

内湾における流れと水質の3次元構造のモデル化について

堀 江 毅*・細 川 恭 史**

1. ま え が き

近年、内湾における富栄養化が問題にされ、関連する調査や対策事業に精力的に取り組まれている。本文では、こうした問題に対処するために開発された流れと水質の3次元の構造を再現できる数値モデルに対し、COD、栄養塩類、DO等の平面および鉛直分布に支配的な要因の感度特性とそれらの取扱いについて述べる。

2. 内湾の水質分布とそのモデル化

内湾における水質は地形、排出負荷、気象海象条件に強く影響を受けている。湾奥部に汚染源が集中する海域ではCOD、I-P、O-Pとも湾奥から湾口にわたってほぼ同様の分布形状を示す。鉛直的には、夏期に表層海水が温められて成層が発達し、表層では基礎生産の活発化、底層では貧酸素化と溶出により、湾奥では特に表層と底層の水質が悪くなる。一方冬期には生産活動が低下すると共に鉛直混合が進み、水質の水平・鉛直分布はともに一様化する傾向となる。水質分布の地域的季節的変動は大であるが、ここでは大阪湾を対象とし、水質上特に問題となる夏場についてモデルの構築、パラメーターの感度特性、再現性についての検討を行う。

モデルの構築に当たりつぎのような仮定を設定したり。

i) 物質の循環を栄養塩-植物プランクトンの段階にとどめ、基礎生産量に応じて溶存酸素量と有機物質量を増加させる。

ii) 水質指標は、有機物濃度を表わすCOD、有機態および無機態栄養塩、および溶存酸素とする。栄養塩は制限因子としてのリンのみとする。

iii) 海域は表層の有光層と底層の無光層とに分かれ、有光層でのみ生産が起る。

iv) COD、DOおよび栄養塩は、生産、溶出、分解、沈降、舞い上り等の過程を通じて変化させる。

v) さらに、海域の流れによる移流と拡散の作用を受け、水平および鉛直方向に移流分散する。

i)~v)の仮定のもとで、第*i*層(2層モデルでは*i*=

1, 2, 3層モデルでは*i*=1, 2, 3)における、COD、I-P、O-PおよびDOの物質収支の関係式が次のように組立てられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{COD}_i \cdot D_i}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(\text{COD}_i \cdot u_i \cdot D_i) \\ & -\frac{\partial}{\partial y}(\text{COD}_i \cdot v_i \cdot D_i) \\ & +\frac{\partial}{\partial x}\left(KD_i \frac{\partial \text{COD}_i}{\partial x}\right) \\ & +\frac{\partial}{\partial y}\left(KD_i \frac{\partial \text{COD}_i}{\partial y}\right) \\ & -K_z(\text{COD}_i - \text{COD}_{i-1}) \\ & +K_z(\text{COD}_{i+1} - \text{COD}_i) \\ & +\beta G_i \cdot \text{OP}_i \cdot D_i - B_i^c \cdot \text{COD}_i \cdot D_i \\ & +S_{i-1}^c \cdot \text{COD}_{i-1} - S_i^c \cdot \text{COD}_i \\ & -w_{i-1/2} \cdot \text{COD}^* + w_{i+1/2} \cdot \text{COD}^* \\ & \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{IP}_i \cdot D_i}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(\text{IP}_i \cdot u_i \cdot D_i) - \frac{\partial}{\partial y}(\text{IP}_i \cdot v_i \cdot D_i) \\ & +\frac{\partial}{\partial x}\left(KD_i \frac{\partial \text{IP}_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_i \frac{\partial \text{IP}_i}{\partial y}\right) \\ & -K_z(\text{IP}_i - \text{IP}_{i-1}) + K_z(\text{IP}_{i+1} - \text{IP}_i) \\ & -G_i \cdot \text{OP}_i \cdot D_i + B_i^c \cdot \text{OP}_i \cdot D_i \\ & -w_{i-1/2} \cdot \text{IP}^* + w_{i+1/2} \cdot \text{IP}^* \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{OP}_i \cdot D_i}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(\text{OP}_i \cdot u_i \cdot D_i) - \frac{\partial}{\partial y}(\text{OP}_i \cdot v_i \cdot D_i) \\ & +\frac{\partial}{\partial x}\left(KD_i \frac{\partial \text{OP}_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_i \frac{\partial \text{OP}_i}{\partial y}\right) \\ & -K_z(\text{OP}_i - \text{OP}_{i-1}) + K_z(\text{OP}_{i+1} - \text{OP}_i) \\ & +G_i \cdot \text{OP}_i \cdot D_i - B_i^c \cdot \text{OP}_i \cdot D_i \\ & +S_{i-1}^c \cdot \text{OP}_{i-1} - S_i^c \cdot \text{OP}_i \\ & -w_{i-1/2} \cdot \text{OP}^* + w_{i+1/2} \cdot \text{OP}^* \\ & \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{DO}_i \cdot D_i}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(\text{DO}_i \cdot u_i \cdot D_i) - \frac{\partial}{\partial y}(\text{DO}_i \cdot v_i \cdot D_i) \\ & +\frac{\partial}{\partial x}\left(KD_i \frac{\partial \text{DO}_i}{\partial x}\right) \\ & +\frac{\partial}{\partial y}\left(KD_i \frac{\partial \text{DO}_i}{\partial y}\right) \\ & -K_z(\text{DO}_i - \text{DO}_{i-1}) \end{aligned}$$

