

佐世保湾の流動および拡散に関する研究

(第4報: 数値計算による拡散)

宇都 幸一* ・中根 重勝**
野中 稀平*** ・栗須 正登*Studies on Tidal Current and Diffusion of Sea
Pollution in Sasebo Bay
(Diffusion Calculation)

by

Kouichi UTO

(Department of Mechanical Engineering)

Shigekatu NAKANE

(Fisheries)

Marehei NONAKA

(Sasebo Technical College)

Masato KURISU

(Department of Mechanical Engineering)

The Current by Calculation in Sasebo Bay was reported in the third report. In this paper, The Diffusion of Pollution is simulated in Sasebo Bay by finite difference method, by using the Current results of the third report.

The results are as follows

- (1) The Diffusion Pattern in Sasebo Bay is influenced by the Density of Omura Bay.
- (2) It is usefull in this Diffusion Calculation to use the Method of Least Squares.

1. 緒言

第1報¹⁶⁾で述べたように佐世保湾では各種の開発が考慮されており、まず現状での潮流および拡散を把握する必要がある。第1報、および2報¹⁸⁾では水理

模型を使用して潮流および拡散について多くの結果を得た。また数値シミュレーションについては第3報¹⁹⁾で潮流について報告した。本報は第3報で得た潮流計算結果の潮流 (U, V) を最小自乗法により周期的な

昭和55年10月1日受理

* 機械工学科

** 水産学部

*** 佐世保高専

関 数に近似し、拡散方程式を差分化して佐世保湾の数値計算を行い結果を得たので報告する。

2. 基礎式および差分式

2.1 基礎式

海洋の拡散¹³⁾は三次元の拡散であるが、今回は次のような仮定を用いて準三次元として取り扱った。

- i) 汚染物質は鉛直方向に拡散しない。
- ii) 鉛直方向の潮流成分は無視でき、かつ水平方向成分の鉛直方向に対する変化はない。
- iii) 拡散係数 K_i は水平方向に対して等方性でありまた全ての海域において一定であり、その大きさは離散距離 (ΔS^*) によって決まる。

いま海域を高さ H 、幅および長さが ΔS の直方体によって区分し、その直方体に対する汚染物質の保存を考えると次式¹³⁾が得られる。

$$\frac{\partial HC}{\partial t} = -\frac{\partial HUC}{\partial x} - \frac{\partial HVC}{\partial y} - KH \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで

- H : 水深
- C : 汚染物質の濃度
- x, y : 水平方向直交座標
- U, V : x および y 方向の流速

(1)式を展開すると

$$H \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial H}{\partial t} = -C \frac{\partial HU}{\partial x} - C \frac{\partial HV}{\partial y} - HU \frac{\partial C}{\partial x} - HV \frac{\partial C}{\partial y} + KH \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

となる。一方連続の式は^{6), 7), 11), 19)}

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial HU}{\partial x} - \frac{\partial HV}{\partial y}$$

よって、(2)式の左辺第2項および左辺1, 2項は連続の式により消去され、両辺を H で除すると

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} - V \frac{\partial C}{\partial y} + K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

となる。(3)式を拡散の基礎式¹³⁾とする。

2.2 差分式

図1に今回用いた差分点を示す。(3)式を差分化して計算する場合、差分の種類により安定、不安定が生じる。例えば左辺を時間的に前進差分、右辺第1, 2項を中央差分を用いると計算は不安定¹³⁾となり、発散する。計算の安定、不安定は固有値によって決まり、中央差分を用いると固有値が1より大きくなるためである。よって右辺第1, 2項については $\partial C/\partial x, \partial C/\partial y$ の係数 U, V の正負により前進および後進差分を用いた。この差分は上流の差分点を利用するという意味か

