

課題番号：II-3)

課題名：栄養塩管理方針の検討

東京大学大学院新領域創成科学研究科

佐々木淳

千葉県水産総合研究センター

石井光廣

水産研究・教育機構水産技術研究所

渡部諭史

【背景・目的】

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（例えば、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、貧酸素水会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）、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、栄養塩管理方針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、栄養塩管理方針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いまだ深刻であり、栄養塩管理方針の主軸が下水処理の緩和運転とはなりえない可能性がある。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。また、黒潮の蛇行に起因する、秋季の水温低下時期の遅れやクロダイ等による食害が水産資源量減少の一因と推察され、気候変動による海洋環境の変化を踏まえた検討も必要である。

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効な数値モデルシステムを構築し、栄養塩管理方針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 年度は数値モデルシステムのプロトタイプを構築し、2025 年度以降の具体的な課題検討に有効な、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ことを目的とする。まず、令和 7 年度以降の検討において必要となる、モデル駆動のための境界条件や検証データについて、データ処理ツールと併せて整備を進めていく。特に、湾口情報として海洋再解析データ、湾口から湾内については千葉県水産総合研究センターおよび神奈川県水産技術センターによる観測データ、東京都下水道局等による下水処理水の水質データ、国土交通省モニタリングポストの水質データの整備を重点的に進める。生態系モデルとして採用した ERSEM は、60 以上の状態変数と 600 以上のパラメータを含む生態系モデルであり、ERSEM-FVCOM の精度向上を効率的に進めるための工夫が不可欠である。そこで、鉛直 1 次元（水柱）の物理モデルとして Umlauf・Burchard (2005) の GOTM (General Ocean Turbulence Model) を採用し、東京湾における鉛直 1 次元の周年変動再現を対象とした、FABM-ERSEM-GOTM システムを構築する。ERSEM-GOTM によるモデルパラメータのチューニングを検討し、その成果を ERSEM-FVCOM に反映させるアプローチを検討する。

【方法】

(1) 水質データセットの整備

気候変動影響の検討には湾外の海況情報やモデル開境界における適切な境界条件の設定が重要である。本研究では湾外の海況情報として、過年度まで採用してきた HYCOM (<https://www.hycom.org/>) に加え、JAMSTEC の JCOPE2M 再解析データ (Miyazawa ら, 2017, 2019) を入手、整理した。同データを読み込み、モデル開境界におけるデータの切り出しを含む、データ解析が行える Python スクリプトを作成した。千葉県水産総合研究センターおよび神奈川県水産技術センターによる水質観測データを入手、整理した。同データを読み込みデータ解析を行うための Python パッケージ Xfrc を構築した。

下水処理水の水質データについては千葉県内および神奈川県内のデータに加え、最も東京湾水環境への影響の大きい東京都下水道局のデータ入手を検討し、可能な限りデータを収集した。

国土交通省モニタリングポストにおける補正済みの水質データを入手し、データの精査と異常値の欠損値指定を行った。また、ERSEM-GOTM の環境データとしての入力が必要となるため、鉛直座標を構造格子に変換し、形式的に欠損値をすべて補間したデータセットとそれから欠損値を除外したデータセットを構築した。これらの一連の作業を効率的に進めるためのプレポスト処理ツールとして Python パッケージ Xmpos を構築し、将来的に提供されるデータも迅速に活用できるようにした。

(2) ERSEM-GOTM・ERSEM-FVCOM システムプロトタイプの構築

FABM は物理モデルと生態系モデルを連成するモデルカプラーであり、これを用いてまず、鉛直 1 次元物理モデル GOTM と生態系モデル ERSEM を連成させる、ERSEM-GOTM 計算システムを構築した。ERSEM モデルの状態変数とその関連する要素モデルパラメータを構成するための設定ファイル fabm.yaml (なお、この設定ファイルは FABM フレームワークにおけるすべての生態系モデルに共通のフォーマットである) と、GOTM の構成ファイル gotm.yaml

を適切に作成した。また、モデルを駆動するための境界条件として、全天日射量や風向・風速を含む気象データを整備した。GOTM は鉛直 1 次元モデルのため、基本的に河川流入の影響を陽に考慮することができないこと、および鉛直 1 次元の水質過程の解析が目的であることから、水温・塩分はモニタリングポストの観測値による短い緩和時間でのナッジングを行うこととした。これにより、実質的に水温・塩分場は観測値とほぼ同様の計算値となるようにした。

ERSEM モデルは既述の通り、多数の状態変数とパラメータをもつため、パラメータチューニングの効率化を検討した。機械学習のハイパーパラメータの自動最適化で定評のある Python パッケージの Optuna (Akiba ら, 2019) を用いた最適化を検討した。チューニングの実装では fabm.yaml ファイルにおいて、最適化の対象とする状態変数とそのパラメータを選定し、そのとりうる値の範囲を入力することで、Optuna がその条件に合致する fabm.yaml を生成し、ERSEM-GOTM 計算が実行されるシステムについて、Python パッケージの TB-GOTM として構築した。計算結果は指定した評価関数によって精度評価が行われ、より高い精度を達成する方向に向かって次の試行が行われ、多くの試行を繰り返すことでパラメータの最適化が進んでいくものとなっている。この過程における各試行のパラメータ値と評価結果をアーカイブするデータベースを用意することで、効率的な分散並列最適化を実装した。以上により、ERSEM-GOTM と Optuna を組み合わせることで、様々な数値実験が効率的に実施できるフレームワークを構築した。

ERSEM-FVCOM における生態系モデル ERSEM は ERSEM-GOTM におけるものと基本的に共通であり、同様に fabm.yaml によって ERSEM モデルの設定を行うものとなっている。令和 5 年度までに検討した FVCOM による流動場を用いることで、ERSEM-FVCOM における生態系モデル状態変数の移流・拡散過程を駆動した。境界条件としては気象庁気象官署観測所の東京、千葉等における気象データ、江戸川、荒川、多摩川、隅田川、鶴見川の主要河川水に加え、千葉県沿岸の海老川、真間川、養老川、小櫃川、村田川、小糸川等の中小河川水を考慮し、東京都区部および千葉県沿岸の下水処理水を考慮した。開境界においては潮汐および再解析モデルによる水位、水温、塩分を考慮し、神奈川県水産技術センターの観測データに基づく水質場を考慮した。なお、境界条件の設定法には計算で着目したい過程や時空間解像度に応じて多くの組み合わせが考えられ、令和 7 年度以降は個々の課題に応じて適切に取捨選択して設定していく予定である。

(3) 栄養塩管理方針検討委員会の開催

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、令和 7 年度以降に検討すべき具体的な課題とそのために必要となる数値モデルシステムや収集すべき観測データ等について検討し、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 回開催する。

【結果】

(1) 水質データセットの整備

海洋再解析データ JCOPE2M を用い、東京湾沖合の黒潮流路の一部を含む日本南岸海域における水位分布と海面水温分布の一例を図 1 (a) に示す。海面が低下した低気圧性の渦が見られ、海面水温が低下している様子がわかり、黒潮の蛇行の様子が再現されており、東京湾へ

の黒潮影響を考慮した検討には開境界条件を適切に設定することで考慮できることが示唆される。図 1 (b)には東京湾口における塩分鉛直分布の 15 日間移動平均を施した時系列で、上が 2002 年前後、下が 2021 年前後の結果である。図 1 (c)には同じ東京湾口における鉛直分布の時系列データから求めた水温と塩分の累積頻度分布について、2002 年前後と 2021 年前後を比較したものである。中央値でみると、水温は 12.14℃から 12.54℃に上昇し、塩分も 34.43 から 34.48 に上昇しており、この 20 年間で高水温化と若干の塩分上昇が見られることがわかる。本事業で検討している 2000 年頃と 2020 年代以降の東京湾における環境変化が湾口環境としても顕著に見られることを示唆するものであり、数値計算において考慮可能であることを示している。

図 2 に神奈川県水産技術センターによる、2019 年から 2021 年と 2001 年から 2003 年における、図 2 (a)水質観測点と図 2 (b)東京湾口におけるリン酸態リンの時系列の例を示す。観測点数は 2002 年前後から 2020 年前後に大きく増加しているが、湾口のデータは確保されており、両期間の比較解析に有効であることがわかる。一方、観測は月 1 回程度のデータであり、高解像度の時空間データが必要となる場合は他のデータも活用した補間法の検討が必要である。

図 3 に東京都下水道局下水道年報による、2022 年度の東京都区部水再生センターの種別の下水処理量・放流量および汚泥発生量の一例を示す。現在のところ処理量や放流量の時系列変動は不明であるが、高級処理水放流量と高度処理水放流量において、日最大値と日平均値の差は数割程度に収まっており、日平均値を一定値として与えることで概ね問題ないことが示唆される。日平均値の活用を前提とすれば 2000 年頃と 2020 年頃の比較が可能である。

図 4 に国土交通省関東地方整備局東京湾口航路事務所 WEB において公開されている、東京湾モニタリングポストのデータ処理の一例を示す。図 4 (a)は 4 つの観測点における、2010 年から 2022 年の鉛直層 (lev) 別の深度の時系列を示す。Xmpos パッケージは Bokeh (<https://bokeh.org/>) を用いたインタラクティブプロット機能を有しており、目視によるデータの妥当性確認を行うと同時に、しきい値の設定による自動クリーニングと併せてデータクリーニングを行った。また、図 4 (b)は川崎人工島における 2010 年から 2022 年の溶存酸素濃度鉛直分布の時系列だが、上パネルに示す通り、元データは深度範囲にばらつきがあり、多くの欠損値が含まれている。GOTM の環境データとしての入力を想定し、深度範囲を固定するとともに内外挿による欠損値補間を行い (同中パネル)、さらにそこから欠損期間をマスクした最終的なデータセット (同下パネル) を構築した。このデータセットのうち 2020 年から 2022 年の川崎人工島における水温、塩分、クロロフィル a 鉛直分布の時系列を図 4 (c)に示す。2010 年以降に限られるが、湾奥から湾中央にかけての 4 測点モニタリングポストのデータセットは水質鉛直分布の長期間の連続的な時系列データとして極めて貴重であり、数値モデルの精度検証や改良に有用なデータとなるものである。

(2) ERSEM-GOTM・ERSEM-FVCOM システムプロトタイプの構築

ERSEM-GOTM を用い、モニタリングポスト川崎人工島における 2020 年を対象とした再現計算の一例を図 5 に示す。鉛直 1 次元モデルであるため、栄養塩は基本的に初期値で与えた濃度に依存し、実現象とは大きな乖離があるが、鉛直 1 次元過程の比重が大きいと考えられる、植物プランクトンによる光合成による有機物の生産やその沈降、および分解過程についてはある程度模擬できると推察される。本計算では珪藻類と珪藻類以外のマイクロプランク

トン、ピコプランクトン、ナノプランクトンの計 4 種類の植物プランクトンが考慮されており、係数を調整することによって様々な性質を発現させることが可能である。図 5 においては春から秋の密度躍層上における植物プランクトンの増殖とそれに伴う上層における栄養塩の減少が示され、夏季においては下層において有機物分解に伴う栄養塩の増加が表現されていた。特にケイ酸態ケイ素の減少が珪藻類から他の植物プランクトンへの遷移につながっている様子を確認したが、これは選定されたモデルパラメータから類推できるものであり、鉛直 1 次元モデルの計算結果が示す時空間変動は比較的理解しやすいことがわかった。さらに、一般的に過小評価となりがちな上層におけるクロロフィル *a* や溶存酸素濃度は Optuna を用いたチューニングにより比較的容易に再現可能であることを確認しており、ERSEM-GOTM は一次生産の規模を観測値に整合させるための係数の最適化に特に有用なツールであると評価できる。

ERSEM-FVCOM を用い、2020 年の東京湾における周年再現計算を実施した一例を図 6 に示す。計算結果は定性的には妥当な振る舞いをしていることを確認したが、定量的には改善の余地が多分にあり、令和 7 年度の具体的な課題検討の際に ERSEM-GOTM を用いた成果や Optuna によるパラメータチューニングと併せて精度向上を図っていく予定である。湾口境界の影響として、HYCOM と JCOPE2M を用いた計算を行ったところ、東京湾奥部の計算結果に大きな影響は見られないと判断したが、開境界の位置を東京湾口に取ったため、湾口付近での流動場の精度検証を踏まえた上で、黒潮による影響の検討に際しては広く湾外に開境界を設定する等、検討が必要であることが示唆された。また、本計算結果においては ERSEM-GOTM による検討結果が十分反映されておらず、一次生産が相当に過小評価となっていた。さらに、河川水と下水処理水の両者を考慮した計算に際し、淡水供給量や河川における栄養塩供給量の調整も課題である。令和 6 年度の検討により、観測データセットおよび境界条件データセットが整備され、モデルセットアップのためのツールが整備されたことから、これらを活用し、令和 7 年度における課題検討を効率的に進めていくためのモデルシステムのプロトタイプが構築できたものと考えている。

(3) 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 6 年 9 月 18 日および令和 7 年 1 月 28 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検討委員として迎え、栄養塩管理の検討に資することを目的とする数値モデルシステムの構築と計算結果について検討を行った。その他の参加機関は以下の通り。水産庁、東京大学、千葉県水産総合研究センター、神奈川県水産技術センター、水産研究・教育機構。

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

【参考文献】

- 石井光廣. 貧酸素水塊の発生による栄養塩供給, 月刊海洋, 53(9), 489-494, 2021.
- 柿野純. 東京湾の環境とアサリ漁業 40 年. 青娥書房, 2021.
- 国土交通省関東地方整備局東京湾口航路事務所 WEB. モニタリングポスト.
<https://www.pa.ktr.mlit.go.jp/wankou/overview/monitoring/index4.htm> (2025 年 3 月 5 日確認)
- 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). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001597388.pdf>, 2023.
- 水産庁. 伊勢湾・三河湾における栄養塩類管理方策の提言(栄養塩類管理の必要性について), 2024. https://www.jfa.maff.go.jp/j/sigen/attach/pdf/230614_23-6.pdf
- 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. <https://www.env.go.jp/content/900517230.pdf>
- 東京都下水道局. 下水道年報, 2022.
- Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., Koyama, M. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework. arXiv:1907.10902, 2019.
- Bruggeman, J., Bolding, K.: A general framework for aquatic biogeochemical models. *Environmental Modelling & Software*, 61, 249–265, 2014.
- Butenschön, M., Clark, J., ..., Torres, R.: ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels. *Geoscientific Model Development*, 9(4), 1293–1339, 2016.
- Chen, C., Liu, H., Beardsley, R.C. An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *J. Atmospheric and Oceanic Tech.*, 20(1), 159-186, 2003.
- Umlauf, L., Burchard, H. Second-order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work. *Continental Shelf Research*, 25(7-8), 795--827, 2005.
- Uncles, R. J., Clark, J. R., Bedington, M., Torres, R. “On sediment dispersal in the Whitsand Bay Marine Conservation Zone: Neighbor to a closed dredge-spoil disposal site” in Marine Protected Areas: Evidence, Policy and Practise, eds Robert Clark and John Humphreys (Elsevier Inc.), 2020.
- Matsubara T, Shikata T, Sakamoto S, Ota H, Mine T, Yamaguchi M. Effects of temperature and salinity on rejuvenation of resting cells and subsequent vegetative growth of the harmful diatom *Asteroplanus karianus*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 550, 151719, 2022.
- Miyazawa, Y., Kuwano-Yoshida, A., Doi, T., Nishikawa, H., Narazaki, T., Fukuoka, T., Sato, K. Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region. *Ocean Dynamics*, 69, 267-282, 2019.
- Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, K., Kachi, M., Kurihara, Y., Murakami, H. Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three dimensional variational scheme. *Ocean Dynamics*, 67, 713-728, 2017.

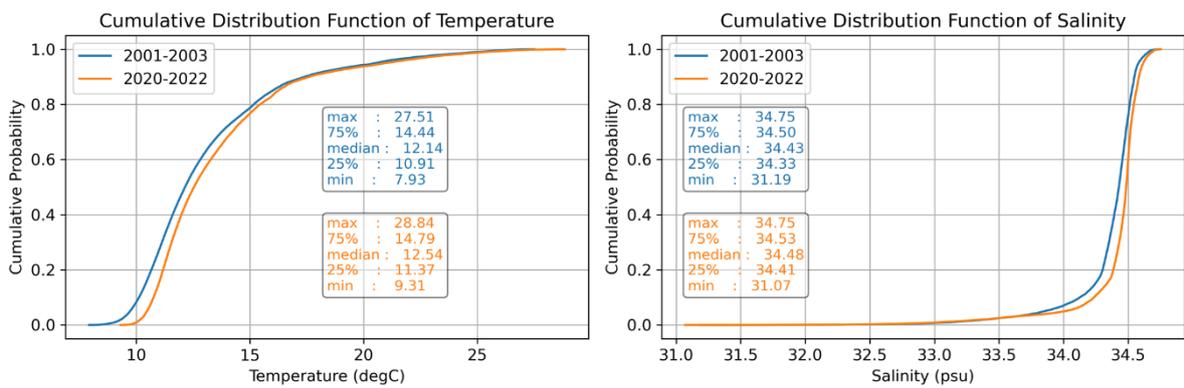
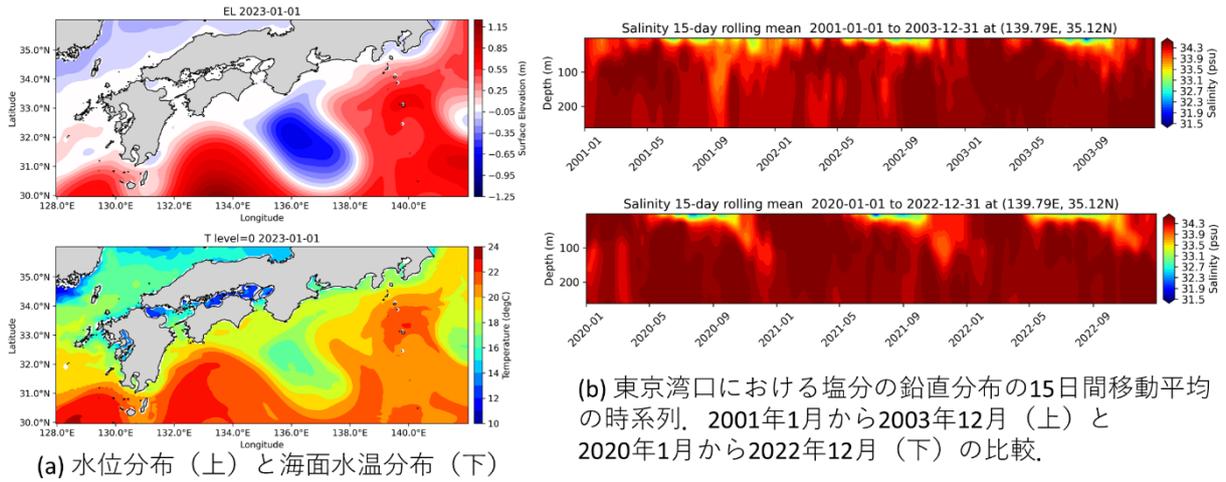


図1 海洋再解析データ JCOPE2M を用いたデータ解析

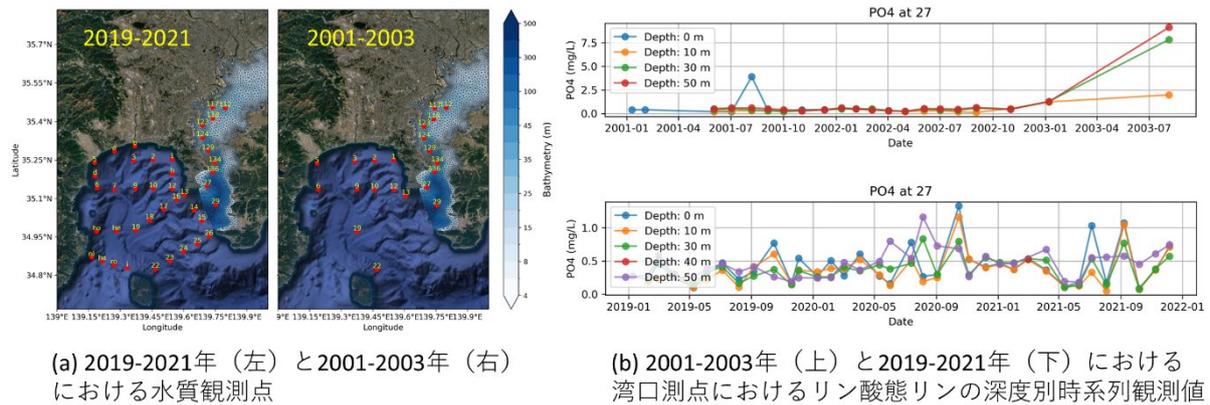


図2 神奈川県水産技術センターによる東京湾口を含む現地観測点と観測値の一例

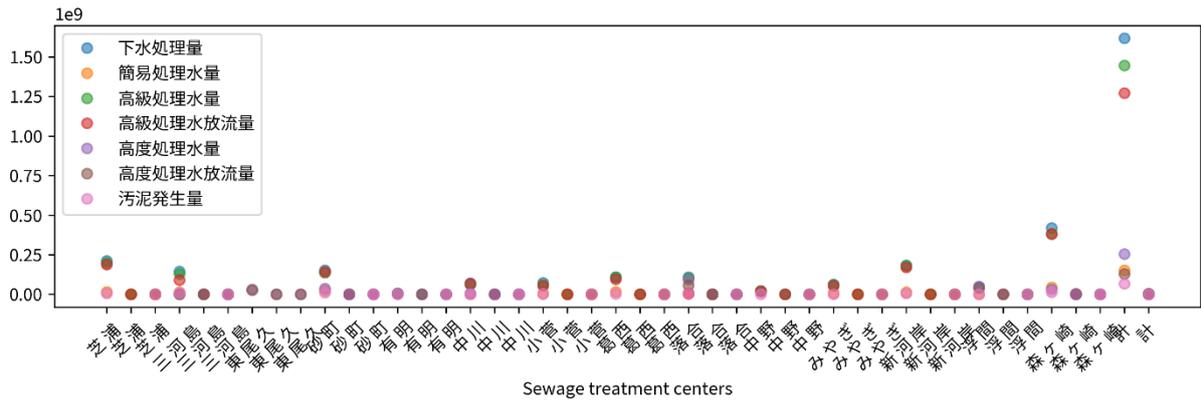


図3 2022年度の東京都区部水再生センターの種別の下水処理量・放流量および汚泥発生量. 各水再生センターにおいて、左からそれぞれ年合計，日最大，日平均量 (m³) を示す。

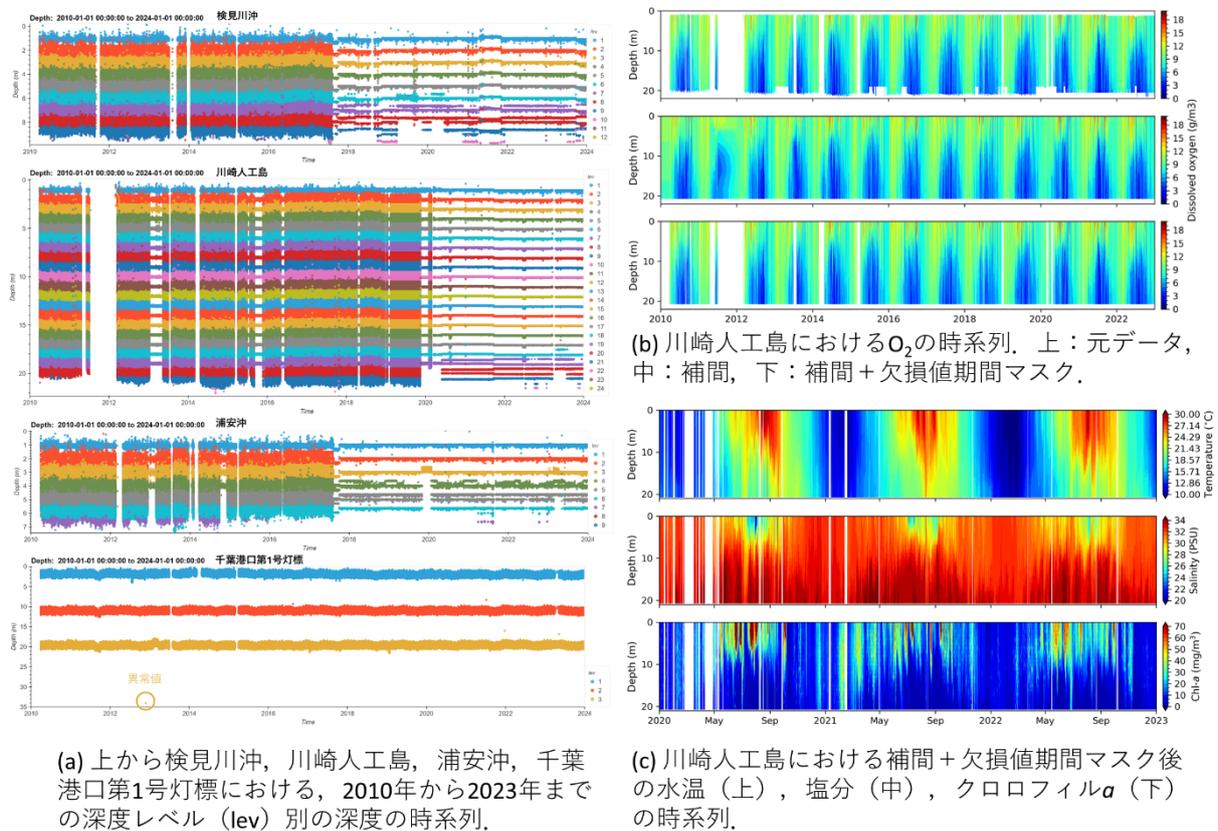


図4 国土交通省東京湾モニタリングポストのデータ処理の一例

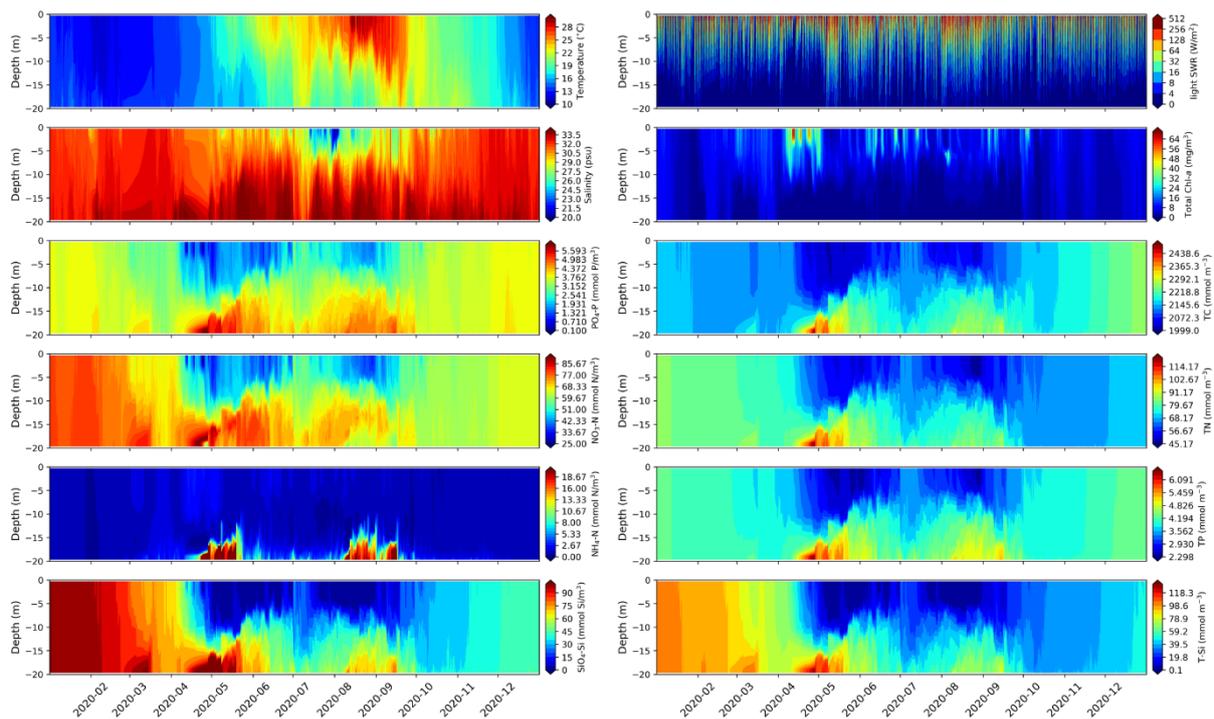


図5 ERSEM-GOTMによるモニタリングポスト川崎人工島を対象とした、2020年の水質再現計算。左は上から水温、塩分、リン酸態リン、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、ケイ酸態ケイ素。右は上から短波放射、全クロロフィル *a*、全炭素、全窒素、全リン、全ケイ素。

