

(2) 試験等の方法

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。調査実施日を表 4 に示す。

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 $\times 10^{-3}$ (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 (1991~2020 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 1~3 月に, PCR 法による高感度調査を実施した (表 2, 表 3)。調査実施日を表 4 に示す。

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, 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。同センターは, 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, PCR 法を用いて行った。*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作製し, 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) を用いて解析した。得られた数値は, 既知の細胞密度を測定して得られた値を基に細胞密度へと変換した。なお, 推定細胞密度 0.001 cells/mL 未満は検出限界以下 (N.D.) とした (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, 宇和島湾奥に流入する須賀川水位 (愛媛県南予地方局須賀川ダム管理事務所提供) をそれぞれ用いた。また, “You see U-Sea” (<http://akashio.jp/kaisuion/>) により観測されている愛媛県塩子島および宇和島湾の水温データも利用した。

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,

2014～2018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を試作した。機械学習モデルには、2クラス分類（例えば、赤潮の発生と非発生）の代表的な手法（竹内・鳥山 2020）であるサポートベクトルマシンを採用した。プランクトンデータには、愛媛県農林水産研究所水産研究センターが所有する *K. mikimotoi* および珪藻の日別最高細胞密度（高頻度観測を含む）のデータを利用した。目的変数である「7日後の赤潮発生・非発生」には、*K. mikimotoi* の細胞密度 1,000 cells/mL 以上を赤潮の発生、それ未満を非発生として、細胞密度のデータを2クラスのデータに変換して用いた。説明変数には、*K. mikimotoi* の細胞密度、珪藻の細胞密度、そして、須賀川ダム管理事務所から提供を受けた須賀川ダム放流量 (m³/s) を利用した。なお、説明変数には、予測対象日の7日前に取得されたデータを用いた（例えば、2018年7月1日の *K. mikimotoi* 細胞密度を用いて、7月8日における赤潮の発生・非発生を予測）。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年をテストデータとして、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、豊後水道東部海域（宇和海）における *K. mikimotoi* 赤潮（発生時期・最大細胞密度）について、今年度の海象・赤潮データを加え、黒潮系外洋水の宇和海への進入現象（急潮・底入り潮）と気象・海象条件との関連性を調べた。具体的には、外洋水の進入強度については、宇和海中央部に位置する愛媛県塩子島における1997～2022年の海水温（水深5m・60m）の日平均値を用いて、Takeoka *et al.* (2000) の手法により、5～8月にかけて10日毎の「急潮強度」・「底入り潮強度」を算出した。気象条件については、気象庁宇和島特別地域気象観測所の「降水量」・「日照時間」の日平均値を用いた。海象条件としては、塩子島5m深における「表層海水温」の日平均値を用いた。*K. mikimotoi* 赤潮については、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* 発生日」・「*K. mikimotoi* 年最高細胞密度」を抽出して解析に用いた。これまで解析に用いてこなかった非発生年については、昨年度の発生日予測直線の最も遅い値である230日目とし、細胞密度は0 cells/mLとして解析に加えた。また、新たに、上記で検討したいくつかの環境要因を用いてスコア化による赤潮発生日予測の方法を提案した。

4) 有害鞭毛藻類の培養試験

① *K. mikimotoi* の培養試験（細胞サイズの変化、画像解析アプリによる解析）

室内培養実験において *K. mikimotoi* の細胞サイズは、培養定常期から減衰期にかけて細胞が肥大化する傾向がこれまでに観察されている。本課題では現場で出現した *K. mikimotoi* の細胞サイズ変化を測定することで、本指標の赤潮終息予測判断への応用可能性について検討した。高知県浦ノ内湾に出現した本種個体群について、グルタルアルデヒド最終濃度0.01%にて固定後、10分以内に *K. mikimotoi* の顕微鏡撮影を行った。取得画像に対して画像解析ソフト Touch De Measure（熊本大学 戸田真志 教授）を用いて細胞面積の測定を行った。

② 内湾環境を室内再現可能な培養装置の新規構築

この課題の目的は、赤潮発生域にて観察される様々な環境変動を室内にて再現可能な新しい培養システムを開発し、それを用いて有害赤潮原因藻の挙動を明らかにすることにある。

ここでは、沿岸海域にて観察される光の鉛直的な変動を室内再現することに重点をおき、*K. mikimotoi* の鉛直的な挙動を光の変動と関連づけて捉えようとした。

試験には、浦ノ内湾より分離した *K. mikimotoi* KmURN6Y クローン株 (Yamaguchi et al. 2016) を用いた。先に構築した大量培養装置 (2014 年度事業成果) に IMK 培地 10 L (塩分 30) を調製し、高温・高圧処理により滅菌した。その大量培地に供試株の保存培地を接種、20°C に設定した恒温培養室内にて、高輝度白色 LED 光照射の下 (明暗周期 12hr:12hr) 20 日間培養した。これにより得られた培養試料ならびに新鮮な培地をガラス製円筒に流し入れて、試料全体を攪拌・混合した。続いて、乾熱滅菌処理した特大シリコン栓を円筒上部に取りつけた。これら一連の操作はクリーンルーム内にて実施した。

明暗周期光照射条件下で試料を培養し、培養 0 日目に光強度の鉛直変動をモニタリングし、培養 4 日目以降、明期において光強度および細胞密度の鉛直的かつ経時的なモニタリングを実施した。その過程で、培養 9 日目の暗黒下でも細胞密度の鉛直分布を測定した。

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* 赤潮発生に至る初期細胞密度について)

K. mikimotoi が初期細胞密度 (100 cells/mL) から赤潮発生 (1,000 cells/mL) に至った確率および日数を算出した。

② 既存データの解析 (*K. mikimotoi* 赤潮の終息要因について)

K. mikimotoi 赤潮の短期的な動態予測として、連続観測データを用いて、終息要因について検討した。

③ 既存データの解析 (赤潮予察技術の検証)

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技術を開発し、2018 年から 2020 年までの結果の検証がなされている (平井ら 2021)。本年度はそれに 2021 年の結果を追加し、再度検証を行った。

(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 5 月 11~15 日頃 (平年は 6 月 4~6 日頃)、梅雨明けは 7 月 13~19 日頃 (平年は 7 月 17~19 日頃) で、梅雨入りは平年より 21~25 日程度早く、梅雨明けは平年より 6 日程度早かった、もしくは 2 日程度遅かった。

6 月に台風 3 号、8 月に台風 9 号、台風 12 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 に示した。

降水量 (図 3a) : 4 月は平年並みで、梅雨入り後の 5 月は多かったが、6 月は少なく、7 月は

広島では多かったものの他地点では少なく、梅雨明け後の8月は台風9号上陸や前線停滞の影響を受けて多く、9月は広島では多かったものの他地点では少なかった。特に、8月中旬は、前線が停滞したことにより、平年の3.7～10.7倍にあたる283.0～508.5 mmの降雨があった。

平均気温（図3b）：期間中、8月中旬を除いて高め基調で推移した。8月中旬は、前線が停滞した影響により、平年より2.9～4.1℃低かった。

日照時間（図4a）：期間中、6月上旬・下旬および7月下旬を除いて短め基調で推移した。5月中旬、8月中旬は、前線が停滞した影響により、それぞれ平年より45.4～52.8h、60.0～66.7h短かった。6月下旬、7月下旬は、前線の影響を受けず、それぞれ平年より6.2～32.9h、23.1～51.1h長かった。

平均風速（図4b）：広島は低め基調、他地点は平年並みで推移した。

② 海象

本事業以外の調査結果を含めた各県海域の2021年4～11月の海象データの推移を図5～8、平年偏差を表5、平年偏差の算出に用いたデータ期間、対象調査点、対象水深を表6に示す。

水温（平均値；図5）：広島県広島湾海域（5m層、4～9月）は13.2～24.4℃、山口県徳山湾・笠戸湾海域（5m層、5～8月）は15.3～26.3℃、福岡県周防灘海域（5m層、5～8月）は17.8～28.3℃、大分県周防灘海域（5m層、4～9月）は14.6～28.5℃、大分県別府湾・豊後水道海域（10m層、4～8月）は14.5～23.0℃、愛媛県豊後水道海域（10m層、5～8月）は17.3～26.0℃、高知県宿毛湾海域（5m層、4～9月）は18.6～26.9℃、高知県浦ノ内湾海域（5m層、4～11月）は18.3～28.7℃で推移した。8月中旬以降に調査を実施した、広島県広島湾、大分県周防灘海域、大分県別府湾・豊後水道海域、高知県宿毛湾海域、高知県浦ノ内湾海域では、8月中旬のまとまった降雨、短い日照時間の影響を受けて、8月中下旬に表層付近で水温の低下がみられた。なお、大分県周防灘海域では、9月上旬も表層付近で水温の低下がみられた。

塩分（平均値；図6）：広島県広島湾海域（5m層、4～9月）は28.01～32.03、山口県徳山湾・笠戸湾海域（5m層、5～8月）は、31.67～32.78、福岡県周防灘海域（5m層、5～8月）は32.08～33.03、大分県周防灘海域（5m層、4～9月）は28.66～32.78、大分県別府湾・豊後水道海域（10m層、4～8月）は32.59～33.78、愛媛県豊後水道海域（10m層、5～8月）は33.64～34.19、高知県宿毛湾海域（5m層、4～9月）は31.82～34.49、高知県浦ノ内湾海域（5m層、4～11月）は26.39～32.21で推移した。8月中旬以降に調査を実施した、広島県広島湾海域、大分県周防灘海域、大分県別府湾・豊後水道海域、高知県宿毛湾海域、高知県浦ノ内湾海域では、8月中旬のまとまった降雨の影響を受けて、8月中下旬に表層付近で塩分の低下がみられた。なお、広島県広島湾海域、大分県周防灘海域、高知県宿毛湾海域では9月上旬も表層付近で塩分の低下がみられた。

透明度（平均値；図7）：広島県広島湾海域（4～9月）は1.7～4.2 m，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5～8月）は3.5～6.1 m，福岡県周防灘海域（5～8月）は4.7～6.5 m，大分県周防灘海域（4～9月）は3.3～10.2 m，大分県別府湾・豊後水道海域（4～8月）は5.6～14.3 m，愛媛県豊後水道海域（5～8月）は12.4～17.4 m，高知県宿毛湾海域（4～9月）は5.8～10.2 m，高知県浦ノ内湾海域（4～11月）は1.9～5.4 m で推移した。

