

## 強制循環流による海水交換の促進について

Increase a tidal exchange by enforced tidal circulation

港湾技術研究所海洋水理部 正会員 ○村 上 和 男

港湾技術研究所海洋水理部 正会員 森 川 雅 行

港湾技術研究所海洋水理部 白 井 正 生

### 1. まえがき

閉鎖性の強い海域、例えば開口部のせまい湾奥部、あるいは防波堤に囲まれた港内などでの水質は、あまり良くないことが多い。これは、外海の清浄な水との交換があまりなされないためと思われる。このような閉鎖水域の水質を改善するために、いくつかの方法が提案されている。例えば、三河湾<sup>1)</sup>、鹿児島湾<sup>2)</sup>などでは閉鎖水域を形成する半島部に水路を開削して海水の交換を図る検討がなされたことがある。また、規模は小さいが、名瀬港<sup>3)</sup>、松山港<sup>4)</sup>などでは、防波堤を透過構造にし、海水交換を促進しようという検討がなされている。しかし、名瀬港ではスリット堤よりも従来のケーソン堤の方が海水交換が良いという報告例もあるように、これらの対策工法は、閉鎖水域全体を考えると必ずしも海水交換が促進されるものとは限らないようである。このことは、水路の開削または透過構造物と周辺海域の流況をよく検討する必要性を示している。

流れに関する物質の輸送に関しては、恒流（平均流）による寄与が非常に大きいことが従来から指摘されている。そこで、ここでは潮汐の干満現象を利用して強制的に循環流を発生させる方法についての提案を行い、それに基づく海水交換の促進についてを、水理模型実験および数値計算によって検討したものである。

### 2. 海水交換の表し方

内湾域の水質を浄化するものとして外海水による希釈が最も大きな要因であるので、従来から海水交換に関する研究は数多くなされている。海水交換率の算定法としては、湾口部での塩分の流出入から、湾外に出た湾内水が次の上潮時にどの程度外海水と交換したかを算定するParker et al.<sup>6)</sup>の方法と、湾内全域の水塊の滞留時間等を考慮した方法<sup>7)</sup>とがあげられる。また最近では、物質をラグランジュ風<sup>8)</sup>に追跡して、流れの中に置かれた粒子の動きから海水交換率を求める方法なども検討されている。

ここでは、海水交換現象を最も考え易いと思われる湾奥部全体の物質の残余関数からの海水交換現象の検討を行った。いま、初期条件として湾内の物質濃度を一定にし、その湾内水が外海水と交換することにより湾内濃度が減少する低減曲線を利用して海水交換現象を検討する。湾内水の平均濃度の低減曲線は

$$\frac{c}{c_0} = r(t) = \exp\{-\alpha t^p\} \quad (1)$$

で表される。ここに、 $c$ は湾内水の平均濃度、 $c_0$ は湾内水の初期濃度、 $t$ は時間、 $\alpha$ 、 $p$ は係数である。また $r(t)$ は、湾内に物質が残っている残余関数<sup>7)</sup>として定義されるものである。したがって、海域全体の海水交換を表すものとして、次式で表される平均滞留時間<sup>7)</sup>がひとつの尺度となる。

$$\tau_r = \int_0^\infty r(t) dt \quad (2)$$

ここに、 $\tau_r$ は物質の湾内での平均滞留時間である。

### 3. 海水交換の促進法

閉鎖水域の海水交換を促進する方法として、水路を開削する方法、透過式防波堤を用いる方法などが検討されているが、これらの方法は単に閉鎖域と外海域を結ぶだけにすぎず、その周辺においては確かに湾内水は希釈されるが、閉鎖域全体の海水交換という観点からすると、あまり大きな効果が期待できないことがあ

る。これは、水路開削による閉鎖水域の流れが海水交換に対してどう寄与するのかが重要な問題であることを意味している。そこで、水路開削部に水門を設置して、例えば上潮時に開放にし、下潮時に閉鎖するというようにすると、水路内では上潮流だけの一方向流が発生する。このようにして湾内に流入した外海水のために、湾内水は湾の開口部から流出するという強制的な循環流が閉鎖水域内に発生する。このことは、平均的にみれば水路開削部から湾口部に向かう恒流が存在することを意味し、閉鎖水域の物質輸送に多大な貢献があるものと期待される。

