

沿岸域における最適環境修復技術

Optimum Environmental Restoration Technologies for Enclosed Coastal Sea

上 嶋 英 機

Hideki UESHIMA

1. はじめに

沿岸海域は、陸上からの負荷と社会形態や開発状況による直接的な影響を受ける海域である。しかも、海域の水産資源や埋蔵海底資源を活用し、更に空間利用としてのレジャーや観光としての活用、沿岸域の海浜や浅場の活用、港湾機能としての物流、防災等の場でもある。このように多様な価値を共有する沿岸海域、特に開発と都市化の進んだ閉鎖性海域の瀬戸内海、大阪湾、東京湾においては、恒常的な環境悪化と生態系への被害が深刻化し、自然環境保全と利活用とのバランスが崩れている。これまでの大規模な埋立により藻場、干潟などの浅場が喪失し、赤潮による漁業被害や貧酸素水塊などが発生してきた。特に、貧酸素水塊はわが国の内湾では慢性化しており、大阪湾では約3割の水域で5ヶ月間にわたって発生し、東京湾では青潮が発生するなど、わが国の沿岸域生態系の構造と機能、生物多様性は大きな影響を受けている。このため、国家的な政策としての沿岸海域の総合管理とその制度化、そして環境活動に向けた具体的な戦略が求められている。

この中、1997年以降、河川法や海岸法、港湾法が環境保護・管理の政策に改変された。また、沿岸域総合管理の必要性が高まり、2000年には「21世紀『環の国』づくり」会議での提案を受けて、自然と共生する社会の実現に向けての「自然再生型公共事業」の重点化が提唱された。一方、2000年2月に国土庁は、新全総「21世紀の国土のグランドデザイン」を受けて「沿岸域圏総合管理計画策定のための指針」を決定した。そして、2002年度には沿岸域の環境を再生する「自然再生推進法」が成立した。この自然再生法は、森、川から磯浜、干潟、藻場までを連続した場として捉え再生しようとする政策である。一方、2002年には「都市再生法」による海の再生プロジェクトとして「東京湾再生」や「大阪湾再生」が動き出した。

このように、沿岸海域を海陸一体として捉え、沿岸海域の環境を総合的に管理することを基盤として、まずは、「自然再生推進法」の定義により、これまでの開発によって損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すための自然再生事業を始めなければならない。しかし、自然再生事業に不可欠な、水質浄化などの環境調整機能を担う生態系の構造と機能の修復と、海域全体の物質循環機能の回復を目的とした環境修復技術の開発は未だ緒についたばかりである。

そこで、本稿では、自然再生に必要な環境修復技術の概観と、各技術の効果検証のための研究開発状況について紹介する。特に、閉鎖性海域である大阪湾を対象として、自然再生のための最適な環境修復技術の選定のために、現地海域と水理模型で実施している効果検証実験の取り組みを中心に論じる。

2. 自然再生のための環境修復技術の開発動向

2-1 環境修復のためのミティゲーション¹⁾

自然再生の定義である「開発に伴う環境変化や自然生態系へのマイナス効果を修復する」この概念は、1989年に米国から日本に伝わった「ミティゲーション (mitigation)」の考え方と同じである。

この「ミティゲーション」の考え方は米国で生育したもので、開発と自然保護の両立を図るための制度化までされている。その概念は「開発による自然生態系への被害を最小限にし、損なった環境を復元、開発行為による環境への損失をゼロにするためにとられる活動」である。開発で失われた干潟、海藻、魚類を別の場所で補い、自然の摂理を復元する代償措置や影響緩和措置の考え方である。

表-1 ミチゲーションの歴史

1934	FWCA	漁獣保護法
1969	NEPA	国家環境政策法
1972	CZMA	沿岸域管理法
	FWPCA (CWA 1977)	連邦水質汚染統制法
1975	SECTION 404	●環境保全の進め方・基準は環境保護庁[EPA] 取締まりは工兵隊[USACE]が行うことを決定
1985	MOA	関係官庁ミチゲーション合意書
1988	ブッシュ選挙公約	No Net Loss
1990	SEQUENTIAL TEST	合意書改定
1992	MOA再改定	●EPA・USACE・内務省野生保護局の足並みが揃った

米国でのミティゲーションの歴史を示したのが表-1である。この歴史からは、米国のミティゲーション政策は1988年のブッシュ大統領選挙公約の中で「No Net Loss」：自然環境における「正味の喪失阻止」を図ることを提唱したことで決定的となり、世界的にミティゲーション政策が認識されるようになった。このため1992年には陸軍工兵隊 USACE と環境保護庁 EPA、そして内務省野生保護局の足並みが揃い、合意書[MOA]が再度改訂され具体的なミティゲーションプログラムが提示された。これらの政策はカリフォルニア州

の湿地帯の環境保護・修復と開発との共生に大きな役割を果たす制度となった。

次に、ミティゲーションを具体的な活動として段階的に進めるための考え方を図-1に示した²⁾。

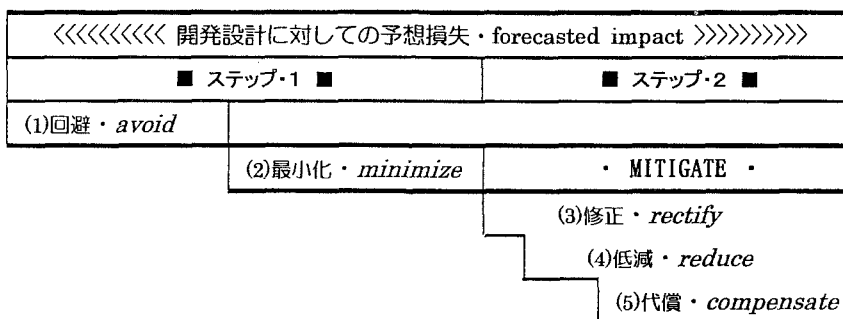


図-1 ミティゲーションプログラム

先ず、ステップ1では自然環境に損失を与えない開発設計と立地が必要であり、このため開発計画における事前のマイナスインパクトを回避(avoid)し、設計段階での影響を極限に最小化(minimize)を図る。

次に、ステップ2では極限に最小化したマイナス要素を具体的にミティゲーションする活動である。先ず修正（rectify）では、その工事により影響を受けた環境を修復・復元することにより影響を修正する。その過程で予想よりインパクトが大きければ再びステップ1に戻り設計変更する。更に、低減（reduce）では、開発行為の期間中の保存や維持により時間を経て生じる影響を低減または除去する。長期的な影響に対しても考慮する。そして、代償（compensate）では、修正や低減の実施が不可能で、その場所や資源では修復・復元できない場合には、別の場所で代替的に置き換えることで影響を代償する。この思考は特徴的で、狭い海域や規制等の制約のある海域では別の場所で代償措置をとらざるを得ないため不可欠である。

以上のステップによりミティゲーション事業が実施されていくが、実際に必要なのは、具体的なミティゲーション技術と効果の評価方法である。

2-2 環境修復技術の分野

表-2 沿岸域の環境修復技術

方法	目的	環境技術
生物利用	生物生産 生物多様性	人工干潟・浅場 ヨシ原造成
		アマモ場造成
		藻場造成 人工潟湖 人工リーフ 傾斜護岸
	水質改善	人工砂浜 礫間接触酸化堤
	底質改善	ベントス利用 微生物利用
生物非利用	水質改善	透過堤 曝気型護岸 鉛直混合促進
		作渚 導流堤
		エアレーション
	底質改善	浚渫 覆砂
		底質改良材(剤)投入

これまで、沿岸域の環境修復技術を分類すれば表-2に示されるものとなる³⁾。修復技術適用の直接的な目的としては、生物生産や生物多様性の回復・促進、水質改善や底質改善であるが、その方法には生態系機能を活用した「生物利用」によるものと、流動場や地形地質の改変制御を物理的・化学的に行う「生物非利用」の方法がある。

一方、これらはまた手法的分類として表-3に示すように、①物理的手法、②化学的手法、③生物的手法に分けられる。表中の各手法に該当する具体的な技術としては、多種多様な技術が存在するが、この中には古くから使用されている技術や、最近開発された新技術などが含まれる。古くからの技術は1955年以降、浅海漁場開発事業や干拓事業の時代にオランダから持ち込まれた浚渫技術や埋立・干拓技術の他に、導流堤や渚筋、水路開削等の海水交換促進のための流況制御技術として実用化されていた。これらは農水産業関連の生産性向上に向けた取り組みの国家事業として使用された。

現代においては、生態系環境が損なわれている沿岸海域の基本的な生物環境の再生策として、これまでの技術が環境修復技術とし目的を変え急務となっている。従って、前述した各々の修復目的に対応する技術効果と信頼性の確認が不可欠となっている。

これまで、各修復目的に対して事業化に使用された技術と場所の関連を表-4に示す。これまで実施された事業では水質改善を目的として、覆砂工法や浚渫が多く、干潟・浅場造成による多目的な整備事業に使用されてきた。改善事業として使用される場所も特色を持っており一様ではない。一方、環境修復を必要とする海域の特性は同一ではなく海域毎に個性が存在する。従って、使用する技術が同じでも海域により効果が異なることがある。また、複合的な環境修復目的に対応し効果を上げるためには、単一技術だけでなく異なる技術の組合せが必要となる。そのためには、実海域において修復目的を満足する最適な技術の組合せを検討することが重要な課題となっている。

