

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（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）。

（3）結果及び考察

1) 気象および河川流量の推移

2021 年 10 月から 2022 年 2 月までの気象庁(<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 2021 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（2021 年度は 2 月中旬までのデータ）。

① 気温

旬別の平均気温は、10 月上旬は高く、佐賀市では平年値より 3.9°C 、熊本市では 3.4°C 上回った。10 月中旬以降は 1 月上旬まで平年並みで推移した。1 月中旬は、佐賀市、熊本市ともやや低く（佐賀市で平年値の -1.3°C 、熊本市で -1.5°C ）、下旬はやや高かった（佐賀市で平年値の $+2.1^{\circ}\text{C}$ 、熊本市で $+1.7^{\circ}\text{C}$ ）。

② 降水量

旬別の積算降水量は、11 月上旬の熊本市、12 月中旬の佐賀市と熊本市は平年並みだったが、11 月下旬は佐賀市で 67.0 mm、熊本市で 73.0 mm と、平年値の 2.9 倍と多く、1 月下旬は佐賀市で 39.5 mm、熊本市で 42.5 mm と、平年値の 1.8～1.9 倍と多かった。それ以外は 10 mm 以下と少なかった。

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点日射量は、佐賀市、熊本市とも、平年並みか多めだった。

④ 河川流量

10 月以降の筑後大堰直下の日平均流量は、10 月 1 日は 9 月の降水の影響が残り $72.6 \text{ m}^3/\text{s}$ を記録し、その後は、降水の影響により、11 月 22 日（11 月 22 日に 23.5 mm の降水）、12 月 1 日（11 月 30 日に 36.5 mm）、1 月 24 日（1 月 23 日に 39.5 mm）に、それぞれ $82.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $97.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $82.9 \text{ m}^3/\text{s}$ を記録した。それらを除くと大きな増加はみられず、2 月上旬まで概ね $40\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度で推移した。

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、2021 年 10 月から 2022 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 2021 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

2021 年度の表層平均水温は、10 月上旬は高い気温の影響で、奥部海域で 26.4~26.9°C、中央部海域で 25.4°C と高かった。10 月下旬以降は、奥部においては、東西両側域で 12 月上旬に 15°C を下回り、1 月上旬に 10°C を下回った。中央部では、12 月中旬に 15°C を下回り、沖合域では 1 月中旬に 11°C 台、2 月上旬に 10°C 台まで低下し、沿岸域では 12 月下旬に 11°C 台、2 月上旬に 10°C を下回った。2021 年度の平均水温の変化を過去 8 カ年と比較すると、10 月上旬は奥部で高め、中央部でやや高めとなり、10 月下旬以降は平年並みで推移した。

② 塩分

塩分の表層平均は、中部沿岸で最も高く、30.6~32.0 で変動した。中央部沿岸域では、調査前の降水の影響により、11 月下旬は 29.0 (3 定点で 28.6~29.6)、1 月下旬は 28.9 (Stn. 7 で 22.9) とやや低かった。奥部は、10 月上旬から 1 月下旬まで、西側域では 29.1~30.7、東側域では 29.1~30.8 で推移した。2021 年度の表層平均塩分の変化を過去 8 カ年と比較すると、10 月から 1 月まで、平年並みから高めで推移した。

③ DIN

DIN の表層平均濃度は、奥部西側域で 0.8~15.0 μM 、東側域で 2.7~14.7 μM 、中央部沖合域で 1.6~8.4 μM 、沿岸域で 2.1~19.5 μM だった。奥部では、10 月下旬に西側域で 15.0 μM 、東側域で 14.7 μM 、11 月上旬に東側域で 14.5 μM を記録したのを除くと、0.7~7.3 μM と低濃度だった。10 月下旬の濃度上昇は、10 月 16~17 日の強風の影響で生じた鉛直混合により水塊が攪拌されたことで植物プランクトンが減少すると共に、底層の栄養塩が表層へ供給されたことによると推察される (図 5)。10 月下旬を除くと、降水量が少なく、河川流入量も少なかったことで、低濃度で推移したと推察される。中央部沿岸では、12 月中旬に *Skeletonema* spp. の高密度化 (後述) の影響で大きく低下したが、それを除くと 8.3~19.5 μM と比較的高かった。2021 年度の表層平均 DIN 濃度の変化を過去 8 カ年と比較すると、奥部は 10 月下旬~11 月上旬を除き低め、中央部は平年並から低めだった。

