

## 東京都内湾の水質の長期変動傾向について

安藤 晴夫 柏木 宣久\* 二宮 勝幸\*\* 小倉 久子\*\*\*

(\*統計数理研究所 \*\*横浜市環境科学研究所 \*\*\*千葉県水質保全研究所)

### 要 旨

1970年代から約20年間の水質測定データを用いて、東京都内湾における水質の長期変動傾向を調べた。ベイズ型季節調整法により、時系列データをトレンド、季節変動、不規則変動の3成分に分離し、各水質項目のトレンド成分の特徴を検討した。河川流量との関係では、流量の増加時期にCOD濃度は低下、NO<sub>3</sub>-N濃度は上昇する傾向が認められた。発生負荷量の変化と河川及び海域におけるCOD、T-N、T-P濃度の変動傾向とを比較検討した。発生負荷量の削減にともない、河川ではCOD、T-N、T-P濃度が低下する傾向が認められたが、海域では、こうした傾向は認められなかった。東京都内湾における現在の水質の状況は、CODは横ばいかやや上昇傾向、T-Nは横ばい、T-Pでは下げ止まりの状況にある。なお、下水処理センターに近いSt.23では、下層のPO<sub>4</sub>-Pを除き、すべての水質項目の濃度が上昇する傾向が認められた。

キーワード：東京湾、水質汚濁、季節調整法、長期変動

## Long-term Trends of Water Quality in the Coastal Sea of Tokyo

Haruo Ando, Nobuhisa Kashiwagi\*, Katusuyuki Ninomiya\*\* and Hisako Ogura\*\*\*

\*The Institute of Mathematics,

\*\*Yokohama Environmental Research Institute,

\*\*\*The Chiba Prefectural Laboratory of Water Pollution

### Summary

Long-term trends of water quality along the coastal areas of Tokyo were studied using monitoring data recorded since the 1970s. The time-series water quality data were categorized according to trend, seasonal, and noise, using the Bayesian seasonal adjustment method. During the period when the water flow of Arakawa River was increasing, NO<sub>3</sub>-N concentrations increased while COD concentrations decreased. The trends of COD, T-N and T-P concentrations in rivers and sea waters were compared with the changes in their generation loads. Corresponding to the load reductions of COD, T-N, and T-P, their concentrations in river waters indicate reductions, but not in sea waters. At present, in the coastal sea of Tokyo, COD concentration is steady or increasing slightly; T-N concentration is steady; and T-P concentration has stopped decreasing. At Station No.23, located in the water area connected to the drainage canal of a sewage treatment plant, all water quality measures are increasing except PO<sub>4</sub>-O in the bottom layer.

Keywords : Tokyo Bay, water pollution, seasonal adjustment method, trend

1 はじめに

東京湾では、これまでに1984、1989、1994年をそれぞれの目標年度とした3次にわたるCODの総量規制が実施され、1999年はそれにつづく第四次総量規制の目標年度となっている。しかし、こうした水質汚濁防止対策にもかかわらず、DOやCOD、全窒素(T-N)、全磷(T-P)の環境基準達成率は地点や採水層によっては依然として低い状況にある<sup>1)</sup>。このため2000年度から実施が予定されている第五次総量規制では、CODに加えて窒素(N)、磷(P)も総量規制項目に含める方向で検討がなされている。また既に東京都は、湾岸関係県市と共同して、1998年12月に東京都公害防止条例を改正し、N、Pの上乗せ排水基準を設定し、1999年4月1日から工場及び指定作業場に対する規制を強化している。

筆者らは、東京湾の公共用水域水質測定データを電子データファイルとして整備し、これらの水質データを統計的に解析することにより東京湾の水質汚濁状況の現状や変遷を明らかにすることを目的に研究を行っている。ここでは、栄養塩類等の水質データに時系列解析手法を適用し、東京都内湾における水質の長期的な変動傾向を解析、検討した結果について報告する。