表-3 環境修復技術の区分

目的	技術内容	具体的対策例
物理的手法	回収・除去 移動・拡散 密閉 地形改変・造成 等	浚渫、覆砂、清掃、 砂浜・干潟造成、 人工岬・リーフ造成 緩傾斜護岸造成 作渚 等
化学的手法	凝集・沈殿 浄化 分解 等	凝集・沈降 固化剤の散布 酸素供給・調整(剤) 等
生物的手法	生物増殖・生育場 造成 資源増殖 保護・育成 等	浅場・藻場造成 魚礁設置 種苗生産・放流 監視 等

出典：ミチゲーションと第3の国土づくり（水環境創造研究会、1997）

表—4 環境修復技術の分類と各技術の代表事例 ³⁾

＜生物利用＞			＜非生物利用＞		
目 的	環境技術名	代表的な事例(都道府県)	目 的	環境技術名	代表的な事例(都道府県)
生物生産・ 多様性	人工干潟	五日市（広島）、 葛西海浜公園（東京）	水質改善	透過堤	三田尻中関港（山口）、 志賀島漁港（福岡）
	ヨシ原造成	山王川（茨城）、琵琶湖（滋賀）		曝気護岸	和歌山マリナーシティ（和歌山）
	アマモ場造成	樋合島（熊本）、似島（広島）		鉛直混合促進	堺出島漁港（大阪）、 五ヶ所湾（三重）
	藻場造成	様似島（北海道）、 アクアライン（東京）		作渚、水道	松島湾潜ヶ浦（宮城）、 稲江港（長崎）
	人工ラグーン	りんくう公園内海（大阪）		導流堤	葛西海浜公園（東京）
	人工リーフ	新潟西海岸浸食対策事業（新潟）		エアレーション	久美浜湾（福井）
	緩傾斜護岸	関西国際空港護岸（大阪）	底質改善	浚渫	お台場海浜公園（東京）
水質改善	人工砂浜	横浜市金沢地区（神奈川）		覆砂	周防灘刈田港（福岡）、 津田港（香川）
	礫間接触酸化堤	ハウステンボス（長崎）		底質改良剤	仮屋湾（佐賀）
底質改善	ベントス利用				
	微生物利用				

3. 物理的環境修復技術の適用と効果

3-1 大阪湾の流動環境

大阪湾は図-2に示す瀬戸内海の東の入り口に位置する閉鎖的な海域である。瀬戸内海そのものが、日本で最大の閉鎖性海域である。東京湾、伊勢湾と異なり、湾外が直接外洋でなく多くの灘、湾が連結され、相互が物理的に関係し合っている。この瀬戸内海は図2に示すように、潮流によって生じる特有の循環流により海水交換の規模が規定されている。瀬戸内海水の90%が外洋水と交換するには約1年半かかる⁵⁾。しかし、閉鎖性海域には海水交換が極めて悪い停滞性水域が存在している。特に、大阪湾、播磨灘北部と南部、燧（ひうち）灘東部、広島湾、周防灘、別府湾に停滞性水域が存在する。この停滞性水域には富栄養な河川水が流入し、赤潮の発生や強い貧酸素水塊が形成され、海底にはヘドロが堆積する環境悪化の状態となっている。これまで開発の進行した瀬戸内海の沿岸域では総延長約68000kmのうち、自然海岸は37.0%しか残っていない（83年調査）。特に大阪湾では95%以上が人工海岸化した沿岸域となり、干潟は皆無の状態である。人工海岸化した原因は工業開発による埋立であり、瀬戸内海に「瀬戸内海環境保全臨時措置法」が成立した73（昭和48）年11月から96（平成8）年11月までの約23年間で4038件、10059haの埋立が実施されてきた。特に大阪湾では埋立面積が最大である。

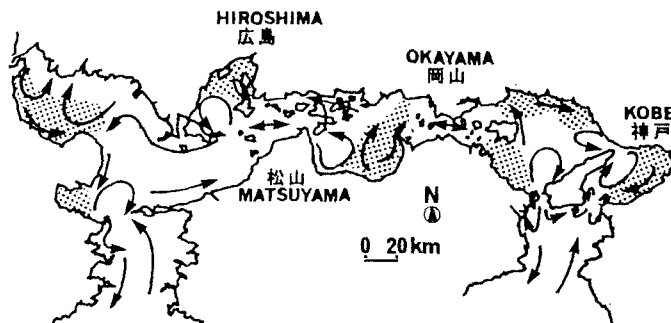


図-2 瀬戸内海の恒流分布と停滞性水域の分布

このため水深10mの浅海域まで人工海岸が拡張し、埋立地を取り巻く数kmにもなる防波堤の設置により生じた人工水域により河口域は閉鎖され、流出する汚濁河川水は長期間トラップされ、赤潮、貧酸素水塊の発生が慢性化し、有機汚泥が堆積している。特に、停滞域での貧酸素の発生は大きな生態系環境の破壊となっている。

海岸線が人工化すると同時に、当然ながら干潟や藻場の減少が生じる。戦後の開発により、45～78年までに日本全体で自然干潟は既に約35%消滅した。環境庁が92年に発表した調査結果では、過去13年間で日本の沿岸海域において消滅した藻場と干潟は約1万haで、東京ドームの約2200個分に相当した。図-3では、大阪湾の江戸時代から今日までの埋立の変遷を示した⁶⁾。新構想では、水深15mまでが埋め立て地として計画されていた。

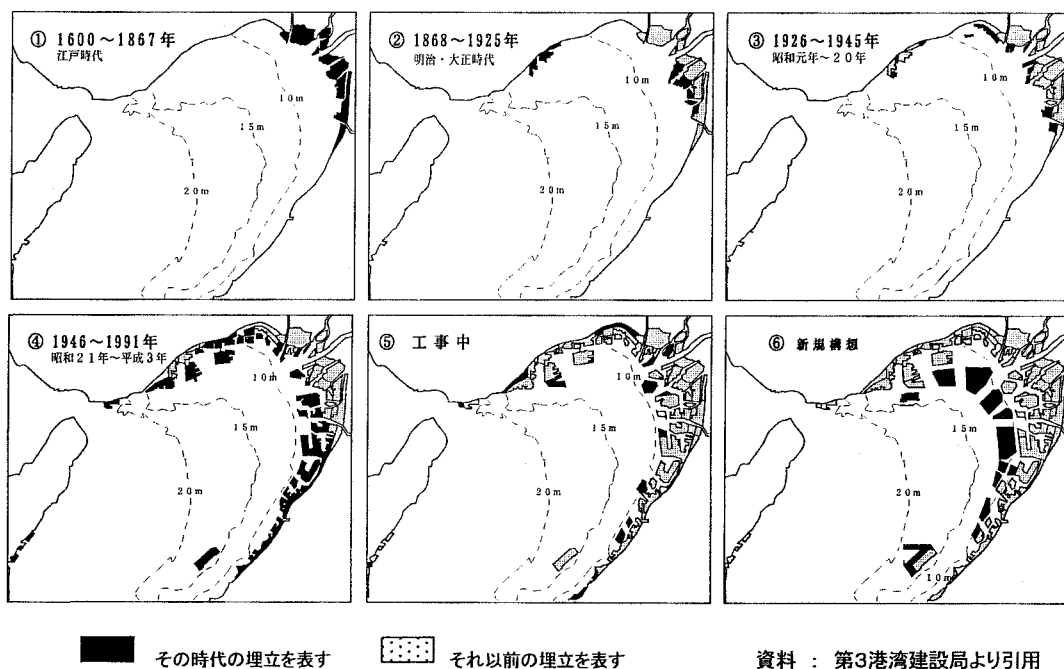


図-3 大阪湾沿岸域の埋立の変遷と構造図⁶⁾

そこで、この停滞性海域を改善するためには、停滞域の流動環境を改善し、海水交換能力を促進することがまず必要である。図-2に示した、湾内の潮流によるエネルギーを永久的に利用する事により流動環境を物理的に改善することが期待される。

3-2 物理的環境修復としての流況制御技術⁷⁾

閉鎖性海域の環境悪化を根本的に改善し、適正な環境に修復し新たな環境を創造するためには、前項で述べた環境修復技術(ミティゲーション技術)が必要である。ミティゲーション技術としては大きく「生態系環境修復技術」と「物理的環境修復技術」に区分される。

物理的環境修復技術は、閉鎖性海域全体の広域的な流況制御と、湾奥の局所的な流動環境を適正に制御できる技術が主体となる。すなわち、停滞性海域の海水交換を促進し、生態系環境に必要な水質環境を復元するために必要な技術が「流況制御技術」である。赤潮発生や貧酸素水塊を解消するには、広域的な栄養塩濃度のバランスを整備することが重要である。この流況制御技術は潮汐潮流の自然エネルギーを利用して湾内循環流を制御したり湧昇流を発生させることで、河川水の拡散領域の配置を制御可能とし長期的に流動環境を制御する画期的な技術である。

