

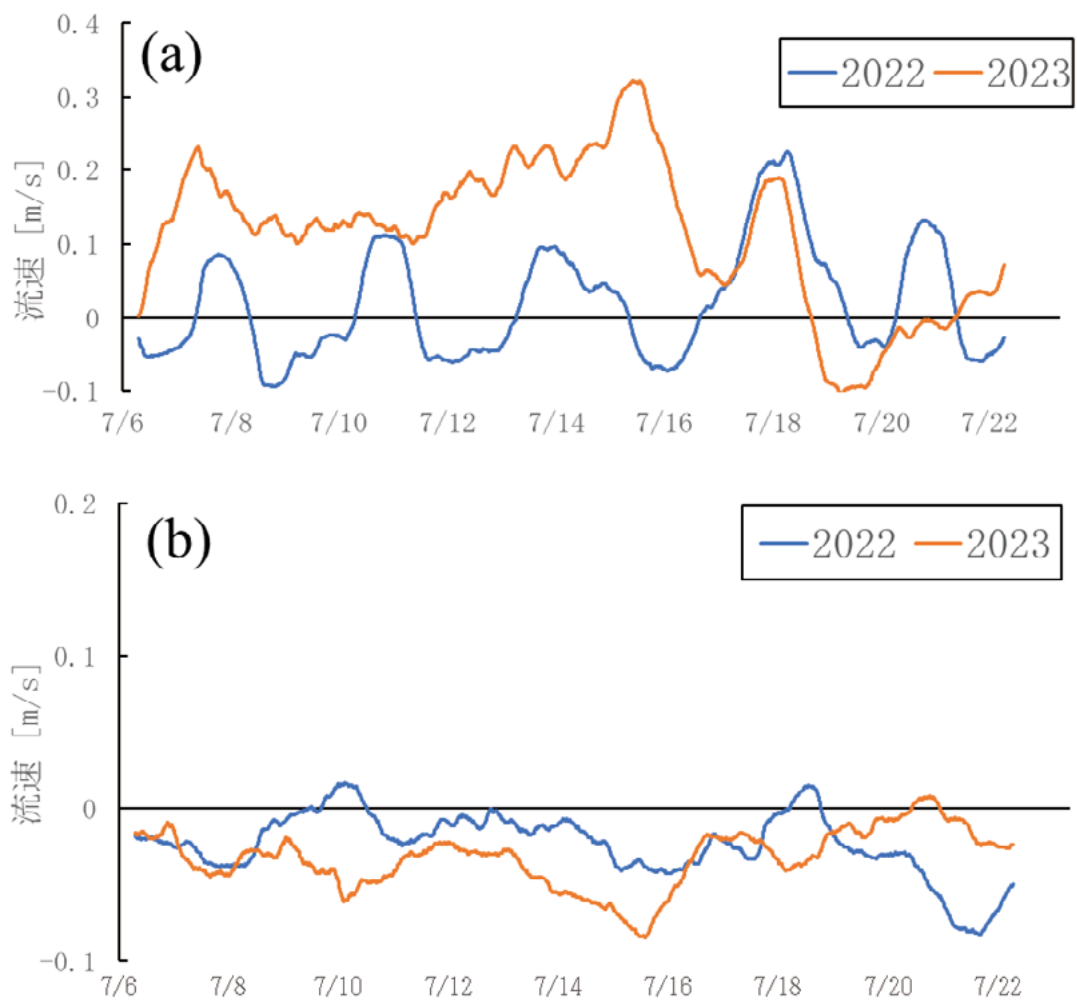


図 16 Stn.12 における海面下 1.0 m (a), 海底上 4.1 m (b)の
25 時間移動平均南北流速の推移 (正值が北向き)

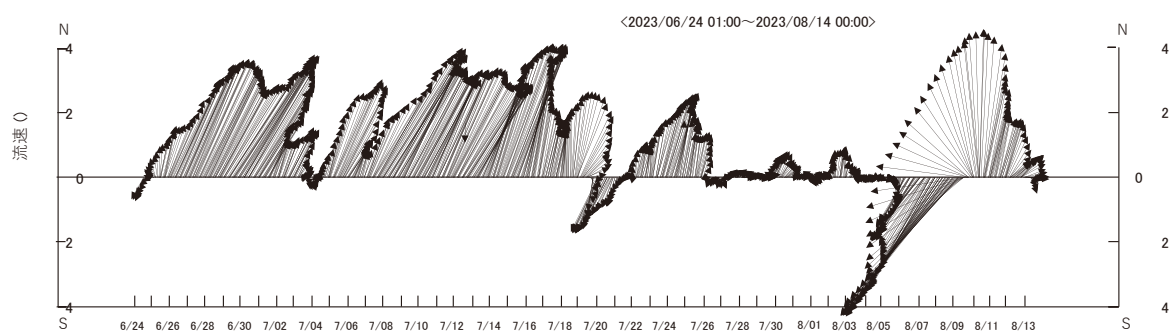


図 17 佐賀県伊万里における風向風速

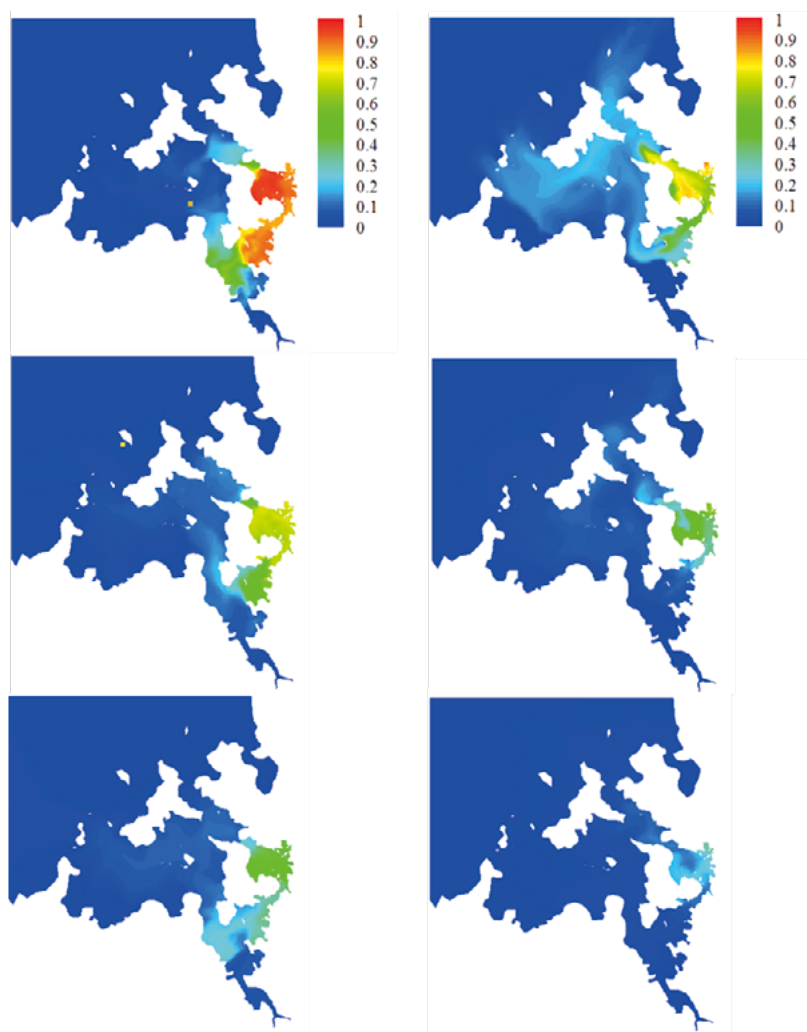


図 18 2022 年（左）および2023 年（右）のトレーサー濃度水平分布の変化
（上：7 月 2 日 0:00 中：7 月 4 日 0:00 下：7 月 6 日）

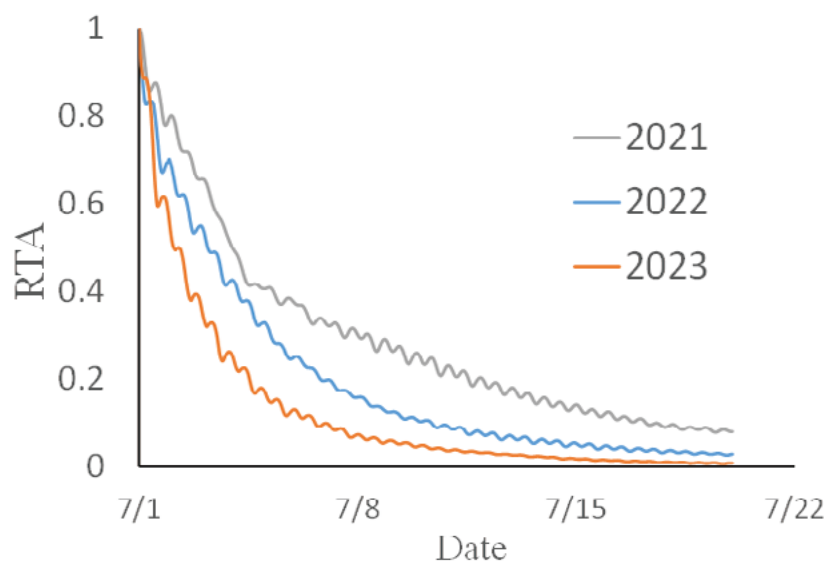


図 19 初期投入海域に残存する初期投入量に対する相対トレーサー量の時間変動

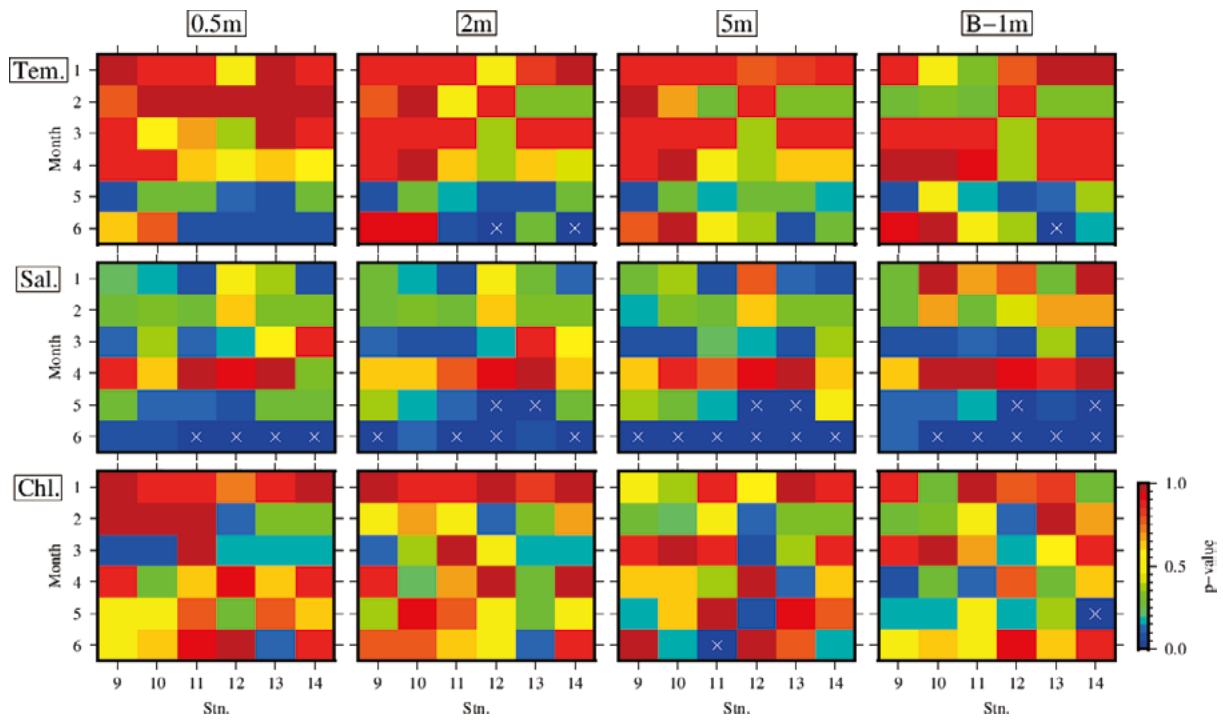


図 20 大・小規模発生年とその他年の環境差の危険率 (p)。白× : $p < 0.05$

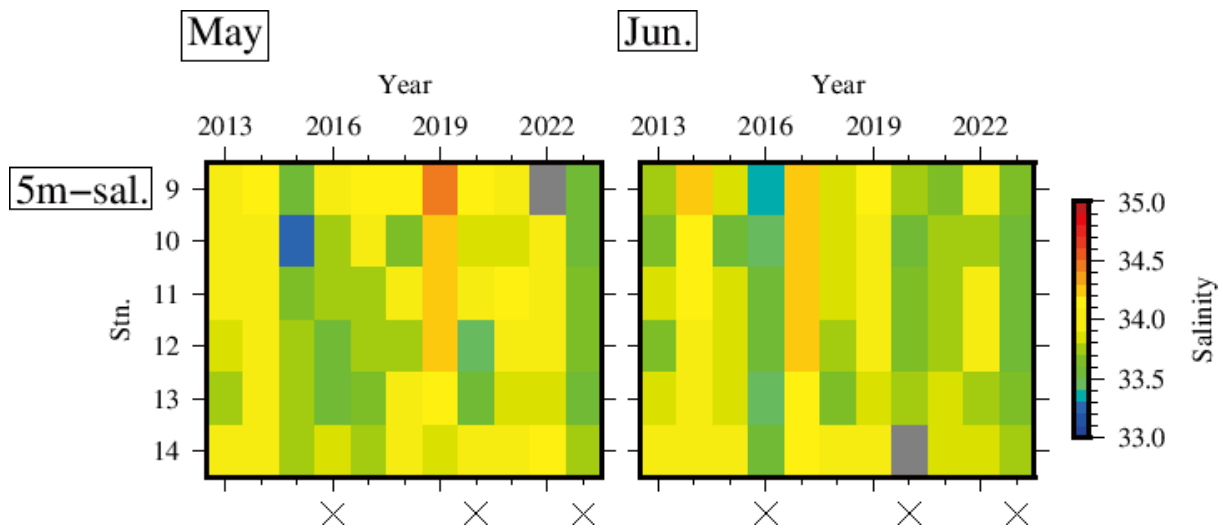


図 21 佐賀県海域 (Stn.9-14) の 5-6 月の 5 m 層塩分 × : 小規模以上の赤潮が非発生

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並びに赤潮の発生段階に応じた一連の対策（行動計画）の検討・策定

カ. 有明海・八代海海域

① 有明海海域

水産研究・教育機構水産技術研究所
福岡弘紀，徳永貴久，山口 聖，杉松宏一，橋本和正，岡村和磨
福岡県水産海洋技術センター有明海研究所
古賀まりの，徳田眞孝，加藤将太，福永 剛，藤井直幹，尾田成幸
佐賀県有明水産振興センター
岩永卓也，中原啓太，山田秀樹，野口浩介
長崎県総合水産試験場
山名涼太，鎌田正幸，山砥稔文
熊本県水産研究センター
阿部慎一郎，上原美咲，安藤典幸

1 全体計画

(1) 目的

有明海および近接海域の橘湾では，毎年夏季に貧酸素水塊が形成され，有用魚介類のへい死のみならず，餌料となる生物の生息にも多大な影響を及ぼしている。そのため，貧酸素水塊の発生メカニズムや貧酸素水塊の発生が魚介類に及ぼす影響等を明らかにするとともに，漁業被害を軽減するための予察技術開発を推進する必要がある。また，有明海では秋季から冬季に珪藻赤潮の発生により，養殖ノリの色落ち被害が頻繁に発生している。被害の未然防止や軽減対策のためには，赤潮の発生機構の解明と予察技術の開発が必要である。本課題では，関係機関が連携して，夏季に有明海の奥部海域から橘湾にかけて，冬季に奥部海域から中央部海域にかけて，広域的な調査を実施し，夏季は貧酸素水塊の発生状況を監視するとともに短期・長期の予察技術の検証・高度化や赤潮と貧酸素水塊の関係解明によって，貧酸素水塊の発生予察と操業の効率化に資することを目的とし，冬季はノリ色落ち原因珪藻の発生状況および海洋環境を監視するとともに，既存を含むモニタリングデータの解析等によって，当該海域におけるノリ色落ち原因珪藻の発生機構を構築・検証し，赤潮発生予察に資することを目的とする。

2 令和5年度計画および結果

(1) 目的

全体計画と同じ。

(2) 方法

1) 夏季の貧酸素水塊

1-1) 有明海奥部

①水質の連続観測

有明海奥部において，7月から9月まで，図1に示す3定点（P1，P6，T13）において連続観測を行った（表1）。観測データは海面に設置した通信装置から携帯電話通信網を通じて，観測後30分以内にデータ処理サーバーへ送信され，水温，塩分，クロロフィル蛍光値，溶存酸素（DO）濃度等のデータをウェブサイト「赤潮ネット（有明海・八代海等の水質観測情報）」

(<https://ariake-yatsushiro.jp/>) において公表された。

②水質の定期観測

奥部海域から諫早湾に至る 8 定点 (図 1 左) において、7 月から 9 月まで 1 週間に 1 回程度の頻度 (大潮期と小潮期) で、水質 (水温、塩分、DO 濃度、クロロフィル蛍光等) の鉛直観測および栄養塩濃度や植物プランクトンのモニタリングが実施された (表 1)。

1-2) 熊本県海域

有明海熊本県海域の 8 定点において、2023 年 7 月から 9 月の間に定期観測を実施した (図 1 右)。調査地点は宇土市網田沖から荒尾市沖 (沖合点) 5 点、熊本港地先から玉名市岱明町地先 (沿岸点) 3 点であった。調査頻度は隔週であり、計 6 回行われた。多項目水質計 (JFE アドバンテック社製 AAQ176 型) を用いて、表層から底層までの水温、塩分、クロロフィル蛍光値、濁度及び DO 等の鉛直観測が行われた。また、表層・中層・底層から栄養塩 (溶存態無機窒素・溶存態無機リン・溶存態ケイ素)、植物プランクトンの組成・細胞密度を測定するための採水が行われた。また、解析には調査を通して取得したデータ及び気象庁が公開しているアメダスデータ (熊本市)、国土交通省が公開している河川の水位データが使用された。

1-3) 橘湾

①水質の連続観測 (長崎県)

図 2 に示す St. 26 の養殖筏においてテレメーター (水温、塩分、クロロフィル蛍光値) によるリアルタイムモニタリングを行った。7 月から 9 月まで 1.5 m 層において 30 分毎に取得したデータを関係漁協等に HP「長崎県漁場テレメータ水質情報」により提供された。

②水質の定期観測 (長崎県)

橘湾奥部の 20 定点 (図 2) において、6 月から 9 月まで 2 週間に 1 回の頻度で、小潮期に 7 回程度、貧酸素水塊発生時は 1 週間に 1 回程度の観測が行われた。全調査点において、多項目水質計による鉛直観測が行われた。4 点 (調査点 4, 8, 11, 14) においては、各層採水 (表層, 5 m, 海底上 1 m)、栄養塩濃度や植物プランクトンの細胞密度計数 (表層, 5 m) が行われた。多項目水質計により得られた底層付近の DO 濃度のデータは速やかにまとめられ、観測翌日までに関係漁協等に FAX 等により提供された。「赤潮ネット (赤潮分布情報)」や「長崎県漁場テレメータ水質情報」の情報を活用し、調査の 1 週間前に、橘湾及び周辺海域で有害プランクトンの *Chattonella* は 10 cells/mL, *Karenia* と *Cochlodinium* は 500 cells/mL を基準値 (長崎水試警戒値) とし、基準値を超えて出現が確認された場合には、5 定点 (St. 20~25) において多項目水質計による鉛直観測および植物プランクトン細胞密度計数用の試料 (0.5, 5 m) が得られた。また、貧酸素水塊 (DO ; 40%未満) の発生が確認された場合には、20 定点 (St. 1~20) で多項目水質計による鉛直観測および植物プランクトン細胞密度計数用の試料 (0.5, 5 m) が得られた。さらに橘湾及び周辺海域で有害プランクトンが基準値を超えて出現が確認された場合に、9 定点 (St.1, 4, 5, 8, 11, 13, 14, 17, 19) において植物プランクトン細胞密度計数用の試料 (0.5, 5 m) が得られた。

1-4) 当該年度結果および既存データを用いた解析

得られた観測データ及び既往知見などを基に、貧酸素水塊の短期・長期予察技術の検証、赤潮と貧酸素水塊との関係解明、有害プランクトンの消長、貧酸素水塊の形成機構の検証について解析された。また、複数海域に関係する現象 (赤潮の輸送等) についても解析された。

2) 冬季のノリ色落ち原因珪藻赤潮

2-1) 連続観測

有明海奥部海域に設けた Stn. T13 (図 3, 表 2) の表層および底層に観測機器を設置し、2023 年 10 月から 2024 年 2 月までの期間、30 分間隔で、水温、塩分、クロロフィル蛍光および濁度の連続

観測を実施した。また、Stn. P1 および P6 (図 3, 表 2) に設置されている鉛直観測ブイを用いて、2023 年 10 月から 2024 年 2 月までの期間、30 分間隔で、水温、塩分、クロロフィル蛍光、濁度、水中光量子量、風向・風速および空中光量子量の観測データを取得した。ただし、予定していた Stn. P6 は機器故障のため鉛直データを取得できなかった。得られた観測データは、海面に設置した通信装置から携帯電話通信網を通してデータ処理サーバーへ送信し、ウェブサイト（赤潮ネット「有明海・八代海等の水質観測情報」）において公表した。

2-2) 定期観測

2023 年 10 月から 2024 年 2 月に、有明海奥部海域に設けた 8 定点 (P1, P6, T13, T2, T3, T4, T5, 6) および中央部海域に設けた 8 定点 (図 3, 表 2) において観測を実施した。原則月 2 回の頻度で、多項目水質計 (JFE アドバンテック社 AAQ175, AAQ176, AAQ177, ASTD102) により、水温、塩分、クロロフィル蛍光、濁度、水中光量子量の鉛直観測を行うとともに、透明度の測定を行った。また、表層 (0 m 層) と底層 (底上 1 m 層) から採水し (ただし、中央部沖合の Stn. 1~5 では表層と 10 m 層)、塩分 (奥部のみ)、クロロフィル *a* 濃度 (奥部のみ)、栄養塩 (硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、溶存態無機リン DIP および溶存態ケイ素 DSi) 濃度の分析および植物プランクトンの同定、計数 (試水 0.1~1 mL) に供した。さらに、孔径 100 μm のプランクトンネットの鉛直曳き (原則、5 m 層から表層まで、水深の浅い定点においては底層から表層まで) を行い、固定後、プランクトン沈殿量の分析に供した (中央部は Stn. 7~9 のみ)。また、奥部西側域の 8 定点 (T2, T13, P6, SA, P1, SB, SC, B3) では、月に 1, 2 回の頻度で多項目水質計 (JFE アドバンテック社 AAQ1183, AAQ176) による鉛直観測を実施し、得られた観測データから水質の鉛直断面図を作成し、ウェブサイト (赤潮ネット「有明海・八代海等の水質観測情報」) において公表した。

(3) 結果および考察

1) 夏季の貧酸素水塊

1-1) 有明海奥部

有明海奥部の観測点 T13 (国営干拓沖) における底層の溶存酸素濃度 (DO 濃度) は、7 月 1 日から 8 日にかけて、断続的に貧酸素状態 (DO 濃度 3.0 mg/L 未満) になった (図 4)。9 日から 19 日までは海底にセンサーが埋没したため欠測となったが、20 日から 26 日まで断続的に貧酸素状態が観測された。8 月 1 日から 4 日にかけて、断続的に貧酸素状態と回復を繰り返しながら上昇した (図 4)。9 日から 13 日までは海底にセンサーが埋没したため欠測となった。14 日から 18 日までは底層 DO 濃度は高い値だったが、19 日以降は減少傾向となり、23 日には貧酸素状態が観測された。9 月 1 日から 4 日にかけて低下し、断続的に貧酸素状態と回復を繰り返した (図 4)。4 日から 7 日まで高い状態が継続したが、9 日から底層 DO 濃度は急激に低下し、再び貧酸素状態になった。また、10 日から 20 日まで高い状態だったが、21 日から減少傾向となり、22 日から約 2 日間貧酸素状態が継続した。

