

沿岸海域総合管理のためのミチゲーション技術の開発

－瀬戸内海における実験的研究－

中国工業技術試験所	正会員	上嶋英機
同	上	田辺弘道
同	上	正会員 宝田盛康
同	上	湯浅一郎
同	上	正会員 橋本英資
同	上	正会員 山崎宗広

1. はじめに

新しい海洋開発時代を迎えた日本沿岸一帯は海洋リゾート、海洋都市等の海洋開発プロジェクトで賑わっている。一方、自然環境保全の課題を地球規模で対応しようとしている中で、日本沿岸海域全体の海洋環境保全と海域有効利用の両立をどのように図っていくかの概念の確立と具体的技術の開発が求められている。特に日本沿岸海域の中で大都市を抱える東京湾、伊勢湾、そして瀬戸内海の各湾では、すでに大規模な開発計画が実施されているため、全ての湾に共通する問題点を総合して、長期的・広域的な視点に立った沿岸海域総合管理を目的とした、快適環境を優先する開発計画・設計を推進し、広域環境評価の上に立ったミチゲーション機能を満たす具体的な海域制御技術の開発が急務となっている。このため当所では、快適な海洋環境を創造し総合的な有効利用を図る上でのミチゲーション技術として、湾全体の流況を制御・デザインする「流況制御技術」の開発研究を瀬戸内海を対象として行ってきた。本報では、ミチゲーションの概念を基盤とした海域総合管理体制の機能整備と必要性を提示し、瀬戸内海大型水理模型による実験を主体として実施してきた「流況制御技術」の研究成果について紹介する。

2. 海域総合管理体制に必要な概念と機能整備

日本沿岸海域の中でも人口密度の高い大都市圏を持つ閉鎖性海域は、経済基盤の変化に伴う新たな海洋利用の必然性により開発の集中度が極度に高まっている。開発スタイルも多様化し、沿岸部一帯の再開発を含むウォーターフロント開発、沖合人工島開発、海洋リゾート開発等が計画実施されている。これらの開発構想は一つの海域にオーバーラップし機能整理がなされないまま独自に計画されているため、各々の開発構想には以下に示すような共通の問題点を持っている。

2.1 海洋開発構想の共通的問題点

- ① 開発行為には海洋環境の改変が必ず伴うが、基本構想の中に海を守りより美しくする思想が入っていない。
- ② 湾全体の開発を将来的にどのような形で進めていくかの統一的な視点が見られない。
- ③ 湾内の“海の機能”(自然生態系)をどのように管理・制御していくかの基本的概念が欠如している。
- ④ 湾全体の総合環境アセスメントのあり方、進め方の具体的な提案がなされていない。
- ⑤ 湾総合管理機構の必要性が明示されていない。

以上の問題点を解決するためには、開発計画において産業ニーズ優先型から、都市住民の生活環境を守る上での住民ニーズを重視し、湾自体の機能を維持していくための基本的な概念と具体的な総合管理機構が必要である。

2.2 湾開発総合管理機構の必要性

多くのプロジェクトは国(各省庁)、自治体、民間等の計画主体が持つ個別ニーズ、コンセプトによりバラバラに配置されている。しかし、これらの構想を調整なくこのまま実施した場合、社会的な混乱を始めとし大きな自然破壊を招くことは必至である。そこで、全ての開発プロジェクトを総合的にチェックし、オーバーラップした計画を整理して過剰な開発を抑制し、湾全体の総合的な環境保全を図るため、以下の機能を持った湾開発総合管理機構が必要不可欠である。

① ミチゲーション機能

我が国では、開発に伴う環境変化や自然生態系へのマイナス効果に対して具体的な復元の方策は取られず、権利者に対する補償を行い開発が進められてきた。これに対して現在アメリカでは、開発と自然保護の両立を図る上で、「ミチゲーション」が基本概念として導入されている^{1, 2)}。このミチゲーション(mitigation)の考え方は、「開発に対する環境(自然生態系)への被害を極力減少し(reduce)損なった環境を復元し(repair)、不足する場合は他の地域で償う(compensate)ことにより、開発行為による環境への損害をゼロにするためにとられる活動」と定義されている。そこでこのミチゲーションの概念を機能化したミチゲーションプランを我が国の開発構想の中に取り入れ、予想される自然環境へのマイナス効果に対して具体的処置を実施させる機能が重要である。このため、ミチゲーション機能を満足する上で海域制御技術や蘇生技術等の具体的技術が求められる。