この技術開発の研究は、1985年から元・通産省工業技術院中国工業技術研究所(現：産業技術総合研究所・中国センター)において、国内では最初に着手してきた。この研究プロジェクトは瀬戸内海の閉鎖的領域を対象とした

「潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究」であり、世界でも最初の物理的ミチゲーション技術の研究開発として、世界最大の瀬戸内海大型水理模型を使用し行われてきた。図-4は、流況制御技術の研究開発における具体的な技術を示したものである。閉鎖的な湾をモデルとして、海水交換を促進させるために必要な各技術として、大きくは①湾口地形改変工法、②海底地形改変工法、③流況制御構造物設置工法、④湧昇構造物設置工法が代表とされる。「湾口地形改変工法」では、湾口断面積を増減したり、水深を浅くすることで湾口部潮流による縮流効果を活用でき、停滞性水域の平均流(循環流)を強め、海水交換を促進する効果が期待される。

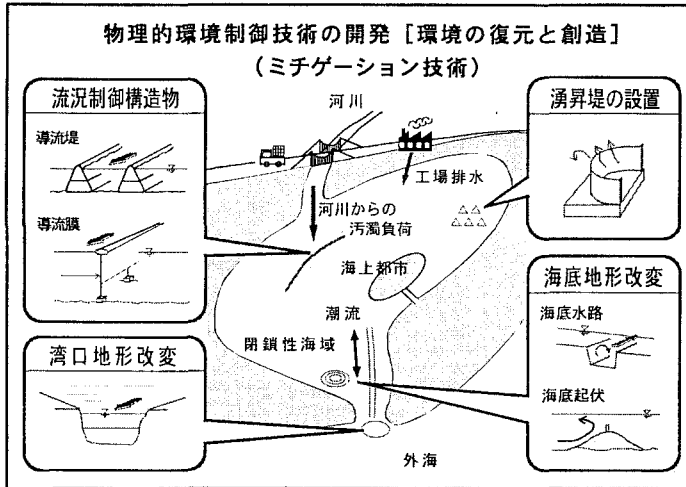


図-4 流況制御技術の工法

「海底地形改変工法」では、湾内の海底地形を掘削し海底水路を形成したり、海底傾斜をつくり、湾奥までの海水交換量を促進し、停滞性水域の貧酸素水塊を解消する効果が期待される。

「流況制御構造物設置工法」では、海底に潜堤を設置したり、流況制御構造物(導流堤)を設置し流れを誘導したり、湾内の循環流を制御する工法である。また、海面や海底から誘導膜(カーテン)を設置し、局所的な流れの誘導を行うことによって海水交換の促進効果が期待される。

「湧昇構造物設置工法」では、海底に湧昇構造物を設置し、湾内に形成される密度成層を鉛直循環流を発生させて破壊し、上下層の海水交換を図り、下層の貧酸素水塊の形成を阻止する効果が期待される。以上、各工法の具体的な構造設計や効果検証のための応用研究と、各構造物の効果的な湾内配置の研究、さらには、現地海域での実証研究が必要である。

3-3 瀬戸内海大型水理模型による広域的流況制御技術の応用研究

前項において示した流況制御技術の工法の効果を検証するため、瀬戸内海大型水理模型を使用し、停滞性水域を湾内に持つ大阪湾を対象にして水理実験を行った。実験で取り扱った工法として、広域的海水交換の促進が期待される「流況制御構造物設置工法」を使用した実験を行った。

実験で使用された世界最大の瀬戸内海大型水理模型は図-5に示す通り、水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/159 のひずみ型の潮汐水理模型である⁵⁾。この模型の潮汐、潮流、拡散の相似性は高精度で達成されており、30年の実験歴を持つ高性能な水理模型である。

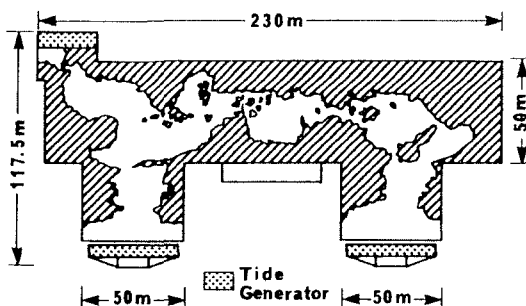


図-5 瀬戸内海大型水理模型平面図

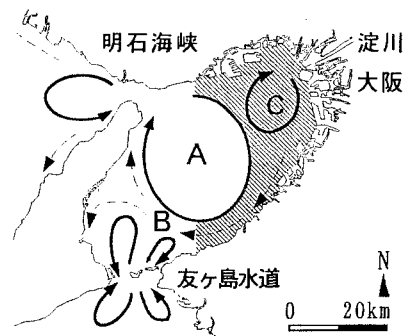


図-6 大阪湾の循環流と停滞域(斜線部)

大阪湾の流動形態は図-6の模式図に示すように、北西側湾口部である明石海峡から形成される循環流 A と、南東側湾口部である友ヶ島水道から形成される循環流 B の 2 つの循環流が存在し、湾奥には明確な停滞性水域が形成されていることが明らかにされている⁸⁾。さらに、この停滞性水域内には夏冬を通じて上層に直径約 15km の循環流 C が存在することも明らかになっている。この循環流 C は 1 回転するのに約 1 週間を要する速さで「閉鎖型循環流」と定義され、停滞性水域を形成する原動力となっている。この閉鎖型循環流に淀川からの高栄養塩の河川水が取り込まれ、長期間滞留することから、赤潮や貧酸素水塊の形成を加速させている。強大な停滞性水域と明石海峡からの循環流 A との間には大規模なフロント(潮目)が安定的に位置している。

そこで流況制御構造物設置による実験では⁹⁾、大阪湾内で最も支配的な明石海峡からの循環流 A を利用して、湾内流況を制御することを目的とし、図-7 に示すように、明石海峡の淡路島側から垂直に突き出した、長さ 1m (現地換算 2 km) の流況制御構造物(広義の導流堤)を設置した Case 1 と、反対側の須磨から長さ 1.5m (現地 3 km) に設置した Case 2、さらに、循環流 A の中央に 2m (現地 4km) の構造物を東西方向に設置した場合を Case 3 として実験

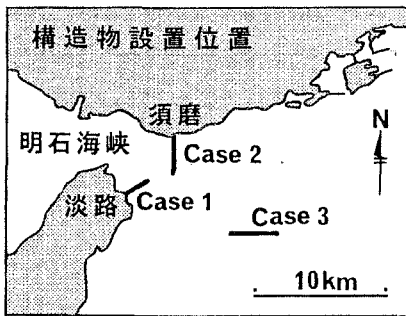


図-7 堤防型構造物設置位置図

を行った。各ケースの導流堤の長さや向きは、初段階として試行的に設定し流況変化の程度を探ることを目的とした。実験内容については、浮標追跡により流況変化を測定し、淀川から模型水と同密度の染料水を年平均流量で連続放流し、河川水拡散分布の変化を調べた。また、導流堤設置による瀬戸内海全域に与える潮汐への影響も調べた。

各実験ケースでの浮標追跡による流跡分布図を図-8 に、50 周期間での淀川河川水拡散過程を図-9 に示す。淡路島側に導流堤を設置したケース 1 では、明石循環流 A は、現状地形ケース 0 に比べ著しく拡大・加速され、同時に、淀川河口沖に反時計回りの循環流が新たに形成された。この河口沖の循環流によって、淀川河川水は現状より数倍以上も速く拡散し、明石海峡を抜けるパターンとなった。

須磨側に導流堤を設置したケース 2 では、明石循環流 A の回転方向が現状と全く反転し、反時計回りの強い循環流となる驚異的な変化が生じた。これに伴い、淀川河川水は神戸沖海岸を細くはって明石海峡に輸送される結果となった。

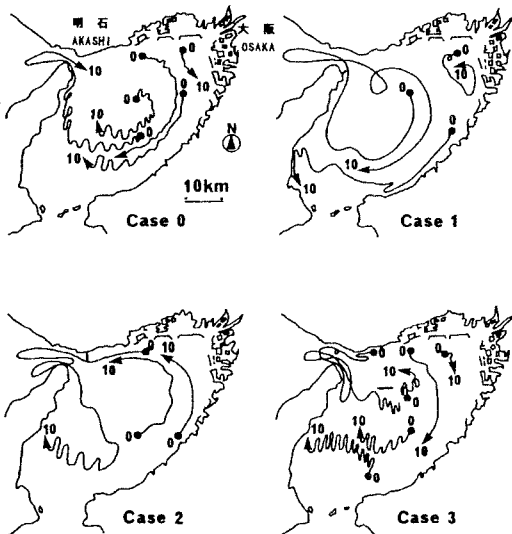


図-8 大阪湾における 10 周期間流跡図

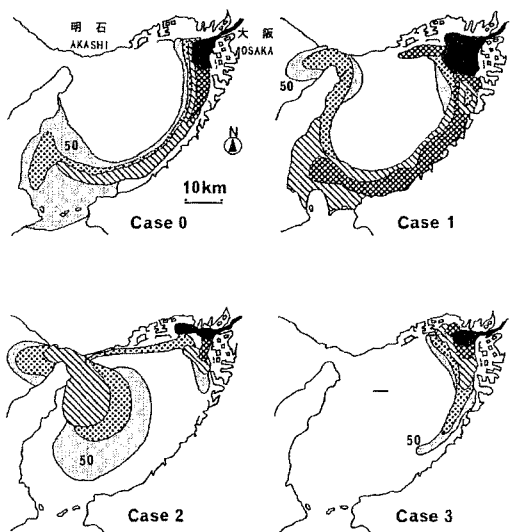


図-9 淀川河川水拡散分布図(50 周期間)

