

## 大村湾・海水汚染の予測シミュレーション

栗 須 正 登\*・児 玉 好 雄\*  
田 中 清 裕\*

## Numerical Simulation of Pollution in Omura Bay

by

Masato KURISU\*, Yoshio KODAMA\*  
and Kiyohiro TANAKA\*

The pollution of a bay can be rated by the chemical oxygen demand, COD. One mechanism to cause COD increase in the bay is the direct inflow of it with the water of river. The distribution of COD is also controlled by the exchange of water between the bay and ocean. The distribution of COD is calculated by solving the simultaneous partial differential equation numerically by taking all these factors into account (first COD). The other one is due to plankton which is controlled by the amount of phoprous (second COD).

In this paper, the calculated results of these two sources of COD are respectively discribed. Then the sum of them are compared with the measured value of COD.

## 1. まえがき

産業の発達に伴い工場及び団地等からの汚濁排水は増加の一途をたどり、河川及び湾港等の水質汚濁は今や大きな社会問題となっている。特に長崎県の大村湾は代表的な閉鎖海域であり、海水の出入は主として針尾瀬戸を通して佐世保湾とで行われ、大村湾と外海との海水交換率は約20%<sup>1)</sup>で他の湾に比べてかなり低い。このため流入した汚濁物質は外海へ流出しにくく、さらに湾周辺における急激な工場や団地等の増設によって湾内の汚染の度合は急速に増加している。最近の汚染状況の調査に基づけば、すでに許容値(COD 評価で2 ppm)を越えた領域は湾全体の1/2程度にもなっている<sup>2)</sup>。したがって、汚染源からの汚濁物質の量を精度よくは握し、これらと湾内の汚染状況との関係を調査するとともに、数値シミュレーションなどを行って湾

内の汚染状況を精度よく予測し、この結果に基づいて対策を講じることは急務のことと思われる。

本研究では、まず陸地からの汚濁負荷量と湾内水と外海水との交換率を考慮に入れて偏微分方程式を差分法を用いて解き、CODの分布を求めた(一次CODと呼ぶ)。次に前述と同様の手法を用いてリンの濃度分布を求め、相関式によってリンに基づくCOD(二次COD)を算出し、これらの和をCODの計算値として実測値との比較を行った。

## 2. 記号表

A<sub>1</sub>: 渦動粘性係数 m<sup>2</sup>/s

C: 汚濁物質の濃度 ppm または ppb

g: 重力の加速度 m/s<sup>2</sup>

H: 平均水深 m

昭和59年10月1日受理

\*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

$h$ : 潮位 m または cm

$K$ : 拡散係数  $m^2/s$

$M$ : 単位長さあたりの  $x$  方向の流量  $m^2/s$

$N$ : 単位長さあたりの  $y$  方向の流量  $m^2/s$

$S$ : 格子の一辺の長さ m

$t$ : 時間 s

$U$ :  $x$  方向の平均流速  $m/s$

$u$ :  $x$  方向の流速  $m/s$

$V$ :  $y$  方向の平均流速  $m/s$

$v$ :  $y$  方向の流速  $m/s$

$W$ :  $z$  方向の流速  $m/s$

$x, y, z$ : 座標

$\gamma$ : 海底摩擦係数

### 3. 理 論

#### 3.1 基礎式

湾内の流動状況は運動方程式と連続の式を連立させて解くことによって求められる。運動方程式において、 $z$  方向（深さ方向）の加速度を無視し、 $z$  方向の積分を行えばそれらは式(1)~(3)で示される<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} = & - \left[ \frac{\gamma}{H+h} \sqrt{U^2 + V^2} + 2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{U}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial x} \right] M - \left[ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{U}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial y} \right] N \\ & - g(H+h) \frac{\partial h}{\partial x} + Al \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} = & - \left[ \frac{\gamma}{H+h} \sqrt{U^2 + V^2} + 2 \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{V}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial y} \right] N - \left[ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial x} \right] M \\ & - g(H+h) \frac{\partial h}{\partial y} + Al \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \left( \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式(1), (2)はそれぞれ  $x$  及び  $y$  方向の運動方程式で、式(3)は連続の式である。式中の  $U, V$  は  $x$  及び  $y$  方向の平均流速を、 $H$  は海図から求めた平均水深を、 $h$  は鉛直下方を正とした平均水面からの潮位を、 $g$  は重力の加速度を、 $t$  は時間を、 $\gamma$  は海底摩擦係数を、 $Al$  は渦動粘性係数を示している。また  $M$  と  $N$  はそれぞれ  $x$  方向及び  $y$  方向の単位長さあたりの流量で次式で定義している。

$$M = (H+h)U, \quad N = (H+h)V \quad (4)$$

一方、汚濁物質の二次元の拡散現象は、拡散係数が  $x, y$  方向に同じであると仮定すれば次式によって表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = K \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + q \quad (5)$$

