

(総説)

有明海佐賀県海域における赤潮研究

- 現状と課題 -

松原 賢[※]Studies on the Harmful Algal Bloom in the Ariake Sea off Saga Prefecture
-Current Status and Future Prospects-

Tadashi MATSUBARA

はじめに

植物プランクトンは基本的に海域における重要な基礎生産者である。しかし、なかには環境もしくは人間活動に悪影響を与える有害有毒藻類(Harmful Algae)も存在し、それらの大量発生は有害有毒藻類ブルーム(Harmful Algal Bloom=HAB)と呼ばれる。HABは「大量増殖赤潮」, 「有毒ブルーム」, 「有害赤潮」, 「珪藻赤潮」の4つに類型化される¹⁾。「大量増殖赤潮」は基本的には無害な藻類が高密度化し、溶存酸素の欠乏などを引き起こして魚介類をへい死させるものを指す。「有毒ブルーム」は強力な毒を産生する藻類の増加を指す。有毒藻類は赤潮に至らない程度の密度でも食物連鎖を通じて人間に貝毒等の悪影響をもたらす。「有害赤潮」は人間には無害だが養殖魚介類を中心に大量へい死させるものを指す。そして「珪藻赤潮」は珪藻類がノリ漁期に増殖して栄養塩を消費し、ノリの色落ちを引き起こすものを指す。これらHABのうち、有明海では「有害赤潮」および「珪藻赤潮」による漁業被害が発生している。前者の原因生物としてラフィド藻類の*Chattonella antiqua*および*C.marina*(以降、両種をまとめて*Chattonella*属と称す)、後者の原因生物として羽状目珪藻類の*Asteroplanus karianus*および中心目珪藻類の*Eucampia zodiacus*が特に問題視されている。筆者は上記生物それぞれについて現場出現動態の解析を中心に研究を進め、漁業被害防止対策の観点から発生予察技術の開発に取り組んできた。本稿ではこれまでの成果を概説し、今後取り組むべき課題を提示する。

*Chattonella*属

有害鞭毛藻類が引き起こす漁業被害のうち、日本国内では*Chattonella*属によるものが最悪であり、被害金額が最も大きくなっている。特に1972年に瀬戸内海播磨灘で発生した*C.antiqua*赤潮による養殖ハマチの漁業被害は

71億円に達し、「播磨灘赤潮訴訟」に発展した。こうした背景もあり*Chattonella*属に関する調査および研究は瀬戸内海を中心に1970年代から行われてきた。一方、有明海佐賀県海域(以降、当海域と称す)では1984年に*Chattonella*赤潮が初認され、1990年に発生した赤潮についてはその発達過程²⁾や同赤潮海水を用いた魚介類への暴露試験³⁾が報告されている。しかし、1990年代までは有明海における*Chattonella*属に関する調査・研究は現在ほど活発ではなかった。これは、有明海では魚類養殖が行われておらず、*Chattonella*赤潮による漁業被害が金額として顕在化しないためである。しかし2000年度のノリの大不作を契機に、有明海的环境に対する社会的関心が高まり、*Chattonella*赤潮も環境問題の一つとしてクローズアップされるようになったため、*Chattonella*属に関する調査・研究が精力的に行われるようになった^{4,7)}。

*Chattonella*属は底泥中にシストを形成するが、有明海ではその現存量および発芽量の多寡と赤潮の発生・非発生は関係がなく、シストから発芽した栄養細胞の増殖環境が重要であることが指摘されている⁸⁾。筆者らは2007年および2009~2011年の夏季の現場調査データを解析し、当海域における*Chattonella*属の動態と各種環境要因の関係を解析した。その結果、*Chattonella*属の初期増殖期(当海域では概ね6月中旬から7月上旬)の競合生物、つまり珪藻類の多寡が*Chattonella*赤潮の発生に影響を与えることが示唆された⁹⁾。また、成層の形成、好天、小潮、南風という条件が赤潮形成に好適であり¹⁰⁾、そのうち特に成層の形成と南風が重要であることが指摘された⁹⁾。なお、当海域夏季における成層の形成は出水に伴うことがほとんどであるが、表層塩分が10を下回るほどの大きな出水があった場合、*Chattonella*属は赤潮を形成できないことが報告されている^{11,12)}。

*Chattonella*属による漁業被害の防止対策として、魚類養殖がある海域では餌止め・粘土散布・避難漁場への養殖生簀の移動等が実施されている。一方、有明海にお

