

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、2020 年 10 月から 2021 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, 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 (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 1mL) 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

2020 年 10 月から 2021 年 1 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 2020 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 (2020 年度は 2 月上旬までのデータ)。

① 気温

旬別の平均気温は、10 月上旬から 11 月上旬までは平年並みで推移した。11 月中旬は佐賀市、熊本市とも高く、平年値を 4.1°C 、 4.0°C 上回った。11 月下旬から 12 月下旬までは平年並みかやや低めだった。1 月上旬は低く、佐賀市で平年値を 3.2°C 、熊本市で 3.5°C 下回ったが、その後は上昇し、1 月下旬は佐賀市、熊本市とも平年値を 4.5°C 上回った。2 月上旬はやや低下したが、佐賀市、熊本市とも平年値より高かった。

② 降水量

旬別の積算降水量は大きく変動し、10 月上旬 (佐賀市、熊本市とも 1 mm)、11 月下旬から 12 月中旬 (佐賀市で 0 mm、熊本市で 0~0.5 mm)、1 月上旬から中旬 (佐賀市で 2.5~7 mm、熊本市で 3.5~5 mm) は非常に少なかった。一方、10 月下旬は比較的多く、佐賀市で平年値の 3.2 倍、熊本市で 2.2 倍だった。

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、佐賀市、熊本市とも、10 月上旬から 2 月上旬まで概ね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、降水の影響により10月22日～23日に97.5～149.6 m³/s, 11月20日に117.9 m³/sを, 2月2日に111.4 m³/sを記録したが, それ以外の期間は, 10月は平均59.9 m³/s, 11月は49.9 m³/s, 12月は44.5 m³/s, 1月は44.7 m³/sだった。

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, 2020年10月から2021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2020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

2020年度の表層平均水温は, 10月中旬以降は概ね中央部沖合域で高く, 奥部西側域で低かった。奥部においては, 東西両側域で12月上旬に15℃を下回り, 西側域では1月上旬に, 東側域では1月中旬に10℃を下回った。中央部では, 12月中旬に15℃を下回り, 1月上旬に沖合域では12℃台, 沿岸域では11℃台, 1月中旬に沖合域で10℃台, 沿岸域で9℃台まで低下した。2020年度の平均水温の変化を過去7カ年と比較すると, 12月中旬以降は, 奥部では低めで推移し, 中央部ではやや低めで推移した。

② 塩分

塩分の表層平均値は, 中央部沖合域で最も高く, 30～32 で変動した。中央部沿岸域では, 11月上旬 (28.8) と11月下旬 (27.3) で低かったが, これは Stn. 7において調査前の降水の影響により, 11月上旬は26.9, 下旬は19.4 と低かったことが影響した。奥部の西側域では28.9～30.0 で変動し, 東側域では, 10月から11月は西側域より低く, 28.5 前後で推移し, 12月から1月は西側域と同様か僅かに高く, 30 前後で推移した。2020年度の表層平均塩分の変化を過去7カ年と比較すると, 奥部では10月から11月まではやや低め, 12月から1月までは高めで推移し, 中央部では11月は低め, それ以外は概ね高めで推移した。

③ DIN

DINの表層平均濃度は, 奥部西側域で1.0～18.9 μM, 東側域で1.7～15.3 μM, 中央部沖合域で2.6～11.15 μM, 沿岸域で1.4～28.5 μM だった。10月下旬は, 奥部では *Skeletonema* spp. と *Chaetoceros* spp., 中央部では *Chaetoceros* spp. の高密度化 (後述) の影響により大きく低下した。11月上旬と下旬に中央部沿岸域で高い濃度を記録したが, これは降水の影響により Stn. 7で上旬に36.9 μM, 下旬に59.3 μM と高かったことが影響した。奥部では11月下旬から1月上旬まで12.4～13.4 で推移し, 中央部では12月上旬から1月上旬まで9.3～12.2 で推移したが, 1月下旬には奥部では2.5 μM (西側域で1.0 μM, 東側域で3.9 μM), 中央部では5.0 μM