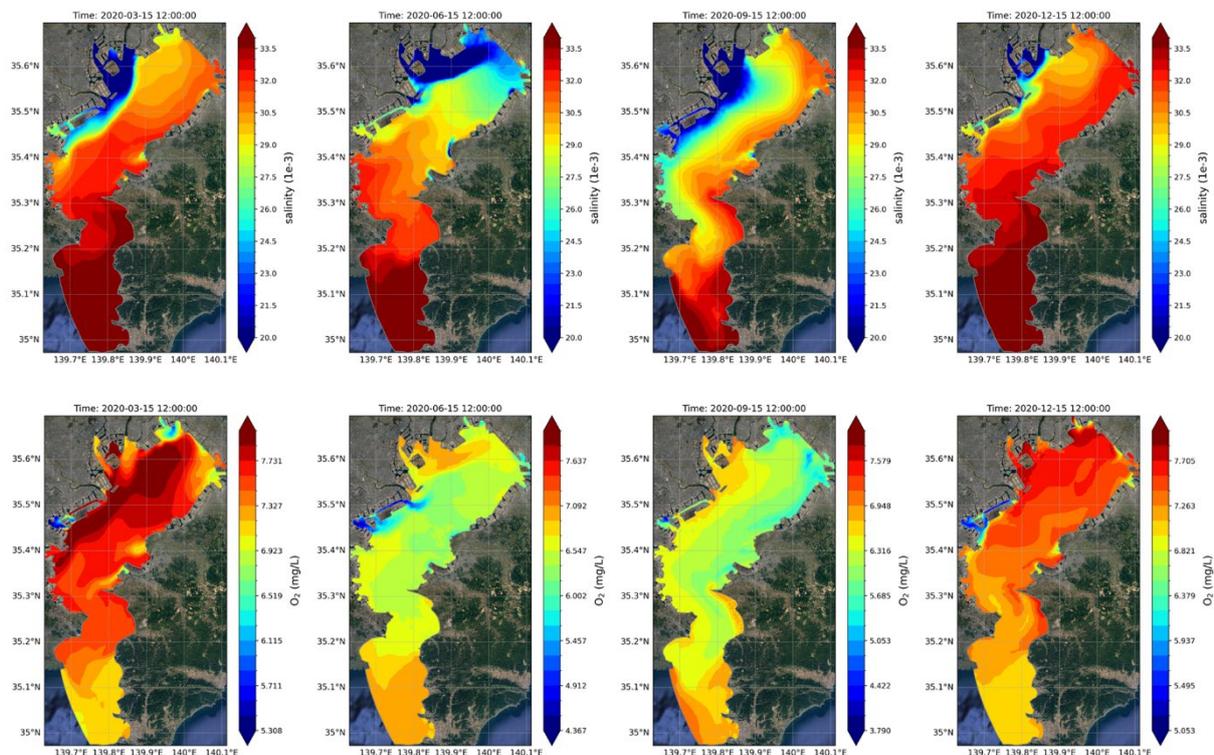


図6 ERSEM-FVCOMによる、2020年の東京湾表層における塩分（上）と溶存酸素濃度（下）の平面分布の周年計算例。

課題番号：Ⅲ) - 1

課題名：栄養塩類等の水質環境の変化が閉鎖性内湾の動・植物プランクトン等の低次生態系に及ぼす影響の解明

水産研究・教育機構 水産資源研究所

寒川清佳，青木一弘，渡辺剛，横内一樹，堀正和（社会・生態系システム部）

笥茂穂，田所和明（海洋環境部）

愛知県水産試験場

柘植朝太郎，中嶋康生，松村貴晴，河住大雅，大澤博（漁場保全グループ）

中島廉太郎，加藤毅士，荒木克哉（海洋資源グループ）

【背景・目的】

近年、伊勢・三河湾における水産資源量の減少や低迷が顕著になっている。その要因として、貧栄養化等の環境変化に伴う動・植物プランクトン等の低次栄養段階位置する生物生産の低下が指摘されている。しかし、それらがどのように変動し、水産資源に影響するかは未解明な点が多い。また、湾内の栄養塩等の水質環境の変化に外洋水が与える影響が考えられるが、外洋と湾内の循環関係についてはよく分かっていない。本課題では、栄養塩動態等に影響を与える外洋からの循環関係を評価し、栄養塩類等の水質環境の変化が動物プランクトンや植物プランクトン等の低次生態系に与える影響を明らかにすることを目的とする。

伊勢・三河湾において定期的な現地調査と自動観測ブイによる連続観測を実施して、栄養塩等の水質環境および動・植物プランクトンについて現況を把握するとともに、過去の観測と比較してそれらが時間的・面的にどのように変化しているのかを把握する。また、既存の海洋観測資料および生物試料の収集・整理・分析を行い、動物プランクトンと植物プランクトンの群集構造とその季節・経年変動を統計的解析手法を用いて解析して、その変動に影響を及ぼす外的な環境要因および内的要因について比較検討する。さらに、外的要因を高度に評価するために、湾内外の循環構造および栄養塩動態のモデル評価を着手する。

【方法】

(1) 水質環境と動・植物プランクトンに関する定点観測の実施

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

これらの観測・分析結果は研究グループ内で共有され、本課題の(2)と(3)における水質環境と動・植物プランクトンの関連性の解析に資した。

(2) 水質環境が動・植物プランクトンの組成や量に与える影響の検討

本年度は、伊勢・三河湾で季節ごとに実施された海洋観測から得られたデータと試料を分

析し、当海域における低次栄養段階に位置する生物の生産過程の特徴を把握した。これまでに収集・整理した観測データと生物試料の分析を引き続き進め、経年的に変化する植物プランクトンと動物プランクトン群集の季節変動に水質環境の変化が与える影響を検討した。また生態系モデルにつながる情報を提供するため、群集の炭素量換算を進めた。

具体的には、(2) -1 では、水質環境と植物プランクトン細胞数の関係を明らかにするため、長期的な定点観測のデータを用いて、各水質項目と植物プランクトン分類群ごとの総細胞数の相関分析を行った。また、植物プランクトンの総細胞数、珪藻類細胞数、渦鞭毛藻類細胞数 *Skeletonema* spp. 細胞数、*Chaetoceros* spp. 細胞数、*Leptocylindrus danicus* 細胞数を応答変数、水温、塩分、全窒素 (TN)、全リン (TP)、DIN、DIP を説明変数として一般化線形モデル (GLM) 解析を行った。また、植物プランクトンの量的な変化を把握するため、2004-2013 年度と 2014-2023 年度の 2 期間について各調査点毎の珪藻類の平均細胞数を算出し、水平分布を作成した。加えて、2014-2023 年度の 20 年間分について、湾毎の月別植物プランクトン細胞数と 20 年間平均細胞数を比較し、増減時期や季節的变化を解析した。

上記の解析結果を基に、三河湾でよくみられる *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus* について、湾奥から湾口にかけて設定した調査点毎 (図 1) に細胞数の変動傾向を解析した。変動傾向の有意性は、Mann-Kendall 検定により確認した。また、2014-2023 年度の 20 年間分について、湾毎の月別 *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus* および渦鞭毛藻類の平均細胞数を 20 年間の平均細胞数を比較し、増減時期や季節的变化を解析した。

(2) -2 では、伊勢・三河湾の動物プランクトン群集に、地理的な変化があるのかを調べるため、伊勢湾奥 (P3)、三河湾西部 (P27)、伊勢湾中央 (P10)、湾口 (A1)、湾外 (A10) の 5 測点 (図 2) で、2022 年 4 月~2024 年 3 月の期間に、改良型ノルパックネット (335 μ m 目合、口径 45cm) 曳網で採取された試料の同定を行い、個体数密度を算出した (inds. m^{-2})。伊勢・三河湾で優占する動物プランクトンであるカイアシ類について、多変量解析手法 (Bray-Curtis 類似度指数を使用した非メトリック多次元尺度構成法 (nMDS) と階層的クラスタ分析) を用いた解析を行なった。地理的なグループ間でみられる類似性の差異が統計的に有意であるかを評価するため、類似性解析検定 (ANOSIM 検定) を実施した。

また、カイアシ類を炭素重量で評価するため、伊勢湾中央 (P10) と湾外 (A10) 2 測点 (図 2) で、2023 年 4 月~2024 年 4 月の期間に、改良型ノルパックネット (100 μ m 目合、口径 45cm) 曳網で採取された試料についても同様に個体数密度を算出した (inds. m^{-3}) 後、炭素重量 (mgC m^{-3}) への換算を行なった。全動物プランクトンの個体数密度と炭素重量密度について、湾内と湾外の比較および季節変動の違いを把握するために比較を行い、内湾における炭素重量密度におけるカイアシ類群集の変化を把握するため、Bray-Curtis 類似度指数を使用した階層的クラスタ分析による群集の類型化を行なった。

(3) 湾内の循環構造や栄養塩動態評価モデルを用いた検討

本年度は、これまで収集した既存の海洋観測資料の解析や、湾内の循環構造や栄養塩動態を評価するためのモデルを用いて、環境および栄養塩循環の経年・季節変動の把握に着手した。また、評価モデルの高度化を併せて進めた。

具体的には、(3) -1 では国土交通省によって設置された三河湾口の中山水道モニタリングポ

ストの流行流速データを伊勢湾環境データベース (<https://www.isewan-db.go.jp/>) から入手し、流れ場の季節・経年変動の把握に用いた (図 2)。2010~2023 年の 1 時間毎データを使用し、15 日以上観測データが得られた月について、8 分潮 ($M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, K_2, \mu_2, P_1$) を除去し、各月の平均値を算出した。経年変動要因を解釈するために、黒潮流軸データを海上保安庁の海洋速報から、矢作川の河川流量を国交省の水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) から入手した。

(3) -2 では、既存の海洋観測資料や流動モデルの結果を用いた粒子追跡モデルを構築し、伊勢湾・三河湾およびその周辺海域の循環構造および栄養塩動態を評価する。R6 年度は、粒子追跡モデルの改良を行い、拡散項を追加するとともに、放流粒子数を増大させた。境界条件として用いる気象庁の MOVE-jpn (Sakamoto et al. 2019) のデータも昨年度 2008~2019 年から 2008~2023 年に拡張した。改良した粒子追跡モデルを用いて 2020~2023 年の三河湾への DIN 流入量を推定した。

【結果】

(1) 水質環境と動・植物プランクトンに関する定点観測の実施

伊勢・三河湾の愛知県沿岸域において、月 1~2 回調査を実施し、水温、塩分、溶存酸素などの観測を行うとともに、主な環境指標である窒素、リンやクロロフィル *a* (Chl. *a*) の分析を行い、データを蓄積した。試水を検鏡して、植物プランクトンの細胞数密度、およびその構成を把握した。また適宜、プランクトンネット等により動物プランクトンを採集した。さらに自動観測ブイ 3 基を用いて連続観測を行い、三河湾内の水質環境について時間的な変化を把握した。

(2) 水質環境が動・植物プランクトンの組成や量に与える影響の検討

(2) -1. 植物プランクトン群集と水質との関係および珪藻類の長期変化

各水質項目と植物プランクトン細胞数との相関：定点観測の結果を用いて、今年度は三河湾（西側を知多湾，東側を渥美湾と呼ぶ）を知多湾，渥美湾に分けて各水質項目と植物プランクトン分類群ごとの細胞数について相関分析を行った。Chl. *a* との相関は、TN（知多湾， $r = 0.294$ ，渥美湾， $r = 0.357$ ）よりも TP（知多湾， $r = 0.532$ ，渥美湾， $r = 0.481$ ）の方が高かった。また、Chl. *a* と DIN（知多湾， $r = -0.282$ ，渥美湾， $r = -0.053$ ），DIP（知多湾， $r = -0.234$ ，渥美湾， $r = -0.035$ ）の相関は TN，TP よりも低かった。Chl. *a* とプランクトン分類群との相関は総細胞数（計数している全プランクトン細胞数）が最も高く（知多湾， $r = 0.625$ ，渥美湾， $r = 0.409$ ），次に珪藻類で高かった（知多湾， $r = 0.600$ ，渥美湾， $r = 0.363$ ）。また、総細胞数との相関は珪藻類（知多湾， $r = 0.994$ ，渥美湾， $r = 0.979$ ）が高かった。これらのことから、知多湾，渥美湾ともに Chl. *a* は窒素よりもリンの方が関係性が強く、Chl. *a* の主体は珪藻類であることが示唆された。蒲原ほか（2021）は知多湾において Chl. *a* 濃度と TN，TP 濃度の関係について解析しており、TP 濃度は TN 濃度より Chl. *a* 濃度との相関が高かったと報告している。知多湾については本解析結果においても同様となっており、渥美湾についても同様であることが明らかになった。

珪藻類細胞数の長期変化：海域の栄養塩減少に反応して、珪藻類の量に変化が生じている可能性があるため、2004-2013 年度と 2014-2023 年度に分けて平均細胞数 (cells/mL) を比較

した（図 3）。珪藻類の平均細胞数は 2004-2013 年度と 2014-2023 年度の間で大きく減少しており、約 5,000 cells/mL 減少している海域もあった。また、月別の植物プランクトンの増減（図 4）をみると、知多湾、渥美湾ともに植物プランクトン全体と珪藻類の長期的傾向は類似しており、2010 年頃から 20 年間の平均細胞数（2004-2023 年度）を下回ることが多くなっていったが、2019 年前後から平均並み又は平均を上回ることが多くなり、回復傾向にあることが明らかになった。柘植ほか（2024）はリン増加運転が開始された 2017 年以降、これまで減少傾向だった TP 濃度に変化の兆しがみられることを報告しており、総細胞数、珪藻細胞数にも同様の変化が現れていると考えられた。

珪藻類全体の細胞数に大きな長期変化がみられることから、従来からよくみられる細胞数の多い珪藻に変化が生じていると予測し、知多湾、渥美湾において 2004-2023 年度までの平均細胞数の上位種で、伊勢湾内で休眠期細胞が確認されている（石井ほか 2016）、*Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus* について湾奥から湾口にかけて設定した調査点毎（図 1）に細胞数の変動を Mann-Kendall 検定により解析した（表 1）。解析に供した期間は 2004-2023 年度通期の他、下水道増加運転試験が開始された 2017 年の前後で期間を分けた 2004-2016 年度、2017-2023 年度の 3 期間とした。*Skeletonema* spp. の年平均細胞数は 2004-2023 年度でみると全地点で減少傾向となっており、K5, K6, A8 では有意な減少となっていた。リン増加運転開始前後でみると、リン増加運転開始前（2004-2016 年度）は全体的には減少～横ばいで、知多湾の K5, K6, K7 では有意な減少だったが、開始後（2017-2023 年度）は有意ではないが全地点で増加傾向となった。*Chaetoceros* spp. の年平均細胞数は 2004-2023 年度でみると有意ではないが A5 以外の全地点で減少傾向となっていた。リン増加運転開始前後でみると、リン増加運転開始前（2004-2016 年度）は全地点で減少傾向で、K6, K7, A8 では有意な減少だったが、開始後（2017-2023 年度）は A5, A7 を除いて増加傾向となり、K4 では有意な増加傾向となった。*Leptocylindrus danicus* の年平均細胞数は 2004-2023 年度でみると A5 以外の全地点で増加傾向となっており、K5, K6, A8 では有意な増加となっていた。リン増加運転開始前後でみると、リン増加運転開始前（2004-2016 年度）は有意ではないが全地点で増加傾向で、開始後（2017-2023 年度）は知多湾では引き続き増加傾向だったが、A5, A7, A10 は減少傾向となり、有意ではないものの傾向の変化がみられた。

更に詳細な変動傾向を把握するため、月別の *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus* および渦鞭毛藻類総細胞数の増減を解析した（図 5）。知多湾（図 5 左）においては、*Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp. は 2010 年頃から 20 年間の平均細胞数（2004-2023 年度）を下回ることが多かったが近年は回復傾向となっており、年平均細胞数の変動と類似した傾向になっていた。また、*Leptocylindrus danicus* も年平均細胞数の変動と同様に長期的な増加傾向となっていた。3~10 月の *Chaetoceros* spp. と *Leptocylindrus danicus* は増加の程度が大きかった。渦鞭毛藻については 2010 年頃から経年的に 20 年間の平均細胞数を上回る月が増えており、通年で増加傾向となっていた。渥美湾（図 5 右）については、*Skeletonema* spp. は長期的に減少傾向にあり、2017 年度以降増加傾向となった年平均細胞数の検定結果とは一致しなかった。この要因としては調査点毎にみたものと湾平均値を用いたものの違いや、2017 年度以降のピークが以前のピークよりも小さい点が挙げられた。*Chaetoceros* spp. は 2011~2017 年頃を底に回復傾向にあり年平均細胞数の変動傾向と一致した。*Leptocylindrus danicus* は近年、秋季に増加傾向で、その他の時期は減少傾向となっ

ており、その結果として一部の測点で減少傾向に転じていると考えられた。渦鞭毛藻については知多湾と同様、2010年頃から経年的に20年間の平均細胞数を上回る月が増えており、通年で増加傾向となっていた。これらのことから、長期的にみれば三河湾においても大阪湾（多田ほか2012）や播磨灘（Nishikawa et al. 2010）等と同様に、*Skeletonema* spp. が減少していることが明らかになった。また、知多湾の *Skeletonema* spp.、両湾の *Chaetoceros* spp. は長期的には減少していたが、リン増加試験運転開始後増加傾向に、*Leptocylindrus danicus* は長期的に増加していたがリン増加試験運転開始後は渥美湾で横ばいに転じており、栄養塩増加運転の結果、一次生産に変化が生じてきていると考えられた。

一般化線形モデルによる解析：植物プランクトンの総細胞数、珪藻類細胞数、渦鞭毛藻類細胞数 *Skeletonema* spp. 細胞数、*Chaetoceros* spp. 細胞数、*Leptocylindrus danicus* 細胞数を応答変数、水温、塩分、TN、TP、DIN、DIP を説明変数として一般化線形モデル解析を行った（表2）。BICでモデル選択を行い、選択された係数は渥美湾の *Leptocylindrus danicus* の切片を除く全てがモデルに有意な ($p < 0.01$) 影響を与えていた。重要な説明変数としては、両湾ともに全リン、DIP が該当し、特に *Skeletonema* spp. 細胞数に対する説明変数には全リン、DIP のみが選択された。また、水温は多くの応答変数に対して選択されなかった。珪藻細胞数との相関は全リンが高く、一般化線形モデルによる解析においてもリンが重要な説明変数として選択されていることから、三河湾の珪藻細胞数の変動には、リンの影響が大きいことが明らかになった。

(2) -2. 動物プランクトン群集の地理的变化と炭素重量による評価

多変量解析を用いた地理的变化の解析結果より、湾外から湾口、湾内、湾奥へと群集が移行していることが明らかになった（図6）。水温塩分ダイアグラムからも、水塊が湾外から湾奥へとシフトする様子がみられたため、カイアシ類群集は地理的な距離と水塊の変化に対応して変化していると考えられた。地理的なグループ間の有意差検定より、湾外（A10）と湾内の3測点（P3, P27, P10）はそれぞれ有意差が強く ($R=0.850\sim0.946$, 0.0001)、湾外と湾口（A1）も有意に異なる ($R=0.659$, 0.0001) ことが明らかになった。湾口と伊勢湾奥（P3）も有意に異なったが ($R=0.324$, 0.0001)、湾口と三河湾西（P27）および伊勢湾中央（P10）とはそれぞれ有意差が弱かった ($R=0.128\sim0.182$, $0.039\sim0.012$)。水温塩分ダイアグラムでも、湾口の水塊は外洋系水よりも内湾系水に含まれるか、外洋系水と内湾系水の間位置するため、カイアシ類群集と水塊との関係性がみられた。一方で湾内では、伊勢湾中央と湾奥および三河湾は、それぞれ差がなかった ($R=0.008$, 0.387 ; $R=-0.006$, 0.463)。

別の多変量解析手法であるクラスターによる類型化より、カイアシ類群集は大きく2つのグループに分かれ、季節的な傾向があることが明らかになった。冬～夏の途中まで湾口は湾内と似た群集を形成し（グループI）、夏から初冬にかけて湾口は湾外と似た群集を形成する（グループII）。湾内も秋を中心に、湾外と似た群集を形成する（グループII）。これまでの本課題の解析結果より、夏は枝角類（ミジンコ類）の *Penillia avirostris* が優占することが分かっている。冬～春に形成されたカイアシ類群集が、塩分が低くなる夏に一時的に *P. avirostris* で代表されるミジンコ群集に移行するが、夏から秋に湾外から湾内に暖流の外洋水が流入する影響下で、新たなカイアシ類群集が湾内に形成されると考えられる。

100 μm のネットで採集された動物プランクトンについて、湾外と湾内の個体数密度と炭素

重量の年平均を比較すると、前者で湾内は湾外の約 3.4 倍高く、後者で約 4.5 倍高かった。季節変動のパターンも異なり、湾内は 2023 年の春に高かったが、湾外は 2024 年の春に高かった (図 7)。カイアシ類の炭素重量による評価では、内湾では *Calanus sinicus* の寄与が最も高いことが分かった。

(3) 湾内の循環構造や栄養塩動態評価モデルを用いた検討

(3) -1. 既存データを用いた循環構造の季節・経年変化の把握

中山水道における 2010~2023 年の北向・東向流速の月別平均値を図 8 に示す。季節変化は顕著でなく、季節通して、上層 (海底上 13-16 m) は南東向流 (流出)、下層 (海底上 1-12 m) は北東~北西向流であった。海底上 0-15 m における月平均北向流積算値の各年・各季節平均を図 9 で示す。2020 年以降、全ての季節で北向流 (外洋水の流入) が強化された。2020 年以降は、黒潮流軸が北向する位置が伊勢湾沖にある傾向があり (図 10)、そのことが外洋水流入に寄与していた可能性がある。矢作川河川流量は、夏季で 2020 年以降多い傾向にあるが、春季は少ない傾向にあり、河川流量の変化だけでは、全季節での下層北向流強化を説明できなかった。

(3) -2. 粒子追跡モデルの改良および三河湾への DIN 流入量と黒潮流軸との関係

(1) 粒子追跡モデルの改良

ランダムウォークによる拡散項を粒子追跡モデルに実装した。放流粒子数を昨年度の 114 個から 1127 個に増強した。MOVE-jpn の 2020~2023 年のデータを整備し、改良した粒子追跡モデルで、水平拡散係数 0, 2, 10 m²/s の 3 ケースについて粒子追跡実験を行った。

(2) 三河湾への DIN 流入量と黒潮流軸との関係

2020 年や 2021 年には成層期 (6~9 月) に DIN 流入が多くなる季節変動が顕著であった。2018~2019 年は大王埼沖の黒潮の離岸距離が大きくなり、DIN 流入が低い傾向にあったが、2020~2023 年は比較的流入が多い傾向が継続した (図 11)。ただし、2020 年後半の黒潮接岸時には DIN 流入は多かった。成層期の DIN 流入の経年変化を調べたところ、2020 年代になって湾外から三河湾への DIN 供給量が増加している可能性が示された (図 12)。

【参考文献】

- Sakamoto K, Tsujino H, Nakano H, Urakawa S, Toyoda T, Hirose N, Usui N, Yamanaka G. Development of a 2km-resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. *Ocean Dynamics*, 69, 1181, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01291-1>
- 蒲原聡, 芝修一, 鶴島大樹, 鈴木輝明. 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. *水産海洋研究*, 85 (2), 69-78, 2021.
- 柘植朝太郎, 二ノ方圭介, 河住大雅, 大澤博, 石田俊朗. (三河湾における窒素・リン濃度および相互比の長期的変化とアサリ, ノリ漁業との関係. *愛知水試研報*, 29, 30-46, 2024.
- 石井健一郎, 石川輝, 今井一郎. 3-10 休眠期を持つ珪藻類. 「有害有毒プランクトンの科学」今井一郎, 山口峰生, 松岡数充 編, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 258-270, 2016.
- 多田邦尚, 山本圭吾, 一見和彦, 山田真智子, 西川哲也, 樽谷賢治, 山口一岩. 大阪湾の植物プランクトンの季節・経年変動とその要因. *瀬戸内海*, 64, 75-77, 2012.
- Nishikawa T, Hori Y, Nagai S, Miyahara K, Nakamura Y, Harada K, Tanda M, Manabe T, Tada K.

Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35 - year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*, 33, 417-427, 2010.

表1 *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus* の年平均細胞数の長期変動の Mann-Kendall 検定結果 (τ は変動傾向(正の場合増加, 負の場合減少傾向)を示す。黄色は変動傾向が統計的に有意)

Skeletonema spp.

期間	FY2004-2023		FY2004-2016		FY2017-2023	
	τ	p	τ	p	τ	p
K4	-0.0632	0.721	-0.205	0.36	0.333	0.368
K5	-0.411	<0.05	-0.487	<0.05	0.429	0.23
K6	-0.379	<0.05	-0.487	<0.05	0.238	0.548
K7	-0.305	0.0644	-0.462	<0.05	0.0476	1
A10	-0.305	0.0644	0.0256	0.951	0.143	0.764
A5	-0.284	0.0855	-0.256	0.246	0.524	0.133
A7	-0.263	0.111	-0.0769	0.760	0.429	0.23
A8	-0.442	<0.01	-0.333	0.127	0.0476	1

Chaetoceros spp.

