

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研 究 区 分	： 環境問題対応型研究（一般課題）
研 究 実 施 期 間	： 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
課 題 番 号	： 5-2202
体 系 的 番 号	： JPMEERF20225002
研 究 課 題 名	： 特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発
Project Title	： Development of Assessment Method for Nutrient Management in Specific Sea Areas
研 究 代 表 者	： 西嶋 渉
研 究 代 表 機 関	： 広島大学
研 究 分 担 機 関	： 国立環境研究所
キ ー ワ ー ド	： 栄養塩類、モニタリング、数理モデル、季節別管理運転、植物プランクトンデータベース

注： 研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



環境研究総合推進費
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人

環境再生保全機構
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
研究課題情報	3
<基本情報>	3
<研究体制>	3
<研究経費の実績>	4
<研究の全体概要図>	5
1. 研究成果	6
1. 1. 研究背景	6
1. 2. 研究目的	6
1. 3. 研究目標	6
1. 4. 研究内容・研究結果	8
1. 4. 1. 研究内容	8
1. 4. 2. 研究結果及び考察	17
1. 5. 研究成果及び自己評価	34
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	34
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価	37
1. 6. 研究成果発表状況の概要	37
1. 6. 1. 研究成果発表の件数	37
1. 6. 2. 主要な研究成果発表	38
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動	38
1. 7. 国際共同研究等の状況	39
1. 8. 研究者略歴	39
2. 研究成果発表の一覧	41
(1) 産業財産権	41
(2) 論文	41
(3) 著書	41
(4) 口頭発表・ポスター発表	41
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	43
(6) マスメディア等への公表・報道等	44
(7) 研究成果による受賞	44
(8) その他の成果発表	44
権利表示・義務記載	44

Abstract

研究課題情報

<基本情報>

研 究 区 分 :	環境問題対応型研究（一般課題）
研 究 実 施 期 間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研 究 領 域 :	安全確保領域
重 点 課 題 :	【重点課題 16】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究 【重点課題 14】生態系サービスの持続的な利用やシステム解明に関する研究・技術開発
行 政 ニ ー ズ :	(5-12) 瀬戸内海における順応的プロセスによる栄養塩類の管理に向けた評価手法の提案 (5-19) 瀬戸内海における順応的プロセスによる栄養塩類の管理に向けた数理モデルの開発と実証
課 題 番 号 :	5-2202
体 系 的 番 号 :	JPMEERF20225002
研 究 課 題 名 :	特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発
研 究 代 表 者 :	西嶋 渉
研 究 代 表 機 関 :	広島大学
研 究 分 担 機 関 :	国立環境研究所
研 究 協 力 機 関 :	

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

<研究体制>

サブテーマ1「モニタリング技術開発」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	広島大学	環境安全センター	教授	西嶋渉	2022年4月～2025年3月
研究分担者	広島大学	大学院先進理工系科学研究科	教授	中井智司	2022年4月～2025年3月
研究分担者	広島大学	統合生命科学研究科	准教授	浅岡聡	2022年4月～2025年3月
研究分担者	広島大学	環境安全センター	助教	梅原亮	2022年4月～2025年3月
研究分担者	広島大学	大学院先進理工系科学研究科	助教	末永俊和	2022年4月～2025年3月

		科			
研究分担者	国立環境研究所	地域環境保全 領域海域環境 研究室	主任研究員	中田聡史	2022 年 4 月 ~ 2025年3月

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

サブテーマ2「影響評価モデル開発」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	国立環境研究所	地域環境保全 領域海域環境 研究室	上級主幹研究 員	東博紀	2022 年 4 月 ~ 2025年3月
研究分担者	国立環境研究所	地域環境保全 領域海域環境 研究室	室長	越川海	2022 年 4 月 ~ 2025年3月
協力者	国立環境研究所	地域環境保全 領域海域環境 研究室	特別研究員	赤星怜	2023 年 4 月 ~ 2025年3月

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

<研究経費の実績>

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2022	27,981,000	8,393,000	36,374,000	36374000
2023	27,303,000	8,190,000	35,493,000	35493000
2024	26,860,018	8,056,982	34,917,000	34917000
全期間	82,144,018	24,639,982	106,784,000	106784000

注： 環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

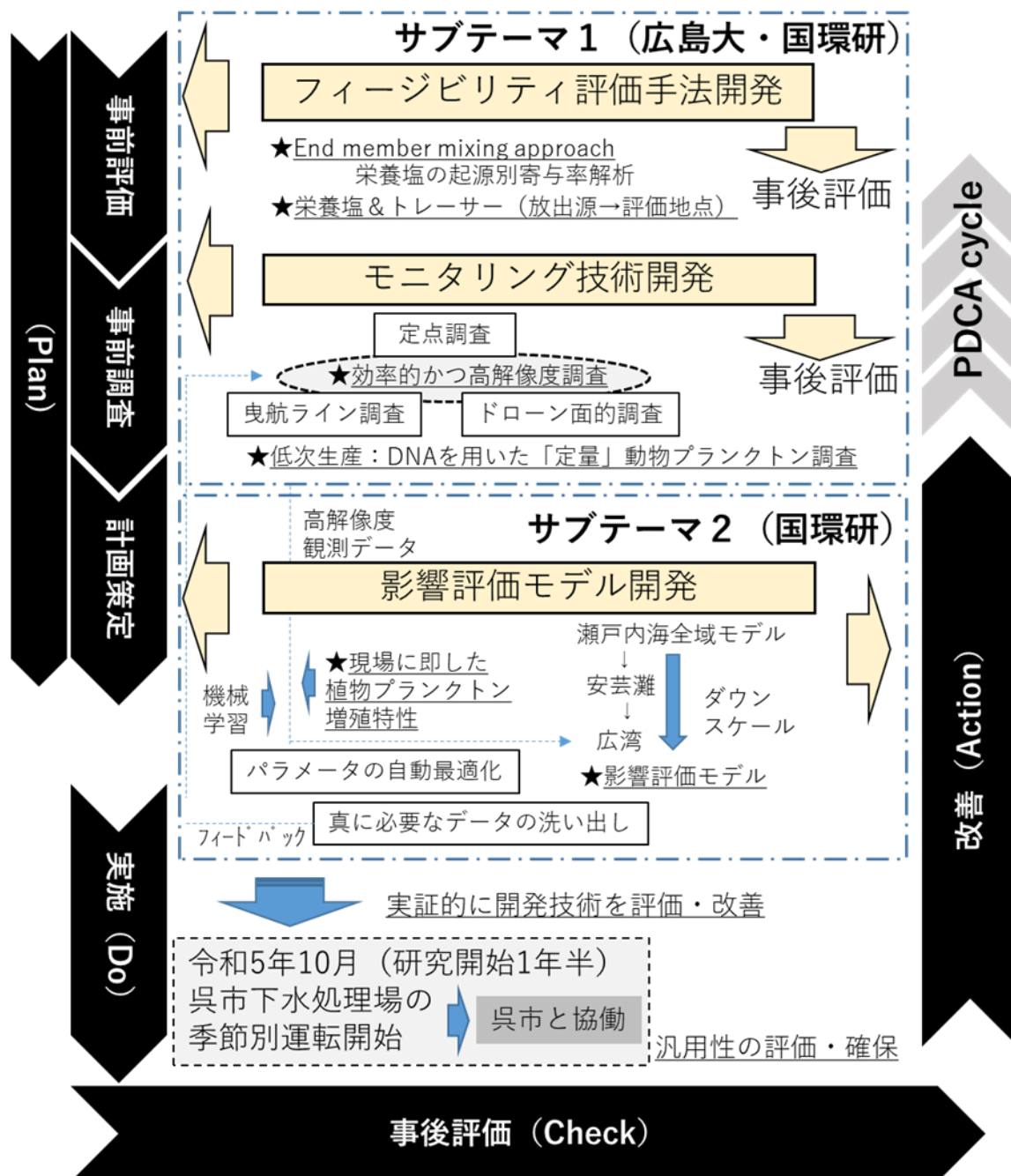
<研究の全体概要図>

特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発

研究代表：西嶋 渉（国立大学法人広島大学）

令和3年度の瀬戸内海環境保全特別措置法で、環境保全と生物生産を両立させる「きれいで豊かな海」を目指す栄養塩類管理制度が導入されたが、この制度を基づいて栄養塩管理を行うための技術的基盤が整備されていない。

研究目的：広島県呉市広湾をモデル特定海域として、栄養塩類管理制度の実施において必要とされる自治体で利用可能な汎用的な評価手法を開発する



1. 研究成果

1. 1. 研究背景

沿岸海域は、本来生物多様性と生物生産性に富んだ豊かな海域である。その豊かさは、環境の多様性と森・川・里・海のつながりによる豊富な栄養塩供給によって支えられているが、一方で沿岸海域は人間活動の影響を受け、富栄養化が進みやすい脆弱な海域でもある。特に閉鎖性海域では、それが顕著であり、急速な経済発展に伴う富栄養化と水質汚濁の改善は全世界共通の課題である。瀬戸内海は世界に先駆け富栄養化を克服しつつある海域であるが、同時に生物生産の低下が危惧されており、平成 27 年に改正された瀬戸内海環境保全特別措置法では、環境保全と生物生産を両立させる「きれいで豊かな海」を目指すことが明記され、令和 3 年の改正では、「きれいで豊かな海」を実現するための栄養塩類管理制度が導入された。すでにいくつかの自治体では、試行的に低水温期に下水処理場から栄養塩類濃度を高めて処理水を放流するいわゆる季節別管理運転等に取り組んでいるが、事前の効果予測と実施後の科学的な検証といった評価・管理はほとんど行われていない。また、下水処理場の季節別管理運転等のほとんどがノリの色落ち対策として実施されており、改正法が目的とする海域の生物生産を高めるという視点からは限定的な取り組みとなっている。栄養塩類管理制度では、PDCA サイクルを回して順応的に栄養塩類管理を行うことが謳われており、そのためには、計画策定前のフィージビリティ評価法、計画策定に必要な数理モデル、現状把握と施策評価のための効率的な水質及び生物・生物生産のモニタリング法等が必要であるが、自治体が利用可能な評価技術等が整備されておらず、現状ではこの制度を用いて栄養塩類管理を行える状況にはない。なお、広湾の 16 定点の採水・水質分析が呉市の事業として実施されており、そのデータも活用して研究を実施した。

1. 2. 研究目的

本研究では、広島県広湾で令和5年度から開始される下水処理場の季節別管理運転を対象事例として、栄養塩類管理を実施するために自治体が必要とする計画策定前のフィージビリティ評価法、計画策定に必要な数理モデル、現状及び施策実施後の効率的な水質モニタリング法、生物生産性の評価法を開発することを目的とする。開発する技術は、自治体が利用可能な汎用的な技術をするを目指す。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発
全体目標	広島県呉市広湾 をモデル特定海域とし、下水処理場の季節別運転（以下、季節別運転と略す）を具体的な栄養塩放出手段として、栄養塩類管理制度の実施において必要とされる自治体で利用可能な汎用的な評価手法を開発する。 具体的には、本格的な計画策定段階に入る前のフィージビリティ評価手法、本格的な計画策定と事後評価に必要な現状把握のためのモニタリング手法、効果・影響予測のための特定海域に最適化された影響評価モデルを開発すること目標とする。

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	モニタリング技術開発
サブテーマ1実施機関	広島大学、国立環境研究所
サブテーマ1目標	モニタリング技術としては、3つの目標を掲げる。 ①本格的な栄養塩類管理計画を立てる前段階で必要とされる、大きな労力をかけずに栄養塩類濃度を高める施策の有効性を予測するフィージビリティ評価のためのモニタリングと計算の手法を開発する。 ②栄養塩類管理においては、現状把握や事後評価においては、空間解像度が高い水質モニタリングが要求される。そこで、最低限の定点による採水を伴う水質測定、特定海域をメアンダ状に曳航しながらの水質センサによるライン上の測定、さらにドローンによる面的なChl. <i>a</i> 濃度推定等を組み合わせた効率的

	<p>かつ汎用的な水質モニタリング手法を開発し、自治体職員や外部委託によって容易に実施可能なモニタリング技術を開発する。</p> <p>③植物プランクトン量におけるChl. <i>a</i>濃度のような代替指標がなく、これまで専門家による同定によってしかモニタリングできなかった動物プランクトンについて、生化学的分析であるDNAメタバーコーディング技術を用いた動物プランクトンのモニタリング技術を開発する。この技術は、試料によるDNA抽出率の違いやPCRによる増幅過程を経ることから定量性がないことが欠点であるが、本研究では、化学分析でよく用いる内部標準添加法による試料間補正と生物種ごとの増幅性の違いを予め評価して種間補正を行う方法を組み込むことで本技術に定量を持たせる。ここで得られる各動物プランクトン種の個体数情報をバイオマスに変換し、二次生産速度を推定する手法を開発し、一次生産速度とあわせて低次生産を推定する手法を開発する。</p>
--	---

<サブテーマ2の研究目標>

サブテーマ2名	影響評価モデル開発
サブテーマ2実施機関	国立環境研究所
サブテーマ2目標	<p>影響評価モデル開発としては、3つの目標掲げる。</p> <p>目標①：瀬戸内海～安芸灘～広湾をケーススタディとして、特定海域（広湾）の栄養塩管理による生物生産性への効果と周辺海域の水質への影響を自治体独自で客観的に評価することが可能な影響評価モデルを開発する。水質総量削減や気候変動等の影響評価を目的として国立環境研究所が開発を進めてきた瀬戸内海の陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルをベースとして、瀬戸内海全域（水平解像度約1 km）の再現計算結果（親データ）から湾灘（安芸灘、水平解像度約0.3km）、特定海域（広湾、水平解像度約0.1km）へと段階的に水質のダウンスケール予測を行うネスティング海域モデルを構築する。特定海域では、サブテーマ1で取得される高密度・高頻度のモニタリングデータを活用して、下水処理水の水塊移動やそれに伴う一次生産・水質の変化を追跡可能なモデルを構築・検証するとともに、客観的な評価結果を得るための機械学習に基づくパラメータ自動最適化手法を開発する。</p> <p>目標②：生物生産性や水質への影響予測を行う上で最も重要な植物プランクトンのモデルについては、代表的な優占種を対象に先行の培養実験事例・データを収集するとともに、正確なデータが乏しい閾値近傍の環境条件（低栄養塩濃度、低温・高温、強光など）下の増殖速度を半連続培養実験で補完し、海域に即した種のモデル選択を可能とするデータベースを作成・拡充する。</p> <p>目標③：以上をパッケージ化した影響評価モデルを広湾に実装し、季節別運転の効果・影響予測の数値実験を行い、栄養塩類管理に関する科学的知見を集積する。また、自治体に対してできるだけ負荷の少ないモニタリングとなるように、完成したモデルから再現性の確保のために真に必要なモニタリングデータ（頻度・測定数・項目）を導き出す。</p>

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

1. 4. 1. 1. モニタリング技術開発（サブテーマ1）

サブテーマ1では、3つのモニタリング手法開発を行った。すなわち、①フィージビリティ評価のためのモニタリングと計算の手法の開発、②現状把握や事後評価のための空間解像度が高い効率的な水質モニタリング技術の開発、③DNAメタバーコーディング技術を用いた動物プランクトンのモニタリング技術の開発である。

1. 4. 1. 1. 1. モデル特定海域である広湾の概要

モデル特定海域として選定した広島県呉市の広湾は、瀬戸内海中西部安芸灘の北部に位置する面積約8 km²の小湾である（図1）。広湾へ流入する栄養塩類の主な陸域負荷源は、黒瀬川、広浄化センター（下水処理場）、A工場の3つである。広湾の全窒素（TN）及び全リン（TP）の環境基準類型指定はⅡ類型である。化学的酸素要求量（COD）については広湾全体の類型はA類型であるが、湾奥の広浄化センター及びA工場の放流口がある内湾はC類型、その外側の非常に狭い海域がB類型に指定されている。広湾中央部にはカキ筏が設置されている養殖海域がある。その海域はA類型である。



図1 広湾の概要

広島県の総量削減基準に基づく下水道業のTNのC値は25 mg/Lであるが、2022年10月24日策定された第9次水質総量削減計画の中で、下水道の季節別管理運転の実証試験に特化し、40 mg/Lの基準（実証試験基準）が設定された（TPのC値は3 mg/Lで、新基準4 mg/L）。広浄化センターでは、2023年10月～2024年3月にかけて、この基準に基づき季節別管理運転が実施された。本研究では、広湾をモデル海域として、広浄化センターの季節別管理運転期間を挟んだ3年間を研究期間に設定し、季節別管理運転による水質の変化を調査し、そのデータに基づき特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発を行った。

1. 4. 1. 1. 2. フィージビリティ評価手法の開発（目標①）

特定海域へ栄養塩類の供給を検討する場合、想定する栄養塩類供給方法と供給量の有効性を予め把握した上で、本格的な栄養塩類管理計画の策定に移行することが、効果的である。本研究では、栄養塩類の供給手法として一般的な下水処理場からの栄養塩類の放出を想定し、モデル海域である広湾において、その評価法としてのフィージビリティ評価手法の開発とその評価に必要なモニタリングについて検討した。栄養塩類供給方法と供給量の有効性を評価するフィージビリティ評価を、End-Members Mixing Analysis (EMMA) という手法を用いて行った。EMMAは、ある地点（評価地点）の水質はそこに流入する様々な水（起源水）が混合して決定されるという概念に基づき、評価地点における各起源水の混合率を計算するものである。多くの海域では、隣接海域から流入する海水の混合率が極めて大きく、その中で陸域からの複数の起源水の混合割合を算出することが困難である。そのため、①淡水の混合率を塩分から求め、その後、②淡水混合率（1－海水混合率）の中での下水処理水他の各陸域起源の混合率を求める2段階の手法を開発した。②では、各起源水の識別を可能とするトレーサーに基づき計算した。

【淡水（陸域負荷）及び海水の混合率の推定】

エスチュアリー循環を考慮し、隣接海域の海水と陸域負荷源からの淡水の混合率を計算する際の海水には、隣接海域に設定したStn e（図2）の海面下7メートル（m）以下の底層水を用いた。Stn eの水深は約11mである。陸域の3起源（黒瀬川、広浄化センター、A工場）の塩分は海水と比較するとゼロと見なしても問題ないレベルであるため、陸域3起源全体を塩分ゼロの淡水と仮定し、まず、淡水の混合率を計算した。

Stn eの海面下7メートル（m）以下の平均鉛直塩分（ $\bar{S}_{e,7}$ ）及び各調査地点の平均鉛直塩分（ \bar{S}_i ）を用いて、以下の式1に基づき、各調査地点における淡水（陸域負荷）の混合率（ $g_{fw,i}$ ）を算出した。

$$g_{fw,i} = \left(1 - \frac{\bar{S}_i}{\bar{S}_{e,7}}\right) \times 100 \quad \text{式1}$$

g_{fw} ：淡水の混合率 [%]、 \bar{S} ：各地点の平均鉛直塩分 [PSU]、 $\bar{S}_{e,7}$ ：Stn eの海面下7 mの平均鉛直塩分[PSU]、 i ：各地点

【検証地点における各陸域負荷源の混合率の評価】

EMMAでは、特定のトレーサーをそのまま用いて解析することが一般的であるが、本研究では、トレーサーの数に制限がない主成分分析によって得られる第1、2主成分(U1、U2)を解析に用いた（PCA-EMMAと呼ばれる手法）。また、隣接海域の海水、広浄化センターやA工場の放流水、ならびに黒瀬川の河川水のトレーサーは標準化処理後、計算に使用した。

EMMAでは式2～式4の連立方程式を解くことで、3つのエンドメンバー、即ち広浄化センターやA工場の放流水、黒瀬川河川水による混合率を評価した。ここでは、淡水中での広浄化センター、A工場、河川水の混合率を求めた後、各々の値と先に求めた淡水（陸域負荷）の積を計算し、検証地点での混合率とする。そのため、ここでは3起源の混合率の合計は1である（式2）。

$$\begin{aligned} 1 &= g_{RIV} + g_{PM} + g_{STP} && \text{式 2} \\ U1_{target} &= g_{RIV} \times U1_{RIV} + g_{PM} \times U1_{PM} + g_{STP} \times U1_{STP} && \text{式 3} \\ U2_{target} &= g_{RIV} \times U2_{RIV} + g_{PM} \times U2_{PM} + g_{STP} \times U2_{STP} && \text{式 4} \end{aligned}$$

g ：陸域負荷源の混合率 [%]、 $U1$ ：第1主成分、 $U2$ ：第2主成分、 $target$ ：検証地点、 RIV ：黒瀬川河川水、 PM ：A工場の放流水、 STP ：広浄化センターの放流水

なお、EMMAにおいて、 $U1$ 、 $U2$ は2次元空間（U空間）の座標軸を構成する（Christophersen et al., 1992）。この空間に標準化した検証地点の平均値や各陸域負荷源（エンドメンバー）の値を投影し、ミキシングダイアグラムを表現した。

【各陸域負荷源の混合率の検証】

PCA-EMMAにより求めた混合率を検証するため、式5に示すように各負荷源のTN濃度と混合率を乗じてこれらを総和し、検証地点におけるTN濃度を推定し、検証地点で実測したTN濃度と比較した。

$$C_{target} = g_{RIV} \times C_{RIV} + g_{PM} \times C_{PM} + g_{STP} \times C_{STP} + g_{sw} \times C_{sw} \quad \text{式5}$$

C ：全窒素濃度 [μM]、 $target$ ：検証地点、 sw ：隣接海域の海水

【各陸域負荷の流量と潮汐の変動による陸域負荷の混合率への影響】

ここまで求めた混合率は、水質調査実施日のデータに基づいて算出されたが、各陸域負荷の流量や潮汐の変動は陸域負荷の混合率に影響することが見込まれる。黒瀬川の流量は他の二つの負荷源の流量よりも卓越しており、変動も大きいことから、黒瀬川の流量と広湾の潮位の変動による陸域負荷の混合率への影響を評価した。

1. 4. 1. 1. 3. 水質モニタリング技術開発（目標②）

一般には、栄養塩類管理を行う特定海域は、瀬戸内海の湾灘のような広範囲の水域ではなく、養殖海域を中心とした沿岸域などが想定される。そのため、特定海域内には、環境基準点がない、あるいは数か所しか存在しないなど、従来のモニタリング地点だけでは、水質や生物生産の現状を把握することが困難な場合が多い。このような限られた地点の水質に基づいて数理モデルのパラメータ調整を行うと精度の高い予測は困難となる。そこで、特定海域の空間解像度と時間分解能を上げたモニタリングデータの取得方法を検討した。

【広湾における水質調査】

調査は2022年5月～2024年6月の期間に原則月1回、図2に示す16地点において広島大学調査船カラヌス丸を用いた定点調査、湾奥部では曳航調査を行うとともに、カキ筏が多数設置されている湾中央部で水質センサーを設置した係留調査を実施した。広浄化センター放流口とA工場放流口が位置する埋立地と東海岸に挟まれた内湾に2地点（Stn 1、2）の調査地点を設定した。

