

## 三河湾における潮流による拡散の水理模型実験について

樋 口 明 生\*・柳 哲 雄\*\*・柏 井 誠\*\*\*

## 1. はじめに

沿岸海域における保存物質の分布は移流と拡散によって決まるあるバランスの状態にあると考えられる。

従来、沿岸海域における物質分布の解析は、エストュアリーを1次元化して、移流項中の流量としては淡水供給量のみを考え、潮流や他の運動による物質輸送は拡散項としてみつめることにより進められてきた。しかし、このような方法では拡散係数の大きさは決定できても、それがどのようなメカニズムによって定まるかを知ることはできない。

分散の考え方は mass transport を分解し、拡散項を流速分布と対応させて、拡散のメカニズムに迫ろうとする試みである。拡散係数の統計的性格は分散係数においては一段低いレベルに落とされるので、より決定論的な物質分布を予知することが可能となる。

しかし、沿岸海域において物質分布と同程度の密度で流速の水平・垂直分布を直接測定することは非常に困難を伴う。そこでまず種々の測定が容易に行える水理模型内での拡散現象について研究することは、原型での現象を理解するための有力な視点を与えるものと考えられる。

今回、三河湾の水理模型実験を行う機会を得たので、潮汐・潮流が再現されている模型内で、物質分布がどのようにして決まっているのかを明らかにしようとした。

未だ十分な結果を得るに至っていないが、今までに得られた結果について報告する。

## 2. 原型

三河湾は 図-1 に示すように、知多・渥美両半島に囲まれ、伊勢湾南東部に開口している。伊良湖水道を通って太平洋から入って来る潮浪は、湾口部から知多湾・渥美湾に進入する。この海域では半日周潮が卓越している。大潮差は太平洋岸の赤羽根で 1.3 m、湾奥の三河港で 1.9 m であり、湾内では外海側より約 50% 大きい。湾内外の  $M_2$  分潮の位相差は 12 度(24 分)である。

これまでの観測結果によると、この海域における流れ

は主として潮汐によって支配されている。片浜における満潮前3時項に上げ潮最強流があらわれ、満潮後3時項に下げ潮最強流があらわれる。

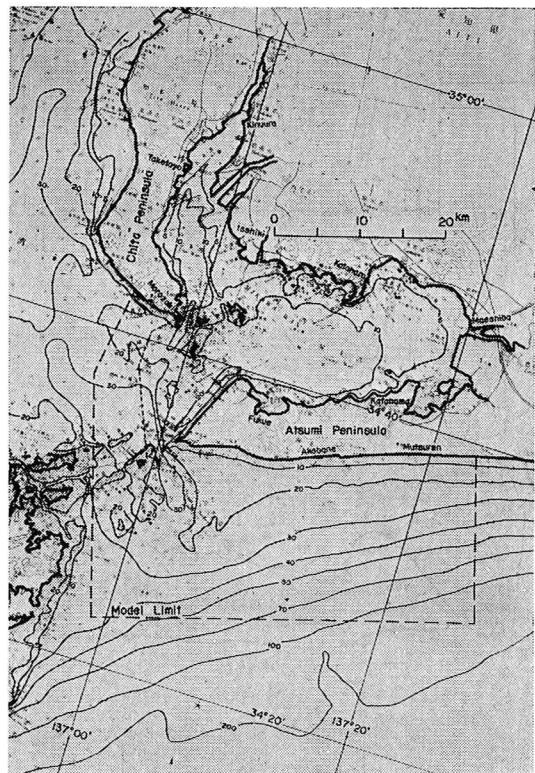


図-1 三河湾

### 3. 模型

潮流の運動は水平方向に卓越しており、圧力は静水圧分布をなすとしてよい。ここでは海面から海底まで平均した流れについての相似を考える。Froude の相似律と拡散係数の相似律から次式が得られる<sup>1)</sup>。

$$C_r = x_r^{1/3} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 $x$  は水平距離、 $h$  は鉛直距離、 $t$  は時間、 $c$  は海底摩擦係数を表わし、添字  $r$  は原型と模型の比率を表わしている。

ここでは対象とする海域の広さ、水粒子の移動範囲と実験施設の大きさとを考慮して、 $1/x_r = 1/2\,000$ 、 $1/h_r =$

\* 正会員 理博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科  
\*\* 理修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科  
\*\*\* 農修 京都大学防災研究所

