

# 東京湾の水質環境 (1都2県共同調査)

古井戸 良雄 江角 比出郎 長 沢 久  
川 原 浩 松 本 浩 一

(東京都立衛生研究所)

## は し が き

東京湾の浄化のためにはその汚濁機構を明らかにする必要がある。東京湾を囲む1都2県では昭和46年度より3カ年計画で東京湾の調査を実施している。

47年度の調査結果を中心として、1 水質、生物、底質、2 湾内における物質収支、3 拡散のシミュレーション、について概報する。なお、調査にあたり国立公衆衛生院衛生工学科長南部祥一氏の指導を得たほか、生物調査については、立正女子大学教授井出嘉雄氏、横浜市立大学福島博氏の協力による。

## 1 水質、生物、底質

東京湾の水質は、その水色、透明度の示す如く富栄養化され、清澄さを失っている。夏期、水面にはオガクズを撒いたような赤潮がみられる。このような汚濁の実態は46年度報告書に概略<sup>1), 2)</sup>はのべたが47年度の調査結果と合わせて主要な点を要約する。

透明度の低下は、十分な栄養塩と水の垂直混合が行なわれない成層期に太陽エネルギーを得て増殖する植物プランクトンが、表層に濃厚な生物群集をなして生ずる現象で、透明度の深度で表層光の約15%、また2倍の深さ<sup>3)</sup>で光合成量と呼吸量が等しい補償深度となっている。したがって透明度が1~2 m余となる東京湾の成層期には、水深5~6 mの海中は暗やみ同然であり、海底では生物酸化のみの場であり、嫌氣的にもなりやすい暗黒の世界である。

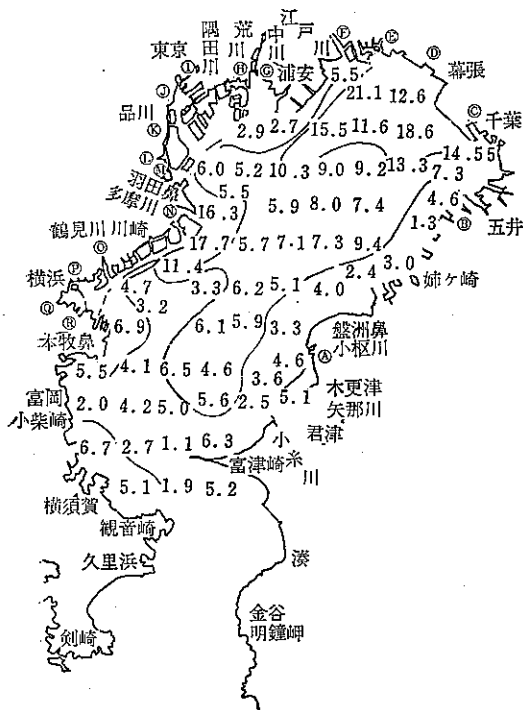
このような富栄養化をもたらしている栄養塩の濃度についてみると、1都2県共同調査、あるいは建設省調査結果<sup>4)</sup>も季節的な濃度のちがいはあれ同様な分布を示し、東京内湾付近がT-N 2 ppm、T-P 0.2 ppm前後と最も高く、これをとりまく千葉、浦安、川崎、横浜が高い。そして外洋の影響を受ける湾口部が低くなっていて、湾口部でT-N 0.7~1 ppm、T-P 0.08 ppm前後となって

いる。このような栄養塩濃度は湖沼学でいわれてきている富栄養湖のレベル<sup>5)</sup>T-N 0.2 ppm、T-P 0.02 ppm以上を大きくこえている。しかし、現在行なわれている化学分析法では、測られた量の栄養塩が全量植物プランクトンに利用可能なものかどうかは不明で、生物試験を行なってみなければ明らかとはならないが、このような高濃度であるので、N, P に関しては十分すぎると考えてよいであろう。

植物プランクトン量は富栄養化の程度を目安となるが、水の垂直混合状態、水温、光量等の影響を受けて季節変化する。47年8月の調査によると、<sup>6)</sup>表層のクロロフィルa量は、20~90 µg/l、特に奥部は大体40 µg/l以上となっている。同年10月の1都2県共同調査によるクロロフィルa量の分布は図1のようになる。この値は、生産層(光合成が行なわれている表層)と思われる深さ5 mまでの平均値を示したものであり、表層ではこの数値より高い。浦安—千葉の比較的遠浅な沿岸沖合部と多摩川河口部が特に高く20~40 µg/lとなっているほか湾口部および五井から富津にかけての沿岸部をのぞき、ほぼ10 µg/l以上となっている。このクロロフィルは諸々の条件により異なるが、最大数 mg C/mg Chl. a/hの有機物を合成するので、湾全体で合成される有機物量は相当な量となる。

同時点の表層の植物プランクトンの分布は *Thalassiosira mala* が全域に優占種として出現し、*Skeletonema costatum* が湾奥部沿岸に、*Chlamidomonas* が富津から盤洲にかけてと五井—浦安—川崎にかけての沿岸部で優占していた。動物プランクトンは *Cyolopoida* が60地点中57地点で第1位優占種として出現し、船橋沖、羽田沖、本牧沖の3地点で *Microsetella* が第1位であった。底生生物についてみると、46年10月72地点中、20地点無生物地点であったが、47年10月には60地点中3地点であった。このことは47年10月の方が海底の生物に対する生

図1 東京湾のクロロフィル a  
(0~5 mの平均値:  $\mu\text{g/l}$ )



活環境が良くなっていることを示しているが、しかしその個体数は少なく、構成種が多毛類で占められているので、底質の状態はあまり変化していないことを示している。このような底生生物の消長は、水の垂直混合の程度により季節変化するが、そのほか外洋の潮流の影響も受けるので、一概に水質が改善されたとはいえないであろう。

次に底質の重金属類等について15地点で調べた結果、各項目とも湾西側の沿岸部で高目であり、船橋沖、市原~君津沿岸で低値になる西高東低型を示す。46年度と同様1地点の周囲500mで8(46年度は10)サンプルを採取分析し、統計処理を行なった。このうちHg, Cdの15地点における平均値と95%信頼区間を図2に示す。(●)は今年度8サンプルの測定値、(○)は昨年度の10サンプルの測定値である。これらの図から

わかるように、95%信頼区間は大きい。これは、従来の調査方法のように1地点1サンプルの測定値のもつ信頼度が非常に低いことを示し、各地点群で平均値が異なっても95%信頼区間の大部分が重複していれば両地点間に有意な差は認められないことになる。底質の汚染物質分布を論じるには、濃度を数ランクに分けて、ある広さをもった地域がどのランクに相当するかを検討する方法がよい。このようにすれば1地点1サンプルの測定値でも、多くの地点で測定することによりその欠点を補うことができ、長期にわたる底質の変化を調べるには、今回行ったような1地点10サンプル程度の採泥を行なうのがよいであろう。ここに蓄積されている重金属類がどのように挙動するかは今後の研究調査を待たねばならない。

## 2 東京湾の物質収支

東京湾に流入する河川・工場等からの総水量は46年度調査で明らかにしたが、 $3.47 \times 10^9 \text{ t/日}$ である。これらと共に流入する汚濁負荷量はCOD(酸性法)で1042t/日(46年度の値を修正)である。一方富栄養化の因子であるT-N, T-Pの流入負荷について排出原単位を用いて推計してみると表1のようになり、東京から162t N/日、12.8t P/日、神奈川から72.9t N/日、5.25t P/日、千葉から47.2t N/日、3.72t P/日、隅田川・荒川・江戸川等の