定点調査では、各地点において表層水（海面下0.5 m）及び底層水（海底面上1 m）をバンドーン採水器または水中ポンプを用いて採水した。多項目水質計（AAQ-RINKO、JFEアドバンテック製）による水質の鉛直分

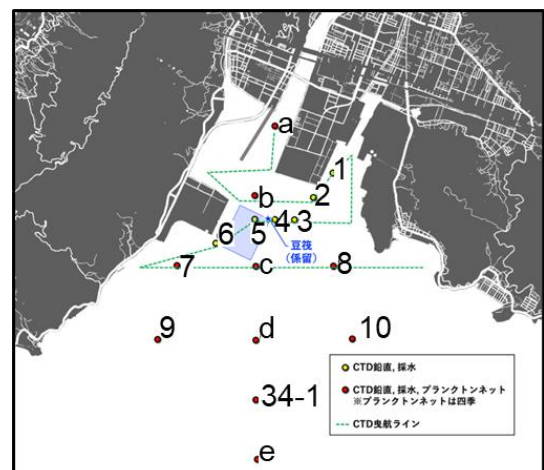


図2 採水地点の概要

布を測定し、水温、深度、塩分、蛍光値、濁度、溶存酸素（DO）濃度、pH、光量子等のデータを得た。採水試料については、COD濃度、TN濃度、及びTP濃度、溶存態無機窒素（DIN）濃度、溶存態無機リン（DIP）濃度等を測定した。クロロフィル a （Chl. a ）濃度については、培養植物プランクトンのChl. a 濃度に基づいてセンサー測定された蛍光値を補正し、データは補正後のChl. a 濃度として示した。この調査と並行して、広湾に流入する主な3つの陸域起源水である広浄化センター及びA工場の放流水、黒瀬川河川水を採水・分析した。また、広浄化センターで毎日測定されているTN濃度及びTP濃度等の水質データを使用した。

【空間解像度の向上のための曳航調査】

空間解像度を高めるために、曳航調査を実施し、従来の採水による測定値との比較・検証を行った。曳航調査では、船を時速 5 kmで走らせながら、図 3に示すように船側に固定した水中ポンプから表層水（0.5 m）をかけ流し水槽（70 L）内に常時汲み上げ、かけ流した。水槽内の水質を多項目水質計により30秒に1回の頻度で測定した。GPS測定も同時に行い、観測時間により水質データと位置座標を照合した。栄養塩類については、現時点では海域モニタリングに使用できる精度でのセンサー技術が確立されていないため、水槽内の水を高頻度に採水し、分析した。



図 3 曳航調査の概要

【時間分解能の向上のための係留観測】

時間分解能の高い水質モニタリングのために、カキ筏を利用した水質センサーによる係留観測を実施した。

係留調査に関しては、呉市広漁協の協力のもと、カキ筏が配置されている湾中央部で最も放流口に近い（沖合約1 km）Stn 5付近の豆筏の端側から水深 0.5 mの位置に水質センサー（水温、Chl. a 濃度、濁度センサー（INFINITY、JFEアドバンテック）及び塩分、pH（HANNA instruments）センサー）を設置した。豆筏にはカキは吊るされていない。センサーは2023年3月～2024年6月まで係留し、2本のセンサーを交互に取り付けることで連続的にデータが取得できるようにし、10分間隔でロギングした。

【時間分解能の向上のためのパッシブモニタリング法の開発】

季節別管理運転は、硝化反応を抑制することによって窒素除去率を下げる硝化抑制運転が一般的であり、放流水中の窒素はほとんどがアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）である。そのため、特に海水中でのアンモニア態窒素の挙動が重要なモニタリング項目となる。しかし、海水中でアンモニア態窒素を測定できる水質センサーは存在しない。そこで、当初計画にはなかったが、アンモニア態窒素の連続観測用のパッシブサンプラー法の開発に取り組んだ。パッシブモニタリングは、サンプラーを水中に常時浸漬させ、水中の対象物質が自然拡散によって、吸着材に捕集させ、捕集された物質から一定期間の平均濃度を測定する方法である。

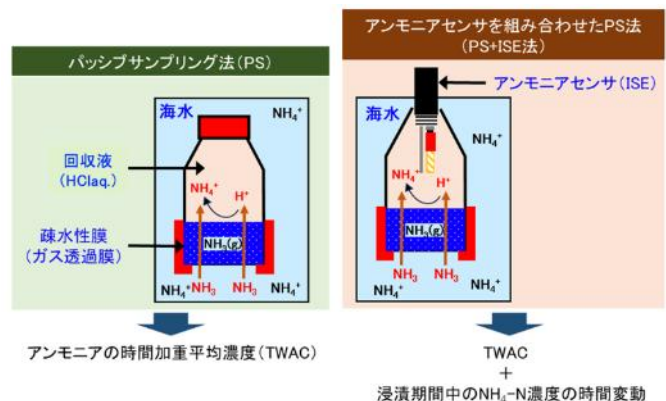


図 4 海水中アンモニア態窒素のパッシブサンプラーの原理

$\text{NH}_4\text{-N}$ は、海水pH下ではそのほとんどがアンモニウムイオン（ NH_4^+ ）として存在するが、約1割がアンモニア（ NH_3 ）として存在する。広口瓶の底部を切り取り、ガス透過膜取り付け付けたパッシブサンプラーを作成した（図 4）。これを海水に浮かべ、海水中の NH_3 を選択的にガス透過膜から回収液（希塩酸）中に浸透させ、 NH_4^+ として回収した（回収液中に浸透した NH_3 は、回収液中での酸性条件下では NH_4^+ として溶解する）。ガス透過膜には海水中の塩類等溶存成分の浸透は限定的であるため、回収液中の NH_4^+ 濃度は淡水用のアンモニウムイオンセンサー（ISE）で測定できる。そこで、パッシブサンプラーを改良し、淡水域で使用されているISEを膜の反対側に取り付けることで、長期的かつ連続的に $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度変化を捉えることを試みた。パッシブサンプリング法の開発では、実験時の水温は平均的な海水温である20℃で実施し、ガス透過膜として疎水膜（Durapore及びFluoropore）を用いた。

【空間解像度と時間分解能の向上のためのドローンによるモニタリング】

ここまでのモニタリング方法は、いずれも調査船が必要であるが、陸域からモニタリング可能なドローン

によるモニタリング方法についても検討した。ドローンによってモニタリングできる可能性がある水質項目はChl. *a*濃度、有色溶存有機物(CDOM)濃度、水温、濁度などであるが、ここではChl. *a*濃度とCDOM濃度を推定するアルゴリズムを開発した。栄養塩類管理においては、一般には臨海部に設置されている下水処理場から特定海域への栄養塩類の放出が検討されている。そのため、下水処理場の屋上等から定期的に特定海域にドローンを飛ばして、海域をモニタリングすることが可能である。ドローンは予め飛行経路を入力しておけば、自動操縦が可能であるため、調査自体の労力は小さい。

調査では、マルチスペクトルカメラ搭載ドローンを使用し、500mの高高度から海面空撮を行った。2022年夏季(9/27、9/28)と秋季(11/15~11/22)に調査を集中的に行うとともに、月1回の調査も行った。11/21は先に示した16点定点・曳航調査日である。マルチスペクトルカメラの空撮によって、1600×1300ピクセルの5波長バンド(B(青:450nm±16nm)、G(緑:560nm±16nm)、R(赤:650nm±16nm)、RE(レッドエッジ:730nm±16nm)、NIR(近赤外:840nm±26nm))の画像を得た。同時に、現場採水(アセトン抽出)を行い、Chl. *a*濃度(実測値)を測定し、上記5波長を組み合わせた様々な光学指標と比較し、Chl. *a*濃度(実測値)を高い推定精度で表すアルゴリズムを検討した。

画像中央部20×20ピクセルの範囲において上記アルゴリズムを使ってChl. *a*濃度を推定し、その中央値を求め、1枚の画像から1つのChl. *a*濃度推定値を求めた。このようにサブサンプリング・統計処理されたChl. *a*濃度の中央値と、画像中心部の位置座標(緯度経度)のデータセットを作成し、広域のChl. *a*濃度の分布図を作成した。

ドローン空撮による水質モニタリング手法と他の環境計測を含めた統合的モニタリング手法として、ロボット船を用いた自動環境計測手法(ロボセン)も検討した。ロボセンを用いた海洋観測調査では、処理場季節別管理運転開始前の2022年11月と開始後の2023年11月における延べ13ないし14日間において、多項目水質計(Rinko-Profiler, JFEアドバンテック社)を用いた水温・塩分・DO・濁度・Chl. *a*濃度等の環境計測を実施し、各計測地点における鉛直プロファイルを収集した。また、ロボセンの船体側面に取り付けた有色/蛍光溶存有機物CDOM/FDOM水質センサーロガー(Cyclops-7, TURNER DESIGNS)によって、表層CDOM/FDOM(以降、便宜上CDOMと呼称)濃度もロボセン航路に沿って計測された。

1. 4. 1. 1. 4. 動物プランクトンのモニタリング技術開発(目標③)

本研究の開始に先立ち播磨灘で採取、種同定済みの試料を使って、DNAメタバーコーディング技術による動物プランクトンの定量的モニタリング技術を開発した。検討の対象は、魚類等高次消費者の餌となるカイアシ類とした。開発した技術を用いて、広湾の動物プランクトンのモニタリングを行った。

【動物プランクトン試料の採取】

播磨灘の動物プランクトン試料は、播磨灘の3地点において2020年4月~2021年3月まで毎月採取された。動物プランクトンは、改良型ノルバックネット(口径:0.45 m;長さ:1.95 m;目合い:100 μm)を海底から海面まで鉛直引きして採取した。広湾の動物プランクトンの試料は、Stn 1~6を除く、11地点(ただし、Stn aでは、水深が小さくほとんど調査できなかった)で年4回(四季)採取した。採取方法については、播磨灘での採取方法と同じである。

【DNA分析】

動物プランクトン試料に、内部標準として日本沿岸海域には存在しないアルテミアの卵を秤量、添加した。アルテミア卵の添加量は、バーコード領域(以下、DNA領域)毎に試料の全DNA読み取りカウント数(リード数)に占めるアルテミアリード数の割合が2割程度になるよう調整した。内部標準を加えた試料をビーズ破砕機で破砕し、Proteinase K solutionによって56℃で30分間分解した。分解処理後、試料を遠心し、上澄みのDNA抽出液を分取し、DNAの精製と回収を行った。次世代シーケンス用のライブラリは二段階PCRで準備した。精製した2nd PCR産物をIllumina iSeq100を用いて塩基配列を決定し、各塩基配列のリード数情報を得た。得られた塩基配列は、Genbank nt データベースの登録塩基配列情報と照合し、種を決定した。

【種網羅性の高いバーコード領域の選択】

DNAメタバーコーディングは、種によって塩基配列が異なるDNA領域をターゲットしてDNA解析を行うが、使用するDNA領域によって、判別できる種が限定される。そこで本研究では、ミトコンドリアDNAシトクロムオキシダーゼI(mtDNA COI)遺伝子の部分配列Leray及びZplank、核DNA(ncDNA)18S rRNA遺伝子の部分配列18S、あわせて3領域を対象にDNA分析を行い、種網羅性を高めることを試みた。

【定量法の開発】

DNAメタバーコーディング結果は、試料間でのDNA抽出やPCR増幅、シーケンスにおけるバイアスの影響で、シーケンスで得られた生のDNA読み取りカウント数の量的比較は直接的には行えない(Sickel et al.,

2023)。そこで本研究では、DNAメタバーコーディングでのバイオマス絶対量の定量化のために2段階の工夫を組み合わせ試みた。①内部標準（試料には含まれない既知量の動物プランクトン）を試料に添加し、試料からのDNAの抽出からシーケンスまでの一連の操作を行い、内部標準の結果に基づき、シーケンスで得られた生のDNA読み取りカウント数を補正した。その後、②種毎に標準補正により定量性を改善したDNA読み取りカウント数から形態学的種同定に基づき計量されたバイオマス量に基づき検量線を作成しバイオマス絶対量を推定した。補正方法は以下に示す。

$$corD_{ij} = D_{ij} \div \left(\frac{D_{Si}}{W_{Si}} \right) \quad \text{式6}$$

$corD_{ij}$ ：試料iにおける種jの内部標準補正したDNA読み取りカウント数（reads）、 D_{ij} ：試料iにおける種jのDNA読み取りカウント数生値（reads）、 D_{Si} ：試料iにおけるアルテミア属のDNA読み取りカウント数生値（reads）、 W_{Si} ：試料iに添加した内部標準アルテミアの乾燥重量（mg）

【低次生産を推定する手法の開発】

海洋における生態系ピラミッドの基盤となる低次生産、すなわち、植物プランクトンによる一次生産量及び動物プランクトンによる二次生産量の推定を行った。一次生産量については、Nishijima et al., (2021)の瀬戸内海を対象とした推定式を用いた。計算の概要としては、表層水中の植物プランクトン量($\text{mgChl. } a/\text{m}^3$)に、ある水温や栄養塩環境下での同化効率(P^0 : $\text{mgC}/\text{mgChl. } a/\text{h}$)を乗じることで表層水中の一次生産量($\text{mgC}/\text{m}^2/\text{d}$)を求め、光減衰係数により鉛直方向の各層における生産割合を算出し、有光層で積分した。

動物プランクトンについては、顕微鏡観察（検鏡）とDNAメタバーコーディングによって、それぞれ種ごとのバイオマス(mgC/m^3)を求めた。二次生産量は、種ごとにバイオマスにその種の比増殖速度($/\text{d}$)を乗じて求め、全種を合計してその各地点の二次生産量($\text{mgC}/\text{m}^3/\text{d}$)とした(Hayashi & Uye, 2008)。一次生産量との比較のために各地点の水深を乗じて単位面積あたりの生産量とした($\text{mgC}/\text{m}^2/\text{d}$)。

1. 4. 1. 2. 影響評価モデル開発（サブテーマ2）

1. 4. 1. 2. 1. ネスティング影響評価モデルの開発と再現性の検証（目標①）

サブテーマ2では、地方自治体が汎用的に利用可能な栄養塩類管理の影響評価モデル（図5）の開発を目的として、広湾を特定海域とする瀬戸内海（水平解像度約1km）～安芸灘（同0.3km）～広湾（同0.1km）のネスティングモデルを構築した。瀬戸内海モデルは、先行研究（東ら，2019；東ら，2020；東ら，2021）で開発された陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルであり、中央審議会の水質総量削減の検討にも用いられたものである。ネスティングは海域モデルでのみ行い、瀬戸内海モデルを親モデルとして、安芸灘モデル及び広湾モデルに与える陸域からの淡水・汚濁負荷流出量は、水平解像度約1kmの陸域モデルの出力値を共通して用いた。



図5 本研究で開発する影響評価モデルの概要

陸域モデルについては、二級河川の黒瀬川の流域界や呉市広地区の下水道網、流量・水質の観測データなどの河川・流域情報を広島県と呉市より収集し、モデルの落水線の確認・修正や再現性の検証を行った。COD、TN、TPの発生負荷量については、先行研究では中央環境審議会（2021）の第9次水質総量削減の検討に用いられた環境省の2014年度発生負荷量調査データを使用したが、新たに第10次水質総量削減の検討に用いられている2019年度実績の調査データ（環境省，2021）を入手・整備し、本研究の入力条件として使用した。海域モデルについては、モデルの海底地形の見直しや陸域発生負荷量の更新に伴うパラメータ調整を実施するとともに、先行研究において2015年12月まで実施されていた瀬戸内海全域の再現計算を2024年3月まで拡張した。ネスティング計算に必要な気象条件や初期・境界条件の切り出し作業は、地方自治体での利用を想定して、ユーザーが特定海域の計算領域を設定した際に気象条件や境界条件等を自動で生成するプログラムコードを作成し、環境省事業にて別途開発しているGUIに搭載した。

構築したネスティングモデルを用いて広湾の再現計算を行い、計算値とサブテーマ1の観測値の比較を通じて、モデルの検証を行った。計算期間は、季節別管理運転が実施された2023年10月～2024年3月とその前後に実施されたサブテーマ1の観測期間、及び後述する数値実験を踏まえて2019年4月～2024年3月の5年間とした。広浄化センターからの負荷量については、瀬戸内海モデルと安芸灘モデルの計算時には上述した環境省の発生負荷量調査の報告値を与えた陸域モデルの計算値を使用したが、広湾モデルでは陸域モデルの出力値をサブテーマ1が収集した処理水量・水質の日別実績データに置き換えて計算を行った。

1. 4. 1. 2. 2. 季節別管理運転の効果評価（目標③）

広湾における下水処理場の季節別管理運転の効果を定量的に評価するため、開発したモデルを用いて数値実験を行った。本研究で実施した数値実験は次の2つのcaseに大別される。

Case 1：2019年4月～2024年3月において、いずれも季節別管理運転を実施しない数値実験

Case 2：2019年4月～2024年3月において、毎年10月～翌年3月に季節別管理運転を実施する数値実験

Case 1と2においてモデルの入力条件を変えるのは下水処理場からの負荷量のみとし、それ以外の陸域からの流出や海上の気象条件等は両caseともに同じものを与えた。Case 1と2の下水処理場からの負荷条件

は、広浄化センターの処理水量・水質データより、2023年度の季節別管理運転の実施時のTN、TP負荷量がそれぞれ2019～2022年度平均値の概ね1.3倍、1.7倍となった実績を踏まえ、これらの比率をTNとTPの日別実績データに乘除することによって作成した。有機態と無機態の分画比についても、季節別管理運転の実施前後にサブテーマ1が処理水の水質分析を行って得た実績データを踏まえて設定した。

季節別管理運転の効果は気象・海象条件においても左右されることが予想されるため、特定の気象・海象条件に限定された結果とならないように、季節別管理運転が実施される10月～3月が5セット含まれる2019年4月～2024年3月の5年間を計算期間として設定した。この5年間においてcase 1と2の計算結果を比較することにより、広湾における下水処理場の季節別管理運転の効果を考察した。

1. 4. 1. 2. 3. 気象・水温条件の変化が季節別管理運転の効果に及ぼす影響（目標③）

上述のcase 1と2の数値実験は、サブテーマ1の観測結果と同様に、季節別管理運転の効果が限定的である結果となった。また、季節別管理運転の効果には季節性が見られ、広湾の流動・海水交換に強く支配されることが窺われた。これらの原因とプロセスを明らかにするため、以下の(a)～(e)の河川流量、海上風、気温・水温が変化したときのcase 1と2の数値実験を行った。

- (a) 10～3月における黒瀬川の流量が2割減少したとき
- (b) 10～3月における北風が全体的に 0.7 m/s 強まったとき
- (c) 10～3月における東風が全体的に 0.7 m/s 強まったとき
- (d) 全期間を通じて水温が平均0.9℃上昇したとき（RCP2.6相当）
- (e) 全期間を通じて水温が平均3.5℃上昇したとき（RCP8.5相当）

1. 4. 1. 2. 4. 植物プランクトンデータベースの補完（栄養塩の半飽和濃度）（目標②）

植物プランクトンの栄養塩応答特性のうち、特に *Prorocentrum dentatum* の硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) に対する半飽和濃度 K_μ を明らかにするため、比増殖速度 μ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (S) との関係を示す Monod 関数（式7）に基づき、流加式半連続培養法を用いた実験を実施した。この手法は、既存の回分培養法や連続培養法において課題とされていた低濃度環境下での制御性や十分な試料量の確保といった技術的制約を克服するものであり、信頼性の高い K_μ の推定を可能にする。

$$\frac{\mu}{\mu_{\max}} = \frac{S}{K_\mu + S} \quad \text{式7}$$

本研究で使用した培養装置は、自動化された培地供給・排出機構と温度・光制御機能を備えており、培地供給と希釈操作を組み合わせることで、定常増殖条件を維持しながら安定的に分析試料を採取できる構造となっている（図6）。これにより、複数の希釈率（D）条件下で平衡に達した培養系を構築し、それぞれの条件において $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と比増殖速度（ μ ）を測定することが可能となった。

P. dentatum の培養実験には NIES-2010 株、f/2 改変培地を用い、スカラーPAR $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、水温 20°C 、明暗周期 12h:12h の条件下で実施した。比増殖速度 μ は in vivo クロロフィル蛍光をもとに評価し、 $\mu = D$ の関係が成立する $\text{NO}_3\text{-N}$ 制限条件下において、Monod 関数による回帰分析を通じて K_μ を推定した。

なお、特定海域（広湾）において硝酸態窒素が主な制限栄養塩であることは、広島県水産海洋技術センターによる定点観測データの解析により確認され、本研究ではこの知見に基づいて $\text{NO}_3\text{-N}$ を制限栄養塩として実験条件を設定した。

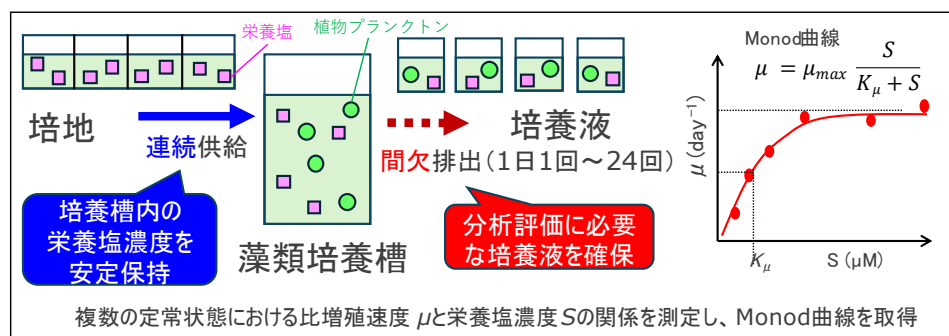


図6 流加式半連続培養装置の特徴と Monod の半飽和濃度 K_μ の評価方法

1. 4. 1. 2. 5. 植物プランクトンデータベースの補完（強光に対する増殖応答）（目標②）

P. dentatum の強光条件における増殖応答を明らかにするため、2023年4月から8月にかけて流加式半連続培養装置を用いた培養実験を実施した。初期条件として、栄養塩非制限かつ安定な培養系（水温 20°C 、スカ

ラーPAR 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期12h:12h、希釈率0.66 day^{-1})を設定し、LEDデューティー比を順次変更することでスカラーPAR = 20~2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の7段階の照射条件を設定した。

各条件では、栄養塩制限や細胞のフラッシュアウトを避けるため、クロロフィル蛍光や栄養塩濃度をモニタリングしつつ、希釈率Dを0.1~0.75 day^{-1} の範囲で調整した。毎日の比増殖速度 μ は安定期データを用いて評価し、スカラーPARとの関係を定量的に解析した。

