

成層化した閉鎖性内湾の海水交換促進技術に関する研究

山崎宗広*・上嶋英機**・早川典生***・村上和男****

1. はじめに

瀬戸内海には、物理的に閉鎖性の強い湾・灘が数多く存在している。そのような海域の多くは、赤潮や貧酸素水塊が発生しやすい停滞性海域であり、水質環境保全の上から海水の停滞性を改善する技術の開発が望まれている(中国工業技術試験所, 1991)。このような閉鎖性海域の水質改善策として、いろいろなアイデアに基づく構造物等が提案されている(例えば, 大谷ら, 1995; 小松ら, 1997)。

また山崎ら(1998)は、閉鎖性海域の流動環境の改善や海水交換促進のために、地形改変を均一流体場の水槽実験により検討してきた。しかしながら、富栄養化が問題となっている夏場の内湾域では鉛直的に成層化しており、均一流体場とは異なった流れとなっていることが予想される。そこで本研究では、成層化している閉鎖性内湾の海水交換促進技術の開発を目的に、二成層潮汐流が再現できる平面水槽を用いた実験により、成層場が湾内の水平循環流に与える影響を調べるとともに、成層場における湾内の海水交換促進方法を湾口部の水深を操作する地形改変手段により検討した。

2. 成層場における湾内の流れと地形改変の効果

2.1 二成層流平面実験水槽

成層状態を模擬する実験水槽は、塩水楔の挙動を調べる鉛直二次元水槽はあるものの、閉鎖性内湾等を模擬して二成層潮汐流を発生する平面水槽は著者の知る限りないようである。そこで図-1に示す「二成層流平面実験水槽」を開発した。

この水槽は、幅 2 m, 長さ 5 m, 高さ 0.3 m の平面水槽であり、二成層は淡水と塩水を用いて作成する。流入物質の輸送・拡散・堆積の挙動をあらゆる方向から観察可能とするために、水槽の底面及び側面は全てガラス張りで作られている。

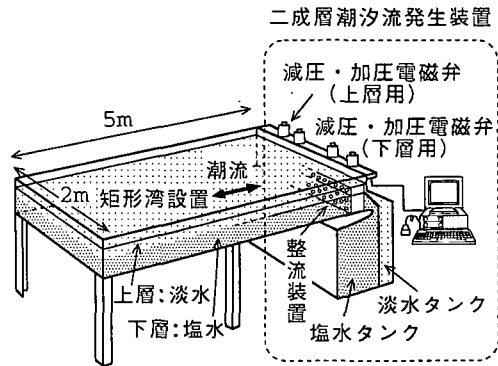


図-1 二成層流平面実験水槽の概観図

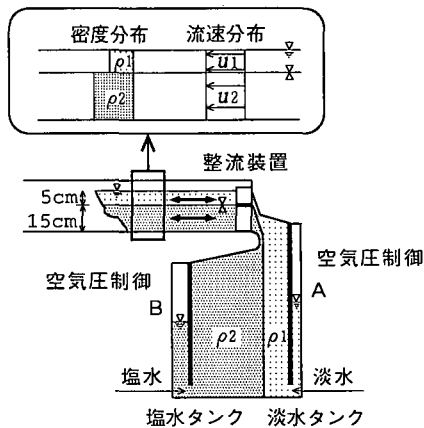


図-2 二成層潮汐流発生装置の概観図

図-2は、平面水槽内に二成層潮汐流を発生させる装置の概観を示したものである。この装置は、図で示すように淡水用と塩水用の二つのタンク内の空気圧を周期的に変化させることにより、淡水及び塩水を水槽の上層及び下層に流入出させて二成層潮汐流を発生させることができる。各タンク内の空気圧の周期的な変化は、制御用計算機によって図中 A, B に示すタンク内の水位の高さを超音波式水位計で監視しつつ、各タンクの上部に設置されている減圧、加圧電磁弁を開閉制御することによって与えている。なおこの時、上層と下層の流速が等しく

