

# 東京湾における赤潮の消長要因に関する考察

佐々木 淳\*・磯部雅彦\*\*・今井 誠\*\*\*

## 1. はじめに

環境影響評価法の制定をはじめとして、近年、環境意識の高まりから、開発による沿岸環境への影響や、人工干潟の造成をはじめとする環境創造の効果を予測・評価することが強く求められるようになってきた。内湾における代表的な水質問題である富栄養現象に関しても、生態系項目を含む環境変化予測モデルの確立が急務となっている。従来から実験や観測に基づき様々な予測モデルが提案されてきているが、植物プランクトンをはじめとする生物の環境に対する応答は現地と実験室ではかなりの相違があることが指摘されている。また、現地観測はコストや労力の問題の他に、生物項目に関しては測定法が確立されていないものも多く、調査される頻度も月に一度程度であったり、調査項目・測点数が不十分なものがほとんどで、時空間的により小さいスケールで大きく変動する現地の状態を捉えることは難しいのが現状である。このような中、最近ではクロロフィル a に関して長期連続測定が可能となり、重要な生物項目である植物プランクトンの動態に関しては時々刻々の詳細な現地データが得られるようになってきた(八木ら, 1997, 1998)。空間分布やプランクトン種組成、栄養塩動態等に関してはまだまだ情報不足ではあるが、公共機関による水質調査結果等を総合すれば、かなりの情報が利用可能となってきている。そこで、本研究では近年充実してきたこれらの現地データを収集分析することで、赤潮動態の要因を考察することを目的とする。さらに、著者らが開発している生態系モデルによる現地の現象の再現を試みる。

## 2. 赤潮現地データ

### (1) 既往の観測データの整理

東京湾においては従来から「公共用水域水質測定結果」が公表されているが、これに加えて、東京都は東京都内湾を対象として昭和 52 年度から、赤潮発生の実態把握を

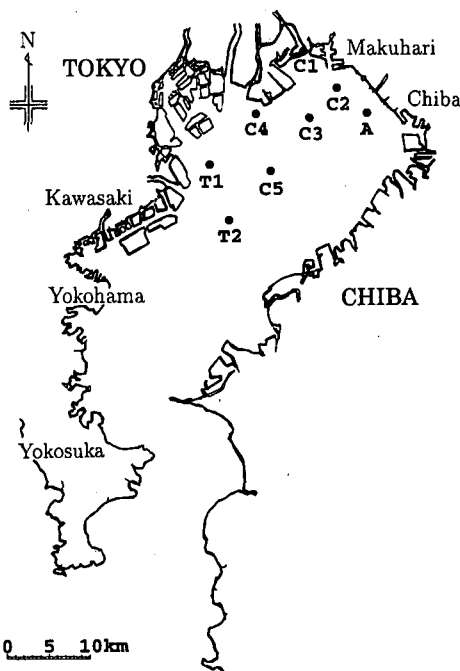
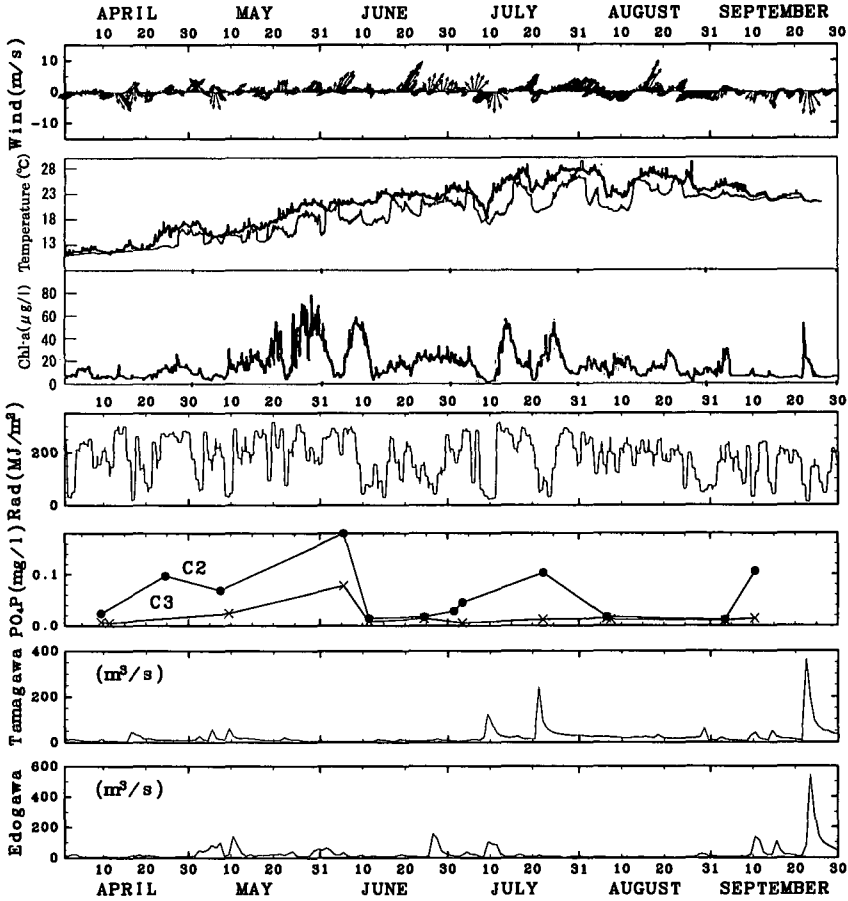