沖合域の観測点 P6 (沖神瀬西) の底層の DO 濃度は、7 月 1 日に貧酸素状態が観測され、2 日から 4 日は一時的に貧酸素状態から回復したものの、5 日から低下し、26 日まで継続的に貧酸素状態が観測された。特に 19 日及び 23 日以降には 0.1 mg/L 未満の著しい貧酸素状態となった (図 4)。8 月 1 日から 9 日まで継続的に貧酸素状態が観測されたが、10 日には台風 6 号の影響により貧酸素状態から回復した (図 4)。11 日以降は、海底にセンサーが埋没したため欠測となった。9 月 1 日から 6 日まで上昇傾向だったが、6 日から下降傾向になり、10 日には貧酸素状態が観測された (図 4)。13 日には貧酸素状態から回復し、それ以降は高い値を示した。

さらに沖合域の観測点 P1 (大浦沖) では、7 月 1 日から 3 日まで断続的に貧酸素状態が観測され、4 日から 5 日までは貧酸素状態から回復したものの、6 日から再び断続的に貧酸素状態が観測された (図 4)。11 日には貧酸素状態から急激に回復したものの、その後は徐々に低下し、15 日から 26 日まで貧酸素状態が継続的に観測された。8 月 1 日から 9 日まで継続的に貧酸素状態が観測され、

10 日には台風 6 号の影響により貧酸素状態から回復したものの、18 日から再び断続的に貧酸素状態が観測された（図 4）。9 月 1 日は貧酸素状態が観測されたものの、3 日から 14 日までは高い状態が継続した（図 4）。15 日から 17 日は断続的に貧酸素状態になったが、それ以降は高い状態だった。

全体的な DO 濃度の変化傾向として、T13 では DO 濃度の短期的な変動が沖合域（P6 や P1）に比べ大きく、基本的に小潮期に DO 濃度は低下、大潮期に DO 濃度は上昇する傾向が見られた。小潮－大潮の変動は、小潮期には底層フロントが T13 より岸側に位置し、大潮期には沖側に見かけ上移動するためと考えられる（図 5）。また、P6 では、数時間スケールの変動は小さく、水平移流の影響は T13 に比べて小さいことが示唆される。また、基本的に大潮から小潮にかけて DO 濃度は低下し、大潮でも貧酸素状態から回復しない場合があることが報告されている（徳永ら 2009）。P6 では、大潮－小潮周期で底層フロントの見かけ上の移動の影響が小さいため、水平移流の影響は小さく、鉛直方向の成層と底層酸素消費により貧酸素化すると考えられる。P1 では、数時間スケールの変動は小さく、水平移流の影響は T13 に比べてさらに小さいことが示唆される。また、基本的に大潮期に DO 濃度の低下傾向、小潮期に DO 濃度の上昇傾向が見られた。P1 では、沖合からの高塩分水の底層貫入の影響を受けるため小潮期に中層で貧酸素化し、底層は相対的に高い DO 濃度となる（図 6）。ただし、密度成層が長期形成すると、高塩分水も貧酸素化し、小潮期にも貧酸素化する可能性がある。さらに大潮では底層 DO 濃度は鉛直方向に一樣となり、これが継続すると P1 でも長期的に貧酸素状態が継続する可能性が示唆される。

T2, T13, P6, P1 における DIN（溶存態無機窒素）の時系列変化を図 7 に示す。いずれの定点においても 7 月中旬が最も濃度が高かった。これは、6 月下旬から 7 月初旬までの河川出水の影響だと思われる。その後徐々に濃度が減少していることがわかる。図 8 に *Chattonella* 属、渦鞭毛藻類、珪藻類の時系列変化を示す。7 月上旬は豪雨で表層が低塩分化し、増殖に不適であった（7 月 13 日～7 月 27 日の T2 表層塩分は 1.28～12.5）。全天日射量も少なかった。その後、競合種である珪藻の細胞密度が増加し、8 月 28 日にはブルームを形成した。珪藻ブルームが終息したタイミングで *Chattonella* 属がブルームを形成した。9 月 14 日にブルーム終息した。降雨による海域外への流出（拡散）の可能性が示唆される。珪藻類の増殖が見られた 8 月 13 日の表層 DIN は 9.48 $\mu\text{mol/L}$ であり、珪藻類の密度が減少し始めた 8 月 17 日表層 DIN は 3.05 $\mu\text{mol/L}$ であった。*Skeletonema costatum* の半飽和定数は $\text{NH}_4\text{-N}$ が 0.1～4.4 $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が 0.0～1.5 $\mu\text{mol/L}$ であることから（山本 1998）、表層栄養塩が減少して珪藻類の細胞密度が減少した可能性が示唆される。*Chattonella* 属の増殖が見られた 8 月 28 日の表層 DIN は 0.39 $\mu\text{mol/L}$ 、底層は 9.69 $\mu\text{mol/L}$ であり、*Chattonella* 属は底層栄養塩を利用して増殖した可能性が示唆される。さらに、T2 表層塩分と DIN は強い負の相関があり（図 9 左）、筑後川流量と T2 表層塩分は強い負の相関があるため（図 9 右）、河川等からの栄養塩負荷→珪藻類の増殖→表層栄養塩枯渇→底層栄養塩を利用した *Chattonella* 属の増殖のプロセスの可能性が示唆される。

1-2) 熊本県海域

本報告では、外海寄りの St.1、有明海奥部寄りの沖側 St.5 と岸側 St.9 を代表点とし、各調査項目の推移を示す。調査定点のうち代表 3 点（St.1, St.5, St.9）の水温の推移を図 10 に示す。調査期間中、水温は 23.2℃から 29.9℃で推移した。7 月中旬以降、表層付近から上昇しはじめ、鉛直差が大きくなったが、30℃を上回ることにはなかった。

調査定点のうち代表 3 点（St.1, St.5, St.9）の塩分の推移を図 11 に示す。調査期間中、塩分は 1.6 から 32.2 で推移した。6 月下旬から 7 月上旬の降雨の影響で、調査を実施した 7 月中旬から下旬は表層から水深 5 m 層付近まで塩分が低下した。特に、St.5 や St.9 などの湾奥部及び沿岸部で低下した。

調査定点のうち代表 3 点（St.1, St.5, St.9）の海水密度（ σ_t ）の推移を図 12 に示す。調査期間中、 σ_t は 0.0 から 21.2 で推移した。7 月中旬から 8 月上旬に表層から水深 5 m 付近にかけて低下したが、これは塩分の低下による影響が大きいものと考えられた。

調査定点のうち代表3点 (St.1, St.5, St.9) のクロロフィル *a* の推移を図 13 に示す。調査期間中においては、7月中旬には St.1, 8月下旬には St.9 でクロロフィルの上昇が確認された。

7月11日は St.1 で *Chattonella* 属が 12 cells/mL 確認され、St.4 及び St.7 で 1 cell/mL が確認された。また、*Akashiwo sanguinea* は各調査点で確認され、St.2 で最高 250 cells/mL が確認された。7月24日は各調査点で *Chattonella* 属等有害プランクトンや珪藻類が少ない状況であった。8月4日は St.1 で *Chattonella* 属 (5 cells/mL) 及び *Karenia mikimotoi* (37 cells/mL) が確認されたが、他の調査点では *Chattonella* 属等有害プランクトンや珪藻類が少ない状況であった。8月24日になると、St.9 で *Chattonella* 属が最高 680 cells/mL が確認され、他の調査点でも 3~390 cells/mL が確認されたが、9月7日は各調査点で *Chattonella* 属等有害プランクトンや珪藻類が少ない状況であった。9月20日には *Chaetoceros* 属及び *Skeletonema* 属を主とした珪藻類による赤潮が確認され、St.9 で最高 7900 cells/mL 確認され、他の調査点においても 160~5700 cells/mL 確認された。

調査定点のうち代表3点 (St.1, St.5, St.9) の DIN の推移を図 14 に示す。調査期間中、DIN は 0.5 μ M から 50.5 μ M で推移した。7月上旬の降雨の影響で7月中旬は全調査点の DIN が高い値を示したが、7月下旬から8月下旬にかけては全調査点の表層付近で低い状態が続いた。

調査定点のうち代表3点 (St.1, St.5, St.9) の DIP の推移を図 15 に示す。調査期間中、DIP は 0.0 μ M から 2.3 μ M で推移した。St.1 では調査期間をとおして低かったが、St.1 以外の調査点では、7月上旬の降雨の影響で7月中旬に高い値を示した。

調査定点のうち代表3点 (St.1, St.5, St.9) の DSi の推移を図 16 に示す。調査期間中、DSi は 1.2 μ M から 215.5 μ M で推移した。7月上旬の降雨の影響で、7月中旬に全調査点の表層から水深 10 m 付近にかけて高い値を示した。DIN, DIP と比較して調査期間をとおして豊富に存在していた。

図 17 に調査期間の気温、降水量、全天日射量の推移を、表 3 に気温、降水量、日照時間の旬毎の階級区分を示す。気温については、7月は「平年並み」もしくは「高い」状態であった。8月上旬には「かなり高い」状態となり、30℃を超える日が続いたが、8月中旬は「平年並み」、8月下旬は「高い」状態であった。9月中旬は「かなり高い」状態が続く、中旬には平年値と比べて 4.3℃高い日もあった。降水量については、7月、8月ともに旬は「多い」状態であったが、それ以外は「平年並み」であった。9月には台風の通過がなく、9月上旬から下旬にかけて「かなり少ない」、 「平年並み」、 「少ない」状態に推移した。全天日射量については、降雨が多いときは少なく、少ないときには多い傾向であった。

図 18 に菊池川、白川、緑川の水位の変動を示す。前述の降水量と比較すると、降雨が確認された後、水位が上昇していることが各河川で確認された。特に、6月下旬から7月上旬の降雨後に各河川の水位が大きく上昇した。

調査定点のうち代表3点 (St.1, St.5, St.9) の DO 濃度の推移を図 19 に示す。調査期間中、DO 濃度は 2.8 mg/L から 10.7 mg/L で推移した。7月24日調査時の St.8, St.9 の水深 5 m 層付近で局所的に 3.0 mg/L を下回る貧酸素水が確認されたが、8月4日の調査時には貧酸素水は確認されなかった。7月24日調査時は、塩分低下が影響し、海水の鉛直密度差が顕著に大きかった (図 11, 12)。図 20 に7月11日 (小潮) における St.1~St.5 塩分及び DO 濃度の断面図を示す。St.5 から St.1 にかけて表層では低塩分水が見られ、底層では St.1 から St.5 にかけて高塩分水が貫入していた。St.4 では中層で低酸素になっていた。この原因として、潮流が小さい小潮では表層への低塩分水の流入及び底層への高塩分水の貫入により低酸素水が中層へ移動したためと考えられる。このことは、有明海奥部でも見られる現象である (図 6)。

貧酸素水塊の発生要因については、(1) 物理的要因として、表層水温の上昇及び表層塩分の低下による海水の鉛直密度差の増加や (2) 生物学的要因として底層付近での酸素消費量の増加が考えられる (堤ら 2003, 徳永ら 2009)。(1) については気温及び降雨により状況が左右される。今年度は、7月中旬から8月上旬頃まで降雨による塩分低下が影響したと考えられる海水の鉛直密度差が大きい状態が続く、それと同じくして、DO 濃度の低下が確認され、7月24日に St.8, 9 の水深 5 m 層付近で局所的に 3.0 mg/L を下回る貧酸素水が確認された。(2) については、赤潮の発生・衰退

によりプランクトンが斃死し、底層へ沈降、有機物が増加することで貧酸素化することが考えられる。今年度は、*Chattonella* 属及び *Skeletonema* 属等の珪藻類による赤潮の発生から衰退にかけて、3.0 mg/L を下回ることにはなかったものの、DO 濃度が低下していた。

今年度は、主に降雨による塩分の低下の影響で、沿岸部での DO 濃度の低下が確認され、その結果、中層の一部で貧酸素水が発生したと考えられた。7 月 24 日に DO 濃度の低下が確認されたが水深 5 m 付近と局所的であること、8 月 4 日の調査では解消していることから、小潮時等の潮汐が小さい時期に赤潮や大規模な出水が同時に発生することで、一時的に貧酸素水が発生しやすいものの、短期間で解消されることが考えられた。

1-3) 橘湾

気温はほぼ例年より高めで推移した。降水量は、橘湾は有明海からの淡水の流入に影響を受けるとの報告があるため、筑後川流域の久留米市の値を用い、6 月 20 日～30 日に合計 267 mm、7 月 3 日に 200 mm、7 月 10 日に 170 mm を超える降水が観測された。風向風速は、期間を通して南よりの風が卓越し、6 月下旬は北東よりの風、8 月 8～9 日は台風による強風（日平均風速 3.1～7.7 m/s）が観測された。

調査点 4, 8, 11, 14 における表層（0.5 m）の水温は 22.6～30℃、塩分は 30.5～33.1、DO は 93～123%，クロロフィル蛍光は 0.28～1.53 の範囲で推移した。

調査点 4, 8, 11, 14 の表層、5 m、底層（海底上 1 m）の DIN は 0.00～17.96 μM、PO₄-P は 0.00～4.03 μM の範囲で推移し、他層に比べ底層は高めであった（図 21, 22）。底層は *Karenia mikimotoi* 増殖の半飽和定数（DIN 0.68 μM、PO₄-P 0.15 μM）を超え、後述の本種赤潮化の一因と考えられた。調査点 4, 8, 11, 14 では、*K. mikimotoi* が 6 月 23 日～8 月 22 日に 0～27 cells/mL、*Cochlodinium polykrikoides* が 7 月 18 日に 12 cells/mL、*Chattonella* spp. が 7 月 18 日～8 月 30 日に 0～15 cells/mL 出現した。その他期間を通して珪藻類が 0～1610 cells/mL 出現した。

K. mikimotoi は有明海から移流後、7 月 31 日～8 月 10 日に湾広域で大規模赤潮を形成したため、臨時調査を行った。最高細胞密度は 8 月 3 日に京泊地先で確認（41010 cells/mL）された。本種赤潮発生状況の詳細は第 28 回シャットネラ等対策協議会（R5.10.20）で報告した。

貧酸素化の定義は水産用水基準（日本水産資源保護協会 2000）に示された底生生物が生存可能な最低濃度 2.0 ml/L を参考に、水温 25℃、塩分 30 のときの DO に換算すると約 40%となるため、DO40%以下を貧酸素化とした。7 月上旬に久留米市で 300 mm 超の降水があった。7 月中旬には水温・塩分躍層が認められ、7 月 25 日より湾奥部（調査点 1, 2, 3, 4, 8）で貧酸素化がみられた。台風接近後の 8 月 16 日に一旦解消したが、8 月下旬に湾中央～湾奥部の一部で再び貧酸素化し、10 月上旬まで継続して観測された。調査ごとに貧酸素水塊の分布が大きく変化しており、海底や底層水の酸素消費を受けながら底層流れの影響で貧酸素水塊が水平移動する可能性がある（図 23）。貧酸素調査後は貧酸素、赤潮速報を当日中に関係機関へ送付し、詳細は長崎県漁場テレメーターシステム水質情報（<https://telemeter-area.jp/nagasaki/nagasaki.htm>）の「橘湾情報」にアップロードした。また、「赤潮ネット」内の「貧酸素情報」、「赤潮分布情報」でも公開した。

橘湾では小型底びき網、刺網漁業等が操業されているが、貧酸素水塊が広域化・長期化した場合は、漁獲量が減少する。特にガザミを対象とした刺網漁業では、漁獲物が水揚げ前にへい死することにより収益面で損失となる。漁業者への貧酸素情報の報提供は、漁場選択や休漁等の操業の効率化等により有効に活用されているとの情報を現場関係者から得ている。

橘湾では、沖合域から奥部に向かって混合水が中層に貫入し、中層と底層に密度差が生じ、底層水の薄い層で貧酸素化することが報告されている（岡山 2007）。2022 年の水質の鉛直データを解析した結果、中層水と底層水の密度差は 0.15～0.51 kg/m³ であり、底層の薄い層（層厚 2.3～5.9 m）で DO が低下していた。中層と底層の密度差と底層の見かけの酸素消費量とは相関関係が見られたことから（図 24）、定点 20（沖合）の混合水が中層に貫入して底層との間に密度成層が形成され、底層及び海底の酸素消費により貧酸素化したことが示唆される。平成 26 年度水産庁委託事業報告書

では、筑後川の出水から 2 日後に島原、3～4 日後に口之津、5 日後以内に戸石で低塩化することが報告されている。2023 年度は、7 月 1 日から筑後川日平均流量が $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上となっており（図 25）、定点 20 では 7 月 18 日に表層塩分が小さくなっていた（図 26）。したがって、18 日間のズレが認められた。この結果は既往知見とは大きな差であり、筑後川流量の違いによるものと考えられるため、今後も継続的な関係解明を行う予定である。

2) 冬季のノリ色落ち原因珪藻赤潮

2-1) 気象および河川流量の推移

気象庁 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) による、2023 年 10 月から 2024 年 2 月上旬までの佐賀市および熊本市における旬別平均気温、旬別積算降水量、旬別積算日照時間および旬別平均全天日射量の推移を図 27 に示した。また、2013 年度から 2023 年度の 9 月から 2 月までの筑後大堰直下の日平均流量の変化を図 28 に示した（2023 年度は 2 月上旬までのデータ）。

① 気温

10 月上旬から 2 月上旬までの旬別平均気温は、平年並みかやや高めで推移し、1 月中旬に佐賀市で平年値より 3.5°C 、熊本市で 3.4°C 上回り、それを除くと佐賀市では平年値より $-1.7\sim 3.1^\circ\text{C}$ 、熊本市では $-2.2\sim 3.1^\circ\text{C}$ で変動した。

② 降水量

10 月上旬から 2 月上旬までの旬別積算降水量は、10 月上旬から 12 月上旬まで少なく、佐賀市では $0.5\sim 24.5 \text{ mm}$ （平年値の $0.02\sim 0.8$ 倍）、熊本市では $0.5\sim 23.5 \text{ mm}$ （平年値の $0.02\sim 0.8$ 倍）だった。12 月中旬は増加し、佐賀市で 26.0 mm （平年値の 1.7 倍）、熊本市で 41.5 mm （平年値の 2.5 倍）を記録した。12 月下旬から 2 月上旬までは、佐賀市では 1 月中旬に 22.0 mm （平年値の 1.2 倍）、2 月上旬に 34.0 mm （平年値の 1.7 倍）と増加したが、熊本市では 1 月下旬まで少なく、2 月上旬に 40.0 mm （平年値の 1.6 倍）を記録した。

③ 日照時間および全天日射量

旬別の積算日照時間および平均全天日射量は、10 月中旬から 12 月上旬まで多く、日照時間は、佐賀市で平年値の $1.1\sim 1.6$ 倍、熊本市で $1.1\sim 1.7$ 倍、全天日射量は、佐賀市、熊本市とも $1.1\sim 1.4$ 倍だった。12 月中旬は、日照時間は平年値の $0.3\sim 0.4$ 倍、全天日射量は $0.5\sim 0.7$ 倍と少なかったが、それ以降は上昇して 1 月中旬は平年値を上回り、2 月上旬は再び平年値の 0.7 倍に減少した。

④ 河川流量

9 月以降の筑後川大堰直下の日平均流量は、降水量が少ない影響により、9 月から 1 月中旬まで $40\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$ 台の低位で推移し、この間に $60 \text{ m}^3/\text{s}$ を越えたのは 10 月 9 日（ $62.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ）だけだった。1 月下旬から 2 月上旬までは、降水の影響により 1 月 20～21 日に $52.5\sim 67.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、2 月 5 日～7 日に $57.3\sim 90.0 \text{ m}^3/\text{s}$ と増加がみられた。

2-2) 定期観測による海況とクロロフィル *a* 濃度 (Chl. *a*) の推移

有明海奥部海域および中央部海域で実施した定期観測調査の結果をもとに、2023 年 10 月から 2024 年 1 月の有明海奥部西側域 (Stn. T2, T13, P6, P1)、奥部東側域 (Stn. T3～T5, 6)、中央部沖合域 (Stn. 1～5)、中央部沿岸域 (Stn. 7～9) における表層の平均水温、塩分、栄養塩濃度、Chl. *a* 濃度および透明度の変化を図 29a に示した。また、2013 年度から 2023 年度の奥部全定点および中央部全定点による表層平均水温、塩分、栄養塩濃度、Chl. *a* 濃度および透明度の変化を図 29b～c に示した。

① 水温

2023 年度の表層平均水温は、奥部では、11 月上旬に 20°C 台まで低下し、12 月上旬に 15°C を下回り、1 月上旬に $10\sim 11^\circ\text{C}$ まで低下した。中央部では、11 月上旬に 21°C 台まで低下し、12 月中旬に 15°C を下回り、1 月中旬に 12°C 台まで低下した。2023 年度の平均水温の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、概ね平年並みだが、1 月は高めだった。

② 塩分

塩分の表層平均は、中央部沖合域で最も高く、31.5～32.5 で推移し、中央部沿岸域は大きな低下は見られず、29.7～31.6 で推移した。奥部は、西側域では 29.7～31.0、東側域では 29.2～30.4 で、大きな低下は見られなかった。2023 年度の表層平均塩分の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、期間を通して概ね高めで推移した。

③ DIN

DIN の表層平均濃度は、奥部西側域では 0.03～2.4 μM と期間を通して低く、東側域は、11 月に筑後川河口沖の定点 (Stn. T3, T4) で高かった影響で平均濃度は 9.0～10.5 μM だったが、それを除くと 1.1～4.6 μM と低かった。中央部沖合域では、期間を通して 2.3～8.2 μM で推移し、沿岸域では変動が大きく、10 月下旬、11 月中旬、12 月中旬に 11.4～22.8 μM と高く、それ以外は 3.3～8.3 μM で推移した。2023 年度の表層平均 DIN 濃度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部は期間を通して低く、中央部は 10 月下旬と 11 月中旬は高かったが、それを除くと低めだった。

④ DIP

DIP の表層平均濃度は、奥部西側域で 0.4～0.9 μM 、東側域で 0.4～1.2 μM 、中央部沖合域で 0.3～0.7 μM 、沿岸域で 0.2～1.2 μM だった。変動傾向は概ね DIN と同様だった。2023 年度の表層平均 DIP 濃度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部では期間を通して低く、中央部では 11 月上旬と 1 月に低く、それを除くと平年並みだった。

⑤ DSi

DSi の表層平均濃度は、奥部の西側域では 14.7～26.3 μM 、東側域では 31.4～49.7 μM で推移した。中央部では、沖合域で 7.8～22.5 μM で推移し、沿岸域では大きく変動し、10 月下旬に 79.1 μM 、11 月中旬に 80.5 μM で、それ以外は 23.7～53.2 μM だった。2023 年度の表層平均 DSi 濃度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部では期間を通して低く、中央部では平年並みか低かった。

⑥ Chl. *a*

Chl. *a* の表層平均濃度（中央部は蛍光強度の補正值）は、奥部西側域では、10 月上旬から 12 月中旬まで 10.1～13.7 $\mu\text{g/L}$ とやや高めで推移したが、1 月は 5.6～8.5 $\mu\text{g/L}$ に低下した。奥部東側域では、11 月上旬と 1 月上旬に 6 $\mu\text{g/L}$ 程度だったが、それを除くと 10.2～18.3 $\mu\text{g/L}$ とやや高めで変動した。中央部沖合は、10 月下旬に 0.9 $\mu\text{g/L}$ と非常に低かったが、それを除くと 4.8～10.0 $\mu\text{g/L}$ で変動し、沿岸域では 10 月下旬に 0.9 $\mu\text{g/L}$ と非常に低かったが、11 月上旬に 16.1 $\mu\text{g/L}$ と上昇し、その後は 7.5～13.0 $\mu\text{g/L}$ で変動した。2023 年度の表層平均 Chl. *a* 濃度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部、中央部とも大きな上昇はみられないが、奥部は 10 月から 12 月まで高めで推移し、中央部では 11 月から 1 月まで概ね高めで推移した。

