

2010年夏季に八代海で発生した *Chattonella antiqua* 赤潮の短期動態 —南部海域における出現特性—

鬼塚 剛^{1†}, 青木一弘¹, 清水 学¹, 松山幸彦², 木元克則², 松尾 斉³,
 末代勇樹³, 西 広海⁴, 田原義雄⁴, 櫻田清成⁵

Short-term dynamics of a *Chattonella antiqua* bloom in the Yatsushiro Sea, Japan, in summer 2010: characteristics of its appearance in the southern area

Goh ONITSUKA^{1†}, Kazuhiro AOKI¹, Manabu SHIMIZU¹, Yukihiro MATSUYAMA², Katsunori KIMOTO²,
 Hitoshi MATSUO³, Yuuki KITADAI³, Hiromi NISHI⁴, Yoshio TAHARA⁴ and Kiyonari SAKURADA⁴

In summer 2010, a harmful bloom of the raphidophycean flagellate *Chattonella antiqua* occurred in the Yatsushiro Sea. The short-term dynamics of the *C. antiqua* bloom and oceanographic conditions were investigated by intensive field observations. The bloom first appeared in the west-central area of the Yatsushiro Sea at the end of June. It then expanded rapidly to include the entire area in early July, and high cell density with short-term fluctuations continued to exist till the end of July. In the southern area, increase in the cell density of *C. antiqua* was synchronized with the timing of low salinity water covering the surface layer, which originated in the fresh water discharge from the Kuma River in the northern area of the Yatsushiro Sea. This synchronization implies that the dense water containing *C. antiqua* was transported by a density-driven current from the north-central area, and/or cell density was enhanced by the stratification associated with the low salinity riverine water. A rapid increase in cell density in the surface layers and the subsequent deepening of dense water below 20 m occurred in the southern area in late July, resulting in enormous damage to cultured finfish.

Key words: *Chattonella antiqua*, harmful bloom, Yatsushiro Sea, Kuma River, low salinity water, density-driven current

はじめに

八代海は九州本土と天草諸島に囲まれた我が国の代表的な閉鎖性海域の一つで、北東から南西にかけて樋島、御所

浦島、獅子島、長島などの島々が連なる複雑な地形を有している (Fig. 1)。比較的水深の浅い北部海域では海面加熱・冷却や八代海に注ぐ唯一の一級河川で全流域面積の5割以上を占める球磨川 (流域面積 1,880 km²) を中心とした河川水の影響を強く受ける一方で、水深の深い南部海域では主に牛深港を通じて侵入する外海水の影響も受けている (滝川ほか, 2004)。八代海では南部海域を中心にブリ等の魚類養殖が盛んに行われているが、近年、有害藻類による赤潮が頻発しており、養殖魚の斃死による漁業被害も報告されている。特に、2008年以降3年連続でラフィド藻 *Chattonella antiqua* の赤潮が大規模に発生し、2009年には約29億円、2010年には約53億円と2年続けて甚大な漁業被害をもたらした (水産庁九州漁業調整事務所, 2010a, 2010b)。八代海における *C. antiqua* 赤潮の発生機構解明ならびに今後の被害軽減対策のためにも、まず本種赤潮の出現特性を把握しておく必要がある。

八代海では1988年に *C. antiqua* による最初の漁業被害が報告された (水産庁九州漁業調整事務所, 2010a)。本種の

2011年2月23日受付, 2011年5月30日受理

¹ 独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所
 National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan

² 独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所
 Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 1551-8 Taira-machi, Nagasaki, Nagasaki 851-2213, Japan

³ 東町漁業協同組合
 Azuma-cho Fishery Cooperative Association, Takanosu, Nagashima-cho, Izumi-gun, Kagoshima 899-1403, Japan

⁴ 鹿児島県水産技術開発センター
 Kagoshima Prefectural Fisheries Technology and Development Center, 160-10 Takadaue, Iwamotoaza, Ibusuki, Kagoshima 891-0315, Japan

⁵ 熊本県水産研究センター
 Kumamoto Prefectural Fisheries Research Center, 2450 2 Naka, Oyano-machi, Kami-amakusa, Kumamoto 869-3603, Japan

† onizuka@affrc.go.jp

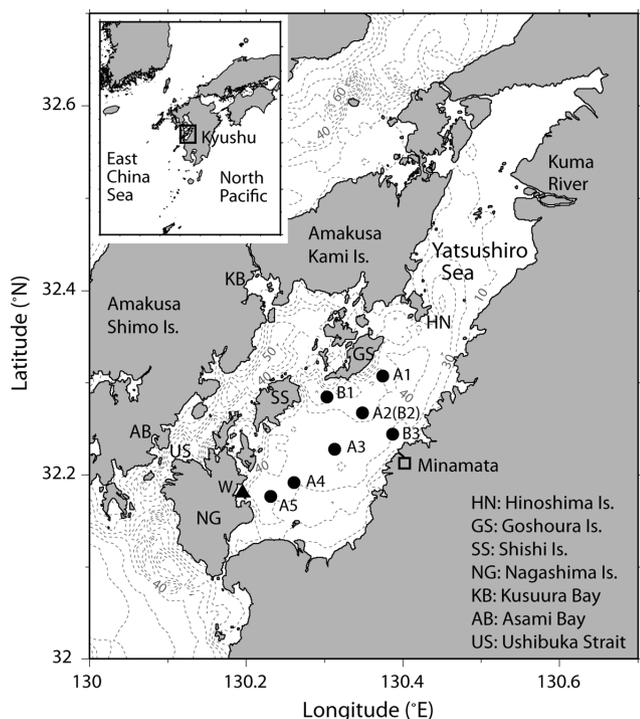


Figure 1. Map of the study area in the Yatsushiro Sea, Japan. Gray dotted lines indicate the bottom topography in 10-m intervals. Solid circles indicate observation stations along and across the Yatsushiro Sea. The solid triangle indicates the observation station W off the east coast of Nagashima Island. The open square indicates the AMcDAS weather station of Minamata.

出現頻度は近年増加傾向にあり、1998年以降はほぼ毎年出現し、度々漁業被害を引き起こしている（水産庁九州漁業調整事務所，2010a）。八代海における *C. antiqua* の出現と環境特性との関係については、現場観測や室内実験からいくつかの知見が報告されている。櫻田ほか（2008）や櫻田（2009）は、1986年以降の気象・海況データを用いた重回帰分析や平年値との比較により、赤潮発生年・非発生年の違いを検討した。これらの既往知見によると、*C. antiqua* 赤潮発生年には非発生年に比べて赤潮発生の約1-2ヶ月前にあたる6-7月の底層水温・表層塩分が高く、表層のDIN（溶存態無機窒素：dissolved inorganic nitrogen）濃度が低い傾向を示した。紫加田ほか（2010）は室内実験と2008年4月-2009年3月で実施された毎月1回の広域観測、樋島北沖での毎週1回の定点観測から *C. antiqua* を含む各種植物プランクトンの出現特性を報告している。彼らは、室内実験で見出された珪藻類と *C. antiqua* の水温に対する増殖特性の違いが現場海域における両者の季節的な動態を反映していることを示した。さらに、紫加田ほか（2011）は、室内実験および紫加田ほか（2010）と同様の現場データから、八代海における *C. antiqua* の増殖制限栄