※; 国立研究開発法人水産研究・教育機構 瀬戸内海区水産研究所

ける *Chattonella* 赤潮に起因する問題は、天然魚介類のへい死¹⁰⁾や天然クルマエビの漁場からの散逸¹³⁾などであり、松原ほか(2011)¹⁴⁾はこれらの被害防止対策の一環として *Chattonella* 赤潮の発生予察法の開発に取り組んだ。すなわち、赤潮の発生が予察できれば、赤潮シーズン前に精力的な漁獲を実施するなどの対策により、漁業被害の軽減が可能になる。*Chattonella* 赤潮の発生予察法に関しては、様々な気象・海象要因を先行指標とした播磨灘における研究が有名であり、今井(2012)¹⁾に詳しい。また、橘湾ではAGP試験¹⁵⁾、八代海では気象・水質データの重回帰分析¹⁶⁾により発生予察を行っている。一方、当海域では2000年代に入るまで、夏季の水質データの十分な蓄積がなかったため、松原ほか(2011)¹⁴⁾は気象データのみによる *Chattonella* 赤潮の発生予察法の開発を試みた。2010年の一例を除き、当海域における *Chattonella* 赤潮は7月中旬以降の発生であったので、5月上旬から7月上旬までの佐賀市の旬平均気温、旬合計降水量および旬平均全日射量のデータを用いて *Chattonella* 赤潮の発生・非発生について判別分析を行った。その結果、5月下旬の全日射量、7月上旬の合計降水量および全日射量を独立変数とする判別関数(誤判別率11.5%)が算出された(表1)。この式を活用することで、7月上旬までに赤潮の発生・非発生を予察することができる。しかし、本法は赤潮発生時期や赤潮の規模を予察するものではない。当海域で *Chattonella* 赤潮が発生しうる時期は7月上旬から9月中旬までと幅広い。また、8,000 cells/ml以上の高密度な赤潮が発生した場合に天然魚介類がへい死する傾向がある(図1)。*Chattonella* 赤潮の発生予察法をより実用的なものにするためには、発生時期および規模に関する予察法を開発する必要がある。

「有害赤潮」としての側面のほか、当海域において

表1 *Chattonella* 赤潮の判別分析結果(松原ほか 2011を改変)

年	実際の記録	分析1	分析2	分析3
1984	+	+	+	+
1985	—	—	—	—
1986	—	—	—	—
1987	—	—	—	—
1988	+	+	+	+
1989	+	+	+	+
1990	+	—	+	—
1991	+	—	+	—
1992	+	+	+	+
1993	+	+	+	+
1994	+	+	+	+
1995	+	+	+	+
1996	—	—	—	—
1997	—	—	—	—
1998	+	+	+	+
1999	+	+	+	+
2000	+	+	+	+
2001	—	+	+	+
2002	—	+	+	+
2003	+	—	+	—
2004	+	+	+	+
2005	—	—	—	—
2006	—	—	—	—
2007	+	+	+	+
2008	+	+	+	+
2009	+	+	+	+
誤判別率		19.23%	11.54%	15.38%
判別関数 ($Z > 1$ のときに赤潮発生)	分析1 分析2 分析3	$Z = -0.0049 (PJ1) + 0.1549 (RJ1) - 1.3326$ $Z = -0.0012 (PJ1) + 0.029 (RJ1) + 0.0654 (RM3) - 1.3664$ $Z = -0.0018 (PJ1) + 0.0373 (RJ1) + 0.0432 (RM3) - 1.0251$		

+: *Chattonella* 赤潮発生。—: 赤潮非発生。*: 誤判別。PJ1: 7月上旬の合計降水量
RJ1: 7月上旬の平均全日射量。RM3: 5月下旬の平均全日射量

Chattonella 属は赤潮衰退時に海底の貧酸素化を引き起こす生物としても問題視されている。*Chattonella* 属に起因する当海域での漁業被害は、赤潮による直接的なものよりも、貧酸素水塊を通じた間接的なもののほうが大きな可能性がある。しかし、*Chattonella* 赤潮の衰退が貧酸素水塊の形成に与える影響について定量的な評価には至っておらず、今後の課題である。

