

伊勢湾および東京湾の水質 (模型実験を中心として)

金子 安雄

1. まえがき

1950年代以降わが国の経済は世界にも類をみない程に伸展拡大し、物質的な生活水準は著しく向上した。しかし、こうした経済成長の反面で、かつて美しかった国土の自然環境はいたる処で公害に蝕まれており、とりわけ大規模かつ深刻な問題は、都市排水、産業廃水の流出による公共水域の水質汚濁現象である。わが国の沿岸海域でも、都市河川の流入する海域や臨海工業地帯を持つ内湾域の水質汚濁が著しく、特に東京湾・伊勢湾・大阪湾などでは地形的に閉鎖された海域で外海との海水交換も小さいため、水質汚濁のワーストケース海域となっている。

このような状況に対して、行政当局は公害対策基本法や水質汚濁防止法を制定して排水の規制を強化し、さらに下水道の整備等によって、水質汚濁は徐々に改善されつつある。他方、より総合的な水質汚濁防止対策の確立を目的に汚濁海域の実態調査が数多く実施され、遅ればせながらその機構が明らかにされつつある。けれども実態調査データからは汚濁の現状は把握し得ても、将来計画による地形、流入汚濁負荷量等の変更にもとまう汚濁現象の変化を予測するのはきわめて難しい。このため近年、実態調査資料にもとずいて模型（水理模型・数値模型）を利用した予測が行なわれており、その有用性も確認されつつある。¹⁾

本稿では題意にしたがい、伊勢湾・東京湾の水質に関して実施された水理模型実験を中心にして、同湾の水質汚濁の現状、実験方法（実験の基本的な考え方、手法）および汚濁拡散の特性等について述べることにする。ただし、本稿で言う水質は環境問題としての水質汚濁現象に係る水質を主題とするが、この点では質的に多様性を有するけれども、ここでは都市排水、産業廃水その他の汚水を総括して汚水（広義）として扱うこととお断りしておく。

2. 伊勢湾の水質

(1) 伊勢湾の海域環境

伊勢湾は水面積 2130 km²、海岸延長約 290 km（南北約 65 km、東西約 70 km）を有する大湾で知多半島により伊勢湾（約 1620 km²）と三河湾（または渥美湾、約 510 km²）に分割される。湾内には伊勢湾側に木曾川・揖斐川・長良川等の大河川その他、庄内川・鈴鹿川・五十鈴川、天白川等の中小河川が、さらに三河湾側には矢作川をはじめ都市部を流下する豊川・境川等が流入している。

伊勢湾（広義）は広大な水面積を有するにもかかわらず、水深は伊勢湾部で約 19 m、三河湾部で約 9 mと浅く摺鉢状の海底地形となり、さらに湾口部は約 20 kmの開口巾（渥美半島と志摩半島間）を持っているが、この間には答志島をはじめ大小の島々が点在し、有効巾は狭くなっている。このため外海の影響も少なく、特有の地形と相まって汚染され易い海域地形となっている。

湾内の流れの主体は潮流であり、潮流は湾口（伊良湖水道）から進入する潮汐によって支配され、海上保安庁の調査による平均大潮時の潮流は、上げ潮時伊良湖水道から進入した流れは地形に順応して伊勢湾および三河湾奥へ流動し、下げ潮時には上げ潮時と全く逆の流動を示す。流速は伊良湖水道最強時に約 2 kt (1.0 m/s)、伊勢市沖合および三河湾西部で約 1 kt (0.5 m/s)、津市沖合で 0.1 ~ 0.2 kt (0.05 ~ 0.1 m/s)、伊勢湾奥および知多半島西部で 0.3 ~ 0.4 kt (0.15 ~ 0.20 m/s) となっている。²⁾

また湾内の恒流（定常流）は、夏期（6～9月）の上層部については伊勢湾奥では時計廻り、湾口部では反時計廻りの、流速 0.1～0.3 kt 程度であり、冬期および三河湾側の恒流は明確でない。

(2) 伊勢湾水質の現況

伊勢湾内の水質調査は沿岸の愛知県および三重県により定期的に観測されているが、ここでは環境庁による伊勢湾水質汚濁総合調査結果（昭和48年度）⁰ から同湾内の水質を転載して示す。さらに水質の指標として海水の透明度、塩素量、COD、クロロフィル、 $\text{PO}_4\text{-P}$ （リン酸態リン）の表層年平均的分布（-3 m層・5月7月10月1月の年4回平均）を図-1～5の各図に示す。