期間	FY2004-2023		FY2004-2016		FY2017-2023	
	τ	p	τ	p	τ	p
K4	-0.0842	0.627	-0.256	0.246	0.714	<0.05
K5	-0.137	0.417	-0.385	0.0769	0.524	0.133
K6	-0.0947	0.581	-0.538	<0.05	0.0476	1
K7	-0.0316	0.871	-0.487	<0.05	0.524	0.133
A10	-0.126	0.456	-0.333	0.127	0.0476	1
A5	0.0105	0.974	-0.282	0.200	-0.143	0.764
A7	-0.158	0.347	-0.385	0.0769	-0.333	0.368
A8	-0.105	0.538	-0.462	<0.05	0.238	0.548

Leptocylindrus danicus

期間	FY2004-2023		FY2004-2016		FY2017-2023	
	τ	p	τ	p	τ	p
K4	0.263	0.112	0.205	0.360	0.238	0.548
K5	0.337	<0.05	0.333	0.127	0.238	0.548
K6	0.358	<0.05	0.308	0.161	0.333	0.368
K7	0.316	0.0556	0.282	0.200	0.143	0.764
A10	-0.0211	0.922	0.103	0.669	-0.238	0.548
A5	0.179	0.284	0.0256	0.951	-0.0476	1
A7	0.200	0.230	0.0256	0.951	-0.143	0.764
A8	0.337	<0.05	0.0513	0.855	0.238	0.548

表2 一般化線形モデル (GLM) による解析結果

知多湾

分類群	水温	塩分	全窒素	全リン	DIN	DIP	切片
Phytoplankton	~	-868	+ -17	+ 504		+ -689	+ 26,619
Diatom	~	-781	+ -18	+ 488		+ -661	+ 24,023
Dinoflagellate	~	-73	+ 2		+ -4		+ 2,180
<i>Skeletonema</i> spp.	~			267		+ -401	+ -2,573
<i>Chaetoceros</i> spp.	~	45	+ -93	+ -3	+ 20	+ -36	+ 3,427
<i>Leptocylindrus danicus</i>	~					-21	+ 459

渥美湾

分類群	水温	塩分	全窒素	全リン	DIN	DIP	切片
Phytoplankton	~	-648		+ 362	+ -20	+ -491	+ 16,027
Diatom	~	-551	+ -9	+ 384		+ -558	+ 14,056
Dinoflagellate	~	-36	+ -151	+ 25	+ -5		+ 5,295
<i>Skeletonema</i> spp.	~			+ 261		+ -425	+ -3,815
<i>Chaetoceros</i> spp.	~	+ -63	+ -3	+ 40		+ -48	+ 2,255
<i>Leptocylindrus danicus</i>	~	23				+ -22	+ -9

応答変数が従う確率分布：ガウス分布

ベイズ情報量基準 (BIC) に基づきモデル選択

重要な説明変数 (表中の赤字) : t値の絶対値 >10

有意な説明変数 ($p < 0.01$) : 渥美湾の *L.danicus* の切片を除く全ての係数

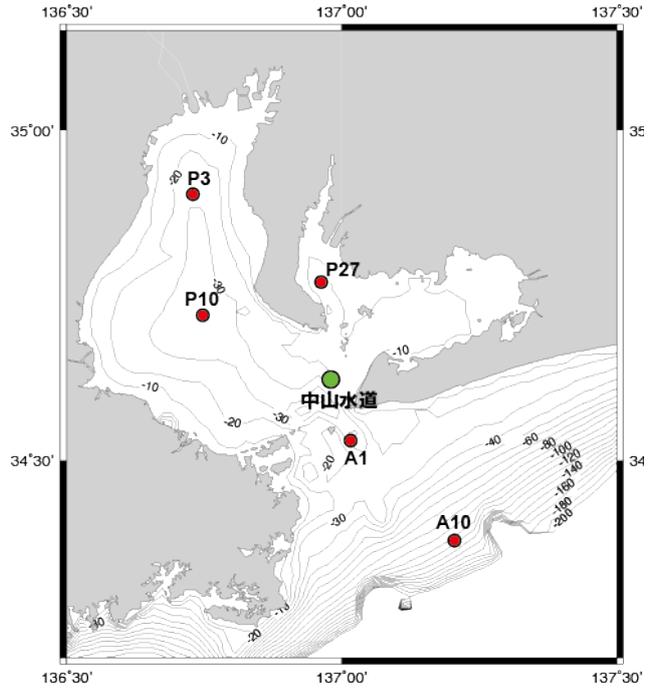
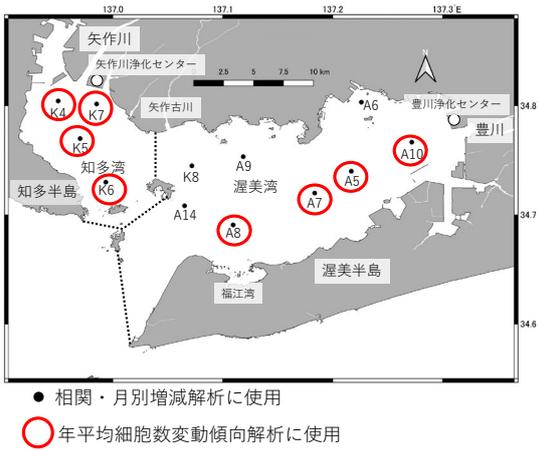


図1 植物プランクトン等の調査測点図

図2 流行・流速観測点（中山水道；緑丸）と
ノルパックネット曳網の5測点（赤丸）

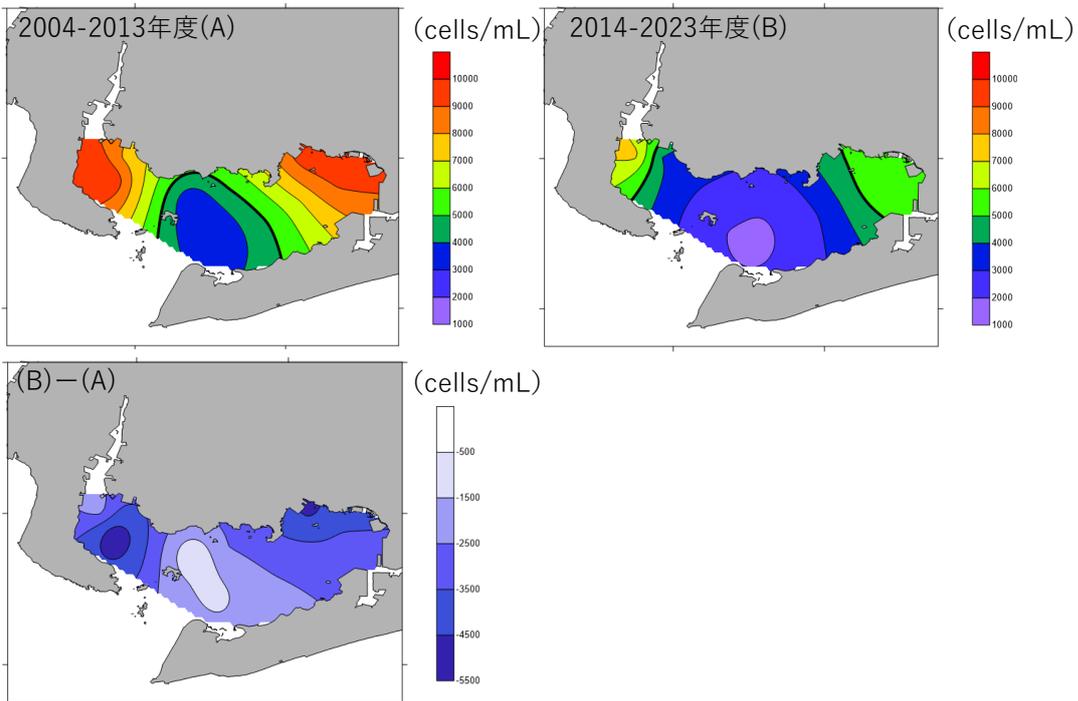


図3 2004-2013年度と2014-2023年度の珪藻平均細胞数の水平分布

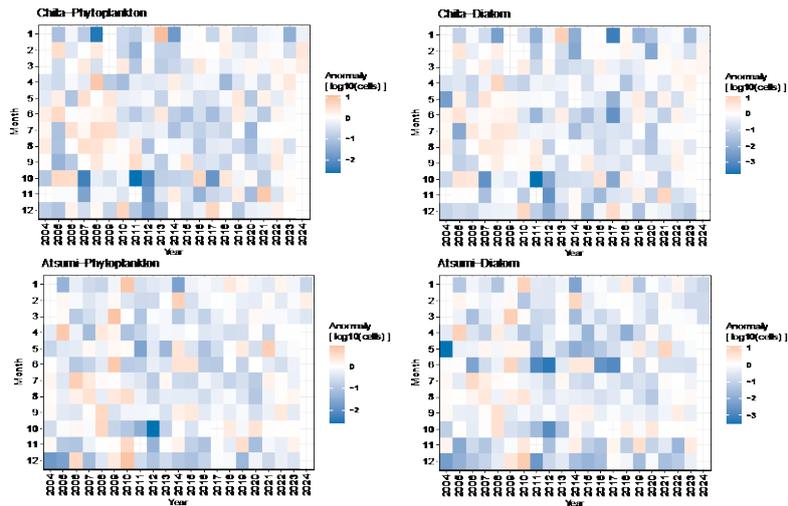


図4 月別の植物プランクトン総細胞数および珪藻類総細胞数の増減 (Log10(各月の平均細胞数) - Log10(20年間の月平均))

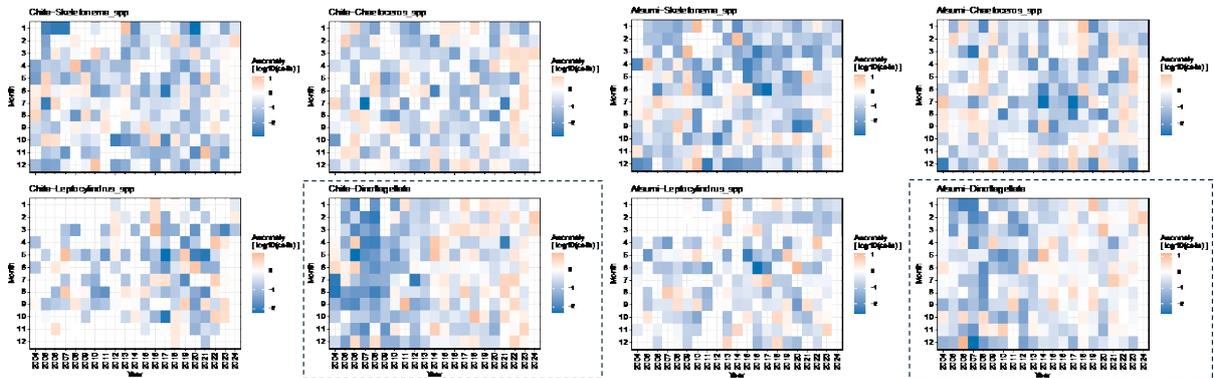


図5 知多湾(左)と渥美湾(右)における月別の *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus* および渦鞭毛藻類総細胞数の増減 (Log10(各月の平均細胞数) - Log10(20年間の月平均))

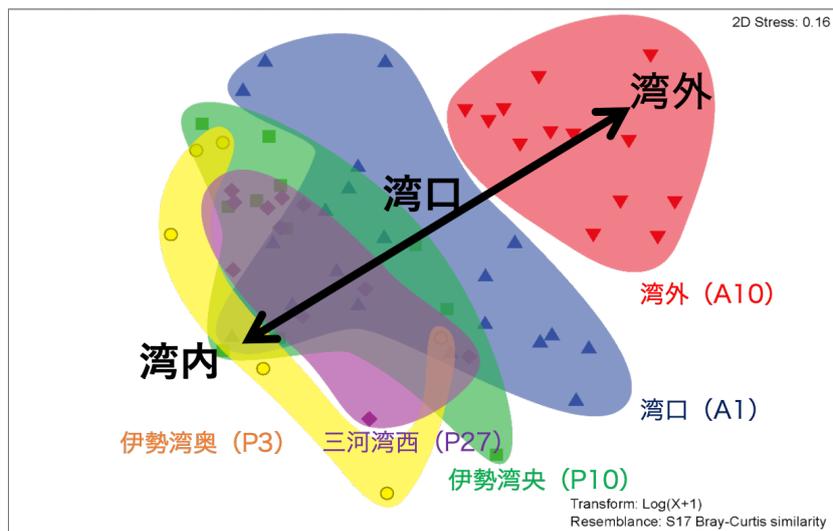


図6 非メトリック多次元尺度構成法によるカイアシ類群集の地理的変化

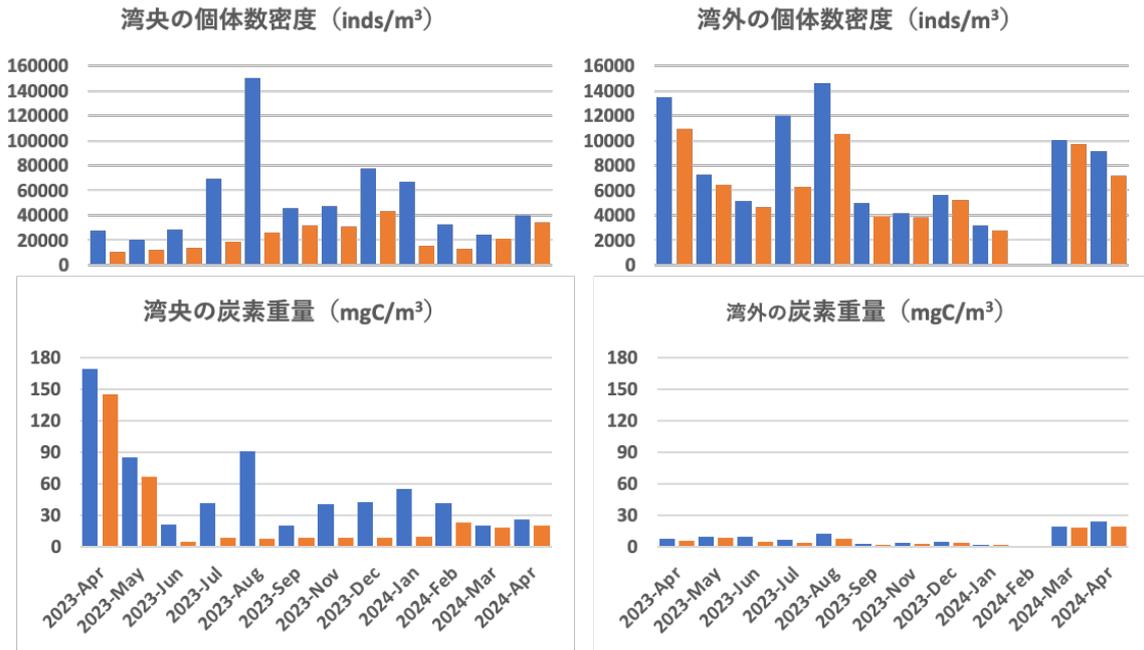


図7 伊勢湾中央 (P10) と湾外 (A10) の個体数密度と炭素重量の比較

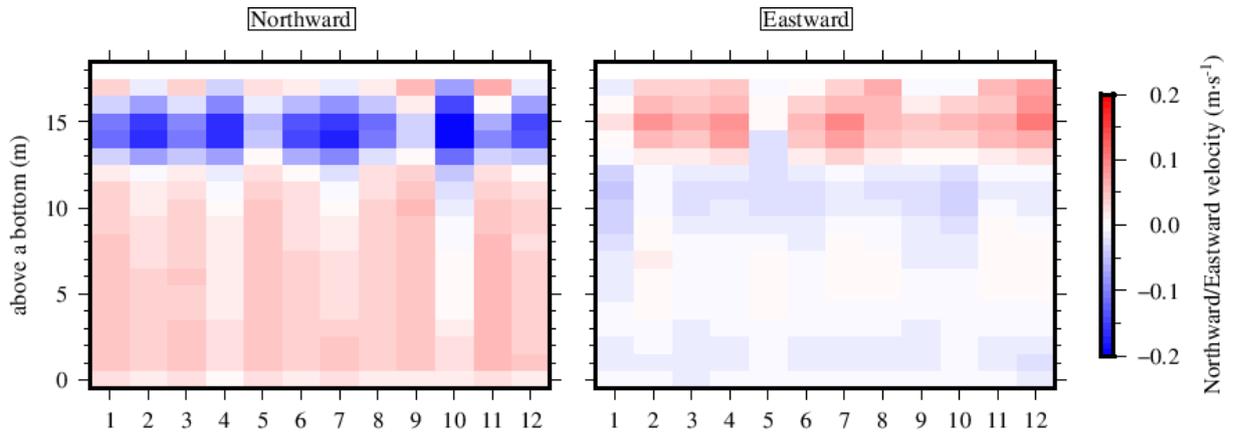


図8 中山水道における月別平均流速 (左：南北成分, 右：東西成分)

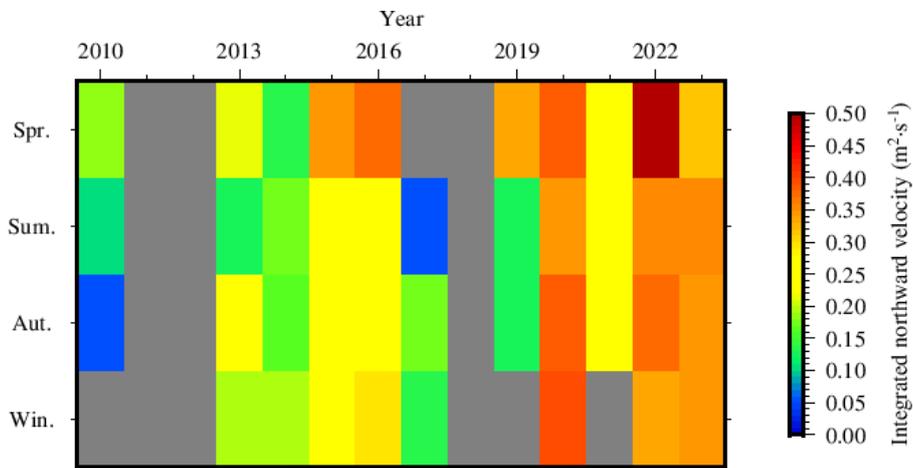


図9 中山水道海底上 0-15 m における月平均北向流積算値の各年・各季節平均

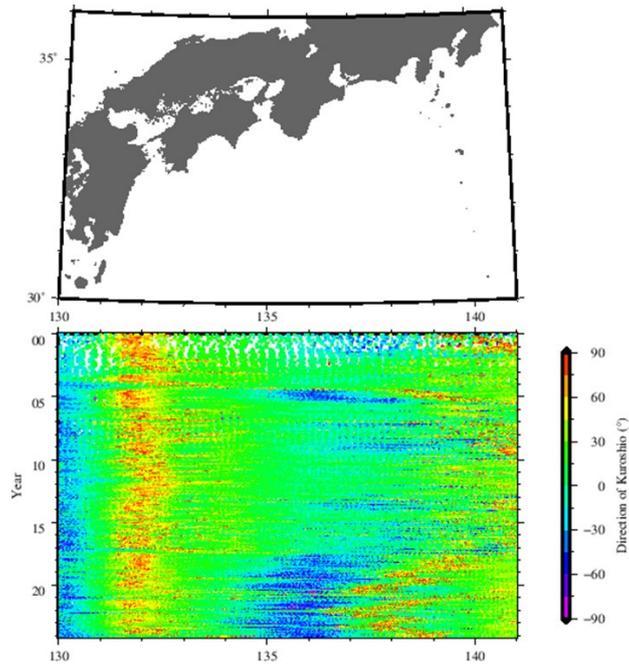


図 10 黒潮流軸の流向

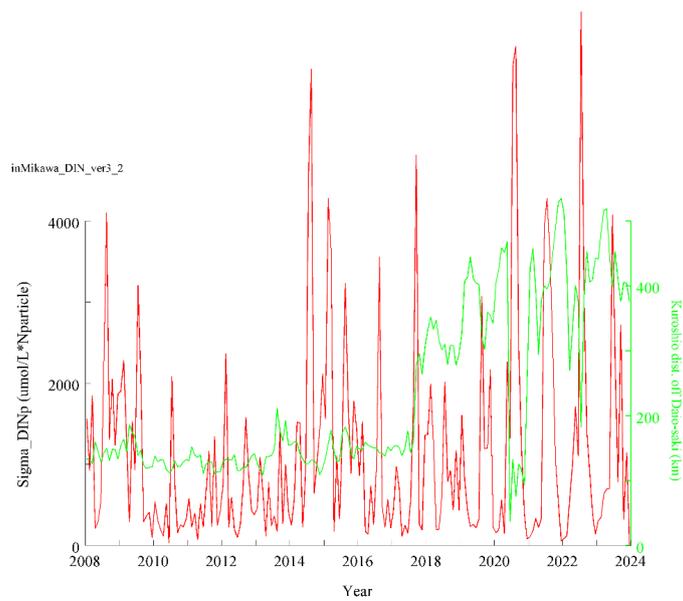


図 11 三河湾への DIN 流入 (Σ DINp) (赤線) と大王埼沖の黒潮流軸距離 (緑) との比較

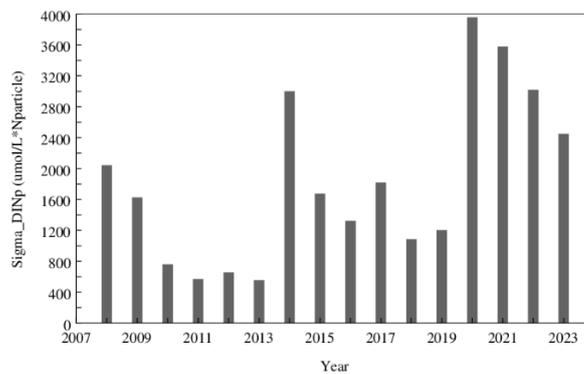


図 12 三河湾への成層期 (6~9 月) の DIN 流入 (Σ DINp) (月平均値) (水平拡散計数 $=2\text{m}^2/\text{s}$ のケース)

課題番号：Ⅲ－２)

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

水産研究・教育機構水産技術研究所：井上誠章，多賀悠子，西本篤史

三重大学 生物資源学部：伯耆匠二

愛知県水産試験場：稲葉博之，平井玲，和久光靖，澤田知希，川村耕平，
進藤蒼，阿知波英明，荒川純平

三重県水産研究所：畑直亜，岡田誠，岩出将英，高崎有美子，北川強司

【背景・目的】

アサリ資源は全国的に極めて低い水準にあり，その要因の一つとして沿岸域の栄養塩不足に伴う微細藻類の減少や種組成の変化との関連が示唆されている。餌料に適した植物プランクトン不足はアサリ全生活史における減耗要因となるが，特に飢餓耐性の低い着底初期や稚貝にとっては致命的となり得る。それゆえアサリを含めた二枚貝資源の変動機構の解明には，アサリが曝露された餌料環境とさらにそれに伴う生理状況変化の正確な把握は重要な課題である。近年，アサリ等の二枚貝類は各生活段階において，好適餌料となる植物プランクトンのサイズや種の変化が起こることが明らかになってきた。しかし，現状の海洋研究においては摂餌環境の指標として，植物プランクトン量を反映するクロロフィル値を間接的に用いるしかない。これではアサリが摂餌できる植物プランクトンのサイズや種組成を無視していることになり，クロロフィル値は正確な摂餌環境の指標となっていない可能性がある。本研究では，メタバーコーディングによる微細藻類の網羅的解析と，飢餓への遺伝子応答の網羅的解析による生理的指標の開発により，本種にとっての正確な餌料環境評価手法の開発を目指す。

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

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

【方法】

(1) メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発

西三河海域の3定点（味沢実録境，丙，吉田）と，福江湾の1定点で，春，夏，秋，冬に野外調査を実施した。採泥器でアサリ稚貝・成貝（殻長約10～30 mm），海底表層1 cmの砂泥（環境砂泥）を約10 g採集し，即座に99%エタノール中で固定した。海底直上の海水（環

境水)を1L採取してDNA分解抑制剤(塩化ベンザルコニウム溶液)を0.1%の濃度で添加した。環境水中に含まれる懸濁物については、目開きの異なる5種類のフィルターでろ過してサイズ分画した後にDNAを抽出した。環境砂泥をエタノール中で攪拌して得られた懸濁物、環境水中に含まれる懸濁物をGF/Fフィルター上に捕集してDNAを抽出した。各月のアサリ消化管内容物、環境水、環境砂泥試料からDNAを抽出し、葉緑体rbcL領域上に設計された珪藻特異的なユニバーサルプライマー(Maitland et al. 2020)を用いて1st PCRを実施したのち、2nd PCR・シーケンシング・ライブラリの作成を行った。決定された各配列についてBLASTによる相同性検索を行い、配列一致度95%を基準に微細藻類を属レベルで同定した。予算の都合上、全ての最終試料を分析することができなかつたため、2024年5月と10月の試料についてのみ分析を実施した。残りの月の試料についてはR7年度に分析を進める予定である。

(2) 摂餌環境等のアサリ生理状態の指標開発に向けた遺伝子解析

ダウンウェリング水槽(直径15cm×深さ15cm、底面:500 μ mメッシュ)に1mmガラスビーズを厚さ1cmで敷き詰め、ろ過海水を0.5L/minでかけ流した6水槽に、それぞれ稚貝(平均殻長8.5mm)を20個体ずつ収容した。3水槽ずつを給餌区(一日あたり*Chaetoceros gracilis*を 5×10^8 細胞給餌、以下F群)と無給餌区(以下N群)に設定し、飼育開始1, 3, 5, 10, 15, 20日にそれぞれの水槽から3個体ずつ採集した。採集された108個体からRNAを抽出し、リアルタイムPCRによりマーカー遺伝子候補の11遺伝子について遺伝子発現量を測定し、三日以上絶食の有無を判定する統計モデル(絶食確率予測モデル)を作成し、その精度を評価した。

(3) 三河湾におけるアサリ漁場及びその周辺等における現地調査

三河湾内におけるアサリ漁場の計11地点(福江湾、六条潟、蒲郡水神、東幡豆、吉田、丙、味沢実録境、実録(沖)、味沢、14号地、古布)において(図1)、枠取り(25cm×25cm)により各地点3回底泥を採取し、目開き2mmまたは4mmのふるいによりアサリを選別し、個体密度、殻付き湿重量による現存量を求めた。ただし、吉田、丙、味沢実録境の3地点では、稚貝採捕用のジョレンを用い定面積分採捕した。採捕したアサリの殻長を計測し、うち各地点30~60個体について肥満度及び群成熟度を求めた。環境調査として、採水によるクロロフィルa濃度、底泥中のクロロフィルa量(DMF抽出+蛍光光度計による測定)、栄養物質濃度(全窒素、全リン、硝酸・亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン)の測定を行った。なお、栄養物質濃度試料の前処理を行った後、測定は三洋テクノマリン株式会社に委託した。試水は、各地点において1回ずつ海底上30cm程度(干出している場合には干潟前面の膝丈程度の水深)で採水した。現地調査は、各地点とも春(5月)、夏(7-8月)、秋(10-11月)及び冬(1月)に実施した。

