

相模湾における栄養塩類の分布と消長*1

鎌谷明善, 奥 修, 辻 久恵, 前田 勝, 山田佳昭

(1999年4月13日受付)

The Distribution and Fate of Nutrients in Sagami Bay

Akiyoshi Kamatani,*2 Osamu Oku,*2 Hisae Tsuji,*2
Masaru Maeda,*2 and Yoshiaki Yamada*3

The distribution and seasonal change of phosphate, silicic acid and nitrate of Sagami Bay were studied from 1993 to 1994. The concentrations and the ratios of these three components in the waters located below the sub-surface layer were shown to be quite similar as those observed 15 years ago. This finding could be ascribed to the fact that the nutrients caused by the increasing coastal eutrophication to date are quickly washed out into the open ocean by the presence of a fairly strong current: the residence time of the waters in this bay being short. The nutrients in the euphotic zone were often depressed to less than the limiting level for phytoplankton growth when the seasonal thermocline set over. The potential importance of silicon for diatom growth was essentially sustained by the upwelling of silicic acid enriched sub-surface waters and/or by the river waters. It was thus concluded that the nutrient environments in Sagami Bay are still favorable for the maintenance of diatom ecosystems.

キーワード：相模湾，栄養塩，珪藻類

相模湾は、河川から直接流入してくる淡水や栄養塩に富んだ低塩分の東京湾水が黒潮系の表層水と混合しながら外洋に流れ出る遷移帯に位置している。

相模湾海域の生物生産を支えている栄養塩類の供給は、深層水の湧昇と河川・東京湾水の流入に大きく依存していると考えられるが、この海域における栄養塩類の分布や消長について、表層から深層におよぶ栄養塩類の長期的かつ詳細な調査を行った報告例は見られない。比較的まとまったこれまでの栄養塩類の調査研究は、Kamataniらが1971-74年にかけて湾中央部に設けた定点(0-200 m)で観測を行った報告¹⁾のみである。

日本でも有数の人口密集地域が相模湾・東京湾を取り巻いているので、これらの海域に供給されるリン・窒素の負荷量は大きい。したがって、富栄養化が相模湾における生物生産、なかんづく植物プランクトンの増殖にどのような影響を及ぼしているかを正しく把握し、解析してゆくことは相模湾の今後の漁海況の予測や環境の管理・維持などの対策を講じて行く上からも大事といえよ

う。

現在の海洋は珪藻を中心とした生態系から成り立っているといわれている。²⁾珪藻の増殖には、海水に溶存している栄養塩類濃度とそれらの組成比がある一定値以上に保たれていることが必要である。³⁾相模湾のように陸域から供給される窒素・リンの負荷量が増加している海域において、珪藻生態系が正常に維持されているかどうかを知るには、ケイ素濃度の消長に注目しなければならない。なぜならば、河川水中の溶存ケイ酸濃度は、窒素・リンとは異なり、人間活動によってほとんど影響を受けない成分であるので、富栄養化は窒素・リンに対する溶存ケイ酸の相対的な欠乏状態をつくり出すことになるからである。一般に海洋においては、窒素・リンは水塊と生物との間をケイ素よりも速い速度で循環しているので、⁴⁾富栄養化が長期間に亘って持続すれば、ケイ素欠乏はさらに進行することになる。特に、水深が深く、表層で生産された粒子(フラックス)が下層に運び込まれやすい海洋構造を示している相模湾海域では、ケイ素欠

*1 本研究の一部は大学等における地球圏-生物圏国際共同研究計画の一環として実施された。

*2 東京水産大学海洋環境学科 (Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan).

*3 神奈川県水産総合研究所 (Kanagawa Prefectural Fisheries Research Institute, Jyogasima, Misaki, Miura, Kanagawa 238-0237, Japan).

乏がよりおこりやすいことが予測される。ケイ素欠乏によって珪藻よりも渦鞭毛藻などの増殖に適した栄養環境が作り出され、食物連鎖における珪藻の役割が相対的に小さくなるとすれば、それは沿岸域の生態系にとって望ましいことではない。²⁾

栄養塩が豊富に存在する環境で、正常に増殖している珪藻類が生体内に取り込んでいるケイ素と窒素の比 (Si/N) 及びケイ素とリンの比 (Si/P) の平均的な値はそれぞれ 1:1 と 16:1 とされている。⁵⁻⁶⁾ このことから珪藻類の増殖が継続的に維持されるためには、栄養元素の供給と消費の速度に併せて、これらの組成比がある限界以上の値を保っていることが必要である。さらに、増殖を維持してゆくための下限濃度 (Si: $2\sim 3\ \mu\text{M}$, P: $\sim 0.1\ \mu\text{M}$, N: $\sim 0.5\ \mu\text{M}$) よりも豊富に栄養塩類が存在することもまた必須要素となる。³⁾ したがって、栄養塩類の消長についてはこれらの面からも検討しなければならない。

そこで 1993~1994 年にかけて、表層から深層に至る数回の観測と毎月の表層観測 (0~250 m) で得られた栄養塩類の分析結果に基づいて、相模湾における栄養塩類の分布やそれらの濃度が季節や時代によってどのように変化してきているかについて検討してみた。併せて、相模湾の栄養環境が珪藻生態系を維持するのにどのような状況にあるのかを考察した。

材料と方法

試料水の採取及び分析法 表層から深層にかけての海洋観測は Fig. 1 に示したそれぞれの観測点 (Stn. 9, 19, 23, 31) で 1993 年 5, 6, 7, 9 月と 1994 年 5, 7 月に実施した。観測層は水域の水深を考慮に入れ、次のように定めた。Stn. 23 では 0, 100, 300, 700, 1000, 1200, 1400 m とし、Stn. 31 ではさらに 1700, 2000 m を加えた。Stn. 9 では 0, 100, 250, 400, 500, 650 m とした。これらの観測はいずれも東京水産大学所属の青鷹丸に備え付けられている OCTOPUS システム⁷⁾ を用いて行なった。

一方、観測点 Stn. 3, 19 での 1993 年 5 月から 1994 年 7 月にかけての表層部の観測・採水は神奈川県調査船「うしお」の協力によって行われた。なお、採水層は 0, 10, 30, 50, 100, 150, 200, 250 m であった。

採取した試水は 250 ml ポリエチレンビンに入れ、密栓した後に速やかに凍結保存した。栄養塩分析用の試水を長期間凍結保存すると、リン酸濃度が低下することが指摘されているので、分析は 3 カ月以内に行なった。

分析に先立ち、凍結試料を室温で解凍した。凍結中に形成していたポリケイ酸をモノケイ酸に加水分解するために、室温に達した後もさらに数時間放置した。試水中の硝酸はカドミウム還元-ナフチルエチレンジアミン

