

鹿児島湾における有害赤潮発生時の 水質とプランクトン組成の現地観測

WATER QUALITY AND PLANKTON COMPOSITION DURING BLOOMING OF
HARMFUL ALGAE IN KAGOSHIMA BAY

安達貴浩¹・小橋乃子²・小針統³

Takahiro ADACHI, Naoko KOHASHI and Toru KOBARI

¹正会員 博士(工) 鹿児島大学准教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)

²正会員 博士(工) 鹿児島大学元プロジェクト研究員 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)

³非会員 博士(水産) 鹿児島大学助教 水産学部 (〒890-0056 鹿児島市下荒田4-50-20)

In Kagoshima bay, fishery such as cultivation of yellowtail has been actively carried out. Since 1977 red tide of Raphidophyte “*Chattonella marina*”, which causes serious damage to fishery, has often occurred in the bay. In order to make clear the mechanism to form such harmful algae, we started the field observation from 2007. In this paper, the mechanism was examined using the results of time-series on water quality and composition of plankton during the blooming of the algae. As a result, the following findings were made clear; 1) influences of some environmental factors to the red tide are compared quantitatively, 2) it was observed that diatom was dominate, even when red tide of Raphidophyte “*Chattonella marina*” was formed.

Key Words : Red tide, harmful algae, Raphidophyte, *Chattonella marina*, Kagoshima bay, semi-enclosed bay, fishery, cultivation of yellowtail

1. 本研究の目的

鹿児島湾ではブリやハマチの養殖をはじめとする水産業が活発に営まれているが、1977年の*Chattonella marina*の発生以来しばしば有害赤潮が発生し、深刻な漁業被害が生じている。しかしながら、現地観測結果が限られていることもあって、鹿児島湾における赤潮発生メカニズムについては未だ不明な点が多い。赤潮による被害を未然に防ぐためにも、過去の赤潮発生状況と発生メカニズムを明らかにし、今後の赤潮発生の予測や対策に活かすことが必要である。

以上のような背景の下、著者らは鹿児島湾での*C. marina*赤潮発生メカニズムを明らかにすることを目的とし、2007年より現地観測を開始した。

本論文では、赤潮の特性や既往の観測結果を整理するとともに、2008年6～7月の*C. marina*赤潮期間における水質とプランクトン組成の経時変化の観測結果を用いて、鹿児島湾での*C. marina*による赤潮の発生メカニズムについて考察を行った。

2. *Chattonella marina*の生理生態学的な特性

ラフィド藻類の一属である*Chattonella marina*は、比較的大型で、鞭毛による鉛直移動が可能である。*C. marina*は、水温が温かくなり始める6月から7月にかけて発芽し、この時期に環境条件が所定の条件を満たすと、赤潮を形成する。*C. marina*の増殖に好適な条件は、水温が15～30℃(最大増殖温度は25℃)、塩分が10～35psu(最大

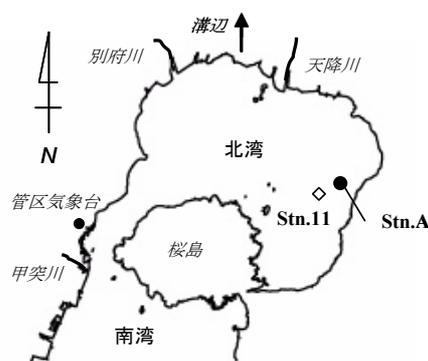


図-1 鹿児島湾の桜島周辺海域

増殖塩分は20psu)である¹⁾。通常、8月から9月になると、*C. marina*はシストを形成して海底に沈降し、シストの状態で越冬するが、冬季の水温が比較的高い鹿児島湾においては、栄養細胞のまま越冬している可能性も指摘されている²⁾。

鹿児島湾では1977年以来、*C. marina* がしばしば赤潮を形成し、ハマチやカンパチなどの魚介類が大量に斃死するといった問題が生じている(表-1)。文献によって値が多少異なっているが³⁾、*C. marina* の魚毒性はブリで2,000cells/ml前後、カンパチで2,000cells/ml以下の値とされている⁴⁾。

