

閉鎖性内湾における水質・底質モデルの構築とその検証

韓 銅 珍*・丸 谷 尊 彦**・中 辻 啓 二***

1. はじめに

閉鎖性内湾における水質汚染は、主として栄養塩の陸域からの負荷、内部生産による生成、底泥からの溶出など複雑な物理・化学生物作用に起因している。その結果、流入負荷量が削減されても期待された水質改善が遅れるという報告もある(山根, 1997)。水質の改善の時間遅れをもたらし要因の一つに底泥からの溶出がある。しかしながら、既往のモデルの多くは底泥からの溶出速度を一定値として与えてきた(Jorgensen, 1975; Kamp Nielsen, 1975)。堀江・細川(1984)は底泥からの窒素・リンの溶出機構を考慮した検討を行っている。しかしながら、大阪湾のような閉鎖性の強い沿岸域では、水質および底泥の溶出に関連するメカニズムは複雑である。嫌気状態では、陽イオンと結合しているリンの脱着や間隙水窒素の脱窒作用によって、底泥からの窒素とリンの溶出速度が大きく変化する。したがって、リンの脱着特性や脱窒作用もモデル化に際して考慮しなければならない。また、水質の長期予測計算を行う場合には、負荷量の変化に対して水質の変化だけではなく、底質の変化も計算する必要がある。

閉鎖性内湾における水質の長期予測や水質の空間分布をより正確に把握するためには、底泥からの栄養塩の溶出機構を取り込んだモデルが必要となる。本研究では、この底泥内の窒素・リンの溶出機構を考慮し、海水と底泥とを一体化した水質・底質モデルを構築した。ここではモデルの概要とパラメータの感度分析、さらに、検証実験の結果について報告する。

2. モデルの概要

2.1 三次元バロクリニック流れモデル

流動と密度場の計算にはこれまで中辻(1994)が大阪湾の解析に用いてきた三次元バロクリニック流動モデルを用いる。数値モデルは、連続方程式、3方向運動方程式、水温・塩分の拡散方程式、海表面での熱収支式およ

び密度の状態方程式で構成されている。水平方面の渦動粘性係数と渦拡散係数にはSGS粘性係数を用いて時空間変化を考慮し、また、鉛直方向の渦動粘性係数と渦拡散係数はリチャードソン数の関数として、湾内の成層効果を取り込んでいる。

2.2 三次元水質モデル

本モデルでは海水(Pelagic Zone)と底泥(Benthic Zone)とのやりとりを、有機デトリタスの底泥への沈降と、底泥からの無機栄養塩の溶出として考慮している。

a) 海水(Pelagic Zone)

水質モデルは窒素、リン、COD、溶存酸素の生物化学的な変化過程をモデル化した(山根(1997)参照)。物質の輸送・拡散には流動モデルで求めた流速3方向成分と渦拡散係数を用いた。計算対象の物質形態としては生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィルa、栄養塩として無機態窒素、無機態リン、非生物体の有機態窒素、非生物体の有機態リン、化学的酸素要求量、さらに溶存酸素を設定した。非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の有機物の総称としている。

b) 底泥(Benthic Zone)

底質モデルでは、底泥における有機物のバクテリアによる分解・無機化、および間隙水中の無機物の直上水への拡散過程をモデル化している。底泥モデルでの物質形態としては、底泥内の有機態窒素・リン、無機態窒素・リン、間隙水中の無機態窒素・リンを設定した。

本底質モデルでは、以下の仮定に基づいている。

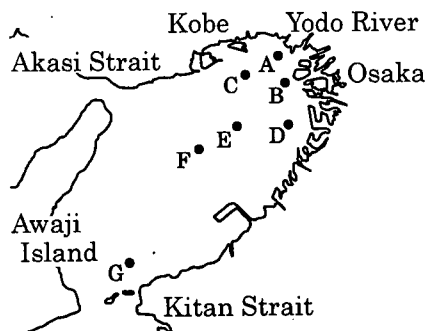


図-1 計算対象領域と観測点

* 学生会員 工修 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工修 奥村組
*** 正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

