

瀬戸内海における栄養塩構成比の季節変動と赤潮発生の関係

陸田 秀実*・土井 康明**・稲山 丈晴***

本研究では、瀬戸内海において比較的赤潮の発生が多いとされる広島湾奥部、周防灘、播磨灘・備讃瀬戸の過去 10 年間の水質の季節変動と赤潮の種・発生日数を調べるとともに、水質の相関分析や多変量解析を行い、栄養塩やその構成比の季節変動が赤潮発生に及ぼす影響を調べたものである。その結果、各海域の水質間には共通の相関関係はなく、各海域特有の水質条件や季節変動がその海域の赤潮種やその発生を支配していることが明らかとなった。また、近年の沿岸域の栄養塩構成比 DIN : DIP 比、DIN および DIP の季節変動と赤潮発生および赤潮種との関連性が明らかとなった。

1. はじめに

瀬戸内海では、瀬戸内法に基づき、1980 年以降リン化合物の負荷削減指導が行われ、特に 1995 年の第 4 次削減指導方針以降は海水中のリン濃度が有意に低下傾向にあることが分かってきた。しかしながら、こうした水質規制による沿岸海域の栄養塩構成比 (N:P 比) の経年変動は、植物プランクトンの分布や一次生産量、さらには赤潮発生とその種組成に大きな影響を及ぼし、ひいては海洋生態系への悪影響や漁業生産の低下をもたらすものと考えられている。

本研究では、瀬戸内海において比較的赤潮の発生が多いとされる広島湾奥部、周防灘、播磨灘・備讃瀬戸の 3 海域に着目し、過去 10 年間の水質の季節変化と赤潮種およびその発生日数を調べ、水質の相関分析や多変量解析を行う。さらに、栄養塩構成比の季節変化と赤潮発生日との関係について検討を行い、各海域特有の赤潮種とその発生原因について明らかにすることを目的としている。

2. 調査海域と水質データ

水質データは、広島県、山口県および香川県水産試験場の報告書 (1989~2000 年) を基に約 10 年間の気温、水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル a、溶存無機態窒素 DIN (アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ の和)、リン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ の表層データを用いることとした。また、赤潮の種類およびその発生日数については各県水産試験場の赤潮報告書を参考にした。

水質調査地点は、図一1に示すように広島湾奥部 7 測点 (以下、広島県沿岸域)、周防灘の山口県沿岸域 8 測点 (以下、山口県沿岸域)、播磨灘・備讃瀬戸の香川県沿岸域 6 測点 (以下、香川県沿岸域) である。なお、これら

の測点番号は各県水産試験場に倣い、各海域において比較的赤潮発生が多かった測点を選定した。

3. 調査結果

(1) 水質の季節変動

図一2は各海域における各水質項目の季節変動を示したものである。なお、観測データにバラツキが大きいため過去 10 年間の全測点の平均値で表している。広島県沿岸域では、太田川からの河川流入によって夏季の塩分低下と栄養塩増加が顕著であり、また溶存酸素濃度が比較的高い傾向にあることが分かる。その他の特徴として、山口県沿岸域では年間を通じて栄養塩が少ないこと、香川県沿岸域では溶存酸素濃度やクロロフィル濃度が低い傾向にあること等が挙げられる。

(2) 赤潮発生時期と河川流量の関係

沿岸域の水質変化は、降雨によって陸域から流入する河川水の影響を強く受けており、これらと赤潮発生時期との関連性を調べておく必要がある。ここでは、河川流量の多い広島県太田川および山口県佐波川の春~秋の流量変化と赤潮発生時期との関連性について検討する。なお、香川県沿岸域の測点付近には流量の多い河川がないため、ここでの考察からは省くこととした。

図一3および図一4は、太田川および佐波川の流量と赤潮発生時期の関係を示したものである。図より、降雨によって河川流量が一端増えた直後、赤潮が数週間程度に亘って発生する傾向にあることが分かる。したがって、河川からの流入負荷の大きい海域では、降雨による河川流量の増減が海域の水質の急変をもたらし、その結果として赤潮が発生しているものと考えられる。

