

東京湾における栄養塩の動向 (1989-1998年)

松村 剛*・堀本奈穂*・許 耀霖*・石丸 隆*

Recent trends of nutrients in Tokyo Bay (1989-1998)

Tsuyoshi MATSUMURA*, Naho HORIMOTO*, Yaolin XU* and Takashi ISHIMARU*

Abstract : Nutrient concentrations were investigated from 1994 to 1998 in Tokyo Bay and trends in recent ten years of nutrient concentrations were discussed. DIN and $PO_4\text{-P}$ were high in winter and low in summer, while $Si(OH)_4\text{-Si}$ was low in winter and high in summer. DIN/DIP (DIP= $PO_4\text{-P}$) ratio was much higher than 16 in winter and decreased to about 16 in summer, because desorption of phosphorus from the sediment was active in summer. DSi/DIN (DSi= $Si(OH)_4\text{-Si}$) ratio was lower than 1, which is an average Si/N ratio of diatoms, in winter and higher in summer. Thus, the reason why diatoms are recessive in summer and dominant in winter is due to other factor than $Si(OH)_4\text{-Si}$ concentration. For ten years between 1989 and 1998, DIN and $Si(OH)_4\text{-Si}$ concentrations were a little decreased. But DIN concentration is still high and may not control phytoplankton production. Decrease of DIN concentration was not explained from the increase of Chl *a* concentration caused by the increase of solar radiation.

Key words : Tokyo Bay, nutrients, Redfield ratio, seasonal change

1. はじめに

東京湾の富栄養化は1960年代から急激に進行し、それにもとない湾内のDINや $PO_4\text{-P}$ の濃度が急激に増加した(宇野木・岸野, 1977)。東京湾における1990年までの栄養塩濃度の変動については高田(1993)や野村(1995)によりまとめられている。それらによると、 $NH_4\text{-N}$ は1970年頃をピークにやや減少したが、 $NO_3\text{-N}$ および $NO_2\text{-N}$ は増加し続けており、結果としてDINは一貫して増加し続けた。 $PO_4\text{-P}$ 濃度については1970年頃にピークに達し、それ以降は合成洗剤の無リン化などによりやや減少し、1980年頃以降は平均 $1\mu\text{M}$ 程度で推移した。 $Si(OH)_4\text{-Si}$ は1970年頃までは濃度が低下する傾向にあり、1990年頃は1970年頃とはほぼ同じ濃度レベルであると述べられている。また、山口・柴田(1979)、山口(1999)は、1970年頃以降東京湾では栄養塩が植物プランクトンの増殖を制限することはほとんどなくなったと述べている。

近年の東京湾の栄養塩濃度に関しては、KAWABE and

KAWABE (1997b)が東京都、神奈川県、千葉県の栄養塩データを整理し、1980-1989年の間のDINの変動傾向について調べたものがあり、また魚ほか(1995)は1989年から1993年にかけての5年間の観測結果から、季節変動についてまとめている。本研究では1994年から1998年の毎月1回の湾内定点の観測結果から、栄養塩濃度の最近の状況について調べ、さらに1989-1998年にかけての10年間の栄養塩濃度の経年変動について論じた。

2. 材料と方法

観測は1989-1998年にかけて毎月1回(ただし1992年8月は2回)、東京水産大学研究練習船青鷹丸または実習艇ひよどりにより、多摩川河口沖に位置するSta. F3(水深約23m)と木更津沖のSta. F6(水深約26m)の2点(Fig. 1)で行った。各測点でCTDを用いて水温・塩分について観測を行った。同時に表面採水バケツ、ロゼット採水器またはバンドン採水器を用いて、Sta. F3では0・5・10・15・20mの5層、Sta. F6では0・5・10・15・20・25mの6層で採水を行った。

得られた海水は栄養塩およびChl *a*の分析に用いた。栄養塩は海水50mlをWhatman GF/Fフィルターを用いて濾過し、濾液を凍結保存後、 $NO_3\text{-N}$ 、 $NO_2\text{-N}$ 、 $NH_4\text{-N}$ 、 $PO_4\text{-P}$ および $Si(OH)_4\text{-Si}$ について分析した。 $NO_2\text{-N}$ はTechniconのマニュアル(1978)に従い、 $NO_3\text{-$

* 東京水産大学海洋環境学科, 〒108-8477東京都港区港南4-5-7

Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minato, Tokyo, 108-8477 Japan

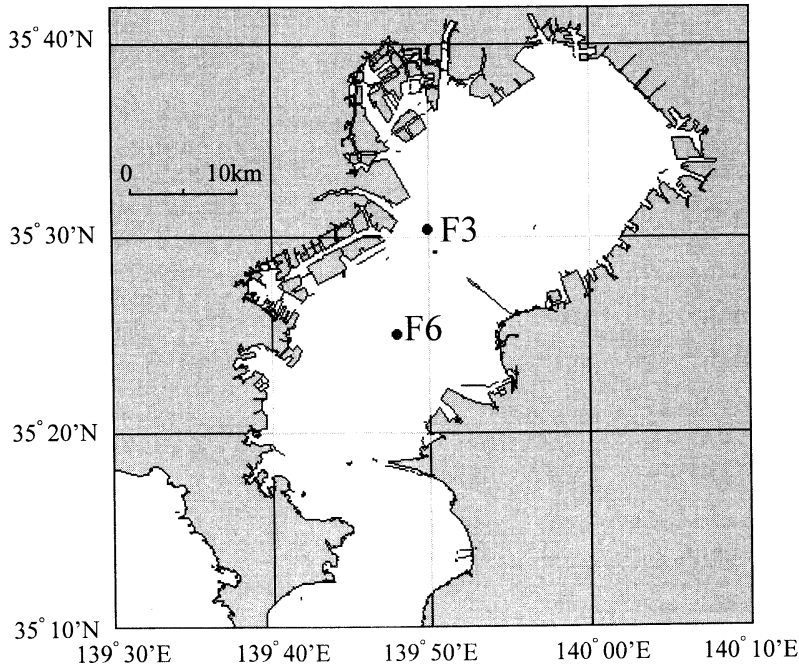


Fig. 1. Observation stations F3 and F6 in Tokyo Bay.

NはCu-Cdカラムで還元し $\text{NO}_2\text{-N}$ と同じ方法で、また $\text{NH}_4\text{-N}$ はYu *et al.* (1994)のサリチル酸ナトリウム、ジクロロイソシアニル、ニトロプルシドを用いる方法で、それぞれオートアナライザーを用いて分析した。リン酸はMURPHY and RIELY (1962)の方法で、珪酸はKOROLEFF (1983)のモリブデン青法でそれぞれ手分析で測定を行った。

Chl *a*は栄養塩の濾過に用いたフィルターをSUZUKI and ISHIMARU (1990)に従い、N, N-Dimethylformamidにより抽出し、Turner Design 10R型蛍光光度計を用いて蛍光法(STRICKLAND and PARSONS, 1972)により分析した。1989-1993年のデータは魚 (1994)より引用した。

3. 結果と考察

3-1 海洋構造およびChl *a*濃度の季節変動

栄養塩の濃度は、生物による取り込み、排出や物理的な移流拡散、水塊の混合などに大きく支配されている(例えば、才野, 1985)。そこでまず、海洋構造およびChl *a*濃度の季節変動について述べる。

Fig. 2にSta. F3, Fig. 3にSta. F6における1994年1月から1998年12月にかけての水温、塩分、 σ_t およびChl *a*濃度の季節変動をそれぞれ示す。