② 開発計画の総合的整備・管理機能

個々の開発プロジェクトに対する実施計画・ゾーンニングの設定、各々の開発計画の関連性及び社会性、経済性、運用性について査定し、関係機関との調整を図り湾全体の開発について管理し得る機能が必要である。

③ 総合環境アセスメント機能

開発プロジェクトを総合し、湾全体の広域環境アセスメントを実施する。社会科学的、自然科学的見地から環境影響因子を整理し湾内流動・水質状態を長期的に保持し、開発後の環境変化に対する監視を実施する機能が必要である。

2.3 ミチゲーション技術としての海域制御技術の導入

ミチゲーション機能を満足する具体的技術として、長期的・広域的に海洋環境をコントロールする海域制御技術がミチゲーション技術の中核となる。海域制御の中で物理的環境を改善、制御し得る「流況制御技術」は、海域の浄化能力を直接的に高める海水交換の促進が期待でき、水質、生態環境の改善と維持に直結するものである。これまで、開発行為に伴い自然海域が閉鎖的な人工水域と化し、流水が停滞することから水質環境が悪化し貧酸素化が増進される傾向にあるが、このような水域は、開発計画の時点であらかじめ流況制御技術を取り入れ、適正環境を保持できる設計をすべきである。湾全体の広域的な環境創造のためには、流況制御技術により流動場を適切に制御し海域有効利用との調和を図ることが必要である。

3. 瀬戸内海の閉鎖性海域における「流況制御技術」の研究

瀬戸内海は日本沿岸海域の中でも最も大きな内海であり、閉鎖的な湾・灘が数多く海峡部、瀬戸部によって複雑に連結された水路から成っている。瀬戸内海の各海域には地形的物理的に閉鎖された海域が多く存在し、そのため海水交換が極度に悪く、赤潮、貧酸素水塊が発生しやすい停滞性水域が多く分布している。図-1に示す模式図からは、各海域には潮流により生じる特有な恒流(水平循環流)が潜在的に存在し、この

恒流により押し込められたり取り残された形で流れの弱い停滞性水域が分布する。この水域に富栄養な河川水が流入、滞留することから強い貧酸素水塊の形成やヘドロの堆積が進行する。一方、沿岸海洋開発が活発化する昨今にあって、静穏で利用価値の高いこの停滞性水域が開発対象水域としてニーズが高まっている。それ故、沿岸海洋開発を進めていく上で停滞性水域の流動水質環境の保全と開発に対する適正な環境管理が必要不可欠な状態となっている。この課題に対処すべく、瀬戸内海の閉鎖的な湾内に現存する停滞性水域の流動場を、潮汐流といった自然エネルギーを利用し工学的立場から人為的に制御し改良する流況制御技術の研究開発に取り組んできた。

瀬戸内海には停滞性水域を有する数々の湾・灘が存在するが、それらを類型化したものが図-2に示す3タイプの湾である。各々は湾形状と湾口部位置、及び循環流配置の関連性の中で停滞性水域が形成されている。これらいずれのタイプにおいても、潮汐状態が根本的に変わらなければ、地形形状を変えない限り停滞性水域の流動を変えることは不可能である。流れを変化させたり海水交換を促進させる具体的な工学的手法として、これまで湾口改良、作渚、海底構造物(礁、潜堤、導流堤)設置による工法が用いられてきたが、本研究ではこれらの工法に海底地形その物を改変する新たな手法を加え、地形改変の位置、規模、湾全体の形状を変えることにより、水平・鉛直循環流の規模、流程を広域的に制御することを主体とした。

そこで上記研究目的を達成するため、①基礎的な流況制御技術を開発するための基礎水槽実験を主体とした要素研究^{6, 7)}、②瀬戸内海大型水理模型による大阪湾、別府湾等を対象水域とした具体的工法適用による応用実験から流況制御技術の効果検証^{3, 4, 8)}、更に③実海域で停

