

大阪湾湾奥部のエスチュアリー循環と栄養塩収支

山根伸之*・寺口貴康**・中辻啓二***

1. 緒 言

内湾の富栄養化問題が顕在化してから、多くの年月が経過した。大阪湾においては、この間、下水道をはじめとする様々な流入負荷削減対策が実施されてきた。しかしながら、水質はここ数十年横這い状態にある。水質改善対策が一時に比べて効果を十分に発揮しなくなっている。大阪湾においてどのような汚濁機構がはたらいているのだろうか。内湾における水質汚濁機構を理解するためには、栄養塩の分布と挙動について当該海域で発生している物理的過程との関連において検討する必要がある。大阪湾のような広大な海域の汚濁機構については、水域間の物質輸送機構、汚濁要因間の相互作用について総合的な見地から分析を行う必要がある。このような定量的評価に関しては数値実験によらざるを得ない。著者らは陸水の影響の強い閉鎖性水域におけるエスチュアリー鉛直循環の重要性を指摘してきた。そこで、三次元流動、水質変化機構に係わる知見を総合的に取り込んだ三次元流動・生態系水質モデルを用いて、大阪湾における夏季の栄養塩の循環機構について数値実験を行い、湾奥部を中心とした流量フラックスや栄養塩フラックス、栄養塩収支について検討する。

2. 数値モデルの概要

本研究で用いた大阪湾水質モデルは、山根ら (1998) が構築した三次元バロクリニック流れモデルと一次生産を考慮した生態系水質モデルを用いている。

(1) 三次元バロクリニック流れモデル

流動・密度場の計算はこれまで中辻 (1994) が大阪湾で用いてきた三次元バロクリニック流れの数値モデルを用いる。数値モデルは連続方程式、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る。水平方向の渦動粘性係数ならびに渦拡散係数には SGS 粘性係数を用いて時空間変化を考慮している。鉛直方向の渦動粘性係数、渦拡散係数は

リチャードソン数の関数とし、湾内の成層状態を勘案している。

(2) 三次元生態系水質モデル

生態系水質モデルは窒素、リン、COD、溶存酸素の生物化学的な変化過程をモデル化している。物質の輸送、拡散は三次元バロクリニック流れモデルで予め求めた流速 3 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 (PP)、栄養塩として無機態窒素 (IN)、無機態リン (IP)、非生物体の有機態窒素 (NL-ON)、有機態リン (NL-OP)、化学的酸素要求量 (NL-COD)、さらに溶存酸素 (DO) を設定した。湾内の各物質の輸送ならびに変化過程の概要を図-1 に示す。ここで、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。

(3) 計算条件

計算領域は図-2 に示すように大阪湾を中心とした 64 km 四方を対象とする。水域分割は水平方向に 1 km メッシュ、鉛直方向は湾内の流動・密度の鉛直分布をより正確に表現するために、表層から 2 m×15 層位、4 m, 6 m, 10 m×2 層位の全 19 層位とした。計算に用いた夏季の境界条件を表-1 に示す。流動計算については海側の境界条件は明石海峡、紀淡海峡の外縁において平均潮 (M_2) の潮位変動と水温・塩分の鉛直分布を与えた。陸側境界は淀川・大和川をはじめとする主要 21 河川からの流入水量と水温・塩分を与えた。河川流入量や水温・塩分条件および海表面の熱収支条件は、既往の月別の観測データ

