

広島湾奥部の赤潮発生に及ぼす陸域起源の降雨量の影響

陸田秀実*・土井康明**・河村和憲***・亀山直記****

1. はじめに

広島湾は湾口部を屋代島と倉橋島に囲まれ瀬戸内海の中でも特に閉鎖性の強い湾である。その上、湾内には島々が点在しており、その地形は複雑で海水交換は極めて悪い。また、総流入量の90%を占める太田川からの人為的汚濁物質により慢性的に富栄養化した海域でもある。

瀬戸内海環境保全措置法(1973)によって、瀬戸内海に負荷される有機物量とともにリン負荷量も減少し、赤潮発生件数は300件から100件以下へと減る傾向にある。しかしながら、リンと同時に窒素の削減をしなかったため、海域の窒素濃度は依然として高く、窒素とリンの存在比は広島湾でかなり高くなる傾向にある。近年では、このような栄養塩構成比(窒素/リン比)の変化に伴って海のバランスが崩れ(Smayda, 1989)、リンを効率良く溜め込む能力の高い *Heterocapsa circularisquama* や *Alexandrium tamarense* といった悪性の渦鞭毛藻類に属する有毒赤潮プランクトンが優占する傾向にある。山本ら(1999)は、栄養分の取り合いにおいて珪藻類が強く、リンが少ないほど渦鞭毛藻類に対して有利に働き優占種となることを指摘している。事実、1998年、広島湾において *Heterocapsa circularisquama* が異常発生し、その被害総額は約40億円(過去2番目)にも上った。

本研究では、太田川から流入する栄養塩類(特にリン)による外部負荷は陸域起源の降雨と深く関わっていることから、過去9年間の夏季(6月～8月)の梅雨や台風などによる降雨量と広島湾奥部の水質変化、さらには赤潮の発生状況などとの関連性を調べ、近年の新型有毒赤潮プランクトンの発生に対する支配因子について明らかにすることを目的としている。

2. 新型有毒赤潮プランクトン

近年、広島湾では、これまで赤潮の主体となっていた

珪藻類から、低濃度の栄養塩環境下でも増殖できる *Heterocapsa circularisquama* や *Alexandrium tamarense* といった渦鞭毛藻へと赤潮の種が変遷した。

Heterocapsa circularisquama は高水温、高塩分(水温30°C、塩分30‰で増殖速度1.13 div/day)を好み、10°Cでは死なず、主にマガキ、アサリ、アコヤガイといった二枚貝だけに毒性を発揮し、魚介類には全く影響を与えない。また、夏季の高水温期に無機態の栄養塩(特にリン)が枯渇し、他の植物プランクトンが増殖しにくいような環境下で発生しやすく、無機態リンが欠乏している海域において従来型赤潮よりも生態的に有利となり、個体群の増大をはかり得る重要な特性を有している(山口, 2000)。

一方、*Alexandrium tamarense* は、リン酸塩濃度が低い場合には溶存態有機リンDOPを利用し、リン酸濃度が高くて活発に増殖している場合にはDOPを排出するという特徴を持っており、珪藻類に比べリンを体内にため込む能力に長けている(山本ら, 1999)。

