

## 淀川河口域～大阪湾奥部の貧酸素水塊解消に向けた検討

杉本隆成

東海大学海洋研究所

### 1. はじめに

淀川河口域を含む大阪湾奥部では、窒素、リンの陸域からの負荷が1960年頃から1970年頃にかけて3倍程度に急増したために水域が著しく富栄養化し、赤潮と貧酸素水塊の発生が1970年代半ばにピークに達した。その結果、二枚貝や底生生物が激減して、浅海域の有機物浄化能力が著しく低下し、有機物のバクテリア分解に伴う貧酸素化が底泥のリン溶出を促進し、富栄養化をさらに増大させる「悪循環」に陥った。

その後、1970年代末以降の総量規制により、負荷は1980年代末にはピーク時の半分近くまで減少した。しかし、淀川左岸沖のフェニックス計画をはじめ、1990年代には再び地先の大規模埋立が進められ、湾奥部の停滞水域が広がった。その結果、1990年代は負荷量の削減努力にもかかわらず、赤潮と貧酸素水塊の発生が減少せず慢性的に発生する状態が続いている。

こうした富栄養化現象と貧酸素水塊の発生に伴う栄養塩収支の実態を定量的に明らかにするために、2004年11月13日に「淀川下流・河口域の栄養塩収支」に関するワークショップを行い、翌日の11月14日に、マイクロバスを用いて淀川中下流域の現場視察を行った。また、翌年2005年の8月16日に淀川河口域の視察と大阪府の大野下水処理場の見学、10月8日には京都市上下水道局の鳥羽水環境保全センターの見学を行いつつ資料の収集を行って、淀川流域の取水・排水網と下水処理場の実態について分析を行った<sup>1)</sup>。

本節では、これらと合わせて行った文献調査に基づいて、(1) 淀川河口域～大阪湾奥部の赤潮と貧酸素水塊の形成に関わる陸域の発生源、すなわち海域に流入する栄養塩負荷の空間的分布と経年変化、(2) 大阪湾奥部の海水の滞留と交換に関わる流動環境の特徴について整理した。

さらに2006年9月24日には、大阪大学工学部と京都大学農学部等の研究者や、大阪府水産試験場

と環境コンサルタントの業務担当者等に来ていただいて、ミニワークショップを開き、「大阪湾奥部の赤潮と貧酸素水塊の慢性化対策」について、大阪湾全体からの総合的な視点で考察した。

### 2. 大阪湾に流入する有機汚濁負荷の空間分布と経年変化

大阪湾に流入する主要河川のBOD（生物的酸素要求量）負荷の経年変化を図1に示す<sup>1)</sup>。流入負荷量は、日平均の河川流量と水質指標値の積を各年積算することによって算出される。淀川からの流入負荷量が最も多いのは、河川流量が年平均約300m<sup>3</sup>/secで、大阪湾に注ぐ全河川流量の7割以上を占め、水質が比較的良好でも、流量が多いためである。淀川に次いで流入負荷が多いのは、下水道の普及率が低く水質の悪い大和川である。琵琶湖・淀川流域の下水道の未普及率が2003年度11%であるのに対して、大和川流域では約33%である。

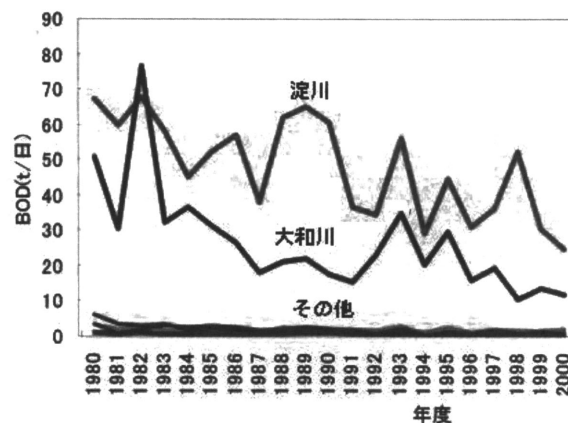


図1 大阪湾に流入する主要河川の有機汚濁負荷量の経年変化

出典) 国土交通省近畿地方整備局『大阪湾環境データベース』(2004) (<http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/>)  
国土交通省河川局編, (社) 日本河川協会 (1980-2001) 『流量年表』より作成