ここで  $C$  は汚染濃度、 $K$  は拡散係数、 $q$  は汚濁負荷量を示している。また、 $q$  の単位は ppm/s である。

### 3. 2 差分方程式

#### 3.2.1 運動方程式の差分

Fig. 1 は運動方程式の差分に用いられた座標系を示したものである。計算時間を短縮させるために離散距離  $\Delta S^*$  は格子間隔  $\Delta S$  の  $\sqrt{2}$  倍に取っている。また、平均水深  $H$  及び流速  $U, V$  と潮位  $h$  とは互いに  $\Delta S^*/2$  ずれている。運動方程式を差分式を用いて解く場合、式(1)及び(2)の右辺第4項の渦動粘性項は値が小さいので、この項だけ別に計算してその結果をあとで付け加えるほうが計算上便利である<sup>3)</sup>。右辺第4項を除けば式(1), (2)は式(6)の形で示される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= aM + cN + r \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= bN + dM + s \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)において係数  $a, b, c, d$  は時間の関数であるが、本研究で用いる  $\Delta t$  (24秒) に対してはその変化は小さいので定数とみなし、時刻  $t + \Delta t$  における差分を行ったものが式(7), (8)である。ただしこの場合  $M$  と  $N$  は時刻  $t + \Delta t$  と  $t$  との平均値を用いている。

$$\begin{aligned} X_{ij}(t + \Delta t) = & (2A - 1) X_{ij}(t) + 2CY_{ij}(t) \\ & + AR_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) + CS_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{ij}(t + \Delta t) = & (2B - 1) Y_{ij}(t) + 2DX_{ij}(t) \\ & + BS_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) + DR_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) \quad (8) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} A = 1 + \frac{a}{2} \Delta t = 1 - & \left[ \frac{\gamma}{H+h} \sqrt{U^2 + V^2} + 2 \frac{\partial U}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{U}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial x} \right] \frac{\Delta t}{2} \end{aligned}$$

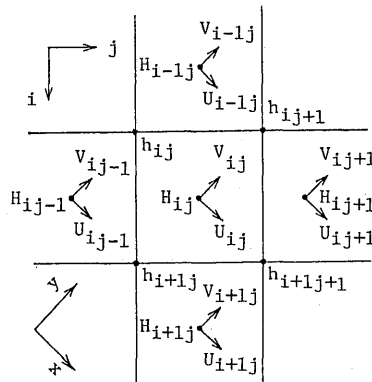


Fig. 1 Grid points used in the finite difference schemes

$$\begin{aligned}
 B &= 1 + \frac{b}{2} \Delta t = 1 - \left[ \frac{\gamma}{H+h} \sqrt{U^2 + V^2} + 2 \frac{\partial V}{\partial y} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial y} \right] \frac{\Delta t}{2} \\
 C &= \frac{c}{2} \Delta t = - \left[ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{U}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial y} \right] \frac{\Delta t}{2} \\
 D &= \frac{d}{2} \Delta t = - \left[ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H+h} \frac{\partial(H+h)}{\partial x} \right] \frac{\Delta t}{2} \\
 R_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= r \cdot \Delta t \frac{\Delta t}{\Delta S^*} = -g(H+h) \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta t^2}{\Delta S^*} \\
 S_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= s \cdot \Delta t \frac{\Delta t}{\Delta S^*} = -g(H+h) \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta t^2}{\Delta S^*} \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H+h &= HZ_{ij} = H_{ij} + (h_{ij} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j} + h_{i+1,j+1})/4 \\
 \partial U/\partial x &= (U_{i,j+1} + U_{i+1,j} - U_{i-1,j} - U_{i,j-1})/2 \Delta S^* \\
 \partial U/\partial y &= (U_{i-1,j} + U_{i,j+1} - U_{i,j-1} - U_{i+1,j})/2 \Delta S^* \\
 \partial V/\partial x &= (V_{i,j+1} + V_{i+1,j} - V_{i-1,j} - V_{i,j-1})/2 \Delta S^* \\
 \partial V/\partial y &= (V_{i-1,j} + V_{i,j+1} - V_{i,j-1} - V_{i+1,j})/2 \Delta S^* \\
 \partial(H+h)/\partial x &= (HZ_{i,j+1} + HZ_{i+1,j} - HZ_{i-1,j} \\
 &\quad - HZ_{i,j-1})/2 \Delta S^* \\
 \partial(H+h)/\partial y &= (HZ_{i-1,j} + HZ_{i,j+1} - HZ_{i+1,j} \\
 &\quad - HZ_{i,j-1})/2 \Delta S^* \tag{10}
 \end{aligned}$$

R と S は連続の式の差分式の計算で求められる  $h(t + \Delta t/2)$  を使って計算される。

$$\begin{aligned}
 R_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= -g \frac{\Delta t^2}{(\Delta S^*)^2} HZ_{ij} \left\{ h_{i+1,j+1}(t + \frac{\Delta t}{2}) \right. \\
 &\quad \left. - h_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) \right\} \\
 S_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= -g \frac{\Delta t^2}{(\Delta S^*)^2} HZ_{ij} \left\{ h_{i,j+1}(t + \frac{\Delta t}{2}) \right. \\
 &\quad \left. - h_{i+1,j}(t + \frac{\Delta t}{2}) \right\} \tag{11}
 \end{aligned}$$

