

水工学シリーズ 09-B-7

河口沿岸域の水環境問題

大阪大学大学院 工学研究科 教授

西田 修三

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

河口沿岸域の水環境問題

Water Environmental Issues in Estuary

西 田 修 三

Shuzo NISHIDA

1. はじめに

淡水と塩水が混じり合う河口沿岸域は、豊かで多様な生態系を有し、良好な漁場として利用されてきた。しかし、高度経済成長期には陸域負荷の増大にともない、沿岸域の水質は極度に悪化し、富栄養化の進行による赤潮の発生や底質の悪化が生じ、一部海域では底層の貧酸素化にともなう青潮の発生も見られるようになった。本講では、まず、このような沿岸域の水環境の劣化について、その進行が顕著な大阪湾の河口沿岸域を例に、その現状と問題点について述べる。次いで、劣化のメカニズムを理解するために栄養塩や濁質等の物質動態について解説し、そのモデル化についても解説する。最後に、現在、国が進めている水環境の再生施策について紹介する。

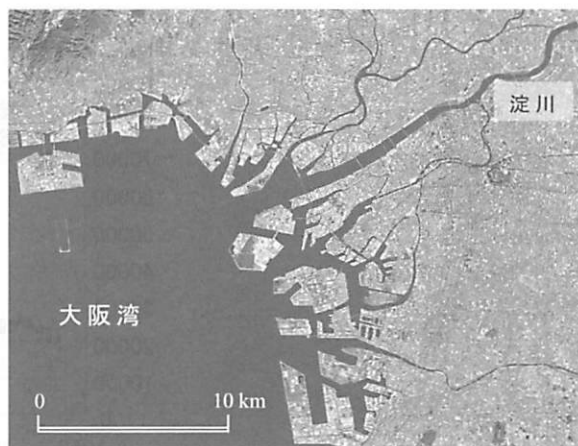


図-1 淀川河口域

2. 水環境の変遷と劣化の現状

(1) 赤潮現象

図-2 は、大阪湾に注ぐ淀川の水質と河口沿岸域の水質の経年変化を示したものである¹⁾。年平均流量は年によって変動はあるが、概ね $150\sim300\text{m}^3/\text{s}$ を有し、大阪湾に流入する河川流量の約 70～80% を占める。1970 年代の経済成長期に水質が悪化し、流入負荷が増大したことがわかる。図には、赤潮発生件数もあわせて図示している。

