

1996年5月の駿河湾におけるクロロフィル a と 栄養塩との関係について

塩本明弘^{*1}・橋本慎治^{*1}

Relationship Between Chlorophyll a and Nutrients in Suruga Bay, Central Japan May 1996

Akihiro Shiomoto^{*1} and Shinji Hashimoto^{*1}

Abstract

Chlorophyll a concentration was measured at depths shallower than 200 m in Suruga Bay, May 1996. Three water masses were observed: coastal water originating from river water, surface mixed water retaining much of the characteristics of coastal water and offshore surface water retaining much of the Kuroshio water. Water column was stratified and nutrients were probably supplied by diffusion from the lower layer to the euphotic zone of the offshore surface water which retains much of the Kuroshio water. Significantly negative relationships were found between concentrations of chlorophyll a and nutrients (nitrite + nitrate, silicate, and phosphate) in the euphotic zone of the offshore surface water. The negative relationships reflect the fact that nutrients supplied to the euphotic zone are decreased by phytoplankton uptake. Moreover, significantly linear relationships were found between concentrations of nitrite + nitrate and silicate, and between concentrations of nitrite + nitrate and phosphate in the euphotic zone of the offshore surface water. These results suggest that nitrite + nitrate is exhausted faster than other nutrients by phytoplankton uptake. The nitrite + nitrate versus silicate slope was about 1, indicating that nitrite + nitrate was taken up exclusively by diatoms since the 1:1 slope of disappearance was identical to the biomass ratio of silicon and nitrogen in diatoms. Nutrients supplied to the euphotic zone probably begin diminution from spring toward autumn due to strongly stratified water column. We can therefore say that there is a possibility that nitrogen is a limiting factor for the phytoplankton production, especially diatoms, in the offshore surface water in Suruga Bay during spring to autumn.

1. はじめに

駿河湾は本州の中部に位置する日本で最も深い湾で(最深部2,500m), 1,000m以深の海底峡谷が湾口から湾奥まで南北に連なり, 外洋水つまり黒潮系水の影響

を受けやすい開放型の湾である。駿河湾におけるクロロフィル a 濃度に関する知見は乏しく, 現在でもおよそ25年から30年前に行われた観測の結果(岡部ほか, 1976; Aruga, 1977)がその根幹を成しているのが現状である。数年前からは鈴木ほか(1996, 1997)による沿岸域を中心とした表面での観測が年4回行われているものの, 駿河湾におけるクロロフィル a 濃度についてはより多くの知見の蓄積が望まれている。

駿河湾においては季節的な水温躍層は5月ごろから

1998年9月21日受付, 1998年11月16日受理

^{*1} 遠洋水産研究所

National Research Institute of Far Seas Fisheries,
7-1 Orido 5 Chome, Shimizu, Shizuoka, 424-8633 Japan

約60m以浅にみられ、その後は顕著な成層化が進み、8月には30-40mにみられる(例えば、中村, 1977)。このことから、5月は成層前期と位置づけられる。また、この時期の塩分躍層は約30m以浅にみられる。一方、5月の湾中央部における透明度は10-20m程度なので(村中, 1984)、透明度の3倍を有光層とすると(Parsons *et al.*, 1984b)、5月において有光層の深さは表層混合層の深さと等しいか深いと判断される。Sverdrup (1953) の臨界深度モデルに従うと、臨界深度が表層混合層よりも深い場合には、植物プランクトンの純増加が見込まれる。臨界深度は有光層よりも深いので(Parsons *et al.*, 1984b)、5月には植物プランクトンの増加が予想され、実際に高い珪藻類の細胞数(村野, 1977) やクロロフィル *a* 濃度(鈴木ほか, 1996, 1997) が観測されている。以上から、5月は表層の成層化に伴う植物プランクトンの増加により表層の栄養塩が減少し、栄養塩が植物プランクトン成長の制限要因となっていく時期として捉えることができる。駿河湾においては、栄養塩の起源として植物プランクトンが重要であることは示唆されているが(岡部ほか, 1976)、栄養塩が植物プランクトンにどのような影響を与えているかについて論じられたことはなかった。そこで、本報告では1996年5月における観測にて得られたクロロフィル *a* 濃度と栄養塩濃度との関係を用いて、植物プランクトンに対する栄養塩の影響について考察を加えた。

