

2009年及び2010年に八代海で発生した *Chattonella antiqua* 赤潮 — 発生期の環境特性と養殖ブリへの影響 —

西広海・田原義雄・徳永成光・久保満・吉満敏¹⁾・中村章彦

1) 鹿児島県商工労働水産部水産振興課

要 約

鹿児島県における *Chattonella antiqua* (以下、「*C. antiqua*」と記載) による赤潮は、2009年と2010年には八代海で大規模赤潮が発生し、2年連続で大被害を与えるなど、魚類養殖業に深刻な影響を与えている。本稿では、両年に発生した *C. antiqua* 赤潮の発生環境、そして対策等について考察した。

2009年は、赤潮発生時は低水温・低塩分で、*C. antiqua* 赤潮の増殖に適した環境であった。また、発生後に北西～北風の割合が高く、八代海中北部の着色域が、本県海域へ南下・集積するのを促進したものと考えられた。赤潮終息には、特に DIP の枯渇が制限要因となったものと考えられた。

2010年の *C. antiqua* 赤潮の特徴は、①各養殖漁場での同時発生、②早期発生、③長期間継続であった。前年の赤潮後に大量のシストが供給され、各養殖漁場で同時多発的に発生したものと考えられた。2月から5月の底層水温の上昇が平年より早くシストの発芽が早かったことにより、前年より約1ヶ月早く発生したものと考えられた。また、降雨による栄養塩の供給や大潮時の鉛直循環と、その後日射量の増加により、*C. antiqua* 赤潮の増殖が2回繰り返されたことが、赤潮が長期間続いた要因になったものと考えられた。赤潮終息には、2009年と同様に、DIP の枯渇が制限要因となったものと考えられた。

C. antiqua の日周鉛直分布は、赤潮前半では水深0～15mまで高密度で分布し、後半は多くの時間帯で中底層に高密度で存在していた。

2009年、2010年に発生した *C. antiqua* 赤潮は、これまでにない大規模なもので、従来の赤潮対策の効果がみられない場合もあった。その際は、生簀を避難させることが最善の対策である。今後は、赤潮の発生をこれまでより早く予察するためのデータを蓄積し、赤潮予察技術を確立することが重要である。

鹿児島県における *C. antiqua* による赤潮は、1988年以降、八代海において確認され、しばしば本県の魚類養殖業に対して被害をもたらしてきた¹⁾。なかでも、2009年と2010年には同種による赤潮が八代海だけでなく、有明海、橘湾の広い範囲で大規模に発生し、本県では2009年に約20億3千万円、2010年には約36億8千万円と、2年連続で被害が発生するなど、本県のみならず、熊本県、長崎県における魚類養殖業の存続に深刻な影響を与えている。

本稿では、2009年と2010年に発生した *C. antiqua* 赤潮の発生環境、そして本県が取り組んできた対策等について考察することにより、今後の *C. antiqua* 赤潮発生に対して、漁業被害の軽減を図る一助とする。

なお、各調査・試験については、水産庁委託事業(漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業のうち赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業「八代海・鹿児島湾における有害赤潮等分布拡大防止」)で実施し

た。

材料及び方法

1 *C. antiqua* 赤潮発生前後の環境

a. 気象

熊本地方気象台の八代地域気象観測所(アメダス)が観測した降水量、気温、日照時間、風向、風速のデータを使用し、経過を把握するとともに、降水量、気温については平年値との比較を行った。平年値は1971～2000年の30年間の平均とした。

b. 海象

図1に赤潮調査定点を示す。

八代海南部海域に St.①～⑫の12点に調査定点を設定した。採水は、採水器(株式会社離合社製リゴ一B号採水器)を用いて2009年4月から2010年3

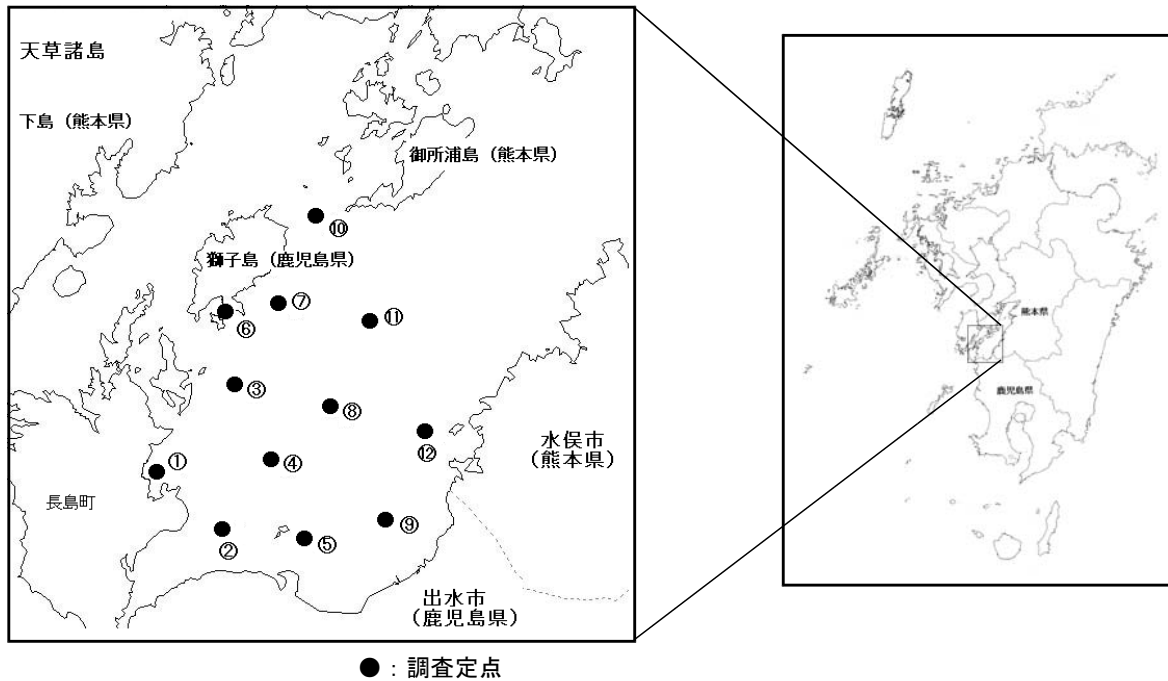


図1 赤潮調査定点

月に0m, 5m, 10m層(加えてSt①, ⑫は2009年4月から2010年3月, St⑩, ⑪は2009年6~8月に20m, 30m, B-1(海底から1m上)層)で行い, プランクトン計数や, DIN(溶存態無機態窒素), DIP(溶存態無機態リン)の栄養塩の分析に供した。

また, 水温, 塩分, DO(溶存酸素量)は, 多項目水質計(HYDROLAB社製 DataSonde5)を用いて測定した。するとともに, 透明度と水色を測定した。

なお, 12定点の水深0mにおける水温, 塩分については平均値を求め, 平年値と比較した。2009年の平年値は, 4~5月のデータは2003~2008年の, 6月のデータは2001~2008年の, 7~8月のデータは1989~2008年の平均とした。2010年の平年値は, 4~5月のデータは2003~2009年の, 6月のデータは2001~2009年の, 7~8月のデータは1989~2009年の平均とした。

c. 栄養塩

八代海の赤潮調査時に採取したサンプルを当场に持ち帰った後に, オートアナライザー(BL-TEC社製 AACS-4)でDINおよびDIPを測定した。

d. プランクトン組成

赤潮調査定点のうち, St.①, St.⑩, St.⑫の3定点は, 0m, 5m, 10m層の海水毎に1mlあたりのプランクトン組成を検鏡により把握した。

2 日周鉛直分布調査

*C.antiqua*の日周鉛直分布を把握するために, 24時間の日周鉛直分布調査を実施した。

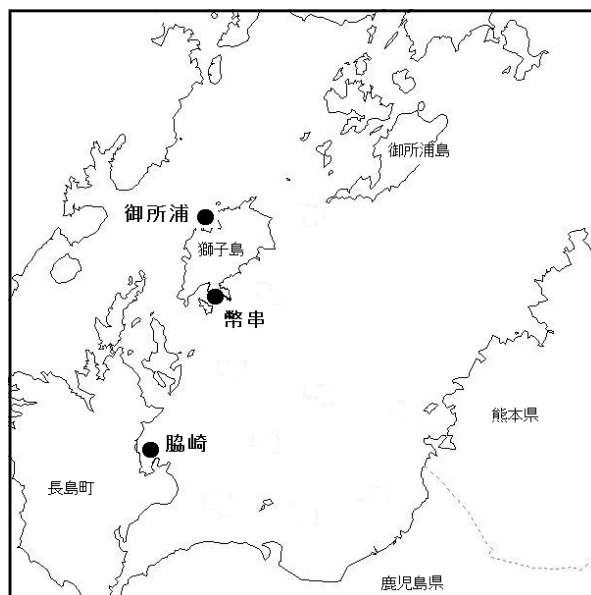
図2に調査地点を示す。長島町の獅子島幣串地先, 御所浦地先及び長島町脇崎地先の3点に調査地点を設定した。3点とも, 各地先の魚類養殖漁場の生簀から50~200m以内の近隣に設定した。

