

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

——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——

上嶋 英機*・橋本 英資**・田辺 弘道***・宝田 盛康****

1. はじめに

海洋開発が活発化する中で、沿岸海域の海洋環境保全と海域有効利用の両立を図る広域的、具体的な海域環境制御技術の開発が強く望まれている。このため、本研究では、図-1 に示したような瀬戸内海の閉鎖的・海域に存在する停滞性水域の水質流動環境を、潮流を利用した工学的的手法により広域的に改善・制御する適正環境を創造する流況制御技術の開発を進めている。この研究の一環として、停滞性水域の流動・水塊構造の実態を明らかにする現地観測も大阪湾、別府湾、広島湾で実施してきた。更に、流況制御技術の基礎的な研究も進められてきた(宝田ら, 1987; 山崎ら, 1988)。そこで、潮流を利用した流況制御技術の具体的工法として「湾口地形改变工法」、「海底地形改变工法」、「流況制御構造物設置工法」を瀬戸内海大型水理模型内の各海域に適用し、その効果を検証する応用実験を実施してきた。前報(上嶋ら, 1989)では、湾口部地形改变工法を大阪湾の友ヶ島水道に適用した実験結果を示した。本報では、流況制御構造物設置工法の適用による効果検証のため、別府湾、大阪湾に導流堤を設置した水理模型による応用実験から、湾内流況と海水交換形態の変化よりその効果について紹介する。

2. 別府湾での流況制御構造物設置による効果

別府湾は湾口部は広く、水深は湾長軸に対し北に浅く南に深くなり、特に、湾奥部は水深 70 m の海釜となっている。この湾奥部は停滞性が強く、夏季には強い貧酸素水塊が形成される。また、大野川、大分川河川水が湾内に流入している。この別府湾の湾内循環流及び停滞性水域の分布は、これまでの現地調査や水理模型実験結果(上嶋ら, 1988) から、図-2 に示すような分布が得られている。即ち、豊予海峡からの伊予灘に北上する大規模な時計回りの循環流 A があり、この循環流に連動して回転方向の異なる 2 つの循環流 B、C が形成される。ま

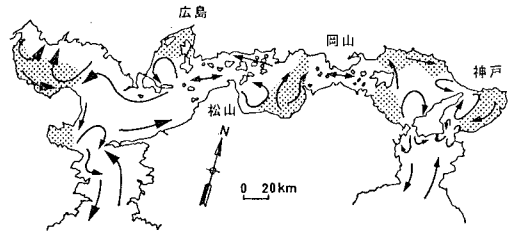


図-1 瀬戸内海の恒流分布と停滞性水域の模式図(陰影部は停滞性水域)

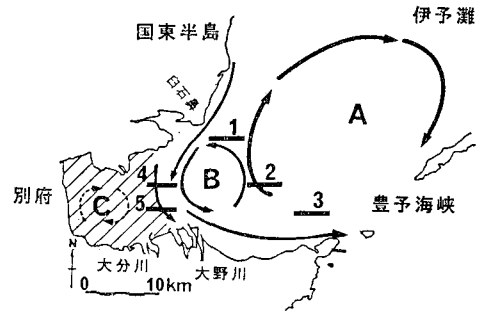


図-2 別府湾の循環流と流況制御構造物の設置位置

た、国東半島からは湾内に南下する明確な恒流も分布している。湾奥部停滞水域に分布する循環流 C が弱い閉鎖型循環流であり、水塊を永く閉じ込めて停滞性水域の形成要因となっている。そこで、この別府湾停滞性水域の流況改善を図るため、流況制御構造物として導流堤を設置する工法を用い、循環流を改変・制御する応用実験を瀬戸内海大型水理模型を使用し効果検証を行った。なお、瀬戸内海水理模型は水平 1/2000、鉛直 1/159 の縮尺であり、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。

(1) 実験内容

実験ケースは図-2 に示すように、湾口部の循環流 A を利用し、湾外水を湾奥部に導入することを狙って、循環流 A と B の間に長さ 2 m (現地換算 4 km) の導流堤を Case 1, 2, 3 と順次別々に設置した。更に、湾奥循環流 C を直接制御することを目的として、湾中央の循