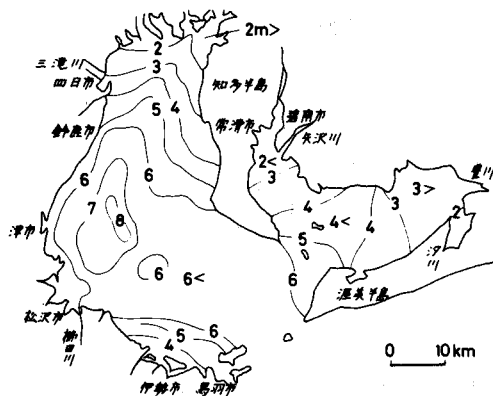


図-1 透明度(m) - 年平均値

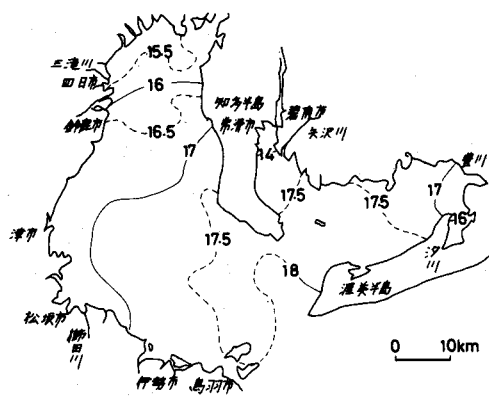


図-2 塩素量(‰) - 表層年平均値

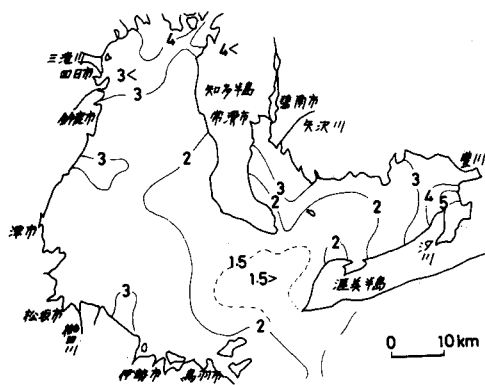


図-3 COD(ppm) - 表層年平均値

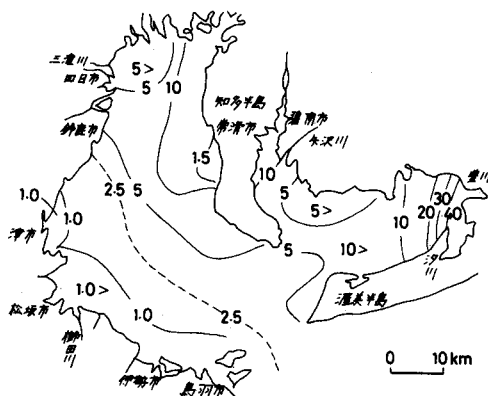


図-4 クロロフィル(mg/m^3) - 表層年平均値

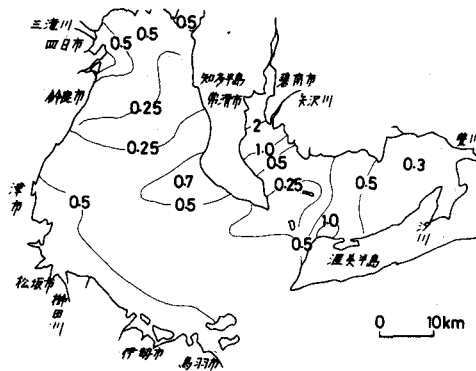


図-5 PO_4-P ($\mu g-at/l$) - 表層年平均値

「透明度：伊勢湾の津市沖合に 8 m と高い部分があり、これを中心に 6 m 以上の海域がほぼ 1/3 を占めているが、四日市市と常滑市を結ぶ線以北湾奥は 4 m 以下となり湾奥名古屋港付近では 2 m 以下となる。湾奥海域では春から秋にかけては一定で 2 m 程度であるが冬には急激に高くなり 5 m 弱となる。

三河湾でも湾央で 4 m 程度湾奥で 2 m 以下となるが冬期には 4 ~ 5 m と高くなる。

塩素量：湾内の chl 濃度は湾口からの距離に反比例して減少しているが、湾奥でも chl 濃度は比較的に大きく木曾三川（木曾、揖斐、長良）の影響は名古屋港付近に止まっている。

COD：塩素量の分布と類似して 2 ㎎の等量線は知多半島先端を中心に湾口から東西に広がっている。3 ㎎の分布範囲は鈴鹿川から北東に向う線以南にあり、局所的には高濃度の海域もある。3 ㎎以上の分布は四日市港、木曾三川、名古屋港海域である。

三河湾では衣浦港、三河湾奥部で 3 ㎎以上となっている。

季節的には伊勢湾では、春が最大で冬最小となり、平均レベルは 1 ~ 5 ㎎となる。また三河湾では夏から秋にかけてピークが出現し、平均レベルは伊勢湾よりやや高いが、6 ㎎以上にはならない。

PO_4-P ：伊勢湾では年平均値 0.5 $\mu g-at/l$ 以下となっているが、三河湾の碧南市付近で 2 $\mu g-at/l$ の高い値を示している。栄養塩類については水産環境水質基準で赤潮の発生しない濃度としてリンで 0.015 ㎎ (0.48 $\mu g-at/l$) 以下が採用されているが、このレベルから見ると伊勢湾の平均レベルは湾口を除いておおよそこれ以上となっており、富栄養化の水質状態となっている。

クロロフィル：全般的傾向として四日市から伊良湖岬を結ぶ線の愛知県側が 5 mg/m^3 以上の濃度を示し、それ以南三重県側で 1 mg/m^3 と低濃度である。平均値レベルでは伊勢湾で 4 ~ 5 mg/m^3 、三河湾では 5 ~ 15 mg/m^3 となっているが、三河湾の豊橋沖では 10 ~ 40 mg/m^3 と非常に高濃度を示している。濃度の季節的な変動は夏と秋に比較的高くなるが、三河湾奥ではむしろ春と秋に高い。

(3) 汚濁負荷量

伊勢湾に流入する汚濁負荷量を把握する目的で、前記水質調査と併せて、流入河川および廃水を直接海域に排出する工場、事業場を対象として調査が実施された。調査結果によれば、COD 値について、伊勢湾域では流入総量 512 t/日であり、このうち河川から 391 t/日、工場から 121 t/日の流出となっている。そしてこの約 80 % が四日市以北湾奥に流入している。一方三河湾では流入総量 93 t/日、このうち河川が 75 t/日、工場から 18 t/日と推定されている。

3. 東京湾の水質

(1) 東京湾の海域環境

ここで述べる東京湾は千葉県富津岬と神奈川県観音崎を結ぶ線以北の海域とする。(ただし東京湾水質基準設定水域は三浦半島剣崎より房総半島州崎を結ぶ東京湾全域となっている。)

同湾は長さ約 61 km, 平均巾約 16.5 km, 平均水深 15 m, 水面積約 1,000 km²を有する瓢形の海域であるが, その湾口水深は局部的に 70 m と比較的大水深を持っているが湾口巾(富津岬～観音崎間)は僅か 6 km 程度の典型的な内湾である。このため, 外海からの風浪の影響は小さく, 平穏な海域となっている反面, 湾奥部に隅田川をはじめ, 荒川, 江戸川, 多摩川等都市部を流下した大河川が流入しかつ, この沿岸は巨大な臨海工業地帯を構成しているため, これらより発生する各種汚排水の総てが流入することによる海域の水質汚濁が著しく, 地形的に外海との海水交換作用も小さいため, わが国の水質汚濁現象の代表的な海域となっている。

湾内の流れの主体は湾口から流入する潮流であり, 潮汐変化に順応して半日周潮流が卓越する。この潮流も湾口狭搾部によってコントロールされ, 湾口部で流速が最も速く, 平均大潮時約 1.0 ～ 1.2 kt (0.5 ～ 0.6 m/s) であり, 湾内では湾口から流入距離に反比例して流速が低下し平均大潮時で 0.3 ～ 0.7 kt (0.15 m/s ～ 0.35 m/s) 以下となり, 湾奥では 0.1 kt (0.05 m/s) 程度となる。この流れはほぼ地形通りに流動しているが, 湾内流速は全般的に下げ潮流か上げ潮流に比べ速い傾向を持つ。

