

伊勢湾水理模型実験と現地調査 (第1報)

藤 森 研 一*・稲 富 隆 昌**・金 子 俊 六***

1. はじめに

伊勢湾を地形的にみると東京湾の2倍、大阪湾の1.5倍という広大な水面積を持っているが、湾口部の断面積は小さく、かつ湾の構成が摺鉢状となっているため外洋水との交換がきわめて悪いといわれている。

したがって、伊勢湾の海域およびその周辺の利用計画にあたっては事前にその利用計画が海水の交換、潮流の動き、汚染物質の拡散、さらに生態系にどのような影響をおよぼすかを適切に予測する必要があると考えられる。

予測手段としては現地調査を基礎にした水理模型実験、数値模型のシミュレーションが用いられる。われわれは49年度より伊勢湾の海域環境保全のため伊勢湾海水汚染対策調査体系を組み現地調査、水理模型実験、シミュレーションによって伊勢湾の海域環境保全に努めている。

本論文は49年度に実施した水理模型実験、現地調査、シミュレーションの基礎的な報告である。

2. 伊勢湾水理模型実験場の概要

われわれの調査体系の中心ともなる伊勢湾水理模型実験場は図-1, 2に示すとおりである。水理模型の範囲は図-3に示す三重県大王崎と静岡県浜名湖を結ぶ外海を含めた伊勢湾(三河湾を含む)とした。

潮流は水平方向に卓越し、圧力は静水圧分布をなすとして、海面から海底まで平均した流れについての相似を考え、Froudeの相似律と拡散係数の相似律から次式が得られる。

$$t_r = h_r = x_r^{2/3}$$

$$C_r = x_r^{-1/3}$$

$$n_r = x_r^{-1/18}$$

$$Q_r = x_r^2$$

ここに、 x は水平距離、 h は鉛直距離、 t は時間、 C は海底摩擦係数、 n は粗度係数、 Q は流量を表わし、添字

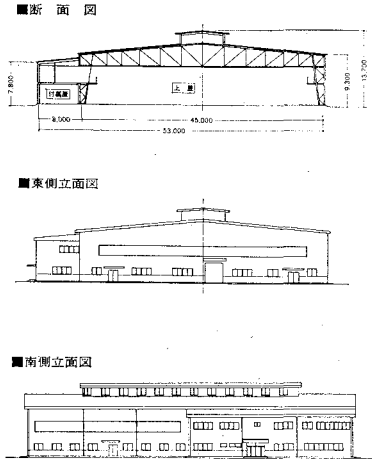


図-1 上屋一般図

r は原型と模型の比率を表わしている。ここで対象とした海域では $1/x_r=1/2\,000$, $1/h_r=1/160$, $1/t_r=1/160$ を採用してある。模型は海図などをもとに水深100m(模型では62.5cm)までを再現範囲としている。模型上の主要河川の上流部には仕切板を設けて感潮区域の距離と面積を再現してある。

年平均流量が模型で1cc/sec以上になる河川のみを再現した。海底面には乱流現象等を出すために模型粗度として幅3cmの銅板を50cm千鳥型に基本水準面まで附設した。

海域における汚染拡散は非常に複雑な現象であり、潮流、風、浪などに影響されるが、これを模型で完全に再現することは困難なので、伊勢湾水理模型では伊勢湾のような内湾において汚染拡散に一番支配的と考えられる潮流を取扱っ