* 正会員 工博 通産省中国工業技術試験所 海洋工学研究室長
 ** 正会員 通産省中国工業技術試験所 海洋工学研究室
 *** 理修 通産省中国工業技術試験所 海洋工学研究室主研
 **** 正会員 工修 通産省中国工業技術試験所 海洋工学研究室主研

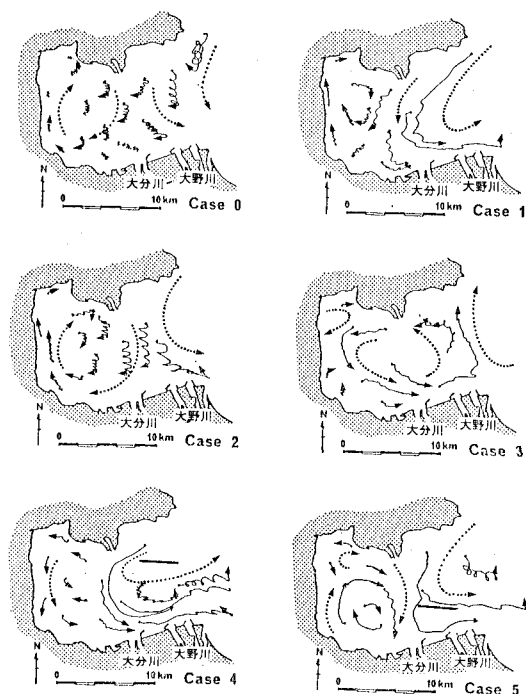


図-3 5周期間のフロート追跡による流跡図 (M_2 潮)

環流BとCの間に同じ長さの導流堤を Case 4, 5 と設置した。導流堤の設置角度については初段階の実験として一定とした。これらの結果を現状地形での実験 Case 0 の結果と対比し、その効果を検証した。実験潮汐は半日周期 (M_2 潮) を与え、浮標追跡と電磁流速計による湾内流況測定を行った。また、湾内流況変化に伴う拡散変化を把握するため、大野川、大分川から河川水として、模型水と同じ密度の染料水 (ローダミンB) を年平均流量で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、移動ボール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。なお、本実験では、実験要素を簡素し、地形変化に対する潮流 (循環流) の変化形態を明かにすることを目的としたため、模型内に密度場を再現せず実験を行った。

(2) 実験結果

a) 流況変化と河川水拡散形態の変化

各実験ケースにおける5周期間浮標追跡による流跡図を図-3に、100周期間での河川水拡散過程を図-4に示す。現状地形の Case 0 では現状流況分布をよく再現しており、湾奥部には微弱ながら時計回りの循環流が分布している。大分川、大野川河川水は一部湾奥部に拡散するが、主には図-2に示す循環流Bに運ばれて湾南岸部を岸沿いに東流し、豊予海峡に達する。

Case 1 では、構造物設置により国東半島沿いの流れが強調されて、循環流Bが非常に強くなる。このため、

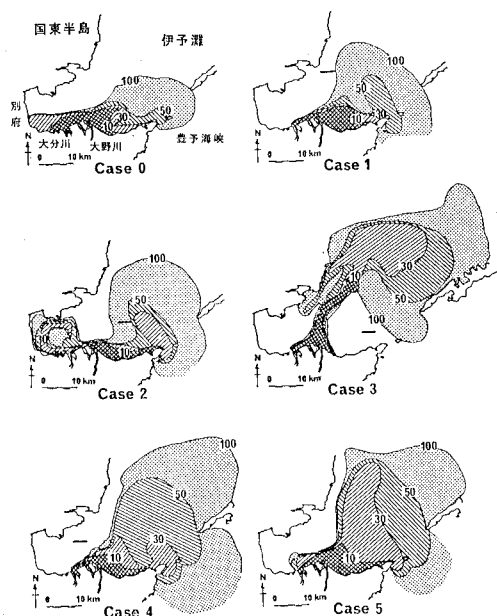


図-4 河川水拡散分布図(100周期間での染料水拡散前線の分布、図中の数字は周期数)

