

有明海における赤潮発生と海域環境の変動特性

CHARACTERITIC OF ENVIRONMENTAL CHANGING WITH OCCURRENCE OF RED TIDE IN ARIAKE BAY

園田吉弘¹・滝川清²・齋藤孝¹

Yoshihiro SONODA, Kiyoshi TAKIKAWA and Takashi SAITHO

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)

Separately water quality into the before increase of red tide occurrence becomes remarkable (1987 April-1998 March) and the after increase of occurrence becomes remarkable (1998 April-2004 March), cluster analysis was done. The tendency to change of environmental characteristic before and after increase of red tide occurrence was examined at each sea area division by cluster analysis. Ariake Bay was divided into 6 zones as follows, head of bay north and west part and head of bay east part and Chikugo river estuary front, middle and entrance of bay. In order to correspond with this division, occurrence of red tide in sea area was rearranged, connection of increase of red tide occurrence and characteristic of variation of sea area environment was investigated. Middle and entrance of Ariake Bay, after 1998 when red tide occurrence increases, rise of water temperature, transparency, COD, PO4-P and decrease of (NO2-N + NO3-N)/NH4-N ratio which are cause and factor of red tide increase, became clear.

Key Words : Red tide, Change of environmental characteristic, Cluster analysis, Ariake Bay

1. はじめに

有明海における底質の泥化, 貧酸素水塊や赤潮発生の増加, 大規模化など生物生息環境の悪化が著しいものの, 環境悪化の要因・原因についての知見に乏しい状況にある。海域環境は物理・化学的要因や, これに生物系の要素が加わる複雑系であり, 総合的な視点からの調査・分析が重要であるが, いまだ総合的・科学的視点からの研究成果が十分に得られていない。本研究は, 近年の赤潮発生の頻発化, 長期化, 広域化などの現象の機構を, 過去からの海域環境調査データの変動特性との関連において解析して, 有明海における赤潮発生と海域環境変動との特性を明らかにしようとするものである。

2. 有明海における赤潮発生状況の変化

(1) 赤潮発生の増加に関する原因・要因

有明海においては, 以下に示すような赤潮発生の増加の原因・要因が指摘されている¹⁾。

a) 赤潮全般

- ・赤潮プランクトンは, 種類により程度は異なるが, 一般的に水温の上昇により増殖速度が増加する。
- ・アサリなどの二枚貝の減少は, 懸濁物の除去能力を低下させ, 海域の浄化能力の低下と富栄養化を招き, 赤潮発生が増加することが考えられる。

- ・小潮時に *Chattonella* 赤潮の発生や, クロロフィルの増加がみられることから, 経年的に潮流低下, 潮位差減少が生じている海域では, 赤潮発生が増加することが考えられる。

b) 珪藻

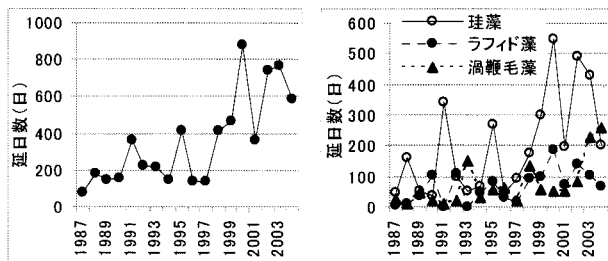
- ・一般的に透明度の上昇は, 光制限を緩和し増殖速度の促進に有利に働く。
- ・富栄養化した海域では, 気象・海象条件が整うと, 植物プランクトンが大繁殖し, 赤潮が発生する。

c) 鞭毛藻, ラフィド藻

- ・有明海湾奥部や諫早湾では, 貧酸素水塊によって底泥から栄養塩および鉄が溶出し, *Chattonella* 赤潮の増加につながっていることが考えられる。赤潮生物は, 種類によって生理的・生態的性質は異なるが, その挙動には, 水温, 透明度, 富栄養化, 貧酸素水塊, 流動特性などの海域環境の変動や気象条件等が, 密接に関わっている。

(2) 赤潮データの整理

図-1 は, 九州海域の赤潮^{2), 3)}により調べた 1985年から2005年の21年間の, 485件におよぶ赤潮発生の経年変化の状況である。この図に示されるように, 有明海では1998年頃以降, 赤潮発生の延日数や珪藻赤潮の増加の傾向などが顕著に表れており, 近年, 赤潮発生の増大に密接に関連する海域環境の変動が生じていることを示唆している。



