

令和4年度漁場環境改善推進事業のうち  
栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発

## (2) 赤潮被害防止対策技術の開発 報告書

令和5年3月

## 目次

1. 研究開発の概要	
(1) 目的.....	1
(2) 研究開発課題と実施体制.....	1
(3) 研究開発の内容.....	1
2. 研究開発結果	
1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視及び予察技術開発	
ア. 瀬戸内海東部海域.....	7
イ. 瀬戸内海西部・豊後水道・土佐湾海域.....	55
ウ. 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域.....	109
エ. 日本海西部海域.....	134
オ. 九州北部海域.....	149
カ. 有明海・八代海・鹿児島湾海域	
① 有明海海域.....	163
② 八代海・鹿児島湾海域.....	189
2) 赤潮の防除・被害軽減手法の開発	
ア. 魚毒性診断技術の開発.....	233
イ. 生け簀の魚介類を守る技術の開発・実証	
① ウイルス等微生物による赤潮防除法の確立と現場実証.....	261
② 既存の赤潮防除技術の高度化とマニュアル作成.....	272
③ 改良粘土散布の実証試験および新たなマグネシウム製剤の開発，対策実施マニ アルの作成.....	278
④ 物理化学的防除策および過飽和救命策併用によるブリ類の救命.....	300
⑤ 給餌条件の変更による赤潮発生下での延命効果検証.....	314
3) 有害赤潮プランクトンのモニタリング技術の開発・実証及び普及並びにデータ利活用 の促進	
ア. モニタリング技術の開発・実証.....	329
イ. 赤潮関連情報の提供及び利活用の促進.....	341
ウ. モニタリング技術の普及と事業検討会の開催.....	356

## 漁場環境改善推進事業のうち栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発 (2) 赤潮被害防止対策技術の開発

栄養塩、赤潮・貧酸素共同研究機関

### 1. 研究開発の概要

#### (1) 目的

近年、瀬戸内海・九州海域およびその周辺海域では、シャットネラやカレニア等の有害赤潮により、養殖・天然魚介類に甚大な被害が頻発している。特に、八代海で平成 21～22 年に発生したシャットネラ赤潮では、ブリ、カンパチ、シマアジ等を中心に被害総額 86 億円と養殖漁業に壊滅的な打撃をもたらした。その後も、平成 24 年に瀬戸内海西部・豊後水道海域で広域発生したカレニア赤潮によって、マダイ、ハマチ、カンパチ等の養殖魚やアワビ・サザエ等の天然磯根資源で約 13 億円、平成 29 年に伊万里湾で発生したカレニア赤潮によって養殖トラフグを中心に約 6 億円もの漁業被害が報告されており、各地で地域の水産業の脅威となっている。また、有明海や瀬戸内海東部海域などでは、冬季の珪藻赤潮によって養殖ノリの色落ちが発生し、商品価値低下による経済的損失も問題となっている。これらの有害赤潮は、我が国の水産業、とりわけ養殖漁業の振興と今後の発展に向けての大きな阻害要因となっており、漁業被害の防止対策および軽減技術の開発が強く求められている。そこで本課題では、瀬戸内海・九州海域およびその周辺海域等を主要なフィールドとして、広域共同モニタリングによる監視体制強化、モニタリング技術や予察技術、防除技術等の研究開発を行うことにより、有害赤潮による漁業被害の軽減および健全な海洋生態系の保全に資することを目的とした。

#### (2) 研究開発課題と実施体制

本課題は、国立研究開発法人水産研究・教育機構（水産機構水産技術研究所、水産資源研究所、水産大学校）、国立大学法人広島大学、国立大学法人高知大学、国立大学法人愛媛大学、国立大学法人埼玉大学、国立大学法人九州大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構基礎生物学研究所、学校法人北里研究所、徳島県、兵庫県立農林水産技術総合センター、岡山県農林水産総合センター、香川県水産試験場、地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所、福岡県、山口県、大分県農林水産研究指導センター、愛媛県農林水産研究所、広島県立総合技術研究所、高知県、三重県、愛知県、鳥取県、島根県、佐賀県、長崎県総合水産試験場、熊本県、鹿児島県水産技術開発センター、東町漁業協同組合、海洋エンジニアリング株式会社、宇部マテリアルズ株式会社、林兼産業株式会社、いであ株式会社、株式会社アイコックの計 33 機関で実施した。表 1 に研究開発の実施体制を示す。

#### (3) 研究開発の内容

瀬戸内海・九州海域およびその周辺海域において、広域共同モニタリングや各種研究開発により、有害赤潮等に対する監視体制の強化、有害赤潮発生シナリオの構築や原因プランクトンの生理・生態特性に基づく発生機構の解明と発生予察技術の開発、赤潮防除技術や漁業被害軽減技術の開発と現場実証を行った。また、赤潮関連情報の提供や利活用の促進、有害プランクトン同定研修会を開催して新たなモニタリング技術などの成果の普及にも取り組んだ。

本事業は、以下に示す研究課題構成で実施した。

#### 1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視及び予察技術開発

瀬戸内海・九州海域およびその周辺海域において、各機関が連携して広範な調査を実施し、有害鞭毛藻やノリ色落ち原因珪藻などの有害赤潮プランクトンの発生状況および海洋環境を監視する。

表 1. 研究開発の実施体制.

研究総統括・課題進行管理:水産研究・教育機構(代表機関)	
1)有害赤潮プランクトンの出現動態監視及び予察技術開発	
ア. 瀬戸内海東部海域	徳島県立農林水産総合研究センター 兵庫県立農林水産技術総合センター 岡山県農林水産総合センター 香川県赤潮研究所 大阪府立環境農林水産総合研究所
イ. 瀬戸内海西部・豊後水道・土佐湾海域(重点海域)	水産機構水産技術研究所 愛媛大学 高知大学 福岡県水産海洋技術センター 山口県水産研究センター 大分県農林水産研究指導センター 愛媛県農林水産研究所 広島県立総合技術研究所 高知県水産試験場
ウ. 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域	水産機構水産技術研究所 三重県水産研究所 愛知県水産試験場
エ. 日本海西部海域	水産機構水産技術研究所 兵庫県立農林水産技術総合センター 鳥取県栽培漁業センター 島根県水産技術センター 山口県水産研究センター
オ. 九州北部海域	水産機構水産資源研究所 九州大学 長崎県総合水産試験場 佐賀県玄海水産振興センター
カ. 有明海・八代海・鹿児島湾海域(重点海域)	水産機構水産技術研究所 福岡県水産海洋技術センター 佐賀県有明水産振興センター 熊本県水産研究センター
①有明海海域	水産機構水産技術研究所 熊本県水産研究センター 鹿児島県水産技術開発センター 東町漁業協同組合
②八代海・鹿児島湾海域	水産機構水産技術研究所 熊本県水産研究センター 鹿児島県水産技術開発センター 東町漁業協同組合
2)赤潮の防除・被害軽減手法の開発	
ア. 魚毒性診断技術の開発	水産機構水産技術研究所 水産機構水産大学校 自然科学研究機構基礎生物学研究所 埼玉大学 北里大学 大分県農林水産研究指導センター 鹿児島県水産技術開発センター
イ. 生け簀の魚介類を守る技術の開発・実証	水産機構水産技術研究所 三重県水産研究所 愛知県水産試験場
①ウイルス等微生物による赤潮防除法の確立と現場実証	水産機構水産技術研究所 大分県農林水産研究指導センター 東町漁業協同組合
②既存の赤潮防除技術の高度化とマニュアル作成	鹿児島県水産技術開発センター 長崎県総合水産試験場 大分県農林水産研究指導センター 宇部マテリアルズ 水産機構水産技術研究所
③改良粘土散布の実証試験および新たなマグネシウム製剤の開発、対策実施マニュアルの作成	海洋エンジニアリング 水産機構水産技術研究所
④物理化学的防除策および過飽和救命策併用によるブリ類の救命	林兼産業 水産機構水産技術研究所
⑤給餌条件の変更による赤潮発生下での延命効果検証	水産機構水産技術研究所
3)有害赤潮プランクトンのモニタリング技術の開発・実証及び普及並びにデータ利活用の促進	
ア. モニタリング技術の開発・実証	水産機構水産技術研究所 広島大学
イ. 赤潮関連情報の提供及び利活用の促進	水産機構水産技術研究所 アイコック いであ
ウ. モニタリング技術の普及	水産機構水産技術研究所

また、当該海域における有害赤潮プランクトンの出現特性の把握や生理・生態特性等の各プロセス研究を融合することで、有害赤潮発生シナリオの構築と検証ならびに有害赤潮発生予察技術開発を進め、漁業被害を軽減する。海域毎の調査研究内容は以下の通りとする。

#### ア. 瀬戸内海東部海域

大阪湾、播磨灘および備讃瀬戸を主海域とする瀬戸内海東部海域を対象として、夏季（6～8月）に24点程度の観測定点において8回以上、冬季（10～2月）に40点程度の観測定点において4回以上の調査を行い、水温・塩分等の海況、プランクトン細胞数、クロロフィルおよび栄養塩等のモニタリングを実施する。また、取得データ解析等により有害赤潮発生シナリオと有害赤潮発生予察技術の高精度化を検討するとともに、ホームページを活用した迅速な情報発信の試行や一部運用を開始し、漁業被害軽減に資する。

#### イ. 瀬戸内海西部・豊後水道・土佐湾海域

周防灘と広島湾を主海域とする瀬戸内海西部海域および豊後水道・土佐湾を対象として、夏季（5～9月）に58点程度の観測定点において4回以上の調査を行い、水温・塩分等の海況、プランクトン細胞数、クロロフィルおよび栄養塩等のモニタリングを実施する。顕微鏡でのカレニア・ミキモトイの確認が困難な時期（1～6月）には8点程度の観測定点において4回以上の調査を行い、分子生物学的手法も含めた有害赤潮プランクトンの高感度監視を実施する。また、5～8月に宇和島湾における高頻度観測（週1回）を実施してカレニア・ミキモトイの短期動態の解析やモデルの開発を試みる。現場海域の光・栄養塩等の環境条件を再現・制御可能なマイクロズム系を開発して、各種増殖パラメータを定量的に評価する。得られたデータをもとに有害赤潮発生シナリオ構築と有害赤潮発生予察技術開発を行うことで、漁業被害軽減に資する。

#### ウ. 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域

伊勢湾、三河湾、英虞湾等を主な対象として、周年（契約月～翌3月）に計26点程度の観測定点において月1回以上の調査を行い、水温・塩分等の海況、プランクトン細胞数、クロロフィルおよび栄養塩等のモニタリングを実施する。また、ノリ色落ち原因珪藻の出現諸特性の解明を目的として、同海域において冬季（10月～翌3月）に計29点程度の観測定点において月1回以上の調査を行い、周年調査と同様な観測項目について海洋モニタリングを実施する。取得データの解析や既存データ等に基づいて、当該海域における有害赤潮種およびノリ色落ち原因珪藻の発生と気象条件・海洋環境との関係を解析し、有害赤潮およびノリ色落ち被害の発生シナリオを構築・検証することで、漁業被害軽減に資する。

#### エ. 日本海西部海域

日本海南西部を主な対象水域として、夏季（7～9月）を中心に20点程度の観測定点において8回以上の調査を行い、水温、塩分、透明度、水色等の海況およびプランクトン細胞数等のモニタリングを実施する。細胞がごく低密度に存在する場合や混雑物が多い場合でも、迅速かつ正確な種判別を行うためにコクロディニウム・ポリクリコイデスおよびカレニア・ミキモトイについては一部の試料で分子生物学的手法（LAMP法）を導入し、モニタリング精度の向上を図る。また、取得データの解析や衛星画像解析、赤潮輸送シミュレーション等により有害赤潮発生シナリオと有害赤潮発生予察技術の高精度化を行うことで、漁業被害軽減に資する。

