

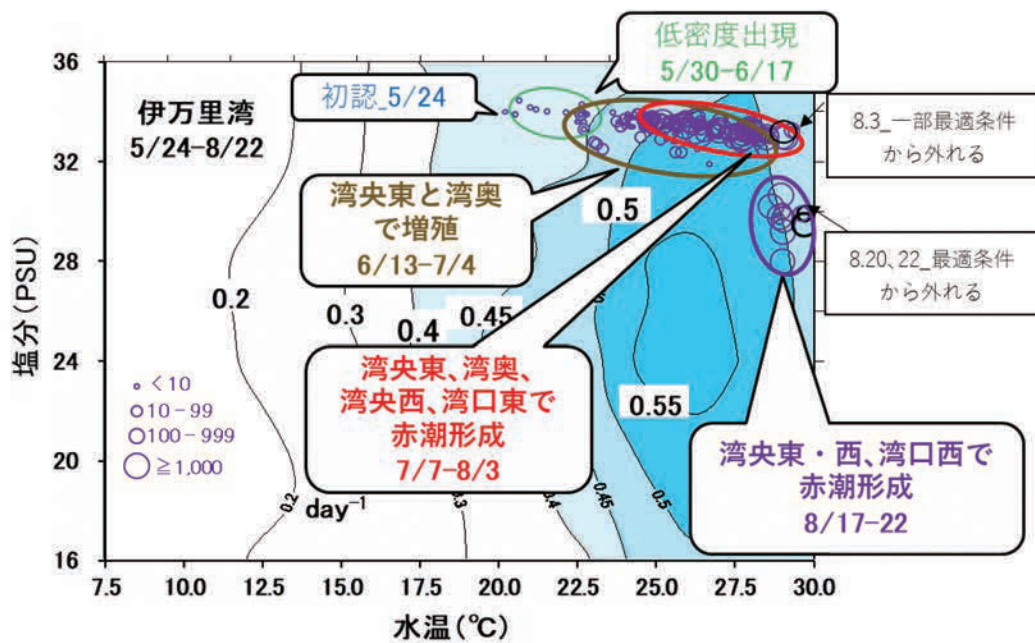


図 13 *K. mikimotoi* の発生量と比増殖速度 (day⁻¹) に及ぼす水温塩分の関係 (山砥 2006 改訂)

