

諫早湾および北部有明海における *Chattonella* 赤潮発生予察の試み

中嶋雅孝*・横山佳裕**・本城凡夫***

1. はじめに

日本で赤潮を形成する *Chattonella* 属は *Chattonella antiqua*, *C. marina*, *C. ovata*, *C. verruculosa* である。有明海では本属の赤潮は *C. antiqua* と *C. marina* が複合して発生する。瀬戸内海でも被害の大半はこれら2種の赤潮によってもたらされてきた。そこで、本論文では両種の赤潮を含めた *Chattonella* 赤潮として記述することにする。わが国において *Chattonella* による赤潮は1962年、広島湾で最初に記録された。1972年、瀬戸内海の播磨灘と紀伊水道で発生した *Chattonella* 赤潮による被害は未曾有の72億円に達し、これから順調な経営の伸びを期待していたハマチ養殖業に大きな打撃を与えた。その後も1977年、78年および87年に発生した *Chattonella* 赤潮によりそれぞれ20億円以上の被害が断続的に発生した。しかし、1988年以降、瀬戸内海における赤潮の発生は激減した。この原因として、Honjo (1994) は窒素とリンの規制に関する1973年の臨時措置法と1977年からの瀬戸内海環境保全特別措置法の制定により栄養塩類の濃度が次第に減少したためであろうと推測している¹⁾。

最も甚大な被害を受けてきた播磨灘の *Chattonella* 赤潮に関する西風指数・黒潮流路による予察、瀬戸内海20m層塩分イソプレットパターン、明石の水温・塩分による判別、紀伊水道50m層水温の水平パターンによる判別、鉛直安定度・底層水温による判別といった個々においても発生予察確率の高い手法が開発されてきた。さらに、個々の手法による発生・非発生のスコアを出し、それらを合計したスコアで発

生の有無を判定することによってより一層高い確率の予察結果が得られた²⁾。

一方、有明海では1984年に初めて *Chattonella* 赤潮が記録されその後断続的に発生を繰り返している³⁾。有明海の中でも諫早湾や有明海湾奥において *Chattonella* 赤潮は多く発生し、漁業被害をもたらしている。そのため、北部有明海における *Chattonella* 赤潮発生原因の解明と発生予察技術の開発が急がれている⁴⁾。

本研究では、諫早湾における自動連続観測結果他、有明海北部の観測結果も用いて諫早湾を含む北部有明海における *Chattonella* 赤潮の発生予察を試みた。

2. 研究の方法

Chattonella 赤潮の発生環境の検討にあたっては、農林水産省九州農政局が諫早湾干拓事業環境モニタリングの一環として実施している諫早湾内の2002年～2007年の植物プランクトン調査結果^{5～10)} および2008年の長崎県南水産業普及指導センターおよび長崎県総合水産試験場による赤潮発生状況速



図1 水質の連続観測地点

* (財)九州環境管理協会 環境部 環境技術課長, **同研究員

***九州大学名誉教授・香川大学瀬戸内圏研究センター長

報^{11, 12)}, 2002年～2008年の自動昇降装置による諫早湾内の水質連続観測結果^{13～18)}を用いた。解析の対象とした地点は、環境モニタリング地点のうち諫早湾中部に位置するB3地点(図1)とし、対象期間は7月および8月とした。

植物プランクトン調査は、おおよそ2週間に1回の頻度で実施されており、バンドーン型採水器により海面下0.5mの位置から採取した試料とその一部をホルマリンで固定した試料を実験室に持ち帰った後、海洋観測指針¹⁹⁾の方法に従い光学顕微鏡を用いて、細胞が高密度であるときは希釈して、低密度であるときは濃縮して種類の同定および計数を行った。一方、水温、塩分、蛍光強度に関する水質は2002年6月以降、自動昇降装置に取り付けられた多項目水質計(クロロテック:アレック電子社製)を用い、海面から海底までの0.5m毎に水温、塩分、蛍光強度が毎正時1回の頻度で測定された。なお、蛍光強度は、2002年～2004年にB3地点と同様に自動昇降装置が設置されているB4地点(図1)において実施されたクロロフィルa(Chl-a)の採水分析結果との関係よりChl-a濃度に換算した。換算式は、 $Chl-a = 3.8 \times \text{蛍光強度} - 0.86$ ($R^2 = 0.75$, $n = 27$)である²⁰⁾。

3. 結果

3.1 諫早湾における *Chattonella* 赤潮の発生状況と増殖速度

図2に2002年から2007年の7月から8月にかけてB3における表層(海面下0.5m)でのプランクトン細胞数の経時変化を示す。なお、2008年の植物プランクトン調査結果は整理中のため今回使用しなかった。諫早湾では *Chattonella* を含むラフィド藻類は、2002年、2004年、2005年および2007年に出現しており、2004年と2007年に *Chattonella* は $10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 以上の細胞に達し、2007年にも細胞数は $10^4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ を超える濃密な赤潮を形成した。2004年の赤潮は7月26日以降から増殖し、8月8日にピークに達し8月中旬に衰退した。一方、2007年のラフィド藻類による赤潮も2004年と同様