3. 調査資料

水質調査地点は、図-1に示すように広島湾奥部太田川河口域の計6測点である。調査データとして、広島県

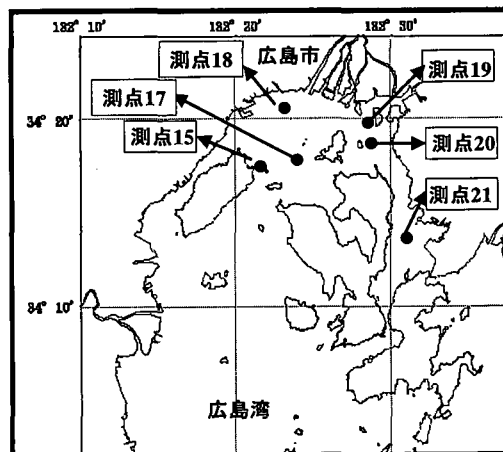


図-1 広島湾と調査地点

* 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

** 工 博 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

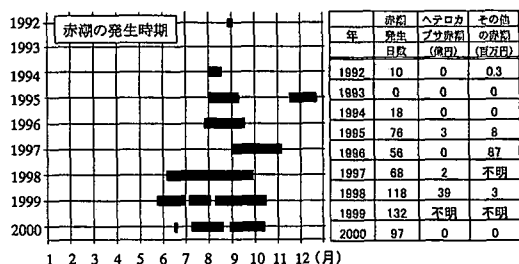


図-2 赤潮発生状況と被害額

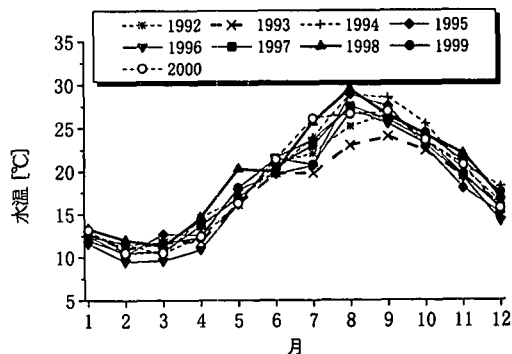


図-4 水温の季節変動

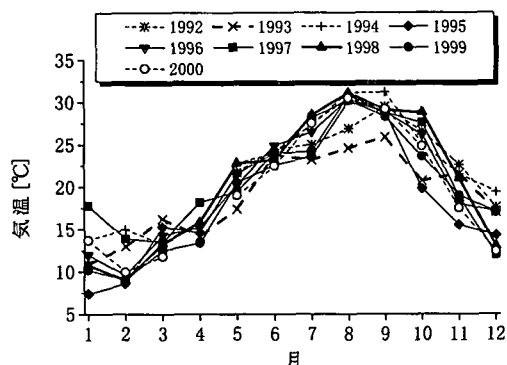


図-3 気温の季節変動

の水質測定結果（広島県水産試験場，1992～2000）を基に，1992年～2000年の過去9年間の水温，塩分，溶存酸素，クロロフィルa（Chl.a）濃度，栄養塩濃度（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 $\text{NO}_2\text{-N}$ ，リン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ ）の表層と水深5mのデータを分析した。また，広島市の降雨量は広島地方気象台の観測データを引用し，陸域起源の淡水負荷量である太田川の河川流量は水門水質データベース（国土交通省，1993～1999）を基に調べた。なお，平水時の太田川水系主要5河川（本川，元安川，京橋川，太田川放水路，天満川）の水質データとして1990年～1999年の全窒素（TN）および全リン（TP）を調べた（広島市，1990～1999）。さらに，赤潮発生時期および被害額は広島県水産試験場と水産庁（1992～2000）の資料を参考にした。

4. 調査結果

(1) 赤潮発生と被害額

まず始めに過去9年間の広島湾の赤潮発生状況についてまとめる。図-2は，各年毎の赤潮発生の時期と日数および被害額について示したものである。広島湾においては，1995年以降赤潮発生が増加傾向にあり，中でも1998年の *Heterocapsa circularisquama* による被害額は極端に大きいことが分かる。また，1993年は冷夏多雨，1994年と2000年は猛暑少雨という異常気象であり赤潮被害

