

伊勢湾の水理特性について

門 司 剛 至
岩 滝 清 治

1. はじめに

東京湾の1.8倍、大阪湾の1.4倍の水面積を有する伊勢湾（三河湾を含む）は、懷が広くて閉鎖的な浅海性内湾である。このため、湾内の水域は比較的静穏である反面、外海水との交流が小さく、水質においては問題を生じている。

第五港湾建設局では、昭和49年度以降、特に赤潮が多発する三河湾を中心として現地調査、模型実験及び数値解析により潮流、拡散、海水交換などの海洋水理機構に関する調査、プランクトン、バクテリアを主体とする生物の生産、分解機構に関する調査、有機汚泥の分布状況、貧酸素水塊の発生状況などの汚染実態に関する調査等を実施している。

本稿では、これまでの調査成果を踏まえて伊勢湾の水理特性についての概要とともに伊勢湾の汚染拡散に関する水理模型実験の一例について述べることとする。

2. 水理特性を把握する意義

(1) 沿岸域の安全確保

海域と陸域の接点である沿岸域は、海上交通、漁業、レクリエーション、用地造成等多面的な利用の場として活用されており、国土が狭隘な我が国においては極めて利用価値の高い貴重な空間となっている。このような沿岸域の利用に対する要請は、今後増々多様化し、高度化して行くものと予想される。このため、沿岸域の計画的な利用を図りつつ利用空間を拡大して行くことが必要となってくる。浅海で静穏な沿岸海域の利用は既に高密度化しており、今後は大水深、高波、高潮、津波等自然条件のより厳しい沿岸海域への展開が求められている。

沿岸海域を利用価値の高いものとするには、静穏な水域を確保する基本施設としての防波堤が必要であり、沿岸陸域の人命・財産をまもるためには海岸保全施設（堤防・護岸等）が必要である。これらの施設を整備するに当っては、外力となる「波」の特性を十分に把握し、安全で経済的な構造物を設計しなければならない。

(2) 沿岸域環境の保全と創造

昭和30年代後半からの高度成長期に沿岸域の環境は著しく変化し、水底質の悪化、有害物質による汚染、赤潮・青潮の発生、奇型魚の発生、自然海岸の消滅、大気汚染等の様々な問題が発生した。これに対し、環境保全を目的とする各種の法律が整備され、海域への様々な物質の排出を規制したり、各種の環境保全事業への助成等の措置がとられ、環境保全のための諸事業が積極的に実施された。港湾においても水質等の改善を行うだけでなく、緑地等の港湾環境整備施設が整備されており、さらに人工干潟、人工砂浜等の造成も行われるようになってきた。¹⁾

一方、海水交換の悪い閉鎖性の内湾に堆積する有機汚泥については、内湾周辺地域の都市活動、経済活動に伴い海域に排出された生活排水、工場排水等により長期間にわたって海底に蓄積されたもので、近年赤潮の発生により漁業被害を生じて問題を起こしている海域の富栄養化や、夏季における貧酸素水塊等、種々の環境悪化の原因の一つになっている。

これらの問題を解決し、良質の海域環境に改善するための有効な方法の一つとして、有機汚泥から海水へ溶出する窒素・リンの栄養塩をカットするための汚泥の浚渫、有機汚泥の上面に良質な砂を覆って蓋をする

覆砂等の底質浄化事業についても検討が進められている。

本格的な底質浄化事業に着手するに先立ち、事前に底質浄化の効果及び工法を確定するために、当局では三河湾において昭和54年度から実施設計調査（底質浄化）を実施している。

実施設計調査は、①海域の汚染の実態を把握すること、②現地で試験工事を行い、その環境改善の効果把握すること、③海域の汚染機構を把握し、シミュレーションモデルを作成して本事業段階での環境改善効果を明らかにすること、④試験工事を通じ、工法に関するデータを蓄積すること等を目的としている。

現在までに、有機汚泥除去の浚渫試験工事及び覆砂の試験工事の実施並びにこれらによる浄化効果の追跡調査の他、底質浄化による水質改善効果の予測モデルの開発等について検討してきている。²⁾

3. 伊勢湾の水理特性

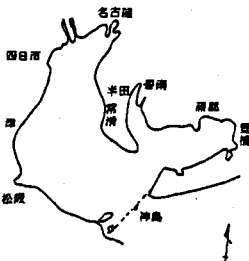
(1) 地形と港湾の配置

知多半島を境にして西側の伊勢湾及び東側の三河湾から成る広義の伊勢湾は、水面積が2,130 km²、平均水深が伊勢湾で19 m、三河湾で9 m、湾口距離が20 kmとなっており、懐が広くて閉鎖的な浅海性内湾といった地形的な特性を有している。東京湾及び大阪湾との比較で言えば、表-1に示すとおり、水面積が1.8倍と1.4倍、海岸線延長が1.9倍と1.8倍になっている。

海底地形は図-1に示すようにすりばち状であり、最大水深は湾央部で37 m、湾口部で100 mとなっている。また、地質は全般的に細泥であり、三河湾は特に含泥率が高い。

一方、伊勢湾内に位置する港湾は、図-2に示すとおり、特定重要港湾が2港、重要港湾が3港、地方港湾が17港で合計22港である。

表-1 三大湾の地形

項目 \ 湾名	伊 勢 湾	東 京 湾	大 阪 湾
	伊良湖と鳥羽を結ぶ線以内で狭義の伊勢湾に知多湾、渥美湾を加えた水面。 	 浦賀水道以内の水面	 紀淡海峡および明石海峡以内の水面
海岸線延長	290 km (100%)	154 km (53%)	160 km (53%)
水面積	2,130 km ² (100%)	1,160 km ² (54%)	1,530 km ² (72%)
水深			
— 15 m以浅	1,000 km ²	560 km ²	390 km ²
— 10 m以浅	620 km ²	360 km ²	140 km ²
— 5 m以浅	290 km ²	180 km ²	35 km ²