* 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 工博 通産省中国工業技術研究所 海洋環境制御部長
*** フェロー Ph.D. 長岡技術科学大学教授 環境・建設系
**** 正会員 工博 通産省中国工業技術研究所 海洋制御研究室長

なるように制御用計算機で制御されている。

2.2 実験方法

内湾域における汚染物質の拡散や海水交換現象を調べた水理模型実験は数多くみられるが、密度差を考慮した実験例は少ない。これは、村上 (1998) が指摘しているように僅かな密度差による流れを制御することは非常に困難なためと、密度効果を考慮した湾規模の模型相似則が確立していないためだと考えられる。ここでは、潮流に関するフルードの相似則により、 M_2 潮が卓越している徳山湾のモデル化を想定して実験を行った。

図-3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。徳山湾は狭い湾口を持つ閉鎖的な湾であり、湾中央部より湾口部の方が水深が深くなっている。実験では図に示すように、湾口部に深みがある地形を実験水槽内に設定し、流動環境の改善策として、その湾口部の深みを埋め込む地形改変効果を調べた。なお、湾規模は $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、湾口幅は 20 cm 、湾口水深は 20 cm 、湾内水深は 10 cm とした。

潮汐条件は、上下層とも潮汐の周期を 180 秒 、潮汐の振幅を 0.58 cm とし、密度成層は上層に淡水を下層に塩水を用いて二成層状態を作り、湾内における層厚は各々 5 cm とした。

成層条件は上層と下層の密度差 $\Delta\sigma_t$ ((下層密度-上層密度) $\times 1000$) を 0 (成層なし、一様密度)、 $1.87 \sim 5.87$ 内の 5 段階に変化させ、実験ケースは地形改変手段との組合せにより 12 ケースとした。実験ケースを表-1に示す。海水の密度は塩分と水温の変化に対して非線型的に変化するが、ここでは実験水槽の水温を 15°C とし、「水温-塩分ダイアグラム (日本気象協会, 1970)」より $\Delta\sigma_t$ に相当する塩分濃度を算出した。作成した下層の塩分濃度

表-1 実験ケース

	湾口部の地形形状	$\Delta\sigma_t$ ($\times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$)	塩分濃度 (psu)
Case T1S0	深み有り	0	0
Case T1S1	深み有り	1.87	2.36
Case T1S2	深み有り	2.87	3.63
Case T1S3	深み有り	3.87	4.91
Case T1S4	深み有り	4.87	6.20
Case T1S5	深み有り	5.87	7.49
Case T2S0	深みなし (埋め込み)	0	0
Case T2S1	深みなし (埋め込み)	1.87	2.36
Case T2S2	深みなし (埋め込み)	2.87	3.63
Case T2S3	深みなし (埋め込み)	3.87	4.91
Case T2S4	深みなし (埋め込み)	4.87	6.20
Case T2S5	深みなし (埋め込み)	5.87	7.49

の値を表-1に併せて示しておく。

湾内全体の流況は、湾内に均一に初期配置した上層用 (20 cm 格子に 100 個配置) と下層用 (30 cm 格子に 49 個配置) の浮標の移動により評価した。なお、上層浮標は直径 2 cm の発泡スチロール製のものを、下層浮標は下層の流れを捉えるために十字型抵抗板を取り付けたものを使用した。

湾内の塩分濃度の変化は導電率計 (ケネック製 MK-206 型) により湾内代表 6 地点 (上下 2 層) で測定した。

海水交換の評価は、湾内に残留する浮標の数や塩分濃度の変化により行った。

2.3 実験前の塩分の初期状態

二成層状態の作成は、まず平面水槽内に淡水を張っており、塩水タンクの底部より場を乱さないようにゆっくりと塩水を水槽内に入れる方法で行った。このとき、塩水の流入を確認するために、塩水側は青色 (インジゴカルミン染料、濃度 3 ppm) に着色した。

図-4は、Case T1S2, T2S5の実験開始前の鉛直方向の成層状態を示したものである。図は湾口中央部で測定したものであるが、両実験ケースとも二成層状態が良く再現されている。なお、他の実験ケースの初期状態も

