

潮汐による港内の移流・拡散に関する実験的研究

足立 昭 平*・中 村 俊 六**・森 章***

1. ま え が き

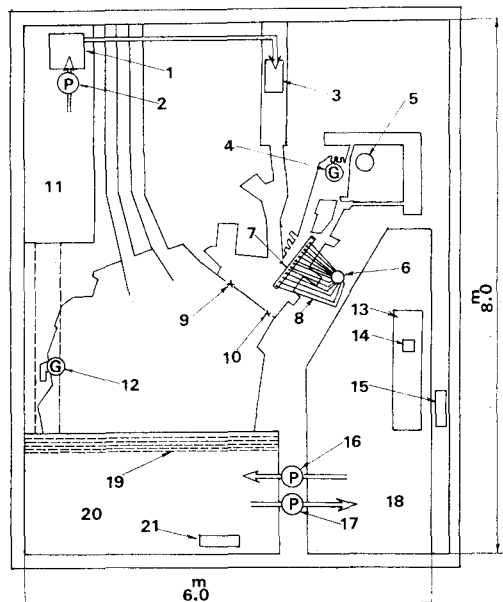
沿岸水域の汚濁防止は、基本的には産業廃水・都市下水の処理にまたねばならないが、防波堤あるいは埋立地で囲まれる港内水域においては、水の流動が地形に拘束されて流入水の停滞が懸念される場合が少なくない。本研究は、名古屋港を原型とする小模型水域を例にとって、比較的奥の深い港内水域の潮汐による水の流動と物質の移流・拡散機構を実験的に考察し、それらの地形的要因に基づく特性を明らかにしようとしたものである。

2. 模型概要

模型水域は、名古屋港を原型として水平縮尺 1/5 000、鉛直縮尺 1/100 で形成し、模型は伊勢湾の地形も考慮して、港内水面積の約 4 倍の港外水域を範囲とした。起潮装置は、模型水域の沖側に貯水槽を設け、これに給水ポンプと排水ポンプをとりつけて、電磁リリーススイッチによる交互運転を行うものである。模型潮汐は、操作の便宜上給排水量を一定としたため、直線的な水位昇降になっているが、一応原型の大潮期半日潮を基準として、周期 86.4 sec、名古屋港最奥地点の潮差 2 cm とした。実験水槽内の模型配置は、図-1 に示すようである。なお、模型水域に流入する河川については、港内に河口を開くものの平水量は模型でただか数 cm³/sec の程度であり、港外水域に流入するものの流量も港内水域の流況にさほど顕著な影響を及ぼさないと判断されたので、河川流量はいずれも実験条件から除外した。

3. 流 況 実 験

起潮装置作動後、所定の潮汐が発生していることを確かめ、第 4 周期目の低潮転流時を浮標投入の開始時刻とした。浮標は主副両港口に時間間隔 1/18 周期(4.8 sec)で次々に投入し、水面上 3.5 m の高さに設置したカメラ(広角 $f=43\sim86$ mm) をモータードライブで遠隔操作し、1/36 周期(2.4 sec)の時間間隔で投入後の浮標位置を撮影した。なお、浮標にはそれぞれ写真で判読できる番



- | | |
|---------------|-----------------|
| 1 河川用高水槽 | 12 水位計(抵抗線式自記) |
| 2 河川用ポンプ | 13 計器机 |
| 3 庄内川流量検定せき | 14 写真撮影間隔自動制御装置 |
| 4 水位計(抵抗線式自記) | 15 配電板 |
| 5 染料注入装置 | 16 上潮用ポンプ |
| 6 採水装置 | 17 下潮用ポンプ |
| 7 採水管固定装置 | 18 潮汐用貯水槽(1) |
| 8 採水パイプ | 19 整流装置 |
| 9 副港口浮標投入点 | 20 潮汐用貯水槽(2) |
| 10 主港口浮標投入点 | 21 潮汐周期自動制御装置 |
| 11 河川用貯水槽 | |

図-1 実験水槽平面図

号を書き込み、水面下 5 cm に十字に組んだ流圧板を吊してある。図-2 および 3 は、このようにして得られた浮標の流跡をそれぞれ上潮期の前半に投入されたものと後半に投入されたものに分けて図示したものである。図中の丸印は満潮時刻における浮標位置を投入番号別に表示している。