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水浄化研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官

$$\begin{aligned}
 &+K_z(DO_{i+1}-DO_i) \\
 &+\gamma \cdot G_i \cdot OP_i \cdot D_i - B_i^0 \cdot COD_i \cdot D_i \\
 &-w_{i-1/2} \cdot DO^* + w_{i+1/2} \cdot DO^{**} \\
 &\dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

ここに, t : 時間, (x, y) : 直交直線座標系の水平2軸, (u, v) : x, y 方向の流速成分, w : 鉛直流速, D : 層厚, COD : COD 濃度, IP : I-P 濃度, OP : O-P 濃度, DO : 溶存酸素濃度, K : 水平拡散係数, K_z : 鉛直混合係数, G : 生産速度定数, B^0 : O-P 分解速度, B^0 : COD 分解速度, B^0 : 分解による酸素消費速度, S^0 : O-P の沈降速度, S^0 : COD の沈降速度, β : $COD/O-P$ 比, γ : $DO/O-P$ 比, である. また, サフィックス i は第 i 層の, $i-(1/2)$ は $(i-1)$ 層と i 層との間の値であり, * 又は ** は上流差分であることを示す.

なお, COD および I-P については表層において陸上負荷が与えられ, 底層において溶出が起る. DO については表層で再曝気, 底層で底泥による DO 消費の項が式 (1)~(4) の対応する式に加わる.

上記の式 (1)~(4) により構成される8組 (2層の場合) 又は12組 (3層の場合) の式を陽形式に差分化して COD_i, IP_i, OP_i, DO_i を時間ステップごとに逐次求めてゆく. この計算に必要な流れ (u, v, w) は2層または3層のレベルまたはレーヤモデルによりあらかじめ求められた結果を利用する.

3. 水質支配要因の検討

(1) 計算条件

計算対象範囲は, 東二見 - 江井以東, 沼島 - 海南以北の大阪湾および一部周辺海域とし, 平面格子は $4\text{km} \times 4\text{km}$, 層厚は 10m (又は 5m , 3層の場合は上層, 中層各 5m) とした.

流れについては両境界より M_2 分潮の振幅と位相差を, また周辺20カ所から総流量 $690\text{m}^3/\text{s}$ の河川流入をそれぞれ与えてタイムステップ360秒で計算した. この場合, レベルモデルにおいては流入河川水の水塩, 塩分を 27°C , 0‰ に, レーヤモデルにおいては層間密度差 $0.005\text{g}/\text{cm}^3$ に設定した.

式 (1)~(4) に含まれる定数については実験値, 実測値またはそれらを適宜補正した値を用いた. すなわち, $G=0.513IP/(0.027+IP)$ (1/日), $B^0=0.02$ (1/日), $B^0=0.016$ (1/日), $B^0=0.016$ (1/日), $S_i^0=0.528$ (m/日), $S_i^0=1.04$ (m/日), $S^0=0.65$ (m/日), $\beta=93$, $\gamma=143$, $K=2.5 \times 10^5$ (cm^2/s), $K_z=0.0013$ (cm/s) とした. COD , I-P の溶出速度は水塩, DO , 底泥の T-P または COD の関数として与えた.

