

過去21年間に有明海奥部で発生した赤潮原因 8種の前駆気象条件について

METEOROLOGICAL CONDITIONS OF FORERUNNER ON RED TIDE 8 SPECIES IN INNER ARIAKE SEA FOR THE PAST 21 YEARS

齋藤孝¹・滝川清²・園田吉弘¹

Takashi SAITHO, Kiyoshi TAKIKAWA and Yoshihiro SONODA

¹熊本大学自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

²フェロー 工博 熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター教授 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

In occurrence frequency of red tide 8 species, it was most number of times when the total precipitation for 7 days before red tide occurred was 10-50mm, the daylight hours before it occurred was more than 7.5 hours, the daily maximum temperature was 20-30°C, the daily maximum wind speed was less than 7.5m/s. In 84 times which red tide occurred with the 3 species of diatom, the incidence of red tide accounted for 75% when the total precipitation for 7 days before red tide occurred was more than 10mm. Before 1998, *Skeletonema costatum* red tide rarely occurred between July and November. However, after 1998, it frequently occurred in that season. In the terms, as the total precipitation for 3-5 days before red tide occurred was 0mm, it was suggested that *Skeletonema costatum* propagated oneself only by the daylight condition.

Key Words : Red tide, Meteorological, Ariake Sea

1. はじめに

有明海では、近年環境劣化が指摘されるなかで、珪藻をはじめ渦鞭毛藻、ラフィド藻を原因種とする赤潮が有明海奥部から熊本県沿岸海域にかけて多発傾向にある¹⁾。2000年のノリ漁期中に発生した *Rhizosolenia imbricata* を主体とする珪藻赤潮は、大規模かつ長期間持続し養殖ノリに甚大な色落ち被害をもたらした。こうした経緯から赤潮問題への取り組みは有明海の再生課題の1つに挙げられている²⁾。この珪藻赤潮の発生には大量の降雨と日照が長く続いたことが一要因として指摘されているが、赤潮発生予知に関する研究手法において、気象要素との関連性を解析することは有効であると考えている。赤潮の発生要因は、発生現場海域及び室内実験から原因種の水溫、塩分、流動、栄養塩、金属類その他増殖促進物質など物理・化学的に明らかにされつつあるが、こうした要因の挙動には降雨、風など気象の働きかけが大きいと考えられる。その意味で従来から気象との関連性が研究者や漁業関係者らによって指摘されてきた³⁾。しかし、数十年以上の長期的な調査・観測データを用い、赤潮原因種個々に発生時の気象要素と関連づけた研究事例は少ない。

本研究は、1985年以降21年間に有明海で発生し公

開データとなっている赤潮及び気象資料を基に、有明海奥部(佐賀県海域)における赤潮原因8種の赤潮に至る前駆気象条件を把握し赤潮発生との関連を明らかにすることを目的とした。

2. 有明海における21年間の赤潮発生状況

有明海における赤潮発生の状況把握は、有明海等環境情報・研究ネットワーク (<http://ay.fish-jfrc.a.jp/ariake/>) より1985~2005年まで4県(佐賀, 福岡, 熊本, 長崎) 海域別の発生日, 終息日, 原因種及びその最高細胞数等を整理した。有明海(4県海域全体)の年発生回数の推移は図-1に示すように、1985~1997年にかけて年間11~20回の範囲で推移していたが、1998年以降になると顕著な増加傾向にあり2002年には最多の48回発生している。

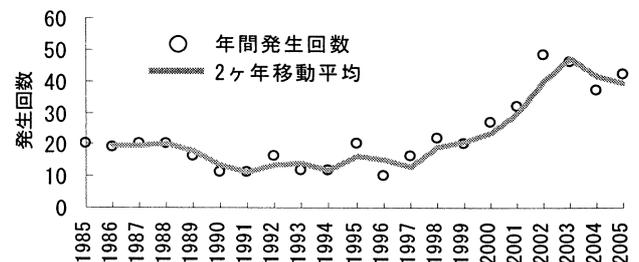


図-1 有明海における赤潮原因8種の年発生回数

主な赤潮原因種としては8種が挙げられ、それらは珪藻類の*Skeletonema costatum*, *Chaetoceros spp.*, *Thalassiosira spp.*, ラフィド藻の*Chattonella antiqua*, *Heterosigma akashiwo*, 渦鞭毛藻類の*Gymnodinium sanguineum*, *Prorocentrum spp.*, *Ceratium furca*である。また、これら原因種別の発生率は図-2に示すように佐賀, 福岡, 熊本県海域では珪藻3種が全体の54~76%を占めたが、長崎県海域のそれは20%以下であった。長崎県海域の主な出現場所は諫早湾で、同湾の赤潮原因種が*G.sanguineum*, *C.antiqua*, *H.akashiwo*の3種によって大半が占められており、2000年以降*C.antiqua*, *H.akashiwo*の有害赤潮原因種に変わりつつあることが指摘されている⁴⁾。