両図は、両港口を中心にそれぞれ一対の還流が形成されることを示しており、港内に流入した港外水の大部分はこれらの還流に乗って再び港外へ流出し、港奥に達する水塊はほとんど認められない。両図には港口に投入した浮標の流跡だけを示したが、それらの流跡線の及ばない港奥水域には比較的単調な往復流が観察され、一般に奥の深い港内水域の流況は還流水域と往復流水域とから

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 名古屋大学助手 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 本州四国連絡橋公団設計第2部

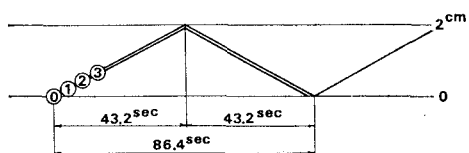
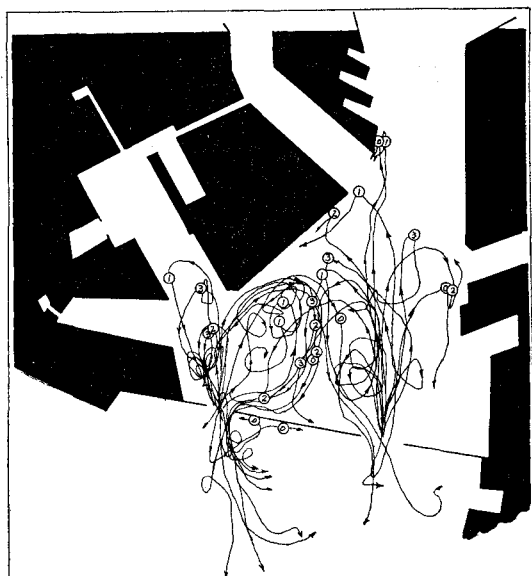


図-2 上潮期前半に投入した浮標の流跡

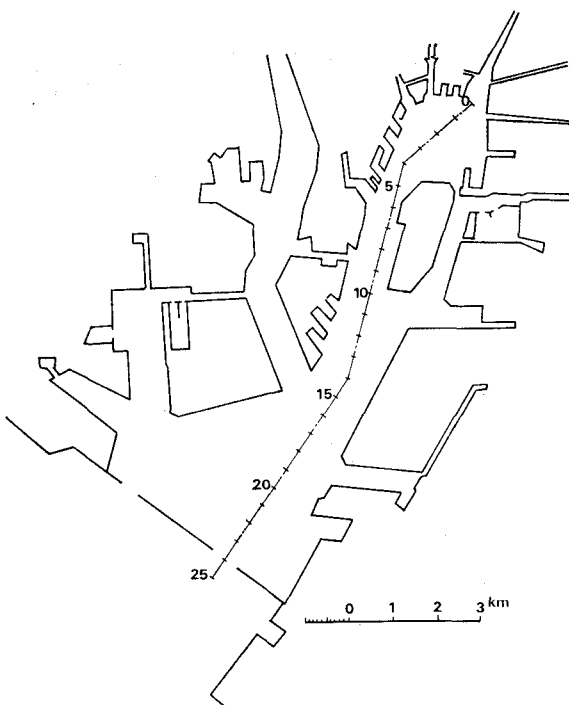


図-4 採水地点

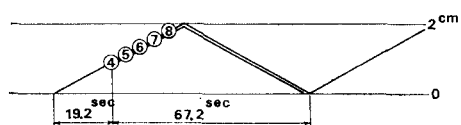
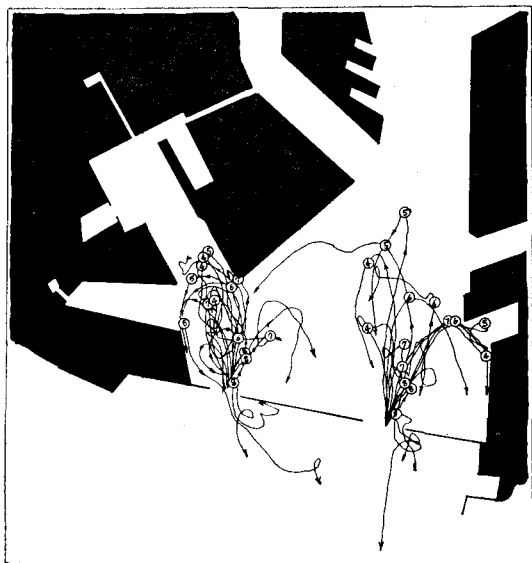