湾内恒流の一般的傾向は中層から底層において流入し, 上層部は流出の様相を示すが, 川崎～盤州を結ぶ線以北の湾奥部海域では時計方向に環流する傾向がみられ, 以南水域では湾外に流出する傾向がある。しかしこの流況も季節的(10月中旬から4月中旬までの北偏風卓越期と4月下旬から10月初旬にかけての南風卓越期)に変動する様相がある。恒流の速さはおよそ 0.2 kt (0.10 m/s) 以下であるが, 湾口に近い神奈川県側を流出する恒流は約 0.3 kt (0.15 m/s) 程度と速い。

(2) 東京湾水質の現況

湾内の水質調査は古くから特定海域で特定な目的の下に(例えば水産の見地)数多く実施されてきた。昭和 45 年以降, 沿岸の自治体(東京都, 神奈川県, 千葉県)協同による湾内の総合汚染調査をはじめとし, 建設省, 環境庁等の手により調査が進められ, 湾内汚濁の実態が明らかになってきた。ここでは伊勢湾同様に環境庁による調査結果から転載して示すことにする。さらに水質の代表例として塩素量, 透明度, COD, クロロフィル, PO₄-P の表層の年平均的水平分布は図-6～10 の各図に示すようになる。

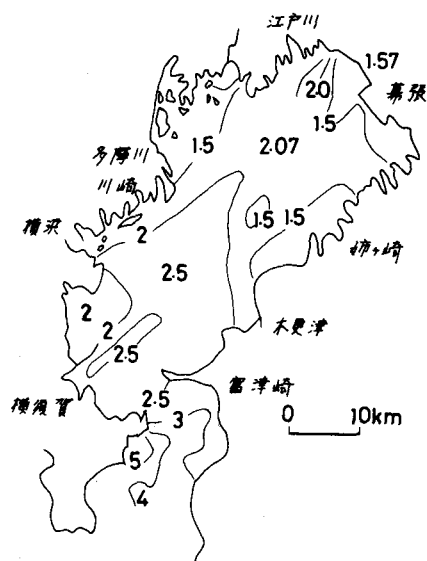


図-6 透明度(m) - 年平均値

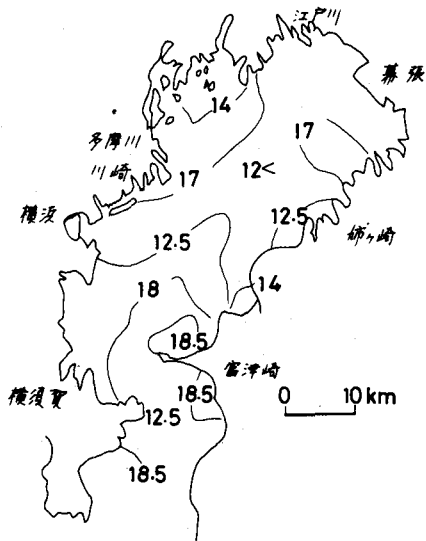


図-7 塩素量(‰) -表層年平均値

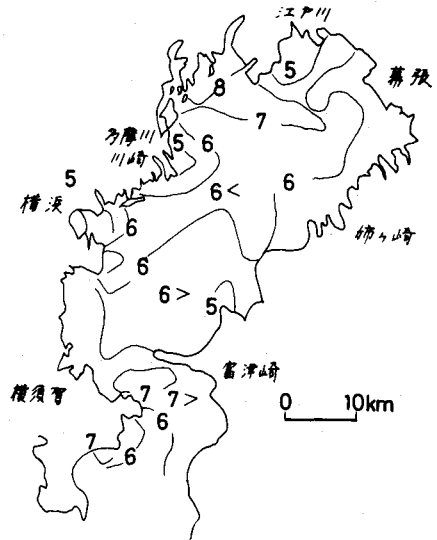


図-8 COD(ppm) -表層年平均値

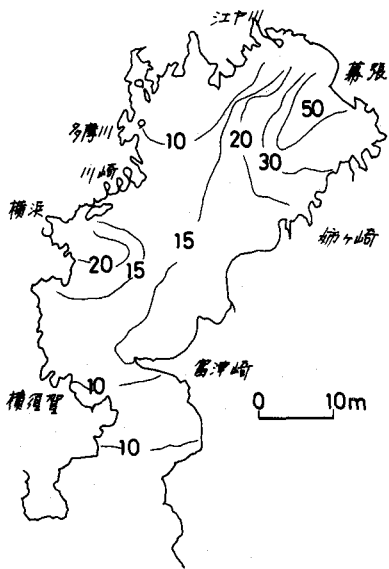


図-9 クロロフィル(mg/m^3) -表層年平均値

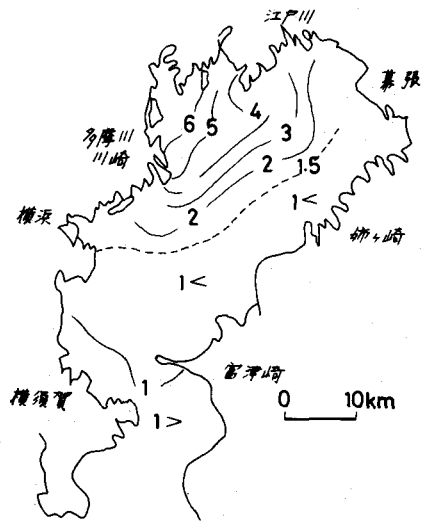


図-10 $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{g-at}/\ell$) -表層年平均値

「透明度：多摩川と木更津を結ぶ線以北湾奥および川崎市、横浜市などの都市地先海域では2.0 m以下であり、流入河川および都市からの排出水の影響を示しており、特に春・夏期は平均1 mと低下するが冬に向って2 m程度となる。湾中央から港口にかけては河川水の影響も少なくなる結果2～3 m以上となる。

塩素量：湾口部（18.5%）から湾奥（13%）に向ってその濃度は低下し、湾中央では17%程度になるが、特に東京港内は流入河川の影響が明らかであり、春、夏期は水温変化から成層状態にあり、表層の σ_t は14%以下と低塩である。しかし秋から冬にかけては上下層の混合が活発となり上下層一様となり17～18%程度となり外洋水の進入が推測される。

COD：年平均的分布図からは湾内 COD 濃度は5～8 mg/l であるが、季節的変動が著しく、春から夏にかけて増加し約10 mg/l 程度に達し、秋から冬に向って急激に減少し2～4 mg/l となる。湾奥海域ではこの傾向が顕著であり、表層の平均値は春9.3 mg/l 、夏13.2 mg/l 、秋には急激に減少し2.9 mg/l 、冬には1.6 mg/l 程度と低い。