次に渦動粘性項の微分方程式の差分形を次式で示す。ただし、この項は変化が小さいので計算は 144 秒ごとに行う。なお、式(12)中では  $\Delta T = 6 \Delta t$  である。

$$\begin{aligned}
 Al \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) &= - \left[ 1 - Al \frac{8 \Delta T}{(\Delta S^*)^2} \right] X_{ij}(T) \\
 &\quad - Al \frac{2 \Delta T}{(\Delta S^*)^2} \left\{ X_{i,j+1}(T) \right. \\
 &\quad \left. + X_{i+1,j}(T) + X_{i,j-1}(T) \right. \\
 &\quad \left. + X_{i-1,j}(T) \right\} \\
 Al \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) &= - \left[ 1 - Al \frac{8 \Delta T}{(\Delta S^*)^2} \right] Y_{ij}(T) \\
 &\quad - Al \frac{2 \Delta T}{(\Delta S^*)^2} \left\{ Y_{i,j+1}(T) \right. \\
 &\quad \left. + Y_{i+1,j}(T) + Y_{i,j-1}(T) \right. \\
 &\quad \left. + Y_{i-1,j}(T) \right\} \tag{12}
 \end{aligned}$$

### 3. 2. 2 連続の式の差分

$$\begin{aligned}
 h_{ij}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= h_{ij}(t - \frac{\Delta t}{2}) - X_{ij}(t) + X_{i-1,j}(t) \\
 &\quad - Y_{i,j}(t) + Y_{i,j-1}(t) \tag{13}
 \end{aligned}$$

### 3. 3. 3 拡散方程式の差分

式(5)の左辺第 1 項の非定常項の差分式は次式で示される。

$$\partial C/\partial t = \{ C_{ij}(t + \Delta t) - C_{ij}(t) \} / \Delta t \tag{14}$$

左辺第 2 項以下の微分の項の差分については、上流側の影響が下流側より大きい理由から上流差分を行う。

$U > 0$  のとき

$$\partial C/\partial x = 2C_{ij} - C_{i,j-1} - C_{i-1,j} / \Delta S^* \tag{15}$$

$U < 0$  のとき

$$\partial C/\partial x = -2C_{ij} + C_{i,j+1} + C_{i+1,j} / \Delta S^* \tag{16}$$

$V > 0$  のとき

$$\partial C/\partial y = 2C_{ij} - C_{i-1,j} - C_{i,j+1} / \Delta S^* \tag{17}$$

$V < 0$  のとき

$$\partial C/\partial y = -2C_{ij} + C_{i,j-1} + C_{i+1,j} / \Delta S^* \tag{18}$$

一方、式(5)の右辺第 1 項の差分形は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} &= \frac{1}{(\Delta S)^2} \{ C_{i-1,j} + C_{i,j-1} + C_{i+1,j} + C_{i,j+1} \\
 &\quad - 4C_{ij} \} \\
 &= \frac{2}{(\Delta S^*)^2} \{ C_{i-1,j} + C_{i,j-1} + C_{i+1,j} + C_{i,j+1} \\
 &\quad - 4C_{ij} \} \tag{19}
 \end{aligned}$$

拡散方程式の差分形は  $\partial C/\partial x$ 、 $\partial C/\partial y$  の差分をそれぞれ CX, CY とおくと、最終的には次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 C_{ij}(t + \Delta t) &= \left[ 1 - \frac{8K \Delta t}{(\Delta S^*)^2} \right] C_{ij}(t) \\
 &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta S^*} \{ U_{ij}(t) CX_{ij}(t) \\
 &\quad + V_{ij}(t) CY_{ij}(t) \} + \frac{2K \Delta t}{(\Delta S^*)^2} C_{i,j-1}(t) \\
 &\quad + C_{i,j+1}(t) + C_{i+1,j}(t) + C_{i-1,j}(t) \\
 &\quad + q' \Delta t / \{ HZ_{ij}(t) \cdot (\Delta S^*)^2 / 2 \} \tag{20}
 \end{aligned}$$

ただし、 $q'$  は汚濁物質の負荷量で  $g/s$  の単位である。

## 4. 計算条件

### 4. 1 地形の条件

計算の安定の都合上、水深 0.5m 以上を海、以下を陸とする。

### 4. 2 初期条件と境界条件

$t=0$  を満潮時に定める。この場合の流速は全領域に

わたって0とし、潮位の初期値は満潮時の水位を与える。境界条件としては海岸では流量、汚染濃度ともに0とする。潮位の変動は、大村湾の外に佐世保湾と同等の等価回路（大村湾入口の潮位の振幅が22cm、佐世保湾との干満の時間遅れが3時間となるように作った回路）をつくり外海側に潮せき観測データを正弦波と仮定して次式で与える。

$$h = a_0 \sin(2\pi t/T + k) \quad (21)$$

ここで $a_0$ は潮位の振幅( $a_0=86\text{cm}$ )を、 $T$ は周期(12時間)を、 $t$ は時間を、 $k$ は位相を示している。

#### 4.3 海底摩擦係数 $\gamma$ 及び渦動粘性係数 $Al$

本研究で用いた $\gamma$ と $Al$ は加藤らが用いた値<sup>3)</sup>を参考にして次のように定めた。

$$\gamma = 2 \times 10^{-3}, \quad Al = 173.7 \text{ m}^2/\text{S}$$

#### 4.4 拡散係数

本研究における拡散係数は実測値の $K=15.13 \text{ m}^2/\text{S}$ が用いられた。

#### 4.5 計算時間間隔

離散距離 $\Delta S^* = 900\sqrt{2} \text{ m}$ であるから、 $\Delta S^*/\Delta t > \sqrt{2gH_{\text{max}}}$ の式から $\Delta t$ は24秒とした。ただし $H_{\text{max}}$ は30mである。

