.4）、その一方で成魚の卵巣は餌切替後 10～20 日で収束すること（半更新時間＝3 日）がそれぞれ示された（米田ほか 未発表）。

2000 年代のカタクチイワシと餌生物の関係を再検証するため、銭谷ほか (2013) で報告された情報に基づいて、カタクチイワシの发育段階を 4 つに区分けした（体長：仔魚＜35mm；稚魚＜50mm；未成魚＜80mm；成魚≥80mm）。さらに、2023 年 5 月に採取されたカタクチイワシ雌成魚の筋肉と卵巣の SI 分析を行い、2000 年代のカタクチイワシ成魚や餌生物の SI と比

較した。

(3) イカナゴの夏眠期における酸素消費量に及ぼす影響

イカナゴの脂質と体サイズの関係性を調べるため、夏眠前～夏眠後の飼育魚計 80 個体の筋肉の脂質含有量と水分含有量を次のように分析した (米田ほか, 未発表)。筋肉の一部をエッペンチューブに収容し、60℃で 3 日間乾燥させた後、乾燥前後の筋肉重量から水分含有量を求めた。次に、乾燥させた筋肉からクロロフォルム・メタノールにより脂質を抽出し、脂質含有量を求めた。混合効果モデル (採集時期をランダム効果) により脂質含有量 (L) と水分含有量 (W) の関係を調べたところ、有意な負の相関が認められた ($L = -0.084 - 0.473 \cdot \ln(W)$, $p < 0.001$)。

夏眠前から夏眠中の飼育魚計 218 個体 (0 才=160 個体 ; 1 才=58 個体) を用いて、脂質含有量に及ぼす体サイズの影響を調べた。各個体の筋肉の水分含有量は、上述した方法により求めた後、脂質含有量と水分含有量の関係式から脂質含有量を推定した。混合効果モデル (採集時期をランダム効果) により脂質含有量に及ぼす体長と肥満度の影響を調べた。

夏眠期のイカナゴの酸素消費量を調べるため、8～9 月に夏眠中の飼育魚計 39 個体を用いて次の処理を行った。10メスフラスコにガラスビーズ (約 0.8mm) を約 500ml 敷き詰めた後、夏眠中のイカナゴ 1 個体を各メスフラスコへ収容し、1 昼夜馴致させた。実験では、25～28℃の水温下において、メスフラスコを密栓し、100～150 分間放置させた。DO メータにて実験開始 (密栓前) と終了時の溶存酸素量から酸素消費量を推定した。個体当たり 3～4 水温帯の酸素消費量を繰り返して計測した (計測には 6 時間～1 昼夜の馴致期間を設けた)。酸素消費量と水温の関係に及ぼす影響を混合効果モデル (個体をランダム効果) により評価した。備讃瀬戸と播磨灘のイカナゴの夏季における酸素消費量の比較を行うため、Akai & Yoneda (2021) および Nishikawa & Okamoto (2021) で報告された夏眠前のイカナゴのデータを用いた。飼育実験で得られた脂質含有量と体サイズの関係から、各海域の脂質含有量と体長の間関係を求めた。備讃瀬戸 (屋島湾) と播磨灘 (明石海峡) の夏季 (8～9 月) の平均水温および飼育実験の成果に基づいて、各海域のイカナゴの酸素消費量を推定した。

【結果】

(1) カタクチイワシとイカナゴの野外調査と加入量 (漁獲量) の動向

2024 年の燧灘カタクチイワシについて、4 月に卵、仔魚が出現し始め、5 月と 7 月に出現のピークが認められた (図 1)。2024 年の卵・仔魚密度は 2022 年および 2023 年よりも高かった。カイアシ類密度 (親魚の餌) は 2023 年と比べて低く、おおむね平年並みであった。当該海域の主要な発生時期である 5 月と 6 月の加入状況について、仔稚魚の漁獲尾数 (加入尾数) は約 8.6 億尾で過去 4 番目に低く、特に 5 月発生の漁獲は 0.01 億尾に留まった (図 2)。卵・仔魚調査の結果を併せると、近年の傾向と同様に、2024 年においても卵・仔魚密度と加入尾数の間にはミスマッチが生じていることが示された。ボンゴネット調査の結果に基づいた発育初期 (～約 14 日齢) の 2024 年の日間生残率は、5 月で約 50%、6 月で約 63%と推定された (図 3)。加入尾数と日間生残率の関係について、2001～2005 年と 2016～2020 年では強い正の相関 ($R^2=0.69$) が認められた。しかし、2021 年以降では日間生残率に拘らず加入尾数は少ないという現象が続いており、全期間における加入尾数と日間生残率の相関関係は低かった ($R^2=0.33$)。Yoneda et al. (2022) では、成魚の餌の減少に起因した母性効果 (ボトムアップ

プ効果)によって、発育初期の生残や成長に負の影響を及ぼしていることが示唆されている。その一方で、昨年度の報告(米田ほか, 2024)において、過去2番目に加入の悪かった2017年について、仔稚魚の耳石解析から成長の遅い個体に対しての強い選択圧(トップダウン効果)の可能性が示されており、過去3番目に加入の低かった2022年にも同様の現象が見いだされている(植田, 未発表)。これらのことから、近年の加入量の低迷には、ボトムアップ効果とトップダウン効果の複合的な要因が作用している可能性が示唆された。1993~2024年のカタクチイワシ成魚の肥満度は経年的に減少していることが明らかになり、2024年は平年値に比べて低かった(図4左)。一方、2018年と2023年の肥満度は平年値を上回っていた。そこで、2015~2023年において成魚の餌となるカイアシ類の現存量を調べたところ、2018年と2023年には *Calanus sinicus* の出現割合が高かった(図4右)。なお、2023年のカタクチイワシ成魚の胃内容物調査においても *C. sinicus* が高い割合で出現した(岡崎, 未発表)。*C. sinicus* はカタクチイワシ成魚において重要な餌料生物であることから(Yoneda et al. 2022)、2018年と2023年の高い肥満度は *C. sinicus* の高出現が影響していると推察された。

備讃瀬戸で実施された夏季(7月)と冬季(12月)のイカナゴ親魚調査について、香川県水産試験場(2013~2024年)および水産機構(2016~2024年; 2017年7月欠損)による2024年の親魚密度はいずれも過去最低を記録し、7月では0.4尾/回(香川水試)と0.7尾/回(水産機構)、12月では0.2尾/回と0.06尾/回であった(図5)。屋島湾の夏季(8~9月)の平均水温は2013年以降で過去最高(27.4℃)であった。夏・冬季の親魚調査から求めた減少率と屋島湾の夏季水温の関係には有意な正の相関が認められた(図6)。2024年では減少率および夏季水温ともに最も高かったことが明らかになり、夏眠期における死亡率が高かったことが示唆された。なお、2024年1~2月のイカナゴ仔魚調査について、仔魚の採集個体数は昨年度と同様に過去最低となっていることから、2025年の備讃瀬戸におけるシンコ漁の動向に注視する必要がある。

(2) 燧灘カタクチイワシと餌生物の関係

2006年5~7月について、小型カイアシ類の窒素SIは9~10‰、炭素SIは-21~-19‰であり、時期を経るにつれて上昇していた(図7左)。これは、植物プランクトンの増殖速度が上がるとSIも上昇すること(Takahashi et al. 1991; Laws et al. 1998)、*Oithona*のような雑食性カイアシ類の食性が植食性から肉食性へ変化していること(銭谷ほか 2013)に起因していると考えられる。一方、仔稚魚の筋肉のSIは同月の小型カイアシ類のSIと比べて、窒素SIで3~4‰、炭素SIで約1‰高く、餌のSI上昇に伴って、仔稚魚のSIも上昇していた。発育に伴うカタクチイワシ筋肉のSIの変化を調べるため、2004年5~8月の仔魚、稚魚、未成魚のSIを調べたところ、発育段階を経るにつれてSIが上昇していることが示された(図7右)。これは上述したカイアシ類のSIが春から夏に上昇することに加えて、発育に伴い餌の選択性(サイズ、種)が拡大することが影響していると考えられている(銭谷ほか 2013)。一方、体長50~70mmの春発生(主に5月)の未成魚は3~4カ月齢であることが示されている(河野ほか 2024)。燧灘では4月中~下旬からカタクチイワシ卵が出現するが、2004年に漁獲された仔稚魚には4月以前に発生した個体は認められなかったことが示されている(Fujita et al. 2021)。このため、同年6月に採取された未成魚は昨年生まれの標本であると推察された。2004~2006年の4~8月に採取されたカタクチイワシについて、各発育段階のSIを調べたと

ころ、仔魚～未成魚の SI は時期および発育段階に伴って上昇しており、8 月の標本の SI が最も高かった (図 8 左)。その一方で、6 月に採取された成魚では、炭素 SI が比較的高い値を示しており、仔魚～未成魚の SI のトレンドから外れていた。飼育実験から、成魚は摂取した餌の栄養を卵生産へ速やかに利用するため、筋肉の SI は現場の餌ではなく、過去の餌履歴の影響を受けることが判明している (Yoneda et al. in submitted; 米田ほか 未発表)。瀬戸内海のカタクチイワシでは 5 カ月齢から成熟・産卵を開始することを考慮すると (河野ほか 2024), 春に発生したカタクチイワシは、筋肉の SI が夏季に最も高くなった後、秋以降に成魚として成熟・産卵を開始することから、筋肉の SI は高い範囲で緩やかに変動すると予想される。一方、2023 年 5 月に採取されたカタクチイワシ成魚の筋肉 SI は、2000 年代の成魚の筋肉 SI と比較して、炭素 SI で低く、窒素 SI で高い傾向が認められ、2004 年 6 月に採取された未成魚の筋肉の SI と類似した (図 8 右)。近年では春発生 (5～6 月) のカタクチイワシの減少により、当該海域では秋発生 (9～10 月) が主体となって翌年の春～夏に産卵しているのではないかと考えられている。上述したように、餌となるカイアシ類の SI は水温と密接に関係していることから、夏から冬にかけてカイアシ類の SI は減少すると予想される。このため、秋発生のカタクチイワシ筋肉の SI は発育に伴って減少した後、翌年の春に成熟・産卵を開始することで、低い範囲で緩やかに変動するのではないかと考えられる。その一方で、2023 年 5 月に採取されたカタクチイワシ成魚の卵巣 SI および飼育実験による卵巣 SI の濃縮係数から、同時期の餌の SI は窒素で 13～14‰、炭素で -22～-23‰の範囲であると推定された (図 8 右)。この結果は、2006 年 4～6 月に採取されたパラカラヌスとコリケウス (成魚の主要な餌) の SI とは大きく異なり、特に窒素 SI において 3～4‰高いことが示唆された。以上から、カイアシ類の SI は水温 (季節) により変動すること、年代間における成魚 SI の比較においては発生時期を考慮する必要があること、近年の餌の SI は 2000 年代よりも上昇している可能性があることがそれぞれ示唆された。これらのことから、燧灘における餌生物とカタクチイワシの関係性を年代間で比較するためには、採集時期や発育段階を可能な範囲で捻げること、カイアシ類のホルマリン固定標本を用いた窒素 SI の経年変化を明らかにすること、などが必要であると考えられた。

(3) イカナゴの夏眠期における酸素消費量に及ぼす影響

2024 年 7～11 月 (夏眠前～夏眠中) の 0 才魚と 1 才魚における筋肉の脂質含有量は体長と肥満度に有意な影響を受けていることが明らかになった (図 9)。すなわち、肥満度が同じでも、体長が大きい個体は小型個体に比べて脂質含有量が高いことが示された。夏眠期のイカナゴの酸素消費量は水温上昇とともに増加した (図 10)。酸素消費量と水温の関係において、脂質含有量には有意な影響が認められたが、体長、肥満度、総脂質量 (脂質含有量×体重) では有意な影響は認められなかった。すなわち、同じ水温でも、脂質含有量が低い個体 (小型で痩せた個体) ほど、酸素消費量が高くなることが示された。備讃瀬戸 (2011～2018 年) と播磨灘 (2010～2017 年) の夏眠前のイカナゴの脂質含有量と体長の関係には有意な差異が認められ、同じ体長でも、備讃瀬戸は播磨灘に比べて脂質含有量が低かった (図 11)。調査期間における備讃瀬戸と播磨灘の夏季 (8～9 月) の平均水温は 26.6℃と 25.6℃であった。これらの結果を併せて、体長 80mm の個体における酸素消費量を求めたところ、備讃瀬戸 (0.109 mgO₂/g/hour) は播磨灘 (0.076) の 1.4 倍であった (図 11 右)。さらに、両海域の夏眠前の平

均体長は備讃瀬戸が 70mm (= 0.116 mgO₂/g/hour), 播磨灘が 80mm であることから, 当該調査年における平均サイズのイカナゴの酸素消費量は, 備讃瀬戸が播磨灘に比べて 1.5 倍 (= 0.116/0.076) であると推定された。以上の結果から, 備讃瀬戸のイカナゴは播磨灘に比べて夏眠期におけるエネルギー消費が激しいことが窺え, 上述した 2024 年の夏季水温と減少率が過去最高であった状況は, 夏眠期の死亡率が高かったことを支持していると考えられた。

【参考文献】

- Akai N, Yoneda M. Age-related variation in reproductive potential and influence on recruitment of western sand lance *Ammodytes japonicus* in the Seto Inland Sea, western Japan. J. Sea Res. 172, 102036, 2021.
- Fujita T, Yamamoto M, Kono N, Tomiyama T, Sugimatsu K, Yoneda M. Temporal variations in hatch date and early survival of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in response to environmental factors in the central Seto Inland Sea, Japan. Fish. Oceanogr. 30, 527–541, 2021.
- 河野悌昌, 高橋正知, 安田十也, 渡井幹雄, 井元順一, 日野晴彦, 木下順二, 西嶋翔太. 令和 5 (2023) 年度カタクチイワシ瀬戸内海系群資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価. 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 65pp, 2024. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2024/03/details_2023_25.pdf.
- Laws EA, Thompson PA, Popp BN, Bidigare RR. Sources of inorganic carbon for marine microalgal photosynthesis: A reassessment of $\delta^{13}\text{C}$ data from batch culture study of *Thalassiosira pseudonana* and *Emiliania huxleyi*. Limnol. Oceanogr. 43, 136-142, 1998.
- Nishikawa T, Okamoto S. Annual variation in condition factor of sand lance *Ammodytes japonicus* during the estivation period in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan. Reg. Stud. Mar. Sci. 42, 101644, 2021.
- Takahashi K, Wada E, Sakamoto M. Relationship between carbon isotope discrimination and the specific growth rate of green algae *Chlamydomonas reinhardtii*. Jpn. J. Limnol. 52, 105-112, 1991.
- Tanaka H, Yoneda M, Kitano H, Kawamura K, Imanaga Y, Matsuyama M, Okamura K, Ohshima S. Stable isotope evidence for income resource allocation to egg production in the Japanese anchovy *Engraulis japonicus*. Mar. Biol. 163, 28. 2016.
- Uye SI. Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan 38, 149–158, 1982.
- Yoneda M, Fujita T, Yamamoto M, Tadokoro K, Okazaki Y, Nakamura M, Takahashi M, Kono N, Matsubara T, Abo K, Xinyu G, Yoshie N. Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. Prog. Oceanogr. 206, 102860, 2022.
- 米田道夫, 中村政裕, 田所和明, 岡崎雄二, 河野悌昌, 高橋正知, 植田悠太, 宮川昌志, 高砂敬, 吉田 誠, 富山 毅, 山本昌幸. 水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の解明. 令和 5 年度豊かな漁場環境推進事業のうち海域特性に応じた赤潮・貧酸素水塊, 栄養塩類対策事業 (2) 栄養塩類不足による漁業被害への対策技術の開発・実証・高度化報告書, 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所, 広島, 2024, 50-58.
- 銭谷 弘, 河野悌昌, 亘 慎吾, 塚本洋一. 瀬戸内海燧灘におけるクラゲ・クシクラゲ類, 浮

魚類の栄養段階：炭素・窒素安定同位体比による評価. 水産海洋研究 77, 68–82, 2013.

Zenitani H, Kono N, Tsukamoto Y. Relationship between daily survival rates of larval Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and concentrations of copepod nauplii in the Seto Inland Sea, Japan. Fish. Oceanogr., 16, 473–478, 2007.

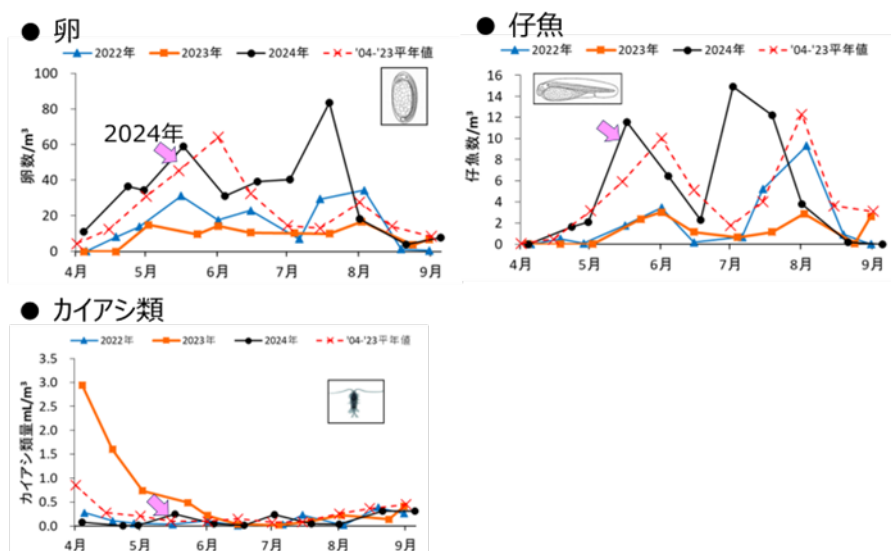


図1. 燧灘カタクチイワシ卵，仔魚，カイアシ類の月別採集状況

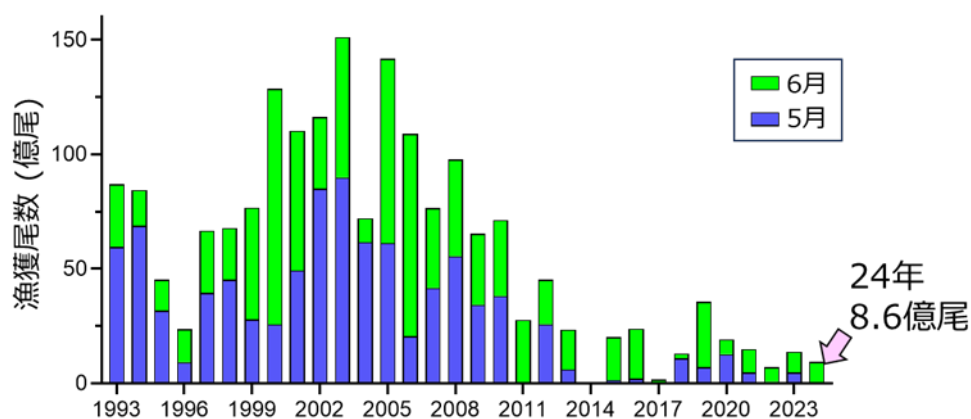


図2. 燧灘カタクチイワシ仔稚魚の漁獲尾数（1993～2024年5, 6月）

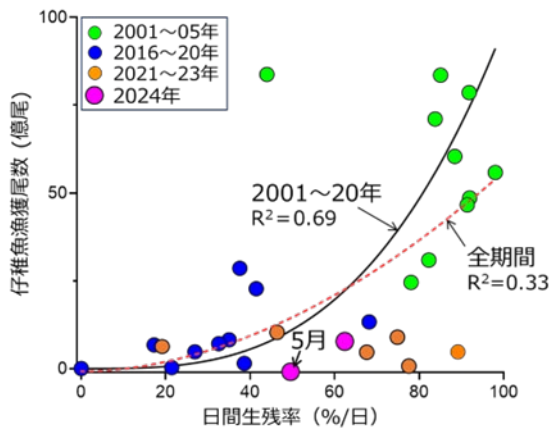


図3. 燧灘カタチイワシ仔稚魚の漁獲尾数と仔魚期の日間生存率の関係

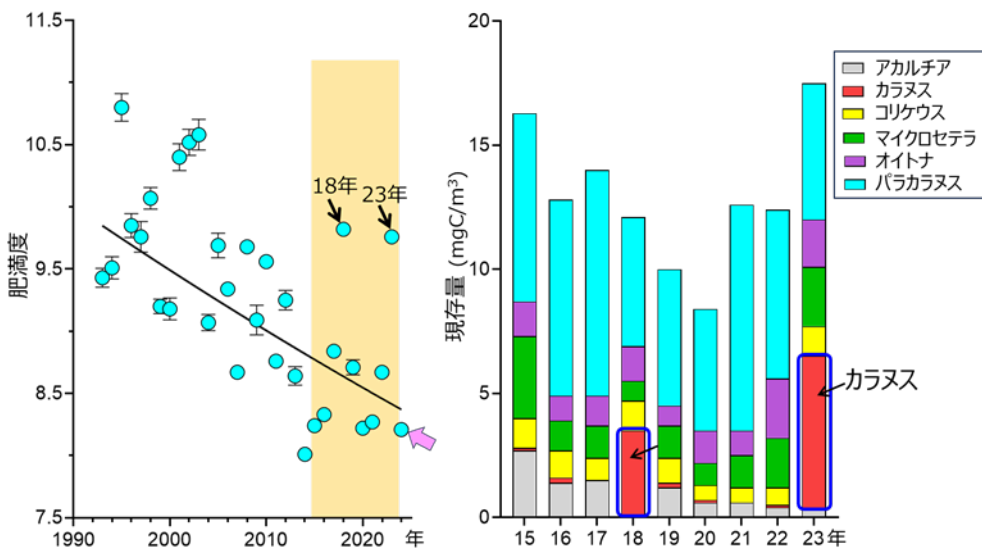


図4. 燧灘カタチイワシ成魚の肥満度の経年変化 (左; 1993~2024年5~6月) およびカイアシ類現存量の経年変化 (右; 2015~2023年5~6月)

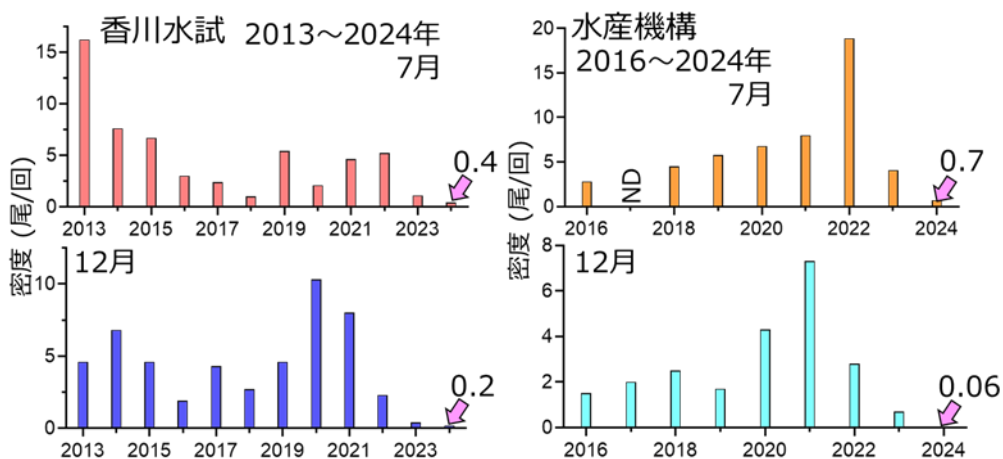


図5. 備讃瀬戸イカナゴの夏季 (7月) と冬季 (12月) の親魚密度

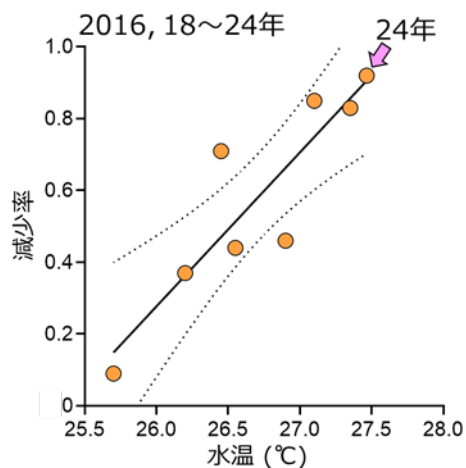


図6. 備讃瀬戸イカナゴの夏眠期における密度減少率と夏季水温の関係

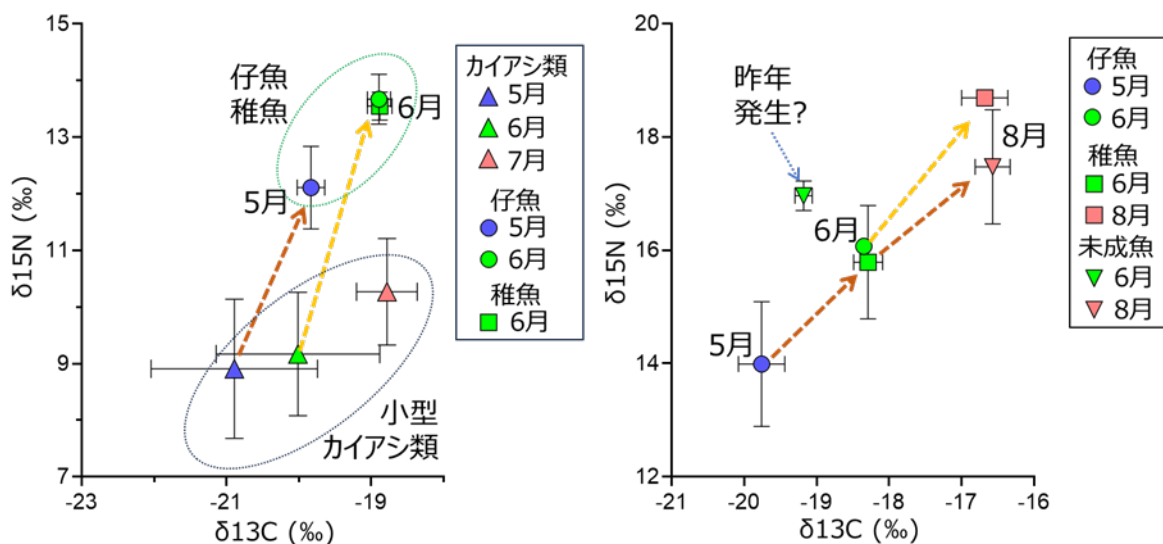


図7. 小型カイアシ類とカタクチイワシ仔稚魚の安定同位体比 (左, 2006年) およびカタクチイワシ仔魚～未成魚の安定同位体比 (右, 2004年)