2. 試料および方法

1996年5月21日から5月24日、駿河湾の湾奥部に位置する田子の浦沖から湾口中央部に向っておよそ3マイルおきに設けた9つの観測点で観測を行った(Fig. 1)。10lのニスキン採水器を用いて深さ0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150および200mの10層から海水試料を採水した。採水後、1lの海水試料をWhatman GF/F (孔径約0.7 μ m)を用いてろ過し、このろ紙を凍結保存して持ち帰った。実験室において、90%アセトンにて冷暗所で一晩色素を抽出した後、日立F-2000分光蛍光光度計を用いた蛍光法によりクロロフィル *a* の濃度を求めた(Parsons *et al.*, 1984a)。蛍光値からクロロフィル *a* 濃度への換算には、市販のクロロフィル *a* 純品(和光純薬株式会社製)を用いて行った。栄養塩類(亜硝酸塩+硝酸塩, ケイ酸塩, リン酸塩)の濃度は実験室においてブラン・ルーベ社のトラックス800を用いて測定された。なお、栄養塩類の濃度測定

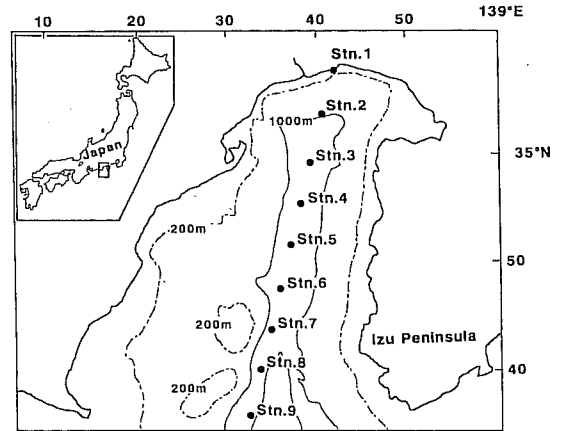


Fig. 1. Location of sampling stations in Suruga Bay during May 21-24, 1996.

用の海水試料は測定まで凍結保存された。200mまでの水温および塩分はニール・ブラウン社のCTDマークを用いて測定された。各観測点において透明度は透明度板を用いて測定された。

3. 水塊区分

春季から秋季にかけての駿河湾における200m以浅の水塊は沿岸系水と黒潮系外洋水、そしてこれらの混合水に分けられる(中村・村中, 1979)。中村・村中(1979)に従うと、4月から6月のこれらの水塊はそれぞれ沿岸河川系水(水温: 14-21 $^{\circ}$ C; 塩分: <34.1; 10m以浅)、外洋系水主流部(水温: 11-19 $^{\circ}$ C; 塩分: 34.4-34.7; 200m以浅)、表層水(水温: 14-21 $^{\circ}$ C; 塩分: 34.0-34.5; 50m以浅)と呼ばれている。表層水はさらに沿岸系水の影響を強く受ける水(水温: 14-21 $^{\circ}$ C; 塩分: 34.0-34.3; 20m以浅)と外洋系水の影響を強く受ける水(水温: 14-20 $^{\circ}$ C; 塩分: 34.2-34.5; 50m以浅)に細分化される。