湾奥部の循環流域も影響され回転が速くなるが、その支配領域は狭くなる。この流況変化により河川水は湾奥部に輸送されることなく伊予灘側に広く拡散する。

Case 2 では、湾奥部循環流Cが強化・拡張され、大分沿岸沖では湾奥への西流が強まる。これに伴い、大分川河川水の一部が、湾奥部循環流の回転パターンに沿って湾奥に流入拡散する。これにより湾奥部停滞水が押し出され交換が促進される。

Case 3 では、構造物設置により湾口循環流Aが湾中央まで導流され、大野川河口沖から強い北流が発生する。これは、循環流Cの領域に循環流Bが移動したことによるもので、湾奥の循環流Cはほとんど消滅し、代わりに回転方向のことなる強い循環流が配置されることになる。このため、河川水は中央から2つの循環流の間を帯状となって北上し、国東半島から伊予灘に強く拡散していく。

次に、湾中央に構造物を設置した Case 4 の実験結果では、循環流Bが強調され、湾奥循環流Cが結果的に反転し河川水の湾外流出を著しく早めた。Case 5 では、逆に循環流の回転を強める結果となり、Case 4 と同様、河川水の湾外流出を早めた。

本実験では更に、電磁流速計による測定を図-5に示す湾口部と湾中央の横断測線上で行った。この結果から各実験ケースの潮流楕円要素を求め現状と比較した。表-1には St. 1 と St. 9 での Case 0 と Case 1 での潮流楕円要素を一例として示した。全ケースの中で比較的

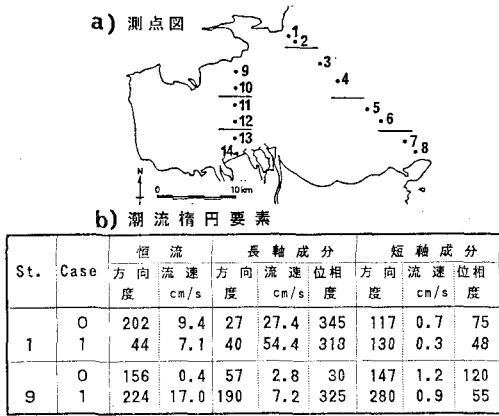


図-5 流速測定点と潮流楕円要素(恒流と M_2 潮成分)

変化の大きかった Case 1 では、恒流値は St. 1 で向きを反転させ、St. 9 では現状の 0.4 cm/s から 17.0 cm/s に大きく変化した。また、 M_2 潮流長軸成分の振幅値では、St. 1 と St. 9 で共に現状より 2 倍に増幅した。これらは図-3 の浮標追跡による結果を裏付けるものである。

b) 海水交換の変化

上記のように、導流堤を設置したことで湾奥部停滞性水域の循環流形態は大きく変化したが、この流況変化に伴って湾奥部の海水交換がどのように変化したかを知るため、図-6、a) に示す領域に、250個のボール(比重 0.96)を均一配置して海水交換実験を行った。各ケースでの湾内ボール残留率の経時変化を図-6、b) に示す。現状地形 Case 0 では、100 周期経過しても初期投入数の約 70% が残留し、停滞性の強さを示している。しかし、Case 1, 2, 3 では、100 周期での残留率が 15~20% に減少し、更に Case 4, 5 では少なくとも 6~11% となり、現状地形に比べ構造物設置により海水交換が 3 倍以上も促進される著しい効果を示す結果となった。また、湾口部より湾中央部に設置した方が海水交換がよく、この中でも湾口部では Case 1 が、湾中央部で Case 4 が効果的であった。

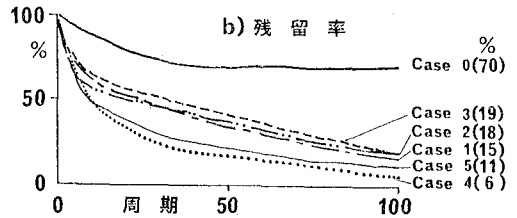
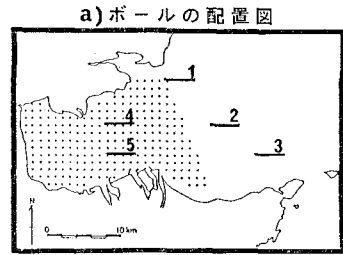


