

現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構

鯉 渕 幸 生*・五明美智男**・佐々木 淳***・磯 部 雅 彦****

1. はじめに

東京湾は水質悪化の著しい我が国の代表的な内湾であり、赤潮が頻繁に発生し問題となっている。八木ら(1997)は、東京湾幕張沖において成層の形成過程や一次生産の変動過程を現地観測し、春季の表層における植物プランクトン生産量が年間で最も高いことや、湾奥部で貧酸素水塊が形成されることなどを報告しているが、春季は混合期から成層期への過渡期にあたり湾内の水質が劇的に変化するため、赤潮の発生機構には未だ不明な点が多い。また、赤潮時に生産される大量の有機物は下層において分解され貧酸素水塊の形成要因となるため、その後の栄養塩溶出や湧昇による青潮の発生等、湾内の水質悪化に重大な影響を与えと考えられるが、これまでに行われた現地観測例は少なく、調査海域や項目に偏りがあったため、春季における植物プランクトンの増殖やそれに伴う栄養塩等の水質変動を解明するために必ずしも十分ではなかった。

本研究では、富栄養化した内湾における春季の赤潮発生機構や、それに伴う貧酸素水塊の形成・栄養塩濃度の変化など一連の水質変動をその規模も含めて明らかにするために、湾奥部の3地点においてクロロフィルaや栄養塩、光量子をはじめとする水質の連続観測を行った。

2. 多点連続水質観測の概要

水質の連続観測は、東京都および千葉県が実施している公共用水域水質測定結果を基に、水質悪化の著しい湾奥部の3地点で1999年4月から実施した。観測地点は、河川水による直接的な汚濁負荷の影響を受ける東京灯標(水深12.5m)、海水交換が弱く特に水質悪化が著しい湾最奥部に位置する千葉灯標(水深12.5m)、湾奥中央に位置する京葉シーバース(水深22m)とした(図-1)。測定項目は3地点共通である(図-1)。係留系による測定は

クロロフィルa・水温・塩分・溶存酸素・pHであり、測定時間間隔は10分である。期間中週一回のメンテナンスを千葉県所有の調査船「きよすみ」および東亜建設工業(株)所有の「しおつる」にて交互に行った。その際、DataSonde 4 (Hydrolab社製)を用いて水温・塩分・溶存酸素・クロロフィルa・ORP・pH・水中光量子の鉛直分布を計測すると共に、採水により栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, SiO_2 , T-N, T-P)の鉛直分布を1.5m間隔で計測した(鯉渕ら, 2000)。

3. 植物プランクトンの変動特性

3.1 赤潮動態の支配要因

図-2に1999年4月15日から6月25日までの千葉管区気象台における風速ベクトル、東京管区気象台における短波放射(日射量)、クロロフィルa(上から千葉灯標・京葉シーバース・東京灯標)、および水温(上から千

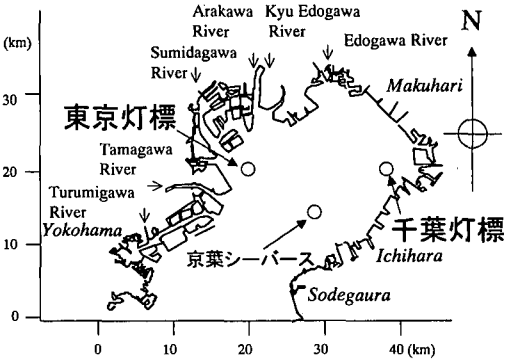


図-1 現地観測海域

表-1 測定項目

観測項目	測定深度	測定時間間隔	方 法
クロロフィルa	2 層 (2.6 m)	10 分	係留
塩分, 溶存酸素	4 層		
pH	海底上 50 cm		
水温	8 層		
栄養塩 ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, SiO_2 , T-N, T-P)	1.5 m 間隔	週 1 回	採水
水中照度, ORP, pH, Chl.a, 水温, 塩分, DO	連続		

* 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
** 正 会 員 水修 東亜建設工業株式会社技術研究所水環境研究室長
*** 正 会 員 工博 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