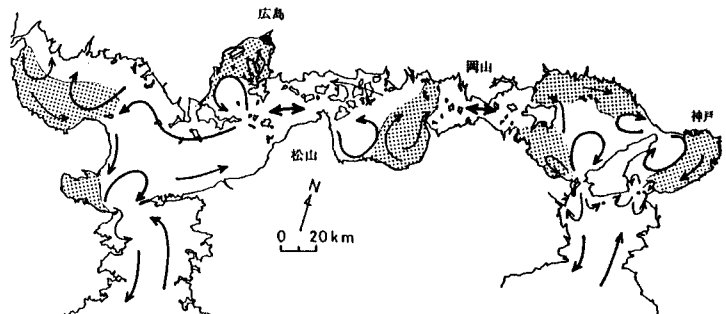


図-1 瀬戸内海の恒流分布と停滞性水域の模式図

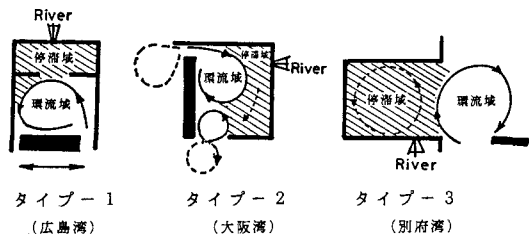


図-2 瀬戸内海の停滞性水域の分類模式図

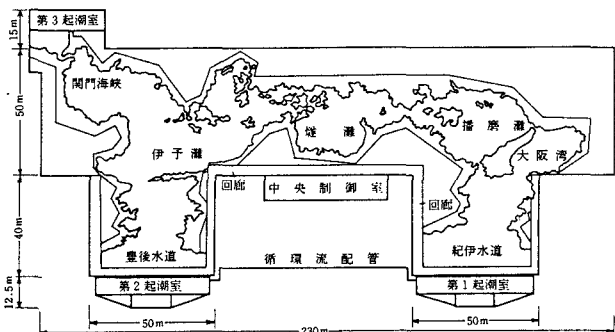


図-3 瀬戸内海大型水理模型の平面図

滞性水域の流動水塊構造を把握する実態調査⁵⁾の3項目について研究を実施してきた。これらの研究の中から、研究項目②による流況制御技術の具体的工法を用いた応用実験の成果について紹介する。

4. 瀬戸内海大型水理模型による流況制御技術の応用実験

瀬戸内海の中で代表的な閉鎖性水域である大阪湾、別府湾、及び広島湾に存在する停滞性水域の流況改善のため流況制御技術を適用した応用実験を瀬戸内海大型水理模型で実施した。流況制御工法として、先にも述べた海底地形改変工法、湾口地形改変工法、海底構造物設置工法を各々の海域特性に応じて適用し、その効果として湾全体での流況変化、海水交換形態の変化について検証した。これらの実験から、大阪湾での海底地形改変工法と湾口地形改変工法の応用実験結果及び別府湾での海底構造物設置工法の応用実験結果について紹介する。なお、瀬戸内海大型水理模型は図-3に示すように、水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/159の潮汐水理模型で潮汐・潮流の相似性はすでに達成されている。

4.1 大阪湾での湾口地形改変工法の適用による流況改善効果の検証^{3, 4)}

図-4は、現状地形での大阪湾内に分布する循環流と停滞性水域の模式図を示したものである。大阪湾には明石海峡からの大きな時計回りの循環流Aと、友ヶ島水道からの湾口循環流Bの2つの循環流によって閉じ込められたように湾奥部に神戸沖から泉南にかけて停滞性水域が分布している。この停滞性水域の流況改善を図るための流況制御工法の一つである「湾口地形改変工法」を適用し、流況改善等の効果検証を行った。この工法は、湾内に流入する潮流エネルギー量や海水交換量を制御可能とし、湾内循環流形態変化と海水交換促進を図る上で大きな効果が期待できるものと考えられる。そこで、大阪湾の明石海峡と友ヶ島水道の2つの湾口部の中で、外洋に近い紀伊水道側湾口部の友ヶ島水道を対象として、湾口地形を各種改変し実験を行った。