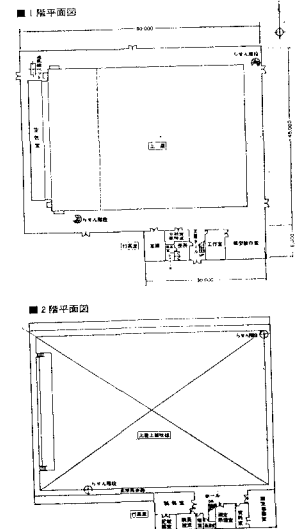


図-2 上屋平面図

* 正会員 運輸省第五港湾建設局設計室長

** 正会員 運輸省第五港湾建設局設計室

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所企画室

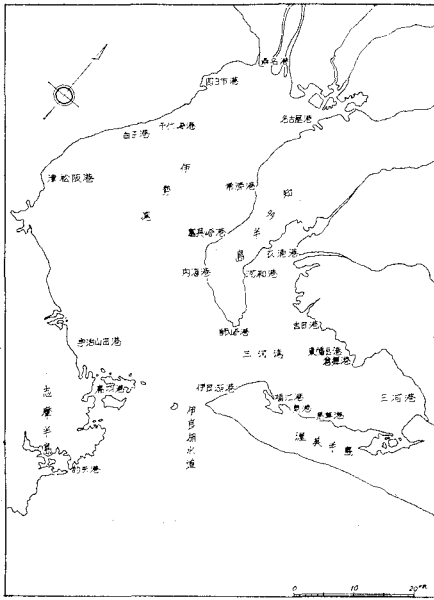


図-3 伊勢湾模型

た。潮流は潮汐において誘起された現象であるから、実験では外海側に設置した空気圧方式による起潮装置を用いて潮汐を発生させている。原型の潮汐現象は一般に半日周期が卓越しているがその振幅は常に変化している。模型実験においても原型通りに再現することが望ましいが、今回は大潮で代表させた。この模型における潮汐の基準は渥美半島の太平洋岸の赤羽根港検潮所の潮汐とした。赤羽根の大潮は潮位差 1.3m, 周期 12 時間 25 分である。模型上では潮位差 8.1mm, 周期 4 分 40 秒となる。

潮流実験はまず模型水面上に 150 台設置されているフロート投入器によって直径 30mm (比重 0.9) のフロートを同時に投入し、その動きを水面上 7m に設置されている 35mm 電動カメラ (標準レンズ 20mm) 17 台で 2~4 秒間隔に連続撮影し、撮影されたフロートの動きを画像解析装置によって各フロートごとにその流動を描き、この流跡線から潮流の流向、流速を測定する。

汚染拡散実験について述べる。伊勢湾全体の汚染度を表わす汚染指標は有機物質の汚染指標である化学量の COD が用いられている。COD は海域環境に応じ時間的に変化する非保存系物質である。海域に連続的に投入した長時間の COD 分布は希釈、拡散、自浄作用、さらに湾口での海水交換等により濃度は定常状態に達する。実験においてはこの COD のトレーサーとしてけい光染料ウランを用いているが、ウランは COD にみられる非保存系ではなく沈殿、自浄作用のともなわない保存系物質になっている。模型上の汚染負荷濃度は現地濃度に等しく、汚染負荷流量は現地の流量を模型上に換算した。各汚染源から伊勢湾へ拡がる汚染水は湾内に 130 台設置

してある自動採水器で全点同時に採水する。採水した汚染水はけい光光度計にかけてその濃度を測定する。

3. 伊勢湾潮流実験

(1) 潮位

原型、模型の赤羽根検潮所で得られた潮汐の振幅を基準にした湾内の各検潮所の潮汐の振幅比は図-4 に示すとおりである。振幅比は赤羽根からの流程距離に比例して増大する傾向がみられ、その関係は直線的で湾奥では 1.4~1.5 倍となる。

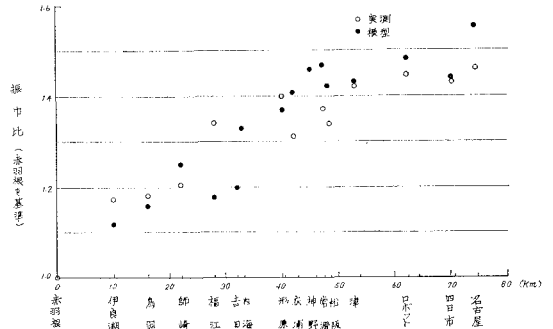


図-4 潮位振幅の変化

(2) 潮流, 恒流

伊良湖水道上げ潮最強時における伊勢湾の模型上の潮流は図-5 に示すとおりである。伊良湖水道では 3 ノットに達する。伊良湖水道を通じた潮流の流勢は三河湾へ移る傾向がある。師崎と伊勢市を結ぶ海域で 0.6~0.7 ノット、津市前面で 0.2 ノット前後、名古屋、四日市港前面で 0.3 ノット近い流速になっている。三河湾に

