

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

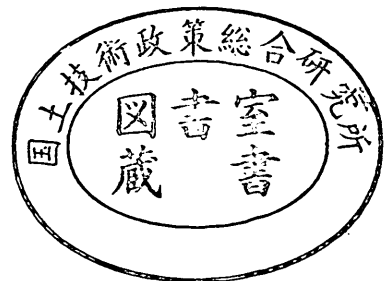
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 23

NO. 2

JUNE. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第23巻 第2号 (Vol. 23, No. 2), 1984年6月 (June 1984)

目 次 (CONTENTS)

1. 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報)
——現地観測波圧データの解析——……………高橋重雄・谷本勝利…………… 3
(Uplift Forces on a Ceiling Slab of Wave Dissipating Caisson with
a Permeable Front Wall (2nd Report)—Field Data Analysis—
……………Shigeo TAKAHASHI and Katsutoshi TANIMOTO)
2. 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法……………加藤一正・吉松 晃……………27
(A New Method of Three-Dimensional Empirical Eigenfunction Analysis for
Contour Maps ……………Kazumasa KATOH and Akira YOSHIMATSU)
3. 海域底泥中のリンの挙動モデルについて……………堀江 毅・細川恭史……………49
(Modelling of the Behaviors of Phosphorus in Sea Mud
……………Takeshi HORIE and Yasushi HOSOKAWA)
4. 砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究……………荘司喜博……………75
(Experimental Study on Lateral Resistance of a Pile with Embedded
Head in Sand ……………Yoshihiro SHOJI)
5. 波の繰返しを受ける防波堤基礎地盤の安定性に関する研究 (第1報)
——過剰間隙水圧の挙動解析——……………善 功企…………… 181
(Study on the Stability of Subsoil under Breakwaters Subjected to Cyclic
Wave Loading (1st Report)
—Analysis on Wave-Induced Excess Pore Water Pressure—
…………… Kouki ZEN)
6. 連続水ジェットによる岩盤掘削機構……………岩崎峯夫・秋園純一…………… 207
(A Consideration of Rock Excavation Mechanism with Water Jets
…………… Mineo IWASAKI and Junichi AKIZONO)

3. 海底泥中のリンの挙動モデルについて

堀 江 毅*
細 川 恭 史**

要 旨

海域における有機物の内部生産に関連の深い底泥中のリンの挙動に対する数値モデルを開発した。このモデルにおいて、リンの溶出は、新生堆積物および在来底泥中の有機リンの分解により生成するリン酸態リンが一部間隙水中に移行し、濃度勾配に基づく拡散により水中にもたらされる現象としてとらえた。西宮沖の底泥に適用した結果、同海域の溶出周年変化、堆積速度、底泥の I-P, O-P および間隙水 $PO_4\text{-P}$ の分布をほぼ再現することができた。

* 海洋水理部 海水浄化研究室長

** 海洋水理部 主任研究官

3. Modelling on the behaviors of phosphorus in sea bed

Takeshi HORIE*

Yasushi HOSOKAWA**

Synopsis

Numerical model is developed on bottom phosphorus behaviors which are closely related with primary production of marine organics. Several assumptions are applied to the model formulation such that $\text{PO}_4\text{-P}$ release is caused by the dispersion in interstitial water. $\text{PO}_4\text{-P}$ in interstitial water is determined by the decomposition and dissolution of organic substance in bottom, absorption or adsorption to mud particle, and dispersion. Each process included in the model is confirmed by field experiments or laboratory tests. Effective thickness of the mud is decided by 60 cm, considering settling velocity, effective depth to release, vertical distribution of bottom substance, etc. Seven layers in total are prepared for the analysis. Dissolved oxygen and settling velocity of O-P are obtained from the result of nutrient cycle simulation to the bay of Osaka. T-P and I-P in mud, $\text{PO}_4\text{-P}$ in interstitial water, and $\text{PO}_4\text{-P}$ release rate from surface bed are simulated to the present values in a specific spot, with the condition of time increment 1/10 day and iteration times sufficient enough to saturate each concentration. Acceptable results are obtained.

* Chief of Purification Hydraulics Laboratory, Hydrodynamics Division

** Senior Research Engineer, Hydrodynamics Division.

目 次

要 旨	49
1. ま え が き	53
2. 大阪湾の夏期の水質底質特性	53
3. リン酸態リンの挙動モデル	54
3.1 従来の取扱い	54
3.2 モデルの組立て	54
4. 各過程の定式化	56
4.1 有効泥厚と層分割	56
4.2 沈降と堆積	59
4.3 $\text{PO}_4\text{-P}$ の生成	59
4.4 生成 $\text{PO}_4\text{-P}$ の吸着と溶存化	62
4.5 底泥中の物質の移動	64
4.6 含水率と単位体積重量	66
5. 数値シミュレーション	66
5.1 計算条件	66
5.2 底泥内のリン濃度分布と溶出速度	71
6. ま と め	71
参 考 文 献	71
主 要 記 号 表	72
付 録. 主 要 パ ラ メ ー タ の 感 度 解 析	72

1. ま え が き

海域における有機性汚濁は主として陸域からの流入負荷、海域内部での生産、底泥からの溶出などに起因している。これらの過程は海域の水質を決定する重要な要因となっており、相互に複雑に作用し合っている。筆者らは先に上述の過程を取込んだ物質循環モデルを大阪湾に適用し、パラメータの感度解析と水質の再現性についての検討を行った。¹⁾ このモデルにおいては、底泥からの溶出速度は、底泥の底質、温度、溶存酸素量などの関数として与えられているが、海水中より沈積して底泥に供給される沈降物の溶出に対する影響は考慮されていない。ところが、実海域での現地溶出試験や実験室内での室内試験^{2),3)}によると、沈降物による溶出速度への影響は無視しがたく、場合によってはかなり大きな比重を占めるものと推定される。したがって、物質循環モデルにより水質分布をより詳細に解析するためには、沈降物の影響を考慮した底泥からの溶出機構を明らかにし、これをモデルに組込んでおく必要がある。

一方、底泥からの溶出は、底泥内部での諸現象に大きく依存するが、海水、特に底層水の特性にも支配される。したがって、海水の水質変化と切り離して溶出変化機構のみを取扱うことは、溶出機構を簡略化して海水の水質を取扱うと同様に片手落ちといえる。しかし、溶出の機構の未だ明らかでない現状においては、底泥内の溶出機構を取込んで底泥と海水とを一体化した水質解析を行うことは容易でない。このため、現段階においてはまず溶出変化機構をモデル化し、その再現性を確認して後、水質モデルに組込んでいくのが当面の手順かと思われる。

このような理由から、西宮沖で得られた水質、底質、間隙水および溶出速度の実測データをもとに底泥中のリンの挙動モデルを組立て、溶出速度の変化、堆積厚、底質と間隙水の水質分布のシミュレーションを行った。このモデルにおいては、海水中よりの沈降は外生的に与え、底層水との境界水質は交換係数を仮定することにより解析した。

本文の構成として、3.では海域底泥からの溶出の取扱いに関し、2、3の例として、筆者らがこれまで取扱ってきた方法、平城ら⁴⁾のモデルその他について概略を紹介した。さらに、リン酸態リンの溶出モデルの詳細を述べた。4.では西宮沖の実測データをもとに諸係数の定式化とパラメータの設定法を述べた。5.では西宮沖についての溶出シミュレーションを行い、溶出速度の年周変化、堆積速度、水質・底質の再現性を検討した。さらに6.では、以上の結果をとりまとめるとともに、溶出モデ

ルの活用方策と今後の課題について述べた。最後に本モデルの主要パラメータに対する感度解析の結果を付録として添付した。

2. 大阪湾の夏期の水質底質特性

海域の有機性汚濁は、周辺に大都市や工業地帯をひかえた閉鎖性の内湾において問題となりやすい。東京湾、伊勢・三河湾や大阪湾をはじめとする瀬戸内海各海域はその可能性が大である。

これらの海域における水質は、関係の諸機関により公共用水域水質測定調査または浅海定線調査として定期的に広範囲に測定されている。また港湾建設局においても広域汚染実態調査などが行われている。このような調査によって、限られた項目ではあるが、当該海域の水質、底質の分布や季節変化の概略を知ることができる。

たとえば、プランクトンの活動が活発化する夏期の大阪湾に注目すると、湾内の水質は淀川を中心とする湾奥の阪神工業地帯から、明石海峡および紀淡海峡にわたって等濃度線が分布し、各項目ともほとんど同様のパターンを示す。まず上層5mの化学的酸素要求量(以下CODという)では、西宮と泉佐野を結ぶ線以東では4mg/l以上で、3mg/lの等濃度線は湾のほぼ中央で南北に位置する。水深5~10mの中層では2mg/lの領域が湾の東側の一部海域を占める。さらにそれより下層では1.2~1.6mg/lとなり顕著な平面分形状はみられない。有機態リン(以下O-Pという)については、上層では湾奥の0.06mg/lから湾奥の0.03mg/lまで等濃度線がほぼ南北方向に分布するが、中、下層ではそれぞれ0.01~0.025mg/lおよび0.01~0.02mg/lの範囲にあり、平面分布形状は定かでない。一方、リン酸態リン(以下PO₄-Pという)は上層と下層で高く中層では低くなっている。上・下層でのPO₄-Pは、湾奥の0.06mg/lから神戸~泉佐野の0.02mg/lまで地形に沿った分布がみられるが、中層では湾全体で0.01mg/l前後となりほぼ一様化している。また、溶存酸素は上中層では6~8mg/lであるが、下層では湾奥で4~5mg/lとなり、一部海域では2mg/l以下の貧酸素水域がみられるようになる。こうした水質各項目の平面分布は、大阪湾の地形、流れ、および陸域からの栄養塩やCODの流入負荷によるところが大きい。すなわち、大阪湾では潮汐と地形、流入河川水その他の影響を受けて、湾の中・西部に右回りの大きな環流があり、湾奥から海岸線に沿って西向きと南西向きに流れる恒流によって各物質が移送される。陸域から流入するCODやリンの8割以上は湾奥部に集中しているため、水質各項目の分布は先に述べたような湾奥部高、湾口部

低の分布となる。さらに、大阪湾の底質分布も水質と同様に湾奥から湾口にわたって高から低への分布をする。泥層0～5cmの夏の測定例をみると、CODは大阪湾の東半分領域で高く30～45mg/g乾泥となっている。全リン（以下T-Pという）、全窒素（以下T-Nという）についても同様で、高濃度域は湾の中央以東に集中している。こうした底泥のCODや栄養塩濃度の高い領域では溶出速度や酸素消費速度も大きく、夏期のCODおよびリンの溶出速度は、陸域から流入する負荷の4割程度と見込まれ、海水中的の水質分布に対しても影響を及ぼし合っているものと思われる。したがって、大阪湾のような閉鎖性内湾における有機性汚濁の水質解析の精度を高めてゆくためには、水質と底質との相互の関係を明らかにし、これらを一体とした取扱いをとり入れていくのが今後の課題である。

3. リン酸態リンの挙動モデル

3.1 従来の取扱い

海域における有機性汚濁の水質解析手法として、一つの物質循環モデルをとりあげ、大阪湾のCODと栄養塩の分布を対象とした水質シミュレーションによって支配要因と再現性についての検討を既報¹⁾にて行った。このモデルにおいては、COD、および内部生産の制限因子として扱ったリンの底泥からの溶出を考慮している。しかし、これらの溶出速度は次式で示されるような関係式：

$$R_{\text{COD}} = 48.6 \times (1.04)^{T-8} / 22.6 \times M_{\text{COD}} \quad (3.1)$$

$$R_{\text{LP}} = \begin{cases} 10 \times (1.09)^{T-28} / 510 \times C_b \\ \quad (\text{DOM} > 5 \text{ mg/l}) \\ (40 - 6 \times \text{DOM}) \times (1.09)^{T-28} / \\ \quad 510 \times C_b (\text{DOM} \leq 5 \text{ mg/l}) \end{cases} \quad (3.2)$$

を用いている。ここに、 R_{COD} ：CODの溶出速度(mg/m²/日)、 T ：温度(°C)、 M_{COD} ：底泥のCOD濃度(mg/g乾泥)、 R_{LP} ：リン酸態リンの溶出速度(mg/m²/日)、 C_b ：底泥のT-P濃度(mg/g乾泥)、DOM：底泥直上水の溶存酸素濃度(mg/l)、である。

式(3.1)、(3.2)に示されるように、溶出速度は温度や底泥の濃度（リンにおいては溶存酸素量とも）をパラメータとしている。これらのパラメータは季節毎に固定して用いられている。ところが、たとえば式(3.2)のリンの溶出に関していえば、直上水の溶存酸素(DOM)や底泥のT-P濃度は上層の水質と深い関係があるはずであるが、この関係を無視した扱いとなっている。すなわち、計算される直上水の水質が溶出速度に作用を及ぼしていない。さらに、算出される沈降物からの溶出速度へ

