

表 12 3 変数の判別モデルによる予察結果

		赤潮発生		
		○ (発生)	× (非発生)	
予察	○ (発生)	0 (0%)	1 (4%)	1 (4%)
	△ (判断保留)	2 (8%)	13 (54%)	15 (63%)
	× (非発生)	0 (0%)	8 (33%)	8 (33%)
		2 (8%)	22 (92%)	24 (100%)

表 13 3 変数の判別モデルによる交差検証結果

		赤潮発生		
		○ (発生)	× (非発生)	
予察	○ (発生)	0 (0%)	2 (8%)	2 (8%)
	△ (判断保留)	2 (8%)	11 (46%)	13 (54%)
	× (非発生)	0 (0%)	9 (38%)	9 (38%)
		2 (8%)	22 (92%)	24 (100%)



図 66 赤潮ネットの「赤潮分布情報」に設定された「瀬戸内海東部海域」における 2022 年 7 月 25 日の *Karenia mikimotoi* の細胞密度の水平分布図

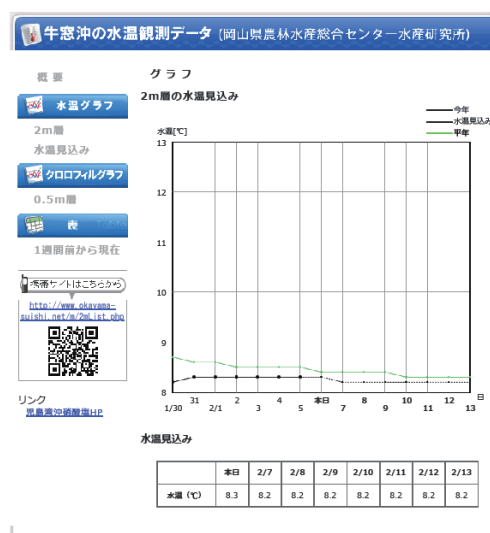
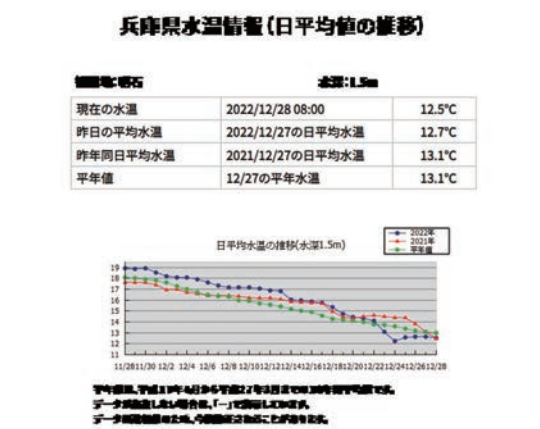


図 67 水温予測の提供

左が兵庫県水産技術センターホームページで右が岡山県水産研究所ホームページ

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

イ. 瀬戸内海西部・豊後水道・土佐湾海域

高知県水産試験場
上村海斗, 占部敦史, 山下慶太郎
広島県水産海洋技術センター
加川真行, 上原達亮, 相田 聡
山口県水産研究センター内海研究部
馬場俊典, 茅野昌大, 内田喜隆, 畑間俊弘
福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所
後川龍男, 恵崎 摂, 鹿島祥平
大分県農林水産研究指導センター水産研究部
斉藤義昭, 野田誠, 宮村和良
大分県農林水産研究指導センター水産研究部北部水産グループ
平野莊太郎, 徳丸泰久
愛媛県農林水産研究所水産研究センター
三門哲也, 神野 智, 関信一郎
愛媛大学沿岸環境科学研究センター
吉江直樹, 郭 新宇
愛媛大学南予水産研究センター
清水園子, 松原孝博, 竹内久登
高知大学教育研究部自然科学系農学部部門
山口晴生
水産研究・教育機構水産技術研究所
外丸裕司, 三宅陽一, 坂本節子, 鬼塚 剛

1 全体計画

(1) 目的

瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域では有害赤潮プランクトンによる漁業被害が頻繁に発生しており, 2012 年夏季には当該海域で広範囲に *Karenia mikimotoi* 赤潮が発生し, 県によっては十数億円の過去最大の漁業被害が発生した。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連携調査を実施する必要がある。本課題では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, 既存のモニタリングデータの解析, 数値モデルを用いた解析等によって当該海域における有害赤潮の発生シナリオを構築し, 赤潮発生予察や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) 方法

1) モニタリング調査

当該海域に計 58 点の調査定点を設置し(図 1), 原則, 有害赤潮が発生する 5~9 月に計 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 1, 表 2)。なお, 調査時に多項目 CTD にクロロフィル極大層の反応が確認された場合は, その層を採水し, プランクトン細胞密度の検鏡計数を行うこととした。広島県広島湾海域, 山口県徳

山湾・笠戸湾海域、福岡県・大分県周防灘海域および高知県浦ノ内湾海域については、水塊の成層強度を示す鉛直安定度を以下の式（1）により求めた。

上層と下層の海水密度差÷水深差× 10^{-3} （Sverdrup et al. 1942）（1）

また、気象データとして気象庁 HP 気象統計情報から広島、豊後高田、宇和島、須崎における降水量、気温、日照時間および風速の観測値と平年値（1992～2021 年の 30 年間の平均値）を解析に用いた。

2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

1) のモニタリング調査定点 58 点のうち、8 点を調査定点に設置し（図 1）、モニタリング調査前の 4～6 月、および冬季の 2～3 月に、PCR 法による高感度調査を実施した（表 1）。

各県の共同提案機関は、各調査点で採水した海水 1 L を孔径 5 μm のメンブレンフィルター（Millipore JMWP04700）で濃縮濾過し、そのフィルターを凍結保存して、愛媛大学南予水産研究センターに送付した。同センターにおいて送付された凍結試料を解凍後、速やかにビーズ粉砕によりホモジナイズし、DNeasy Plant Mini Kit（QIAGEN, 69106）を用いて DNA を抽出した。DNA の検出・定量は *K. mikimotoi*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Heterocapsa circularisquama*, *Chattonella* spp. (*antiqua* + *marina* + *ovata*), *Heterosigma akashiwo* の遺伝子をそれぞれ特異的に識別するプライマーと蛍光プローブを用いたリアルタイム PCR 法により行い、解析にはマルチプレックス検出可能なリアルタイム PCR 機（バイオ・ラッド, CFX96）を用いた。得られた定量値は、既知の細胞数を測定して得られた検量線を基に細胞数へと変換した（鬼塚ら, 2021）。

3) 高頻度観測とデータ解析・モデル構築等

図 2 に示す宇和島湾 6 定点にて 5～8 月に週一回の頻度で採水および多項目水質計（JFE アドバンテック社製 AAQ-RINKO）を用いた観測を行った。重点観測点の U6 では表層、5 m, 10 m, 海底上 1 m, クロロフィル極大層で採水を行い、海水試料は植物プランクトン種組成・細胞密度の分析に供するとともに、オートアナライザー（ビーエルテック社製 QuAAtro）で栄養塩濃度（DIN: $\text{NO}_2\text{-N}$ + $\text{NO}_3\text{-N}$ + $\text{NH}_4\text{-N}$, DIP: $\text{PO}_4\text{-P}$, DSi: $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）を測定した。さらに、気象庁の宇和島特別地域気象観測所の日照時間と降水量をそれぞれ用いた。

昨年度と同様に、モデル構築の一環として、1 週間先の *K. mikimotoi* 赤潮の発生・非発生の予測を目的に、2014～2022 年 4～10 月のプランクトンおよび環境データを用いて機械学習モデル（サポートベクトルマシン）を試作した。本モデルの詳細については、昨年度の報告書（茅野ほか 2022）を参照されたい。説明変数には、昨年度に最も高い正解率を示した *K. mikimotoi* の細胞密度（予測対象日 7 日前）を使用した。また、昨年度の 5) 予察技術の検証および赤潮シナリオ作成 ②既存データの解析において、潮位差が赤潮の終息に重要であることが複数の海域で示唆されたため（茅野ほか 2022）、本年のモデルでは、気象庁のホームページで公開されている宇和島湾の潮汐表（<https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php?stn=UW>）から日別最大潮位差を作成し、予測対象日の推定値を説明変数として用いた。例えば、2018 年 7 月 1 日の *K. mikimotoi* 細胞密度と 7 月 8 日の日別最大潮位差（推定値）を用いて、7 月 8 日における赤潮の発生・非発生を予測した。なお、日別最大潮位差は、潮汐表に基づいて計算されたものであるため、予測対象日より前に推定可能な値である。本モデルの交差検証では、2014～2017 年を対象に時系列データに適した手法（rolling forecasting origin ; Hyndman & Athanasopoulos 2018）を用いた。また、2018～2022 年进行测试データとして、正解率に基づいて各モデルを評価した。正解率は、7 日後の赤潮の発生および非発生を正しく予測できた割合である。

その他に、昨年度と同様に、豊後水道東部海域（宇和海）における *K. mikimotoi* 赤潮発生に関わる 5 つの環境要因について平年値からの偏差をスコア化し、4 月から 6 月上旬にかけて段階的な赤潮発生日の予測を試みた。赤潮発生日は、単に時間的な意味合いだけではなく、早期発生年には長期持続・広域拡大・漁業被害増大の傾向があるため、発生日は赤潮規模のインデックスとみなすこ

とができる。具体的な5つの環境要因は、①宇和海中央部の油袋沖における4月の表層5m水温が17℃以上となる日の積算日数、②4月下旬の同表層水温の平均値、③同表層水温から Takeoka et al. (2000) の手法により求めた5月上旬の急潮強度、④同表層水温が20℃に到達する日付、⑤気象庁宇和島特別地域気象観測所の6月上旬の平均降水量である。*K. mikimotoi* 赤潮の発生日については、水産庁瀬戸内海漁業調整事務所発行の「瀬戸内海の赤潮」、および愛媛県農林水産研究所水産研究センターから提供された赤潮関連観測データをもとに、宇和海における「年最初の *K. mikimotoi* 赤潮発生日」を抽出して解析に用いた。また、本事業で開発した DIN, Diatom, *K. mikimotoi* の3コンパートメントから構成される数値生態系モデル(黒田ほか 2019)を改良し、先に挙げた環境要因の中でも影響が大きいとされた表層水温が *K. mikimotoi* 動態に及ぼす影響について解析を行った。具体的な改良点としては、*K. mikimotoi* の光依存性について、山口ら(未発表)による *K. mikimotoi* の単離培養実験から導き出された関係を導入すると共に、水温依存性について、山口(1994)の関係を導入した。そして、2018年の5月から7月にかけての *K. mikimotoi* の動態を再現することを試みた。さらに、2018年の高水温年と2020年の低水温年を比較することにより、表層水温が *K. mikimotoi* の動態に及ぼす影響について考察した。

4) 有害鞭毛藻類の培養試験

現場における *K. mikimotoi* 等有害鞭毛藻類の短期挙動予測技術、ならびに細胞状態の簡易診断技術の開発を目的とし、以下の基盤研究を実施した。*K. mikimotoi* の増減を表現可能な生物モデル構築に資する事を前提とした、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コスモ系を高知大学で設計・構築した。また、*K. mikimotoi* 等有害鞭毛藻類の各種パラメータを定量的に評価した。