図2 平均および95%信頼区間

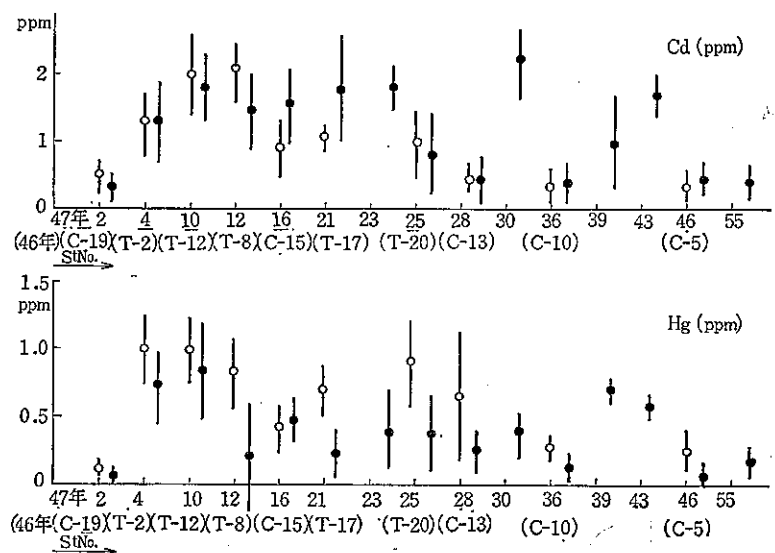


表1 東京湾流入負荷量（現状）

		東京		神奈川		千葉		埼玉	
		発生負荷量 t/日	流出負荷量 t/日	発生負荷量 t/日	流出負荷量 t/日	発生負荷量 t/日	流出負荷量 t/日	河川負荷量 t/日	
生活排水	N	132.7	80.0 外洋投棄 (32.7)	38.26	30.61	23.4	18.6 外洋投棄 (0.2)	江戸川	野田橋
	P	15.48	7.98 (2.18)	4.46	2.68	2.74	2.17 (0.02)	N 1.15	P 0.153
工場排水	N	79.2	79.2	40.77	40.77	26.4	26.4	中川	飯塚橋
	P	3.19	3.19	1.66	1.66	0.83	0.83	N 0.57	P 0.076
畜舎 (豚)	N	2.6	2.6	1.47	1.47	1.1	1.1	綾瀬川	内匠橋
	P	1.63	1.63	0.91	0.91	0.67	0.67	N 2.51	P 0.318
耕地	N	6.3	0.6	/	/	11.1	1.1	荒川	新荒川橋
	P	2.69	0.03	/	/	4.67	0.05	N 8.51	P 1.135
計	N	220.8	162.4	80.50	72.85	62.0	47.2	18.38	
	P	22.99	12.83	7.03	5.25	8.91	3.72	2.434	

上流部から流下してくるものも合わせると、合計300tN/日、24t P/日となり東京の占める割合は約55%である。東京の生活排水系の発生負荷は132.7t N/日であるが、参考までに、46年度都内市場で扱われた魚肉、野菜、果物および穀類中の全窒素量を推計してみると40,000t N/年、110t N/日となり、ほぼこの数値に近い。このように、1,042t COD/日、300t N/日、24t P/日の負荷が東京湾に流入し、一定期間湾内に滞留していると考えられるが、物質収支を論ずるには、湾内水中の現存量および湾口部からの流出量を明らかにする必要がある。1都2県の47年度の現場調査は、この項目に重点をおいたものであるが、作業は4kmメッシュに切った60地点において上層(0, 1, 2, 3, 4, 5mの混合試料)、中層(6, 8, 10mの混合試料)、下層(11m, 11m +  $\frac{1}{4}$ (水深-11)m, 11m +  $\frac{2}{4}$ (水深-11)m, 底上1mの混合試料)について各項目の分析をした。その結果水面積1,000km<sup>2</sup>、17.9km<sup>3</sup>の水中にCOD負荷(アルカリ法)31,200t、BOD負荷33,000t、T-N 12,800t、T-P 1,980t存在していた。

かりに流入するCOD物質がe<sup>-kt</sup>の速度で減少するものとする。流入水の滞留日数を60日とし自浄係数k=0.025とすると、湾内に滞留しているCOD負荷は、32,400t、k=0.02で36,950tとなる。CODの分析法で、流入が酸性法、滞留がアルカリ法のちがいはあるが、滞

留COD負荷が流入する外部負荷のみとすると、その分解速度はk=0.025位となる。しかし、滞留COD負荷には一次生産による内部負荷によるものもあるので、実際にはkはもっと大きな値となるであろう。

一次生産による内部負荷を図1に示したクロロフィル量から試算してみる。クロロフィル量と光合成量の相関に関する研究は多くの研究者によりなされているが、東京湾のように過度に富栄養化された水域での研究は少なく、用いるには大きな疑問があるが、Ryther-Yentsch<sup>16)</sup>が外洋で得た経験式

$$P = \frac{1}{k} \cdot R \cdot C \cdot 3.7$$

P:生産量 (g C/m<sup>2</sup>/day)

$$k = \frac{1.9}{\text{透明度(m)}}$$

R:水面上輻射エネルギーに対する光合成の相対値 (R/m<sup>2</sup>/day)

C:有光層の平均クロロフィルa量 (g/m<sup>3</sup>)

を用いてみる。その結果は0.47g C/m<sup>2</sup>/日となった。すなわち、湾全体で500t C/日、TOD負荷にして1,300t/日である。調査時のクロロフィルaの値が東京湾として低目のものであったことと、Ryther-Yentschの式をそのままあてはめたことにより、このような値になったと考えられる。

成層期の赤潮時には、 $2\sim 3\text{ g C/m}^2/\text{日}$ の光合成能がある。かりに $1.5\text{ g C/m}^2/\text{日}$ とすると、湾全体で $1,500\text{ t C/日}$ の有機炭素、TOD 負荷 $4,000\text{ t/日}$ の有機物が生産されていることになる。先に求めた流入 COD 負荷 $1,042\text{ t}$ の酸化率を5割強とすると、TOD 負荷にして、 $2,000\text{ t/日}$ となる。したがって光合成能 $0.5\text{ g C/m}^2/\text{日}$ として4割、 $1.5\text{ g C/m}^2/\text{日}$ として6.6割、 $3\text{ g C/m}^2/\text{日}$ として8割の有機物が内部負荷による汚濁であり、富栄養化による汚濁の問題は大きい。

ところで流入負荷が $300\text{ t N/日}$ 、 $24\text{ t P/日}$ 、 $\text{N/P}=12.5$  滞留負荷が $12,800\text{ t N}$ 、 $1,980\text{ t P}$   $\text{N/P}=6.5$ となっている。滞留日数についてみると T-N が約40日、T-P が80日と T-Pの方が2倍となっている。この理由は明らかではないが、T-N が選択的に湾外に流出すると考えられない。一般にりんは生体⇒環境の回転速度が速く、海底に堆積しにくいのに対し、生体中の窒素は比較的分解がおそく沈んで水中から除去されやすいのに加えて脱窒素の効果も考えられるので、このような値になったのかも知れない。また流入負荷を求めるのに用いた数値、仮定の不正確さに由来するとも考えられる。