駿河湾表層部の水塊区分は塩分が良い指標となる(中村・村中, 1979)ので、塩分の鉛直断面図(Fig. 2a)から水塊構造を見た。その結果、Stns. 1-3の5m以浅には沿岸河川系水が見られ、Stns. 3と4の間の表面に黒潮系外洋水と沿岸河川系水との間に形成される河口域前線(中村・村中, 1979)が見られた。Stns. 1-8の10-40m以浅には表層水が、それ以深とStn. 9の200m以浅には外洋系水主流部が見られた。Stns. 4と5の表面の塩分はStn. 6以降に比べて幾分低く(Fig. 2a)、透明度は10mであった(Fig. 3)。春季から夏季における沿岸河川系水とその影響を受けた水での透明度は10

m以下である(村中, 1984)ので, Stns. 4と5では沿岸河川系水の影響を強く受けていたと考えられる. 以上のことから, Stns. 1-3の5m以浅を除くStns. 1-5の表層の水は沿岸河川系水の影響を強く受けた表層水(以後, 沿岸系の水と呼ぶ), Stns. 6-9の表層の水は黒潮系外洋水の影響を強く受けた表層水と外洋系主流部(以後, 外洋系の水と呼ぶ)である.

4. 結果

透明度はStns. 1-5で7-10m, Stns. 6-9で15-20mであった(Fig. 3). 透明度の3倍を有光層とすると(Parsons *et al.*, 1984b), 有光層の深さはStns. 1-5で

21-30m, Stns. 6-9で45-60mとなる.

Stns. 1-3すなわち河口域前線よりも湾奥の10mよりも浅いところでは亜硝酸塩+硝酸塩とケイ酸塩に沿岸河川系水の影響を反映して高い濃度が見られた(Fig. 4). Stns. 1-3では亜硝酸塩+硝酸塩とケイ酸塩の濃度は10mから, リン酸塩の濃度は20ないしは30mから, そしてStns. 4-9ではいずれの栄養塩の濃度も表面から深さとともに増加した. また, およそ20m以深ではいずれの栄養塩の濃度にも観測点間で大差は見られなかった.

クロロフィルaの濃度は30m以浅ではStns. 1-4で $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上と高く, 表面に最大値が見られた(Fig. 5). 河口域前線のすぐ湾奥側に位置するStn. 3の表面において $3.2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ という本観測における最大値がみられた. これに対して, Stns. 5-9の30m以浅では大半

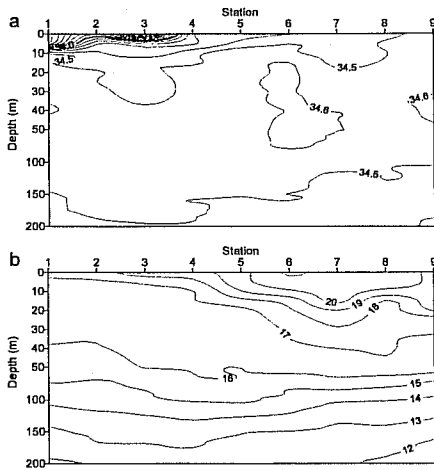


Fig. 2. Vertical sections of (a) salinity, and (b) temperature ($^{\circ}\text{C}$) shallower than 200 m between Stns. 1 and 9.

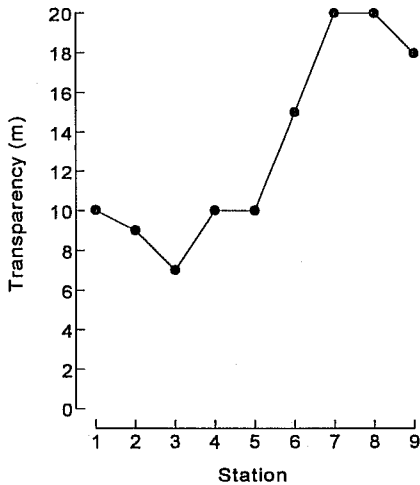


Fig. 3. Transparency (m) between Stns. 1 and 9.