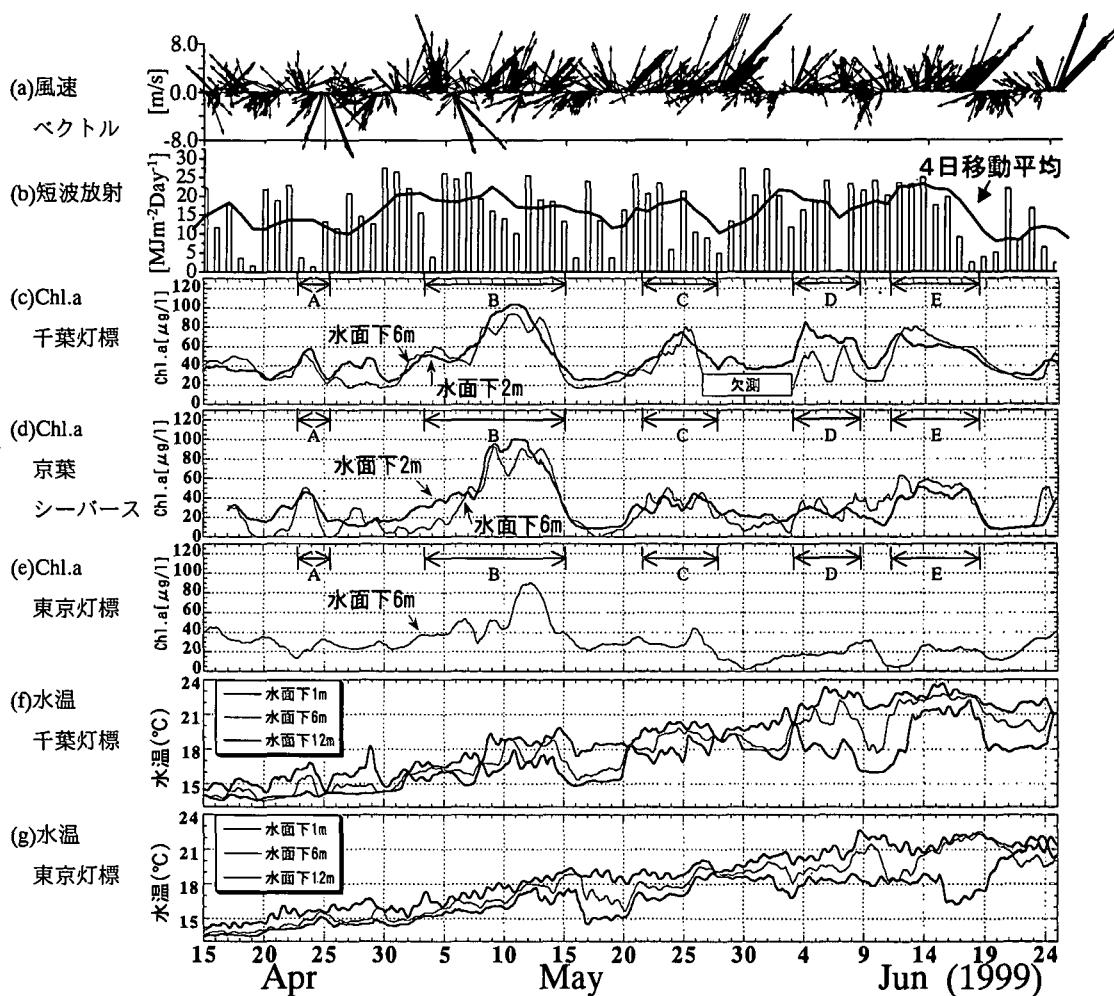


図-2 千葉管区気象台における風速ベクトル (a), 東京管区気象台における短波放射 (b), クロロフィル a (千葉灯標 (c)・京葉シーバース (d)・東京灯標 (e)), 水温 (千葉灯標 (f)・東京灯標 (g)) の時系列

葉灯標・東京灯標) の時系列を示す。期間中の日射量は全般に高く、1週間程度の周期で変動している。特に5月1日にこの年の最高値が記録されている。このような高い日射量は、春季に特徴的なものである。