陸上からの負荷に対しては, 36点から COD 計386 (t/日), I-P 計24 (t/日) を与えた.

物質循環モデルにおける水質支配要因を検討するため, 上述の諸定数を基準としてそれらの条件を変化させた数値実験を行った.

(2) 流れと拡散係数

大阪湾の COD (図-5 (1)), I-P (図-5 (4)), O-P (図-5 (7)) などの水質は湾奥で高く, 明石および紀淡両海峡に向って低くなるように分布している. これは陸上からの COD と I-P 負荷の約70% が湾奥部に集中していることのほか, 同湾内の流れ, 特に残差流と大きな関係がある. 顕著な残差流として, 淡路島北寄りの右回りの環流, 湾奥から神戸にわたっての弱い西流および湾奥から東海岸沿いの南西流がある. 湾奥部より流入する汚濁物質はこれらの流れに移送され, 神戸から泉南にわたる逆S字形の濃度コンターを形成する. このことは, 生産, 溶出, 分解などを無視した保存系の移流拡散モデルによる COD の計算結果 (図-1) からも容易に推定できる.

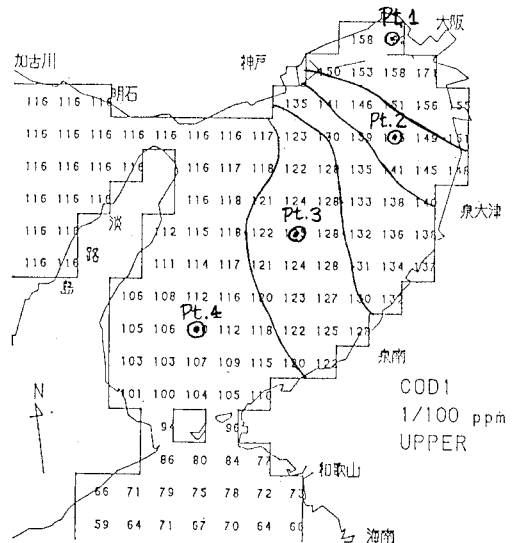


図-1 保存モデルによる COD 分布

一方, 水質の平面分布は水平拡散係数によっても大きく左右される. 物質の移動が移流と拡散のいずれにより支配されるかは

$$K \geq U \cdot \Delta S \quad (\text{拡散} \geq \text{移流}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

(K : 拡散係数, U : 水平流速, ΔS : 格子間隔) により大略推定できる. いま $\Delta S=4\text{km}$, $U=5\text{cm}/\text{s}$ とすれば式 (5) より $K > 2 \times 10^8 \text{cm}^2/\text{s}$ に対しては拡散項が移流項を上回ることになる. 先の $K=2.5 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ を全域一律に与えたのに対し, 湾奥26格子には $10^4 \text{cm}^2/\text{s}$, 流れの大きい両海峡の11~12格子には $10^8 \text{cm}^2/\text{s}$, その他には $10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ として計算すると, 水質の平面分布はより流れとの関連が強くなり, 等濃度線の逆S字形の曲率は高くなり, 負荷点近傍では高濃度に, また境

界近傍では低くなって全体的に拡散範囲は小さくなる。

(3) 鉛直流と鉛直混合係数

鉛直流や鉛直混合係数は上下層間の物質収支に重要な作用をしているものと思われる。このため2層レーヤモデルにおいて鉛直混合係数 (K_z) を基準の 0.0013 cm/s に対し、10 倍にした場合と $1/10$ にした場合について算出される上下層の COD, I-P, O-P を代表点で比較した。図-2 はこの結果を示すもので、各水質とも混合係

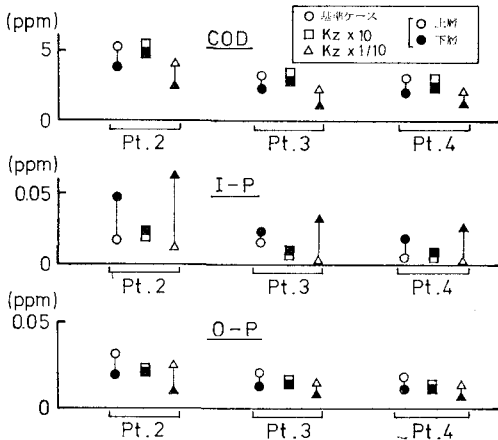


図-2 代表点における水質 (測点は図-1 参照)

