

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（重点海域）

② 八代海・鹿児島湾海域

水産研究・教育機構 水産技術研究所（五島）

紫加田知幸

水産研究・教育機構 水産技術研究所（廿日市）

北辻さほ，湯浅光貴，三宅陽一，鬼塚 剛

水産研究・教育機構 水産技術研究所（長崎）

杉松宏一，中野 善，岡村和麿

熊本県水産研究センター

向井宏比古，丸吉浩太，安藤典幸

鹿児島県水産技術開発センター

高杉朋孝，東條智仁，吉満 敏

東町漁業協同組合

浦 啓介，細谷昌玄，立元伸幸，濱島俊一

1 全体計画

(1) 目的

近年，八代海等において *Chattonella* 等鞭毛藻による赤潮が頻発し，甚大な漁業被害が報告されている。一方で，発生した有害赤潮を駆除する効果的で実用的な技術はなく，現場では餌止め，生簀避難などの事前策を講じて凌いでいるのが現状である。よって，事前策をより確実に且つ効果的に実施する方策の提案が現場から強く求められている。しかしながら，それを実現するためには赤潮動態および関与する環境条件の高頻度モニタリングとリアルタイムでの情報共有，そして高精度の赤潮短期動態予察技術が必要である。本課題では，現場観測および室内実験を行って当該海域における赤潮の短期動態と環境条件との関係を定量的に解析し，有害赤潮生物の短期動態に影響する主たる因子を特定する。また，有害赤潮生物について増殖や光合成等に関する生理学的な解析を進め，赤潮の発達や衰退を予測する上で利用可能な生物指標を見出す。最終的に，当該海域における有害赤潮の短期動態予測手法を提案する。まずは過去の被害額が大きい八代海について優先的に取り組む。

2 令和3年度計画及び結果

(1) 目的

「全体計画と同じ」

(2) 方法

1) 八代海における赤潮短期動態予測技術の開発

①自動観測ブイ等による環境条件の連続モニタリング（水技研 [長崎]）

八代海姫戸沖に設置されている大型観測ブイ（図 1，Stn. A）に自動昇降式多項目水質計（AAQ-170W，JFE アドバンテック），流向流速計（Aquadopp Profiler，Nortek，抽出深度：1.5，5，10，20 m），風向風速計（CYG-5106，Climatec，海面から高さ 3 m），光量

子計 (DEFI-L, JFE アドバンテック, 海面から高さ 3 m) および硝酸塩センサー (SUNAV2, SEA-BIRD SCIENTIFIC, 設置深度: 1.5 m および 5.0 m) を装着して各種観測を実施した。2021 年 6 月から 9 月まで, 1 時間間隔で水温, 塩分, クロロフィル蛍光, 濁度, 溶存酸素飽和度, 流向・流速の鉛直観測データ, 海上風の風向・風速, 1 分間隔で光量子束密度, 30 分間隔で硝酸塩濃度のデータを取得した。光量子束密度および硝酸塩濃度以外の観測データは, 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 (有明海・八代海等の水質観測情報, <http://ariake-yatsushiro.jp/>) 上で公開した。なお, 鉛直自動観測ブイの機能維持と観測データの精度向上を図るため, 1 ヶ月に 1 回の頻度で点検を行うとともに, 表層, 深度 1.5 m, 2 m, 5 m, および 10 m から採水を行い, 塩分 (8400B, GUILD LINE), クロロフィル濃度 (10AU, TURNER DESIGNS, Holm-Hansen 法 [Holm-Hansen et al. 1965]), 懸濁物質濃度 (孔径 0.45 μm のミリポアフィルターでろ過・乾燥後に秤量 [植松ほか 1978]) および栄養塩 (TRACCS2000, BRAN+LUEBBE) の分析に供した。採水試料の分析結果の一部は, 自動観測ブイに搭載した多項目水質計で得られた観測データの較正に用いた。

②高頻度赤潮モニタリング (熊本水研, 鹿児島水技セ, 東町漁協, 水技研)

2021 年 5~9 月, 図 1 に示す 8 定点 (Stn. 2~6, A, C, K) において, 週 1 回の頻度で採水 (採水器: バンドーン採水器, 離合社製) および多項目水質計 (AAQ-RINKO176, AAQ-RINKO171, JFE アドバンテック) を用いた環境観測 (海面から海底まで) を行った。採水層は Stn. A, 楠浦で表層, 10, 20 m 層およびクロロフィル極大層, その他の定点で表層, 5, 10 m 層とした。全ての海水試料について有害赤潮プランクトン種の細胞密度および栄養塩濃度 ($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$) の分析に供した。なお, 無機態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) を DIN, リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) を DIP, シリカ ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) を DSi とした。また, 代表 3 定点 Stn. 2, 4, 6 の表層および 5 m 層, Stn. A, K の表層, クロロフィル極大層で採取した海水試料については植物プランクトン種組成を算出した。クロロフィル極大層が不明瞭な場合は採水を実施しなかった。植物プランクトンの細胞密度は, 光学顕微鏡 (IMT-2, BX53, BX51, BH2, オリンパス) 下で海水試料 1 mL 中に含まれる細胞を計数して算出した。栄養塩分析はオートアナライザー (QuAAtro36, ビーエルテック) を用いて分析した。調査期間終了後, 得られたデータについて気象データ, 過去のデータおよび既往知見との比較等を行い, 八代海における赤潮発生シナリオを提案するとともに, 短期動態に關与する主たる環境条件を考察した。また, 気象観測データは気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>), 球磨川の水位データは国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) より得た。

さらに, 近年, *Chattonella* の赤潮発生時期が梅雨時期から晩夏に遅れている現象について, その原因を明らかにするために過去 30 年以上の調査データを解析した。八代海における *Chattonella* による赤潮の発生状況を把握するため, 鹿児島県海域での発生および被害状況, 発生時期について整理した後, 水質データ, 気象データとの関連について解析した。*Chattonella* による赤潮の発生および被害状況, 発生時期は, 1988~2003 年は水産庁九州漁業調整事務所「九州海域の赤潮」から引用し, 2004~2021 年は調査において, 鹿児島県海域で *Chattonella* が 10 cells mL^{-1} 以上確認された期間とした。水質データは八代海北部の熊本県姫戸沖における水温, 塩分, DIN, DIP 濃度を熊本県内湾調査 (1989~2014 年) およ

び鹿児島県ライン調査（2015～2021年）、南部の鹿児島県米ノ津沖における水温、塩分、DIN、DIP濃度を鹿児島県南部調査（1989～2021年）により得られたデータを使用した。気象データは気象庁ホームページより、1989～2021年の八代、水俣観測所における気温および降水量データを取得した。

③八代海における栄養塩起源に関する情報収集（水技研 [廿日市, 長崎], 東町漁協）

栄養塩起源に関する基礎資料を得るために、2021年8月20～21日に陽光丸で八代海の沖11点（YK1, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 15, 16, 22, 23）、8月25日に鯨王丸で漁場周辺の8点（戸馳南、龍ヶ岳、嵐口、幣串、伊唐、脇崎、宮ノ浦、浦底）において採水、採泥調査を実施した（図2）。バケツおよびニスキン採水器（離合社）を用いて0, 5, 10, 20, 30, 40 m、海底直上1 mにおいて採水を行った。試水50 mLをシリンジフィルター（Millipore社、孔径0.45 μm）でろ過して-20°Cで保存した。溶存態の無機窒素（DIN）、リン（DIP）濃度はオートアナライザー（QuAAtro39, ビーエルテック）を用いて測定した。溶存態の全窒素（TDN）、全リン（TDP）はParsons et al. (1984)の湿式分解法に従い、分解後のNO₃-NおよびPO₄-P濃度をオートアナライザー（QuAAtro, ビーエルテック）で測定した。TDNとDINの差し引きを溶存態有機窒素（DON）、TDPとDIPの差し引きを溶存態有機リン（DOP）とした。また、試水1 mLを光学顕微鏡下（TS100, ニコン）で検鏡して有害赤潮プランクトンを計数した。

堆積物からの栄養塩溶出速度を見積もるために、アシュラ式採泥器（離合社）を用いて柱状コアにより海底堆積物を採取した。直上水を採取した後に堆積物を0-2 cm、2-5 cmの層で採取し、遠心機（CN-1050, アズワン）により3,000 rpmで15分間、遠心処理し、間隙水を得た。得られた直上水および間隙水をシリンジフィルター（Millipore社、孔径0.45 μm）でろ過し、DIN、DIP濃度をオートアナライザー（QuAAtro39, ビーエルテック）で測定した。NH₄-NおよびPO₄-Pの溶出フラックスは、Fickの第一法則に基づく山本ら(1998)の方法により、直上水と0-2 cmの間隙水の濃度差から見積もった。なお、YK23、戸馳南および幣串は砂質のため、間隙水を採取できなかった。

一部のコアはコアインキュベート法に供した。YK3（水深34.7 m）およびYK22（水深23.1 m）のコアそれぞれ3本ずつを底層水温26.0°Cでインキュベートし、培養開始0, 1, 3, 6, 12, 24時間目に10 mLずつ採水して0.45 μmシリンジフィルターでろ過し、-20°Cで保存した。その後、試水中の溶存態無機栄養塩濃度（NO₃-N+NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P, SiO₂-Si）をオートアナライザーで測定し、溶出速度を算出した。なお、試験中の溶存酸素濃度は7.1～8.4 mg L⁻¹であった。

得られた堆積物試料は元素分析計（FLASH EA1112, サーモエレクトロン）を用いて有機物量（TN）を測定した。また、塩酸抽出後にオートアナライザーを用いてTP測定を実施した。

なお、コアインキュベート法により見積もった堆積物からの栄養塩溶出量が、八代海の栄養塩動態に及ぼす影響を評価するために、陸域からの供給量と比較した。八代海北部に流入する球磨川を供給源と仮定し、2021年8月における球磨川流量（横石観測所）および河川水中の全窒素、全リン濃度については、国土交通省九州地方整備局（<http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/>）のデータを使用した。

④有害赤潮の動態予測技術の開発

ア. 八代海における *Chattonella* 赤潮の中長期動態予測技術の開発（水技研 [廿日市]

八代海における *Chattonella* 赤潮の発生には、冬から春の気温および梅雨入り時期が関係していることが報告されている（北辻ら 2018, Onitsuka et al. 2015）。この既往知見をもとに、2月から4月の平均気温（アメダス八代）と九州南部梅雨入り日（5月16日からの経過日数）の2変量を用いた判別分析による *Chattonella* 赤潮の中長期予察技術を開発した（紫加田ら 2019）。今年度は本予察技術を用いて *Chattonella* 赤潮の発生確率と発生時期を予察するとともに、現場出現状況との比較検証を行った。

イ. 生物指標を用いた短期動態予測手法の開発（水技研 [五島, 廿日市]