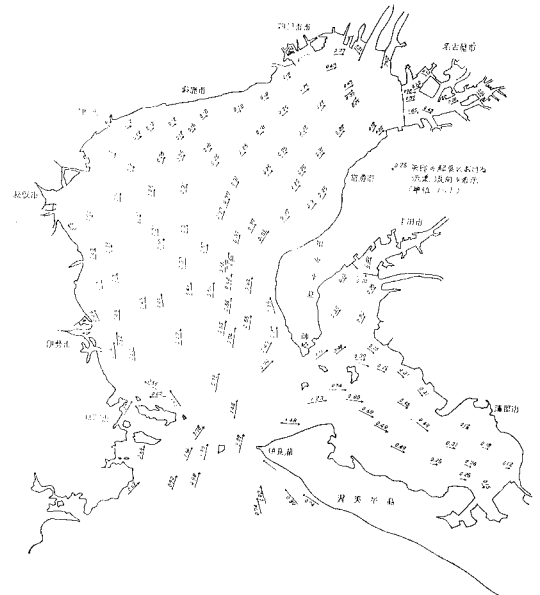


図-5 伊良湖水道上げ潮最強時流況 (大潮)

おいては湾奥に向うにつれて次第に流速が弱くなり湾奥で0.2ノット前後となっている。図-6に示す原型の潮流と比較すると原型の松阪沖の弱い環流を除くとよく再現されている。図-7はフロートの1潮汐間の流跡線を示しているが、湾口、湾奥においてはその流動距離が長く、しかも1潮汐後にはフロートは始点に戻っていない。また、湾中央ではフロートの1潮汐後は始点に等しく流動距離も短い。流跡線の始点と終点が一致していないのはその場所における恒流の作用を示すものと判断し、下げ潮ピーク時のフロートの位置を3潮汐分結んだ結果を

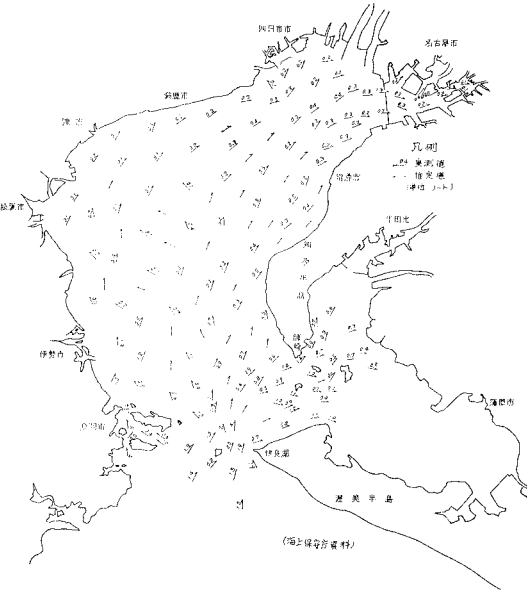


図-6 伊良湖水道北西流最強時流況 (原型)

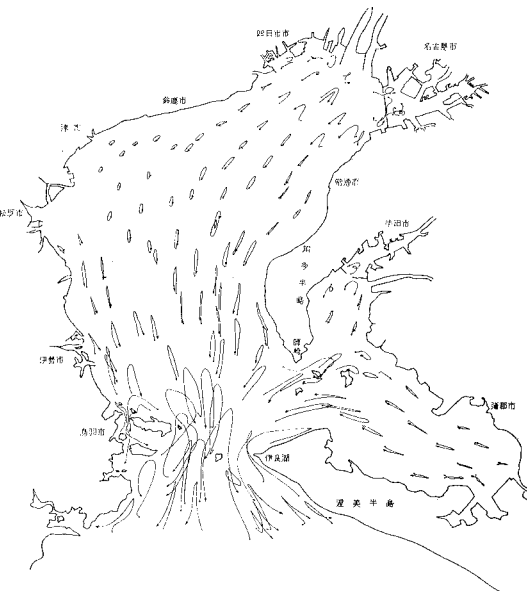


図-7 流跡線 (大潮)