(3) 多変量解析

表一1~3は、各海域における過去 10 年間の水質間の相関係数を示したものである。上段値は全観測日、下段値は赤潮発生日のみを抽出し相関分析したものであり、使用したデータは各海域の測点の水質を平均したものをを用いている。なお、表中の太枠線は、比較的相関が高い傾向にあるものを示している。また、表一4は、目的変数を赤潮発生日数、説明変数を各水質とした場合の重回帰

* 正会員 博(工) 広島大学助手 大学院工学研究科社会環境システム専攻

** 正会員 工 博 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 新キャピラー三菱株式会社

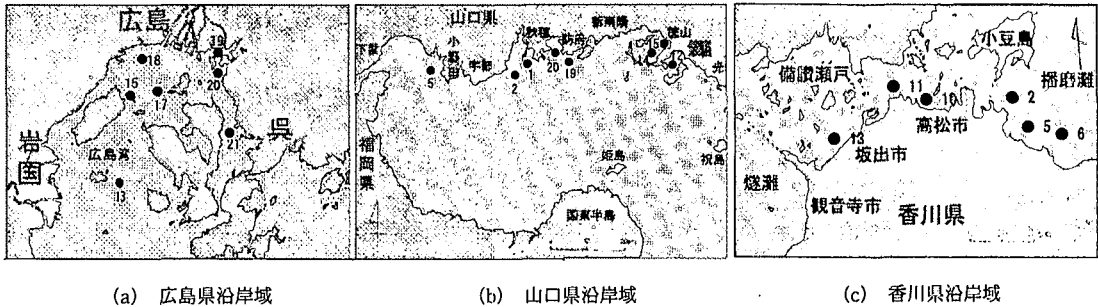


図-1 水質調査地点

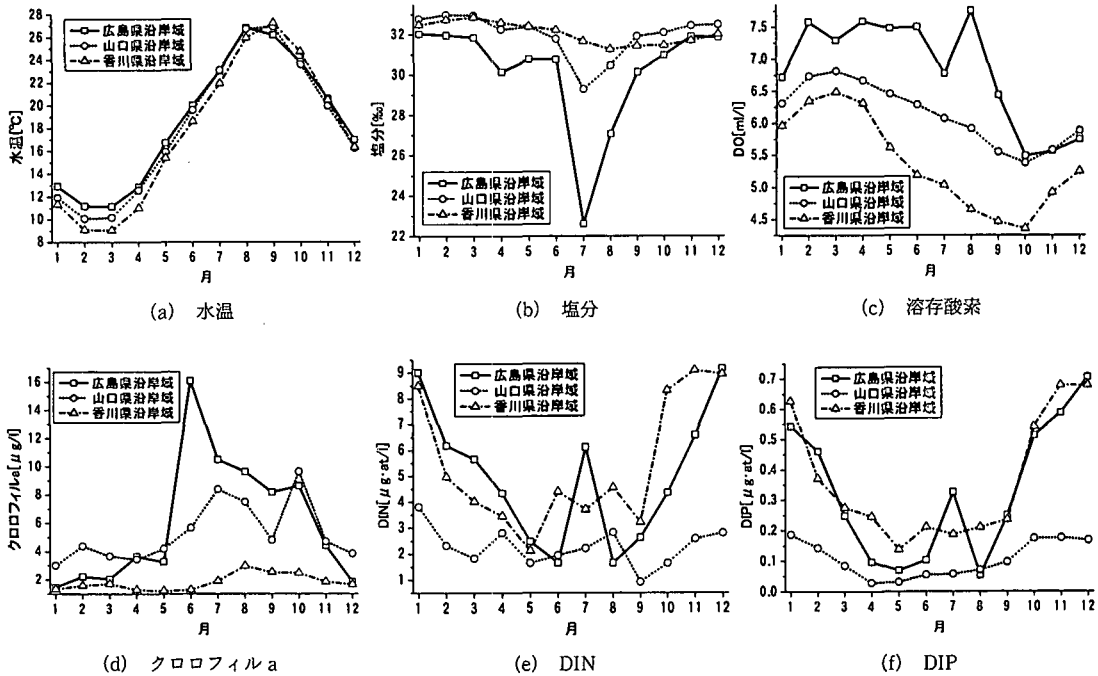


図-2 過去10年間の水質の季節変動

分析結果を各海域ごとに示したものである。なお、これらの重相関係数はいずれも0.6~0.7であった。

これらの表から、いずれの海域も水質間の相関関係は全く異なっている。また、赤潮が発生する場合に水質間の相関値が高くなるものもあれば、逆に低くなるものもある。いずれの海域も水質間の相関関係と赤潮発生に何らかの関係を見出すことは難しいことから、各海域特有の水質変化が赤潮発生や赤潮種に深く関わっているものと考えられる。