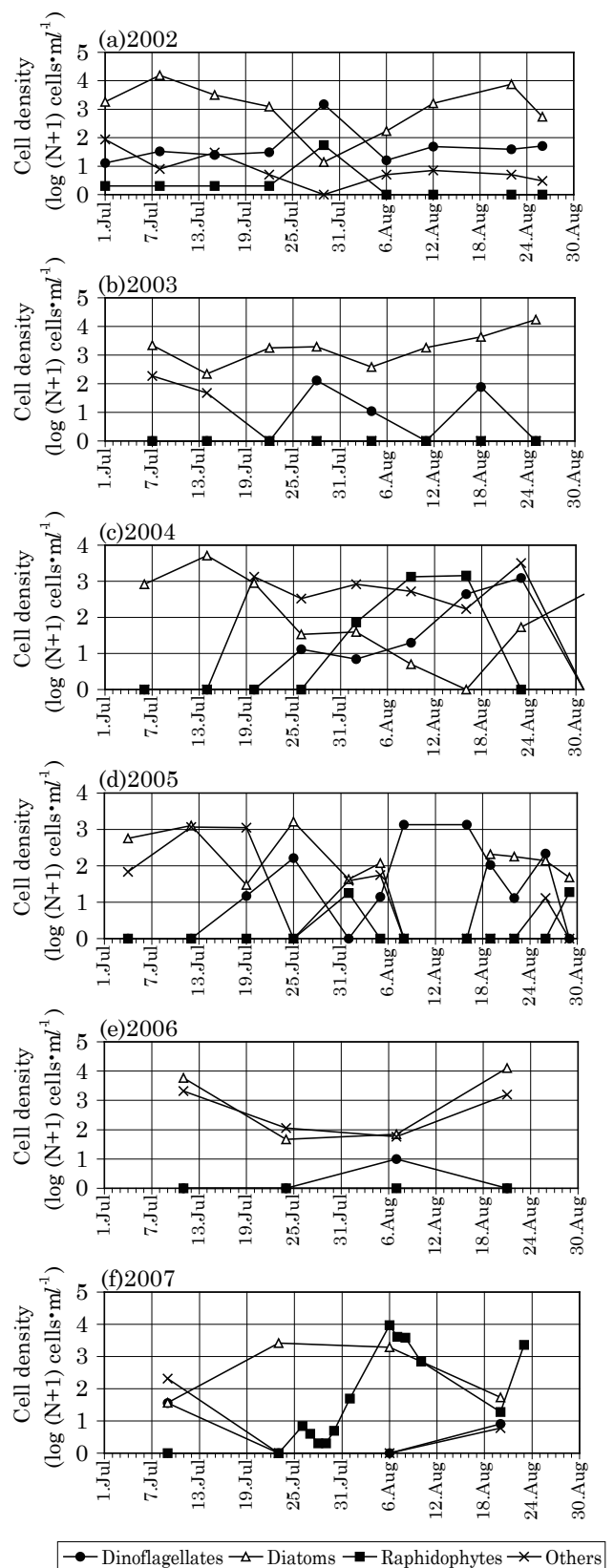


図2 7月と8月における渦鞭毛藻類, 珪藻類, ラフィド藻類の細胞数密度の経年変化 (B3 地点)

に7月26日から増殖が観察され始め、数日間の誘導期を経た後、片対数直線的で増加し、8月6日頃にピークを示し、その後やや減少したものの8月下旬まで発生が継続している。この時には *Chattonella antiqua* と *C. marina* が複合して観察された。

3.2 諫早湾における赤潮形成種の変化

2002年から2008年の7月と8月における連続観測による Chl-a の断面分布の経日変化とこの期間の優占種を図3に示す。なお、2008年については長崎県南水産業普及指導センターおよび長崎県総合水産試験場による赤潮発生状況速報等^{11, 12)}に基づき、図中に▼印で *Chattonella* の出現日と出現期間をそれぞれ示す。

各年とも7月初旬と中旬には *Skeletonema costatum* などの珪藻類が優占して発生する傾向にあるが、7月下旬から8月にかけて、2002年は *Ceratium furca* などの渦鞭毛藻類、*Chattonella* 属、*Heterosigma akashiwo* のラフィド藻類、*Cheatoceros* 属などの珪藻類、2003年は *S.costatum* や *Cheatoceros* 属などの珪藻類、2004年は *C.furca*, *Akashiwo sanguinea* (これまで *Gymnoinium sanguineum* と呼ばれていた) などの渦鞭毛藻類と *Chattonella* 属のラフィド藻類、2005年は *C.furca* や *A.sanguinea* の渦鞭毛藻類と *H.akashiwo* のラフィド藻類、2006年は珪藻類、2007年、2008年は *Chattonella* 属のラフィド藻類が優占した。これらを大別すると、2003年と2006年の7月から8月にかけては珪藻類が、その他の年は7月が珪藻類、8月が渦鞭毛藻類またはラフィド藻類のいずれかが優占している。殊に、断面分布より7月26日から31日の間に珪藻類が発生した場合は *Chattonella* 属などのラフィド藻類や渦鞭毛藻類は8月には発生しないが、2007年を除いて珪藻類が優占的に発生しなかった場合はこれらの種類が8月に発生する傾向を強く示している。