図-8に示す。結果からは伊勢湾においては湾奥部に時計回り、湾口部に反時計回りの強い恒流域がみられる。また湾中央部では複雑な流向を示す弱い恒流域がみられる。この結果を図-9に示す原型の恒流と比較すると恒流の中心はやや異なるが恒流はよく再現されている。また三河湾においては湾奥部より渥美半島に沿う弱い恒流域がみられる。

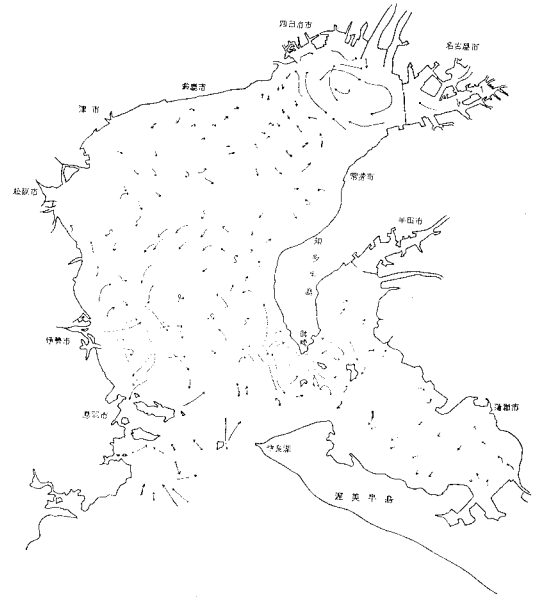


図-8 恒流図

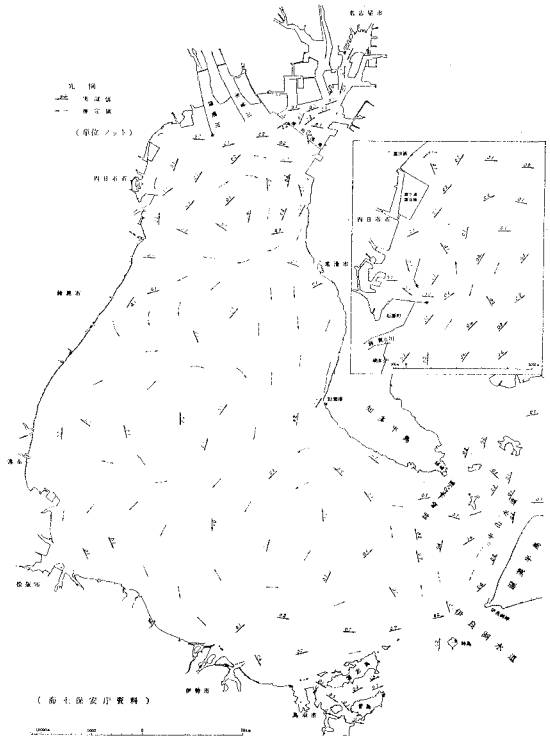


図-9 夏期の恒流 (原型)

4. シミュレーションによる伊勢湾潮流

水理模型実験と並行して数値計算による伊勢湾の潮流計算 (シミュレーション) を実施した。地形格子は 2×2 km である。計算条件 (潮汐, 河川流量等) は模型実験と一致させている。図-10 は伊良湖水道の上げ潮最強時の伊勢湾の潮流を示したものである。

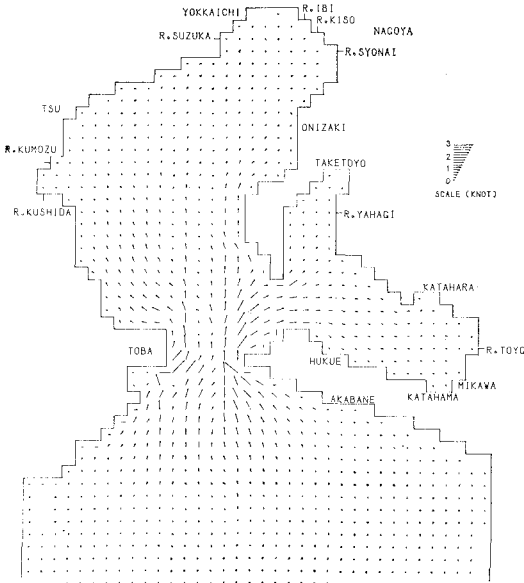


図-10 シミュレーションによる伊勢湾の潮流 (大潮)