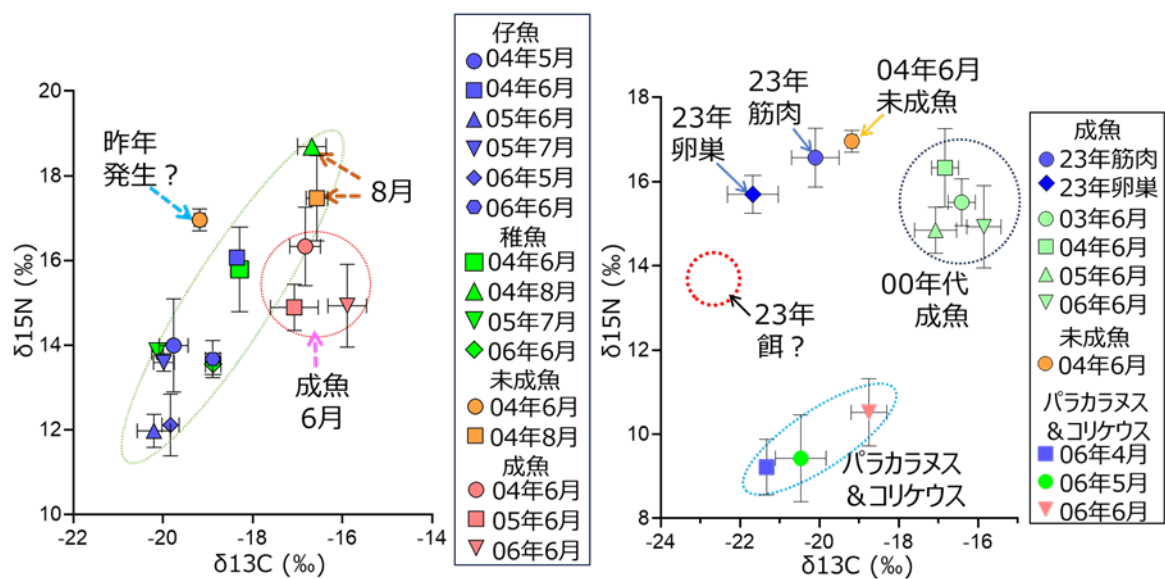


図8. カタクチイワシ仔魚～成魚の安定同位体比 (左, 2004～2006年) および成魚、未成魚および主要な餌生物の安定同位体比 (右, 2023年5月と2000年代)

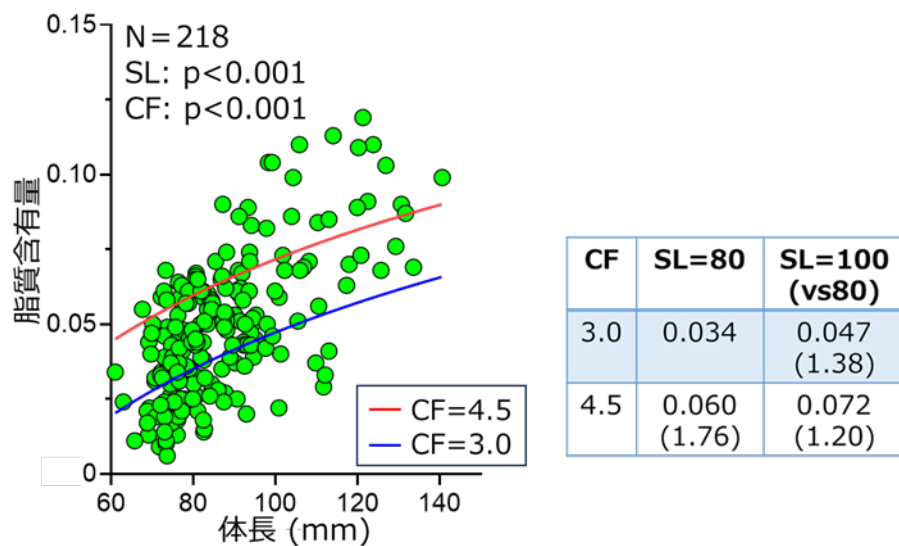


図9. 夏眠前～夏眠中のイカナゴの脂質含有量と体長 (SL) , 肥満度 (CF) の関係 (左) およびモデルの推定結果 (右)

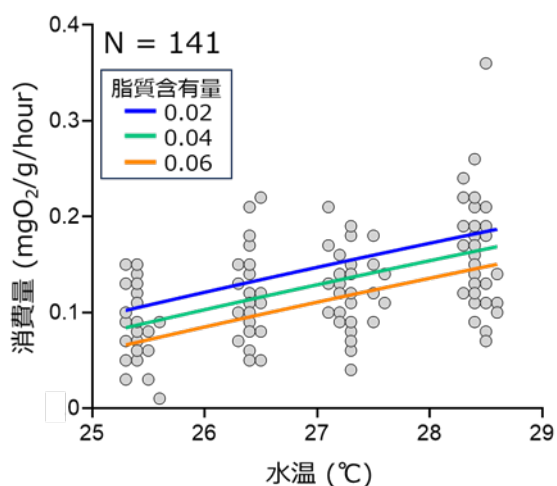


図10. 夏眠期におけるイカナゴの酸素消費量と水温の関係

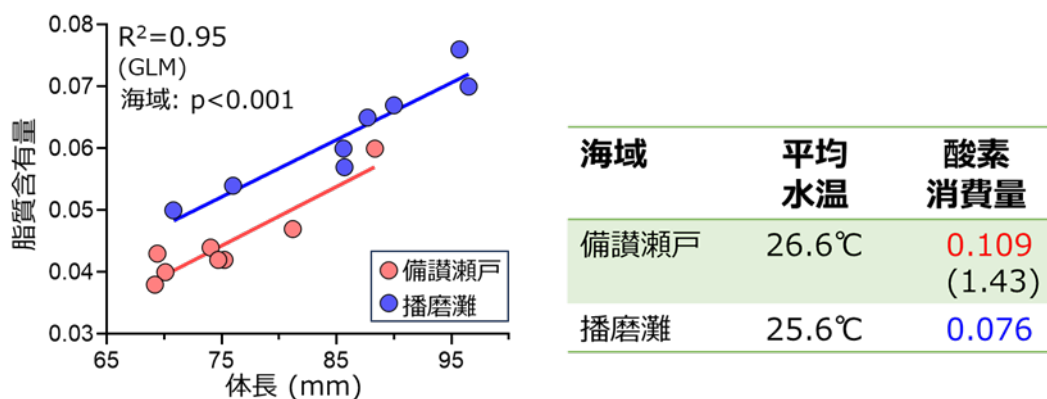


図11. 備讃瀬戸と播磨灘の夏眠前の体長と脂質含有量の関係 (左) および夏季の平均水温と予想される酸素消費量 (右, 体長 = 80mm)

課題番号：I－3)

課題名：栄養塩類管理方策の検討

愛媛大学，沿岸環境科学研究センター，郭新宇

愛媛大学，先端研究院，吉江直樹

愛媛県水産研究センター，栽培資源研究所，谷川貴之，喜安宏能
水産研究・教育機構，水産技術研究所，鬼塚剛，阿保勝之，樽谷賢治，児玉真史

【背景・目的】

燐灘を対象とした，栄養塩循環の解明と，ノリ養殖とカタクチイワシに対応する栄養塩類管理方法の検討に資する2種類の3次元低次生態系モデルを開発する。1つ目は中解像度の流動モデルとNPDZタイプのシンプルな低次生態系モデルを結合し，ノリ養殖が展開される水深の浅い沿岸域における栄養塩濃度の経年変動と陸上からの栄養塩負荷の管理方法について検討する。2つ目は，中解像度の流動モデルと多種類のプランクトンを取り扱うことができるeNEMUROタイプの複雑な低次生態系モデルを結合し，カタクチイワシ餌料として重要な動物プランクトンの変動特性を理解し，カタクチイワシ資源変動との関連性について検討する。以上の知見を踏まえて栄養塩類管理方策の検討を行う。

【方法】

(1) ノリ養殖を対象とした中解像度3次元NPZDモデルの開発

燐灘を対象とする中解像度の流動-NPZDタイプの低次生態系モデル(図1)(Morimoto et al., 2021)を用いて，燐灘，特に燐灘南部のノリ養殖海域における栄養塩濃度の，陸起源栄養塩の負荷変動に対する応答特性を検討する。陸起源栄養塩の負荷変動は，2021年度に燐灘へ直接排出された生活系および産業系の月平均窒素・リン負荷量を対象とする。実施する実験は以下のとおりである。(a)年平均の陸起源窒素・リン負荷量を使用する(標準実験「Control」)。(b)ノリの養殖期に陸起源窒素・リン負荷量を増加させるとともに，それ以外の期間は減少させることで，年間負荷量を(a)と同じにする(感度実験1「Sensib1」)。(c)ノリの養殖期に陸起源窒素・リン負荷量を増加させるとともに，年間負荷量も増加させる(感度実験2「Sensib2」)。これら3つの計算結果を比較し，下水処理施設の管理運用方式の変更がノリ養殖区域の栄養塩濃度に及ぼす影響を解明する。

(2) カタクチイワシ餌料を対象とした中解像度3次元eNEMUROモデルの開発

燐灘を対象とする中解像度の流動モデルに，eNEMUROタイプの生態系モデル(図2)(Yoshie et al., 2011)を組み込んだ低次生態系モデルを開発する。本モデルは，日本周辺におけるカタクチイワシの重要な餌料であるカイアシ類動物プランクトンの生物量について，季節変動および経年変動を再現することを目指す。モデルの構築に必要な境界条件として，1級・2級河川および産業系・生活系排水による栄養塩フラックス，周辺海域との境界における栄養塩，植物プランクトン，動物プランクトン，有機物濃度の観測データを準備する。また，環境省が提供する栄養塩および植物プランクトン濃度の観測データを基に，モデル中の生理パラメータのチューニングを行う。特に，Yoneda et al. (2022)による燐灘東部のカイアシ類動物プランクトンの現存量観測データと比較し，生理パラメータを調整する。モデル開発の

初年度には、気候値外力による計算に集中するが、異なる年代の産業系・生活系排水による窒素・リン負荷量に対応する3つの感度実験を実施し、カイアシ類動物プランクトンの生物量の応答特性を解明する。

(3) ノリと低次生態系の競合を対象としたノリを導入した eNEMURO-SW モデルの開発

現場の要望ならびに管理方策検討委員会での検討を踏まえ、当初の計画には含まれていなかったが、ノリ養殖海域におけるノリと植物プランクトンの栄養塩競合や、下水処理場の管理運転および河川流量変化に伴う陸起源栄養塩供給量変化に対するノリと低次生態系の応答を調べることを目的として、0次元の eNEMURO モデルにノリを陽に導入したモデルを開発する。昨年度までに、ノリ養殖海域における観測データに基づいた外力の準備と、モデル中の生理パラメータの調整を実施した0次元の eNEMURO モデルを用いて、新たに、ノリの現存量の時間変化を規定する定式系を eNEMURO 中の植物プランクトンの定式系を参考に導入し、ノリ生長の生理パラメータについて文献値を基に調整を行う。2023年度の観測に基づいた外力として与え、栄養塩と植物プランクトンの季節変動とノリの現存量の再現を目指す。

(4) 燧灘広域及びノリ養殖海域における現地調査

愛媛県農林水産研究所水産研究センター所属の水産試験船「よしゅう」による浅海定線調査（図3）として、毎月1回、燧灘・安芸斎灘26定点の水質調査（水温・塩分・DO・栄養塩等）を行う。また、26定点のうち12定点ではクロロフィル量分析用サンプルの採水を行う。西条市沖にあるノリ養殖漁場8定点において（図4）、環境調査として養殖期間中の週に1回程度、水温、塩分、DO及び栄養塩等の測定を行う。また、定点近傍の養殖網からノリ葉体を採取し、葉体の色調（ $L^* \cdot a^* \cdot b^*$ 値）及びクロロフィル量（SPAD値）の測定を行う。ノリ葉体の色調等については、測定が可能な大きさとなった1月上旬から測定を開始する。

(5) 栄養塩類管理方策検討委員会の開催

瀬戸内海を含む沿岸域の物質循環や環境保全および生物生産に造詣の深い学識者複数名（2名程度）を構成員とする「栄養塩類管理方策検討委員会」を年2回開催し、上記の数値モデル解析結果を元に栄養塩類管理方策について検討を行う。

【結果】

(1) ノリ養殖を対象とした中解像度3次元 NPZD モデルの開発

ア) ノリ養殖海域における栄養塩濃度の水平分布と季節変動

前年度に構築した中解像度の流動-NPZD タイプの低次生態系モデルをベースとして、本年度は2021年度の生活系および産業系の窒素・リン負荷量を新たにモデルに入力し、2021年度に愛媛県水産研究センター栽培資源研究所により観測された燧灘南部のノリ養殖区域での表層 DIN（図5・6）および DIP（図7・8）濃度との比較を行った。観測データによると、各観測点（S1～S8）における DIN 濃度は10月から12月にかけて高く、1月から4月にかけて低い傾向を示した。モデルのシミュレーション結果はこのような季節変動を概ね再現できたが、モデルが算出した DIN 濃度が観測値より過大評価であった。特に、1月から4月の期間、観測値は DIN 濃度が 3 mmol/m^3 以下であったのに対し、シミュレーション結果は 3 mmol/m^3 を超えている。水平分布の特徴としては、観測値とシミュレーションはともに DIN 濃度が沿岸域から沖合にかけて減少する傾向を示した。DIP 濃度については、観測値は10月から12月にかけて高く、1月から5月にかけて低い濃度を示したのに対し、シミュレーションでは全

体的に過小評価であった。次年度は、DIN 濃度の過大評価および DIP 濃度の過小評価を改善する必要があることが判明した。

イ) ノリ養殖海域における陸起源窒素・リン負荷量の変動に対する栄養塩濃度の応答

実施した 3 つの実験では、生活系および産業系の窒素・リン負荷量のみが異なり（図 9）、それ以外の設定は全て同じである。標準実験「Control」と比較して、感度実験 1「Sensib1」と感度実験 2「Sensib2」では、ノリの養殖期（10 月～翌年 3 月）の窒素・リン負荷量を増加させ、その以外の期間（4 月～9 月）の負荷量を減少させた。図 10 に示されている各観測点の表層 DIN 濃度の季節変動を見ると、ノリの生育期間に生活系および産業系の窒素・リン負荷量を増加させることで、この期間内には燧灘南部の表層 DIN 濃度が顕著に増加することが分かる。逆に、他の期間には表層 DIN 濃度が減少している。水平分布を見ると、観測点 S3（西条浄化センター付近）の DIN 濃度変動が最大であり、観測点 S6, S7, S8 の変動幅が比較的小さいことが分かる。図 11 は各観測点の表層 DIP 濃度の季節変動を示しており、観測点 S3 以外では DIP 濃度に変動がほとんど見られない。この結果は、この海域の基礎生産がリンに制限され、人為的に増加させた DIP の大部分は植物プランクトンの増殖に使われてしまったと考えられる。観測点 S3 で一定量の DIP の増加が見られたのは、ここが排出源に非常に近いいため、植物プランクトンの DIP 消費量が外部からの DIP 入力量よりまだ少ないためである。以上の感度実験の結果から、生活系および産業系の窒素・リン負荷量の管理においては、ノリ養殖海域の制限栄養塩の実態を考慮する必要があることが示唆された。

(2) カタクチイワシ餌料を対象とした中解像度 3 次元 eNEMURO モデルの開発

ア) カイアシ類動物プランクトンの現存量の季節変動とその変動要因

中解像度 3 次元流動モデルに、eNEMURO 型の低次生態系モデルを導入した。まず、eNEMURO モデルを 1km 解像度の瀬戸内海全域モデル（Leng et al., 2023; Zhu et al., 2019）と結合させ、計算結果と観測データを比較しながら、モデル中の生理パラメータを調整した。中解像度モデル計算に必要な境界条件は、1km 解像度の瀬戸内海全域モデルから提供された。図 12 は、燧灘東部におけるカタクチイワシの重要な餌であるカイアシ類動物プランクトンの現存量（モデル内では ZL, meso-zooplankton として表現）の季節変動を示している。モデルによって得られた現存量は、5～7 月において 2001～2019 年の観測された現存量の平均値の 1 倍の標準偏差内に収まり、この期間の動物プランクトンの現存量の変動範囲をうまく再現できた。しかしながら、観測された動物プランクトンの現存量は 5 月から 7 月にかけて減少しているのに対し、シミュレーション結果ではこの期間中ほとんど変化しなかった。カイアシ類動物プランクトンの現存量の季節変動に影響を与える生物学的要因を分析したところ、カイアシ類動物プランクトンは 3 種類のサイズの植物プランクトン（PM, PLc, PLp）と、より小さいサイズの動物プランクトン（ZM）を捕食し、また、より大きなサイズの動物プランクトン（ZP）によって捕食されていた（図 13 上）。燧灘東部では、PM の生物量が最も多く、次いで PLp, PLc と ZM の生物量は比較的小さい。カイアシ類動物プランクトンの現存量の季節変動は、基本的には PM の季節変動と同期的であり、5 月から 9 月にかけて PM の現存量が減少したが、カイアシ類動物プランクトンの別の重要な餌である PLp の生物量が急速に増加し、PM の生物量減少の影響を部分的に相殺している可能性がある（図 13 下）。これはシミュレーションにおいてカイアシ類動物プランクトン現存量が観測値のように 5～7 月に急激に減少しなかった理由である。これはボトムアップのメカニズムの影響である。さらに、トップダウン

のメカニズムも現存量に影響を与える重要な要因であるが、本モデル結果から、カイアシ類動物プランクトンを捕食する動物プランクトン ZP の現存量は小さく、季節的にも顕著ではないことが示されており、トップダウンのメカニズムはモデルにおいて影響を与えていないと考えられる。先行研究 (Kodama et al., 2022; Wang et al., 2024) によると、トップダウンのメカニズムは動物プランクトンの現存量を制御する重要なプロセスであるため、次年度には、この影響を考慮する必要があることが示唆された。

イ) 陸起源窒素・リン負荷量の変動に対するカイアシ類動物プランクトンの応答

観測データ (Yoneda et al., 2022) によると、燧灘東部でのカイアシ類動物プランクトン現存量は 2001 年から 2019 年にかけて顕著な経年変動があり、大きく分けて 3 つの期間に分類することができる。2001～2005 年は現存量が高かった；2006～2010 年はプランクトン現存量が低下し、低いレベルを維持した；2011～2019 年はプランクトン現存量が回復したが、2001～2005 年のレベルには戻らなかった。これらの 3 つの期間におけるプランクトン現存量の違いの主要な要因を特定するために、まず、陸起源窒素・リン負荷量の経年変動の影響を検討した。図 14 に示されたように、陸起源窒素・リン負荷量は 2001～2005 年が最も高く、次いで 2006～2009 年、2011～2019 年は最も低かった。これらの 3 つの期間における窒素・リン負荷量を基にした 3 つの感度実験を設定し、それぞれの結果を図 15 に示す。燧灘東部で観測されたカイアシ類動物プランクトン現存量には顕著な差があるが、シミュレーション結果ではこの 3 つの期間でほぼ同じであった (3 本の実線が重なっている)。この結果は、生活系および産業系の窒素・リン負荷量の経年変動がカイアシ類動物プランクトン生物量の経年変動の主な原因ではないことを示唆している。次年度には、物理的環境 (水温、河川流量、流動場、光条件など)、河川からの栄養塩負荷、隣接海域との物質交換、堆積物からの栄養塩供給などがカイアシ類動物プランクトン現存量の経年変動に与える影響を調べる必要があることが示された。

(3) ノリと低次生態系の競合を対象としたノリを導入した eNEMURO-SW モデルの開発

昨年度までにモデル中の生理パラメータの調整を実施した 0 次元の eNEMURO モデルに、ノリの現存量の時間変化を規定する定式系を eNEMURO 中の植物プランクトンの定式系を参考に導入し、ノリの動態を陽に取り扱うことができる eNEMURO-SW モデルを開発した (図 16)。ノリ生長の生理パラメータについては、観測及び培養実験による文献値 (山本ら 1988; 村上ら 1991; Bao et al., 2019; Platt et al., 1980) を基に基本的な調整を行った (図 17)。モデルの対象海域は、西条沿岸のノリ養殖海域周辺の岸から沖合へ 2km、岸沿いに 10km の領域、平均水深 7m の領域を想定した。また、隣接する水塊との海水交換については、観測された塩分と河川流量の時間変化から、交換速度を推定しモデルに与えた。2023 年度に観測された水温、日射量、底泥からのアンモニア供給量、隣接する沖合海域の栄養塩濃度、河川及び下水処理施設からの栄養塩供給量を外力として与え (図 18)、モデルを駆動した。その結果、植物プランクトン現存量の指標である Chl. a 濃度、栄養塩濃度の季節変動、ノリ現存量を再現することに成功した (図 19)。

この観測された低次生態系およびノリ現存量の季節変化を再現できるモデルの出力を用いて、ノリの養殖時期 (1 月～3 月) の窒素収支について解析したところ、硝酸塩は河川が、アンモニアは下水処理施設が主要な供給源であることが明らかとなった (図 20)。また、ノリ養殖海域における、植物プランクトンとノリによる栄養塩消費量を比較すると、植物プランクト

ンによる消費量はノリによる消費量の約 100 倍も大きいことが判明した。このことから、下水処理場の管理運転などにより陸域から栄養塩が供給されたとしても、そのほとんどが植物プランクトンの増殖に利用され、ノリには行き渡らない可能性が示唆された。

(4) 燐灘広域及びノリ養殖海域における現地観測

浅海定線調査については、水産試験船「よしゅう」の船舶検査期間中であった 12 月を除き、予定通り毎月 1 回の観測を行い、データを収集した。また、クロロフィル量分析用サンプルの採水を行い、愛媛大学へ送付した。西条市沖のノリ養殖漁場調査については、10 月中旬から週に 1 回木曜日前後に観測を行い、データを愛媛大学に提供した。

(5) 栄養塩類管理方策検討委員会の開催

愛媛県漁業協同組合代表理事専務の岩森雅章氏ならびに広島大学大学院統合生命科学研究科講師の首藤宏幸氏を外務有識委員とする検討委員会を令和 6 年 8 月 27 日および令和 7 年 1 月 23 日に開催した。両日とも委員 2 名に加えて水産庁、愛媛大学、愛媛県栽培資源研究所、水産研究・教育機構が参加し、燐灘における栄養塩類管理方策検討のためのモデル構築および栄養塩類管理の在り方について検討を行った。

委員会では課題担当者より、ノリ養殖を対象とした中解像度 3 次元 NPZD モデル、カタクチイワシ餌料を対象とした中解像度 3 次元 eNEMURO モデル、ノリと低次生態系の競合を対象としたノリを導入した eNEMURO-SW モデルについて開発状況の説明を行った。当初の計画では、ノリ養殖海域を対象としたモデルでは、水平解像度 100m の高解像度の 3 次元流動モデルを用いる予定であったが、水平解像度 300m の中解像度の流動モデルで十分にノリ養殖海域の流動特性を再現できることが判明したため、以降は、中解像度流動モデルを使用することとなった。委員から、モデルの感度解析から示された「陸起源窒素・リン負荷量を増加させることにより燐灘南部のノリ養殖場海域の表層 DIN 濃度が顕著に増加する」という結果は、栄養塩類管理に期待が持てる重要なものであるとの意見をいただいた。ただし、同海域の DIP 濃度が過小評価であるため、それらを改善したうえで再検討する必要性が指摘された。また、陸起源窒素・リン負荷量の変動に対してカイアシ類動物プランクトンの応答が極めて小さいことの原因究明と今後の改善が求められた。今後は、本事業で開発するモデルを活用し、科学的にどのような方策が有効かを検討し、具体的な施策提言に資することが期待される。

【参考文献】

- Bao, M., L. Hu, Q. Fu, G. Gao, X. Li, and J. Xu (2019): Different Photosynthetic Responses of *Pyropia yezoensis* to Ultraviolet Radiation Under Changing Temperature and Photosynthetic Active Radiation Regimes, *Photochemistry and Photobiology*, 95(5), 1213-1218, doi: 10.1111/php.13108
- 川村嘉応, 山下康夫, 鬼頭鈞 (1991): 養殖ナラワスサビノリの生長と環境条件について, *水産増殖*, 39(3), 273-278
- Kodama, T., Igeta, Y., Iguchi, N., (2022): Long-Term Variation in Mesozooplankton Biomass Caused by Top-Down Effects: A Case Study in the Coastal Sea of Japan. *Geophysical Research Letters* 49, e2022GL099037.
- Leng, Q., Guo, X., Zhu, J., and Morimoto, A., (2023): Contribution of the open ocean to the nutrient and phytoplankton inventory in a semi-enclosed coastal sea. *Biogeosciences*, 20, 4323–4338.