④ DIP

DIP の表層平均濃度は、奥部西側域で 0.5~1.8 μM 、東側域で 0.6~1.4 μM だった。中央部は奥部より低く、沖合域で 0.2~0.8 μM 、沿岸域で 0.2~0.7 μM だった。変動傾向は、奥部東西両側域と中央部沖合域では概ね DIN と同様だったが、中央部沿岸域では DIN と比較して変動が小さかった。2021 年度の表層平均 DIP 濃度の変化を過去 8 カ年と比較すると、奥部は 10 月下旬~11 月上旬、1 月中旬を除き低め、中央部は平年並から低めだった。

⑤ DSi

DSi の表層平均濃度は、奥部西側域で 26.4~65.7 μM 、東側域で 32.0~67.7 μM 、中央部沖合域で 15.2~33.0 μM 、沿岸域で 35.5~93.0 μM だった。変動傾向は、概ね DIN と同様だった。2021 年度の表層平均 DSi 濃度の変化を過去 8 カ年と比較すると、平年並みか低めだった。

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、11 月中旬に最高の 13.1 $\mu\text{g/L}$ 、1 月中旬に最低の 6.6 $\mu\text{g/L}$ を記録し、それ以外は 9.7~11.7 $\mu\text{g/L}$ だった。奥部東

側域では、10月中旬に 11.5 µg/L, 11月下旬に 14.3 µg/L とやや高く、それ以外は 8.6~9.0 µg/L だった。中央部沖合域では、12月中旬に沿岸域における *Skeletonema* spp.の密度上昇（後述）の影響を受けて 16.4 µg/L と高い値を記録したが（最高は Stn. 2 での 30.1 µg/L）、それを除くと 2月上旬まで 2.2~8.7 µg/L だった。中央部沿岸域では 1.3~33.4 µg/L と変動が大きく、10月中旬に *Skeletonema* spp.の高密度化（後述）により 12.5 µg/L, 11月中旬に *Chaetoceros* spp.の高密度化（後述）により 33.4 µg/L, 12月に *Skeletonema* spp.の高密度化（後述）により 14.8~20.5 µg/L を記録した。それ以外は 1.3~6.5 µg/L だった。2021 年度の表層平均 Chl. *a* 濃度の変化を過去 8 カ年と比較すると、奥部では平年並みで推移し、中央部では 11月中旬と 12月中旬に高め、それ以外は平年並みから低めだった。

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、2021 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、2021 年 10 月から 2022 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 6 に示した。なお、図 6 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、2021 年度の海域別の表層平均細胞密度の変化、および 2013 年度から 2021 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 7 に示した。

① *Chaetoceros* spp. (図 6a, 7a)

Chaetoceros spp.は、11 月に中央部沿岸域、11 月下旬に奥部の広域、1 月下旬から 2 月上旬に奥部西側湾奥で細胞密度が上昇した。11 月中旬は、中央部沿岸域で 2,338~13,300 cells/mL を記録し、沿岸から移流したと考えられる沖合湾口側の Stn. 1 でも 8,831 cells/mL を記録した。11 月下旬は、奥部西側域の Stn. P6（表層で 832 cells/mL, 底層で 2,530 cells/mL）、Stn. P1（1,288 cells/mL, 2,528 cells/mL）、東側域の Stn. T5（1,390 cells/mL, 4,210 cells/mL）、Stn. 6（2,470 cells/mL, 3,110 cells/mL）と、湾口側で細胞密度が高かった。1 月下旬から 2 月上旬は、奥部の Stn.T2（表層で 3,290 cells/mL, 底層で 4,640 cells/mL）と Stn. T13（2,880 cells/mL, 1,790 cells/mL）で高く、高密度域は西側湾奥に限られた。2021 年度の細胞密度変化を過去 8 カ年と比較すると、2018 年度以降、秋季に細胞密度が上昇する傾向がみられ、特に中央部沿岸域で毎年高密度化した。

② *Skeletonema* spp. (図 6b, 7b)