#### 4.6 大村湾及び外海の汚染濃度の初期値

大村湾の初期濃度は計算の収束値には影響を与えないが、収束時間の短縮を考慮して各点で実測した値の平均値を用い、外海の濃度も同様に現地の平均値を用いた。一次CODは大村湾が1.3ppm、外海が0.8ppmであり、リンの濃度はそれぞれ15、13ppbである。

#### 4.7 上げ潮及び下げ潮時の汚染濃度

上げ潮、下げ潮濃度は湾内の汚染濃度分布及び収束時間に影響を及ぼす重要な因子の一つである。本研究ではこれらを以下のように定めた。Parkerらは外海と湾内海水との交換率 $\gamma_0$ を次式で定義している<sup>4)</sup>。

$$\gamma_0 = Q_0/Q_F = (C_F - C_E)/(C_0 - C_E) \quad (22)$$

ここで $Q_0$ は上げ潮時に湾内に流入する海水量で、 $Q_F$ は $Q_0$ のうち初めて湾内に流入する外海水量である。また、 $C_F$ は上げ潮時の平均塩素濃度で、 $C_E$ は下げ潮時の平均塩素濃度で、 $C_0$ は外海の平均塩素濃度である。大村湾と外海との海水交換率は実測の結果 $\gamma_0=0.2$ がすでに得られている。本研究で $C_F$ 、 $C_E$ 、 $C_0$ をそれぞれ平均汚染濃度として適用することにする。

一方、湾内の汚染状況が平衡状態を保っているときは式(23)が成り立つものと仮定する。

$$M = Q(C_E - C_F) \quad (23)$$

ここで $M$ は1潮せきの間に大村湾に投入される汚染物質質量で、 $Q$ は上げ潮時と下げ潮時との平均海水量であり、1潮せきあたり $15 \times 10^7 \text{ m}^3$ である。

式(22)と式(23)より上げ潮、下げ潮の汚染濃度 $C_F$ 、 $C_E$ はそれぞれ次式で表わされる。

$$C_F = C_0 + (1 - \gamma_0)M/\gamma_0 Q \quad (24)$$

$$C_E = C_0 + M/\gamma_0 Q \quad (25)$$

### 5. 計算結果及び考察

#### 5.1 潮流シミュレーション

大村湾の潮流及び汚染濃度分布の数値シミュレーションに際してはFig. 2に示すような一辺の長さが900mの格子に区切り計算を行った。なお、図中には汚染濃度を実測した代表点A~G及び汚染源におけるリンの負荷量が併記してある。数値は実測値の1000倍で表示している。この負荷分布に基づけば、湾の奥部すなわち諫早近傍に大きな負荷を持つ地点が存在すること湾入口の西海橋近傍に近づくにつれその値が小さくなる傾向がみられることなどがわかる。CODの負荷分布もリンと同様の傾向がみられる(図省略)。

