

大阪湾における水質の長期予測計算

丸谷尊彦*・韓 銅珍**・中辻啓二***

1. はじめに

1979 年以降、大阪湾では「瀬戸内海環境保全臨時措置法」施行に伴って COD（化学的酸素要求量）の総量規制と P（リン）の削減が計られてきた。この施策により、1970 年代に比べて水質は改善され、一定の成果を収めてきた。しかし、赤潮の発生や底層の貧酸素化は毎年のように発生しており、公共用水域水質の測定結果においても環境基準達成率は 67% と未だ低い状態である。このような水質改善の遅れの原因の一つとして、底泥の果たす役割が大きいことが明らかにされつつある。しかしながら、底泥からの窒素・リンの溶出による内部負荷に関して定量的な評価は行われていない。

そこで、本研究では底泥と海水間の物質交換・変換過程を含んだ水質・底質モデルを構築し、長期予測計算を行って、負荷量の累積的な効果が水質や底質にどのように影響するのかを調べた。また、1979 年から実施されてきた COD 総量規制と P 削減政策の効果と今後 2010 年までに計画されている COD, N(窒素), P に関する負荷量削減政策の効果の算定を試みた。

2. 数値実験の概要

2.1 モデルの構成

使用したモデルは、流動モデルと水質モデル、底質モデルの3つのサブモデルから構成されている。流動計算は、中辻ら(1991)がこれまで大阪湾で用いてきた三次元流動モデルのODEMを用いた。水平方向の渦動粘性・拡散係数にはSGS係数を用いて係数の時間的・空間的変化を考慮している。鉛直方向の係数はリチャードソン数の関数とし、湾内の成層状態の影響を考慮した。水質計算は、流動計算から得られた三次元流動密度構造と生物・化学的な物質変化機構を取り込んだ低次生態水質モデル(山根;1997)を用いた。物質の輸送・拡散は流動モデルで予め求めた流速3方向成分と渦拡散係数を用いる。計算対象とする物質形態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。

底質モデルは、底泥における有機物のバクテリア分解による無機化、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、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。また、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。その概念図を図一1に示す。

2.2 計算条件

計算領域は、図-2 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 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。本計算では 1965 年から 2010 年におよば春夏秋冬の変化を考慮した非定常 3 次元流動計算と水質・底質計算を時間間隔 30 秒で繰り返し実施する。したがって、格子の数は可

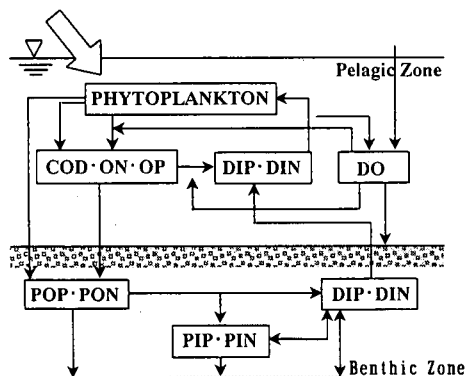


図-1 モデルの模式図

・正会員 工修 奥村組
 ・学生会員 工修 大阪大学大学院工学研究科
 ・正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科

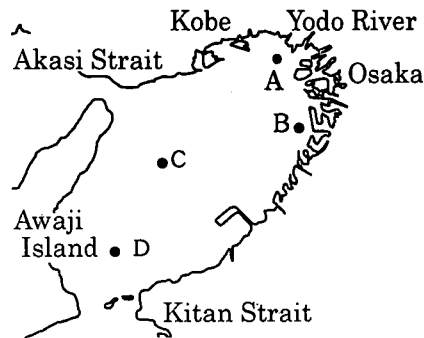


図-2 計算対象領域と観測点

表-1 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 ℃		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/m²		184.6	193.4	109.0	96.6
	陸側境界	流入量 m³/s	淀 川	273.8	367.9	165.7	142.1
			大和川	23.8	27.2	21.2	16.1
		海入水温℃		18.0	28.9	18.0	7.0
		流入塩分 psu		21.5	20.0	21.5	23.0
	海側境界	潮位変動		M2 平均潮			
		水温 ℃		13.0	22.0	22.0	11.0
塩分 psu		32.0	32.0	32.0	32.0		
水質・底質モデル	海側境界	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

