

図 21 2018 年 11 月から 2019 年 2 月の奥部表層における *Skeletonema* spp.と *Eucampia zodiacus* の平 均細胞密度と平均 DIN 濃度の変化(左),および 2019 年 1 月から 3 月の Stn. P6 表層の水温,佐賀市日間降水量,筑後大堰直下流量の変化(右)



図 22 2019 年1月から2月の定期観測による,奥部海域湾奥定点(Stn. T2)から中央部海域湾口 側定点(Stn. 1)までの塩分,水温,海水密度(σt)の鉛直断面図



図 23 2019 年 1 月から 3 月の Stn. P6 における水温, 塩分, 海水密度 (ot), クロロフィル蛍光強度, 溶存酸素飽和度の鉛直時系列変化



図 24 2018 年 10 月から 2019 年 3 月の Stn. P6 における 3 m 深および 10 m 深における流速の南北 成分 (25 時間移動平均) および水深の変化



図 25 2018 年度から 2021 年度の定期観測による Stn. P6 における 2 月の海水密度(ot)の鉛直変化



図 26 2018 年度から 2021 年度の1月から3月の筑後大堰直下流量の変化



図 27 Eucampia zodiacus の赤潮発生における秋季および冬季の環境条件の模式図

- 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
- 力. 有明海·八代海·鹿児島湾海域
- 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,上原美咲,安藤典幸 鹿児島県水産技術開発センター 今吉雄二,赤塚麻美,吉満 敏 東町漁業協同組合 浦 啓介,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 実施する方策が現場から強く求められており、その具体的な方策として、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 術が該当する。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4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 m, 3.0 m,以下 1.0 m 毎に海底まで),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(SUNA V2, SEA-BIRD SCIENTIFIC,設置深度:1.5 m)を装着して各種観測を実施した。2022年5月27日から10月3日 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 [植松ら 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)

2022年5~9月,図1に示す8定点(Sm. 2~7, 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Sm.A,楠浦で表層,10,20m層およびクロロフィル極大層,その他の定点で表層,5,10m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(NO2-N, NO3-N, NH4-N, PO4-P, SiO2-Si)の分析に供した。なお,無機態窒素(NO3-N+NO2-N+NH4-N)をDIN,リン(PO4-P)をDIP,シリカ(SiO2-Si)をDSiとした。また,代表3定点Sm.2,4,6の表層および5m層,Sm.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で採取した海水試料については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1mL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,短期動態に関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(http://www1.river.go.jp/)より得た。

③八代海における栄養塩起源に関する情報収集(水技研 [長崎, 廿日市])

栄養塩起源に関する基礎資料を得るために、2022年8月6~7日に陽光丸で八代海の沖11点(YK1, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 15, 16, 22, 23) において採水, 採泥調査を実施した(図 2)。ニスキン採水器(離合社)を用いて海底直上 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℃で保存した。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(QuAAtro39, ビーエルテック)を用いて測定した。

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。堆積物表層(0-1 cm)を採取し、遠心機(CN-1050、アズワン)に より3,000 rpmで15分間、遠心処理し、得られた間隙水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。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(QuAAtro39、ビーエルテック)で測定した。なお、一部の 定点(YK4、8、22、23)では調査時間の都合でろ過なしで -20° Cで保存し、分析直前に静置して 夾雑物を沈下させ、上清を分析に供した。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、海底直上1mにおける海水と0-1 cmの間隙水の濃度差か ら見積もった。

④有害赤潮短期動態に深く関与する環境条件の絞り込み

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)。今年度も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])

A)細胞形態を指標とする短期動態予測手法の開発

これまでの室内外における実験および調査により、*Chattonella*において、細胞サイズ(長幅比) や形態(核の見え方など)が増殖活性と密接に関係しており、赤潮の短期動態を予察するための指 標となる可能性が示唆された。令和4年度は、これまでに室内外で得た画像データを用いて、フリ ーの画像解析ソフトによる再解析等を実施しながら、実用化のためのマニュアル作りを進めた。 また、本年度は八代海において大規模な*K. mikimotoi*赤潮が発生したため、天然細胞を用いて、*K. mikimotoi* が *Chattonella* と同様、赤潮の動態と細胞の形態変化の間に関係性があるか否かを調査し た。赤潮の発達期(8月7日)、最盛期(8月13日)と衰退後期(8月17日)に、3地点(御所浦, 宮野河内,楠浦)で表層とクロロフィル極大層にて採水を行い、直ちに片野固定液(Katano et al. 2009) で固定し、冷蔵保存した。後日、光学顕微鏡下で20細胞以上の静止画を取得した。ImageJ を用い て、全サンプル20細胞を対象として、細胞長と細胞幅を計測するとともに、形態異常を観察した。 B) 色素組成を指標とする増殖活性診断手法の開発(水技研[廿日市])

これまでの室内実験により、Chattonellaの形態変化を指標とする増殖活性の推定において、長幅 比の低下や一部の異常形態の出現といった形態変化は複数の条件で生じ得ることが分かっている。 そのため、天然細胞を対象とする際、各形態変化の背景にある要因を特定できず、形態変化の情報 だけでは赤潮の動態を予察しづらい。そこで、細胞の生理状態をより正確に反映する指標を探索す るため、他の微細藻類で環境変化に敏感に応答することが知られている色素組成と増殖との関係を 調べた。増殖に多大に影響する栄養条件を変えて培養した八代海産の Chattonella 無菌クローン株