以上のような強制循環流による海水交換の促進法についての検討を、水理模型実験および数値シミュレーションによって行った。対象モデルとしては図-1に示す鹿児島湾を用いた。これは、この種の問題を検討するには最適な鹿児島湾の模型が当研究所に所在したことによるもので、実際の計画に基づいているものではない。模型は水平縮尺1/1200、鉛直縮尺1/200の歪模型で、模型の制約上水深は1m（原型で200m）までとしている。この模型の一部に長さ1.70m、幅33cm、深さ15cm（原型で2Km×400m×30m）の水路を開削した（図-1参照）。ここでは、実験による効果を鮮明に出すために、非常に大規模なものとしている。水路部での水門の制御は手動とした。

#### 4. 水理模型実験と数値シミュレーションによる検討

鹿児島湾の模型で潮流の測定、恒流の測定を行った。実験は現況（Case-A）、上潮のみを通過させた場合（Case-B）、下潮のみを通過させた場合（Case-C）、上下潮とも通過させた場合の4つのケースについて実施した。潮流の測定は、湾全域に対してはフロートの写真撮影、および流速の早い所での超音波流速計による連続測定を行った。その結果の一例を図-2、図-3に示す。また、フロートの位置を10潮汐間にわたって追跡した恒流図を図-4に示す。これらの図から、水門により流れを一方向に限定すると、湾内に相当強い恒流が発生することがわかる。

次に、海水交換実験を行った。実験方法は、筆者の一人が以前に東京湾の模型で行った方法と同様で、初期状態として湾内と湾外を板で遮蔽し、湾内水を染料（ウラニン）濃度が一定になるように攪拌する。実験開始直後に、この遮蔽板を取り外し、湾内水と湾外水の交換により海水交換の程度を知る方法である。図-5に示すのは、現況と上潮通過のケースでの30潮汐目の濃度分布の結果である。右図の上潮通過のケースにおいて湾奥の停滞部に外海水が導入されている様子がよくわかる。これらの濃度分布図から、模型内を10の領域に分割（図-10参照）し、その各々の30潮汐目の平均濃度を図-6に示す。領域10において、Case-B、Dの濃度が低く、Case-Aの濃度が高い。また、領域4においてCase-C、Dの濃度が高いというように水路開削部両端での領域濃度に特徴的な分布がみられる。次に、領域7～10までの湾奥部の平均濃度の経時変化曲線を図-7に示す。現況と上下潮通過のケースではあまり差がなく、上潮通過と下潮通過のケースでの湾奥部の平均濃度の減少の早いことがわかる。この図から、閉鎖水域に水路を開削するだけでは湾内全体の海水交換の促進にはあまり貢献しないので、水門による強制循環流が非常に有効であることがよくわかる。

同様な検討を数値シミュレーションによっても行った。まず、鹿児島湾で大潮時の潮流計算を行い、それを流れのデータとして拡散計算を行った。数値モデルは、有限要素

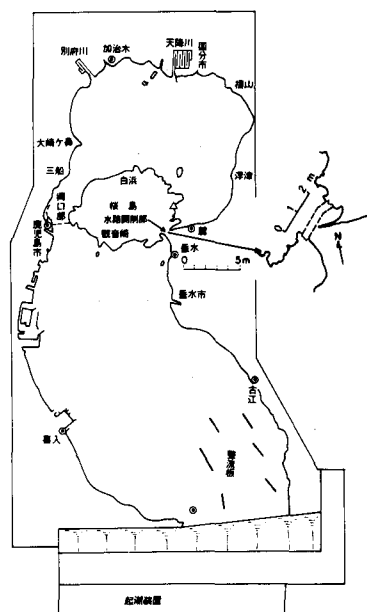


図-1 鹿児島湾水理模型と水路開削部

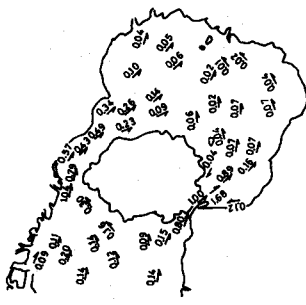


図-2 潮流図 (フロート)