2 解析資料

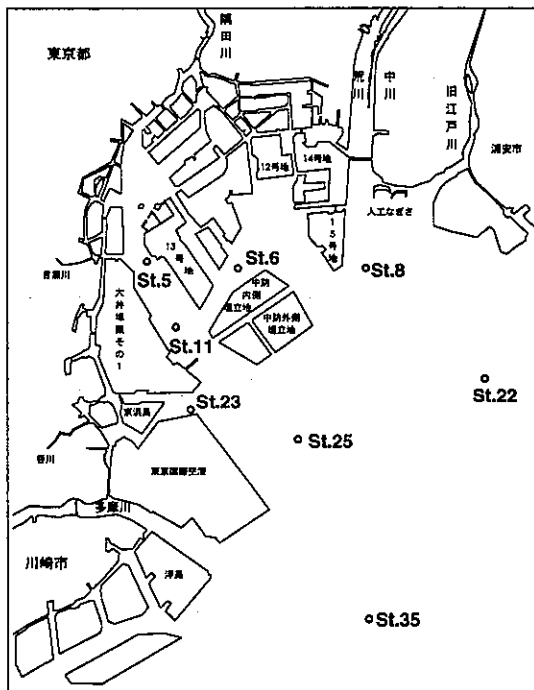


図1 東京都内湾の環境基準点

東京湾では公共用水域の水質測定計画に基づいて湾岸の各自自治体が1970年代の前半から地点を定め、定期的な

採水調査を行っている。東京都の地先水域である東京都内湾では、現在、環境基準点8地点とその他23地点が水質監視の定点として設けられ、前者では月1回、後者では7月と1月の年2回、上下層2層で採水調査が行われている<sup>1)</sup>。当初、水質測定項目は透明度、塩分、COD、DOなど少数で、頻度も少なかったが、1970年代後半には富栄養化に関連する項目が追加され、測定頻度も現在のように月一回になった。表1は、各地点、項目毎に、毎月測定が行われるようになった年度をまとめたもので、N、Pに関連する項目の多くは1978年度から測定が開始されたことを示している。したがって地点により若干異なるがDOやCODでは25年以上、N、Pについては約20年のデータが蓄積されている。このうち今回の解析に

表1 月1回の測定が開始された年度

項目	測定地点 (St.)							
	5	6	8	11	22	23	25	35
水温	1977							
pH								
DO								
COD								
透明度								
塩分	1975							
TOC	1978							
T-N								
T-P								
NH <sub>4</sub> -N								
NO <sub>2</sub> -N								
NO <sub>3</sub> -N	1980							
PO <sub>4</sub> -P	1984							
DOC								
POC								
PON	1987							
DTP	1981							
DCOD								
クロロフィルa+フェオ色素	1985							
クロロフィルa	1984							
プランクトン沈殿量	1984							

使用した水質データは、以下の通りである。

- ・資料 公共用水域水質測定結果2)
- ・地点 東京都内湾環境基準点(St.5, St.6, St.8, St.11, St.22, St.23, St.25, St.35)計8地点(図1)の上下層
- ・項目 透明度、COD、全窒素(T-N)、アンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N)、亜硝酸性窒素(NO<sub>2</sub>-N)、硝酸性窒素(NO<sub>3</sub>-N)、全磷(T-P)、磷酸性磷(PO<sub>4</sub>-P)

・期間 ～1997年3月まで（開始時点は項目による）

### 3 解析方法

富栄養化した河口域に位置する東京都内湾の水質は、季節変化が大きいという特徴を持っている<sup>34)</sup>。これは、直接的な水質変動の原因であるプランクトン増殖や海水の上下混合などが、気温、日射量、降雨などの気象条件に大きく支配されているためである。このほか、大雨や強風など突発的な事象も水質に影響を与える。このため観測データをそのまま時系列にプロットしても、それから水質の長期的な変動傾向を把握することは難しい。こうした場合に簡便な解析手法として、年平均値や12ヶ月移動平均を利用する方法などがよく用いられる。しかしこれらの方法では、欠測値や異常値（飛びぬけて高い値のデータ）が含まれている場合などには、その影響を受けやすく、大局的な変動傾向を的確に把握することが難しい。さらに、1年周期の季節成分を不規則成分から分離することも容易にはできない。このため季節調整という手法により水質データの解析を行った。