能な限り少なくすることが好ましい。しかしながら、大阪湾の特徴的な流れや残差流の再現が必須である。本計算で水平方向の間隔を 2 km に採用したのは、予備計算の結果、水平方向の間隔を 2 km にした場合においても大阪湾の流れや残差流がよく再現されたことによる。本計算に用いた主な計算条件を表-1 に示す。

3. 流入負荷量

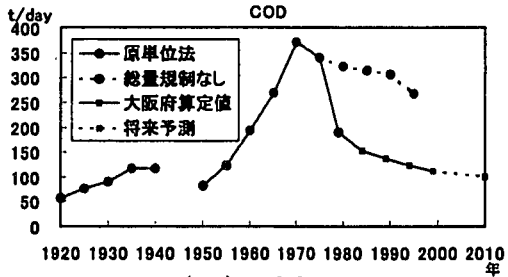
3.1 流入負荷量の算定方法

算定の対象とする項目は、水質汚濁の指標である化学的酸素要求量 COD と富栄養化により水質汚濁に関係す

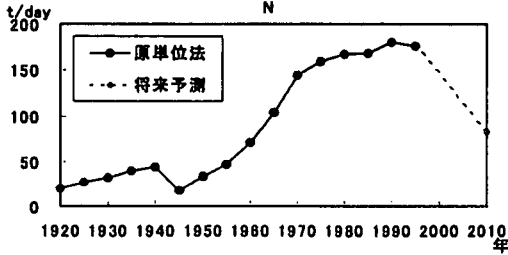
る窒素 N とリン P とする。流入負荷量は海域環境に密接に関係する因子であるが、その重要性が認識され始めたのは 1970 年代以降である。流入負荷量の長期的な変化を実測から知ることは難しい。そこで、本研究では、原単位法と積み上げ法により大阪府の排出負荷量の長期的変化を調べた。そして、実測により大阪湾に流入する各河川の流入負荷量が既知の年とそれぞれの年との比をとることにより、その年の各河川の流入負荷量とした。また、季節による負荷量の変化は河川の流量によって考慮した。

3.2 長期間水質予測実験の概要

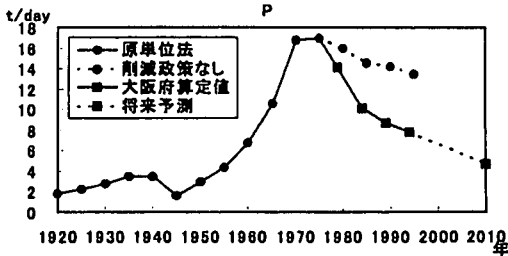
本研究の目的である負荷量の累積的な効果が水質・底質に及ぼす影響と流入負荷量削減政策の効果を見るために、大阪湾に流入する主要 21 河川からの流入負荷量は以下に示す 3 つのパターンを与えて長期計算を行った。この 3 パターンによる負荷量の経年変化を図-3 に示す。



(a) COD

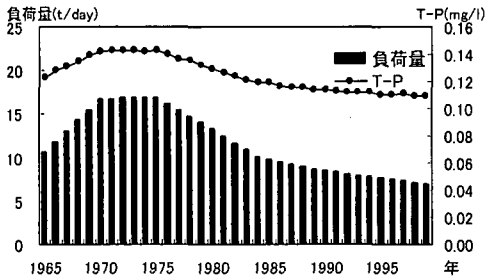


(b) N

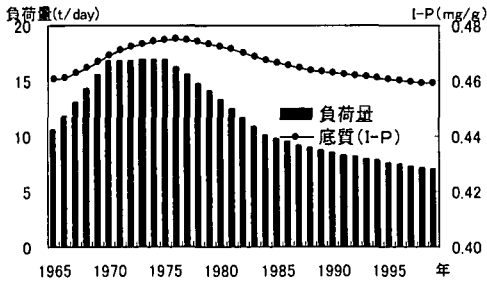


(c) P

図-3 大阪府排出負荷量の経年変化



(a) 海水中のT・P濃度



(b) 底泥中のI・P濃度

図-4 リン負荷量と海水中のT・P、底泥中のI・P濃度の経年変化

パターン① 1965年から現在までの再現

パターン② 1979年から現在にかけてCOD総量規制とP削減政策がなされていなかった場合

パターン③ 現在から2010年にかけて大阪府で計画している下水道の高度処理化が予定通り行われCOD, N, Pの流入負荷量の削減がなされた場合

大阪府におけるCOD排出負荷量の変化は、1920年の56.6 t/dayから1935年には116.8 t/dayと約2倍に増加し戦前のピークを迎える。その後、戦争で人口と工業出荷額が減少し、1950年において81.9 t/dayと排出負荷量は減少する。しかし、戦後の復興期から高度経済成長期にかけて、京阪神人口が増加したこと、工業出荷額が増加したことによって、1970年には370.9 t/dayと爆発的に増えた。この20年間における増加率は実に4.53倍にも及ぶ。