(a) 赤潮発生延日数 (b) 赤潮生物別延日数
図-1 有明海における赤潮発生の延日数の推移

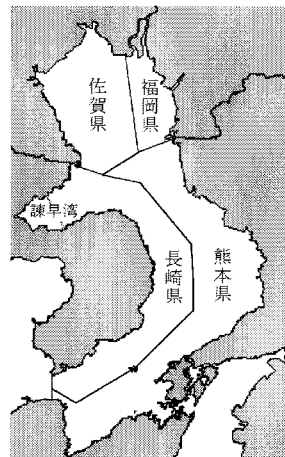


図-2 赤潮の発生海域区分

九州海域の赤潮^{2), 3)}をもとに, 「3. 海域環境の変動解析結果」で後述するように, クラスター分析と同一の期間における赤潮の発生状況を, 赤潮増大前後の環境特性の変動の傾向が類似する海域に対応するように整理し, 赤潮発生の増大と海域環境の変動特性の関連性を調査した. 海域区分については, 図-2の赤潮発生海域区分と図-7のクラスター分析による海域区分に示すように, 赤潮発生海域のうち, 福岡県海域が湾奥部の B・C 海域, 佐賀県海域が湾奥部の A・D 海域, 熊本県と長崎県を合わせた海域が湾央・湾口部の E・F 海域に, 対応する. なお, クラスター分析は諫早湾を含んでいないため, 長崎県の赤潮データのうち諫早湾でのみ発生しているものを除外した.

また, 赤潮のデータについては, 赤潮発生の増大が顕著になる前 (1987 年 4 月～1998 年 3 月の 11 年間) および発生の増大が顕著になった後 (1998 年 4 月～2004 年 3 月の 6 年間) の時期に分けて, 発生海域ごとに, 赤潮発生の回数, 延日数および赤潮生物別の発生回数を月別に合計し, 平均値を求めた.

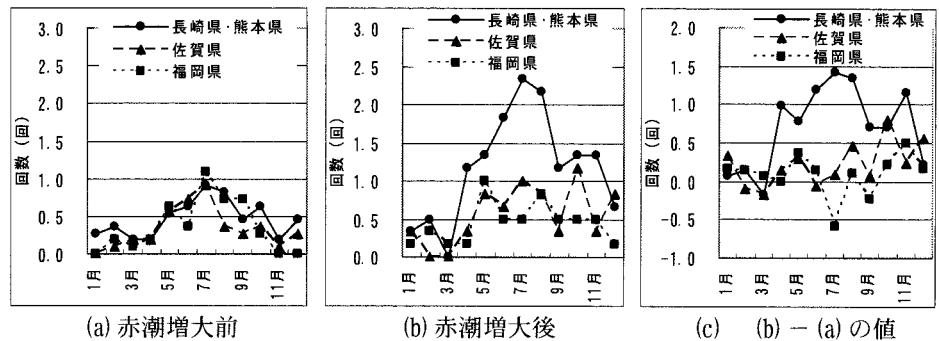


図-3 赤潮の月別平均発生回数の変化

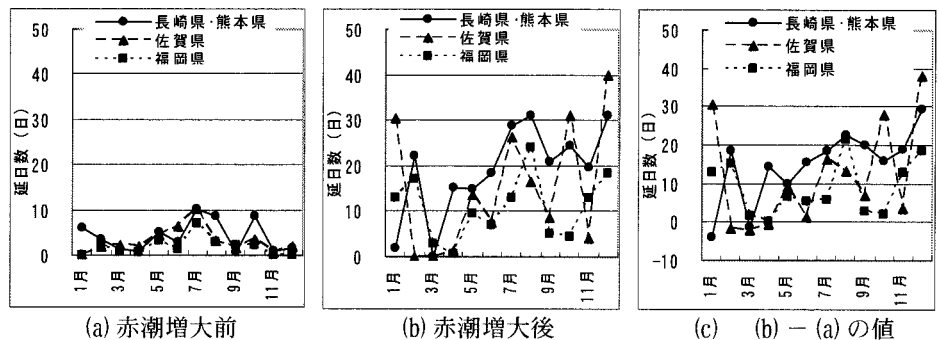
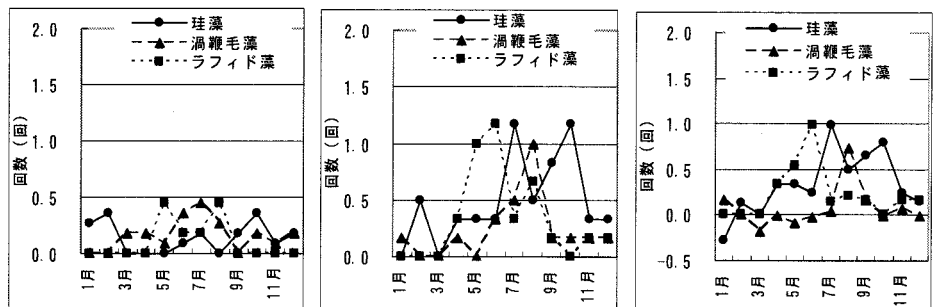