3. 既往の観測データを用いた検討

(1) 既往の水質測定結果を用いた検討

鹿児島湾湾奥の模式図を図-1に示す。鹿児島湾において、*C. marina* による赤潮は1976年～2006年の30年間で13回起きているが、いずれの発生も6月から7月にかけてである(表-1)。

そこで、6、7月を対象に、公共用水域の水質測定ならびに鹿児島県水産技術開発センターによる定期観測の実測結果を用いて、塩分・栄養塩濃度・水温と*C. marina* 赤潮発生の有無との関係を調べた。ところが、これらの調査はせいぜい1ヵ月間隔でしか実施されておらず、また赤潮発生期間であってもその終焉期には栄養塩は枯渇してしまいうため、栄養塩と赤潮発生との明確な相関関係は見出せなかった。

(2) 気象条件を用いた赤潮発生条件の検討

次に潮汐・降水量・平均風速・全天日射量といった海象・気象条件を対象に、5月中旬から7月中旬にかけての時系列データを用いて*C. marina* 赤潮の発生条件について検討した。潮汐については鹿児島港の潮位観測データを、また気象条件については、鹿児島管区気象台の観測データを用いた。これらについては連続データの入手が可能であり、また、潮汐・平均風速は湾内の流動や海水交換を、降水量は、栄養塩や塩分を規定する要因と考えられる。赤潮発生期間における各項目の傾向を調べて見ると、1) まとまった降雨、2) 強い日射、3) 弱風速、の条件になると*C. marina* 赤潮が発生しやすいことが確認された(図-2)。降雨と日射の関係を詳しく見ると、「まとまった降雨の後2日以内の強い日射」という条件が満足されると赤潮が発生しやすいことが確認できた。なお、解析のプロセスは不明であるが、ほぼ類似した結果が鹿児島県水産技術開発センターによっても示されている⁴⁾。

(3) 既往の観測の問題点

以上をまとめると、鹿児島湾で*C. marina* 赤潮発生の

可能性の高い条件として、1) 5月～7月、2) まとまった降雨後2日以内の強い日射、3) 3m/s以下の風速、が挙げられる。これらは水温、塩分、栄養塩、流動の条件の違いを意味するため、*C. marina* 赤潮発生の有無は同種の生理生態学的特性により十分説明可能な条件ではないかと考えられる。しかしながら*C. marina* の発生メカニズムを定量的に明らかにするには、観測項目、観測頻度のいずれについても既往の定期観測だけでは十分ではない。このため、1) 水温、塩分、栄養塩について同一地点での高頻度観測を行うこと、2) *C. marina* の競合関係を明らかにすることに重点を置き、2007年7月より、5章に示すような現地調査を開始した。

4. 2008年の赤潮発生状況

(1) 2008年赤潮の概要

鹿児島湾湾奥部では毎年6、7月になると、適切な漁場管理のために、各漁業協同組合によって有害プランクトンを対象とした検鏡調査が行われている。水温が25℃程度になると、湾奥部では毎年のように*C. marina*が少なくとも1細胞は検出されているが、それが赤潮を形成するまでに増殖するかどうかは年毎に異なっている。2008年においても6月3日に湾奥部に*C. marina* が1細胞検出され、

表-1 鹿児島湾での*C. marina*赤潮発生⁴⁾

赤潮発生期間	継続期間	被害金額(千円)
1977/6/8 ~ 6/20	13日	699,662
1978/6/13 ~ 6/21	9日	0
1982/7/15 ~ 7/21	7日	0
1984/6/27 ~ 7/1	5日	6,646
1985/6/4 ~ 6/28	25日	750,000
1987/6/15	1日	0
1989/6/30 ~ 7/6	7日	0
1993/6/17 ~ 6/20	4日	15,000
1994/6/14 ~ 6/24	11日	4,140
1995/6/23 ~ 7/10	18日	12,450*
1997/7/15	1日	0
2000/6/13	1日	0
2003/6/15 ~ 7/2	18日	-