5) 赤潮発生シナリオと予察技術の検証と改良

① 既存データの解析 (*K. mikimotoi* 赤潮発生の短期的動態について)

K. mikimotoi が100 cells/mLに到達後、赤潮発生(1,000 cells/mL)に至るまでの期間に影響した環境因子を調べた。本種が100 cells/mLに到達するとほとんどの海域で赤潮(1,000 cells/mL)が発生(確率:65~100%)しており、100 cells/mL到達日から赤潮発生に至るまでの期間は平均6.4~29.6日を要した(茅野ら 2022)。その期間に影響する環境因子を一般化線形モデル(GLM)によって解析し、抽出した。本モデルの目的変数は100 cells/mL到達日から赤潮発生(1,000 cells/mL)に至るまでの日数とし、説明変数は各海域における気象、海象などのデータとし(表3)、気象データは気象庁のものを利用した(<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)。本モデルの目的変数(日数)はカウントデータであるため、確率分布はポアソン分布を仮定した。なお、説明変数は多重共線性がないことを確認している。モデル選択はAIC(赤池情報量規準)が最小のものをベストモデルとした。

② 既存データの解析(赤潮予察モデルの検証)

2017年度までに実施した統計解析により、*K. mikimotoi* 赤潮の発生シナリオの構築および判別分析による予察モデルを開発し(岩野ら 2020)、2018~2021年までの結果の検証がなされている(茅野ら 2022)。予察モデルの詳細について、統計解析により赤潮発生に関与すると想定された環境因子(海象・気象)を用いて、赤潮発生年と非発生年に分けて、環境因子の組み合わせで判別分析により判別得点を求めた。次に赤潮の発生と非発生を目的変数、判別得点を説明変数とし、ロジスティック回帰式を作成し、本年取得したデータで求めた判別得点から発生または非発生を予測した。本予察モデルは各環境因子の組み合わせで予測した発生確率が80%より大きい場合を「○」、20~80%を「△」、20%未満を「×」と表記し、的中の欄では、予測と赤潮発生状況(結果)が一致した場合を「◎」、「△」と予測して発生した場合を「○」、「△」と予測して非発生の場合を「△」、予測と結果が一致しなかった場合を「×」と表記した。

(3) 結果および考察

1) モニタリング調査

① 気象

【概況】

本年度の梅雨入りは、中国地方（山口県を除く）、九州北部地方（山口県を含む）および四国地方では6月11日頃（平年は6月4～6日頃）、梅雨明けは7月22～26日頃（平年は7月17～19日頃）で、梅雨入りは平年より5～7日程度遅く、梅雨明けは平年より3～5日程度遅かった。なお、当該地方の梅雨明けは当初、6月28日と発表されていたものの、その後、7月上中旬にかけて台風4号、低気圧、前線などの影響で曇りや雨天が続いたため、正式な梅雨明けは7月22～26日頃となった。

6月に台風4号、8月に台風8号および11号、9月に台風14号が接近または上陸した。

【広島、豊後高田、宇和島、須崎の観測結果】

各観測所における4～9月の降水量、日照時間、平均気温および平均風速の旬別気象データと平年値の推移を図3～4に示す。

降水量（図3a）：期間中、平年並みから少なめで推移し、梅雨入り後の6月は平年より少なく、空梅雨となり、7月は雨天が続き平年より多くなった。また、9月は台風14号の影響で平年より多い傾向を示す地域が確認された。

平均気温（図3b）：期間中、平年並みから高めで推移し、4月中下旬は平年より1.1～2.9℃高く、空梅雨の影響で6月下旬は平年より1.7～3.8℃高かった。

日照時間（図4a）：期間中、4月上旬および6月下旬を除いて平年並みから短めで推移した。4月上旬は平年より27.2～46.6h長く、空梅雨の影響で6月下旬は平年より19.8～39.7h長かった。

平均風速（図4b）：期間中、平年並みから低めで推移したが、豊後高田および須崎において9月中旬が平年より1.0～1.5m/s高かった。

② 海象

各県海域の2022年4～9月の海象データの推移を図5～7に示す（海域によっては本事業以外で得られた調査結果もデータに含む場合あり）。

水温（平均値；図5）：広島県広島湾海域（5m層、4～9月）は12.2～26.4℃、山口県徳山湾・笠戸湾海域（5m層、5～8月）は16.9～26.4℃、福岡県周防灘海域（5m層、5～8月）は17.9～28.0℃、大分県周防灘海域（5m層、4～9月）は13.4～29.5℃、大分県別府湾・豊後水道海域（10m層、4～8月）は14.0～24.3℃、愛媛県豊後水道海域（10m層、5～8月）は17.8～23.7℃、高知県宿毛湾海域（5m層、4～9月）は17.7～28.7℃、高知県浦ノ内湾海域（5m層、4～9月）は20.4～29.7℃で推移した。

塩分（平均値；図6）：広島県広島湾海域（5m層、4～9月）は29.61～32.19、山口県徳山湾・笠戸湾海域（5m層、5～8月）は32.27～32.94、福岡県周防灘海域（5m層、5～8月）は32.07～32.84、大分県周防灘海域（5m層、4～9月）は31.84～32.73、大分県別府湾・豊後水道海域（10m層、4～8月）は32.65～33.57、愛媛県豊後水道海域（10m層、5～8月）は33.62～34.02、高知県宿毛湾海域（5m層、4～9月）は32.85～34.43、高知県浦ノ内湾海域（5m層、4～9月）は29.22～33.03で推移した。

透明度（平均値；図 7）：広島県広島湾海域（4～9 月）は 1.9～4.5 m，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5～8 月）は 3.6～5.6 m，福岡県周防灘海域（5～8 月）は 2.0～5.4 m，大分県周防灘海域（4～9 月）は 3.3～8.2 m，大分県別府湾・豊後水道海域（4～8 月）は 8.2～15.0 m，愛媛県豊後水道海域（5～8 月）は 11.1～15.0 m，高知県宿毛湾海域（4～9 月）は 7.0～15.0 m，高知県浦ノ内湾海域（4～9 月）は 1.9～3.0 m で推移した。

鉛直安定度（平均値）：広島県広島湾海域（4～9 月）は $6.5 \times 10^{-5} \sim 97.5 \times 10^{-5}$ ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5～8 月）は $6.8 \times 10^{-5} \sim 20.0 \times 10^{-5}$ ，福岡県周防灘海域（5～8 月）は $2.1 \times 10^{-5} \sim 8.1 \times 10^{-5}$ ，大分県周防灘海域（4～9 月）は $0.8 \times 10^{-5} \sim 28.3 \times 10^{-5}$ ，高知県浦ノ内湾海域（4～9 月）は $9.7 \times 10^{-5} \sim 148.2 \times 10^{-5}$ で推移した。

③ 水質

各県海域の 2022 年 4～9 月の水質データの推移を図 8～11 に示す（海域によっては本事業以外で得られた調査結果もデータに含む場合あり）。

クロロフィル a（平均値；図 8）：広島県広島湾海域（5 m 層，4～9 月）は 0.90～4.67 $\mu\text{g/L}$ ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5 m 層，5～8 月）は 1.98～4.65 $\mu\text{g/L}$ ，福岡県周防灘海域（5 m 層，4～8 月）は 0.47～1.82 $\mu\text{g/L}$ ，大分県周防灘海域（5 m 層，4～9 月）は 1.08～4.78 $\mu\text{g/L}$ ，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8 月）は 1.59～2.29 $\mu\text{g/L}$ ，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8 月）は 1.40～2.70 $\mu\text{g/L}$ ，高知県宿毛湾海域（10 m 層，4～9 月）は 0.40～1.24 $\mu\text{g/L}$ ，高知県浦ノ内湾海域（5 m 層，4～9 月）は 1.79～13.22 $\mu\text{g/L}$ の範囲で推移した。

DO（溶存酸素飽和度）（最低値；図 9）：広島県広島湾海域（B-1 m 層，4～9 月）は 10.8～93.8 %，山口県徳山湾・笠戸湾海域（B-1 m 層，5～8 月）は 56.8～80.6 %，福岡県周防灘海域（B-1 m 層，4～8 月）は 76.2～101.4 %，大分県周防灘海域（B-1 m 層，4～9 月）は 67.3～98.7 %，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8 月）は 82.5～101.0 %，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8 月）は 96.5～101.1 %，高知県宿毛湾海域（20 m 層，4～9 月）は 75.5～87.3 %，高知県浦ノ内湾海域（B-1 m 層，4～9 月）は 0.9～81.8 % の範囲で推移した。

DIN（平均値；図 10）：広島県広島湾海域（5 m 層，4～9 月）は 0.14～1.76 μM ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5 m 層，5～8 月）は 0.08～0.46 μM ，福岡県周防灘海域（5 m 層，4～8 月）は 0.84～3.73 μM ，大分県周防灘海域（5 m 層，4～8 月）は 0.04～1.65 μM ，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8 月）は 0.41～1.61 μM ，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8 月）は 1.19～2.85 μM ，高知県宿毛湾海域（10 m 層，5～9 月）は 0.51～2.60 μM ，高知県浦ノ内湾海域（5 m 層，5～9 月）は 0.23～2.68 μM の範囲で推移した。

DIP（平均値；図 11）：広島県広島湾海域（5 m 層，4～9 月）は 0.04～0.43 μM ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5 m 層，5～8 月）は 0.01～0.07 μM ，福岡県周防灘海域（5 m 層，4～8 月）は 0.01～0.14 μM ，大分県周防灘海域（5 m 層，4～8 月）は 0.01～0.14 μM ，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8 月）は 0.16～0.21 μM ，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8 月）は 0.10～0.16 μM ，高知県宿毛湾海域（10 m 層，5～9 月）は 0.03～0.16 μM ，高知県浦ノ内湾海域（5 m 層，5～9 月）は 0.03～0.48 μM の範囲で推移した。

④ プランクトン

各県海域の 2022 年 4～9 月のプランクトンの観測値（最高細胞密度，珪藻は表層平均密度）を図

12, 各県海域の2022年4～9月の*K. mikimotoi* および *Chattonella* spp.の観測値（最高細胞密度）の水平分布を図13-16に示す。なお、各海域において本事業以外の調査結果もデータとして使用しており、水平分布の図には本事業以外の調査実施日を下線で示している。

K. mikimotoi（最高値；図12, 13, 15）：高知県宿毛湾海域（全層，4～9月）では検出されなかった。広島県広島湾海域（全層，4～9月）ではN.D.（検出限界以下）～7 cells/mL，福岡県周防灘海域（全層，5～8月）ではN.D.～46 cells/mL，大分県周防灘海域（全層，4～9月）ではN.D.～89 cells/mL，愛媛県豊後水道海域（全層，5～8月）ではN.D.～17 cells/mLの範囲で推移した。大分県別府湾・豊後水道海域（全層，4～8月）では，4～6月にN.D.～3 cells/mLの範囲で推移し，7月に108 cells/mLまで増殖し，8月にN.D.となった。山口県徳山湾・笠戸湾海域（全層，5～8月）では，5月上旬から6月上旬にN.D.～2 cells/mLの範囲で推移し，7月中旬の徳山湾内で65～316 cells/mLに増殖し，8月上旬に7,450 cells/mLとなり，赤潮を形成した。高知県浦ノ内湾海域（全層，4～9月）では4月中旬に細胞密度が100 cells/mLを超え，5月上旬には1,000 cells/mL以上となって赤潮を形成し，6月27日に最高細胞密度の35,000 cells/mLに達した。浦ノ内湾では本種が5～8月に3回の赤潮を形成した。