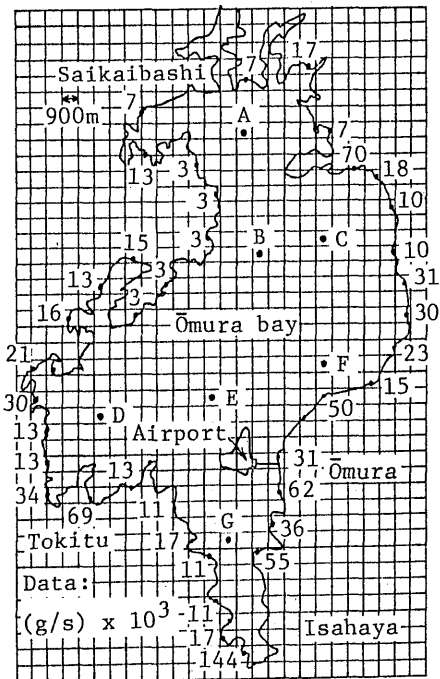


Fig. 2 Dimension of grid and sources of pollution in Omura bay

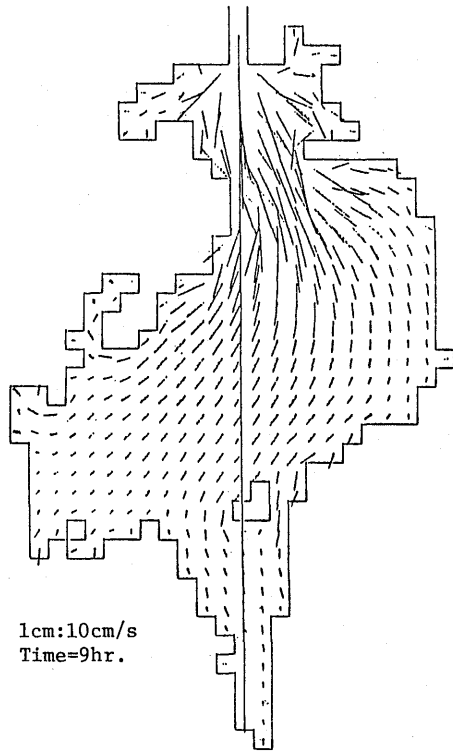


Fig. 3 Tidal current in Omura bay

Fig. 3は佐世保湾の満潮時 ( $t=0$ ) から9時間後における大村湾内の流動状況を速度ベクトルで表わしたものである。図にみられるように湾入口においてかなり大きな速度で佐世保湾から大村湾への流れ込みがある。これに対して湾奥部では流速はかなり遅く、約2cm/Sとなっている。このことは、湾奥部では主流による汚濁物質の拡散は湾入口部に比較してかなり小さいことを示唆しており、高い濃度を示すことが予想される。

5. 2 拡散係数及び粘性係数が汚染濃度に及ぼす影響

Table. 1は陸地から各河川を經由して湾内に流入す

Table. 1 Effects of diffusion factor on concentration of COD

K	A	B	C	D	E	F	G
0 %	0.87	0.87	0.86	1.06	1.07	0.90	2.21
20 %	0.89	0.90	0.90	1.06	1.03	0.93	1.65
80 %	0.89	0.92	0.92	1.01	0.97	0.94	1.19
100 %	0.89	0.92	0.92	1.00	0.97	0.94	1.14
120 %	0.89	0.92	0.92	0.99	0.96	0.94	1.11
140 %	0.89	0.92	0.92	0.98	0.95	0.93	1.08

Unit:ppm

るCODの負荷量に基づいて計算されたA～G点の一次CODの濃度を示したものでパラメータは拡散係数で実測値を100%として表示している。D, E, G点では拡散係数が大きくなるにつれ、濃度は低くなる傾向を示す。特に湾奥部のG点の変化が大きい。一方、A, B, C, F地点では逆の傾向がみられるもののその変化量はきわめて小さい。これは拡散係数が大きくなると濃度差による拡散が激しくなるため、湾全体に汚濁物質が広がるため各点における差がなくなる、したがって湾奥部では濃度は低くなり、湾入口部では逆に濃度は高くなるためであろう。収束時間は拡散係数が実測値の140%以上か、40%以下ではD, E, G点で600サイクル(1サイクルは12時間)以上になるが、60%~120%では各点とも250~300サイクルで収束する。粘性係数が濃度及び収束時間に及ぼす影響は小さく、本研究で与えている値の±50%で濃度の増減は±0.01~±0.02ppm程度である。またこの場合の収束時間は各点とも250~350サイクル以内である。

5. 3 リンの濃度分布

Fig. 4はFig. 2の負荷分布に基づいた計算結果を示したもので、縦軸はリンの濃度で、横軸は時間である。この図から250~400サイクルで各地点とも濃度はほぼ一定値となり収束することがわかる。また、Fig. 5はFig. 4と同じ条件下における負荷分布を用いて算出された汚染濃度分布を示したもので、500サイクル時におけるものである。汚染濃度は湾入口部から湾奥部にかけて次第に増加する。これは湾奥部が流速が遅いことと、負荷量が大いことによっている。本研究の計算においては佐世保湾の負荷の影響は含まれていない。これはデータが不足しているためであるが、大村湾の負荷と同程度であるとすれば、これによって大村湾内のリンの濃度は1.5ppbの増加が予測される。