(4) 海藻(ノリなど)の窒素安定同位体比を用いた窒素供給源モニタリング

ノリの漁期中に定期的にかれる共販にて乾燥板ノリ試料を入手し、窒素安定同位体比(以下、 $\delta^{15}\text{N}$)をモニタリングした。方法の詳細は令和4年度報告書を参照されたい。なお、ノリ漁期の開始は11月と遅いことから、令和6年度は令和5年度漁期試料を主に分析した。

また、サンプル数の充実している伊勢湾西岸・三重県海域において、ノリ $\delta^{15}\text{N}$ と DIN 濃度との関係を整理した。それに基づき、3つの窒素供給源候補、すなわち、陸水と外洋中層水、そして伊勢湾水、以上3つの窒素源を利用して生育したノリの $\delta^{15}\text{N}$ を推定した。ここで伊勢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た栄養塩の希釈、枯渇を表現するために採用した。

- ・陸水：栄養塩が十分にある状況、つまり $\text{DIN} > 170 \mu\text{g/L}$ のノリ $\delta^{15}\text{N}$
- ・伊勢湾水：栄養塩が枯渇した状況、つまり $\text{DIN} < 10 \mu\text{g/L}$ のノリ $\delta^{15}\text{N}$
- ・外洋中層水：伊勢湾の湾口に位置する菅島地区のノリ $\delta^{15}\text{N}$

これら3つをエンドメンバーとして仮定し、ベイズによる同位体混合モデルを用いて、R3年度からR5年度までの3カ年分の試料について、共販別に窒素供給源を推定した。また、ノリ生産枚数の情報を用いて、得られた推定結果の妥当性について検討を行った。

【結果】

(1) メタバーコーディングを用いた餌料環境評価法の手法開発

2024年5月、11月の各試料中から検出された浮遊珪藻と底生珪藻の割合と、珪藻属組成 (rbcLプライマー使用) を図2に示す。5月においては、 $20 \mu\text{m}$ を境に環境水の分画間で珪藻の属組成が異なっていたが、10月においては環境水の分画間で属組成は大きく変わらなかった。また、5月においては、いずれの調査点においてもアサリ消化管中の底生珪藻の割合が比較的高いといった、昨年度までの結果とは異なる傾向が認められた。一方、10月においてはアサリの消化管中には浮遊珪藻が圧倒的に優占していた。5月においては、R5年度までの結果から摂餌に不適と考えられた *Dactyliosolen* や *Guinardia* などの大型の群体を形成する浮遊珪藻が環境水中に優占していた。

(2) 摂餌環境等のアサリ生理状態の指標開発に向けた遺伝子解析

昨年得られた次世代シーケンサーの結果より、F群とN群で有意に発現量が変化した遺伝子 (DEG) から5遺伝子を、またパスウェイ解析の結果より3遺伝子と合わせて既存の報告から消化に関する2遺伝子と細胞内タンパク質分解に関する1遺伝子の合計11遺伝子の発現量を説明変数に、3日以上絶食の有無を応答変数とする初期モデルを作成し、AICによる最適モデル選択を行った。これより C-type lectin, Difensin, ECM および Amylase の4遺伝子が絶食確率予測モデルの説明変数として選択された。得られたモデルの精度を LOOCV (Leave-One-Out Cross-Validation) 法により検証したところ、正解率は81.6%であった。

(3) 三河湾におけるアサリ漁場及びその周辺等における現地調査

各地点における季節ごとのアサリ肥満度について図3に示した。地点間の平均肥満度は、2023年度までの調査結果とは異なる傾向が見られ、前年度まで肥満度が低い傾向にあった吉田、丙及び味沢実録境では、秋を除くと他地点との差が小さくなっていた。また、2024年度は、秋の肥満度の低下が著しく、11地点中9地点において、肥満度がへい死の恐れのある12を下回っていた。なお、六条潟では、8月末に発生した苦潮の影響によりアサリ稚貝のへい死が起こり、調査地点では秋、冬にアサリを採取することができなかった。各地点における調査時期ごとのアサリ現存量について図4に示した。全体的な傾向として、現存量は冬から夏

にかけて増加し、秋から冬に減少する傾向がみられた。福江湾は、2023年度までは年間を通して肥満度が高く、現存量も他地点と比べて高い水準を維持していたが（日比野ほか、印刷中）、2024年度は、夏から秋への肥満度の低下が著しく、また、夏から冬にかけての現存量の減少が顕著であった。2022年から2024年までの各地点における夏から秋への肥満度の低下率について図5に示した。11地点中9地点で肥満度の低下率が年々、高くなっており、夏から秋にかけての餌不足が進行していると考えられた。また近年、秋季の水温低下が晩期化しているが、秋の水温上昇に伴う代謝量の増加が肥満度の低下を増長している可能性もあり、今後、さらに詳細を調べる必要がある。アサリ漁場における全窒素（TN）と全リン（TP）の関係と海水クロロフィル *a* 濃度の季節変化を図6に示した。海水クロロフィル *a* 濃度は、春から夏に高く秋には顕著に低下した。夏にはTN濃度に対するTP濃度は高く、地点間の差も大きくなった。

矢作川浄化センター近くの14号地、味沢及び実録沖では、月1回の定期調査を行っているが、同地点の肥満度の年ごとの最低値は経年的に低下傾向にある。近隣漁場の一色干潟では2021年以降に秋冬季減耗が軽減されてきたが、この状況が続けば、各地で秋冬季減耗が再発する恐れがある。夏のクロロフィル *a* 濃度と秋冬季の現存量変化は有意な正の相関があることから（日比野ほか、2025）、夏季の餌不足解消が喫緊の課題である。今後は、夏季を含めた餌料環境の評価や栄養塩管理の検討が重要であると同時に、近年の秋季の水温低下の晩期化や温暖化等、漁場の水温変化を加味したアサリに適した餌料環境を調べる必要がある。

(4) 海藻（ノリなど）の窒素安定同位体比を用いた窒素供給源モニタリング

栄養塩の波及範囲を考慮し、本課題では、伊勢湾西岸（三重県海域）、東岸（愛知県海域）、三河湾の知多地区、西三河地区、以上4海域に分けて、ノリ $\delta^{15}\text{N}$ とDINとの関係を整理してきた。R6年度報告書では、広域での調査を終えた伊勢湾西岸について報告したい。

・伊勢湾西岸（三重県海域）

2000年以降、ノリ生産枚数は減少の一途を辿っているが、近年でも特に生産不良であった令和3年度漁期の窒素供給源の推移をみると、漁期を通じて栄養塩をほとんど含まない伊勢湾水が高い割合で寄与していることが示唆され、慢性的に栄養塩不足であったことが示唆された（図7）。次に令和4年度漁期を見ると、陸水の寄与率が、10回汐を除いて、40%~60%と高い割合で推移した。特に、4回汐にて伊勢湾水の寄与率が大きく低下したタイミングで、ノリの生産枚数が大きく増加した。また、栄養塩をほとんど含まない伊勢湾水の寄与率が上昇した9回汐以降、ノリの生産枚数は大きく減少した。このように、ノリ $\delta^{15}\text{N}$ から推定された窒素供給源の推定結果と、ノリ生産枚数との間にきれいな関係性を見出すことが出来た。最後に令和5年度漁期を見ると、1回汐から3回汐にかけて、他の時期に比べて、陸水由来の窒素の寄与率が非常に高く、漁期の開始からかなり生産枚数も多かった。その後、4回汐において、栄養塩供給源が大きく変化し、外洋中層水からの栄養塩供給が湾全域において主要な窒素供給源となっていることが示唆された。5回汐以降は栄養塩をほとんど含まない伊勢湾水の寄与率が大きく上昇したものの、陸水の寄与は比較的高いまま推移し、ノリの生産枚数が大きく減少することはなかった。これらの推定結果の妥当性については、ノリの生産枚数だけでなく、海況等とも照らし合わせた更なる検討が必要であるものの、栄養塩供給状況が近年も年によって大きく変動していることを検出することが出来ており、指標としての有効

性を確認することが出来た。

【参考文献】

日比野学・進藤蒼・曾根亮太・柘植朝太郎・平井玲（2025）三河湾におけるアサリ漁業が成り立つために必要な栄養塩類と餌料の濃度水準の検討. 水産海洋研究, 89 (1), 1-14.

日比野学・進藤蒼・澤田知希・平井玲（印刷中）漁場生産力回復調査（アサリ漁場における環境特性と資源形成の関連）. 令和5年度愛知県水産試験場業務報告.

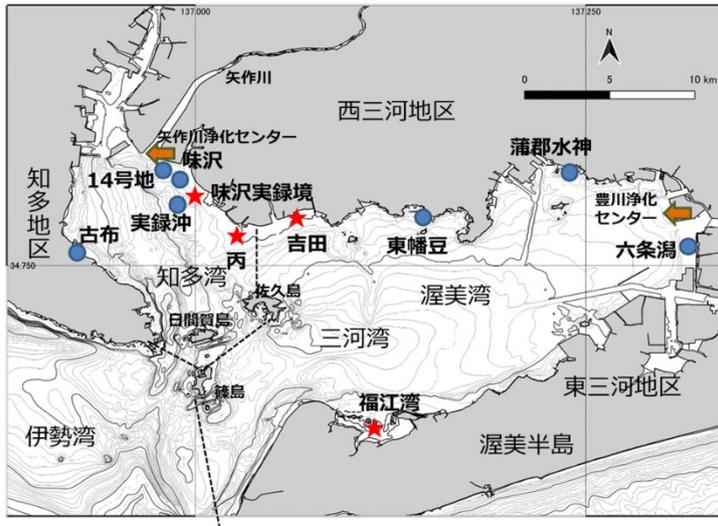


図1 調査地点図 (★地点はメタバーコーディング試料採取地点を示す)

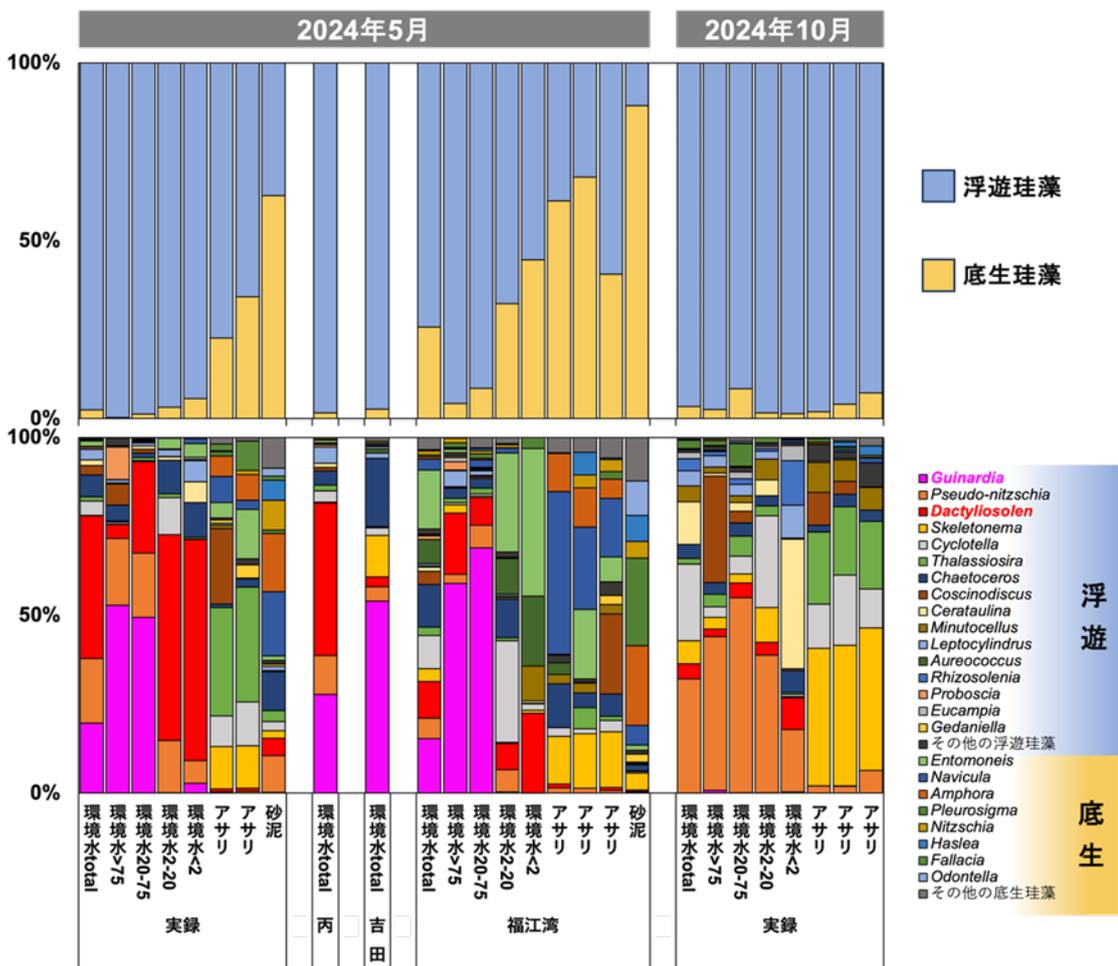


図2 rbcL プライマーを用いたメタバーコーディング解析結果
各調査月、各調査地点の環境水、アサリ消化管内容物、砂泥中の、浮遊珪藻および底生珪藻の割合 (上図)、珪藻各属の割合 (下図) を示す。珪藻各属の生活型については Round et al. (1990)に基づいて区分した。

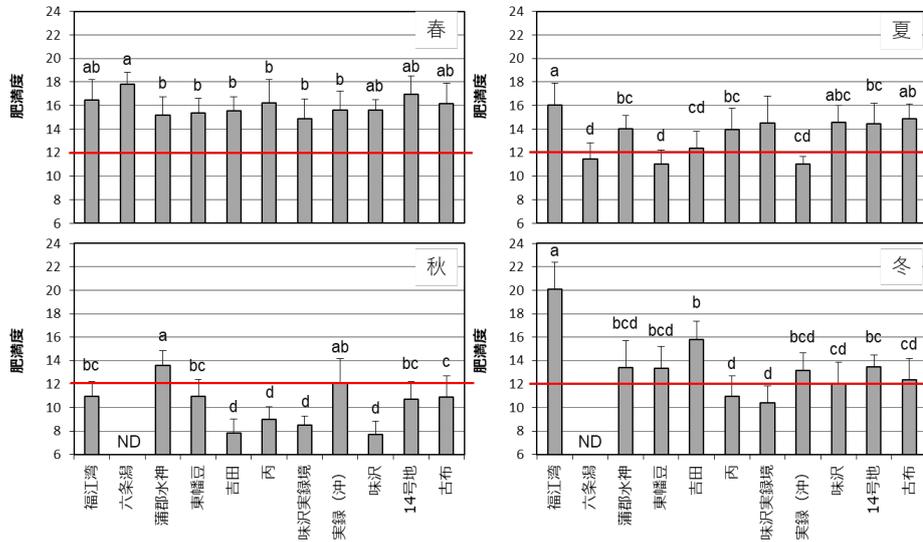


図3 各地点におけるアサリ平均肥満度（縦棒は標準偏差）
異なるアルファベットは地点間の有意差を示す（TukeyHSD, $P < 0.05$ ）

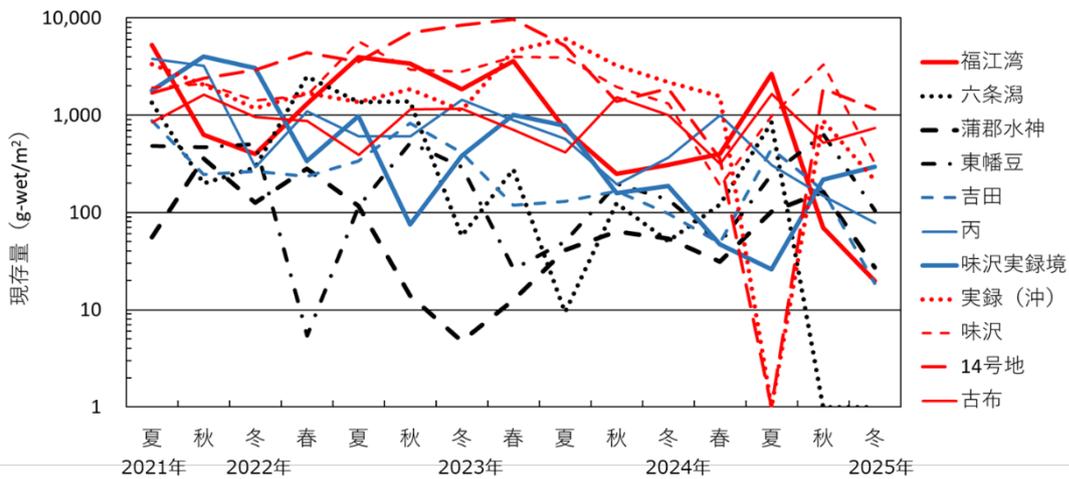


図4 各地点におけるアサリ現存量（g-wet/m²）の季節変化

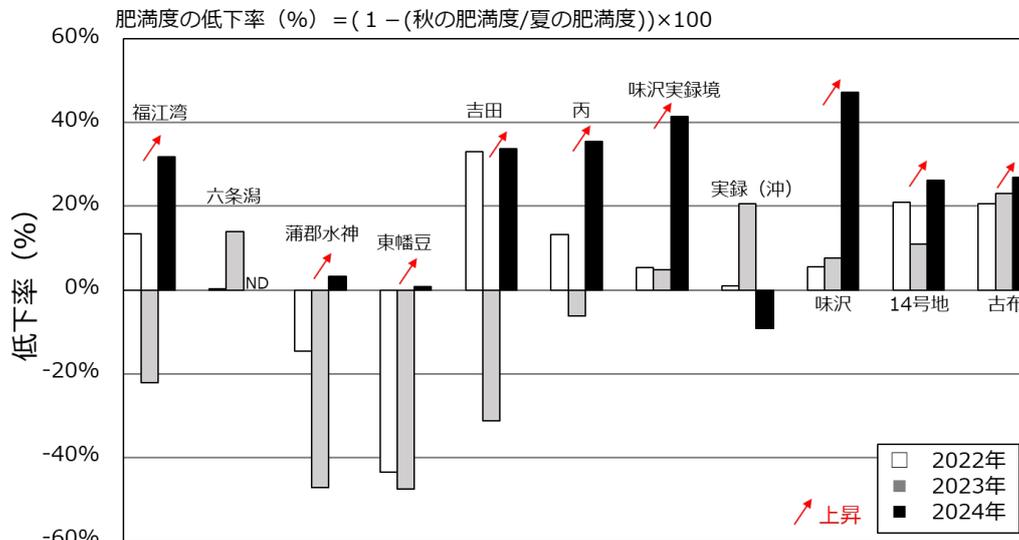


図5 各地点における夏から秋へのアサリ肥満度の低下率

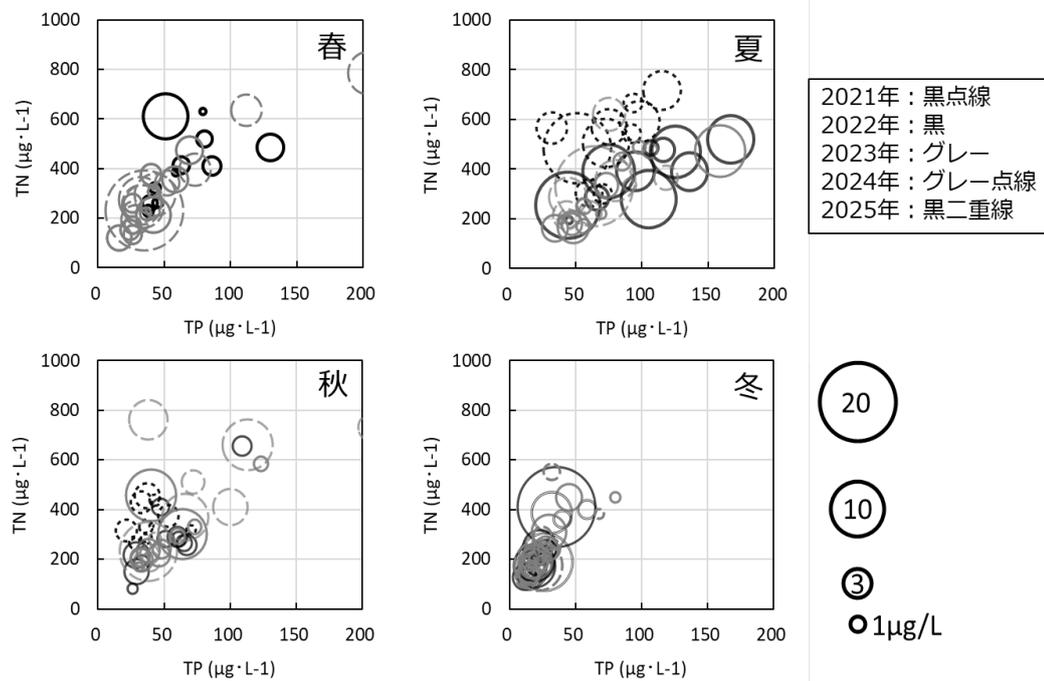
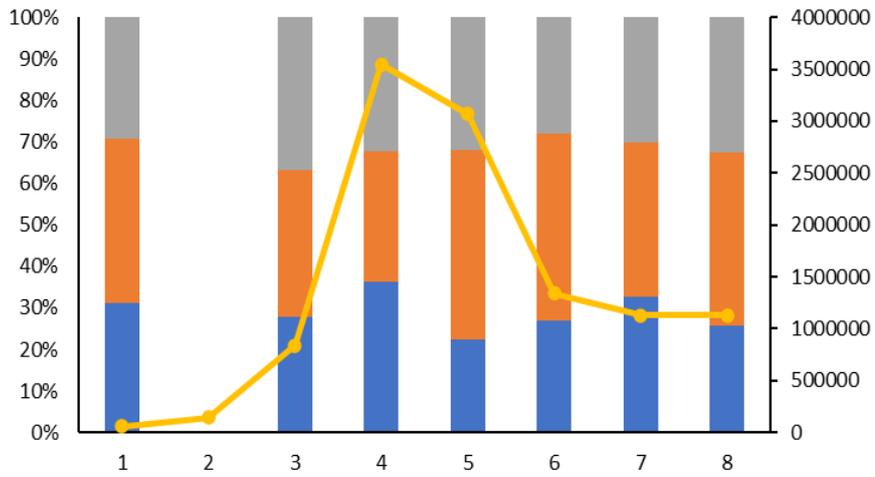
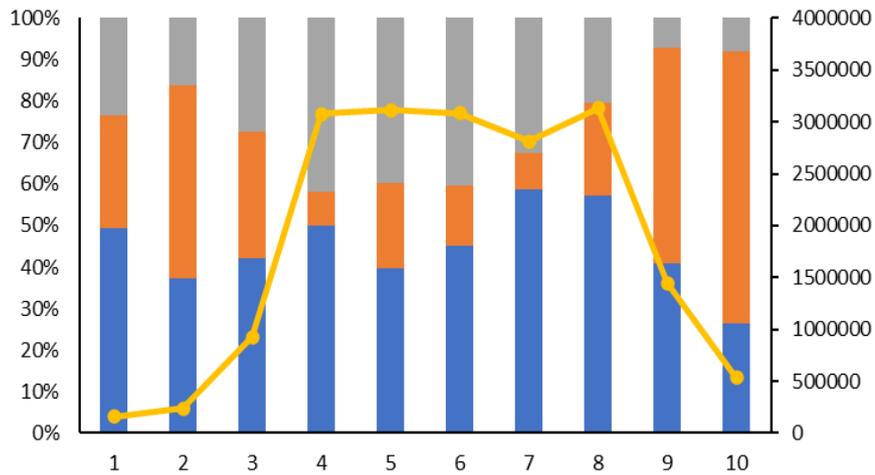


図6 アサリ漁場における全窒素 (TN) と全リン (TP) の関係と海水クロロフィル a 濃度の季節変化 (円の大きさがクロロフィル a 濃度の高さに比例する)

2021年（令和3年）



2022年（令和4年）



2023年（令和5年）

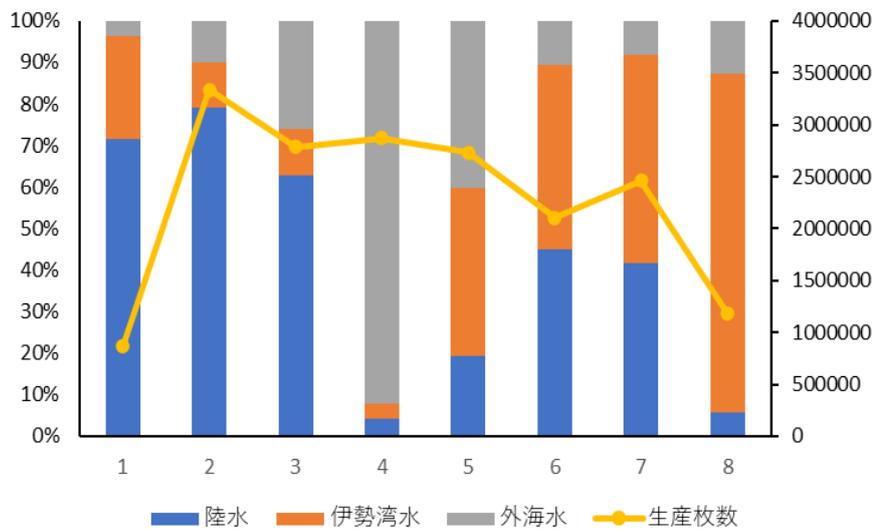


図7 伊勢湾三重県海域における窒素供給源と生産枚数の遷移

課題番号：Ⅲ－３)

課題名：栄養塩類管理方策の検討

一般社団法人 全国水産技術協会

シニア技術専門員 北川高生

技術専門員 畑 恭子

技術専門員 池田宗平

調査協力員 小山悠人

調査協力員 持田史佳

調査協力員 児嶋大地

【背景・目的】

本調査では「豊かな海」に必要な栄養塩供給を把握して管理することによって、「きれいな海」において漁業資源の増大と持続的な維持を可能とし、さらに、適切な栄養塩の配分による安定した生態系の維持と生産量の最大化を可能とする方針の検討を行うものである。そのため、伊勢・三河湾をモデル海域として、栄養塩管理方策を検討する。この海域における資料・データの収集により栄養塩の挙動や漁業実態の把握を行い、既存の物質循環モデルを対象海域に当てはめ、対象海域における物質循環の実態を把握する。さらに、既存の生態系モデルとの統合を図り、漁業資源を含めた生態系を構成する生物の動態を再現し、栄養塩供給の変化等に伴う漁業生物の変動を予測する内湾漁業生産管理モデルを構築する。最終的には栄養塩管理モデルによって栄養塩と漁業生産との関係性を明らかにし、下水処理場の季節別管理運転等による漁業への効果について検討を行い、栄養塩管理方針をとりまとめる。

令和 6 年度では、モデル海域とする伊勢湾・三河湾における栄養塩管理モデルの構築および感度解析を実施し、栄養塩管理運転に伴うアサリ資源量への影響について検討を行う。

