

内湾における快適空間創造への手がかり

—海域の水質・底質・生物相からみた環境づくり—

港湾技術研究所海洋水理部

正会員 堀江 毅

横浜国立大学工学部

正会員 合田良実

運輸省港湾局環境整備課

正会員 橋川 隆

シーブルーテクノロジー研究会

名取 眞

1. はじめに

昭和50年代以降、わが国の低成長率安定型経済のもとで、国民の生活の力点は物質的な豊かさを求める一方、心の豊かさを重視する傾向が一段と高まってきている¹⁾。こうした変化の中で、余暇時間の拡大化、充実を求める声が次第に大きくなってきている。

海、または海辺は、本来、その青さ、雄大さ、力強さ、やさしさ、さわやかさ、寛大さ、ロマン、・・・などをもちあわせており、古来より、人の心を捉えて離さない。このような魅力にひかれて、今日では、若年層を中心としたヨット、サーフィン、ボートセーリング、ダイビング、水上スキー、洋上旅行、海水浴など、海辺でのレジャー、スポーツの人氣が急上昇している。

ところが、人口の集中している大都市周辺においてこのようなレジャー、スポーツが可能な海辺を身近に見つけられるところはほとんどない。すなわち、現状においては、海辺がきたない、水が濁っている、臭い、人の近づける適当な場所、交通手段がない、波、流れが適当でない、遠すぎる、施設が整備されていない、などの悪条件下にあり、本来の海のもっているべき資質を十分に活用できる状況にはない。

このため、環境保全の面から内湾域の抜本的な浄化対策を明らかにすると同時に、これを実現するための方策を探ることが緊急の課題である。このような主旨から、本文では、内湾域における快適空間創造の際に留意すべき水質、底質改善策の問題点の指摘と、これらを実現するための一方策を提案する。議論を具体化するため、モデル海域を設定し、実際の自然条件、社会条件を当てはめたケーススタディから環境制御法と改善効果について数値シミュレーションによる予測結果をもとに検討する。

2. 海域の現況

‘海が汚れている’最大の原因は、レジャーや余暇の場として要請される身近な海辺は人口の集中している湾奥部に位置しており、陸域からの汚染原因物質の高負荷に加えて、海水が停滞しているためである。東京湾における湾奥の東京、川崎、横浜、千葉などはその好例である。同湾湾奥部においては、夏場の上層水のCOD（化学的酸素要求量）は6~8 mg/lに上昇し、下層ではDO（溶存酸素量）が2mg/l以下の貧酸素水塊が発達する。これは、陸域から窒素、リンなどの多量の栄養塩—たとえば、全リンで22 t/日—の流入と、水温上昇、海水の成層化、植物プランクトンの異常増殖、底層の貧酸素条件下での堆積物の分解などに因っている。プランクトン増殖の典型は赤潮の大発生であり、有害種プランクトンは養殖魚に大きな被害をもたらす。

増殖したプランクトンは、やがて枯死し、それらの多くは海底に堆積する。この堆積物は時間の経過とともに徐々に分解する。夏場は海水の表面温度が上昇して成層化し、底層水との上下混合が阻害される。このため、溶存酸素の補給源である上層水が底層に運ばれなくなり、貧酸素条件のもとでの分解が進行する。海水中の硫酸塩は還元され硫化物濃度が上昇して、底層では無酸素状態となる。秋口に陸風が吹くと、表層水は沖側に吹送され、その補流として無酸素かつ多量の硫化物を含んだ底層水が海岸付近で湧昇流となって表層部に現れる。表層部の海洋生物に大きな被害を与える青潮はこうした現象が大規模に発生した場合である。8~10月に湾奥部浅海域で青潮被害を受ける。

一方、内湾部における油汚染は最も多発する海水汚染の一つである。海上保安庁が確認した1985~1987年の3年におけるわが国周辺海域における油汚染発生件数は600に及び、赤潮を含めた海洋汚染全体の60%を超えている²⁾。特に、東京湾、伊勢湾・三河湾、瀬戸内海に多く発生している。排出源別では船舶からが大部分を占め、これらのうち取扱い不注意が船舶排出油の約40%、故意の排出が約20%である。油汚染は、異臭の発生、水色変化、異臭魚の発生を引き起こし、海域の多目的利用上様々な弊害をもたらす。

