

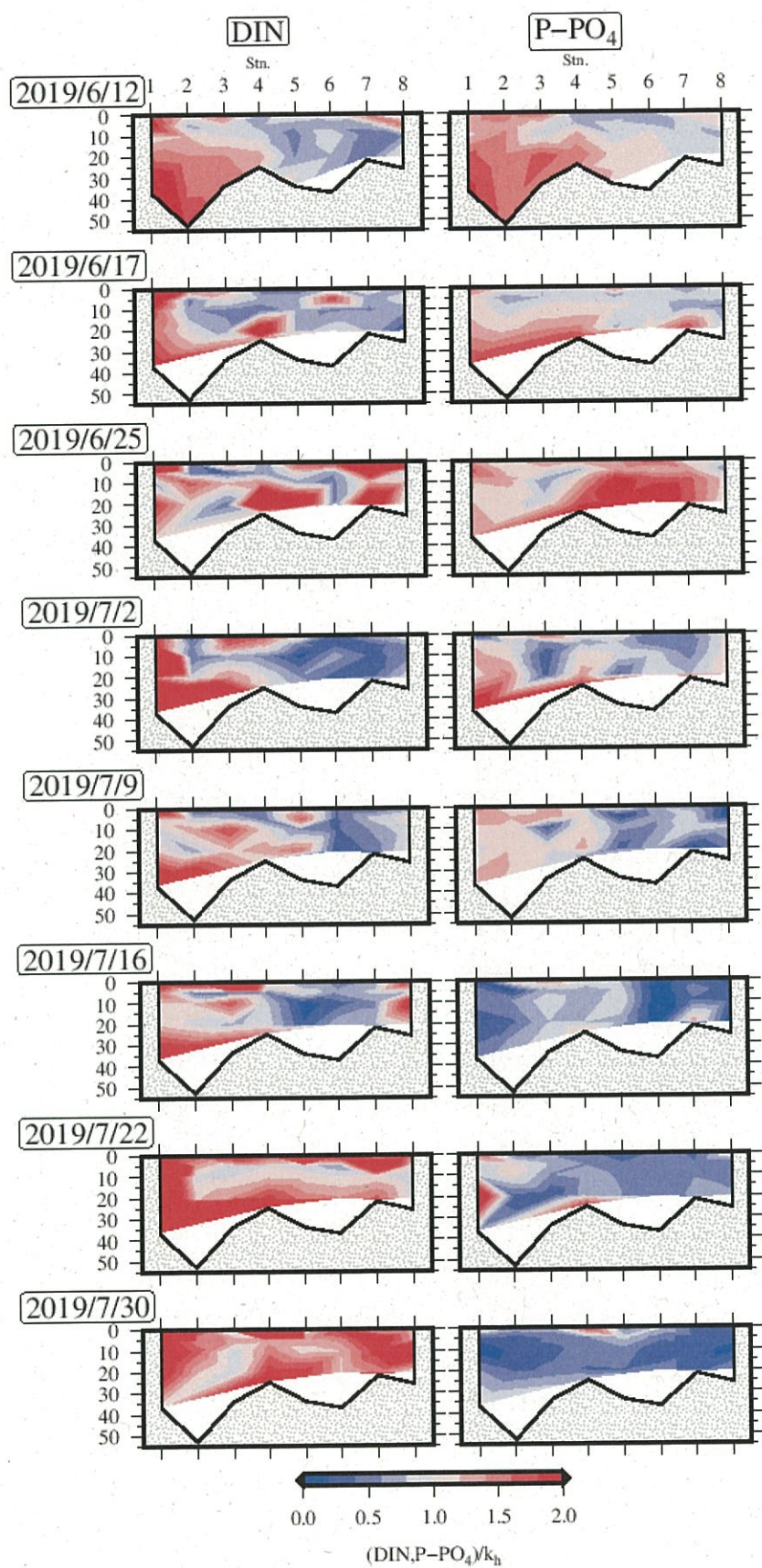


図 12 Stn.1~8 の DIN および DIP を半飽和定数で除した値の鉛直断面分布の推移

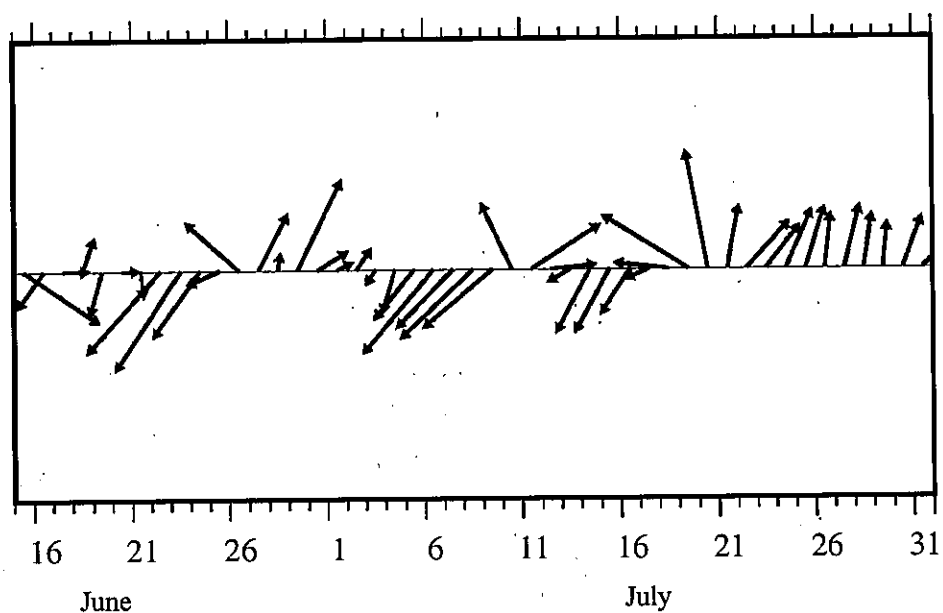


図 13 伊万里湾における風ベクトルの推移 (気象庁 MSM GPV を使用)