表層の水温はSta. F3では8.5-28.7°C, Sta. F6では

8.3-27.8°Cの間で変動し、両測点とも毎年8月に最も高く1, 2月に最も低くなった。底層の水温はSta. F3では9.6-22.1°C, Sta. F6では10.2-22.7°Cの間で変動し、表層より1ヶ月程度遅れて9, 10月に最も高く、表層とほぼ等しく1, 2月に最も低くなった。鉛直的に見ると春・夏季は底層より表層の水温が高く、海面冷却が進む10, 11月から3月頃にかけては逆に表層より底層の水温がやや高かった。1994-1996年は両測点ともに2月に0-20m層までの水温が10°C以下にまで低下しているが、1997年以降は低下しなかった。また、いずれの年も混合は海底には及ばなかった。

表層の塩分はSta. F3では15.1-32.4 psu, Sta. F6では23.8-32.9 psuの間で変動し、6, 7月の梅雨および9, 10月の秋雨の時期に最も低く、冬季の1月頃に最も高かった。表層の塩分の最低値は両測点とも1998年10月に見られ、 σ_t も低塩分を反映し極端に低くなっている。これは、観測前日(10月1日)の大雨により淡水流入量が増大したためと考えられる。底層ではSta. F3では32.0-34.3 psu, Sta. F6では32.5-34.1 psuの間であり、表層に比べて変動幅は小さかった。表層とは逆に、底層の塩分は1月頃に最も低かった。これは、宇野木・岸野(1977)が指摘しているように、冬季は水柱が混合しやすく、底層水が表層の低塩分水の影響を受けるためと考えられる。底層の塩分が34以上の高塩分水がSta.

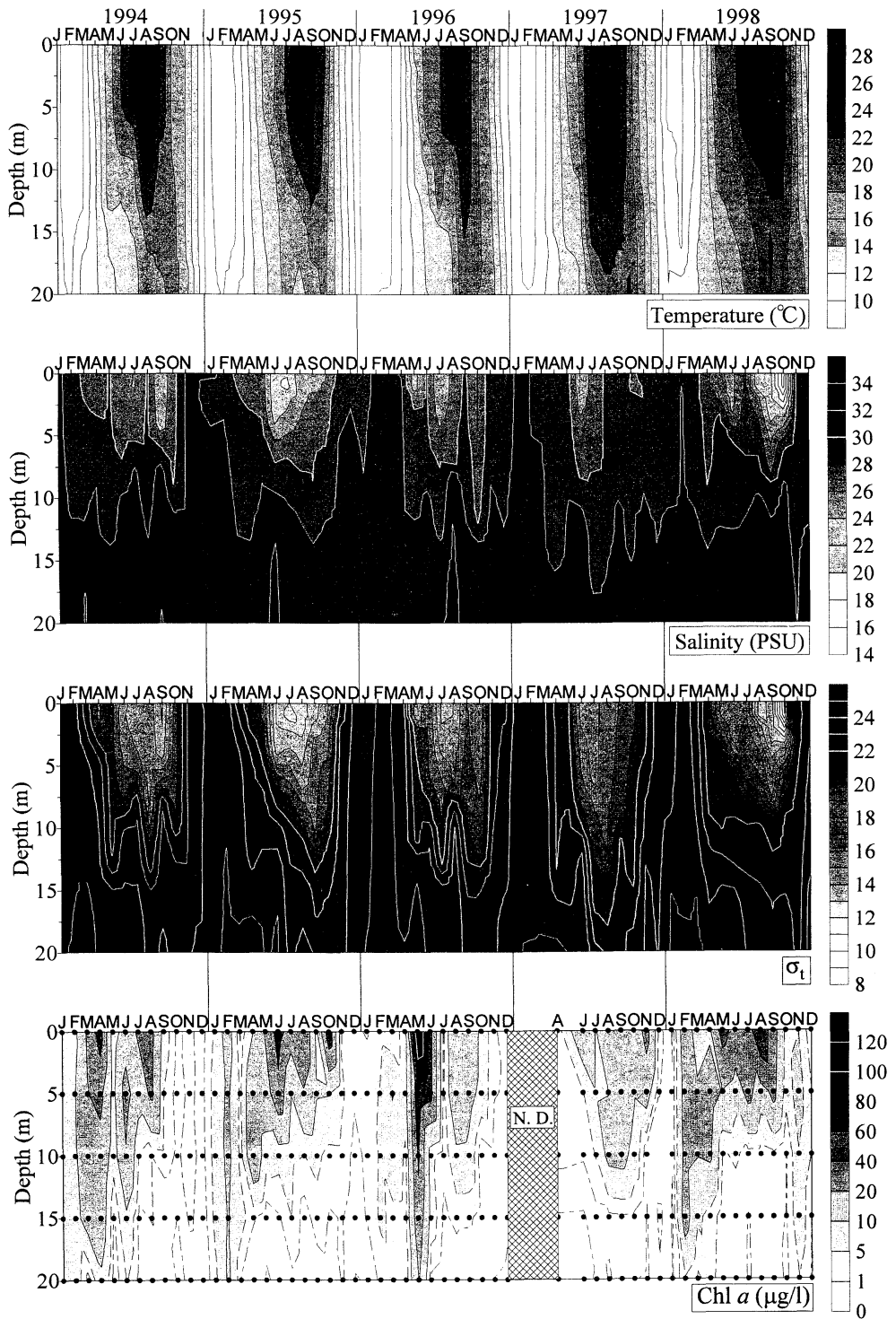


Fig. 2. Seasonal variation in vertical distribution of temperature, salinity, sigma-t and Chl *a* at station F3 in Tokyo Bay from January 1994 to December 1998. N. D. = No data.