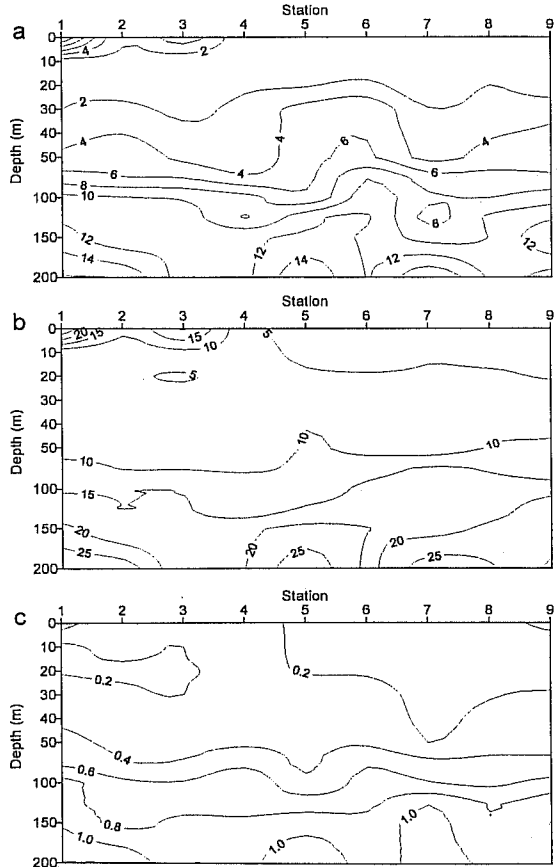


Fig. 4. Vertical sections of (a) nitrite + nitrate, (b) silicate, and (c) phosphate concentrations ($\mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$) shallower than 200 m between Stns. 1 and 9.

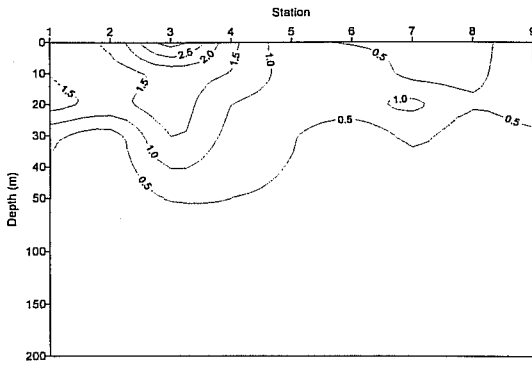


Fig. 5. Vertical section of chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) shallower than 200 m between Stns. 1 and 9.

の値が $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下で、20m附近に最大値が見られた。一方、30–40m以深では観測点に関わらずクロロフィル*a*濃度は $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった。

沿岸系の水と外洋系の水における植物プランクトンと栄養塩との関係を見るためにStns. 1–5の有光層内(0–30m、ただしStns. 1–3の0mを除く)とStns. 6–9の有光層内(0–50m)において得られた結果を用いて、クロロフィル*a*の濃度に対して栄養塩類の濃度をプロットした(Fig. 6)。その結果、外洋系の水においては亜硝酸塩+硝酸塩、ケイ酸塩およびリン酸塩ともにクロロフィル*a*との間に負のスピアマンの順位相関が認められた。一方、沿岸系の水においてはいずれの栄養塩についてもクロロフィル*a*との間にスピアマンの順位相関が認められなかった。

次に、有光層内における栄養塩濃度の相互の関係を見るために、亜硝酸塩+硝酸塩の濃度に対してケイ酸塩およびリン酸塩の濃度を、ケイ酸塩の濃度に対してリン酸塩の濃度をプロットした(Fig. 7)。その結果、外洋系の水、沿岸系の水ともに有意な直線関係が認められ、いずれの直線も正の勾配および切片を有していた。さらに、有光層内における栄養塩と塩分との関係を見ると、外洋系の水においてはいずれの栄養塩についても塩分との間に正のスピアマンの順位相関が認められた(Fig. 8)。一方、沿岸系の水においては、亜硝酸塩+硝酸塩については塩分との間に正のスピアマンの順位相関が認められたものの、ケイ酸塩とリン酸塩については塩分との間にスピアマンの順位相関が認められなかった。なお、沿岸河川系水においてはデータ数が少なかったため、栄養塩とクロロフィル*a*との関係、栄養塩相互の関係ならびに栄養塩と塩分との関係