大阪湾に流入するCOD（化学的酸素要求量）負荷量の湾岸に沿う分布を、海域表層のCOD濃度の水平分布と合わせて図2<sup>2)</sup>に示す。COD流入負荷の河川別割合は、淀川が32%、大和川が15%、淀川・大和川間の大阪市内小河川の和がその中間の24%、神崎川は14%で大和川と同程度である。淀川のCOD流入負荷の中では、生活系が70%近くを占めている。

図中、COD濃度のとくに高い水域は、淀川の西側の沿岸域と、淀川の南側の大和川河口および堺港周辺の沿岸域である。両者はともに大阪湾奥部の中でも流入負荷が大きく、かつ海水が停滞気味の海域である。栄養塩類の収支から見ると、この停滞気味の海域では、「底泥からの溶出」の影響がとくにリンについて大きく、陸域からの流入負荷と同程度になっている。

また、奥部の浅海域沖合の環流域では、CODに対する植物プランクトン（内部生産）の影響が大きく、これを支える栄養塩類のストックは半分

以上が「外洋起源」である<sup>3)</sup>。したがって、陸域からの負荷削減は、湾奥部に対しては効果は大きい。沖合の環流域に対する効果はそれ程大きくはない。

### 3. 大阪湾における赤潮と貧酸素水塊の空間分布および経年変動

大阪湾における赤潮の発生件数は、1970年代に極大値（年間50件程度）に達したが、その後はCODや窒素、リンの負荷量の削減努力に伴って徐々に減少し、1990年代初めには半減した。しかしながら、1990年代には沿岸海域の大規模な埋立が再び進み、汚濁負荷量が減少したにもかかわらず、赤潮発生件数（年間30件程度）は横ばい状態である。また、湾奥部における夏季の底層における溶存酸素濃度は、淡水流入に起因するエスチュアリー循環の強さにも依存して年々大きく変動するものの、全体的な傾向としては1.5 mg/L前後でほぼ横ばいに近い（図3<sup>4)</sup>）。



図2 大阪湾に流入するCOD負荷量と海域表層のCOD濃度の水平分布  
 出典) 大阪湾再生推進会議『大阪湾再生行動計画』(説明資料)より一部改変<sup>2)</sup>

大阪湾の中央部～奥部における夏季底層のDO（溶存酸素）濃度の水平分布（1998～2000年時点のもの）を図4に示す<sup>1)</sup>。湾奥部の水深20m以浅の海域は5mg/Lを下回り、とくに東岸沿いの水域と淀川河口付近で低く3mg/Lを下回っている。

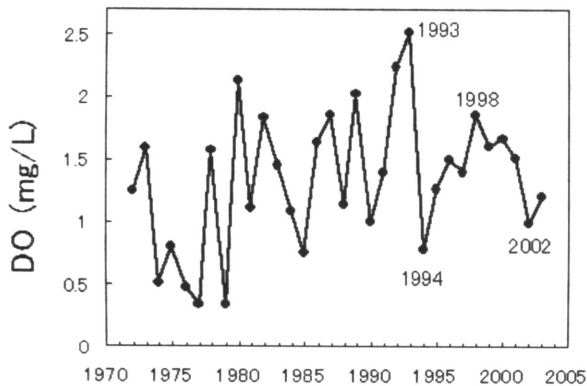


図3 大阪湾東奥部における夏季底層の溶存酸素濃度の経年変化

出典) 藤原建紀・岸本綾夫・中嶋昌紀「大阪湾の貧酸素水塊の短期的および長期的変動」『海岸工学論文集』51 (2004) 931-935<sup>4)</sup> より転載