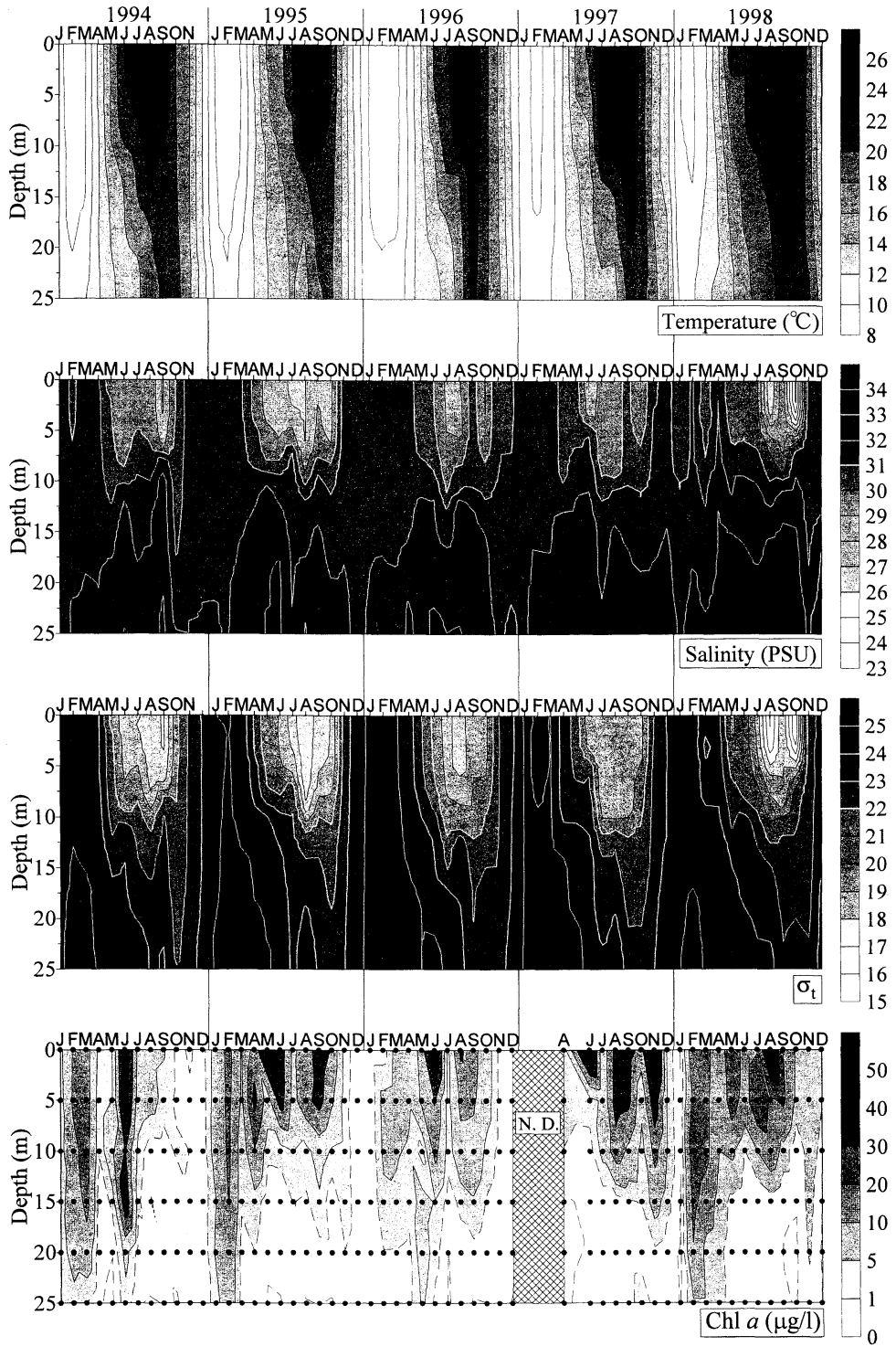


Fig. 3. Seasonal variation in vertical distribution of Temperature, Salinity, Sigma-t and Chl *a* at station F6 in Tokyo Bay from January 1994 to December 1998. N. D. = No data.

F3 では 1994 年 3, 9 月, 1995 年 6 月, 1996 年 8 月に, Sta. F6 では 1994 年 6, 9 月, 1995 年 5, 6 月, 1996 年 4, 6, 7, 8 月に見られたが, 1997 年以降は見られなかった。

表層の水温・塩分を両測点について比べると, 多摩川河口に近く陸水の影響を受けやすいと考えられる Sta. F3 の方が水温は夏季には高く, 冬季には低く, 塩分は周年にわたり低かった。

以上のような水温・塩分の変動を反映して, 顕著な密度躍層が 4 月頃以降 10 m 層以浅に形成された。密度躍層は 11 月以降急速に衰退し, 混合層の深度は冬季には大きくなるものの, 水温構造からみていずれの年も海底に達することはなかった。表層と底層との密度差は 1 月を中心に小さくなったが, 1997 年秋季から 1998 年冬季にかけては全体的に表層の塩分が低く, 表層と底層の密度差がやや大きかった。

表層の Chl *a* 濃度は Sta. F3 では 0.9–122 $\mu\text{g/l}$, Sta. F6 では 0.9–57.2 $\mu\text{g/l}$ の間で変動した。成層が発達している春季から初秋 (4 月–10 月) には表層で濃密に, 密度躍層が深で非常に低濃度になる傾向にあり, 成層が弱く混合層が海底近くに達する冬季 (11 月–3 月) には水柱全体にほぼ均一に分布した。これは山口・有賀 (1988) が, Chl *a* の濃度分布は基本的に水温等の物理的パラメーターに対応して, 夏季の成層期には表層で著しく高く, 冬季は比較的低濃度で上下一様の分布様式を示すと述べていることと一致する。野村 (1995) は東京湾では 1986 年以降 Chl *a* の平均濃度は変化しないものの最高値が経年的に低下していると述べている。本研究では Chl *a* が 100 $\mu\text{g/l}$ を越える高濃度を記録したのは 1996 年の Sta. F3 表層のみで, それ以外では高くても 60 $\mu\text{g/l}$ 程度であり, 高濃度の Chl *a* が見られない傾向が依然として継続しているようである。各年の Chl *a* 濃度の最高値は成層期に見られるが, 1997 年は例外的に 11 月に Chl *a* 濃度が最高になった。

3-2 栄養塩濃度の季節変動

1994 年 1 月から 1998 年 12 月にかけての Sta. F3 および Sta. F6 における $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ の季節変動をそれぞれ Fig. 4 および Fig. 5 に示す。

$\text{NO}_3\text{-N}$ は Sta. F3 表層で 3.0–63.8 μM , 底層で 0.09–35.7 μM , Sta. F6 では表層で 0.2–38.8 μM , 底層で 1.2–30.1 μM の間で変動した。表層・底層ともに 8 月頃を中心に夏季に低濃度になり, 1 月頃を中心に冬季に高濃度になる傾向にあった。

$\text{NO}_2\text{-N}$ は Sta. F3 表層で 0.6–9.7 μM , 底層で 0.02–8.0 μM , Sta. F6 では表層で 0.3–6.7 μM , 底層で 0.4–6.2 μM の間で変動した。表層・底層ともに 8 月頃を中心に夏季に低濃度になり, 1 月頃を中心に冬季に高濃度になり, $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様の変動を示した。

$\text{NH}_4\text{-N}$ は Sta. F3 表層で 0.7–70.0 μM , 底層で 0.2–37.9 μM , Sta. F6 では表層で 0.2–32.5 μM , 底層で 1.0–21.5 μM の間で変動した。表層では 7 月頃を中心に低濃度になり, 1 月頃を中心に高濃度になった。底層では Sta. F6 では表層と同様の季節変動を示したが, Sta. F3 底層では冬季とともに夏季にも比較的高濃度になった。

$\text{PO}_4\text{-P}$ は Sta. F3 表層で 0.1–2.8 μM , 底層で 0.5–4.1 μM , Sta. F6 では表層で 0.03–1.9 μM , 底層で 0.5–3.0 μM の間で変動した。表層では 6 月頃を中心に低濃度に, 12 月頃を中心に高濃度になっていた。底層では逆に 2, 3 月を中心に低濃度になり, 8 月を中心に夏季に非常に高濃度になった。

$\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ は Sta. F3 表層で 1.2–12.9 μM , 底層で 1.1–84.4 μM , Sta. F6 では表層で 0.7–56.4 μM , 底層で 1.1–58.7 μM の間で変動した。表層では 2 月頃に最も低濃度になり, 10 月頃に最も高濃度になった。年によっては 4 月から 9 月の成層期に一時的に低濃度になることがあった。底層では 2 月頃に表層と同様に低濃度となり, 7, 8 月に高濃度となった。

塩分のところで述べたように, 1998 年の 10 月は淡水流入の増大のため, 表層で $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が高濃度で特に Sta. F3 顕著であった。

Fig. 6 に 1994 年 1 月から 1998 年 12 月にかけての Sta. F3, F6 における DIN/DIP 比 ($\text{DIN} = \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$, $\text{DIP} = \text{PO}_4\text{-P}$) および DSi/DIN 比 ($\text{DSi} = \text{Si(OH)}_4\text{-Si}$) の変動を示す。全海洋における DIN/DIP 比や海洋植物プランクトン細胞の N/P 比は平均で 16 の値を示すことが知られている (REDFIELD *et al.*, 1963)。表層の DIN/DIP 比は冬季を中心に 16 を大きく上回る高い値を示し, 夏季に 16 前後の値を示す傾向が見られた。ただし, 1995 年の夏季は例外的に高い値で推移した。底層の DIN/DIP 比は表層同様の季節変動を示したが, 値は表層より低く, 特に底層の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が非常に高くなる夏季には毎年 16 以下の値が数ヶ月継続した。

一般的に海水中の DIN/DIP 比が 16 より高いときは植物プランクトンの増殖にとってリンが, 16 より低いときは窒素が制限要因となる可能性があるといわれている (例えば, 佐々木, 1991; 魚ほか, 1995)。本研究の結果について見ると, DIN/DIP 比は両測点とも夏季の一時期を除いて 16 を大きく上回っていた (Fig. 6)。これは, 東京湾では流入負荷における N/P 比が佐々木 (1991) の試算では 34, 高田 (1993) の試算では 27 と高く, さらに湾内の植物プランクトンが窒素・リンを REDFIELD 比に近い割合で取り込んだ結果, リンが先に枯渇するため (魚ほか, 1995) と考えられる。夏季に DIN/DIP 比が 16 前後の値を示すのは, 後に述べるように夏季には底泥からの溶出によるリンの負荷があるためと考えられる。しかし, DIN 濃度は最低でも Sta. F3 で 5 μM 以上, Sta. F6 で 2 μM 以上はあり, 周年枯渇することはない, DIN が植物プランクトンの増殖を律速することはほと