Skeletonema spp.の細胞密度は、奥部では、10 月から 1 月下旬までの最高が 10 月上旬の Stn. P1 の表層における 3,386 cells/mL と比較的lowだったが、その中では 10 月と 1 月にやや上昇した。10 月の奥部西側域の表層平均密度は、中旬は 1,395 cells/mL, 下旬は 747 cells/mL で、中旬の最高は Stn. P1 の表層の 3,386 cells/mL, 下旬の最高は Stn. T2 の底層の 1,804 cells/mL だった。1 月に密度が上昇した定点は限られ、>1,000 cells/mL を記録したのは、上旬では Stn.P6（底層で 1,048 cells/mL）、下旬では Stn. T2（表層で 1,240 cells/mL, 底層で 1,500 cells/mL）と Stn. T13（表層で 1,770 cells/mL）だった。中央部では、11 月下旬から 12 月中旬にかけて密度が上昇し、12 月中旬に沿岸域の表層で平均 7,713 cells/mL（最高は Stn.8 での 11,760 cells/mL）

だった。2021 年度の細胞密度の変化を過去 8 カ年と比較すると、奥部は期間を通して低く、中央部は 2020 年度と同様に 12 月に高密度化した。

③ *Eucampia zodiacus* (図 6c, 7c)

Eucampia zodiacus は、10 月から 11 月上旬は奥部で、その後 12 月中旬までは中央部までの広域で、12 月下旬は中央部で、散在的に低密度で出現した。1 月は奥部の僅かな定点で出現し、1 月中旬に Stn. T4 で 220 cells/mL を記録した。その後、2 月上旬は出現が見られなかった。2021 年度の平均細胞密度を過去 8 カ年と比較すると、2 月下旬まで低かった。

④ *Asteroplanus karianus* (図 6d, 7d)

Asteroplanus karianus は、2 月上旬まで全定点で細胞は確認されなかった。過去 8 カ年においては低密度であっても観測期間中に出現したが、2021 年度は初めて確認されなかった。

⑤ *Akashiwo sanguinea* (図 6e, 7e)

Akashiwo sanguinea は、期間を通して広域に低密度で出現したが、奥部では 1 月上旬に西側域の Stn. T2 の表層で 102 cells/mL、中央部では 12 月中旬に沿岸域の Stn. 8 の表層で 208 cells/mL を記録した。2021 年度の平均細胞密度を過去 8 カ年と比較すると、観測期間を通して概ね低かった。

4) 2021 年度の水環境と植物プランクトンの出現動態

2021 年度の植物プランクトンの出現動態としては、小型珪藻の *Chaetoceros* spp. が 11 月に奥部海域の湾口側と中央部海域の沿岸域で細胞密度が上昇し、*Skeletonema* spp. は奥部海域では比較的 low 密度で推移したが、中央部海域では 2020 年度に引き続き 12 月に沿岸域で高密度化したのに特徴付けられる。また、中型珪藻の *Asteroplanus karianus* は 2 月上旬まで出現が確認されず、大型珪藻の *Eucampia zodiacus* および鞭毛藻の *Akashiwo sanguinea* の細胞密度は、10 月から 2 月上旬まで概ね低かった。

① *Chaetoceros* spp.

有明海において、*Chaetoceros* spp. はしばしば秋期に細胞密度が上昇することがあるが、2018 年度以降は毎年高い密度を記録した (図 7a)。密度の上昇は、奥部海域と中央部海域において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 (Stn. 7, 8) で上昇した後、11 月上旬に両海域の広域で上昇した (図 8)。2020 年度は、10 月下旬に奥部東側域の湾口側 (Stn. T5, 6) と中央部沿岸域 (Stn. 8, 9) で密度が上昇し、中央部の一部では 11 月中旬まで高い密度が継続した。一方、2021 年度は、中央部海域で 11 月中旬に密度が上昇したが (最高は Stn. 8 での 13,300 cells/mL)、奥部海域では 11 月下旬に湾口側 (Stn. P1, T5, 6) でやや上昇したに過ぎなかった (最高は Stn. 6 での 2,470 cells/mL)。

有明海においては、10 月から 11 月はノリ養殖における採苗、育苗、そして冬季に使用する冷凍網の入庫が行われる時期であり、*Chaetoceros* spp. の高密度化による栄養塩濃度の低下は、ノリの成長への影響が懸念される。秋季に高密度化ようになった要因は明らかでないが、高密度化は中央部沿岸域で顕著であることから、これら海域を中心に要因の解明が今後の課題といえる。

② *Skeletonema* spp.

