

## 新たな多層採水法による東京湾湾奥部の 栄養塩鉛直濃度分布調査結果について

安藤 晴夫 山崎 正夫 鯉淵 幸生\* 小倉 久子\*\*  
(\*東京大学工学部 \*\*千葉県水質保全研究所)

### 要 旨

沿岸海域や湖沼の水質調査で、多層の水を簡便にしかも精度良く同時に採取できる新たな方式の採水器を開発し、この採水器を用いて東京湾湾奥部の3地点（東京灯標、千葉灯標、京葉シーバース）で約半年間にわたり栄養塩の鉛直濃度分布を観測した。その結果から、東京灯標ではりん酸性りん（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）やアンモニア性窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）の濃度は、表層と底層で高い傾向が認められ、河川からの流入負荷と海底からの溶出の影響が大きいことが示唆された。更に調査結果から、表層と底層の上下2層平均値と、全層平均値を計算し、比較検討した。その結果、東京灯標では、上下2層平均値が全層平均値に比べて大きな値となり、表層と底層のみの観測では、栄養塩の現存量を正確に把握することが困難であるが、千葉灯標と京葉シーバースでは、両者が比較的良く一致し、2層平均値に代表性のあることが明らかになった。

キーワード: 東京湾、栄養塩、鉛直濃度分布、多層採水器

### 1 はじめに

荒川や多摩川、江戸川などが流入する東京湾の湾奥部では、水温や塩分濃度の違いにより河川水と海水が混合しにくく、成層構造が形成されやすい。さらに、表層付近での植物プランクトンの増殖や海底での栄養塩類の溶出などの影響により、上下層間で水質変化が大きいことが知られている<sup>1-4)</sup>。

筆者らは、東京湾における負荷量削減対策等の効果を明らかにするために、湾内の栄養塩現存量を把握し、その変遷を明らかにすることを試みている。

海水中の物質量を求めるためには、地点毎に上層から下層までの濃度を積算する必要があり、特に上下層で濃度の変化が大きい場合には、より詳細な鉛直濃度分布のデータが必要になる。しかし、過去に数多くの水質調査が実施されてきた東京湾でも、栄養塩など採水・分析が必要な水質項目については、上下2層以外のデータは、ほとんど報告されておらず、現存量の正確な把握を困難なものにしている。

これまで栄養塩等の多層観測が行われなかった大き

な理由としては、水深が10~30m程度の浅海域で簡便にしかも精度良く採水できる方法がなかったことが挙げられる。実際、筆者らも当初は北原式採水器を反復使用して多層採水を試みたが、位置精度と労力を考慮して、この方法を断念した。しかし、研究を進める上では多層での水質測定が不可欠であるため、採水方法について検討し、新たに同時多層採水器を開発した。ここではこの採水器について述べるとともに、これを用いて東京湾湾奥部の3地点で行った栄養塩の採水調査結果について報告する。

### 2 従来の採水方法

東京湾などの沿岸海域で下層の海水を採取する場合には、バンドン採水器や北原式採水器がよく使用される。これらの採水器では1回に0.5~10ℓ程度の水を採取することができ、浮遊物質（SS）やクロロフィル濃度の測定など、比較的多量の試料水を必要とする調査には適した方法である。しかしこれらの採水器を用いて多層採水を行う場合には、次のような問題点があった。

① これらの採水器では1回の操作で1層の試料しか採水できず、多層の水を採取するためには採水操作を反復する必要がある。しかし、採水器自体が比較的重いため、採水回数が多くなると多大な労力と時間がかかり、特に水深が大きな地点や船舶が頻繁に往来する水域での多層採水は困難である。

② 反復操作で多層採水を行うため、各層の採水時点が異なる。したがって、風や流れの影響で調査船の位置を完全に固定することが困難な海域では、採水操作の度毎に、採水地点が少しずつ移動し、水質の違いが鉛直方向の位置変化によるものか、水平方向の位置変化によるものかがはっきりしない恐れがある。

③ 海域では、採水器が流れの影響で浮上しやすい。このため水面下に投入したロープの長さで、設定水深の試料水を採取することが難しい。例えば、25mのロープに接続された採水器が流されて、20度傾いた場合には約1.5m、30度では約3.3mも採水器が浮上していることになる。しかもこうした状況は時々刻々と変化し、採水を繰り返す度にその影響の程度も異なるため、水深を順次変えて採水を行っても、水深の差が小さい場合には実際の採取水深が逆転してしまう恐れがある。