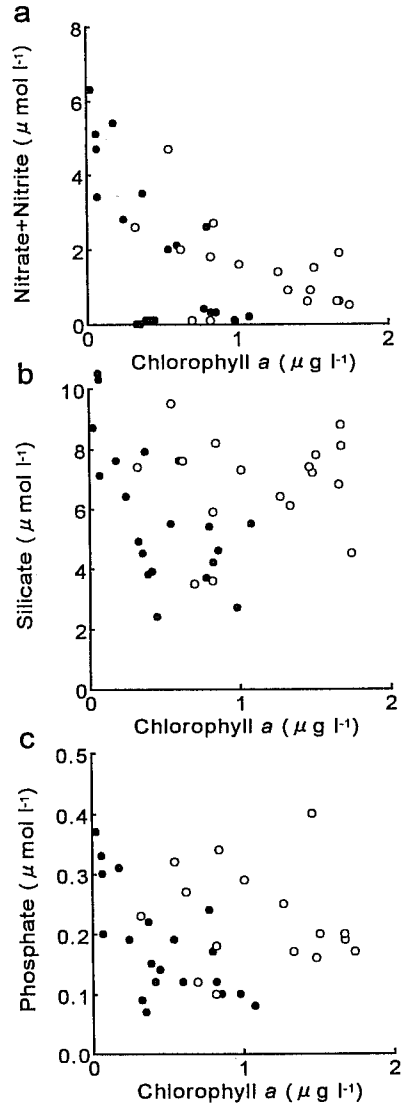


Fig. 6. Relationships between chlorophyll *a* concentration and (a) nitrite + nitrate, (b) silicate, and (c) phosphate concentrations within the euphotic zone of surface mixed water retaining the characteristics of coastal water with river effluents (○: 0–30 m for Stns. 1–5 except 0 m for Stns. 1–3), and in offshore surface water retaining the Kuroshio water (●: 0–50 m for Stns. 6–9).

a: $r_s = -0.41$, $n = 17$, $p > 0.1$, two-tailed test in the coastal water (○). $r_s = -0.53$, $n = 20$, $p < 0.05$ in the offshore water (●). b: $r_s = 0.039$, $n = 17$, $p > 0.8$ in the coastal water (○). $r_s = -0.62$, $n = 20$, $p < 0.01$ in the offshore water (●). c: $r_s = -0.15$, $n = 16$, $p > 0.5$ in the coastal water (○). $r_s = -0.64$, $n = 20$, $p < 0.01$ in the offshore water (●).