図-3 上潮期後半に投入した浮標の流跡

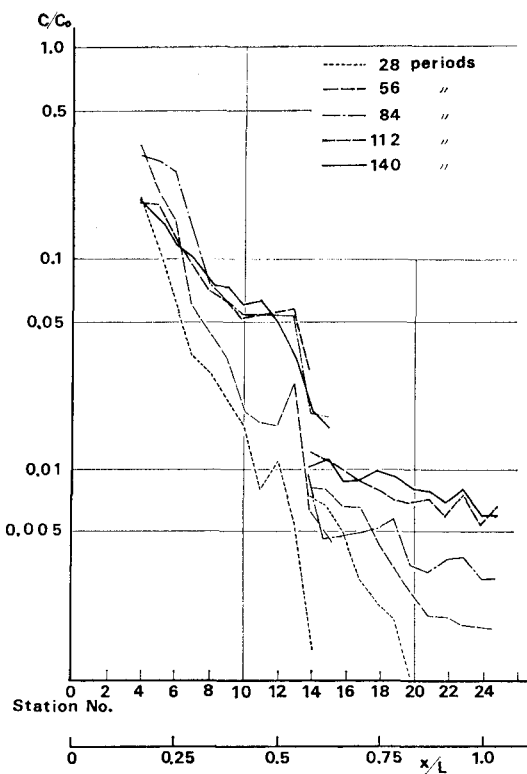


図-5 測点0を連続供給源とする濃度分布の実験値

成るものと考えられる。

4. 港奥に連続供給源を与えた染料の拡散実験

港軸として、図—4のように航路に沿って測点 0～25 を設定し、港奥堀川河口の 0 点に $0.4\sim 10\text{ cm}^3/\text{sec}$ の流量で 1 000 ppm のローダミン B を連続投入し、各測点において 28 周期(40 分 19 秒、原型の 14 日に相当)の時間間隔で 5 回の採水を行い、吸光濁度計によってそれぞれの濃度を測定した。図—4 の各測点間隔は 10 cm (原型: 500 m) であり、採水は真空ポンプによる採水装置を用いて、測点 4～15 および測点 14～25 のそれぞれ 12 地点を同時に行った。また各地点では水深 7 cm にわたって一様に採水した。

測定された各時刻の濃度分布は、図—5 のようであり、濃度勾配は時間の経過とともに漸減し、84 周期、120 分 58 秒 (原型: 42 日) には各区間ごとにはほぼ一定の勾配を示す。しかし、測点 15～25 の水域では濃度の絶対値はなお漸増し、定常状態は 112 周期、161 分 16 秒 (原型: 56 日) に現われる。定常状態と見なされる濃度分布は、各区間ごとにそれぞれ特定の勾配を形成しているが、特に測点 13 と 14 の間の不連続的変化が際立っており、さきの浮標流跡で見出された還流水域の外縁と合致している。

5. 瞬間点源による染料の拡散実験

連続固定源による染料の濃度分布は、港内の還流水域と往復流水域とにおける移流・拡散の相違を明瞭にあらわしているが、それらの相違を機構的に追究するために、それぞれの水域について瞬間点源による染料の拡散を円形パッチ理論と対比し、拡散パラメーターを検討した。

2 次元等方性拡散場における円形パッチはよく知られているように、

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial S}{\partial r} \right) : r \geq 0, t \geq 0 \dots (1)$$

で与えられる。ここに、 S は濃度、 r は点源からの距離、 t は時間、 K は 2 次元水平拡散係数である。 K の一般形を

$$K = kr^m f(t) \dots (2)$$

とおけば、式 (1) の解は次式のようにあらわされる¹⁾。

$$S = \frac{A}{(kt)^l} \exp \{ -r^m/(kt)^n \} \dots (3)$$

ここに、 A は瞬間点源の強さに関する定数、 k は拡散パラメーター、 l, m, n は式 (2) の形に由来する係数であり、従来の主な円形パッチ理論の K の仮定とそれらの係数値を示せば、表—1 のようである。