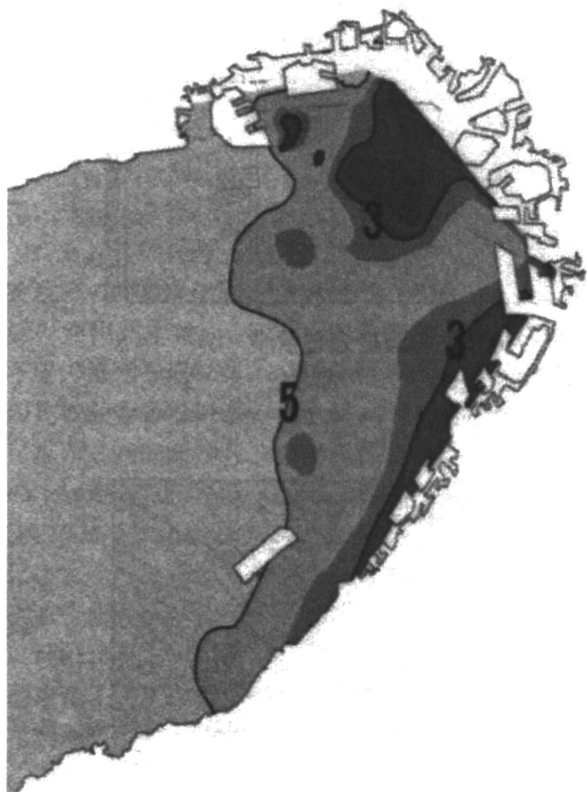


図4 大阪湾における夏季の底層の溶存酸素濃度 (mg/L) の水平分布

出典) 大阪湾再生推進会議「大阪湾再生行動計画」(説明資料)より一部改変<sup>2)</sup>

底層におけるDO濃度が5mg/Lを満たさない海域の表面積は大阪湾全体の約30%、3mg/Lを満たさない海域は湾全体の約10%を占めており、湾奥部については、図3に見られるように、依然として貧酸素水塊の影響が強い状態が続いていると云える。

#### 4. 陸域からの栄養塩流入負荷量削減の効果

河川には、山地、農地、工場、住宅地、下水処理場等から、窒素、リン、シリカ等の栄養塩類や、土砂礫、残留農薬など、さまざまな物質が流入する。それらは河川内での自浄作用を受けながら、河口から海へと流出する。河口域で海水に接したコロイド状の粘土粒子は、電気的に中和されてフロックを作り、有機物粒子も吸着しながら海底に沈降する。

堆積した粒状有機物は、溶存酸素を消費しつつ分解する。夏季は海面加熱と淡水供給量の増加に伴う海水の密度成層の強化で上層から下層への酸素供給が断たれるために、底層水の無酸素化が生じる。その結果、底泥からリン酸塩が溶出しやすくなり、リンの陸域からの供給と同程度になる。これが湾奥部の海水の停滞域で始まる赤潮発生の引き金および貧酸素水塊慢性化の原因になると考えられている。大阪湾や東京湾、伊勢・三河湾などの閉鎖的内湾の奥部では、水質・底質がこのように著しく悪化した状況が夏季を中心に生じ、アサリなどのベントス類の近年の激減に密接に関わっていると考えられている。

これらの諸問題を解決するために、大阪府下の下水処理場では、有機物分解やリン・窒素除去の高度化に努め、港湾内外ではヘドロの浚渫や覆砂にも力が注がれている。しかし、河口周辺および港湾内外から湾奥部における夏季の貧酸素水塊は、それらの努力を以てしても依然として解消することが困難な状況にある<sup>5)</sup>。

図5a (左), b (右) はそれぞれ夏季の大阪湾における表層のCOD濃度の現在の分布と、陸域からの汚濁負荷量をピーク時の約1/3に減らした10年先の濃度分布の大阪湾再生推進会議による予測である<sup>6)</sup>。(a) は図2に示したCODの濃度分布と同じものである。これによれば、(a) 図における淀川河口沖の4～5mg/Lの水域が3～4mg/Lに変わり、多少改善されるものの、湾奥部ととくに、淀川河口先の西側(尼ヶ崎地先)と南側(堺港周辺)では望ましいレベル(表層のCOD濃度5mg/L,

底層のDO濃度3mg/L以上)には届かないことが明らかになっている<sup>7)</sup>。

淀川河口西側の尼崎港周辺域と、南側の堺港周辺域については、これまでに堆積した底泥からの溶出の影響が小さくないために、下水処理場を通しての負荷削減が効果を発揮できていないためであると考えられる。なお、このモデルでは、合併式下水処理場における汚濁負荷が雨水の増水期に未処理のまま溢れ出す現象の寄与分が無視されており、流入負荷量が過小評価されている問題性があるので、これ等を含めたモデルの改良とともに、合併式下水処理システムの分別式への改善が長期的には重要であると考えられる。

5. 海域の流動が物質輸送と分布に及ぼす影響  
つぎに、大阪湾規模で富栄養化と貧酸素水塊の

問題を考える。このさい、湾規模のボックスを用いて基礎生産と有機物分解に伴う栄養塩類や溶存酸素の収支を検討するとともに、「海水交換」の実態とその役割を定量的かつ構造的に明らかにすることが必要である。