(沖合域で 8.3 μM , 沿岸域で 3.0 μM) に低下した。2020 年度の表層平均 DIN 濃度の変化を過去 7 カ年と比較すると, 10 月下旬と 1 月下旬は低め, それ以外は平年並みだった。

④ DIP

DIP の表層平均濃度は, 奥部では DIN と同様の変動傾向であり, 最も低い濃度は, 西側域では 1 月下旬に 0.3 μM , 東側域では 10 月下旬に 0.3 μM だった。中央部では, 奥部より濃度は低い変動傾向は DIN と同様であり, 最も低い濃度は 10 月下旬に沖合域で 0.3 μM , 沿岸域で 0.1 μM だった。2020 年度の表層平均 DIP 濃度の変化を過去 7 カ年と比較すると, 奥部は 10 月下旬と 1 月下旬を除くと平年並みかやや高め, 中央部は 10 月から 11 月上旬は低め, 11 月下旬から 1 月下旬は平年並みだった。

⑤ DSi

DSi の表層平均濃度は DIN と同様の変動傾向であり, 10 月下旬と 1 月下旬に低下したが, 中央部沿岸域では 1 月下旬に上昇しており, これは Stn. 7 で 101.4 μM と高い値だったことが影響した。2020 年度の表層平均 DSi 濃度の変化を過去 7 カ年と比較すると, 奥部は 10 月下旬と 1 月下旬は低め, それ以外は平年並みだった。中央部は, 10 月下旬は低め, それ以外は平年並みかやや高かった。

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, 海域により異なる変動をした。奥部西側域では, 10 月下旬に 11.3 $\mu\text{g/L}$ (最高は Stn. T13 での 21.4 $\mu\text{g/L}$), 1 月下旬に 12.6 $\mu\text{g/L}$ (最高は Stn. T2 での 25.8 $\mu\text{g/L}$) と高く, それ以外は 3.1~7.6 $\mu\text{g/L}$ だった。奥部東側域では, 10 月上旬に 13.9 $\mu\text{g/L}$ (最高は Stn. 6 での 24.4 $\mu\text{g/L}$) と高く, その後は 1 月下旬まで 1.2~5.2 $\mu\text{g/L}$ で変動した。中央部沖合域では, 10 月上旬から 11 月上旬まで 8.9~9.7 $\mu\text{g/L}$ (最高はいずれも Stn.1 で記録) とやや高く, 11 月下旬から 1 月下旬までは 3.5~4.6 $\mu\text{g/L}$ で変動した。中央部沿岸域では, 10 月下旬に 25.4 $\mu\text{g/L}$ (最高は Stn. 8 での 31.6 $\mu\text{g/L}$) に上昇し, 11 月上旬は低下するものの 14.0 $\mu\text{g/L}$ (最高は Stn. 8 での 20.5 $\mu\text{g/L}$) を記録した。11 月下旬は 4.3 $\mu\text{g/L}$ に低下し, その後 12 月下旬までやや上昇した後, 1 月下旬にかけて低下した。2020 年度の表層平均 Chl. *a* 濃度の変化を過去 7 カ年と比較すると, 奥部では 10 月は平年並み, 11 月から 1 月は低めで推移し, 中央部では 10 月下旬から 11 月上旬は高め, それ以外は平年並みかやや低かった。

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, 2020 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, 2020 年 10 月から 2021 年 1 月