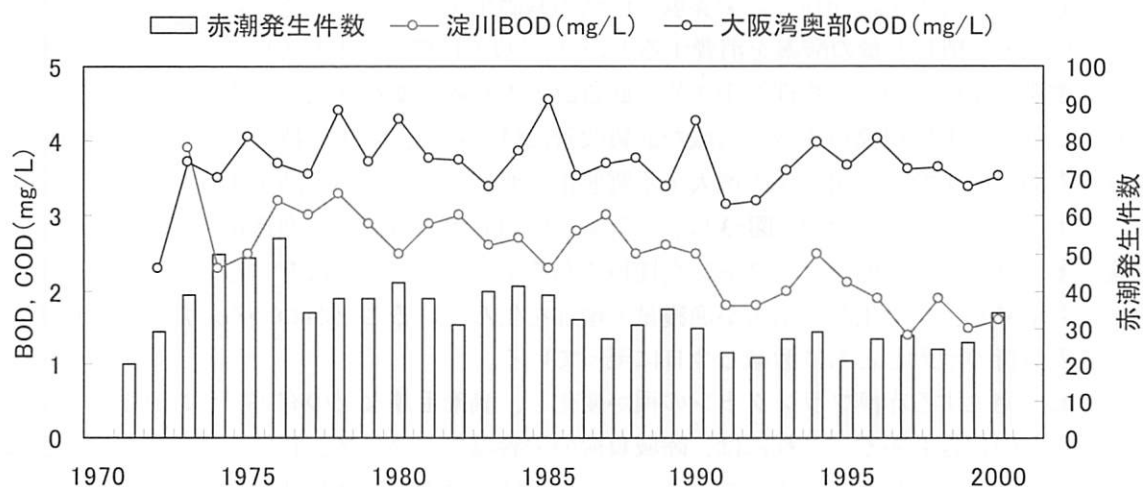


図-2 水質の変遷と赤潮の発生状況

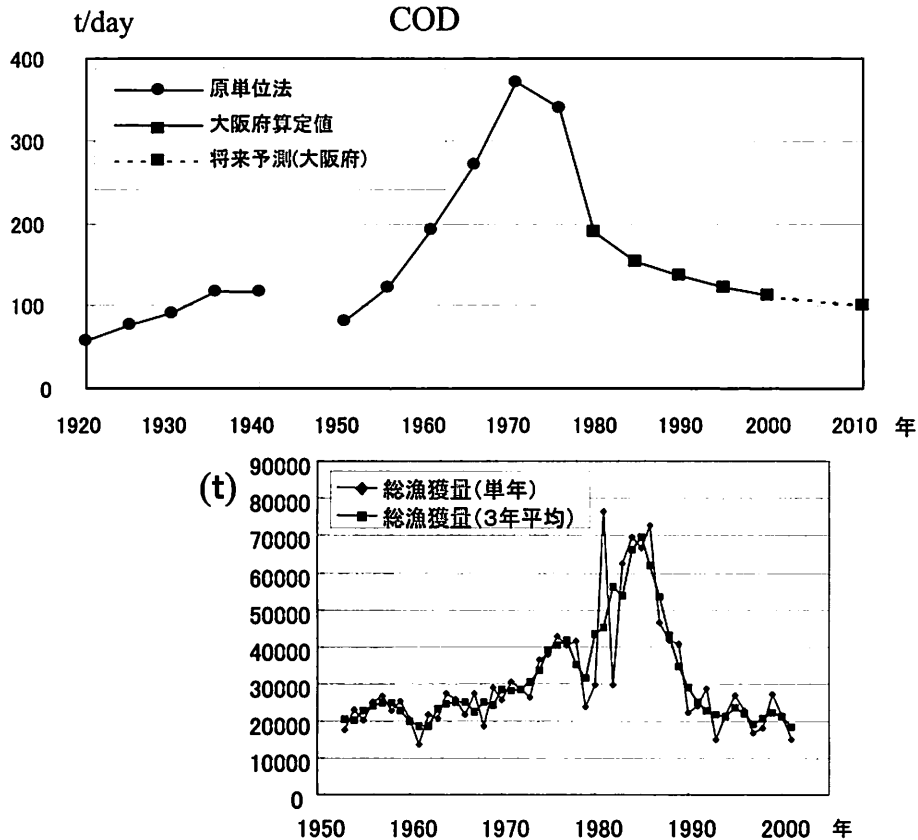


図-3 流入負荷量と漁獲量の推移

東京湾や大阪湾に代表されるような閉鎖性内湾の水質は、陸域からの流入負荷によって決定されと考えられてきたため、排水の濃度規制や総量規制等の負荷量削減施策によって水環境の改善を図ってきた。しかし、図-2 に示す赤潮発生件数の推移からもみてとれるように、排水規制の強化により発生件数の低下はみられるものの、流入水質の改善率に比して減少割合は小さく、30 年余におよぶ規制にも拘わらず未だに赤潮が頻発し、期待したほどの改善効果は得られていない。中辻ら²⁾は、後述の低次生態系水質モデルを適用して、大阪湾における削減・規制施策が水質保全に及ぼす影響を 1950 年から 2020 年に亘って再現・予測し、総量規制等の排水規制施策と富栄養化対策ならびに環境再生施策を合わせた政策の展開が好ましいと述べている。

海域の水質が改善しない原因の一つとして、長年にわたり海底に堆積した有機物の分解・溶出現象が挙げられる。この底泥から海水中に回帰した栄養塩が内湾の基礎生産を促進し、その結果大量に発生した植物プランクトンが枯死・堆積し大量の酸素を消費するという、「負の循環」が生じている。この循環を断つための方策として、浚渫や覆砂といった物理的手法や、底質改善のための薬剤注入などの化学的手法が一部の水域で講じられているが、実施規模が小さく広域な底質改善には至らず、効果の持続性も低いのが現状である。

このように赤潮の発生など一次生産の増大が水質悪化の要因ではあるが、漁業生産の面からは富栄養化は必ずしもマイナス面ばかりではない。図-3 は、大阪湾への COD 流入負荷量と漁獲量の変化を比較したものである。漁獲の多くはイワシ等のプランクトン食性種であるが、タイムラグは有するものの流入負荷の増減に呼応して漁獲も増減し、一次生産の増大が漁獲量の増加を生んでいることがわかる。ただし、底生魚介類については、流入負荷の増大とともに激減し今日に至っている。

近年、沿岸域で発生する赤潮プランクトンの種が変化し、渦鞭毛藻などの有害プランクトンの発生頻度が高くなっているとの報告もある。これには、陸域負荷の栄養塩のバランス、特にシリカの欠乏や、海水温の変化等が影響していると言われている。このように、沿岸域では赤潮の発生件数ばかりではなく種（質）の変化も問題となっている。

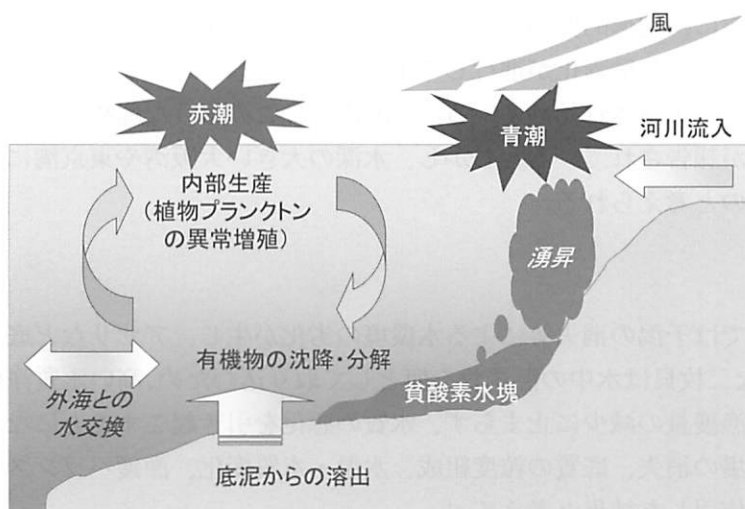


図-4 赤潮と青潮の発生機構

(2) 貧酸素水塊の発生と青潮現象

赤潮の発生とともに問題となっているのが青潮現象である³⁾。前述のように赤潮は植物プランクトンの異常増殖現象であるのに対し、青潮現象は底層に形成される硫化物を含んだ無酸素水塊の湧昇によって発現する。近年、栄養塩濃度 (TN, TP) や有機物濃度 (COD, TOC) に加え、溶存酸素濃度 (DO) が水域の健全化を表す指標として注目されるようになった。それは生物の生息環境と密接に関わっているためで、例えば、DO が 3 mg/L 以下では生物の生息が難しいとも言われており、この 3 mg/L を貧酸素化の目安とすることが多い。

底層の貧酸素化は、陸域から供給される有機物や海域での内部生産によって発生した有機物が沈降・堆積し、その分解過程で酸素を消費することにより生じる。貧酸素化の進行は、水域の成層構造と大きく関わっている。夏期の水温成層の形成や河口域の塩淡水成層の存在により水塊の鉛直混合が抑制され、表層からの酸素供給量が大きく低下することによって生じる。さらに貧酸素化が進行すると底層は無酸素化して硫化水素等が発生する。冲向きの出し風の連吹によりこの硫化水素を含んだ無酸素水の湧昇が沿岸部で起こり、表層で酸素と反応して青白く発色した青潮を惹起する。