明石循環流 A の中央に設置したケース 3 の結果では、循環流 A の回転方向は変わらないが、規模と流速が現状よりも半減以下に縮小した。このため友ヶ島水道からの循環流領域が北上拡大し、停滞性水域が強調されることになった。その結果、淀川河川水は河口域に強く停滞し、滞留したままで拡散しなくなる状態に大きく変化した。

以上の結果を分析すれば、湾内の流動場はそもそも湾口から流入する潮汐潮流や河川水流入等が湾内地形特性に釣り合って決定されており、各水塊の輸送力によって海水交換規模が決定されている。このため、構造物(人工島)を設置する位置がこの流動バランスを破壊することになれば、湾全体に影響を与える。人間の身体に例えれば、手足に損傷を受けても生命に直接影響しないが、心臓部や脳を直撃されれば破壊的である。これと同様に、海域内にも急所があり、循環流や渦発生 of 急所となる所に埋立や構造物を設置することは、湾全体の流動バランスを破壊し、自然生態系の環境に大きなダメージを与えることになる。この位置は、決して海図上からはわからない。その位置を把握するには十分な現地調査とシミュレーションが必要である。

4. 大阪湾の大規模埋立てによる流動環境の変化と損失¹⁰⁾

大阪湾では臨海地域開発整備法(大阪湾ベイエリア開発推進法)の制定により、水深 15m までの海域が開発可能空間として位置付けられ、現在では大規模な埋立開発構想が多数計画されている。これらの開発海域は海水交換が悪く水質悪化の著しい停滞性水域や河口周辺海域であることから、各々の大規模埋立開発により、大阪湾全体の広域的な流動変化と水質悪化を招くことが予想される。このため、埋立構想によるマイナス影響の回避・軽減と、浄化能力低下による環境悪化を修復するための環境修復技術(ミティゲーション技術)の適用が強く求められる。これまで、ミティゲーション技術の研究の一環として、潮流を利用した工学的手法により停滞性水域の水質流動環境を広域的に改善する流況制御技術の開発を瀬戸内海大型水理模型や基礎水槽により進められてきた(上嶋ら¹¹⁾, 1991; 宝田ら¹²⁾, 1987; 山崎ら¹³⁾, 1988)。

そこで現在、大阪湾で施工が進行している大規模埋立開発として、神戸空港、六甲アイランド南(以下略称、六甲 I 南)、大阪南港沖の新人工島(以下略称、新人工島)、そして関西空港拡張の 2 期、3 期埋立計画(以下略称、関空拡張)の四つの計画について、瀬戸内海大型水理模型実験を実施し、個々の開発に対する湾内流動変化の形態、及び、各々の開発が複数同時期に設置した場合の「複合的な開発」による流動変化、そして、四つの埋立てが完成した時の湾全体の流動変化と、淀川河川水の拡散形態の変化から明らかにする。

4-1 実験内容

大阪湾の流況は図-6 に示したように、湾中央部は明石海峡からの循環流が支配し、湾南部には友ヶ島水道からの循環流が分布している。しかし、開発の著しい神戸から泉南沖の湾奥部にかけて強い停滞性水域となっている(上嶋ら, 1987)⁸⁾。この停滞性水域には、淀川河川水が流入し赤潮の発生と貧酸素水塊の形成を招いている。この湾奥部沿岸域にはこれまで多くの埋立開発が行われ、ほとんどの海岸が人工化し、埋立地に囲まれた汚濁の著しい人工水域(運河)を形成している。

平成 9 年 4 月現在における大阪湾での大規模埋立構想として、図-10 に示す位置に四つの計画がある。各々

の開発規模は、神戸空港が約 270ha、六甲 I 南が約 330ha、新人工島が約 300ha、関空拡張(現空港 1 期+2, 3 期)が約 1300ha(2 期: 約 530ha)である。これらの大規模開発が実施されれば大阪湾全体に対する広域的な流動環境の変化が予想される。

そこで、これら開発構想の設置による流動環境への影響を湾全体規模の広域的な視点から把握するため、瀬戸内

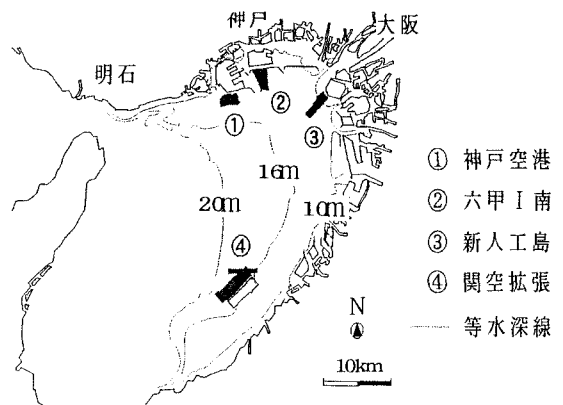


図-10 大規模埋立構想位置図

海大型水理模型を使用し、以下の実験項目について実験を行った。

(1) 実験項目

- ①大阪湾全体での流動形態の変化（循環流規模の変化）
- ②淀川河川水の拡散形態の変化
- ③湾奥部停滞性水域の水循環機構と海水交換性の変化
- ④埋立地に囲まれた閉鎖的な人工水域の流動変化

(2) 実験方法

各々の実験 Case としては表－5 に示すように、Case 0 から Case 8 の合計 9 ケースの埋立地形による実験を行った。その内容は大阪湾の現地形（1997 年現在地形）を含む、神戸空港、六甲 I 南、新人工島、関空拡張について

個々の開発構想地形（埋立地）を単独で水理模型に設置し実験を行った。

表－5 実験ケース一覧表

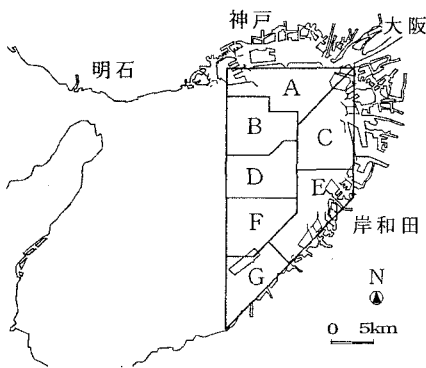
実験対象 構想埋立地形	実験 Case
◆ 単独埋立地形による実験	
現在地形（1997 年現在）	Case 0
神戸空港	Case 1
六甲アイランド南（略：六甲 I 南）	Case 2
大阪新人工島（略：新人工島）	Case 3
関西空港拡張（略：関空拡張）（現+3期）	Case 4
◆ 複合埋立地形による実験	
六甲 I 南+新人工島	Case 5
六甲 I 南+関空拡張	Case 6
新人工島+関空拡張	Case 7
◆ 全埋立による総合実験	
神戸空港+六甲 I 南+新人工島+関空拡張	Case 8

更に、四つの大規模開発構想の内、神戸空港を除いて、六甲 I 南、新人工島、関空拡張の三つの埋立地をお互いに組合せた複合的な埋立地形による実験を行った。更に、全ての埋立構想が同時期に設置されたとして、四つの埋立地を同時に設置し大阪湾全体にあたる流動変化等について実験を行った。

実験に使用した瀬戸内海大型水理模型は図－5 に示すように、水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/159、時間縮尺 1/159、模型水量は 5000m³、面積が 17000 m²の世界最大の潮汐拡散水理模型である。1973 年に完成して以来、潮汐、潮流の相似性が確立した中で多くの実験研究が行われてきた。

実験潮汐は半日周潮(M₂潮)を与え安定した中で、湾内流動測定には模型水の比重に近い浮標ボールを

模型水面に多数配置して写真やビデオカメラにより連続撮影し追跡した。また、湾奥部の停滞性水域内の海水交換機構や滞留時間を詳しく調べるため、図－11 に示すように水域内を 7 区分（A～G）し、各区分ごとに色分けした浮標ボールを一定間隔で初期配置し、上げ潮開始時に一斉放流し各周期での浮標ボールの移動・分布を写真撮影した。



図－11 停滞性水域の7区分(海域容量均等区分)

一方、流況変化による河川水拡散形態の変化を把握するため、淀川より河川水としてインジゴカルミン水溶液（青色：濃度 25ppm）の染料水を年平均流量(275 m³/sec：模型 68.75cc/sec)で 50 周期間連続放流し、10 周期毎に拡散分布を写真撮影した。

4-2 実験結果

(1) 大規模埋立開発構想による大阪湾流動変化

大阪湾での現地形 Case 0 と、開発構想として計画されている 4 ケースの埋立地形を各々単独で設置した Case 1, 2, 3, 4 での流動形態を把握する実験結果と、複合的な埋立地形による Case 5, 6, 7 の同様な実験結果から大阪湾内での流動変化について示したのが

