

水系－底泥系の物質循環モデルについて

Modeling of the Nutrient Cycle in Seawaters and Sediments

港湾技術研究所海洋水理部 正員 堀 江 毅

1. まえがき

内海、内湾における有機汚染の進行は陸域からの汚染負荷に依るところが大であるが、湾奥部の比較的浅い海域に堆積している汚泥からの有機物や栄養塩の溶出の寄与も小さくない。こうしたことから、流入負荷規制以外に、堆積汚泥の浚渫や覆土による溶出制御の検討を行っている。

海域における有機汚染は、水系と底泥系の物質循環と密接な関係があり、栄養塩の挙動を把握することによって有機汚染の制御が容易になるものと思われる。

従来の研究によると、水系モデルでは底泥からの栄養塩類、CODの溶出は外生的に与えられることが多く、また底泥系のモデルは海水からの栄養塩負荷が外生的に与えられ、これら両者の水系および底泥系モデルは個別に扱われるものが多くなっている。ところが、厳密には底泥への栄養塩負荷は水系から、また底泥からの溶出は底泥および境界近傍の条件により決定されており、この意味から解析も水系、底泥系相互の作用を考慮して行うのが合理的である。

本研究はこのような考えに基づき、溶出速度や沈降量が内生的に計算される水系－底泥系一体モデルを構築し、その適用性について検討したものである。

2. 物質循環のモデリング

水系および底泥系での栄養塩、溶存酸素およびCODの循環を図-1のようにモデル化する。

まず水系においては、i)物質の循環を栄養塩－植物プランクトンの段階でとどめ、基礎生産量に応じて溶存酸素量と有機物量とを増加させる、ii)水質指標は、有機物濃度を代表するCOD、有機態および無機態の栄養塩および溶存酸素量とする、iii)海域は鉛直的に表層の有光層と底層の無光層とに分け、有光層においてのみ生産が起る、iv)COD、DOおよび栄養塩は、生産、溶出の他、分解、沈降など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分散させる。

現実の海域では物質循環はさらに動物プランクトンから魚介類、さらには大型動物へと及ぶが、これらすべてをとりこむことは不可能であり、また必ずしもモデルの精度を向上することにならない。ここでは簡単のため上述 i)に従った。一方、有機物指標としては、水質規制指標となっているCODを採用した。栄養塩は窒素系、リン系が主であるが、後述する大阪湾ではリンが制限因子となっていること、および窒素に比して取扱いが容易であることからリンを採用することとした。

つぎに底泥系においては、i)リン酸態リン(以下 PO_4-P という)の溶出は底泥間隙水からの拡散により生ずる、ii)間隙水 PO_4-P は微生物による底泥内有機態リン(以下 $O-P$ という)の分解、溶存化による生成、泥粒子との吸脱着、および拡散により変化する、iii)底泥より分解生成された PO_4-P は一定の分配率で間隙水および吸着態として泥粒子に分配される、iv)底泥内における PO_4-P 生成は新生堆積物および既存底泥中の $O-P$ の分解により生じ、その速度は水温と泥中の $O-P$ に依存する、v)溶出に係わる一定泥層内において、 $O-P$ 、リン分解、溶存化、吸脱着、拡散、攪乱が生ずる、vi)底泥直上の PO_4-P は一定交換率で底層海水と交換する、などとした。