図-5 に貧酸素化が進行した夏期 (2002 年 7 月 31 日) に淀川河口の西側に位置する尼崎西宮芦屋港において観測された、DO 濃度、密度、クロロフィル a 濃度の鉛直分布を示す。DO 濃度、クロロフィル a 濃度が急変する深度は、密度躍層の位置とよく一致している。つまり、躍層の存在により鉛直拡散が抑制され、下層の貧酸素化が進行していることがわかる。この水域の貧酸素水塊は少なくとも 6 月から 11 月の長期にわたって存在し、多少の風や気温低下では解消されにくく、都市沿岸域の水環境と生態系に大きな影響を及ぼしている⁴⁾。貧酸素水塊の発生は、陸域からの栄養塩の供給と底泥からの溶出、一次生産と有機物分解等の生物化学過程と、物質の輸送と拡散を決定する物理過程に支配されている。しかし、河川から供給される栄養塩の動態と河口沿岸域における一次生産の実態については未だ不明な点が多い。

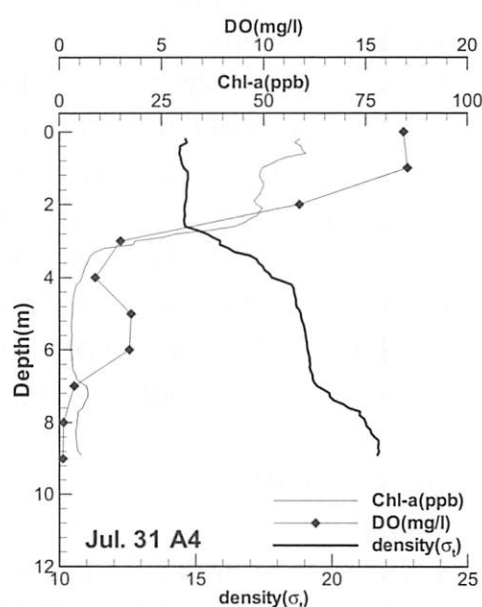


図-5 夏季の水質鉛直分布 (2002/7/31)

また、貧酸素水塊の発生には地形的要因もある。例えば、航路浚渫や埋立土砂の採取等で生じた窪地では流動が弱く停滞性が強いいため、貧酸素化が進行しやすい。現在、国や地方自治体では、沿岸域の水質改善の一貫として窪地の埋め戻しが実施され始めている。三河湾ではこのような埋め戻しにより、水質の改善とともに魚介類の斃死の改善が報告されている。しかし、水深の大きい大阪湾や東京湾においては、三河湾ほどの効果は期待できないものと考えられる。

(3) 生態系の異変

臨海開発により沿岸域では干潟の消失等による水環境の劣化が生じ、アサリなど底生生物の激減が報告されている。アサリのような二枚貝は水中の懸濁物を餌として取り込むため、高い水質浄化機能を有している。アサリの激減は、単なる漁獲量の減少に止まらず、水質の悪化を引き起こすことになる。激減の原因としては、干潟・浅場など生息場の消失、底質の粒度組成、水温・水質変化、漁獲バランス、等が考えられるが、むしろこれらが複合的に作用した結果と考えるべきであろう。

近年、河口沿岸域は漁場としての有用性ばかりでなく、浅場や干潟が有する自然浄化機能が再認識され、環境の保全と創造に向けた施策も講じられるようになってきた。沿岸汽水域における生態系の安定性は、栄養塩等の物質循環に大きく依存している。その一方で、生息する生物自体が物質循環の連鎖に組み込まれ、その水域の水環境に大きな影響を及ぼしている。したがって、河口沿岸域における水環境の管理と保全のためには、生態系を考慮した水質特性の把握と予測が必要となる。

ノリの色落ち問題も河口沿岸域の水環境問題として関心を集めている。ノリは植物プランクトンと同じく栄養塩を摂取して成長するが、ノリは冬期に成長するため、通常は植物プランクトンとは競合せず栄養塩の摂取が可能である。しかし、最近栄養不足による色落ちが頻繁に発生するようになってきた。これには、陸域負荷の削減による流入栄養塩の減少や、海水温の上昇、さらにはノリと競合する大型珪藻類（ユーカンピア等）の発生等が関わっているものと考えられている。河口沿岸域の水質改善に最も効果的と考えられている流入負荷の削減施策も、「豊かな海」「里海」としての生態系バランスを考慮する時期にきている。