⑦ 透明度

平均透明度は、奥部西側域では 2.0～2.9 m、東側域では 1.8～2.9 m で変動した。中央部沿岸域では、12 月中旬までは 2.6～3.4 m で変動したが、1 月中旬に 1.7 m と低下し、2 月上旬には 4.3 m と高かった。沖合域では、11 月中旬に 3.4 m に低下したのを除くと 1 月中旬まで 4.7～5.3 m で変動し、2 月上旬は 6.5 m と高かった。2023 年度の平均透明度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部では期間を通して高めで、中央部では 1 月中旬までは平年並みだったが、2 月上旬は高めだった。

2-3) 定期観測による植物プランクトン細胞密度と経時変化

近年の有明海において、ノリの色落ち原因となる主要な藻類は、珪藻の *Eucampia zodiacus*, *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., 渦鞭毛藻の *Akashiwo sanguinea* である。2000 年度に大規模なノリ色落ち被害をもたらした珪藻の *Rhizosolenia imbricata* は、その後は赤潮を形成していない。*Asteroplanus karianus* は、2007 年度から奥部西側域の河口沖において単独で赤潮を形成するようになり、奥部西側域ではノリ色落ち原因種として注視されていたが、2015 年度以降は単独での赤潮を形成せず、2021 年度以降は本事業の定点で細胞の出現は確認されていない。

有明海奥部および中央部で実施した定期観測調査をもとに、2023 年 10 月から 2024 年 2 月上旬ま

での各定点における主要種の細胞密度の経時変化を図 30 に示した。なお、図 30 では各定点の各採水層で記録された密度のうちの最高密度が示されている。また、2023 年度の海域別の表層平均細胞密度の変化、2013 年度から 2023 年度の奥部全定点および中央部全定点の全層平均細胞密度の変化を図 31 に示した。

① *Chaetoceros* spp. (図 30a, 31a)

Chaetoceros spp. の平均細胞密度は、奥部では、10 月上旬に西側域で 1310.3 cells/mL、東側域で 3425.0 cells/mL とやや高く、浅い水域 (Stn. T13, T3, T4) では 5000 cells/mL 以上を記録した。10 月中旬以降は、西側域では 2 月上旬まで 5.5~678.0 cells/mL と低かったが、東側域では 1 月上旬に 2391.5 cells/mL とやや上昇し、特に Stn. T5, T6 で高かった。中央部では、沖合域は 2 月上旬まで 0.2~606.9 cells/mL と低く、沿岸域は 1 月上旬に 2700.0 cells/mL に上昇したのを除くと 3.7~878.0 cells/mL と低かった。2023 年度の細胞密度変化を過去 10 ヶ年と比較すると、2018 年度以降は秋季に密度が上昇するようになったが、2023 年度も同様に 10 月上旬に奥部で高かったが、それ以降は低く、また、これまで上昇が見られなかった 1 月上旬にも密度がやや上昇した。

② *Skeletonema* spp. (図 30b, 31b)

Skeletonema spp. の平均細胞密度は、奥部では、10 月上旬に西側域で 4407.0 cells/mL、東側域で 2588.8 cells/mL とやや高かったが、10 月中旬から 2 月上旬までは、1 月中旬に東側域で 1826.3 cells/mL を記録したのを除くと 1000 cells/mL 未満で推移した。中央部では、10 月上旬から 2 月上旬まで、沿岸域で 12 月上旬に 1694.2 cells/mL、1 月に 1096.7~1613.3 cells/mL とやや高かったのを除くと、期間を通して密度は低かった。2023 年度の細胞密度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部で 10 月上旬に密度が高かったが、その後は大きな上昇は見られず、比較的低めだった。

③ *Eucampia zodiacus* (図 30c, 31c)

Eucampia zodiacus は、10 月に散発的に出現し、細胞密度は最高で 34 cells/mL (Stn. T3 の表層) を記録した。11 月は奥部、中央部とも出現は見られず、12 月以降に再び散発的に出現し、12 月の最高密度は 92 cells/mL (Stn. T2 の底層) だった。1 月上旬から 2 月上旬までは、奥部を中心に出現する定点が増加するとともに平均細胞密度も上昇し、西側域で 4.3~69.0 cells/mL、東側域で 56.0~73.8 cells/mL となり、出現時の細胞密度の最高は 370 cells/mL (Stn. 6 の表層) だった。2023 年度の細胞密度の変化を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部で 1 月から上昇し、2 月上旬まででは、大規模赤潮となった 2013 年度より低いが、2018 年と同定程度の密度まで上昇した。

④ *Akashiwo sanguinea* (図 30d, 31d)

Akashiwo sanguinea は、奥部では 11 月上旬から密度が上昇し、西側域は 11 月下旬から 12 月下旬に 69.8~126.0 cells/mL を記録し、東側域では 12 月に 34.9~44.5 cells/mL を記録した。高い細胞密度は Stn. T3 (最高 194 cells/mL)、Stn. T2 (最高 526 cells/mL)、Stn. T13 (最高は 186 cells/mL) など河口沖に近い水域で記録した。中央部も 11 月以降、主に沿岸域で低密度ながら出現したが、1 月上旬の 37.0 cells/mL (Stn. 7 の表層) が最高だった。2023 年度の平均細胞密度を過去 10 ヶ年と比較すると、奥部では、10 月から 1 月まで密度が高かった 2016 年度までの高い密度ではないが、11 月中旬から 12 月中旬まで高い密度が継続した。

2-4) 植物プランクトンの出現動態と予察手法の検討

① *Chaetoceros* spp.

有明海において *Chaetoceros* spp. は秋季にしばしば細胞密度が上昇することがあったが、2018 年度以降は毎年、10 月~11 月に密度が上昇して赤潮化している (図 32)。2018 年度以降、秋季に頻繁に赤潮化するようになった要因を検討するため、まずは気象等について検討を行った。2013 年度以降の佐賀市および熊本市の 10 月から 12 月の合計降水量をみると、2018 年以降では 2019 年は 200 mm を超えたが、それを除くと 200 mm に満たず、特に 2022 年と 2023 年は佐賀市で 89.0~116.0 mm、熊本市で 100.5~123.0 mm と少なかった (図 33)。奥部海域に流入する筑後川 (筑後大堰直下) と熊本県海域に流入する緑川 (城南) (国土交通省水文水質データベースより。2023 年のデータは未

公表)の日平均流量は、2019年以降は少なく、また一時的な大きな増加も記録することがなかった(図34)。また、月別の平均日射量をみると、10月は2020年以降、11月は2018年頃から多くなっている(図35)。近年の10月から12月の気象等をまとめると、晴天が多くて日射量が多く、一方で降水量が少ないため河川流量も少ないのが特徴といえる。10月から12月における海域別の平均透明度は、奥部海域では2021年以降やや高めとなっている(図36)。瀬戸内海では主要な珪藻が *Skeletonema* 属から *Chaetoceros* 属に遷移している要因として、栄養塩の低下による透明度の上昇が考えられており、有明海においても水中の光環境が *Chaetoceros* 属の増殖に有利に働くようになっている可能性があるかもしれない。

② *Skeletonema* spp.

Skeletonema 属の種分類は電子顕微鏡による微細形態の観察が必要であることから、光学顕微鏡を用いた調査では *Skeletonema* spp.として扱われてきた。現在は分子形質による種分類が可能となり、佐賀県海域では7種が出現し、種による出現時期の特性が報告されている(Yoshida et al. 2023)。しかし、有明海広域での出現状況は明らかとなっていないため、秋季および冬季の *Skeletonema* 属の赤潮発生機構の解明のために、まずは広域での出現状況の把握が必要である。そこで、定期観測定点のうち、佐賀県海域の Stn. P6, T2, 福岡県海域の Stn. T4, T5, 熊本県海域の Stn. 7, 9 の計6定点の表層から採水試料を得て、Yoshida et al. (2023)の方法に従い定量PCRにより7種の検出を行った。10月から12月の試料による分析結果では、*Skeletonema* 属7種全てが検出され、*S. dohrnii* が最も高頻度で出現し、DNAのコピー数も多かった(表4)。福岡県および熊本県海域では、続いて *S. costatum* と *S. tropicum* の検出数が多かったが12月には減少し、*S. japonicum* は Stn. T4, T5, 7 でコピー数は少ないが頻度高く検出された。一方、佐賀県海域は検出される種数、コピー数とも少なく、これが海域による特徴なのかについては、さらにデータの蓄積を行い確認していく必要がある。

③ *Eucampia zodiacus*

濃縮試料による細胞サイズの変化を図37に示した(一部に *E. cornuta* が含まれている可能性があるが、ここでは *E. zodiacus* として扱う)。2023年度の細胞のサイズ回復時期(大型化した細胞が全体の>50%を基準)は10月下旬から11月上旬の間と判断され、これまでの結果と同様に、Stn. P6表層における水温がおよそ20℃まで低下した時期だった(図38)。

有明海における *E. zodiacus* による赤潮は、2月から3月に発生するのが特徴であるが、11月から12月に密度が上昇することがある。2013年度以降では、2014年度、2018年度、2019年度、2022年度に11月から12月に密度上昇が確認されており、2022年度は奥部西側域の湾奥で赤潮化した。2022年度は12月中旬に浅い水域(Stn. T13, T2)において574~1112 cells/mlを記録したが、降水量が少なく、筑後大堰直下の流量も低位で推移し、栄養塩濃度が低く小型珪藻の密度も低い状況で、12月中旬の奥部の平均透明度は2.7 mと、この時期において2013年度以降では最も高かった。12月中旬はサイズ回復して比較的大きな細胞が出現するが、大きな細胞は沈降速度も大きいと考えられ、浅い水域では底層に沈降した細胞も大潮期には鉛直混合で表層に輸送されやすく、小潮期に透明度が高いことで細胞は良好な環境下で増殖したと考えられる(福岡ら、2023)。2023年度は、12月上旬にStn. T2の底層で92 cells/mLを記録したが、奥部平均透明度は2.6 mと、この時期の平均透明度としては2013年度以降では最も高く、良好な光環境が浅い水域において細胞密度の上昇につながった可能性が考えられる。しかし、2022年度は12月の全天日射量が平年並みで推移したのに対し、2023年度は12月中旬に全天日射量が大きく低下しており(図24)、このことで赤潮化までの増殖に至らなかったと推察される。11月から12月の密度上昇においては透明度が高いことが重要であり、このような環境条件を注視することで、密度上昇や赤潮化の可能性が予測できると考えられる。

これまで *E. zodiacus* の赤潮発生・非発生の予察手法として、秋季のデータに基づく冬季の発生・非発生の予察(長期予察)と、冬季における赤潮化の可能性や発生時期についての予察(短期予察)について仮説を提示してきた。長期予察においては、細胞サイズが回復する時期の出現率(各月において細胞が出現した延べ定点数を延べ観測定点数で除した百分率)に着目し、11月の出現率を示

してきた。2018 年度以降の細胞サイズ測定によるサイズ回復時期の把握から、Stn. P6 表層の水温がおよそ 20℃まで低下した時期がサイズ回復時期であることが明らかになってきたため、各年の比較においてはサイズ回復後の細胞の出現率として水温を基準にすることが適当と考えられることから、水温 20℃まで低下した以降 1 ヶ月間のデータに基づく出現率の比較を行った（図 39）。2021 年度の出現率は 31.3%と高かったが、冬季に赤潮化しなかった。その要因として、冬季の増殖では表層水温の上昇と河川流量の増加（栄養塩供給、エスチュアリー循環の形成、成層の強化）が重要と考えられるが、2021 年度は 1 月～2 月の水温が低く（Stn. P6 の表層平均で 9.3℃）、3 月中旬まで降水量が少なかったことにより筑後大堰直下の流量も低位で推移したことで、増殖する環境条件でなかったと考えられる。一方、冬季に赤潮化した 2013 年度と 2018 年度の出現率はそれぞれ 3.8%、3.1%と低かった。また、2023 年度も出現率は 6.3%と低かったが、2 月には *E. zodiacus* の細胞は広域に出現して密度も上昇し、佐賀県では赤潮化している（佐賀県赤潮発生状況速報 SA-2024-1）。秋季の細胞出現率は、サイズを回復した細胞は沈降速度が大きいと考えられることから、海水密度の鉛直勾配が小さい状況では、鉛直混合により光環境の良い表層に出現することで生残に有利となり、一定の細胞数を維持できると想定している。長期予察としての細胞の出現率は、本事業の定期観測定点に基づいた手法であることから、水温が 20℃を下回った後の降水や河川流量の変化および表層塩分の変化による推定の検討を進めていく必要がある。

冬季の *E. zodiacus* の増殖には、気温が上昇に転ずる 2 月における降水と、それ伴う河川流量の増加による小潮期の密度成層の拡大が重要と考えられている（福岡ら 2023）。2023 年度は、奥部では 1 月の水温が高めで（図 40）、1 月上旬に筑後川河口沖の Stn. T4 および沖合の Stn. 6 で 100 cells/mL を超える高い密度が記録され、降水により 1 月 20～21 日に筑後大堰直下の流量が増加した後の 2 月上旬にはほとんどの定点で 100 cells/mL 以上の高い密度となった。河川流量の増加が *E. zodiacus* の増殖を促進させることから、細胞の出現状況を把握し、降水予報を注視することで、短期予察が可能になると考えられる。

④ *Akashiwo sanguinea*

2023 年度は、11 月に奥部西側域で密度が上昇し、その後奥部東側域や中央部沿岸域で密度が上昇した。2016 年度と 2017 年度も秋季を中心に高密度化し、その要因として、大きな出水ではないが筑後大堰直下の流量が 50～60 m³/s 程度とやや多い状況が継続していたことで表層塩分が低下し、本種の好む低塩分環境と躍層の形成による表層への集積が影響したと示唆された（山口ら 2018、福岡ら 2018）。2023 年度は 10 月から 12 月の期間は河川流量が低位で推移し、表層塩分も高めで推移したが、塩分が最も低い六角川河口沖の Stn. T2 で密度が上昇した後、周辺の Stn. T13 や Stn. T3 で上昇がみられた。2022 年度も 10 月中旬から 12 月中旬まで、河口沖の定点を中心に比較的高い密度が記録されており、河口の沖合域を中心とする低塩分環境が初期増殖の要因となっていることが示唆される。

引用文献

- 岡山紘介. 夏季の橘湾底層における低酸素水塊の発達・消滅機構. 長崎大学修士論文 2007.
- 日本水産資源保護協会. 水産用水基準(2000年版) 社団法人日本水産資源保護協会, 東京. 2000; 21.
- 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達貴浩, 小松利光. 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊及び赤潮発生と海洋構造の関係. 海の研究 2003 ; 12 : 291-305.
- 徳永貴久, 児玉真史, 木元克則, 柴原芳一. 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 2009 ; B2-65, No.1 : 1011-1015.
- 福岡弘紀, 岡村和麿, 井手浩美, 小谷正幸, 藤井直幹, 山口 聖, 太田洋志, 森川太郎, 三根崇幸, 松谷久雄, 吉村直晃, 山下博和. 有明海におけるノリ色落ち原因ケイ藻の出現特性の解明と発生予察技術の開発, 5 カ年のまとめ. 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 九州海域での有害赤潮・貧酸素水塊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. 2018 : 189-196.
- 福岡弘紀・山口 聖・岡村和麿・古賀まりの・徳田眞考・藤井直幹・岩永卓也・太田洋志・野口浩介・向井宏比古・上原美咲・安藤典幸. 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, ⑥有明海・八代海・鹿児島湾海域, ア. 有明海海域. 令和 4 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. 2023 : 163-188.
- 山口 聖, 太田洋志, 森川太郎, 三根崇幸, 井手浩美, 小谷正幸, 藤井直幹, 福岡弘紀, 岡村和麿. 有明海におけるノリ色落ち原因ケイ藻の出現特性の解明と発生予察技術の開発, 有明海奥部における冬季のケイ藻等の赤潮動態の把握. 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 九州海域での有害赤潮・貧酸素水塊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. 2018 : 161-174.
- 山本民次. 植物プランクトンの光合成と増殖—光, 温度, 栄養塩類に対する依存性「沿岸の環境圏」(平野俊行監修) フジ・テクノシステム, 東京. 1998 ; 162-169.
- Yoshida K, Ota H, Iwanaga T, Yoshitake A, Mine T, Omura M, Kimura K. Species-specific monitoring of *Skeletonema* blooms in the coastal waters of Ariake Sound, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2023; **703**: 31–46.

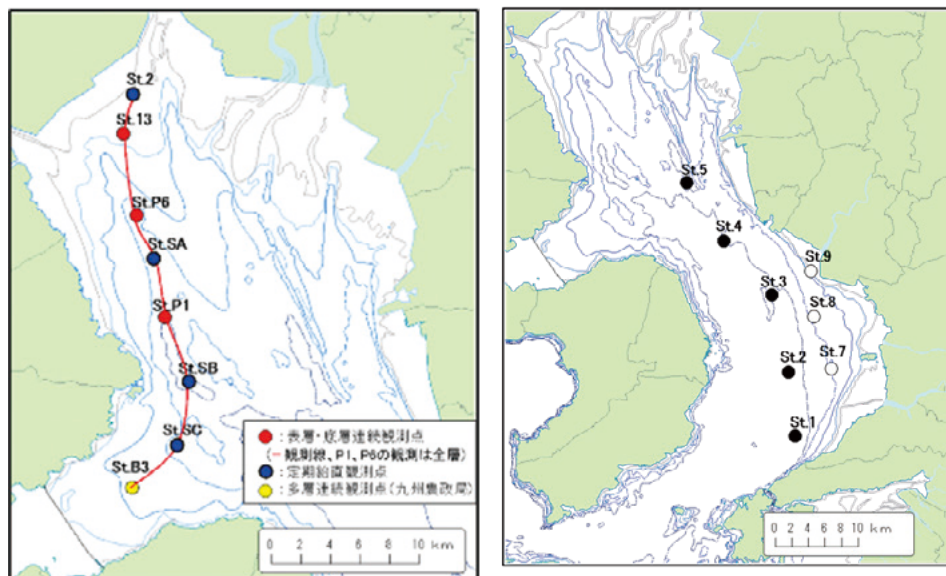


図1 夏季の有明海奥部海域（左）および中央部海域（右）における調査定点

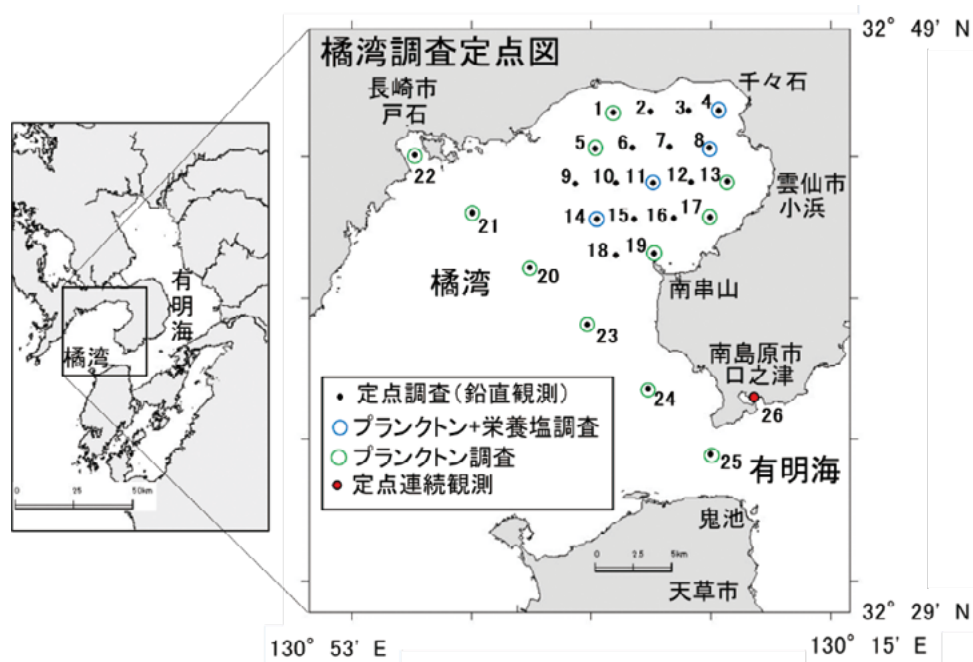


図2 橘湾における調査定点

表 1 「夏季の貧酸素水塊」における有明海の連続・定期観測の調査項目

海域	奥部		中央部
担当機関	水産機構	水産機構・福岡県・佐賀県	熊本県
	連続観測	定期観測	定期観測
期間	7月～9月	7月～9月の 約1週間毎	7月～9月の隔週毎
調査定点数	3点 (T13, P6, P1)	8点 (T2, T13, P6, SA, P1, SB, SC, B3)	8点 (St.1～5, St.7～9)
調査方法・採水層	表層及び底層に 設置したセンサー (T13) 及び自 動観測ブイ (P6, P1)	多項目水質計による鉛直観 測・表層, 2 m, 5 m, 底層 (海 底上 1 m)	多項目水質計による 鉛直観測・表層・底 層 (海底上 1 m)
調査項目			
透明度	—	○	○
水温・塩分	○	○	○
クロロフィル蛍光値	○	○	○
濁度	○	○	○
溶存酸素	○	○	○
流向・流速	○	—	—
栄養塩 (採水)	—	△ (B3, P1, P6, T13, T2)	○
植物プランクトン (採水)	—	△ (B3, P1, P6, T13, T2)	○

*1 多項目水質計のクロロフィル蛍光値補正用のみ

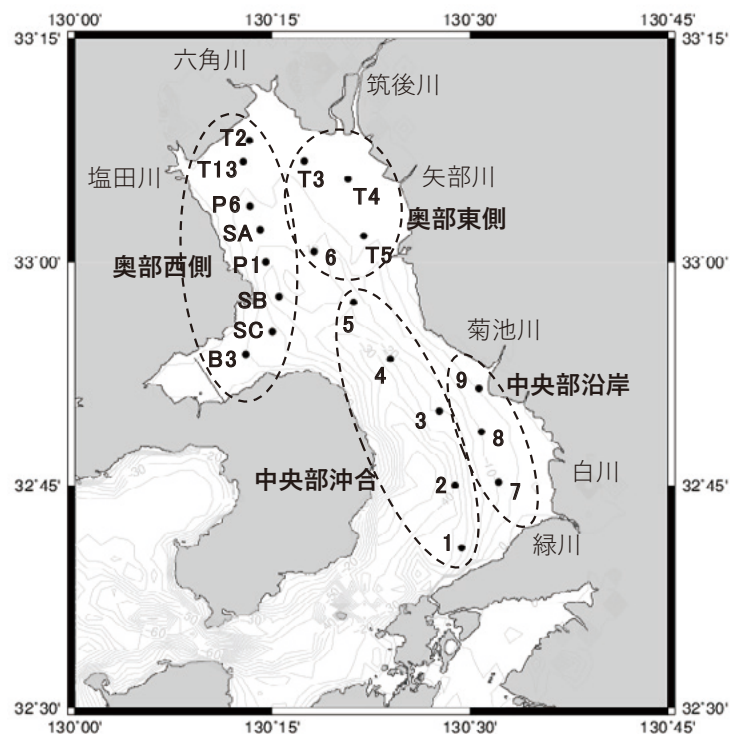


図3 有明海における観測定点位置

表2 有明海における観測定点

海域	定点		北緯	東経	水深(m)	観測
奥部	T2	六角川観測塔	33° 08.15′	130° 13.25′	1	定期観測
	T3	早津江川観測塔	33° 06.78′	130° 17.42′	1	定期観測
	T4	筑後川沖観測塔	33° 05.57′	130° 20.73′	1	定期観測
	T5	大牟田沖	33° 01.76′	130° 21.93′	5	定期観測
	6		33° 00.70′	130° 18.16′	12	定期観測
	T13	国営干拓沖	33° 06.75′	130° 12.79′	5	定期観測、表・底層測器連続観測
	P6	沖神瀬西	33° 03.75′	130° 13.30′	10	定期観測、鉛直自動観測ブイ
	SA		33° 02.17′	130° 14.08′	12	鉛直観測(採水なし、ブイメンテ時のみ)
	P1	大浦沖	33° 00.00′	130° 14.50′	20	定期観測、鉛直自動観測ブイ
	SB		32° 57.67′	130° 15.50′	10	鉛直観測(採水なし、ブイメンテ時のみ)
中央部	SC		32° 55.33′	130° 15.00′	13	鉛直観測(採水なし、ブイメンテ時のみ)
	B3	諫早湾央	32° 53.79′	130° 12.98′	8	鉛直観測(採水なし、ブイメンテ時のみ)
	1	宇土市赤瀬沖	32° 40.80′	130° 29.36′	34	定期観測
	2	熊本港沖	32° 45.00′	130° 28.86′	38	定期観測
	3	菊池川河口沖	32° 49.97′	130° 27.67′	27	定期観測
	4	玉名郡長洲町沖	32° 53.49′	130° 23.95′	26	定期観測
	5	荒尾市沖	32° 57.30′	130° 21.16′	35	定期観測
	7	熊本港地先	32° 45.20′	130° 32.16′	12	定期観測
	8	玉名市横島町地先	32° 48.60′	130° 30.86′	11	定期観測
	9	菊池川河口地先	32° 51.50′	130° 30.67′	11	定期観測