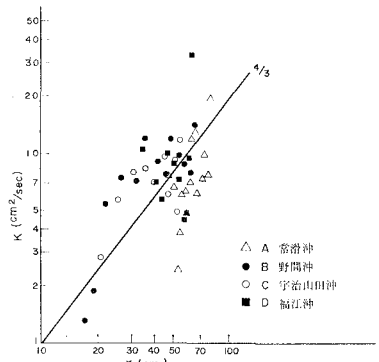


図-11 拡散係数 (模型)

(12) 伊勢湾汚染拡散実験

伊勢湾の沿岸にある汚染源から伊勢湾へ流入する汚染水の時間的な拡がりを見るために伊勢湾全体の汚染拡散実験を実施した。模型上の汚染源, 汚染負荷量は 48 年度環境庁調査「伊勢湾三河湾水質汚濁総合調査」結果を用い, 図-12 に示す。現地調査は春夏秋冬の年 4 回調査である。汚染源は工場, 污水処理場および河川である。図-12 に示す汚染源からの汚染負荷量は年 4 回調査の平均値で示してある。実験でもその負荷量を採用した。また, 海域における COD も同様に年 4 回の平均値である。汚染源としては名古屋, 四日市, 木曾三川が汚染濃度, 流量的にも大きい。海域の COD は湾奥が高い。環境基準からみると B, C 海域ではほぼ基準値を達成しているが A 海域では基準値を達成していない海域が多い。

5. 伊勢湾汚染拡散実験

(1) 拡散係数実験

拡散現象の相似性を検討するため染料の拡がりの時間的な変化から拡散係数を求め, 現地調査 (後述) の拡散係数との対比を行った。染料を瞬間的に放出し, 拡がった染料雲の外縁での濃度は常に等しいとして染料域の形を円に換算する。この場合 r_i, r_{i-1} および S_i, S_{i-1} をそれぞれ時刻 t_i, t_{i-1} における染料雲の換算半径, 染料雲面積とすると拡散係数 K は次式で示される。

$$K = \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})} = \frac{(S_i - S_{i-1})}{4\pi(t_i - t_{i-1})}$$

図-11 は現地調査と同じ地点で大潮の下げ潮時に瞬間的に放出した染料 (ウラニン 1 000 ppm, 100 cc) の染料雲の相当半径と拡散係数との関係を示したものである。実験から理論的な $4/3$ 乗則に合致する水域は顕著に認められなかった。また模型の拡散係数を原型に換算すると $10^4 \sim 10^5$ (cm²/sec) となり, 現地調査結果の $10^3 \sim 10^4$ (cm²/sec) と比較すると 1 桁大きいのが相当半径を考慮するとほぼ妥当な結果と考えられる。

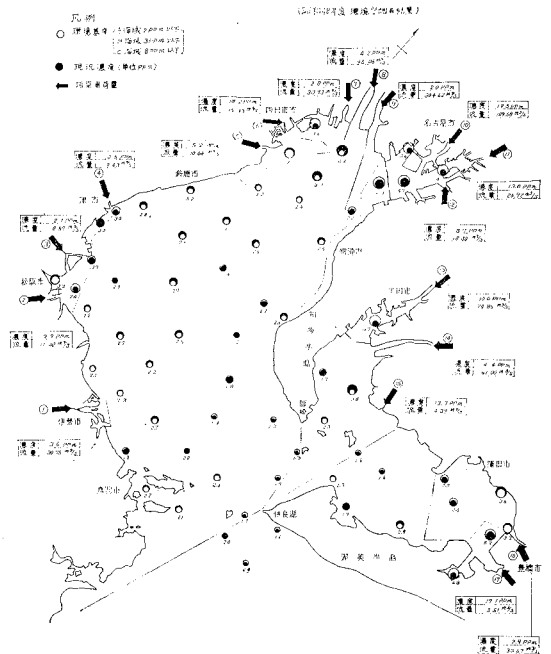


図-12 伊勢湾における汚染実態 (COD)