一方、2007年については、以下のような興味深い現象がみられている。断面分布(図3)から抽出した毎10分間の鉛直方向の Chl-a 最大値(ピーク値)

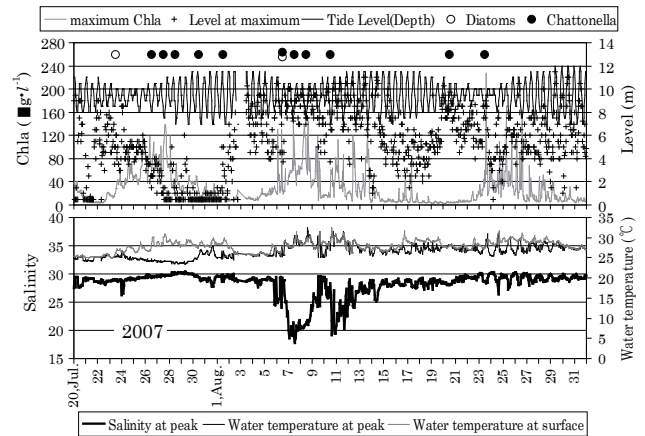


図4 図3の鉛直分布におけるクロロフィル a の最大値と最大値出現位置における水深と塩分の経時変化 (B3 地点, 2007 年 7 月 20 日~8 月 31 日)

とその深さを、水深およびピーク位置における水温と塩分、ならびに図2で示した表層での植物プランクトンの発生状況とともにプロットした図4をみると、表層では7月23日に *S.costatum* などの珪藻類が発生したが、それに伴う Chl-a のピークはその後7月27日にかけて強度を増しながら海底まで移動し、28日から31日にかけて減少している。なお、7月23日から27日にかけての Chl-a ピーク位置での塩分は約28~30、水温は約25℃であった。その後はピーク位置での水温も8月9日から11日頃にかけて30℃を超えるまで上昇し、*Chattonella* 属が優占するようになっている。また、8月に入ってからは、5日から7日にかけて降雨に伴う淡水の流入によって塩分が20を下回り表層に栄養塩が供給されたため8月15日頃まで *Chattonella* の分布のピークは表層にみられたが、この栄養塩を消費した後はピークが深部へと移っている。このように、2007年も7月28日以降に珪藻類が優占できなかった状況は、2002年、2004年、2005年、2008年と同様であった。