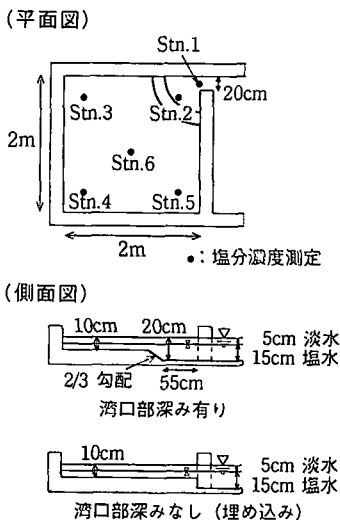


図-3 基礎実験地形

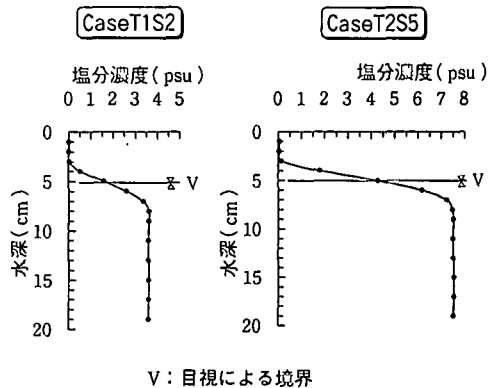


図-4 実験開始前の塩分の初期状態

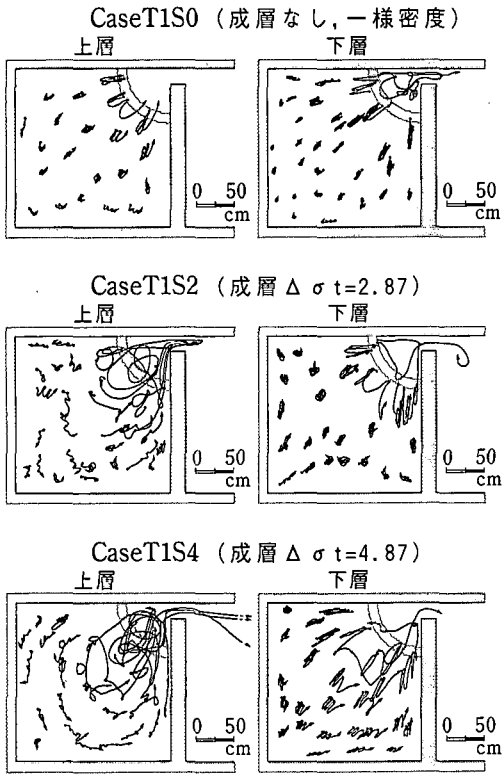


図-5 成層有無による流跡の変化 (深み有り地形)

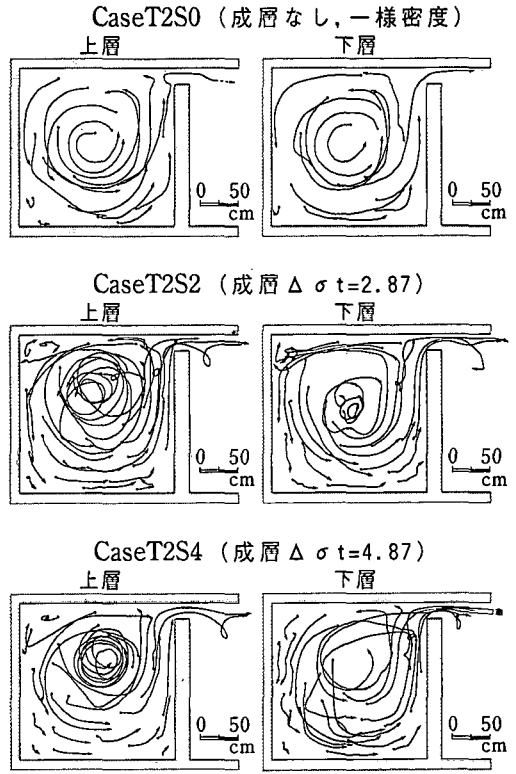


図-6 成層有無による流跡の変化 (深みなし地形)