3. 河口沿岸域の物質動態

(1) 河川水の流入

河口沿岸域では、淡水の供給とともに土砂や栄養塩等の物質供給もあわせてなされる。特に出水時には土砂とともに大量の栄養塩も供給される。

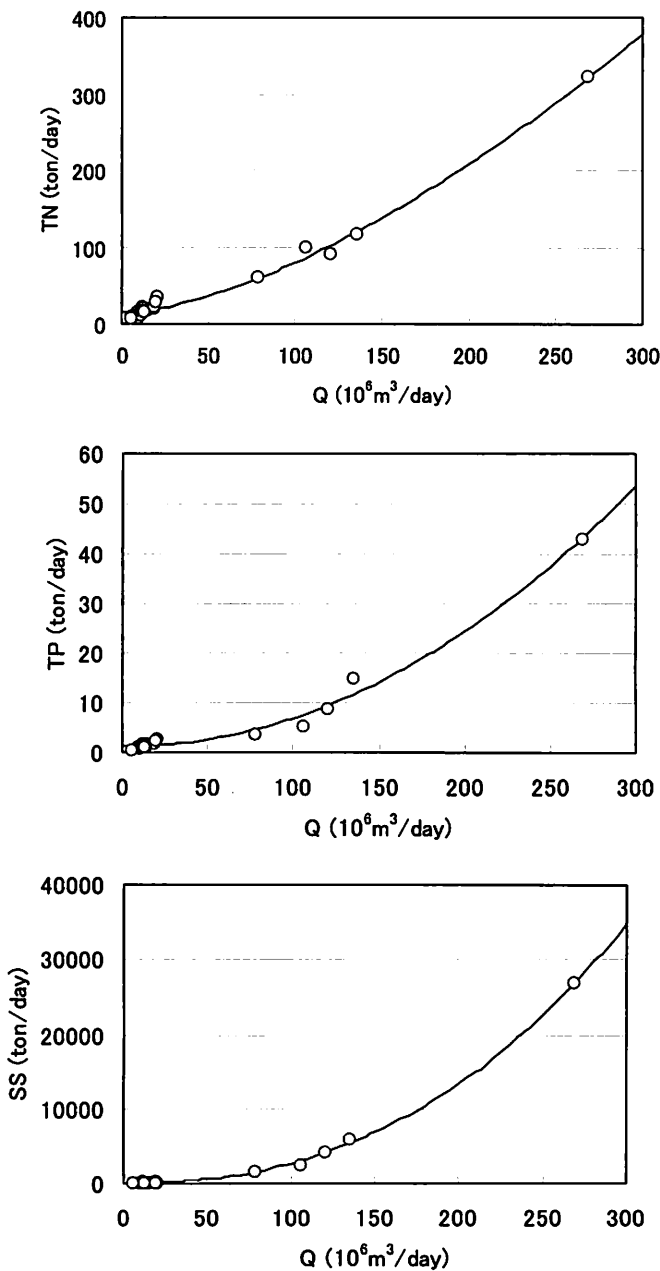


図-6 観測より得られた L-Q 曲線

出水時の観測例として、図-6に筆者ら⁵⁾の調査によって得られた大阪湾への流入負荷特性を示す。流量の増加にともない、急激に負荷量が増大していることがわかる。出水の発生頻度は高くはないが、このような負荷特性により、年間の総流入負荷量のかなりの割合を占めることになる。出水時に供給されるSS量は1年間に供給される総SS量の約80%、リンでは約40%、窒素では約30%を占めていた。このように出水時の流入負荷量は非常に大きな値を示す。しかし、その実態は十分に把握されていない。また、短期間に淡水、SS、栄養塩の供給がなされるため、海域へのインパクトは極めて大きい。しかし、これまで出水時の観測が困難であったことと、発生頻度が低いため河川の代表水質を表わしていないとの認識から、出水時の観測はほとんど実施されず、むしろ出水時を避けて水質の定点観測がなされてきた。最近はその重要性が認識され、出水時のデータ採取もなされ始めている。例えば、東京湾においては二瓶ら⁶⁾や横山ら⁷⁾の研究、大阪湾においては星加らの研究⁸⁾があるが、未だ観測データが少ないのが現状である。

(2) 栄養塩循環と内部生産

沿岸域に形成される生態系は、濁水や赤潮など懸濁物質の影響を顕著に受ける。そのため、沿岸開発の影響評価や漁場造成の適地選定には、精度の高い濁質の挙動予測が必要とされている。さらに、湾奥部など閉鎖性が強い水域では、沈降性を有する懸濁物質が栄養塩等の物質循環に重要な役割を果たし、水域全体の環境動態に大きな影響を及ぼしている。

これまで、栄養塩の動態に関する観測や実験データを基に、種々の水質予測モデルが提案されてきた。そして、溶存物質の動態に関しては、比較的良好な予測が可能になってきた。しかし、懸濁物質の動態については、生物化学過程に加え物理過程が大きく作用し、より複雑な挙動を示すため、精度の高い予測は難しい。また、懸濁物質の動態を支配する素過程（吸脱着、凝集、沈降、分解、堆積、溶出、再懸濁）に関する実験的研究も進められてきたが、流れのスケールが大きく異なる上に、強い非定常性を有する実水域への適用には未だ問題が多い。例えば、沈降速度に関しても、沿岸域では水平移流が卓越し、さらに底質の巻き上げも生じるため、海洋で行われているような単純なセジメントトラップでは精度の高い沈降速度は得られない。