(2月上旬の一部を含む)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(ただし、10月上旬の Stn. P6 および Stn. P1 は欠測)。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、2020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2020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.は、奥部では10月、中央部では10月から11月上旬まで細胞密度が高かった。奥部では、10月は東側域で高く、筑後川河口沖の Stn. T4 では上旬に表層で 2,700 cells/mL、底層で 2,080 cells/mL、下旬に表層で 4,740 cells/mL、底層で 9,780 cells/mL を記録し、Stn. T5 では上旬に表層で 4,370 cells/mL、底層で 220 cells/mL、下旬に表層で 6,250 cells/mL、底層で 8,900 cells/mL を記録した。11月上旬から1月下旬までは奥部全域で細胞密度は低く、>1,000 cells/mL を記録したのは1月下旬における六角川河口沖の Stn. T2 (底層で 4,220 cells/mL) のみだった。中央部では、10月上旬は湾口側の Stn. 1 と Stn. 7 で細胞密度がやや高かった(最高は Stn. 1 の 10 m 層で 1,671 cell/mL)。10月下旬には湾口側の定点で密度が上昇し、沖合域では Stn. 1~Stn.3 の表層で 1,640~2,257 cells/mL、沿岸域では Stn. 7~Stn. 9 の表層で 2,016~5,990 cells/mL を記録した。11月上旬になると、沖合域では Stn. 1 と Stn. 2 の表層でそれぞれ 9,746 cells/mL、2,806 cells/mL を記録し、沿岸域では Stn. 7~Stn. 9 の表層で 1,290~6,260 cells/mL を記録した。11月下旬には全域で低密度となり、1月下旬まで出現は僅かだった。2020年度の平均細胞密度を過去7カ年と比較すると、2020年度は2018年度及び2019年度と同様に秋季に密度が上昇し、ピークは2019年度と同様に10月下旬から11月上旬であったが、密度は2019年度より低かった。

② *Skeletonema* spp. (図 5b, 6b)

Skeletonema spp.の細胞密度は、10月は奥部東側域で高め、12月は中央部沿岸域で高め、1月は奥部西側域で高めとなった。10月の奥部東側域の表層平均密度は、上旬に 5,047 cells/mL (最高は Stn. 6 での 9,286 cells/mL)、下旬に 9,634 cells/mL (最高は Stn. T3 での 29,280 cells/mL) だった。12月は、中央部の湾口側の定点で密度が上昇し、最も高かったのは沿岸域の Stn. 8 で、上旬に 10,600 cell/mL、下旬に 6,240 cells/mL を記録した。1月は、下旬に奥部西側域の Stn. T2 の表層で 10,390 cells/mL、底層で 18,120 cells/mL を記録した。2020年度の平均細胞密度を過去7カ年と比較すると、2020年度は、奥部では過去にみられたように秋季の10月と冬季の1月下旬に上昇し、中央部ではこれまでみられなかった12月に細胞密度が上昇した。

③ *Eucampia zodiacus* (図 5c, 6c)

Eucampia zodiacus は、10月上旬に主に奥部で出現したが、最高細胞密度は Stn. T13 の表層における 122 cells/mL だった。その後は、奥部での出現は僅かで、中央部では全定点で出現しなかった。2020年度の平均細胞密度を過去7カ年と比較すると低かった。

④ *Asteroplanus karianus* (図 5d, 6d)

Asteroplanus karianus は、12 月上旬まで全定点で確認されず、12 月下旬から 1 月下旬まで奥部西側域の Stn. T2 を中心に出現した。Stn. T2 では、12 月下旬に表層で 84 cells/mL、1 月上旬に 70 cells/mL だったが、1 月下旬は表層で 1,460 cells/mL、底層で 3,289 cells/mL まで上昇した。2020 年度の平均細胞密度を過去 7 カ年と比較すると、奥部西側域においては赤潮化した 2013 年度および 2014 年度より遅い 1 月下旬にやや高めとなった。

⑤ *Akashiwo sanguinea* (図 5e, 6e)

Akashiwo sanguinea は、10 月は全定点で確認されなかったが、11 月上旬から 1 月下旬まで、奥部を中心に広く出現した。奥部西側域で他の海域より細胞密度が高めだったが、最高でも 1 月下旬の底層における 30 cells/mL と低かった。2020 年度の平均細胞密度を過去 7 カ年と比較すると、観測期間を通して低かった。

4) 2020 年度の水環境と植物プランクトンの出現動態

2020 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 10 月上旬から 11 月上旬に広域で密度が上昇し、*Skeletonema* spp. が 10 月に奥部海域で、12 月に中央部の湾口側を中心とした海域で、1 月に奥部西側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* が 1 月下旬に奥部の六角川河口沖の定点を中心に密度が上昇した。一方で、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 1 月まで低かった。

① *Chaetoceros* spp.