さらに、漁業生産との関連においては、餌料プランクトンの生産を通して魚類の生活史サイクルと再生産に及ぼす富栄養化の影響、および植物プランクトン、海藻、動物プランクトン、ベントス類等の各種、各栄養段階の生物生産による浄化機能について定量的に明らかにしておくことが重要である。

それらの生態系における食物連鎖と栄養塩類循環の構造と変動のプロセスの理解の上に立って、はじめて、「陸域負荷と海洋における収支を繋いだ水質環境の修復保全策」を、総観的かつ合理的に

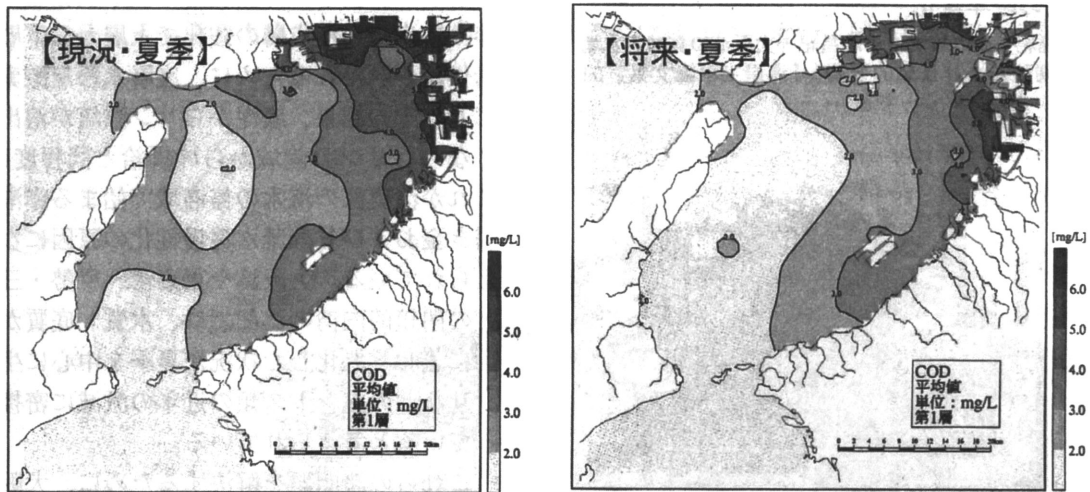


図5 表層のCOD濃度の現在の分布 (a) と、10年先の濃度分布予測 (b)

出典) 大阪湾再生会議「大阪湾再生行動計画」(説明資料)<sup>6)</sup> より一部改変

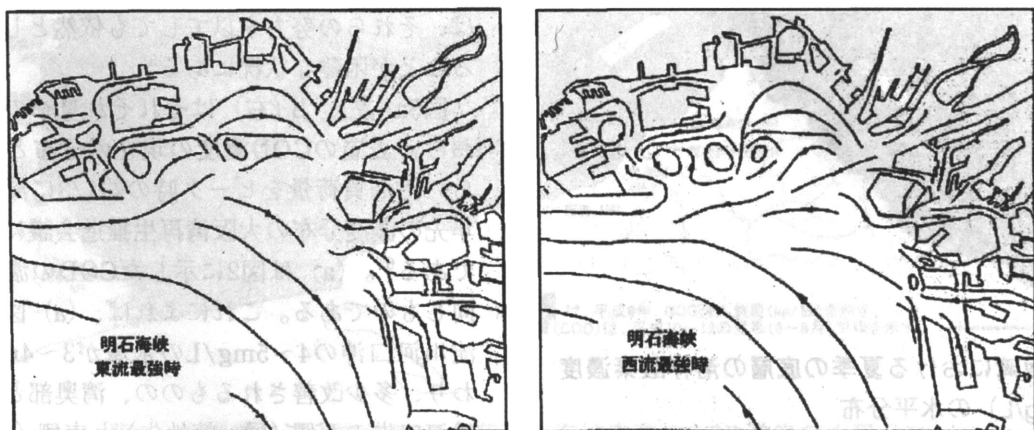


図6 大阪湾奥部の潮流 (a) 東流、(b) 西流の最強時 (水理模型実験による)<sup>8)</sup>

検討することができる。そこで本節では、「海域の流動」に焦点を絞り、その実態と物質輸送機能についてより具体的に述べる。

沿岸海域の流れは、一般に潮流、河口密度流、風波と吹送流、および沖合からの異水塊の流入に伴う流れによって構成されている。これらの外力で駆動される流動場は、さらに、浅くて変化に富む沿岸海洋の水深の大きさと、海岸・海底地形の形状の影響を強く受けたものとなる。大阪湾の奥部に重点をおいて、それらの流れの特徴について以下に示す。