季節調整法は、景気動向の解明など、経済分野でもよく用いられる手法で、移動平均型（米国センサス局のX12ARIMA<sup>5)</sup>）とモデル型（統計数理研のDECOMP<sup>6)</sup>）に大別されている<sup>7)</sup>。ここでは水質データの構造を明示的に表現できるモデル型のバイズ型季節調整法を用いた。すなわちこの手法では、 $t$ 時点の観測値 ( $Y_t$ ) は、トレンド成分 ( $T_t$ )、季節変動成分 ( $S_t$ )、不規則変動成分 ( $I_t$ ) の3成分の和として、 $Y_t = T_t + S_t + I_t$  で表されると仮定し、最尤推定法およびバイズ推定法によって、各時点 $t$ における $T_t$ 、 $S_t$ 、 $I_t$ を推定する。ここでトレンド成分とは、大局的になめらかな変動を示す成分であり、季節変動成分とは毎周期（毎年）同じ様な動きをする成分である<sup>8)</sup>。

### 4 結果と考察

#### (1) 東京湾におけるCOD、N、P負荷量の動向

第1～4次の総量規制において算定された東京湾の流域全体（4都県合計）と東京都のCOD、N、Pの発生負荷量（1979～1994年度は実績値、1999年度は削減目標値）を図2に示す<sup>9)</sup>。1999年度の流域全体でのCOD、N、Pの発生負荷量（t/日）は、それぞれ263、277.9、22で、このうち東京都分はそれぞれ53、112.8、7.8であり、流

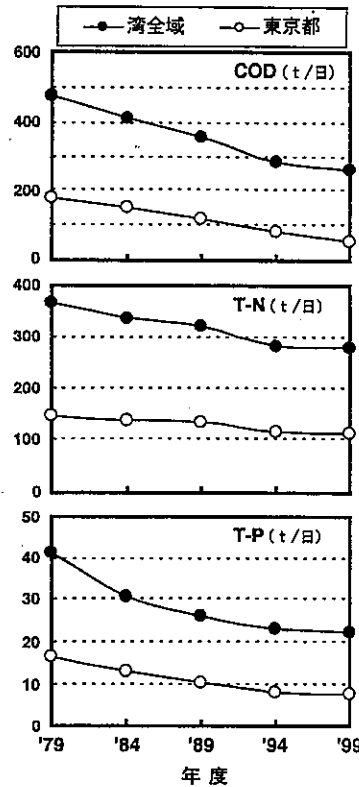


図2 東京湾における発生負荷量の推移

域全体に占める東京都の負荷割合は、COD：20%、N：41%、P：35%と、CODに比べてN、Pの割合が高いことが特徴である。また、1979年度の負荷量を100とすると1999年度の値（カッコ内は東京都）は、CODが55（29）、Nが76（77）、Pが53（47）と表され、この間にCODとPは約1/2、Nは約3/4に削減されたことを示している。

一方、多摩川の調布取水堰では、自動機器により測定

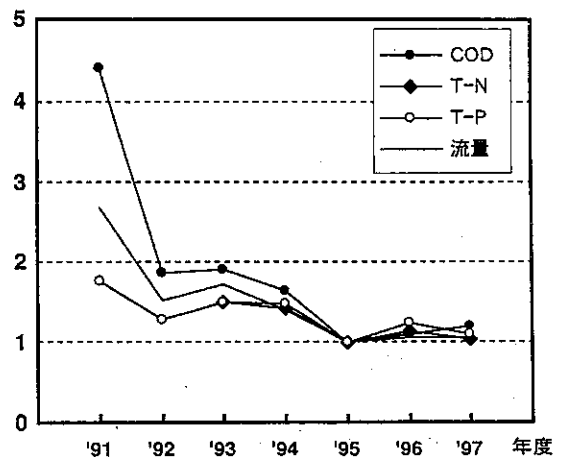


図3 河川流量と汚濁負荷量の経年変化（この間の最低値である'95年度の値で基準化）

された水質の日平均濃度と河川流量の日平均値から、COD、N、Pの流達負荷量が計算され、その結果が報告されている<sup>1)</sup>。それによれば、COD、N、P負荷量は、河川流量が増加する夏から秋にかけて増加し、河川流量が減少する冬から春にかけて減少する周期的な変化を示す。図3は、1991～1997年度の河川流量とCOD、N、P負荷量を、1996年度の値で規準化し、比較したもので、年間の総負荷量が、やはり河川流量によく対応して変化していることが分かる。ただし、河川水質については、河川流量が少ないほど濃度が高い傾向があると言われている<sup>1)</sup>。

(2) 主要河川の水質の経年変化

都内主要河川の多摩川（田園調布堰上）、江戸川（江戸川水門上）、荒川（葛西橋）、隅田川（両国橋）におけるBOD、T-N、T-Pの年平均値<sup>1)</sup>の経年変化を図4に示

