

湾口部地形改変による停滞性海域の流況改善に関する実験的研究

山崎 宗広*・宝田 盛康**・上嶋 英機***・朝位 孝二****

1. はじめに

閉鎖性海域や埋立によって形成された人工水域内では、広い範囲で水域が停滞して富栄養化しており、赤潮の発生や貧酸素水塊の形成といった、水質環境問題が引き起こされている。このような浄化機能の低下している海域では、これを改善するためのミチゲーション技術の導入が強く求められている。海域での水質や生物生息環境は、物理的な水の流れに左右され、生物の生息を阻害しないで持続的なものとするためには、これを適正な状態にするための流れの制御が必要となり、そのために使用する構造物の開発や、海底地形の改変・調整や埋立地の配置等に関する研究を不可欠とする。

これまでに、閉鎖性海域の流動環境の改善や海水交換促進のために、山崎ら (1988) や上嶋ら (1991) は湾口部に海底構造物や導流堤を設置する方法を、上嶋ら (1989) は湾内の流動を考慮して海底に溝を掘る方法を、大谷ら (1995) は湾口部の両岸に突起状の構造物を設置する方法を、小松ら (1997) は湾内に抵抗特性の異なる人工構造物を海底に設置する方法を提案している。

本研究では、湾口部の深みを操作する地形改変を取り上げ、閉鎖型矩形湾の湾内循環流の変化機構と海水交換の変化を、基礎水槽実験や瀬戸内海大型水理模型実験から検討した。

2. 地形改変手段による海域制御機能

2.1 実験装置と実験方法

一般的に狭い湾口を持つ閉鎖性内湾では、湾中央部より湾口部の方が水深が深くなることが多い。基礎水槽実験では、人為的な湾口部の深み埋め込み操作が、循環流や渦流をどのように変化させ、湾内水の停滞性の改善につながるかを明らかにすることにした。

図-1 は実験に使用した閉鎖型矩形湾の地形を示したものである。平面水槽内に湾規模 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 、湾口幅 30cm の矩形湾を設定し、図に示すように湾内側の海底に

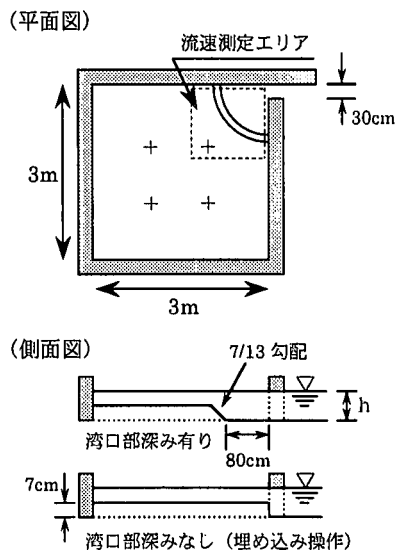


図-1 基礎実験地形

急勾配型のスロープ (7/13 勾配) を設けた場合 (湾口部深み有り、以下、単に「地形1」と呼ぶ) と、湾口部の深みを埋め込んでステップ的な地形の場合 (湾口部深みなし、以下、単に「地形2」と呼ぶ) の2ケースを取り扱った。

水理模型実験では、原型との運動学的相似を保ちながら、幾何学的相似 (形状の相似を表す) を任意に選んで行われる (速水ら, 1958)。本実験では、特定の湾 (原型) の現象だけを検討するのではなく、幅広い実験条件の基に海底形状の違いによる効果を検討した。すなわち、実験では主要パラメータである、①湾外の水深 h を 10.5cm , 14cm , 17.5cm , ②湾外の潮汐周期を 120sec , 180sec , 240sec , ③湾外の潮汐振幅を 0.3cm , 0.5cm , 0.7cm と幅広く変化させて海底形状の違いによる効果を検討した。実験ケースを表-1に示す。なお、潮汐の周期を変化させることは湾のスケールを変化させることと同じ意味を持つ (相対的にみれば潮汐の周期が短くなるほど、湾のスケールが大きくなる)。