鉛直安定度（平均値；図8）：広島県広島湾海域（4～9月）は $17.3 \times 10^{-5} \sim 95.8 \times 10^{-5}$ ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5～8月）は $10.4 \times 10^{-5} \sim 23.3 \times 10^{-5}$ ，福岡県周防灘海域（5～8月）は $5.0 \times 10^{-5} \sim 16.5 \times 10^{-5}$ ，大分県周防灘海域（4～9月）は $1.9 \times 10^{-5} \sim 22.9 \times 10^{-5}$ ，高知県浦ノ内湾海域（4～11月）は $3.0 \times 10^{-5} \sim 124.1 \times 10^{-5}$ で推移した。広島県広島湾海域では，7月上旬のまとまった降雨の影響を受けて，7月中下旬に鉛直安定度の増大がみられた。また，8月中旬以降に調査を実施した海域のうち，広島県広島湾海域，高知県浦ノ内湾海域では，8月中旬のまとまった降雨の影響を受けて，それぞれ8月下旬～9月上旬，8月下旬に鉛直安定度の増大がみられた。

③ 水質

本事業以外の調査結果を含めた各県海域の2021年4～11月の水質データの推移を図9～12，平年偏差を表5，平年差の算出に用いたデータ期間，対象調査点，対象水深を表6に示す。

クロロフィル *a*（平均値；図9）：広島県広島湾海域（5 m 層，4～9月）は3.00～7.96 $\mu\text{g/L}$ ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5 m 層，5～8月）は1.58～5.15 $\mu\text{g/L}$ ，福岡県周防灘海域（5 m 層，4～8月）は0.73～3.38 $\mu\text{g/L}$ ，大分県周防灘海域（5 m 層，4～9月）は1.12～6.00 $\mu\text{g/L}$ ，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8月）は0.81～4.50 $\mu\text{g/L}$ ，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8月）は1.33～1.93 $\mu\text{g/L}$ ，高知県宿毛湾海域（10 m 層，4～9月）は0.86～2.17 $\mu\text{g/L}$ ，高知県浦ノ内湾海域（5 m 層，4～11月）は0.78～7.49 $\mu\text{g/L}$ の範囲で推移した。広島県広島湾海域では，7月中下旬，8月中下旬に表層で10 $\mu\text{g/L}$ 以上に上昇した。

DO（溶存酸素飽和度）（最低値；図10）：広島県広島湾海域（B-1 m 層，4～9月）は13.7～91.2 %，山口県徳山湾・笠戸湾海域（B-1 m 層，5～8月）は43.7～85.7 %，福岡県周防灘海域（B-1 m 層，5～8月）は53.0～90.1 %，大分県周防灘海域（B-1 m 層，4～9月）は37.4～98.7 %，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8月）は84.1～101.9 %，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8月）は60.6～96.8 %，高知県宿毛湾海域（20 m 層，4～9月）は70.3～85.8 %，高知県浦ノ内湾海域（B-1 m 層，4～11月）は0.7～79.8 % の範囲で推移した。広島県広島湾海域では8～9月にB-1m層で30 %以下に低下した。また，高知県浦ノ内湾海域では6～9月にB-1m層で著しく低下した。

DIN（平均値；図11）：広島県広島湾海域（5 m 層，4～9月）は0.08～7.73 μM ，山口県徳山湾・笠戸湾海域（5 m 層，5～8月）は0.14～0.81 μM ，福岡県周防灘海域（5 m 層，4～8月）はN.D.～0.43 μM ，大分県周防灘海域（5 m 層，4～9月）は0.02～2.26 μM ，大分県別府湾・豊後水道海域（10 m 層，4～8月）は0.45～3.07 μM ，愛媛県豊後水道海域（10 m 層，5～8月）

は 0.48~0.89 μM 、高知県宿毛湾海域 (10 m 層, 5~9 月) は 0.37~2.59 μM 、高知県浦ノ内湾海域 (5 m 層, 5~9 月) は 0.08~10.44 μM の範囲で推移した。8 月中旬以降に調査を実施した海域のうち、広島県広島湾海域、高知県浦ノ内湾海域では、8 月中旬のまとまった降雨の影響を受けて、8 月下旬に表層、5 m 層で DIN の増加がみられた。

DIP (平均値 ; 図 12) : 広島県広島湾海域 (5 m 層, 4~9 月) は 0.11~0.81 μM 、山口県徳山湾・笠戸湾海域 (5 m 層, 5~8 月) は N.D.~0.06 μM 、福岡県周防灘海域 (5 m 層, 4~8 月) は N.D.~0.03 μM 、大分県周防灘海域 (5 m 層, 4~9 月) は 0.03~0.11 μM 、大分県別府湾・豊後水道海域 (10 m 層, 4~8 月) は 0.14~0.37 μM 、愛媛県豊後水道海域 (10 m 層, 5~8 月) は 0.04~0.13 μM 、高知県宿毛湾海域 (10 m 層, 5~9 月) は 0.27~0.38 μM 、高知県浦ノ内湾海域 (5 m 層, 5~9 月) は 0.04~0.69 μM の範囲で推移した。

④ プランクトン

本事業以外の調査結果を含めた各県海域の 2021 年 4~11 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 13, 本事業以外の調査結果を含めた各県海域の 2021 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 14, 15, 16, 17 に示す (本事業以外の調査実施日に下線を付す)。

K. mikimotoi (最高値 ; 図 13, 14, 16) : 広島県広島湾海域 (全層, 4~9 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。福岡県周防灘海域 (全層, 5~8 月) では N.D.~5 cells/mL, 大分県周防灘海域 (全層, 4~9 月) では N.D.~51 cells/mL, 大分県別府湾・豊後水道海域 (全層, 4~8 月) では N.D.~1 cells/mL の範囲で推移した。山口県徳山湾・笠戸湾海域 (全層, 5~8 月) では, 5, 6 月は 1~3 cells/mL の範囲で推移し, 7 月 6 日に 98 cells/mL, 7 月 20 日に 100 cells/mL まで増殖し, 8 月 2 日には 4 cells/mL に減少した。また, 高知県浦ノ内湾海域 (全層, 4~11 月) では, 4 月 2 日に 16 cells/mL 観測され, 5 月 13 日に 435 cells/mL まで増殖した。その後, 6 月 2 日に一旦は 6 cells/mL に減少したが, 再び増殖がみられ, 7 月 23 日に最高細胞密度である 10,700 cells/mL となった。8 月 10 日~11 月 5 日は N.D.~4 cells/mL の範囲で推移した。

C. polykrikoides (最高値 ; 図 13) : 福岡県周防灘海域 (全層, 5~8 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), 高知県浦ノ内湾海域 (全層, 4~11 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.~9 cells/mL, 山口県徳山和・笠戸湾海域 (全層, 5~8 月) では N.D.~4 cells/mL, 大分県周防灘海域 (全層, 4~9 月) では N.D.~8 cells/mL, 高知県宿毛湾海域 (全層, 4~9 月) では N.D.~45 cells/mL の範囲で推移した。

H. circularisquama (最高値 ; 図 13) : 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,

4～11月)では、7月までは検出されなかったが、8、9、11月に360～2,250 cells/mLで出現が確認された。

Chattonella spp. (*antiqua* + *marina* + *ovata*) (最高値 ; 図 13, 15, 17) : 愛媛県豊後水道海域 (全層, 5～8月) では検出されなかった。山口県徳山湾・笠戸湾海域 (全層, 5～8月) では N.D.～16 cells/mL, 福岡県周防灘海域 (全層, 5～8月) では N.D.～6 cells/mL, 大分県周防灘海域 (全層, 4～9月) では N.D.～55 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, 高知県宿毛湾海域 (全層, 4～9月) では N.D.～2 cells/mL の範囲で推移した。広島県広島湾海域 (全層, 4～9月) では、6月16日に4 cells/mLで初認され、その後増殖がみられ、7月21日に最高細胞密度である489 cells/mLとなった後急激に減少し、8月4日～9月15日は N.D.～1 cells/mL の範囲で推移した。また、高知県浦ノ内湾海域 (全層, 4～11月) では、4月12日に1 cell/mLで初認され、6月16日までは N.D.～25 cells/mL の範囲で推移し、7月2日に最高細胞密度である15,500 cells/mLまで増殖した。その後、7月30日に一旦は3 cells/mLまで減少したが、再び増殖がみられ、8月26日に12,800 cells/mLとなった。後減少し、9月27日～11月5日は N.D.～2 cells/mL の範囲で推移し、減少した。

H. akashiwo (最高値 ; 図 13) : 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.～65 cells/mL, 山口県徳山湾・笠戸湾海域 (全層, 5～8月) では N.D.～16 cells/mL, 福岡県周防灘海域 (全層, 5～8月) では N.D.～1 cells/mL, 大分県周防灘海域 (全層, 4～9月) では N.D.～10 cells/mL, 大分県別府湾・豊後水道海域 (全層, 4～8月) では N.D.～10 cells/mL, 愛媛県豊後水道海域 (全層, 5～8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, 4～11月) では、4月2日に22,650 cells/mL 観測され、4月14日に最高細胞密度である115,000 cells/mLまで増殖した。4月27日に一旦は N.D. cells/mL に減少したが、5月7日には再び48,000 cells/mLまで増殖し、その後は N.D.～1,000 cells/mL 程度の範囲で増殖・減少がみられた。

珪藻類 (平均値 ; 図 13) : 広島県広島湾海域 (表層, 6～9月) では 618～17,145 cells/mL, 山口県徳山湾・笠戸湾海域 (表層, 5～8月) では 150～14,797 cells/mL, 福岡県周防灘海域 (表層, 5～8月) では 478～3,047 cells/mL, 大分県周防灘海域 (表層, 4～9月) では 30～350 cells/mL, 大分県別府湾・豊後水道海域 (表層, 4～8月) では N.D.～2,100 cells/mL, 愛媛県豊後水道海域 (表層, 5～8月) では 3～248 cells/mL, 高知県宿毛湾海域 (表層, 4～9月) では 30～1,023 cells/mL, 高知県浦ノ内湾海域 (表層, 4～11月) では 2～6,060 cells/mL の範囲で推移した。

