

東京湾の水質環境

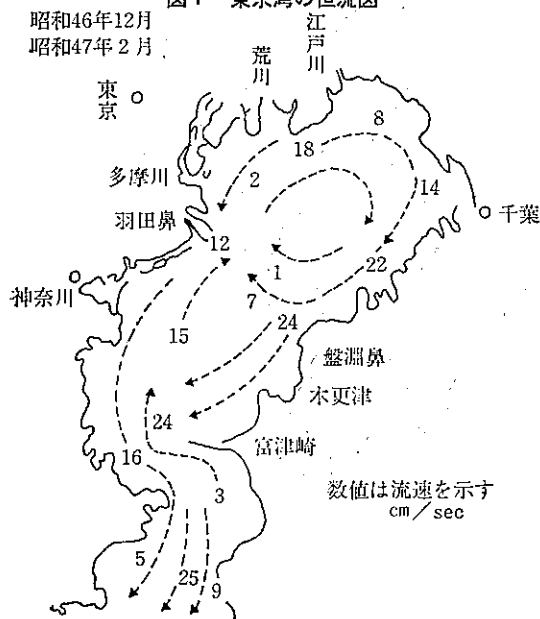
江角 比出郎 古井戸 良雄 川原 浩
曾田 京三

緒言

東京湾は日本のほぼ中央に位置し、西に三浦半島、東を房総半島で囲まれる内湾で、その大きさは長さ約60 km、幅約34 km、海面積約1,000 km²、平均水深約18 mである。そしてS字状の浦賀水道を経て太平洋と連なり、その最狭部は約6 kmとせまく、湾内水の停滞性を強くしている。

関東平野を背景とした約7,000 km²の流域面積からは、荒川、江戸川、多摩川等の大小38河川が流入し、また東京湾周辺には、首都東京を中心に大都市と大工場群が存在している。また、その密度は、日本国土面積の2%の土地に1970年で日本全人口の20%の2,000万人、工場出荷額でいえば27%、16.3兆円にも及んでいる。この東京湾の汚濁の現状把握と今後の浄化対策々定のための総合調査を、東京・千葉・神奈川の1都2県共同で3ヵ年にわたり実施した。その結果と、既存の他報告と合わせて東京湾の水質およびその概況についてのべる。

図1 東京湾の恒流図



潮流

東京湾の一般的な流れ(恒流)は図1のとおりであると報告されている¹⁾。すなわち冬季には時計回りの流れが認められるが、夏季には湾中部から湾口にかけては複雑である。また、本牧の鼻から観音崎にかけての三浦半島沿岸にそって、夏冬とも、南行流が認められるという。一般に沿岸部の流れは、海流、潮流、地形や地球の自転等の要因のほか、風による流れ、即ち吹送流にも影響されるものもある。東京湾の湾口における観測結果によると、冬季には北北東風が、夏季には南偏風が卓越している。したがって、汚濁が大きく進行する夏季には、表層水が湾奥に吹きよせられ、湾奥の汚濁を一層著しいものとしていると考えられる。

水質

東京湾の水質は、春先水温の上昇とともに赤潮状態になり汚濁観を強くし、また岸壁から見る海水も常時汚濁され、潮の香も澄んでいない。

最も簡単な水質指標である透明度をみると、その季節変化は図2に示したように、循環期には3~7 mと比較的澄んでいるが、成層期には1 m以下にも低下する。そして水色もオリーブ色を帯びている。表層水質が悪くなる成層期と、比較的良好な循環期の全有機炭素TOCの分布を比べてみると、図3、4に示したように、循環期の2月には湾口部で1.5 mg·C/l、湾奥部で2 mg·C/l以上、川崎から東京港の沿岸部が3 mg·C/lとなり、周辺からの流入負荷量を反映した分布を示している。一方、成層期8月には湾口で3 mg·C/l、横須賀・木更津以東で4 mg·C/l、湾奥部で6 mg·C/l以上と、2月の2~3倍の値になっている。

このTOCのうち懸濁態有機炭素POCについて、その垂直方向の季節変化を湾中央部のSt-25についてみると、図5のとおりである。10 m以深では年間通じてほとんど変化がなく0.3~0.7 mg·C/lであるのに対し、成層

图2 調査地点図(左), 透明度季節变化図(右)

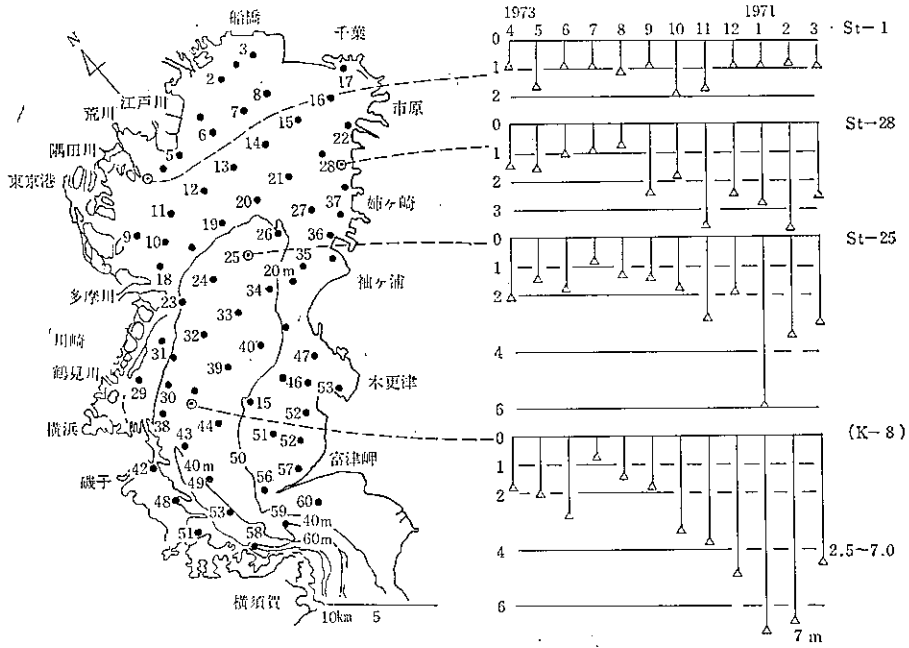


图3 東京湾 TOC 平面分布図
(mg C/l) (0, 1, 2, m 平均値) (Aug. 1973)