【方法】

(1) モデルの構築

港湾空港技術研究所で開発された EcoPARI (田中・鈴木(2010), 田中ほか(2011), Matsuzaki *et al.*, (2024)) をベースに、伊勢湾・三河湾におけるアサリ資源量を推定するモデルを構築した。再現性の検証は 2012 年度～2014 年度の 3 か年を対象に実施した。

(2) 感度解析の実施

(1) で構築したモデルを用い、下水処理場等での管理運転を想定して、下水処理場等からの流入負荷量を増加させる感度解析を実施した。

(3) 検討委員会の開催

モデル構築ならびに栄養塩管理方針に専門的な立場からのご意見をいただくために、水産分野の専門 6 名 (検討委員会メンバーは以下の通り) からなる検討委員会を設置し、8 月及び 2 月の計 2 回開催した。

<検討委員会の委員構成>

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

【結果】

(1) モデルの構築

(1) -1 モデルの概要

構築したモデルのベースとなった EcoPARI の概要は図 1 およびに示すとおりである。アサリ資源量モデルについては、鶴島ら(2019)のアサリ成長モデルが組み込まれた EcoPARI を利用した。水平格子分割は図 3、鉛直層分割は図 4 に示す通りとした。計算期間は 2012 年 4 月 1 日～2015 年 3 月 31 日とした。

流入負荷量については、一級河川については水文水質データベースから得られた流量および水質データから LQ 式を推定して算定し、その他河川や下水処理場等（図 5）については、環境省から提供頂いた汚濁負荷量調査結果から算定した（図 6、図 7,）。

(1) -2 モデルの再現性

モデルの再現性の検証例を図 11～図 23 に示す。表層 T-N および表層 T-P については、特に三河湾内での季節変動が逆位相となっている。また、底層での DO が過大評価傾向であることや、アサリ漁獲量が過小評価傾向であることから、モデルの再現性にはまだ課題があると考えられる。

(2) 感度解析の実施

(2) -1 計算条件

感度解析ケースを表 1 に示す。感度解析ケースに適用する流入負荷量を図 24 および図 25 に示す。case2 は 9 月～3 月で下水処理場等の T-N が 30mg/L, T-P が 3mg/L となる条件、case3 は通年で下水処理場等の T-N が 20mg/L, T-P が 2mg/L となる条件ではあるが、年度間の流入負荷量は同程度であった。

(2) -2 感度解析結果

(1) で示したように再現性には課題があるが、まずは増減の傾向を確認するために現段階モデルでの感度解析を実施した。感度解析結果を図 26～図 30 および表 2～表 7 に示す。

環境基準の達成状況の変化については、case1 から case4 にかけて非達成となる水域が増えていく傾向が見られた。特に、三河湾（ハ）では 2012 年度～2014 年度では T-N, T-P によらずほとんどが非達成となっている。また、T-N に比べて T-P の方が非達成となる水域が多くなる傾向が見られた。

アサリ資源量の変化については、管理運転をしてすぐに効果が出るというよりは、2 年開いてから顕著な影響が出る傾向が見られた。これは、令和 5 年度第 2 回検討委員会資料でも示

されている試験運転および社会実験の結果と類似した傾向である。

アサリ漁場におけるアサリの生育に必要な T-N 濃度 (0.4mg/L) となる格子数割合は、狭義の伊勢湾内では最大でもアサリ漁場の 50%に広がる傾向であった。アサリの生育に必要な T-P 濃度 (0.04mg/L) となる格子数割合については、最大でもアサリ漁場の 20%程度に広がる傾向が見られた。一方で、三河湾内では T-N, T-P 共に最大 90%を超える傾向が見られた。

(3) モデルの課題

(1) -2 でも触れたが、現段階のモデルには以下の課題が残されている。今後は、底質モデルのパラメーターを中心に再現性向上に向けた検討を進める必要がある。

- 表層 T-N および表層 T-P については、特に三河湾内での季節変動が逆位相
- 底層での DO が過大評価傾向
- アサリ漁獲量が過小評価傾向

【参考文献】

1. 田中陽二, 鈴木高二郎. 密度流湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について. 港湾空港技術研究所報告 49 (1): 3-25, 2010.
2. 田中陽二, 中村由行, 鈴木高二郎, 井上徹教, 西村洋子, 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築, 港湾空港研究所報告 第 50 巻第 2 号, 2011.
3. Matsuzaki Y, Inoue T, Kubota M, Matsumoto H, Sato T, Sakamoto H, Naito D. Web application of an integrated simulation for aquatic environment assessment in coastal and estuarine areas. Environmental Modelling & Software 181 106184, 2024.
4. 鶴島大樹, 永尾謙太郎, 中田喜三郎. 数値シミュレーションを用いた伊勢湾におけるアサリの餌料不足に関する一考察. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2019.

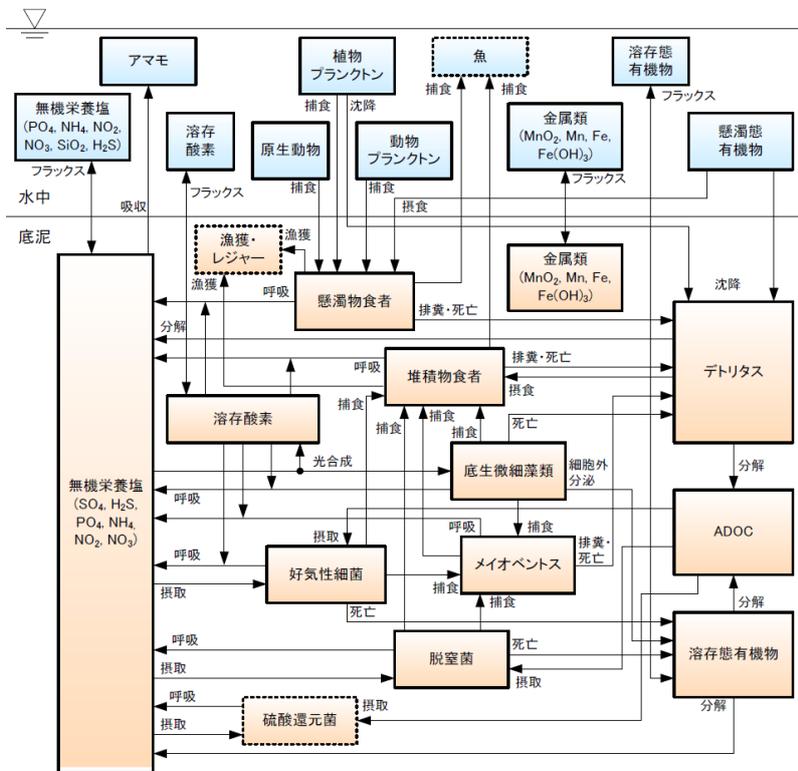
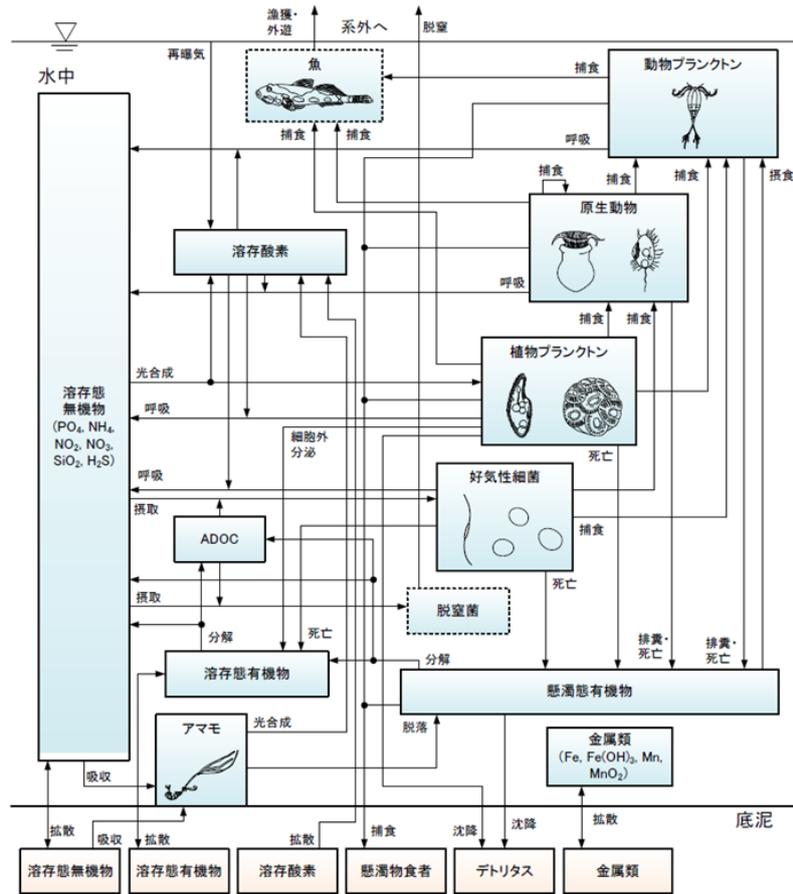
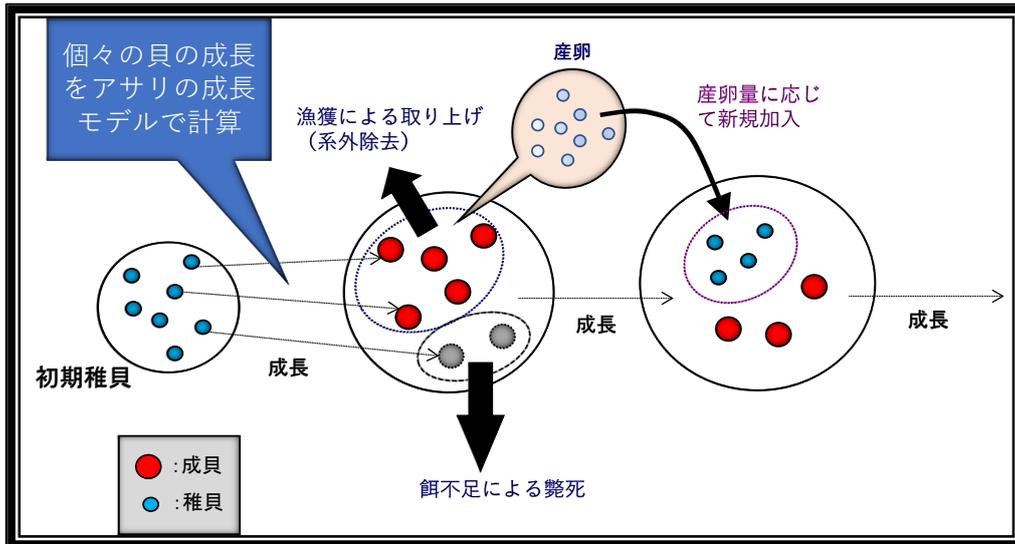


図 1 モデルの概要



出典：伊勢湾シミュレーターを活用した栄養塩管理とアサリ資源量の回復について
 (https://www.p-unique.co.jp/tokyobay/pdf/university_1.pdf)

図 2 アサリ資源量モデルの概念図

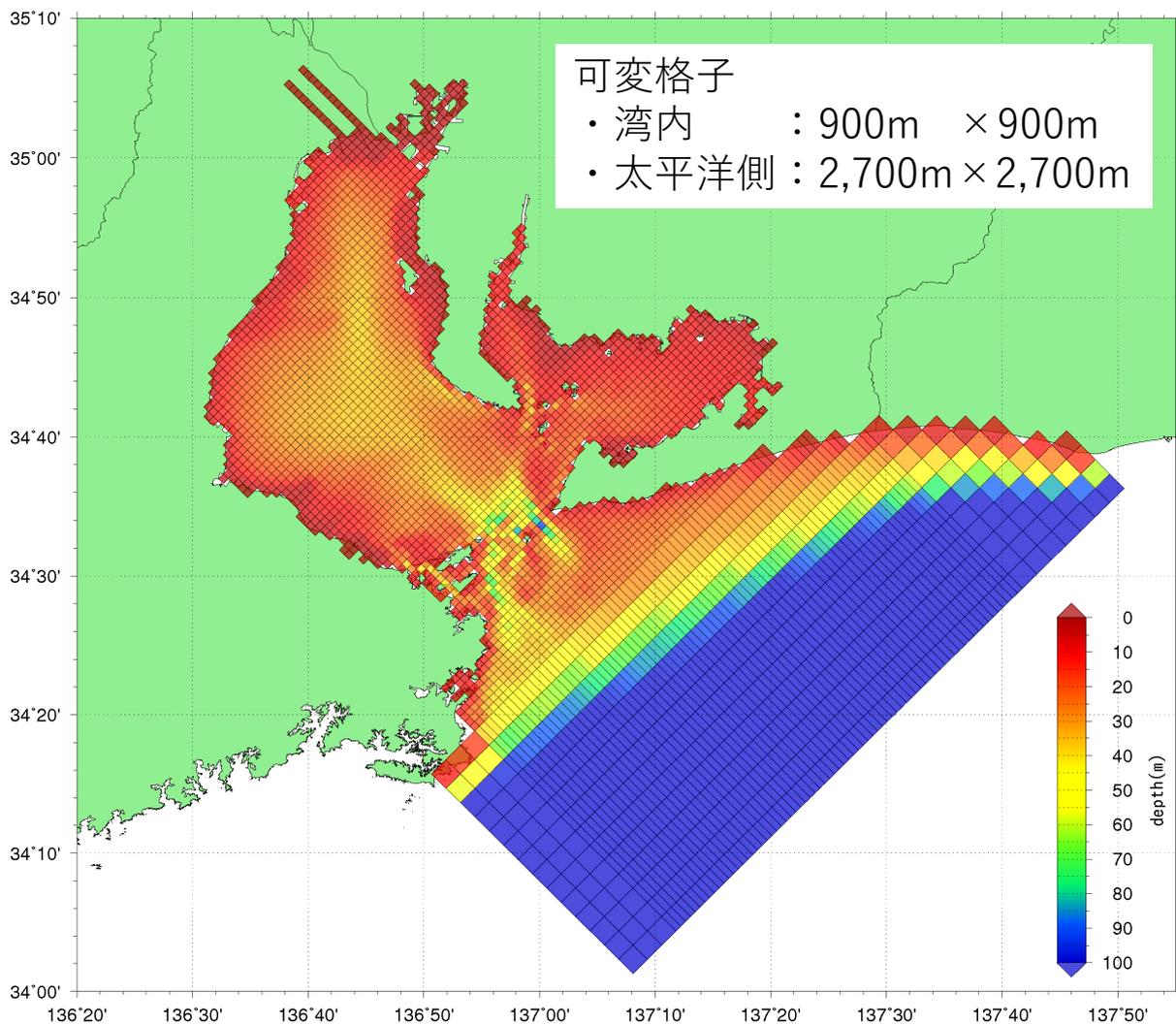
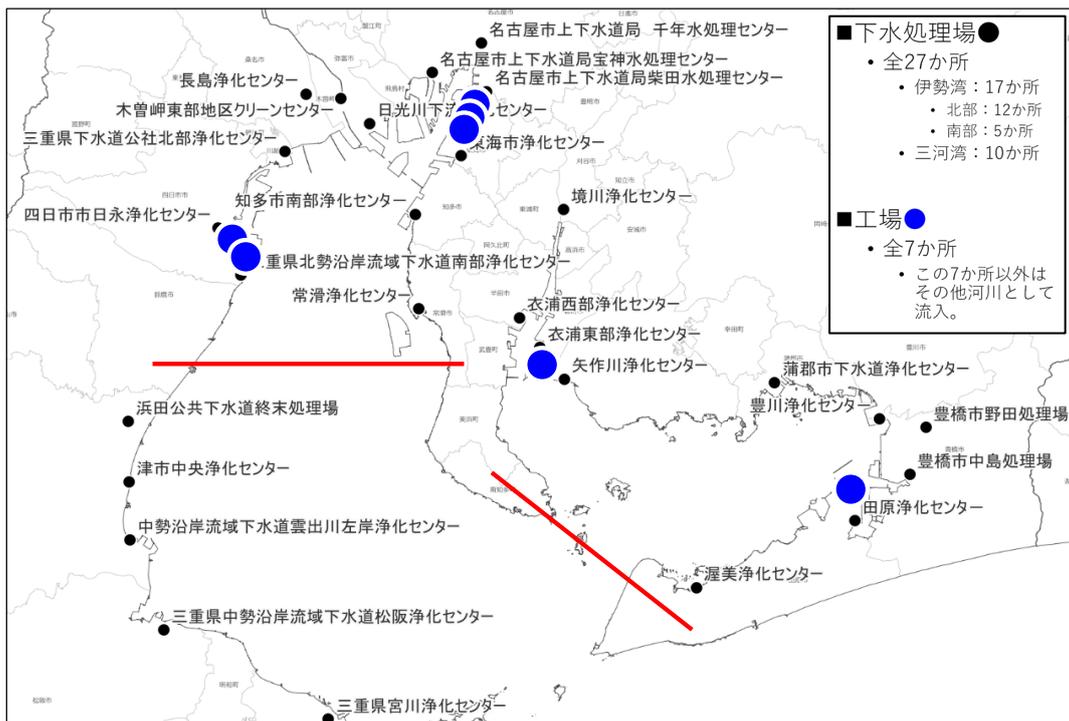


図 3 モデル計算の対象域

層番号	水深	層番号	水深	層番号	水深
第1層目	5m～1m	第11層目	-11m～-13m	第21層目	-31m～-33m
第2層目	1m～0m	第12層目	-13m～-15m	第22層目	-33m～-35m
第3層目	0m～-1m	第13層目	-15m～-17m	第23層目	-35m～-37m
第4層目	-1m～-2m	第14層目	-17m～-19m	第24層目	-37m～-39m
第5層目	-2m～-3m	第15層目	-19m～-21m	第25層目	-39m～-41m
第6層目	-3m～-4m	第16層目	-21m～-23m	第26層目	-41m～-50m
第7層目	-4m～-5m	第17層目	-23m～-25m	第27層目	-50m～-70m
第8層目	-5m～-7m	第18層目	-25m～-27m	第28層目	-70m～-100m
第9層目	-7m～-9m	第19層目	-27m～-29m		
第10層目	-9m～-11m	第20層目	-29m～-31m		

図 4 鉛直層分割



出典：国土地理院タイル（白地図）

図 5 下水処理場および工場の位置

T-N流入負荷量

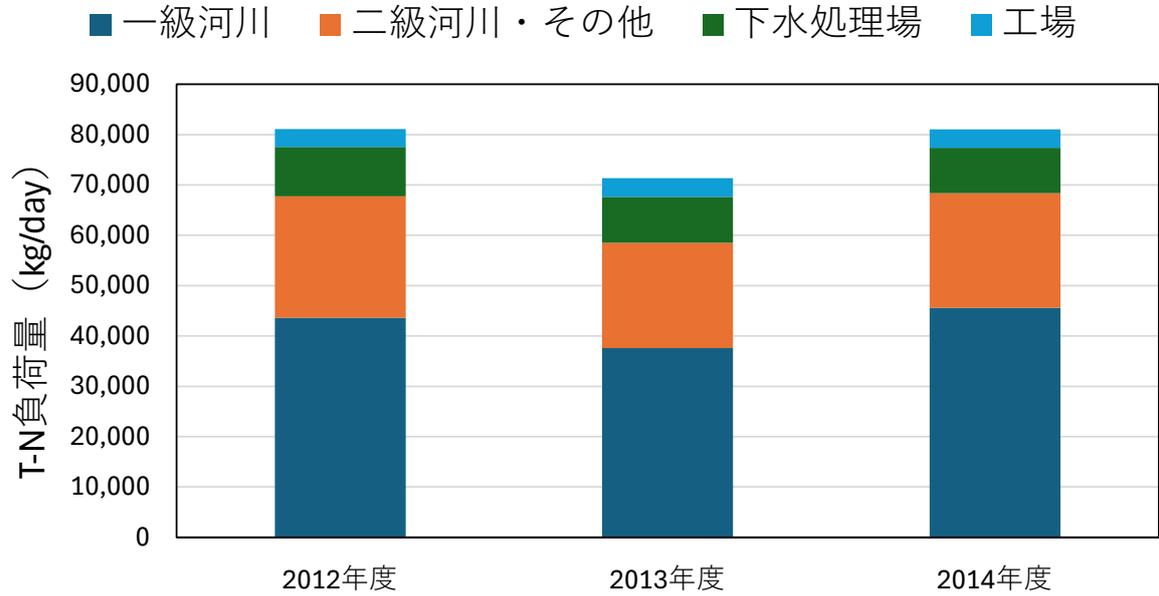


図 6 流入負荷量 (T-N)

T-P流入負荷量

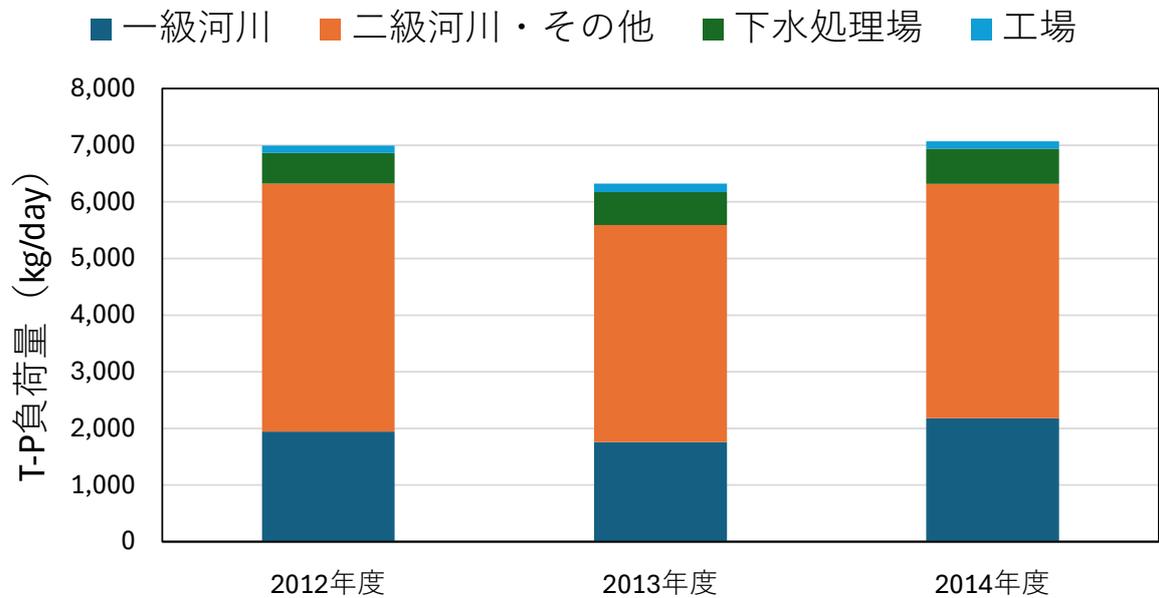


図 7 流入負荷量 (T-P)

伊勢湾北部

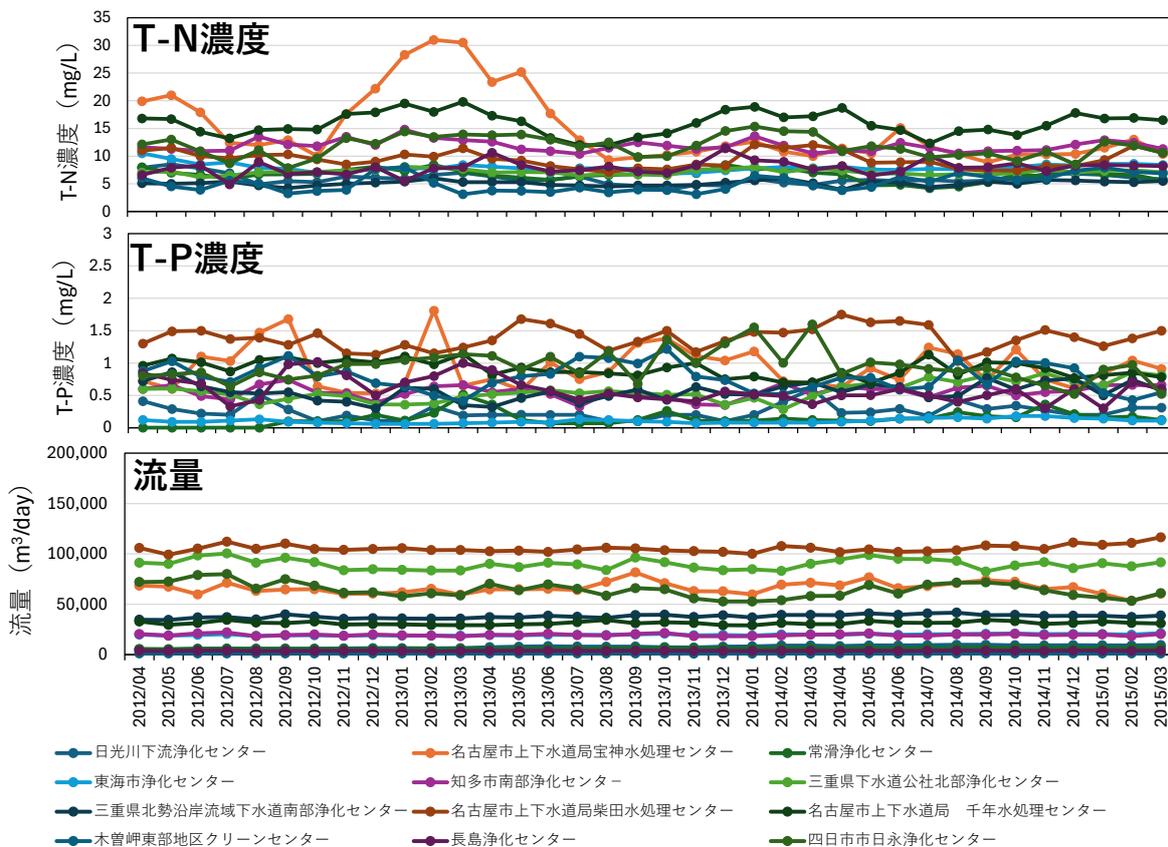


図 8 下水処理場からの流入水質濃度および流量 (伊勢湾北部)