- Morimoto, A., Mino, Y., Buranapratheprat, A., Kaneda, A., Tong-U-Dom, S., Sunthawanic, K, Yu X., and Guo, X. (2021): Hypoxia in the Upper Gulf of Thailand: Hydrographic observations and modeling. *Journal of Oceanography*. 77, 859–877.
- Platt, T., C. L. Gallegos, and W. G. Harrison. (1980): Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton, *Journal of Marine Research* , 38 (4), 687-701
- Wang, W., Wang, N., Wang, Y., Zhang, F., Sun, X., Sun, S., (2024): Evaluating top-down and bottom-up drivers of temporal mesozooplankton community variability in a temperate semi-enclosed bay, China. *Marine Pollution Bulletin* 209, 117149.
- 山本民次, 高尾允英 (1988): スサビノリ *Porphyra yezoensis* 葉体のアンモニア態および硝酸態窒素の摂取に及ぼす温度の影響, *藻類*, 36, 37-42
- Yoneda, M., Fujita, T., Yamamoto, M., Tadokoro, K., Okazaki, Y., Nakamura, M., Takahashi, M., Kono, N., Matsubara, T., Abo, K., Xinyu, G., Yoshie, N., (2022): Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. *Progress in Oceanography* 206, 102860.
- Yoshie, N., X. Guo, N. Fujii, and T. Komorita (2011): Ecosystem and nutrient dynamics in the Seto Inland Sea, Japan. In *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry Vol.5, Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems*, ed. by K. Omori, X. Guo, N. Yoshie, N. Fujii, I. C. Handoh, A. Isobe, and S. Tanabe, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 39-49.
- Zhu, J., Guo, X., Shi, J., Gao, H. (2019): Dilution characteristics of riverine input contaminants in the Seto Inland Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 141, 91-103.

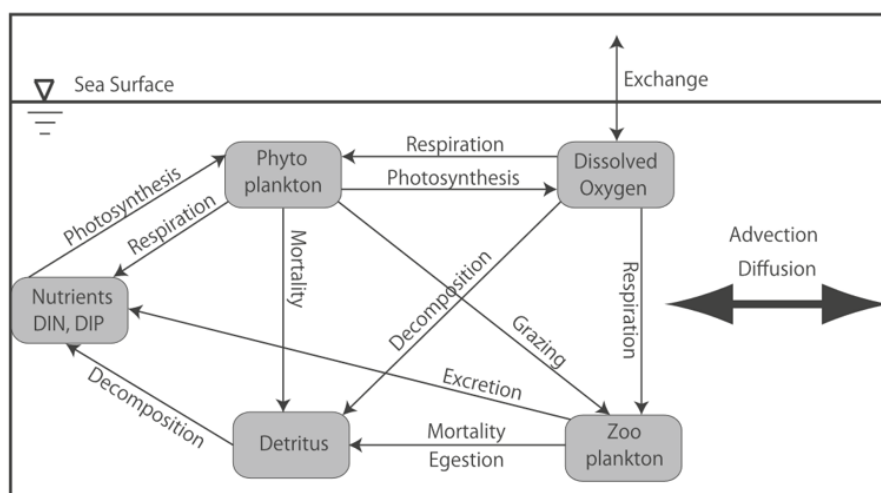


図1 低次生態系モデルの模式図。予報変数は栄養塩濃度 (DIN, DIP), 植物プランクトン, 動物プランクトン, デトリタス, 溶存酸素 (DO) などがある。主なプロセスは移流と拡散, 海面における酸素フラックス, 植物プランクトンの光合成, 呼吸, 死亡と被摂食, 動物プランクトンの摂食, 呼吸, 分泌と排泄, デトリタスの分解などである。

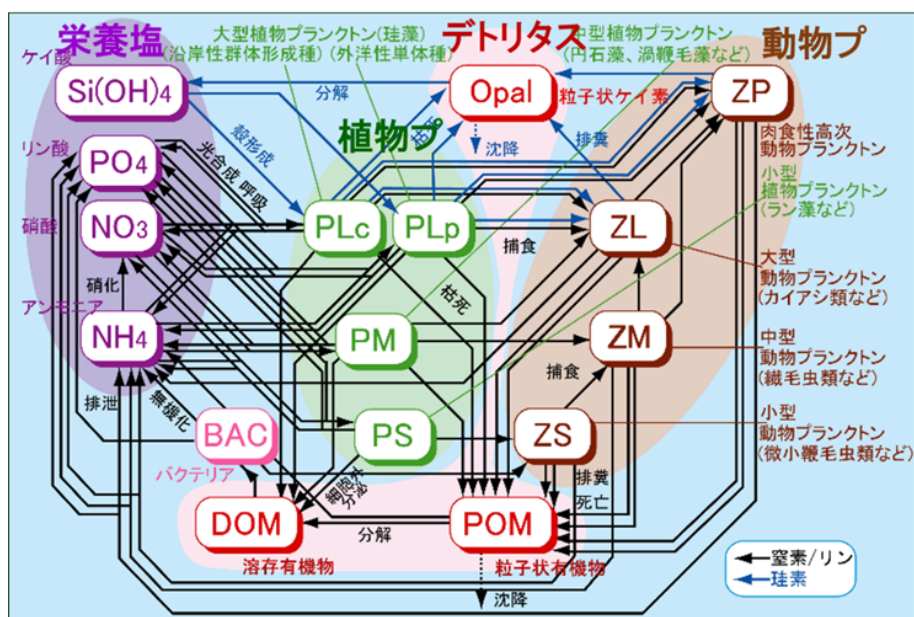


図2 eNEMUROタイプの生態系モデルの模式図。予報変数は、紫の栄養塩4種、緑の植物プランクトン4種、茶色の動物プランクトン4種、赤のデトリタス3種があり、主な物質フローは底層との物質交換、光合成、捕食、分解などである。

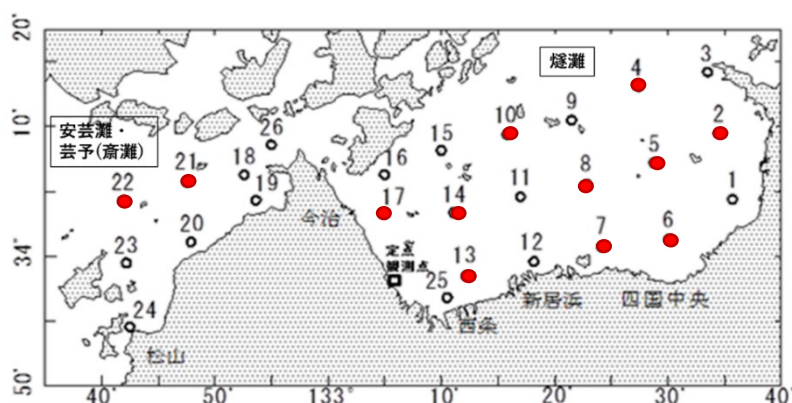


図3 燧灘における浅海定線観測の観測点

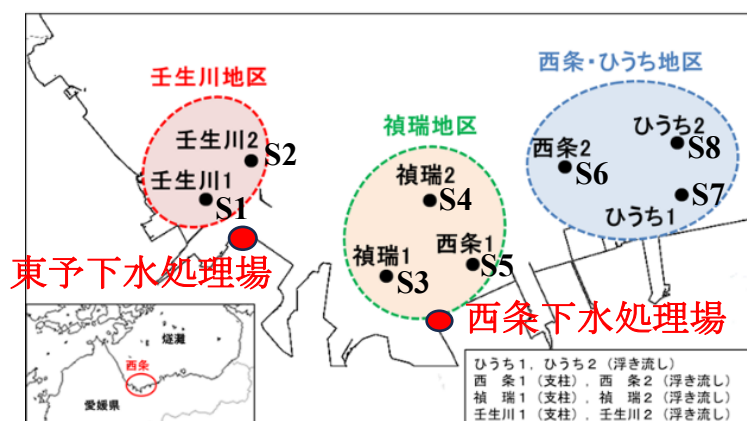


図4 西条沿岸におけるノリ養殖漁場の観測点

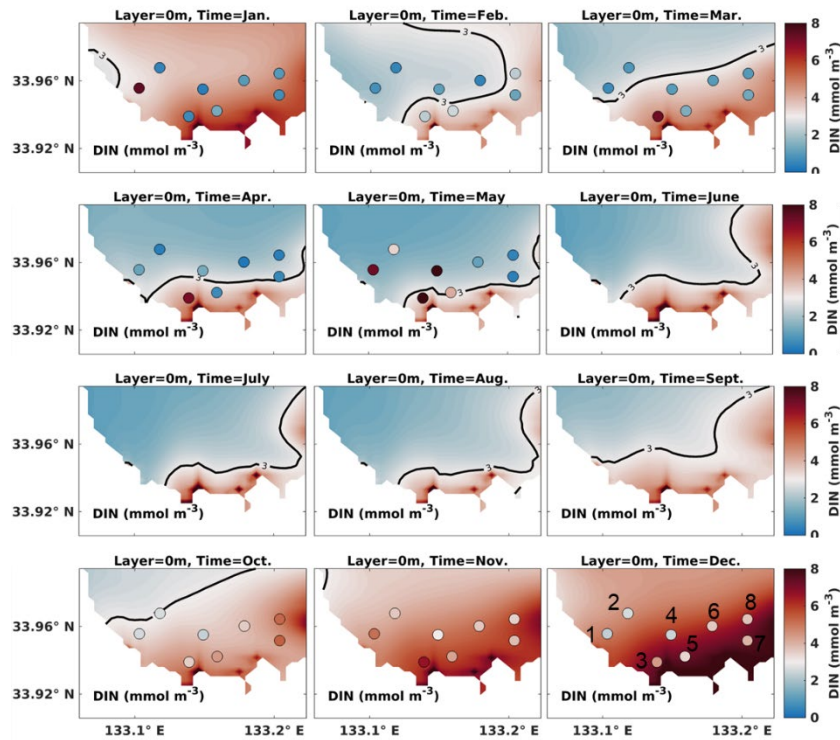


図5 中解像度モデル (NPZD タイプ) によって求めた燧灘南部のノリ養殖区域における表層 DIN 濃度 (mmol/m^3) 月平均値の水平分布。色付きの丸印は 2021 年度の観測値。

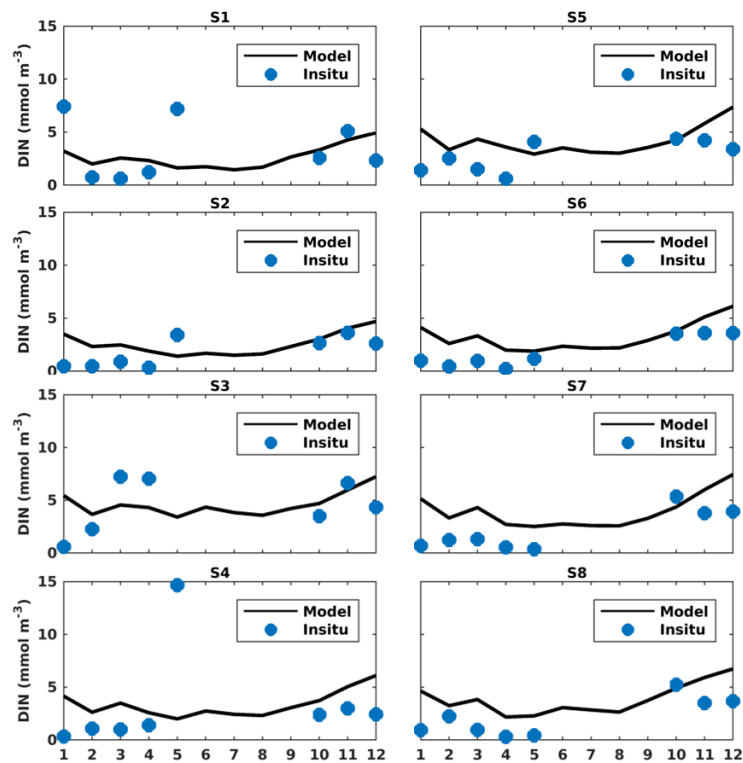


図6 中解像度モデル (NPZD タイプ) によって求めた燧灘南部のノリ養殖区域における観測点 (S1~S8) での表層 DIN 濃度 (mmol/m^3) の季節変化。観測点の位置は図4に示す。

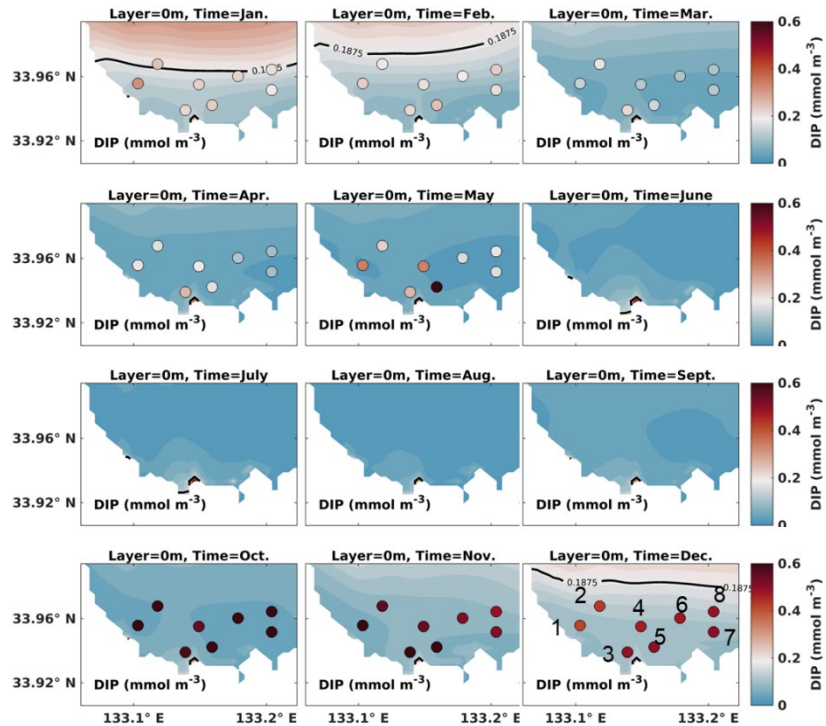


図7 中解像度モデル (NPZD タイプ) によって求めた燧灘南部のノリ養殖区域における，表層 DIP 濃度 (mmol/m^3) 月平均値の水平分布。色付きの丸印は 2021 年度の観測値。

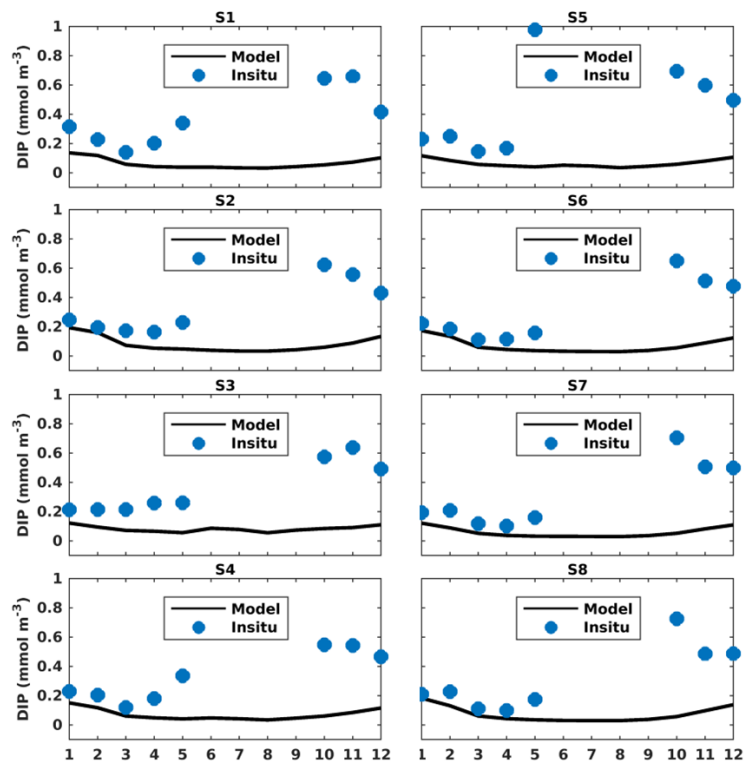


図8 中解像度モデル (NPZD タイプ) によって求めた燧灘南部のノリ養殖区域における，観測点 (S1～S8) での表層 DIP 濃度 (mmol/m^3) の季節変化。観測点の位置は図4に示す。

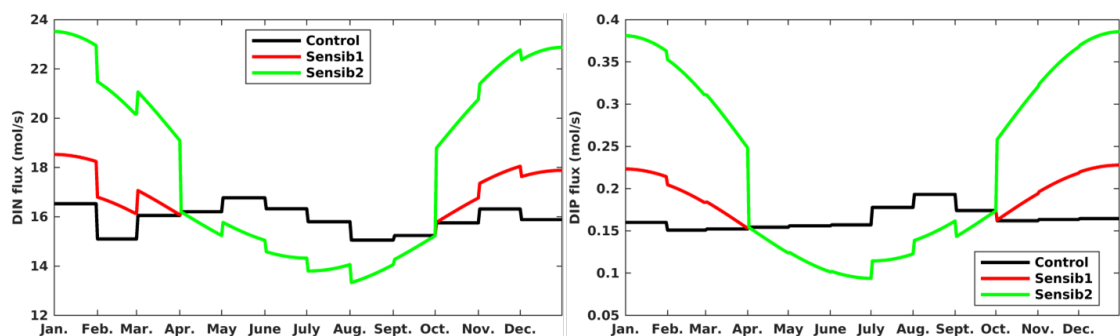


図9 3つのシナリオにおける陸起源DIN 負荷量（左）とDIP 負荷量（右）。“Control” は生活系陸起源栄養塩負荷量が年間を通じて一定である；“Sensib1” は生活系陸起源栄養塩負荷量をノリの養殖期（10月から翌年3月）に増加させ、他の月に減少させるが、年間平均負荷量は“Control” と同じである；“Sensib2” は生活系陸起源栄養塩負荷量がノリの養殖期（10月から翌年3月）において“Sensib1” よりもさらに増加させ、他の月は“Sensib1” と同様である。なお、緑色の実線と赤色の実線は4月から10月にかけて重なっている。

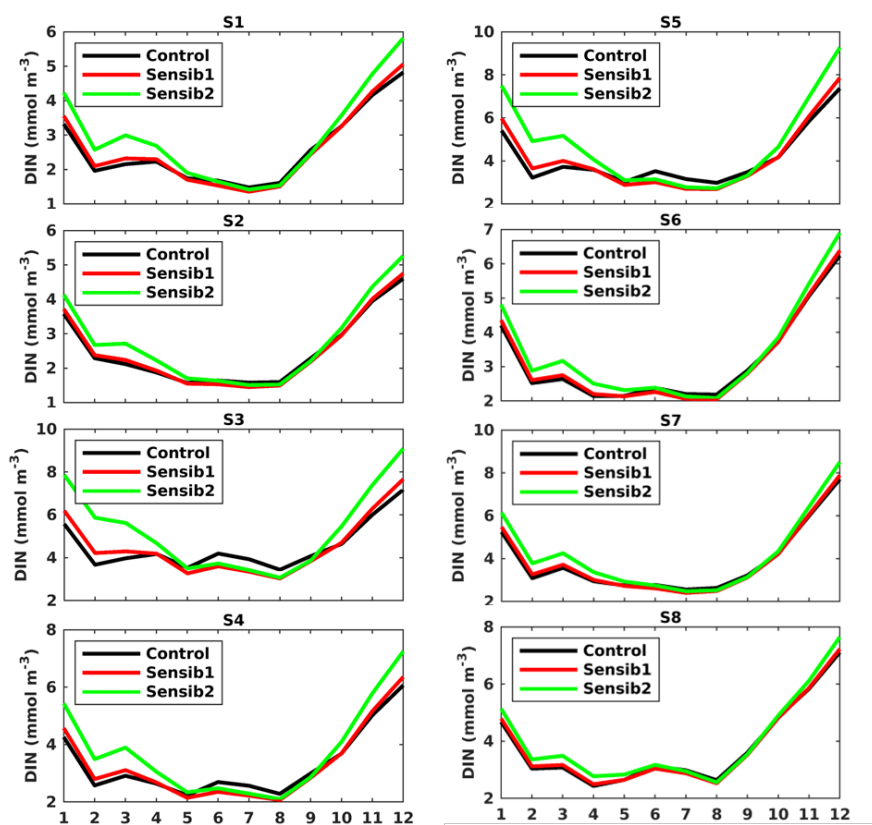


図10 観測点（S1-S8）における3つのシナリオで求めた表層DIN 濃度（ mmol/m^3 ）の季節変化。“Control”，“Sensib1”，“Sensib2” の意味は図9を参照。観測点は図4に示す。

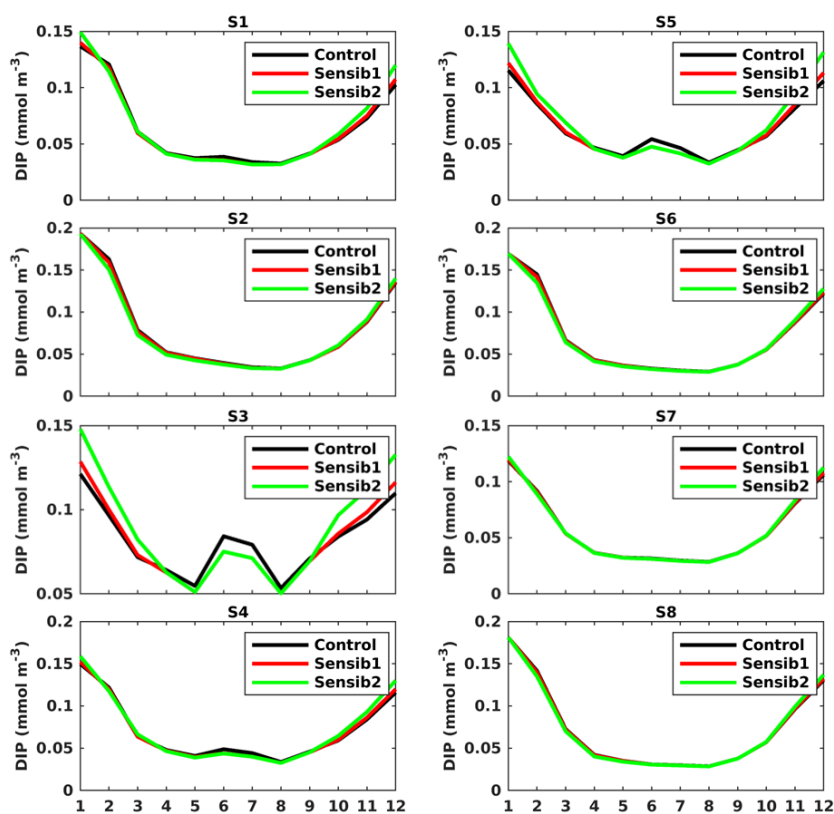


図 11 観測点 (S1-S8) における 3 つのシナリオで求めた表層 DIP 濃度 (mmol/m^3) の季節変化。“Control”，“Sensib1”，“Sensib2” の意味は図 9 を参照。観測点は図 4 に示す。