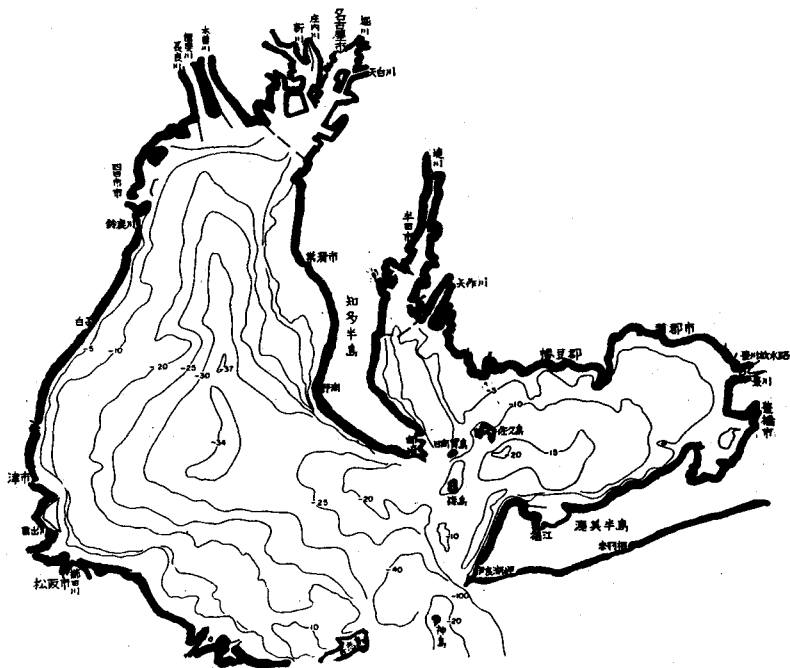


図-1 伊勢湾の海底地形

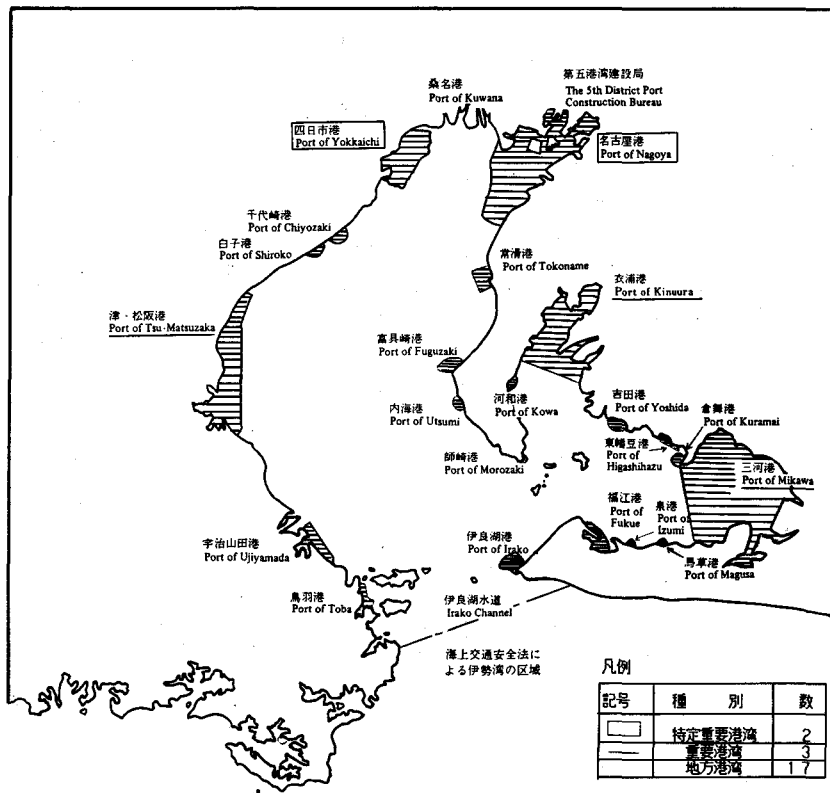


図-2 港湾の配置

(2) 流 況

伊良湖水道における下げ潮最強時の伊勢湾の流況は、図-3に示すように伊良湖水道で2ノット、三河湾西部及び伊勢市沖で1ノット、津市沖で0.1～0.2ノット、知多半島西部及び湾奥で0.3～0.4ノット程度のものとなっている。

恒流については、夏季の海上保安庁資料によれば伊勢湾では湾奥で時計回り、湾口で反時計回り、三河湾では湾央で反時計回り、中山水道では流出する流れとなっている（図-4参照）。一方、当局における三河湾での15昼夜連続潮流観測によれば、夏季の場合、湾口では大きな流速で時計回りの循環流と知多半島に沿って伊勢湾に向う流れとになっており、湾央では層間でかなり異なった方向を示し、流速は中層で大きなものとなっている（図-5参照）。冬季の場合、湾央及び湾奥の流速は夏季に比べて上層で大きく、下層で小さいものとなっている。また、三河湾の湾奥（図-5のA点）で1年間、湾口（同図のB点）で半年間の長期連続観測を当局で実施した結果によれば、湾奥における流向及び流速並びに湾口における下層の流速の変化が比較的大きなものとなっている（図-6参照）。なお、恒流発生の一要因である河川水の流入については、図-7に示すように伊勢湾内主要10河川のうち、木曽三川（木曽川、長良川、揖斐川）が総流入量の69%を占めている。

湾内水と外海水との海水交換については、図-8～10に示す地点での現地調査⁶⁾の結果によると一潮汐間

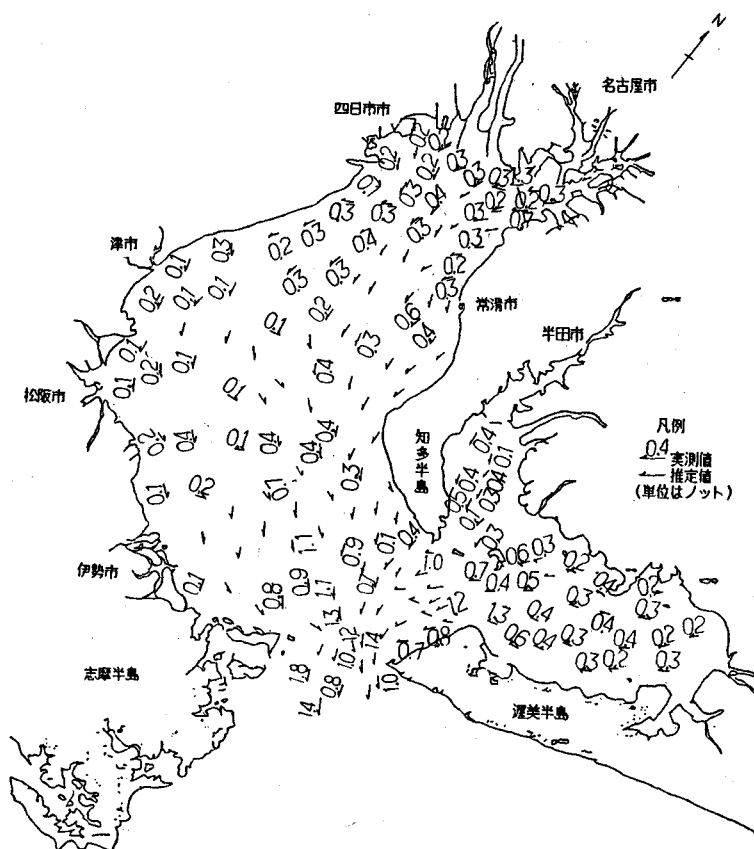


図-3 伊良湖水道南東流最強時流況
(海上保安庁資料)

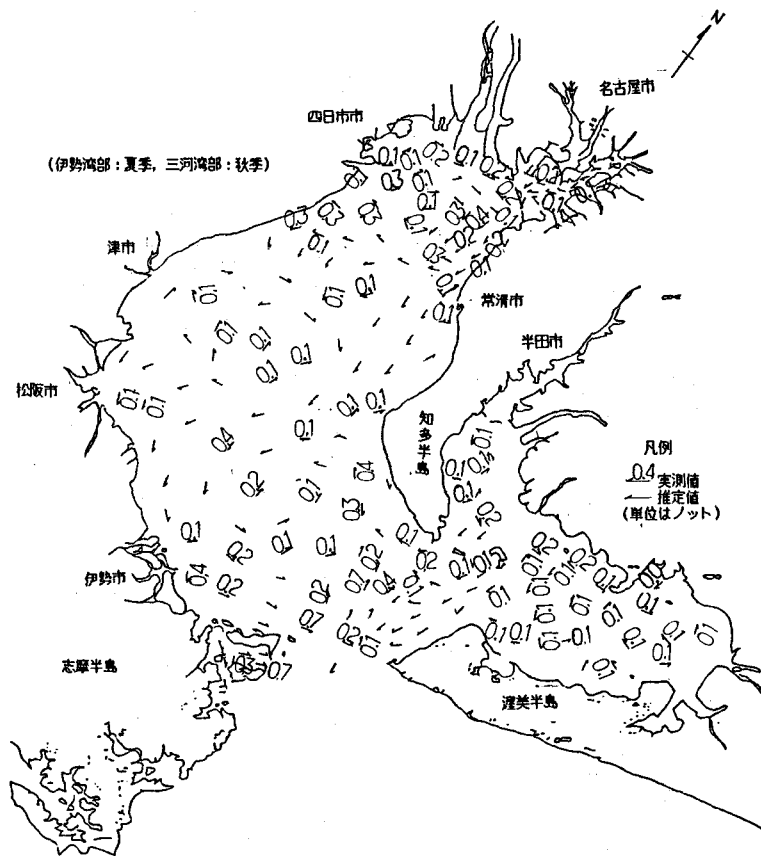
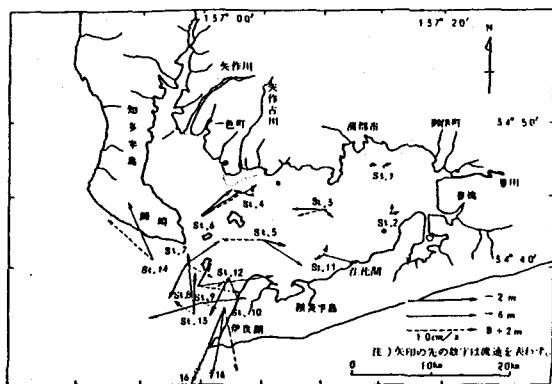
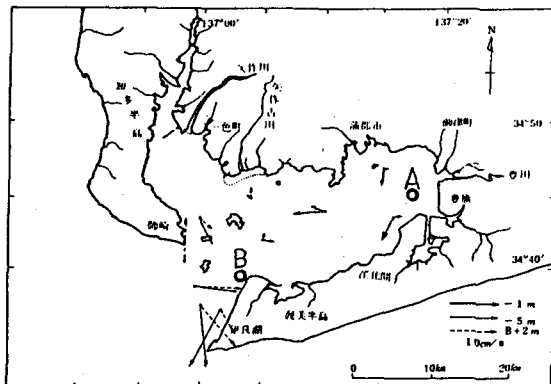