奥部海域では毎年冬季に赤潮化しており、奥部西側域では六角川や塩田川の河口沖が初期

増殖域とされ（山口ら 2018）、過去 8 カ年の結果でも六角川河口沖にあたる Stn. T2 とその沖合の Stn. T13 で細胞密度の上昇時期が早く、密度も高かった。2021 年度も 1 月に $>1,000$ cells/mL を記録したのは 1 月 25 日の Stn. T2 と Stn. T13 だけだったが、それぞれ 1,240 cells/mL, 1,770 cells/mL と比較的低い密度だった。奥部西側域において冬季に *Skeletonema* spp. が増殖する時期は、水温が 12°C を下回り、全天日射量が 10 MJ/m^2 を超えているとされ（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）。2021 年度は、Stn. T13 の表層水温は 12 月 20 日に 12°C を下回ったが、*Skeletonema* spp. の細胞密度の上昇は 1 ヶ月後の 1 月中旬だった（図 9）。水中の濁度は小潮期に低下するが、12 月 26～28 日の小潮期における全天日射量は 12 月 28～29 日に大きく低下し、27 日の定期観測における水中光量子量は 3 m 深で $14.3 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 、5 m 深で $2.4 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ だった。1 月 9～11 日の小潮期は、全天日射量が 10 MJ/m^2 を超え、12 日の定期観測における水中光量子量は 3 m 深で $54.3 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 、5 m 深で $14.0 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ だった。12 月下旬の小潮期は十分な光条件でなかったことで *Skeletonema* spp. の細胞密度は増加に転じず、1 月中旬の良好な光環境において増加したと考える。2013 年度においても、日射不足により *Skeletonema* spp. の細胞密度が増加に転じる時期が遅れたと指摘されている（山口ら 2018）。栄養塩濃度は低位で推移していたが、12 月中旬から下旬は非常に低く、1 月中旬にやや回復した。2021 年度は、光条件により増殖が遅れ、栄養塩濃度が低いことで最高細胞密度が低かったと考える。一方で、1 月 14 日に西側の浅い水域である塩田川河川域から南西の竹崎沖にかけて *Skeletonema* spp. による着色が確認されていた（佐賀県赤潮発生状況速報 SA-2022-1）。奥部西側域では、*Skeletonema* spp. の増殖において河口感潮域が供給源として寄与しており（山口ら 2017）、栄養塩が少なからず供給される河口に近い水域では増殖したが、栄養塩濃度の低い沖合域では増殖が促進されなかったと推察される。

中央部沿岸域では 2020 年度と同様に 2021 年度も秋季に *Skeletonema* spp. による赤潮が発生した。2020 年度は、降水による河川流量の増加にともなう表層塩分の低下で密度躍層が形成され、好天が継続したことで光環境も良好だったことが、*Skeletonema* spp. が高密度化した要因と推察された（福岡ら 2021）。2021 年度は、11 月 22 日に 37 mm、11 月 30 日に 34.5 mm の降水があり、11 月 26 日の観測では沿岸域の 3 定点で密度躍層が形成され、12 月 15 日の観測では Stn. 8 で密度躍層が形成されていた（図 10）。11 月 11 日の観測では、沿岸域で *Chaetoceros* spp. が高密度で出現したが、その後低下し、12 月 15 日の観測において *Skeletonema* spp. が 5,060～11,760 cells/mL の高い密度を記録した。*Chaetoceros* spp. の衰退の要因は明確でないが、11 月 22 日の低気圧通過による強風で水塊が攪拌されたことが影響したかもしれない。その後の降水の影響により密度躍層が形成され、栄養塩濃度も高い環境で、*Skeletonema* spp. が増殖したと推察される。しかし、2019 年度以前も 12 月に密度躍層が形成されることはあった。2020 年度から *Skeletonema* spp. が高密度化するようになった要因については明らかでなく、今後の課題といえる。

③ *Eucampia zodiacus*

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 2021 年度の奥部と中央部における各月の出現率（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 11 に示した（2020 年度は 1 月まで）。赤潮非発生年は 11 月の出現率が 0.0～1.6%（平均 0.5%）と非常に低い一方、赤潮発生年は 3.1～60.5%（平均 20.3%）と高かった。