* *Heterosigma akashiwo* 赤潮による被害額は約1,000,000千円

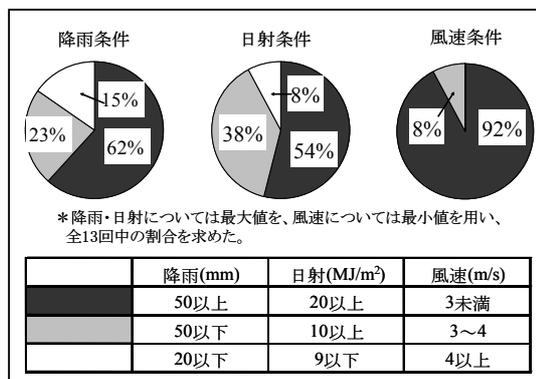


図-2 気象条件と赤潮発生の関係

細胞密度が次第に増加したことから、6月17日には鹿児島県によって「赤潮注意報」が発令された。翌日の6月18日には、湾奥東部を中心に数百細胞/mlのレベルが継続していることや、その後の気象条件等を加味して、「赤潮警報」が発令された。

図-4に鹿児島県の関連漁協により計測された⁴⁾表層における*C. marina*の細胞密度の経時変化を示す。図中の「北湾全域平均」とは竜ヶ水、赤生原、古河原、福山沖、中磯、辺田、居世神の7測点(図-5)での平均値を、「北湾・北東部平均」とは福山沖、中磯、辺田3測点で得られた細胞密度の平均値を示している。この結果を見ると、6月23~27日に細胞密度は急激な増減を繰り返しているが、6月27日以降、細胞密度は低レベルにとどまっている。このような細胞密度の推移を考慮して、7月9日には赤潮形成の可能性は低いとの判断の下、赤潮警報が解除された。なお、6月23~27日における*C. marina*の細胞密度は北湾全域平均で約100~4500cells/mlの値を示し、他期間と比較しても特に細胞密度が高くなっていた。このため、6月23~27日の期間を本論文では「赤潮最盛期」と定義した。

以上のように2008年には鹿児島湾湾奥部において魚毒性が現れる細胞密度まで*C. marina*赤潮が発達したが、この期間、湾奥東部の養殖生簀を鹿児島湾南湾中央部に避難させたため、赤潮による養殖魚の斃死は生じなかった。しかしながら、燃油高騰の中での養殖生簀避難によって甚大な経済的損失が生じている⁵⁾。

(2) 北湾全域での赤潮時の空間変動

まず細胞密度の経時変化を見ると(図-4)、北東海域では6月23日に細胞密度のピークが出現しているのに対し、北湾全体では6月25日にピークが出現しており、*C. marina*の出現傾向が空間的に異なっていることが分かる。また、各地点で計数された細胞密度を見ても、その値は時空間にかなり大きな変動を示し、細胞密度の高い水塊がパッチ状に存在していたことが推察される。*C. marina*の空間分布の一例を図-5に示す。この結果を見ると、2008年の赤潮は最初に北湾・北東部で急激な増殖を示し、次第に北湾全域、特に北湾南部へと拡大していることが分かる。なお、赤潮発生期間における最大細胞密度は、6月25日5時30分に北湾南部・古河原の表層で観測され、その値は13,600 cells/mlであった。

ところで、*C. marina*は鞭毛を有していることから鉛直移動が可能である⁶⁾。この点を考慮して、牛根漁協によって日中4回(5:30, 10:30, 14:00, 18:00)、4水深(表層, 5m, 10m, 15m)計測された細胞密度を調べた⁵⁾。その結果、観測時間に拘らず水深方向の最大細胞密度は表層に出現する機会が多いことが確認された(図示省略)。また、1日の中で細胞密度の変化を調べたところ、早朝(5:30)において最大の細胞密度が出現していることが分かった。これは*C. marina*の細胞分裂が主に日没から日の出までの間に行なわれることや夜間の風速が日中に比べて小さく、*C. marina*が表層に滞留・集積しやすかったことによると考えられる(6月23~27日の0時~5時の平均風速: 1.4m/s, 12時~17時の平均風速: 2.5m/s)。