4. 考察

4.1 ラフィド藻類や渦鞭毛藻類発生を規制する塩分要因

図5に各年の7月と8月における塩分の鉛直分布を示す。7月から8月に継続して珪藻類が優占し8月にはラフィド藻類や渦鞭毛藻類が発生しなかった

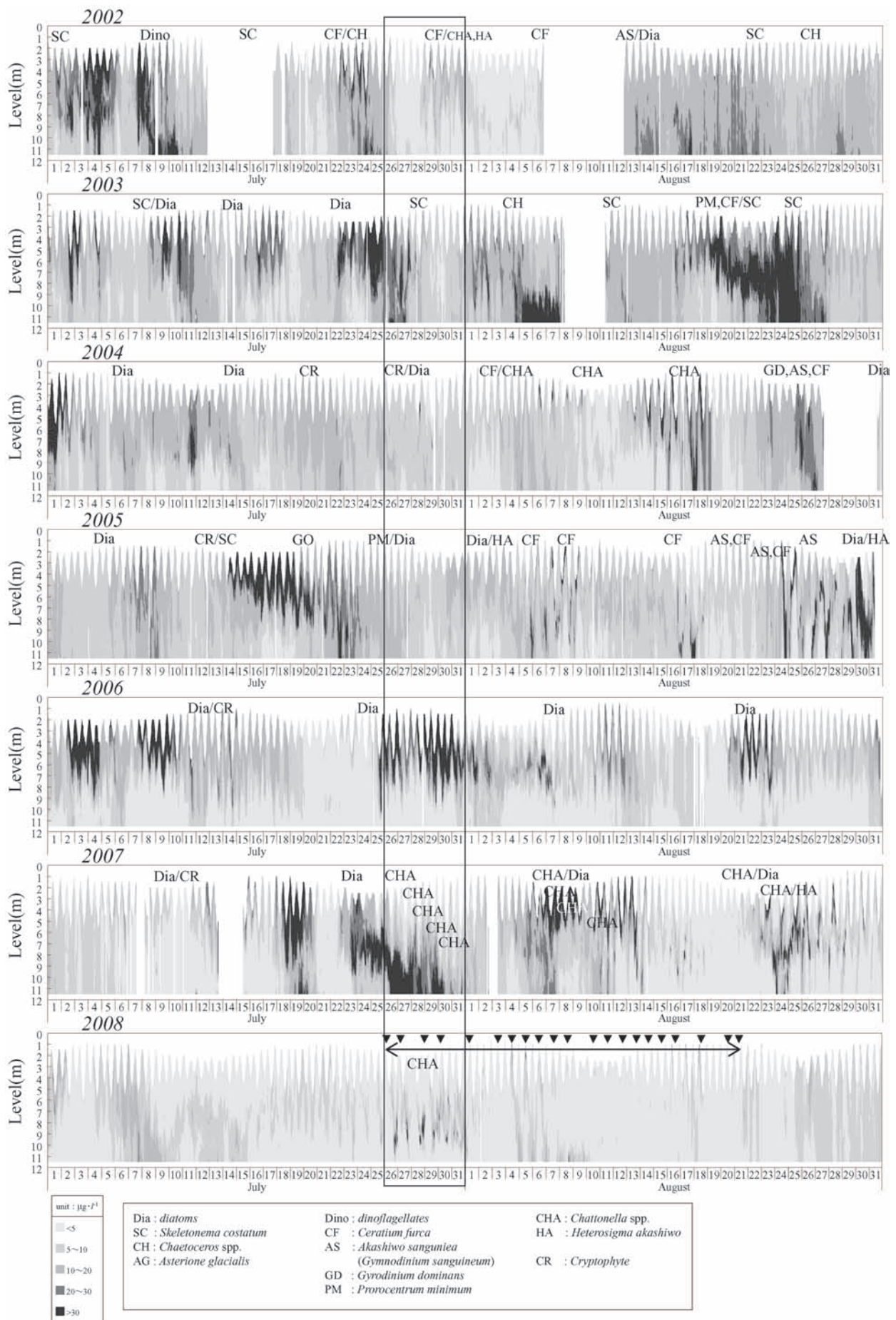


図3 7月と8月のクロロフィル a の鉛直分布の経年変化 (B3 地点, 2002 年~ 2008 年, 略号は表層での出現種)