### 3 同時多層採水器の仕組みと操作方法

今日では、栄養塩などに項目を限定すれば、数m<sup>3</sup>の試水量でも分析が十分可能である。そこで採水量は数10m<sup>3</sup>と少ないが、精度良く簡便に多層採水ができるような方法を念頭において、新たな同時多層採水器（以下、SMD採水器：Simultaneous Multi-Depthと記す）を開発した。

#### (1) 採水器の構成

SMD採水器の主要部分は、図1に示すような採水セルを複数個ロープで直列に連結したものである。

各採水セルは市販の容量100m<sup>3</sup>のポリプロピレン（以下「PP」と記す）製ディスポーザブル注射器を改造して作成したもので、注射器の原理で、ピストンとシリンダのそれぞれに取り付けられたロープが逆向きに引かれた時に内部に試料水が吸引採取される。ただし、設定水量の試料水が吸引されると、ピストンの動きを止め、シリンダから外れないようするために、PP製の枠を取り付けた。また、各採水セルのピストン部上端には、ロープのよじれを解消するために、より戻しを取り付けた。

なお、後述のように、採水セルのピストンは、投入

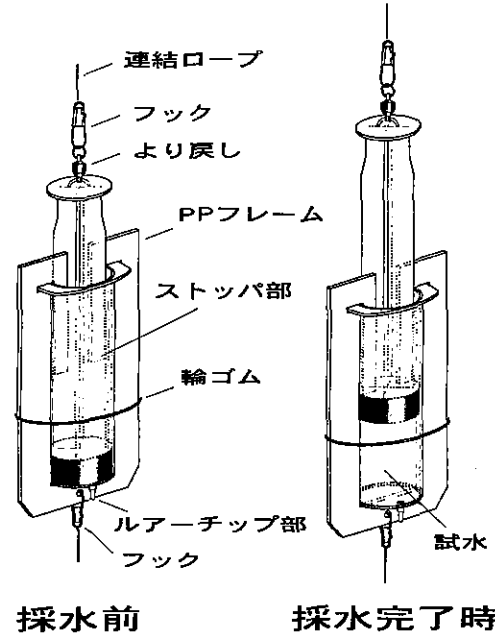


図1 同時多層採水器の仕組み

時には動かず、錘の荷重をかけた時点ではじめて動くことが必要である。このため、目標水深の水をうまく採取するためには、採水セルのピストン、シリンダ間の摩擦の大きさが重要になる。摩擦が小さいと、採水セルの投入時に、空気や他の層の水を吸引する恐れがある。逆に摩擦が大きすぎるとピストンが動きにくくなり、採水ができないことがあるからである。市販のPP製注射器では、シール部に潤滑処理が施されているため、ピストンの摩擦が小さいものがある。その場合には、シリンダ部をガラス器具用の丸ブラシでこすって、摩擦の大きさを調整した。

#### (2) 採水方法

採水は以下に述べる手順で行った（図2）。

#### (1) 投入 (2) 採水 (3) 回収

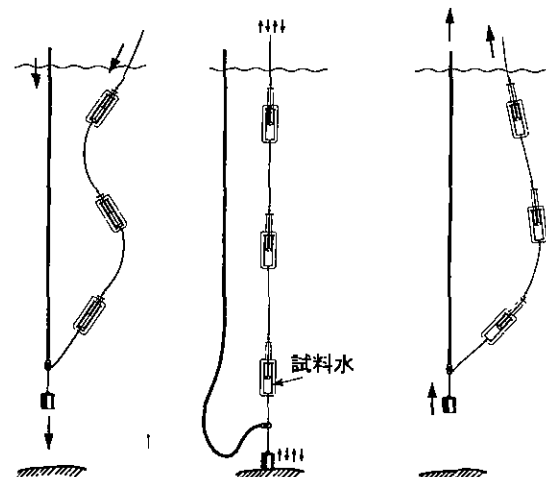


図2 同時多層採水器による採水手順

① 直列に連結した採水セルの最下端のロープを鉛製錘（約5kg）に接続する。

② 錘を別のロープで吊るして、船からゆっくりと水面下に降ろし、それと同時に、錘に連結された下層の採水セルから順番に、採水セルの連結ロープに張力をかけないようにたるませた状態で順次水面下に投入する。錘の降ろし方が速すぎると、採水セルが水の抵抗を受け、ピストンに張力がかかるので、注意が必要である。