の作用も考慮されていない。したがって溶出速度に季節変化を与える場合、または長期にわたる水質予測を行う場合などには、それらの条件に応じた溶出速度を測定、または別途予測して外生的に与える必要がある。

一方、平城・中西・浮田・河合⁴⁾は、富栄養化水域における水質シミュレーションにおいて、底質予測を行わないで水質予測を行うことは不合理であるとの考え方から、底泥と海水の間の窒素とリンの挙動の季節変化のパターン再現を試みている。このモデルにおいては、海水層が2層と底泥層が20層（底泥各層は20cmまたは10cm厚）から成り、窒素とリンの循環がとりこまれている。

底泥中において未分解の有機窒素を第一層にのみ与え、この分解によって生成するNH₄-Nが間隙水中に存在するとしている。一方リンは、間隙水中のPO₄-P、補給層のPO₄-P、酸素消費速度、溶存酸素および有機態リンの関係づけをしている。上層水においては植物プランクトンの生産、分解、呼吸も考慮しているが、海水層での水平方向の移送は無視された。海水層間の鉛直混合係数、O-Pの分解速度定数、プランクトンの生産速度定数などに季節変化を与え、 $\Delta t = 1$ 日のタイムステップで長期シミュレーションが行われた。間隙水NH₄-NやNH₄-Nの溶出速度の季節変化パターンは実例と同傾向のものが得られ、このモデルによるNに関する底質環境の再現予測は原理的に可能であることが示された。

また、筆者らは⁵⁾底泥からの栄養塩の溶出を、上述の平城らのモデルよりも簡略化した機構としてとらえ、栄養塩溶出の周年変化の挙動再現と、溶出抑制効果の評価手法の検討を行った。すなわち、ここでは溶出を、底泥による供給、消費、吸着、および間隙水中での鉛直方向の一次元拡散として各過程をモデル化した。対象栄養塩としてはNH₄-N、PO₄-Pをとりあげ、吸着は底泥厚1cmの第1層でPO₄-Pに対してのみ起ると考えた。西宮沖の底泥より得られた試料をもとに各パラメータを定め、 $\Delta T = 0.1$ 日のタイムステップで間隙水濃度と溶出速度の計算を行った。この結果、底泥表層の間隙水濃度と溶出速度の周年変化は比較的よく再現された。ただしこのモデルでは、底泥への新たな沈降物による影響は考慮していない。

したがって、有機性汚濁の進行した海域における水質解析のためには、上述モデルをさらに発展させた新生堆積物の影響もとり入れた底泥内間隙水中のリンの挙動モデルの開発が緊急の課題となった。

3.2 モデルの組立て

海域の富栄養化に影響を与える因子として、水温や照度などの物理的条件のほか、プランクトン体を構成す

海域底泥中のリンの挙動モデルについて

るすべての必須元素がその可能性をもっている。後者の化学的な条件に限ると、窒素、燐、炭素、鉄、マンガン、ビタミン類などが制限因子になりやすい。これらの元素のうち、鉄、マンガンは底泥から供給されるため、とくに窒素と燐の存在量が問題となる。この両者でいずれがより重要であるかは一概にはいえないが、より存在量の少ない方に支配されるといえる。前述の海域の水質分布特性からみて、本解析ではとりえず燐の挙動に着目することとした。

底泥中の燐挙動モデルの構築に当たり、つぎのような仮定と定式化を行った。

- 1) $PO_4\text{-P}$ の溶出 (R) は、底泥間隙水からの拡散により生ずる。
- 2) 底泥間隙水の $PO_4\text{-P}$ 濃度 (C_*) は、底泥有機物の微生物による分解溶存化による生成、泥粒子との吸脱着、および海水中への拡散 (溶出) により変化する。
- 3) 底泥より分解生成された $PO_4\text{-P}$ は、一定の分配率 (α) で間隙水および泥粒子 (吸着態として) に分配される。
- 4) 底泥における $PO_4\text{-P}$ 生成は、新生堆積物および

在来底泥中の O-P の分解により生じ、その速度は水温と底泥中の O-P 含有量に依存する。

- 5) O-P の堆積過程は、沈積する SS を媒体としてとられ、その SS は保存される。
- 6) 溶出に関係する一定泥深間で層を設定し、この層内で O-P、間隙水および泥粒子の $PO_4\text{-P}$ の分解、溶存化、吸脱着、拡散、さらに層間での攪乱と拡散による変化する。
- 7) 底泥直上の $PO_4\text{-P}$ は一定交換率で底層海水と交換する。

以上の仮定により組立てられる $PO_4\text{-P}$ 溶出モデルの物質の流れをブロックチャートで示すと図-1 のようになる。

また、各層の底質 O-P (OP_n)、底質 $PO_4\text{-P}$ (IP_n)、間隙水 $PO_4\text{-P}$ (C_*) および直上水 $PO_4\text{-P}$ (C_w) の濃度変化はつぎのような関係式で表すことができる。

第 n 層の O-P

$$\begin{aligned}
 OP_n^{t+\Delta t} - OP_n^t = & \{-r_n^t + DS \times (OP_{n-1}^t - OP_n^t) \\
 & \text{(分解)} \quad \text{(堆積)} \\
 & + DSL \times (OP_{n-1}^t - 2 \times OP_n^t + OP_{n+1}^t)\} \times \Delta t \\
 & \text{(攪乱)} \quad \text{(3.3)}
 \end{aligned}$$

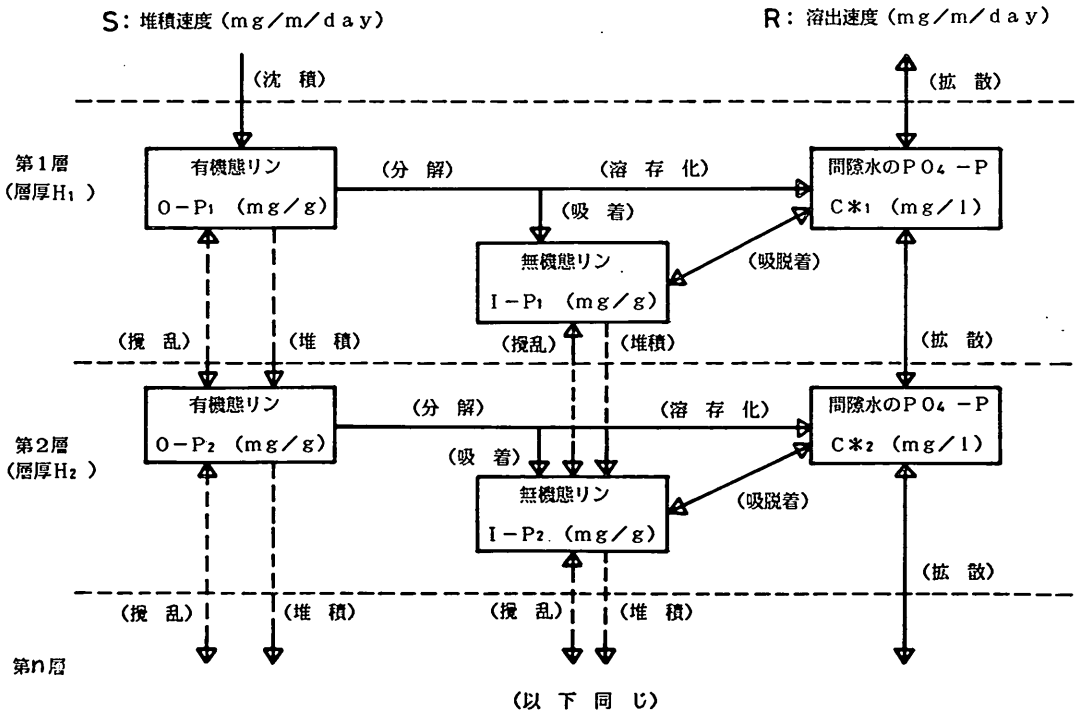


図-1 底泥内のリン挙動モデル

第 n 層の I-P

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

(I-P 分配)
(吸脱着) (堆積)
(攪乱)

(3.4)

直上水の C_w

$$C_w^{t+1} = (C_w^t + \frac{1}{1000} \times R^t \times \Delta t) \times DL \quad (3.7)$$

ここに、 DS : 堆積速度、 DSL : 攪乱係数、 D : 拡散係数、 ϕ : 乾泥間隙水比、 ϕ' : 間隙率、 D : 層厚、 α : 生成 PO_4 -P の吸着分配率、 q : 吸脱着速度、であり、各変数の肩字は時間 t 又は $t+1$ の値を、また脚字 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ はそれぞれ第 $n-1$ 、 n および $n+1$ 層の値を示している。

これらの式および係数については次章で述べる。

第 1 層の C_{*1}

$$C_{*1}^{t+1} - C_{*1}^t = \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_1 \alpha_1}} \times \frac{1}{\phi_1} \times r_1^t - \frac{1}{\phi_1} \times q_1^t + \left\{ \phi_1' \times D \times \frac{C_w^t - C_{*1}^t}{H_1/2} + \phi_1' \times D \times \frac{C_{*2}^t - C_{*1}^t}{(H_1 + H_2)/2} \right\} \times \frac{1}{H_1} \right] \times \Delta t$$

(吸脱着)
(間隙水分配)
(拡散)

(3.5)

4. 各過程の定式化

4.1 有効泥厚と層分割

PO_4 -P 溶出モデルの支配方程式は式 (3.3)~(3.7) に示した形で表すことができるが、これらの式に含まれる諸係数や条件については取扱う対象海域によって特性があるため、以後は大阪湾内の西宮沖 1 km の地点において得られている資料をもとに解析を行う。

まず、底泥からの PO_4 -P 溶出に対して、底泥がどの程度の厚さまで有効に作用しているかを把握する必要がある。図-2は大阪湾湾奥4地点で ϕ 200mm のアクリルパイプにより不攪乱採泥された底泥の溶出試験結果である。同図左は、25℃、嫌気状態で20日間の試験から測定ごとの溶出速度を示したもので、図中白抜きは底泥の表層30cm分、ハッチは泥深5cm~35cm層、黒は泥深50cm~80cm層の値である。これらの結果によると、泥深50~80cm層の底泥からの溶出は極めて小さく、これ以浅の底泥が溶出に大きく寄与していると思われる。

第 n 層の C_{*n}

$$C_{*n}^{t+1} - C_{*n}^t = \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_n \alpha_n}} \times \frac{1}{\phi_n} \times r_n^t - \frac{1}{\phi_n} \times q_n^t + \left\{ \phi_n' \times D \times \frac{C_{*n-1}^t - C_{*n}^t}{(H_n + H_{n-1})/2} + \phi_{n+1}' \times D \times \frac{C_{*n+1}^t - C_{*n}^t}{(H_{n+1} + H_n)/2} \right\} \times \frac{1}{H_n} \right] \times \Delta t$$

(吸脱着)
(間隙水分配)
(拡散)

(3.6)

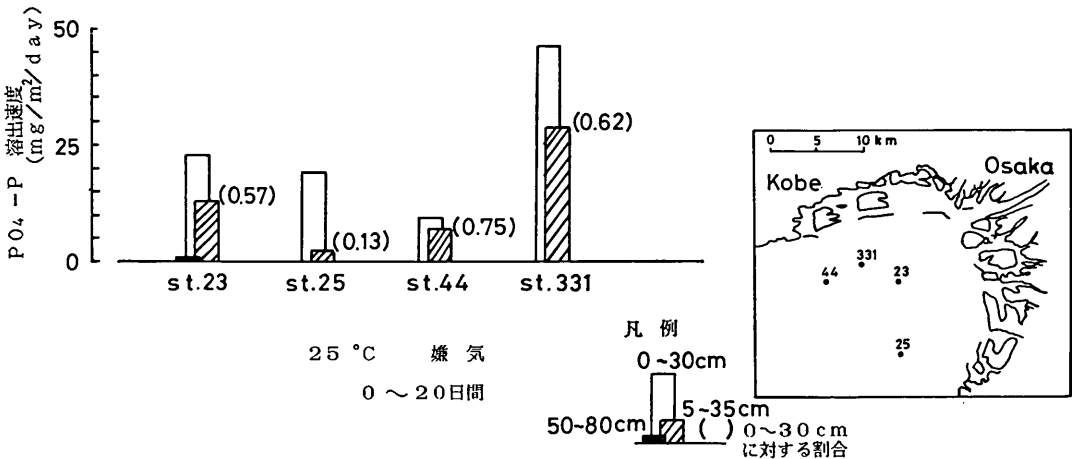


図-2 大阪湾湾奥底泥の PO_4 -P 溶出速度

一方、松本・横田⁶⁾が²¹⁰Pbの鉛直分布より求めた大阪湾の堆積速度は図-3に示すように湾奥部で0.18~0.61 cm/年の範囲にあり、平均0.41cm/年となっている。また、第三港湾建設局が実施した西宮防波堤沖の1/2水深における捕集沈降物量から算出した堆積速度は0.04~0.66cm/年で平均0.19cm/年であった⁷⁾。