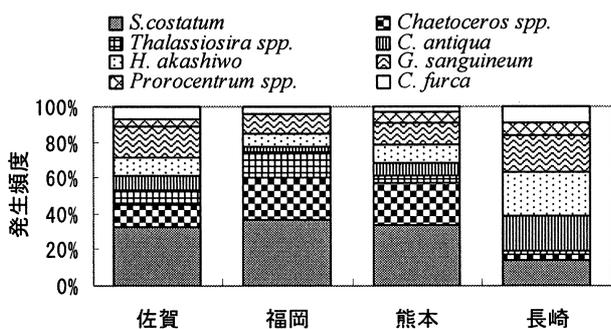


図-2 4県海域における赤潮原因8種の発生頻度

3. 有明海奥部の赤潮原因8種の前駆気象

(1) 対象海域と前駆気象要素の選定

一般に、赤潮は降雨後、2, 3日穏やかな快晴が続くと発生するといわれており、赤潮発生海域においては河川水が流入し流動が比較的緩慢であることが想定される。このことから、対象海域の選定では、有明海4海域のなかで塩田川, 六角川, 嘉瀬川が注ぎ込み、潮流が弱い有明海奥部の佐賀県海域とした。前駆気象要素は佐賀地方気象台の観測データとして取り扱われている日降雨量, 日照時間, 日最高気温, 日最大風速の4要素を採用した。赤潮発生には日射量の関連性も重視されるが、日照時間には直達日射量 $120W/m^2$ 以上というしきい値が設定されていることを考慮し、今回は観測項目の全天日射量を外した。

(2) 赤潮原因8種の前駆気象

原因8種の前駆気象条件を図-3, 表-1に示す。

a) *Skeletonema costatum*

本種の赤潮発生回数は8種中最多の53回で、周年にわたって発生するが特に夏と秋に集中し66%の発生率である。発生前7日間の日降雨量は、平均的には0~54mmの範囲で、平均日照時間が4.9時間であるが2日前から発生日にかけて上昇し、風速は弱まる傾向が示されている。

b) *Chaetoceros spp.*

本種赤潮発生回数は19回で、春を除く3季に集中

的である。本種は単一赤潮に至るケースが少なく、しばしば*S.costatum*との混成赤潮となり、その発生時期は秋と冬に多かったが、このケースでは前日までの降雨量は極端に少ない。

c) *Thalassiosira spp.*

本種の発生回数は12回であるが、単独で赤潮とはならず、すべて*S.costatum*と混成形態をとる。

d) *Chattonella antiqua*

発生回数は13回で、うち12回は6~8月に集中しているため高水温を好む種であるとみられる。このため、本種の発生前7日間平均気温は8種中最高 $32.6^{\circ}C$ で、 $27\sim 38^{\circ}C$ の範囲である。しかし、発生日の平均日照時間をみると、珪藻類3種と比べると下方にあり日照への依存度は低い傾向にある。この点に関して、本種のシスト発芽は低照度でも可能であるといわれている。

e) *Heterosigma akashiwo*

すべて5~8月に発生し特に5月期は8回と多い。発生前7日間の日降雨量は、発生4日前までは平均10mm前後で少ないが、6日前には20mm近いところにピークがある。このため、本種は降雨の影響がしばらく日数を経て現れるタイプであることが示唆される。平均日照時間も降雨と同じように発生直前よりも4~5日前が大きくなっている。また、平均日最高気温は $25\sim 27^{\circ}C$ で推移するが、本種赤潮は広島湾でも6月前後に毎年のように発生し、そのときの水温は $15\sim 20^{\circ}C$ 以上での発生が大部分としている。有明海浅海定線調査では、塩田川河口海域の発生同一日の水温は全層とも $19.1^{\circ}C$ であったことから有明海奥部の*H.akashiwo*赤潮もこうした好適温度が大増殖に影響したことが考えられる。