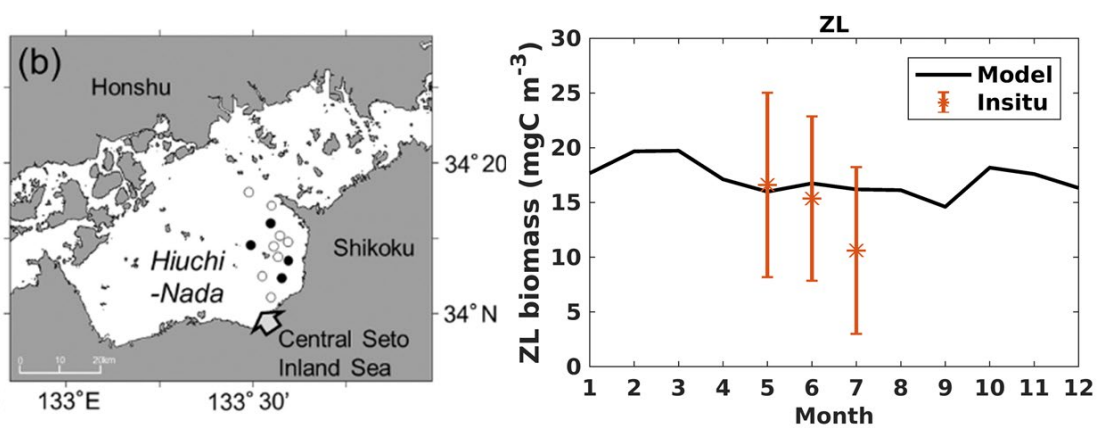


図 12 (左) カイアシ類動物プランクトンの観測点 (白丸, Yoneda et al., 2022)。(右) 燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトンの季節変化。黒色実線は中解像度 eNEMURO モデルによって求めた結果である。オレンジ色の星印は、2011 年から 2019 年の観測データの平均値、エラーバーはその標準偏差を示す。

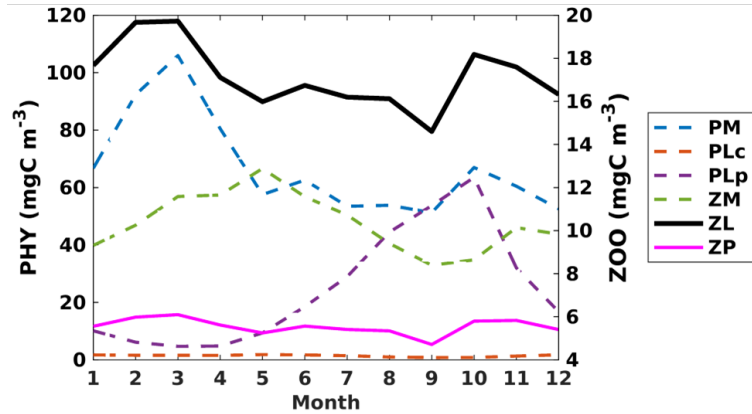
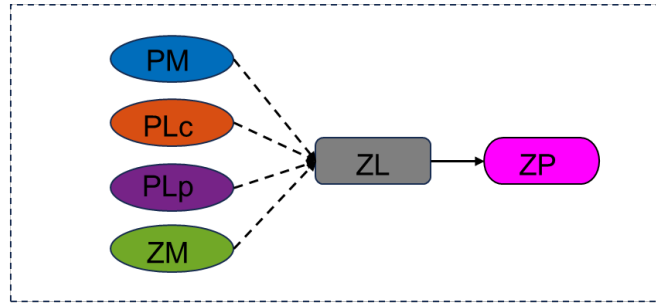


図 13 (上) カイアシ類動物プランクトンの 4 つの捕食対象：小型植物プランクトン (PM)，沿岸性大型植物プランクトン (PLc)，外洋性大型植物プランクトン (PLp)，中型動物プランクトン (ZM)。カイアシ類動物プランクトンの捕食者の一つ：肉食性動物プランクトン (ZP)。(下) 燧灘東部におけるカイアシ類動物プランクトンの生物量およびその生物量に影響を与えるプランクトン生物の生物量の季節変化。植物プランクトンの生物量は左側の縦軸を，動物プランクトンの生物量は右側の縦軸を参照。

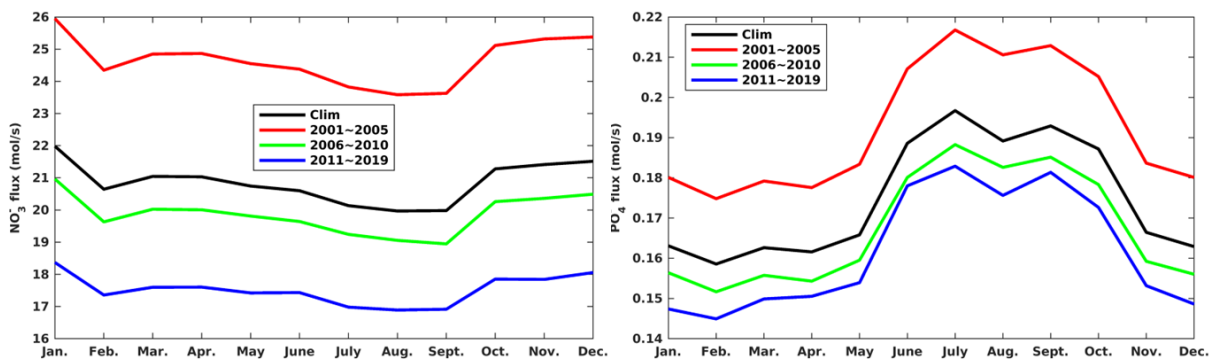


図 14 (左) 3 つの期間と気候値に対応する陸起源窒素負荷量 (mol/s) の季節変化。(右) 3 つの期間と気候値に対応する陸起源リン負荷量 (mol/s) の季節変化。

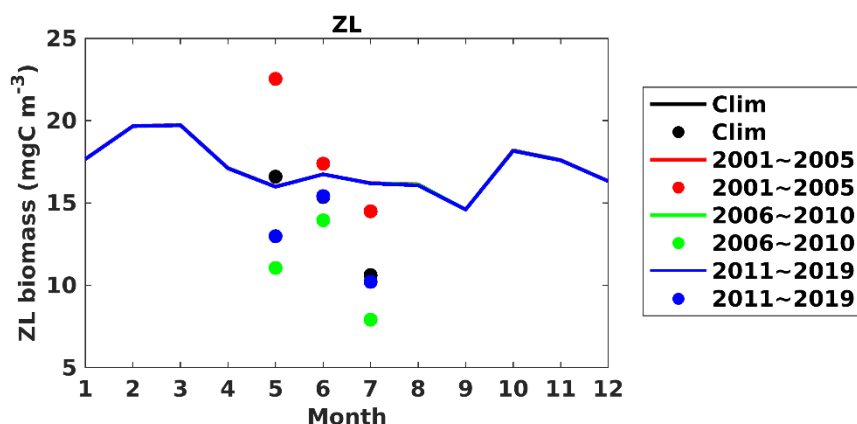


図 15 3つの期間と気候値に対応する燧灘東部のカイアシ類動物プランクトンの生物量の季節変化。実線はモデル結果，色付き丸印は3つの期間と気候値に対応する観測結果を示す。

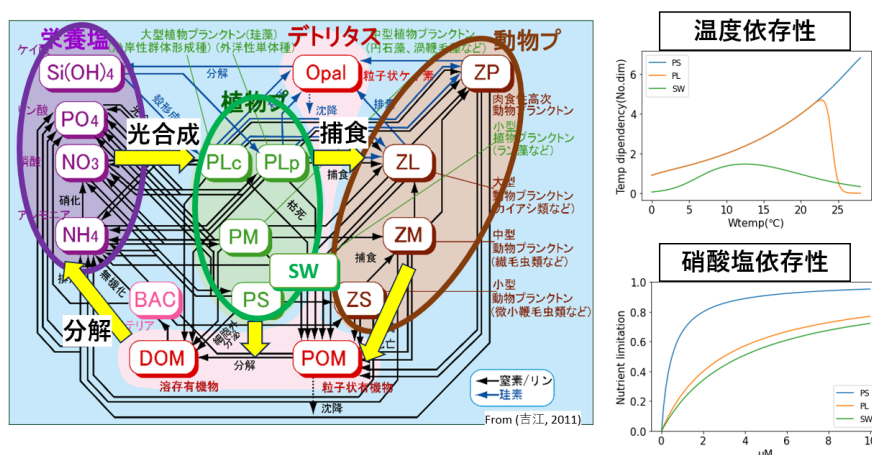


図 16 eNEMURO-SW モデルの模式図。SW(ノリ)を eNEMURO に陽に導入し，植物プランクトンとノリの温度依存性・栄養塩濃度依存性の差異を右のグラフに示す。

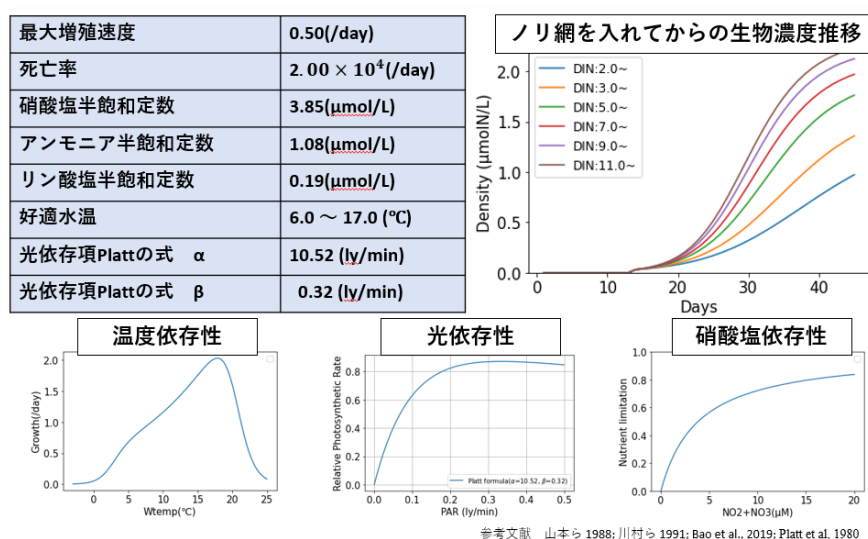


図 17 eNEMURO-SW モデルのノリに関連する生理パラメータの一覧。栄養塩濃度に依存したノリ現存量の時間変化とノリの温度・光・栄養塩依存性も図に示す。

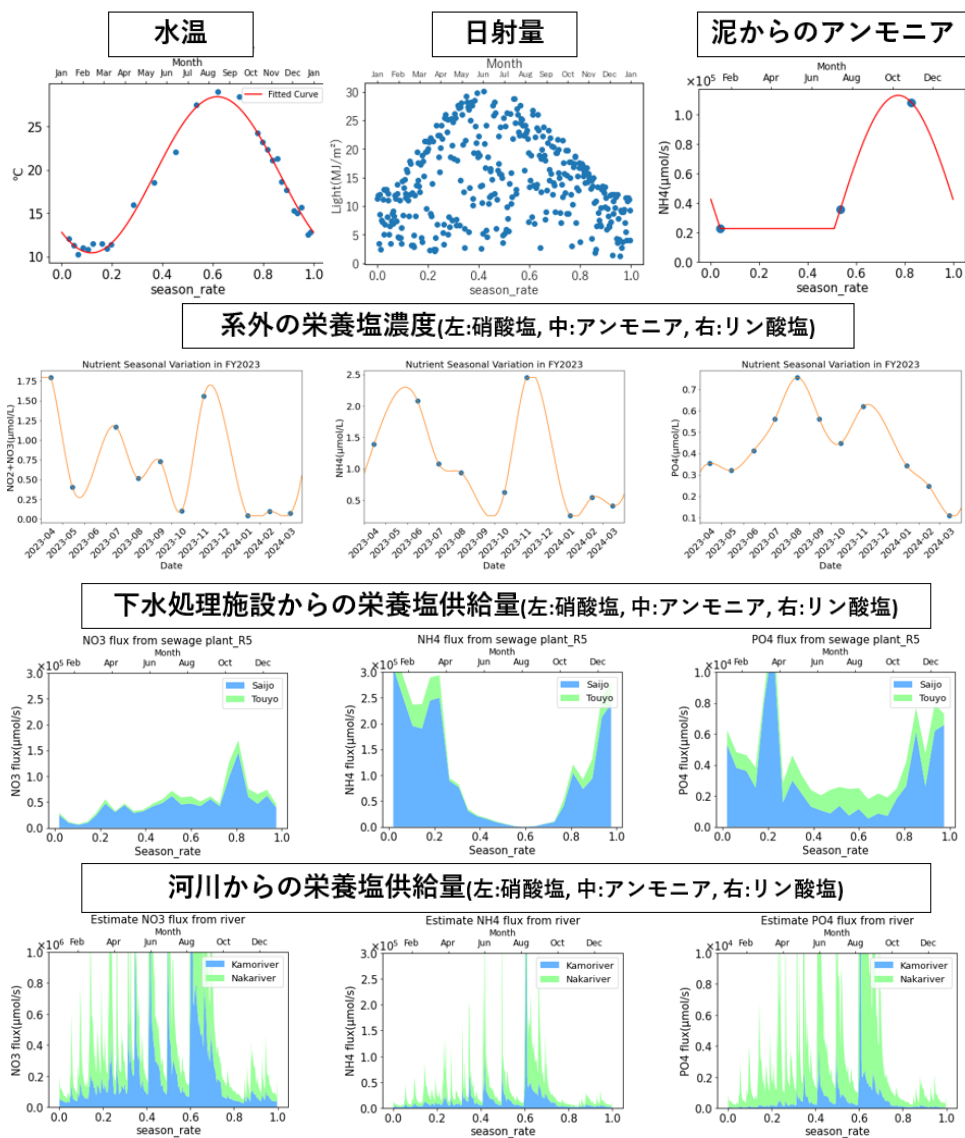


図 18 eNEMURO-SW モデルに与えた外力の季節変化。

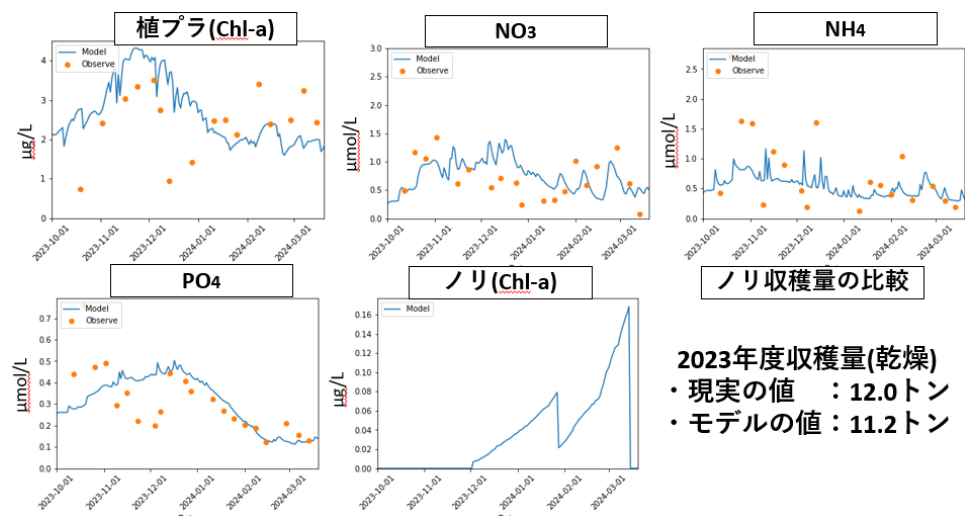


図 19 eNEMURO-SW による低次生態系構成要素とノリ現存量の季節変化。モデルの出力は青線で、観測値はオレンジの点で示す。

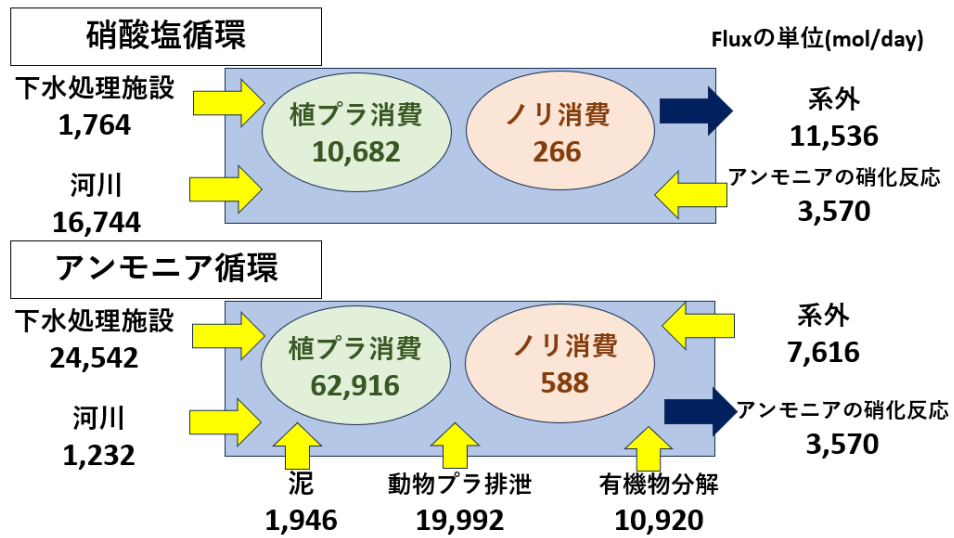


図 20 eNEMURO-SW によるノリ養殖海域の1月から3月の平均的な窒素循環像(上：硝酸塩循環，下：アンモニア循環，消費・供給などの Flux の単位は mol/day)。

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

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，渡邊晟也，尾崎真澄，原田貴大，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思われる。

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、ノルパックネットを用いて海底直上から海面まで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335 μm と100 μm のものを使用した。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。335 μm 目合いのネットで採集したサンプルについては、神奈川県の内湾域の3測点（2d, 7, 12）を対象に2017年～2024年、湾岸の1測点（27d）を対象に2015年5月～2024年11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 11 月までのサンプルの分析を完了した。100 μm 目合いのネットで採集したサンプルについては、千葉県で採集したものを対象に、2023 年 5 月～2024 年 3 月までの分析を完了した。これにより、小型の動物プランクトンについても通年の解析が可能となった。分析方法は、検鏡による種レベルでの個体数の計数である。分析が完了したデータを用い、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使用した。類似度指数には Bray-Curtis、クラスタリングには Ward 法を用いた。

(2) ベントス群集

国土技術政策総合研究所（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（国総研ウェブページ）、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、千葉県所属の調査船「ふさなみ」を活用し、東京湾内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 0.1 m^2 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、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～2024 年 9 月に実施した 12 地点 15 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 地点を抽出し奇数月の 6 回分のデータを使用した。さらに、湾内を 4 地点ずつの 3 区域（奥部、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。

出現サンプル数の多い分類群（種）については、20 年前と今回とで他種と比較して出現の増減の顕著なものを抽出した。前回と今回のベントス群集構造について単変量による比較を行うため、サンプルごとに総個体数、総湿重量、および森下の繁栄度指数を求めた。森下の繁栄度指数は多様性指数と個体数の積による合成指数であり、群集の多様性が大きいほど、また生息密度（定面積あたりの出現個体数）が高いほど、大きな値を示し、生物群集の豊かさを統一的に示す便利な指数である（Takada 2015）。森下の繁栄度指数 D^0N （種数 $\times$ 個体数）および D^2N （シンプソン多様度 $\times$ 個体数）を求め、固定効果として期間（前回 2002-2003 年と今回 2022-2023 年）、区域（奥部、中部、南部）、季節（春、夏、秋、冬）を用いた 3 元配置分散分析を行なった。 D^0N よりも D^2N の方がより優占種に重みを置いた指数となっている。指数はあらかじめ対数変換（ $\log(x+1)$ ）し、等分散性を確認するために Levene-test を行なった。

今回 3 年間の千葉県の調査で得られたベントス生物群集について、日本海区水産研究所（2018）のプロトコルに従い多変量による解析を行った。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0.01 g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によって調査年、季節、および区域による群集組成への影響を検定した。

また、環境要因の影響を検討するため、20年前の国総研による13回の調査のうち12地点のデータを用いて、dbRDAを行った。説明変数として同月同地点で得られた59の環境変数のうち、主に底質環境に関する要因について適宜データ変換を行なって分布の偏りを少なくし、標準化を行ったのち、VIFによって多重共線性の問題の少ない変数の組み合わせを抽出して使用した。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。

(3) 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」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。「北袖」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岸側水深約10 mを設定した。合計9地点にて調査を実施した(図3, 4, 表1)。

環境調査(水質、底質及び底生生物)は調査船ふさなみを用いて2か月に1回の頻度で行った。2024年4月2日、6月13日、7月31日、9月9日、11月12日及び2025年1月16日の計6回行った。水質観測は、多項目水質計(Aqua TROLL 500, 環境システム株式会社)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レーザ回折式粒子径分布測定装置(SALD-2300, 株式会社島津製作所)を用いて中央粒径を測定した。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。なお、マクロベントスについては、年間を通して結果が得られている2023年5月～2024年4月までのゴカイ綱の結果を用いた。

桁網調査は2023年4月18日、6月26日、7月24日、9月19日、11月14日、12月13日及び2025年1月27日に計7回行った(表2)。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

335 μm 目合いの結果

クラスター解析により、4つのグループに区分した（図6）。湾外（27d）では、おおむねクラスター3とクラスター4が出現したことから、これらが湾外の群集であると考えられた。両者の出現には季節的なパターンがあり、クラスター4は主に冬（1月）～春（5月）、クラスター3は夏（7月）～秋（11月）に出現した。

湾内（2, 54, BB, 富津, 12, 7, 2d）では、おおむねクラスター1, 2, 3が出現したが、出現するクラスターは年によって異なった。千葉県データもそろっている2022年～2023年では、おおむね秋（11月）～春（5月）にクラスター1が出現し、夏（7月～9月）にクラスター2が出現した。しかし、それ以外の年では、夏（7月）～秋（11月）にクラスター3が出現した。クラスター3は湾外の群集であると考えられることから、この時期には湾外からの流入があったことが示唆された。

各グループの上位種をみると、カイアシ類以外に枝角類およびヤムシ類も多く出現した（表3）。個体数はクラスター1が最も多く、次いでクラスター4, 3, 2の順となった。クラスター1と4では *Acartia (Acartiura) omorii* の個体数が最も多く、クラスター2と3では枝角類が最も多く出現した。重要種である *Calanus sinicus* はクラスター4で最も多く出現したが、クラスター1および3でも多く確認された。また、重要種である *Paracalanus orientalis* はクラスター4, 3, 1で多く出現した。

100 μm 目合いの結果

クラスター解析により、3つのグループに区分した（図7）。各クラスターの出現には季節的なパターンがあり、晩春（5月）～初夏（7月）にはクラスター1、晩夏（9月）～秋（11月）、冬（1月）にはクラスター2、冬（1月）～初春（3月）にはクラスター3が出現した。

各グループの上位種をみると、目合いの細かい100 μm ネットでは小型のカイアシ類も定量的に採集できるため、335 μm ネットに比べて総個体数が多くなった（表4）。また、小型のカイアシ類が上位を占めるようになったため、335 μm ネットと比較すると、枝角類とヤムシ類の順位が相対的に低くなった。

いずれのクラスターでも、小型で富栄養の指標種である *Oithona davisae* が最も多く出現し、特にクラスター1では高い値を示した。*A. omorii* と *C. sinicus* の個体数は、335 μm ネットと同程度のオーダーを示した。このことから、これらの種については335 μm ネットでも定量的な解析が可能であると考えられた。一方で、*P. orientalis* は100 μm ネットのほうが1オーダー多い個体数を示した。このことから、本種は335 μm 目合いのネットでは脱落するため、定量的な解析はできないと考えられた。