Asteroplanus karianus

Asteroplanus karianus はかつて *Asterionella kariana* および *Asterionellopsis kariana* と呼ばれていたが、Crawford & Gardner (1997)¹⁷⁾により現在の学名が提唱された。当海域において *A. karianus* は1980年代から出現が確認されていた。しかし、2007年度のノリ漁期から突如として高密度な赤潮を形成してノリの色落ちを引き起こすようになり、赤潮発生機構の解明と被害防止対策の確立が急務となった。*A. karianus* によるノリの色落ち被害は当海域以外の海域では報告されておらず、また当海域においても過去には問題視されていなかったため、その生理・生態に関する知見は非常に限られていた。そこで、松原ほか(2014)¹⁸⁾は2007年12月から2012年3月までの現場観測結果を解析し、*A. karianus* の栄養細胞は7月から10月の期間は確認されないが、水温および日射量が年間で最も低くなる12月下旬から1月中旬に塩田川河口域を中心とする海域で増殖して赤潮を形成する傾向を見いだした(図2)。しかし、室内試験において夏季(25℃, 14hL:10hD)および冬季(10℃, 10hL:14hD)条件下における *A. karianus* の栄養細胞の増殖を調べたところ、夏季条件下で *A. karianus* の増殖速度は高く、水温に対する増殖特性ではその現場動態が説明できなかった。そこで、次に休眠細胞に着目し、夏季および冬季条件下における復活

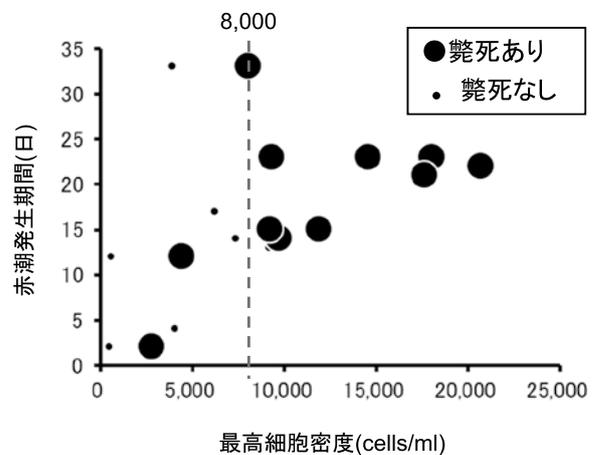


図1 *Chattonella* 赤潮の最高細胞密度および発生期間と魚介類へい死との関係

特性を調べたところ、冬季条件下で良好な復活およびその後の増殖が確認された。このことから、*A. karianus*が冬季に限定的に赤潮を形成する要因として、休眠細胞の復活特性が低水温に適応していることが重要であることが示唆された¹⁸⁾。その後、各機関との共同研究により、*A. karianus*の窒素要求性が非常に高いこと¹⁹⁾、*A. karianus*は他種よりも低い光強度を利用可能であることが明らかになった²⁰⁾。また、近年の研究で*A. karianus*の休眠細胞の復活およびその後の増殖に至適な水温は15℃付近と推定された(松原ほか 未発表)。このように、2010年代に入り、*A. karianus*の生理・生態に関する研究が進展した結果、現在までに想定される*A. karianus*の赤潮発生機構の概念図が示された(図3)²¹⁾。*A. karianus*が赤潮を形成する12月下旬から1月中旬は、ノリ養殖の冷凍網期が開始され、高品質かつ高価なノリが生産される重要な時期である。*A. karianus*はそのような時期のノリを色落ちさせる非常に厄介な生物である。ノリの色落ち被害防止対策として、当海域では施肥を実施している。施肥は色落ちを未然に防ぐものではなく、色落ちしたノリの色調の回復もしくは維持を目的とするものである。一方、色落ちの未然防止に繋がりうる手法として、ノリの色落ち原因珪藻の発生予察技術が有効と考えられる。技術の活用法は*Chattonella*属の場合と同様であり、事前に対象藻類の発生規模や時期が予察できれば、その情報を考慮したノリ養殖スケジュールの構築が可能となる。ノリの色落ち原因珪藻の発生予察については*Coscinodiscus wailessi*²²⁾および*E. zodiacus*²³⁾で研究が進んでおり、前者は春夏の積算水