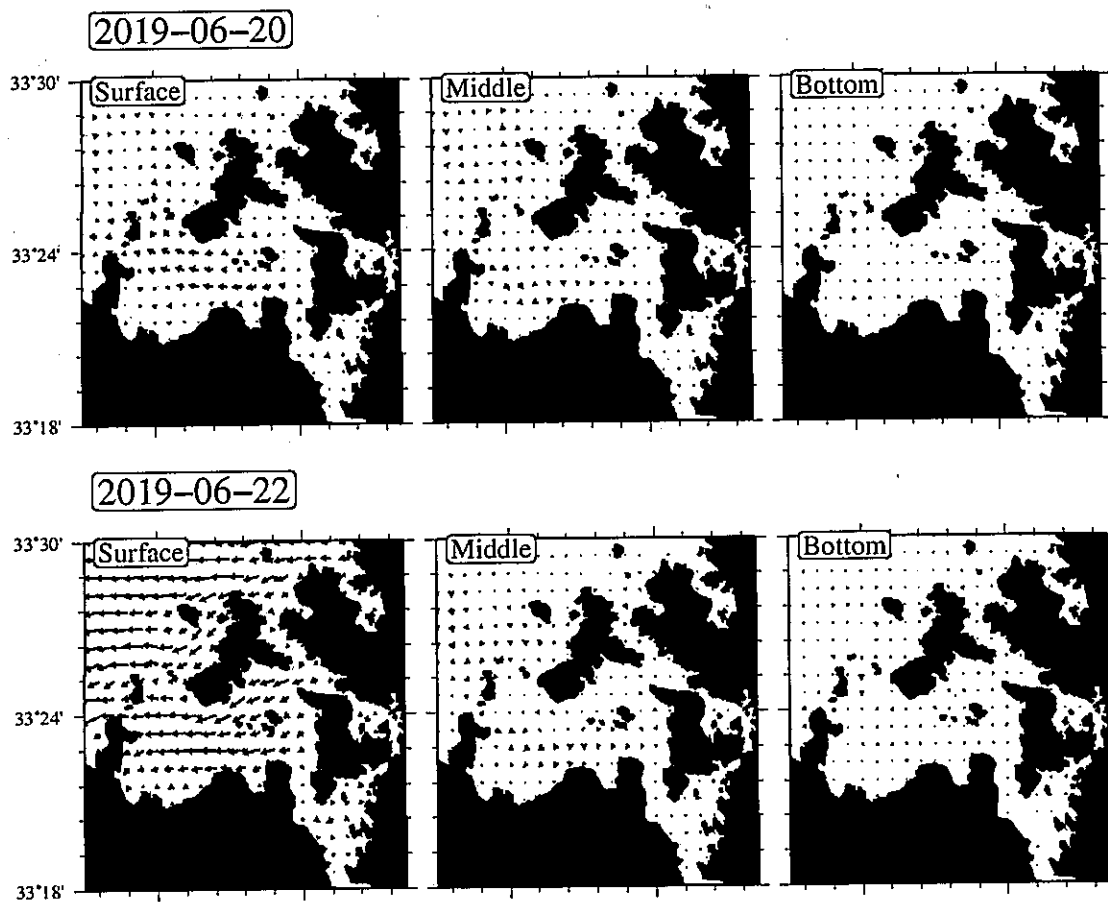


図 14 6 月 20 日および 22 日の最上・中・最下層のモデル流速ベクトル

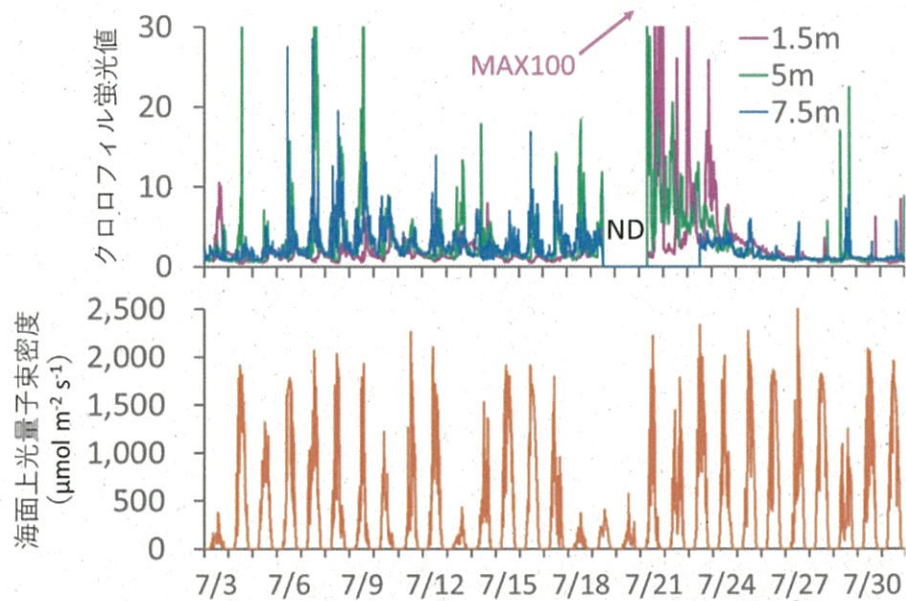


図 15 St.15 の 3 層のクロロフィル蛍光値と筏上の光量子束密度



図 16 粘土散布の様子（中層散布や漁船での AAQ 搭載状況など）

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 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 西海区水産研究所
福岡弘紀，岡村和麿
福岡県水産海洋技術センター有明海研究所
内藤 剛，藤井直幹
佐賀県有明水産振興センター
吉武愛子，太田洋志，森川太郎，三根崇幸
熊本県水産研究センター
松谷久雄，向井宏比古，山下博和

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 平成31年度計画及び結果

(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、2019年10月から2020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、2019年10月から2020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、空中光量子量および流向・流速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、ホームページ (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, 2019 年 10 月から 2020 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, 中性ホルマリンで固定後, 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

2019 年 10 月から 2020 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 2019 年度の 10 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, 11 月上旬から中旬および 12 月上旬に佐賀市で平年値との差が $+0.1^{\circ}\text{C}$ ~ $+0.7^{\circ}\text{C}$, 熊本市で -0.2°C ~ $+0.4^{\circ}\text{C}$ であったのを除くと, 佐賀市, 熊本市とも 10 月から 1 月まで平年値より 1°C 以上高かった。特に, 12 月中旬は佐賀市で平年値より 3.3°C , 熊本市で 3.4°C 上回り, 1 月下旬は佐賀市で平年値より 5.0°C , 熊本市で 5.2°C 上回った。

② 降水量

旬別の積算降水量は大きく変動し, 10 月上旬, 11 月上旬および 1 月中旬は, 佐賀市で 0 ~ 1.5 mm, 熊本市で 0 ~ 9.0 mm と非常に少なかった。一方, 1 月下旬は, 佐賀市で平年値の 4.7 倍, 熊本市で 3.2 倍と非常に多かった。

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天日射量は, 佐賀市, 熊本市とも, 11 月上旬から中旬および 1 月上旬に平年値を大きく上回り, 12 月下旬および 1 月中旬から下旬に平年値を大きく下回った。

④ 河川流量