図-4 赤潮の月別平均発生延日数の変化



(a) 赤潮増大前 (b) 赤潮増大後 (c) (b) - (a) の値
図-5 赤潮生物別の月別発生回数の変化 (長崎県・熊本県)

(3) 赤潮の発生回数および発生延日数

図-3 (a), (b) から, 長崎県・熊本県では 7 月が最も回数が多いが, 佐賀県と福岡県では, 5 月～12 月の期間において同程度の回数で発生する傾向がみられる.

また, 図-3 (c) から, 赤潮増大後, 長崎県・熊本県での発生回数の増加が顕著である. さらに, 図-

4 (c) を合わせて考えると, 福岡県と佐賀県は, 長崎県・熊本県とともに, 延日数の増加傾向が顕著に表れており, 赤潮増大後に発生期間が長期化している.

(4) 赤潮生物

長崎県・熊本県では、図-5 (b) から、赤潮増大後に、珪藻は 7 月・11 月、渦鞭毛藻は 8 月、ラフィド藻は 6 月の発生回数が最も多くなる。また、図-5 (c) から、珪藻とラフィド藻は、5 月～10 月に増加傾向がみられる。

佐賀県海域では、図-6 (a), (b) から、赤潮の増大後は、増大前に比べ、ラフィド藻と珪藻の発生回数が多くなる傾向がみられる。また、図-6 (c) から、珪藻は 7 月～11 月、ラフィド藻は 8 月～11 月に発生回数が増加する傾向がみられる。福岡県は、図-7 (a), (b) から、夏季の 7、8 月における珪藻の発生回数が最も多い、また、図-7 (c) から、赤潮の増大前後において、赤潮生物別の発生回数に大きな変化はみられない。

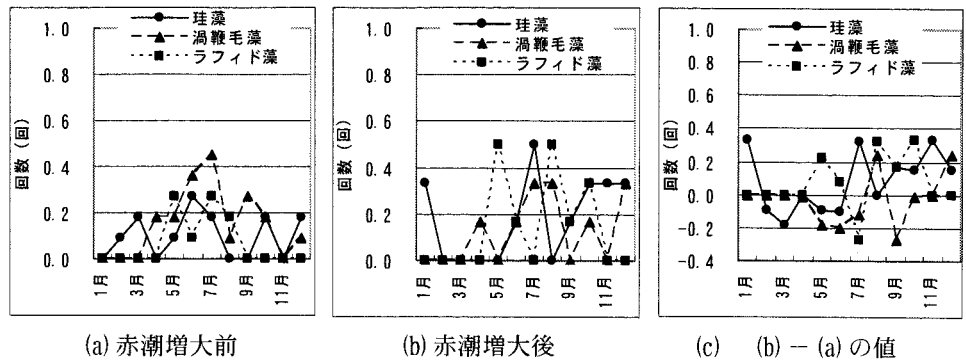


図-6 赤潮生物別の月別発生回数の変化 (佐賀県)

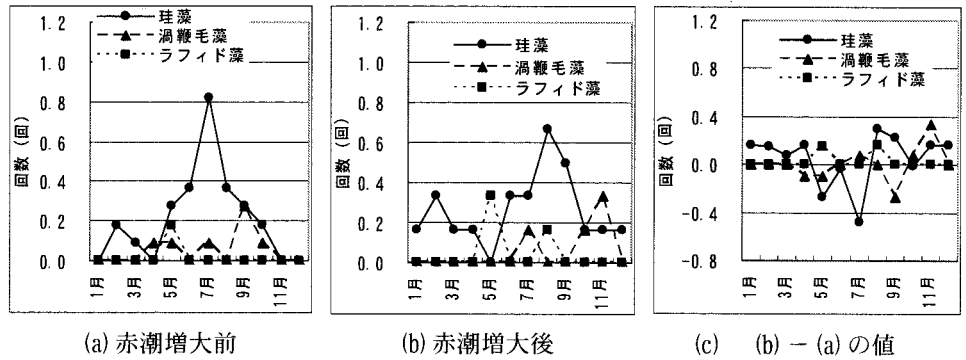


図-7 赤潮生物別の月別発生回数の変化 (福岡県)