海水の透明度は、水質上から、また、感覚上からも重要な指標である。透明度は、海水中の溶解物質、懸濁物の種類、量などによって決定される。一般に、有機物濃度が上がると懸濁物が増え、透明度は低下する。プランクトン増殖の促進される夏場は湾奥部汚染海域で透明度は0.5m以下となり、水中照度、水中視界は極めて悪くなる。一方、冬場での海水の循環期においては、透明度は回復し、湾奥においても2mまたはそれ以上となる。

東京湾、伊勢湾・三河湾、瀬戸内海などの内湾湾奥部における海域利用の要請が高い水域の水質環境を概観すると、COD はほぼB類型（3～8 mg/l）、DOは7 mg/l 以下、特に夏場の底層は 2 mg/l 以下であり、有機汚濁が進行しており、水に親しめる条件にない。油による汚染は異臭や異臭魚のもととなり、海水は茶～黒色である。

したがって、海域の利用目的に応じて海域の水質改善目標値を設定する必要がある。本研究においては、水質改善目標をつぎの3段階に分けて考える。

水と遊ぶ（泳げる）・・・COD 2 mg/l 以下、DO 7.5 mg/l 以上、透明度 2 m 以上

水に親しむ・・・COD 5 mg/l 以下、DO 5 mg/l 以上

生物が豊富・・・COD 8 mg/l 以下、DO 5 mg/l 以上

3. 汚濁海域の浄化対策

上述の海域汚濁のうち、油汚染については重大ではあるけれども、その原因は既述のように、取扱上のミス、あるいは故意によるものであり、取扱について十分な訓練を行うこと、規則、規制の強化を図るなどの手段によるほかない。

一方、上述の油以外の赤潮、青潮、貧酸素化、透明度などの項目については相互の関連が深く、海域における物質循環の問題として捉えることができる。

海域の物質循環を制御して汚濁海水を浄化する方法としては、つぎのようなものが考えられる。

- ①汚濁負荷源を削減する（元を断つ）
- ②海底堆積物を除去する（とり除く）
- ③海底堆積物を被覆する（ふさぐ）
- ④水流による希釈（薄める）
- ⑤海水の循環、交換を促進する（流す）
- ⑥生物による捕食、代謝作用を利用する（とらせる）

東京湾を対象としたシミュレーション結果によると³⁾、①の負荷量削減は他のどの方法によるよりも改善効果は大きく、また、②、③による堆積汚泥の除去または被覆によって陸域からの負荷量削減の約 1/3の効果を上げ得ることが予測されている。さらに、④または⑤に関しては、清浄水の湾内導水によって、流れの促進される領域においては水質改善が見込まれる反面、流れが弱まる領域については逆に水質悪化が起こり得ることが予測されている。⑥は生物による有機物の捕食、濾過作用を期待するものである。底生生物の一種である多毛類は有機物による汚濁にも比較的強く、大型底生生物、底魚の餌にもなる。砂浜や海岸、港湾構造物に付着する生物による懸濁態有機物の捕食量も海岸線全域で見積ると大きく、海水の有機物除去に効いていることが予測される³⁾。

以上、内湾域の水質改善策①～⑥において、⑥は天然の生物による浄化能力を利用するもので、生物の活動しやすい緩斜面、浅場、構造物を造成することでその効果が期待できる。しかし、①～⑤については、抜本的な内湾規模の海水浄化を図るためにはかなり大規模な工事をしないとその効果は小さい。すなわち、効果をあげるためには莫大な工費、運転費、維持費を要することとなる。

こうした技術的、経済的制約条件の中で、快適空間を創造する手がかりを探ることが当面の重要課題である。

運輸省港湾局およびシーブルーテクノロジー研究会は、昭和62～63年度にわたり、この点に着目した調査研究を行った⁴⁾。本調査においては、①海の資質を活かした積極的な環境創造を図ること、②海域の利用を前提とした海域環境の整備、改善を図ること、③潮汐、波、流れ、風など、できるだけ自然のエネルギーを利用すること、④港湾、海岸構造物に対して環境改善、創造のための機能を付加すること、⑤利用により生み出される便益を環境改善に還元すること、などを柱とする海域環境創造について、計画の手順を検討するとともに、このような快適空間創造の要請が高いと考えられる区域の地理的、社会的条件をあてはめることにより、いくつかのケーススタディを実施した。