細胞のサイズなど基本的な生物パラメータが増殖活性の指標となるかを検証してきた。これまでの室内外の結果、細胞サイズ（長幅比）や形態（核の見え方など）が *Chattonella* の増殖活性の指標となる可能性が示唆されている（紫加田ら 2019, 2020）。しかしながら、*Chattonella* は株によって細胞サイズが大きく異なることが知られている（Demura et al. 2009）。そこで、本研究では、八代海産の複数の *Chattonella* 培養株について、細胞サイズおよび環境条件に対する感受性の違いを調べた。八代海より分離された4株（4KGY, CHA12, 8820, 3KGY）を実験に供した。4KGY以外は全て有菌株である。25 mLの改変 SWM-3 培地（完全培地）もしくは硝酸塩およびリン酸塩無添加の改変 SWM-3 培地（NP無添加培地）が入った50 mL容三角フラスコに、対数増殖期にある各株を1 mL接種した。その結果、初期細胞密度は200~500 cells mL⁻¹の範囲に設定された。25°C, 400 μmol m⁻² s⁻¹, 12hL:12hDの条件で13~15日間培養し、1~2日に1回の頻度でサンプリングし、光学顕微鏡下で計数して細胞密度を算出するとともに、20 cellsを200倍で写真撮影した。Image Jを用いて取得した画像を解析し、細胞の長さ（Ferret値）および幅（最小Ferret値）を算出した。

また、細胞サイズを指標とする *Chattonella* の短期動態予測手法の実用化に向けて、取得した細胞画像から迅速かつ簡便に細胞サイズを算出する手法を検討した。これまでに室内外で得た画像データを用いて、Image Jマクロを構築した。

次に、2021年夏、八代海にて *Chattonella* 赤潮が発生したので、現場個体群の細胞形態変化と形態に多大な影響を及ぼす栄養塩濃度を追跡した。2021年7月15~23日、八代海の異なる地点あるいは深度層より5~12の海水サンプルを採集した。全ての海水試料について *Chattonella* の計数を行った後、20細胞を200倍で写真撮影した。後日、ImageJマクロを用いて細胞長および幅を計測した。

2) 鹿児島湾における有害赤潮等発生監視と発生機構の解明（鹿水技セ）

2021年4月~7月は毎月2回、2021年8月~2022年1月は毎月1回の頻度で、図3に示す12定点において、採水（採水器：バンドーン採水器，離合社）および多項目水質計（AAQ-RINKO171, JFE アドバンテック）を用いた環境観測を行った。採水層および環境観測層は表層と10 m層とした。さらに、Stn. ⑩については多項目水質計を用いて海面から海底までの環境観測を実施した。海水試料は有害赤潮プランクトンの細胞密度（全定点）および植物プランクトン種組成（Stn. ②, ⑧, ⑩）、栄養塩濃度（全定点）の分析に供した。植物プランクトンの細胞密度は、光学顕微鏡（BX53, BX51, オリンパス）下で海水試料1 mLに含

まれる細胞を計数して算出した。栄養塩濃度はオートアナライザー（QuAAtro39，ビーエルテック）を用いて分析した。また，通常検鏡（全定点）および濃縮検鏡（Stn. ③，⑩）により *Chattonella* spp.細胞の計数を行った。濃縮検鏡は1,000倍を基本として行ったが，1月については越冬細胞の有無を確認するため，20,000倍を上限に細胞が確認されるまで濃縮した。得られたデータについて気象データ，過去のデータおよび既往知見との比較等を行い，有害赤潮発生の特徴を把握するとともに，発生機構の解明に向けた解析を行った。気象観測データは気象庁ホームページ（<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>）より得た。

(3) 結果及び考察

1) 八代海における赤潮短期動態予測技術の開発

①自動観測ブイ等による環境条件の連続モニタリング

大型観測ブイは台風通過や時化などによる一時的な停止（風速 9 m s^{-1} 以上を目安に判断）を除き，観測期間を通して稼働した。また硝酸塩センサーについては，ここではデータ補正前の値として整理する（本事業履行期限までに機器点検・校正予定）。

自動昇降式多項目水質計で計測された水温，塩分およびクロロフィル *a* 濃度の鉛直プロフィールを図4に，各層別の経時変化を図5に示す。観測期間中，表層水温（深度0.5 m）は $20.2 \sim 31.8^\circ\text{C}$ で推移し，8月5日に最高値を示した。10，20および30 m層の水温はそれぞれ $20.3 \sim 27.4^\circ\text{C}$ ， $20.0 \sim 26.6^\circ\text{C}$ および $20.0 \sim 26.3^\circ\text{C}$ の範囲で推移し，10 m層については8月上旬に，20および30 m層については8月中旬に最高値を示した。観測期間中，表層塩分は $0.6 \sim 32.3$ で推移し，7月中旬に塩分低下後，7月下旬には塩分が回復するも，8月中旬の台風や停滞前線による降雨後に最も低下し，9月中旬ごろ回復した。10，20および30 mの塩分は，それぞれ $26.3 \sim 33.9$ ， $28.9 \sim 33.0$ および $30.8 \sim 33.0$ の範囲で推移した。観測期間中，表層（深度0.5 m），10，20および30 m層のクロロフィル *a* 濃度は，それぞれ $0.2 \sim 93.7$ ， $0.4 \sim 15.9$ ， $0.3 \sim 13.1$ および $0.3 \sim 5.7 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲で推移した。

観測期間中，硝酸塩センサーで計測された硝酸塩濃度（標準液を用いた予備的な補正を行った暫定値）は $92.5 \mu\text{M}$ 以下で変動し，6～9月は球磨川の出水に伴って上昇した（図6）。7月中旬にクロロフィル *a* 濃度の大きな上昇，8月以降も $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下の一時的な上昇が認められ，いずれの時期においても，直前に河川流量の上昇，表層塩分の低下および硝酸塩濃度の上昇が確認された。ただし8月中旬の降雨による硝酸塩濃度のピークは7月中旬のものよりも大きかったが，クロロフィル *a* 濃度のピークは7月中旬が最も高かった。

海上風については，センサーのトラブルのため大型ブイの風速データの信頼性が担保できなかったため，アメダス気象観測点の熊本県松島における地上8 mの風向風速を図7に示す。7月上旬は梅雨前線により南風が卓越，また8月中旬から下旬にかけては台風と停滞前線によって南風が卓越，9月中旬には台風通過に伴い強い南風が卓越していた。流況は東西方向には弱く，20 m以浅では北向きの流れが，20 m以深では南向きの流れが優位であった（図8）。光量子束密度の日積算値は $3.6 \sim 90.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の範囲で推移した（図9）。

水温，塩分，密度（ σ_t ）を過去の平均値（2013～2020年）と比較すると（図10），表層（およそ5 m以浅）水温は7月上旬までは高め，7月中旬から8月頭まで，および8月中旬から下旬にかけては平均値より低めで推移，8月下旬以降は高めで推移していた。また，

中層（およそ 10~20 m 深）および下層（20 m 以深）の水温は 7 月上旬まで平均値より低め、7 月中旬から 9 月頭まで平均より高め、9 月に入ると平均より低めで推移していた。塩分は 7 月上旬から 8 月上旬までは高め、8 月中旬以降は低めであった。密度は塩分によく似た分布を示した。2021 年は例年より梅雨入りが早く、南九州では 5 月 11 日に梅雨入りしたが、その後降雨が少なく、多少の降雨があるも平年には及ばず、7 月から 8 月にかけての表層の高塩分化（すなわち密度成層の弱化）につながったものと考えられる。

②高頻度赤潮モニタリング

ア. 環境条件

A) 気象

図 11-a に、八代市における 2021 年の 5~9 月までの気象条件の変化を示す。気温は期間中、14.2 (5 月 2 日) ~29.8°C (8 月 5 日) の範囲で推移した。5 月上旬~8 月上旬にかけて上昇したが、大雨の影響により 8 月中旬に 23°C まで低下した。その後の好天で 8 月下旬に 29.2°C まで上昇したが、それ以降は下降した。

降水量は、5 月 15, 20, 27 日, 7 月 10 日, 8 月 2, 11, 12, 13, 16, 17 日に 50 mm を超え、5 月 20 日に 145 mm, 8 月 13 日に最高値 182 mm を記録した。8 月に発生した記録的な大雨 (2021 年 8 月の大雨) では、熊本県のアメダス観測所 25 か所のうち 13 か所において、72 時間雨量 (8 月) としては観測史上最大値 (天草市本渡: 521 mm, 宇城市三角: 372 mm 等) を記録した。国土交通省水管理・国土保全局所管の球磨川水系の観測所では、72 時間雨量として 358 mm を記録した。また、気象庁発表資料によると、八代海が含まれる九州北部地域の梅雨入りは 5 月 11 日で平年より 24 日早く、梅雨明けは 7 月 13 日で平年より 6 日早かった。八代観測所では梅雨入り直後の 5 月中旬の降水量は平年比 543% と多かったが、その後 6 月上旬~7 月中旬は平年比 79% と少なく、特に 6 月下旬の日照時間は平年と比べて長かった。大雨が発生した 8 月中旬の降水量は平年比 720% だった。

図 11-b に、宇城市三角観測所における 2021 年の 5~9 月までの平均風速 (特別値) と風向の推移を示す。10.0 m s⁻¹ 以上が観測されたのは、5 月 20 日 (10.8 m s⁻¹: 梅雨前線の影響), 8 月 9 日 (10.4 m s⁻¹: 台風 9 号の影響), 9 月 17 日 (12.3 m s⁻¹: 台風 14 号の影響) であった。梅雨前線の影響で、7 月 4~9 日に 5.0 m s⁻¹ 以上が断続的に観測された。風向は、概して 9 月 3 日までは南成分が卓越し、9 月 4 日以降は北成分が卓越した。東西成分については、南北成分と比べ風速への寄与は低めで推移した。

B) 水質

調査期間中、水温は 17.8 (5 月 11 日, Stn. 4, 6, 底層) ~30.0°C (8 月 3 日, Stn. 2, 表層) で推移した (図 12)。概して、水温は 5 月~8 月第 1 半旬にかけて上昇し、その後の大雨で大きく低下した後、8 月末にかけて再上昇し、その後は低下した。塩分は 5 月中旬の梅雨前線による降雨と 8 月の大雨時に、大きな低下が観測され、9.7 (5 月 18 日, Stn. K, 表層), 9.1 (8 月 17 日, Stn. K, 表層) ~34.3 (5 月 11 日, Stn. C: 10m~底層, Stn. 7: 表層~底層) で推移した。記録的な大雨があった 8 月中旬~下旬では、Stn. 1, 2, A, 4, 5, 6, K の表層付近において 25 を下回った (図 13)。水温および塩分のデータより算出された密度 (σ_t) は、塩分と同様に 2 度の大きな低下が観測され、5.5 (5 月 18 日, Stn. K, 表