以上の結果より、溶出に関する泥厚を60cmと設定した。この泥厚は上述の堆積速度からいくと100年またはそれ以上の期間にわたって堆積した泥質を対象とすることを意味する。

つぎに、底泥の鉛直分布構造は概念的に図-4のように表すことができる。すなわち、底泥表層の薄層部は沈降して間もない新生堆積物で構成され、含水率は高く、舞い上りや底面に沿った移動がある。T-Pの含有量とPO₄-Pの生成速度はともに大で、溶出に関して最も関係の

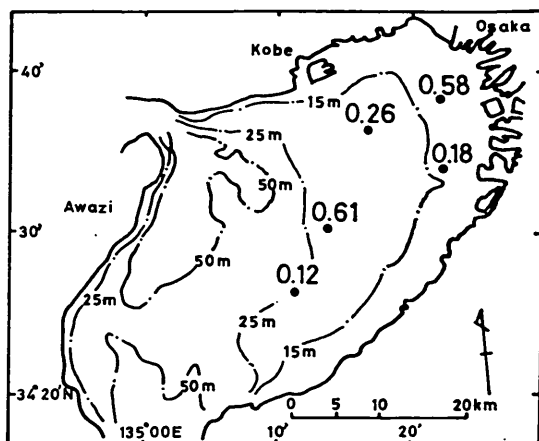


図-3 堆積速度の分布 (単位: cm/年)

項目	概念図	T-P含有量 (mg/g)	PO ₄ -P生成速度	堆積状況
新生堆積物 (浮泥)		3.2 大	大	舞い上がりによる混合あり
底泥上部	(上)	1.0 やや大	やや大	底生生物、波浪、漁業等の攪乱あり
	(中)	0.8 中	中	
	(下)	0.6 中	中	比較的安定
底泥下部	(上)	0.6 小	小	大きな鉛直移動なし
	(下)	0.4 小	小	

図-4 底泥の鉛直分布構造

深い層である。一方、底泥下部は長期間にわたる圧密を受ける含水率も鉛直的にはほぼ一定となり、大きな鉛直移動は起らない。T-P含有量は表層に比べて小さく、PO₄-P生成は小である。これら2層の中間に位置する層では含水比は底層に近くほぼ一定であり、下層部は比較的安定であるが、上層部では底生生物、波浪、漁業操業などによる攪乱を受ける。

前述の松本・横田⁶⁾による大阪湾底泥中の過剰²¹⁰Pb含有量の鉛直分布は図-5のように示されており、泥深8~30cmで不連続となり、この層が攪乱されているものと推定される。

また菊池⁸⁾は、ペントスによる底泥攪拌は種により異なるが、深さ20cm程度まで可能としている。その速度は

種々推定している。

以上の事実を総合して、本モデルでは泥深15cmまでが攪乱を受ける層とし、その速度は4年に一度の割合で完全に入れ代るものとした。

このように、溶出に対する有効泥厚60cmに対して、上層15cmの攪乱層と、下層45cmの不攪乱層に大別し、さらにこれら上下層をそれぞれいくつかの層に細分割した。この際、松本・横田が求めた大阪湾平均堆積速度0.41cm/年を参考に、表層第1層は1か年の堆積層として0~0.41cm層をとった。表層第2層については、これまで実測による資料蓄積の豊富な泥深5cmまでの層とした。泥深15cmまでの攪乱層にさらにもう一つの区割を設け第3、第4層とした。泥深15cmから60cmまで

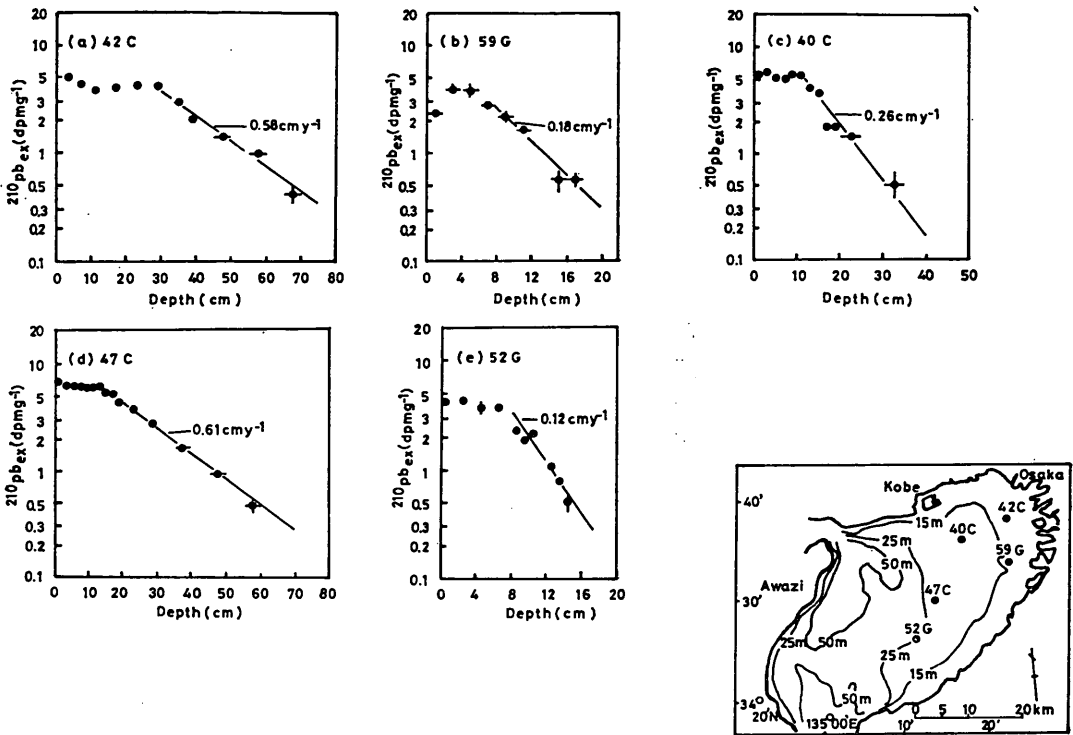


図-5 過剰²¹⁰Pbの鉛直分布(松本・横田, 1978)

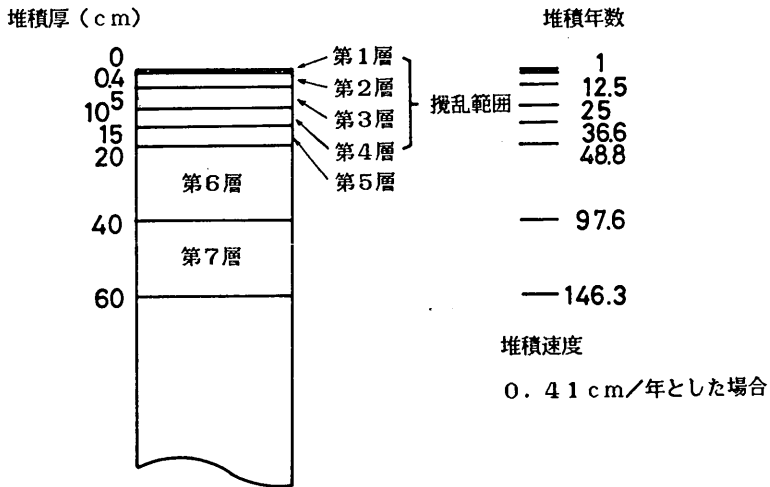


図-6 底泥の層分割

の不攪乱層については、泥深20cmと40cmに区割を設け、順次下方に第5層、第6層、および第7層とした。図-6はこれらの層分割を示したものである。松本・横田

の堆積速度0.41cm/年より各層の堆積年数を換算すると、上層よりそれぞれ1年、12.5年、25年、36.6年、48.8年、97.6年、146.3年となる。

以上の7層に対して式(3.3)~(3.7)で示される物質の収支計算よりPO₄-P 溶出過程の解析を行う。

4.2 沈降と堆積

沈降物の堆積速度と沈降量との関係はつぎのように表すことができる。

$$T = S \times \frac{1}{\text{含泥率}} \times \frac{1}{\text{単位体積重量}} \times 10^{-4} \times 365 \quad (4.1)$$

ここに、 T ：堆積速度 (cm/年)、 S ：沈降量 (SS, g/m²/日)、である。

式(4.1)に対して、含泥率29%、単位体積重量1.12 g/cm³、および前述の大阪湾の堆積速度(T)0.41cm/年を代入すると、沈降量 S は3.9gSS/m²/日と算出される。

一方、 t 日目の沈降量を ΔS_t 、第1層の t 日目における現存量を S_{1t} 、第1層の許容量を TS_1 とすれば、層内現存量はつぎのようにして算出される(図-7参照)。

$$\left. \begin{aligned} S_{1t} &= S_{1t-1} + \Delta S_t && (S_{1t} < TS_1 \text{ の場合}) \\ S_{1t} &= TS_1 \\ \Delta S_t' &= \Delta S_t - (S_{1t} - S_{1t-1}) && (S_{1t-1} + \Delta S_t \geq TS_1 \text{ の場合}) \\ \Delta S_t' &= S_{1t} + \Delta S - TS_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

第2層以降についても同様とする。

なお、堆積厚として関係するのはSSとする。O-P、I-Pは、後述するように、このSSに含まれて移動し、これらの含有量は分解と吸脱着により変化するものとし

て取扱う。

4.3 PO₄-P の生成

(1) 新生堆積物からの PO₄-P 生成速度

底泥における PO₄-P 生成はおもに微生物の有機物分解によるものと考えられる。本モデルでは、この機構を図-8に示すようにモデル化した。すなわち、PO₄-P 生成速度は底泥中の O-P 含有量に応じて起ると考え、前掲図-4に示された底泥の性状を考慮して、第1層に対しては新生堆積物からの生成(r_F)を、また第2層から第4層に対しては既存底泥からの生成(r_S)のみをそれぞれとりあげた。底泥からの PO₄-P 生成、SSおよび O-P を時間との関係で概念的に示すと図-9のようになる。図-9において、左から右方向に時間経過を表す。破線で示す SS (これは保存量で時間的に増減しない) 中に含まれる O-P は分解による PO₄-P 生成によって時間とともに減少していく。これに応じて PO₄-P 生成速度も小さくなる。

まず、新生堆積物からの PO₄-P 生成速度については、試水中の O-P 濃度の減少は SS 中の O-P 含有量の減少によると仮定し、水中有機物の分解実験から得られた分解速度定数と、実験に用いた試水の O-P/SS 比からつぎのようにして求めた。

すなわち、分解速度定数を μ とすると、1日間に溶出化する PO₄-P 量 (A) は次式により算出される。

$$A = P_0 - P_1 = P_0 \times (1 - e^{-\mu \times 1}) \quad (4.3)$$

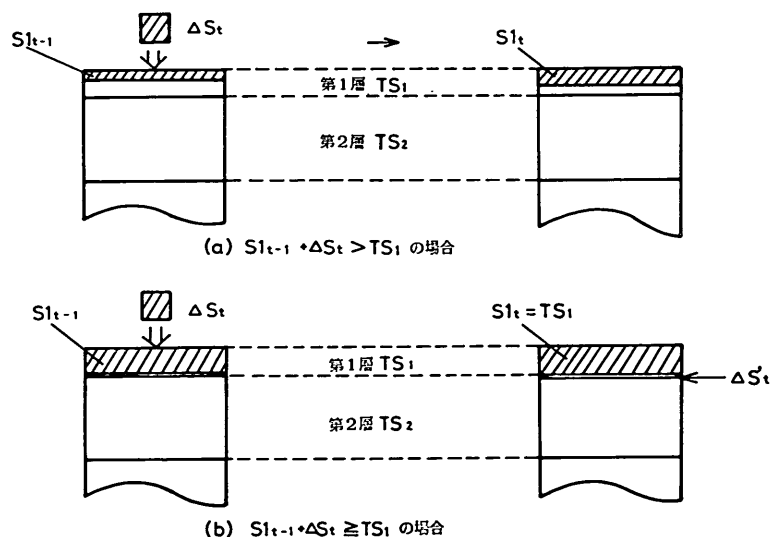


図-7 SS 現存量の算定法


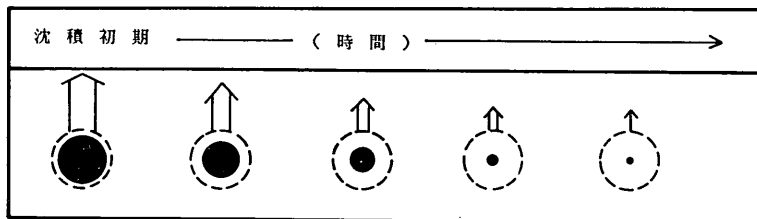
項目	概念図	T-P含有量 (mg/g)	O-P含有量 (mg/g)	PO ₄ -P 生成速度	PO ₄ -P生成速度のO-P依存形
新生堆積物 (浮泥)		3.2 大	3.2 大	大	r _F で表現
底泥上部	(上)	1.0 中	0.45 中	中	r _S で表現
	(中)				
	(下)				
底泥下部	(上)	0.6 小	0.25 小	小	同上
	(下)				

