

1. まえがき

湾域における汚濁物質の拡散に関する要因としては、汚濁物質の理化学的性質、移送、拡散、沈降、再浮上、自己減衰あるいは生産などが考えられる。ここでは、汚濁物質が溶解性で保存性物質である場合の移送および拡散をとりあつかう。水質に係る環境基準にあげられ、また魚貝類を斃死させる $\text{NH}_4\text{-N}$ などを考慮している。ここにいう湾域とは、河口および沿岸部を含む岸より10 km 程度までの領域である。湾域拡散問題の検討には、(1)現地調査、(2)模型実験、および、(3)拡散解析、の三つの方法が考えられる。これらの方法のほか(1)はマルチバンドカメラなどを使用したりモートセンシングによる濃度分析と、現地での採水分析に分類できるが、気象、潮流、潮位差など種々の条件を考慮した調査を同時に行なうには多大の費用と労力がかかり、将来の予測をたてにくいなどの困難がともなう。また、(2)による方法は、対象とする湾域の面積が広い場合平面縮尺と鉛直縮尺を歪めた模型によらなければならないことが多く、そうするとその相似性に多くの問題がでてくる。すなわち、拡散模型実験の結果を定量的にそのまま現地へ換算することはできない。つぎに(3)は、拡散の偏微分方程式を解くことにはなるが、境界条件や初期条件が複雑なため、解析解が求められることは一般にはほとんどなく、偏微分方程式を差分式に展開し電子計算機を用いてその数値解を求め、その結果によって検討することになる。この方法によれば、時間と費用の節約ができ、また解析結果は、任意地点任意時間についてえられるので、現在についてはもとより、過去の拡散経過も検討でき、さらに予測や汚濁制御をおこなうにあたって有効な資料を提供できる。しかし、湾域拡散問題は非定常現象であること、広範囲を対象とするために差分化する差分間隔をある程度大きくとらざるをえないこと、および境界条件と初期条件が複雑であることなどが原因となって数値解析方法は複雑になる。

本報では、拡散方程式の数値解析と、これに相似な実験とを同時にとりあげ、これらをよく一致させようとの意図のもとに、研究を進めてきた過程でえた若干の知見をのべたものである。

2. 拡散現象と基礎方程式

移送拡散機構解明には、Fickの拡散方程式が使用され、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) \cdots \cdots (1)$$

で示される。ここに C :濃度、 t :時間、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数である。

また、拡散係数は、一般には乱流による拡散係数と、媒質とその温度によってきまる分子拡散係数との和であるが、ここでは乱流による拡散係数のみを考えている。乱流による拡散係数については次のような吟味を行なっている。

いま、拡散係数に關係する物理量として、重力の加速度 g 、底面の粗度係数 n 、水深 h 、および流れの直角方向の流速 V を考え、次元解析によってこれらの間の関数關係を求めれば、次式がえられる。

$$\frac{D}{Vh} = f\left(\frac{\sqrt{gh}}{V}, \frac{nV}{h^{3/2}}\right) \cdots \cdots (2)$$

一方、拡散係数を与える式として、次の2式がある。^{2), 3)}

$$D = k U_* h \cdots \cdots (3)$$

$$D = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\bar{V}^2) \cdots \cdots (4)$$

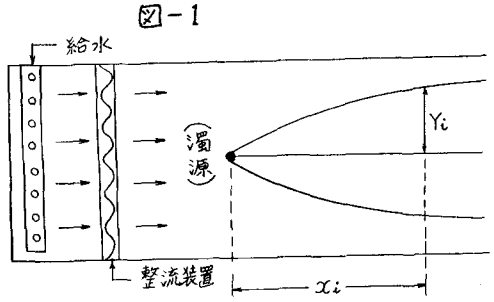
ここに、 U_* はまさつ速度、 k は無次元定数、 $\bar{V}^2$ は流体塊が時刻 $t=0$ から $t=t$ までに流れの直角方向に到達し