#### オ. 九州北部海域

伊万里湾を主な対象海域として、夏季（5～8月）を中心に14点程度の観測定点において原則週1回の調査を行い、水温・塩分等の海況、プランクトン細胞数、クロロフィルおよび栄養塩等のモニタリングを実施する。また、養殖漁場の1点で観測機器による水質連続観測も実施する。取得さ

れたデータの解析および数値シミュレーション手法を使用することにより有害赤潮発生シナリオと有害赤潮発生予察技術の検証を行い高精度化することで、漁業被害の軽減に資する。

## カ. 有明海・八代海・鹿児島湾海域

### ①有明海海域

有明海を対象水域として、冬季のノリ色落ち原因珪藻について冬季（10～2月）を中心に20点程度の観測定点で月2回程度の調査を行い、水温・塩分等の海況、プランクトン細胞数、クロロフィルおよび栄養塩等のモニタリングを実施する。また、有明海奥部の3定点において自動観測ブイおよび表層に設置する観測機器で海洋環境の連続観測を行う。取得データの解析等により色落ち原因珪藻赤潮の発生・非発生と気象条件・海洋環境との関連を解析し、発生シナリオを作成するとともに予察手法を提案することで、漁業被害軽減に資する。

### ②八代海・鹿児島湾海域

八代海・鹿児島湾海域を対象水域として、水温・塩分等の海況、プランクトン細胞数、クロロフィルおよび栄養塩等のモニタリングを実施する。八代海では5～9月に週1回の頻度で8定点、鹿児島湾では周年にわたり月1～2回の頻度で12点の調査を行う。また、八代海では1点の観測定点で観測機器による気象および水質の連続観測も実施する。得られたデータについて過去のデータ、既往知見や室内実験結果との比較、統計解析等を行い、八代海における赤潮発生シナリオを提案するとともに、短期動態に関与する主たる環境条件を特定する。八代海では栄養塩がシャットネラの短期動態に影響を与えると考えられることからその起源と供給量を見積もるための調査を行う。さらに、赤潮の発達や衰退を予測する上で利用可能な生物指標として細胞サイズに注目し、増殖活性との関係を種々の培養条件下で検討する。

## 2) 赤潮の防除・被害軽減手法の開発

餌止めなどの「苦肉の策」を最小限に留めて被害を軽減するために、現場において有害赤潮プランクトンの魚毒性を定量する技術を開発する。また、有害赤潮が発生した際に漁業被害を軽減するために講じる防除・被害軽減手法の開発・現場実証を行う。調査研究内容は以下の通りとする。

### ア. 魚毒性診断技術の開発

現場において有害赤潮プランクトンの魚毒性を定量するために、簡易アッセイ系、分子生物学的・生化学的手法等を用いた魚毒性診断技術を開発し、現場に普及するためのマニュアル作成を行う。餌止めなどの対策を適切なタイミングで講じるとともに最小化させるための技術を開発することで被害を軽減する。

### イ. 生け簀の魚介類を守る技術の開発・実証

#### ①ウイルス等微生物による赤潮防除法の確立と現場実証

ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマを標的種として、有害赤潮プランクトンを特異的に死滅させるウイルス等微生物を利用した赤潮防除法の確立と現場実証を行う。特に、赤潮が発生した海域からウイルスを含む底泥を採取し、それを同じ海域で翌年以降の赤潮発生時に散布するという土着の生物を利用した赤潮防除法について、技術課題や改善点を精査し、現場実証を行うとともに手法についてマニュアルにまとめる。

#### ②既存の赤潮防除法の高度化とマニュアル作成

養殖現場では長年の経験に基づいて構築された被害軽減技術（餌止め、生簀避難など）が実用されている。本課題では、既存の技術を対象として科学的な検証と基礎情報の収集を行い、高度化を図ること、そして技術普及を円滑に推進するためにマニュアルを作成することを目的とする。特に、

海面養殖における足し網および生簀浮沈法について検討する。

### ③改良粘土散布の実証試験および新たなマグネシウム製剤の開発、対策実施マニュアルの作成

アルミニウム含有酸性粘土の海面散布について改良を加え、アルミニウムイオン等の濃度を増加した新型活性粘土（改良型粘土）を用いて中層で発生する赤潮への効果を現場で検証する。また、これまで物理化学的防除が困難であったカレニア・ミキモトイに対して効果が報告されているマグネシウム製剤について、その効果や安全性、散布方法、および経済性について検証し、より有効な散布方法を確立したうえで対策実施マニュアルの更新を図る。

### ④物理化学的防除策および過飽和救命策併用によるブリ類の救命

西日本海域において頻発するシャットネラ属、カレニア属、及びコクロディニウム属による赤潮に伴う漁業被害を必要最小限の費用で軽減するため、赤潮プランクトンが魚介類に及ぼす悪影響を物理的手法で駆除しつつ、溶存酸素を高める手法を併用して、実際の養殖漁場でも実施可能な赤潮被害低減策の基礎を確立することを目指す。本課題では、既に救命効果が確認されている物理的防除と高濃度酸素供給効果に着目し、生簀周辺の環境を改変することを提案・立証する。また、赤潮が発生しても養殖魚を出荷して被害を軽減する等の実用策の可能性を模索することで、漁業被害防止策の基礎を確立する。

### ⑤給餌条件の改変による赤潮発生下での延命効果検証

赤潮被害軽減を目的とした餌止めは延命効果が知られており、コストのかからない対策であるものの、稚魚など餌止めに対するストレスが大きい時期、あるいは魚病などの罹患歴があって投薬を行っている養殖魚では、餌止め自体がストレスとなって減耗を引き起こすリスクがある。加えて、近年は養殖現場に周年出荷体制が普及しており、餌止めによる品質低下も魚価下落や販路の喪失など、漁家経営に対して甚大な悪影響を及ぼす。そこで、餌止めによる延命効果のメカニズムを解明しつつ、赤潮発生下でも給餌を行い、延命効果を発揮させる新たな手法を開発する。具体的には、赤潮生物が鰓組織上の炎症反応に与える影響について着目し、この炎症作業を極力軽減するのに有効な餌料成分の改変を行うことを提案・立証する。改変餌料と魚類死亡との関係を室内繰り返し試験で把握し、この特殊餌料を飽食させることで、餌止めに匹敵もしくはそれを超える延命効果を発揮させ、赤潮が発生しても養殖魚の被害を軽減する等の実用策を開発する。

## 3) 有害赤潮プランクトンのモニタリング技術の開発・実証及び普及並びにデータ利活用の促進

我が国沿岸域に出現する有害赤潮プランクトンのモニタリング技術の開発・実証に取り組むとともに研修会を通じて都道府県担当者に普及する。また、モニタリングデータの一元管理・迅速な公表により漁業被害軽減対策への利活用を促進する。

### ア. モニタリング技術の開発・実証

有害赤潮プランクトンの分子生物学的手法による簡易検出、同定法の開発・改良を行う。また、新奇有害プランクトンに関する生態や増殖生理特性等の情報収集のための現場調査、培養実験を行う。

### イ. 赤潮関連情報の提供及び利活用の促進

平成 25 年度より開発を進めてきた「赤潮分布情報」の運用・改良することによって、最新の水温・塩分や有害赤潮プランクトンの細胞密度等の観測データを多数の提供者より収集・データベース化し、一般向けに分かりやすく迅速に提供する。また、水温予報についても有明海、瀬戸内海等の複数の定点を対象に提供を行う。これらのデータの利活用を促進することで、有害赤潮発生時に速やかな対策の実施に繋げ、漁業被害軽減に資する。

#### **ウ. モニタリング技術の普及と事業検討会の開催**

都道府県の職員等を対象に、有害プランクトン同定研修会を開催し、事業成果の普及を行う。研修会では、有害プランクトンの発生動向、生理・生態、形態分類・分子同定、検索に関する講義と本事業等で開発した各種同定技術の実習を行う。また、新たな技術の普及に向け、研修テキストの改訂を検討する。

本事業で実施する調査・研究開発課題間の連携と進行管理を行うため、瀬戸内海・九州海域およびその周辺海域の海洋環境分野に精通した2名以上の有識者を検討委員とした事業計画および結果検討会を開催する。

## **2. 研究開発結果**

本事業の各課題で得られた研究開発結果を次頁以降にまとめた。

# 1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発

## ア. 瀬戸内海東部海域

兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター  
妹背秀和, 肥後翔太, 宮原一隆  
香川県赤潮研究所  
小川健太, 松下悠介  
大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センター  
秋山 諭, 辻村裕紀, 近藤 健  
岡山県農林水産総合センター水産研究所  
高木秀蔵, 乾 元気  
徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課  
嵐 俊右, 朝田健斗, 棚田教生

### 1 全体計画

#### (1) 目的

近年、瀬戸内海東部海域では有害赤潮プランクトンによる漁業被害が生じている。赤潮による漁業被害を未然防止および軽減するためには、赤潮発生海域を網羅した広域的な調査を実施する必要がある。本課題では、瀬戸内海東部海域において、各機関が連携して広範な調査を実施し、有害赤潮プランクトンの発生状況および海洋環境を監視するとともに、既存データも含めたデータ解析によって当該海域における有害赤潮の発生シナリオを検証し、赤潮発生予察技術の精度向上を図る。併せて、これらの情報発信方法を検討することで漁業被害軽減に資することを目的とする。

### 2 令和4年度計画および結果

#### (1) 目的

全体計画と同じ。

#### (2) 試験等の方法

有害赤潮が問題となる夏季および冬季に共同提案機関が保有する海洋観測調査船または備船を用いて広域的な海洋調査を実施し、瀬戸内海東部海域における有害赤潮種の出現特性を明らかにするとともに、各機関が有する有害赤潮発生シナリオと発生予察技術（夏季：*Chattonella* spp., 冬季：*Eucampia zodiacus*）について、取得データ解析等による検証を重ね、当該技術の精度向上を図る。また、本課題で取得される調査結果および予察情報を漁業者等が一元的に確認できる方法等、新たな情報発信方法を検討する。

##### 1) 夏季海洋モニタリング調査

当該海域に計24点の調査定点を配置し（図1）、有害赤潮が発生する6～8月までに計8回以上、海洋環境（水温、塩分、栄養塩等）およびプランクトン細胞密度等のモニタリング調査を実施した（表1、表2）。

調査定点（24 定点，図1）

徳島県3点（T4, T1, St.4）

香川県7点（K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7）

岡山県5点（OY1, OY2, OY3, OY4, OY5）

兵庫県6点（H2, H28, H30, H31, Bz1, Bz2）

大阪府3点（OS1, OS2, OS3）

アンダーラインは、珪藻の全数計数を行った定点を示す。

#### 調査実施月日

徳島県 6/6, 6/13, 6/20, 6/27, 7/4, 7/11, 7/19, 7/25, 8/1  
香川県 6/13, 6/20, 6/27, 7/4, 7/11, 7/19, 7/25, 8/1, 8/8, 8/12, 8/15, 8/18,  
8/23  
岡山県 6/21, 6/27, 7/8, 7/13, 7/20, 7/26, 8/2, 8/16  
兵庫県 6/6, 6/20, 6/27, 7/5, 7/11, 7/19, 7/25, 8/1, 8/8  
大阪府 6/8, 6/13, 6/27, 7/4, 7/11, 7/20, 7/25, 8/2, 8/8

#### 観測層および調査項目等

観測層および調査項目を表 1, 2 に示した。水温, 塩分および溶存酸素飽和度 (以下溶存酸素) は, 多項目CTDにより測定した。採水は, 北原式採水器またはバンドーン式採水器にて行い, 栄養塩, クロロフィルa濃度 (以下クロロフィルa), プランクトン細胞密度の測定に供した。プランクトンの細胞密度は, 原則として試水 1 mLを検鏡した。また, 代表点の表層において全珪藻数の測定を行った。