C. polykrikoides（最高値；図12）：山口県徳山和・笠戸湾海域（全層，5～8月），福岡県周防灘海域（全層，5～8月），大分県周防灘海域（全層，4～9月），大分県別府湾・豊後水道海域（全層，4～8月），高知県浦ノ内湾海域（全層，4～9月）では検出されなかった。広島県広島湾海域（全層，4～9月）ではN.D.～309 cells/mL，愛媛県豊後水道海域（全層，5～8月）ではN.D.～2 cells/mL，高知県宿毛湾海域（全層，4～9月）ではN.D.～16 cells/mLの範囲で推移した。

H. circularisquama（最高値；図12）：広島県広島湾海域（全層，4～9月），山口県徳山湾・笠戸湾海域（全層，5～8月），福岡県周防灘海域（全層，5～8月），大分県周防灘海域（全層，4～9月），大分県別府湾・豊後水道海域（全層，4～8月），愛媛県豊後水道海域（全層，5～8月），高知県宿毛湾海域（全層，4～9月）では検出されなかった。高知県浦ノ内湾海域（全層，4～9月）では，7月まで確認されなかったが，8～9月に赤潮を形成し，最高細胞密度は11,700 cells/mLであった。

Chattonella spp. (*antiqua* + *marina* + *ovata*)（最高値；図12, 14, 16）：広島県広島湾海域（全層，4～9月）ではN.D.～7 cells/mL，山口県徳山湾・笠戸湾海域（全層，5～8月）ではN.D.～1 cells/mL，福岡県周防灘海域（全層，5～8月）では1～37 cells/mL，大分県周防灘海域（全層，4～9月）ではN.D.～31 cells/mL，大分県別府湾・豊後水道海域（全層，4～8月）ではN.D.～2 cells/mL，愛媛県豊後水道海域（全層，5～8月）ではN.D.～1 cells/mL，高知県宿毛湾海域（全層，4～9月）ではN.D.～1 cells/mLの範囲で推移した。高知県浦ノ内湾海域（全層，4～9月）では6月中旬に細胞密度が100 cells/mLを超えて赤潮を形成し，7月13日に最高細胞密度の11,900 cells/mLに達した。

H. akashiwo（最高値；図12）：福岡県周防灘海域（全層，5～8月），大分県周防灘海域（全層，4～9月），高知県宿毛湾海域（全層，4～9月）では検出されなかった。広島県広島湾海域（全層，4～9月）ではN.D.～6,283 cells/mL，山口県徳山湾・笠戸湾海域（全層，5～8月）ではN.D.～40 cells/mL，大分県別府湾・豊後水道海域（全層，4～8月）ではN.D.～100 cells/mL，愛媛県豊後水道海域（全層，5～8月）ではN.D.～2 cells/mLの範囲で推移した。高知県浦ノ内湾海域（全層，4～9月）では，4月下旬から5月上旬に赤潮を形成し，4月下旬に最高細胞密度の192,000 cells/mLに達した。

珪藻類（平均値；図12）：広島県広島湾海域（表層，6～9月）では2,002～11,631 cells/mL，山口県徳山湾・笠戸湾海域（表層，5～8月）では1,228～10,925 cells/mL，福岡県周防灘海域（表層，5～8月）では216～5,468 cells/mL，大分県周防灘海域（表層，4～9月）では18～643 cells/mL，大分県

別府湾・豊後水道海域（表層，4～8月）では15～271 cells/mL，愛媛県豊後水道海域（表層，5～8月）では12～694 cells/mL，高知県宿毛湾海域（表層，4～9月）ではN.D.～111 cells/mL，高知県浦ノ内湾海域（表層，4～9月）では6～26,500 cells/mLで推移した。

⑤ まとめ

2022年4～11月の赤潮発生状況を表4に示す。*K. mikimotoi* 赤潮は広島県燧灘海域，山口県徳山湾，大分県周防灘海域，大分県別府湾，大分県豊後水道海域，愛媛県豊後水道海域，高知県浦ノ内湾海域で計12件発生し，前年の2件から10件増加した。本種赤潮は広島県燧灘海域では8月上旬から10月上旬，山口県徳山湾では7月上旬から9月上旬，大分県周防灘海域・別府湾・豊後水道海域では7月中旬から10月上旬，愛媛県豊後水道海域では7月下旬から10月下旬，高知県浦ノ内湾海域では5月上旬から8月中旬に発生した。一方，*Chattonella* 赤潮は広島県燧灘海域，大分県周防灘海域，大分県豊後水道海域，高知県浦ノ内湾海域で計4件発生し，前年の13件から9件減少した。

本年は複数海域で*K. mikimotoi* 赤潮が発生した。主要海域において本種赤潮が発生および非発生に至った要因を以下のように整理した。

広島県広島湾海域：当該海域では*K. mikimotoi* の赤潮は発生しなかった。本種は珪藻との競合が知られている。2016年および2017年では珪藻の衰退に伴い，本種が増殖し，赤潮化している。本年は，6月上旬から7月上旬にかけて，珪藻の平均細胞密度が9,214 cells/ml から2,002 cells/ml に低下したが，本種の増殖には結びつかなかった。これは6月上旬から7月上旬にかけて，降水量が少なく推移しており，河川からの栄養塩の供給が限られていたことによるものと推測される。また，同期間中における日照時間が平年より多めで推移しており，この点も本種よりも珪藻の増殖に有利となった一因と考えられる。7月中旬には珪藻細胞密度が7,987 cells/ml まで再度上昇し，以降は珪藻が優占し，本種の増殖に適した環境ではなかったと考えられた。

山口県徳山湾・笠戸湾海域：当該海域では，*K. mikimotoi* 赤潮が7月上旬から8月中旬に徳山湾の湾奥で発生した（最高細胞密度：7,450 cells/mL）。高感度監視調査において，濃縮検鏡では6月上旬に0.16～0.27 cells/mL，PCR法では5月上旬に0.054～0.206 cells/mL が検出され，本種のシードポピュレーションの存在が確認された。また，徳山湾の湾奥において，6月以降に底層ではDOが低下し，海底からの栄養塩の溶出が促進され，DINが高くなった。本種が赤潮化した理由は，6月以降の鉛直安定度が高くなった時期に本種が栄養塩の豊富な底層でDINを優先して利用できたことにより，増殖が促進されたためと考えられる。

福岡県周防灘海域：当該海域では栄養塩類が低レベルで推移したが，珪藻類は沿岸域で多めで推移した。*K. mikimotoi* はPCR法で2月から調査毎に確認されており，本年の赤潮発生が懸念されたものの，赤潮化しなかった。また，*Chattonella* 属も6月下旬に増加したものの赤潮発生には至らなかった。本年，*K. mikimotoi* 赤潮が非発生となった要因としては，競合種となる珪藻類が長期的に多く出現したことや，空梅雨による栄養塩の供給不足や高日照により増殖が抑制された可能性が考えられた。

大分県周防灘海域：当該海域では*K. mikimotoi* は1～5月まで検出されず，1 cell/mL以上の初認日は6月22日であった。本事業の調査以外において，7月中旬に本県周防灘の沿岸域で本種の赤潮が確認され，例年より遅い赤潮発生であったが，漁業被害の報告はなかった。

気象は6月下旬から7月上旬の気温が高く，日照時間が長いなど，梅雨から初夏にかけての天候は異質なものであった。6月下旬に晴れ間が続き，その後，7月上旬から台風4号や低気圧の影響で雨の日が多く，大雨の日もあったため，本年の梅雨明けのタイミングが大幅に見直された。このよ

うな異質な天候によって赤潮プランクトンの増殖が抑制されたものと推測される。

大分県別府湾・豊後水道海域：当該海域において *K. mikimotoi* は本事業の調査では最大 108 cells/mL 確認されたが、本事業以外の調査では例年より遅い 7 月下旬以降に各湾で赤潮が確認された。赤潮形成が遅かった原因として、本種が増殖する梅雨時期の降水量が例年より少なく、海域の栄養塩の供給も少なかったことから、本種の増殖に適さない気象、海況環境であったと推測される。また、佐伯湾では本種が増殖する 7 月上旬中旬にかけて他の渦鞭毛藻の増殖が確認された。

愛媛県豊後水道海域：当該海域において *K. mikimotoi* は本事業の調査では最大 17 cells/mL 確認されたが、本事業以外の調査では、沿岸域で 7 月下旬に本種赤潮の発生が確認された。本種赤潮について、PCR 法で 5 月下旬から、1 mL 検鏡で 6 月中旬に初認されて以降、6 月下旬にかけて数 cells/mL 程度まで、7 月上旬から中旬には数十から数百 cells/mL 程度まで細胞密度が増加し、7 月 26 日に赤潮を形成した。

気象・海象について、宇和島市では 6 月の降水量が平年の半分以下と少なかったが、7 月上旬から下旬は平年並みからやや高めで推移した。日照時間は 6 月下旬に長く、6 月中旬、7 月上旬中旬にやや短かった。宇和島市沿岸域の水温は、2 月下旬から 5 月中旬は低めで、6 月下旬から 8 月上旬にかけて高めに推移した。また、本種の赤潮発生前に珪藻類や *Prorocentrum dentatum* が優占していたが、いずれも本種が増殖してくると同時に減少がみられた。これらのことから、7 月上旬中旬に低日照、高水温環境により競合種が衰退し、本種の増殖に適した条件が整ったことで赤潮の発生に至ったと考えられた。

高知県宿毛湾海域：当該海域において *K. mikimotoi* 及び *Chattonella* spp. は 1 cells/mL 以下で推移し、両種による赤潮は発生しなかった。過去に漁業被害をもたらした *C. polykrikoides* は 5 月に最大 16 cells/mL 確認されたが、急激な増殖は見られず赤潮を形成しなかった。2～4 月の表層水温は平年より 1～2℃低く、5～8 月の累積降水量は平年比 74%、同時期の DIN は平年比 61%であった。4 月までの低水温、5 月以降の少雨に伴う栄養塩供給不足等により、渦鞭毛藻の増殖が抑制されたと考えられる。当該海域の赤潮発生件数は 2010 年代後半から減少傾向にあり、漁業被害を伴った赤潮は 2020 年以降発生していない。赤潮発生が減少している要因は各年の特異的な気象・海況だけでなく、漁場環境の改善や、長期的な気象・海況変動が影響していると考えられる。