図-4 恒流(海上保安庁資料)



(1) 昭和53年7~8月(夏期)



(2) 昭和52年12月(冬期)

図-5 三河湾の恒流

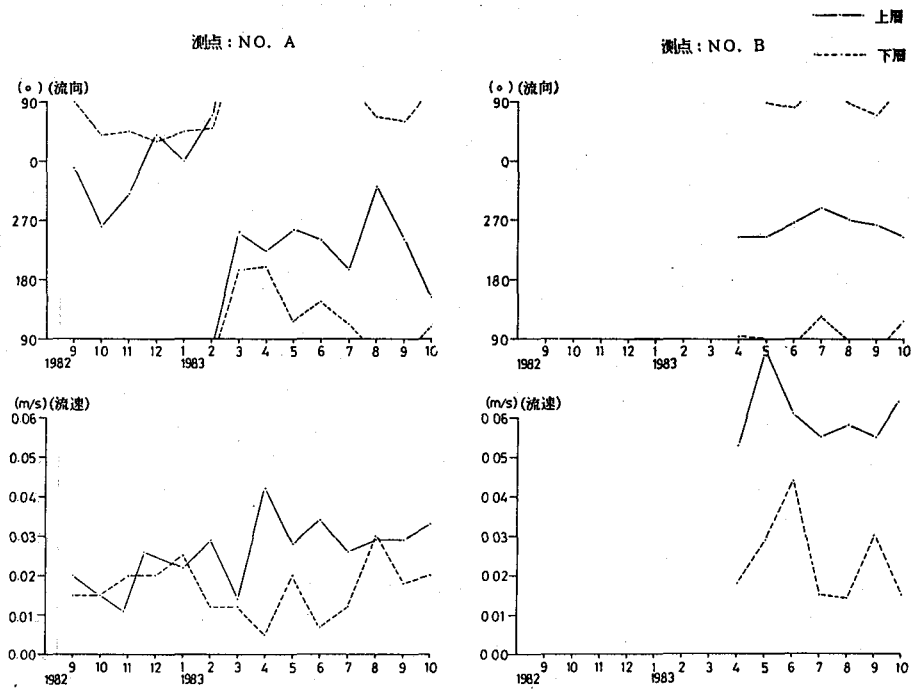


図-6 平均流の月変化

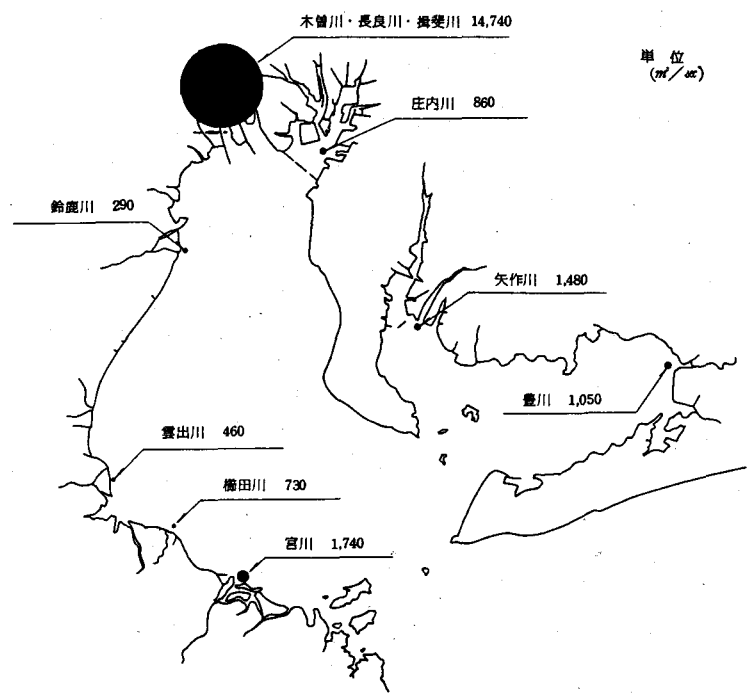


図-7 河川水の流入量分布(昭和54年平均値)
建設省資料による

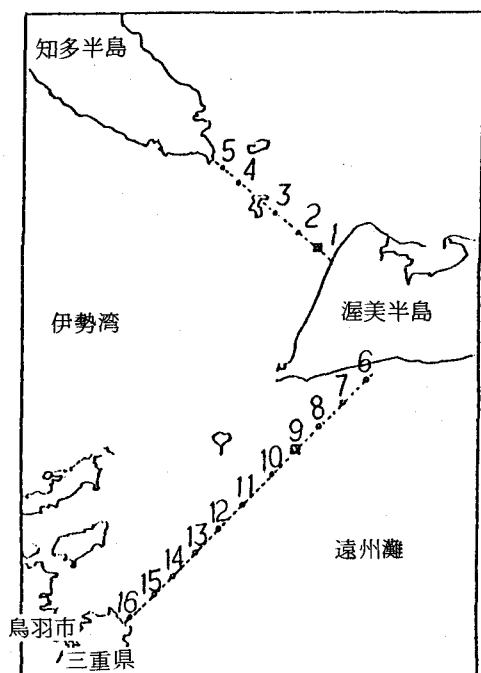


図-8 伊勢湾海水交換現地調査測点位置

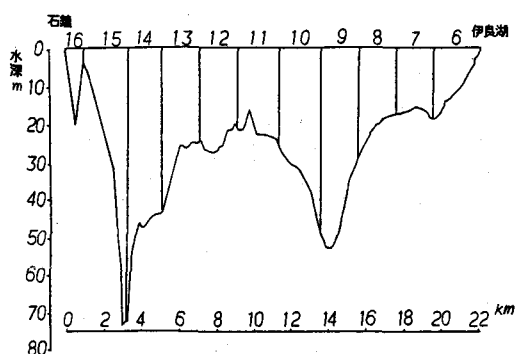


図-9 伊勢湾口断面測点位置及びブロック区分

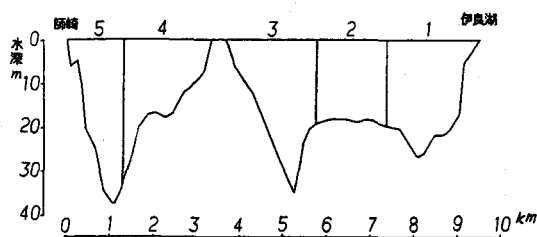


図-10 三河湾口断面測点位置及びブロック区分

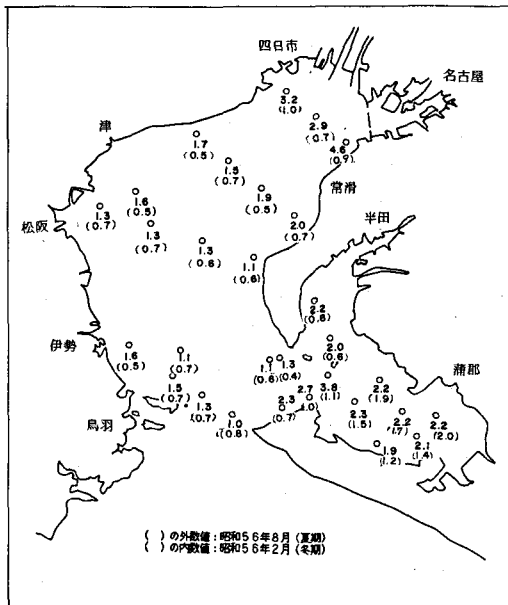
の交換率が伊勢湾口で20％程度、三河湾口で10％程度と推定されている。また、模型実験によれば、外海水との海水交換日数は伊勢湾の湾口で40～70日程度、湾央で200～300日程度であり、河川水との交換は湾奥で40～70日程度である。一方、三河湾での海水交換は300～360日程度の長期間を要するものとなっている。これは、伊勢湾の湾奥では河川水、湾口では外海水の影響が大きいため交換日数が早いものとなり、その他の海域では両者の影響が弱まるために長い交換日数になるものと考えられる。なお、模型実験では、伊勢湾の湾口部の流れは神島を境として伊良湖側で下げの恒流が卓越し、志摩半島側では上げが卓越している。

(3) 水 質

伊勢湾内のCOD(化学的酸素要求量)分布は図-11に示すとおりであり、表層水質は夏季のCODが高いものとなっている。赤潮の発生は図-12に示すように年々増加し、三河湾で多発している。夏季の水質悪化は富栄養化現象によるものであり、上層には赤潮が出現するとともに下層には貧酸素水塊が発達する。当局では、この貧酸素水塊の発生、発達及び消滅の過程を把握するために現地調査⁷⁾を実施しており、その結果、次のような点が判明した。①DOが2ppm以下の貧酸素水塊は、6月中旬の時点から見出されたこと、②海底近くの水塊の貧酸素化は湾内水の成層化と強い関連性をもっており、成層が強まればDOが下がり、成層が弱まればDOも上がっていること、③成層が強化するのは好天が続き、日平均気温が上昇するときであり、成層が弱まるのは天気が悪化したり、風が強い日であることなどが具体的データにより明らかにされた。また、④秋には成層がかなり弱まったにもかかわらず、調査期間中貧酸素水塊が完全には消滅していなかった(図-13、14参照)。