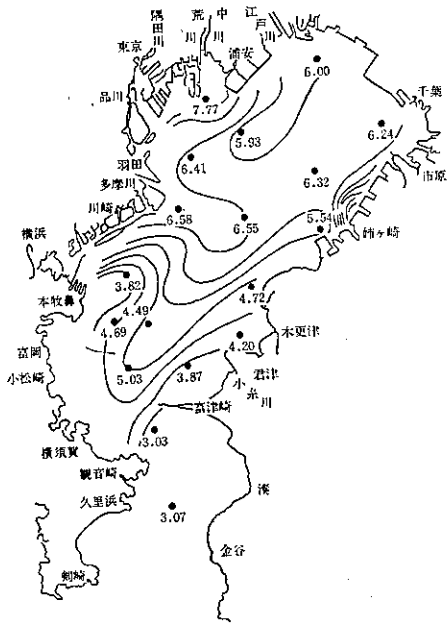


图4 東京湾 TOC 平面分布図
(mg C/l) (0m) (Feb. 1974)

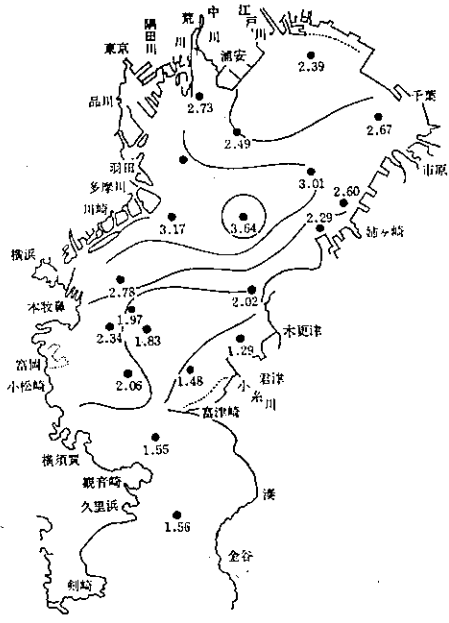
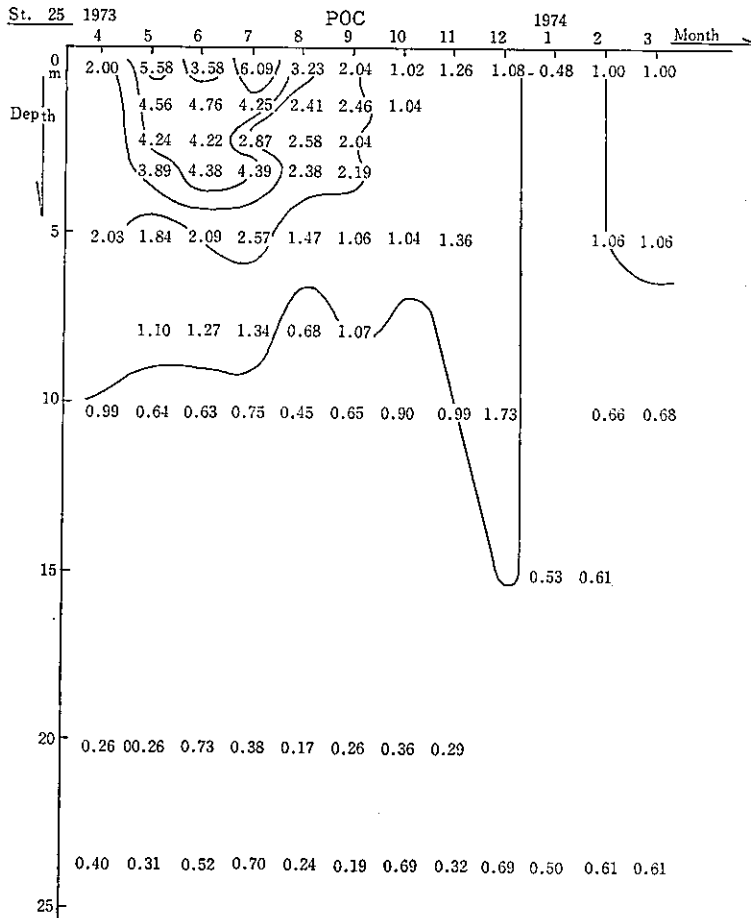


図5 St-25におけるPOCの垂直季節変化図 (mg C/l)



期表層が高く、特に著しい赤潮状態になった7月には6.09mg-C/lにも達している。このような表層のPOCの変化は前述の透明度の変化とよく一致している。

生物化学的酸素要求量BODもPOCと同様な変化を示し、成層期表層は10ppm近くにもなるが、その他の数値は1~2ppmと低い。またPOCとBODとの相関係数が0.91と高い値であることから、東京湾のPOCは生物分解されやすい有機物であるといえる。

化学的酸素要求量CODも他の有機汚濁指標と同様な変化を示し、成層期の値が高く10ppm以上であったのに対し、循環期には全層低下して、ほぼ2ppm以上と比較的きれいだである。他方、溶存有機炭素DOCは、POC、BOD、CODと同様な傾向の変化を示し、成層期表層は2.5mg-C/l以上と高いが、下層では0.4~0.7mg-C/lである。DOCのBODとCODとの相関係数はそれぞれ