円形パッチ理論に基づいて観測資料の拡散パラメーターを算定する方法は、通常の場合、 t が十分大きいもの

表—1 K の仮定と円形パッチ理論の係数値

Proposer	Diffusion parameter	l	m	n
Fick	$K = \text{constant}$	1	2	1
Joseph & Sendner	$K = p r$ p :diffusion velocity	21	1	1
Ozmidov	$K = c r$ c :energy dissipation parameter	3	2/3	1
Okubo & Pritchard	$K = q t$ q :diffusion velocity	2	2	2
Okubo	$K = a r t$ a :energy dissipation parameter	3	4/3	2
Obukhov	$K = b t$ b :energy dissipation parameter	3	2	3

が対象とされ、式 (3) の指数関数をべきに展開して求められるが²⁾、ここでは観測時間が観測時間間隔に比較して、かならずしも大きくはないから、式 (3) の指数関数を展開するのではなくて、両辺の対数をとる、

$$\ln \frac{A}{S} = \frac{r_{i+1}^m}{(kt_{i+1})^n} + l \ln(kt_{i+1}) = \frac{r_i^m}{(kt_i)^n} + l \ln(kt_i) \dots (4)$$

したがって、

$$k = \left[\{ (r_i^m/t_i^n) - (r_{i+1}^m/t_{i+1}^n) \} / l \ln(t_{i+1}/t_i) \right]^{1/n} \dots (5)$$

によって拡散パラメーターを検証した。ここに r_i および r_{i+1} はそれぞれ時刻 t_i および t_{i+1} におけるパッチの半径である。

さて、瞬間点源として港奥の往復流水域に対しては測点 6 を、港口につながる還流水域に対しては測点 18 をとり、下潮から上潮への転流時刻に 1 000 ppm、10 cc のローダミン B を注入した。注入は染料が全水深に一様に分布するように、染料を封入したパイプを注入測点に立ててから、パイプの下端を開くと同時に、それを静かに引上げる方法をとった。パッチの拡散過程は相当半径の時間的推移であらわし、相当半径は浮標流跡の測定と同様の

表—2 瞬間点源によるパッチ相当半径の実験値

t (cm) time (sec)	往復流 域	還流域
5	—	9.5
10	7.7	13.2
20	11.4	21.4
30	12.9	24.1
45	—	29.5
60	17.4	39.1
120	21.6	56.1
240	29.5	—
480	38.3	—

カメラで撮影したカラー写真から染料の拡散前線を判読して算定した。両水域における相当半径の測定結果は、表—2 のようである。

表—2 の相当半径の測定値 r_i に対して、表—1 の諸理論におけるそれぞれの係数値を適用して、 $\log(t_i/t_0)$ と $\{ (r_0^m/t_0^n) - (r_i^m/t_i^n) \}$ との関係は算定すれば、往復流水域に対して 図—6 が、