図-1 東京湾における観測地点

目的として、赤潮の発生期間、発生海域、種の同定と計数等を含む水質調査を通年にわたり行っている。また、千葉県は水産試験場による東京湾全体の水質分布調査や水質保全研究所による赤潮調査、三番瀬の埋め立て計画に関係した調査等により多くの水質データを公開している。一方、1996 年には八木ら (1997, 1998) により幕張沖波浪観測塔において係留系によるクロロフィル a を含む水質の連続観測が一年近くにわたり行われ、貴重な情報が提供されている。そこで、データの豊富な 1996 年度を主な分析対象として、表-1 に示すデータを収集解析する。表には 1996 年における調査分のみを示すが、資料によっては過去 10 年分程度のデータを収集参照している。

以上の情報を基に、1996 年 4 月から 9 月までの、千葉測候所における 24 時間移動平均風速ベクトル、東京における 24 時間移動平均全日射量、江戸川および多摩川に

\* 正会員 博(工) 東京大学助教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻  
\*\* フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻  
\*\*\* 修(工) 大和証券(株)



図—2 1996年4月から9月までの時系列観測データ。上から、千葉測候所における24時間平均風速ベクトル、St. Aにおける水温およびクロロフィルa、東京における24時間平均日射量、St. C2, C3における表層でのリン酸態リン濃度、多摩川調布堰および江戸川河口での流量