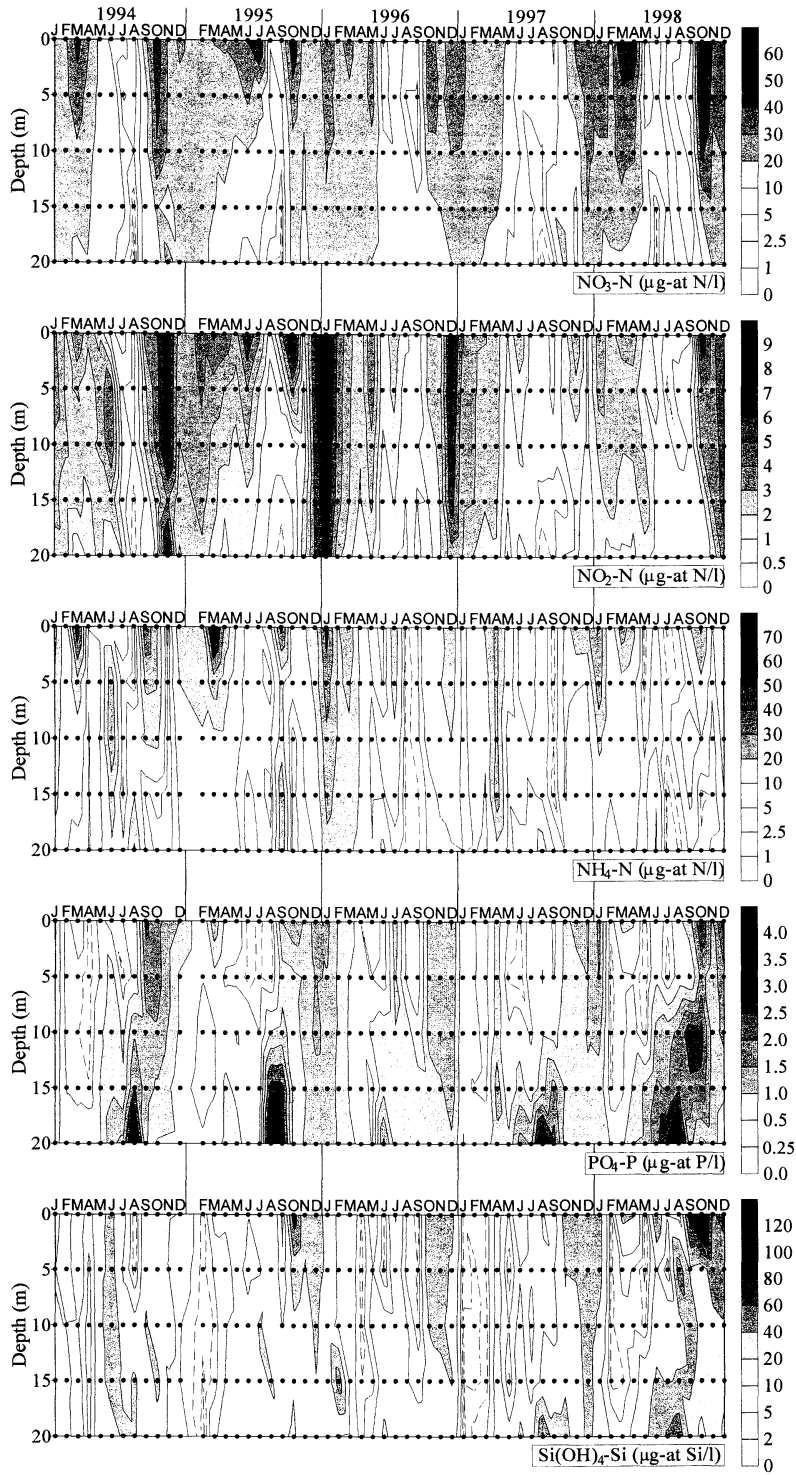


Fig. 4. Seasonal variation in vertical distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ at station F3 in Tokyo Bay from January 1994 to December 1998.

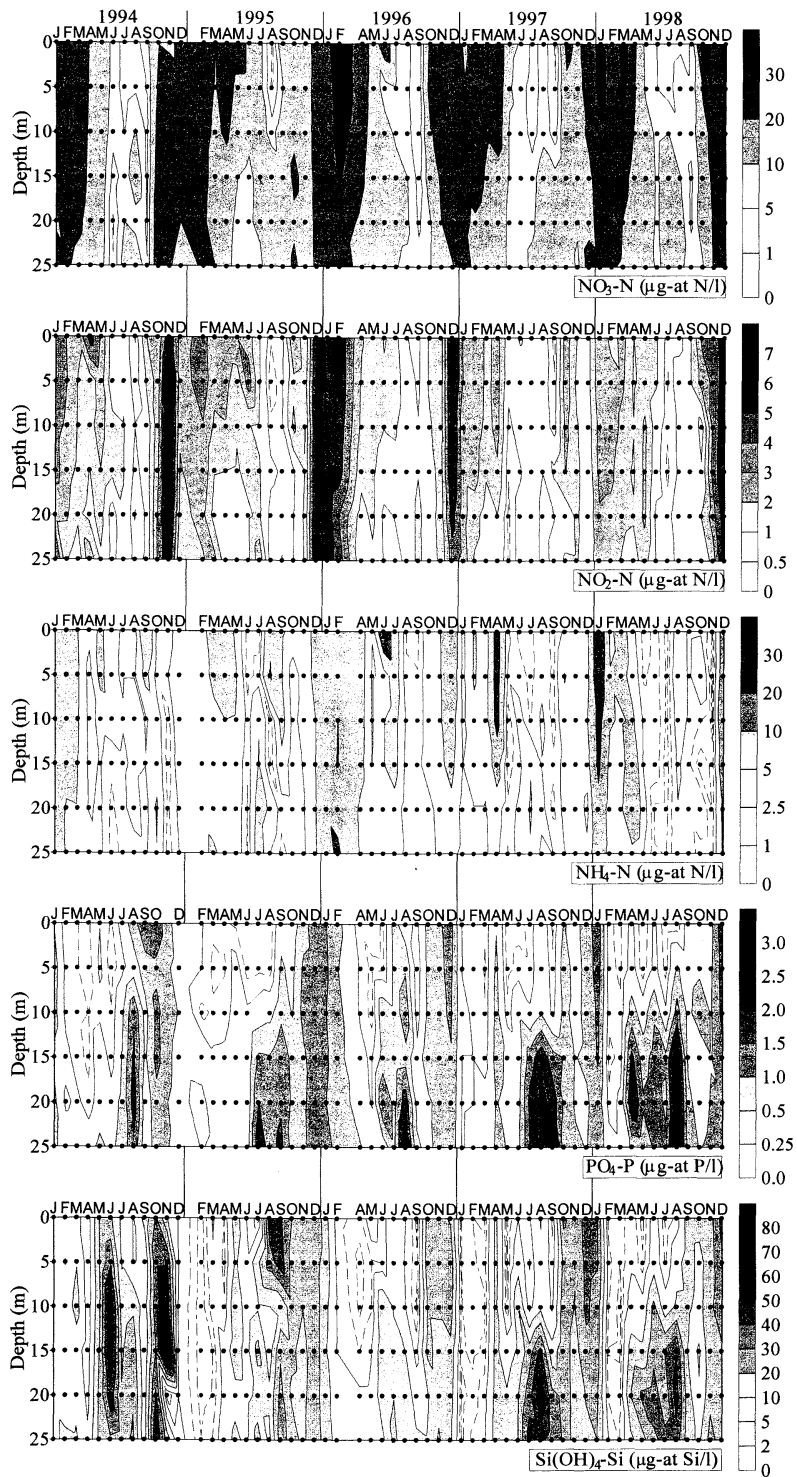


Fig. 5. Seasonal variation in vertical distribution of NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P and Si(OH)₄-Si at station F6 in Tokyo Bay from January 1994 to December 1998.

