<論 文>

東京湾における溶存性無機態窒素およびリンの空間濃度分布の季節別特徴

二 宮 勝 幸* 柏 木 宣 久**
安 藤 晴 夫*** 小 倉 久 子°

Seasonal Characteristics of Spatial Distributions of Dissolved Inorganic Nitrogen and Phosphorus in Tokyo Bay

Katsuyuki NINOMIYA*, Norihisa KASHIWAGI**,
Haruo ANDO*** and Hisako OGURA°

* Yokohama Environmental Research Institute, 1-2-15, Takigashira, Isogo-ku, Yokohama 235 Japan

** The Institute of Statistical Mathematics, 4-6-7, Minamiazabu, Minato-ku, Tokyo 106 Japan

*** The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection, 1-7-5, Shinsuna, Kohtoh-ku, Tokyo 136 Japan

° The Chiba Prefectural Laboratory of Water Pollution, 3-5-1, Inagekaigan, Mihama-ku, Chiba 261 Japan

Abstract

Seasonal characteristics of the spatial distributions of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in Tokyo Bay were revealed by applying statistical methods to the monitoring data obtained at 41 observation points every month from April 1985 to March 1990.

In the surface layer, the concentrations of the three nutrients were always high near the mouths of the big rivers which are located at the head and the west coast of the bay, and those were low at the mouth of the bay. The difference between the concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$ at the mouths of the rivers and those at the offing was relatively larger during spring to autumn comparing with that in winter, and difference in $\text{NH}_4\text{-N}$ was largest in spring. At the offing of the mouth of the R. Tama and at the southwestern part of the bay, the concentration of $\text{PO}_4\text{-P}$ became lower comparing with those at their circumferences.

On the other hand, in the bottom layer, the concentration of the three nutrients were always high at the northern part of the bay where the Shallows lie. The concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ in summer and in autumn were lower than those in the other seasons. That of $\text{PO}_4\text{-P}$ took its peak in August and in September, and it was higher than that in the surface layer.

Key words: Tokyo Bay, monthly distribution, seasonal characteristic, nitrogen, phosphorus

1. はじめに

閉鎖性海域の富栄養化防止対策として、1993年に窒素およびリンに係わる環境基準ならびに排水基準が設定され、また、1995年には東京湾、大阪湾の窒素およびリンに係わる環境基準の類型指定がなされた¹⁾。さらに、1995年度以降における第4次水質総量規制に当たった基本的な考え方のなかでも、より総合的な閉鎖性海域における水質保全対策を推進するため窒素・リンの汚濁負荷量の的確な把握等の検討を行う必要があるとしている²⁾。

このように東京湾の富栄養化防止のために様々な施策が実施されようとしているが、そのためにはまず東京湾における富栄養化の現状、特に栄養塩の空間濃度分布の季節毎の特徴を把握しておくことは重要である。

東京湾では、水質汚濁防止法に基づく公共用水域水質測定計画により、沿岸の自治体が測定地点を分担しほぼ湾全域について月1回の頻度で水質測定が実施されている。しかし、これらのデータを用いて東京湾の水質濃度分布を作成し、その季節毎の特徴を精度よく抽出することはむずかしい。なぜなら、これらのデータは一斉採水

* 横浜市環境科学研究所 〒235 横浜市磯子区滝頭1-2-15

** 文部省統計数理研究所 〒106 東京都港区南麻布4-6-7

*** 東京都環境科学研究所 〒136 東京都江東区新砂1-7-5

° 千葉県水質保全研究所 〒261 千葉市美浜区稲毛海岸3-5-1

データではないので、各自治体の担当する水域毎に異なる測定条件（気象や海況など）の影響が水質濃度分布に反映されてしまうからである³⁾。また、一斉採水データであったとしても、これら月1回のデータはその月のなかである程度の幅をもって変動している水質の一時期を捉えているのであり、必ずしもその月の水質を代表しているとは限らない。したがって、これらの問題を解決するためには、多年度にわたるデータに何らかの統計処理を行う必要がある。

著者らは、前報^{3,4)}で、東京湾内41地点の5年間の公共用水域水質測定結果に統計的手法を適用することによって、精度よく季節毎の水質濃度分布を作成できることを明らかにした。そして、水温、塩分、COD および溶存酸素 (DO) について空間濃度分布の季節別特徴を把握することができた。