筑後大堰直下の日平均流量は、降水の影響により 10 月 24 日 ($103 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)、12 月 2 日 ($118 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)、1 月 23～29 日 ($100 \sim 136 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) に $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以上を記録したが、それ以外の期間は概ね $45 \sim 50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ と平年並みで推移した。

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、2019 年 10 月から 1 月の有明海奥部西側域 (Stn. 2, T13, P6, P1)、奥部東側域 (Stn. 3～6)、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 2019 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

2019 年度の表層平均水温は、10 月中旬以降は各観測日において概ね中央部沖合域で高く、中央部沿岸域、奥部東側域、奥部西側域の順で低かった。奥部においては、西側海域では 12 月上旬に 15°C を下回り、1 月上旬に 11°C 台まで低下し、東側海域では 12 月中旬に 15°C を下回り、1 月中旬に 11°C 台まで低下した。中央部では、1 月上旬に 15°C を下回り、1 月中旬に沖合域でおよそ 13°C 、沿岸域でおよそ 12°C まで低下した。2019 年度の平均水温の変化を過去 6 カ年と比較すると、12 月中旬以降は、奥部では高めで推移し、中央部ではやや高めで推移した。

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、10 月中旬に 28.5 と低かったが、これは Stn. 7 で 25.8 を記録したことが影響した。奥部の東側域では 30 前後で推移し、西側域では 27～30 で推移した。2019 年度の表層平均塩分の変化を過去 6 カ年と比較すると、10 月上旬から 11 月上旬まではやや低め、11 月中旬以降は、12 月上旬に低下したのを除くと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 $7.7 \sim 27.3 \mu\text{M}$ 、中央部沿岸域で $5.2 \sim 25.0 \mu\text{M}$ と大きく変動した。奥部海域と中央部沖合域では、*Chaetoceros* spp. の高密度化 (後述) の影響により 10 月中旬から 11 月上旬にかけて濃度が低下し、11 月上旬に最も低い濃度 (奥部西側域で $7.7 \mu\text{M}$ 、東側域で $4.4 \mu\text{M}$ 、中央部沖合域で $2.2 \mu\text{M}$) を記録した。中央部沿岸域は他の海域よりも遅く 10 月中旬から 11 月中旬にかけて濃度が低下し、11 月中旬に最も低い濃度を記録した。全域で濃度は 11 月中旬から 12 月上旬にかけて回復し、12 月中旬以降は、中央部沿岸域では $17 \sim 25 \mu\text{M}$ で変動し、その他の海域では $7 \sim 13 \mu\text{M}$ で推移した。2019 年度の表層平均 DIN 濃度の変化を過去 6 カ年と比較すると、11 月に低めとなったのを除くと平年並みだった。