た距離の二乗平均である。 U_x は乱流においては断面粗度 n 、水深 h 、流速 V などの物理量であらわすことができる。すなわち、これらの物理量と断面まじり力 τ_0 、流体密度 ρ 、まじり損失係数 f などの関係は水理学的定義により、 $U_x = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, $\tau_0 = \frac{f}{8} \rho V^2$, $f = \frac{8g n^2}{h^{1/3}}$ である。したがって $U_x = \frac{n \sqrt{g} V}{h^{1/6}}$ がえられ、

(3)式は次のようにあらわされる。

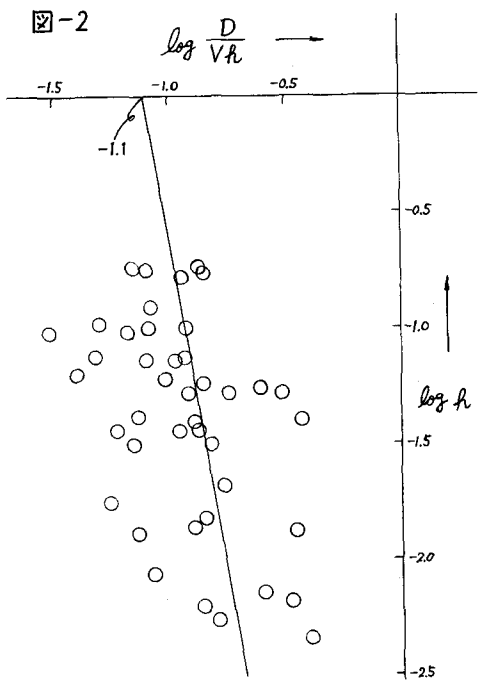
$$D = k \sqrt{g} n h^{5/6} V \dots (5)$$

つぎに、無次元定数 k の決定は、次のようにおこなった。
 図-1に示す実験装置において、濁源よりの距離 x_i 、到達距離 Y_i 、 h および V を測定し、(4)式をかきかえた $D_i = \Delta Y_i^2 / (20 x_i / v_c)$ によって D_i を算定する。次に $\log(D/vh)$ と $\log(h)$ とを求め、実験結果をプロットすると図-2がえられる。そこで、このグラフの横軸切片は-1.1となるので、 $\log(k \sqrt{g} n) = -1.1$ がえられる。粗度係数はマンニング公式 $n = R^{2/3} I^{1/4} / V$ より算定し、 n の平均値は0.012となった。したがって、 k の値はほぼ2.11となる。



すなわち $D = 2.11 \sqrt{g} n h^{5/6} V \dots (6)$

がえられる。上式に任意地点、任意時刻の水深および流速を適用すれば、これに対応する拡散係数を求めることができ、湾域あるいは河口付近などにおける非定常の問題に対して、ほぼ妥当な結果を与えるものと考えられる。また、(6)式により、図-7に示す模型の拡散係数を計算し、解析に使用した。その例を表-1のDの欄に示している。



一才、移送拡散機構には、汚濁物質の流出状況、潮流、潮位差、地形、風および波が影響する。そして、拡散解析では、(1)式中の流速と拡散係数および解析過程での初期条件と境界条件へ影響要因をもち込むことになる。図-3は、これらの要因を整理したものである。すなわち、汚濁物質の流出は初期濃度条件に、潮流は流速に、潮位差は流速および水深に、地形は流速と境界条件に、および風は吹送流を経て流速および波に起因すると考えられる。この波はさらに海浜流に起因し、(6)式による拡散係数の表現は、これらの要因を流速 V と水深 h に包含している。

3.基礎方程式の差分化

いま、簡単のために、 $U = \text{一定}$ 、 $D_x = \text{一定}$ と考えて、(1)式を一次元で表示すれば

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots (7)$$

となる。この式を差分化するには、図-4に示しているように $(x-t)$ 平面を長方形格子で区切り、

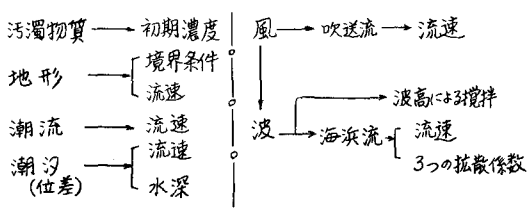


図-3

$C(i\Delta x, k\Delta t)$ を C_i^k とあらわそう。ここに i は場所格子点, k は時間格子点に用い, また, $\Delta x, \Delta t$ はそれぞれ場所, 時間方向の格子間隔である。(7)式左辺の差分は
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{k+1} - C_i^k}{\Delta t}$$