これらの項目のなかでも、塩分は海域における栄養塩の挙動を把握する上で重要な項目である。すなわち、栄養塩を豊富に含む河川水は海域で海水と混ざり合い、その混合割合で規定される塩分濃度は河口から沖合いに向かって高くなり、栄養塩濃度は逆に低くなる⁵⁾。しかし、栄養塩は、保存成分である塩分とは異なり、海域で様々な変化を受けている⁶⁻⁹⁾。例えば、栄養塩は植物プランクトンへの取り込みにより溶存態から粒子態へ変化する。一方、粒子に取り込まれた栄養塩は沈降過程での分解や底泥からの溶出により新たに水系に供給される。窒素に関しては、硝化作用による形態変化や脱窒作用による水

系からの除去なども起こる。このような栄養塩の挙動は水温や DO などの変動と密接に関連しており、季節毎に特徴ある空間濃度分布を示すと考えられる。したがって、東京湾における栄養塩の挙動はこれらの項目と対比する

Fig. 1 Observation sites in Tokyo Bay

Fig. 2 Long-term variations of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ at the site of No. 30 in Tokyo Bay

ことによって、より正確に把握することができよう。

そこで、本報告では、東京湾における上下層の溶存性無機態窒素およびリンについて前報³⁾と同様な統計手法を適用し、それらの空間濃度分布の季節別特徴を、塩分などの結果^{3,4)}を参考にして検討した。

2. 解析方法

2.1 解析資料

次の東京湾の公共用水域水質測定結果^{10~12)}をデータベース化し解析に用いた。

期 間：1985年4月～1990年3月の毎月のデータ
(60回分の調査結果)

地 点：東京都7地点、神奈川県15地点、千葉県19地点の計41地点 (Fig. 1)

測定水深：上層は海面下0.5mの位置、下層は海底上1mの位置

項 目： $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$

2.2 統計処理方法

前報³⁾で示したように、各地点・各項目毎の時系列データは、統計的には、傾向変動成分、季節変動成分、および測定条件のばらつきに応じて一時的に変動する不規則変動成分からなるとみなすことができる。したがって、データから情報をよりの確に抽出するためには、季節変動と傾向変動を分離して推定し、同時に不規則変動を除去すればよい。具体的には、まず、各地点・各項目毎にベイズ型季節調整¹³⁾という時系列解析手法により不規則変動成分を除去し、各月の平均的な推定値を求めた。次に、各月の推定値から離散薄板補間¹⁴⁾により東京湾の水質濃度分布を作成した。

なお、用いるデータは5年間という比較的短い期間のものであるので、ここでいう傾向変動成分とは、太陽の黒点数の変化にともなう11年周期やエルニーニョ現象による数年周期など気象に由来する変動成分^{15,16)}、そして、東京湾への流入汚濁負荷量が下水道普及率や社会経済活動などの影響を受けて変化することに起因する人為的な変動

Fig. 3 Monthly distributions of salinity in surface layer in Tokyo Bay using estimated data

成分などが含まれていると考えられる。

Fig. 1 は、水質濃度分布を作成するために用いた東京湾の 1 km メッシュ図である。

3. 結果と考察

3.1 水質時系列とその季節調整モデル

各地点・各項目毎の時系列データにベイズ型季節調整を適用したところ、地点間の距離が近いほど季節変動のパターンが類似しており、また、変動の大きさは河口付近で大きく湾口部に向かって小さくなる傾向が認められた。この節では、淡水による塩分低下の影響を受け、比較的明確な季節変動を示す東京湾のほぼ中央部に位置する地点 (St. 30, 水深約 30m) を例として、その上下層における栄養塩の時系列の実測値と推定値の比較検討を行った。Fig. 2 に St. 30 における上下層水質の実測値と推定値の時系列を示す。

まず、 $\text{NO}_3\text{-N}$ についてみると、上層の実測値は不規則に変動しており、はっきりした季節変化は認められな

かったが、上層の推定値は 7 月に少し高くなる傾向を示した。7 月は梅雨期に相当しその時期の上層塩分が低かったことから³⁾、降雨に伴う淡水の影響を大きく受け、7 月の上層の $\text{NO}_3\text{-N}$ が比較的高濃度になったと考えられる^{17,18)}。また、下層の推定値は年毎に月毎に変動する実測値に比べて滑らかな変動となっており、冬季にやや高まる傾向が認められた。

次に、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、上層の実測値は冬季に高く夏季に低くなる傾向を示したものの、月毎の不規則な変動が大きかった。しかし、上層の推定値は 12 月から 5 月にかけて高くそれ以外の月は低くなる安定した季節変化を示した。