以上、東京湾に流入する量、滞留負荷量について述べたが、外洋への流出量を把握すれば、湾全体の物質収支が大体つかめたことになる。湾口での交換率を求めるために、46年度、47年度と2回実測を試みた。測線は、富津崎—横須賀を結ぶ線としたが、いずれも確信できる結果は得られなかった。46年度の結果では流入出の差が1割で0.9の交換率となったが、47年度の結果では、水量、T-P は流入、T-N は流出するとなった。このような理由として調査測線としては、最も適当な所と考えられるが、現場は大型船舶の出入の激しい浦賀水道におけるものであり、海上保安上危険なこと、3～4地点の観測結果では渦流も生じている現場の解析が困難なこと、さらに現在の流速計では $5\text{ cm/秒}$ 以下の測流は不可能に近いこと、また、東京湾上の気圧が $1\text{ mb}$ 高ければ水位が $1\text{ cm}$ 高くなり、 $10^7\text{ m}^3$ 流入する等の要因が考えられ、実際このような試みは、非常にむずかしいことが認識された。

### 3 数値解析による拡散のシュミレーション

46年度に一層（循環期）のシュミレーションを行ない、47年度は成層期のシュミレーションとして二層モデ

ルによる拡散のシュミレーションを行なった。

この解析は1都2県の委託により、新日本気象海洋(株)および東大、杉の原・蓮沼両氏のご尽力によるものである。

#### (1) 数理解析の意味

東京湾は水面積約 $1,000\text{ km}^2$ 、水量 $17.9\text{ km}^3$ 、外洋とは幅 $6\text{ km}$ のせまい浦賀水道でつながる袋状をした大きな湾である。この湾の周囲には、 $2,000$ 万人の人口と京浜・京葉の大工場群が存在し、47年度推計で、これらの家庭、工場あるいは河川から、水量 $3.47\times 10^7\text{ t/日}$ 、COD 負荷 $1128\text{ t/日}$ 、窒素加合物（全窒素） $300\text{ t/日}$ が流入している。そして現在の東京湾は慢性的赤潮状態にあり、かつての清澄な海とは程遠い。このように多量の汚濁汚染物質が流入し、過度に富栄養化されている東京湾の浄化計画を策定するにあたっては、汚濁機構を明確にしなければならない。

一般に水の汚れは大別して、(1)水銀、カドミウム、あるいは BHC 等の有害物質による汚染、(2)人間に直接有害と考えられないが、流入する有機物あるいは土砂による一次的汚濁、(3)あるいは栄養塩の流入過多による富栄養化による二次的汚濁の3種類になると考える。このような汚れに対してなすべきことは、(1)の有害物質の対策として、そのような物質を環境中に放出しないことと、環境中に放出されてしまったものが食物連鎖などを通じて人間とどのような関係にあるかを明らかにすることである。次に(2)(3)の有機汚濁の点については、その地点における汚濁が何に起因するものかを明らかにし、目標水質達成のためには、何をどれだけ削減すればよいかを明らかにすることである。後二者による一次、二次汚濁の寄与率は地点により異なるものであり、それぞれ各点に対し調査・解析を行なわなければならない。その手法として、大体2または3とおり考えられる。

その一つは実測である。流入する有機物は、河川の流入効果、湾内の流れ（潮流、吹送流等）等により沖合に拡散していき、その間に沈澱したりあるいは無機化されたりして減少する。湾内のある地点に及ぼすこれら流入有機物の影響は、潮流、到達時間、水温あるいは汚濁物質の質等により異なるが、かりにその地点の水柱（単位面積）あたりの有機汚濁物質の量が、水の成層期、循環期の垂直混合率のちがいを無視して一定とすると、そ

の水柱中の総有機物質量を年間通じて測定すれば、季節的にそれぞれの寄与率を推定することができる。

他の手法は、流入する汚濁物質がどのように拡散するかを数理解析または模型実験から再現する方法である。すなわち、モデルに流入負荷を与え潮流等により拡散していく様子を追うものであり、拡散計算値と現場の実測値の差を二次汚濁由来とするものである。しかしながら、いずれの拡散結果も、現実の姿をそのまま再現するものでなく、一長一短がある。模型実験による再現は、潮流および細かな地形の変化による流れの相違や、それに伴う拡散の差異を明らかにすることができるが、模型の大きさに限界があり、それに伴う縮尺の歪みなどが問題となる。また一つのケースを行なうのに時間がかかりすぎる点も問題になる。

一方、数理解析による再現は、基本形式は対象水域をあるメッシュに切り、これに潮汐を与えて各メッシュの流れを計算した後、流入する負荷を与え、ある条件下で拡散させていくもので、計算に人手を煩わせることなく電子計算機で短時間に計算できるのが利点である。模型と同様にある拡散計算においても、現実的な拡散を再現するには、流入水量、負荷量およびその流入地点、潮位変化、成層の状態、地形図、風向風力、拡散係数、そして分解速度（自浄係数）などの正確なデータを必要とする。

しかしながら、これらのデータをすべて正確に得ることは不可能であり、計算には仮定が入らざるを得ない。このように、得られた結果は、ある条件のもとでの拡散であり、一定条件下における近似値として取扱うことを認識しておかねばならない。

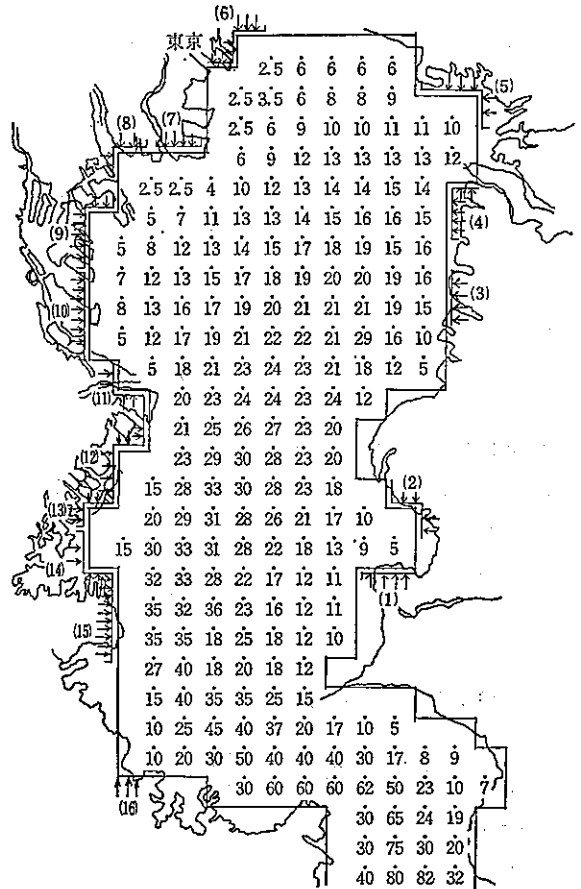
東京湾における数理解析は今までにいくつかなされているが、1都3県公害防止協議会、東京湾部会による東京湾総合調査で、一層モデル二層モデルを用いて解析を手懸けているので、その一部を紹介する。

## (2) 東京湾における数値解析

### ア. 一層モデル

湖沼、海域では、春先から気温の上昇と共に表面水温も上がり、下層の比重が変わらないのに対し表層の比重は軽くなる。流入水の水温も高まり流入汚濁物質は表層をつたわって広がっていく。このように水塊の垂直混合率が低い時期を成層期というのに対し、表層水温が低下