数の増大により上下層ほぼ一樣になるのに対し、混合係数を $1/10$ とした場合では上下層の濃度差は大となる。一方、混合係数の増大は I-P の下層よりの補給増により上層における基礎生産を促進し COD は上昇する。

一方レーヤモデルとレベルモデルとでは、前者の方が全般的に上下層の濃度差は大となるが生産が低下し、COD と O-P が下り、底層の I-P は高くなり、レーヤモデルにおいて鉛直混合係数を増減させた場合と同様の傾向がみられる。

(4) 沈降速度と分解速度

沈降と分解はそのものの物質量を減少させる方向に作用する。レーヤモデルにおいて、基準のケース、COD 下層の分解速度 (B_z^c) を 2 倍にしたケース、COD 下層の沈降速度 (S_z^c) を 2 倍にしたケース、および B_z^c と S_z^c とをともに 2 倍にしたケースについて比較した。図-3

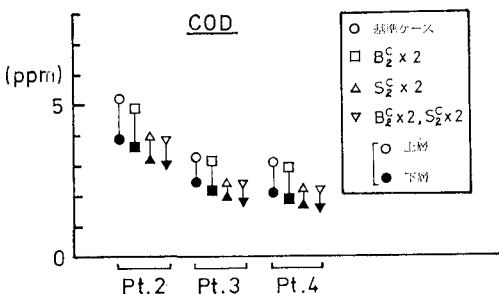


図-3 代表点における水質 (測点は図-1 参照)

はこれらの結果を示すもので、下層 COD の沈降速度に対する COD への影響は特に大であるが、I-P, O-P はほとんど変化しない。

(5) 層厚と多層化

以上は上層厚を 10 m とした場合であるが、層厚や層数についても物質の循環や水質分布に影響しているはずである。このことを上層厚を 5 m とした 2 層モデルおよび 3 層モデルによって検討した。図-4 はこれらの結果

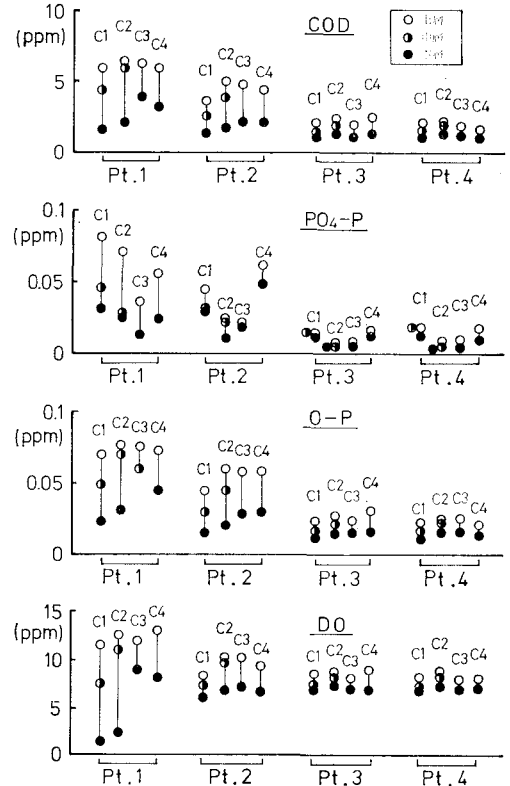


図-4 代表点における水質 (測点は図-1 参照)

を代表 4 点の COD について示したものである。ここに C1 は 2 層で上層 5 m のみが生産層、C2 は 3 層で上層 5 m 、中層 5 m が生産層、C3 は 2 層で上層厚 10 m 、C4 は 2 層で上層厚 5 m のケースを示している。3 層モデルの C1 と C2 を比較すると、上下層とも COD は C2 の方が高く、また 2 層モデルの C3 と C4 とでは上層厚の大きい C3 の方が高い。これは生産層の厚い C2 又は C3 の方が生産総量が大きくなるためである。また生産層厚が同じ 5 m の 3 層モデル (C1) と 2 層モデル (C4) とでは上下層とも総じて 2 層モデルの方が高い。これは生産に必要な下層から I-P の補給が 3 層モデルでは中間層を介して間接的になることによると考えられる。一方、生産層厚が同じ 10 m の 3 層モデル (C2) 2 層モデル (C3) とでは上層 COD はいずれの点でも C2 の方が高く、下層 COD は湾奥高濃度域で低くなる。このこ