光量応答関数には、Lederman and Tett型の光量飽和関数や強光阻害を考慮した Peeters and Eilers 型の関数を参考にして、補償光量 I_0 を含む光量飽和型や、至適光量 I_{opt} を超える領域での強光阻害を表現する関数を統合した新たな関数を考案・採用した。この関数は、暗条件では $\mu \approx 0$ 、至適光量で最大化、阻害効果を引き起こす強光下では増殖抑制を緩やかに反映する構造を持つ。

この構造により、浅海域の強光条件から深層の低光量までを一式で表現可能とし、広湾における実態を再現しやすくなると考えられた。関数のパラメータ推定には Origin 2024b を使い、*P. dentatum* に加え、既にベースモデルに実装されている *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex 及び *Eucampia zodiacus* に対しても、同一関数形式を適用して再評価を行った。

1. 4. 1. 2. 6. 植物プランクトンデータベースの補完（高温に対する増殖応答）（目標②）

光量応答実験の終了後、*P. dentatum* の高温環境に対する増殖応答を明らかにするため、2023年6月中旬から8月中旬にかけて培養実験を実施した。初期条件はスカラーPAR 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、水温20℃、明暗周期12h:12h、栄養塩非制限とし、水温を25~33℃の範囲で6段階に設定した。水温以外の条件は一定に保ち、フラッシュアウトや栄養塩制限を避けるため、希釈率 D を0.1~0.8 day^{-1} で調整しながら安定培養を行った。

水温応答のモデルについては、種特異的な応答を表現するために、Norberg (2004) による関数を採用した。この関数は、 μ が至適水温 z で最大となり、温度ニッチ幅 w に応じて左右対称あるいは非対称に減衰する応答を表現できる構造を持つ（式8）。

$$\mu = \left[1 - \left(\frac{T - z}{\frac{w}{2}} \right)^2 \right] \cdot ae^{bT} \quad \text{式 8}$$

ここで、本式の各変数及びパラメータは次のとおりである：

- ・ T : 水温 (°C)
- ・ z : μ が最大となる至適水温 (°C)
- ・ w : ニッチ（生息可能な）温度幅 (°C)
- ・ a, b : 回帰パラメータ、かつ $\mu_{\text{max}} \approx ae^{bT}$

本研究では、この関数を *P. dentatum* に適用して水温応答特性を整理したほか、影響評価モデルに組み込まれている *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex 及び *Eucampia zodiacus* についても同様に再評価を行い、分類群間で比較可能な関数体系を構築した。

1. 4. 1. 2. 7. 植物プランクトンデータベースの拡張（特定海域における重要種の抽出）（目標②）

生態系モデルでは、すべての植物プランクトン種を実装することは現実的でなく、増殖応答や生態特性が類似する種を代表群として分類・整理する必要がある。本研究のベースとなる海域モデルでも同様の枠組みが用いられてきたが、広湾のような特定海域では、現地の群集構成との適合性を見直す必要がある。このため、2022年7月から2024年6月にかけて、広湾の定点2か所にて月1回の植物プランクトン調査を実施し、固定・沈殿・濃縮した表層水試料を光学顕微鏡により分類同定・計数した。分類・計数作業は一部を外注し、出現頻度・細胞濃度・サイズに基づいて解析対象種を絞り込んだ。

各種の細胞濃度に対し、細胞体積 (Hillebrand et al., 1999 に準拠) を乗じて算出した細胞体積濃度を指標とし、生物量としての多寡の観点から重要種を抽出した。なお、全ての出現種の細胞体積を算定することは困難であったので、出現頻度が高い、細胞濃度が高い、または細胞サイズが大きい種を優先的に評価対象とした。

抽出種については文献調査を行い、増殖特性や環境応答に関する知見を整理し、既存モデル分類群での対応可否を検討した。結果として、必要に応じて新たな導入候補種の抽出を行い、植物プランクトンデータベースの拡張につなげた。

1. 4. 1. 2. 8. 影響評価モデルのパラメータ自動最適化技術の開発（目標③）

水質・底質モデルの多数のパラメータを自動最適化する技術の開発に向けて、まずは簡易NP（栄養塩-植物プランクトン）時系列モデルを用いた双子実験を実施し、影響評価モデルに適した学習アルゴリズムを選定するための基礎的検討を行った。その検討結果をもとに、植物プランクトン3種の比死亡速度と沈降速度、デトリタス態及び溶存有機態の比分解速度と沈降速度の合計9つのパラメータを選択的に調整可能なパラメ

ータ自動最適化プログラムを海域流動・水質・底質モデルに組み込み、水平格子21×21個、鉛直16層の小規模な仮想空間において双子実験を行った。

さらに、広湾におけるサブテーマ1の観測値を用いて、現場海域における実証試験を実施した。当初の計画では、開発したパラメータ自動最適化機能を活用して、モデルの再現性を確保するために真に必要なモニタリングデータ（頻度・測定数・項目など）を検討する予定であったが、現場海域の実証試験においてパラメータ自動最適化がうまく機能しなかった。その原因が膨大な計算量を削減するために用いた仮定にあると考えられ、それを前提として組込んだプログラムコードの根幹に関わるものであったため、研究実施期間内における開発完了は困難と判断され、以降の研究を断念した。

1. 4. 2. 研究結果及び考察

1. 4. 2. 1. モニタリング技術開発（サブテーマ1）

1. 4. 2. 1. 1. フィージビリティ評価手法の開発（目標①）

【淡水（陸域負荷）及び海水の混合率の推定】

塩分に基づいて、検証地点における周辺海水及び淡水（陸域負荷）の混合率を計算したところ、2023年5月～2024年6月までの6回の測定で、検証地点における海水の混合率は平均的に98.75%となり、量的には海水の影響を強く受けていることが明らかとなった。

【トレーサの選定】

下水処理場からの放流水中の濃度が高いと推定された人工甘味料としてアセスルファム、サッカリン、スクラロース、アスパルテムを分析した。4種の中ではスクラロースが高濃度で検出されたが、A工場や海域において定量下限となるケースが認められ、EMMA解析で使用するトレーサーとしては不適であった。

8種の金属やホウ素はいずれの負荷源でも検出されたため、トレーサー候補として8種の金属とホウ素を分析することとした。Cu、Fe、Pbについて、各月で最も高濃度となる負荷源に特定の傾向は認められなかった。また、Znは例外的に高濃度で検出された月があったが原因はわからない。そこで、残りの6種の候補について、各地点での検出状況を検討した。その結果、Alのみ地点6付近で高くなる傾向が認められた。この傾向は2024年6月以外の月でも認められたため、Alは除外し、残りのBa、Mn、Ni、B濃度の4物質を用いて、主成分分析を行った。その結果、第1主成分の寄与率は平均64.2%、第2主成分の寄与率は平均27.3%、両主成分合計で平均91.5%と高い寄与率であり、第1主成分と第2主成分でほぼデータの変動を説明できる結果となった。そこで得られた第1と第2主成分を用いて、EMMAを行った。

【各陸域負荷源の混合率の推定】

第1、第2主成分を座標軸とした各起源水（エンドメンバー）によるミキシングダイアグラムを示す（図7）。検証地点の平均値は広浄化センター、A工場、黒瀬川で囲まれる三角形の内側にあり、検証地点への陸域負荷は、これら3つのエンドメンバーによって説明できることが示された。なお、各月によって検証地点に近接するエンドメンバーは異なっており、影響の大きいエンドメンバーは時期によって変化することが示された。一方で、評価に用いた物質濃度は非常に小さく、この分析誤差が結果に影響を及ぼした可能性は否定できない。

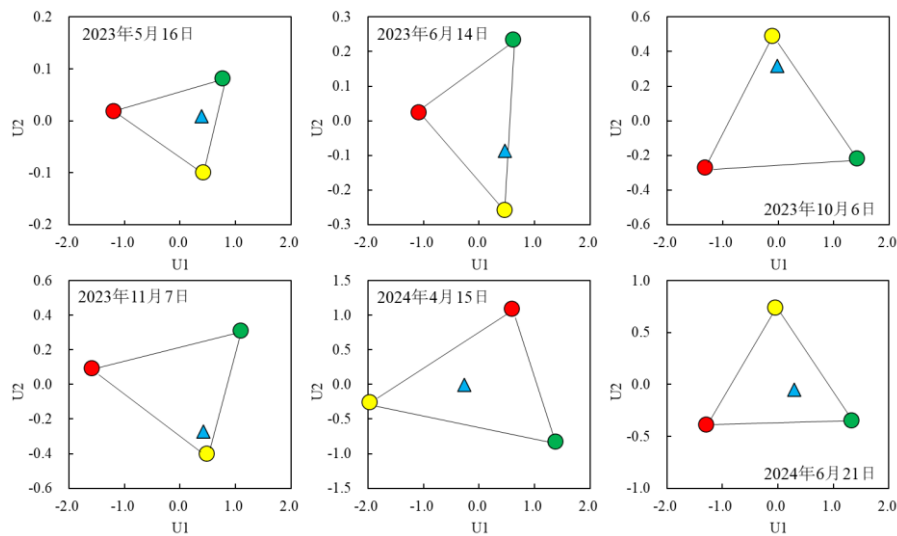


図7 ミキシングダイアグラム（▲，検証地点；●，広浄化センター放流水；●，A工場放流水；●，黒瀬川河川水）

ミキシングダイアグラム（図7）に基づき、調査地点に対する陸域負荷源の中での混合率を評価した（表1）。各陸域負荷源の混合率は調査月により異なったが、全体的にはA工場放流水の混合率が大きく（ $54.2 \pm 20.0\%$ ）、次いで黒瀬川河川水（ $27.1 \pm 11.6\%$ ）、広浄化センター放流水（ $15.0 \pm 9.6\%$ ）となった。

図8に調査地点に対する広浄化センター、A工場、黒瀬川の混合率[%]を示す。陸域負荷（淡水）全体の混合率は最大でも2.7%であるため、わかりやすいように本図の縦軸の最小値は97%とした。月によって各陸域負荷源の混合率は異なったが、黒瀬川の流量が広浄化センターとA工場の流量の合計の7倍を超えた2024年6月では黒瀬川の混合率が最も大きかった。また、6回の調査における広浄化センター、A工場、黒瀬川の平均的な混合率は0.19%、0.60%、0.45%であった。

表 1 検証地点への陸域負荷に対する広浄化センター、A工場、黒瀬川の混合率 [%]

	広浄化センター	A工場	黒瀬川
2023年5月16日	13.3	35.5	28.7
2023年6月14日	3.7	63.5	32.8
2023年10月6日	10.3	76.2	13.5
2023年11月7日	7.1	79.8	13.1
2024年4月15日	30.5	41.8	27.7
2024年6月21日	24.8	28.5	46.7
平均	15.0	54.2	27.1

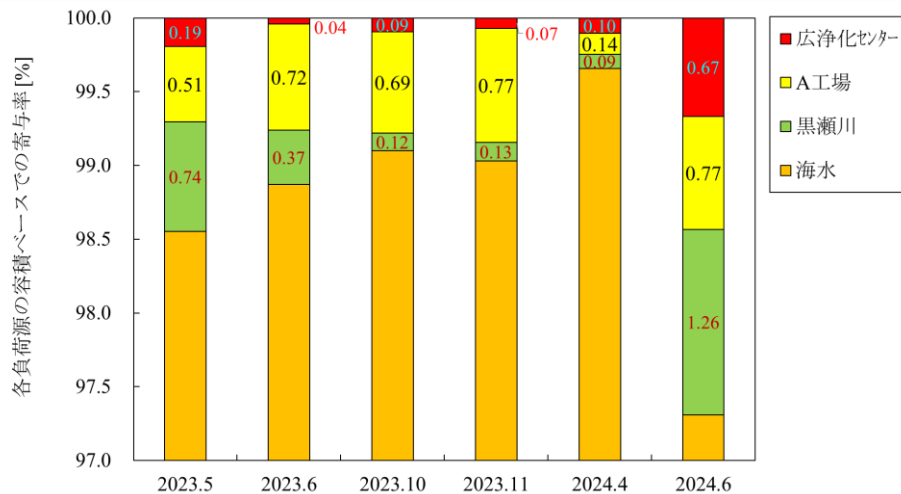


図 8 PCA-EMMA を用いて各陸域負荷源の容積ベースでの混合率

【広浄化センターによる季節別管理運転の効果の推定】

算出した混合率を検証するため、各負荷源の混合率及び全窒素濃度のデータから検証地点におけるTN濃度を推定し、実測したTN濃度と比較した（図 9）。検証地点の推定TN濃度は、それぞれの調査日における各負荷源のTN濃度に混合率を乗じて総和して求めた。その結果、推定値/実測値は0.63～1.03とやや過小評価が多かったが良好な結果であった。また、図 9（再掲）に推定値と実測値の関係を示すが、相関線の傾きは1.0となることが理想であるが、1.08と許容できるレベルであり、高い決定係数（0.94）を示し、混合率の計算結果は妥当であることが示された。図 8に示した広浄化センター放流水の混合率の平均値は0.19%と極めて低い値ではあったが、この値は、季節別管理運転により、TN濃度が10 mg/L増加した場合、検証地点のTN濃度を0.019 mg/L増加させることを示した。これは、検証地点の現状TN濃度（表 1）の約1割である。

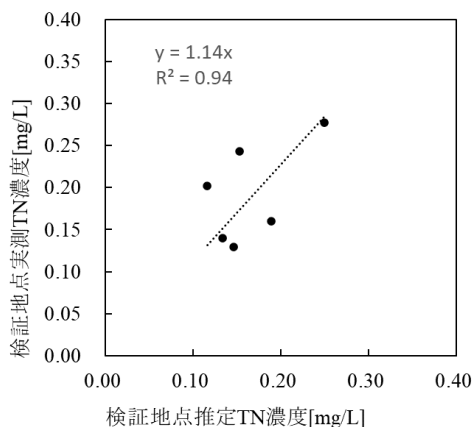


図 9 混合率から推定した検証地点のTN濃度と実測値との比較

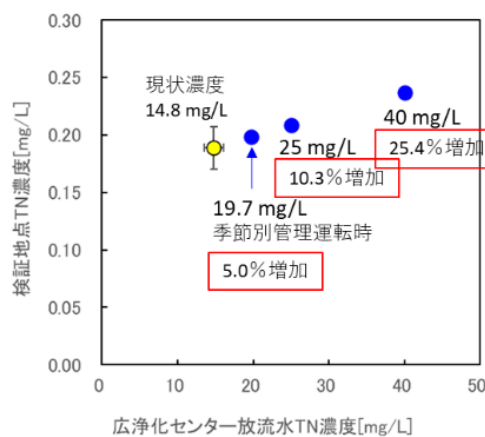


図 10 広浄化センター放流水TN濃度を高めた場合の検証地点TN濃度の予測

【広浄化センター放流水のTN濃度を高めた場合の効果の予測】

平均的な広浄化センター放流水の検証地点における混合率は0.19%であることがわかったので、この値

を使って、広浄化センター放流水のTN濃度を2022年10月から2023年3月までの平均濃度0.189 mg/Lから、季節別管理運転により放流水TN濃度をC値である25 mg-N/L、広島県で実証試験に限り認められた40 mg/Lに高めた場合のフィジビリティ評価を行った。その結果を図 10に示すが、検証地点のTN濃度は、0.189 mg/Lからそれぞれ0.208 mg/L、0.237 mg/Lに上昇することが示された。

1. 4. 2. 1. 2. 水質モニタリング技術開発（目標②）

【空間解像度の高い水質モニタリング】

図 11に、春季（2023年5月）の水質調査で得られた広湾奥部海域における水質の水平分布を一例として示す。奥部海域における定点は11地点あるが、これだけでも通常実施されるモニタリング調査としては空間解像度が十分に高く、黒瀬川河口部で水温が低く図 11 (a)、湾南西部でChl. *a* 濃度が高い傾向にあることは把握できる図 11 (e)。一方で、曳航調査では定点調査に比べ約25倍のデータ量であり、黒瀬川河口部、放流口付近の内湾、及び湾東側に低水温の水塊があることがわかった図 11 (b)。また、低塩分水（塩分28.5）が黒瀬川河口部からやや離れた阿賀マリノ緑地北側に局所的に存在し図 11 (d)、その水塊では水温（最大19.7℃）やChl. *a* 濃度（最大9.3 µg/L）が高い傾向であり、水塊構造を詳細に把握できた。

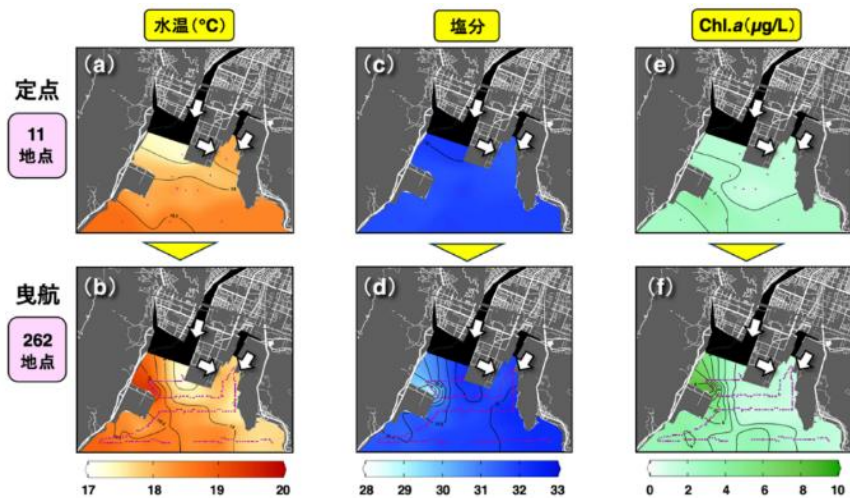


図 11 広湾奥部海域における春季の表層 (a, b) 水温、(c, d) 塩分、及び (e, f) Chl. *a* 濃度の水平分布 (上段) 定点調査 (下段) 曳航調査

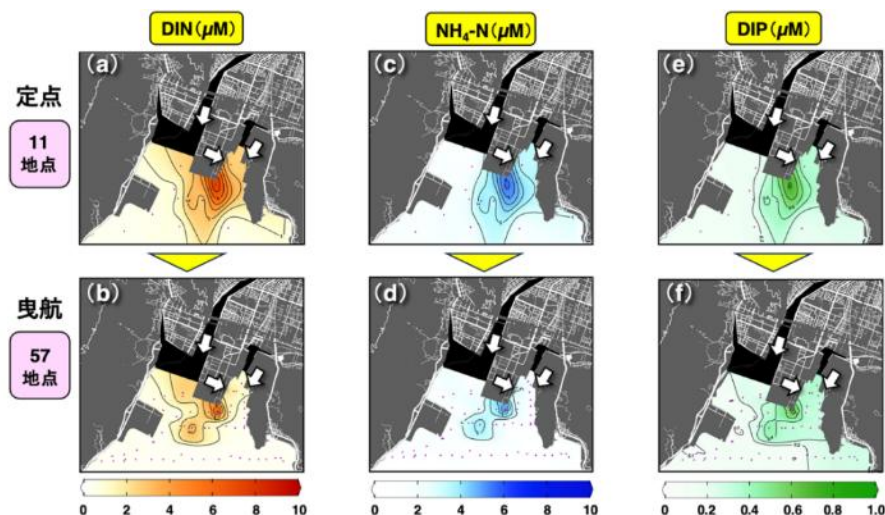


図 12 春季の表層栄養塩 ((a, b) DIN、(c, d) NH₄-N、(e, f) DIP) 濃度の水平分布 (上段) 定点調査 (下段) 曳航調査

定点調査及び曳航調査により採取した表層水の栄養塩濃度分析結果を図 12に示す。今回の曳航調査での採水地点数は50地点程度である。栄養塩濃度分布に関しても、曳航調査により当日の高濃度水塊の分布は局所的であることがわかり、季節別管理運転の効果検証において重要な沿岸部での下水処理場放流水の動態を明らかにできる可能性が示された。また、曳航調査による表層水質分布の明確化はその他の季節でも同様の傾向であった。曳航調査では、一定の曳航速度で航行する船中での採水なので、採水地点を増やしても調査時

間は変化しない。一方で分析試料数は当然増えるが、栄養塩類は自治体ではオートアナライザーで分析することが一般的なので、こちらもそれほど労力が増えるわけではないが、試薬費は試料数に応じて増加する。

【時間解像度の向上のための係留観測】

付着生物の影響によりデータが取得できない期間が度々生じたが、豆筏に係留した水質センサーの全係留期間（2023年3月～2024年4月）における10分間隔のデータ量は、水温、Chl. *a*濃度、濁度センサーでは43,140データ、塩分、pHセンサーの方では22,959データとなり、同期間のStn 5の定点調査データ（水温センサー12データ、塩分センサー8データ）と比べると3,000倍程度のデータ量を取得できた（図 13）。有意な相関関係は得られていないが、塩分と濁度の関係から淡水流入による濁度の増加の傾向が見られ（図 13a）、塩分とChl. *a*濃度の関係から河川由来の植物プランクトンのChl. *a*濃度は4～8 $\mu\text{g/L}$ であることが考えられた（図 13b）。一方、塩分28～33程度の水塊においても濁度が20以上、Chl. *a*濃度が10 $\mu\text{g/L}$ 以上となる場合もあり、これは湾内で増殖した植物プランクトンによるものであると考えられた。水温とChl. *a*濃度の関係から、一般的な赤潮レベルである10 $\mu\text{g/L}$ を指標にすると、広湾の赤潮は約17℃以上で起こることが示唆された（図 13c）。このように、月1回程度の頻度の調査では捉えることができないイベントデータも取れることがわかった。

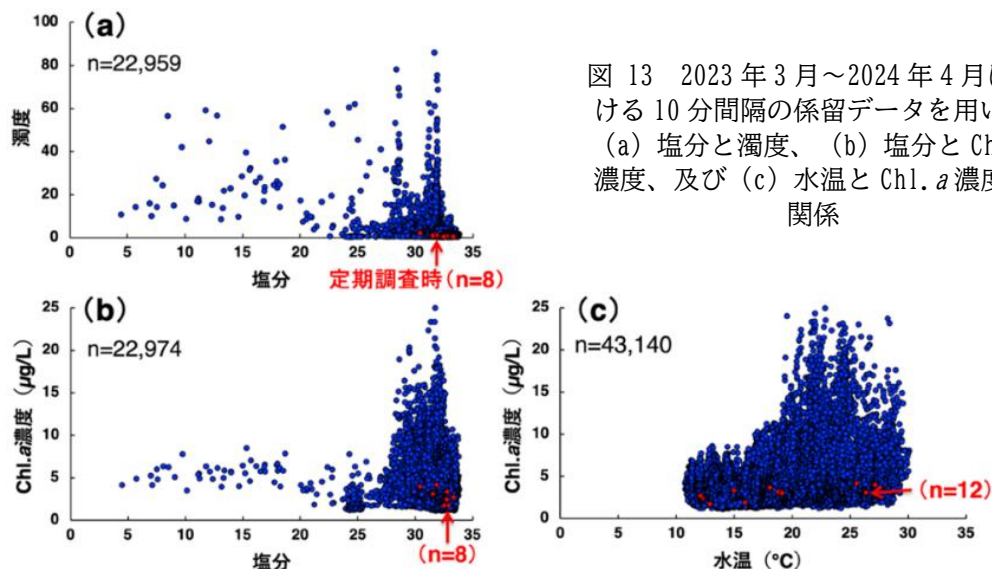


図 13 2023年3月～2024年4月における10分間隔の係留データを用いた (a) 塩分と濁度、(b) 塩分とChl. *a*濃度、及び(c) 水温とChl. *a*濃度の関係