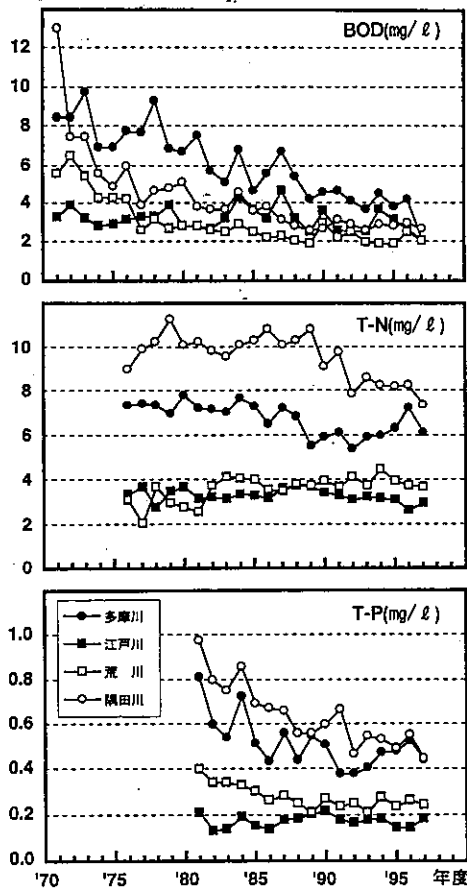


図4 主要河川における水質の経年変化

す。

BODについては、1970年代から3 mg/l程度でほとんど変化なく推移している江戸川を除き、各河川とも濃度

が低下し、約25年間で水質が改善されてきたことを示している。そして4地点ともBODの濃度レベルが2 mg/l付近に収束してきたことも特徴として挙げられる。

T-Nは、4河川のうち当初から濃度が低かった荒川と江戸川では1975年から約20年間ほとんど濃度変化が認められないのに対して、濃度の高い隅田川、多摩川でわずかに濃度が下がる傾向がみとめられる。

T-Pについても、江戸川では1980年代から約0.2mg/lでほとんど変化が認められないのに対して、その他の3河川では、その間に濃度が約1/2に低下している。

これらの結果は、前述の発生負荷量の動向と比較的よく一致していると考えられる。

(3) 河川流量の長期変動傾向

東京都内湾に流入する荒川および多摩川の流量の長期的な変動状況を調べるために、1978～96年度の秋ヶ瀬（荒川）と調布（多摩川）における月間流量データ<sup>10)</sup>に季節調整を適用し、トレンド成分を抽出した（図5）。その結果、荒川については1981年頃と1991年頃に山、1984～85年頃に谷となる変動パターンが認められ、一方、多摩川でも同様な変動パターンを示したが、その変動幅は小さい。こうした河川流量の変動傾向は、東京の月平均降雨量に同様の処理を行って得られた変動パターンとよく一致した。