(4) 波 浪

伊勢湾内の波浪は、湾形の特性により静穏なものとなっており、各地点の観測結果によれば、有義波高の最大値は伊良湖において5.7m、周期が12.4秒であり、表-2に示すとおりである。伊勢湾台風については、湾口部における推算有義波高が19m、周期が16.4秒となっている。



(単位ppm)

図-11 COD分布(夏季)
(浅海定線調査により作成)

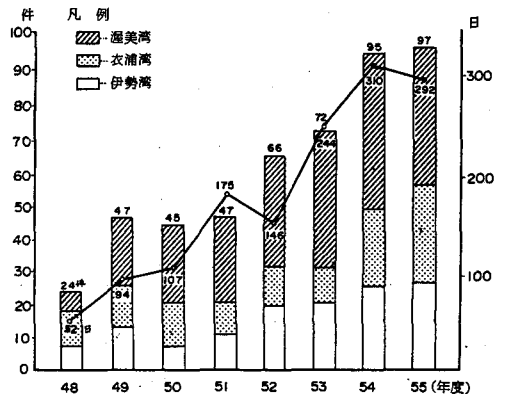


図-12 赤潮発見件数及び延べ日数の推移
(昭和48年度～55年度)

- (注) 1. 伊勢湾については、愛知県側水域で発生したものに限る。
2. 棒グラフは赤潮発見件数を、折れ線グラフは延べ日数を示す。
出典：愛知県環境白書

表-2 伊勢湾内各地の波浪極値

観測地点 項目	赤羽根	伊良湖	蒲 郡	名古屋	鍋田堤前面	四 日 市	松 阪	福 江	衣浦(武豊)
観 測 期 間	S 37.5 ~ 44.3	S 43.9 ~ 45.8	S 37.3 ~ 39.12	S 39.11 ~ 44.3	S 41.8 ~ 41.10	S 44.12 ~ 47.9 S 49.4 ~ 49.11	S 38.3 ~ 39.12	S 38.1 ~ 38.8	S 36.8 ~ 40.5
最 高 有 義 波	5.59 ^m	5.67	2.37	2.03	3.21	1.87	1.9	1.78	1.87
周 期	11.8 ^{sec}	12.4	5.0	2.6	5.6	5.2	7.1	4.7	5.3
観 測 年 月 日	S 38.8.26	S 45.8.28	S 37.4.3	S 43.3.6	S 41.9.10	S 46.8.5	S 39.4.26	S 38.3.25	S 36.9.16
最 高 最 大 波	7.15 ^m	10.42	3.54	2.98	7.44	5.56	3.10	2.64	5.64
周 期	12.0 ^{sec}	8.0	4.9	2.9	4.4	4.0	6.9	3.9	5.2
観 測 年 月 日	S 38.8.26	S 45.8.28	S 37.4.3	S 43.3.6	S 41.9.25	S 46.8.5	S 39.4.26	S 38.4.22	S 37.7.26
観 測 主 体	水産庁	五 建	五 建	五 建	五 建	五 建	五 建	愛知県	愛知県

- (注) 1. 観測地点の位置については図-2を参照のこと。
2. 観測期間は有義波も最大波も同じである。

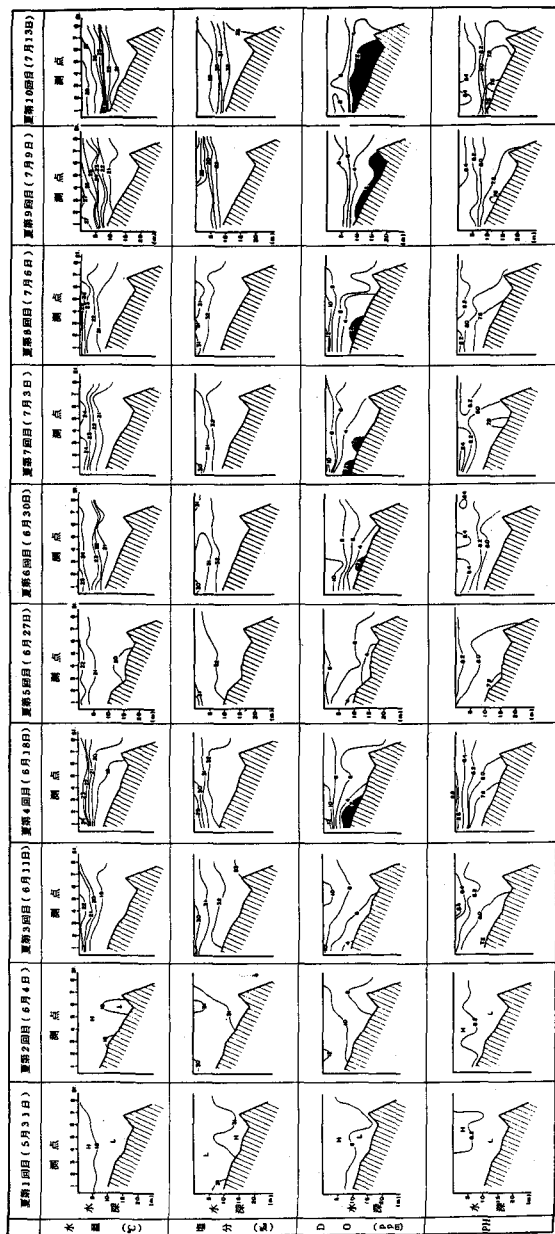


図-14 水質鉛直分布図 (夏季)