伊勢湾南部

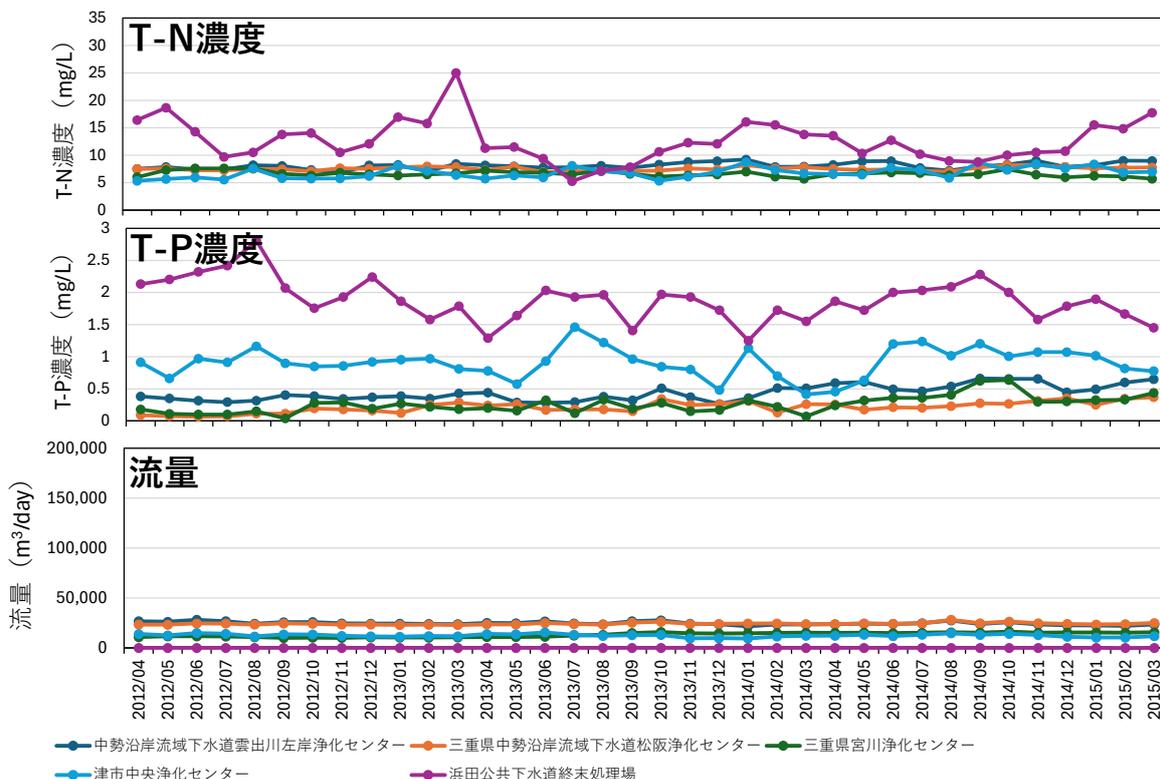


図 9 下水処理場からの流入水質濃度および流量 (伊勢湾南部)

三河湾

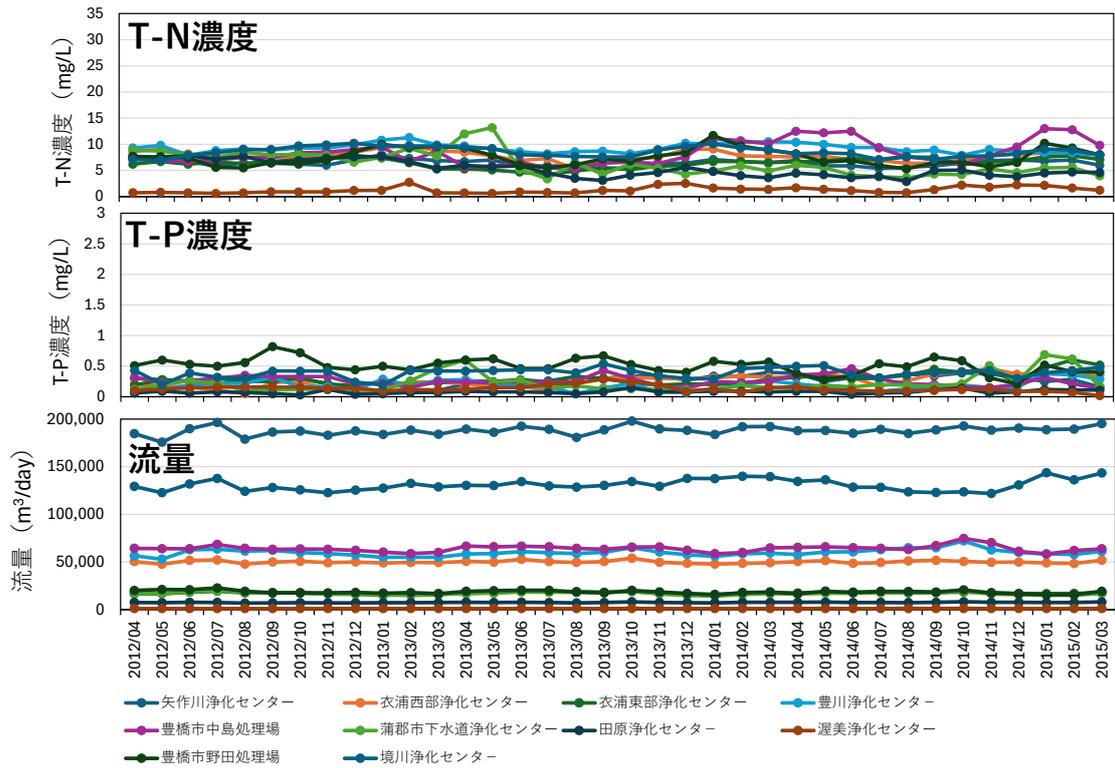
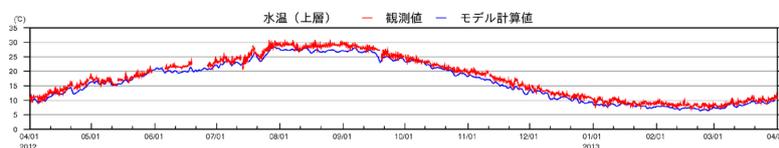


図 10 下水処理場からの流入水質濃度および流量 (三河湾)

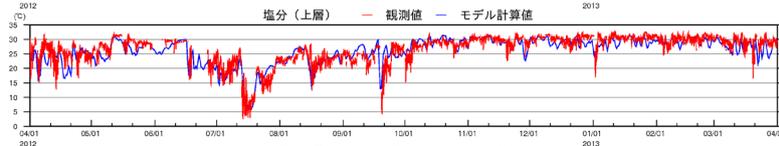
2012年度

上層・水温

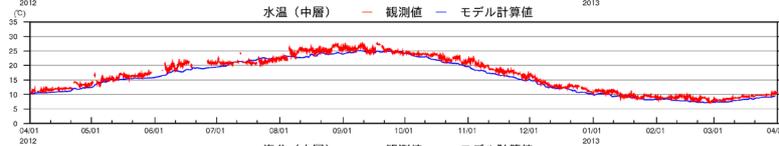


赤：観測
青：計算

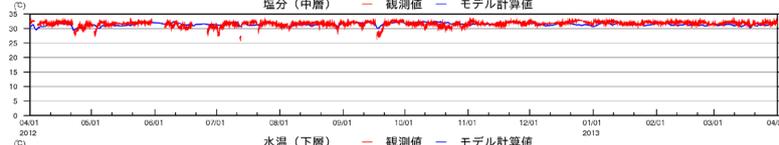
上層・塩分



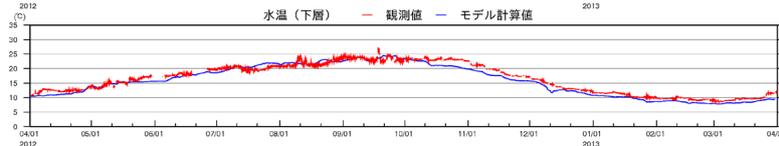
中層・水温



中層・塩分



下層・水温



下層・塩分

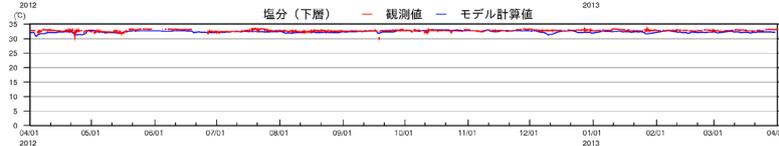
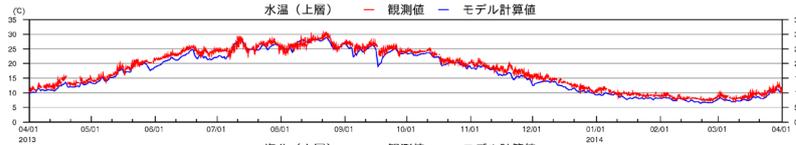


図 11 再現性の検証結果 (2012 年度, 水温・塩分, 湾奥ブイ)

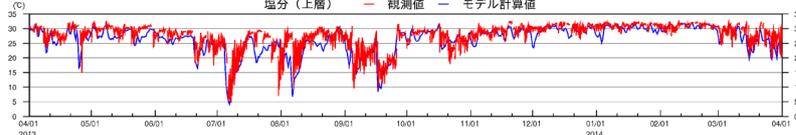
2013年度

上層・水温

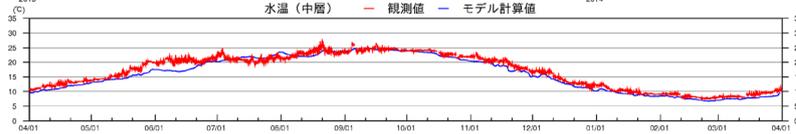


赤：観測
青：計算

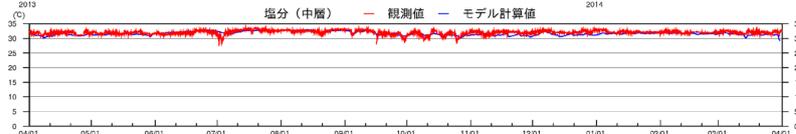
上層・塩分



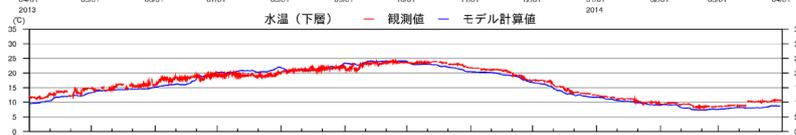
中層・水温



中層・塩分



下層・水温



下層・塩分

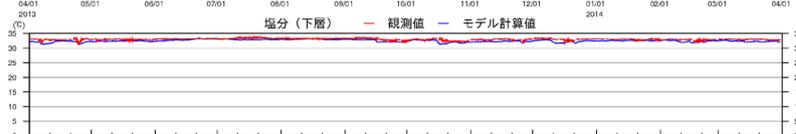
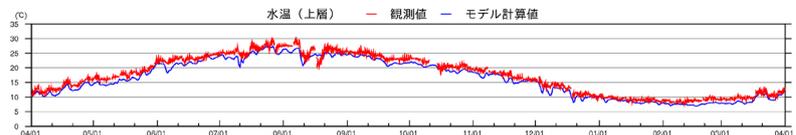


図 12 再現性の検証結果 (2013 年度, 水温・塩分, 湾奥ブイ)

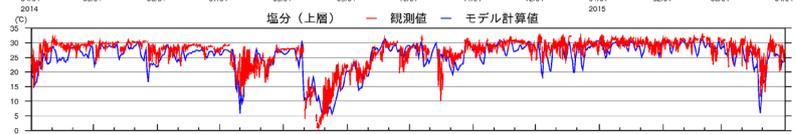
2014年度

上層・水温

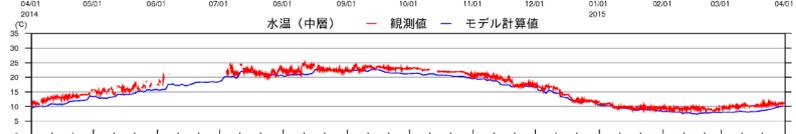


赤：観測
青：計算

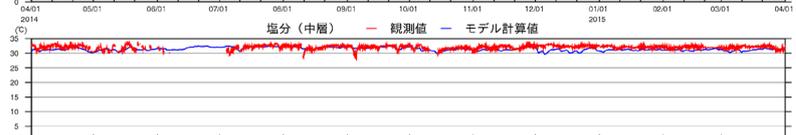
上層・塩分



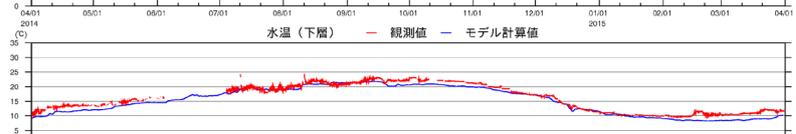
中層・水温



中層・塩分



下層・水温



下層・塩分

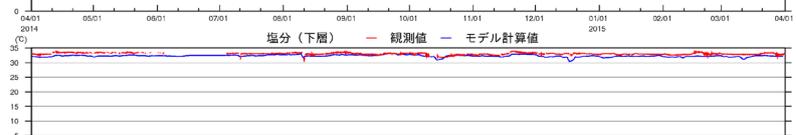
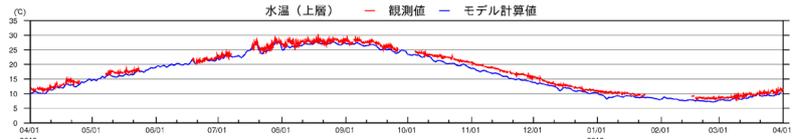


図 13 再現性の検証結果 (2014 年度, 水温・塩分, 湾奥ブイ)

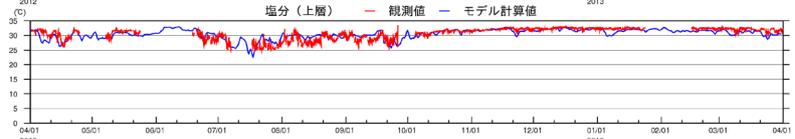
2012年度

上層・水温

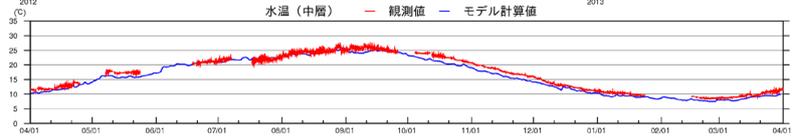


赤：観測
青：計算

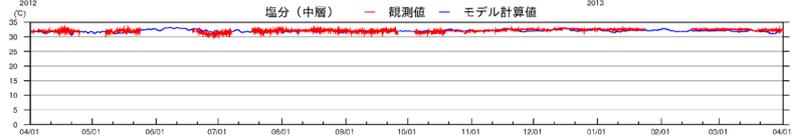
上層・塩分



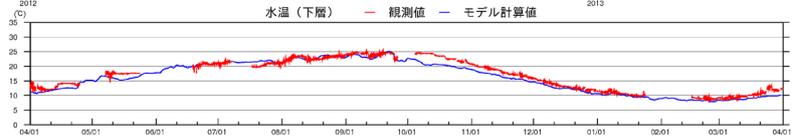
中層・水温



中層・塩分



下層・水温



下層・塩分

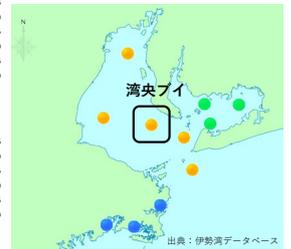
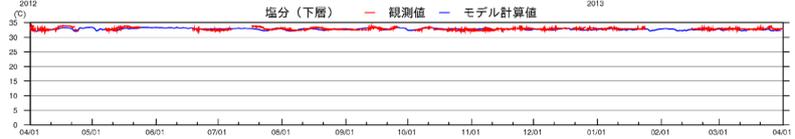
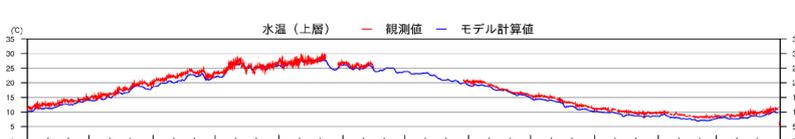


図 14 再現性の検証結果 (2012年度, 水温・塩分, 湾央ブイ)

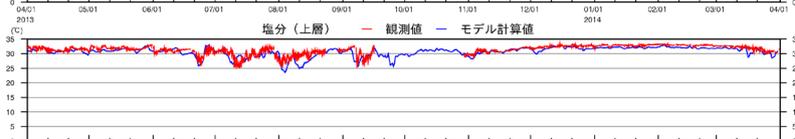
2013年度

上層・水温

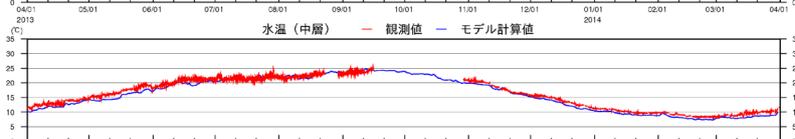


赤：観測
青：計算

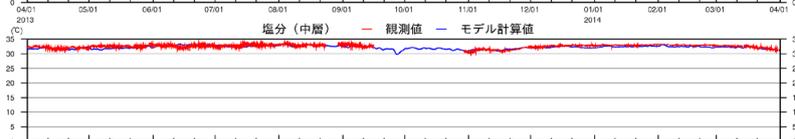
上層・塩分



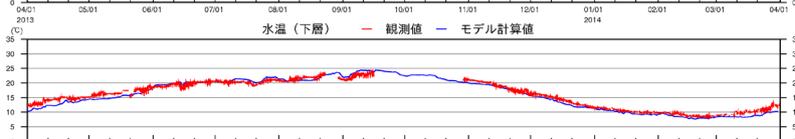
中層・水温



中層・塩分



下層・水温



下層・塩分

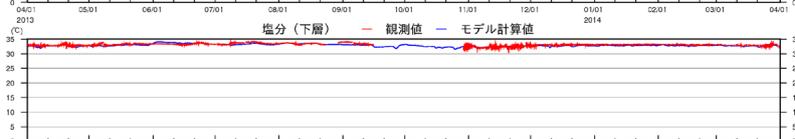
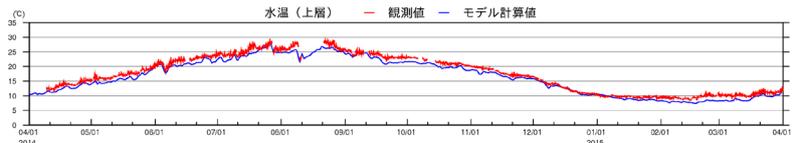


図 15 再現性の検証結果 (2013年度, 水温・塩分, 湾央ブイ)

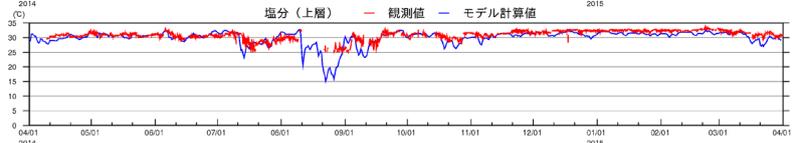
2014年度

上層・水温

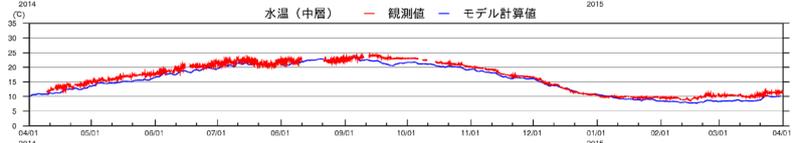


赤：観測
青：計算

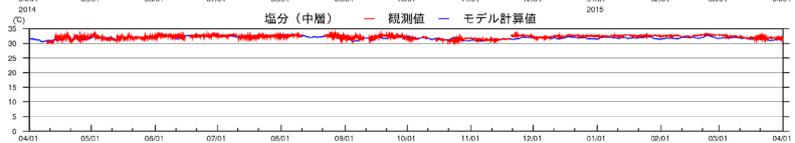
上層・塩分



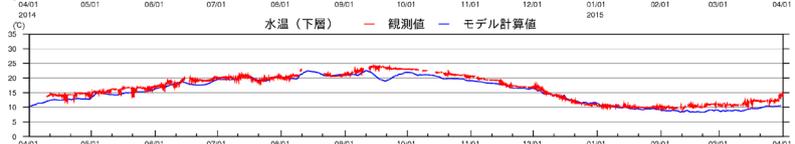
中層・水温



中層・塩分



下層・水温



下層・塩分

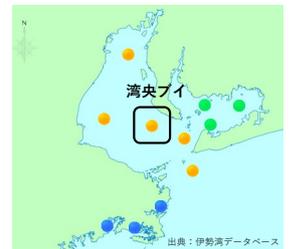
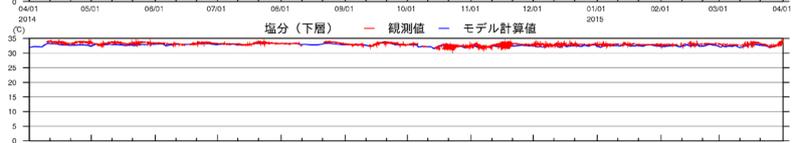


図 16 再現性の検証結果 (2014年度, 水温・塩分, 湾央ブイ)

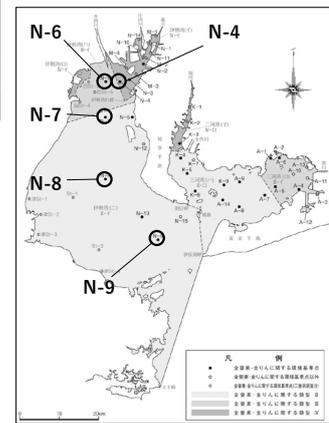
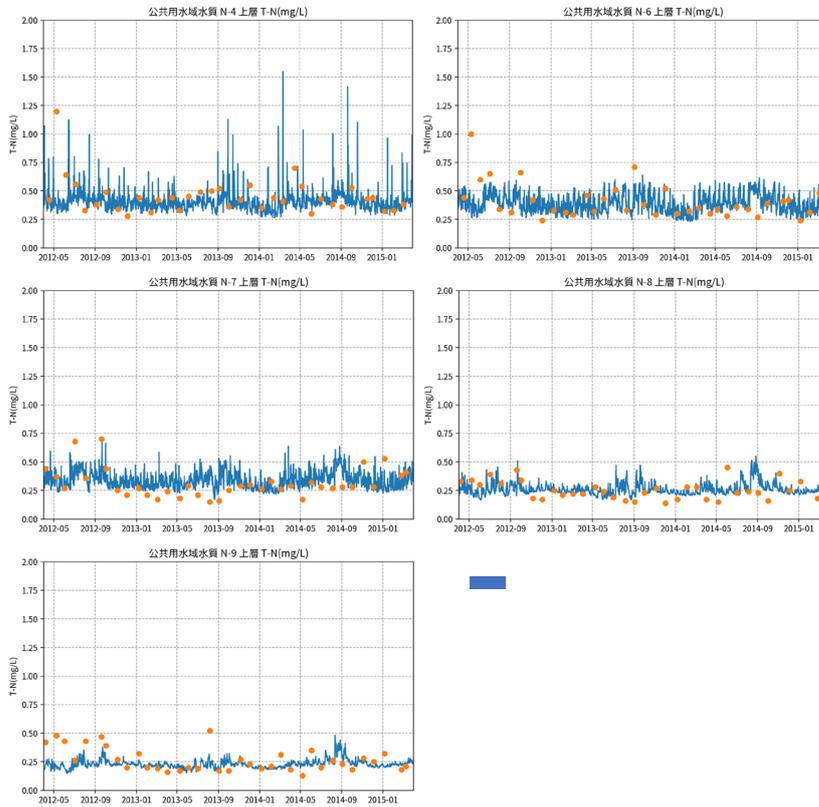


図 17 再現性の検証結果 (2012年度～2014年度, 表層 T-N 濃度, 伊勢湾)

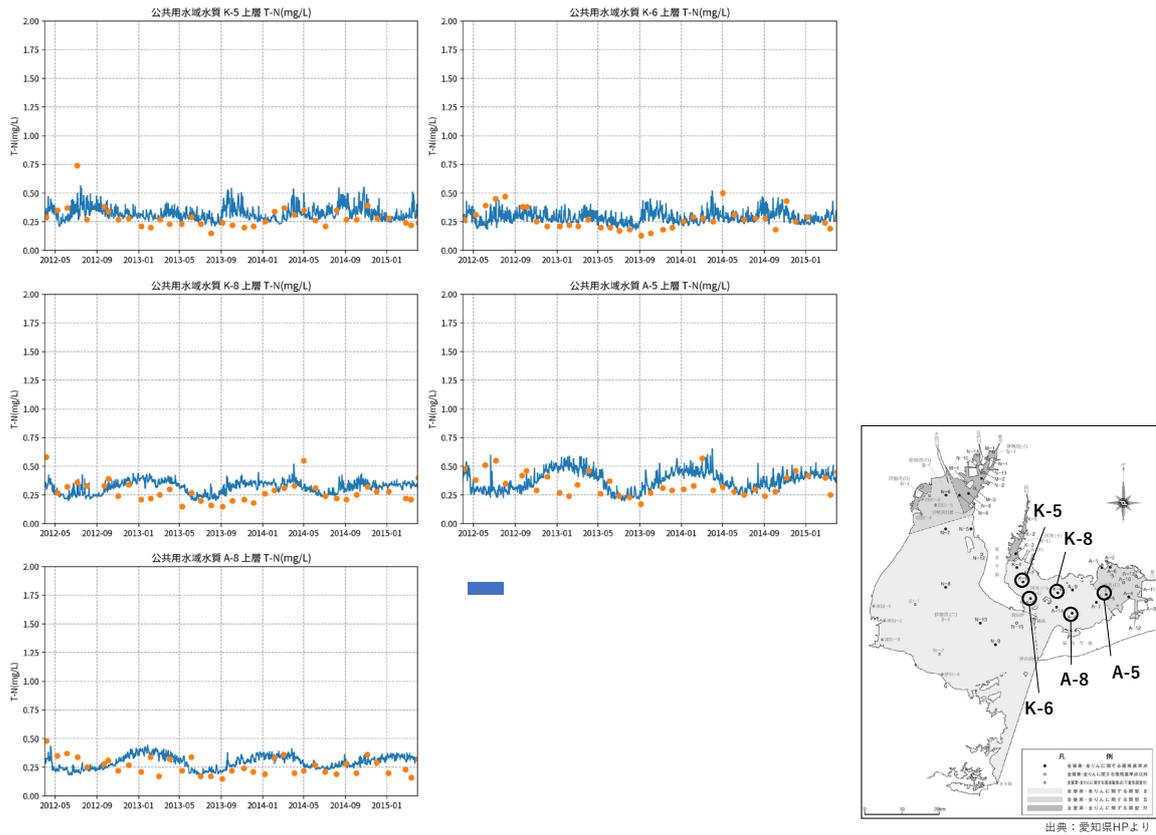


図 18 再現性の検証結果 (2012 年度～2014 年度, 表層 T-N 濃度, 三河湾)