海が本来もっているべき資質が損なわれていればいるほど海域環境創造に対する要請は高い。この意味から、東京湾、三河湾湾奥部はその典型といえる。

本文においては、このような中から、三河湾湾奥部の地理的社会的条件をあてはめて構築した快適空間創造例を紹介する。

4. 快適空間創造のケーススタディ

(1) 計画の概要

三河港港湾区域内の大塚地区は、港湾域の再開発とともに、海浜リゾート地としての開発に対する要請が高まっている。ところが、本地区および周辺の水際線は岸壁、高潮対策護岸などで占められており、海辺への接近、海水とのふれあい、眺望が困難な状況である。大塚地区前面の海水の水質も夏場には悪化し、COD は4～5 mg/l、

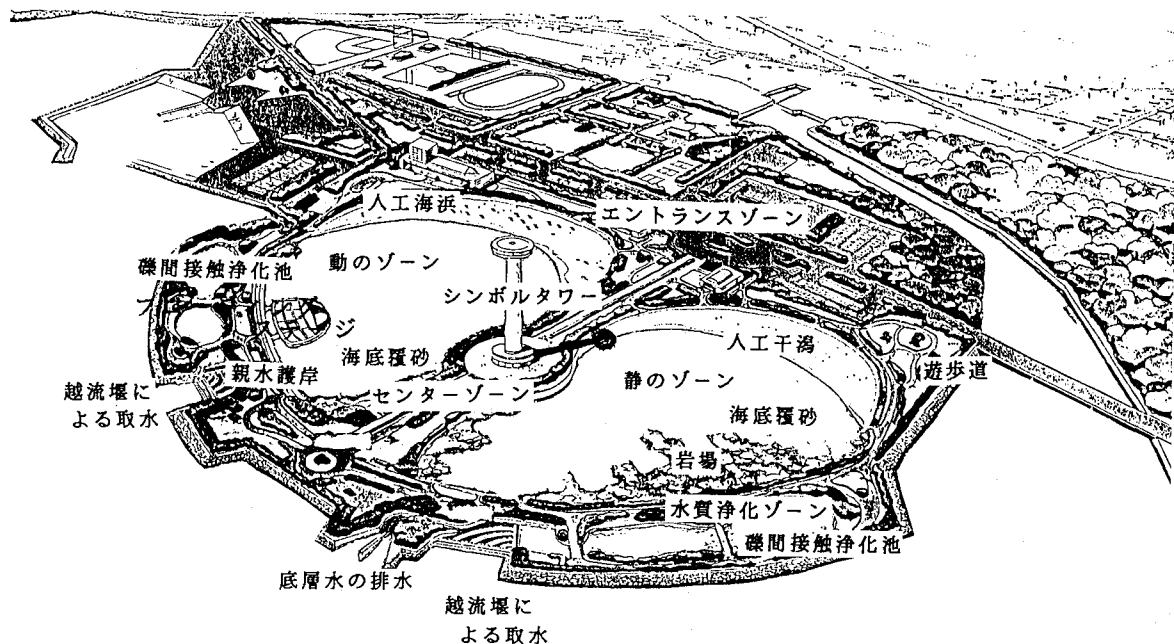


図-1 快適空間創造計画全体図

D0 6 mg/l となる。このため、本ケーススタディーにおいては、大塚地区海洋レクリエーション基地前面に人工的な閉鎖水域を設け、水質浄化、底質改善を図り、人工海浜、人工干潟の造成、修景などを行って水浴ならびに人と海水とのふれあいの場を創造することを目指す。

本地区における快適空間創造の配置を図-1に示す。東西約 700 m ,南北約 500 m の領域を5つのゾーン、すなわち、エントランス、センター、動、静、および水質浄化の各ゾーンにゾーニングする。センターゾーンにはシンボルタワーを設置し、売店、休憩所、水質浄化管理室を設ける。海水浴その他の水上、水中スポーツができる海、ゆったりとくつろげる海の空間を創造するために、動と静のゾーンにはそれぞれ人工海浜を設ける。砂浜の勾配は1/30程度の緩傾斜とし、後浜領域を広くとり、汀線はゆるやかな曲線とし開放感をもたせる。静のゾーンの砂浜は干潟への連続性をもつように割石のブロックで区切る。動のゾーンには鋼製台船あるいはプラスチック製ポンツーンによるフローティングステージを設置し、各種イベントの場を提供する。観客は親水護岸に腰掛けてイベントに参加する。親水護岸は水質浄化ゾーンの内側と外側とに設置する。内側の護岸は階段式とし、水辺に近づきやすく、かつ腰掛けたり散策ができるようにする。さらに、静のゾーンには、海辺と人とのふれあいの場として人工干潟を設置し、干潟生物、植物、野鳥などを生息させる。潮干狩が可能なようアサリの生息を図る。内水域は人工的な潮の干満が生ずるようにする。さらに、静のゾーンには岩場を設置して磯の生物が観察できるようにする。

