

近年 70 年の大阪湾水質の時間変化と環境事後評価の試み

中 辻 啓 二*・寺 口 貴 康**・山 根 伸 之***

1. はじめに

大阪湾の水質の長期観測データを分析した結果, つぎに示す興味深い結果を得た(山根ら; 1997). 1928 年 6 月に大阪湾湾奥海域で観測された透明度は 3 m であり, 現在とほとんど変わらない. 湾奥海域の水質は戦前においても既に悪化している. 透明度をはじめとして, COD や夏季底層の DO の飽和度等は現在の水質レベルと大きく違わなかった. 戦前から現在に到る大阪湾沿岸陸域の人口増加や産業の発展にはめざましいものがある. 1960 年代の高度成長期における増加率は顕著である. ことにこのような沿岸域の経済的な発展による栄養塩の流入負荷量の増加や地形改変の影響を受けて, 大阪湾の水質は著しく悪化したと言われている. 本当に悪化したのだろうか? 大阪湾は昔から汚かったのではないだろうか?

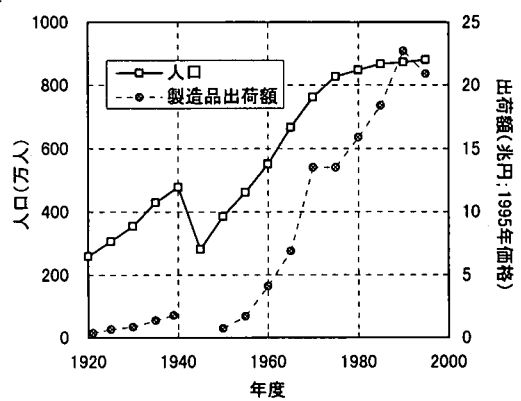
本研究では沿岸域の社会環境データを収集して 1920~1995 年間の沿岸陸域からの栄養塩の流入負荷量を算定し, 沿岸海域で観測された水質変動との因果関係を明らかにする. さらに, 1935, 1965, 1970, 1990 年の地形と算出した流入負荷量を与えた数値実験を実施し, 沿岸域の開発が水質変動に与えた影響を定量的に評価する. アセスメントが環境事前評価であるならば, 今回の試みは環境の事後評価と言える.

2. 大阪湾の水質の変遷と沿岸域開発の影響

(1) 沿岸域の社会環境の変遷

大阪湾の流域は 2 府 5 県にまたがり, 流域内人口は約 1,600 万人, 流域内製造品出荷額は約 40 兆円となっている. 神戸から大阪府泉南域にいたる沿岸域は, 人口や産業の集積が著しく進んでいる. 大阪湾は古くから我が国の経済の中心として栄えてきた. 現在では, 神戸, 尼崎から大阪, 堺, 高石にいたる臨海工業地帯には重化学工業関連の多くの工場が存在する.

大阪湾沿岸域のうち, 流域内人口の 60% 弱, 製造品出荷額の 50% 強を占める大阪府を対象にして人口と製造



図一1 大阪府の人口と製造品出荷額の変遷

品出荷額の変遷を図一1に示す. 大阪府の人口は 1935 年において 430 万人, 終戦時に人口の減少があったものの, その後急激に増加して, 高度成長期中の 1970 年には 760 万人, そして 1995 年現在で 880 万人となっている. 現在の人口は戦前人口の約 2 倍となっている. 一方, 出荷額 (各年度とも 1995 年価格に換算) は 1935 年には 1.4 兆円, 戦後 1965 年頃から急激に増加して 1970 年には 13.5 兆円, そして 1995 年では 20.9 兆円となっている. 現在は戦前の約 15 倍の出荷額になっている.