となる。次に, 右辺の差分にあたっては, 安定性と収束性を考慮して, 第1項移送項の差分には One-Sided 差分をとり, 第2項拡散項の差分には陰形式の中央差分を用いれば,

$U \geq 0$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_i^{k+1} - C_i^k}{\Delta t} &= -U_i \frac{C_i^k - C_{i-1}^k}{\Delta x} + \frac{D_x}{(\Delta x)^2} (C_{i-1}^{k+1} - 2C_i^{k+1} + C_{i+1}^{k+1}) \\ U < 0 \text{ のとき} \\ \frac{C_i^{k+1} - C_i^k}{\Delta t} &= -U_i \frac{C_{i+1}^k - C_i^k}{\Delta x} + \frac{D_x}{(\Delta x)^2} (C_{i-1}^{k+1} - 2C_i^{k+1} + C_{i+1}^{k+1}) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

がえられる。ところで, 上式(7)において, 未知量 $(k+1)\Delta t$ 時刻の濃度を算定する過程で, 通常 Δt と Δx は一定とするのに対し, U_i は場所と時間で変化するので, $U_i \Delta t$ が Δx と等しくない箇所が生じる。そのために(8)式の右辺第1項に基因して, 実際には不合理な Numerical diffusion (数値拡散誤差) があらわれる。

4. 数値移送係数の定義

いま, 図-5(a)に示すように, 時刻 k において, 距離 i を中心とした幅 Δx , 高さ C_i^k の長方形の濃度分布を考える。移送により, これは時刻 $k+1$ において(図)のような状態になるはずである。ところが, いまの場合, 時刻 $k+1$ における i 点の移送拡散は, その移送に基因して

$$\frac{U_i}{\Delta x} C_i^k - \frac{U_i}{(\Delta x)^2} C_i^{k+1} U_i \Delta t \doteq C_i^{k+1} \left\{ \frac{U_i}{\Delta x} \left(1 - \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) \right\} \dots (9)$$

だけ進んでいることになる。そこで, われわれは, 時刻 k において距離 i と $i-1$ とに生じた進みすぎは同じ k において i と $i-1$ とで補正し, また k において $i+1$ と i とで生じた進みすぎも同じ k において $i+1$ と i とで補正することを試みた。まず, 移送に基因する Numerical diffusion は, (9)式によってあらわされているので, これを

$$C_i^k \left\{ \frac{U_i}{\Delta x} \left(1 - \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) \right\} \doteq C_i^k \left\{ \frac{U_i}{2\Delta x} \left(1 - \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) \right\} + C_{i-1}^k \left\{ \frac{U_i}{2\Delta x} \left(1 - \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) \right\} \dots (10)$$

のように近似的にあらわし, 右辺の第1項および第2項をその補正量と考えれば, これを(8)式の右辺の第1項, すなわち移送項に適用して,

$$\left. \begin{aligned} U \geq 0 \text{ のとき} \\ C_i^{k+1} &= C_i^k + \left\{ \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} - \frac{U_i \Delta t}{2\Delta x} \left(1 - \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) \right\} (C_{i-1}^k - C_i^k) + \frac{\Delta t D_x}{(\Delta x)^2} (C_{i-1}^{k+1} - 2C_i^{k+1} + C_{i+1}^{k+1}) \\ U < 0 \text{ のとき} \\ C_i^{k+1} &= C_i^k + \left\{ \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} + \frac{U_i \Delta t}{2\Delta x} \left(1 + \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) \right\} (C_i^k - C_{i+1}^k) + \frac{\Delta t D_x}{(\Delta x)^2} (C_{i-1}^{k+1} - 2C_i^{k+1} + C_{i+1}^{k+1}) \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