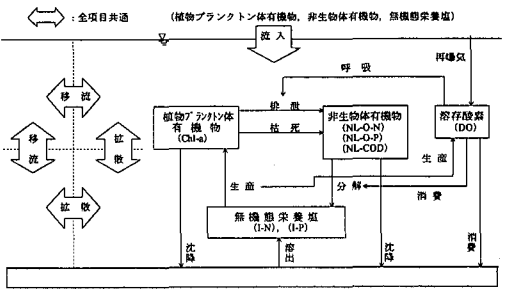


図-1 生態系水質モデルの物質循環模式図

* 正会員 工博 (株)建設技術研究所大阪支社
** (株)JR 西日本
*** 正会員 工博 大阪大学大学院 教授

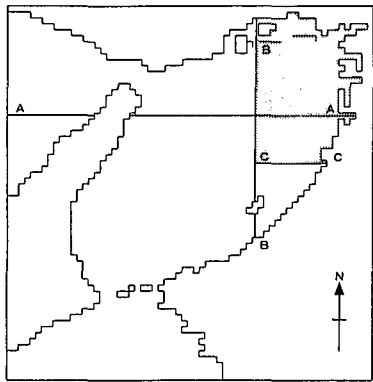


図-2 大阪湾の計算対象領域と格子分割

表-1 流動、水質計算の境界条件

モデル	境界条件		夏 季
流動 モデル	海面 境界	気 温 °C	26.7
		雲 量	6.7
		風 速 m/s	3.0
		水蒸気圧 hPa	25.8
		日射量 W/m ²	193.5
	陸側 境界	流入量 m ³ /s	淀川 367.9 大和川 27.2
		流入水温 °C	28.9
		流入塩分 Psu	20.0
		潮汐変動	M ₂ 分潮(平均潮)
	海側 境界	水 温 °C	22.0
水 質 モデル	陸側 境界	流 入	COD 423
		負荷量 t/日	T-N 253
			T-P 17
	海側 境界		COD 明石 2.6, 紀淡 1.9
		外 海	T-N 0.38, 0.38
		水 質	T-P 0.039, 0.031
		(mg/l)	クロロフィル 0.005, 0.005
			DO 8.1, 8.1

から7, 8月の平均値を設定した。流動計算は50 潮汐の
繰返し計算を行い、最終の50 潮汐目の流動・密度場の
時間変化を最終計算結果とした。水質計算については海
側境界に各物質濃度、陸側境界に各物質流入負荷量を与
えた。なお、各河川のクロロフィル a 濃度は10 μ g/l, 溶
存酸素濃度は飽和濃度とした。また、各種内部変化過程
におけるモデルパラメータについては既往の大阪湾にお
ける設定事例を参考に設定した。水質計算に用いた各空
間要素の水位、流速、水温、渦拡散係数は流動計算にお
ける30分毎のデータを計算時間間隔毎に線形補間して

与え、30 潮汐の繰返し計算を行った。

3. 大阪湾湾奥部の水収支構造

(1) 大阪湾湾奥部のエスチュアリー循環構造

図-3 は1 潮汐積分した流速場(残差流)と密度場の水
深3 m, 9 mの水平分布ならびに東西方向 A-A 断面の
鉛直分布を示す。大阪湾の密度分布の計算結果から、湾
西部は水深方向に密度がほぼ一様な強混合状態となっ
ており、湾東部は淀川系河川水に影響された成層状態と
なっている。大阪湾でみられる代表的な残差流は湾西部
の沖ノ瀬環流と湾東部の西宮沖環流である。沖ノ瀬環流
は潮汐に関連する残差流で明石海峡の南東部に現れる。
また、西宮沖環流は湾北東部の成層域の上層に発達する
時計回りの水平循環流であり、水深3~5 mに限って現
れる残差流である。図-3の水深3 m層に両残差流が再
現されているのがわかる。また、この成層海域では上層

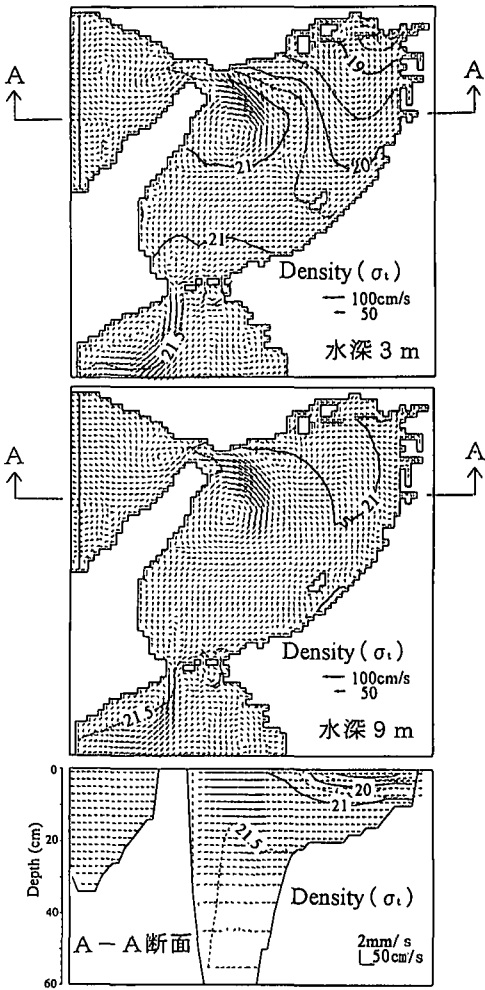


図-3 大阪湾の残差流と密度 (σ_t) の分布

では湾口に、下層では湾奥に向かうエスチュアリー循環が卓越していることが図-3の鉛直分布からわかる。

(2) 湾奥部の水収支構造

大阪湾湾奥海域では淀川水系からの陸水が滞留して、明瞭な密度成層が形成される。また、陸水とともに流入した汚濁負荷等起因して湾内でも最も汚濁の進んだ海域となっている。図-2に示す東西C-Cライン、南北B-Bラインによって囲まれる西宮沖環流系を含む東部湾奥海域(図中の色塗り部)を対象に水収支を検討した。湾奥海域は数値実験の鉛直水域分割の関係から水深6m以浅の上層と、水深6m以深の下層とに2分割した。