有明海において *Chaetoceros* spp. はしばしば秋季に細胞密度が上昇する (図 6a)。2020 年度は、奥部では 10 月上旬から下旬に、中央部では 10 月下旬から 11 月上旬に細胞密度が上昇した。中央部海域における秋季の *Chaetoceros* spp. の増加は、これまで湾口側の定点を中心に発生しており、2020 年度も同様だった。10 月上旬に沖合域、沿岸域とも最も湾口側の定点から密度が上昇し、その後に湾口側の広域で密度が高くなった。

② *Skeletonema* spp.

奥部海域では毎年冬季に赤潮化しており、2020 年度は奥部西側域を中心に 1 月上旬から下旬に細胞密度が上昇した。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 7 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。2020 年度も同様に、1 月 4 日に Stn. T2 で細胞密度は 1,000 cells/mL を超え、1 月 21 日に >1,000 cells/mL を記録したのは Stn. T2 と Stn. T13 のみであり、Stn. T2 で最高の 18,120 cells/mL を記録した。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/m² を超えているとされる (山口ら 2018)。2020 年度も、Stn. T13 では 12 月 17 日には表層水温は 12°C を下回り、Stn. T13 及び Stn. T2 における *Skeletonema* spp. の細胞密度は 12 月 22 日から 1 月 4 日にかけて上昇し、その後 1 月 21 日に大きく上昇した (図 7)。全天日射量は、12 月 20 日から 1 月 13 日まで概

ね低めだったが、1月14日から1月21日は10 MJ/m²を越える日が多かった（図7）。水温が12℃を下回った後の12月下旬から1月上旬は光環境が良好でないことで *Skeletonema* spp. の増殖は低調で推移し、光環境の好転により密度が上昇したと考える。2018年度及び2019年度も同様の条件で細胞密度の上昇は生じており（福岡ら 2019, 2020）、これらの結果は山口ら（2018）の結果と一致するものであった。一方、12月28日に西側湾奥部の浅い水域では *Skeletonema* spp. と *Thalassiosira* 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-2020-14）。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）、水深の浅い水域でより早くに増殖していたことになる。冬季の奥部西側域における *Skeletonema* spp. の動態においては、感潮域を含む浅海域が重要な場となっている。

奥部海域では秋季にもしばしば *Skeletonema* spp. による赤潮が発生する。過去7カ年で秋季に細胞密度が >10,000 cells/mL を記録したのは、2013年度の10月中旬に Stn. T13 と Stn. P6, 11月上旬に Stn. 6, 2016年度の10月中旬に諫早湾の Stn. B3 であった。2020年度は、定期観測開始時には東側域で赤潮化しており（福岡県赤潮発生状況速報 FO-20-10）、定期観測による10月12日の細胞密度は、東側域の Stn. T4 で 5,150 cells/mL, Stn. T5 で 5,660 cells/mL, Stn. 6 で 9,280 cells/mL だった。その後、10月26日には Stn. T4 と Stn. T5 で上昇し（それぞれ 29,280 cells/mL, 7,430 cells/mL）、Stn. 6 では低下した（1,300 cells/mL）。定期観測前の状況については、Stn. P6 における連続観測によるクロロフィル蛍光強度の鉛直分布を見ると、小潮期の10月11日から14日まで表層でクロロフィル蛍光強度が高く、その後は鉛直的に拡散し、大潮期の10月18日には低下していた（図8）。10月12日に東側域の広範囲で *Skeletonema* spp. の密度が上昇していたことを考えると、Stn. P6 でのクロロフィル蛍光強度の上昇は *Skeletonema* spp. の増加によることが考えられ、*Skeletonema* spp. は奥部の比較的沖合の広い範囲で密度が高かったと推察される。有明海において、栄養細胞としては6月から10月は *S. costatum* s.str. が、9月から翌年の5月までは *S. dohrnii* が多数単離され（山田ら 2017）、秋季と冬季の優占種は別種である可能性が指摘されている（山田ら 2017, 山口ら 2018）。過去に奥部海域で秋季に形成された *Skeletonema* spp. による赤潮は、比較的沖合の定点（Stn. P6, Stn. 6）や諫早湾（Stn. B3）で高密度化しており、これは秋季に赤潮を形成する種による特徴かもしれない。11月9日には東側域の密度は <1,000 cells/mL に低下したが、10月26日には DIN が Stn. T4 で 3.1 µM, Stn. T5 と Stn. 6 では検出限界以下と低く、その後の河川流量も低位で推移したことから、栄養塩の不足により衰退したと考える。