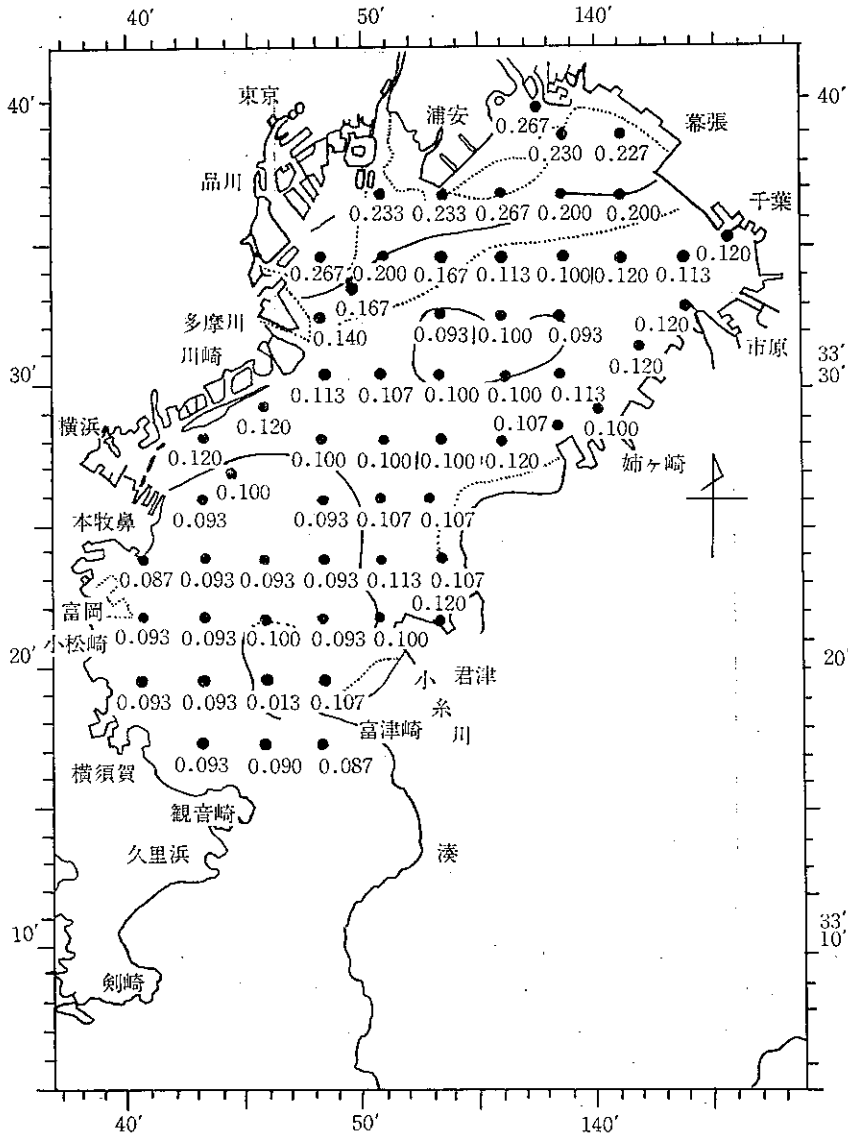
0.47、0.69となり、BODとの相関が悪く、DOCは生物的に分解されにくい有機物であると考えられる。

溶存酸素量DOも大きな変化を示し、循環期には全層飽和度で95%前後である。他方、成層期表層では200%近くにもなるが、下層では低酸素になっている。

クロロフィルa、Chl. aについてみると、成層期表層には70μg/lにも達する濃度の値が観測され、植物プランクトンの総沈殿量からも明らかなように、多量の植物プランクトンが繁殖していることが明らかとなっている。東京湾はこのプランクトン群のために透明度が悪く、高いTOC、POC、BOD、CODの値となり、またDOは過飽和状態となっている。

この現象は典型的な富栄養化による汚濁現象である。この間接的な有機汚濁を引き起こす栄養塩の一つである磷酸塩についてみると、図6に示したように東京内湾で

図6 東京湾におけるT-Pの平面分布図(0, 1, 2, 3, 5 mの平均値)(Oct. 1973)

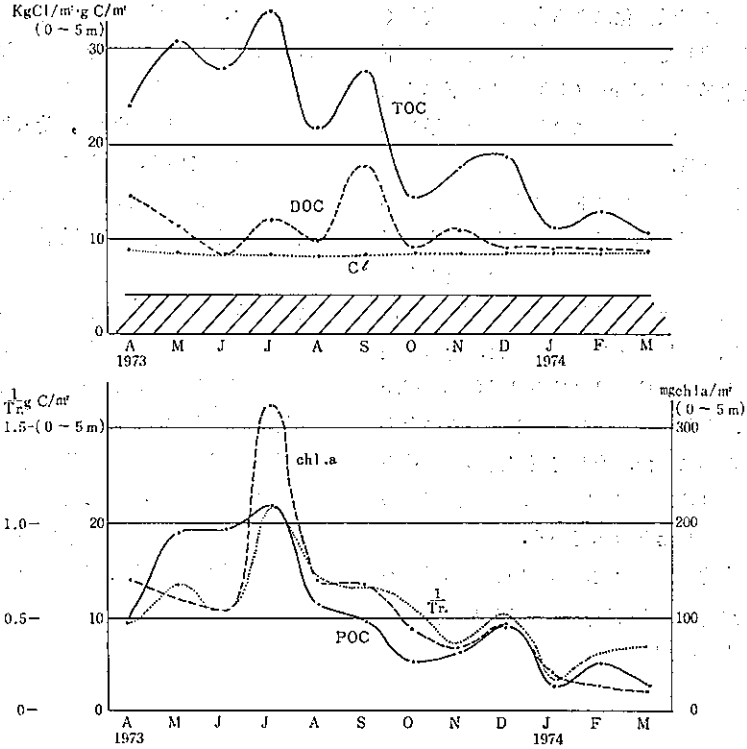


は0.2ppmP以上、湾口部でも0.08ppmPと高く、またT-N/T-Pは6~8とバランスのとれた栄養塩条件を示している。このようなことから、富栄養化というより過栄養化と呼べる栄養塩条件であるといえ、水産環境基準²⁾でいう赤潮防止のための無機栄養塩の基準0.1ppmN, 0.015ppmPを大きく上回っており、外洋の値よりはるかに高い。