リンは拡散して行く間に一部は沈降する。また気温が上昇すれば汚泥中のリンは溶出する。Fig. 6は春か

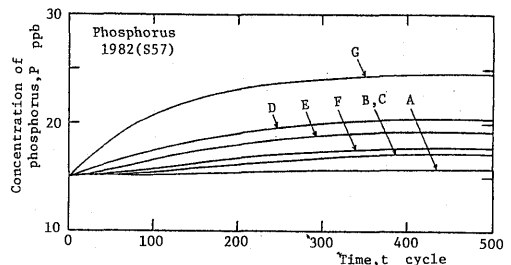


Fig. 4 Concentration of phosphorus

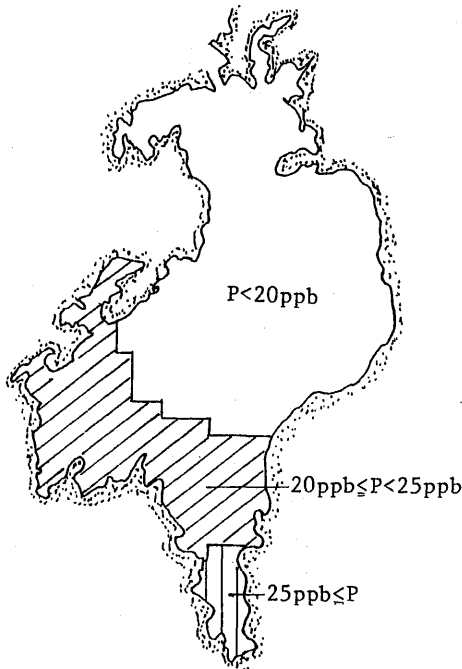


Fig. 5 Distribution of phosphorus in 1982's

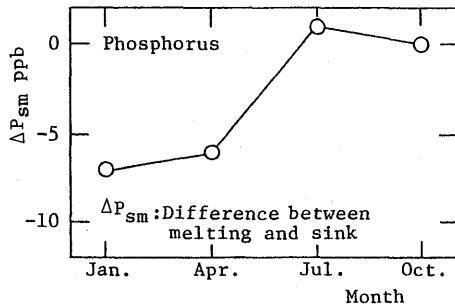


Fig. 6 Difference between melting and sink for phosphorus

ら冬にかけて実測したリンの溶出量と沈降水量との差を縦軸にとって表わしたものである。この図から7月は溶出量が沈降水量より1ppb多く、10月は両者はほぼ同じとなり、1月と4月は沈降水量が溶出量より6~7ppb多いことがわかる。1年間を平均すれば沈降水量が溶出量より約2ppb多いことが示される。したがって、リンの濃度の実測値と計算値を比較する場合には計算値に沈降水量と溶出量を加味した値を用いて比較がなされるべきである。

Fig. 7 は上述の補正を行った計算値と実測値とを比較したものである。図中の太い実線は計算値と実測値とが一致することを、細い実線はこれより±2.5ppb平

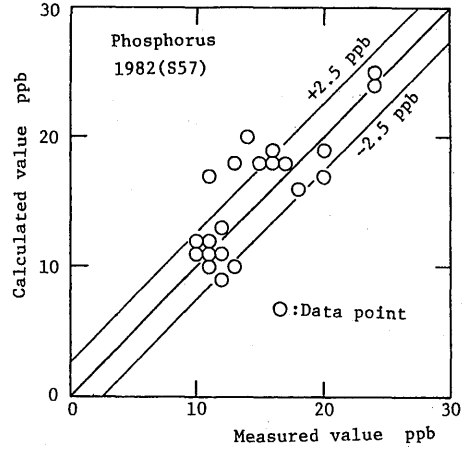


Fig. 7 Comparison of measured with calculated value

行移動した線を表わしている。計算値と実測値とは季節や測定場所が異なるにもかかわらずよい一致を示している。

湾や湖の汚濁状況は一般的にCOD（化学的酸素要求量）を用いて議論される。このCODの供給源としては、陸地からの流入だけでなく、汚泥からのプランクトンの発生に伴う生産などがあげられる<sup>5)</sup>。前者を本研究では一次COD(COD<sub>I</sub>と略記)、後者を二次COD(COD<sub>II</sub>)と呼ぶことにする。二次CODは湾内における窒素やリンの量と関係がある。特にリンとの相関が強い<sup>6)</sup>。大村湾におけるリンと二次CODとの相関を調べたところ、次式で示される相関が認められた<sup>6)</sup>。

$$COD_{II} = 0.08(P - 5.5) \quad (20)$$

ここでPはリンの実測値で、単位はppbである。また、COD<sub>II</sub>の単位はppmである。COD<sub>II</sub>を理論計算で求める場合には、まずリンの負荷分布に基づいて湾内のリンの濃度分布を求め、さらに沈降水量と溶出量をこれに加味してリンの濃度Pを計算し、式(20)に代入することになる。

CODの計算値は前述したように流入負荷量に基づく一次CODとプランクトンによって生産される二次COD

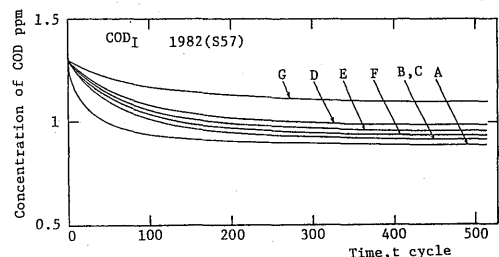


Fig. 8 Concentration of first COD at each location

の和で示される。Fig. 8 は一次CODの収束状況をA～G点について調べたものである。初期値を1.3ppmにとれば大体300サイクル前後で収束する。また、この場合も前述したリンと同様に湾奥部のG点が最も濃度は高い。

Fig. 9 は一次CODの大村湾内における濃度分布を示したものである。湾入口から湾奥部にかけて次第に濃度が高くなるが、これは前述したように湾奥部に大きな負荷を有する個所が存在すること、流速が湾奥部

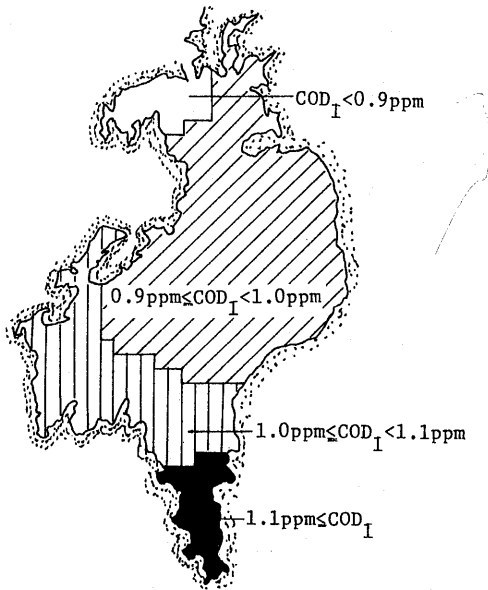


Fig. 9 Distribution of first COD in Omura bay (1982's)