図3 水深図 (単位:m)



し密度の上下逆転が生じ混合が良く現われる時期を循環期という。

この循環期における拡散の様子を再現するには、水質が上下均一とする一層モデルを考えなければならない。今回、計算に用いたモデルは、東京湾を2kmの格子間隔に切り、図3のように各メッシュの深度を海図より読みとり、湾口部に与えた潮汐により潮流を再現し、これに流入負荷を入れ拡散させた。

### 潮流計算

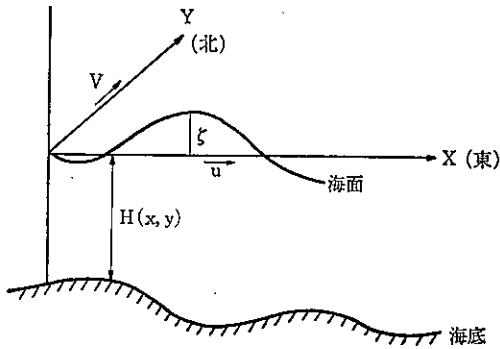
潮流は、回転流体の運動方程式および連続の方程式を、密度均一の仮定のもとで、海面から海底まで積分した式を解くことにより再現する。回転流体の運動方程式および連続の方程式を積分した潮汐現象を表現する基本方程式は、次のとおりである。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -g(H+\xi) \frac{\partial \xi}{\partial x} - r^2 \frac{\bar{u}^2}{H+\xi} + fN - (H+\xi) \cdot$$

図4 一層モデルの座標系

$g$ : 重力加速度 (980)

( ) 内の単位は c.g.s.



$\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  は各々東西(x), 南北(y)方向の流速の海面から海底までの平均を示し, 流量  $M$ ,  $N$  とは次の関係がある。

$$M = \bar{u}(H + \xi)$$

$$N = \bar{v}(H + \xi)$$

$$\left\{ \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} \right\} + A \Delta^2 \bar{u} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -g(H + \xi) \frac{\partial}{\partial y} - r^2 \frac{\bar{v}^2}{H + \xi} - fM - (H + \xi)$$

$$\left\{ \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} \right\} + A \Delta^2 \bar{v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial y} \quad (3)$$

ここで  $f$ : コリオリのパラメーター ( $8.367 \times 10^{-3}$ )

$A$ : 水平混合係数

海底摩擦としては, 従来内海・湾等で成功している流速の2乗に比例する表現を採用した。

抵抗係数:  $r^2$  の値として  $2.6 \times 10^{-3}$  を取った。

与えた流入条件は, 表2に示した水量を, それぞれ相当する地区のセルの陸部より流入させ, 湾口と久里浜—金谷線とし, そこでの潮汐は, 周期24.86時間の主要4分潮の合成潮とした。

数値計算は(1)~(3)式を差分形に直し, Primitiveの方法で時間積分を行ない, 逐次新しい時間での  $M$ ,  $N$ ,  $\xi$  を求め, 計算を進めた。

その結果, 潮流分布は図5 a. b. c. d. となった。後でものべるが, 東京湾のようなスケールの汚濁拡散を論ずる場合, 潮汐による移流項が最も重要な働きをしている。したがって, その潮汐現象をいかに正確に再現するかが拡散問題の研究に最も基本的な問題となっている。東京湾の潮位記録を調べてみると, 主要4分潮がいずれも大きく観測されているので, これらの合成潮で拡散を取扱うことにした。結果についてみると図5 d. のように横浜沖に  $M_2$  潮位変化ではみられない漲潮時に時計回りの渦が形成された。また, 格子間隔を2kmとしたためもあって, 最大80cm/secに達する流速を得ることができたが, これは従来の研究に比べ, 潮位(湾口で与える潮位の振幅)が大きいためもあるが, 現実をよく再現していると考えられる。しかし, 浅海域では, 格子間隔の粗さのため, 水深および陸岸の形状がよく表

表2 東京湾流入汚濁負荷量表

C-1 (1) 君津・富津		C-2 (2) 木更津		C-3 (3) 袖浦町		C-4 (4) 市原市		C-5 (5) 千葉・習志野		C-6 (6) 船橋市・市川市・浦安町		T-1 (7) 江戸川水域		T-2 (8) 荒川・中川水域	
$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷
2,544	24.7	1,117	2.88	699	9.05	3,545	44.09	1,947	16.9	241	8.01	4,505	62.9	5,537	216.7
T-3 (9) 隅田川水域		T-4 (10) 城南水域		T-5 (11) 多摩川水域		K-1 (12) 工場		K-2 (13) 鶴見川		K-3 (14) 工場		K-4 (15) 山下・八幡		K-5 (16) 工場	
$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	$\times 10^8$ m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷
3,911	94.0	1,277	59.6	1,544	41.9	4,071	314	2,004	53.8	2,946	176	1,507	13.2	27.3	0.98

図5(a) 流況図(66時間後)

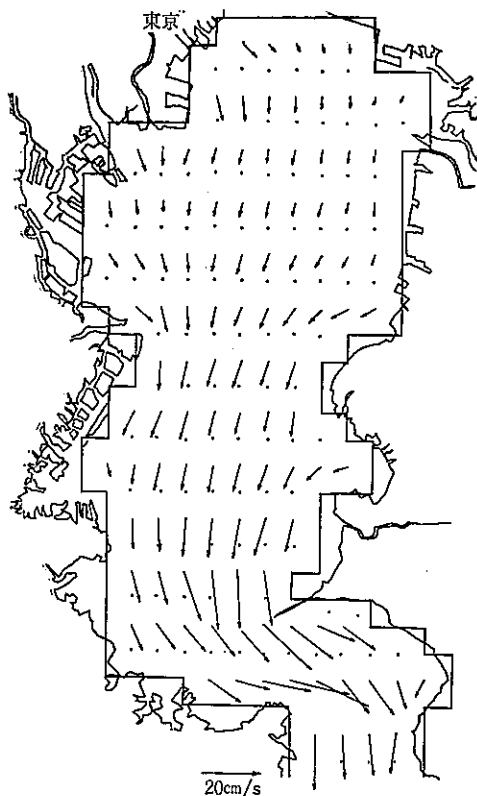
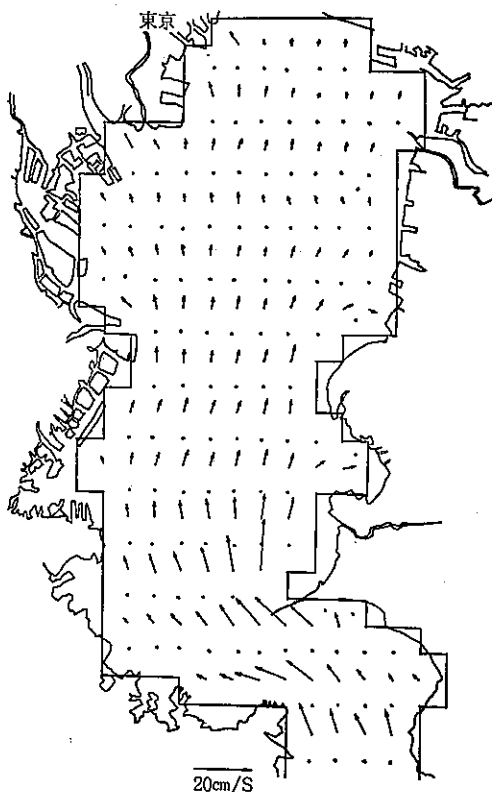


