

# 海洋性赤潮種の感潮水域における増殖と赤潮形成過程

伊藤 禎彦\*・村上 仁士\*\*・池田 良一\*\*\*

## 1. 緒 言

徳島市内の感潮水域においては、海洋性赤潮種が原因の赤潮が毎年発生し、親水空間を生かした街づくりを進める上での障害となっている。一般に、海洋赤潮(代田, 1992; 電力中央研究所, 1992)、淡水赤潮(石田, 1991)については多くの研究が行われ、膨大な知見が集積しているが、感潮水域で発生する赤潮の研究例は非常に少ない。感潮水域は、海域とは異なり塩分や水位・流れが大きく変動し、そのため汚濁物が凝集、沈澱するなど特有の物理化学的作用があり、これらがまた生物活動に影響を与えている。

筆者らは、徳島市内の感潮水域で発生する赤潮をとりあげ、これまでに増殖制限物質を特定するなどの研究を行ってきた(伊藤ら, 1993)。本研究では、本感潮水域において発生する赤潮の消長に関して詳細な調査研究を行ったところ、感潮域に特有の興味ある結果を得たので報告する。

現地観測は、徳島市内の感潮水域を対象として、年間を通じて行った。また、水域が感潮域であることを考慮し、特に赤潮発生時には、上層水と下層水について観測を行った。これらの調査により、赤潮原因藻類を特定し、その水域内での動態を把握した。さらに現地調査より得られた結果をもとに、本感潮水域において赤潮原因藻類が増殖あるいは優占する過程を調べる室内培養実験を行った。すなわち、塩分濃度の変化の影響、および、複数種の藻類が混合したとき各藻類種がいかなる増殖特性を示すかについて検討した。

## 2. 現地観測結果

### (1) 観測内容

図-1に示すような徳島市中心部を流れる新町川水系は2ヶ所の水門で吉野川に通じており、河口とともに潮汐作用による水位変動や流れの影響を受けている。1992年度から行っている現地観測を継続し、1993年3月から

12月にかけて図-1に示す4点において、1ヶ月に1、2度、主に干潮時に観測を行った。さらに、水域が感潮域であることを考慮し、赤潮の発生が予想されたときには水質変動と赤潮原因藻類の消長を把握するため、経日あるいは経時的に観測し、上層水と下層水についても調査を行った。観測および分析項目は、気温、水温、塩分濃度、DO、Chl-a、TP、TN、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、藻体数とした。

### (2) 観測結果

当水域で1993年度は4月、6月、8月の計3回の赤潮の発生を確認した。以下、それぞれの赤潮現象についての発生状況とその特徴について明らかにする。

#### a) 4月赤潮

主に上流域のSt.3で発生し、水面が茶褐色化した。発生時の気温は23°C、水温は20°C前後であり、日射が強くなって水温が上昇しはじめる頃であった。赤潮発生前に降雨はなかったが、赤潮が発生してから3日後の降雨によって消散した。優占種は珪藻類 *Melosira* sp.(出現密度154,000 cells/ml)で *Thalassiosira* sp.も多く混在していた。また、St.2においても *Melosira* sp.の密度が高かったが、これは経時的な潮汐による流れにより、田宮川から新町川へ藻類が流下したのもであると推察できた。St.3では、5月と7月にも高濃度のChl-aを観測しており、*Melosira* sp.による赤潮が慢性的に発生している地点である。

#### b) 6月赤潮

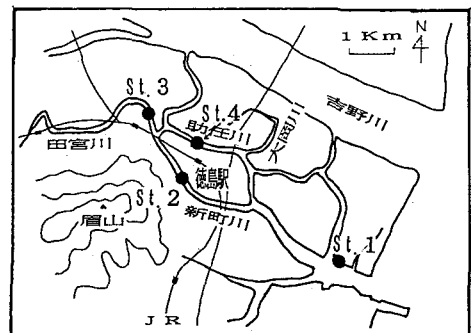


図-1 現地観測対象地域

\* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科

\*\* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科

\*\*\* 正会員 工修 徳島県庁

6月12日に St.1 と St.3 で独立に赤潮が発生し、褐色化した。すなわち、河口沿岸域と上流域で主に発生、中流域の新町川、助任川では発生していなかった。気温は27°C前後まで上昇、また水温は21~24°Cとなったときであった。