なお, 赤潮の発生に関しては, 本事業以外での調査結果も一部含めてとりまとめた。気象データとして, 気象庁気象統計情報 (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/manureport.html>) から姫路特別地域気象観測所 (兵庫県姫路市) における気温, 風速, 降水量および大阪管区气象台 (大阪府大阪市) の全天日射量の観測値と平年値 (1991年~2020年) を解析に用いた。

#### 2) 冬季海洋モニタリング調査

当該海域に計 40 点の調査定点を配置し (図 2), 有害珪藻赤潮が発生する 10~翌 2 月までに計 4 回以上, 海洋環境 (水温, 塩分, 栄養塩等) およびプランクトン細胞密度等のモニタリング調査を実施した (表 3)。

#### 調査定点 (40 定点, 図 2)

徳島県 3点 (St.2, St.4, St.5)  
香川県11点 (KA1, KA2, KA4, KA7, K4, KA11, KA19, KA21, KA22, KA23,  
KA26)  
岡山県11点 (OY1, OY2, OY3, OY4, OY5, OY6, OY7, OY8, OY9, OY10, OY11)  
兵庫県12点 (H1, H2, H3, H4, H6, H7, H8, H28, H29, H30, H31, H32)  
大阪府 3点 (OS1, OS2, OS3)

#### 調査実施月日

徳島県 11/2, 12/5, 12/21, 1/6, 1/19, 2/1  
香川県 10/17, 10/31・11/1, 11/14, 12/1・8, 12/28, 1/5・6, 1/16, 1/31・2/1  
岡山県 11/1, 12/6, 1/5, 1/31  
兵庫県 10/31, 11/14, 11/22, 11/30, 12/8, 12/21, 1/4, 1/16, 1/23, 2/1  
大阪府 10/31, 12/5, 1/5, 1/31

#### 観測層および調査項目等

水温, 塩分および溶存酸素は, 多項目CTDにより測定した (表2, 3)。採水は, 北原式採水器またはバンドーン式採水器にて行い, 栄養塩, クロロフィルa, プランクトン細胞密度の測定に供した。各調査項目の測定および分析方法を表2に示した。プランクトンの細胞密度は, 原則として試水1~3 mLを検鏡した。*Coscinodiscus wailesii*については, 試水 (100 mL~1 L) を濃縮して計数した。なお, とりまとめにあたり, 全機関の調査日がほぼ揃っている11月上旬, 12月上旬, 1月上旬, 2月上旬の結果を中心に, 一部本事業以外の調査結果も含めてデータの整理と解析を実施した。

気象データとして気象庁気象統計情報 (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>) から姫路特別地域気象観測所 (兵庫県姫路市) における気温, 風速, 降水量および大阪管区气象台 (大阪府大阪市) の全天日射量の観測値と平年値 (1991年~2020年) を解析に用いた。

### 3) 有害赤潮発生シナリオおよび発生予察技術の検証

本年はこれまでに作成した赤潮予察技術の結果検証およびシナリオの適合状況を確認した。また、ユーカンピアの予察モデルは構築後6年が経過することから、各モデルの予察精度を検証し、モデルの高精度化に取り組んだ。

### 4) 新たな情報発信方法の試行

新たな情報発信方法として赤潮ネット (<https://akashiwo.jp/>) との連携を模索した。海洋モニタリング調査により得られた瀬戸内海東部のプランクトン情報を網羅的に把握できる方法を試行した。

また、海域環境把握の高度化および漁業経営の効率化のため、過去の水温データを基にした周期性、気温の変化量等を用いる等、人的・経済的コストを軽減することのできる新たな水温予測手法を構築し、情報提供を試行した。

## (3) 結果および考察

### 1) 夏季海洋モニタリング調査

#### ① 気象

概況：2022年の近畿地方は、梅雨入りが平年より遅い6月14日頃となり（平年：6月6日頃）、梅雨明けは7月23日頃（平年：7月19日頃）であった。5月下旬の天候は晴れた日が多かった。6月も晴れた日が多く、下旬は日照と気温が平年よりかなり高かった。降水量は平年よりかなり少なかった。7月上旬から中旬にかけては梅雨前線や低気圧の影響で曇りや雨の日が多く、下旬は高気圧に覆われて晴れた日が多かった。7月の降水量は平年並みであった。8月上旬は晴れた日が多かったが、中旬から下旬にかけては台風や前線、低気圧の影響で雨が多かった。8月の降水量は平年並みであった。

気象庁観測結果：6～8月の気温、日平均風速、降水量および全天日射量の旬平均値・旬合計値と旬平年値の推移を図3～6に示した。気温は、6月下旬から7月上旬に平年よりかなり高かったが、その他の期間はほぼ平年並みであった（図3）。日平均風速は、6月と8月上旬は平年を上回ったが、その他の期間は平年並みか平年より低く推移した（図4）。降水量は、6月上旬、7月中旬および8月中旬は平年より多く、その他の期間は平年より低かった（図5）。全天日射量は、6月上旬および下旬から7月上旬、7月下旬から8月上旬は平年より多かったが、6月中旬および7月中旬、8月中旬から下旬は平年並みか少なかった。（図6）。

#### ② 海象

水温（図7）：播磨灘では6月中旬に18～22℃前後で、その後穏やかに上昇した。その後8月上旬にかけて表層水温は27～28℃前後まで上昇した。大阪湾では6月下旬に表層水温が26℃前後で、その後は横ばい傾向であったが、8月上旬に上昇した。

塩分（図8）：播磨灘北部では7月下旬、8月上旬に降雨の影響による塩分低下がみられた。

播磨灘南部では大きな変化はみられず、32前後で推移した。大阪湾では調査期間中22～32前後で推移し、7月下旬と8月上旬に大きな塩分低下がみられた。

透明度（図9）：播磨灘北部では3～8m、播磨灘南部では5～10m、大阪湾では3～5mで推移した。

#### ③ 水質

栄養塩（図10～12）：全般に低めで推移した。DIN濃度（以下DIN）については、徳島県、香川県、兵庫県、大阪府海域ともに表層と底層の層間差が大きかった。岡山県海域と大阪府海域では、7月下旬に表層のDINが高かった。

クロロフィルa（図13）：播磨灘北部では高めで、播磨灘南部では低めで推移した。大阪湾では高めであった。

DO (図 14) : 期間を通じて表層は高く、底層は低く推移し 7 月から 8 月にかけて層間の差が大きくなった。

④ 有害赤潮種

*Chattonella antiqua* および *C. marina* (図 15, 16) : 6 月中旬に播磨灘南東部で初認された (0.01 cells/mL (6/13) 徳島県海域, St.4, 中層)。6 月下旬から 7 月下旬にかけて播磨灘および大阪湾で出現が確認されたものの、期間中は低密度で推移した。なお、片上湾における別調査では 5 月 23 日に湾奥で初認され、8 月 1 日に 2,790 cells/ml まで増加した。その後いったん減少したが、8 月 22 日には期間中最高となる 11,940 cells/ml となった。以降は急速に減少し、9 月 5 日以降には確認されなくなった。いずれの調査時においても湾奥付近で細胞密度が高く、湾外への流出は確認されなかった。

*Karenia mikimotoi* (図 17, 18) : 6 月上旬に播磨灘北部で初認された (0.7 cells/mL (6/6) 兵庫県海域, H2, 中層)。播磨灘南東部では低密度で推移したが、播磨灘北部および南西部、大阪湾で高密度化し赤潮を形成した。関係府県における出現状況および赤潮形成に関連する発生要因は以下のとおり。

・兵庫県海域 (播磨灘北東部)

6 月上旬に播磨灘北部で初認された (0.7 cells/mL (6/6), H2, 中層)。初認から断続的に低密度な出現が確認されたが、7 月中旬から下旬 (最高細胞密度 ; 6,700 cells/mL (7/23), 本調査外の臨時調査地点) と 8 月上旬 (最高細胞密度 ; 6,200 cells/mL (8/8), 本調査外の臨時調査地点) に高密度化した。

・香川県海域 (播磨灘南西部)

8 月 1 日に初認され (最高細胞密度 ; 16.3 cells/mL, K5, 5 m 層), 8 月 12~15 日にかけて広い範囲で赤潮化した (最高細胞密度 ; 876.0 cells/mL (8/12), K1, 10 m 層)。その後速やかに減少し、8 月 18 日以降は低密度で推移した。本種赤潮による漁業被害は、東かがわ市沿岸の養殖トラフグと志度湾の養殖カンパチで確認された (表 4)。本種は水深 20 m 前後の日周鉛直移動により表層だけでなく底層付近の栄養塩を個体群増大に利用できるとされている (Koizumi *et al.* 1996)。本年の播磨灘南部における栄養塩濃度の推移を見ると、表層~10 m 層では本種の増殖速度に対する半飽和定数 (DIN=0.78  $\mu$ M, DIP=0.14  $\mu$ M) (山口 1994) を下回る調査定点が見られたのに対し、底層では概ね上回っていた (図 10, 11)。また、8 月は栄養塩をめぐる競合相手となる珪藻類の出現密度が低く (図 21), *Chattonella* spp. (図 15, 図 16, 図 19) も低密度であった。以上の海域環境が、本種の増殖に有利に働いたものと考えられた。

・大阪湾 (大阪府海域)

8 月後半から徐々に増加し始め、9 月 7 日には 20 cells/mL, 9 月 22 日には 18 cells/mL 確認された。10 月 3 日には、湾奥で珪藻類の赤潮中にパッチ状に高密度化し、21,875 cells/mL で赤潮化した。なお、本種の高密度海水中には珪藻類はほとんど確認されず、珪藻類の赤潮海水中にも本種はほとんど確認されなかった。以後は低密度化した (10 月 17 日に 16 cells/mL, 10 月 31 日に 3 cells/mL)。漁業被害なし。

*Chattonella ovata* (図 19) : 6 月上旬に播磨灘南東部で初認された (0.01 cells/mL (6/13) 徳島県海域, St.4, 表層)。7 月中旬にかけて播磨灘南東部で出現が確認されたものの、期間中は低密度で推移した。

*Cochlodinium polykrikoides* (図 20) : 6 月下旬に播磨灘南東部で初認された (0.23 cells/mL (6/27) 徳島県海域, St.4, 5 m 層)。8 月中旬にかけて播磨灘中部および播磨灘南部で出現が確認されたものの、期間中は低密度で推移した。

本事業の調査対象海域外における有害種の出現状況を以下に示す。

*Heterocapsa circularisquama* : 期間中における出現は確認されなかった。本事業の対象期間外であるが、播磨灘北部相生湾内で 9 月 26 日に出現が確認され (最高細胞密度 ; 15 cells/mL 兵

庫県海域，本調査外の臨時調査地点），10月3日に13.3 cells/mLとなり，その後は確認されなかった。

*Heterosigma akashiwo*：本事業の調査対象海域外ではあるが，紀伊水道に面する徳島県小松島市和田島町沿岸では，本種が7月8日～12日にかけて高密度化し赤潮を形成した（最高細胞密度9,000 cells/mL，7/8）。なお，この赤潮による漁業被害はなかった。

*Gonyaulax polygramma*：本事業の対象期間外であるが，播磨灘北部相生湾内で10月7日に高密度化し赤潮を形成したが（最高細胞密度：23,500 cells/mL 兵庫県海域，本調査外の臨時調査地点），10月11日には低密度化した。この赤潮による漁業被害の報告はなかった。

