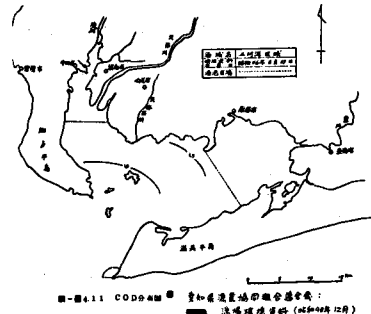
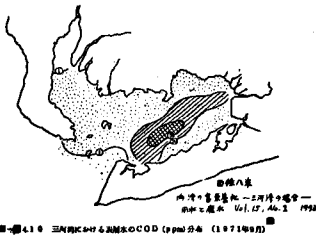
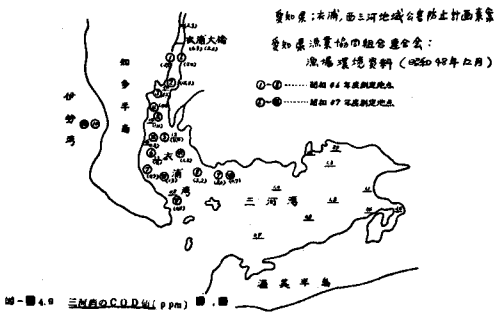


3. 基礎方程式系と初期、境界条件

3-1. 潮汐流

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{g}{H_0} U (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} \right) = 0 \quad \text{---- (3.1)}$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{g}{H_0} V (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} \right) = 0 \quad \text{---- (3.2)}$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{---- (3.3)}$$

ここに $H = h + z$, $f = 2\omega \sin \varphi$,

$U(x, y, t)$, $V(x, y, t)$: 鉛直方向に平均化された x 方向, y 方向の流速,

$z(x, y, t)$: 平均潮位面から測った潮位, $h(x, y)$: 平均潮位, ω : 地球自転の角速度,

φ : 緯度, g : 重力加速度, C : Chezy 係数.

初期条件: $z(x, y, 0) = U(x, y, 0) = V(x, y, 0) = 0$

境界条件: 外海との境界においては 潮位を与える。(閉境界条件)

内陸との境界においては 境界に垂直な速度成分を 0 とする。(閉境界条件)

3-2. CODモデル

$$\frac{\partial (HP)}{\partial t} + \frac{\partial (HUP)}{\partial x} + \frac{\partial (HVP)}{\partial y} - \frac{\partial (HD_x \frac{\partial P}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (HD_y \frac{\partial P}{\partial y})}{\partial y} + K(P)HP + HS = 0 \quad \text{---- (3.4)}$$

ここに $-K(P) = -\mu P^2 + \lambda$,

$P(x, y, t)$: COD 濃度, $D_x(x, y, t)$, $D_y(x, y, t)$: 拡散係数, $-S$: 負荷量

μ : COD 減少係数, λ : COD 増加係数.

初期条件: $P(x, y, 0) = 0.7 \text{ ppm}$ (外海との境界における濃度)

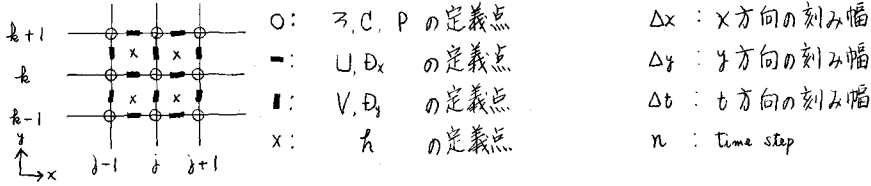
境界条件: 外海との境界においては濃度を与える。(閉境界条件)

内陸との境界においては輸送がないとする。(閉境界条件)

ここでは 有機物の分解による COD の減少率を 村上に従い⁸⁾ 濃度の 3 乗に比例させた。また 光合成による COD の増加率を 濃度に比例させている。これは自然水において 藻類の増殖が ロジスチック曲線を示すという報告に¹¹⁾ レントを得たもので あなばち 無意味な仮説ではないと思われる。

4. ADI法

3で述べた方程式系は種々の近似解法で解かれるが¹⁾ここでは J.J. Leendertse にならい^{3), 4), 13)}ADI法を採用した。以下に 内点における計算法のみを示し、境界点における計算法は省略する。