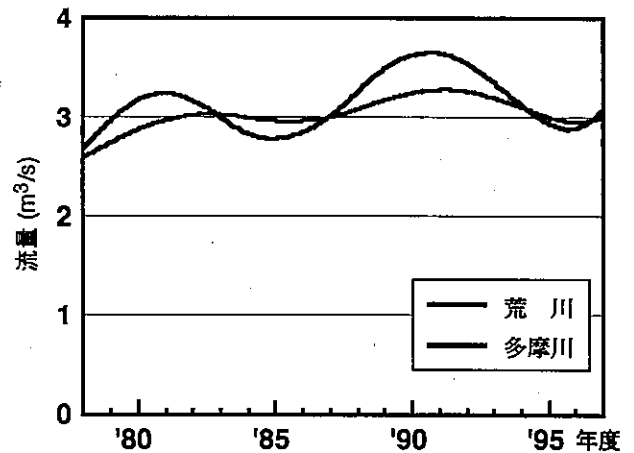


図5 荒川と多摩川の流量のトレンド

(4) 各水質項目の長期変動傾向

ア 透明度

透明度は、観測方法に変化のない項目で、長期的な水

質変化の概要を検討するのに適している。図6は、1973年度から24年間の全地点の透明度のトレンドで、もっとも沖合に位置するSt.35では、この間ほとんど変化が認められない。これに対して、St.6、22、25では、わずかに上昇する傾向を示した。また、St.11、23では河川の流量変動と同様に、1980、90年頃が山、85年頃が谷となる変動傾向を示している。荒川河口のSt.8では、1990年には、他の地点と逆に透明度が下がっている。このことは、河川流量の増加によりSt.11、23では、希釈効果が働き、透明度が上昇したのに対し、St.8は流量増加が大きい場合には懸濁物質が増加し、透明度が低下したものと考えられる。図7は、各地点の平均的な透明度(24年間のトレンド成分の総平均)と透明度の季節変動の大きさ(24年間の季節変動成分の最大値と最小値の差)を散布図に表したもので、St.35のように透明度が大きい地点の方が、年間の透明度の変動幅が大きいことを示している。

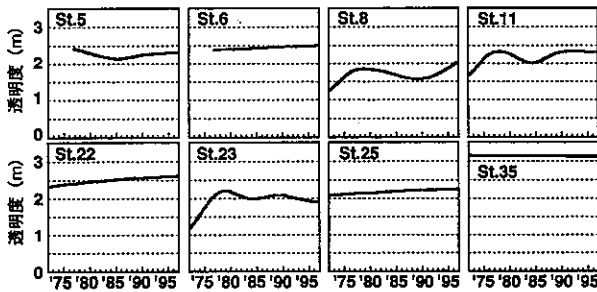


図6 透明度のトレンド

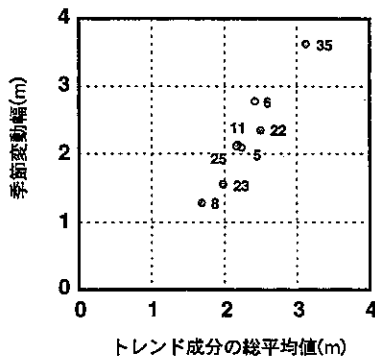


図7 透明度の季節変動幅と平均値の関係

イ COD

各地点におけるCODのトレンドを図8に示す。

上下層を比較すると、上層の方が地点間の濃度差が小さく、またその変動パターンがよく一致している。各地点上層のCODのトレンドは、全般的には、1972~80年頃に濃度が比較的大幅に低下した後、1985年頃まで濃度

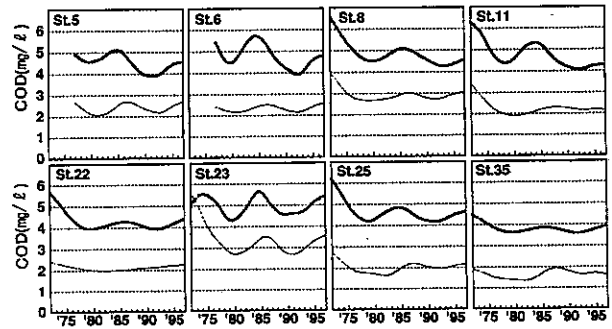


図8 CODのトレンド

が再上昇し、再び1990年頃まで濃度が低下して、それ以後は再び上昇傾向を示している。

下層のCOD濃度も上層とほぼ同様な変動傾向が認められる。ただし、1980年代半ばの濃度のピークが1~2年程度遅れている。

この変動パターンを図5の荒川の河川流量と比較すると、1980年と90年の河川流量の増加に伴ないCOD濃度が低下する傾向が認められる。前述の多摩川での観測では、河川流量の増加がCODやT-N、T-Pの流達負荷量を増加させることが報告されているが、海域の観測結果は、負荷量の増減よりも、その時々々の河川水質の状況(河川流量が増加すると濃度が低下する)を反映する結果になっている。このことから、流入負荷量の削減効果を検証するためには、河川の場合と同様に濃度と水量の積として計算される水域内の現存量の経年変化を把握する必要があると考えられる。