図-13は模型伊勢湾に上記の汚染負荷を約1年間(750潮汐, 大潮時のみ)与え, その750潮汐日の伊勢湾の濃度分布である。汚染拡散は図-8に示した恒流の影響を直接に受けていることが把握できる。また伊勢湾内の代表測点 図-14における濃度と潮汐回数との関係を示したのが 図-15である。各測点の濃度変化は潮汐回数の増加とともに減少し, 伊勢湾湾奥部では定常状態に近づいている。これは与えた汚染負荷量に対する伊勢湾の負荷容量を示しているものと考えられる。原海域における48年

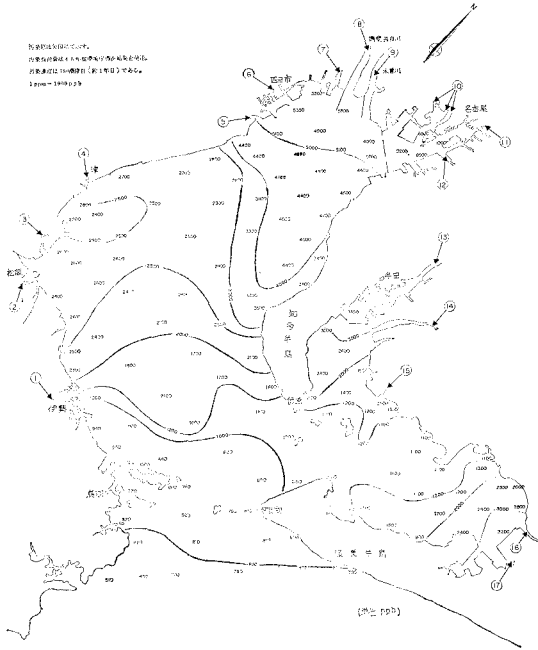


図-13 伊勢湾汚染拡散

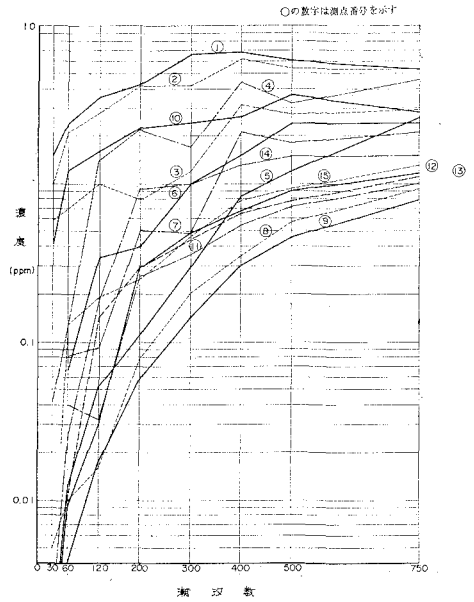


図-15 各測点での濃度変化

度の伊勢湾汚染状況は 図-12に示すとおりである。原型と模型を比較すると模型の日潮不等, トレーサーの自浄作用, 湾外の沿岸流等は再現していないがひずみ模型による定量実験の可能性を含んでいるように思われる。50年度では日潮不等, 沿岸流発生装置を設置し模型の再現性向上を図る。また, 伊勢湾の自浄係数調査を実施して模型実験成果の中に組入れる予定である。