図-12である。この図の流動分布のベクトル長は、1潮汐周期間の流れによる実質移動距離（実質変位ベクトル）であり、大阪湾全体の広域的な恒流形態が把握できる。

現地形 Case 0 の流況については、図-6 に示した上嶋ら（1987）⁸⁾ が現地観測結果等から得た流動形態を証明するもので、大阪湾にとって明石海峡からの循環流が大きなエネルギーとなっている。その中に大規模な埋立地形を個々に設置した場合の Case 1 から Case 4 の流況分布には大きな変化が現れている。

神戸空港の Case 1 では現地形の流況に比べ湾奥部の停滞性が強まる傾向を示している。Case 2 の六甲 I 南の流況は明石海峡からの湾中央部の循環流中心が東に偏り、循環流によって湾奥部の水域を押し込む形態となり停滞性が強まる。淀川河口に突出した新人工島 Case 3 では、淀川河川水の南下を遮断し、埋立地南側の背後が強い停滞域となって、湾全体の流動形態に大きな変化を与えている。更に、Case 4 の関空拡張での流況分布では、湾中央循環流の規模が縮小分散し、湾奥部西宮沖の閉鎖型循環流の形成により滞留が強まる傾向となる。

次に、複合埋立地形については六甲 I 南と新人工島の組合せの Case 5 では、Case 1、2 で生じたお互いの影響域を維持している。Case 6 では関空拡張による湾奥への影響が六甲 I 南による流況変化を相殺し、全体の影響は緩衝している。Case 7 では関空拡張と新人工島の影響がより強調しあって複雑な流況となっている。そして、4 埋立地を全て設置した総 Case 8 の合的な実験結果としては、Case 0 に比べて極めて大きな流動変化を示している。

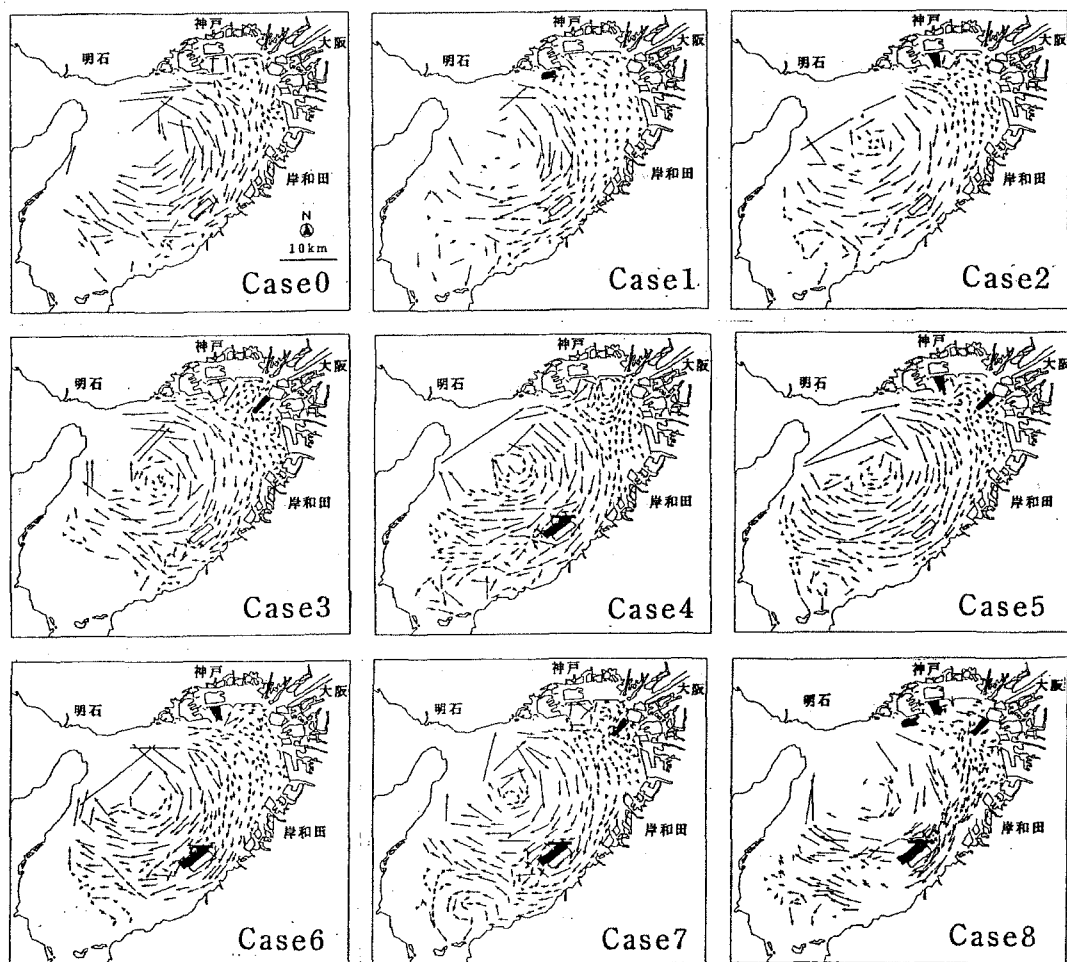


図-12 大規模開発構想による湾内流況分布 (M_2 潮1周期間の水粒子実質変位ベクトル)

(2) 停滞性水域における滞留時間の変化

開発構想埋立地による流動形態変化について、特に影響が顕著に現れる湾奥部の停滞性水域に限定して滞留時間や海水交換性について評価するための解析を行った。

図-11に示した7区分に各々配置した浮標ボールの時間的残留量から、区分した各水域での滞留時間を求めた結果が表-6の平均滞留時間、そして現地形を基準とした平均滞留時間の増減を図-13に示した。なお、平均滞留時間の定義と算出法については武岡(1984)の方法によって行

表-6 各実験ケースにおける海域区分内の平均滞留時間

実験ケース	区分海域の平均滞留時間 (単位: 潮汐周期)						
	A	C	E	G	B	D	F
Case 0	10.0	6.9	5.4	2.1	2.1	1.6	1.8
Case 1	9.5	11.5	8.4	2.3	2.4	1.8	1.8
Case 2	7.7	8.9	7.6	2.1	2.6	1.8	1.8
Case 3	11.5	11.1	5.8	2.4	2.1	1.6	1.9
Case 4	21.6	12.5	6.7	2.4	2.3	1.7	2.3
Case 5	7.5	11.2	6.4	2.1	2.3	1.8	1.8
Case 6	6.9	8.3	6.6	2.3	2.5	1.9	2.4
Case 7	12.7	13.1	8.7	2.4	2.0	1.6	2.3
Case 8	6.6	11.1	7.0	2.3	2.3	1.9	2.2

った。全実験ケースにおける解析結果では、前項の流況分布で示した変化傾向を定量的に示している。

図-13での現地形での平均滞留時間からは、A海域が最も停滞性が強くなっている。この現地形に対して神戸空港のCase1ではC、E海域で停滞性を増加させ、逆にA海域で交換性が良好となる。六甲I南埋立のCase2ではA海域で現状より交換性を増すが、C、E海域で共に悪化し滞留が強くなっている。新人工島のCase3ではA、C海域が停滞的となっており、流出した淀川河川水を長期間トラップすることになる。関空拡張のCase4では、A海域が現地形の2倍以上の最も高い停滞性を示し、C海域も連動して滞留時間が増し、F海域にも影響が生じた。

Case0で基準化(%)

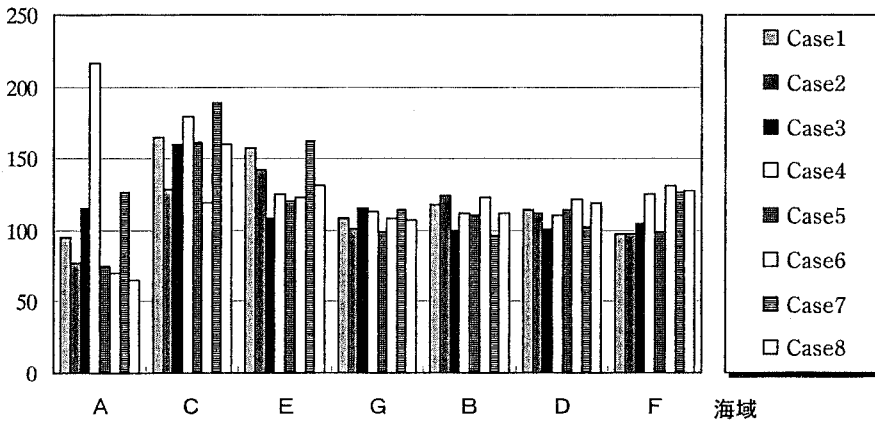


図-13 各実験ケースにおける海域区分内の平均滞留時間の変動
(現地形の平均滞留時間を基準とした比較)

複合埋立の実験 Case 5 では新人工島によるA海域の悪化を六甲I南による効果によって改善されて良好となるが、C海域の停滞性は両方の影響で悪化している。Case 6 では、Case 2 と Case 4 の影響を重ねたものであるが、Case 4 で最も悪化したA海域の海水交換が現地形より良好となり、C、E海域も各々単独埋立の場合より停滞性が弱くなった。Case 7 では新人工島と関西拡張による影響の重ね合わせであるが、A、C、E海域とも停滞性を強める極めて悪い結果となった。