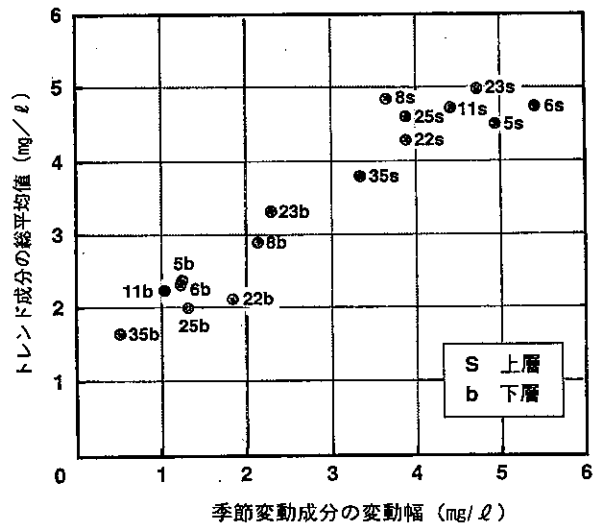


図9 CODの季節変動幅と平均値の関係

図9は、25年間のCOD濃度の平均値と季節変動の大きさの関係を地点毎(層別)に、示したものである。例えば、St.35b (bは下層を表す)のCOD濃度は、この

期間の平均で約1.5mg/l、年間の変動幅は約0.5mg/lであることが分かる。COD濃度は、平均濃度の高い地点で季節変動幅も大きく、両者はほぼ比例関係にあることを示している。なお、この両者の回帰直線のY軸との切片(約1.2mg/l)は、季節変動がゼロになる平均COD濃度を示し、CODの年間最低値を流入CODと仮定して得られる、1.7mg/lの値<sup>1)</sup>と比較的よく一致する。

ウ Nに関連する項目

図10は、Nに関連する項目の1978~96年度のトレンドを示したものである。

これらの中ではNH<sub>4</sub>-N濃度の変動が最も著しい。1978年度の初めには、上層のNH<sub>4</sub>-N濃度は、地点間の濃度差が小さかったが、1984~86年頃までに陸域に近い地点ほど濃度が急上昇し、その後は濃度が低下、または横這いの傾向を示している。下層については、1990年の河川流量が多くなった時期に、濃度が低下し、それ以後は、ほぼ横這いの傾向となっている。ただしSt.23については、上下層とも濃度の上昇傾向が続いている。

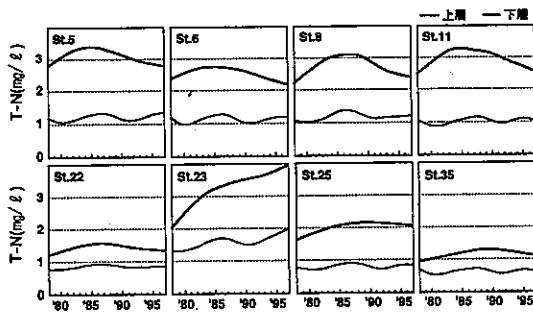


図10 T-Nのトレンド

こうしたNH<sub>4</sub>-N濃度の変動傾向は、T-N濃度の変動パターンによく反映されている。すなわちT-N濃度は1985年頃をピークにわずかに低下する傾向が認められる。この変動傾向は、またT-N濃度が比較的高かった隅田川のT-N濃度の変動傾向(図4)と一致する。下層については、CODと同様に荒川の河川流量との関係が示唆される。全般的にはNH<sub>4</sub>-NとT-Nは近年、横這いの状況が続いている。東京都内湾のT-N濃度の環境基準値は1mg/L、1999年度までの暫定目標値は1.4mg/lと定められている(それぞれ年平均値)。これと比較すると、上層では、最も濃度が低いSt.35で環境基準値をやや上回る濃度レベルであり、それより陸域に近いSt.25では、濃度がその2倍であることから、環境基準の達成は非常に困難な状況にある。河川水の濃度レベルと比較すると、隅田川河口域に位置するSt.5、6や荒川河口域のSt.8の濃度レベル

は、葛西橋や両国橋の濃度レベルと同じ3mg/l前後で、沖合のSt.25ではその1/2、St.35では1/4程度の値になっている。なお、T-Nの値は、1984年度まではケルダール-N+NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nの総和法で計算され、それ以後はペルオキシ二硫酸カリウム分解による方法に変わったが、分析法の違いによるデータの不連続性は認められなかった。