(4KGY) について、色素の吸収スペクトルを計測した。本株は実験まで温度 25°C, 12hL:12hD, 明期 6:00~18:00, 400 µmol m² s⁻¹, 白色光(昼白色蛍光灯)の光条件で継代培養した。培養株を滅菌ろ過海水で洗浄後,改変 SWM-3 培地(完全培地)および N 無添加培地(改変 SWM-3 培地成分から硝酸塩を除いたもの)と P 無添加培地(改変 SWM-3 培地成分からリン酸塩を除いたもの)に それぞれ終濃度 500 cells mL⁻¹および 10,000 cells mL⁻¹となるよう接種した。その後,継代培養と同条件で培養し、培養開始後 0, 3, 7 日目に各培養液 10 mL をサンプリングした。各試料を 3,000 rpm で 5 分間遠心分離にかけ、集藻した。藻体ペレットを 1 mL の 90% アセトンに懸濁して色素を抽出し、15,000 rpm、2 分間の遠心分離で不要な沈殿物を取り除いた後、上清の吸収スペクトル(350 nm-750 nm)を吸光プレートリーダー(Thermo Fisher Scientific, Multiskan)で計測した。また、培養試料の一部を光学顕微鏡下で計数し、サンプル中の細胞数を算出した。得られた吸収スペクトル値を差し引き、細胞あたりの色素の吸収スペクトルを算出した。さらに、各吸収スペクトルからクロロフィルやフコキサンチンの吸収極大等を踏まえて選定した 664 nm と 450 nm の値を抽出し、各栄養条件における 664/450 nm の経日変化を比較した。

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) 赤潮モニタリング

2022年4月~7月は毎月2回,2022年8月~12月は毎月1回の頻度で,図1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)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10m層とした。さらに,Stn.⑪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, ⑪), 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.③,①)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・時化などによる一時的な停止(風速 9ms⁻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。

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濃度の鉛直プロファイルを 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20.2~32.1℃で 推移し,7月28日に最高値を示した。深度10,20および30m層の水温はそれぞれ18.8~28.8℃, 18.7~28.0℃および18.8~27.3℃の範囲で推移し,深度10mについては8月25日に,深度20およ び30m層についてはそれぞれ8月18日および9月13日に最高値を示した。観測期間中,表層塩 分は11.9~32.9で推移し,7月下旬に塩分低下後,8月初旬には急速に塩分が回復し,8月下旬の台 風や停滞前線による降雨後に再び低下,9月上旬に回復したものの9月下旬に再び台風による降雨 により低下,その後回復した。深度10,20および30m層の塩分は,それぞれ30.0~33.4,31.0~ 33.5および31.5~33.5の範囲で推移した。観測期間中,表層(深度0.5 m),深度10,20および30m 層のクロロフィル濃度は、それぞれ0.4~146.4,0.4~24.0,0.3~18.0および0.3~8.3 µg L⁻¹の範囲 で推移し、最大値はいずれも*K. mikimotoi*赤潮発生時期(8月上旬)に一致した。なお、8月上旬の みを抽出した多項目水質計の経時変化を図6に示すが,*K. mikimotoi*赤潮が抜大した期間は潮汐周期 とは異なるクロロフィル濃度の鉛直運動が認められた。これは*K. mikimotoi*赤潮が夜間に深い水深 帯へ、日中は浅い水深帯へと移動する日周鉛直運動を捉えたものと推測される。

観測期間中,硝酸塩濃度は16.4 µM以下で変動したが,7月の塩分低下期は機器不調により観測できておらず,7月下旬に観測再開以降は2.0 µM以下の低濃度で移行した(図7)。7月下旬から8月中旬にかけて,本海域では*K. mikimotoi*赤潮が発生しており,同期間中は栄養塩が枯渇状態であったことが示唆される。

海上風を図8に示す。6月から8月下旬にかけては概ね南寄りの風が卓越しており、台風や停滞 前線の影響による風速10 m s¹以上の擾乱も観測期間中に見られた。特に塩分の急速な回復が見ら れた8月1日付近は、台風5、6号が続けて東シナ海を北上した時期に相当しており、強い南風が 数日にわたって吹き続けていた。この南風によって密度成層が破壊され、急速な塩分回復に至った ものと推測される。流況については、6月6日から8月3日までは機器の不調により欠測であるが、 東西方向には弱く、南北方向は8月中旬までは10 m 以深で北向きの流れが、10 m 以浅では塩分成 層に呼応するように南向きの流れが優位であった(図9)。光量子束密度の日積算値は4.5~68.2 mol m²d¹の範囲で推移した(図10)。

水温,塩分,密度(ot)を過去の平均値(2012~2021年)と比較すると(図11),水温は6月下 旬以降,かなり高めで推移していた。塩分は期間を通して高めで,特に6月下旬から9月上旬まで の表層で,特異的に河川の影響が見られた7月下旬と8月下旬を除き,高塩分が顕著であった。本 年は梅雨入り以降降雨が少なく,7月下旬にまとまった降雨があったものの,強風による鉛直混合 で表層塩分が回復し,その後も表層は例年よりも高塩分で推移したものと考えられる。密度の指標 の一つとして,水深0.5mと20mにおける密度差を深度で除した,単位メートル当たりの密度変化 の時系列を図 12 に整理する。本年(2022 年)は、6 月から7 月にかけては例年より密度躍層は弱く、7 月中旬以降に密度躍層が強化されるも、8 月初旬に急速に密度躍層が弱まり、8 月下旬に再び 密度躍層が強化されるも、9 月以降の密度成層は例年よりも弱い状態で推移した。

②高頻度赤潮モニタリング

ア.環境条件

A) 気象

図 13a に、八代市と球磨川水系流域における 2022 年の 5~9 月までの気象変化を示す。八代市の 気温は期間中、15.3 (5月15日) ~31.3℃ (8月1日)の範囲で推移した。5月上旬~6月中旬にか けては平年並みから低めで推移したが、6月下旬から9月下旬にかけては、7月中旬、8月中旬と下 旬が平年並みであった以外は、高めからかなり高めで推移した。八代市の降水量は、5月11,6月 25日、7月9、19、20日、8月18日、9月18日に 50 mm を超え、7月9日に最高値 107 mm、9月 18日は台風 14号の接近で 91.5 mm を記録した。なお、球磨川水系流域の国土交通省水管理・国土 保全局所管の観測所の平均降水量(以降、「球磨川流域降水量」と略す)は、6月5日、21日、7 月15、19、20日、8月21日、9月18、19日に 50 mm を超え、7月15、19日、9月18、19日は 100 mm を超え、9月18日は 270 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6月11日で平年より7日遅く、梅雨明けは7月22日で平年より3日遅 かった。7月15日から20日にかけては、梅雨明け前の大雨があり、八代観測所では 173 mm、球磨 川水系流域の降水量としては 353 mm が観測された。