その他(図21)：*Skeletonema* spp.や*Chaetoceros* spp.等で構成された珪藻類が優占して出現した。

#### ⑤ まとめ

2022年6～8月の瀬戸内海東部海域における赤潮発生状況を表4に示した。発生件数は7件で，*K. mikimotoi*によるものが5件であった。この赤潮による漁業被害は，香川県海域で確認された。また，岡山県では*C. marina*，徳島県海域では*H. akashiwo*による赤潮が確認された。その他の有害種については，調査期間中の高密度化は確認されなかった。

## 2) 冬季海洋モニタリング調査

### ① 気象

概況：11月の近畿地方は，上旬から中旬は高気圧に覆われて晴れた日が多かった。下旬は低気圧や前線の影響で曇りや雨の日が多かった。寒気の影響が弱く11月の平均気温はかなり高かった。12月上旬は数日の周期で天候が変わり，中旬と下旬は冬型の気圧配置となった日が多く気温は低くなった。1月は上旬と下旬を中心に冬型の気圧配置となることが多く，中旬は低気圧や前線の影響で荒れた日が多かった。気温は上旬から中旬が高く下旬はかなり低くなった。

気象庁観測結果：11月から2月上旬の気温，日平均風速，降水量および全天日射量の旬平均値・旬合計値と旬平年値の推移を図22～25に示した。気温は，11月は平年より高いかまたは，平年並みで推移したが，12月から1月上旬は平年を下回り，1月中旬は平年より高く，1月下旬は平年より低く，2月上旬は平年より高くなった(図22)。日平均風速は，11～12月上旬は概ね少ないか平年並みで推移した。その後は12月中旬と下旬は平年より多く，1月上旬から2月上旬までは少ないかまたは平年並みで推移した(図23)。降水量は，11月下旬は平年よりかなり多かった。12月から1月上旬は少なく，1月中旬～2月上旬までは平年並みかまたは多かった(図24)。全天日射量は，期間中，概ね平年を上回った(図25)。

### ② 海象

水温(図26)：期間ごとの全海域平均で見ると，11月上旬は21°C前後，12月上旬は16～18°C，1月上旬は10～11°C，2月上旬は8～9°Cであった。大阪湾は，11月から2月にかけて表層より底層の水温が1～2°C程度高く，他の海域と比べて表底差が大きかった。大阪湾北部の定点では河川水の影響が大きく，特に表層で低水温，低塩分であったことにより，この表底差が生じたと推察された。

塩分(図27)：播磨灘南部と備讃瀬戸では11月から2月にかけて塩分が緩やかに上昇した。播磨灘北部では12月に表層の塩分が低下し，降雨の影響が考えられた。大阪湾では期間中の表層塩分が29～31，底層は32前後となっており，期間を通じて他の海域より表底差が大きかった。水温と同様，河川水の影響したと推察された。

透明度(図28)：11～2月の大阪湾の透明度は4～6m，播磨灘北部で3～7m，備讃瀬戸は3～8mで推移した。播磨灘南部は5～11mと他の海域に比べ高く，これは植物プランクトンの発生が少なかったことが影響したと考えられた。

### ③ 水質

栄養塩(図29～31)：播磨灘のDINは11，12月に6～7μMとなったが1月には低下した。播磨

灘北部で特に低く、 $2\ \mu\text{M}$  以下となった。備讃瀬戸における DIN は、11 月から 12 月には  $7\ \mu\text{M}$  前後の濃度で推移したものの、12~2 月にかけて大きく低下し、2 月には  $1\ \mu\text{M}$  未満~ $2\ \mu\text{M}$  となった。 $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度 (以下  $\text{PO}_4\text{-P}$ ) は播磨灘、備讃瀬戸ともに  $0.3\sim 0.8\ \mu\text{M}$  前後で推移した。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$  濃度 (以下  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ) は播磨灘では  $3\sim 16\ \mu\text{M}$  前後で、備讃瀬戸では  $2\sim 14\ \mu\text{M}$  前後で推移した。近年続いていた *Coscinodiscus wailesii* の発生が少なかったことで、両海域における栄養塩が昨年、一昨年と比較して高い値を示したと考えられた。大阪湾では、DIN は  $1\sim 25\ \mu\text{M}$  前後、 $\text{PO}_4\text{-P}$  は  $0.2\sim 1.1\ \mu\text{M}$  前後、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$  は  $1\sim 22\ \mu\text{M}$  前後で推移したが、表層と底層で濃度差がみられた。クロロフィル *a* (図 32) : 播磨灘南部と備讃瀬戸では期間中の変動が小さかった。播磨灘北部では 1 月に一部定点においてクロロフィル *a* の増加がみられ、大阪湾では 12 月に一部の定点で大きく増加した。

DO (図 33) : 大阪湾を除いて表層、底層とも大きな変動が見られなかった。大阪湾は表底差が他の海域と比べ大きく、上昇傾向がみられた。

#### ④ ノリ色落ち原因種

*Coscinodiscus wailesii* (図 34) : 備讃瀬戸、播磨灘では増殖のピークが 2 月、大阪湾では 12 月にみられたが、いずれの海域においても昨年、一昨年と比較して発生は低密度であった。

*Eucampia zodiacus* (図 35) : 11 月から 12 月は播磨灘北部において  $6.7\ \text{cells/mL}$  ( (10/31) 兵庫県海域, H32, 底層) 確認され、播磨灘南東部でも発生が確認された。それ以外の海域では不検出で推移した。1 月は播磨灘北部において  $210\ \text{cells/mL}$  ( (1/4) 兵庫県海域, H28, 表層) 確認され、播磨灘南部の一部の調査定点でも  $100\ \text{cells/mL}$  以上となった。2 月は播磨灘北部において  $241\ \text{cells/mL}$  ( (2/1) 兵庫県海域, H29, 底層) 確認され、大阪湾では最高細胞密度  $756\ \text{cells/mL}$  ( (2/1) 大阪府海域, OS3, 中層) まで増加した。本年漁期の、2023 年 2 月上旬現在までの暫定的な発生状況について、平成 25 年度の報告書 (高木ら 2014b) に基づく発生基準をあてはめると、播磨灘北東部と南西部海域および大阪湾では AA (大量発生) または A (発生年)、他海域は B (局所発生年) となる見込みである。

その他の種類 :

- ・ 播磨灘南東部 (徳島県海域) では、1 月初旬 (1 月 6 日) に *Chaetoceros* spp. 主体に小型珪藻が  $558\ \text{cells/mL}$  みられたが、それ以外の調査では  $9\sim 55\ \text{cells/mL}$  と低密度だった。
- ・ 播磨灘南西部および備讃瀬戸 (香川県海域) では、*Chaetoceros* spp. や *Leptocylindrus* spp. を中心とした小型珪藻が期間を通じて見られたものの、全体的に低密度であった。
- ・ 播磨灘北東部 (兵庫県海域) では、期間を通じて *Chaetoceros* spp. を中心とした小型珪藻が発生していた。
- ・ 播磨灘北西部および備讃瀬戸 (岡山県西部海域) では、1 月以降 *Leptocylindrus danicus* や *Chaetoceros* spp. を中心とした小型珪藻が発生していた。
- ・ 大阪湾 (大阪府海域) では、12 月に湾奥で *H. akashiwo* による赤潮が発生した ( $2.68 \times 10^3\ \text{cells/mL}$ )。その他の期間は概ね  $100\ \text{cells/mL}$  以下の低密度であった。

#### ⑤ まとめ

今年度は秋に *C. wailesii* の大量発生がみられなかったこと、*E. zodiacus* が 1 月から 2 月に播磨灘および大阪湾で大量発生したことが特徴的な事象であった。12 月までは、表層栄養塩 (DIN) 濃度が各海域の平均  $6\ \mu\text{M}$  以上と近年と比較して高く、養殖ノリの育苗や本張りへの影響が少なかった。しかし、1 月以降は *E. zodiacus* 等の増加に伴う栄養塩の急激な減少によってノリの色落ち被害が確認され、色調の低下が報告されていることから、今後の動向に注視する必要がある。

### 3) 有害赤潮発生シナリオおよび発生予察技術の検証

#### ① シャットネラ赤潮

- ・ 発生予察の検証

令和 3 年度に予察精度を検証しモデルの高精度化に取り組んだ各モデル（小川ら 2022）で発生予察を行った。各府県海域における本年度取得したデータによる予察結果およびシナリオ適合状況を以下に示す。なお、本予察モデルは *C. antiqua* および *C. marina* の 2 種による赤潮を対象とし、生理生態学的特性の異なる *C. ovata* の発生履歴は勘案されていない（秋山ら 2021）。また、地球温暖化や貧栄養化等の影響を受けて海域環境は年々変化している。現在運用しているモデルが適合しなくなる可能性も高いことから、今後もデータを継続的に取得し、解析を進めることによりモデルの修正と的中率の向上に努める必要がある。

#### 1. 徳島県海域（播磨灘南東部）

##### ・ 発生予察の検証

令和 3 年度に、前事業で作成した赤潮発生予察モデルの精度検証と高精度化を行った。新たな予察モデルの構築には 1999～2014 年までの環境条件（降水量（徳島市 5 月））および 1999～2021 年までの環境条件（水温（6 月 St.4, 1 m）、水温（6 月 St.4, 5 m）、DIN（6 月 St.4, 10 m）、珪藻の細胞密度（7 月上旬 St.4, 0-5 m））を使用している。2022 年に適用した結果、いずれも「×（非発生）」となった（表 5、図 36）。2022 年夏季、シャットネラ赤潮は非発生であり、予察が的中した。

徳島県海域のシャットネラ赤潮発生シナリオを図 37 に示した。2022 年 5 月の降水量は、解析に用いた期間（1999～2014 年）における赤潮発生時（2003, 2011）の平均値である 311.8 mm に対して 155.0 mm と少なかった。また、6 月の表層の DIN は解析に用いた期間（1999～2021 年）における赤潮発生時（2003, 2011, 2021 年）の平均値である 1.59  $\mu\text{M}$  に対して 0.42  $\mu\text{M}$  と小さく、7 月上旬の珪藻細胞密度は発生年の平均が 29.6 cells/mL であったのに対して、209.7 cells/mL とやや高密度であった。これらの要因がシャットネラ赤潮発生シナリオに適合していなかったものと考えられる。

#### 2. 香川県海域（播磨灘南西部）

##### ・ 発生予察の検証

前事業では、1999～2014 年のデータセットを用いてシャットネラ赤潮発生予察モデルを構築した。また、令和 3 年度は前事業で構築したモデルの予察精度を検証し、高精度化を図った。図 38 に香川県海域のシャットネラ赤潮発生シナリオを示す。香川県海域では、「5 月の塩分,  $\text{PO}_4\text{-P}$ 」と「5 月の降水量, 6 月の  $\text{PO}_4\text{-P}$ , 7 月の珪藻細胞密度」を説明変数とする 2 つのモデルによる予察を実施している。2022 年の結果を表 5 に、代表的な予察モデル（説明変数；5 月の塩分,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ）の解析例を図 39 に示した。

本年はシャットネラ赤潮の非発生年であった。「5 月の塩分,  $\text{PO}_4\text{-P}$ 」のモデルによる予察は的中したものの、「5 月の降水量, 6 月の  $\text{PO}_4\text{-P}$ , 7 月の珪藻細胞密度」では「 $\Delta$ （判断保留）」と予察された（表 5）。香川県海域の発生シナリオでは 5 月の降水量が多く、6～7 月の栄養塩濃度と珪藻類細胞密度が低い年にシャットネラ赤潮が発生しやすいとしている（図 38）。本年は、6 月の栄養塩濃度が低かったものの、5 月の降水量が少なく、7 月の珪藻類細胞密度が高かったことが「 $\Delta$ （判断保留）」予察に影響したものと推察された。