⑤ まとめ

2021年4～11月の赤潮発生状況を表7に示す。*K. mikimotoi* 赤潮が山口県徳山湾・笠戸湾海域, 高知県浦ノ内湾海域で計2件発生した。高知県浦ノ内湾海域では7月上旬～8月上旬, 山口県徳山湾・笠戸湾海域では7月中旬～8月上旬に発生した。一方, *Chattonella* 赤潮が広島県広島湾海域, 広島県燧灘海域, 山口県広島湾海域, 山口県周防灘海域, 福岡県周防灘海域, 大分県周防灘海域, 大分県伊予灘海域, 大分県豊後水道海域, 愛媛県燧灘海域, 高知県浦ノ内湾海域で計13件発生し, 前年の6件から7件増加した。

本年度は、山口県徳山湾・笠戸湾海域、高知県浦ノ内湾海域を除いて *K. mikimotoi* 赤潮が発生しなかったことから、本調査結果もふまえ、*K. mikimotoi* 赤潮の発生過程や発生に至らなかった要因等について海域毎に検討した。

広島県広島湾海域では、6月上旬から中旬にかけて、および7月下旬から8月中旬にかけて珪藻の平均密度の低下がみられた（前者は 1,465 cells/mL から 618 cells/mL、後者は 6,290 cells/mL から 2,701 cells/mL）。その後、珪藻の平均密度は、それぞれ7月上旬、8月下旬にかけて、前者は 2,019 cells/mL、後者は 17,145 cells/mL まで回復した。6月中旬、8月上中旬の平年より多い降雨量による陸水流入に起因すると考えられる DIN の上昇が6月中旬、8月下旬にみられ、これが珪藻の平均密度の回復要因と推定された。本事業の調査で *K. mikimotoi* の赤潮化が確認された 2016、2017 年では、珪藻の平均密度の低下に伴い *K. mikimotoi* が増殖して赤潮化している。このことを珪藻との競合が示唆されている *K. mikimotoi* 増殖の可能性につながる事象としてとらえると、2021 年は珪藻の平均密度が低下する時期がみられたものの、DIN の供給により回復し、期間を通じて優占する傾向であり、*K. mikimotoi* の増殖に適した環境ではなかったと推測された。加えて、2021 年は6月以降の通常検鏡、および2月と4月～6月の濃縮検鏡では、*K. mikimotoi* の細胞は確認されず、PCR 法で5月に検出された 0.006 cells/mL が最高密度であった。このことから、2021 年の *K. mikimotoi* シードポピュレーションは極めて低密度であったと推測され、*K. mikimotoi* 赤潮の非発生に影響しているものと考えられる。

山口県徳山湾・笠戸湾海域では、7月中旬～8月上旬に *K. mikimotoi* 赤潮が発生した。最高細胞密度は7月中旬に観測された 215 cells/mL であった。*K. mikimotoi* は、2月および4～6月にかけて、濃縮検鏡で N.D.～0.03 cells/mL 観察され、PCR 法で 0.009～2.301 cells/mL 検出された。その後、6月下旬に日照時間が長かったことで珪藻類が増殖し、7月上旬には 10,000 cells/mL を超えた。珪藻類は8月上旬まで優占したことから、本種の増殖が抑制され、大規模発生には至らなかったと考えられる。

福岡県周防灘海域では、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。PCR 法では *K. mikimotoi* が2月から調査毎に確認されており、赤潮発生が懸念されたものの赤潮化はしなかった。一方、*Chattonella* spp. が6月に増殖し、一部漁港域で赤潮化した他、低密度ながら広範囲に分布を拡大し、6月末に終息した。本年度 *K. mikimotoi* 赤潮が非発生となった要因としては、競合種となる *Chattonella* spp. の増殖や、同じく競合種となる珪藻類が比較的多く推移した影響が考えられる。

大分県周防灘海域では、*K. mikimotoi* による赤潮形成は確認されなかった。1 cell/mL 以上の初認日が4月6日と早かったが、早い梅雨入り、その後の安定した天候、8月中旬の大雨といった例年とは大きく異なる気象状況の影響を受けて、赤潮形成に至る条件が整わなかったと考えられる。

大分県別府湾・豊後水道海域では、*K. mikimotoi* 赤潮の発生は確認されなかった。その原因

として、例年、本種が増殖する梅雨時期の降水量が少なく、海域の栄養塩の供給が少なかったことから、本種が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7～8月にかけて *Prorocentrum dentatum* が赤潮化する等、他の渦鞭毛藻の増殖が確認された。

愛媛県豊後水道海域では、*K. mikimotoi* は2月および5～8月の間、濃縮検鏡で0～0.02 cells/mL、PCR法で2～6月まで推定細胞密度 N.D.～0.006 cells/mL 検出された。本種赤潮が頻発する宇和島湾では、本種が5月24日に1 cell/mL 初認され、6月21日に19 cells/mL 確認されたものの、その後 N.D.～6 cells/mL で推移し、高密度化しなかった。宇和島市地先5m層の水温は、1月下旬～4月上旬まで平年（1991～2020年）より概ね1～2℃高く、シードポピュレーションとなる遊泳細胞の増殖に適した環境であったと考えられる。また、7月上旬から8月上旬までの同水温は、7月中旬を除いて平年より1.5～2.7℃高く推移し、8月中旬の降水量は平年の5.5倍、日照時間は平年の3.8%と高水温且つ低日照の本種の増殖に適した環境となったが、本種は低密度のまま推移し、赤潮に至らなかった。その要因として、珪藻類が6月上・中旬を除いて4～9月まで（最高細胞密度21,500 cells/mL、7/21）、*H. akashiwo* が6月下旬～7月下旬および8月中旬（最高細胞密度80,500 cells/mL、6/24）、*P. dentatum* が6月上旬～7月下旬まで（最高細胞密度51,400 cells/mL、6/14）優占していたため、本種の増殖が抑制されたと考えられる。

高知県宿毛湾海域では、降水量が例年に比べて5月および7～8月で多く、それに伴って、同時期の日照時間は短くなった。本年度の赤潮発生について、宿毛湾では *K. mikimotoi* 赤潮は発生しなかった。また、当該海域で問題となっている *C. polykrikoides* も赤潮を形成しなかった。

高知県浦ノ内湾海域では、降水量が例年に比べて5月および8月に多く、それに伴って同時期の日照時間は短くなった。*K. mikimotoi* は *Chattonella* spp. および珪藻類が一時的に衰退した7月上旬に赤潮化し、珪藻類が増殖した7月下旬以降に終息した。*K. mikimotoi* は *Chattonella* spp. および珪藻類が同時に衰退し、競合種の密度が低下したことによって増殖が促進されたと考えられる。また、*Chattonella* spp. は6～7月の底層における栄養塩濃度が高い時期に赤潮を形成し、表層～中層での栄養塩濃度がやや高くなった8月中旬に再び赤潮を形成した。*Chattonella* spp. は6～7月に底層、8月中旬に表層～中層で増殖しており、前者は貧酸素状態によって底層から供給された栄養塩を利用し、後者は豪雨によって表層～中層へ供給された栄養塩を利用して増殖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* 遺伝子量の挙動

顕微鏡観察で把握できる前の動向を把握するために、2021年1～6月（大分県は9月、愛媛県は8月まで）の期間における各県海域の海水に存在する *K. mikimotoi* 遺伝子のモニタリングを実施した。なお、本年度の1～3月の結果については、次年度に報告する。

各調査点の遺伝子量から推定した *K. mikimotoi* 細胞密度を表8および図18、19、水柱平均

値を図 20 に示した。まず、本年度は、山口県徳山湾・笠戸湾海域で 7 月中旬～8 月上旬に、高知県浦ノ内湾海域で 7 月上旬～8 月上旬に *K. mikimotoi* 赤潮が発生した。2～6 月における *K. mikimotoi* 遺伝子の挙動を解析した結果、赤潮が発生した山口県徳山湾海域では、福岡県・大分県周防灘海域と比較して 2 月から高い遺伝子量が検出され、6 月までその値が維持された (Y4 : 0.399～1.144 cells/mL)。福岡県・大分県周防灘海域においても、2 月から本種遺伝子が検出され、6 月まで増加する傾向がみられた (F11 : 0.003 cells/mL～0.12 cells/mL, O13 : N.D.～0.361 cells/mL)。その後、大分県周防灘海域において 7 月まで増加し、9 月にかけて減少した (O13 : 0.009 cells/mL～25 cells/mL, 他事業調査結果)。他方、7 月に赤潮が発生した高知県浦ノ内湾海域においては、1 月から既に *K. mikimotoi* の遺伝子量が高値を示していた (KU : 0.013 cells/mL～5.397 cells/mL)。前年度の報告書において、どの海域でも赤潮発生時にはその 1 ヶ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を示しており、本年度の解析結果においても、同様の傾向がみられた。

広島県広島湾海域、大分県別府湾海域および大分県・愛媛県豊後水道海域においては、本年度は *K. mikimotoi* による赤潮は発生しなかった。本海域の冬季～夏季における *K. mikimotoi* 遺伝子の挙動を解析した結果、まず、大分県豊後水道海域については、2 月から本種遺伝子が検出されていたが、6 月中旬まで検出量はほぼ一定であった。その後、7、9 月に増加する傾向がみられた (O9 : N.D.～0.26 cells/mL)。また、愛媛県豊後水道海域においては、2 月上旬と 5 月にわずかに検出されたが、2 月下旬～6 月上旬は検出限界以下であった。その後 6 月下旬から再度検出され、8 月まで増加した (E4: N.D.～0.541 cells/mL, E9: N.D.～0.093 cells/mL)。高知県宿毛湾海域においては、2 月に検出された後、4 月に再度検出され、7 月まで緩やかに増加した (KS : N.D.～0.194 cells/mL)。

本年度の広島湾については、4、5 月にわずかに検出された (H3 : 0.001～0.002 cells/mL)。また、別府湾においては 2 月から検出され、4 月～夏季にかけて検出量が増加する傾向がみられた (O3 ; N.D.～0.599 cells/mL)。

② 瀬戸内海西部海域における 4 年間の *K. mikimotoi* 遺伝子の挙動

これまで本事業において、4 年間遺伝子モニタリングを実施した。そこで、高感度監視調査対象地点の 2018～2020 年の過去 3 年間と 2021 年の遺伝子検出状況の比較および 4 年間の赤潮発生状況と遺伝子挙動の比較を行った (図 21, 表 9)。