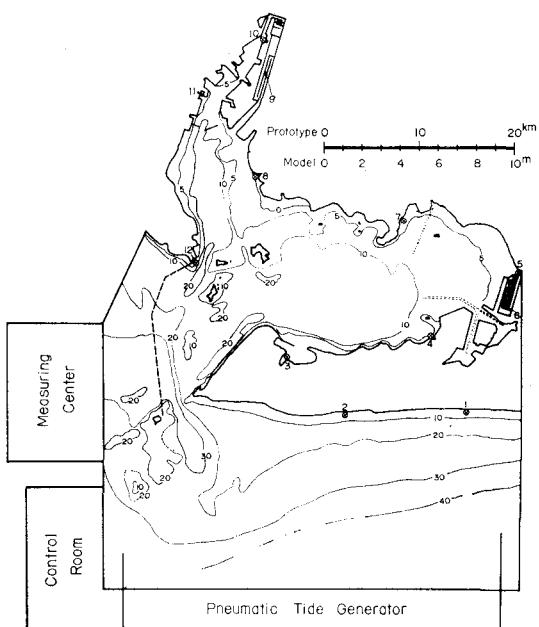


図-2 模型一般図

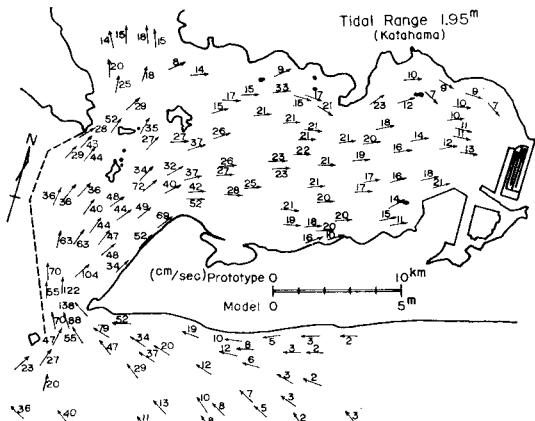


図-3 上げ潮最盛時の流況（模型）

$1/160$ ,  $1/t_r = 1/160$  を採用した。模型一般図を 図-2 に示す。図中 $\otimes$ 印の 1~12 は水位測定点である。

潮汐・潮流はよく再現されているが、その詳細については別報<sup>1)</sup>を参照されたい。模型で得られた上げ潮最盛時の流況を 図-3 に示す。

#### 4. 恒 流

浮標が 1 周期の間に移動した流跡を 図-4 に示す。この図から明らかなように一般に流跡は閉じていない。このような tidal residue はいわゆる恒流(潮流観測値の 25 時間平均値)をつくる。恒流の研究は未だ十分に行われておらず、その実体はよくつかめていないが、潮流の地図による偏流と河川水の流入によるものが主な原因と考

えられている<sup>2)</sup>。模型で得られた恒流を 図-5 に示す。図-3 と比較すればわかるように恒流の大きさは潮流の数%である。原型の観測が不十分なため、実験で得られた恒流が原型のそれを再現しているかどうかは現在のところ不明である。