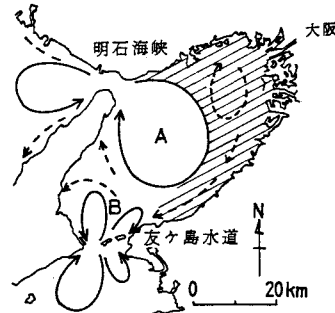


図-4 大阪湾内の環流分布と停滞性水域模式図

(1) 実験内容

図-5に示すように、友ヶ島水道は全幅が約11kmであるが、和歌山側の地ノ島、沖ノ島、そして淡路島側の由良間に加太瀬戸、中ノ瀬戸、由良瀬戸の3つの瀬戸が存在し、前者の2つの瀬戸は水深が約50mと浅く、幅も1km程度とせまいが、由良瀬戸(紀淡海峡)は水深が140mと深く、幅も約4kmで全体の約35%となっている。また、各瀬戸部の断面積は、由良瀬戸で全断面積の89%、中ノ瀬戸は4%、加太瀬戸は7%となっている。そこで瀬戸内海大型水理模型の大阪湾において以下の4ケースの実験を行った。即ち、複数個の瀬戸部から成る友ヶ島水道の現状のままの地形での実験をCase0とし、加太瀬戸のみを閉鎖した場合をCase1、中ノ瀬戸と加太瀬戸を閉鎖した場合をCase2、更に図-6に示すように、友ヶ島である沖ノ島、地ノ島の2つの島を水深20mまで掘削し、水道部を全て開放した場合をCase3として実験を行った。Case1、2、3の水道部断面積の割合は、Case0に対し各々、93.3、89.1、145.6%である。

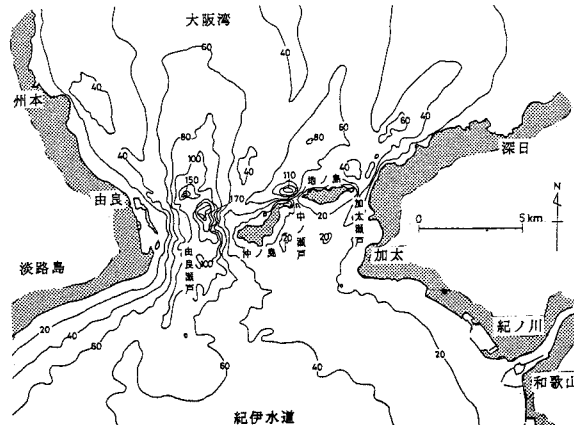


図-5 友ヶ島水道海深・地形図

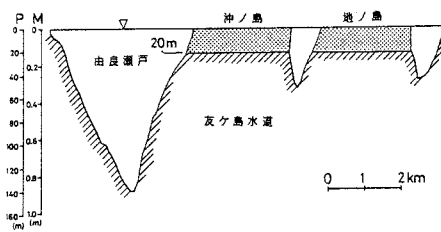


図-6 友ヶ島水道横断面図

実験内容としては①海峡部の流動形態変化、②湾内全体の潮汐潮流及び循環流規模の形態変化、③淀川河川水拡散形態の変化、④湾全体及び停滞性水域内物質の移動、及び海水交換性の把握について調査した。実験潮汐として、半日周期(M_2 潮、周期282秒)を水理模型内に与え、河川水は10PPm濃度の染料水(ローダミンB)を使用し淀川から年平均流量で連続放流した。

(2) 実験結果

(a) 大阪湾内の流況変化

湾内の代表点から同時放流したボールを10周期間追跡し得た恒流分布を図-7に示す。Case0に比べ各々のケースでは、明石からの循環流の規模とバランスを大きく変化させる結果となった。Case1の泉南沖(B点)ではCase0に比べ約2倍の速さの南下流となり、停滞性水域内の流況を大きく変化させる効果が示された。次にCase2では、Case1より明石循環流域が南東にシフトしたため、神戸沖はCase0に近い恒流分布となるが、由良瀬戸(N点)からの流入形態が異なる。更に、Case3では友ヶ島付近の循環流Bが消去し、全体的に明石循環流を北へ押し上げる形に変化した。

(b) 淀川河川水拡散形態の変化

大阪湾奥部の停滞性水域に分布する淀川河川水の拡散形態が、湾口部地形を改変することによりどのように変化するかを調べる実験を行った。図-8は、Case0,1,2,3での50周期間の河川水移動分布を10周期毎の拡散前線と領域で示したものである(濃度分布ではない)。河川水移動分布は図-1に示した湾内流動形態に規定されているが、Case0の場合、淀川河口沖から友ヶ島水道に達した河川水は循環流に押され淡路島寄りに北上するため、河川水の滞留時間が長くなっている。これに対し、Case1では、明石循環流の形態変化に従って淀川河口沖から泉南沖にかけての河川水分布幅が広くなり、友ヶ島水道を抜ける河川水が多くなる。しかし、Case2の場合には、明石循環流の拡張により沿岸部に押し込められた河川水は幅せまく張り付き、河川水の南下する時間が遅くなり、湾内に広く拡散することはない。一方、Case3では友ヶ島水道の通過断面積が最も大きにもかかわらず、河川水の分布状態はCase2とほぼ同じパターンを示すが、淀川河口から岸和田沖を南下する河川水の移動速度は最も遅い。しかし、40周期を過ぎて友ヶ島水道部の広域な流動域(湾口循環流B)に取り込まれ、一気に拡散希釈される。

