

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 オ九州北部海域

長崎県総合水産試験場
山砥稔文, 宮崎隆徳, 鎌田正幸
佐賀県玄海水産振興センター
松本日向乃, 豊福太樹, 梅田智樹
九州大学総合理工学研究所
山口創一
水産研究・教育機構 水産資源研究所
青木一弘

1 全体計画

(1) 目的

近年、伊万里湾を中心とする九州北部海域において *Karenia mikimotoi* 等鞭毛藻による有害赤潮が発生し、魚介類がへい死する漁業被害が発生していることから、各機関が連携して広域共同モニタリングを実施することにより、有害赤潮の監視体制の強化、発生機構の解明と、発生予測技術の開発並びに被害防止技術の開発を行い、有害赤潮等による漁業被害の防止と健全な海洋生態系の保全に資することを目的とした。

2 令和6年度計画および結果

(1) 目的

全体計画と同じ。

(2) 方法

1) 長崎県海域における赤潮モニタリング（長崎県総合水産試験場）

【定点調査】

① 調査定点

伊万里湾内8定点。(Stn. 1-8: 図1と表1参照)

② 調査回数

6月下旬-8月下旬に、原則1回/週。

③ 調査項目

- ・多項目水質計による鉛直観測（水温、塩分、クロロフィル蛍光値）
- ・プランクトン検鏡（0, 5, 10mおよびクロロフィル蛍光極大層）
- ・栄養塩分析（0, 5, 10m層のNO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P）

【定点連続観測】

図1および表1のStn. 15の養殖筏において実施した。

① テレメーター（水温、クロロフィル蛍光値、濁度）によるリアルタイムモニタリング

- ・設置期間：6月-8月（3ヶ月間）
 - ・設置水深：1.5m層, 5m層
- 30分毎にデータを取得し、関係機関に専用WEBサイト上で自動送信。

2) 佐賀県海域における赤潮モニタリング（佐賀県玄海水産振興センター）

① 調査定点

伊万里湾内6定点程度（Stn. 9-14: 図1と表1参照）

② 調査回数

6-8月：週1回程度

③ 調査項目

（水質）水温、塩分、DO, pH, 栄養塩（NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P）
クロロフィル蛍光値
（プランクトン）有害赤潮プランクトンの同定・計数

④ 調査層

0-0.5, 5, (10), B-1 m（水温、塩分、クロロフィル蛍光値、DOについては多項目水質計による鉛直測定を実施）

3) 数値モデル等を用いた解析による発生シナリオの検証（九州大学総合理工学研究院）

本研究では、九州北部海域における流動場が有害赤潮の輸送に寄与した可能性について検証するために数値シミュレーションの再解析値を用いる。特に、2022年に伊万里湾内で発生

した大規模赤潮の輸送過程について着目した。高解像度沿岸海洋モデル FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model, Chen et al., 2006) をベースとして、外海条件に海況予測モデル Dreams D (Hirose et al., 2005) および Matsumoto et al. (2000) , 気象条件に気象庁 MSM/GPV と解析雨量, 淡水流入量評価に降雨流出氾濫モデル RRI (Rainfall Runoff Inundation model, 佐山ら, 2013) による計算値を取りこんだ高解像度沿岸海洋モデル (通称 UCHI ; Unstructured Coastal model with High-resolution Information) を利用している。図 2 に FVCOM および RRI モデルを適用した計算対象領域を示す。海域は伊万里湾を含む外海まで領域を拡張し、河川については伊万里湾集水域に位置する 14 河川を計算に導入している。初期条件は、流れは静穏、水温・塩分は長崎県総合水産試験場および長崎県北水産普及指導センターが行った 1995 年から 2015 年までの現地観測の平均値を用いた。計算期間は 2022 年 1–9 月までとし、特に 8 月に着目して解析を行った。本モデルによって同期間の流動場や水温・塩分のスカラー場に関する良好な再現性を確認した。計算された仮想海域に *K. mikimotoi* に模した仮想粒子を投入することで赤潮の動態を解析した。拡散過程はランダムウォーク手法で考慮し、能動的日周鉛直移動は 2022 年に行った現地観測データをもとに設定した。また、生物的増殖・死滅による *K. mikimotoi* の生物量の時間変化を粒子に導入するために、Gentien et al. (2007) を基に式 (1) の

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \mu(T, S) \cdot F(I) \cdot B - K \cdot \gamma \cdot B^2 \quad (1)$$

ように定式化した。左辺は細胞数単位で表した生物量 ($B[\text{cells/ml}]$) の時間変化を表し、右辺第一項は生物的増殖、第二項は細胞同士の衝突による自己損失 (Autotoxin: Gentien et al., 2007) を表している。 $\mu(T, S)$ は水温 (T) と塩分 (S) の関数で評価した成長速度 (山砥ら, 2006b), $F(I)$ はミカエリス・メンテン型で表した光制限関数 (光合成有効波長放射強度 PAR の半飽和定数 $52.6 \mu\text{mol/m}^2/\text{sec}$) (山口ら, 1989) , K はスケーリングパラメータ (0.5×10^{-7}) , $\gamma (\text{s}^{-1})$ はせん断速度で $\gamma = (\varepsilon/7.5\nu)^{1/2}$ である (ε : エネルギー散逸率, ν : 動粘性係数) 。*K. mikimotoi* の増殖は栄養塩の制限を受けるが、伊万里湾東部 (粒子の初期投入海域, 図 2) の海底近傍には十分量の栄養塩が存在するため、日周鉛直移動を行う同種への栄養塩制限は強くないと考えて導入していない。初期投入海域は初期発生域と考えられている福島東部海域 (図 3) に設定した。2022 年も同海域で最初に細胞密度の上昇が見られた。投入のタイミングは大規模な赤潮が確認された 2022 年 8 月 17 日 0 時で、海底直上に設置した。増殖により初期細胞数 (10 cells/粒子) の 2 倍に達した場合は分裂 (粒子が 1 増加) するようにコード化した。

4) 伊万里湾 *K. mikimotoi* 赤潮の中長期予察指標の探索・発生機構の解明 (水産研究・教育機構)

Aoki et al. (2020) によって、春季東部海域の全窒素濃度と M_2 潮汐振幅および春季済州一仮屋の水位差を用いた直線判別分析による伊万里湾における *K. mikimotoi* 赤潮の予察法が提案された。また、その後の解析により、5–6 月の伊万里湾東部海域塩分が指標に在り得ることが示された (豊福ら 2024) が、クロロフィル蛍光値には、小規模以上発生年 (最大細胞数密度 100 cells/mL 以上, 発生期間 15 日以上) とその他の年で有意な差が見つかっておらず、塩分が *K. mikimotoi* の増殖・赤潮化にどう寄与したか不明である。東部海域においては、植物プランクトンの種別個体数密度データは蓄積されていないが、珪藻類として計数されたデータは十年程度蓄積されたことから、小規模以上発生年とその他の年の差を Mann-Whitney の u 検定を用いて解析した。

Aoki et al. (2020) や遠山ら (2023) では、春季済州一仮屋の水位差や五島沖水温が伊万里湾の *K. mikimotoi* 赤潮発生に寄与していると示されている一方で、豊福ら (2024) では、湾内塩分も寄与すると示されているが、外洋環境と内湾環境の関係性は不明である。よって、海況予測実験結果 (DREAMS-D) および気象再解析値 (MSM/GPV) を用いて、外洋域の塩分環境と赤潮発生の関係性を検討するとともに、粒子逆追跡手法を用いて、湾内水の起源について検討を行った。各年 6 月 1–30 日に湾内 0, 10, 20, 30, 40 m に粒子を配置し、1 ヶ月逆追跡を行った。

(3) 結果および考察

1) 植物プランクトンの出現状況

令和6年度調査期間中の伊万里湾における赤潮発生件数は1件で、構成種は *Chattonella* spp. であった。なお、本節における有害赤潮の定義については、*Chahtonella* spp.は、山砥ら(2006a)が 50 cells/mL 未満で養殖ブリの斃死を報告していることから、着色が確認されずとも 30 cells/mL 以上とする。*K. mikimotoi* は、山砥・石田(2016)に基づく警戒基準値の 500 cells/mL 以上とする。*Chattonella* spp., *K. mikimotoi* および珪藻類の出現状況を海域別(西部, 中部, 東部)に、臨時調査の結果を含めて図4に示す。また、7月に赤潮を形成した *Chattonella* spp.については、赤潮発生時における細胞密度の水平分布の推移を図5に示す。ここで示す細胞密度(cells/mL)は、各層およびクロロフィル極大層で採水・検鏡された最高値である。

① *Chattonella* spp

Chattonella spp.は西部海域において、7月1日に初認(2 cells/mL)され、7月上旬には増殖(1–13 cells/mL)し、7月11日には細胞密度が 30 cells/mL を超え、赤潮を形成(最高、95 cells/mL)した。中部および東部海域でも7月上中旬に、細胞密度の増加(4–49 cells/mL)が確認されたが、細胞密度は7月16日以降、湾全域で 10 cells/mL 未満に減少した。*Chattonella* spp.は西部, 中部, 東部の順に出現し、西部海域での出現が主体であった。西部海域の星鹿地区では養殖マグロ等に斃死被害が発生した。

② *K. mikimotoi*

K. mikimotoi は東部海域において、5月13日に初認(2 cells/mL)された。*Chattonella* spp.と同様、7月上中旬に全域で増殖(≥ 10 cells/mL)し、7月8日の中部海域で、最高細胞密度(62 cells/mL)を記録した後、7月下旬以降、低密度(≤ 3 cells/mL)で推移した。*K. mikimotoi* は東部, 中部, 西部の順に出現する傾向がみられた。赤潮の発生は確認されなかった。塩分 0.5 m層は 24.8–33.8, 10 m層は 31.4–34.1 の範囲で推移した。

③ 珪藻類

珪藻類は *K. mikimotoi* と *Chattonella* spp.の増殖が全域で確認された7月上旬に、全域で低密度化(<2,000 cells/mL)していた。

2) 水質(水温, 塩分, DO,)

Stn. 1, 7, 10および14における令和6年6月3日–8月27日の0.5 mおよび10 mの水温, 塩分, DO, DINおよびPO₄-Pの推移を図6–9に示す。

① 水温 0.5 m層は 22.0–32.4 °C, 10 m層は 18.9–29.1 °Cの範囲で推移した。

② 塩分 0.5 m層は 24.8–33.8, 10 m層は 31.4–34.1 の範囲で推移した。

③ DO 0.5 m層は 96–128%, 10 m層は 63–118%の範囲で推移した。

④ DIN 0.5 m層は 0.00–21.26 μ mol/L, 10 m層は 0.00–4.39 μ mol/L の範囲で推移した。

⑤ PO₄-P 0.5 m層は 0.00–0.66 μ mol/L, 10 m層は 0.00–0.43 μ mol/L の範囲で推移した。

Stn. 15における令和6年6月26日–8月31日の1.5 mおよび5 mの水温の連続観測結果(日平均値の推移)を図10に示す。

⑥ 水温は、1.5 m層では 23.0–30.9 °C, 5 m層では 22.2–30.1 °Cの範囲で推移した。

3) 気象

令和6年6–9月の伊万里の平均気温, 降水量および日照時間の旬別の推移を図11に示す。気温は、20.5–29.8 °C(平年値 21.0–27.9 °C)で推移し、6月中旬, 7–8月は平年値を1 °C以上上回った。降水量は、12.5–196.5 mm(平年値 54.9–192.7 mm)で推移し、6月は月平年値を上回った。旬別日照時間は、8.6–109.9 時間(平年値 26.9–77.0 時間)で推移し、6–9月は月平年値を上回った。

令和6年6–9月の松浦での風速ベクトルの推移を図12に示す。期間を通して南風の頻度が多かった。6月下旬–8月初旬は南風が連吹したが、7月中旬に一時的に北風に転じた。

4) *Chattonella* spp.赤潮と環境要因の関係

本種の本湾西部での星鹿地区における出現状況を図13に示す。7月1日に初認された本種は、7月上旬に増加し、7月11日には 30 cells/mL を超え、赤潮を形成した。赤潮が継続して確認された7月12日には防除剤散布が実施された。細胞密度は7月16日以降には減少、8月9日に終息した。高密度分布(≥ 10 細胞/mL)は、7月10–12日に、水深 0.5–15 mで確認された。

本種出現時の流動（25 時間平均）を図 14 に示す。流速は表中層とも総じて 0.05 m/s 未満であった。1 m 層では湾外への流れが認められるものの、7、15 m 層では期間を通じ、概ね時計回りの渦がみられたことから、本地区の表中層は滞留傾向にあったと考えられる。

本種発生量と比増殖速度に及ぼす水温、塩分の関係を図 15 示す。水温、塩分から見積もった本種の比増殖速度は初認時には 0.5 day⁻¹であったが、高密度化に伴い 0.6–0.7 day⁻¹と高くなり、赤潮形成時は 0.7 day⁻¹を上回った。

6–7 月の気象(松浦)および Stn. 1（城山下）の栄養塩の推移を図 16 に示す。本種出現前（6 月下旬）と出現時（7 月上旬中）に、まとまった降水による栄養塩の供給があり、中村（1987）の本種半飽和定数（DIN : 1.0, PO₄-P : 0.11 μmol/L）を上回るかあるいは同程度で推移した。本種増殖前の 7 月上旬に、4 時間を超える日照は 5 日間であった。これらに、前述の 7 月上旬に珪藻類が低密度で推移したことを加味すると、7 月前半の本地区は本種の増殖に適した環境条件にあったといえる。

本地区における本種の鉛直分布の推移を図 17 に、7 月の風速ベクトル（松浦）および潮位（佐賀県仮屋）の推移を図 18 に示す。7 月 10 日に、本種は広域の表中層に分布（4–13 cells/mL）していた。7 月 11–12 日午前の北風と上げ潮で本種は湾奥（御厨）で高密度化し、7 月 12 午後には下げ潮と南風の相乗作用により、御厨、城山、青島、魚固島へ移流した可能性がある。7 月 12 日に、養殖場③–⑥では、魚類警戒基準（10 cells/mL）を超え、マグロ養殖場④、⑥では、マグロ警戒基準（1 cell/mL）を大幅に超えて分布したことが被害に繋がったと考えられる。

5) *K. mikimotoi* 赤潮と環境要因との関係

今年度、*K. mikimotoi* 赤潮は昨年度と同様に発生しなかった（図 4）。昨年度の赤潮非発生要因の仮説として、6–7 月の降雨にともなう密度流と、同時期に卓越した南風による吹送流が東部の海水交換を活性化させ、本種の初期増殖個体を拡散、低密度化させたとしている（豊福ら 2024）。そこで今年度も同様に、これら気象海況に着目した解析を行った。

今年度は 6 月に伊万里で合計 367 mm の降雨があり（図 11）、それに伴い 6 月 20 日から東部一帯で表層塩分が低下し密度成層が形成された（図 19 (a, b)）。7 月に入ってから合計 318 mm の断続的な降雨があったことから、成層状態は 8 月上旬まで継続した（図 19 (b)）。降雨にともなう密度成層はエスチュアリー循環と呼ばれる密度流を駆動させ、躍層以浅の表層水は沖合へ、以深は反対の湾奥に向かう流れが生じる（藤原 2007）。そのため、成層化した 6 月中旬–8 月上旬は密度流が強化されていたと考えられる。また、6 月下旬–8 月上旬は南風が卓越しており（図 12）、この吹送流によって表層水の北向きの流れがさらに強化されたと考えられる。実際、7 月に東部 Stn. 12 で観測した表層流速は強い北向きの流れが生じており（図 20）、これが東部 *K. mikimotoi* を低密度（0–18 cells/mL）で維持させた要因と考えられる。

また密度成層と南風が弱まった 8 月中旬以降も本種は増加しなかった。7 月中旬以降の東部珪藻類は 1,420–8,000 cells/mL と高く（図 4）、*K. mikimotoi* と競合関係にあったと考えられる。珪藻類が高い細胞密度を維持した理由のひとつとして、8 月の東部 DIN が 0.1–5.0 μmol/L と一定量あったことが影響したと考えられる。

以上の結果より、6–7 月の降雨にともなう密度流と、同時期に卓越した南風による吹送流、8 月における競合種の出現が、今年度の *K. mikimotoi* 赤潮非発生に寄与したと考えている。そして今年度の気象海況は、赤潮非発生となった昨年度と酷似するものであった。

6) 数値モデル等を用いた解析による発生シナリオの検証（九州大学総合理工学研究院）

図 21 に 8 月 17 日 0 時投入後の 24 時間ごとの細胞数分布を示す。仮想粒子の有する細胞数を FVCOM の計算格子ごとに積算した値である。福島東部から北部へ、その後、鷹島南部へと輸送されている様子が分かる。また福島南部へも輸送されていることが確認された。鷹島南部ではパッチ状の高濃度域が形成され、現地観測においても同様の局所的な着色域が確認されている（8 月 18 日長崎県総合水産試験場）。そこでパッチ状の高濃度域の形成要因について検討した結果、福島東部から北部に輸送された高細胞水塊の一部が間欠的に剥離し、西方へ輸送されていることが分かった（図 22 に 8 月 20 日に見られた剥離の様子）。図 23a には 8

月 20 日 13 時における海面下 10 m における流れの水平分布, 同図 b には TF 断面 (同図 a の赤点線) に直行する流れの流速分布 (正值が湾内方向), 同図 c には福島北部海域 (同図 a の赤いハッチ領域) における粒子の鉛直分布の時間変動を示す。日比水道 (図 23b) をぬけて TF ライン南部から湾内へと流入する強い流れが確認できる。同図 b より, この流れは亜表層から中層に存在した。これは干潮から満潮に向かう上げ潮に伴う潮流と河川出水に伴うエスチュアリー循環が重なった流れであった。仮想粒子は日周鉛直移動によって日中にはこの層まで浮上している。こうしたことから, 福島東部から北部へ輸送された高細胞水塊が日中に浮上し, 湾内方向の流れに取り込まれることでパッチ状に鷹島南部へと輸送されたと考えられる。

7) 伊万里湾 *K. mikimotoi* 赤潮の中長期予察指標の探索・発生機構の解明 (水産研究・教育機構)

4-6 月における東部海域の各測点・各基準層水深における珪藻類細胞密度が, 小規模以上発生年 (1000 cell/mL 以上, 15 日以上) とその他の年で異なるか検定した結果 (危険率 p 値) を図 24 に示す。5 月で p 値が 0.05 以下となったのは, 測点 10 の 10 m 深のみであった。6 月では, 測点 12 より湾奥 (測点 12-14) で, 低 p 値がみられ, 湾奥 (測点 14) の中層 (2.5 m 深および 10 m 深) で, $p < 0.05$ となった。小規模以上の赤潮が非発生となる年は珪藻類の細胞密度が, 測点 10 の 5 月 10 m 深で低い傾向, 測点 14 の 6 月中層 (2.5 m 深および 10 m 深) で高い傾向があった (図 25)。後者は, *K. mikimotoi* の競合種である珪藻が多いことで, *K. mikimotoi* が卓越できなかったと解釈できるが, 前者は解釈が難しい。

粒子 (6 月の湾内水塊) の 1 ヶ月の逆追跡を行った結果, 粒子の拡がりに年による差異はあるが, 粒子の殆どは, 五島沖や五島灘に分布し, 対馬暖流域に分布した粒子は僅かであった (図 26)。このことから, 対馬暖流水が直接伊万里湾に移入するとは考え難いということが考えられる。赤潮非発生年において, 5 月および 6 月に海面塩分偏差が負の分布が目立った (図 27) が, 九州沿岸域と対馬暖流域には, 別の負偏差のコアがみられるとともに, 降水量の正偏差が 5-6 月では長江河口域から九州まで広く分布していた (図 28)。以上のことから, 湾外の赤潮指標は, 湾内環境 (塩分や珪藻類細胞密度) と同期した変動を示すが, 直接寄与していない可能性も考えられる。

8) 行動計画

佐賀県では, 赤潮情報を迅速に漁業者個人へ配信することを目的に, 公式ラインを作成しており, 漁業者個人への登録を促している。登録者数は令和 7 年 1 月時点で 219 名となり, 伊万里湾の魚類養殖業者はすべて登録が完了している。今後も関係機関と連携し, 迅速な情報配信により被害の軽減を図る。長崎県では, モニタリング等で得られた情報をホームページ (長崎県漁場テレメーターシステム水質情報) やラインで公表し, 漁業被害軽減対策を効率的に実施するための赤潮の発生状況や FSI, クロロフィル等の水質, 気象, 海況に加え, 現状が赤潮種の増殖にとって好適な条件かどうかを提示した。

引用文献

- Aoki K, Yamatogi T, Hirae S, Yamamoto K, Yoshida K, Muta K. Increased occurrence of red-tides of fish-killing dinoflagellate *Karenia mikimotoi* and related environmental conditions in Imari Bay, Japan. *Regional Studies in Marine Science* 2020; **39**: 101470.
- 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡 奨, 牛山朋来, 田中茂信. 大規模洪水氾濫の時空間資源分析に関する研究. 水工学論文集 2013; **57**: I_463-I_468.
- 中村康男 1987. 赤潮鞭毛藻 *Chattonella antiqua* の硝酸塩, アンモニウム塩, リン酸塩摂取に及ぼす増殖条件の影響. 国立公害研究所研究報告; **110**: 116-126.
- Chen C, Beardsley RC, Cowles G. An unstructured-grid finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanography* 2006; **19**: 78-89.
- 遠山陽香, 戸澤隆, 山砥稔文, 津城啓子, 川名拓里, 梅田智樹, 山口創一, 青木一弘. 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 オ. 九州北部海域. 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; 149-162.
- 豊福太樹, 松本日向乃, 梅田智樹, 鎌田正幸, 山名涼太, 山砥稔文, 山口創一, 青木一弘. 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 オ. 九州北部海域. 令和 5 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. 2024; 143-156.
- Gentien P, Lunven M, Lazure P, Youenou A, Crassous MP. Motility and autotoxicity in *Karenia mikimotoi* (Dinophyceae). *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 2007; **362**: 1937-1946.
- Hirose N, Fukumori I, Kim CH, Yoon JH. Numerical simulation and satellite altimeter data assimilation of the Japan Sea circulation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 2005; **52**: 1443-1463.
- 藤原建紀. 河口域および内湾域におけるエスチュアリー循環流. 沿岸海洋研究 2007; **44**: 95-106.
- Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography* 2000; **56**: 567-581
- 山口峰生, 本城凡夫. 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温, 塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌 1989; **55(11)**: 2029-203
- 山砥稔文, 坂口昌生, 岩滝光義, 松岡数充. 長崎県薄香湾における有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella* 3 種の出現状況と増殖特性. 藻類 2006a; **54**: 157-164.
- 山砥稔文, 坂口昌生, 岩滝光義, 松岡数充. 諫早湾に出現する有害赤潮鞭毛藻 4 種の増殖に及ぼす水温, 塩分の影響. 日本水産学会誌 2006b; **72(2)**: 160-168.
- 山砥稔文, 石田直也. 島嶼海域での低密度赤潮による新たな漁業被害の発生. 「有害有毒プランクトンの科学」(今井一郎・山口峰生・松岡数充編) 恒星社厚生閣, 東京. 2016; 131-138.