④ DIP

DIP の表層平均濃度は、奥部海域では DIN と同様の変動傾向だったが、1 月上旬に東側域で $0.6 \mu\text{M}$ 、西側域で $0.4 \mu\text{M}$ と最も低い濃度を記録した。中央部海域では、1 月上旬を除き奥部海域より濃度は低く、DIN と同様に 11 月に低下したが、それを除くと沖合域では $0.5 \sim 0.8 \mu\text{M}$ 、沿岸域では $0.4 \sim 0.9 \mu\text{M}$ で変動した。2019 年度の表層平均 DIP 濃度の変化を過去 6 カ年と比較すると、奥部海域は変動が大きく、10 月と 12 月上旬は高め、11 月上旬と 1 月上旬は低め、それ以外の期間は平年並みだった。中央部海域は 10 月から 11 月まで低め、12 月から 1 月は平年並みだった。

⑤ DSi

DSi の表層平均濃度は、全域で 10 月中旬から 11 月中にかけて低下し、その後 12 月上旬に回復した。12 月中旬以降は DIN と同様の変動傾向だった。2019 年度の表層平均 DSi 濃度の変化を過去 6 カ年と比較すると、11 月に低めとなったのを除くと平年並みだった。

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、10 月中旬に中央部沿岸域で濃度が上昇したのを除くと、全域で同様の変動傾向だった。11 月中旬から 12 月中旬まで、全域で $4 \mu\text{g L}^{-1}$ 未満と低い濃度だった。奥部では、1 月上旬に *Skeletonema* spp. の高密度化（後述）により東側域で $17.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 、西側域で $24.3 \mu\text{g L}^{-1}$ に上昇したが、1 月中旬にはそれぞれ $3.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 、 $4.2 \mu\text{g L}^{-1}$ まで低下した。2019 年度の表層平均 Chl. *a* 濃度の変化を過去 6 カ年と比較すると、奥部海域では 10 月上旬と 1 月上旬を除き平年より低め、中央部海域では 10 月から 11 月上旬は高めで推移し、その後は低めで推移した。

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、その後は出現しても低密度で、本種による赤潮は発生していない。

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、2019 年 10 月から 2020 年 2 月上旬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、2013 年度から 2019 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、10 月から 11 月上旬まで全域で細胞密度が高く、奥部では 11 月 5 日に西側域 (Stn. T13, P6) で、中央部では 10 月 23 日に沿岸域 (Stn. 7, 8), 11 月 5 日に湾口側の定点 (Stn. 1, 7) で $>10,000 \text{ cells mL}^{-1}$ を記録した。細胞密度は 11 月 18~20 日までに急激に低下し、2 月上旬まで低位で推移した。2019 年度の平均細胞密度を過去 6 カ年と比較すると、

2019年度は2018年度と同様に秋季に高密度を記録したが、細胞密度のピークは2018年度が11月下旬であったのに対し、2019年度は11月上旬と時期が早かった。

② *Skeletonema* spp. (図 5b, 6b)

Skeletonema spp.は、10月4~7日は全域で細胞密度が高めで、中央部の湾口側の定点(Stn. 1, 2, 7)では $>10,000$ cells mL^{-1} (最高は Stn. 7 の表層で $29,000$ cells mL^{-1}) を記録した。その後は全域で細胞密度は低下し、11月中旬から12月中旬は低位で推移した。1月4~6日になると、奥部海域を中心に細胞密度は急激に上昇し、Stn. 2 の表層 ($11,310$ cells mL^{-1}) と底層 ($11,750$ cells mL^{-1})、Stn. 5 の表層 ($10,180$ cells mL^{-1}) および Stn. 6 の表層 ($17,050$ cells mL^{-1}) で $>10,000$ cells mL^{-1} を記録した。中央部海域では Stn. 8 の表層における $8,850$ cells mL^{-1} が最高だった。1月16~17日には全定点で細胞密度は低下し、2月3~6日は奥部西側域でやや密度が上昇した。2019年度の平均細胞密度を過去6カ年と比較すると、2019年度は、奥部海域では冬季の密度ピークが1月上旬であり、これは2017年度を除く他の年に比べ時期が早かった。中央部海域では、10月上旬に高かったが、それ以降は平年並みで推移した。

③ *Eucampia zodiacus* (図 5c, 6c)

Eucampia zodiacus は、10月は低密度であるが広域で散在的に出現し、細胞密度の最高は10月21日に奥部海域の Stn. 5 の表層における 103 cells mL^{-1} だった。その後、12月4日まで出現は少なかった。12月18~19日には、奥部西側域の4定点と中央部湾口側域の3定点に出現し、奥部西側域では主に底層(表層での出現は1定点で 58 cells mL^{-1} 、底層での出現は4定点で $26\sim128$ cells mL^{-1}) に出現した。1月から2月上旬は、奥部海域では散在的に出現し、 >100 cells mL^{-1} を記録したのは1月6日の Stn. 4 の底層において 383 cells mL^{-1} 、2月3日の Stn. T13 の底層において 106 cells mL^{-1} だった。中央部海域では、1月は出現せず、2月上旬は湾奥側の定点(Stn. 5, 8, 9)において低密度($2\sim60$ cells mL^{-1}) で出現した。2019年度の平均細胞密度を過去6カ年と比較すると、2月上旬までのところ低かった。