12 月の出現率も、赤潮非発生年は 0.0~5.8% (平均 3.2%) と低く、赤潮発生年は 2020 年度の 0.0%を除くと 11.8~25.0% (平均 13.9%) と高かった。2021 年度の出現率は、11 月は 31.3%、12 月は 15.6%と高く、赤潮発生年に該当した。

出現率を用いた赤潮の発生・非発生の予察が 2013 年度以前のデータでも適用可能か、2008 年度から 2012 年度の水産庁事業（赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業）のデータを用いて検討を試みた。2008 年度から 2012 年度の観測では、植物プランクトンの計数は奥部西側域の 4 定点 (Stn. T2, P6, P1, B3) でのみ行われ、採水層も 4 層だった。ここでは同じ条件にするため、全て奥部西側域の 4 定点 (2019 年度以降は観測を行っていない Stn. B3 を除く 3 定点) の表層と底層のデータで算出した。なお、2008 年度は採水が表層のみだったことから検討から除いた。11 月の出現率は、赤潮非発生年では 0.0~25.0% (平均 5.0%)、赤潮発生年では 0.0~75.0% (平均 27.4%) だった (図 12)。赤潮非発生年の 2009 年度は 0.0%だったが、2010 年度は 25.0%と高く、また赤潮発生年の 2019 年度は定点を変えての再計算で 0.0%となった。細胞出現率による検討では、広域に設定した定点における評価が必要であろう。

Eucampia zodiacus は休眠期細胞が知られておらず、年に一回、秋季に細胞は最小サイズから最大サイズに回復することが知られている (Nishikawa et al. 2007, 松原 2015)。2018 年 10 月から、奥部から中央部の広域から選定した定点で濃縮検鏡 (表層水 500~1,000 mL を 20 μm のメッシュで濾過濃縮) により細胞サイズ (頂軸長) の測定を実施し、有明海においても 10 月から 11 月に細胞サイズが回復していることを確認した (図 13)。サイズ回復期の細胞サイズは、小型の細胞は <35.0 μm 、大型の細胞は >50.2 μm だった。サイズ回復時期 (大型細胞数が >50%となる時期) は、2021 年度は 10 月中旬から下旬と判断され、これは 2019 年度の 11 月上旬から中旬に比べ早く、2020 年度の 10 月中旬と同様だった (図 14)。細胞サイズの回復に影響する環境要因として水温に注目すると、20°C前後に低下した時期にサイズを回復していた (図 15)。2019 年度は、10 月下旬の水温低下の停滞がサイズ回復時期の遅れに影響した可能性がある。これらの結果から、11 月の細胞出現率はサイズ回復した細胞の出現によると判断される。秋季にサイズ回復した細胞が冬季に赤潮を形成する個体群のシードポピュレーションと考えられ (西川・今井 2011)、11 月に出現率が高いということは、シードポピュレーションが通常検鏡で確認される程度の細胞密度ながら広域に存在していることを示す。

細胞出現率は観測海域の偏りや観測頻度に影響されることが考えられることから、出現率が高くなる環境要因を抽出し、環境要因から冬季の赤潮の発生・非発生の予察が出来ることが重要と考える。赤潮発生年に 11 月の細胞出現率が高くなる環境要因として、表層塩分が高めで推移することで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滞留でき、細胞の生残に有利であるのではと示唆された (福岡ら 2018)。奥部西側域の Stn. P6 における連続鉛直観測データにおいて、水温が細胞サイズの回復時期の目安となる 20°Cより低下した時期の海水密度 (σ_t) は、赤潮非発生年である 2016 年度と 2017 年度においては低下後 20 日間程度、表層で低く鉛直勾配がみられたが、赤潮発生年の 2018 年度から 2020 年度と 11 月に出現率の高い 2021 年度においては鉛直的に 20~21 で一様だった (図 16)。光環境においては、4 年振りに赤潮化した 2018 年度は、水温 20°Cを下回った直後の小潮期に、*E. zodiacus* の増殖における光量の閾値である 7.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (20°C) (Nishikawa and Yamaguchi 2006) が 8 m 深まで達するなど良好だった。2018 年度は、細胞は 12 月から広域に出現し、1 月下旬には一斉に密度が上昇していた (図