最後に、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、実測値は上下層とも年毎に月毎に不規則に変動していたが、その上層の推定値は 6 月前後に低く 12 月前後に高くなる季節変化を示し、その平滑化された季節変化パターンは毎年安定して表れていた。また、下層の推定値は上層とは逆に 8・9 月に高く冬季に低くなる安定した季節変化を示した。このよう

Fig. 4 Monthly distributions of $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) in surface layer in Tokyo Bay using estimated data

に $\text{PO}_4\text{-P}$ の上下層の濃度差は6月頃から9月にかけて大きくなったが、冬季の循環期になると濃度差はほとんどなくなった。

3.2 水質濃度分布の季節別特徴

本節では、測定地点毎に求められた推定値から、離散薄板補間¹⁴⁾により東京湾の水質濃度分布を作成し、上下層における季節毎の栄養塩濃度分布の特徴を塩分濃度分布を参考にして検討した。水質濃度分布を作成するために用いたデータは1987年度の毎月の推定値である。

3.2.1 上層

Figs. 3~6 に、上層における毎月の塩分、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度分布を示す。

(1) 塩分

ここでは、栄養塩濃度分布の特徴を検討する際の参考として、前報³⁾で示した塩分濃度分布の季節別特徴の概要を述べる。

上層の塩分は年間を通じて湾奥部から西岸沿いの江戸川、荒川、多摩川および鶴見川などの河口で低く、そこ

から沖合いあるいは湾口部に向かって高くなる傾向が認められた。春季から秋季にかけては河口域の塩分が特に低下し、この周囲で等塩分線は密になった。冬季の循環期には湾内全域で塩分は高くなり、等塩分線の間隔は広がった。等塩分線によれば、塩分が30以下の低塩分域は7~9月頃に最も沖合いに張り出し、冬季になると湾奥部河口方面に後退した。

一方、湾奥部の中央付近には春季から秋季にかけて周囲に比べ塩分の高い海域が形成される傾向が認められ、この原因として、その海域における複雑な還流の存在が考えられた。また、江戸川河口では7・8月の塩分濃度が他の月に比べてかなり低くなり、その付近の等塩分線は比較的密になった。淡水の影響がこの時期の江戸川河口で特に強まったためと考えられる。

(2) $\text{NO}_3\text{-N}$

上層の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は年間を通じて河口から沖合いに向かって低下する傾向が認められ、等濃度線は春季から秋季にかけて湾奥部西岸沿いで密に分布していた。また、

Fig. 5 Monthly distributions of $\text{NH}_4\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) in surface layer in Tokyo Bay using estimated data

この時期の湾奥部中央付近には $\text{NO}_3\text{-N}$ の低濃度域が出現する傾向が認められ、それは複雑な還流によって生じていると考えられる高塩分域とほぼ一致した。さらに、江戸川河口では7・8月の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が他の月に比べて高くなり、等濃度線が密になった。

年間を通して $\text{NO}_3\text{-N}$ と塩分の濃度分布を比較すると、6月を除き $\text{NO}_3\text{-N}$ と塩分の濃度分布は負の相関を示した。6月の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は荒川河口先で高く、逆に河口で低かった。一方、6月は東京湾全域で植物プランクトンの増殖活性が高まり、特に荒川河口先でCODの値はかなり高くなった⁴⁾。したがって、6月の $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布は植物プランクトンの異常増殖の影響で生じたとは考えにくく¹⁰⁾、その原因はわからなかった。

一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の等濃度線の位置の季節変化を詳細にみると、 $0.4\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の等濃度線を境にして異なる様相を示した。すなわち、 $0.4\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の等濃度線は湾奥部西岸沿いに分布し、その位置は年間を通じてあまり変わらなかったが、 $0.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上の等濃度線は冬季になると河

口に後退し、逆に $0.3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の等濃度線は沖合いに展開する傾向が認められた。

(3) $\text{NH}_4\text{-N}$

上層の $\text{NH}_4\text{-N}$ も上層の塩分の濃度分布と負の相関を示した。一方、それは上層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布と類似していたが、季節毎の等濃度線の分布状況や位置関係などについては異なる点が認められた。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の挙動は硝化作用による形態変化²⁰⁾など $\text{NO}_3\text{-N}$ と相互に密接に関連していることから、ここでは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の相違点について比較検討した。