以上各実験ケースの結果から、停滞性水域の水質改善を図る上で最も効果的な場合がCase1であり、Case2,3は逆に、大阪湾奥部沿岸水域の河川水滞留時間を長くし、水質状態を更に悪化する可能性を示すことが明らかとなった。

(c) 湾全体及び湾内各水域の海水交換性

湾内に1195個のボールを均一投入し、全ボールの湾内残留量及び湾外流出量を測定した。湾内全ボールの移動は、明石海峡を抜け播磨灘へ流出するものと、友ヶ島を抜け紀伊水道に流出するものとに分かれる。100周期目(約50日後)の大阪湾内に残留する率の最も少ないのが13.9%のCase3で、このときの湾外流出率は紀伊水道で全体の71%、播磨灘で15%であった。湾内残留率から計算される平均滞留時間は、Case0で63周期、Case1で66周期、Case2で85周期、Case3で51周期となり、湾全体の海水交換促進にはCase3が最も効果的であり、Case2では、現状よりかなり悪化する結果となった。

以上湾口部地形改変の流況制御工法による応用実験からは、湾内循環流の規模と各々の循環流の配置(バランス)を変化させることが確認された。特に、湾口断面積を全体の4%縮小しただけの改変率の低いCase1が改変率の高い他のケースに比べ、湾内流況変化及び海水交換性と河川水拡散の促進に大きな効果をもたらすことが検証された。また、湾口部地形を改変することによる大阪湾の潮位変化については、Case1,2で潮汐の振幅は現状より減少し、Case3で、振幅は増加、位相は遅れ、更に瀬戸内海全域に対する潮位変化は播磨灘以西までの広域に達する結果が見られた。

4.2 大阪湾での海底地形改変工法の適用による流況改善効果の検証

流況制御の他の工法である湾内海底地形を改変する工法を大阪湾に適用し、湾内流況を制御できるか、更にその効果として湾内停滞性水域をどのように改善できるかを物理的に明らかにする応用実験を水理模型で行った。

(1) 実験内容

図-9に示すように、瀬戸内海大型水理模型の大阪湾内の海底に水路を掘削し海底地形を段階的に改変した。各々の水路による流況変化を捉えるためCase1,2,3と別々に実験を行い現地でのCase0の実験結果と比較検討した。Case1の実験ケースで対象とする水路は、神戸沖合の東向きの環流(明石循環流)を淀川河口まで導流し、河川水の滞留を消去することを狙って設けたもので、東西方向13m(現地換算26km)、幅2m(4km)、水深18.8cm(30m水深)の水路である。Case2は、Case1の水路に加えて淀川河口沖から深日沖合までの水路を対象とした実験ケースである。水路の規模は、湾沿いに幅1m(2km)、長さ約20m(40km)、水深18.8cm(30m)であり、明石循環流Aの右回りの環流を強化し停滞水域を破壊し、混合を