6. 現地拡散調査

染料およびフロートの現地拡散調査は 図-16に示す

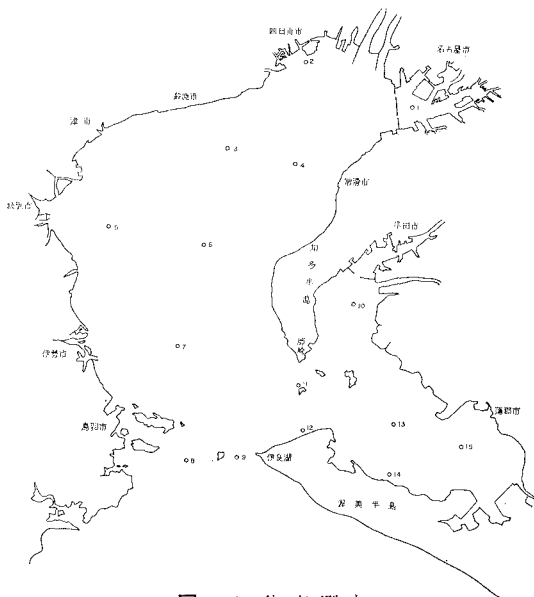


図-14 代表測点

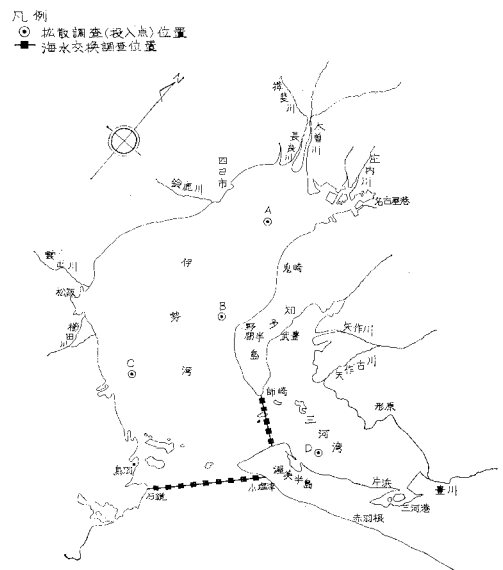


図-16 現地調査位置

表-1 現地拡散調査

地 点	A	B	C	D
調査月日	S 49-7-23	S 49-7-23	S 49-8-21	S 49-7-22
調査時刻	10:20~13:20	10:15~13:15	9:15~12:15	9:00~12:00
染料投入	ウラニン 2% 水溶液 60 l	〃	〃	〃
フロート投入	耐水ベニヤ (60 cm×60 cm)	〃	〃	〃
撮影間隔	50枚	〃	〃	〃
撮影間隔	約5分	〃	〃	〃
平均流向・流速	WSW 0.45 m/sec	SSW 0.40 m/sec	SSE 0.42 m/sec	WNW 0.18 m/sec
平均風向・風速	S 1.6 m/sec	SE 1.3 m/sec	NNW 0.6 m/sec	SW 2.8 m/sec
拡散係数(染料)	$1.3 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^4$ cm ² /sec	$1.1 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^4$	$7.8 \times 10^2 \sim 2.2 \times 10^4$	$9.8 \times 10^2 \sim 4.1 \times 10^4$
〃(フロート)	$4.3 \times 10^3 \sim 5.8 \times 10^4$	$2.1 \times 10^3 \sim 6.5 \times 10^4$	$2.2 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$	$1.2 \times 10^3 \sim 8.7 \times 10^4$

伊勢湾の4地点において実施した。染料およびフロートは観測船上から一時に投入する点源投入法をとった。染料は表-1に示すようにウラニン2%水溶液で1点当り60 lを投入し、フロートは耐水ベニヤ製(60×60 cm)で1点当り50枚を円状に等間隔に投入した。染料およびフロート投入時は大潮の下げ潮時とした。染料およびフロートの拡がり航空機による撮影と海上での染料採水調査により測定し、その結果から拡散係数を求めた。

染料による拡散係数 K は水理模型実験でも述べたように瞬間に投入された染料雲の面積の時間的変化から求めた。その結果は表-1、図-17に示すとおりである。

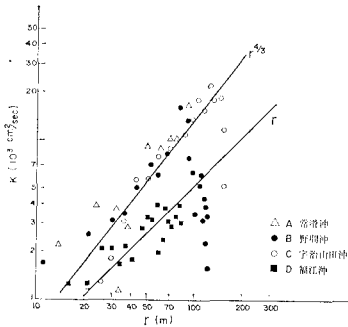


図-17 拡散係数(現地)