伊勢湾との比較

100 μm 目合いのネットで採集したサンプルを用いて、伊勢湾と比較した。伊勢湾の結果は、本事業の伊勢三河湾課題で得られたデータを用いた。いずれも閉鎖性の湾ではあるものの、多く出現する種や季節遷移のパターンは大きく異なっていた。

個体数で比較すると、伊勢湾では主要な種に季節的な遷移が見られた（図 8a）。*P. orientalis* は周年出現し、特に 7 月、11 月、1 月に多く見られた。それ以外の種については、5 月に *C. sinicus*、7 月に *O. davisae*、9 月に *Parvocalanus crassirostris*、11 月および 1 月に *Microsetella norvegica*、3 月に *C. sinicus* が多く出現した。一方、東京湾では 9 月を除き *O. davisae* が最も多く出現し、特に 7 月に高い値を示した。9 月については、伊勢湾と同様に *P. crassirostris* が主要なカイアシ類となった。また、伊勢湾で秋から冬にかけて多く出現した *M. norvegica* は、東京湾では出現しなかった。

次に、炭素量で比較すると、伊勢湾では大型種である *C. sinicus* の炭素量が春（3 月～5 月）に高い値を示した（図 8b）。一方、東京湾では個体数の多い *O. davisae* が炭素量でも高い値を示した。このように、伊勢湾では個体数とは異なるパターンが示されたが、東京湾では *C. sinicus* のような大型のカイアシ類が少ないため、小型で個体数の多い *O. davisae* が炭素量においても優占していた。

過去の研究との比較

富栄養の指標種である *O. davisae* の個体数について、東京湾が富栄養の状態であった 1986 年の結果（Itoh & Nishida 2015）と比較した。1986 年には、*O. davisae* の個体数は夏にやや減少するものの、通年で 25 万個体 m^{-3} 以上の高い値を示していた。一方、2023 年の調査では、最も高い値を示した 7 月の湾奥（St2）で 53 万個体 m^{-3} が出現したが、それ以外の月では数千～数万個体の範囲で推移した。このことから、夏には増加するものの、他の季節では個体数が減少していると考えられた。この変化は、富栄養の状態が改善したことで、現在では本種の現存量が減少していることを示唆している。

(2) ベントス群集

国総研による 2002-2003 年の調査および、今回の千葉県による 2022-24 年の調査によって得られたサンプルについて、種同定の精度などを考慮して整理したところ、合わせて前回で 220 分類群、今回で 190 分類群からなるベントス群集が認識された。うち、両期間ともに出現したのは 144 分類群であった。

解析対象とした全 252 サンプルのうち、18 サンプル以上で出現した分類群（優占種）について、20 年前と現在とで他の種と比較して出現サンプル（地点）数の増減が明らかな種を抽出した（表 4）。減った種のうち *Gyptis* 属は前回 19 サンプルで出現したものの、今回は生息が確認できなかった。表 1 の減った種のうちアシビキツバサゴカイ以外の種は、昨年度の報告で 20 年前のベントス群集の IndVal 指標種として抽出された種である。一方、表 1 の増えた種で IndVal 指標種として抽出された種は *Mediomastus* 属とクチベニデのみであった。

昨年度の報告と同様に、今年度のデータを追加しても、期間による違いが総重量よりも総個体数で顕著であり、20 年前に比較して個体当たりの重量の小さい、小型の個体の密度の減

少が顕著であることを示している。一般に小型ベントス類は大型の生物の餌として生態系内の物質循環を担っているため、食物網においてトップダウンコントロールがより強く作用する系に変化した可能性がある。森下の繁栄度指数は D^0N と D^2N で同様の傾向を示し、前回より今回、南部よりも奥部で指数が低いものの、季節差は顕著ではなかった（表 6、図 9）。平均値のみを見ると、今回の秋の南部の値は前回の中央部の値と同程度であり、冬には奥部の値は前回の中央部の値よりも低下した。また奥部の平均値は春から夏への低下が前回よりも激しくなっていた。 D^2N について空間内挿を行うと（図 10）、前回より今回で全体的に繁栄度が低下し、9月の無生物区域が拡大したことが見てとれる。

今回の3年間のベントス群集組成について、調査年、季節、および区域による群集組成への影響を検定したところ（表 7）、個体数データでも湿重量データでも区域による違いは有意であり（PERMANOVA, $P < 0.05$ ）、調査年は有意ではなかった。個体数では季節による違いが有意ではなく、nMDS 配置図でも同様の傾向が見てとれた（図 11）。湿重量では季節による違いが有意となり、春と比較して夏が有意に異なっていた。

環境変数を選択し、VIFによる相関の少ない14変数（ $VIF < 4.11$ 、表 B4）による国総研129サンプルのdbRDAを行ったところ、有意なdbRDAの回帰が得られ、全体として33.4%のばらつきが説明できた。第3軸までの固有値が1以上となり、第1軸が52.4%、第2軸が14.6%、第3軸が9.4%を説明した。第1および2軸による配置図では（図 12）、第1軸に底質中央粒径値、底質全硫化物、底質密度が強く働き、第2軸には水深が強く働いていることが見て取れる。南部と奥部のサンプルが第1軸で大まかに分離しており、粒度が小さく硫化物が多く底質密度の低い方向に奥部のサンプルが多く見られた。また水深が深いと両者の重なりが見られた。底質密度は底質の含水率・強熱減量・全窒素・全磷・CODなど底質に関する他の環境変数と高い相関を示していた。このように、環境データがよく揃っている国総研調査では有効なdbRDAの解析が可能であった。今回の調査においても環境データを合わせた解析を行う必要がある。

今年度の結果により、この3年間のベントス群集組成の年変動はそれほど大きくなく、20年前のデータと比較することによって長期変動を把握できる可能性が高いと考えられた。長期的な栄養塩濃度の低下や秋冬期の水温上昇（石井 2019）とベントス群集組成の長期変動との関連が想定される。また、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」状態が起こっている可能性がある（片野ほか 2019）。本課題の結果より湾内のベントス群集の地域間の違いの大きさが明らかにされており、湾奥から湾口にかけて強い環境傾度があることから、地域ごとに影響する環境要因が異なる可能性がある。

（3）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 ）と強熱減量（%）、マクロベントスの分布密度及び種数、桁網採集生物の種数の推移を項目ごとに報告する。2024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13に示した。養老川河口では、約10m及び約15mで6月から低下がみられ、7月には3地点とも1ml/L以下に低下した。五井では、約5mで7月に0.5ml/L以下となったが、それ以外では大きな減少はみられなかった。

約 10 m 及び約 15 m で 6 月から低下がみられ、7、9 月には 2 地点とも 0.5 ml/L 以下に低下した。北袖では、マウンド上及び岸側で 7、9 月に 0.5 ml/L 以下に低下した。マウンド下で 6 月から低下がみられ、7、9 月に 0.5 ml/L 以下に低下した。2024 年は貧酸素水塊の内湾全域で広く発生したため、東岸浅場において長期に渡り底層 DO の低下が続いた。

底質は調査ごとに、強熱減量を測定したほか、11 月の調査では中央粒径を測定した。強熱減量は 2023 年 5 月～2024 年 9 月までの 9 か月分の平均を用いた。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（図 14）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、中央粒径は五井約 5 m (236 μm)、五井約 10 m (105 μm) 及び北袖マウンド上 (161 μm) で高く、強熱減量は五井約 5 m (1.8%)、五井約 10 m (2.4%) 及び北袖マウンド上 (2.4%) で低い傾向であった。一方、北袖マウンド岸側（中央粒径 41 μm 、強熱減量 7.6%）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が考えられる。

ゴカイ綱の分布密度、種数及び湿重量の季節変化について、図 15～17 に、種数と湿重量の関係（地点ごとに年平均）を図 18 に示した。養老川河口では、約 5 m で夏季に分布密度、種数及び湿重量は低い傾向にあった。約 10 m では 9 月に分布密度が高くなったが、種数は少なく、汚濁指標種であるシノブハネエラスピオが優占していた。約 15 m で年間を通じて分布密度、種数及び湿重量が低く推移し 7、9 月にはシノブハネエラスピオのみが分布していた。五井では、約 5 m で夏季に分布密度の低下がみられたが、年間を通して 15 種類以上が確認された。5 月には約 10 m で約 5 m より種数が多くなったが、それ以外の月では約 5 m を下回っていた。約 15 m では年間を通して分布が少なく、7、9、1 月では無生物となった。北袖では、マウンド上で 1 月に種数が低下したものの、年間を通して多くの種が確認された。マウンド下及びマウンド岸側では、年間を通して複数種が確認されたが、マウンド上の種数を上回ることはなかった。

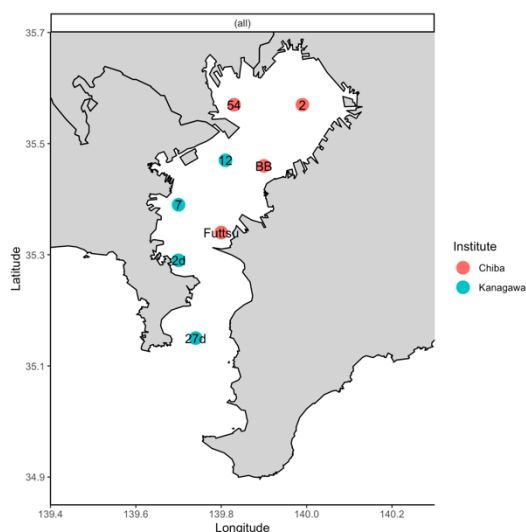
東京湾東岸海域全体でみると、養老川河口約 5 m、10 m では、湿重量は重くなったが、種数は少ない傾向であり、多様性は認められなかった。五井約 5 m 及び北袖マウンド上は他海域で見られなかったケヤリ科が多く分布していた。五井約 5 m 及び北袖マウンド上以外では、シノブハネエラスピオが優占した。北袖マウンド上は、マウンド下や同水深の岸側の地点に比べて、夏季でも貧酸素化しにくく、中央粒径が大きく、強熱減量が小さく、ゴカイ綱の分布密度及び種数も多く多様性が高いといった特性がみられた。年間を通して良好な底質が保たれ、一定量のゴカイ綱の分布及び多様性が認められた。

マウンド上（水深約 10 m）は五井約 10 m 並みに生物生残が良かった。これは、マウンド上が周囲より数 m 浅いため、潮汐や風などによる流れの影響を受けやすく、海水交換が進みやすいことや底泥直上で酸素が消費されても、同じ水深帯の海水を混合するため、底層 DO が低下しにくいことが考えられる。また、周囲に傾斜があるため、浮泥がマウンドの下へ落ちるため、上には有機物が溜まりにくく、酸素消費量が小さいことや傾斜により流速の変化が生じやすい可能性が考えられる。

桁網採集生物の種数及び密度の推移について（図 19, 20）、養老川河口では、2024～2025 年の約 5 m における種数及び密度は特に 11 月に多くなった。これはハタタテヌメリ、トリガイ等が多く入網したこと、甲殻類が多種入網したことが要因である。全ての深度で密度は概ね 10 個体/100 m² 上であったが、1 月に約 10 m で生物が採捕されなかった。五井では、2024～

2025 年の約 5 m 及び約 10 m における密度は通年で 2023 年以前より低い月が多かった。約 5 m では無生物になることはなかったが、約 10 m では 6 月及び 11 月に無生物状態となった。2024～2025 年の種数は過去並であった。北袖では、2024～2025 年の種数はマウンド上下ともに 7 月及び 9 月に低下した。密度はマウンド上下ともに過去と比較して低い水準で推移した。特にマウンド上では 6～9 月に、マウンド下では 9 月に低下した。

【参考文献】



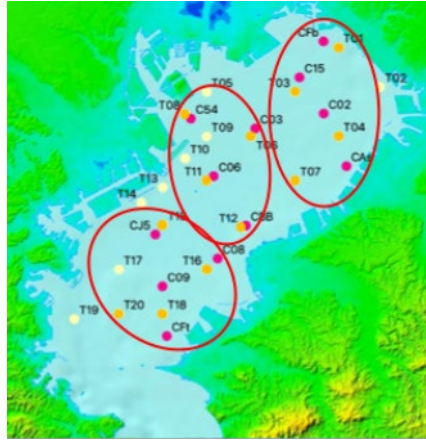


図2 ベントス調査地点図

赤丸が2002-2003年の国総研による東京湾広域環境調査から抽出した12点と青丸が千葉県による12点。赤の楕円は湾内3区域（奥部，中部，南部）



図3 マウンド効果：調査点図

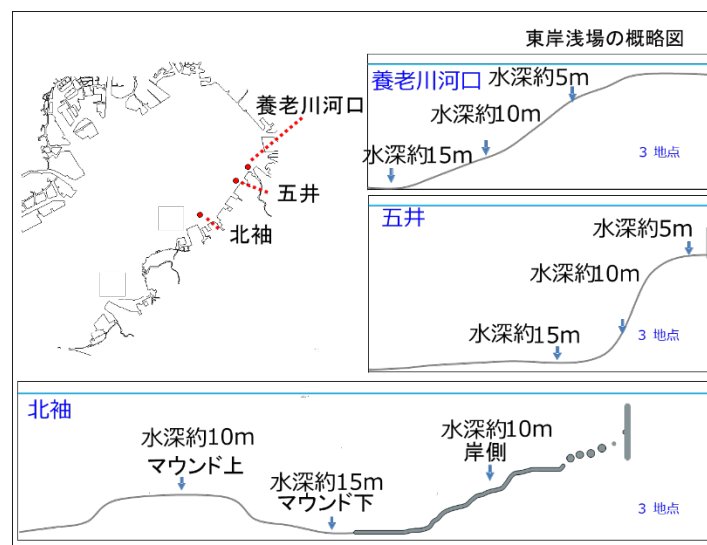


図4 マウンド効果：調査点プロフィール図

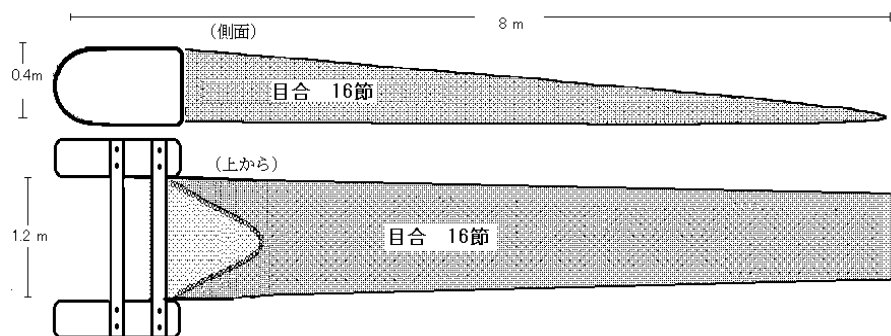


図5 マウンド効果：桁網

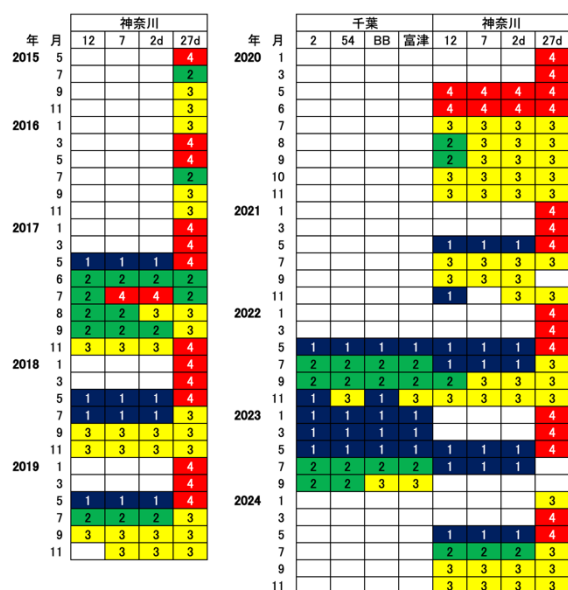


図6 335 μ m目合いのネットで採集した各クラスターの出現状況
青，緑，黄色および赤のセルはそれぞれグループ1，2，3，4を示す

		千葉			
年	月	2	5d	BB	富津
2023	5	1	1	1	1
	7	1	1	1	1
	9	2	2	2	2
	11	2	2	2	2
2024	1	3	2	2	3
	3	3	3	3	3

図7 100 μ m目合いのネットで採集した各クラスターの出現状況
青，緑および黄色およびセルはそれぞれグループ1，2，3を示す

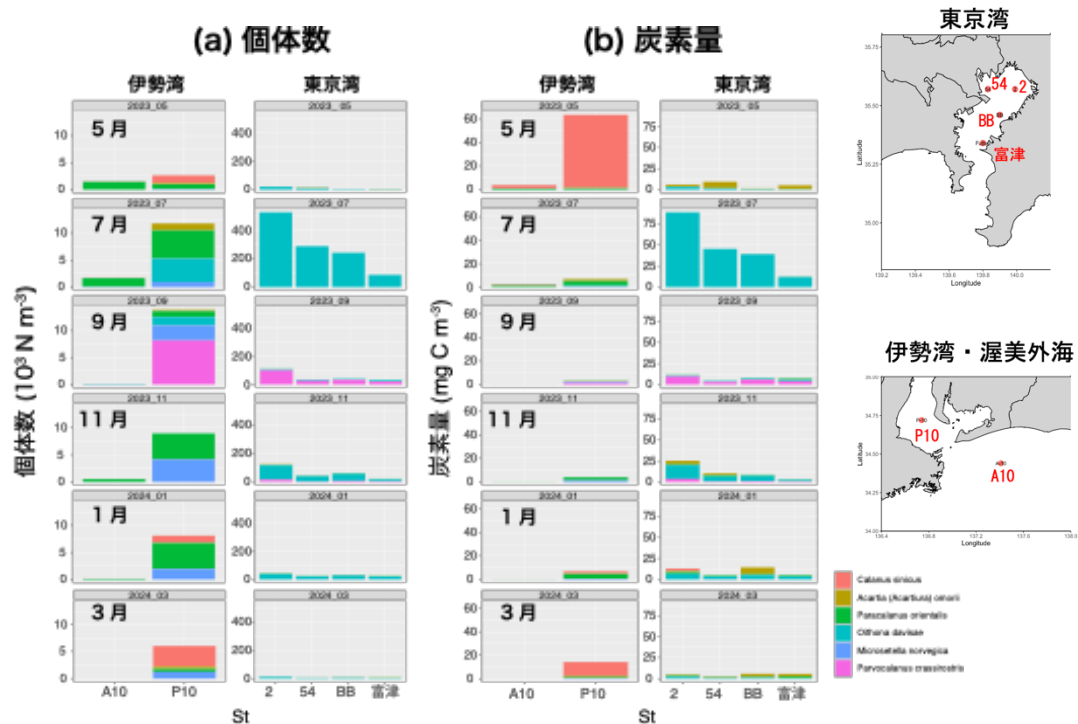


図8 東京湾と伊勢湾の主要カイアシ類の個体数(a)と炭素量(b)

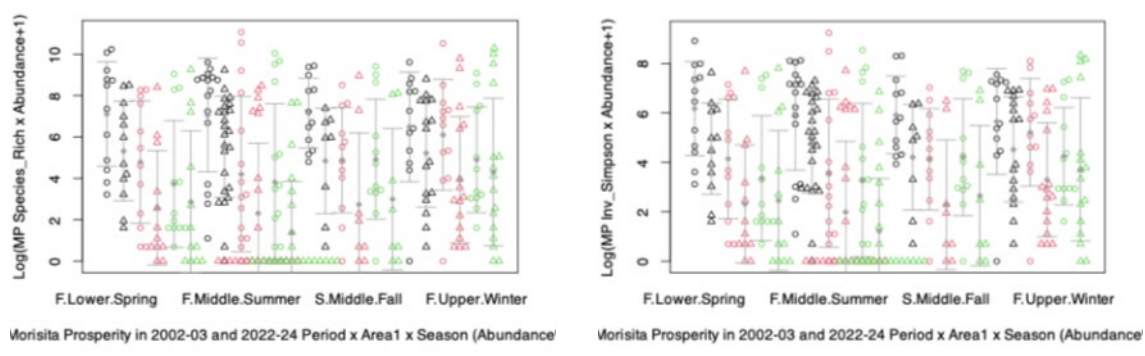


図9 ベントス：ベントス群集による森下の繁栄度指数 D^0N (種数×個体数) および D^2N (シン普森多様度×個体数) の、期間 (丸：前回，三角：今回)，区域 (黒：南部，赤：中部，緑：奥部)，季節別の平均 ($\pm$ 標準偏差)
データは対数変換 ($\log(x+1)$) した。分散分析の結果は表 6

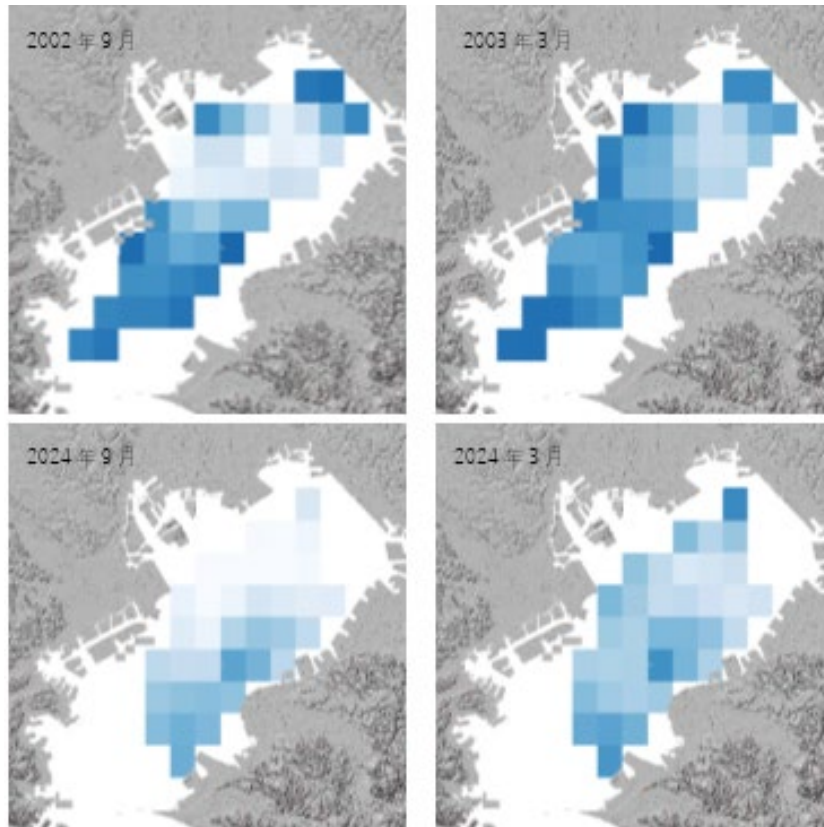


図 10 ベントス：前回と今回の 9 月と 3 月の繁栄度指数 D^2N を東京湾内に空間内挿した推定図。白色は無生物区、青の濃い領域ほど繁栄度の値が高い

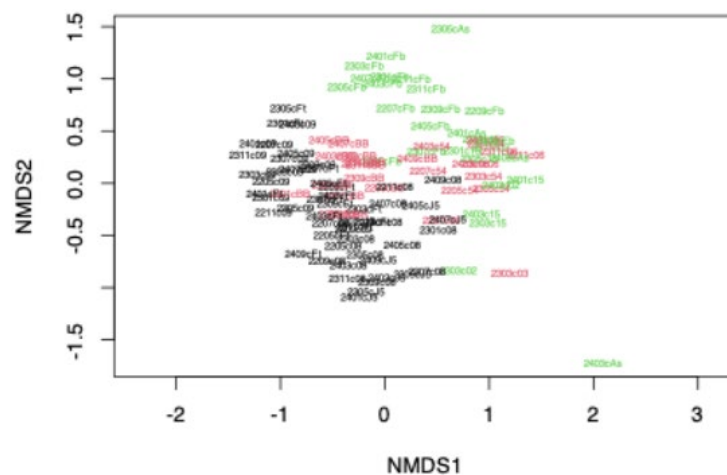


図 11 ベントス：3 年間の今回の調査で得られたベントス群集 109 サンプル（総個体数が 2 個体より多いもの）262 分類群による nMDS 二次元配置図
個体数をもとに Bray-Curtis 非類似度を用いて、群集組成の違いを求めた。
黒：南部，赤：中部，緑：奥部。Stress=0.186