ある j, k, n に着目して次の値を定義する。

$$\begin{aligned} \bar{F}^x &= \frac{1}{2} \{ F_{j+\frac{1}{2}, k}^n + F_{j-\frac{1}{2}, k}^n \} \\ S_x F &= \frac{1}{\Delta x} \{ F_{j+\frac{1}{2}, k}^n - F_{j-\frac{1}{2}, k}^n \} \\ \bar{F} &= \frac{1}{4} \{ F_{j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n + F_{j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}}^n + F_{j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^n + F_{j-\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}}^n \} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} y, t \text{ にも関係する。} \\ \text{同様に定義される。} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} S_{+\frac{1}{2}} &= \frac{2}{\Delta t} \{ F_{j, k}^{n+\frac{1}{2}} - F_{j, k}^n \} \\ F_+ &= F_{j, k}^{n+\frac{1}{2}}, \quad F_- = F_{j, k}^{n-\frac{1}{2}} \\ \bar{F}^{\pm} &= \frac{1}{2} \{ F_{j, k}^{n+\frac{1}{2}} + F_{j, k}^n \} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} t \text{ にも関係する。} \\ \text{定義される。} \end{array} \right\}$$

4-1. 潮汐流^{3), 13)}

$$\text{前半. } S_{+\frac{1}{2}} U + U_+ \bar{S}_x \bar{U}^x + \bar{V}_+ \bar{S}_y \bar{U}^y - f \bar{V}_+ + g S_x \bar{z}_+ + g U_+ \frac{(\bar{U}_+^2 + \bar{V}_+^2)^{\frac{1}{2}}}{(\bar{h}^x + \bar{z}_+^x)(\bar{C}^y)^2} = 0 \quad \text{--- (4.1)}$$

$$S_{+\frac{1}{2}} \bar{z}_+ + S_x \{ (\bar{h}^y + \bar{z}_+^x) U_+ \} + S_y \{ (\bar{h}^x + \bar{z}_+^y) V_+ \} = 0 \quad \text{--- (4.2)}$$

$$S_{+\frac{1}{2}} V + \bar{U}_+ \bar{S}_x \bar{V}^x + V_+ \bar{S}_y \bar{V}^y + f \bar{U}_+ + g S_y \bar{z}_+ + g V_+ \frac{(\bar{U}_+^2 + \bar{V}_+^2)^{\frac{1}{2}}}{(\bar{h}^x + \bar{z}_+^x)(\bar{C}^y)^2} = 0 \quad \text{--- (4.3)}$$

(4.1) は $j+\frac{1}{2}, k, n$ に, (4.2) は j, k, n に, (4.3) は $j, k+\frac{1}{2}, n$ に着目している。

$$\text{後半. } S_{+\frac{1}{2}} V + \bar{U} \bar{S}_x \bar{V}^x + V_+ \bar{S}_y \bar{V}^y + f \bar{U} + g S_y \bar{z}_+ + g V \frac{(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{\frac{1}{2}}}{(\bar{h}^x + \bar{z}_+^x)(\bar{C}^y)^2} = 0 \quad \text{--- (4.4)}$$

$$S_{+\frac{1}{2}} \bar{z}_+ + S_x \{ (\bar{h}^y + \bar{z}_+^x) U \} + S_y \{ (\bar{h}^x + \bar{z}_+^y) V_+ \} = 0 \quad \text{--- (4.5)}$$

$$S_{+\frac{1}{2}} U + U_+ \bar{S}_x \bar{U}^x + \bar{V}_+ \bar{S}_y \bar{U}^y - f \bar{V}_+ + g S_x \bar{z}_+ + g U_+ \frac{(\bar{U}_+^2 + \bar{V}_+^2)^{\frac{1}{2}}}{(\bar{h}^x + \bar{z}_+^x)(\bar{C}^y)^2} = 0 \quad \text{--- (4.6)}$$

(4.4) は $j, k+\frac{1}{2}, n+\frac{1}{2}$, (4.5) は $j, k, n+\frac{1}{2}$, (4.6) は $j+\frac{1}{2}, k, n+\frac{1}{2}$ に着目している。

注意. 単位時間あたりの流量 Q_R の河川が 格子点 $(j_0 x, k_0 y)$ の近傍において湾内に流入している時、

(4.2), (4.5) の右辺は 0 でなく, $\frac{Q_R}{\Delta x \Delta y}$ とする。

4-2. CDDモデル^{4), 13)}

$$\begin{aligned} \text{前半. } S_{+\frac{1}{2}} \{ P(\bar{h} + \bar{z}) \} + S_x \{ (\bar{h}^y + \bar{z}_+^x) U_+ \bar{P}_+^x \} + S_y \{ (\bar{h}^x + \bar{z}_+^y) V_+ \bar{P}_+^y \} \\ - S_x \{ (\bar{h}^y + \bar{z}_+^x) D_x + S_x P_+ \} - S_y \{ (\bar{h}^x + \bar{z}_+^y) D_y + S_y P_+ \} + \frac{(\bar{h} + \bar{z}) K P^{\frac{1}{2}}}{(\bar{h} + \bar{z})} + (\bar{h} + \bar{z}) S = 0 \end{aligned} \quad \text{--- (4.7)}$$

