

新しい分散係数の評価法を取り入れた物質循環モデル

A Model of Ecosystem Using the New Evaluation of Dispersion Coefficients

小松利光*・矢野真一郎**・朝位孝二***・中村由行****・劉容伶*****

By Toshimitsu KOMATSU, Shinichiro YANO, Koji ASAI,
Yoshiyuki NAKAMURA and Jungling LIU

A new formula of local 2-D dispersion coefficients proposed by Komatsu *et al.* is incorporated into an ecological simulation model of COD (Chemical Oxygen Demand) and T-P (Total Phosphorus) in Hakata Bay. The 2-D dispersion coefficient is expressed as the product of the local tidal maximum velocity and the local depth. The proportional constant of the formula for COD is found to be slightly different from that for salinity. The model calculations of COD and T-P are reasonably consistent with observations.

Keywords: 2-D dispersion, Model of ecosystem, Pollutant simulation, Evaluation of diffusivity

1. ま え が き

内湾はその閉鎖的な地形的特性により静穏であるため、港湾が作りやすく、背後地に大都市や工業地帯が発達することが多い。したがって、ほとんどの内湾において、陸上から多くの生活雑排水や工場排水等の流入があるにも関わらず、外海との海水交換率が低いために有機汚染問題が深刻化している。海域の有機汚染には陸上からの有機物質の流入負荷のみならず、海水中の栄養塩を利用した基礎生産も大きく寄与している。それらの水質汚染問題やその浄化対策等について検討する際には、コンピューターによる潮流・水質拡散シミュレーションが今や不可欠な手法となっている。有機汚染に関して精度良いシミュレーションを行うためには、物質の循環を考慮したモデルを構築する必要があり、従来より様々な試みがなされている¹⁾。物質循環モデルにおいては、移流、拡散、沈降などの物理的過程と生産、分解、溶出などの生化学的過程、さらには捕食や被捕食、排泄、死滅などの生物的過程が考慮される。これらの諸過程をどこまでモデルに取り込むかは解析目的や要求精度に依存する。ところで、どのようなモデルを用いるにしても水平方向の拡散現象は重要かつ支配的な物理過程であり、拡散（分散）係数の与え方は計算の精度に強い影響を与える。最近著者らは新しい高精度な分散係数評価方法を開発した²⁾。本論文では、博多湾を対象海域としてその評価方法を物質循環モデルに組み込んだ水質拡散シミュレーションを行い、その適用性を検討した。

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
** 学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程水工土木学専攻
*** 正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科
**** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)
***** 工修 台北市政府工務局衛生下水道工程処

2. 分散係数の評価法について

内湾における物質循環モデルを用いた有機汚染のシミュレーションに関する研究は、従来より種々行われてきた²¹⁾。しかしながら、それらの研究では現象を規定する最も重要なファクターである分散係数が明らかでないため、多くの場合湾全体において一定と仮定して処理されている。また、その一定値についても拡散物質濃度分布の実測値のある場合については現況を再現した計算結果をfittingさせて求めているのが実状である。

著者らは、水深方向に積分して得られる平面2次元モデルの場所毎の水平2次元動粘性係数 ν_t ・水平方向分散係数 D が代表流速と代表長さの積に比例するものと考えられることから、 ν_t ・ D を評価する新しい方法を提案した²²⁾。それによると、 ν_t ・ D は流速と濃度が水深方向に分布を持つことから水深方向に積分する際に生じる移流分散効果を含むので、代表流速として場所毎の潮流最大流速 V_m を、代表長さとして場所毎の時間平均水深 h を採用し、比例定数を α として ν_t ・ D を以下の様に表している。

$$\nu_t \approx D = \alpha V_m h \quad (1)$$

この評価式を用いて、博多湾を含む6つの内湾について潮流・水質拡散シミュレーションを行い、各湾における比例定数 α を決定している。この比例定数 α は湾の特性によって異なり、湾全体を代表する密度成層度のパラメーター Ψ と吹送流の影響を表すパラメーター Φ により以下の様に定式化されている。

$$\Psi = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{g}{B} \frac{Q_f}{V_T^3} \quad (2) \quad \Phi = \frac{\rho_a \gamma^3 V_w^3 A_{bay}}{\rho Q_T V_T^2} \quad (3)$$