染料による拡散係数は A, B, C 点においては理論的な $4/3$ 乗則に合致している。D 点では他の3点と異り $1/1$ 乗則となっている。これは D 点の平均流速が他の3点と比較して $1/2$ 以下であるためと考えられる。図から推算される拡散係数は $10^3 \sim 10^4$ (cm²/sec) であることがわかった。

次にフロートの拡散について述べる。海洋の乱流場での慣性中間領域での2粒子の相対拡散はリチャードソン等により次のように表わせる。2粒子の相対距離を l とし l の2乗平均 \bar{l}^2 を考えると、これはエネルギー逸散率 ϵ_0 と最初の相対距離 l_0 に依存するが時間が十分に経ち、 \bar{l}^2 が大きくなると

$$\bar{l}^2(t) = \bar{l}_0^2 + \epsilon_0 t^3 \sim \epsilon_0 t^3$$

となる。一方、拡散係数 K を

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\bar{l}^2}{dt}$$

と定義すると、これから

$$K \sim \epsilon_0^{1/3} (\bar{l}^2)^{2/3}$$

となる。 $\sqrt{\bar{l}^2}$ は拡散に關与するうずのスケールと考えられるから上式は拡散係数がスケールの $4/3$ 乗に比例することを示している。この2粒子の相対拡散を多粒子群の重心に対する相対拡散に適用して、重心のまわりの統計的分散を \bar{Y}^2 とすると

$$\bar{Y}^2 \sim \epsilon_0 t^3$$

$$K \sim \epsilon_0^{1/3} (\bar{Y}^2)^{2/3}$$

が期待されるといわれている。今回の調査ではこれらの解析手法を適用してフロートの拡散を算出した。各フロート群の重心に対する距離の2乗平均 (\bar{Y}^2) と経過時間 t の関係を示したのが図-18である。 \bar{Y}^2 と t の関係は $\bar{Y}^2 \sim t^{0.5} \sim t^{1.5}$ となり先に示した $\bar{Y}^2 \sim t^3$ の関係とかなり異なった結果が出た。これはフロートの浪、風による影響、さらに水深の影響等が考えられる。なお、このようにフロートによる拡散から厳密な拡散現象を捉えることはむづかしいがフロートによる拡散係数を表-1に示しておく。

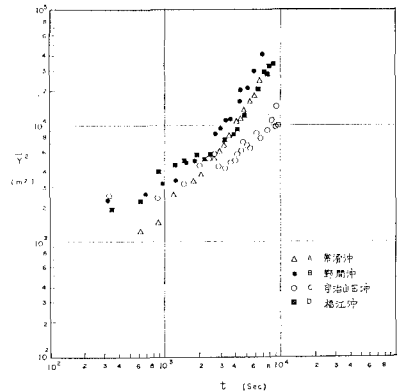


図-18 \bar{Y}^2 と t の関係

7. あとがき

われわれは伊勢湾の環境保全のために49年度より現地

調査, 水理模型実験, シミュレーションを実施しているが今回は伊勢湾水理模型の潮流, 汚染拡散の再現性についての基礎的な報告を行った。潮流についてはほぼその再現性を確認できた。汚染拡散については1年実験を実施してその定量的な拡散現象の可能性について試みた。今後は施設にも改良を加え, さらに自浄作用等の検討も加える考えである。現地調査は拡散調査について報告した。われわれは伊勢湾, 三河湾口において1潮汐間の海水交換調査を実施したが調査結果の整理が遅れ今回の報告では省略した。

本調査は運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水汚染水理研究室の指導のもとに実施している。またシミュレーションは同研究所の TOSBAC 3400 にて行ったものである。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生: 沿岸海洋に関する水理模型実験, 1972, 7.
- 2) 海上保安庁: 伊勢湾潮流図, 1971.
- 3) 金子安雄: 海洋汚染に関する水理模型実験の現状, 1973, 12.