東京湾の有機汚濁は、以上のように富栄養化による間接汚濁が大きく支配していると考えられるが、周辺の工

場・家庭から流入する有機物も多量にあり、これに起因する汚濁も当然ある。この直接汚濁と間接汚濁の寄与率を明らかにすることは汚濁を制御する上で非常に重要なことである。その意味から河川の影響の強い荒川河口のSt-4、工場排水の影響のあるであろうSt-28、東京湾の水質を代表する湾中央部のSt-25、外洋水の影響を受けるK-8について毎月の各態有機炭素の変化を追跡した(図2参照)。そのうちSt-25を例にとり解析すると以下のように考えられる。各月の0~5mの表層水柱中のT

図7 東京湾 St-25 における各態有機炭素等の季節変化図



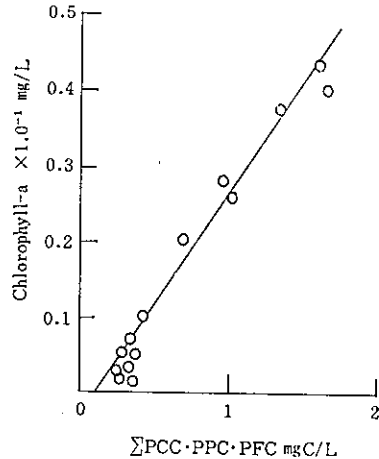
OC, POC, DOC, Chl. a, Cl を積算し, その季節変化をみると図7のようになる。

外洋の深層の清澄な海中にも有機物は含まれ0.5mg C/l 前後とされているが, 東京湾では内湾性を考慮してその値を0.8mg·C/l とすると斜線部がその部分になり, この4 (=0.8mg·C/l × 5m) gC/m² をこえる部分が直接的, 間接的に人為的影響を受けた汚濁部分であるといえる。ところでこの地点に対する流入有機物の影響は, 流入負荷量を年間一定とし, 水温の変化による分解速度の相異を無視すると, 塩素量と対応した量と考えられるが, 塩素量の季節変化は図から明らかなようにほとんど変化なく, 直接汚濁物質の影響は年間一定とすることができる。またPOCはChl. a あるいは透明度の逆数とほぼ平行な変化を示し, 前述のようにPOCは大部分微細藻類の量を表現していると考えられる。流入汚濁物質のうち懸濁態のものはほとんど沈殿し, 溶存態のもののみが水中に残り拡散していること, 循環期は藻類の活動が弱いこと等を考え合せてみると, 循環期のDOCの値が直接汚濁物質由来部分に近いと考えられる。この値は

St-25 では3.8gC/m² となり, この値より高い部分を間接汚濁部分とすることができる。すなわち, この地点の0~5mの表層では,

$$\text{成層期には, 直接汚濁: 間接汚濁} = 3.8 : 20 \sim 26 \\ (1 : 5 \sim 7)$$

図8 東京湾における Chl. a と ΣPCC・PPC・PFC との相関図 (半田, 1973)

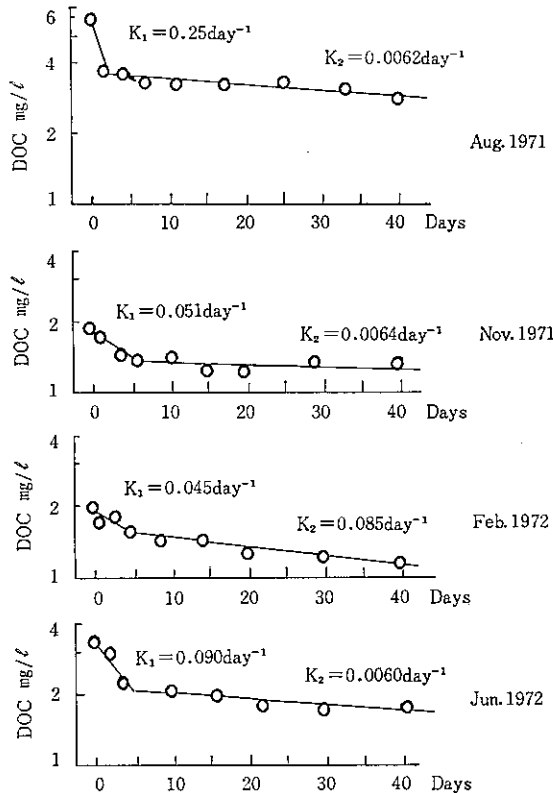


循環期には、直接汚濁：間接汚濁=3.8：4=(1：1)といえる。このように富栄養化による有機汚濁は大きく流入有機物を90%削減しても栄養塩のある濃度まで低下させない限り、全体が3.4gC/m² (3.8×0.9) 下がるだけで、成層期には10%余、循環期には30%位の効果しか見込めないと推定される。