相違点のひとつは、湾奥部西岸沿いの等濃度線は年間を通じて $\text{NO}_3\text{-N}$ より $\text{NH}_4\text{-N}$ のほうが密になっており、その傾向は特に11～5月に顕著であったことである。この分布の違いは、11～5月の河口での非常に高い $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に起因している。例えば、荒川河口の濃度を比べると、11～5月までは $\text{NH}_4\text{-N}$ は $\text{NO}_3\text{-N}$ に比べて2～4倍ほど高く、なかでも3月と4月の $\text{NH}_4\text{-N}$ は年最高値を示した。この理由として、冬季は硝化活性の低下

などにより相対的に $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度が高まり、早春は農業活動の開始時期に相当し施肥の影響が加わったことなどが考えられる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ も、4月頃の荒川河口などで濃度がやや高まっていた。

もうひとつは、上層の $\text{NH}_4\text{-N}$ の等濃度線は、上層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合のように $0.4\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の等濃度線を境にして異なる季節変化を示さず、冬季に最も沖合いに張り出していたことである。冬季には鉛直循環による混合の影響が沖合いまで及んでいたためと考えられ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の等濃度線の間隔は夏季に比べ冬季のほうがやや広がっていた。

そのほかの特徴として、6月の湾奥部や7・8月の江戸川河口における $\text{NH}_4\text{-N}$ は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合とは異なり、他の月と変わらない濃度分布を示したことが挙げられる。

(4) $\text{PO}_4\text{-P}$

上層の $\text{PO}_4\text{-P}$ も上層の塩分濃度分布と負の相関を示

したが、等濃度線の分布状況については違いが認められた。それは、4～10月に多摩川河口沖合い域の $\text{PO}_4\text{-P}$ がその周辺海域に比べて低濃度を示したことである。その $\text{PO}_4\text{-P}$ の低濃度域は湾奥部の中央付近に存在する高塩分域よりも少し北西寄りに偏っていたことから、外洋水以外の要因が影響していたと考えられる。この時期は植物プランクトンの盛んな増殖によってクロロフィル *a* 濃度が高くなり、特に多摩川河口沖合い付近で COD 濃度は比較的高くなった⁴⁾。したがって、この海域ではその周囲に比べ植物プランクトンによる $\text{PO}_4\text{-P}$ の取り込み量が大きかった可能性が高い。同様に、3～7月の横浜市南部沖合いでも $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度がその周囲に比べて低い海域が出現した。このような濃度分布の特徴は $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合には認められなかった。東京湾では一般に上層水中の N/P 比が植物プランクトンの取り込みの N/P 比よりも大きいことが報告されている¹⁷⁾。したがって、植物プランクトンが必要とする $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$

Fig. 7 Monthly distributions of salinity in bottom layer in Tokyo Bay using estimated data

-N は $\text{PO}_4\text{-P}$ よりも相対的に過剰にあり, $\text{PO}_4\text{-P}$ の消費される割合が大きいいため, こうした海域が出現したと考えられる⁶⁾。

3.2.2 下層

Figs. 7~10 に, 下層における毎月の塩分, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度分布を示す。

(1) 塩分

上層の塩分の場合と同様に, 下層の塩分濃度分布の季節別特徴の概要を述べる³⁾。

外洋水の塩分濃度に近い33の等塩分線は湾口部から西岸に沿って湾奥部まで入り込み, その等塩分線から沿岸に向かって塩分は低くなった。下層水は水深の浅い水域ほど低塩分の上層水の影響を受けやすいことから, 下層の塩分濃度分布は水深の違いを反映したものと考えられる²¹⁾。このような分布状況は成層構造の発達した6月~9月頃に顕著に表れており, 等塩分線は等深度線とほぼ平行な分布となった。しかし, 循環期に相当する12月~2月は湾全域が高塩分となり等塩分線の間隔は広がった。

た。

一方, 上下層における塩分濃度分布を比較すると, 大河川の河口があり水深の大きい湾奥部西岸沿いで上下層の塩分濃度差は大きく, この傾向は夏季に強まった。逆に, 大河川がなく水深の小さい湾東部では塩分濃度差は小さかった。

(2) $\text{NO}_3\text{-N}$

下層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布は下層の塩分濃度分布と負の相関を示した。湾奥部の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は, 8月前後に $0.2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であったのに対し, 12月~3月頃はそれより少し高い $0.3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を示しており, 冬季に比べ夏季のほうが少し低くなる傾向が認められた。下層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の等濃度線の位置の季節変化をみると, $0.3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の等濃度線は, 上層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合と同様に, 冬季に最も沖合いに張り出していた。