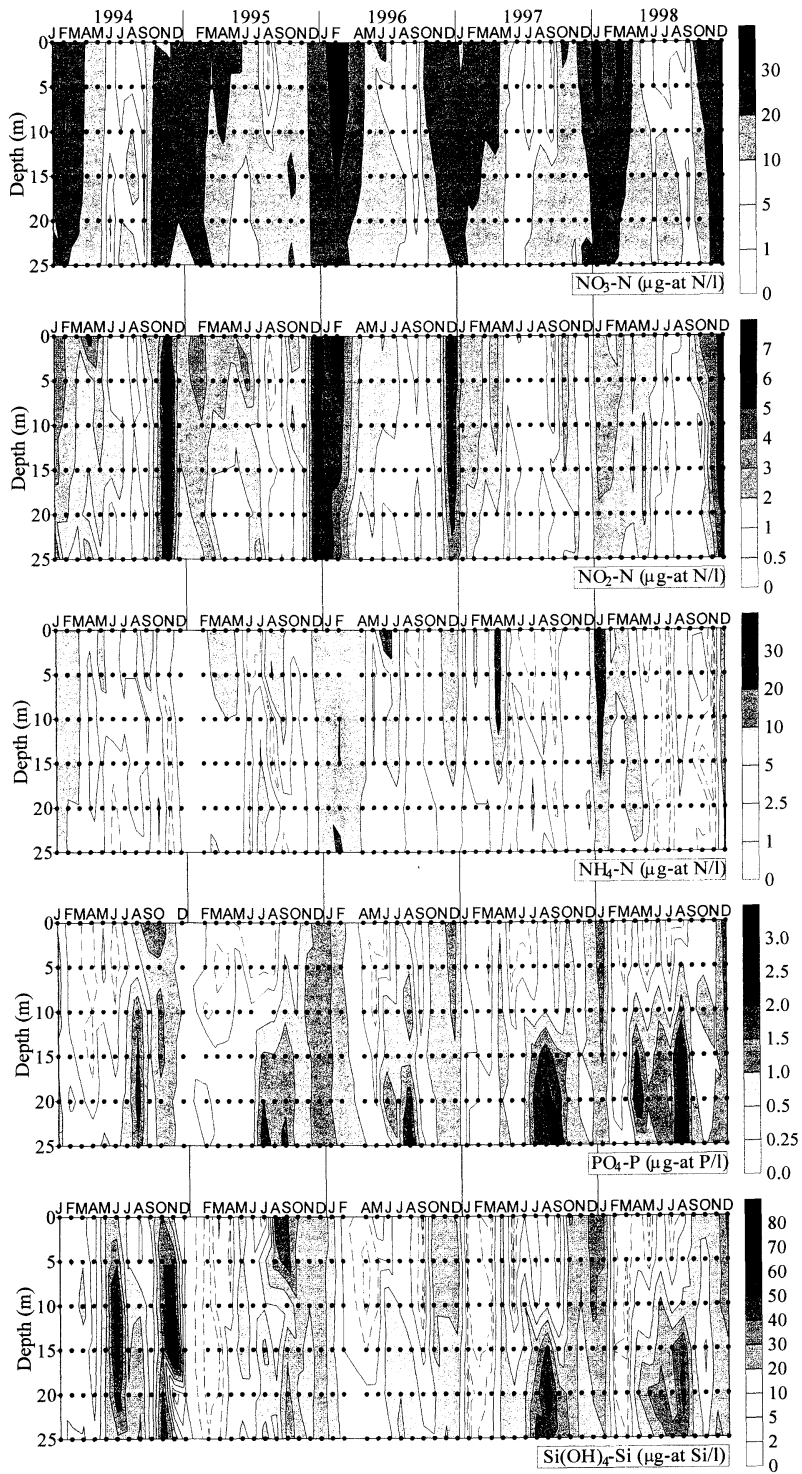


Fig. 6. Seasonal variation in vertical distribution of DIN/DIP (DIP=PO₄-P) and DSi/DIN (DSi=Si(OH)₄-Si) at station F3 and F6 in Tokyo Bay from January 1994 to December 1998.

んどないと思われる。

表層における $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度は冬季に低く、夏季に高くなる季節変動を示した (Fig. 4, 5)。野村・吉田 (1997) は、東京湾の植物プランクトン群集は 1-3 月の冬季には珪藻類の割合が高く、春季から秋季の 4-12 月には鞭毛藻類の割合が高くなると述べている。したがって、冬季に $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度が低いのは珪藻類の増殖により取り込まれるため、このことは 1995 年 2 月や 1998 年 2 月のように冬季でも比較的 Chl *a* 濃度が高く、珪藻類が大増殖していると思われる時に、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が特に低濃度であることから示される (Fig. 2, 3, 4, 5)。夏季の Chl *a* 濃度が高く植物プランクトンが活発に増殖している時期に $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度が高いのは、珪藻が少なく $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ があまり利用されないためと考えられる。また、夏季には淡水流入量が増加し (宇野木・岸野, 1977)、それにともない栄養塩の流入量が増加すること、後述するが水温が高く底泥から珪素が溶解しやすくなることも挙げられる。

人為的影響や珪藻類のブルームなどにより水柱の DIN に対する $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ の割合が低下すると、珪藻の増殖にとって珪素不足となり、結果として鞭毛藻類が卓越すると言われている (OFFICER and RYTH, 1980; CONLEY and MALONE, 1992; DEL AMO *et al.*, 1997)。平均的な珪藻類の Si/N 比はほぼ 1 である (BRZEZINSKI, 1985) ことから、海水中の DSi/DIN 比が 1 以下になれば珪藻の増殖が律速される可能性が考えられる。表層の DSi/DIN 比は、珪藻類の卓越する冬季に 1 より低く、鞭毛藻類が卓越する夏季に 1 より高いことが多かった。また、珪藻は $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ の濃度が $2 \mu\text{M}$ 以下になると他の藻類との競合に打ち勝つことができると言われる (EGGE and AKENES, 1992)。本調査の 10 年間で、珪藻の現存量が低くなる 4-12 月に $2 \mu\text{M}$ 以下の $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度が見られたのは Sta. F3 では 1990 年 8 月、1994 年 8 月のみであり、Sta. F6 では 1990 年 9 月、1991 年 7 月、1996 年 9 月、1997 年 5 月、1998 年 7 月とあまり多くなく、東京湾において $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が濃度の面で珪藻類の増殖を制限することはまれであると考えられる。以上のことから東京湾では、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度が低く DSi/DIN 比が低い冬季に珪藻類が卓越し、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度が高く DSi/DIN 比が比較的高いにもかかわらず夏季には珪藻類が少なく鞭毛藻類が卓越することがわかる。噴火湾では春季の珪藻ブルームにより珪素が枯渇し、鞭毛藻への遷移がおこると言われる (TSUNOGAI and WATANABE, 1983) が、東京湾においては、珪藻の衰退は $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度の低下よりも、鞭毛藻類との光の競合など他の要因によっていると考えられる。

底層における各栄養塩の季節変動についてみると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ については夏季に低濃度、冬季に高濃度で、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は冬季のみでなく夏季にも比較的高濃度であった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ は夏季に高濃度で冬季に