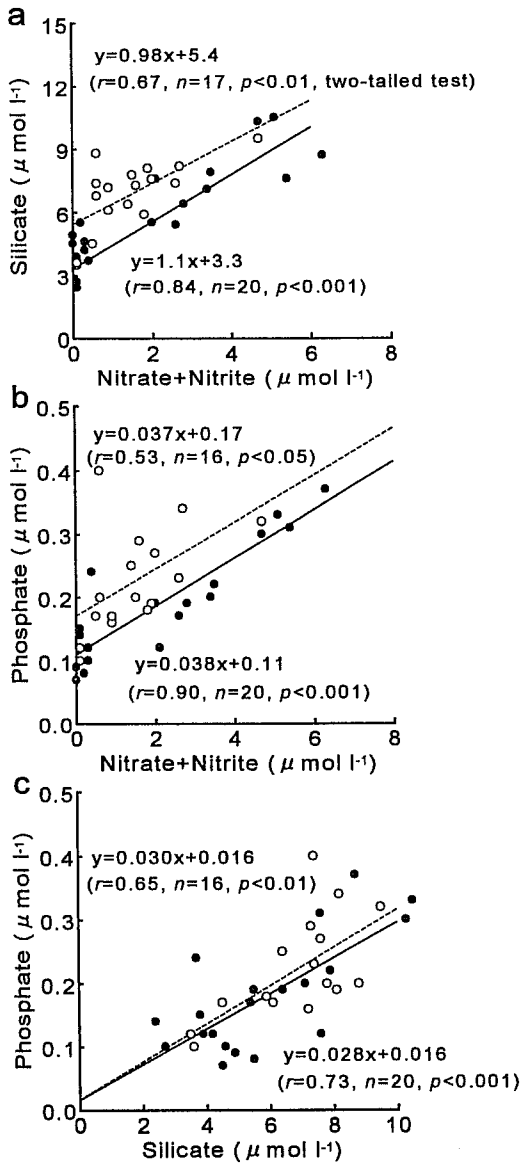


Fig. 7. Relationships between (a) nitrate + nitrite and silicate concentrations, (b) nitrate + nitrite and phosphate concentrations, and (c) silicate and phosphate concentrations within the euphotic zone of surface mixed water retaining the characteristics of coastal water with river effluents (○: 0–30 m for Stns. 1–5 except 0 m for Stns. 1–3), and in offshore surface water retaining the Kuroshio water (●: 0–50 m for Stns. 6–9). The broken and solid straight lines indicate the regression lines in the coastal (○) and offshore (●) waters obtained by least-squares method.

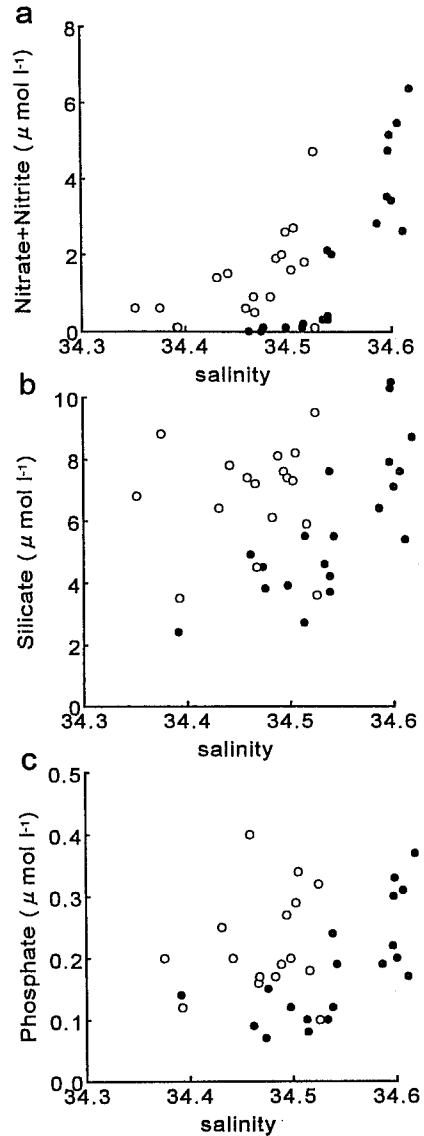


Fig. 8. Relationships between salinity and (a) nitrate + nitrite, (b) silicate, and (c) phosphate concentrations within the euphotic zone of surface mixed water retaining the characteristics of coastal water with river effluents (○: 0–30 m for Stns. 1–5 except 0 m for Stns. 1–3), and in offshore surface water retaining the Kuroshio water (●: 0–50 m for Stns. 6–9). a: $r_s=0.52, n=17, p<0.05$, two-tailed test in the coastal water (○). $r_s=0.94, n=20, p<0.0001$ in the offshore water (●). b: $r_s=0.081, n=17, p>0.7$ in the coastal water (○). $r_s=0.75, n=20, p<0.01$ in the offshore water (●). c: $r_s=0.10, n=16, p>0.6$ in the coastal water (○). $r_s=0.78, n=20, p<0.01$ in the offshore water (●).