まず、水理模型実験で得られた、大潮期における大阪湾奥部の潮流に伴う流況を、明石海峡の東流最強時と西流最強時について、それぞれ図6の左 (a), 右 (b) に示す<sup>8)</sup>。これらによれば、淀川河口域の流れは沖合水の東流時に流入し、西流時に流出することがわかる。潮流の振動成分に乗った粒子は一周後にはほぼ元の位置に戻るが、戻らない成分もあり、潮汐残差流と呼ばれる。水理模型実験や数値実験、現地での漂流ブイの流跡調査等によって求められた大阪湾の潮汐残差流（一潮時平均した流れ、恒流）の流況模式図を図7に示す（藤原建紀, 私信）。湾の中央部に「沖ノ瀬環流」と呼ばれる時計回りの強い環流、奥部には弱い時計回りの「西宮沖環流」、東岸沿いに南向きの恒流帯が見られる。また、明石海峡と友ヶ島水道では、強い潮流に伴う地形性渦流や乱流によって、機械的な水平・鉛直混合が活発に行われる。

つぎに、淀川河口付近における淡水流入に伴う密度流に注目すると、淀川河口から流出する低密度の河川系水は、1日以下の時間スケールでは、下層の海水を取り込みつつ希釈されながら、密度の比較的大きな海水の上をジェット状ないし扇状に拡がる傾向を持ち、潮流の影響を受けて西流時の下げ潮後期から干潮時にかけて強く流出する。河口先の平均的な密度流の鉛直構造を、海面冷却による鉛直混合の影響の強い冬季と、海面加熱による密度成層化が強くなる夏季について、模式的に図8に示す<sup>10)</sup>。春～夏には湾奥部の底層に比較的冷たく密度の大きな水塊が停滞し、貧酸素化の重要な要因になっている。

河口先に拡がったこの低密度水の沖合への拡がり、2、3日以上時間スケールでは、地球自転の効果によるコリオリ力の影響を受けるようになり、時計回りの水平循環流（西宮沖環流）を形成する。しかし、この密度流の流速は高々数cm/sec



図7 大阪湾の恒流の模式図<sup>9)</sup>

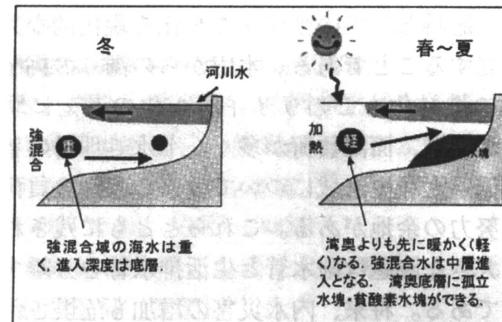


図8 淀川河口先の密度流の鉛直構造<sup>10)</sup>

であり、大阪湾の場合には、図7にも見られる10cm/sec以上の流速を持つ時計回りの水平循環流（潮汐残差環流としての沖ノ瀬環流）の影響をより強く受ける。より長い時間スケールでは、東岸の和歌山県沿いに南下し、さらに紀淡海峡から紀伊水道へと流出する。

大阪湾の規模では、こうした水平環流や密度流の鉛直循環による移流効果が、栄養塩類等の分布、収支に重要な役割を演じている。

## 6. 淀川河口域～大阪湾奥部の貧酸素水塊の解消策

琵琶湖では富栄養化の進行に伴ってアオコが頻発している。陸起源の栄養塩負荷の半分近くは水田からで、しかも5月の連休に行われる田植え直前に出される濁水の排出が集中的に行われることによる。琵琶湖-淀川プロジェクトの主要な努力は、空間スケールの異なる階層・利害対立者間の対話と合意形成への実践によって、この面源負荷を如何に抑制するかに注がれてきたといえる。

淀川河口域～大阪湾奥部においても、赤潮の発生とこれに伴う底層の貧酸素水塊の形成や底生生物の大量斃死は共通の現象である。しかし、その発生源は淀川中流域においては、上流にある琵琶