高知県浦ノ内湾海域：本年は 6 月に梅雨入りしたものの、6 月の降水量は平年より少なく、7 月が平年より多かった。また、9 月の降水量は台風、停滞前線によって平年より多かった。昨年は *K. mikimotoi* の赤潮が 7 月に発生したが、本年は 5 月に発生し、5～8 月に 3 回発生した。本年は、昨年よりも 5 月の水温が高く、本種の増殖に有利な環境が早い時期から整っていたことから、早期に発生したものと考えられた。また、5 月以降は他種の赤潮も発生したことから、競合作用により本種の増殖と衰退が繰り返され、赤潮発生回数が多くなったものと推察された。*Chattonella* spp. は 6～8 月に赤潮を形成し、細胞密度のピークが 2 回確認された。昨年と同様に 8 月の細胞密度が大きく減少しており、昨年、本年ともに、7 月後半の *K. mikimotoi* の急激な増殖が *Chattonella* spp. の増殖を抑制したものと考えられた。

2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

① 瀬戸内海西部海域における *K. mikimotoi* 遺伝子量の年間挙動

冬季から赤潮発生期における *K. mikimotoi* の挙動を把握するために、2022 年 1～6 月（大分県、愛媛県は 10 月まで）の期間における各海域の海水中の *K. mikimotoi* 遺伝子量のモニタリングを実施した。

2022 年の各調査点の遺伝子量から推定した *K. mikimotoi* 細胞密度を表 5 および図 17～18、水柱平

均値を図 19 に示した。本年は *K. mikimotoi* 赤潮が周防灘の山口県と大分県、大分県別府湾、豊後水道の愛媛県および大分県で 7 月下旬から 9 月上旬に発生した。また、高知県浦ノ内湾では 5 月上旬から 8 月中旬に赤潮が発生した。各海域の *K. mikimotoi* 遺伝子の挙動を解析した結果、周防灘海域では赤潮が発生した山口県と大分県において、1 月から比較的高濃度の遺伝子量が検出され、6 月まで同程度の値で推移した（水柱平均値，Y4：0.300～2.186 cells/mL，O13：0.019～27 cells/mL）。また、赤潮発生が見られなかった福岡県においても、2 月から本種遺伝子が検出され、4 月には未検出になったものの、5 月と 6 月に増加する傾向が見られた（水柱平均値，F11：N. D.～1.463 cells/mL）。大分県別府湾においては、2 月では本種遺伝子は未検出であったが 4 月以降増加し、6 月以降高い値を維持した（水柱平均値，O3：N. D.～1.203 cells/mL）。豊後水道海域においては、大分県では 2 月から本種遺伝子が検出され、その後増加する傾向が見られた（水柱平均値，O9：0.003～0.921 cells/mL）。一方、愛媛県では 1 月から 3 月上旬には検出されたが、3 月中旬から 5 月中旬には未検出となった。しかし、5 月下旬以降に再び検出され、その後 7 月まで増加傾向を示し、8～9 月にかけて減少傾向が見られた（水柱平均値，E4：N. D.～0.737 cells/mL）。また、豊後水道海域の高知県宿毛湾では赤潮は発生しなかったが、愛媛県海域と同様に、2 月に検出されたが 4 月に未検出となり、5 月に再度検出された（水柱平均値，KS1：N. D.～0.052 cells/mL）。高知県浦ノ内湾においては、5 月に赤潮が発生し、7 月まで継続した。遺伝子量は 1 月から既に高値を示しており、赤潮になる直前には 100 cells/mL 近くまで急激に増加した（水柱平均値，KU：0.192～93.917 cells/mL）。昨年、どの海域でも赤潮発生時にはその 1 カ月以上前から本種遺伝子が検出され、その量が増加することが示されていたが、本年も同様の傾向が見られた。広島湾においては、本年は *K. mikimotoi* による赤潮は発生しなかった。本海域の *K. mikimotoi* 遺伝子は、1～4 月は未検出であったが、5～6 月に検出された（H3：N. D. ～0.007 cells/mL）。

② 瀬戸内海西部海域における 5 年間の *K. mikimotoi* 遺伝子量の挙動

本事業において、5 年間分の瀬戸内海西部海域における *K. mikimotoi* 遺伝子モニタリングのデータが得られたため、5 年間の赤潮発生状況とモニタリングデータの比較を行った。まず、各年の 1～4 月の *K. mikimotoi* 遺伝子検出状況を表 6 にまとめた。いずれの海域でも 1～3 月に海水から本種の遺伝子が検出されており、各海域に本種のシードポピュレーションが存在する可能性が示唆された。さらに、5 年間の赤潮発生状況と遺伝子挙動の比較を行った（図 20，表 7）。瀬戸内海西部海域の検出状況を海域別にみると、まず広島湾においては、昨年までの調査において、本種赤潮発生年の 2018 年は冬季に検出されたのち赤潮発生に向けて継続して増加する傾向が見られたのに対し、非発生年においては、冬季から春季の期間は未検出、もしくは継続した増加が見られないという挙動であった。非発生であった本年についても冬季には検出されず、初検出は 5 月であったことから、本湾における冬季のシードポピュレーションの存在量は少なく、また存在が確認された場合は春季以降の環境条件が関与して赤潮を形成している可能性が考えられた。

周防灘海域においては、2018 年 1 月の大分県北部を除き、2018 および 2019 年の 1～3 月では未検出であったが、2020 年以降の当該期間においては検出された。また、本年は 2021 年と同様冬季から比較的高濃度で検出され、春季から夏季にかけて増加する傾向がみられた。一方で本種赤潮の発生状況と比較すると、昨年は山口県海域において比較的短期間で終息したのに対し、本年は山口県と大分県の両海域で約 1 カ月の発生となった。これらのことから、本海域ではシードポピュレーションは比較的多く存在するものの、赤潮形成には気象や海象などの環境条件が関与している可能性が考えられた。

豊後水道海域においては、愛媛県海域の過去 4 年間では、赤潮の非発生年には冬季に一旦検出されたのち春季から初夏に未検出になっていたが、一方で発生年にはこれらの時期にも継続して検出されるという傾向であった。しかしながら、本年においては、春季から初夏に未検出であったにもかかわらず 5 月中旬から急激に増殖し、赤潮発生に至っていた。このことから、当該海域における赤潮形成は、冬季から継続的に存在、または春季に減少した後再加入するシードポピュレーション

の増殖が夏季の環境条件により促進されることに起因する可能性が示唆された。一方、大分県海域においては、赤潮発生が遅かった 2020 年を除いて、発生・非発生に関わらず、冬季に検出されたのち春季に減少し、その後夏季に向かって増加する傾向が見られた。これらのことから、大分県豊後水道海域においてはシードポピュレーションが継続的に存在しており、赤潮形成は環境要因に依存するものと考えられた。高知県宿毛湾においては、モニタリングを実施した 2019～2022 年の 4 年間に本種の赤潮が発生していない。しかしながら、例年本種の遺伝子は検出されていることから、今後も引き続きモニタリングを行うとともに、愛媛県や大分県海域の発生状況と比較することは、豊後水道海域全体の発生予察の基盤になると考えられる。

大分県別府湾海域においては、本種赤潮の発生は 2020 年と 2022 年であったが、遺伝子の挙動は周防灘海域の調査地点と類似した挙動を示していた。別府湾海域と周防灘海域の関係性については今後も比較・検討を進める必要がある。

高知県浦ノ内湾においては、モニタリングを開始した 2019～2022 年まで毎年本種の赤潮が発生した。本年は 5～8 月の長期にわたり赤潮が発生し、遺伝子モニタリングでは 1 月から高濃度で検出されていた。過去 4 年間と比較すると、本年と同様に赤潮発生期間が長期におよんだ年（2019 年および 2021 年）においても、冬季から春季に既に本種遺伝子が検出され、短期間で終息した 2020 年には 5 月に初検出となった。このことから、本海域は冬季の存在量が本種の増殖量や継続期間に関与している可能性が示唆された。

③ 高頻度調査地点における発生年と非発生年の比較解析

広域調査を実施した海域のうち、調査頻度が多かった地点の豊後水道海域に位置する愛媛県の E4、U6 および周防灘海域に位置する大分 O13 について発生年と非発生年を比較検討した（図 21）。愛媛県海域の E4 および U6 地点で発生年と非発生年の遺伝子から推定される *K. mikimotoi* 細胞数の推移を比較した結果、発生年および非発生年ともに、初夏から夏季にかけて推定細胞数が増加していた。しかしながら、夏季に赤潮を形成した 2018 年と 2022 年は初夏の海水中の推定細胞数が E4 地点では 0.01 cells/mL および 0.1 cells/mL、U6 地点では 0.1 cells/mL を超過する時期が、非発生年の 2019 年および 2021 年と比較して早い傾向が見られた。これらのことから、愛媛県海域においては、初夏の増殖パターンによって赤潮発生を予察できる可能性が示唆された。一方、大分県周防灘海域の本種遺伝子量を比較した結果、いずれの年も冬季から同程度の細胞数が検出され、5～8 月にかけて増加していた。また、それらの増殖パターンについても、発生年と非発生年で差は見られなかった。このことから、本種は本海域で夏季に向けて増殖することが示唆され、その後の環境要因が増殖規模に関与している可能性が示唆された。

また興味深いことに、いずれの海域においても 9 月以降に急激に推定細胞数が減少するという傾向が認められ、水温変化や潮流変化などで細胞数が減少している可能性が示唆された。今後、水温データや海流データなどの環境情報も解析に加えることで、各海域での *K. mikimotoi* の挙動をより詳細に明らかにできると考えられる。

3) 高頻度観測とデータ解析・モデル構築等

図 22 に 5～9 月にかけての環境条件と宇和島湾奥の重点調査点 U6 におけるクロロフィル極大層の *K. mikimotoi* 細胞密度推移を示す。本年は、昨年と比べて重点調査点における細胞密度が高く推移した（最大値 190 cells/mL : 7 月 26 日 5 m 層）。日照時間が平年よりも短くなった 7 月中旬以降に細胞密度が増加したものの、本調査点を含む宇和島湾内 6 定点では赤潮（1,000 cells/mL）が認められなかった（宇和島湾奥の吉田湾や宇和島湾の南側に位置する岩松湾などでは一部海域で赤潮化）。図 23 に U6 における水質と植物プランクトン細胞密度の鉛直分布時間変化を示す。7 月上旬には、降水に伴う表層の低塩分が認められ、これとともに栄養塩の上昇が認められた。その後、水深 5 m 付近で Chl. a が上昇し始め、それに対応して *K. mikimotoi* や *P. dentatum* の分布も認められた。8 月上旬には、高水温・低塩分・高溶存酸素の水塊が流入し、その後、両種ともに低密度化し

た。そのほかにも、*K. mikimotoi* の細胞密度の増減が、日照時間の増減に対応した珪藻の細胞密度の変化に応答していた可能性が考えられ、7 月上・中旬の日照時間が短い時期の後に珪藻の増殖鈍化と *K. mikimotoi* の急増が認められ、日照時間が長くなるにつれて *K. mikimotoi* が減少して珪藻の増殖が認められた (図 24)。

K. mikimotoi 赤潮の短期予測モデルとして、昨年と同様に、説明変数として予測対象日 7 日前の *K. mikimotoi* 細胞密度のみを使用したモデルを構築した。本モデルの正解率は、昨年 (0.74, $p=0.01$) よりも高い値 (0.86, $p=0.004$) を示した (本年は、テストデータに 2019~2022 年を追加)。しかしながら、2018 年のテストデータにおいては、赤潮発生と判別すべき最初の日を非発生と判別した。一方で、日別最大潮位差を説明変数に加えたモデルは、前述のモデルよりもわずかに低い正解率 (0.84, $p=0.019$) を示したが、最初の発生日を正しく判別できていた。いずれのモデルでも、赤潮の終息日を予測できていなかったため、本海域における短期予測の実現には、今後もモデルを継続的に改善することが重要である。