このような COD の季節的変動はクロロフィルの変化と対応しており、汚水の流入に起因するのは当然であるが、さらに湾内において植物性プランクトンの生産活動によるものと推定される。

クロロフィル：植物性プランクトンの現存量の指標となるクロロフィル a の表層年平均分布からみると、湾内は全般に10 mg/m^3 以上であり、特に横浜市沖合で20 mg/m^3 、千葉市沖合で54 mg/m^3 と非常に高く、全体的傾向として湾の東側が高めとなっている。しかし、下層では、その分布のパターンは表層と類似しているが、濃度は約 $\frac{1}{10}$ に減少している。この表層のクロロフィル濃度は地域的にまた季節的に変動が激しく、春に高く冬に向って急激に減少する傾向がある。

$\text{PO}_4\text{-P}$ ：栄養塩の一つであるが、湾内には一様に1.0 $\mu\text{g-at/l}$ であり特に湾奥江戸川から川崎港に至る東京港前面海域が高濃度を示し、港内では6 $\mu\text{g-at/l}$ と極めて高い。この値も季節的変動が激しく、夏期の成層期において最大となり、成層が消失する冬期は1.3 $\mu\text{g-at/l}$ と最小である。

東京湾内の栄養塩類については、赤潮の発生しない基準濃度（前掲伊勢湾と同じ）からみれば完全にレベルオーバーとなっており、富栄養化の水質状態となっている。」

(3) 汚濁負荷量

前記水質調査と同時に実施された汚濁負荷量調査によれば、東京湾に流入する COD 負荷量は年平均で総量741 t/日 、このうち河川からの流入465 t/日 、工場・事業場からの排出量276 t/日 と推定されている。

これらを地域別にみると、東京港を中心として江戸川～川崎港の地域から総量の80%（592.8 t/日 ）が、横浜および千葉県木更津までの区域から20%（148.2 t/日 ）の流入量となっている。

この他、建設省による東京湾流入負荷量調査（昭和47年）によれば、冬季に東京湾に流入すると見積られる COD 負荷量の総量は1200 t/日 にも及んでおり、各地区の負荷量を経路別に見ると、このうち約45%（540 t/日 ）が河川からの流入によるものであり、ほぼ同量が臨海工場からの直接流入となっており、残り10%（120 t/日 ）が臨海污水处理場からのものとなっている。また流入負荷のおよそ90%（1080 t/日 ）が江戸川以西横浜に至る東京港を中心とした東京湾西岸に集中しており、湾内の水質汚濁現象のパターンとよい対応を示している。

なお、環境庁、建設省の調査による汚濁負荷量の相違は、汚濁源の排出量の変動のほか、むしろ両調査地点、調査時期、規模および推計法の違いに起因するものであろうと推察される。

4. 水質汚濁実験手法

水質に関する模型実験にも、目的によって種々の実験が考えられるけれども、伊勢湾・東京湾の実験は湾内の拡散現象に基く水質の変化を検討したものであり、従ってここでは海域の拡散現象についての実験方法を簡単に述べる。

(1) 実験の考え方

海域の汚濁現象自体は、懸濁態あるいは溶存態の物質が大量に流入するからであり、流入負荷が汚濁の根源であり、汚濁機構そのものであるが、海域に流入した汚濁物質の拡散に寄与する流体の運動としては、潮汐および吹送する風、あるいは流体の密度差などに起因して発生する各種の流れをあげることができる。この中、伊勢湾・東京湾などの内湾の乱流にエネルギーを供給する主体は潮流である。そしてこの潮流は平均流として汚濁物質の移動を受持ち、その中に存在する乱れが汚濁物質と周囲の海水と混合を起していると見られる。しかし長時間後の汚濁物質の拡がり、潮流の excursion によって移動しながら最終的な分散方向は湾内の恒流に支配されていると推察される。

このような状況認識の下に、伊勢湾・東京湾などの内湾域での汚濁物質の混合拡散を規定する要因は、潮流の流動に基ずく水平乱流拡散と移流であるとして取扱うことにしている。

なお原型の汚濁濃度は前述の物理作用のほかに、沈澱、吸着、生物化学的变化などいわゆる自浄作用を受けた結果であるが、実験ではこれら作用の再現は不可能であるから考慮しない。従って実験で扱う水質は保存系の物質による汚濁現象を対象としていることになる。

(2) 相似則

この種の実験目的は、汚水の拡散と濃度分布の把握であるから、流体の運動量および物質収支に関する相似則が必要である。

潮流現象について………広い海域での運動を表現する方程式は、外洋の場合には地球自転の偏向力（コリオリの係数）の項が必要となるが、伊勢湾・東京湾程度の海域規模では無視することが可能である。いま鉛直方向に平均化した流水の運動方程式および連続式は次式で近似できる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \alpha U \frac{\partial U}{\partial x} + \alpha V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{u_*^2}{(h + \eta) \sqrt{U^2 + V^2}} U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \alpha U \frac{\partial V}{\partial x} + \alpha V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{u_*^2}{(h + \eta) \sqrt{U^2 + V^2}} V = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h + \eta) + \frac{\partial}{\partial x} \{ U (h + \eta) \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ V (h + \eta) \} = 0 \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 x 、 y は水平直角座標、 U 、 V は x 、 y 方向鉛直平均流速、 h は基準面から水底までの深さ、 η は自由水面高、 α は速度分布係数（ ≈ 1 ）、 u_* は摩擦速度である。

重力と慣性力が卓越する現象にはフルード則が適用されるので、潮流の場合も、(1)～(3)式が原型と模型で成立し諸量が 1 対 1 の対応をなすためには(4)～(6)式が成立する必要がある。

$$U_r = h_r^{1/2} \quad (4)$$

$$T_r = L_r h_r^{-1/2} \quad (5)$$

$$u_{*r} = h_r L_r^{-1/2} \quad (6)$$

添字 r は模型と原型の比を表わし、 L_r 、 h_r は各々水平、鉛直縮尺である。

汚濁拡散………海域中の汚濁物質濃度の変化は拡散方程式で表わされるが、沈澱、自浄作用を無視した水平成分の拡散方程式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (7)$$

ここで、 C は物質濃度、 u 、 v は x 、 y 方向の流速、 K_x 、 K_y は x 、 y 方向の乱流拡散係数
汚濁物質の拡散に関する正しいモデル化とは、模型内の各点における濃度が原型の幾可学的対応点