③ 錘が着底したら、採水セルに接続したロープを錘の重量を感じるまで引き上げ、その後5～6回小刻みに上下させてから錘の重量をかける。これによって各層の採水セル内に試料水が吸引される。

④ ロープで錘を引き上げるのに合せて上層の採水セルから順番に船上へ回収する。

### (3) SMD採水器の利点

この採水器には、以下の様な利点がある。

① 多層の水を同時に採取できるため、完全に同一地点の試料水が得られる。

② 流れなどの影響をうけてロープが傾いた場合でも各採水セルの位置関係は変わらないため、水深の順序通りの試料水を得ることができる。

③ 採水に要する時間は、採水層数が多くてもあまり変わらず、錘が着底するまでの時間（水深にもよるが25mでも1～2分間）と、その後、錘の荷重をかけて各採水セルに試料水を吸引するための時間（1分間程度）で完了する。

④ 採水セルの着脱が容易なため、様々な長さの連結用ロープを用意しておくことにより、調査地点の状況に応じて水深や水深間隔を変えた採水ができる。

⑤ 採水セルに利用した注射器の針取り付け部（ルーアチップ部）に、市販のディスポーザブルメンブランフィルターユニット（東洋ろ紙製DISCMIC等）を取り付けることができるため、採水現場で直ちにろ過することも可能である。

⑥ 採水セルのルーアチップ部にキャップをすれば、採水セルを容器として試料水をそのまま実験室に持ち帰ることができる。

⑦ 多数の採水セルを水平方向に配置し両端からピストンを引くような方法で採水することにより、河川や湖沼などで水平濃度分布を調査する場合などにも使用できる。

### (4) 採水の誤差

SMD採水器は採水セルが直列に連結されているため、ある採水セルのピストンが移動し試料水が採取されると、それより上層にある採水セルの位置が上昇する。容量100m<sup>l</sup>の採水セルに50m<sup>l</sup>採水した場合のピストンの移動距離は約5cmで、21層では最上層の採水セルの位置は、当初の位置から最終的には1m上昇することになる。ただし、どの層の採水セルのピストンが先に移動したかによって各採水セルへの影響は異なり、最上層の採水セルの場合の採水深の誤差は0～1mの範囲にあると考えられる。この他、錘によって着底を判断しているため、浮泥層が厚い場合には、音探により測定された水深と異なる可能性がある。

この採水器では採取水深に関してこうした誤差要因が考えられるため、採取水深の精度を考慮して、採水セル数や採水量、各層の採水セルの配置を決定する必要がある。例えば、表層付近についてはより精度良く採水したい場合などには、水深より短く採水セルを連結し、最上層の採水セルの位置を固定しておき、錘をゆっくり降ろして、採水セル側のロープに荷重をかければ、上層ほど位置変化の小さい採水ができる。

この他、調査船のスクリューによる下層水の巻き上げや錘の着底による浮泥の巻き上げなども考慮して、採水操作の開始時間を決めることも重要である。

## 4 栄養塩鉛直濃度分布調査結果

SMD採水器を使用して東京湾で行った栄養塩濃度の調査結果について次に述べる。

### (1) 調査方法

1999年4月～9月に東京湾の湾奥部に位置する東京灯標（St.T）、千葉灯標（St.C）、京葉シーバース（St.K）の3地点（図3）で計11回の調査を行った。このうちSt.Tは、東京都の環境基準点St.25に近いが、灯標にもっと隣接した地点で、水深はSt.25の約15mより浅く10m以下である。St.Cは湾最奥部の東岸に位置し、水深は約10mである。St.Kは湾の中央部に位置し、水深は約20mで、他の2地点に比べて約2倍である。

SMD採水器を用いて、水深間隔約1.5m、各層約60m<sup>l</sup>ずつの海水を採取し、一部をポリビンに分取した後、採水セルに直接カートリッジ式フィルター（アセチルセルローズ製、孔径0.45 $\mu$ m）を取り付け、船上で直ちにろ過を行った。なお、表層水は同時にバケツで採取