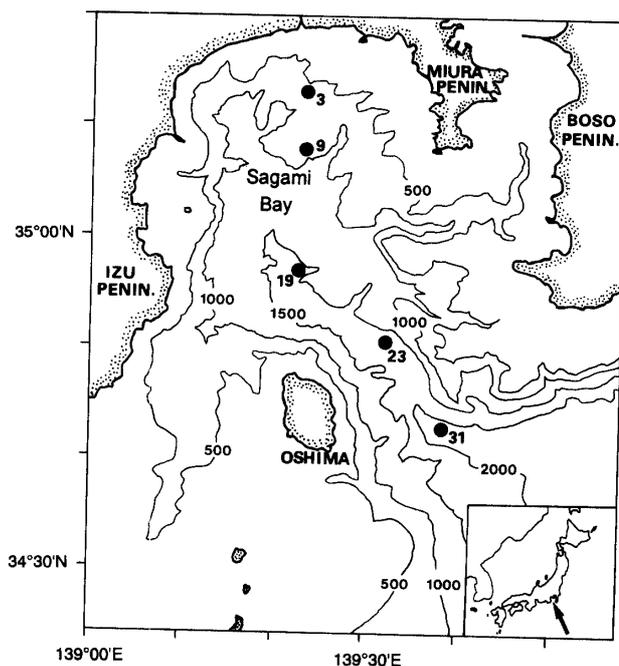


Fig. 1. Sampling stations locations (Stn. 3, 9, 19, 23 and 31) in Sagami Bay, and the bathymetric contours are drawn at 500 m intervals.

法,⁸⁾ リン酸はモリブデン青法,⁹⁾ ケイ酸はモリブデン黄法¹⁰⁾ で分析した。検出限界は、硝酸及びリン酸塩でそれぞれ $0.05\ \mu\text{M}$ 、ケイ酸では $0.2\ \mu\text{M}$ であった。

結果と考察

相模湾の概況 栄養塩類の分布・挙動は主に生物活動に支配されるが、一方では海流、水塊の混合・拡散といった物理的作用によっても影響を受ける。そこでまず、今回の調査で得られた水温と塩分の分布をまとめた。次いで、既存の資料¹¹⁻¹⁸⁾ に基づいて流れの様子を付記し、栄養塩類の分布と消長の解析の参考資料とした。

1. 水温の鉛直分布 Station 19 の表層 (0~250 m) の水温と塩分の経時変化を Fig. 2 に、また表層から深層にいたる代表的な水温、塩分及び溶存酸素の鉛直分布の様子を一括して Fig. 3 に示した。季節風の卓越している冬季には、上下水塊の混合がよく行われるので、100 m 以浅の水温は均一で、 14°C と低い。しかし、春から夏にかけて季節温度躍層の形成が進み、最も発達する 8~9 月頃には表面水温は 25°C 以上に上昇している。10 月以後になると、気温の低下と相俟って表面水は冷却され、上下層の混合が活発となり、季節温度躍層は消滅し、水温は低下している。このように 100 m 以浅の水温は $14\sim 25^\circ\text{C}$ と大きく変動するが、季節温度躍層の下端部 ($\sim 150\ \text{m}$) の水温は年間を通して $12\sim 14^\circ\text{C}$ であり、変動幅は小さかった。この近辺の水温は、表層でみられるような気温の変化に伴う季節変化よりは、むしろ

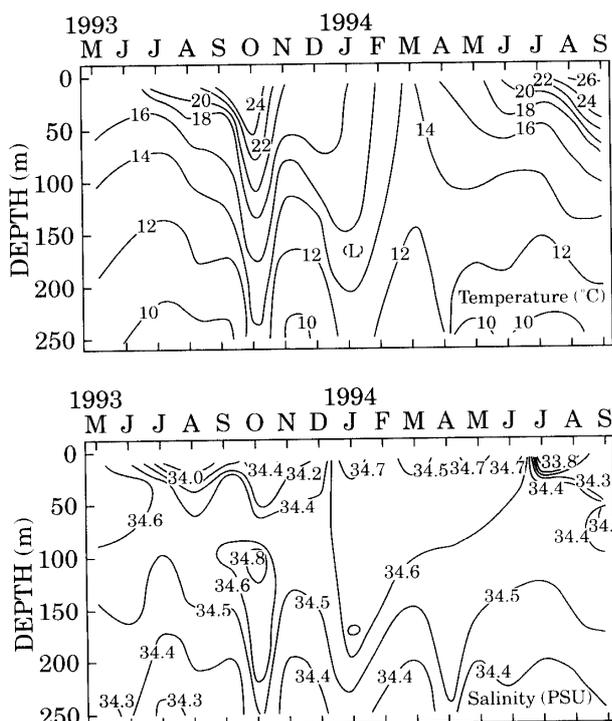


Fig. 2. Seasonal changes of temperature and salinity in the surface water (0-250 m depth) at Stn. 19.

ろ黒潮流の蛇行の影響を受ける部分が大きくなるように思われる。さらに深くなると水温の年変動幅は著しく小さくなっていった。主温度躍層の下端部（1000 m 付近）に至っては、年間の水温の変動幅は 0.5°C 程度であった。このような水温の変化の様子は、Kawabe and Yoneno¹⁸⁾ によっても報告されている。

2. 塩分の鉛直分布 鉛直混合がよく行われ、しかも河川水の流入や降水量の少ない冬季においては、表層に比較的高い塩分 ($S=34.5\sim 34.7$ psu) の海水が厚い層となって存在している。一方、春から夏にかけては水温の上昇と河川水の流入量の増加^{**}が相乗効果となって現れ、顕著な季節温度躍層が形成され、上下層の混合は妨げられる。その結果、100 m 以浅の塩分は著しく低下している。成層が最もよく発達する頃（7~8 月）の 10 m 以浅の塩分は 34.0 psu, あるいはそれ以下にまで低下している (Fig. 2)。この様な塩分の変動の大きい層は水温と同様に 100 m 以浅に限られていた。

年間を通して 70~100 m 付近に塩分のやや高い層 ($S=34.4$ psu) が存在するが、これより深くなると塩分は次第に低下してゆき、400~500 m で極小値 ($S=34.2$ psu) を示している。この極小層は多少の上下変動があるにしても周年存在するようである。さらに水