16)。一方、2021 年度は、20℃を下回った後の 2 週間程度は全天日射量が低下した影響で水中の光環境も悪く、12 月から 2 月上旬まで細胞が出現した定点は少なかった（図 6, 16）。鉛直混合が生じやすい環境はサイズ回復後の細胞の増殖に有利であり、さらに光環境が良いと増殖を促進し、早期の増加につながる可能性がある。しかし、光環境については、検討できるデータが少ないことから、さらにデータを蓄積しての検討が必要である。

2018 年度から 2021 年度の細胞サイズ測定時の濃縮検鏡による細胞密度の変化を図 18 に示した。いずれの年も、細胞が最小サイズになるサイズ回復期前に密度がやや上昇していた。これは、成層の形成が弱まる秋期に、小型の細胞が表層まで出現する機会が増えたことや、光環境の良い上層に出現することで増殖が促進された可能性が考えられる。しかし、2018 年度から 2020 年度はいずれも赤潮発生年であることから、赤潮非発生年のデータとの比較が必要である。

瀬戸内海では、細胞サイズの回復期の細胞密度が高いとブルームピークまでの積算日数が短いと報告されている（西川・今井 2011）。2019 年度と 2020 年度のサイズ回復期の平均細胞密度は 0.68 cells/mL と 9.75 cells/mL だった。本研究では複数の定点を基に検討していることからブルームピークの判断が難しいため、赤潮として記録されるまでの日数とすると、2019 年度は 116 日、2020 年度は 138 日と見積もられ、細胞密度の高かった 2020 年度の方が赤潮化まで日数を要した。これらは、瀬戸内海における結果と一致しないが、2 年間のみの検討であるため、検証のためにはさらなるデータの蓄積が必要である。

冬季に形成される赤潮の発生時期や規模は年により異なるが（図 17）、2018 年度から 2020 年度の赤潮発生時の細胞サイズは 50～55 μm であり、これは瀬戸内海とほぼ同様だった（Nishikawa et al. 2007, 2013）。しかし、早期に密度が上昇した 2018 年度は、赤潮化時の細胞サイズが約 55 μm で、密度上昇の時期が遅かった 2019 年度と 2020 年度の赤潮化時の細胞サイズは約 50 μm だった。*Eucampia zodiacus* の比増殖速度は、10℃では塩分 25 以上であれば 1.0/day を上回り、水温が高くなるに従い増大する（西川 2002）。2018 年度に広域で細胞密度が上昇し赤潮化した 2 月中旬から下旬は、水温が 11℃を上回る時期だった（図 19）。2019 年度の水温は 1 月中旬から 11℃を上回っていたが、細胞密度の上昇は 2 月下旬以降と遅く、水温以外の環境要因が増殖時期に大きく影響しているといえる。冬季の *E. zodiacus* の赤潮化については、栄養塩の競合する小型珪藻の衰退や光環境の好転が重要とされる（Ito et al. 2013）。奥部西側域の Stn. 6 における細胞密度データと水質の連続鉛直観測データに基づき、*E. zodiacus* の赤潮が発生した 2018 年度と 2019 年度の *Skeletonema* spp. と *E. zodiacus* の増減の変化をしてみる（図 19）。2018 年度は、*Skeletonema* spp. が 1 月中旬の小潮期に表層で増加し始め、1 月下旬まで全層で高いクロロフィル蛍光強度を維持していたが、1 月 31 日に低気圧通過による強風の影響で強い鉛直混合が生じ、クロロフィル蛍光強度は急激に低下した。その後、2 月上旬の大潮期に *Skeletonema* spp. と判断されるクロロフィル蛍光強度は全層で上昇したが、小潮期に向かい衰退した。2 月中旬の小潮期から大潮期に向かい、*E. zodiacus* と判断されるクロロフィル蛍光強度が全層で上昇し始め、その後、河川流量の増加にあわせるように急激に上昇した。2019 年度は、2 月上旬の小潮期に表層で *Skeletonema* spp. によるクロロフィル蛍光強度の上昇がみられたが、その後の大潮期には低下していった。小潮期である 2 月 16 日の低気圧通過による強風の影響で強い鉛直混合が生じ、大潮期に向かい *E. zodiacus* と判断されるクロロフィル蛍光強度が全層で上昇していった（2 月 28 日以降に赤潮として記録）。