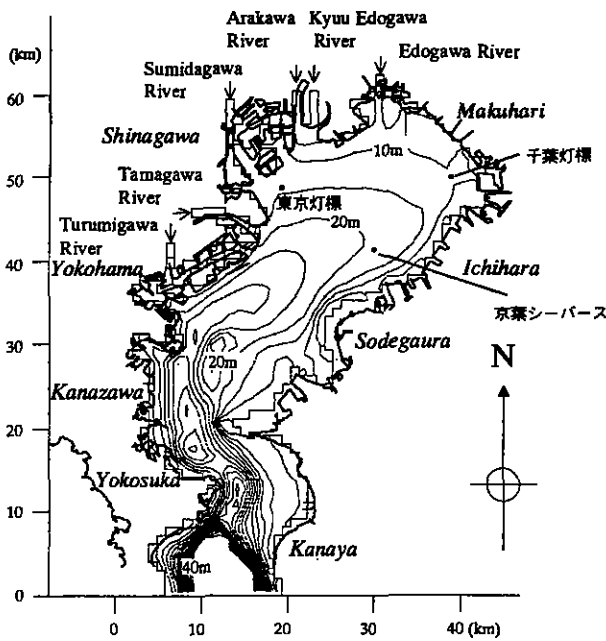


図3 調査地点図

した。

試水を入れたポリビンは、クーラーボックスに入れて実験室に持ち帰り、オートアナライザ（プラン・ルーベTRAACS-800）でNO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P濃度を測定した。

(2) 結果と考察

ここでは、公共用水域の水質測定結果などの既存の上下2層データを使用して現存量を推定する場合に、どの程度の推定誤差が見込まれるかを中心に検討した。

ア 鉛直濃度分布の特徴

図4~6は、それぞれ調査地点における各調査日（京葉シーバースの図中右上）のNO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-Pの鉛直濃度分布を示したものである。