図-6 a) ボールの初期配置と b) 湾内ボール残留率

以上、潜在的な湾内循環流を基に構造物(導流堤)を配置することにより、湾内流況変化と海水交換が大きく促進される結果となるが、今後構造物設置の最適な角度についても検討する必要がある。

3. 大阪湾での流況制御構造物設置による効果

大阪湾の流況については、これまでの観測結果(上嶋ら, 1986)から、図-7 左図に示す模式図のように、湾内には明石海峡と友ヶ島水道からの 2 つの循環流 A, B が形成され、湾北部から泉南沖にかけて停滞性水域が分布していることが明かとなっている。この停滞性水域は、基本的には潮流流と地形との相互作用から形成される領域であるが、この水域に淀川を始めとする多くの河川水流入により密度成層が発達し、上層には閉鎖型循環流 C が形成されることで、より停滞性が強まると見られる。これまで、大阪湾停滞性水域の流況改善のため潮流流を利用した流況制御技術として、「湾口地形改変工法」や「海底地形改変工法」を適用した応用実験を水理模型で行い、各々の工法により湾内循環流の規模を変え停滞性水域の海水交換を促進する効果が得られた(上嶋ら, 1989)。そこで、流況制御技術のもう 1 つの工法である「流況制御構造物設置工法」を適用した応用実験を実施した。

(1) 実験内容

本実験では、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 の右図に示すように、明石海峡の淡路島側から垂直に突出した、長さ 1 m (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 1.5 m (現地換算 3 km) に設置した Case 2、更に、循環流 A の中央に 2 m (現地換算 4 km) の構造物を東西方向に設置した場合を Case 3 として実験

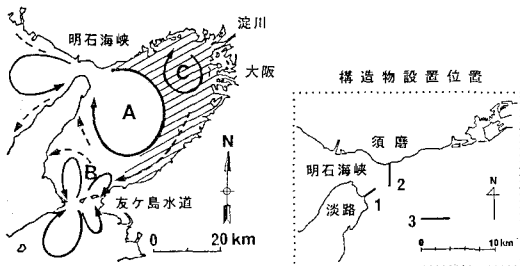
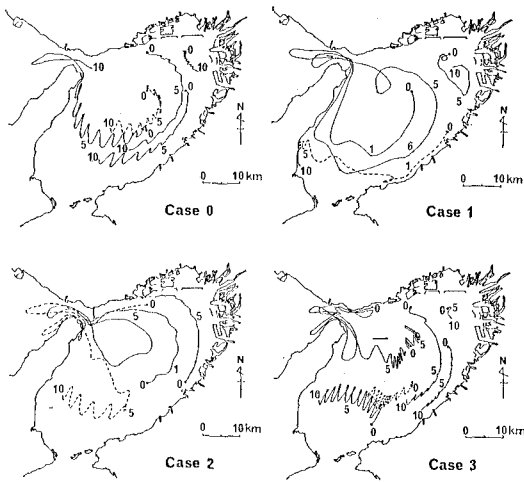


図-7 左図: 大阪湾の循環流域(A, B)と停滞性水域(陰影部 C は閉鎖型循環流)
右図: 導流堤設置位置図(Case 1, 2, 3)



図—8 10周期間浮標追跡図(図中数字は周期数)

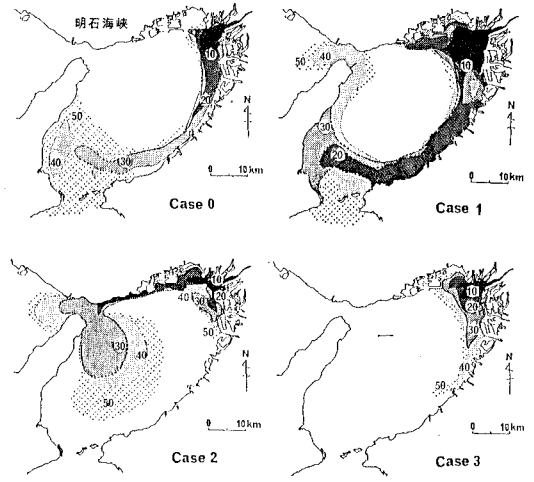
を行った。各ケースの導流堤の長さや向きは、初段階として試行的に設定し、流況変化の程度を探ることを目的とした。実験内容については、浮標追跡による流況変化を測定し、淀川から模型水と同密度の染料水を年平均流量で連続放流し、河川水拡散分布の変化を調べた。また、導流堤設置による瀬戸内海全域に与える潮汐への影響も調べた。更に、湾内全体の詳細な水粒子の動きを高密度で捉えることで、渦形成や循環流形成機構を把握するため、模型水面に多数のボールを投入し、CCDカメラによる撮影を行い、当所開発の「浮標画像解析システム」で全体画像を求めた。