湖や京都市の下水処理場からのものがほとんどであるのに対して、河口域においては、大阪府の都市生活排水の下水処理場経由のものが大半を占めており、かつ大量である。

さて、大阪湾奥部における貧酸素水塊の解消策として、以下のような項目が考えられる。まず、陸域発生源での有機物負荷削減策として、現在は下水処理技術に頼って分解除去している傾向が強いが、これが正常に機能するためには、長期的な視点で次の2つの努力がさらに必要である。

まず、発生源での抑制策としては、第1に生ゴミを極力少なくすることであるが、これとともに、飼料・肥料としてのリサイクル化を現代的な方法で確立することである。水田からの濁りの抑制や廃油の燃料化もこのリサイクル化の考えに繋がる。つぎに、面源負荷が多く、下水処理場の普及率も低い大和川流域については、この種の負荷削減の努力の余地がある。これらとともに残されている大きな課題は雨水管と生活排水管を分離することである。将来、内水災害の増加も危惧される中で、この問題の解決を早める必要がある。

他方、下水処理排水等が流入する河口域では、第1に、海水交換を悪化させているタイプの港湾域の埋立てや防波堤の建設を極力避け、これと同

時に、川筋と航路をミオ筋として活かすことによって、潮流と密度流による海水交換を促進することが水理的に見て有効と思われる。第2には、下水処理場での栄養塩類の除去技術の高度化を計ることであり、これと同時に、尼崎の前面海域のように停滞性の強い水域では、神崎川関連の「下水処理排水の放出口を沖合化する方法」も検討に値すると思われる。それは汚染物質が防波堤に囲まれた港湾周辺域に滞留してヘドロ化する状況を回避するためであり、また浮魚の漁獲やノリの養殖漁業などを含む大阪湾全体規模の生態系としては、栄養塩類の収容力にまだ余力があるという現実判断に基づくものである<sup>11)</sup>。具体的には、図9に示す大阪市内河川系および神崎川系の下水処理排水<sup>12)</sup>を防波堤外あるいはフェニックス計画で沖に伸びた人工島の先に導き放出することが、ひとつの検討案である。ボストンやバンクーバー、シドニー、ニース等の大都市では、以前からこの手法が取り入れられて機能している。

このような「水理工学的な場の改善手法<sup>13)</sup>」で、溶存酸素や透明度をある程度回復させた上で、河口域・港湾域に干潟と藻場を造成し、栄養塩類をベントスや海草・海藻類に吸収させ、これらを陸上に回収することによって、栄養塩類のさらなる