がえられる。そこで, われわれは, 右辺第2項の $\{ \}$ 内の第2項を

$$C_{N_x, i} = \left[\begin{array}{cc} \frac{U_i \Delta t}{2\Delta x} \left(1 - \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) & \dots & U_i \geq 0 \\ -\frac{U_i \Delta t}{2\Delta x} \left(1 + \frac{U_i \Delta t}{\Delta x} \right) & \dots & U_i < 0 \end{array} \right] \dots (12)$$

とあらわし, $C_{N_x, i}$ を数値移送係数 (Numerical Convection Coefficient) と定義した。

これを Balla による疑似拡散係数 D_N と比較すると次のようになる。疑似拡散係数は, 移送項に基因する進み

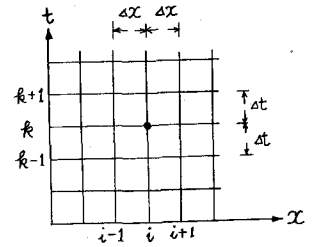


図-4 差分モデル

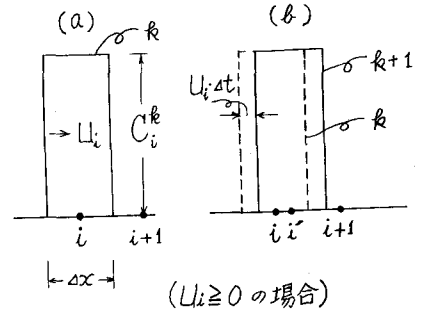


図-5 移送項補正モデル

すぎを拡散項で補正するために、時刻 k において $u_{i,j} \geq 0$ のときは距離 i と $i-1$ で、 $u_{i,j} < 0$ のときは $i+1$ と i との2箇所で生じる進みすぎを、常に $k+1$ において $i-1$ 、 i および $i+1$ の3点で近似的に補正してゆくことになり、われわれの目的にこの方法を適用すると負の濃度が出現するなどの不合理が生じる。これは、拡散現象において濃度勾配が大きい場合には、疑似拡散係数 D_N を使用する際の $(C_{i-1}^{k+1} + C_{i+1}^{k+1})/2 \approx C_i^{k+1}$ なる中央差分の仮定にがかりの無理が生じるためであろう。一方、数値移送係数 $C_{Nx,i}$ の適用は、流向の正負で前方差分と後方差分とを使いわける移送項で行なうために、濃度勾配の大きい場合にも(10)式の仮定に物理的矛盾はなく、負の濃度があらわれるような不合理は生じないものと考えられる。

5. 2次元拡散問題への適用

湾域拡散問題は三次元現象であるが、ここでは鉛直方向には流速の変化と濃度変化は小さいと考えて、二次元の場合に単純化している。一次元の式である(11)式の二次元への拡張適用は、次のようにおこなう。まず、 y 方向の距離ステップを y まであらわし、 y が距離 y をあらわすものとし、 x 方向のみの濃度の変化を考えた仮想濃度 $C^{(k+1)*}$ を

$$C_{i,j}^{(k+1)*} = C_{i,j}^k + \left(\frac{U_{i,j} \Delta t}{\Delta x} - C_{Nx,i,j} \right) (C_{i-1,j}^k - C_{i,j}^k) + \frac{\Delta t \cdot D_{x,i,j}}{(\Delta x)^2} (C_{i-1,j}^{(k+1)*} - 2C_{i,j}^{(k+1)*} + C_{i+1,j}^{(k+1)*}) \quad (\text{但し } u \geq 0) \quad (13)$$

により算定しておき、これに対応する理論濃度は

$$C_{i,j}^{k+1} = C_{i,j}^{(k+1)*} + \left(\frac{V_{i,j} \Delta t}{\Delta y} - C_{Ny,i,j} \right) (C_{i,j-1}^{(k+1)*} - C_{i,j}^{(k+1)*}) + \frac{\Delta t \cdot D_{y,i,j}}{(\Delta y)^2} (C_{i,j-1}^{(k+1)*} - 2C_{i,j}^{(k+1)*} + C_{i,j+1}^{(k+1)*}) \quad (\text{但し } v \geq 0) \quad (14)$$