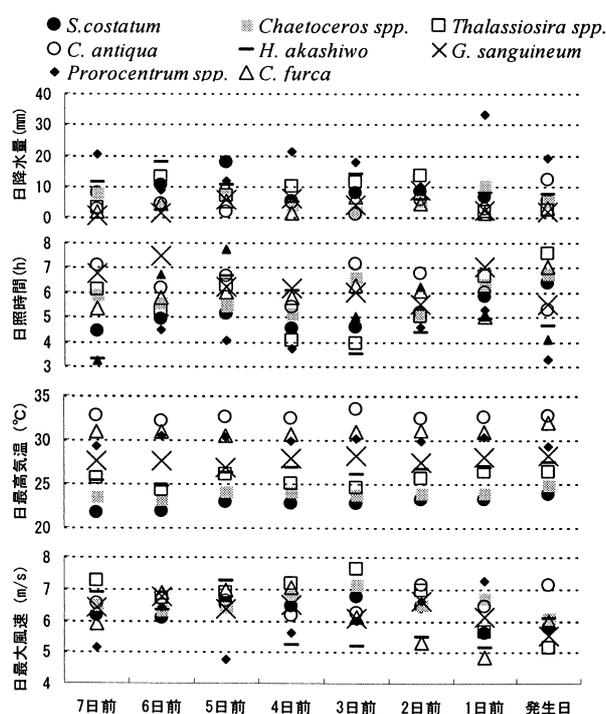


図-3 赤潮原因8種の発生前1週間の気象

f) *Gymnodinium sanguineum*

発生回数27回は*S.costatum*に次ぐ多さである。周年にわたって赤潮を形成するが、半数以上が7~9月に発生している。発生前7日間の平均日降雨量は、5mm以下で、降雨の影響が珪藻類に比べ小さいことが示唆される。しかし、日照時間は8種中上位で発生前日は7時間辺りにあることから、日射への依存度が大きくその条件が調べば冬季の低温下でも大増殖の可能性が示唆される。

g) *Prorocentrum spp.*

本種はすべて6~8月に発生し特に7月期が多い。発生前日の日降雨量は30mm以上と8種のなかでは突出しており降雨性赤潮の典型種といえる。また、日照時間は発生前7日間を通じ4時間前後で下位にあることも本種の特色である。

h) *Ceratium furca*

本種の発生時期も*Prorocentrum spp.*と重なり6~9月である。発生前最高気温は*C.antiqua*に次ぐ高さで30~32°Cで推移し比較的高水温の時期に赤潮に至る種である。また、発生前日~4日前の日降雨量が少ないことから降雨に伴う栄養塩の補給量や塩分低下よりも温度が最優先される種と考えられる。

(3) 赤潮原因3藻類の発生前の気象階級別発生頻度

これまで赤潮原因8種個々の発生前7日間を通じた前駆気象をみてきたが、以下ではこれら原因種が大増殖を始める前段階にどのような気象条件のときに発生頻度が高かったのかを3藻類区分で調べた。

この結果、図-4示すように気象4要素の階級別発生頻度において、発生前7日間の総降雨量は3藻類とも10~50mmの階級頻度が全体の39~53%を占め最多であった。発生前日の日照時間は、珪藻類及び渦鞭毛藻類は7.5時間以上の2階級を合わせた発生頻度は51%となりそれ以下の3階級を上回っているが、ラフィド藻類は7.5時間以下の3階級合計で63%を占めた。また、珪藻類3種の発生前日の日最大風速は2.5~5.0m/sの階級頻度が50%近くになっているのに対して、ラフィド藻類と渦鞭毛藻の場合はそれよりも1階級大きい5.0~7.5m/sの頻度が60%近くであった。

このように、日照時間と日最大風速は赤潮原因藻類によって発生前日の気象条件は異なることが示されており、特に珪藻赤潮が発生する前日の気象については、7.5時間以上の日照条件下にあって日中は風浪がかなり弱まっていたものとみられる。