第1回調査は, 2010年7月6~7日に, 長島町獅子島の幣串地先(水深36m)及び御所浦地先(水深27~29m)で, 0m, 5m, 10m, 15m, 20m, 30m, B-1層の海水を, 採水器(株式会社離合社製 リゴーB号採水器)で6時間毎に各2回採水し, 採水後, 顕微鏡で速やかにそれぞれの*C.antiqua*の細胞密度を計数し, 平均細胞密度を算出した。

第2回調査は, 2010年7月24~25日に, 長島町脇崎地先(水深29m)で, 0m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 27m層の海水を, 採水器で2時間毎に採水し, 採水後, 顕微鏡で速やかに*C.antiqua*の細胞密度を計数した。

両調査とも併せて, 多項目水質計を用いて水温, 塩分, DO, DO%を測定した。

なお第1回調査は, 東町漁業協同組合所属の漁業者の漁船を借り上げ, 第2回調査は, 鹿児島県漁業指導取締兼調査船「おおすみ」を試験地に停泊させ, 同船上で実施した。



● : 調査地点

図2 日周鉛直分布調査地点

結 果

1 *C.antiqua* 赤潮発生前後の環境

(1) 2009年

a. 気象

図3に2009年3～8月の旬毎の降水量と平年偏差を示す。

3月から7月初旬までは平年値と比較して-4.1～-154.8mmとなる小雨であったが、7月中旬には約260mm, 下旬には約191mmと、平年値を上回るまとまった降雨があった。

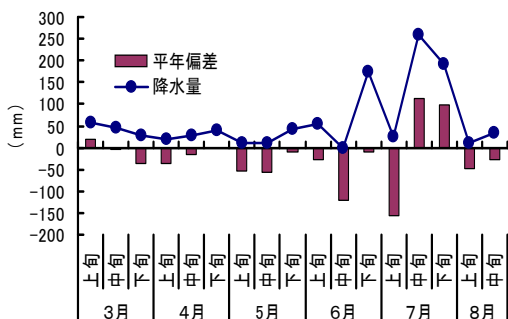


図3 旬毎の降水量と平年偏差 (2009年3～8月)

図4に2009年3～8月の旬毎の気温と平年偏差を示す。

3月から7月中旬にかけて、平年値と比べ、+0.1

～+3.3℃と、気温は全体的に高めで推移した。その後は、ほぼ平年値と同様の推移を示した。

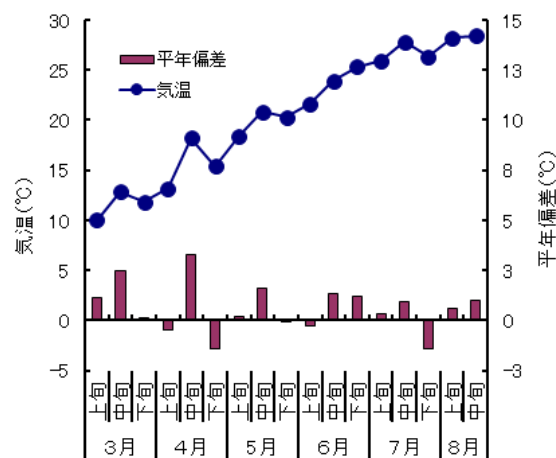


図4 旬毎の気温と平年偏差 (2009年3～8月)

図5に、赤潮発生期間中の風向, 風速を示す。

赤潮発生直後の7月28日から7月29日までは、南～南東風の割合が79.4%と多く、その風速は最大3.5m/sであった。着色域が拡大しはじめる7月30日から、着色域が減少傾向となる8月5日までは、北西～北風の割合が54.1%とやや多く、その風速は最大4.4m/sであった。

図6に赤潮発生前後の降水量, 日照時間, 潮汐の状況を示す。*C.antiqua*が赤潮化した7月28日から30

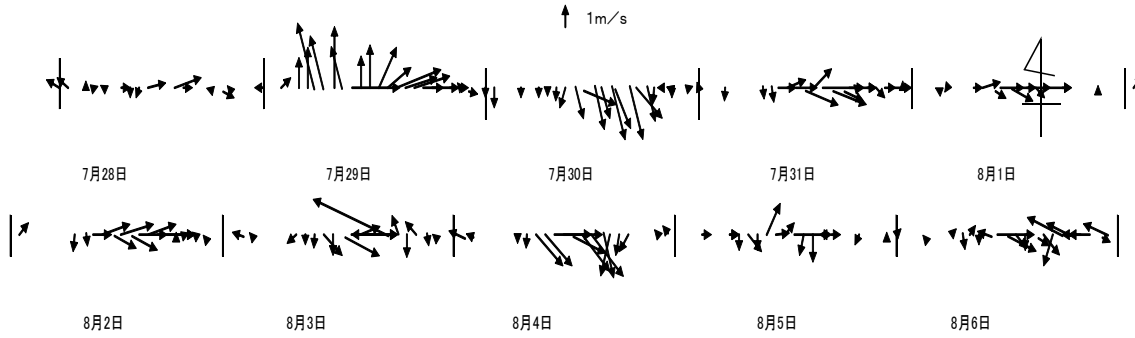


図5 赤潮発生期間中の風向, 風速 (2009年)

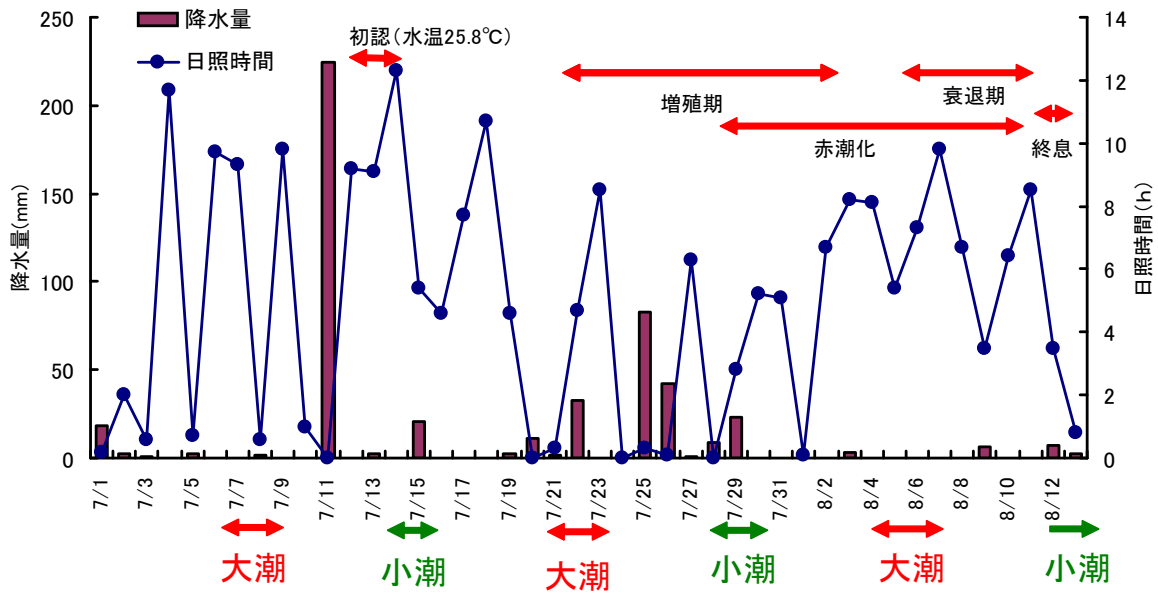


図6 赤潮発生前後の降水量, 日照時間, 潮汐の状況 (2009年)

日までは小潮であり, 終息に向かった8月4日から7日は大潮であった。

C.antiqua が初認された7月14日の前に200mmを超えるまとまった降雨があったほか, 赤潮直前の7月22~26日にもややまとまった降雨があった。*C.antiqua* 赤潮発生期にはほとんど降雨はなく, 日照時間が5時間/日以上の日が14日中10日と多かった。

b. 海象

図7にSt.①~⑫の12定点の0m層における水温の平均値と年間偏差を示す。

C.antiqua が初認された7月14日から7月27日にかけては平年より低かったが, 着色後, 終息傾向に向かう8月4日まで28℃台まで上昇した。

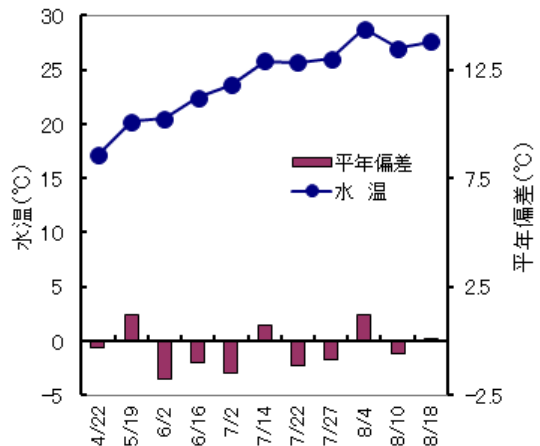


図7 0m層水温と年間偏差 (2009年4~8月)

図8に0m層における塩分の全調査点の平均値と
 平年偏差を示す。

春先から7月22日まで塩分は33psu前後と高い濃
 度で推移した。その後、7月27日から8月4日まで
 最低は平年を下回る28.7psuと、*C.antiqua*の至適塩
 分(30psu以下)^{5,6)}に低下した。終息を確認した8
 月10日には再び31.6psuまで上昇した。