【時間解像度の向上のためのパッシブモニタリング法の開発】

上記の結果より、浄化センターからの放流水のモニタリングにおいては特に $\text{NH}_4\text{-N}$ が重要であることが示唆されたため、海域のセンサー係留調査に用いることができる新たな手法を開発することとした。回収液の塩酸濃度や回収液量を変えた検討より、塩酸濃度は0.5 mM～50 mM、回収液量は100 mL～500 mLが適当であることを見出した。また、ガス透過膜の選定においては、4週間のパッシブサンプラー浸漬実験を行い、回収液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度及び電気伝導度（EC）の測定結果から、Durapore膜では塩類をあまり透過させず、 NH_3 を選択的に透過させることがわかった。

Durapore膜を用いて銅メッシュによる付着生物の防除対策について検証した。銅メッシュを用いることの副次効果として、アンモニアの透過性がやや減少したが、回収液中の電気伝導度は大幅に低減された。銅メッシュを用いた場合、膜に青色の付着物が観察され、電子顕微鏡観察と成分分析を行ったところDurapore膜の上に酸化銅の膜が形成されていたことがわかった。そのため、銅メッシュの使用は付着生物の防除対策としてだけでなく、塩類の透過の低減対策としても有効であることが示された。

海水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度（ NH_3 として存在する窒素も含む）を推定するために、回収液へのアンモニア透過速度と外液濃度の関係を評価した（図 14）。回収液量200 mLで銅メッシュ及びDurapore膜を用いたパッシブサンプラーを、異なる $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度とした模擬海水（外液）に浸漬する室内実験を約1ヶ月間行った。浸漬日数の経過に伴いDurapore膜表

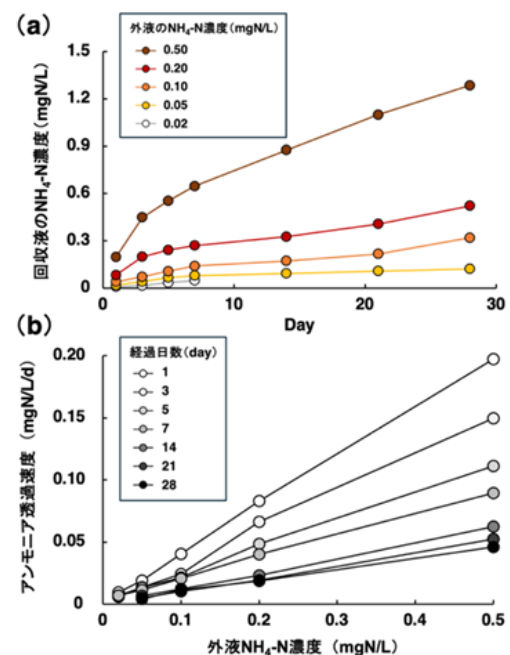


図 14 パッシブサンプラーにおける (a) 回収液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の時間変化及び (b) アンモニア透過速度と外液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の関係

面に酸化銅が形成され、アンモニア透過速度は徐々に低下したが、この関係性から海水中のアンモニア濃度を推定することが可能であることがわかり、本パッシブサンプラーは7日程度使用可能と考えられた。

次にアンモニウムセンサーを用いた検討を行った。アンモニアセンサーを取り付けたパッシブサンプラーを用いて、現場海水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度変化を想定した室内実験を行った。約1週間の実験を4回行い、それぞれ期間平均濃度は現場海域にあわせ0.1~0.3 mgN/Lとなるように幅を持たせ、濃度の上下変動パターンについてもそれぞれ異なるように設定した。実験により得られたアンモニアセンサーの応答値を透過速度の関係式を用いて外液濃度を推定した。図 15にセンサーを用いたパッシブサンプラーにより推定された外液の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と実際の濃度との関係を示す。外液の実測値と推定値は概ね一致しており ($r^2 = 0.92$)、外液濃度の変化を追うことが可能であることがわかった。以上のことから、ガス透過膜を用いたパッシブサンプリング法に、アンモニアセンサーを組み合わせることで海水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度変化を連続モニタリングできる新たな手法が開発できた。

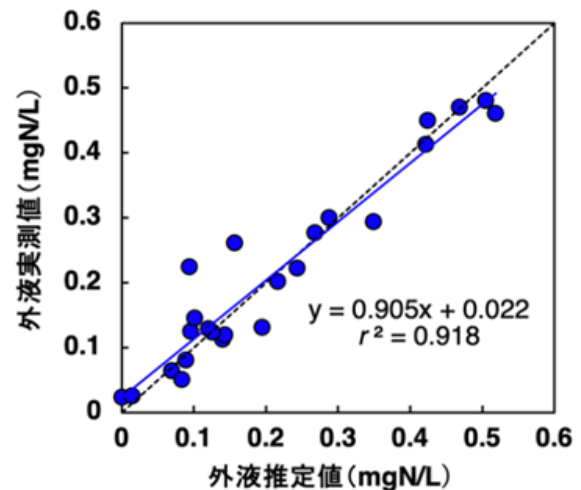


図 15 センサーを用いたパッシブサンプラーにより推定された外液の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と実際の濃度との関係（波線は1:1）

【季節別管理運転による湾の水質の変化】

浄化センター放流水中のCOD及び栄養塩類（TN、TP）濃度の季節変化について、季節別管理運転前（2018～2022年度）及び季節別管理運転実施（2023年度）の年で比較を行なった（図 16）。比較対象は2018年4月～2022年3月までの5年間の月平均値である。季節別管理運転を行う前の5年間の月平均値を元に年平均値を求めるとCOD濃度は10.3 mg/Lであった。季節別管理運転を行った2023年10月から2024年3月のCOD濃度は季節別管理運転前5年間の同月比では平均1.02倍に増加したがほとんど変化がみられなかった（図 16a）。季節別管理運転を行う前の5年間の月平均値を元に年平均値を求めるとTN濃度は14.8 mgN/L、TP濃度は0.54 mgP/Lであり、TN濃度では過去5年間はC値（25 mgN/L）の6割程度で運転されていたことがわかった。季節別管理運転を行った2023年10月から2024年3月のTN濃度は、季節別管理運転前5年間の同月比では平均1.33倍に増加した（図 16b）。一方で、TP濃度は季節別管理運転前よりも平均1.73倍に増加した（図 16c）。

放流水中の無機栄養塩濃度については、季節別管理運転前の定常時となる2022年度で見ると、浄化センターのDIN濃度はA工場や黒瀬川に比べてそれぞれ10倍及び3倍程度高く、DIPについても浄化センターの濃度はそれぞれ280倍及び14倍高かった。3つの起源水のDIN/DIP比の年平均値については、浄化センターでは66、A工場では910、黒瀬川では430でありレッドフィールド比の16より大きく、窒素制限である広湾において窒素が非常に多く供給されていることがわかった。季節別管理運転が実施された秋季及び冬季（10月～翌年3月）においては、浄化センターにおいては顕著な差が変化が見られ、2022年度に比べ2023年度では栄養塩濃度が大きく増加し、それぞれ2倍程度が増加していた。

放流口から湾口部にかけて、水温及び塩分の鉛直分布を見ると年間を通して放流口付近の内湾では密度躍層が発達していたことがわかった。そこで、放流口付近の内湾における栄養塩類のマスバランス評価を行なった結果、DIN及びDIPともに、期間中に浄化センター、A工場、及び底質より供給された栄養塩類の大部分（88～98%）が放流口付近内湾の外へ流出していることがわかった。

放流口付近の内湾よりもさらに外側の広湾全体へどのように栄養塩が拡散し、栄養塩濃度が変化したのか

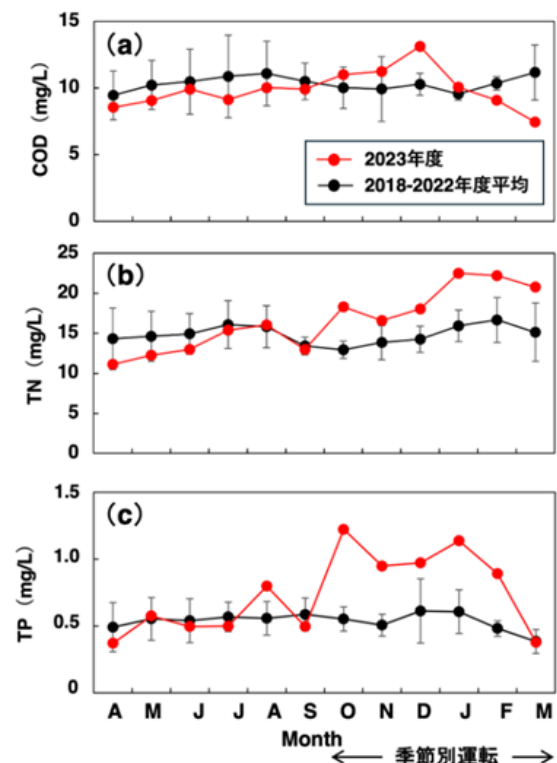


図 16 浄化センター放流水中の (a) COD 濃度、(b) TN 濃度、及び (c) TP 濃度の季節変化

を明らかにするために、図 17及び図 18に季節別管理運転前後における秋季及び冬季（10～3月）の表層水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度及び $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度/DIN濃度の比率の水平分布を示す。2022年度の分布より、表層水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は放流口付近の内湾において高い傾向にあるため河川水の寄与は低いと考えられ、浄化センターから放出された高濃度の $\text{NH}_4\text{-N}$ を含む水が広湾全体へ拡散していることがわかった（図 17）。拡散方向は定まっていないが、内湾から南西方向のカキ筏の多い場所で比較的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の高い水が存在した。2023年度の季節別運転期間においては、放流口付近の内湾の濃度が大きく上昇し、Stn 1において2024年3月に最高値となる47 μM を観測した。広湾全体の16の調査地点で平均すると、2022年度では期間平均濃度が0.9 μM であったが、2023年度では2.6 μM に上昇し、約3倍となった。DIN濃度については、黒瀬川河口部もしくは放流口付近の内湾のどちらかで最大値となり湾口部に向けて低下しており、これは河川中に高濃度に含まれる $\text{NO}_{2+3}\text{-N}$ が影響していると考えられた。広湾全体で平均すると、2022年度では期間平均濃度が5.2 μM であったが、2023年度では7.7 μM に上昇しており、黒瀬川流入水については両年度で流量やDIN濃度に明確な違いがなかったため、湾の濃度上昇は主に季節別運転による $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の上昇によるものであると考えられた。表層水の $\text{NH}_4\text{-N}$ /DIN比については、両年度において1月に湾平均値が最も高くなる傾向がみられたが、すべての調査日において2022年度よりも2023年度の方が高く、期間平均では2022年度で0.14、2023年度では0.29となり、約2倍上昇した（図 18）。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は湾奥部で高い傾向にあったが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ /DIN比は湾口部（Stn e）を除き湾全体で高い傾向となった。DIPについては、DIN同様に黒瀬川河口部もしくは放流口付近の内湾のどちらかで最大値となり分布は類似したが、期間平均濃度は両年代で明確な違いがなかった。これらのことから、季節別運転期間において広湾表層に存在したDINにおける $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合は顕著に増加しており、季節別管理運転に伴う広湾への $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給の寄与が大きいことが示された。

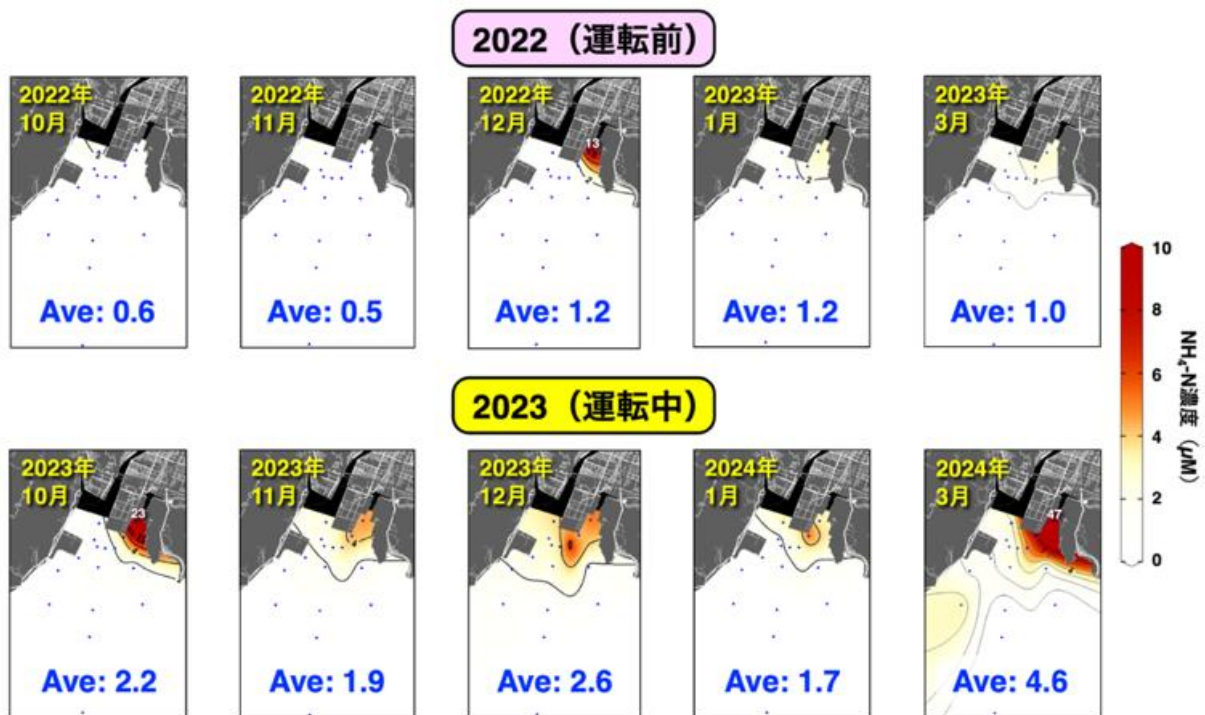


図 17 秋季及び冬季（10～3月）における表層 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の水平分布
（上段）季節別管理運転前（下段）季節別管理運転中

本研究で対象とした浄化センターの季節別管理運転では曝気量を減らす硝化抑制運転が実施されたが、有機汚濁物質の分解性が低下し、その結果として放流水中のCOD濃度が高くなることが懸念されていた。浄化センター放流水中のCOD濃度の季節変化の結果からは、季節別管理運転期間中においても平均的には例年のCOD濃度からの明確な増加は確認されなかったが、10月から12月は例年より高い傾向であることがわかっている（図 16a）。水質汚濁に係る環境基準のうち、生活環境の保全に関する環境基準として海域のCOD濃度が定められており、項目類型C環境保全では基準が8 mg/L以下とされている。季節別管理運転期間中の2024年3月にStn 1において比較的高い値（6.1 mg/L）を検出したが、本研究のすべての調査期間で8 mg/Lを超える濃度は検出されなかった。湾平均値としては、2022年度に比べ2023年度の濃度が高かった月は10月及び1月であるが、濃度差は0.1～0.2 mg/Lと小さく、季節別運転に伴う海域COD濃度の大幅な上昇は見られなかった。

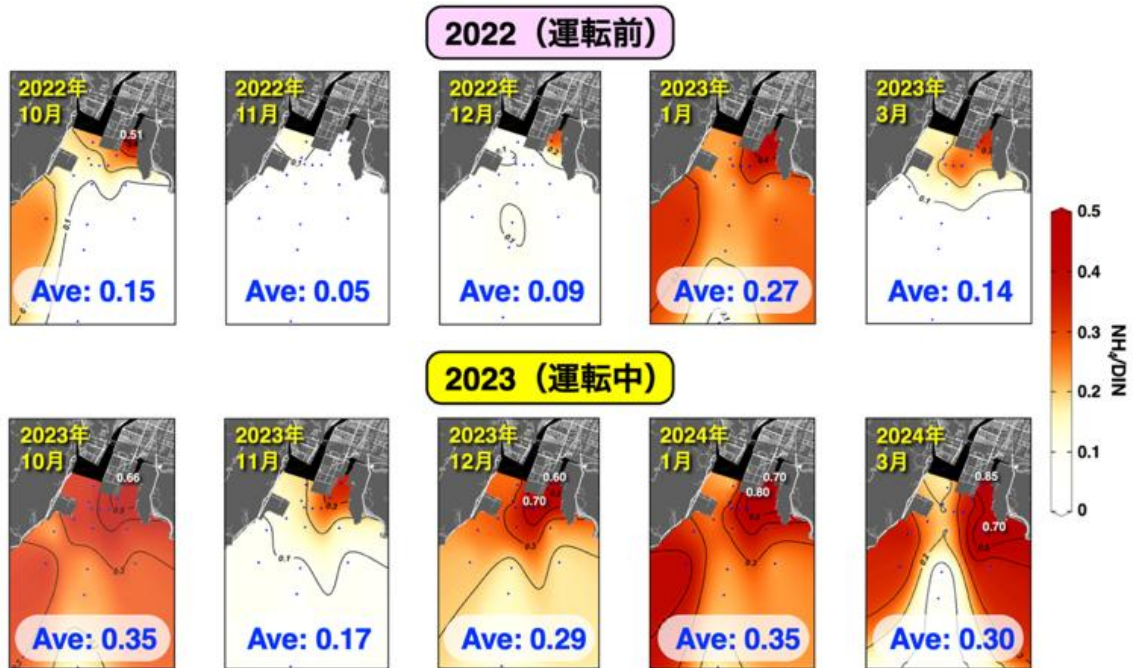


図 18 秋季及び冬季（10～3 月）における表層 $\text{NH}_4\text{-N/DIN}$ 比の水平分布（上段）季節別管理運転前（下段）季節別管理運転中

【空間解像度と時間分解能の向上のためのドローンによるモニタリング】

マッチアップできた採水と空撮地点は 6 地点であった。実測値と光学指標との間に最も高い相関関係（決定係数 $R^2=0.9121$ ）が認められた NGRDI 散布図（図 19）を示す。次に、ロボセン現場計測によって広湾の沖合域（阿賀マリノ周辺）から黒瀬川河口域と処理放流口付近までの CDOM 濃度を測定した。沖合では CDOM 濃度が低く、河口域や放流域では高濃度の分布が捉えられた。得られた CDOM 濃度を空撮画像から推定する手法について検討した。各計測点に対応した空撮画像解析から得られた光学指標（ $B/(R+G+B)$ ：便宜上 BRGB と呼称）と実測 CDOM 濃度に良好な相関関係（ $\text{CDOM} = 241.27 \times \text{BRGB} - 56.995$ ）が得られた（図 20）。

作成された $\text{Chl. } a$ 濃度と CDOM 濃度の推定式を用いて空撮画像から作成した各濃度の広域マップの一例を図 21 図 21 空撮画像から推定した広域 $\text{Chl. } a$ 濃度（左）と広域 CDOM 濃度のマップ（右）に示す。 $\text{Chl. } a$ 濃度は $1 \sim 10 \mu\text{g/L}$ の範囲であり、赤潮のような極端な高濃度は確認されなかったものの、撮影時期により $\text{Chl. } a$ に濃度差が認められ、2 月が高く、10 月が低い傾向を示した。また、河口域においては $\text{Chl. } a$ 濃度が沖合よりも高くなっていることが分かる（2/13、3/27、10/8）。このように、空撮画像からサブサンプリングされたデータセットを作成することで、画像結像アプリケーションを使わず計算コストを抑えて、 $\text{Chl. } a$ 濃度マッピングが可能であることが示唆された。一方、CDOM 濃度のマップからは黒瀬川河口からやや東寄りの沖合にかけて高濃度 CDOM 域が形成されているのが確認できる。これらの水塊は放流口からの出水と合流して形成された可能性がある。例えば、11/16 においては放流口付近でも高濃度 CDOM 域が形成されており、この水塊は黒瀬川河口域でみられる高濃度 CDOM 域よりも濃度が高い。黒瀬川からの河川出水分布について 11/16 の方が南西寄

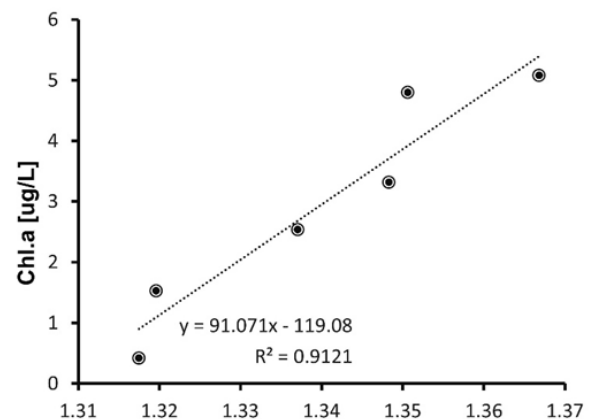


図 19 $\text{Chl. } a$ 濃度（実測値）と空撮画像解析による光学指標 NGRDI の散布図

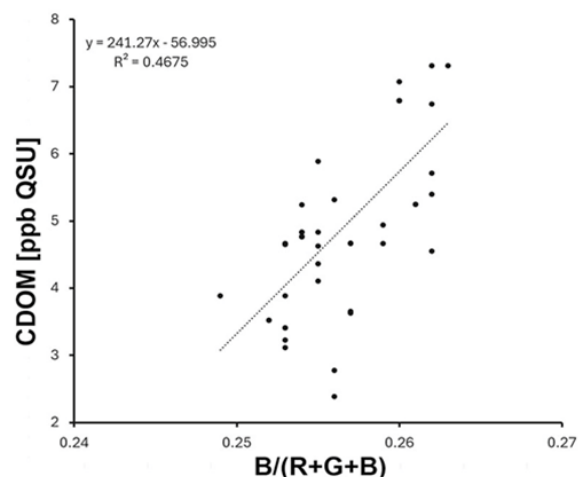


図 20 実測 CDOM 濃度（蛍光センサー）と空撮画像解析による光学指標 BRGB の散布図

り分布であり、相対的に放流口付近の高濃度域が強調されたと考えられる。また黒瀬川河口から左岸の沿岸においてもやや高いCDOM濃度域の分布がみてとれた。このようにドローン空撮からも、下水処理放流水に高濃度で含まれる難分解性のCDOMは、放流水をモニタリングするための良好なトレーサーとして有効であることが示唆された。