養塩であるDIN:DIP（溶存態無機リン：dissolved inorganic phosphorus）濃度の挙動が本種ブルームの動態を制御しており、栄養塩環境によって発生時期を絞り込める可能性を指摘している。以上のような *C. antiqua* 赤潮発生年・非発生年の海洋環境の違いや増殖特性を反映した種の遷移、制限栄養塩に対する応答は、月ごとまたは週ごとの定点観測データからみえてきた1週間から数ヶ月程度の時間スケールでの八代海における *C. antiqua* の出現条件を示唆している。その一方で、一旦赤潮が発生した後の分布域の移動・拡大や急激な細胞密度の増減といった数日から1週間程度の時間スケールでの短期的な *C. antiqua* の動態については、これまで八代海ではほとんど報告がなく、その要因についても議論されてこなかった。この理由としては、増殖と枯死といった生物的な要因によるプランクトン増減の時間スケールが数日程度と短い上に、八代海のような内湾域では背景となる流動場等の海洋環境が数日程度で大きく変化するため、赤潮の時空間変動を現場のモニタリング調査で把握するのが困難であったことが挙げられる。

八代海では、定期的に赤潮モニタリング調査を実施している熊本県・鹿児島県に加えて、鹿児島県の東町漁業協同組合を中心に漁業者自らが高頻度のモニタリング調査によって赤潮出現状況をいち早く把握しており、それらの情報はインターネットを通じて準リアルタイムで公開されている（熊本県水産研究センター赤潮情報：<http://www.suiken.pref.kumamoto.jp/kan/akasio.htm>、鹿児島県水産技術開発センター赤潮情報：<http://kagoshima.suigi.jp/akashio/html/index.shtml>）。上記モニタリング調査は、2008年以降、*C. antiqua* 等の有害プランクトンの出現が確認された場合にほぼ毎日行われており、細胞密度の時空間変動を克明に記録し続けている。本稿では、この高頻度モニタリング調査データから明らかとなった2010年夏季の八代海 *C. antiqua* 赤潮の短期動態と同時期の海洋環境との関係について報告する。本研究では、特に、魚類養殖の盛んな八代海南部海域における *C. antiqua* 赤潮の出現特性を中心に検討を行った。

解析資料

赤潮発生状況については、熊本県・鹿児島県によって準リアルタイムで公開されている *C. antiqua*（または *Chattonella* 属）細胞密度（cells ml⁻¹）のうち、2010年は6月下旬-8月上旬のデータを用い、2008・2009年は南部海域で高密度水塊が確認された8月中旬-下旬および7月下旬-8月上旬のものをそれぞれ使用した。公開されているデータには、熊本県や鹿児島県による調査結果のほか、天草市、熊本県海水養殖業組合、鹿児島県の東町漁業協同組合・北さつま漁業協同組合の漁業者によって行われた調査結果も収録されているが、本研究では *C. antiqua* 赤潮発生期間中ほぼ毎日調査を実施していた東町漁業協同組合所属の勇盛丸により取得されたものを主に用い、適宜他機関のデータ

を使用した。各機関で実施された採水は北原式採水器あるいはバンドーン採水器によって表層から5mごとまたは10mごとに行われ（熊本県による調査では2m深でも実施）、試水は固定せず、船上検鏡もしくは陸上で数時間後に検鏡された。

近年、*Chattonella*属に関しては、形態と遺伝情報から *C. antiqua*, *C. marina* および *C. ovata* の分類が再検討された結果、3種を明瞭に区別することは難しく *C. marina* として統合することが提案されている (Demura et al., 2009)。ただし Demura et al. (2009) では *C. marina* 原記載種の生息海域であるインド沿岸の標本との比較検討が行われておらず、新しい分類体系への学術的な評価が必ずしも定まっていない。これまで八代海では *C. antiqua* と *C. marina* の出現が確認されているが、各機関による調査中に観察された細胞のほとんどすべてが *C. antiqua* タイプであった。Demura et al. (2009) の分類体系に従えば、本研究で対象とした赤潮原因種は *Chattonella marina* var. *antiqua* となるが、本論文では混乱を避けるためにあえて従来の分類体系に従い、*C. antiqua* の名称を使用した。

海況情報については、東町漁業協同組合および鹿児島県の調査で取得された5mごとの多項目水質計 (YSI社製 6600EDS, Hydrolab社製 DataSonde5) データのうち水温・塩分・蛍光強度を用いた。栄養塩については、鹿児島県による採水およびオートアナライザー (BL-TEC社製 AAC-4) を用いた分析で得られた DIN および DIP 濃度を使用した。また、気象情報については、気象庁アメダスデータ (水俣市) より1日ごとの日照時間および1時間ごとの風向・風速を日平均したものを使用し、河川流量については、国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所によって公開されているリアルタイム河川情報 (<http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/>) から、1日ごとの球磨川流量速報値を用いた。

結果

八代海における *Chattonella antiqua* の出現状況

2010年は6月3日に八代海中部の御所浦島東沖で1 cells ml⁻¹が初めて確認され、その後、八代海西部の楠浦湾で14 cells ml⁻¹が確認された6月25日に熊本県より赤潮警報が発令された。6月30日には八代海中部の御所浦島周辺や西部の楠浦湾で細胞密度100 cells ml⁻¹以上に達し、7月6-7日には八代海北部湾奥を除くほぼ全域で数十から数百 cells ml⁻¹の赤潮が形成された (Fig. 2)。御所浦島周辺や天草諸島沿岸ではその後も高密度な状態が続き、7月15日には楠浦湾で最高6,615 cells ml⁻¹、天草下島の浅海湾では最高21,100 cells ml⁻¹が確認され、御所浦島西側では7月23日に最高3,200 cells ml⁻¹が確認された。一方、南部の獅子島・長島周辺では7月12日頃に細胞密度は一旦低下し100 cells ml⁻¹以下となったものの、7月16日以降再び増加に転じ、7月20日前後に高密度の着色水塊が出現した (Fig. 2)。

この7月下旬のピーク時には7月22日に長島東部地先で最高2,260 cells ml⁻¹が確認されたのをはじめ、南部海域の広範囲が数百 cells ml⁻¹以上の赤潮に覆われ、この頃に多くの養殖魚が斃死した。その後、7月末から8月初めに細胞密度は急激に減少し、8月5日には八代海全域で細胞密度2 cells ml⁻¹以下となって、赤潮は終息した。2010年の特徴としては、過去の *C. antiqua* 赤潮発生年に比べて発生時期が1ヶ月程度早く、細胞密度の高い状態が広範囲で長期間続いたことが挙げられる。

Chattonella antiqua 細胞密度推移と気象条件・河川流量・海洋環境との関係

八代海中部の Stn A1 では、7月1日の表層塩分低下後の7月5日に1,100 cells ml⁻¹となった後は比較的細胞密度の変動が小さく、表層の水温・塩分の変化にかかわらず7月28日まで数十から数百 cells ml⁻¹の高密度を維持していた (Fig. 3b)。一方、南部 Stn W の細胞密度は表層塩分の低下と同期して増加しており、特に7月前半の2度のピークは塩分低下とタイミングも一致していた (Fig. 3c)。Stn W における7月後半の細胞密度の増加は塩分低下のピークを迎えた7月17日以降も続き、7月22日に最高580 cells ml⁻¹に達した (Fig. 3c)。気象条件については、6月下旬から8月上旬にかけて強弱はあるものの基本的には南寄りの風で、日照時間は梅雨が明け7月17日以降急激に増加していた (Fig. 3a)。河川流量をみると、この期間中に球磨川からの大規模な出水が2度起こっており (Fig. 3a)、その数日後に Stn A1 や W で表層の塩分の低下していたことから、球磨川から流入する河川水は数日程度で八代海南部まで到達すると考えられた。Fig. 3b および Fig. 3c によると、7月10日頃に球磨川流量と対応しない塩分低下があったが、これはこの時期に南風が弱まったことで、八代海北部に分布していた低塩分水が南下したためと推察される。また、表層と20m深の密度差の時間変動は概ね表層塩分の変動で説明でき、測点間で比較すると相対的に表層塩分が低い Stn A1 で密度差が大きかった (Fig. 3d)。Stn W では上下層の密度差が解消され成層が弱まった7月4, 12, 29日に細胞密度の低下がみとめられた (Fig. 3c, d)。