NO<sub>3</sub>-Nは、St. Tでは常に表層の濃度が高く、下層に行くほど低下する傾向が認められた。特に調査前に多量

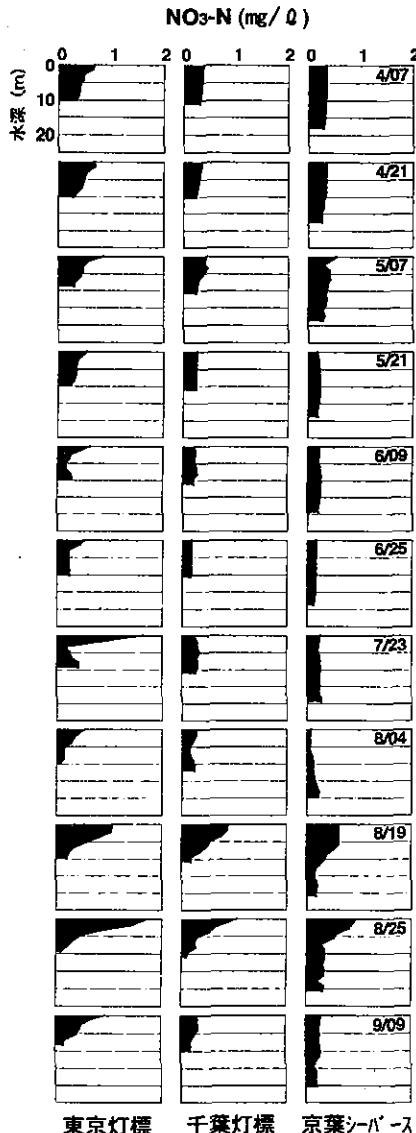


図4 NO<sub>3</sub>-Nの鉛直濃度分布変化

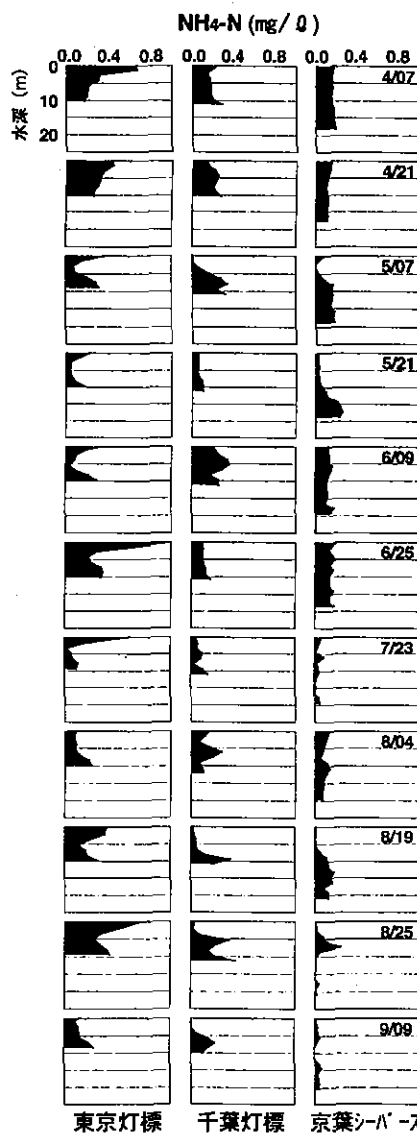


図5 NH<sub>4</sub>-Nの鉛直濃度分布変化

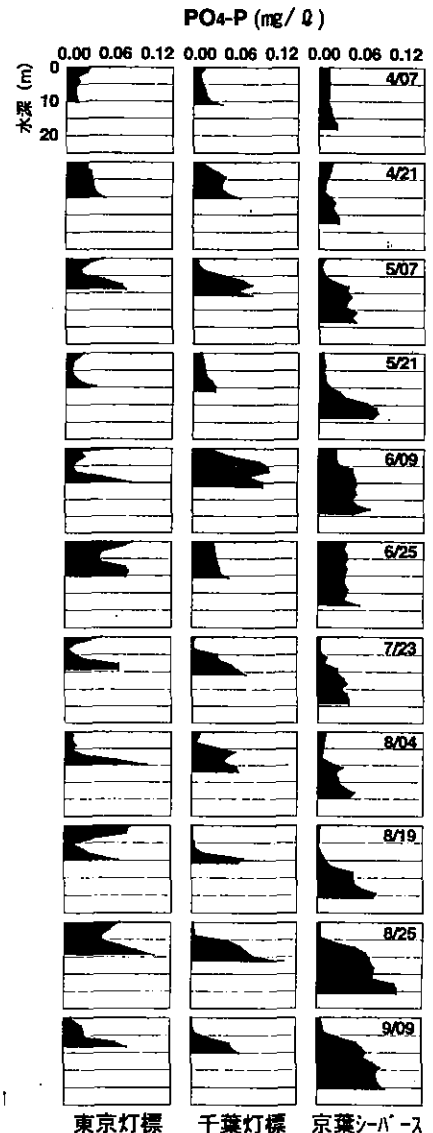


図6 PO<sub>4</sub>-Pの鉛直濃度分布変化

の降雨があった7月23日、8月19、25日にその傾向が極端に強くなっていた。一方、St.CおよびSt.Kについては、8月4日までは、表層から底層まで、あまり濃度の変化が認められないが、8月中旬の大雨の後はSt.Tと同様に、表層の濃度が高い傾向を示した。

以上の結果から、NO<sub>3</sub>-N濃度は、主に河川水の影響を強く受け、St.Tでは、晴天時でもその影響が認められるのに対して、St.CとSt.Kでは大雨の場合以外は、河川水の影響が非常に小さいと考えられる。

NH<sub>4</sub>-Nは、St.Tでは表層と底層の濃度が高い傾向が認められた。表層は、河川水の影響、底層は堆積物からの溶出で濃度が高くなっていると考えられる。St.Cでは、表層の濃度が低く、底層で濃度が高い傾向が認められるが、5m層付近でも濃度が高くなる場合が多く、濃度

分布はより複雑である。このように濃度分布がジグザグの場合には、採水ミスが疑われるが、NO<sub>3</sub>-Nの濃度分布は比較的滑らかな曲線を描いていることから、その可能性は小さいと考えられる。St.Kでは、5月7日に下層ほど濃度の高い状況が認められるが6月までは全般的に濃度が高く、表層から底層まで濃度が一定している場合が多い。これに対して7月以降では濃度が全般的に低下し、8月は、調査の度毎に濃度分布の状況が変化した。