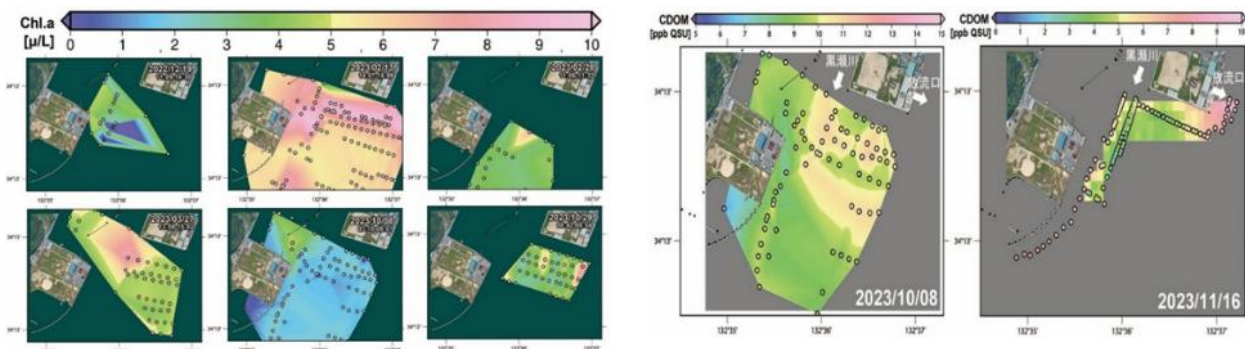


図 21 空撮画像から推定した広域 Chl. a 濃度（左）と広域 CDOM 濃度のマップ（右）

1. 1. 4. 3. 動物プランクトンのモニタリング技術開発（目標③）

【3種のDNA領域での網羅性の評価】

広湾における顕微鏡観察によって同定・計数され、その体長から計算されたバイオマス（重量）とDNA解析で使用した3領域で検出された種を表 2示す。広湾で検出されたカイアシ類の内、重量ベースで多かった種は、*Microsetella norvegica* (45.5%)、*Oithona davisae* (16.5%)、*Paracalanus parvus* (7.7%) であった。DNA分析で検出されたカイアシ類は使用するDNA領域によって異なり、種網羅性が高い領域は、COI/Leray-XTで9種であった。一方で、検出数は少なかったが、重量割合が最も高い*Microsetella norvegica*を唯一検出できたのは18S rRNA/Hiraiであった。単一のDNA領域では、種数割合では、9.8%～29.0%、重量割合では16.2%～54.2%となった。以上のように、検出種数及びバイオマスの網羅性という視点では、単一のDNA領域では十分ではないことがわかった。一方で、3領域を合計することで、種数割合として45.2%、重量割合として73.2%を網羅できることがわかった。種数割合としては、網羅率はそれほど高くなかったものの、重量割合の高い上位12種中9種を網羅できた。

表 2 広湾におけるカイアシ類の重量割合とDNA解析によって検出された種の一覧

種	重量割合	COI/Leray-XT	COI/Zplank	18S rRNA/Hirai	
<i>Microsetella norvegica</i>	45.5			45.5	45.5
<i>Oithona davisae</i>	16.5				
<i>Paracalanus parvus</i>	7.7	7.7	7.7		7.7
<i>Acartia omorii</i>	6.0			6.0	6.0
<i>Ditrichocorycaeus affinis</i>	5.2				
<i>Acartia pacifica</i>	4.4	4.4			4.4
<i>Acartia sinjiensis</i>	3.7				
<i>Calanus sinicus</i>	2.9		2.9		2.9
<i>Oithona similis</i>	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
<i>Acartia erythraea</i>	1.2		1.2		1.2
<i>Tortanus forcipatus</i>	1.0	1.0	1.0		1.0
<i>Parvocalanus crassirostris</i>	0.9	0.9			0.9
<i>Centropages abdominalis</i>	0.3	0.3	0.3		0.3
<i>Canthocalanus pauper</i>	0.3		0.3		0.3
<i>Tortanus gracilis</i>	0.3				
<i>Centropages tenuiremis</i>	0.2	0.2			0.2
<i>Hemicyclops japonicus</i>	0.2				
<i>Oncaea waldemari</i>	0.2				
<i>Euterpina acutifrons</i>	0.2				
<i>Candacia tuberculata</i>	0.2				
<i>Calanopia elliptica</i>	0.1				
<i>Acartia danae</i>	0.1				
<i>Oithona brevicornis</i>	0.1				
<i>Oithona attenuata</i>	0.0				
<i>Oithona nana</i>	0.0				
<i>Clausocalanus furcatus</i>	0.0				
<i>Oithona simplex</i>	0.0	0.0			0.0
<i>Temora turbinata</i>	0.0	0.0			0.0
<i>Hemicyclops gomsoensis</i>	0.0				
<i>Clytemnestra rostrata</i>	0.0				
<i>Oncaea scottodicaloi</i>	0.0				
合 計	100.0	17.3	16.2	54.2	73.2

【定量化の検討結果】

広湾に出現し、DNA分析で検出可能であった重量ベースで上位6種のカイアシ類 (*Microsetella norvegica*, *Paracalanus parvus*, *Acartia omorii*, *Acartia pacifica*, *Calanus sinicus*, *Oithona similis*) について、定量化を試みた。内部標準の結果に基づき、シーケンスで得られたそれぞれの種のDNA読み取りカウント数を補正した補正カウント数（以下、標準補正DNA量）と検鏡によって推定したバイオマス（mgC）との関係を図22に示す。*Acartia pacifica*を除いては、いずれかのDNA領域で有意な相関（ $P < 0.05$ ）を示した。

以上の結果は、本来定性的な分析方法であるDNAメタバーコーディングにおいても、内部標準を加えて得られたDNA読み取りカウント数を標準化することによって、定量的なモニタリングに利用できることを示している。DNAメタバーコーディング技術を用いた定量モニタリングの手法に関しては以下の手順となる。

- ① 特定海域の複数の場所、地点等から動物プランクトンの構成が異なる試料を採取する（統計的な優位性を得るためには本研究の30試料程度が目安になる）。
- ② 試料について、検鏡によるバイオマス推定と内部標準を加えたDNAメタバーコーディングを実施する。
- ③ 汎用的に出現した種毎に、DNAメタバーコーディングから得られた標準補正DNA量から検鏡によって推定したバイオマスを求める検量線を作成する。
- ④ 各種の検量線作成後は、内部標準を加えたDNAメタバーコーディングのみの結果から、検量線を使ってバイオマスを推定する。

なお、汎用的には出現しない種についても、試料数を増やして、その種が出現した試料数が増えれば信頼性が高い検量線を作成することが可能である。同一試料中には、多くの種の動物プランクトンが出現するので、汎用的に出現する種に関しては同時に検量線を作成できるという利点がある。

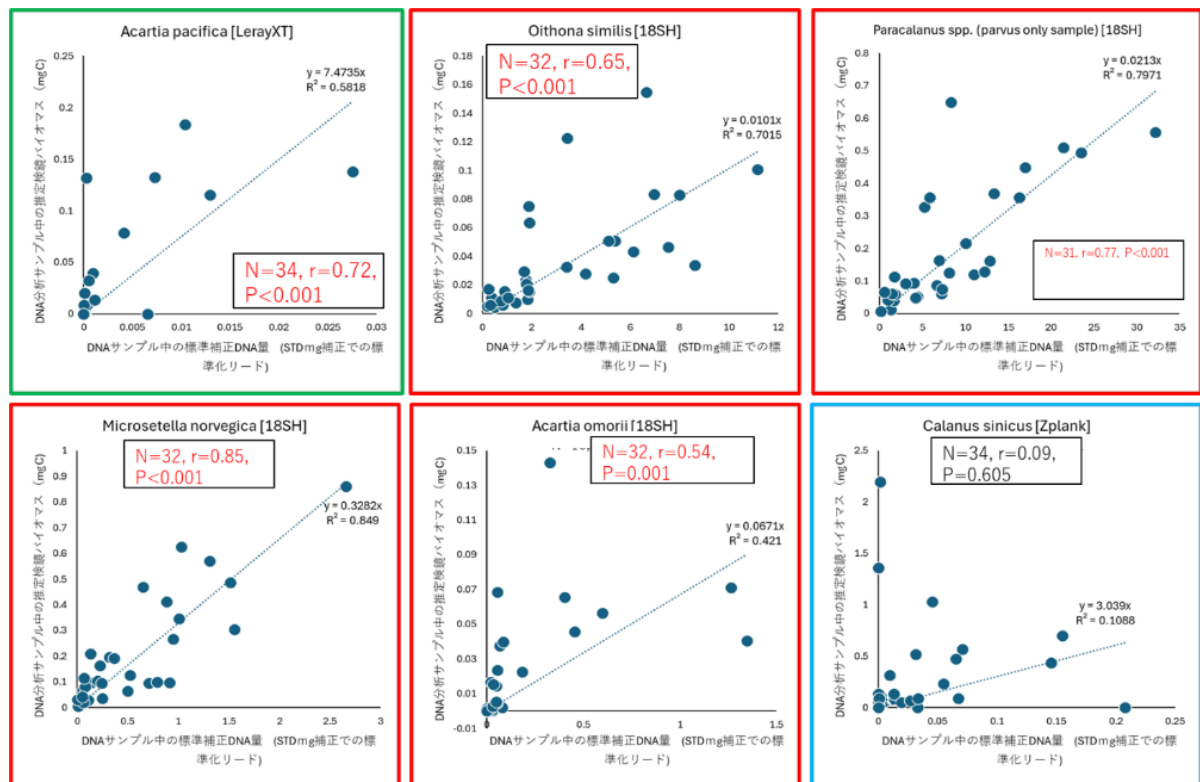


図 22 6 種のカイアシ類における標準補正 DNA 量と検鏡で推定したバイオマスとの関係

【季節別管理運転による広湾の低次生物生産性の変化】

海洋における生態系ピラミッドの基盤となる植物プランクトンによる一次生産量及び動物プランクトンによる二次生産量の推定を行った。一次生産量については、Nishijima et al. (2021) の瀬戸内海を対象とした推定式を用いて計算した。計算の概要としては、表層水中の植物プランクトン量 (mgChl. a/m³) に、ある水温や栄養塩環境下での同化効率 (P : mgC/mgChl. a/h) を乗じることで表層水中の一次生産量を求め、光減衰係数により鉛直方向の各層における生産割合を算出し、有光層で積分した。

広湾においては、湾奥部で栄養塩濃度が高い傾向であったが、一次生産量に関しては必ずしも湾奥部が高くなることはなく、10月及び11月については湾西部、12月では湾央部、1月では湾東部、3月には湾口部と湾奥部において高い傾向であった。広湾全体で平均すると、2022年度では秋季及び冬季（10～3月）の期間平均一次生産量が131 mgC/m²/dであったが、季節別管理運転を実施した2023年度では126 mgC/m²/dとほとんど変化

しなかった（図 23）。広湾において、2023年度にDIN濃度が上昇したにも関わらず一次生産量がわずかに減少した理由として、秋季及び冬季（10～3月）における月平均全天日射量が2022年度（11.8 MJ/m²）に比べ2023年度（11.0 MJ/m²）ではわずかに低く、地点1及び2の表層水温も2022年度（17.6℃）に比べて2023年度（16.9℃）ではわずかに低かったことが考えられた。

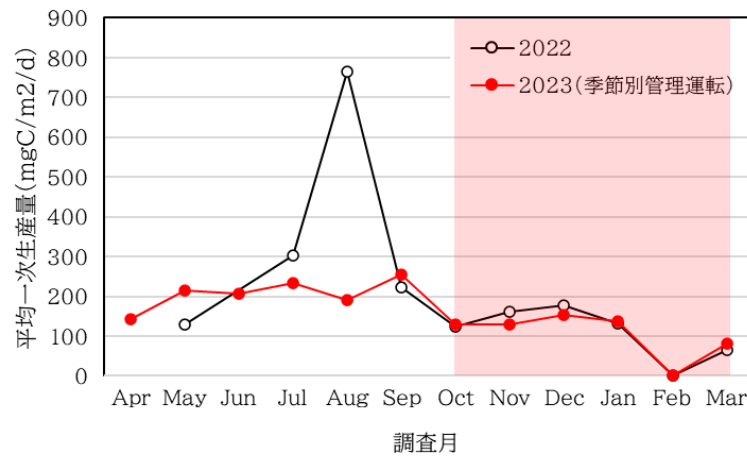


図 23 広湾における平均一次生産量

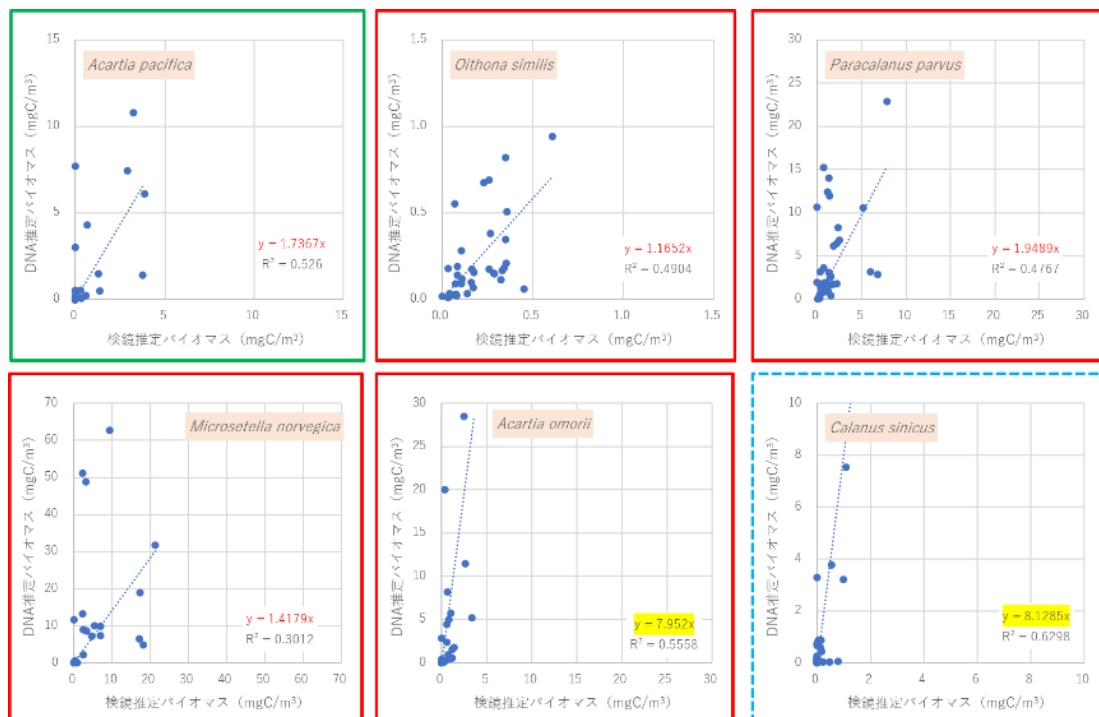


図 24 主要 6 種のカイアシ類に関する検鏡推定バイオマスと DNA 推定バイオマスの比較

二次生産の基礎となる動物プランクトンのバイオマス（mgC/m³）については、DNAメタバーコーディンと検鏡によってそれぞれ求めた。DNAメタバーコーディンでは、播磨灘試料で作成した主要6種のカイアシ類の検量線を使って、標準補正DNA量から定量した。図 24に、主要6種について、従来の検鏡によるバイオマス推定結果と定量的DNAメタバーコーディングによって推定したバイオマスの結果を比較した（隣接海域の2地点のデータも含めた）。*Acartia pacifica*、*Oithona similis*、*Paracalanus parvus*、*Microsetella norvegica*の4種については、検鏡推定バイオマスに対するDNA推定バイオマスは、1.2～1.9の範囲に収まり、播磨灘で作成した検量線によって広湾の同種のバイオマスもほぼ推定可能であることがわかった。一方で、*Acartia omorii*と*Calanus sinicus*については、約8倍となり、過大評価となっており、課題が残った。*Calanus sinicus*については、播磨灘で作成した検量線の精度が悪かった（ $P = 0.605$ ）ことも要因と考えられる。

主要6種について、従来の検鏡によるバイオマスに基づく二次生産量と定量的DNAメタバーコーディングによって推定したバイオマスに基づく二次生産量の結果を比較した（図 25）。また、全カイアシ類の検鏡結果によるバイオマスに基づく二次生産量に対して、主要6種の定量的DNAメタバーコーディングによって推定したバイオマスに基づく二次生産量の結果を比較した（図 25）。定量的DNAメタバーコーディングによって推

定した個別の種のバイオマスがやや高い値を示した（図 24）ことから、主要6種の二次生産量もDNA推定値の方がやや高くなった。検鏡で得られた全カイアシ類のバイオマスに基づく二次生産量に対しては、主要6種のDNA推定二次生産量は66%であった。主要種のみでの評価でもある程度二次生産量を推定できることがわかった。

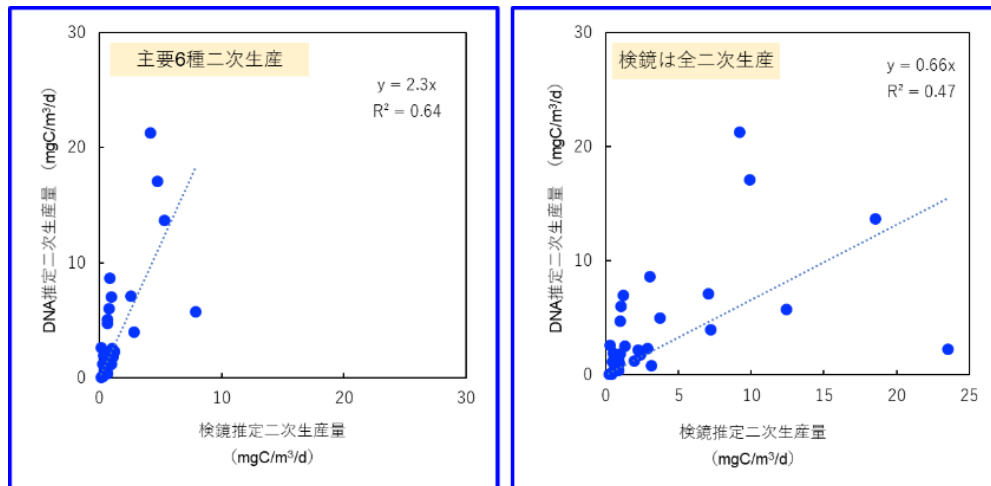


図 25 検鏡推定バイオマス及びDNA 推定バイオマスに基づく二次生産量の比較

1. 4. 2. 2. 影響評価モデル開発（サブテーマ2）

1. 4. 2. 2. 1. ネスティング影響評価モデルの開発と再現性の検証（目標①）

陸域モデルの改良では、広島県や呉市より収集した資料によって、季節別管理運転を実施する広浄化センターの排水口の位置の修正や、黒瀬川流域と広東大川流域の分割など、特定海域スケールの海域モデルの計算に必要な流出先の位置が精緻化された（図 26a）。黒瀬川の流量・水質観測データを用いて陸域モデルの検証を行ったところ、先行研究では一級河川以外の再現性は不明であったが、本モデルは二級河川の黒瀬川においても淡水流出量、及びTN・TPの濃度・流出量を良好に再現することが確認された（図 26b）。

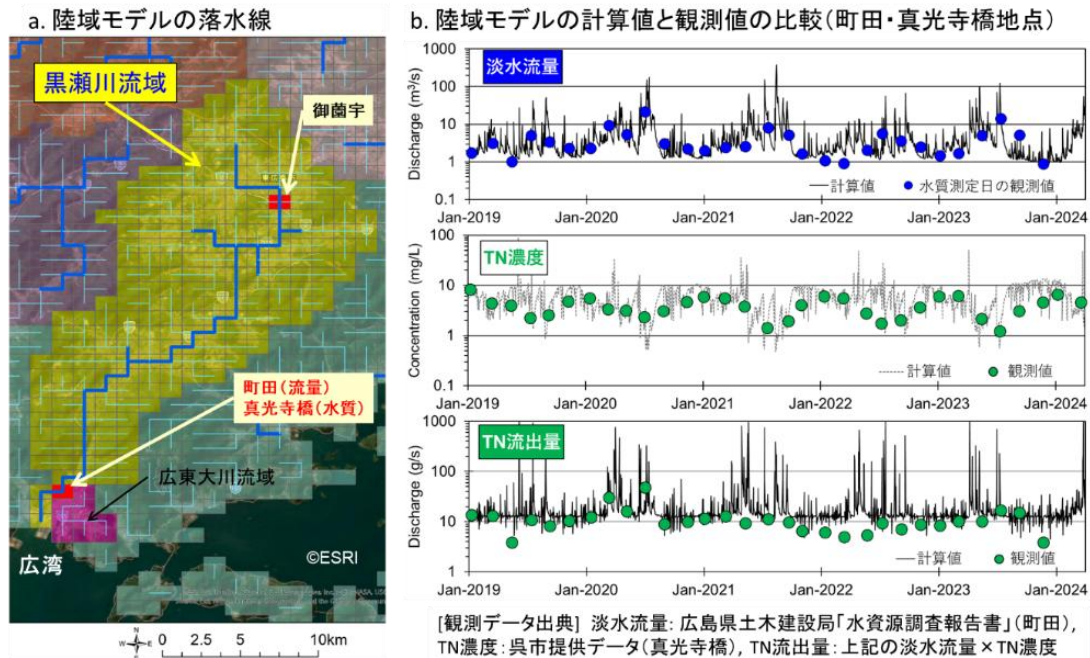


図 26 黒瀬川の陸域モデルの落水線と淡水流量・TN濃度・TN流出量の計算値と観測値の比較

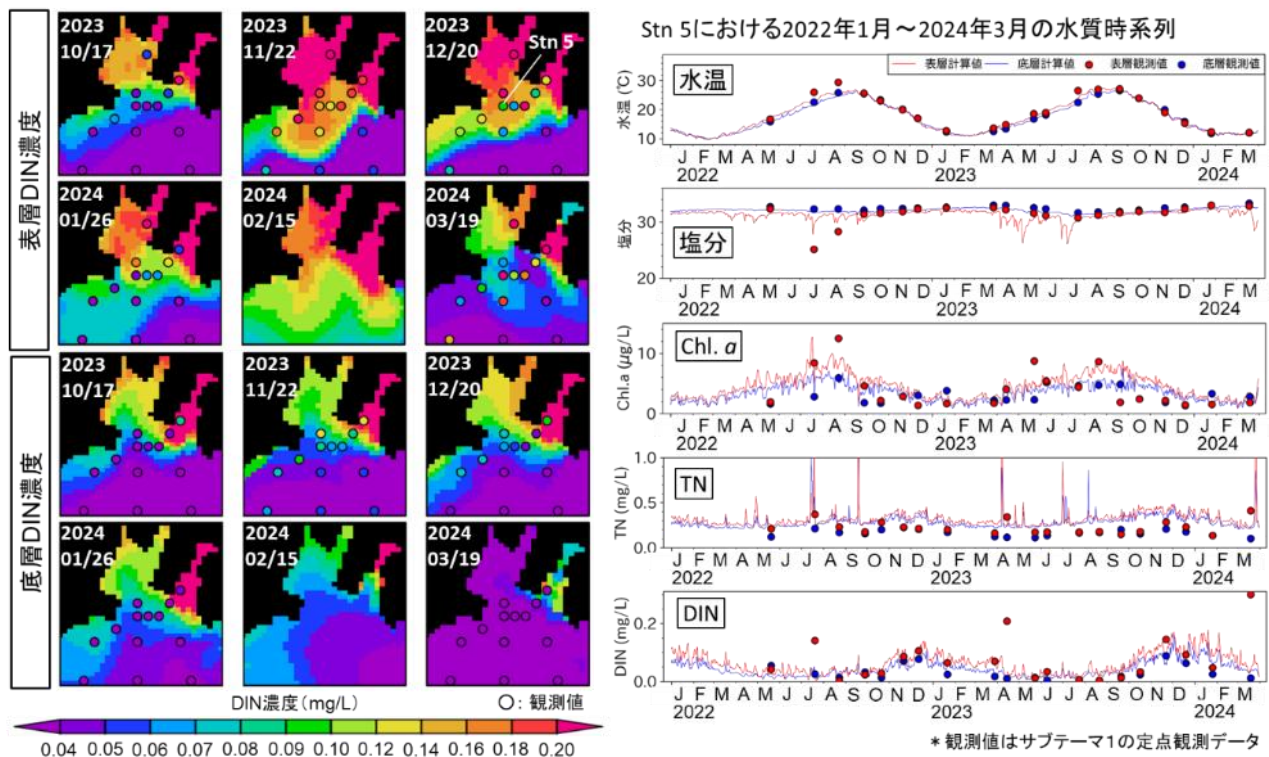


図 27 広湾モデルによる水質の再現計算結果とサブテーマ1の観測結果の比較

ネスティング海域モデルで得られた広湾の計算結果は、季節別運転が目標とする養殖海域の水質が潮流によって激しく変動する場であることを示した。サブテーマ1の定点観測は観測開始から終了までに4～6時