クロロフィル a は期間中およそ5回 (図-2 期間 A, B, C, D, E) 増加しており、この際、期間 A, E における東京灯標を除けば、3地点共ほぼ同時期にクロロフィル a の増加が見られる。ここで図-2 における日射量と、クロロフィル a の対応関係を調べてみると、両者の増加時期が一致している。また図中の実線は日射の4日移動平均であるが、日射の移動平均とクロロフィル a の対応は4月下旬を除いて非常によい。これは、植物プランクトンが赤潮状態にいたるまでに数日間を要し、この間の日射の積分量が重要なこと、および光順化に3日程度時間を要することを考慮すると説明がつく。

一般に植物プランクトンの増殖においては、栄養塩濃度、光、塩分、水温をはじめ様々な制限要因が考えられる。栄養塩濃度や塩分に関しては、河口部に近い東京灯標と他の2地点では大きく異なるため (鯉淵ら, 2000)、これらが制限要因であるとするクロロフィル a が3地点共に同様の変動をすることを説明することは困難であり、日射の増大がクロロフィル a 増大の引き金であると考えられる。また観測地点が互いに10 km 程度離れていることを考慮すると、クロロフィル a の変動が湾奥部全体でほぼ同様の挙動となることを示唆している。しかしながら期間 A, E におけるクロロフィル a 変動には地点間の相違があることや、4月下旬においては日射量が高いにも係わらずクロロフィル a の増大がみられないなど、日射のみでクロロフィル a の変動をすべて説明することは不可能である。そこで湾内流動とクロロフィ

ル a の対応関係を次節で検討する。

3.2 赤潮におよぼす湾内流動の影響

図-2(f), (g) は、千葉灯標および東京灯標における水温の時系列である。水温と風の関係を見ると、北よりの風で千葉灯標における上層水温が急激に低下するのに対し、東京灯標では下層水温が上昇する(4月25日, 5月15日など)。一方、南よりの風ではこれとは逆の現象となっている。このような風系に対する水温の応答は、両地点が湾の東側と西側に位置することから、一方が吹き寄せのとき他方は湧昇となるためと考えられる。その結果、千葉灯標においては北よりの風で、東京灯標においては南よりの風で、クロロフィル a の低い下層の水塊が湧昇することにより、上層クロロフィル a が急激に濃度低下するものと考えられる。ところで先に述べたように期間 A, E では日射量が多いにもかかわらず東京灯標のクロロフィル a が増加していない。この原因はこれらの期間の風が南よりであり、地球自転の影響により東京灯標が湧昇域となっていたと考えると説明が付く。また千葉灯標と京葉シーバースのクロロフィル a の変動傾向が類似しているのは、両測点が共に湾東岸側に位置していることに起因する。

水塊の移動を考慮に入れて、水温とクロロフィル a の対応を検討すると、例えば期間 B においては5月14日から強い北風が、また期間 C, D, E においてはそれぞれ5月26日, 6月8日, 6月17日に強い北風が連吹しているなど、期間 B を除く赤潮発生期間の終わりには北よりの風が連吹しており、湾奥部全体的に水塊が混合しクロロフィル a が薄められたとすると説明がつく。また4月の下旬においては日射量が高いにも係わらず、クロロフィル a が増大しないが、この時期強い北風が連吹しており、下層の水塊が湧昇し表層における増大が起らなかったものと考えられる。

ところで最も大規模な赤潮に発展した期間 B のクロロフィル a は、5月12日ごろを境に減少を始めている。風との対応を見ると、5月11日に北風が吹くものの同程度の北風は5月8日にも見られ、主に風に起因したクロロフィル a の減少は、強い北風が吹く14日以降と考えるのが妥当であろう。そこで期間 B におけるクロロフィル a 減少の原因を、クロロフィル a の鉛直プロファイルに着目して検討する。

3.3 赤潮に伴う水質鉛直分布の変化

図-3は大規模な赤潮に発展した期間 B (5月13日) と図-2で最もクロロフィル a が低い時期 (5月31日) における、東京灯標での水温、クロロフィル a、光量子量の鉛直プロファイルである。赤潮時 (5月13日) における水温プロファイルは、水面下0.5 m および9 m 付近で水温が急変している。水面下0.5 m までは塩分濃度が著