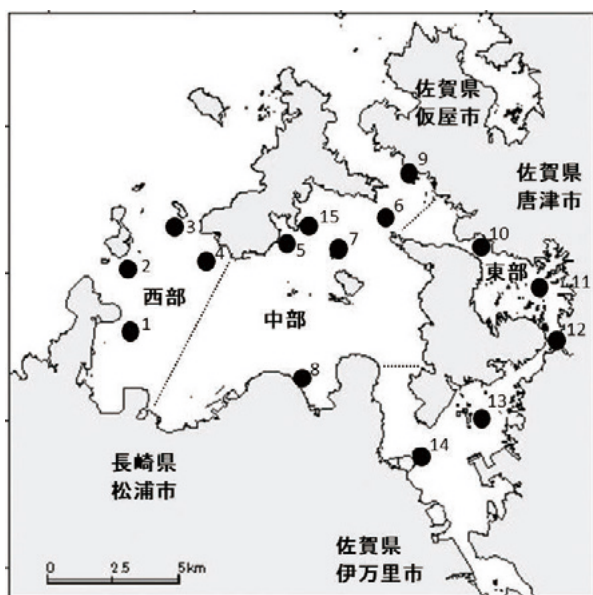


表1 伊万里湾における調査定点座標

定点番号	緯度経度	
	北緯	東経
1 (城山下)	33°22' 56.64"	129°41' 22.92"
2 (青島南)	33°24' 13.68"	129°41' 18.24"
3 (魚固島南)	33°25' 04.08"	129°42' 32.04"
4 (船唐津沖)	33°24' 18.36"	129°43' 15.24"
5 (浦下沖)	33°24' 42.12"	129°45' 15.48"
6 (初崎沖)	33°25' 13.80"	129°47' 35.52"
7 (山島東)	33°24' 31.32"	129°46' 27.48"
8 (今福沖)	33°21' 51.12"	129°45' 40.32"
9 (晴気)	33°26' 03.00"	129°48' 16.80"
10 (阿漕)	33°24' 34.80"	129°49' 55.80"
11 (大浦浜)	33°23' 47.40"	129°51' 24.60"
12 (波多津)	33°22' 38.40"	129°51' 49.20"
13 (福島南)	33°21' 03.60"	129°50' 00.60"
14 (伊万里港入口)	33°20' 21.60"	129°48' 26.40"
15 (南ヶ崎)	33°25' 02.00"	129°45' 39.00"

図1 伊万里湾における調査定点 (Stn. 15は連続観測定点)

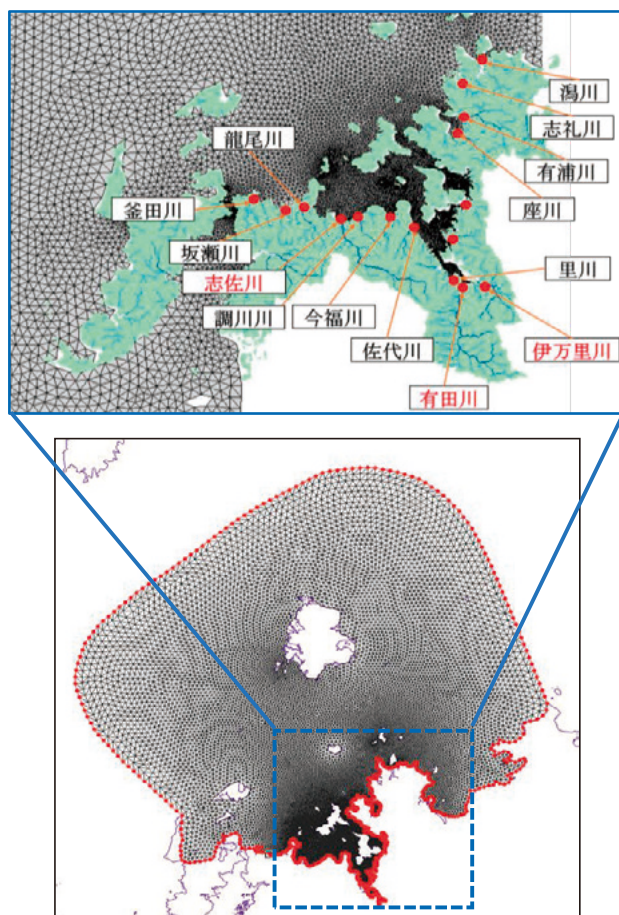


図2 FVCOM および RRI モデルの計算対象領域
(下: FVCOM 上: RRI モデル)

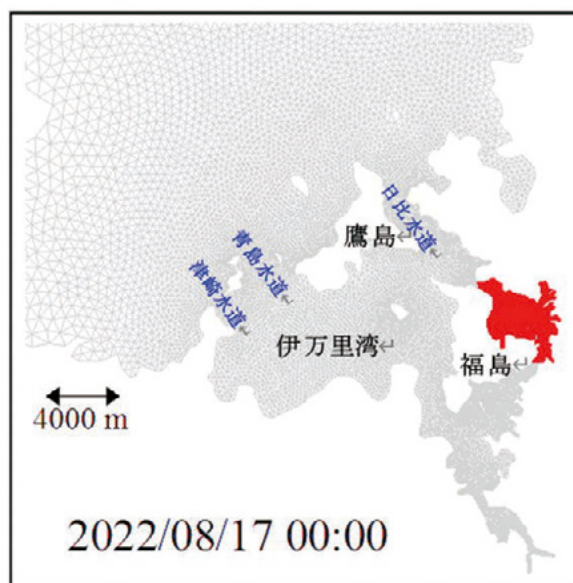


図3 仮想粒子の初期設置海域

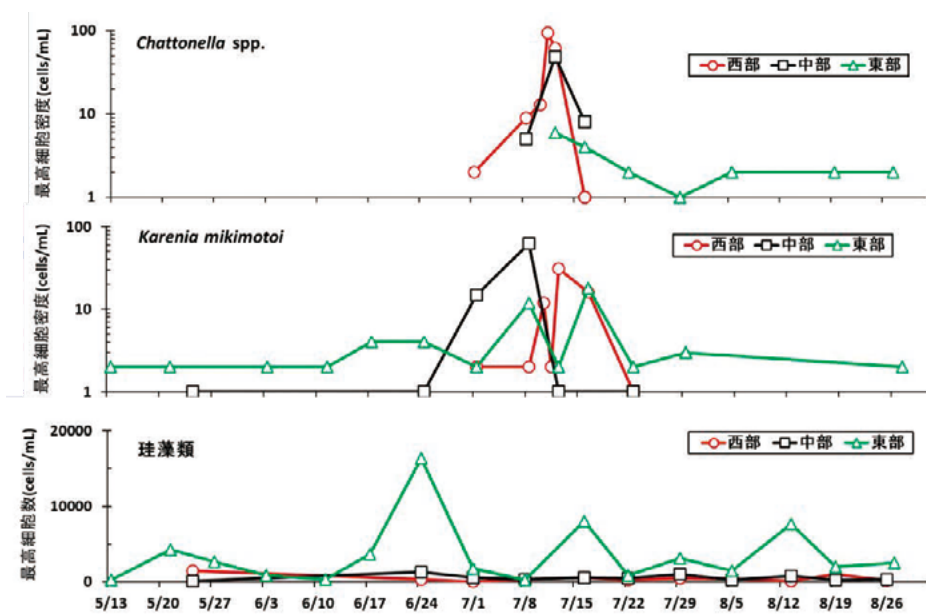


図4 海域別 *K. mikimotoi*, *Chattonella* spp.および珧藻類の最高細胞密度の推移

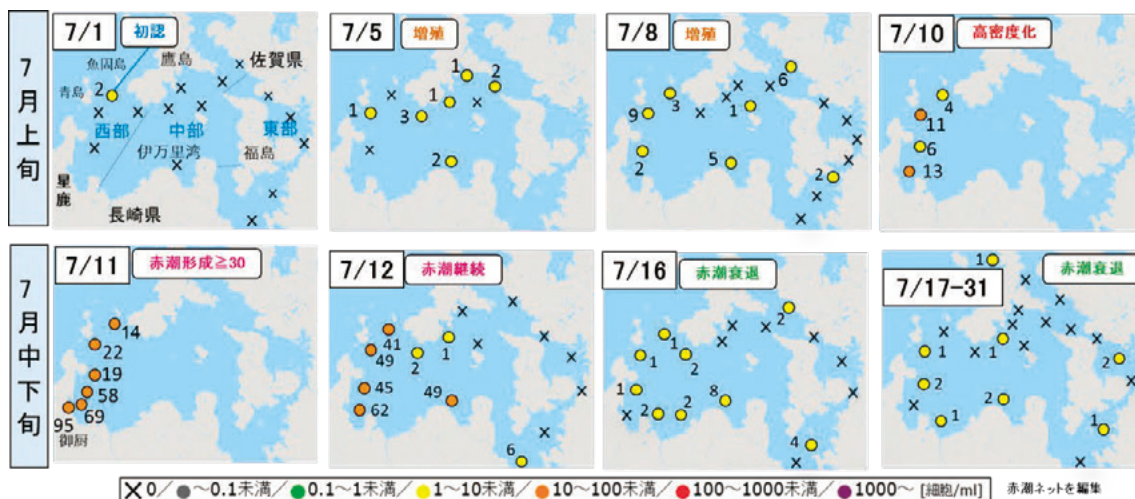


図5 *Chattonella* spp.の水平分布 (複数層採水による最高細胞密度)