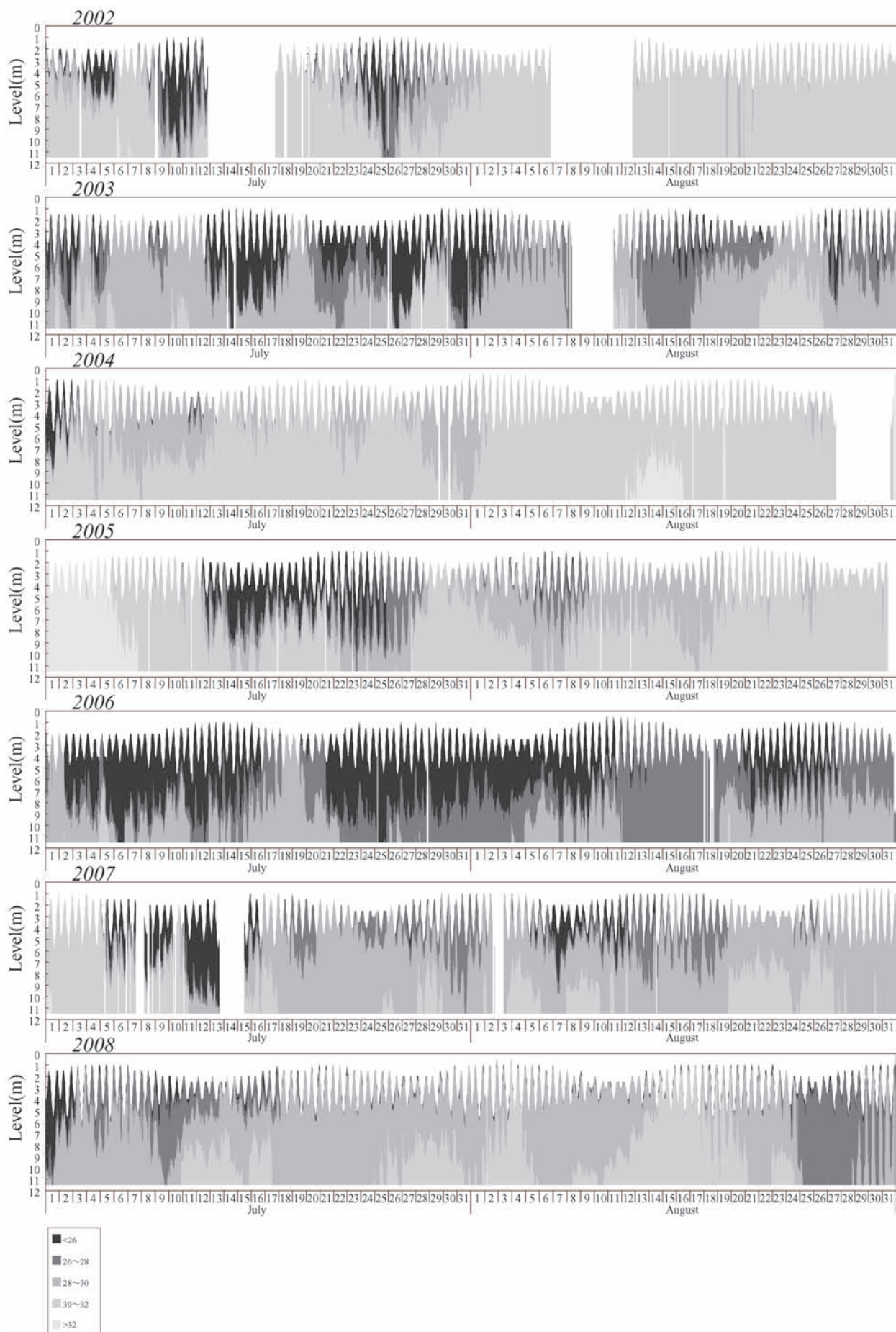


図5 7月と8月の塩分の鉛直分布の経年変化 (B3 地点, 2002 年~ 2008 年)

2003年と2006年は、梅雨明けがそれぞれ7月31日頃、7月26日頃と例年と比べ遅く降雨が継続したため²¹⁾、7月26日から31日の表層から底層にかけて塩分が20未満と低い、その他の年ではこの期間の塩分の低下は小さかった。これより、陸域からの淡水の影響が大きく塩分が低下し珪藻類が優占する場合には、その後のラフィド藻類や渦鞭毛藻類といった赤潮種の出現が規制されている傾向を強く示す。すなわち、7月の陸域からの淡水の流入に伴う塩分の変化が、8月における赤潮形成種の決定に大きく関与していると考えられる。

4.2 赤潮形成種の決定に対する淡水の影響

諫早湾における陸域からの淡水の影響を各年の塩分および水温の違いにより検証した。図6に2002年から2008年までの7月26日から31日までの期間においてB3地点で毎10分間Chl-a値の鉛直分布のピーク値を示す層の水温（縦軸）と塩分（横軸）の関係を示す。ラフィド藻類や渦鞭毛藻類の発生が観察されなかった2003年と2006年は、水温の変動幅は小さくて塩分の変動範囲が大きく、両者の関係を示す回帰直線の傾きが低い（回帰係数としては大きい）ことがわかる。一方、ラフィド藻類や渦鞭毛藻類の発生がみられた2002年、2004年、2005年、2007年、2008年では塩分の変動は小さいが水温の変動が比較的大きくなっており、回帰直線の傾きは2003年と2006年の場合と比べて高い（回帰係数としては小さい）。塩分の低下は陸域からの淡水流入によるものであるため、回帰直線の傾き（回帰係数）と8月のプランクトン出現種の種類の関係および淡水の影響がみられた7月26日以前の10日間における佐賀地方気象台における降雨および気温の推移を図7に示す。7月26日から31日の水温と塩分との回帰直線の傾きは降雨と密接に関係しており、回帰係数（slope）が大きければ珪藻類が、小さければ*Chattonella*属などのラフィド藻類や渦鞭毛藻類が発生し、傾きの違いによってその後の出現優占種類が異なっていた。これより、7月26日から31日の淡水存在状況とそれに伴う塩分レベルがその後8月の