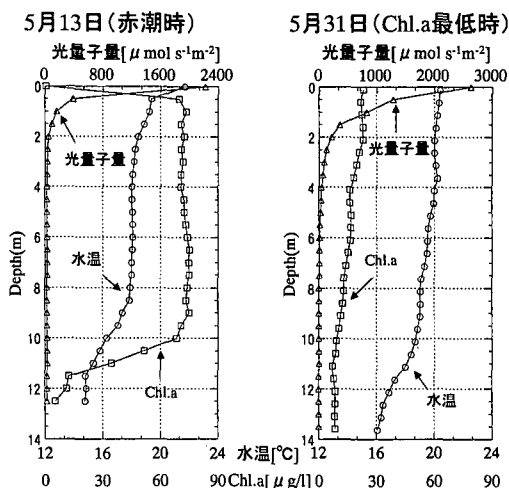


図-3 東京灯標における水質の鉛直プロファイル

しく低く河川水の影響が大きいため表層混合層は水面下9 m と考えられる。これに対するクロロフィル a は、躍層より上ではほぼ一定値の75 $\mu\text{g/l}$ となるもの、躍層下で急激に減少し、クロロフィル a 鉛直分布と水温鉛直分布に一致する傾向が見られた。このようなクロロフィル a の鉛直分布は、他の2地点においても同様であった。次に光量子量は、全地点共に指数関数的に急激に減少しており、有光層は表層における光量子量の1%を目安とすると水面下2 m 程度である。混合層内でクロロフィル a 濃度がほぼ等しいことは、この中で植物プランクトンがよく混合していることを意味しており、混合層厚 (9 m) と有光層厚 (2 m) の比から光合成が可能な植物プランクトンは混合層全体のおよそ2割程度と考えられる。さらに表層で強光阻害が起こればこの割合はさらに低下し、水柱クロロフィル a は減少していくことになる。

次に赤潮が終息した5月31日において同様の検討を行う。図-2からこの時期のクロロフィル a 濃度は期間中最低であるが、5月27日に強い南風が記録されており、東京灯標・千葉灯標共に水温が一様化していることから、鉛直混合により植物プランクトン濃度が低下していると考えられる。時系列図 (図-2g) と同様に5月31日の水温鉛直プロファイルは上下の水温差が小さい。この時のクロロフィル a は水温プロファイルと同様濃度勾配が小さくおよそ15 $\mu\text{g/l}$ となっている。ここで先ほどと同様に、表層における光量子量の1%までを有光層と考えると、水面下6 m 付近までが有光層であることが分かる。この有光層厚の増加は、クロロフィル a 濃度の減少に伴う透明度の増加に対応していると考えられる。このような水温・塩分・クロロフィル a の鉛直分布傾向は千葉灯標および京葉シーバースにおいてもほぼ同様であるが、これら2測点においては、クロロフィル a の

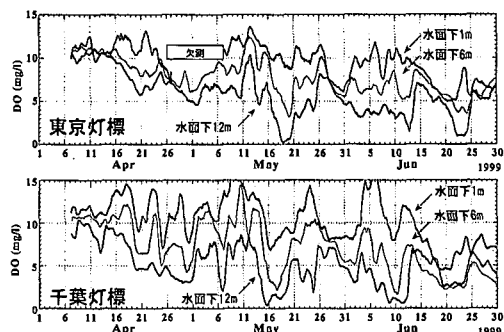


図-4 溶存酸素時系列

ピークが水面下約2mにあり、表層において強光阻害の影響が見られた。東京灯標において強光阻害の影響が小さい理由としては、この地点が河口に近く、他の2測点に比べて透明度が著しく低いことが考えられる。また図-2において東京灯標における水面下6mのクロロフィルa量が他の2点に比べ全体的に低くなっているが、東京灯標は光の消散が大きい傾向にあるため、表層でのみクロロフィルaの増加がおきたものと考えられる。

以上のことから期間Bの赤潮は表層で植物プランクトン濃度が著しく高まり、混合層における有光層の割合が低下したために増殖が抑えられ、さらに日射量の低下と相まって急激な植物プランクトンの減少を招いたものと考えられる。