表-1 過去21年間に有明海奥部で発生した赤潮原因8種の前駆気象条件

赤潮原因種	発生回数					気象要素				
	春	夏	秋	冬	計	降雨(mm)	日照(h)	気温(°C)	風速(m/s)	
珪藻類	<i>S.costatum</i>	5	21	14	3	53	0-54(9.0)	1-10(4.9)	7-34(22.6)	4-10(6.3)
	<i>Chaetoceros spp.</i>	1	7	7	4	19	0-46(5.8)	2-10(5.7)	10-35(23.8)	5-10(6.6)
	<i>Thalassiosira spp.</i>	1	4	4	3	12	1-24(8.5)	3-8(5.3)	10-33(25.3)	4-10(6.9)
ラフィド藻類	<i>C. antiqua</i>	0	12	1	0	13	1-9(3.5)	4-11(6.4)	27-38(32.6)	5-9(6.5)
	<i>H. akashiwo</i>	8	9	0	0	17	2-24(10.1)	1-7(4.8)	22-32(26.1)	5-7(5.9)
渦鞭毛藻類	<i>G. sanguineum</i>	2	13	9	3	27	0-20(4.3)	1-10(6.4)	15-35(27.7)	5-10(6.4)
	<i>Prorocentrum spp.</i>	0	7	0	0	7	3-46(17.5)	3-9(4.4)	26-34(30.0)	5-7(6.0)
	<i>C. furca</i>	0	8	3	0	11	0-12(3.9)	2-10(5.7)	26-35(30.8)	5-9(6.1)

注) 気象要素の欄の値は、発生毎に発生1日前から7日前まで値を平均処理しその最小-最大(平均値)を示す。

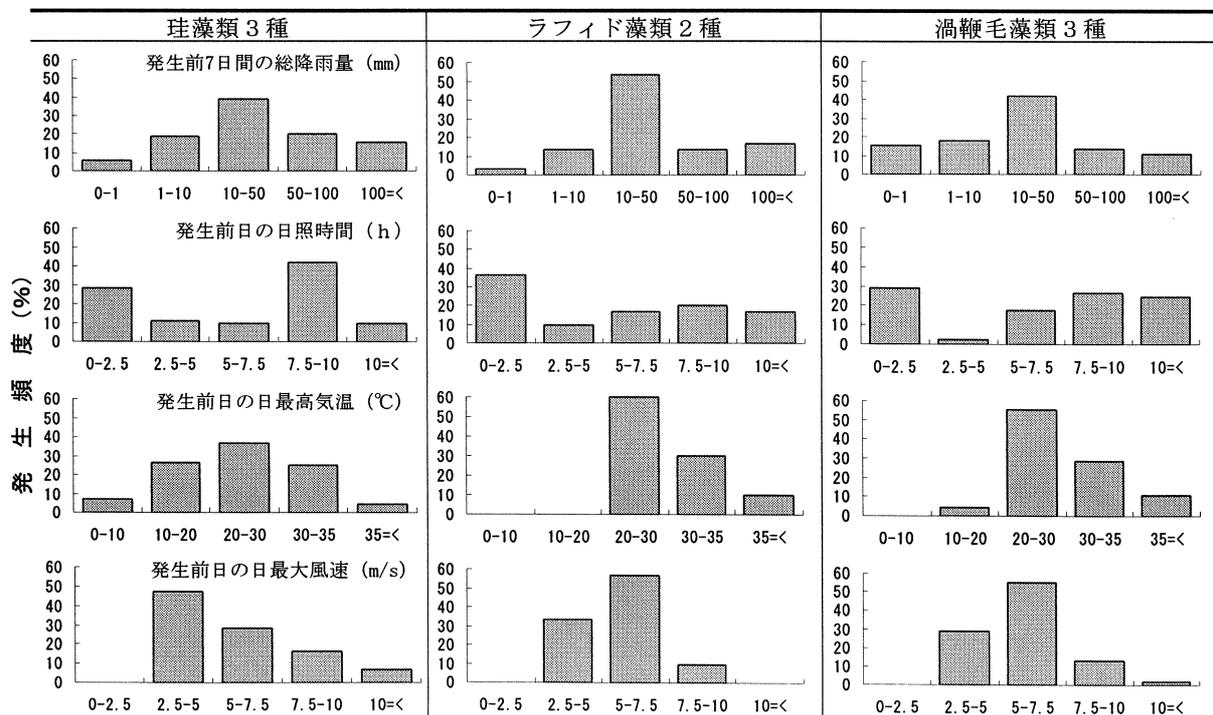


図-4 佐賀県海域における赤潮原因3藻類の気象要素別の階級発生頻度(1985~2005年)