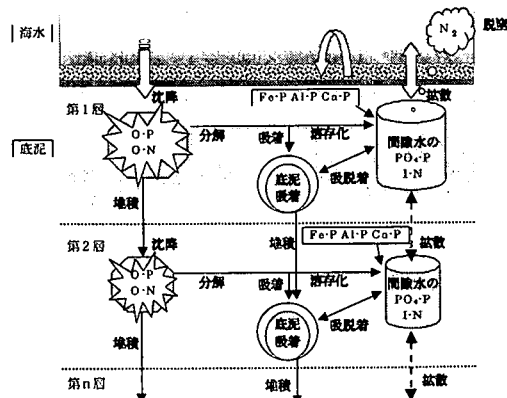


図-2 底質モデルの模式図

(1) 底泥における $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の分解生成速度は、微生物の活性、水温、O-P 含有量、O-N 含有量、DO に依存する。(2) 底泥により分解生成された $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ は、一定の分配率で間隙水に溶存化、または泥粒子に吸脱着される。(3) 分解により生成された溶存態リンは海水中の陽イオンと結合し沈降するが、その一部は再び溶出する。しかし、結合形態によって溶出速度は異なり、Fe-P は溶出しやすいが、Al-P と Ca-P はほとんど溶出しない。(4) 底泥からの $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出速度は、底泥直上水の水温および流速、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に依存する。さらに、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の場合は底泥直上水の DO にも大きく依存する。(5) 底泥間隙水における $\text{NH}_4\text{-N}$ の一部は脱窒により大気中に放出される。

c) 底泥モデルの基礎式

i) 底泥における有機態リン

$$\frac{\partial C_{MOP}}{\partial t} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MOP}}{\partial Z} - D_{SP}$$

C_{MOP} : 底泥における有機態リンの濃度 (mg/g)

S_{Ed} : 堆積量 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{日}$)

D_{SP} : 底泥における有機態リンの分解速度定数 (1/日)

ii) 底泥における有機態窒素

$$\frac{\partial C_{MON}}{\partial t} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MON}}{\partial Z} - D_{SN}$$

C_{MON} : 底泥における有機態窒素の濃度 (mg/g)

D_{SN} : 底泥における有機態窒素の分解速度定数 (1/日)

iii) 底泥における無機態リン

$$\frac{\partial C_{MIP}}{\partial t} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MIP}}{\partial Z} - \frac{1}{1+\phi\alpha} D_{SP} + Q$$

C_{MIP} : 底泥における無機態リンの濃度 (mg/g)

ϕ : 間隙水量-乾泥比 (l/g)

α : 分配率 (g/l)

Q : 泥粒子への吸脱着速度

iv) 底泥における無機態窒素

$$\frac{\partial C_{MIN}}{\partial t} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MIN}}{\partial Z} - \frac{1}{1+\phi\alpha} D_{SN} + Q$$

C_{MIN} : 底泥における無機態窒素の濃度 (mg/g)

v) 間隙水における無機態リン

$$\frac{\partial C_{WIP}}{\partial t} = \frac{1}{1+\phi\alpha} D_{SP} + \frac{1}{\phi} Q + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\phi \cdot DIF \cdot \frac{\partial C_{WIP}}{\partial Z} \right)$$

C_{WIP} : 間隙水における無機態リンの濃度 (mg/l)

DIF : 拡散係数

vi) 間隙水における無機態窒素

$$\frac{\partial C_{WIN}}{\partial t} = \frac{1}{1+\phi\alpha} D_{SN} + \frac{1}{\phi} Q + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\phi \cdot DIF \cdot \frac{\partial C_{WIN}}{\partial Z} \right) - DIN \cdot C_{WIN}$$

C_{WIN} : 間隙水における無機態窒素の濃度 (mg/l)

DIN : 脱窒速度定数 (1/日)

vii) 吸着速度

$$Q = \frac{C_{WIP} - C_{EXP}}{1 + \frac{1}{\phi\alpha}} \cdot \frac{1}{T_{AD}}$$