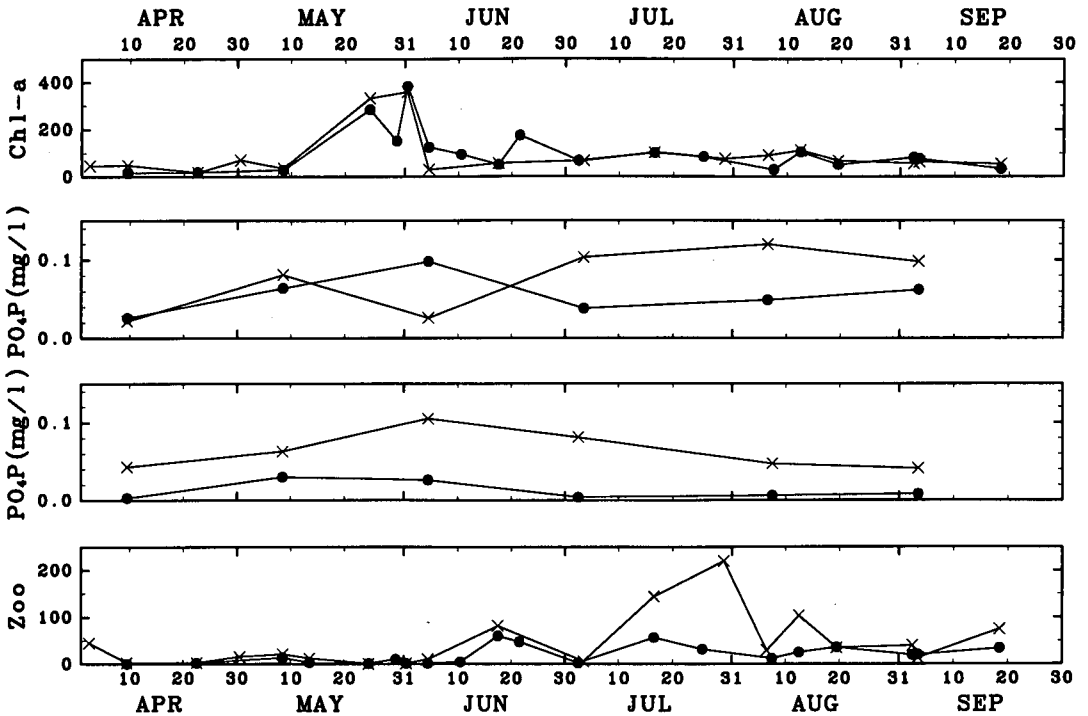
おける河川流量、図—1のSt. C2, C3における表層のリン酸態リン、およびSt. Aにおける水温・クロロフィルa濃度の連続観測データ（八木ら, 1997）を図—2に示す。また、東京港沖のSt. T1およびSt. T2におけるクロロフィルa濃度、表層・底層のリン酸態リン濃度、および動物プランクトン個体数の経時変化を図—3に示す。

表—1 分析に用いた1996年の観測データ

主な参照データ	出典
東京都内湾赤潮	東京都環境保全局 (1998)
三番瀬水質・生態系	千葉県土木部・企業庁 (1998)
赤潮等プランクトン調査	小倉・佐藤 (1997)
湾内海況	千葉県水産試験場 (1997)
水質 (栄養塩)	東京都環境保全局 (1997)
水質 (栄養塩)	千葉県環境部 (1997)
湾奥水質連続観測	八木ら (1997, 1998)
気象 (風, 降水量, 日射量)	気象庁 SDP データ東京・千葉
多摩川調布堰下流流量	東京都水道局
江戸川河口放水量	建設省江戸川工事事務所

(2) 赤潮優占種の概要

東京湾における赤潮優占種は時代と共に大きく変化しており、1960年代までは *Gymnodinium* 属をはじめとする渦鞭毛藻類が多く、外洋種を含む多様性の高い種構成であったが、現在では、珪藻類の *Skeletonema costatum* や *Thalassiosira*、ラフィド藻類の *Heterosigma akashiwo* 等、ごく少数の種が支配的となっている（例えば、野村, 1998）。これは現在の東京湾が過栄養な状態にあること、および都市化に伴う淡水流入量の増大に起因していると考えられている。平成2年から平成8年までの東京都内湾における赤潮調査データ（東京都環境保全局, 1991~1997）を基に、代表的な赤潮優占種およびそれぞれの出現特性をまとめたものが表—2である。これからわかるとおり、東京湾における赤潮優占種の数は限られており、中でも春及び秋を中心に通年出現する *S. costatum*、初夏の *H. akashiwo*、および盛夏の *Thalassiosira* sp. が極めて支配的かつ単純な出現パターンとなっている



図一 1996年4月から9月までのSt. T1, T2における観測値の時系列データ(上から、クロロフィルa, リン酸態リン, 動物プランクトン個体数)。

表一 東京都内湾における優占植物プランクトン

優占種	H8	H7	H6	H5	H4	H3	H2	性質
<i>Skeletonema costatum</i>	7	3	6	5	3	4	7	増殖速度大。春、秋、冬に優占。好適水温 10~30°C, 好適塩分 10~30 psu.
<i>Heterosigma akashiwo</i>	2	3	2	1	3	2	1	増殖速度大。6月頃優占。好適水温 20°C 前後, 好適塩分 20~25 psu.
<i>Thalassiostris</i> sp.	3	1				1	1	増殖速度中。夏に優占。
Cryptomonadaceae		1		4				増殖速度中。夏に優占。低塩分高温に適応。
<i>Procentrum triestinum</i>							1	増殖速度中。夏季に優占。好適水温 22°C 前後, 好適塩分 26~29 psu