④ *Asteroplanus karianus* (図 5d, 6d)

Asteroplanus karianus は、12月18日までは出現せず、その後の出現も奥部海域が中心だった。1月4日に Stn. 2 の表底層(表層 132 cells mL^{-1} 、底層 150 cells mL^{-1}) と Stn. T13 の表層(90 cells mL^{-1}) に出現した。1月17日は低密度ながら表層では1定点(Stn. 13)、底層では5定点(Stn. 2~4, T13, P6)と出現範囲が広がった。2月3~6日は低密度で散在的に出現した。2019年度の平均細胞密度を過去6カ年と比較すると最も低かった。

⑤ *Akashiwo sanguinea* (図 5e, 6e)

Akashiwo sanguinea は、10月から12月までは全域において散在的に低密度で出現し、1月から2月は奥部海域の河口沖の定点(Stn. 2, T13)を中心に低密度で出現した。2019年度の平均細胞密度を過去6カ年と比較すると、観測期間を通して低かった。

4) 2019 年度の水環境と植物プランクトンの出現動態

植物プランクトンの出現動態では、小型珪藻の *Chaetoceros* spp. が 10 月下旬から 11 月上旬に広域で高密度化し、*Skeletonema* spp. が 10 月に中央部の湾口側域を中心として広域で高密度化し、1 月には奥部海域を中心として広域で高密度化したのに特徴付けられる。一方で、大型珪藻の *Eucampia zodiacus* や中型珪藻の *Asteroplanus karianus* および鞭毛藻の *Akashiwo sanguinea* の出現頻度及び細胞密度は期間を通して低かった。

① *Chaetoceros* spp.

Chaetoceros spp. は有明海において秋季に細胞密度が上昇することがあり、2013 年度は 12 月上旬に中央部海域で、2017 年度は 12 月上旬から中旬に奥部海域で、2018 年度は 11 月下旬に奥部海域と中央部海域で密度が上昇した (図 6a)。2019 年度は、10 月下旬から 11 月上旬に奥部海域と中央部海域で細胞密度が上昇して赤潮化した。

これまで中央部海域における秋季の *Chaetoceros* spp. の細胞の高密度化は、湾口側の定点を中心に発生し (図 7)、2019 年度も同様だった。2019 年度は、10 月上旬は湾口側の水域では *Skeletonema* spp. が高密度化しており (図 5)、それと入れ替わるように 10 月下旬から *Chaetoceros* spp. が高密度化した (図 5, 8)。高密度化の中心は共に Stn. 7 であり、緑川河口の沖合にあたる。*Skeletonema* spp. の衰退の要因は明らかでないが、*Skeletonema* spp. の衰退期と考えられる 10 月下旬から 11 月上旬にかけて、Stn. 7 では降水による河川水量の増加により栄養塩が供給され (図 8)、それに呼応して *Chaetoceros* spp. が増殖すると共に沖合に広がったと推察される。11 月中旬には、栄養塩濃度の低下により *Chaetoceros* spp. の密度も低下したと考える。

② *Skeletonema* spp.

Skeletonema spp. は、奥部海域において毎年冬季に赤潮化している。2019 年度は、1 月上旬に奥部西側域を中心に細胞密度が上昇して赤潮化した。過去 6 カ年の結果では、奥部海域における冬季の *Skeletonema* spp. の細胞密度は、西側域の Stn. 2 および Stn. T13 において上昇する時期が早く、密度自体も高いことから、六角川や塩田川の河口沖が初期増殖域であると考えられている (山口ら 2018)。2019 年度は、1 月 4~6 日には奥部のほぼ全域で高密度化していたが、12 月 18 日の観測では Stn. 2 および Stn. T13 の表底層で細胞密度が高かったことから、本域が初期増殖域であったことが推察される。一方、中央部海域においては、奥部海域と同様に冬季に *Skeletonema* spp. の細胞密度は上昇するが、過去 6 カ年を含め、2019 年度も奥部海域ほど高密度化することはない、明確な初期増殖域があるかは明らかでない。

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} を超えていたとされる (山口ら 2018)。2019 年度も、奥部西側域の Stn. T13 の小型ブイによる連続観測データでは、12 月 25 日に水温が 12°C を下回り、その後の小潮期である 1 月 1 日から急激にクロロフィル蛍光強度が上昇しており、佐賀市の全天日射量は上昇期である 1 月 1 日から 1 月 5 日に $10.4\sim 12.6 \text{ MJ m}^{-2}$ と好転していた (図 9)。2018 年

度も細胞密度の上昇は同様の条件で生じており（福岡ら 2019）、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。