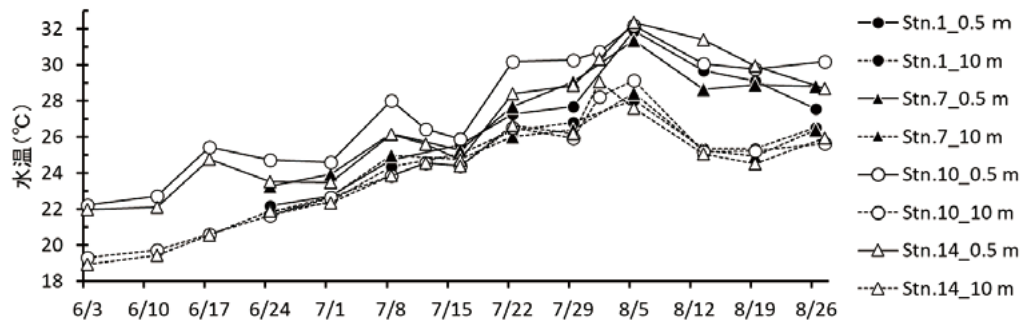


図6 Stn. 1, 7, 10, 14における水温の推移

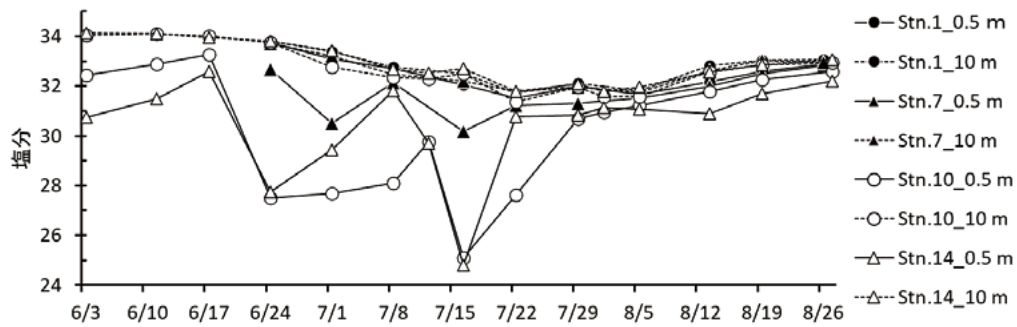


図7 Stn. 1, 7, 10, 14における塩分の推移

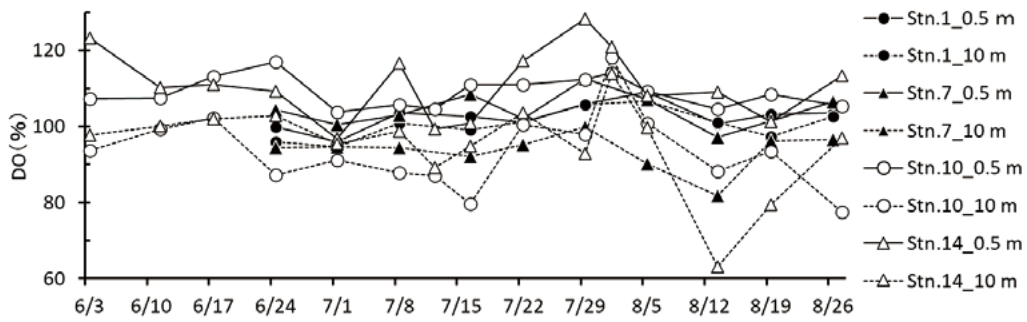


図8 Stn. 1, 7, 10, 14におけるDO分の推移

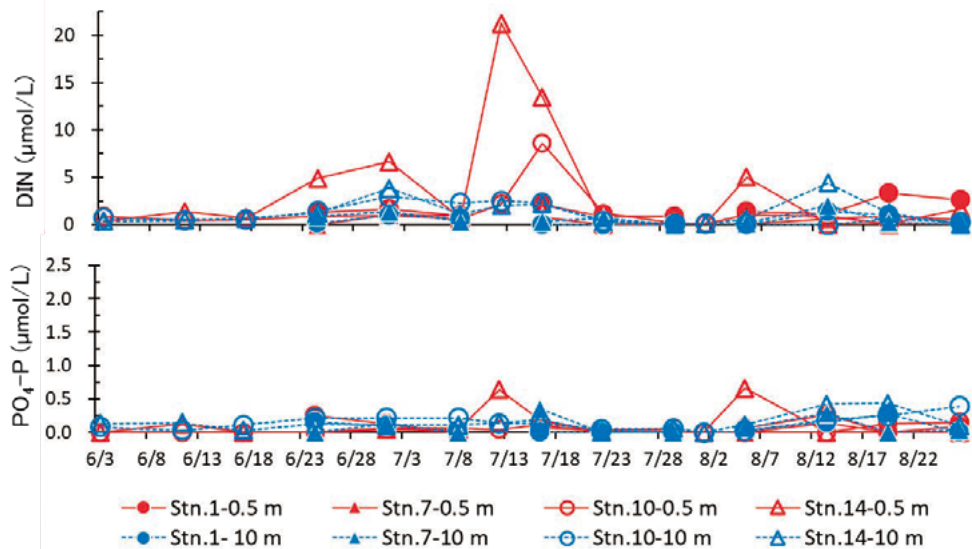


図9 Stn. 1, 7, 10, 14におけるDINおよびPO₄-Pの推移差

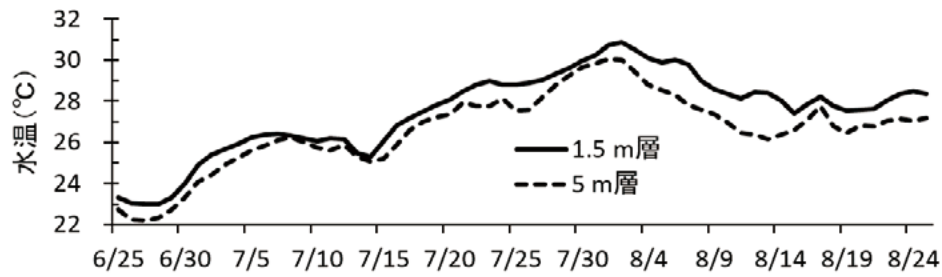


図 10 Stn. 15 における水温の推移

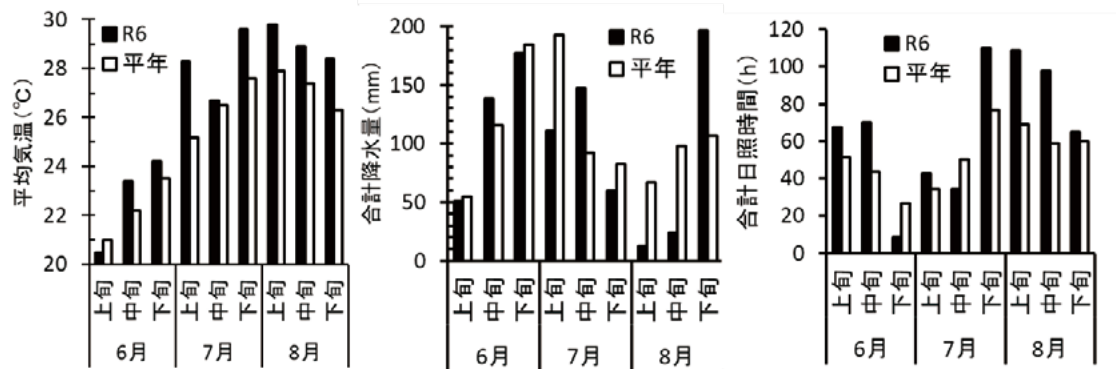


図 11 伊万里における旬別平均気温、降水量、日照時間の推移

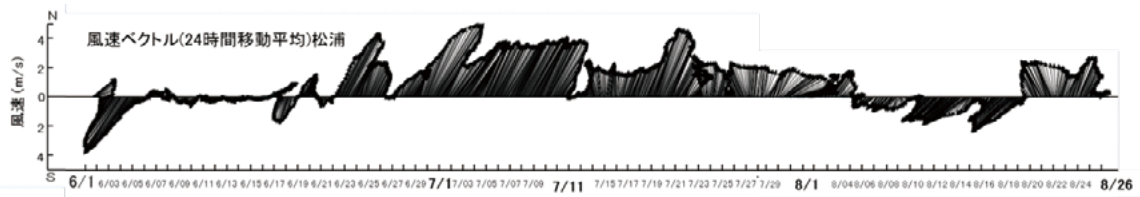


図 12 松浦における風速ベクトルの推移

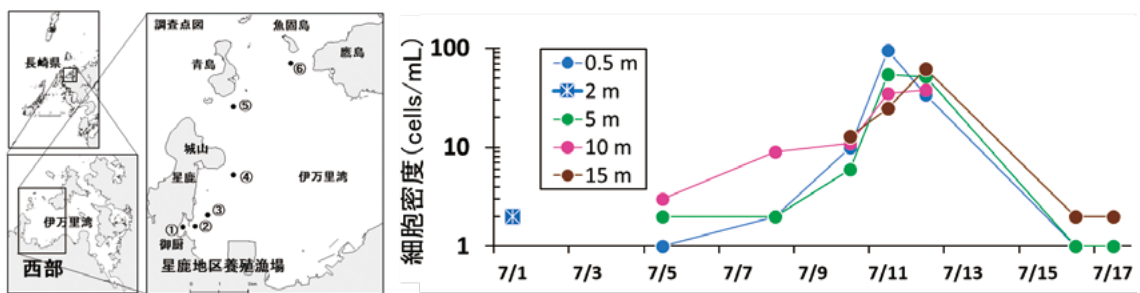


図 13 星鹿地区における詳細調査点と *Chattonella* spp. の層別細胞密度の推移

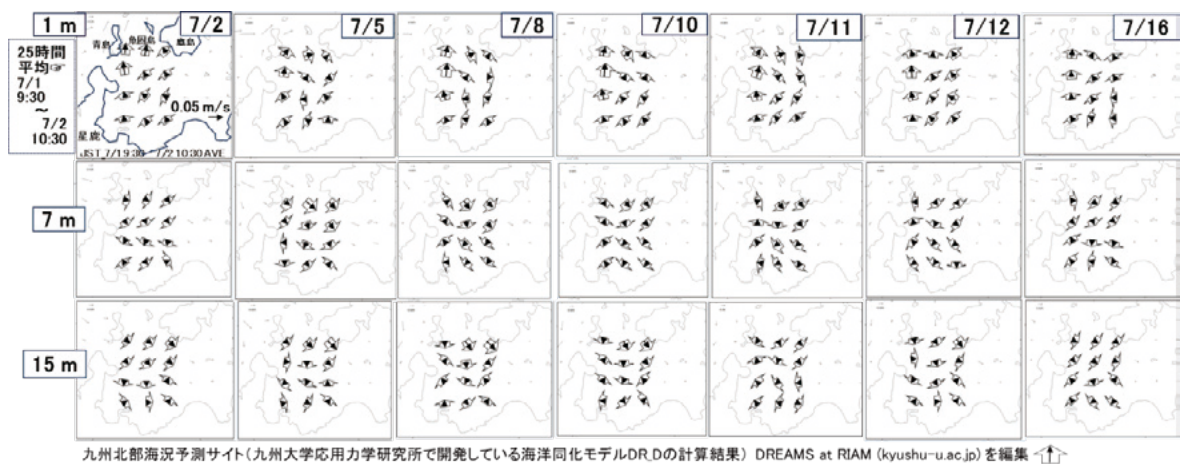


図 14 星鹿地区における層別流動の推移

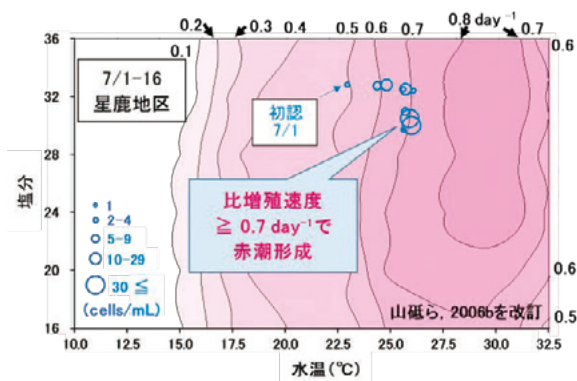


図 15 *Chattonella* spp.の発生量 (cells/mL) と比増殖速度 (day⁻¹) に及ぼす水温, 塩分の関係

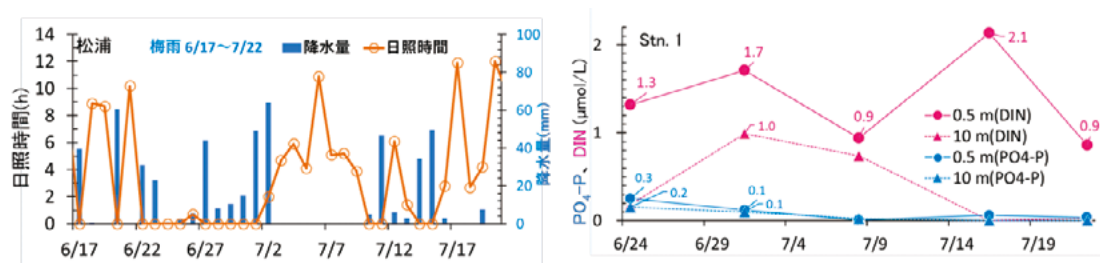


図 16 気象 (松浦) と栄養塩 (Stn. 1) の推移

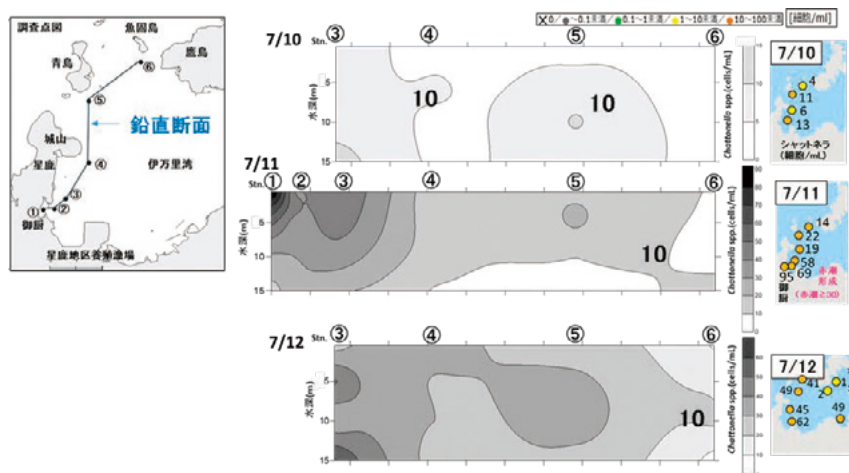


図 17 星鹿地区における *Chattonella* spp.の鉛直分布の推移

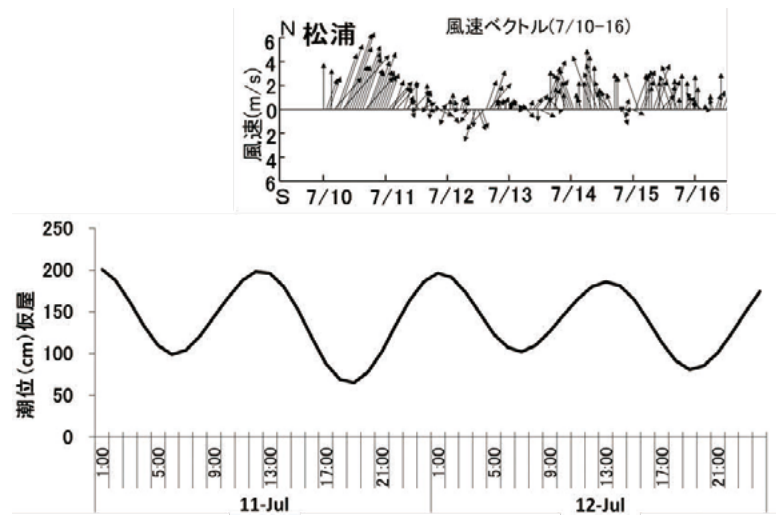


図 18 風速ベクトル（松浦）と潮位（仮屋）の推移

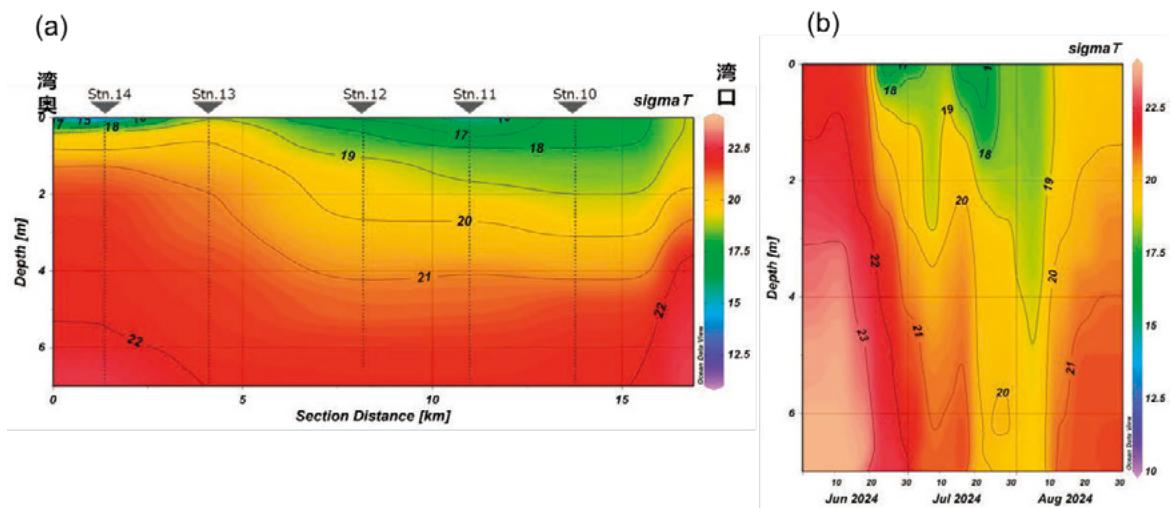


図 19 令和 6 年 7 月 1 日東部の鉛直 σT 分布 (a), Stn.12 の時系列鉛直 σT 断面図 (b)

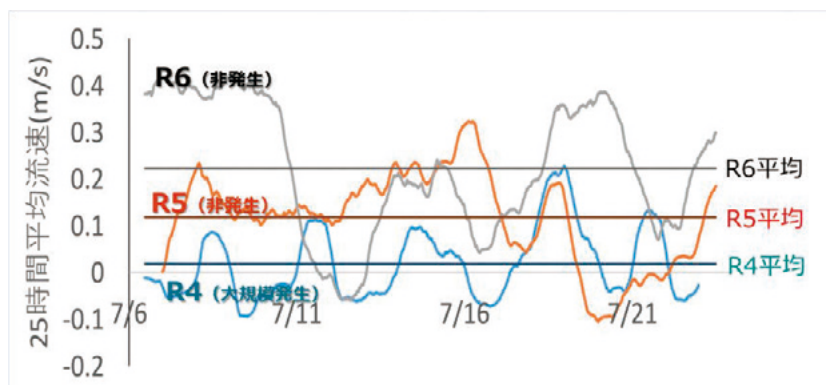


図 20 Stn.12 における海面下 1.0 m の 25 時間移動平均南北流の推移（正値が北向き）

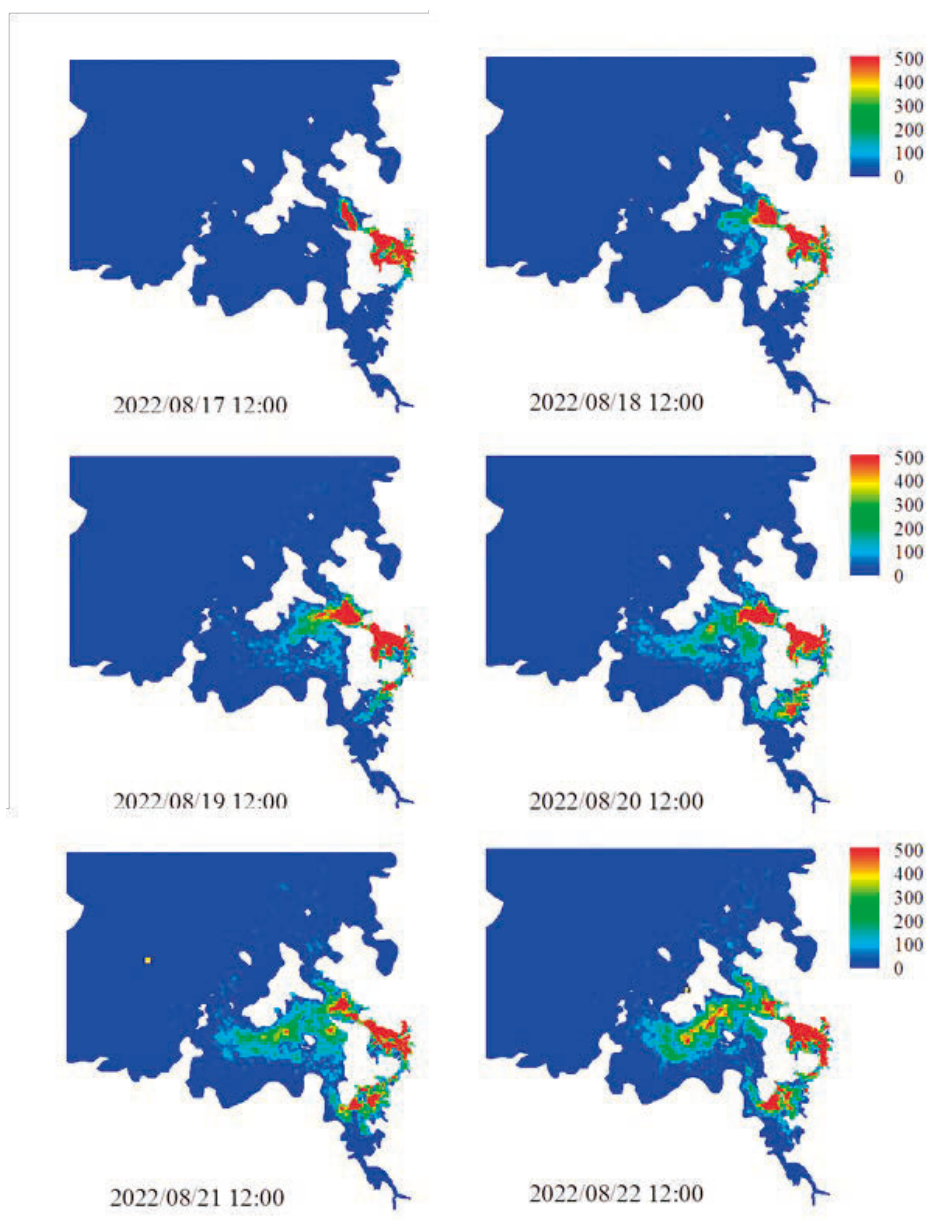


図 21 8月17日0時投入後の24時間毎の細胞数分布

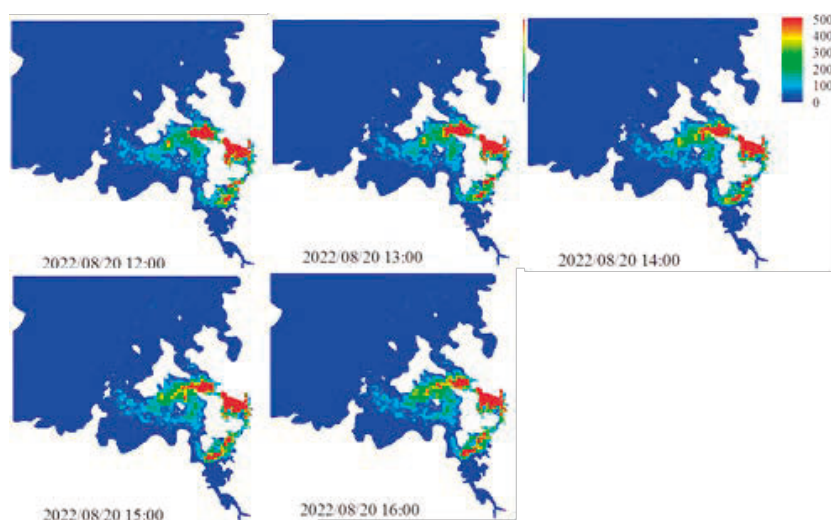


図 22 8月20日の日中における1時間ごとの細胞数分布

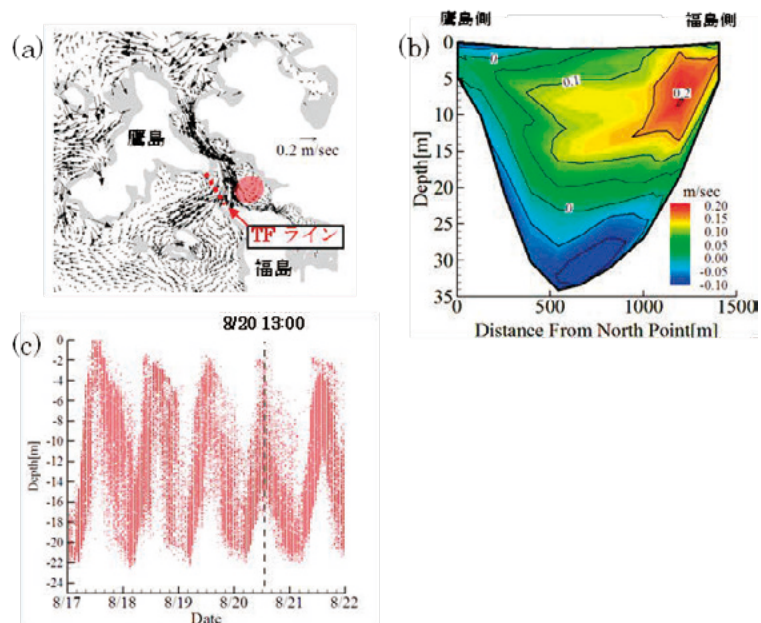


図 23 8 月 20 日 13 時における a) 海面下 10m の流れベクトル (灰色は 10m 以浅), b) TF 断面 (a の赤点線) に直行する流れの鉛直断面図, c) 福島北部 (a の赤ハッチ領域) における粒子の鉛直分布

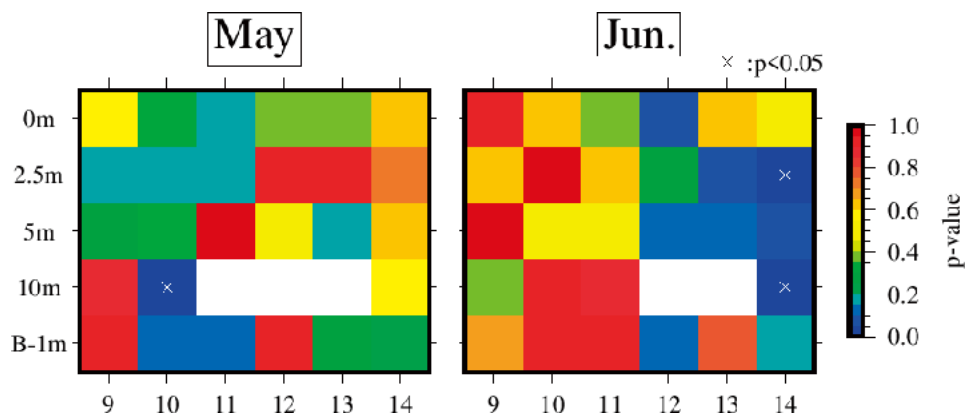


図 24 大・小規模発生年とその他年の珪藻類細胞密度差の危険率 (p)。白× : $p < 0.05$

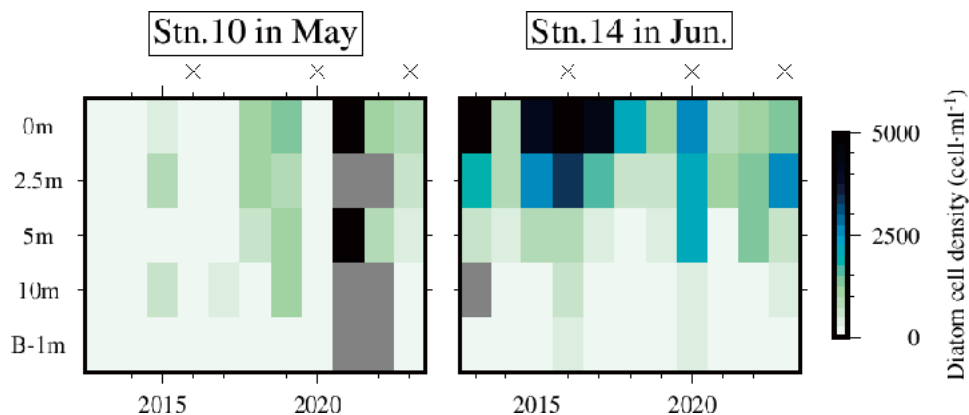


図 25 測点 10 の 5 月および測点 14 の 6 月珪藻類細胞密度。× : 小規模以上の赤潮が非発生

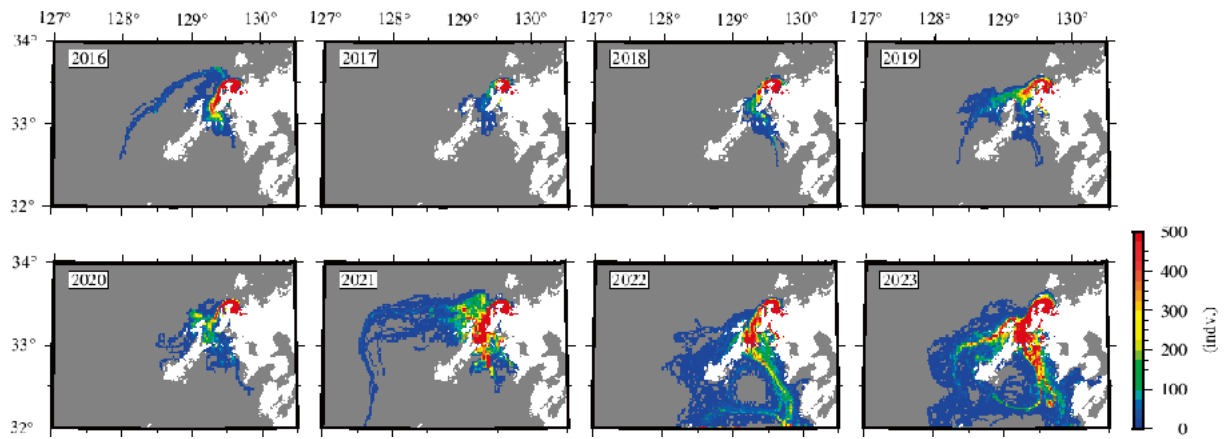


図 26 伊万里湾内に配置した粒子を1カ月逆追跡した結果

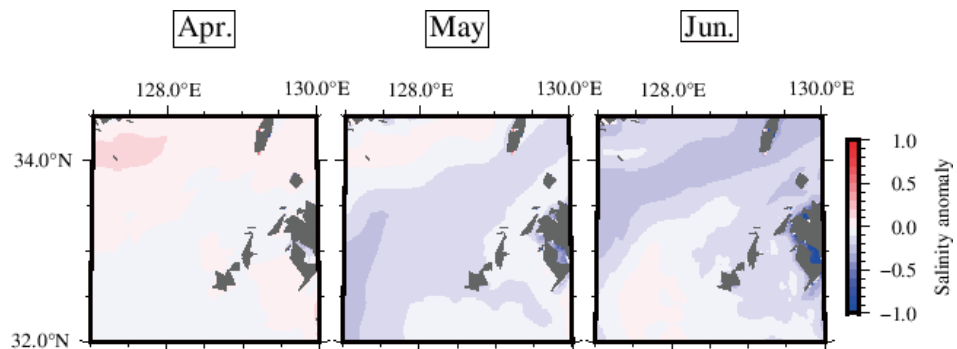


図 27 小規模以上の赤潮日発生年における4-6月 DREAMS-D 海面塩分偏差

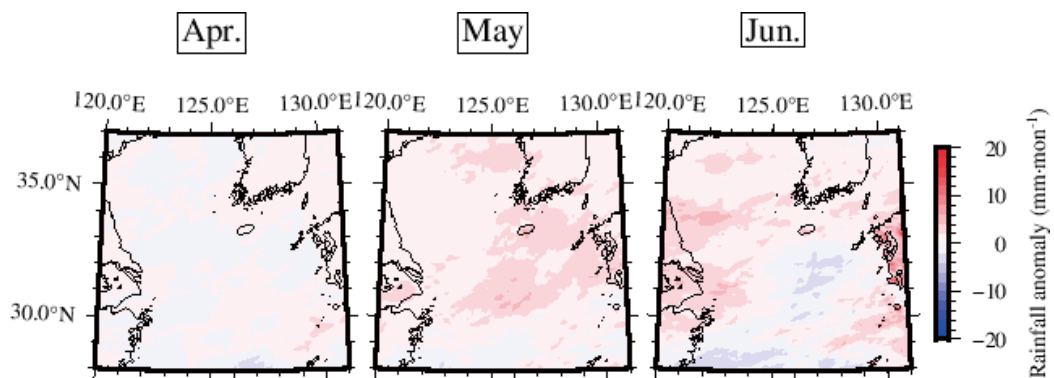


図 28 小規模以上の赤潮非発生年における4-6月 MSM 降水量偏差

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
白石日出夫，古賀まりの，藤井直幹
佐賀県有明水産振興センター
岩永卓也，山田秀樹，中原啓太，野口浩介
長崎県総合水産試験場
鎌田正幸，山砥稔文，宮崎隆徳
熊本県水産研究センター
阿部慎一郎，若田隆太，生嶋 登

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6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）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、2024 年 7 月から 9 月の間に定期観測を実施した（図 1）。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（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 11 回の観測を行った。多項目水質計（JFE アドバンテック株式会社製：AAQ-RINKO および CTD RINKO-Profiler）により、水温、塩分、溶存酸素飽和度（以下 DO）、クロロフィル蛍光及び濁度を 0.1 m 間隔で行った。観測点のうち、3 点（調査点 8, 11, 14）では表層（0.5 m）、5 m、底層（海底上 1 m）の各層から採水し、栄養塩濃度（NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P）の分析と植物プランクトンの細胞密度の計数（表層、5 m）を行った。有害プランクトンの出現や DO（底層）分布状況を速やかにまとめて、観測翌日までに関係漁協等に FAX や e-mail により伝えた。併せて、「赤潮ネット（沿岸海域水質・赤潮観測情報）」や「長崎県漁場テレメータシステム水質情報（<https://telemeter-area.jp/nagasaki/>）」により公開した。

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、有明海奥部海域では底層フロントの位置と貧酸素水塊の潮汐周期変動との関係解明、栄養塩・植物プランクトンと貧酸素水塊との関係解明について解析する。また、熊本県海域では過去の観測データも用いて、河川からの淡水供給と底層における高塩分水の貫入プロセスについて解析する。橘湾においては、中層と底層の密度差と見かけの酸素消費量との関係や中層と底層の密度差の要因について解析し、有害赤潮の防除手法（駆除の試行を含む）の検討を併せて行う。

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 の表層および底層に観測機器を設置し、2024 年 10 月から 2025 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（図 3、表 2）。また、Stn. P6 に設置されている鉛直観測ブイを用いて、2024 年 10 月から 2025 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（図 3、表 2）。予定していた Stn. P1 に設置されている鉛直観測ブイは、機器故障のため鉛直データを取得できなかった（図 3、表 2）。得られた観測データは、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」、<https://ariake-yatsushiro.jp/>）において公表した。

2-2) 定期観測

2024 年 10 月から 2025 年 2 月に、有明海奥部海域に設けた 8 定点（Stn. P1, P6, T13, T2, T3, T4, T5, 6）および中央部海域に設けた 8 定点において観測を実施した（図 3、表 2）。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、中央部沖合の Stn. 1～5 では 10 m 層）から採水し、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）。中央部沖合域の 5 定点（Stn. 1～5）から得られた鉛直観測データからは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」、<https://ariake-yatsushiro.jp/>）において公表した。また、奥部西側域の 8 定点（Stn. 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」、<https://ariake-yatsushiro.jp/>）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は、7 月 1 日から 8 日まで、および 18 日から 23 日まででは、溶存酸素濃度は満潮時に低下、干潮時に上昇という変動を繰り返しながら、断続的に貧酸素状態（溶存酸素濃度 3.0 mg/L 未満）になった（図 4）。9 日から 17 日までには海底にセンサーが埋没したため欠測となった。8 月 1 日から 10 日まで、断続的に貧酸素状態と回復を繰り返しながら上昇した。11 日から 14 日まで、また 16 日から 18 日まで継続的な貧酸素状態となった。19 日以降の底層溶存酸素は一時的な貧酸素状態も観測されたが、基本的に高い値だった。9 月 1 日から 10 日までには高い状態だったが、11 日から低下し、12 日に貧酸素状態になった。貧酸素状態は 15 日まで継続した。16 日以降は、高い状態と貧酸素状態が断続的に観測された。