図-4は湾奥海域の水量収支を示す。湾奥海域の水収支は、上層では西部海域と南部海域へそれぞれ3,710 m³/s, 1,340 m³/sの流出があり、河川からと下層からの湧昇によりそれぞれ500 m³/s, 4,340 m³/sの流入がある。一方、下層では、上層と南部海域へそれぞれ4,340 m³/s, 1,170 m³/sの流出があり、それを補うように西部海域から5,410 m³/sの流入がある。藤原ら(1994)はこの鉛直上昇流が上層に存在する西宮沖環流の生成機構にとって重要であることを指摘している。同水域の断面平均的な湧昇流速として 1.13×10^{-3} cm/sが得られた。この値は、現地観測による流量、塩分収支から算定した柳(1993)の 2.6×10^{-3} cm/s, 湯浅ら(1993)の 1.13×10^{-3} cm/s, ならびに理論解析から得られた藤原ら(1994)の 0.69×10^{-3} cm/sとほぼ同様の値となっている。以上の計算結果より、東部湾奥海域での水収支構造を見ると、西部海域の下層から湾奥部下層へ流入した海水を100とすると、上層への湧昇(80)と南部海域への流出(20)にわかれる。つぎに、上層へ湧昇した海水(80)は河川流入水(9)と合わさって、西部海域(63)と南部海域(25)へ流出していることになる。これより、湾奥水域の上層

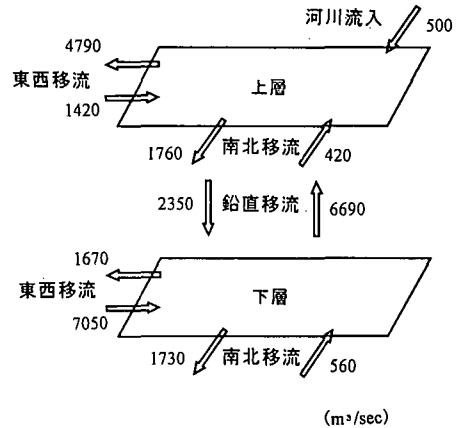


図-4 大阪湾湾奥部の水収支構造(残差流)

への海水の供給は、河川流入水の約9倍に相当する下層からの湧昇が主要な要因であることがわかる。今回得られたこのような東部湾奥海域での水収支構造は同水域の物質輸送、水質変化機構を理解する上で重要な知見となる。

4. 大阪湾湾奥部のリンの収支構造

(1) 大阪湾奥部のリン循環

大阪湾のリン循環は、陸域からの負荷流入、底泥からの負荷溶出、湾内における物質輸送、さらには輸送過程での内部生産、消滅等の各種変化過程の空間構造に支配されている。図-5は、各形態別リンの循環構造を理解するために、大阪湾長軸方向の代表地点(図-5のB~K)における形態別リン濃度の鉛直分布を示したものである。大阪湾の水収支構造から、東部海域の下層への海水は西部海域から湾奥に向かう流れによって供給されてい