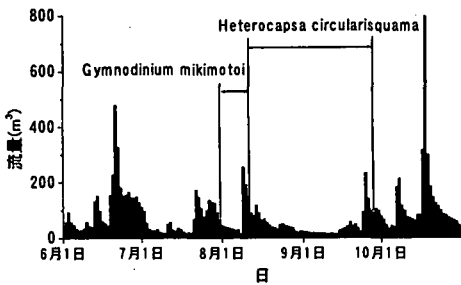
次節以降では、植物プランクトンの種や増殖に深く関わっていると考えられる海域の栄養塩構成比(DIN:DIP比)と赤潮発生との関係について検討する。

(4) 栄養塩構成比の経年変化

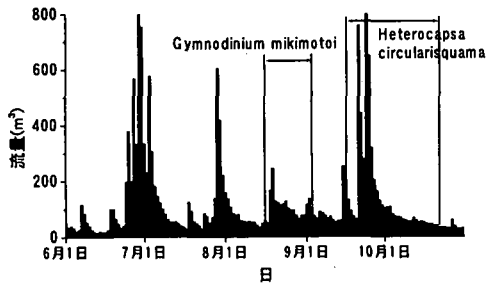
栄養塩構成比(DIN:DIP比)は、海域への栄養塩の流

入負荷構成、植物プランクトンにおける栄養塩制限、さらには植物プランクトンの増殖生理や細胞構成成分と深く関わっているため、ここでは各海域ごとの栄養塩構成比の変化特性について調べる。

図-5は、各海域の栄養塩構成比の経年変化を比較したものである。なお、これらの値は各海域の各測点における栄養塩構成比の平均値である。図より、香川県沿岸域では、1995年以降栄養塩構成比が急激に低下し、その後、かなり低いレベルで推移していることから、年間を通して安定な水質状況にあると言える。一方、広島県および山口県沿岸域の栄養塩構成比は平均的に低下傾向であるが、春先から夏にかけて著しく高くなる場合がある。このことから、季節による短期的な水質の急変が発生していると言える。