図 13b に、宇城市三角観測所における 2022 年の 5~9 月までの平均風速(時別値)と風向の推移 を示す。8.0 m s⁻¹以上が観測されたのは、6月 23、24 日、7月 5、18、19 日、9月 5、6 日、18、19、 20 日であった。全調査期間中では9月 20 日(14.7 m s⁻¹:台風 14 号の影響)、*K. mikimotoi*が初認さ れた7月 12 日から衰退した8月下旬までの期間では7月 19日(9.3 m s⁻¹:梅雨明け前の梅雨前線 の影響)に最大値を記録した。風向は、概して6月中旬から8月中旬までは南成分が卓越し、他の 期間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 17.5 (5月10日, Stn. 2,底層) ~30.5℃ (8月23日,Stn. K,表層)で推移 し、その後は低下した(図14a)。なお、7月上旬から8月下旬にかけては、平年と比べ高水温で推 移しており、深度5mの全調査点平均値は、平年と比べ「かなり高め」から「甚だ高め」で推移し た(図14b:平年値は 1991~2020年に熊本県が別事業で実施した調査の平均値)。塩分は、7月15 日から20日にかけての大雨の影響で、八代海の北から3点の表層は大きく低下し、7月26日の調 査で、8.9 (Stn. 2)、17.1 (Stn. A)、23.3 (Stn. 4) であった(図15)。この他、Stn. 2の7月20日の 調査で14.3 だった以外は、6月7、28日、7月12、20日、8月23日の表層、Stn. Kの6月22日の 表層で塩分が22.8~24.4 まで低下した。水温および塩分のデータより算出された密度(ot)は、塩 分と同様な低下が観測され、7月26日の調査で、2.7 (Stn. 2)、8.5 (Stn. A)、13.3 (Stn. 4) であっ た(図16)。この他、Stn. 2の7月20日の調査で7.7 だった以外は、6月7、28日、7月12日、8 月23日の表層、Stn. K の6月22日の表層で密度(ot)が12.8~14.9 まで低下した。密度(ot)のデ ータによると、密度成層はStn. 2 で6月第2半旬、第6半旬、7月第3半旬~第6半旬、8月第5 半旬に発達した。また、Stn. A で7月第6半旬、8月第5 半旬に、Stn. 4 で7月第6半旬に発達した。

8月2~16日のクロロフィル極大層の深度は*K. mikimotoi*の細胞密度のピークとおおむね一致していた。しかし、8月23日には、Stn2、A、4、K.で確認されたクロロフィル極大層深度は細胞密度の極大層深度と一致せず、他の植物プランクトンも特段多く認められなかったことから、*K. mikimotoi*の死骸に由来するものと推定された(図 17)。

DIN, DIP および DSi 濃度は、それぞれ ND(8月23日, Stn. K, 0m)~14.0 µM(7月20日, Stn. 2, 表層), ND(8月9日, Stn. 2, A, 4, 5, 6, 7, K, 表層等)~0.89 µM(8月23日, Stn. 2, 表層), 0.6(8月30日, Stn. K, 表層)~109.6µM(7月26日, Stn. 2, 表層)の範囲で推移した(図)

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 *K. mikimotoi*の増殖に必要となる半飽和定数(DIN:0.78 μM, DIP:0.14 μM)を表層から有光層の下限近辺(10 m 深)まで下回ることが度々あり、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~8 月に上昇したが(7月26日を除く)、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。7月26日の調査では、梅雨明け前の大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、DIP 濃度は低下した。当日は *K. mikimotoi*の赤潮は確認されておらず、翌日の7月27日に別の赤潮調査で本種の中層赤潮が確認された後、8月1日の別の赤潮調査で八代海北部から中部域にかけて、本種の赤潮が広範囲で確認されたことから、*K. mikimotoi*に吸収された可能性が高いと考えられた。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とされる濃度(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月下旬の一部の深度層のみであった。

光量子量について,表層を100%とした場合の深度ごとの相対値を図19に示す。調査期間中,透 過率は北部から南部にかけて高くなる傾向が認められた。*K. mikimotoi*の活発な増殖速度に必要な光 量子量(半飽和定数: 53.6 μ mol m⁻² s⁻¹[山口・本城 1989])は、晴天時(約2,000 μ mol m⁻² s⁻¹)は 3% ライン,曇天時は30% ライン(約200 μ mol m⁻² s⁻¹)に相当する。クロロフィル蛍光値が高かった 時期は光の透過が低下した。*K. mikimotoi*の高密度化する直前は光の透過率は高かった。

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 21a, K. mikimotoiの細胞密度分布を図 21b に示す。

K. mikimotoi は、他事業の情報も含めると、7月12日にStn. A で2 cells mL⁻¹が初認された。7月20日の別の調査でStn. A で30 cells mL⁻¹が検出され、7月27日には別の赤潮調査で八代海の20調査点のうち12調査点で本種が確認され、Stn. 4 の北東部の調査点の5m層はクロロフィル極大層となっており、2,500 cells mL⁻¹が検出された。8月第1半旬には八代海全域で高密度化し、8月8日には別の赤潮調査でStn. 4 の北側の表層で2.2×10⁵ cells mL⁻¹(八代海全域での最高細胞密度)が検出された。8月中旬には、八代海北部で本種の減少が始まったが、天草市志柿地先や大矢野島周辺といった有明海にも着色域が広がった。8月第4半旬になると、八代海中部と南部でも細胞密度の減少が始まり、第5半旬には八代海のうち有明海と接続する一部海域を除き、急速に減少した。

Chattonella spp.は5月24日にStn. 2, A, 4, 5, 7, K で濃縮検鏡により2~11 cells L⁻¹で初認された。その後,6月20日に別の赤潮調査においてStn.4付近で2 cells mL⁻¹,7月30日に別の赤潮調査で8 cells mL⁻¹を記録したが、それ以上増加しなかった。

Cochlodinium polykrikoides は、5月17日以降、低密度で推移し、調査期間中、8月2日の350 cells mL⁻¹が最高だった。

Heterosigma akashiwo は別の赤潮調査で4月25日に天草下島南端の久玉浦で9.7×10⁴ cells mL⁻¹,4月28日には八代海北部の八代港外港地先で4×10³ cells mL⁻¹が検出されたが,5月末には終息した。 6月以降は,暫く本種による赤潮は検出されなかったが,7月下旬に八代海北部の戸馳島沖で2.5×10³ cells mL⁻¹が検出されたが,拡大しなかった。