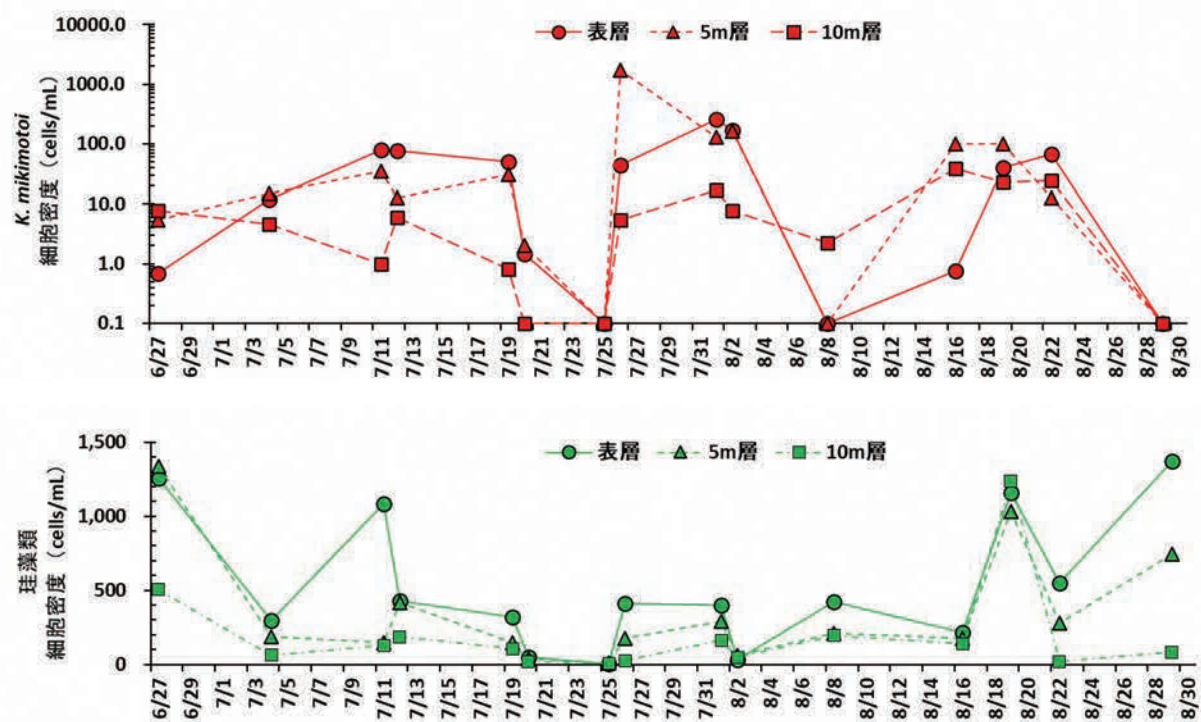


図 14 *K. mikimotoi* と珪藻の観測定点における平均細胞密度の推移

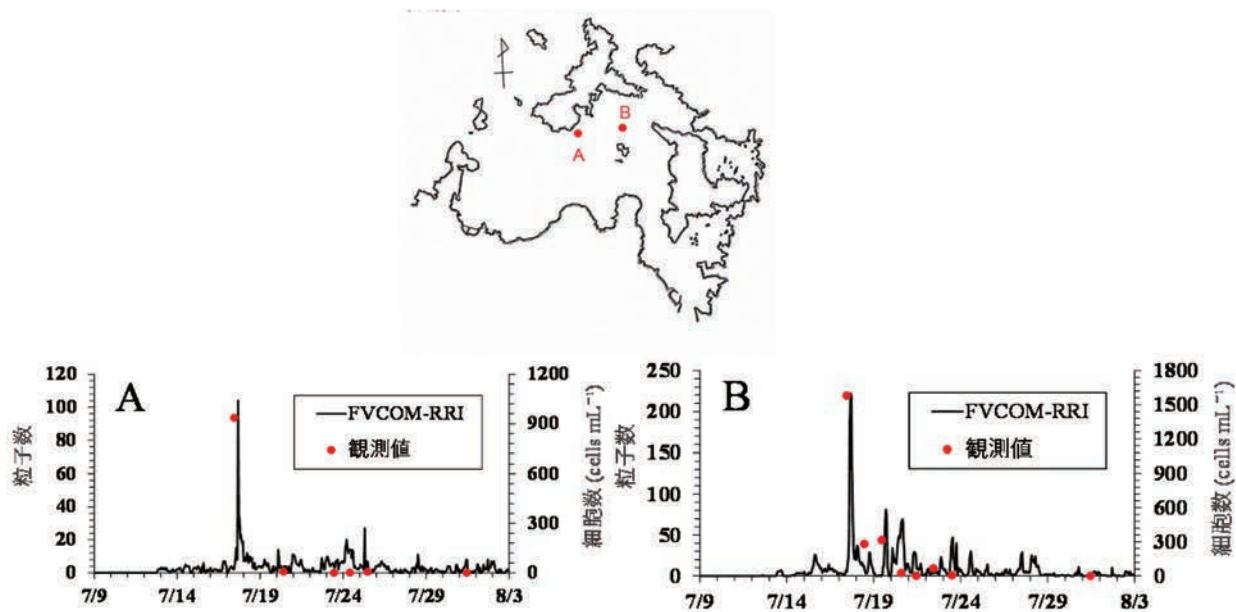


図 15 鷹島南部の観測定点 (Sta. A および Sta. B) における細胞数変動 (赤丸) と到達粒子数 (実線) の比較

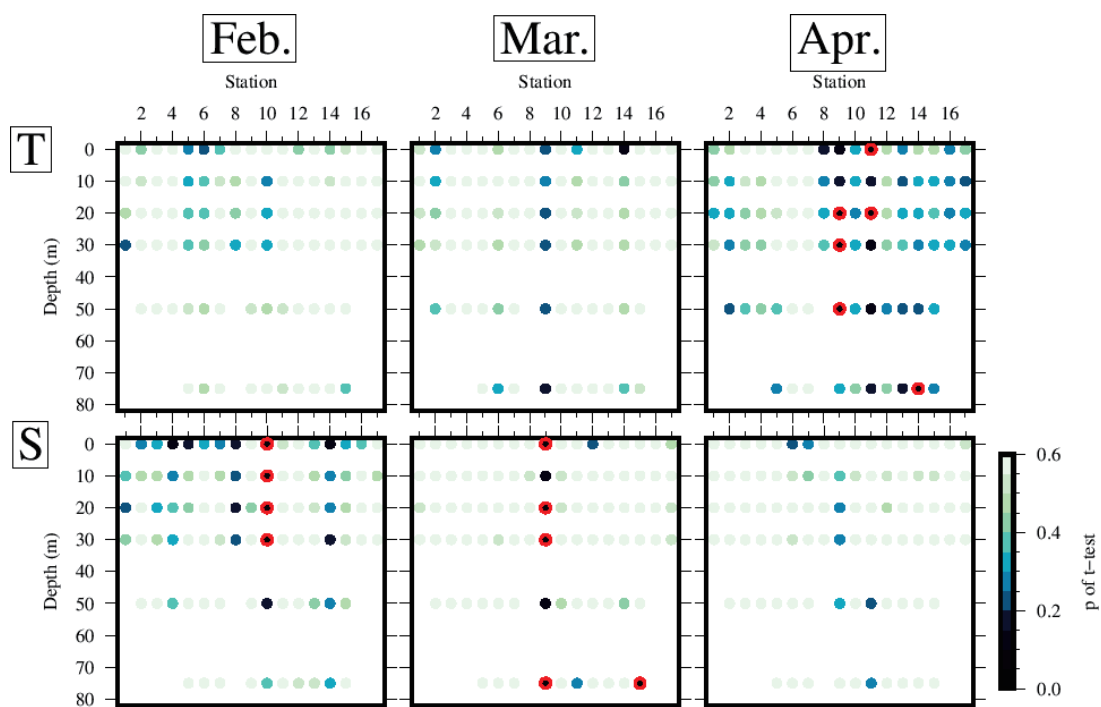


図 16 大規模・小規模発生年とその他の年の佐賀県調査点の春季水温 (上段)・塩分 (下段) 差の t 検定結果 (p 値)。○ : $p < 0.1$

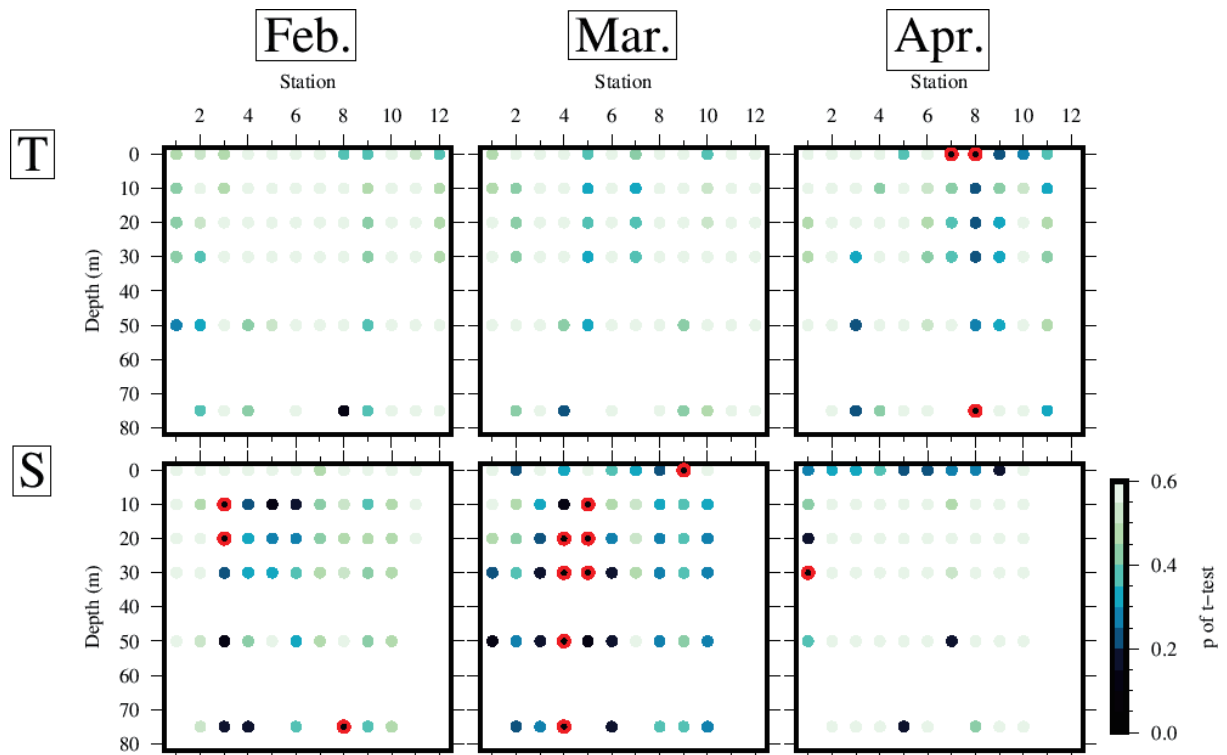


図 17 大規模・小規模発生年とその他の年の長崎県調査点（2-4月）の水温（上段）・塩分（下段）差のt検定結果（p値）。○：p<0.1

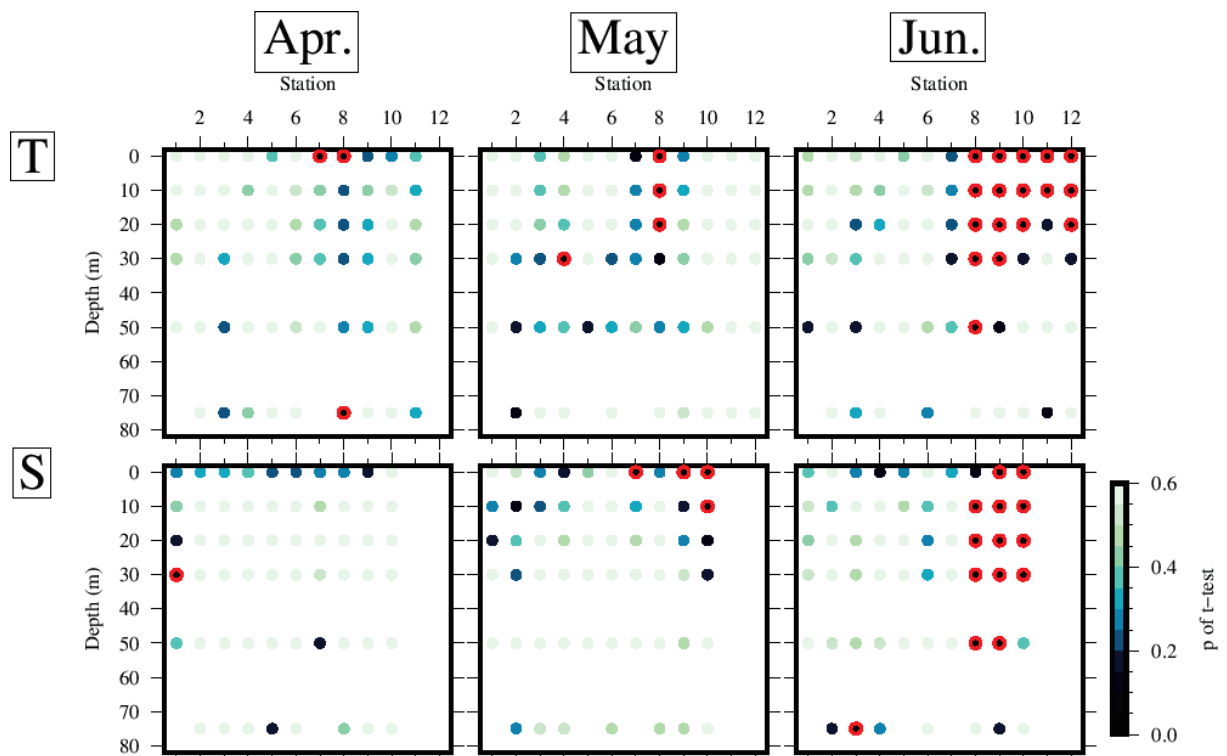


図 18 大規模・小規模発生年とその他の年の長崎県調査点（4-6月）の水温（上段）・塩分（下段）差のt検定結果（p値）。○：p<0.1

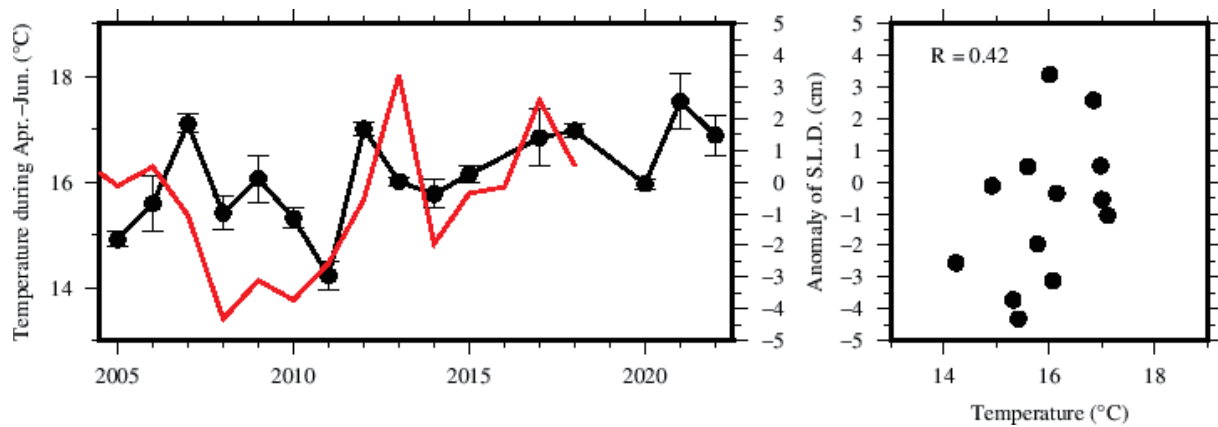


図 19 長崎県測点 7・8 の 4 月外海表層水温（黒線&黒丸）と春季済州一飯屋の水位差（赤線）

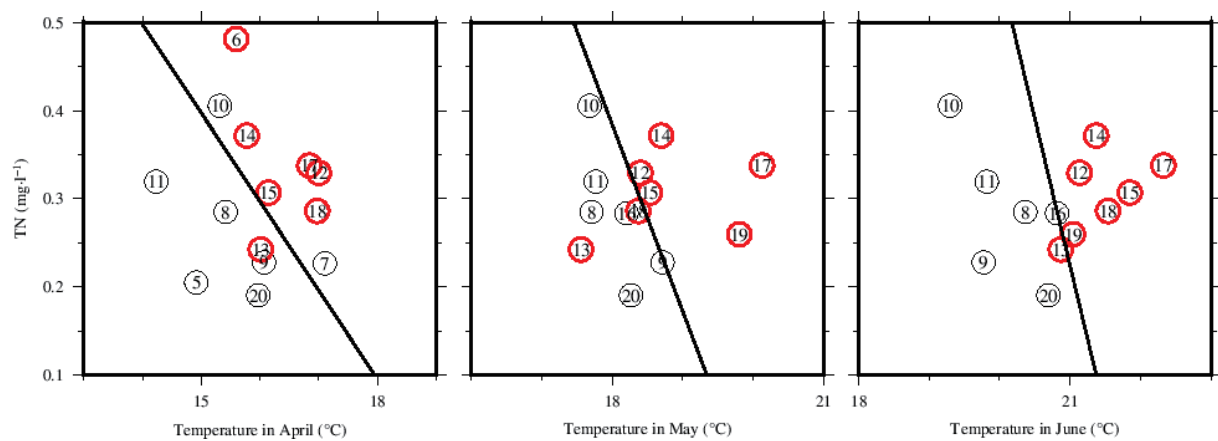


図 20 外海表層水温と春季東部海域の全窒素濃度

○：大規模・小規模発生年，○：その他の年

表 2 伊万里湾海域での過去の赤潮発生状況

年	長崎県海域			佐賀県海域		
	発生日	～ 終息日	最高細胞数 cells/mL	発生日	～ 終息日	最高細胞数 cells/mL
H24	7/16	～ 8/1	15,300	6/25	～ 8/8	104,200
25	7/24	～ 8/2	3,920	7/26	～ 8/12	13,700
26	7/23	～ 8/26	19,300	7/11	～ 8/31	28,600
27	8/11	～ 8/28	2,120	8/11	～ 11/1	3,300
29	7/13	～ 8/25	15,000	7/12	～ 9/5	13,050
30	6/6	～ 8/3	17,300	6/12	～ 9/11	34,400
R1	6/11	～ 8/7	210,500	6/11	～ 8/20	66,000
R3	6/29	～ 7/16	3,800	7/5	～ 8/5	2,150
R4	7/8	～ 8/29	4,975	7/7	～ 9/2	27,000

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 カ. 有明海・八代海・鹿児島湾海域

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, 山口 聖, 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, 藤井直幹
佐賀県有明水産振興センター
岩永卓也, 太田洋志, 野口浩介
熊本県水産研究センター
向井宏比古, 上原美咲, 安藤典幸

1 全体計画

(1) 目的