#### 3. 岡山県海域（播磨灘北西部）

##### ・ 発生予察の検証

令和 3 年度に前事業で作成したモデルの予察精度を検証し、直近 16 年間（2006～2021 年）のデータを用いて高精度化を行った。新たなモデルはモデル①:表層水温（5 月）、表層塩分（5 月）、表層 DIN（6 月）、モデル②:表層水温（5 月）、表層塩分（5 月）、底層水温（7 月）を説明変数とする。なお、本県では有害種の発生初期に陸水の流入が少ない場合、海域の DIN 量が不足して（競合する）珪藻の増殖が抑制され、その結果として *C. antiqua* および *C. marina* が増殖する可能性が上昇するという考えを基本にしている（図 40）。

本年の *C. antiqua* および *C. marina* は本県基準 (100 cells/ml 以上を発生年) を超えることがなく、「× (非発生)」であった。前述した予察モデルを 2022 年に適応したところ、予察モデル①については「△ (判断保留)」, 予察モデル②については「× (非発生)」となっており、予察は概ね的中したと考えた (図 41)。

#### 4. 兵庫県海域 (播磨灘北東部)

##### ・ 発生予察の検証

これまで検討してきた兵庫県海域におけるシャットネラ赤潮発生シナリオの模式図を図 42 に、5 月の表層水温 (高いほど発生する)、底層水温 (低いほど発生する)、6 月または 7 月の珪藻密度 (低いほど発生する) を説明変数とする判別分析の結果を図 43 に示した。なお、ここでは長谷川ら (2018a) で示されたとおり、珪藻密度のデータ獲得時期別に 6 月時点での予察を早期予察、7 月時点での予察を直前予察とした。

本年は、両予測モデルでシャットネラ赤潮の「× (非発生)」と予察され、予察は的中した。2022 年は 4 月から当該海域の表層水温は高めで推移していたが、底層の水温も高めであり、珪藻類の発生は多かった。

兵庫県海域における *Chattonella* spp. の初認は 6 月 20 日となり、例年より遅かった。7 月 10 日に 10 cells/ml (H31, 底層) まで増加したが、その後は低密度化し終息した。珪藻類は 6 月下旬に一時的に減少したが、その後は細胞密度の高い状態が続き、*Chattonella* spp. の発生を抑制したと考えられた。

#### 5. 大阪府海域 (大阪湾)

##### ・ 発生予察の検証

令和元年度に作成したフローチャートに基づいて予察を実施した (図 44)。フローチャートでは、第 1 段階として 6 月の *Chattonella* 細胞密度、第 2 段階として環境条件 (7 月上旬の水温 1 年偏差、5~6 月の降水量、6 月下旬~7 月上旬の日照時間) を説明変数とする線形判別により判別基準を設けている。また、昨年度に実施した予察モデルの精度検証および高精度化により、5~6 月降水量と 6 月下旬~7 月上旬日照時間を説明変数とし、判別期間を予察年前年まで延長した新たな判別モデルを予察モデルとして追加した。本年は、6 月中に *Chattonella* spp. が確認されなかった (0 cells/mL) ことから、第 1 段階の *Chattonella* 細胞密度で「× (非発生)」となった。また、第 2 段階の判別式では全 4 モデルのうち 1 モデルで「○ (発生)」, 残り 3 モデルで「△ (判断保留)」となった (図 45)。本年夏季にはシャットネラ赤潮は発生しなかった (非発生) ことから、第 1 段階での予察結果が的中した。

これまでの予察では 6 月の *Chattonella* 細胞をシードポピュレーションとし、5~7 月の環境が *Chattonella* spp. にとって好適であれば (近年の赤潮発生時期として多い 7 月頃に) 赤潮化するとシナリオ化してきた (図 46)。本年は環境としては赤潮発生の可能性が高い条件 (水温が高く、日照時間が長い) を満たしていた部分もあったが、降水量が少なかったこと、またシードポピュレーションとなる細胞が出現しなかったことによりシャットネラ赤潮が発生しなかったと考えられる。

#### ② ユーカンピア赤潮

##### ・ 発生予察の検証

シャットネラ赤潮と同様に、2016 年に 2005~2015 年までの環境条件データセットを用いた判別解析により毎年の発生状況を予察するモデルを構築した。また、これまでの海洋環境データの解析や数値計算から地場発生と海流依存発生の二種類の存在が明らかとなり、これを考慮した発生シナリオを作成した (長谷川ら 2018b)。本検証では昨年度漁期 (2021 年 11 月~2022 年 3 月) の予察結果 (表 6) とシナリオ適合状況を確認するとともに、高精度化に取り組んだモ

デルによる，本年度の予察状況（本報告作成時点で漁期が終了していないため暫定的な予察）について各府県海域別に以下に示す。

- ・ 予察モデルの高精度化

現在，各府県が運用している予察モデルは構築後6年が経過することから，各モデルの予察精度を検証し，モデルの高精度化に取り組んだ。予察精度の検証は，全てのモデル（教師データ期間：2005～2015年）について，2016～2021年の的中率と判断保留（△）予察の含有率を調べた。予察モデルの高精度化は，長谷川ら（2018a）の方法に準じ，説明変数の再選択や教師データ期間の変更等により行った。新たに構築・改良されたモデルの予察精度（汎化性能）は，時系列データに対する交差検証により確認した。ここでは，予察モデルごとに2005～2021年の環境条件データセットを教師データ（学習データ）とテストデータに区分した。

現在運用中の各モデルにおける予察精度の検証結果を表6に示した。各モデルにおける2015～2021年の予察精度をみると一定の精度を有するものの一部についての的中率の低いモデルや判断保留（△）予察の含有率が高いモデルもみられた。各モデルにおける高精度化の取り組み状況（高精度化の検証結果）を表7に示した。本年度，既存モデルの精度検証を行ったところ，現在でも一定の精度を有して変更の必要がない海域，的中率や判断保留割合の観点から予察モデルを作り直す必要があった海域が混在した。次年度以降，各府県が運用を予定している予察モデルの一覧を表8に示した。今後も，モデルの予察精度について確認を行い，的中率の低下等が見られた場合には，再度新しい変数の探索や教師データ期間の見直し等を実施する。以下に，各府県海域における予察モデル高精度化の取り組み結果を示す。

### 1. 徳島県海域（播磨灘南東部）

- ・ 発生予察の検証

徳島県海域では，*E. zodiacus*の大発生（250 cells/mL以上）は2011年の1度のみであり（表9），予察技術を確立するためのデータ数が十分ではない。徳島県海域における*E. zodiacus*は，最高細胞密度に達する時期が1月（2011年度），2月（2016年度），3月（2012，2015年度）の3パターンに分かれることから，それらパターンと水温，塩分，風速，栄養塩濃度などの環境パラメータとの関連性を解析し，それぞれで発生シナリオを構築している。2021年漁期は，最高細胞密度4.18 cells/mLと低密度であり，局所発生年となった。シナリオとの適合状況を検証した結果を以下に示す。

#### ア) 1月の発生シナリオ（流入発生）の検討

前事業において，1月にユーカンピア赤潮が大発生した年（2011年のみ）は「12月に北寄りの風（徳島地方気象台における北寄りの最大風速のベクトル成分合計）が強い」，「表層塩分が低い」，「底層水温が高い」，「DINが12月に高く，1月に低い」という特徴を示した（図47）。これらのことから，1月のユーカンピア赤潮は，「他海域の*E. zodiacus*が北～北西寄りの吹送流によって流入し，地先の栄養塩を利用して増殖する」というシナリオが考えられた（図48）。2021年12月の徳島県の北風風速合計値は平年値（2000～2020）より低く，兵庫および香川県海域では同月に*E. zodiacus*がほとんど出現しなかった。また，塩分は平年値よりやや低かったものの，底層水温は平年値並みでありDINは平年値より著しく低く発生シナリオと適合していなかった。したがって，*E. zodiacus*は徳島県海域にほとんど流入せず，増殖もしなかったと考えられた。

#### イ) 2，3月の発生シナリオ（流入発生）の検討

2，3月の発生については，発生年と局所発生年との間で統計的に有意な環境条件を見いだせていないものの，発生年で「1月に北寄りの風が強い」という傾向がみられた。このことから，2，3月の発生シナリオも地場発生ではなく，他海域からの高密度水塊の流入を想定している（図49）。徳島県の1月の北風風速合計値は平年値よりやや高かったものの，上述の通り，兵庫県海域において*E. zodiacus*は低密度であった。したがって，*E. zodiacus*は徳島県海域にほとんど

流入しなかったと考えられた。

- ・ 予察モデルの高精度化

徳島県海域における *E. zodiacus* は、最高細胞密度に達する時期が1月(2011年度)、2月(2016年度)、3月(2012、2015年度)の3パターンに分かれるが、1月発生と2月または3月発生は赤潮発生シナリオが異なるため(図48、図49)、それぞれで予察モデルの構築を試みた。従来の教師データ期間(2005~2015年)では、赤潮発生回数が1月発生については1回、2月または3月発生については2回と少なく、統計解析には不十分だったが、教師データ期間を2016年以降まで拡大することで、2月または3月発生については赤潮発生回数が2016年を加えた3回となり予察モデルの構築が可能となった。

予察モデルの構築には長谷川ら(2018a)に準じ、説明変数の選択や解析を行った。2005~2016年の環境条件データセット(1~3月の水質および気象等の60指標)をユーカンピア赤潮の発生・非発生年に分けて Mann-Whitney U-test を行った。そして、発生年と局所発生年との間で偏りが見られた環境条件の中から、要素間の多重共線性を考慮しつつ、徳島県の2月または3月の赤潮発生シナリオに沿うものを抽出し、「1月の北風風速合計値(徳島地方気象台における北寄りの最大風速のベクトル成分合計)」と「1月の兵庫県沿岸のユーカンピアの最高細胞密度」を組み合わせたモデルを構築した。

精度の検証については、2017~2021年の5か年に対して、2005年から予察の前年までを教師データ期間として時系列分割交差検証を行った。その結果、2017年と2020年で判断保留となったものの、2018年および2019年、2021年で非発生と予察され、予察は的中した(的中率100%(3/3))。教師データ期間を的中率および判断保留(△)予察含有率の観点から検討したところ、的中率は2017~2021年の5か年に対していずれも100%だったが、判断保留(△)予察含有率は教師データ期間を最も長くした場合に43.8%となり最も小さくなった。したがって、教師データ期間は2005年から予察対象年の前年までのデータを対象とする。なお、2022年漁期は、「判断保留(△)」と予察されているが(図50)、本年度の最終調査実施後に改めて予察結果の検証を進める。

## 2. 香川県海域(播磨灘南西部・備讃瀬戸南部)

- ・ 発生予察の検証

前事業では、2005~2015年度のデータを用いてユーカンピア赤潮発生予察モデルを構築した。図51に香川県海域のユーカンピア赤潮発生シナリオを示す。香川県海域では播磨灘と備讃瀬戸について、11~12月の環境条件データセットより、その漁期(1~3月)に「大発生(O)」、「局所発生(X)」または「判断保留(△)」を予察するモデルを作成しており、その検証を行った。

### ア) 播磨灘

2021年漁期のユーカンピア赤潮は局所発生であり、「12月北風、12月表層珪藻細胞密度」の2変数による判別分析の結果は「局所発生(X)」と予察され的中した。(表6、図52)。2022年漁期の予察については「大発生(O)」と予察されているが、本年度の最終調査結果の判明後、予察結果の検証を進める。

### イ) 備讃瀬戸

2021年漁期のユーカンピア赤潮は局所発生であり、「11月西風、12月降水量」の2変数による判別分析では「大発生(O)」と予察され、的中しなかった(表6、図52)。香川県備讃瀬戸における本種の発生シナリオでは、11~12月の西から北西寄りの風が強く、降水量の低い年ほど赤潮が発生しやすいとされている(図51)。2021年は、11~12月の西風が強かったものの、11月には大型珪藻の *C. wailesii* が多く発生していたこと、1~2月に小型珪藻類(*Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp.等)が発生していたことにより、本種の増殖が抑制された可能性が考えられた。