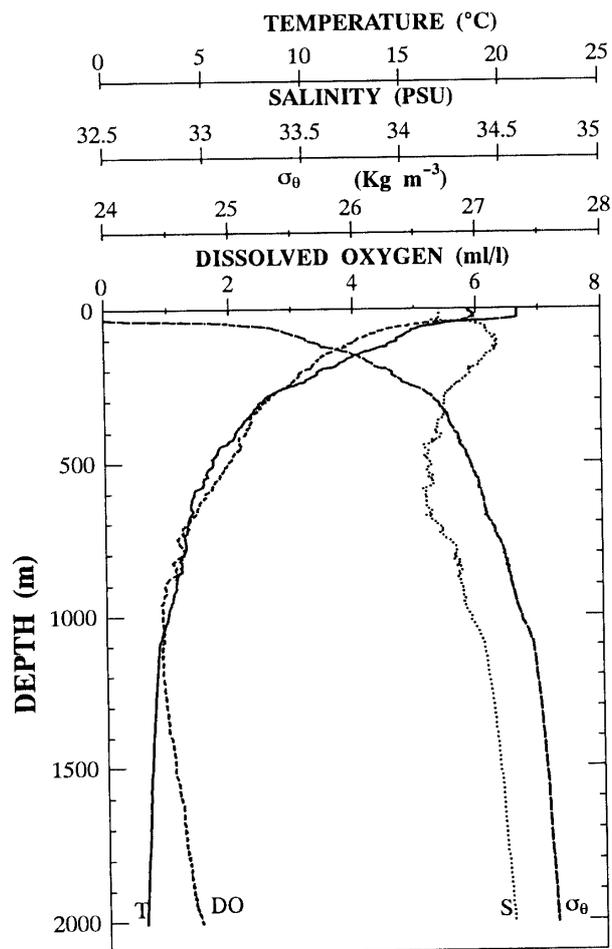


Fig. 3. A typical vertical profiles of temperature, dissolved oxygen, salinity and σ_{θ} at Stn. 31 in May 1993.

深が増してゆくと塩分は次第に増加し、底層付近（~2000 m）で約 34.6 psu となっている (Fig. 3)。溶存酸素の濃度は表層水で飽和に近いが、中層域（100~800 m）では水温と同様に水深の増加に伴い急激に減少してゆき、1000 m 付近で極小値 ($\text{DO}=\sim 1.0$ ml/l) を示していた。さらに深くなると酸素濃度は緩やかに増加し、2000 m 付近で約 1.4 ml/l となっている (Fig. 3)。

3. 表層付近の流れ 相模湾は開放系の湾 (Fig. 1) であり、沖合いには強い勢力を持つ黒潮が西から東に向かって流れているので、湾内の表層水はこの流れを強く反映しているといわれている。^{11,12)} この黒潮流路の変動（蛇行）は複雑であり、流路の蛇行に伴って湾内に流入する黒潮水の流量をはじめ流向・流速に大きな変化が生じ、時には急潮現象を引き起こすことが知られている。¹³⁾

黒潮流軸の変化は東京湾への外洋水の流入と内湾水の流出にも影響を及ぼすことになる。また、東京湾の表層

** 神奈川県企業庁：水運用年報（平成5年版）。神奈川県都市部下水道課，（財）神奈川県下水道公社：相模川・酒匂川流域下水道維持管理年報（平成5年度）。

水の一部は三浦半島先端部を回って半島の西側の岸沿いに広がっていくが、その広がり具合もまた黒潮流路の変動（離岸・接岸）に支配され、変化する。この様子は衛星画像解析からもよく捉えられている。

4. 底層付近の流れ この海域の深層や底層近くの流れは、相模トラフに沿って進入してくる北太平洋中層水の挙動に影響されていると考えられている。例えば海底付近に設置された流速計の記録を解析した報告によれば、トラフ軸に平行の強い流れが記録され、最大流速は ~ 45 cm/sにも達している¹⁴⁾。一方、海底堆積物の形状写真、あるいは底棲生物やその近辺に棲息している生物の姿勢とか配向から推定した平均的な流れは $5\sim 15$ cm/sとされている。¹⁵⁻¹⁷⁾ これらの値からみて、相模湾の底層付近の水は相当はやい速度で移動しているの、滞留時間は長くないものと判断される。

栄養塩類の分布特性

1. 鉛直分布 栄養塩類の鉛直分布の代表的な様子をFig. 4に示した。いずれの栄養塩の濃度も表層で低く、水深が増加するにつれて高くなっていく。リン酸と硝酸は $0\sim 700$ m付近にかけての増加は著しいが、 $1200\sim 1400$ m付近ではほぼ極大値に達している。この極大層付近のリン酸は $3\ \mu\text{M}$ で、硝酸では $45\ \mu\text{M}$ となっている。その後はいずれも次第に減少し、底層付近(~ 2000 m)でリン酸は $2.7\ \mu\text{M}$ 、硝酸は $42\ \mu\text{M}$ 程度になっている。一方、ケイ酸は $0\sim 1000$ m付近にかけて急激に増加し、その濃度は $130\ \mu\text{M}$ 程度に達している。その後もゆるやかな増加傾向を辿り、底層付近で $160\ \mu\text{M}$ 程度になっている。

栄養塩類の季節変動の幅はいずれの観測点においても深層で小さく、表層の有光層では大きかった。有光層内での変動幅は、沖合いよりも沿岸部においてより顕著であった。この原因は、沖合に比べて沿岸域で栄養塩に富んだ河川水や東京湾水の流入の影響と生物活動によるものであったと考えられる。なおこの詳細については後で考察する。

2. 淡青丸と今回の観測結果の比較 相模湾全域に多くの観測点を設け、しかも表層から深層にかけての調査が東大海洋研究所（淡青丸）によって行われている（1978年11月から12月）^{*5)}。この報告資料の中で水深 1000 mに及ぶ観測が行われているのは4測点である。この観測資料と、我々の今回の観測データを比較し、この間に相模湾の栄養環境に変化が生じてきているかどうかを検討してみることにした。

まずP-N、P-Si及びN-Siの関係をグラフ上にプロット（Fig. 5A-C）し、相互の関係から栄養塩の分布特

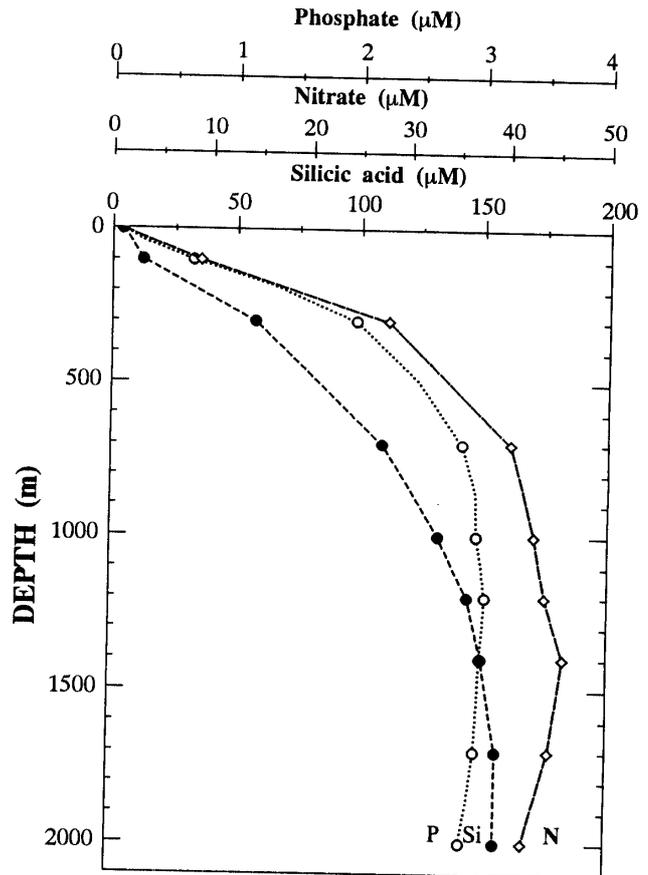


Fig. 4. A typical vertical profiles of concentrations of nutrients (NO_3^- : open squares, PO_4^{3-} : open circles, $\text{Si}(\text{OH})_4$: closed circles) at Stn. 31 in May 1993.