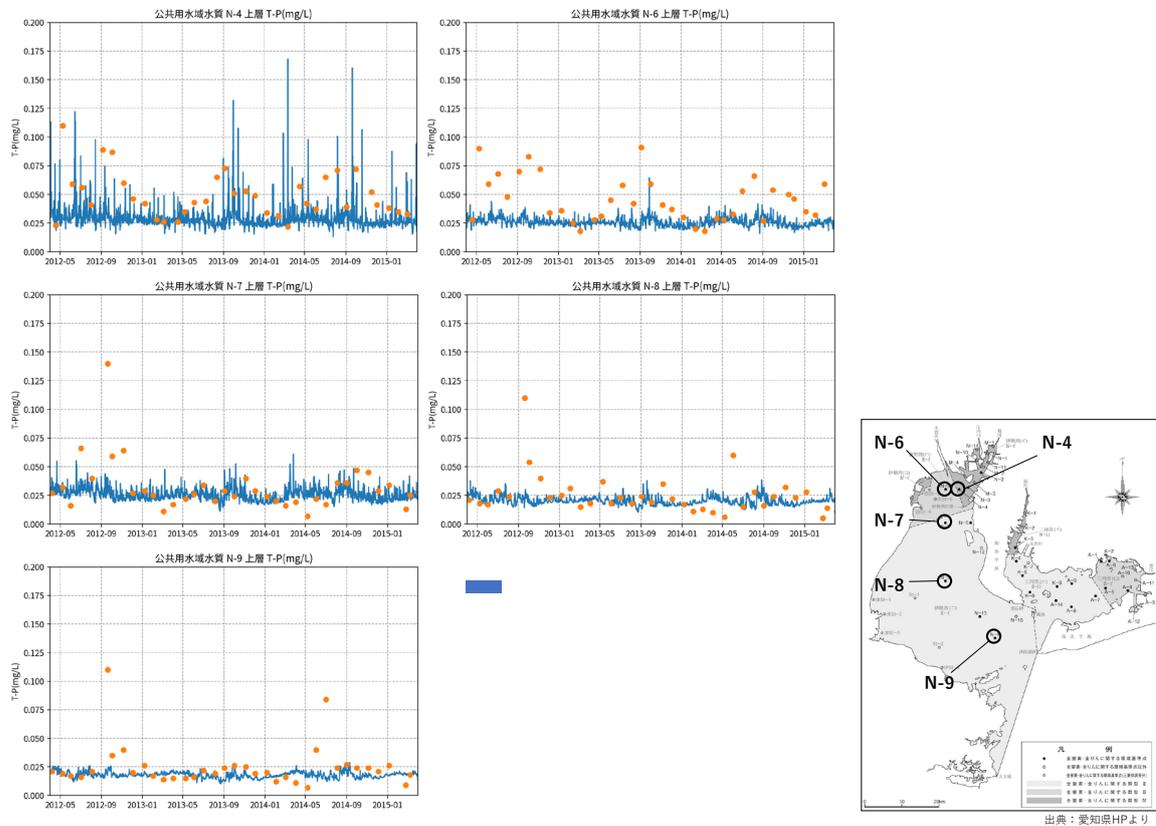


図 19 再現性の検証結果 (2012 年度～2014 年度, 表層 T-P 濃度, 伊勢湾)

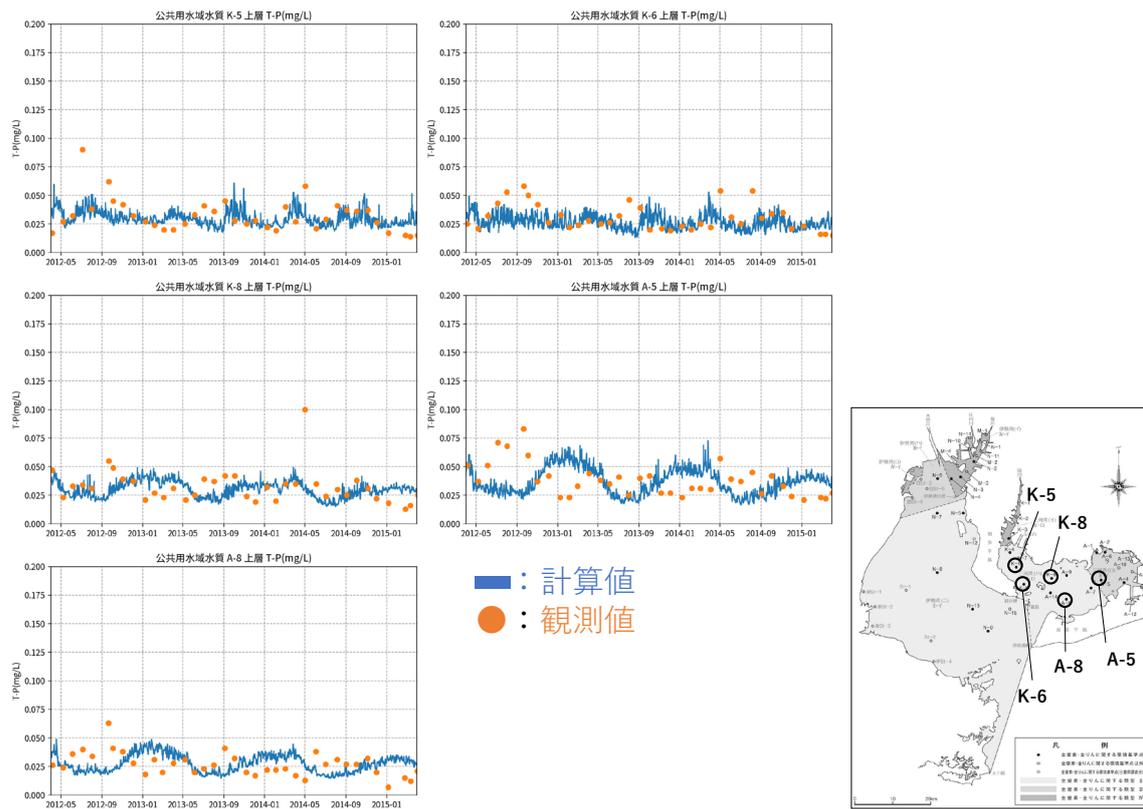


図 20 再現性の検証結果 (2012 年度～2014 年度, 表層 T-P 濃度, 三河湾)

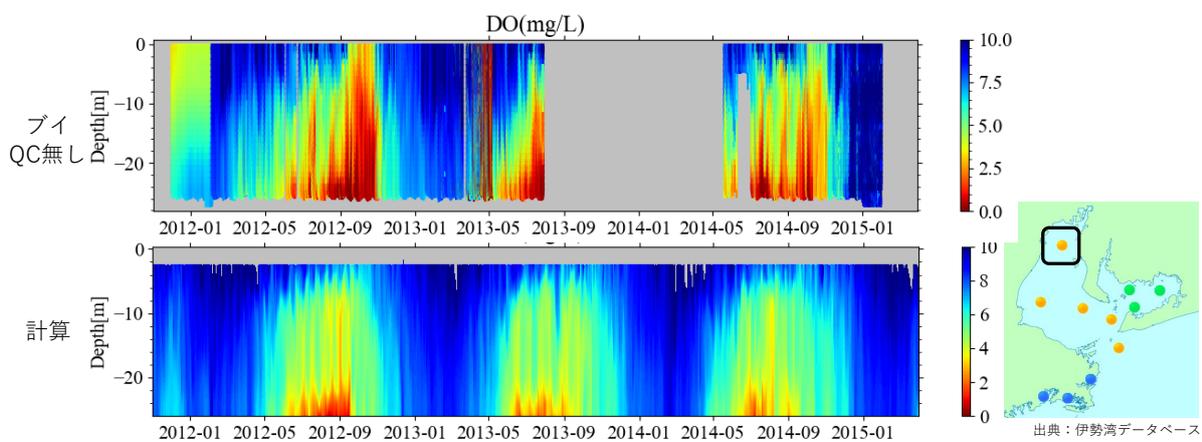


図 21 再現性の検証結果 (2012 年度～2014 年度, DO, 湾奥ブイ)

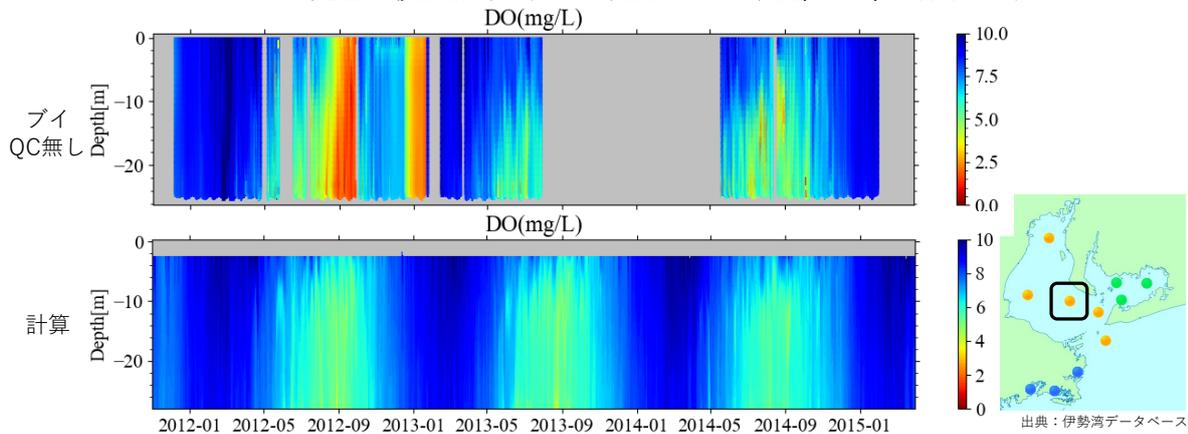


図 22 再現性の検証結果 (2012 年度～2014 年度, DO, 湾央ブイ)

年間漁獲量比較

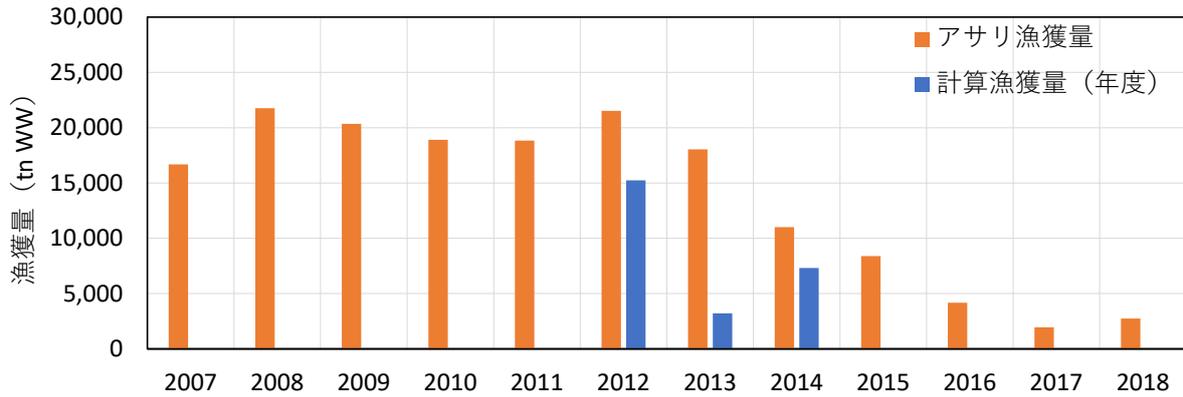


図 23 再現性の検証結果 (2012 年度～2014 年度, アサリ漁獲量)

表 1 感度解析ケース

ケース	内容
base	現況ケース (2012年度～2014年度)。 →アサリ資源量の減少期。
case1	全下水処理場および一部の工場・事業所において、9月～3月でT-N20mg/L, T-P2mg/L。
case2	全下水処理場および一部の工場・事業所において、9月～3月でT-N30mg/L, T-P3mg/L。
case3	全下水処理場および一部の工場・事業所において、周年でT-N20mg/L, T-P2mg/L。
case4	全下水処理場および一部の工場・事業所において、周年でT-N30mg/L, T-P3mg/L。

年度間の流入負荷量 (T-N)

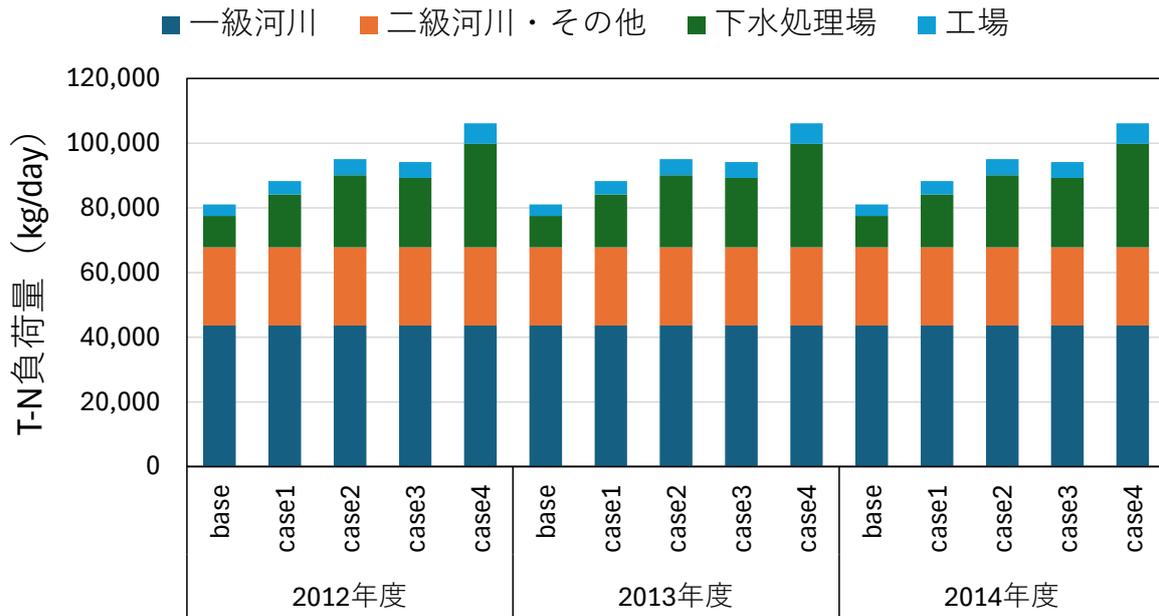


図 24 感度解析に用いた流入負荷量 (T-N)

年度間の流入負荷量 (T-P)

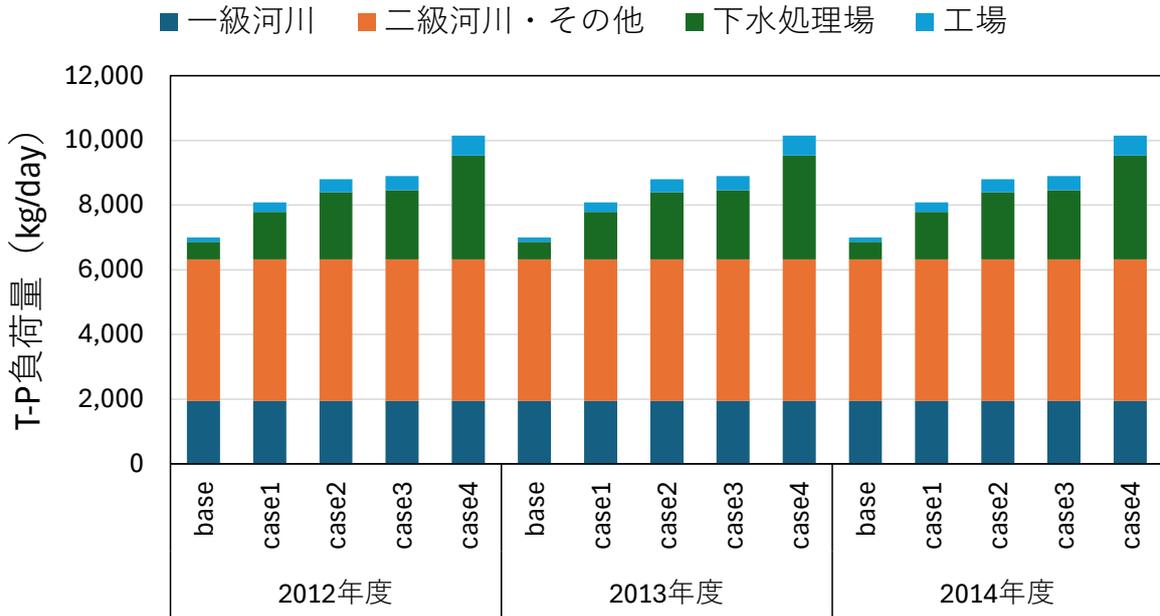
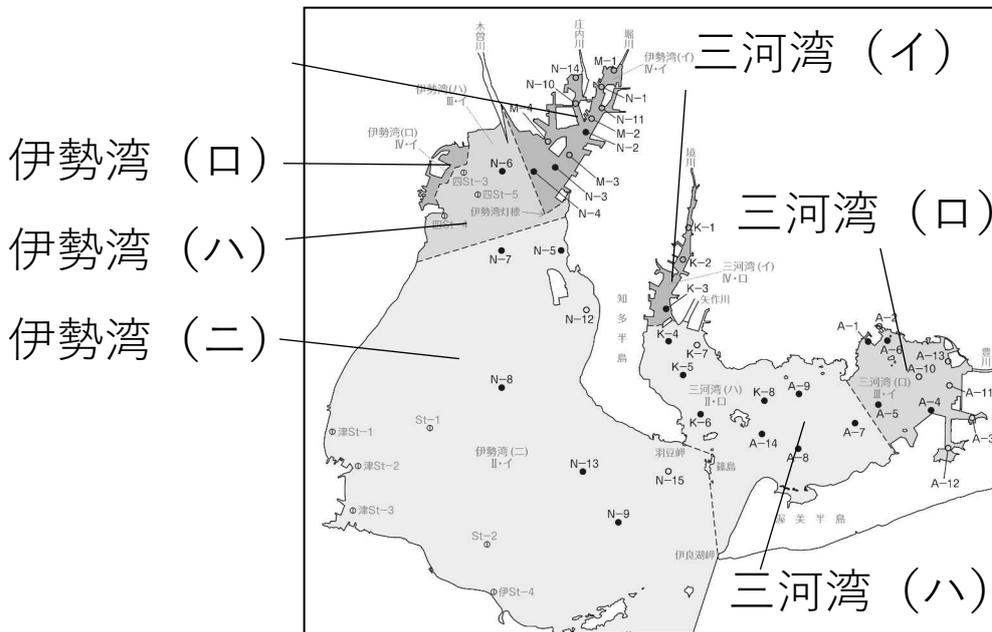


図 25 感度解析に用いた流入負荷量 (T-P)



出典：愛知県 HP

図 26 NP の類型区分

表 2 環境基準の達成状況の変化 (2012年度, T-N)

2012年度	N基準値	N類型	obs	case1	case2	case3	case4
伊勢湾 (イ)	1.0	IV	0.73 ○	0.74 ○	0.78 ○	0.78 ○	0.84 ○
伊勢湾 (ロ)	1.0	IV	0.40 ○	0.41 ○	0.44 ○	0.44 ○	0.48 ○
伊勢湾 (ハ)	0.6	III	0.38 ○	0.39 ○	0.41 ○	0.41 ○	0.43 ○
伊勢湾 (ニ)	0.3	II	0.28 ○	0.29 ○	0.30 ○	0.30 ○	0.32 ×
三河湾 (イ)	1.0	IV	0.54 ○	0.62 ○	0.71 ○	0.71 ○	0.86 ○
三河湾 (ロ)	0.6	III	0.41 ○	0.45 ○	0.47 ○	0.47 ○	0.53 ○
三河湾 (ハ)	0.3	II	0.32 ×	0.35 ×	0.37 ×	0.37 ×	0.41 ×

表 3 環境基準の達成状況の変化 (2013年度, T-N)

2013年度	N基準値	N類型	obs	case1	case2	case3	case4
伊勢湾 (イ)	1.0	IV	0.60 ○	0.63 ○	0.67 ○	0.66 ○	0.71 ○
伊勢湾 (ロ)	1.0	IV	0.41 ○	0.43 ○	0.44 ○	0.44 ○	0.49 ○
伊勢湾 (ハ)	0.6	III	0.39 ○	0.41 ○	0.43 ○	0.43 ○	0.46 ○
伊勢湾 (ニ)	0.3	II	0.23 ○	0.24 ○	0.24 ○	0.24 ○	0.26 ○
三河湾 (イ)	1.0	IV	0.37 ○	0.44 ○	0.52 ○	0.52 ○	0.64 ○
三河湾 (ロ)	0.6	III	0.37 ○	0.42 ○	0.44 ○	0.44 ○	0.50 ○
三河湾 (ハ)	0.3	II	0.26 ○	0.29 ○	0.31 ×	0.31 ×	0.35 ×

表 4 環境基準の達成状況の変化 (2014年度, T-N)

2014年度	N基準値	N類型	obs	case1	case2	case3	case4
伊勢湾 (イ)	1.0	IV	0.60 ○	0.62 ○	0.66 ○	0.65 ○	0.70 ○
伊勢湾 (ロ)	1.0	IV	0.49 ○	0.51 ○	0.53 ○	0.53 ○	0.57 ○
伊勢湾 (ハ)	0.6	III	0.42 ○	0.44 ○	0.46 ○	0.46 ○	0.49 ○
伊勢湾 (ニ)	0.3	II	0.26 ○	0.27 ○	0.28 ○	0.28 ○	0.30 ○
三河湾 (イ)	1.0	IV	0.46 ○	0.54 ○	0.63 ○	0.63 ○	0.77 ○
三河湾 (ロ)	0.6	III	0.42 ○	0.47 ○	0.49 ○	0.49 ○	0.55 ○
三河湾 (ハ)	0.3	II	0.30 ○	0.32 ×	0.35 ×	0.35 ×	0.39 ×

表 5 環境基準の達成状況の変化 (2012年度, T-P)

2012年度	P基準値	P類型	obs	case1	case2	case3	case4
伊勢湾 (イ)	0.09	IV	0.074 ○	0.079 ○	0.085 ○	0.082 ○	0.092 ×
伊勢湾 (ロ)	0.09	IV	0.047 ○	0.050 ○	0.053 ○	0.053 ○	0.057 ○
伊勢湾 (ハ)	0.05	III	0.050 ○	0.053 ×	0.057 ×	0.057 ×	0.062 ×
伊勢湾 (ニ)	0.03	II	0.036 ×	0.038 ×	0.040 ×	0.040 ×	0.042 ×
三河湾 (イ)	0.09	IV	0.069 ○	0.083 ○	0.097 ×	0.097 ×	0.110 ×
三河湾 (ロ)	0.05	III	0.051 ×	0.059 ×	0.062 ×	0.062 ×	0.067 ×
三河湾 (ハ)	0.03	II	0.036 ×	0.040 ×	0.044 ×	0.044 ×	0.048 ×

表 6 環境基準の達成状況の変化 (2013年度, T-P)

2013年度	P基準値	P類型	obs	case1	case2	case3	case4
伊勢湾 (イ)	0.09	IV	0.060 ○	0.064 ○	0.069 ○	0.068 ○	0.077 ○
伊勢湾 (ロ)	0.09	IV	0.044 ○	0.046 ○	0.049 ○	0.049 ○	0.054 ○
伊勢湾 (ハ)	0.05	III	0.040 ○	0.043 ○	0.046 ○	0.046 ○	0.051 ×
伊勢湾 (ニ)	0.03	II	0.024 ○	0.026 ○	0.027 ○	0.027 ○	0.029 ○
三河湾 (イ)	0.09	IV	0.062 ○	0.076 ○	0.092 ×	0.092 ×	0.110 ×
三河湾 (ロ)	0.05	III	0.042 ○	0.050 ○	0.052 ×	0.052 ×	0.058 ×
三河湾 (ハ)	0.03	II	0.032 ×	0.037 ×	0.040 ×	0.040 ×	0.045 ×

表 7 環境基準の達成状況の変化 (2014年度, T-P)

2014年度	P基準値	P類型	obs	case1	case2	case3	case4
伊勢湾 (イ)	0.09	IV	0.063 ○	0.068 ○	0.072 ○	0.072 ○	0.080 ○
伊勢湾 (ロ)	0.09	IV	0.059 ○	0.063 ○	0.066 ○	0.066 ○	0.072 ○
伊勢湾 (ハ)	0.05	III	0.046 ○	0.049 ○	0.052 ×	0.052 ×	0.057 ×
伊勢湾 (ニ)	0.03	II	0.028 ○	0.029 ○	0.031 ×	0.031 ×	0.033 ×
三河湾 (イ)	0.09	IV	0.057 ○	0.070 ○	0.082 ○	0.082 ○	0.098 ×
三河湾 (ロ)	0.05	III	0.051 ×	0.060 ×	0.064 ×	0.064 ×	0.070 ×
三河湾 (ハ)	0.03	II	0.031 ×	0.036 ×	0.039 ×	0.039 ×	0.043 ×

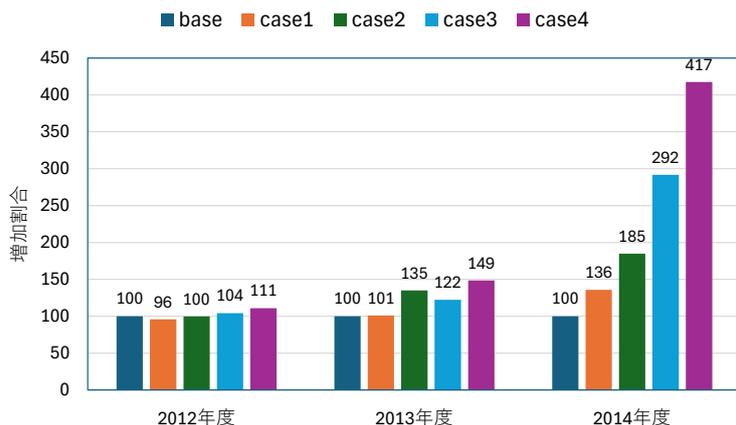


図 27 アサリ資源量の増加割合の変化

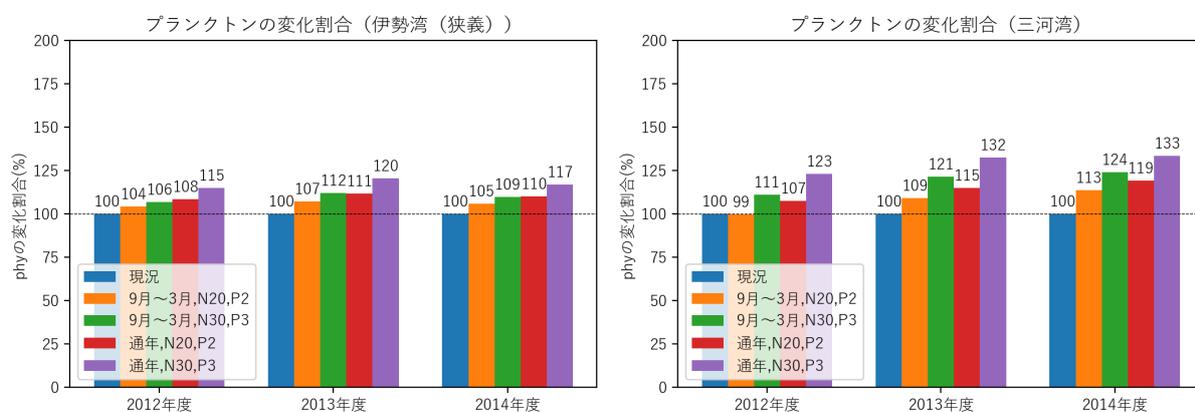


図 28 植物プランクトンの変化

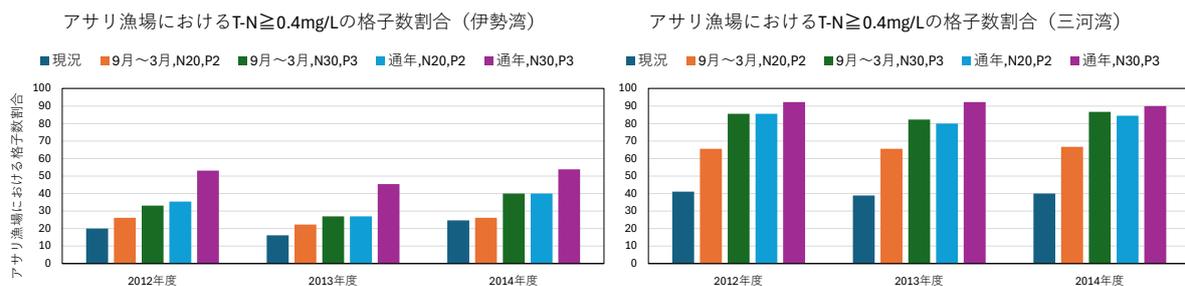


図 29 アサリ漁場におけるアサリの生育に必要な表層 T-N 濃度を満たす格子数割合の変化

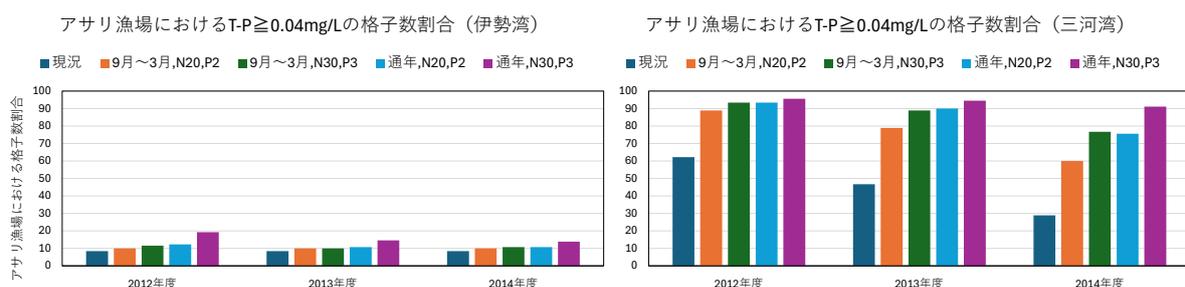


図 30 アサリ漁場におけるアサリの生育に必要な表層 T-P 濃度を満たす格子数割合の変化

課題番号：IV

課題名：藻類養殖場における生産力低下の原因解明と栄養塩供給手法の開発

徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課

池脇義弘，岡本裕太，棚田教生

大塚テクノ株式会社 川村浩史，三枝 渚

【背景・目的】

紀伊水道西部及び周辺海域において、栄養塩の不足が原因と考えられるノリ・ワカメの色落ち被害が深刻化している（牧野ほか，2015）。そこで、本海域のノリ・ワカメ養殖漁場における、海水中の栄養塩濃度等の分析を行い、漁場生産力低下の原因解明を行う。また、養殖藻類の色落ちを防ぎ、回復させるための方策の一つとして、施肥が考えられる。徳島県沿岸の藻類養殖漁場は、水深が深く、流れが速いことから、徐々に肥料成分が溶け出すような施肥剤を漁場に設置する手法が有効と考えられ、そのような特性をもつ施肥具の開発を試みた。