2022年漁期の予察については「大発生(O)」と予察されているが、本年度の最終調査結果

の判明後、予察結果の検証を進める。

- ・ 予察モデルの高精度化

前事業までに構築した2つのモデルについて2016～2021年の6年間のデータを用いて予察精度を検証したところ、的中率は播磨灘モデル（説明変数；12月北風・12月珪藻細胞密度）で60%となった一方、備讃瀬戸モデル（説明変数；11月西風・12月降水量）では25%と低かった（表6）。また、判断保留予察の含有率も播磨灘モデル（17%）と比較して備讃瀬戸モデル（33%）の方が高かった。以上の検証結果を踏まえ、今年度は予察精度の低下が見られる備讃瀬戸モデルについて、教師データ期間の変更や説明変数の再抽出による高精度化に取り組んだ。

まず、現行モデルの説明変数について、2016～2021年のデータを追加し、教師データ期間を2005年から予察対象年の前年までとして予察の的中状況を確認した。併せて、両説明変数の赤潮大量発生年・局所発生年の2群間における有意差をMann-Whitney *U*-testにより確認した。検証の結果、予察的中率の向上は認められず、判断保留予察の含有率が83%と現行モデルよりも高くなった（表7）。これは、教師データ期間を延長した場合、特に11月西風の説明能力が大きく低下したためと考えられる。次に、長谷川ら（2018）の方法に準じ、2005～2021年の気象・海象データを用いた新たな説明変数の抽出を試みた。その結果、ユーカンピア赤潮の大量発生年・局所発生年の2群間で有意差（Mann-Whitney *U*-test,  $\alpha=0.05$ ）の認められる環境因子を見出すことはできなかった（表10）。そこで、備讃瀬戸（香川県海域）における赤潮発生シナリオ（図52）、説明変数間の多重共線性、独立性、期待値を考慮した上で、一定の説明能力を持つと思われる11月北風と12月珪藻細胞密度の2変数を用いて、マハラノビス距離（非線形判別分析）による新たな予察モデルの構築（以下、改良モデルとする）を試みた（図53）。改良モデルは、判別率（判別期間における的中率）が100%（2/2）となった一方で、判断保留予察の含有率が88%と現行モデルよりも高かった。さらに、目的変数を「1～2月の大量発生 or 局所発生」と「3月の大量発生 or 局所発生」に区分した場合でも、有効な説明変数を見出すことはできなかった。

今回の高精度化の取り組みでは、現行モデル以上に有効な説明変数の再抽出には至らなかった。一方で、現行モデルの説明変数のうち、12月降水量については2005～2020年を教師データ期間とした場合を除くと、引き続き一定の説明能力を保持していることが分かった。香川県の備讃瀬戸におけるユーカンピア赤潮は地場発生に加えて備讃瀬戸北部からの流入発生を想定したシナリオとなっている（図51）。現時点では、現行モデルによる予察精度の検証を引き続き行うが、今後は、備讃瀬戸北部（岡山県海域）の予察結果を踏まえたモデルの構築（改良）に取り組む必要がある。

### 3. 岡山県海域（播磨灘北西部・備讃瀬戸北部）

- ・ 発生予察の検証

2005～2015年度のデータを用いて播磨灘と備讃瀬戸の2海域で発生シナリオと1～2月発生の予察モデルを構築している。いずれのシナリオも良好な光環境で競合する小型珪藻の増殖後、栄養塩が制限要因となり、有機態リンの利用能で優位な*E. zodiacus*が優位化するとしている（図54、図55）。本検証では、2021年度を中心に予察モデルの的中結果やシナリオの適合状況を確認した。なお、各海域20%以上の調査点で細胞密度が100 cells/mLとなった場合を発生年としているが、教師データによる判別分析で誤判別があったため、予察を「判断保留」とする「△」の範囲を設定している。

#### ア) 播磨灘

2021年漁期は*E. zodiacus*の局所発生年であった。予察は11月西風（姫路、気象庁データ）、1月底層PO<sub>4</sub>-P（OY2）のモデルで「×（局所発生）」、12月日照時間、1月底層PO<sub>4</sub>-Pのモデルで「×（局所発生）」であり（図56）、両モデル共に的中した。11月の西風成分が弱く、

12月の日照時間が多かったため（姫路，気象庁データ），継続して小型珪藻が増殖したため *E. zodiacus* が増殖できなかったと考えられた。

#### イ) 備讃瀬戸

2021年漁期は *E. zodiacus* の局所発生年であった。予察は12月日照時間（岡山，気象庁データ），12月底層  $\text{PO}_4\text{-P}$ ，1月底層水温のモデルにおいて「○」（大量発生），1月底層  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ，1月底層水温のモデルで「×（局所発生）」となり（図57），12月底層  $\text{PO}_4\text{-P}$ ，1月底層水温を用いたモデルにおいて的中しなかった（表6）。同海域では，漁期当初に大型珪藻の *C. wailesii* が多く発生し，一時的に栄養塩が枯渇する状況が見られた。そのため，12月底層の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度が低下し，同項目を指標とするモデルにおいて，発生するとの予察結果になったと考えられた。

#### ・ 予察モデルの高精度化

岡山県海域では，2005～2015年度のデータを用いて播磨灘と備讃瀬戸の2海域において1～2月における *E. zodiacus* の発生予察モデルを構築している。両シナリオ共に，良好な光環境で競合する小型珪藻の増殖後に栄養塩が枯渇した結果，有機態リンが利用できる *E. zodiacus* が優占することを軸としている。前事業でのモデル構築後5年が経過したことから，2016～2021年の6カ年のデータを用いて精度検証を行い，精度に問題があった場合について，その修正や再構築を検討することとした。

#### ア) 精度検証

播磨灘においては，2016，2019年が発生年となり，それ以外では局所発生であった。予察の的中率をみると，11月西風，1月底層  $\text{PO}_4\text{-P}$  を判別係数として用いた線形分析において50%となり，12月日照時間，1月底層  $\text{PO}_4\text{-P}$  によるマハラノビス距離を用いたモデルでも40%となり，いずれについても発生年を的中させることはできなかった（表6）。備讃瀬戸では，2016，2017年が発生年となった。予察の的中率をみると，12月日照時間，12月底層  $\text{PO}_4\text{-P}$ ，1月底層水温を用いた線形分析において60%となり，1月底層水温，1月底層  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  によるマハラノビス距離を用いたモデルにおいて67%となり，前者のモデルで2017年の発生を的中させるなど一定の精度を有していた。これらの検証結果を踏まえ，播磨灘の予察モデル修正が必要と考えたことから，高精度化に取り組んだ。

#### イ) 教師データの追加

2005～2015年以降のデータに2016，2017，2018，2019，2020年のデータを1年ずつ追加し，予察する前年までを判別データとする時系列追加型の交差検証を実施した。すなわち，2016年の予察には2005～2015年（ $n=11$ ）のデータを，2017年の予察には2005～2016年（ $n=12$ ）のデータを用いている。その結果，期間中の線形判別分析での的中率は0%（表7），マハラノビス距離を用いたモデルでの的中率が25%となり，いずれにおいても明確な予察ができていなかった。また，図表化していないが，1999年以降を教師データとして教師期間を延長して精度検証を行った場合には，判断保留となる確率が67%となり，説明変数の説明力が低下していた。これらのことから，予察モデルの説明変数の検証が必要と考えられた。

#### ウ) 説明変数の変更

新たな予察モデルの検証にあたっては，近年の気象，海況状況の変化を考慮して2011～2021（直近11年間）年のデータを用いた。11～1月の水質および気象等の指標をそれぞれ *E. zodiacus* の発生，非発生に分けて Mann-Whitney *U*-test を行った。その結果，1月表層クロロフィル *a* と11月底層水温について有意な（ $p<0.1$ ）差が見られた（表11）。また，有意差はなかったものの，11月表層クロロフィル *a* についても発生年と非発生年で数値の偏りが見られた。岡山県の播磨灘海域では，秋季に一定程度 *E. zodiacus* が存在する状況において，冬季に栄養塩環境が悪化し，競合する珪藻類が減少した際に大量発生につながるケースが多い。11月底層水温が高い時には，*E. zodiacus* の初期の増殖に適していること，1月のクロロフィル *a* が低い時には競合する珪藻類が少ないことから *E. zodiacus* の発生，非発生に関係する要素となったものと考えた。

#### エ) 新たなモデルの作成と検証

上記で示した11月底層水温, 11月クロロフィル a, 1月クロロフィル a を説明変数とした新たなモデル(非線形)を作成した。判別期間中(2011~2021年)の的中率は100%となり, 判断保留の割合も27%となった(図58)。一方, 汎化能力の確認のため, 2019~2021年の3カ年の発生状況を用いて, 予察年の前年までを教師期間とした時系列追加型の交差検証を行ったところ, 3カ年の内の2カ年で非的中, 1カ年で判断保留となり, 当該期間において的中しなかった。引き続き, 2022年以降のデータを加えて新たに作成したモデルの検証を継続する必要がある。今後, 岡山県では, 播磨灘については今回作成したモデル(表8), 備讃瀬戸については既存の予測モデルを用いて予察に取り組む。

#### 4. 兵庫県海域(播磨灘北東部)

##### ・発生予察の検証

前事業では, 2005~2015年度のデータを用いてユーカンピア赤潮発生予察モデルを構築した。図59に兵庫県海域のユーカンピア赤潮発生シナリオを示す。本海域(播磨灘北部)はユーカンピア赤潮の初期発生海域であり, 地場発生のみが想定されている。前事業での検討から, 本海域については, ①1~2月の発生と, ②3月の継続性について, 区別して検討することが妥当と考えられ, それぞれの期間毎に発生を予察した。また, 本海域では, 程度判断が困難な中間的な発生がこれまで確認されていないため, 大量発生・局所発生の二区分のみとして予察を運用している。

2021年漁期においては, 兵庫県海域では2月9日に*E. zodiacus*の最高細胞密度が42 cells/mLに増加したが, これ以上の増加はなく低密度で推移した。したがって, 2021年漁期の発生状況判断としては「×(局所発生)」であると判断した。

モデルによる予察結果は1~2月は「×(局所発生)」が予察され, 3月期については「○(大量発生)」が予察された(表6, 図60)。これらの予察は1~2月は的中し3月は的中しなかった。

1~3月の播磨灘の兵庫県海域では小型珪藻類との競合により, *E. zodiacus*が増殖できなかった可能性が考えられた。先行または同時発生する珪藻類構成種が*E. zodiacus*の大量発生にどのように影響するかは不明な点が多いが, 本種の大量発生は, 日照・栄養塩・水温等の環境要因が他の珪藻類に不適となるタイミングを契機とすることが多い(西川2011)。今後は, 他の珪藻類との競合・共存関係にも着目しする必要がある。

2022年漁期の予察については, 1~2月の判別領域としては大量発生が予察された。本年度の最終調査結果の判明後, 予察結果の検証を進める(3月期については, 2月に獲得されるデータを用いるため未実施)。

##### ・予察モデルの高精度化

兵庫県では2016年から現在のモデルで予察を行ってきたが, 運用から6年が経過していたことから, 予察精度の検証と高精度化の取り組みを行った。

現在のモデルによる過去6年の予察は, 1~2月予察は的中が4年, 非的中が2年, での中率67%であったが, 3月予察は的中が2年で非的中が3年, 判断保留が1年であった(表6)。このことから1~2月予察は一定の予察精度を持っていたが, 3月予察については的中率の低下が進んでいることから, 3月予察について, 教師データ期間の変更や変数の再抽出による高精度化に取り組んだ。