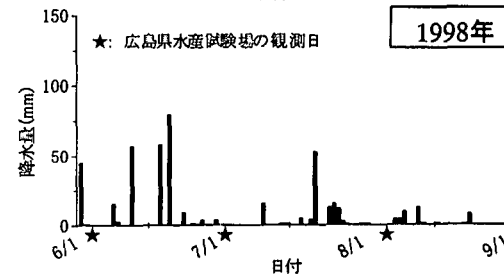
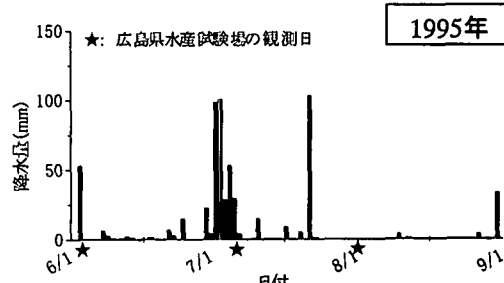
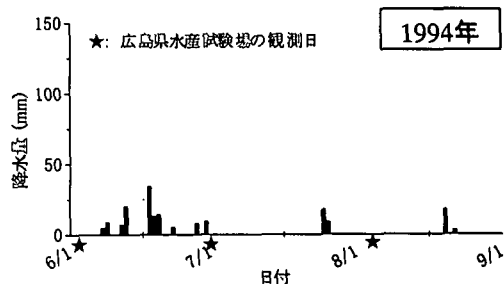


図-5 広島市の日降雨量

報告はない。

(2) 気温，水温および降雨量の変動

図-3及び図-4は測点18における気温と水温の季節変動を示したものである。過去9年間において，赤潮被害が最も少なかった1993年と最も多かった1998年の夏季の気温と水温は5℃以上の開きがあることから，近年の新型有毒赤潮プランクトンは高温環境下で猛威を奮うことが特徴的である。なお，ここ10年間で，水温は冬季に

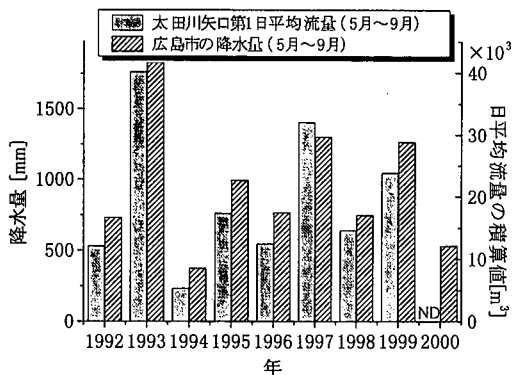
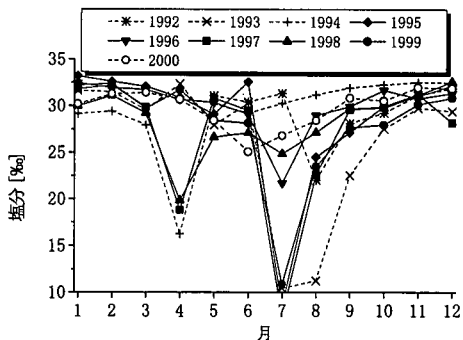
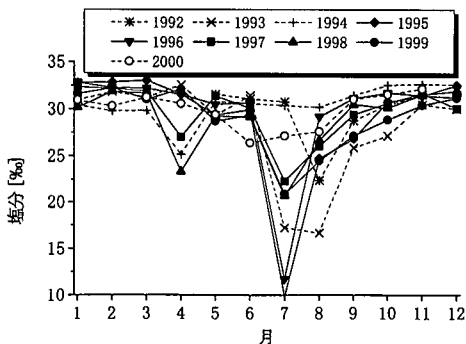