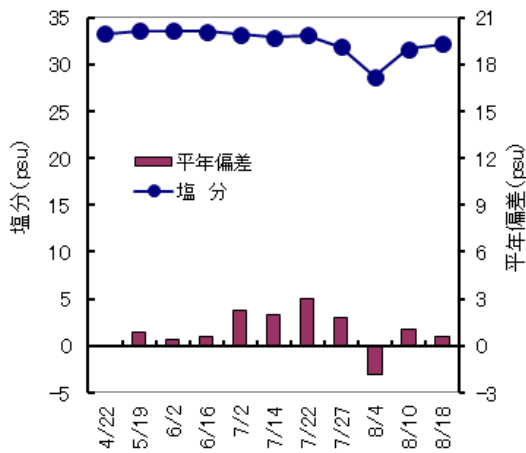


図8 0m層塩分と平年偏差 (2009年4~8月)

c. 栄養塩

図9に0m層におけるDINの12定点の平均値と平
 年偏差を示す。

DINは*C.antiqua*赤潮発生前の7月2日に急上昇し
 たがその後減少し、*C.antiqua*が初認された7月14
 日以降、DINは0.6~1μmol/Lで、平年値の-1μmol/L
 以下であったが、7月27日にはDINが2.7μmol/Lに
 急上昇した。赤潮終息傾向に入った8月4日は、再
 び濃度が1μmol/L以下に低下した。

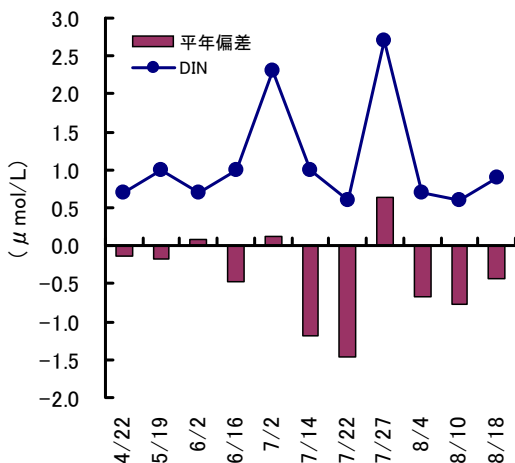


図9 0m層DINと平年偏差 (2009年4~8月)

図10に0m層におけるDIPの12定点の平均値と
 平年偏差を示す。

DIPはDINと同様に、*C.antiqua*赤潮発生前の7月2
 日に急上昇したがその後減少した。シャトネラが初
 認された7月14日以降、DINと比べると顕著ではな
 いが、DIPが0.11μmol/Lに上昇し、終息傾向に入っ
 た8月4日は、0.01μmol/Lと非常に低い濃度まで低
 下した。

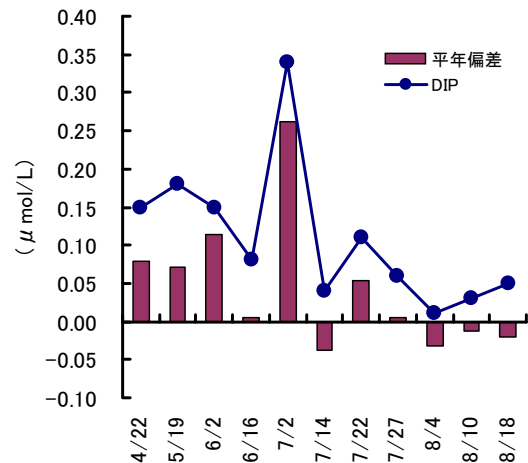


図10 DIPと平年偏差 (2009年4~8月)

図11に、St.①の脇崎地先におけるDIN/DIP比の
 鉛直分布を示す。7月22日までは0m層から底層の
 DIN/DIP比はほぼ10~20であったが、赤潮が終息
 傾向に入った8月4日のDIN/DIP比は、0m層から
 10m層にかけて82以上の高い値を示した。

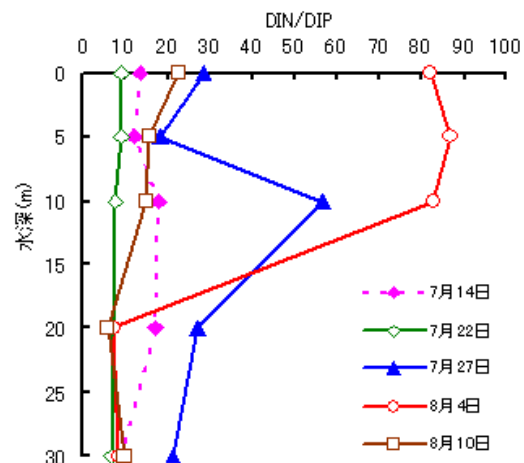


図11 St. ①におけるDIN/DIP比の鉛直分布
 (2009年)

d. プランクトン種別密度の推移

図12に、赤潮調査定点のうち、St.①、St.⑩、St.

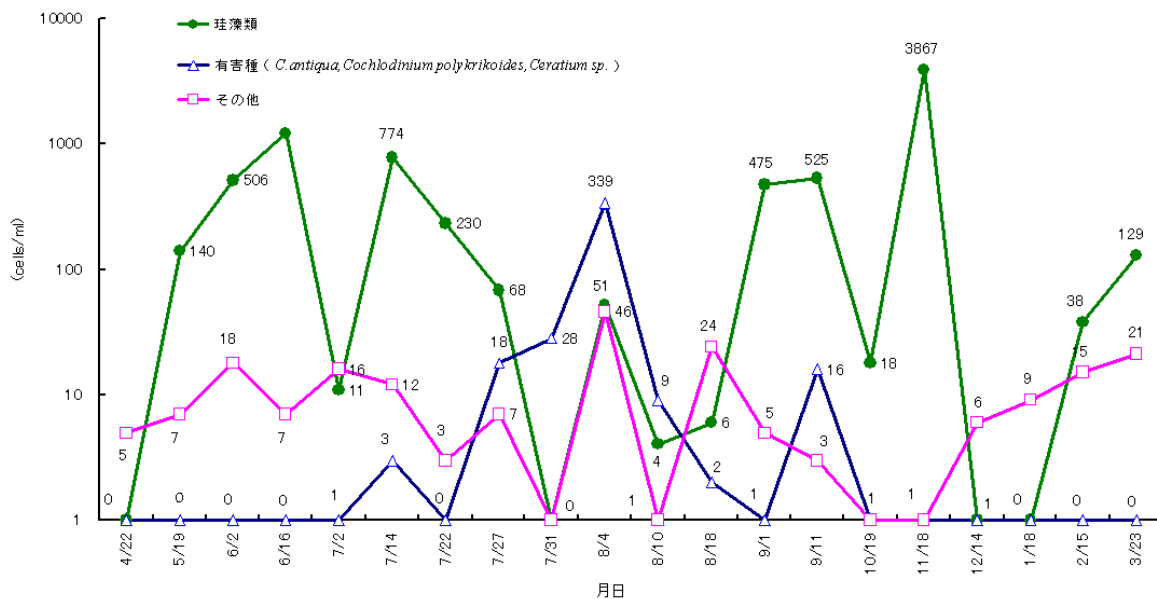


図12 プラクトン種別密度の推移 (2009年, St. ①, St. ⑩, St. ⑫表層の合計)

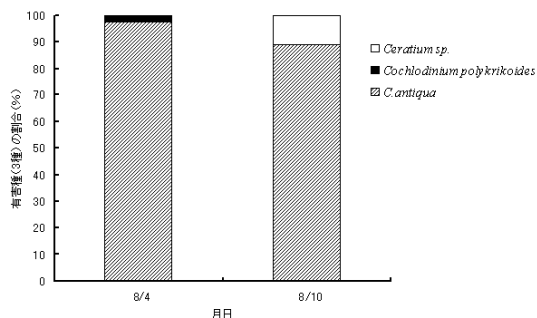


図13 有害種 (3種) の割合 (2009年8/4, 8/10)

⑫の0m層のプラクトン種別密度の推移を, 図13に有害種(3種)の割合を示す。

春先はプラクトンの少ない状況であったが, 5月以降は珪藻類が徐々に増加し, 6月中旬まで続いた。その後, 7月上旬には珪藻類の数が激減したものの, 中旬には珪藻類が回復した。7月下旬には*C. antiqua*を主とする有害種が増殖するに従い珪藻類が減少し, 8月上旬~中旬に*C. antiqua*が優占種となった(図13)。9月上旬には珪藻類の増殖がみられ, 11月中旬まで継続した。12月中旬にはプラクトンのほとんど見られない状況となったが, その後は徐々に珪藻類等が増加する傾向が見られた。

(2) 2010年

a. 気象

図14に2010年3~8月の旬毎の降水量と年平均偏差を示す。

2010年の梅雨入りは, 熊本を含む九州北部では平年より7日, 九州南部では14日遅く, 特に九州南部では観測史上, 過去40年で最も遅い梅雨入りであった。6月下旬に370.5mm, 7月中旬には227mmと, 平年値を大きく上回る降雨があった。

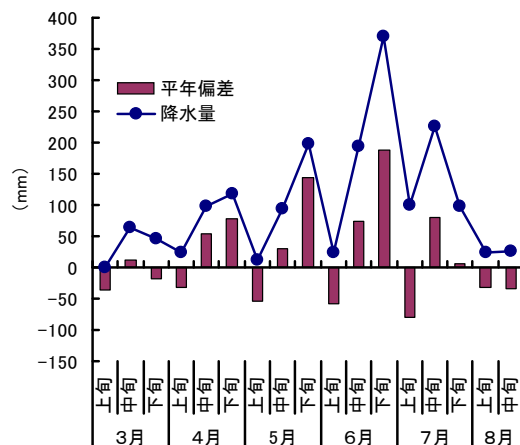


図14 旬毎の降水量と年平均偏差 (2010年3~8月)