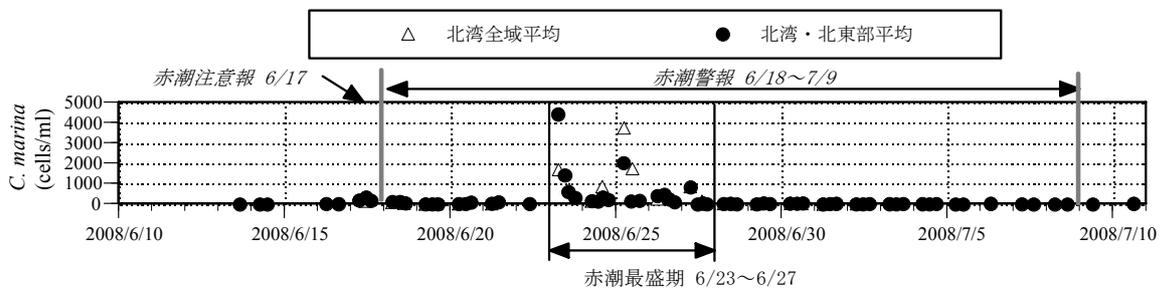


図-4 *C. marina*の表層での細胞密度の経時変化⁴⁾

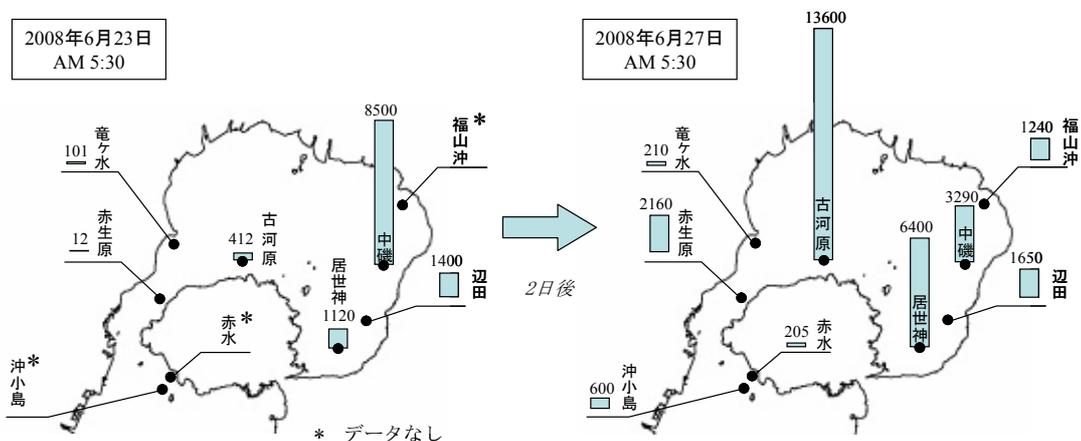


図-5 *C. marina*の空間的分布の変化⁴⁾ (図中の数字は表層の細胞密度を表す)

したがって、本研究で検討した*C. marina* 赤潮については、日周鉛直運動の影響はそれ程強く現れていないと考えられる。

5. 北湾北東海域における赤潮発生メカニズム

(1) 現地観測の概要

3章で示した既往の観測の問題点を補足するために、2007年7月以降、現地観測を開始した。具体的には、北湾北東部海域に設置された観測用の浮体構造物（北緯31度37分26秒，東経130度47分28秒，水深70m，図-1の点Stn.A）に、塩分・水温計（アレック社製・COMPACT）ならびに蛍光度・濁度計（アレック社製・COMPACT-CLW）を係留し、水面下1mの水温，塩分，蛍光度，濁度の連続観測を行った。なお，赤潮が発生しやすい地点であることから同地点が観測地点として選定された。また，ほぼ月に1回の頻度で，水深1m地点の海水を採水し，アンモニア態窒素，亜硝酸態窒素，硝酸態窒素，全窒素，リン酸態リン，全リン，珪酸塩，クロロフィル a ，CODの分析を行った。なお，赤潮発生期間においては，上記観測の頻度を増やすとともに，表層と水深5mの植物プランクトン相ならびに表面から水深4mまでの水柱に存在する動物プランクトン相の観測を行った。

(2) 植物プランクトンの細胞密度の経時変化

図-6にStn.Aの表層における植物プランクトンの細胞密度，*C. marina* のみの細胞密度，植物プランクトンの構成比の経時変化を示す。赤潮最盛期間中（6月23～27日）の*C. marina* の細胞密度はいずれも全植物プランクトン細胞数の9～20%であり，珪藻類の割合が76～89%と卓越していた。但し，*C. marina* の発生がほとんど見られない期間では珪藻類が95%以上を占めた。なお，検鏡のための採水は*C. marina* の細胞密度がピークとなる早朝ではなく，正午前後（採水時間10:30～14:00）に実施されている。