有明海では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。被害の防止対策のためには、赤潮の動態予測技術の開発が急務であり、そのためには有明海広域での調査を実施する必要がある。本課題では、関係機関が連携して有明海の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、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、既存の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シナリオを構築し、赤潮発生予察に資することを目的とする。

2 令和4年度計画および結果

(1) 目的

全体計画と同じ。

(2) 方法

1) 連続観測

有明海奥部海域に設けた Stn. T13 (図1, 表1) の表層および底層に観測機器を設置し、2022年10月から2023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. P6およびStn. P1 (図1, 表1) に設置されている鉛直観測ブイを用いて、2022年10月から2023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。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」, <http://ariake-yatsushiro.jp/>)上で公表した。

2) 定期観測

有明海奥部海域に設けた12定点および中央部海域に設けた8定点(図1, 表1)において、2022年10月から2023年2月に観測を実施した。原則月2回の頻度で、多項目水質計(JFEアドバンテック社 AAQ1183, AAQ177, AAQ176, AAQ175, 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プロファイルを観測するとともに、透明度の測定を行った。また、上記定点のうち、Stn. B3, SA, SBおよびSCを除く16定点において、表層(0m層)と底層(底上1m層)から採水し(ただし、中央部沖合のStn. 1~5では表層と10m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 NO₃-N, 亜硝酸態窒素 NO₂-N, アンモニア態窒素 NH₄-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0.1~1mL)に供した。さらに、孔径100μm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)。

(3) 結果及び考察

1) 気象および河川流量の推移

2022 年 10 月から 2023 年 2 月上旬までの気象庁 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) による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 2 に示した。また、2013 年度から 2022 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 3 に示した(2022 年度は 1 月までのデータ)。