図-8 PO₄-P 生成層






-  SSまたは 乾泥 全体の量
-  O-P 量
-  PO₄-P 生成速度

図-9 O-P 分解と PO₄-P 生成の概念

P₀: 初期O-P 濃度 mg/l

P₁: 1日後のO-P 濃度 mg/l

式(4.3)により得られるAをSS濃度(g/l)で除せば, SS 1g当りのPO₄-P生成速度が得られる。

図-10は, 第三港湾建設局が海域17試料, 河川域4試料について上述方法により求めたPO₄-P生成速度を実験を用いた試水のO-P/SS比に対してプロットしたものである^{9),10),11),12)}。海域下層は7と少ないが, 1次回歸曲線は

$$Y = 0.017 \times (X - 0.016) \quad (4.4)$$

となる。

一方, 同試料によるPO₄-P生成速度の水温依存特性は片対数グラフで図-11に示すようになり, 調査年度ごとの上・下層に対して回歸式を求めると同図右に示したようになる。水温補正項の1.03~1.06に対してほぼ平均

となる1.05を採用すれば, 式(4.4)と合わせて新生堆積物からのPO₄-P生成速度(r_F)はつぎのように表すことができる。

$$r_F = 0.017 \times (OP/SS - 0.016) \times 1.05^{T-25} \quad (4.5)$$

ここに, O-P/SS: 沈降物1g当りのO-P量(mgP/gSS) T: 水温(°C)である。

つぎに, 既存底泥からのPO₄-P生成速度(r_S)は, 室内における底泥の20日間培養により, 間隙水中のPO₄-P濃度変化から次式を用いて算出した。

$$r_S = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{w}{V_d} \times \frac{1}{1-w} \times \frac{1}{1000} \quad (4.6)$$

ここに, ΔC/Δt: 間隙水中のPO₄-P濃度変化(mg/l/日), r_S: 乾泥1g当りのPO₄-P生成速度(mg/g乾泥/日), w: 含水率, V_d: 単位体積重量(g/cm³), である。

式(4.6)を用い, 底泥表層0~5cm, 同10~15cmお

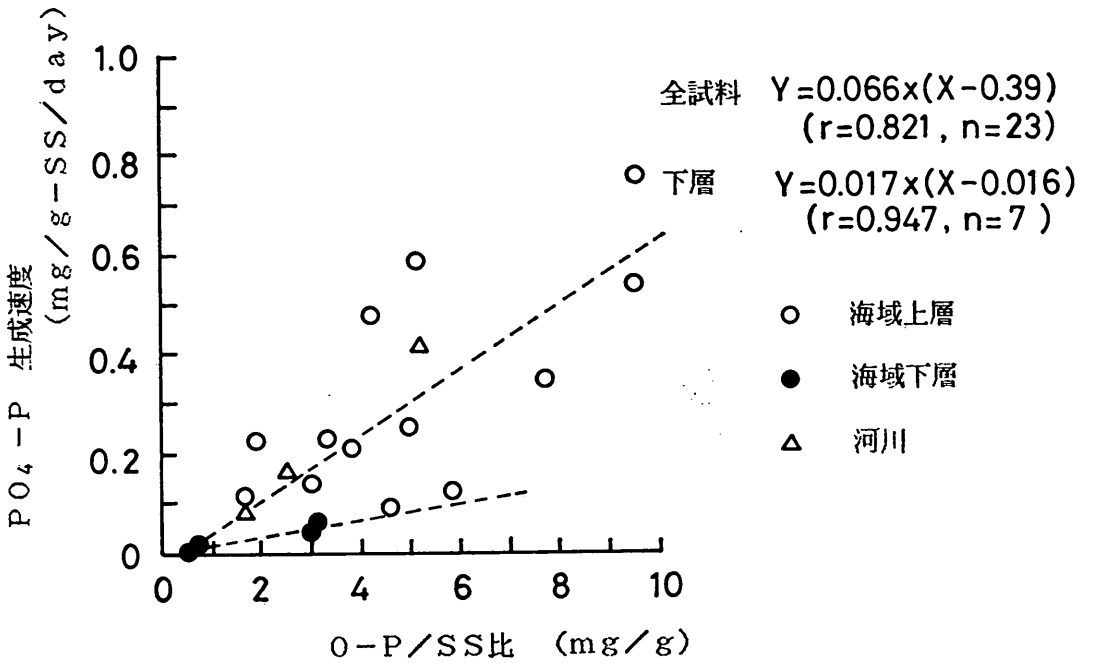


図-10 水中有機物による PO_4 -P 生成速度 (25°C)

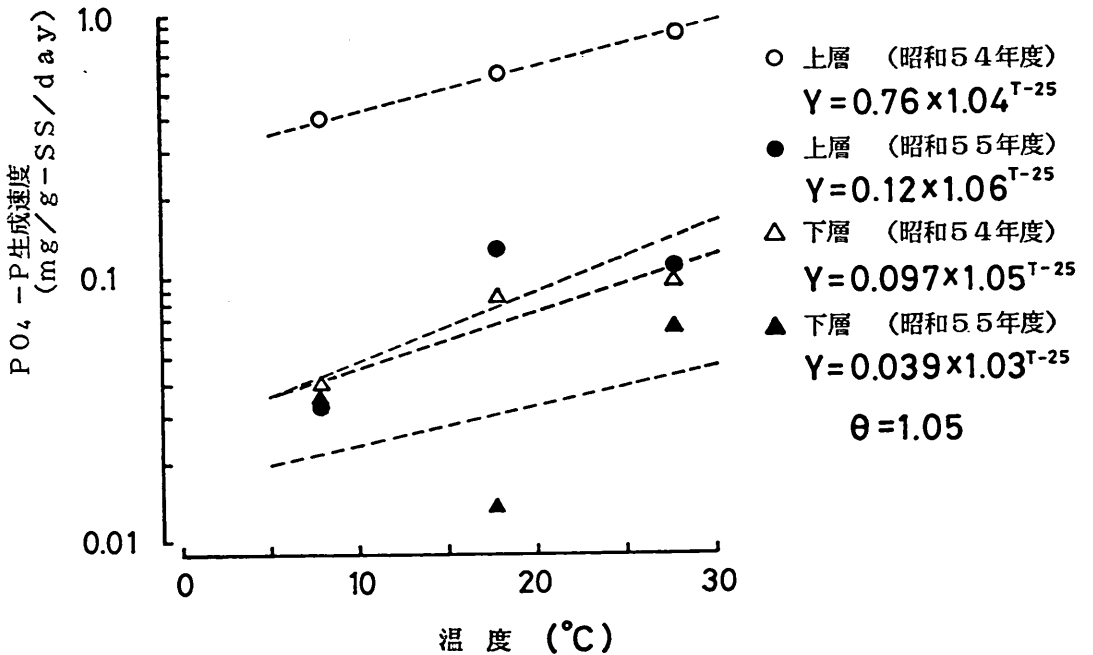


図-11 水中有機物による PO_4 -P 生成速度の温度依存性

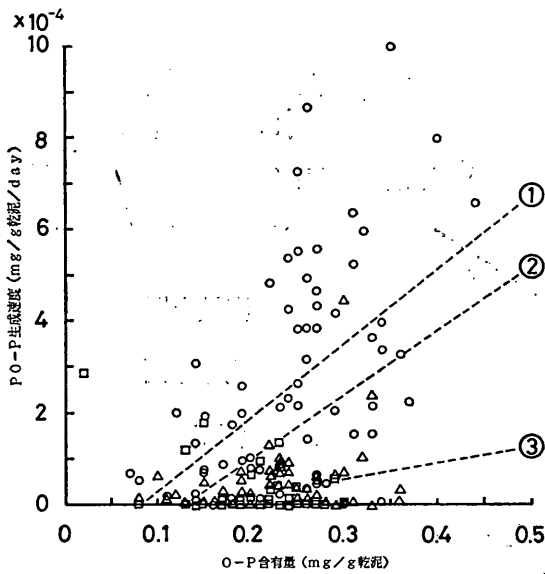


図-12 底泥のO-PとPO₄-P生成速度

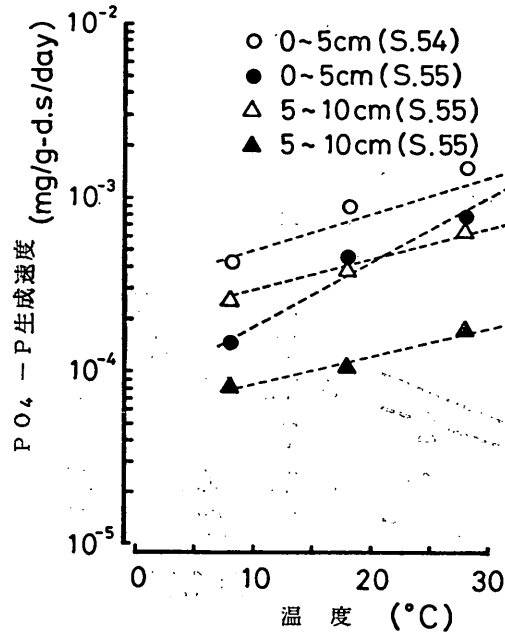


図-13 底泥におけるPO₄-P生成速度の温度依存性

および30~35cmの25°C一定条件下で行われた培養試験結果から r_s を算出して試料泥のO-P含有量に対しプロットすると図-12のようになる¹³⁾。各層ごとの一次回帰線、0~5cm層と10~15cm層とを合わせたもの、および10

~15cm層と30~35cm層を合わせたものの一次回帰線は同図中に示したようになる。

一方、水温依存性についても図-13のような結果が得られており、水温補償係数は平均1.06である。したがって既存底泥からのPO₄-P生成速度は各層別につきのように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} r_s &= 0.0016 \times (\text{OP/SS} - 0.08) \times 1.06^{T-25} && (0 \sim 5 \text{ cm 層}) \\ r_s &= 0.0014 \times (\text{OP/SS} - 0.13) \times 1.06^{T-25} && (5 \sim 10 \text{ cm 層}) \\ r_s &= 0.00035 \times (\text{OP/SS} - 0.14) \times 1.06^{T-25} && (10 \text{ cm 以深}) \end{aligned} \right\} (4.7)$$

ここに、OP/SS：底泥のO-P含有量(mg/g), T ：水温(°C)である。

4.4 生成PO₄-Pの吸着と溶存化

底泥有機物が分解して生成するPO₄-Pは、一部は間隙水中に溶存化され、残りは泥粒子に吸着すると仮定する。いま、 Δt 時間において、生成速度 r のPO₄-Pの間隙水PO₄-P濃度増加 ΔC_* 、および底泥への吸着によるI-P濃度増加 ΔIP とすると、つぎの関係が成立つ。

$$r \times \Delta t = \Delta IP + \phi \cdot \Delta C_* \quad (4.8)$$

ここに、 C_* ：間隙水中のPO₄-P濃度(mg/l), IP ：底泥のI-P含有量(mg/g), ϕ ：底泥間隙水比(l/g), r ：PO₄-P生成速度(mg/g/日), t ：時間, である。

一方、上述の溶存 C_* と吸着I-Pとの分配係数 α をつぎのように設定する。

$$\alpha = \frac{C_*}{IP} \quad (4.9)$$

式(4.9)を式(4.8)に用いると、

$$\Delta IP = \frac{\frac{1}{\phi \alpha}}{1 + \frac{1}{\phi \alpha}} \times r \times \Delta t \quad (4.10)$$

または

$$\Delta C_* = \frac{1}{1 + \frac{1}{\phi \alpha}} \times \frac{1}{\phi} \times r \times \Delta t \quad (4.11)$$