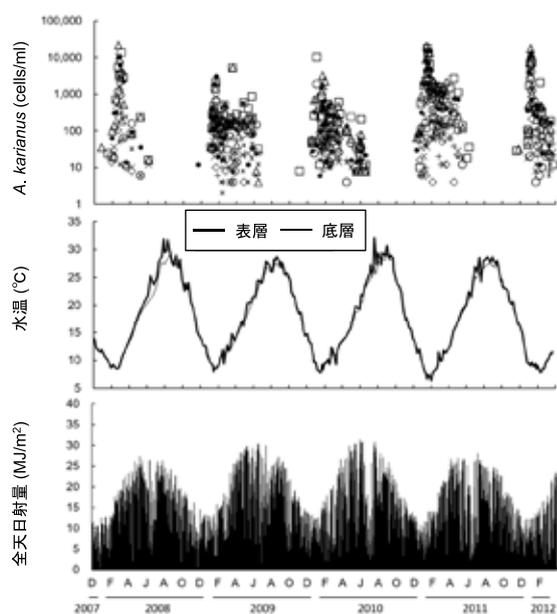


図2 有明海佐賀県海域における*Asteroplanus karianus*の細胞密度、水温および佐賀市の全天日射量の変動 (松原ほか2014を改変)

温値から秋季の発生量を、後者は細胞サイズ(頂軸長)の変動パターンからブルームピーク時期を予察するものである。有害藻類の発生予察は発生時期、規模ともに対象とすべきであるが、*A. karianus*は2007年度以降、ほぼ毎年DINを枯渇させる密度まで増加していたので、ブルームピーク時期の予察法の開発を優先した。*A. karianus*は10℃以下の低水温期に高密度化する傾向が見いだされており¹⁸⁾、また有明海奥部の植物プランクトンの動態は潮汐の影響を強く受けることが報告されている²⁴⁾。こうしたことから、松原ほか(2016)²⁵⁾は2008年度から2013年度の毎年12月から翌年1月までの当海域における*A. karianus*の動態と水温および潮汐の関係を解析した。その結果、*A. karianus*のブルームピークのタイミングは、「塩田川河口域の水温が10℃を下回った後の初めての大潮期に続く小潮期」であることが確認された。有明海におけるノリ漁期の水温については「沿岸海域水質・赤潮ポータルサイト (<http://akashiwo.jp/>)」において2週間後までの予測値が公開されている。つまり、この予測値と潮汐表を活用することで、*A. karianus*のブルームピークの予察が遅くとも2週間前には可能となる。しかし、「塩田川河口域の水温が10℃を下回った後の初めての大潮期に続く小潮期」のタイミングで*A. karianus*のブルームピークが確認される原因は現段階で不明であり、今後の検討課題である。

Eucampia zodiacus

ノリの色落ち原因珪藻には、本稿で取り扱う*A. karianus*や*E. zodiacus*、前出の*C. wailessi*に加え、*Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira* spp.など多くのものが含まれる¹⁾。しかし、各海域のノリ生産者から最も恐れられている生物は*E. zodiacus*と言って

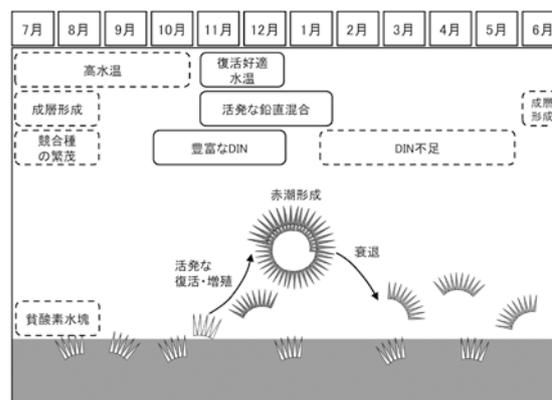


図3 *Asteroplanus karianus*赤潮発生機構の概念図
*A. karianus*に好適な要因を実践囲みで、不適な要因を破線囲みで示す。競合種の繁茂、貧酸素水塊は*A. karianus*についての試験データはないが、負の影響が想定される(松原2016)

過言ではない。その原因は、*E.zodiacus*のブルームは *A.karianus*や *Skeletonema* spp.等に比べて広範囲にわたり、また低栄養塩環境下でもブルームが維持されるからである。当海域において*E.zodiacus*の高密度化は1980年代以前より確認されており、高密度なブルームが発生する年は数年連続する傾向がある²⁶⁾。