広島県広島湾海域においては、2018 年が本種赤潮の発生年であり、その後 3 年間は非発生年であった。これらの挙動について比較すると、発生年は冬季に検出され、赤潮発生に向けて継続して増加する傾向がみられた。一方、非発生年においては、冬季～春季の期間は検出限界以下 (2019 年, 2020 年)、もしくは継続した増加がみられない (2021 年) という挙動を示した。このことから、本海域においては、冬季からのシードポピュレーションの存在と、その後の環境条件が本種の増殖に関与している可能性が考えられた。

山口県徳山湾海域および福岡県・大分県周防灘海域においては、いずれの海域においても、過去 3 年間と比較して 2021 年は冬季から本種遺伝子が高濃度で検出され、春季～夏季にかけて増加する傾向がみられた。このことから、本海域においては、2021 年の冬季はシードポピュレーションが多い年であった可能性が示唆された。一方で、過去 3 年間と比較して、赤潮発生期間が短かったことから、本海域での *K. mikimotoi* 大規模増殖には気象や海象等の環境

条件が関与している可能性が考えられた。

大分県別府湾海域においては、本種赤潮の発生は2020年のみであったが、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ことから、別府湾海域と周防灘海域の関係性については、本種遺伝子の挙動について今後も比較・検討を進める必要がある。

大分県・愛媛県豊後水道海域においては、愛媛県海域では例年冬季に本種遺伝子が検出されているが、赤潮が発生していない2019年と2021年では、春季～初夏（3～6月）検出限界以下となる調査日がほとんどであった。一方で赤潮が発生した2018年と2020年では、同期間に継続して本種遺伝子が検出されていた。このことから、冬季～春季の本種の存在が愛媛県海域でのシードになっている可能性が考えられた。一方、大分県海域においては、2018年と2019年の赤潮発生時には冬季～春季に遺伝子が検出、増加する傾向がみられ、2020年の非発生年ではほとんど検出限界以下であった。しかしながら、2021年は冬季～春季に増加する傾向がみられたが、赤潮形成に至らなかったことから、大分県海域での赤潮形成には冬季～春季の本種の存在および環境条件が関与している可能性が考えられた。

高知県宿毛湾海域においては、遺伝子モニタリングを実施した2019～2021年の3年間に本種の赤潮が発生しておらず、今後も引き続き遺伝子モニタリングを実施するとともに、愛媛県・大分県豊後水道海域の発生状況と比較することにより、海域全体の発生予測の基盤になると考えられる。

高知県浦ノ内湾海域においては、遺伝子モニタリングを開始した2019～2021年の3年間毎年本種による赤潮が発生している。冬季～春季の検出状況を比較すると、赤潮発生期間が長期におよんだ2019年と2021年では3月もしくは1月の冬季～春季にすでに本種遺伝子が検出され、2019年では4月に高値を示していた。一方で、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、本海域においては冬季～春季のシードポピュレーション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。

以上4年間の遺伝子モニタリングによって、*K. mikimotoi* 赤潮が発生する場合、その1ヵ月以上前から本種遺伝子が検出・増加する傾向がみられることが示された（平井ら2021）。さらに、2021年は各調査地点において、冬季～春季に発生年と非発生年でそれぞれ特徴的な挙動を示す可能性が示唆された。今後も*K. mikimotoi* 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の詳細な解析と継続した遺伝子モニタリングが必要である。

3) 高頻度観測とデータ解析・モデル構築等

図22に5月から10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、細胞密度が低く推移し、日照時間が平年よりも短くなった7月上旬に微増したものの、赤潮（1,000 cells/mL）は発生しなかった。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月中旬および8月中旬には、比較的水温が低く、塩分が高い海水が中・底層に進入し、同時に濁度や栄養塩濃度が上昇した。両時期には、塩子島に続くU6での水温下降が認められるため（図24）、豊後水道南部で底入り潮（武岡2020）が発生し、宇和島湾の外で底入り潮由来の海水（高栄養塩）と混合した水塊が湾内まで進入していた可能性がある。また、両時期の間には、比較的高水温・低塩分の海水が湾内に入り込んでおり、本年は7月から8月に

かけて、複数回にわたり大きく海水が交換していたと考えられる。植物プランクトンについては、珪藻類 (*Chaetoceros* 属や *Nitzschia* 属) が多かったものの、5月下旬からは *Prorocentrum dentatum* が増殖した。8月中旬以降は *K. mikimotoi* や *P. dentatum* がほとんど認められなくなっており、上述のように、湾内で海水交換が発生した可能性がある。宇和島湾の南に位置する下波湾では、底入り潮に伴う海水交換によって *K. mikimotoi* 赤潮が終息した事例が報告されている (兼田ほか 2010)。このため、本年の宇和島湾でも、底入り潮に伴う海水交換が *K. mikimotoi* の赤潮化を防ぐ一因となっていた可能性が考えられる。

機械学習の手法であるサポートベクトルマシンを用いて、宇和島湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生・非発生に関する予測モデルを試作した。2014~2017年のデータを訓練データとしてモデルを構築し、2018年のデータをテストデータに用いて検証した。3つの説明変数の組み合わせに基づいてモデルを試作し、それらの正解率 (7日後の赤潮の発生・非発生を正しく予測できた割合) を算出した (表 10)。*K. mikimotoi* の細胞密度のみを説明変数として選択したモデルでは、正解率は 0.74 ($p=0.01$) と有意であり、全組み合わせのうち、最も高い正解率を示した。一方、*K. mikimotoi* の細胞密度に珪藻細胞密度を加えた場合は正解率が 0.65 ($p=0.28$)、これに須賀川ダム放流量を加えた場合は 0.65 ($p=0.42$) と、説明変数の追加によりモデルの正解率は改善されることはなかった。本年度では、複数年を対象として正解率 7割以上の機械学習モデルを構築することができたが、今後は、説明変数の組み合わせや対象期間の拡大をとおして、モデルを改善することが課題である。

本年度の観測データを加えた急潮強度、底入り潮強度と赤潮との関連性を再解析したところ、5月上旬の急潮強度と年最初の *K. mikimotoi* 赤潮発生日の間に有意相関 ($r=0.52, p<0.05$) が認められ、5月上旬の急潮が強いと発生日が遅くなる傾向が明らかとなった。一方、底入り潮強度と赤潮の間には有意な相関関係が認められなかった。気象条件と発生日に注目すると、大雨の直後に赤潮が発生する傾向がみられ、6月上旬の降水量と年最高細胞密度の間に有意相関 ($r=0.60, p<0.01$) が認められた。一方、日照時間とは明瞭な関連性は認められなかった。晩春から初夏にかけて表層水温が上昇し 20°C に到達する時期に注目すると、2002年から2016年にかけて5月の20°C到達時期の早期化に同期して発生日が早期化しており、20°C到達日と発生日の間に有意な相関関係 ($r=0.44, p<0.05$) が認められた。以上より5月の表層水温が赤潮発生時期に、6月上旬の降水量が赤潮規模に影響を及ぼすことが示唆された。これらから、5つの環境要因について平均値を基準に1点 (赤潮抑制条件) から4点 (赤潮促進条件) にスコア化し、各年の合計得点を算出した。図 25 にスコア合計と赤潮の発生日の相関解析結果を示す。合計得点と赤潮の発生日の間に有意な相関 ($r=0.69, p<0.01$) が認められ、合計得点が高い年 (赤潮促進条件) ほど赤潮の発生日が早くなることが明らかとなった。本研究から、宇和海において、様々な環境要因から発生日と有意な相関関係が認められた次の5つを抽出したところ、①4月17°C以上の積算値、②4月下旬の平均水温、③5月上旬の急潮強度、④表層水温20°C到達日、⑤6月上旬の降水量が *K. mikimotoi* の発生日に関与し、それらの環境要因を点数化することにより、赤潮の発生日を予測できる可能性が示唆された。これらのデータは、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/kaisuion/>) の準リアルタイムデータとして漁業者にもアクセス可能であり、その予測計算法も非常に簡易である。また、赤潮発生の1~2ヶ月前から、早期・中期・直前と段階的に予測精度を高めながら発生日を予測することができる。

う。

4) 有害鞭毛藻類の培養試験

① *K. mikimotoi* の細胞サイズ変化 (画像解析アプリによる解析)

2020年の測定結果を図26に示す。2020年4月30日から6月18日までの間に6回の調査を行い、*K. mikimotoi* 細胞を含む顕微鏡画像を得た。その画像から計151細胞のサイズデータ(面積, 相対値)をTouch de Measureにより取得した。4月30日から6月2日まで細胞面積は緩やかに増加したが、その後約1週間は若干の減少傾向になった。しかしながら6月18日になると、細胞サイズはそれ以前の細胞サイズと比較して有意に大きかった(ANOVA, Tukey-Kramer method, $p < 0.05$)。一方、浦ノ内湾における*K. mikimotoi*の細胞密度は一時的な減少を除き、4月30日の20 cells/mLから徐々に増加し6月18日の最高細胞密度 2.3×10^4 cells/mLに達した。そして、翌6月19日以降*K. mikimotoi* 個体群の細胞密度は減少し、6月26日には < 10 cells/mLとなった。*K. mikimotoi*の細胞サイズは赤潮の発達期から最盛期まで、細胞密度とともに大きくなったように見えた。一方、細胞密度が減少に転じる6月19日以降は、細胞サイズデータを取得することができなかった。

2021年の測定結果を図27に示す。前期(5月3日~5月28日)ならびに後期(6月2日~8月9日)の*K. mikimotoi* 赤潮個体群の顕微鏡写真を撮影し、その画像から約2,600細胞のサイズデータをTouch de Measureにより取得した。前期の5月3日(107 cells/mL)から5月13日にかけて*K. mikimotoi* 個体群の密度は増加し、最高細胞密度435 cells/mLに達した。その後5月28日にかけて漸減し、36 cells/mLになった。その間、細胞サイズは緩やかに変動したが、赤潮末期と言える5月28日の細胞サイズはそれまでの細胞サイズと比較して明らかに大きかった(ANOVA, Tukey-Kramer method, $p < 0.05$)。ただし、赤潮個体群の細胞密度が減少傾向にある5月25日までの12日間、細胞サイズの増加傾向は認められなかった。一方、後期の赤潮個体群は6月2日から7月23日まで漸増し(最高細胞密度 1.2×10^4 cells/mL)、その後7月26日に掛けて530 cells/mLまで急減した。この急減した後の本種個体群は8月2日まで約一週間細胞密度を維持していたものの、それ以降減少して8月10日には < 10 cells/mLとなった。細胞サイズは赤潮の発達期から最盛期まで緩やかな減少傾向にあったが、細胞密度急減後の 10^2 オーダーの細胞密度が維持された期間、細胞サイズは増加傾向を示していた。7月26日ならびに7月28日の細胞サイズと比較して、7月30日から8月6日までの細胞サイズは有意に差があると認められた(ANOVA, Tukey-Kramer method, $p < 0.05$)。