赤潮最盛期間中の植物プランクトンの総細胞密度は3,000cells/ml程度とほぼ一定の値を示していた。このため，*C. marina* の細胞密度の増加とともに，珪藻類の細胞密度が減少する傾向が見られた（珪藻類の細胞密度：6月20日，2662cells/ml→6月26日，2182cells/ml）。また，細胞密度そのものは小さいが，*C. marina* の増加に伴って渦鞭毛藻類の細胞密度も増加した（渦鞭毛藻類の細胞密度：6月20日，37cells/ml→6月26日，68cells/ml）。6月30日以降になると*C. marina* はほとんど存在しなくなり，次第に珪藻が増加した。なお，水面下5mでもほぼ同様の結果が得られている。

(3) 赤潮発生メカニズムの検討

以上のような植物プランクトンの変化の要因を調べるため，潮汐，風，全天日射量，降水量，Stn.Aにおける

塩分・水温，栄養塩（DIN，DIP）の時系列データとの関係を調べた（図-7）。降水量に関しては，鹿児島管区気象台での観測値に加え，鹿児島湾最大の河川で湾奥に流入する天降川の流域内観測点（溝辺）での値も併せて示す。また，6月30日以降の塩分データが取得できなかったことから，塩分については水産技術センターにより7月9日にStn.11で測定された値もプロットした。さらに，DIN，DIPについてもStn.11およびStn.Aの値を併せてプロットした。なお，Stn.11とStn.Aは約30m離れており，Stn.11では表層，Stn.Aでは水面下1mでの水質が調べられている。

a) 塩分・水温の環境：まず，塩分の変動を見ると，赤潮警報が発令された6月18日以降には6月15～16日のまとまった降雨の影響を受けて，Stn.Aの塩分が32.2psuから27.7psuへと急激に下がっており，また水温も上昇していることがわかる。このような塩分・水温の変化が*C. marina*赤潮におよぼす影響を調べるため，室内培養実験から得られた以下の山口ら(1991)の式⁷⁾を用いて*C. marina*の比増殖速度を算出した（図-8上図）。

$$\frac{\mu}{\mu_m} = 7.43755 - 1.21833T + 0.05924T^2 - 0.00092T^3 \\ - 0.00157S^2 + 0.00669TS + 0.00001TS^2 - 0.00015T^2S$$

ここで， μ は*C. marina*の増殖速度， μ_m は最大増殖速度， T は水温， S は塩分である。この結果，比増殖速度が約0.8と高い値で推移している6月19日から7月2日の期間と，*C. marina*の細胞密度が高い値を示す期間とがほぼ一致しており（図-6），鹿児島湾の*C. marina*に関しても山口らの式は十分有効だと判断できる。また，7月3日を過ぎると比増殖速度は急激に下がっているが，上式を用いるとこれは主に水温の変化によってもたらされていることが分かった（図示省略）。

b) 光環境：以上のように，*C. marina*赤潮が発生した期間は塩分と水温の環境からは好適な条件が整っていたことが分かった。しかしながら，赤潮最盛期間の光環境を見ると，6月24日および25日の全天日射量が比較的低いにも拘らず，25日には再度細胞密度が増加している（図-6，7）。このような現象は*C. marina*の集積によってもたらされた可能性も考えられるが，この日は北湾全域の表層で細胞数の増加が見られることから（図-5），集積よりもむしろ増殖の影響が強いと考えられた。そこで，次に光強度に対する比増殖速度の応答についても山口ら(1991)の室内培養実験結果から得られた光強度と増殖速度の関係式⁷⁾を用いて調べた。なお，本観測では光量子の計測は行われていないので，1) 光合成有効放射は全輻射エネルギーの50%，2) 海面での消失分は30%，の仮定の下⁸⁾，昼間の代表的な太陽光のスペクトル分布を用いた換算によって（ $1W/m^2 = 4.57 \mu mol/m^2/s$ ），全天日射量を最低光量子束密度に換算した。その結果，全天日射量が $0.5MJ/m^2$ 程度であっても比増殖速度は0.8程度と