また, Heterocapsa circularisquama は本調査期間中, 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 6,100 cells mL⁻¹ (6月 28日, Stn.2, 表層) が検出された。 1,000 cells mL⁻¹を超えたのはこの時だけで, 主な優占種は *Skeletonema* spp. と *Chaetoceros* spp. であった(図 22)。

ウ. Karenia mikimotoi の消長要因

2022 年度の K. mikimotoi の消長への気象,水質の影響について,Stn. A を代表点として,図 23 に 整理した。本種は7月12日に2.6 cells mL⁻¹が初認され,7月15日から20日にかけて梅雨明け前の まとまった降雨(7月第4半旬)があった後,別の調査で,Stn.A の近傍の調査点(2 km 以内)で7 月25日に30 cells mL⁻¹,7月27日に400 cells mL⁻¹が確認された。珪藻は7月20日に高密度化して いたが,その直後に表層水温が29.4°Cまで急上昇したタイミングで衰退し,優占種が K. mikimotoi に遷移した。

K. mikimotoi が高密度化した8月上旬~中旬の表層水温は30℃付近であり、本種にとっては増殖 可能な範囲内であったが、珪藻類にとっては生残が厳しかった可能性がある(紫加田ら 2010)。ま た、下層は25℃前後とK. mikimotoiの増殖にとって最適であった。本種は高密度化した時期に表層 から 20~30 m 深を日周鉛直移動しており(図 6)、本種は弱光下でも増殖可能であるので(山口・ 本城 1989), 一日の大半は増殖に好適な環境に身を置いていたと考えられた。また, 7 月 15 日か 20日にかけての大雨と出水により八代海には大量の栄養塩が供給されたが、珪藻類は増加すること なく,主に K. mikimotoi の栄養源となったと推定された。7月15~20日における梅雨明け前の大雨 により球磨川水系流域の積算降雨量は353 mm(観測所平均値)で、球磨川流量(横石観測所)は 339 hm³であった。球磨川水系の流域面積(1,880 km²)と八代海の全流域面積(2,971 km²)から八 代海に流れ込む河川全ての流量は536 hm3,同時期の海面上の降雨量は195 mm(八代海沿岸の観測 所の平均値:三角,松島,八代,田浦,水俣,牛深,本渡)で体積としては234 hm³で,八代海へ の直接降雨と河川からの出水の合計量は770 hm3と推定された。これは八代海を0.64 mの厚みで淡 水化できる規模であり、含まれる栄養塩類は K. mikimotoiの増殖に必要となる栄養源として多大に 寄与したと考えられた。しかし、高密度化による栄養塩の消費等で、8月9日には表層から水深20 m まで, DIP 欠乏状態(0.00~0.05 μM)が確認された後,本種は鉛直移動距離を低下させ,最終的 には表層付近に停滞した。その時点では、DIN も半飽和定数を下回り,8月16日は1,260 cells mL⁻¹, 8月19日は400 cells mL⁻¹、8月23日は2 cells mL⁻¹と次第に減少し終息した。

③八代海における栄養塩起源に関する情報収集(水技研 [長崎, 廿日市])

NH₄-Nの溶出速度は 0.330~323 µmol m² h⁻¹ (平均 84 ± 93 µmol m² h⁻¹), PO₄-P は 9.00~141 µmol m² h⁻¹ (平均 53 ± 43 µmol m² h⁻¹) の範囲だった (図 24)。YK13 (NH₄-N; 323, PO₄-P; 118 µmol m² h⁻¹) や YK6 (NH₄-N: 164, PO₄-P:141 µmol m² h⁻¹) などの本年度 *K. mikimotoi* が高密度化した八代海中部 海域でやや大きい傾向にあり,これは 2021 年 8 月の結果と一致した。堆積物からの窒素およびリン溶出量が *K. mikimotoi* の生残に与える影響を検討した。拡散方程式による見積もりだと,堆積物 1 cm² あたりの溶出量は,一晩 (10 h) で NH₄は $3.3 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^1$ µmol cm⁻², PO₄は $9.0 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^1$ µmol cm⁻²になると考えられる。仮に, *K. mikimotoi* が海底に一晩滞在して栄養塩を利用したとする と,一晩分の溶出量を *K. mikimotoi* の最小細胞内含量 (NH₄; 3.13, PO₄; 0.25 pmol cell⁻¹, Yamaguchi and Itakura 1985) で除すると, NH₄ では YK13 でおよそ 1.0×10^5 cells mL⁻¹, PO₄ では YK6 でおよその 5.6×10^5 cells mL⁻¹ の *K. mikimotoi* の高密度化を後押ししたと考えられるが, 今後, その詳細を検証する必要 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 25 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。2022 年は2 月から4 月の平均気温が11.6℃、梅雨入り日が6月11日(速報値および確定値)であり、図 25 にプロット すると発生確率は「高め」と判定された。これまで、判別分析で「高め」と判定された年はいずれ も大規模発生していたが、今年度は最高細胞密度 100 cells mL⁻¹未満の小規模発生年だった。一方、 判別得点が高い年は赤潮発生時期が早く、判別得点が低い年は赤潮発生時期が遅い傾向が認められる(図26)。2022年の判別得点は2.03であったため、回帰直線から推定された赤潮発生時期は7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7月上旬から7月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14日に注意報が発令され、予察結果と一致した。

2022年は Chattonella が増殖し始めた 7 月中旬以降, K. mikimotoi の細胞密度が急激に増加しており、これは Chattonella が結果的に高密度化しなかった一因と考えられる。今井(1990)は周防灘における両種赤潮の発生条件を整理し、初夏に高日照・少雨の年に Chattonella 赤潮が発生することを報告している。図 27 に 1988~2022年の八代海における Chattonella と K. mikimotoi の赤潮発生することを報告している。図 27 に 1988~2022年の八代海における Chattonella と K. mikimotoi の赤潮発生状況と 5~7月の降水量(アメダス八代)を示す。八代海では、両種とも極端な多雨や少雨の年に赤潮非発生の場合が多く、種間で明瞭な差は認められなかった。近年、伊万里湾など九州北部海域では K. mikimotoi が高頻度で赤潮化している。そこで、本種赤潮の他海域との関係を探るため、水産庁九州漁業調整事務所が発行する「九州海域の赤潮」で分類されている九州の八代海以外の海域(福岡湾や有明海などを含む 14海域)の発生状況を整理した。図 28 によると、八代海における K. mikimotoi 赤潮発生年は非発生年に比べて、九州海域内における K. mikimotoi 赤潮発生海域数が有意に多く