図5(b) 流況図(69時間後)



現されておらずそれ程よく再現できていないと思われる。河川・排水口からの流入による流れは、潮汐流に比べ小さなもので、結果からはほとんどその働きを知ることができない。しかし、長時間にわたる拡散計算では、このほとんど無視できると思われる流れも、潮汐のような往復運動ではないため、重要な働きをしてくるものと考えられる。

拡散計算

COD濃度をSとすると、COD負荷の保存を示す式は、

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -u \frac{\partial s}{\partial x} - v \frac{\partial s}{\partial y} - w \frac{\partial s}{\partial z} + K_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2}$$

ここで  $K_x$ : 水平拡散係数  $K_z$ : 鉛直拡散係数

海面から海底まで積分すると

$$\frac{\partial}{\partial t} S(H+\xi) = -\frac{\partial}{\partial x} SM - \frac{\partial}{\partial y} SN + K \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H+\xi) \frac{\partial s}{\partial x} \right\} + K \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (H+\xi) \frac{\partial s}{\partial y} \right\}$$

上式によって、潮汐計算で求めたM, N,  $\xi$ の値を用いればCOD濃度Sを求めることができる。

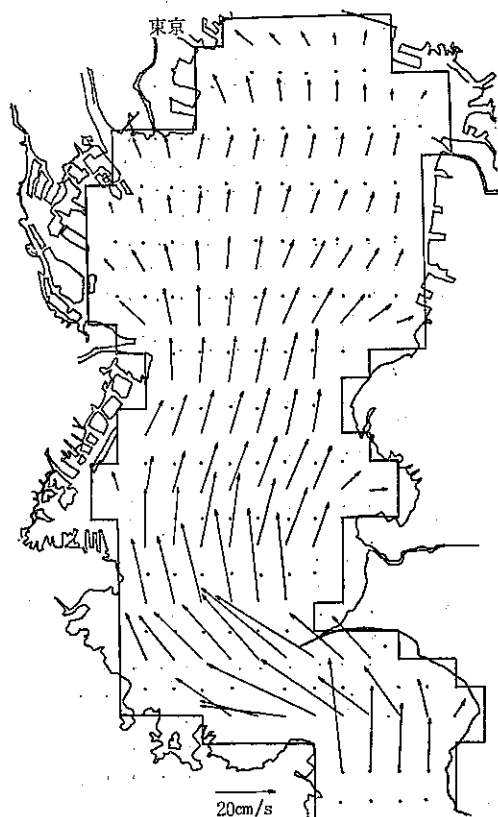
数値計算は、潮汐計算と同様 Primitive の方法を用いて解く。格子点の取り方は、潮汐計算と同じで、Sは $\xi$ 点で求め  $S(H+\xi)=S$  として差分方程式を解く。このようにして上記の潮汐および乱流拡散によるCOD負荷の拡散を下記のようなA, Bの2ケース行ない、Aケースの結果を図6に示す。

	Aケース	Bケース
湾口域初期濃度	1.0ppm	0.5ppm
拡散係数	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^4$
流入負荷	1,127t/日	1,139t/日
計算日数	42.5日	45日

与えたCOD負荷の詳細は表2に示してある。初期濃度は湾西側を2.1ppm、湾中部を1.2ppm、湾東側を1.6ppmとした。

東京湾のような湾における拡散問題では拡散係数の取り方が重要だと考えられている。例えば、拡散係数  $10^6$  を採用した場合、汚濁が2~3日で湾内に広がっていき、内湾でも20ppm以上になった。また汚濁の様相も完

図5(c) 流況図(72時間後)

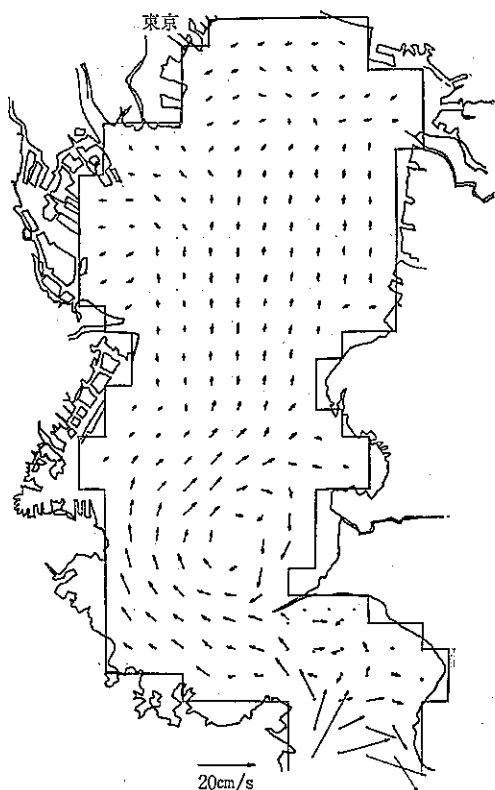


全に汚染源からの距離に比例したもので、現実的なものではない。したがって今回用いた  $10^5 \sim 5 \times 10^4$  の値は、染料拡散実験等で得られた数値で勿論種々検討が必要であるが、妥当なものと考えてよいだろう。

計算結果をみると西高東低の分布状況を示し、東京沿岸部では 10ppm 以上にもなっている。また、横浜沖に 2 ppm の領域がはり出しており、それは湾奥の値より高いのが特徴的である。これは潮流計算で得られた渦によるもので移流項の重要性が指摘される。

汚濁流入源の付近では計算開始後大略 1 ヶ月は濃度の急激な上昇がみられたが、それ以後は比較的安定した値を示すようになる。これはある種の釣合状態を示しているものといえる(連続的に河口・排水口から負荷が流入している状態下の釣合)。計算が 1 ヶ月半しか行なわれなかったため、湾口付近までは汚染影響が及んでいなく、また内湾領域では初期期急激でないが、徐々に濃度が高くなっている。湾口部のある点での釣合状態になる濃度を求めるためにも、もっと長時間の計算が必要であ

図5(d) 流況図(75時間後)



ろう。

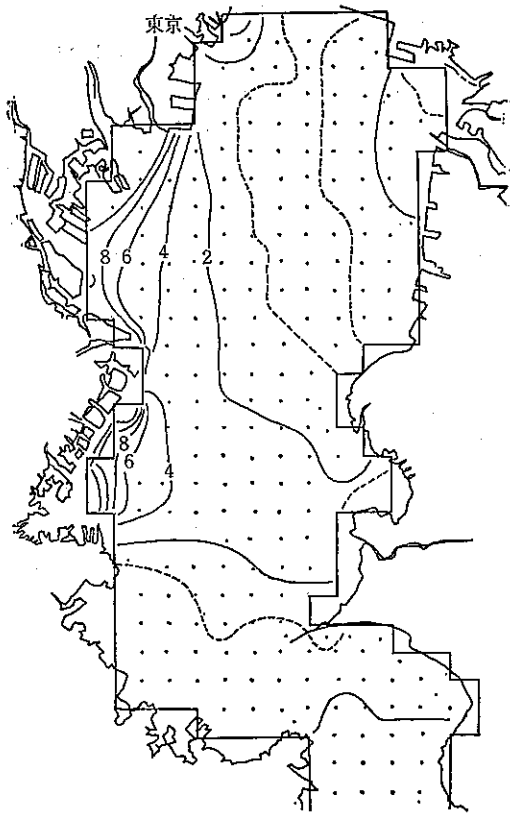
計算時間に関して次の点も留意しておく必要がある。計算に用いたモデルの東京湾全容量は約  $20 \text{ km}^3$  弱で、初期濃度分は A ケースで  $31.8 \times 10^4 \text{ t}$  であり、1 日に流入する汚濁物質は 1,127t であった。それゆえ 42.5 日間に流入した負荷量は  $47.9 \times 10^4 \text{ t}$  となる。これを東京湾の平均水質に直すと 4.5ppm に相当する。また 1 日当たりの流入水量は  $3.36 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$  であるため、2 年間の流入量が東京湾容積に相当する。速水によると潮汐による混合で 1 潮汐約 10% の水が入れかわるという結果が得られているので、東京湾口における海水を対象に交換すれば東京湾奥水の滞留時間は、湾口の平均流量  $2.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日}$  を参考にすると、40 日となるが現実はずっと複雑なものになる。