となる。

式(4.9)で表される分配係数 α の鉛直分布の一例が図-14のように得られている。表層0~10cmで鉛直変化が大きく、温度や溶存酸素に依存するようと思われる。まず、温度変化に対する α の変化は、図-14の硫化物含有量の少ない深さ80cm層における分布よりつぎのようにして求めることができる。

$$\alpha = \alpha_{20} \times \theta^{T-20} \quad (4.12)$$

ここに、 α : $T^{\circ}\text{C}$ における分配係数である。

図-14より、 $\alpha_{20} \approx \alpha_{21.1} = 6.07 \text{ (g/l)}$ 、および、 $\alpha_{11.2} = 4.92 \text{ (g/l)}$ であるから、式(4.12)に代入して $\theta = 1.02$ が得られる。

また、大阪湾内底泥(温度いずれも 20°C)の $0 \sim 5 \text{ cm}$ 層における分配係数 α を、海底上 $0.2 \sim 2 \text{ m}$ のDO値に対してプロットすると図-15のようになる。これら全点の回帰式を求めると、

$$\alpha_{20} = 11.5 \times 0.748^{\text{DO}} \quad (4.13)$$

が得られる。

上述の式(4.12)、式(4.13)より、表層 $0 \sim 5 \text{ cm}$ の底泥の α に対しては、

$$\alpha = 11.5 \times 0.748^{\text{DO}} \times 1.02^{T-20} \quad (4.14)$$

とし、また 5 cm 以深については図-14より $\alpha = 6.1 \text{ g/l}$ の一定値を与えた。

分配係数 α は、表層においては温度やDOの変化によって変わるため、間隙水と泥粒子との間でこれを満すよ

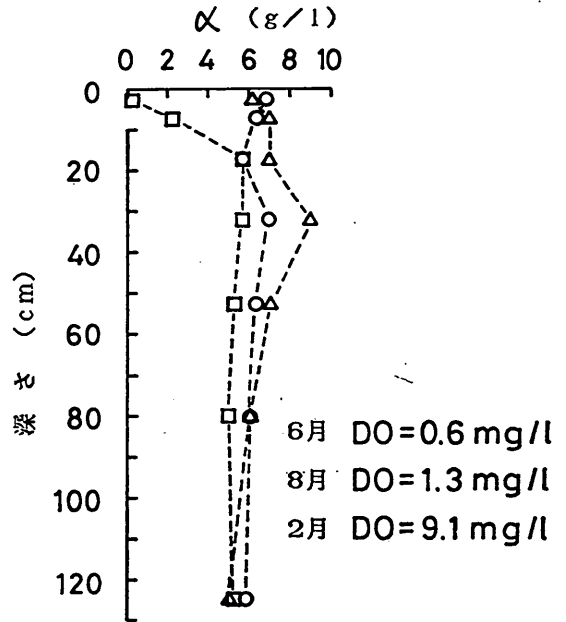


図-14 分配係数の鉛直分布

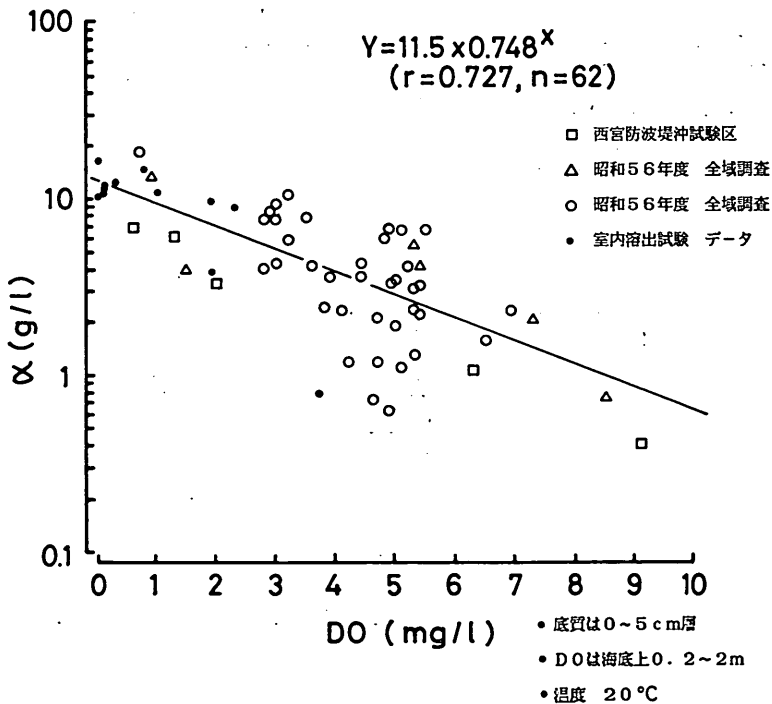


図-15 分配係数と DO

うに吸着量が Q だけ変化するとすれば、つぎの関係が成立しなければならない。

$$\frac{C_* - \frac{Q}{\phi}}{IP + Q} = \alpha \quad (4.15)$$

すなわち、

$$Q = \frac{\frac{C_*}{\alpha} - IP}{1 + \frac{1}{\phi\alpha}} \quad (4.16)$$

である。

ここに、 Q ：吸着量 (mg/g) である。

式 (4.15) (または式 (4.16)) で表されるような吸着平衡に達するまでの時間は、河川底質に対して十数時間を要することが報告されている¹⁴⁾。したがってここでは吸着平衡に達する日数を1日として吸着速度(q)をつぎのように表した。

$$q = \frac{1}{d} \times Q = \frac{\frac{C_*}{\alpha} - IP}{1 + \frac{1}{\phi\alpha}} \quad (4.17)$$

ここに、 q ：吸着速度 (mg/g/日)、 d ：平衡吸着速度に達する時間 (日)、である。

4.5 底泥中の物質の移動

(1) O-P の移動

沈積したSSのO-P含有量は、4.3で述べたように分解により次第に低下し、底泥のO-P鉛直分布を規定していく。底泥攪乱のない下層部において、沈降物、底泥中のO-P、SS、 PO_4 -P生成速度などの時間変化の算定は、図-16に示すようにつぎの方式により行う。

すなわち、計算のスタート第1日目において、沈降量を ΔS_1 とすれば、底泥O-P存在量(P_1):

$$P_1 = OP \cdot \Delta S_1$$

底泥SS存在量(S_1):

$$S_1 = \Delta S_1$$

PO_4 -P生成速度(r_1):

$$r_1 = f(P_1/S_1, T_1)$$

と表せる(式(4.7)参照)。ここに、 T :温度、 OP :沈降物のO-P含有量である。

つぎに第2日目において、沈降量を ΔS_2 とすれば、底泥O-P存在量(P_2):

$$P_2 = P_1 - r_1 \times S_1 + OP \times S_2$$

底泥SS存在量(S_2):

$$S_2 = S_1 + \Delta S_2$$

PO_4 -P生成速度(r_2):

$$r_2 = f(P_2/S_2, T_2)$$

と表せる。

同様に、第 n 日目の沈降量を ΔS_n とすれば、 P_n 、 S_n 、 r_n はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} P_n &= P_{n-1} - r_{n-1} \times S_{n-1} + OP \times \Delta S_n \\ S_n &= S_{n-1} + \Delta S_n \\ r_n &= f(P_n/S_n, T_n) \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

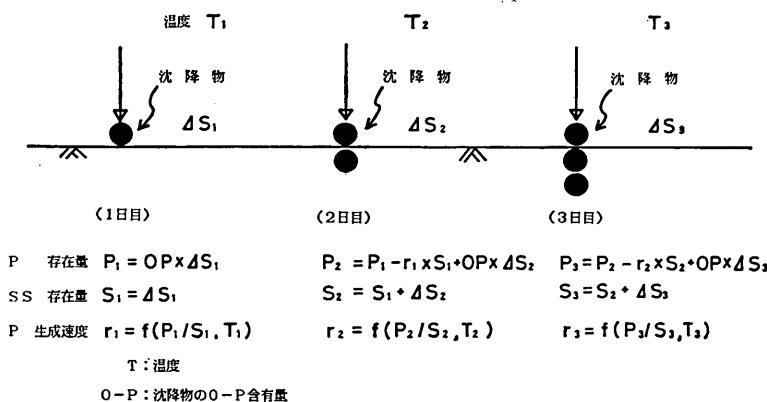


図-16 沈降SS, Pおよび生成 PO_4 -Pの算定法

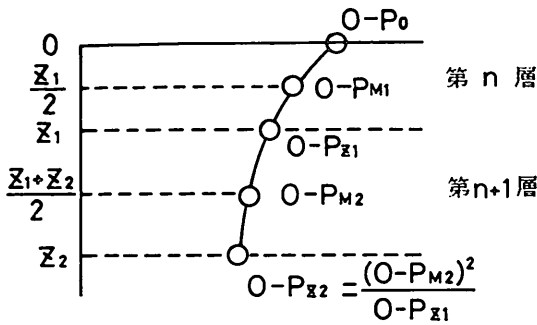


図-17 層境界のO-P算定法

と表せる。

4.1で述べたように、泥深15cm以深の底泥は沈積後攪乱を受けないと仮定すると、O-P含有量の鉛直分布は主として有機物の分解に起因するものとし、指数的に減衰するものとする(図-17参照)。

$$OP_{z+\frac{H}{2}} = OP_{z-\frac{H}{2}} e^{-hH} \quad (4.19)$$

ここに、 $OP_{z+\frac{H}{2}}$: 深さ $z+\frac{H}{2}$ (cm) のOP含有量, $OP_{z-\frac{H}{2}}$: 深さ $z-\frac{H}{2}$ (cm) のOP含有量, H : 層厚 (cm), である。

いま、各層の平均O-P含有量 OP_M がその層厚の1/2深度にあるとすれば、

$$OP_M = OP_{z-\frac{H}{2}} e^{-\frac{hH}{2}} \quad (4.20)$$

と表せる。したがって式(4.19), (4.20)を用いると、不攪乱層の下部境界O-P濃度 $OP_{z+\frac{H}{2}}$ は、同層の上部境界O-P濃度 $OP_{z-\frac{H}{2}}$ および層平均O-P濃度 OP_M によりつぎのようにして求めることができる。

$$OP_{z+\frac{H}{2}} = \frac{(OP_M)^2}{OP_{z-\frac{H}{2}}} \quad (4.21)$$

これに対し、泥深15cm以浅の攪乱層については、各層の中ではO-P含有量は鉛直的に一様分布しているとし、攪乱による層間移動には各層の平均値を用いることとした。

I-Pの移動についても、泥深15cm以深と以浅に対してO-Pと同様の取扱いをした。

(2) 拡散と溶出

間隙水 PO_4-P の層間の拡散は式(3.5), (3.6)に示されるように鉛直濃度勾配により移動する通常形で表した。また底泥からの PO_4-P 溶出 (R) は、底泥表面から海水中への拡散としてつぎのような形で表した。

$$R = \phi' \times D \times \frac{C_{*1} - C_w}{H_1/2} \times 10^3 \quad (4.22)$$

ここに、 R : PO_4-P 溶出速度 (mg/m²/日), ϕ' : 間隙率, D : 拡散係数 (m²/日), C_{*1} : 第1層の間隙水の PO_4-P 濃度 (mg/l), C_w : 直上水の PO_4-P 濃度 (mg/l), H_1 : 第1層の層厚, である。

0~30cm層, 50~80cm層, および100~130cm層の底泥について、25°C室内溶出試験で得られた溶出速度 (R) と

$$\frac{\phi' \times (C_{*1} - C_w)}{H_1/2} \times 10^3$$

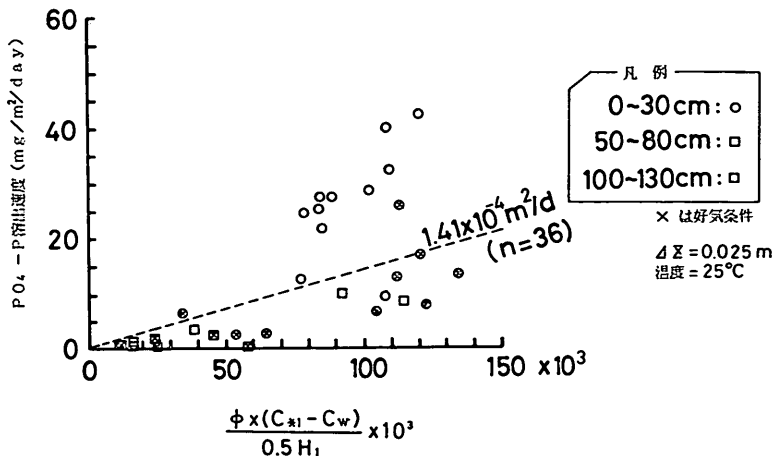


図-18 拡散係数

との関係を図示すると 図-18 のようになる。この結果から 25°C での拡散係数 $D_{25}=1.41 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{d}$ が得られる。