宇和海における *K. mikimotoi* 赤潮発生に関わる 5 つの環境要因について、平年値からの偏差をスコア化し、4 月から 6 月上旬にかけて環境情報の蓄積に伴い段階的に赤潮発生日の予測を行った。その結果、5 つの環境要因が全て揃う 6 月 10 日の段階で、今年度の赤潮発生日は 7 月 20 日と予測された。宇和海吉田湾において 7 月 22 日に本年初めての *K. mikimotoi* 赤潮が確認されており、赤潮発生日を適切に予測することに成功した。1997 年から 2022 年にかけての環境要因スコアと赤潮発生日の相関解析から、両者間に正の有意相関 (Pearson product-moment correlation, $r = 0.77, p < 0.01$) が認められ、環境要因スコアが高い年 (赤潮促進条件が揃う年) ほど赤潮発生日は早くなり、大規模化する可能性が高まることが明らかとなった。本研究で用いた環境要因は、気象庁アメダス (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>) および宇和海水温情報システム “You see U-sea” (<http://akashio.jp/kaisuiou/>) の準リアルタイムデータとして公開されており、予測計算法も簡易である。本研究を応用すれば、赤潮発生の 1~2 カ月前から、早期・中期・直前と段階的に予測精度を高めながら宇和海における *K. mikimotoi* 赤潮の発生日と規模を予測することが可能であろう。

その他に、本事業で開発した *K. mikimotoi* を取り扱うことができる数値生態系モデルの 2 つの大きな問題点、*K. mikimotoi* の光依存性が考慮されていない点と、水温依存性が適切に考慮されていない点について、室内培養実験による現実的な依存性を導入することで改良した。山口ら (未発表) による *K. mikimotoi* の光増殖曲線をモデルに導入した。ただし、そのままでは *K. mikimotoi* の現存量が観測と比較して極めて過小評価となったため、海水の消散係数の調整や *K. mikimotoi* の日周鉛直移動に伴い底層の栄養塩を貯蓄する過程などを新たに導入し、2018 年の *K. mikimotoi* 動態を再現することに成功した (図 25)。また、水温依存性については、山口 (1994) の室内培養実験による水温依存性 ($Q_{10} = 3.3$) をモデルに導入した。そして、改良されたモデルを用いて、2018 年の高水温年と 2020 年の低水温年における *K. mikimotoi* 動態を再現し比較したところ、表層水温が高い 2018 年の方が早期に *K. mikimotoi* が赤潮化することが示され、先の長期観測データ解析により得られた春季の表層水温が赤潮発生日を左右する結果と整合的であった。

4) 有害鞭毛藻類の培養試験

① 珪藻 *Chaetoceros tenuissimus* の細胞サイズ変化 (機械測定による解析)

珪藻 NIES-3714 株を、SWM-3 完全培地 (対照区)、N1/10 量 SWM-3 培地 (N 欠区) ならびに P1/30 量 SWM-3 培地 (P 欠区) のそれぞれで培養を行った (25 °C, 12 h:12 h, 光強度 600 μ E, 各処理区 4 連立て)。培養個体群が崩壊するまで、Tali イメージベースサイトメーターにより、細胞サイズ (直径) を測定した (図 26)。対照区では培養開始後 24 日目までに細胞サイズが 6 μ m から 8 μ m まで徐々に大きくなり、それ以降培養終了時 (33 日目) まで肥大化 (>12 μ m) した。P 欠区では実験終了時まで約 6 μ m から 9 μ m になった。一方、N 欠区では培養 16 日目まで細胞の肥大化傾向は見られたが (概ね 7 μ m 程度)、その後急激に細胞密度が減少して実験は終了した。以上の細胞サイズ変化と培養条件の関係からは、栄養条件特異的な当該珪藻の細胞サイズ変化は認められなかった。

② 現場における *K. mikimotoi* の細胞サイズ

高知県浦ノ内湾にて 2022 年 4 月 18 日から 6 月 27 日に行われた 18 回の調査で、高知県水産試験場により *K. mikimotoi* 細胞を含む植物プランクトン群集の顕微鏡画像が取得された。その画像から計 2840 cells のサイズデータ（面積，相対値）を Touch de Measure（熊本大学戸田教授提供）により取得した（図 27）。4 月 18 日から 5 月 2 日まで細胞面積は緩やかに増加し、その後 5 月 13 日まで増減しながら推移したが 5 月 17 日には急なサイズ減少が観察された。同時期、5 月 2 日から 5 月 13 日にかけてカレンシア赤潮の密度は 910 cells/mL から 9,400 cells/mL まで増加したが、5 月 17 日には 540 cells/mL まで減少した。

③ *K. mikimotoi* ・マイクロコズム実験

赤潮多発海域として知られる高閉鎖性の内湾では、高水温期になると水塊の成層構造が発達する。それに伴って、有害鞭毛藻の増殖に不可欠な窒素・リンが有光層では枯渇し、ごく底層ではリッチになる。このような環境を再現するため、塩分に起因して密度が異なる水塊複数をマイクロコズム内で構築しようとした。該当コズム内に海水を無菌的に注入する手法を用いることで、表層・中層・底層にそれぞれ塩分 25・30・32 の水塊を形成することができた（図 28）。この塩分不均一な構造は、1 週間以上にわたっても維持された（データ示さず）。

あらかじめ栄養塩を高塩分海水に一定量添加しておけば、底層にのみ栄養塩を高濃度で分布することが可能と判断される。さらに光照射系を実装すれば、底層付近では光を検出できない無光環境となる。これらにより、現場海域でみられる水塊の成層構造のみならず、底層の無光環境・栄養塩リッチ環境についても、マイクロコズム内で同時再現することが可能と判断された。

また、光照射型装置において弱光あるいは強光照射下で得られた *K. mikimotoi* の鉛直挙動を総合的に考察し、本藻が弱～中程度の光強度（120～780 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ ）が得られる水深に高密度分布することを示した（図 29）。この強度は筆者らが明らかにした本種の至適増殖光強度域とほとんど一致しており、「本種が弱～中程度の光を好む」ことを示唆している。そのことを一部支持するように、*K. mikimotoi* 現場個体群は、晴天時、強光ふりそそぐ海面よりも弱い光が得られる亜表層～それ以深に高密度分布することが多い。以上を踏まえると、*K. mikimotoi* は増殖に至適な光を求めて、おそらく分布水深をフレキシブルに変えながら特定水深に高密度分布するのではないかと示唆される。

5) 予察技術の検証および赤潮シナリオ作成

① 既存データの解析（*K. mikimotoi* 赤潮発生の短期的動態について）

各海域における解析項目を表 3 および解析結果を表 8 に示し、それぞれの解析結果の特徴を以下に記載した。

広島県広島湾海域：全 5 項目のうち、最も AIC が低かったベストモデル（AIC：141.4）は平均気温および合計降水量の 2 項目が選択された。100 cells/mL 到達日以降、平均気温が高い場合は赤潮発生までの期間が短くなる傾向があった（ $P<0.05$ ）。

福岡県周防灘海域：全 5 項目のうち、最も AIC が低かったベストモデル（AIC：56.8）は合計日照時間および水温差（表層）の 2 項目が選択された。100 cells/mL 到達日以降、低日照および表層水温の最大値と平均値に差が生じる（≡急激な水温上昇がある）場合は赤潮発生までの期間が短くなる傾向があった（ $P<0.05$ ）。

大分県周防灘海域：全 4 項目のうち、最も AIC が低かったベストモデル（AIC：35.9）は全ての項目を含む（平均気温，合計降水量，最大瞬間風速，他種赤潮の有無）ものが選択された。100 cells/mL 到達日以降、気温および最大瞬間風速が高い場合は赤潮発生までの期間が長くなり、降水量が多く、他種赤潮が発生している場合は期間が短くなる傾向があった（ $P<0.05$ ）。

大分県佐伯湾海域：全 4 項目のうち、最も AIC が低かったベストモデル（AIC：70.6）は全ての項目を含む（平均気温、合計降水量、合計日照時間、最大瞬間風速）ものが選択された。100 cells/mL 到達日以降、気温が高い場合は赤潮発生までの期間が長くなる傾向があった（ $P<0.05$ ）。

愛媛県岩松湾海域：全 7 項目のうち、最も AIC が低かったベストモデル（AIC：132.6）は合計降水量、合計日照時間、最大瞬間風速、水温差（表層）および他種赤潮の有無の 5 項目が選択された。100 cells/mL 到達日以降、他種赤潮が発生している場合は赤潮発生までの期間が長くなり、降水量が多く、表層水温の最大値と平均値に差が生じる（≡急激な水温上昇がある）場合は期間が短くなる傾向があった（ $P<0.05$ ）。

高知県浦ノ内湾海域：全 6 項目のうち、最も AIC が低かったベストモデル（AIC：35.9）は全ての項目を含む（平均気温、合計降水量、合計日照時間、最大瞬間風速、水温差、他種赤潮の有無）ものが選択された。100 cells/mL 到達日以降、平均気温が高い、最大瞬間風速が高い、他種赤潮が発生している場合は赤潮発生までの期間が長くなり、降水量が多く、合計日照時間が長く、表層水温の最大値と平均値に差が生じる（≡急激な水温上昇がある）場合は期間が短くなる傾向があった（ $P<0.05$ ）。

② 既存データの解析（赤潮予察モデルの検証）

各海域における解析結果を表 9～15 に示し、それぞれの解析結果の特徴を以下に記載した。

広島県広島湾海域（表 9）：広島湾では *K. mikimotoi* の最高細胞密度 500 cells/mL 以上の年を「発生年」として解析を行った。2022 年は非発生となったが、予察モデルでは 22 通りの組み合わせのうち 77.2%が「発生」、9%が「非発生」、13.6%が「発生・非発生のどちらとも区別できない」と予測され、ほとんどのモデルで的中しなかった。予察モデル 22 通りの組み合わせのうち、予測と赤潮発生結果が一致した組み合わせの割合（的中率）を 2018～2022 年についてそれぞれ算出すると、2018 年は 73%、2019 年、2020 年はともに 18%、2021 年、2022 年は 9%と低下傾向が見られた。これらから、広島湾では 2002～2017 年の環境データを用いた本予察モデルでは赤潮発生の予測が難しくなりつつあると考えられた。

山口県徳山湾海域（表 10）：徳山湾では *K. mikimotoi* の最高細胞密度が 1,000cells/mL 以上の年を「発生年」として解析を行った。2022 年は発生年となったが、予察モデルでは 10 通りの組み合わせのうち、8 通りで「非発生」、1 通りで「発生・非発生のどちらとも区別できない」、1 通りで「発生」と予測され、ほとんどのモデルで的中しなかった。