7月下旬に南部海域でみられた *Chattonella antiqua* 細胞密度の増加と鉛直分布の変化

八代海南部に位置する Stn W では、表層に低塩分水が分布し強い成層が形成されていた7月17-19日には最高73 cells ml⁻¹ (7月17日午後の5m深)であったが、7月20日以降も細胞密度は増加を続け7月22日午後を表層で580 cells ml⁻¹となった (Fig. 4)。表層の強い塩分成層は徐々に解消されていったが、表層での高温・低塩分傾向は7月27日頃まで続き、その間は比較的高密度が維持された。ただし、7月21日以降、垂表層にみられた蛍光強度の極大値と *C. antiqua* 高密度層が徐々に深くなっていき、7月23-27日には20m以深において日最高値で73-155 cells ml⁻¹と

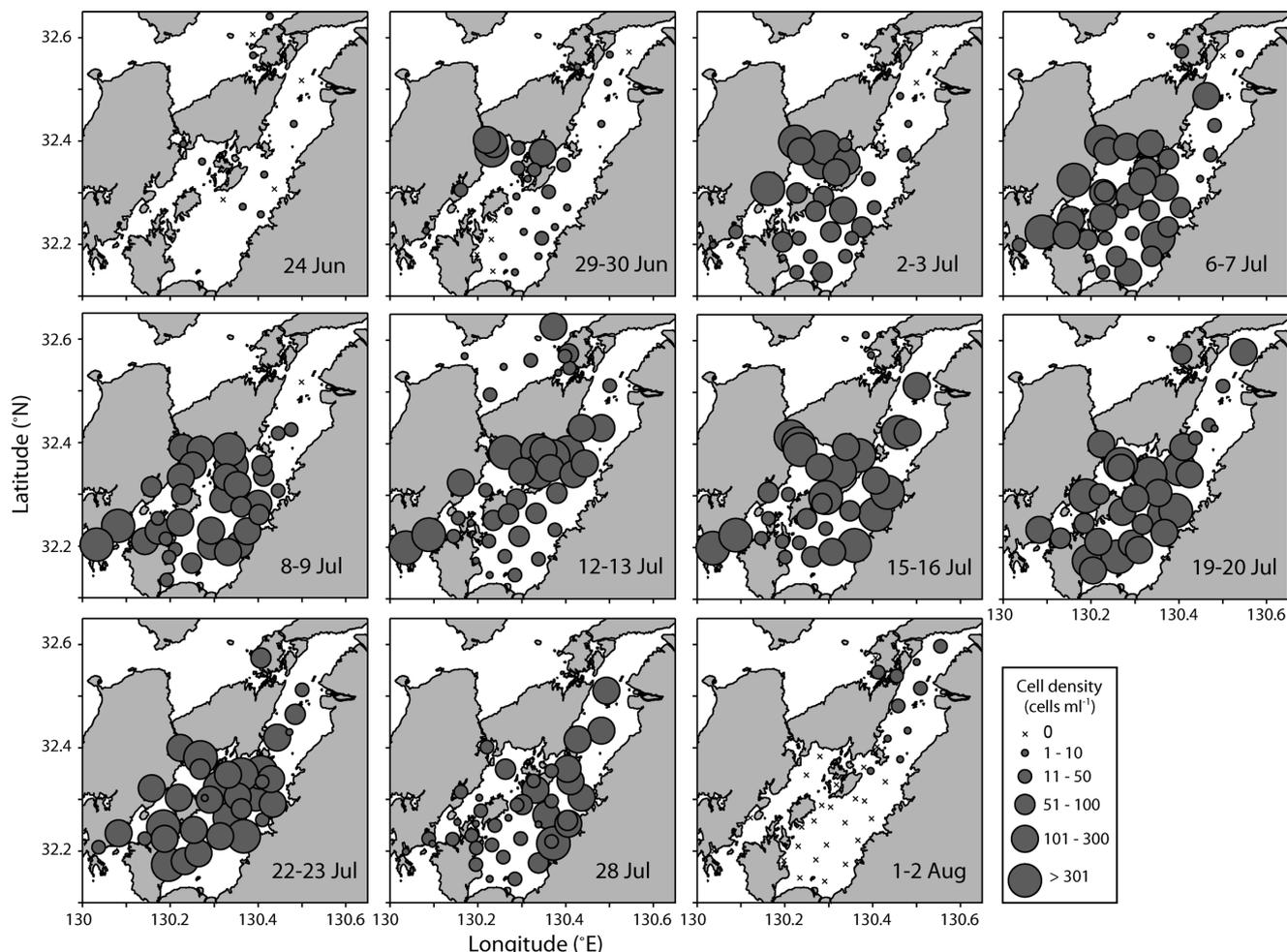


Figure 2. Spatio-temporal variations in the maximum cell density of *Chattonella antiqua* (or *Chattonella* spp.) in a water column in the Yatsushiro Sea in 2010.

いう比較的高い細胞密度が確認された。このような蛍光強度極大値および *C. antiqua* 高密度層の深化は、Stn W だけでなく同時期の八代海南部海域において広範囲で観測された (Fig. 5)。7月28-29日には、成層の崩壊と時期を同じくして細胞密度は全層で急激に減少した (Fig. 4)。Stn. W の栄養塩について7月下旬の *C. antiqua* 高密度化および高密度層深化の前後で鉛直分布を比較すると、7月19日には10m深を境に下層では比較的濃度が高かった (DIN濃度 $>3.20 \mu\text{M}$, DIP濃度 $>0.14 \mu\text{M}$) のに対し、7月28日には10mより深い層でも濃度が表層と同じレベル (DIN濃度 $<1.44 \mu\text{M}$, DIP濃度 $<0.02 \mu\text{M}$) にまで低下していた (Fig. 6)。

考察

八代海南部海域における *Chattonella antiqua* 赤潮の出現特性

八代海南部海域での *C. antiqua* 細胞密度の増減は表層塩分の変動と同期していた (Fig. 3c)。また、八代海南部海域

における細胞密度の増加と表層塩分低下のタイミングの一致は2010年に限らず、2008年および2009年でも確認された (Fig. 7)。このような特徴は八代海中部ではみられなかったことから、*C. antiqua* 赤潮の南部海域固有の出現特性といえる。以下では、この要因として考えられる、球磨川からの淡水流入によって駆動された密度流による中北部海域からの高密度水塊の移入、および河川由来の栄養塩流入や成層構造形成に伴う南部海域自体での高密度化、という2つの可能性について検討する。

これまでの生物学的研究によると、*C. antiqua* は春から夏にかけて底層水温の上昇 ($>20^\circ\text{C}$) とともにシストから発芽し海中を浮遊する栄養細胞となり、その後栄養細胞にとって好適な環境になると増殖し赤潮を形成することが知られている (例えば、Imai and Itoh, 1987; Imai et al., 1991)。櫻田 (2009) は八代海におけるシストや栄養細胞の分布調査から、八代海における *C. antiqua* の seed population はシストであること、発芽可能なシストの分布量は春季に八代海