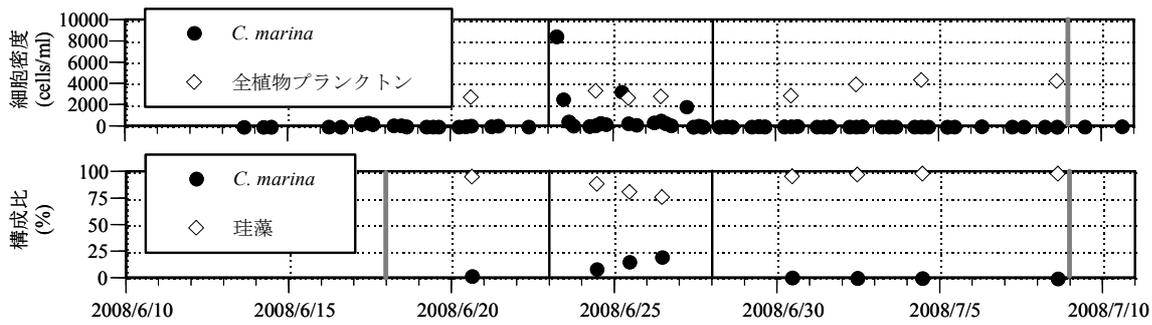


図-6 St.Aにおける表層細胞密度（上図）と植物プランクトン組成（下図）
 * 図中の — は赤潮最盛期間を，— は赤潮警報発令期間をそれぞれ意味する

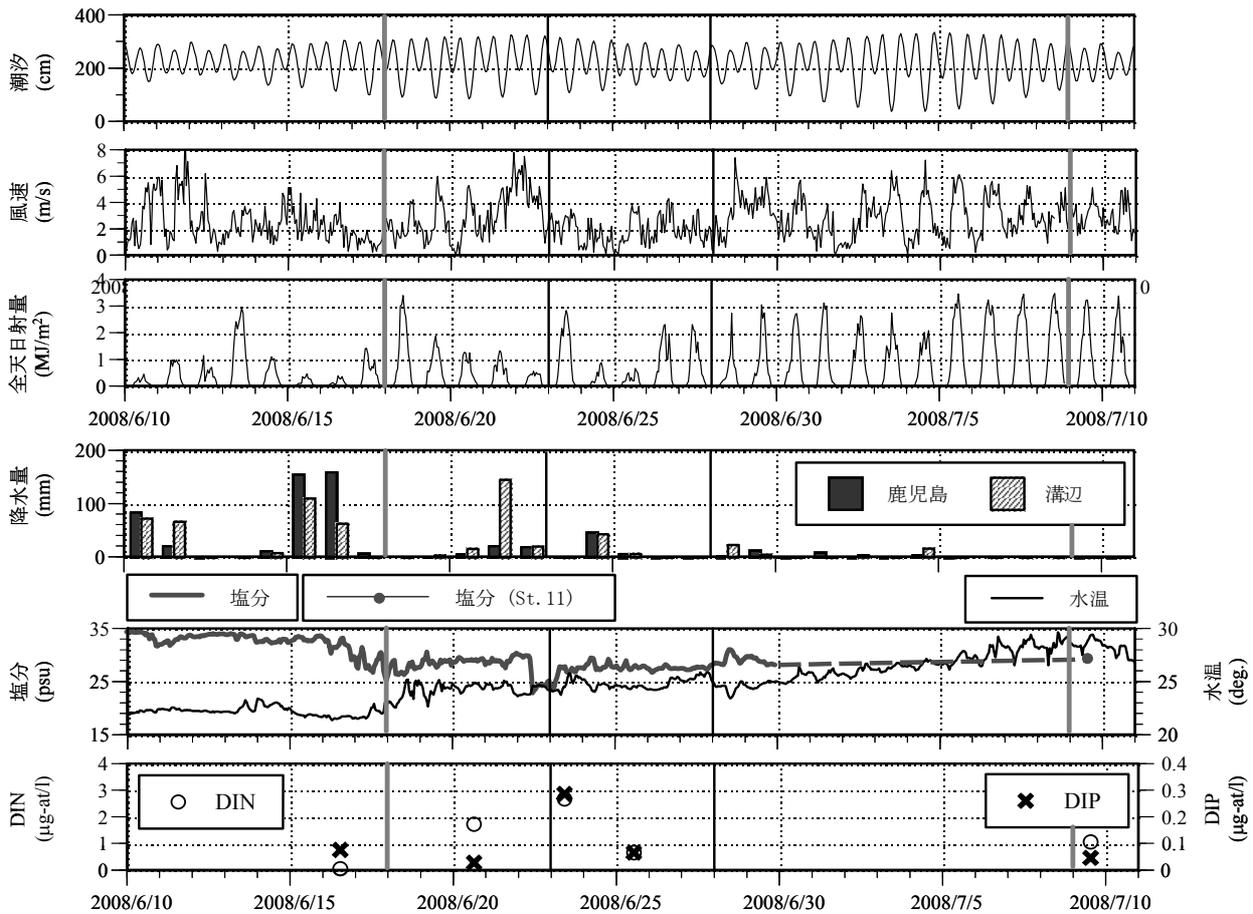


図-7 潮位，風速，全日射量，降水量，塩分・水温，DIN・DIPの経時変化

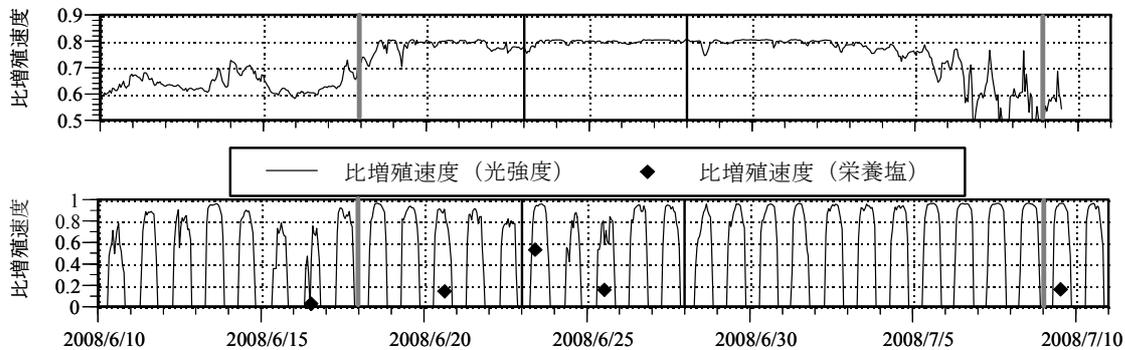


図-8 各パラメータに対する比増殖速度の経時変化（上図：水温・塩分，下図：光強度もしくは栄養塩）
 なお，いずれについても各パラメータ以外の条件は好適とし，各パラメータと増殖速度の関係を調べた室内実験結果⁷⁹⁾を用いて算定されている。

なることがわかった(図-8下図)。このため、図-7の全天日射量を見ると6月24日と25日の全天日射量は比較的小さいがその影響はさほど大きくなく、光環境の面では*C. marina*は十分増殖できる条件にあったと考えられる。

c) 栄養塩環境：次に栄養塩環境の影響を調べた。図-7を見ると、6月21～22日の降雨に続き、6月23日には塩分低下および栄養塩の急増が見られた。*C. antiqua*を対象とした窒素とリンの半飽和定数(K_g^N , K_g^P)はY.Nakamura & M. Watanabe(1988)の培養実験により求められており⁹⁾、本研究では、この値($K_g^N=1.0$, $K_g^P=0.1$)と実測のDIN, DIPから、窒素およびリンに対する比増殖速度を算定した(図-8下図)。この結果、DIN, DIPの値が最も高い6月23日においても比増殖速度は0.6程度であり、栄養塩環境は光環境よりも厳しい条件にあったと言える。3章では降水量の増加により*C. marina*が増殖する傾向が示されたが、本章の塩分・水温環境と栄養塩環境の比較から、少なくとも2008年の赤潮については降水量の増加は塩分低下よりも栄養塩供給として*C. marina*の増殖に寄与していたと判断される。