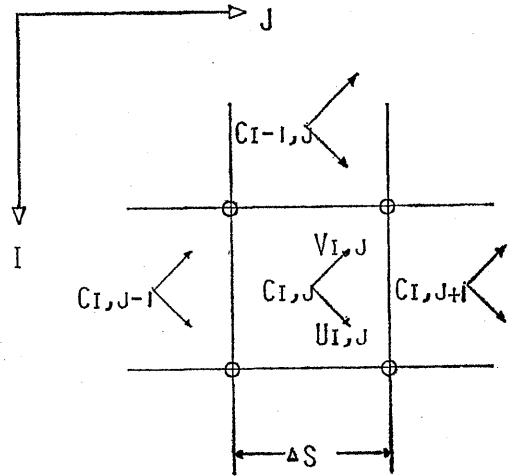


Fig. 1 The Point of Finite Different Method in X-Y Plane

ら Up-Wind¹³⁾ 法とよばれている。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x} \text{について} \\ U \geq 0 & \quad 1/2\Delta S^*(2C_{i,j} - C_{i-1,j} - C_{i,j-1}) \\ U < 0 & \quad 1/2\Delta S^*(C_{i+1,j} + C_{i,j+1} - 2C_{i,j}) \\ \frac{\partial C}{\partial y} \text{について} \\ V \geq 0 & \quad 1/2\Delta S^*(2C_{i,j} - C_{i,j+1} - C_{i,j-1}) \\ V < 0 & \quad 1/2\Delta S^*(C_{i-1,j} + C_{i,j+1} - 2C_{i,j}) \end{aligned}$$

また右辺第3項の拡散項については中央差分を行う。

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{1}{\Delta S^{*2}} (C_{i+1,j} + C_{i-1,j} + C_{i,j+1} + C_{i,j-1} - 4C_{i,j})$$

ただし計算点が境界に接している場合には、接する境界の濃度は計算点と同じ値とする鏡面の条件を用いた。よって全体の差分式は

$$\begin{aligned} C_{i,j}^{t+\Delta t} = & C_{i,j}^t - \frac{\Delta t}{2\Delta S^*} (U_{i,j}(t) \cdot C_{i,j,x} \\ & + V_{i,j}(t) \cdot C_{i,j,y}) + \frac{K\Delta t}{\Delta S^{*2}} \\ & (C_{i+1,j} + C_{i,j+1} + C_{i-1,j} + C_{i,j-1} - 4C_{i,j}) \\ & + q_{i,j}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで $U_{i,j}(t), V_{i,j}(t)$ および $q_{i,j}(t)$ は既知量である。 $q_{i,j}(t)$ は佐世保湾に加えられた汚染負荷量であり実測値が得られている。一方 $U_{i,j}(t), V_{i,j}(t)$ は潮流計質により得られる、一般に拡散計算は潮流計算と同時にやっているが、潮流計算が約6 cycle で収集するのに対して拡散は数10~数100cycle の計算が必要である。また、計算安定性から潮流の時間ステップが数秒から数10秒なのに対して拡散は数100秒でしかない。よって両計算を同時に行うことは非常に多大のCPU時間を必要とするため実用的ではないと考えられる。よって $U_{i,j}(t)$ および $V_{i,j}(t)$ は第3報で得た潮流の最終結果を周期の1/24 (30分) 毎にテーブ又

はディスクに記録しておき、その値を各 i, j 点毎に最小自重法¹⁴⁾により次のような周期関数として近似した。

$$U_{i,j}(t) = U_{i,j,0} + U_{i,j,s} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + U_{i,j,c} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$V_{i,j}(t) = V_{i,j,0} + V_{i,j,s} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + V_{i,j,c} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

ここで

T : 潮流の周期で計算では12時間

$U_{i,j,0}, V_{i,j,0}$: 潮流の x および y 方向平均流速 (恒流)

$U_{i,j,s}, V_{i,j,s}$: 潮流の x および y 方向の \sin 成分

$U_{i,j,c}, V_{i,j,c}$: 潮流の x および y 方向の \cos 成分である。

3. 計算および境界条件

図2に示すように佐世保湾を 300m のメッシュに区切り、汚染物質としては COD について計算した。境界条件として陸地では濃度を零とし、図中の $A-A'$ 線上で佐世保湾口の濃度として $0.606\text{ppm}^{1), 10)}$ また $B-B'$ 線上で大村湾の平均濃度 1.8ppm を与えた。ま