今回得られた現場における赤潮の減少・崩壊と細胞サイズの関係には、特徴的な傾向があるとは結論づけられない。これまでに*K. mikimotoi*の細胞サイズの肥大化はリン欠乏時に特徴的に起こることが山口(1998)によって報告されている。昨年までに本事業で得られた結果も同様で、栄養制限時に細胞が肥大化して個体群の崩壊が発生した。今回の調査では栄養塩レベルとの関係については、十分なデータに基づいた議論をすることはできなかった。“細胞サイズが肥大化した後に赤潮崩壊が起こる”という現場観察に基づいた経験的な感覚については、栄養制限の有無も考慮しつつ今後さらなる精査が必要と思われた。

② 内湾環境を室内再現可能な培養装置の新規構築

赤潮が多発する高水温期、赤潮原因藻の増殖の場となる沿岸表層においては、栄養塩の濃度が低下し、赤潮の発生を制限することがよく知られている。代表的な赤潮多発海域である

浦ノ内湾では、水温の上昇にともなう成層構造の発達によって、底層から表層への栄養塩の供給が滞り、赤潮原因藻の栄養要求量が満たされない (Yamaguchi & Sai 2015)。このような環境において、*K. mikimotoi* などの赤潮原因藻は、強い光が降りそそぐ海面付近に集積して赤潮を形成するに至る。したがって、赤潮の挙動を合理的に説明可能なシナリオを構築するには、沿岸域で観察される水塊構造・光強度・栄養塩を厳密にコントロール可能な室内培養系を構築し、赤潮原因藻の挙動と各環境因子との関係を精密に試験する必要がある。

このような背景から、沿岸で観られる環境変動を室内で部分的に再現可能な培養装置が開発されている (Erga & Omar 1999, Erga et al. 2015, Shikata et al. 2014)。この事業に携わる課題担当者は、環境諸因子のなかで光に着目、高輝度 LED (山口 2017) を用いることで、沿岸域で観られる光強度の鉛直変動を室内で近似再現し、あわせて系外から光強度をモニタリングできる技術を開発してきた。しかしながら、水面に照射する光強度は $10^3 \mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ に達しておらず、沿岸の照射光を高精度に再現できていなかった。

そこで本年度においては、新規開発した“強光”照射培養システムを用いて、*K. mikimotoi* の鉛直挙動を調べようとした。その結果、培養期間を通して、光源を起点に光強度は水深に応じて指数関数的に減衰しており、このような光変動環境において *K. mikimotoi* 細胞はある特定的水深に高密度分布することが示された (図 28)。培養 4 日目、水深 6–10 cm において、*K. mikimotoi* 細胞群が 10^4 cells/mL オーダーの高密度で観察された (図 28)。このような特定水深における高密度分布の様子は、細胞密度に差はあれども、培養 10 日目まで継続して観察された (図 28)。その一方で、光源近辺にあたる水深 0–2 cm では、*K. mikimotoi* 細胞が 10^1 cells/mL 程度のごく低密度で推移し続けた (図 28)。中層にあたる水深 20–60 cm においては、 $10^2\text{--}10^3 \text{ cells/mL}$ 程度の密度で細胞が認められたものの、高密度分布域のそれと比較すると明らかに低かった (図 28)。光源近辺では、常時 $10^3 \mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ オーバーの光が照射されており、*K. mikimotoi* の増殖には不適な強光環境が形成されていたと推測される。

培養 9 日目の暗期では、表層 (水深 0 cm) から底層 (水深 60 cm) まで、*K. mikimotoi* 細胞が概ね 10^3 cells/mL 程度の密度でおおよそ鉛直的に均一分布していた (図 28)。ただし、その前後の明期では、前述した水深での高密度分布が認められ、光照射下でのみ高密度分布の現象が生じることを明らかにできた。

以上、培養槽の水面表層に強光が降りそそぐ環境において、*K. mikimotoi* は光依存的な鉛直挙動をとり、おおよそ良好に増殖可能な光環境にて、高密度に分布することが示唆された。光照射条件が異なる過去の実験でも、おおよそ同様の光依存的な高密度分布現象が認められていることから、再現性をもって *K. mikimotoi* の高密度分布に関わる鉛直挙動が光依存的なことを示唆するに至った。このような光依存性は、赤潮の発生を高精度に予測する上で極めて重要な位置付けにあり、より詳細な検証が求められる。次年度においては、当初の予定通り、これまでに得られた結果を比較・総合する。本課題を通じて、*K. mikimotoi* の光依存的な鉛直挙動とその機作を詳細に解明できると期待される。

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* 赤潮発生に至る初期細胞密度について)

魚貝類養殖現場において、赤潮発生時期を迎えるに先立って、その年に有害赤潮が発生するか否かの照会が度々なされる。そこで、赤潮を形成する *K. mikimotoi* には、ある一定の細胞

密度に達すると赤潮発生に至る閾値が存在すると考え、それを「初期細胞密度」として扱うこととした。その「初期細胞密度」について検討した。

県の設定する注意基準のうち最も低密度であって最も採用されている 100 cells/mL を「初期細胞密度」、その年の最高細胞密度が 1,000 cells/mL 以上となる場合を「赤潮発生」として、その関係について整理した。

各県海域における *K. mikimotoi* 細胞密度が 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達した確率と 100 cells/mL 確認日から 1,000 cells/mL 確認日に要した日数について、表 11 にまとめた（山口県徳山湾海域および高知県宿毛湾海域はデータが少ないため解析対象海域から除外した）。なお、初認日に 1,000 cells/mL 以上で確認された場合、予察には繋がらないことから当年は除外した。

広島県広島湾海域では、解析対象期間を 1992～2021 年とした。この過去 30 年間のうち 100 cells/mL 以上の密度に到達した年数は 24 年、1,000 cells/mL 以上の密度に到達した年数は 21 年であった。そのうち初認日に 1,000 cells/mL 以上の密度に到達した 6 年を除くと、100 cells/mL 以上の密度確認後に 1,000 cells/mL 以上の密度に到達した年数は 18 年のうち 15 年であり、その確率は 83% となった。また 100 cells/mL 以上の密度から 1,000 cells/mL 以上の密度に到達するまでの日数は平均 13.1 日（5～32 日）であった。広島県では *K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準は 500 cells/mL であるが、本海域で 100 cells/mL 以上の密度を確認した場合、概ね 2 週間には 83% の確率で赤潮化の危険性があることが確認された。

福岡県周防灘海域では、解析対象期間を 2002～2021 年とした。この過去 20 年間のうち 100 cells/mL に到達した年数は 14 年、1,000 cells/mL に到達した年数は 12 年であった。そのうち初認日に 1,000 cells/mL に到達した 4 年を除くと、100 cells/mL 確認後に 1,000 cells/mL に到達した年数は 10 年のうち 8 年であり、その確率は 80% となった。また 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達するまでの日数は平均 16.0 日（5～33 日）であった。福岡県では魚類養殖がないため *K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準は設定していないものの、本海域で 100 cells/mL を確認した場合、概ね 2 週間には 80% の確率で赤潮化の危険性があることが確認された。

大分県周防灘海域では、解析対象期間を 1995～2021 年とした。この過去 27 年間のうち 100 cells/mL に到達した年数は 20 年、1,000 cells/mL に到達した年数は 17 年であった。そのうち初認日に 1,000 cells/mL に到達した 4 年を除くと、100 cells/mL 確認後に 1,000 cells/mL に到達した年数は 20 年のうち 13 年であり、その確率は 65% となった。また 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達するまでの日数は平均 29.6 日（2～64 日）であった。大分県では *K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準は 200 cells/mL であるが、本海域で 100 cells/mL を確認した場合、概ね 1 ヶ月後には 65% の確率で赤潮化の危険性があることが確認された。

大分県佐伯湾海域では、解析対象期間を 2005～2021 年とした。この過去 17 年間のうち 100 cells/mL に到達した年数は 13 年、1,000 cells/mL に到達した年数は 11 年であった。そのうち初認日に 1,000 cells/mL に到達した 2 年を除くと、100 cells/mL 確認後に 1,000 cells/mL に到達した年数は 11 年のうち 11 年であり、その確率は 100% となった。また 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達するまでの日数は平均 8.8 日（3～22 日）であった。大分県では *K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準は 200 cells/mL であるが、本海域で 100 cells/mL を確認した場合、概ね 1 週間には 100% の確率で赤潮化の危険性があることが確認された。

愛媛県岩松湾海域では、解析対象期間を 1989～2021 年とした。この過去 33 年間のうち 100

cells/mL に到達した年数は 17 年、1,000 cells/mL に到達した年数は 15 年であった。そのうち初認日に 1,000 cells/mL に到達した 5 年を除くと、100 cells/mL 確認後に 1,000 cells/mL に到達した年数は 12 年のうち 10 年であり、その確率は 83% となった。また 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達するまでの日数は平均 6.4 日 (1~19 日) であった。愛媛県では *K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準は 100 cells/mL であり、本海域で 100 cells/mL を確認した場合、概ね 1 週間後には 83% の確率で赤潮化の危険性があることが確認された。

高知県浦ノ内湾海域では、解析対象期間を 1992~2021 年とした。この過去 30 年間のうち 100 cells/mL に到達した年数は 24 年、1,000 cells/mL に到達した年数は 22 年であった。そのうち初認日に 1,000 cells/mL に到達した 3 年を除くと、100 cells/mL 確認後に 1,000 cells/mL に到達した年数は 21 年のうち 19 年であり、その確率は 90% となった。また 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達するまでの日数は平均 22.0 日 (2~80 日) であった。高知県では *K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準は 100 cells/mL であり、本海域で 100 cells/mL を確認した場合、概ね 3 週間後には 90% の確率で赤潮化の危険性があることが確認された。

このことから、*K. mikimotoi* が 100 cells/mL で確認された場合、1,000 cells/mL に到達する日数は平均 6.4~29.6 日で海域によって差がみられるが、その確率は 65~100% であることが明らかとなり、漁業被害を最小限に抑えるためには、モニタリングにより初期増殖をとらえ、赤潮の発生を事前予測することが重要であると再確認された。