① 気温

旬別の平均気温は、10 月は平年並みだったが、11 月は高く、佐賀市では下旬に平年値より 4.3℃、熊本市では 4.0℃上回った。11 月下旬から 12 月にかけて大きく低下し、12 月下旬は、佐賀市で平年値より 2.0℃、熊本市で 2.4℃下回った。12 月下旬から 1 月中旬にかけては大きく上昇し、1 月中旬は、佐賀市では平年値より 3.6℃、熊本市では 3.5℃上回った。1 月下旬は再び大きく低下し、佐賀市では平年値より 2.2℃、熊本市で 2.4℃下回り、2 月上旬は平年よりやや高かった。

② 降水量

旬別の積算降水量は、10 月から 1 月上旬まで概ね低く、10 月下旬から 11 月上旬は佐賀市で 0~2.0 mm、熊本市で 0 mm、12 月上旬から中旬は、佐賀市で 1.0~6.0 mm、熊本市で 2.5~3.5 mm、1 月上旬は、佐賀市で 3.0 mm、熊本市で 1.0 mm と非常に少なかった。1 月中旬は平年値を大きく上回り、佐賀市で 64.5 mm (平年値の 3.5 倍)、熊本市で 73.5 mm (平年値の 3.3 倍) を記録し、1 月下旬から 2 月上旬は平年並みとなった。

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 月から 2 月上旬まで、1 月中旬を除くと、平年並みから多めで推移し、10 月下旬の日照時間は平年値の 1.4 倍、全天日射量は 1.2 倍、1 月上旬の日照時間は平年値の 1.7~2.9 倍、全天日射量は 1.3~1.4 倍と多かった。1 月中旬は平年値より少なく、日照時間は平年値の 0.4~0.5 倍、全天日射量は 0.7 倍だった。

④ 河川流量

10 月以降の筑後川大堰直下の日平均流量は、10 月上旬は 9 月下旬の降水の影響が残り 76.3~100.8 m³/s を記録したが、10 月 27 日から 1 月 12 日までは降水量が少ないことが影響し、11 月 30 日~12 月 1 日 (53.2~58.1 m³/s) と 12 月 22 日 (57.1 m³/s) を除き、40 m³/s 台と低位で推移した。その後は、1 月 14 日に前日からの降水 (21.5~41.0 mm/day) の影響で一時的に 143.7 m³/s に増加し、1 月 23 日も降水の影響で僅かに増加して 61.2 m³/s を記録した。

2) 定期観測による海況とクロロフィル a 濃度の推移

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、2022 年 10 月から 2023 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、栄養塩濃度およびクロロフィル a 濃度の変化を図 4a に示した。また、2013 年度から 2022 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、栄養塩濃度およびクロロフィル a 濃度の変化を図 4b~c に示した。

① 水温

2022 年度の表層平均水温は、奥部では、10 月下旬に 20℃、12 月上旬に 15℃を下回り、12 月下旬に 10℃まで低下したが、1 月上旬は 11℃前後に上昇し、1 月下旬に 8℃程度まで低下した。中央部では、11 月中旬に 20℃、12 月中旬に 15℃を下回り、1 月上旬に 12℃台まで低下した。2022 年度の平均水温の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、概ね平年並みだが、12 月下旬と 1 月下旬は低めだった。

② 塩分

塩分の表層平均は、中央部沖合域で最も高く、30.5～32.2 で推移した。中央部沿岸域では、10 月中旬は 28.9、11 月上旬は Stn. 7 で 24.0 と低かったため平均としては 29.3 とやや低かったが、11 月中旬以降は 30.7～31.6 で推移した。奥部は、西側域で 27.6～30.5、東側域で 26.0～30.8 で変動した。2022 年度の表層平均塩分の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、10 月中旬と 1 月中旬は低めで、その他の時期は平年並みか高めで推移した。

③ DIN

DIN の表層平均濃度は、奥部西側域では、10 月中旬に 11.3 μM だったが、10 月下旬から 12 月下旬まで 0.03～2.7 μM と低く、1 月にやや回復して 3.4～5.9 μM だった。東側域では、10 月中旬に 15.1 μM だったが、10 月下旬に 1.9 μM に低下し、11 月中旬は筑後川河口沖定点で高かった (Stn. T3 で 18.5 μM , Stn. T4 で 14.3 μM) ため、平均濃度としては 9.8 μM に回復したが、11 月下旬から 12 月中旬まで 1.0～1.2 μM と低く、12 月下旬に 3.2 μM とやや上昇した後は回復傾向を示し、1 月下旬に 11.4 μM となった。中央部沖合域では、10 月中旬は 6.4 μM だったが、11 月上旬以降は 1 月中旬まで 1.3～3.6 μM と低濃度で推移し、1 月下旬に 6.1 μM に上昇した。沿岸域では、11 月上旬に Stn. 7 で 36.4 μM と非常に高かったため、平均濃度は 15.3 μM と高かったが、11 月中旬から 1 月上旬まで 1.1～9.6 μM で推移し、1 月中旬は降水の影響で 12.5 μM と高い値を記録した。2022 年度の表層平均 DIN 濃度の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、奥部は 10 月中旬に平年並みだったが、その後は 1 月中旬まで低く、1 月下旬に平年並みに回復し、中央部は 10 月中旬から 1 月下旬まで低めで推移した。

④ DIP

DIP の表層平均濃度は、奥部西側域で 0.3～1.2 μM 、東側域で 0.3～1.1 μM 、中央部沖合域で 0.1～0.5 μM 、沿岸域で 0.1～0.7 μM だった。変動傾向は概ね DIN と同様だった。2022 年度の表層平均 DIP 濃度の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、奥部で 10 月中旬と 1 月下旬に平年並みだったのを除くと低く、中央部では 12 月中旬と 1 月下旬に平年並みだったのを除くと低かった。

⑤ DSi

DSi の表層平均濃度は、奥部では、10 月中旬に西側域で 78.0 μM 、東側域で 99.4 μM と高く、その後は西側域で 5.6～21.4 μM 、東側域で 15.4～49.4 μM だった。中央部では、沖合域で 3.0～17.7 μM 、沿岸域で 13.1～55.0 μM だった。2022 年度の表層平均 DSi 濃度の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、10 月中旬は奥部で高く、中央部では平年並みだったが、その後は 1 月下旬まで低かった。

⑥ クロロフィル *a* (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 月は 12.6～22.6 $\mu\text{g/L}$ と高く、11 月中旬から 12 月中旬は 5.4～8.5 $\mu\text{g/L}$ に低下し、12 月下旬から 1 月中旬は 10.1～11.3 $\mu\text{g/L}$ とやや高かった。東側域では、10 月は 21.1～24.7 $\mu\text{g/L}$ と高く、11 月から 1 月中旬は 7.2～14.7 $\mu\text{g/L}$ とやや高めで推移した。中央部沖合域では、10 月中旬に 13.4 $\mu\text{g/L}$ 、1 月上旬に 11.9 $\mu\text{g/L}$ 、1 月下旬に 12.6 $\mu\text{g/L}$ とやや高く、それを除くと 5.1～9.9 $\mu\text{g/L}$ で変動した。沿岸域では、10 月中旬に 44.5 $\mu\text{g/L}$ と非常に高い値となり、1 月上旬に 14.6 $\mu\text{g/L}$ 、1 月下旬に 12.0 $\mu\text{g/L}$ と高い値を記録し、それを除くと 5.8～9.6 $\mu\text{g/L}$ で変動した。2022 年度の表層平均 Chl. *a* 濃度の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、10 月は平年より高く、その後は平年並みからやや高めで推移した。

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

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., *Asteroplanus karianus*, 渦鞭毛藻の *Akashiwo sanguinea* である。珪藻の *Rhizosolenia imbricata* は、2000 年度に大規模なノリ色落ち被害をもたらしたが、その後は本種による赤潮は発生しておらず、2022 年度も出現は僅かだった。

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、2022 年 10 月から 2023 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 5 に示した。なお、図 5 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表示されている。また、2022 年度の海域別の表層平均細胞密度の変化、2013 年度から 2022 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 6 に示した。

① *Chaetoceros* spp. (図 5a, 6a)