その他、自然の紹介や、児童から年寄りまでが利用できる講演、勉強会用のホール、緑地、庭園、池、小川、
吾妻屋などを配置する。

これらの各ゾーンを結ぶため、遊歩道を設置する。エントランスゾーンからセンターゾーンに通ずる遊歩道は幅を広くし、花壇、植栽をする。静と動のゾーンの砂浜に通ずる遊歩道は両側を階段式とし、展望をよくする。水質浄化ゾーンの遊歩道は沈澱池、礫間接触浄化池の外周に生け垣やフェンスを設け、安全を図るとともに、景観に変化をもたせ、道を緩やかにするなどによって単調化を防ぐ。

(2) 水質底質改善法

対象水域内の海水の流れは図-2のようになる。すなわち、上げ潮時に潮流堰からオーバーフローした海水は、スクリーン、沈澱池からなる一次浄化施設を通過した後、外郭護岸内に設けた礫間接触池によって浄化され、動のゾーン（水域Ⅰと呼ぶ）、静のゾーン（水域Ⅱと呼ぶ）に放流される。水域Ⅰ、Ⅱ内では新たに造成された砂浜、干潟、人工磯などにおける自浄作用が期待される。下げ潮時は水域Ⅰ、Ⅱ内の底層水は出口に設けた礫間接触池を通して浄化された後、水域外に排出される。この海水の循環には、出口のところに設けたゲート（自動式）および潮汐の干満による自然エネルギーを利用する。

(3) 水質浄化効果の予測

本節では、礫間接触浄化池他において浄化された海水が新たに創造される閉鎖水域に流入した後、内部生産、分解、沈降および人工海浜・干潟などの浄化作用を受けてどの程度の水質が維持されるかを数値モデルにより予測する³⁾。

越流堰より閉鎖水域内に取水された海水の閉鎖水域内における流れの予測および水質予測をするため、つぎのモデルを適用する。

① 2次元2層流れモデル

閉鎖水域内に取水された海水が内部を循環し、放水口に至るまでの流れの予測計算（格子間隔 25m, 上層厚 2m, 下層厚 2m 以深, 時間刻み20秒, 3潮せき分計算）

② 2次元2層富栄養化モデル

閉鎖水域内の水質予測（格子間隔, 層分割は①と同一, 時間刻み90秒, 20潮せき分計算）

本ケーススタディでは不透水性護岸に囲まれた閉鎖水域となるため、内部での海水の流れや水質を現況と比較することは大した意味をもたない。また、水域内の海水の交換量、交換率は越流堰、もぐり堰を通じて取排水される水量は推定可能である。したがって、ここでは、対策後の条件において、越流堰を通過してから閉鎖水域内を循環してもぐり堰より流出するまでの流れおよび水質を予測することとする。

計算の対象範囲は、図-3に示すように、中央にて2分された水域Ⅰ、水域Ⅱを合わせた東西約600m, 南北約300mの領域とする。

流れの計算において、越流堰からの流入量または流出量、およびもぐり堰からの流出量については、単純計算より得られた各時刻毎の量（総流入量、総流出量ともに 40400m³/潮せき）を積分し、平均流量として一定値を与える。

水質計算においても、水域Ⅰ、Ⅱ内のみでの水質変化を取り扱うこととする。したがって、越流堰を通して流入する水質は与えられたものとして取り扱う。すなわち、収れん堤から礫間接触浄化池内に流入した海水が越流堰より水域Ⅰ、Ⅱに至るまでの水質変化はここでは取り扱わない。水質計算の対象となる季節は水質が最も悪化する夏場を想定し条件を設定する。水域Ⅰ、Ⅱにおいて水質変化に係わる内部生産、分解、沈降、溶出については別途三河湾の富栄養化計算で用いられている結果を利用する。