一方, Li and Gregory¹⁵⁾ は各種陰陽イオンの分子拡散係数に対する温度依存性を $1.03T^{-25}$ で与えている。本モデルにこれを適用すると, 任意の温度 T のもとでの拡散係数 D_T (m^2/d) は

$$D_T = 1.41 \times 10^{-4} \times 1.03T^{-25} \quad (4.23)$$

と表すことができる。

式 (3.5), (3.6) の拡散項において, 最下層の第7層ではその層以深の底泥との拡散はないものとした。また, 式 (3.7) で表される直上水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は, 直上水厚さを 1 m とし, それ以浅の海水との希釈係数を 0.95 として計算した。

(3) 攪乱

4.1 で述べたように, 底泥上部の第1層から第4層までの泥深 15cm 以浅の領域では波浪, 流れ, 底生生物, その他による攪乱を受ける層とし攪乱係数 DSL をつぎのように定義した。

$$T = DSL \times C_{SS} \times \frac{1}{L} \quad (4.24)$$

ここに, T : SS 移動量 ($\text{g-SS}/\text{m}^2/\text{日}$), DSL : 攪乱係数 ($\text{m}^2/\text{日}$), C_{SS} : 底泥中の SS 濃度 ($\text{g-SS}/\text{m}^3$), L : 移動距離 (m), である。

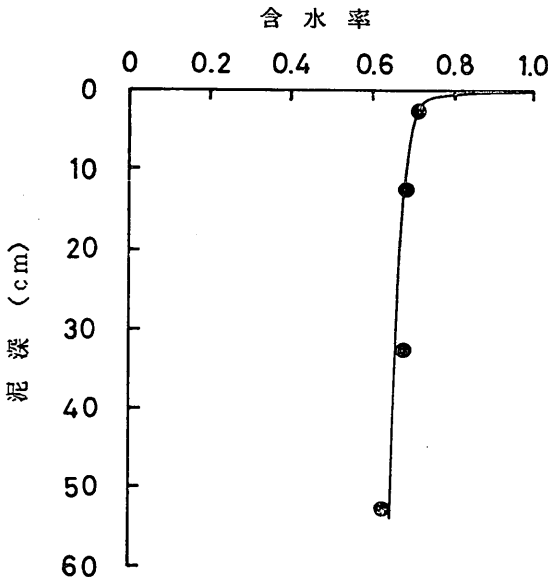


図-19 含水率の鉛直分布

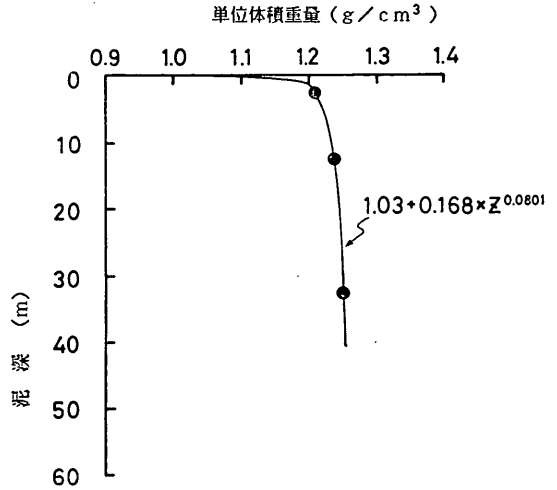


図-20 単位体積重量の鉛直分布

いま, 深さ 15cm までの底泥の物理性状を一定とすると, その 1/2 に相当する 7.5cm 層に存在する SS が 4 年間にわたる 15cm 移動すれば, その層内の底泥は完全に攪乱されることになる。このことから, 式 (4.24) により,

$$DSL = 3.4 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{日}) \quad (4.25)$$

が得られる。

4.6 含水率と単位体積重量

西宮沖 (測点26, 昭和57年度大阪湾汚染実態調査¹³⁾) における底泥の含水率 (w) および単位体積重量 (V_d) の鉛直分布はそれぞれ 図-19, 図-20 のように得られている。底泥表面 ($z=0$) において w および V_d がそれぞれ 1.0, 1.03 g/cm^3 となり, かつ z の指数べきで表されるものと仮定してつぎのように与えた。

$$\left. \begin{aligned} w &= 1 - 0.268 \times z^{0.0689} \\ V_d &= 1.03 + 0.168 \times z^{0.0801} \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

5. 数値シミュレーション

5.1 計算条件

西宮防波堤沖において取得されたデータをもとに, 間隙水の $\text{PO}_4\text{-P}$, O-P , 堆積厚, $\text{PO}_4\text{-P}$ 生成速度, 同溶出速度等の計算を行った。

本海域の底上 1 ~ 1.5m 層で捕集された沈降物の P 含有量は 0.41 ~ 3.2 mg/g の範囲にあり, 平均 1.9 mg/g であった⁵⁾。しかしながら, 底層付近の捕集沈降物には,

分解が進んでP含有量が低くなった浮泥の舞い上りによる影響があるものと推定され、海水から底泥に供給される真の新生堆積物中のPより低い値を示すものと思われる。このため、舞い上りの影響が少ないと考えられる1/2水深における沈降物のP含有量、その沈降速度および分解速度とを考慮して、底泥に到達する新生堆積物のP含有量をつぎのようにして算定した。

まず、図-21に示されるように全水深15mの1/2水深、すなわち、7.5m水深における沈降物中のP含有量は、10回測定から2.0~14.1mg/gの範囲で得られ、平均は6.2mg/gであった。沈降物のP含有量の鉛直分布は、沈降する間の分解による減少によるものと考え、捕集層間の距離、両層でのP含有量比および分解速度定数から沈降物の沈降速度は0.08~1.7m/日となり、平均0.51m/日であった。したがって、残り1/2水深(7.5m)を沈降して底泥面に達するまでの時間は約15日となる。

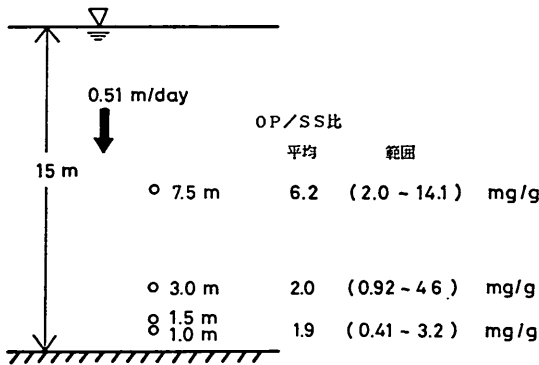


図-21 沈降物中のP含有量

また、O-P含有量が6.2mg/gの沈降物の分解速度定数は、年平均水温17.7°Cとすれば0.0451/日となる。したがって、海底に達する新生堆積物中のPは約3.2mg/gと推定される。

一方、年間4g/m²の溶出速度を持続し、底泥下層のT-Pが0.4mg/gとなり溶出に寄与しなくなるとすれば、SS沈降量3.9g/m²/日(堆積速度0.41cm/年に相当)の場合、新生堆積物のP含有量xは次式より求められる。

$$\left. \begin{aligned} (x-0.4) \times 3.9 \times 365 &= 4 \times 1000 \\ x &= 3.2 \text{ mg/g} \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

以上の結果から、沈降物のP含有量は3.2mg/gとする。

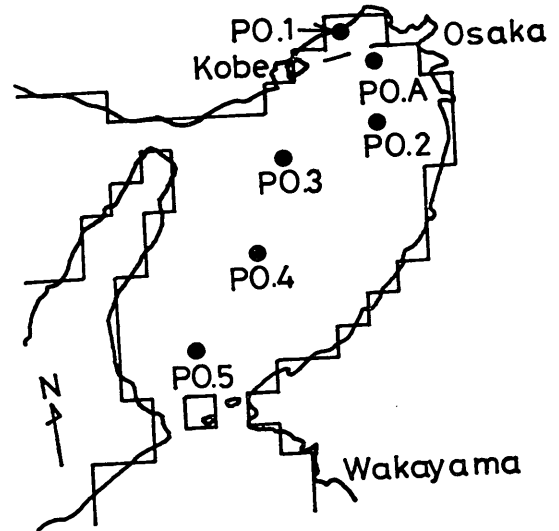


図-22 経時変化検査点

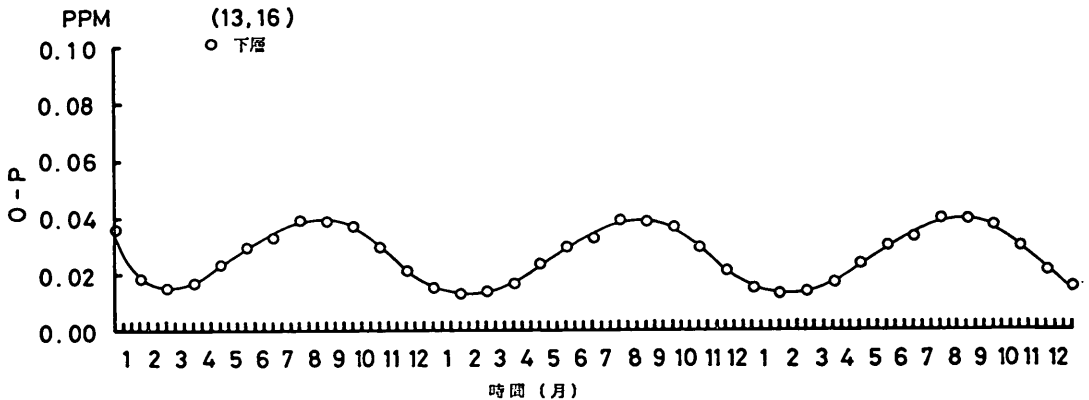


図-23 Po. A (図-22) におけるO-P変化

表-1 Pt.AにおけるO-P濃度 (単位g/m³)

項目 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
O-P濃度	0.015	0.013	0.014	0.017	0.024	0.030	0.033	0.039	0.039	0.037	0.029	0.021	0.026

表-2 Pt.AにおけるO-P沈降量 (単位: mgP/m²/day)

項目 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
OP沈降量	6.9	6.0	6.4	7.8	11.0	13.8	15.2	17.9	17.9	17.0	13.3	9.7	11.9

表-3 おもな計算条件

項目	係数	備考
沈降物のO-P/SS比	3.2mg-P/g-SS	
沈降量	3.9g-SS/m ² /day	含泥率0.29, 単位体積重量を1.21g/cm ³ とすれば0.41cm/yearの堆積速度に相当
浮泥の分解速度	$r_F = 0.017 \times (O-P/SS - 0.016) \times (1.05)^{T-25} \text{mg-P/g-SS/day}$	T: 水温(°C)
在来泥の分解速度	$r_S = 0.0013 \times (O-P/SS - 0.11) \times (1.06)^{T-25} \text{mg-P/g-SS/day}$	T: 水温(°C)
第1層厚	0.4cm	約1年分の堆積厚に相当
分配係数	$12.4 \times 0.745^{DO} \text{g/l}$	DO: 直上水のDO濃度(mg/l)
拡散係数	$1.4 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{day}$	$1.6 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$ に相当
攪乱係数	$3.4 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{day}$	4年に1度, 深さ15cmの底泥を掘り返す速さに相当

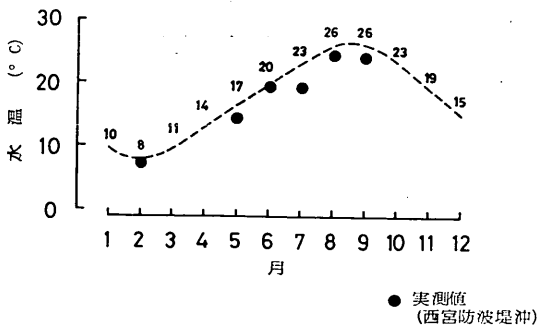


図-24 西宮防波堤沖の水温変化

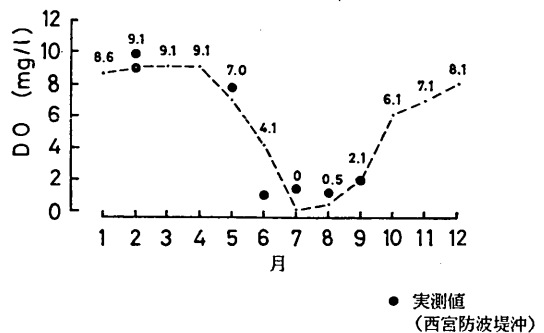


図-25 西宮防波堤沖のDO変化

したがって、海底へのO-P供給速度は年平均約12mg/m²/日となる。

つぎに、海底へのP供給速度の季節変化は、下層水のO-P濃度に一定の沈降速度を乗じることにより与えるこ

ととする。下層水のO-P濃度は、メッシュモデルによるPt.A(図-22参照)における現況計算結果を用いることとすると、その変化は図-23または表-1に示すとおりである。これらの結果よりO-Pの平均濃度は0.026g/m³