東京湾のPOCは植物プランクトンに由来するものが多いことが考えられたが、小山半田等²⁹⁾はPOC中の炭水化物 Particulate Carbohydrate Carbon, たん白質 Particulate Protein Carbon, 脂質 Particulate Fat Carbon とを測定し、Chl. a との相関を見た。その結果は図8に示したようにPOC+PPC+PFCがChl. a と直線関係にあり、生きた植物プランクトンのみに含まれていることを明らかにした。そして東京湾のPCC+PPC+PFC/POCは0.14~0.78で、湾奥部表層のPOCほど高い値を示したとのべている。

他方DOCは生物的な分解を受けにくい有機物である

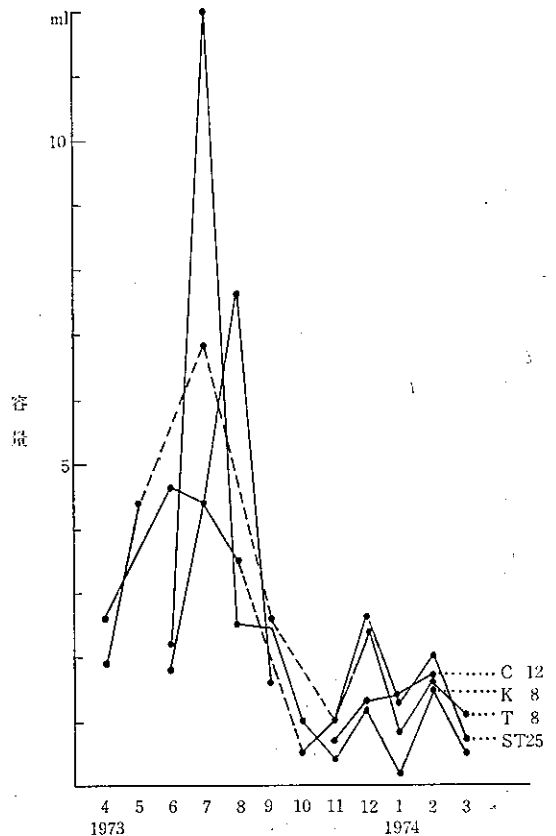
図9 東京湾表層水中の溶存有機炭素の減少曲線図(小倉, 1973)



ことが考えられたが、小倉²⁹⁾はこのDOCの分解過程を追跡した。DOCの分解速度は図9に示したように見かけ上分解しやすい物質と分解のおそいものとの2種類に分かれ、分解が1次反応にしたがうと仮定すると最初の数日間の k_1 は0.0n day⁻¹、それ以後の k_2 は0.00n day⁻¹であるとしている。さらに分解に伴う溶存有機物の分子量分布の変化を限外濾過法により調べた。表層水の溶存有機物のうち分子量500以下の低分子部分が全体の約30%を、分子量10万以上の高分子部分が約20%を占めた。このような溶存有機物が分解すると、500以下の低分子溶存有機物の割合が減少し高分子部分の割合が増加する傾向が認められた。このようなことから図9に示した分解初期に減少する分解速度 k_1 にあたる部分は、主として低分子溶存有機物であると考えられるとしている。

図9からうかがえることは、後者の量が全量の半分あるいはそれ以上の量を占めていることである。

図10 東京湾の表層水の総沈殿量、季節変化図 (ml/10ℓ)



生 物

現在の東京湾は富栄養化され、水質的にみると前述のとおりであるが、生物相からみると次のようなことが明らかとなった。

表層水を採水後放置して得たプランクトン等の総沈殿量は図10のように有機汚濁指標と同様な季節変化を示し、夏と冬では5倍位の差異が認められた。

3カ年の調査で東京湾でみられた植物プランクトンは夏には微細な珪藻である *Thalassiosira mala* が主体で、観測された個体数の最高値は164,000個/mlであった。冬には同じ珪藻の *Skeletonema costatum* で、60,000個/mlであった。*Ske. costatum* は過去の東京湾の観測記録をみても、赤潮の代表種の一つである。また *Tha. mala* は1951年千葉沖に大発生し、貝類に大被害を与えた記録があるが、その他にも *Exuviaella marina* による赤潮の被害も報告されている。両者とも近年夏季の代表的な種類となっている。

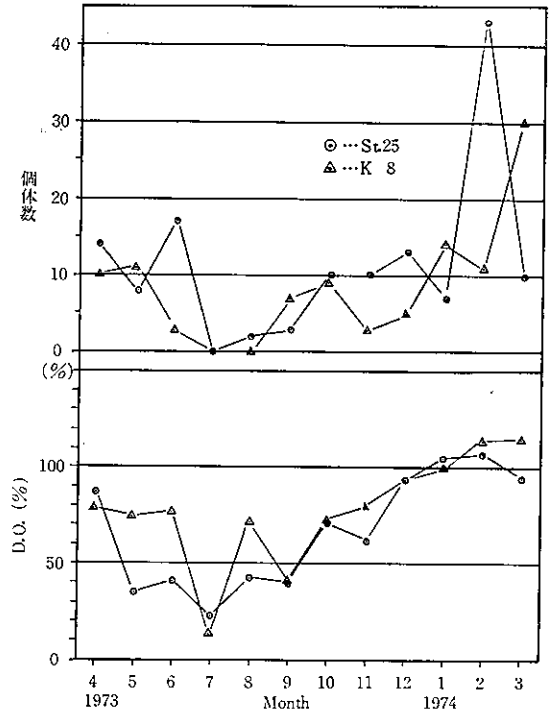
過去の資料を比較してみると、植物プランクトンでは東京湾内には外洋性種が出現しなくなるとともに全体的に種類数が減少し、同定困難な非常に微細なプランクトンが増え強内湾性となっている。