図15に2010年3~8月の旬毎の気温と年平均偏差を示す。

気温は3月中旬が平年より高かったものの, その後は全体的に平年並みで推移した。

図16に赤潮発生前後の降水量, 日照時間, 潮汐の状況を示す。

6月28日~30日と7月10日~14日の大潮時に

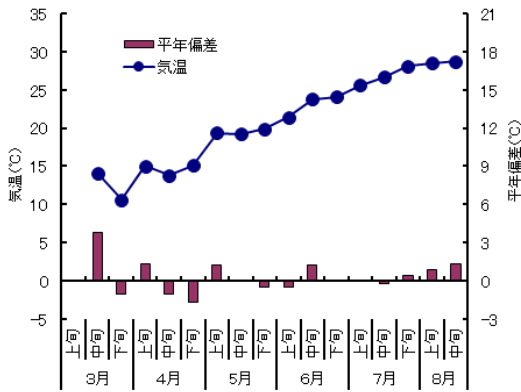


図15 旬毎の気温と平年偏差 (2010年3~8月)

まとまった降雨があり、それぞれ以降の小潮時にはほとんど降雨がみられず、晴天で日照時間が長く、この時期に *C.antiqua* 細胞の増殖により赤潮が確認された。また *C.antiqua* 赤潮が衰退に向かった 7 月 26 日以降は大潮であった。

b. 海象

図 17 に 0m, 10m, B-1 層における水温の全調査点の平均の推移を示す。6 月下旬の大潮時以降、0m 層と 10m 層以深の水温差が次第に大きくなり、B-1 層とは約 3℃の水温差があったが、7 月 12 日頃に 0m 層は 25.8℃まで上昇していた水温が 22.6℃まで低下し、B-1 層との水温差は 0.8℃と、ほとんど差がなくなった。その後は再び 0m 層と B-1 層との水温差は大きくなり、0m 層水温が上昇して 27.1℃となり、

水温差 4.8℃まで達したが、7 月下旬の大潮時には、0m 層水温はやや低下したものの、0m 層と B-1 層との水温差は 2.45℃あった。

図 18 に、0m, 10m, B-1 層における塩分の全調査点の平均の推移を示す。6 月下旬の大潮時以降、0m 層塩分は 31.6psu から徐々に低下し、7 月 9 日には 21.2psu となって成層が発達したが、7 月 12 日頃に 0m 層塩分は急上昇し、31.9psu まで回復した。その後も再び成層が発達し、0m 層塩分が 17.7psu まで低下したが、その後、7 月下旬の大潮時まで、次第に 0m 層塩分は上昇した。

c. 栄養塩

図 19 に、St.① (脇崎) における 0m, 10m, B-1 層の DIN の推移を、図 20 に 0m 層における DIN の全調査点の平均値の平年偏差を示す。6 月下旬から特に 0m 層の DIN が低下したが、7 月 12 日頃に 20m 以深と同じ 4.8μmol/L にまで上昇した。7 月中旬頃は、0m 層の DIN は全調査点の平均で平年より 6μmol/L 以上高かったが、その後、St.①では 0m 層だけでなく全層の DIN が 1μmol/L 以下まで低下し、7 月下旬には 0.65μmol/L にまでになった。

図 21 に、St.① (脇崎) における 0m, 10m, B-1 層の DIP の推移を、図 22 に表層 DIP の全調査点の平均値の平年偏差を示す。

DIN と同様、6 月下旬から特に表層の DIP が低下したが、7 月 12 日頃に、20m 以深と同じ 0.38μmol/L にまで上昇した。

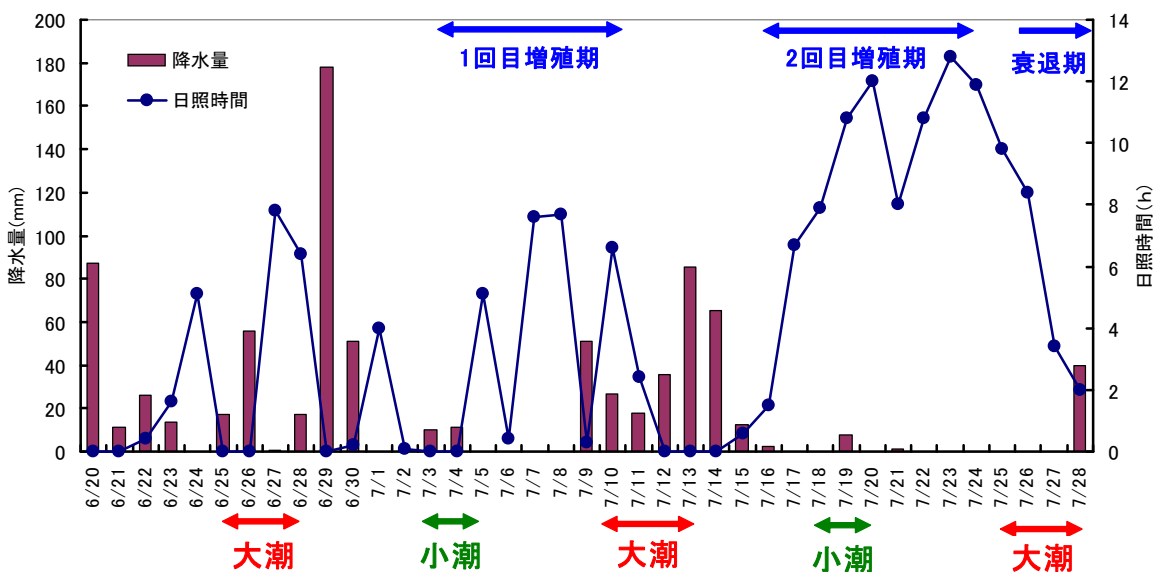


図16 赤潮発生前後の降水量, 日照時間, 潮汐の状況 (2010年)

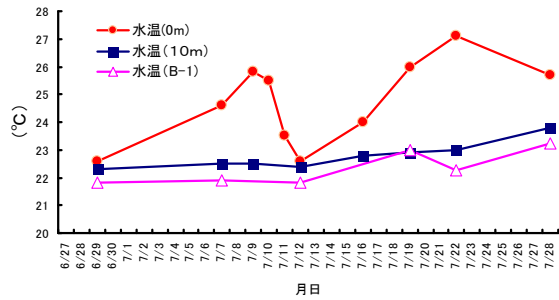


図17 水温の推移 (2010年)

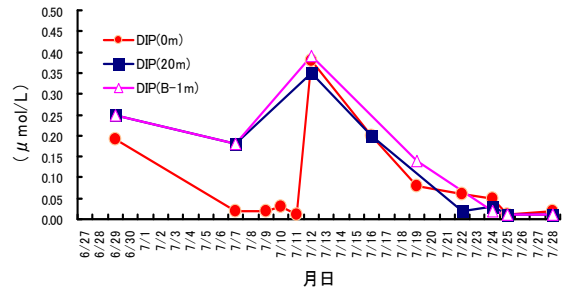


図21 DIPの推移 (2010年, St. ① 脇崎)

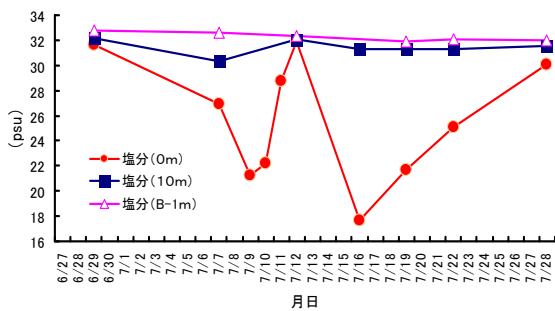


図18 塩分の推移 (2010年)

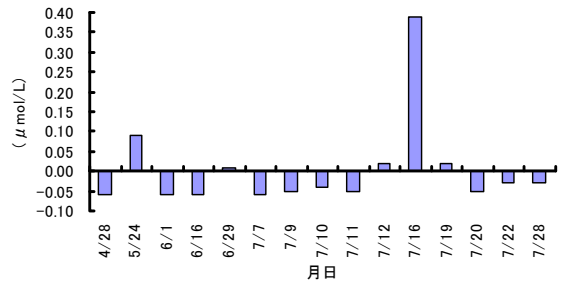


図22 0m層DIP (12定点平均) の年平均偏差 (2010年)

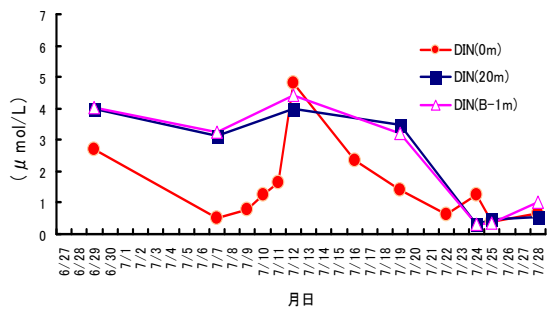


図19 DINの推移 (2010年, St. ① 脇崎)