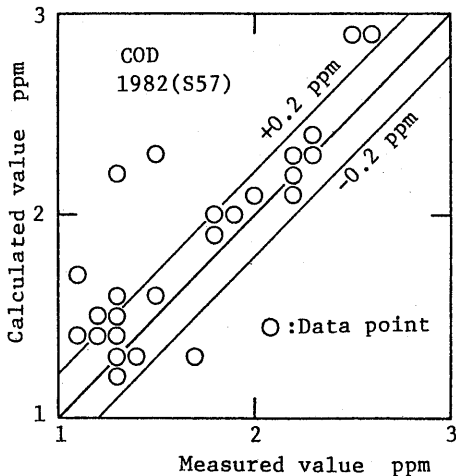


Fig. 10 Comparison of measured with calculated value of COD

は遅いため主流による拡散が小さいこと、入口部からかなり離れているため外海との海水の交換が悪いことなどの理由によるものである。

式(26)から明らかなように、リンの濃度の増加は二次CODの増加をもたらす。Fig. 10 は一次CODと二次CODとの和を計算値として実測値と比較したものである。この結果に基づけば、データの大部分が±0.2ppmの中にはいっており、計算値と実測値とはよい一致を示しているといえる。

温度が高くなればプランクトンの動きが活発になり、

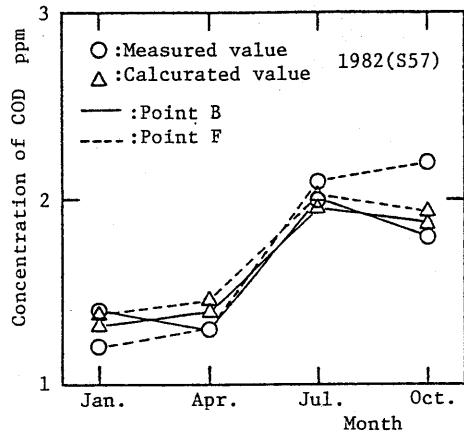


Fig. 11 Comparison of measured with calculated value in one year

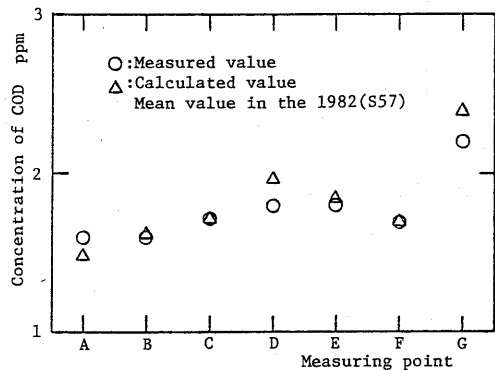


Fig. 12 Concentration of COD at each location

プランクトンによって生成される二次CODが増加する。このためCODは季節によって大幅に変化する。Fig. 11 は季節によるCODの変化を示したもので、例としてB点とF点を記載している。図中の○印は実測値を、△印は計算値を示している。1月及び4月は水温が低いためCODの濃度は低く、1.1～1.2ppm程度であるが、7～10月にかけては水温の上昇に伴ってプランクトン

の動きが活発になり二次CODが増加するためCODは2ppm近くになる。この図に基づけば、一次CODと二次CODの比率は夏場で約1:0.9程度である。

Fig. 12 はA~G点におけるCODの実測値と計算値を1年間の平均値で比較したものである。一般的に計算値(△印)のほうが高目の値を示す場合が多いが、それらはほぼ±0.2ppmの誤差の範囲内にある。また、昭和57年度現在ではG点1点のみが長崎県で指定した環境基準値の2ppmを越えている。

Fig. 13 は昭和47年度、57年度および70年度の汚濁負荷量に基づいて算出された大村湾内のCODの計算結果を示したものである。ただし昭和70年度における

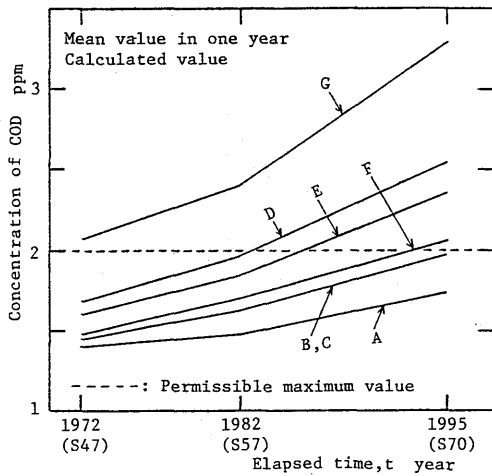


Fig. 13 Predicted value of COD

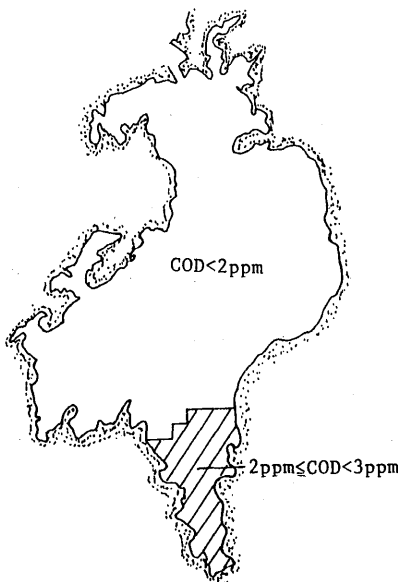


Fig. 14 Distribution of COD in 1972's

負荷量は将来に予測される工場、団地等の増設並びに人口の増加に基づいて算出された値を用いている。昭和47年度ではA~Gの代表点のうち2ppmの基準値を越えているのはG点のみであるが、この地点の値も約2.1ppmにすぎない。昭和57年度になるとG点の値は約2.4ppmと増加し、D点も2ppm近くになる。一方、昭