性を捉えてみた。ここに用いた今回のデータは年間の総てのデータがプロットしてあるが、各元素間には一つの曲線で回帰できるような関係にあることを示している。また、淡青丸観測資料と比べても、いずれの元素間の関係においてもそれらの濃度範囲と組成比（N/P, Si/P, Si/N）においてよく一致している。このことは、この約15年間に相模湾の表層から深層にかけての栄養塩類の濃度範囲とそれらの組成比に大きな変化がなかったのではないかと判断できる大変興味深い結果を示しているといえる。このように大きな変化が認められなかった一つの理由として次のようなことが考えられる。すなわち、相模湾の表層及び深層水の交換が速く、滞留時間が短いために、栄養塩類に富んだ河川水や東京湾水が相模湾に流入し、生産性を高めているにしても、生産された生物粒子やその分解生産物である栄養塩類が水の流れによって速やかに外洋に運び去られるためではないかということである。

これらの点を明らかにしてゆくには、海洋表層の生物

*5 小池勲夫, IBP 観測時の未発表資料 (1979).

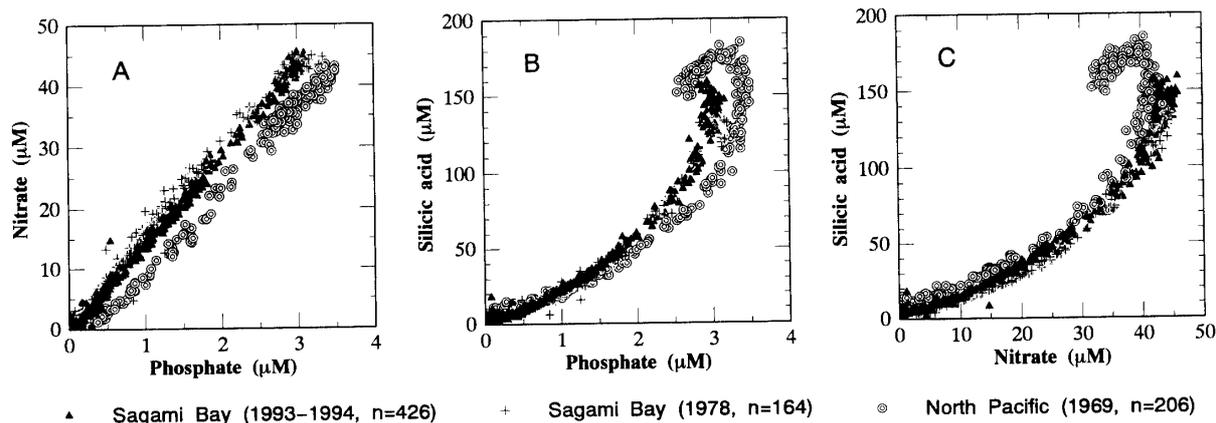


Fig. 5. Nutrient molar ratios for the samples from Sagami Bay and North Pacific Ocean.

A: NO_3^- vs PO_4^{3-} , B: $\text{Si}(\text{OH})_4$ vs PO_4^{3-} , C: $\text{Si}(\text{OH})_4$ vs NO_3^- . Solid triangle: Sagami Bay (1993-1994), cross: Sagami Bay (Nov-Dec 1978), open circle: North Pacific (30-50°N, 17°E, May 1969). The relationship between nitrate and phosphate concentrations is given as: Sagami Bay (1993-1994); $[\text{N}] = 14.52[\text{P}] - 0.64$ ($r = 0.9975$, $n = 426$), Sagami Bay (1978); $[\text{N}] = 14.29[\text{P}] + 1.07$ ($r = 0.9975$, $n = 164$), North Pacific Ocean (1969); $[\text{N}] = 13.25[\text{P}] - 4.11$ ($r = 0.9949$, $n = 206$). The ratios of silicic acid to phosphate and of silicic acid to nitrate increase exponentially with increasing depth. i.e. In Sagami Bay, the Si-P ratios are less than 10 in the surface water ($\text{P} < 0.5 \mu\text{M}$), about 25 for the intermediate waters ($\text{P} = \text{about } 2 \mu\text{M}$), and 45 for the deep waters ($\text{P} = \text{about } 3 \mu\text{M}$).

生産の歴史的な変遷過程を記録として残している堆積物中の有機炭素・窒素、色素等の分布を調べ、解析することが必要である。また、粒子のフラックスの測定、外洋への流出量の見積もりも今後に残された重要な調査・研究課題といえる。

3. 外洋域の栄養塩類の組成との比較 次に、相模湾の栄養塩類の分布特性が外洋のそれらと比べて、どのような状況にあるかを知るためにP-N, Si-P及びSi-Nの関係をグラフ上にプロットし、相互に比較してみた。なお、ここに用いた外洋の資料とは、東京大学海洋研究所の白鳳丸が1969年に中部北太平洋で行った観測データである⁴⁶。

リンと窒素の関係 (Fig. 5A) をみると、相模湾のプロットはおしなべて中部北太平洋のそれらのプロットよりも上に位置している。このことは、相模湾海域が中部北太平洋より表層から深層に至るいずれの水深においても、リンに比べて窒素が相対的に豊富に存在していることを示唆している。また、両海域のリンと窒素の間には高い正の相関がみられる。相模湾におけるN/P比は14.5 (1993-94年データ) ~14.3 (1978年データ) で、Redfieldら⁵⁾が沿岸域の栄養塩類の分布から求めているN/P比 (15.0) とよく一致している。