底質浄化効果については、これを考慮しない場合と、考慮する場合とについて検討する。前者の場合、底泥からの溶出速度は COD 76.2 mg/m²/日, PO₄-P 10 mg/m²/日であり、さらに、底泥による酸素消費速度は 2000g/m²/日である。底質浄化効果を考慮する場合にはCODとPO₄-Pの溶出量はともに0, 底泥の酸素消費速度0として扱う。

計算開始時の初期濃度は COD 4.88 mg/l (上層), 同3.42 mg/l (下層), DO 9.56mg/l (上層), 同6.11mg/l (下層) などとする。水平拡散係数は、格子の大きさ (25m) を考慮し, 5000 cm²/s とする。層間の鉛直拡散係数は無視できるとして扱う。沈殿池、スクリーンによる一次浄化、および礫間接触浄化池においては、懸濁物 (SS) 100% 除去で設計されている。これに応じてO-P, CODの懸濁態分は除去されるとして、O-P, CODともに52%除去をして取水することとする。

砂浜および干潟の浄化原単位としては、既往の調査成果³⁾を利用し、砂浜は 1.3 gCOD/m²/gSS/日, 干潟は6.7 g COD/m²/gSS/日とする。ここに、SS 量の算定については、東京湾にて得られているCODとの関係³⁾,

$$SS = 1.584 \times COD$$

をもとに、富栄養化モデルにより算出されるCOD 濃度を用いて行う。一方、O-P の浄化量は、同様に、COD との

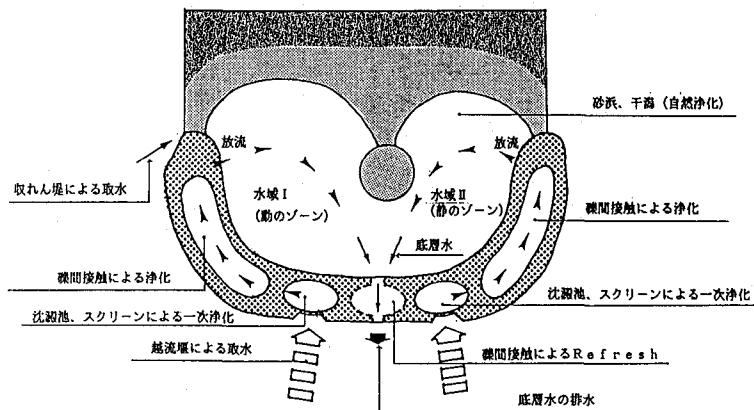


図-2 海水循環模式図

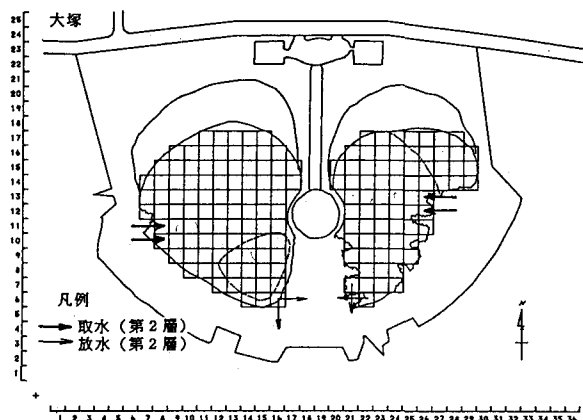


図-3 シミュレーション領域

相関を示した既往の成果³⁾,

$$\text{COD}/\text{O-P} = 82.5$$

をもとに設定する。

なお、砂浜・干潟の浄化効果を考慮しない場合についても比較のため計算を行う。

上述の条件により得られる下層における1潮せき間の平均流れを示したものが図-4である。水域Ⅰ、Ⅱへの海水の取り込みおよび放水は下層より行われるため、下層においては取水部から放水部に向かう流れが見られる。しかし、平均の流速は0.5 cm/s程度と小さい。一方、上層における1潮せき間の平均流れは全般的に微弱である。

底質浄化効果と砂浜・干潟の浄化機能の効果を調べるため次の3ケース、すなわち、ケース1

(底質浄化効果、砂浜・干潟の浄化機能、いずれも考慮しない)、ケース2(底質浄化効果考慮しない、砂浜・干潟の浄化機能考慮する)、ケース

3(底質浄化効果、砂浜・干潟の浄化機能、ともに考慮する)について検討する。

以上の条件において水質予測計算を行った結果をCOD, DOについてとりまとめたものが図-5である。

まず、ケース1の、底質浄化効果、砂浜・干潟の浄化機能のいずれも考慮しない場合については、上層CODは2.64~2.67mg/lでほぼ一樣になるのに対し、下層は2.06~2.22mg/lとなり、上層値の方が高くしかも上層は2mg/lを超える。O-Pについては上下層ともに0.019~0.020mg/lで全域でほぼ一樣濃度となる。DOは7mg/l未満の領域は現れない。