4. 赤潮発生増大前後の前駆気象

(1) 4 県海域の赤潮発生回数

有明海における赤潮発生回数は、先の図-1に示したように、1998年以前の横ばい傾向から1998年以降になると一転して増加し始めている。4県海域別の赤潮原因8種の1998年前後の発生回数は図-5に示すようにいずれも1998年以降に増加し、特に長崎県、熊本県の増加が目立つ。

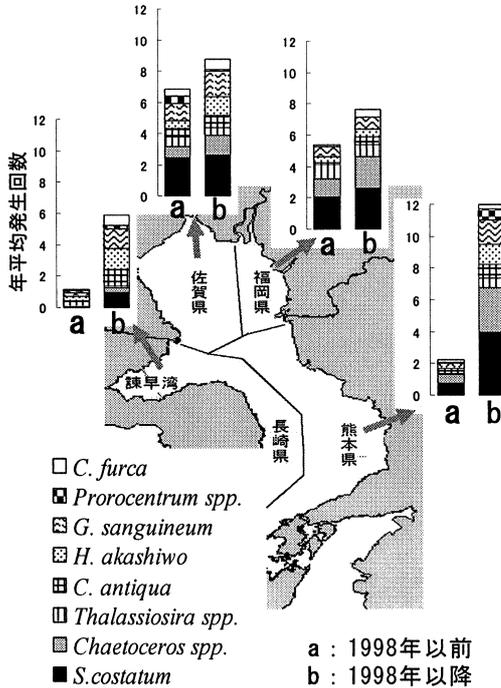


図-5 1998年前後の赤潮原因8種の年平均発生回数

(2) 赤潮の発生時期

有明海奥部（佐賀県海域）における1998年以前・以降の赤潮発生時期の比較を図-6に示す。ここで両発生時期に明確な違いが出ている種は*S. costatum*と*Prorocentrum spp.*でしかも、両者では1998年前後の発生状況が異なっている。つまり、*S. costatum*は1998年以降の発生時期がそれ以前には発生していない7~11月期に比較的に多く発生している点である。反面、*Prorocentrum spp.*の方は発生時期の範囲は両時期とも共通しているものの、発生回数が1998年以前の6回に対してそれ以降は1回だけとなっている。

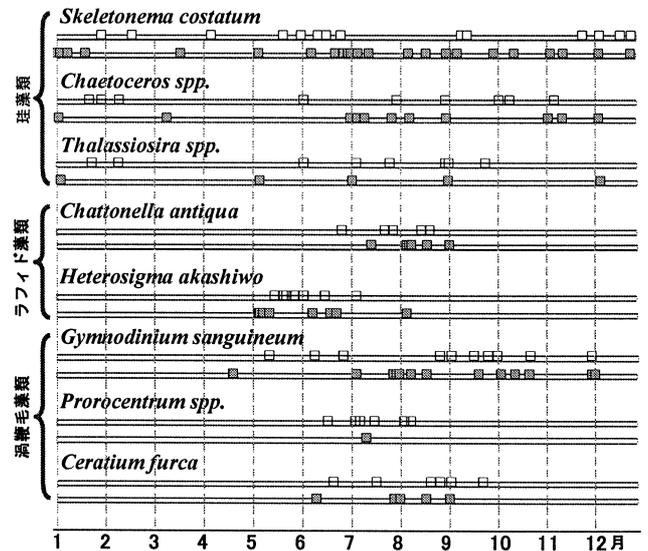
(3) 赤潮発生増大前後の前駆気象

図-7は赤潮原因種の最高出現細胞を「1」とし、赤潮発生日の各気象要素の値を表-2に示す抽出方法により取り出した関係図である。各気象要素の抽出は、赤潮が降雨後2~3日静穏で快晴が続くと発生し易いという知見から、まず降雨は赤潮発生日3~5日前を想定しその間の最大値を抽出した。これは平均日降雨量では赤潮との関連性を過小評価する可能性からである。日照時間も降雨と同じ考え方で赤潮発

生日前3日間での最大値とした。これに対して日最高気温と日最大風速は発生日前日から3日前までの平均値とした。これは、両気象の継続度をみるときに3日間のうち最小ないし最大では不適と考えた。