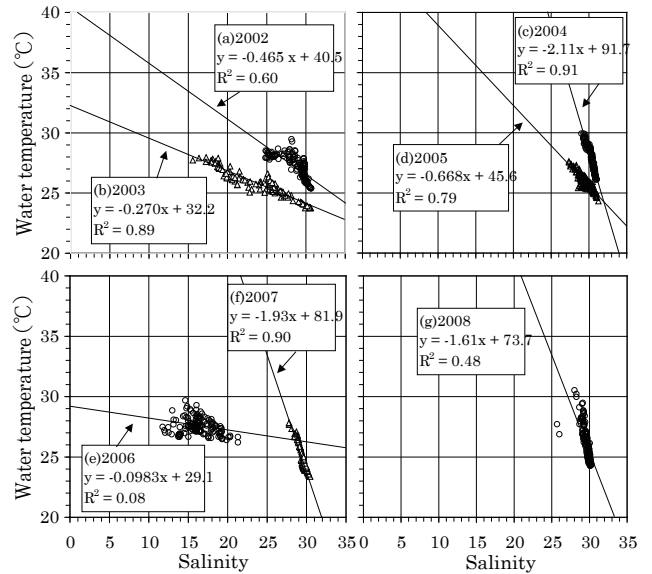


図6 クロロフィル a 最大位置における水温と塩分の関係（B3地点、各年7月26日～31日）

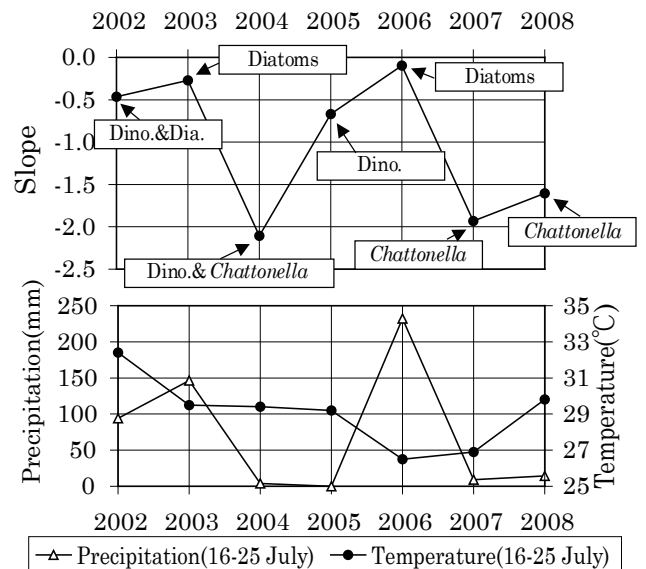


図7 水温/塩分比（傾き：slope）とプランクトンの種類、降水量（佐賀地方気象台）の関係

赤潮形成種を規定していると考えられた。

4.3 諫早湾へ流入する淡水の起源

図8に2007年7月20日から31日におけるB3地点とその北側に位置するB4地点の表層（海面下0.5m）と底層（海底上1.2m）の塩分の連続観測結果を示す。B4地点の表層で7月23日2:00にみられた塩分の低下は、B3地点では同11:00とおおよそ半日遅れて現れており、7月26日、27日にも同様の状況が観測されている。底層でも塩分低下の程度は小さいが7月23日や27日に同様の状況がみられ、

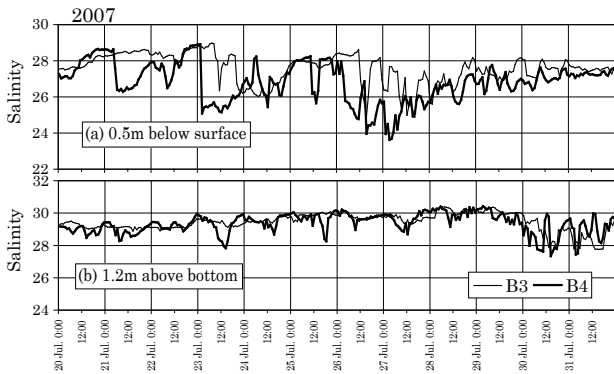


図8 B3地点とB4地点の塩分変化の比較

このことは諫早湾（B3地点）への淡水供給が主に湾の外側（有明海）に強く影響されていることを示唆している。

4.4 有明海湾奥のラフィド藻類の発生状況と淡水影響

「九州海域の赤潮」（水産庁九州漁業調整事務所）^{3, 22)}を参照すると、有明海湾奥部（佐賀県沖、福岡県沖）における *Chattonella* 属を含むラフィド藻類、渦鞭毛藻類、珪藻類による7月から9月の赤潮発生日数は、図9に示すとおりである。図中には、井上ら（2006）²³⁾が構築した有明海流域からの淡水流出モデルを用いて求めた諫早湾の赤潮形成種を規制すると考えられる7月26日以前の10日間の筑後川、矢部川、嘉瀬川、六角川及び塩田川からの淡水流入量の合計の累積値を併記した。

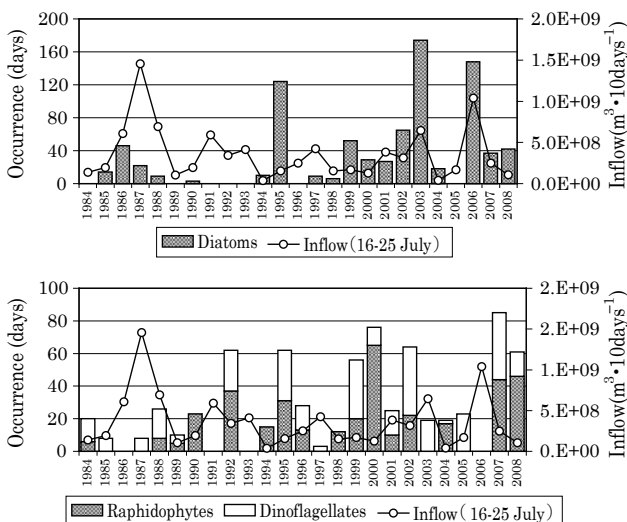


図9 赤潮発生日数（7月～9月）と有明海湾奥部への淡水流入量（各年7月16日～25日の10日間）の経年変化

有明海湾奥部では、観測が開始された1984以降1991年と1993年を除き毎年赤潮が発生しており、珪藻類による赤潮発生日数が多い年はラフィド藻類や渦鞭毛藻類による赤潮の発生日数は少ない傾向にある。2002年から2008年までの状況をみると、2003年と2006年に珪藻赤潮が多く、その他はラフィド藻類や渦鞭毛藻類による赤潮が多く、諫早湾と同様の傾向がみられた。さらに、淡水流入量が多い場合は珪藻類の発生が多く、7月16日から25日の10日間の淡水流入量が $4 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot 10 \text{ days}^{-1}$ よりも少ない場合はラフィド藻類や渦鞭毛藻類による赤潮の発生確率は高く、諫早湾の場合と同様に7月における陸域からの淡水により赤潮優占種が規制されていることが伺える。