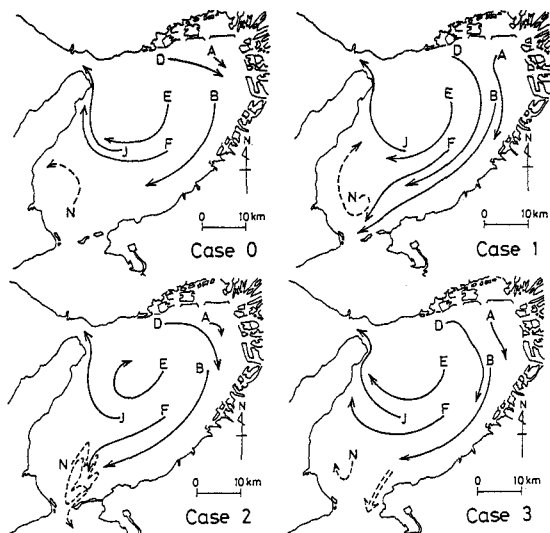


図-7 大阪湾内代表点からの10周期間流跡図

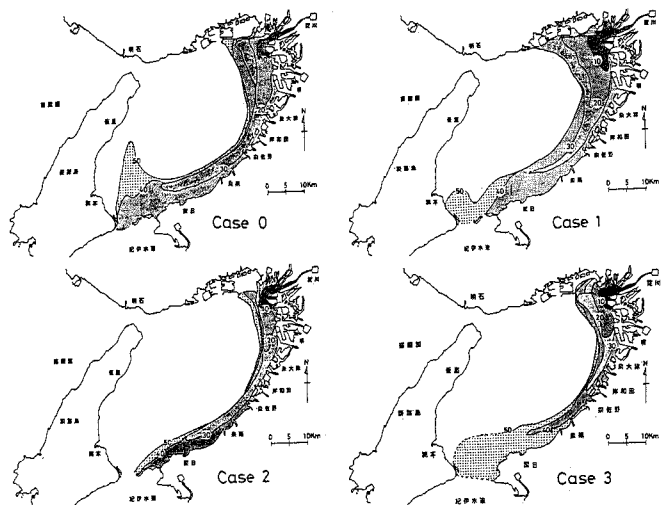


図-8 各実験ケースでの淀川河川水移動分布図

促進することを狙ったものである。Case3は更に、Case2の湾東沿岸の水路に直結する4本の水路を東西方向に櫛状に設けた場合で、この水路を南下する流れを利用して鉛直混合を促進することを目的とした。各々の水路は幅1m(2km)、水深18.8cm(30m)、長さは20m等深線までとした。

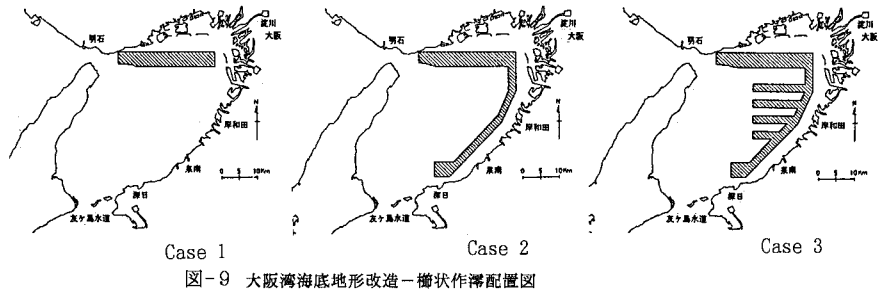


図-9 大阪湾海底地形改造—櫛状作渠配置図

(2) 河川水拡散実験による拡散形態の変化

大阪湾奥の停滞性水域の領域が海底地形を改変したことでどのように変化するかを河川水拡散実験から定性的に確認した。実験では停滞性水域に流入している湾内最大流量を持つ淀川河川水を対象とし、前節で示した実験と同様に染料水を河川水とし、年平均流量 $14.5\text{cm}^3/\text{s}$ (現地換算 $166\text{m}^3/\text{s}$)で連続放流し、その拡散形態を明らかにした。その結果の1例として図-10に全水路を使用したCase3の、50周期間(約25日間)放流した場合の拡散分布を示す。Case0とCase3では拡散範囲が大きく異なり、Case3では明石海峡付近まで拡散域が北上している。これはCase3での水路により、明石海峡の環流域が強化されて岸和田沖沿岸に深く入り込み、河川水を早く南下させたためと考えられる。50周期間での湾内拡散面積は、Case0に対しCase3では1.4倍に促進され、河川水流出量が一定であることを考えれば、拡散面積当たりの平均濃度は、Case0よりCase3の方がはるかに低濃度となっている。拡散が促進され停滞水域内の滞留時間が短縮されることで、実際海域に見られる高濃度の栄養を含む河川水が拡散希釈され、集中的な赤潮や貧酸素水塊の発生を阻止できると考えられる。