大阪湾奥部においても、淀川等の河川から流入した有機物や内部生産による懸濁物が大量に堆積している。

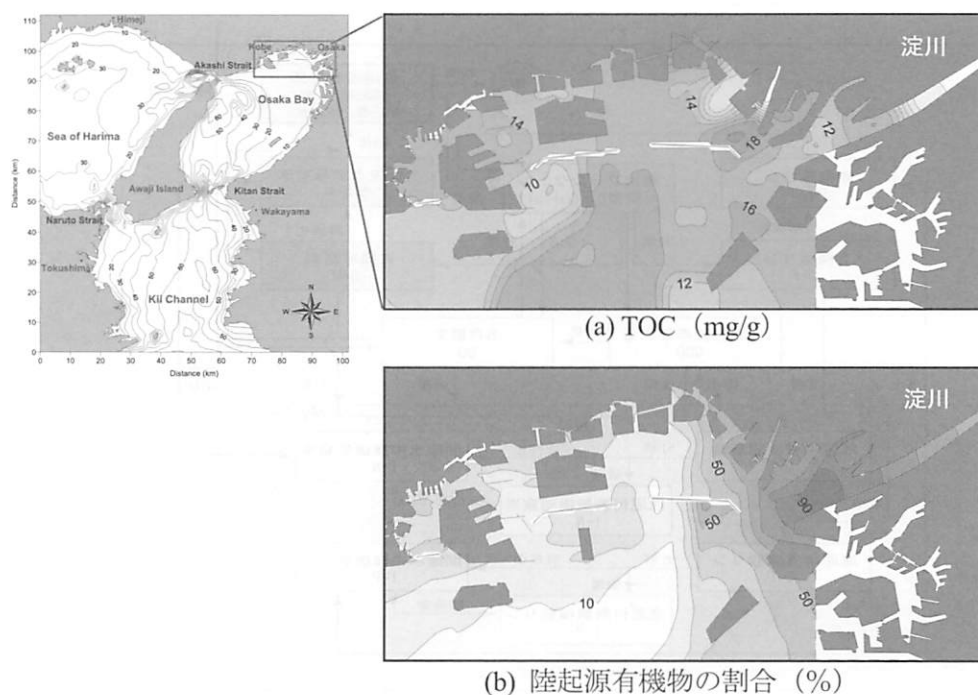


図-7 大阪湾奥部の底質特性（表層 5cm, 2004 年 12 月）

現地観測によって得られた有機物の堆積状況を図-7 に示す⁹⁾。陸起源有機物の割合は、炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ より陸起源有機物 (-27‰) と海起源有機物 (-20‰) の混合比より算定した¹⁰⁾。この結果を見ると、陸起源有機物の影響域は淀川河道部と沿岸数 km の範囲に限られ、ほとんどの陸起源有機物がこの領域で沈降堆積しているものと考えられる。全有機炭素 (TOC) の分布と比較すると、港湾域の沖に堆積している有機物は、そのほとんどが内部生産によるものであることがわかる。この海底に堆積した有機物は分解されて再び海中に溶出し、これが赤潮の発生など大阪湾奥部の水質汚濁の原因ともなっている。また、有機物の分解過程で大量の酸素が消費されることにより底層部の貧酸素化が進行し、底生生物に悪影響を及ぼすとともに、前述のように風の作用によってこの貧酸素水塊が湧昇して青潮が発現し、沿岸生態系に大きなダメージを与えることにもなる。

(3) 水質モデル

流動は単なる水の質量輸送にとどまらず、水中に溶存または浮遊する物質をも輸送し、この流動による物理的な物質輸送と生態系に関わる複雑な生物化学的作用によって、水域の環境が決定される。水環境の管理や修復のためには、この物質循環機構を明らかにし、動態の適切なモデル化とモニタリングが必要とされる。

沿岸域に適用されている水質モデルの一例を図-8 に示す。窒素とリンの循環に主眼を置き、海水中的の水質項目として植物プランクトン、非生物体 COD、非生物体有機態リン、非生物体有機態窒素、無機態リン、アンモニア態窒素、亜硝酸態および硝酸態窒素、溶存酸素を計算対象とし、底泥と海水間の窒素とリンの交換機構と、酸素の消費過程もモデルに組み込んでいる。沿岸域の貧酸素化現象を扱うためには、溶存酸素濃度が過飽和状態から無酸素状態までの広範囲にわたって再現が可能な水質モデルを必要とする。最近では青潮現象の再現と発生予測に向けた、硫化物等を加味した底質モデルが国内においても提案され、計算精度の向上が図られている^{11)~13)}。

図-8 のモデルを用いて計算された、大阪湾における夏期の代表的な溶存酸素濃度 (DO) の分布を図-9 に示す。有機物の堆積が多い湾奥部沿岸域の底層において(図-7)、貧酸素化が進行していることがよくわかる。一方、湾奥部表層では活発な光合成により溶存酸素が過飽和の状態にあることもわかる。