一方で、初期の発生については十分に明らかでない。有明海における 12 月以降の *Skeletonema* spp. の高密度化においては、*S. dohrnii* が優占種である可能性が指摘されている（山田ら 2017, 山口ら 2018）。Kaeriyama et al. (2011) によれば、*S. marinoi-dohrnii* complex は低水温での増殖速度が高く、冬季の温帯域の水温に適応しているとされる。また、山田ら（2017）は、有明海の海底堆積物を用いた休眠期細胞の発芽実験において、10～30℃の実験区のうち 15℃と 20℃の実験区において *S. dohrnii* の栄養細胞が出現したと報告している。水温条件から推定すると、水温が 20℃を下回る 11 月から 12 月に休眠期細胞が発芽し、水温が 12℃を下回った後の小潮期に栄養細胞が急激に増殖する可能性が考えられる。一方、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）。図 10 に奥部西側域の Stn. P6 における、2018 年度の 10 月から 12 月の水中光量子束密度の変化を示した。ここでは、板倉（2000）による光強度 $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の照射で珪藻の休眠期細胞の発芽・増殖が起こるとの報告を参考に、昼間（10 時から 15 時）に $10.0 \sim 10.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の水中光量子束密度（以下これを単に光量子束密度と記す）を記録した深度を示した。光量子束密度の到達深度は、小潮期に深く、大潮期は海底堆積物の巻き上げによる濁度の上昇の影響を受けて浅くなった。また、10 月から 12 月にかけて全天日射量は低下し、天候にも影響されるが、小潮期の光量子束密度の到達深度は浅くなっていった。2018 年度は、11 月上旬から 12 月中旬に水温が 15～20℃となったが、11 月の小潮期には光量子束密度は海底近くまで達していた。大潮期に休眠期細胞が巻き上げられて水柱に拡散し、その後の小潮期に光環境が好適な深度に細胞があれば発芽する条件にあると考える。しかし、冬季に有明海で赤潮化する *Skeletonema* 種の休眠期細胞が発芽する光条件は明らかでなく、水温 15～20℃で発芽したとしても水温 12℃以下となって増殖する要因は不明であり、これらは今後の課題となる。

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 2019 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（2019 年度は 1 月まで）。2019 年度の出現率は、10 月は奥部海域で 43.8%、中央部海域で 50.0% と比較的高かったが、11 月は中央部海域では 12.5% に低下し、奥部海域では 0.0% だった。その後、奥部海域では 1 月まで上昇傾向だったが、中央部海域では 12 月に 18.8% に上昇したが、1 月に 6.3% に低下した。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 年度は全域の平均で 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）の 11 月の出現率は比較的高く、2013 年度は全域の平均で 7.7% だったが、2014 年度は 60.5%、2018 年度は 23.8% だった。2019 年度は全域の平均で 6.3% であり、赤潮非発生年より高いが、赤潮発生年で最も低かった 2013 年度よりやや

低かった。近年、奥部海域での調査定点数は減少し（2019 年度から 1 定点減少）、調査頻度は低下しており（月 4 回から月 2 回に減少）、これらが出現率の計算に影響する可能性は否めない。また、出現率の月変化において、過去 6 カ年は奥部海域と中央部海域で同じ変化傾向であったが、2019 年度は 1 月に奥部で上昇する一方、中央部では低下するなど、これまでと異なる傾向がみられた。

11 月の細胞出現率が高い赤潮発生年は、11 月に奥部の沖合域の海水密度 (σ_t) が高めで鉛直的にも一様であり、河川からの大きな出水がないことから表層塩分が大きく低下しないことで風等の影響で鉛直混合が生じ易い環境であったと考えられる。このような環境においては、大型化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長い時間滞留でき、細胞の生残に有利な環境であったと推察されている（福岡ら 2018）。2 月に赤潮化した 2018 年度も過去の赤潮発生年と同様の環境条件であった（福岡ら 2019）。2019 年度は、筑後川からの大きな出水はなく（図 3）、Stn. P6 の連続観測ブイにおける表層（1 m 層）の塩分は平年並みか高めで推移し、変動も小さかった（図 12）。しかし、定期観測時の奥部沖合域の定点である Stn. 6 における 11 月 5 日の σ_t は、深度 5 m 付近で勾配がみられた（図 13）。Stn. P6 における 11 月の表層塩分は変動が小さかったものの、11 月 1 日から 8 日までの日平均値が 29.5~30.1 であり、11 月 9 日から 30 日までの 29.9~31.0 より僅かに低かった。これは 10 月 23~24 日の降水にともなう河川の流量増加の影響が残っていたことによると考える。赤潮非発生年であった 2017 年度は、出水による表層塩分の大きな変動はなかったが、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 2017 年度よりも表層塩分の低い期間が短く（2017 年度は 11 月 15 日頃まで継続）、塩分もやや高かった（2017 年度は 28~30 で推移）。

このように、2019 年度は、11 月の細胞の出現率や水環境は赤潮発生年に近いが、過去 6 カ年における赤潮発生年と異なる点もあり、2 月上旬の時点で細胞密度の上昇はみられていない。今後の結果を含めて、引き続き検討していく必要がある。

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（Nishikawa et al. 2007, 松原 2015）。2018 年 10 月から細胞サイズ（頂軸長）の測定を実施しており、その変化を図 14 に示した（現時点では 2019 年度のデータは一部のみ）。細胞サイズの回復時期（大型細胞数が >50% となる時期）は、2018 年は 11 月中旬（までには回復していた）、2019 年は 11 月下旬（暫定）であった。今後もデータを蓄積し、サイズ回復した細胞の水平分布を明らかにし、分布と拡散について検討していく必要がある。