リンとケイ素の関係 (Fig. 5B) をみると、両者の関係は直線ではなく、曲線で回帰する方がより妥当な様子を示している。さらに仔細にながめると、濃度の低い表層

($1.5 \mu\text{M} > \text{P}$, $40 \mu\text{M} > \text{Si}$) では、中部太平洋と相模湾でいずれも類似した組成比を示している。しかしこれよりも高い濃度、言い換えれば、これよりも水深が深くなるにつれてリンに比べてケイ素の増加割合が相対的に大きくなるために中層から深層にかけてのこの曲線の湾曲度合いは中部北太平洋のそれよりも相模湾で大きくなっている。このことは相模湾の中層から深層に沈降してきた粒子からのリンの溶出に比べて、珪藻殻 (ケイ酸殻) が活発に溶解しているためではないかと考えられる。珪藻の分解に伴うリンとケイ素の再生速度を室内実験で追跡した報告¹⁹⁾によれば、珪藻に含まれる有機態リンは珪藻殻よりも速く無機化するもので、Si/P比は分解初期に小さく、分解の進行にともなって次第に大きくなるとされている。このような分解・溶解の傾向は、珪藻の種類の違いはもとより、沈降粒子に含まれる鉱物粒子の種類・量、さらには海域の温度環境によっても変化することが予測される。リンとケイ素の関係が相模湾と中部太平洋で異なったパターンとなったのは、これらのことが反映されているためではないかと考えられる。

ケイ素と窒素の関係 (Fig. 5C) は、リンとケイ素にみられたような曲線関係を示しているが、ややパターンに違いがみられる。すなわち、相模湾のプロットの多くが中部北太平洋のそれらよりも下方に位置している点である。

相模湾におけるP-N-Siの関係を更にグローバルな

⁴⁶ Preliminary report of the Hakuho Maru cruise KH-69-4 (IBP cruise), Ocean Res. Inst., University of Tokyo, 1970.

視点で、深層水が形成されている北大西洋海域のそれらと比較検討してみた。その結果は次のようである。北大西洋の中層から深層にかけての栄養塩類の濃度は、リンで $1.2 \mu\text{M}$ 、窒素で $18 \mu\text{M}$ 、ケイ素では $15 \mu\text{M}$ 程度と、いずれの濃度も相模湾の代表的な値 (Fig. 4) に比べて低い。²⁹⁾リン・窒素ではともに 40% 程度で、ケイ素に至っては 10% 弱に過ぎない。また組成比を比べてみると、北大西洋では、Si : N : P は 15 : 16 : 1 であるが、相模湾のそれは 50 : 15 : 1 と概算され、相模湾の Si/P、Si/N は北大西洋の値よりも 3 倍以上も大きい値となっていた。相模湾海域ではケイ素がリン、窒素に比べて著しく豊富に存在している点が特徴といえる。ケイ素に富んだ水塊が有光層にまで湧昇してくる現象は、珪藻の増殖にとって好ましいことである。沿岸域の富栄養化は、ケイ素に対するリン・窒素の過剰供給といえるが、相模湾海域は深層からのケイ素の供給が十分であるのでケイ素濃度の低い大西洋の沿岸海域の富栄養化に比べて、珪藻の生産を維持するのに適しており、非珪藻生態系に移行しにくい状況にあることを示唆している。

4. 表層における栄養塩の消長と水温変化との関係 Station 19 の 250 m 以浅における栄養塩類の季節変化を Fig. 6 に示した。すでに述べてきた塩分と水温の季節変化の様子を栄養塩類のそれらと対比してみると、次のような特徴がみられる。季節温度躍層が発達している 4 月から 9 月にかけての 100 m 以浅の栄養塩類はいずれも低い濃度で推移しているが、10 月を過ぎた頃からは上下層の水塊の混合が活発となり、それに伴って栄養塩類に富んだ下層の水塊が表層へ栄養塩類を供給する様子がうかがえる。このような季節変化の様子は過去においても観測されている。¹⁾

10 月観測時の水温、塩分及び栄養塩類の鉛直分布の様子はこの前後と著しく異なっている。すなわち水温・塩分は共に高く、栄養塩類は低い値を示している。Fig. 2 と Fig. 6 を対比してみると、一般に 100 m 以深で水温が低下している時期の栄養塩類の濃度は高くなり、反対に水温が上昇している時期には濃度が低下する傾向がみられる。このような変動は水温・塩分の分布から判断して、相模湾の沖合いを流れている黒潮の離接岸と関係するものと思われる。そこで、海洋速報^{*7}に掲載されている黒潮流軸の変動の様子と栄養塩類の増減との関係を検討してみた。黒潮流軸が相模湾に接近している頃には、水温は高く、栄養塩類の濃度は低くなり、逆に流軸が沖合いにある時は水温は低めで、栄養塩類濃度は上昇する傾向がうかがえた。しかし、黒潮流軸は単純に直進しているときもあれば、複雑に蛇行している時期も

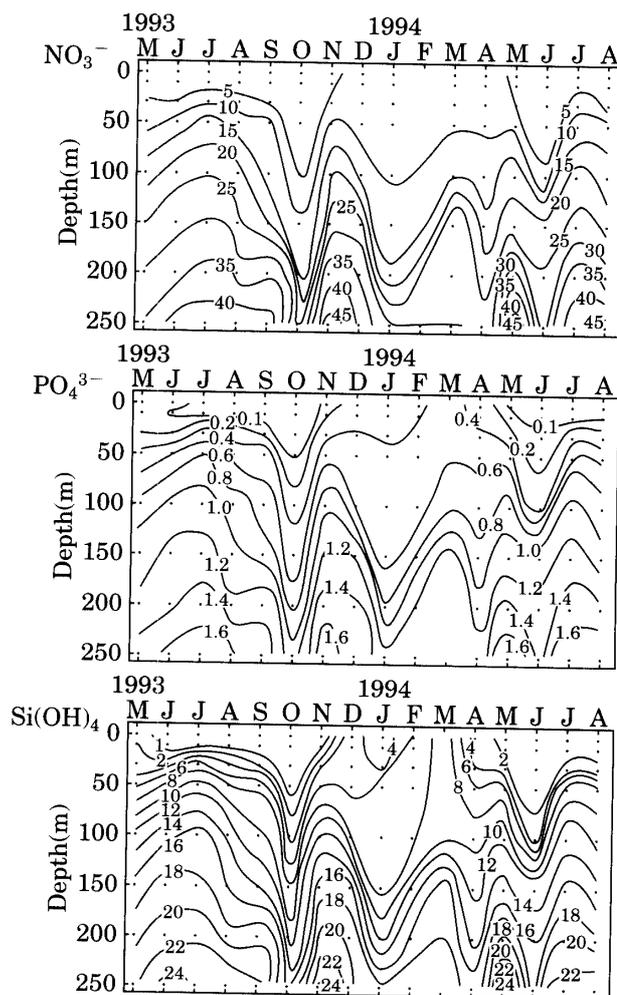


Fig. 6. Contours of nutrient concentrations in unit of μM in the upper 250 m at Stn. 19 in Sagami Bay.

Nitrate (upper), phosphate (middle) and silicic acid (lower).