によって算定する。ここで $C_{Ny,i,j}$ は(12)式の U を V と書きかえたものである。このように2次元の拡散問題は x 方向と y 方向にそれぞれ一次元の問題として一回づつ取り扱うことによって解析され、これはまた、 x 、 y 方向の拡散を同時に取り扱うよりも、 Δt 、 Δx 、 Δy をより小さくすることができ電算機メモリーを有効に使用することにもつらなる。さて(13)式において

$$\left\{ A_{i,j} = C_{i,j}^k + \left(\frac{U_{i,j} \Delta t}{\Delta x} - C_{Nx,i,j} \right) (C_{i-1,j}^k - C_{i,j}^k) \quad , \quad B_{i,j} = \frac{\Delta t \cdot D_{x,i,j}}{(\Delta x)^2} \right\} \quad \dots (15)$$

とおき、任意の j につき、 i を2から $n-1$ まで展開し、両端での境界条件 $C_{1,j}^{(k+1)*} = C_{1,j}^k$ 、 $C_{n,j}^{(k+1)*} = C_{n,j}^k$ として、これを行列表示すれば

$$\begin{bmatrix} 1+2B_{2,j} & -B_{2,j} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -B_{3,j} & 1+2B_{3,j} & -B_{3,j} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -B_{4,j} & 1+2B_{4,j} & -B_{4,j} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -B_{n-2,j} & 1+2B_{n-2,j} & -B_{n-2,j} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -B_{n-1,j} & 1+2B_{n-1,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{2,j}^{(k+1)*} \\ C_{3,j}^{(k+1)*} \\ C_{4,j}^{(k+1)*} \\ \vdots \\ C_{n-2,j}^{(k+1)*} \\ C_{n-1,j}^{(k+1)*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{2,j} + B_{2,j} C_{1,j}^k \\ A_{3,j} \\ A_{4,j} \\ \vdots \\ A_{n-2,j} \\ A_{n-1,j} + B_{n-1,j} C_{n,j}^k \end{bmatrix} \quad \dots (16)$$

となる。なお、(13)式に対する(16)式と同様式が(14)式に対してもえられる。

この N 元連立一次方程式をGauss-Jordanの消去法を用いて解く場合、係数行列は3重対角行列であるので、0の係数についての演算を除けば、所要の演算回数は、通常のGauss-Jordanの消去法によるよりも少なく、能率をあげることができる。また、(15)式より $B_{i,j}$ を試算すれば、われわれの解析においては、 D は表-1より $0.1 \sim 35.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲にあり、 $\Delta x = 66.7 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 5 \text{ sec}$ であるので、 $B_{i,j} = 1.0 \times 10^{-4} \sim 0.04$ をえる。そこで、係数行列における軸要素 $(1+2B_{i,j})$ と他の2つの要素 $(-B_{i,j})$ を比較すれば1対 -0.04 のオーダーになり軸要素がかなり大きい。したがって、演算回数が減少していることと相まって消去法による演算過程に生じるまるめの誤差は少ないものと考えられる。

このように、われわれは(13)式、(14)式を使用して消去法により拡散解析をおこなってきたが、ここで移送項、数値移送項および拡散項のオーダーを数値解析の結果を使って検討しておこう。表-1はこれを示したものである。これによって、移送項と数値移送項を比較すれば、移送項が後者の2倍程度で、オーダーとしてはほぼ等しくなっており、数値移送項による補正が重要であることを示している。また、拡散項と他の2項と比較すれば、流速が2cm/sec以上を示す箇所では拡散項のオーダーが他の2項のそれより1つ〜3つ小さいが、流速が小さくなるにつれて、ほぼ同じオーダーとなっている。