中央部沿岸域でも秋季および冬季に *Skeletonema* spp. による赤潮は発生するが、2020年度は12月に Stn. 8 を中心に高密度化した（図5b）。11月24日の観測では、11月19～20日の降水による影響で緑川河口沖の Stn. 7 では表層塩分が大きく低下し、Stn. 9 においても極表層で低下していたが、Stn. 8 ではほとんど低下していなかった（図9）。しかし、12月7日の観測では、Stn. 7 および Stn. 9 の表層塩分は回復する一方、Stn. 8 は3 m 深まで塩分が低下していた。

Stn. 8 では気温低下の影響で表層の水温が低かったが、塩分が低下していたことで、深度 2～3 m に密度躍層が形成され、躍層より上層で Chl. *a* 濃度が高かった (図 9, 10)。12 月 20 日においても 3 m 深まで密度勾配がみられ、表層で高い Chl. *a* 濃度が記録された。12 月上旬は好天が続き日照時間も長く良好な光環境にあったと考えられ (図 10)、定期観測が行われた小潮期には Stn. 8 では成層が発達し、表層で *Skeletonema* spp. が増殖したと考える。沿岸域の定点の中で Stn. 8 で成層が発達した要因は明らかでないが、11 月 23 日以降 12 月 23 日まで熊本市では降水が記録されていないことから、11 月 20 日の降水により沿岸域の南部で形成された表層の低塩分水が北部へ移流し、滞留していたのかもしれない。

③ *Eucampia zodiacus*

これまで、冬季の赤潮の発生・非発生の予察の可能性として、11 月の出現率に注目してきた (福岡ら 2019)。2013 年度から 2020 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)。2020 年度の出現率は、10 月は奥部海域で 35.7%、中央部海域で 18.8%、全域では 26.7% とやや高かったが、11 月は奥部海域で 6.3%、中央部海域で 0.0%、全域では 3.1% と低く、12 月及び 1 月は奥部、中央部海域とも 0.0% だった。赤潮非発生年 (2015 年度, 2016 年度, 2017 年度) は 11 月の出現率が低く、2015 年度と 2016 年度は全域で 0.0%、2017 年度は 1.6% だった。一方、赤潮発生年 (2013 年度, 2014 年度, 2018 年度, 2019 年度) の 11 月の出現率は比較的高く、2013 年度 (7.7%) と 2019 年度 (6.3%) はやや低いが、2014 年度は 60.5%、2018 年度は 23.8% だった。赤潮発生年の 11 月の出現率の幅が大きいことから、さらに 12 月の出現率について着目すると、赤潮非発生年の全域での出現率は 0.0～3.8% と低く、赤潮発生年は 11.5～25.0% と高かった。

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)。本課題においても奥部から中央部の広域から選定した定点において、2018 年 10 月から濃縮検鏡 (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) の測定を実施しており、細胞サイズの回復は 10 月から 11 月であることを確認した (図 12)。また、海域による細胞サイズ変化の違いは認められなかった (図 13)。細胞サイズの回復時期 (大型細胞数が >50% となる時期) は、2020 年度は 10 月下旬と判断され、これは 2019 年度の 11 月上旬から中旬に比べ早かった (図 14)。サイズ回復時期の細胞サイズは、小型の細胞は <35.0 μm 、大型の細胞は >53.4 μm だった。回復時期の違いは、2020 年度は 2019 年度に比べ水温の低下が早かったことが影響した可能性がある (図 14)。2020 年度の定期観測では、10 月上旬から中旬に奥部海域で出現率がやや高かったが、これはサイズ回復前の細胞によるものと判断される。