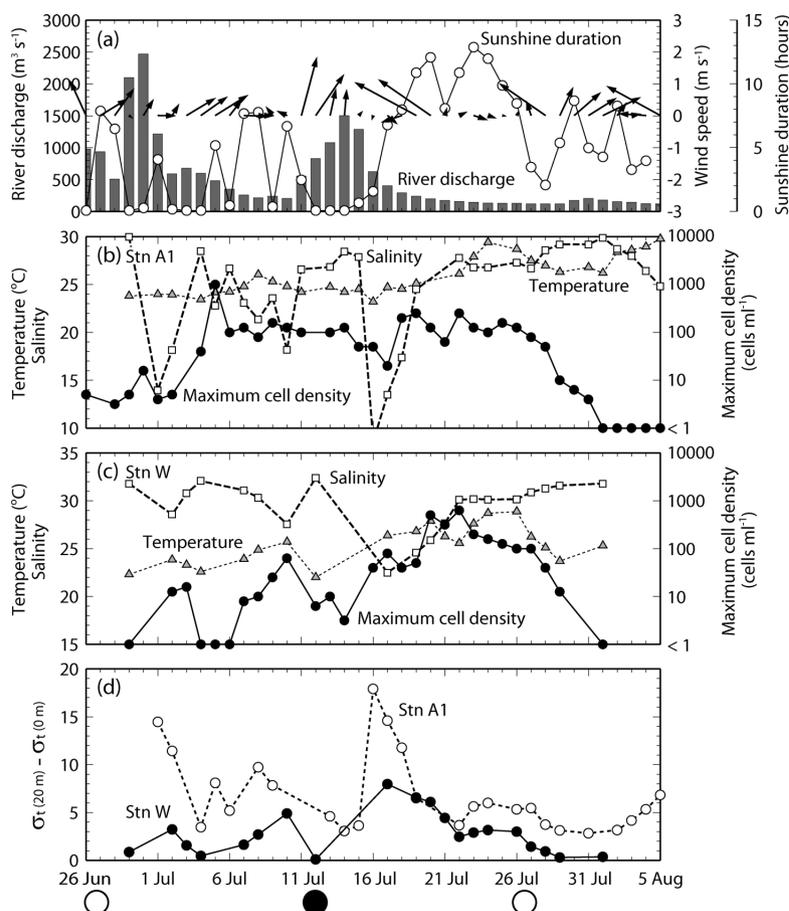


Figure 3. Temporal changes in (a) sunshine duration (open circle) and daily wind vectors at Minamata, water discharge from the Kuma River (gray bar); (b), (c) sea surface temperature (gray triangle), salinity (open square), and maximum cell density of *Chattonella antiqua* (closed circle) at both stations A1 and W; and (d) differences in densities (σ_t) between the surface and at a depth of 20 m at stations A1 (open circle) and W (closed circle). Open circles along the time axis indicate full moon, and closed circle indicates new moon. Stations A1 and W with frequent observations were selected as representatives for the central and southern areas of the Yatsushiro Sea.

北部海域で多いこと、栄養細胞が初認された海域から初期発生海域は八代海北部であることを報告している。金・本城 (2005) も同様に、*Chattonella* 属の赤潮初期発生海域は球磨川河川水の影響を受け塩分が比較的低い北部海域あるいは低塩分海域と南部高塩分海域の境界域付近と述べている。また、ここでは示さないが熊本県・鹿児島県が公開している赤潮情報によると、2010年同様に *C. antiqua* 赤潮が発生した2008・2009年には、細胞密度の高い海域が数日から1週間程度で中北部から南部に移っていく様子が確認された。このうち2009年の赤潮分布域の推移については、球磨川から流入した河川水や風によって駆動された残差流による赤潮水塊の移流で説明可能であるという数値シミュレーション結果も得られている (青木ほか、未発表)。Fig. 2によると、2010年は北から南への高密度分布域の移動が明瞭ではないが、従来通りの初期発生海域だったとすれば、球磨川からの淡水流入によって駆動された密度流によって

栄養細胞が南部海域に輸送された可能性は十分に考えられる。Fig. 3bおよびFig 3cにおいて、Stn A1ではStn Wよりも細胞密度が高い傾向にあることや、Stn Wで塩分低下と細胞密度の増加にタイムラグがほとんどないこと (7月前半のみ) は、2010年も2008・2009年と同様に中北部海域から高密度水塊が移流されたと解釈して矛盾しない結果となっている。

一般的に、河川は沿岸海域に淡水だけでなく多量の栄養塩も供給する。八代海においても表層の栄養塩濃度は河川水の影響を受ける北部湾奥部で高いことが報告されている (滝川ほか、2004)。このような河川由来の栄養塩が南部海域まで到達し、低密度であった *C. antiqua* が栄養塩を消費し増殖することで、結果としてFig. 3cにみられたような表層塩分と細胞密度の同期が起こった可能性がある。そこで南部海域における塩分と栄養塩濃度の関係を調べたところ、DIN・DIPともにむしろ低塩分側で濃度が低い傾向を示

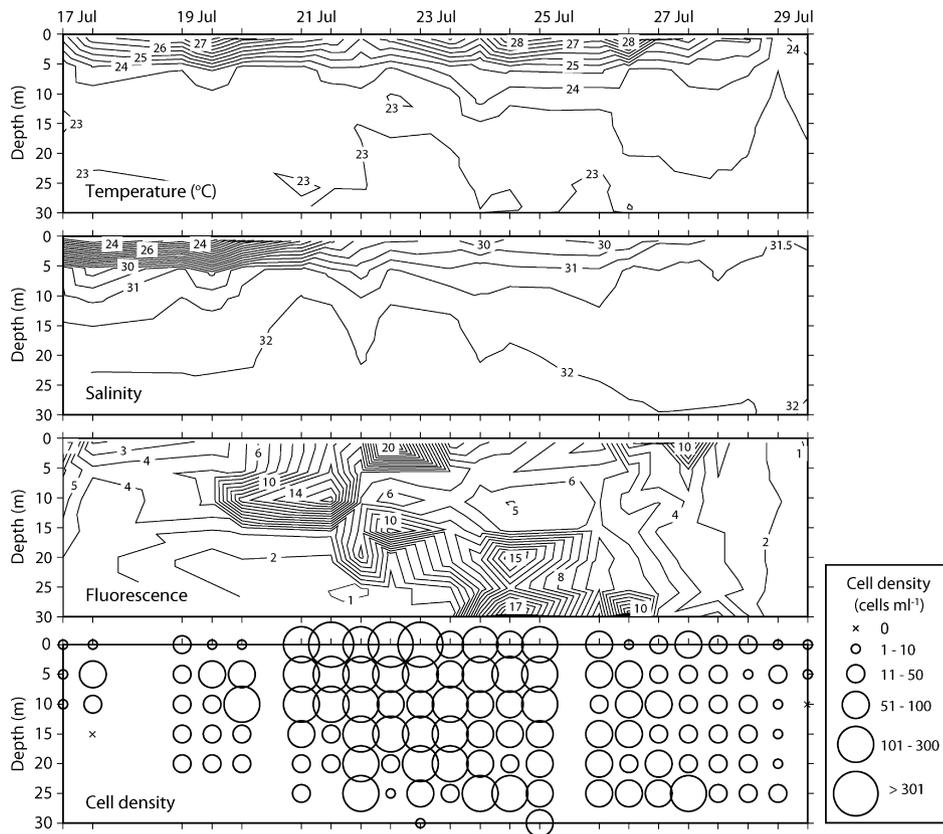


Figure 4. Vertical distributions of water temperature, salinity, fluorescence, and the cell density of *Chattonella antiqua* at station W during 17–29 July 2010, when the highest cell density was detected in the southern area of the Yatsushiro Sea. During this period, the observations were made twice a day in the morning and afternoon, except for 18, 20, and 25 July.