あり、栄養塩濃度の変動を単純に離接岸で説明することはできなかった。この詳細については今後の研究課題である。

ともあれここでは、水温の上下変動にともなう有光層への栄養塩濃度の供給機構の解析を目的としているので、栄養塩濃度と水温の関係をグラフ上にプロットしてみた。その結果、両者の間には高い負の相関のあることがわかった (Fig. 7A-C)。このことは、温度の低い下層の水塊が上昇してくることによって有光層に栄養塩類が補給 (供給) されることを意味している。Fig. 7 の直線の勾配から推定すると、水温の 1°C の低下によってリンで約 $0.127 \mu\text{M}$ 、窒素で $1.86 \mu\text{M}$ 、そしてケイ素では $3.21 \mu\text{M}$ の増加が予測される。即ち、下層の水塊の湧昇 (水温低下) は相模湾の高い生産性を維持してゆく

*7 海上保安庁：海洋速報，平成 5 年第 18 号～平成 5 年第 24 号，海上保安庁水路部。

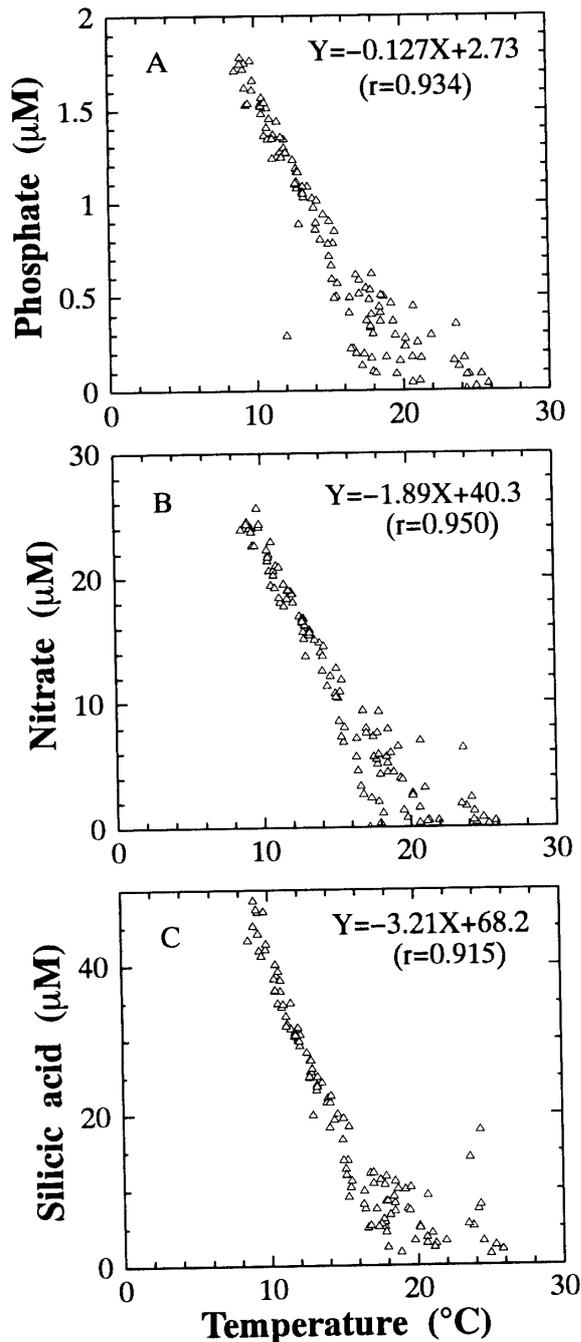


Fig. 7. Nutrients as a function of temperature for the samples in the upper 250 m from Sagami Bay.

For the statistical calculations, the points scattering over 21°C, corresponding to the surface waters (0 m) at summer season, were omitted because the origin was not from the subsurface water, but from the river waters supplying in this Bay.

上で、大きな役割を果たすことが期待される。特に、温度躍層が発達しているような夏期におけるこの役割は大きいといえよう。また、この様な湧昇に伴い表層に運ばれてくる栄養塩類の組成比(勾配の比)は、Si : N : P

=25.3 : 14.9 : 1で、この比は珪藻の増殖を維持してゆくに必要な条件 (Si : N : P=16 : 16 : 1)²⁰⁾を満たしている。

5. 珪藻の増殖に対する栄養塩類の組成比と限界濃度 珪藻が正常に増殖をおこなって行くためには、珪藻が取り込む栄養塩類が下限値以上に存在し、しかもまたそれらの組成がある一定の割合(比)以上であることが理想的といえる。そこで相模湾の有光層内の栄養塩類がこのような条件に対してどのような状況にあるかを調べてみることにした。観測深度、透明度等を勘案して、有光層は便宜的に0~50 mとした。

本調査ではアンモニアの測定を行っていないが、生物活動の盛んな海洋の表層近辺には硝酸と同程度の濃度でアンモニアが存在することも希ではない。また、珪藻は尿素やアミノ酸のような低分子の有機化合物も窒素源として利用することが知られている。²¹⁾この様な点を考慮に入れ、窒素の下限濃度を0.5 μMとした。一方、リンとケイ素については、Justicらの報告³⁾を参考にし、それぞれ0.1 μMと3.0 μMとした。

これらの値をそれぞれの下限濃度の目安として、珪藻の増殖の制限因子となっている回数(頻度)を調べた。その結果は次のようであった (Fig. 6参照) : 1)窒素では26回、リンで21回、そしてケイ素では25回で、それぞれの元素が単独で増殖の下限濃度以下になる頻度には大きな差はみられなかった、2)2元素が同時に下限濃度となる可能性のある場合について調べてみると、窒素とリンの組み合わせでは19回、リンとケイ素の組み合わせでは19回、窒素とケイ素では20回であり、出現頻度はいずれの場合も同程度であった、3)3元素が同時に下限濃度以下になっている場合の頻度は17回であり、このように、2元素あるいは3元素が同時に制限因子として出現する頻度に大きな差がみられなかった。以上のことから、相模湾表層の植物プランクトン群集は、しばしば栄養制限に曝される可能性のあることがわかる。

なお、栄養塩の枯渇は主に沖合いで観測された。例えば3元素が同時に下限濃度以下になっている頻度17回のうち、沿岸(Stn. 3)での出現は2回にすぎず、残りはすべて沖合い(Stn. 19)での出現であった。しかもいずれの場合も、成層が発達している時期に観測された。このように沿岸と沖合いで栄養塩類の消長が異なっている理由は、陸からの栄養の供給に負うところが大きいものと推測される。そこで0 m層のケイ酸に注目してみると、沖合いの濃度が<3.0 μMに低下している時期(1993年9, 10月)の沿岸域では>14.0~18 μMと高い値を示していた。この観測時期は丁度、降水量や河川流量の多い時期とよく一致していた(脚注⁴⁾の資料参

照)。しかも、この頃の沿岸部の表層の塩分は著しく低下 ($S < 32.0$ psu) していた。このことから、沿岸の 0 m 層 (Stn. 3) の高いケイ酸濃度は河川からの供給であったといえる。