Chaetoceros spp.の平均細胞密度は、奥部西側域では、10 月は 1894.5~1908.5 cells/mL と高く、11 月下旬から 12 月下旬まで 50.5~188.0 cells/mL と低位で推移し、1 月下旬に再び上昇して 1914.5 cells/mL を記録した。奥部東側域では、10 月は 2867.5~3200.0 cells/mL と高く、その後は低下傾向となり、1 月下旬は 7.5 cells/mL と非常に低かった。中央部では、10 月中旬に沖合域で 1765.0 cells/mL、沿岸域で 6000.0 cells/mL と高かったが、その後は低下し、11 月は沖合域で 127.4~973.0 cells/mL、沿岸域で 147.0~1073.3 cells/mL となり、12 月から 1 月は沖合域、沿岸域とも 100 cells/mL 未満となった。2022 年度の細胞密度変化を過去 9 ヶ年と比較すると、2018 年度以降は秋季に細胞密度が上昇する傾向がみられたが、2022 年度も同様な傾向であり、奥部西側域では 1 月下旬にもやや高かった。

② *Skeletonema* spp. (図 5b, 6b)

Skeletonema spp.の平均細胞密度は、奥部では、10 月中旬から 11 月下旬まで 20.0~450.0 cells/mL と低かったが、12 月中旬に西側域の六角川河口沖定点 (Stn. T2, T13) を除いて上昇し、12 月下旬まで 1347.0~4852.5 cells/mL を記録した。1 月中旬には西側域で 9228.8 cells/mL、東側域で 6115.0 cells/mL と高い密度となり、1 月下旬には西側域では 5370.0 cells/mL と高い密度が継続したが、東側域では 687.5 cells/mL に低下した。中央部では、10 月中旬に沿岸域では Stn. 9 で高い密度 (4800 cells/mL) を記録したことで平均では 1600.0 cells/mL とやや高かったが、それを除くと沖合域、沿岸域とも 12 月中旬まで 18.8~896.0 cells/mL と低めで推移した。1 月上旬に沖合域では 3960.0 cells/mL に上昇し、沿岸域では 16400.0 cells/mL (Stn. 7 で 21000 cells/mL、Stn. 8 で 24000 cells/mL を記録) と高密度化した。1 月中旬には沖合域で 3228.0 cells/mL、沿岸域で 2806.7 cells/mL に低下し、1 月下旬には沖合域で 250.0 cells/mL、沿岸域で 796.7 cells/mL まで低下した。2022 年度の細胞密度の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、奥部では密度上昇の時期が 12 月中旬と早く、1 月は非常に高くなり、中央部では 12 月までは低く、1 月は非常に高かった。

③ *Eucampia zodiacus* (図 5c, 6c)

Eucampia zodiacus は、10 月中旬は奥部の広域に出現し、平均細胞密度は西側域で 68.5 cells/mL、東側域で 22.5 cells/mL を記録した。その後は 12 月上旬まで、奥部から中央部の広域に散在的に出現したが、細胞密度は 11 月下旬から 12 月上旬は西側域の Stn. T2 における 4.0 cells/mL が最高だった。12 月中旬に、奥部西側域の六角川河口沖の Stn. T2 (表層で 944 cells/mL、底層で 1112 cells/mL) から鹿島市沖の Stn. T13 (表層で 1018 cells/mL、底層で 574 cells/mL) およびその沖合の Stn. P6 (表層で 290 cells/mL、底層で 132 cells/mL) で高密度化し、その影響により奥部西側域で平均 563.2 cells/mL を記録したが、東側域では 9.0 cells/mL、中央部沿岸域では 0.7 cells/mL と低く、中央部沖合域では出現しなかった。12 月下旬から 1 月上旬には奥部西側域の Stn. T2 の表層で 96 cells/mL、底層で 126 cells/mL を記録したが、それを除くと全域で 1 月まで出現は僅かだった。2022 年度の細胞密度の変化を過去 9 ヶ年と比較すると、奥部西側域に限られたが、これまで上昇の見られなかった 12 月に高く、それを除くと全域で 1 月まで低かった。

④ *Asteroplanus karianus* (図 5d, 6d)

Asteroplanus karianus は、1 月まで全定点で細胞は確認されなかった。2013 年度以降では、2020 年度までは低密度であっても観測期間中に出現が確認されたが、2021 年度と同様に 2022 年度も確認されなかった。

⑤ *Akashiwo sanguinea* (図 5e, 6e)

Akashiwo sanguinea は、期間を通して広域に出現したが、10 月 17 日に奥部西側海域の Stn. T13 で 100 cells/mL、12 月 15 日に Stn. T2 で 126 cells/mL を記録したのを除くと、低密度で推移した。2022 年度の平均細胞密度を過去 9 ヶ年と比較すると、観測期間を通して概ね低かった。

4) 2022 年度の水環境と植物プランクトンの出現動態

2022 年度の植物プランクトンの出現動態としては、10 月に奥部から中央部の広域で *Chaetoceros* spp. が赤潮化し、12 月中旬に奥部西側域の六角川河口沖から鹿島市沖で *Eucampia zodiacus* が赤潮化する一方、東側域では *Skeletonema* spp. が赤潮化し、12 月下旬から 1 月まで奥部から中央部の広域で *Skeletonema* spp. の赤潮が継続したのに特徴付けられる。*Asteroplanus karianus* は 1 月まで出現が確認されず、鞭毛藻の *Akashiwo sanguinea* の細胞密度は、10 月から 1 月まで概ね低かった。

① *Chaetoceros* spp.

有明海において秋季に *Chaetoceros* spp. は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 7）。細胞密度の上昇は奥部と中央部で同時期に発生することが多く、2018 年度は両海域とも 11 月下旬に上昇し、2019 年度は 10 月下旬に中央部沿岸域で上昇した後、11 月上旬に両海域で上昇した。2020 年度は 10 月下旬に奥部東側域と中央部沿岸域で上昇し、中央部では湾口部側の定点で 11 月中旬まで継続した。2021 年度は中央部で 11 月中旬に上昇したが、奥部では 11 月下旬に湾口側の定点で上昇したに過ぎなかった。2022 年度は、10 月中旬には奥部と中央部沿岸域で高密度となり、11 月中旬まで継続した。近年はノリの採苗期や育苗期に *Chaetoceros* spp. の赤潮が発生して栄養塩濃度の低下を引き起こし問題となっている。*Chaetoceros* spp. による赤潮の発生要因の解明は重要な課題であるが、有明海において秋季に赤潮化するようになった要因は現在のところ明らかでなく、今後の課題となる。

② *Skeletonema* spp.

有明海において *Skeletonema* spp. の赤潮は冬季に毎年発生している。奥部では 12 月以降、主に 1 月に入ってから高密度化するが、2022 年度は 12 月中旬から赤潮が確認された（図 8）。福岡県海域では、12 月 12 日に筑後川河口沖合で赤潮が確認された後、赤潮は南東部へ拡大していった（福岡県赤潮発生状況速報 FO-15）。佐賀県海域では、12 月 15 日に六角川沖より東方の水域（筑後川河口沖から東与賀町地先）で赤潮が確認された。そして、六角川沖より西方の水域（白石町地先から鹿島市地先）で 12 月 12 日から発生していた *Eucampia zodiacus* による赤潮が終息した 12 月下旬には、ほぼ全域で赤潮が確認されるようになった（佐賀県赤潮発生状況速報 SA-2022-16 および 17、佐賀県海況速報 19 号）。中央部沿岸域では、12 月 12 日に奥部寄り（荒尾市地先）と湾口寄り（宇土市赤崎地先）で赤潮が確認され、12 月 26 日には熊本県沿岸の広域で確認されるようになり、その後は全域で細胞密度が上昇していった（熊本県赤潮情報第 69, 70, 72 号）。