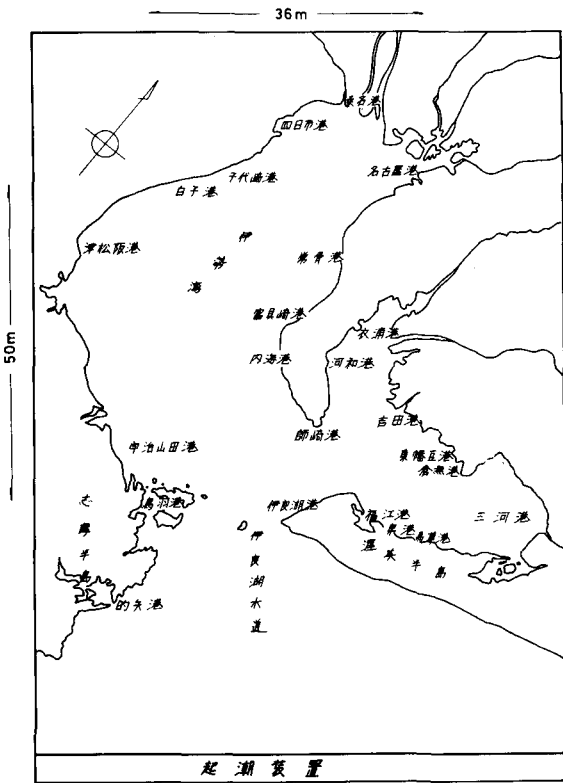
の濃度に等しくなるようなモデル化と考えられる。(7)式が原型と模型で成立するためには拡散係数 K について(8)式が必要となる。

$$K_{xr} = K_{yr} = L_r h_r^{1/2} \tag{8}$$

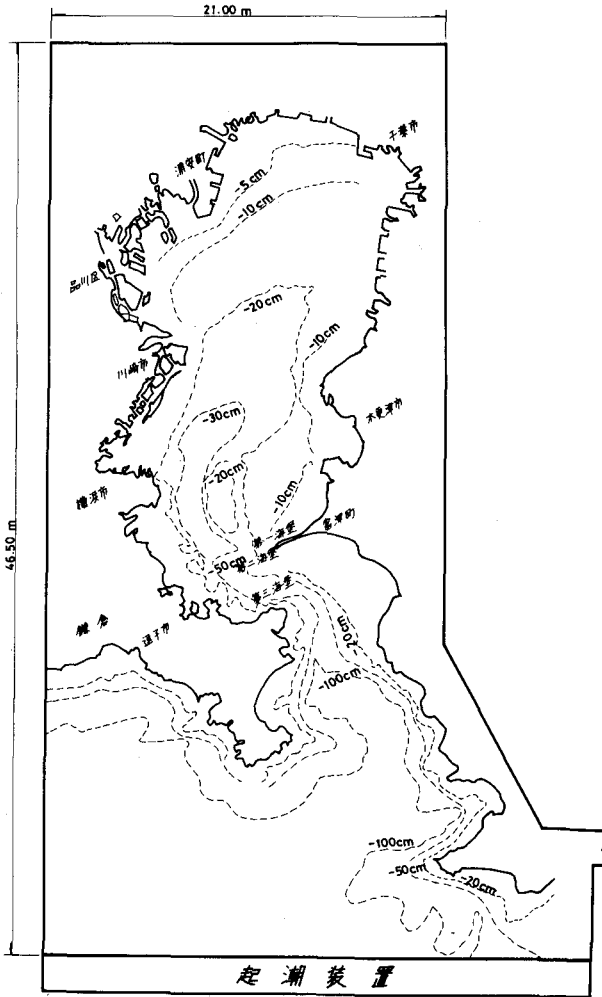
(3) 伊勢湾⁸⁾、東京湾⁹⁾の実験

実験目的は両者とも、同湾内の潮流による汚濁物質拡散の特性把握と、各湾内に計画されている各種プロジェクトが拡散現象におよぼす影響を検討したものである。

模型縮尺は、伊勢湾では水平 1/2000，鉛直 1/160，東京湾では水平 1/2000，鉛直 1/100 の歪模型でコンクリート・モルタルで製作されている。模型再現範囲は図－11，12の各図に示してあるが、湾内全域から外海の一部を包含し、地形、水深は海図に基づいて再現されている。



図－11 伊勢湾模型図



図－12 東京湾模型図

さらに両模型ともに湾内に流入する大河川（伊勢湾では木曽川をはじめ 14 河川，東京湾では江戸川をはじめ 9 河川）の感潮水域潮汐現象到達地点までの河積を再現するとともに、湾奥の運河筋は可能な限り再現し、実験では年平均流量を放流している。

実験潮汐は、両模型とも模型外海端に設置された空気圧式起潮機によって、伊勢湾では赤羽根、東京湾では布良における潮汐調和常数値を用い、半日周潮を対象に、 $12^{\text{h}}25^{\text{m}}$ の周期を採用した。

(模型周期、伊勢湾 = $4^{\text{m}}42^{\text{s}}$ 、東京湾 = $3^{\text{m}}44^{\text{s}}$) 潮汐の振幅は大潮あるいは小潮を対象とし、正弦運動を与えて模型上に水位変動を発生させている。

模型内の流況はフロートによる流動を(水表面)写真撮影し、この流動記録から潮流の流速流向を測定している。そして模型沿岸の水位測定とともに、相似律から定まる摩擦抵抗を人工粗度で調整することにより流況の相似性が確認されている。

汚濁拡散実験は原型汚濁負荷量の大きな河川、工業地域および下水処理場などを選定し、伊勢湾では17ヶ所、東京湾では15地点より原型COD値に対応する汚濁負荷量を縮尺し、汚水トレサーとして蛍光染料(ウラニン)を連続放流した。負荷量縮尺に際しては流量を縮少し濃度は原型と $\frac{1}{2}$ として扱っている。

各汚染源から模型内に投入された染料は潮流の流動によって湾内に拡散されてゆくが、この濃度変化は、模型内の70地点(東京湾)および130地点(伊勢湾)で同時に、10潮汐目ごとに採水し、東京湾では80潮汐までをもって実験を終了しているが、伊勢湾では実験目的によって120~750潮汐目まで実験している。これら採水された試料は含有する染料濃度を蛍光光度計で測定し湾内の濃度分布図として図示している。