$$\alpha = 70 \Psi^{1/4} \Phi^{1/6} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\rho/\rho (=0.02)$ は淡水と海水の相対密度差、 g は重力加速度、 Q_f は単位時間当たりの淡水流入量、 B は湾口の幅、 V_T は湾口における潮流流速の1周期平均の根二乗平均、 $\rho_a (=1.293 \text{ kg/m}^3)$ は空気密度、 ρ は海水の密度、 V_w は湾における年平均風速、 $\gamma (=0.0026^{1/2})$ は水表面上での風の摩擦速度 V_{*w} と V_w との比、 A_{bay} は湾の表面積、 Q_T は潮汐により湾口から湾内へ流入する単位時間当たりの入潮量の半周期平均値である。上の式を用いることにより、任意の内湾において α を決定することが可能となる。

3. 物質循環モデルについて

潮流の計算に関しては、一年を通しての成層効果はそれ程顕著ではないとみなして平面2次元単層非定常モデルを用いて行った。計算座標は水平方向に x, y 軸、平均水表面を原点として鉛直上向きに z 軸をとる。計算に用いた基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M}{h+\zeta} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{h+\zeta} \frac{\partial M}{\partial y} - fN = -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\gamma^2}{(h+\zeta)^2} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{h+\zeta} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{h+\zeta} \frac{\partial N}{\partial y} + fM = -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\gamma^2}{(h+\zeta)^2} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (7)$$

ここで、 $U(x, y, t), V(x, y, t)$ は x, y 方向の水深平均流速、 $\zeta(x, y, t)$ は潮位、 $M(x, y, t) = (h+\zeta)U$ 、 $N(x, y, t) = (h+\zeta)V$ はそれぞれ x, y 方向の線流量、 $q(x, y)$ は流入水量、 f はコリオリ係数、 γ^2 は海底摩擦係数である。

水質シミュレーションに関しては、海域の有機汚染の指標であるCODを対象とし、博多湾では制限栄養塩がリンであることから、リンの循環を考慮できるモデル化を行った。光の届く表層（有光層）でのみ内部生産を行うものと仮定し、有光層と光の届かない深い層（無光層）の上下2層に分割する2層レベルモデルを

採用した。また、栄養塩のリンについては、有機態リン（植物プランクトン）と無機態リン（栄養塩）を一括した全リン濃度T-Pとして取り扱った。CODとT-Pは、生産、分解、底泥からの溶出、懸濁態の沈降の過程を通じて変化させた。各過程のモデル化に関しては、表-1にまとめて示した。加えて、海域の流れにより移流及び拡散されるものとし、水平方向の移流・分散と鉛直方向の混合を考慮した。モデルの概略図を図-1に示す。

表-1 物質循環モデルの各項

	上層（有光層）	下層（無光層）
鉛直分散項	$-K_z(C_1 - C_2)$	$K_z(C_1 - C_2)$
沈降項	$-S_c SS_C C_1$	$-S_c SS_C(C_1 - C_2)$
COD 溶出項	0	γ_c
流入負荷項	$(Q_C - q_C)(h_1 + \zeta)/(h_1 + h_2 + \zeta)$	$(Q_C - q_C)h_2/(h_1 + h_2 + \zeta)$
生産項	$K_C P_1$	0
分解項	$-(h_1 + \zeta)D_C C_1^2$	$-h_2 D_C C_2^2$
鉛直分散項	$-K_z(P_1 - P_2)$	$K_z(P_1 - P_2)$
全リン沈降項	$-S_P SS_P P_1$	$-S_P SS_P(P_1 - P_2)$
T-P 溶出項	0	γ_P
流入負荷項	$(Q_P - q_P)(h_1 + \zeta)/(h_1 + h_2 + \zeta)$	$(Q_P - q_P)h_2/(h_1 + h_2 + \zeta)$