3. 海域環境の変動解析結果

(1) クラスター分析による海域区分

赤潮発生の増大と海域環境の変動特性との関連性を解析するために、浅海定線調査データの中から調査項目の揃っている水深 5m 層のデータにより、有明海で赤潮発生の増大が顕著になる前 (1987 年 4 月～1998 年 3 月) および発生の増大が顕著になった後 (1998 年 4 月～2004 年 3 月) の時期に分けてクラスター分析を行った (SPSS 社統計ソフト SPSS ver. 15)。クラスター分析には、水温、塩分、透明度、DO、COD、DIN、PO4-P の 7 項目の、毎月の観測値を使用し、欠測した月は移動平均により補完した。また、クラスター分析は、データは全て独立したクラスタと見なした初期状態をまず作り、その状態から始めて、クラスタ間の距離を計算し、最もこの距離に近いものから逐次クラスタを併合し、全てのデータが一つのクラスタに併合されるまで繰り返す階層型の手法とし、クラスタ間の距離の計算は、Ward 法によった。

クラスター分析の結果、図-8 に示すように、湾奥部は、A の湾奥北部、B の筑後川河口沖、C の湾奥東部、D の湾奥西部に、湾央・湾口部は、E の湾央東部、F の湾央西部・湾口部にそれぞれ区分され、赤潮発生増大の前後における海域区分の分布に、大きな変化はみられない。

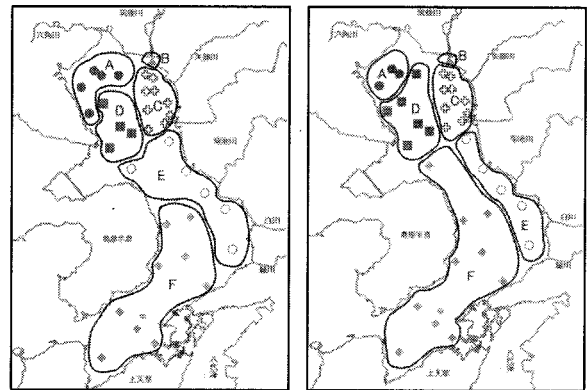


図-8 クラスター分析による海域区分 (水深 5m データ)

(2) 水質要素の海域特性

赤潮発生の増大の前後の時期に分けて、クラスター分析による海域区分ごとに、赤潮の増大と密接に関連する水温、塩分、透明度、COD、DIN、PO4-P の 6 項目の月平均値の年変動を調べた。さらに、 $(NO_3-N + NO_2-N)/NH_4-N$ 比による硝化能力と DIN/PO_4-P 比による栄養塩バランスの月平均値の年変動を調べた。

a) 水温

月平均値の年変動特性を図-9に示した。図-9(b)から、水温は $+1.6 \sim -0.8^{\circ}\text{C}$ の範囲で変動する。7月と9月は、全ての海域区分で、前後の月に比べ水温が低下するが、図-10(a)の塩分の低下傾向から、7月の水温低下は梅雨による陸水の流入等の影響が考えられる。

図-9(b)から、海域区分別にみると、特に、E海域は2, 7, 9月を除いて、また、F海域は1, 2, 3月を除いて、赤潮増大前に比べ、水温が上昇している。また、8, 10月は、全ての海域区分で赤潮増大前に比べ、水温が上昇している。

b) 塩分

月平均値の年変動特性を図-10に示した。図-10(b)から、赤潮増大前に比べ、5月から9月にかけて上昇する傾向がみられる。

c) 透明度

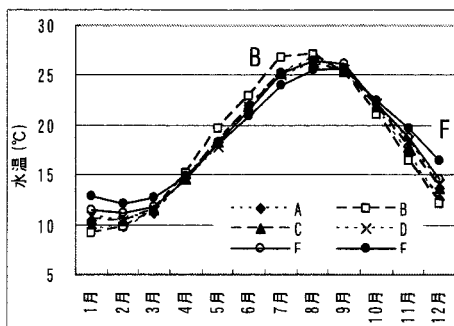
月平均値の年変動特性を図-11に示した。図-11(b)から、赤潮増大前に比べ、湾央・湾口部のF, E海域で上昇し、湾奥のD, A海域で減少する傾向がみられる。月別にみると、F海域では6, 11月を除き、また、E海域では6, 9, 10, 11月を除いて、透明度が上昇している。有明海における最近の透明度の増加は、浮泥の巻き上がりの低下の影響が大きく、その原因として潮位差の減少による潮流流速の減少や平均潮位の増加が推測されているが⁴⁾、総合的・科学的な視点からの説明は進んでいない。