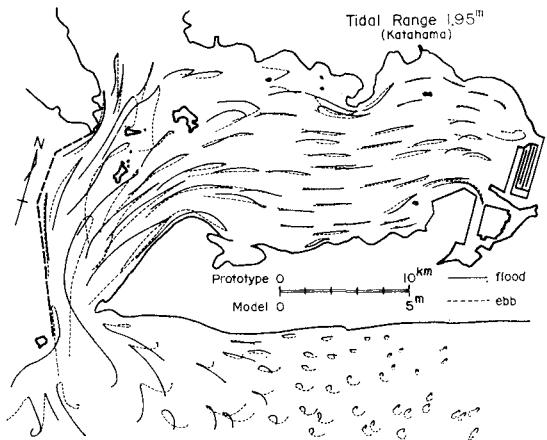


図-4 流 跡（模型）

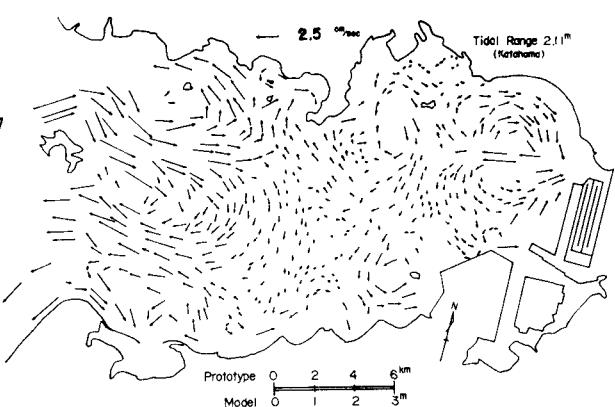


図-5 恒 流（模型）

#### 5. 連続点源拡散実験

実験は模型に大潮を与えた。図-6 に示す A 点から 0.69 cc/sec の割合で 75 ppm のウラニン溶液を連続投入した。染料水は密度が模型水槽の水と等しくなるように、暖めて流した。採水には内径 6 mm のガラス管を用い、海面から海底までの水柱をとった。代表測点 (7, 11, 21, 27) では 5 周期ごとに、満・干潮時に採水し、濃度の時間的変化を調べた。80・100 周期目の上げ潮・満潮・下げ潮・干潮時には、27 点で同時採水を行い、濃度の水平分布を調べた。濃度測定には、螢光光度計(ターナー社製 111 型)を用いた。

濃度の時間的変化を 図-7 に示す。図の横軸は半日周潮の 1 周期を単位とする時間、縦軸は投入原液との千分

率(%)で表わした濃度である。

80周期と100周期の値を平均して得られた90周期目の濃度の水平分布を図-8に示す。これをみると濃度の水平分布は図-5で示した恒流によく対応していることがわかる。