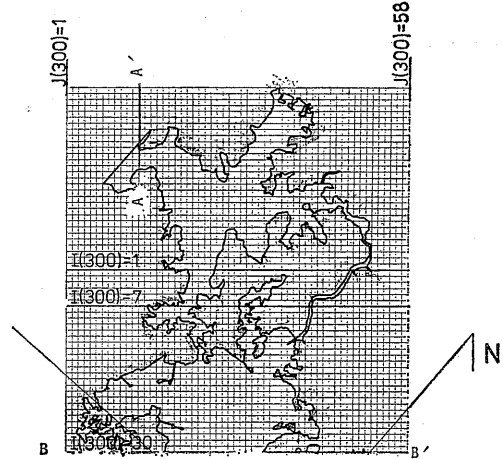


Fig. 2 The Mesh of the Diffusion Calculation

た負荷を与える点として佐世保川河口および日宇川河口にそれぞれ 94.5Kg/day および 731.3Kg/day を与

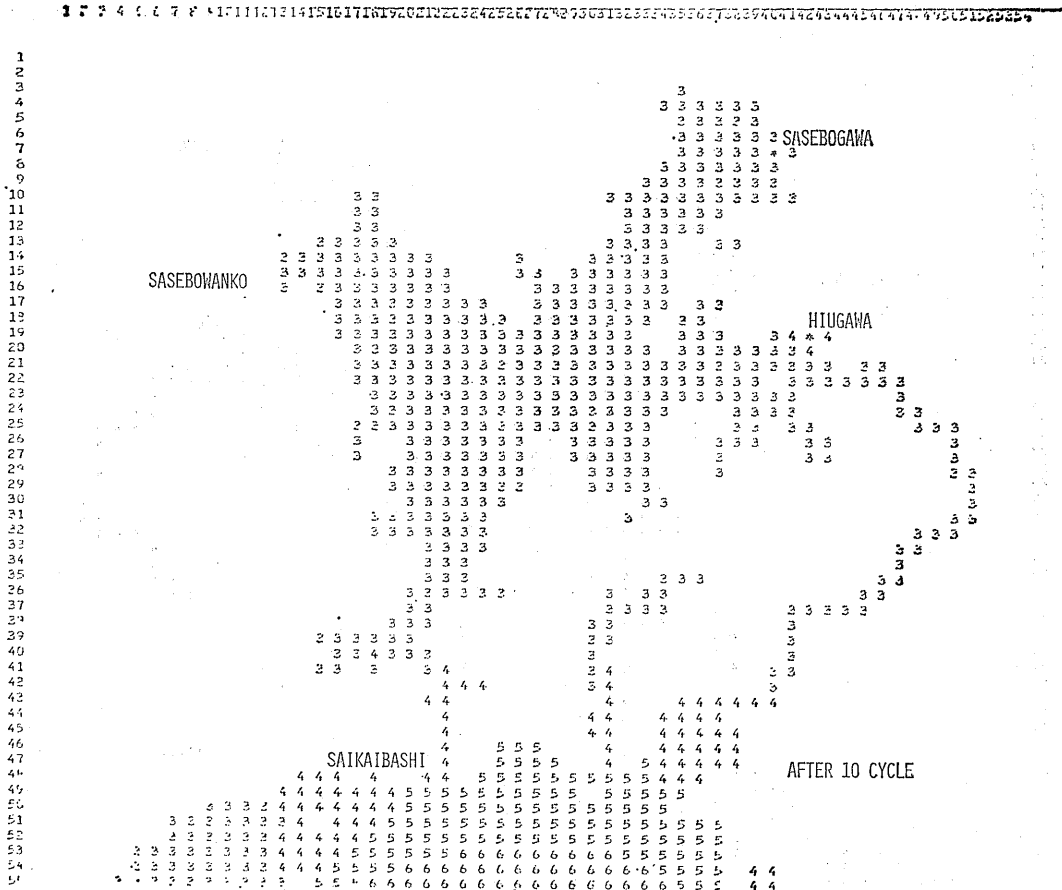


Fig. 3 (a) Result of Calculation

えた。(4)式の Up-Wind 法の計算安定条件は固有値 λ で決まる、簡単のために(4)式において $V_{i,j}=0$ 場合を仮定すると

$$\lambda = 1 \pm U(t)_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S^*}$$