T_{AD} : 吸着平衡に達するまでの時間 (日)

viii) 酸化・還元条件におけるリン脱着

酸化条件

$$DE_{SP} = DE_O * EXCp \cdot \theta^{T-20}$$

還元条件

$$DE_{SP} = DE_A * EXCp \cdot \theta^{T-20}$$

DE_{SP} : リンの脱着速度

DE_O : 酸化条件におけるリンの脱着速度定数

DE_A : 還元条件におけるリンの脱着速度定数

$EXCp$: 還元条件で脱着可能なリンの濃度 (Fe-P)

3. モデルの検証

計算領域は、図-1 に示す大阪湾を中心とした 64 km 四方を対象とし、水域分割は水平方向に 2 km メッシュ、鉛直方向は湾内の流動・密度構造を正確に表現するために、表層から 2 m × 10 層、10 m、15 m × 2 層の全 13 層とした。

また、底泥は、大阪湾の流動密度構造をもとに 18 の領域に分割し、泥深 100 cm までを 8 層に分割した。本計算に用いた主な計算条件を表-1、表-2 に示す。

表-1 底質モデルのパラメータ (基準値)

P 分解速度	1.0×10^{-3} (mg/g/day)
N 分解速度	1.0×10^{-3} (mg/g/day)
P 分配率	12.5 (g/l)
N 分配率	89 (g/l)
拡散係数	5.40×10^{-3} (cm ² /s)
脱窒速度係数	0.09 (1/day)
沈降速度	0.3 (m/day)

表-2 流動, 水質モデルの境界条件

		境界条件	春季	夏季	秋季	冬季
流動モデル	海面境界	気温 °C	16.3	26.7	15.2	5.5
		雲量	6.2	6.3	5.4	5.8
		風速 m/s	3.2	3.0	3.2	3.2
		水蒸気圧 hPa	12.2	25.8	12.1	5.8
		日射量 W/m ²	184.6	193.4	109.0	96.6
	陸側境界	流入量 m ³ /s				
		淀川	273.8	367.9	165.7	142.1
		大和川	23.8	27.2	21.2	16.1
	海側境界	流入水温 °C	18.0	28.9	18.0	7.0
		流入塩分 psu	21.5	20.0	21.5	23.0
水質・底質モデル	陸側境界	COD mg/l	明 2.0 紀 1.5	明 2.6 紀 1.9	明 2.0 紀 1.5	明 1.3 紀 1.1
		T-N mg/l	0.36 0.36	0.38 0.38	0.36 0.36	0.34 0.34
		T-P mg/l	0.034 0.030	0.039 0.031	0.034 0.030	0.029 0.029
		クロロフィル mg/l	0.004 0.004	0.005 0.005	0.004 0.004	0.005 0.005
		DO mg/l	8.6 8.6	8.1 8.1	8.5 8.5	9.0 9.0
	海側境界	潮位変動	M2 平均潮			
		水温 °C	13.0	22.0	22.0	11.0
		塩分 psu	32.0	32.0	32.0	32.0

1965 年から 1999 年までの負荷量を与えて水質および底質の長期計算を行った。陸域からの負荷量および海水の境界条件は春夏秋冬の季節変化を考慮した。

3.1 感度分析

構築した本モデルの主要パラメータに対する感度を調べるために、拡散係数、沈降速度、堆積有機物の分解速度、リンの脱窒係数および脱窒速度係数を、基準値に対してそれぞれ 0.5 倍、1.5 倍および 2 倍した場合の窒素・リンの溶出速度を計算した。図-3 に示されるように、窒素・リンともに海水からの有機物の沈降速度の感度が高いことがわかる。とくにリンに関しては脱窒速度係数が溶出速度に対して感度が高い。また、窒素に関しては脱窒係数および拡散係数が溶出速度に対して感度が高い。両者は負の相関関係にあることから、脱窒により底泥からの窒素の溶出が抑制されていることが考えられる。