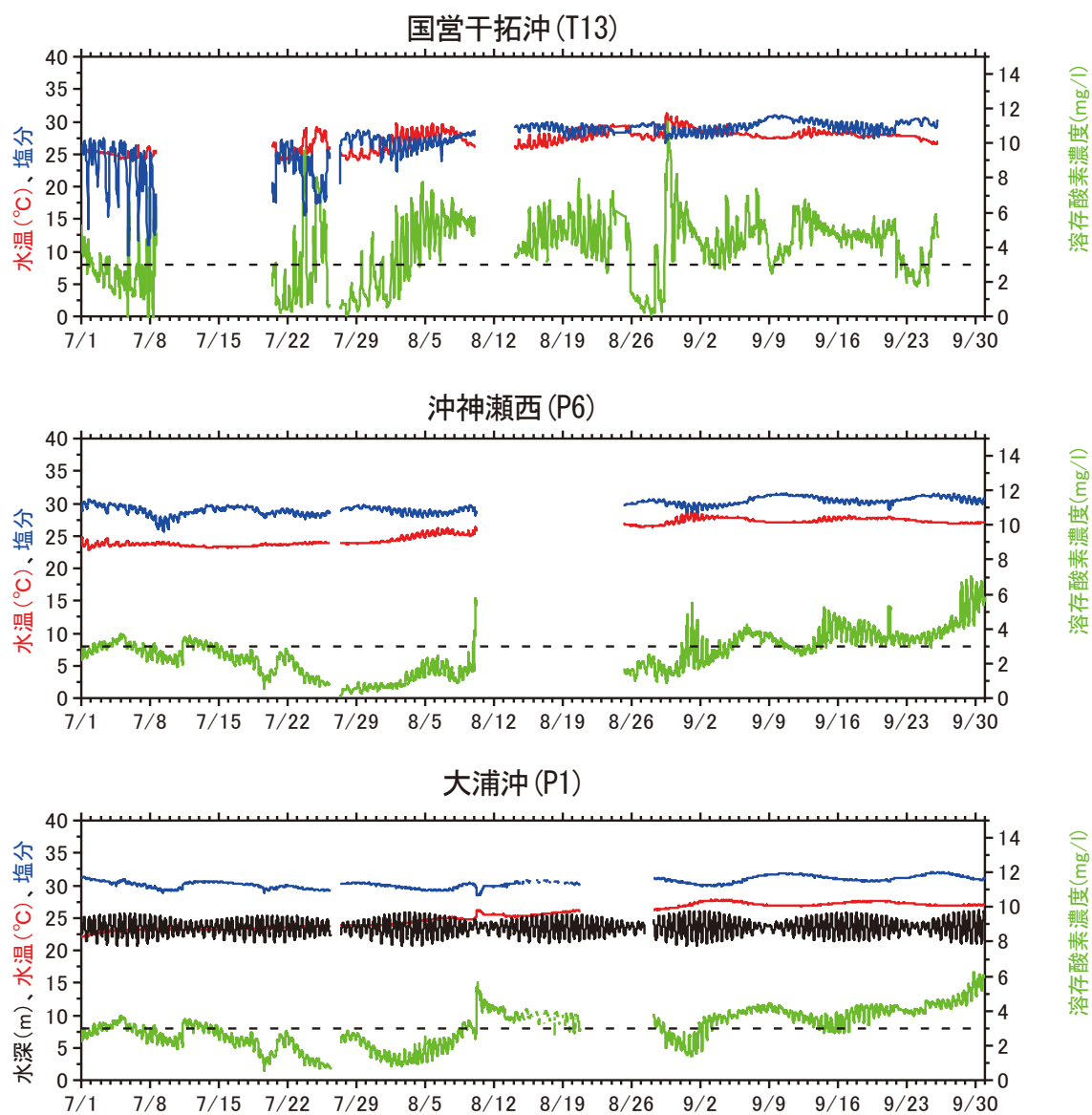


図4 2023年7月から9月の国営干拓沖 (T13), 沖神瀬西 (P6), 大浦沖 (P1) における底層 (底上 20 cm) の水温, 塩分, 溶存酸素濃度の変動。点線は溶存酸素濃度 3.0 mg/L を表す。

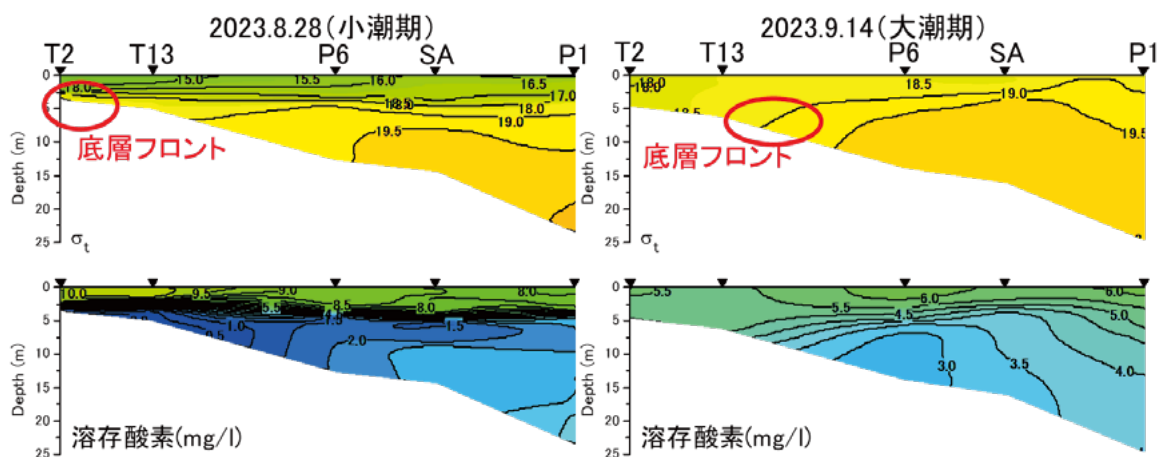


図5 小潮及び大潮期における底層フロントの位置と溶存酸素濃度との関係

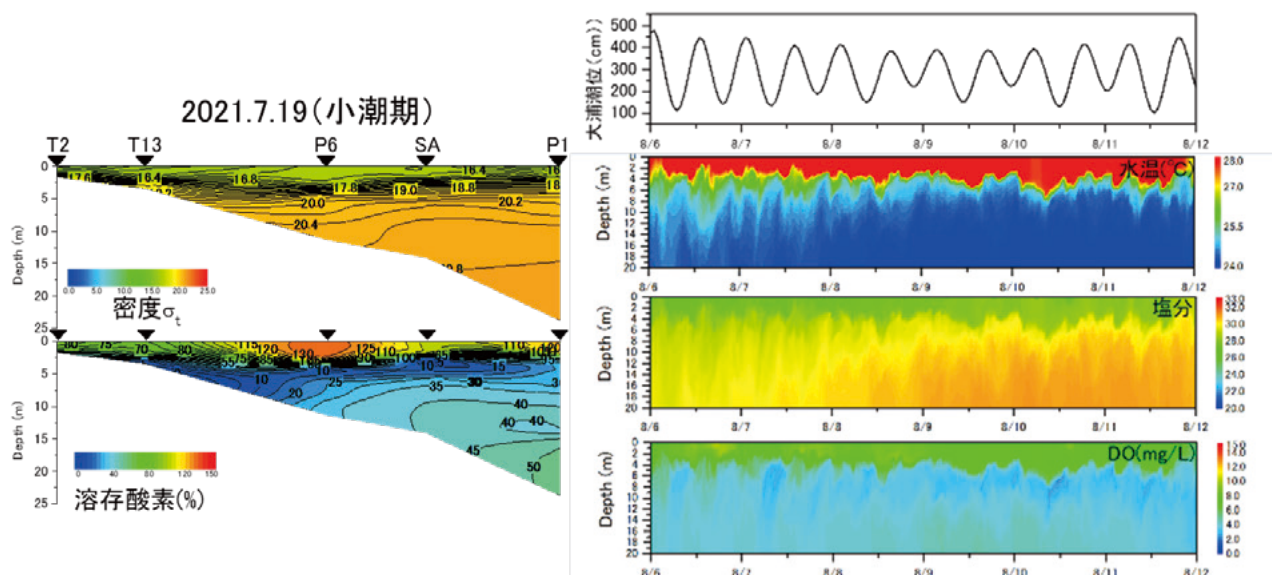


図6 P1における密度 σ_t と溶存酸素(DO)の断面図(左図)とP1における水温, 塩分, 及びDO濃度の鉛直時系列(右図)

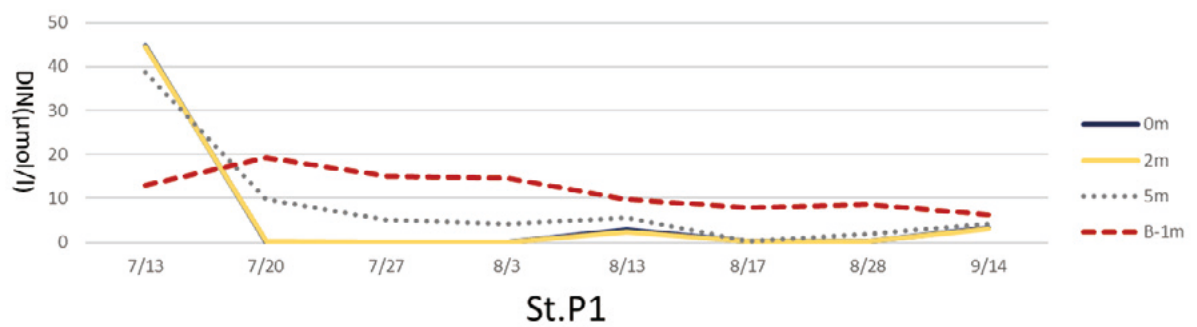
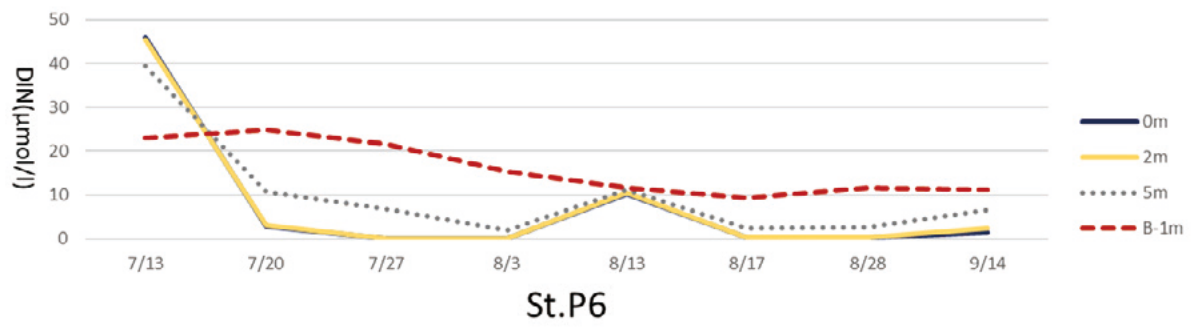
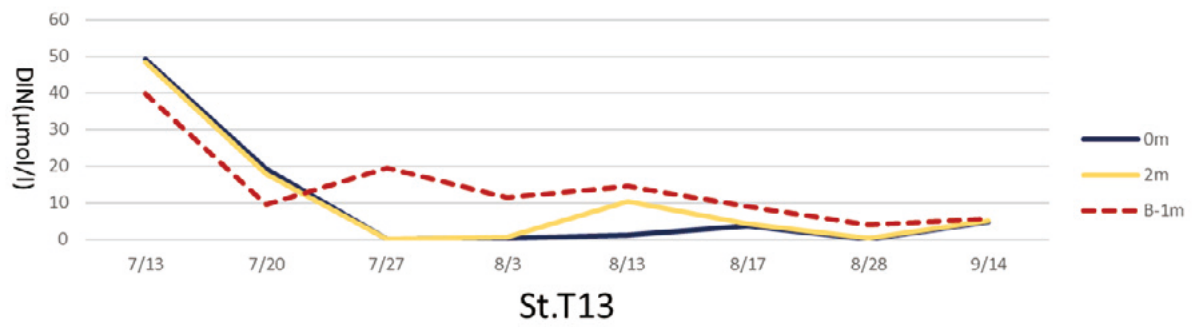
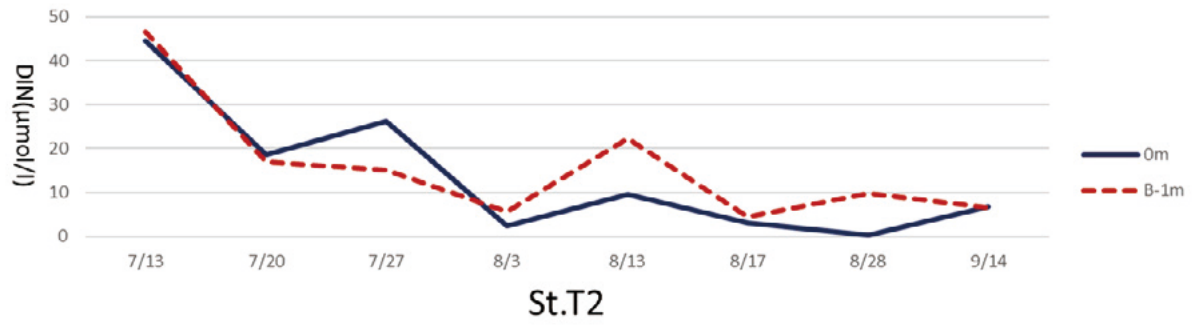