関西圏はもとより土地, 特に平地の面積が狭い. よって, 経済活動の拠点となるべき用地の確保は必然的に沿岸域の埋立による必要があった. 戦後の埋立て面積は 6,300 ha に及ぶ. 戦後臨海部では巨大な鉄鋼, 石油コンビナートとともに, 物流拠点としてコンテナ埠頭があいついで建設された. その後, 瀬戸内海での水質汚濁が進み, 1973 年には瀬戸内海環境保全臨時措置法が制定され, その後埋立て件数は急激に減少した. しかしながら, 同法の施行後以降もポートアイランド第 2 期 (390 ha) や関西国際空港 (511 ha) などが実施されてきた. また, 近年では産業構造の転換の中で, 低・未利用化の進む既存埋立地の活用と沿岸開発を併行して進めることを目的とした大阪湾臨海地域開発整備法が 1992 年に制定され, 多数のプロジェクトが積極的に推進されようとしている.

* 正会員 工博 大阪大学教授 (大学院)
** 正会員 工修 西日本旅客鉄道
*** 正会員 工博 (株)建設技術研究所大阪支社

(2) 流入負荷量の算定

城 (1986) は 1955 年から 1982 年に至る 28 年間の負荷量算定を行っている。城の手法に倣い、負荷量の算定を行った。対象項目は BOD, COD, SS, N (窒素), P (リン) であり、排出源として生活廃水、産業排水、家畜廃水、農地排水を考え、各排出源別に負荷量を算定した。対象区域は大阪府全域とする。城によると湾全域からの流入負荷量に対する兵庫県との寄与率は、1971 年の時点で BOD と N が 23%, P は 25.4% である。この地域における人口動態や産業構造に特筆される変化が生じているとは考えられないことから、湾全体の排出負荷量が必要なときは、この寄与率を用いる。フレームとして、人口、家畜飼育頭数、化学肥料使用量、工業出荷額を大阪府統計年鑑や大阪府生活環境部資料等より調査し、対象項目別の原単位を設定して、1920～1995 年間の 5 年毎の負荷量を算定した。

算定結果のうち COD, 窒素, リンの値を運輸省第三港湾建設局の 1990 年度の推計値と比較したのが、表-1 である。但し、前述の寄与率をかけて、大阪湾への流入負荷量に換算している。COD と窒素の算定値は高く、リンは低くなっている。しかし、その差は許容範囲内であり、算定結果は妥当であると判断した。

表-1 算定負荷量の比較

対象水質	今回算定値	第三港湾推計値	差(%)
COD	376.6	356.9	5.5
N	219.1	201.0	9.0
P	14.0	15.8	11.5

3. 大阪府域からの流入負荷量の経年変化

図-2 は COD, 窒素, リンの流入負荷量の経年変化を排出源別の内訳も含めて示す。いずれの項目も 1935 年から終戦時にかけて一時減少している。その後の 1950 年以降には急激に増加している。COD は産業排水の急激な増加に伴って 1970 年まで増加し、その後は一転して 1995 年まで減少傾向が続いている。COD の減少は下水道整備やリンの使用規制に伴う生活廃水の減少に起因していると考えられる。窒素は 1970 年までは産業排水、生活廃水の増加により、急激に増加しており、その後も現在まで増加傾向にある。リンは COD と同様に 1970～1975 年まで急激に増加しているが、これは主に生活廃水の増加に起因している。その後、リンは急激な減少を示し、現在は 1965 年レベルまで減少している。リンの減少は下水道の普及や瀬戸内法による使用規制による生活廃水の減少によるものである。