※ 検測水質 (DO 2ppm以下)

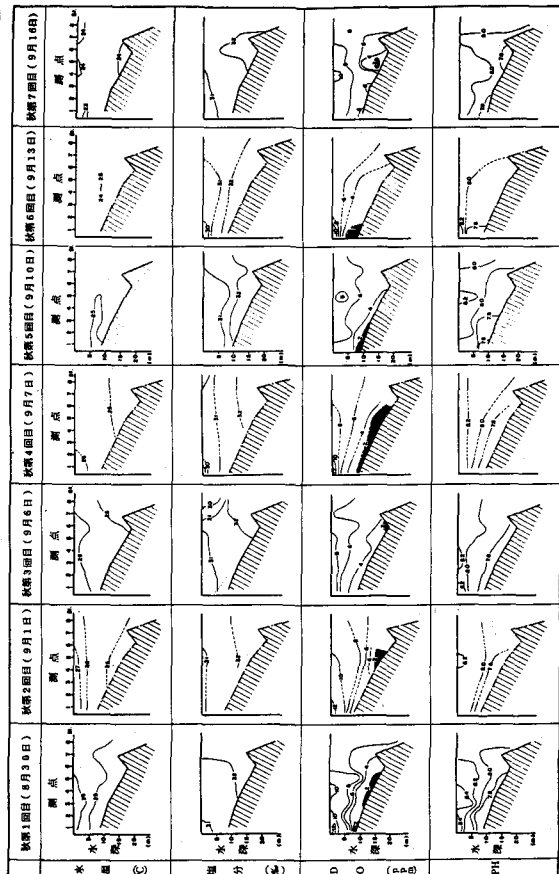


図-13 測定点位置図

4. 伊勢湾を対象とした水理模型実験

伊勢湾水理模型実験場においては、伊勢湾の良好な海域環境の形成を目途にして各種の水理模型実験による検討を重ねてきている。すなわち、潮流及び汚染拡散をはじめとして海水交換、拡散係数、日潮不等、貧酸素水塊の挙動、海水浄化等に関する実験を実施しており、その結果の一部については、3.の伊勢湾の水理特性で簡単にふれた。ここでは、最近の事例として、^{*} 拡散現象の線型性と汚染物質の非保存系における拡散現象^{*}に関する実験の概要について以下に述べる。

(1) 実験の目的

拡散方程式は一般に次式で表わされる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial X} + V \frac{\partial c}{\partial Y} + W \frac{\partial c}{\partial Z} = \frac{\partial}{\partial X} \left(N_x \frac{\partial c}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(N_y \frac{\partial c}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(N_z \frac{\partial c}{\partial Z} \right) + Q - S$$

ここで、 c は濃度、 $U \cdot V \cdot W$ は $X \cdot Y \cdot Z$ 方向の流速、 $N_x \cdot N_y \cdot N_z$ は $X \cdot Y \cdot Z$ 方向の拡散係数、 Q は流入負荷量、 S は減衰量（ $S=0$ ：染料での拡散実験の場合、保存系と考える）、 t は時間である。

海洋での拡散を取扱う場合は乱流拡散であるから、 N_x, N_y, N_z は一般に流れの場によって決定されるものであり、濃度に依存しないものと考えられる。⁸⁾ 故に上式は濃度に関して線型な方程式である。もし、線型重ね合わせが成立すれば、1つの負荷源から1潮汐間だけ負荷量を投入したときの拡散実験データを時間的に重ね合わせるにより、連続的に負荷量を投入したときの拡散結果を得ることができる。また、このことを負荷源毎に行ったうえでそれらを全て重ね合わせれば、全負荷源からの連続投入時の拡散結果を得ることができる。

以上は、汚染物質の保存系についての考え方であるが、現実には海域に流入した汚染物質は微生物の作用によって時間とともに消滅している。この汚染物質の非保存系における拡散についても、保存系での一潮汐間負荷投入実験による時間と濃度の関係を用いて解析することが可能である。

このような考え方に基づいて、本実験では拡散現象の線型性を検証するとともに汚染物質の分解性を考慮した場合の拡散状況を明らかにすることを目的としている。

(2) 実験条件

実験ケース、模型縮尺、河川流量、汚染負荷量等については表-3～5及び図-15に示すとおりである。

表-3 実験ケース

ケース番号	汚 染 源		汚染水放流方法
	地 区	河 川	
ケース1	三 河	豊川、梅田川	一潮汐間放流
ケース2	衣 浦	矢作川、矢作古川、境川	〃
ケース3	三河及び衣浦	ケース1と2の5河川	連続放流
ケース4	名古屋	庄内・新川、新日鉄・堀川	一潮汐間放流
ケース5	木曾三川	木曾川、揖斐・長良川	〃
ケース6	四日市	員弁川、三滝川、鈴鹿川	〃
ケース7	津・松阪	雲出川、宮川	〃
ケース8	全河川	ケース1,2,4,5,6,7の全河川	連続放流

表-4 縮 尺

注)

$$h r = x r^{\frac{2}{3}}$$

$$t_r = x r \quad \cdot \quad h r \frac{1}{2} = x r^{\frac{2}{3}}$$

$$u_T = x_T \quad \cdot \quad h_T^{-1} = x_T \frac{1}{3}$$

$$Q_r = x r \quad \cdot \quad \ln r^{\frac{3}{2}} = x r^2$$

$$n_T = x_T^{-\frac{1}{2}} \quad \cdot \quad h_T \frac{2}{3} = x_T^{-\frac{1}{3}}$$

$$c_r = x_r^{-1} \quad , \quad h_r = x_r^{-\frac{1}{3}}$$

$$c_r = nr^2 \quad \cdot \quad h\bar{r}^{-\frac{1}{3}}$$

表-5 河川流量と汚濁負荷量

(伊勢湾部)

河川名		新日鉄	庄内川	木曽川	掛長良川	員弁川	三滝川	鈴鹿川	雲出川	宮川	(小計)
流量	現地 (l/sec)	41.0	116.3	297.4	251.4	23.6	13.1	24.7	36.2	43.0	(846.5)
流量	模型 (cc/sec)	10.2	29.1	74.3	62.9	5.9	3.3	6.2	9.1	10.7	(211.7)
負荷量	現地 (kg/day)	34.1	137.4	56.0	53.8	8.1	22.7	10.3	10.5	12.6	(345.5)
	濃度 (ppm)	9.6	13.7	2.2	2.5	4.0	20.0	4.8	3.9	3.4	(4.7)

(三河灣部)