間程要しているが、その間に表層の栄養塩濃度は大きく変動していることが予想された。一方、底層の栄養塩濃度の変動は比較的小さく、観測した日の水質データとして一定の代表性を有していると考えられた。このような海域特性を踏まえて広湾モデルの水質の再現性を検討する必要があるが、季節別運転の効果評価に必要な栄養塩のDIN濃度と植物プランクトンのChl. *a* 濃度の計算値は、観測値に見られる分布傾向や、DIN濃度に見られる表層と底層の差、季節別運転の効果検証地点 Stn 5 における表層と底層の水質時系列を良好に再現した（図 27）。本モデルは栄養塩類管理の影響評価に実用的な精度を有していると判断した。

1. 4. 2. 2. 季節別管理運転の効果評価（目標③）

季節別管理運転を全期間実施しないcase 1と毎年10～3月に実施するcase 2の数値実験で得られた結果に基づいて季節別管理運転の効果を考察した。以降の記述や図表では、特に断りがない限り、各種水質は図 28aの海域区分の領域平均、かつ5年間の月別平均値を意味するものとして表記する。

養殖海域においてcase 1と2でDIN、Chl. *a*、TN濃度の差が生じるのは、表層、底層ともに季節別管理運転が実施される10～3月にほぼ限定され、4月以降には影響が及んでいないことが確認された（図 28bc）。ただし、10～3月に見られるcase 1と2の差は、いずれも年々の変動に比べて小さいために有意なものとはいえず、季節別管理運転の効果は限定的であると評価された。サブテーマ1の観測においても季節別管理運転の実施前後において一次生産量や栄養塩濃度が顕著に増加することは確認されておらず、本数値実験はそれを裏付けるものと考えられた。

10～3月における養殖海域のDINについてcase 2/case 1の濃度比を月別に求めたところ、表層、底層ともに概ね1割程度の濃度上昇で安定に推移した（図 28b）。それに対してChl. *a*の濃度比の変動は、11～12月にピークとなり、2～3月は急落する季節性が見られた（図 28c）。

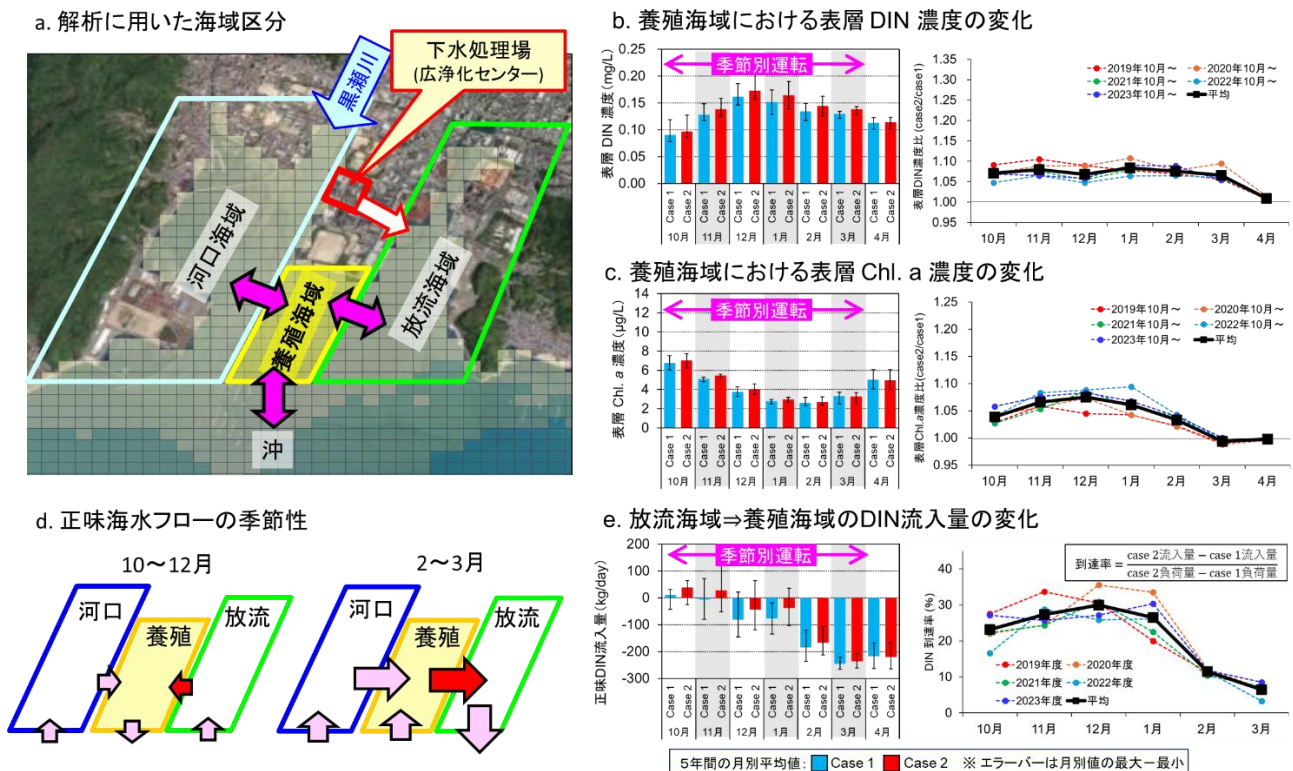


図 28 解析に用いた海域区分と季節別管理運転が養殖海域の水質や海水・栄養塩フローに及ぼす影響

Chl. *a*の濃度比の上昇はDINに比べて全体的に小さい傾向があった。また、DINの濃度比は10～3月にかけてほぼ一定であるのに対し、Chl. *a*の濃度比には2～3月に顕著に低下する季節性が見られた。これらの原因とプロセスについて解析を進めた結果、広湾における海水交換速度が疑われた。

広湾の海水滞留時間を把握するために別途実施した数値トレーサ実験の結果、広湾の大部分は海水の滞留時間が数日程度と短いことが明らかになった（図 29）。全体的に表層よりも底層、湾奥よりも湾口の方が滞留時間が短いことから、10～3月における広湾の海水交換は沖からの底層水の侵入、すなわちエスチュアリー循環が支配的であると考えられた。加えて、海水交換にも有意な季節性が見られ、養殖海域において滞留時間が最も長いのは12月（表層で2.5日、底層で1.8日）であるが、そこから3月にかけて滞留時間が1日程度も短くなると評価された（図 29）。この滞留時間の季節性は上述のChl. *a*濃度比のそれと対応が見られた。すなわち、季節別管理運転によって増加した負荷は、養殖海域に到達して一定の栄養塩濃度を高める効果は

あるが、その水塊の滞留時間は高々数日と短いため、植物プランクトンの一次生産で有意に消費される前に栄養塩が養殖海域外に拡散してしまうと解釈できる。また、2～3月のChl. *a*濃度比の低下についても10～1月より滞留時間が短いことで説明ができる。

実際に放流海域から養殖海域への海水の正味フローを求めると、1月頃までは流入と流出がほぼ拮抗し、12月までの正味フローは養殖海域への流入を示したが、それ以降は養殖海域から放流海域への流出に転じ、2月、3月と進むにつれて流出量が顕著に増加した（図 28d）。DINとTNの正味フローもこれに追従する結果となった（図 28e）。

数値実験において計算条件が異なるのは下水処理場からの負荷のみであるため、case 1と2の計算値が異なる要因はすべてこれに帰結する。それを踏まえて、季節別管理運転による栄養塩類負荷の増加が放流海域から養殖海域への流入フローの増加にどれくらい寄与したかを図 28eに示す到達率で評価したところ、10～1月はDINが23～30%、TNは27～32%となった。2～3月は10%程度以下に落ち込むが、10～1月の到達率は決して小さい値ではない。海水交換が速いために養殖海域の栄養塩濃度や植物プランクトンのChl. *a*濃度を有意に上昇させるまでには至らないが、例えば海藻類やカキの餌となる付着珪藻など、生産者が流されずに固定されている状況であれば、栄養塩の安定的な供給となり、生産性の向上に繋がることが期待できると考えられた。

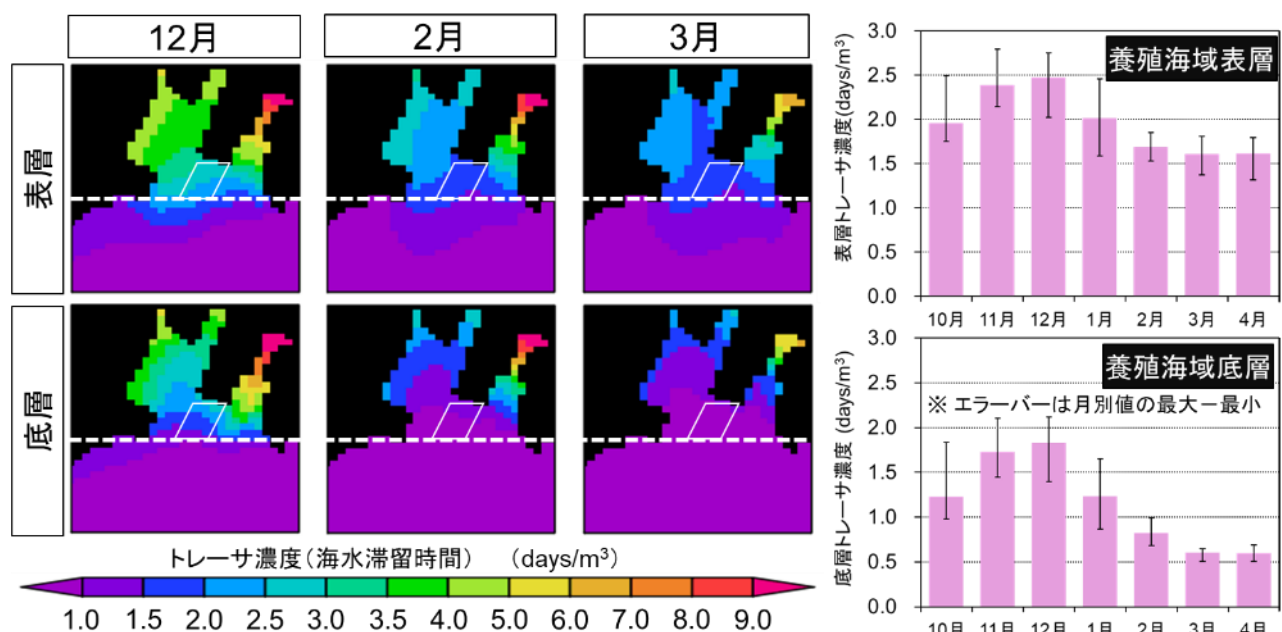


図 29 10～3月の広湾（左）と養殖海域（右）における表層と底層のトレーサ濃度（海水滞留時間）の変化（左図の白破線は河口・養殖・放流海域と沖の隣接海域との境界、白枠は養殖海域を示す）

1. 4. 2. 2. 3. 気象・水温条件の変化が季節別管理運転の効果に及ぼす影響（目標③）

気象・水温条件の変化が季節別管理運転の効果に及ぼす影響を明らかにするために行った数値実験の結果をまとめると次のとおりである。

10～3月の黒瀬川の流量を2割減らした結果は、養殖海域の海水交換速度がすべての月において現況よりも遅くなり、養殖海域の表層DIN、Chl. *a*、TN濃度は若干上昇する傾向を示した。湾奥に流入する河川流量の減少は、エスチュアリー循環が弱まることに繋がるため、それと矛盾しない数値実験結果になったといえる。反対に、10～3月の北風を0.7m/s強くする数値実験では、エスチュアリー循環が強まるため、養殖海域の海水交換速度がすべての月において現況よりも速くなり、養殖海域の表層DIN、Chl. *a*、TN濃度は低下する傾向を示した。

10～3月の東風を0.7m/s強くした数値実験の結果は、月によって影響が異なり、特に11～12月の海水交換速度は現況に比べて速くなる応答を示した。2～3月の海水交換速度はほぼ変わらず、どちらかと言えば遅くなる傾向が見られた。養殖海域の表層DIN、Chl. *a*、TN濃度はそれらに対応した変化を示し、11～12月は減少、2～3月は若干増加する結果となった。

水温上昇が養殖海域の表層DIN、Chl. *a*、TN濃度に及ぼす影響は月によって様々であり、0.9℃上昇と3.5℃上昇によって増加・減少の傾向が異なる結果も見られた。海水交換速度には大きな違いが見られなかったため、一次生産や分解など生物反応の温度依存性による影響が濃度の変化に強く表れたと考えられた。

季節別管理運転の効果について強調すべき点は、養殖海域における濃度比や放流海域から養殖海域へのフロー差がいずれの数値実験においてもほとんど変化しないことである。これについては、下水処理場の放流

地点と養殖海域が近いこと、広湾の海水交換が速いことなど、海域の特性によるものと考えられるが、この広湾のケースにおいては気候変動の適応策としても下水処理場の季節別管理運転が有効となり得ることを示唆するものと考えられた。

1. 4. 2. 2. 4. 植物プランクトンデータベースの補完（栄養塩の半飽和濃度）（目標②）

P. dentatum に対する流加式半連続培養実験では、希釈率の制御により、複数の比増殖速度 μ を持つ増殖平衡状態を構築し、各 μ に対応した $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を測定した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と μ の関係から Monod 関数への回帰を行った結果、 K_μ は $0.030 \mu\text{M}$ 、 μ_{\max} は 0.60 day^{-1} と推定された。この値は従来文献より 1 オーダー以上低いことが示された。また、他のモデル導入種（*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex、*Eucampia zodiacus*）でも同様に極めて低い K_μ （それぞれ、 $0.014 \mu\text{M}$ 及び $0.036 \mu\text{M}$ ）が得られたことを踏まえると、分類群を問わず、植物プランクトンに共通した高い栄養塩親和性が示唆された。

現場観測でも $\text{DIN} < 1 \mu\text{M}$ の頻度は限定的であり、広湾では光や水温、鉛直混合などが植物プランクトンの出現や増殖の制限要因としてより支配的である可能性が高いと考えられた。今後、閉鎖性海域のモデル精度を高めるためには、過大な栄養塩制限を避けるべく、実測に基づく低濃度の K_μ の設定が重要であると考えられた。

1. 4. 2. 2. 5. 植物プランクトンデータベースの補完（強光環境における増殖応答）（目標②）

P. dentatum に対して、スカラー PAR $20 \sim 2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲で段階的に照度を変化させた流加式半連続培養実験を実施し、安定期の比増殖速度 μ を補償光量及び強光阻害を同時に考慮した光量応答関数に回帰した。結果として、*P. dentatum* は最大照度である $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ でも μ_{\max} に近い増殖速度を維持し、明瞭なピークを持つ至適光量はなかった。このことは、本種が強光条件下においても顕著な増殖抑制を受けない高い強光耐性を持つことを示唆した。

比較のため、先行研究で得られていた *S. marinoi-dohrnii* complex 及び *E. zodiacus* のデータにも同じ式を適用したところ、両種では $300 \sim 500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲に至適光量があり、それを超えると比増殖速度が低下する明確な強光阻害傾向が観察された（表 3）。ここで、表 3 の μ_{\max} は最大比増殖速度 (day^{-1})、 β は曲線形状係数（無次元）、 I_{opt} は至適光量 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 I_0 は補償光量 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) である。

表 3 *P. dentatum*、*S. marinoi-dohrnii* complex、*E. zodiacus* の光量応答関数パラメータ（値 \pm SE）

種	水温	μ_{\max}	β	I_{opt}	I_0	Adj. R^2	n
<i>P. dentatum</i>	20	0.74 ± 0.01	6.06 ± 1.02	796 ± 68	12.68 ± 0.00	0.967	36
<i>S. marinoi-dohrnii</i> complex	20	1.67 ± 0.03	1.91 ± 0.46	319 ± 25	1.85 ± 2.20	0.887	55
<i>E. zodiacus</i>	20	2.17 ± 0.03	0.91 ± 0.21	467 ± 21	10.55 ± 1.86	0.969	59

P. dentatum の高い耐光性は、強光環境にある浅海域表層での本種の優位性を説明する可能性がある。特に本種は日周鉛直移動を行う種であり、日中には表層に集積する傾向があるため、強光に耐える能力と行動特性が組み合わさることで、他種に対する競争的優位を確保していると考えられる。

また、3種の補償光量 I_0 を比較すると、*P. dentatum* は $12.68 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と最も高く、低光条件では成長が抑制される（表 3）。一方、*S. marinoi-dohrnii* complex は $1.85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と低く、他の種より深い水深や透明度の低い水塊でも増殖可能であることが示唆された。*E. zodiacus* は中間的な値を示し、応答特性の位置づけも明瞭となった。

得られた光量応答パラメータは、今後の影響評価モデルにおいて、種ごとの光応答特性を定量的に反映することを可能にする。特に、強光耐性や低光適応性の違いをモデル上で明確に扱うことで、現場環境に即したモデル精度と確からしさの向上が期待される。

1. 4. 2. 2. 6. 植物プランクトンデータベースの補完（高温に対する増殖応答）（目標②）

P. dentatum の温度応答特性を把握するため、水温 $20 \sim 33^\circ\text{C}$ の範囲で段階的に昇温し、流加式半連続培養下において比増殖速度 μ を測定した。 30°C までは成長が安定していたが、 31°C では μ が急減し、 33°C ではクロロフィル蛍光も消失、減温による回復も見られなかった。この結果から、*P. dentatum* の増殖停止温度は $31 \sim 32^\circ\text{C}$ 付近と推定された。

実験により得られたデータを Norberg の温度応答関数（表 4）に回帰し、至適水温 z や温度ニッチ幅 w などのパラメータを導出した（表 4）。比較対象として、先行課題により得られた *S. marinoi-dohrnii* complex 及び *E. zodiacus* のデータにも同関数を適用し、関数形式の統一を図った。

表 4 *P. dentatum*、*S. marinoi-dohrnii* complex、*E. zodiacus* の水温応答関数パラメータ (値±SE)

種	光量	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>Z</i>	<i>w</i>	Adj. <i>R</i> ²
<i>P. dentatum</i>	500	0.16±0.10	0.11±0.03	19.72±1.87	23.35± 3.59	0.882
<i>S. marinoi-dohrnii</i> complex	460	0.66±0.17	0.09±0.02	11.72±5.51	41.55±11.00	0.953
<i>E. zodiacus</i>	320	0.76±0.16	0.10±0.01	12.45±3.61	39.37±7.20	0.976

表 4 及び実験結果を踏まえると、*P. dentatum* は至適水温 *z* が約 20℃ と高めで、*w* は約 23℃ と狭く、温暖な環境に特化した戦略を持つと考えられた。一方、*S. marinoi-dohrnii* complex 及び *E. zodiacus* は至適水温が 12～13℃、*w* は 40℃ 以上と広く、より寒冷～温帯まで幅広い環境に適応している汎用型の応答特性を示した。特に、*P. dentatum* の増殖は 31℃ を超えると完全に停止したが、他の 2 種はそれをやや上回る水温でも増殖を維持したことから、本種の高温限界が相対的に低いことが明らかになった。

また、最大比増殖速度 (明暗周期 12h 換算) は *S. marinoi-dohrnii* complex が 2.71、*E. zodiacus* が 2.40 day⁻¹ と高いのに対し、*P. dentatum* は 0.60 day⁻¹ と低めであり、水温条件や季節変動によって種の優占順位が変化する可能性が示された。これらの種間差異は、植物プランクトン群集構造の変動の大きな要因として、水温応答特性が重要な役割を果たすことを示唆する。

本研究では、従来異なる関数形式で記述されていた各分類群の水温応答を Norberg 関数に統一したことにより、影響評価モデルにおける構造的な整合性と比較可能性が高まり、モデル全体の拡張性・精度・信頼性が大きく向上した。

一方で、従来の関数形式はもとより、Norberg 型の関数は比増殖速度がゼロに近づく挙動までは表現できるものの、高温による不可逆的な死滅や損傷といった生理的実態の詳細な動態を直接扱うには限界がある。今後は、高温曝露時間や細胞死を取り込んだ動的モデル構造の構築に向けて、実験や関数設計の改善が行われることが期待される。

1. 4. 2. 2. 7. 植物プランクトンデータベースの拡張 (特定海域における重要種の抽出) (目標②)