であり $U > 0$ のときは

$$\lambda = 1 - U(t)_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S^*}$$

となる。計算が安定なために $|\lambda| \leq 1$ である。よって

$$0 \leq U(t)_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta S^*} \leq 2$$

$$\therefore \Delta t \leq \frac{2\Delta S^*}{U(t)_{i,j}}$$

よって、全ての計算点で安定であるためには、 $U(t)_{i,j}$ の最大値を U_{MAX} とすると

$$\Delta t \leq \frac{2\Delta S^*}{U_{MAX}}$$

となる。今回の場合 $\Delta S^* = 300\sqrt{2} m$, $U_{MAX} = 1 m/sec$ とした場合 $\Delta t \leq 600\sqrt{2} sec$ となるが(4)式が空間二次元であること、また潮流計算に比べ計算時間 (CPU) が少ないこと等により $\Delta t = 300 sec$ とした。

4. 結果および考察

図 3 (a)~(e)に濃度分布図を示す、図中の *印は佐世保川および日宇川の河口である。図 3 (a) は全ての海域において佐世保湾口の値 0.606ppm と同じとして計算を進めてから 10cycle 後での値であり、以後 10cycle ごとに示している。図中の数値は濃度を 5 倍した値で示している。10 cycle 後では大村湾からの汚染が西海橋付近まで到達しており 20, 30, 40, 50 cycle と進むにつれて佐世保湾中央、佐世保港まで到達していることがわかる。しかしながら湾口まではまだ到達しておらず、湾口付近で大きな濃度向配がみられる。図 3 (a)~(e)を通じて佐世保湾の濃度は大村湾の影響が大きく、佐世保湾自体の負荷による濃度の増加は日宇川付近 (19, 42) において少しみられるが佐世保川付近 (7, 40) ではほとんど見られない。