ただし $K = \mu (P_{j, k}^n)^2 - \lambda$ 。(4.7) は j, k, n に着目している。

$$\begin{aligned} \text{後半. } S_{+\frac{1}{2}} \{ P(\bar{h} + \bar{z}) \} + S_x \{ (\bar{h}^y + \bar{z}_+^x) U \bar{P}_+^x \} + S_y \{ (\bar{h}^x + \bar{z}_+^y) V_+ \bar{P}_+^y \} \\ - S_x \{ (\bar{h}^y + \bar{z}_+^x) D_x + S_x P \} - S_y \{ (\bar{h}^x + \bar{z}_+^y) D_y + S_y P_+ \} + \frac{(\bar{h} + \bar{z}) K P^{\frac{1}{2}}}{(\bar{h} + \bar{z})} + (\bar{h} + \bar{z}) S = 0 \end{aligned} \quad \text{--- (4.8)}$$

ただし $K = \mu (P_{j, k}^{n+\frac{1}{2}})^2 - \lambda$ 。(4.8) は $j, k, n+\frac{1}{2}$ に着目している。

注意. (4.7) の第2項の $\bar{P}_+^x$, 第3項の $\bar{P}_+^y$ ならびに (4.8) の第2項の $\bar{P}_+^x$, 第3項の $\bar{P}_+^y$ は 平均をとらずに 流れの上流側の値を使っている。河川からの負荷量は 河川の平水量と CDD濃度から算出する。

5. Input Data

図-2.1は 文献6)から引用した三河湾・知多湾の地形図で同時に 等深線(最低低潮面)と4か所の潮流補円比較地点が示されている。我々は 衣浦港入口の防波堤を考慮し 潮流計算では 衣浦港以北を陸地とみなした。ただし拡散計算では防波堤の切れ目の部分を考慮し 一部分 開境界とした。また伊良湖付近と師崎付近を“く”の字で結び 開境界とした。

図-3.1は M, P の計算される格子点を1で示している。 M は X 軸方向の格子点番号で(1~49), N は Y 軸方向の格子点番号(1~30)を表わす。図-2.1を時計回りに 90° 回転させたものが 図-3.1に対応する。 $M=48, N=24$ の点が豊川の流入点, $M=8, N=29$ の点が矢作川の流入点である。また $M=16, N=18$ ならびに $M=17, N=17$ の2点は佐久島を示し $M=12, N=15$ の点は日間賀島, $M=12, N=11$ の点は篠島を示す。前述したように $N=29, M=4.5$ の2点は拡散計算の時には 開境界とみなされる。

以後 特に断わらなければ M, K, S 単位とする。

$$\Delta x = 1000 \times \frac{152}{200}, \Delta y = 1000 \times \frac{183}{200} \quad \Delta t = 180.0,$$

$$\varphi = (34 + \frac{44}{60})^\circ \quad C = 61.4, \quad g = 9.81,$$

$$D_x = D_y = 1.0, \quad \lambda = \mu \times (1.5)^2 \frac{1}{\text{day}}, \quad \mu = 0.025 \frac{1}{\text{day}}.$$

開境界における潮位は半日周 M_2 潮を与える。

開境界点	振幅	遅角	COD (PPM)
$N=29, M=4.5$ の2点			1.4
$N=13, 14, M=7$ の2点	0.55	179.0°	0.7
$N=10, M=4$ の点	0.54	180.0°	0.7
$N=1, M=13$ の点	0.53	183.0°	0.7

その他の開境界点については 線型補間を与える。

	平水量 (m^3/s)	COD (PPM)
矢作川	36.1	7.3
豊川	15.0	3.5

6. 計算結果とその検討

図-5.1は 文献6)の潮流補円の実測結果(—)と計算結果(○)の比較図に 我々の計算結果(X)を加えた図である。左肩の番号は 図-2.1の比較地点の番号を示す。これを見ると 我々の計算結果は 知田, 宮池の結果と同様に 実測結果とよく一致を示している。

潮流流の6周期目(1241 Step~1488 Step)の計算結果:

図-6.6 (1364 Step), 図-6.5 (1488 Step)を それぞれ 図-2.6, 図-2.5の実測結果と比較すれば これも 良好な一致を示している。