層), 4.3 (8月17日, Stn. K, 表層) ~24.7 (5月11日, Stn. 4, 底層) で推移した (図 14)。密度 (σ_t) のデータによると, 密度成層は5月第4半旬~6月第2半旬, 7月第3半旬~第5半旬, 8月第4半旬~9月第2半旬に発達した。Stn. 2, A, 4における密度躍層の位置は表層~6 m 層と推定された。

クロロフィル蛍光値は5月下旬と7月中旬に Stn. 2, A, 4 の表層付近, 8月上旬~中旬の Stn. 2, 8月下旬, 9月下旬に全域で高くなった (図 15)。

DIN, DIP および DSi 濃度はそれぞれ ND (5月11日, Stn. 2, A, K, 表層等) ~18.4 μM (8月17日, Stn. 2, 表層), ND (6月11日, Stn. 2, A, 4, 6, A, 表層等) ~1.2 μM (8月17日, Stn. K, 表層), ND (9月28日, Stn. 4, 表層) ~97.1 μM (8月17日, Stn. K, 表層) の範囲で推移した (図 16, 17, 18)。調査期間を通して, いずれの栄養塩種も北部で高い傾向にあった。DIN および DIP 濃度は全調査点で *Chattonella* spp. の増殖に必要な半飽和定数 (DIN : 0.65 μM , DIP : 0.26 μM , Nakamura et al. 1988) を下回ることがあり, 特にその頻度は八代海南部の DIP 濃度で多かった。10 m より浅い深度層において, 多くの調査定点 (Stn. 2, A, 4, 5, K) で DIN, DIP, DSi 濃度が5月中~下旬と8月中旬に上昇したが, 塩分低下と同期していたことから, 降雨および球磨川からの供給によるものと考えられた。一方, 7月中旬には梅雨明け前のまとまった降雨や出水に伴う塩分低下が認められ, 栄養塩類の供給があったと考えられるが, DSi 濃度のみが増加し, DIN 濃度には大きな変化が認められず, DIP 濃度は低下した。DIN および DIP は, 当該期間に赤潮を形成していた *Chattonella* spp. に吸収された可能性が高いと考えられた。また, 9月中旬の降雨は少なかったが, DIN, DIP, DSi 濃度は上昇した。当該時期は台風 14 号の接近で擾乱による密度成層の崩壊が認められたため, 鉛直混合による海底や下層から上層への栄養塩供給の可能性が考えられた。DSi についても概して, DIN および DIP と同様の変動パターンが認められたが, 珪藻の活発な増殖に必要な濃度 (DSi : 2.0 μM) を下回ったのは, 珪藻が高密度化した影響と考えられる8月下旬と9月下旬の一部の深度層のみであった。

水中光量子量は, 熊本市の全天日照量について, 計算の単純化のため日照時間を8時間と固定して, 平均光量子量を算出し, 実測した水中光量子率に乗じて求めた。*Chattonella* の最高増殖速度を得るために必要な光量の半飽和定数 (61 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 紫加田ら 2010) の境界は, 深度 0.8 m (8月10日, Stn. 2) ~29 m (5月11日, Stn. 6) の範囲で推移した。また, 8月の大雨の期間に, 全域 (Stn. 2, A, 4, 5, 6, K, C, 7) において, 深度がそれぞれ 0.8, 4, 4, 3, 8, 1, 6, 8 m に上昇した (図 19)。球磨川からの出水により濁度が増加したためと考えられた。

イ. 植物プランクトンの発生状況

A) 有害赤潮プランクトン種の発生状況

他の調査結果も含めた八代海全域の有害赤潮プランクトン細胞密度の推移を図 20 に, 調査点別の発生概況を図 21 に示す。*Chattonella* spp. は5月11日に Stn. 2 で濃縮検鏡により $2 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ が初認されたが, その後5月末まで検出されなかった。6月1日に $2 \times 10^3 \sim 1 \text{ cells mL}^{-1}$ が検出された後は, 6月22日まで 1 cell mL^{-1} 以下で推移し (Stn. 2, A, 4, 5, 6, C), 6月29日以降は, 通常検鏡で複数の調査定点 (Stn. A, 5, K) で検出されるようになった。本課題とは別の赤潮調査において7月6日に 13 cells mL^{-1} (戸馳

島沖) が検出され、7月12日に八代海北部～中部、楠浦湾など広範囲で $100 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上に増加した (<https://akashiwo.jp/>)。7月13日には $1 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ (Stn. A) と急速に増加するなど、八代海北部～中部を中心に全域で高密度化した (<https://akashiwo.jp/>)。他事業の情報も含めると、本種は7月18日に上天草市松島町樋合漁港で $1 \times 10^5 \text{ cells mL}^{-1}$ (八代海全域での最高細胞密度)、19日に上天草市姫戸町牟田漁港地先で $9 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ に達した (<https://akashiwo.jp/>)。その後も高密度化した地点が認められたものの(7月23日: $2 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ [宇城市不知火町]、7月30日: $8 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ [氷川郡和加島樋門])、7月下旬には八代海全域で $1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 未満に減少した

(<https://akashiwo.jp/>)。その後、再び八代海北部で8月6日に $3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ (八代市郡築沖) に増加したが、8月7日以降には $1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 未満に減少し、8月13日以降に $100 \text{ cells mL}^{-1}$ 未満、8月15日以降に 10 cells mL^{-1} 未満、8月19日には 1 cell mL^{-1} と急激に衰退し、8月下旬には mL レベルでは検出されなくなった (<https://akashiwo.jp/>)。9月7～16日に濃縮試料 (1 cell mL^{-1} 以下) で細胞が検出されはじめ (Stn. 2, A, 4, 5, C, K)、9月21日に 3 cells mL^{-1} (Stn. 5)、28日には 4 cells mL^{-1} (戸馳島沖) が検出された (<https://akashiwo.jp/>)。調査点別の発生概況をまとめると、北部 (Stn. 2, A, 4) で7月中旬、8月上旬、9月下旬の3回、南部および西部 (Stn. 5, 6, C, 7) で7月中旬と9月下旬の2回、増殖のピークが確認された。また、概して北部において南・西部より発生密度は高く、長期化する傾向が見られた。

Cochlodinium polykrikoides は、6月15日以降、 10 cells mL^{-1} 未満で散見されるようになり、7月20日の 12 cells mL^{-1} から8月10日にかけて $2 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ まで高密度化した後減少に転じ、8月13日に 41 cells mL^{-1} 、8月19日～9月14日は 2 cells mL^{-1} 以下で推移したが、9月28日には 12 cells mL^{-1} に上昇した (図20)。

Heterosigma akashiwo は別の赤潮調査で4月21日に八代海湾奥部で $8 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 、5月18日には天草下島南端の久玉浦で $1 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 、5月19日に上天草市大矢野町宮津湾で $8 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ が検出された。6月以降は、暫く本種による赤潮は検出されなかったが、別の赤潮調査で9月6日に Stn. 2 の近傍で $4 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ が検出され、9月7日には Stn. 2, A, 4, 5, 6 で検出されたが、9月中旬に衰退した (図20)。

Karenia mikimotoi は7月21日に別の赤潮調査で 3 cells mL^{-1} が検出されたが増加しなかった。また、*Heterocapsa circularisquama* は検出されなかった。

B) 珪藻類の発生状況

珪藻類の細胞密度は調査期間中、最高で $3 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ (5月25日, Stn. A, 極大層) が検出された。また、 $5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ を超えたのは、5月25日に Stn. 2 の表層と5m層, Stn. 4 の表層, Stn. A の表層と極大層、8月24日に Stn. 2 の表層と5m層、9月21日の Stn. 4 の5m層であった。多くの場合、優占種は *Skeletonema* spp. あるいは *Chaetoceros* spp. であった (図22-1, 22-2)

ウ. *Chattonella* spp. の消長要因

2021年度の *Chattonella* spp. の消長への気象、水質の影響について、Stn. 2 を代表例として、図23に整理した。*Chattonella* spp. は例年通り5月に初認されたが、その後の梅雨入り

で、降雨に伴う珪藻赤潮の発生により *Chattonella* spp.の増加が抑えられた。珪藻衰退後の6月上旬～中旬にかけても降雨がほとんどなく栄養塩不足により、*Chattonella* spp.の増殖は抑えられた。6月下旬になると密度成層の崩壊と同時に DIP 濃度が上昇し、水温も *Chattonella* spp.の増殖に至適な範囲である 25°C以上となり、7月上旬には *Chattonella* spp.は 13 cells mL⁻¹まで増加した。さらに、梅雨前線の影響で7月4～9日の強風による擾乱と、7月8～11日のまとまった降雨や出水による栄養塩の供給により、7月15日には 2×10³ cells mL⁻¹ (最高値)まで増加したが、高密度化した *Chattonella* spp.による消費等によって栄養塩濃度が低下し、7月25日には 6 cells mL⁻¹まで減少した。その後、7月末に密度成層の崩壊によって栄養塩が供給され、8月10日には 240 cells mL⁻¹まで再び増加したが、8月としては記録的な大雨 (2021年8月11～19日にかけての大雨)による大規模な出水が起こり、*Chattonella* spp.は衰退した。7月10～12日における球磨川流量 (横石観測所)は 148 hm², 8月11～19日は 1,123 hm²であった。これを球磨川の出水の影響を受けやすいと考えられる流入面積 (400 km²)で除すると、流入した河川水の厚さを見積もることができる。7月10～12日の 0.4 m に比較すると、8月11～19日は 2.8 m と出水の規模が大きく、このことが *Chattonella* spp. 個体群の衰退に影響した可能性が高いと考えられる。すなわち、7月上旬の球磨川の出水は栄養塩供給等の *Chattonella* spp.の増殖にとって正の影響があり、8月中旬の出水には個体群の拡散、流出や濁度による光量低下等といった負の影響があったと考えられる。その後、8月下旬には天候の回復とともに水温が上昇して成層化し、珪藻類が卓越した。9月に入ると気温低下に伴う鉛直混合により栄養塩が供給され、*Chattonella* spp.が再検出されるようになったが、珪藻類が卓越したため高密度化しなかった。

エ. 八代海の *Chattonella* 赤潮発生の長期変化

八代海の鹿児島県海域における *Chattonella* による赤潮について、*Chattonella* の最高細胞密度と被害金額の経年変化を図 24 に示す。期間中、最高細胞密度は 2003 年、被害金額は 2010 年が最高であった。次に、*Chattonella* 赤潮の年ごとの発生時期を図 25 に示す。九州海域の赤潮からデータを得た 1989～2003 年の発生時期は 7 月中旬～8 月中旬であった。また、2004～2010 年の発生時期 (*Chattonella* 細胞密度が 10 cells mL⁻¹ 以上確認された期間) は 6 月下旬～8 月下旬だったが、2015～2019 年の発生時期 (*Chattonella* 細胞密度が 10 cells mL⁻¹ 以上確認された期間) は 8 月下旬～9 月下旬となり、近年は過去と比較して発生時期が遅れている傾向が確認された。