冬季の *Eucampia 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）。2018 年度の冬季は、*Skeletonema* spp. が 1 月下旬から 2 月中旬にかけて赤潮を形成し、*E. zodiacus* が 2 月下旬から 3 月に赤潮を形成した。*Skeletonema* spp. は、クロロフィル蛍光強度の鉛直分布から、1 月中旬の小潮期に表層で細胞密度が上昇し、その後の大潮期に細胞が水柱全体に拡散したと推察される（図 15）。栄養

塩濃度は *Skeletonema* spp. が高密度化した 1 月中旬から 1 月下旬に低下していった。その後、*Skeletonema* spp. は、1 月下旬から 2 月上旬の小潮期に細胞が水柱に拡散しており、天候が悪い事も影響して水柱の光環境が好転しなかったことで細胞密度は低下し、2 月下旬の大潮期には衰退したと考える。一方で、*E. zodiacus* は *Skeletonema* spp. が衰退し、光環境が好転していくとともに細胞密度が上昇していった。クロロフィル蛍光強度の鉛直変化から、表層で高密度化する *Skeletonema* spp. と異なり、増殖初期の *E. zodiacus* の細胞は水柱全体に分布していたことが見て取れる。定期観測は 2 月で終了したが、3 月まで赤潮は継続しており、日射の増加による水中の良好な光環境が密度の継続に影響していたと考える。これらの結果は、Ito et al. (2013) のシナリオを支持するものであった。

④ *Asteroplanus karianus*

Asteroplanus karianus の出現は、有明海においては主に奥部の六角川河口沖および塩田川河口沖の水域であり（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）。Stn. T13 に設置した小型ブイにおける連続観測では、2019 年度の水温は、1 月 1 日に今期初めて 9℃台を記録したが、10℃を下回った期間は短く、日平均としては 1 月に 10℃下回ることにはなかった（図 9）。定期観測において本種の細胞が記録されたのは水温が 9℃台を記録した後の小潮期である 1 月 4 日であったが、その後の増殖はみられなかった。本種の細胞密度はこれまでの 7 カ年において最も低かった。本種は 2007 年度以降、単独で赤潮を形成するようになったが、2015 年度以降は赤潮が記録されていない。赤潮を形成するようになった要因は明らかでなく、形成しなくなった要因も明らかでない。本種については、増殖メカニズムについての知見は蓄積されてきているが（松原 2016 など）、赤潮を形成する要因の検討は今後の課題といえる。

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 2018, 福岡 2018）。2019 年度秋季の筑後川の河川流量は平年並みで推移し（図 3）、表層塩分は高めで推移したことにより（図 4）、細胞密度は高密度化せず低位で推移したと考える。

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が頻発し、発生期間が長期化している *Skeletonema* spp. や、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。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などのスケジュール調整など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月の細胞出現率や気象・海象に注目してきた。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（赤潮非発生年はほぼ0%）、この時期の沖合域の物理環境が細胞の最大化あるいは最大化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きた。2018年度は奥部海域の定期観測の実施が11月からであったこともあり、細胞サイズ回復前と想定される10月のデータは十分に得られなかったが、2019年度はサイズ回復した細胞は10月下旬からみられ、暫定的であるが11月下旬にサイズ回復した（大型細胞数が>50%）と判断された。細胞サイズのデータは現在も取得中であり、今後、最大化した細胞の水平分布等を詳細に分析していくことで、秋季から冬季の動態を明らかにする必要がある。

現段階の有明海における *Eucampia zodiacus* による赤潮の発生シナリオとしては、秋季に沖合域で鉛直混合が生じやすい環境において大型化した細胞が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16）、大型化した細胞が秋季から冬季に分布を広域化し、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。2019年度の細胞出現率や奥部沖合域の物理環境は、これまでの赤潮発生・非発生年の結果との適合が不明瞭なところもあり、最終的な今年度の結果を含めて詳細に解析し、赤潮発生シナリオ仮説について検証する必要がある。

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。冬季の奥部海域における *Skeletonema* spp.の初期の増殖については、北西部域を中心とすることや、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、中央部海域については依然として明瞭でなく、さらなる解析が必要とされる。また、*Skeletonema* spp.等の小型珪藻の動態は冬季の *Eucampia zodiacus* の増殖に影響すると考えられており、直接的なノリ色落ち原因種としてだけでなく、他種の高密度化との関連においても重要であることから、細胞の高密度化とともに衰退のメカニズムについても今後検討していく必要がある。

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.
- 板倉 茂. 沿岸性浮遊珪藻類の休眠期細胞に関する生理生態学的研究. 瀬戸内水研報 2000; 2: 67-130.
- 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 PJ. 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. 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.
- 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.
- 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・岡村和磨. 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.