(4) 拡散実験の再現性

流れの再現性は実験潮汐に対応する水位、流速記録からの原型の観測記録を比較検討することによって容易であり、その調整もフルードの相似則から模型の摩擦抵抗を操作することによって可能である。けれども汚濁現象の相似性の検討は容易でない。拡散現象が流れの乱れによるものであるとの前提に立脚すれば、その相似性の検討は、流れの相似性は勿論のこと、乱れのスペクトル分布の再現が最も望ましいことである。この点に関しては和田ら¹⁰⁾によれば、流況の再現を図ればそのスペクトル分布もほぼ相似であると報告されている。

伊勢湾・東京湾の実験では原型の乱れのスペクトル分布の観測記録がないので、実験では染料の拡がりの時間的变化から拡散係数(K)を求め、理論値と対比した。

水面に瞬間投入した染料雲(パッチ)が時間経過につれて拡散したとき、パッチのスケールと K の関係は次式で結ばれる。

$$K \approx \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})} \quad (9)$$

ここで、 r_i 、 r_{i-1} はそれぞれ時刻 t_i 、 t_{i-1} における円換算半径である。

図-13は東京湾模型における測定値であり、模型内代表水域の K を(9)式から求め相当半径 r との関係を示したものであり、伊勢湾の実験でもほぼこの傾向を持っている。

海洋における現象のスケール L と拡散係数 K との関係はRichardsonによって

$$K \approx \alpha L^{4/3} \quad (10)$$

の関係が導かれている。(10)式の比例係数 α は海域の地形、水理条件によって異なるが、実測例によ

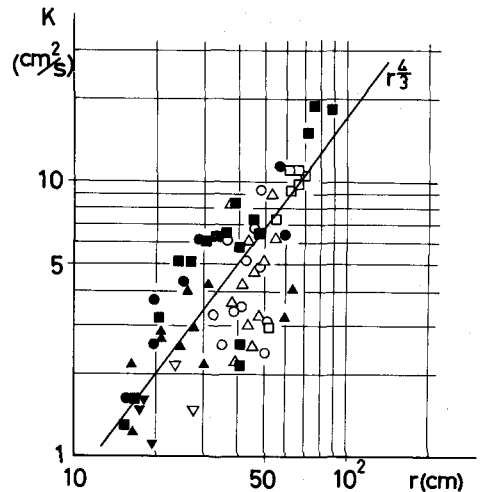


図-13 模型上の拡散係数(東京湾)

れば $0.01 < \alpha < 0.09$ と示されている。¹¹⁾ 東京湾の実験も局部的に(10)式が適用可能と考えられるので α を計算すると約 0.035 となる。さらに 図-13 から得られる K 値 ($1.5 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$) を原型に換算すれば $3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 (\text{cm}^2/\text{s})$ であり、一般にいわれている原型のオーダーともほぼ合致している。¹²⁾ この結果から、模型の拡散現象は流況の合致とともに相似性は得ているものと考えられる。

(なお、沿岸海域の水質予測についての水理模型実験の詳細に関しては、それぞれの実験報告書および海岸工学講演会論文集¹³⁾その他の論文¹⁴⁾を参考にされたい。)

5. 拡散実験の濃度分布

(1) 伊勢湾

図-14 の濃度分布図は、伊勢湾沿岸の汚濁源とみられる河川、工場、下水処理場等から湾内に流入する汚濁水の拡散状況を示したものである。模型上の汚濁源、汚濁負荷量は昭和48年環境庁調査結果から、表-1 に示す負荷量を湾内17地点から、トレーサーとして蛍光染料（ウラニン）を連続投入し、約1年間後に対応する750潮汐目（大潮時）の濃度分布である。

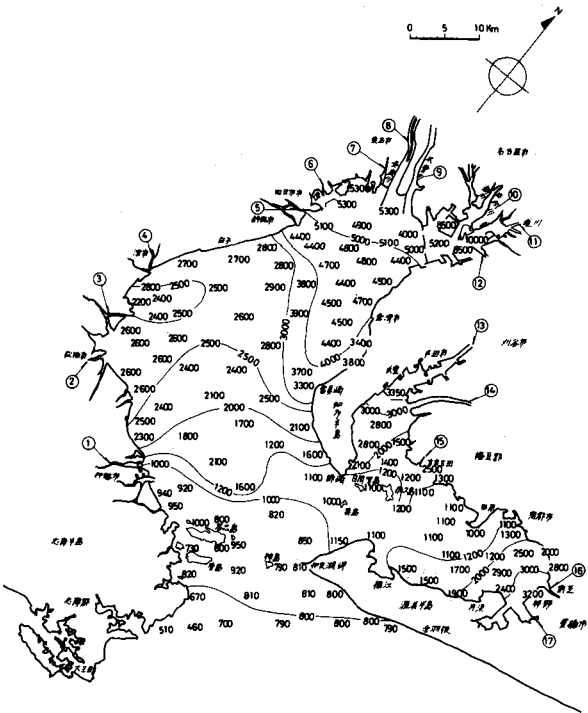


表-1 模型負荷量（染料）

汚濁源No.	流量 cc/s	濃度 (ppb)
1	7.6	3.6
2	2.8	2.9
3	2.1	2.1
4	2.3	10.6
5	2.6	5.2
6	3.8	18.2
7	8.3	2.8
8	23.7	4.2
9	75.2	2.0
10	27.1	19.3
11	6.2	13.8
12	4.5	5.7
13	6.1	10.0
14	15.1	4.4
15	1.1	13.7
16	8.3	2.9
17	0.9	17.1

図-14 染料濃度分布（現況，750潮汐目，大潮時，単位 ppb）

汚濁源から投入された染料は、湾内の潮流の流動に順応して広域に拡散してゆくが、長期的には湾内恒流に支配されている。この様相は模型上の潮流および恒流の流動とよく対応していることから認めることができる。また伊勢湾奥の名古屋港付近、三河湾奥の豊橋および半田市近傍は潮流および恒流の流速が微弱であるとともに大きな汚濁源でもあるため、 $3 \sim 10 \text{ ppb}$ と高濃度海域となっている。

図-15 は伊勢湾全域の汚濁現象に対し強い汚濁源と考えられる木曽3川の影響度（汚濁寄与）を実験的に検討したもので、実験方法は木曽3川を汚濁源として汚荷重を与えた大潮時120潮汐目の濃度分布図である。