潮汐の発生には平面水槽に設備されているプランジャー式起潮装置で行った。湾口部周辺の流動は、二次

* 正会員 通産省中国工業技術研究所 海洋制御研究室
** 正会員 工修 通産省中国工業技術研究所 海洋制御研究室
*** 正会員 工博 通産省中国工業技術研究所 海洋環境制御部長
**** 正会員 工博 山口大学講師 工学部社会建設工学科

表-1 実験ケース

	湾口部地形	水深(cm)	周期(sec)	振幅(cm)
Case 1	地形 1	10.5	180	0.5
Case 2	地形 1	14.0	180	0.5
Case 3	地形 1	17.5	180	0.5
Case 4	地形 1	14.0	120	0.5
Case 5	地形 1	14.0	240	0.5
Case 6	地形 1	14.0	180	0.3
Case 7	地形 1	14.0	180	0.7
Case 8	地形 2	10.5	180	0.5
Case 9	地形 2	14.0	180	0.5
Case 10	地形 2	17.5	180	0.5
Case 11	地形 2	14.0	120	0.5
Case 12	地形 2	14.0	240	0.5
Case 13	地形 2	14.0	180	0.3
Case 14	地形 2	14.0	180	0.7

元電磁流速計(アレック電子製 ACM-250 型)と極小浮標ボール(直径 12 mm, 比重 0.92)を用い, また湾内全体の流況や海水交換は, 湾内に 20 cm 間隔格子状に均一に配置した浮標ボール(直径 35 mm, 比重 0.92)の移動から評価した。

2.2 湾内循環流の強化機能

図-2 は一連の実験の中で湾外水深が 14 cm, 潮汐周期が 180 sec, 湾外の潮汐振幅が 0.5 cm の場合の実験結果であり, 浮標ボールの追跡から得られた上げ潮, 下げ潮最強時における流速分布と流跡図を示したものである。なお流跡図は, 下げ潮後の憩流時をスタートとして●印で示し, 地形 1 の Case 2 の場合は 3 潮汐周期間, 地形 2 の Case 9 の場合は 1 潮汐周期間追跡したものを示している。まず流速分布をみると, Case 2 の場合は湾奥部では流れが殆どなく停滞し, 3 cm/sec 以上の流速は湾口部近傍にのみ存在している。一方, Case 9 の場合は Case 2 で存在していた湾奥部の停滞域がなくなり, 湾全体に強い反時計回りの環流が生じている。この環流は, 強さや規模は異なるものの上げ潮, 下げ潮最強時とも常に反時計回りの流れとなり, 通常考えられるような往復流にはなっていない。大局的にみれば, 環流の中心は上げ潮最強時には湾口部付近, 下げ潮最強時には湾中央付近に存在している。次に流跡図についてみると, Case 2 の場合は湾奥部では停滞域のため 3 周期経っても殆ど動いておらず, 潮流の流程を図から求めると 10~30 cm 程度であり, 湾内にはゆっくりとした時計回りの大きな循環流が存在している。一方, Case 9 の場合は Case 2 でみられたような時計回りの循環流はみられず, 湾内全体に強い反時計回りの循環流が形成されている。なお, 海底形状の違いによるこのような循環流のパターンは大局的にみれば, 他の実験ケースでも同様な結果が得られているが, 水深の浅い Case 1, 潮汐周期が長い Case 5, 潮汐