そこで、2002年から2008年において7月から8月にかけての筑後川からの累積淡水流入量を淡水流出モデルを用いて求め、各年における淡水の流入状況を比較した（図10）。図中太線で示した2003年と2006年をみると、他の年と比べ7月は流入量の傾きが大きく、基底流量を上回る淡水流入が継続していることを示している。その他の年では傾きは比較的平坦で過剰の淡水流入はみられない。また、図11に示す筑後川河口沖の浅海定線調査地点S1の1978年から2007年までの毎月1回の塩分の調査結果²⁴⁾と淡水流入量の関係（図12）から、有明海湾奥部では淡水流入量に応じて塩分が低下する傾向があり、有明海湾奥部においても7月の淡水流入が8月の赤潮形成種を決定づける一要因となっていると考えられる。

4.5 赤潮の発生予察の試み

以上の解析により、諫早湾と有明海湾奥での夏季における赤潮形成種は、7月26日から31日における塩分低下、すなわち淡水流入量が十分であれば、8月にみられるプランクトンの種類は珪藻類となり、淡水流入量が少なく塩分が低下しなければ珪藻が発現せず、それに代わってラフィド藻類や渦鞭毛藻類が発生すると考えられる。

塩分変化を動かす淡水流入量は図13に示すよう

に降水量との間に相関がみられることから、7月下旬から8月にかけて出現する赤潮種を予測するにあたっては、降雨状況の長期予報により事前に淡水流入状況を予測することは可能である。さらに、図9に示したように有明海湾奥では7月16日から25日の10日間の累積淡水流入量が約 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以下である場合に、ラフィド藻類や渦鞭毛藻類の発生確率が高くなっており、図13に示した関係式を用いればこの累積淡水流入量に相当する累積降水量は約

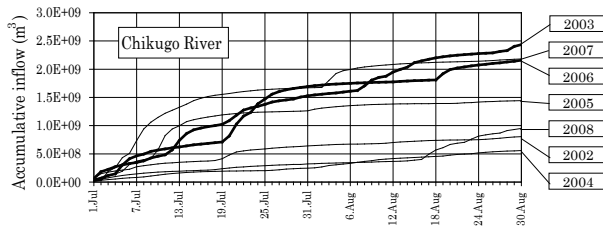


図10 7月, 8月の筑後川の淡水流入量(計算値, 累積)の経年変化

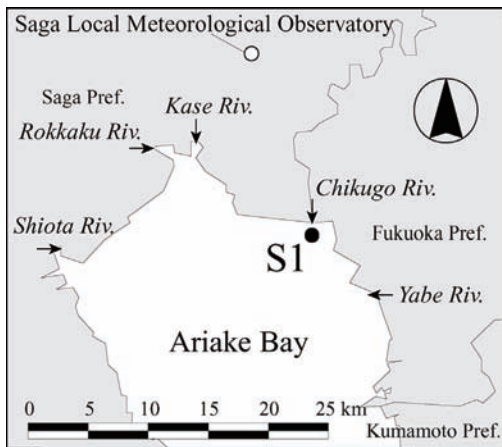


図11 有明海湾奥部の塩分観測地点 (S1)