【方法】

(1) 藻類養殖場における生産力低下の原因解明

徳島県のノリ・ワカメ養殖漁場がある海域を、「播磨灘」，「小鳴門海峡」，「紀伊水道北部」（鳴門市地先の紀伊水道），“吉野川河口周辺”（松茂町～徳島市地先），“紀伊水道南部”（小松島市～阿南市地先），“吉野川”（スジアオノリ漁場がある吉野川感潮域）に分類し，その中に計 37 の定点を設定した（図 1）。2024 年 10 月から 2025 年 3 月までの原則火曜日に，調査定点にて表層水を採水し，塩分及び無機溶存態窒素（DIN）濃度の測定と植物プランクトンの計数を行った。塩分測定には，ポータブル電気伝導率計（東亜ディーケーケー社製，CM-31P）を用いた。DIN 濃度は，試水を GF/C フィルターで濾過した後，連続流れ分析装置（ビーエルテック社製：QuAAtro）で測定した。植物プランクトンは，*Coscinodiscus wailesii* 及び *Eucampia zodiacus* について計数した。

また，養殖ワカメの色調の指標となる SPAD 値（團ほか，2004）の測定を，播磨灘の鳴門市粟田地区と紀伊水道南部の阿南市今津地区で行った（図 1）。SPAD 値は，葉緑素計（ユニカミノルタ社製：SPAD-502 Plus）を用いて計測した。計測部位は藻体基部と中部の 2 箇所であり，裂葉の中肋に近い部分を 3 回ずつ測定した平均値を各個体の各部位の SPAD 値とした。なお，ワカメの藻体基部付近は裂葉の幅が狭いため，SPAD 計の計測部が裂葉により確実に覆われるような幅が 10mm 以上の仮根にできるだけ近い裂葉で計測を行った。

(2) 栄養塩供給手法の開発

（溶出試験）

容器に硝酸アンモニウム溶液を充填し，半透膜を挟んだ穴（以下，“溶出口”という。）から肥料成分である硝酸イオン及びアンモニウムイオンが半透膜を通して海中で浸出するという構造の施肥具（図 2）を開発し，その改良を進めてきた。今年度は，昨年度開発した容積 2.5L のプラスチックバッグ型施肥具（以下，“プラバッグ”という。）の側面の溶出口（直径 30mm）を最大 3 個まで増設したものを供試した（写真 1）。施肥具内には無機態窒素を含有する液肥

として 50%硝酸アンモニウム溶液（以下，“原液”という。）を充填した。半透膜は、ヴィスキングチューブ（ケニス株式会社製）を切り取って用いた。

溶出口数の異なる各施肥具の溶出特性を調べるため、溶出試験を実施した。溶出試験は、約 700L の海水を入れた容積 1 トンの角形水槽（田中三次郎社製，KF-1000S）に、溶出口の数が 1～3 個のプラバッグ施肥具を 1 つずつ吊るして実施した。水槽には換水率約 2.5～3 回転/h で海水を注水した。そして、2～4 日毎に施肥具を取り上げ、施肥具内の硝酸アンモニウム溶液（以下、「液肥」という。）の比重と水温を計測した。比重はメスフラスコを用いて液肥を 200 ml を計量し、電子天秤（エー・アンド・デイ社製：EK-2000i）でその重量を計測して求めた。なお、比重を計測した液肥は再び施肥具に戻して水槽に吊るした。

施肥具内に原液の何%の DIN が残ったかを「成分残存率」と定義し、次式で求めた。

成分残存率 (%) = 液肥の DIN 濃度 / 原液の DIN 濃度 × 100

そして、昨年度求めた液肥の比重と成分残存率との関係式（図 3）から、液肥の成分残存率を推定した。

溶出試験は、2024 年 9 月 3 日から 2025 年 1 月 7 日の間の様々な水温条件で計 5 回実施し、海水温や施肥具の溶出口の数の違いが成分残存率の変化にどのような違いが見られるかを調べた。

（野外試験）

開発した施肥具の効果を見るため、徳島県阿南市今津地先のワカメ養殖漁場において施肥具を設置し、色落ちしたワカメの色調を回復させる試験をおこなった。漁場の位置および施肥具の設置場所を図 4 に示した。施肥具は、3 ロタイプを用い、3m 間隔で 16 個（3m 区）、6 m 間隔で 9 個（6m 区）、養殖ロープの交点のブイの直下に設置した。また、漁場の北西角の水深 1m に電磁流向流速計（JFE アドバンテック社製 INFINITY-EM）を設置した。なお、この漁場では、南向きの流れが卓越し、また、時期的に北西の季節風が吹きやすいことから、施肥具から溶出した成分が流れてゆきにくいと考えられる漁場の北東角付近を対照区に設定した。

試験開始後 8 日目および 15 日目に漁場内の様々な箇所（図 4）でワカメを採取し、窒素安定同位体比を分析し、原液の窒素安定同位体比との差を用いて施肥の効果を推定（池脇 未発表）することとした。また、対照区および 3m 区の中央付近（施肥中心）と南側 3m の地点（南方 1）のワカメの SPAD 値を藻体基部および中部で測定し色調を比較した。

【結果】

（1）藻類養殖場における生産力低下の原因解明

2024 年 10 月中旬から 2025 年 2 月下旬までの DIN 濃度と塩分の調査結果についてコンター図で示した（図 5）。また、図 6 に海域別の *C. walesii* 及び *E. zodiacus* の出現状況を示した。

DIN 濃度は、播磨灘では調査期間中に極端に低い値にはならず、緩やかに減少する傾向が見られた。一方、紀伊水道の各海域では、11 月上旬までは 10 μM 前後の高い値を示したが、11 月下旬と 12 月中旬以降に低下し、ワカメの色落ちが発生する危険のある 2 μM 未満になる調査地点も見られた。塩分は、紀伊水道北部から吉野川河口周辺で断続的に 30 以下になったほか、紀伊水道南部では 10 月下旬前後に 30 未満まで低下した。塩分の低下は、河川水や降雨の影響と考えられた。また、色落ち原因プランクトンである *C. walesii* は 11 月中旬から 12

月上旬にかけて、*E. zodiacus* は1月中旬以降に急増した（図6）。

色落ち原因プランクトンの動態から、紀伊水道における DIN 濃度の低下原因は、11月中旬～12月上旬は *C. wailesii*、1月中旬以降は *E. zodiacus* の大量発生が原因であると考えられた。

養殖ワカメの SPAD 値は、DIN が極端に低下しなかった播磨灘の粟田では10前後の高い値であったが、DIN が $2\mu\text{M}$ 未満に低下した状態が続いた紀伊水道南部の今津では2月以降、2～4と極度の色落ちが発生した（図7）。

(2) 栄養塩供給手法の開発

(溶出試験)

以下では、溶出口が1つのプラバッグ施肥具を「1ロタイプ」、2個のものを「2ロタイプ」、3つのものを「3ロタイプ」という。

図8に、5回行った溶出試験における各施肥具内の液肥の成分残存率の変化を示した。なお、成分残存率の推定に際しては、図3に示した関係式のうち、試験1および2については関係式1を、試験3、4および5については関係式2を用いた。いずれの水温帯の溶出試験においても、成分残存率の減少は、溶出口の数が多いほど早い傾向がみられ、溶出口の数で溶出量を調整可能であることが分かった。また、図9に各溶出試験の結果を施肥具の各タイプ別にグラフに示したが、1ロタイプに比べて、2ロおよび3ロタイプの方が各溶出試験における成分残存率の減少傾向の差異が小さく、溶出口の数が多いほど溶出量が水温に影響されにくいと考えられた。

(野外試験)

試験は、2025年2月12日に開始した。図4に示した地点で採取したワカメについては、今後、窒素安定同位体比分析を行う。図10に SPAD 値を測定した結果を示した。試験開始時に SPAD 値は2未満であったが、対照区は試験開始後8日目に藻体基部・中部ともにおよそ3に上昇した。一方、施肥中心では6以上と対照区よりも顕著に上昇し、藻体全体で色調の回復がみられた。試験開始後15日目には、藻体中部の SPAD 値は対照区の3.7に対して施肥中心および南方1ではおよそ6と対照区よりも色調が良い状態を保っていたが、藻体基部の SPAD 値は施肥中心で3.5に低下するなど、すべてのサンプリング箇所でも3前後と差が見られなくなった。この原因については、海域の DIN が極めて低い環境（図7）の中で、設置してから2週間以上経過したため施肥具からの無機態窒素の溶出量が少なくなり、ワカメの生長点に近い藻体基部の新たに生長した箇所では、十分な色調回復が見られなかった可能性が考えられた。

【参考文献】

牧野賢治, 住友寿明, 中西達也, 加藤慎治, 平野匠, 上田幸男. 養殖ワカメの色落ちのメカニズムと対策. 海洋と生物, 218, 254-260, 2015.

團昭紀, 加藤慎治, 萩平将. 養殖ワカメの色落ち対策試験 色落ち指標としての SPAD 値の利用. 平成14年度徳島県水産研究課事業報告書, 91-93, 2004.



図1 栄養塩等を観測した調査地点(黒丸)とワカメのSPAD値を測定した漁場の位置(青と赤の白抜き丸)

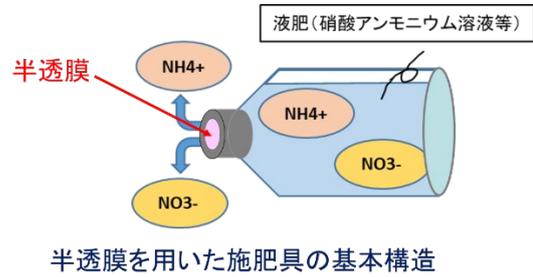


図2 半透膜を用いた施肥具の概念図

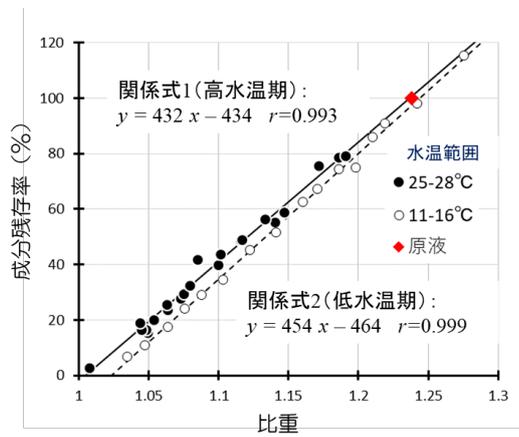


図3 施肥具内の液肥の比重と成分残存率との関係. ●:高水温期, ○:低水温期

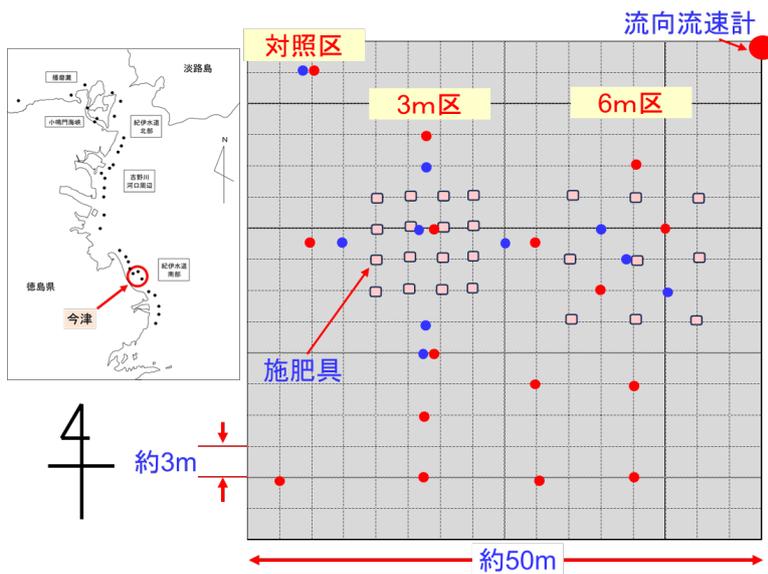


図4 野外試験を行った漁場の位置と施肥具の設置箇所
青丸は試験開始後8日目, 赤丸は試験開始後15日目のワカメのサンプリング場所

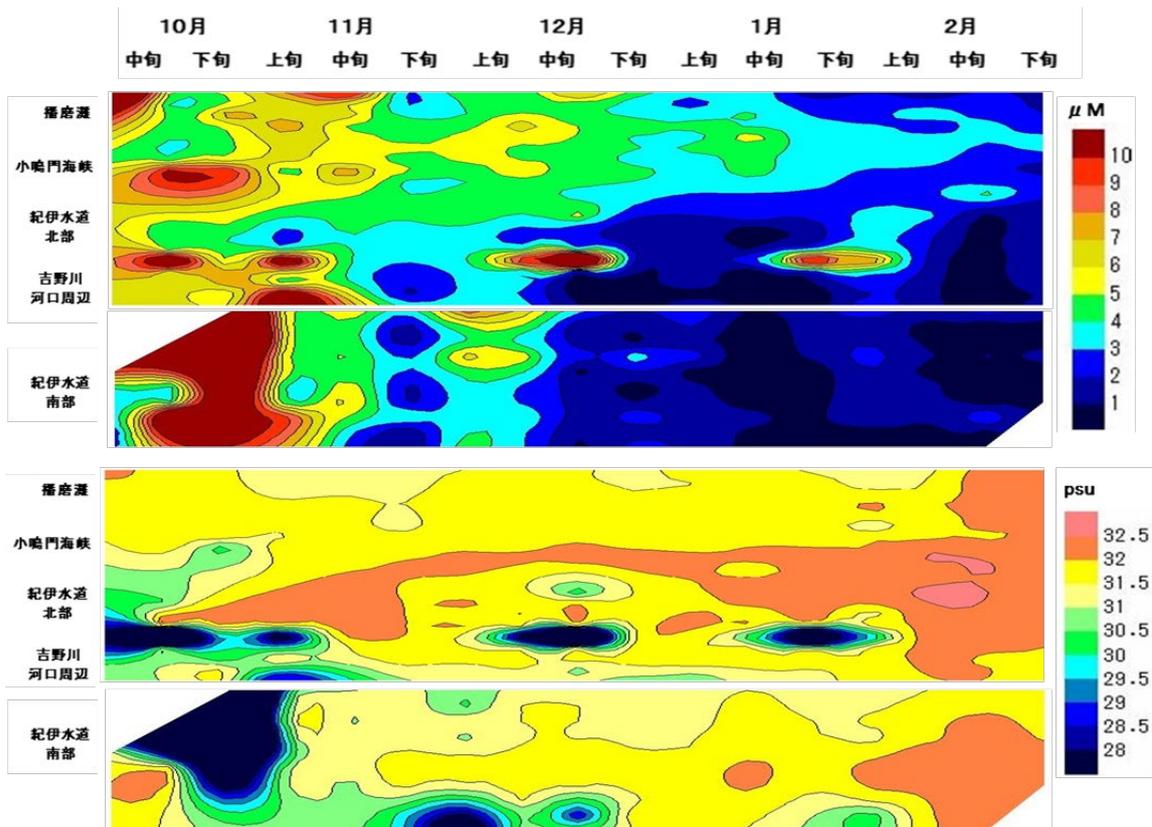


図 5 藻類養殖漁場栄養塩調査における DIN 濃度と塩分のコンタ図
 上図: DIN 濃度, 下図: 塩分

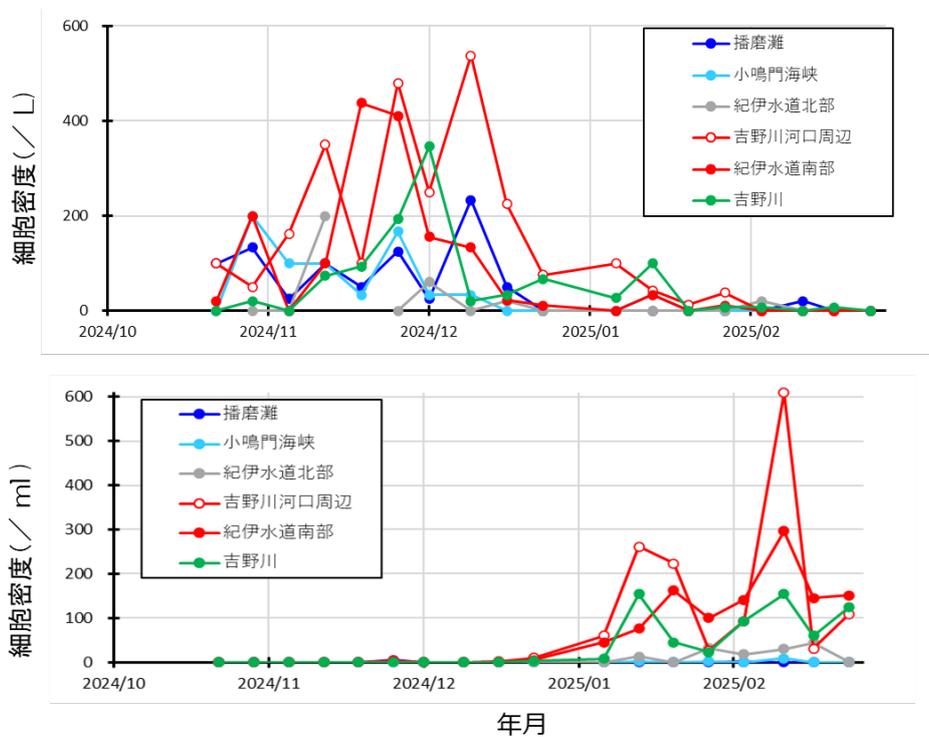


図 6 *Coscinodiscus wailesii* (上図) および *Eucampia zodiacus* (下図) の細胞密度の変化

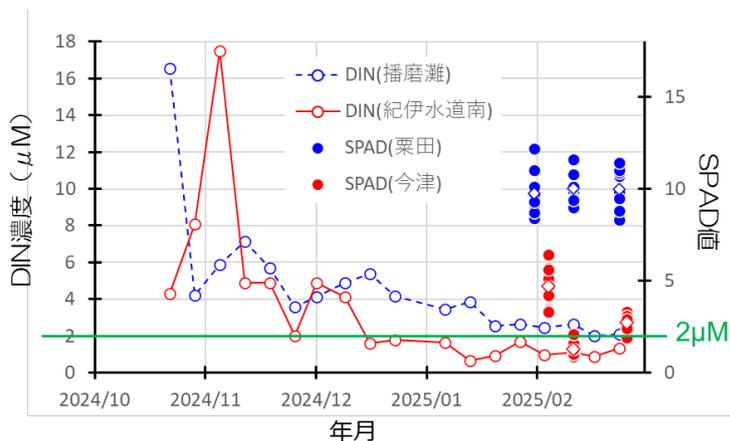


図7 播磨灘および紀伊水道南部におけるDIN濃度の変化と養殖ワカメのSPAD値(鳴門市粟田地区および阿南市今津地区)

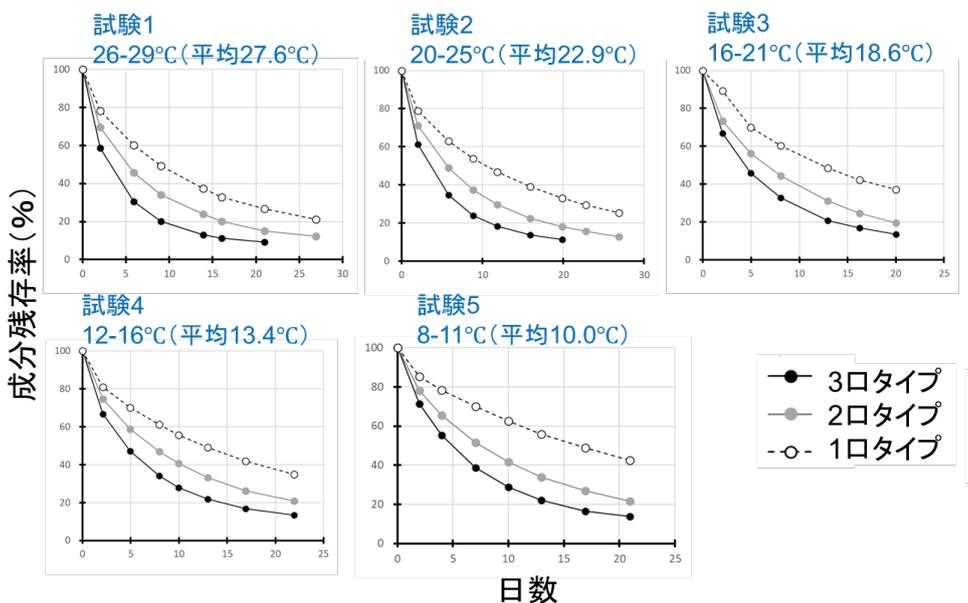


図8 各溶出試験における各施肥具の成分残存率の経時変化

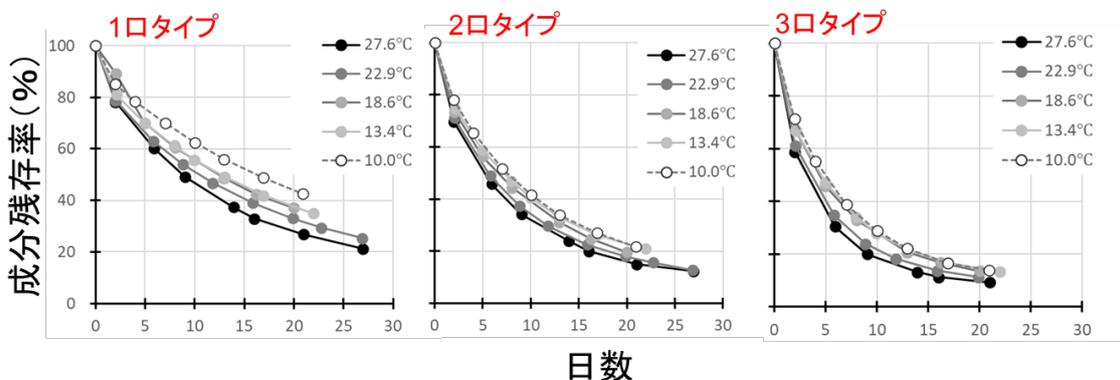


図9 溶出試験における各タイプの施肥具の成分溶出率の経時変化
凡例の温度は、各溶出試験時の平均水温

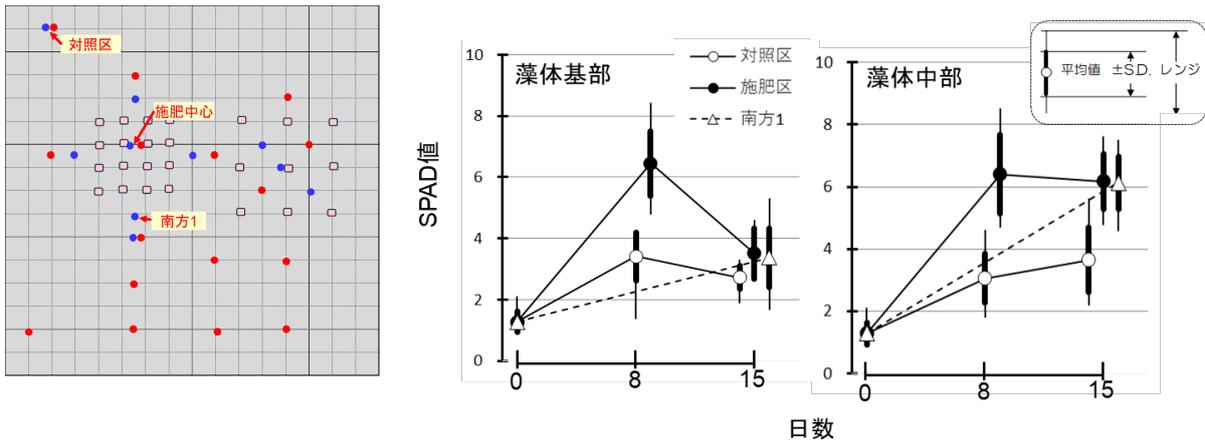


図 10 ワカメの SPAD 値を測定した場所と部位別の SPAD 値の変化



写真 1 溶出口を増設したプラバッグ施肥具



写真 2 色調回復試験 8 日目のワカメの色調の違い 上:対照区, 下:施肥中心

令和6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、栄養塩類対策推進事業
「(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

発行 令和7年3月
発行者 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産技術研究所
〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5
編集責任者 阿保勝之、渡部諭史、黒木洋明