奥部西側域では、冬季に発生する赤潮は、六角川や塩田川の河口域が初期増殖域とされ、増殖する時期は水温が 12℃を下回り、全天日射量が 10 MJ/m² を超え（山口ら 2018）、小潮期から大潮期に向かうタイミングで密度が上昇する（福岡ら 2020）。2022 年度の西側域の Stn. T13 の表層水温は、12 月 15 日に 12℃を下回り、12 月下旬は 10℃を下回った（図 9 上）。六角川河口沖の西方に位置する Stn. T2 や Stn. T13 では、*Skeletonema* spp. の細胞密度は水温が 12℃を下回った 12 月中旬から下旬の小潮期から大潮期にかけて急激に上昇していた。12 月における高密度化は 2017 年度にもみられたが、2017 年度も Stn. T13 の表層水温は 12 月中旬に 12℃を下回り、細胞密度は 12 月中旬に上昇していた（図 9 下）。一方、六角川河口沖の東方に位置し、筑後川河口沖に近い Stn. T3 と Stn. T4 では、細胞密度は 12 月上旬から中旬にかけて上昇していた（図 9）。このように、筑後川河口沖に近い Stn. T3 と Stn. T4 において、六角川河口沖の西方に位置する Stn. T13, T2 よりも早い時期の細胞密度の上昇は、2013 年度以降の観測では確認されていない。有明海の冬季に奥部海域で赤潮化する種は *S. dornii-marinoi* とされているが、他にも *S. japonicum* や *S. grevillei* が出現することが報告されている（Yoshida et al. 2023）。種により増殖に適した環境条件は異なり、*S. japonicum* は *S. dornii-marinoi* と同様に低水温に適応しているとされており（Kaeriyama et al. 2011）、奥部東側域で赤潮化した種は西側域で赤潮化した種と異なる可能性も考えられる。

Skeletonema spp. の初期増殖は休眠期細胞の発芽が重要な役割を果たしていると考えられ、休眠期細胞の発芽には水温とともに水柱の光環境が重要であることが知られている（板倉 2000）。2022

年度の 12 月における日照時間および全天日射量は平年並みだったが、定期観測（小潮期）における奥部定点の平均透明度は 11 月から 12 月に高かった（図 10）。透明度が高いことにより小潮期には水中の光環境が良く、休眠期細胞の発芽が促進されたことにより増殖したのかもしれない。しかし、11 月から 12 月に透明度が高くなった要因については明らかでない。今後は中央部海域も含め、赤潮化した種を把握しての検討が、有明海における *Skeletonema* 属による赤潮の発生機構の解明には必要である。

③ *Eucampia zodiacus*

2018 年度から実施している濃縮試料による細胞サイズと細胞密度の変化を図 11, 12 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）。*E. zodiacus* は休眠期細胞が知られず、秋季に細胞サイズが最小から最大に回復するが、2022 年度は 11 月上旬にサイズ回復（大型化した細胞が全体の >50% を基準とする）したと判断された（図 11, 13）。2019 年度から 2021 年度の細胞サイズ回復は、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 14）。2022 年度の Stn. P6 の表層水温は、10 月下旬に一時的に 20℃を下回り、11 月上旬に低下傾向が鈍化した後再び低下して 20℃を下回った。2022 年度のサイズ回復はこれまでと同様におよそ 20℃まで低下した時期だった。

有明海における *E. zodiacus* による赤潮は、2 月から 3 月に広域で同時期に発生するのが特徴であるが、2022 年度（1 月まで）は 12 月に奥部西側域の湾奥という限られた水域で高密度化した。11 月から 12 月における細胞密度の上昇は、2013 年度以降では、2014 年度、2018 年度、2019 年度にみられたが、単独での赤潮化までは至らず、2014 年度の熊本県海域で *Chaetoceros* spp. との混合赤潮として記録されたのみだった（図 15）。2019 年度は、12 月下旬から奥部で 100 cells/mL 以上となる定点がみられるようになり、2 月まで 100 cells/mL 以上となる定点がパッチ状にみられ、2 月下旬以降は 1000 cells/mL 以上を記録する定点もみられた。一方、2014 年度と 2018 年度は、11 月に奥部や中央部で密度が上昇した後、12 月には出現が確認される定点が減少すると共に細胞密度も低下し、1 月下旬に再び広域に出現して 100 cells/mL 以上となる定点がみられ、2 月には広域で密度が高くなった。秋季に細胞密度が上昇した 2014 年度、2018 年度、2019 年度、2022 年度の奥部における各定点での細胞密度をみると、2014 年度に東側域の Stn. T5 で細胞密度が上昇したのを除くと、2022 年度と同様に西側域の Stn. T13、Stn. T2 とその沖合の Stn. P6 で高かった（図 16）。

冬季の *E. zodiacus* の赤潮化では、栄養塩の競合する小型珪藻が減少し、栄養塩濃度も低い状況で、低栄養塩濃度でも増殖できる *E. zodiacus* が増加するとされる（Ito et al. 2013）。2022 年度の 10 月から 12 月は降水量が少なく、筑後大堰直下の流量も低位で推移し、栄養塩濃度も低い状況が続き、10 月から発生していた *Chaetoceros* spp. による赤潮は 11 月下旬には終息していたことから、2022 年度の 12 月も小型珪藻の細胞密度は低く、栄養塩濃度が低い状況で *E. zodiacus* が増加したことになる（図 17）。細胞の増殖には光環境が重要であるが、既に述べたように、2022 年度の 11 月から 12 月の日照時間および全天日射量は平年並みである一方で透明度は高かった。有明海では 10 月下旬から 11 月上旬に *E. zodiacus* の細胞サイズは最小（10 μm 程度）から最大（80 μm 程度）に回復することから、細胞密度が上昇した 11 月から 12 月の細胞サイズは比較的大きかった（2018 年の 11 月中旬は平均 66.1 μm、2019 年 12 月中旬は 62.4 μm、2022 年 12 月中旬は 61.7 μm）。大きな細胞は沈降速度も大きいと考えられるが、Stn. T2 や T13 のような浅い水域では、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、2022 年度は小潮期の良好な光環境下で増殖できたのかもしれない。

これまで、秋季のデータに基づく冬季の赤潮の発生・非発生の予察の可能性として、11 月の出現率に着目してきた（福岡ら 2019）。2013 年度から 2022 年度の各月の出現率（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）の変化を図 18 に示した（2022 年度は 1 月まで）。11 月の出現率は、赤潮発生年において 3.1~60.5% であり、赤潮非発生年は 2021 年度の 31.3% を除くと 0.0~1.6% と低かった。2022 年度の 11 月の出現率は 12.5% であり、出現率からは赤潮発生年に該当した。11 月の細胞出現率が高くなる環境要因として、降水量が少ないことで表層塩分が大

きく低下せず、風等の影響で鉛直混合が生じ易い環境となり、サイズ回復した大型の細胞が上層に巻き上げられて増殖に有利な光条件の良い層に出現することで、細胞の生残に有利となると考えられている（福岡ら 2018）。Stn. P6 における水質連続観測データでは、2022 年度も細胞サイズ回復後の表層塩分は大きく低下することなく、海水密度の鉛直勾配は小さかった（図 19）。

④ *Asteroplanus karianus*

Asteroplanus karianus は、有明海においては主に奥部西側域の六角川河口沖および塩田川河口沖に出現し（松原ら 2016, 山口ら 2018）、水温が 10°C 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（松原ら 2016）。本種の休眠期細胞の発芽とその後の成長における至適水温は 10～20°C であることから、低水温期に増殖できると考えられている（Matsubara et al. 2022）。2013 年度から 2020 年度の 8 ヶ年においても、細胞密度は概ね水温が 10°C 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。しかし、2021 年度と 2022 年度は、水温が 10°C を下回った後も出現が確認されなかった（図 20）。本種は 2007 年度から毎年、赤潮を形成するようになり、単独で濃密な赤潮を形成することもあった（松原 2016）。しかし、2015 年度以降は、単独での赤潮は形成されず、2020 年度に混合赤潮として記録されたのみだった。2007 年度から赤潮を形成するようになった要因、そして 2015 年度以降に赤潮がほとんど形成されず、2021 年度以降は細胞が確認されなくなった要因は明らかでない。