### (1) 1次元モデル

図-9に示すように投入点Aを原点とし、点線に沿って湾口にいたる1次元座標を考えて、図に示したような各海区で濃度を平均すると、図-10のようになる。こ

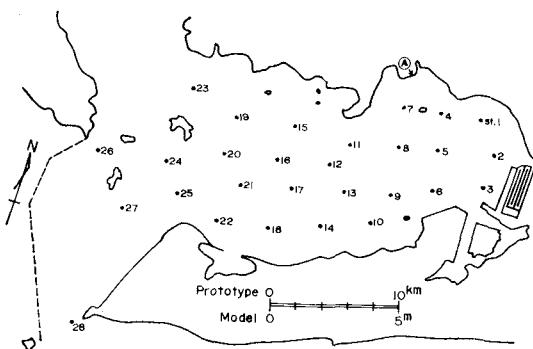


図-6 染料投入・採水点

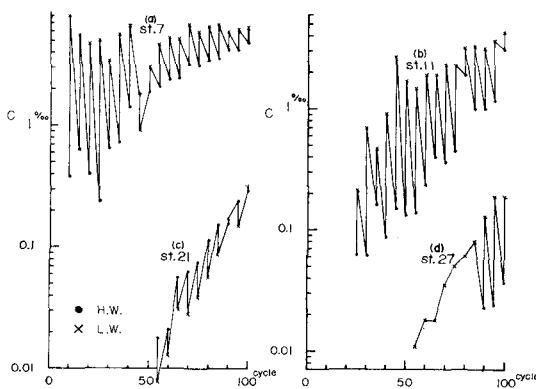


図-7 濃度の時間的変化

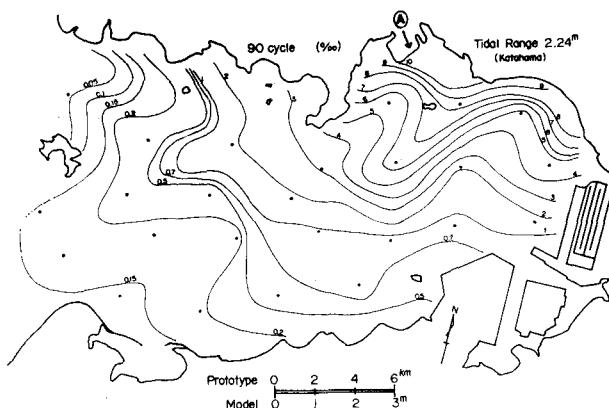


図-8 濃度水平分布

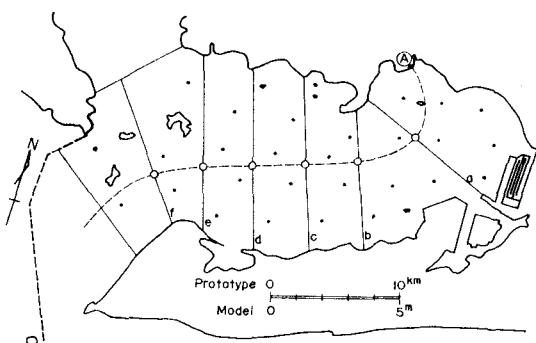


図-9 一次元座標

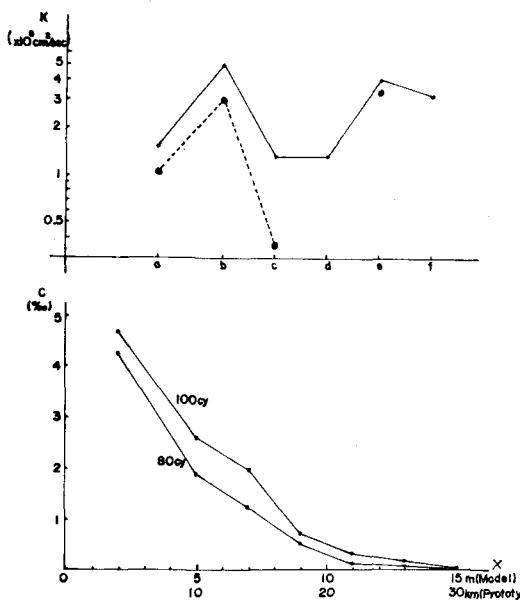


図-10 断面平均濃度・拡散・分散係数

のような濃度勾配を与える拡散係数を、1次元拡散方程式の差分近似によって求めてみた。1次元拡散方程式は次のように書ける。

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + Q \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \cdot K \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $A$ は横断面積、 $C$ は染料濃度、 $Q$ は単位時間当たりの染料投入量、 $K$ は拡散係数である。式(4)を差分形に書き直すと

$$K = \frac{A \cdot \Delta x \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} + Q \cdot \Delta C}{A \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x}} \dots \dots \dots (4)$$

となる。このようにして求めた拡散係数を図-10に示す。図中実線で結んだのがそれである。各海区の $K$ の平均値  $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  を三河湾全体の平均的な拡散係数と考えてもよいであろう。

## (2) 2次元モデル

1次元モデルにおいては、恒流による染料輸送も、潮流の往復運動による染料輸送も断面平均すれば0となるので、すべて拡散項に含めて考えざるを得なかった。ここでは2次元的に取扱うため、湾内に図-11のようなboxを考え、恒流による染料輸送を移流項とし、潮流の往復運動による染料輸送を拡散項として考えて、拡散係数を算出してみた。

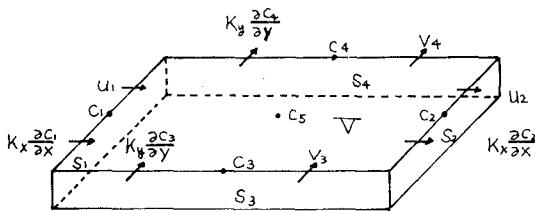


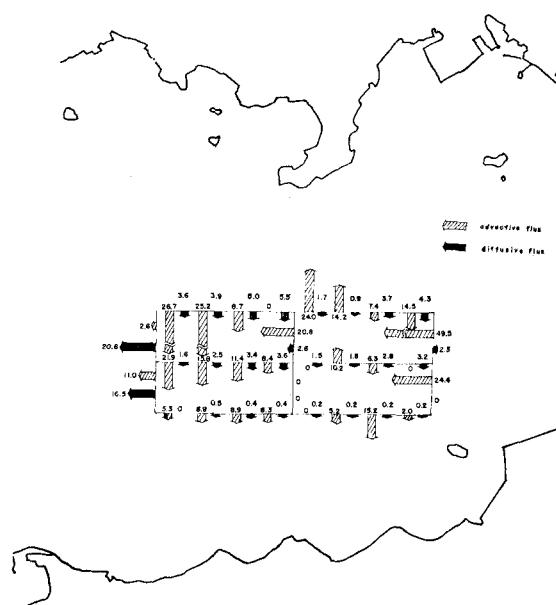
図-11 box model

図-11において、boxの大きさは潮流半円の主軸( $x$ )方向に4km、その直角( $y$ )方向に1.5kmとした。図中 $C$ は染料濃度、 $u$ ,  $v$ は $x$ ,  $y$ 方向の恒流速度、 $S$ は断面積、 $V$ はboxの容積、 $K_x$ ,  $K_y$ は $x$ ,  $y$ 方向の拡散係数である。染料の収支は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \cdot (uC) + v \cdot (K_y C) \quad (5)$$