サブテーマ 1 の広島大学のチームが 2022 年 7 月～2024 年 6 月にかけて行った広湾定点調査のうち、2 定点 (b 及び d) において採取された植物プランクトン試料 (計 44 試料) について光学顕微鏡による分類同定を行った。その結果、10 綱 25 目 53 科 225 属種が確認された。このうち、出現頻度や濃度の低い属種を除外し、111 属種について細胞体積の算定を実施した。

2 定点の植物プランクトンの綱別優占度は、細胞濃度ベースでは円心目珪藻及び羽状目珪藻が群集の大半を占めた (図 30)。細胞体積濃度ベースでも、円心目珪藻が約 78%、羽状目が約 9% を占め、全体で 85% 以上が珪藻によって占められた (図 30)。これに対し、細胞濃度では寄与が少なかった渦鞭毛藻は、細胞体積濃度では明瞭な寄与の増加が認められた。細胞濃度及び体積とクロロフィル濃度との log-log 回帰の結果、細胞体積ベースの指標の方が高い説明力 ($R^2=0.49$) を示し、生物量の指標としてより妥当であることが示唆された。

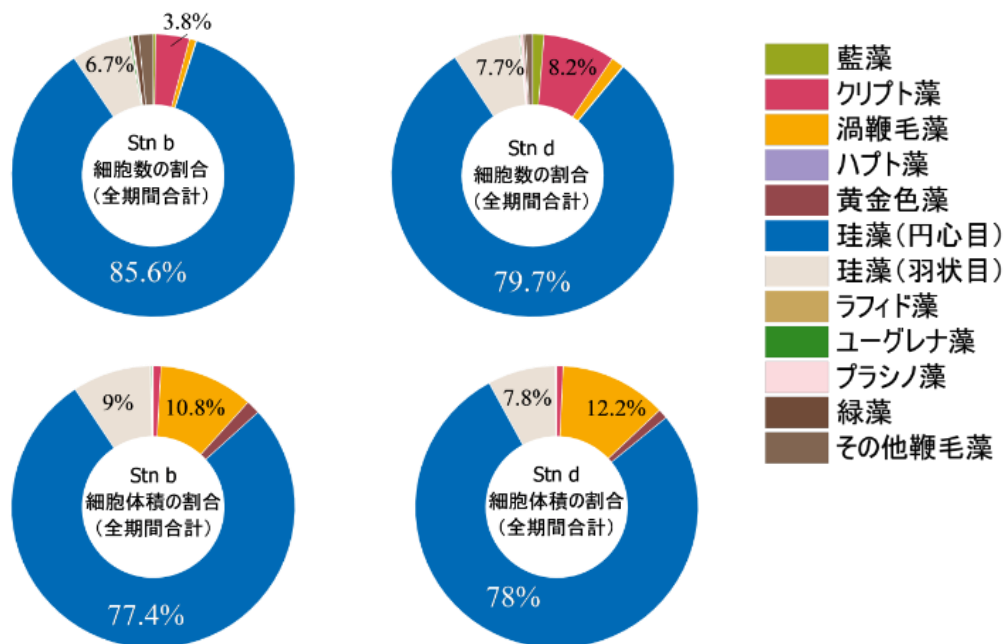


図 30 2 年間の広湾調査 (定点 b 及び d) において出現した植物プランクトンの細胞濃度及び細胞体積濃度基準の優占度

円心目珪藻が生物量として最も重要なグループであることを踏まえ、細胞体積濃度を算定した円心目珪藻 60 分類を対象として全期間の積算細胞体積に基づくパレート解析を行った (図 31)。その結果、細胞体積寄与の高い上位 12 分類だけで円心目珪藻の約 85%、全植物プランクトンの約 66% を占めていた。また、*S. costatum* complex (cf. *S. marinoi*-*dohrnii* complex) や *E. zodiacus* など、本研究で応答関数を整備した種も含まれていた。

これら上位 12 分類について文献調査を行い、水温・光量に対する応答データの有無を検討した。その結果、現時点で即時にモデル導入可能な種は限られており、多くの分類群では応答データが不十分または高温・高光領域の情報が不足していることが明らかとなった。

たとえば、*Coscinodiscus wailesii* は光量応答に関しては既存文献により一定の整理が可能であり、影響評価モデルへの追加の候補種と考えられた。一方で、水温応答にはデータの不足が見られ、完全な関数整備には至らなかった。また、*Chaetoceros salsugineum* は $30^{\circ}\text{C} \cdot 700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 条件下で非常に高い増殖速度 ($\mu = 8.5 \text{ day}^{-1}$) を示すデータが存在することから、温暖化下での優占の可能性が示唆されるが、水温応答特性の詳細は未知であり、今後、優先的に応答関数整備を進めるべき対象と考えられた。

また、*Dactyliosolen fragilissimus* や *Leptocylindrus danicus* の水温・光量応答に関する報告は、古い文献が中心であり、蛍光灯を培養光の光源としていた当時の実験環境の制約により、強光条件を含むデータが存在しないことが明らかになった。*D. fragilissimus* については本研究の中で広湾で単離された培養株が確保されており、今後の研究において応答特性の補完を行っていききたい。

総じて、細胞体積に基づく系統的な分類群の評価を通じて、広湾の植物プランクトン群集において生物量寄与の大きい分類群が明確化され、モデル導入の前段階にある有望な分類の抽出が可能となった。今後は、これらの分類に対して応答関数の構築に向けた培養実験を計画的に進めるとともに、渦鞭毛藻を含む非珪藻分類群に対しても同様の評価手法の適用が必要である。

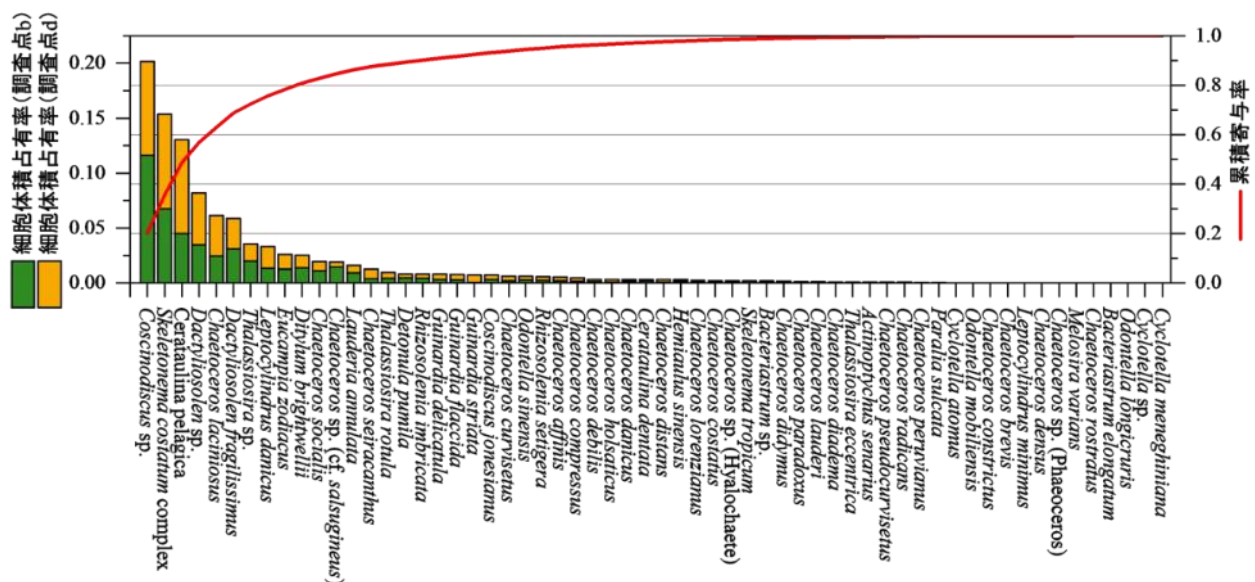


図 31 広湾で出現した円心目珪藻 60 分類の細胞体積濃度のパレート解析結果。上位 12 分類の細胞体積濃度の合計は全円心目珪藻のその合計の 85% を占めた。

1. 4. 2. 2. 8. 影響評価モデルのパラメータ自動最適化技術の開発 (目標③)

簡易NP時系列モデルを用いたパラメータ自動最適化手法の基礎的検討において、真値のパラメータに収束し、かつ収束が速い手法の組み合わせを試行・検討した結果、誤差を評価する目的関数は観測値と計算値の平均絶対誤差和と相関係数を組み合わせたもの、目的関数の勾配を算定する手法は二重数を用いた自動微分、比減少速度のパラメータ更新は対数軸で実施、最適化手法はAdaGradが最適であることが分かった。特に、 c の比増殖速度のパラメータ更新を対数軸上で行うA2に変更した効果は大きく、植物プランクトン濃度など指数的な増加・減少を支配する感度が高いパラメータについては、更新幅が小さくなるような手段を講じる必要があると考えられた。

上記の検討結果を踏まえて、パラメータ自動最適化機能を海域流動・水質・底質モデルに実装した。一般的に湖沼や沿岸域の低次生態系を含む水質モデルは多数のパラメータを有するため、そのパラメータ自動最適化では計算時間が著しく膨大になることが問題となる。これまでの経験を踏まえて、本研究では最終的に 9 個のパラメータ調整を想定して開発を進めたが、標準的な数値微分を用いた最適化を例にあげると、順解

析（通常の再現計算）の数百倍の計算量が必要と試算された。その中でも特に計算量を要するのは個々の調整パラメータに対する目的関数の偏微分勾配を得る過程であるが、本研究ではそこに1回の順計算ですべての偏微分勾配を算定可能な自動微分を採用した。しかし、1回の順解析で済むとはいえ、個々のパラメータに対する各種水質の偏微分勾配が予報変数として追加する必要があり、予報変数の個数が9倍に膨れ上がる。結局、自動微分をそのまま適用すると1回の順解析に必要な計算量は数値微分の順解析10回分とほとんど変わらないということになり、計算量を減らす工夫が必要と考えられた。

順解析では、個々の水質の予報変数に対して、水平方向の移流拡散過程、鉛直輸送・混合過程、生成・消滅過程の計算が実施されるが、沿岸域の水質予測のパラメータ調整は主に沈降を含む鉛直輸送・混合過程と生成・消滅過程に対して実施される。また、目的関数の偏微分勾配が最終的に必要となるのは観測点のみであり、大半の格子においては不要な計算となる。これらを踏まえて、本研究では、自動微分で新たに予報変数として追加される各種水質の偏微分勾配については、観測点における鉛直に方向のみに配置し、水平方向の移流拡散を無視することで計算量の大幅な削減を図った。また、並列計算において、予報変数が膨大な数となる観測点上の計算のみを担当する専用コアを設けることで、プログラムコード全体の最適化を行った。

開発したモデルを用いて、小規模仮想空間において双子実験を行ったところ、流れがある状態においてもパラメータはほぼ真値に近い状態に収束した。また、計算時間を計測したところ、自動微分の順解析1回分の計算量を数値微分の順解析1回分とほぼ同じにすることに成功した。

開発したモデルを広湾に適用したところ、小規模仮想空間の双子実験では見られなかった勾配爆発が発生し、計算が停止する問題が発生した。原因を調べたところ、広湾では黒瀬川河川水、下水処理場の放流水、南側の側方境界、東側の側方境界の4つの流入水塊があるが、勾配爆発が生じる観測点はその境界に位置するものと考えられた。特に前者2つと後者2つの水塊は、栄養塩の制限の有無や制限因子がリンと窒素で異なるといった大きな違いがあるが、一次生産や栄養塩の計算を左右するほど特徴が異なる水塊が激しく入れ替わることに對して、勾配の水平輸送・拡散を無視した本モデルが対応できていないことが主な原因と考えられた。実際に個々の水塊が卓越している海域の観測点では、潮汐による水質の変動が大きいにも関わらず、勾配爆発は生じていなかった。実用化のために不可欠な計算量の削減に用いた仮定が広湾では適用できないことが判明し、研究実施期間内での開発・実装は困難と判断されたため、以降の研究を断念した。計算機の性能が向上し、順解析そのものが高速化することによって問題の大部分が解決するものでもあるため、今後の当該分野の発展を待って再度開発に挑戦したい。

1. 5. 研究成果及び自己評価

1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

- (1) サブテーマ1で取り組んだフィージビリティ評価では、栄養塩類管理の対象となる海域において、季節別管理運転に対する応答を予め評価するためのツールとして、PCA-EMMAが利用できることを明らかにした。従来の研究において、EMMAは沿岸域への河川水や地下水の流入の解析(Petermann et al., 2018)や懸濁物の由来の解明(Zhang et al., 2023)などに利用されてきた。本研究では、PCA-EMMAにより対象地点での陸域負荷の混合率や、下水処理場の季節別管理運転に伴うTN濃度の増加を予測できることを新たに明らかにした。
- (2) パッシブサンプリング法は、水質モニタリングにおいては水中の農薬、多環芳香族化合物、放射性セシウムなどに応用されており、これらは吸着剤を用いて捕集している。本研究で用いた水中でアンモニア態窒素がアンモニウムイオンとアンモニアに分配される特性を利用して、ガス透過膜を通じてアンモニアを捕捉し、水中のアンモニア態窒素濃度を測定する手法はパッシブサンプリング法の中でもユニークな方法である。先行研究では、ガス透過膜を通じて回収液（希塩酸）に捕捉されたアンモニアを一定期間後に測定し、その期間の平均濃度を推定している(Šraj et al., 2018)。本研究では、希塩酸中であれば海水の妨害なく淡水用のアンモニアセンサーが利用できることを活用し、パッシブサンプラーとアンモニアセンサーを組み合わせて、平均濃度ではなく、アンモニア態窒素濃度を連続的に測定する装置としているところに大きな特徴がある。ガス透過膜であっても徐々に塩分が浸透してくるが、ガス透過膜の上に銅メッシュを加えることで膜表面に酸化銅被膜が生成され、塩分の浸透を抑制することを見出した。
- (3) マルチスペクトルカメラを搭載したドローン空撮による沿岸海域における水質マッピング(Kim et al., 2021)は、海色衛星プロダクトよりも高解像度で高い雲被度時でも海面画像が得られるため、赤潮等の沿岸域特有の現象を、例えばクロロフィルa濃度推定分布から捉えることが可能である(Gai et al., 2021)。しかし、沿岸海洋環境は時空間変動が大きくドローンが空撮する時間にも顕著に海面は変化するため、高い画像オーバーラップ率が要求される複数枚の空撮画像を結像して一枚の画像に統合することは困難である。本手法はこれらの問題を克服し、特に河口や下水処理放流口からの陸水を捉えるた

め、高高度からの一発撮影によって広範囲にわたる海面撮影を実施し、生物生産指標としてのクロロフィルaや汚濁負荷指標としての有色溶存有機物（CDOM）の精細な濃度マップが得られることを示した。また、複数枚の画像を結像する代わりにオーバーラップ率を低くして、画像中央部におけるクロロフィルa濃度をサブサンプリングすることで、さらに広域のクロロフィルa濃度マップを作成可能にした点は極めて独自性が高い。本手法は簡易的かつ低コストであるがゆえに自治体の研究者にも扱うことが可能であり、ドローン空撮による水質マッピング技術を拓いた学術的・社会的意義は大きい。

- (4) 本研究が取り組んだ古典的な形態学的種同定を代替する動物プランクトンモニタリング手法は、正確な種同定のための明確な同定形質がない近縁種の識別同定や、幼生など初期生活史段階における形体同定形質の知見が乏しい個体の種同定も可能な点で、古典的な形態学的種同定に基づく手法より利点がある(Ershova et al., 2017)。一方で、DNAメタバーコーディング結果は、サンプル間でのDNA抽出やPCR増幅、シーケンスにおける方法論的バイアスの影響で、生のDNA読み取りカウント数の量的比較は直接的には行えない(Sickel et al., 2023)。サンプル間での定量性は、サンプルに内部標準となる既知のDNAを添加し、各サンプルでの次世代シーケンス結果を内部標準DNAの読み取りカウント数で補正することで改善することがわかってきている(Ushio et al., 2022, Luo et al., 2023)。先行研究によって内部標準添加の有効性は示されていたが、実際に多くの種が混在する実環境サンプルを用いて、特定種をターゲットとして、その定量的なモニタリングにつなげた研究はなく、古典的な形態学的種同定を代替できるレベルまでDNAメタバーコーディング技術を発展させたという意味で本研究の学術的・社会的意義は大きい。
- (5) 開発したモデルは、中央環境審議会の第10次水質総量削減の検討に用いられている瀬戸内海の陸域淡水・汚濁負荷流出―海域流動・水質・底質モデルをベースとしたネスティングモデルである。本モデルを地方自治体が利用可能とすることは、陸域の発生負荷量や気象・海象等の入力データも含めて、国と地方が同じモデルで方策検討を可能にすることを意味する。複数の省庁や地方自治体が関与する沿岸域の施策検討を効率的に進めるためには一定のモデル・データの共通化が不可欠であり、実用に耐える性能や精度が担保された本モデルは標準ツールの1つとして貢献することが期待される。
- (6) また本研究では、地方自治体での利用を想定して、ユーザーが特定海域の計算領域を設定すれば、ネスティング計算に必要な入力条件を自動で切り出すプログラムも作成しており、別の環境省GUI開発事業と緊密に連携して、それに関わるユーザー操作をブラウザアプリで行えるようにした。そのGUIは、陸域からの負荷量や放流先などの入力条件の変更も可能であり、影響評価モデルの計算実行や停止、予測結果の可視化やファイルのダウンロードもマウス操作で行えるように開発されている。実装に向けた準備も進められ、国立環境研究所のスーパーコンピュータシステムへのプロトタイプの搭載と動作確認を完了している。さらに、このプロトタイプの試験運用も兼ねた利用研究の話も進んでおり、瀬戸内海環境保全知事・市長会議の専門部会である瀬戸内海水環境研会議の令和7年度合同調査テーマに採択され、複数の関係自治体が参加予定である。栄養塩類管理に留まらず、今後の水質総量削減のあり方、水質環境基準の類型指定の見直し、豊かな海に向けた方策検討などへの利用も検討され、地方自治体の沿岸環境政策に貢献することが期待される。

<環境政策等へ既に貢献した研究成果>

特に記載する事項はない

<環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

- (1) PCA-EMMAは、栄養塩類管理対象とする海域において、数理モデル等を使った本格的な栄養塩管理計画策定の前段階として、想定する栄養塩類供給方法の有効性、供給する栄養塩類量に応じた海域の栄養塩濃度の上昇濃度などに関する大まかな検討の方向性と予測を得ることに貢献できる。PCA-EMMAの実施に必要な情報は、陸域負荷源の流量や海域の潮汐の変動、ならびに陸域負荷源や海水でのトレーサーとなる重金属やホウ素の濃度、塩分である。これらは、地方公共団体や事業所で観測できる。また、陸域負荷の混合率や混合率の計算はフリー統計ソフトのRとエクセルのソルバー機能により実施できるため、本研究で示したPCA-EMMAによる季節別管理運転の効果予測方法は、汎用的な手法となり得ることが期待される。
- (2) 栄養塩類管理を行う特定海域は、養殖海域を中心とした沿岸域などが想定され、このような海域では地点による水質の違いが大きい。このため、限られた地点の水質では、現状把握、その水質に基づく数値モデルでは、予測精度が低くなる。そのため、栄養塩類管理ではどうしても時間的・空間的に精緻なモニタリングが必要となる。本研究では、曳航しながら水をくみ上げ、水質センサーでモニタリングする調査手法や、これまで海水で使用できなかったアンモニアセンサーを改良したパッシブモニタリング手法を開発しており、現場負担が小さく利用しやすいモニタリング技術として自治体での利用が期待される。また、今回広湾を対象に実施された季節別管理運転により得られた放流水の栄養塩濃度データや、

湾における水質や低次生物生産性の応答の結果は、他海域における今後の季節別管理運転の負荷運転の程度を決めるための重要な知見となることが期待される。

- (3) 海域の水質モニタリングは、調査船を使用して行われている。調査船を使用することは、時間、手間、コスト等の制約が大きい。本研究ではクロロフィル a 濃度をドローンで得られる空撮画像が推定するアルゴリズムを開発した。ドローンを使った観測は、観測できる水質項目は限られるが、陸域から観測可能であり、短時間で広域の観測ができる点で、頻繁な観測を可能とする。栄養塩類管理においては、一般には臨海部に設置されている下水処理場から特定海域への栄養塩類の放出が検討される。その場合、下水処理場の屋上等から定期的に地先の特定海域にドローンを飛ばして、海域をモニタリングすることが可能である。ドローンは予め飛行経路を入力しておけば、自動操縦が可能であるため、調査自体の労力は小さい。
- (4) 栄養塩類管理の計画策定・方策検討に必要となる、地方自治体でも汎用的に利用可能な影響評価モデルを開発した。それを広湾における下水処理場の季節別管理運転に適用し、サブテーマ1の現地観測データを活用してモデルの検証を行ったところ、栄養塩類や植物プランクトンのChl. a など、水質環境基準や生物生産性の評価に必要な水質の再現性を有することを確認した。開発したモデルは、中央環境審議会の第10次水質総量削減の検討に用いられている瀬戸内海の陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルをベースとしたネスティングモデルである。本モデルを地方自治体が利用可能とすることは、陸域の発生負荷量や気象・海象等の入力データも含めて、国と地方が同じモデルで方策検討を可能にすることを意味する。複数の省庁や地方自治体が関与する沿岸域の施策検討を効率的に進めるためには一定のモデル・データの共通化が不可欠であり、実用に耐えうる性能や精度が担保された本モデルは標準ツールの1つとして貢献することが期待される。
- (5) 影響評価モデルを用いた数値実験により、広湾における下水処理場の季節別管理運転の効果を評価した。季節別管理運転の効果は限定的であるとともに季節性を有することが示されたが、これらの原因は広湾の海水交換速度が速いためであることが明らかになった。また、気象・水温条件がある程度変化しても効果はほとんど変わらず、気候変動の適応策としても有効であることを示唆した。本研究によって栄養塩類管理に関する新たな科学的知見が蓄積されたが、当然のことながら、広湾に限定された知見と言わざるを得ず、他の海域でもそのまま適用できるとは限らない。一方で、本研究の評価アプローチは他の海域においても応用が可能であり、得られた科学的知見も含めて広湾の事例として栄養塩類管理の実施を検討している地方自治体にとって貴重な資料となり得る。
- (6) 本研究では、地方自治体での利用を想定して、ユーザーが特定海域の計算領域を設定すれば、ネスティング計算に必要な入力条件を自動で切り出すプログラムも作成しており、別の環境省GUI開発事業と緊密に連携して、それに関わるユーザー操作をブラウザアプリで行えるようにした。そのGUIは、陸域からの負荷量や放流先などの入力条件の変更も可能であり、影響評価モデルの計算実行や停止、予測結果の可視化やファイルのダウンロードもマウス操作で行えるように開発されている。実装に向けた準備も進められ、国立環境研究所のスーパーコンピュータシステムへのプロトタイプの搭載と動作確認を完了している。さらに、このプロトタイプの試験運用も兼ねた利用研究の話も進んでおり、瀬戸内海環境保全知事・市長会議の専門部会である瀬戸内海水環境研会議の令和7年度合同調査テーマに採択され、複数の関係自治体に参加予定である。栄養塩類管理に留まらず、今後の水質総量削減のあり方、水質環境基準の類型指定の見直し、豊かな海に向けた方策検討などへの利用も検討され、地方自治体の沿岸環境政策に貢献することが期待される。