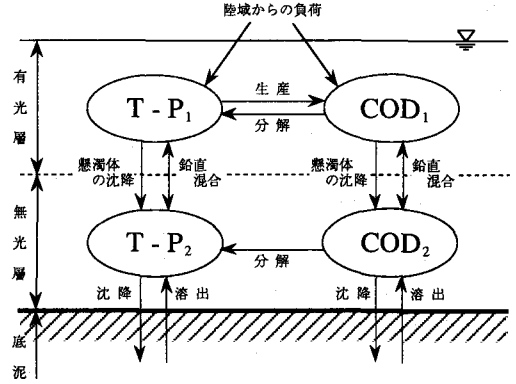


図-1 モデルの概略図

水質シミュレーションに用いた基礎式は以下に示す通りである。

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} + U \frac{\partial C_1}{\partial x} + V \frac{\partial C_1}{\partial y} = \frac{1}{h_1 + \zeta} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h_1 + \zeta) D \frac{\partial C_1}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (h_1 + \zeta) D \frac{\partial C_1}{\partial y} \right\} \right. \\ \left. - S_C SS_C C_1 + (Q_C - q_C) \frac{h_1 + \zeta}{h_1 + h_2 + \zeta} - D_z (C_1 - C_2) + K_C P_1 - (h_1 + \zeta) D_C C_1^2 \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} + U \frac{\partial C_2}{\partial x} + V \frac{\partial C_2}{\partial y} = \frac{1}{h_2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ h_1 D \frac{\partial C_1}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h_2 D \frac{\partial C_2}{\partial y} \right\} \right. \\ \left. + S_C SS_C (C_1 - C_2) + (Q_C - q_C) \frac{h_2}{h_1 + h_2 + \zeta} + D_z (C_1 - C_2) - h_2 D_C C_2^2 + \gamma_C \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} + U \frac{\partial P_1}{\partial x} + V \frac{\partial P_1}{\partial y} = \frac{1}{h_1 + \zeta} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h_1 + \zeta) D \frac{\partial P_1}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (h_1 + \zeta) D \frac{\partial P_1}{\partial y} \right\} \right. \\ \left. - S_P SS_P P_1 + (Q_P - q_P) \frac{h_1 + \zeta}{h_1 + h_2 + \zeta} - D_z (P_1 - P_2) \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} + U \frac{\partial P_2}{\partial x} + V \frac{\partial P_2}{\partial y} = \frac{1}{h_2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ h_2 D \frac{\partial P_2}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h_2 D \frac{\partial P_2}{\partial y} \right\} \right. \\ \left. + S_P SS_P (P_1 - P_2) + (Q_P - q_P) \frac{h_2}{h_1 + h_2 + \zeta} + D_z (P_1 - P_2) + \gamma_P \right] \quad (11)$$

ここで、 $C_i(x, y, t)$, $P_i(x, y, t)$ は各層 ($i=1$: 上層、 $i=2$: 下層) のCOD, T-P濃度、 $h_i(x, y)$ は時間平均層厚、 $D_z(x, y, t)$ は鉛直混合係数、 $Q_C(x, y)$, $Q_P(x, y)$ はCOD, T-Pの流入負荷、 $S_C(x, y)$, $S_P(x, y)$ はCOD, T-Pの沈降速度、 $SS_C(x, y)$, $SS_P(x, y)$ はCOD, T-P中の懸濁態の割合、 $K_C(x, y)$ はCODの生産速度、 $D_C(x, y)$ はCODの分解速度、 $\gamma_C(x, y)$, $\gamma_P(x, y)$ はCOD, T-Pの底泥からの溶出速度である。

鉛直混合係数 D_z については、乱れにより層間の混合が生じるものと考え、流速分布が対数則をとる場合に混合距離理論より得られる渦動拡散係数と各層の中心点を代表点と見なした場合の代表点間の距離から次式のように表わした。

$$D_z = \beta \frac{K}{6} \bar{u}_* h \left(\frac{2}{h_1 + h_2 + \zeta} \right) \quad (12)$$

ここで、 κ はKarman定数($=0.41$)、 $\overline{u}_*(x,y)$ は一周期平均海底摩擦速度、 β は比例定数であり、 D_x に影響を及ぼす他の要因の影響は全て β に含ませるものとする。