5. 結論

以上の様な結果より佐世保湾の汚染拡散についてつぎのことがわかった。

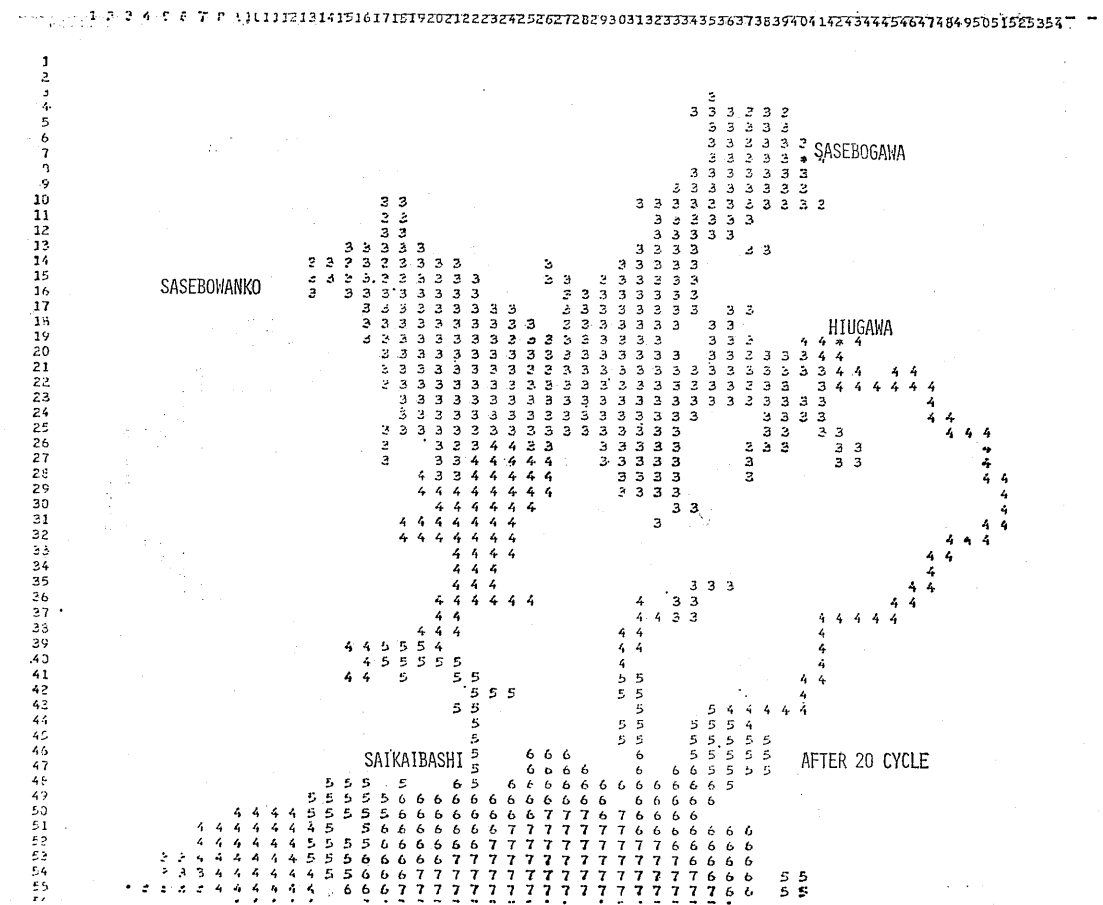


Fig. 3 (b) Result of Calculation

- 1) 佐世保湾の濃度は湾自体の負荷よりも大村湾の濃度によって支配されている。
- 2) 佐世保港の濃度は湾口での濃度勾配によってその値が決定される。
- 3) 2)の目的を達成するためにはより長時間の数値シミュレーションが必要である。
- 4) 拡散計算を潮流計算と分離して行うことは CPU 使用時間に対して有効であり、かつ使用メモリをも節約できる。

最後に、本研究に御協力いただいた、長崎県環境部 諸氏、卒業生いすゞ自動車K.K 野村拓郎氏に謝意を表します。なおこの報告の計算は九大大型センター M190を使用した。

参 考 文 献

- 1) 長崎県環境部 公共用水質測定結果 昭和45～52年
- 2) 長崎大学水産学部 大村湾水質汚濁対策報告書 昭和51年3月

- 3) 日本下水道公団 大村湾水質汚濁解析調査 昭和51年3月
- 4) 長崎大学工学部 大村湾水質汚濁対策報告書 昭和51年3月
- 5) 富樫・中村・宇都・田中 大村湾の潮汐水理模型実験 昭和51年5月 第23回海岸工学講演論文型実験
- 6) 栗須・野中・宇都 大村湾の潮汐シミュレーション(1) 昭和50年11月 佐世保高専研報
- 7) 栗須・野中・宇都 大村湾の潮汐シミュレーション(2) 昭和52年11月 佐世保高専研報
- 8) 栗須・中村・田中 大村湾の流動および拡散に関する研究 昭和52年7月 長崎大学工学部研報
- 9) 長崎大学工学部 大村湾水質汚濁対策報告書 (第二集・3報)
 - 9・1 流動および拡散のコンピューターシミュレーション手法
 - 9・2 水深データの処理
 - 9・3 拡散シミュレーション
 - 9・4 水理模型実験結果