本年、「非発生」と予測した非的中のモデル 8 通りには「前年 10 月底層塩分」、「前年 11 月中層塩分」と「前年 11 月底層塩分」のいずれかの環境因子が含まれており、赤潮発生・非発生には赤潮発生直前の環境条件が強く関与している可能性があった。本年は 6 月以降には底層で DO が低下し、海底から DIN の溶出が促進され、底層 DIN が高くなった。さらに、鉛直安定度が 6 月以降に高くなったことで、7 月に中層で優占していた本種が底層 DIN を利用でき、増殖が促進されたため赤潮化したと考えられた。

今後、モデルの的中率が低下しているため、予察技術の開発に使用するデータ期間の見直しを検討していく必要がある。

福岡県周防灘海域（表 11）：周防灘福岡県海域では *K. mikimotoi* の最高細胞密度が 1,000 cells/mL 以上の年を「発生年」として解析を行った。本年は *K. mikimotoi* 赤潮が非発生であり、これまでに作成した予察モデル 21 通りのうち 9 通りが「非発生」と予測し、的中した。また、昨年は「4 月上

旬気温」を含むモデルが全て非的中となったが、本年も「4月上旬気温」を含むモデルはすべて非的中となった。これを除くモデル12通り中9通りの組み合わせで「非発生」と予測したことから、「4月上旬気温」を含まないモデルについては概ね的中したと考えられる。「4月上旬気温」は近年上昇傾向にあり過去の発生年並みかそれ以上の高温傾向が固定化しつつあるため、近年の赤潮発生、非発生を予測するには不適当な環境因子になりつつある可能性が考えられた。

2002～2017年の解析期間で抽出された赤潮発生に関する環境因子の組み合わせ21通りのうち、2018～2022年の5年のうち、本年を含む4年間で予測と発生状況（結果）が一致「◎」した組み合わせが5通りあり、うち3通りに「4月上旬日照時間」、2通りに「6月5m層DIP」と「7月5m層水温」のいずれかまたは両方の環境因子が含まれていた。赤潮発生年は4月上旬の日照時間が短く、6月の5m層のDIPが高く、7月の5m層水温が低い傾向があり、「4月上旬日照時間」が短いほどシードポピュレーションの生残に有利、「6月5m層DIP」が高いほど本種の増殖に有利、「7月5m層水温」が低いほど海域の成層化が進んでいるため、鉛直移動出来る本種に有利と考えられる。本年は4月上旬の日照時間が長く、6月の中層から底層のDIPが低く、7月の5m層水温が高くなり、いずれも赤潮発生年とは逆の傾向を示したため、結果的に赤潮化しなかったと考えられた。

大分県周防灘海域（表12）：周防灘大分県海域では*K. mikimotoi*の最高細胞密度が2,000 cells/mL以上の年を「発生年」として解析を行った。本年は本種赤潮の発生年となったが、予測と結果が一致した項目がなく、「発生・非発生のどちらとも区別できない」が3項目あった。「区別できない」以外の6項目は全て「非発生」と予測し、非的中であった。予察モデル構築に用いた2002～2017年における的中率が最も高かった項目の「5月表層水温」と「7月分布指標（10cells/mL以上）」の組み合わせも本年は的中しなかった。また、的中したモデルの数も年々減ってきており、データ解析の再検討が必要である。

本年は周防灘および伊予灘で本種赤潮が確認されたが、漁業被害は報告されていない。気象については、梅雨明けは当初6月28日とされていたが、7月22日に修正された。6月下旬に一定期間晴れ間が見られ、その後は台風や低気圧の影響で曇りや雨の日が続くなど異質な気象となった。また、海象についても7月水温が例年に比べてかなり高かった。このような異質な気象および海象が影響し、判別分析の予測が的中しなかったと推察される。

大分県佐伯湾海域（表13）：佐伯湾では*K. mikimotoi*の最高細胞密度が1,000 cells/mL以上の年を「発生年」として解析を行った。本年は11通りの予察モデルの組み合わせのうち1通りで「非発生」、6通りで「発生」、4通りで「発生・非発生のどちらとも区別できない」と予測された。実際、本年は「非発生」となり、予測が的中したモデルは少なかった。本年において、3月降水量を説明変数に用いた組み合わせは、「非発生」もしくは「区別できない」を予測し、3月降水量のみ非発生である可能性を示した。そのため、当該海域では3月の降水量が本種の赤潮発生の有無に関連していると考えられた。例年、豊後水道大分県海域において本種は各湾沿岸の中層で増殖し、赤潮に至る地場発生型赤潮が漁業被害を発生させるが、佐伯湾では本年、地場発生型赤潮は確認されなかった。

佐伯湾において本種は、5月下旬に初認されたものの、その後、顕著に増殖することなく、8月4日に325cells/mLが確認されたのが最高であり、9月上旬には確認されなくなった。また、2～8月の豊後水道沖合調査において、検鏡では本種の遊泳細胞が確認されなかったが、PCR法による遺伝子検査では4月以降に本種の遺伝子が少量検出された。本年は暖冬の影響で冬季水温が高めであったため、冬季はシードポピュレーションとなる遊泳細胞が生存しやすい環境であったと推察される。さらに、本年は本種が増殖する梅雨時期の降水量が後半に多く、海域の栄養塩の供給が多かった。そのため、昨年に比べて本種の増殖に適する気象、海況環境であったと推測されたものの、本種の

増殖時期に *Prorocentrum* spp.等のプランクトンが優占していたことで増殖が抑制され、赤潮化しなかった可能性があった。

愛媛県岩松湾海域（表 14）：岩松湾では、*K. mikimotoi* の最高細胞密度が 1,000 cells/mL 以上の年を「発生年」として解析を行った。その結果、31 通りの予察モデルの組み合わせのうち 74%で「発生」、13%で「非発生」、13%で「発生・非発生のどちらとも区別できない」と予測された。本年は実際に赤潮が発生し、この 5 年間で最も高い的中率が得られた。

本年「発生」と予測されたモデルの多くには、「1 月下旬 5 m 水温」、「2 月上旬 5 m 水温」等の冬季水温の項目や、「7 月日照時間」や「5 月下旬日照時間」等の初夏の日照時間に関する項目が関与していた。一方で、「非発生」と予測された 5 通りの組み合わせには、全て「4 月下旬 5 m 水温」が関与していた。1 月下旬および 2 月上旬の 5 m 水温は、平年並みからやや高めであり、*K. mikimotoi* の初期個体群が維持されやすかったと考えられる。実際に、岩松湾沖合域では本種の遺伝子が 1~2 月に PCR 法で検出されていたが、3 月~5 月中旬は検出されなかった。その要因として、宇和島市沿岸における 2 月下旬から 5 月上旬の水温は、平年より 1℃程度低くなっており、個体群の維持・増殖に不適な環境となっていたことが考えられる。その後、5 月下旬以降に再び PCR 法で検出され始め、6 月以降に検鏡でも確認されるようになり、7 月には低日照でやや高水温と、本種の増殖に適した環境となり、同月下旬に赤潮が発生した。このことから、本年の赤潮発生には直前の気象・海況が大きく影響していたことが考えられた。

高知県宿毛湾海域：2022 年は *K. mikimotoi* 赤潮の非発生年となり、遊泳細胞は 1 mL 検鏡で全く確認されなかった。2002~2022 年の本種赤潮の発生は 3 年であり、当該海域における本種の予察モデルが構築できておらず、検証には至っていない。過去の本種の少数発生事例からは、隣接する海域での発生後に当該海域で発生する傾向がみられており、隣接海域からの移入・集積が当該海域での発生の一因と考えられている。本年も本種の赤潮は隣接海域で確認されておらず、当該海域でも確認されていなかった。今後も、当該海域と隣接海域との発生状況の関連性を検証していくことが必要である。高感度調査では本種遺伝子が 2 月および 4~6 月に検出されたが、検鏡による遊泳細胞は確認されなかった。このことから、当該海域において本種は低密度で存在しているものの、増殖には適さない環境であることがうかがわれた。

高知県浦ノ内湾海域（表 15）：浦ノ内湾では、*K. mikimotoi* の最高細胞密度が 1,000 cells/mL 以上の年を「発生年」として解析を行った。2022 年は *K. mikimotoi* 赤潮が発生したが、予察モデルでは 12 通りの組み合わせのうち、5 通りで「発生」、7 通りで「発生・非発生のどちらとも区別できない」と予測され、モデルの半数以上が的中しなかった。

2002~2017 年の解析期間で抽出された赤潮発生に関する環境因子の組み合わせのうち、2018~2022 年の 5 年間にわたって予測と発生状況（結果）が的中した組み合わせは 2 通りで、それらに含まれる環境因子は「1 月下旬降水量」と「3 月中旬日照時間」、「6 月下旬日照時間」と「5 月表層 DO」の組み合わせであった。また、4 年間および 3 年間での中「◎」した組み合わせはそれぞれ 3 通りおよび 4 通りであった。また、4 年間をとおして区別できない「△」と予測された組み合わせが 2 通りあり、これらは予察モデルとして機能しなかった。

2018~2022 年の 5 年間に、この予察モデルでは「発生」または「区別できない」のどちらかが予測され、「非発生」は予測されなかった。これは、本モデルを構築した 2002~2017 年のデータのうち、本種赤潮の非発生年が 3 カ年と少ないことから、予測が「発生」に偏っていたものと考えられた。このため、本モデルからは「非発生」を予測することは困難であることがうかがえる。さらに、浦ノ内湾では 2008 年以降、本種の赤潮が毎年発生しており、発生・非発生を予測する必要性は低いと考えられる。そのため、当該海域では本種の赤潮が毎年発生するものと仮定し、その規模や短期的動態についての予察モデルを構築していくことが必要であると考えられた。

まとめ：予察モデルにおいて、モデル構築時にデータを利用した 2002～2017 年の的中率は各海域で 79.1～95.0%程度であるのに対し、その後の 5 年間の予測では的中しないケースが散見された(表 16)。ほとんどの海域で的中率が年々低下しており、予察モデルの再度構築が必要であることがうかがえた。また本種赤潮の発生と非発生には、赤潮発生直前の環境条件が強く関与している事例もあり、赤潮発生直前の気象条件や競合種である珪藻類等の動態も加味し、予察モデルを構築する必要があると推察される。さらに長期的な気候変動等によりの中しなくなる事例もあり(長谷川ら 2018)、予察モデルの定期的な改良は不可欠で、来年度事業ではこの予察モデルの改良が望まれる。

3 5 年間のまとめ

(1) モニタリング調査

瀬戸内海西部海域、豊後水道海域、土佐湾海域では、有害赤潮が発生する 5～9 月にかけて各県が連携して同時期に調査を行うことで、有害プランクトンの動向監視と出現特性の解明に取り組んだ。さらに、各県は連携および情報共有を密に実施することで隣接海域の有害プランクトンの動向や海況等を詳細に把握し、それを基に各海域の関係漁協や行政機関に注意喚起を促すことで、赤潮対策の一役を担うことができた。この 5 年間に於いて *K. mikimotoi* をはじめとする有害プランクトンは各海域で毎年出現し、赤潮を形成したが、その出現特性や赤潮分布は各海域、各年によって異なった。各海域における 5 年間の特徴的なものを以下に記載した。