珪藻類の *Biddulohia* 属についてみると1955年頃には、*B. sinensis*、*B. longicuris* がかなり出現していたが、1960年頃より出現しなくなり、代って *B. mobilensis* が見出されるようになったが、現在ではこれも非常に少なくなっている。

同様な現象は動物プランクトンにもみられる。橈脚類の *Microsetella* 属についてみると、1955年頃には *M. rosea* がかなり出現していたが、その後減少し最近見出されなくなり、現在、*M. norvegica* だけになったようである。そして現在の東京湾では、この *M. norvegica* と *Oithona nana* が代表種となっているが、これらは水質富栄養化状態に最も強い適応性をもっていると考えられる⁹⁾。

底生生物についてみると、1948年頃東京湾部に一部汚濁水域が観測されているが、現在千葉—浦安と本牧—盤洲を結ぶ2線に囲まれた水域に広がり、その構成種は多毛類が中心となっている。底生生物の季節変化をみると図11のように底層D.O.と対応し、貧酸素になる成層期に減少し循環期には回復することが観測された。

図11 東京湾底生生物の個体数とD.O.(%)の季節変化図



底 質

東京湾の底生生物が多毛類を主体とし、無生物地点が出現しているということは、底質がかなり有機汚濁されていることを示している。

東京湾の海底にはヘドロと呼ばれる硫化水素臭のする黒色浮泥が多量に存在しているといわれているが、その組成性状に関する報告はほとんどない。音響測深器による深さとロープにレッドをつけて実測した深さとの差をヘドロ層の厚さとした報告がある⁹⁾が、これによると地点によっては1.5mの厚さとしている。このようなヘドロとよばれる底質は、

1. 流入してくる有機物が分解されないまま沈降蓄積すること。
2. 表層で多量に増殖したプランクトンの遺骸が沈殿蓄積すること。
3. 流入河川の流域では宅地造成等の土木工事が盛んに行われているため、雨水と共に流入する微細粘土の量が増大したこと。

などにより形成されると考えられるが、下記のようにコ

図12 東京湾のコアサンプル分析結果図

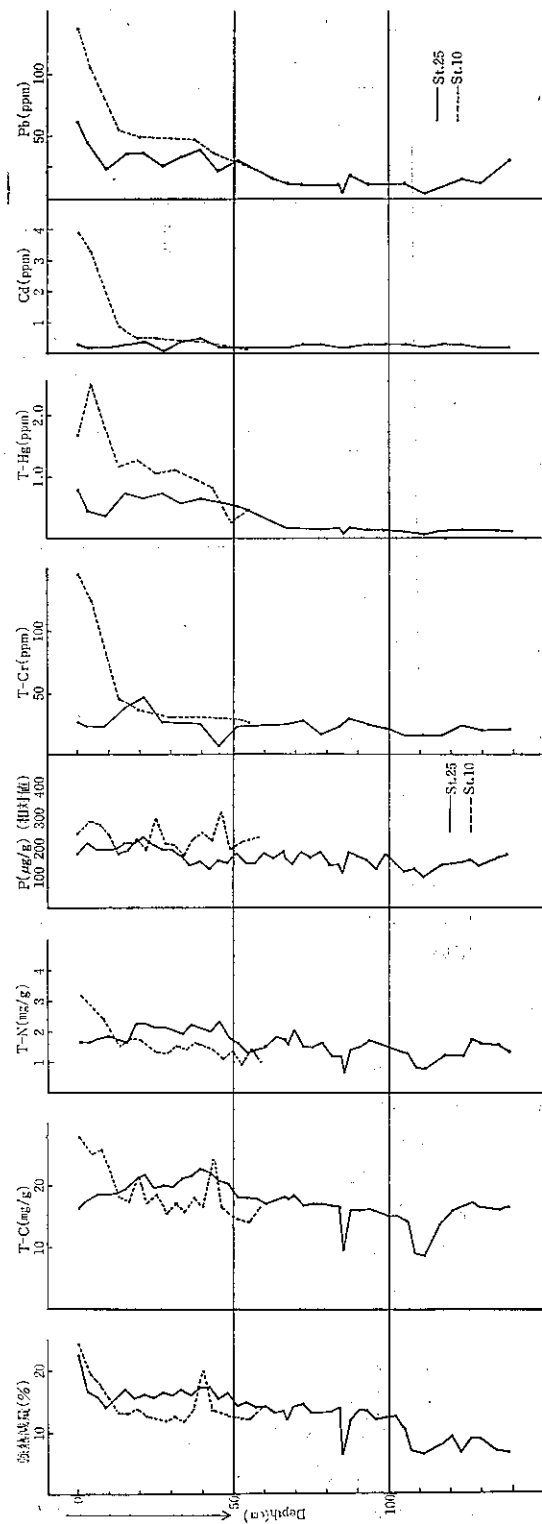
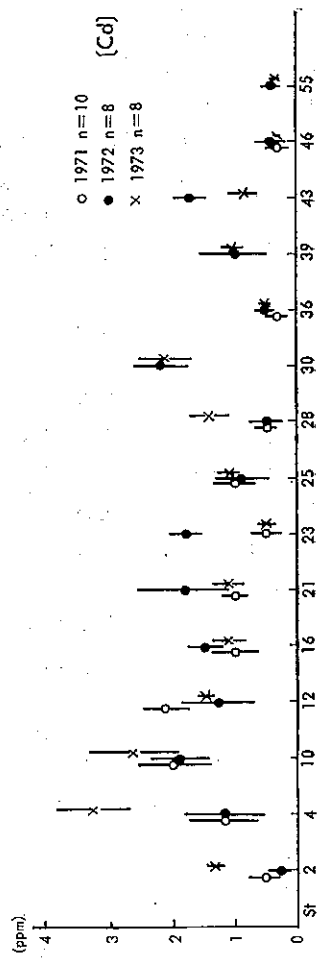