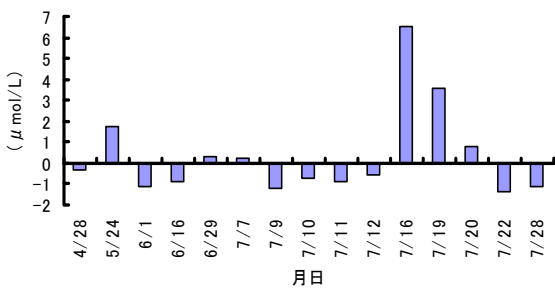


図20 0m層DIN (12定点平均) の年平均偏差 (2010年)

7月中旬頃は、表層のDIPは全調査点の平均で年より $0.35\mu\text{mol/L}$ 以上高かった(図21)が、その後St.①では表層だけでなく全層のDIPが低下し、*C.antiqua*赤潮が衰退する7月下旬にはDIPが $0.002\mu\text{mol/L}$ と

なった。

図23に、St.①におけるDIN/DIP比の鉛直分布を示す。7月19日までは0m層から底層のDIN/DIP比は6月16日を除きほぼ10~20であったが、赤潮が終息傾向に入った7月28日のDIN/DIP比は全層で30以上となり、特に10m層では144と高い値を示していた。

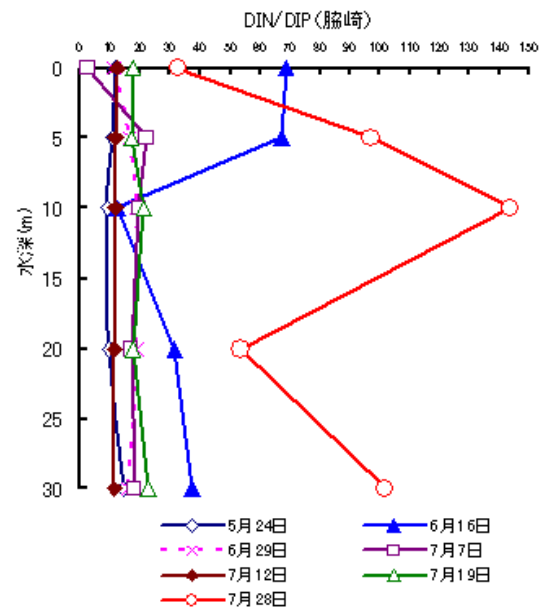


図23 St. ①におけるDIN/DIP比の鉛直分布 (2010年)

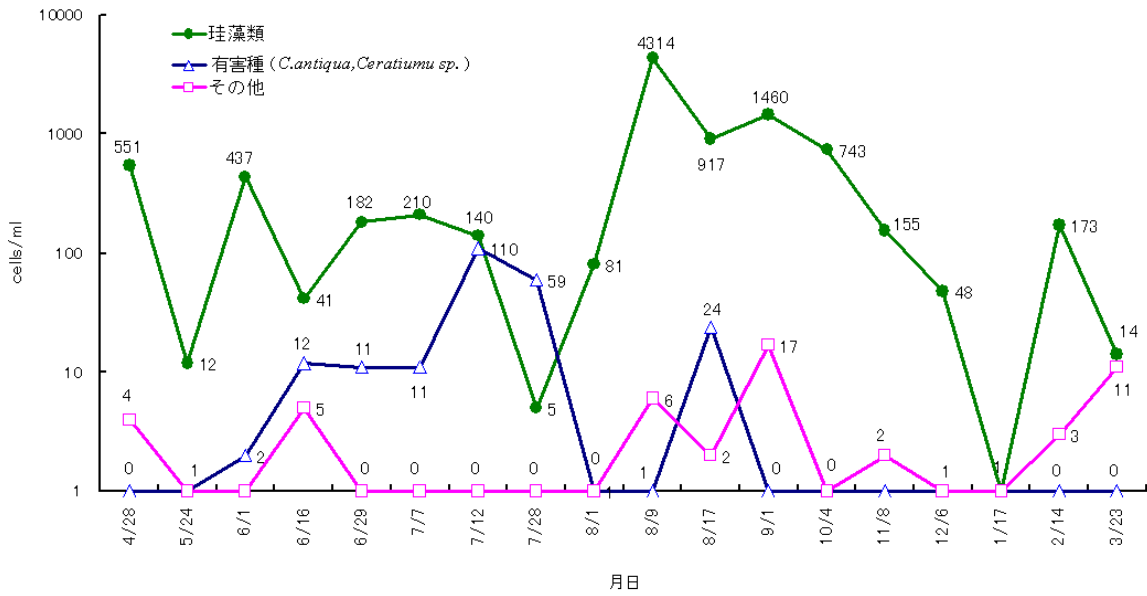


図24 プランクトン種別密度の推移 (2010年, St. ①, St. ⑩, St. ⑫表層の合計)

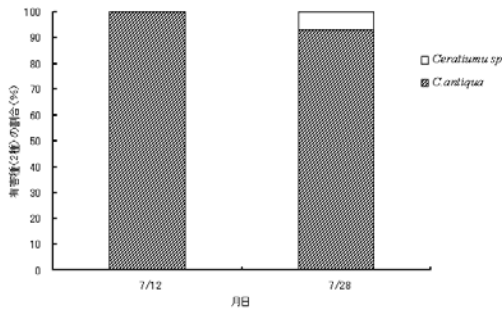


図25 有害種 (2種) の割合 (2010年7/12, 7/28)

d. プランクトン種別密度の推移

図 24 に、赤潮調査定点のうち、St.①, St.⑩, St. ⑫の 0m 層のプランクトン種別密度の推移を、図 25 に有害種 (2種) の割合を示す。

4月下旬には珪藻類が多い状況であったが、5月下旬にはプランクトンのほとんどみられない状況となった。6月に入ると珪藻類が増殖したが、6月下旬から *C. antiqua* の増殖がみられ、7月上旬までは珪藻類が 100cells/ml 以上みられたがその後減少し、*C. antiqua* の 2 回目の増殖のピーク時である 7月下旬には、ほとんど *C. antiqua* しか見られなくなった。8月以降は珪藻類が増殖し、10月上旬まで継続した (図 25)。冬場は珪藻類が徐々に減少し、プランクトン数が少なくなった。

2 日周鉛直分布調査

表 1 に獅子島幣串地先、表 2 に獅子島御所浦地先での *C. antiqua* の日周鉛直分布調査時における水質測定結果を示す。両地先の水温は、0m 層が 23.8 ~ 25.6 °C であったのに対し、底層は 21 °C 台と低かった。両地先の塩分は、0m 層が 27.8 ~ 30.4psu と低く、5m 層以深は徐々に高くなり、底層は 32 ~ 33psu であった。両地先の DO は、0m 層が 8.52 ~ 10.43mg/L (溶存酸素飽和度 120.4 ~ 146.5%) と高かったが、5m 層以深は徐々に低くなる傾向を示した。

図 26 に 2010 年 7 月 6 日 ~ 7 日の獅子島幣串地先、図 27 に獅子島御所浦地先における *C. antiqua* の各観測水深別細胞密度を示す。*C. antiqua* の最高平均細胞密度は、獅子島幣串地先で 7 月 7 日 0:00 の水深 0m 層で 147.5cells/ml、獅子島御所浦地先で 7 月 7 日 6:00 の水深 0m 層で 246.5cells/ml であった。7 月 6 日 18:30 における *C. antiqua* 細胞の鉛直分布をみると、幣串地先では水深 10m に多いのに対し、御所浦地先では水深 0 ~ 5m に多い傾向がみられた。また 7 月 7 日 0:00 には、幣串地先では水深 0 ~ 10m に多くなり、御所浦地先では水深 10m が多くなった。このように *C. antiqua* の分布状況は、同じ時間帯でも場所によって異なった。また両地先とも、*C. antiqua* は水深 0 ~ 15m に高密度層がみられ、15m 以深では細胞密度が少ない傾向がみられた。

表 3 に長島町脇崎地先での *C. antiqua* の日周鉛直分布調査時における水質測定結果を示す。水温は、0m 層が 26.0 ~ 27.4 °C であったのに対し、B-1 層は 22.9

℃と低く、3.1～4.5℃の温度差があった。塩分は、0m層が29.6～30.3psuと低かったが、5m層以深は、ほとんど31～32psuで推移した。DOは、0m層が10.4～14.8mg/L（溶存酸素飽和度164.2～220.9%）と非常に高い数値を示し、5m層も9mg/L以上（溶存酸素飽和度100%以上）であったが、10m層以深は徐々に低下し、B-1m層では4.8～5.0mg/L（溶存酸素飽和度67.8～70.1%）であった。

図28に、長島町脇崎地先における*C.antiqua*の日周

鉛直分布を示す。*C.antiqua*の最高細胞密度は、7月24日15:00の水深25m層で554cells/mlであった。

期間中、脇崎漁場では、*C.antiqua*の細胞が、1日のうち多くの時間帯で中底層に高密度で分布し、20m以深では、全調査期間中*C.antiqua*の細胞が100cells/ml以上分布した。また、時間帯によっては底層に分布することもあり、25m以深では、300cells/ml以上分布することが多かった。なお早朝には、表層に分布する傾向が見られた。