図-4と同様な結果が得られている。

2.4 湾内の水平循環流

図-5は、上層浮標および下層浮標の追跡より得られた流跡図を示したものである。図は湾口部に深みがある地形のものであり、実験開始後1周期目の下げ潮後より3周期間追跡したものである。密度成層がないCase T1S0の場合は、湾奥部の浮標は殆ど動かず停滞し、上層浮標と下層浮標の動きに顕著な差はみられない。成層場が存在すると、上層浮標と下層浮標の動きに変化がみられ、その移動量は下層よりも上層の方が大きい。またCase T1S2よりも成層強度の強いCase T1S4の方が流動の規模は大きく、上層、下層とも湾内に反時計回りの水平循環流がみられる。

図-6は、湾口部の深み埋め込み操作を施した時の、1周期間の流跡図を示したものである。湾口部の深みを埋め込むと、湾内の流れが強化されて湾奥部の停滞域を解消し、成層が存在する実験ケースや成層強度の強い実験ケースの方が、浮標の移動量は大きい。また深み有りの実験結果である図-5と比べると、湾内の上層、下層とも流動の規模が大きくなっており、湾口部の深み埋め込み操作は成層状態でも有効であることを示している。

なお、図-5で示した上層の流れは、密度成層が存在することにより海底地形の深みの影響を受けることが小さ

くなり、海底地形の深みの影響は成層強度が強くなるほど小さくなって、図-6に示した深みなし地形の実験結果に近づくものと推論される。

2.5 湾内の塩分濃度変化

図-7は、導電率計で得られた長周期間における塩分濃度の時間変化を示したものである。図は成層強度 $\Delta\sigma_t$ が2.87の実験結果のものであり、上層(測定水深は水面下2.5 cm)、下層(測定水深は水面下7.5 cm)毎に1潮汐周期間の平均をとり、下層の初期塩分濃度値(C_{L0})で正規化して整理している。なお、図の横軸の時間単位pd.は1潮汐周期を表す。湾口部に深みがある地形の場合、湾口部に位置するStn.2では、上層、下層とも実験開始後、直ちに混合が起こって塩分濃度が大きく変化し、その後はある一定の値を保持している。湾奥部の停滞域に位置するStn.4では、上層、下層とも塩分濃度の顕著な変動はみられず、湾口から湾奥にかけて水平的な塩分濃度の勾配が認められる。

一方、深み埋め込み操作を施した実験ケースでは、塩分濃度は両測点とも上層では時間とともに大きく上昇し、下層では減少している。図-6の流動場の解析からも分かるように、湾口部の深みを埋め込むことにより、湾内の流れが強化されて湾外水および上下層間での塩分の交換が促進されていることを示している。

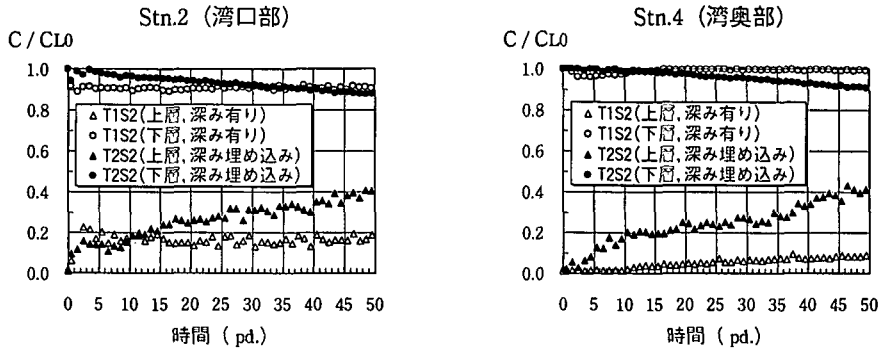


図-7 代表点における塩分濃度の時間変化 (場所の違い)