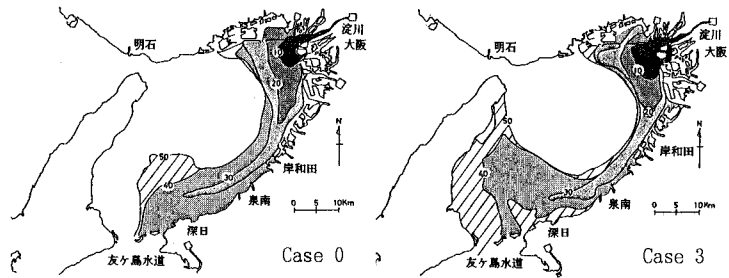


図-10 Case0とCase3での河川水拡散分布図

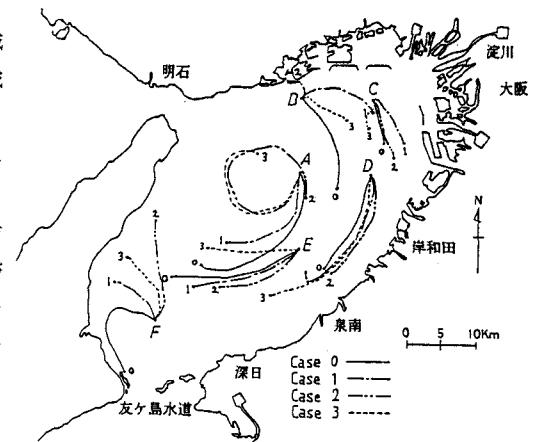


図-11 大阪湾内代表点からの10周期間移動経路図

(3) 湾内の流況変化

水路掘削による湾内流況の変化を調べるため、湾内に縦横2.5m(現地換算5km)間隔でボールを設置し、このボールの移動を写真撮影及び直接観測により連続的に追跡した。各実験ケースでの10周期間移動経路の変化を各代表点について示したのが図-11である。各代表点での移動経路は実験ケースごとに大きく変化し、流程距離も異なっている。湾中央測点(A)では掘削水路を増加するほど循環流が強くなり全体的に北へシフトしている。泉南沖の測点ではCase3の流程距離が最も長くなっている。このように、各実験ケースで得られた結果を基に、目的に応じた湾内流況を設計することが可能となれば湾全体の流況改善・制御が実現できる。

以上から本実験で適用した海底地形改変による流況制御工法では、湾内に存在する支配的な循環流の規模と位置を改変させ、その移動経路と流程距離を制御できる可能性が明らかとなった。更に、循環流を強化することにより、停滞性水域内に滞留する河川水の拡散混合を促進する効果を持つことが明確となった。

4.3 別府湾での海底構造物設置工法の適用による流況改善効果の検証⁸⁾

別府湾は図-12の湾内循環流分布に示されるように湾口部前面には豊予海峡からの伊予灘を北上する外洋性水塊による大規模な循環流aがあり、この循環流に閉鎖されながらも湾内に連動した2つの循環流b、cが形成され、湾奥部は最も停滞性の強い閉鎖型循環流cにより環境が支配されている。従って別府湾内の流動水質環境は湾口前面からの循環流によって決定づけられる。このため湾口部に海底構造物として導流堤を設置する工法を用い、湾口循環流を改変・制御することにより湾内の停滞性水域の環境改善のための応用実験を水理模型で行った。

(1) 実験内容

瀬戸内海大型水理模型の別府湾において、湾口部に導流堤を設置する実験を行った。実験ケースは図-12に示すよ

うに湾口部の循環流を利用し外洋水を湾内に導入することを狙って、長さ2m(現地換算4km)の導流堤をCase1,2,3と別々に設置し、各々の実験結果と現状(Case0)での実験結果を対比しその効果を検証した。実験潮汐は半日周期(M_2)を与え浮標による湾内流況測定と、大野川、大分川からの河川水として、染料水を連続放流する河川水拡散実験を行った。更に湾内にボールを均一に配置し、その分布形態変化と湾内残留量から海水交換の変化を調べた。

(2) 実験結果

上記に示した実験の中から各実験ケースにおける河川水拡散実験結果による拡散分布図を図-13に示す。現状地形Case0での河川水拡散は、湾南部の岸沿いに東進し豊予海峡に達する。この拡散過程に対し、Case1では、導流堤の設置により国東半島沿いに南下する流れが縮流効果により強制され、湾中央部での流れが加速されて湾奥部環流が押し込められる。この流況変化に伴い河川水は湾奥部に流入せず、伊予灘に広く拡散する。Case2は、湾奥部の環流が強化され、それに伴い河川水が環流パターンに沿って流入拡散する。Case3では湾中央部で速い北流が発生し湾奥環流の向きが逆回転となり、河川水は帯状に北上して国東半島から伊予灘に強く拡散していく。