赤潮発生年において 11 月の細胞出現率が高い要因として、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ことによる（福岡ら 2018）。赤潮非発生年である 2015 年度と 2016 年度は出水の影響により 11 月中旬から下旬に表層塩分が大きく低下し、2017 年度は筑後川の流量が平年より僅かに多い期間が継続したことで表層塩分が低い状況が長期間継続した（福岡ら 2017）。2019 年度は、10 月 23～24 日の降水にともなう河川流量増加の影響により、11 月 1 日から 8 日まで表層塩分の日平均が 29.5～30.1 と、9 日から 30 日までの 29.9～31.0 に比べ僅かに低かった。しかし、2019 年度の細胞サイズの回復は 11 月上旬から中旬と推定されたことから、サイズ回復した細胞の出現は表層塩分が回復した時期であったと判断される。2020 年度は、奥部西側域の Stn. P6 および Stn. P1 の表層塩分の変化を見ると、9 月の出水や 10 月下旬の河川流量の増加による影響で 11 月下旬まで低めで推移し、11 月は 26 日まで日平均で 29.3～30.0 とやや低かった（図 3, 15）。定期観測による奥部沖合の Stn. 6 における 11 月の海水密度 (σ_t) も 2020 年度は鉛直的な勾配がみられた（図 16）。2020 年度の細胞サイズの回復時期は 10 月下旬であったことから、サイズ回復した細胞の出現後 1 ヶ月程度は表層塩分がやや低い時期となり、11 月の出現率が低かった要因となったことが考えられる。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ると（西川・今井 2011）、サイズ回復時期とその後の水環境が冬季の増殖に影響を及ぼしている可能性がある。

細胞サイズ測定時の濃縮検鏡による細胞密度の変化みると、冬季に赤潮化した 2019 年度は、変動はあるものの夏季から冬季まで上昇傾向だった（図 17）。2020 年度は 5 月から 6 月までは 2019 年度より高い密度であったが、7 月から 9 月までほとんど細胞が確認されなかった。試料は表層から得ており、2020 年度の夏季は表層塩分が低かったことが影響した可能性がある。表層塩分が回復してきた 10 月から細胞が確認されたが、密度は低下傾向だった。

サイズ測定のための濃縮検鏡によれば、本種は一年を通して奥部から中央部まで広域で出現した。しかし、中央部沖合の中・底層にも分布するか不明であることから、2019 年 10 月に実施された水産機構所属の陽光丸による有明海航海を利用し、10 月 2 日（中潮）及び 10 月 7 日（小潮）に奥部から湾口部までの沖合域における定点において、各層から得られた試水（900～1,000 mL）を用いた濃縮検鏡により、水平的および鉛直的な分布の把握を行った（図 18）。出現したのは全てサイズ回復前の細胞（12.1～20.5 μm ）だった。細胞は、奥部の Stn. 20（水深 19 m）では両日とも全ての採水層で確認され、奥部に近い Stn. 22 では両日とも表層で確認（7 月 2 日は底層でも確認）されたが、中央部から湾口部の定点（水深 39 m～48 m）では 10 月 7 日に Stn. 26 の表層で確認されたのみだった。本種は主に水深 20 m 程度までの水域に分布している可能性がある。

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により高密度化するとされる（Ito et al. 2013）。2019 年度は、2 月上旬から密度が上昇し初め、定期観測終了後に赤潮化した。奥部西側域では、*Skeletonema* spp. が湾奥部の浅い水域で 2 月上旬から密度上昇し、2 月 7 日には着色が確認された（佐賀県赤潮発生状況速報 SA-2020-01）。