有明海奥部における1998年前後の最高出現細胞時の前駆気象条件を表-3に示した。

この結果、先の赤潮発生時期の比較で違いが明らかになった珪藻類の*S. costatum*の場合、日降水量の1998年以降には0mmと100mmを超えるところにピークが示され、日照時間も3hと10h辺りがピークで、両時期の前駆気象にも大きな違いが現れている。*Chaetoceros spp.*は、両時期の日降水量曲線に変化はなかったものの、他の3要素には1998年以前に対してそれ以降の曲線にはいくつかの大小のピークがある。一方、ラフィド藻類の2種は両時期の曲線は概ね重なり合っているが、日照時間だけは1998年以前のピークは4~9hにあり、曇天時の赤潮形成であったことが伺われる。また、渦鞭毛藻類では1998年以前の年平均発生数1.1回に対してそれ以降は1.6回とやや増大傾向の*G. sanguineum*は、日降水量曲線はほぼ同一であったが、他の3要素はいずれも1998年以降の方が大きい数値にピークが示された。



上段□：1998年以前，下段■：1998年以降
図-6 1998年前後の赤潮原因8種の発生時期

表-2 気象要素の抽出方法

赤潮発生年月日	赤潮形成時における最高出現細胞数	気象要素			
		日降雨量	日照時間	日最高気温	日最大風速
		発生日の3日前から5日前での最大日降雨量	発生日の前日から3日前での最大日照時間	発生日の前日から3日前までの3日間の平均	
		○○○	○○○	○○○	○○○
		○○○	○○○	○○○	○○○
		○○○	○○○	○○○	○○○
		○○○	○○○	○○○	○○○
		○○○	○○○	○○○	○○○
赤潮発生日	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○