1) 瀬戸内海西部海域

瀬戸内海西部海域では本事業の 5 年間に於いて、*K. mikimotoi* 等の有害プランクトンは出現規模や分布推移が年によって異なるものの、毎年出現し、各地で赤潮が発生した。*K. mikimotoi* については、閉鎖性の高い徳山湾では毎年 100cells/ml を超える増殖が確認されたが、広島湾では 2018 年のみ赤潮が発生した。また周防灘から別府湾では 2019 年、2020 年、2022 年に複数県海域で赤潮が発生した。本事業期間中の赤潮発生要因としては、珪藻類をはじめとする競合種の減少や日照時間の減少、降雨による栄養塩供給が示された。2020 年には過去に類似例の少ない 9 月に *K. mikimotoi* 赤潮が発生し、本種赤潮は山口県周防灘海域、次いで大分県周防灘海域で発生した後、さらに南の大分県別府湾および豊後水道でも発生した。その発生事例について、本種赤潮は台風後の成層崩壊、低日照、多雨等により 9 月と遅い時期に発生し、水塊の移流により他海域に移動した後、その海域が好適増殖環境だった場合に赤潮を形成したと推測された。特に周防灘海域では、複数県で同時期に本種赤潮が発生する傾向や、2020 年のように水塊の移流により隣接海域での赤潮発生につながる事例があることから、複数県で広域を監視する調査は今後も重要であると考えられる。

2) 豊後水道海域

豊後水道海域では、本事業 5 年間の期間中に *K. mikimotoi* や *Chattonella* spp.をはじめとした有害プランクトンの赤潮が毎年のように発生した。*K. mikimotoi* 赤潮の発生月はこれまでと同様に 6～8 月頃が多かったものの、2020 年には愛媛県と大分県海域で 9 月中旬に、2022 年には大分県海域の一部で 9 月上旬に発生するなど、例年より遅い時期の発生が散見された。また、本種の赤潮発生には、冬季から春季における初期個体群の出現状況や、本種の増殖段階における環境条件が関係していることが分かってきた。なかでも、愛媛県海域では梅雨時期の日照条件や、珪藻類、*Prorocentrum* spp.等の競合種の動態が特に大きく関与していると考えられた。さらに、黒潮由来の暖水波及に伴う海水交換は本種初期個体群を希釈して発生を抑制する一方、環境の変化により競合種を衰退させて赤潮のきっかけになるなど、正負両面で影響していると考えられた。

3) 土佐湾海域

土佐湾海域の浦ノ内湾は赤潮頻発海域であり、本事業 5 年間に於いても *K. mikimotoi* や *Chattonella* spp.をはじめとした有害プランクトンの赤潮が毎年発生した。このうち、*K. mikimotoi* 赤潮の発生日は 5 月上旬から 8 月下旬と長期にわたり、一般的な水質環境項目(水温、塩分等)のみでは説明がつかないものの、珪藻や他種プランクトンの動態が発生時期の早晩に関連していることがうかがわ

れた。また、本湾では密なモニタリング調査により、*K. mikimotoi* や *Chattonella* spp. は湾奥部を起点に分布を拡大させることが確認されている。これらのことから、浦ノ内湾における主な有害赤潮は地場発生であり、その発生状況の差異は他種プランクトンとの競合作用によって生じるものと考えられた。

(2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

本調査により、瀬戸内海西部海域では1~4月に*K. mikimotoi*の遺伝子が検出されたことから、冬季においても本海域にシードポピュレーションが広く存在する可能性が示唆された。また、本海域において本種赤潮が発生する場合、その1カ月以上前から本種遺伝子が検出・増加する傾向が示された。しかしながら、非発生年でも夏季に増加する傾向が見られ、本種の赤潮形成には、シードポピュレーションの存在だけでなく、増殖過程における海象や気象が赤潮形成に関与している可能性が考えられた。今後は本種の遺伝子量と赤潮発生状況の相関を解明するために、シードポピュレーション追跡のための継続的な遺伝子モニタリングに加え、海流データ等も含め環境条件との関連性を検討することが重要である。

また、本事業では、*K. mikimotoi* 早期検出技術の普及のために、愛媛大学南予水産研究センターで実施している測定系を基に、各試験機関で使用できる*K. mikimotoi* 遺伝子検出マニュアルの作成に取り組んだ。マニュアル作成にあたり、各機関で異なると想定されるDNA抽出方法、および使用するPCR反応試薬の差異が遺伝子検出結果に及ぼす影響について検討を行い、最適な抽出方法やPCR反応試薬等を選定し、遺伝子検出マニュアルを作成した。本マニュアルは愛媛大学南予水産研究センターのホームページ上で公開予定であり (<http://ccr.ehime-u.ac.jp/cnf/>, 令和5年公開予定), 各海域の研究機関が本マニュアルを活用することで迅速な*K. mikimotoi* 検出が可能になり、本種赤潮の発生予測に繋がると期待できる。

(3) 高頻度観測とデータ解析・モデル構築等

5年間にわたる5~8月の宇和島湾高頻度観測によって、*K. mikimotoi*の鉛直分布と周辺環境の詳細な時間変化を可視化することができた。また、そのデータの解析から、本有害種の動態が、物理（日照の低下、水温の上昇時期、河川水流入、急潮・底入り潮に伴う海水交換）、化学（底層の栄養塩濃度）、生物環境（珪藻との競合）から影響を受けていることが示された。

本海域における*K. mikimotoi* 赤潮を対象とした統計解析から、発生日や規模に影響を及ぼす可能性のある環境因子を特定するとともに、赤潮発生時期の数ヶ月前に発生日を予測するための手法を開発し、本年度は、その検証をとおして本手法の有用性を示すまでに至った。さらに、*K. mikimotoi* 赤潮の発生・終息の7日前予測を目的とした機械学習モデルを開発し、80%を超える正解率を得ることが可能となったことから、本種赤潮の短期予測技術の基盤を構築することができた。

本課題で開発した*K. mikimotoi* 赤潮の動態を対象とした数値生態系モデルにより、本種赤潮の発生には底層での栄養塩利用が効いていたこと、終息には河川水流入に伴う希釈、鉛直移動不調・増殖停止、強光による死亡の過程を経ていたことが示唆された。また、課題4)の培養実験から得られた光増殖曲線を数値生態系モデルに組み込んで改良することにより、赤潮の動態に対する物理環境（光・水温）の影響を詳細に再現および検討することが可能となった。

本課題において高頻度観測、データ解析、そしてモデル構築を進めることにより、宇和海で発生する*K. mikimotoi*とその赤潮の動態が、物理、化学、生物環境から様々な時間スケールで影響を受けて変動していることを示すことができた。本種赤潮に影響を及ぼす環境要因を特定できたことは、今後の漁業被害の軽減に向けた予察技術等の改良・更新に大きく貢献するものと考えられる。

(4) 有害鞭毛藻類の培養試験

① 細胞サイズの画像解析

K. mikimotoi 細胞の画像解析に基づく細胞状態の簡易診断を目指した研究開発を行った。その結果、

当該種は栄養制限環境（リン）において細胞が肥大化することが確認された。細胞サイズの情報をも簡易に数値情報に置き換える手法開発においては、画像解析アプリ・タッチデメジャー（熊本大学戸田真志教授提供）が有用であった。さらに、本アプリにより現場で発生する当該種のサイズ測定を実施することで、赤潮の推移と細胞サイズの関係を視覚化することに成功した。今後、さらに画像情報を機械的に処理するシステム開発により、赤潮の監視体制強化に繋がるものと期待された。

② マイクロコズム試験

5 カ年の事業を通じて、沿岸環境を室内で近似再現可能な新しいマイクロコズム系を開発した。この系では、現場海域で観察される光の強さ・波長組成がよく再現されており、さらに光の鉛直変動を縮尺レベルで再現可能である。すなわち水面に対して強度 $100\sim 2000\ \mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ の「強い」かつ「青色光に富んだ」光を照射可能であり、水中透過する過程で劇的に減衰、底部では検出されないオーダーにまで消失できる。この光制御型マイクロコズムを用いた試験により、供試藻 *K. mikimotoi* が高密度に分布する光条件は、弱～中程度の光強度であることを明らかにした。おそらく本藻は、増殖に至適な光を求めて、特定水深に高密度に分布するのではないかと示唆される。さらに、光制御型マイクロコズム系における水温・塩分の制御も実現した。なお、有害鞭毛藻の挙動を栄養塩と関連づけて解析していくためには、栄養塩をめぐって競合する細菌の混入が問題となる。開発したマイクロコズムは“それごと”滅菌処理できるため、栄養塩の競合を交えた解析にも有効とみなされる。

以上、現場海域で観察される水塊の鉛直成層構造、栄養塩の鉛直分布、さらには晴天時の強光、曇天時の弱光というように、室内に居ながら自然環境の近似再現かつ制御を果たすことができた。本事業を通じて、赤潮発生機構の全容解明に資する重要知見・新技術を提供でき、今後の被害軽減に向けた技術開発につながるものと期待される。

(5) *K. mikimotoi* 予察技術の検証および赤潮シナリオ作成

1) 赤潮シナリオ

赤潮は海域ごとに原因プランクトンの構成や発生要因が異なる。そのため養殖現場で漁業被害対策を効果的に講じるには、対象海域での赤潮プランクトン種ごとの出現特性を明らかにする必要がある。そこで、*K. mikimotoi* 赤潮を予察する第一段階として、海域ごとに過去の出現状況を整理し、赤潮発生シナリオを構築した。まず、各海域において本種の初認日（1 cell/mL 確認日）と発生規模（最高細胞密度）の関連を精査した。その結果、各海域において初認日と発生規模には関連性が確認され、初期発生が早いほど、赤潮の規模が大きくなることが示唆された。次に、本種赤潮の発生年／非発生年、赤潮規模の大／小に分け、それぞれで気象ならびに海洋環境を比較した。これらの解析結果を基に海域ごとの赤潮シナリオを作成したところ、ほとんどの海域で本種赤潮が大規模発生となる共通項として「日照時間が短く、降水量が多い」傾向が認められた。つまり、本種の増殖時期に例年に比べて低日照と多雨であった場合には本種赤潮が大規模化する恐れがあることが推察された。各海域における本種の赤潮シナリオから、本種の初認日に注意すること、日々のモニタリングデータならびに週間天気予報等を比較しつつ、低日照・多雨に注目することで、本種赤潮の規模を大まかに判断できるようになった。

2) 赤潮予察モデルの開発と検証

その年に本種赤潮が発生するか否かを予察する技術を開発・検証した。具体的には、2002～2017 年までの本種赤潮の発生年／非発生年で有意な差が認められた環境因子を組み合わせ、発生年／非発生年の判別分析による判別得点を求めた。次に赤潮の発生と非発生を目的変数、判別得点を説明変数としたロジスティック回帰式を作成し、その回帰式を用いてその年の判別得点から発生または非発生を予測した。各海域における 2018～2022 年のその予測的中率（グループ全県の平均値）は 25.7～60.0%で、海域によっては 80%を超える年、10%に満たない年も散見される。このように、予測が的中する年、しない年があることから、さらなる予察モデルの精度向上を図るために本モデ