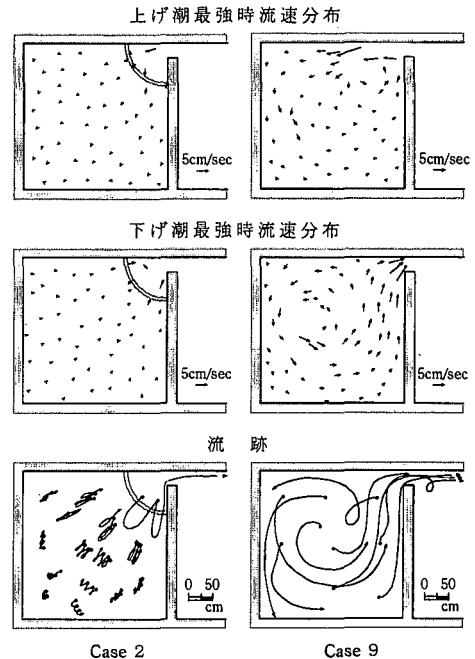


図-2 湾口部深み有無による水粒子のベクトル, 流跡の変化

振幅が大きい Case 7 では, 循環流の規模は違うものの時計回りと反時計回りの 2 つの循環流がみられる。また, 循環流の強さは, 水深が浅くなるほど, 潮汐の周期が短くなるほど, 潮汐の振幅が大きくなるほど, 大きくなっている。

このような循環流のパターンの違いは, 湾口部において形成される潮流渦の発達過程の違いによるものと推測される。次に, このことを明らかにするために図-1 に示す湾口部周辺の領域に, 二次元電磁流速計を 10 cm 間隔格子状の測点に多数設置して, 空間的に詳細な流動場の測定を行った。

図-3 は, この流速計から得られた湾口部周辺の表層における平面流速と渦度分布の時間変化を示したものである。図は湾口部の下げ潮後の憩流時を 0 deg. として上げ潮期のみ示したものであり, 渦度については反時計回りが正の値(濃色系)である。両実験ケースとも, 湾口の突堤の先端で剥離によって形成される反時計回りの潮流渦が時間と共に湾内に輸送されて集積し大きくなっている。しかし, その規模・強さは大きく異なっており, 湾口部の深みが湾内側まで入り込んでいる Case 2 の場合には, 潮流渦が海底の漸浅化によって回転を弱められて十分な誘導速度を得ることができなくなり, 潮時 150 deg. になっても湾内に深く進入しきれていない。一方, Case 9 の場合には, 湾口部の深みが無いことにより湾内側での流速が増大し, この効果が解消され, 湾内を大きく循環する強い流れが発生している。

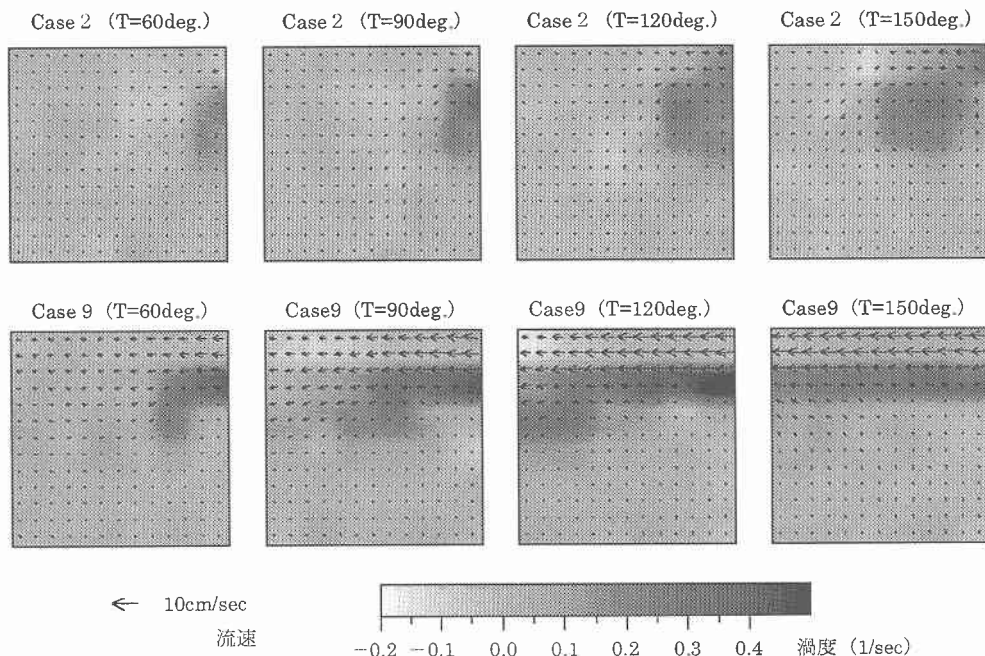


図-3 湾口部周辺の表層における流速と渦度分布の時間変化 (Case 2: 地形1, Case 9: 地形2)