る。そこで、データの豊富な1996年度を対象として、種変遷を含む赤潮の消長過程に関する考察を行う。

### 3. 1996年度における赤潮の変遷

東京都環境保全局(1998)、小倉・佐藤(1997)、千葉県水産試験場(1997)および公共用水域水質測定結果を基に1996年度に発生した赤潮の消長過程を考察し、次に消長要因の整理を行う。

#### a) 4月1日から3日

4月1日から3日にかけて東京港内からSt. T1周辺にかけて*S. costatum*による赤潮が発生した。これは日射量の増大と気温の上昇による水温上昇を主因として春先に毎年繰り返されるものだが、このとき発生した直接的な原因は、それ以前と比較して風速が弱まり拡散作用が小さくなったことがあげられる。また、赤潮は東京港周辺に限られ、湾奥全体で赤潮となっているわけではな

い。これは栄養塩であるリン酸態リン( $PO_4\text{-P}$ )が不足しているためと考えられ、 $PO_4\text{-P}$ の主要な供給源である河川からの淡水流入量がまだ少なくその影響が河口付近に限られること、および湾奥底層においてもDO濃度が高いため $PO_4\text{-P}$ の溶出速度が小さいことによると考えられる。その後気温の低下と、風がやや強くなり拡散作用が卓越したことから赤潮が解消している。

#### b) 4月25日から30日

4月22日頃から好天が続き、水温の上昇と風速の低下により東京港からSt. T1周辺にかけて赤潮状態となった。St. Aのクロロフィルaの観測データを見てもその増大が見られ、湾奥全体において*S. costatum*の量が増加している様子が分かる。その後は天候の悪化と強風による拡散作用で赤潮状態は解消した。

#### c) 5月13日から6月13日

5月のはじめから江戸川の出水量が増大して栄養塩が

湾内に供給され、また10日頃から天候が回復し風が弱まったことで、クロロフィルa濃度の増大が見られた。千葉県水産試験場(1997)によれば5月13、14日には内湾の広い範囲で赤潮状態となっており、構成種は様々であるが *H. akashiwo* が優占種の一つとなっている。*H. akashiwo* は毎年この時期にブルームを形成しており、これは豊富な栄養塩と日射に加えて、水温が本種の最適水温に近づくことによって他種にない極めて高い増殖速度を達成したことによると考えられる。その後、東京港沖では河川水の直接の影響が弱まり、20日ころからきわめて濃密な赤潮が広範囲に出現した。このときの優占種も *H. akashiwo* であるが、*S. costatum* もかなりの量存在していた。その後も好天が続き南風系が卓越したため、湾奥全体に濃密な赤潮が形成された。この濃密な赤潮は6月13日まで継続したが、6月4日ころに優占種が *H. akashiwo* から *S. costatum* に変化していることが確認されている。この種変遷の原因は不明であるが、一つは江戸川からの淡水流入量が増大して塩分が低下したことにより、*S. costatum* に有利となったこと、表層の栄養塩が増大して鉛直移動をしない *S. costatum* にも十分な栄養塩が供給されたことが考えられる。また、この間のもう一つの大きな変化は南西の強風が吹いたことであり、鉛直方向によく散らばっている *S. costatum* と違って、日周鉛直移動を行う *H. akashiwo* は全体が同じように流されやすいことが考えられる。このときの強風の影響は St. A におけるクロロフィルa濃度の大幅な低下の形で現れている。その後風が弱まり、7日頃まで好天が続いたことから、内湾全体で *S. costatum* の赤潮が継続したが、その濃度は  $100 \mu\text{g/l}$  程度以下とそれ以前に比べるとかなり低くなっている。8日からは天候が悪化して日射量が大幅に減り、風が弱く静穏であったことから珪藻である *S. costatum* は沈降していったこと、および千葉県水産試験場(1997)によれば10、11日には栄養塩が大幅に低下していたことから、この赤潮が収束したものと考えられる。この頃にいわゆる spring bloom は終了し、これ以降は慢性的な赤潮状態が継続し、表層の栄養塩は不足気味となり、底層水の湧昇や河川出水による栄養塩の供給に敏感に反応するようになる。