した (Fig. 8). Nakamura et al. (1988) によると *C. antiqua* の栄養塩に対する半飽和定数は DIN で $1.0 \mu\text{M}$, DIP で $0.11 \mu\text{M}$ とされている. Fig. 8 によると, 塩分 30 以下の場合, DIN・DIP 濃度ともに半飽和定数を下回る割合が高く, 八代海南部海域において低塩分水はむしろ貧栄養であった. この結果は, 低塩分水が南部に到達したときにはすでに河川由来の栄養塩は消費された後であったことを示唆している. したがって, 河川由来の栄養塩が南部海域まで到達し *C. antiqua* が増殖したというよりも, 中北部海域で栄養塩を消費し増殖した後に南部海域に移流された, もしくは中北部海域から移流される途中で栄養塩を消費し増殖したと考えたほうが自然であろう.

一方, たとえ低塩分水が貧栄養であったとしても, 低塩分流入で生じる密度成層が間接的に *C. antiqua* 高密度化に関与している可能性がある. Fig. 3c と Fig. 3d を比較すると, 南部海域では成層強度と *C. antiqua* 細胞密度の増減がよく一致している. 一般に, 渦鞭毛藻を中心とする多くの有害藻類において密度成層が形成されると垂表層で高密度化することが知られている (Gentien et al., 2005). ラフィド藻である *C. antiqua* も多くの有害渦鞭毛藻と同様に鉛直

移動することが知られており (浜本ほか, 1979; Watanabe et al., 1991; Watanabe et al., 1995; 中野ほか, 2006), 密度成層し水柱が安定することで, 鉛直移動によって *C. antiqua* 自身に条件のよい深度に集積し高密度化した可能性も考えられる. 実際に, 既往の研究において *Chattonella* 属の高密度化の要因として水柱の安定化や鉛直移動による集積, 下層の栄養塩を取り込んでの増殖の可能性が指摘されている (例えば, Watanabe et al., 1995; 吉松, 1992; 紫加田ほか, 2011). そのような観点で今回の観測結果をみると, Stn W における 7 月後半の細胞密度増加については, 低塩分水の流入に伴う成層構造の形成が影響していた可能性がある. Fig. 3c や Fig. 7 によると, 7 月 12 日には南部海域で表層塩分が 32 程度まで上がっているが, この時期は大潮であったことに加えて, 南寄りのやや強い風が連吹したことで鉛直混合したことが示唆される. そのため, 7 月中旬の細胞密度の減少はこの鉛直混合による希釈効果とも解釈できる. その後, 7 月 17 日頃に低塩分水の流入によって成層構造が形成されたことで, 希釈効果によって低密度となっていた *C. antiqua* が鉛直移動し再び表層-垂表層に高密度層を形成した可能性がある. 一方で, Stn W における 7 月前

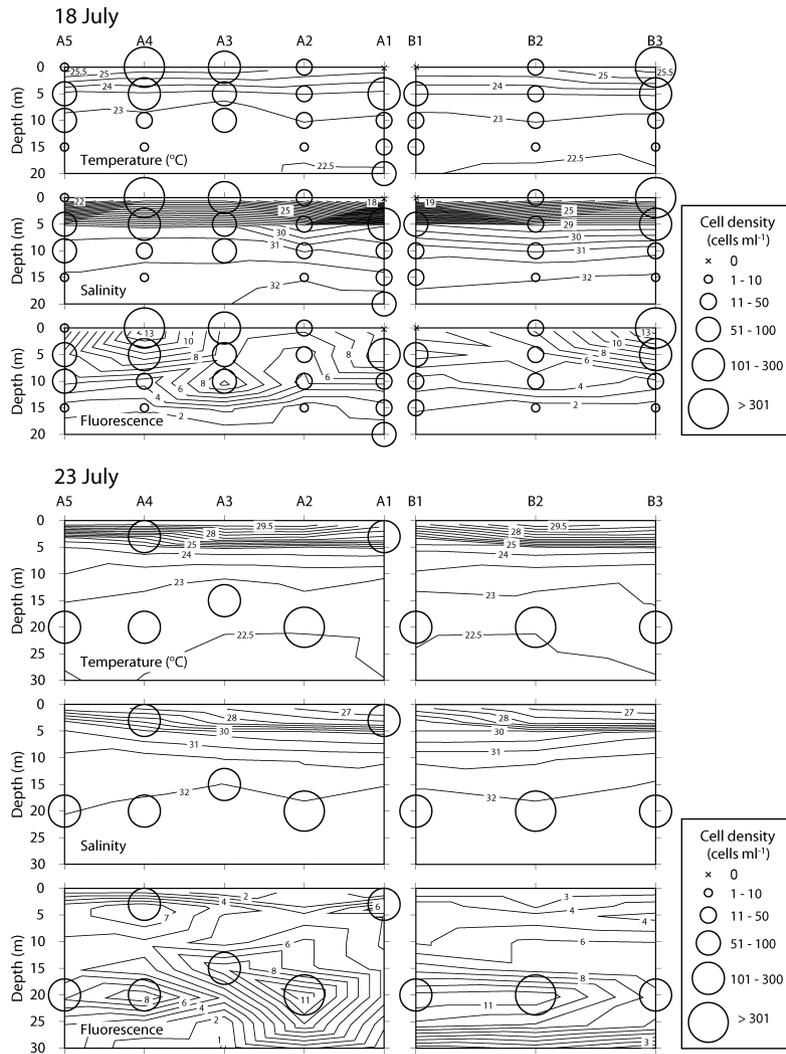


Figure 5. Vertical sections of water temperature, salinity, fluorescence, and the cell density of *Chattonella antiqua* along the lines of A and B on 18 and 23 July 2010.

半の二度のピーク（7月3日と7月10日）については、その直前の6月29日や7月5日には *C. antiqua* の栄養細胞は確認されておらず、その場での増殖や鉛直移動による集積だけで細胞密度の変動を説明するのは困難と考えられ、やはり水塊の移入を示唆する結果となっている。

上記検討結果から、八代海南部海域における *C. antiqua* 細胞密度の増減と表層塩分の同期の要因として、中北部海域からの高密度水塊の移入や成層構造形成に伴う南部海域自体での高密度化の可能性が推察された。いずれにしても、八代海南部海域では中北部海域で栄養細胞が出現した後に球磨川由来の低塩分水が流入するタイミングで赤潮となる、というシナリオが想定されるため、出現初期の細胞密度分布ならびに球磨川の出水やその後の低塩分水の挙動を注視していく必要がある。

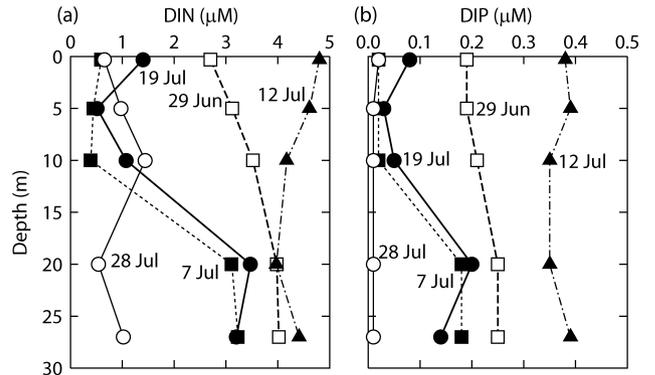


Figure 6. Vertical profiles of (a) dissolved inorganic nitrogen (DIN) and (b) dissolved inorganic phosphorus (DIP) at station W (open square: 29 June, closed square: 7 July, solid triangle: 12 July, solid circle: 19 July, open circle: 28 July).