1970年代に入ってから、負荷量は減少傾向になる。とくに1978年には、「瀬戸内海環境保全特別措置法」が制定され、1979年より、CODの総量規制が始まった。この規制により排水量が50 m³/dayを超える工場は総量規制対象となり、海域環境の保全を目標とした負荷量削減政策が本格的に始動した。負荷量も現在(1999年)の推定値において112.0 t/dayと1970年のピーク時の約1/3にまで減少してきている。図中の黒丸・点線は総量規制を実施しなかった場合を示し、1970年から1995年の

穏やかな減少傾向は下水道の整備等による。大阪府算定値は総量規制による減少分を示している。

Pの排出負荷量の経年変化の推移はCODとよく似た傾向を示している。ただし、1979年以降のPの負荷量の減少原因はCODとは異なる。CODは総量規制として産業排水を規制したのに対し、Pは規制ではなく生活排水を対象とし削減政策を行ったことである。1993年には水質汚濁防止法の改正によりNとPの排水規制も導入され、1999年の大阪府の試算値ではPは7.0 t/dayと1975年のピーク時の約2/5まで減少してきている。

4. 計算結果とその考察

4.1 負荷量の経年変化に対する表層水質および底質の応答特性(1965年—1999年)

図-4はリンの負荷量の時間変化と海水中のT・Pおよび底泥中のI・Pの応答特性を示している。観測位置は図-2に示すA点であり、尼崎防波堤沖である。湾奥に位置し、年中成層化しており、最も水質汚濁の進んだ海域である。陸域からの負荷量は1970年から1975まで最大値約17 t/dayとなり、その後1986年まで一様勾配で減少、さらにそれ以降にも勾配を変えて減少する傾向にある。

海水中のT・Pは1970-1975の最大値、また1985年の変曲点と負荷量の時間変化に追従した時間変化を示している。一方、底泥中のI・PはT・Pあるいは負荷量に対してはほぼ4年遅れて変化している。しかし、負荷量が半分まで減少されても表層水質は25%程度しか改善されていないことがわかる。底泥にいたってはわずか2%程度の減少にしか対応していない。底泥に蓄積された後は負荷量が減っても底質の改善は遅くなり、これが水質改善の遅れ現象につながっていると考えられる。

4.2 流入負荷量削減政策の定量的評価

(a) 1999年夏の表層水質分布

大阪湾の1965年の栄養塩の分布を初期条件として、図-3に示す排出負荷量を元に境界条件を与えて計算した。図-3は大阪府沿岸からの排出負荷量データであることから、湾全域の排出負荷量は城(1986)の換算値を採用して計算した。

図-5は1999年度における表層(水面下1 m)でのCOD, T-P, T-Nの分布を示す。山根(1998)は同じ数値モデルを用いた計算を実施し、1995年の分布を求めている。ただし、彼の計算は底質モデルを用いず海域を分割して栄養塩の溶出速度と酸素消費速度を一定値で与えることと、水平分割が1 kmであることが異なっている。図には示さないが両計算の結果を比較すると、本計算のT-Pの60 μg/lの等値線が若干広がり傾向にあるものの、CODとT-Nはほぼ一致している結果が得られた。し