沖合域の観測点 P6（沖神瀬西）の底層の溶存酸素濃度は、7 月 1 日から 5 日まで断続的に貧酸素状態が観測され、6 日から 22 日まで継続的に貧酸素状態が観測された。特に 19 日から 22 日までには 0.1 mg/L 未満の著しい貧酸素状態となった。8 月 1 日から 19 日まで継続的に貧酸素状態が観測されたが、それ以降は基本的に高い値だった。9 月 2 日から 8 日まで上昇傾向だったが、9 日から下降傾向になり、13 日には貧酸素状態が観測された。14 日から 21 日までには高い状態と貧酸素状態が繰り返して観測された。22 日以降は高い状態だった。

沖合域の観測点 P1（大浦沖）では、7 月 1 日から 6 日まで底層の溶存酸素濃度は高い状態だったが、7 日から断続的に貧酸素状態が観測された。8 月 1 日から 12 日まで継続的に貧酸素状態が観測された。19 日から 21 日には断続的に貧酸素化した。それ以降は高い値だった。9 月 7 日から低下し、18 日から 21 日までには高い状態と貧酸素状態が繰り返して観測された。22 日からは高い状態だった。

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。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。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、P6 と同様に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。しかしながら、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 濃度となることが考えられる（図 5）。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。

T2, T13, P6, P1, B3 における DIN (溶存態無機窒素) の時系列変化を図 6 に示す。観測点 T2, T13 では各層とも 7 月 15 日に最高値を示した。その後は漸減し、T2 は 8 月 4, 19 日に、T13 は 8 月 19, 27 日に DIN がほぼ 0 $\mu\text{mol/L}$ となった後、9 月頃に DIN がやや増加した。観測点 P6, P1 では B-1 m 層を除き、7 月 22 日に急減した後、0~2.5 $\mu\text{mol/L}$ の範囲で推移した。観測点 B3 では、表層、2 m 層は 7 月 15 日に、5 m 層、B-1 m 層は 7 月 27 日に最高値を示した後、全層とも 9 月 5 日まで漸減した。特に表層、2 m 層、5 m 層では 8 月 4 日以降、DIN はほぼ 0 $\mu\text{mol/L}$ を示した。PO₄-P は 0.1~4.4 $\mu\text{mol/L}$ の範囲で推移し、最大値は 7 月 15 日における観測点 T2 の表層、最小値は 9 月 5 日における観測点 B3 の 2 m 層であった。PO₄-P の推移は、概ね DIN と同調していた。SiO₂-Si は 15.5~204.4 $\mu\text{mol/L}$ の範囲で推移し、最大値は 7 月 15 日における観測点 T13 の 2 m 層、最小値は 9 月 5 日における観測点 P1 の表層であった。SiO₂-Si は、7 月 15 日又は 7 月 22 日から 9 月 5 日にかけて、全観測点で漸減傾向を示した。

各定点における *Chattonella* 属の細胞密度の推移を図 7 に示す。*Chattonella* 属は、7 月 9 日の St. P6 と B3 でそれぞれ 60 cells/mL と 20 cells/mL 確認されたが、7 月 15 日、7 月 22 日、7 月 29 日および 8 月 4 日では全地点 0 cells/mL で推移した。8 月 19 日で *Chattonella* 属の増殖がみられ、8 月 27 日の St. T13 で 956 cells/mL と高密度化した。9 月 5 日では全地点で 0~4 cells/mL と減少していた。その他のラフィド藻類は確認されなかった。珪藻類は、0~12,240 cells/mL の範囲で確認され、7 月 29 日の St. T2 および 7 月 22 日の St. P1 でそれぞれ 12,240 cells/mL と 10,536 cells/mL であり、高密度であった。珪藻類が高密度で確認された観測における優占種は、*Skeletonema* 属であった。St. T13, St. P6 と St. B3 の珪藻類の細胞密度は、期間を通し低密度で推移した。渦鞭毛藻類は、0~116 cells/mL の範囲で確認され、比較的低位で推移した。

7 月中旬の河川等からの出水によって表層栄養塩は増加し (図 6)、その後 7 月下旬から 8 月上旬に珪藻類及び渦鞭毛藻類の増殖が見られた。また、7 月中旬から T13 における表層栄養塩は徐々に減少し、7 月下旬には 0 $\mu\text{mol/L}$ となった。さらに、表層 T13 塩分の増加とともに DIN の減少 (図 8 左)、また筑後川流量と T13 表層塩分は負の相関が見られたため (図 8 右)、栄養塩負荷→珪藻類・渦鞭毛藻類の増殖→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。ただし、8 月中旬から下旬には表層 DIN も枯渇していたため、*Chattonella* 属の増殖に必要な DIN の由来は不明である。

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 9 に示す。調査期間中、水温は 23.0°C から 31.5°C で推移した。7 月中旬以降、表層付近から上昇しはじめ、8 月上旬まで底層との鉛直差が大きくなった。

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 10 に示す。調査期間中、塩分は 19.3 から 32.2 で推移した。7 月中旬の降雨の影響により、8 月上旬まで、表層から水深 5 m 層付近まで塩分が低下した。

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 11 に示す。調査期間中、 σ_t は 9.5 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 12 に示す。調査期間中、クロロフィル *a* は 0.0 から 132.3 $\mu\text{g/L}$ で推移した。7 月中旬から 8 月上旬および 9 月上旬に表層から水深 5 m 付近にかけてクロロフィル *a* の増加がみられたが、それぞれ、同時期に確認されたシャットネラ属 (最高細胞数 480 cells/mL) と、スケルトネマ属およびキートセロス属 (最高細胞数スケルトネマ属 1,600 cells/mL, キートセロス属 520 cells/mL) によるものと考えられた。

調査定点のうち代表 3 点 (St. 1, St. 5, St. 9) の DIN の推移を図 13 に示す。調査期間中、DIN は

0.1 μM から 35.3 μM で推移し、7 月中旬および 9 月下旬の降雨後に濃度が上昇する傾向がみられた。調査定点のうち代表 3 点 (St. 1, St. 5, St. 9) の DIP の推移を図 14 に示す。調査期間中、DIP は 0.1 μM から 2.3 μM で推移し、DIN と同様に、7 月中旬および 9 月下旬の降雨後に濃度が上昇する傾向がみられた。調査定点のうち代表 3 点 (St. 1, St. 5, St. 9) の DSi の推移を図 15 に示す。調査期間中、DSi は 0.9 μM から 256.2 μM で推移した。7 月中旬の降雨の影響で、7 月中旬から 8 月上旬にかけて、表層から水深 30 m 付近にかけて高い値を示した。

図 16 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 月中旬を除き、平年より「かなり高い」状態で推移し、8 月 4 日には期間中で最高となる 32.4°C を記録したほか、9 月 19 日には、平年より 7.3°C 高い 31.9°C を記録した。降水量については、7 月中旬、8 月下旬、9 月下旬は「多い」または「かなり多い」状態であったが、それ以外は「少ない」または「かなり少ない」状態で推移した。全天日射量については、降水量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 17 に菊池川、白川、緑川の水位の変動を示す。各河川について、7 月中旬、8 月上旬および 9 月下旬での降雨が確認された後、水位が上昇していることが確認された。

調査定点のうち代表 3 点 (St. 1, St. 5, St. 9) の溶存酸素濃度の推移を図 18 に示す。調査期間中、溶存酸素濃度は 2.0 mg/L から 8.8 mg/L で推移し、7 月下旬に、熊本県北部海域の沖合点 (St. 4, St. 5) および沿岸点 (St. 8, St. 9) の水深 5 m 層付近以下の層で 3.0 mg/L を下回る貧酸素が確認された。また、8 月中旬に熊本県北部海域の沖合点 (St. 5) の 5 m 層付近でも貧酸素が確認されたが、その他の調査時には確認されなかった。

貧酸素水塊の発生要因については、(1) 物理的要因として、表層水温の上昇およ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。(1) については、気温および降雨により大きく影響を受ける。今年度は、例年より高く気温が推移したため、特に、7 月中旬から 8 月上旬にかけて表層と底層との水温の鉛直差が大きくなった。また、7 月中旬の降雨により海水の鉛直密度差が大きい状態が 8 月上旬まで確認された。また、(2) については、赤潮の発生と衰退によりプランクトンの死骸が沈降し、底層で分解される際に、酸素を消費することにより貧酸素化することが考えられる。今年度の有明海では、6 月上旬から 8 月上旬にかけてシャットネラ属による赤潮が確認されており、底層で酸素が消費されたと考えられる。よって、今年度は、これら (1) および (2) の要因により、7 月下旬に、熊本県北部海域の沖合点 (St. 4, St. 5) および沿岸点 (St. 8, St. 9) の水深 5 m 層付近以下の層で、3.0 mg/L を下回る貧酸素が発生したと考えられる。

なお、8 月中旬にも溶存酸素の低下が確認されたが、水深 5m 付近と局所的であること、それ以後の調査では解消していることから、小潮時等の潮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

調査期間中の気温は、ほぼ例年より高めで推移した。降水量については、橘湾は付近に大きな河川がなく、有明海からの淡水の流入に影響をうけるとの報告があるため、有明海の筑後川流域に位置する久留米市の降水量を利用した。6 月 20 日に 74 mm, 6 月 27 日に 74.5 mm, 7 月 1 日に 101 mm, 7 月 15 日に 113 mm, 8 月 29 日に 111.5 mm のまとまった降水が観測された。風向風速は 6 月中旬から 8 月中旬にかけて南風が連吹した。

定点 (St. 4, 8, 11, 14, 20) 表層水の水温は 21.6~31.0°C, 塩分は 29.57~33.38, DO は 94.6~157.6%, クロロフィル蛍光値は 0.24~26.24 の範囲で推移した。表層 (0.5 m) では DIN は 7 月 25 日, 8 月 1 日の沖合で、PO₄-P は 7 月 20 日の沖合で高い値であった。中層 (5 m) では DIN は 6 月 26 日, 7 月 12 日に湾全体で確認され、7 月 25 日には湾奥部で著しく高かった。PO₄-P は 6 月 26 日, 7 月 12 日, 9 月 10 日に湾全体で高い値を示した (図 19)。

橘湾では 6 月 17 日~7 月 16 日まで *Chattonella* spp., 7 月 31 日 ~ 8 月 31 日まで *Karenia*

mikimotoi による赤潮が発生し、養殖魚に甚大な被害が生じた。

貧酸素水塊の定義は水産用水基準（日本水産資源保護協会,2018）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、DO 40%未満を貧酸素化とした。6 月 19 日、6 月 26 日の調査時、貧酸素水塊は確認されなかった。7 月 12 日の調査時に St. 1, 3, 5, 6, 10, 13, 16, 7 月 20 日には St. 1～3, 7 月 25 日には St. 1～3, 6, 7, 10～12, 14, 16, 8 月 1 日には St. 2, 3, 5, 7, 8 で貧酸素水塊が確認された。8 月 8 日には貧酸素水塊が確認されなかったが、8 月 16 日には St. 2., 8 月 23 日には St. 2, 5～13, 15～17, 9 月 10 日は St.10, 9 月 20 日は St. 8 で貧酸素水塊が確認された（図 20）。

2024 年の定点 7 の底層 (B-0.2 m) の DO 濃度の時系列変化から DO 低下速度を算出したところ、0.0072 mg/L/hour だった。有明海奥部西部海域の沖合域 (P6) の DO 低下速度は 0.0063～0.0388 mg/L/hour であることが報告されている（未発表データ）。このことから、有明海奥部に位置する P6 より低密度差が小さく、かつ薄い層（海底から 4m 程度）で貧酸素化するにもかかわらず、DO 低下速度は小さいことから、橘湾においては酸素消費速度が小さいことが示唆される。

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、詳細は先述の長崎県漁場テレメータシステム水質情報の「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情報提供は、漁場選択や休漁等の操業の効率化等に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。

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/etm/index.php>) による、2024 年 10 月から 2025 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 21 に示した。また、2013 年度から 2024 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 22 に示した（2024 年度は 2 月上旬までのデータ）。

① 気温

10 月上旬から 2 月上旬の旬別平均気温は、10 月上旬から 11 月中旬までは高めで推移し、佐賀市では平年値より 1.6～6.2℃、熊本市では 1.4～5.3℃上回った。11 月下旬から 12 月下旬は平年値並みで推移し、1 月上旬は低下して平年値より佐賀市で 1.0℃、熊本市で 1.4℃下回り、その後は上昇して 1 月下旬は佐賀市で 1.7℃、熊本市で 1.4℃上回ったが、2 月上旬は再び低下して佐賀市、熊本市とも 2.3℃下回った。

② 降水量

10 月上旬から 2 月上旬の旬別積算降水量は、10 月から 11 月は変動が大きく、佐賀市では 10 月上旬から下旬は 26.0～39.5 mm（平年値の 0.8～1.4 倍）だったが、11 月上旬は 147.5 mm（平年値の 4.6 倍）と多く、中旬は 3.0 mm（平年値の 0.1 倍）と非常に少なくなり、下旬は平年値並みの 37.5 mm となった。熊本市では、10 月上旬から 11 月上旬まで平年値より多く、11 月上旬に 116.0 mm（平年値の 3.9 倍）を記録したが、11 月中旬は 1.0 mm（平年値の 0.03 倍）と非常に少なく、下旬は平年値並みの 27.5 mm となった。12 月上旬から 1 月下旬は、佐賀市、熊本市とも平年値より少なく、佐賀市で 1.0～12.5 mm（平年値の 0.02～0.9 倍）、熊本市で 0.0～13.5 mm（平年値の 0.0～1.0 倍）だったが、2 月上旬は平年値並みとなった。

③ 日照時間および全天日射量

10 月上旬から 2 月上旬までの旬別の積算日照時間および平均全天日射量は、10 月上旬と下旬は少なく、日照時間は佐賀市、熊本市とも平年値の 0.5～0.7 倍、全天日射量は佐賀市で 0.8 倍、熊本市で 0.7～0.9 倍だった。11 月は平年値並みで推移し、12 月上旬から 1 月中旬は、12 月中旬に平年

値並みで、1月中旬は少なかったが（日照時間は佐賀市で平年値の0.7倍、熊本市で0.9倍、全天日射量は佐賀市で0.9倍、熊本市で1.0倍）、それ以外は平年値を上回った。1月下旬は多く、日照時間は佐賀市で平年値の1.6倍、熊本市で1.5倍、全天日射量は佐賀市、熊本市とも1.3倍だったが、2月中旬は平年値よりやや下回った。

④ 河川流量

9月から2月上旬の筑後川大堰直下の日平均流量は、9月上旬から11月上旬まではしばしば100 m³/s以上を記録し、特に9月22日の降水により9月22～24日に最大954.6 m³/s、11月1～2日の降水により11月2～5日に最大881.9 m³/sを記録した。しかし、12月上旬から2月上旬は降水量が少なく、流量は40～50 m³/s台と低位で推移した。

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、2024年10月から2025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23aに示した。また、2013年度から2024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23b～cに示した。

① 水温

2024年度の表層平均水温は、奥部では11月上旬に西側域で20℃台、東側域で21℃台まで低下し、12月上旬に両域とも15℃を下回り、1月上旬に10℃台まで低下した。中央部は、11月上旬に21℃台まで低下し、12月上旬に沖合域で16℃台まで低下し、沿岸域では15℃を下回り、1月上旬には沖合域で12℃台まで低下し、沿岸域では11℃台まで低下した。2024年度の平均水温を2013年度以降と比較すると、11月下旬までは平年よりやや高く、12月から1月は平年並みだった。

② 塩分

塩分の表層平均は、中央部沖合域で最も高く、30.5～31.8で推移し、中央部沿岸域は29.0～31.1で変動して11月上旬は沖合域より僅かに高かった。奥部は、西側域で28.4～30.0、東側域では10月下旬に27.0と低かったが、それ以外は28.7～30.0で変動した。2024年度の表層平均塩分の変化を2013年度以降と比較すると、奥部では10月下旬、11月上旬、12月上旬および下旬はやや低め、中央部では10月下旬は低かった。

③ DIN

DINの表層平均濃度は、10月中旬から11月上旬まで奥部、中央部とも10 μM以上と高く、11月下旬は低下するものの奥部西側域で8.3 μM、東側域で12.1 μM、中央部沖合域で8.8 μM、沿岸域で11.7 μMと比較的高かった。中央部沿岸域を除き、12月上旬から大きく低下し、1月下旬まで奥部では0.1～1.9 μM、中央部沖合域では0.7～3.5 μMで変動した。中央部沿岸域では徐々に低下したが、3.2～15.9 μMと他の海域より高かった。2024年度の表層平均DIN濃度の変化を2013年度以降と比較すると、10月中旬から11月中旬まで奥部、中央部とも平年並みか高く、12月以降は、奥部は低く、中央部は平年並みか低かった。

④ DIP

DIPの表層平均濃度は、10月中旬から11月下旬まで、奥部西側域で1.1～1.8 μM、東側域で1.0～1.7 μM、中央沖合域で0.6～0.8 μM、沿岸域で0.7～1.1 μMで変動した。その後大きく低下し、12月上旬から1月下旬まで、奥部では0.2～0.5 μM、中央沖合域で0.1～0.4 μM、沿岸域で0.04～0.6 μMだった。変動傾向は、中央部沿岸域を除き、概ねDIN濃度と同様だった。2024年度の表層平均DIP濃度の変化を2013年度以降と比較すると、10月は高く、11月は平年並み、12月から1月は低かった。

⑤ DSi

DSiの表層平均濃度は、奥部では10月中旬から11月下旬まで高く、西側域で57.3～74.4 μM、東

側域では 51.6~89.3 μM で変動し、その後大きく低下して、12 月上旬から 1 月下旬は西側域で 8.8~24.7 μM 、東側域で 20.8~34.6 μM だった。中央部沖合域も同様に変化し、10 月中旬から 11 月下旬は 24.0~47.6 μM 、12 月上旬から 1 月下旬は 10.0~17.3 μM だったが、沿岸域は期間を通して高めで推移し、33.5~87.7 μM で変動した。2024 年度の表層平均 DSI 濃度の変化を 2013 年度以降と比較すると、10 月は高く、11 月は平年並み、12 月から 1 月は低かった。

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、10 月中旬から 11 月上旬まで、奥部西側域で 4.1~5.3 $\mu\text{g/L}$ 、東側域で 5.2~8.3 $\mu\text{g/L}$ 、中央部沖合域で 4.7~6.1 $\mu\text{g/L}$ 、沿岸域で 4.4~5.5 $\mu\text{g/L}$ だった。その後、奥部西側域では大きく変動し、11 月下旬は 13.7 $\mu\text{g/L}$ に上昇したが、12 月下旬は 3.9 $\mu\text{g/L}$ まで低下し、1 月上旬は 8.3 $\mu\text{g/L}$ 、下旬は 3.0 $\mu\text{g/L}$ だった。東側域では、11 月下旬から 12 月上旬まで上昇して 13.1 $\mu\text{g/L}$ を記録し、12 月下旬から 1 月下旬までは 9.1~10.8 $\mu\text{g/L}$ で推移した。中央部では 11 月上旬以降は上昇を続け、1 月下旬は沖合域で 11.0 $\mu\text{g/L}$ 、沿岸域で 18.6 $\mu\text{g/L}$ となった。2024 年度の表層平均 Chl. *a* 濃度の変化を 2013 年度以降と比較すると、奥部は 10 月中旬から 11 月上旬まで低め、11 月下旬から 12 月上旬はやや高め、12 月下旬から 1 月下旬は平年並みで推移し、中央部は 11 月上旬まで低め、それ以降は高めで推移した。

⑦ 透明度

平均透明度は、奥部西側域では 10 月中旬から 11 月下旬まで 1.8~2.3 m で変動したが、12 月は上昇して上旬は 2.8 m、下旬は 3.2 m となり、1 月は低下して 2.4~2.6 m だった。東側域では、12 月下旬に 2.9 m と高かったが、それ以外は 1.9~2.6 m で変動した。中央部沿岸域は、10 月に 2.5~3.0 m だったが、11 月上旬は 3.9 m に上昇し、その後は徐々に低下して 1 月は 2.2~2.4 m だった。沖合域では、10 月中旬は 3.1 m だったが、その後上昇して 11 月下旬に 5.8 m となり、それ以降は徐々に低下して 1 月下旬は 4.8 m だった。2024 年度の平均透明度の変化を 2013 年度以降と比較すると、奥部海域では 10 月中旬は平年並みだったが、10 月下旬から 1 月下旬まで高く、中央部海域では 10 月は低かったが、11~12 月は高く、1 月は平年並みだった。

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、2024 年 10 月から 2025 年 1 月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 24 に示した。なお、図 24 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、2024 年度の海域別の表層平均細胞密度の変化、2013 年度から 2024 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 25 に示した。

① *Chaetoceros* spp. (図 24a, 25a)

Chaetoceros spp. の表層平均細胞密度は、10 月中旬から 11 月上旬まで低く、奥部では東側域で最高 86.3 cells/mL、中央部では沿岸域で 29.3 cells/mL だった。奥部では、11 月下旬は西側域でのみ上昇して 484.0 cells/mL を記録し、12 月上旬は上昇して西側域で 936.5 cells/mL、東側域で 1055.0 cells/mL を記録したが、12 月下旬は低下して西側域で 106.0 cells/mL、東側域で 111.5 cells/mL となり、1 月は再び上昇して西側域で 425.5~806.0 cells/mL、東側域で 187.5~274.8 cells/mL だった。中央部は、12 月に上昇して沖合域で上旬に 528.0 cells/mL、下旬に 498.0 cells/mL、沿岸域で上旬に 675.7 cells/mL、下旬に 1020.7 cells/mL だったが、1 月は低下して沖合域で上旬に 115.2 cells/mL、下旬に 261.6 cells/mL、沿岸域で上旬に 170.7 cells/mL、下旬に 115.3 cells/mL だった。2024 年度の細胞密度

変化を 2013 年度以降と比較すると、両海域とも期間を通して大きな上昇は見られず、12 月にやや高くなったが、それ以外は低かった。

② *Skeletonema* spp. (図 24b, 25b)

Skeletonema spp.の表層平均細胞密度は、奥部は 10 月中旬から 1 月下旬まで低く、最高密度は西側域では 11 月下旬の 445.0 cells/mL、東側域では 1 月下旬の 476.0 cells/mL だった。中央部は、10 月中旬から 12 月下旬まで低かったが（最高は 12 月下旬の沿岸域における 161.3 cells/mL）、1 月に上昇し、下旬には大きく上昇して沖合域で 3063.6 cells/mL、沿岸域で 8220.0 cells/mL となった。2024 年度の細胞密度の変化を 2013 年度以降と比較すると、奥部は期間を通して低く、中央部は 10～12 月まで低かったが、1 月下旬は高かった。

③ *Eucampia zodiacus* (図 24c, 25c)

Eucampia zodiacus は、両海域とも 10 月中旬から 12 月下旬まで表層からは細胞の出現は確認されず、底層からは 10 月下旬に Stn. T13 に出現して 1.0 cells/mL、12 月上旬に Stn. T5 に出現して 1.7 cells/mL を記録した。1 月上旬はまばらながら広域で細胞が確認され、平均細胞密度は奥部西側域の表層で 10.0 cells/mL、底層で 16.5 cells/mL、東側域の表層で 17.5 cells/mL（底層は出現なし）、中央部沿岸域の表層で 3.3 cells/mL（底層は出現なし）、沖合域の 10 m 層で 5.6 cells/mL（表層は出現なし）だった。1 月下旬になると細胞密度は上昇し、奥部西側域の表層で 36.5 cells/mL、底層で 87.0 cells/mL、東側域の表層で 108.2 cells/mL、底層で 291.3 cells/mL、中央部沖合域の表層で 41.4 cells/mL、10 m 層で 6.8 cells/mL、沿岸域の表層で 39.7 cells/mL、底層で 20.7 cells/mL となった。2024 年度の細胞密度の変化を 2013 年度以降と比較すると、全域で 1 月上旬まで低かったが、下旬に高かった。

④ *Akashiwo sanguinea* (図 24d, 25d)

Akashiwo sanguinea は、奥部では、10 月は細胞が確認されなかったが、11 月から出現して密度が上昇し、表層平均細胞密度は西側域で 12 月上旬に 104.0 cells/mL、東側域では西側域より遅れて 12 月下旬に 42.5 cells/mL の最高を記録した。西側域は、1 月上旬も 80.5 cells/mL と高かったが、下旬に 5.0 cells/mL まで低下し、東側域では、1 月も 21.8～50.4 cells/mL を記録した。中央部は、11 月上旬まで細胞は確認されず、その後、沿岸域では 12 月下旬に 17.7 cells/mL まで上昇したが、1 月は 10.0～14.0 cells/mL に低下した。沖合域では、11 月下旬から 1 月下旬まで出現したが、細胞密度は 0.2～3.6 cells/mL と低かった。2024 年度の平均細胞密度を 2013 年度以降と比較すると、奥部海域では 12 月上旬から 1 月下旬まで高く、中央部海域では期間を通して低かった。

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.