とは上層で生産される COD, O-P の下層への移動が2層モデルでは抑制されるためと考えられる。

O-P については COD と全く同様の傾向がみられる。

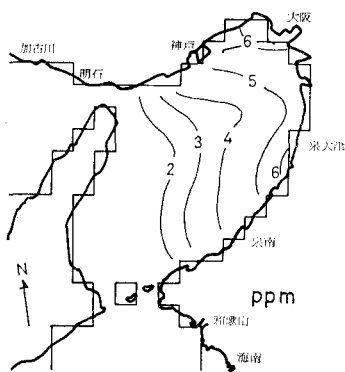
これに対し基礎生産に消費される I-P は COD や O-P とは対照的な特性を示し, 上層で生産が大きくなる C2 や C3 において低くなる。

DO についても COD や O-P と同じ特性を示すが, 特に湾奥底層の DO は3層モデルで 2ppm 近傍まで低

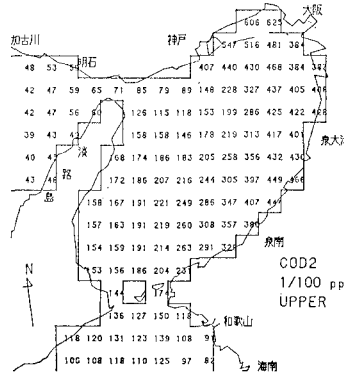
下し, 上下層間でかなりの濃度差のつくことがわかる。

4. 大阪湾の水質分布の再現性

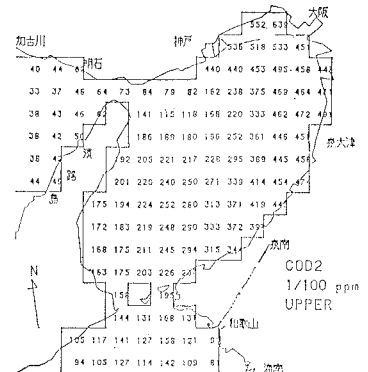
数値モデルを扱う上でシミュレーション結果が実態をどこまで再現し得ているかは最重要である。このため, 以上で検討した中から2層レベルモデルと3層レベルモデルによる結果をそれぞれ1ケースとりあげ実測値と対比してみた。



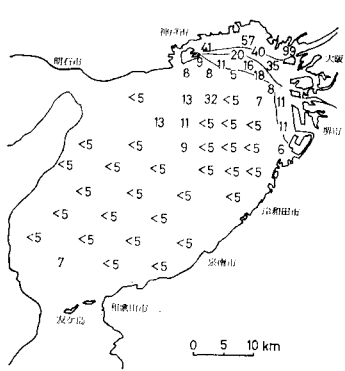
(1) 実測 COD(表層, 7~8 月平均)



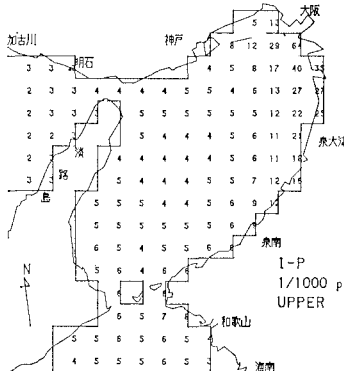
(2) 2 層モデル COD (表層)



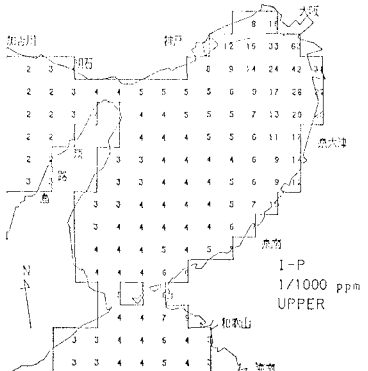
(3) 3 層モデル COD (表層)