2011年度のノリ漁期に、10年ぶりに2,000cells/ml以上の高密度な赤潮が発生したため、筆者らは発生予察法の開発を急いだ。

播磨灘での先行研究²³⁾では、*E.zodiacus*の頂軸長の季節変動パターンを予察に応用している。そこで、まず当海域でも同様の変動パターンがあるかどうかを確認するために2006年度以降の*E.zodiacus*の頂軸長の経月変動を調べた。当海域では2012年度まで*E.zodiacus*の頂軸長をリアルタイムで調査していなかったため、プランクトン沈殿量の測定後に保存されていた固定試料を分析に用いた。その結果、当海域でも播磨灘同様に頂軸長は秋季に最大となり、その後夏季に向かい縮小し、その後の秋季に再度最大化するという周期性が確認された。しかし、当海域での頂軸長の調査頻度は月に一回と低かったため、先行研究²³⁾と同様の予察手法は適応できなかった。そこで、秋季から夏季についての頂軸長データについて最小二乗法により近似直線を算出し(図4)、その傾きの絶対値と*E.zodiacus*の増加時期との関係を解析した。その結果、両者の間に相関が確認され、*E.zodiacus*増加時期の予察法に応用出来る可能性が示された(松原ほか 未発表)。また、近年では*Chattonella*赤潮の発生予察法で用いた判別分析を、*E.zodiacus*の発生規模の予察へ応用する研究も進んでいる(中村ほか 未発表)。

*E.zodiacus*の生理・生態については瀬戸内海の播磨灘で研究が進んでいる²⁷⁾が、有明海では近年本格化している。Ito et al.(2013)²⁸⁾は2012年2~4月に有明海奥部東部海域における*E.zodiacus*の短期動態について調べ、

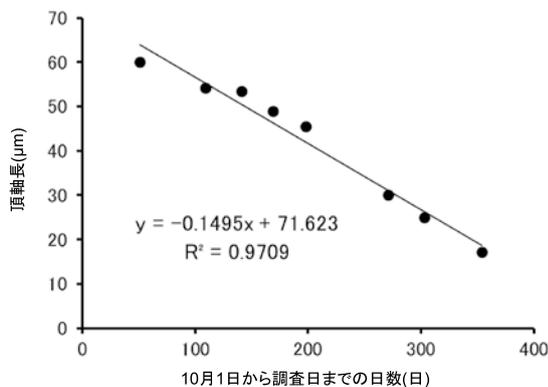


図4 秋季から夏季における*Eucampia zodiacus*の頂軸長の経時変化(2006年度の例)

*E.zodiacus*は深くまで光が到達する小潮期に底層で細胞密度を高め、潮位差が大きく鉛直混合が強い大潮期に水柱全体に拡散、増殖することを報告している。また有明海において、*E.zodiacus*のシードは沖合から移入している可能性が指摘されている(中村ほか 未発表)。今後、複数年にわたる水平・鉛直的な観測データを詳細に解析することで、有明海における*E.zodiacus*のブルーム形成機構が明らかになることを期待する。

文 献

- 1) 今井一郎(2012):シャットネラ赤潮の生物学. 171pp, 生物研究社, 東京.
- 2) 野田進治・大隈斉・古賀秀昭(1991):1990年夏季に佐賀県有明海で発生したシャットネラ赤潮-I-発生状況-. 佐賀有明水振セ研報, (13), 43-50.
- 3) 古賀秀昭・吉本宗央(1991):1990年夏季に佐賀県有明海で発生したシャットネラ赤潮-II-魚介類斃死試験-. 佐賀有明水振セ研報, (13), 51-56.
- 4) 中野拓治・山田耕武士・金子俊幸・中嶋雅孝・本城凡夫(2006):有明海における*Ceratium furca*と*Chattonella*属の日周鉛直運動の特徴および躍層との関係. 水環境学会誌, (29), 489-494.
- 5) 山砥稔文・坂口昌生・岩滝光儀・松岡敷充(2006):諫早湾に出現する有害赤潮鞭毛藻4種の増殖に及ぼす水温,塩分の影響. 日本水産学会誌, (72), 160-168.
- 6) 吉田 誠(2012):有明海で発生する有害鞭毛藻-*Chattonella*を中心に. p.25-38. 豊饒の海・有明海の現状と課題. 大嶋雄治編. 恒星社厚生閣, 東京.
- 7) 本城凡夫・島崎洋平・長副聡・松原 賢・紫加田知幸・川村嘉応・吉田幸史・久野勝利・山崎康裕・大嶋雄治(2012):赤潮. p73-81. 蘇る有明海-再生への道程. 楠田哲也編著. 恒星社厚生閣, 東京.
- 8) 片野俊也・吉野健児・伊藤祐二(2014):有明海奥部におけるシャットネラの発芽シスト数と赤潮との関連. 日本プランクトン学会報, 6, 8-14.
- 9) 松原 賢・首藤俊雄(2013). 有明海佐賀県海域における*Chattonella*赤潮および貧酸素水塊の動態と各種環境要因との関係(2009-2011). 佐賀有明水振セ研報, (26), 57-71.
- 10) 松原賢・吉田幸史・久野勝利(2009):2007年夏季に有明海佐賀県海域で発生した*Chattonella*赤潮. 佐賀有明水振セ研報, (24), 39-47.
- 11) Katano, T., K. Yoshino, T. Matsubara and Y. Hayami(2012): Wax and wane of *Chattonella*(Raphidophyceae) bloom with special reference to competition between *Skeletonema*(Bacillariophyceae) in the Ariake Sea, Japan. Journal of Oceanography, 68, 497-507.