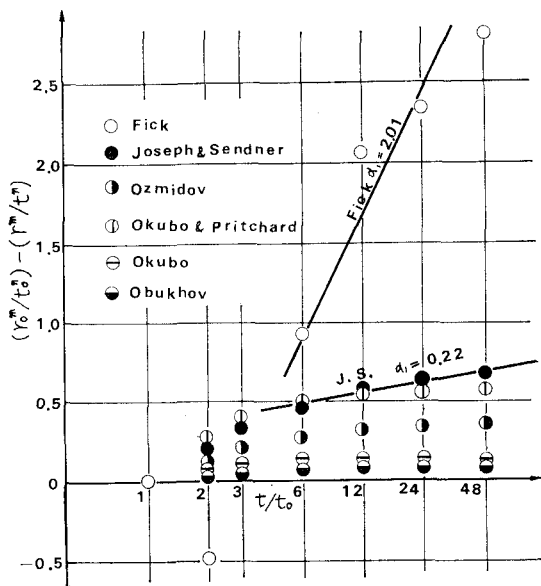


図-6 往復流水域における $\log(t_i/t_0)$ と $\{(r_0^m/t_0^m) - (r_i^m/t_i^m)\}$ との関係

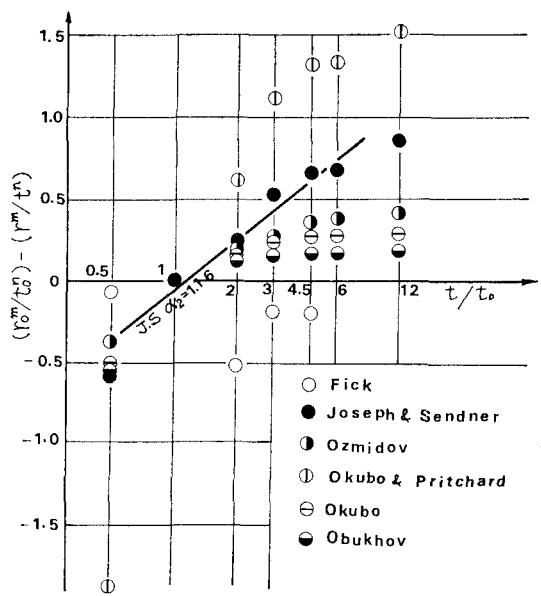


図-7 還流水域における $\log(t_i/t_0)$ と $\{(r_0^m/t_0^m) - (r_i^m/t_i^m)\}$ との関係

還流水域に対して図-7が得られる。式(5)から明らかなように、各パッチ理論の拡散パラメーターの仮説が成立するとすれば、図-6および7の点描は直線的でなければならない。また、両図における縦軸は、 $t_i/t_0 > 1$ に対して正、 $t_i/t_0 < 1$ に対して負でなければならない。図-6に関しては、こうした条件に対していずれの仮説もさほど大きくは外れていないように見えるが、図-7に関しては、Fickの仮説がこれらの条件に明らかに反している。

Fickの仮説は拡散係数を一定値とおくものであり、拡散理論の基本形でもあるが、この実験は、それが還流水域には適用できないことを示したわけである。一般に、往復流水域と還流水域との相違は、水平シアの相違と考えることができ、すでに多くの指摘がなされているように、水平シアは拡散を促進する効果を有する。しかし、上記の結果は、水平シアの効果は単に拡散係数の値を大きくとることだけで評価できないことを示唆しているように思われる。

さて、還流水域に対してFickの仮説は排除されるが、その他について図-6および7の点描だけからいずれが最適の仮説であるかを判定することは困難であり、どの仮説をとってもそれほど大差はないものと考えられる。したがって、解析の簡便さを選択の尺度とすれば、往復流水域に対してFickの仮説を、還流水域に対してJoseph-Sendnerの仮説が好ましいといえよう。

6. 港内濃度分布の一次解析に関する考察

供給される物質が保存量であれば、一様水深、一定幅の水域における濃度 C の一次元拡散方程式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。ここに、 D は一次元拡散係数である。

いま、港軸に直角にとった断面で水域を分割し、断面 $i-1$ と i との間の水域に対して、 D_i を一定値と見なし、

$$\text{初期条件: } C_i(x, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{境界条件: } C_i(x_i, t) = C_{i-1}(x_{i-1}, t), \dots, \\ C_0 = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{および } C_i(\infty, t) = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

とおけば、式(6)の解は、区間 $x_{i-1} < x < x_i$ に対して、

$$C_i(x, t) = C_{i-1}(x_{i-1}, t) \frac{\text{Erfc}(x/2 \sqrt{D_i t})}{\text{Erfc}(x_i/2 \sqrt{D_i t})} \quad (10)$$

となる。

さきのパッチ理論に準拠して得られる拡散パラメーターによって、一次元拡散係数 D_i を求めれば、

1) 港奥往復流水域に対して、図-6のFick仮説を適用して、

$$D_i = D_0 = \left(\frac{\alpha_1}{l} \log e \right)^{1/n} = \frac{2.01}{0.5} \times 0.434 = 1.75 \text{ cm}^2/\text{s} \quad \dots\dots\dots (11)$$

2) 還流水域に対して、図-7でJoseph-Sendnerの仮説を採用して拡散速度 p を求めれば、

$$p = \left(\frac{\alpha_2}{l} \log e \right)^{1/n} = \frac{1.16}{2} \times 0.434 = 0.252 \text{ cm/s}$$

したがって、還流外縁を測点15と見なし、それからの距離を x^* とおけば、

$$D_i = p\xi = 0.252 x^* \text{ cm}^2/\text{s} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。しかし、式 (11) および (12) は水面幅の変化による拡散効果を含んでいないから、港内水域の一次元解析には水面幅の変化に対する補正を付加した拡散係数を用いなければならない。その補正は明確ではないが、かりに

$$D_i' = D_i \frac{B_0}{B_i} \quad \dots\dots\dots (13)$$

とおけば、各測点に対する D_i' の値は表-3 のようになる。ここに、 D_i は式 (11) あるいは (12) の値、 B_0 はパッチ拡散実験の原点とした測点(測点 6 あるいは 18)の水面幅、 B_i は断面 i の水面幅とする。