このように、大阪湾へ流入汚濁負荷量は、戦前の 1935 年を基準にすると、1970 年時点では COD で 3.1 倍、窒素

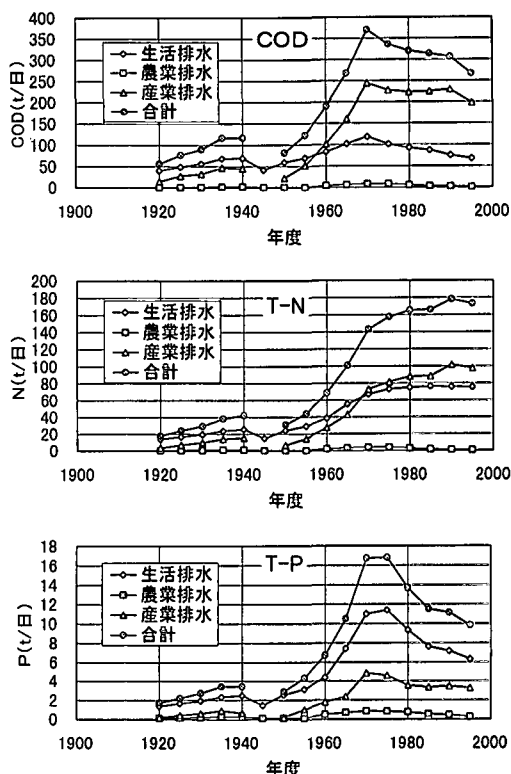


図-2 大阪府域からの流入負荷量の経年変化

では 3.8 倍、リンでも 4.8 倍になっている。さらに、1995 年では COD で 2.2 倍、窒素で 4.5 倍、リンで 2.8 倍の増加である。公害対策基本法が施行された 1972 年以降、様々な水質改善施策が実施されてきたが、COD とリンの流入負荷量でみると、有効な負荷削減がなされていることが分かる。

(4) 流入汚濁負荷と水質の関連

図-3 は算定した流入汚濁負荷量と湾奥海域で観測された表層水質の観測値の経年変化を示す。COD は 5 月の値、リン酸態リンは年平均値であり、観測値のばらつきが大きいことから 3 年移動平均して記載している。両図で明瞭なことは、浅海定線観測調査が始まった 1972 年以降の観測値の年変化が、流入負荷量の変化と酷似していることである。COD の流入負荷量は 1970 年をピークに緩やかに減少しているのに対して、COD の観測値も全体的に緩やかな減少傾向にある。リンの年変化はもっと明確である。流入負荷量は 1950 年代から急激に増加し、1970 年代前半をピークに、今度は急激に減少する。湾奥表層で観測されたリン酸態リン濃度も 1970 年頃から急激な増加を見せ始め、1979 年にピークを迎えて、その後は急減している。4～5 年の遅れはあるものの両者の傾向は一致している。窒素は図には示さないが、観測値は 10 年程度の遅れ時間で流入負荷量の経年変化に追随してい

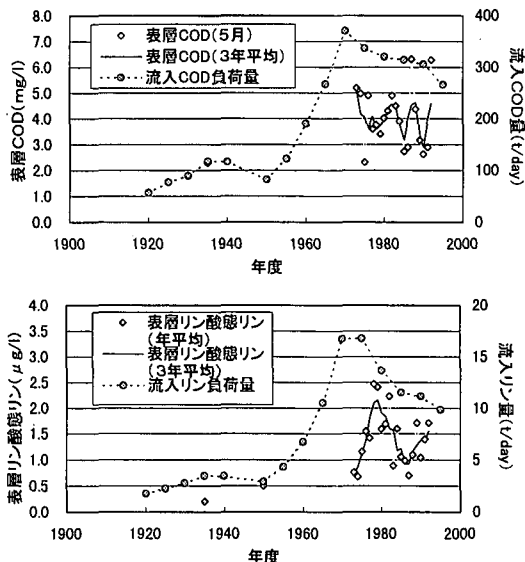
る。これらの遅れ時間は底泥への堆積あるいは溶出と強く関係していると思われる。1935 年の COD の観測値を見ると、流入負荷は 1980 年代の 1/3 程度なのに対して、表層 COD は 1/2 に近い値である。戦前には陸域からの負荷流入が少ないにもかかわらず、湾奥海域の COD

は高い値が観測されていた(山根ら, 1997)。このことは、湾奥海域においては陸域起源よりも、海域起源の COD が支配的であると推察される。このような見方に立つと、リンは陸域からの汚濁負荷の流入量に強い影響を受けている。つまり、陸域起源のリンによって湾奥部の表層リン濃度は支配されていると考えられる。