低濃度であった (Fig. 4, 5)。

底層水の栄養塩濃度は底質中の有機物の分解の影響を受けると考えられる。また有機物の分解は水温が高いほど促進され、よって夏季に底層の栄養塩濃度が高くなると予想されるが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は高くはない。有機態窒素が無機態の窒素に分解されるには、まず $\text{NH}_4\text{-N}$ の形で水中に放出され、また $\text{NH}_4\text{-N}$ は好氣的な環境下では硝化細菌により、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ へと酸化される (才野, 1985)。東京湾では夏季、底層水が貧酸素化あるいは無酸素化することが知られており (風呂田, 1988)、したがって $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高く $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低いのは、嫌氣的な環境下で $\text{NH}_4\text{-N}$ が $\text{NO}_2\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ に酸化されにくいと考えられる。

有機物が分解されると $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は REDFIELD 比に近い割合で生じる (REDFIELD *et al.*, 1963) が、夏季底層水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ は $\text{NH}_4\text{-N}$ に比べて著しく高濃度である。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は酸化的環境下では底泥中の鉄水酸化物に吸着され、還元的環境下では溶脱することが知られている (才野, 1985)。夏季に見られる底層の高い $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が有機物の分解により生じるとともに、底層水の貧酸素化により底質から溶出したためと考えられる。

また底泥からの珪素の溶解は水温の上昇により促進されることが知られている (YAMADA and D'ELIA, 1984)。したがって、水温の高い夏季に珪素の溶解が活発になり、高濃度の $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が底層で見られると考えられる。

神山ほか (1998) は夏季播磨灘における底泥からの栄養塩の負荷は、陸上からの負荷に比べて DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ でそれぞれ 82, 79, 250% であると述べている。東京湾において底泥からの栄養塩の負荷を見積もった例は珪素については見当たらないが、一年間の陸上からの負荷に対して窒素では 15%、リンで 38% といわれている (環境庁水環境研究会編, 1996)。従来、東京湾では流入負荷中のリンの割合は窒素に比べ低く、有機物の内部生産を抑えるためには、リンの流入負荷を削減することが効果的であると言われてきた (佐々木, 1991)。しかし、リンは夏季に底泥から大量に溶出しており、枯渇しない窒素とともに、内部生産をさらに助長すると考えられる。東京湾の環境回復のためには貧酸素水塊が発生しないレベルまで窒素、リンの流入負荷を抑える必要がある。

3-3 1989-1998年にかけての栄養塩濃度の経年変動

Fig. 7 および Fig. 8 にそれぞれ Sta. F3 および Sta. F6 表層における 1989-1998 年にかけての DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 、DIN/DIP 比、DSi/DIN 比の変動を示す。1 ヶ月内に 2 回調査を行った 1992 年 8 月については、2 回の調査のデータを平均して用いた。図中の曲線は各項目の 12 ヶ月移動平均を示し、直線は 12 ヶ月移動平均したデータをもとに最小二乗法により求めた回帰直線を示す。また、コックス・スタートの検定を用いて、危険

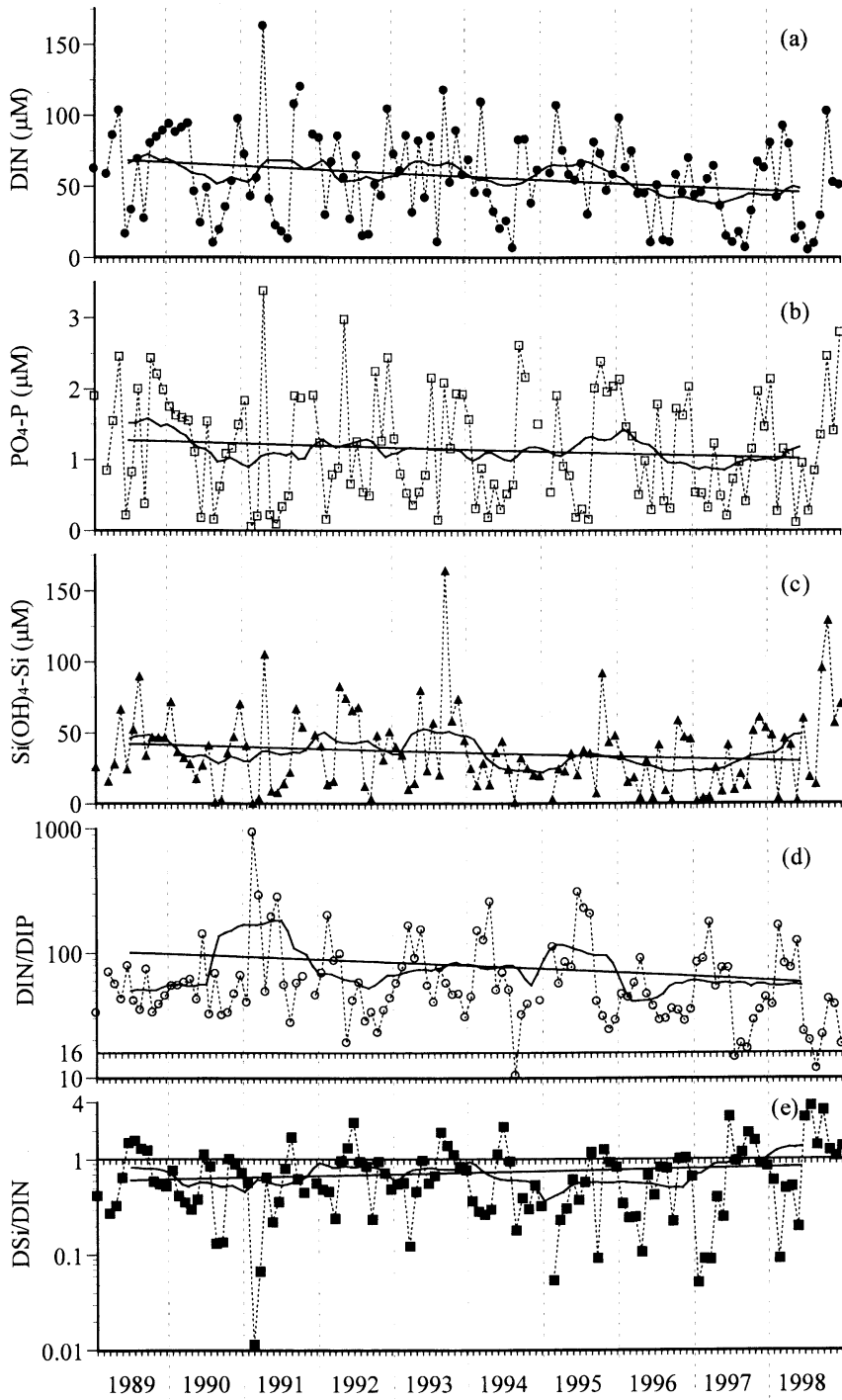


Fig. 7. Yearly variation of surface DIN (a), $\text{PO}_4\text{-P}$ (b), $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ (c), DIN/DIP ($\text{DIP}=\text{PO}_4\text{-P}$) (d) and DSi/DIN ($\text{DSi}=\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$) (e) at station F3 in Tokyo Bay from January 1989 to December 1998. Curve lines denote 12-months running mean during 1989 to 1998. Straight lines denote the trends for 1989 to 1998 calculated by least-squares method.