PO<sub>4</sub>-Pの濃度分布は、St.Tでは、NH<sub>4</sub>-Nと同様に表層と底層の濃度が高い傾向を示しているが、特に底層の濃度の上昇が顕著であった。St.CもNH<sub>4</sub>-Nの分布と類似しているが、底層の濃度の上昇がやはりNH<sub>4</sub>-Nに比べて大きかった。一方、St.Kでは、6月まではNH<sub>4</sub>-Nの分布と類似性が認められるがそれ以降は下層ほど濃度が高

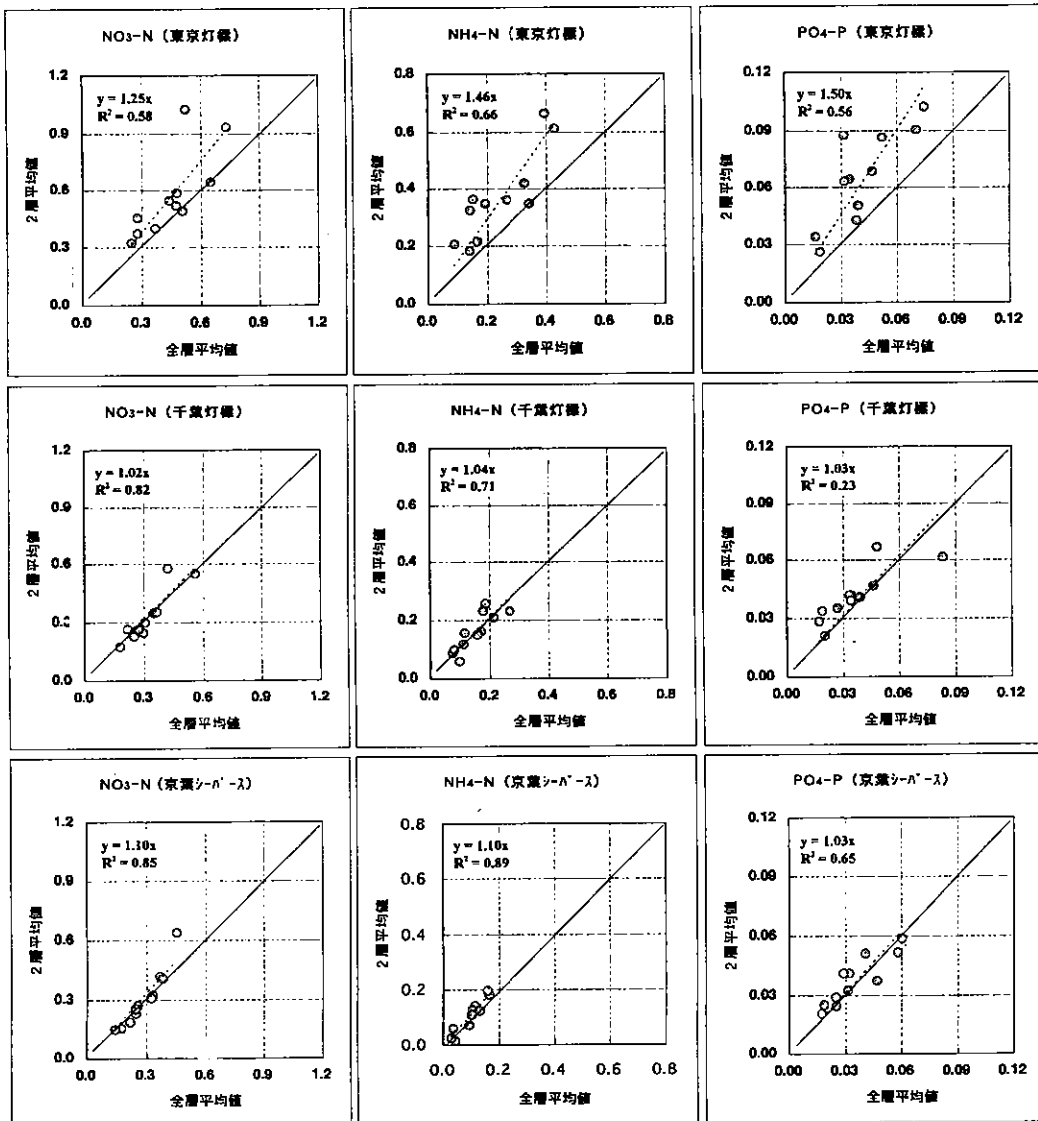


図7 上下2層平均値と全層平均値の比較

くなり、NH<sub>4</sub>-Nの濃度が低下したのと対照的な変化を示した。

こうした栄養塩の鉛直濃度分布の地点による特徴は、河川水の流入や底泥からの溶出、プランクトンによる吸収同化などの要因で決まると考えられるが、詳細な検討結果についてはここでは省略する。