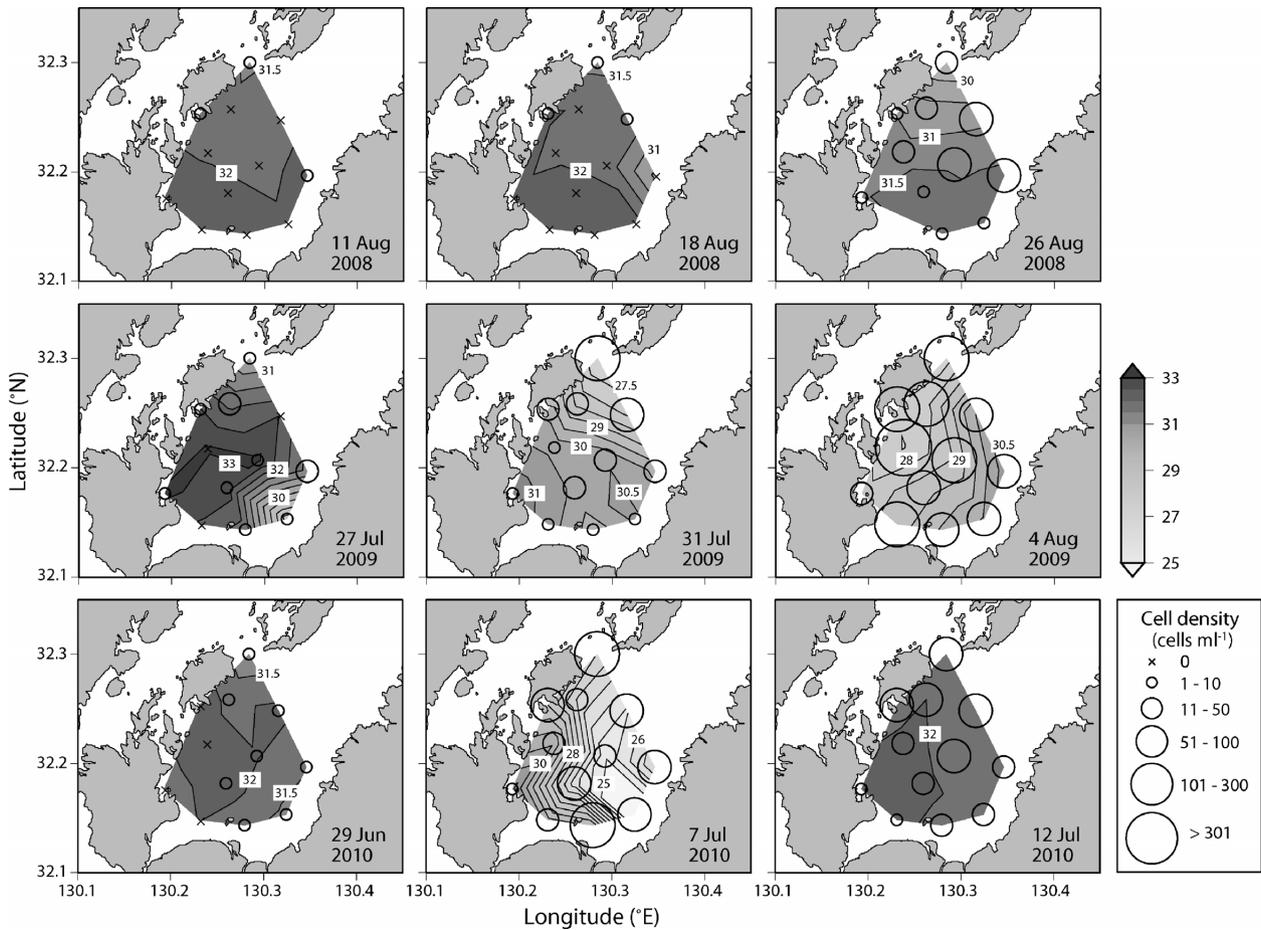


Figure 7. Horizontal distributions of sea surface salinity and the maximum cell density of *Chattonella antiqua* in the southern area of the Yatsushiro Sea in 2008, 2009, and 2010.

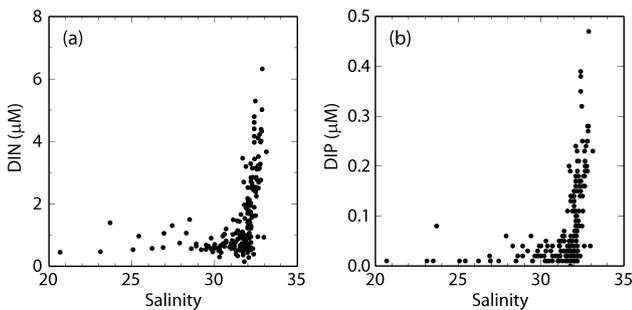


Figure 8. Relationships between (a) salinity and dissolved inorganic nitrogen (DIN) and (b) salinity and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in the southern area of the Yatsushiro Sea in summer 2010. The data were collected by the Kagoshima Prefectural Fisheries Technology and Development Center on 29 June, 7, 12, 19, and 28 July.

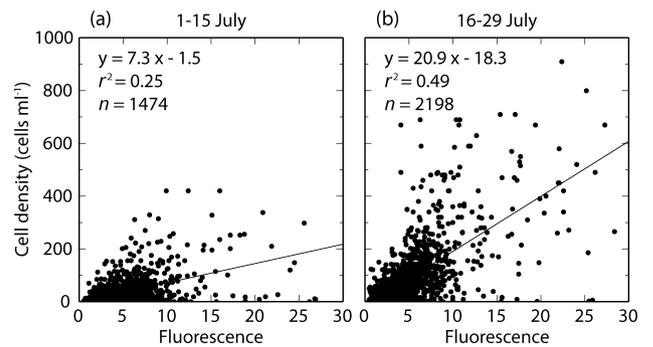


Figure 9. Relationships between fluorescence and the cell density of *Chattonella antiqua* during (a) 1–15 July and (b) 16–29 July. The data were collected by the Azuma-cho Fishery Cooperative Association mainly in the southern area of the Yatsushiro Sea.