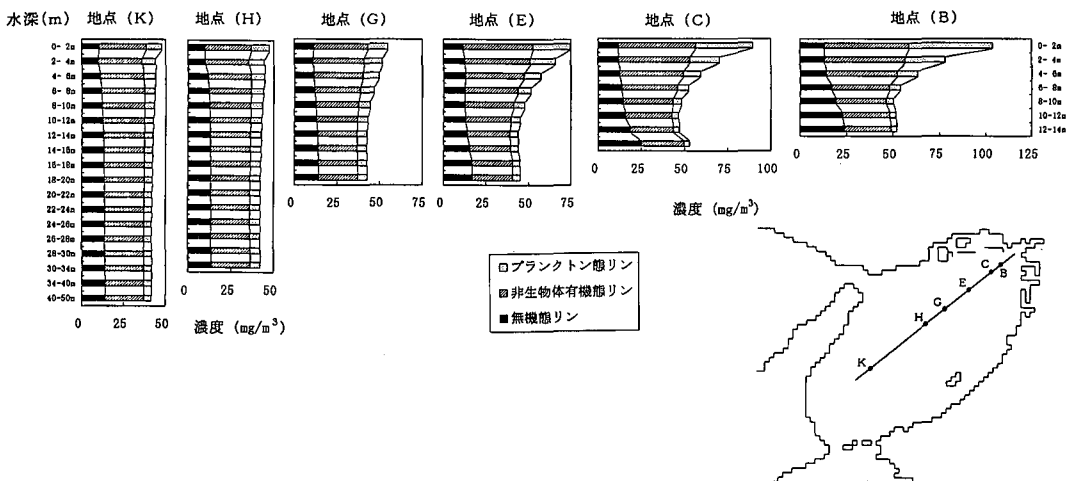


図-5 大阪湾長軸方向の代表地点における形態別リン濃度の鉛直分布

る。このため、東部海域下層の水質は西部海域の水質が大きく寄与しているものと考えられる。本計算結果でのI-P（無機態リン）の底層分布は西部海域と東部海域で明瞭な差が見られるが、T-P（総リン）の底層分布は西部海域と東部海域で差はあまり見られなかった。これは、東部海域のI-P濃度は西部海域の水質の影響を受けつつも、図-5のE地点から湾奥の分布で見られるように、底層では底泥からの溶出がI-P濃度に大きく寄与する。したがって、西部海域から進入した海水は徐々に底層から溶出した高濃度のI-Pを取り込んで濃度を上昇させる。東部湾奥部に近づくにしたがい下層全体にわたり濃度を上昇させている。西部海域からの比較的低濃度の海水の進入はむしろ成層界面下部の中層に見られる。さらに、流動特性の検討結果から、東部上層への海水供給は80%以上を下層からの湧昇が占めている。このことから、成層下部におけるI-Pの分布が、上層におけるI-Pの分布に影響を及ぼしていると考えられる。このため、湧昇に伴うI-Pの上層への供給は、I-P濃度が高くなる湾奥に近

づくほど大きくなるものと考えられる。さらに、上層に湧昇したI-Pは、西宮沖環流で再び水平循環を繰り返すなかで、プランクトンに取り込まれ、沖合に向かうにしたがい急激に減少している。このようなリンの循環機構により、大阪湾の東部沿岸域ではプランクトンの増殖が活発に行われ、常に赤潮の発生しやすい状態になっているものと考えられる。T-Pについては、底層のT-Pに占めるI-Pの割合が35%程度と少ないため、底泥からの溶出の影響よりも西部海域からの海水進入による希釈の影響が大きく、西部海域と東部海域で大きな濃度差が生じなかったものと推測できる。

(2) 湾奥海域のリン収支

大阪湾で最も汚濁の進んでいる湾奥海域を対象に、2潮汐積分したリンの収支（単位はトン/日）を算定した。対象海域は水収支の算定海域と同様である。図-6は夏季の形態別リン収支の結果を示している。総リンは、下層では周辺海域から14.9トン/日が流入する。下層においては、底泥溶出で6.4トン/日、上層からの沈降で3.5