② 既存データの解析 (*K. mikimotoi* 赤潮の終息要因について)

魚類養殖現場において、有害赤潮が発生した場合には、餌止めによる対策が講じられているが、長期間続けると養殖魚の成長に影響が生じてしまうため、赤潮終息時期について照会がなされることがある。これまで *K. mikimotoi* 赤潮の終息については検討がなされていないため、気象・海象との関連性を解析した。

広島県広島湾海域

1992~2021 年 (過去 30 年間) について、6~9 月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン 1 (1,000 cells/mL 以上) とパターン 2 (10,000 cells/mL 以上) に区分した。赤潮発生年について、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日 (最高細胞密度が確認された日以降で、初めて 1 日当たり 105 cells/mL 以上の減少速度が確認され始めた日) を求め、ピーク前後の 7 日間の気象庁気象統計情報による広島の降水量、最大風速、日照時間、気象庁による広島湾の潮位差 (2010 年以前は海上保安庁による広島湾の毎時潮位から算出) および広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター観測による同センター棧橋の水温の計 5 要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p > 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理した。その結果、有意差が認められた要素は、パターン 1 においては最大風速 ($p < 0.05$)、表層水温 ($p < 0.05$) の 2 要素で、パターン 2 においては表層水温 ($p < 0.05$) の 1 要素であった。

両パターンで有意差が認められた表層水温を確認すると、ともにピーク後はピーク前に比べて高い傾向があった。パターン 1 で有意差が認められた最大風速を確認すると、ピーク後はピーク前に比べて小さい傾向があった。

表層水温の上昇と最大風速の低下は、*K. mikimotoi* 赤潮終息へ以下のように影響していると考えられる。水温が上昇することで海水が成層化すると考えられる。加えて、最大風速の低下により表層水の移動や吹送流が弱まると考えられ、これも海水の成層化に拍車をかけると考えられる。この成層化によって海水が鉛直的に混合しにくくなることで、海底からの栄養塩の供給が抑制され、*K. mikimotoi* が増殖に用いる栄養塩が不足し、増殖が抑制され、赤潮の終息につながる可能性が考えられた。

ただし、ここで用いたデータは表層水温であり、成層化について検討するためには鉛直方向の海水密度の分布を確認する必要があると考えられる。また、最大風速は瞬間的な数値であるが、*K. mikimotoi* 赤潮終息への影響を検討するにはより長い時間継続したデータを用いる必要があると考えられる。

山口県徳山湾海域

1989～2021年（過去33年間）について、6～9月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン1（1,000 cells/mL以上）とパターン2（10,000 cells/mL以上）に区分した。赤潮発生年について、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日（最高細胞密度が確認された日以降で、初めて1日当たり70 cells/mL以上の減少速度が確認され始めた日）を求め、ピーク前後の7日間の気象庁気象統計情報による下松の降水量、最大風速、日照時間、潮汐ソフト「潮時表」による徳山の潮位差および山口県水産研究センター内海研究部観測による山口漁港の表層水温の計5要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれでShapiro-Wilk検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合（ $p \geq 0.05$ ）はWelchの t 検定、正規分布でない場合（ $p < 0.05$ ）はMann-Whitneyの U 検定によって統計処理したところ、有意差が認められた要素は、パターン1においては日照時間（ $p < 0.05$ ）、潮位差（ $p < 0.01$ ）、表層水温（ $p < 0.01$ ）の3要素で、パターン2においては日照時間（ $p < 0.10$ ）、潮位差（ $p < 0.01$ ）の2要素であった。

両パターンで有意差が認められた潮位差を確認すると、ともにピーク後はピーク前に比べて小さい傾向があった。同じく両パターンで有意差が認められた日照時間を確認すると、ともにピーク後はピーク前に比べて長い傾向があった。パターン1で有意差が認められた水温を確認すると、ピーク後はピーク前に比べて高い傾向があった。

これらのことから、潮位差が小さくなることで海水交換による栄養塩の補給が十分に行われなくなることで、日照時間が長く、水温が高くなることで*K. mikimotoi*の増殖が促進されて栄養塩の消費が一層進むことが、*K. mikimotoi*の増殖に必要となる栄養塩の不足に繋がり、*K. mikimotoi*赤潮の終息に影響していた可能性が考えられた。

福岡県周防灘海域

2002～2021年（過去20年間）について、6～8月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン1（1,000 cells/mL以上）とパターン2（10,000 cells/mL以上）に区分した。赤潮発生年について、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日（最高細胞密度が確認された日以降で、初めて1日当たり100 cells/mL以上の減少速度が確認され始めた日）を求め、ピーク前後の7日間の気象庁気象統計情報による行橋の降水量、最大風速、日照時間、福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所作成の潮位表から算出した宇島港の潮位差および同所観測による宇島漁港の

表層水温の計 5 要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p \geq 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理したところ、有意差が認められた要素は、パターン 1 においては降水量、日照時間、表層水温 ($p < 0.05$)、最大風速 ($p < 0.10$) の 4 要素で、パターン 2 においては降水量、日照時間 ($p < 0.01$)、表層水温 ($p < 0.05$) の 2 要素であった。

両パターンで有意差が認められた要素のうち、降水量ではピーク後はピーク前に比べて少なく、日照時間ではピーク後はピーク前に比べて長く、表層水温ではピーク後はピーク前に比べて高い傾向が認められた。パターン 1 のみ有意差がみられた最大風速については、ピーク後はピーク前に比べて弱い傾向が認められた。また、潮位差については有意差が認められなかった。

以上より、まず降雨による栄養塩供給と低日照により増殖に好適環境条件となった *K. mikimotoi* の赤潮が大規模化してピークを迎えるが、その後降水量の減少により *K. mikimotoi* の増殖に必要な栄養塩の陸域からの供給が減少するとともに、*K. mikimotoi* の増殖に不利となる日照時間の増大により、*K. mikimotoi* 赤潮が急速に終息することが示唆された。また最大風速が低下することで海水の鉛直攪拌作用が弱まり、底層からの栄養塩供給が減少し、*K. mikimotoi* 赤潮の終息につながる可能性も示唆された。また表層水温については、*K. mikimotoi* 赤潮の発生・終息時期が水温上昇期にあたるため、ピーク後はピーク前に比べて高くなるのは明らかであるが、表層水温の上昇に伴い水塊の成層強度が強まる一方で鉛直混合が弱まることにより、表層への栄養塩供給が減少して *K. mikimotoi* 赤潮の終息につながる可能性も考えられた。

大分県周防灘海域

1995～2021 年（過去 27 年間）について、6～9 月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン 1 (1,000 cells/mL 以上) とパターン 2 (10,000 cells/mL 以上) に区分した。赤潮発生年について、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日（最高細胞密度が確認された日以降で、初めて 1 日当たり 500 cells/mL 以上の減少速度が確認され始めた日）を求め、ピーク前後の 7 日間の気象庁気象統計情報による豊後高田の降水量、最大風速、日照時間、一般財団法人日本気象協会九州支社監修「大分の暦」による中津港の潮位差および福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所観測による宇島漁港の水温の計 5 要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p \geq 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理したところ、パターン 1、パターン 2 とともに潮位差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$) において有意差が認められた。両パターンともに、潮位差ではピーク後はピーク前に比べて小さい傾向があった。

これらのことから、潮位差が小さくなることで海水交換による栄養塩の補給が十分に行われなくなることが、*K. mikimotoi* の増殖に必要となる栄養塩の不足に繋がり、*K. mikimotoi* 赤潮の終息に影響していた可能性が考えられた。

大分県佐伯湾海域

2005～2021年（過去17年間）について、4～9月の最高細胞密度を基に赤潮発生年（1,000 cells/mL以上）を抽出した。赤潮発生年の *K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日（ピークは最高細胞密度が1,000 cells/mLを2週連続して下回る前の調査日）を求め、ピーク前後の7日間の気象庁気象統計情報による佐伯の気温、最高気温、最低気温、降水量、風速、最大風速、風向、最大風向、日照時間、日本気象協会「大分の暦」による佐伯港の潮位差および大分県農林水産研究指導センター地先筏観測による上浦津井漁港内の表層水温・塩分の計12要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p \geq 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理したところ、有意差が認められた要素は、水温 ($p < 0.05$)、気温 ($p < 0.05$)、最高気温 ($p < 0.01$)、降水量 ($p < 0.05$)、日照時間 ($p < 0.05$) の5要素であった。

有意差が認められた各要素を検討すると、ピーク後はピーク前に比べて、水温、気温、最高気温では高く、降水量では少なく、日照時間では長い傾向が認められた。これらは夏期に晴天が続き、降雨が少なく、日照時間が長い状況を示すものであり、高密度に達した *K. mikimotoi* にとって個体群を維持するに十分な栄養塩の供給がなく、かつ貧栄養条件下で強光に曝されることで、増殖が阻害され個体群密度が低下したと推測された。

これらのことから、本湾における *K. mikimotoi* 赤潮の終息条件として夏期の晴天が継続し、降水量の低下と日照時間の増加が深く関係していると考えられた。

愛媛県岩松湾海域

1989～2021年（過去33年間）について、6～9月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン1（1,000 cells/mL以上）とパターン2（10,000 cells/mL以上）に区分した。赤潮発生年について、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日（最高細胞密度が確認された日以降で、初めて1日当たり890 cells/mL以上の減少速度が確認され始めた日）を求め、ピーク前後の7日間の気象庁気象統計情報による宇和島の降水量、最大風速、日照時間、潮位差および愛媛県水産研究センターによる下波地先の0.5 m層水温の計5要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p \geq 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理したところ、パターン1、パターン2ともに水温 ($p < 0.01$) で有意差が認められた。

両パターンで有意差が認められた水温について検討すると、ピーク後はピーク前に比べて高い傾向がみられた。そのうち、2000年、2005年、2007年の3年間については、基準日を挟む数日（2～3日）の間に水温が2℃以上上昇する急潮が確認された（小泉2002）。このことから、単に季節的にピーク後の方が高水温になりやすいことに加え、黒潮由来の暖水波及が拡散や輸送を介して *K. mikimotoi* 細胞密度を低下させている可能性が考えられた。