上下層における $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布を比較すると, 塩分の場合と同様に, 濃度差は夏季を中心に湾奥部西岸沿いで大きく, 東岸で小さかった。また, 湾内では年間を

Fig. 8 Monthly distributions of $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) in bottom layer in Tokyo Bay using estimated data

通じて上層の濃度のほうが下層の濃度よりも高かった。

(3) $\text{NH}_4\text{-N}$

下層の $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度分布も下層の塩分濃度分布と負の相関を示した。夏季に比べて冬季のほうが濃度が少し高くなる傾向が認められ、高濃度域は沖合いに広がった。例えば、 $0.2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の等濃度線は 6 月～11 月頃に湾奥部河口付近にあったが、1・2 月前後には湾口部方面まで張り出していた。また、上下層における $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度差は湾奥部西岸沿いで大きかったのに対し、東岸では濃度差はあまりみられなかった。さらに、年間を通じて湾内のほとんどの水域で上層の濃度のほうが下層の濃度よりも高かった。このような季節毎の濃度分布の状況は $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合とほぼ同じであったが、濃度は $\text{NO}_3\text{-N}$ よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ のほうが相対的に高かった。

底泥を用いた $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出実験によると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は水温の上昇とともに底泥から溶出しやすくなるが、水温が $20\sim 25^\circ\text{C}$ 程度になると硝化・脱窒作用も大きくなる^{7,8)}。また、東京湾における水質鉛直分布調査によると、

海底直上部の $\text{NH}_4\text{-N}$ が減少しており、 $\text{NO}_2\text{-N}$ は水深とともに減少していることが指摘されている²²⁾。湾奥部下層の水温は 6～11 月にかけて 18°C 以上を示し³⁾、また、この期間に下層の $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ は最も低くなったことを併せて考慮すると、夏季～秋季の底泥表層付近では $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出に比べ脱窒がかなり活発に起こっていた可能性が高い。

(4) $\text{PO}_4\text{-P}$

下層の $\text{PO}_4\text{-P}$ は、下層の $\text{NO}_3\text{-N}$ や $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合とは反対に、夏季～秋季に最も濃度が高くなった。例えば、 $0.06\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の等濃度線の位置の変化をみると、それは 4 月に湾奥部河口付近にあったが、徐々に沖合いに張り出して行き、7 月に湾奥部西部、そして 8・9 月にはほぼ湾中央部を横切る位置まで南下した後、再び湾奥部沿岸方面に後退して行った。

一方、上下層における $0.06\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の等濃度線の位置を比較すると、上下層の等濃度線は 4・5 月頃はほぼ同じ位置にあったが、6・7 月には下層のほうが上層よりも

Fig. 9 Monthly distributions of $\text{NH}_4\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) in bottom layer in Tokyo Bay using estimated data

やや沖合いに展開し、8・9月になるとその差がさらに広がった。そして、10月に再び上下層の等濃度線の位置が重なった後、それらの位置関係は逆転した。 $0.04\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ などの等濃度線も含めて観察すると、下層の濃度が上層のそれよりも高くなる傾向は河口近辺を除き4～9月にかけて認められた。

この原因として、はじめに述べたように、底泥表層や植物プランクトンの沈降分解過程における $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出影響が挙げられる⁷⁻⁹⁾。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出の主要な因子であるDOについてみると²³⁾、7月～9月に下層の $\text{PO}_4\text{-P}$ が $0.06\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上を示した濃度域は下層のDOが $3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の濃度域⁴⁾とほぼ一致した。また、10月に上下層の $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度分布がほぼ等しくなったのは、10月頃の下層では水温は 20°C を下回りDOは上昇しはじめるので^{3,4)}、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出は抑えられること、そして、北東の季節風が卓越し鉛直混合がはじまることも加わって上下層の濃度は釣り合ったと考えられる。

4. ま と め

東京湾内41地点の5年間の公共用水域水質測定結果に統計的手法を適用し、東京湾における溶存性無機態栄養塩の濃度分布の季節別特徴を検討したところ、以下のことが明らかとなった。

1) 上層の栄養塩濃度はいずれも湾奥部から西岸沿いの河口で高く沖合いに向かって低下した。

河口部と沖合い部の濃度差は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合は春季～秋季に大きかったが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合は春季に最大となり、他の季節も比較的大きかった。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は春季～初秋に多摩川河口沖合いや横浜市南部沖合いではそれらの周囲に比べて低くなる傾向が認められた。