八代海の北部 (熊本県姫戸沖) および南部 (鹿児島県米ノ津沖) における 6～8 月の DIN, DIP 濃度 (月平均値) の経年変化をそれぞれ図 26, 図 27 に示す。2013 年以降、北部、南部ともに 6 月の DIN 濃度が *Chattonella* の半飽和定数を下回るようになったことが判明した。また、DIP 濃度は北部南部を問わず、多くの年において、6, 7 月の濃度は半飽和定数を下回っていたが、経年変化の特徴は明確でなかった。すなわち、以前から 6, 7 月はリン制限がかかっていたが、近年は 6 月に窒素欠乏も加わっている状況にある。このことが、近年 *Chattonella* の発生が比較的栄養塩が豊富に存在する 8 月以降へ追いやられている一因と考えられた。他方、水質データのうち水温、塩分、珪藻類、気象データのうち気温、降水量についても月ごとの推移と赤潮発生状況との関連を解析したが、明確な関係性は認められなかった。

③八代海における栄養塩起源に関する情報収集

調査期間中、降雨の影響により八代海全域で表層に低塩分水塊が認められ、塩分 1.1～32.6、水温 22.0～27.4°Cの範囲であった(図 28)。クロロフィル蛍光値は 0.25～8.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ の範囲にあり、海水 1 mL 中に有害種は検出されなかった(図 28)。5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以上の高いクロロフィル蛍光値が YK16(表層から 4 m 層)や嵐口(表層から 14 m 層)で認められたが、これは *Skeletonema spp.*や *Thalassionema spp.*などの珪藻類によるものであった。溶存酸素濃度は 3.7～9.3 mg L^{-1} の範囲にあった(図 28)。YK1(3.7 mg L^{-1} , 水深 15.9 m)および YK13(3.8 mg L^{-1} , 水深 40.5 m)の底層では、溶存酸素濃度は塩分成層の影響により低かったが、これらの定点を除くと 4.0 mg L^{-1} 以上であった。

溶存無機態、有機態栄養塩濃度の推移をそれぞれ図 29 および 30 に示す。DIN は 0.5～26.2 μM の範囲にあり、表層の低塩分水塊ではその内訳は $\text{NO}_3\text{-N}$ (6.4～24.5 μM) であった。DIP は ND～1.2 μM の範囲にあった。また、DON は ND～16.5 μM , DOP は ND～0.6 μM の範囲にあり、低塩分水塊中ではほとんど検出されなかった。

コアインキュベーション法による YK3 および YK22 の DIN ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) の溶出速度は、それぞれ $76.8 \pm 56.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$, $78.0 \pm 84.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ であった。DIP の溶出速度はそれぞれ $4.2 \pm 2.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$, $8.4 \pm 4.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ であった(図 31)。

間隙水中には $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NO}_2\text{-N}$ はほとんど含まれていないため、拡散方程式による溶出量の見積もりには $\text{NH}_4\text{-N}$ を用いた。漁場では $234 \sim 663 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (平均 $401 \pm 184 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、漁場以外の地点では $109 \sim 238 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (平均 $187 \pm 40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$) と、漁場で溶出量が高い傾向が認められた(図 32)。DIP ではその傾向がより顕著に現れ、漁場では $8 \sim 528 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (平均 $141 \pm 194 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、漁場以外の地点では $14 \sim 110 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (平均 $53 \pm 30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$) であった(図 32)。堆積物表層(0-1 cm)における有機物量は、漁場(伊唐)および漁場以外(YK3)ではそれぞれ TN が 0.8 mg g^{-1} および 0.4 mg g^{-1} , TP が 0.3 mg g^{-1} および 0.1 mg g^{-1} が得られており、漁場で有機物量が豊富であることが明らかとなった。漁場では餌等による負荷の影響で、堆積物中の有機物量が高くなることが報告されている(多田ら 2021)。なお、コアインキュベーション法で得られた溶出速度は、拡散方程式で得られた値よりも小さかった。見積もり方法の違いによって溶出速度が異なることが知られており、現場の流速を再現できないこと、拡散境界層や堆積物表層のバクテリアなどの生物活動の影響が複雑に影響していることなどが要因と考えられている(山本 2003)。

コアインキュベーション法により見積もった堆積物からの栄養塩溶出量を、球磨川からの供給量と比較した。8月の流量($1.06 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$)に TN (700 mg m^{-3}) および TP (31 mg m^{-3}) を乗じて流入量を算出すると、それぞれ 7.4 ton day^{-1} および $0.33 \text{ ton day}^{-1}$ となる。一方で、コアインキュベーション法により得られた DIN および DIP の溶出量に、八代海の面積($1,200 \text{ km}^2$, 大和田 2001)を乗じると、それぞれ 31 ton day^{-1} および 5.6 ton day^{-1} となる。球磨川からの流入量と比較すると、窒素は 4.2 倍、リンは 17.1 倍と大きく、8月の八代海では堆積物からの溶出による影響は非常に重要であると考えられる。ただし、八代海へ流入する河川は球磨川だけでは無いため、陸域からの供給量は過小評価となっている。

次に、堆積物からの窒素溶出量が *Chattonella* の生残に与える影響を検討した。コアイン

ンキュベート法により得られた堆積物 1 cm²あたりの溶出量は、一晚 (10 h) で 0.77 μmol cm⁻²になると考えられる。仮に、*Chattonella* が海底に一晚滞在して栄養塩を利用したとすると、一晚分の溶出量を *C. antiqua* の最小細胞内含量 (NH₄; 7.7 pmol cell⁻¹, Nakamura 1985) で除すると、およそ 1.0×10⁶ cells の *Chattonella* 個体群が生残できると考えられる。これは、底面積 1 cm²の水柱に存在する *Chattonella* 個体群に該当し、この個体群が昼間に 2 m の厚さに分布したと仮定すると、500 cells mL⁻¹ と十分に赤潮状態になると推定される。しかしながら、*C. antiqua* が鉛直移動によって到達できる深度は 7.5 m と報告されている (Watanabe et al. 1995)。平均水深が 22.2 m (大和田 2001) である八代海において、*Chattonella* の動態に堆積物由来の栄養塩がどの程度影響しているかを評価するためには、*Chattonella* が到達可能な深度にまで、堆積物由来の栄養塩が拡散し得る環境条件等について、今後、検討する必要がある。

④有害赤潮の動態予測技術の開発

ア. 八代海における *Chattonella* 赤潮の中長期動態予測技術の開発

図 33 によると、2 月から 4 月の平均気温が高く梅雨入りが遅いほど *Chattonella* 赤潮が発生しやすく、平均気温が低く梅雨入りが早いほど発生しにくい傾向が認められる。2021 年は 2 月から 4 月の平均気温が 13.4°C、梅雨入り日が 5 月 11 日 (速報値および確定値) であり、図 33 にプロットすると発生確率は「中程度」と判定された。実際には、最高細胞密度 100 cells mL⁻¹、継続日数 10 日間を超える大規模発生年だった。

また、図 34 によると、判別得点が高い年は赤潮発生時期が早く、判別得点が高い年は赤潮発生時期が遅い傾向が認められる。2021 年の判別得点は 0.03 だったため、回帰直線から推定された赤潮発生時期は 8 月中旬で、散布図の点のばらつきを表す平均絶対誤差 (約 10 日) を考慮すると 8 月上旬から下旬にかけての発生見通しだった。実際には、熊本県で 7 月 5 日に、鹿児島県で 7 月 15 日に警報が発令され、予察結果と 1 ヶ月程度のずれが生じていた。

2021 年は 1988 年以降で 2 月から 4 月の平均気温が最も高い 13.4°C、梅雨入り日は最も早い 5 月 11 日だった。そのため、2021 年は図 33 の散布図において左上の大きく外れた位置にプロットされた。本予察技術は過去の赤潮発生状況をもとに構築されているため、2021 年のような過去に経験していない環境条件の年の予察には注意が必要である。本予察技術に用いている 2 変量 (2 月から 4 月の平均気温、九州南部梅雨入り日) は既往知見で赤潮発生日と相関関係が認められていたものである (Onitsuka et al. 2015)。そこで、2021 年も含めて 2 変量と赤潮発生日との関係を再確認した (図 35)。2 月から 4 月の平均気温が高いほど赤潮発生日が早い傾向があり、2021 年も過去の発生年と同様の関係性が認められた。一方、過去の発生年では梅雨入り日が早いほど赤潮発生日が遅い傾向があったものの、2021 年は大きく外れた値となっていた。以上の結果から、梅雨入り日が記録的に早かったことが予察精度を下げたと考えられる。2021 年の梅雨入りは早かったものの、降水量の大半は 6 月上旬までに観測されており、赤潮発生日 (7 月 5 日) までの 1 ヶ月間の降水量は 69.5 mm とかなり少なかった。過去の赤潮発生年をみると、梅雨期間中の降水量が少ないほど赤潮発生日は早い傾向が認められており ($r = 0.47, p < 0.05$)、梅雨入り後の気象条件も赤潮の発生を左右することが示唆される。

イ. 生物指標を用いた短期動態予測手法の開発

完全培地において、全ての *Chattonella* 株が同程度の速度で増殖したが、最高細胞密度は株間で差異が認められた (1.90×10^4 [3KGY] $\sim 8.00 \times 10^4$ cells mL⁻¹ [4KGY]) (図 36)。一方、NP 無添加培地では全ての株で培養 3~5 日目に増殖が急激に低下し、11 日目から細胞密度が減少した。最高細胞密度は株ごとに異なり、 1.70×10^3 (3KGY 株) $\sim 9.00 \times 10^3$ cells mL⁻¹ (8820 株) の範囲にあった。細胞長および細胞幅は、NP 無添加培地においてそれぞれ 49~98 μm および 25~39 μm 、完全培地において 63~95 μm および 22~38 μm の範囲で変化した (図 37, 38)。全ての株において、細胞長は試験後半で完全培地よりも NP 無添加培地の方が小さかったのに対し、細胞幅は一貫して培地間で差はほとんどなかった。NP 無添加培地および完全培地における各株の細胞長の最小値はそれぞれ 49~58 μm および 63~77 μm の範囲にあり、二区間で重複しなかった。NP 無添加培地および完全培地における各株の細胞幅の最小値は 25~30 μm および 22~25 μm 、最大値は 33~39 μm および 35~38 μm でいずれも二区間で重複した。長幅比は全ての株において、試験後半において完全培地と比べて NP 無添加培地で小さくなった。長幅比の最小値は NP 無添加培地および完全培地でそれぞれ 1.8~2.1 および 2.2~2.4 となり、両区間で重複しなかった (図 39)。これらのことから、多数のクローン株で構成されることが想定される現場個体群が生理状態の変化による影響を受けたとしても、細胞長や長幅比は、株間の差異を超えた共通の指標として有効である可能性が示唆された。本試験の結果のみに基づけば、細胞長が 60 μm もしくは長幅比が 2 を下回ると、「栄養不足により細胞増殖が不全である」と診断できる。