3月予察の高精度化にあたっては, まず現状の予察モデルに, 各説明変数の2016年から2020年まで1年ごとのデータを2005~2015年の教師データに追加して, 各説明変数について発生年と非発生年の差を調べ(Mann-Whitney U-test)翌年の予察を行い, 結果を検証した。これと並行して, 赤潮発生より以前に入手可能であることを念頭に整理した2005~2020年の観測・調査データを対象として, 発生・非発生の類型別に統計的な有意差, または分布形式に差異があった項目を説明変数として抽出した。その検討にあたっては, 説明変数の多重共線性の確認を

行った。

その結果、現状の予察モデルへの教師データ追加については、2月の最高細胞密度とPO<sub>4</sub>-Pは発生・非発生で有意差があったが ( $p < 0.05$ )、2月の日照時間は明確な違いが見られなかった。このことからデータを追加し教師データ期間を延長した場合、2月の最高細胞密度、2月のPO<sub>4</sub>-Pは引き続き説明能力を持っているが、2月の日照時間の説明能力は低下することが分かった。評価期間における予察結果においては表7のとおり、的中が4年で非的中が1年で、1年が判断保留となった。教師データ期間を2020年まで延長することで、評価期間における的中率は向上した。説明変数の抽出においては、現在用いている2月の最高細胞密度、日照時間、2月のPO<sub>4</sub>-P、以外の有効な発生・非発生に関連する説明変数を見出すことはできなかった。

これらをもとに、今後は現行のユーカンピア赤潮予察シナリオを継続し、1~2月予察は一定の精度を持っている現行の予察モデルにて予察を実施し、3月予察については説明変数の教師期間を2020年まで延長して精度の向上を図る。現行の予察が的中しなかった2ヶ年についてみると、2018年度は1月から2月にかけて小型珪藻および*C. wailesii*の発生、2020年度も小型珪藻の発生があったことから、予察された大量発生にはならなかったと考えられた。*C. wailesii*や小型珪藻類の栄養塩の消費もノリの色落ちに係る要因として重要であることから、これらを含めて監視を続けデータを蓄積し、精度向上に努める必要がある。

## 5. 大阪府海域（大阪湾）

### ・ 発生予察の検証

大阪府海域のユーカンピア赤潮は、類型化により大阪湾内における地場発生と明石海峡を經由した播磨灘北部からの流入発生を想定している。ただし、2005年以降の赤潮発生年が2005、2007、2011年の3回のみで地場/流入発生のそれぞれについて統計解析に堪えなかったために、1997年度にまで遡って再解析を行った結果を採用している。なお、2021年漁期については2021年11月~2022年2月は局所発生（非発生）となっている。

#### ア) 地場発生赤潮

浅海定線調査20定点のうち、明石海峡に近いSt.6およびSt.7を除いた18定点のうち3点以上で100 cells/mLを超過した調査年月を地場赤潮発生と定義している。これまでに作成した予察モデルでは、調査実施旬および1旬前の降水量を説明変数とする判別分析と補足情報として*E. zodiacus*を除いた珪藻細胞密度を使用している。判別分析による予察では、2021年11月は発生確率20~80%の「△（判断保留）」、2021年12月は「○（発生）」、2022年1月および2月は「×（非発生）」と判別され（図61）、2021年12月を除いて概ね的中したと言える。2021年11月下旬~12月上旬には比較的まとまった降水があったが、その他の期間は全体的に降水量が少なく、陸域からの栄養塩供給は少なかった。一方で、定期的に強風が吹き、大阪湾水質定点自動観測データ配信システム (<http://teiten.pa.kkr.mlit.go.jp/obweb/index.aspx>) によると11月10日頃、11月23日頃、12月1日頃、12月17日頃、12月26日頃、1月12日頃に鉛直混合が生じている。11月から12月にかけては、大阪湾内の広い範囲で*C. wailesii*が増殖しており、12月の予察が的中しなかったのは、*C. wailesii*との栄養塩競合が働いたためであると考えられる。なお、1月中旬以降は*Skletonema spp.*をはじめとした小型珪藻類が増殖していた。

#### イ) 流入発生赤潮

浅海定線調査時に明石海峡に近いSt. 6またはSt. 7で100 cells/mLを超えた場合を流入発生の可能性が高いとしている。解析には調査月上旬の兵庫県海域（St. H1 と St. H28 の平均）の細胞密度および西風成分（毎時データの平均値）を使用し、明石海峡付近への吹き寄せが流入へ寄与しているとしている（図 62）。解析結果は、2021年漁期にはいずれも非発生と予察され、流入発生の予察は的中したと言える。2021年11月中旬以降には、東風に対して西風が断続的に卓越していたものの、播磨灘北部、特に明石海峡に近い海域では*E. zodiacus*は高密度化しなかった（2地点平均で最高15.5 cells/L）ことから（図 63）、明石海峡付近には本種がほとんど

吹き寄せられず、潮流によって大阪湾に進入した *E. zodiacus* も少なかったものと考えられる。

・ 予察モデルの高精度化

地場発生ユーカンピア赤潮に対して、前事業で構築した判別分析による予察モデル（1996～2015年漁期データを使用）では、「当該旬の降水量」と「1旬前の降水量」という直前の気象状況を説明変数として採用しており、予察としての役割を果たしているとは言えない。そこで、当該旬の1ヶ月以前の環境データを対象に、説明変数の再検討を行った。前事業では主に気象・海象データから説明変数の探索を実施したが、有力な変数として前述の降水量しか採択されなかった。*E. zodiacus* は比較的大型の珪藻で、梯子状に連結して群体を形成するため、海面付近に留まるには海水の動きや海水との比重差が重要となることから、今回は海水の密度に着目した。赤潮発生年月と非発生年月（局所発生年を含む）における各変数の値の分布差や偏りに着目しながら説明変数を探索したところ、赤潮発生パターンと比較的関連性が見られたのは、当該月の1ヶ月前の「透明度」（Mann-Whitney  $U$ -test,  $p=0.052$ ）、「10m層の海水密度（ $\sigma_T$ ）」（Mann-Whitney  $U$ -test,  $p=0.02$ ）、「鉛直安定度（5m層  $\sigma_T$  と底層  $\sigma_T$  の差）」（Mann-Whitney  $U$ -test,  $p=0.78$ ）であった（図64）。そこで、この3変数による判別分析を実施した。なお、使用データはこれまでの予察モデルと同じく1996～2015年漁期とし、11～2月について月ごとのデータを使用した。変数の分布形状から、判別分析はマハラノビス距離による判別とした。その結果、「△（判断保留）」の割合が56%（45/80）とやや高いものの、判別率は91%（32/35）と高いモデルが得られた（図65（A）, 表7）。この判別モデルを使用して2016～2021年漁期について、赤潮発生予察を実施したところ、「△（判断保留）」の割合が63%（15/24）、的中率が89%（8/9）となり、教師データと統計的に差があるとは言えないという結果が得られた（Fisherの正確確率検定； $p=0.64$ （「△（判断保留）」含有率）、 $p=1.00$ （判別率・的中率））（図65（B）, 表7, 表12）。また、従来の「降水量」による予察モデルと比較しても、精度に差があるとは言えなかった（Fisherの正確確率検定； $p=0.77$ （「△（判断保留）」含有率）、 $p=1.00$ （判別率・的中率））。すなわち、今回の3変数による予察モデルでは、これまでの直前の「降水量」に基づくモデルと精度に差がない予察を、1ヶ月前の説明変数により実施できることとなった。以上のことから、大阪府海域における新たな赤潮発生シナリオは以下のように考えられる；

ア) 透明度が高く、中底層にまで光が届くことにより、表層に分布していない *E. zodiacus* も増殖が可能になる。

イ) また、海水密度が高く、海水の鉛直混合が起きやすい条件になると、大型珪藻である *E. zodiacus* が表層付近に分布しやすくなる。

ウ) これらの条件が整うと、*E. zodiacus* が表層付近で高密度に出現し、赤潮化する。

シャットネラ赤潮については、海洋環境の変動等によりそれ以前の予察モデルの的中率が低下したことから、前事業で新しい予察モデルを構築した。また、新モデルも構築後7年が経過したことから、昨年度、より新しいデータを教師データとして追加することで、的中率が上昇するのかを検証した。本年度は、ユーカンピア赤潮予察についても、1996～2015年漁期データに、予察年の前年までを判別データとして加えて精度検証を行う時系列分割交差検証を実施した。すなわち、2017年漁期が予察（検証）年月の場合は1996～2016年漁期を教師データ、2018年が予察年の場合は1996～2017年漁期を教師データという形で1年ずつデータを追加し、2021年漁期を予察する場合には1996～2020年漁期を教師データで使用した。なお、説明変数は「透明度」「10m層の海水密度」「鉛直安定度」の3変数を使用し、判別手法も同じもの（マハラノビス距離）を使用した。その結果、2016～2021年漁期の計24ヶ月間で「△（判断保留）」含有率が54%（13/24）、「△（判断保留）」を除いた的中率は82%（9/11）となり、1996～2015年漁期データのみとの予察と比較して、精度が変化しているとは言えなかった（Fisherの正確確率検定； $p=0.77$ （「△（判断保留）」含有率）、 $p=1.00$ （判別率・的中率））（表7, 表13）。以上のことから、予察実施時期、予察運用コストという観点から、1996～2015年漁期データを

教師データとした「透明度」「10 m 層の海水密度」「鉛直安定度」の3変数による予察モデルが現在のところ最も妥当だと判断される。

#### 4) 新たな情報発信方法の試行

(国研)水産研究・教育機構水産技術研究所が管理運営している赤潮ネットとの連携を図り、夏季および冬季海洋モニタリング調査結果の網羅的な確認手法と予察情報の発信手法を検討した。

赤潮ネットの「赤潮分布情報」([https://akashiwo.jp/public/kaikuInit.php?qkaiku\\_id=2&sid=1](https://akashiwo.jp/public/kaikuInit.php?qkaiku_id=2&sid=1))の表示海域に設定されている「瀬戸内海東部」と(図66)、漁業者に馴染みのある日付ごとのタブからプランクトン情報を網羅的に確認できるサイトによりモニタリング調査結果を発信した。

また、水温予測について兵庫県および岡山県において蓄積されている観測データをもとに、運用可能な手法による試行を開始した(図67)。なお、水温予測は本調査外の他事業にて実施したものである。

### 3 5カ年のまとめ

平成30年度からの5カ年で、有害プランクトンの発生状況の監視も含めた現場海域のモニタリングを実施した。また、平成30年に発生したシャットネラ赤潮の海域間輸送、シャットネラ赤潮出現状況と底層環境との関係について検討した。さらにモニタリングにより得られたデータや既存の環境データの解析により、赤潮の発生予察モデルの精度検証を行うとともに必要に応じて、改良を行った。モニタリングで得られた情報については赤潮ネットと連携して情報発信を行い、これに加えて各機関が実施可能な水温予測手法による水温予測を試行した。

#### (1) 広域共同調査

夏季海洋モニタリング調査においては当該海域に計24点の調査定点を配置し、6月から8月までの期間で5カ年にわたり、延べ231回のモニタリング調査を実施した。期間中に延べ49件の有害赤潮の発生を確認し、臨時調査等の対策を講じた。これらの結果は、遅くとも翌日には漁業者に提供するとともに、関係機関で共有した。この情報は魚類養殖において餌止めなどの対策の効果的な運用とそのため必要となる関係者の準備や畜養、活魚運搬の管理など赤潮被害の防止・軽減に役立てられた。