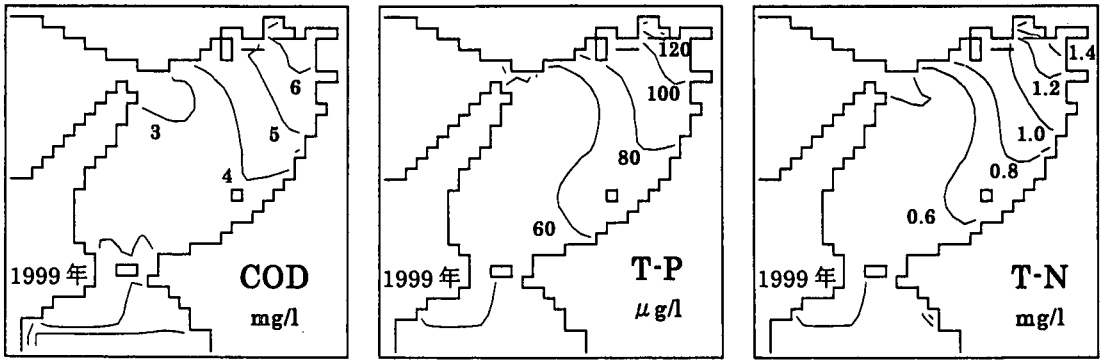


図-5 1999年夏の大阪湾の表層（水面下1m）のCOD、T-PおよびT-Nの水平分布

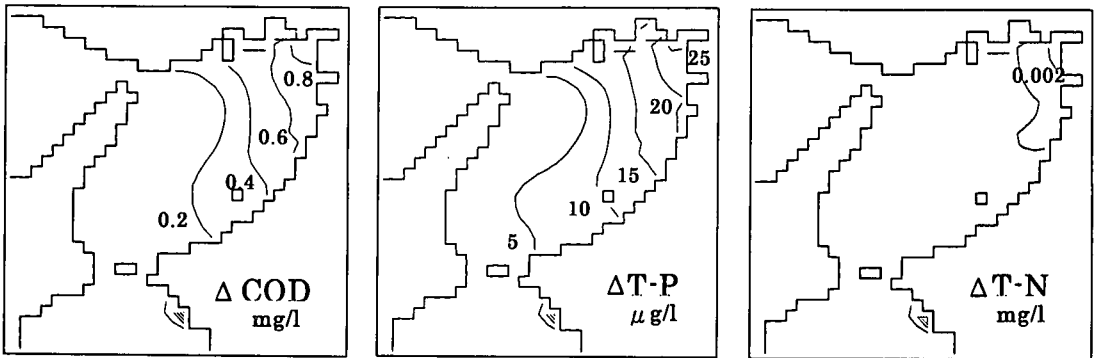


図-6 COD総量規制とPの削減施策による水質の改善効果（図中の数値は低減量を示す）

たがって、間接的であるが実測値ともよく一致している。

(b) 負荷量削減政策が水質に及ぼす効果

図-6はCOD総量規制とP削減施策が実施されなかったパターン②の計算結果からパターン①の計算結果を差し引いた濃度差 Δ COD、 Δ T-P、 Δ T-Nの分布を示す。つまり、総量規制や削減の効果を評価したものである。同図より負荷量の削減効果が大阪湾奥部で効果を及ぼしていることが分かる。とくに、 Δ CODは湾奥の広範な海域で0.6-0.8 mg/l程度濃度が低下し、湾中央部では0.2-0.4 mg/l低下している。 Δ T-Pにおいても湾奥で20-25 μ g/l、湾中央部では5-15 μ g/lの濃度の低下が見られる。しかし、 Δ T-Nの変化は残念ながらほとんどない。削減対象でなかったため、当然であるかもしれない。

以上の計算結果から1979年から施行されてきた水質総量規制が海域の水質改善に及ぼす効果の大きさが伺える。しかし、大阪湾への流入負荷量の削減から考えるとCODは十分低下したとはいえない。これは、CODが内部生産によるところが大きく、T-P濃度の低下がCODの内部生産を抑制するところまで達していないためであると考えられる。