図7 T2, T13, P6, P1におけるDINの時系列変化

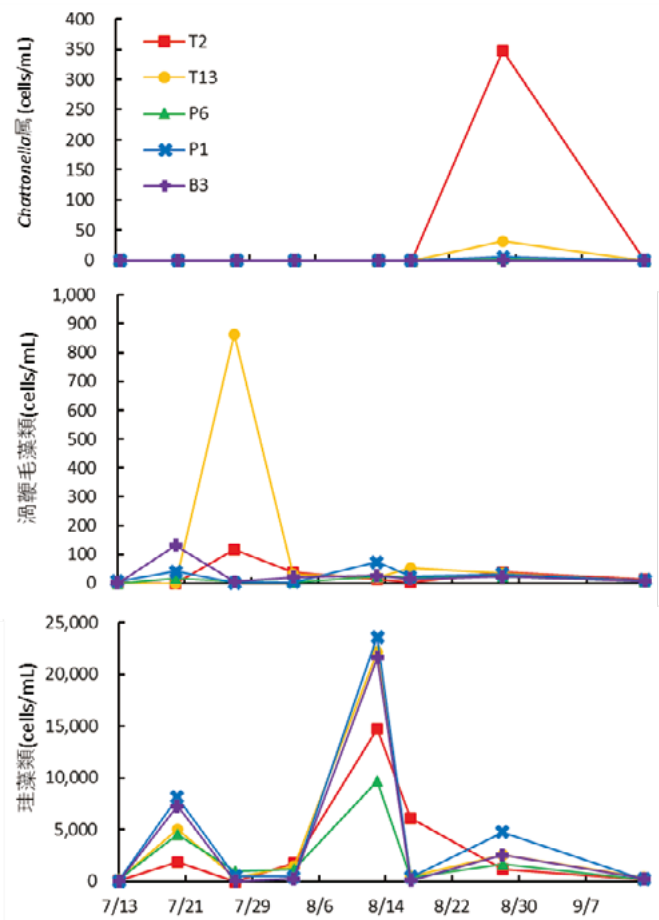


図8 *Chattonella* 属，渦鞭毛藻類，珧藻類の時系列変化

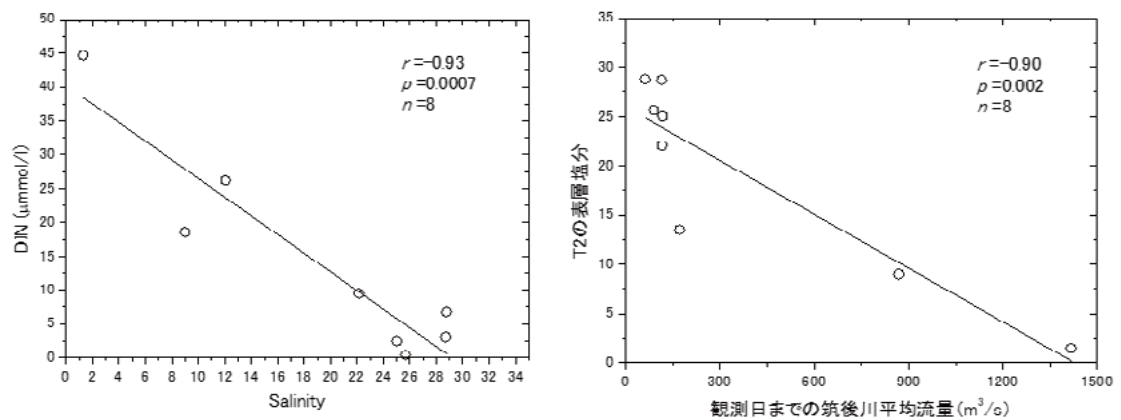


図9 T2 表層塩分と DIN の関係 (左図) 及び筑後川流量と T2 表層塩分の関係 (右図)。

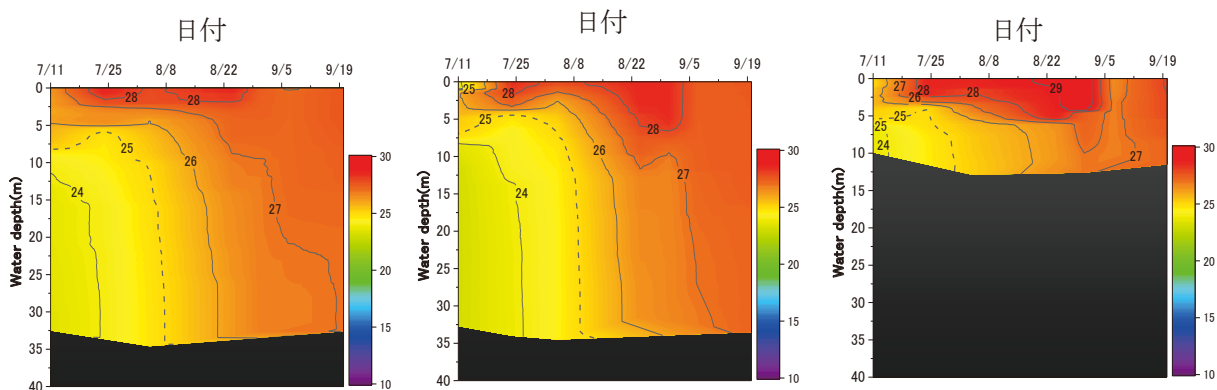


図 10 水温の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

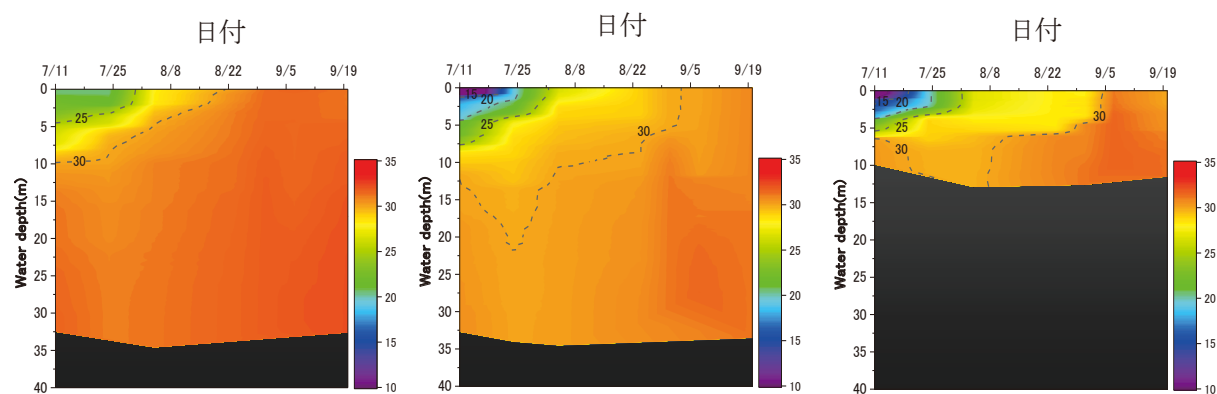


図 11 塩分の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

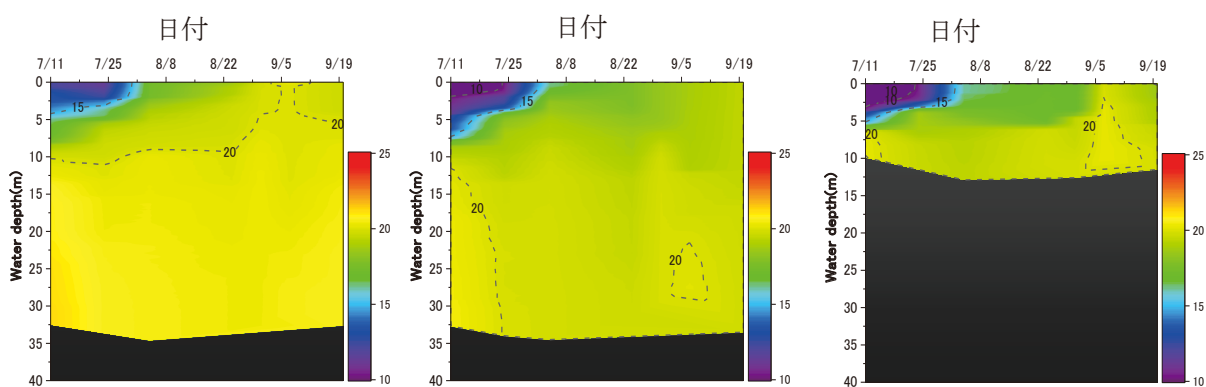


図 12 σ_t の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

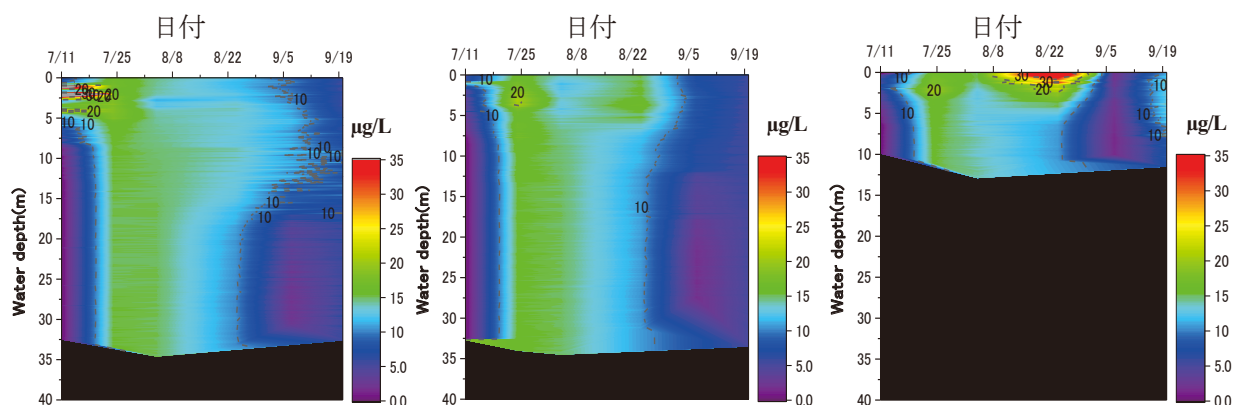


図 13 クロロフィル a の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

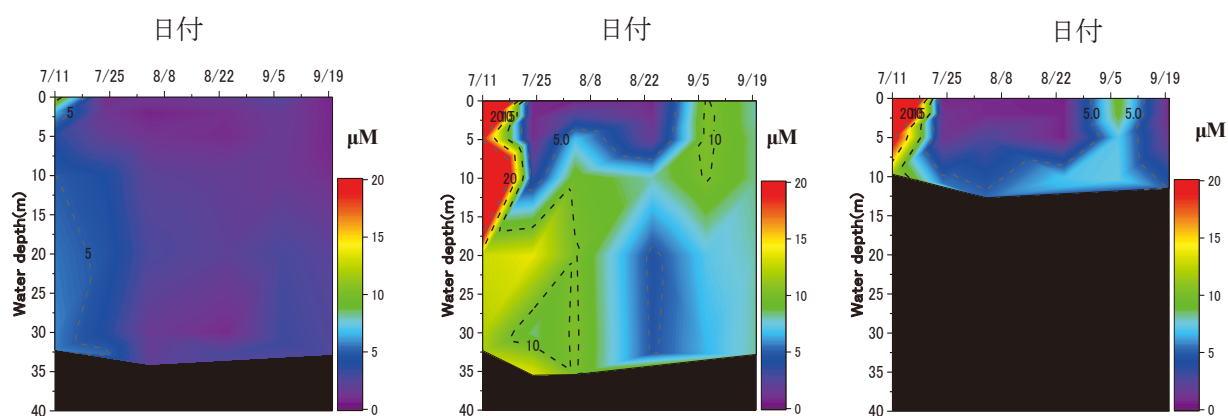


図 14 DIN の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

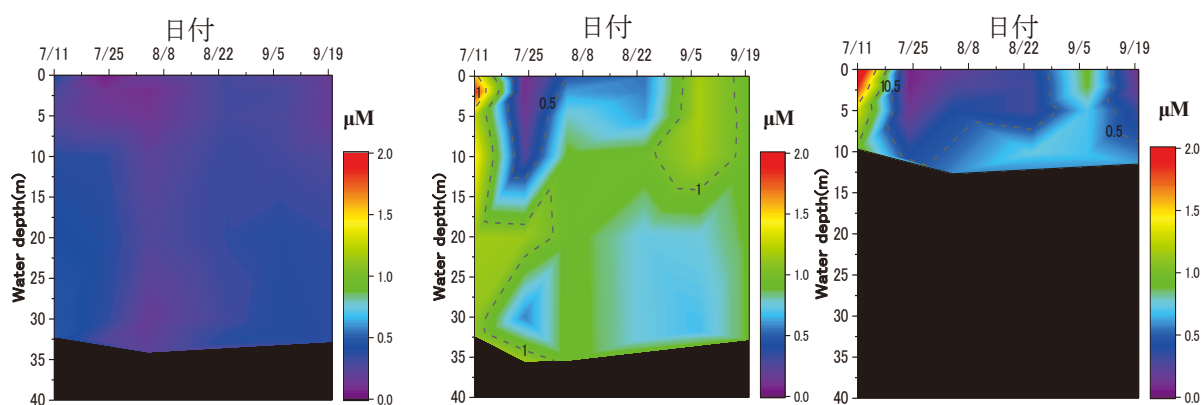


図 15 DIP の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

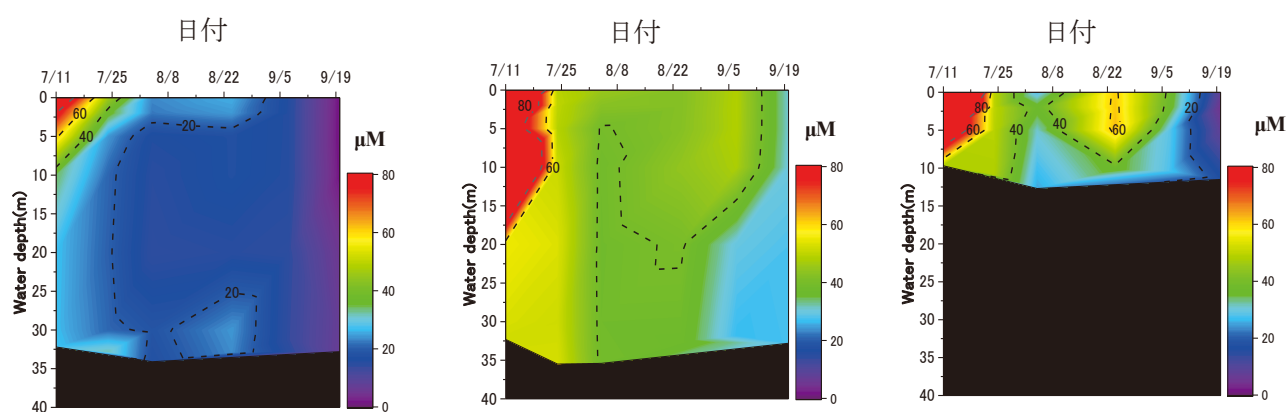


図 16 DSi の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

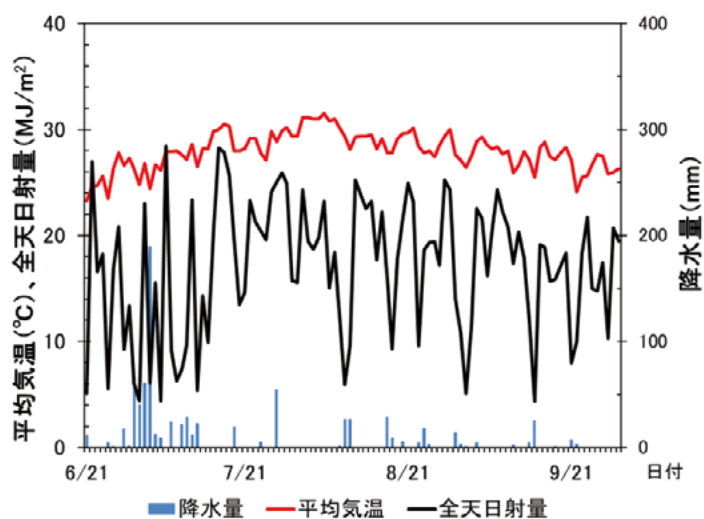


図 17 気温, 降水量, 全天日射量の推移
出典 気象庁 (観測点: 熊本市)

表 3 気温, 降水量, 日照時間の旬毎の階級区分
出典 気象庁 (観測点: 熊本市)

月	時期	気温	降水量	日照時間
6月	下旬	高い	少ない	平年並み
7月	上旬	平年並み	多い	少ない
	中旬	高い	平年並み	平年並み
	下旬	平年並み	平年並み	平年並み
8月	上旬	かなり高い	多い	少ない
	中旬	平年並み	平年並み	平年並み
	下旬	高い	平年並み	平年並み
9月	上旬	かなり高い	かなり少ない	多い
	中旬	かなり高い	平年並み	平年並み
	下旬	かなり高い	少ない	多い

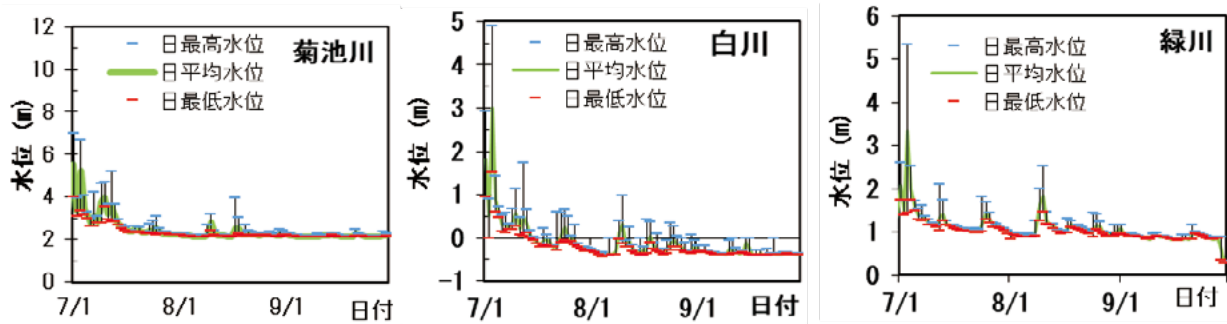


図 18 河川の水位の変動

出典 国土交通省（観測点：菊池川（菰田），白川（代継橋），緑川（城南））

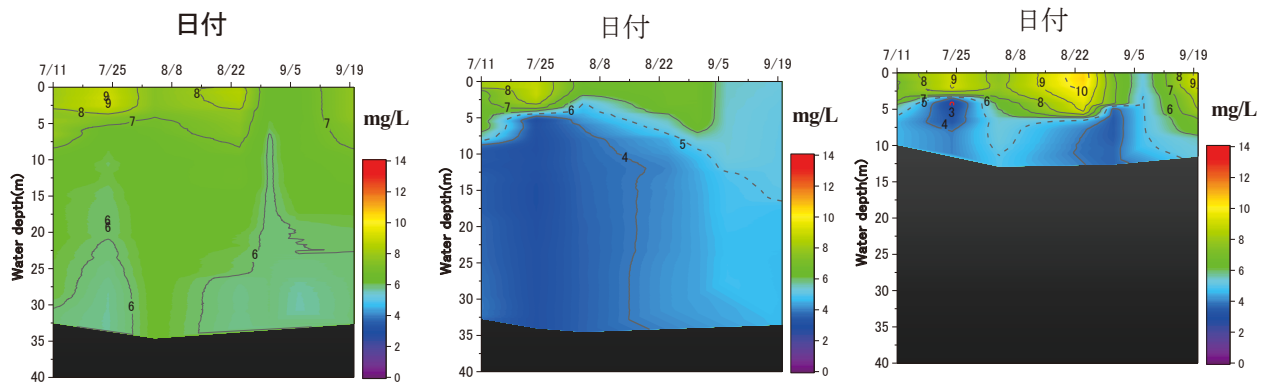


図 19 溶存酸素濃度の推移（代表 3 点：左図から St.1, St.5, St.9）
（赤線：3.0 mg/L）

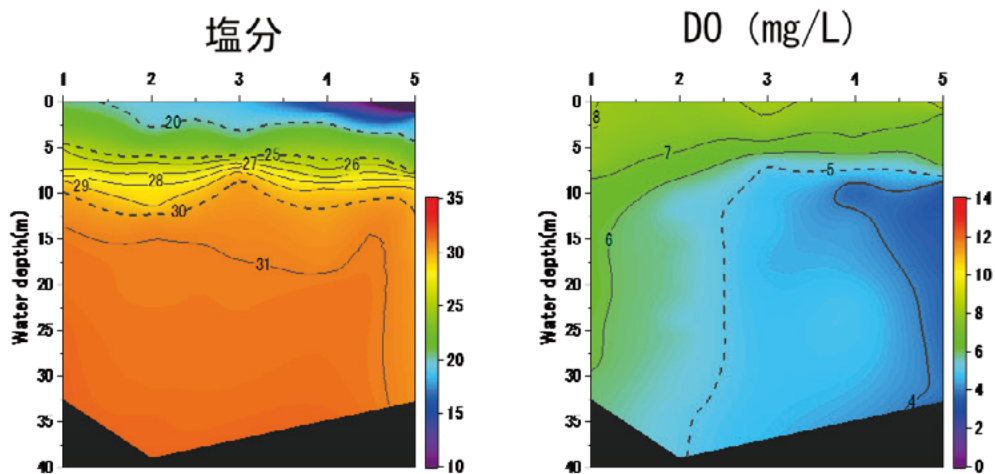


図 20 2023 年 7 月 11 日における St.1～St.5 の塩分（左図）及び溶存酸素（右図）の断面図

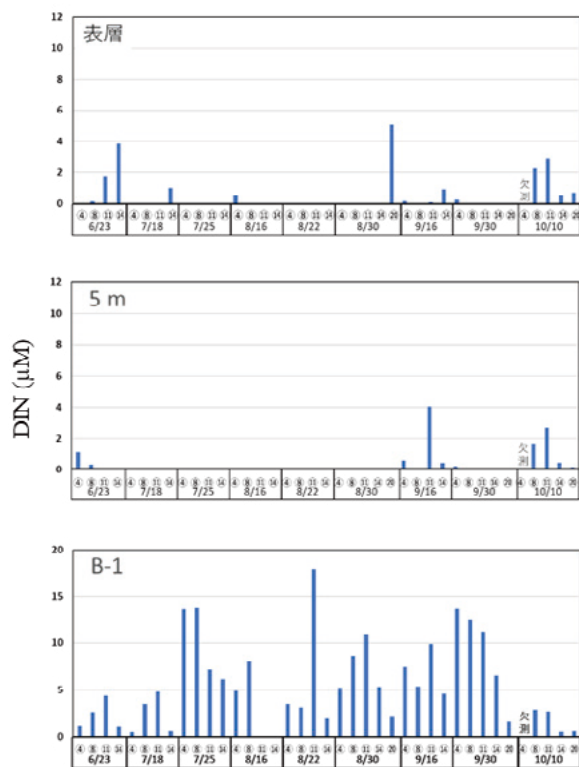


図 21 調査点毎の DIN (μM)

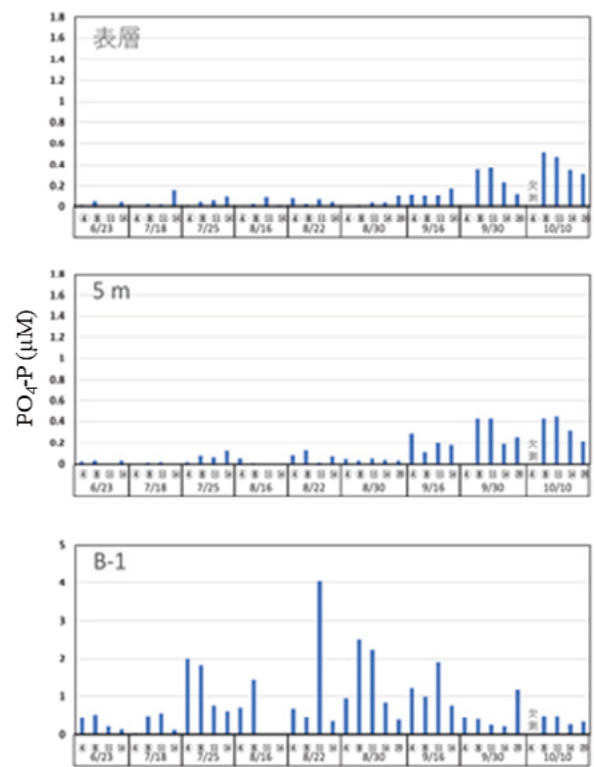


図 22 調査点毎の $\text{PO}_4\text{-P}$ (μM)