図-2 は、各地点での Chl-a と出現藻類の消長を経日的に示したものである。水面が褐色化し、赤潮状態であると判断できるのは、Chl-a 濃度でいうと上流域では 100  $\mu\text{g/l}$  以上、中流域や沿岸河口域では 50  $\mu\text{g/l}$  以上となったときである。細胞密度では  $10^5$  cells/ml 以上に相当する。上流域の方が赤潮発生を確認する Chl-a 濃度が高いのは、上流域の通常の水質が中流域や沿岸河口域と比較して悪化しているためである。

St.1 では主に海洋性赤潮の一般的な原因種(岡市, 1987)である珪藻類 *Chaetoceros sp.* (出現密度 272,000 cells/ml) が出現し、一方、St.3 では *Melosira sp.* (出現密度 212,000 cells/ml) が優占的に出現、その他 St.1 では *S. costatum*, St.3 では *Thalassiosira sp.* が混在していた。St.2 では褐色化してはいないものの、*Chaetoceros sp.* と *Melosira sp.* が混在していた。発生後、天候は不安定で、翌日の13日に20mmの降雨を記録、この降雨により褐色度がやや低下した。また、14日になって St.2 で褐色化、*Melosira sp.* によるものと確認した。

図-3 に発生前後の潮位変化を示すが、赤潮を確認した12日は小潮で、翌13日も潮位差が小さかったことがわかる。つまり、赤潮が発生した12日、13日は流れがほとんどなく、水系全域は停滞傾向にあったものと思われる。そして、13日の降雨による河川の固有流によって、さらに潮位変動の増大によって上流域由来の藻類が中流域へ流下し、14日になって褐色化したものと考えられ

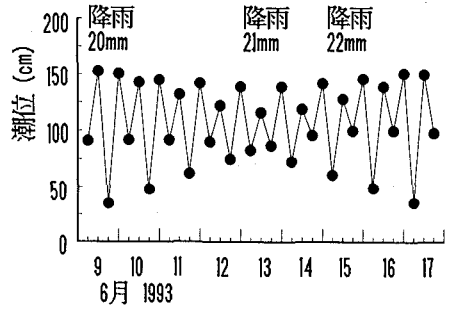


図-3 赤潮発生前後の潮位変動

た。一方、St.1 では14日、St.2, St.3 でも15日の降雨により減衰、ほぼ消散した。また St.4 では、褐色化はみられなかった。

この赤潮では、河口部と上流域で赤潮が独立して発生し消散したこと、しかも河口部と田宮川で出現する藻類が異なるものであった点が大きな特徴であった。

c) 8月赤潮

7月末から8月中旬まで全国的に天候不順となり、記録的な冷夏となった。22日までに5~10mmの降雨、22日には55mmもの降雨を記録している。この22日以降は晴天が続き、このとき赤潮が発生した。8月26日に、まず St.1 のみにおいて、ついで27日に St.2, St.3 において発生し水面が茶褐色化した。気温は30~33°C、水温も27~28°Cまで上昇しており、年間の最高温期である。また、6月と同様、St.4 では褐色化はみられなかった。今回もやはり、沿岸河口域と上流域とでは優占的に出現する藻類に違いがみられた。すなわち、St.1 では *Chaetoceros sp.* (出現密度 133,000 cells/ml) と *S. costatum* (出現密度 82,000 cells/ml) が複合した赤潮が発生し、St.3 では *Melosira sp.* (出現密度 120,000 cells/ml) が優占種として出現した。その他、St.1 では *Melosira sp.* や *Thalassiosira sp.* など、また St.3 でも *Thalassiosira sp.* が混在していた。