3.2 溶出速度

モデルの再現性を検証するため、大阪湾の湾奥部における底泥からの DIP (溶存無機態リン) 溶出速度の月別変化を計算した。実測から得られた 1982 年における底泥

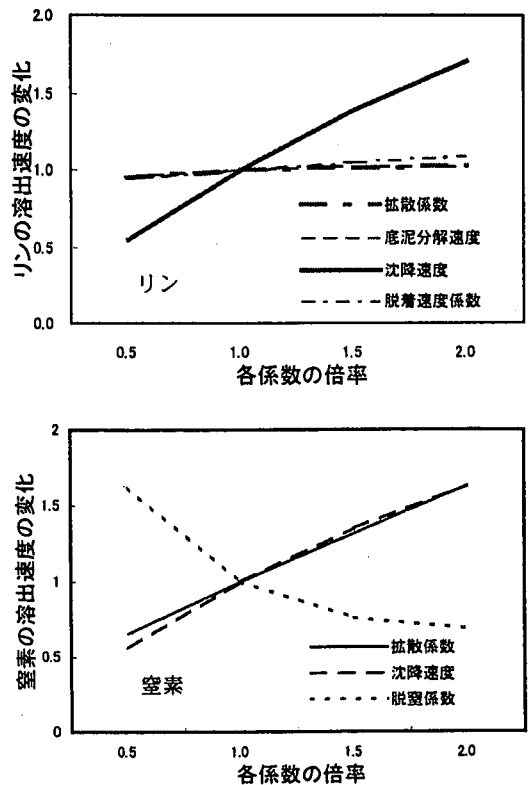


図-3 各パラメータに対する感度分析

からの DIP の溶出速度の月別変化と数値計算結果を図-4 に示している。DIP の溶出速度は底泥直上水の水温と DO の関数からなり、その値は、冬には 5 mg/m²/day, 夏には 25 mg/m²/day となっている。提案したモデルがその季節変動を良好に再現できることが確認された。とくに、溶存酸素の濃度が低く、水温が高い夏にかけてリンの溶出速度が急に高くなる現象がよく再現されている。

図-5 は、大阪湾における窒素とリンの溶出速度の実測値と計算値を比較したものである。リンに関しては夏場の平均値を用いて比較を行っている。湾奥部におけるリンの溶出速度は 30 mg/m²/day, 関西空港の周辺では 10 mg/m²/day 前後の値となっており、大阪湾におけるリンの溶出速度を概ね良好に再現している。窒素に関しては 8 月の実測値との比較であり、湾奥部では実測値の方が高くなっているが、湾中央部ではほぼ一致している。

3.3 底質

図-6 は、図-2 に示した観測点 B, D, E, F における底質の I-N, I-P, T-P の鉛直分布を示す。実測値は著者らが 1999 年 10 月に実測したデータである。I-P に比べて I-N の濃度は実測値と計算値ともに低くなっており、T-P に対しては実測値が計算値を上回っているものの、全