#### イ 二層モデル

一層モデルが循環期における拡散の再現をめざしているのに対し、二層モデルは成層期における拡散をめざしたもので、上下各々均一な密度を想定している。モデル



図6 CODの計算濃度分布図  
(Aケース, 1017時間後97潮時)



は、一層モデルと同様 2 km 間隔のメッシュに切り、それに表2の値を修正した表3の流量、負荷を与えた。湾口の境界線として、試算検討の末、城ヶ島—大房の鼻を結ぶ線とした。

潮流計算

潮汐は一層モデルと同様に回転流体の運動方程式および連続の方程式を上層、下層の各層間で積分した式を解くことによって再現した。その基本方程式は次のとおりである。

上層:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{\partial u^2 h}{\partial x} - \frac{\partial uvh}{\partial y} - fvh - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \gamma^2 i (u-u') \cdot \sqrt{(u-u')^2 + (v-v')^2} + AeV^2 u$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial uvh}{\partial x} - \frac{\partial v^2 h}{\partial y} + fuh - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \gamma^2 i (v-v') \sqrt{(v-v')^2 + (u-u')^2} + AeV^2 v$$

下層:

$$\frac{\partial M'}{\partial t} = -\frac{\partial u'^2 h'}{\partial x} - \frac{\partial u'v'h'}{\partial y} - f'v'h' - gh'$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \Delta \rho gh' \frac{\partial \eta}{\partial x} + \gamma^2 i (u-u')$$

$$\sqrt{(u-u')^2 + (v-v')^2} - \gamma^2 i u' \sqrt{u'^2 + v'^2} + AeV^2 M'$$

$$\frac{\partial N'}{\partial t} = -\frac{\partial u'v'h'}{\partial x} - \frac{\partial v'^2 h'}{\partial y} + f'u'h' - gh' \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \Delta \rho gh' \frac{\partial \eta}{\partial y} + \gamma^2 i (v-v') \sqrt{(u-u')^2 + (v-v')^2} - \gamma^2 i v' \sqrt{u'^2 + v'^2} + AeV^2 N'$$

また連続方程式は次のようになる。

$$-\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (M+M') + \frac{\partial}{\partial y} (N+N')$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial M'}{\partial x} + \frac{\partial N'}{\partial y}$$

ここで

表3 東京湾流入汚濁負荷量表

C-1 (1) 君津・富津		C-2 (2) 木更津		C-3 (3) 袖浦町		C-4 (4) 市原市		C-5 (5) 千葉・習志野		C-6 (6) 船橋市・市川市・浦安町		T-1 (7) 江戸川水域		T-2 (8) 荒川・中川水域	
x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷
2,435	21.1	735	5.4	1,120	12.3	4,731	51.7	1,843	14.5	217	5.3	3,153	74.4	3,327	199.3
T-3 (9) 隅田川水域		T-4 (10) 城南水域		T-5 (11) 多摩川水域		K-1 (12) 工場		K-2 (13) 鶴見川		K-3 (14) 工場		K-4 (15) 山下・八幡		K-5 (16) 工場	
x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷	x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /日 排水量	t/日 COD 負荷
3,665	76.4	1,347	71.3	1,544	41.9	4,071	303.8	2,004	52.2	2,946	173.5	1,507	12.7	27	1.0

$\Delta\rho$ : 上層と下層の密度差

$f$ : Coriolis parameter

$\gamma_1^2$ : 上, 下層の摩擦係数 (0.001)

$\gamma_0^2$ : 海底摩擦係数 (0.0026)

$g$ : 重力加速度

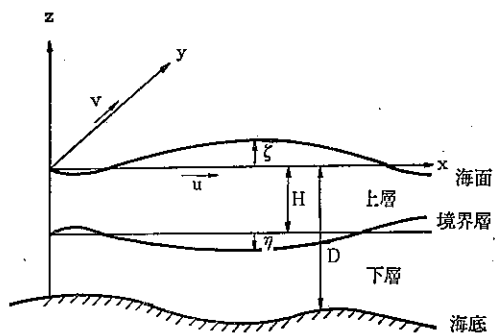
$u, v$ : 上層の水深方向での平均流速

$u', v'$ : 下層の水深方向での平均流速

$h$ : 上層の厚さ ( $=H+\eta+\xi$ )

$h'$ : 下層の厚さ ( $=D-\eta-H$ )

図7 二層モデルの座標系



なお下層の式で  $-gh' \frac{\partial \xi}{\partial x} + 4\rho g n' \frac{\partial \eta}{\partial x}$  と  $-gh' \frac{\partial \xi}{\partial x} + 4\rho g h' \frac{\partial \eta}{\partial y}$  は下層での圧力傾度を表わしている。

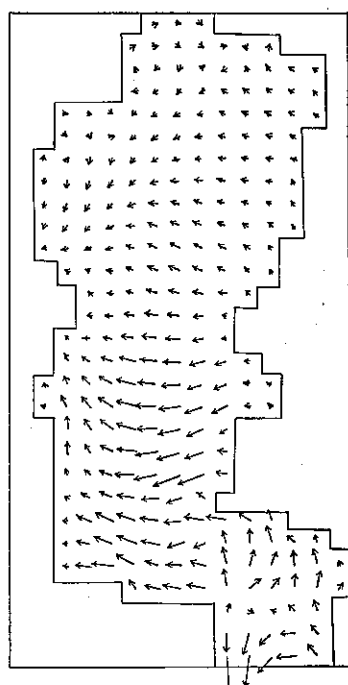
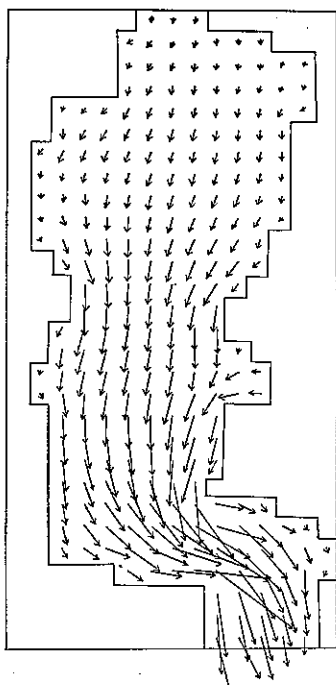
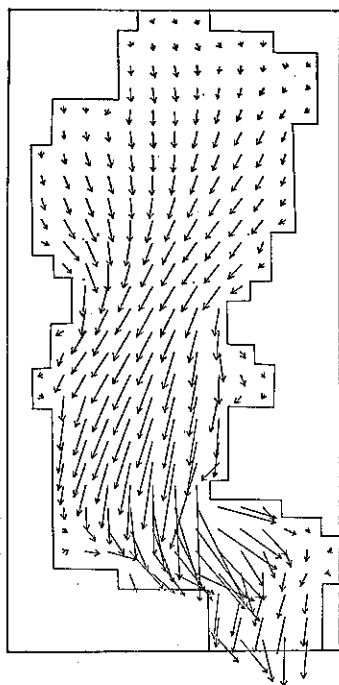
湾口条件は、25時間周期(4分潮)のバロトロピックな潮位変化( $M_2$ 潮位)を71cmで与えた。上層の平均の厚さは、水温躍層を考えると5~10m位であるが、計算の都合上3.5mと5mの2ケース試みた。河川・排水からの流入水は表3に示したが、流入地点は、一層モデルと同様とし、表層のセルに与えた。表層水の平均の厚さ5mとしたときの計算結果を図8 a~hに示す。