図-1に示されるように、水系と底泥系との接続は PO_4-P の溶出、舞い上り、および $O-P$ の沈降によって行った。

一般に、水系と底泥系における物質循環の速度は同一でなく、安定的な解を得るのに水系では1～2か月、

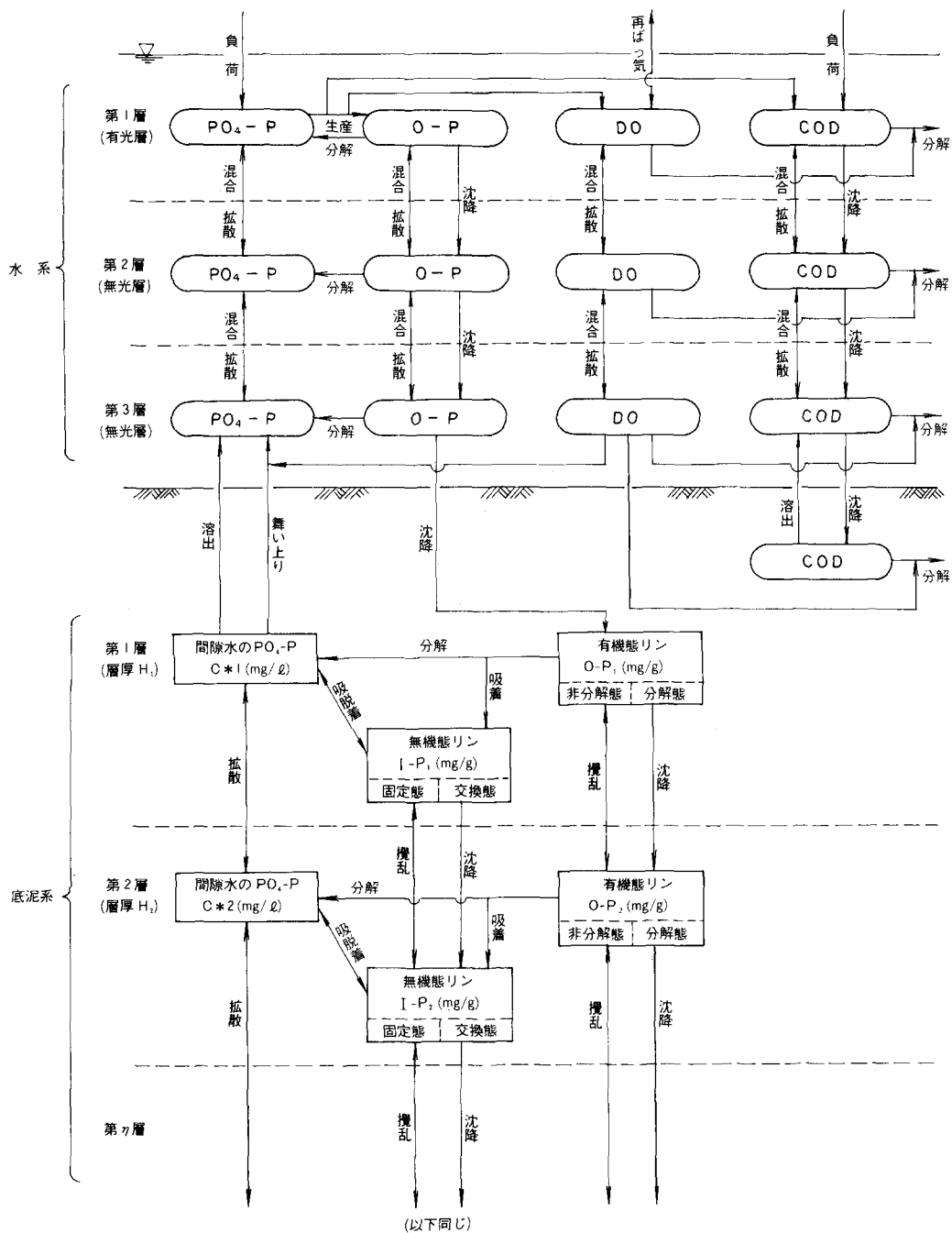


図-1 物質循環フロー (数値モデル)

底泥系では30～40年を要する。したがって、水系と底泥系に対して同一の時・空間スケールを適用すれば底泥系の計算がばう大となる。このため、空間スケールに対しては対象海域を10個程度に分割したブロック単位で考えることとした。

各ボックス、各層におけるO-P, PO₄-P, COD, DO(溶存酸素量)の時間変化はつぎのような形で表した。

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} \text{ブロック内物質質量} \\ \text{の時間変化} \end{array} \right) = & \left(\begin{array}{c} \text{ブロック間} \\ \text{水平移流} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{ブロック間} \\ \text{鉛直移流} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{ブロック間} \\ \text{水平拡散} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{ブロック間} \\ \text{鉛直拡散} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{生産 } T_G \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) \\ & + \left(\begin{array}{c} \text{分解 } T_B \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{沈降 } T_S \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{溶出 } T_R \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{流入負荷 } T_L \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) \\ & + \left(\begin{array}{c} \text{底泥による消費 } T_C \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{大気との交換 } T_E \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