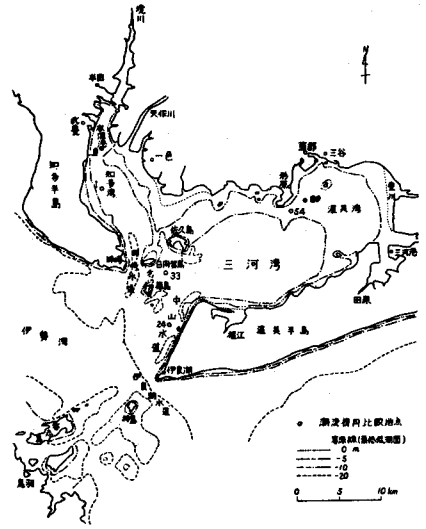


図-2.1 三河湾・知多湾の地形図

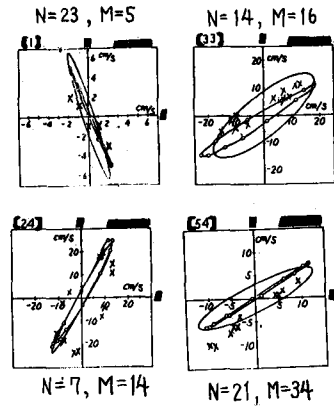
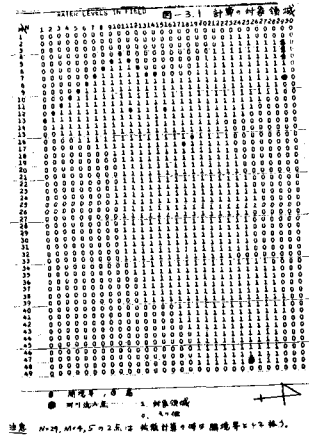


図-5.1 潮流補円比較図
— : 実測結果
○ : 知田, 宮池の計算結果
X : 我々の計算結果

図-4.5 (STEP= 1488)
計算結果の状況図

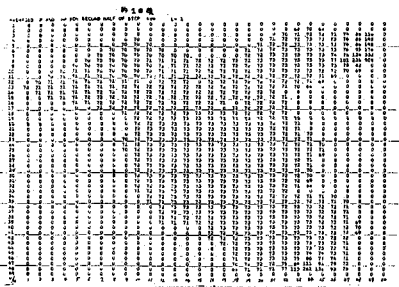
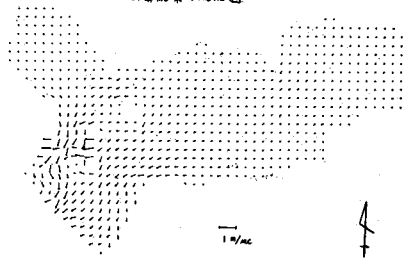


図-7.1 約1日後のC.O.D分布 単位: 10³ PP

図-4.6 (STEP= 1364)
計算結果の状況図

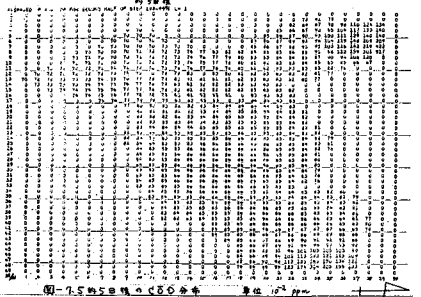
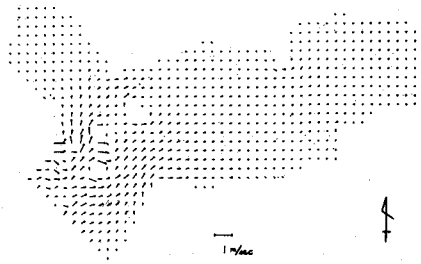