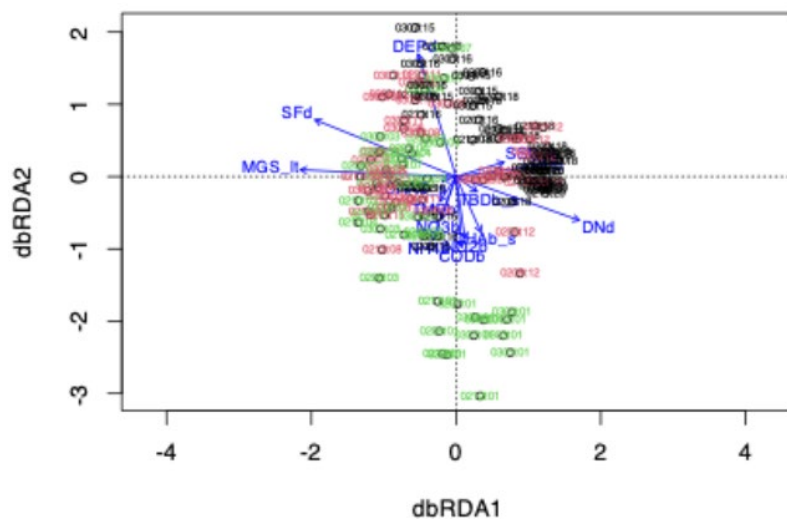


図 12 ベントス：国総研調査の 12 地点 129 サンプル 14 環境変数による dbRDA の第 1 軸と第 2 軸による配置図

黒：南部，赤：中部，緑：奥部。矢印先端の環境変数の略号は表 8 参照

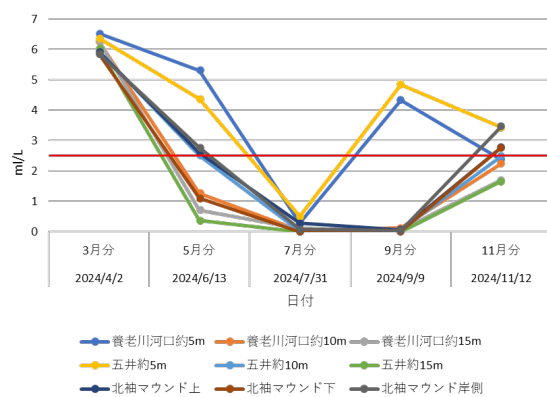


図 13 マウンド効果：各地点における底層 DO

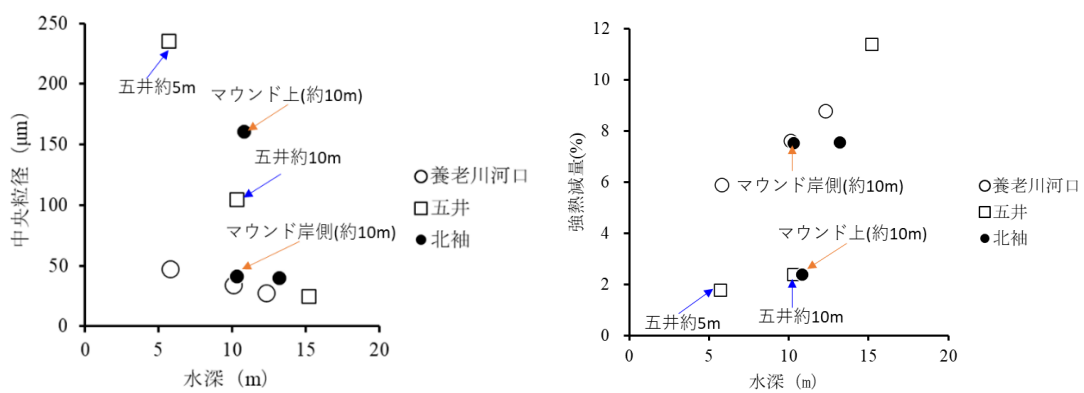


図 14 マウンド効果：水深と底質の中央粒径，強熱減量（IL）の関係

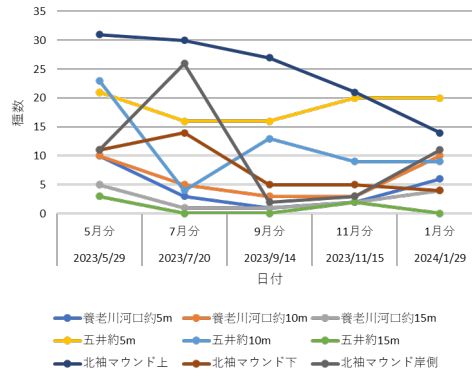


図 15 マウンド効果：ゴカイ綱種数の季節変化

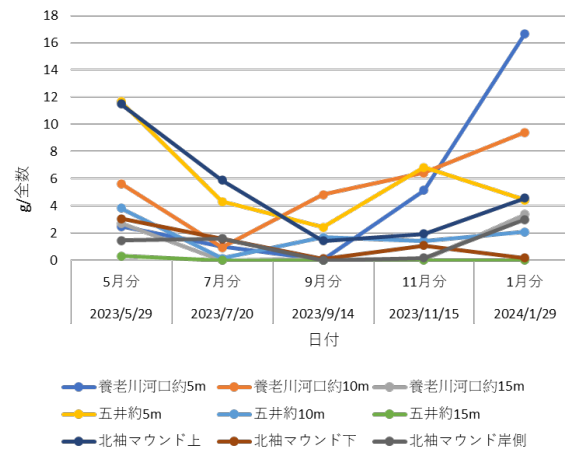


図 16 マウンド効果：ゴカイ綱湿重量の季節変化

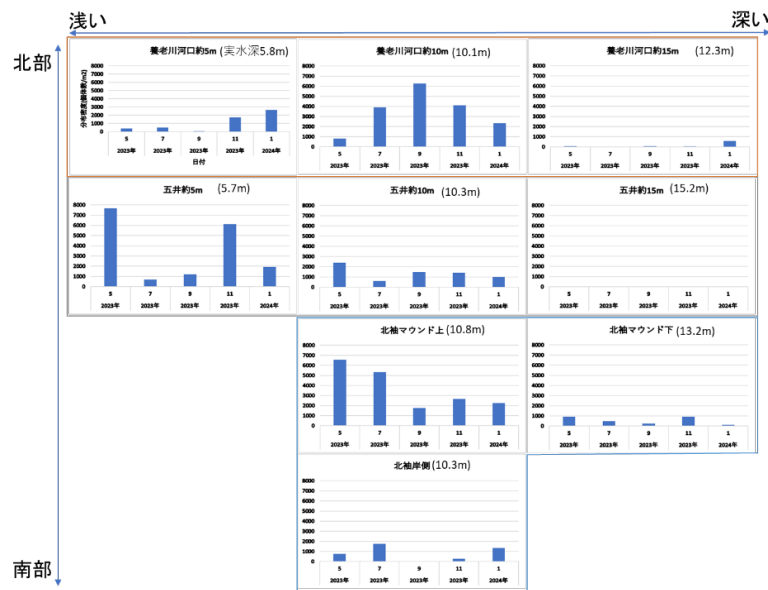


図 17 マウンド効果：ゴカイ綱分布密度の季節変化

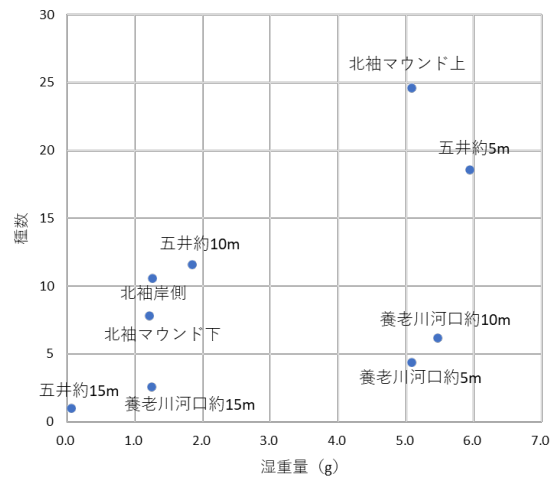


図 18 マウンド効果：ゴカイ綱における種数と湿重量の関係

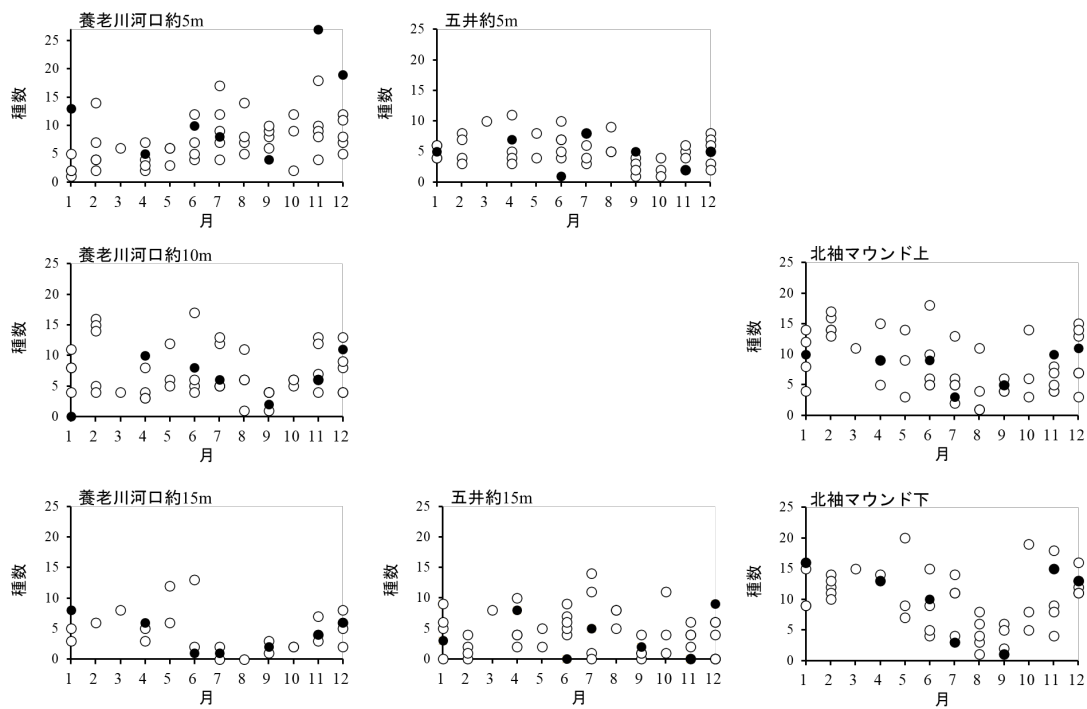


図 19 マウンド効果：桁網採集物の種数の推移

(○：2018～2023 年，●：2024～2025 年)

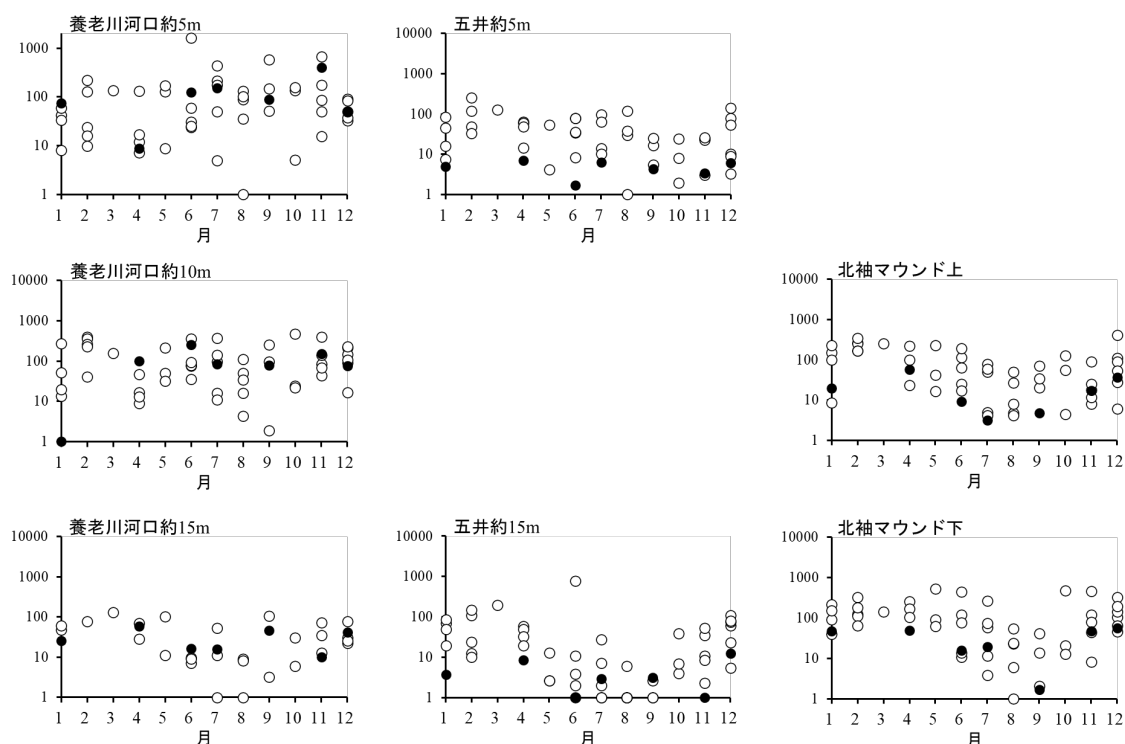


図 20 マウンド効果：桁網採集物の密度（個体数+1/100 m²）の推移
（○：2018～2023 年，●：2024～2025 年）

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
養老川河口	約5m	N35° 32.81′	E140° 03.89′	5.8	○	○	○
	約10m	N35° 32.88′	E140° 03.67′	10.1	○	○	○
	約15m	N35° 32.97′	E140° 02.69′	12.3	○	○	○
五井	約5m	N35° 31.72′	E140° 02.77′	5.7	○	○	○
	約10m	N35° 31.75′	E140° 02.85′	10.3	○	○	○
	約15m	N35° 31.81′	E140° 02.56′	15.2	○	○	○
北袖	マウンド上	N35° 29.15′	E139° 59.23′	10.8	○	○	○
	マウンド下	N35° 29.25′	E139° 59.29′	13.2	○	○	○
	岸側	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	
	約5m	約10m	約15m	約5m	約15m	マウンド上	マウンド下
2024/4/18	○	○	○	○	○	○	○
2024/6/26	○	○	○	○	○	○	○
2024/7/24	○	○	○	○	○	○	○
2024/9/19	○	○	○	○	○	○	○
2024/11/14	○	○	○	○	○	○	○
2024/12/13	○	○	○	○	○	○	○
2025/1/27	○	○	○	○	○	○	○

○：実施、-：未実施

表3 335 μm 目合いのネットで採集した各クラスターの上位10種の平均個体数 (N m^{-3})
 黒字はカイアシ類, 緑字は枝角類, 青字はヤムシ類を示す。

順位	クラスター1	N m^{-3}	クラスター2	N m^{-3}	クラスター3	N m^{-3}	クラスター4	N m^{-3}
1	Acartia (Acartiura) omorii	1227	Penilia avirostris	333	Pseudevadne tergestina	295	Acartia (Acartiura) omorii	623
2	Evadne nordmanni	170	Pseudevadne tergestina	126	Paracalanus orientalis	238	Pseudevadne tergestina	345
3	Paracalanus orientalis	139	Aidanosagitta crassa	80	Temora turbinata	84	Paracalanus orientalis	288
4	Aidanosagitta crassa	84	Acartia (Acartiura) omorii	72	Penilia avirostris	54	Calanus sinicus	185
5	Pleopis polyphemoides	47	Pseudodiaptomus marinus	39	Calanus sinicus	54	Podon leuckartii	94
6	Calanus sinicus	47	Paracalanus orientalis	26	Aidanosagitta crassa	51	Pleopis polyphemoides	60
7	Pseudodiaptomus marinus	41	Ctenocalanus vanus	13	Acartia (Acartiura) omorii	39	Penilia avirostris	49
8	Pseudevadne tergestina	24	Evadne nordmanni	6	Flaccisagitta enflata	30	Ditrichocorycaeus affinis	23
9	Centropages abdominalis	23	Oithona davisae	5	Ditrichocorycaeus affinis	21	Evadne nordmanni	22
10	Ditrichocorycaeus affinis	20	Ditrichocorycaeus affinis	5	Paracalanus aculeatus aculeatus	17	Oncaea venusta	12
Others		16		28		116		83
Total		1838		733		999		1784

カイアシ類
 枝角類
 ヤムシ類

表4 100 μm 目合いのネットで採集した各クラスターの上位10種の平均個体数 (N m^{-3})
 黒字はカイアシ類, 緑字は枝角類, 青字はヤムシ類を示す。

順位	クラスター1	N m^{-3}	クラスター2	N m^{-3}	クラスター3	N m^{-3}
1	Oithona davisae	214313	Oithona davisae	48340	Oithona davisae	19467
2	Acartia (Acartiura) omorii	1325	Parvocalanus crassirostris	34980	Paracalanus orientalis	2667
3	Pseudodiaptomus marinus	900	Paracalanus orientalis	4340	Centropages abdominalis	1583
4	Aidanosagitta crassa	429	Acartia (Acartiura) omorii	1100	Acartia (Acartiura) omorii	950
5	Oithona similis	150	Euterpina acutifrons	280	Pleopis polyphemoides	450
6	Acartia (Acanthacartia) sinjiensis	100	Centropages abdominalis	260	Oithona similis	267
7	Centropages abdominalis	100	Ditrichocorycaeus affinis	240	Calanus sinicus	233
8	Ditrichocorycaeus affinis	100	Oithona similis	240	Danielssenia typica	167
9	Hemicyclops japonicus	100	Aidanosagitta crassa	142	Pseudodiaptomus marinus	117
10	Ditrichocorycaeus andrewsi	50	Pleopis polyphemoides	120	Parvocalanus crassirostris	33
	Others	176	Others	583	Others	12
	Total	217742		90624		25945

カイアシ類
 枝角類
 ヤムシ類

表5 ベントス：出現サンプル数が他種と比較して減った種および増えた種の各時期での出現サンプル数（総出現サンプル数が18以上）

	学名	和名	2002-2003	2022-2024
総サンプル数			72	180
減った種	Prionospio pulchra	イトエラスピ ^o	41	5
	Pinnixa rathbuni	ラスバ ^o ンマメガ ^o ニ	18	7
	Prionospio aucklandica	ミツバ ^o ネスピ ^o	14	10
	Ophiura kinbergi	クシノハクモヒトデ ^o	15	8
	Spiochaetopterus costarum	アジビ ^o キツバ ^o サコ ^o カイ	13	8
増えた種	Gyptis spp.		19	0
	Glycera spp.	チリを含む	22	59
	Mediomastus spp.		14	58
	Nephtys spp.	コノハシロガ ^o ネコ ^o カイを含む	5	22
	Chrysopetalidae	タンザ ^o クコ ^o カイ科	4	21
	Chaetozone spp.		3	22
	Anisocorbula venusta	クチベ ^o ニテ ^o ガ ^o イ	3	15

表6 ベントス：総個体数，総湿重量，森下の繁栄度指数 D^0N （種数 x 個体数）および D^2N （シンプソン多様度 x 個体数）の 3 元配置分散分析の結果（P 値）。固定効果として期間（前回 2002-2003 年と今回 2022-2023 年），区域（奥部，中部，南部），季節（春，夏，秋，冬）を用い，指数は対数変換（ $\log(x+1)$ ）した。Levene-test の結果も合わせて示す

要因	自由度	総個体数	総湿重量	D^0N （種数 x 個体数）	D^2N （シンプソン多様度 x 個体数）
期間	1	< 0.001	0.025	< 0.001	< 0.001
区域	2	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
季節	3	0.082	< 0.001	0.051	0.032
期間 x 区域	2	0.731	0.671	0.813	0.771
期間 x 季節	3	0.530	0.948	0.848	0.922
区域 x 季節	6	0.161	0.299	0.232	0.217
期間 x 区域 x 季節	6	0.931	0.850	0.948	0.938
Levene-test	23/312	0.724	0.158	0.925	0.912

表7 ベントス：2022-2024 年調査の群集組成に対する 3 要因（調査年，季節，区域）の PERMANOVA による結果*

	個体数ベース		湿重量ベース	
	df	P 値	df	P 値
調査年	1	0.153	1	0.058
季節	3	0.130	3	0.016
区域	2	< 0.001	2	< 0.001
残差	102		116	

* adonis2(BC_distance~Year+Season+Area, by="margin", permutations=9999)

表8 ベントス：国総研調査の 12 地点 129 サンプル 14 環境変数による dbRDA の結果。固有値が 1 以上の第 3 軸までの各変数の係数を示す。括弧内は図 12 の略号

軸	dbRDA1	dbRDA2	dbRDA3
低層水 pH (PHb)	0.013	0.003	-0.021
低層水 COD (CODb)	0.008	0.007	-0.016
低層濁度 (TBD _{b_s})	-0.004	-0.014	0.013
低層水 SS (SS _{b_s})	0.01	0.024	-0.011
5mCHla (CHA5 _s)	0.004	0.008	0.019
低層水 Chla (CHAb _s)	-0.012	-0.039	0.011
低層水 NH4 (NH4b)	0.001	-0.016	-0.016
低層水 NO2 (NO2b)	-0.004	-0.016	-0.001
低層水 NO3 (NO3b)	-0.015	-0.047	0.016
低層水温 (TMPb)	-0.020	-0.081	0.068
底質中央粒径 (MGS _{lt})	-0.05	-0.049	-0.053
底質全硫化物 (SFd)	-0.031	0.032	0.059
底質密度 (DNd)	0.012	-0.033	0.021
水深 (DEPd)	0.008	0.03	-0.006
固有値	7.382	2.053	1.318

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（2024～2025 年）

分類	種名	養老川河口			五井		北袖マウンド		合計
		5m	10m	15m	5m	10m	上	下	
魚類 (21種)	アイゴ						1		1
	アカメフグ					1			1
	アミメハギ	5	1		6	5	19	1	37
	イネゴチ							1	1
	カタクチイワシ					1			1
	カワハギ							1	1
	キララハゼ							3	3
	クサフグ	2			2	1			5
	クロサギ				1				1
	コモチジャコ							1	1
	シロギス	3	1				1		5
	シログチ		1						1
	テンジクダイ		1	2				5	8
	トウゴロウイワシ	1		1					2
	ネズミゴチ	1							1
	ハタタテヌメリ	56	16	48	3	5	36	40	204
	ヒメハゼ			1					1
	マコガレイ	4	1	2	3				10
	マゴチ	2					1		3
	マハゼ	19	1						20
	メイタガレイ	1	1						2
甲殻類 (18種)	イシガニ	8	2		1		8	3	22
	イッカククモガニ	32	6	6	5	4	113	21	187
	エビジャコ	5	0	2	7	1	6	7	28
	ガザミ	7	1	1	1	1		2	13
	ケブカエンコウガニ							4	4
	サメハダヘイケガニ	1				1	2	2	6
	サルエビ	4		1			4	1	10
	シャコ	4		11				47	62
	ジュウイチトゲコブシ	3					1	11	15
	ツノナガコブシ	3					2		5
	テッポウエビ							7	7
	テナガコブシ	2					5	10	17
	ヒメガザミ	26				2	12	33	73
	ヒライソガニ	6			3		6		15
	ヒラテコブシ	11	1	1		1		6	20
	マメガニ属	1						1	2
	マルガザミ	1							1
	マルバガニ		1					5	6
頭足類 (2種)	テナガダコ							1	1
	マダコ					6			6
巻貝類 (5種)	アカニシ				4	2			6
	アラムシロ	4							4
	キヌボラ	6	2						8
	コロモガイ	18	2				11	3	34
	ツメタガイ				2				2
二枚貝類 (16種)	アカガイ	1	38				1		40
	アサリ	546	23			1			570
	イヨスダレ							1	1
	オニアサリ					1	1		2
	カガミガイ	1					1		2
	カラスノマクラ	2				1			3
	ゴイサギガイ	16	20					3	39
	サクラガイ	1							1
	サザナミガイ	1						3	4
	サルボウガイ	93	65			4	3	6	171
	タマエガイ						4		4
	チゴトリガイ	2							2
	チヨノハナガイ	4							4
	トリガイ	134	176	21			9	55	395
	ホトトギス	2	1			1		1	5
	ホンビノスガイ	91	329	89	1	3		10	523
合計		1130	690	186	39	42	247	295	2629

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，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

速水啓介，石井光廣，島田裕至，久保賢二，宇都康行，小山智行，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

千葉県の主要な 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、金沢および走水地区の試料も収集した。なお、ノリ漁期の開始は 11 月と、本事業の後半に始まることから、本報告書（令和 6 年度）では、令和 5 年度に収集した試料について、炭素・窒素安定同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ ）の分析結果を報告する。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。

2022 年度及び 2023 年度漁期の市川，金田，富津，大佐和のノリ $\delta^{15}\text{N}$ と，千葉県水産総合研究センターが実施した，ノリ養殖漁場に近接した観測地点の水質観測結果（DIN，塩分