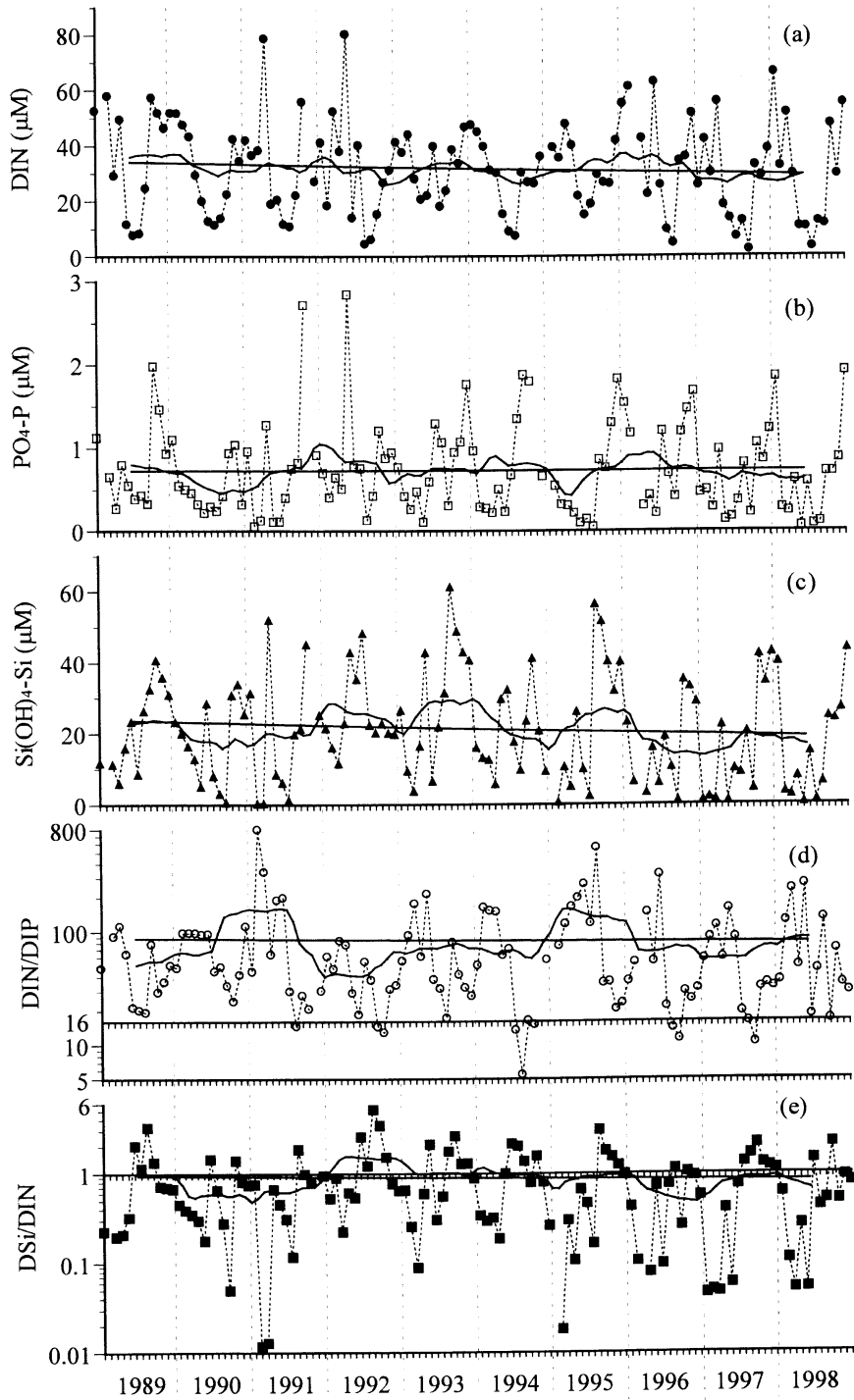


Fig. 8. Yearly variation of surface DIN (a), $\text{PO}_4\text{-P}$ (b), $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ (c), DIN/DIP (DIP= $\text{PO}_4\text{-P}$) (d) and DSi/DIN (DSi= $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$) (e) at station F6 in Tokyo Bay from January 1989 to December 1998. Curve lines denote 12-months running mean during 1989 to 1998. Straight lines denote the trends for 1989 to 1998 calculated by least-squares method.

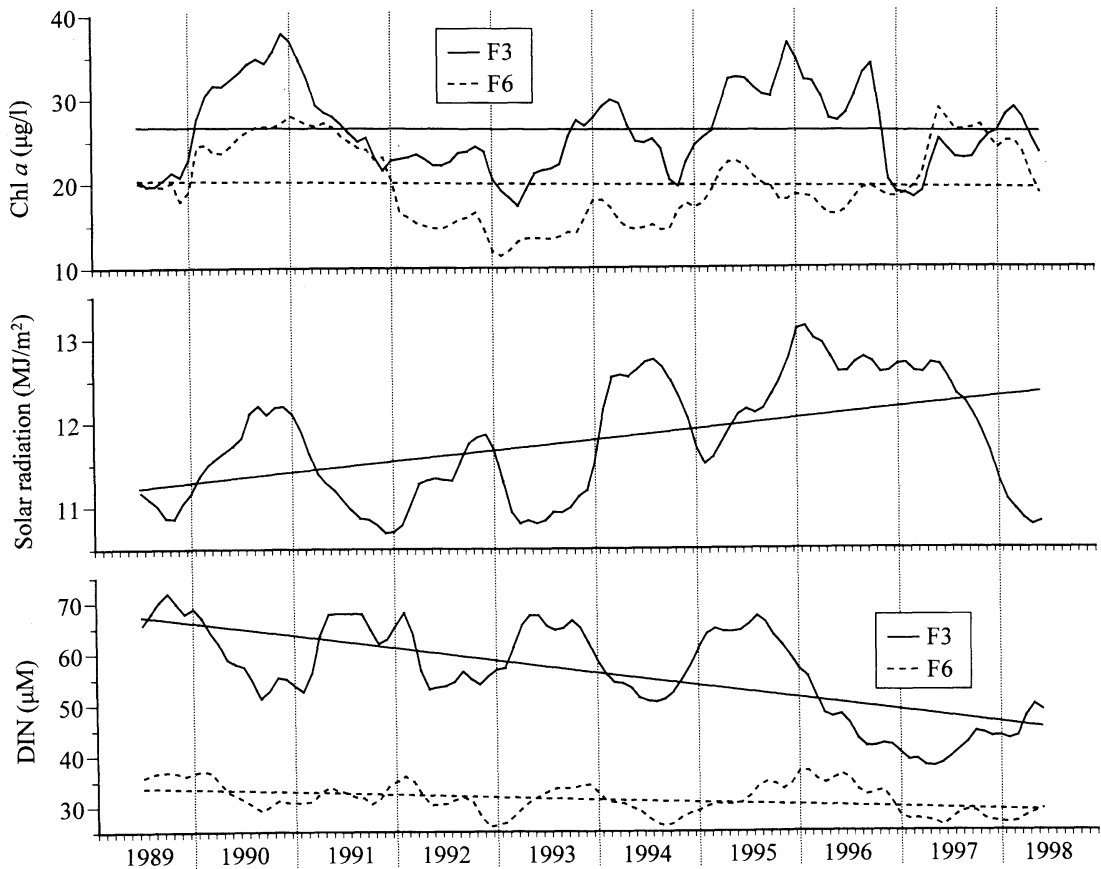


Fig. 9. Time series of 12-months running mean of surface Chl *a* at station F3 and F6 (top), solar radiation at Tokyo (middle) and surface DIN at station F3 and F6 (bottom) from 1989 to 1998. Straight lines are the trends for 1989 to 1998 calculated by least-squares method.