表1 獅子島幣串地先での水質の測定結果

水深(m)	水温(°C)	塩分(psu)	DO(mg/L)	DO(%)
0	23.9～25.6	27.8～30.2	9.7～8.5	120.6～136.7
5	23.1～23.9	30.3～31.5	6.8～8.7	95.3～123.0
10	22.7～22.8	31.9～31.9	6.7～6.8	93.5～94.6
15	22.0～22.3	32.2～32.5	5.8～6.2	80.2～85.5
20	21.8～21.9	32.6～32.7	5.5～5.7	75.0～78.1
30	21.7～21.8	32.7～32.8	5.4～5.5	74.2～75.3
35	21.7～21.8	32.7～32.8	5.2～5.4	71.9～74.3

※測定時刻：7/6 18:30, 7/7 0:00,6:00,11:00

表2 獅子島御所浦地先での水質の測定結果

水深(m)	水温(°C)	塩分(psu)	DO(mg/L)	DO(%)
0	23.8～24.4	29.3～30.4	8.6～10.4	120.4～146.5
5	22.4～23.7	30.3～31.9	6.6～8.5	91.1～120.5
10	21.9～22.5	31.8～32.8	6.1～6.9	85.1～96.5
15	21.7～22.4	31.9～32.7	5.9～6.5	80.7～90.4
20	21.6～22.3	32.1～32.8	5.8～6.2	79.8～85.7
25	21.2～22.0	32.4～33.1	5.7～5.8	78.3～79.2

※測定時刻：7/6 18:30, 7/7 0:00,6:00,11:00

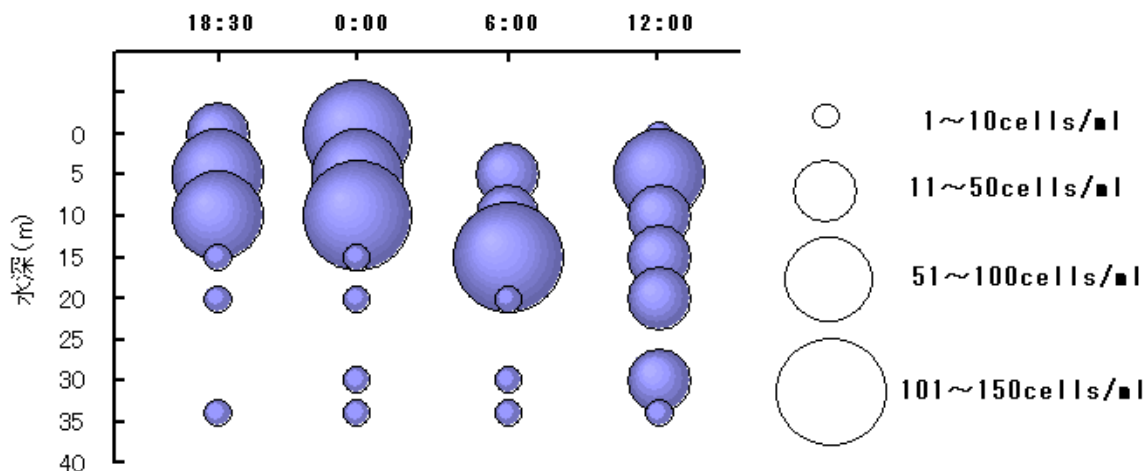


図26 *C. antiqua* の日周鉛直分布 (獅子島幣串地先 : 7/6~7)

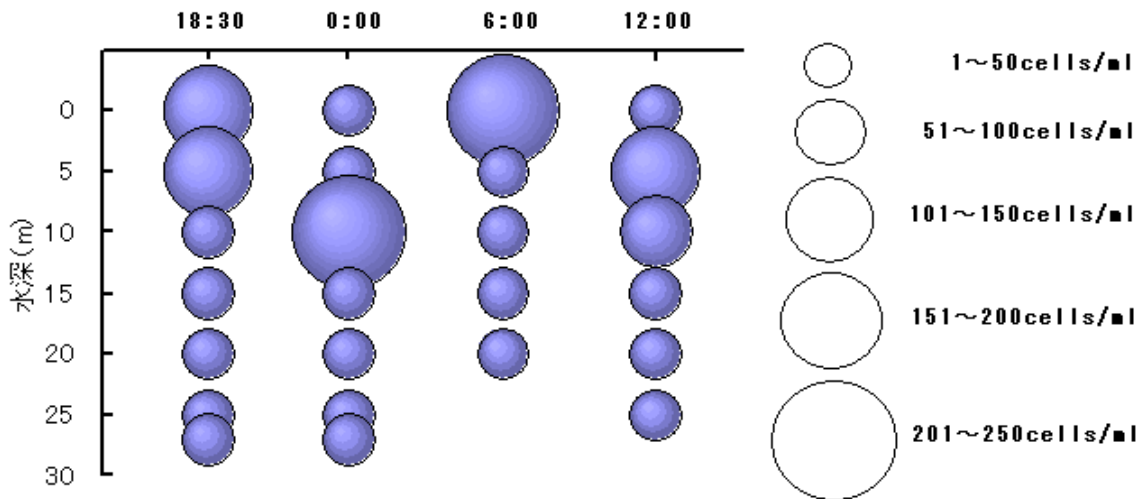


図27 *C. antiqua* の日周鉛直分布 (獅子島御所浦地先 : 7/6~7)

表3 長島町脇崎地先での水質の測定結果

水深 (m)	水温 (°C)	塩分 (psu)	DO (mg/L)	DO (%)
0	26.0~27.4	29.6~30.3	10.4~14.8	164.2~220.9
5	23.9~24.8	30.7~31.4	9.0~11.7	122.6~166.5
10	23.6~23.9	31.1~31.7	6.9~7.5	97.6~103.8
15	23.1~23.7	31.5~31.7	5.1~6.0	71.9~84.0
20	22.9~23.0	31.7~31.7	5.1~5.5	70.4~76.1
25	22.9~23.0	31.8~31.9	4.8~5.1	67.5~72.6
B-1	22.9~22.9	31.9~32.0	4.8~5.0	67.8~70.1

※測定時刻 : 7/24 13:05, 19:00, 7/25 1:00, 8:00

※ B-1 層 : 水深 27m

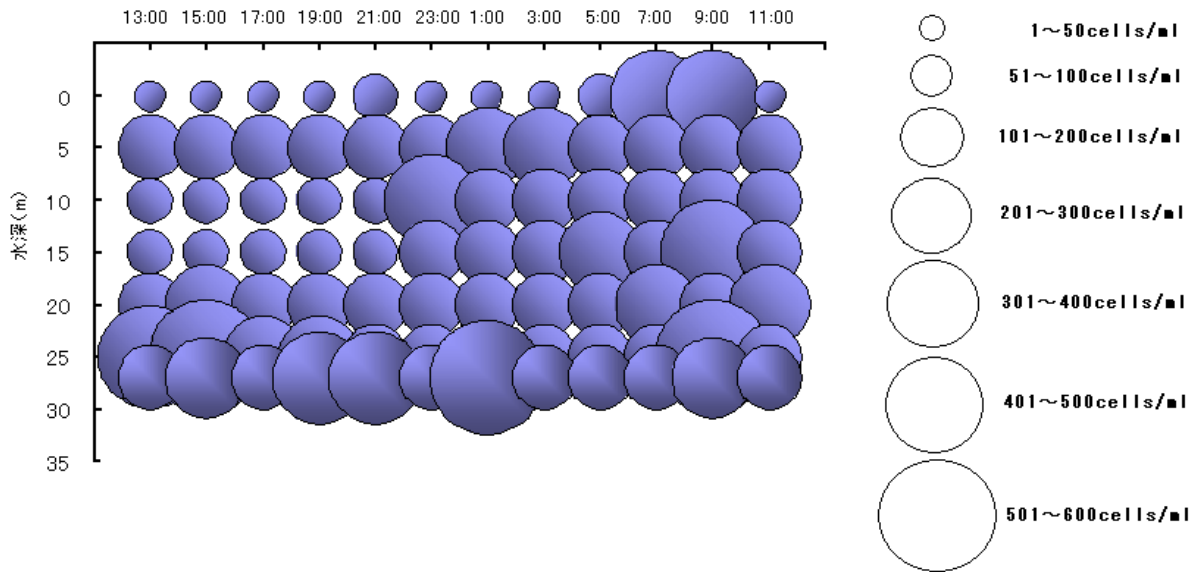


図28 *C. antiqua* の日周鉛直分布（長島町脇崎地先：7/24～25）

考 察

1 *C. antiqua* 赤潮の発生状況と対応

(1) 2009年

2009年の*C. antiqua*による赤潮の発生要因を、赤潮発生前後のプランクトン組成、気象、海象、水質等により考察する。

伊藤ら²⁾により播磨灘南部を対象として1979～1987年の期間、シャットネラ赤潮の発生年と非発生年における環境要因（水塊の鉛直安定性、表層部の栄養塩濃度、シストの発芽に影響する底層水温、珪藻類の変動）が整理されているが、その結果から今井³⁾は、シャットネラ赤潮が発生するためには、珪藻類が増殖しないことが必要条件であり、逆に珪藻類が増殖した夏季にはシャットネラ赤潮は発生していない傾向が明らかであるとしている。このように珪藻類は、*C. antiqua*と競合関係にあるが、*C. antiqua*が初認された7月14日から7月27日にかけての赤潮発生前における、八代海のプランクトン種別密度の推移をみると（図12）、7月14日頃には珪藻類が多かったが、7月27日にかけて珪藻類が徐々に少なくなっており、*C. antiqua*が増殖するのに適した状況にあったものと考えられる。