d) COD

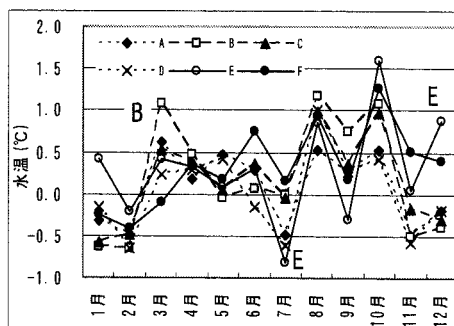
月平均値の年変動特性を図-12に示した。図-12(b)から、赤潮増大前に比べ、F, E, A海域で増加し、B, C海域で減少する傾向がみられる。

e) DIN

月平均値の年変動特性を図-13に示した。図-13(b)から、赤潮増大前に比べ、6, 8, 10月などで

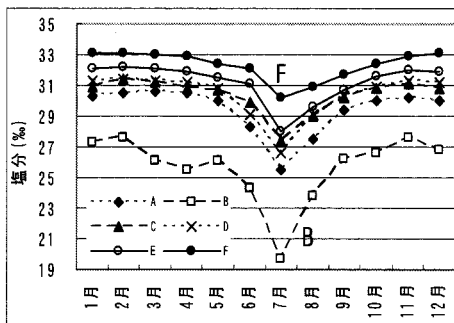


(a) 赤潮増大前

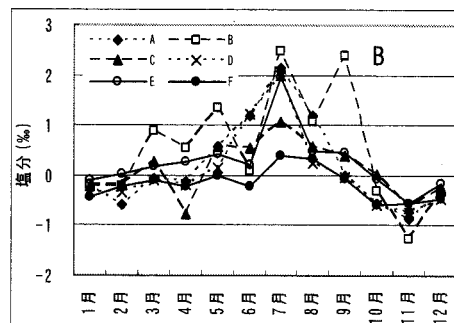


(b) 赤潮の増大後から増大前を引いた値

図-9 水温の月平均値の年変動特性

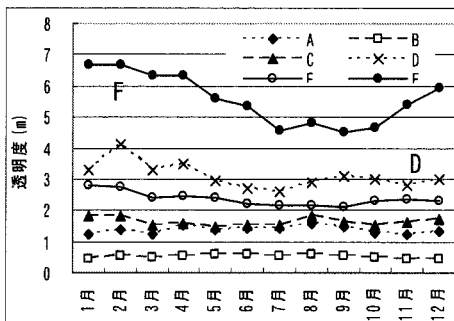


(a) 赤潮増大前

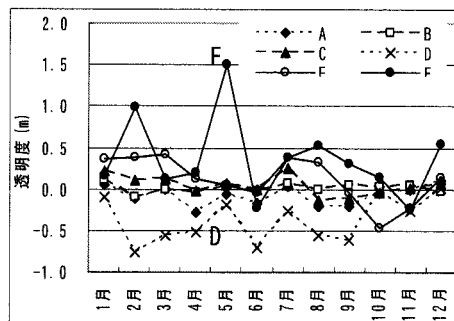


(b) 赤潮の増大後から増大前を引いた値

図-10 塩分の月平均値の年変動特性

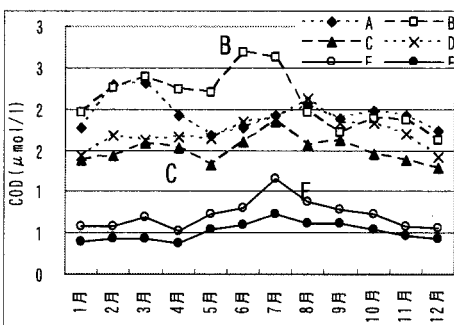


(a) 赤潮増大前

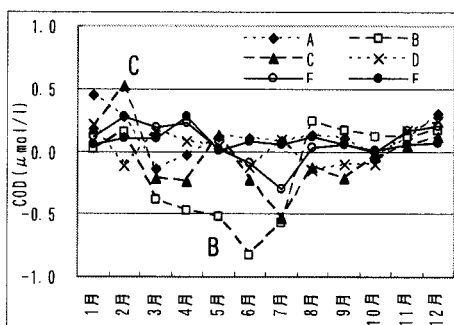


(b) 赤潮の増大後から増大前を引いた値

図-11 透明度の月平均値の年変動特性



(a) 赤潮増大前



(b) 赤潮の増大後から増大前を引いた値

図-12 CODの月平均値の年変動特性

少し増加するものの、全ての海域で減少する傾向がみられ、特に筑後川河口沖のB海域では、1, 4, 9, 12月などで、筑後川からのDIN流入量が大きく減少する傾向がみられる。

f) P04-P

月平均値の年変動特性を図-14 に示した。図-14 (b) から、赤潮増大前に比べ A, D 海域で減少、B 海域でやや増加の傾向がみられる。また、図-14 (a) に示されるように、A, D 海域の P04-P 濃度は他の海域に比べて高い。A, D 海域は、富栄養化・嫌気化した泥が分布する海域であることから、P04-P が底泥から溶出している可能性がある。

g) (N03-N+N02-N) / NH4-N 比

この比が小さくなると、アンモニウム態窒素 (NH4-N) が亜硝酸態窒素 (N02-N) を経て硝酸態窒素 (N03-N) に変化する過程において、硝化細菌による硝化能力が十分発揮されなくなっている状態であることが推察される。