については検討しなかった。

5. 考察

1969年5月の駿河湾全域にわたる観測で得られた50m以浅(ほぼ有光層に相当する)でのクロロフィルaの平均濃度は $0.16\text{--}0.96\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ である(Aruga, 1977)。また、1995年と1996年の5月の表面水で報告された値は沿岸域で $1\text{--}5\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、沖合域で $0.1\text{--}2.5\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ である(鈴木ほか, 1996, 1997)。本研究において得られた有光層内の値($0.03\text{--}3.2\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)は、これまでに5月の濃度として報告された値の範囲内といえる。

外洋系の水の有光層内(50m以浅)においては、いずれの栄養塩の濃度も塩分とともに増加することが認められた(Fig. 8)。有光層内において塩分は深さとともに増加していた(Fig. 2a)ので、外洋系の水では有光層以深から有光層内への栄養塩の供給が示唆される。また、塩分の増加は黒潮系水の影響が強くなることをも意味するが、5月や6月における表層の栄養塩類の濃度に黒潮系水と湾内水との間で大差が見られない(豊田, 1985; 鈴木ほか, 1996, 1997)ことから、水平方向の栄養塩類の供給を考慮する必要はないものと考えられる。さらに、観測時の水柱はよく成層化していた(Fig. 2b)ことと外洋系の水では栄養塩類の濃度は植物プランクトンの増加に伴い減少した(Fig. 6)ことから、外洋系の水では下層からおそらく拡散により有光層内に供給された栄養塩は植物プランクトンによる取り込みの影響を強く受けているように思える。さらに、有光層内の亜硝酸塩+硝酸塩の濃度に対してケイ酸塩およびリン酸塩の濃度をプロットした場合に得られた直線の切片が正であることは(Fig. 7)、供給された栄養塩が植物プランクトンに取り込まれ減少していった場合、まず亜硝酸塩+硝酸塩が枯渇することを意味している。

外洋系の水における、ケイ酸塩の濃度とリン酸塩の濃度との直線の勾配は0.028、亜硝酸塩+硝酸塩の濃度とリン酸塩の濃度との直線の勾配は0.038であることから(Fig. 7)、リン酸塩を1とした時のケイ酸塩、亜硝酸塩+硝酸塩とリン酸塩の勾配の比は36:26:1となる。一方、外洋系の水において有光層内に下層から供給される栄養塩のケイ酸塩、亜硝酸塩+硝酸塩とリン酸塩の濃度比は、Stns. 6-9の有光層以深におけるケイ酸塩とリン酸塩の濃度比ならびに亜硝酸塩+硝酸塩とリン酸塩の濃度比の平均値±標準誤差が 24.5 ± 1.0 ($n=20$)と 13.3 ± 0.5 ($n=20$)であることから、

25:13:1となる。栄養塩の相互関係にて得られた直線の勾配は植物プランクトンがもつ栄養塩の取り込み比とみなされるので、駿河湾の外洋系の水における植物プランクトン群集はとくに亜硝酸塩+硝酸塩を供給されるよりも高い割合で取り込んでいると考えられる。以上のことから、成層化が進むと外洋系の水では窒素態栄養塩が植物プランクトンにとって制限要因となるものと考えられる。

外洋系の水における亜硝酸塩+硝酸塩の濃度とケイ酸塩の濃度との直線の勾配は1.1である(Fig. 7)ことは、植物プランクトンによるこれらの栄養塩の取り込み比がほぼ1であることを意味している。この取り込み比は珪藻類の有する窒素とケイ素の平均的な組成比(原子比で約1; Brzezinski, 1985)にほぼ等しいことから、亜硝酸塩+硝酸塩は主に珪藻類によって取り込まれていると考えられる。したがって、駿河湾の外洋系の水における植物プランクトン群集の中、とくに珪藻類が窒素制限となっていくものと考えられる。