図-4 に中流域である St.2 における、赤潮発生前後の水質変動を示す。塩分濃度をみると、中旬までに降り続いた降雨によって水域全体で低塩化したものが、流量の減少とともに密度流によって塩分が遡上し、下層から、のち上層で高塩化した。また、図より高塩化とともに、Chl-a 濃度も下層から、のち上層でも増大したことがわかる。栄養塩濃度は、TP, TN とも大きな変化はみられなかったが、Chl-a 濃度の増大とともに  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が減少した。

図-5 は、各地点での主な赤潮藻類の出現状況を経日的に示したものである。まず、St.1 において *Chaetoceros sp.* と *S. costatum* が複合して増殖した。翌日になって、St.

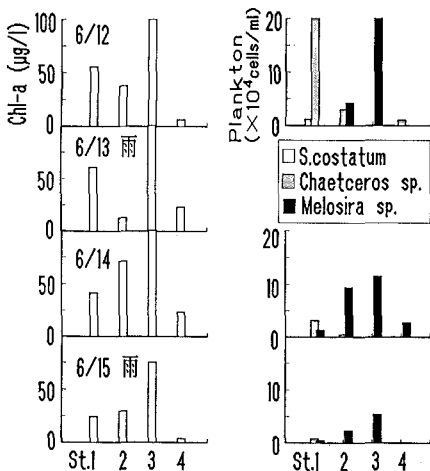


図-2 6月赤潮における Chl-a と藻類の消長

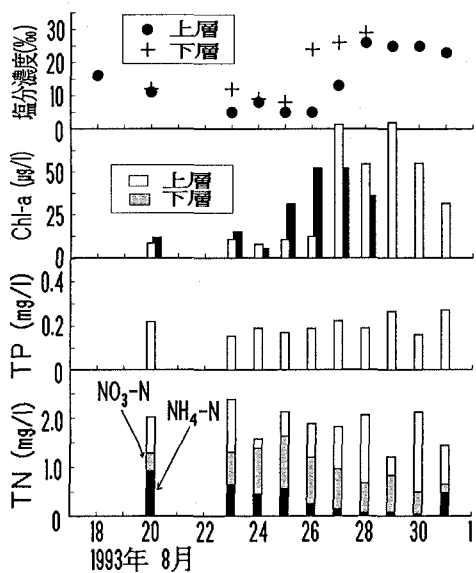


図-4 8月赤潮発生前後の水質変動(中流域)

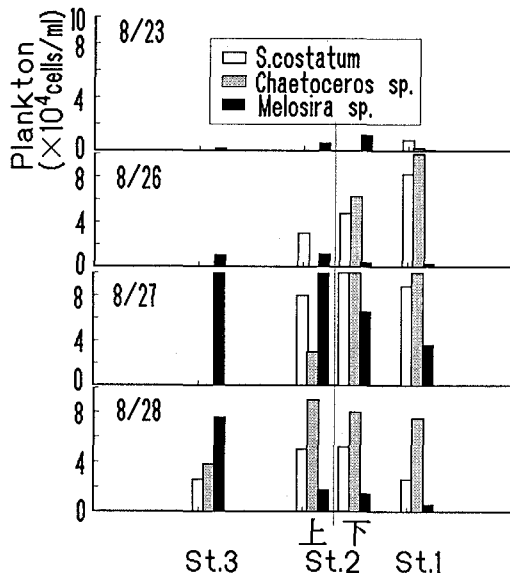


図-5 出現藻類の経時変化

3でも *Melosira sp.*が主に増殖、優占した。このとき St.2 では、塩分濃度の低い上層では St.3 と同じ藻類が、塩分濃度の高い下層では St.1 と同じ藻類が主に出現している。

これら藻類は、図-6 に示すようにおのおの独立に増殖した後、河川の固有流あるいは密度流によって水域内を移動したものと考えられ、のち混合、増殖して新たに *Chaetoceros sp.*と *S. costatum* を主体とする赤潮が形成されていったと考えられる。この過程は、感潮域特有の水理現象によるもので、本研究で観察された最大の特徴である。