月平均値の年変動特性を図-15 に示した。図-15 (a) から、この比は A, D 海域で低い傾向がみられる。また、図-15 (b) から、赤潮増大前に比べ、A 海域で増加する傾向がある。

h) DIN/P04-P 比

基礎生産から食物連鎖を通じて形成される海域生態系にとって、健全な栄養塩濃度と栄養塩バランスが必要であり、DIN/P04-P 比は窒素とリンの濃度バランスを表している。月平均値の年変動特性を図-16 に示した。

図-16 (a) に示すように、この比が A, D 海域で小さいのは、これらの海域では、図-14 (a) に示すように、P04-P 濃度が他の海域に比べて突出して高いことが影響している。また、図-16 (b) から、この比は A, D 海域を除き減少する傾向がみられる。B 海域での減少は、筑後川からの DIN 流入量の減少によって考えられる。また、

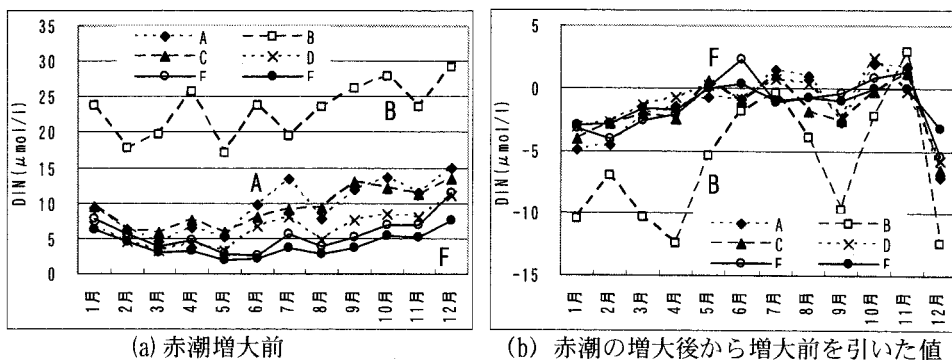


図-13 DIN の月平均値の年変動特性

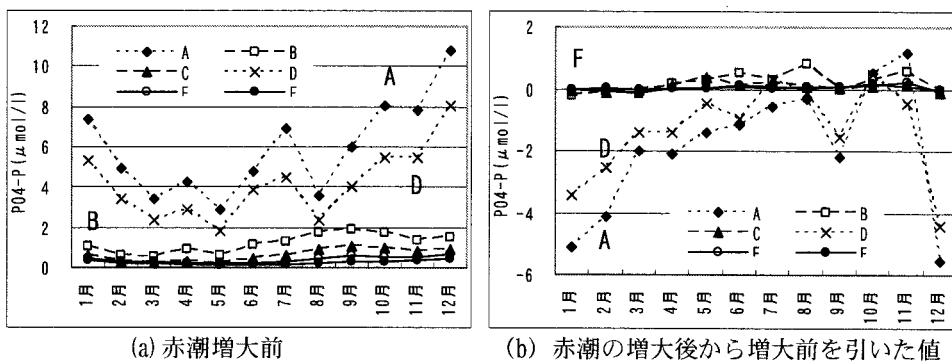


図-14 P04-P の月平均値の年変動特性

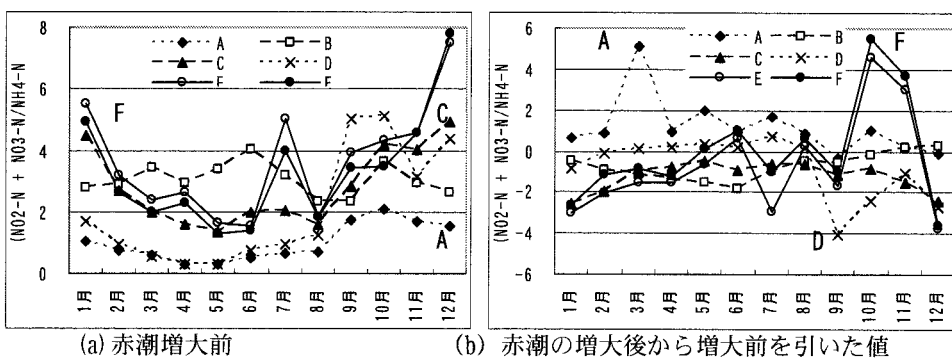


図-15 (N02-N + N03-N) / NH4-N の月平均値の年変動特性

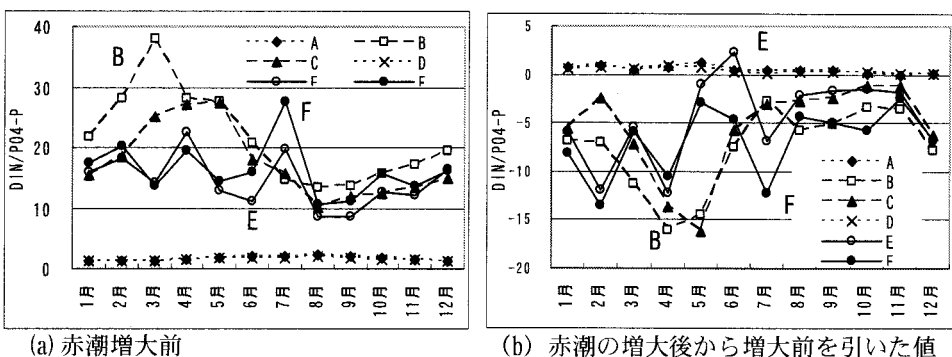


図-16 DIN/P04-P の月平均値の年変動特性

ノリ養殖に伴う窒素消費による可能性が考えられる。

以上に述べた、赤潮発生が増大前後における環境特性の変動の傾向は、表-1 に示すようにまとめられる。湾央・湾口部の E, F 海域では、赤潮増大の原因・要因となる水温、透明度、COD の上昇、硝化による浄化能力を示す (N03-N + N02-N) / NH4-N 比の

低下が揃ってみられ、また、それ以外の環境特性の変動の傾向も類似する。一方、湾奥部の A、B、C、D 海域では、水温は揃って上昇し、それ以外の環境特性の変動は海域ごとに異なるが、赤潮増大の前後に、A 海域と D 海域、B 海域と C 海域で、それぞれ類似した環境特性の変動の傾向が見られることがわかった。

表-1 赤潮増大前後における環境特性の年平均値の比較

環境特性	期間	湾奥部				湾央・湾口部	
		A	D	B	C	E	F
①水温	(a)1987/4-1998/3	17.84	18.20	18.05	18.10	14.62	18.75
	(b)1998/4-2004/3	17.91	18.23	18.25	18.27	15.50	19.09