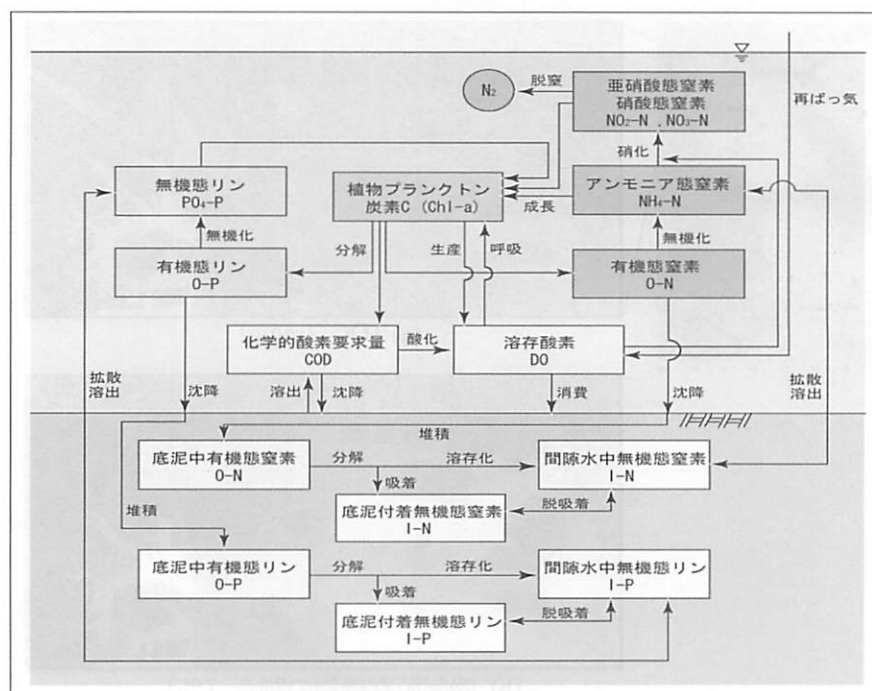


図-8 水質と底質のモデル化

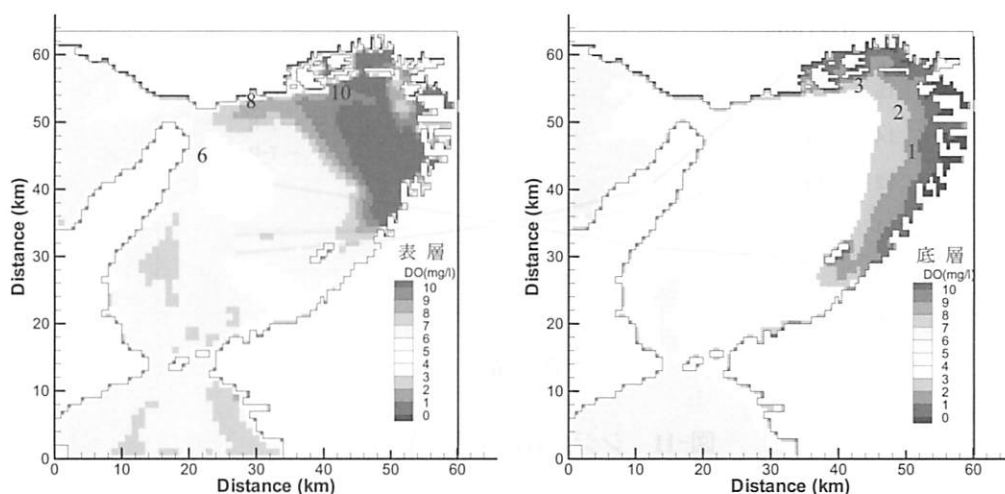


図-9 大阪湾の溶存酸素分布（夏季の再現計算結果）

図-8の水質モデルにおける植物プランクトンの生成・消滅項に、動物プランクトンや二枚貝による摂取を考慮すれば、より高次のモデルとなる。しかし、高次のモデルになればなるほど多くのパラメタの同定が必要となるが、十分なデータがなく定量的評価が難しいのが現状である。

沿岸に位置する汽水湖沼の水質モデリングの一例¹⁴⁾を以下に述べる。汽水域で高い水質浄化の働きをするシジミを水質モデルに組み込んで、小川原湖（青森県）を対象に解析を行った。この湖の浅水域には、 10^3 個/ m^2 のオーダーでヤマトシジミが生息し、植物プランクトンを含む懸濁物を濾過・捕食して成長し、年間約2500トンが漁獲によって系外に運び出されている。この行為が湖の汚濁物質の除去と水質浄化に少なからぬ役割を果たしていると考えられる。

この湖にこれほど高密度のシジミが安定して生息し、高い漁獲量を誇るに至った背景には、人為的作用が大きく関わっている。小川原湖と太平洋を結ぶ高瀬川の河口は、かつて河口位置が大きく変動するとともに河口閉塞が度々起こり大きな被害を被っていた。この対策として1964年に導流堤を兼ねた護岸が構築され、河口地形の安定化が図られた。その結果、海から川への海水の遡上も容易となり、図-10に示すように小川原湖の塩素イオン濃度は工事前の2倍以上に上昇し、現在は500～600ppm(海水の約1/30)の値に安定している。

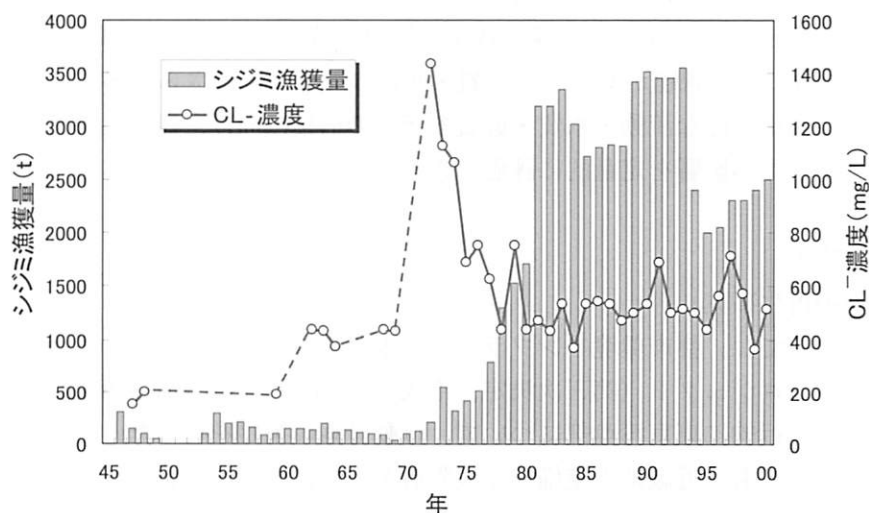


図-10 表層塩素イオン濃度とシジミ漁獲量の変遷

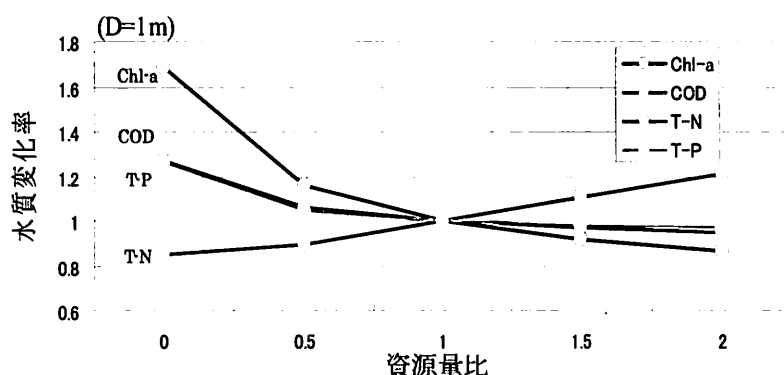


図-11 シジミ資源量と水質変化

図-10 には、湖水の塩素イオン濃度の経年変化とともにシジミの漁獲量の推移もあわせて示している。塩素イオン濃度の増加とシジミ漁業の振興が相俟って漁獲量は約 20 倍に急増し、河口地形の安定化処理という人為的行為が、塩分環境を急変させ、シジミの生息環境を大きく変えてしまったことがわかる。現在では、このシジミが小川原湖において最も重要な漁業資源であるばかりではなく、湖の水質と生態系に大きな影響を及ぼす優占種となっている。