等) 及び湾軸に沿った観測地点の水質観測結果を照らし合わせ、漁場毎の窒素源の推定を行った。なお、降水量は、気象庁の観測所「船橋」及び「木更津」の日別観測データを用いた。

(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）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は、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。なお、盤洲漁場として調査してきた久津間地区は流入河川である小櫃川の影響が大きいことから、令和6年度より、金田地区を新たに調査地に加えた。金田地区を加えることで、湾奥から湾口にかけての栄養塩環境の勾配を反映したデータの取得が可能であると考えられる。

・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微細藻類（MPB: microphytobenthos）もしくは底質中の有機物（SOM: sediment organic matter）を採用した。同位体分析方法の詳細については令和5年度報告書を参照されたい。データの信頼性を担保するため、CN比（重量ベース）4.0以上の動物試料、CN比8.0以上のSOMおよびMPBは以下の解析から除外した。

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、調査時に干潟上で採取した試料に加えて、流入河川である小櫃川の真水、沖合水（St.8：千葉県沿岸定線）についても検討を行った。

・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質について、検鏡計数に基づく生物組成の調査を実施した。市川、金田、久津間、富津の4地点でアサリ及び海水と砂を採集した。令和6年度の調査は2024年と2025年の奇数月（2024年3月～2025年1月）に実施した。試

料は全て採集時に中性ルゴールで固定した。アサリは消化管を取り出し、内容物を検鏡試料とした。海水は適宜濃縮処理を行い、底質は固定液中の懸濁物を検鏡試料とし、いずれも中和処理をして検鏡に用いた。顕微鏡下で同定可能な水準で分類し細胞を計数して、湿重量 (cells / mg [wet weight]) または体積 (cells / mL) あたりの細胞数 (細胞密度) を算出した。また、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。今年度の解析では 2023 年 5 月から 2024 年 11 月 (海水は 9 月まで、金田は 2024 年のみ) の海水と底質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。

- ・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

上記の 4 定点 (北部：市川，中部：金田・久津間，南部：富津) において，2024 年 5 月から 2025 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。環境水中に含まれる懸濁物については，目開きの異なる 4 種類のフィルターでろ過してサイズ分画した後に冷凍保管した。本年度は，久津間を除く 3 地点の，5 月，7 月，9 月，11 月の試料の分析を実施し，特にアサリの餌料への底生珪藻の寄与に着目して解析を行った。各試料から抽出した DNA を鋳型として，*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するとともに，各属の生活型 (浮遊もしくは底生) を判定した。

【結果】

(1) ノリ状況調査

2022 年度及び 20223 年度漁期における千葉県沿岸のノリ $\delta^{15}\text{N}$ は，市川 ($15.5 \pm 2.0\text{‰}$ ， $N = 30$)，金田 ($14.3 \pm 2.4\text{‰}$ ， $N=29$)，富津 ($14.5 \pm 2.6\text{‰}$ ， $N = 18$)，大佐和 ($12.6 \pm 2.0\text{‰}$ ， $N = 17$) と，湾奥から湾口にかけて低下する傾向がみられた (図 1)。一方，同じ木更津地区の中里 (2023 年度漁期から収集) のノリ $\delta^{15}\text{N}$ は $17.3 \pm 1.7\text{‰}$ ($N = 8$) と高かった。また，同じ漁場でもノリ $\delta^{15}\text{N}$ 値にはばらつきがあり，特に，金田と富津では約 10‰と大きく，これは窒素源が時間スケールで変化していることを示していると考えられた。なお，木更津地区の養殖方法別のノリ $\delta^{15}\text{N}$ は，金田，中里ともに養殖方法による有意な差は認められなかった (t-test, $p > 0.05$) (図 2)。

2022 年度漁期の市川では，降水量の増加に伴い DIN の増加及び塩分の低下が確認され，その後ノリ $\delta^{15}\text{N}$ が 20‰近くまで高くなる例がみられた (図 3)。そのため，湾奥における窒素源は，河川から流入する陸域由来の割合が高いと推定された。

一方，2022 年度漁期の富津及び大佐和では，2023 年 1 月にノリ $\delta^{15}\text{N}$ が 10‰前後と低い値を示した。この少し前の海況をみると，富津，大佐和周辺の鉛直密度 (σ_t) に差はなく，湾口の中底層に含まれる DIN が両漁場に波及しやすい海況となっていた (図 4)。これ

らのことから、千葉県ノリ漁場の窒素源は、陸域由来と海況に応じて湾口水が寄与している可能性が考えられた。

東京湾西岸の神奈川県金沢地区では、令和5年度漁期中、漁業者の協力の下、高頻度で乾燥板ノリ試料を入手することが出来た。そちらの結果（図5）を見ると、生産の開始した11月後半から1月半ばまではノリ $\delta^{15}\text{N}$ が低い値で推移し、1月後半から2月半ばにかけて、ノリ $\delta^{15}\text{N}$ が顕著に高くなる傾向がみられた。但し、ノリ試料のCN比は、この期間に上昇することではなく、ノリの品質に変化はなかった。漁期開始直後の金沢地区周辺のDIN濃度は200 $\mu\text{g/L}$ 程度と高く、更に高濃度のDINが波及してきたとしても、ノリの品質には影響がないということだと考えられる。一方で、これらの高頻度データは、対象とする漁場内におけるDINの波及を直接的に観察することが出来ることを改めて確認することが出来た。今後も、採取頻度や詳細な位置情報などを加味したサンプリングを行うことが出来れば、漁場内における更なる栄養塩供給状況の把握が可能だと考えられる。

(2) アサリ食性調査

異なる3つの手法、すなわち、検鏡、炭素・窒素安定同位体比およびメタバーコーディングを用いて、アサリ食性解析に取り組み始めて2年が経過した。本報告書では、各手法を用いて得られてきた情報の整理を試みた。手法の特徴として、検鏡およびメタバーコーディングは藻類の組成に関する膨大なメタデータから構成され、情報整理の方向性に更なる検討が必要であるのに対して、炭素・窒素安定同位体比による食性解析では、基本的に浮遊系⇄底生系の判別に情報量を絞った指標であることから、まずは炭素・窒素安定同位体比分析をベースに、各手法で得られた情報の整理を試みた。

・炭素・窒素安定同位体比を用いた餌料源分析

エンドメンバーである植物プランクトンおよび底生微細藻類の同位体比について検討を進めた。まず植物プランクトンとして、盤洲漁場の久津間地区を対象に、流入河川である小櫃川の真水、調査時（大潮干潮時）に干潟上で採取した汽水、千葉県沿岸定線の定点 St.8 にて採取した沖合海水、以上3つの水を用いて、アサリ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ との相対的な関係性を確認した（図6）。なお、こちらの図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‰, $\delta^{15}\text{N}$: 4.6‰）を加えたものが表示されていることに留意頂きたい。こちらの図を見ると、沖合海水の寄与無くしてアサリ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ を説明することはできず、アサリは沖合海水に含まれる植物プランクトンを餌利用していることが明らかとなった。これまで、検鏡およびメタバーコーディング解析における環境水としては、大潮干潮時の干潟上に残った汽水を取り扱ってきたが、次年度以降、環境水の取り扱いについて注意が必要なことを確認した。潮下帯サイトである市川地区を除く、金田および富津地区についても、エンドメンバーとして扱っている水の妥当性について検討が必要である。なお、富津地区における同位体分析用の水については、2023年11月から少し沖のサイトにて採取、分析していることをここに付記しておく。

次に底生微細藻類の採集方法についての検討を行った。炭素・窒素安定同位体比を用いた二枚貝類の食性に関する先行研究では、MPBの値をエンドメンバーとして使用している例に加えて、先行研究のMPBの値をそのまま引用している例が多く見受けられる。しかし、

事業開始以来、MPB の単離を試みてきた所感として、きれいに MPB を単離することは難しい。富津を例に CN プロットを見ると（図 7）、MPB ではアサリ $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ を説明することはできず、むしろ SOM の方がエンドメンバーとして妥当な値を取っていることが分かる。他の地区についても同様に比較をしたところ、盤洲漁場の久津間地区を除いて、SOM の $\delta^{13}\text{C}$ の方が MPB の $\delta^{13}\text{C}$ よりも高い値を取る傾向がみられ、一般的に知られている底生微細藻類の値に近い値を取った。河川から流入する陸上植物片由来有機物の影響が大きい河口域（e.g. 久津間地区）を除いて、SOM が底生微細藻類 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ の代替として使えるのではないかと考えているが、今後、更なる精査が必要であろう。

アサリとエンドメンバーの値を各地区について整理した結果（図 8）、湾奥の市川地区と小櫃川河口の久津間地区では、アサリ $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ を $\text{POM}\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ だけで説明可能だった。一方、金田地区と富津地区では、アサリ $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ を $\text{POM}\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ だけで説明することは出来ず、アサリ $\delta^{13}\text{C}$ が $\text{POM}\delta^{13}\text{C}$ に比べて顕著に高い傾向を示した。これは金田および富津地区において、アサリ餌料として底生微細藻類が高い割合で寄与していることを示唆するものであった。これらの結果は、栄養塩濃度が高く水中に豊富な植物プランクトン（餌）がある場合には、アサリは水中の餌を利用するものの、栄養塩濃度が低く水中に十分な餌がない場合は底生微細藻類をやむなく利用している構図が示唆される。以下の検鏡およびメタバーコーディングの結果においても、炭素・窒素安定同位体比から導かれた状況がどのように検出されているのかを含めて報告する。

・顕微鏡観察に基づくアサリ餌料生物の群集解析

2023 年 5 月から 2024 年 11 月（海水は 9 月まで、金田は 2024 年のみ）の細胞密度の平均から（図 9A）、市川は生物量が多く（海水 800 ± 866 cells/mL, 底質 $28,016 \pm 44,949$ cells/g, 金田は海水の生物量が少なかった（海水 12 ± 4 cells/mL, 底質 $7,494 \pm 5,850$ cells/g）。久津間と富津の生物量は中程度（久津間 海水 111 ± 128 cells/mL, 底質 $13,526 \pm 10,552$ cells/g ; 富津 海水 76 ± 100 cells/mL, 底質 $6,255 \pm 4,807$ cells/g）だった。海水の生態型は金田（浮遊 76.1%）を除き、浮遊が 90%程度を占めた（図 9B）。底質の生態型は市川（底生 70.9%）を除き、底生が 85%以上を占めた（図 9B）。藻類の平均組成は細胞密度をみると（図 10A）、海水と底質ともに珪藻が主体であり、特に底質は珪藻が大半（68%以上）を占めた。海水に含まれる珪藻以外の藻類は（図 10B）、市川は渦鞭毛藻（27.7%）、金田はクリプト藻（12.4%）と渦鞭毛藻（11.8%）およびプラシノ藻（4.1%）、久津間はユーグレナ（18.0%）の割合が高かった。富津は他の藻類の割合が低かった（4%未満）。各地点の詳細な特徴を示すために珪藻と渦鞭毛藻の属組成を調べた。市川の海水の平均組成（図 11A）は *Thalassiosira*（29.0%）と *Skeletonema*（28.5%）、ついで *Prorocentrum*（20.6%）が優占した。季節変動（図 11B）は通年で *Thalassiosira*, *Skeletonema* が優占し、春と秋に *Prorocentrum* の割合が高くなることがあった。底質の平均組成（図 11A）は *Thalassiosira*（19.2%）, *Nitzschia*（39.6%）, *Navicula*（22.8%）が優占した。季節変動（図 11B）は夏秋に *Thalassiosira*, 他は *Navicula* や *Amphora* の割合が高かった。市川では海水と底質で共通属が優占することが明らかとなった。金田の海水の平均組成（図 12A）は *Pseudonitzschia*（21.7%）, *Thalassiosira*（20.8%）, *Navicula*（26.1%）, *Cocconeis*（10.6%）が優占し、季節変動では（図 12B）*Navicula* や *Pseudo-nitzschia* などが通年で優占し、時々渦鞭毛藻（7 月

Heterocapsa, 9月 *Gyrodinium*) が出現した。底質の平均組成 (図 12A) は *Navicula* (66.7%) が優占し、季節変動 (図 12B) でも通年で *Navicula* が優占した。金田では海水と底質で共通した属 (*Navicula*) が優占していた。久津間の海水の平均組成 (図 13A) では *Chaetoceros* が大半を占め (48.9%), 季節変動 (図 13B) では *Chaetoceros* と *Thalassiosira* を中心の多様な属が出現した。底質の平均組成 (図 13A) は *Navicula* (51.6%) と *Catenula* (18.4%) が優占した。季節変動では 2023 年夏に *Catenula*, 2024 年冬春に *Nitzschia*, 夏秋に *Navicula* が占め、海水と底質で優占属の組成が異なることがわかった。富津の海水の平均組成 (図 14A) は *Chaetoceros* (40.8%), *Thalassiosira* (20.6%) が優占し、季節変動 (図 14B) では 2023 年通年 *Chaetoceros*, 2024 年秋冬 *Thalassiosira* が卓越した。底質の平均組成 (図 14A) は *Navicula* (45.5%) と *Amphora* (23.7%) が優占し、季節変動 (図 14B) では通年で *Navicula* と *Amphora* が卓越しており、海水と底質で優占属の組成が異なっていた。これらの結果をもとに、全体と地点ごとの微細藻類の特徴を整理する。主たる微細藻類は珪藻であり、特に底質はほとんど珪藻だった。市川の特徴は生物量が多く、海水はほぼ浮遊のみで渦鞭毛藻の割合が高かった。海水は *Skletonema*, 底質でも浮遊性の *Thalassiosira* が優占した。金田の特徴は海水の生物量少なく、海水に底生が混ざり珪藻以外の藻類 (クリプト藻, 渦鞭毛藻, プラシノ藻) の割合も高い。海水は *Pseudo-nitzschia*, 底質は *Navicula* が優占した。久津間の特徴は生物量が中程度、海水に少し底生混ざり、渦鞭毛藻 や ユーグレナの割合が高く、海水は *Chaetoceros*, 底質は *Navicula* が優占する。富津の特徴は生物量が中程度、海水に少し底生混ざり他の藻類は少ない傾向にあり、海水と底質で優占属が異なっていた。以上のように各地点の微細藻類の特徴を明らかにできた。

・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

2024 年 5 月, 7 月, 9 月, 11 月の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珪藻の属組成と浮遊珪藻, 底生珪藻の割合を図 2-2-15~18 にそれぞれ示す。全ての調査月・調査地点においてアサリ消化管内に浮遊珪藻が優占していた R5 年度とは異なり, R6 年度においては, 5 月の市川と富津, 7 月の金田, 11 月の金田と富津においてはアサリ消化管内に底生珪藻が優占していた。このうち, 5 月の市川と富津, 11 月の富津においては, 環境水中には底生珪藻は優占していなかった。一方, 7 月と 11 月の金田では環境水中にも底生珪藻が優占していた。これらの結果から, 市川においては 5 月を除き, アサリは環境水中に懸濁する浮遊珪藻を, 金田においては 5 月を除き, アサリは環境水中に巻き上げられた底生珪藻を主に摂食していたと推察された。一方, 富津においては, 環境水中とアサリ消化管中の珪藻組成が大きく異なる現象が繰り返し認められたことから, アサリの摂餌活動とサンプリングの時間的なずれが生じていた可能性が考えられた。

・まとめ

3つの手法を組み合わせることで, アサリの食性が海域の栄養塩環境に応じて異なり, 水中の基礎生産が高いと植物プランクトンを摂餌し, 水中の基礎生産が低いと, やむなく底生微細藻類を摂餌する構図が見えてきた。今後, 手法毎に得られるデータを相補的に利用することで, 解析結果の精度や定量性の部分を改善していく必要がある。特に, メタバーコーディングについては, 微細藻類の分類群による PCR 増幅効率の違いに関する情報を収集するこ

とで、将来的に定量評価に繋がる情報の収集を試みる必要がある。

また、現場の環境水および底質試料を検鏡およびメタバーコーディングを用いて調べた結果、水中の基礎生産が高い漁場や、引き潮時の水流の淀んだ干潟上では、水中の植物プランクトンが底質上に堆積したり、逆に水中の植物プランクトンの少ない漁場の干潟では、舞い上がった底生微細藻類が環境水から相対的に多く検出されることが明らかになった。こうした環境水と底質中の微細藻類の混合が、アサリ消化管内容物の結果との間に不一致を生じさせている部分がある。この部分についても、次年度以降、環境水および底質のサンプリングのタイミングによる影響を検証していく必要がある。これらの取り組みを通じて、栄養塩環境に対する指標としてのアサリ食性情報の精度向上を目指す予定である。

【図表】

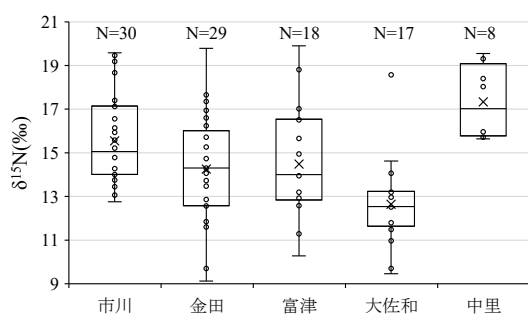


図1 千葉県内ノリ養殖漁場のノリ $\delta^{15}\text{N}$

漁場	金田		中里	
養殖方法	ベタ	支柱	ベタ	支柱
平均	14.4	14.0	16.6	18.6
標準偏差	2.6	2.3	1.7	0.7
サンプル数	17	12	5	3
p値	0.657		0.101	

図2 木更津地区の2漁場における養殖方法別のノリ $\delta^{15}\text{N}$

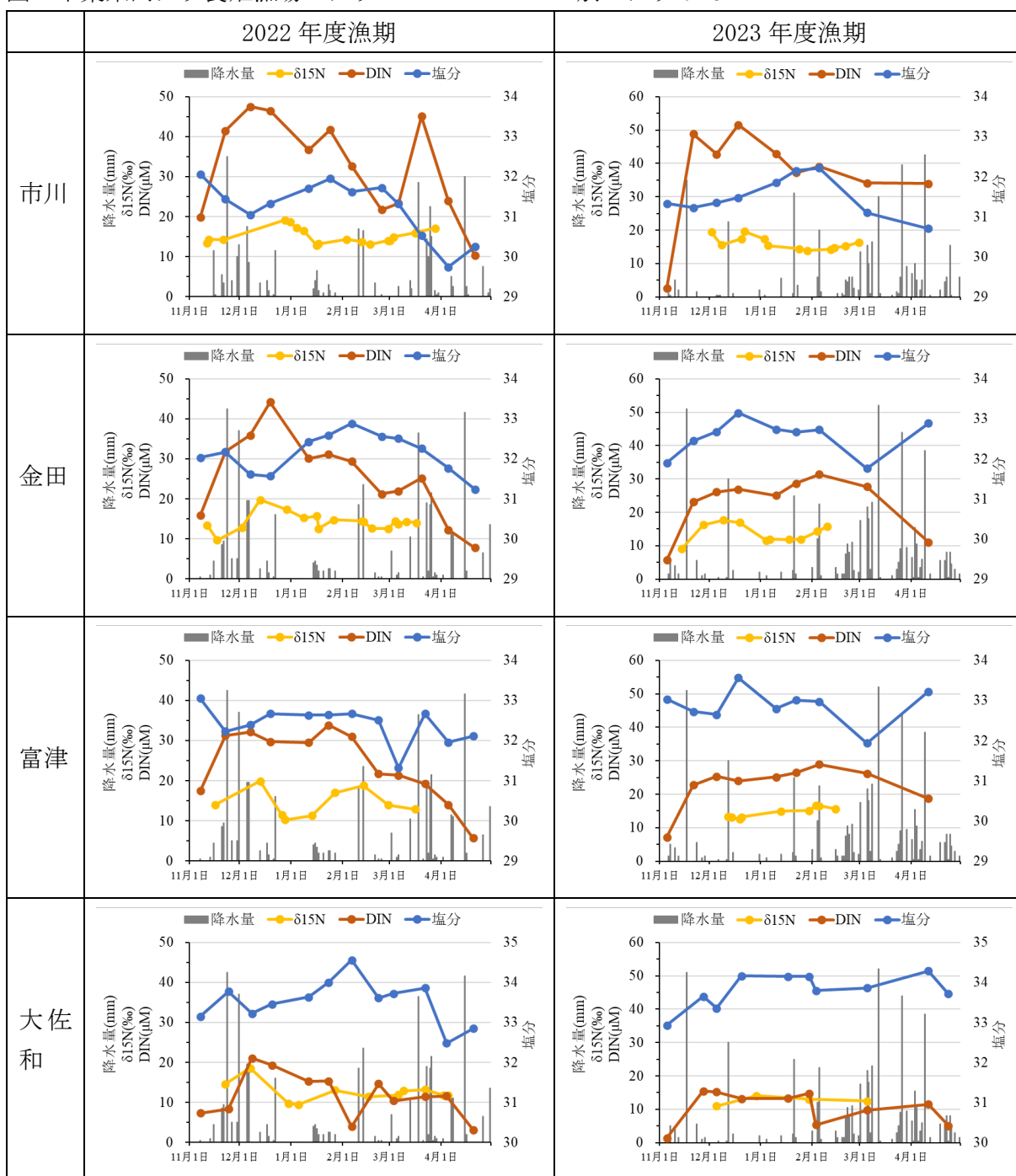


図3 千葉県内ノリ養殖漁場（市川，金田，富津，大佐和）の水質観測結果とノリ $\delta^{15}\text{N}$

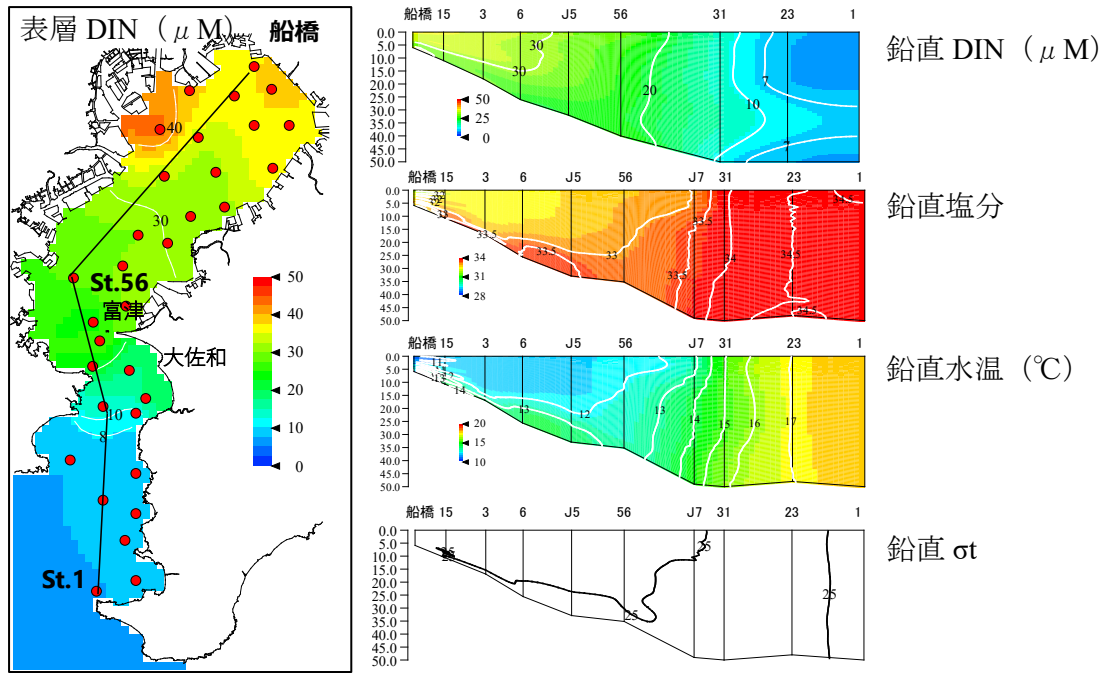


図4 富津及び大佐和でノリ $\delta^{15}\text{N}$ が 10‰前後と低かった時の海況（2023 年 1 月上旬）
 左 表層 DIN，右 上から鉛直 DIN，鉛直塩分，鉛直水温，鉛直 σ_t