最後に、四つの構想埋立地を全て配置した総合的な実験 Case 8 では、A海域では現地形より交換性が高くなり、

C, E 海域では他の実験ケースと同様に海水交換が悪くなった。そして F 海域についても現状より停滞する傾向を示した。以上の結果から、全ての開発構想について停滞性悪化を招く影響海域は C, E 海域であり、このため淀川河川水の滞留・拡散に大きな影響を与える。

(3) 淀川河川水拡散形態の変化

上記の実験ケースにおいて、淀川河川水の大阪湾における拡散形態の変化を明らかにするため染料水による拡散実験を行った。現状では富栄養な淀川河川水が湾奥部に位置する河口から湾内に流出し、赤潮発生や有機物汚泥の堆積、貧酸素水塊の発生を招いている。これらは停滞性水域の制御・改善と合わせて大阪湾の重大な環境修復課題となっている（上嶋ら, 1987）⁸⁾。

実験は約 1 ケ月間である 50 周期（ M_2 潮）連続して行われた。その実験から 10 潮汐周期毎の染料拡散フロント（前線）を 50 周期まで示したのが図-14 の河川水拡散分布である。前述した滞留時間や流動形態の変化を反映して河川水拡散の形態からは、各埋立地形は現地形 Case 0 での拡散分布を大きく変化させる結果となった。しかし、全ての実験ケースにおいて、現地形 Case 0 の拡散分布より広く拡散したものは無かった。特に、Case 2 の六甲 I 南の影響は大きく、湾奥部に最も停滞する拡散分布を示した。更に、六甲 I 南の設置により Case 2, 5, 6 では神戸沖のポートアイランドまで河川水が拡散する。また、Case 3, 5, 7 の拡散規模は類似している。全埋立地形を配置した Case 8 では現地形に比べ拡散規模は小さく停滞性の強い状態となる。

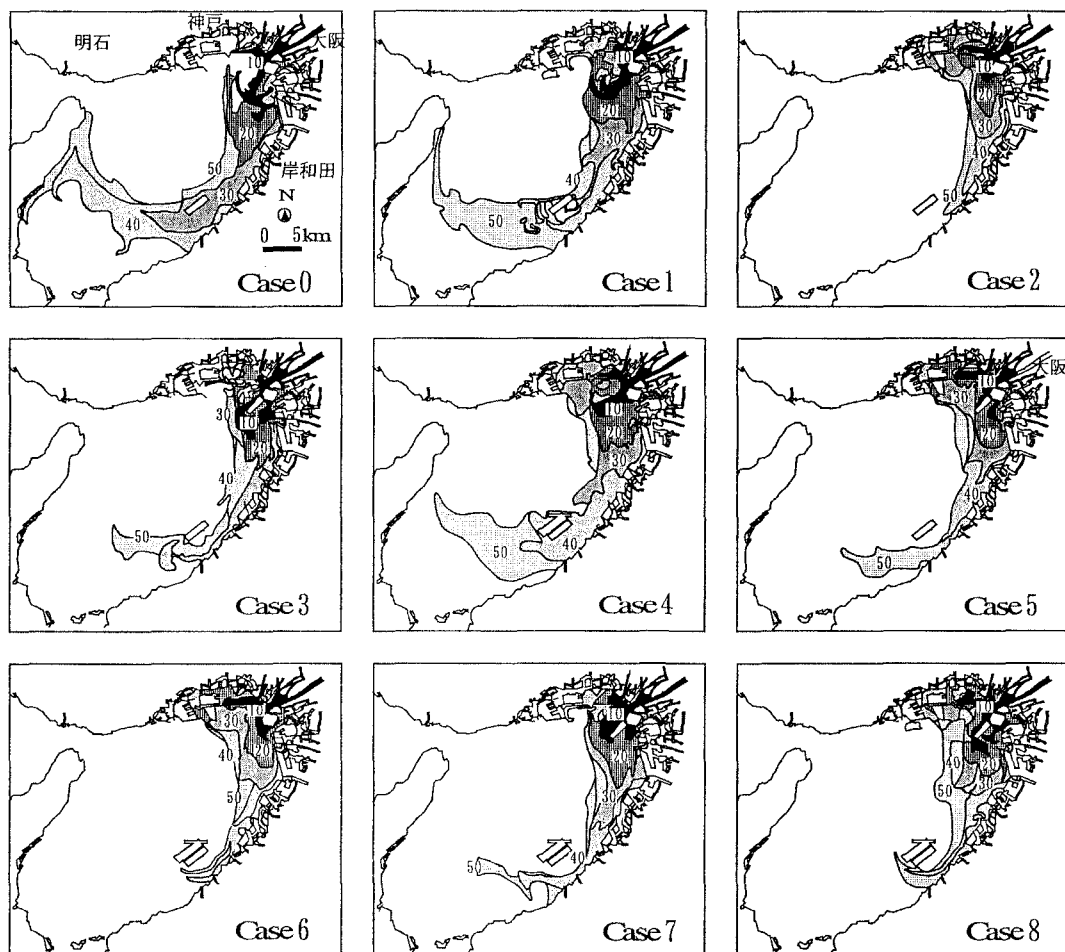


図-14 開発構想埋立地形による淀川河川水拡散分布図(図中の数字は潮汐周期数)

(4) 実験結果のまとめ

大阪湾の1997年を現地形として、今後開発が計画されている大規模埋立構想について、神戸空港、六甲アイランド南（六甲I南）、大阪新人工島（新人工島）、関西空港拡張（関空拡張）の四つの埋立地を対象とし、瀬戸内海大型水理模型による実験から、流動形態の変化と、停滞性水域内の滞留時間及び海水交換時間の変化を明らかにした。更に、染料拡散実験から淀川河川水の拡散形態の変化についても確認し、以下の結果が得られた。

①構想埋立地は大阪湾中央部の循環流規模と形態を変化させ、湾奥部の停滞性海域の滞留時間を長くした。②特に関空拡張では淀川河口域（A海域）の平均滞留時間を現状の2倍以上遅くした。関空拡張と新人工島が同時設置の場合は堺沖（C海域）で最も停滞性が強くなり、現地形の1.8倍も滞留時間を増した。③六甲I南の埋立は全実験ケースの中で淀川河川水の拡散を最も遅らせ停滞させた。全ての埋立地形及び、複合埋立地形の河川水拡散分布は、現地形より小規模で停滞性を強めた。構想される全埋立地形を配置した実験では、停滞性水域のC、E海域の滞留時間を長くし、河川水拡散を遅くする結果となった。

以上から、現在計画中の大規模開発構想は大阪湾奥部の停滞性を強め、現状よりも水質汚濁や赤潮発生等を促進するマイナス影響が強く心配される結果となった。

これらの結果は、あくまでも水理模型実験によるものであり、他の手法での精度確認が要求される。しかし今後、マイナス影響を回避・軽減するための埋立地形の適正配置とミティゲーション技術の適用を図ることが必要であり、引き続き研究を進めて行きたい。

4-3 大規模埋立てによる流動環境変化の影響回避技術の効果

上記の実験結果から、大阪湾内大規模埋め立てにより生じた大阪湾全体の流動変化と強まった停滞域水域の改善のため、物理的環境修復技術である「流況制御技術」を用いた実験を試みた。

そこで、大阪湾の大規模埋め立てによる影響を回避するために、前項3-3で示した明石海峡に「流況制御構造物（突堤）」を設置する事による実験を重ねて行った。実験は、4埋立地形が存在する状態（将来地形）で、前述の3-3項で示した図-7での、淡路島に流況制御構造物を設置したCase1の実験を発展させて行った。本実験

で用いた流況制御構造物の長さは、Case9が0.5km（現地換算）、そして、Case10が1.0km（現地換算）である。その結果得られた河川水の拡散分布が図-15である。埋立地形の無い現状地形 Case 0 と、大規模埋立のある将来地形 Case 8 に対し、Case 9, Case 10 の河川水拡散分布は何れも Case 8 の将来地形の拡散分布より回復している。Case 9 は殆ど Case 0 と同じ状態に回復した拡散パターンを示し、0.5km の構造物で現状に回復させる効果を確認できた。更に、Case 10 では更に海水交換を促進させ、現状より促進させた結果を得た。以上により、流況制御構造物により大規模埋め立てによる流動変化と湾奥部の停滞性を回避させる可能性を明確にできた。この結果は、あくまでも流動環境に対する効果であって、生態系環境への効果についても検討することが不可欠である。