Chaetoceros spp.の細胞密度は秋季に上昇することがあるが、2018 年度から 2023 年までは毎年 10 月～11 月に高密度化した。瀬戸内海や福岡湾、洞海湾では、珪藻の優占種が *Skeletonema* 属から *Chaetoceros* 属となる頻度が増加し、その要因として栄養塩減少や、透明度上昇による水柱内の光透過量の増加が示唆されている (Nishikawa et al. 2010, 山田ら 2011, 多田ら 2012, 里道ら 2015)。有明海では、2018 年度から 2023 年度は秋季に降水量が少なかったことで河川流量が少なく栄養塩供給量が少なく、また晴天が多かったことで日射量が多く、平均透明度も高かったことにより水中の光環境が良かったと考えられ、これらが *Chaetoceros* 属の増殖に有利に働き、秋季の高密度化の要因となったと考えられる (図 26)。2024 年度は、10 月から 11 月の平均透明度は奥部で比較的高かったが、10 月の日照率は低く、10 月および 11 月の全日日射量は佐賀市で 2023 年度の 0.74～0.89 倍（平年値の 0.87～1.03 倍）、熊本市で 0.74～0.86 倍（0.86～1.01 倍）と少なかった (図 26, 27)。2024 年度は、秋季における本種の細胞密度は低かったが、その要因としては水中の光条件が *Chaetoceros* 属の増殖には十分でなかった可能性が考えられる。

② *Skeletonema* spp.

Skeletonema 属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、有明海広域での各種の出現状況は明

らかでないため、2023 年度より広域での出現状況を把握することを目的に、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。その結果、2023 年度および 2024 年度（1 月上旬まで）とも 7 種全てが検出された。2023 年度は、主要な 4 種のうち、*Skeletonema dohrnii* が最も高い頻度で出現してコピー数も多く、11 月と 1 月に増加し、*S. costatum* と *S. tropicum* は 10 月から 11 月に多く、*S. japonicum* は 1 月から 2 月に多かった（図 28 左）。2024 年度は、10 月から 12 月まで *Skeletonema* 属の細胞密度が低く、コピー数も少なかったが、2023 年度と同様に *S. dohrnii* の出現頻度が最も高く、主要 4 種の増加時期も 2023 年度と同様であり、種による出現時期の違いが確認された（図 28 右）。出現域については、*S. costatum* は福岡県海域、*S. tropicum* は熊本県海域でコピー数が比較的多いが、海域における出現特性の解明にはさらにデータを蓄積していく必要がある。

Skeletonema 属はこれまで秋季および冬季に高密度化し、それは奥部で顕著だった。しかし、2024 年度は、奥部においては 10 月から 1 月まで細胞密度が継続して低かった。2013 年度以降では、2021 年度および 2023 年度の冬季も奥部では細胞密度は低かった。奥部における冬季の高密度化は、主に 1 月に入ってから発生し、増殖する時期は水温が 12℃を下回り、全天日射量が多い条件において、小潮から大潮へのタイミングに生じるとされる（山口ら 2018）。2021 年度は、1 月中旬まで全天日射量が少ないことによる光条件で増殖が遅れ、栄養塩濃度が低かったことで細胞密度が低かったと考えられた（福岡ら 2022）。一方、2023 年度と 2024 年度の全天日射量は、12 月下旬以降は概ね平年値並みかそれより多く、透明度も高いことで水柱の光環境は良かったと考えられる。しかし、両年度とも 11 月下旬から *Akashiwo sanguinea* の密度が高い状況が続き、また降水が少なく河川流量が少なかったこともあり、*Skeletonema* 属が増殖する時期である 12 月から 1 月は栄養塩濃度が非常に低く、そのため細胞密度が上昇することがなかった可能性が考えられる。

一方、中央部海域では 1 月に細胞密度が上昇して赤潮化した。中央部海域では、*Skeletonema* 属が高密度化する時期は年により異なり、2013 年度から 2019 年度は 10～11 月と 1 月以降であることが多く、2020 年度から 2023 年度は 12～1 月に多かった。しかし、明瞭な初期増殖域は確認できず、何れの年も比較的湾奥側の定点（Stn. 8, 9）で高い密度を記録することが多かった。2024 年度も 1 月上旬に Stn. 9 で上昇するが、沖合の湾口側である Stn. 1 でも上昇した。2024 年度は、中央部沿岸域では 12 月上旬から 1 月上旬まで DIN 濃度が比較的高く、これが奥部と異なり増殖できた要因かもしれない。中央部沿岸域における増殖時期は奥部海域と異なることから、種判別の結果に基づいて主要種を把握し、増殖機構を検討していく必要がある。

③ *Eucampia zodiacus*

濃縮試料により測定した細胞サイズの変化を図 29 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）。2024 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 11 月中旬と判断され、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（表 4）。これまで秋季のデータに基づく冬季の赤潮発生・非発生の予察手法（長期予察）として、細胞サイズ回復後の細胞出現率（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）に着目してきており、赤潮発生年は出現率が高く、非発生年は低いと想定していた。細胞サイズの回復時期が Stn. P6 表層の水温が 20℃まで低下した時期であることから、20℃まで低下した以降 1 か月のデータを基にした出現率では 2024 年度の出現率は 3.1%と低かった（図 30）。しかし、1 月から広域で出現がみられ、1 月下旬から 2 月上旬（本報告ではデータ未記載）には赤潮化し、2024 年度は赤潮発生年となった。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。2024 年度の Stn. P6 における水質鉛直データからは、細胞サイズ回復時期の 11 月中旬に水温が低下し、11 月下旬は干潮時に表層塩分がやや低下するが、海水密度 (σ_t) は鉛直的に一様だった（図 31）。冬季の赤潮発生・非発生の予察における細胞の出現率は、

本事業の定期観測定点に基づいている手法のため、予察手法としては見直しが必要と考えられる。

2024 年度は、1 月上旬に広域で低密度ながら細胞の出現が確認され始め、1 月下旬には細胞密度が大きく上昇し、特に奥部の Stn. P6, T13, T3, T4 で 100 cells/mL を超え、筑後川河口沖の Stn. T4 の底層では 923 cells/mL を記録した (図 32)。2023 年度も、1 月上旬に Stn. T4 および Stn. 6 で 100 cells/mL を超える密度を記録し、1 月下旬の降水により河川流量が増加した後の 2 月上旬にほとんどの定点で 100 cells/mL 以上の高い密度となった。奥部海域においては、2023 年度および 2024 年度の 12 月から 1 月は、栄養塩濃度が低く、小型珪藻の密度も低い状況だった。一方で、水深の浅い奥部沿岸の定点 (Stn. T2-T5, T13) では透明度が高かった (図 27)。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光環境下が良好となり、増殖した可能性がある。

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 (Yamaguchi et al. in press), 冬季の *E. zodiacus* の赤潮化の可能性や発生時期についての予察 (短期予察) においては、1 月以降の細胞の出現状況を把握し、水温の変化と降水予報から可能と考えてきた (図 33)。一方、2024 年度の高密度化は水温が上昇に転ずる前の 1 月下旬からみられ、また降水も少なく河川流量の増加もない状況だった。水温上昇と河川流量の増加による栄養塩供給と密度成層の形成は赤潮の大規模化の要因になると考えられるが、栄養塩競合種である小型珪藻が低密度で推移するような状況では、透明度等の光環境条件によっては浅い水域から、そして少なからず栄養塩の供給がある河口域周辺から、高密度化が進むことも考えられ、冬季の高密度化の要因として、今後はこれらについての検討も必要である。

④ *Asteroplanus karianus*

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ったが、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。本種の高密度化の予察手法として、水温が 10℃を下回った後の初めての大潮期に続く小潮期に高密度化すると報告されている (松原ら 2016)。細胞密度の上昇期は、2013 年度と 2014 年度は 12 月下旬から 1 月上旬にかけてだったが、2015 年度から 2020 年度は 1 月中旬から 2 月上旬と遅かった (図 34)。水温と細胞密度の変化をみると、2013 年度から 2020 年度まで概ね水温が 10℃を下回った後の初めての大潮期に続く小潮期に上昇していたが、水温が 10℃を下回る時期が、2013 年度および 2014 年度は 12 月下旬だったのに対し、2015 年度から 2020 年度は時期が遅くなっており、このことが細胞密度の上昇期の遅れに影響したものと考えられる (図 35)。細胞密度の上昇期の遅れとともに、細胞密度も赤潮化するほどの上昇がみられなくなったが、その要因は不明である。2019 年度は水温が 10℃まで低下した 1 月上旬に細胞密度が僅かに上昇したものの、それ以上の上昇はみられず、これは冬季の水温が高かったことが影響した可能性がある。

2021 年以降は、水温が 10℃を下回っても細胞は確認されなかった。本種の DIN の半飽和定数は高く、効率よく増殖するには窒素源が豊富に存在する必要があるとされる (Yamaguchi et al. 2014)。2021 年度から 2024 年度は、12 月から 1 月は少雨により河川流量が少なく、また他の珪藻や *Akashiwo sanguinea* の増殖により DIN 濃度が低かった (図 36)。このことが、本種の増殖には不利な環境となっているのかもしれない。

⑤ *Akashiwo sanguinea*

Akashiwo sanguinea は、10 月から 11 月に局所的に高密度化することがあるが、2016 年度と 2017 年度は秋季を中心に奥部から中央部の広域で高密度化した。この高密度化の要因としては、筑後大堰直下の流量が僅かながら継続的に多かったことにより広域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 (Matsubara et al. 2007, 山口ら 2018, 福岡ら 2018)。

有明海において秋季に本種の赤潮が比較的広域で発生するときは、奥部西側域の河口沖で細胞密度が上昇し、その後周辺海域へ広がり細胞密度も上昇していく。2017 年度以降では、2023 年度と 2024 年度に比較的広域で本種の高い細胞密度が記録されたが、両年とも最奥部の定点 (Stn. T13, T2,

T3) で上昇し、その後、周辺海域に広がっていった。本種は広塩性であるが低塩分を好むことから、六角川河口沖など塩分が低く、滞留しやすい海域で初期増殖するものと考えられる。

2016 年度および 2017 年度に発生した広域的な高密度化では、広域的に表層塩分が低下したことが要因として示唆されたが、2023 年度および 2024 年度に高い細胞密度が記録された時期は、筑後大堰直下の流量は少なく、表層塩分も継続的に低下することはなかった。2023 年度および 2024 年度においては、継続的に高い細胞密度が記録されたのは六角川河口沖の Stn. T2 とその周辺の Stn. T13 や Stn. T3 であり、河川から僅かに流入する栄養塩を取り込みながら細胞密度を維持していたと考えられる。また、本種の増殖は中心目珪藻が高密度で存在すると抑制されることが知られている(松原ら 2008)。2023 年度と 2024 年度の本種の増殖時期は、小型珪藻は極端に少なかったため、本種の増殖に有利な条件だったことが考えられる。

引用文献

- 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, 内藤 剛, 藤井直幹, 岩永卓也, 太田洋志, 藤武史行, 三根崇幸, 向井宏比古, 丸吉浩太, 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 3 年度漁場環境改善推進事業 赤潮被害防止対策技術の開発報告書, 水産庁, 東京. 2022 ; 166–187.
- 松原 賢, 三根宗幸, 伊藤史郎. ノリの色落ち原因珪藻 *Asteroplanus karianus* のブルームピーク時期の予察. 日本水産学会誌, 2016 ; **82** : 777–779.
- Matsubara T, Nagasoe S, Yamasaki Y, Shikata T, Shimasaki Y, Oshima Y, Honjo T. Effects of temperature, salinity, and irradiance on the growth of the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2007; **342**: 226–230.
- 松原 賢, 長副 聡, 山崎康裕, 柴加田知幸, 島崎洋平, 大嶋雄治, 本城凡夫. 渦鞭毛藻 *Akashiwo sanguinea* に対する中心目珪藻類による増殖抑制作用. 日本水産学会誌 2008 ; **74** : 598–606.
- 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.
- Nishikawa T, Hori Y, Nagai S, Miyahara K, Nakamura Y, Harada K, Tanda M, Manabe T, Tada K, Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*. 2010; **33**: 417–426.
- 里道菜穂子, 恵崎 撰, 杉野浩二郎. 福岡湾における植物プランクトンの変遷について. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2015 ; **25** : 27–33.
- 多田邦尚, 山本圭吾, 一見和彦, 山田真知子, 西川哲也, 樽谷賢治, 山口一岩. 大阪湾の植物プランクトンの季節・経年変動とその要因. 瀬戸内海 2012 ; **64** : 75–77.
- Yamaguchi A, Fukuoka K, Okamura K, Ota H, Naitou T, Abe S. Development of *Eucampia zodiacus* blooms associated with salinity stratification in Ariake Bay during winter. *J. Oceanogr.* <https://doi.org/10.1007/s10872-025-00743-1>
- 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.
- Yamaguchi H, Minamida M, Matsubara T, Okamura K. Novel blooms of the diatom *Asteroplanus karianus*

- deplete nutrients from Ariake Sea coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2014; **517**: 51–60.
- 山田真知子, 上田直子, 濱田健一郎. 過栄養海域である洞海湾における栄養度の低下とそれに伴う赤潮発生状況の変化. 日本水産学会誌 2011 ; **77** : 647–655.
- 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.

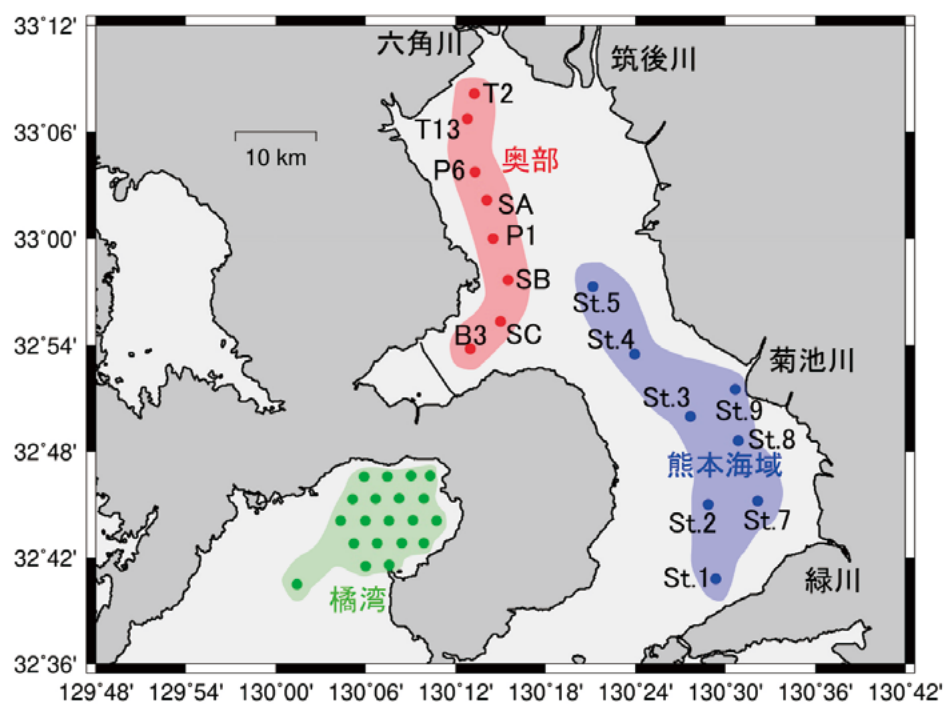


図1 夏季の有明海奥部海域（左）および熊本県海域における調査定点

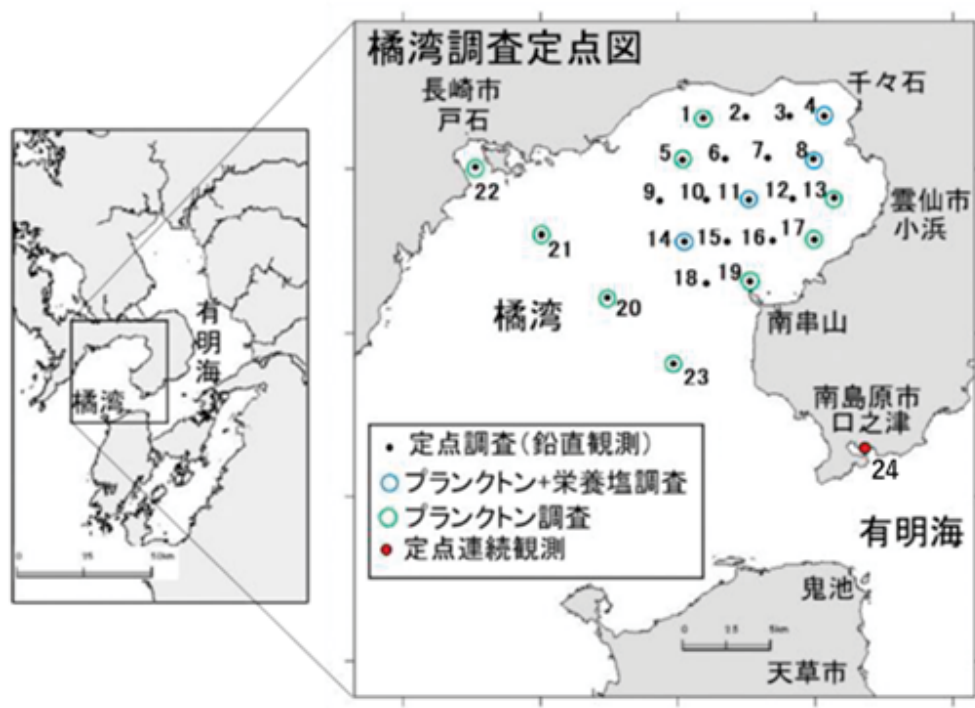


図2 橘湾における調査定点

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

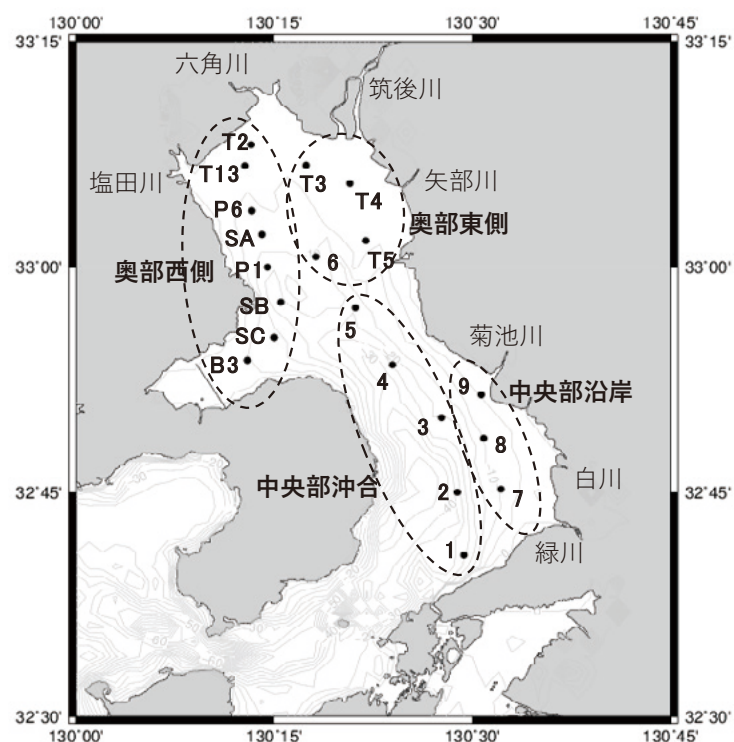


図3 冬季の有明海における観測定点位置

表2 冬季の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)
	SC		32° 55.33′	130° 15.00′	13	鉛直観測(採水なし、ブイメンテ時のみ)
中央部	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