湾奥（木曽3川河口付近）の濃度は実験時間が短いため、いまだ定常状態ではないが、流動のパターンからは、木曽3川から流出する污水の一部は名古屋港内にも流入している模様が明瞭に感得することができる。そして木曽3川からの大流量とこの海域に存在する反時計方向の恒流に支配されて、知多半島浜に南下し湾内に拡散し、伊勢湾（三河湾を除く）全域に影響を及ぼしていることが判る。このことは伊勢湾全域の汚濁負荷量に対して、木曽3川からの負荷量が約20%を占めていることから肯定できる。

ところで、海域の水質濃度の変化は式

(7)の拡散方程式で計算されるが、式の中の拡散係数 K は、いずれも流れの場の関数であり、濃度 C には依存しない。従って、式(7)は濃度に関して線型な方程式であるといえる。この思考から、伊勢湾全体の汚濁度は各汚濁源（1～17点）の実験濃度の重ね合せと見做すことが可能である。そこで各々の汚濁源からの実験濃度を、全汚濁源からの濃度で除した値を汚濁寄与率と定義し、その平均値から、伊勢湾全域の汚濁度に対する木曽3川の寄与率を約19%程度と推定している。

(2) 東京湾

昭和44年経済企画庁調査推計にもとづく、昭和60年の汚濁負荷量（COD 値 = 405 t/d）を用い、湾内15代表地点（河川、工場など）より染料（ローダミンB）を連続投入した実験の、大潮時80潮汐目の湾内濃度分布を図-16に示した。（汚濁負荷量は表-2参照）

図によれば、川崎-盤州を結ぶ線以北湾奥水域で濃度1ppm以上となり、汚濁負荷量の大きな東京港付近は濃度5ppm以上の高濃度を示している。川崎-盤州以南水域では湾央より流速が小さい沿岸域が濃度が高くなっており、特に神奈川沿岸では千葉県側よりも濃度がやや高い。また湾口部では0.1ppm以下の低濃度となっている。この濃度分布のパターンは湾内の汚濁源および湾内潮流の流速分布さらには恒流の流動とよく対応しており、污水の拡散は潮流の流動で一義的に決まる様相が判る。この傾向は小潮時を扱った実験では顕著となり、小潮時の流速は微弱となるから、濃度は汚濁源の前面海域に停滞し、比較的流速の大きな湾央から湾口にかけては急激に低濃度となる。

図-17は同湾の将来計画の一つである湾口航路（巾 = 1,000 m、水深 = 23 m）を開削したケースであり、他は図-16と同じ条件の濃度分布図である。湾口航路開削により潮流の流動がスムーズとなり、従って流入量の増大、増速となった結果、図-16の実験に較べ湾内の污水拡散速度が速まり、東京港付近から流出する污水は盤州前面に向かって進行して、この付近の污水域と一体となる。このため湾奥千葉港前面水域の高濃度水域との間に濃度1ppm以下の水域が広がっている。

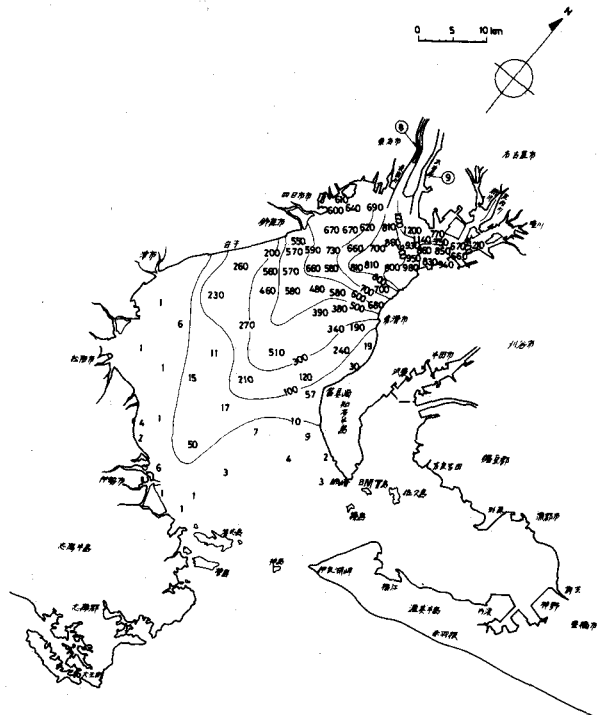


図-15 染料濃度分布（汚濁源、木曽3川、120潮汐目、大潮時）

表-2 模型負荷量(染料)

No	地名	D 負荷量 t/d	Q_p 流量 千t/d	C_p 濃度 ppm	Q_m 模型流量 cc/s	C_m 模型濃度 ppm
1	根岸	6.77	96	70.5	0.55	19.4
2-1	横浜港内	9.0	438	20.5	2.5	51.2
-2		"	"	"	"	"
3	鶴見川	40.3	1130	35.6	6.54	232.8
4	川崎	44.2	372	119.0	2.15	255.8
5	多摩川	16.7	153.2	10.9	8.86	96.6
6-1	隅田川	93.36	6294	14.8	36.4	538.7
-2						
7	荒川	50.42	5460	9.2	31.6	290.7
8	江戸川	43.15	7994	5.4	46.3	249.8
9	船橋	12.92	190	68.0	1.10	74.8
10	花見川, 稲毛	23.27	330	70.5	1.90	134.0
11-1	千代田市	15.60	718	21.7	4.16	90.3
-2						
12	養老川	-	980	-	5.67	-
13-1	姉崎	18.47	324	54.0	1.87	101.0
-2						
14-1	小比	13.0	1628	8.0	9.48	75.8
-2						
15	木更津	8.77	*200	43.8	1.16	50.8

注 *仮定値 $Q_m = Q_p \times 1/2 \times 10^6$ $C_m = C_p$ 負荷量 $= C_m \times Q_m$
但し C_m は汚水量 1 cc/s 放流の場合の濃度, Q_m は別途淡水流量を流す。

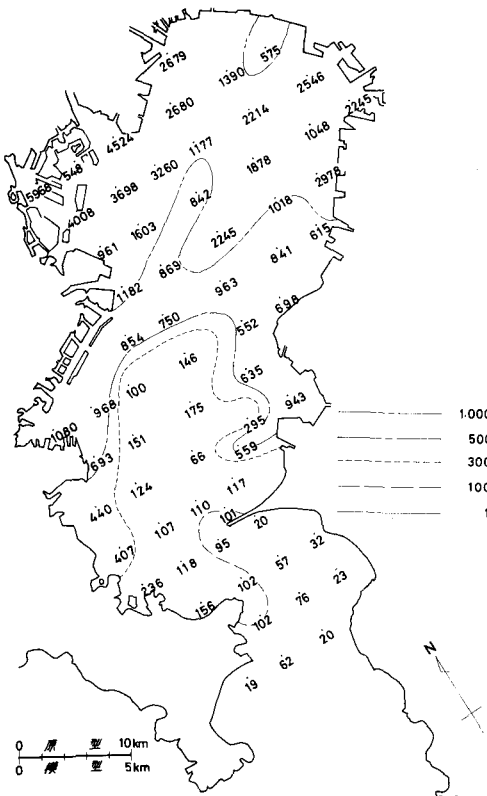


図-16 染料濃度分布(現在, 80 潮汐目, 大潮時)