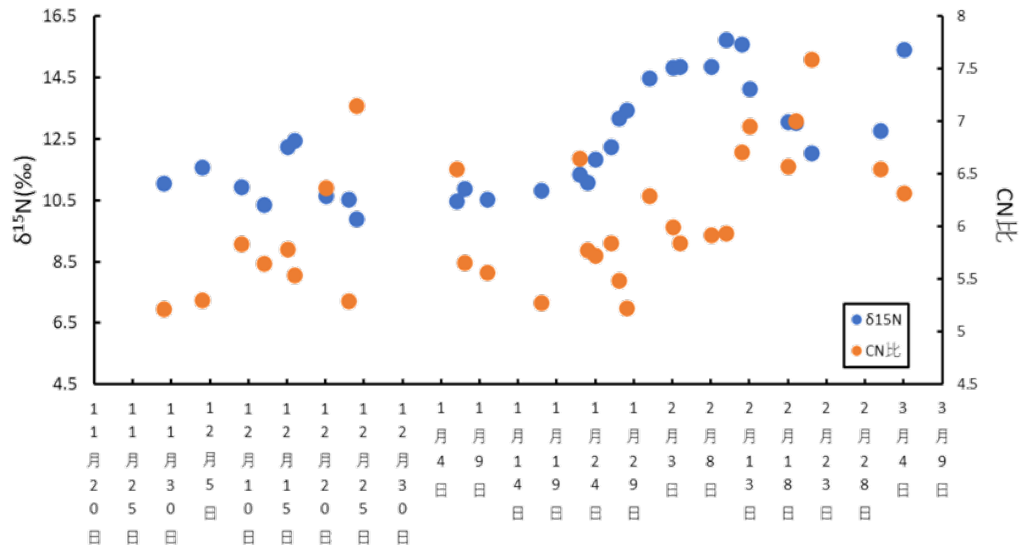


図5 金沢地区におけるノリ $\delta^{15}\text{N}$ および CN 比の推移

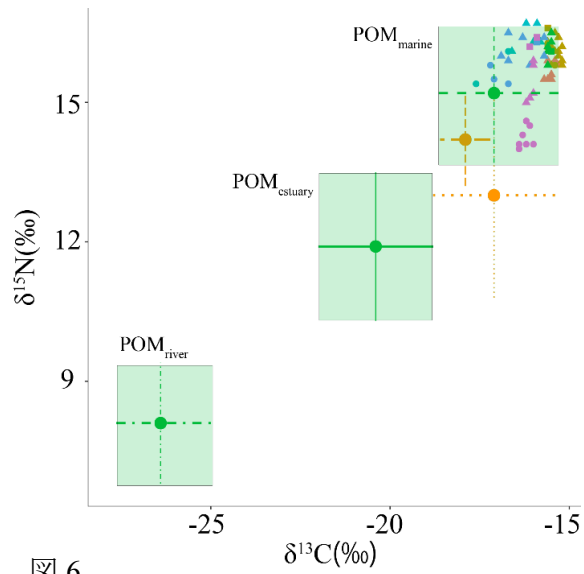


図 6
久津間地区における POM の検討

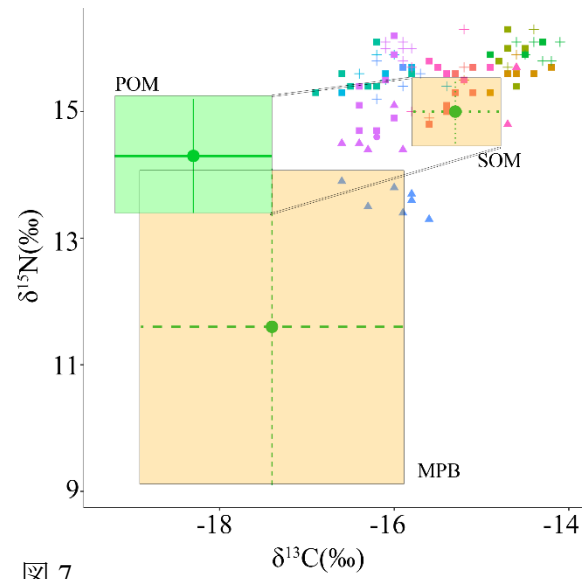


図 7
富津地区における底生微細藻類の検討

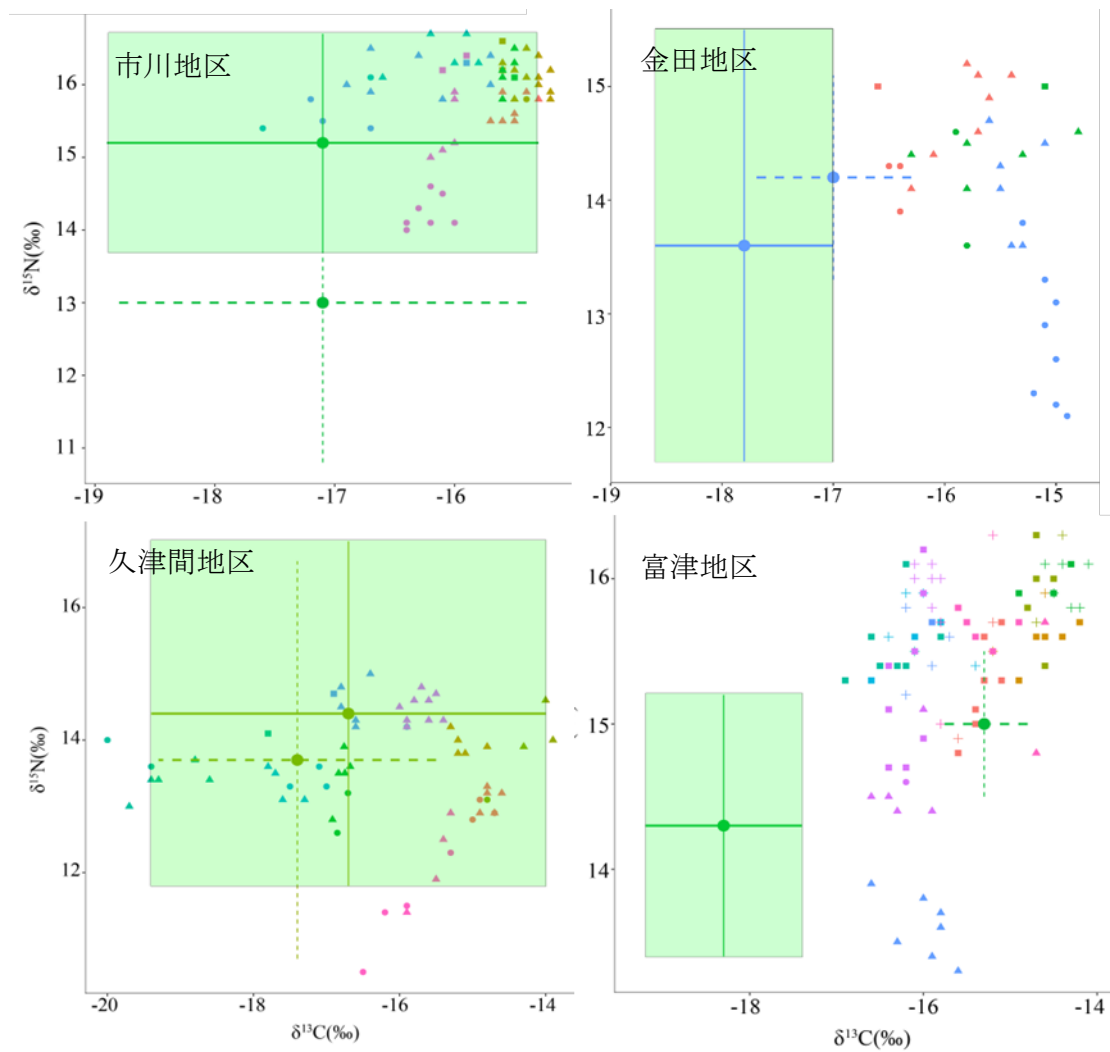


図 8
地区別のアサリと POM の配置比較

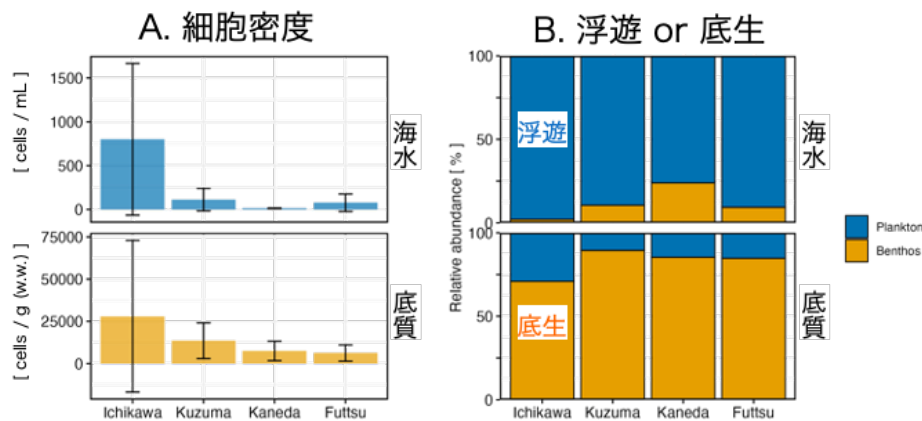


図 9 各地点の海水と底質の A) 平均細胞密度と B) 生態型の割合

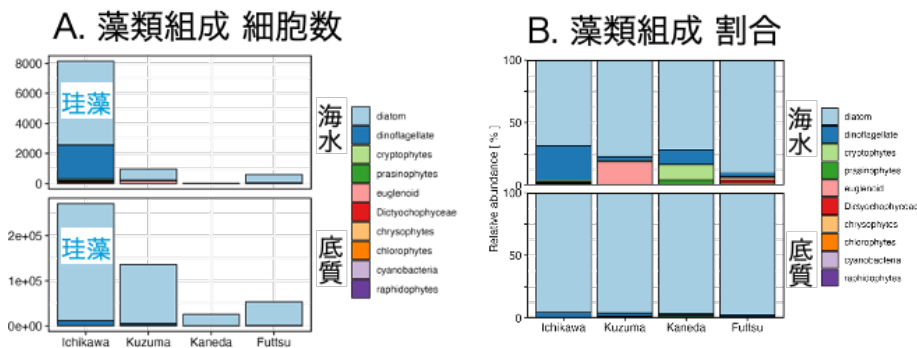


図 10 各地点の海水と底質の藻類組成の A) 合算した細胞数と B) その割合

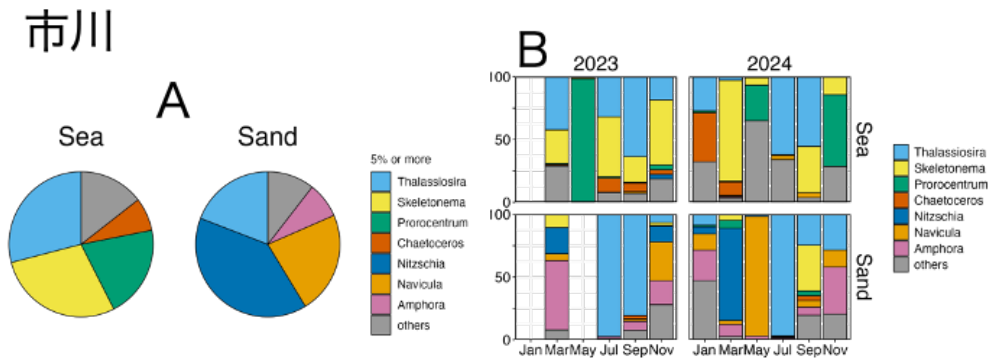


図 11 市川における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合, A) 2年間の合算で平均組成, B) 年月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属 (5%以上出現) を示す。

金田

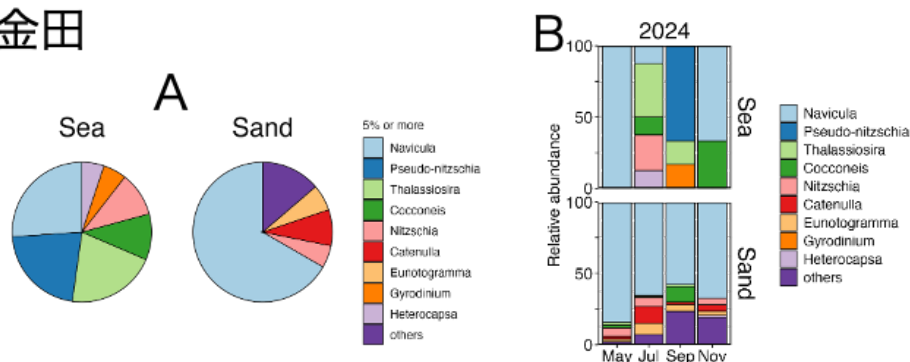


図 12 金田における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合, A) 2 年間の合算で平均組成, B) 年月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属 (5%以上出現) を示す。

久津間

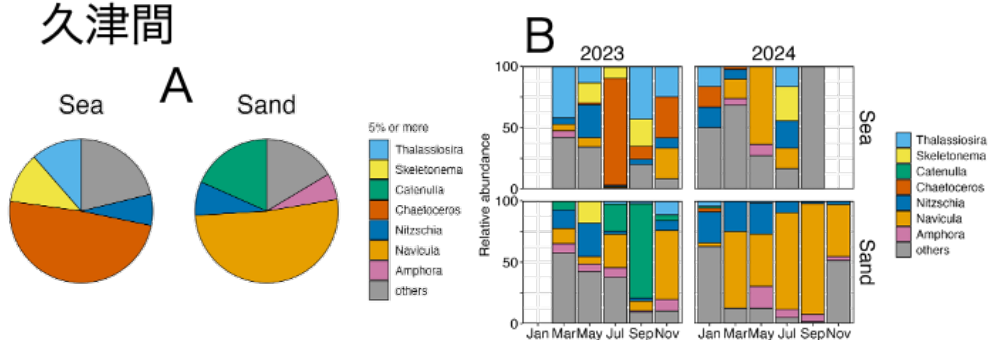


図 13 久津間における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合。A) 2 年間の合算で平均組成, B) 年月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属 (5%以上出現) を示す。

富津

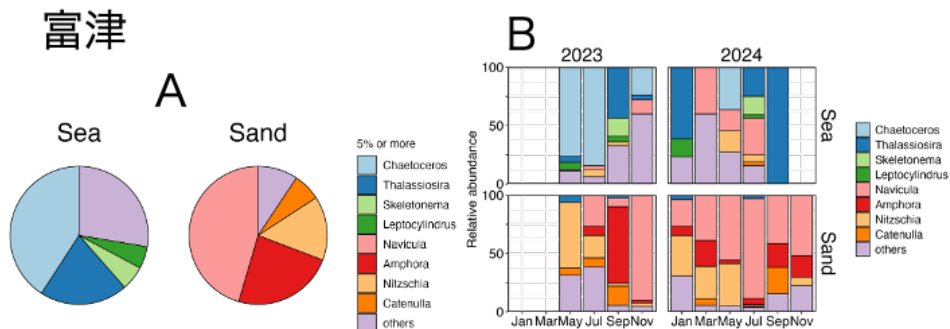


図 14 富津における珪藻と渦鞭毛藻の属組成の割合。A) 2 年間の合算で平均組成, B) 年月ごとの組成で季節変動を表す。色分けは優占属 (5%以上出現)

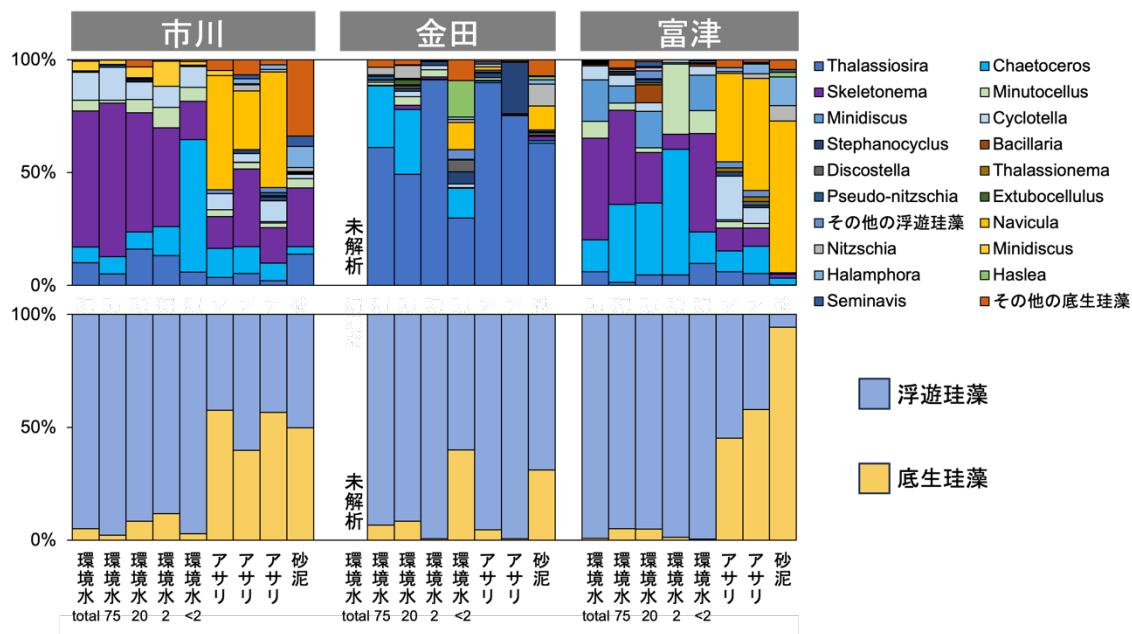


図 15 DNA メタバーコーディングに基づく 5 月の各調査点における環境水，アサリ消化管内容物，砂泥中の珪藻の属組成の割合（上図）と浮遊珪藻と底生珪藻の割合（下図）

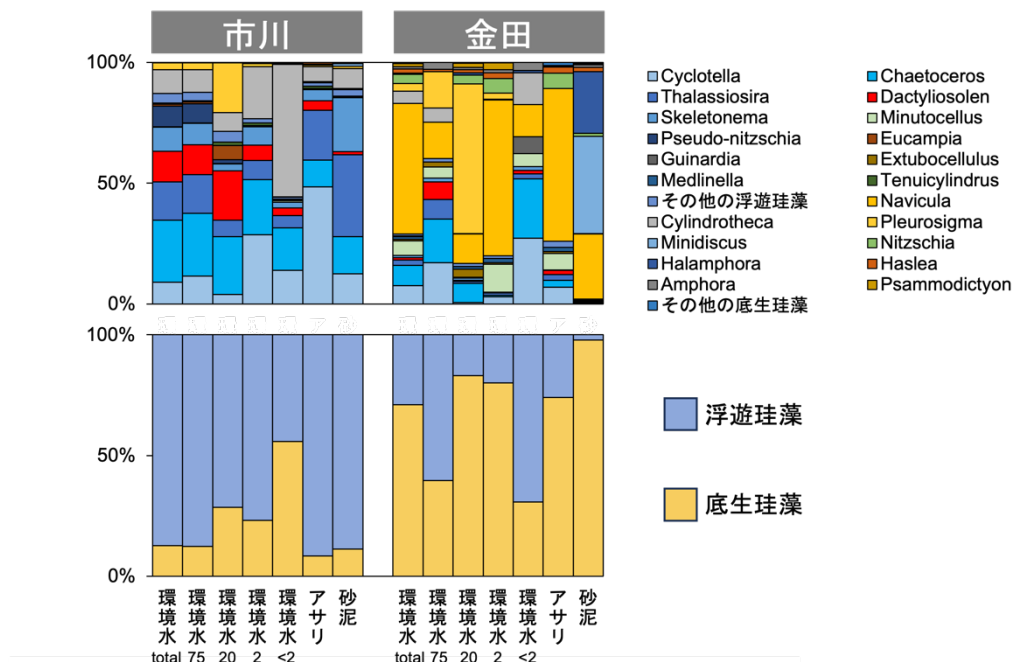


図 16 DNA メタバーコーディングに基づく 7 月の各調査点における環境水，アサリ消化管内容物，砂泥中の珪藻の属組成の割合（上図）と浮遊珪藻と底生珪藻の割合（下図）

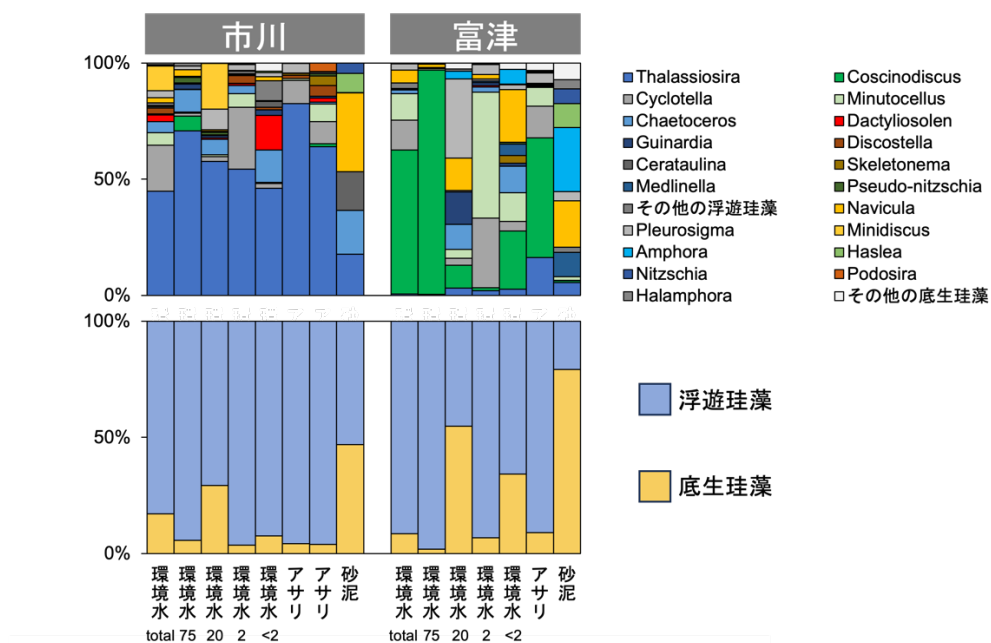


図 17 DNA メタバーコーディングに基づく 9 月の各調査点における環境水、アサリ消化管内容物、砂泥中の珪藻の属組成の割合（上図）と浮遊珪藻と底生珪藻の割合（下図）

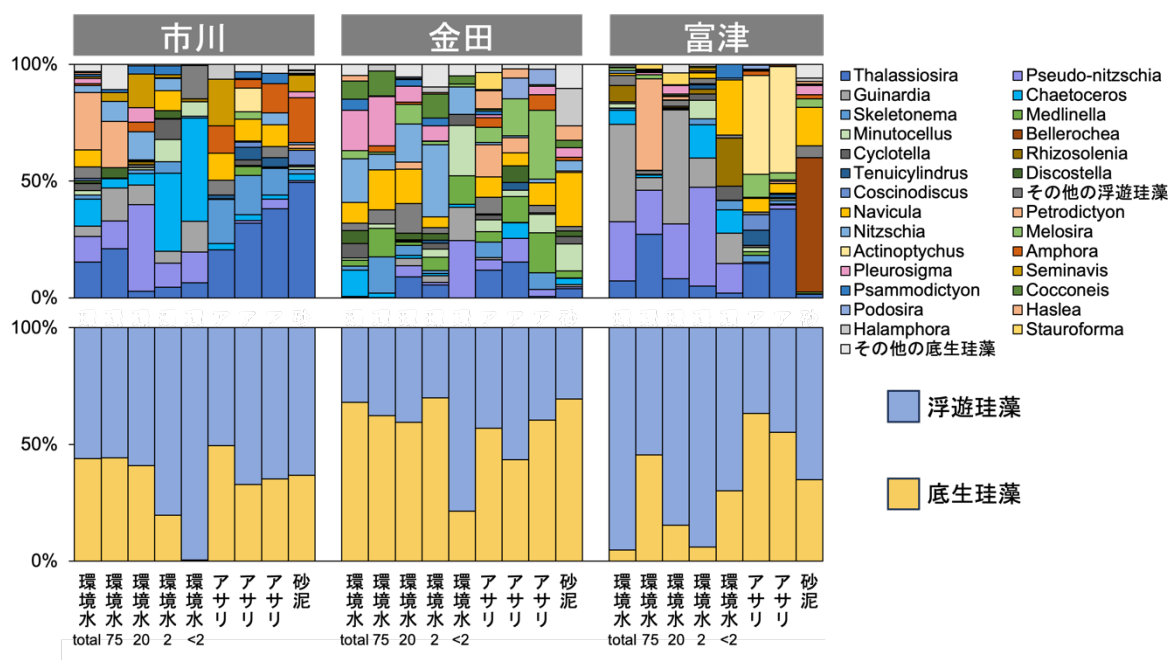


図 18 DNA メタバーコーディングに基づく 11 月の各調査点における環境水、アサリ消化管内容物、砂泥中の珪藻の属組成の割合（上図）と浮遊珪藻と底生珪藻の割合（下図）