(Welch's t-test, p = 0.027), 九州海域内で広範囲に発生している年に八代海でも発生する傾向が認められた。

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])

A)細胞形態を指標とする短期動態予測手法の開発

「細胞形態を指標とする Chattonella の増殖活性診断法」というタイトルでマニュアルを作成した (図 29)。まず背景や本手法の必要性を説明し、2019 年と 2021 年の現場データや室内実験による 検証結果を示して Chattonella の動態と細胞形態の関係を解説した。その後、広く一般の方々が試行 できることを心掛けて方法を解説した。本マニュアルには未発表のデータが含まれるため、論文と して公表後に、水産庁ホームページで公開する予定である。

赤潮の発達段階ごとにサンプリングして固定された*K. mikimotoi* 細胞における形態変化を調べた。 最盛期に細胞長が低下した(図 30)。しかしながら、全地点の表層およびクロロフィル極大層で、 発達段階間の細胞長および長幅比の有意差(Dunnet T3, p>0.05)は認められなかった。他方、 *Chattonella* と同様、一部の細胞で核クリア細胞が認められ、特に最盛期や衰退期に多かった(図 31)。 このことから、*K. mikimotoi* の核クリア細胞の出現頻度は増殖活性や発達段階を推定指標となる可能 性が示唆された。

B) 色素スペクトルを指標とする短期動態予測手法の開発

それぞれの栄養条件で培養開始後 0,3,7 日目の色素の吸収スペクトルを比較した結果,完全培地 および P 無添加培地の吸収スペクトルは、0 日目と3 日目で変化はほとんど見られず、7 日目で 432 nm と 664 nm を極大とする波長帯で約 1.3 倍増加した (図 32)。一方で、N 無添加培地の吸収スペ クトルは、全波長帯で培養3 日目と7 日目で0 日目の 0.5, 0.3 倍までそれぞれ減少した。また、測 定した各吸収スペクトルから 664 nm と 450 nm の値を抽出して 664/450 nm を計算した結果、完全培 地および P 無添加培地では、0 日目と3 日目で 0.60-0.63 の値を示し、7 日目にそれぞれ 0.53 と 0.55 まで低下した(表 1)。N 無添加培地では、0 日目の 0.59 から 3 日目、7 日目でそれぞれ 0.49, 0.38 まで低下した。以上の結果から、*Chattonella* における色素の吸収スペクトルは P 欠乏の影響はほと んど受けず、N が枯渇した状況に陥ると大幅に減少することが明らかとなった。また、664/450 nm の値は、培養日数の経過に伴って低下し、N 無添加培地でその低下率が大きかったことから、664/450 nm の値は、Chattonella 細胞における N の枯渇状況を判別できる有用な指標になると考えられた。664 nm は主にクロロフィル a の吸収極大を示し、450 nm はフコキサンチンを主体とするカロテノイド 類の吸収極大を示している(日本光合成研究会 2003)。また、一般的に、窒素が枯渇するとカロテ ノイド類を含有する光合成集光タンパク質の発現量が減少することが知られている(Yang et al. 2014)。従って、窒素の枯渇などによる 664/450 nm の低下はクロロフィル a の減少率がカロテノイ ド類の低下率よりも大きいことに起因すると考えられる。

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 33 に溝辺アメダスの降水量,図 34 に牧之原アメダスの日照時間を,表2 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1月から3月中旬 はかなり少ない~平年並みで推移し,3月下旬から7月中旬は概ね平年並み~かなり多く,7月下 旬から8月下旬は少ない~平年並みで,9月上旬から中旬は多い~かなり多く,9月下旬以降は11 月中旬~下旬が平年よりかなり多かったが、その他の期間はかなり少ない~平年並みで推移した

(図 33)。日照時間は、1月から2月中旬は概ねかなり少ない~平年並みで、2月下旬から3月中旬 は平年並み~かなり多く、3月下旬から5月下旬にかけては概ねかなり少ない~平年並みであり、6 月は上下旬で平年より多かったが中旬はかなり少なく、7月は少ない~平年並みで、8月以降は概 ね平年並み~多かった(図 34)。旬別階級区分によると、平均気温は、1月上旬から3月上旬にか けて、概ね低い~平年並みで、3月中旬から4月下旬にかけては平年並み~かなり高く、5月上旬 から6月中旬はかなり低い~平年並みで推移したが、6月下旬以降は平年並み~かなり高い期間が 続き、11月下旬までこの傾向が続いた(表2)。

B) 水質

観測期間中の鹿児島湾央における環境観測結果および栄養塩分析結果を図 35 に,湾奥の結果を 図 36 に示す。

湾央において,水温は表層および10m層でそれぞれ18.2~29.8℃および18.1~29.4℃の範囲で推移し、4月上旬から12月上旬にかけて平年並みかやや高めであった。塩分は、表層および10m層でそれぞれ29.5~34.3 および31.8~34.3 の範囲で推移し、4月上旬から6月下旬にかけて平年並みかやや低めであり、7月上旬はやや高めで、8月下旬から12月上旬にかけては平年並みかやや低めであった。透明度は、4.5~14.1mの範囲で推移し、7月上旬と10月下旬で平年より高く、7月下旬から10月上旬にかけて平年より低めであった。溶存酸素濃度は、表層および10m層でそれぞれ6.5~8.2mgL⁻¹および5.8~8.2mgL⁻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10m層でそれぞれND(<0.01µM)~3.2µMおよびND~4.0µMの範囲で推移し、10月下旬は平年よりやや高く、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10m層でそれぞれND~0.33µMの範囲で推移し、4月上旬から6月上旬および11月上旬は平年より低く、6月下旬から10月上旬は平年より高く、12月上旬は平年並みであった。