d) 6月28日から7月6日

この少し前に江戸川の出水があり、東京都内湾に栄養塩が供給されたことにより、赤潮が発生したものと考えられる。その後7月2日から5日の調査では栄養塩の急激な低下みられ、栄養塩不足となったこと、7月6日ころから強風が吹いたこと、および天候悪化により日射量が著しく減少したことが、この赤潮を収束させたものと考えられる。

e) 7月15日から20日

7月7日および9日頃からそれぞれ多摩川および江戸川の出水が見られ豊富な栄養塩が供給されたこと、7日からの北東風の連吹により栄養塩を豊富に含む底層水が湧昇したこと、および11日より好天が継続したことにより、東京都内湾全域において *S. costatum* を中心とする赤潮が発生したものと考えられる。小倉・佐藤(1997)による16日のクロロフィルa分布から、湾奥全域で赤潮状態になっていたことがわかり、St. Aにおけるクロロフィルa濃度の急上昇にも現れている。このように、植物プランクトンにとって好適な条件が揃うと、急激な増殖が見られることになる。また、この間の変動のタイムスケールが短いことから一つの種が支配的となることはなく、様々な種が種間競争を繰り返している状態であると推察される。20日頃から北東風が連吹し、赤潮プランクトンが湾口へ向かって流出すると同時に、天候悪化による増殖速度の著しい低下から、本赤潮が終息したものと考えられる。

f) 7月25日から7月29日

このときも河川出水、湧昇および日射量の増大といった7月15日から20日のときと同様の現象が起こり、東京都内湾において赤潮が発生したものと考えられる。このときの優占種は最初 *S. costatum* であったが、水温が  $27^{\circ}\text{C}$  を越えたことにより、高水温を好む *Thalassiosira spp.* も増加し優占種となったものと考えられる。これ以降、9月10日頃まで河川からの淡水流入量は大幅に低下する。

g) 8月12日から23日

7月20日過ぎから目立った河川の出水は見られず、千葉県水産試験場によれば表層の栄養塩は不足気味で8月5、6日の時点では湾全体に薄い赤潮が広がっている状態であった。が、この頃から北風系の連吹により湾奥において底層水の湧昇が見られた。その結果、表層に栄養塩が供給され東京都内湾全体に広がる赤潮が形成されたものと考えられる。その後23日頃から強い北風系が連吹し、赤潮水が湾口方向に流出したことにより、解消したと考えられる。

h) 9月1日から6日

8月23日ころより始まった北風系の連吹は風速を弱めながら9月1日頃まで継続し、湾奥一帯に豊富な栄養塩を含む底層水が湧昇し、内湾全体に広がったものと考えられる。その結果、内湾一帯で濃密な赤潮が発生したが、このときの優占種は珪藻類の *Cycrotella* であった。本種による東京湾での赤潮は珍しく、その発生原因は不明である。9月4日ころには表層の栄養塩が不足気味となっており、風の弱い状態が継続したため、栄養塩の供給が少なく、赤潮状態が解消したものと考えられる。

i) 9月11日から20日

9月8日頃より河川出水が見られ、9日、11日の千葉県水産試験場により内湾西側で赤潮状態となっていることが報告されている。また、北風系の連吹がみられたことから、船橋沖において湧昇域が見られ、その後赤潮状態となったものと推察される。この間、St. Aにおけるクロロフィルa濃度は低い状態を保っていたが、これは赤潮域が船橋沖から横浜にかけての西側沿岸一帯に限られていたことを物語っていると推察される。20日過ぎにはSt. Aにおいてクロロフィルa濃度の急激な増大が見られるが、これは湾奥西側に存在していた赤潮水がこの頃通過した台風による強風で幕張沖まで流されたことに起因すると考えるのが自然であろう。この台風時に大規模な河川出水が見られたが、強い北風系が連吹していたことから湾口に流されたものと推察され、日射量が少なくなっていることからこの出水に直接起因する赤潮の発生は見られなかったようである。