図のように上層では落潮時に、表層では千葉から神奈川にかけて東京湾を対角線に流れ、逆に漲潮時には神奈川側から千葉側にかけて流れる。湾口部の流れは潮時によって50~60cm/secに達する。すなわち千葉側の沿岸水は早い流れに乗って湾口に拡散するが、多摩川以北の湾奥水は湾口への拡散が悪いことを示している。一方下層では、ほぼ湾に沿って流れている。また満潮時には、上層は東京・神奈川沿岸から千葉に向かって流れ(5cm/sec程度)、下層はほぼ逆に約3cm/sec以下で流れており、

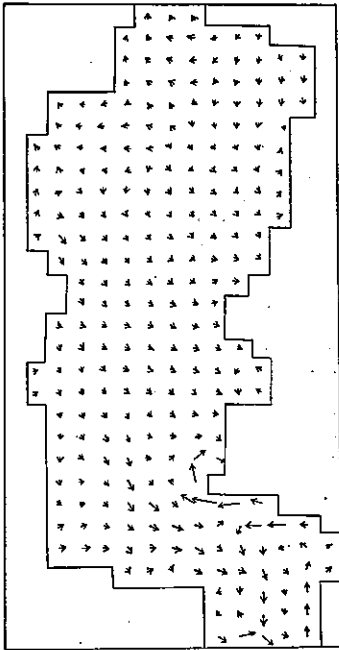
図8 (a) 3.00上層

(b) 3.00下層

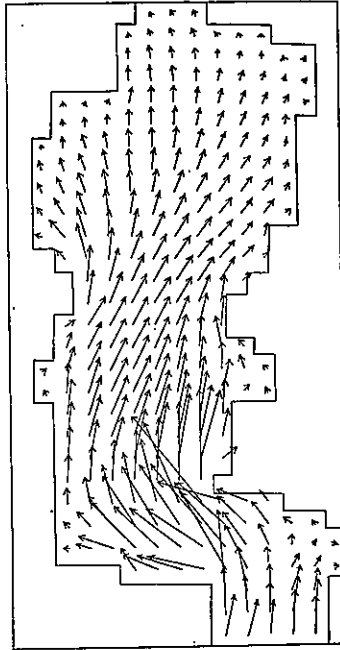
(c) 6.00上層



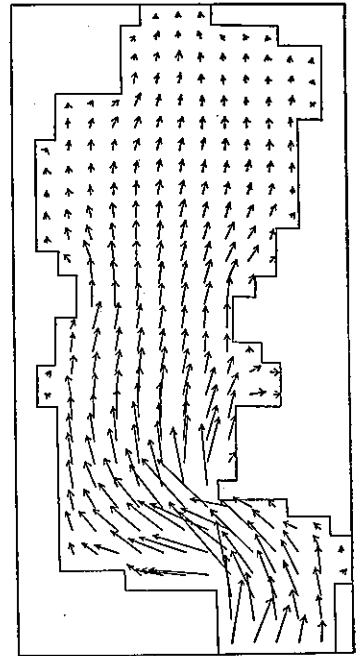
(d) 6.00下層



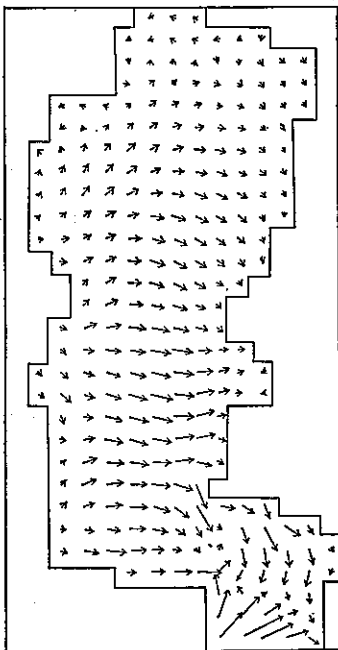
(e) 9.00上層



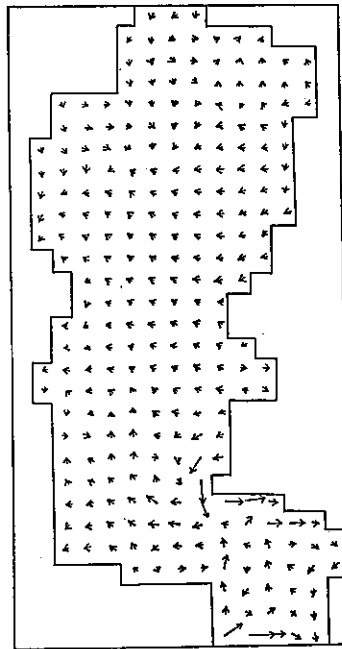
(f) 9.00下層



(g) 12.00上層



(h) 12.00下層



干潮時には逆と、内部モードの運動が卓越している。

#### 拡散計算

初期濃度は、上下層とも 0 ppm とし、計算開始後の下層の濃度は、上下層間の物質交換係数を一定として取扱ひ、上下層間の濃度差によって決まるようにした。その係数は、経験的に  $1.3 \times 10^{-8}$  とした。また水平拡散係数は、汚濁拡散を早くするために（実質的には移流効果が大きいため、この影響は小さい。）一層モデルより大きく  $2 \times 10^5$  とした。湾口では、移流項の動きにより濃度が定まるものと仮定し、濃度傾向が保存するようにし、流入時（外洋→湾内）には希釈係数として 0.9 を乗じた。潮流計算の結果を用いて拡散計算を行なうと 60.5 日後の上層・下層