2) 下層の栄養塩濃度は水深の浅い湾奥部で高く湾口部で低い分布となったが、その季節変化は窒素とリンとで異なった。

$\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度は下層水温の高まる夏季～秋季のほうが他の季節に比べて低かった。逆に、 PO_4

Fig. 10 Monthly distributions of $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) in bottom layer in Tokyo Bay using estimated data

-P 濃度は春季～初秋に上昇し、しかも下層の濃度は上層の濃度よりも高くなった。そのような傾向は下層の DO 濃度が最も低下した 8・9 月に顕著に表れていた。

謝 辞

公共用水域水質測定結果を利用するにあたり、東京都環境保全局、神奈川県環境部、千葉県環境部、横浜市環境保全局の水質監視担当の皆様の協力を得ました。ここに記して感謝します。

(原稿受付 1997年1月20日)

(原稿受理 1997年4月8日)

参 考 文 献

- 1) 斉藤昭夫 (1995) 東京湾および大阪湾の全窒素および全リンに係る環境基準の水域類型の指定について, 水環境学会誌, 18, 538-542.
- 2) 森谷賢 (1996) 第四次水質総量規制について, 用水と廃水, 38, 384-389.
- 3) 二宮勝幸, 柏木宣久, 安藤晴夫 (1996) 東京湾における水温と塩分の空間濃度分布の季節別特徴, 水環境学会誌, 19, 480-490.
- 4) 二宮勝幸, 柏木宣久, 安藤晴夫 (1996) 東京湾における COD と DO の空間濃度分布の季節別特徴, 水環境学会誌, 19, 741-748.
- 5) 城久, 矢持進 (1986) 赤潮, 漁業からみた閉鎖性海域の窒素・リン規制 (村上彰男編), pp.32-49, 恒星社厚生閣.
- 6) 柳哲雄 (1990) 潮目の科学—沿岸フロント域の物理・化学・生物過程—, 恒星社厚生閣.
- 7) 清家泰, 近藤邦男, 伊達義夫, 石田雄三郎 (1986) 汽水湖・中海における窒素代謝Ⅲ—低酸素濃度下における硝化・脱窒—, 陸水学雑誌, 47, 269-278.
- 8) 白柳康夫, 大矢正代 (1991) 横浜港底質からのリン, 窒素の溶出—溶存酸素濃度と温度の影響—, 横浜市公害研究所報, 15, 57-66.
- 9) 成瀬洋児, 安藤良, 榊原靖, 土山ふみ (1984) 底泥からのリンの溶出への影響因子について, 名古屋市公害研究所報, 14, 59-65.
- 10) 東京都環境保全局 (1985-89) 昭和60-平成元年度版, 公共用水域の水質測定結果.
- 11) 神奈川県環境部 (1985-89) 昭和60-平成元年度版, 神奈川県水質調査年表.
- 12) 千葉県環境部 (1985-89) 昭和60-平成元年度版公共用水域水質測定結果.
- 13) Akaike, H. (1980) Likelihood and the Bayes procedure, *Trabajos de Estadística*, 31, 143-166.
- 14) Matsushita, K., Kashiwagi, N., Aki, S. and Kuboki, H. (1988) Statistical analysis of air pollution data with graphical methods; location characteristics of the monitoring stations, In "Statistical Theory and Data Analysis", Elsevier Science Publishers B.V.
- 15) 気象庁編 (1989) 異常気象レポート '89, 気象庁.
- 16) 古田正次, 岩瀬敏夫 (1991) 汽水域における環境要因の変動特性, 愛知県公害調査センター所報, 18-22.
- 17) 小川浩史, 小倉紀雄 (1990) 東京湾における水質変動 (1980-1988), 地球化学, 24, 43-54.
- 18) 嶋津輝之, 安藤晴夫 (1991) 東京湾水質データの統計解析 (その2), 東京都環境科学研究所報, 129-140.
- 19) 日本水産学会編 (1986) 赤潮—発生機構と対策, 水産学シリーズ34, p12, 恒星社厚生閣.
- 20) 津久井公昭 (1994) 都内河川の N-BOD について, 用水と廃水, 36, 115-119.
- 21) 貝塚爽平編 (1994) 東京湾の地形・地質と水, p2, 築地書館.
- 22) 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水質鉛直分布, 第30回日本水環境学会年会講演集, p314.
- 23) 細見正明, 須藤隆一 (1984) 霞ヶ浦底泥からの窒素及びリンの溶出について, 国立公害研究所研究報告, 51, 191-217.