式(1)中の $T_G, T_B, T_S, T_R, T_L, T_C$, および T_E は表-1で示されるように定式化した。

表-1 物質循環式の各項

		1層(上層)	2層(中層)	3層(下層)
O-P	T_G	$G \cdot OP_{1i} \cdot V_{1i}$	0	0
	T_B	$-B_1^P \cdot OP_{1i} \cdot V_{1i}$	$-B_2^P \cdot OP_{2i} \cdot V_{2i}$	$-B_3^P \cdot OP_{3i} \cdot V_{3i}$
	T_S	$-S_1^P \cdot OP_{1i} \cdot \bar{A}_1^{12}$	$S_1^P \cdot OP_{1i} \cdot \bar{A}_i^{12} - S_2^P \cdot OP_{2i} \cdot \bar{A}_i^{23}$	$S_2^P \cdot OP_{2i} \cdot \bar{A}_i^{23} - S_3^P \cdot OP_{3i} \cdot \bar{A}_i^{23}$
	T_R, T_L, T_E, T_C	0	0	0
PO ₄ -P	T_G	$-G \cdot OP_{1i} \cdot V_{1i}$	0	0
	T_B	$B_1^P \cdot OP_{1i} \cdot V_{1i}$	$B_2^P \cdot OP_{2i} \cdot V_{2i}$	$B_3^P \cdot OP_{3i} \cdot V_{3i}$
	T_L	$F_{IP,i}$	0	0
	T_R	0	0	$R_{IP,i} \cdot \bar{A}_i^{23}$
	T_S, T_E, T_C	0	0	0
COD	T_G	$\beta \cdot G \cdot OP_{1i} \cdot V_{1i}$	0	0
	T_B	$-B_1^C \cdot COD_{1i} \cdot V_{1i}$	$-B_2^C \cdot COD_{2i} \cdot V_{2i}$	$-B_3^C \cdot COD_{3i} \cdot V_{3i}$
	T_S	$-S_1^C \cdot COD_{1i} \cdot \bar{A}_i^{12}$	$S_1^C \cdot COD_{1i} \cdot \bar{A}_i^{12} - S_2^C \cdot COD_{2i} \cdot \bar{A}_i^{23}$	$S_2^C \cdot COD_{2i} \cdot \bar{A}_i^{23} - S_3^C \cdot COD_{3i} \cdot \bar{A}_i^{23}$
	T_L	$F_{COD,i}$	0	0
	T_R	0	0	$R_{COD,i} \cdot \bar{A}_i^{23}$
	T_E, T_C	0	0	0
DO	T_G	$r \cdot G \cdot OP_{1i} \cdot V_{1i}$	0	0
	T_B	$-B_1^O \cdot COD_{1i} \cdot V_{1i}$	$-B_2^O \cdot COD_{2i} \cdot V_{2i}$	$-B_3^O \cdot COD_{3i} \cdot V_{3i}$
	T_E	$A_8(HOWA - DO_{1i}) \cdot V_{1i}$	0	0
	T_C	0	0	$-DB_i \cdot \bar{A}_i^{23}$
	T_S, T_L	0	0	0

ここに、 $OP_{li,i}$:ブロックiのl層のO-P濃度、 $COD_{li,i}$:ブロックiのl層のCOD濃度、 $DO_{li,i}$:ブロックiのl層のDO濃度、 $V_{li,i}$:ブロックiのl層の容積、 $\bar{A}_i^{lm}$:ブロックiにおけるl層とm層間の面積、 G :生産速度($G = G_0 \times IP / (0.027 + IP)$)、 G_0 :生産速度定数、 IP :PO₄-P濃度)、 B_l^P :l層のO-P分解速度、 B_l^C :l層のCOD分解速度、 S_l^P :l層のO-P沈降速度、 S_l^C :l層のCOD沈降速度、 $R_{IP,i}$:ブロックiのPO₄-P溶出速度(内生)、 $R_{COD,i}$:ブロックiのCOD溶出速度($R_{COD,i} = \kappa R_{IP,i}$ 、 κ :定数)、 DB_i :ブロックiの底泥のDO消費($DB_i = \kappa' \cdot R_{IP,i}$)、 $F_{OP,i}$:ブロックiへのO-P負荷、 $F_{IP,i}$:ブロックiへのPO₄-P負荷、 $F_{COD,i}$:ブロックiへのCOD負荷、 A_8 :再ばつ気係数、 $HOWA$:DO飽和濃度、 β :COD換算係数、 r :DO換算係数、である。