図-6 広島市の月別降雨量と太田川の流量



(a) 測点 18

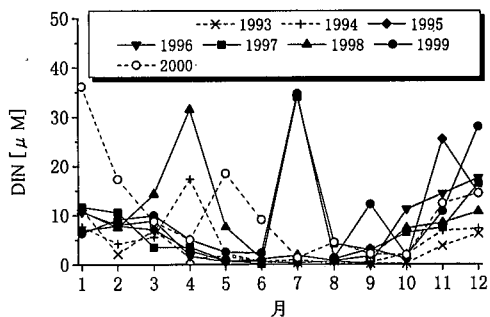


(b) 測点 19

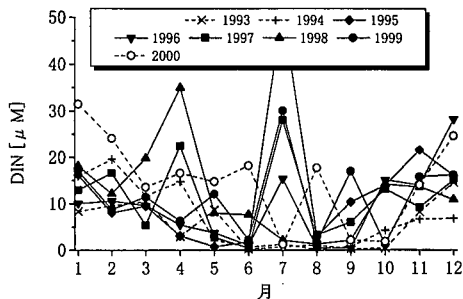
図-7 塩分濃度の季節変動

10°Cを下回ることがなく比較的高温状態にある。

図-5は夏季6月～8月の広島市の日降雨量を示したものである。ここで、図中の★印は広島県の水質調査日を表しており、7月上旬の調査日前後において50～100 mmの集中的な日降雨が観測されていることに注意されたい。図-6は5月～9月の広島市の月別降雨量と太田川（矢口第1観測点）の流量との関係を示したものである。図から、赤潮被害額の少なかった1994年と2000年の降雨量は少なく太田川からの流入負荷が極端に少ない一



(a) 測点 18



(b) 測点 19

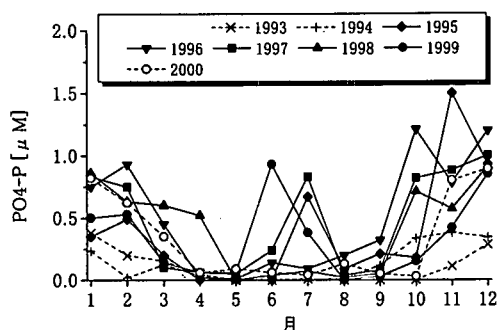
図-8 溶存無機態窒素の季節変動

方で、1995年以降赤潮被害額の多い年は夏季の降雨量の合計が軒並み500 mm超となっており、夏季の太田川の流入負荷が赤潮発生に何らかの影響を与えていることが推察される。

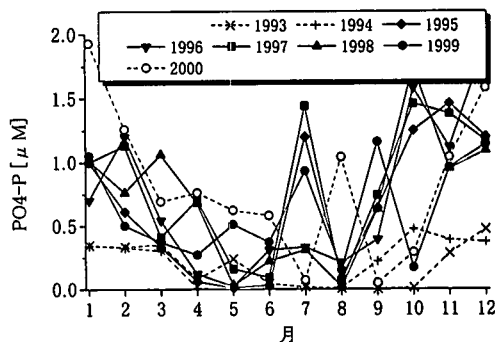
(3) 水質の変動

図-7は各年の測点18および測点19における表層の塩分濃度の季節変動を示したものである。また、図-8及び図-9は同一測点における表層の溶存無機態窒素 DIN ($=\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$) とリン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変動を示したものであり、リンについては水深5 mの結果も同時に示した。これらの図から、赤潮被害の多い1995年～1999年の7月において急激な塩分低下が見られ、逆に栄養塩である窒素やリンが同月に急激に増大していることが分かる。また、春から初夏にかけて海水中の窒素濃度は十分であるのに対して、リン濃度は7月の急増前（4月～6月）に極端な枯渇状態にあったことも分かる。実際、田中（1991）は、広島湾では河川汚濁物中の吸着態である $\text{PO}_4\text{-P}$ の負荷は、年間10日程の出水時に集中していることを指摘しているが、これを裏付ける結果となっている。

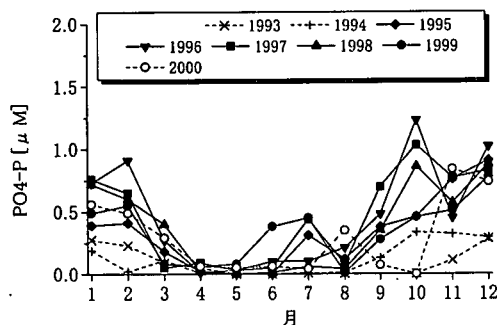
一方、赤潮被害の少ない1994年および2000年7月の塩分濃度は年間を通じて30‰前後の高塩分で推移し、また栄養塩は7月の集中降雨期を含め春先～秋口にかけて常に不足状態にあると言える。