また、細胞のサイズを迅速に算出するために、以下の ImageJ マクロを構築した。スクリプトを以下に示す。

```
run("Images to Stack", "name=Stack title=[] use");
run("Split Channels");
selectWindow("Stack (blue)");
selectWindow("Stack (green)");
close();
selectWindow("Stack (red)");
close();
selectWindow("Stack (blue)");
run("Invert", "stack");
run("Median...", "radius=10 stack");
setAutoThreshold("Otsu dark");
//run("Threshold...");
roiManager("Deselect");
run("Analyze Particles...", "size=500.00-Infinity circularity=0.30-1.00 display exclude clear include add stack");
```

本マクロにより取得画像に施す処理の概要は以下の通りである。

1. Image を stack にする。
2. RGB に分け、B だけ残す。

3. 白と黒の領域を入れ替える。

4. 縁辺部をぼかす。

5. 二値化（白黒化）する。

6. 細胞内の穴を埋める。画像縁辺部で切れている細胞を対象から外すなどのエラー処理を実施する。

7. 長軸（Feret 値）、短軸（最小 Feret 値）を計測する。

室内外でこれまでに得た細胞画像に本マクロを適用した結果、室内において栄養塩欠乏が著しく進行した細胞については、色素が薄く、細胞と背景とのコントラストが低くなり、細胞の一部を二値化後に認識できないという問題点を見出した（図 40）。現場個体群についてこの問題は確認されていないが、室内外で使用したカメラが異なることなどが関与していると考えられるが、要検討である。

高頻度モニタリング調査の結果および本調査における細胞密度の経時変化データ（図 41）から、現場個体群の調査を行った期間は赤潮の定常期～衰退期と判断された。上述の ImageJ マクロを用いて、*Chattonella* 細胞の面積、細胞長、細胞幅を計測し、長幅比を算出した。その結果、面積の全定点平均値は $1,123\sim 1,364\ \mu\text{m}^2$ 、細胞長は $60\sim 67\ \mu\text{m}$ 、細胞幅は $25\sim 29\ \mu\text{m}$ 、長幅比は $2.2\sim 2.7$ の範囲で推移し、期間中大きな変化は認められなかった（図 42）。一方で、核が鮮明に見える細胞（核クリア細胞）は調査開始 4 日後から急増した（図 43）。本細胞は室内の N 無添加培地で見出され、2019 年の赤潮衰退直前にも現場で頻繁に観察された（紫加田ら 2020）。室内の N 欠乏条件において、本細胞が認められる時も細胞のサイズには異常がないことも明らかとなっている（紫加田ら 2020）。しかしながら、当時、DIP は極めて低濃度であったが、DIN は枯渇していなかった（図 44）。そのため、核クリア細胞の形成条件は N 欠乏以外にもあると考えられた。以上の結果から、*Chattonella* の場合、細胞形態からある程度衰退期を予知できるが、衰退要因を推定するためには更なる研究が必要であると考えられた。

2) 鹿児島湾における有害赤潮等発生監視と発生機構の解明

①赤潮モニタリング

ア.環境条件

A) 気象

図 45 に溝辺アメダスの降水量、図 46 に牧之原アメダスの日照時間を、表 1 に気象庁による九州南部地域における気温、降水量および日照時間の旬別階級区分を示す。降水量は 3 月中旬を除き、1 月から 5 月上旬は概ね少ない～平年並みで推移し、5 月中旬から 6 月上旬はかなり多い～多いで推移し、6 月中旬から 8 月上旬はかなり少ない～平年並みで推移し、8 月中旬はかなり多く、それ以降は 9 月中旬を除き、概ね少ない～平年並みで推移した（図 45）。日照時間は、1 月中旬、2 月上旬はかなり多く、2 月中旬から 5 月上旬は少ない～多く、5 月中旬はかなり少なく、5 月下旬から 8 月上旬は少ない～多く、8 月中旬はかなり少なく、それ以降は少ない～かなり多いで推移した（図 46）。旬別階級区分によると、平均気温は、1 月上旬はかなり低く、1 月中旬から 4 月下旬は平年並み～かなり高く、5 月上旬は低く、5 月中旬はかなり高く、5 月下旬から 8 月上旬は低い～高く、8 月中旬はかなり低く、10 月上旬から 10 月中旬はかなり高く、それ以降は、かなり低い～平年並みで推移した（表

1)。

B) 水質

観測期間中の鹿児島湾中央における水質観測結果および栄養塩分析結果を図 47 に、湾奥の結果を図 48 に示す。湾中央において、水温は表層および 10 m 層でそれぞれ 17.6~29.1°C および 17.7~28.2°C の範囲で推移し、4 月上旬から 10 月上旬にかけて概ね平年並みかやや高く、11 月下旬から 12 月上旬にかけて概ね平年よりやや低く、1 月上旬はやや高めであった。塩分は、表層および 10 m 層でそれぞれ 28.5~34.3 および 31.7~34.3 の範囲で推移し、4 月上旬から 5 月下旬にかけては平年並みであり、降雨や梅雨の影響で 5 月下旬から 6 月上旬は平年よりやや低めか低めであり、7 月下旬は高く、9 月上旬は低く、10 月下旬以降は概ね平年並みかやや高めであった。透明度は、4.0~13.0 m の範囲で推移し、特に 5 月下旬から 6 月上旬にかけて平年より低めであり、7 月下旬および 10 月上旬は平年より高めであった。溶存酸素濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 6.6~8.0 mg L⁻¹ および 5.8~7.9 mg L⁻¹ の範囲で推移し、概ね平年並みであった。DIN 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ ND (<0.01 μM) ~7.9 μM および 0.1~3.0 μM の範囲で推移し、5 月の中旬は平年より高く、他期間は概ね平年より低めであった。DIP 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ ND~0.34 μM および ND~0.30 μM の範囲で推移し、全調査期間を通して平年より低めであった。SiO₂ は、表層および 10 m 層でそれぞれ 0.8~53.4 μM および 0.4~14.9 μM の範囲で推移し、4 月上旬から 6 月上旬にかけては概ね平年より高めであり、7 月上旬以降は平年より低めであった。クロロフィル蛍光値は、表層および 10 m 層でそれぞれ 1.1~7.2 μg L⁻¹ および 0.6~9.5 μg L⁻¹ の範囲で推移し、5 月上旬から 6 月上旬、9 月上旬および 11 月上旬は平年より高めであり、他期間は概ね平年よりやや低めか低めであった。

湾奥において、水温は表層および 10 m 層でそれぞれ 17.3~28.6°C および 17.2~26.9°C の範囲で推移し、4 月下旬、8 月上旬および 11 月上旬は平年よりやや低かったが、他期間は平年並みかやや高めであった。塩分は、表層および 10 m 層でそれぞれ 25.6~33.7 および 31.2~33.8 の範囲で推移し、5 月下旬から 6 月上旬は低く、6 月下旬から 8 月上旬にかけては平年よりやや高めか高めであった。透明度は、2.7~16.7 m の範囲で推移し、4 月上旬から 6 月上旬にかけて平年よりやや低めか低めであった。溶存酸素濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ 6.0~8.9 mg L⁻¹ および 4.1~8.5 mg L⁻¹ の範囲で推移し、概ね平年並みかやや高かった。DIN 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ ND~8.4 μM および ND~8.5 μM の範囲で推移し、5 月上旬を除き、概ね平年より低めであった。DIP 濃度は、表層および 10 m 層でそれぞれ ND~0.81 μM および ND~0.83 μM の範囲で推移し、4 月上旬から 10 月上旬にかけて概ね平年より低く、11 月以降は概ね平年よりやや低めであった。SiO₂ は、表層および 10 m 層でそれぞれ 4.6~100.7 μM および 0.9~31.5 μM の範囲で推移し、4 月上旬から 7 月上旬にかけては概ね平年より高めであった。クロロフィル蛍光値は、表層および 10 m 層でそれぞれ 1.0~7.0 μg L⁻¹ および 1.1~5.2 μg L⁻¹ の範囲で推移し、4 月上旬から 6 月上旬にかけては概ね平年より高めであり、6 月下旬から 7 月上旬にかけては平年より低めであった。

また、代表点 Stn. ①における多項目水質計による各測定項目の 4 月上旬から翌年 1 月上旬までのイソプレットを図 49 に示す。水温および塩分に注目すると、特に 7 月から 9 月に成層が形成されており、10 月以降は徐々に成層が崩壊していった。さらに、栄養塩(DIN,

DIP) に注目すると、4月から11月の期間は表層から10 m層まで概ね貧栄養状態であった。

イ. 植物プランクトン

A) 赤潮発生状況および有害赤潮プランクトンの発生状況

2021年に鹿児島湾で発生した赤潮を図50に示す。2月22日から3月26日にかけて *H. akashiwo* による赤潮（最高細胞密度 4×10^4 cells mL⁻¹）、7月24日から8月24日にかけて *Gonyaulax polygramma* による赤潮（最高細胞密度 5×10^4 cells mL⁻¹）、9月28日から10月2日にかけて *Cochlodinium convolutum* による赤潮（最高細胞密度 500 cells mL⁻¹）、12月14日から12月20日にかけて *Mesodinium rubrum* による赤潮（最高細胞密度 4×10^3 cells mL⁻¹）が発生した。鹿児島湾で特に警戒すべき *Chattonella marina* による赤潮は発生しなかった。通常検鏡で *C. marina* は、8月10日に Stn. ③の表層および10 m層で各1細胞確認されたのみで、他調査定点、他期間では確認されなかった。

B) プランクトン種組成

図51, 52, 53に植物プランクトンの組成変化を示す。珪藻類は湾央部の Stn. ②の表層では、7月6日に 820 cells mL⁻¹、9月7日に 1×10^3 cells mL⁻¹ 確認され、他の期間は 300 cells mL⁻¹ 未満であった。Stn. ②の10 m層は、最高が9月7日の 338 cells mL⁻¹ であり、他は 300 cells mL⁻¹ 未満であった。（図51）。優占種は表層、10 m層ともに、9月7日は *Leptocylindrus danicus* であり、他の期間は主に *Chaetoceros* spp. が優占していた（図9）。湾奥部の Stn. ⑧, ⑩の表層について、Stn. ⑧は9月7日に 2.13×10^3 cells mL⁻¹、Stn. ⑩は7月30日に 960 cells mL⁻¹、9月7日に 3×10^3 cells mL⁻¹ 確認され、それ以外は 600 cells mL⁻¹ 未満であった。Stn. ⑧, ⑩の10 m層について、両調査地点とも、最高細胞密度が確認されたのは、9月7日で、それぞれ 555 cells mL⁻¹、854 cells mL⁻¹ 確認され、それ以外は 500 cells mL⁻¹ 未満であった（図51）。優占種は、表層、10 m層ともに、9月7日は *L. danicus* であり、他期間は *Chaetoceros* spp., *Bacteriastrum* spp. が優占していた（図52）。