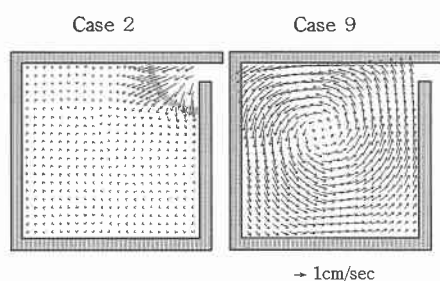


図-4 湾口部深み有無による潮汐残差流の変化

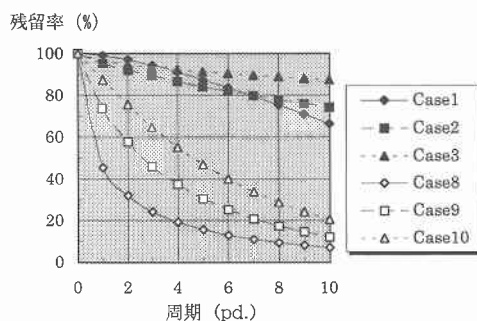


図-5 湾内残留率の時間変化

図-4 は湾内全域の潮汐残差流の変化を示したものである。この図は、デジタル画像処理流体計測システム (nexus 製 PTV システム) により 5 秒毎の流速分布を求め、1 潮汐周期間平均して得たものである。地形1の Case 2 の場合は、湾口部近傍のみに潮汐残差流が存在している。一方、深みを埋め込むことによって (Case 9, 地形2) 海水の停滞性が改善され、湾内全域に強い反時計回りの潮汐残差流が形成されている。海底形状に依存するこのような潮汐残差流パターンの違いは、他の実験ケースでも同様な結果が得られているが、その強さは、水深が浅くなるほど、潮汐の周期が短くなるほど、振幅が大きくなるほど、大きくなっている。

2.3 海水交換の促進機能

これまでの研究では、湾内に強い循環流が生成され

ば、湾内各水域の海水の平均滞留時間が短くなり、湾内水全体の海水交換を良くすることが確認されている。

図-5 は、各潮時における湾内に残留する浮標ボールの個数を求めて投入量で基準化し、実験パラメータの一つである水深変化別に整理したものである。残留率の時間変化をみると、地形1に比べ地形2では、残留率は急激に指数関数的に減少し、湾外水との交換が短時間で行われていることがわかる。

湾口部における流速は、水深が浅くなるほど、潮汐の周期が短くなるほど、振幅が大きくなるほど、大きくなることが流速測定結果より明らかになっている。図-6 は、湾口部における断面平均流速と平均滞留時間の関係を示したものである。なお、この断面平均流速は上げ潮

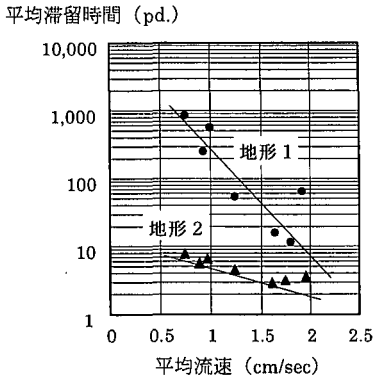


図-6 平均流速と平均滞留時間との関係

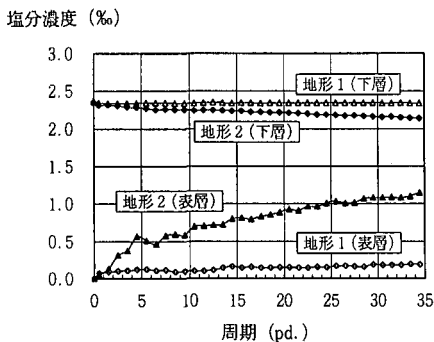


図-7 平均塩分濃度の時間変化

期間における時間平均値でもある。この図からわかるように、湾口部の深みを埋めることにより、湾内水全体の海水交換が良くなっている。また、海底形状の違いで分類することができ、それぞれの分類の中では平均流速が大きくなるにつれて湾内水全体の海水交換も良くなることわかる。