シジミは湖水中の植物プランクトンを補食し、無機態窒素を排泄する。さらに、呼吸によって溶存酸素を消費する。このような水質に及ぼすシジミの影響を考慮し、湖の物質循環モデルに組み込んでいる。

シジミの個体数を現存量から変化させた場合の計算を行い、個体数と水質の関係を解析した。表層水質の計算結果を図-11 に示す。資源量比（＝仮想資源量／現存資源量）が 0 で表されるシジミが存在しない場合には、表層（水深 1m）でクロロフィル a が 1.7 倍、COD が 1.3 倍、TP は 1.3 倍、TN は 0.9 倍の濃度を示し、現状より水質が悪化することがわかる。換言すれば、現存のシジミによる表層水質の改善効果は COD で約 30% であると言える。また、シジミの餌となる植物プランクトンの増殖には、陸域からの栄養塩の流入にも増して、底泥からの溶出が大きく寄与しており、有機物の堆積は水質悪化の要因となる一方で、重要な栄養塩の供給源でもあることがわかった。

シジミやアサリが生息する河口沿岸域では、干潟が出現する水域もあり、干潟の生態系を考慮した物質循環機構のモデル化も必要とされている。干出と冠水を繰り返す干潟域には多様な生物が生息し、複雑な物質循環系を形成している。近年、干潟の水質浄化機能が再認識されるようになり、保存・再生活動が活発になってきている。しかし、干潟域における物質循環の実態は、未だ十分に解明されていない。物理モデルにおいても、汀線移動や干出・冠水の扱い、水深の浅化と層厚の薄化にともなう計算の不安定性、干潟表面の熱・物質収支、底質の物性、等の課題があり¹⁵⁾、水質・底質のモデル化はさらに多くの課題を抱えている¹⁶⁾。干潟を有する沿岸域に適用可能な流動・水質・底質モデルの構築に向けた研究も進められており、今後、流動と物質循環に及ぼす干潟の影響を定量的に評価できるようになることが期待される。

4. 水環境の再生施策

(1) 都市再生「海の再生事業」

都市再生本部においては、都市環境インフラとして水質汚濁が慢性化している大都市圏の「海」の再生を図るため、都市再生プロジェクト（第三次決定、平成 13 年 12 月）に「海の再生」を位置付け、東京湾再生推進会議において、先行的に東京湾奥部について、行動計画の策定を行った。

大阪湾の再生についても、近畿地方整備局や大阪府を中心に国と地方自治体で構成される「大阪湾再生プロジェクトワーキンググループ」において検討を開始し、平成 15 年 7 月に大阪湾再生推進会議が設置され、翌 16 年 3 月には大阪湾再生行動計画（平成 16 年度～25 年度）が策定されその推進が図られてきた。

「大阪湾の水環境の改善対策を講じることにより、海と都市のかかわりに重点を置く総合的な海の再生を目指す」ことを目的として、以下の2項目を含む検討がなされ、一部事業の推進が図られている。

【陸域からの流入負荷削減対策の検討】

- ・ 下水道等の生活排水処理施設普及の推進
- ・ 窒素・リンの除去等、処理水質向上のための高度処理の導入
- ・ 雨天時の汚濁負荷を削減するための合流式下水道の改善
- ・ 河川浄化施設の整備
- ・ 森林の適正な整備
- ・ 面源系負荷の低減対策の推進

【失われた良好な環境の回復手法の検討】

- ・ 沿岸域における緑地、干潟、浅場、藻場等の創造・回復
- ・ 汚泥の浚渫、覆砂等の底質改善対策の検討
- ・ 人と海のふれあい（パブリックアクセス）の確保

これら個別の検討項目については、当該水域の環境の保全と改善のために、これまで継続して実施されてきたものであるが、それらを総合的かつ効果的に推進しようとするものである。特徴としては、例えば溶存酸素量の目標値を「5mg/L 以上」と設定する等、具体的な数値目標を設定している点が挙げられる。また、住民・NPO・行政機関が一体となって連携・協働し、沿岸域の管理やモニタリングを行うことの必要性を謳っている点も新しい動きである。今後、住民やNPOの果たす役割はより大きくかつ重要なものになると思われる。

具体的な再生事業としては、河口湿地・干潟の再生に向けた検討や、一部では人工干潟の造成も行われ、沿岸環境の再生が図られているが、現時点では規模は極めて小さく、その効果は当該水域周辺の限定的な環境改善に止まり、大きな効果は期待できない状況にある。

表-1 大阪湾再生の具体的な目標と指標

具体的な目標	指標
年間を通して底生生物が生息できる水質レベルを確保する	底層DO ・ 5mg/L以上（当面は3mg/L以上）
海成生物の生息に重要な場を再生する	干潟、藻場、浅場等の面積 砂浜、磯浜等の延長
人々の親水活動に適した水質レベルを確保する	表層COD ・ 散策、展望：5mg/L以下 ・ 潮干狩り：3mg/L以下 ・ 海水浴：2mg/L以下 ・ ダイビング：1mg/L以下
人々が快適に海に触れ合える場を再生する	自然的な海岸線延長
臨海部での人々の憩いの場を確保する	臨海部における海に面した緑地の面積
ごみのない美しい海岸線・海域を確保する	浮遊ごみ、漂着ごみ、海底ごみ

(2) 下水道整備と排水規制

大阪湾再生行動計画においても、陸域からの流入負荷削減対策として、下水道の普及率向上や高度処理の導入等、下水道事業の推進が謳われている。しかし、平成18年11月に策定された新たな総量削減基本方針（第6次水質総量規制）においては、「大阪湾を除く瀬戸内海においては（水質の改善が見られることより）、海域のCODが悪化しないこと、窒素及びリンについては現状を維持することを目途とする」こととなり、