有害種について、100 cells mL⁻¹ 以上が確認されたのは、4月20日の Stn. ⑩の表層（100 cells mL⁻¹）のみで（図51）、優占種は *Dictyocha* spp. であった。無害種は、4月5日に湾央部、湾奥部ともに主に *Heterocapsa* spp. が優占し、その後は、*Prorocentrum* spp. や *G. polygramma* 等が確認された（図53）。

C) 濃縮検鏡による有害種の検出

Chattonella spp. の水中越冬細胞の有無、栄養細胞の早期発見およびそれらと赤潮発生との関係を明らかにすることを目的とした濃縮検鏡の結果を図54に示す。*Chattonella* spp. は Stn. ③は4月20日、7月30日、8月10日、9月7日に確認され、最高細胞密度は8月10日の 5×10^2 cells mL⁻¹ であった。Stn. ⑩は10月5日に 1×10^2 cells mL⁻¹ 確認されたのみであった。

2015年以降の濃縮検鏡の結果を図55に示す。過去7年では、2015～2017年は、湾奥部の Stn. ⑩で、2018～2021年は湾央部の Stn. ③で、より高い頻度で検出される傾向が見られた。1月から3月にかけて栄養細胞が確認されたのは、Stn. ③では2018年9月および2019年3月、Stn. ⑩では2018年1月と2020年3月であった。一方で、5～7月に *Chattonella* spp. による赤潮が発生したのは2015年のみであり、2016年以降は発生していない。濃縮倍

率の上限が、2015年は1,000倍、2016年は4,000倍、2017年～2018年は10,000倍、2019年～2021年は20,000倍と年によって異なるため、単純には比較できないが、過去7年間では赤潮発生の事例が少ないこともあり、冬期の栄養細胞の有無と5月～7月の赤潮発生の関係性は、現在のところ不明である。

ウ. *H. akashiwo* および *Chattonella* 赤潮の発生・非発生要因

A) *H. akashiwo* 赤潮の水平分布の経時変化の整理

県事業のデータを追加して作成した *H. akashiwo* 赤潮の発生状況を図 56 に、*H. akashiwo* 赤潮の最高細胞密度の推移を図 57 に示す。2月22日に鹿児島湾の全域で *H. akashiwo* が確認され、最高 $520 \text{ cells mL}^{-1}$ であった（重富沖）。2月25日は重富沖から隼人沖にかけて着色が確認され、最高 $5 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。その後は一時減少傾向となり、3月1日には最高 $245 \text{ cells mL}^{-1}$ （隼人沖）となったが、徐々に増殖し、3月11日には福山沖、隼人沖で着色が確認され、最高 $2 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ （福山沖）となった。その後は、減少傾向となり、3月18日の最高は $245 \text{ cells mL}^{-1}$ （隼人沖）、3月26日の最高は 30 cells mL^{-1} （重富沖）となり、赤潮は終息した。

B) 2021年の *H. akashiwo* 赤潮の発生・衰退要因

図 58 に降水量および日照時間の推移を示す。降水量については、2月14日に29 mm の降水があった後は、2月25日までほとんど降水はなく、2月26日から3月7日にかけて8 mm から17 mm の降水があった。その後は、3月19日までまとまった降水はなかったものの、3月20日に70 mm の降水が確認され、その後は赤潮が終息した3月26日まで降水は少なかった。

図 59 に水温、塩分、DIN および DIP 濃度の推移について示す。赤潮発生期間の2月22日から3月26日の水温は、表層では $16.2 \sim 17.1^\circ\text{C}$ 、10 m 層では、 $16.2 \sim 16.4^\circ\text{C}$ と *H. akashiwo* の増殖至適水温 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ （Shikata 2009）の範囲内であった。塩分について表層は $33.4 \sim 33.9$ 、10 m 層は $33.8 \sim 34.0$ で推移した。DIN、DIP 濃度は、表層、10 m 層とも、 $1.00 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ の個体群が維持されるために最低限必要となる濃度（N : $1.7 \mu\text{M}$ 、P : $0.1 \mu\text{M}$ 、紫加田・本城 2016、以降基準値）を大きく上回っていた。2月25日は2月22日と比較してDIN、DIPとも減少したが、3月1日、3月4日には再びDIN、DIPともに、基準値を大きく上回った。その後は減少し、3月18日、26日はDIN、DIPの表層、10 m 層ともに基準値を下回った。競合種の珪藻類について、細胞密度の推移を図 60 に示す。2月22日は湾中央部の Stn. ②の表層は $291 \text{ cells mL}^{-1}$ と例年の同時期と比較すると多かったが、赤潮が発生した湾奥部の Stn. ⑧、⑩は、表層、10 m 層とも 10 cells mL^{-1} 未満で推移した。

以上のことから、*H. akashiwo* 赤潮発生期間中の水温、塩分は至適レベルであり、競合種である珪藻類が少なく、赤潮発生時には栄養塩が豊富に存在していたことが発生要因と考えられた。2月22日に豊富に存在していた栄養塩を利用して、2月25日に *H. akashiwo* が最高 $5 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ まで増殖したが、*H. akashiwo* が増殖する際に栄養塩が消費され、一時減少傾向となった。しかし、3月1日、3月4日の調査では栄養塩の回復が確認されており、それを利用して3月11日に最高 $2 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ まで増殖したと考えられた。それ以降は栄養塩が枯渇したことから、赤潮が衰退したと推察された。

C) 2021 年の *Chattonella* 赤潮の非発生要因

これまで鹿児島湾において *Chattonella* spp.による赤潮は水温が 20~26°C, 塩分が 22~34 の範囲の時に主に発生しており, 発生時期は 5~7 月が主となっている。2021 年の 5~7 月の湾奥部の水温について, 表層は 20.9~28.0°C, 10 m 層は 19.8~26.1°C, 塩分について, 表層は 27.2~31.7, 10 m 層は 31.7~33.8 と水温, 塩分ともにと概ね至適環境であった。表層 DIN 濃度は 5 月上旬と 7 月上旬に半飽和定数を上回ったものの, それ以外は少ない状況であり, DIP 濃度は表層, 10 層ともに期間を通して欠乏状態であった (図 47) (半飽和定数: 硝酸塩は 1.0 μM, リン酸塩は 0.11 μM, Nakamura et al.1988)。競合種である珪藻類は 5 月上旬から 6 月上旬まではほとんど確認されず, 6 月下旬は最高が 136 cells mL⁻¹ (6 月 24 日, Stn. ⑧表層) と少なく, 7 月はやや増加し, 最高 960 cells mL⁻¹ (7 月 30 日, Stn. ⑩表層) となった (図 51, 52)。これらのことから, 5 月から 7 月において, 水温, 塩分は増殖至適範囲にあり, 競合種である珪藻類は 5 月から 6 月は少なかったが, 栄養塩, 特に DIP が不足していたことにより, *Chattonella* spp.による赤潮は発生しなかったと考えられた。

引用文献

- Demura M, Noël MH, Kasai F, Watanabe MM, Kawachi M. Taxonomic revision of *Chattonella antiqua*, *C. marina* and *C. ovata* (Raphidophyceae) based on their morphological characteristics and genetic diversity. *Phycologia* 2009; **48**: 518–535.
- Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes RW, Strickland JD. Fluorometric determination of chlorophyll. *ICES J. Mar. Sci.* 1965; **30**: 3–15.
- 北辻さほ, 紫加田知幸, 鬼塚剛, 青木一弘. 八代海における赤潮発生メカニズムの解析. 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. 九州海域赤潮・貧酸素共同研究機関, 東京. 2018; 32–41.
- Nakamura Y. Kinetics of nitrogen-or phosphorus-limited growth and effects of growth conditions on nutrient uptake in *Chattonella antiqua*. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 1985; **41**: 381–387.
- Nakamura Y, Takashima J, Watanabe M. Chemical environment for red tides due to *Chattonella antiqua* in the Seto Inland Sea, Japan Part 1. Growth bioassay of the seawater and dependence of growth rate on nutrient concentrations. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 1988; **44**: 113–124.
- Onitsuka G, Aoki K, Shimizu M. Meteorological conditions preceding *Chattonella* bloom events in the Yatsushiro Sea, Japan, and possible links with the East Asian monsoon. *Fish. Sci.* 2015; **81**: 123–130.
- 大和田紘一. 八代海の環境と生物の動態-序論-. 月刊海洋 2005; **37**: 3–7.
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM. "I, I. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis." Pergamon Press, Oxford, UK 1984; **1**: 73.
- Shikata T. Studies on the mechanisms of bloom development in the raphidophyte *Heterosigma akashiwo*. PhD thesis, Kyushu University, Fukuoka. 2009.
- 紫加田知幸, 本城凡夫. 赤潮ラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* の生理生態. 「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 ; 232–

240.

紫加田知幸, 北辻さほ, 鬼塚剛, 中野善, 岡村和麿, 向井宏比古, 松谷久雄, 山下博和, 高杉朋孝, 宮田翔也, 森島義明, 西広海, 石田幸生, 古川新平, 浦啓介, 上野翼, 西山佳孝. 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イ. 八代海・鹿児島湾海域. 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. 赤潮共同研究機関, 東京. 2019; 179–224.

紫加田知幸, 北辻さほ, 鬼塚剛, 中野善, 杉松宏一, 岡村和麿, 向井宏比古, 松谷久雄, 山下博和, 高杉朋孝, 宮田翔也, 吉満敏, 立元伸幸, 古川新平, 浦啓介, 西山佳孝. 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②. 八代海・鹿児島湾海域. 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. 赤潮共同研究機関, 東京. 2020; 200–252.

紫加田知幸, 櫻田清成, 城本祐助, 生地暢, 吉田誠, 大和田紘一. 八代海における植物プランクトンの増殖に与える水温, 塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌 2010; 76: 34–45.

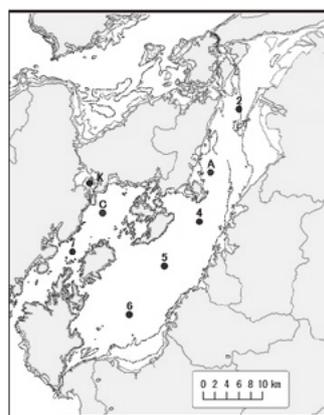
多田邦尚, 中國正寿, 山口一岩, 岸本浩二, 一見和彦. 魚類養殖場における堆積物への有機物負荷の評価. 日本水産学会誌 2021; 21-00018.