表-3 一次元拡散係数の推定値

往復 流域	St.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	D_i	2.11	0.88	0.79	0.73	1.32	1.82	1.75	1.55	1.65
	D_i'	1.40	0.60	0.66	0.79	0.86	0.96		3.28	8.69
環 流域	St.	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	D_i	3.28	8.69	10.95	10.18	12.60	10.43	8.56	13.24	15.22
	D_i'	24	25	26						
		--	14.00	15.12						

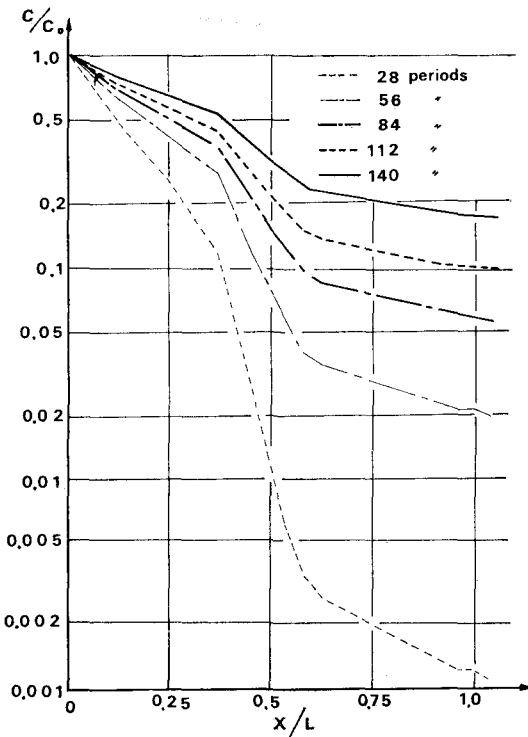


図-8 式 (10) による濃度分布の試算

表-3 の D_i' の値を式 (10) に適用して、港軸に沿う 1 次元濃度分布を計算すれば、図-8 が得られる。この試算値は、さきの測点 0 に連続供給源を置いた実験結果、図-5 よりも全般に高い濃度を与え、港内水域の混合を過大に評価する結果になっている。図-5 の実験値から

拡散係数を逆算すれば、表-3 の D_i' の値は、 $0 \leq x/L \leq 0.42$ に対して過大、 $0.42 \leq x \leq 0.54$ に対して過小、 $0.54 \leq x \leq 0.58$ に対して過大と見られる。このようない違いは、1 次元拡散の取扱いにおける断面量の平均操作、特に式 (13) の仮定に問題があるためと考えられるが、いま一つの問題点として、式 (9) の境界条件が港口の存在をいわば無視した形になっていることを再考しなければならない。式 (9) を

$$x=L \text{ において, } C=0, D=D_L \quad \dots\dots\dots (14)$$

と修正すれば、式 (10) は

$$C_i(x, t) = C_{i-1}(x_{i-1}, t) \times \frac{\text{Erfc}(x/2\sqrt{D_i t}) - \text{Erfc}(L/2\sqrt{D_i t})}{\text{Erfc}(x_{i-1}/2\sqrt{D_{i-1} t}) - \text{Erfc}(L/2\sqrt{D_{i-1} t})} \quad \dots\dots\dots (15)$$