2.4 成層状態下における深み埋め込み操作の有効性

次に、密度成層状態下における深み埋め込み操作の有効性を調べるために、成層状態で潮汐の発生が可能な平面水槽により検討した。実験では上層（湾内の上層水深5cm）に淡水を、下層（湾内の下層水深5cm）に塩水を使用した。実験条件は、周期を180sec、湾外の各層における潮流の流程距離を25cmとし、成層状態は上嶋ら（1989）が行った大阪湾奥部の現地観測結果に基づき、上層密度1.020と下層密度1.021の密度差 $\Delta\sigma_t=1$ （塩分換算2.357‰）を再現することにした。

図-7は、導電率計から得られた湾内平均塩分濃度の時間変化を各層毎に示したものである。この値は湾内代表6測点の塩分データを1潮汐周期間で平均したものである。地形1の場合は表層で僅かな塩分濃度の上昇がみられるものの、下層では35周期経っても殆ど変化がみ

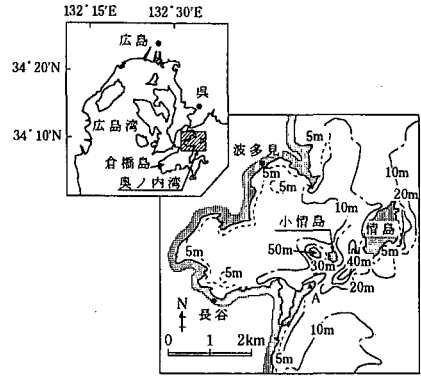


図-8 奥ノ内湾の地形形状と水深図

れない。一方、地形2の場合は表層で時間と共に大きな上昇、下層では減少傾向がみられ、湾外水及び上下層間での交換が促進されている。

3. 倉橋島奥ノ内湾の事例

湾口部地形改変操作の有効性を、瀬戸内海大型水理模型（水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/159）における倉橋島奥ノ内湾で具体的に検討した。

図-8は、奥ノ内湾の地形形状と水深を示したものである。奥ノ内湾は瀬戸内海西部の倉橋島に位置し、瀬戸内海の中でも小規模な内湾の一つである。湾のスケールは、東西方向約4km（模型上の長さは2m）×南北方向約3.2km（模型上の長さは1.6m）であり、湾口部に小情島があり、2つの開口部を持つ。湾内の水深は、約10m（模型上の水深は6.3cm）でフラットな海底地形をしており、小情島周辺の湾口部には50m強（模型上の水深は31.4cm）の深みがある。基礎水槽実験から得られた知見を基に、実験ケースは、①現状の場合（Case 0）、②図-8に示す小情島とA地点の間の20m以深の深みを埋立した場合（Case 1）、③10m以深の同深みを埋立した場合（Case 2）の3ケースとした。そして、実験条件として半日周期（ M_2 潮、周期282秒）を与えた。流況の測定は、20cm間隔格子状に配置した45個のフロート（フィルムケースの蓋、直径3.5cm）を追跡することにより行った。

図-9は1潮汐周期間のフロートの流跡を、下げ潮後の憩流時をスタートとして●印で示し、各実験ケース毎に整理示したものである。湾口部に深みがある現状Case 0の場合では、湾口部周辺フロートは上げ潮期には北へ向かって流れ、下げ潮期になると南へ向かって流れる。また湾南東部では小さな反時計回りの循環流がみられるが、湾奥部では1周期経ってもフロートは殆ど動かず停滞している。湾口部の水深を操作したCase 1、2（埋立位置は、各々の図中の斜線部分）の場合には、湾南東部では大きな反時計回りの循環流が形成され、水深