植松光夫, 南川雅男, 有田英之, 角皆静男. 海水中の懸濁粒子量の測定法. 北海道大学水産学部研究彙報 1978; 29: 164–172.

Watanabe M, Kohata K, Kimura T. Generation of a *Chattonella antiqua* bloom by imposing a shallow nutricline in a mesocosm. *Limnol. Oceanogr.* 1995; 40: 1447–1460.

山本民次, 松田治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智顕. 瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積もり. 海の研究 1998; 7: 151–158.

山本民次. 2-4 底泥間隙水からの物質の溶出. 「地球環境調査計測辞典 第 3 巻沿岸域編」(監修 竹内均) フジテクノシステム, 東京. 2003; 192–199.



調査定点

Stn	定点名	緯度	経度
2	大築島北	32.506666	130.495000
4	田浦沖	32.336666	130.421667
5	津奈木沖	32.270000	130.358333
6	米ノ津沖	32.196666	130.295000
7	獅子島西	32.293333	130.195000
A	姫戸ブイ	32.411388	130.442777
C	大多尾	32.351666	130.249166
K	楠 浦	32.393433	130.227700

図 1. 調査定点.

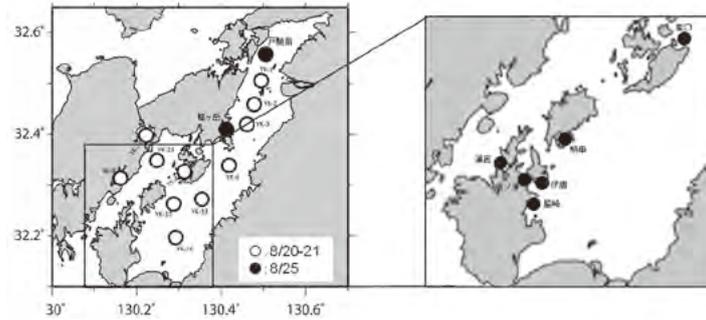


図2. 八代海における採水，採泥調査定点.



鹿児島湾調査定点(緯度経度)

Stn.	緯度	経度	Stn.	緯度	経度
①	31° 31.0'	130° 34.0'	⑦	31° 42.4'	130° 42.4'
②	31° 31.2'	130° 37.7'	⑧	31° 40.0'	130° 41.8'
③	31° 31.8'	130° 41.0'	⑨	31° 38.2'	130° 41.3'
④	31° 36.1'	130° 35.5'	⑩	31° 34.2'	130° 44.4'
⑤	31° 38.8'	130° 37.2'	⑪	31° 37.1'	130° 46.5'
⑥	31° 41.6'	130° 38.9'	⑫	31° 39.7'	130° 48.0'

図3. 鹿児島湾における調査定点.

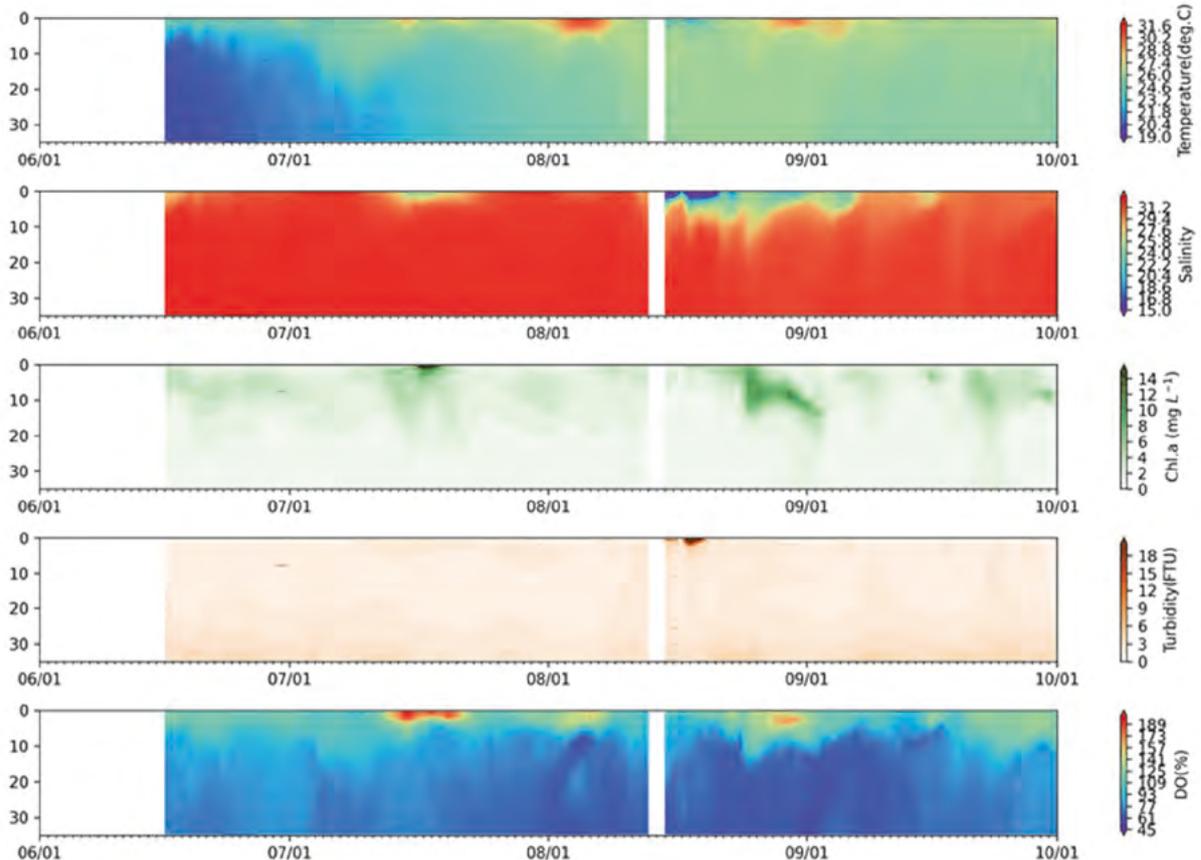


図4. 大型観測ブイ (Stn. A) における水温，塩分，クロロフィル *a* 濃度，濁度および溶存酸素飽和度の鉛直プロファイルの経時変化.

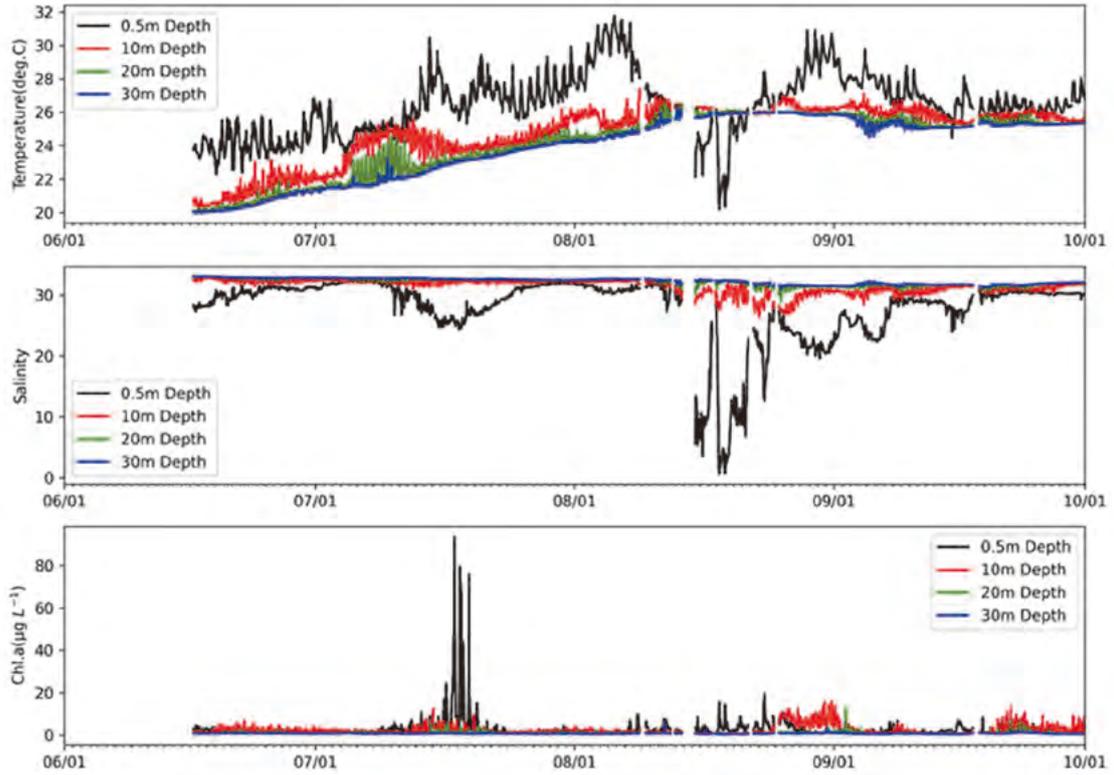


図 5. 大型観測ブイ (Stn. A) の各深度層における水温 (上段), 塩分 (中段), クロロフィル *a* 濃度 (下段) の経時変化.

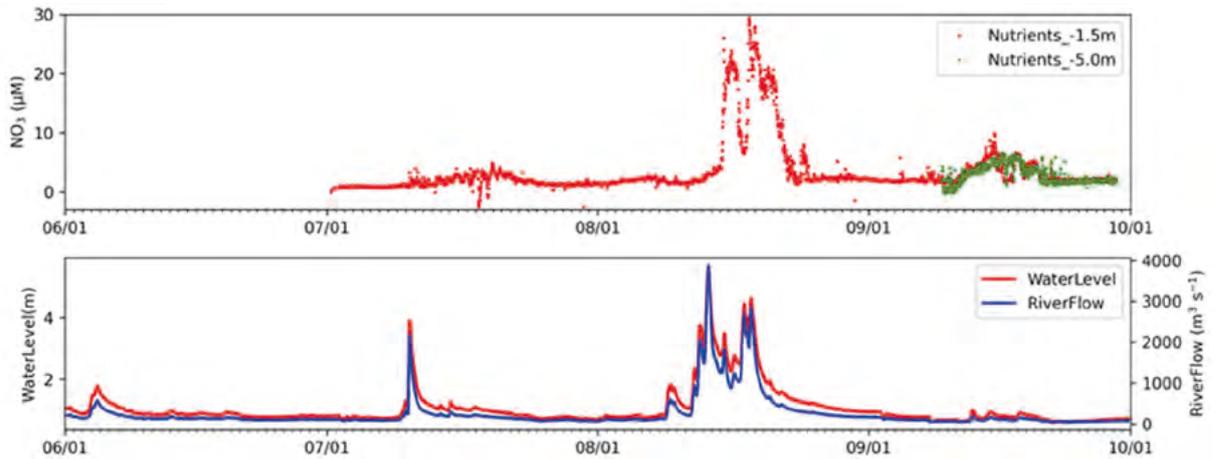


図 6. 大型観測ブイ (Stn. A) における硝酸塩濃度 (上段; 未補正值) と球磨川河口 (横石) における水位・推定流量 (下段) の経時変化.