対象とする明石海峡は、瀬戸内海全体の流動・海水交換にとって重要な節目となる場所であるが、最近本四架橋・明石大橋の建設に対する海峡部地形変化の影響が心配されている。中村ら(1975)は、明石海峡に導流堤を設置することによる海水交換への効果を流量係数の変化から見積り、設置後の海水交換が約9.6倍に増加したと報告している。このように瀬戸内海全体にとって明石海峡の地形変化は大きな影響を与えるものである。この点を留意し本実験を行った。

(2) 実験結果

a) 流況変化と拡散分布の変化

各実験ケースでの浮標追跡による流況分布図を図-8に、50周期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Case 1では、明石循環流Aは、現状地形Case 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した。この河口沖の循環流により淀川河川水は拡散しながら、拡大した明石循環流Aによって、現状より10周期以上も早く南下し、その後北上して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Case 2で



図—9 淀川河川水拡散分布図(50周期間、図中の数字は周期数)

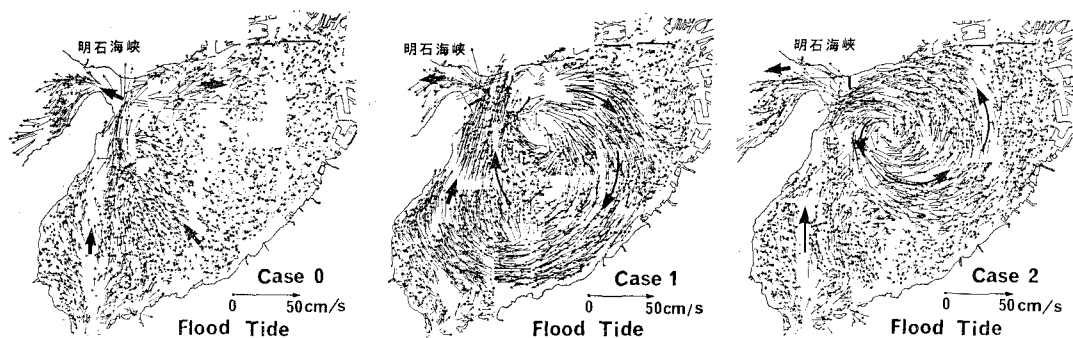
は、明石循環流Aの回転方向が現状と全く反転し、反時計回りの強い循環流となる驚異的な変化が生じた。これに伴い淀川河川水は神戸沖海岸を細く這って明石海峡に向い、反転した循環流の中心部に輸送され、大阪湾中央部に拡散分布する結果となった。

明石循環流Aの中央に設置したCase 3の結果では、循環流Aの規模と流速が現状よりも半減し、友ヶ島からの循環流Bの領域が広くなり、河川水も淀川河口域に強く停滞し、拡散しなくなる状態に変化した。一方、多数の浮標を湾内全域に投入し、4台のCCDにより浮標の動きを撮影し、画像解析した結果では、これまでに得られなかった詳細な水粒子の動きと分布が1潮汐間連続して観察することができた。図-10には、Case 0, 1, 2での上げ潮初期の流速ベクトルによる流況パターン図を示す。これらを基に地形変化による渦形成や循環流の形成過程の変化について解析していく。

b) 構造物設置による瀬戸内海全域の潮汐変化

明石海峡に導流堤を設置することによる瀬戸内海全域への潮汐変化について明らかにするため、湾内28地点で得た、各ケースでの潮位記録を調和解析し M_2 潮成分の振幅・位相を求め、現状地形(Case 0)を基準としてその変化を調べた。図-11には、水位測点図とCase 1と2での振幅の変化量(現地換算値)を一例として示した。