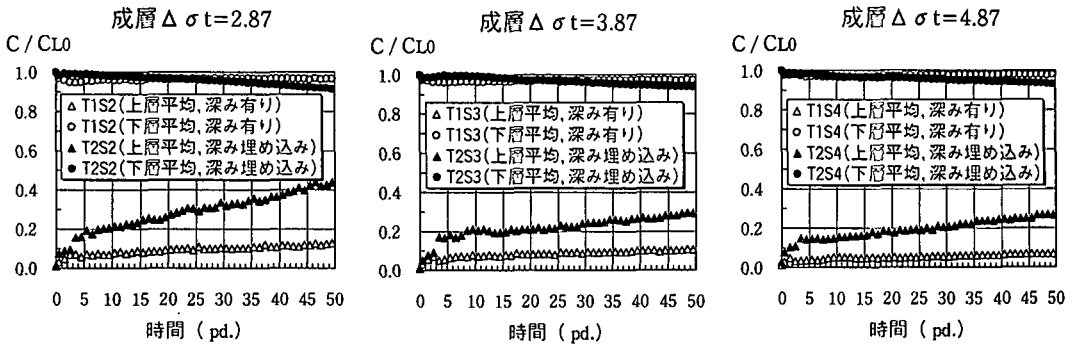


図-8 各層毎の湾内平均塩分濃度の時間変化 (成層強度の違い)

図-8 は、各層における湾内平均塩分濃度の時間変化を示したものである。この値は湾内代表6測点で得られた塩分データを代表水域のボリュームを考慮した重み付き平均を施し、下層の初期塩分濃度値で正規化して求めたものである。湾口部に深み有る地形の場合、上層では僅かな塩分濃度の上昇がみられるものの、下層では長時間経っても殆ど変化がみられず、成層強度が強くなるほど、その変化量は小さくなっている。一方、湾口部の深みを埋め込むと、上層では時間とともに大きく上昇、下層では僅かではあるが減少する傾向がみられ、塩分の交換が促進されている。なお、このケースでも成層強度が強くなるほど、塩分の変化量は小さくなっている。

2.6 湾内水の海水交換と塩分の交換

これまでの研究では、湾内に強い循環流が生成されれば、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-9 は、湾内に残留する浮標の変化を示したものである。図の浮標残留率は、各潮時における湾内に残留する上層用と下層用の浮標の合計個数を求め、投入量で正規化して整理したものである。浮標残留率の時間変化をみると、湾口部の深みを埋め込んだ地形の方が減少速度が早い。表-2 は、この浮標残留率変化より、平均滞留時間と 50% 交換時間を示したものである。なお平均滞留時間 τ_r は、湾内の海水交換速度の尺度となるものであり、武岡 (1984) にならって (1) 式により求めた。

浮標残留率 (%)

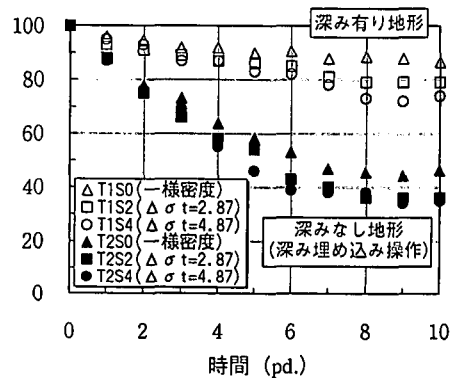


図-9 湾内における浮標残留率の時間変化

間 τ_r は、湾内の海水交換速度の尺度となるものであり、武岡 (1984) にならって (1) 式により求めた。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $r(t)$ は物質の残余関数であり、浮標残留率変化を、 $\exp(-at^b)$ (t は時間、 a 、 b は定数) で近似して計算を行った。図-5、6 に示した湾内循環流の形態の変化は、湾内に残留する浮標数の減衰率や平均滞留時間の値でも分かるように、湾内の海水交換促進に反映されてい

表-2 浮標より求めた平均滞留時間と50%交換時間

	平均滞留時間 τ_r (pd.)	50%交換時間 (pd.)
Case T1S0	240.4	104.1
Case T1S1	221.6	89.4
Case T1S2	119.5	48.0
Case T1S3	49.3	27.9
Case T1S4	39.2	23.1
Case T1S5	25.5	16.5
Case T2S0	12.2	6.9
Case T2S1	9.5	6.2
Case T2S2	8.5	5.5
Case T2S3	7.6	5.3
Case T2S4	7.4	5.1
Case T2S5	7.0	4.7