⑤ *Akashiwo sanguinea*

Akashiwo sanguinea は、2016 年度と 2017 年度に秋季を中心に奥部および中央部で高密度化し、栄養塩濃度が大きく低下して一部でノリの色落ちが発生した。高密度化の要因として、表層塩分の低下が指摘されており、本種の好む低塩分環境（Matsubara et al. 2007）と躍層の形成による表層への集積が影響した事が示唆された（山口ら 2018, 福岡ら 2018）。2022 年度は、本事業の観測点では期間を通して低密度での出現だったが、10 月に福岡県海域と佐賀県海域（筑後川河口域から太良町地先）、11 月に熊本県海域（熊本港地先）で赤潮が報告された。2022 年度は、比較的降水量が少なく、塩分も平年並みから高めで推移したことにより、広域化せず局所的な高密度化に留まったと推察される。2022 年度の本事業の観測点で比較的高い細胞密度が記録されたのは、奥部西側海域の Stn. T13 と Stn. T2 であり、どちらも河口沖の定点だった。

3 5 年間のまとめ

有明海のノリ色落ち原因珪藻としては、広域で発生し、栄養塩の少ない状況で赤潮化して栄養塩を枯渇させる *Eucampia zodiacus* が最も注意を必要とする種といえる。また、冬季に奥部海域を中心に赤潮を形成する *Skeletonema* spp. や、近年は中央部海域で秋季に赤潮化している *Chaetoceros* spp. が注意の必要なグループとなる。ここでは、5 年間のまとめとして、*E. zodiacus* について赤潮の発生メカニズムと短期・長期の予察手法について取りまとめる。

有明海における *E. zodiacus* の赤潮発生メカニズムについては、2011 年度の赤潮の発生状況の解析から、小型珪藻の衰退と光環境の好転が影響することが示唆されている（Ito et al. 2013）。即ち、*Skeletonema* 等の小型珪藻の増殖により栄養塩濃度が低下し、栄養塩濃度が低下した結果として小型珪藻が減少し、代わって低栄養塩濃度でも増殖できる *E. zodiacus* が増加し、さらに、大潮期の鉛直混合により細胞が水柱に広く分散し、小潮期の濁度低下による光環境の好転により増殖する。2018 年度は 2 月下旬から 3 月中旬にかけて、4 年ぶりに有明海の奥部から中央部の広域で大規模な赤潮が発生した（図 15）。1 月に *Skeletonema* spp. が高密度化していたが、1 月下旬をピークとして栄養塩濃度の低下と共に細胞は減少した（図 21）。*E. zodiacus* が増加する 2 月下旬は、水温が上昇傾向に転じ、降水による河川流量の増加がみられた（図 21）。定期観測データからは、湾奥で小潮期に密度成層が形成されていることが確認され、*E. zodiacus* の細胞密度が高密度化したタイミングは、小潮期の塩分成層の拡大時期と一致していた（図 21, 22）。奥部西側域の Stn. P6 における水質連続観測データのクロロフィル蛍光強度からは、*E. zodiacus* の細胞は表層から底層まで存在し、密度躍層より上層は溶存酸素飽和度が高いことから、小潮期に形成された表層の混合層内で細胞が活発に

光合成を行い生産していたと考えられる（図 23）。一方で、底層に存在する細胞は表層で増殖した細胞の一部が沈降してきたものと推察される。Stn. P6 における流向は、小潮期には底層では北向き（湾奥方向）の残差流がみられ、この流れは細胞を 1 日に湾奥方向へ 4 km 程度輸送することができると見積もられる（図 24）。底層に沈降した細胞は、この流れにより湾奥部の浅海域へ輸送される可能性がある。

2 月以降の小潮期に密度成層が拡大する要因として、気温の上昇に伴う表層水温の上昇とともに、降水に伴う河川流量の増加が考えられ、河川流量は栄養塩の供給とともに、エスチュアリー循環の形成と成層の強化につながり、表層混合層での *E. zodiacus* の活発な増殖に関係していたと示唆される。2018 年度以降の 2 月における *E. zodiacus* の細胞密度は、2019 年度は一部で高密度化したが、2020 年度および 2021 年度は高密度化しなかった。定期観測による Stn. P6 における 2 月の海水密度（ σ_t ）の鉛直変化をみると、2019 年度は密度躍層が形成されていたが、2020 年度と 2021 年度は水温上昇期中の中旬以降では明瞭な躍層はみられなかった（図 25）。河川流量は、2019 年度は 2 月に増加していたが、2020 年度は一時的な増加がみられたのみで、2021 年度は低位で推移していた（図 26）。冬季の *E. zodiacus* の増殖には、水温が上昇傾向に転ずる 2 月における降水とそれに伴う河川流量の増加が重要な要因になっている可能性がある。このことは、栄養塩を競合する小型珪藻の衰退と、2 月以降の降水と河川流量の変化から、短期的な赤潮発生予察が行える可能性があるといえる。

これまで、秋季のデータに基づく冬季の赤潮の発生・非発生の予察の可能性として 11 月の出現率に着目してきた。秋季の細胞出現率による冬季の赤潮発生・非発生の予察手法の検討では、10 月下旬から 11 月上旬に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。この時期の表層の海水密度の低下は降水に伴う河川流量の増加による。細胞サイズの回復は奥部西側域の Stn. P6 の水温に基づく 20℃まで低下した時期に起こることから、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り推定できる可能性がある。

2013 年度から 2021 年度までの 11 月の出現率による結果では、2021 年度は 11 月の細胞出現率が 31.3%と高かったが赤潮が発生しなかった。2021 年度は 2 月末まで水温が 10℃以下で推移するとともに、3 月中旬まで降水量が少なく河川流量が低位で推移した。細胞の増殖には 2 月の水温上昇と、降水に伴う河川流量の増加が重要な要因になっている可能性があることから、2021 年度についてはそのような環境条件でなかったといえる。秋季の出現率を冬季の赤潮発生の可能性としての長期予察と考え、冬季に増殖するか否かや増殖時期については、冬季の環境、特に 2 月の水温変化とともに降水および河川流量の変化によって短期的な予察を行うという、二段階での予察手法が有効ではないかと考える（図 27）。

今後は冬季の *E. zodiacus* の赤潮化について、長期および短期を組み合わせた予察手法について検証を進める必要がある。また、近年は小型珪藻の *Skeletonema* spp. や *Chaetoceros* spp. の出現様式が変化しており、変化に対応した要因解明の検討を継続していく必要がある。

引用文献

- 福岡弘紀・岡村和磨・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・岡村和磨・内藤 剛・井手浩美・藤井直幹・山口 聖・太田洋志・森川太郎・三根崇幸・松谷久雄・向井宏比古・山下博和. 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. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業 赤

- 潮被害防止対策技術の開発報告書, 水産庁, 東京. 2019 ; 157–178.
- 福岡弘紀・岡村和麿・内藤 剛・藤井直幹・吉武愛子・太田洋志・森川太郎・三根崇幸・松谷久雄・向井宏比古・山下博和. 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. 平成 31 年度漁場環境改善推進事業 赤潮被害防止対策技術の開発報告書, 水産庁, 東京. 2020 ; 178–199.
- Ito Y, Katano T, Fujii N, Koriyama M, Yoshino K, Hayami Y. Decreases in turbidity during neap tides initiate late winter blooms of *Eucampia zodiacus* in a macrotidal embayment. *J. Oceanogr.* 2013; **69**: 467–479.
- Kaeriyama H, Katsuki E, Otsubo M, Yamada M, Ichimi K, Tada K, Harrison P J. Effects of temperature and irradiance on growth of strains belonging to seven *Skeletonema* species isolated from Dokai Bay, southern Japan. *Eur. J. Phycol.* 2011; **46**: 113–124.
- 松原 賢. 有明海の新たなノリ色落ち原因珪藻 *Asteroplanus karianus*. 「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) 恒星社厚生閣, 東京. 2016 ; 252–257.
- 松原 賢・三根崇幸・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.
- Matsubara T, Shikata T, Sakamoto S, Ota H, Mine T, Yamaguchi M. Effects of temperature and salinity on rejuvenation of resting cells and subsequent vegetative growth of the harmful diatom *Asteroplanus karianus*. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 2012; **550**: 151719.
- 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.
- 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.