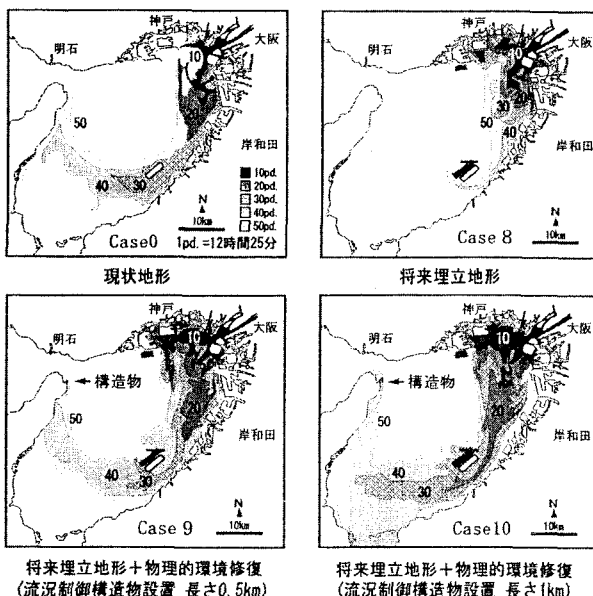


図-15 淀川河川水拡散分布図

5. 環境修復技術の効果検証実験と最適技術のパッケージ化

閉鎖性海域における環境問題を解決するためには、これまで開発された多くの環境修復技術分野から選定した環境修復技術を、実際の対象海域に適用して実証実験を行い、その効果を検証して最適な技術選定や効果的技術の組合せを行い、適正な環境修復事業を行うことが重要である。

そこで紹介する本研究では、大阪湾北奥部に位置する埋め立てにより閉鎖性海域となった尼崎港を実験海域として設定し、港内の物質循環系と生態系を回復するための環境修復技術の最適な組合せとその効果を見出すための実証実験である。この研究では、得られた結果から、他の海域に適用する事のできる技術のパッケージ化を図ることを目的としている。

5-1 研究体制と実験海域

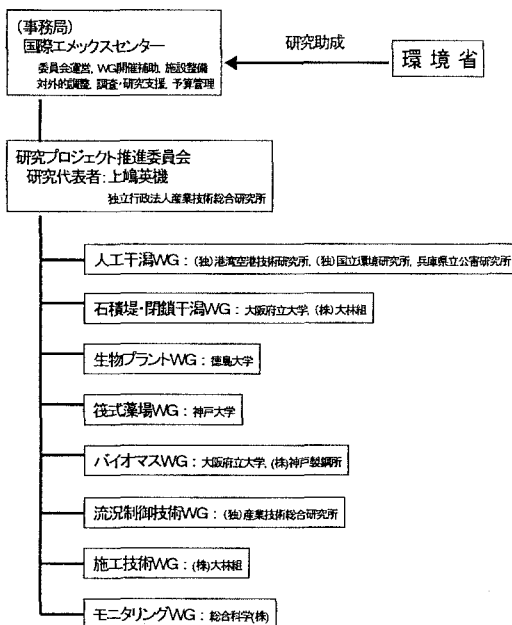


図-16 研究開発実施体制

本研究プロジェクトは、2001 年度に環境省の環境技術開発等推進事業¹⁵⁾として採択を受けた課題「閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化」によるものである。即ち、沿岸域における物質循環の歪みを矯正し、よりよい生態系を回復するための最適な環境修復技術の組合せ（ベストミックス）を明らかにするとともに、基本的な技術のセット化（パッケージ化）を図るものである。

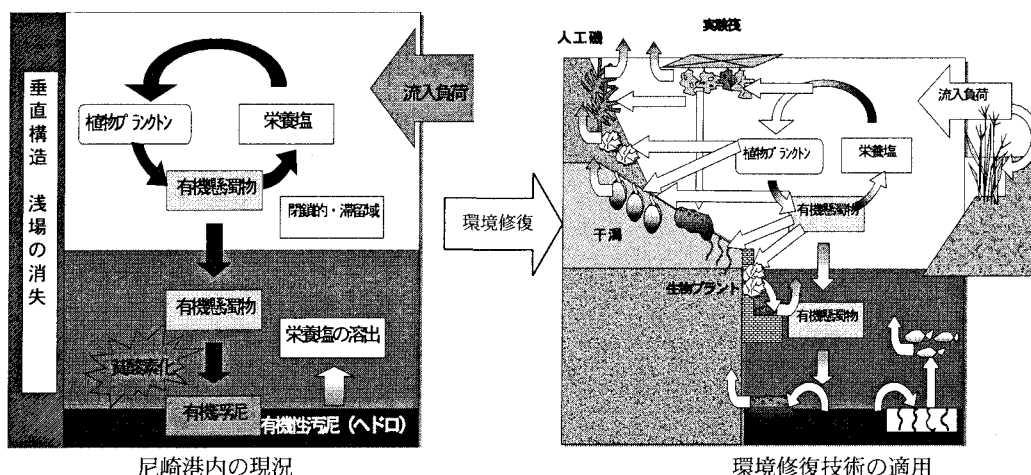
この研究プロジェクトの実証実験の場となる尼崎港は、かつては「公害の街・尼崎臨海都市」と言われた都市のもとにあり、昭和初期から大規模な埋め立てが進み、閉鎖性の強い海域が形成された。港内には河川や下水処理を通じて、陸域からの負荷が流入し続け、水質、底質が著しく悪化している。更に港内の底層から中層にかけて夏季には強い貧酸素状態が形成され、底生生物や底魚が生息できない状態が継続している。この尼崎港において環境修復技術の効果検証実験を実施するため、図-16に示す産学官連携による研究体制を構成して行った。

5-2 研究内容と実験対象技術

図-17には、港内における物質循環の現状と期待される効果の関連図を示す。このように尼崎港の悪化した物質循環を修復するための具体的な目的としては以下である。

- ① 流入負荷削減
- ② 有機懸濁物削減
- ③ 海中の栄養塩削減
- ④ 底質改善、栄養塩の溶出量削減
- ⑤ 海水流動の改善

上記の目的を達成するための具体的な数値目標としては、夏季底層の DO(溶存酸素)を 3mg/l 以上（現状は最大 3mg/l）、透明度 3m 以上（現状は年平均 2.5m）。総合効果として生物の多様性の確保である。

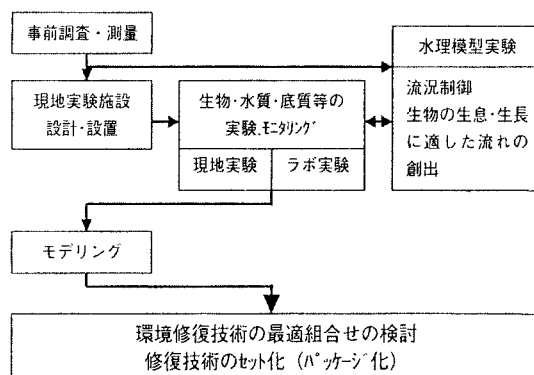


図－17 港内の物質循環の現状と期待される効果の連関図

そこで本実験で使用する環境修復技術をこれまでの各種調査結果や検討に基づき、表－7に示す技術と実験内容を設定した。図－18に研究実施フローを示す。また、各技術の実証実験施設の設置場所については、図－19に示す。

表－7 実験技術と内容

(1)人工干潟
・底質と底生生物を中心とした物質循環の検討
・二枚貝による水質浄化
・人工干潟の維持管理手法の確立
(2)石積堤と閉鎖性干潟
・生物生息空間と生物多様性の形成
・透明度改善等の水質浄化による親水空間の創造
(3)環境配慮型港湾構造物
・直立護岸における生態系の改善
・底質への堆積物負荷削減
(4)筏式藻場
・透明度の著しく低い海域における海洋培養
・藻体取り上げによる水質浄化、
・藻場造成による生物多様性の回復
(5)アオサバイオマス利用
・アオサの取上げによる水質浄化と陸域での活用
(6)流況制御技術
・生物の生息に適した流れの環境創出
・海水交換促進、貧酸素水塊排除、透明度改善



図－18 研究実施フロー



図－19 尼崎港内の現状と実証実験施設の位置

5-3 実験施設と研究内容

(1) 人工干潟の施設と現地実験

実験干潟の設置場所においては、干潟機能を満たす安定した地形を検討し、生物生息空間を構築することが重要である。そのためには、実験干潟の空間規模、安定した基礎地盤、干潟勾配、底質を設計した。更に、外的要因として、波浪、潮汐潮流等を考慮し場所の設定を行った。図-20に実験干潟を示す。この実験干潟の配置は、図の



図-20 人工干潟実証実験施設(満潮時)

ように陸側は堤防(コンクリート護岸)と外側の石積みで囲まれており、その規模は、堤防に沿って長さ(陸域から汀線へ)32m、幅16mで、勾配は約1/50の造成である。干潟面積の2/3を潮間帯に、1/3を潮下帯に設定した。この実験干潟は二枚貝の生息環境を満たす条件を確保することを主体とし、アサリの生息環境を満たす底質条件として設計された。現在、施設完成後、実験を開始・継続している。

(2) 石積堤と閉鎖性干潟の施設と実験

水質浄化が期待される修復技術の一つに石積堤を用いた浅場造成が在る。この石積堤は、石積堤体の空隙に付着した生物によって、水質を浄化する機能を有している(赤井ら1984¹⁶⁾)。当然、この機能のエネルギーとなるのは潮流や波浪による自然エネルギーである。この石積浄化堤で囲まれた空間の浅場(干潟)の水質浄化への効果を確認するための実験を行う。

施設の形状・規模については、図-21に示す。施設を構成する石積堤は堤体延長が41m、堤体が堤体側前面で4m、堤体側面で1.5~2mである。石積堤で囲まれた内水域は、幅5m×奥行9mの矩形形状となっている。海水の深さは満潮時には最大OP+2.1m、干潮時には全域が干出する構造とした。この中で、石積浄化堤による懸濁物質の除去効果を確認するために、水質調査、植物プランクトン濃度、有機物濃度、藻類調査、底質調査を実施する。