冬季海洋モニタリング調査においては当該海域に計40点の調査定点を配置し、10月から2月までの期間で5カ年にわたり、延べ155回のモニタリング調査を実施した。これにより、ノリ色落ち原因種である *E. zodiacus* や *C. wailesii* に加え、その他の珪藻類の出現状況の監視を行った。これによって得られたデータは、遅くとも翌日には漁業者に提供するとともに関係機関の間で共有した。この情報は、ノリ養殖において品質を確保するための刈り取りなどの作業の最適化や漁期継続の判断など珪藻赤潮被害の防止・軽減に役立てられた。

#### (2) *Chattonella* 属の海域間輸送の検討

平成30年度に播磨灘4県で広域的にシャットネラ赤潮が発生した。播磨灘北西部においては、細胞密度の時空間的な変化から、岡山県沿岸域から香川県海域への水塊移流による赤潮または初期個体群の移動の可能性が考えられた。当該年の気象(平成30年7月豪雨)が特異的であった可能性もあるが、シャットネラ赤潮については、海域間の物理的な輸送についても考慮する必要があり、湾灘を超えた調査及び情報交換体制の重要性が再認識された。

#### (3) シャットネラ赤潮出現状況と底層環境との関係

瀬戸内海東部の6～7月の底層水温は、毎年、明石海峡周辺部に高温帯が分布していた。明石海峡部は強混合域であり、先行して昇温している周辺海域の表中層水と混合するため、底層水の昇温が他海域よりも早い、と考えられた。これにより、播磨灘の中央部の底層水温は毎年、明石海峡部からの波及により昇温し、等温線（等温域）が概ね南北方向に延伸する結果となった。また、気温等陸上の気象要因を受けやすい沿岸浅海部（播磨灘北西部）では、等温線は海岸線と平行となった。

1970～80年代については、6、7月の底層水温が高い年にシャットネラ赤潮が広域発生する傾向があり、特に1977～1979年の赤潮発生年において顕著であった。1970～80年代における播磨灘は比較的海域の栄養塩が豊富でありさらに、シャットネラ赤潮が頻発していたため、海域のシスト量が非常に多かった。したがって、この頃はシャットネラ赤潮発生のための水温以外の因子による制限が少なく、播磨灘全体やシストの密度が高い中央部の水温環境が大規模なシャットネラ赤潮発生に影響したと考えられる。

一方、1990年代以降は海域の貧栄養化が進行し、赤潮の発生頻度は減少、規模も小さくなった。また、播磨灘における *Chattonella* spp. の総シスト数は、水質の改善に伴い減少していたと報告されている。これらのことから、1990年代以降は1970～80年代よりも赤潮が大規模発生するための条件が揃いにくくなっており、沿岸部や湾内、港内などの狭い範囲での海底環境条件が、個々の小規模な赤潮発生に影響するようになったと考えられる。

#### (4) 赤潮発生シナリオの再検証と赤潮発生予察技術の高精度化

各府県で運用していたシャットネラ及びユーカンピア予察モデルの予察精度を検証し、モデルの高精度化に取り組んだ。予察精度の検証は、全てのモデルについて、今まで行ってきた予察的中率と判断保留（△）予察の含有率を調べた。予察モデルの高精度化は、説明変数の再選択や教師データ期間の変更等により行った。新たに構築・改良されたモデルの予察精度（汎化性能）は、時系列データに対する交差検証により確認した。

各既存モデルにおける予察精度は、高い精度で運用可能なモデルがあった一方で、的中率の低いモデルや判断保留（△）予察の含有率が高いモデルも一部でみられた。精度が低下していたモデルについては今回の新たなモデルの構築・改良によりの中率の向上や判断保留（△）予察含有率が改善された。

#### (5) 新たな情報発信方法と水温予測手法の試行

（国研）水産研究・教育機構水産技術研究所が管理運営している赤潮ネットとの連携を進め、赤潮ネットの「赤潮分布状況」において海洋モニタリング調査結果の網羅的な確認手法と予察情報を発信した。

従来の水温予測業務で運用されている重回帰モデルを用いた水温予測手法は、説明変数として有料の気象情報を組み込んでいることや、説明変数間で相関があり多重共線性を随時確認する必要があるといった問題があった。そこで将来的に各機関で独立して運用することも見据え、人的・経済的コストを抑えて運用することのできる代替手法を開発し、水温予測の試行を開始した。

#### (6) まとめ

以上のように、シャットネラ赤潮の発生を左右する海域間輸送、底層環境と赤潮発生の関係について検討を行った。また、モニタリングにより得たデータをもとに赤潮発生シナリオの再検証と赤潮発生予察技術の高精度化を行った。海洋環境は近年急激に変化しており、今回開発した予察モデルが今後適合しなくなる可能性があり、定期的な更新を行いながら運用する必要がある。これまでの研究によって、一定確率での予察は可能になったものの、予察結果とは異なる事例も散見される。そのため、有害赤潮への対策や被害の軽減のためには、現場モニタリングによるプランクトンの動向の監視が必須である。今後も、現場モニタリングによりデータを収集し、情報を対

策につなげていくとともに、赤潮対策や予察技術の改善に努めていく必要がある。

## 引用文献

- 秋山諭, 辻村裕紀, 田中咲絵, 近藤健, 中嶋昌紀, 宮原一隆, 高倉良太, 山下泰司, 高木秀蔵, 乾元気, 越智洋雅, 小川健太, 吉田和貴, 朝田健斗, 加藤慎治. 1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発ア. 瀬戸内海東部. 令和2年度漁場環境改善推進事業のうち栄養塩, 赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発 (2) 赤潮被害防止対策技術の開発報告書, 水産庁, 東京. 2021 ; 7-58.
- 長谷川尋士, 本田恵二, 山下泰司, 濱崎正明, 宮原一隆, 原田和弘, 秋山諭, 山本圭吾, 田中咲絵, 住友寿明, 池脇義弘. 魚介類の斃死原因となる有害赤潮等分布拡大防止のための発生モニタリングと発生シナリオの構築①瀬戸内海東部海域. 平成29年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「瀬戸内海等での有害赤潮発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」報告書, 水産庁, 東京. 2018a ; 9-38.
- 長谷川尋士, 本田恵二, 山下泰司, 濱崎正明, 宮原一隆, 原田和弘, 秋山諭, 山本圭吾, 田中咲絵, 住友寿明, 池脇義弘, 鬼塚剛, 阿保勝之, 松原賢. ノリ色落ち珪藻の発生モニタリング, 発生機構解明, 予察技術開発①瀬戸内海東部海域におけるノリ色落ち原因珪藻の出現諸特性の解明と発生予察. 平成29年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「瀬戸内海等での有害赤潮発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」報告書, 水産庁, 東京. 2018b ; 282-321.
- Koizumi Y, Uchida T, Honjo T. Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during a red tide in Hoketsu Bay, Japan. *Journal of Plankton Research*, 1996; **18**: 289-294.
- 西川哲也. 養殖ノリ色落ち原因珪藻 *Eucampia zodiacus* の大量発生機構に関する生理生態的研究. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 (水産編), 2011 ; **42** : 1-82.
- 小川健太, 松下悠介, 秋山諭, 辻村裕紀, 近藤健, 妹背秀和, 宮原一隆, 石黒貴裕, 古村振一, 嵐俊右, 朝田健斗, 棚田教生. 1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発ア. 瀬戸内海東部. 令和3年度漁場環境改善推進事業のうち栄養塩, 赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発 (2) 赤潮被害防止対策技術の開発報告書, 水産庁, 東京. 2022 ; 7-56.
- 高木秀蔵, 石黒貴裕, 宮原一隆, 原田和弘, 山本圭吾, 秋山諭, 斎浦耕二, 西岡智哉, 吉松定昭, 大山憲一, 鬼塚剛, 阿保勝之. ノリ色落ち珪藻のモニタリング, 発生機構解明, 予察技術開発①瀬戸内海東部海域におけるノリ色落ち原因珪藻の出現諸特性の解明と発生予察技術の開発. 平成25年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業報告書「瀬戸内海等での有害赤潮発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」報告書, 水産庁, 東京. 2014b ; 196-209.
- 山口峰生. *Gymnodinium nagasakiense* の赤潮発生機構と発生予知に関する生理生態学的研究. 南西海区水産研究所研究報告, 1994 ; 27 : 251-394.

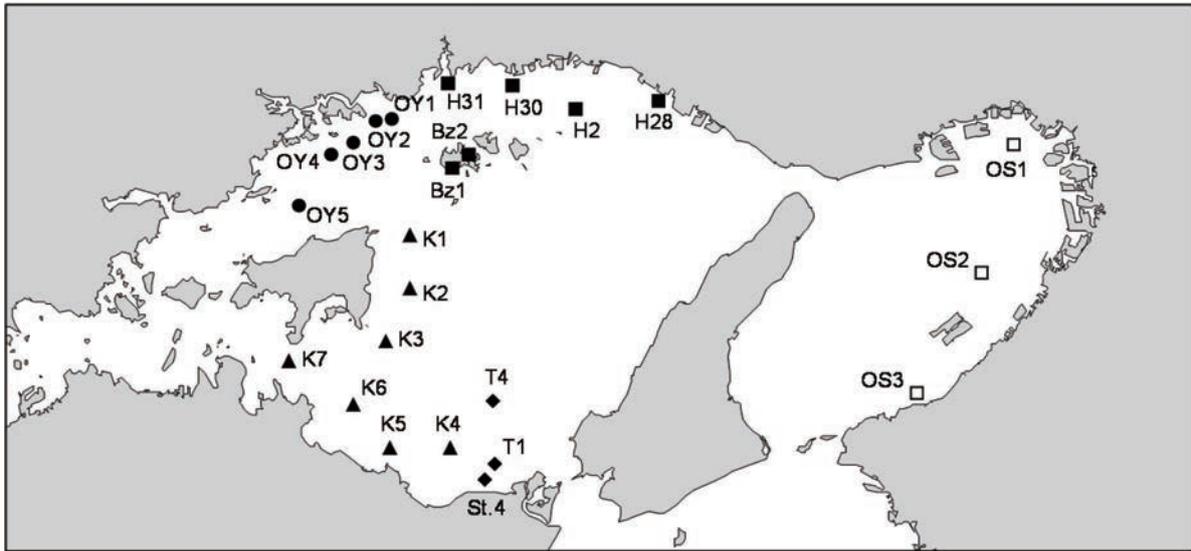


図1 夏季調査定点位置

■: 兵庫県実施定点    ●: 岡山県実施定点    ▲: 香川県実施定点  
 ◆: 徳島県実施定点    □: 大阪府実施定点

表1 観測層および調査項目(夏季)

府県名	兵庫県	岡山県	徳島県	香川県	大阪府
観測層	0.5, 5 or 10, B-1m	0.5, 5 or 10, B-1m	1, 5, 10, B-1m	0.5, 5, 10, B-1m	0.5, 5, 10, B-1m
調査定点数	6	5	3	7	3
調査回数	9	8	9	13	9
調 査 項 目	水温	○	○	○	○
	塩分	○	○	○	○
	透明度	○	○	○	○
	NH <sub>4</sub> -N	○	○	○	○
	NO <sub>2</sub> -N	○	○	○	○
	NO <sub>3</sub> -N	○	○	○	○
	DIN	○	○	○	○
	PO <sub>4</sub> -P	○	○	○	○
	SiO <sub>2</sub> -Si	○	○	○	○
	クロロフィル $a$	○	○	○	○
	DO	○	○	○	○
	プランクトン	○	○	○	○
	ク	○	○	○	○
	ト	○	○	○	○

\*: プランクトンは原則として試水1mL中の有害赤潮種の細胞数を計数する。

兵庫県 : 水深10m前後の3定点(H28, H30, H31)は3層(0, 5, B-1m)で観測。

岡山県 : 水深10m前後の4定点(OY1~4)は3層(0, 5, B-1m)で観測。

: 水深20m前後の1定点(OY5)は3層(0, 10, B-1m)で観測。