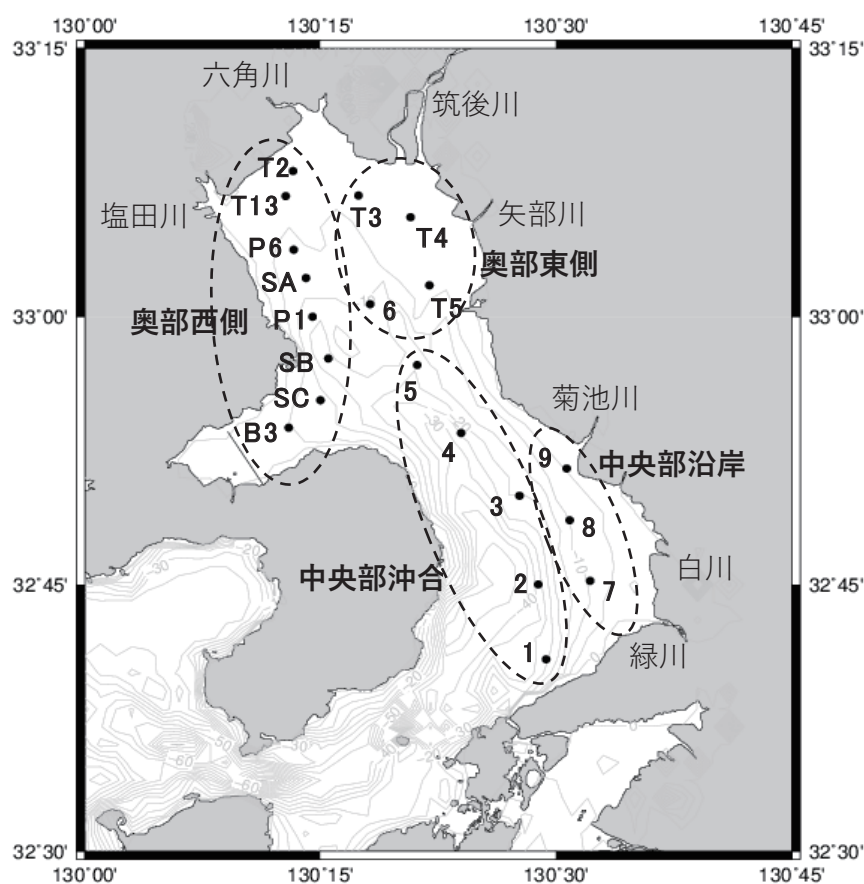


図 1 有明海における観測定点位置

表 1 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)
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)	
中央部	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

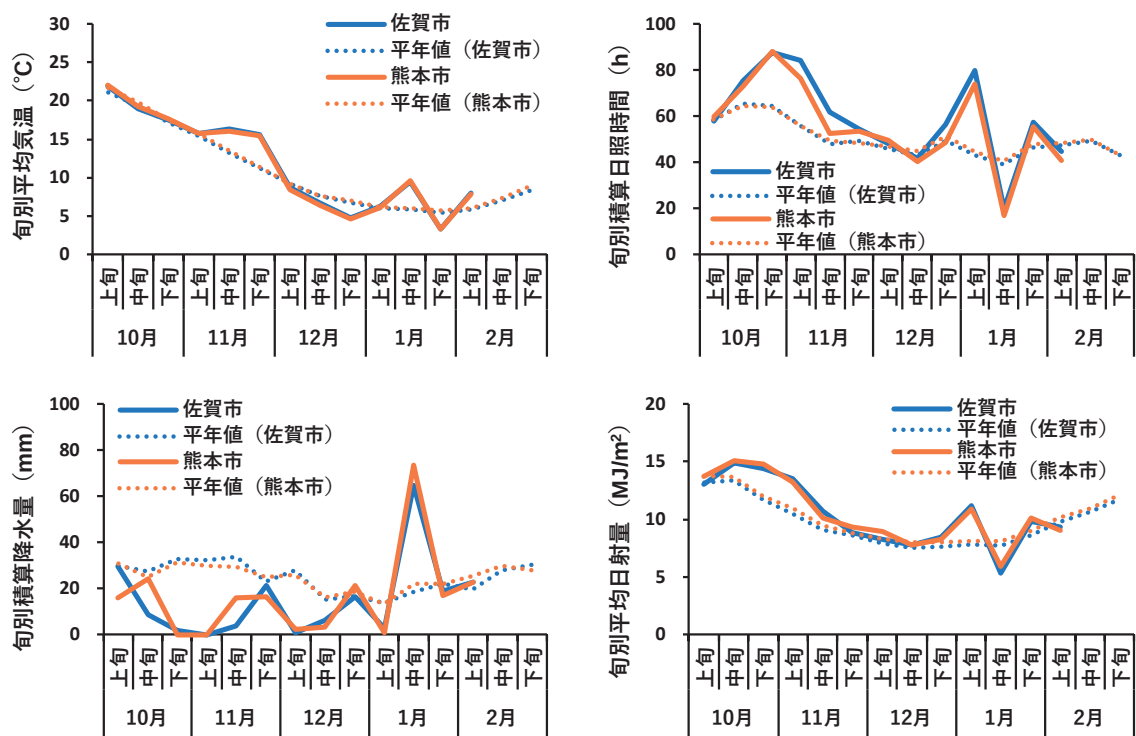


図2 2022年10月から2023年2月上旬の佐賀市および熊本市における旬別平均気温、旬別積算降水量、旬別積算日照時間、旬別平均全日射量の推移（平年値は2月下旬まで）

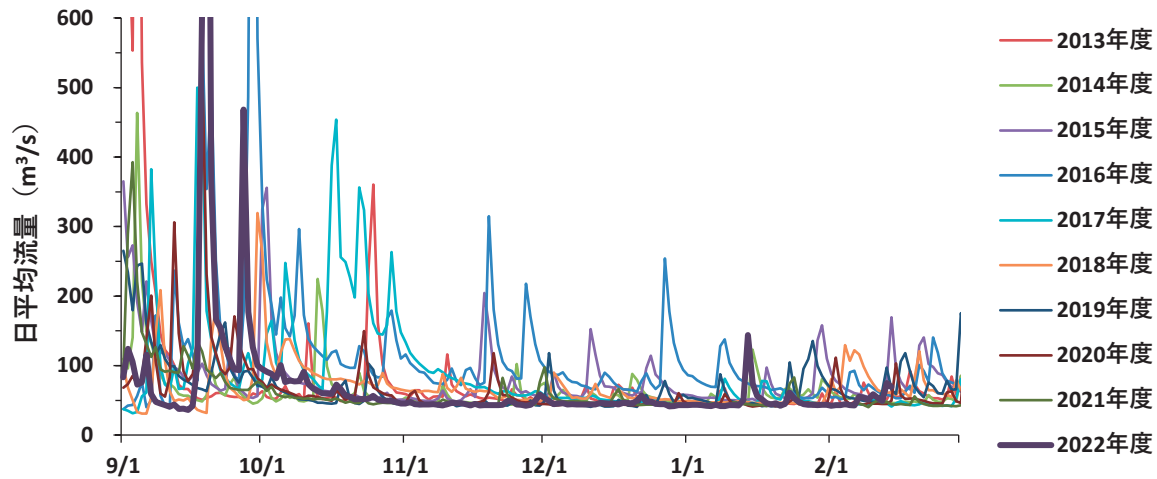


図3 2013年度から2022年度の9月から2月（2022年度は1月まで）の筑後大堰直下の日平均流量の変化