表-1 各項のオーダーの比較

流速	0	0	-0.51	-1.04	-1.09	-1.04	-1.00	-2.17	-2.48	0	-1.22	-1.29	-2.04	-1.16	-1.32
	-4.78	-4.72	-1.41	-1.04	-1.09	-1.33	-2.24	-0.11	0.35	-2.05	0	-1.65	0	0	1.32
拡散係数	0	0	24.3	19.4	19.1	23.0	35.5	1.7	4.6	0	0.1	27.5	0.1	0.1	17.0
	0.1	0.1	8.9	19.4	19.1	18.0	15.8	32.6	32.4	0.1	0	21.5	0	0	17.0
移送項	0	0	3.8×10^{-4}	6.2×10^{-4}	4.1×10^{-4}	1.6×10^{-4}	4.6×10^{-4}	9.8×10^{-5}	7.4×10^{-5}	0	-9.2×10^{-5}	2.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}	8.7×10^{-6}	2.0×10^{-5}
	3.6×10^{-5}	-1.4×10^{-4}	7.4×10^{-5}	1.4×10^{-4}	1.9×10^{-4}	9.0×10^{-5}	-4.4×10^{-5}	2.6×10^{-5}	-8.4×10^{-5}	1.5×10^{-5}	0	2.1×10^{-5}	0	0	-2.0×10^{-5}
数値移送項	0	0	1.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}	1.8×10^{-5}	7.3×10^{-5}	2.1×10^{-5}	4.1×10^{-5}	3.0×10^{-5}	0	4.2×10^{-6}	1.3×10^{-5}	7.6×10^{-6}	4.0×10^{-6}	-0.9×10^{-5}
	1.2×10^{-5}	-4.5×10^{-5}	3.3×10^{-5}	6.5×10^{-5}	8.7×10^{-5}	4.1×10^{-5}	-1.8×10^{-5}	1.3×10^{-5}	4.1×10^{-5}	0	6.3×10^{-6}	9.2×10^{-6}	0	0	-9.0×10^{-6}
拡散項	0	0	5.5×10^{-5}	2.0×10^{-5}	4.3×10^{-5}	4.1×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}	4.1×10^{-5}	0	7.9×10^{-5}	2.4×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-5}	3.8×10^{-5}
	1.1×10^{-5}	-5.6×10^{-5}	4.0×10^{-5}	2.4×10^{-5}	2.8×10^{-5}	1.6×10^{-5}	-5.1×10^{-5}	-8.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}	0	-7.7×10^{-5}	0	0	0	3.1×10^{-5}
-2.43	-2.60	-1.16	-1.04	-1.65	-2.18	-1.15	0.20	-0.87	-1.50	-0.27	-0.30	-1.41	0	0	-0.13
0.43	0.27	0	1.87	1.65	2.18	0.85	3.16	0.44	2.57	1.50	2.17	2.38	1.41	3.60	2.50
5.5	1.8	0.1	22.9	19.8	24.9	6.6	22.8	2.5	22.9	15.4	11.4	15.9	8.3	0	11.1
31.1	17.3	0	12.7	19.8	24.9	14.1	8.3	1.1	8.3	15.4	1.8	1.9	8.3	0.1	0.6
1.8×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.0×10^{-5}	6.9×10^{-6}	2.9×10^{-5}	-3.1×10^{-5}	4.8×10^{-5}	-6.6×10^{-5}	2.8×10^{-5}	5.3×10^{-5}	-2.2×10^{-5}	8.0×10^{-5}	0	3.4×10^{-5}
1.5×10^{-5}	5.3×10^{-6}	0	-2.5×10^{-5}	7.0×10^{-6}	8.3×10^{-6}	-2.5×10^{-5}	7.9×10^{-5}	-6.6×10^{-5}	-6.8×10^{-5}	-2.8×10^{-5}	-3.6×10^{-5}	-6.2×10^{-5}	-2.7×10^{-5}	-6.4×10^{-5}	-5.6×10^{-5}
7.4×10^{-5}	5.6×10^{-5}	7.8×10^{-5}	-7.4×10^{-5}	2.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}	2.4×10^{-5}	3.1×10^{-5}	1.2×10^{-5}	-2.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	3.6×10^{-5}	0	0	-1.7×10^{-5}
7.3×10^{-5}	2.6×10^{-5}	0	1.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}	2.9×10^{-5}	-2.9×10^{-5}	9.5×10^{-5}	-2.8×10^{-5}	2.7×10^{-5}	3.0×10^{-5}	4.1×10^{-5}	1.5×10^{-5}	2.8×10^{-5}	9.9×10^{-6}	2.3×10^{-5}
3.1×10^{-5}	2.8×10^{-5}	3.4×10^{-5}	5.2×10^{-5}	3.1×10^{-5}	3.9×10^{-5}	2.1×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}	2.2×10^{-5}	2.1×10^{-5}	2.6×10^{-5}	1.3×10^{-5}	4.4×10^{-5}	0	4.5×10^{-5}
-1.4×10^{-5}	-2.8×10^{-5}	0	2.6×10^{-5}	5.1×10^{-5}	1.3×10^{-5}	-1.8×10^{-5}	-4.0×10^{-5}	7.4×10^{-5}	3.3×10^{-5}	-1.9×10^{-5}	2.9×10^{-5}	2.1×10^{-5}	-1.5×10^{-5}	3.4×10^{-5}	4.0×10^{-5}