#### 4. 数値モデルによる再現

1996年度における赤潮の消長過程をクロロフィルaの変動に着目して、数値モデルによる再現を試みる。モデルは佐々木ら(1998)と基本的な枠組みは同様で、準3次元流動モデルと水質・生態系モデルを結合し、境界条件を時々刻々を与えることで、現地における現象の再現を目指すものである。本研究では種ごとの相違を取り入れたモデル化の第一歩として、東京湾において最も優占する*S. costatum*を念頭においたモデル化を行い、再現性の向上をはかることを試みる。

*S. costatum*は他種と比較して特に広い水温・塩分の適応性を有しているが、これは水温、塩分の広域にわたって高い増殖速度を有していることを意味する。また、水温が15°Cを下回ると増殖速度は急激に小さくなる等、本種に関する水温や塩分等の制限関数は全変動範囲を滑らかな関数で近似するのではなく、ある好適な範囲を超えた場合は急速に増殖速度が小さくなるよう、不連続的な分布となるようにすべきであると考えられる。そこで、好適範囲の上限と下限を設け、その閾値を境に不連続的に増殖速度が変化するようなモデル化を行った。本モデルによって1996年4月から9月までのSt. Aにおける水温およびクロロフィルa濃度の再現計算結果を図-4に示す。クロロフィルa濃度の経時変化を見ると、春のブルーミングや河川出水、湧昇等による変動が定性的にはよく再現されているものの、定量的には値の大小関係も含めてあまりいい結果とはなっておらず、今後の課題である。

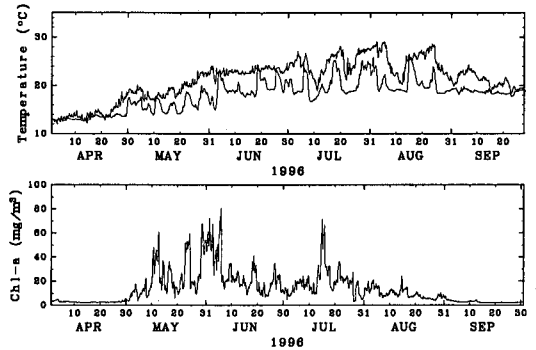


図-4 1996年4月から9月までのSt. Aにおける水温およびクロロフィルa濃度の計算結果

#### 5. おわりに

東京湾において現時点では最も情報が豊富であると考えられる1996年を対象として、可能な限り多くの観測データを入手し、赤潮の消長に関する分析を行ったが、時間的に連続的な情報が1点しかないことと、栄養塩の情報が不足しているため、どうしても推測の域を出ない部分が多くなってしまふことが課題として残される。今後、内湾の多点における連続的な観測と、詳細な栄養塩および植物プランクトン種等の調査を行うことで、内湾における富栄養現象に関する定量的な情報を蓄積し、モデルに反映していくことが必要である。

#### 参考文献

- 小倉久子・佐藤正春(1997): 赤潮等プランクトン調査, 平成8年度千葉県水質保全研究所年報, pp. 77-84.
- 千葉県環境部(1997): 平成8年度公共用水域水質測定結果及び地下水の水質測定結果, 574 p.
- 千葉県水産試験場(1997): 平成8年度版「東京湾海映速報」集, 108 p.
- 千葉県土木部・千葉県企業庁(1998): 市川二期地区・京葉港二期地区計画に係わる環境の現況について(要約版), 336 p.
- 東京都環境保全局(1997): 平成8年度公共用水域及び地下水の水質測定結果, 418 p.
- 東京都環境保全局(1992-1998): 東京都内湾赤潮調査報告書.
- 野村英明(1998): 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷, 海の研究, Vol. 7, No. 3, pp. 159-178.
- 濱 順子・半田暢彦(1996): 出水期における植物プランクトン生産の動態, 海洋, Vol. 28, No. 3.
- 八木 宏・鯉淵幸生・日向博文・灘岡和夫(1998): 東京湾湾奥部の水環境に与える河川水の影響について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 986-990.
- 八木 宏・内山雄介・鯉淵幸生・日向博文・宮崎早苗・灘岡和夫(1997): 東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1076-1080.