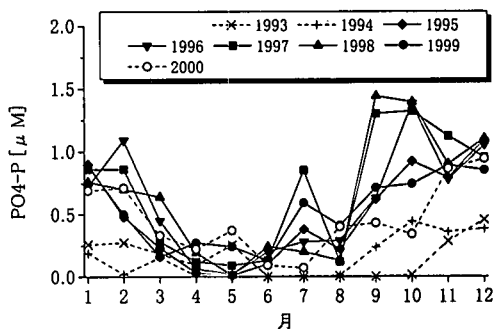
(a) 測点 18 (表層)



(b) 測点 19 (表層)



(c) 測点 18 (水深 5 m)



(d) 測点 19 (水深 5 m)

図-9 リン酸態リンの季節変動

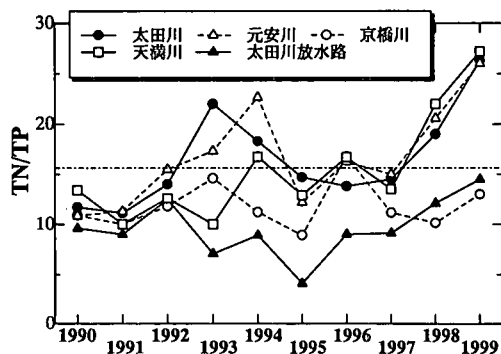


図-10 太田川の主要 5 河川の TN/SP 比の経年変化

(4) 窒素/リン比が新型赤潮発生に及ぼす影響

一般的に、植物プランクトンの制限栄養塩は DIN/DIP 比と Redfield 比 16:1 の関係によって窒素からリンに決まると言われているため、太田川の淡水や集中降雨期の海域の栄養塩構成比を調べる必要がある。

図-10 は、太田川河口域の主要 5 河川における TN/TP 比(重量比)の経年変化を示したものである。図から、赤潮被害の多くなる 1995 年以降の TN/TP 比は増大傾向にあり、以前の約 3 倍に達している。このことから、近年、太田川からのリン負荷が極端に低下し、Redfield 比

が非常に高い陸域起源の淡水が流入する傾向にあることが分かる。

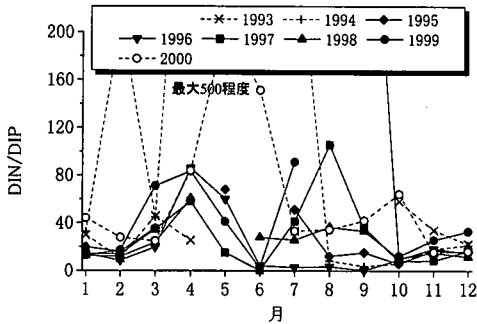
図-11 は測点 18 および測点 19 における DIN/DIP 比(モル比)の季節変動を示したものである。

赤潮被害の多い 1995 年～1999 年夏季の DIN/DIP 比は、陸域からの集中降雨による急激なリン負荷によって比較的低い値で推移している。一方、赤潮被害の少ない 1993 年、1994 年および 2000 年の春先～秋口のそれは、少雨によるリンの極端な枯渇によって非常に高い値(最大 DIN/DIP=500～600 のため図中では表記していない)を示していることが分かる。