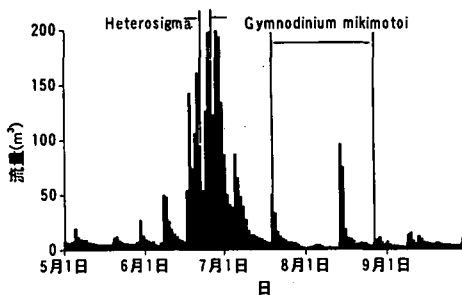


(a) 1998 年

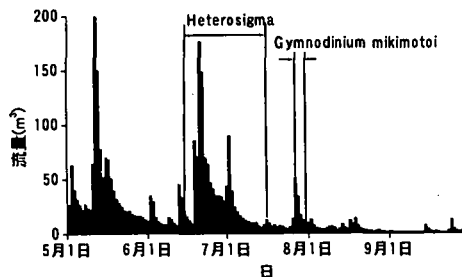


(b) 1999 年

図-3 広島県太田川の河川流量



(a) 1996 年



(b) 1998 年

図-4 山口県佐波川の河川流量

(5) 栄養塩構成比と赤潮発生の関係

ここでは各海域ごとに、DIN、DIP および栄養塩構成比と赤潮種およびその発生原因との関連性について調べ

表-1 広島県沿岸域の水質の相関分析結果

	水温	塩分	DO	Chl.a	DIN	PO ₄ -P
水温	1.000	—	—	—	—	—
塩分	-0.341	1.000	—	—	—	—
	0.210					
DO	-0.221	-0.086	1.000	—	—	—
	0.410	-0.300				
Chl.a	0.379	-0.287	0.090	1.000	—	—
	-0.490	-0.380	0.190			
DIN	-0.296	-0.116	-0.334	-0.251	1.000	—
	-0.510	-0.040	-0.710	-0.070		
PO ₄ -P	-0.127	0.104	-0.469	-0.188	0.752	1.000
	-0.650	0.240	-0.730	-0.260	0.700	

上段：全観測日，下段：赤潮発生日のみ

表-2 山口県沿岸域の水質の相関分析結果

	水温	塩分	DO	Chl.a	DIN	PO ₄ -P
水温	1.000	—	—	—	—	—
塩分	-0.399	1.000	—	—	—	—
	-0.090					
DO	-0.682	0.131	1.000	—	—	—
	-0.600	-0.010				
Chl.a	0.438	-0.355	-0.275	1.000	—	—
	0.380	-0.360	-0.110			
DIN	-0.171	-0.506	0.056	0.016	1.000	—
	-0.150	-0.800	0.170	0.040		
PO ₄ -P	-0.061	0.038	-0.379	0.061	0.388	1.000
	0.390	0.070	-0.840	0.060	-0.160	

上段：全観測日，下段：赤潮発生日のみ

表-3 香川県沿岸域の水質の相関分析結果

	水温	塩分	DO	Chl.a	DIN	PO ₄ -P
水温	1.000	—	—	—	—	—
塩分	-0.608	1.000	—	—	—	—
	-0.590					
DO	-0.913	0.564	1.000	—	—	—
	-0.890	0.470				
Chl.a	0.459	-0.290	-0.263	1.000	—	—
	0.670	-0.500	-0.310			
DIN	0.030	-0.212	-0.168	-0.083	1.000	—
	-0.020	-0.470	0.040	0.000		
PO ₄ -P	-0.065	-0.093	-0.131	-0.129	0.709	1.000
	-0.140	-0.390	0.150	-0.020	0.950	

上段：全観測日，下段：赤潮発生日のみ

表-4 赤潮発生の重回帰分析結果

	水温	塩分	DO	Chl.a	DIN	PO ₄ -P	定数項
広島	-5.33	0.07	-5.59	-1.13	-3.09	-21.64	225
山口	3.33	5.87	21.18	-2.94	-1.41	32.76	-337
香川	0.52	4.80	8.911	1.04	10.82	75.14	-218

る。

図-6 は、広島県沿岸域における DIN、DIP および DIN : DIP 比の経年変化と赤潮発生日数との関係を示したものである。この海域では、海域の DIN : DIP 比が渦鞭毛藻類の細胞内 N : P 比 12~25 を下回る期間（すなわち、N : P 比の大きいリン制限海域が N : P 比の小さい窒素制限海域に水質変化する時）において、1995 年以降は確実に渦鞭毛藻が発生していることが分かる。このこ