SiO₂は,表層および10m層でそれぞれ0.8~31.0 µMおよび0.5~21.4 µMの範囲で推移し,4月上旬は平年よりやや高く,5月上下旬および12月上旬は平年より高く,4月下旬および8月下旬は平年よりやや低く,6月上旬から7月上旬および10月下旬から11月上旬は平年より低めであった。 クロロフィル濃度は,表層および10m層でそれぞれ0.7~8.8 µgL⁻¹および0.5~2.0 µgL⁻¹の範囲で 推移し,4月上下旬,7月上旬,10月下旬および12月上旬は平年より低く,5月下旬から6月下旬 は平年よりやや高く,5月上旬および8月下旬は平年より高めであった。

湾奥において,水温は表層および10m層でそれぞれ17.2~29.9℃および16.9~28.7℃の範囲で推移し、6月下旬は平年より高く、9月下旬は平年よりやや低めであったが、その他の期間は平年並みかやや高めであった。塩分は、表層および10m層でそれぞれ26.6~33.3および30.7~33.7の範囲で推移し、5月下旬、7月上旬、10月上下旬は平年よりやや低く、6月下旬は平年よりやや高く、8月下旬は平年より低めであったが、その他の期間では平年並みであった。

透明度は、3.6~15.8mの範囲で推移し、4月上旬は平年よりやや高く、9月下旬および10月下旬 は平年より高かったが、その他の期間は平年並みかやや低めであった。溶存酸素濃度は、表層およ び 10 m 層でそれぞれ 6.4~8.7 mg L⁻¹ および 5.7~8.3 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~4.8 μ M および ND~4.3 μ M の範囲で推移し, 4 月 上旬および 8 月下旬は平年より高く, その他の期間は平年よりやや低めか低めであった。DIP 濃度 は, 表層および 10 m 層ともに ND~0.41 μ M の範囲で推移し, 4 月上旬および 7 月下旬から 10 月下 旬にかけて平年よりやや高めか高めであり,その他の期間は平年よりやや低めか低めであった。SiO₂ は, 表層および 10 m 層でそれぞれ 4.6~63.0 μ M および 1.4~27.2 μ M の範囲で推移し, 4 月上旬か ら 6 月上旬, 8 月下旬から 9 月下旬および 12 月上旬で概ね平年より高く,その他の期間では平年よ りやや低めか低めであった。クロロフィル a 濃度は, 表層および 10 m 層でそれぞれ 0.9~7.4 μ g L⁻¹ および 0.8~5.2 μ g L⁻¹の範囲で推移し, 5 月下旬, 7 月下旬から 8 月上旬および 11 月上旬は平年よ り高く,その他の期間は平年よりやや低めか低めであった。

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12月上旬までのイソ プレットを図37に示す。水温および塩分に注目すると,特に7月から10月に成層が形成されてお り、11月以降は徐々に成層が崩れていた。さらに,栄養塩(DIN, DIP)に注目すると,4月から9 月の期間は表層から10m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

2022 年に鹿児島湾で発生した赤潮を図 38 に示す。1 月 31 日から 3 月 9 日にかけて山川湾で *Pseudochattonella veruculosa* による赤潮(最高細胞密度 629 cells mL⁻¹), 3 月 10 日から 4 月 20 日に かけて湾奥部全域で *H. akashiwo* による赤潮(最高細胞密度 2,525 cells mL⁻¹), 10 月 4 日から 10 月 18 日にかけて湾奥部全域で *Chattonella marina* による赤潮(最高細胞密度 144 cells mL⁻¹)が発生し た。鹿児島湾で特に警戒すべき *C. marina*, *H. akashiwo* 両種による赤潮が発生したが,いずれも大 規模化することなく終息した。

B) プランクトン種組成

図 39~41 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、6月28 日に 1,005 cells mL⁻¹、7月7日に962 cells mL⁻¹、8月25日に 1,199 cells mL⁻¹確認され、他の期間は 500 cells mL⁻¹未満であった。Stn.②の 10 m層は、最高が8月25日の 560 cells mL⁻¹であり、他の期 間は 500 cells mL⁻¹未満であった。(図 39)。優占種は表層、10 m層ともに、8月25日は *Leptocylindrus danicus* であり、他の期間は主に *Chaetoceros* spp.が優占していた(図 40)。湾奥部の Stn.⑧、⑪の表 層について、Stn.⑧は6月28日に 2,253 cells mL⁻¹、7月7日に 862 cells mL⁻¹、7月 19日に 1,884 cells mL⁻¹、8月25日に 2,734 cells mL⁻¹が確認され、それ以外は 800 cells mL⁻¹未満であった。Stn.⑪は6 月 28日に 1,050 cells mL⁻¹、7月19日に 4,178 cells mL⁻¹、8月25日に 1,888 cells mL⁻¹が確認され、そ れ以外は 800 cells mL⁻¹未満であった。Stn.⑧、⑪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 8月25日で、それぞれ 2,342 cells mL⁻¹、1,628 cells mL⁻¹が確認され、それ以外は 500 cells mL⁻¹未満であった(図 39)。優占種は、表層、10 m層ともに、8月25日は *L. danicus* であ り、他期間はほぼ *Chaetoceros* spp.が優占していた(図 40)。

有害種について、100 cells mL⁻¹以上が確認されたのは、4月6日の Stn.⑧の 10 m 層 (151 cells mL⁻¹) のみで(図 39)、優占種は *H. akashiwo* であった。無害種は、*Prorocentrum* spp.が比較的多く出現し、最高は4月6日に Stn.⑧の 10 m 層で確認された 14 cells mL⁻¹であった。その他、*Gyrodinium* spp.や *Fibrocapsa japonica* 等が確認された(図 41)。

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42に示す。*Chattonella* spp.はStn.③は6月7日, 6月28日,8月25日に確認され,いずれも0.001 cells mL⁻¹であった。Stn.④は6月7日,7月19日, 8月25日,9月29日に確認され,最高細胞密度は9月29日の1.086 cells mL⁻¹であった。