6. 解析結果の実験結果による検討

解析の対象とした装置を図-6に示している。恒流成分である潮流を発生させ、また潮汐を与え、また、必要に応じて造波機による波およびシロッコファン型風洞装置による風を与えることができる。

このような条件下に拡散物質としての色素を河口部より、潮汐の影響を考えて一定周期(ほぼ5分)で放流する。放流開始時間以前に流出した色素は、放流停止時間内に河口付近より移送拡散しており、河口部

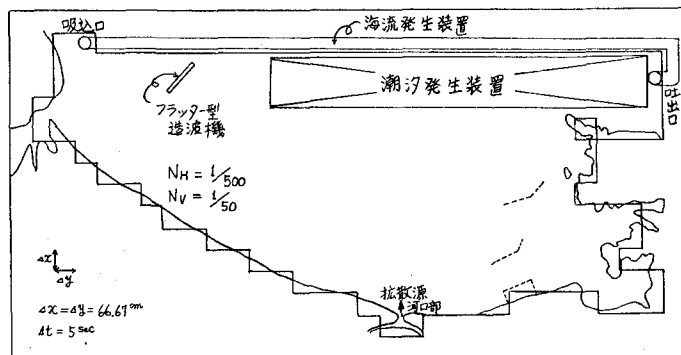


図-6 実験装置

は清澄になると考えている。清澄海域へ高濃度の色素が流出し、大きな濃度差を保って時々刻々ひろがる。このひろがる様子を数値解析した結果を図-7(a)、図-8(a)、および図-9(a)に等濃度線で示している。また、これらに対応する実験結果を図-7(b)、図-8(b)、および図-9(b)に等濃度線で示している。

これらを比較して、解析結果は実験結果によって検証されたと言えよう。

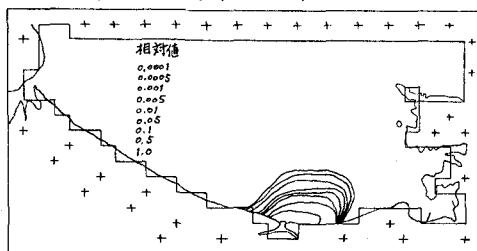


図-7(a) 解析結果(放流開始後1分)

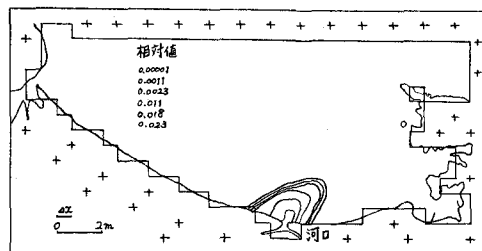


図-7(b) 実験結果(放流開始後1分)