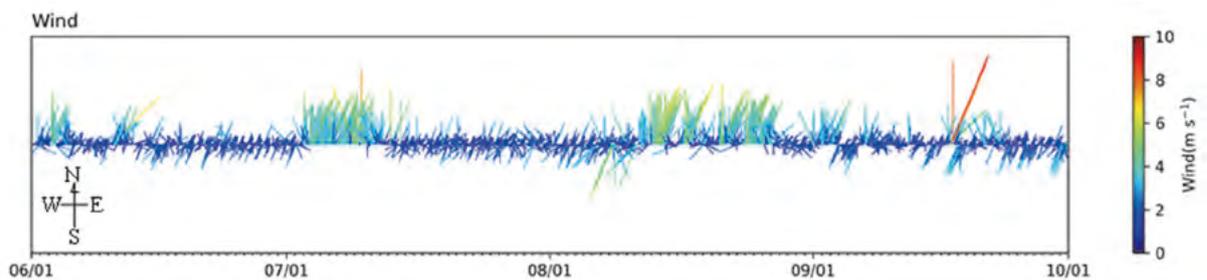


図 7. アメダス観測点 (熊本県松島) における風向風速の経時変化.

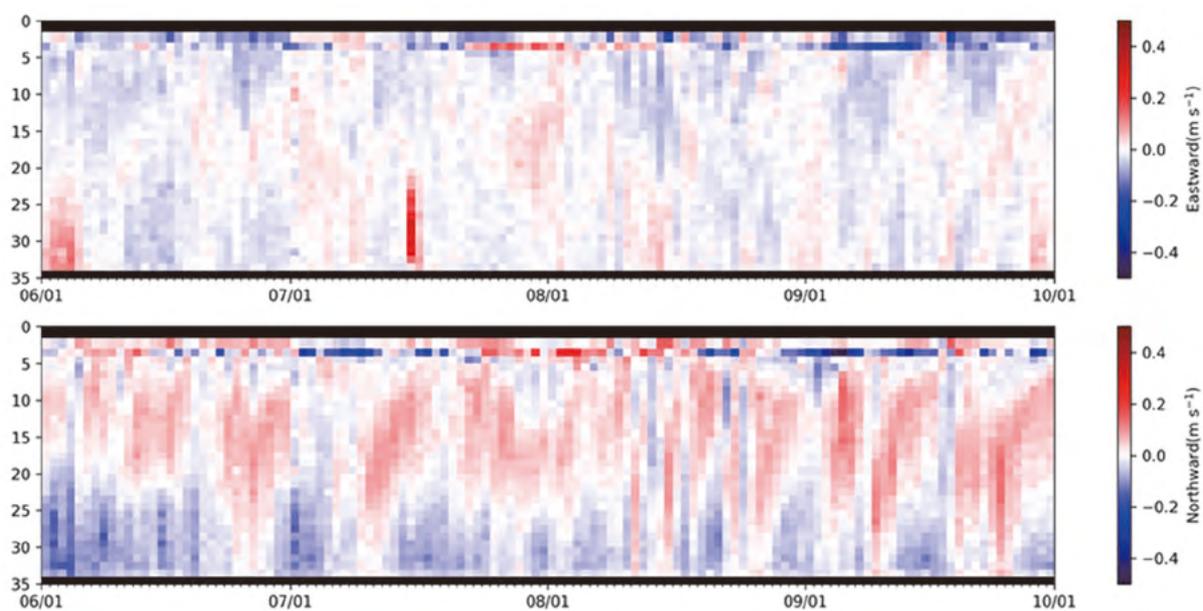


図 8. 大型観測ブイ (Stn. A) における流向流速の経時変化.

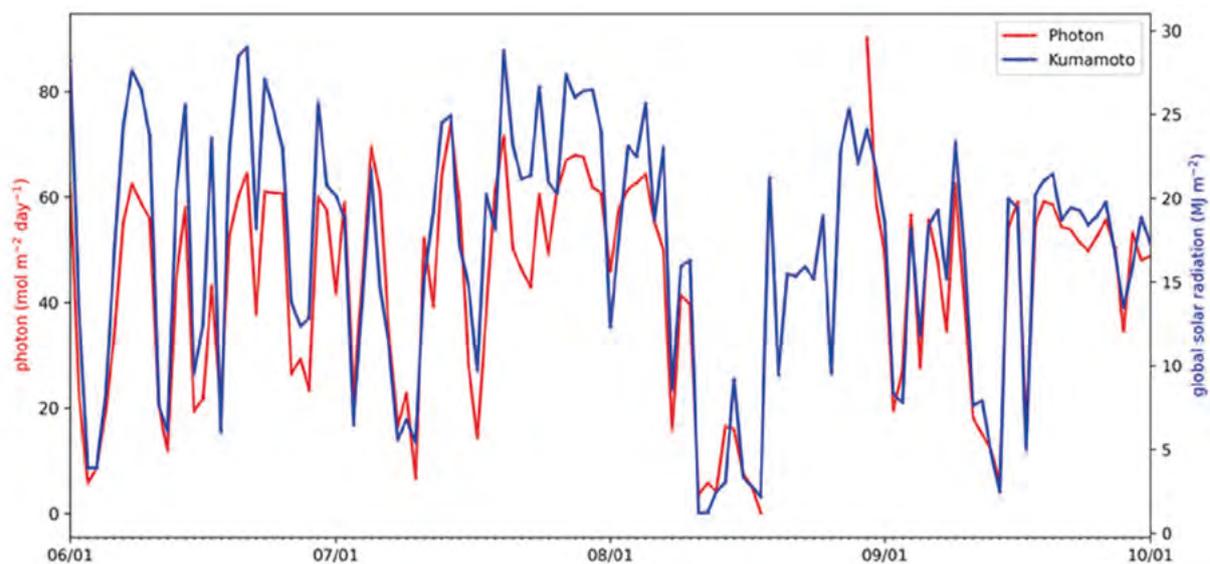


図 9. 大型観測ブイ (Stn. A) における日射量の日積算値 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) の経時変化.

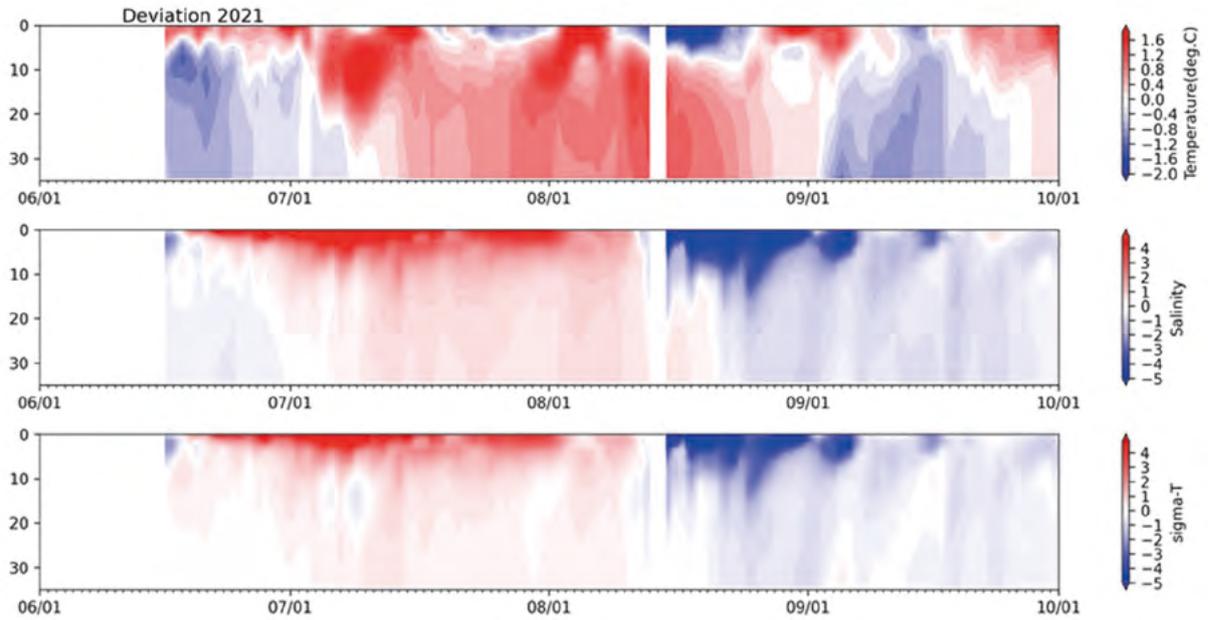
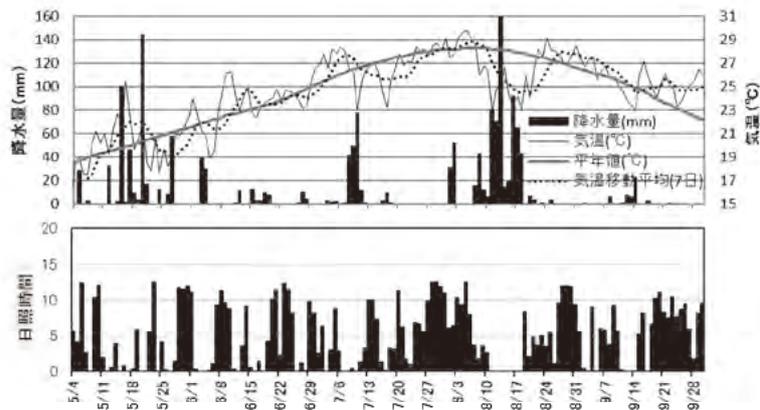


図 10. 大型観測ブイ (Stn. A) における水温 (上図), 塩分 (中段), 密度 (下段) の期間平均観測結果 (2013~2020 年) との偏差の経時変化.



月	時期	気温	降水量	日照時間
5月	上旬	低い	平年並み	多い
	中旬	高い	かなり多い	かなり少ない
	下旬	低い	かなり多い	少ない
6月	上旬	平年並み	平年並み	平年並み
	中旬	平年並み	かなり少ない	少ない
	下旬	平年並み	かなり少ない	かなり多い
7月	上旬	高い	平年並み	かなり少ない
	中旬	低い	少ない	少ない
	下旬	平年並み	かなり少ない	平年並み
8月	上旬	平年並み	かなり多い	少ない
	中旬	かなり低い	かなり多い	かなり少ない
	下旬	高い	かなり少ない	平年並み
9月	上旬	高い	少ない	少ない
	中旬	平年並み	平年並み	平年並み
	下旬	かなり高い	かなり少ない	多い

図 11-a. 八代市における気象条件の経日変化および旬別の平年値との比較.