4. 植物プランクトン変動が水質環境に与える影響

春季の植物プランクトン増加が日射の増大という気象要因を引き金にはじまり、主に北風の連吹によって終息するこれまでの結果は、栄養塩負荷の削減をしない限り、春季の気象と関わりの深いこの現象が東京湾において毎年必ず起こることを示唆している。そこでこのような春季の植物プランクトン増加が湾内の水質に及ぼす影響を考察するため、植物プランクトンの増加が溶存酸素濃度(DO)や栄養塩濃度の変動に与える影響について検討を行う。

図-4は東京灯標および千葉灯標におけるDO時系列である。表層におけるDOの上昇は両地点共ほぼ同時期に見られクロロフィルaの増加に対応していることから、光合成により表層DOが上昇したと考えられる。一方下層では、両地点ほぼ同時にDOが低下している。この貧酸素化は底層水温の上昇による底質有機物分解速度の上昇によるものではなく、この期間における上層クロロフィルaの増加に見られるような活発な有機物生産が底層へ輸送、無機分解される過程で大量の酸素が消費さ

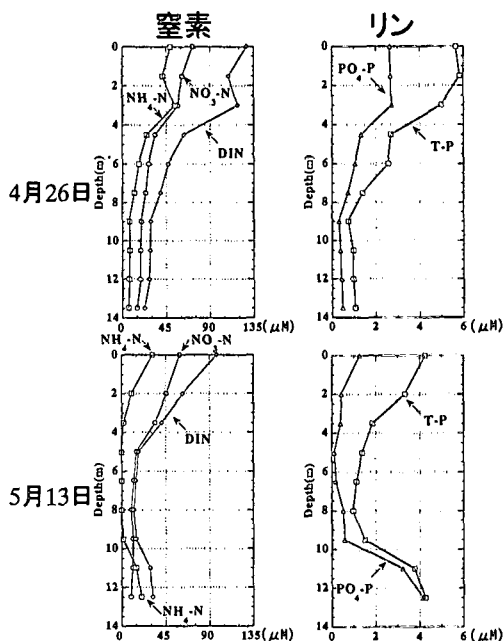
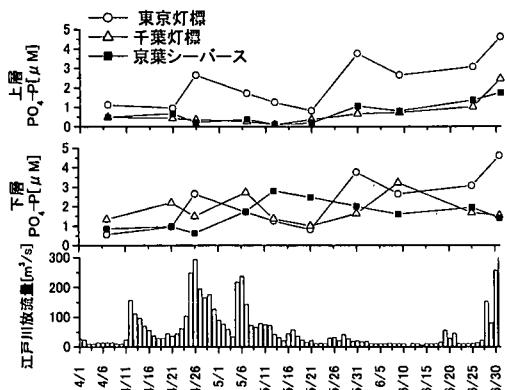


図-5 東京灯標における窒素・リンの鉛直分布

れたことに起因すると考えられる。

次に植物プランクトン増殖に起因する栄養塩濃度変動を検討するため、東京灯標の4月26日および5月13日における栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, T-P)の鉛直プロファイルを図-5に示す。4月26日の東京灯標における栄養塩プロファイルはいずれの項目についても表層で高濃度であり、河川からの栄養塩供給の影響と考えられる。一方、赤潮時(5月13日)は、上層と下層で高く、中層で低い分布となっている。この中層における $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の低下は、クロロフィルaの鉛直分布との対応から植物プランクトンの増殖にともなう栄養塩利用が原因と考えられる。ここで無機態窒素のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ が主に減少する理由として、植物プランクトンの窒素取り込みの選択性が原因と考えられる(McCarthyら, 1977)。ただし同時期の $\text{NO}_3\text{-N}$ については中層において十分な量存在し半飽和定数を大きく超える濃度となっているため(Jørgensenら, 1991)、この $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少が増殖の制限因子となることは考えにくい。一方、T-Pに占める $\text{PO}_4\text{-P}$ の割合を見ると、4月26日には5割程度であったのに対し、5月13日にはその割合が大きく低下している。5月13日の時点で直ちに栄養塩が枯渇するとは考えにくい、さらに植物プランクトンの増殖が継続した場合には中層の $\text{PO}_4\text{-P}$ が不足した可能性もある。

次に底層における $\text{PO}_4\text{-P}$ に着目すると、赤潮時の5月13日において著しく高濃度となっていることが分かる。同時期には底層DOの低下も見られることから、有機物の分解や溶出により栄養塩濃度が上昇したと推測され