このように、*Skeletonema* spp.が衰退し、*E. zodiacus* が増殖していく過程には、物理的な攪拌が重要である可能性がある。

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℃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）。過去 8 カ年においても、細胞密度は概ね水温が 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。しかし、2021 年度は、Stn. T13 の表層水温は 12 月 25 日に 10℃を下回り、1 月に入ると 10℃未満で推移したが、2 月上旬まで本種の出現は確認されなかった。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、2020 年度に混合赤潮として記録されるまで赤潮を形成しなかった。2007 年度から赤潮を形成するようになった要因、そして 2015 年度以降に赤潮を形成する頻度が大きく低下し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、表層の塩分が低いことで、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）。2021 年度は、期間を通して低密度で出現したが、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で高密度化しなかったと推察される。比較的高い細胞密度が記録されたのは、1 月 12 日の奥部西側海域の Stn. T2（102 cells/mL）と 12 月 15 日の中央部沿岸域の Stn. 8（206 cells/mL）であり、どちらも河口沖の定点だった。

5) ノリ色落ち原因珪藻の赤潮発生シナリオ

有明海のノリ色落ち原因珪藻としては、広域で発生し、栄養塩類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。

Eucampia zodiacus は、ノリの冷凍網期である 2 月から 3 月に赤潮化するが、冬季の赤潮の発生・非発生の予察が秋季に出来れば、冷凍網期の開始時期等のスケジュール調整の対応に寄与できる可能性がある。また、冬季に赤潮化する時期について、数日、数週間単位での短期的な赤潮化の予察が可能となれば、摘採スケジュールでの対応に寄与できる可能性がある。*Eucampia zodiacus* の長期的な赤潮発生予察に関して、これまで 11 月の細胞出現率による評価の可能性と出現率が高まる環境条件について検討を行ってきた。細胞サイズの回復時期は水温 20℃を下回る時期であり、海水密度が鉛直的に一様で鉛直混合の生じやすい物理環境がサイズ回復した大型の細胞の出現に影響していることが示唆されてきた。そのような環境が、サイズ回復した細胞が光環境の良い上層へ巻き上げられる機会を増やし、生残や増殖に有利に働くのではないかと考える。また、サイズ回復前の小型の細胞の密度も上昇することから、サイズ回復前から上層へ出現する機会が増えることも有利に働く可能性がある。サイズ回復後の細胞の出現率が高いということは、広域で密度の上昇がみられるということであり、良

好な光環境は広域での生残や増殖に有利に働き、早期の増殖につながっているかもしれない。冬季の赤潮化では、栄養塩が競合する小型珪藻の衰退や光環境の改善が指摘されてきた。冬季に赤潮化する時期の予察では、小型珪藻の衰退時期の予察が一つの鍵といえる。小型珪藻の衰退には、栄養塩濃度の低下や気象による物理的な攪拌が影響する可能性があり、気象予報を利用した短期予察の可能性についても検討が必要であろう。

小型珪藻については、*Skeletonema* spp.による赤潮は頻繁に発生しており、発生・終息の短期的な予察はノリの摘採スケジュールの管理に寄与できると考える。冬季の奥部西側域における *Skeletonema* spp.の初期の増殖については、現象としては水温や日射との関係が明らかになっており、浅海域が初期増殖の場になっていることも明らかになってきている。一方で、近年は、秋期の *Chaetoceros* spp.による赤潮の発生頻度の増加や、中央部沿岸域における 12 月の *Skeletonema* spp.の赤潮化など、これまでと異なった状況が見られる。これら変化の要因はまだ明らかでないが、今後もモニタリングで状況を把握していくと共に、発生要因についての検討が必要であろう。