実際には次式のような差分式を使って計算する。

$$V \frac{\partial C_5}{\partial t} = S_1 U_1 C_1 - S_2 U_2 C_2 + S_3 U_3 C_3 - S_4 U_4 C_4 \\ + S_1 K_x \frac{\partial C_1}{\partial x} - S_2 K_x \frac{\partial C_2}{\partial x} + S_3 K_y \frac{\partial C_3}{\partial y}$$



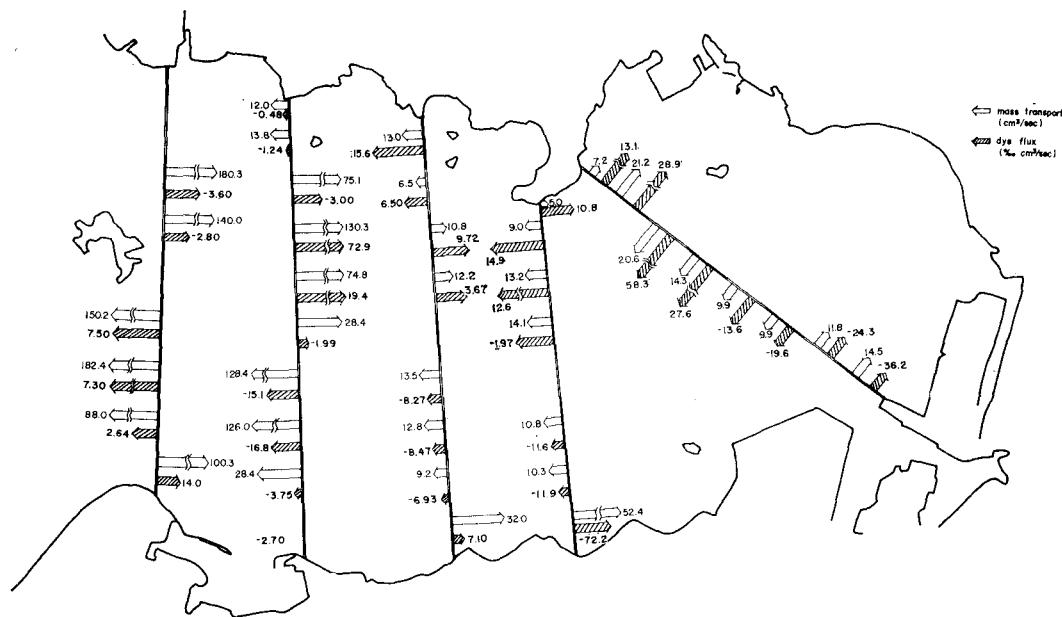


図-13 恒流による染料 flux

理論的に求めた結果<sup>3)</sup>と一致している。

## 6. まとめ

以上著者らは水平縮率 1/2 000, 鉛直縮率 1/160 の模型を使って、三河湾海域における拡散現象に関する実験を行い、今までに次のことが明らかになった。ただしここでは半日周潮のみを対象とし、密度、波浪、風などの影響は考慮していない。

- 1) 潮汐・潮流はほぼ再現された。
- 2) 水平的な染料の拡がりの pattern は tidal residual flow に支配されている。
- 3) 連続点源染料域の水平分布から求めた三河湾の平均的な 1 次元拡散係数は  $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  程度である。
- 4) tidal excursion 3 km, 最大流速 20 cm/sec, 水深 13 m の場所で潮流の往復運動による拡散係数として、潮流構用の主軸方向に  $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , その直角方向に  $1.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の値が得られた。
- 5) 3)に述べた 1 次元拡散係数は恒流の分散係数とし

てほぼ説明できる。

今後、模型で得た視点をもとに現地観測を行って、原理でもこのような考え方が妥当であるかどうか検討していきたいと考えている。

最後にこの研究を進めるにあたって、実験並びに資料の整理に協力していただいた京都大学防災研究所北川吉男技官、および中国工業技術試験所の星加章氏に謝意を表する次第である。

なおこの研究は一部愛知県の委託によって行ったものであることを付記する。

## 参考文献

- 1) 樋口明生・柳 哲雄・柏井 減(1973, 74): 潮流による拡散の水理模型実験について(V), (VI), 京大防災研年報, 第 16, 17 号。
- 2) 山田紀男(1971): 東京湾の潮流, 水路要報 91 号, pp. 85~90.
- 3) Fischer, H. B. (1972): Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, J. F. M. 53, pp. 671~687.