- 12) 片野俊也・吉野健児・伊藤祐二(2013):有明海奥部の植物プランクトンの季節変化:特に夏季,冬季の有害赤潮と環境要因の関連について.沿岸海洋研究,(51),53-64.
- 13) 荒木希世・松岡貴浩・森下貴文・川崎信司(2013):有明海における*Chattonella*赤潮の日周鉛直移動がクルマエビに与える影響.熊本県水産研究センター研究報告,(9),13-18.
- 14) 松原賢・横尾一成・古賀秀昭(2011):有明海佐賀県海域における*Chattonella*赤潮の発生予察(短報).日本プランクトン学会報,(58),18-22.
- 15) 山砥稔文・丸太肇・矢田武蔵(1998):橋湾における*Chattonella antiqua*の発生予察の可能性.長崎県水産試験場研究報告,24,1-6.
- 16) 櫻田清成・山形卓・小山長久・糸山力生(2007):八代海における有害赤潮*Chattonella antiqua*の発生予察.熊本県水産研究センター研究報告,(8),35-45.
- 17) Crawford, R. M. and C. Gardner(1997):The transfer of *Asterionellopsis kariana* to the new genus *Asteroplanus*(Bacillariophyceae), with reference to the fine structure. Nova Hedwigia, 1-4.
- 18) 松原賢・横尾一成・川村嘉広(2014):有害珪藻*Asteroplanus karianus*の有明海佐賀県海域における出現動態と各種環境要因との関係.日本水産学会誌,(80),222-232.
- 19) Yamaguchi, H., M. Minamida, T. Matsubara and K. Okamura(2014):Novel blooms of the diatom *Asteroplanus karianus* deplete nutrients from Ariake Sea coastal waters. Marine Ecology Progress Series, 517, 51-60.
- 20) Shikata, T., T. Matsubara, M. Yoshida, S. Sakamoto and M. Yamaguchi (2015): 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, 81, 1063-1069.
- 21) 松原賢(2016):有明海の新たなノリ色落ち原因珪藻*Asteroplanus karianus*. p.252-257.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.
- 22) 長井敏(2000):播磨灘における有害大型珪藻*Coscinodiscus wailesii*の大量発生機構とその予知. P71-100.有害・有毒赤潮の発生と予知予防.石田祐三郎・本城凡夫・福代康夫・今井一郎編.日本水産資源保護協会,東京.
- 23) 西川哲也・今井一郎(2011):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,(77),876-880.
- 24) 田中勝久・児玉真史・熊谷香・藤本尚伸(2004):有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動.海の研究,(13),163-172.
- 25) 松原賢・三根崇幸・伊藤史郎(2016):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,印刷中.
- 26) 松原賢(2012):有明海佐賀県海域におけるノリ漁期の植物プランクトン. p.9-24.豊饒の海・有明海の現状と課題.大嶋雄治編.恒星社厚生閣,東京.
- 27) 西川哲也(2016):ノリ色落ち原因珪藻類の生理,生態,生活環と個体群動態. p.241-251.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.
- 28) Ito, Y., T. Katano, N. Fujii, M. Koriyama, K. Yoshino and Y. Hayami(2013):Decreases in turbidity during neap tides initiate late winter blooms of *Eucampia zodiacus* in a macrotidal embayment. Journal of Oceanography, 69, 467-479.