海域底泥中のリンの挙動モデルについて

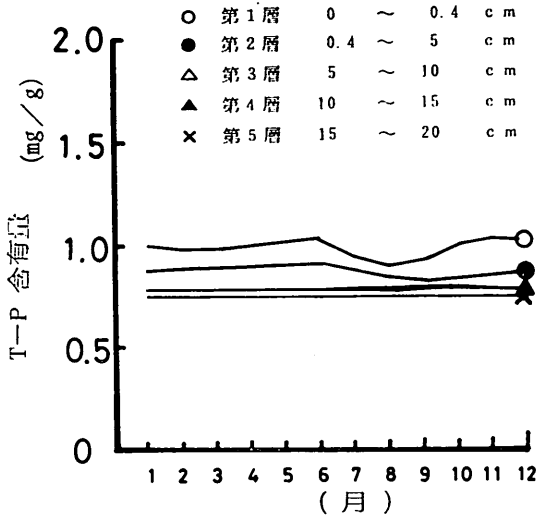
であり、 $12\text{mg}/\text{m}^2/\text{日}$ の供給量を得るためには、 $0.46\text{m}/\text{日}$ の沈降速度を与えればよいことになる。このようにして、底泥へのO-P供給量の季節変化を表-2のように設定することができる。

水温およびDOについては西宮防波堤沖においてそれぞれ図-24、図-25のように得られている。これらの結果から、計算においては各月の始めの値を図中に示した数

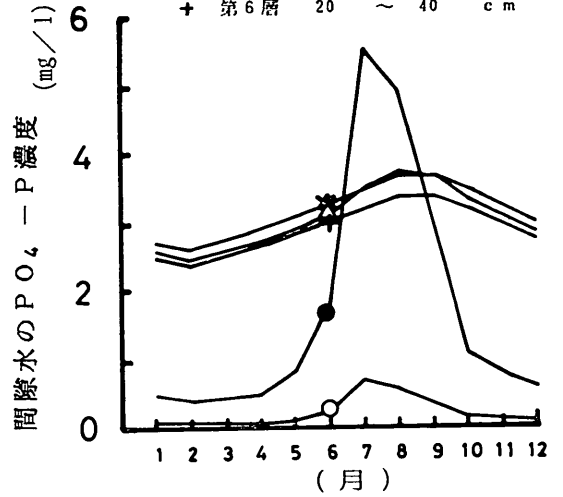
に設定した。

以上述べた計算条件または諸係数の取扱いのおもなものをまとめると表-3のようになる。

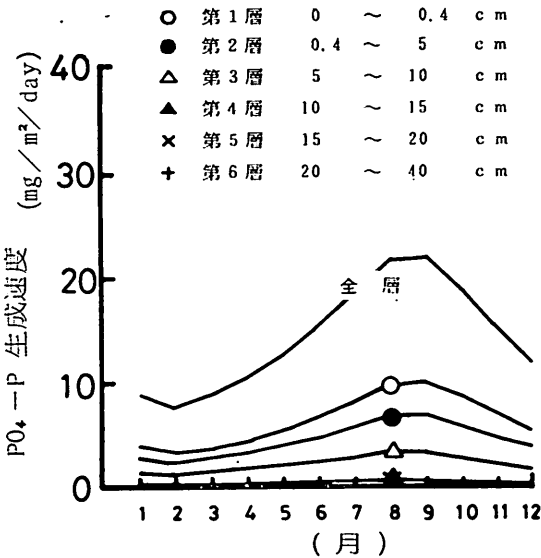
○	第1層	0	~	0.4	cm
●	第2層	0.4	~	5	cm
△	第3層	5	~	10	cm
▲	第4層	10	~	15	cm
×	第5層	15	~	20	cm
+	第6層	20	~	40	cm



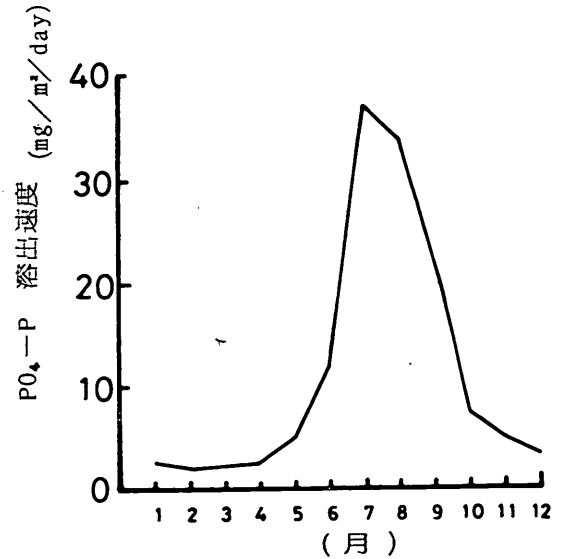
(1) T-P 含有量



(3) $\text{PO}_4\text{-P}$ 生成速度



(2) 間隙水の $\text{PO}_4\text{-P}$



(4) $\text{PO}_4\text{-P}$ 溶出速度

図-26 擬定常状態におけるリンの鉛直分布、間隙水濃度および溶出速度

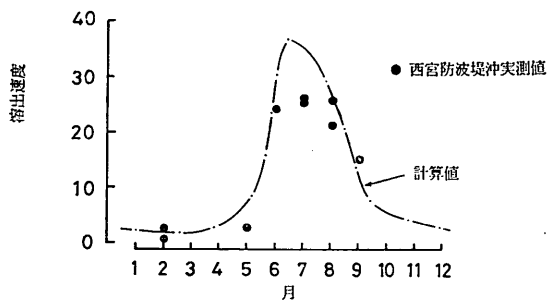


図-27 溶出速度の年周変化

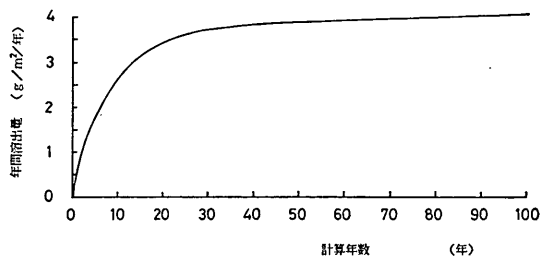
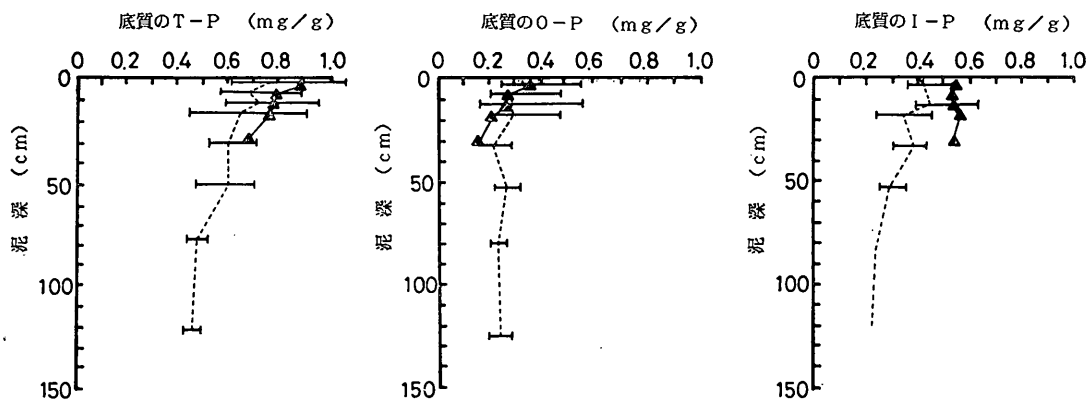


図-28 年間溶出量(計算値)



▲ 計算値
△ 西宮防波堤沖実測値
点線は平均値

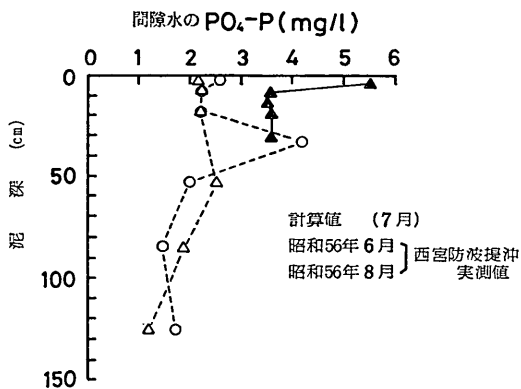


図-29 底質および間隙水のリン濃度

5.2 底泥内のリン濃度分布と溶出速度

式(3.3)~(3.7)およびこれまで述べた諸条件、係数を用い、底泥の初期リン含有量を O として、 $\Delta t=0.1$ 日で100年分の計算を行った。各層の間隙水 $PO_4\text{-P}$ 、 $T\text{-P}$ 含有量、 $PO_4\text{-P}$ 生成速度、および $PO_4\text{-P}$ 溶出速度は計算開始後40年相当の時間ではほぼ一定値の周辺で季節変化をくり返すパターンを示している。これら各項目の99~100年相当時の1か年の季節変化を示すと図-26のようになる。

また、 $PO_4\text{-P}$ 溶出速度については、西宮防波堤沖にて得られた実測値が図-27にて黒丸印にてプロットされている。6~7月で計算値は実測値を上回るが、季節変化は全般的によく再現されており、また計算による年間 $PO_4\text{-P}$ 溶出量も $4.04\text{g}/\text{m}^2/\text{年}$ となり、図-28参照)、2.で述べた実測の年間 $PO_4\text{-P}$ 溶出量に近い値である。

一方、底質の $T\text{-P}$ 、 $O\text{-P}$ 、 $I\text{-P}$ 、および間隙水 $PO_4\text{-P}$ の実測鉛直分布を対応する計算値とともに示したものが図-29である。ここに計算値は実測された同月の1カ月平均値をプロットしている。これらの結果によると、底泥の $O\text{-P}$ はやや低め、底泥の $I\text{-P}$ はやや高め、底泥の $T\text{-P}$ はやや高めであるが、ほぼ底泥の性状を再現しているといえよう。また間隙水 $PO_4\text{-P}$ は底泥表層で約2倍となっているが、泥深とともに急減して実測に近づいている。

6. まとめ

以上、海域底泥のリンの挙動モデルを開発し、西宮防波堤沖の底泥に適用して、底泥の $O\text{-P}$ 、 $I\text{-P}$ 、間隙水 $PO_4\text{-P}$ 、溶出速度等の再現性の検討を行った。結果を要約するとつぎのとおりである。

- 1) 底泥各層の間隙水 $PO_4\text{-P}$ 、底泥 $I\text{-P}$ 、 $O\text{-P}$ 、 $PO_4\text{-P}$ 生成速度、 $PO_4\text{-P}$ 溶出速度は計算開始後40年ではほぼ定常に達する。
- 2) $PO_4\text{-P}$ 溶出速度は6~7月で実測より高めであるが、季節変化はほぼ再現され、年間溶出量は $4.04\text{g}/\text{m}^2$ で実測に近い。
- 3) 実測値に比し、底泥 $O\text{-P}$ はやや低め、底泥 $I\text{-P}$ はやや高めであり、底泥 $T\text{-P}$ はやや高めとなるが、これらの底泥内鉛直分布はほぼ再現される。
- 4) 間隙水 $PO_4\text{-P}$ は底泥表層で実測のほぼ2倍であるが、泥深とともに急減して実測値に近づいている。

なお、上述解析は、海域における栄養塩循環を支配する要因である底泥からの溶出機構を明らかにすることを目的として底泥内の栄養塩挙動をモデル化したものである。栄養塩をリンに限定したことや、CODの溶出機構

を除外した点など今後に残された課題は多い。さらに、栄養塩や有機物の挙動は海水中と底泥内部の双方で一体として解析されるべき性質のものであろうが、底泥内部での物質挙動の時間スケールは海水中でのそれに比して極端に大きいため、メッシュモデルで解析することは事実上不可能に近い。このため、海域に対してはボックスまたはブロックなどより大きな空間時間スケールの挙動に置換えて解析する手法をとるべきであろう。将来この種の解析手法が確立されるならば、溶出制御による水質改善効果の予測、あるいはより総合的な水質解析に対して有力な手段となるであろう。今後は、より多くのデータをもとに他地域についても本解析を適用し改良を加えていく予定である。