一方、底泥系については、溶出に有効と考えられる一定泥層厚を数層に分割し、 n 層内での栄養塩濃度、すなわち $O-P (OP_n)$ 、 $I-P (IP_n)$ 、間隙水 $PO_4-P (C_*)$ および直上水の $PO_4-P (C_w)$ に対し、それらの時間変化をつぎのように表した。

$$IP_n^{t+1} - OP_n^t = \left\{ -r_n^t + DS \times (OP_{n-1}^t - OP_n^t) + DSL \times (OP_{n-1}^t - 2 \times OP_n^t + OP_{n+1}^t) \right\} \times \Delta t \quad (2)$$

$$IP_n^{t+1} - IP_n^t = \left\{ \frac{\frac{1}{\phi_n \alpha_n}}{1 + \frac{1}{\phi_n \alpha_n}} \times r_n^t + q_n^t + DS \times (IP_{n-1}^t - IP_n^t) + DSL \times (IP_{n-1}^t - 2 \times IP_n^t + IP_{n+1}^t) \right\} \times \Delta t \quad (3)$$

$$C_{*n}^{t+1} - C_{*n}^t = \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_n \alpha_n}} \times \frac{1}{\phi_n} \times r_n^t - \frac{1}{\phi_n} \times q_n^t + \left\{ \phi_n^1 \times D \times \frac{C_{*n-1}^t - C_{*n}^t}{(H_n + H_{n-1})/2} + \phi_{n+1}^1 \times D \times \frac{C_{*n+1}^t - C_{*n}^t}{(H_{n+1} + H_n)/2} \right\} \times \frac{1}{H_n} \right\} \times \Delta t \quad (4)$$

$$C_w^{t+1} = (C_w^t + \frac{1}{1000} \times R^t \times \Delta t) \times DL \quad (5)$$

ここに、 DS : 堆積速度、 DSL : 攪乱係数、 ϕ : 乾泥間隙水比、 D : 層厚、 α : 生成 PO_4-P の吸着分配率、 q : 吸脱着速度、 Δt : 時間ステップ、であり、各変数の肩字は時間、脚字は層をそれぞれ表している。

3. 大阪湾への適用

計算対象領域を大阪湾とした。先に述べた理由から、図-2 に示すように同湾を平面的には11のブロックに、また鉛直的には3層（上層厚5m、中層厚5m）にそれぞれ分割した。これらの各ブロック各層に流入する水量はあらかじめ2次元3層メッシュモデルにより計算された平均潮時の潮汐流の結果より求めた。

水系モデルに係わる係数として各層における生産速度定数 G_0 、分解速度などの季節変化を湾内水季節変化を考慮し表-2 のように与えた。沈降速度 (S^c , S^p) は季節に係わりなく $S_1^p = 0.100$, $S_2^p = S_3^p = 0.530$, $S_1^c = 0.200$, $S_2^c = 0.800$, $S_3^c = 1.200$ (いずれも m/日) の一定値を与えた。ブロック間の水平拡散係数は $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。鉛直方向については鉛直移流が支配的であると考慮、鉛直拡散係数は0とした。ブロックに流入する負荷 (F_{IP} , F_{OP} , F_{COD}) は実測値に基づき