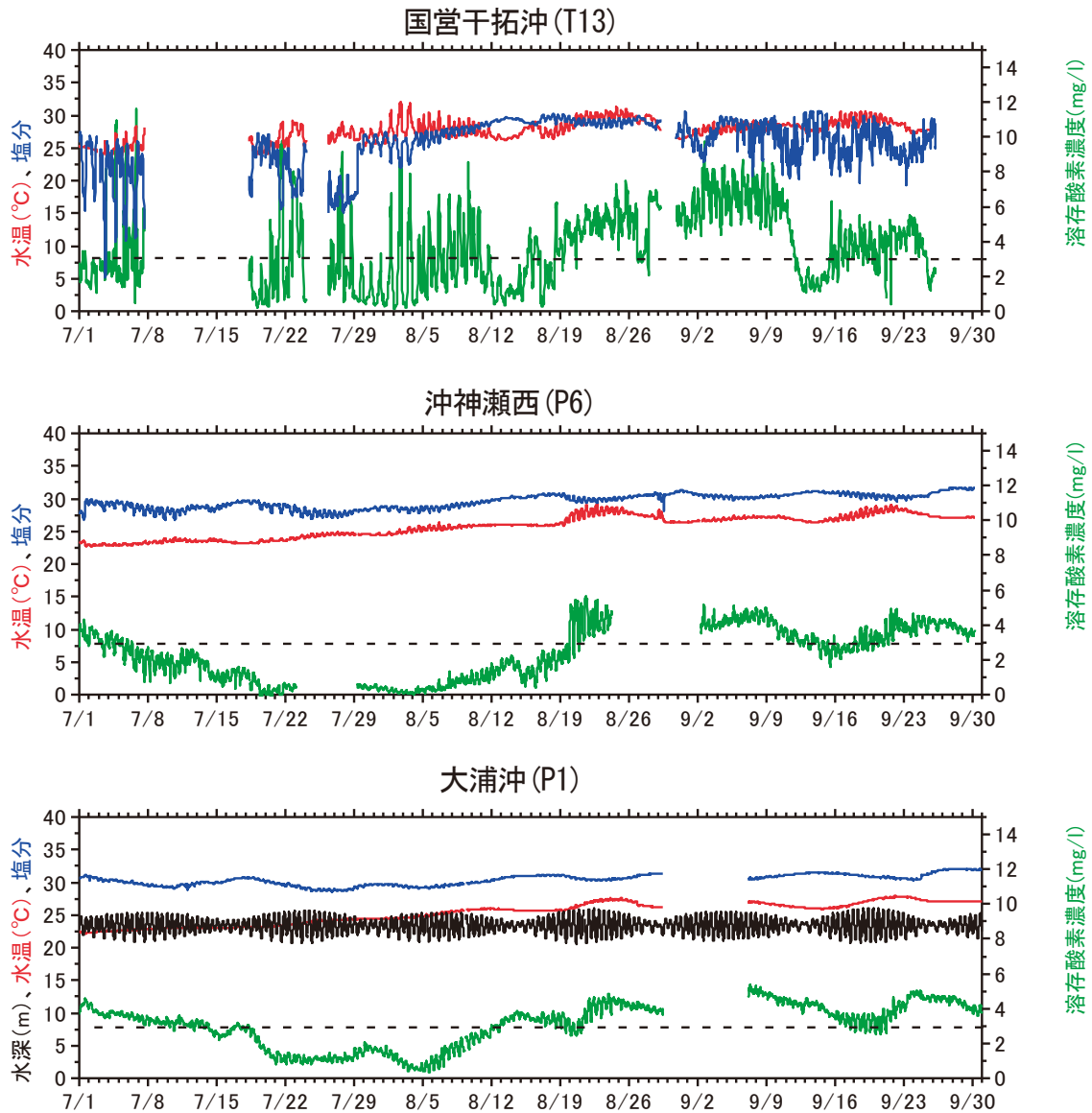


図4 2024年7月から9月の国営干拓沖 (T13), 沖神瀬西 (P6), 大浦沖 (P1) における底層 (底上 20 cm) の水温, 塩分, 溶存酸素濃度の変動。点線は溶存酸素濃度 3.0 mg/L を表す。

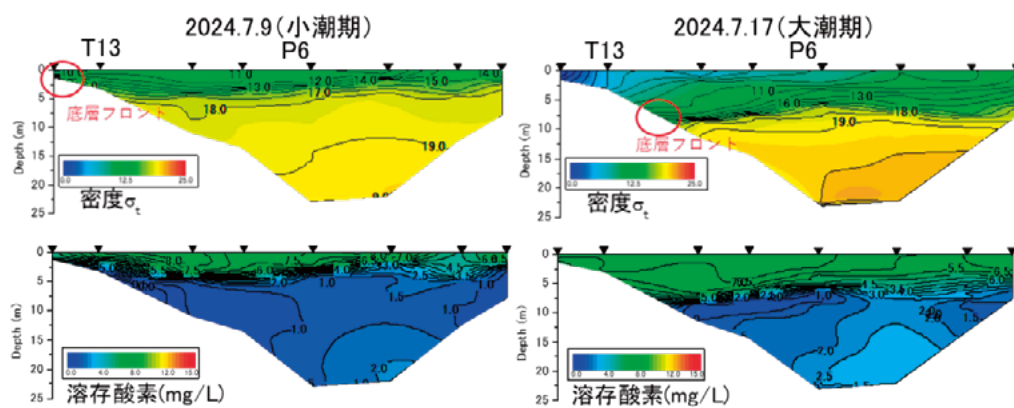


図5 小潮及び大潮期における底層フロントの位置と溶存酸素濃度との関係

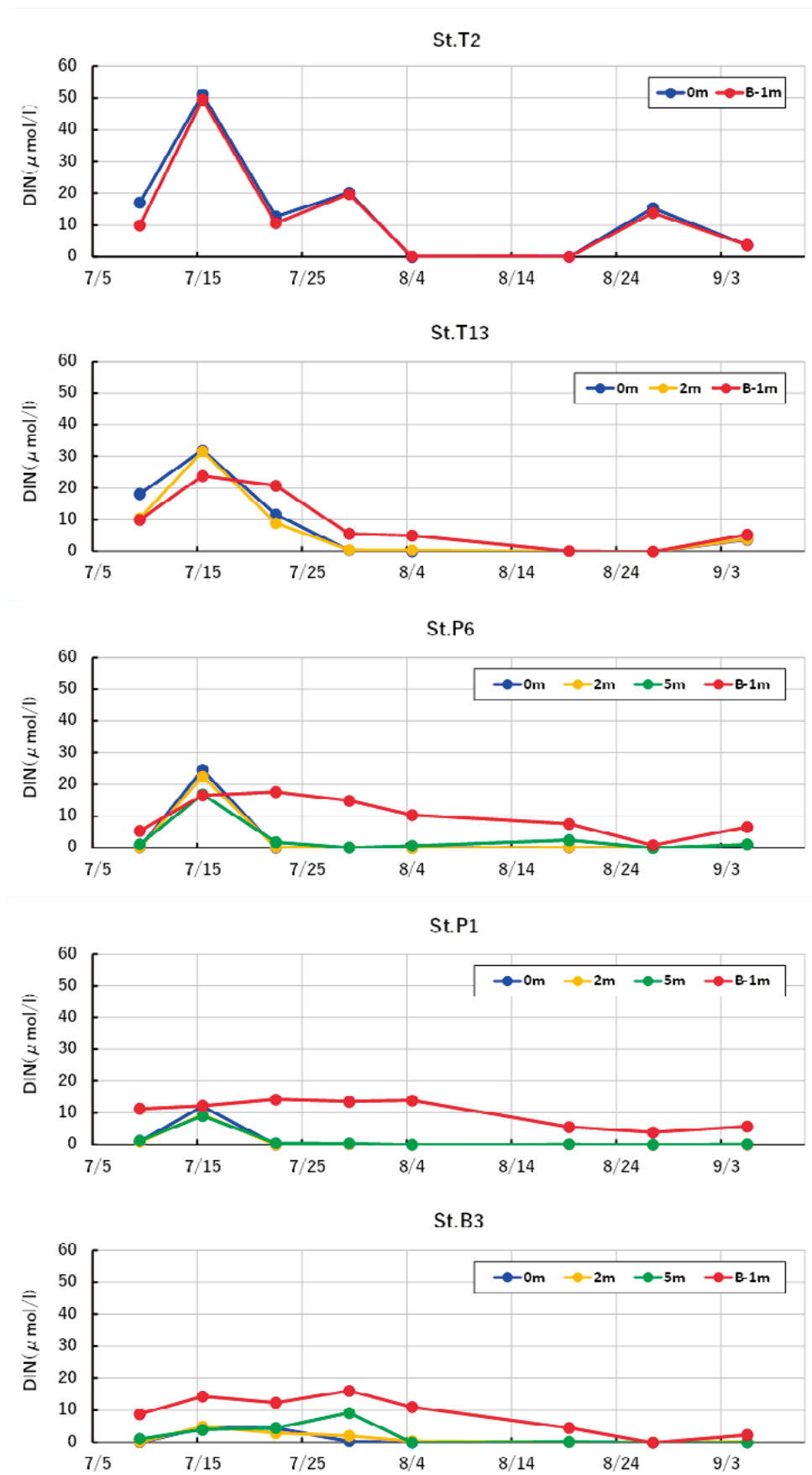


図6 T2, T13, P6, P1, B3 における DIN の時系列変化

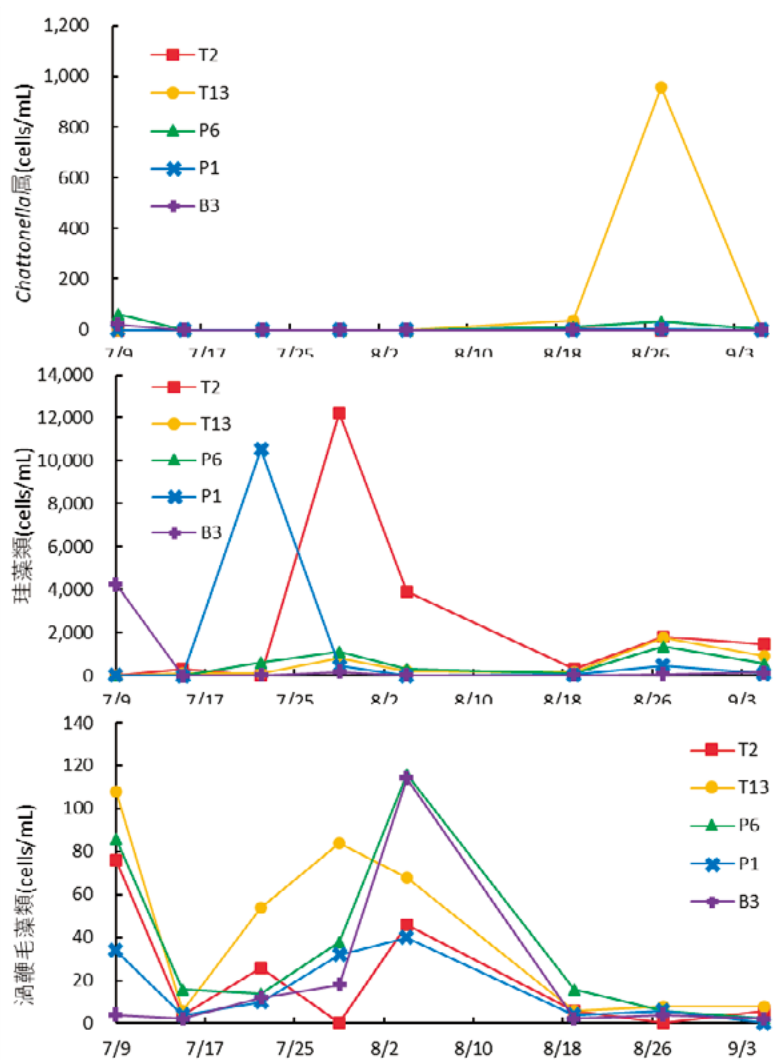


図7 *Chattonella* 属, 珪藻類, 渦鞭毛藻類の時系列変化

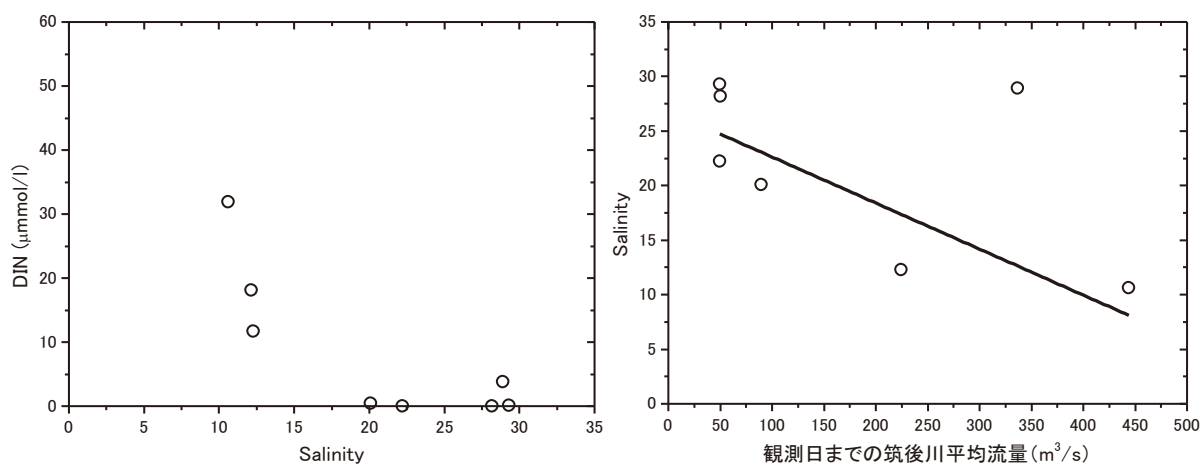


図8 T13 表層塩分と DIN の関係 (左図) 及び筑後川流量と T13 表層塩分の関係 (右図)。

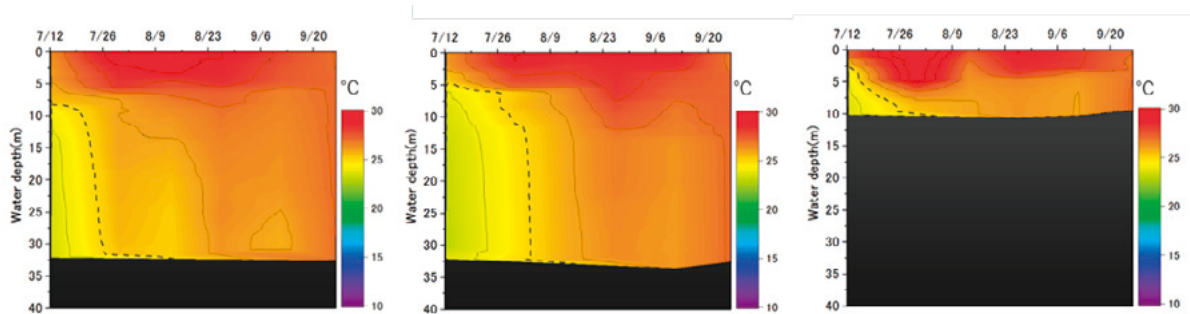


図9 水温の推移 (代表3点: 左図から St.1, St.5, St.9)

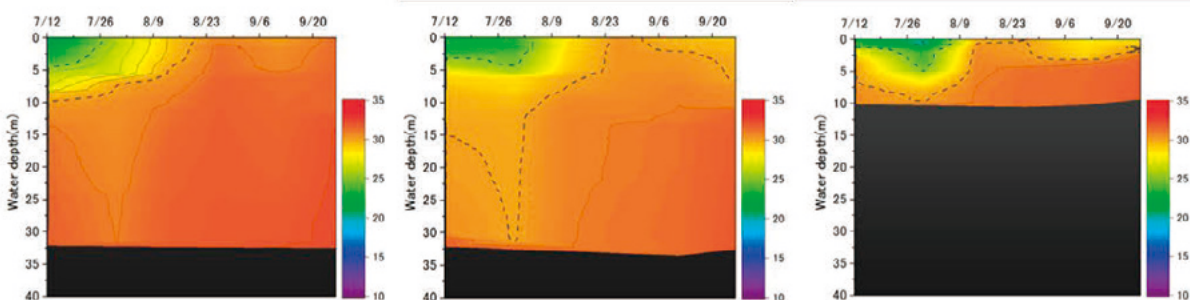


図10 塩分の推移 (代表3点: 左図から St.1, St.5, St.9)

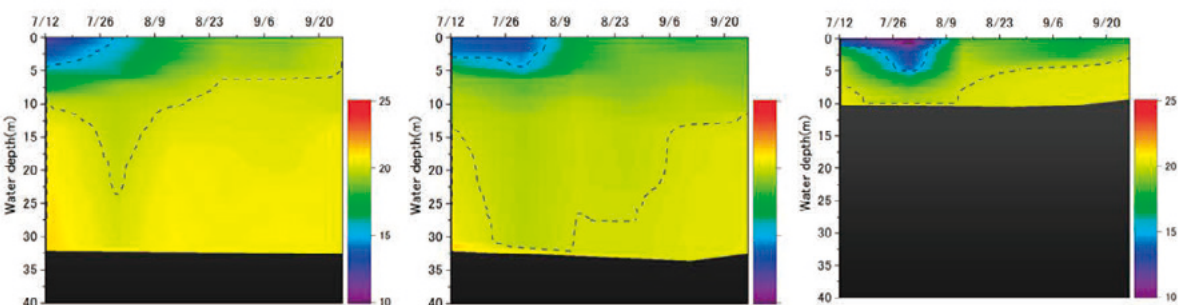


図11 σ_t の推移 (代表3点: 左図から St.1, St.5, St.9)

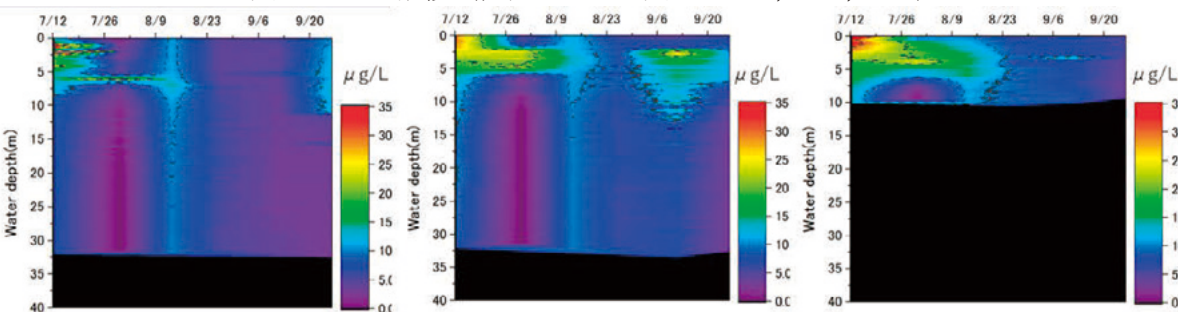


図12 クロロフィルaの推移 (代表3点: 左図から St.1, St.5, St.9)

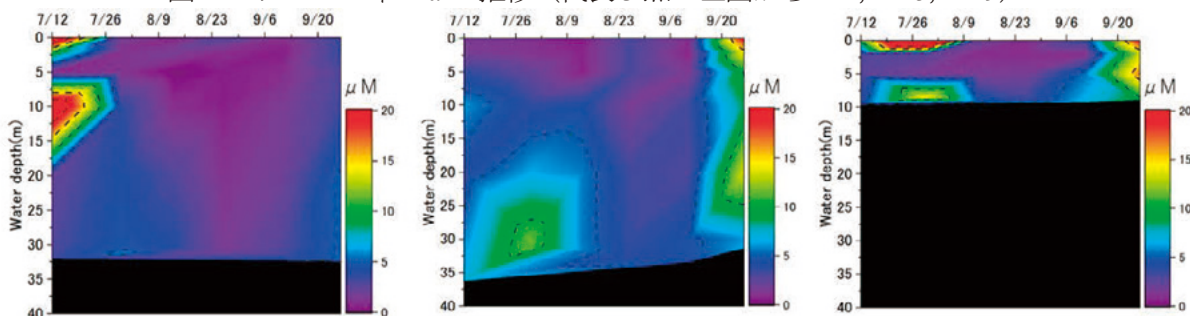


図13 DINの推移 (代表3点: 左図から St.1, St.5, St.9)

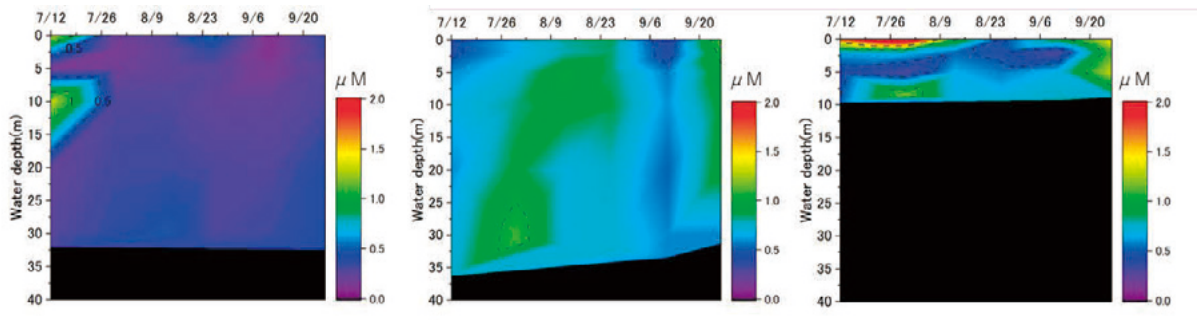


図 14 DIP の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

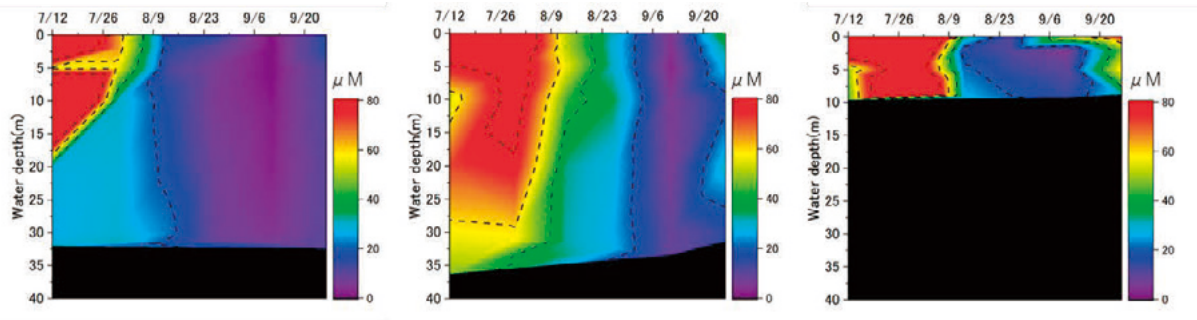


図 15 DSi の推移 (代表 3 点 : 左図から St.1, St.5, St.9)

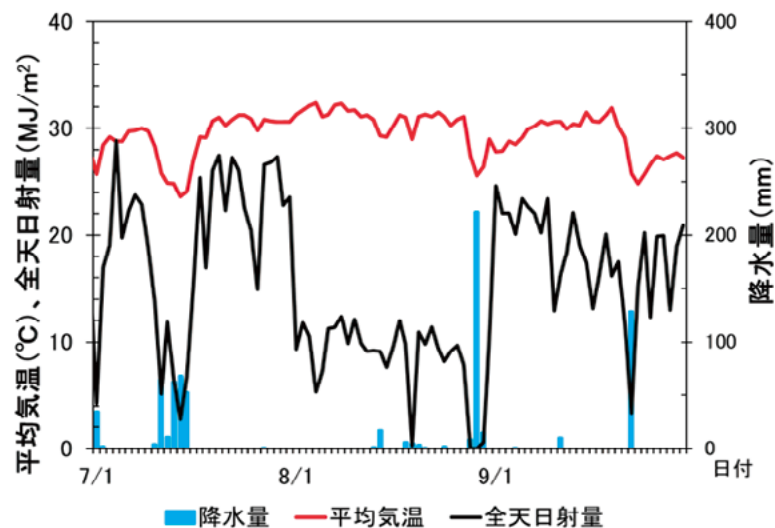


図 16 気温, 降水量, 全天日射量の推移
出典 気象庁 (観測点 : 熊本市)