つぎに、ケース2の、底質浄化効果は考慮しないけれども砂浜・干潟の浄化機能を考慮する場合については、上層では水域ⅠでCOD 1.27~1.46mg/l、水域Ⅱで1.07~1.24 mg/lである。下層では、水域Ⅰ、Ⅱにおいてそれぞれ1.68~1.84mg/l、1.76~1.90mg/lである。いずれの領域においてもCOD 2mg/l以下である。

O-Pは上層で0.004~0.009 mg/lであるのに対し、下層では0.015~0.016mg/lと、上層よりやや高く、ほぼ一樣である。

DOは、水域Ⅱの一部領域で7 mg/lよりやや低くなるけれども、その他の領域では7~8.75 mg/lとなる。

最後に、底質浄化効果、砂浜・干潟の浄化機能を共に考慮するケース3の場合については、ケース2に比して水質はさらに改善され、上層CODは0.90~1.28 mg/l、下層 CODは1.56~1.76 mg/lとなる。また DO は、上・下層全領域で8mg/l以上となる。

以上をまとめると、底質浄化効果、および砂浜・干潟の浄化機能のいずれをも考慮しない場合(ケース1)には、DO は改善されるけれどもCODは 2 mg/l 以上となる。これに対し、底質浄化効果は考慮しないけれども、砂浜、干潟の浄化機能を考慮すれば(ケース2)、COD については全域上下層ともに2mg/l 以下となる。一方、DO については、水域Ⅰでは上下層ともに 7.5mg/l 以上となるけれども、水域Ⅱでは 7.5 mg/l 未満(7.04~7.14