(3) 環境配慮型港湾構造物と現地実験

環境配慮型港湾構造物(エコシステム護岸)は、貧酸素水塊の発生を抑える事と、直立護岸における生態系の改善と底質への堆積物負荷削減を目的として、湾内の直立護岸に貧酸素水塊の影響を受けない水深まで側面に浅場を敷設され、懸濁物食生物とその排泄物質量に見合った堆積物食生物の生息を促すものである。実験用護岸の設置については、図-22に示すように、既存の護岸に敷設する形式を取る。形状はL字型をしており、1基の底面は横幅3.0m、海側に1.5mの大きさを持つ。この底面の位置は夏季に貧酸素水塊の影響を受けない高さ、DL-0.5m、DL-1.0m、DL-1.5mにそれぞれ3基設けている。

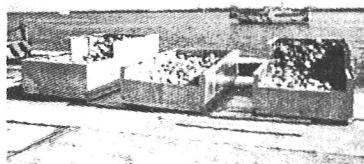
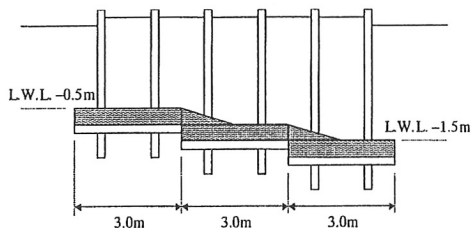
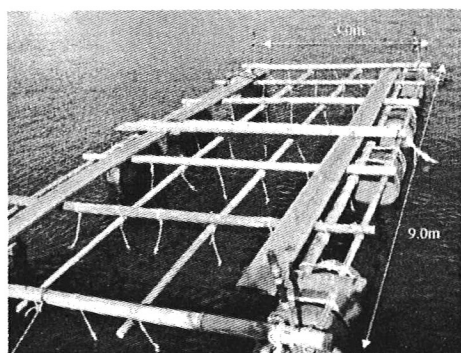


図-22 環境配慮型港湾構造物



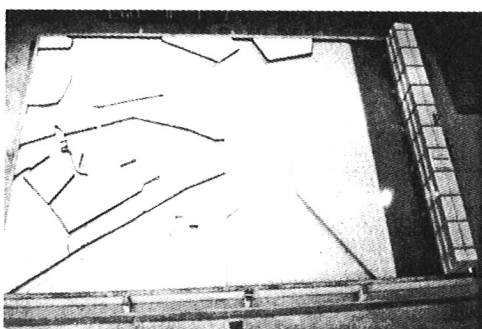


図-24 尼崎港水理模型

そこで、尼崎港の海水交換を促進するための流況制御技術の適用方法について、尼崎港の地形を再現した水理模型を使い海水交換促進のための工法を開発する水理実験を行うものである。

尼崎港水理模型は、独立行政法人産業技術総合研究所中国センターにある中型平面水槽内に作られたものを用いた。図-24に尼崎水理模型の外観を示す。水平縮尺 1/500 で、縦

18m,横 10m の大きさで、鉛直縮尺は 1/63 であり、現地の潮汐潮流を再現させる事ができる。

実験ケースは図-25に示すように、5 ケースの実験を実施している。Case0 は現状地形、Case1 は尼崎港東部埋め立て地の一部に水路を開削し、水路内の海水の出入りによって海水交換促進する方法である。Case2 は、港口部に剥離構造物を設置し、港内に渦を発生させて海水交換を促進させる工法である。Case3 は、埋立地の一つの利用法として遊水池を設け、港内に入りする海水流量を増加させる海水交換を促進させる方法である。Case 4 は港内の一部に浅場を造成して循環流を発生させる方法である。これらの工法を複合的に組み合わせる事によって更なる効果が期待される。

以上の環境修復技術を対象として現場に実験施設を設置し、その効果を検証することにより、尼崎港に適合する技術が定量的に把握出来る。これらの技術の効果検証には、当然現地での詳細な観測（モニタリング）が重要な役割を果たす。

6. おわりに

本稿は、開発等により傷んだ沿岸海域の自然再生を行うために必要な、環境修復技術の開発と実用化を図る上での効果検証のための研究について紹介した。自然再生に関する議論や事業化に向けたプロジェクトの構築が盛んであるが、最終的に必要な事は、「環境修復技術と評価手法」である。特に、環境修復技術は環境修復目的に対して適正に選択され使用しなければならない。環境修復の目標として、水質、底質、生態系環境に対する多くの修復技術があるが、それらを複合的に組み合わせ、効率的な効果を確保することが必要である。環境修復を必要とする海域は、いずれも異なった個性を持ち様ではない。従って、海域の環境特性をしっかりと把握し、診断評価した上で、修復目的に対応する技術を選定し、その技術を実際に海域に適用して効果を検証することが不可欠である。その上で、最適環境修復技術の組合せ(ベストミックス)が可能となる。そこで、本稿では、大阪湾を対象として広域的な環境修復のための物理的環境修復技術（流況制御技術）を適用した場合の効果について瀬戸内海大型水理模型で検証した。一方、大阪湾奥の尼ヶ崎港において、国内でも初めての技術集合による効果検証のための研究プロジェクトを実施しその概要を紹介した。自然再生推進法の実現化のためには、適切な技術選択が事業化への担保となる。事業対象の海域では必ず、事業の前に技術選択のための数年間の実験期間と評価が必要であろう。このような実践的な研究スタイルこそが新たな環境修復技術を創生し、沿岸域環境研究分野の新展開を図るものと期待される。

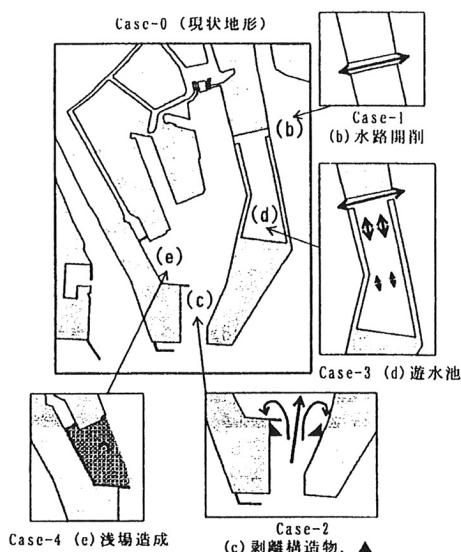


図-25 尼ヶ崎港の流況制御実験ケース

参考文献

- 1) 上嶋英機他共著：「沿岸の環境圏」、フジテクノシステム、pp.933-943.(1998)
- 2) 上嶋英機：豊饒の海をめざして一水環境の修復と再生一,中国地区大学放送公開講座[危機の水環境・水と人間生活],広島大学生涯学習推進委員会,pp.152-170.(1996)
- 3) 中西 敬、大塚耕司、上嶋英機：「ミチゲーションを考える」沿岸域に置けるミチゲーションと環境創造技術、水環境学会誌、Vol.24,No.3 ,pp.126-131.(2001)
- 4) 長尾義三：ミチゲーションと第3の国土づくり、水環境創造研究会、(1997)
- 5) 上嶋英機：瀬戸内海の物質輸送と海水交換性に関する研究,中国工業技術試験所研究報告,第1号,pp.1-179.(1986).
- 6) 上嶋英機：大規模開発による広域流況変化と流況制御技術の研究ーミチゲーション技術の開発に向けて一,関西造船協会“らん”,No.26(1995).
- 7) 上嶋英機他共著：「環境圏の新しい海岸工学」フジテクノシステム pp.594-610 (1999)
- 8) 上嶋英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広：大阪湾停滞性水域の流動と水塊構造、第34回海講論文集、pp.661-665. (1987)
- 9) 上嶋英機他：流況制御構造物設置による流況制御技術の効果検証実験ー瀬戸内海大型水理模型による別府湾・大阪湾での実験結果一,第38回海岸工学講演会論文集,pp.851-855.(1991)
- 10) 上嶋英機他：大阪湾で構想される大規模埋め立てによる流動環境変化に関する研究、海岸工学論文集、第45巻、pp.1016-1020. (1998)
- 11) 上嶋英機・橋本英資・田辺弘道・宝田盛康：流況制御構造物設置による流況制御技術の効果検証実験ー瀬戸内海大型水理模型による別府湾大阪湾での実験結果一、海岸工学論文集、第38巻、pp.851-855. (1991)
- 12) 宝田盛康・上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・今村 均：湾内水停滞性の制御・改善の実験的研究、第34回海講論文集、pp.666-669. (1987)
- 13) 山崎宗広・今村 均・本嶋克二・宝田盛康・上嶋英機：海底構造物による流況制御技術の研究、第35回海講論文集、pp.497-501. (1988)
- 14) 武岡英隆：沿岸海域の海水交換、沿岸海洋研究ノート、Vol.20、No.2、pp.170-171.(1984)
- 15) (財) 国際エメックスセンター：閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化、平成13年度環境技術 開発推進事業[実用化研究開発課題]研究開発進捗状況報告書、(2002)
- 16) 赤井一昭：水域の浄化システム、第11回建設技術発表会論文集、pp.76-79. (1984)