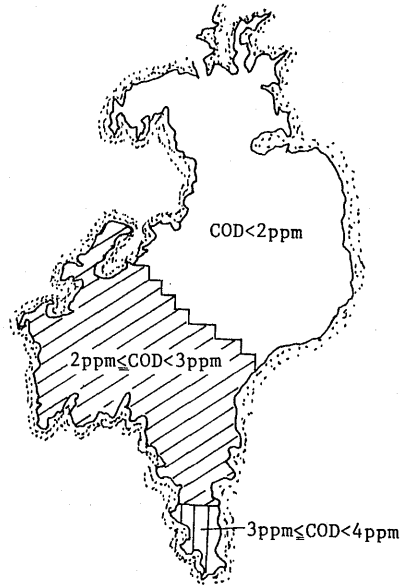


Fig. 15 Distribution of COD in 1982's

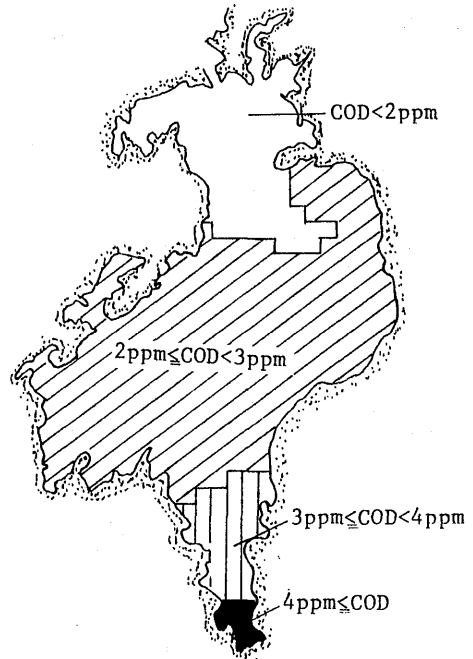


Fig. 16 Distribution of COD in 1995's



和70年になると湾内の環境は急速に悪化し、許容値を越えるのはA点を除くすべての点となる。

以上に示したように何の対策も講じることなく汚濁物質のたれ流しを行った場合、代表点A～Gにおける傾向からも汚染の度合は急速に増加することがわかる。これをさらに詳しく大村湾全体について調べたものがFig. 14～Fig. 16である。Fig. 14の昭和47年度では許容値を越えているのは湾奥部のごく一部で湾全体からみれば1/10以下である。昭和57年度のFig. 15ではそれが1/2程度となり、昭和70年度に致っては7/10以上になる。したがって、大村湾に流入する汚濁物質の削減対策を施すことは急務である。目下、昭和47年度当時の環境状態に戻すためには負荷量をどの程度に押えればよいかを検討中である。将来の工場や団地の増加を考慮に入れて試算してみると、その量は57年度の総負荷量の約50%にならなければいけないようである。

## 6. 結 論

差分方程式を用いて大村湾の水質に関する数値計算を行った。その結論は以下のように要約できる。

- (1) 計算値と実測値との整合性を調べるのに、リンとCODの両者で行った。計算値と実測値とは両者ともかなりよい一致を示すことが明らかとなった。
- (2) 粘性係数が濃度分布や計算の収束時間に及ぼす影響は小さいが、拡散係数の影響は湾奥部において著しい。すなわち拡散係数が小なるほど濃度は高くなり、収束時間も長くなる。

- (3) 季節によるCODの濃度の変化はリンの濃度の変化と相関が強い。
- (4) CODは一次CODとプランクトンによって生産される二次CODとに分けられるが、夏場における比率は湾入口部で1:0.8、湾奥部で1:1程度である。
- (5) 昭和70年度における予測に基づけば、湾全体の7/10以上が許容値を越えるので早急な汚染防止対策が必要である。

おわりに本研究に協力された当時長崎大学学生の川辺真裕、徳留昌文及び種々の御援助と実測データをいただいた長崎県庁環境部公害規制課及び公害衛生研究所の諸氏に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 中村 ;海水交換率について、長崎大学工学部研究報告, 13—19(昭57), 95
- 2) 長崎県環境部報告(昭56), 53
- 3) 加藤・他2名 ;川漁場の改良保全に関する調査研究, 農業土木試験報告, 9(昭46), 220
- 4) Parker, D.S.他2名 ;Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of A.S.C.E., 98—SA2(1972), 305
- 5) 中西・他2名 ;海域におけるCOD生産量について, 山口大学工学部研究報告, 17—6(1975), 725
- 6) 長崎県環境部報告(昭58), 79