	(b)-(a)	0.07	0.03	0.20	0.17	0.88	0.34
②塩分	(a)1987/4-1998/3	29.40	30.37	25.63	30.35	31.22	32.32
	(b)1998/4-2004/3	29.59	30.44	26.17	30.46	31.48	32.14
	(b)-(a)	0.19	0.07	0.54	0.11	0.26	-0.18
③透明度	(a)1987/4-1998/3	1.37	3.10	0.52	1.63	2.36	5.57
	(b)1998/4-2004/3	1.29	2.73	0.53	1.67	2.47	5.94
	(b)-(a)	-0.08	-0.37	0.01	0.04	0.11	0.37
④COD	(a)1987/4-1998/3	1.93	1.72	2.11	1.50	0.71	0.51
	(b)1998/4-2004/3	2.05	1.75	1.96	1.45	0.79	0.60
	(b)-(a)	0.12	0.03	-0.15	-0.05	0.08	0.09
⑤DIN	(a)1987/4-1998/3	9.55	6.39	23.13	9.29	5.61	4.11
	(b)1998/4-2004/3	8.00	5.25	17.02	7.54	4.34	2.86
	(b)-(a)	-1.55	-1.14	-6.11	-1.75	-1.27	-1.25
⑥PO4-P	(a)1987/4-1998/3	5.90	4.14	1.21	0.62	0.41	0.26
	(b)1998/4-2004/3	3.99	2.82	1.41	0.69	0.44	0.31
	(b)-(a)	-1.91	-1.32	0.20	0.07	0.03	0.05
⑦(NO3-N + NO2-N)/NH4-N	(a)1987/4-1998/3	0.99	2.03	3.04	2.80	3.68	3.30
	(b)1998/4-2004/3	2.13	1.24	2.30	1.55	2.96	3.24
	(b)-(a)	1.14	-0.79	-0.74	-1.25	-0.72	-0.06
⑧DIN/PO4-P	(a)1987/4-1998/3	1.66	1.59	21.54	17.50	14.46	16.38
	(b)1998/4-2004/3	2.16	1.98	13.90	11.87	9.88	9.55
	(b)-(a)	0.50	0.39	-7.64	-5.63	-4.58	-6.83
赤潮発生海域区分		佐賀県		福岡県		長崎県・熊本県	
補掛け:①～⑥は赤潮増大後に上昇または増加 ⑦、⑧は赤潮増大後に低下							