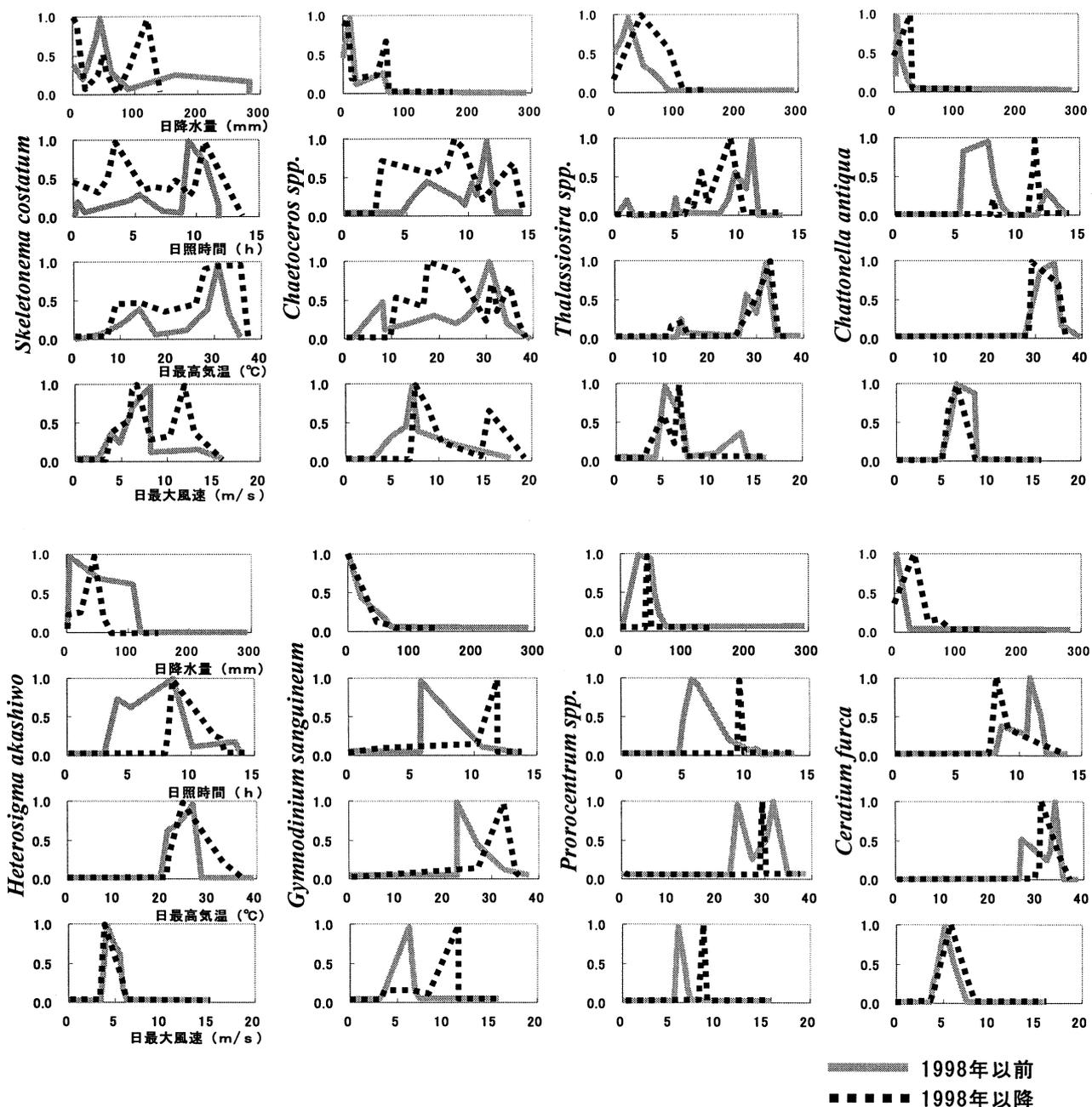


図-7 赤潮増大前後における赤潮原因8種の前駆気象の比較

表-3 1998年前後における最高出現細胞時の前駆気象条件と赤潮未発生年

赤潮原因種		気象要素								未発生年
		日降雨量(mm)		日照時間(h)		日最高気温(°C)		日最大風速(m/s)		
		98前	98後	98前	98後	98前	98後	98前	98後	
珪藻類	<i>S.costatum</i>	45	0	9.1	10.7	30.3	35.1	8.1	6.5	90, 92, 97, 98, 01-03
	<i>Chaetoceros spp.</i>	12	3	11.0	8.4	31.1	16.6	6.3	6.2	85, 89, 90, 93-97, 99, 04, 05
	<i>Thalassiosira spp.</i>	23	42	11.2	9.4	32.1	32.2	5.1	6.6	88-94, 96-99, 03-05
ラフト藻類	<i>C. antiqua</i>	3	27	7.5	11.0	33.9	29.5	6.6	6.5	85-87, 91, 93, 95, 97, 02, 05
	<i>H. akashiwo</i>	4	42	8.4	8.2	26.6	24.0	4.2	3.9	86, 88, 91, 93, 96, 98, 99, 01
渦鞭毛藻類	<i>G. sanguineum</i>	0	0	5.8	11.5	23.9	32.8	6.3	11.5	91, 95, 97
	<i>Prorocentrum spp.</i>	27	41	5.5	9.4	32.1	28.6	5.9	8.4	86, 90-00, 02-05
	<i>C. furca</i>	0	32	10.7	8.2	34.3	31.0	5.0	5.7	87, 90, 92-94, 96, 97, 99-01, 04

5. まとめ

有明海奥部で過去 21 年間に発生した赤潮原因 8 種について赤潮発生前の気象を取り纏めた結果、まず、1985～2005 年まで 21 年間を通じてみると、以下の事柄が明らかとなった。

①珪藻類 3 種による赤潮発生 84 回のうち、発生前 7 日間総降雨量が 10mm 以上、発生前日の日照時間が 9 時間以上、同じく日最大風速 5.0m/s 以下の 3 気象条件が重なった場合の赤潮発生率は 19% で低かったが、降雨量のみのは 75% とかなり高かった。このことは、珪藻赤潮の発生要因が降雨時に河川水の流入に伴う塩分低下、栄養塩類をはじめとする増殖促進物質の補給等の影響を受けていることが考えられる。

②ラフィド藻赤潮は 5～9 月の初夏、盛夏に集中するが、日照時間は珪藻に比べ下位にあった。このため、ラフィド藻赤潮を代表する *Chattonella antiqua* は低日照条件下では珪藻との競合において優位であることが示唆された。