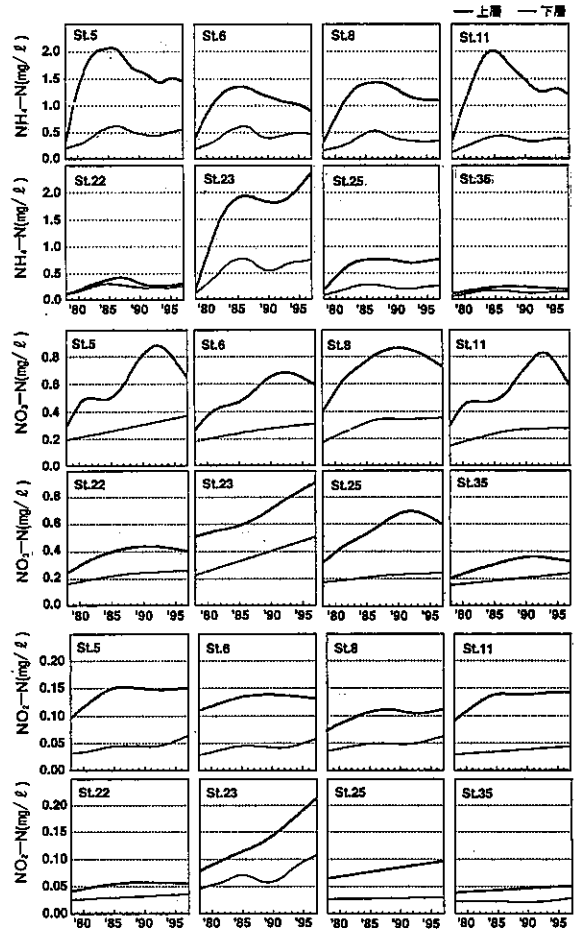


図11 NH<sub>4</sub>、NO<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>-Nのトレンド

NO<sub>2</sub>-N濃度については、上層では、沖合部のSt.25、St.35で若干濃度の上昇傾向が認められるが、それ以外の地点では1986年頃をピークに後はほぼ一定の濃度で推移している。下層についても上層と同様な変動傾向を示している。なお、St.23では、他の地点と異なり、濃度が急激に上昇している。

上層のNO<sub>3</sub>-N濃度は、荒川の河川流量の増加時期にSt.5、St.6、St.11では上昇している。このことは、先に述べたCOD濃度の変化とは逆の傾向で、海域よりも河川水中のNO<sub>3</sub>-N濃度が高いことを示唆している。ただし、もともとNO<sub>3</sub>-N濃度が高かった荒川河口のSt.8ではこうした傾向が認められない。全般的には1990年代初めをピ

一クに濃度が低下している。下層では、St.5、6、35の濃度が上昇傾向にあり、それ以外の地点では1980年代半ばからあまり変化がない。St.23では、他の項目と同様に上昇傾向が著しい。