参考文献

- 環境省（2021）令和2年度水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査及び総量規制基準に係る検討業務報告書～発生負荷量等算定調査（指定水域）～、218p.
- 中央環境審議会（2021）第9次水質総量削減の在り方について（答申），
www.env.go.jp/content/900517230.pdf
- 東博紀，秋山千亜紀，中田聡史，吉成浩志（2019）瀬戸内海流域圏の汚濁負荷流出モデルの構築と2006～2015年における全窒素流出の変動傾向，土木学会論文集B1(水工学)，75(2)，I_421-I_426.
- 東博紀，横山亜紀子，中田聡史，吉成浩志，越川海（2020）RCP8.5シナリオに基づく瀬戸内海の一次生産及び水質への気候変動影響予測，土木学会論文集B2(海岸工学)，76(2)，I_1147-I_1152.
- 東博紀，吉成浩志，中田聡史，横山亜紀子，越川海（2021）RCP8.5の気候変動が播磨灘の窒素フローに及ぼす影響，土木学会論文集B1(水工学)，77(2)，I_1099-I_1104.
- Christophersen, N., Hooper, R. (1992) Multivariate Analysis of Stream Water Chemical Data: The Use of Principal Components Analysis for the End-Member Mixing Problem. *Water Resources Research*, 28 (1), 99-107
- Ershova, E., Questel, J., Kosobokova, K., & Hopcroft, R. R. (2017). Population structure and

- production of four sibling species of *Pseudocalanus* spp. in the Chukchi Sea. *Journal of Plankton Research*, 39(1), 48-64.
- Gai, J., Wang, J., Xie, S., Xiang, L., & Wang, Z. (2024). Spectroscopic determination of chlorophyll content in sugarcane leaves for drought stress detection. *Precision Agriculture*, 25(2), 543-569.
- Hayashi, M., & Uye, S. I. (2008) Geographical and seasonal variations in biomass and estimated production rates of net zooplankton in Yatsushiro Bay, Japan. *Journal of oceanography*, 64(6), 877-889.
- Hamawaki, R., Umehara, A., Nishijima, W. (2023) Quantifying the contributions of various nutrient sources to amounts of N and P in the Eastern Seto Inland, Japan, towards the better nutrient management. 9th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition 2023, Taiwan
- Hillebrand, H., Durselen, C. D., Kirschtel, D., Pollinger, U., Zohary, T. (1999) Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* 35:403-424
- Kim, E. J., Nam, S. H., Koo, J. W., & Hwang, T. M. (2021). Hybrid approach of unmanned aerial vehicle and unmanned surface vehicle for assessment of chlorophyll-a imagery using spectral indices in stream, South Korea. *Water*, 13(14), 1930.
- Luo, M., Ji, Y., Warton, D., & Yu, D. W. (2023). Extracting abundance information from DNA-based data. *Molecular Ecology Resources*, 23(1), 174-189.
- Nishijima, W., Umehara, A., Yamamoto, K., Asaoka, S., Fujii, N., Otani, S., Wang, F., Okuda, T., Nakai, S. (2021) Temporal distribution of primary and secondary production estimated from water quality data in the Seto Inland Sea, Japan. *Ecological Indicators*, 124, 107405.
- Norberg, J. (2004) Biodiversity and ecosystem functioning: A complex adaptive systems approach. *Limnology and Oceanography* 49:1269-1277
- Sickel, W., Zizka, V., Scherges, A., Bourlat, S. J., & Dieker, P. (2023). Abundance estimation with DNA metabarcoding - recent advancements for terrestrial arthropods. *Metabarcoding and Metagenomics*, 7, 305-337.
- Šraj, L. O. C., Almeida, M. I. G., Bassett, C., McKelvie, I. D., & Kolev, S. D. (2018). Gas-diffusion-based passive sampler for ammonia monitoring in marine waters. *Talanta*, 181, 52-56.
- Ushio, M., Furukawa, S., Murakami, H., Masuda, R., & Nagano, A. J. (2022). An efficient early-pooling protocol for environmental DNA metabarcoding. *Environmental DNA*, 4(6), 1212-1228.
- Petermann, E., Knöller, K., Rocha, C., Scholten, J., Stollberg, R., Weiß, H., Schubert, M. (2018) Coupling End-Member Mixing Analysis and Isotope Mass Balancing (^{222}Rn) for Differentiation of Fresh and Recirculated Submarine Groundwater Discharge Into Knysna Estuary, South Africa, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 739-1581
- Zhang, C., Wang, Z., Jiang, A., Zhang, Y. (2023) Source apportionment of suspended sediment using grain-size end-member analysis, *Marine Environmental Research*, 187, 105904.

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

- <全体達成状況の自己評価> 2. 目標を上回る成果をあげた
- <サブテーマ1 達成状況の自己評価> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた
- <サブテーマ2 達成状況の自己評価> 4. 目標にはやや及ばないが一定の成果をあげた

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0

査読付き論文	2
査読無し論文	3
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	1 0
口頭発表・ポスター発表	2 4
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	1
その他の成果発表	1

1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果 番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」から10件まで抜粋)
1	西嶋渉：瀬戸内海の水環境・生態系を管理する、瀬戸内海、84、37-40
2	西嶋渉、梅原亮：閉鎖性海域の栄養塩類管理に向けて、月刊下水道、46（5）、16-20
3	梅原亮：岸沖の視点で見た瀬戸内海の栄養塩環境の変化、水産海洋研究、水産海洋地域研究集、87(2)、136-143
4	東博紀、梅原亮、濱脇亮次、越川海、西嶋渉：広湾における下水処理場の季節別運転の効果とその季節性に関する数値実験、土木学会論文集、82（16）（受理）
5	中田聡史、増田憲和、荒尾雅哉、浅岡聡、小倉亜紗美、東博紀：有色溶存有機物に着目した河川水と下水処理放流水の自動航行船観測、土木学会論文集B2(海岸工学)、82（16）（受理）

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動は、合計で10件行った。その内訳を以下に示す。

- ① 第15回FUコンクリート講座（主催：広島県東部生コンクリート協同組合、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海の水環境と生物生産）、約60名の参加があり、研究成果の普及に効果があった
- ② 水質保全研修会・ふるさとの川セミナー（主催：山口県、山口県瀬戸内海環境保全協会、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海の環境と生物生産を巡る話題）、177名の参加があり、高校生や一般市民、地方自治体からも多くの参加されており、栄養塩類管理にも高い興味が示され、研究成果の普及に効果があった
- ③ 中国四国ウォータークラブ秋季講演会（主催：中国四国ウォータークラブ）、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海を巡る栄養塩類の話題と将来展望、水処理に関する仕事をされている50名程度の参加があり、業務内容に関連する下水処理場の季節別管理運転の水環境に及ぼす影響などに関する本研究の成果の普及に効果があった
- ④ 令和4年度播磨灘等環境保全協議会幹事会（主催：兵庫県、講演者：東博紀、題目：瀬戸内海・播磨

灘における水環境への気候変動影響と栄養塩類管理)、播磨灘に係る省庁、兵庫県内の自治体、漁業協同組合から40名程度の参加があり、一次生産・栄養塩への気候変動の影響と栄養塩類管理の効果について講演するとともに、本研究と今後の連携・情報交換を促進するなどの成果があった

- ⑤ 令和5年度ひろしま気候変動適応セミナーでの講演(主催:広島県、講演者:東博紀、題目:気候変動が瀬戸内海の水質・一次生産に及ぼす影響について)、50名程度の参加があり、安芸灘・広島湾における一次生産と栄養塩の動態、気候変動の影響など本研究に対する理解と成果の普及に効果があった
- ⑥ 第44回日本水環境学会通常総会特別講演(主催:日本水環境学会)、講演者:西嶋渉、題目:瀬戸内海の水環境管理、環境省職員も含め、水環境に関心のある研究者や行政に研究成果をアピールできた
- ⑦ 第31回2024年度瀬戸内海研究フォーラム in 大阪(主催:瀬戸内海研究会議、講演者:東博紀、題目:気候変動と栄養塩類管理が瀬戸内海の水環境に与える影響 ~陸域-海域統合の視点から~)、台風接近のためオンデマンド開催に変更されたが、アクセス数554の参加があり、瀬戸内海の水環境への気候変動の影響と栄養塩類管理の効果など本研究に対する理解と成果の普及に効果があった
- ⑧ 令和6年度瀬戸内海の環境保全・創造に係る研究ワークショップ~きれいで豊かな瀬戸内海の実現を支える研究の最前線~での講演
西嶋渉:下水処理場の季節別管理運転が海域水質に及ぼす影響評価
中井智司:エンドメンバー分析による海域の水質への下水処理場放流水の寄与の評価
東博紀:瀬戸内海・広島湾の栄養塩類管理を対象とした影響評価モデルの開発と数値実験
越川海:広島湾の季節別管理運転が植物プランクトンに及ぼす影響と効果
ワークショップの第二部を本研究成果の発表の場として、サブテーマからそれぞれ2名で講演を行い、瀬戸内海に高い関心を持つ研究者や市民に対する成果の普及ができた
- ⑨ 令和7年度山口県瀬戸内海環境保全協会通常総会における特別講演(主催:山口県瀬戸内海環境保全協会、講演者:東博紀、題目:気候変動と栄養塩類管理が瀬戸内海の水環境に与える影響について)
- ⑩ 令和7年度研修会「瀬戸内海環境保全トレーニングプログラムin 広島における講演(主催:瀬戸内海環境保全協会、講演者:西嶋渉、題目:瀬戸内海の水環境・生態系を管理する)

1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

共同研究を実施していない

<相手機関・国・地域名>

機関名(正式名称)	(本部所在地等の)国・地域名

注:国・地域名は公的な表記に準じます。

1. 8. 研究者略歴

<研究者(研究代表者及びサブテーマリーダー)略歴>

研究者氏名	略歴(学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等)
西嶋渉	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 筑波大学大学院環境科学研究科修了、博士(工学)、広島大学工学部助手、現在、広島大学 環境安全センター教授 中央環境審議会臨時委員 水環境・土壌農薬部会総量削減専門委員会臨時委員 専門是水環境学、生態工学、研究テーマは閉鎖性水域の環境管理
東博紀	サブテーマ2リーダー 京都大学大学院工学研究科修了、博士(工学) 防災科学技術研究所特別研究員

	<p>現在、国立環境研究所地域環境保全領域海域環境研究室上級主幹研究員 中央環境審議会水環境・土壌農薬部会総量削減専門委員会専門委員 有明海・八代海等総合調査評価委員会海域環境再生方策検討作業小委員会専門委員 専門は沿岸域の水環境、研究テーマは沿岸環境・生態系モデルの開発と応用</p>
--	--

2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない。				

(2) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2022	西嶋渉：瀬戸内海の水環境・生態系を管理する、瀬戸内海、84、37-40	1	無
2	2023	西嶋渉、梅原亮：閉鎖性海域の栄養塩類管理に向けて、月刊下水道、46（5）、16-20	1	無
3	2023	梅原亮：岸沖の視点で見た瀬戸内海の栄養塩環境の変化、水産海洋研究、水産海洋地域研究集、87(2)、136-143	1	無
4	2025	東博紀、梅原亮、濱脇亮次、越川海、西嶋渉：広湾における下水処理場の季節別運転の効果とその季節性に関する数値実験、土木学会論文集、82（16）（受理）	2	有
5	2025	中田聡史、増田憲和、荒尾雅哉、浅岡聡、小倉亜紗美、東博紀：有色溶存有機物に着目した河川水と下水処理放流水の自動航行船観測、土木学会論文集B2(海岸工学)、82（16）（受理）	2	有

(3) 著書

<著書>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(4) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
6	2022	高谷大介、柴田淳也、梅原亮、西嶋渉：DNAメタバーコーディングによる動物プランクトン群集の網羅的バイオマス定量法開発と二次生産推定への応用、第57回日本水環境学会年会	1	無
7	2022	東博紀、越川海：閉鎖性海域の水環境を対象とした気候変動の影響予測と栄養塩類管理について、第25回日本水環境学会シンポジウム	2	無
8	2022	東博紀、越川海：気候変動・栄養塩類管理の影響評価に向けた陸域-海域統合水環境モデル、2022年度水圏生態系モデリングシンポジウム	2	無
9	2023	李怡悦、梅原 亮、中井智司、西嶋渉：栄養塩類の季節別管理の効果予測へのEnd-Members Mixing Analysisの応用、第58回日本水環境学会年会	1	無
10	2023	中田聡史：ドローン空撮による海洋・河川・湖沼に	1	無

		おける水環境観測， 養殖場高度化推進研究センター第23回セミナー		
11	2023	濱脇亮次、梅原亮、西嶋渉：瀬戸内海における窒素・リン現存量の経年変動について、全国環境研究協議会研究集会	1	無
12	2023	梅原亮、濱脇亮次、中井智司、西嶋渉：広湾における下水処理場の季節別管理運転に向けた水質評価、2023年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会	1	無
13	2023	Hamawaki R, Umehara A, Nishijima W. : Quantifying the contributions of various nutrient sources to amounts of N and P in the Eastern Seto Inland, Japan, towards the better nutrient management, 9th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition	1	有
14	2023	越川海、東博紀、河地正伸、西嶋渉：沿岸植物プランクトンのNO ₃ 半飽和濃度の再評価、日本海洋学会2023年度秋季大会	2	無
15	2023	東博紀：瀬戸内海の窒素循環への気候変動・大気環境変動の影響、水・大気環境連携セミナー（日本水環境学会地域水環境行政研究委員会、大気環境学会地方環境研究所等委員会共催）	2	無
16	2024	中田聡史：海色衛星・ドローンを用いた河川プリュームの観測，沿岸海洋研究シンポジウム	1	無
17	2024	中田聡史：ドローンやロボット船を用いた先端的沿岸環境計測観測・予測・理解の高度化に向けて，日本沿岸域学会シンポジウム2024	1	無
18	2024	Umehara A, Hamawaki, R, Wang F, Nakai S, Nishijima W. : Study of water quality observation methods and evaluation of primary production in coastal area for seasonal operation of sewage treatment plants, The 5th Asian Marine Biology Symposium	1	有
19	2024	濱脇亮次、梅原亮、西嶋渉：広島県広湾における栄養塩類管理のための評価手法開発、第31回2024年度瀬戸内海研究フォーラム	1	無
20	2024	梅原亮、濱脇亮次、王峰、中井智司、西嶋渉：下水処理場の緩和運転に向けた沿岸域における水質観測手法の検討と一次生産評価、2024年度日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会、	1	無
21	2024	李怡悦、濱脇亮次、梅原亮、西嶋渉、中井智司：栄養塩類の季節別管理の効果予測へのEnd-Members Mixing Analysisの応用、第58回日本水環境学会年会	1	無
22	2024	濱脇亮次、王峰、梅原亮、西嶋渉：アンモニアセンサーを用いた海水中のアンモニアパッシブモニタリング技術の開発、第59回日本水環境学会年会	1	無
23	2024	東博紀：気候変動が貧酸素水塊に及ぼす影響と陸域負荷管理の効果、日本海洋学会2024年度秋季大会シンポジウム3「江戸前の海：環境と生態系の今」	2	無
24	2024	越川海：植物プランクトン増殖モデルの改良に向けた古くて少し新しい培養実験研究、2024年度 第3回RACESセミナー～浅海域の生態系（2）：植物プランクトンを中心に～	2	無

25	2024	東博紀、越川海、中田聡史、赤星怜：広湾における下水処理場の季節別管理運転が水質・一次生産に及ぼす影響、第59回日本水環境学会年会	2	無
26	2025	Yiyue LI, Ryoji HAMAWAKI, Akira UMEHARA, Satoshi NAKAI, Wataru NISHIJIMA, Feng WANG: PCA/EMMA analysis to evaluate the impact of nitrogen discharge from wastewater treatment plant on the water quality in adjacent waters, The Water and Environment Technology Conference 2025 (WET2025)	1	無
27	2025	Wang F, Hamawaki R, Li Y, Umehara A, Nakai S, Nishijima W : UAV-Based Prediction of Coastal Chlorophyll-a Concentration in a Suspended Solid Affected Temperate Coastal Area, Seto Inland Sea, The Water and Environment Technology Conference 2025 (WET2025)	1	無
28	2025	Li Y, Nakai S, Hamawaki R, Umehara A, Nishijima W : Application of End-Member Mixing Analysis to Estimate Different Terrestrial Source Contribution to Nutrient Concentrations in Coastal Waters, 10th IWA-ASPIRE Conference	1	有
29	2025	Higashi H, Umehara A, Hamawaki R, Koshikawa H, Nishijima W : A Numerical Model to Assess the Effects of Adaptive Nutrient Management on Coastal Environment and Biological Productivity, The International Society for Ecological Modelling Global Conference 2025	2	有

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
30	2022	第15回FUコンクリート講座（主催：広島県東部生コンクリート協同組合、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海の水環境と生物生産）（参加者60名程度）	1
31	2022	水質保全研修会・ふるさとの川セミナー（主催：山口県、山口県瀬戸内海環境保全協会、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海の水環境と生物生産を巡る話題）（参加者177名）	1
32	2023	中国四国ウォータークラブ秋季講演会（主催：中国四国ウォータークラブ）、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海を巡る栄養塩類の話題と将来展望（参加者50名程度）	1
33	2023	令和4年度播磨灘等環境保全協議会幹事会での講演（主催：兵庫県、講演者：東博紀、題目：瀬戸内海・播磨灘における水環境への気候変動影響と栄養塩類管理）（参加者40名程度）	2
34	2023	令和5年度ひろしま気候変動適応セミナーでの講演（主催：広島県、講演者：東博紀、題目：気候変動が瀬戸内海の水質・一次生産に及ぼす影響について）（参加者50名程度）	2
35	2024	第44回日本水環境学会通常総会特別講演（主催：日本水環境学会）、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海の水環境管理（参加者50名程度）	1
36	2024	第31回2024年度瀬戸内海研究フォーラム in 大阪での講演（主催：瀬戸内海研究会議、講演者：東博紀、題目：気候変動と栄養塩類管理が瀬戸内海の水環境に与える影響～陸域-海域統合の視点から～）（オンデマンド開催：アクセス数554名）	2
37	2024	令和6年度瀬戸内海の水環境保全・創造に係る研究ワークショップ～きれいで豊かな瀬戸内海の実現を支える研究の最前線～での講演（主催：瀬戸内海研究会議）（参加者184名）	1, 2

		西嶋渉：下水処理場の季節別管理運転が海域水質に及ぼす影響評価 中井智司：エンドメンバー分析による海域の水質への下水処理場放流水の寄与の評価 東博紀：瀬戸内海・広湾の栄養塩類管理を対象とした影響評価モデルの開発と数値実験 越川海：広湾の季節別管理運転が植物プランクトンに及ぼす影響と効果	
38	2025	令和7年度山口県瀬戸内海環境保全協会通常総会における特別講演（主催：山口県瀬戸内海環境保全協会、講演者：東博紀、題目：気候変動と栄養塩類管理が瀬戸内海の水環境に与える影響について）	2
39	2025	令和7年度研修会「瀬戸内海環境保全トレーニングプログラムin 広島」における講演（主催：瀬戸内海環境保全協会、講演者：西嶋渉、題目：瀬戸内海の水環境・生態系を管理する）	1

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
40	2022	東博紀、越川海：2022年度地域水環境行政研究委員会優秀発表賞、日本水環境学会地域水環境行政研究委員会	2

(8) その他の成果発表

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
41	2023	梅原亮：特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発研究の取り組み紹介、第45回（2023年度）九州海洋生態談話会	1

権利表示・義務記載

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract

[Project Information]

Project Title : Development of Assessment Method for Nutrient Management in Specific Sea Areas

Project Number : JPMEERF20225002

Project Period (FY) : 2022-2024

Principal Investigator : Nishijima Wataru

(PI ORCID) : ORCID 0000-0002-8398-3449

Principal Institution : Hiroshima University
Higashi-Hiroshima City, Hiroshima, JAPAN
Tel: +81 82 424 6199
E-mail: wataru@hiroshima-u.ac.jp

Cooperated by : National Institute for Environmental Studies

Keywords : Nutrient management, Monitoring, Numerical model, Seasonal nutrient management operation, Phytoplankton database

[Abstract]

This study aims to develop a suite of techniques: a feasibility assessment method to be used prior to planning, numerical models for planning, efficient water quality monitoring methods, and methods to assess biological productivity, to support local governments for nutrient management in coastal waters. This study was conducted using the seasonal nutrient management operation of the Hiro sewage treatment plant in Kure city from October 2023 to March 2024 as a case study.

Sub-theme 1 addressed three key challenges: water quality and ecosystem monitoring.

(1)A two-step approach using Principal Component Analysis-End-Member Mixing Analysis (PCA-EMMA) was developed as a tool to determine the applicability and effectiveness of the method for nutrient management.

(2)A low-cost, easily fabricated surface water sampling device and an onboard water tank were installed on a survey ship, allowing continuous measurements and sampling during towing. An algorithm based on unmanned aerial vehicle (UAV) imagery was also developed to estimate chlorophyll-a concentrations and colored dissolved organic matter concentrations. The use of UAVs enables more frequent measurements than ship-based surveys because of the UAV's accessibility. Furthermore, a novel passive monitoring method for ammonia nitrogen has been developed.

(3) A quantitative DNA metabarcoding method incorporating internal standards was developed to monitor zooplankton biomass and secondary production, enabling the direct conversion of DNA quantity to biomass for six dominant copepod species. By estimating primary and secondary production using microscopic examination and DNA metabarcoding, the structure of the lower trophic-level productivity in Hiro Bay was clarified.

Sub-theme 2 addresses the development of a generic numerical model to assess the effects of nutrient management on coastal environments and ecosystems that can be used by local governments. The model consists of a distributed river basin model and a nesting coastal model that can predict hydrodynamic current and water quality with high resolution. To improve the model's performance and applicability, phytoplankton culture experiments were conducted to investigate the growth characteristics of the representative species.

We performed numerical experiments using the model to evaluate the effect of the seasonal operation of the sewage treatment plant on the enrichment of nutrient concentration and primary production in Hiro Bay. The results indicated that the effects of sewage treatment varied seasonally, although the differences were not significant. The simulations also revealed that the dominant factor governing the effects was the fast seawater exchange in Hiro Bay, which was less affected by changes in weather and water temperature.