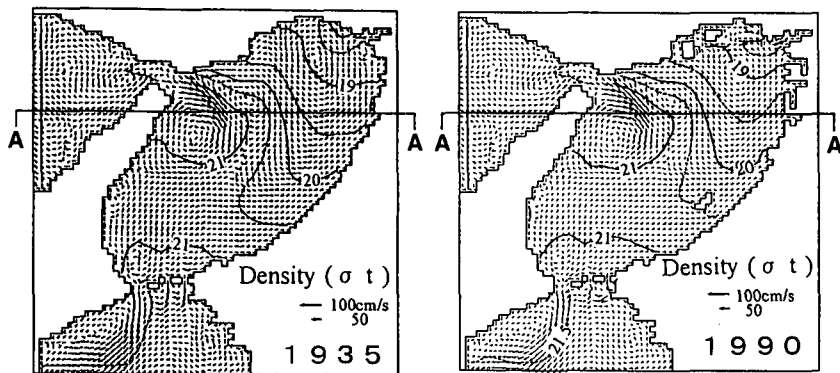
3. 大阪湾の水質の環境事後評価

(1) 数値モデルの概要

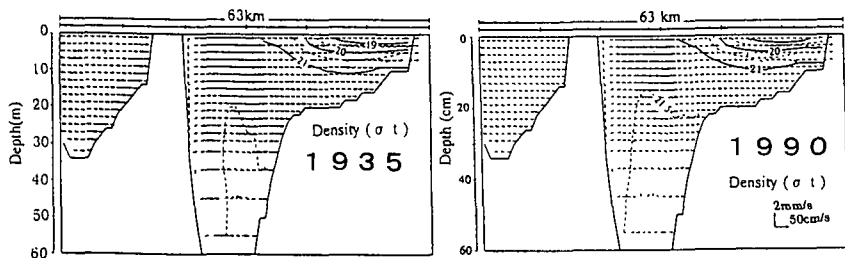
三次元流動場と密度場の計算はこれまで大阪湾で用いていたパロクリニック流れの数値モデルを用いる。詳細は中辻(1994)に記載している。生態系水質モデルは、生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィル a (PP), 栄養塩として無機態窒素 (IN), 無機態リン (IP), 非生物体の有機態窒素 (ON), 有機態リン (OP), 化学的酸素要求量(COD), さらに溶存酸素(DO)の生物化学的な変化過程をモデル化したものである。非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の有機物の総称としている。物質の輸送・拡散等の物理過程は、パロクリニック流れモデルで予め求めた流速 3 成分ならびに渦拡散係数を用いる。水質モデルの詳細ならびに数値実験の設定条件も山根ら(1998a, 1998b)と同じであるので、参考にされたい。



図一3 陸域からの流入汚濁負荷量と湾奥表層で観測された COD とリン酸態リンの経年変化



図一4(a) 水深 3 m の残差流の比較



図一4(b) A-A 断面

(2) 本数値実験の狙い

観測データのある, 1935, 1965, 1970, 1990 年の地形と算出した流入負荷量を与えた数値実験を実施し, 沿岸域の開発が水質変化に及ぼす影響を定量的に評価する。外海境界の水質の値は 1983~1992 年の浅海定線調査の値を用いた。また, 水質の汚濁状態を検討することから, 成層の発達する夏季を対象にする。

(3) 戦前・戦後における大阪湾の流動構造の比較

1935 年地形と現況 (1990 年) 地形における残差流系と一潮汐間積分した密度場を比較した結果を図-4 に示す。平面図は水深 3 m, 断面図は図中に示す A-A 断面である。密度場の違いはほとんどないが, 残差流ベクトルは異なっている。西宮沖環流は 1935 年地形においても存在しているのが明瞭に分かる。その中心位置は現況より 2 km ほど北に移動して, 神戸の元の海岸線まで広がり, 現在の六甲アイランドから東側は東向きの流れ, 西側では西向きの流れを形成している。また, 下層ではエスチュアリー循環に伴う東向きの流れが一様に形成されている。大阪港から堺港周辺においても, 表層は南流, 下層

は東流である。防波堤や港湾施設のない 1935 年地形ではエスチュアリー循環や西宮沖環流は単純な形態をとる。

図-5 は図-6 に示す代表位置における一潮汐間の最大流速と最小流速の比較を示す。湾奥海域全域において, とくに西宮防波堤沖の B, 防波堤内 C, 神戸沖 G において, 現況の流速が減少している。埋立てや防波堤の建設によって沿岸域だけでなく, 湾奥海域全域の流動が停滞しているのが分かる。他方, フロントより西部海域ではわずかに増加傾向にあり, 沿岸域の開発が大阪湾全域の流動に影響を及ぼしている。