中央部沿岸域においても2月19日に *Skeletonema* spp.による赤潮が確認された(熊本県赤潮情報 56号)。奥部西側域では *Skeletonema* spp.の着色は3月3日には確認されなくなる一方、*E. zodiacus* の着色が2月28日に確認された(佐賀県赤潮発生状況速報 SA-2020-02)。他の海域では、*E. zodiacus* の着色は、3月10日に福岡県海域(福岡県赤潮発生状況速報 FO-20-2)、3月18日に熊本県海域(熊本県赤潮情報第57号)で確認された。本事業による観測の期間外のため詳細なデータはないが、2019年度も *E. zodiacus* の増殖は *Skeletonema* spp.の衰退後に生じていたと考える。

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)。2020年度の Stn. T13における表層水温は、12月18日に10℃を下回り、12月下旬に一時的に10℃を超えるまで上昇したが、1月は10℃未満で推移した(図19)。*Asteroplanus karianus* の細胞密度は、1月上旬の水温10℃を下回った後の大潮期に続く小潮期にかけて上昇し、それは六角川河口沖の Stn. T2で顕著だった。過去7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(図19)。本種による赤潮が発生した2013年度と2014年度は、12月下旬には水温が10℃を下回り、密度が上昇する時期が早かった。一方で、水温が高めで推移した2018年度の密度上昇は2月上旬にみられ、水温が10℃を下回ることが少なかった2019年度は低密度で推移した。本種による赤潮の形成においては、早期に水温が低下することが要因として重要かもしれない。赤潮発生・非発生のメカニズムについては、これまで蓄積されてきている知見(Shikata et al. 2015, 松原 2016, 松原ら 2018)と合わせた検討が今後必要である。

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。2016年度と2017年度の秋季は、筑後川の河川流量が平年より僅かに多い量が継続したことで、奥部の表層で28~29程度の低塩分水の広がりが継続し、本種の好む低塩分の環境と(Matsubara et al. 2007)、躍層の形成により細胞が表層に集積することが可能な環境が継続したことにより高密度化したと考えられている(山口ら 2018, 福岡ら 2018)。2020年度は、奥部の表層塩分は9月の出水や10月下旬の河川流量の増加による影響で11月下旬まで29~30とやや低めで推移したが、2016年度や2017年度に比べ高かったことで高密度化しなかったと考える。

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は、*Skeletonema* 等の小型珪藻の衰退と光環境との関連が明らかとなっており、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月の細胞出現率や水環境に注目してきた。即ち、赤潮発生年は細胞サイズが回復する11月の細胞出現率が高く、この時期の沖合域の物理環境がサイズ回復した細胞の生残に影響している可能性があると考えられる。2018年度より、有明海の広域から選定した定点において、濃縮検鏡により細胞サイズと細胞密度の測定を行っているが、2019年度の11月上旬は表層塩分がやや低い環境であったが、細胞サイズの回復時期が上旬から中旬であったことから、サイズ回復した細胞は表層塩分の回復した時期に出現したと判断された。2020年度のサイズ回復は10月下旬であり、11月中旬まで表層塩分がやや低い環境であったことから、サイズ回復した細胞の出現時期は表層塩分の回復前と判断された。このように、現場の水環境と共にサイズ回復する時期が重要であると考えられる。年によるサイズ回復時期の変化については水温の影響が考えられるが、サイズ回復時期に及ぼす要因についてはさらに検討が必要である。

これまで、有明海における *E. zodiacus* による赤潮の発生シナリオとして、サイズ回復前の細胞は比較的沖合に分布し、サイズ回復した細胞の分布が広域化すると想定していた（福岡ら 2018）。しかし、細胞サイズ測定における濃縮検鏡において、試水1 mLの通常検鏡では確認されない低密度ながら、一年を通して広域に出現していることが明らかとなり、細胞サイズの回復も広域で生じていた。現段階の有明海における *E. zodiacus* による赤潮の発生シナリオとしては、秋季にサイズを回復した細胞が、鉛直混合が生じやすい環境において巻き上げにより光環境の良好な層に滞留することで生残が高まり（図 20）、冬季に栄養塩が競合する小型珪藻の衰退と良好な光環境の形成により細胞が高密度化すると想定される。11月の細胞出現率は赤潮発生年においても幅が大きく、これは年により細胞サイズ回復時期が変動することが影響している可能性がある。12月の細胞出現率は、赤潮の発生年と非発生年で明瞭に異なることから、11月に加え12月の細胞出現率にも注目することが重要かもしれない。