一方、赤潮は発生から5日目の31日にはほぼ消散し、その後は降雨(20 mm)が続き、それ以降は観測されなかった。

### 3. 赤潮藻類の増殖特性に関する室内培養実験

感潮域において発生する赤潮現象について、感潮域特有の現象が赤潮の消長に大きく影響していることがわかった。この調査結果をもとに、各赤潮藻類の増殖に影響を与える因子を把握するための培養実験を行った。

#### (1) 塩分濃度の変化の影響

図-5の中流域における赤潮発生過程をみると、沿岸河口域で発生した *Chaetoceros sp.*と *S. costatum* は塩分濃度が低下する条件、また上流域で発生した *Melosira sp.*は塩分濃度が増大する条件となっている。この塩分濃度の変化が赤潮藻類の増殖にいかに関与するかについて検討する。

##### a) 実験方法

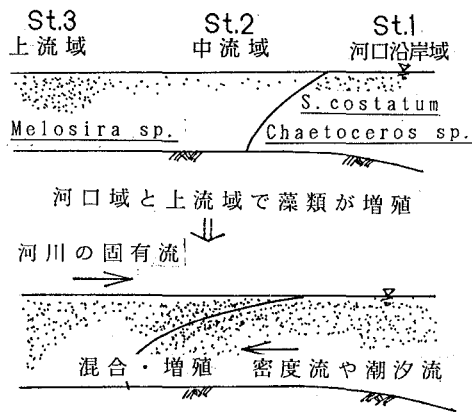


図-6 藻類の動態と混合増殖過程

当水域での主な赤潮原因藻類である珪藻類 *Chaetoceros sp.*, *S. costatum* および *Melosira sp.*の3種をとりあげた。そのうち、*S. costatum* は1985年大阪湾岸和田沖における赤潮から分離された *S. costatum* 323株を国立環境研究所微生物系統保存施設から譲受し、実験に供した。本株は無菌的に保存されている。また、*Chaetoceros sp.*と *Melosira sp.*については、当水域の河口部と上流部よりそれぞれ分離したものである。藻類の継代および試験には基本培地として f/2 培地(須藤, 1988)を用いた。*Melosira sp.*については、上流部の塩分濃度15‰に調整した f/2 培地によって継代したものをを用いた。

まず、f/2 培地中の塩分濃度を0~35‰に段階的に変化させ、20 ml 容量のL型試験管に18 ml 入れて滅菌し

た。塩分濃度の調整は、*f/2*培地中の Seawater を人工海水で置き換え、この人工海水を蒸留水で希釈して行った。ついで、目的とする藻類を接種し、振とう器 (タイテック製モノシンII-A) を用いて、照度 2000 lx, 12 時間明 12 時間暗の明暗サイクルで培養を行った。温度条件は、*S. costatum* が 20°C, *Chaetoceros sp.* と *Melosira sp.* は 25°C とした。藻類の初期値は、西島ら (1990) の研究を参考に、1,000~5,000 cells/ml となるようにした。増殖量は界線入りスライドガラスを用いて藻体数を直接計数して求めた。

#### b) 実験結果

塩分濃度の変化が実際の赤潮の形成にいかに関与しているかをみるためには、誘導期の後の対数増殖期における増殖速度ではなく、むしろ塩分濃度が変化した直後の藻類の挙動をみる方が実際的である。図-7 は、培養初期と培養開始後 2 日目の細胞数の比、すなわち増殖比を示したものである。( ) 内の数値はこの実験を行う前の培養液中における塩分濃度を示している。

まず、*S. costatum* は塩分濃度が低下するほど増殖は抑制される傾向にあるが、10‰を下回らない限り、影響はさほど大きくないようである。*Chaetoceros sp.* は 25‰程度まで変化しても影響はあまりないが、25‰を下回ると顕著に影響を受け、増殖は大きく抑制される。*Melosira sp.* では 10‰以下でやや影響を受けるものの、塩分濃度が高くなってもほとんど影響を受けないといえる。