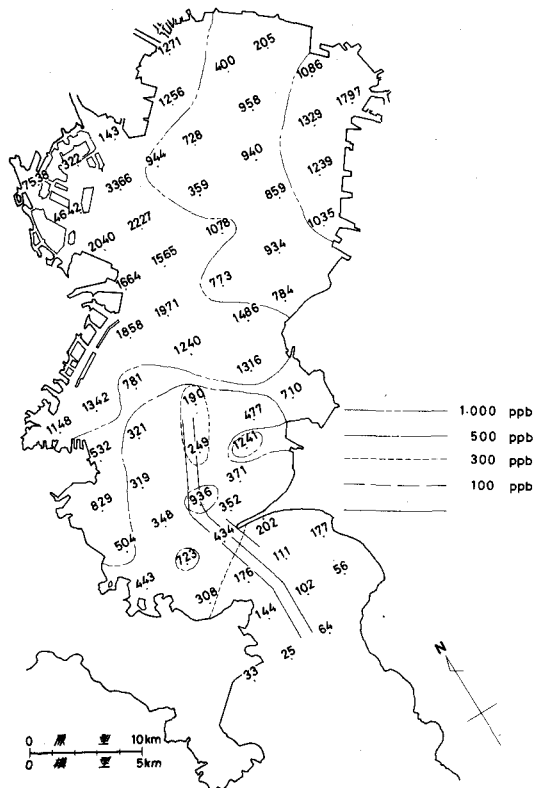


図-17 染料濃度分布(湾口航路開削, 80 潮汐目, 大潮時)

また濃度 1 mg/l 以下ではあるが、川崎一盤州以南湾央部では図-16の濃度分布に比べ若干濃度が上昇しており、湾口部でも同様である。なお湾口部付近にはスポット状に高・低濃度の汚水塊が点在しているが、このパターンは一般に流れの速い水域で汚水が分断され独立な水塊となって点在する傾向と似ており、この様相は湾口航路開削によって当該付近の潮流が増速し、海底地形の変化から生ずる渦流により拡散への強いエネルギー供給による結果であろうと推定され、航路開削は湾内の汚濁浄化に有効であることを示すものと考えられる。

6. ま と め

以上きわめて簡単に伊勢湾、東京湾についての汚濁の現状、両湾に関する水理模型実験手法および結果について述べてきたが、これから両湾の水質の特性を総括することは困難であるけれども、水質の傾向および拡散機構の一端をとりまとめると下記のことが言えよう。

(1) 伊勢湾、東京湾ともに水質汚濁の根源は、陸域から大量に流入する各種汚水に基づくものであり、これが両湾の地形的特性と相まって水質が悪化したものと考えられる。

(2) COD については、伊勢湾では図-3に見られるように湾奥の一部水域を除いて 2 mg/l 程度と比較的小さく良好な水質であるが、東京湾は図-8に示すように全般的に 6 mg/l 以上となり良好な水域といえず、植物性プランクトンの生産によるものと推測され、湾奥水域内に多量の有機物が存在するものと考えられる。

(3) 栄養塩類に関しては、伊勢湾、東京湾ともに富栄養化をすぎ過栄養化の水質状態となっている。

(4) 伊勢湾、東京湾ともに湾内の汚濁物質を拡散する機構の主体は潮流であり、長期間後の汚水の分散は湾内の恒流に支配されている。

(5) 濃度分布は、流れによる分散以上に汚濁負荷量、汚濁源の位置に支配されており、負荷量の大きな汚濁源の有する湾奥海域が高濃度となっている。

水質汚濁に関して水理模型実験を中心にして記述したが、模型を合理的に扱うことによって、海域の汚濁現象の再現および予測はある程度可能と言えよう。特に今後伊勢湾の実験で行なったような湾内汚濁に対して各汚濁源の寄与率が判れば、汚濁対策の樹立に非常に有効と考えられる。されど、なお一層模型実験の有効性を高めるためには、実験に付随する問題点の解決（例えば模型歪の影響など）とともに原型海域における現象の確実な把握と機構（例えば自浄作用など）および特性解明のための実態調査の積み重ねが必要であり要望されるところである。

最後に、前述の各実験は運輸省第5港湾建設局および港湾技術研究所が実施したものであり、本稿執筆にあたり、各種資料を心よく提供して頂いた関係者に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 堀口孝男：汚染物質拡散の数値解法について、第16回海岸工学講演集、1969
- 2) 樋口明生：潮流による拡散の水理模型実験について、京大防災研年報、第10号B、昭和42年
- 3) 海上保安庁、伊勢湾潮流図、昭和46年12月
- 4) 環境庁：昭和48年度、伊勢湾水質汚濁総合調査結果について、水質保全局、昭和50年5月
- 5) 一都三県公害防止協会：昭和46年度、水質汚濁共同調査報告書、(東京湾総合調査)、昭和47年8月
- 6) 建設省関東地方建設局：昭和46年度、東京湾汚濁調査、昭和47年3月

- 7) 環境庁：東京湾水質汚濁総合調査結果について，水質保全局，昭和50年5月
- 8) 運輸省第5港湾建設局：伊勢湾水理模型実験場報告No.6，1975
- 9) 金子安雄，他：東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験，港湾技研報告，第13巻，第3号，1974，9
- 10) 和田 明，他：潮汐水理模型による拡散予測（その2）。第20回海岸工学論文集，1973
- 11) Wiegel, R. I : Oceanographical Engineering, prentice Hall , Inc, 1964
- 12) 土木学会論：土木工学ハンドブック，下巻，P-2386，1950
- 13) 樋口明生：潮流水理模型実験，第10回水工学に関する夏期研修会講義集，B-コース，1974
- 14) 杉本隆成：沿岸海洋における拡散の模型実験，沿岸海洋研究ノート，Vol. 11. No. 1，日本海洋学会，1973，8