(3) 応答関数を用いた計算方法

① 保存系における連続投入の水質計算

ある地点での時間 t に対する濃度の応答関数 $C(t)$ がわかっているものとする。このとき、 $t = 0$ から連続的に負荷量が投入されているとして、 n 潮汐目 $t = nT$ (T : 潮汐周期) における濃度 $R(t)$ を求める。

1 潮汐目の負荷量による濃度 = $C(nT)$

$$2 \quad " \quad = C(nT - T)$$

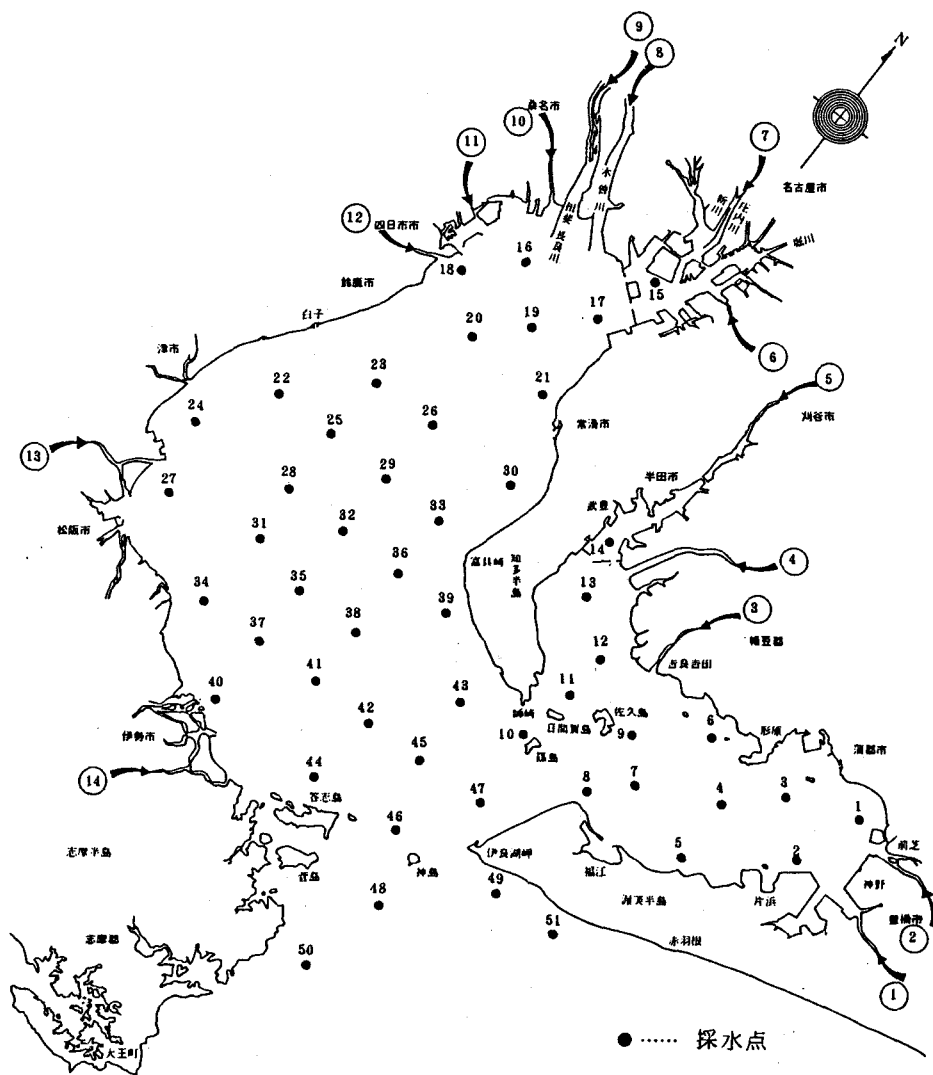
• • • • •

$$n \quad " \quad = C(T)$$

$$R(nT) = \sum_{i=1}^n C(iT) = \int C(t) dt$$

このことから、測定結果を台形積分して $R(nT)$ を求める(図-16参照)。

$$R(nT) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{ C(t_i) + C(t_{i+1}) \} (t_{i+1} - t_i)$$



河川番号	汚染水投入河川	河川番号	汚染水投入河川
①	梅田川	⑧	木曾川
②	豊川	⑨	揖斐・長良川
③	矢作古川	⑩	員弁川
④	矢作川	⑪	三滝川
⑤	境川	⑫	鈴鹿川
⑥	新日鉄・堀川	⑬	雲出川
⑦	庄内・新川	⑭	宮川