5月は成層前期であり、その後夏に向い水柱の成層化は進み、そして秋季まで成層状態は続くので(中村, 1977)、有光層内への栄養塩類の供給は経時的に困難となって行くであろう。したがって、外洋系の水における有光層内の植物プランクトン群集とくに珪藻類にとっての窒素制限は春季から秋季にかけて起こり得るものと考えられる。

本論文の外洋系の水すなわち中村・村中(1979)によるところの外洋系表層水は5月から9月にかけて駿河湾表面の過半(65-75%)を占めている(中村・村中, 1979)。それで、今後駿河湾において窒素態栄養塩が植物プランクトンにとってどのような影響を与えているかを明かにしていくことは、春季から秋季にかけての当湾における生態系内でのエネルギーや物質の流れの解明に大いに資するに違いない。

謝辞

観測にあたり多大のご協力を頂いた遠洋水産研究所所属の俊鷹丸の船長ならびに乗組員の方々にお礼申し上げます。本稿をまとめるにあたり貴重なご助言を頂いた水産庁中央水産研究所の佐々木克之博士に感謝申し上げます。本研究の一部は、平成8年度環境庁地球環境研究「陸域負荷物質の影響評価」によって行ったものである。

駿河湾のクロロフィル a と栄養塩

引用文献

- Aruga, Y. (1977) Biomass of phytoplankton. *In*. Productivity of Biocenoses in Coastal Regions of Japan. JIBP Synthesis, 14, eds. K. Hogetsu, M. Hatanaka, T. Hanaoka and T. Kawamura, University of Tokyo Press, Tokyo, 54-62.
- Brzezinski, M.A. (1985) The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J. Phycol.*, **21**, 347-357.
- 村中文夫 (1984) シラス漁獲量変動と環境. イワシ類シラスの魚種交代現象の生物学的解明—主として初期餌料環境からの検討—. 昭和55-57年度指定研究総合助成事業3ヶ年とりまとめ報告書, 水産庁, 196-220.
- 村野正昭 (1977) 第II編浮遊生物調査. 植物プランクトン. 駿河湾漁場開発調査報告書, 静岡県水産試験場, 75-99.
- 中村保昭 (1977) 駿河湾ならびに隣接海域の海況変動. 水産海洋研究会報, **30**, 8-38.
- 中村保昭・村中文夫 (1979) 駿河湾および遠州灘の海洋構造の変動特性. 水産海洋研究会報, **34**, 128-133.
- 岡部史郎・佐藤義夫・山田秀夫・児玉理彦 (1976) 駿河湾における有機物. 人為的海洋環境変化の診断と改善・制御に関する基礎的研究 (駿河湾の研究), 昭和50年度中間報告, 東海大学海洋学部, 清水, 39-54.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli (1984a) A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analyses. Pergamon Press, Oxford, 173pp.
- Parsons, T.R., M. Takahashi and B. Hargraves (1984b) Biological Oceanographic Processes, 3rd edn. Pergamon Press, Oxford, 330pp.
- 鈴木晶子・水野秀二・平井 亨 (1996) II 漁業公害未然防止のための漁場環境の把握, 2 沿岸域の水質環境調査. 静岡県水産試験場平成7年度事業報告, 75-76.
- 鈴木晶子・水野秀二・平井 亨 (1997) II 漁業公害未然防止のための漁場環境の把握, 2 沿岸域の水質環境調査. 静岡県水産試験場平成8年度事業報告, 78-79.
- Sverdrup, H.U. (1953) On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *J. Cons. int. Explor. Mer*, **18**, 287-295.
- 豊田恵聖 (1985) 第11章駿河湾, III 化学. 日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 東海大学出版会, 457-462.