2015年以降の濃縮検鏡の結果を図 43 に示す。2015年から 2017年は、湾奥部の Stn. ①で、2018

年から 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が、2022 年は湾奥部の Stn.①で多くの細胞が確認された。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 1 月および 2019 年 3 月、Stn.①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。 上限の濃縮倍率が、2015 年は 1,000 倍、2016 年は 4,000 倍、2017 年~2018 年は 10,000 倍、2019 年~2022 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8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 44 に, *H. akashiwo* 赤潮の最高細胞密度の推移を図 45 に示す。3 月 10 日に湾奥部の東部で *H. akashiwo* が確認され, 最高 369 cells mL⁻¹であった(牛根沖)。3 月 15 日には湾奥部全域で *H. akashiwo* が確認され, 最高 660 cells mL⁻¹ であった(牛根境沖)。3 月 23 日には牛根境沖で着色が確認され, 最高 2,525 cells mL⁻¹ であった。 その後は減少傾向に転じ、4 月 6 日には最高 237 cells mL⁻¹ (福山沖) となり、4 月 19 日には最高で 5 cells mL⁻¹ (重富沖)が確認されるに留まり、赤潮は終息した。

B) 2022 年の H. akashiwo 赤潮の発生・衰退要因

図 46 に降水量および日照時間の推移を示す。降水量について、3 月 1 日に 13.5 mm の降水があった後はしばらく観測されなかったが、3 月 14 日から 15 日にかけて 1.5 mm から 7.5 mm、3 月 18 日 に 44 mm、3 月 20 日から 3 月 23 日にかけて 0.5 mm から 21.5 mm、3 月 26 日に 77 mm が観測され、 その後は 4 月 11 日に 41.5 mm が観測された他は、赤潮が終息した 4 月 20 日まで降水は少なかった。

図 47 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 3 月 15 日から 4 月 19 日の水温は、表層では 15.9~18.8°C,10 m 層では、15.9~17.7°C と H. akashiwo の増殖至適水 温 15~25°C (Shikata 2009)の範囲内であった。塩分について、表層は 33.2~33.6,10 m 層は 33.7~34.0 で推移した。DIN,DIP 濃度については、1,000 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 µM,P:0.1 µM,紫加田・本城 2016,以降基準値)と比較すると DIN は 概ね下回っており,DIP は概ね上回っていたが、2 月 24 日以前の測定値と比較すると大きく減少し ており、比較的低い値で推移していた。競合種の珪藻類について、細胞密度の推移を図 48 に示す。赤潮が発生した湾奥部の Stn.⑧, ⑪は、赤潮発生以前の 2 月 24 日は表層、10 m 層とも 10 cells mL⁻¹ 未満であったが、赤潮発生期間の 3 月 15 日には Stn.⑧の表層,Stn.⑪の 10 m 層で 1,000 cells mL⁻¹ を超える細胞が確認された。

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ったものの,発生期間前半は競合種である珪藻類が多く,また4月上旬の降水量が少なかったことも影響し,赤潮発生期間を通して栄養塩が不足気味で推移したため,3月23日の2,525 cells mL⁻¹をピークに大規模な発生には至らず,赤潮が衰退したと推察された。

C) 2022 年の Chattonella 赤潮の発生・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℃,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が,2022 年は従来の発生時期には 増殖は確認されず,10 月 4 日~18 日にかけて,湾奥部で *C. marina* が最高 144 cells mL⁻¹ (10 月 4 日, 湾奥部東部)確認された。

2022 年の 5~7 月の環境条件を整理すると、湾奥部の水温について、表層は 21.0~27.9 ℃、10 m 層は 18.8~26.3℃、塩分について、表層は 26.6~32.3、10 m 層は 30.8~33.5 と水温、塩分ともに概 ね *Chattonella* spp.の増殖至適環境であった。DIN、DIP 濃度については、表層、10 m 層ともに期間 を通して欠乏状態であった(図 35)(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 月下旬まではほとんど確認されなかったものの、6 月に入ると 増加し始め、6月下旬には最高2,253 cells mL⁻¹(6月28日, Stn.⑧表層)、7月中旬には最高4,178 cells mL⁻¹(7月19日, Stn.⑪表層)となった(図39,40)。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ったが、栄養塩の不足と、競合種である珪藻類が6月から7月にかけて増殖したことにより、*Chattonella* spp.による赤潮は発生しなかったと考えられた。

*C. marina*の増殖が確認された9月下旬~10月中旬の水温は,表層で24.4~26.7℃,10m層で24.9~26.4℃,塩分は表層が30.2~31.6,10m層が31.7~32.2と概ね至適条件であり,競合種である珪藻類は少ない状況だった。また,栄養塩は概ね半飽和定数を上回っており,一時的に増殖に適した環境となっていたものと考えられる。

3 5か年のまとめ

本研究では、八代海における赤潮の短期動態予測技術の確立に向けて、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とともに、赤潮の動態を予測する上で利用可能な生物指標を見出 すことを目的とした。そのために、現場における洋上観測ブイによる連続観測や船舶調査による高 頻度モニタリングを行うとともに、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 を行った。また、過去のデータの解析を行って、短期動態に影響を与え得る中長期的な予察手法に ついても検討した。他方、鹿児島湾については、有害赤潮の発生要因の解明を目的として、定期的 なモニタリングを行って、過去の蓄積データと合わせて解析を行った。

【八代海におけるモニタリング】

既往知見により、八代海では出水や鉛直混合などに起因する栄養塩濃度の上昇後に有害赤潮が発 生するケースが多いことが知られている。そこで、本研究では、硝酸塩センサーによる連続観測や 高頻度の採水調査を行い、栄養塩の動態と赤潮の動態の関係をより詳細に解析した。また、漁協や 養殖業者など多くの関係機関がルーティンで実施する採水・検鏡は上層のみを対象とすることが多 いが、本研究では、赤潮の発生前から、赤潮が頻発する定点における表層~深層の調査船観測や自 動昇降式多項目水質計の運用を行い、赤潮の発達前から衰退まで赤潮の分布や関連する水質の鉛直 プロファイルデータを取得した。さらに、赤潮発生時の調査のオーバーラップや漏れを極力減じる ことを目的として、船上からでも簡単にアクセスや投稿が可能な SNS (LINE) を活用し、調査予 定、赤潮プランクトンの分布密度や水質分析結果などを赤潮モニタリングに係る関係機関のメンバ ーで共有する体制を構築した。これらにより、本海域において「くまなく」赤潮や水質の短期動態 に関する情報を取得した。