図13 底質中の重金属類 (平均値および95%信頼区間)



アンプラーにより採取した底質表層泥をみると、表層10数センチまで硫化水素臭を感じたが、しかしこれがヘドロと呼ばれる底質にあたるかどうか不明であった。

このような近年蓄積された表層泥は近年の盛んな人間活動の影響を受けているが、その影響を明らかにするには堆積速度を考慮した採取分析を行う必要がある。この意味から湾内2地点でコアサンプリングを行った。採取後、直ちにドライアイスで凍結して1cm 間隔に切り、いくつかの項目について分析した結果、図12のとおり結果を得た。

堆積した有機物の指標となる強熱減量は、泥表面から10cm 深で約25%から15%に減少し、それ以深では変化が少ない。このことは強熱減量の、この地点での自然値が約15%であることと、厚さ10cm 程の表層泥では採泥層により測定値が大きく変化することを示している。T-C, T-N, PO₄-P (相対値)については、両測点共鉛直方向の濃度変化に一定の傾向は認められないが、窒素・磷については河川の影響を強く受ける St-10 のほうが表層で高い。重金属の鉛直方向への濃度変化は St-10 に明確にみられる。しかし、いずれの成分とも近年の汚染の影響が強くみられるのは表面から15cm ほどまでである。T-Cr と Cd は20cm 以深ではほとんど変化がなく、これを自然値とすると乾重量で、T-Cr が30ppm, Cd が0.5ppm と考えられ、これら自然値と表面での濃度の間には2~8倍もの開きがあるが T-Hg と Pb は St-10 と St-25 との間で15cm 以深も差異がみられ、自然値は明でない。いずれにしても大きな変化が表層10cm 厚で起きていることは、ここでも採泥方法が測定結果に与える影響が極めて大きいことを示している。St-25 の重金属鉛直分布は、St-10 ほど明確な傾向をもたず、河口からの距離等より地域毎に異なることを示唆している。

底質汚染の水平分布を明らかにするためにグラフ式採泥器を用いて試料採取を行った。採取試料は面積1/30㎡ 深さ約10cm と考えられるものである。前述のような採取上の問題点と底質の均一性等によるばらつきの誤差を防ぐために、1地点の周囲半径約500m 内で8または10試料採取し分析した。その結果の1例を図13に示す。

ばらつきの大きさは地点により異なるが、東京湾から姉ヶ崎への張出しと湾西側が高い値を示した。同様に行った3カ年におたる調査結果から得られたそれぞれの最高値は、T-Hg2.37 (St-23), Pb183 (St-23), T-Cr424

(St-12), Cd5.1 (St-4), As29 (St-4) mg/kg(乾重比)で、いずれも東京内湾を中心とした地点であった。

底質の強熱減量、硫化物、CODの有機汚濁指標の測定は1地点1試料について行ったが、東京湾の一般的傾向として、比較的浅く、砂質の浦安-千葉の沿岸部と流れが速く、水深の深い本牧-木更津以南を除く湾全体は汚濁され、強熱減量15%以上、硫化物0.3mg S/g以上COD30mg O₂/g以上の地点がみられた。

浄化の課題

東京湾の水質を経年的にみると、湾全域について図14のようにアンモニア態窒素は1963年まで100μg/l であるが、その後上昇し、1973年には500μg/l になっている。

東京湾のこのような汚濁の進行の原因として、1955年すぎより始まった高度経済成長政策による無秩序な人口集中と工場の拡大によって流入汚水量が急激に増大したこと、これに拍車をかけたのが自浄能力が大きい浅瀬や干潟を埋立てたこと、さらに窒素・磷の物質循環パターンが変化したことがあげられる。すなわち、

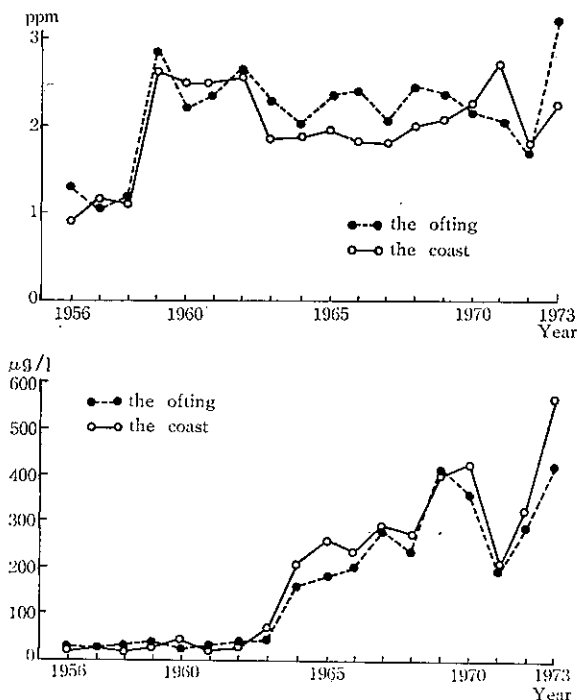
1. 下水道の整備がたちおくれたために、家庭雑排水等の未処理水の流入が増大したこと。
2. 工場の集中拡大により汚水量が増大するとともに、石油化学工場等から難分解性の有機物が流入するようになったこと。
3. 船舶からの廃油の流出。
4. 沿岸部が埋立てられ掘割状となったため、自浄能力が低下し、いつまでも汚濁物質が残るようになったこと。
5. 1, 2の汚水とともに、窒素・磷の流入量が増大し、富栄養化が過度に進行したこと。細かく分けると、

(イ) かつては汲み取られ、大地に還元されていた尿尿が、化学肥料の普及のために、尿尿処理場・下水処理場あるいは浄化槽で希釈処理されるようになり、有機物は一応除去されるものの窒素・磷の大部分は流出するようになったこと。