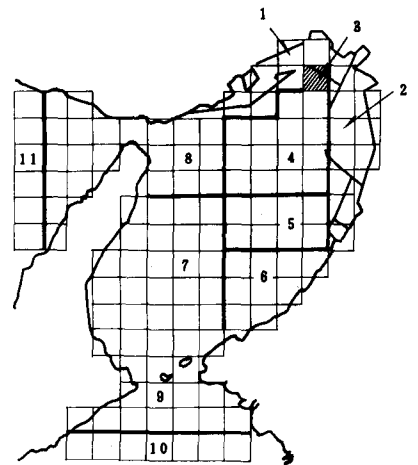


図-2 大阪湾のブロック分割

表-2 諸係数の季節変化

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G_0 1層 (1/日)	0.133	0.121	0.146	0.181	0.254	0.320	0.427	0.561	0.476	0.393	0.306	0.173
G_0 2層 (1/日)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
B_1^p (1/日)	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.007	0.028	0.028	0.028	0.016	0.011	0.003
B_2^p (1/日)	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.007	0.028	0.028	0.028	0.016	0.011	0.003
B_3^p (1/日)	0.004	0.003	0.003	0.004	0.006	0.009	0.057	0.057	0.057	0.022	0.016	0.009
B_4^p (1/日)	0.004	0.003	0.004	0.004	0.007	0.009	0.016	0.016	0.016	0.014	0.011	0.006
B_5^p (1/日)	0.004	0.003	0.004	0.004	0.007	0.009	0.032	0.032	0.032	0.014	0.011	0.006
B_6^p (1/日)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004	0.032	0.032	0.032	0.011	0.007	0.003
B_7^p (1/日)	0.006	0.005	0.005	0.007	0.010	0.014	0.037	0.037	0.037	0.021	0.017	0.009
B_8^p (1/日)	0.006	0.005	0.005	0.007	0.010	0.014	0.073	0.073	0.073	0.021	0.017	0.009
B_9^p (1/日)	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.005	0.075	0.075	0.075	0.016	0.011	0.005
HOWA (mg/l)	1.05	1.10	1.05	1.00	9.0	8.5	8.0	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0

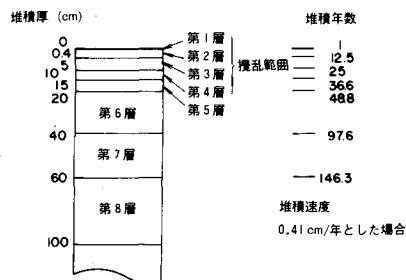


図-3 底泥層の鉛直分割

各ブロック上層に与えた。COD換算係数 β 、DO換算係数 r 、再ばっ気係数 A_g は実験値または理論値をもとにそれぞれ6.11、143および0.3(いずれも1/日)を与えた。

一方、底泥系においては図-3に示されるように溶出有効層100cmに対し、堆積速度を考慮して8層に分割した。

つぎに、底泥直上のDO濃度は式(2)~(4)に示されるように、底泥内で生成される PO_4-P の間隙水-底粒子間の吸脱着に関係する。ところが、水系の3層モデルで計算される底層DOは層内平均されて直上水DOより大きくなるため、これを直接直上水DOと結びつけることはできない。したがって本モデルでは直上水の実測値に基づき表-3に示されるような季節変化を与えた。

さらに、分解速度(B^p, B^c, B^o)、

分配係数 α 、拡散係数などに係わる水温変化は表-4のように与えた。

その他、底泥系モデルに係わる係数として、沈降物のO-P/SS比は実測より2.7 mgP/g·SS、浮泥の分解速度 $r_f = 0.017 \times (O-P/SS - 0.24) \times 1.05^{T-25}$ mgP/g·SS/日、 T : 水温、既存泥の分解速度 $r_g = 0.0016 \times (O-P/SS - 0.24) \times 1.06^{T-25}$ (0.4~5 cm層)、

$r_g = 0.0014 \times (O-P/SS - 0.24) \times 1.06^{T-25}$ (5~10 cm層)、 $r_g = 0.00035 \times (O-P/SS - 0.24) \times 1.06^{T-25}$ mgP/g·SS/日(10 cm以深)、分配係数 $\alpha = 18.1 \times 0.761^{DO} \times 1.02^{T-20}$ g/l (DO: 直上水DO)、拡散係数 $D = 1.4 \times 10^{-4} \times 1.03^{T-25}$ m²/日、攪乱係数 $DSL = 3.4 \times 10^{-5}$ m²/日、などの定数が実験値に基づき与えられた。なお、O-Pの定泥への供給速度は水質の下層O-P濃度の下層の沈降速度を乗して与えたが、ブロック4, 5, 6およびブロック7, 8, 9にはそれぞれ0.8および0.7をさらに乗ずることにより調整した。

このような条件のもとに、タイムステップ Δt は1.5時間とし、計算の初期値を水系ではO-P、 PO_4-P 、CODをそれぞれ0.04、0.0、1.4 mg/l(いずれも全ブロック全層)、およびDOを上層8.0、中層8.0、下層6.0 mg/lを与えて10か年分の計算を行った。

得られた結果のうち、ブロック3の水質および底質鉛直分布を示したものが図-4および図-5である。

表-3 直上水のDO濃度 (mg/l)