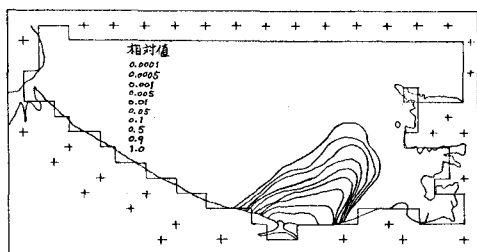


図-8(a) 解析結果(放流開始後3分)

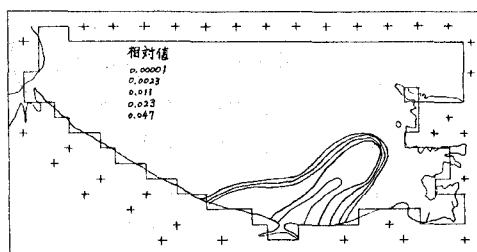


図-8(b) 実験結果(放流開始後3分)

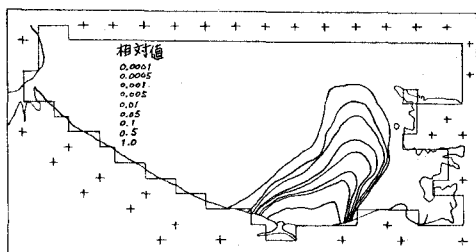


図-9(a) 解析結果(放流開始後5分)

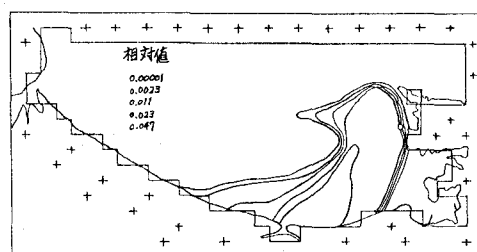


図-9(b) 実験結果(放流開始後5分)

7. おまけ

以上、湾域拡散について、その拡散係数、数値解法さらに実験結果についてのべたが、これらをまとめると、ほぼ次のようなことが言える。

- (1) 拡散係数を、測定容易な底面粗度、水深および流速で定義すれば、非定常現象についても妥当な拡散係数を把握することができる。
- (2) 基礎方程式の差分化にともなう数値拡散誤差の補正のために、その物理性をほぼ満たすように数値移送係数を定義し、これを適用すれば解析結果に負の濃度などがあらわれることはなく、妥当な結果がえられることを確かめた。
- (3) 拡散解析は、三重対角要素をもつ多元連立一次方程式を解くことに帰着し、消去法を用いる過程では軸要素が他の要素よりも大きいので、丸めの誤差は少ない。また0係数に係る演算を省けば、普通の消去法に比べて計算能率がよくなる。
- (4) 移送項、数値移送項および拡散項の値を定量的に比較すると、これらのオーダーについては、移送項と数値移送項はほぼ等しく、拡散項は他の2項とほぼ等しいが、または、より小さい。
- (5) 解析結果は、実験結果にほぼ一致し、理論の妥当性は検証されたと考える。

今後とも、解析ならびに実験の両面に一層の検討を加え、理論値と実験値のよりよい一致をみるべく研究を進めなければならぬ。さらに現象により忠実になるためには、3次元的検討も加えなければならぬ。これらについては引きつづき研究を進める計画である。

参考文献

- 1) 加納、崎山：“拡散模型実験についての二・三の考察、第30回土木学会年講 II-P498
- 2) 土木学会：“水理公式集、昭和46年度版 P54
- 3) 谷一郎：“乱流理論、克誠堂 P38
- 4) 伊藤 剛：“数値計算の応用と基礎、アテネ出版 P205
- 5) D.A.Balla: Difference Modeling of Stream Pollution, J of Sanitary Eng. Div. ASCE, Vol. 94 SA5, 1968
- 6) 加納、崎山：湾内汚染物質追跡の数値計算モデルについて -その2-、土木学会西部支部 昭和50年度研究発表論文集 P109
- 7) 建設省関東地建、土木研究所：東京湾汚濁調査、昭和46年度 P206