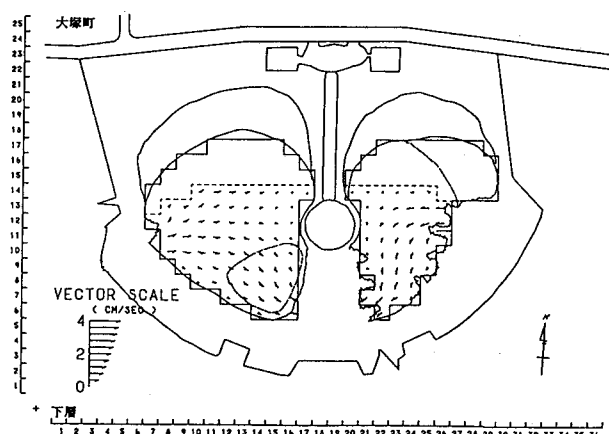


図-4 下層1潮汐間の平均流れ

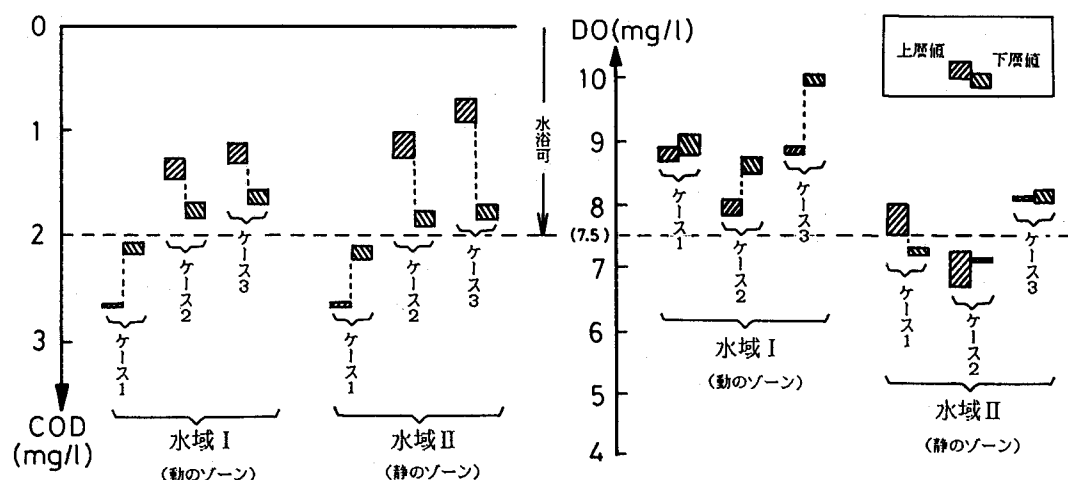


図-5 ケース別 COD, DO 改善効果対照図

mg/l)である。COD, DOについて環境基準と照合すれば、CODについては全域でA類型に入るけれども、水域ⅡのDOはA類型に入らない。しかしながら、水域Ⅰは“水と遊ぶ”(動のゾーン)として水浴可能であり、水域Ⅱは“水に親しむ”(静のゾーン)としての水質は十分満たされていると考えてよい。

さらに、底質浄化効果、砂浜、干潟の浄化機能を共に考慮すれば(ケース3)、CODについては全域上下層ともに2mg/l以下となり、DOについても上・下層全域で7.5mg/l以上となる。

水域Ⅰで水浴可能とするためには、砂浜、干潟の浄化能力に期待するところ大であり、貝類、底生生物などが生育できる環境づくりが重要な課題となる。

底質浄化効果はさらに全域での水浴を可能な水質まで改善し得ることが期待できる。

また、水域Ⅰ、Ⅱより放出される海水の水質はCOD, O-Pともに原海水のそれらより低いため、対象領域の外に悪影響を及ぼすことはない。さらに、放出される海水のDOについては、水域Ⅱの方が7.06~8.23mg/lで元海水の6.11~9.56mg/lに比し一部で低いけれども、水域Ⅱからの排水量を考えればそれらによる影響は小さく、この程度の排水が他に及ぶことはないと考えてよいであろう。

5. おわりに

以上、わが国における近年の生活意識の変化、新しいレジャー・余暇への志向、ならびに、わが国の内湾域の水質状況を概説するとともに、快適空間創造への手がかりとして、三河湾湾奥大塚地区の自然条件、社会条件をあてはめたケーススタディによりその可能性を述べた。これらを要約するとつぎのとおりである。

- 1) わが国においては、昭和50年以降、国民の生活の力点は心の豊かさを重視する傾向が一段と高まり、海辺でのスポーツ、レジャーの人氣が上昇している。
- 2) 現状において、海域の汚濁が著しく、身近にスポーツ、レジャーのできる海辺を見つけることが難しい。このため、水質、底質、周辺環境を早急に改善し、新たな利用可能な海域環境を整備する必要がある。
- 3) 汚濁海域の水質底質を内湾規模で浄化すればその改善効果は大である。しかし、これを実現するための技術的経済的制約は大きい。このため、海の資質を活かし、海域利用を前提として、自然エネルギーを極力利用し、かつ、港湾、海岸構造物に対して環境改善、創造のための機能付加を図り、新たな利用により生み出される利潤を海域浄化に還元するなどにより、比較的身近なところから環境創造を行っていくとよい。
- 4) 人工的に閉鎖水域を造成し、潮汐を利用した自然流下方式の海水循環と、底質浄化、礫間接触浄化池、人工海浜、人工干潟の自然浄化作用を利用することにより、周辺領域に悪影響を及ぼすことなく水浴可能な程度にまで水質を改善し、快適空間を創造することができる。
- 5) 一つ一つは小規模であっても、このような快適空間を順次拡大していくことにより、内湾域全体の環境改善、創造と、新たな海域利用の場を提供していくことができる。

最後に、本調査の実施およびとりまとめ作業は、シーブルー・テクノロジー研究会の若手メンバーを主体としたワーキンググループが中心となって行った。これらの作業の遂行に当たっては、東海大学海洋学部酒匂敏次教授、東京大学農学部清水誠教授、東京水産大学水産学科丸山俊朗助教授、日本大学理工学部近藤健雄助教授の適切な指導と温かい励ましの言葉に支えられた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 総理府広報室：国民生活に関する世論調査，昭和61年5月。
- 2) 環境庁編：環境白書，昭和63年6月。
- 3) 堀江 毅：海域の物質循環のモデル化と浄化効果の予測手法について，港湾技術研究所報告，Vol.26, No.4 pp.57-123, 1987.12.
- 4) シーブルーテクノロジー研究委員会：快適な海域環境に向けてーシーブルー計画ー，1989.3.