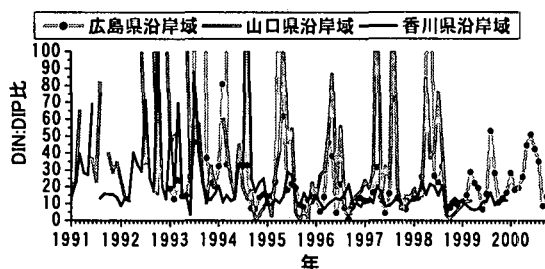


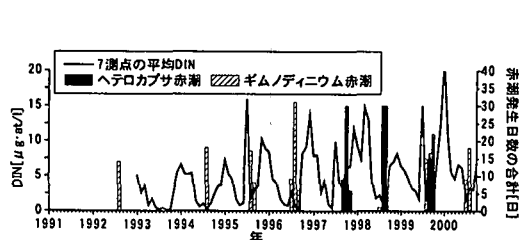
図-5 各海域の栄養塩構成比の経年変化

とは、N:P 比の高い状態において、この種の赤潮増殖は不活発であるという従来の生理学的特徴を裏付ける結果となった。

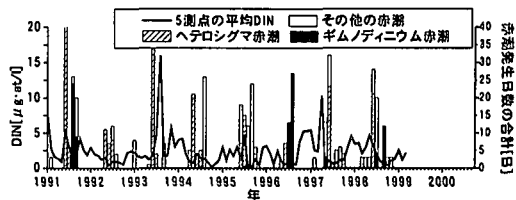
また、1995 年の水質規制以降、夏季の DIN の枯渇は解消されつつあるが、DIP の枯渇は相変わらず続いており、赤潮が発生する期間において両者は共に不足状態にあることが分かる。山口 (2000) および山本ら (1999) によれば、この海域に発生するアレキサンドリウム・タマレンセやヘテロカプサ・サーキュリスカマ赤潮はリンを効率よく取り込める種であり、かつ DIN や DIP が極めて少ない環境下においてギムノディウムやノクテルカよりも競合において優先すると指摘しており、これらの見解を裏付ける結果となった。

図-7 は、図-6 と同様に山口県沿岸域の結果を示したものである。この海域では、海域の DIN:DIP 比がラフィド藻に属するヘテロシグマの細胞内 N:P 比 15.2 を大きく上回る期間において、この種の赤潮発生件数が多い。このことは、海域の N:P 比の高い時期は珪藻や渦鞭毛藻よりもラフィド藻の増殖に有利であることを意味している。また、赤潮が発生する時期のみにおいて DIN および DIP が枯渇しているわけではなく、年間を通じて比較的低い値で両者は推移しており、広島県沿岸域とは明らかに異なる水質傾向を示している。このことから、1995 年の水質規制以降も DIN と DIP の枯渇は全く解消されておらず、慢性的な栄養塩不足状態が続いており、過剰な栄養塩下において増殖しやすい珪藻が優先しにくい環境下にあるという傾向を裏付けている。

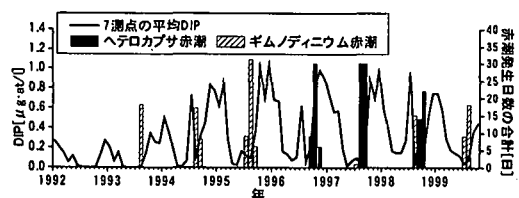
図-8 は、図-6 と同様に香川県沿岸域の結果を示したものである。これらの図から、1995 年の水質規制以降、DIN:DIP 比は Redfield 比 16:1 を常に下回り、一定の水準で推移しており、この海域においては栄養塩構成比と赤潮発生に直接的な関係はないようである。一方、DIP の枯渇は 1995 年の水質規制以降解消されつつあるが、DIN には変化が見られない。これら栄養塩の変化と赤潮との関係に着目すると、DIN および DIP が極小となる時