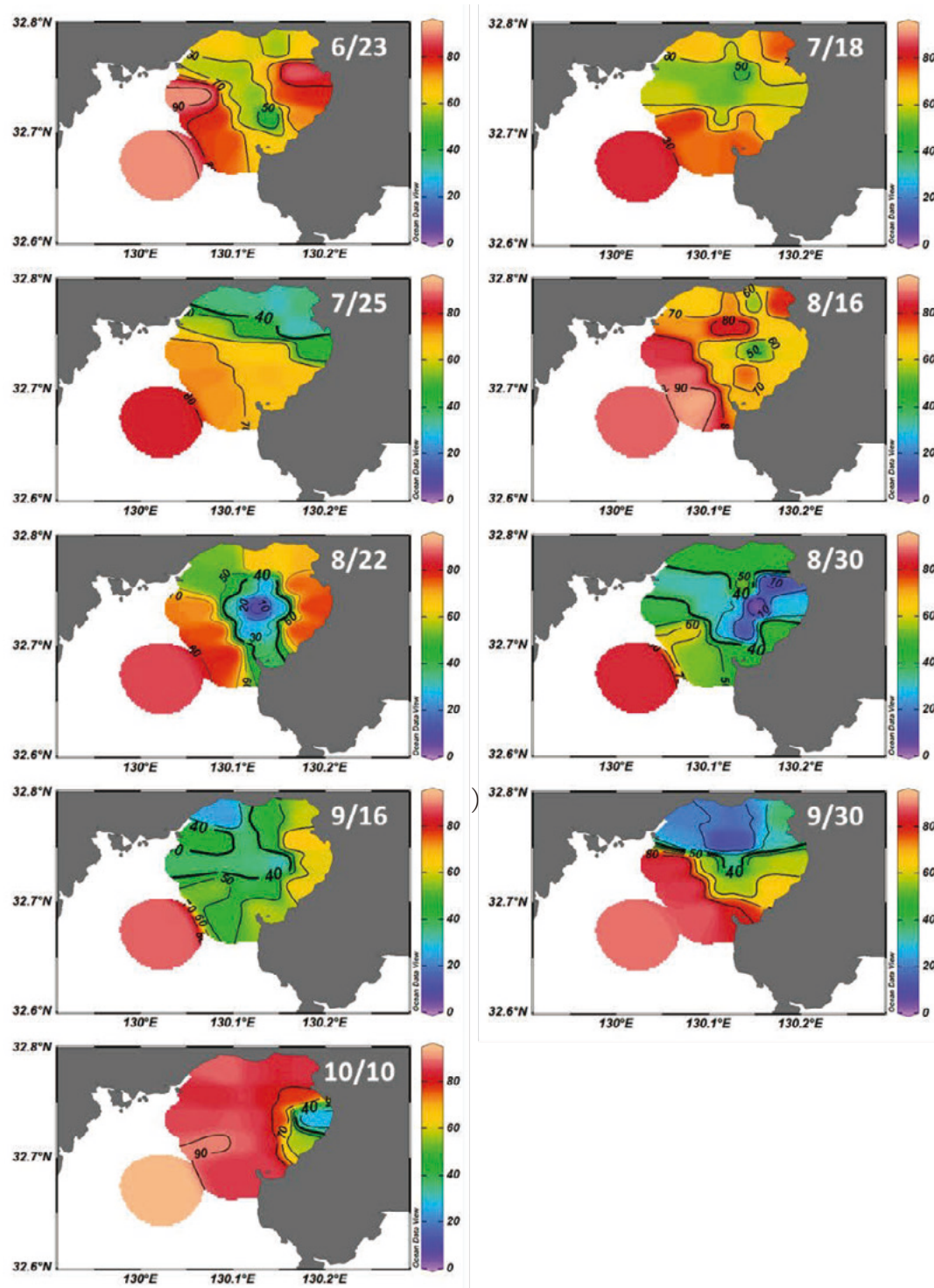


図 23 底層 (B-1) DO (%) の推移

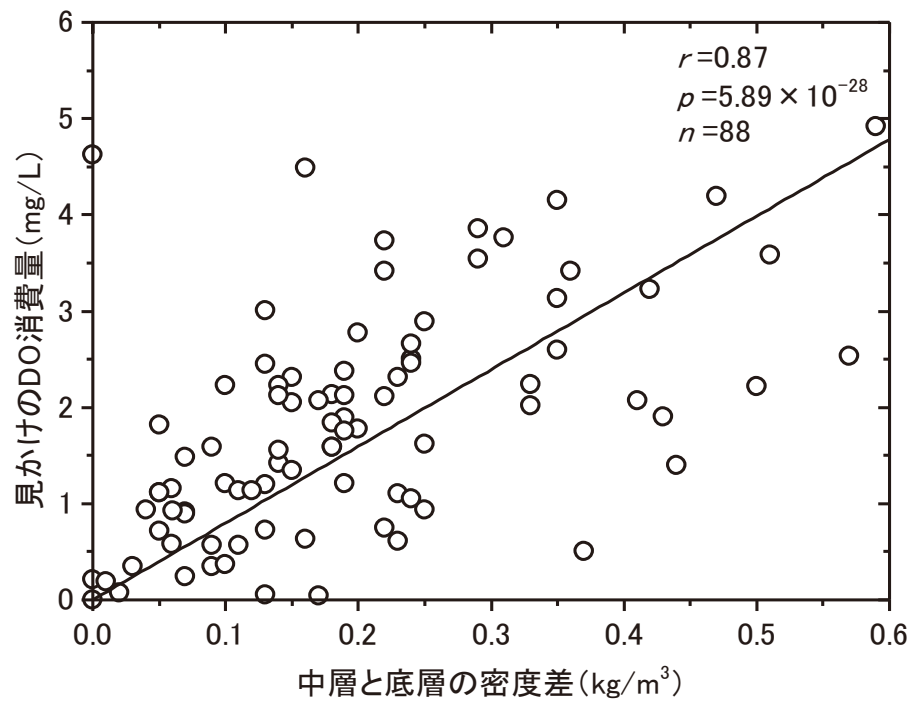


図 24 中層と底層の密度差と見かけの DO 消費量との関係

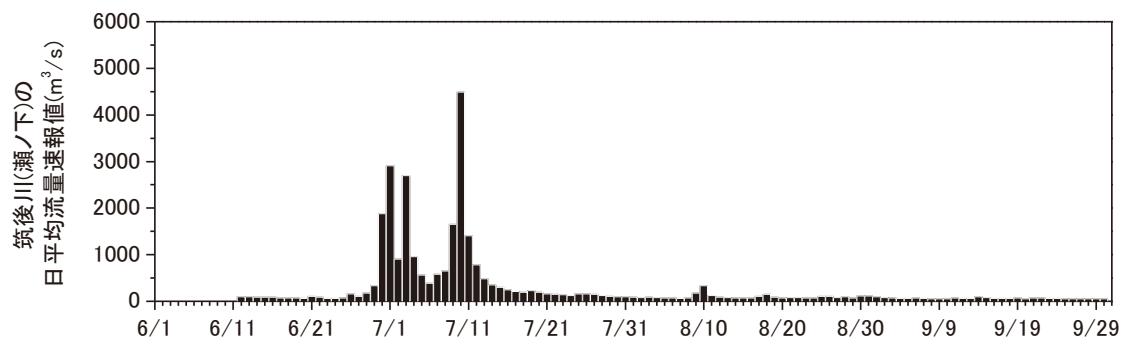


図 25 筑後川 (瀬ノ下) の日平均流量速報値

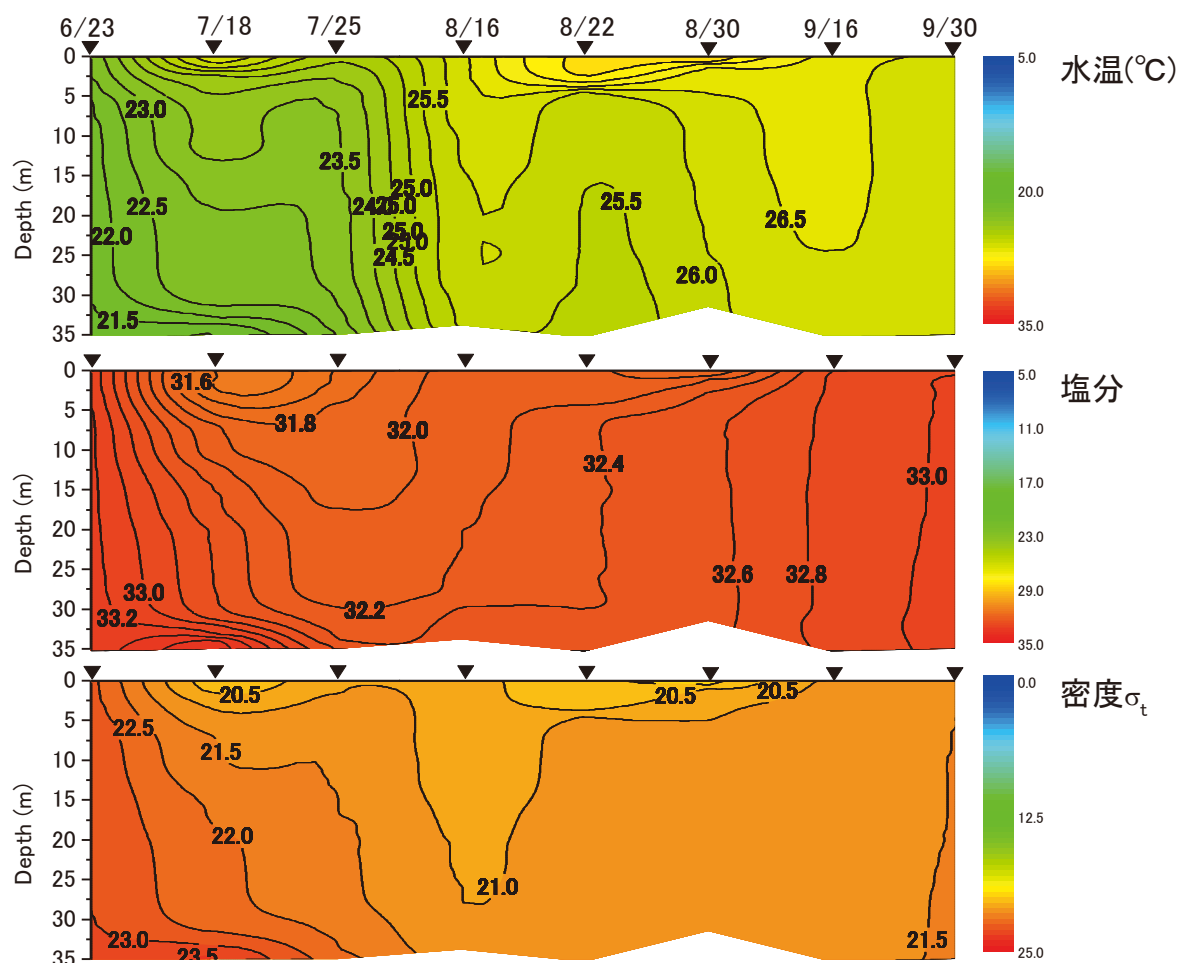


図 26 定点 20 における水温，塩分，密度 σ_t の鉛直分布時系列

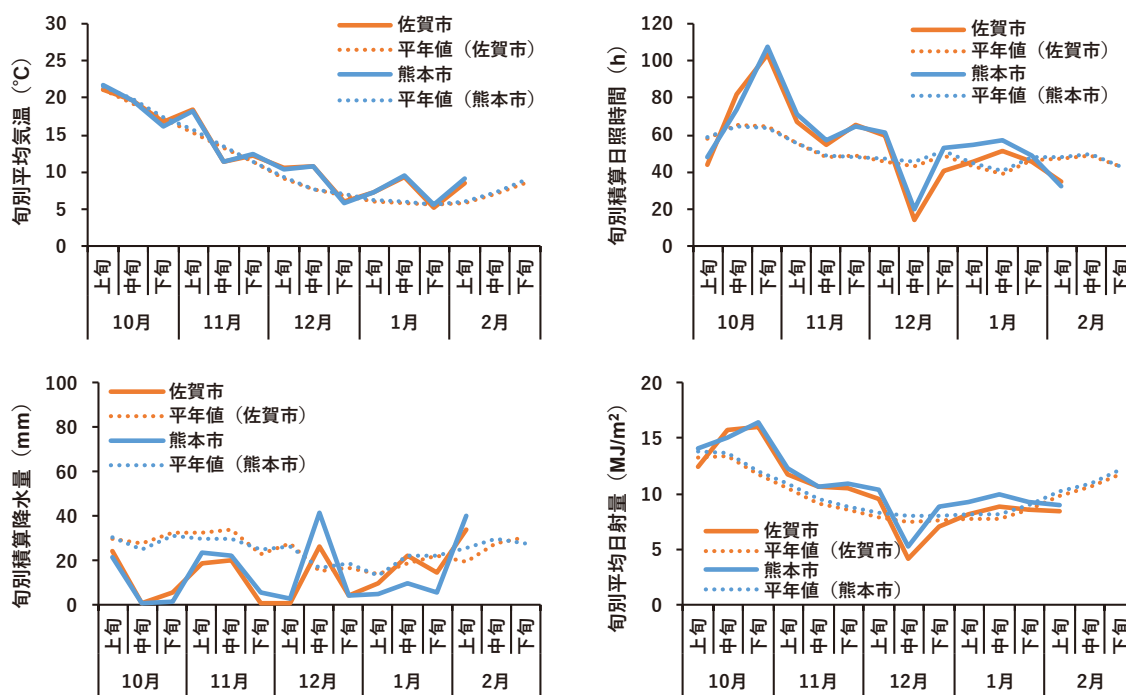


図 27 2023 年 10 月から 2024 年 2 月上旬の佐賀市および熊本市における旬別平均気温，旬別積算降水量，旬別積算日照時間，旬別平均全日射量の推移（平年値は 2 月下旬まで）

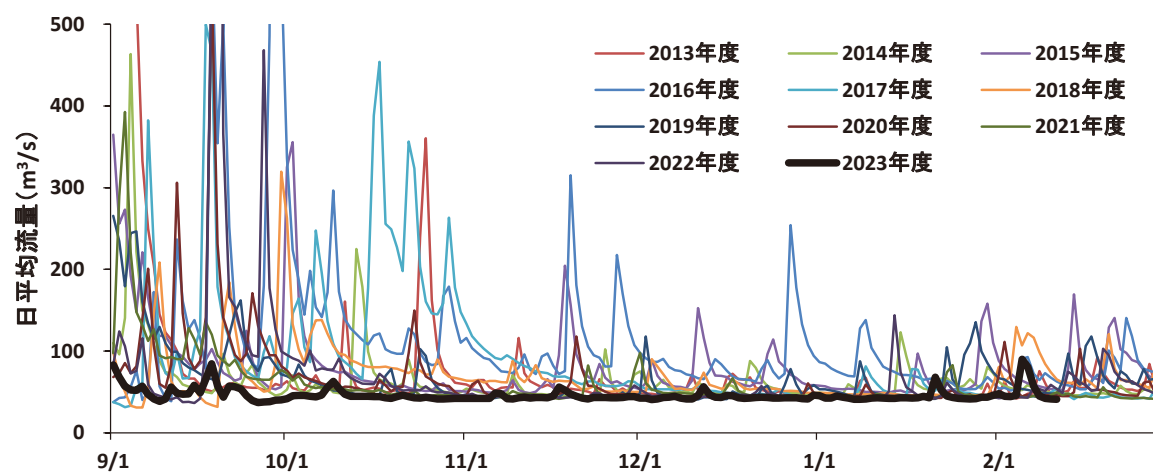
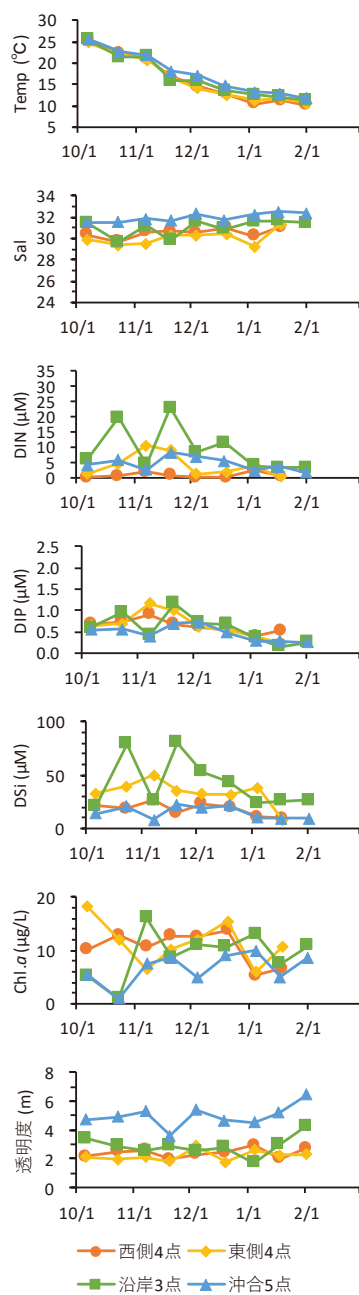
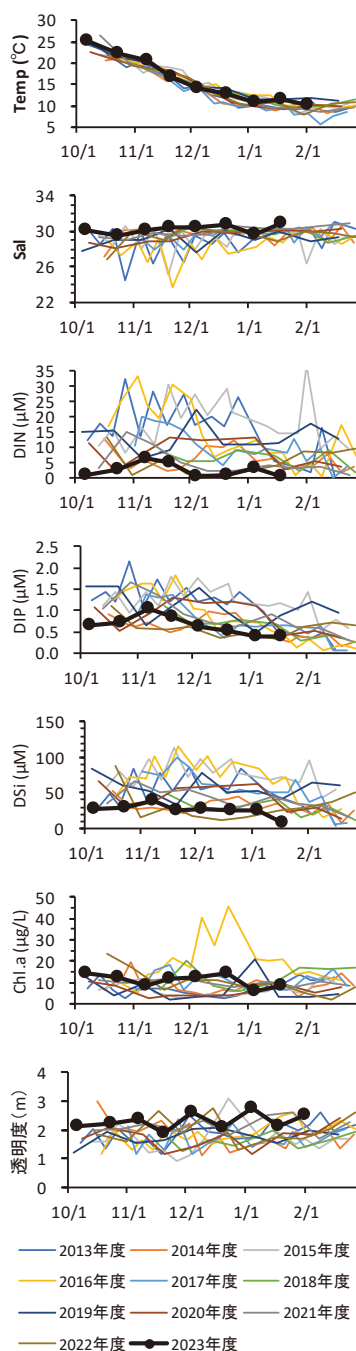


図 28 2013 年度から 2023 年度の 9 月から 2 月（2023 年度は 2 月上旬まで）の筑後大堰直下の日平均流量の変化

a) 2023年度の海域別平均値の推移



b) 10力年の奥部海域全点平均の推移



c) 10力年の中央部海域全点平均の推移

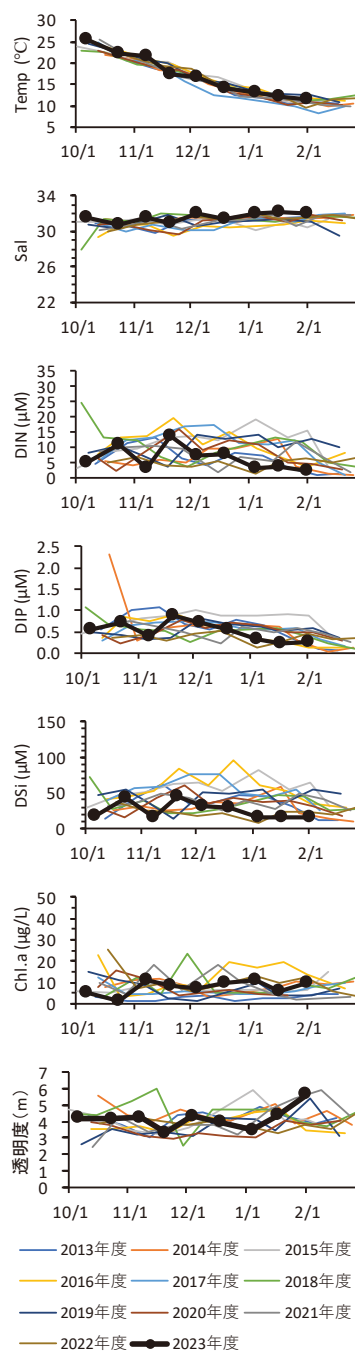
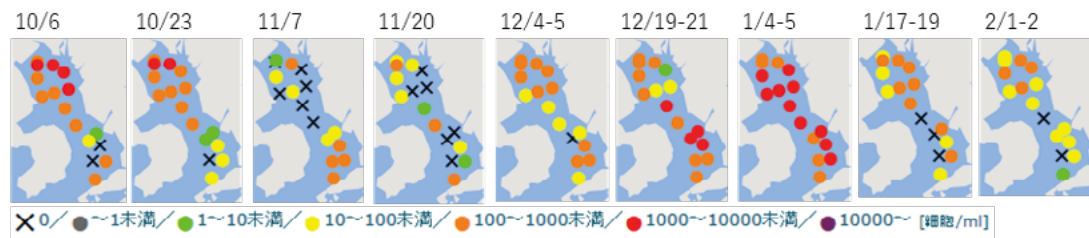
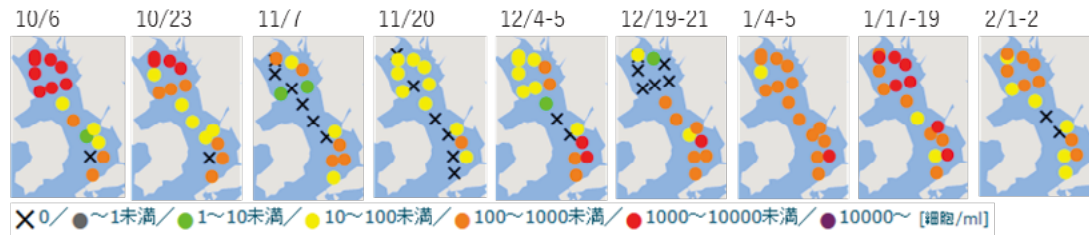


図 29 a) 2023 年 10 月から 2024 年 1 月の有明海奥部西側域 (T2, T13, P6, P1), 奥部東側域 (T3~T5, 6), 中央部沖合域 (1~5), 中央部沿岸域 (7~9) の表層における水温, 塩分, DIN, DIP, DSI, Chl.a, 透明度の平均値の推移, および 2013 年度から 2023 年度の 10 月から 2 月 (2023 年度は 1 月まで) における b) 奥部海域全定点および c) 中央部海域全定点の表層における水温, 塩分, DIN, DIP, DSI, Chl.a, 透明度の平均値の推移

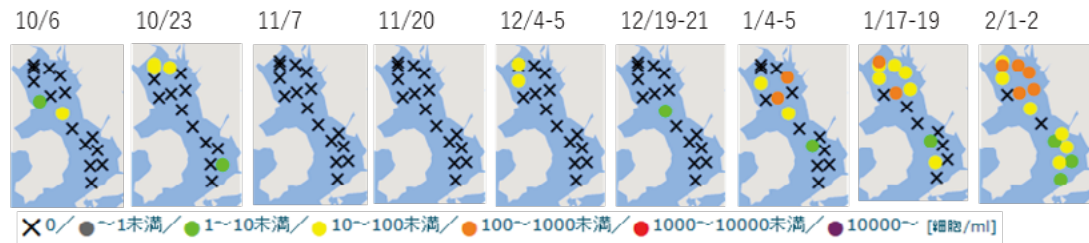
a) *Chaetoceros* spp.



b) *Skeletonema* spp.



c) *Eucampia zodiacus*



d) *Akashiwo sanguinea*

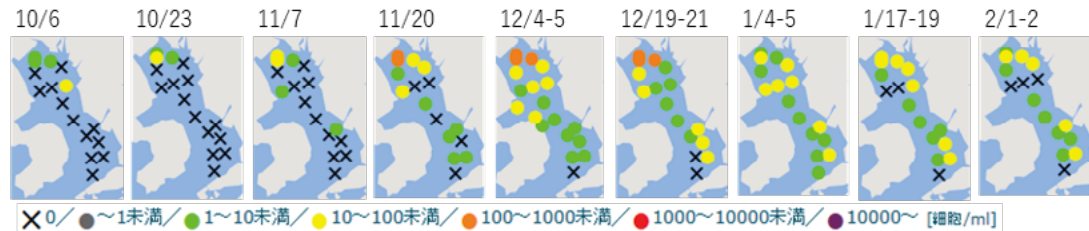


図30 2023年10月から2024年2月上旬までの a) *Chaetoceros* spp., b) *Skeletonema* spp., c) *Eucampia zodiacus*, d) *Akashiwo sanguinea* の各定点における細胞密度（赤潮ネット「赤潮分布情報」の分布図より作成）

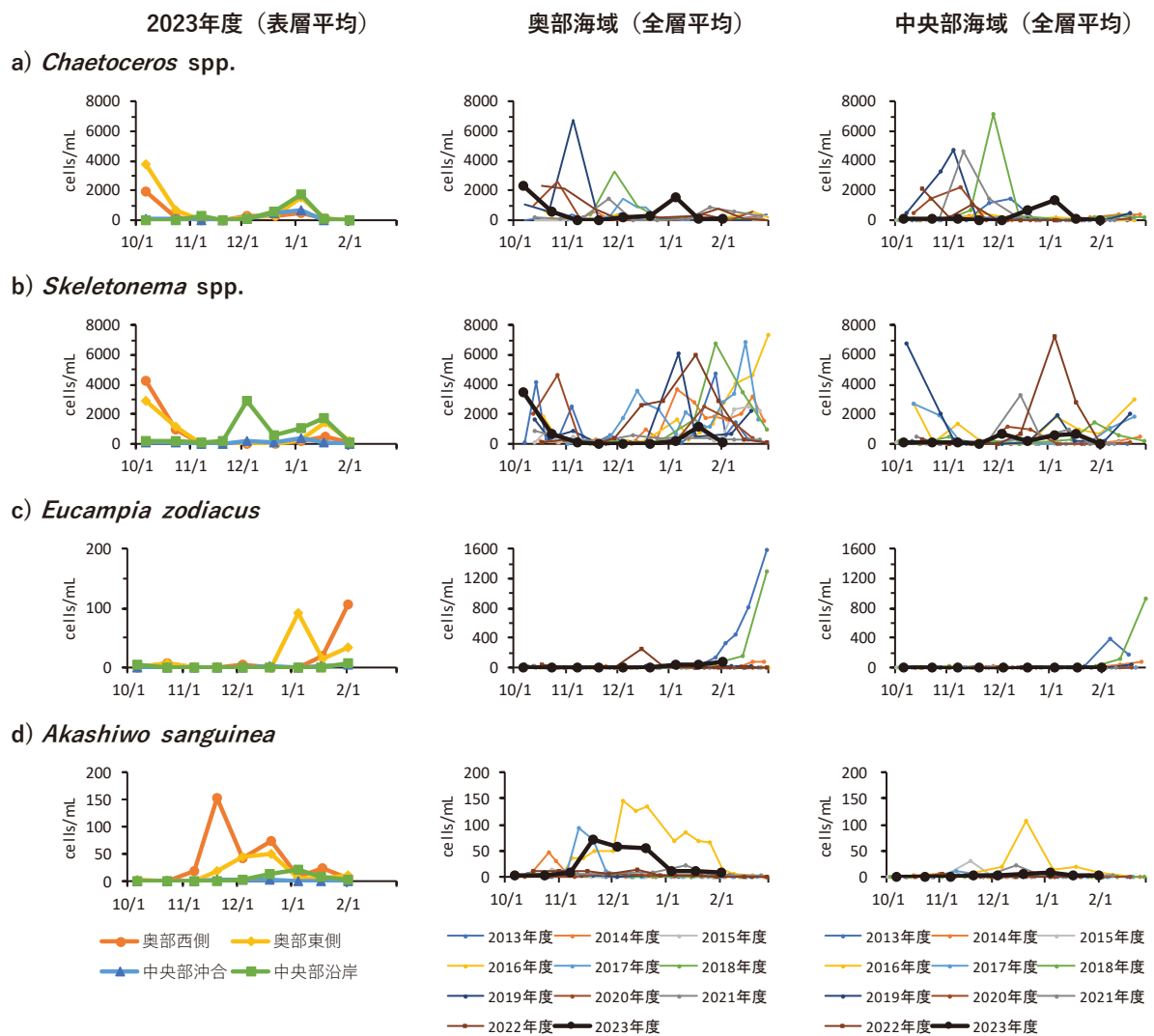


図 31 2023 年 10 月から 2024 年 1 月の水域別定点における表層（左）および 2013 年度から 2024 年度の 10 月から 2 月（2024 年度は 1 月まで）の奥部海域（中央）および中央部海域（右）における全定点の全採水層の a) *Skeletonema* spp., b) *Chaetoceros* spp., c) *Eucampia zodiacus*, d) *Akashiwo sanguinea* の平均細胞密度の変化