以下、これらのモデルを用いて博多湾における現況のCOD、T-P分布の計算を行った。比較に用いた実測値としては、(財)九州環境管理協会により平成元年度に博多湾内の約30地点において実施された測定結果を基に各地点で年平均した値を用いた。また、物質循環モデル中に含まれる各パラメーターは、同協会により行われた実験・実測結果を基に決定された。それらの値を表-2に示す。表-2中に示されている海域の区分を図-2に示す。

表-2 物質循環モデルの各パラメーター			
	西部海域	中部海域	東部海域
γ_c (mg/m ² /day)	16.4	15.1	16.7
γ_p (mg/m ² /day)	0.89	2.12	6.39
S_c (m/day)	0.17	0.17	0.17
S_p (m/day)	0.22	0.22	0.22
SS_c	0.20	0.22	0.20
SS_p	0.22	0.35	0.46
K_c (m/day)	55.2	55.2	55.2
D_c (m ³ /g/day)	0.053	0.053	0.053

表-3 計算条件	
(1) 潮流計算	
計算格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 300.0$ (m)
時間格子間隔	$\Delta t = 10.0$ (sec.)
コリオリ係数	$f = 0.81 \times 10^{-4}$ (sec. ⁻¹)
海底摩擦係数	$\gamma^2 = 0.0026$
湾口境界での潮位振幅	$B = 0.57$ (m)
湾口境界での潮位周期	$T = 12$ hour 25 min.
(2) 水質計算	
計算格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 900.0$ (m)
時間格子間隔	$\Delta t = 300.0$ (sec.)

4. 比例定数 α 、 β の決定と計算結果

潮流計算と水質シミュレーションの計算条件を表-3に示す。潮流計算により得られた最大上げ潮時の流況図を図-3に示す。

水質シミュレーションにおける湾口部での境界条件は、上げ潮時には実測データより $C_1 = 1.8$ mg/l, $C_2 = 1.3$ mg/l, $P_1 = 0.023$ mg/l, $P_2 = 0.016$ mg/l を与え、下げ潮時には流出条件を用いた。層の分割については、博多湾における透明度の実測結果によると、湾奥部の値が最も低く2.0mであるので、補償深度として透明度の2倍をとり有光層(上層)の厚さを4.0mと設定した。

分散係数の評価式(1)式中の比例定数 α は、博多湾においては塩素イオン濃度の拡散シミュレーションから $\alpha = 90$ となることが分かっている²⁾。従って α をその値に固定して、鉛直混合係数の評価式(12)式中の比例定数 β の最適値の決定を計算結果と実測値の比較により行った。その結果、 $\beta = 0.04$ が現況を最も良く再現していることが分かった。しかしながら、ここで用いた α の値は塩素イオン濃度に対する最適値であり、鉛直方向の分布形が塩素イオン濃度の場合とは異なるCODとT-Pを対象とした場合には α は異なる値をとり得ると思われる。そこで、 $\beta = 0.04$ と固定し、再度 α の最適値の決定を試みた。計算結果と実測値の比較を容易にするために、T-Pについてのみ一次的に表示して図-4 a), b) に示す。各点における実測データの標準偏差を平均値の上下にとって図中に表示した。比較地点は図-2中に黒点で示した湾口から湾奥にかけての7点である。比較の結果、 $\alpha = 80$ が最適であることが分かった。その後、 $\alpha = 80$ と固定し再度 β の最適値の決定を試みたところ(図-5 a), b) にCODについてのみ示す)、再び $\beta = 0.04$ が最適と見

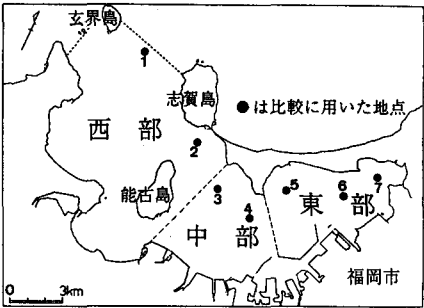


図-2 博多湾の海域の区分と比較地点

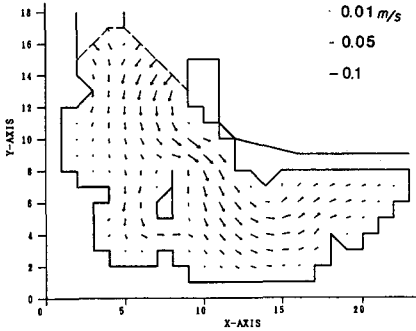


図-3 潮流計算の結果(最大上げ潮時)