これに対し、8 月赤潮では塩分濃度の増大とともに赤潮藻類が増殖した。しかし、ここで行った実験結果からは、塩分濃度の増大が直接藻類の増殖を刺激したとは考えにくいことがわかる。

#### (2) 混合状態での増殖特性

現地調査より、河口域では *Chaetoceros sp.* と *S. costatum*, 上流域の田宮川では *Melosira sp.* が主に優占し、これらの赤潮藻類は潮汐流などによって水域内を移動し、その後、混合、増殖し新たな赤潮が形成された。そ

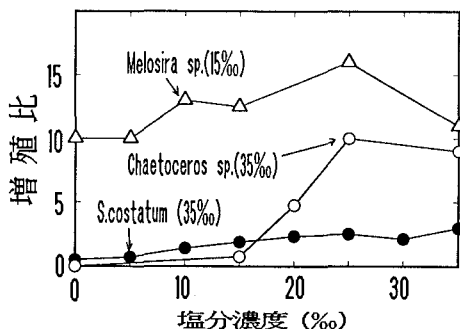


図-7 塩分濃度の影響

こで河口部由来の藻類 *Chaetoceros sp.* および *S. costatum* と上流域由来の藻類 *Melosira sp.* との混合状態での増殖特性を調べ、それらが増殖・優占する過程について把握することを試みた。

#### a) 実験方法

滅菌した *f/2* 培地中に藻類を種々の組み合わせと割合で接種し、塩分濃度の変化の影響を調べた方法と同様に培養を行った。

#### b) 実験結果

まず、各藻類単独での増殖特性を図-8 に示す。図より、*S. costatum* と *Melosira sp.* の比増殖速度がほぼ同じで、*Chaetoceros sp.* はやや小さいことがわかる。最大増殖量に達するのに、*S. costatum* と *Chaetoceros sp.* は 8 日ほど、*Melosira sp.* は 5 日ほどであり、最大増殖量は、*S. costatum*, *Chaetoceros sp.*, *Melosira sp.* の順で大きい。

つぎに混合状態における各藻類の増殖過程を調べた結果を図-9 に示す。培養開始後、それぞれの藻類は単独系と同じように増殖しはじめる。しかし、5 日を過ぎて *Melosira sp.* の細胞密度がほぼ最大となると *Chaetoceros sp.* は増殖を阻害され、その後、死滅に向かった。一方、*S. costatum* は、培養初期には細胞密度が *Melosira sp.* よりかなり大きく、優占するかにみえたが、5 日目に最大細胞数に達した後、死滅に向かった。結局、*Melosira sp.* のみが着実にその細胞密度を増加させ、優占種となった。ここで観察された結果は、藻類の初期細胞割合を変えた場合、また藻類を 2 種類として培養を行った場合、および塩分濃度を変えた場合にも同様にみられた。すなわち、3 種類の赤潮藻類の優占順位は、*Melosira sp.* > *S. costatum* > *Chaetoceros sp.* となることがわかった。

ここで、これらの結果は現地調査と異なっている点があることに気付く。図-5 をみると、混合状態の後、*Chaetoceros sp.* が優占的に増殖した。これに対し、室内実験では、塩分濃度が 35‰ だとえ系の中で *Chaetoceros sp.* が優占していてもやがて *Melosira sp.* が優占するのである。また、現地の沿岸河口域に限っても、*Chaetoceros*