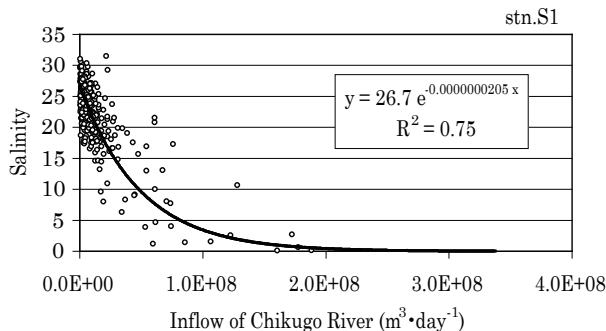


図12 S1地点における淡水流入量と塩分の関係

80mm となり、気象予報によって8月の赤潮形成種を予測することは可能と考えられる。

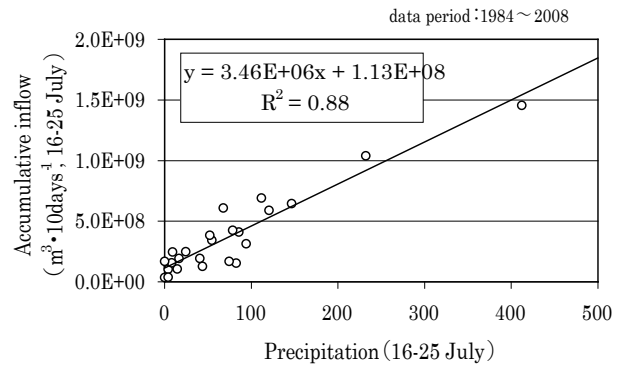


図13 有明海湾奥部に流入する主要5河川の淡水流入量と降水量の関係

5. まとめ

自動昇降装置による諫早湾の水質連続測定結果、植物プランクトン調査結果等を用いて諫早湾および有明海湾奥部における *Chattonella* 赤潮の発生環境を解析した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 諫早湾の8月の赤潮形成種は、7月26日から31日における水温と塩分の回帰式の傾きが大きい場合は珪藻類が優占し、小さい場合は *Chattonella* 属を含むラフィド藻類や渦鞭毛藻類が優占する傾向にある。すなわち、7月下旬に淡水流入の影響により塩分が低い場合8月は珪藻によって優占されるが、淡水影響が小さく塩分が高ければ *Chattonella* 赤潮が発生しやすくなる。この傾向は有明海湾奥でも同様である。
- 2) 7月26日から31日にかけての塩分低下は、その10日前(7月16日~25日)の淡水流入量に応じて変動する傾向にあり、諫早湾では有明海からの淡水流入の影響を受けやすく、有明海湾奥部に流入する主要5河川からの淡水流入量が $4 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot 10\text{days}^{-1}$ を下回る年は諫早湾や有明海湾奥部では *Chattonella* 赤潮が発生しやすくなる。
- 3) 7月16日から25日における有明海湾奥部に流入する主要5河川からの淡水流入量と佐賀地方気象台の降水量との間には相関がみられ、

この期間の合計降水量が 80mm を下回ると *Chattonella* 赤潮が発生しやすくなる。

- 4) *Chattonella* 赤潮を含む赤潮形成種の予察について長期気象予報（降雨予想）による予測の可能性が示された。

諫早湾，有明海湾奥における赤潮の発生については，栄養塩，水温，日射による赤潮規模の変動はありと考えられるが，7月16日から25日の期間に気象予報情報を用いてダムから80mmの降水量に相当する，すなわち $4 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot 10 \text{ days}^{-1}$ の流量を放水する等の対策を施すことによって，赤潮形成種の制御が可能になると考えられる。

6. 謝辞

本研究にあたっては，農林水産省農村振興局，九州農政局の関係各位に多大のご支援とご協力を頂いたことを記し，深甚の感謝を表します。

参考文献

- 1) Honjo, T. (1994) The biology and prediction of representative red tides associated with fish-kills in Japan. *Rev. Fish. Sci.*, 2, 225-253.
- 2) 今井一郎 (1990) 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，23，pp.63-166.
- 3) 水産庁九州漁業調整事務所 (1985～2007)，九州海域の赤潮。
- 4) 山口峰生，今井一郎，本城凡夫 (1991) 有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *C.marina* の増殖速度に及ぼす水温，塩分および光強度の影響，日本水産学会誌，57(7)，1277-1284.
- 5) 九州農政局 (2003) 平成 14 年度諫早湾干拓事業植物その他春・夏調査委託報告書。
- 6) 九州農政局 (2004) 平成 15 年度諫早湾干拓事業植物その他春・夏調査委託報告書。
- 7) 九州農政局 (2005) 平成 16 年度諫早湾干拓事業植物その他春・夏調査委託報告書。
- 8) 九州農政局 (2006) 平成 17 年度諫早湾干拓事業植物その他春・夏調査委託報告書。
- 9) 九州農政局 (2007) 平成 18 年度諫早湾干拓事業植物その他春・夏調査委託報告書。
- 10) 九州農政局 (2008) 平成 19 年度諫早湾干拓事業植物その他春・夏調査委託報告書。
- 11) 長崎県南水産業普及指導センター (2008) 赤潮発生状況速報。
- 12) 長崎県総合水産試験場 (2008) 有明海シャトネラ赤潮速報。
- 13) 九州農政局 (2004) 平成 15 年度諫早湾干拓事業濁り影響評価検討その他業務報告書。
- 14) 九州農政局 (2005) 平成 16 年度諫早湾干拓事業濁り影響評価検討その他業務報告書。
- 15) 九州農政局 (2006) 平成 17 年度諫早湾干拓事業濁り影響評価検討その他業務報告書。
- 16) 九州農政局 (2007) 平成 17 年度諫早湾干拓事業海域環境施設他調査検討（濁り影響）業務報告書。
- 17) 九州農政局 (2008) 平成 19 年度諫早湾干拓事業濁り影響評価検討その他業務報告書。
- 18) 九州農政局 (2009) 平成 20 年度国営干拓環境対策調査諫早湾自動昇降装置データ管理業務報告書。
- 19) 日本海洋学会 (1985) 海洋観測指針 (気象庁編)，pp.91-93.
- 20) 中野拓治，山田耕土，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 (8)，489-494.
- 21) 気象庁ホームページ
http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/baiu/kako_baiu04.html
- 22) 水産庁九州漁業調整事務所 (2008)，九州海域の赤潮 (速報値)
- 23) 井上英彦，藤田健一，中嶋雅孝，中野裕香子 (2006) 有明海における降雨変動に伴う T-N 負荷量の変動特性解析，平成 17 年度日本水環境学会九州支部研究発表会講演要旨集，47-48.
- 24) 水産庁 (1978～2007) 浅海定線調査結果