Case 1の方が全体的に振幅・位相とも変化は大きく、大阪湾での4地点の振幅は現状振幅より7~9cmも大きく、位相は5度遅くなる。一方、播磨灘から備後灘までは逆に振幅は減少し、特に家島(Ie)では振幅が9cm減少し、位相は約10度遅くなる。この影響は遠く安芸灘、周防灘まで及び瀬戸内海全域的に潮汐変化が生じることが分かった。



図—10 浮標追跡によるベクトル分布図, 上げ潮初期, (明石海峡西流初期)

4. 結 語

停滞性水域の流況改善を図るための「流況制御構造物設置工法」として広義の導流堤を瀬戸内海大型水理模型の別府湾・大阪湾(明石海峡)に設置した応用実験からは以下の効果が確認された。

(1) 別府湾の湾口部と湾中央部に導流堤を設置した実験からは、湾内循環流と河川水拡散の規模と形態が大きく変化・促進させ、湾奥停滞性水域の循環流が反転したり、規模が強調されることにより、海水交換が現状地形より約3倍も促進する結果を得た。

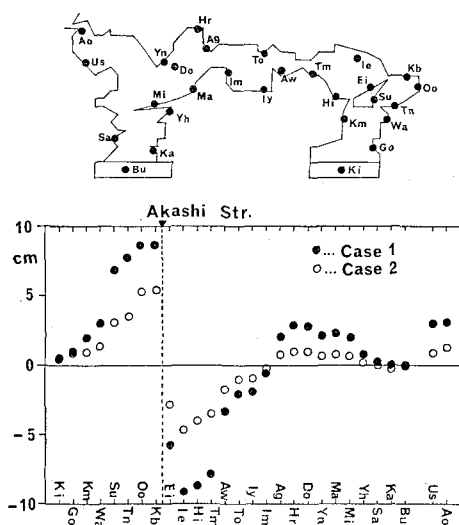
(2) 大阪湾, 明石海峡の淡路島側, 須磨側に導流堤を別々に設置した実験からは、明石循環流の規模を著し

く拡大したり、循環流の向きが全く反転する驚異的な変化が生じた。また、明石循環流中央部に構造物設置した場合には、循環流の規模と流速が半減した。これに伴い、淀川河川水の拡散規模とパターンが極端に変化する結果となった。更に、明石海峡に導流堤を設置することにより、瀬戸内海全域の潮汐に大きな影響も与えた。

(3) 循環流形成に重要な位置となる海峡部・湾口部に構造物を設置した各実験からは、湾内の循環流を大規模に変化させ、河川水拡散規模やパターンの変化、海水交換に大きな効果をもたらすことが明かとなった。しかし一方では、潮汐に与える影響も広域的であり、更には流況変化に伴う物質輸送過程や生態系等に対する二次的影響が心配されるため、具体的技術の開発や設計施工に対しては、多くの研究課題に対処しなければならない。本実験で行った試行的な応用実験の結果を踏まえ、今後更に詳細な実験を重ね、流況変化機構の解明を進めたい。

参 考 文 献

- 上嶋英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広・田辺弘道(1987): 大阪湾停滞性水域の流動と水塊構造, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 661-665.
- 宝田盛康・上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・今村 均(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.
- 山崎宗広・今村 均・本嶋克二・宝田盛康・上嶋英機(1988): 海底構造物による流況技術の研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 479-501.
- 上嶋英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広・田辺弘道(1988): 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.
- 上嶋英機・橋本英資・田辺弘道・宝田盛康・山崎宗広(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.
- 中村 充・萩野静也・乃万俊文(1975): 導流堤による潮流制御工と瀬戸内海の水質改善, 海と空, 第50巻, 第2-3合併号, pp. 75-90.

図—11 構造物設置による瀬戸内海潮汐変化, 上図: 水位測点図, 下図: M₂ 潮成分振幅置(現状地形からの変化量)