瀬戸内海ではこれ以上の栄養塩の削減は行わないことが明確に示された。これは、長年の陸域負荷の削減施策により栄養塩の流入量が減少し、その結果一次生産量の低下と漁業生産量の低減が起こったとされることへの配慮と言える。淀川が注ぐ大阪湾奥部は依然として栄養塩濃度が高い状況にあるが、湾口の位置する西部海域や南部海域においては、すでに栄養塩不足が指摘されており、前述のノリの色落ち問題も起きている。この状況は大きな環境勾配を有する沿岸海域の水環境管理の難しさを物語っている。今後、漁業資源の持続的管理と健全な物質循環系の創造のために、下水道など人工循環系の制御と積極的な利活用が期待される。

普及率の向上や高度処理の推進など現行の下水道施策の効果を検証するために、グリッドモデルを用いた淀川流域の流出解析を行った¹⁷⁾。その結果、過去 30 年間の陸域負荷の削減施策は大阪湾の水質改善に少なからず貢献してきたが、将来に向けては流入負荷の減少はほとんど見込めず、現行の下水道システムでは沿岸域の水質改善はほとんど進まないと予測された。また、淀川流域の土地利用や人口分布の変化等も、大阪湾の水質に大きな影響を及ぼすことはなく、むしろ沿岸域の地形改変や底質改善等の方が大阪湾の水質を大きく変化させることがわかった。

5. おわりに

河口沿岸域では、物理的・化学的・生物的過程が複雑に作用し合い、生態系を含む水環境を構築している。塩分・水温は広いレンジで時空間的に変化し、その微妙なバランスの下に豊かな生態系が育まれている。本講で取り上げた水環境問題はその一部であり、とくに生物に関わる問題は未解明なものが多い。

河口沿岸域の水質は、陸域起源の負荷ばかりではなく、内部生産によって沈降・堆積した底泥起源の物質の動態にも大きく依存している。最近の研究では、地下水の湧水も沿岸域の水質や生態系に少なからず影響を及ぼしていることが明らかになってきた。さらに、外洋起源の栄養塩の流入も、内湾沿岸域の水質に大きく関わっているとの指摘がなされている。例えば、瀬戸内海の一部海域では存在する栄養塩の約 80% が外洋起源であるとの試算もある。豊富な栄養塩が供給される河口を近くに有さない沿岸域では、陸域からの流入負荷ではなく、外洋から供給される栄養塩や、大気からの乾性・湿性沈着による栄養塩の供給も無視できない。しかし、その実態は未だ明らかになっていない。

これらの各要因が閉鎖性内湾の物質の収支や動態に及ぼす影響を定量的に明らかにすることによって、下水道の整備や処理の高度化による陸域負荷の削減や、干潟・浅場の造成など沿岸環境の改善施策など、現在進められている閉鎖性水域の再生施策の実効性について、はじめて有意な評価を行うことができ、再生施策の限界をも示し得るものと考えられる。今後さらなる研究の進展が期待される。

参 考 文 献

- 1) 大阪湾環境データベース：<http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/>
- 2) 中辻啓二，韓銅珍，山根伸之：大阪湾における汚濁負荷量の総量規制施策が水質保全に与えた効果の科学的評価，土木学会論文集，741/7-28 号，pp.69-87，2003.
- 3) 瀬戸内海環境保全協会：特集 青潮と無酸素水塊、瀬戸内海，No. 50，pp.4-44，2007.
- 4) 入江政安，中辻啓二，西田修三：大阪湾における貧酸素水塊の挙動に関する数値シミュレーション，海岸工学論文集，Vol. 51，pp.926-930，2004.
- 5) 西田修三，中谷祐介，嶋田恭佑，入江政安：大阪湾の水質と一次生産に及ぼす降雨の影響，水工学論文集，Vol. 52，pp.1345-1350，2008.
- 6) 二瓶泰雄，江原圭介，臼田美穂，坂井文子，重田京助：江戸川・荒川・多摩川における水質環境と流入

負荷特性, 海岸工学論文集, Vol. 54, pp. 1226-1230, 2007.

- 7) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, Vol. 45, pp. 937-942, 2001.
- 8) 星加章, 谷本照巳, 三島康史: 大阪湾における懸濁粒子の堆積過程, 海の研究, Vol. 6, pp. 419-425, 1994.
- 9) 西田修三, 入江政安, 中辻啓二: 大阪湾奥部沿岸域における懸濁態物質の挙動と底泥特性, 海岸工学論文集, Vol. 53, pp. 991-995, 2006.
- 10) 吉岡崇仁: 有機物の一次生産と分解過程における安定同位体比の変動, 水環境学会誌, Vol. 20, pp. 192-195, 1997.
- 11) 田中昌宏, A. Markus, 板東浩造: 青潮の生化学反応を含む数値モデルの開発, 海岸工学論文集, Vol. 44, pp. 1096-1100, 1997.
- 12) 三浦心, 堀田哲夫, 根岸均, 鶴田泰士: 都市河川汽水域における青潮の発生機構に関する調査と解析, 水工学論文集, Vol. 53, pp. 1453-1458, 2009.
- 13) 入江政安, 寺中恭介, 山口とも, 西田修三: 都市河川河口域の底質特性と貧酸素化への影響, 海岸工学論文集, Vol. 56, 2009. (印刷中)
- 14) 西田修三, 鈴木誠二: 小川原湖の水質変動と物質循環, 水産工学, Vol. 44, pp. 39-43, 2007.
- 15) 内山雄介: 海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 σ 座標海洋流動モデルへの適用, 海岸工学論文集 Vol. 51, pp. 351-355, 2004.
- 16) 西田修三, 入江政安, 橋本基, 海江田洋平: 干潟を考慮した流動モデルの構築と有明海への適用, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1441-1446, 2006.
- 17) 西田修三, 北畠大督, 入江政安: 淀川流域圏の水環境と大阪湾への影響解析, 水工学論文集, Vol. 51, pp. 1153-1158, 2007.