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 年間のまとめ. 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・岡村和麿・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.
- 福岡弘紀・山口 聖・岡村和麿・古賀まりの・徳田眞孝・内藤 剛・藤井直幹・岩永卓也・太田洋志・森川太郎・三根崇幸・向井宏比古・木下裕一・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. 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. 2021 ; 166–190.
- 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.
- 松原 賢. ノリの色落ち原因珪藻ユーカンピアの増加時期の予察法の検討. 佐賀県有明水産振興センター平成 26 年度水産研究成果情報. 2015.
- 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 M, 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・紫加田知幸・坂本節子・三根崇幸・森川太郎. 太田洋志・山口 聖. ②ノリ色落ち原因珪藻の生物学的諸特性の解明, ア. ノリ色落ち原因珪藻類の物理・科学的要因に対する増殖特性, 生活史応答の把握. 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 瀬戸内海等での有害赤潮発生機構解明と予察・被害防止等技術開発報告書, 水産庁, 東京. 2018 ; 322-335.
- 西川哲也. ノリの色落ち原因藻 *Eucampia zodiacus* の増殖に及ぼす水温, 塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌 2002 ; **68** : 356-361.
- Nishikawa T, Hori Y, Tanida K, Imai I. Population dynamics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg causing bleaching of *Porphyra* thalli in aquaculture in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan. *Harmful Algae* 2007; **6**: 763-773.
- 西川哲也・今井一郎. 有害珪藻 *Eucampia zodiacus* による養殖ノリ色落ち発生予察. 日本水産学会誌 2011 ; **77** : 876-880.
- Nishikawa T, Yamaguchi H. Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg, a causative organism in the discoloration of *Porphyra* thalli. *Harmful Algae* 2006; **5**: 141-147.
- 山口 聖・松原 賢・増田裕二・三根崇幸・伊藤史郎. 有明海湾奥西部の鹿島川感潮域における高栄養塩・高クロロフィル水塊と沿岸の冬季珪藻ブルームとの関係. 沿岸海洋研究 2017 ; **54** : 193-201.
- 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.

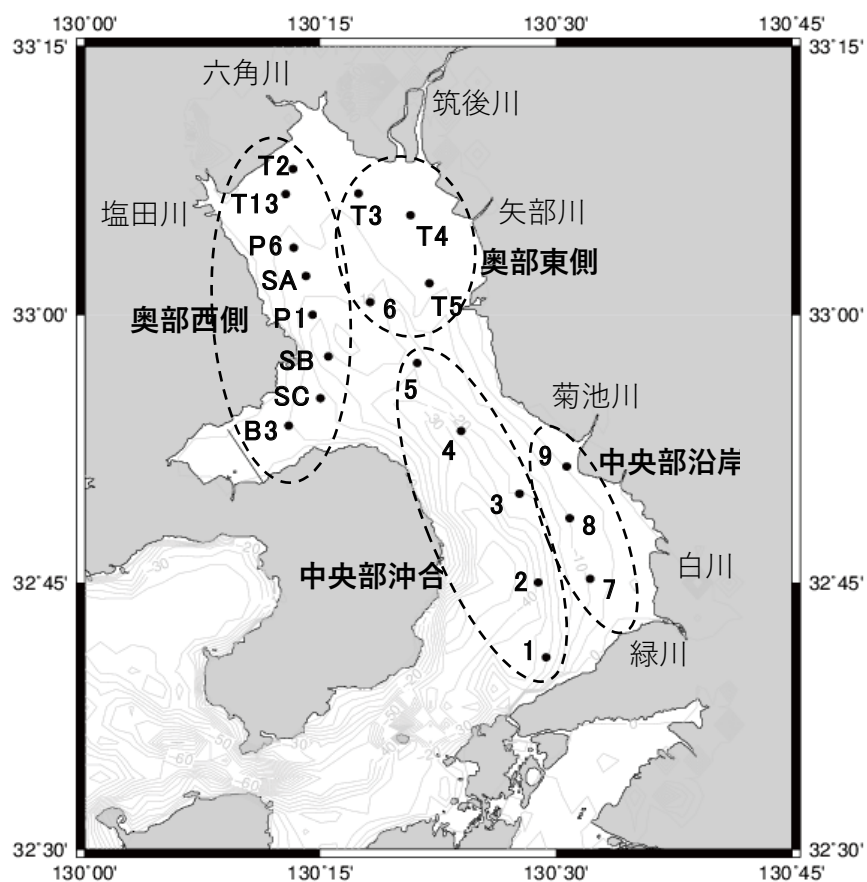


図 1 有明海における観測定点位置

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、鉛直自動観測パイ
	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、鉛直自動観測パイ
	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