図-7.5 約5日後のC.O.D分布 単位: 10³ PP

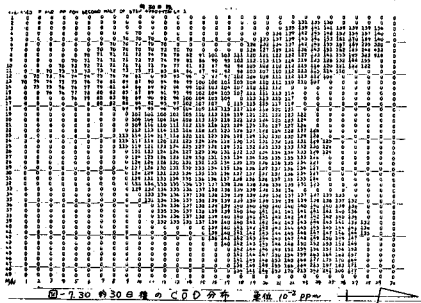


図-7.30 約30日後のC.O.D分布 単位: 10³ PP

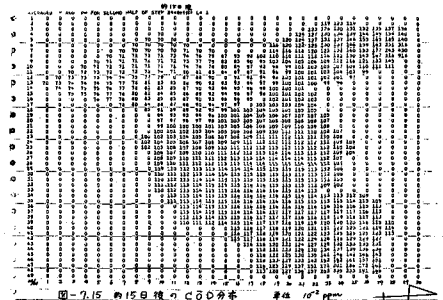


図-7.15 約15日後のC.O.D分布 単位: 10³ PP

潮汐流の6周期目の結果をくり返し使って C.O.D分布を 60周期(約1か月)まで計算した。図-7.1は約1日後、図-7.5は約5日後、図-7.15は約15日後、図-7.30は約30日後のC.O.D分布を示す。図-7.15と図-4.9を比較してみると 十数日で ほぼ現状に近い状態を回復することがわかる。なお計算機はFACOM 230-55で すべて倍精度計算。潮汐流の計算は 6周期行なうのに C.P.U.約1時間、C.O.D分布は60周期までに 約9時間を要した。^{*} 図の見方は図-3.1と同様である。

7. おわりに

この数値実験により はじめに述べた二つの問題に対して 大まかではあるが 定量的な情報を得た。C.O.D分布に関しては 観測結果も一定でないように 多くの困難な問題点がある。我々は 大胆にも C.O.D分布が(3.4)式で表現されうろという立場をとった。仮にこれを認めたとしても 実際には 入や μ は時間的にも空間的にも変化するのはである。河川からの負荷量も時間的に変化しているのはである。しかし 我々は 強引にも入や μ の空間的变化を無視し 現在のC.O.D分布に対して もっともらしい入、 μ 、 S を選んで しばらくの間は これらは時間的にも不変であるとした。これだけの仮定のもとに 外海の濃度と同じ値を空間的に一様な初期値とした場合(これは現状に対する擾動である。)十数日で ほぼ現状に近い状態を回復するという結論を得た。非常にあいまいな結論ではあるが 意味するところは重大なように思われる。

有機性汚濁をより詳細に論じようとするならば 物質の循環をはっきり組みこんだ closed system で考える必要がある。C.O.Dモデルは そのための第一歩として とらえたい。このように 現象の定式化はそれ自身

困難な問題であるが 一たん 定式化を認めたとしても それを解くことも容易でない。ここで採用したADI法は 陰解法であるために 時間おかりすぎる。境界条件の入れ方も研究の余地がある。これらの点を考慮すると 空間有限要素近似, 時間陽差分近似の計算法が この方面の計算法として注目を集めるように思われる。

8. 謝辞

この報告をまとめるにあたり たくさんの方のお世話になった。特に電力中央研究所の和田明氏は 文献6)の一部転載を許可されたうえに 種々の貴重な助言をされた。また京都大学の野木達夫, 甲南大学の三村昌泰の両氏からも 多くの助言と批判をうけた。これら各位に対し深く感謝の意を表したい。多くの同僚, 上司からも 援助を受けた。高森照子, 駒原房子の両嬢, 大塚敬主査の名をあげて おわりとしたい。

9. 参考文献

- 1) 金山 寛: 湾流と汚染拡散を記述する偏微分方程式系を解くアルゴリズム
変形・流動方程式の数値解析 昭和51年3月
- 2) J.J. Dronkers: Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters
North - Holland Publishing Co. 1964
- 3) J.J. Leendertse: Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation
RAND RM-5294-PR 1967
- 4) _____: A Water-Quality Simulation Model for Well-Mixed Estuaries and Coastal Seas:
Vol. I, II RAND RM-6230-RC 1970, RAND R-708-NYC 1971
- 5) 日本海洋開発産業協会: 汚染海域浄化システムの設計研究——汚濁負荷分析システム報告書 1975
- 6) 和田明, 宮池克人: 吹送流による湾内水の流動・拡散の特性
電力中央研究所報告 研究報告: 375009 1976.2
- 7) 丸山泰男: 河川による三河湾への汚濁負荷量について
Jap. J. Limnol. 35, 4, 148-154, 1974
- 8) 村上 健: 海域における有機性汚濁の計算手法
土木技術資料 17-9 1975
- 9) 西條八束: 内湾の富栄養化——三河湾の場合——
用水と廃水 Vol. 15 No. 1 1973
- 10) 三村昌泰: 拡散効果をもつオルテラ方程式について
数理科学講究録 174 1973.3
- 11) 須藤隆一, 森 忠洋, 岡田光正: 藻類培養試験による富栄養化の評価
用水と廃水 Vol. 15 No. 1 1973
- 12) 亀高惟倫: 非線型拡散方程式について
数学 第26巻 第2号 1974.4
- 13) 金子安雄, 堀江毅, 村上和男: ADI法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合について——
港湾技術研究所報告 Vol. 14, No. 1 1975