表 3 気温, 降水量, 日照時間の旬毎の階級区分

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

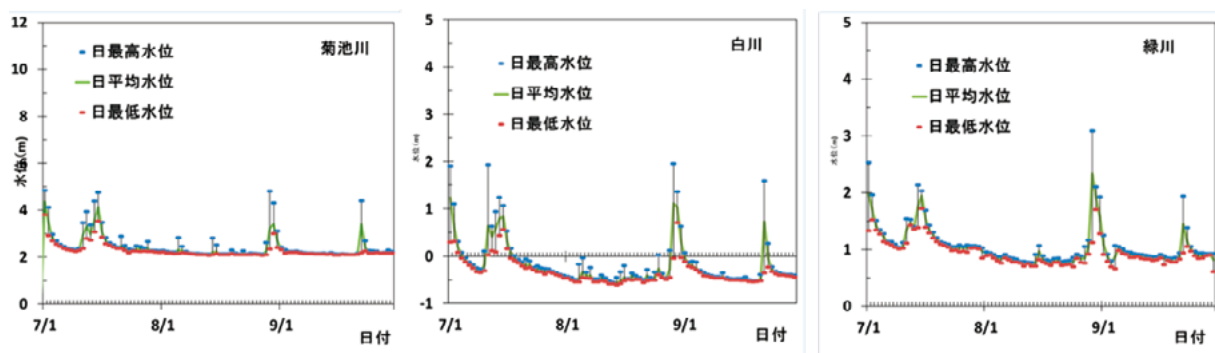


図 17 河川の水位の変動

出典 国土交通省（観測点：菊池川（菰田） 白川（代継橋） 緑川（城南））

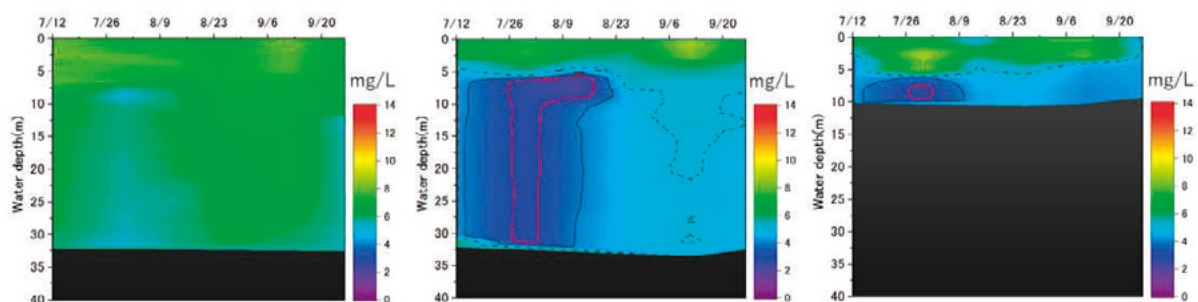


図 18 溶存酸素濃度の推移（代表 3 点：左図から St.1, St.5, St.9）

（赤線：3.0 mg/L）

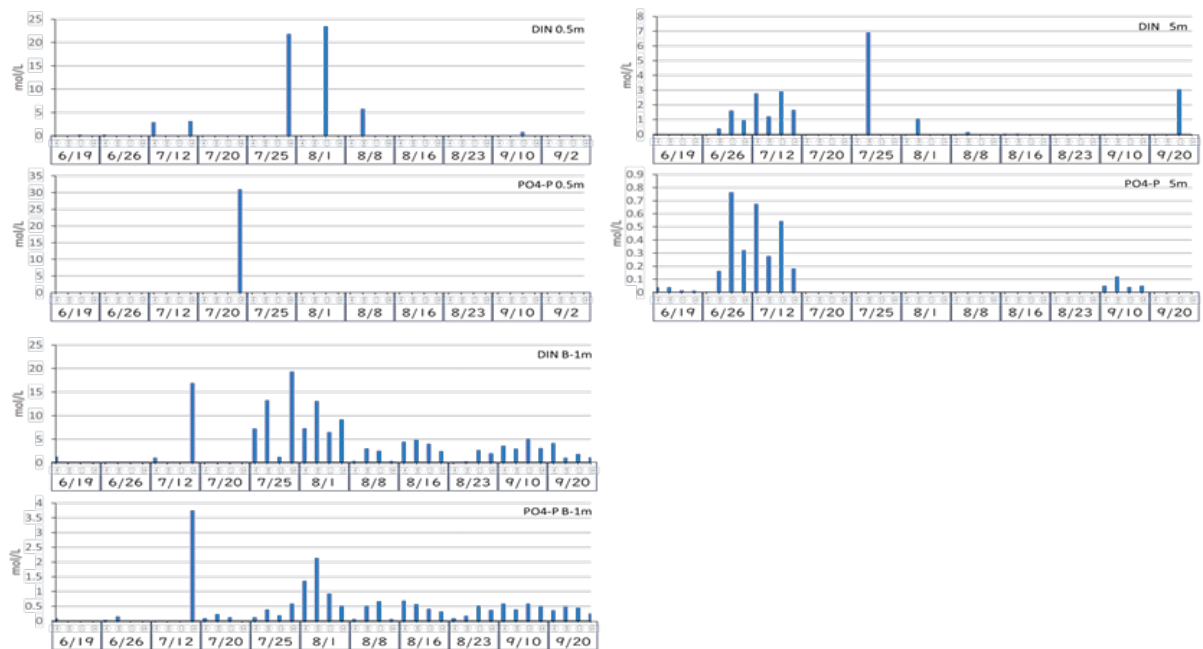


図 19 調査点毎の栄養塩 DIN と PO₄-P (μM)

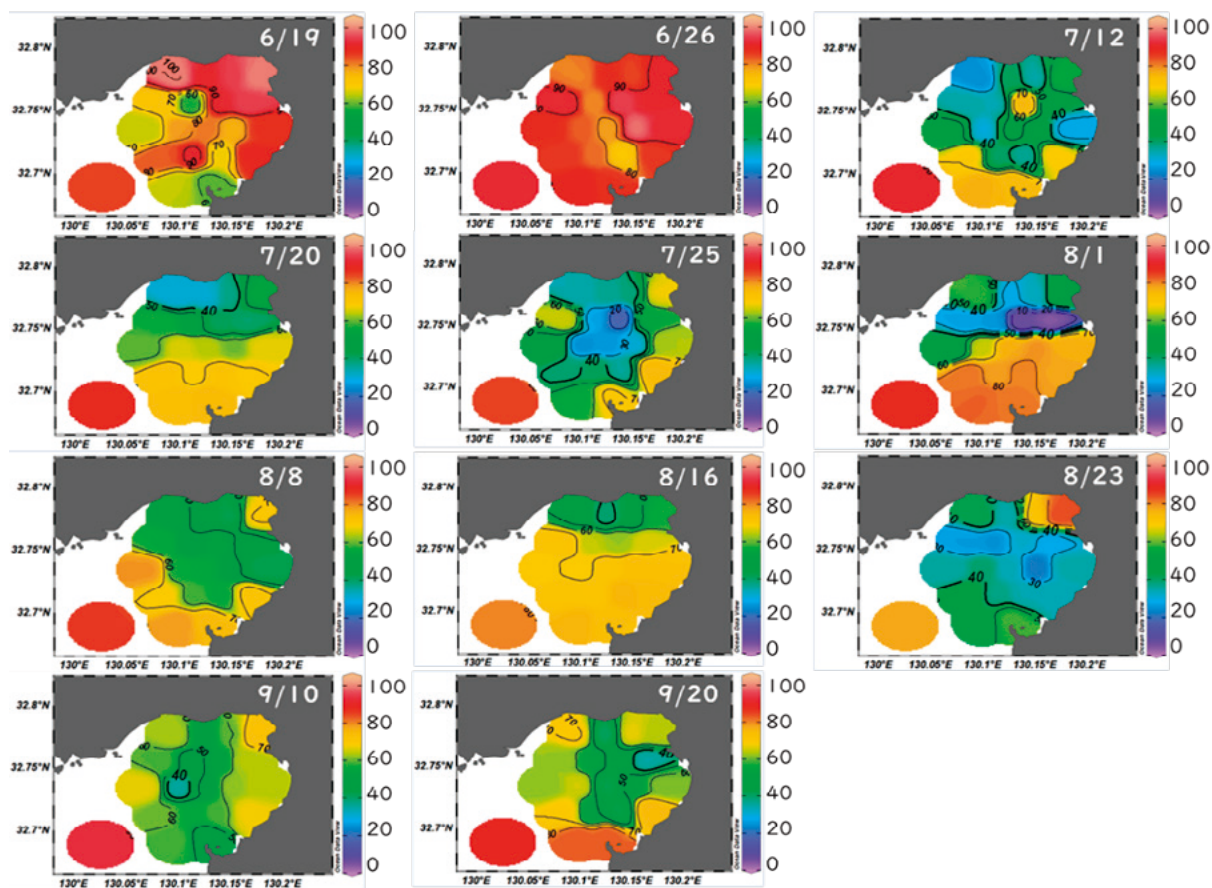


図 20 底層 (B-1) DO (%) の推移

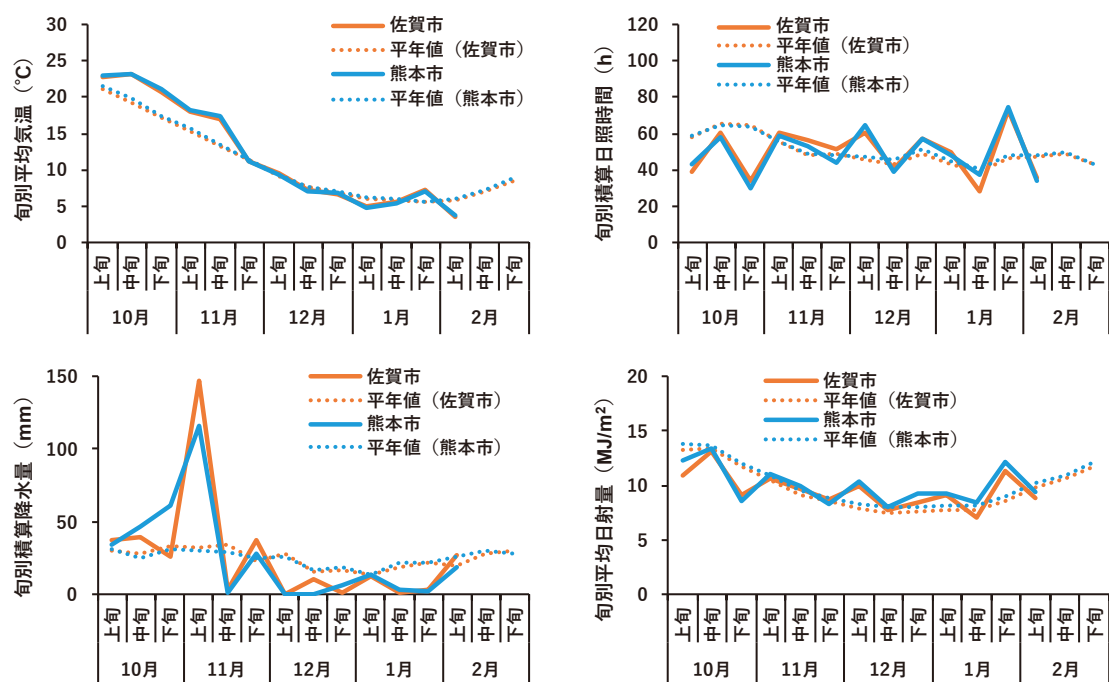


図 21 2024 年 10 月から 2025 年 2 月上旬の佐賀市および熊本市における旬別平均気温、旬別積算降水量、旬別積算日照時間、旬別平均全天日射量の推移（平年値は 2 月下旬まで）

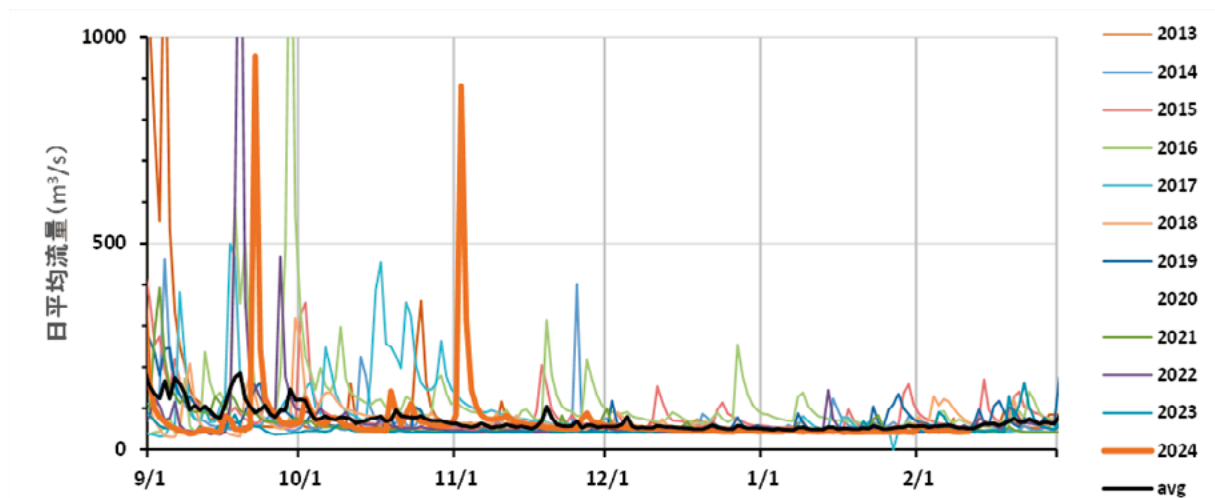


図 22 2013 年度から 2024 年度の 9 月から 2 月（2024 年度は 2 月上旬まで）の筑後大堰直下の日平均流量の変化

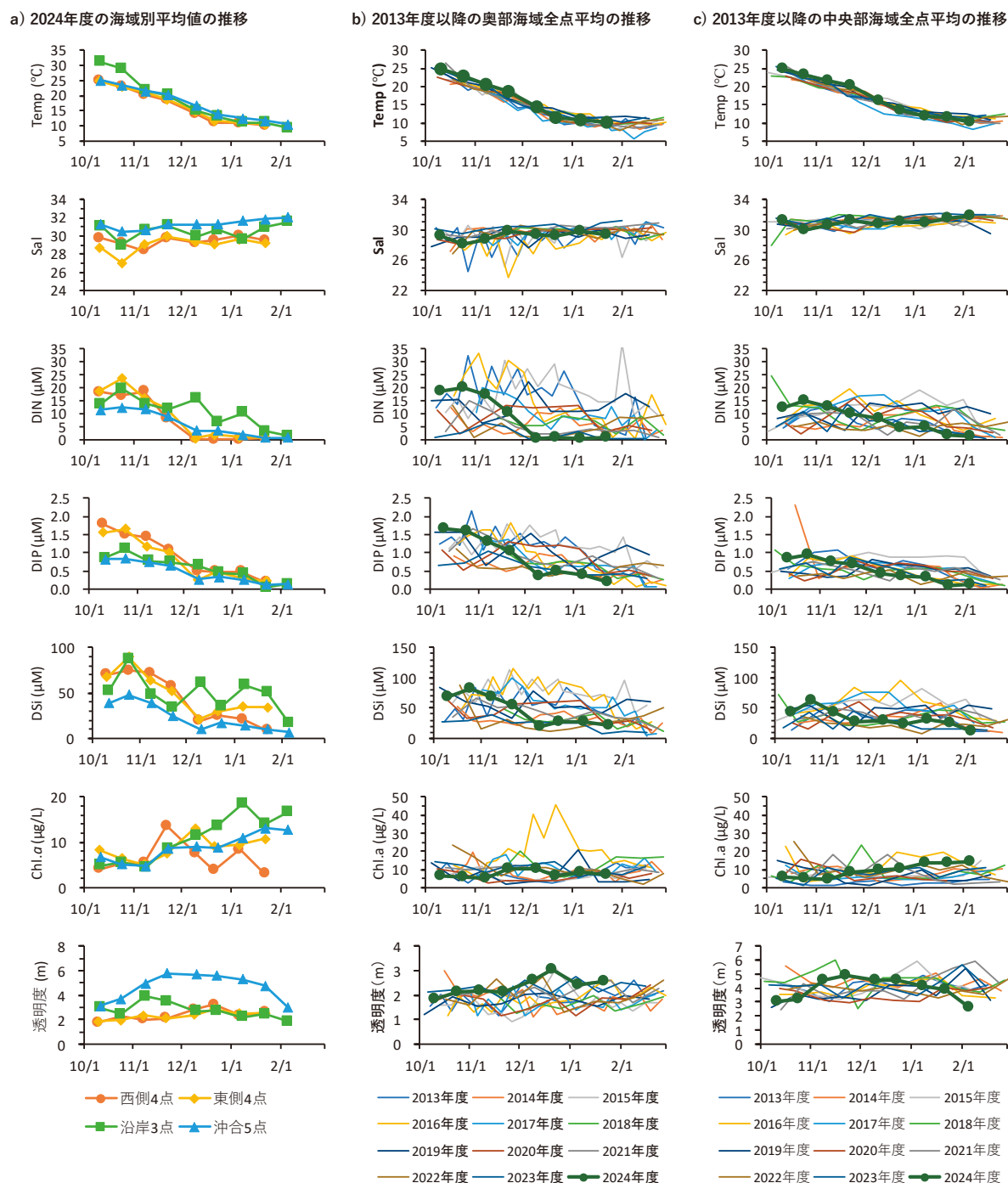
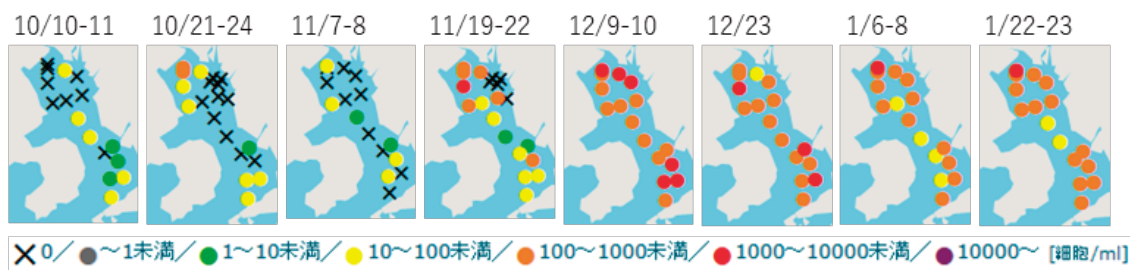
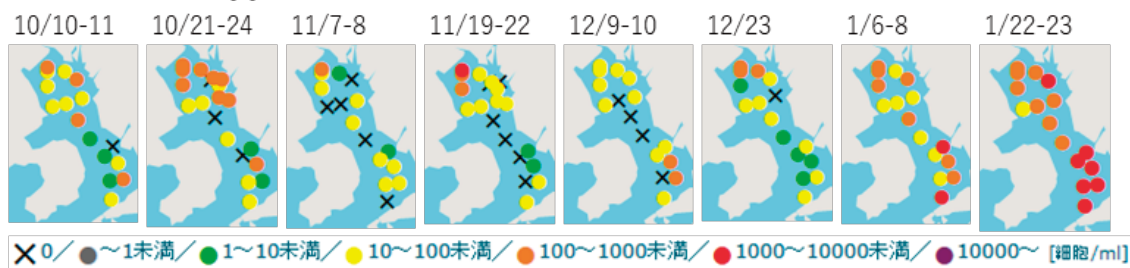


図 23 a) 2024 年 10 月から 2025 年 1 月（一部は 2 月上旬）の有明海奥部西側域（T2, T13, P6, P1），奥部東側域（T3～T5, 6），中央部沖合域（1～5），中央部沿岸域（7～9）の表層における水温，塩分，DIN，DIP，DSi，Chl. a，透明度の平均値の推移，および 2013 年度から 2024 年度の 10 月から 2 月（2024 年度は 1 月まで）における b) 奥部海域全定点および c) 中央部海域全定点の表層における水温，塩分，DIN，DIP，DSi，Chl. a，透明度の平均値の推移

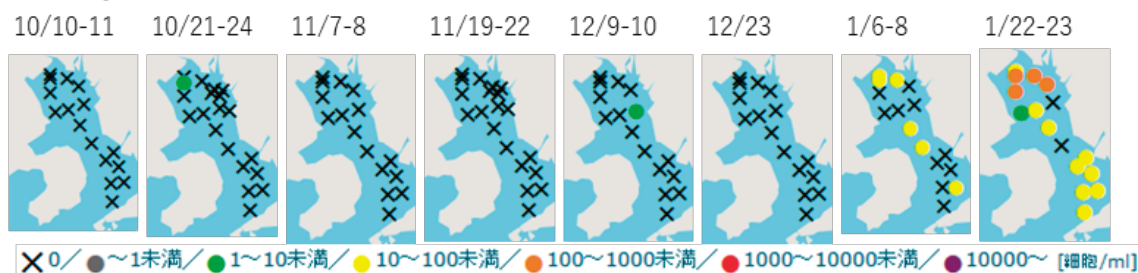
a) *Chaetoceros* spp.



b) *Skeletonema* spp.



c) *Eucampia zodiacus*



d) *Akashiwo sanguinea*

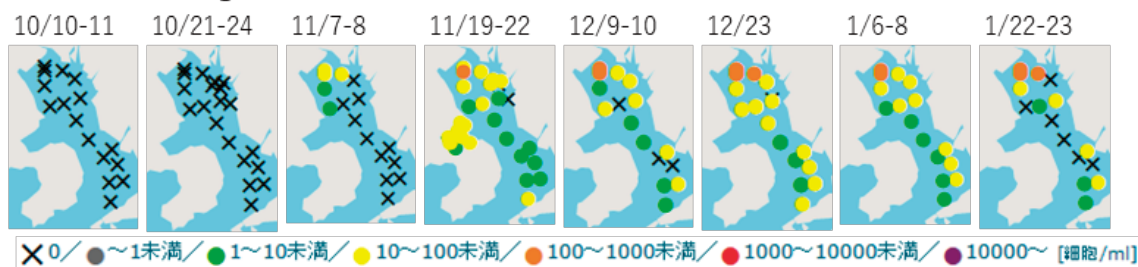


図24 2024年10月から2024年1月までの a) *Chaetoceros* spp., b) *Skeletonema* spp., c) *Eucampia zodiacus*, d) *Akashiwo sanguinea* の各定点における細胞密度（赤潮ネット「赤潮分布情報」の分布図より作成）