汚染水投入河川

ケース4⑥, ⑦

ケース5⑧, ⑨

ケース6⑩, ⑪, ⑫

ケース7⑬, ⑭

ケース8①~④

図-15 採水点及び負荷源

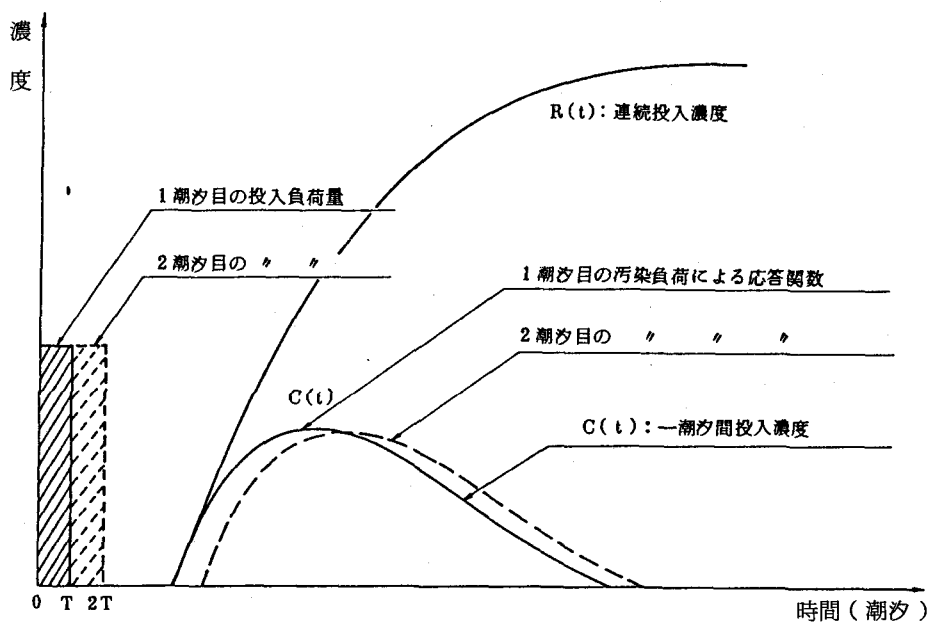


図-16 応答関数の重ね合せ

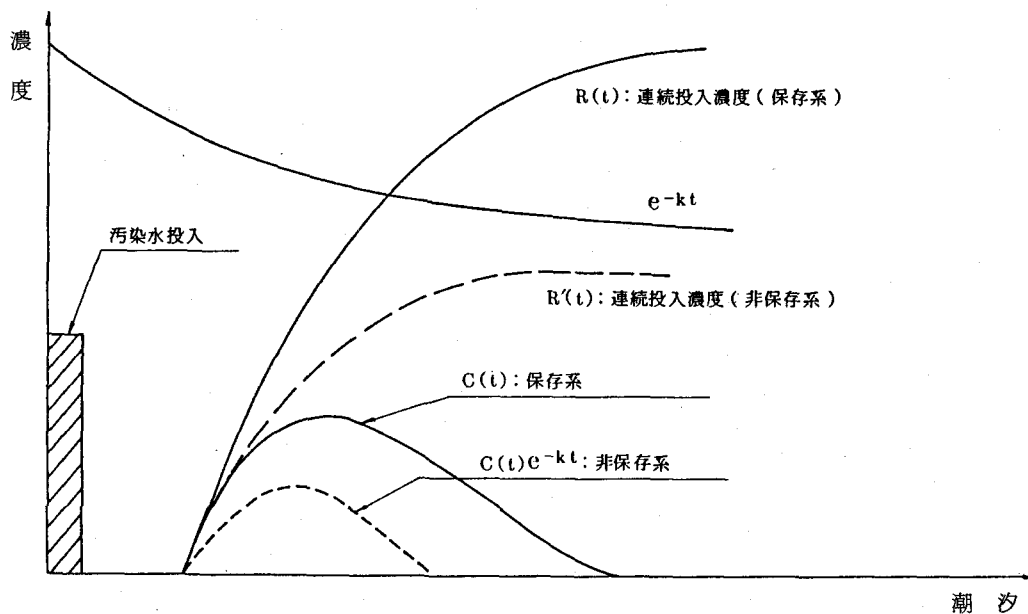


図-17 保存系と非保存系の比較

② 非保存系における連続放流の水質計算

①と同様にして $t = nT$ における濃度 $R'(t)$ を求める (図-17 参照)。

$$\begin{array}{ll}
1 & \text{朝夕目の負荷量による濃度} = C(nT) \times e^{-K/2 \cdot (n)T} \\
2 & \text{〃} = C(nT - T) \times e^{-K/2 \cdot (n-1)T} \\
\vdots & \vdots \\
n & \text{〃} = C(T) \times e^{-K/2 \cdot T}
\end{array}$$

※ K : 自浄係数 (day^{-1})

$$R'(nT) = \sum_{i=1}^n C(t_i) e^{-K/2 \cdot t_i} = \int C(t) e^{-K/2 \cdot t} dt$$

$$R'(nT) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{ C(t_i) e^{-K/2 \cdot t_i} + C(t_{i+1}) e^{-K/2 \cdot t_{i+1}} \} (t_{i+1} - t_i)$$

③ 複数の汚染源から連続投入した場合の水質計算

湾内のある点 P において

$$\begin{array}{lcl} \text{汚染源 1 からの応答関数} & = & C'_1(t) \text{ (投入汚染源濃度は } a_1 \text{)} \\ \text{〃 } 2 & \text{〃} & = C'_2(t) \text{ (〃 } a_2 \text{)} \\ \vdots & & \vdots \end{array}$$

がわかっている場合に

$$\begin{array}{cccc} \text{汚染源 1 の現地汚染濃度を} & A_1 & & \\ \text{〃} & 2 & \text{〃} & A_2 \\ & \vdots & & \vdots \end{array}$$

で連続投入される場合の点 P の濃度は次式で計算される。

$$R_p(t) = A_1/a_1 \cdot \int C_1'(t)dt + A_2/a_2 \int C_2'(t)dt + \dots$$

(4) 實驗結果

① 1 潮汐間及び連続投入の濃度応答曲線

木曽三川を負荷源（ケース 5）とする場合について 1 潮汐間での負荷投入実験の結果とこれを基に算定した連続投入の場合の計算結果とを図-18 に示す。図の上段及び下段は負荷源に近い地点と遠い地点におけるものを示している。

1 潮汐間投入の濃度応答曲線を見ると、いずれのケースも濃度上昇時の勾配が、下降時の勾配よりも急である。特に、負荷源に近い地点ほど濃度が最高になるまでの時間が短く、また濃度の上昇時及び下降時の勾配が急なものとなっている。

また、各ケースの連続投入の濃度応答曲線を見ると、負荷源に近い点では、500 潮汐以降で定常状態になっているが、負荷源から離れた点では、700 潮汐付近でも、定常状態には至らなかった。

② 負荷源の重ね合せの検証

ケース1, 2, 4, 5, 6, 7の実験結果により得られた応答関数を用いてこれらの重ね合せ計算を行い、全負荷源で連続投入した場合の伊勢湾内の濃度予測をしたものと、全負荷源において現地負荷濃度で連続投入したケース8の実験結果とを図-19に示す。700 潮汐後の両方の濃度分布はコンターの位置及び形状ともかなり一致している。また、各地点における両方の値の相関性については図-20に示しており、相関係数は、400 潮汐で0.90, 700 潮汐で0.89となった。以上により、今回の条件では、拡散現象の線型性はほぼ成立しているものと思われる。