図-7は代表4地点におけるCODとPの削減による

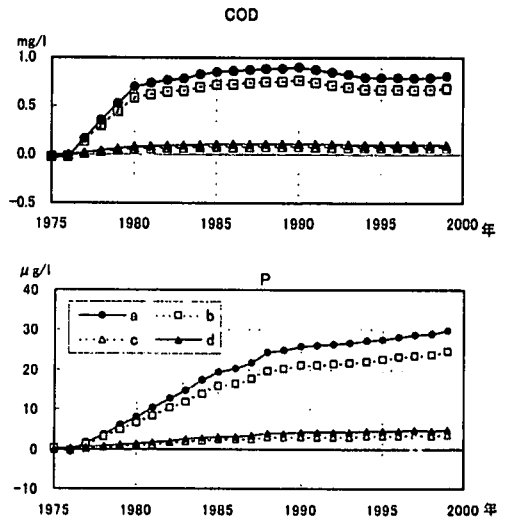


図-7 COD総量規制とPの削減施策による低減効果の経年変化

水質改善効果の経年変化を示している。1975年からの負荷量の減少に伴い海水中のCODおよびT-Pの濃度も改善されていることが分かる。また、図-8に示されるよう

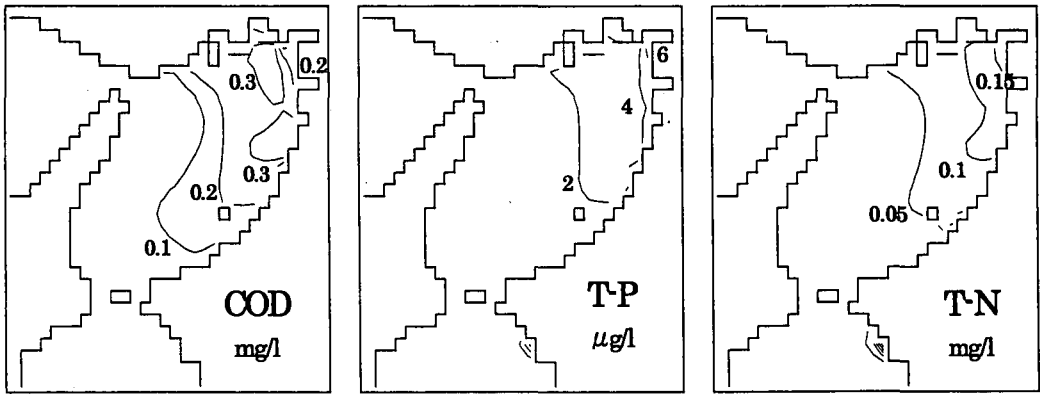


図-9 2010年における削減政策の効果

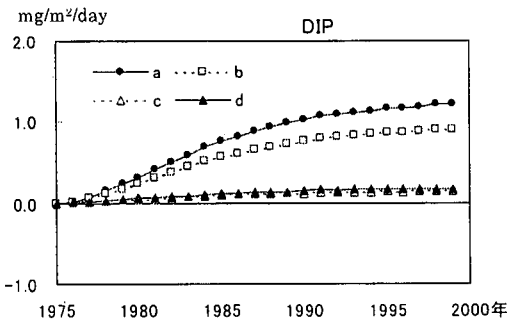


図-8 Pの削減施策による溶出速度の低減効果の経年変化

に、負荷量の削減により底泥からの溶出速度も $1.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 改善され、負荷量削減の効果が底泥の IP にも見られる。

(c) 将来 2010 年における効果

図-9 に 2010 年における海域の水質改善効果の平面分布を示している。COD 濃度を見ると、湾奥で $0.2\text{--}0.3 \text{ mg/l}$ 、湾央で $0.1\text{--}0.2 \text{ mg/l}$ の回復が予想される。また、海域の T-P 濃度も、湾奥で $6 \mu\text{g/l}$ 程度の水質改善が予想される。海域の T-N 濃度は、湾奥で $0.1\text{--}0.15 \text{ mg/l}$ 程度の水質改善が予想され、2010 年においては現況より 10% 程度の削減が見込まれている。

5. おわりに

本研究では、底泥モデルを含んだ水質モデルの構築に取り組み、大阪湾を対象に長期予測計算を行うことで、負荷量の累積的な効果が水質・底質に及ぼす影響について調べた。その結果、1979 年以降、大阪湾への流入負荷

量は減少してきたが、それに見合うだけ水質が改善されてこなかった。それは、1979 年以降、陸域からの負荷が削減されても、それ以前の陸域からの負荷量が底泥に堆積しており、この底泥の回復の遅れが、溶出速度の減少の遅れにつながり海域の水質改善を妨げていたことが原因であることがわかった。またこれまで環境保全を目的に負荷量削減政策を施行してきたが、COD の水質改善は期待された程大きくなかった。それは、海域の COD は内部生産によるものが大きいためである。今後、海域の COD 濃度を低減するためには、内部生産による COD を削減する必要がある。そのためには、内部生産に関わってくる海域の N、P 濃度を下げることが必要である。

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。

参考文献

- 大阪府環境保健部環境局水質課 (1998)：水質汚濁算定業務報告書
- 城久 (1986)：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. A.9. 1-28
- 細見正明 (1987)：湖沼底泥からの窒素・燐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