d) 既往知見の妥当性の検証：3章において*C. marina*赤潮が形成されやすい条件を示したが、2008年の赤潮警報期間を対象にこれらの条件の適合度を検証すると、「平均風速2.7m/s」は「3m/s以下」の条件を満足し、「まとまった降雨後2日以内の強い日射」の条件についても「6月22日の降雨および24日の日射」がこの条件を満足していることが確認された。

e) まとめ：以上の結果をまとめると、2008年の*C. marina*赤潮は、主に水温の好適条件下において、降水による河川流量の増加により栄養塩の供給が増加したため、栄養塩制限下にあった*C. marina*が増殖して発生したと見なすことができる。また、この期間の光環境での増殖の制限はほとんどなく、*C. marina*の増殖に対し、栄養塩や水温の条件が支配的要因であったと考えられる。

ところで、*Chattonella*赤潮の発生時には栄養塩の競合相手となる珪藻類が少ないという観測結果がいくつか報告されている¹⁰⁾。今井(2000)は、栄養塩類が存在するにもかかわらず珪藻類が増殖せずに*Chattonella*赤潮が発生する要因として、珪藻の活性が低下し増殖できない状況が形成されるという「珪藻休眠仮説」を提唱している¹¹⁾。一方、本調査結果では*C. marina*赤潮発生期間中シリカは比較的豊富に存在しており、植物プランクトンの中でも珪藻類が明らかに優占していた。このように鹿児島湾での*C. marina*赤潮においては既往の知見や仮説と必ずしも一致しない部分も見られることから、*C. marina*と珪藻類との競合関係を今後詳細に検討していく必要がある。

6. 結論

本研究は2008年に鹿児島湾で発生した*C. marina*による赤潮を対象として研究を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 既往の現地調査の結果を解析し、*C. marina*赤潮が発生しやすい気象条件を明らかにした。
- 2) 2008年の*C. marina*赤潮は、主に水温の好適条件下で降水による河川流量の増加により栄養塩の供給が増加したため、栄養塩制限下にあった*C. marina*が増殖して発生したことが示された。
- 3) *C. marina*の赤潮発生時においても、植物プランクトンとしては、珪藻が卓越して出現していることが確認された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、牛根漁業協同組合の皆様には現地調査の実施やデータの提供において多大なるご尽力をいただきました。また、中部大学・武田誠准教授には観測機器をご提供いただきました。さらに、鹿児島県水産技術開発センターの方々には貴重なデータを提供していただきました。ここに深甚なる謝意を表します。なお、本研究は文部科学省科学研究費・萌芽研究「逆エスチャリー循環が閉鎖性内湾の水環境に及ぼす影響について」(代表者：安達貴浩, 課題番号：19656233)ならびに財団法人米盛誠心育成会の補助を受けて行われたものであることをここに付記します。

参考文献

- 1) 例えば、山口峰生：有害・有毒赤潮の発生と予知・防除，水産研究叢書，48，pp.101-136，2000。
- 2) 九万田一巳ら：昭和61年度九州海域赤潮調査報告書，1987。
- 3) 水産庁：鹿児島湾赤潮発生原因調査研究報告書，1978。
- 4) 鹿児島県水産技術開発センターホームページ (URL: <http://kagoshima.suigi.jp/index.aspx>)
- 5) 牛根漁業協同組合：私信。
- 6) 渡辺正孝：赤潮の発生機構，月刊海洋，Vol.24, No.1, pp.43-49, 1992。
- 7) 山口峰生ら：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，Vol.57(7), pp.1277-1284, 1991。
- 8) 高橋正征ら：3.1.2 海の光環境，生物海洋学2，東海大学出版，1996。
- 9) Y. Nakamura and M. Watanabe：Chemical Environment for Red Tide due to *Chattonella antiqua* in the Seto Inland Sea, Japan, *J.O.*, Vol.44, pp.113-124, 1988。
- 10) 例えば、小野知足ら：播磨灘西域における *Chattonella antiqua* の高密度発生と水質，気象要因等との関係，日本水産学会誌，Vol.64(4), pp.665-672, 1999。
- 11) 今井一郎：第3章 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，日本水産資源保護協会，pp.29-70, 2000。