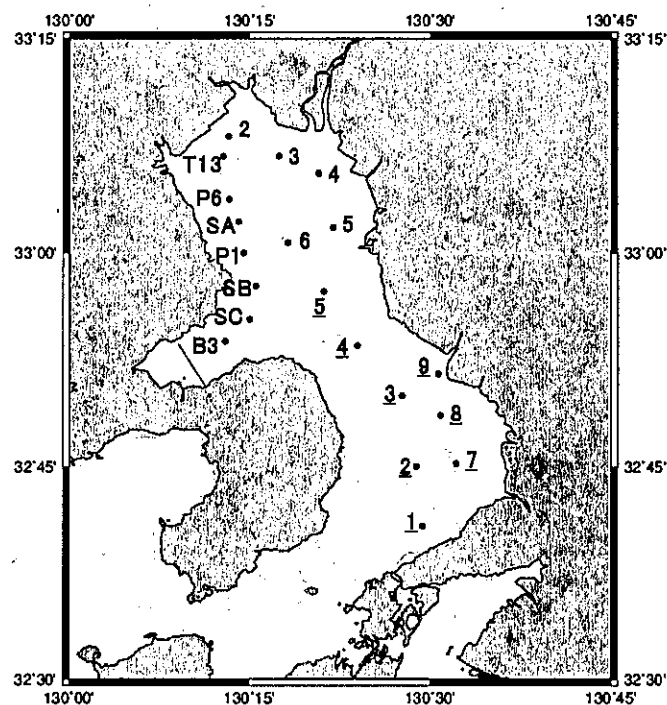


図 1 有明海における観測定点位置 (下線ありは中央部海域の定点)

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	2	六角川観測塔	33° 08.15'	130° 13.25'	1	定期観測
	3	早津江川観測塔	33° 06.78'	130° 17.42'	1	定期観測
	4	筑後川沖観測塔	33° 05.57'	130° 20.73'	1	定期観測
	5	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		32° 40.80'	130° 29.36'	34	定期観測
	2		32° 45.00'	130° 28.86'	38	定期観測
	3		32° 49.97'	130° 27.67'	27	定期観測
	4		32° 53.49'	130° 23.95'	26	定期観測
	5		32° 57.30'	130° 21.16'	35	定期観測
	7		32° 45.20'	130° 32.16'	12	定期観測
	8		32° 48.60'	130° 30.86'	11	定期観測
	9		32° 51.50'	130° 30.67'	11	定期観測

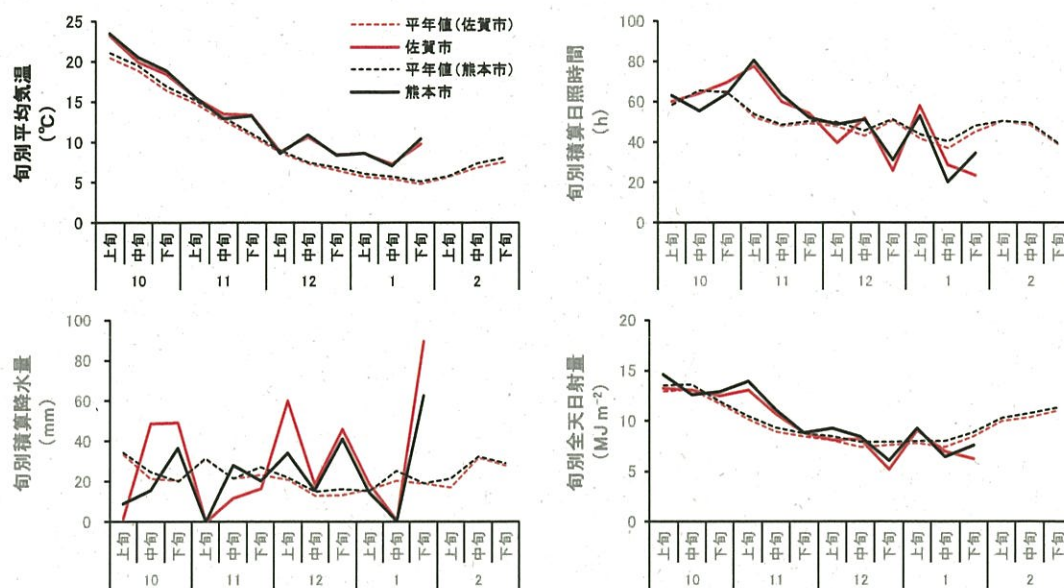


図2 2019年10月から2020年1月の佐賀市および熊本市における旬別平均気温，旬別積算降水量，旬別積算日照時間，旬別平均全天日射量の推移（平年値は2月まで）

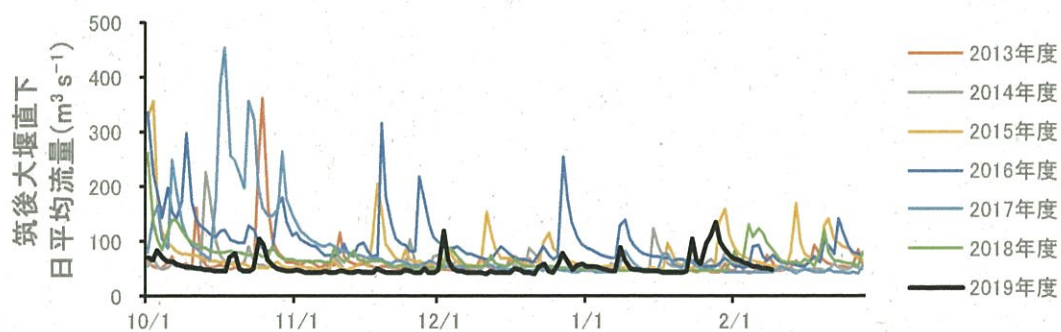


図3 2013年度から2019年度の10月から2月（2019年度は2月上旬まで）の筑後大堰直下の日平均流量の変化