その結果,栄養塩濃度が急上昇した 1~2 週間後に有害赤潮プランクトンの増殖や高密度化が起こるパターンが改めて確認された。2019年,2021年の Chattonella 赤潮,2022年の K. mikimotoi 赤潮が該当し,これらのケースでは、すべて栄養塩上昇の主たる要因は大雨による出水と推察された。また,これらのケースにおいて,発達開始時は珪藻類が低調であった。他方, Chattonella や K. mikimotoi の衰退要因として,栄養塩の枯渇や海面冷却等による成層強度の低下あるいは鉛直攪拌が関与することが再確認された。しかしながら、これらの要因では説明できないケースもあったので、今後の検討課題である。

【生物指標を用いた短期動態予測手法の開発】

Chattonella を対象として、細胞形態の変化を指標とする増殖活性診断手法を開発した。室内において、増殖に多大な悪影響を及ぼす栄養塩枯渇条件や弱光条件で Chattonella を培養し、増殖が低下する時の特徴的な形態変化を探索した。また、八代海において、Chattonella 赤潮の発生前後に、細胞画像を多数取得し、発達段階ごとの形態的特徴を絞り込んだ。その結果、Chattonella の増殖能が低下すると、細胞長/細胞幅(長幅比)が低下すること、核が光学顕微鏡下で明確に観える細胞(核クリア細胞)や尾部に棒状の突起を有する細胞(テイルド細胞)が多く出現することを見出した。また、長幅比の低下はP欠乏時や弱光条件で生じること、核クリア細胞やテイルド細胞は窒素欠乏時に増加することを特定し、こういった形態変化は完全に増殖が停止する数日前から観察され始め

ることを明らかにした。以上の結果を踏まえて、細胞形態の変化は Chattonella の増殖活性の指標として有効であり、ルーティンの水質情報等と組み合わせれば本種の短期動態予察の精度を向上させることができると考えられた。さらに、本手法について一般向けのマニュアルを作成した。

【八代海における中長期予察手法の開発】

八代海における Chattonella 赤潮の中長期動態予察技術として、平成 30 年度に2 変量(2~4月の 平均気温,九州南部における梅雨入り日の5月16日からの経過日数)を用いた赤潮の発生確率(高 め・中程度・低め)判別手法を開発した。本手法による5年間の予察結果と実際の Chattonella 赤潮 の発生規模は表3に示したとおりであり、予察結果は概ね実際の発生規模と整合していた。また、 判別得点に基づく Chattonella 赤潮発生日の予察結果(表4)は、赤潮が発生しなかった2020年と 梅雨入りが記録的に早かった2021年を除いて、実際の発生時期と一致していた。これらの予察結 果は、梅雨入り後に赤潮ネット上で公開され、漁業関係者によって赤潮対策の参考とされている。 今後の課題として、例えば、中程度と予察された年が2年あり、これらの年に発生した赤潮は、非 発生と大規模発生が混在していたため、より明確に発生を予察可能な手法の開発などが挙げられる。

【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】

・Heterosigma akashiwo 赤潮について

過去5年間の*H. akashiwo* 赤潮発生状況は表5のとおり。赤潮発生年は平成30年,令和元年,令和3年,令和4年であり,これらのうち,10,000 cells mL⁻¹以上の密度まで細胞の増殖が確認された 平成30年,令和元年,令和3年については,増殖要因として発生期間前および発生期間中の降雨 による栄養塩の供給が示唆されるが,主な気象条件,環境条件に関して発生年と非発生年との間に 統計的に有意な差は確認できなかった。

・Chattonella 赤潮について

過去5年間の Chattonella 赤潮の発生状況は表6のとおり。Chattonella 赤潮については、これまで 主たる発生時期とされていた5月から7月における発生が平成28年以降確認されておらず、過去5 年間については令和元年と令和4年の10月に低密度の発生が確認されるに止まった。非発生の要 因として、昭和53年(1978年)以降のデータを整理すると、5月、6月における DIN の長期的な 減少傾向が確認され、過去5年間についても5月から7月の DIN、DIP が概ね不足傾向であった。 発生予察については、9月の底層水温と12月の全天日射量の平均値の組み合わせによる手法を令和 元年の本事業で作成したが、現時点で予測精度が低いため、今後サンプル数を追加していく中で精 度が改善されるか否か、検証の必要がある。

引用文献

- Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes RW, Strickland JD. Fluorometric determination of chlorophyll. *ICES J*. *Mar. Sci.* 1965; **30**: 3-15.
- 今井一郎. 有害赤潮ラフィド藻 Chattonella のシストに関する生理生態学的研究. 南西水研研報 1990; 23: 63–166.
- Katano T, Yoshida M, Lee J, Han MS, Hayami Y. Fixation of *Chattonella antiqua* and *C. marina* (Raphidophyceae) using Hepes-buffered paraformaldehyde and glutaraldehyde for flow cytometry and light microscopy. *Phycologia* 2009; **48**: 473-479.
- 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.

日本光合成研究会.「光合成事典」学会出版センター,東京. 2003.

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.

- 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,松岡數充編)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, 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.
- 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.北海道大學水産學部研究 彙報 1978;29:164-172.
- 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.
- 山口峰生,本城凡夫. 有害赤潮鞭毛藻 Gymnodinium nagasakiense の増殖におよぼす水温,塩分および光強度の影響.日本水産学会誌 1989;55:2029-2036.
- Yamaguchi M, Itakura S. Nutrition and growth kinetics in nitrogen-or phosphorus-limited cultures of the noxious red tide dinoflagellate *Gymnodinium mikimotoi*. *Fish. Sci.* 1999; **65**: 367-373.
- Yang KZ, Ma HY, Zheng WJ, Yang DW, Liu SJ, Li YH. Proteomics to reveal metabolic network shifts towards lipid accumulation following nitrogen deprivation in the diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *J. Appl. Phycol.* 2014; **26**: 73-82.