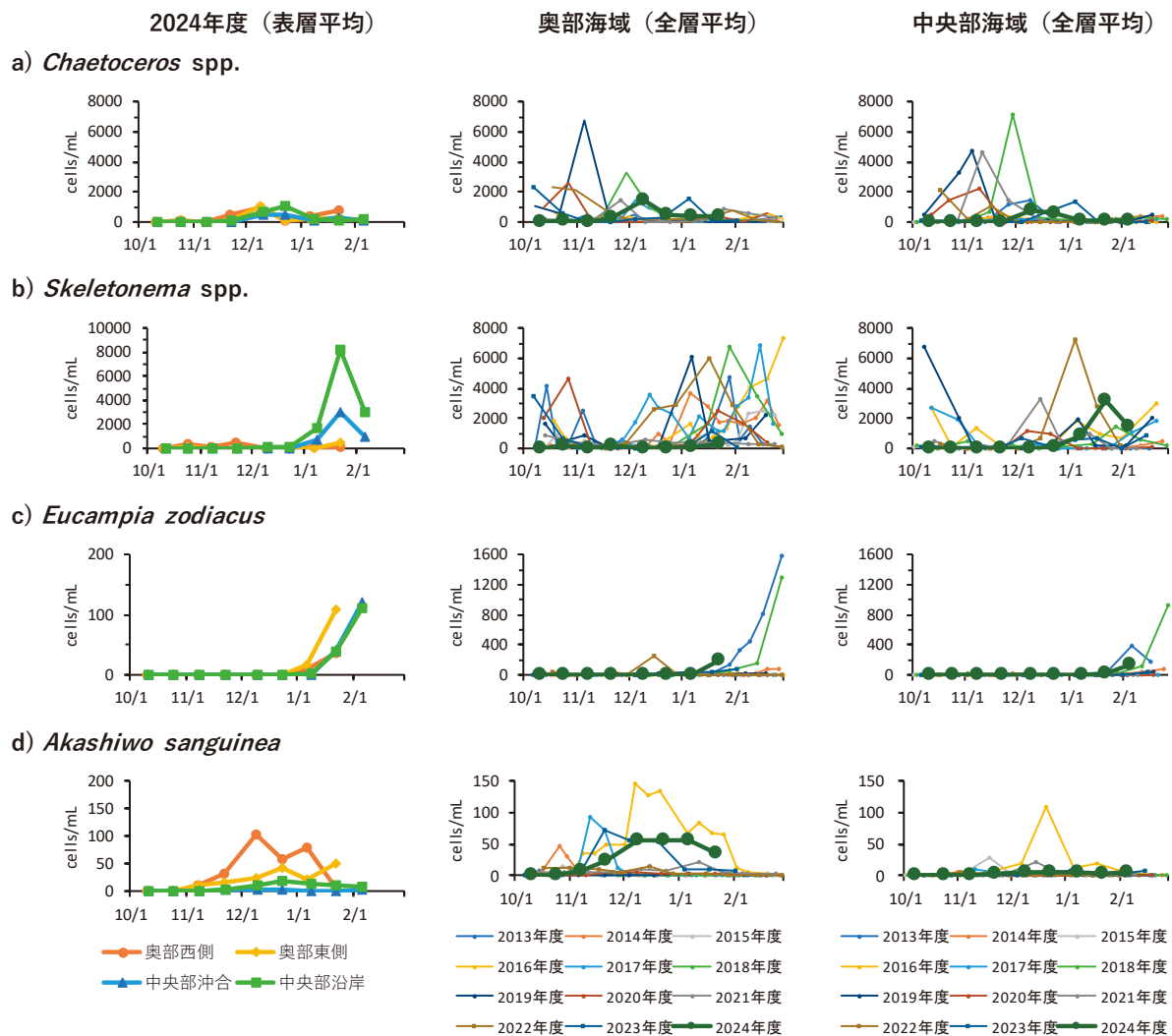


図 25 2024 年 10 月から 2025 年 1 月（一部は 2 月上旬）の水域別定点における表層（左）および 2013 年度から 2024 年度の 10 月から 2 月（2024 年度は 1 月まで）の奥部海域（中央）および中央部海域（右）における全定点の全採水層の a) *Skeletonema* spp., b) *Chaetoceros* spp., c) *Eucampia zodiacus*, d) *Akashiwo sanguinea* の平均細胞密度の変化

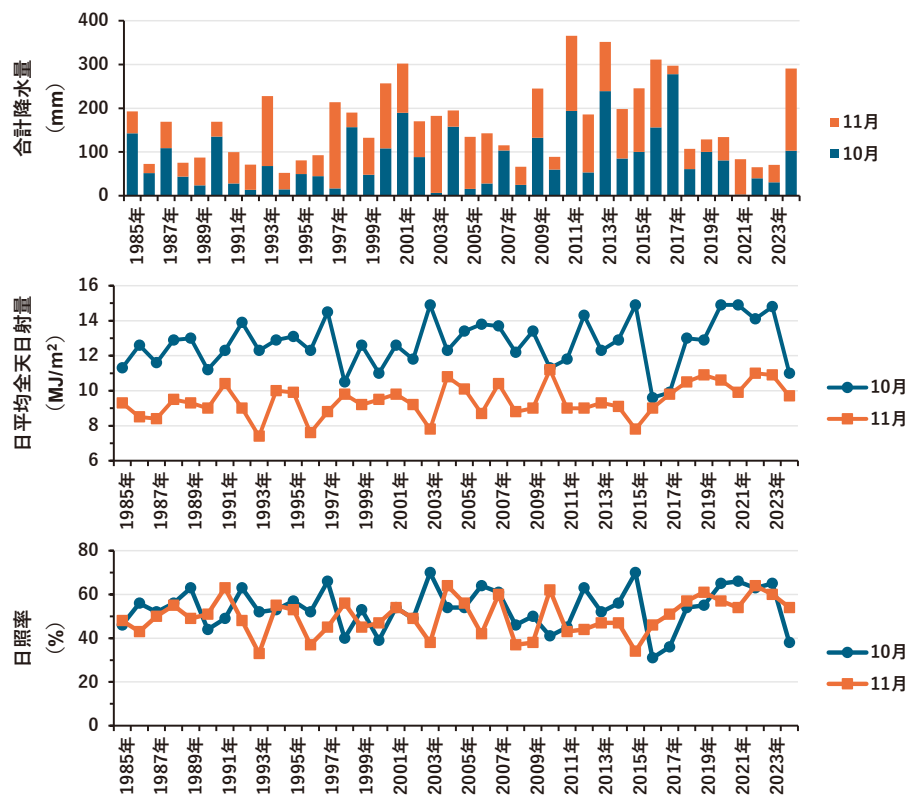
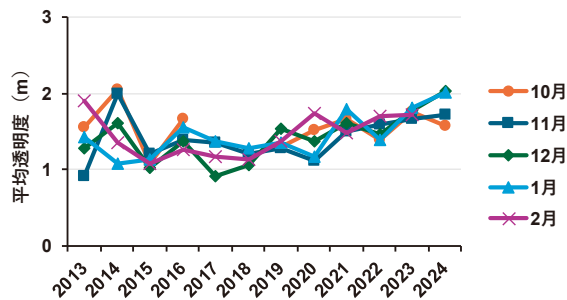
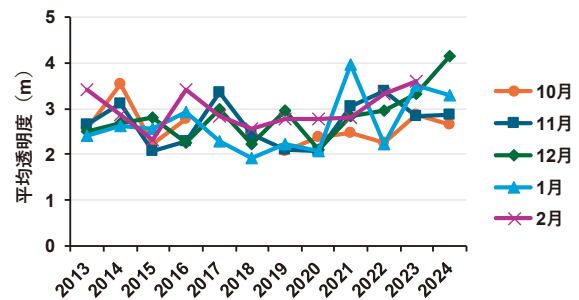


図 26 佐賀市における 1985 年から 2024 年の 10 月および 11 月の合計降水量，日平均全天日射量，日照率の変化

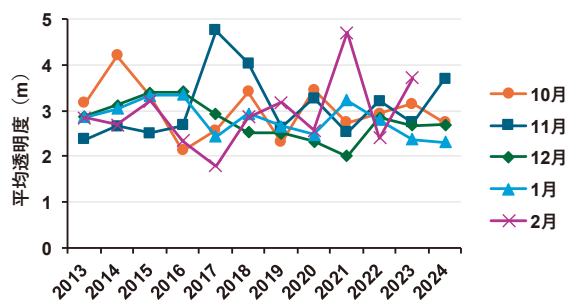
a) 奥部沿岸定点 (Stn. T2-T5, T13)



b) 奥部沖合定点 (Stn. P1, P6, Stn.6)



c) 中央部沿岸定点 (Stn. 7-9)



d) 中央部沖合定点 (Stn. 1-5)

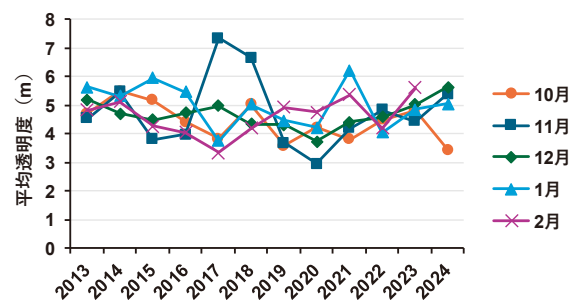


図 27 2013 年度から 2024 年度における各月の a) 奥部沿岸定点，b) 奥部沖合定点，c) 中央部沿岸定点，d) 中央部沖合定点における平均透明度の変化

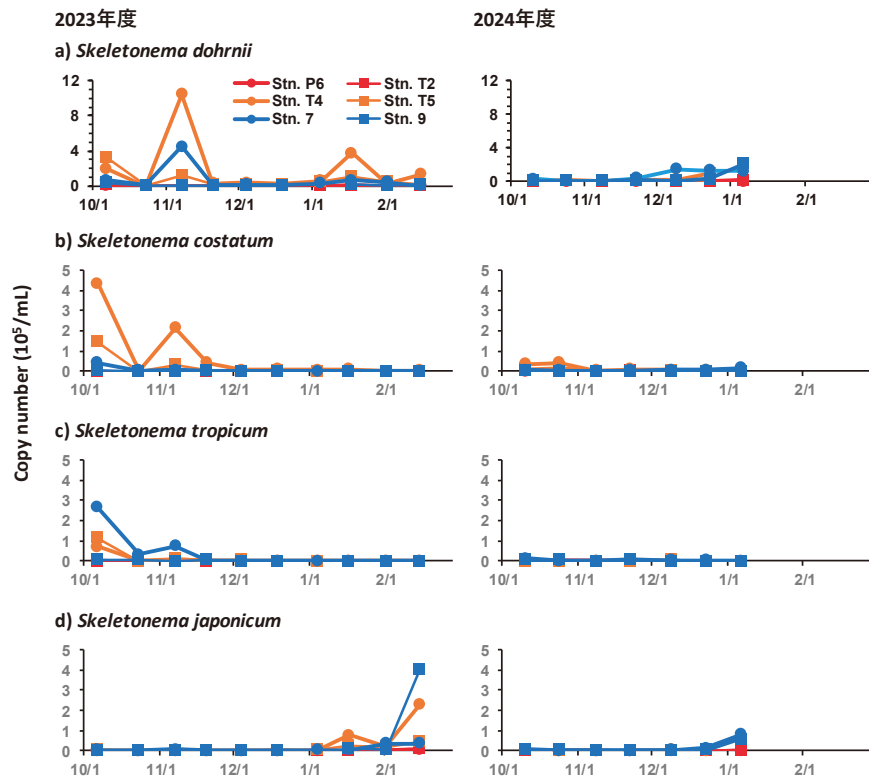


図 28 定量 PCR による各定点における *Skeletonema* 属主要 4 種のコピー数の変化 (左 : 2023 年度, 右 : 2024 年度)

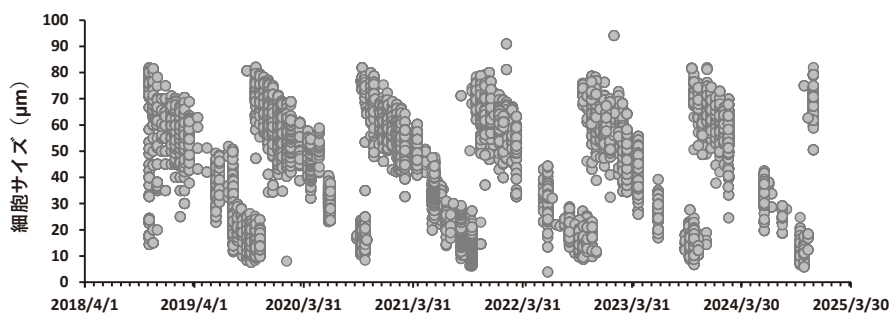


図 29 2018 年 11 月から 2024 年 11 月における *Eucampia zodiacus* の細胞サイズの変化

表 4 *Eucampia zodiacus* のサイズ回復時期と Stn. P6 の表層水温 (2019 年度のみ Stn. P1 の表層水温)

年度	サイズ回復時期	水温 (°C) (平均)
2019	11 月上旬	19.1～22.4 (20.2)
2020	10 月下旬	18.8～21.5 (20.1)
2021	10 月下旬	19.1～23.4 (21.3)
2022	11 月上旬	17.9～20.7 (19.3)
2023	11 月上旬	19.0～22.3 (20.8)
2024	11 月中旬	18.2～21.4 (20.3)

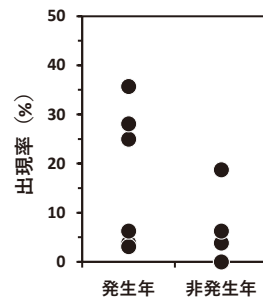


図 30 Stn. P6 の表層水温が 20℃まで低下した後の 1 ヶ月間における *Eucampia zodiacus* の赤潮発生年・非発生年別の細胞出現率

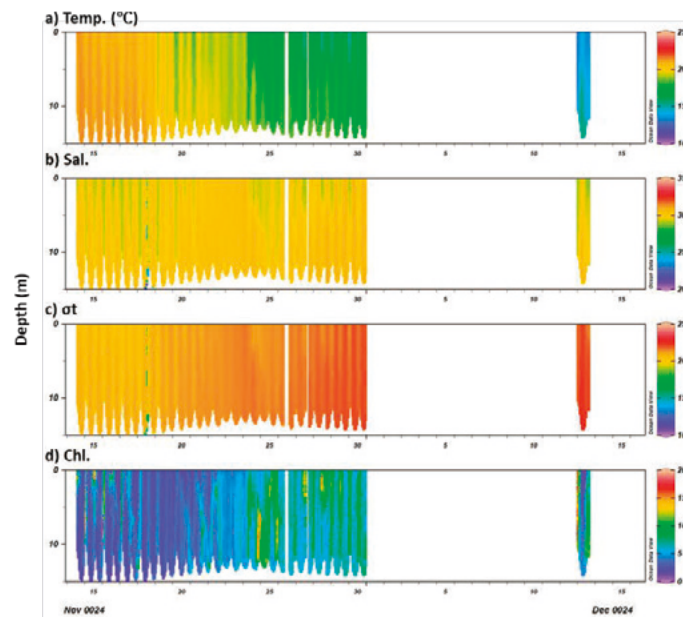


図 31 2024 年 11 月 14 日から 12 月 13 日の Stn. P6 における a) 水温, b) 塩分, c) 海水密度 (σ_t), d) クロロフィル蛍光強度の鉛直データの時系列変化 (12 月 1 日から 12 日は欠測)

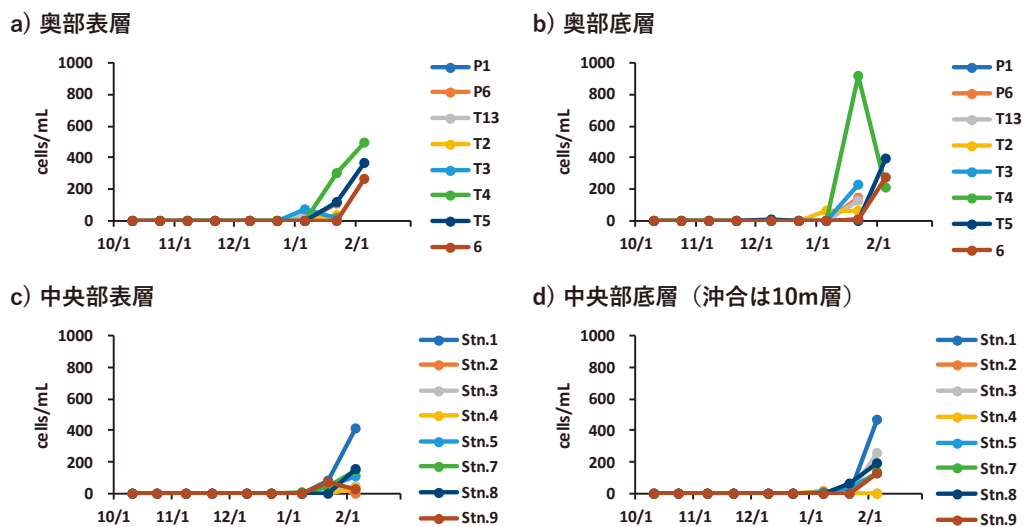


図 32 2024 年度 10 月～1 月 (一部は 2 月上旬) の定点別 *Eucampia zodiacus* の細胞密度の変化

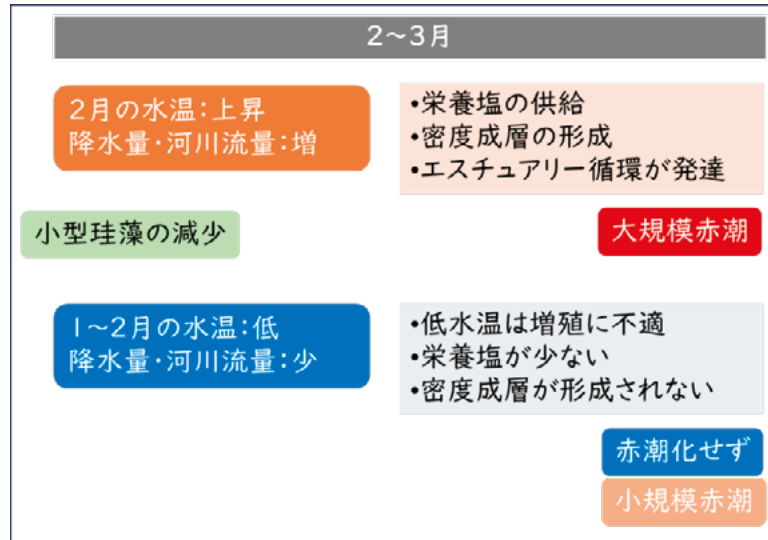


図 33 *Eucampia zodiacus* の冬季の高密度化における概念図

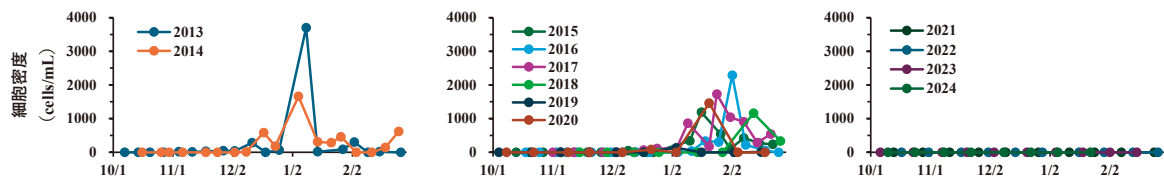


図 34 2013 年度から 2024 年度の Stn. T2 における *Asteroplanus karianus* の細胞密度の変化

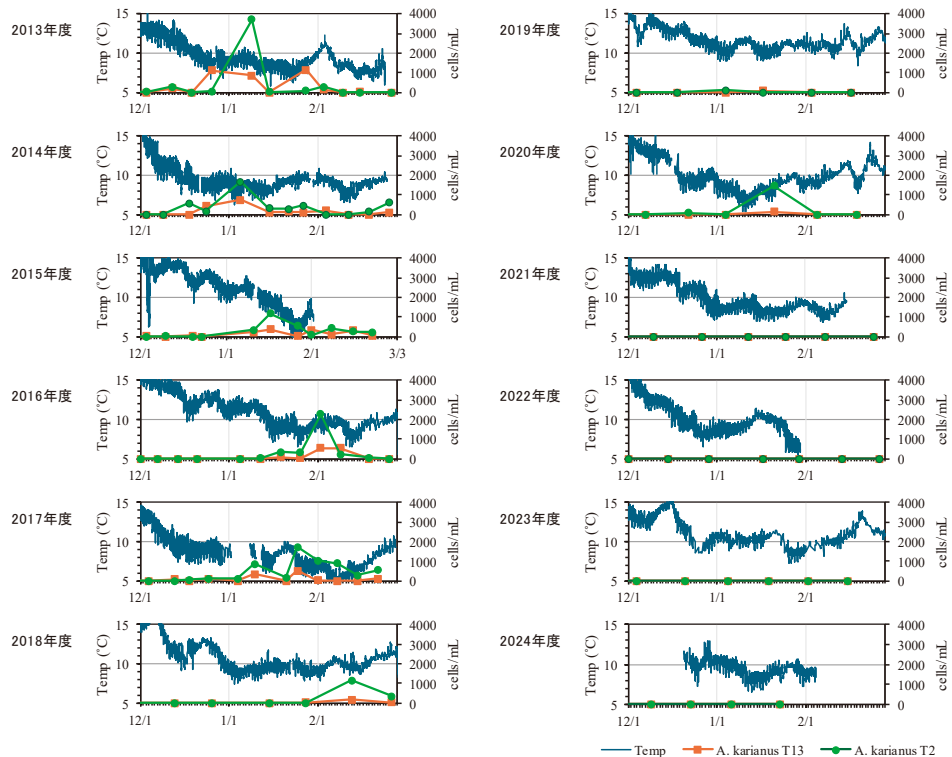


図 35 2013 年度から 2024 年度の 12 月から 2 月における T13 表層水温と Stn. T13 および T2 における *Asteroplanus karianus* 細胞密度の変化

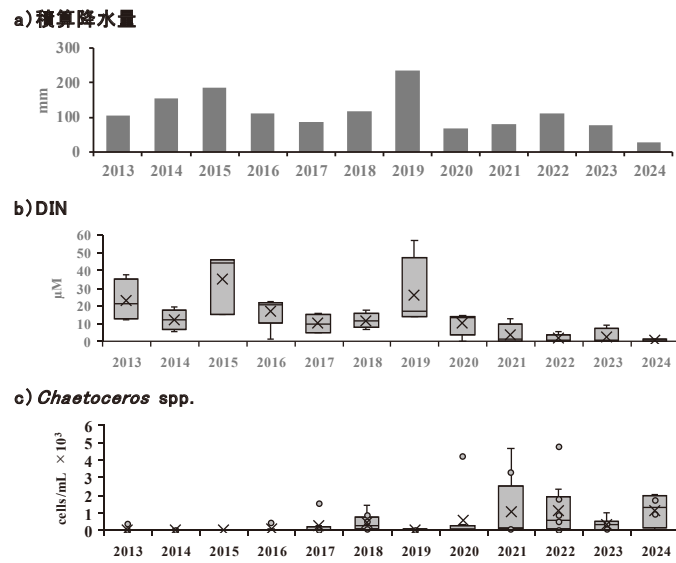


図 36 2013 年度から 2024 年度の 12 月から 1 月における a) 佐賀市の積算降水量, b) Stn. T2 における DIN 濃度, c) Stn. T2 の表層における *Chaetoceros* spp. の細胞密度