と書き改められる。 L および D_L の値を指定する方法に問題は依然として残されるが、いまの場合 D_L を表-3

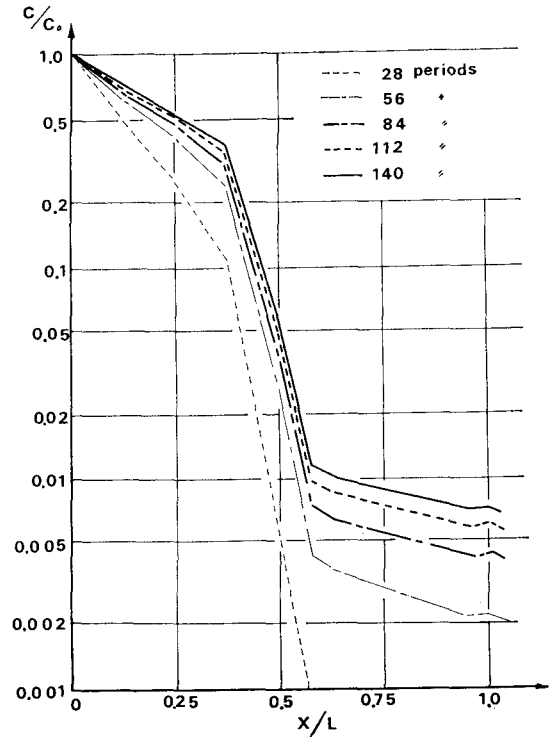


図-9 式 (15) による濃度分布の試算

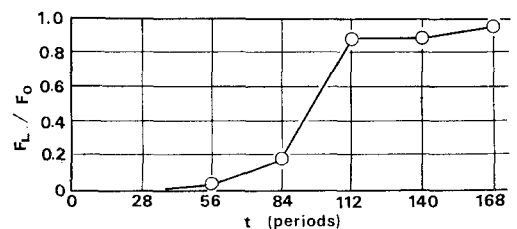


図-10 1 潮汐周期当りの港口からの物質放出率

の還流外縁付近の値を参考として、 $D_L=11.0\text{ cm}^2/\text{s}$ とし、港外水域の地形要素を勘案して $L=500\text{ cm}$ とおけば、式(15)による計算値は図-9のようであり、前図よりもずっと図-5の実験値に近い値を示し、特に港口につながる還流水域の濃度分布はよく合致する。また、港口から港外への1周期当りの物質放出量 F_L と港奥に供給される物質量 F_0 との比を式(15)に基づいて試算した結果は図-10のようであり、濃度分布が定常状態に近づくまでの期間が112周期、161分16秒(原型:56日)の程度であることも、図-5の実験結果によく対応する。

7. む す び

以上、名古屋港を原型とする小模型水域における移流・拡散現象について考察したが、それらを要約すれば、以下のようである。

(1) 比較的奥の深い港内水域の流況は、港口につながる還流水域とその港奥側の往復流水域とに区分される。

(2) 港奥に連続的な物質供給源があるとき、上記両水域における濃度勾配は還流水域において小さく、両水域の遷移部に濃度分布の不連続面が形成される。

(3) 円形パッチ理論に基づいて、両水域における拡散パラメーターを実験的に検討した結果、水平シアの大きい還流水域に対しては、拡散係数一定と見なすFickの仮説は不適である。従来の拡散パラメーターに関する諸仮説は、上記の場合を除いて適応性の優劣を断じ難い。解析上の簡便さに従えば、往復流水域に対してFickの仮説が、還流水域に対して拡散速度一定と見なすJoseph-Sendnerの仮説が実用的と考えられる。

(4) 上記両水域に関するパッチ理論の適用性から推

定された港内の一次元拡散係数の推定値によって、港内濃度分布の試算に一応の目安を得ることができた。しかし、拡散係数の推定値にはなお断面平均操作に関する吟味が必要であり、また同時に、有限水域である港内水域に対する1次元拡散モデルの設定に当って、沖側の境界条件の導入法を研究しなければならない。

なお、本研究は実験値の原型への幾何学的縮尺だけによる単純な定量的換算を意図してはいないが、流れの運動学的境界条件に関しては本実験のような小縮尺の模型においても十分に相似性を期待できるから、港内水域のように地形的拘束の強い場における現象の究明にあたって、その基本的構成を把握するうえにこうした小模型実験の効用は大きいといえよう。

終りに、本研究の遂行に当って実験・資料整理に協力を頂いた山住則夫氏、山田広己氏、安藤裕康氏、古田宝氏および森久子氏のご労苦に対して、ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Okubo, A: A review of theoretical models of turbulent diffusion in the sea, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, 20th Anniv., pp. 286-320, 1962.
- 2) 平野敏行・杉浦健三: 河川流入のある小内湾の塩分分布について, 東海区水産研究所研究報告, 第22号, 昭33.12, pp. 1-15.
- 3) 樋口明生・杉本隆成: 潮流による拡散の水理模型実験について, (I), 京都大学防災研究所年報第10号B, 昭42.3.
- 4) Okubo, A: Some remarks on the importance of the shear effect on horizontal diffusion, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 24, No. 2, pp. 60-69.