山口ら⁴⁾によると、*C. antiqua*の最適増殖水温は25℃付近にあると報告されている。本県における

*C. antiqua*の最適増殖水温は、これまでの増殖傾向から23～26℃と考えられるが、2009年は7月中旬から下旬にかけて平年値を上回るまとまった降雨があり（図3）、河川から大量の栄養塩が供給されるとともに、表層水温の上昇が抑制され、*C. antiqua*の増殖に適した水温（26℃以下）が維持された（図7）と考えられる。

また、この降雨の影響では、表層の塩分濃度が低下した（図8）。岩崎⁵⁾は*Eutreptiella* sp. (= *C. antiqua*) が塩分18.1‰ (=psu) 付近で最も良く増殖し、好適塩分範囲は14.4～30.7‰ (=psu) と述べている。また当所で実施した、*C. antiqua*の増殖に及ぼす水温・塩分の影響について把握するための室内試験では、*C. antiqua*は、比増殖速度から、20～30℃で低塩分を好む傾向が見られた⁶⁾。また海域においても、*C. antiqua*赤潮は降雨による塩分低下時に多く発生することが経験的に知られている。

2009年は、*C. antiqua*赤潮が発生する直前、八代海では、熊本県水産研究センターの調査で、7月16日から熊本県芦北郡津奈木町沖や上天草市姫戸沖を中心に*Cochlodinium* SP.による着色域が確認され、熊本県は16日に赤潮警報を発令している¹⁾。7月21日の東町漁協による調査によると、御所浦島南端～芦北郡津奈木町沖以北のほぼ全域において、*Cochlodinium polykrikoides*による着色域が確認され、細胞密度は200～800cells/mlであったが、翌22日の当所による調査では着色域は確認されず、23日に

は細胞密度も減少している¹⁾。村田ら⁷⁾は、*Cochlodinium polykrikoides*による赤潮発生時の環境は、水温24.1～29.3℃、塩分29.2～33.4psuであり、特に水温27℃前後、塩分31psu以上において赤潮発生が多く、高水温・高塩分の盛夏に赤潮発生が多いと報告しているが、2009年の*C. antiqua*赤潮発生時の環境は低水温・低塩分の状況であった(図7, 8)ことから、7月下旬からの*C. antiqua*赤潮の発生時は、*Cochlodinium polykrikoides*より*C. antiqua*が増殖する環境にあったと考えられる。

風の状況を見ると、赤潮発生前は、南～南東風の割合が多かったが、発生後の7月30日から8月5日まで、北西～北風の割合が多く(図5)、八代海中部～北部で増殖した*C. antiqua*赤潮の着色域が本県海域へ南下・集積するのを促進し、高密度で沿岸部に滞留したものと考えられる。

*C. antiqua*赤潮の終息した要因について、栄養塩の動向により考察した。表層のDINとDIPは、いずれも*C. antiqua*が初認された7月14日以降7月22～27日にかけて、大雨(図3, 6)による河川水の影響で濃度が上昇し、終息傾向に入った8月4日には、プランクトンによる消費により再び濃度が低下したと考えられる(図9, 10)。特にDIN/DIP比が0m層で82と高い値を示したように(図11)、DINよりDIP濃度の低下が顕著であり、DIPの枯渇が制限要因となり、*C. antiqua*赤潮の終息に影響したと考えられる。

なお、2009年の*C. antiqua*による赤潮では、それ以前の八代海における赤潮被害額の合計を単年度で上回る漁業被害が発生しており、漁業被害が拡大した要因については、これまで発生した*C. antiqua*赤潮と同様に、八代海中央部(獅子島東側)から南下して本県海域に流入しただけでなく、天草下島方向(獅子島西側)からも赤潮が流入し、*C. antiqua*赤潮が広範囲かつ高密度に発生してそれが長期間継続したこと、獅子島西側の避難漁場にも広範囲かつ高濃度で流入したこと、最終的には八代海全域で赤潮が発生したため、赤潮防除対策の粘土等の散布も効果的に行えず、漁業被害が拡大したものと考えられている¹⁾。熊本県海域での*C. antiqua*赤潮の拡大状況について櫻田⁸⁾は、2009年は八代海北部と楠浦湾の2ヶ所の海域で形成された*C. antiqua*赤潮が拡大したことで、大規模な赤潮形成に至ったと述べており、このことを裏付けている。

(2) 2010年

2010年の*C. antiqua*赤潮は、2009年やそれ以前に発生した*C. antiqua*赤潮と異なり、①各養殖漁場での同時発生、②早期発生、③長期間継続、といった特徴があった¹⁾。2010年の*C. antiqua*赤潮が、これらの特徴を持った要因を、赤潮発生前後のプランクトン種別密度、気象、海象、水質等により考察した。

2009年の大規模な赤潮で、各地の海底に大量の*C. antiqua*のシスト(休眠細胞)が供給されたと考えられ、瀬戸内海区水産研究所の八代海におけるシャトネラ属シスト分布調査によると、*C. antiqua*赤潮発生前の2009年5月の八代海全域における底泥1cm³中のシャトネラ属シスト平均分布密度は15個/cm³であったが、2009年9月の*C. antiqua*赤潮終息後には684個/cm³に増加していた。また2009年10月の八代海南部の平均分布密度は137個/cm³と、赤潮発生前の約10倍の密度であった⁹⁾。今井は、シストは赤潮発生の直接原因になっているわけではなく、赤潮の“Seed Population”として機能し、種の分布拡大にも重要な役割を持つと述べている¹⁰⁾。2010年の*C. antiqua*赤潮発生前に、シストが八代海の沿岸域を含めた広範囲に供給されており、これが発生源となって発芽して、その後の環境が増殖至適条件となって増殖し、各養殖漁場で同時多発的に発生したものと考えられる。

また、2010年2月から5月の底層水温の上昇が平年より早く(西ら未発表)、シストの発芽が例年より早かったものと思われ、これにより2009年より約1ヶ月早く赤潮が発生した可能性が考えられる。

6月28～30日の大潮時にまとまった降雨があり、それ以降の小潮時にはほとんど降雨がみられず、晴天で日照時間が長い日が続き(図16)、この時期に*C. antiqua*赤潮の増殖が確認された。また6月下旬の大潮時以降、0m層と10m層以深の水温差が顕著となる成層が発達したが(図17)、7月12日頃の大潮時には0m層は約26℃まで上昇していた水温が22℃台まで低下し、10m層以深との水温差がほとんどなくなった(図17)。0m層の塩分も6月末の降雨の影響で低下していたが7月12日頃に増加し、10m層との塩分差がほとんどなくなった(図18)。さらに栄養塩も、*C. antiqua*赤潮が増殖して消費したことにより、7月7日頃には0m層の栄養塩は低下していたが、7月12日頃に20m層以深と同レベルまで上昇した(図19, 21)。この水温、塩分、栄養塩の状況からみて、この大潮時に海域で、鉛直循環が起こったものと考えられた。このように、大潮時に発生した鉛

直循環の影響により、表層水温が低下して *C.antiqua* の増殖適水温（夏としては低い 23 ~ 26 °C）となったこと、栄養塩は底層から 0m 層への供給に加え、同時期のまとまった降雨による供給があったこと、その降雨の影響で増殖適塩分（低塩分）となったこと、さらにその後の天候回復による日射量の増加により、*C.antiqua* 赤潮が増殖するパターンが再度発生した。これらの気象や水質の状況が、*C.antiqua* 赤潮としては異例の、1ヶ月以上の長期間続いた要因になったものと考えられる。また、*C.antiqua* の増殖のピークが期間中に 2 回あり、漁業被害が拡大した要因になったと考えられる。

7月中旬頃は、0m 層の DIN と DIP は平年より高いレベルであったが（図20, 22）、その後 *C.antiqua* 赤潮が再度大増殖し、0m 層だけでなく全層の DIN と DIP が消費されて低下し、*C.antiqua* 赤潮が衰退する7月下旬には DIN がほぼ枯渇した状態となった。DIP は DIN よりそれは顕著であった（図23）。このように7月25日以降には、栄養塩となる窒素やリンの濃度が減少しており、このことが、赤潮が衰退した要因と考えられた。特に DIP の枯渇が DIN より顕著であり、2009年と同様に DIP の枯渇が制限要因となり、*C.antiqua* 赤潮の終息に影響したと考えられる。

2 日周鉛直分布調査

C.antiqua は、日中は 0m 層に、夜間は底層に日周鉛直移動することが、現場海域の調査結果や室内培養試験から知られている^{11, 12)}。そして、この鉛直移動により夜間に下層の栄養塩を利用することができ、他の植物プランクトンに対する *Chattonella* の増殖優位性に関わっていると考えられている^{13, 14)}。

2010年7月6~7日の獅子島幣串地先と獅子島御所浦地先における *C.antiqua* の日周鉛直分布をみると、幣串地先では、夜中の 0:00 には 0m 層に最も多く分布し、明け方の 6:00 に 15 m 層で極大となり、日中の 12:00 と 18:30 は 10 ~ 15 m に多かった（図26）。一方、御所浦地先では、夜中の 0:00 に 10m 層で極大となり、明け方の 6:00 には 0m 層に最も多く分布し、日中は 5 m を中心に多かった（図27）。このように、両地先とも日中は 0 ~ 10 m 層が高密度となり、15 m 以深では細胞密度が少ない傾向が見られたが、日没から夜中を経て明け方までの細胞密度は、全く逆の動きを示した。すなわち、御所浦地先の鉛直移動はこれまでの知見と一致するものの、幣串地先の移動のパターンは異なるもので、他の要因が関