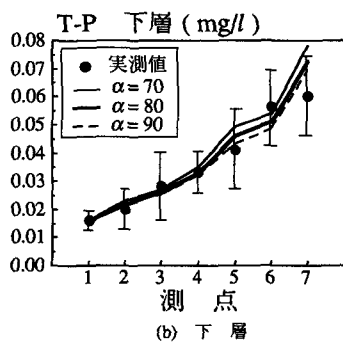
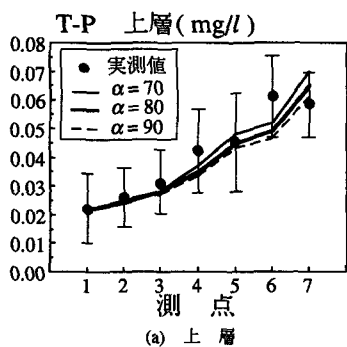


図-4 計算結果と実測値の比較 (T-P, $\beta=0.04$ の場合)

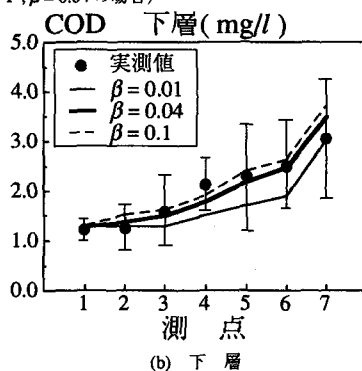
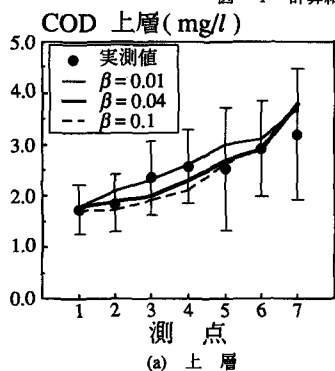


図-5 計算結果と実測値の比較 (COD, $\alpha=80$ の場合)

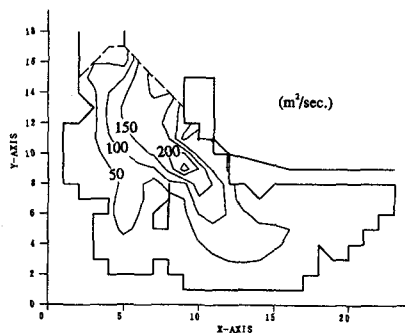


図-6 分散係数の分布図 ($\alpha=80$)

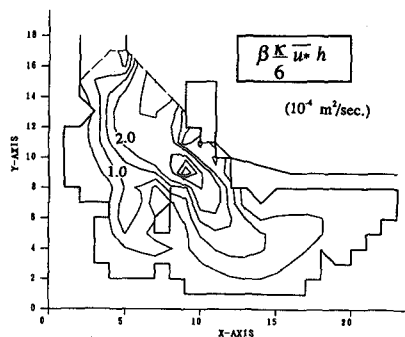


図-7 鉛直方向渦動拡散係数の分布図 ($\beta=0.04$)

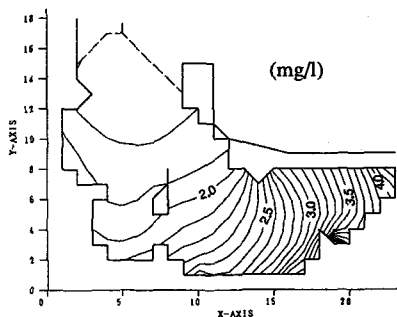


図-8 a) COD 分布再現結果 (上層)

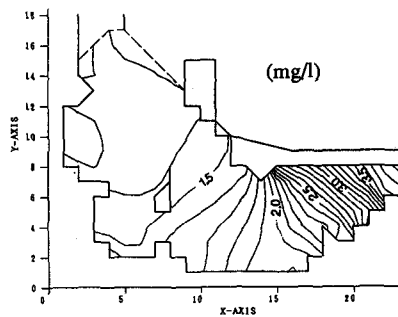


図-8 b) COD 分布再現結果 (下層)