ブロック \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1, 2, 3	8.6	9.1	9.1	9.1	7.0	4.1	1.0	1.5	2.1	6.1	7.1	8.1
4	8.6	9.1	9.1	9.1	7.0	4.1	4.0	4.0	5.0	6.1	7.1	8.1
5, 6	8.6	9.1	9.1	9.1	7.0	5.0	4.0	4.0	5.0	6.1	7.1	8.1
7, 8, 9	8.6	9.1	9.1	9.1	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.1	7.1	8.1

表-4 温度定数に係わる水温の季節変化 (°C)

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
10.0	8.0	11.0	14.0	17.0	20.0	23.0	26.0	26.0	23.0	19.0	15.0

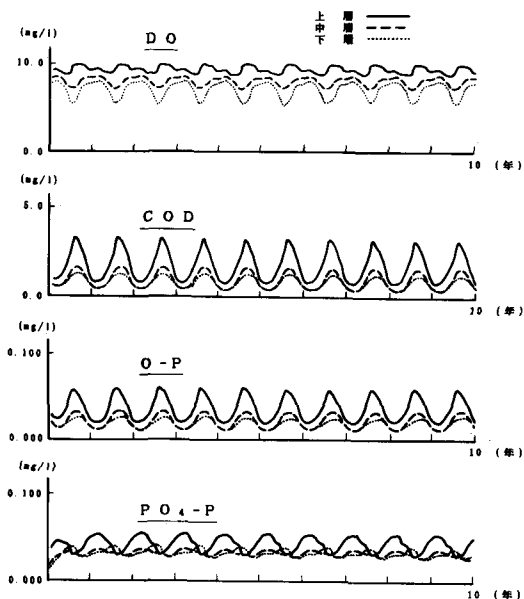


図-4 水質の時間変化 (ブロック3)

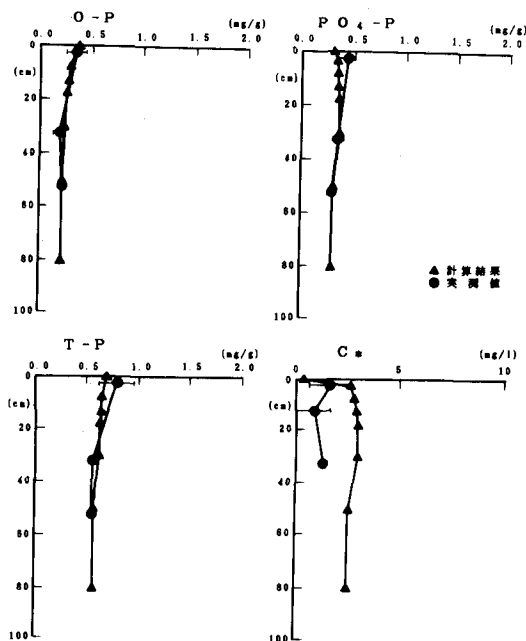


図-5 底質の鉛直分布 (ブロック3)

図-4は各水質に対する10か年間のブロック3の上・中・下層の時間変化を示したものであり、DO、CODおよびO-Pはいずれも夏にピークとなり冬に最低値となる季節変化を繰返している。いずれも上層値が下層値より高濃度であり、中層はその中間の値となっている。一方、PO₄-PはDO、COD、O-Pとは逆の傾向、すなわち、上・中層は冬に高く夏に低くなる。また夏には下層のPO₄-Pが上層のそれより高くなる。これは上層では夏に内部生産が活発化して上層PO₄-Pのとり込みが多くなるのに対し、下層では溶出によるPO₄-P補給があるためと考えられる。図-4における夏の各平均水質と、実測により得られている水質とをボックス3領域について対比すると両者はほぼ一致することがわかる。

一方、ブロック3における底質のPO₄-P、同O-P、同T-P、および間隙水PO₄-Pの鉛直分布の計算値と実測値とを対比した図-5の結果によると、間隙水PO₄-Pを除いてよい一致がみられる。間隙水PO₄-Pは計算値が実測値の2倍程度になっている。

4. まとめ

以上の解析より、水系と底泥系とを結合した栄養塩循環のモデル化が可能であり、このモデルによって底泥のO-P、I-P、T-P、および水系の栄養塩やCODの各層の分布が比較的良好に再現できることがわかった。しかし、このモデルにおいても底泥直上のDOは依然として外生的に与える必要があった。さらに、大阪湾規模の水質分布を精度よく再現するためには10個程度のブロックでは十分でないと推察され、将来的にはメッシュモデルによる解析を行う必要があろう。