与していることも考えられる。

調査期間中の水質をみると、獅子島幣串地先と獅子島御所浦地先とも 0 ~ 5m 層の DO が 8mg/L 以上、溶存酸素飽和度が 100% 以上といった高い数値を示したが（表1, 2）、これは増殖した *C.antiqua* による光合成の影響によるものと考えられる。

2010年7月24~25日の脇崎地先では、*C.antiqua* の細胞が、1日のうち多くの時間帯で中底層に高密度で存在し、20m 以深では、全調査期間中 *C.antiqua* の細胞が 100cells/ml 以上存在し、25m 以深では、300cells/ml 以上存在することが多かった（図28）。調査期間中の DO は、0m 層が 10.4 ~ 14.8mg/L（溶存酸素飽和度 164.2 ~ 220.9%）と非常に高い数値を示したが（表3）、獅子島での調査時と同様に、大増殖した *C.antiqua* の影響によるものと考えられる。なお、25m 以深では *C.antiqua* の細胞が高密度で存在したものの、DO は 4.8 ~ 5.1mg/L（溶存酸素飽和度 67.5 ~ 72.6%）と低かった。調査期間中における海中の照度を測定したところ、日中の表層では 6,500 ~ 8,000lx を示したものの、水深 5 m 層では表層の 15 % 以下に低下し、水深 10m 層以深では 200lx 以下と非常に照度が低い状態であり（西ら未発表）、増殖した *C.antiqua* による光合成はほとんど行われずに酸素消費が多かったと推察され、そのために DO が低かったものと考えられた。

獅子島での調査時は *C.antiqua* 赤潮の最初の増殖のピーク中であつたが、この時は 15m 以深では細胞密度が少ない傾向であつたのに対し、脇崎漁場での調査時は、*C.antiqua* 赤潮の2回目の増殖のピークにあたり、多くの時間帯で中底層に高密度で存在していた。*Chattonella* 赤潮の後期には小型細胞が出現し、出現の分布が底層に移行することが知られており¹⁵⁾、1992年に東町周辺で *Chattonella* 赤潮が発生した際にも、同様の細胞が観察されている¹⁶⁾。今回、底層付近で採取された細胞は、通常の栄養細胞の大きさや色調を維持しており、2回目の増殖ピーク時のように八代海全体が *C.antiqua* 赤潮に覆われている状況では、場所によっては *C.antiqua* が底層まで高密度で存在し得ることを示している。2010年の *C.antiqua* 赤潮では、赤潮対策として生簀に天井網を装着し、生簀網自体を一定の水深に沈めたり、生簀網に網を継ぎ足して網底を底層まで沈め、養殖魚が底層に避難できるようにするなど、底層には *C.antiqua* がいない前提で対策が実施された。赤潮前半である 2010年7月6~7日には、15m 以深では細胞密度が少ない傾

向がみられ、生簀の沈下等の対策が有効であったが、赤潮後半である2010年7月24～25日には、*C.antiqua*が底層まで高密度で存在する状況となり、生簀沈下の効果がみられなかった漁場もあったことから、今後は漁場毎に*C.antiqua*の日周鉛直分布状況を把握する必要があるものと考えられる。

今後の課題

2009, 2010年に発生した*C.antiqua*赤潮は、これまででない大規模なもので、八代海の広範囲で着色し、特に2010年の最も増殖した時は、表層から底層まで*C.antiqua*が高密度で存在する状況となり、粘土等赤潮防除剤の散布や生簀の沈下等の避難では効果がみられない場合もあった。当所が、2010年の*C.antiqua*赤潮被害を検証したところ、東町漁協管内での漁場毎の被害率をみると、長島の東岸より西岸のほうが被害率が低い傾向が見られ、沈下しなかった生簀と比較して、沈下により被害の軽減効果がみられた漁場がある一方、沈下しても被害率の高い漁場もあった¹⁷⁾。

2010年の赤潮終息後、東町漁協では今後大規模赤潮が発生した場合、赤潮防除剤の散布や生簀の沈下による避難といった赤潮対策の効果が低いと思われる漁場のために、赤潮被害の比較的少なかった長島の西岸側で、生簀をより深く沈下できる水深の海域に生簀の避難漁場を新たに整備するとともに、沈下生簀を導入した。大規模な赤潮が発生した場合、従来の赤潮対策では効果が低い場合があることが考えられ、その様な時は、生簀を避難させることが最善の対策であり、これまで一部にしかなかった避難漁場や、沈下生簀が新たに整備されたことは、赤潮対策の選択肢が増えることになり、今後の赤潮発生時に漁業被害を回避する確率が高まることになろう。

本稿では2009, 2010年の2ヶ年に発生した*C.antiqua*赤潮について考察したが、今後は、過去に発生した*C.antiqua*赤潮について同様の検証を進めると共に、今後もより詳細な調査を実施して赤潮の発生をこれまで以上に早く予察するためのデータを蓄積し、赤潮予察技術を確立することが重要である。

謝辞

赤潮調査にご協力いただいた東町漁業協同組合職員の方々、漁船を提供していただいた東町漁業協同

組合所属の中橋義行氏、割地一人氏、長友真一氏に感謝申し上げる。2010年に臨時赤潮調査にご協力いただいた、鹿児島県水産技術開発センターの職員の方々に感謝申し上げる。日周鉛直分布調査にご協力いただいた、鹿児島県漁業指導取締兼調査船「おおすみ」の乗組員の方々に感謝申し上げる。また、2009, 2010年の大規模赤潮発生にあたり、地元養殖業者に対する支援事業やシャトネラ赤潮の発生機構解明、被害防止・防除対策等に関する新たな調査・研究の計画策定や実施にご尽力いただき、さらに本県の赤潮調査や本研究に御協力、御助言をいただいた、水産庁及び独立行政法人水産総合研究センターの皆様にご感謝申し上げます。

文献

- 1) 西広海, 田原義雄, 徳永成光, 久保満, 中村章彦. 2009年及び2010年に八代海で発生した*Chattonella antiqua*赤潮. 鹿水技研報, 3, 2011, 37-44.
- 2) 伊藤克彦, 今井一郎, 板倉茂, 山口峰生, 松尾豊, 寺田和夫, 神菌真人, 池内仁. *Chattonella* および*Gymnodinium*赤潮の発生予知要素の選定と評価. In: 赤潮の発生予知技術の開発に関する研究, 5か年の研究報告, 南西海区水産研究所, pp. 171-179, 1990.
- 3) 今井一郎. 有害有毒赤潮の生物学(8)シャトネラ赤潮の発生環境: 播磨灘を例として. 「海洋と生物」生物研究社, 2010; 32: 175-180.
- 4) 山口峰生, 今井一郎, 本城凡人. 有害赤潮ラフィド藻*Chattonella antiqua*と*Chattonella marina*の増殖速度に及ぼす水温, 塩分及び光強度の影響. 日水誌 1991; 57(7): 1277-1284.
- 5) 岩崎英雄. 赤潮鞭毛藻に関する研究-IV. 日本海洋学会誌 1971; 27: 152-157.
- 6) 西広海, 田原義雄. 赤潮総合対策調査事業-II (有害赤潮発生に関する生態学的研究). 平成21年度鹿水技研事報: 103-106.
- 7) 村田圭助, 櫻田清成. 八代海における*Cochlodinium polykrikoides*赤潮の発生環境と対応. 日本プランクトン学会報 2009; 56(1): 52-55.
- 8) 櫻田清成. 八代海における近年のシャトネラ赤潮. 長島町地域人材育成事業 シャトネラ赤潮対策研修会講演要旨集2010.

- 9) 山口峰生, 坂本節子, 櫻田清成, 西広海, 田原義雄. 八代海における有害ラフィド藻 *Chattonella* 属シストの分布と休眠・発芽特性. 日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会講演要旨集 2010, ROMBUN NO. 229.
- 10) 今井一郎. ラフィド藻赤潮の発生機構と予知. 水産研究叢書48, 有害・有毒赤潮の発生と予知・防除 (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, 2000 : 29-70.
- 11) 浜本俊作, 吉松定昭, 山田達夫. 夜間連続調査. 昭和 53 年 6 月発生ホルネリア赤潮に関する調査報告書 1979, 香川県, 33-47.
- 12) 中村泰男, 渡辺信. *Chattonella antiqua* の日周垂直移動—特にその生態的意味について. 国立公害研究所研究報告 1984, **63** : 97-102.
- 13) 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. 南西海区水産研究所研究報告 1990, **23** : 103-109.
- 14) 松本紀男, 吉松定昭. シャットネラ赤潮被害防止技術開発試験 現場海水による増殖能獲得試験, 平成元年度赤潮対策技術開発試験報告書 1989 ; 香川県赤潮研究所, 1-8.
- 15) 今井一郎. 有害有毒赤潮の生物学(5) シャットネラのシストの生理学. 「海洋と生物」生物研究社, 2009 ; **31** : 551-559.
- 16) 平成 4 年度九州西岸域 シャットネラ赤潮広域共同調査報告書, 水産庁, 1993.
- 17) 西広海, 田原義雄, 吉満敏, 徳永成光, 久保満, 中村章彦. 赤潮総合対策調査事業—V (平成 22 年に発生した シャットネラ赤潮被害の検証), 平成 22 年度鹿水技セ事報, 116-121.