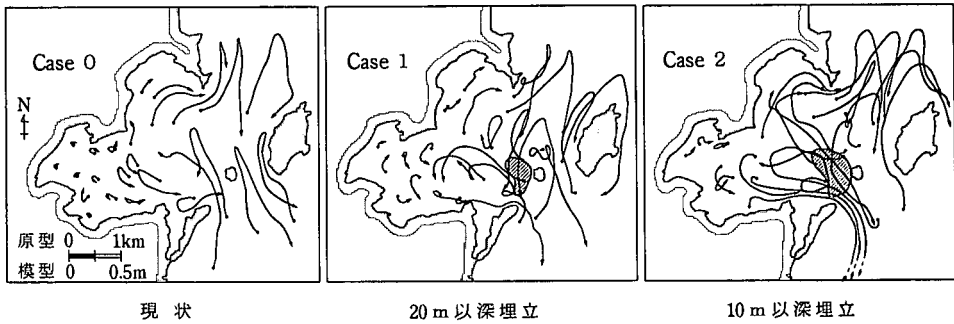


図-9 湾口部深み有無による流跡の変化

が浅い Case 2 の方が循環流の強さや規模は大きくなっている。また両実験ケースとも湾口部の深みを埋めたことによって、湾奥部の停滞域が改善されている。

4. おわりに

閉鎖性海域の流動環境の改善や海水交換促進のために、湾口部の深みを操作する地形改変手段を取り上げ、矩形湾の湾内循環流の変化機構と海水交換の変化を、基礎水槽実験や瀬戸内海大型水理模型実験から検討した。基礎水槽実験から得られた成果を以下に要約する。

① 湾口部に深みがある場合、湾口の突堤の先端で形成される潮流渦は時間と共に発達するが、深みが有ることによって回転が弱められ、湾内を大きく循環する流れまでには至らず、湾奥部に停滞性水域が存在する。深み埋め込み操作は、湾口部湾内側での流速を増大させる結果となり、この潮汐周期で発生する潮流渦の強さや規模も大きく変え、湾奥部の停滞性を流動場の面から改善することができる。

② 深み埋め込み操作により、湾内に反時計回りの大きな循環流や残差流を形成する。この循環流や残差流の強さは、水深が浅くなるほど、潮汐の周期が短くなるほど、潮汐の振幅が大きくなるほど、大きくなる。

③ 深み埋め込み操作により、湾内水全体の海水交換は良くなり、平均滞留時間は循環流の規模や強さに比例して小さくなる。

以上が基礎水槽実験で得られた成果である。ここで得

られた主な成果は、瀬戸内海大型水理模型実験における倉橋島奥ノ内湾の実験で、その有効性を確認することができた。

最後に、本研究を行うにあたり、多大な御助言を賜った長岡技術科学大学の早川典生教授に感謝の意を表わすと共に、本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究「瀬戸内海の適正環境創造のためのミチゲーション技術の適用に関する研究」の一環として行ったことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 上嶋英機・橋本英資・湯浅一郎・田辺弘道 (1989): 海洋環境創造と有効利用のための流況制御技術—瀬戸内海水理模型による実験的研究—, 第9回海洋工学シンポジウム論文集, pp. 281-288.
- 上嶋英機・橋本英資・田辺弘道・宝田盛康 (1991): 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—, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 851-855.
- 大谷英夫・高山百合子・石野和男・勝井秀博・宝田盛康 (1995): 流況制御のための湾口渦と水平循環流に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1221-1225.
- 小松利光・矢野真一郎・小橋乃子・鞠 承淇・藤田和夫 (1997): 流れの方向により抵抗特性の異なる人工粗度の開発, 水工学論文集, 第41巻, pp. 705-710.
- 速水頌一郎・樋口明生・吉田幸三 (1958): 潮流を含む水理模型実験の相似性について, 京都大学防災研究所年報, 第2号, pp. 83-95.
- 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制御技術の研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 497-501.