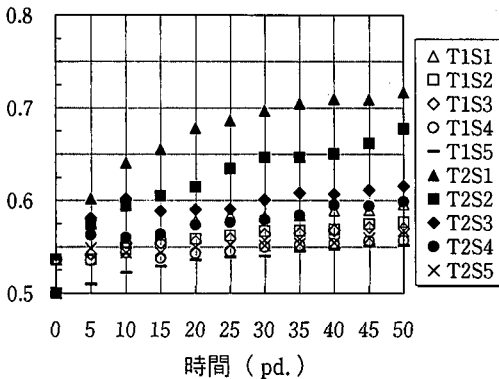
C / Cl₀

図-10 湾内水全体の塩分濃度の時間変化

る。表-2をみると、成層場における湾口部の深み埋め込み操作は湾内の滞留時間を4～23分の1に減少させていることが分かる。両地形とも成層強度が強くなるほど平均滞留時間の値は小さくなっている。なお、成層強度の違いによる平均滞留時間への影響は、湾口部に深みを持つ地形の方が大きい。

次に、塩分濃度の変化より塩分の交換について考察する。図-10は、湾内全体における平均塩分濃度を各実験ケース毎にプロットして示したものである。湾内の塩分濃度の値は、深みを埋め込んだ地形の方が大きく、全ての実験ケースにおいて時間とともに上昇している。この塩分濃度の上昇は、湾口を通して下層湾外水の塩分が潮汐周期で交換され湾内に輸送されるためであり、成層強度や地形形状によって左右され、成層強度が強くなるほど値は小さくなっている。湾内の平均塩分濃度の値が実験開始時より2割増加するのに要する時間を図から求めると、深みがある地形では75～120 pd.、深みを埋め込んだ地形では5～50 pd.であり、深みを埋め込むことによ

り塩分の交換が促進されている。なお、ここで求めた塩分の交換は、初期条件として湾内水と湾外水の上層に淡水を、下層に同じ塩分濃度の塩水を与えて実験を行っており、先程の浮標の残留率から求めた湾内水と湾外水の入れ換わりを示す海水の交換とは違うものである。

3. おわりに

成層化している閉鎖性内湾の海水交換促進技術の開発を目的に、二成層潮汐流が再現できる平面水槽を用いた実験により、成層場が湾内の水平循環流に与える影響を調べるとともに、成層場における湾内の海水交換促進方法の効果を検討した。その水槽実験で得られた成果を以下に要約する。

- ①密度成層場では、一様密度場に比べ流動の規模は小さくなる。この傾向は、成層強度が強くなるほど大きい。
- ②湾口部に深みを持つ地形の上層の流れは、密度成層が存在することにより海底地形の深みの影響を受けることが小さくなり、海底地形の深みの影響は成層強度が強くなるほど小さくなる。
- ③湾口部の深み埋め込み操作は、成層状態でも湾内の流動規模を大きくし、湾奥部の停滞域を解消する。
- ④湾口部の深み埋め込み操作による湾内循環流の形態の変化は、湾内に残留する浮標数の減衰率として現れる。深みを埋め込むことにより、平均滞留時間の値が1/4～1/23程度小さくなり、湾内水全体の海水交換が促進される。

最後に、本研究を遂行するに当たり、実験水槽の製作より終始暖かい御指導と御鞭撻を賜った故宝田盛康氏(元中国工業技術研究所海洋制御研究室長)に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- 武岡英隆(1984): 沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 第21巻, 第2号, pp. 169-182.
- 中国工業技術試験所(1991): 海洋環境改善に関する技術開発の動向, 中国工業技術試験所調査報告書, 185 p.
- 日本気象協会(1970): 海洋観測常用表, 日本気象協会, 96 p.
- 村上和男(1998): 閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究, 港湾技研資料, No. 900, pp. 81-90.
- 山崎宗広・宝田盛康・上嶋英機・朝位孝二(1998): 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1026-1030.