4. 考察

有明海で赤潮発生の増大が顕著になる前（1987年4月～1998年3月）および発生の増大が顕著になった後（1998年4月～2004年3月）の時期に分けてクラスター分析を行い、クラスターによる海域区分ごとに、赤潮発生の増大前後での環境特性の変動の傾向を調べ、湾奥北部・湾奥西部（A・D 海域）、湾奥東部・筑後川河口前面（B・C 海域）、湾央・湾口部（E・F 海域）に区分し、これと対応させて、赤潮の発生海域を区分した。また、クラスター分析を行った時期に分けて、クラスターによる海域区分ごとに、赤潮の増大に関連する各水質要素と、赤潮の発生回数、発生延日数、赤潮生物別発生回数を月別に整理し、各水質要素と赤潮増大との関連性を調べた。

その結果、月レベルでの各水質要素と赤潮増大との対応関係は、明瞭に表れていないが、赤潮増大後における変化は、図-3 の赤潮発生延日数に示されるように、全ての海域区分において、月レベルでの変動を伴いながら年間を通して増加する傾向が顕著に表れている。

表-1 の海域区分別の環境特性の年平均値と赤潮増大との関連性をみると、長崎県・熊本県海域にあたる湾央・湾口部（E・F 海域）では、赤潮発生が増大した 1998 年以降、水温、透明度、COD、PO4-P

の上昇と、硝化による浄化能力を示す (NO3-N + NO2-N)/NH4-N 比の低下が生じていることが明らかとなった。福岡県海域にあたる湾奥東部・筑後川河口前面（B・C 海域）では、1998 年以降、水温、PO4-P が上昇し、硝化による浄化能力を示す (NO3-N + NO2-N)/NH4-N 比が低下したが、COD は減少傾向であった。佐賀県海域にあたる湾奥北部・湾奥西部（A・D 海域）では、水温は上昇したが、透明度は逆に減少傾向であった。

このように、赤潮増大の原因・要因となる環境特性が、湾央・湾口部と湾奥部で異なる原因については、湾奥部の夏季における赤潮の発生と密接に関係する成層化と貧酸素水塊の形成などの環境特性データの解析が必要と考えられ、今後の検討課題としたい。

栄養塩濃度バランスを表す DIN/PO4-P 比は、湾央・湾口部（E・F 海域）と湾奥東部・筑後川河口前面（B・C 海域）では、窒素の減少とリンの増加により低下した。一方、湾奥北部・湾奥西部（A・D 海域）では、リンの減少傾向が窒素のそれに比べて大きいため、DIN/PO4-P 比はやや増加しているが、リンの濃度は、表-1 および図-14 に示すように、他の海域に比べて突出して高く、赤潮増大前に比べ、リンが有明海の全域で高くなる傾向にある。

赤潮増大後の赤潮生物についてみると、湾央・湾口部（E・F 海域）にあたる長崎県・熊本県海域では、図-5 に示すように、珪藻、渦鞭毛藻、ラフィド藻の発生回数がともに増加し、湾奥北部・湾奥西部（A・D 海域）にあたる佐賀県海域では、図-6 に示すように、ラフィド藻と珪藻の発生回数が増加する傾向がみられる。窒素とリンのバランスの変化は、赤潮生物の構成を変化させる可能性が考えられるが、赤潮生物の出現については、窒素やリンのバランスの変化とともに、生理的・生態的性質のちがひ、他の赤潮生物との競合関係などを含めた検討が必要である。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費重要課題解決型研究「有明海生物生息環境の俯瞰型再生と実証試験（平成 17～21 年度）」による研究の一部であることを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 有明海・八代海総合調査評価委員会:第 23 回委員会資料、赤潮の発生件数の増加・大規模化に関する知見の整理、検討、環境省、2006。
- 2) 水産庁 九州漁業調整事務所:九州海域の赤潮、1985～2005。
- 3) 財団法人 日本水産資源保護協会:九州海域の赤潮データベース、2006。
- 4) 有明海・八代海総合調査評価委員会:第 24 回委員会資料、潮流潮汐 WG の検討結果、環境省、2006。