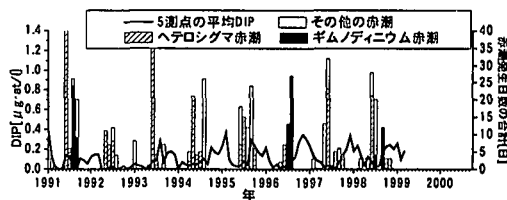
(a) DIN



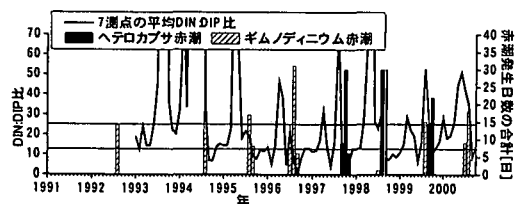
(a) DIN



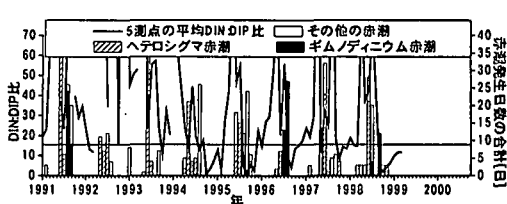
(b) DIP



(b) DIP



(c) 栄養塩構成比



(c) 栄養塩構成比

図-6 広島県沿岸域の栄養塩の季節変動と赤潮発生の関係

図-7 山口県沿岸域の栄養塩の季節変動と赤潮発生の関係

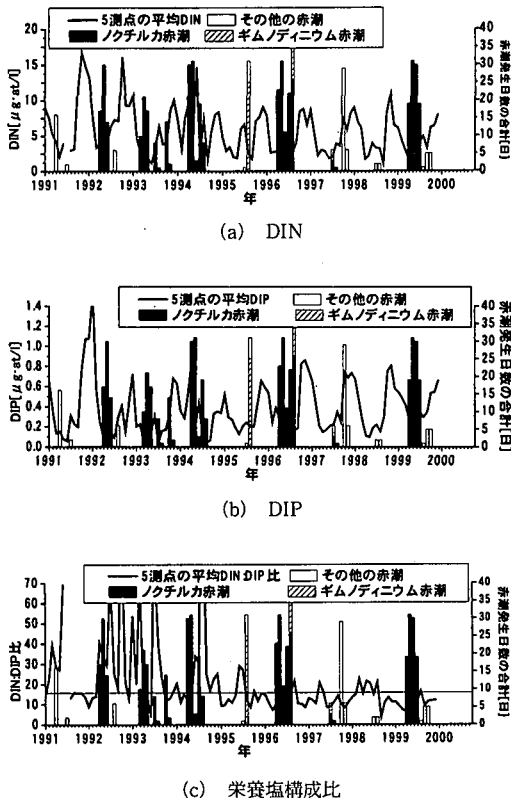


図-8 香川県沿岸域の栄養塩の季節変動と赤潮発生との関係

期においてノクチルカ赤潮が発生している場合が多いことが分かる。このノクチルカ赤潮は従属栄養性渦鞭毛藻類に属し、他者が生産した有機物を摂食して生存し、自らは光合成をしないという特性を有している。以上のことから、低栄養塩下で増殖している点においては渦鞭毛藻の特性を有しているものの、栄養塩構成比に依存しない

い点においては独立栄養性渦鞭毛藻と全く異なる特性を有していると言える。

4. おわりに

瀬戸内海において比較的赤潮の発生が多いとされる広島県、山口県、香川県沿岸域における過去 10 年間の水質の季節変動、水質間の相関分析および多変量解析を行った。その結果、各海域の水質間には共通の相関関係はなく、各海域特有の水質条件や季節変動がその海域の赤潮種やその発生を支配している事が明らかとなった。また、各沿岸域の DIN:DIP 比、DIN および DIP の季節変動と赤潮発生および赤潮種との関連性が明らかとなった。近年、瀬戸内海で発生している渦鞭毛藻類の有毒赤潮プランクトンの発生を抑制するためには、このような栄養塩およびその構成比の季節変動や赤潮の種組成を常に把握し、陸域からの栄養塩負荷量をその構成比も含めて適切に管理モニタリングする必要がある。

謝辞：調査データを提供して頂いた各県水産試験場に謝意を表す。

参考文献

- 香川県赤潮研究所 (1991-1999): 香川県赤潮研究所事業報告書。
 香川県水産試験場 (1991-2000): 浅海定線調査資料 (平成 3 年度～平成 12 年度)。
 広島県水産試験場 (1992-2000): 広島県水産試験場事業報告 (平成 4 年度～平成 12 年度), 漁業環境調査結果。
 山口県内海水産試験場 (1989-1999): 山口県内海水産試験場事業報告, 浅海定線調査資料 (平成元年度～平成 11 年度)。
 山口峰生 (2000): 赤潮プランクトンの増殖生理, 月刊海洋, No. 21, pp. 107-115。
 山本民次, 樽谷賢治, 河原睦恵, 吳 碩津 (1999): 有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* による溶存態有機リンの利用と排出, 広島大学生物生産学部紀要, 38 巻, pp. 151-159。