#### イ 上下2層データの代表性の検討

物質の現存量は、水深毎の濃度の積算値、あるいは全層平均濃度と水深との積として計算される。そのため、現存量を正確に算定するためには、地点毎に濃度の全層平均値が必要となる。したがって、実際に多層での観測データがあれば、現存量は直接計算することができる。しかし、データが表層と底層の上下2層データしかない場合には、その2層データから全層平均値を推定せざるを得ない。

そこで、今回の栄養塩の鉛直濃度分布調査結果から地点・項目毎に表層と底層の上下2層平均値と全層平均値とを計算し、両者を比較検討した。図7は、各地点項目毎に、毎回の調査結果から計算した全層平均値を横軸に、2層平均値を縦軸にプロットしたものである。また、図中の回帰式の係数は、全11回の調査結果について2層平均値が全層平均値の何倍であるかを示した値で、例えば $y=1.25x$ の場合は、2層平均値が全層平均値の1.25倍であることを意味している。したがって、全層平均値がその時点の真の状況を表しているとすれば、この値が1に近いほど、2層平均値の代表性が高いと考えられる。図7によれば、千葉灯標と京葉シーバースでは、概ねどの項目も回帰係数は1に近く、2層平均値の代表性が高いことを示している。しかし、東京灯標では、各調査日とも2層平均値が全層平均値に比べて高く、回帰係数も1.25~1.50と大きな値になっている。このことは、図4~6で表層と底層の濃度が中層に比べて高く、2層のみの調査では、その地点の現存量を過大に評価する可能性があることを示唆している。

こうした推定誤差は、地点や季節による変化が大きいと予想される。したがって、今後、N、Pなどの現存量推定の精度を上げるためには、多層での観測データを更に蓄積し、鉛直濃度分布の時空間特性を明らかにすることが重要である。

## 5 おわりに

東京湾では、CODの環境基準が十分達成されない状

況にあるため、平成12年度に中央環境審議会において、新たにN、Pを規制対象項目に加えた第5次総量規制の実施が答申された。こうした背景から、東京湾でも水質汚濁状況を水質汚濁物質の濃度としてだけでなく量的に把握することが求められ、そうした点からも、水質汚濁物質の鉛直分布状況を明らかにすることが重要になっている。

これまでに東京湾で採水調査にSMD採水器を用い、海域の水質鉛直濃度分布観測に非常に有効であることが分かった。この方法はまた、湖沼や河川感潮域など、同様に鉛直方向の濃度変化が大きい水域で調査に使用すれば、これまでにない詳細なデータが得られると期待される。

平成12年度からは、東京湾全域の栄養塩現存量を推定するため、この採水方法を用いて東京湾岸の自治体と共同で調査を行なっている。

なお、SMD採水器は、“同時多層採水器”として、平成11年12月に特許を出願した（特願平11-376977）。

## 謝 辞

採水器の製作については、基盤研究部の青木一幸氏に多くの有益な助言を頂いた。また、採水器をテストするための調査にあたっては、東京都環境保全局水質監視課海域監視係の皆様と応用研究部の木村賢史氏（現基盤研究部）に多大なご協力を頂いたことをここに記し、感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小倉久子, 飯村晃, 相坂清子(1996) 東京湾における栄養塩類等の鉛直分布, 第30回日本水環境学会年会講演集(平成8年), p.314.
- 2) 日本海洋学会(1985) 第9章 東京湾, 日本全国沿岸海洋誌, p.353-356, 東海大学出版会.
- 3) 貝塚爽平編(1993) 東京湾の地形・地質と水, p.151-157, 築地書館.
- 4) 須藤隆一, 環境庁水質保全局水質規制課(1996) 第2章 内湾・内海の水質汚濁メカニズム, 内湾・内海の水環境, p.7-56, ぎょうせい.