ルの改良が必要と考えられた。

3) 赤潮発生の短期的動態

本種赤潮がいつ発生するかを予察する技術を検討した。ほとんどの海域において、本種が 100 cells/mL に到達すると、赤潮 (1,000 cells/mL) が高頻度で発生 (確率: 65~100%) していることが明らかとなり、100 cells/mL 到達日から赤潮発生に至るまでの期間は平均 6.4~29.6 日を要していた。つまり、本種が 100 cells/mL 到達した場合、約 1 週間から 1 カ月後に赤潮が発生する可能性が高いことが示された。さらに、その期間の長短を決める環境因子の抽出を行ったところ、各海域で共通する環境因子はなかったが、各海域の結果では、その期間の長短は平均気温が高いと長いあるいは短い、合計降水量が多いと短い、合計日照時間が長いと短い、表層水温の最大値と平均値に差が生じる (≡急激な水温上昇がある) と短い、最大瞬間風速が高いと長い、他種赤潮が発生していると長いあるいは短いという結果となった。このように、本種が 100 cells/mL 到達してから赤潮発生に要する期間に影響する因子は各海域でそれぞれ違い、また種々の環境因子が複雑に関係していると考えられた。今後、さらに解析を継続することで、その環境因子を特定し、モニタリングで監視することで、100 cells/mL 到達日から赤潮発生に至るまでの期間が短いか長いかを見極め、いつ発生するかを予察する技術として活用できることが期待される。

引用文献

- 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」, 水産庁, 東京. 2018 ; 9-38.
- Hyndman RJ, Athanasopoulos G. *Forecasting: principles and practice, 2nd edition*. OTexts: Melbourne, Australia. OTexts.com/fpp2. 2018. Accessed on January 20, 2022.
- 岩野英樹, 畦地和久, 井口大輝, 中里礼大, 内海訓弘, 加川真行, 黒田麻美, 村田憲一, 工藤孝也, 本田宇聖, 吉村栄一, 馬場俊典, 國森拓也, 後川龍男, 恵崎撰, 竹中彰一, 平井真紀子, 鈴川健二, 谷口越則, 吉江直樹, 郭新宇, 清水園子, 松原孝博, 武岡英隆, 山口晴生, 外丸裕司, 坂本節子, 鬼塚 剛, 山口聖. 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②瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域. 平成 31 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 水産庁, 東京. 2020 ; 57-116.
- 茅野昌大, 吉村栄一, 馬場俊典, 畑間俊弘, 加川真行, 相田 聡, 村田憲一, 後川龍男, 恵崎 撰, 宮村和良, 野田 誠, 内海訓弘, 徳丸泰久, 都留勝徳, 平井真紀子, 三門哲也, 関信一郎, 上村海斗, 占部敦史, 吉江直樹, 郭 新宇, 清水園子, 松原孝博, 竹内久登, 山口晴生, 外丸裕司, 三宅陽一, 坂本節子, 鬼塚 剛. 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②瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域. 令和 3 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 水産庁, 東京. 2022 ; 57-118.
- 黒田麻美, 村田憲一, 加川真行, 工藤孝也, 吉村栄一, 和西昭仁, 馬場俊典, 國森拓也, 俵積田貴彦, 恵崎撰, 井口大輝, 中里礼大, 木村聡一郎, 岩野英樹, 菅沼倫美, 平井真紀子, 谷口越則, 吉江直樹, 郭新宇, 清水園子, 松原孝博, 武岡英隆, 山口晴生, 外丸裕司, 坂本節子, 鬼塚 剛. 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②瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 水産庁, 東京. 2019 ; 50-99.
- 鬼塚 剛, 鈴川健二, 吉江直樹, 平井真紀子, 竹中彰一, 吉原勇作, 大西秀次郎, 清水園子, 竹内久登, 太田耕平, 外丸裕司, 坂本節子, 阿部和雄, 山口聖, 紫加田知幸, 山口一岩, 武岡英隆. 宇和島湾

およびその周辺海域における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* の出現特性：赤潮発生年と非発生年の比較. 日本水産学会誌, 2021 ; 87 : 144–159.

Sverdrup HU, Johnson MW, Fleming RH. The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, New York. 1942.

Takeoka H, Koizumi Y, Kaneda A. Year-to-year variation of a kyucho and a bottom intrusion in the Bungo Channel, Japan. In: Yanagi T (ed). Interaction between Estuaries, Coastal Seas and Shelf Seas, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo. 2000; 192–215.

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. 南西水研報 1994 ; 27 : 251–394.

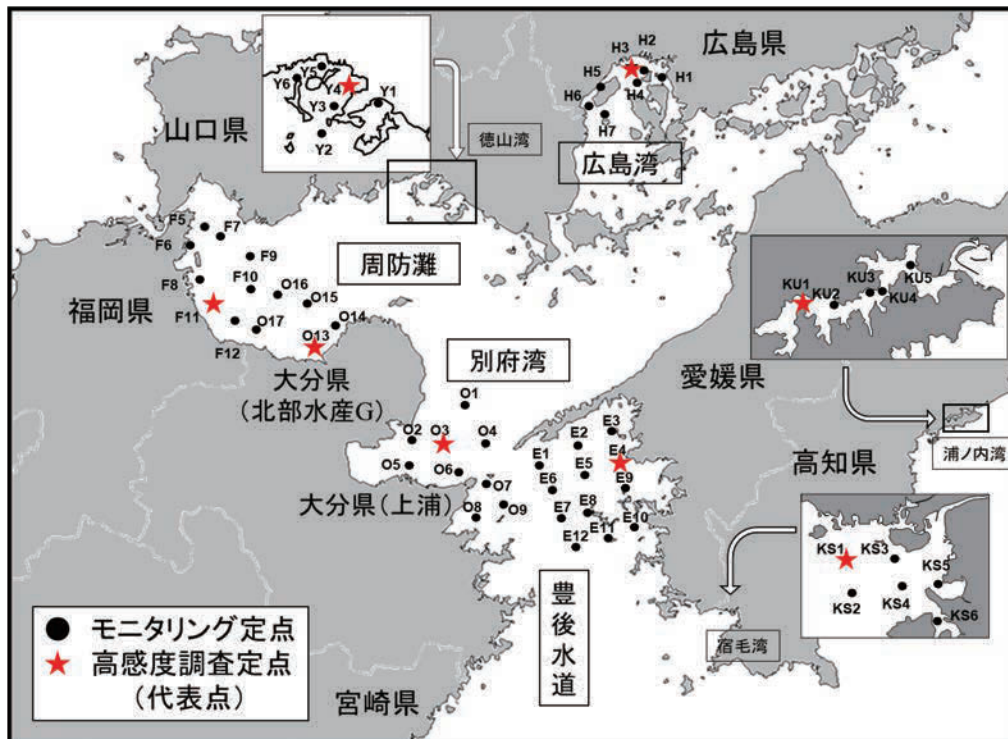


図1 モニタリング調査，高感度調査の定点

表1 モニタリング調査，高感度監視調査の観測分析項目と対象プランクトン

海域		広島湾		周防灘・徳山湾		豊後水道・別府湾・宿毛湾		浦ノ内湾
担当県		広島県	山口県	福岡県	大分県 (北部)	大分県 (上浦)	愛媛県	高知県
調査点数	モニタリング調査	6	4	4	4	5	5	14
	高感度監視調査	1	1	1	1	1	1	1
観測層 (m)	モニタリング調査	0.5, 5, B-1	0.5, 5, B-1	0.5, 5, B-1	0.5, 5, B-1	0.5, 10	0.5, 10	0.5, 10
	高感度監視調査	0.5, 5, B-1	0.5, 5, B-1	0.5, 5, B-1	0.5, 5, (10,) B-1	0.5, 10	0.5, 10	0.5, 2, 5, 10, B-1
調査回数	モニタリング調査	6	4	4	4	5	5	14
	高感度監視調査	4	4	4	4	4	4	4
観測分析項目	水温	○	○	○	○	○	○	○
	塩分	○	○	○	○	○	○	○
	透明度	○	○	○	○	○	○	○
	NH4-N	○	○	○(代表点)	○	○	○	○(代表点)
	NO2-N	○	○	○(代表点)	○	○	○	○(代表点)
	NO3-N	○	○	○(代表点)	○	○	○	○(代表点)
	PO4-P	○	○	○(代表点)	○	○	○	○(代表点)
	クロロフィルa	○	○	○(代表点)	○	○	○	○(代表点)
検体対象プランクトン	DO	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Karenia mikimotoi</i>	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Chattonella antiqua</i>	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Chattonella marina</i>	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Chattonella ovata</i>	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Heterosigma akashiwo</i>	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Heterocapsa circularisquama</i>	○	○	○	○	○	○	○
PCR解析対象プランクトン	珪藻類	○(表層のみ)	○	○	○(代表点)	○(代表点)	○	○(代表点)
	<i>Karenia mikimotoi</i>	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)
	<i>Chattonella</i> spp.	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)
	<i>Heterosigma akashiwo</i>	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)
	<i>Heterocapsa circularisquama</i>	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)	○(代表点)

表 2 測定・分析方法

調査・分析 項目	方法(機器)	広島湾	周防灘・徳山湾			豊後水道・別府湾・宿毛湾・浦ノ内湾		
		広島県	山口県	福岡県	大分県 (北部)	大分県 (上浦)	愛媛県	高知県
水温・塩分	多項目CTD	○	○	○	○	○	○	○
透明度	透明度板	○	○	○	○	○	○	○
NH4-N	インドフェノール青吸光度法	○	○	○	○	○	○	○
NO2-N	ナフチルエチレンジアミン吸光度法	○	○	○	○	○	○	○
NO3-N	銅カドミウムカラム還元 ナフチルエチレンジアミン吸光度法	○	○	○	○	○	○	○
PO4-P	モリブデン青(アスコルビン酸還元) 吸光度法	○	○	○	○	○	○	○
クロロフィルa	アセトン抽出吸光度法	○ (アセトン抽出量異同)	○	○	○			○
	DMF抽出蛍光法					○	○	
DO	ウィンクラー法				○	○	○	
	溶存酸素計	○	○	○				○



図 2 宇和島湾内の調査定点(◇は重点調査点 U6) および気象観測所(○は気象庁宇和島特別地域気象観測所)

表 3 各海域における解析に用いた環境項目および対象期間

県・海域	解析対象年	目的変数 (y)	説明変数 (x) ^{*1}							
			平均気温 (℃)	合計 降水量 (mm)	合計 日照時間 (h)	最大 瞬間風速 (m・s)	平均風速 (m・s)	水温差 ³ (表層)	水温差 ³ (5m)	他種赤潮 の有無
広島県広島湾	1983～2018年	100 cells/mL到達日 から赤潮発生 ^{*1} に 至るまでの日数	○	○	○	○		○		
福岡県周防灘	2002～2019年		○		○	○		○		○
大分県周防灘	1995～2022年		○	○		○				○
大分県佐伯湾	2006～2022年		○	○	○	○				
愛媛県岩松湾	1989～2022年		○	○	○		○	○	○	○
高知県浦ノ内湾	2010～2022年		○	○	○	○		○		○

¹¹: 赤潮発生基準は1,000 cells/mL, ¹²: 解析対象期間は100 cells/mL到達日から2週間分, ¹³: 解析対象期間中の最大水温と平均水温の差