図—6 江戸川放流量および上層における $\text{PO}_4\text{-P}$ 時系列

る。このように植物プランクトンが表層で無機態の栄養物質を取り込み、有機物に変換したことで下層へと栄養素を供給する機構は山口 (1999) によっても指摘されており、植物プランクトンの減少がはじまるこの時期においては、栄養素が上層から下層に大量に輸送されていると考えられる。

このような下層における栄養塩濃度の変動が湾奥部に及ぼす影響を検討するため、上下層における $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度と河川流量の時系列を図—6 に示す。この図から上層の $\text{PO}_4\text{-P}$ は6月にかけて増加する傾向にあるが、5月上旬以降河川出水は見られないことから、少なくとも5月下旬以降の濃度増加が河川出水に起因するものとは考えにくい。一方この時期下層において $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が高いことや北風連吹時に沿岸湧昇が起きていることから、湧昇により下層から上層に栄養塩が供給されたと考えられる。このように北風の連吹は沖合下層の $\text{PO}_4\text{-P}$ を湾奥部に輸送し、湧昇時に表層へと供給する役割を果たしている。

ところで春季における風向は、周期的に南風から北風へと変化する特徴があることはこれまでに示したとおりである。南風系が卓越し湾奥の水塊が安定する期間には、植物プランクトンの増殖により栄養塩が上中層で利用され、沈降有機物の分解と溶出により下層の栄養塩が高濃度化する。さらに北風時においては下層における高濃度の栄養塩が湾奥方向へと輸送され湧昇時に表層へ供給されるために、春季における湾奥部の栄養塩は有光層においても概ね高濃度に維持されていると推察される。

5. まとめ

東京湾湾奥部の3地点において、係留系による連続観測および比較的高い頻度で採水を行い、春季における赤

潮発生やそれに伴う栄養塩の減少、下層における有機物の酸化分解など一連の現象を総合的に把握した。

春季の湾奥部における植物プランクトンの急激な増加(赤潮)は、主に気象条件によって規定され日射量の増大が引き金となる。この日射増大時には南風が卓越するため湾内水が湾奥に停滞しやすく、植物プランクトンの増加が助長されるものと推察される。これに続く赤潮の終息は主に北風系の連吹による湧昇現象で説明できる。このように、気象条件が赤潮の動態を支配するため、湾奥部における植物プランクトンの変動は大局的には一致したものとなる。さらに赤潮が長時間継続した場合には透明度の低下により有光層厚が減少し、光制限となるなどして、長期間赤潮状態が維持されることはないものと推察された。

上層で生産された有機物は下層へ沈降し酸化分解され、それに伴う貧酸素化で下層における栄養塩濃度が増加し、北風連吹時に湾奥部で湧昇する。その結果、湾奥部における栄養塩は常に高濃度に保たれ、夏季の植物プランクトンの増殖やそれに伴う貧酸素水塊の形成へつながるものと考えられる。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、千葉県調査船「きよすみ」、東亜建設工業(株)技術研究所「しおつる」の乗組員の方々に大変お世話になった。さらに千葉県水質保全研究所小倉久子主席研究員からは貴重な助言を賜った。また係留観測に際して(株)京葉シーパースには多くの便宜を図って頂いた。建設省関東地方建設局江戸川工事事務所には河川流量データを提供して頂いた。本研究はRITE/NEDO研究費の補助を得て行われたことをここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 鯉淵幸生・小倉久子・安藤晴夫・五明美智男・佐々木 淳・磯部雅彦 (2000): 東京湾における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1066-1070.
- 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. 401-405.
- 山口征矢 (1999): 植物プランクトンの一次生産, 月刊海洋, 1999, 8, pp. 470-476.
- McCarthy, J. J., W. R. Taylor and J. L. Taft (1977): Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences. Limnol. Oceanogr., Vol. 22, pp. 996-1011.
- Jørgensen, S. E., S. N. Nielsen and L. A. Jørgensen (1991): HANDBOOK OF ECOLOGICAL PARAMETERS AND ECOTOXICOLOGY, ELSEVIER, pp. 10-67.