率 $\alpha = 0.05$ として上昇、下降のトレンドの有無を調べた。その結果、Sta. F3 の DIN, $\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$, DIN/DIP 比および Sta. F6 の $\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$ について減少の傾向が有意に認められた。

Sta. F3 の DIN/DIP 比が減少したのは DIN が減少したためと考えられる。しかし DIN/DIP 比は下がったとはいえ、調査期間を通じて Readfield 比の 16 よりも高い値を示すことがほとんどであり、また、先に述べたように DIN は枯渇することはなく、依然として高い濃度レベルで存在しているといえる。

DSi/DIN 比には両測点ともに 10 年間を通して、トレンドが認められなかった。Sta. F6 の DIN 濃度についても統計的に有意ではなかったが若干減少の傾向が認められたことから、DIN, $\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$ 濃度がともに下降したことが原因である。

KAWABE and KAWABE (1997b) は 1980-1989 年にかけての 10 年間で東京湾における COD の濃度は減少したことを報告しており、その理由は全天日射量が減少し

植物プランクトンの増殖が抑えられたためであると述べている。また、植物プランクトンによる摂取量の低下により、湾内の DIN 濃度が増加したと述べている。本研究の結果では 1989-1998 年にかけて、DIN 濃度が Sta. F3 では有意に減少し、Sta. F6 では統計的に有意ではなかったがわずかながら減少する傾向が見られた。本研究では COD については調査していないが、KAWABE and KAWABE (1997a) によれば、東京湾では COD と Chl *a* 濃度との間には相関係数 $r = 0.80$ と高い相関があることがわかっているため、1989-1998 年にかけての Chl *a* 濃度と全天日射量について調べてみた。全天日射量のデータは「気象要覧」の東京における各月の平均全天日射量(気象庁, 1989-1998)を用いた。結果を Fig. 9 に示す。また、Fig. 7, 8 同様に 12 ヶ月の移動平均、回帰直線を求め、トレンドの有無の検定を行った。全天日射量は 10 年間で増加しており、有意に上昇傾向が認められた。しかし、Chl *a* 濃度については横ばいで変動は認められず、DIN 濃度が減少した理由について、植物プランク

トンの増減から説明することはできなかった。DIN 濃度減少の理由としては下水道の普及や污水处理場の能力の向上などが考えられるが、はっきりとした原因については現在のところ不明である。

Si(OH)₄Si 濃度は両測点とも有意に減少傾向が認められた (Fig. 7, 8)。野村 (1995) は 1990 年まで東京湾の Si(OH)₄Si 濃度が減少した理由として、埋め立てにより砂浜から海域への供給が減少したこと、ダム建設によりダム湖内の珪藻に消費されること、河川改修により川底からの溶出が減少したことなどを挙げている。1989 年以降東京湾岸での埋め立てや流域での河川工事がどの程度行われたか、本研究では調べていないが、Si(OH)₄Si 濃度が減少した理由の 1 つであると考えられる。

2000 年度から 2004 年度に向けて、第 5 次水質総量規制が実施されており、規制項目として従来の COD に加えて新たに N, P が追加された。N, P 流入負荷の削減が東京湾の栄養塩濃度にどのように反映するのか、今後の動向を調べて行きたい。

4. 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、東京水産大学浮遊生物学研究室の田中祐志助教授、丸山隆助手、野村英明博士 (現、東京大学海洋研究所) には貴重なご助言を頂いた。東京水産大学浮遊生物学研究室ならびに生物海洋学研究室の学生各位には観測、試料の採取、分析に関して甚大なるご助力を得た。東京水産大学研究練習船「青鷹丸」の歴代船長および乗組員の方々、実習艇「ひよどり」の乗組員の方々には観測および試料の採取に関して多大なるご協力を頂いた。財団法人電力中央研究所の今村正裕氏には栄養塩試料の一部の採取、分析および文献の収集にご協力頂いた。以上の方々に篤くお礼申し上げます。

文 献

- 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.
- CONLEY, D. J. and T. C. MALONE (1992): Annual cycle of dissolved silicate in Chesapeake Bay: implications for the production and fate of phytoplankton biomass. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **81**, 121-128.
- DEL AMO, Y., B. QUEGUINER, P. TREGUER, H. BRETON and L. LAMPERT (1997): Impacts of high-nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. II. Specific role of the silicic acid pump in the year-round dominance of diatoms in the Bay of Brest (France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **161**, 225-237.
- EGGE, J. K. and D. L. AKENES (1992): Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **83**, 281-298.
- 風呂田利夫 (1988): 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について. 沿岸海洋研究ノート, **25**, 104-113.
- 神山孝史・辻野 睦・玉井恭一 (1998): 夏季成層期の播磨灘海底における栄養塩類溶出量. 南西水研報, **31**, 33-43.
- 環境庁水環境研究会編 (1996): 内湾・内海の水環境. 須藤隆一・環境庁水質保全局水質規制課監修, ぎょうせい, 東京, 365pp.
- KAWABE Mi. and M. KAWABE (1997a): Temporal and spatial characteristic of chemical oxygen demand in Tokyo Bay. *J. Oceanogr.*, **53**, 19-26.
- KAWABE Mi. and M. KAWABE (1997b): Factors determining chemical oxygen demand in Tokyo Bay. *J. Oceanogr.*, **53**, 443-453.
- 気象庁 (1989-1998): 気象要覧 1172-1195号
- KOROLEFF, F. (1983): Chapter 9.7, Determination of silicon, *In* Methods of seawater analysis, GRASSHOFF, K. M., EHRHARDT K., KLEMING (eds.) Verlag Chemie, Weinheim.
- MURPHY, J. and J. P. RIELY (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, **27**, 31-36.
- 野村英明 (1995): 東京湾における水域環境構成要素の経年変化. *La mer*, **33**, 107-118.
- 野村英明・吉田 誠 (1997): 東京湾における近年の植物プランクトンの出現状況. *La mer*, **35**, 107-121.
- OFFICER, C. B. and J. H. RYTHER (1980): The possible importance of silicon in marine eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **3**, 83-91.
- REDFIELD, A. C., B. H. KETCHUM and F. A. RICHARDS (1963): The influence of organisms on the composition of seawater. *In* The Sea, Vol. 2., HILL, M. N., Interscience publ., New York. p.26-77.
- 才野敏郎 (1985): 河口・沿岸海域における栄養塩類の動態. 沿岸海洋研究ノート, **23**, 88-103.
- 佐々木克之 (1991): プランクトン生態系と窒素・リン循環. 沿岸海洋研究ノート, **28**, 129-139.
- STRICKLAND, J. D. H. and T. R. PARSONS (1972): A Practical Handbook of sea Water Analysis, 2nd ed. *Fish. Res. Bd. Canada Bull.*, 311pp.
- SUZUKI, R. and T. ISHIMARU (1990): An Improved Method for the Determination of Phytoplankton Chlorophyll using N, N-Dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 190-194.
- 高田秀重 (1993): 流入負荷. 東京湾, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京. P. 54-58
- Technicon method (1978): No. 154-71 W/B.
- TSUNOGAI, S. and Y. WATANABE (1983): Role of dissolved silicate in the occurrence of a phytoplankton bloom. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **39**, 231-239.
- 宇野木早苗・岸野元彰 (1977): 東京湾の平均的海況と海水交流. Technical Report of the Physical Oceanography Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Reserch, No. 1, 89pp.
- YAMADA, S. S. and C. F. D'ELIA (1984): Silicic acid regeneration from estuarine sediment cores. *Mar.*

- Ecol. Prog. Ser., **18**, 113-118.
- 山口征矢・柴田佳明 (1979): 東京湾における基礎生産の現況. 沿岸海洋研究ノート, **16**, 106-111.
- 山口征矢・有賀祐勝 (1988): 東京湾における基礎生産の変遷. 沿岸海洋研究ノート, **25**, 87-95.
- 山口征矢 (1999): 植物プランクトンの一次生産. 月刊海洋, **31**, 470-476.
- YU Jing-shan, T. ISHIMARU, M. MURANO, A. OTSUKI (1994): Some improvements in the salicylate-dichloroisocyanurate method for the determining ammonia in seawater. La mer, **32**, 119-122.
- 魚 京善 (1994): 東京湾の海洋環境と生態系モデル. 東京水産大学平成六年度博士論文. 56pp.
- 魚 京善・石丸 隆・小池義夫・峰 雄二・栗田嘉宥 (1995): 東京湾における栄養塩類濃度の季節変動. Journal of Tokyo University of Fisheries, **82**, 33-44.

受付 2000年8月10日

受理 2000年10月15日