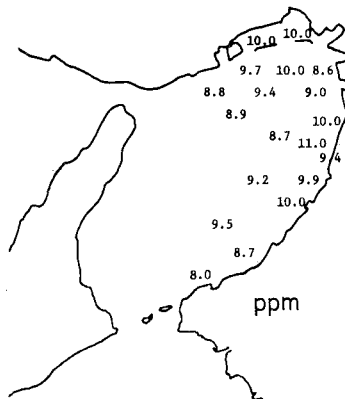
(4) 実測 I-P(表層)



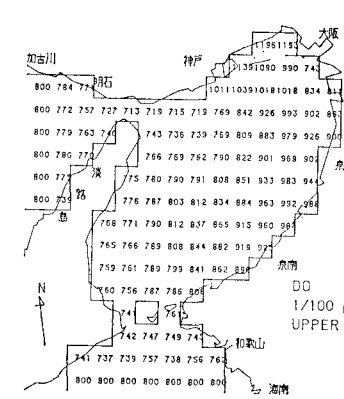
(5) 2 層モデル I-P (表層)



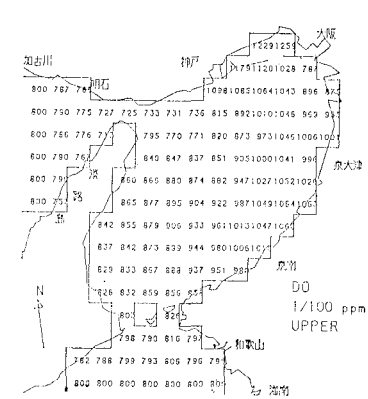
(6) 3 層モデル I-P (表層)



(7) 実測 DO (表層)



(8) 2 層モデル DO (表層)



(9) 3 層モデル DO (表層)

図一五 実測値と計算値との対応

図-5 (1) は水産庁公共水域データのうち COD 表層 (昭和 51~53 年実施 7~8 月平均), 同 (2) は 2 層モデル上層 COD (上層厚 10m), 同 (3) は 3 層モデル上層 COD (上層厚 10m) の結果をそれぞれ示すものである。計算では 5ppm のコンターが 3 層の場合やや狭いが両者ほぼ同様の分布である。一方実測値と比較すると湾東部に多少分布が偏り明石側が小さいが湾内の濃度値と分布形はほぼ適合している。

次に、図-5 (4) は第三港湾建設局による実測表層 $\text{PO}_4\text{-P}$ (昭和 57 年 7, 8 月平均, 海面下 5m), 同 (2) は 2 層モデル, 同 (3) は 3 層モデルによる結果である。実測値の起伏をならして考えればオーダー的には満足し得る。

さらに、図-5 (7) は公共水域水質データの DO (昭和 53 年 9 月実測, 表層), 同 (7) は 2 層モデル, 同 (8) は 3 層モデルの結果である。湾奥の一部で計算値が 1~2ppm 高いようであるが全般的な分布形は再現し得ていると考えられる。

5. ま と め

2 層および 3 層の物質循環モデルに対して諸過程の感度解析と再現性を大阪湾をモデル海域として検討した。これらを要約するとつぎのとおりである。

1) 残差流および水平拡散係数は各種水質の平面分布と密接な関係にある。

2) 鉛直流や鉛直交換係数は層間の水質を均一化するほか、生産に必要な下層 I-P の補給、上層での生産と関係が深い。

3) COD の沈降速度、分解速度は COD 濃度を下げる作用をし、特に前者はその作用が大であるが、O-P, I-P に対する影響は小さい。

4) 生産層厚を大とすると COD, O-P は大となり、下層 I-P は小となる。3 層モデルにおいて上層のみ生産層とする場合は同じ生産層厚の 2 層モデルより生産が落ちる。

5) 2 層モデルは 3 層モデルによりほぼ満足できる水質分布の再現ができる。

最後に、本研究は運輸省第三港湾建設局が行った底質浄化関連調査の一部を担当し、山口大学工学部中西弘教授、東京都立大学工学部堀口孝男教授、港湾技術研究所佐藤昭二所長ほかの指導と、新日本気象海洋(株)所属蔵本武明、細田昌宏両氏の協力を得て実施したものである。以上の諸氏に対し深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 堀江 毅・細川恭史: 海域における物質循環数値モデルの水質支配因子について, 港湾技術研究所報告, Vol. 23, No. 3, 1983. 9.