最後に、本研究は、第三港湾建設局の依頼のもとに実施したものであり、その遂行に当っては、山口大学工業部中西 弘教授、同浮田正夫助教授、東京都立大学工学部堀口孝男教授、大阪大学工学部盛岡 通助教授、大阪府水産試験場 久氏はかの貴重な助言を得た。またモデル開発には新日本気象海洋(株)所属細田昌宏、石野哲両氏の協力を得た。さらに、図表の整理は当研究室加藤道康、三好英一両君が従事した。これらの方々には深く感謝致します。(1984年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 堀江 毅・細川恭史：海域における物質循環モデルの水質支配要因について、港湾技術研究所報告，Vol. 22, No. 3, 1983.9, pp. 159-205.
- 2) 運輸省第二港湾建設局：昭和57年度底質浄化中間報告書作成業務報告書，昭和58年3月。
- 3) 運輸省第五港湾建設局：昭和57年度伊勢湾底質浄化影響評価調査報告書，昭和58年3月。
- 4) 平城高志・中西弘・浮田正夫・河合泰治：富栄養水域における底質評価に関する研究(その3)，第16回衛生工学研究討論会講演論文集，1980.1, pp. 147-152,
- 5) 細川恭史・三好英一・堀江 毅：沿岸底泥からの栄養塩の溶出過程のモデル化，第29回海岸工学講演会論文集，1982.10, pp. 570-574.
- 6) 松本英二・横田節哉：大阪湾底泥の堆積速度と重金属汚染，Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 34, 1978, pp. 108-115.
- 7) 運輸省第三港湾建設局：昭和55年度水質改善予測調査，1981.3.
- 8) 菊池泰二：ベントスの働き，生物攪拌を中心に，沿岸海洋研究ノート，Vol. 18, No. 2, 1981, pp. 67-77,
- 9) 運輸省第三港湾建設局：昭和54年度水質改善予測調査，1980.3.
- 10) 7)に同じ。

- 11) 運輸省第三港湾建設局：昭和57年度大阪湾詳細汚染実態調査，1983.3.
- 12) 運輸省第三港湾建設局：昭和57年度大阪湾河川流出堆積機構等調査，1983.3.
- 13) 運輸省第三港湾建設局：昭和57年度大阪湾金城汚染実態調査，1983.3.
- 14) 下川洪平・高田英明・森 仁・渡辺憲人・原信行・安田裕・小瀬洋喜：河川底質における無機リンの吸着について，水質汚濁研究，Vol. 4, No. 1, pp. 31-36, 1981.
- 15) 角皆静男・乗木新一郎：海洋化学—化学で海を解く，西村雅吉編，産業図書，1983, pp. 185.

主要記号表

- C ：底泥の T-P 濃度 (mg/g 乾泥)
 C_w^t ：時刻 t における直上水の PO_4 -P 濃度 (mg/l)
 C_{*n}^t ：時刻 t における底泥第 n 層の間隙水 PO_4 -P 濃度 (mg/l)
 D ：間隙水 PO_4 -P の拡散係数 (cm^2 /日)
 d ：平衡吸着速度に達する時間 (日)
 DL ：直上水 PO_4 -P の希釈係数
 DOM ：底泥直上水の溶存酸素濃度 (mg/l)
 DS ：堆積速度 (1/日)
 DSL ：攪乱係数 (1/日)
 H_n ：底泥第 n 層の層厚 (cm)
 IP_n^t ：時刻 t における第 n 層の I-P 濃度 (mg/g 乾泥)
 M_{COD} ：底泥の COD 濃度 (mg/g 乾泥)
 Q ：底泥の I-P 吸着量 (mg/g)
 T ：温度 ($^{\circ}C$)
 OP_n^t ：時刻 t における底泥第 n 層の O-P 濃度 (mg/g 乾泥)
 OP/SS ：沈降物 1 g 当りの O-P 含有量 (mg-P/g-SS)
 q_n^t ：時刻 t における底泥第 n 層の吸着速度 (mg/g/日)

- R^t ：時刻 t における溶出速度 (mg/m²/日)
 R_{COD} ：COD の溶出速度 (mg/m²/日)
 R_{IP} ： PO_4 -P の溶出速度 (mg/m²/日)
 r_F ：新生堆積物からの PO_4 -P 生成速度 (mg/g 乾泥/日)
 r_s ：既存底泥からの PO_4 -P 生成速度 (mg/g 乾泥/日)
 r_n^t ：時刻 t における底泥第 n 層の O-P 分解速度 (mg/g 乾泥/日)
 S ：SS 沈降量 (g/m²/日)
 T ：堆積速度 (cm/年)
 V_d ：底泥の単位体積重量 (g/cm³)
 w ：底泥の含水率
 α_n ：底泥第 n 層の PO_4 -P 分配係数 (g/l)
 $\phi_n\phi$ ：底泥第 n 層の間隙水比 (l/g)
 ϕ_n' ：底泥第 n 層の間隙率

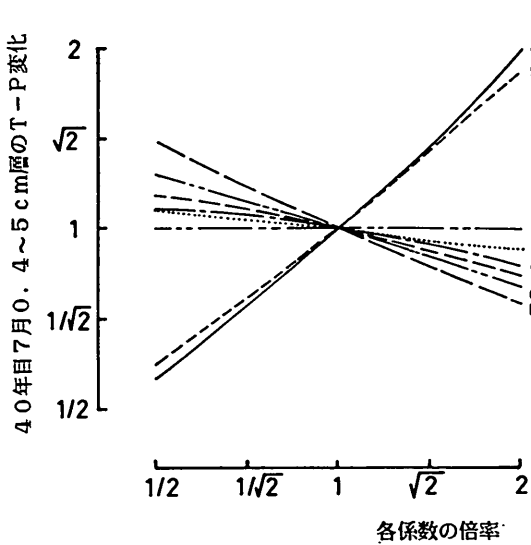
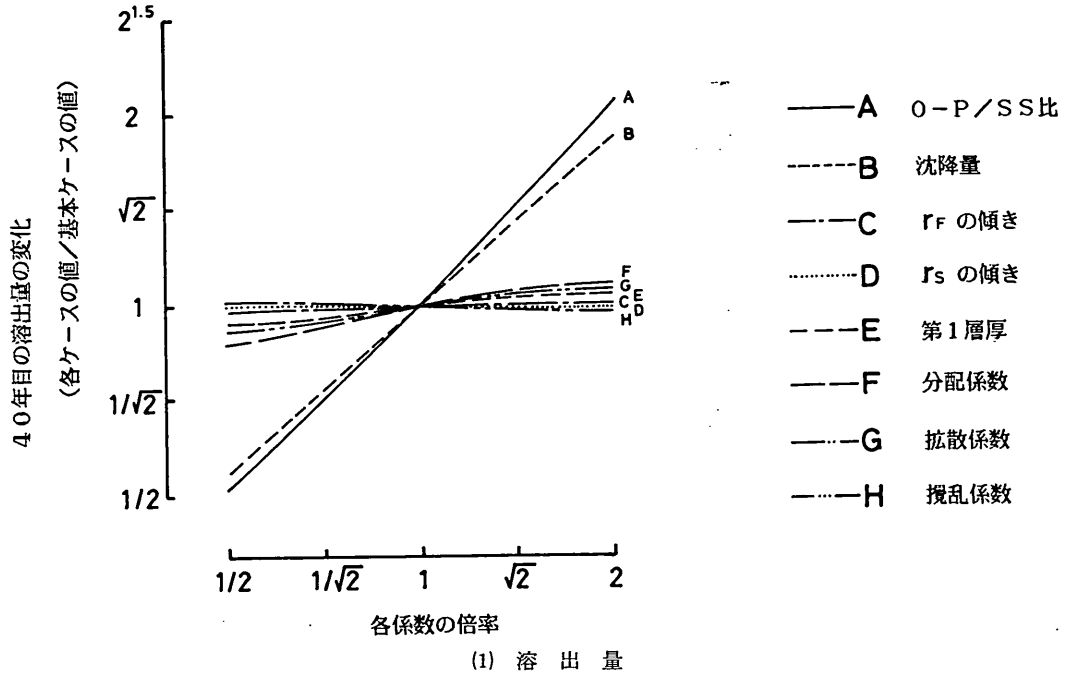
付録. 主要パラメータの感度解析

本文に示したモデルの主要パラメータに対する感度を調べるため，表-A・1に示す沈降物の O-P/SS 比，SS 沈降量，新生堆積物分解速度 (r_F) の傾き，既存泥分解速度 (r_s) の傾き，第 1 層の層厚 (H_1)，分配係数 (α)，拡散係数 (D)，および攪乱係数 (DSL) を基準値に対してそれぞれ 1/2, 1/√2, √2, および 2 倍とした場合の溶出量，各層のリン濃度の計算した。計算開始後，各計算値がほぼ一定となる時点 (40年目 7月に相当) においてそれらの結果を図示したものが 図-A・1, A・2 である。図-A・1, A・2によると，沈降物の R-P/SS 比と沈降量は溶出量，底泥 T-P，間隙水 PO_4 -P いずれに対しても感度が高い。

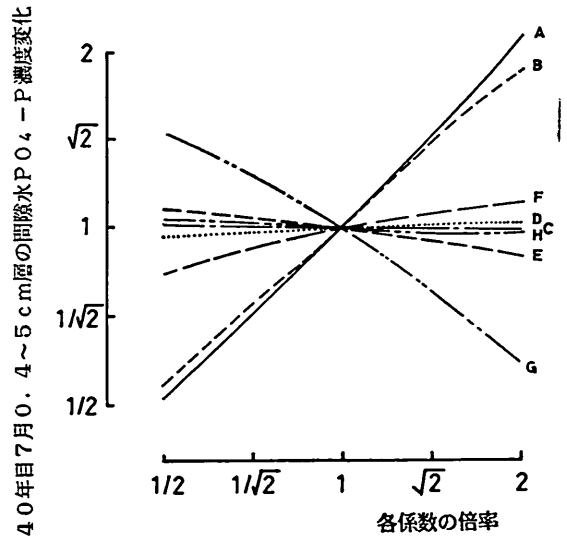
また拡散係数は底泥 T-P や間隙水 PO_4 -P に対しても感度が高く負の相関関係にあることがわかる。

表-A・1 感度解析に用いた各パラメータの値

項目	倍率	1/2	1/√2	1	√2	2
沈降物の O-P/SS比 (mg/g)		1.6	2.26	3.2	4.53	6.4
沈 降 量 (g-SS/m ² /day)		1.95	2.76	3.9	5.52	7.8
浮泥分解速度 [r_F] の傾き		0.0085	0.012	0.017	0.024	0.034
在来泥分解速度 [r_s] の傾き		0.00065	0.000919	0.013	0.00184	0.0026
第 1 層 厚 (cm)		0.2	0.28	0.4	0.57	0.8
分 配 係 数 (g/l)		6.2	8.8	12.4	17.5	24.8
拡 散 係 数 (m ² /day)		0.00007	0.000099	0.00014	0.00020	0.00028
攪 乱 係 数 (m ² /day)		0.0000017	0.0000024	0.0000034	0.0000048	0.0000068

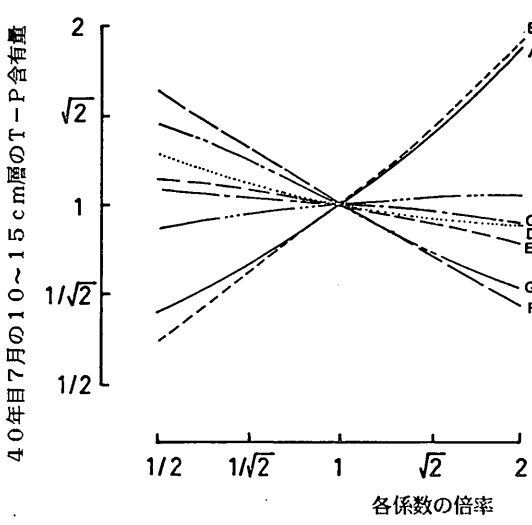


(2) 0.4~5 cm層 (第2層) のT-P

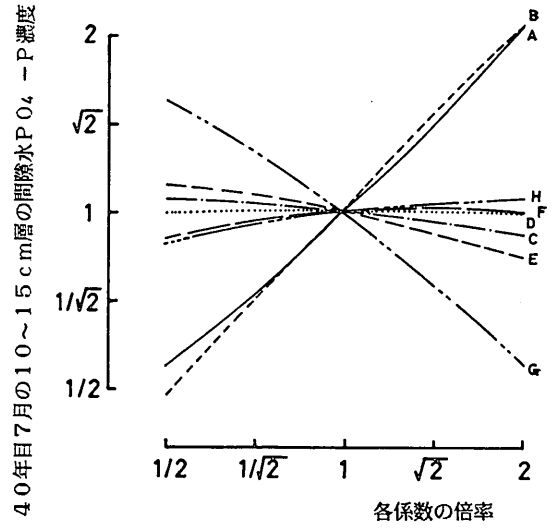


(3) 0.4~5 cm層 (第2層) の間隙水 PO_4-P

図-A・1 各パラメータに対する感度



(4) 10~15cm層（第4層）のT-P



(5) 10~15cm層（第4層）間隙水 PO_4-P

図-A・2 各パラメータに対する感度