7月下旬に南部海域でみられた*Chattonella antiqua*高密度化と高密度層深化の要因

Stn Wにおける7月後半の細胞密度の増加は、表層塩分低下と位相が一致していた7月前半と異なり、表層塩分が最

低となった7月17日以降も続いていた (Figs. 3c, 4). Fig. 6によると、7月19日から28日にかけて10m以深で栄養塩濃度が減少しており、鉛直移動できる*C. antiqua*が下層の栄養塩を消費し、高密度化したことが示唆される。しかし

ながら、7月19日とほぼ同じ鉛直分布である7月7日の後には、7月後半のような細胞密度の増加はみられなかった (Figs. 3c, 6). この7月前半・後半の違いについては気象・海洋環境の状況からいくつかの要因が考えられる。

まず、この期間中に起こった光環境の変化が挙げられる。八代海周辺では、7月前半に少なかった日照時間が梅雨明けする7月17日を境に急激に増加した (Fig. 3a). *C. antiqua* の増殖に及ぼす光強度の影響についてはほかの八代海産の珪藻5種とともに室内実験で検討されており、増殖速度に対する光強度の半飽和定数および閾値はいずれも *C. antiqua* のものが最大であったことが報告されている (紫加田ほか, 2010). そのため、他の植物プランクトンよりも増殖に際して比較的強い光強度を必要とする *C. antiqua* にとって、日照時間が増加した7月後半のほうが好適な増殖環境だったと推察される。次に、前述した成層構造が関係していた可能性がある。7月前半の場合、7月9日に塩分低下のピークを迎えるが、その後7月12日頃に成層が崩れ表層塩分は32.4まで高くなっていた (Fig. 3c, d). 一方、7月後半には、塩分は7月17日に最低となった後、上昇していくものの、7月28日頃まで密度成層は維持されていた。前述したように高密度化するには水柱が安定している成層時のほうが有利に働くと考えられ、7月前半・後半の成層構造の違いが *C. antiqua* の増殖に影響を及ぼしていた可能性がある。

また、珪藻等の競合種の有無も重要な要因であったと考えられる。7月前半・後半で蛍光強度と細胞密度の関係を比較すると両者で明確な違いがあった (Fig. 9). 7月前半には蛍光強度に対する細胞密度の値は低く、両者の相関も弱かったのに比べて、7月後半は蛍光強度に対する細胞密度の値は高くなり、相関も強くなった。この結果は7月前半には海水中に *C. antiqua* 以外の植物プランクトンが多く含まれていたことを示唆している。実際に鹿児島県による調査では、7月前半には *Chaetoceros* 等の珪藻類が含まれていたのに対して、7月後半には珪藻類はほとんど姿を消し、ほぼ *C. antiqua* のみが卓越していたことが確認されている。珪藻類の動態については本研究で検討しておらず *C. antiqua* との関係も不明であるが、競合種が少なかったことが *C. antiqua* の増殖環境として好条件であったことは間違いない。

7月後半の南部海域にみられたもう一つの特徴的な現象として *C. antiqua* 高密度層の深化が挙げられる。7月20日頃まで最高細胞密度は10m以浅で観測されていたが、7月23日以降は20m以深で高密度の *C. antiqua* が観測された (Figs. 4, 5). 現在、*C. antiqua* 赤潮対策として下層に養殖魚を逃がす生簀の沈下が実施されているが、今回観測された高密度層の深化は、生簀沈下でも場所によっては被害を防げなかったことを示唆している。増殖に際して比較的強い光強度を要求する本種にとって、日中に水深10m以深まで分布することは生長にとって不利であるため、この高密

度層の深化には何らかの外的な環境変化が影響したことが推察される。Stn Wにおける *C. antiqua* 高密度層は7月21日から7月25日頃にかけて徐々に深くなっていたが、この間も成層は維持されており (Fig. 4), 鉛直混合や局地的な風による沈み込み等の物理的な要因による現象とは考えにくい。一方、Fig. 6によると、7月28日には全層でDIP濃度が0.02 μM 以下と半飽和定数を大幅に下回っていたことから、この高密度層の深化には栄養塩環境の悪化による生物学的な要因が関与していた可能性がある。今井ほか (1993) は広島湾において *C. antiqua* 栄養細胞の鉛直分布とシスト分布を調査し、赤潮末期に下層でのシスト形成小型細胞や海底泥中シスト密度が増加したことを報告している。また、播磨灘でもセディメントトラップを用いた調査で *C. antiqua* の栄養細胞がピークを迎えて衰退し始めた後に、シストが大量に捕集されている (Nakamura et al., 1991). 今回の調査でシストの形成は確認されていないが、7月下旬にみられた高密度層の深化は、赤潮末期の栄養塩環境悪化に伴うシスト形成の前駆現象であった可能性がある。

まとめと今後の課題

本研究では、八代海に面する地方自治体や漁業者らによって行われたモニタリングのデータを統合し、2010年夏季に八代海で発生した *C. antiqua* 赤潮の短期動態と同時期の海洋環境との関係について検討を行った。その結果、八代海南部海域における *C. antiqua* 細胞密度増加と表層塩分低下の同期が見出され、7月下旬には *C. antiqua* 細胞密度急増後に20m以深への高密度層の深化が確認された。 *C. antiqua* 細胞密度増加と表層塩分低下の同期については、北部に位置する球磨川からの河川水流入の影響による八代海南部海域固有の出現特性と考えられた。また、20m以深での *C. antiqua* 高密度層についてはこれまで香川県引田湾での報告例しかなく (香川県, 1988), 海洋環境データとともに分布深度の経日変化を記録した今回の観測結果は *C. antiqua* の鉛直分布に関する新たな知見となった。

2010年の *C. antiqua* 赤潮は、過去の赤潮発生年に比べて発生時期が早く、細胞密度の高い状態が広範囲で長期間続いたことで漁業被害を大きくした。これらの特徴は、同じく *C. antiqua* 赤潮が発生した2008年や2009年とは異なるが、なぜそのような違いが生じたかについて明らかにするためには、今後、他の年や栄養細胞出現前のデータも含めたより包括的な解析を行うとともに、*C. antiqua* の動態に関わる生物学的あるいは物理的な要因について、本研究で検討が不十分であった部分をより詳細に調べていく必要がある。

Chattonella 赤潮が発生する際には、競合種となる珪藻類が少ないことが経験的に知られている (例えば、今井, 2010; 紫加田ほか, 2011). 今回の調査結果でも、珪藻類が存在した7月前半に比べ、ほぼ *C. antiqua* のみとなった7

月後半に急激な細胞密度の増加がみられ, 既往知見を支持する結果となった (Figs. 3c, 4, 9). 八代海における珪藻類の動態には水温, 塩分や光環境が影響を及ぼすことが報告されている (紫加田ほか, 2010). 今後, *C. antiqua* だけでなく珪藻類についてもモニタリングを続け, その動態を環境条件と照らし合わせて検討していくことが *C. antiqua* の動態解明に繋がるかもしれない. また, 前述したように, 八代海における *C. antiqua* の seed population はシストであるとされていることから (櫻田, 2009), シストの発芽が赤潮発生の初期過程に影響している可能性がある. シスト密度と赤潮発生の関係については, これまで瀬戸内海の周防灘や播磨灘において検討されており, 発芽直前のシスト密度とその後の細胞密度に正の相関が認められたという報告もあるが (大山ほか, 2006), 逆に両者の間に相関はなく発芽後の環境条件が重要であるとの指摘もある (板倉ほか, 1991; 今井, 2000). 今後は, これまで初期発生海域とみられていた中北部海域だけでなく, シスト形成の前駆現象の可能性のある高密度層の深化が観測された南部海域においても, 海洋環境と合わせてシストの動態を監視し, *C. antiqua* 赤潮の発生とどのように関わっているか検討していく必要があるだろう.