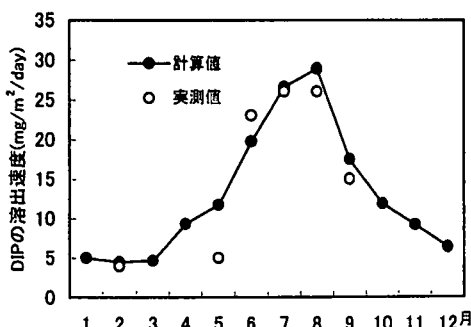


図-4 リンの溶出速度の変化

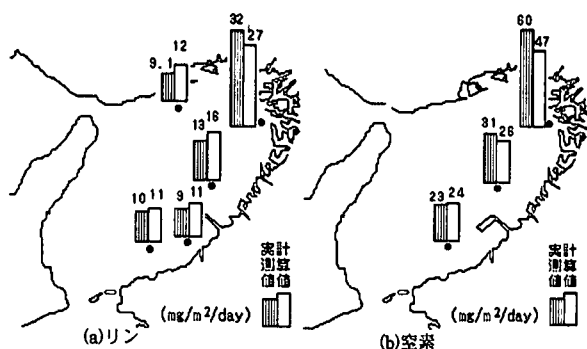


図-5 溶出速度

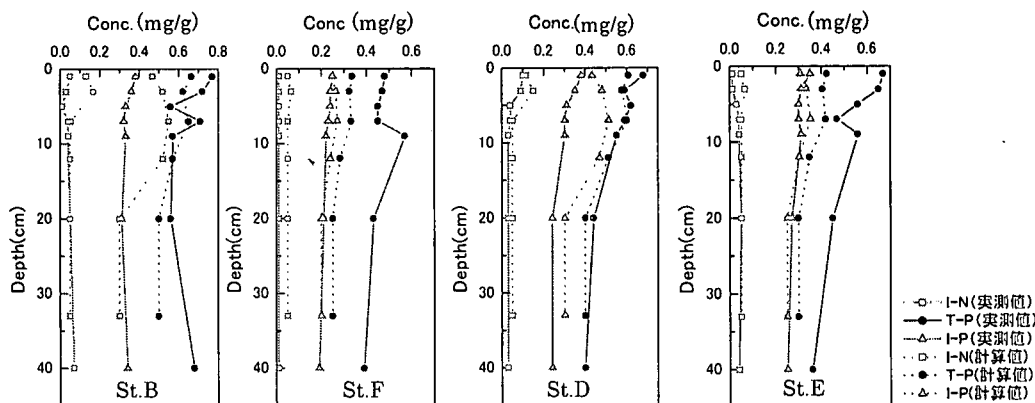


図-6 底質の鉛直分布

体的に底質の鉛直分布をよく再現していると言える。とくに窒素・リンの溶出に強く関係していると考えられる I-N, I-P の再現性が高い。

3.4 水 質

大阪湾に流入する負荷量は 1970 年代にピークをむかえ、1979 年に施行された瀬戸内海特別措置法により大阪湾において COD の総量規制とリンの削減が計られてきた。この施策により 1979 年以降は COD とリンの流入負荷量が減少している。

図-7 は数値計算と実測から求められた海水中の T-P, COD 濃度である。比較地点として各々現地観測データの揃っている観測点を採用した。なお、T-P は観測点 A, C, E, G において、COD は観測点 A, C において比較を行った。実測値は、大阪府水産試験場において行われている浅海定線調査のデータおよび公共用水域データを用いた。図-7(a) に示す 1975~1979 年の浅海定線調査の観測点 A の T-P 濃度は大きく振動しているが、1975 年から 1993 年の約 20 年間の長期的な傾向としては、およそ 0.15 から 0.10 mg/l 程度にまで減少してきている。一方、計算結果は 1970 年代に濃度がピークに至り、その後徐々に減少傾向を示している。湾奥や沿岸域では散乱

している観測値のほぼその中央を通るように推移している。湾中央においても、計算値は若干高くなっているが濃度差は 0.01 mg/l 程度であり、大阪湾全体として見た場合、良好に再現されたと判断できる。

COD に対しては夏の実測値と計算値の比較を行った。計算値は 1965 から徐々に増加して 1975 にピークに達してその後、減少している。とくに、1977 年から 1980 年にかけて大きく減少していることがわかる。実測値と比較してみると絶対値の差はあるものの、COD 濃度のピークや増加および減少傾向はよく再現されている。

T-N に関しては、計算値は 1965 年から 1975 年にかけて大きく増加し、1975 年以降も徐々に増加し続けている。T-N の減政策が行われてなかったことによるものである。なお、実測値は 9 ヶ年のデータしかないため、計算値との十分な比較はできないが、計算値は湾奥部で 1 mg/l、湾中央部では 0.5 mg/l を示し、実測値とほぼ一致している。