エ P に関連する項目

T-P及びPO<sub>4</sub>-P濃度のトレンドを図12、13に示す。

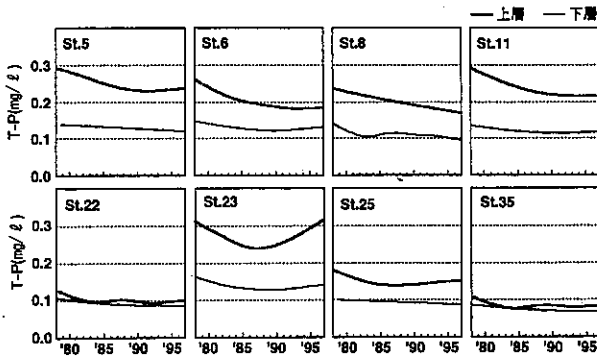


図12 T-Pのトレンド

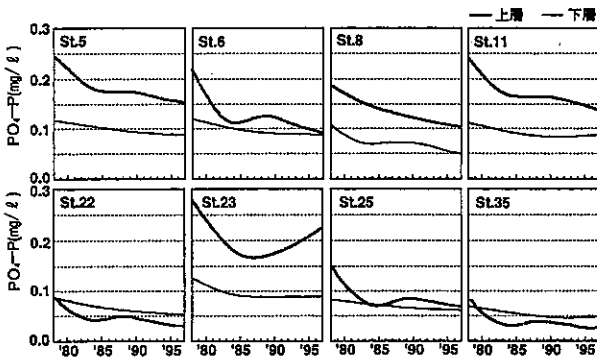


図13 PO<sub>4</sub>-Pのトレンド

T-P中に占めるPO<sub>4</sub>-Pの割合が大きいことから、上層、下層とも、両項目は類似の変動傾向を示している。すなわち、上層では、1970年代後半から80年代半ばまでは濃度が低下し、それ以後は、ほぼ横這いで推移している。この濃度の低下傾向は、1980～83年にかけて実施された無リン洗剤への転換の時期と重なるが、それ以前の1978～80年にかけても既に濃度低下の傾向が認められる。同様な傾向は横浜市の帷子川感潮域についても報告されている<sup>13)</sup>。下層では、濃度の低下傾向は1990年代前半まで続き、それ以後は、ほぼ下げ止まりの状況にある。東京都内湾のT-Pの環境基準値は0.09mg/L、1999年度までの暫定目標値は0.095mg/Lと定められている(それぞれ年平均値)。上層のT-P濃度は、St.22と35の濃度レベルが

環境基準値をやや上回るレベルで、St.25では、その1.5倍程度の濃度となっており、T-Nと同様に、環境基準の達成が難しい状況にある。下層の濃度が上層の濃度に比較的近いレベルとなっている点はT-Nの場合と異なっている。このことは底泥からの溶出が寄与していると考えられ、環境基準の達成をするためには、これを抑制する必要があることを示している。T-P濃度を河川水と比較すると、T-Nと同様に河口部のSt.5、6、8、11などでは0.2～0.3mg/Lで葛西橋や江戸川水門上の濃度レベルと一致し、沖合にゆくに連れて濃度が1/2、1/4と低下している。またPについてもSt.23の濃度の上昇傾向は顕著な特徴として挙げられる。

4 おわりに

これまでの検討結果から次のことが分かった。

① 東京湾では、1970年代末から20年間に発生負荷量として、CODとT-Pは約1/2に、T-Nは約3/4に削減され、主要河川のうち、多摩川や隅田川など汚濁レベルの高かった河川では、負荷量削減に対応して、水質の年平均値が低下している。

② CODは、1970年代に比較的大幅に下がった後、河川流量の増加で濃度が低下し減少により濃度が上昇する傾向が認められた。近年はやや上昇傾向を示している。

③ T-Nは、1985年頃まで濃度が上昇した後、やや低下傾向を示したが、現在ではほとんど濃度変化が見られない。

④ T-PとPO<sub>4</sub>-Pは上層では1985年頃まで、下層では1990年代まで濃度の低下傾向が認められたが、現在は下げ止まりの状況にある。

⑤ 森ヶ崎水処理センターの流路運河に接するSt.23では、1990年代に入ってからほとんどの水質項目で濃度の上昇する傾向が続いている。

⑥ 東京都内湾のCOD、T-N、T-P濃度は、発生負荷量が削減されたにもかかわらず、これに応じた変化は認められなかった。このように、東京都内湾の水質は、濃度的にはこの20年来あまり変化が認められず、負荷量削減対策の効果が明確ではない。しかし本来、こうした効果を的確に評価するためには、水質を単に濃度でとらえるだけでなく、汚濁物質量で把握する必要があると考えられる。したがって、今後は、東京湾の栄養塩等を量的に把握する方法について研究を行っていく予定である。

## 引用文献

- 1) 東京都環境保全局：平成9年度 公共用水域の水質測定結果（総括編），1997.
- 2) 東京都環境保全局：昭和47～平成8年度 公共用水域の水質測定結果（資料編）.
- 3) 安藤晴夫、嶋津暉之：東京湾水質データの統計解析 (1), 東京都環境科学研究所年報, p.119-128,1991.
- 4) 嶋津暉之、安藤晴夫:東京湾水質データの統計解析 (2), 東京都環境科学研究所年報, p.129-140,1991.
- 5) U.S. Bureau of the Census: X-12-ARIMA Reference Manual Final Version 0.1, 1998.
- 6) Akaike H. : Likelihood and the Bayes procedure, Trabajos de Estadística, Vol.31, 143-166,1980.
- 7) 木村武：季節調整法の評価に関する実証分析, 日本統計学会誌, Vol.26, No.3, 269-286,1996.
- 8) 尾崎統、北川源四郎編:時系列解析の方法, 統計科学選書 5, 朝倉書店.
- 9) 関東地方環境対策推進本部：東京湾水質汚濁調査報告書（平成9年度）.
- 10) 水道局資料
- 11) 二宮勝幸：帷子川感潮域における水質の長期変動傾向, 横浜市環境科学研究所 環境研資料No.117, 27-36, 1995.