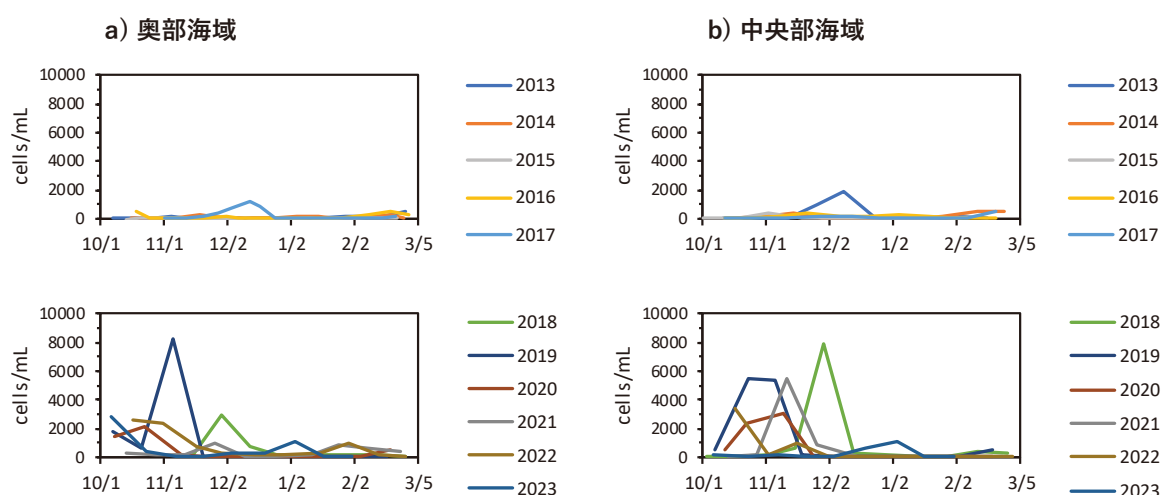


図 32 2013 年度から 2023 年度の *Chaetoceros* spp. の a) 奥部海域と b) 中央部海域の表層における平均細胞密度の変化

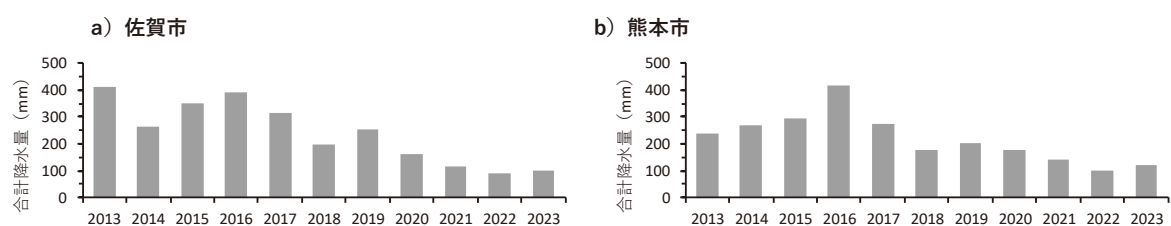


図 33 2013 年から 2023 年の佐賀市および熊本市の 10 月から 12 月までの合計降水量

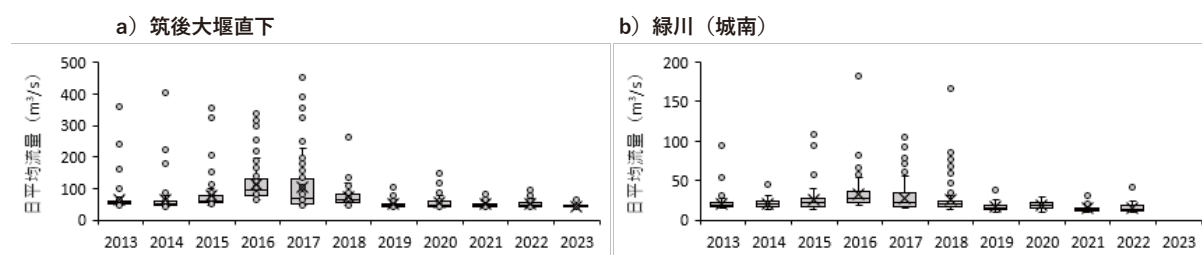


図 34 2013 年から 2023 年の筑後川大堰直下および緑川 (城南) の 10 月から 12 月までの日平均流量

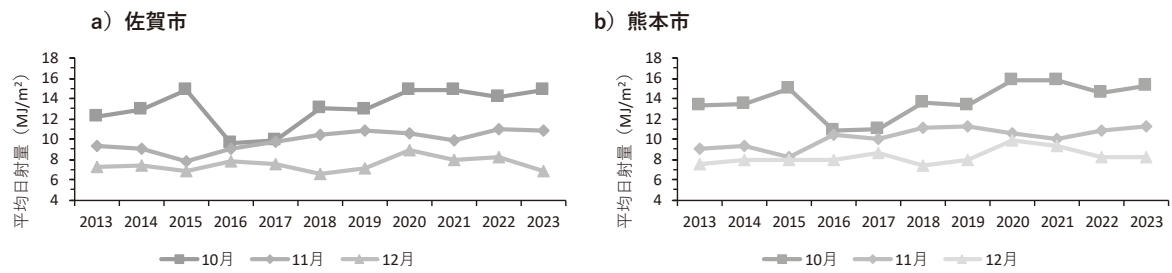


図 35 2013 年から 2023 年の 10 月から 12 月における a) 佐賀市および b) 熊本市の月別平均日射量の変化

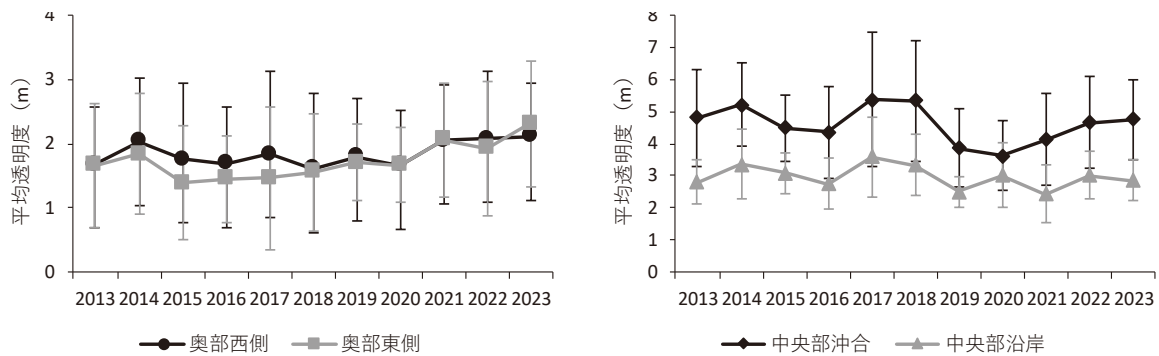


図 36 2013 年から 2023 年の 10 月から 12 月における海域別平均透明度（±標準偏差）の変化

表4 定量PCR による *Skeletonema* 各種の DNA コピー数

Stn.	Date	<i>S. dohrnii</i>	<i>S. costatum</i>	<i>S. tropicum</i>	<i>S. japonicum</i>	<i>S. ardens</i>	<i>S. menzelii</i>	<i>S. grevillei</i>
P6	2023/10/6	2315.2	0	313.7	0	0	0	0
P6	2023/10/23	273.6	0	0	0	0	0	0
P6	2023/11/7	0	367.2	0	0	0	0	0
P6	2023/11/20	453.4	0	0	0	0	0	0
P6	2023/12/4	290.1	0	0	0	0	0	0
T2	2023/10/6	12463.5	0	0	0	0	0	0
T2	2023/10/23	296.0	0	0	0	0	0	0
T2	2023/11/7	0	0	0	0	0	0	0
T2	2023/11/20	461.9	0	0	0	0	0	0
T2	2023/12/4	523.0	0	0	0	0	0	0
T4	2023/10/6	196259.0	436432.5	69337.6	432.8	981.7	0	0
T4	2023/10/23	2101.2	1848.7	144.5	0	0	0	0
T4	2023/11/7	1040985.0	214440.8	7691.9	359.2	1146.3	417.3	0
T4	2023/11/20	25862.9	40741.8	2599.8	0	0	0	0
T4	2023/12/5	34222.2	6935.8	759.9	151.0	0	0	0
T4	2023/12/20	20730.9	8700.7	718.9	229.8	0	0	0
T4	2024/1/4	61170.5	5984.0	0	3884.2	0	0	0
T5	2023/10/6	327933.3	144484.7	113888.5	1339.0	15269.9	482.4	0
T5	2023/10/23	477.2	0	331.1	0	0	0	0
T5	2023/11/7	127018.3	28521.1	7595.9	236.4	367.8	0	0
T5	2023/11/20	17918.8	2253.7	1569.0	226.2	0	0	0
T5	2023/12/5	17601.8	250.6	1185.6	675.2	0	0	0
T5	2023/12/20	10364.7	1533.1	0	504.8	0	0	0
T5	2024/1/4	44913.9	828.2	0	4322.4	0	0	0
St. 7	2023/10/6	61773.9	41296.6	265646.8	1817.6	18000.9	2630.9	740.9
St. 7	2023/10/23	3337.9	1744.9	30117.5	145.1	0	453.2	0
St. 7	2023/11/7	444516.1	5750.0	73151.5	4923.9	3905.2	4241.6	234.8
St. 7	2023/11/20	5669.0	794.3	2451.1	122.3	0	0	0
St. 7	2023/12/4	12957.1	0	665.6	138.0	0	0	0
St. 7	2023/12/19	5000.8	0	251.1	212.3	0	0	0
St. 9	2023/10/6	28781.2	2333.0	6558.9	426.1	6299.9	1661.4	0
St. 9	2023/10/23	1961.9	479.0	3298.4	0	0	258.5	0
St. 9	2023/11/7	3334.9	860.3	787.3	0	0	198.6	0
St. 9	2023/11/20	3981.3	1203.5	1022.5	0	0	0	0
St. 9	2023/12/4	2235.7	0	0	0	0	0	0
St. 9	2023/12/19	666.6	0	0	0	0	0	0

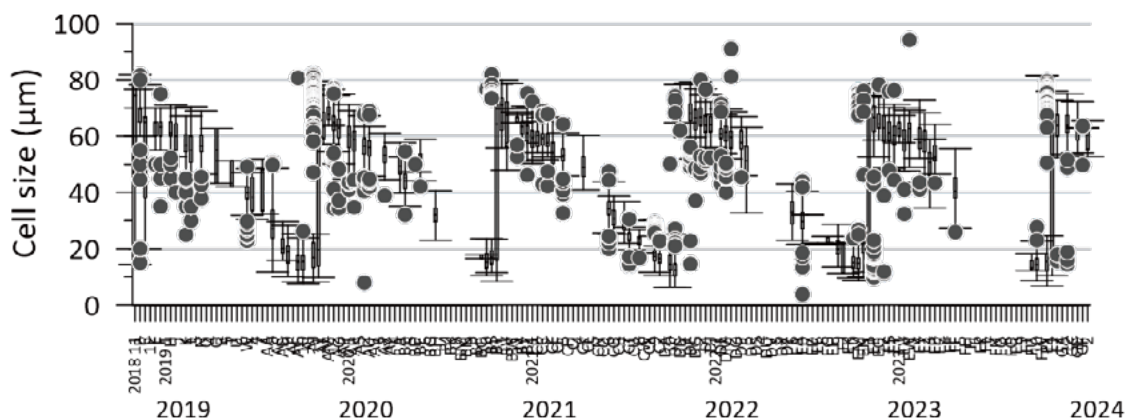


図37 2018年11月から2024年2月における旬別の *Eucampia zodiacus* の細胞サイズの変化

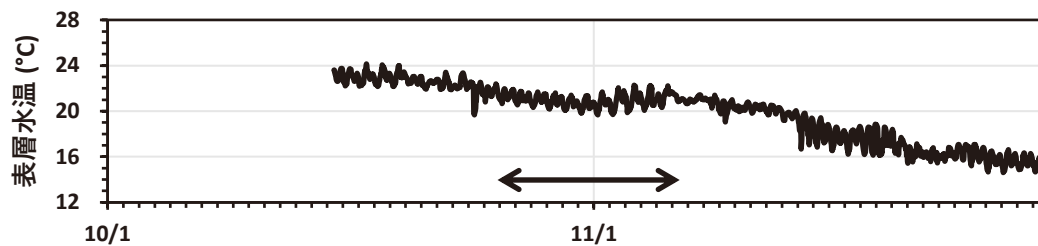


図 38 2023 年 10 月から 11 月の Stn. P6 における表層水温の変化と *Eucampia zodiacus* の細胞サイズ回復時期（両矢印）

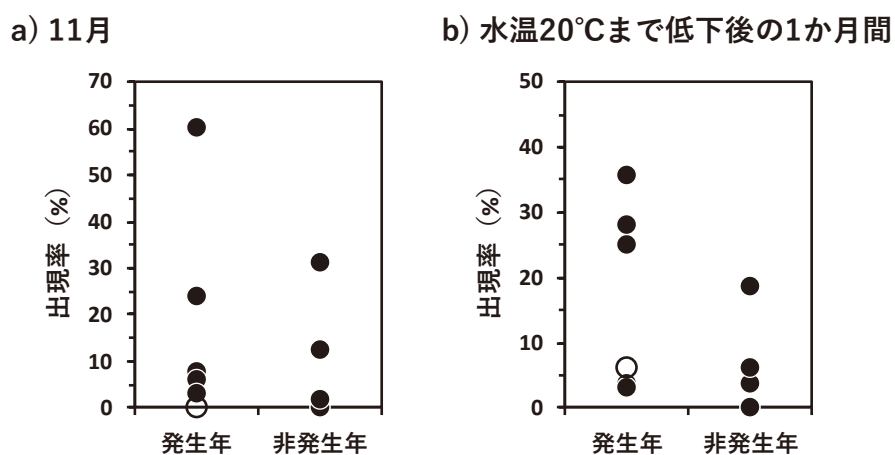


図 39 a) 11 月と b) Stn. P6 における表層水温が 20°C まで低下した後の 1 ヶ月間における *Eucampia zodiacus* の赤潮発生年・非発生年別の細胞出現率（○は 2023 年度）

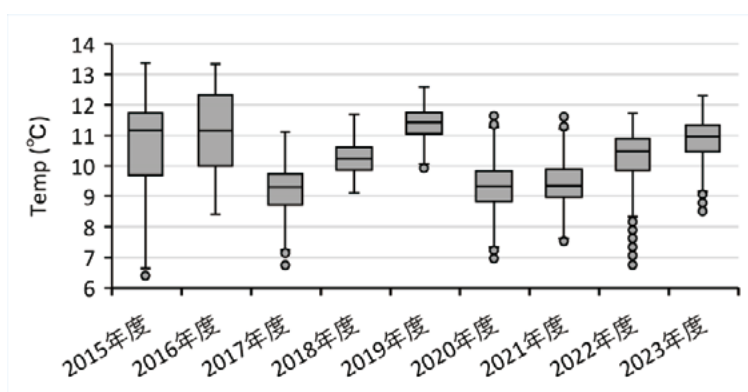


図 40 2015 年度から 2023 年度の Stn. P6 における 1 月の表層水温

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並びに赤潮の発生
段階に応じた一連の対策（行動計画）の検討・策定
カ. 有明海・八代海海域 ② 八代海海域

水産研究・教育機構 水産技術研究所（長崎）
中野 善，岡村 和麿，杉松 宏一，山口 聖，邵 花梅
水産研究・教育機構 水産技術研究所（廿日市）
中山 奈津子，湯浅 光貴，手塚 尚明
熊本県立大学
小森田 智大
熊本県水産研究センター
安藤 典幸，阿部 慎一郎，上原 美咲
鹿児島県水産技術開発センター
吉満 敏，今吉 雄二，赤塚 麻美
熊本県天草市水産研究センター
糸田 拓馬
熊本県海水養殖漁業協同組合
藤本 光，金棒 昭幸
鹿児島県東町漁業協同組合
浦 啓介，立元 伸幸

1 全体計画

(1) 目的

八代海では *Chattonella* 赤潮が頻発し，これまで漁業被害を多数出している。当海域では赤潮被害を低減するため，高頻度赤潮モニタリング，赤潮発生数ヶ月予察，赤潮防除策，に取り組んできた。その結果，被害低減に成功した年もあったが，その一方で課題も浮き彫りとなった。例えば，*Karenia mikimotoi* による赤潮が発生した 2022 年は，2019 年と同様の警戒態勢を敷いていたが，その被害額は 19 億円になった。

どうすれば被害をより抑えられるのだろうか。どうすれば *K. mikimotoi* 赤潮にも対応できるのだろうか。これらの命題に対し，私達は現行の赤潮被害低減対策において以下の項目の増強・追加を検討した。

1. モニタリング
2. 予察
3. 行動計画

これらは，「まず現状を把握し，それをもとに予察を行い，赤潮発生の兆候が見られたときにどのような行動をすべきか整理しておく」という被害低減の考え方において必要な項目である。（1）モニタリングでは，従前のモニタリングに加え，モニタリングの高度化として，赤潮観測にドローン等の先端機器を導入するための技術開発を行った。

（2）予察では，これまでの判別分析による発生予察に加え，発生後の拡大予察に向け

た流動モデルの開発等に取り組んだ。(3) 行動計画では、過去の情報を収集し赤潮発生時の対応表を整理したのち、ドラッカーのフィードバック分析等を用いて対応表の改善を試みた。

2 令和5年度の方法および実施計画

(1) 目的

全体計画と同じ。

(2) 方法

1) モニタリング

従前のモニタリングをこれからも継続することで一定の効果が得られるものと考えられる。しかし、従前のモニタリングが有効であるとは言え、依然として赤潮被害は収まっていない。一方で、これ以上モニタリング頻度を上げることは時間的・労力的に現実的ではない。そこで、本課題ではモニタリングを次の2項目に分けて取り組んだ。

1. 従前のモニタリング
2. モニタリングの高度化

特に後者のモニタリングの高度化では、従前のモニタリングの頻度を上げることなく迅速に赤潮を検出する方法として、先端機器の導入に向けた技術開発に取り組んだ。

①従前のモニタリング

これまで高頻度赤潮モニタリングとして赤潮観測と水質観測を毎週実施してきた。本課題では、これに加え、過年度に補助事業で開発・導入したICTブイによる水質項目の常時観測を実施した。ここで観測した結果は、将来的に赤潮予察で活用することを念頭に置いている。

〈1〉高頻度赤潮モニタリング（熊本水研、鹿児島水技セ、東町漁協、水技研）

2023年5～9月、図1に示す8定点(Stn.2, 4～7, A, K, D)において、週1回の頻度で採水(採水器: バンドーン採水器, 離合社)および多項目水質計(AAQ-RINKO176, JFEアドバンテック)を用いた環境観測(海面から海底まで)を行った。採水層はStn.A, Kで表層, 1.5m層(Stn.Aのみ), クロロフィル極大層(無い場合は5m層), 10m層, 20m層とし, その他の定点で表層, 5m層, 10m層とした。全ての海水試料について有害赤潮プランクトン種の細胞密度および栄養塩濃度($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$)の分析に供した。また, 代表定点Stn.2, 4, 6の表層, 5m層, 10m層, Stn.A, K, Dの表層およびクロロフィル極大層(A, Kは不明瞭な場合実施しない。Dは不明瞭な場合5m層)で採取した海水試料については植物プランクトン種組成を算出した。植物プランクトンの細胞密度は, 光学顕微鏡(IMT-2, BX53, BX51, BH2, オリンパス)下で海水試料1mL中に含まれる細胞を計数して算出した。栄養塩分析はオートアナライザー(QuAAtro36, QuAAtro39, ビーエルテック)を用いて分析した。調査期間終了後, 得られたデータについて気象データ, 過去のデータおよび既往

知見との比較等を行い、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考察した。また、気象観測データは気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>) より得た。

〈2〉 ICT ブイ等で構築した広域監視ネットワークシステムの維持と活用

(i) 大型自動観測ブイ（水技研 [長崎]）

八代海姫戸沖に設置されている大型観測ブイ（図 1, Stn.A）に自動昇降式多項目水質計（AAQ-170W, JFE アドバンテック）、流向流速計（AquadoppProfiler, Nortek, 抽出深度：1.5m, 3.0m, 以下 1.0m 毎に海底まで）、風向風速計（CYG-5106, Climatec, 海面から高さ 3m）、光量子計（DEFI-L, JFE アドバンテック, 海面から高さ 3m）および硝酸塩センサー（SUNA V2, SEA-BIRD SCIENTIFIC, 設置深度：1.5m）を装着して各種観測を実施した。観測期間は 2023 年 6 月 6 日から 10 月 13 日までとし、1 時間間隔で水温、塩分、クロロフィル蛍光、濁度、溶存酸素飽和度、流向・流速の鉛直観測データ、海上風の風向・風速、1 分間隔で光量子束密度、30 分間隔で硝酸塩濃度のデータを取得した。なお自動昇降装置は、強風時に使用すると機器の破損につながるため、風速 9m/s 以上で作動を停止し、風速 6m/s 以下となり強風域を抜けたと判断できた場合に再稼働させた。また光量子束密度以外の観測データは、携帯電話通信網を通してデータ処理サーバーへ送信し、ホームページ（有明海・八代海等の水質観測情報：<http://ariake-yatsushiro.jp/>）上で公開した。さらに、鉛直自動観測ブイの機能維持と観測データの精度向上を図るため、1 ヶ月に 1 回の頻度で点検を行うとともに、表層、1.5m 層、2m 層、5m 層、および 10m 層から採水を行い、塩分（8400B, GUILDLINE）、クロロフィル濃度（10AU, TURNERDESIGNS, Holm-Hansen 法：Holm-Hansen et al., 1965）、懸濁物質濃度（孔径 0.45 μ m のミリポアフィルターでろ過・乾燥後に秤量：植松ら, 1978）および栄養塩（TRACCS2000, BRAN+LUEBBE）の分析に供した。採水試料の分析結果の一部は、自動観測ブイに搭載した多項目水質計で得られた観測データの較正に用いた。

(ii) テレメータ（水技研 [長崎]、熊本水研、天草市水研セ、海水養殖漁協、東町漁協）

本課題では、八代海に広域に配置された自動水質監視システムを利用して包括的な水質環境の把握を行い、既存のセンサーの組み合わせを工夫したコストパフォーマンスに優れた水質監視システムにより、効率的な赤潮等の広域監視を実施するための自動観測システムのネットワークを維持管理・活用した。また、構築されたシステムや観測調査によって取得したデータをより迅速・効率的に可視化し、情報を公表するサイトを運用した。

本課題では、水産研究・教育機構水産技術研究所、熊本県水産研究センター、天草市水産研究センター、熊本県海水養殖漁業協同組合、東町漁業協同組合が八代海に所有する 24 時間連続観測が可能な自動観測ブイや自動水質監視テレメータシステム（表 1, 図 2）で得られる水質等の観測データを監視システムホームページ上及び熊本県水産研究センター（熊本県海域のデータ）、鹿児島県水産技術開発センター（鹿児島県海域のデータ）のホームページ上で随時公開することで、有害赤潮の広域的な監視を行った。また、令和 5 年 6 月～10 月に、月 1 回程度の頻度で熊本県水産研究センター、天草市水産研究センター、熊本県海水養殖漁業協同組合及び東町漁業協同組合の 4 機関がテレメータシステム設置場所を中心に定期調査を実施した。調査項目は多項目水質計、有害

赤潮プランクトンセンサー等による水質（水温，塩分，溶存酸素飽和度，クロロフィル蛍光値等）の鉛直観測，複数層の採水・検鏡調査とした。

(iii) 赤潮カメラ（熊本水研，水技研 [長崎]）

本課題では，赤潮カメラを設置し，画像データの公表と赤潮発生確率の解析を実施した。熊本県天草市楠浦町（楠浦湾）に設置している自動観測機器に赤潮カメラを設置した（図 3）。2023 年 6 月 14 日から 10 月 14 日の 4 ヶ月間，7 時から 19 時まで 10 分間隔で海面撮影を行い，10 時の海面画像を，熊本県のホームページにて公表した。得られた画像データのうち，10 時の海面画像を解析した。解析には昨年度の取得データとベイズ推定を用いた。まず，昨年度の画像データから RGB 値を抽出し，撮影時に検鏡して得られた細胞密度に紐づけて整理した。このとき，*K. mikimotoi* が 1000cells/mL 以上で赤潮と定義した。次に，解析対象画像枚から RGB 値を抽出した。その後，昨年度データを教師データとし，解析対象画像の赤潮発生確率をベイズ推定で算出した。この計算を毎日 10 時の画像を解析対象画像として実施した。このようにして算出した赤潮発生確率のうち，撮影時の細胞密度があるデータについては，その精度確認も行った。精度確認では，赤潮発生確率が 50% 以上を赤潮とし，検鏡結果では昨年同様 *K. mikimotoi* が 1000cells/mL 以上で赤潮と定義した。この定義のもとで検鏡結果と予測結果の混同行列を作成し，正解率・適合率・再現率を算出した（Lantz, 2013）。

(iv) 有害赤潮プランクトンセンサー（熊本水研，海水養殖漁協）

a. 有害プランクトンセンサーを組み込んだテレメータによる定点観測

熊本県天草市楠浦町（楠浦湾）および熊本県天草市御所浦町（御所浦風口）に，有害プランクトンセンサー（JFE アドバンテック（株）製 AHIW2）¹を組み込んだテレメータを設置した（図 4）。2023 年 6 月から 10 月に水深 1.5m，5m および 10m の 3 層で 30 分間隔の自動観測を実施した。また，必要に応じて，現場での採水および有害プランクトンの検鏡を行い，有害プランクトンセンサーの効果を検証した。なお，水深 5m 層の FSI（Fluorescence spectral Shift Index）が 1.95 以上となった場合，関係機関へ通知メールが届くように設定を行った。また，観測結果は，リアルタイムで熊本県および「八代海赤潮等広域監視システム」のホームページで公表した。

b. 有害プランクトンセンサーおよび多項目水質計による鉛直観測

天草市水産研究センターは，楠浦湾および御所浦風口にて，2023 年 6 月～9 月に週 1 回の頻度で，有害プランクトンセンサー（JFE アドバンテック（株）製 AHI-CAD）および多項目水質計（JFE アドバンテック（株）製 AAQ176）を用いた鉛直観測による定期調査を実施した（図 5）。

¹ 有害プランクトンセンサーは，蛍光波長 670nm と 690nm の蛍光強度の比から計算された FSI を指標として，*Karenia* 属や *Chattonella* 属の出現の有無を検出するセンサーである。メーカー公表値として *Karenia* 属，*Chattonella* 属の有害赤潮プランクトンの細胞密度が約 50cells/mL 以上で FSI は 1.95 以上になるとしている。また，有害赤潮プランクトンの細胞密度に加えて，珪藻類等の他プランクトンとの優占割合が *Karenia* 属は 50% 以上，*Chattonella* 属は 80% 以上であることも検出条件として挙げられている。

②モニタリングの高度化

高頻度赤潮モニタリングは費用・労力・時間がかかるため、これ以上頻度を上げることは難しい。しかしながら、八代海全体における赤潮発生状況を早急に把握しなければ、事前の防除策を効果的に実施できない。

どうすればより早急に赤潮発生状況を把握できるのか。この問題に対処すべく、本課題では次の 2 項目を通して先端機器の導入に向けた技術開発を実施した。

1. ドローンによる赤潮範囲の推定
2. 自動採水顕微鏡装置（seaMS）による細胞密度の推定

本課題では、近年急速に活用範囲が広まっているドローンと、新しく開発された seaMS を導入するうえで、障壁となっている問題の解決を目指す。前者では、赤潮発生海域におけるドローンを用いた空撮と採水を通して赤潮範囲推定の精度確認を行った。後者では、赤潮発生海域での試用を通して、画像からの細胞密度算出と検鏡結果を用いた精度確認を行った。将来的にはこれら先端機器による赤潮モニタリングの無人化を視野に入れている。