③渦鞭毛藻 *G. sanguineum* は降雨量よりも日照時間への依存度が比較的大きい種であった。

次に、赤潮発生数が増大する 1998 年以前とそれ以降の前駆気象を比較してみた結果、以下の事柄が明らかとなった。

④まず 1998 年前後における赤潮発生前の各気象要素について有意差検定を行った結果、日照時間と日最大風速は両期に有意な差 ($P < 0.05$) がみられ、これら 2 要素の平均値は 1998 年以降に日照時間が 1.1h 減少し、日最大風速が 0.6m/s 増大していた。

⑤1998 年以降、特に熊本県海域の発生数増加が顕著でその原因藻は珪藻 *S. costatum* であった。これに関しては、熊本沖では水塊構造と底質分布の関係が明らかにされている⁵⁾、本種の赤潮発生数増加との関連も考えられる。

⑥佐賀県海域では *S. costatum* は 1998 年以降、それ以前に未発生だった 7～11 月期に多く発生していた。*S. costatum* の場合、最高細胞数に至る降雨強度が 1998 年前後で違っており、1998 年以降には降雨 0mm の場合でも赤潮が発生していた。佐賀県海域では 1998 年以降に水温、COD の上昇と塩分、透明度、DIN、P04-P の低下が起こっている¹⁾。さらに、発生前の海域には降雨に伴う陸地から無機栄養塩類等の増殖を促進させる物質の新たな補給がなかった。また、1998 年以降は夏季に多発生したがこのときの日照時間が長く 10 時間を超えていた。したがって、*S. costatum* が栄養塩濃度が非常に高い水域を指標する種であるとされているものの、1998 年以降の増大原因を栄養環境の面からは説明できず、本種は日照条件だけで増殖できた可能性が示唆される。

⑦ラフィド藻類の最高出現細胞指数曲線は、日照時間を除く 3 要素で両時期ともほぼ重なっており、1998 年以前は短い日照時間で増殖が起こっていた。

⑧ *Chaetoceros spp.* は 1998 年以降、降雨量が極端に

少ない状況は *S. costatum* の場合と共通していたが、尚且つ 3 時間を下回る短日照時間条件下においても赤潮に至っていた。このことは、同じ珪藻類であっても *Chaetoceros spp.* の場合は長時間日照が栄養細胞の増殖を律速する第一要因にはなっていないことが考えられる。

⑨ *S. costatum* に次いで多発生した *G. sanguineum* は 1998 年以降、最高出現細胞に至るケースでは、日降水量を除く 3 気象要素ともに 1998 年以前より大きい数値で現れていた。このことは、1998 年以降の赤潮が風による巻上げが本種シストの発芽を誘発し、増殖過程ではその直後の長時間日照が影響を及ぼしていたものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、1985～2005 年に有明海奥部で発生した赤潮原因 8 種について、発生前の気象との関連性を調べた結果、原因種によっては気象の影響を受けていることが示唆された。赤潮対策の観点から、赤潮に至る前の早い段階で前駆現象を探り出し発生予知を行うことが求められているが、今後本研究で明らかになった事柄は赤潮発生の予知にも活用できると考えられる。

しかしながら、この作業にあたっては数多くの要因が複雑に関わり合っていると考えられる赤潮発生において、気象・海況の諸条件のみならず水質・底質・生物現象についても細かく分析し、これら多数の要因を総合的に取り扱うことができる新たな予知技術を創り出す必要があると考える。

参考文献

- 1) 園田吉弘・滝川 清・齋藤 孝：有明海における赤潮発生と海域環境の変動特性，海洋開発論文集 第 24 巻，pp. 615-620, 2008.
- 2) 滝川 清・松本聖治・堀田英一・柴田剛志・尾木陽子・園田吉弘：有明海・八代海再生へのマスタープラン～熊本県の取り組み，海洋開発論文集 第 23 巻，pp. 261-266, 2007.
- 3) 園田吉弘・滝川 清・齋藤 孝：有明海における生物生息環境の歴史的変動特性について，海洋開発論文集 第 23 巻，pp. 609-614, 2007.
- 4) 松岡数充：諫早湾における赤潮原因プランクトンの最近の変化，月間海洋，35，pp. 246-251, 2003.
- 5) 滝川 清・秋元和實・平城兼寿・田中正和・西村啓介・島崎英行・渡辺 枢：有明海熊本沖の水塊構造と表層堆積物分布特性，海岸工学論文集 第 52 巻，pp. 956-960, 2005.