高知県浦ノ内湾海域

1998～2021年（過去24年間）について、6～9月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン1（1,000 cells/mL以上）とパターン2（10,000 cells/mL以上）に区分した。赤潮発生年につ

いて、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日（最高細胞密度が確認された日以降で、初めて 1 日当たり 500 cells/mL 以上の減少速度が確認され始めた日）を求め、ピーク前後の 7 日間の気象庁気象統計情報による須崎市の降水量、最大風速、日照時間、気象庁潮汐観測資料による高知市の潮位差および高知県水産試験場観測による浦ノ内湾の表層水温の計 5 要素のデータを整備した。

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p \geq 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理したところ、パターン 1、パターン 2 とともに水温 ($p < 0.01$)、潮位差 ($p < 0.05$) の 2 要素で有意差が認められた。

潮位差はピーク後はピーク前に比べて大きく、表層水温もピーク後はピーク前よりも高い傾向があった。

これらのことから、潮位差が大きくなることで海水交換が促進され、*K. mikimotoi* 赤潮が物理的に拡散されることが、終息要因の一つであると考えられた。また、表層水温については、水温上昇期である 6~9 月のデータを解析に供しているため、ピーク以降の水温が高くなることは季節的なものであり、終息要因として判断することは難しいと考えられた。

③ 既存データの解析（赤潮予察技術の検証）

2017 年度までに実施した統計解析により、赤潮発生に関与する環境因子（海象・気象）を抽出し、有害赤潮発生シナリオを構築するとともに、抽出された環境因子を用いた判別分析や判別得点のロジスティック回帰による予察技術を開発した（岩野ら 2020）。この予察技術を本年度取得したデータで検証を行った（予察技術のデータ期間は 2002~2017 年）。

なお、表 12~18 の予察の欄では、各環境因子の組み合わせで予察した発生確率が 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、予察と赤潮発生状況（結果）が一致した場合を「◎」、「△」と予察して発生した場合を「○」、「△」と予察して非発生の場合を「△」、予察と結果が一致しなかった場合を「×」と表記した。

広島県広島湾海域（表 12）

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ところ、22 通りの組み合わせのうち 82%が「発生年」、9%が「非発生年」、ならびに 9%が「発生年」と「非発生年」のどちらとも区別できない「△」となった。2021 年は *K. mikimotoi* 赤潮は非発生となり、多くのモデルで予察は的中しなかった。

22 通りの組み合わせのうち、予察と赤潮発生結果が一致した組み合わせの割合を 2018 年から 2021 年それぞれについて算出すると、2018 年は 77%、2019 年、2020 年はともに 18%、2021 年は 9%と低下傾向がみられており、広島湾では、2002 年から 2017 年の環境データを用いた本予察技術の適用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 13）

徳山湾では、*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。2021 年は非発生年となったが、予察モデルでは 10 通りの組み合わせのうち、6 通りで「非発生年」、3 通りで「発生年・非発生年のどちらとも区別できない」と予察され、

「発生年」と予察されたのは1通りであったことから、予察モデルが大きく外れることはなく概ね的中した。

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、2018～2021年の4年間にわたって予察と発生状況（結果）が一致「◎」した組み合わせはなかったが、3年間で一致「◎」した組み合わせが3通りあり、それらの組み合わせには「前年11月表層塩分」と「1月中旬日照時間」の両方またはいずれかの環境因子が含まれていた。その他、2年間で一致「◎」した組み合わせが4通り、1年間で一致「◎」した組み合わせが3通りあった。10通りの組み合わせのうち、1年間で一致「◎」した「6月中旬底層DO」と「1月中旬日照時間」の組み合わせでのみ、予察が外れた年があった。この組み合わせでは、3年間で予察が外れており、的中率が低下しているものと考えられた。

福岡県周防灘海域（表14）

周防灘福岡県海域では、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。2021年は*K. mikimotoi*赤潮の非発生年となったが、これまでに作成した予察モデルのうち、「4月上旬気温」を含まない12通りの組み合わせ全てが「非発生年」と予察したことから、概ね的中したと言える。

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、2018～2021年の4年間の全てで予察と発生状況（結果）が一致「◎」した組み合わせはなかったが、3年間で一致「◎」した組み合わせが7通りあり、うち4通りに「4月上旬日照時間」、3通りに「6月5m層DIP」、2通りに「5月中旬気温」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、5月中旬の気温が低く、6月のDIPが高い傾向があるものの、2021年は4月上旬の日照時間が2019年、2020年に続いて極端に長く、5月中旬の気温が高く、6月の中～底層DIPが低かった。シードポピュレーションは2月にPCR法で検出され、その後も低水準で観察されていたものの、4月上旬に日照が多かったことで、珪藻類が優占してDIPを消費し、*K. mikimotoi*の遊泳細胞の増殖が阻害されて低水準で推移し、その後赤潮化の引き金となる6月のDIPも低水準で推移したことで、結果的に赤潮化しなかったと考えられる。

大分県周防灘海域（表15）

大分県周防灘海域では、*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。2021年は非発生年となったが、これまで作成した予察モデルでは、「発生年」と「非発生年」で分かれる結果となった。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「5月表層水温」と「7月分布指標（10 cells/mL以上）」の組み合わせは、2018年と2020年を的中させたが、発生年であった2019年と非発生年となった2021年については予察することができなかった。2021年に的中した予察モデルの多くで「7月分布指標（10 cells/mL以上）」という項目が共通していた。

2021年は、1 cell/mL以上の初認日が4月6日と早くから初期個体群が確認された。また、早期に梅雨入りし、5月の降水量は多く塩分が低下した。しかし、例年梅雨空となる6～7月は好天に恵まれた。さらに、8月中旬は前線に伴う大雨の日が多く、その後に塩分が大きく低下した。このように、例年とは大きく異なる気象状況により、初期個体群が優占して増殖す

る環境条件が整わなかったと推察された。

大分県佐伯湾海域（表 16）

佐伯湾では、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。本年の *K. mikimotoi* 赤潮予察は、これまでに作成した予察モデルの 11 区分のうち 6 区分で「非発生年」、4 区分で「発生年」、1 区分で「区別できない」であったが、実際は非発生であった。一部では的中したが十分な中とは言えなかった。ただし、「3 月降水量」または「3 月日照時間」を説明変数に用いた区分では、7 区分中 6 区分で「非発生」を予察しており、的中率が高くなることから、本海域において 3 月の気象条件が赤潮に深く寄与していることが考えられた。

例年、*K. mikimotoi* が豊後水道沿岸の各湾の中層で増殖し、赤潮に至る地場発生型赤潮により漁業被害を発生させるが、本年度は佐伯湾以外でも地場発生型の赤潮は確認されなかった。佐伯湾において *K. mikimotoi* は、6 月上旬に初認されたが、その後、顕著に増殖することなく、8 月中旬に *P. dentatum* が赤潮を形成した際に 15 cells/mL が確認されたのが最高であり、8 月下旬には本種の遊泳細胞は確認されなくなった。

2 月、4～8 月の豊後水道沖合調査では、顕微鏡観察では本種の遊泳細胞は確認されなかったが、PCR 法による遺伝子検査では、本種の遺伝子が少量であるものの検出された。本年度は暖冬の影響もあり、冬季水温は高めであったため、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。しかし、2021 年は、本種が増殖する梅雨時期の降水量が少なく（佐伯市 7 月降水量 49 mm 平年比 42%）、海域の栄養塩の供給が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、本種が増殖する頃には *P. dentatum* 等の他のプランクトンが優占していたことも本種の増殖を制限した可能性がある。

愛媛県岩松湾海域（表 17）

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。2021 年は非発生となったが、前年に引き続きほとんどの予察モデルで「発生」と予察され、予察は的中しなかった。本年度「発生」と予察したモデルには「1 月下旬 5 m 水温」、「2 月上旬 5 m 水温」等、冬季水温の項目が多く関与していた。一方で、「非発生」あるいは「発生年・非発生年のどちらとも区別できない」と予察された 5 つのモデルには、「6 月中旬日照時間」、「7 月日照時間」等、全て日照時間に関する項目が関与していた。

2021 年の冬季水温は平年より高く推移しており、*K. mikimotoi* のシードポピュレーションが維持されやすかったと考えられる。実際、岩松湾沖合域では、*K. mikimotoi* が冬季から春季にかけて PCR 法で検出され、5 月以降は濃縮検鏡においても 0.01 cell/mL 以上で観測されていた。しかし、湾内にて遊泳細胞が確認されたのは 7 月 14 日の 1 cell/mL のみであり、同時期は珪藻類や *Prorocentrum* sp. 等が優占していた。これらのことから、本年度の岩松湾の光環境が *K. mikimotoi* 以外の種に有意に働いたこと、また、競合藻が常に優占していたことにより、本種初期個体群の増殖が制限されたと考えられる。

また、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、2018～2021 年の 4 年間にわたって予察と発生状況（結果）が一致「◎」した組み合わせ

はなかった。3年間で一致「◎」した組み合わせは2通りあり、その組み合わせは「4月下旬5m水温」と、「6月中旬日照時間」および「7月中旬日照時間」であった。これは、本種初期個体群の維持・増殖に重要な晩春の水温と、対数増殖期の光環境が、赤潮の発生に大きく関わることを示すものと考えられる。しかし、モデルの的中率は直近2年間でかなり低下しているため、解析手法や用いるデータを工夫することで精度の向上を図る必要がある。

高知県宿毛湾海域

2021年は*K. mikimotoi*赤潮の非発生年となり、遊泳細胞は1mL検鏡で全く確認されなかった。2002～2021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。

本年度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い。今後も、当該海域と隣接海域の発生状況が密接な関わりがあるか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18）

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。2021年は発生年であったが、予察モデルでは12通りの組み合わせのうち、6通りで「発生年」、6通りで「発生年・非発生年のどちらとも区別できない」と予察され、予察は半数的中した。

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、2018～2021年の4年間にわたって予察と発生状況（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」、「3月中旬日照時間」、「6月下旬日照時間」、「5月表層DO」の4項目であった。また、3年間および2年間での中「◎」した組み合わせはそれぞれ7通りおよび1通りであった。残りの2通りの組み合わせは4年間をとおして区別できない「△」と予察され、予察として機能しなかった。

2018～2021年の4年間において、この予察モデルでは「発生年」または「発生年・非発生年のどちらとも区別できない」のどちらかに予察された。本年度も半数以上の組み合わせが「発生年」と予察され、予察が発生に偏っていた。また、予察モデルを構築した2002～2017年のデータは本種赤潮の「非発生年」が3年間と少ないため、この予察モデルからは「非発生年」を予察することが難しい可能性があった。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・非発生を予察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