以上により、Case1,2,3と導流堤の設置位置による湾内流況変化は大きく異なり、海水交換が大きく促進される結果が得られた。

5. おわりに

本文では、日本沿岸域全体の海洋環境保全と海域有効利用の両立を図るための概念として「ミチゲーション」の考え方を取り入れた海域総合管理機構に必要な機能整備について示した。更に、ミチゲーション機能を満足する具体的技術、即ちミチゲーション技術として、海域制御を人為的に行う「流況制御技術」を導入し、海域の流動場を適切に制御することの必要性を述べた。流況制御技術の具体的な開発研究に関して、瀬戸内海閉鎖的海域の流況改善のために流況制御技術を適用した応用実験から、その効果について明らかにした。具体的な流況制御工法としては「湾口地形改変工法」と「海底地形改変工法」を大阪湾に適用し、導流堤による「海底構造物設置工法」を別府湾湾口部に用いて行った実験結果からは、いずれの工法も湾内流況の変化と海水交換促進に大きな効果を示すことが検証された。

以上のミチゲーション技術の研究を更に進め、具体的な技術と成果を今後の沿岸海洋開発の中に取り入れ海域有効利用と環境保全とが両立できる沿岸海域総合管理の実現に大いに寄与したい。

<参考文献>

- 1) 金 芳晴 (1988) ; 港湾空間開発とミチゲーション, 海洋開発論文集, V014, pp. 259~264
- 2) 長尾義三 (1988) ; ミチゲーション概念と我が国への適用, 88日本沿岸域会議 研究討論会 講演概要集 NO.1
- 3) 上嶋英機他 (1989) ; 海洋環境創造と有効利用のための流況制御技術, 第9回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, pp. 281~288
- 4) 上嶋英機他 (1989) ; 大阪湾停滞性水域の流況改善技術に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 839~843
- 5) 上嶋英機他 (1989) ; 別府湾停滞性水域の循環流と水塊構造, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 797~801
- 6) 宝田盛康他 (1987) ; 湾内水停滞性の制御・改善の実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 666~669
- 7) 山崎宗広他 (1988) ; 海底構造物による流況制御技術の研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 479~501
- 8) 橋本英資他 (1990) ; 別府湾における流況制御技術の研究, 土木学会第45回年次学術講演会要旨(発表受付済)

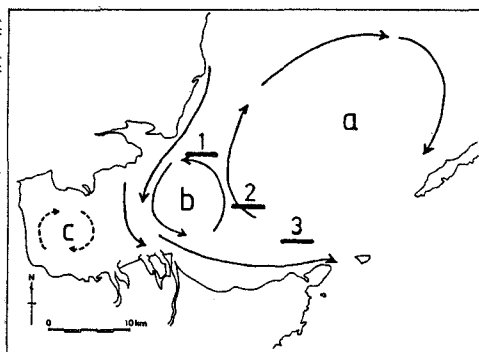


図-12 別府湾内循環流分布と導流堤設置位置
Case1, 2, 3

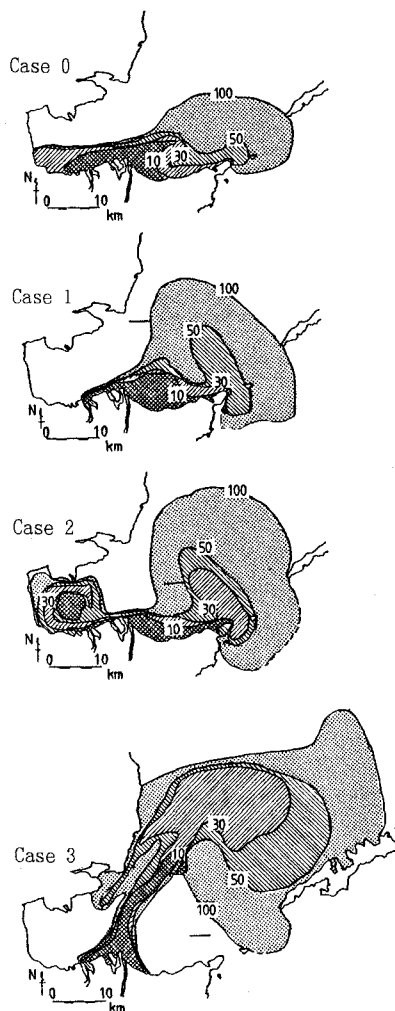


図-13 河川水拡散分布図(数字は周期)