次に栄養塩類の組成比について考察した結果は次のようであった。微量元素をはじめ栄養塩類などが十分に存在し、良好な条件で増殖している珪藻は、概ね $Si:N:P = 16:16:1$ の比率で栄養塩類を体内に取り込む。⁵⁻⁶⁾ 一方、Justic^ら³⁾はプランクトンの栄養塩類の取り込みに関する報告を整理し、それぞれの栄養塩が増殖の制限因子となる可能性の条件を次のように設定している。すなわち窒素が制限因子となる場合には、 $N/P < 10$ で $Si/N > 1.0$ 、ケイ素が制限因子となる条件として $Si/N < 1.0$ で $Si/P < 10$ 、またリンが制限因子となる場合は $N/P > 22$ 及び $Si/P > 22$ としている。しかし、プランクトンが受ける栄養塩類の制限因子の強さは種によって異なるであろうし、光強度、水温といった環境条件にも影響されるので、厳密に定義することははなはだ困難と思われる。

そこで便宜的に Brzezinski が採用している取り込み比 ($Si/P=16$, $Si/N=1$, $N/P=16$)²⁰⁾を基準とし、いずれの元素が増殖の制限因子として作用しているかを組成比から調べてみた。また有光層とそれ以深の層の間で栄養塩類の組成比にどのような違いが見られるかを知ることでも大事であるので、組成比を深さに対してプロットしてみた (Fig. 8A-C)。なお、ここに使用した観測データは下限濃度の考察に用いたのと同様のものであり、総数は 120 点であった。

冬季には、鉛直混合が活発に行われている一方で光合成は低下している。そのために上下間で栄養塩類の組成比に大きな違いは見られず、しかも有光層内 (0~100 m) の組成比も比較的狭い範囲内に分散している ($Si/P = 10-30$, $Si/N=1-3$, $N/P=9-18$)。成層が発達し、光合成活動が活発となる春から晩秋にかけては、有光層内の栄養塩類濃度の低下は著しく (Fig. 6 参照)、またそれらの組成比の分散は広い範囲に及んでいる。有光層内の栄養塩類の組成比の特徴は次のように要約される：1) 有光層内の N/P 比の多くは下層の値に比べて小さい方向、即ちリンに対して窒素が欠乏しやすい状況に陥りやすく、この傾向は冬期よりも夏期に大きい (Fig. 8A)、2) Si/N は、夏期においてもケイ素より窒素の方が遥かに欠乏しやすい状況をつくり出す可能性の高い方向に移行している (Fig. 8B)、3) 有光層内の Si/P 比は Si/N 比の分布と同様に夏期に大きくなる方向、即ち、相対的にケイ素欠乏よりもリン欠乏がよりおこり易い状況にある (Fig. 8C)。

一般に成層が発達している海域で珪藻が活発に増殖している時期には、窒素欠乏よりもケイ素欠乏がおこりやすいことが知られている²²⁾が、相模湾では上に述べたように異なっていた。この現象を引き起こす原因を解明するには、珪藻殻の現存量、季節変化、及び下層へのフラックス、さらには現場における珪藻による栄養塩類の取り込みとそれらの再生・溶解速度に関する情報が必要であるが、相模湾におけるこれらに関する調査・研究資料は皆無である。しかし、珪藻殻の溶解速度は温度に強く依存し、水温が 10°C 上昇すると 2~4 倍程度大きく

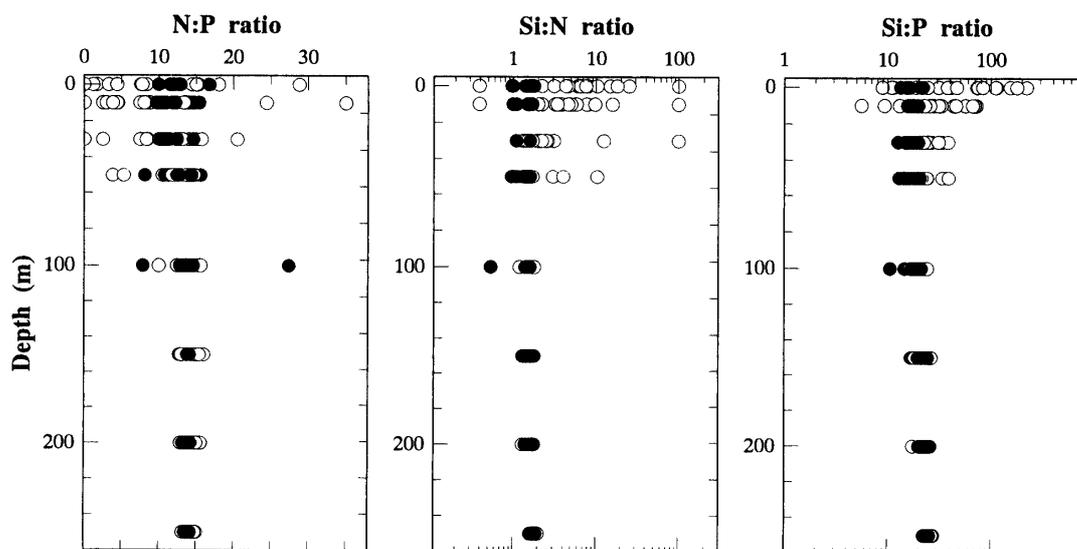


Fig. 8. Scatter diagrams of nutrient molar ratios in the samples from Sagami Bay.

Closed symbols represent the samples collected from Dec. to Apr. (vertical mixing periods). Open symbols represent the samples collected from May to Nov. This figure illustrates that deficiency of nitrate and/or phosphate is in preference to silicic acid in the euphotic zone.

なる。^{20,23-25}また、成層が発達していると珪藻の沈降が阻止されるので、生産された珪藻殻の60~80%が有光層内で速やかに溶解する。²⁶このようなことから、相模湾においても、水温が高く、成層が発達している夏期には生産された珪藻殻の溶解と珪藻への再利用といった循環が窒素やリンと同様に速い速度で進行しているものと思われる。これに加えて、河川から多量のケイ素が相模湾表層水中に供給されている。さらには湧昇によって下層から供給される水塊にケイ素が豊富に存在する事実も外洋域の栄養塩類の組成の項で述べてきた通りである。このような環境条件が、相模湾でケイ素が単独で珪藻の増殖の制限因子となる濃度にまで低下しにくい状況にある理由となっているといえよう。

このような相模湾の栄養塩類の分布特性は、珪藻の増殖だけでなく生き残りにも有利にはたらく。なぜならば、ある種の浮遊珪藻類は窒素が欠乏した際にケイ酸が豊富に存在すると、この過剰のケイ酸を利用して休眠胞子を形成し、生き残る戦略手段に利用している^{27,28}からである。