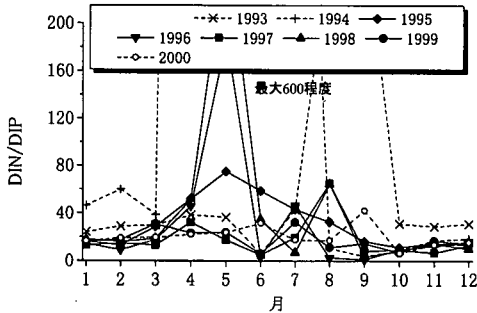
以上のことから、近年の広島湾のようにリンが慢性的に枯渇し栄養塩構成比(窒素/リン比)が崩れた海域では、陸域起源の集中降雨による流入負荷の直後に、窒素/リン比が Redfield 比 16:1 を大きく上回り、赤潮プランクトンの増殖制限因子が窒素からリンにシフトしたと考えられる。また、植物プランクトンは最も少量に存在する物質の量によって支配されるという Liebig の最小律を考えれば、広島湾の制限栄養塩はリンとなる場合が多く、図-5 に示した夏季の陸域起源の集中降雨による太田川のリン負荷が赤潮発生に何らかの影響を与えていると推定される。さらに、このようなリン不足の海域では、リンを効率よく取り込み、かつリンを蓄える能力に長けた

表一 水質パラメータと赤潮被害状況との関連性

因子 基準値	気温[°C] 夏 30 以上	水温[°C] 夏 27 以上	塩分[‰] 夏 25 以下	DIN[μg/l] 夏 10.0 以上	DIP[μg/l] 夏 0.3 以上	クロロフィル a[μg/l] 夏 11.0 以上	降水量[mm] 5～9月 750 以上	台風 2個以上	ヘテロカプサ赤潮 被害 2 億円以上	その他の赤潮 被害 300 万円以上
1998	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○
1997	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
1995	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○
1996	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○
1999	○	×	○	○	○	○	○	○	—	—
2000	○	○	×	×	×	○	×	×	×	×
1993	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×
1994	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
1992	×	×	×	×	×	×	×	—	×	×



(a) 測点 18



(b) 測点 19

図一11 広島湾奥部の DIN/DIP 比の季節変動

新型有毒赤潮プランクトンが競合において有利となることから、近年の広島湾の傾向を裏付ける結果であると言える。

(5) 水質パラメータと赤潮被害状況との関連性

赤潮被害と各水質パラメータおよび気象データとの因果関係を整理するため、各因子毎に一定の基準を定め、基準を満たすものには○、そうでないものには×とし、その基準を満たすものの多い順に並べたものを表一1に示す。ここで定めた基準についてはやや任意性は残るものの、ある特定の因子のみが卓越すれば赤潮発生するのではなく、各因子毎に一定以上の気象・水質条件さえ

整えば、赤潮被害が発生するという目安となるものである。

5. おわりに

本研究では、過去9年間における広島湾奥部の水質、降水量と赤潮被害状況のデータを基に、広島湾奥部における新型有毒赤潮プランクトンの発生原因の分析を行った。その結果、近年の広島湾奥部の有毒赤潮発生の特徴は、気温・水温が比較的高いという基本的条件に加えて、陸域起源の降雨による淡水の流入負荷が、塩分濃度の急減、栄養塩濃度（特にリン）の急増をもたらし、それに伴って慢性的なリン不足にある海域の窒素/リン比が急変し、有毒赤潮プランクトンの大発生につながっていることが明らかとなった。また、夏季の降水量の少ない年は赤潮発生が極端に少ないことも明らかとなった。つまり、広島湾の赤潮発生の特色は、不確定要素の強い夏季の集中降雨によって、リン制限の赤潮プランクトンの増殖が起り易いということになる。

参考文献

- 国土交通省 (1993～1999): <http://wdb-cg.river.or.jp>, 太田川工事事務所。
- 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所 (1992～2000): 瀬戸内海の赤潮。田中勝久 (1991): 河川増水時の懸濁物による沿岸海域への吸着態 PO₄-P 負荷, 水産海洋研究, 55, pp. 450-456.
- 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。
- 広島市衛生局 (1990～1999): 広島市の環境。
- 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・呉 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.
- Smayda, T. J. (1989): Primary production and the global epidemic of phytoplankton blooms in the sea: A linkage?, In: Novel Phytoplankton Blooms, Cosper, E. M., V. M. Bricelj and E. J. Carpenter (eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 449-483.