(4) 過去の大阪湾の再現計算結果

用いた流入汚濁負荷量は表-2 のとおりである。地形は対象年度の地形を 1 km メッシュで再現した。また, 両者の影響のほとんどが表層水質に対してであるので, 表層の COD とリンの平面分布を図-6 に示す。ただし, 紙面の都合上, 1965 年の計算結果は割愛した。

1935 年には COD が 5 mg/l 以上の汚濁水域は, 西宮から大阪港の範囲の湾奥域と神戸の沿岸部のみである。1965 年になると汚濁水域はやや南方に広がる。また, 神戸沖に設置された防波堤の背後地において汚濁水域が出現している。陸域からの流入が最大となる 1970 年には, 汚濁水域は南方に拡大し, 大和川河口部まで達する。1990 年になると, 陸域からの流入は減少するものの, 汚濁水域はさらに南方に拡大し, 大阪市沿岸部がほぼ完全に汚濁水域となる。これに対して, 西方の神戸沖は汚濁水域が後退しているものの, 防波堤や六甲アイランド, ポートアイランドの背後地は汚濁水域となっている。防波堤

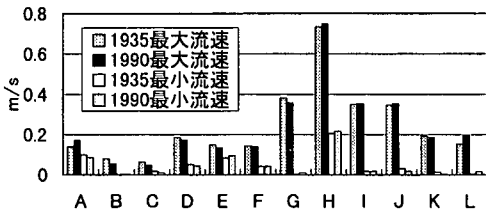


図-5 代表位置における流速の比較

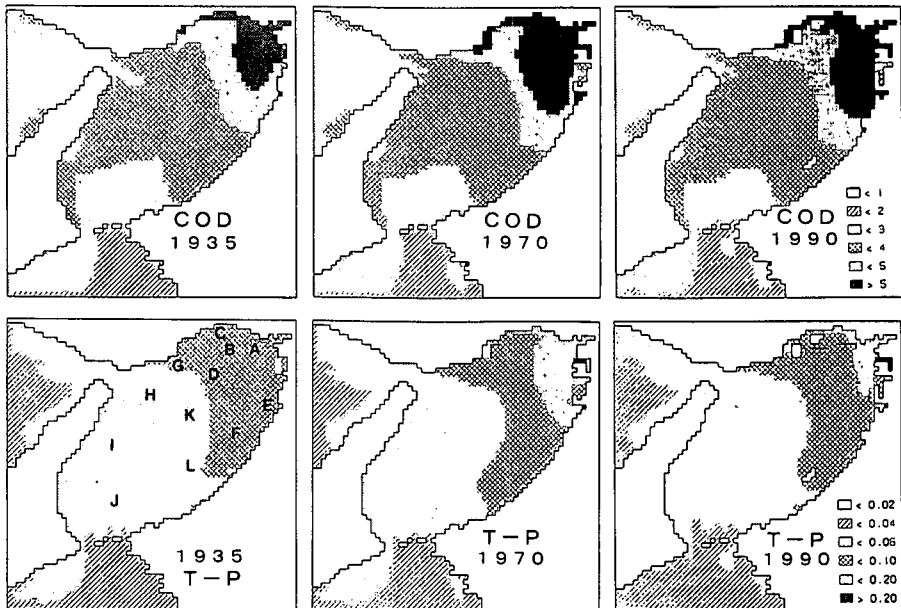


図-6 COD と総リンの表層の平面分布の経年変化

表一1 流入汚濁負荷量 (t/day)

対象年	COD	T-N	T-P
1935	143.7	46.7	4.3
1965	328.7	123.9	13.2
1970	455.5	176.4	21.0
1990	376.6	219.1	14.4