相模湾は隣接する東京湾に比べて富栄養化の影響を受けている範囲と程度は小さい。夏期の沖合域ではかなりの頻度で栄養塩の枯渇が生じているが、この場合でもケイ素は相対的に豊富である。したがって相模湾の栄養環境は、珪藻の種の維持・保存並びに珪藻生態系の存続に対しても好適な状態にあるといえる。

要 約

1) 相模湾に観測定点を設け、栄養塩類(ケイ酸、リン酸、硝酸)の鉛直分布と季節変動について1993年から1994年にかけて調査した。

2) 栄養元素の相互の関係を調べてみたところ、一つの直線(N-P)あるいは曲線(Si-P, Si-N)で回帰できた。これらの関係を過去の資料(15年前)と比較してみたところ、いずれの元素濃度範囲もまた組成比においてもよく一致していた。このことは、湾内の水の交換が速く、滞留時間の短いことに由来するものと判断された。

3) リン酸及び硝酸の極大値は酸素極小層(~1.0 ml/l)のやや下部に位置する中層(1200~1400 m)に存在し、濃度はそれぞれ3.0 μM と45 μM 程度であった。一方、ケイ酸の極大値は中層ではなく底層(2000 m)に存在し、その濃度は156 μM に達していた。

4) 成層が発達している時期の有光層内の栄養塩類濃度が、植物プランクトンの増殖の制限因子として働くまでに低下することもしばしば観測されたが、珪藻類の増殖にとって必要なケイ酸が他の栄養元素よりも著しく低下することは認められなかった。したがって現在にお

いても、相模湾は珪藻生態系を維持するに適した栄養環境であることがわかった。

謝 辞

淡青丸による観測の未発表資料を提供して下さった東京大学海洋研究所教授小池勲夫博士に感謝します。研究の機会を与えて下さった東京水産大学名誉教授有賀祐勝博士、観測に協力していただいた東京水産大学の青鷹丸乗組員の方々、海洋化学研究室の皆様にも厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) A. Kamatani, N. Ogura, N. Nakamoto, M. Funakoshi, and S. Iwata: Distribution of nutrients in Sagami Bay during 1971-1973. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **47**, 1493-1498 (1981).
- 2) C. B. Officer and J. H. Ryther: The possible importance of silicon in marine eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **3**, 83-91 (1980).
- 3) D. Justic, N. N. Rabalais, R. E. Turner, and Q. Dortch: Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuar. cstl. Shelf Sci.*, **40**, 339-356 (1995).
- 4) D. V. Nelson, P. Tréguer, M. A. Brzezinski, A. Laynaert, and B. Queguiner: Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochem. Cycles*, **9**, 359-372 (1995).
- 5) A. C. Redfield, B. H. Ketchum, and F. A. Richards: The influence of organisms on the composition of sea water, in "The Sea" Vol. 2 (ed. by M. N. Hill), John Wiley, New York, 1963, pp. 26-77.
- 6) M. A. Brzezinski: The Si:C:N ratio of marine diatoms; interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J. Phycol.*, **21**, 347-357 (1985).
- 7) T. Ishimaru, H. Otake, T. Saino, H. Hasumoto, and T. Nakai: OCTOPUS, an octo parameter underwater sensor, for use in biological oceanography studies. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**, 207-212 (1984).
- 8) J. D. H. Strickland and T. R. Parsons: A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, **167**: 1-311 (1968).
- 9) F. Koroleff: Determination of phosphorus, in "Methods of seawater analysis" (eds. by Grasshoff, K., Ehrhardt, M. and K. Kremling), Verlag Chemie, Weinheim, 1983, pp. 125-139.
- 10) K. Sugawara: On the preparation of CSK standards for marine nutrients analysis. SCOR UNESCO. ICUC, Tokyo, 1969, pp. 28-32.
- 11) 宇田道隆:「ぶり」漁期に於ける相模湾の海況及び気象と漁況との関係. 水産試験場報告, **8**, 1-59 (1937).
- 12) S. Iwata and M. Matsuyama: Surface circulation in Sagami Bay: the response to variations of the Kuroshio axis. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **45**, 310-320 (1989).
- 13) 木村喜之助: 沿岸の大急潮について. 中央気象台報, **19**, 1-85 (1942).
- 14) K. Taira and T. Teramoto: Bottom currents in Nankai trough and Sagami trough. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 388-398 (1985).
- 15) T. Nanniti: Deep-sea current measurements. *J. Oceanogr.*

- Soc. Japan*, **18**, 73-77 (1962).
- 16) T. Sasaki S. Watanabe, and G. Oshima: New current meters for great depths. *Deep-Sea Res.*, **12**, 815-824 (1965).
 - 17) K. Takano and H. Hara: A preliminary analysis of current meter records. *La mer*, **8**, 205-228 (1970).
 - 18) M. Kawabe and M. Yoneno: Water and flow variations in Sagami Bay under the influence of the Kuroshio Path. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **43**, 283-294 (1987).
 - 19) 鎌谷明善, 上野康広: 植物プランクトンの分解にともなう磷と珪素の再生. *日水誌*, **46**, 537-542 (1980).
 - 20) M. A. Brzezinski and D. M. Nelson: The annual silica cycle in the Sargasso Sea near Bermuda, *Deep-Sea Res.*, part I, **42**, 1215-1237 (1995).
 - 21) J. A. Hellebust and J. Lewin: Heterotrophic nutrition, in "The Biology of Diatom" (ed. by D. Werner), Blackwell Scientific Publications, Berkeley, 1977, pp. 169-197.
 - 22) R. C. Dugdale and F. P. Wilkerson: Silicate regulation of new production in the equatorial Pacific upwelling. *Nature*, **319**, 270-273 (1998).
 - 23) A. Kamatani, J. P. Riley, and G. Skillow: The dissolution of opaline silica of diatom tests in sea water. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**, 201-208 (1980).
 - 24) A. Kamatani: Dissolution rates of silica from diatoms decomposing at various temperatures. *Mar. Biol.*, **68**, 91-96 (1982).
 - 25) D. C. Hurd and S. Birdwhistell: On producing a more general model for biogenic silica dissolution. *Am. J. Sci.*, **283**, 1-28 (1983).
 - 26) D. M. Nelson, P. Tréguer, M. A. Brzezinski, A. Leynaert, and B. Queguiner: Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochem. Cycles*, **9**, 357-372 (1995).
 - 27) O. Oku and A. Kamatani: Resting spore formation and phosphorus composition of the marine diatom *Chaetoceros pseudocurvisetus* under various nutrient conditions. *Mar. Biol.* **123**, 393-399 (1995).
 - 28) M. R. McQuoid and L. A. Hobson: Diatom resting stages. *J. Phycol.* **32**, 889-902 (1996).
 - 29) F. J. Millero: *Chemical Oceanography*, 2nd ed., CRC Press, London, 1996, pp. 281-305.