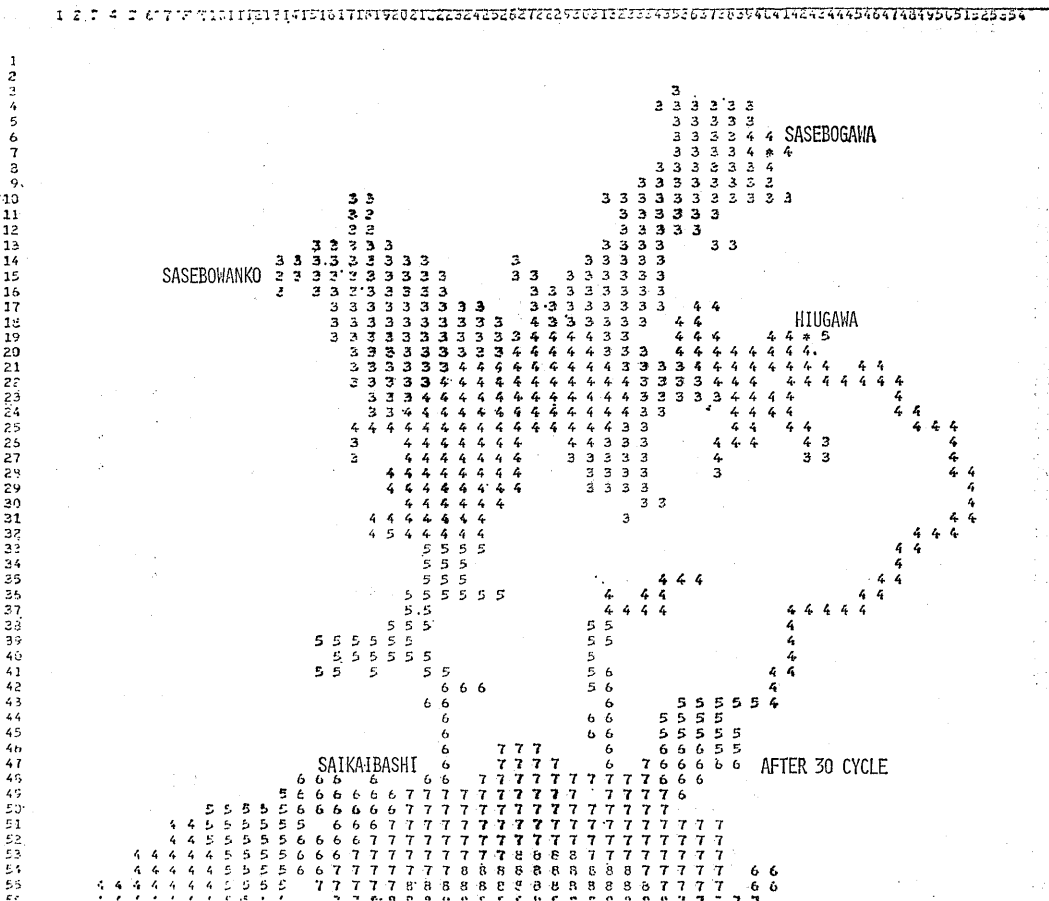


Fig. 3 (c) Result of Calculation

- 10) 長崎県公害衛生研究所 大村湾の水利構造と水質特性 昭和52年10月
- 11) 栗須・野中・宇都 大村湾における拡散シミュレーションに関する研究(1) 昭和53年11月 佐世保高専研報
- 12) 植木・宇都・野中・栗須 新海水導入による大村湾の汚染改善のシミュレーション 昭和54年2月 長崎大学工学部研報 (12号)
- 13) 植木・宇都・野中・栗須 新海水導入による大村湾潮汐シミュレーション 昭和54年2月 長崎大学工学部研報 (12号)
- 14) 中根・宇都・栗須 大村湾および佐世保湾の潮位の調和分解について 長崎大学水産学部研報 昭和54年6月
- 15) 宇都・栗須・中根 大村湾および佐世保湾における拡散係数 昭和54年6月 長崎大学工学部研報 (13号)
- 16) 田中・中根・栗須 佐世保湾の流動および拡散に関する研究 (第1報:水理模型による潮流実験 昭和54年12月 長崎大学工学部研報 (14号))
- 17) 宇都・栗須・中根 佐世保湾における拡散係数について 昭和54年度土木学会西部支部研究発表会 昭和55年2月
- 18) 田中・中根・栗須 佐世保湾の流動および拡散に関する研究 (第2報:水理模型による拡散実験 昭和55年7月 長崎大学工学部研報 (15号))
- 19) 宇都・中根・野中・栗須 佐世保湾の流動および拡散に関する研究 (第3報:数値計算による潮流シミュレーション 昭和55年7月 長崎大学工学部研報 (15号))



Fig. 3 (d) Result of Calculation



Fig. 3 (e) Result of Calculation