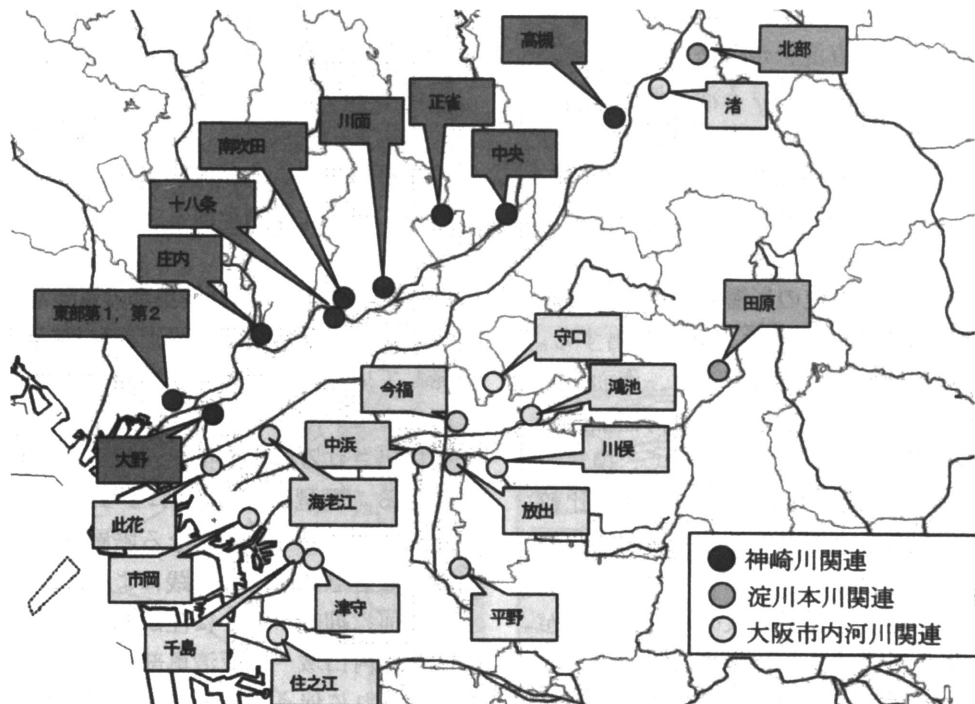


図9 排水が大阪湾奥部に注ぐ下水処理場の系統

出典) (社) 日本下水道協会『下水道統計行政編』(平成13年4月1日~14年3月31日)<sup>12)</sup> より作成

除去が初めて効果的に行われる。ただし、藻場・干潟の再生・維持に当っては、回復が期待される主な生物の再生産および底質の形成に関わる流れ・波浪等の微環境への配慮も重要である。

この対策シナリオがこれまでの悪循環のレジームからの脱出を可能にする道である。なお、これによって修復された河口周辺域の水面が、生態学的にも、野鳥公園やアメニティ空間として、またマリンレジャーの空間としても大きな価値を生み出すことが可能となり、淀川河口周辺域特有の地理的特性として期待できる<sup>6, 14)</sup>。これが、大阪湾奥域の海洋環境の再生と淀川河口域を中心とする地域振興策に対する私のシナリオであり、「海の生態系と環境の地域特性を巧妙に活用する」という海をも含めた視点からの提言である。

## 7. おわりに

以上、琵琶湖・淀川流域のエンドポイントから、「淀川河口域と大阪湾奥部における赤潮と貧酸素水塊の分布と経年変動」、および「汚染負荷と流動環境の特徴から見た対応策」について検討した。それらを要約すれば、以下の2点である。

- (1) 大阪湾奥部への有機汚濁負荷は1980・90年代に漸減しているが、赤潮発生件数と底層水の貧酸素状態は改善されていない。これには、湾奥部の停滞水域における底泥からの栄養塩類の溶出と、1990年代における地先の大規模埋立に伴う流動阻害の影響が大きいものと判断される。
- (2) この赤潮および貧酸素水塊の慢性化に対する対策として、大和川流域については陸域からの栄養塩流入負荷に削減努力の余地があり、全体としては下水処理の高度化とともに合併下水道の改善をはかる必要がある。また、尼崎地先周辺の、とくに停滞性の強い水域については、下水処理排水の放出口の位置を沖合化することや導流堤による流動環境の改善が重要である。

## 参考文献

- 1) 杉本隆成・谷内茂雄・国土環境株式会社「琵琶湖・淀川・大阪湾における水質・負荷量に関する総合レポート」総合地球環境学研究所プロジェクト3-1, 51pp (2005)
- 2) 大阪湾再生推進会議「大阪湾再生行動計画」説明資料 (2004)
- 3) 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本亘「外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量」『海洋工学論文集』44, 1061-1065 (1997)
- 4) 藤原建紀・岸本綾夫・中嶋昌紀「大阪湾の貧酸素水塊の短期的および長期的変動」『海岸工学論文集』51, 931-935 (2004)
- 5) 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, VII-28, 69-87 (2003)
- 6) 大阪湾再生推進会議「大阪湾再生行動計画」説明資料 (2005)
- 7) 西田修三・入江政安「大阪湾沿岸域の流動・水質の現況と予測」『シンポジウム「自然共生型流域圏・都市再生研究」を考えるー大阪大学の淀川流域プロジェクト予稿集』(2006)
- 8) 荒木俊雄「大阪湾における潮流の挙動に関する基礎的研究」京都大学工学部土木工学科修士論文, P18-5 図4.7 (A) (2004)
- 9) 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫「大阪湾の恒流と潮流・渦」『海岸工学論文集』36, 209-213 (1989)
- 10) 藤原建紀「沿岸海域の体系的理解とモデル化」『月刊海洋』号外40 (2005)
- 11) 城久「大阪湾の開発と海域環境の変遷」『沿岸海洋研究ノート』29, 3-12 (1991)
- 12) (社)日本下水道協会「下水道統計行政編(平成13年4月1日~14年3月31日)」
- 13) 上嶋英機・田辺弘道・宝田盛康・湯浅一郎・橋本英資・山崎宗広「大阪湾の流動特製を利用した環境改善への提言」『沿岸海洋研究ノート』29, 60-75 (1991)
- 14) 大阪府環境農林水産部水産課「大阪の漁業」30p (2006)