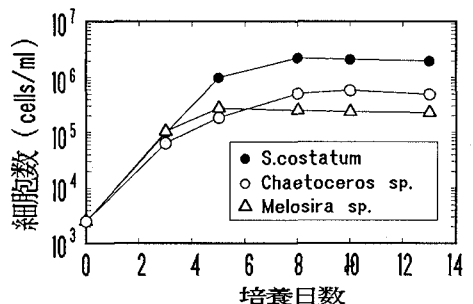


図-8 各藻類の単独での増殖特性

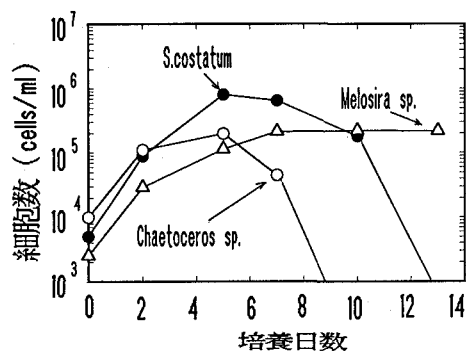


図-9 混合系における増殖特性

sp.が優占したが、室内実験では逆に *S. costatum* が優占化する傾向にある。

以上のように、現地観測でみられた赤潮形成過程は、室内培養実験では再現されず、その理由も明らかではない。考えられる理由はいくつかあるが、本実験では人工培地を用いている点を第一に挙げることができる。つまり、培地中の栄養塩は、リン源として  $PO_4\text{-P}$ 、窒素源として  $NO_3\text{-N}$  を用いているが、どの種が優占化するかは、それぞれの種がもつ栄養塩利用特性により大きく左右される可能性がある。現地調査によって赤潮の発生とともに水中の  $NH_4\text{-N}$  濃度が減少したのが、赤潮藻類の作用によるものと考えられるなら、これによって優占種が変化することも考えられる。今後はそれぞれの藻類の栄養塩利用特性を見極めつつ、実河川水をも用いた実験を行う必要がある。

#### 4. まとめ

徳島市内の感潮水域で発生する赤潮について現地観測と室内培養実験を行い、以下の結果を得た。

1) 1993年度は4月、6月、8月の計3回赤潮発生を確認した。水面が褐色化し、赤潮状態であると判断でき

るのは、Chl-a 濃度でいうと上流域では  $100 \mu\text{g/l}$  以上、中流域や沿岸河口域では  $50 \mu\text{g/l}$  以上となったときであった。これは細胞密度では  $10^5 \text{ cells/ml}$  以上に相当した。

2) 沿岸河口域では *Chaetoceros sp.* と *S. costatum* が主体、上流域では *Melosira sp.* が主体である赤潮がそれぞれ独立に発生した。特に8月の赤潮の場合には、河川の固有流および密度流によって水域内を移動し、その後混合、さらに増殖を続け、中流域での新たな赤潮が形成されていった。この赤潮の形成過程は、感潮域特有の水理現象にともなう特徴的な現象であった。

3) 藻類増殖に対する塩分濃度の変化の影響を調べるための室内培養実験を行った。その結果、塩分濃度変化が直接藻類の増殖を刺激するとは考えにくかった。

4) 沿岸河口域由来の藻類 *Chaetoceros sp.* および *S. costatum* と上流域由来の藻類 *Melosira sp.* とが混合したときの増殖特性を調べ、増殖・優占する過程について調べた。その結果、3種類の藻類の優占順位は、*Melosira sp.* > *S. costatum* > *Chaetoceros sp.* となることがわかったが、現地調査の結果とは異なっていた。

#### 参考文献

- 石田祐三郎 (1991): 淡水赤潮の現状と問題点, 水質汚濁研究, Vol. 14, No. 5, pp. 2-7.
- 伊藤禎彦・村上仁士・池田良一 (1993): 感潮域における赤潮原因藻類の増殖制限因子の推定, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1001-1005.
- 岡市友利編 (1987): 赤潮の化学, 恒星社厚生閣, 294 p.
- 代田昭彦 (1992): 赤潮の対策研究と技術開発試験の経緯と展望, 月刊海洋, Vol. 24, No. 1, pp. 3-16.
- 須藤隆一編 (1988): 環境微生物実験法, 講談社サイエンティフィック, 289 p.
- 電力中央研究所 (1992): 電力中央研究所報告, 赤潮文献調査, 調査報告 U 92017, 186 p.
- 西島敏隆・山砥稔文, 畑幸彦 (1990): 赤潮藻類 *Skeletonema costatum* の栄養要求と AGP 試験に供するための調製法, 水質汚濁研究, 第13巻, 第3号, pp. 173-179.