C. antiqua と *C. marina* による赤潮は, 1970–1980年代に瀬戸内海で大規模に発生し, 甚大な漁業被害をもたらした. そのため, これまで両種に関する研究は精力的に行われ, 増殖生理やシスト形成, 生活様式等の生理・生態学的な知見は数多く得られている (例えば, 福代ほか, 1997; 今井, 2000). 八代海でも水温・塩分・光強度に対する *C. antiqua* の増殖応答特性が調べられており, 増殖可能な最低水温 (20°C) が高いことなど他海域株との若干の違いが報告されている (紫加田ほか, 2010). 一方, 本研究でも明らかとなったように, 海域で赤潮化するかどうかや赤潮の時空間変動については生物的な要因とともに海域特有の物理的な要因にも左右されるため, 流動場を含めた物理的な海域特性を把握しておく必要がある. 実際, 他海域に目を向けると, 湾の海水交換 (例えば, Uchida et al., 1998; Yamamoto et al., 2002) や, 海域で卓越する残差流による移流 (例えば, 宮原ほか, 2005; 宮村ほか, 2005) 等の物理的な要因による赤潮の消長や分布変動に関する報告がなされている. 今回研究対象とした八代海では物理環境特性に関する研究は少なく, その知見は十分とは言い難い. これまで蓄積された *C. antiqua* の生理・生態に関する既往知見を活かすためにも, 今後は現場調査や数値シミュレーションを組み合わせて, 赤潮発生時期である夏季の物理環境特性, 特に球磨川由来の低塩分水の挙動や成層構造の変動要因を明らかにしていく必要がある.

謝 辞

現地調査において多大なご協力を頂いた勇盛丸の長元真一

船長をはじめとする東町漁業協同組合の漁業者の方々, ならびに鹿児島県水産技術開発センター・熊本県水産研究センター職員の方々に心より御礼申し上げる. 本研究は, 平成22年度独立行政法人水産総合研究センター運営費交付金プロジェクト研究「有害ラフィド藻シャットネラの生理・生態学的特性の解明と出現動態予測技術の開発に関する研究」, 平成20–22年度水産庁委託事業「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)」の一環として行われた.

引用文献

- Demura, M., M.-H. Noël, F. Kasai, M. M. Watanabe and M. Kawachi (2009) Taxonomic revision of *Chattonella antiqua*, *C. marina* and *C. ovata* (Raphidophyceae) based on their morphological characteristics and genetic diversity. *Phycologia*, **48**, 518–535.
- 福代康夫・松岡数充・今井一郎・高橋正征・渡辺正孝 (1997) 赤潮生物の生物学的特徴. 「赤潮の科学」第二版, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, 東京, 43–76.
- Gentien, P., P. Donaghay, H. Yamazaki, R. Raine, B. Reguera and T. Osborn (2005) Harmful algal blooms in stratified environments. *Oceanography*, **18**, 172–183.
- 浜本俊作・吉松定昭・山田達夫 (1979) 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」, 香川県, 高松, 33–47.
- 今井一郎 (2000) ラフィド藻赤潮の発生機構と予知. 「有害・有毒赤潮の発生と予知・防除」水産研究叢書 48, 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, 29–70.
- 今井一郎 (2010) 有害有毒赤潮の生物学 (9) シャットネラ赤潮の発生機構. *海洋と生物*, **33**, 58–67.
- Imai, I., S. Itakura and K. Itoh (1991) Life cycle strategies of the red tide causing flagellates *Chattonella* (Raphidophyceae) in the Seto Inland Sea. *Mar. Poll. Bull.*, **23**, 165–170.
- 今井一郎・板倉 茂・大内 晟 (1993) 北部広島湾における *Chattonella* 赤潮の発生と海底泥中のシストの挙動. *日本水産学会誌*, **59**, 1–6.
- Imai, I. and K. Itoh (1987) Annual life cycle of *Chattonella* spp., causative flagellates of noxious red tides in the Seto Inland Sea of Japan. *Mar. Biol.*, **94**, 287–292.
- 板倉 茂・今井一郎・伊藤克彦 (1991) 東部瀬戸内海域の底泥中における有害赤潮鞭毛藻 *Chattonella* (Raphidophyceae) のシスト分布. *日本水産学会誌*, **57**, 1079–1088.
- 香川県 (1988) 昭和62年播磨灘に発生したシャットネラ赤潮の概要と対応. 173 pp.
- 金 大一・本城凡夫 (2005) 八代海における *Cochlodinium polykrikoides* の赤潮. *月刊海洋*, **37**, 40–47.
- 宮原一隆・氏 良介・山田東也・松井芳房・西川哲也・鬼塚 剛 (2005) 2003年9月に日本海山陰沿岸で発生した *Cochlodinium polykrikoides* Margalef 赤潮. *日本プランクトン学会報*, **52**, 11–18.
- 宮村和良・三ヶ尻孝文・金澤 健 (2005) 2003年大分県臼杵湾沿岸に発生した有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の出現特性. *水産海洋研究*, **69**, 91–98.
- Nakamura, Y., J. Takashima and M. Watanabe (1988) 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. Japan*, **44**,

- 113–124.
- Nakamura, Y. and T. Umemori (1991) Encystment of the red tide flagellate *Chattonella antiqua* (Raphidophyceae): cyst yield in batch cultures and cyst flux in the field. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **78**, 273–284.
- 中野拓治・山田耕士・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.
- 大山憲一・松岡 聡・本田恵二・吉松定昭 (2006) 播磨灘南西部における *Chattonella* (Raphidophyceae) のシスト密度と赤潮発生との関係. *香川県赤潮研究所研究報告*, **5**, 11–21.
- 櫻田清成 (2009) 2009年夏季のシャットネラ赤潮. 第8回水産業振興シンポジウム講演要旨集, 8–13.
- 櫻田清成・山形 卓・小山長久・糸山力生 (2008) 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.
- 紫加田知幸・櫻田清成・城本祐助・生地 暢・吉田 誠・大和田絃一 (2010) 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*, **76**, 34–45.
- 紫加田知幸・櫻田清成・城本祐助・小山長久・生地 暢・吉田 誠・大和田絃一 (2011) 八代海におけるラフィド藻 *Chattonella antiqua* の増殖および栄養塩との関係. *日本水産学会誌*, **77**, 40–52.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2010a) 「平成21年九州海域の赤潮」. 95 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2010b) 「平成22年赤潮・貝毒部会資料」. 平成22年度独立行政法人水産総合研究センター水産業関係研究開発推進会議 漁場環境保全関係研究開発推進特別部会 赤潮・貝毒部会, 広島, 6 pp.
- 滝川 清・田中健路・森 英次・渡辺 枢・外村隆臣・青山千春 (2004) 八代海の環境変動の要因分析に関する研究. *海岸工学論文集*, **51**, 916–920.
- Uchida, T., S. Toda, O. Nakamura, K. Abo, Y. Matsuyama and T. Honjo (1998) Initial site of *Gymnodinium mikimotoi* blooms in relation to the seawater exchange rate in Gokasho Bay. *Plankton Biol. Ecol.*, **45**, 129–137.
- Watanabe, M., K. Kohata and T. Kimura (1991) Diel vertical migration and nocturnal uptake of nutrients by *Chattonella antiqua* under stable stratification. *Limnol. Oceanogr.*, **36**, 593–602.
- Watanabe, M., K. Kohata, T. Kimura, T. Takamatsu, S. Yamaguchi and T. Ioriya (1995) Generation of a *Chattonella antiqua* bloom by imposing a shallow nutricline in a mesocosm. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 1447–1460.
- Yamamoto, T., T. Hashimoto, K. Tarutani and Y. Kotani (2002) Effect of winds, tides and river water runoff on the formation and disappearance of the *Alexandrium tamarense* bloom in Hiroshima Bay, Japan. *Harmful Algae*, **1**, 301–312.
- 吉松定昭 (1992) 播磨灘におけるシャットネラの増殖動態. *月刊海洋*, **24**, 25–32.