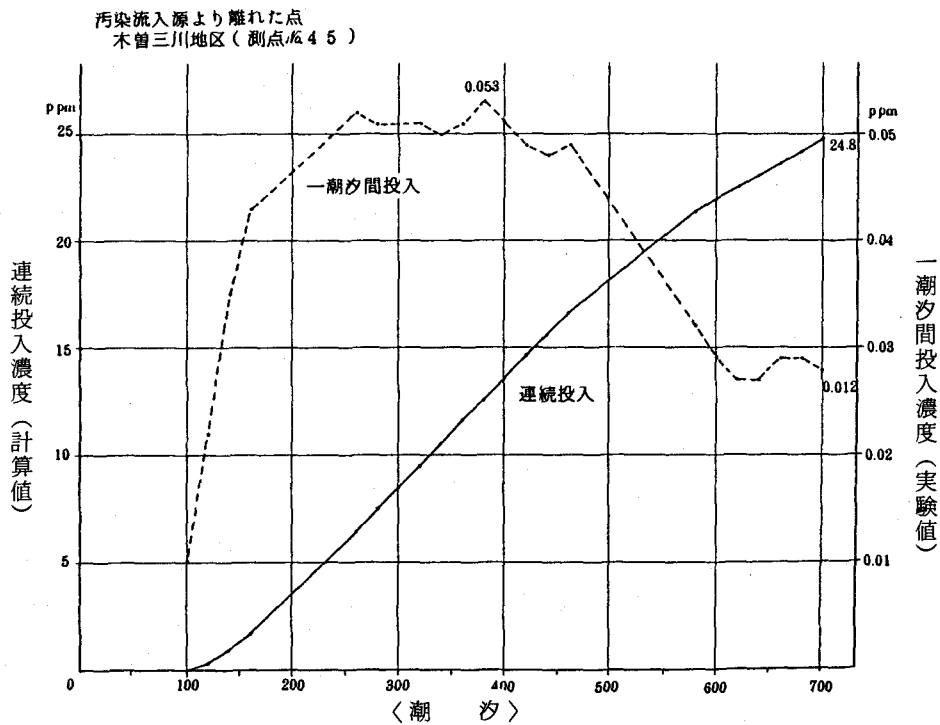
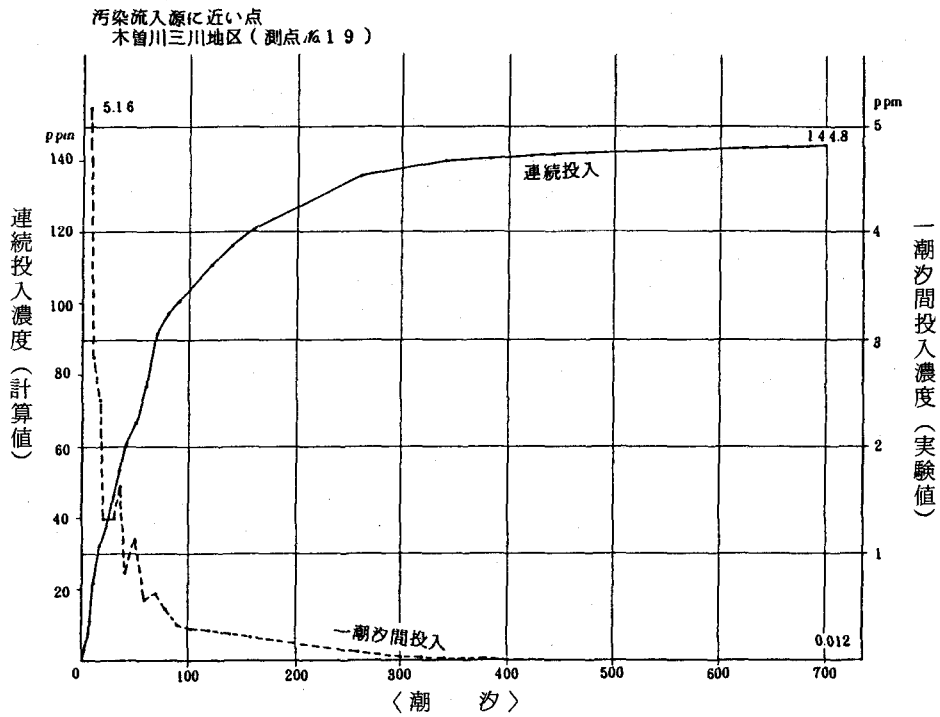
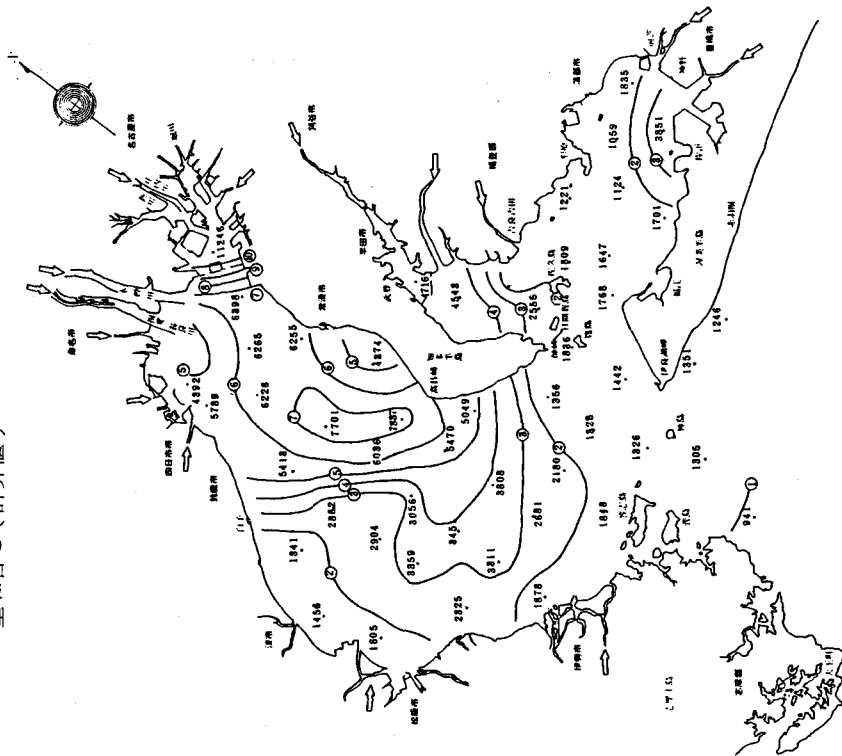
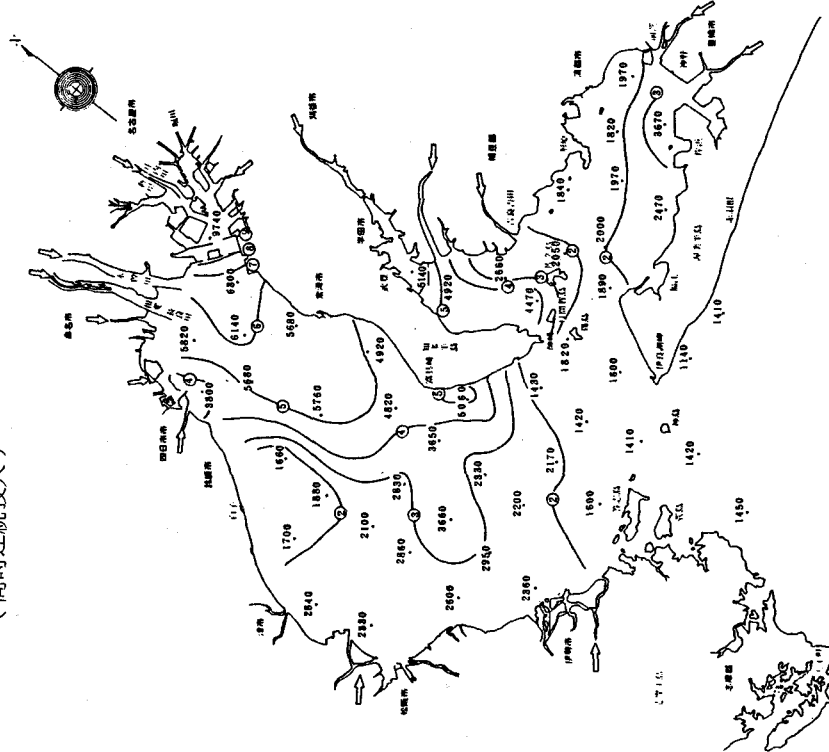


図-18 濃度応答曲線 (保存系)

ケース1, 2, 4, 5, 6, 7, の
重ね合せ(計算値)



ケース8の実験値
(同時連続投入)



図一19 700 潮汐後の濃度分布〔測点: ppb, コンター: ppm, ⇐: 汚染投入源〕

③ 現地観測結果との比較

現地観測結果（COD の年平均値）と実験結果との比較を図-21 に示す。なお、自浄係数を考慮しない実験値については図-19 に示す濃度コンターとなっている。

自浄係数を考慮しない実験値と現地観測値とを比較すると、伊勢湾の湾央及び湾奥並びに知多湾において計算値のほうが高めであり、自浄係数を考慮すると現地観測値と比較的よく一致していた。

渥美湾については、自浄係数を考慮しない計算値よりも現地観測値のほうが高い値を示している。

5. おわりに

伊勢湾の海洋水理機構はその地形的な特性によって極めて複雑なものとなっており、より良い海域環境の保全のための施策を実施するに当たってはこれまでの調査結果を踏まえてさらに今後の十分な検討が必要とされている。とりわけ、底質浄化については今後の重要な水質改善策の一つとして事業化への推進が大いに期待されるものである。

参考文献

- 1) 藤森泰明：港湾における環境創造，港湾，1984，Vol. 61.
- 2) 鹿籠雅純：伊勢湾における海域の環境整備について，埋立と浚渫，1983，No. 114.
- 3) 藤森研一・稲富隆昌・金子俊六：伊勢湾水理模型実験と現地調査（第1報），第22回海岸工学講演会論文集，1975，pp. 219～225.
- 4) 西村俊之・高岡征二郎・稲富隆昌・村田 繁・鬼頭平三：伊勢湾水理模型実験と現地調査（第3報），第25回海岸工学講演会論文集，1978，pp. 480～484.
- 5) 中島幹夫・森脇敏雄・村田 繁・馬場孝博・菅沼 勇：伊勢湾水理模型実験と現地調査（第4報），第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 618～622.
- 6) 藤森研一・稲富隆昌・内田豊彦・園山哲夫：伊勢湾水理模型実験と現地調査（第2報），第23回海岸工学講演会論文集，1976，pp. 518～523.
- 7) 高松 享・藤崎治男・鈴木勝敏：三河湾貧酸素水塊調査，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第2部，昭和57年10月，pp. 337～338.
- 8) 金子安雄・堀江 毅・村上和男：水理模型による汚染拡散実験，第20回水理講演会論文集，1976年2月，pp. 147～152.