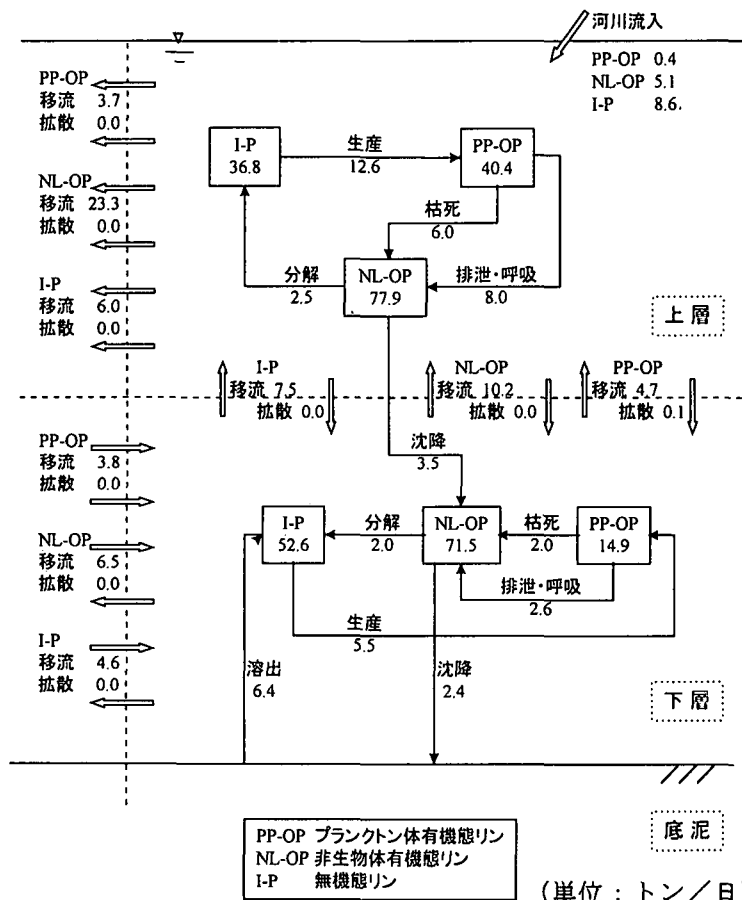


図-6 大阪湾湾奥海域の形態別リンの収支

トン/日供給され、逆に海底への沈降で2.4トン/日が消失する。これら内部変化過程を経て残る22.4トン/日が湧昇して上層へ供給される。上層では、陸域からの14.1トン/日に加わり、下層へ沈降で3.5トン/日が消失し、残る33.0トン/日が表層を通じて、主に西部海域へ流出する。東部湾奥の海底では、溶出と沈降の負荷収支から4.0トン/日の負荷が底泥から海域へ供給されていることとなる。次に、このうち無機態リンについて見ると、下層では周辺海域から4.6トン/日が流入する。さらに、下層内部で底泥溶出の6.4トン/日ならびに生産（植物プランクトンの摂取）や分解の過程を経て、残る7.5トン/日が湧昇している。上層では、陸域負荷流入8.6トン/日や分解の2.5トン/日に加わるが、プランクトンによる生産（摂取）で12.6トン/日が消費され、残る6.0トン/日が周辺海域へ流出している。なお、湯浅ら（1993）は大阪湾における実測から、湾奥海域の総リンおよびリン酸態リン収支を算定している。これによると、湾奥上層海域では、総リン（以下の（）内はリン酸態リン）については陸域流入12.1（4.9）トン/日、

下層からの湧昇 24.3 (10.8) トン/日, 下層への沈降 9.9 (0) トン/日, 残る隣接水域への流出 26.5 (10.0) トン/日となっている。これは, 本計算で算定したリン収支と概ね一致している。本計算の結果から, 湾奥海域においては, 湧昇に伴い下層から上層に供給されるリンは, 陸域流入負荷を 100 とすると総リンで 160, 無機態リンで 110 となる。以上の考察により, 東部海域の上層では, 陸域負荷量の流入と同程度の負荷量が下層から供給されていることとなる。

5. ま と め

本研究で得られた結果をつぎに示す。

(1) 東部湾奥海域の水収支構造は河口沿岸域特有のエスチュアリー循環が支配的であり, 夏季における上層水への海水供給は下層からの湧昇が河川水流入の約 9 倍に相当することがわかった。

(2) 大阪湾の夏季の水質分布は, 湾内の流動(とくに残差流系)および密度場に強く支配されている。東部湾奥海域では, クロロフィル a の増殖に必要なリン栄養塩の供給は, エスチュアリー循環に伴う下層から鉛直移

流によりもたらされていることが明らかとなった。

(3) 東部湾奥海域におけるリンの負荷収支の算定結果から, 東部成層海域の上層へのリンの供給は, 陸域負荷とほぼ同規模のものが下層からの湧昇により供給されていることが判明した。この事実は水質改善対策を講じるうえで重要である。

参 考 文 献

- 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.
- 藤原建紀・澤田好史・中辻啓二・倉本茂樹 (1994): 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性—内湾奥部にみられる高気圧性渦—, 沿岸海洋研究ノート, 第 31 巻, 第 2 号, pp. 227-238.
- 柳哲雄・水野裕・星加章・谷本照己 (1993): ボックスモデル法による大阪湾の鉛直流速と粒子沈降速度の推定, 沿岸海洋研究ノート, 第 31 巻, 第 1 号, pp. 121-128.
- 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二・村岡浩爾 (1998): 大阪湾における水質の季節変動に関する数値実験, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 739-744.
- 湯浅一郎・上嶋英機・橋本英資・山崎宗広 (1993): 大阪湾奥部の循環流とリンの循環, 沿岸海洋研究ノート, 第 31 巻, 第 1 号, pp. 93-107.