なせたため、 $\alpha = 80, \beta = 0.04$ を最適な組み合わせであると決定した。 $\alpha = 80, \beta = 0.04$ とした場合の水平方向分散係数と鉛直方向渦動拡散係数の分布図を図-6、図-7に示す。

COD, T-P の現況濃度分布再現結果は図-8 a), b), c), d) に示した通りである。博多湾における汚染源はほとんどが河川からの生活雑排水の流入によるものであり、湾奥部の汚染が著しいことが分かる。上層と下層を比較すると、COD については栄養塩による内部生産により上層（有光層）の方が高い値を持ち、T-P については湾奥部付近以外は差がほとんどないことが分かる。図-4, 5 は湾奥部で実測値よりやや高い計算結果を示しているが、これは湾奥部の水深が浅く流速も小さいために分散係数が実際よりも過小評価されて、COD, T-P が停滞してしまうためと考えられる。また、実際は局所的にある程度異なるはずの比例定数 α を湾全体で一定としているために、成層度が高い湾奥部で α が過小評価されているためとも考えられる。

5. 結び

平面2次元モデルにおける場所毎の分散係数 D を場所毎の潮流最大流速と場所毎の平均水深から評価する方法

を、物質循環モデルに組み込み水質シミュレーションを行った。シミュレーションの結果は実測値を十分再現できておりモデルの有効性が確認できた。なお、比例定数 α の値が塩素イオン濃度の拡散シミュレーションの場合の値と若干異なっているがこれには以下の理由が考えられる。

- 1). 本研究で用いられた物質循環モデルでは十分に考慮されていない過程の影響やモデルパラメーターの誤差の影響が分散係数に反映されている。
- 2). COD は上層（有光層）で内部生産が行われるために下層に比べて高い値をとるが、塩素イオン濃度は下層の方が高い分布を持つため、両者の水深方向の分布形が異なる。従って、水深方向に積分する際に生じる移流分散効果が異なってくる。
- 3). 本論文で用いた分散係数の評価式は元々単層モデルに対するものであり、多層モデルに適用した際の影響が現れている。

しかしながら、 α に対して大幅な修正が必要だった訳ではないのでモデル化が簡便な保存性物質の拡散シミュレーションによって予め対象海域の α を同定できれば、第一近似としてはその値を用いた物質循環モデルによる水質シミュレーションが可能であると考えられる。

今後は、多層モデルにおいては各層で異なると考えられる分散係数や層間の鉛直混合係数についての更に詳しい検討を行っていく予定である。最後に、物質循環モデル中の各パラメーターの値と博多湾の水質実測値のデータを提供された（財）九州環境管理協会に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、堀江 毅：海域の物質循環過程のモデル化と浄化対策効果の予測手法について、港湾技術研究所報告、第26巻、第4号、pp.57～123、1987。
- 2) 小松 利光・矢野 真一郎・朝位 孝二・松永 康司：内湾における二次元粘性・分散係数の推定に関する研究、水工学論文集、第37巻、pp.391～396、1993。

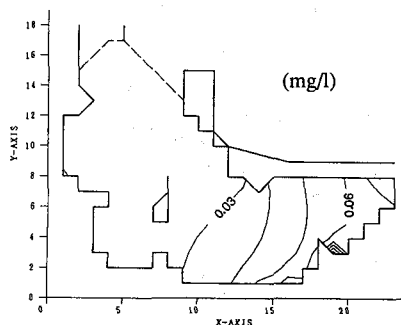


図-8 c) T-P 分布再現結果（上層）

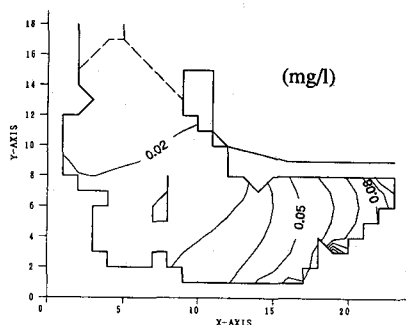


図-8 d) T-P 分布再現結果（下層）