4. おわりに

本研究では、底泥内の溶出機構を考慮して、海水と底泥とを一体化した水質・底質モデルを構築し、その検証

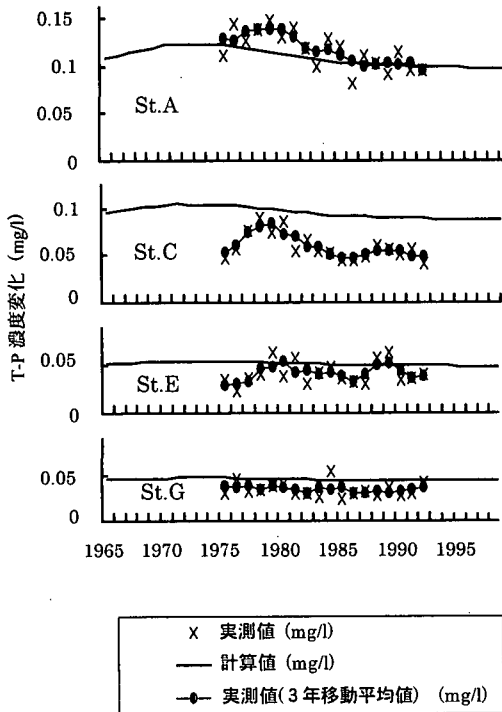


図-7(a) T-P の経年変化

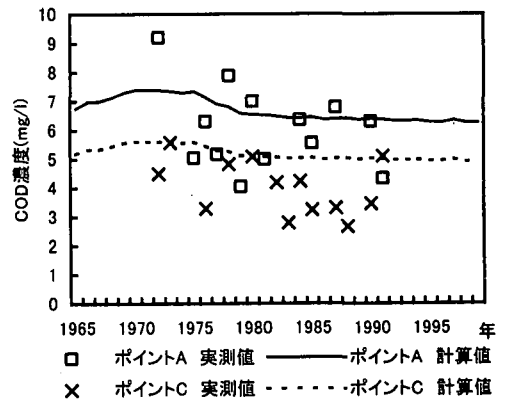


図-7(b) COD の経年変化

減少傾向や水質の長期変動がよく再現できたとと言える。

本研究の一部は文部省科学研究費補助(基盤研究(A):研究代表者 中辻啓二)によって実施されたことを付記する。また、底質調査に関しては関西国際空港(株)の協力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 城 久 (1989): 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について, 大阪府水産試験場研究報告 第7号 pp. 28-38.
- 中辻啓二 (1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ 94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A9.1-28.
- 細見正明 (1987): 湖沼底泥からの窒素・リン溶出とその制御に関する研究.
- 堀江 毅・細川恭史 (1984): 海底中のリンの挙動モデルについて, 港湾技術研究所報告 第23巻, 第2号.
- 山根伸之 (1998): 大阪湾の流動構造と生態系を考慮した水質予測モデルに関する研究, 大阪大学大学院工学研究科博士論文.
- Jorgensen, S. E., and O. S. Jacobsen (1975): A submodel for anaerobic mud-water exchange of phosphate, Ecological Modeling, Vol. 1, pp. 133-146.
- Kamp-Nielsen, L. (1975): A kinetic approach to the aerobic sediment-water exchange of phosphorus in lake esrom, Ecological Modeling, Vol. 1, pp. 153-160.

実験を行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 構築した本モデルの主要パラメータに対する感度分析の結果、窒素・リンともに海水からの有機物の沈降速度および分解速度の感度が高い。さらにリンに関しては脱着係数が溶出速度に対して感度が高い。また、窒素に関しては脱窒速度が溶出速度に対して感度が高く、負の相関関係にあることがわかった。

(2) モデルの再現性を検証するため、大阪湾における底泥からの DIP (溶存無機態リン) 溶出速度の計算を行い、溶出速度の季節変化、とくに溶存酸素の濃度が低く水温の高い夏にかけて、リンの溶出速度が急に高くなる現象をよく再現できた。

(3) 大阪湾における水質の長期計算を行った結果、負荷量の変化による窒素・リン、COD 濃度の増加および