(ロ) 中性洗剤中には洗浄力を増大させるためにトリポリリン酸塩が添加されていて、中性洗剤の使用量の増加とともに磷が多量に流出するようになったこと。

(ハ) 大気中の窒素が工業用、あるいは肥料用の原料

図14 東京湾における COD, NH₄-N の経年変化 (千葉県内湾水試)



として固定され、アンモニア、硝酸等の水に可溶性な化合物にされたため、流出量が増大したこと。

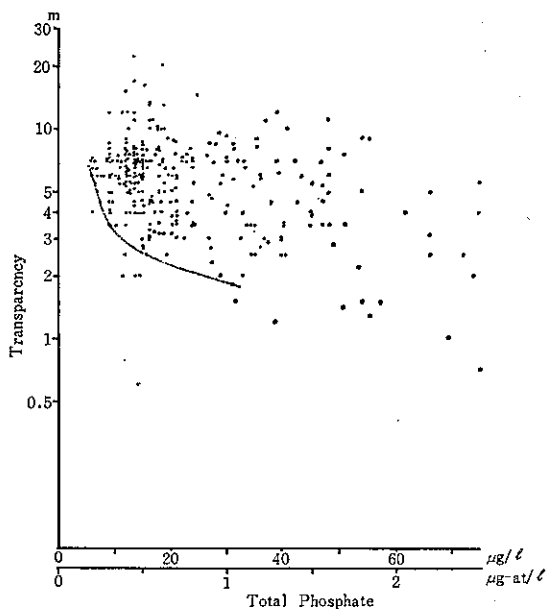
以上のような流入負荷量、その質あるいは地形上の因子により、沿岸部は常時、沖合部は成層期に汚濁されている結果となり、かつての生態系は完全に破壊されているといえる。

東京湾の富栄養化等による汚濁の現状は把握できたが、これによる有機汚濁を抑制するには、前述の汚濁の原因となっている事項を解決しなければならない。

第一にいえることは、流入有機物の削減であることはまちがいない。しかしながら、流入有機物負荷量と直接汚濁との関連については、その汚濁物質がどのように拡散し、またその間に物理的・化学的、あるいは生物的反応によりどの程度減少するかは明らかでない。

現状では約1,100 t COD/dayの有機物が流入しているが、海水がまだきれいであった1955年頃の推定流入負荷量300 t COD/dayに戻しても当時の水質になるかどうか疑問である。都港湾局の調べによると、1951年から現在までには東京湾全体で1,500haの埋立てが行われているが、これは東京湾の5m以浅瀬の約半分にあたり、沿岸部の自浄能力が大きく低下していると考えられるからで

図15 瀬戸内海・伊勢湾・三河湾における T-P と透明度の相関図 (環境庁産業公害防止協会資料より作成)



ある。かつての東京湾の沿岸部には干潟や浅瀬が広がり、ハゼやハマグリ等の恰好の生活の場であるとともに水鳥の憩いの場でもあり、健全な生態系が営まれていた。そして、人々が海と接する場でもあった。前述のように、それが破壊された現在、それを本来の自然の姿に完全に回復させることは無理としても、人工干潟の造成等、自然の回復を積極的にとり入れる必要がある。

さらに、成層期に顕在化する富栄養化による間接汚濁を防止するためには、生体量とある程度比例関係にある生元素、窒素、リンの流入削減をする必要がある。しかしながら、これらの栄養塩濃度と生物生産量との相関は、従来の調査研究でも明らかではない。明確な許容栄養塩濃度の設定は今後の課題としても、可能な限り流入負荷量の削減をする必要がある。

ちなみに、ある栄養塩濃度で透明度がどこまで悪くなるか探るために、図15のように、伊勢湾、三河湾と瀬戸内海における T-P と透明度との関係をみた。水産環境基準でいう赤潮防止の基準15ppb Pは透明度が2 m以下にはならないと考えられるが、東京湾をそこまでのレベルに下げることが非常に難しいといえる。

以上のべたことがらは、物質の現存量を基礎としたものであり、物質の動きをとらえたものではない。前述したように、流入水の3次元方向への拡散速度、その拡散過程における汚濁物質の沈降、分解過程およびその速度、さらに浚渫・埋立等の地形変化によるそれらに対する影響等に関する速度論的な数値はほとんど得られていない。また、栄養塩濃度と基礎生産量との相関について

も、現場に応用できる研究結果も得られていない。したがって今後残されている調査研究は、これらの事項を解明するためのものであり地道な要素をもったものといえる。

この調査は、1971年より3カ年にわたり実施したもので、関係機関の方々に多大の協力を得た。特に公衆衛生院の南部特一博士、神奈川県田辺孝氏、千葉県佐藤正春氏、立正大学の井出嘉雄博士、横浜市立大学の福島博博士、都立衛生研究所の松本浩一博士、東京農工大学の小倉紀雄博士のほか、都の他の部局にあって諸々の助言と協力を下さった方々にも謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 東京湾環境保全調査報告書，建設省，1974. 3
- 2) 水産環境基準，水産資源保護協会，1972. 3
- 3) 半田暢彦ほか：人間生存と自然環境，東京大学出版会
- 4) 小倉紀雄：文部省特定研究「人間生存にかかわる自然環境に関する基礎的研究」報告集，1974. 3
- 5) 村野正昭：東京湾の水域環境，運輸省，1974. 3
- 6) 東京湾汚濁現象委員会報告書，建設省，1973. 3
- 7) 伊勢湾における汚濁物質の循環機構に関する研究報告書，産業公害防止協会，1973. 6
- 8) 瀬戸内海水質汚濁総合調査，環境庁水質保全局，1973. 11