本年度の当該海域の環境は例年と異なっていた。平年より2旬早い5月中旬の梅雨入りで、5月中下旬の降水量は多かったものの、6月は少なく、7月上旬も一部地域を除いて少ないまま、7月中旬には梅雨明けとなった(6月下旬、7月下旬の日照時間は長かった)。しかしながら、その後の8月中旬に前線の停滞によるまとまった降雨があり、気象・海象はこれによる影響を受けて、8月中旬の気温は低く、日照時間は短くなり、8月中下旬(一部地域では9月上旬まで)の水温や塩分は低下した。これらにより、冬季にシードポピュレーションとなる初期の遊泳細胞が確認されていても、*K. mikimotoi*の大規模発生には至らなかったと思われる。

予察モデルでは、モデル構築時にデータを利用した2002~2017年の的中率が100%程度であっても、その後の4年間は予察的中しないケースが散見された。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り、中長期予察に加えて、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監視が必要であることが本年度の調査結果からも再確認された。この他、2018年度に実施した遡り解析の結果、長期的な気候変動や海洋環境の変化が影響し、判別率が下がる項目があることが明らかとなっている(黒田ら 2019)。これらのことから、的中率が高い予察モデルであっても、長期的な気候変動等によりの中しなくなる可能性がある(長谷川ら 2018)。そのため、今後もモニタリングを継続し、環境の変化と赤潮発生との関係性を注視していく必要がある。

また、近年は *Chattonella* spp.赤潮による漁業被害が増加しており、高感度調査やモニタリングを活用し、環境項目と赤潮発生との関係性を解明するとともに、*K. mikimotoi*に加えて *Chattonella* spp.でも予察技術の開発と赤潮発生シナリオの構築を検討していく必要がある。

引用文献

Erga SR, Omar AM, Singstad I, Steinseide E. An optical detection system for the study of fine-scale vertical displacement of microalgae in an artificial water column. *J. Phycol.* 1999; **35**: 425–432.

Erga SR, Olseng CD, Aarø LH. Growth and diel vertical migration patterns of the toxic dinoflagellate *Protoceratium reticulatum* in a water column with salinity stratification: the role of bioconvection and light. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2015; **539**: 47–64.

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.

平井真紀子, 三門哲也, 渡邊昭生, 加川真行, 黒田麻美, 村田憲一, 本田宇聖, 吉村栄一, 馬場俊典, 國森拓也, 後川龍男, 恵崎撰, 井口大輝, 中里礼大, 内海訓弘, 徳丸泰久, 都留勝則, 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2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. 2021 ; 59–117.

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.
- 兼田淳史, 小泉喜嗣, 高橋大介, 福森香代子, 郭新宇, 武岡英隆. 2007 年宇和海下波湾における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の底入り潮の発生による消滅. 水産海洋研究 2010 ; 74 : 167-175.
- 小泉喜嗣. 豊後水道東岸域における急潮と植物プランクトンの増殖機構に関する研究. 愛媛県水産試験場報告 2002 ; 10 : 1-91.
- 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.
- Shikata T, Sakamoto S, Onitsuka G, Aoki K, Yamaguchi M. Effects of salinity on diel vertical migration behavior in two red-tide algae, *Chattonella antiqua* and *Karenia mikimotoi*. *Plankton Benthos Res.* 2014; 9: 42-50.
- Sverdrup HU, Johnson MW, Fleming RH. *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology.* Prentice-Hall, New York. 1942.
- 竹内一郎・鳥山昌幸. サポートベクトルマシン. 講談社, 東京. 2020.
- 武岡英隆. 豊後水道の急潮と底入り潮. 沿岸海洋研究, 2020 ; 58 : 19-43.
- 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.
- 山口晴生. 有害・有毒藻の光応答増殖. 日本プランクトン学会報 2017 ; 64 : 35-39.
- Yamaguchi H, Hirano T, Yoshimatsu T, Tanimoto Y, Matsumoto T, Suzuki S, Hayashi Y, Urabe A, Miyamura K, Sakamoto S, Yamaguchi M, Tomaru Y. Occurrence of *Karenia papilionacea* (Dinophyceae) and its novel sister phylotype in Japanese coastal waters. *Harmful Algae* 2016; 57: 59-68.
- Yamaguchi H, Sai K. Simulating the vertical dynamics of phosphate and their effects on the growth of harmful algae. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2015; 164: 425-432.
- 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.

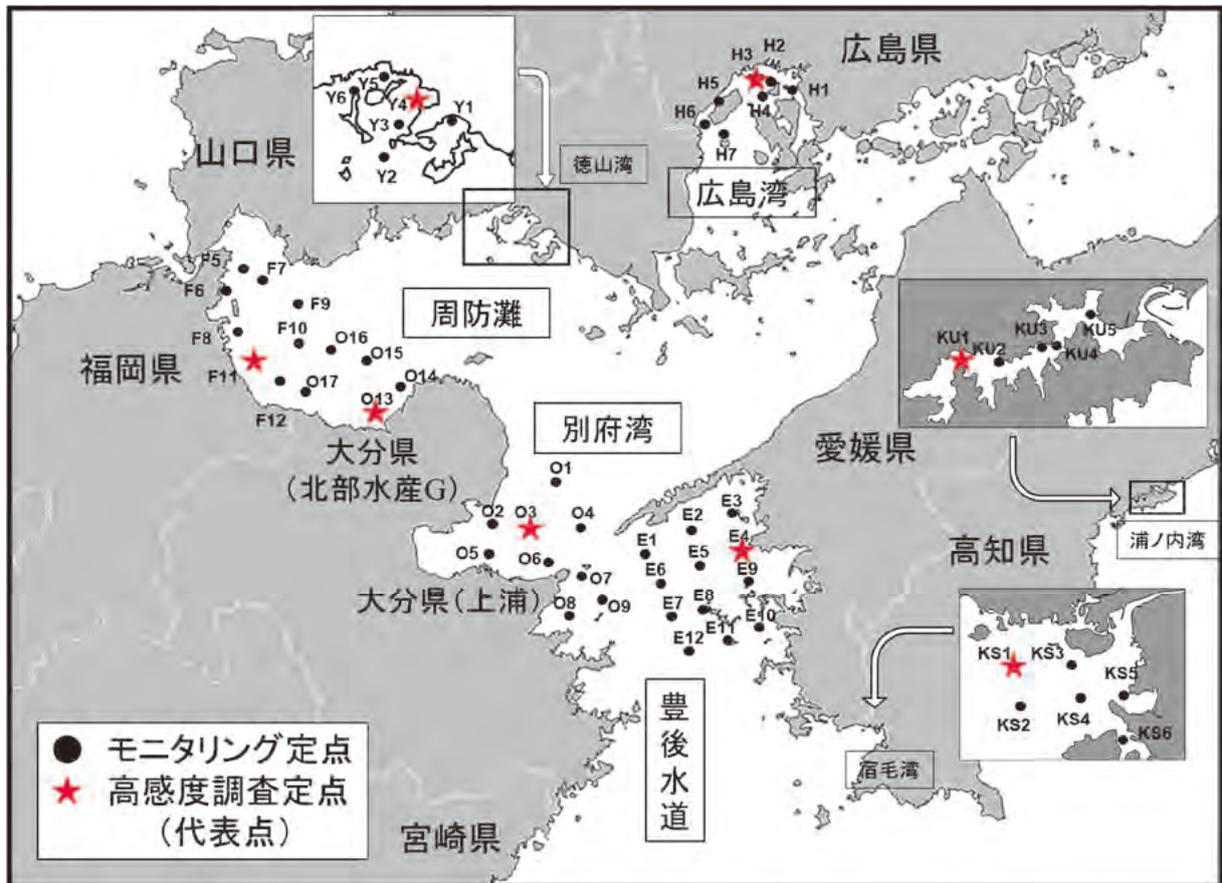


図1 モニタリング調査，高感度監視調査の定点

表1 モニタリング調査の観測分析項目と検鏡対象プランクトン

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		7	6	8	5	9(3・6)	12	6
観測層(m)		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
調査回数		6	4	4	4	5	5	5
観測分析項目	水温	○	○	○	○	○	○	○
	塩分	○	○	○	○	○	○	○
	透明度	○	○	○	○	○	○	○
	NH4-N	○	○	○(代表点)	○	○	○	○
	NO2-N	○	○	○(代表点)	○	○	○	○
	NO3-N	○	○	○(代表点)	○	○	○	○
	PO4-P	○	○	○(代表点)	○	○	○	○
	クロロフィルa	○	○	○(代表点)	○	○	○	○
	DO	○	○	○	○	○	○	○
検鏡対象プランクトン	<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>	○	○	○	○	○	○	○
	珪藻類	○(表層)	○	○	○(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	○ (アセトン抽出蛍光法)	○	○	○			○	
	DMF抽出蛍光法					○	○		
DO	ウインクラー法				○	○	○		
	溶存酸素計	○	○	○				○	

表 3 高感度監視調査の観測分析項目と検鏡対象プランクトン

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	高知県
調査点数		1	1	1	1	1	1	1	1
観測層(m)		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	0.5, 10
調査回数		4	4	4	4	4	4	4	4
観測分析項目	水温	○	○	○	○	○	○	○	○
	塩分	○	○	○	○	○	○	○	○
	透明度	○	○	○	○	○	○	○	○
	NH4-N	○	○	○	○	○	○	○	○
	NO2-N	○	○	○	○	○	○	○	○
	NO3-N	○	○	○	○	○	○	○	○
	PO4-P	○	○	○	○	○	○	○	○
	クロロフィルa	○	○	○	○	○	○	○	○
	DO	○	○	○	○	○	○	○	○
検鏡対象プランクトン	<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>	○	○	○	○	○	○	○	○
	珪藻類	○	○	○	○	○	○	○	○
PCR解析対象プランクトン	<i>Karenia mikimotoi</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Chattonella</i> spp.	○	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Heterosigma akashiwo</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
	<i>Heterocapsa circularisquama</i>	○	○	○	○	○	○	○	○



図2 宇和島湾内の調査定点（◇は重点調査点 U6），気象観測所（○は気象庁宇和島特別地域気象観測所），および須賀川河口位置（黒矢印）