図9(a) COD分布図 上層 60.5日

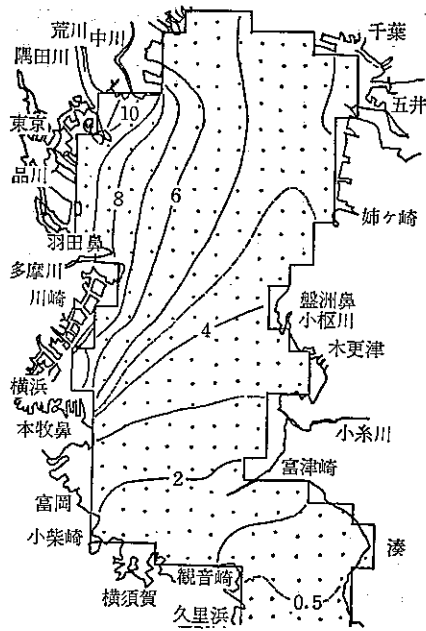
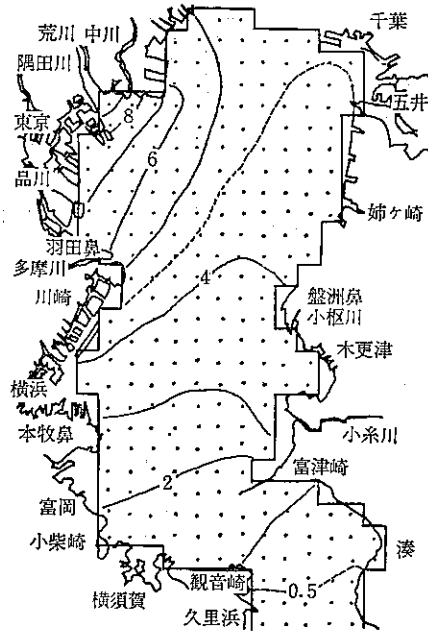


図9(b) COD分布図 下層 60.5日



の濃度分布は図9 a, b のようになる。上層の汚濁の広がり大きく、下層は小さくなっているが、いずれも西高東低と分布状況は似ている。上層についてみると荒川河口で10ppmと高く、浦安から本牧にかけて6ppmとなり沖合に向かって低くなる。そして盤洲鼻から本牧鼻にかけて4ppmの等濃度線が存在し、湾口部で1ppmとなっている。30.5日の分布と比較すると横須賀から富津崎を結ぶ線以北では、濃度分布は60.5日後で約2倍になっており、60.5日時点でも各点での濃度は上昇中である。保存系の物質拡散においては、濃度は時間経過につれて上昇するが、濃度が湾口に達し湾口での物質収支と流入負荷が釣合の状態になれば、定常的な分布が得られる。またこのほかに自浄作用的な減衰項を導入すれば早く定常状態に達するが、潮汐による拡散（河川排水口からの流入による流れもあるがこの流動は微々たるもの）では自浄作用を相当大きく見積らなければ現象に近い定常的な濃度分布は得られない。

(3) モデルの問題点

流入負荷の9割近くが、湾西側の東京・神奈川から排出されているので、汚濁拡散パターンは西高東低となるが、一層モデルと二層モデルの計算結果を比較してみる

と、明らかに異なっている。一層モデルでは、湾の長軸に平行な等濃度線と横浜および川崎から木更津にのびる張出しがある。二層モデルでは、表層のパターンは本牧埠頭を中心として放射状に等濃度線がのびている。下層は上層に似ているが、東京から湾外に向かって濃度変化をしている。この二つの計算において、いくつかの条件、仮定は異なっているが、汚濁分布パターンを最も相違させているものは、移流項の働きによっている。図5と図8に示したように、計算された潮流ベクトルは、一層モデルにおいて4分潮の合成値を湾口条件として計算したため湾の長軸にほぼ平行に流れるが、湾側2回潮の影響によって漲潮時には、横浜—木更津に時計回りの渦ができています。このために横浜沖に張出しのある拡散パターンとなっている。二層モデルにおいては、この種の計算が初めてであるため、二層の影響を定性的につかむことからM<sub>2</sub>潮を湾口条件として計算した。落潮時に表層で千葉から神奈川に向かって東京湾を対角線に流れ、千葉側の汚濁を早く湾口に拡散させ、東京内湾部の汚濁を滞流しやすくしている。このように、汚濁の拡散は、移流項によるところが大きく、現実に近い汚濁拡散パターンを得るには、モデルで得られる潮流が、いかに現実的な

ものかにかかっている。現実の東京湾の潮流を左右している因子として、(1)潮汐による流れ、(2)風の直接的影響である吹送流、(3)湾口から入ってくる黒潮の勢力、(4)河川水の圧力、(5)熱的要因や気圧変化に伴う流れ、あるいは(6)埋立、浚渫等の地形変化等があげられる。これらの影響を正確に実測することが必要であるが、そのまま、計算機に組み込める程の観測密度と精度を得ることは不可能である。必要なのは、モデル作りおよびその検証のためのデータである。このような意味で潮流観測は非常に重要である。

潮汐現象が忠実に再現された場合、残る問題は拡散過程の再現である。拡散計算でまず問題になるのは、湾口条件のとりかた、すなわち湾口を通じての汚濁物質の授受をいかに表現するかである。一層モデルの拡散計算では、湾口境界線において落潮時には移流により湾内水がそのまま汚濁濃度を保持したまま流出し、漲潮時には、外洋の汚濁されている海水が流入するという条件で、また二層モデルでは10%稀釈されて再び流入するという条件で計算したが、これはあくまでも便宜的な手法であり、湾口での水の交換を物理的に明らかにしておかねばならない。そのためには湾口部での長期にわたる細かい現場観察のほか、もっと粗い格子間隔で外洋を十分含む領域で、前者の条件を用いて予備的に湾口での収支計算を行ない、合わせて観測データを考慮しながら適当な条件をみつけるのが最適であろう。

次に、拡散係数の与え方であるが、純学問的にも未知の分野であり、染料投入による観測によって経験的に定めるほか、現在ではその他の方法がみあたらない。しかし、今回の試験的な計算からも、今回使用した格子間隔では、大略  $10^5$  のオーダーの拡散係数を用いれば相当現実的な拡散過程の再現ができるものと考えられる。

次に今回の計算では、CODを保存系物質として拡散を試みたが、初めに述べたように流入する汚濁負荷の湾内汚濁への影響度を明らかにするには、自浄作用の因子を組み込む必要がある。流入する有機物の減少速度は、有

機物の質、濃度により決まるものであり、実験的に求めなければならない。

この計算は、1都2県共同調査の一環として進めているものであり、今後、吹送流、自浄係数等をモデルに組み込み、諸条件をさらに検討し、精度を高めていく予定である。また、汚濁指標として、窒素あるいは、りんについても検討する。

#### 参 考 資 料

- 1) 1都3県公害防止協議会 東京湾総合調査報告書 昭和47年8月
- 2) 古井戸良雄他：東京都公害研究所 年報 4 115 (1973)
- 3) 西条八東：湖沼調査法 (1965)
- 4) 建設省関東地方建設局土木研究所：昭和46年度 東京湾汚濁調査 昭和47年3月
- 5) 吉村信吉：湖沼学 333 (1937)
- 6) 建設省関東地方建設局土木研究所：昭和47年度 東京湾汚濁調査 (中間報告)
- 7) 日本下水道協会：東京湾汚濁防止調査報告書 昭和47年3月
- 8) 浮田正夫他：公害と対策 8 477 577 (1972)
- 9) 茨城県：霞ヶ浦水質保全対策調査報告書 (第一報) 昭和47年3月
- 10) 土木学会：琵琶湖の将来水質に関する調査報告書 昭和44年度、昭和46年度
- 11) 東京都下水道局：汚濁負荷量子測のための基礎数値に関する調査報告書 (昭和46年3月)
- 12) 各都県資料
- 13) 東京都統計年鑑 (昭和46年度)
- 14) 女子栄養大学出版会：食品成分表 (1973)
- 15) 西条八東：海洋科学基礎講座 11巻 287 (1972)
- 16) John H. Ryther and C. S. Yentsch. limnol. Oceanogr. 2, 281 (1952)