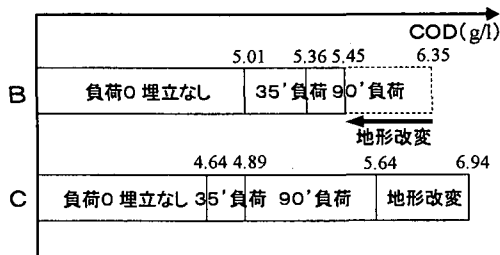
を挟んで水質が異なっている。汚濁水域は年代を経るごとに神戸沖、堺沖に広がっている。また、5 mg/l 以下の水域は各年度で変動はなく、西部海域での水質変動は見られない。

表層総リンに関していえば、0.1 mg/l 以上の汚濁水域は 1935 年には湾奥の沿岸に少し見られるだけである。1965 年になると陸域からの流入負荷量が 3 倍になったことが原因して、汚濁水域は西宮から大阪港の湾奥水域に一気に拡大している。神戸沖の防波堤背後にも現れている。陸域からの流入負荷が最大となった 1970 年には、汚濁水域の南縁は堺沖まで拡大する。西方には神戸の岸沿いを除いて 1965 年時とほとんど違いはない。1990 年になると、陸域からの流入負荷がほぼ 1965 年並にまで減少したこともあり、汚濁水域は縮小している。その大きさは 1965 年よりも小さくなっている。それに代わって、防波堤内や埋立背後地に汚濁域が存在することになる。1965 年には沖へ流出していた陸域負荷が埋立地等によりトラップされているためと考えられる。T-P についても西部海域では各年度ともほとんど変化はない。潮汐フロント上には各年度ともに 0.06 mg/l の等値線が存在している。

5. 水質の変化に及ぼす影響要因の分析—まとめ

大阪湾の水質の変化は流入負荷の変動と地形改変の影響によって生じている。それぞれの影響が、どの程度であるのかを、前章までの数値実験に流入負荷量がゼロである条件設定も含めた系統だった数値実験を実施した。

図一7 は湾奥水域 B と防波堤内水域 C における表層 COD の構成別内訳を示す。地点 B と C は流入負荷、地形改変それぞれの影響が強い地点である。負荷が 0 で戦前地形の場合には地点 B で 5.01 g/l、地点 C で 4.64 g/l である。地点 B の値が大きいのは、淀川河川水の影響をより多く受けるためである。これに 1935 年の負荷が加わると地点 B では 5.36 g/l に、地点 C では 4.89 g/l に濃度は



図一7 湾奥海域における COD の影響原因

増加する。さらに 1990 年の流入負荷を与えると地点 B では 6.37 g/l、地点 C では 5.64 g/l に増加する。地点 B、C それぞれの流入負荷による増加分は 1.34 g/l、1.00 g/l である。しかし、これに 1990 年時の沿岸地形を加えると、地点 B では 5.39 g/l と減少するのに対して、地点 C では 6.94 g/l とさらに増加する。地形改変による増加分は地点 B、C それぞれ -0.99 g/l、1.30 g/l である。地点 B では流入負荷による影響が地形改変による影響よりも大きい、地点 C では逆に地形改変による影響が流入負荷による影響よりも大きくなっている。流入負荷に関しては、負荷削減の結果が水質にも反映されており、その効果は確実に表れている。しかし、地形改変については埋立や防波堤により、その内の水質が悪化した反面、その外の水域の水質が回復するという結果になっており、これに関する対策にはさらなる知見が必要であろう。

謝辞：本研究の実施に関しては文部省科学研究費補助金 (基盤研究 09555158；基盤 C 20093445) の援助を得た。

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, 91-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A-1-28.
- 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二・村岡浩爾 (1997): 浅海調査に基づく大阪湾の水質・密度構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第 43 巻 (1), pp. 331-335.
- 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二・村岡浩爾 (1998a): 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.
- 城久 (1986): 大阪湾における富栄養化の構造, 富栄養化が漁業に及ぼす影響について, 大阪府水産試験場報告, 第 7 号, pp. 1-74.
- 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二 (1998b): 大阪湾湾奥部のエスチュアリー循環と栄養塩収支, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1061-1065.