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、現象としては水温との関係が明らかになってきている。一方、秋季から初冬の赤潮化は、発生する時期や水域により赤潮化までの過程が異なり、環境条件との関係についてはさらなる解析が必要とされる。

引用文献

- 福岡弘紀・中野 善・豊川雅哉・岡村和麿・井手浩美・小谷正幸・宮本博和・吉武愛子・太田洋志・森川太郎・三根崇幸. 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, 1) 有明海奥部における冬季の水質モニタリングの高度化. 平成 28 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. 2017 ; 123–133.
- 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・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.
- 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.

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.

Shikata T, Matsubara T, Yoshida M, Sakamoto S, Yamaguchi M. Effects of temperature, salinity, and photosynthetic photon flux density on the growth of the harmful diatom *Asteroplanus karianus* in the Ariake Sea, Japan. *Fisheries Science* 2015; **81**: 1063–1069.

山田真知子・大坪繭子・多田邦尚・中野義勝・松原 賢・飯田直樹・遠藤宜成・門谷 茂. 亜熱帯から亜寒帯に及ぶ我が国の 5 海域における珪藻 *Skeletonema* 属の種組成. 日本水産学会誌 2017 ; **83** : 25–33.

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.

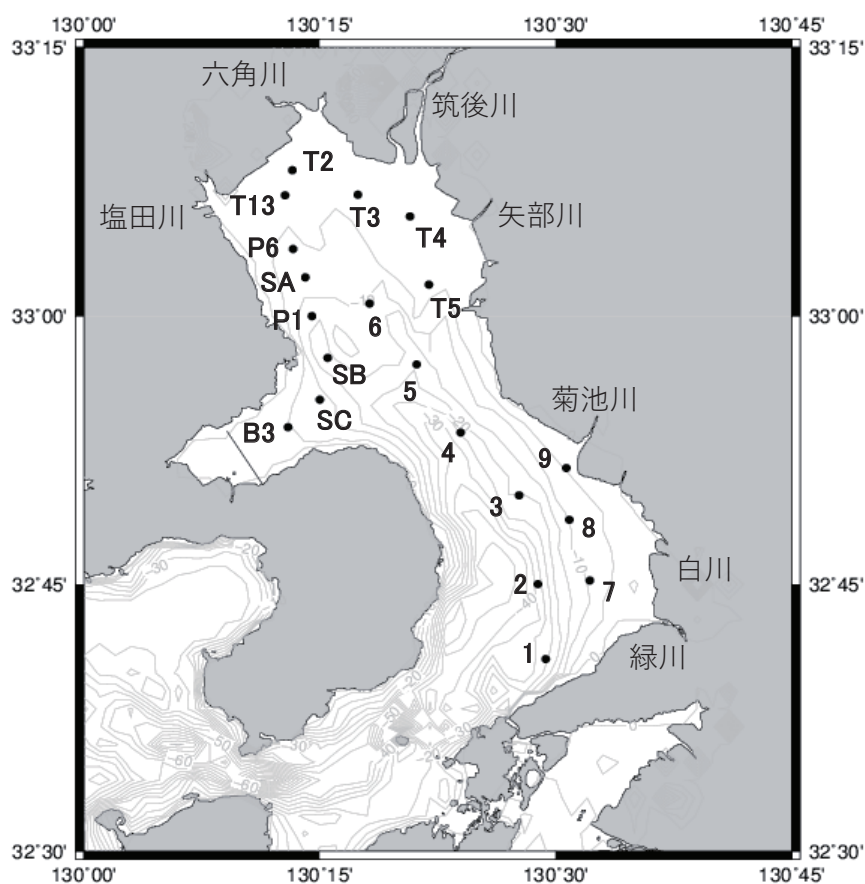


図 1 有明海における観測定点位置

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