〈1〉ドローンによる赤潮範囲の推定

赤潮防除で粘土散布を実施する際に、漁船の船橋からではどこに高濃度の赤潮が分布しているか把握できない。そこで本課題では、ドローンを用いて上空から赤潮の範囲を空撮写真から判別できるか検討した。

赤潮発生海域においてドローンによる空撮と採水を行った。その後、空撮写真から撮影範囲内の赤潮発生海域を推定し、写真内の採水ドローンの位置の赤潮発生確率と検鏡結果で推定精度を検証した。

八代海の楠浦湾にて 7 月 4 日にドローンを用いた調査を実施した。まず、調査船から空撮ドローンと採水ドローンを飛ばした。採水ドローンが空撮ドローンの撮影範囲内に収まっていることを確認し、撮影と採水を行った。撮影と採水は場所を変えて 25 回実施した。空撮写真一枚の中で、赤潮発生または非発生と視認できる点を複数箇所選択し、その点の RGB 値を抽出した。これを訓練データとし、採水ドローンが写っている箇所の周辺の赤潮発生確率を算出した。一方、採水箇所の細胞密度は採水直後に船上検鏡にて赤潮細胞を計数し、算出した。その後、両者を比較し、推定精度を検証した。

〈2〉seaMS による細胞密度の推定

近年開発された seaMS（自動採水顕微鏡装置、西村商会製）には赤潮調査の代行という期待がかかっている。しかし、本装置は顕微鏡映像を配信する機能はあるが、細胞密度を推定する機能は有していない。そこで本課題では、seaMS で撮影した顕微鏡映像から、どれぐらいの精度で細胞密度を推定できるのかを検討した。

本課題では、赤潮発生海域において採水と seaMS 映像の撮影を実施した。その後、seaMS 映像から細胞数を計数し、予め準備しておいた検量線を用いて細胞密度を推定した。推定された細胞密度と観測された細胞密度の誤差および誤差率を算出し、精度を検証した。

調査および撮影は前節のドローンと同日同海域で実施した。場所を変えて 10 回採水し、seaMS による撮影を 1 試料あたり 6~10 回それぞれ 30 秒ずつ行つて、計 79 の映像ファイルを取得した。次に 1 ファイルから 10 個のスナップショットを取り出し、その画像に含まれる赤潮細胞を計数した。計数した細胞数と過年度に作成した検量線から細胞密度を推定した。この推定値と検鏡による観測値を用いて、二乗平均平方根誤差 (RMSE) と誤差率を算出した。RMSE と誤差率は次の式で求めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (\hat{y}_k - y_k)^2}$$

$$\text{誤差率} = \frac{\hat{y}_k - y_k}{y_k} \times 100$$

ここで $\hat{y}_k$ は推定値、 y_k は観測値、 N データの総数を表す。

2) 予察

過年度までの取り組みから、予察を行うことで防除策を事前に準備し、赤潮発生時に速やかに対策を実施することが有効であると考えられた。これまで、当海域では赤潮発生の数ヶ月予察に取り組んできた。しかし、「赤潮の予察」を改めて整理すると、大きく分けて 2 つあることが分かる。

1. 発生予察
2. 拡大予察

これらは、まず発生するか否か、そして発生した赤潮がどのように広がっていくのか、という点に着目している。これらの予察は性質が全く異なるものである。特に後者では、これまで特定の年における赤潮の拡大は再現されているが、予察には応用されていない。そこで本課題では、これまでの発生予察とその高度化に加え、拡大予察という新しいアプローチで赤潮予察の発展を目指す。

①発生予察

これまで赤潮の数ヶ月予察には、気温と梅雨入り日による判別分析手法が用いられてきた。しかし、他海域における同手法による予察では年々精度が低下し、予測が外れてきたとの報告もある (e.g. 小川ら, 2022)。また、梅雨入り日は定性的であり説明変数として使用するにはあまりにも不安定であるため、これも精度を下げる要因となる。このままでは本海域の予測もいずれ精度が低下し、的中しなくなる可能性がある。

そこで本課題では、予測精度の維持・向上のため次の 2 項目を実施した。

1. 判別分析による予察
2. 予察の高度化

前者では、過年度まで開発を続けてきた予察を継続して実施した。後者では、これまでに使用していない変数や統計的分類手法を試行した。具体的には、梅雨入り日の代わりにエルニーニョ監視指数や ENSO 監視指数を用いた。また、統計的分類手法においても判別分析以外の手法を試した。モデルを評価する際は、判別分析による予測精度を本課題の目標値とした。

〈1〉判別分析による予察（水技研 [長崎]）

過年度まで開発を続けてきた予察，すなわち気温と梅雨入り日の 2 変数を用いた判別分析による予察を継続して実施した。八代海の *Chattonella* 赤潮の発生は冬から春の平均気温と九州南部の梅雨入り時期との相関が高いことが報告されている（Onitsuka et al., 2015; 北辻ら, 2018）。また，これらの既往知見をもとに判別分析による赤潮発生の中長期予察が実施されてきた（紫加田ら, 2019）。今年度においても，八代（アメダス）の 2 月から 4 月の平均気温と九州南部梅雨入り日（5 月 16 日からの経過日数）の 2 変数を用いた判別分析を継続して実施した。また，過年度まで，判別分析結果から得られる判別得点と赤潮発生日（6 月 30 日からの経過日数）の回帰式から赤潮発生日の推定が試行されている。今年度においても，過年度同様，赤潮発生日の推定を実施した。

〈2〉予察の高度化（水技研 [長崎]）

予察精度の維持・向上のために，説明変数とモデルの見直しを行った。これまで判別分析モデルで使用してきた梅雨入り日は定性的な指標である。一方で，エルニーニョと南方振動は世界的な気象・海象現象であり，日本の梅雨にも影響を与えることが報告されている（Tanaka, 1997; Ohba et al., 2015）。そこで本研究では，梅雨入り日の代わりに，エルニーニョ監視指数と南方振動指数を説明変数に用いることとした。エルニーニョ監視指数として NINO.3・NINO.WEST・IOBW という 3 海域の海面水温を，南方振動監視指数として SOI・OLR・U200・U850・SAMOI の値を気象庁 HP より取得した。また，地域的なデータとして八代（アメダス）の気温・降水量・日照時間と球磨川（萩原）の河川水位を取得した。取得したデータを赤潮発生（非発生）の前年 7 月～当年 6 月で 1 年を再定義し，月単位で再整理した。次に，発生年の 4 月の気温と非発生年の 4 月の気温に有意差があるかを調べるために分散の等質性の検定と母平均の差の検定を行った。そしてこの検定を全ての変数で行った。次に，有意差が認められた変数を用いて予察モデルを試行した。使用した予察モデルは，判別分析・k 近傍法・一般化線形モデル・ベイズ推定・サポートベクターマシン・ランダムフォレストとした。予察モデルの試行とともに交差検証法（Kohavi, 1995; Lantz, 2013）を用いて精度確認を行った。そして，モデルの評価指標として，正解率・適合率・再現率・F 値・k 統計量を算出し，これらの値が高いモデルを採択した。

②拡大予察

〈1〉有害プランクトンの輸送過程の解明（水技研 [長崎]）

赤潮の移送を把握するため，流動モデルおよび粒子追跡モデルを開発する。今年度は海峡部やリアス式海岸を表現するために有利な，三角形格子を用いた Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) に八代海を表現することを目的とし，八代海の詳細な地

形を再現した。また河川条件として 1 級・2 級河川の流量と水質を整理した。気象条件については、気象庁 GPV-MSM をベースに入力データを整理した。外洋条件については、外洋モデルとの接続を想定したデータ整理を行った。

〈2〉赤潮発生から衰退に至る栄養塩動態の解明（熊本県立大学）

本研究では、2015 年から 2017 年にかけて八代海海域で実施された調査結果（図 6）の解析を通して、八代海において発生した *K. mikimotoi* 赤潮の拡大過程における栄養塩の供給源を明らかにする。解析の手順としては、まず、流量と *K. mikimotoi* 細胞数の推移（図 7）および TS ダイアグラム（図 8）より、同一と見なせる期間を定義した（図 7 の各年における①から⑨）。次に、それぞれの期間において球磨川の横石観測所における水温と溶存無機態窒素（DIN）濃度を取得した（国土交通省水質水文データベース：<http://www1.river.go.jp/>）。各期間において河川水に加えて、表層水（高塩分かつ高水温：主に南部海域の沿岸部）と底層水（最低水温：主に南部海域の代表点周辺の 40m 以深）をエンドメンバーとして定義した。ここで以下の 3 エンドメンバーのミキシングモデルにより各起源水の寄与率を算出した。

$$\begin{aligned} f_{Ri} + f_{Wi} + f_{Bi} &= 1 \\ f_{Ri}T_{Ri} + f_{Wi}T_{Wi} + f_{Bi}T_{Bi} &= T_{it} \\ f_{Ri}S_{Ri} + f_{Wi}S_{Wi} + f_{Bi}S_{Bi} &= S_{it} \end{aligned}$$

ここで f は寄与率、 T は水温、 S は塩分、添字 R は河川水、 W は表層水、 B は底層水、 i は任意の期間、 t は各層の測定値を示す。次に、各寄与率に対して、各起源水の DIN 濃度を乗じることで供給 DIN 濃度（ DIN_{sup} ）を求めた。

$$f_{Xi}DIN_{Xi} = DIN_{sup_{Xi}}$$

ここで X は起源水（河川水、表層水または底層水）を示す。ここで脱窒などによる系外除去は無視できると仮定すると、式（1）のように各起源水の DIN_{sup} の和は実測値 $DIN(DIN_{measure})$ と植物プランクトンによる取り込み量（ DIN_{uptake} ）で成り立つ。

$$\sum_{X=1}^3 DIN_{sup_{Xi}} = DIN_{it} + DIN_{uptake_{it}} \quad (1)$$

この関係より、植物プランクトンの取り込み量は式（2）のように表現できる。

$$DIN_{uptake_{it}} = DIN_{it} - \sum_{X=1}^3 DIN_{sup_{Xi}} \quad (2)$$

この一連の計算を実施し、植物プランクトンの取り込み量を算出した。

3) 行動計画

現在、赤潮被害の対策は漁業者や漁協が過去の経験をもとに判断・実施している。海域全体として被害拡大を防ぐためには、経験に基づく知識を明文化し、洗練・改良したのち共有する必要がある。そこで本課題では、次の2項目を通して知識の共有を図る。

1. 赤潮発生状況と対策の現状把握
2. 赤潮発生状況と対策の改善・更新

まず、これまでに、どの漁場において、どの程度の赤潮が発生したときに、どのような対策を講じてきたのかを整理し、その対応表を作成した。漁場については、八代海中部海域として樋島-龍ヶ岳-楠浦海域を、また八代海南部海域として東町漁協の漁場海域をモデル漁場として設定した。赤潮発生の程度については、原因種と細胞密度と発生海域で整理した。対策については、餌止めや粘土散布、生簀沈下など、何を実施したのかを整理した。

次に、この現状の対応表をもとに今年度の対策を振り返って改善点を洗い出した。具体的にはドラッカーのフィードバック分析を実施した。この手法は、実際の経験を通して行動を修正することで対応表の最適化を検討するものである。フィードバック分析を改変し次の手順で検討した。それは「対応表の作成→被害額の目標値を明記→対応表に沿った対策の実施→期待した被害額と実際の被害額の比較→当該年度の対策の良し悪しを協議→対応表の修正」である。

(3) 結果および考察

1) モニタリング

①従前のモニタリング

〈1〉高頻度赤潮モニタリング

(i) ①有害赤潮プランクトン種の発生状況と関連する気象、環境条件

a. プランクトン細胞密度の推移

2023年の八代海では、6月から9月にかけて3種の有害赤潮プランクトンによる赤潮が継続的に発生した。珪藻類も含め、本調査における代表定点でのプランクトン細胞密度の推移を図9に示す。

有害赤潮プランクトン種の発生状況について種ごとに整理する。

Cochlodinium polykrikoides は、他事業において得られた情報も含めると、6月上旬に Stn.D 付近で初認され、6月6日には Stn.6 の10m層で8cells/mLが検出された。6月中旬には八代海全域で確認されるようになり、6月下旬には局所的に高密度化し、熊本、鹿児島両県海域の複数箇所で赤潮化しているのが確認された。その後、7月上旬のまとまった降雨後は減少傾向となり、再び高密度化することなく低位で推移し、9月上旬には終息したと考えられる。

Chattonella 属は、他事業情報も含めると6月上旬に Stn.K 他で確認され、6月中旬から下旬にかけては八代海全域で増加傾向にあることが確認された。7月上旬には更に増加し、本調査でも Stn.4 や Stn.K, Stn.7 で 1×10^2 cells/mL を超える細胞数が検出されたが、7月中旬になると八代海南部では減少傾向に転じた。8月上旬には台風6号の通過

に伴うまとまった降雨の後に八代海北部を中心に再び増加傾向に転じ、Stn.2 では 8 月 16 日に表層で 1×10^3 cells/mL が検出された。急増した *Chattonella* 属は南部にも拡大し、この期間に最高細胞密度 (2×10^3 cells/mL, 長島町琵琶首地先) を記録した。

8 月下旬以降は減少傾向となり高密度化することはなく、8 月 22 日の調査で Stn.K において 11cells/mL が検出された以降は散発的に 10cells/mL 未満が確認される程度となり、9 月上旬には終息したと考えられる。

K. mikimotoi は 6 月上旬から細胞は確認されていたが、前述の 2 種と比較すると半月程度増加のタイミングが遅く、6 月下旬になって楠浦湾で急速に増加し、赤潮化した。その後、楠浦湾で更に高密度化 (7 月 2 日, 1.65×10^5 cells/mL) し、Stn.D 付近でも $1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^2$ cells/mL 程度の細胞が確認されていたが、7 月中旬に入り *Chattonella* 属と入れ替わるように八代海の広範囲に拡大した。7 月下旬には増殖のピークに達したと考えられ、この期間に南部では最高細胞密度 (8×10^4 cells/mL, 長島町幣串) を記録した。8 月上旬以降は減少傾向となり、本調査では散発的に 1×10^2 cells/mL 未満程度が確認される状況が続いたが、9 月上旬には終息したと考えられる。

これらの有害赤潮プランクトンの競合種である珪藻類の細胞密度は、調査期間中、最高で 3.77×10^3 cells/mL (6 月 13 日, Stn.2, 5m 層) が検出された。例年、 5×10^3 cells/mL を超える細胞数が確認される場合もあるが、今年は珪藻の増殖が低調であったと考えられ、Stn.2 を除くと 1×10^3 cells/mL を超える細胞数が確認された事例も数例のみであり、特に 8 月以降はその傾向が顕著であった。珪藻類の主な優占種は *Skeletonema* spp. と *Chaetoceros* spp. および *Thalassionema* spp. であった。

b. 気象条件

八代市の気温は、5 月から 9 月の調査期間中、 16.3 (5 月 1 日) $\sim 30.5^\circ\text{C}$ (8 月 3 日, 8 月 5 日) の範囲で推移した。5 月上旬から中旬にかけては「平年並み」から「低め」で推移したが、5 月下旬から 8 月下旬にかけては概ね「高め」、9 月上旬から下旬にかけては概ね「かなり高め」で推移した。降水量は、まとまった降雨があったものを抽出すると、5 月 4 日から 7 日までで合計 139mm, 5 月 30 日から 6 月 2 日までで合計 106.5mm, 6 月 6 日から 6 月 8 日までで合計 130.5mm, 6 月 29 日から 7 月 3 日までで合計 217mm を記録し、台風 6 号が接近・通過した 8 月 7 日から 10 日までの期間にも合計 61mm を記録した。なお、気象庁発表資料によると、八代海が含まれる九州北部地域の梅雨入りは 5 月 29 日ごろで平年より 6 日早く、梅雨明けは 7 月 25 日ごろで平年より 6 日遅かった。日照時間は 5 月上旬, 6 月中旬, 9 月上旬および下旬は「多め」であり、その他の期間は「平年並み」から「少なめ」で推移した (図 10)。

c. 水質

調査期間中、水温は 18.0 (5 月 9 日, Stn.A, 1.5m 層) $\sim 30.6^\circ\text{C}$ (7 月 25 日, Stn.K, 表層) で推移した。5m 層の全調査点平均値は、降雨の影響を受けた 5 月上旬, 6 月上旬, 7 月上旬は「やや低め」であり、その他の期間は「平年並み」か「やや高め」で推移した (別事業を含む過去 5 年間で鹿児島県が実施している調査の平均値との比較)。

塩分は、降雨の影響を受けた 5 月上旬, 6 月上旬, 7 月上旬, 8 月上旬に八代海北部から中部 (Stn.2, Stn.A, Stn.4), 楠浦湾 (Stn.K) では低い傾向となった。

DIN, DIP および DSi 濃度は、それぞれ 0.01 (8 月 16 日, Stn.6, 5m 層, 10m 層)

～45.16 $\mu\text{mol/L}$ (8月11日, Stn.A, 表層), 0.00 (5月16日, Stn.2, 4, 5, 6, 表層等) ～1.18 $\mu\text{mol/L}$ (7月4日, Stn.A, 表層), 0.40 (5月16日, Stn.5, 表層) ～136.65 $\mu\text{mol/L}$ (8月11日, Stn.A, 表層) の範囲で推移した。調査期間を通して、いずれの栄養塩種も北部、楠浦湾で高い傾向にあった。

DIN および DIP 濃度は *K. mikimotoi* の増殖に必要な半飽和定数 (DIN : 0.78 $\mu\text{mol/L}$, DIP : 0.14 $\mu\text{mol/L}$) を表層から有光層の下限近辺 (水深 10m) まで下回ることが度々あった (図 11)。10m より浅い深度層において、多くの調査定点 (Stn.2, A, 4, 5, D, K) で DIN, DIP 濃度が 5 月～8 月に上昇したが、同時期に塩分低下と DSI 濃度の上昇がみられていたことから、降雨および球磨川からの供給によるものと考えられた。

以上のように、八代海海域では珪藻類が少ない状態が続き、降雨による栄養の供給もあったことにより、*C. polykrikoides*, *Chattonella* 属, *K. mikimotoi* の 3 種の有害赤潮プランクトンが優占種を交代しながら増殖した。

〈2〉 ICT ブイ等で構築した広域監視ネットワークシステムの維持と活用

(i) 大型自動観測ブイ

大型観測ブイは台風通過・時化などによる一時的な停止 (風速 9m/s 以上を目安に判断) を除き、観測期間を通して稼働した。自動昇降式多項目水質計で計測された水温、塩分およびクロロフィル濃度の鉛直プロファイルを図 12 に、各層別の経時変化を図 13 に示す。観測期間中、表層水温 (深度 0.5m) は 20.3～31.7 $^{\circ}\text{C}$ で推移し、8月20日に最高値を示した。深度 10, 20 および 30m 層の水温はそれぞれ 20.1 ～29.1 $^{\circ}\text{C}$, 19.9～27.8 $^{\circ}\text{C}$ および 19.7～27.6 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で推移し、深度 10m については 8月31日に、深度 20 および 30m 層についてはそれぞれ 9月22日および 9月18日に最高値を示した。観測期間中、表層塩分は 5.9～32.6 で推移し、6月中旬に塩分低下後、6月下旬に回復し、7月上旬に再び塩分低下、7月下旬には次第に塩分が回復するも、8月中旬には台風の影響により再び低下、その後 8月下旬に急速に回復した。深度 10, 20 および 30m 層の塩分は、それぞれ 28.8～33.0, 31.5～33.1 および 32.0～33.2 の範囲で推移した。観測期間中、表層 (深度 0.5m), 深度 10, 20 および 30m 層のクロロフィル濃度は、それぞれ 0.0～20.4, 0.5～12.8, 0.3～10.2 および 0.4～7.0 $\mu\text{g/L}$ (センサー値) の範囲で推移した。なお、7月下旬のみを抽出した多項目水質計の経時変化を図 14 に示すが、カレニア赤潮が拡大した期間、特に 7月27日以降は潮汐周期とは異なるクロロフィル濃度の鉛直運動が認められた。これはカレニア赤潮が夜間に深い水深帯へ、日中は浅い水深帯へと移動する日周鉛直運動を捉えたものと推測される。

海上風を図 15 に示す。7月上旬から中旬にかけて、梅雨前線の影響による強い南西寄りの風が連吹していることが大きな特徴である。同期間中、水深 5m 以浅の流速データ (図 16) は北東に向かう流れが顕著であり、有害赤潮プランクトンの輸送・拡散過程に大きく寄与していたものと推測される。

水温、塩分を過去の平均値 (2012～2021 年) と比較すると (図 17)、水温は 7 月以降、かなり高めで推移していた。塩分は 6 月中旬までは低めで推移したが、7 月以降はまとまった降雨のあった 7 月上旬や 8 月中旬を除き高塩分が顕著であった。

(ii) テレメータ

各観測システムにより得られたデータを効率的に収集して公表し、データをデータベース化して管理するために、過年度に開発・拡張した「八代海赤潮等広域監視システム」を水産研究・教育機構水産技術研究所のホームページ (<https://ariake-yatsushiro.jp/yatsushiro/yatsushiro-sea2/top.php>) において公表した (図 18)。これにより、他機関が管理する観測機器のデータも一元的に表示され、即時確認できるようになった。

(iii) 赤潮カメラ

6 月 14 日から 10 月 14 日まで 10 分間隔で自動海面撮影を実施し、得られたデータを公表・解析した。算出した赤潮発生確率と検鏡結果を比較したところ、赤潮カメラが *K. mikimotoi* を検出する精度は低いことが分かった。

混同行列 (表 2) から、正解率は 32%, 再現率は 6.8%, 適合率は 100% と算出された。この結果から、正解率は低く、モデルとしてのバランスも適合率に偏っていることが明らかとなった。これは、教師データが昨年度観測の 18 回分しかなく、さらに 18 回中 11 回が赤潮発生であったことから、モデル自体がどんな画像でも「赤潮」と判定するように偏っていたことが原因であると考えられた。あるいは、そもそも中層で発達する *K. mikimotoi* は表層の画像では捉えきれないのかもしれない。

(iv) 有害赤潮プランクトンセンサー

今年度夏季の八代海では、*Chattonella* 属、*C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の 3 種類の有害プランクトンによる赤潮が発生した。熊本県では、6 月 14 日に *Chattonella* 属 (警報発令基準 10cells/mL), 6 月 21 日に *C. polykrikoides* (警報発令基準 500cells/mL), 6 月 26 日に *K. mikimotoi* (警報発令基準 1000cells/mL) の警報を発令し、3 種とも 9 月 7 日に警報を解除した。ここでは、楠浦湾における *Chattonella* 属および *K. mikimotoi* の赤潮発生時の結果を報告する。

a. 有害プランクトンセンサーを組み込んだテレメータによる定点観測

有害プランクトンセンサーを組み込んだテレメータにより、*K. mikimotoi* および *Chattonella* 属の赤潮を捉えることができた (図 19)。

昨年度と同様に、*K. mikimotoi* の赤潮発生初期から衰退期まで FSI およびクロロフィル蛍光に反応があり、*K. mikimotoi* の出現動向を捉えることができた。

Chattonella 属の赤潮は、楠浦湾で 6 月中旬から 6 月下旬および 8 月中旬から 8 月下旬の 2 回発生し、6 月中旬は FSI に反応がみられなかったものの、8 月中旬は FSI に反応がみられた。

K. mikimotoi の初期発生時期の結果を図 20 に示す。6 月 14 日に *Chattonella* 属の赤潮警報が発令され、*Chattonella* 属への警戒を強化していた 6 月 22 日に、「水深 5m で FSI が 1.95 以上を観測した」との通知メールが届いたため、同日、天草市水産研究センターが鉛直観測による現場調査を実施したところ、水深 6m で *K. mikimotoi* を 31cells/mL 確認した。これは、初期発生時に中層で増殖する *K. mikimotoi* (Honjou, 1990) を有害プランクトンセンサーが捉えたものと考えられた。そのため、*K. mikimotoi* に対しても注意していたところ、水深 5m の FSI およびクロロフィル蛍光が高い値を示す頻度が高くなった後、6 月 24 日に水深 1.5m でも FSI が 1.95 以上となり、6 月 29 日に楠浦湾内で