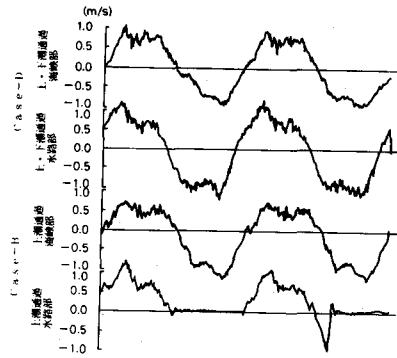


図-3 潮流の経時変化曲線  
(超音波流速計)



図-4 恒流図 (フロート)

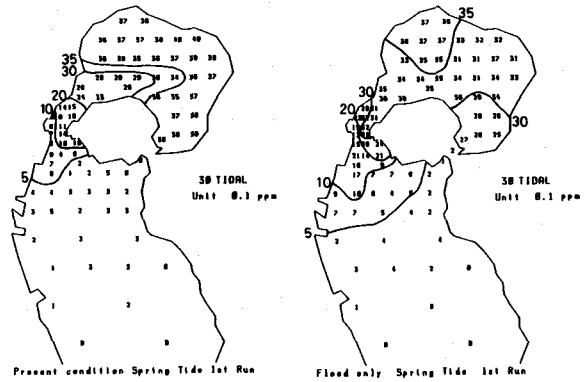


図-5 濃度分布図  
(水理模型, 左: 現況, 右: 上潮通過)

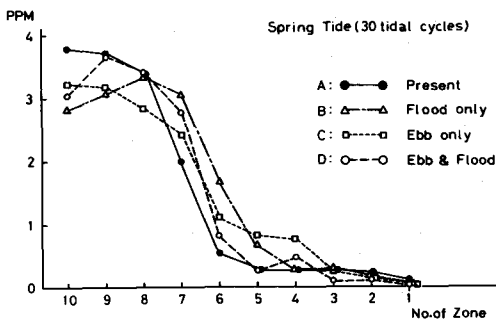


図-6 領域濃度  
(水理模型: 30潮汐目)

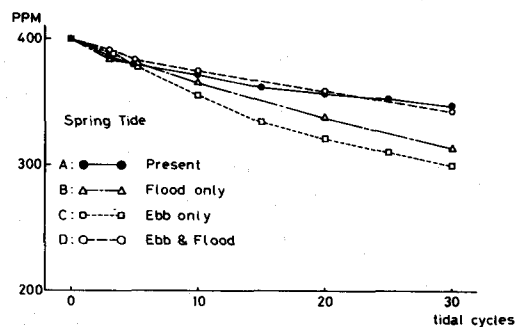


図-7 湾内平均濃度の経時変化  
(水理模型)

法 (Cafe-1, Disper-1)<sup>10)</sup> を用いている。初期濃度は模型実験と同じ、湾内で 4 ppm, 湾外で 0 ppm と設定した。水路開削部での取扱いは, 上潮時には湾外から吸い込んで湾内に流入するという方式を採用した。この際の流入は, 模型実験で得られた値 ( $Q = Q_{\max} \sin \omega t$ ) を正弦的に与えている。また物質輸送に関しては,  $q = \alpha c_i Q$  を与えている。ここに,  $c_i$  は上流側の要素の濃度,  $\alpha$  は 0.3 とおいている。計算結果の 30 潮汐目の濃度コンター図を図-8 に示す。また図-9 には, 湾奥部の平均濃度の経時変化を示す。数値シミュレーションの結果では, 上潮通過と下潮通過の結果にはほとんど差がなく, また上下潮通過の場合は現況より若干交換が良いことを示しているが, 全体的な傾向は実験結果と類似しているものと考えられる。数値シミュレーションによる詳細な検討は, 拡散係数などの諸係数, 水路開削部での物質のやりとりなど更によく検討する必要があるであろう。

##### 5. ボックスモデルによる検討

以上の検討を踏まえて, 海水交換に及ぼす種々の要因の影響を調べるためにボックスモデルによる検討を行った。いま, ボックス  $i$  での  $(n+1)$  潮汐目での濃度  $c_i^{(n+1)}$  を考えると, 物質保存則より

$$c_i^{(n+1)} = c_i^{(n)} + \frac{1}{V_i} \left[ \sum \alpha_{ji} Q_{ji} (c_j^{(n)} - c_i^{(n)}) + \sum q_{ji} \{ \beta_{ji} c_j^{(n)} + (1 - \beta_{ji}) c_i^{(n)} \} \right] \quad (3)$$

とおくことができる。ここに,  $V_i$  はボックス  $i$  の水の容積,  $Q_{ji}$  はボックス  $j$  と  $i$  の間に一潮汐間に往復する振動流成分の交流量,  $q_{ji}$  はボックス  $j$  から  $i$  へ流れる平均流成分の恒流量,  $\alpha_{ji}$  は交流量の交換率,  $\beta_{ji}$  は恒流の上流濃度をとるように 1 または 0 をとる定数である。図-10 に, 各々のボックス容積, 表面積, 現況ケースの交流量, 上潮通過ケースの恒流量を示す。これらの値は, 前述の水理模型実験結果を参考に決めている。なお交換率  $\alpha_{ji}$  は, 海峡部で 0.75, それ以外は 1.0 と仮定している。図-11 に示すのは, 現況ケースについては潮位振幅を, その他のケースについては水路幅 (通過流量) を変えてボックスモデルによる計算を実施した結果の 30 潮汐目での湾奥部 (ボックス 7~10) の平均濃度である。この図から, 交流量 (潮位振幅) の増大は海水交換を促進させるが, 恒流量 (水路幅) の増大もまた, 海水交換に大きな寄与をしていることがわかる。しかし, Case-D の上下潮の場合は水路幅の増大による交換率への寄与はあまり大きくない。

これらのボックスモデルでの結果を用いて, 残余関数, 平均滞留時間, および海峡部を通過する物質の輸送量の検討を行う。図-12 に示すのは, 現況と上潮通過のケースの水理模型実験 (黒丸) とボックスモデル (白丸) での湾奥部の平均濃度の経時変化を示したものである。両者の結果は, ほぼ類似な減衰曲線を示しているものと考えられる。この減衰曲線に式(1)の残余関数をあてはめたものについても図-12 にあわせ示す。

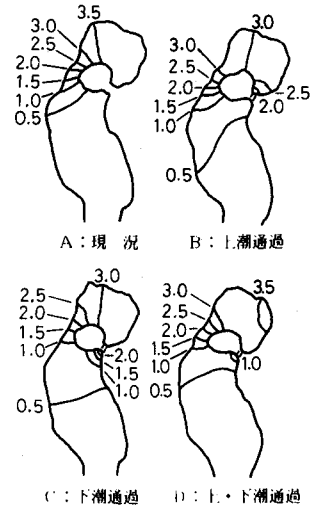


図-8 濃度コンター  
(30 tidal, 数値計算結果)

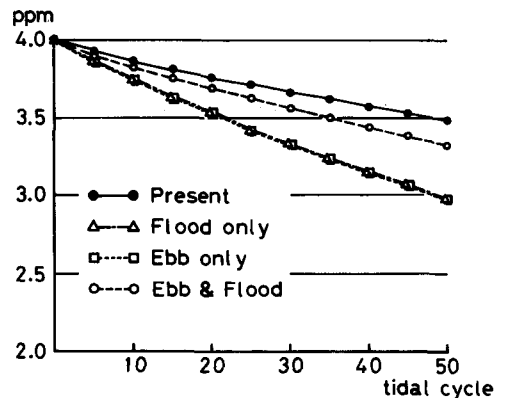


図-9 湾内平均濃度の経時変化  
(数値計算)

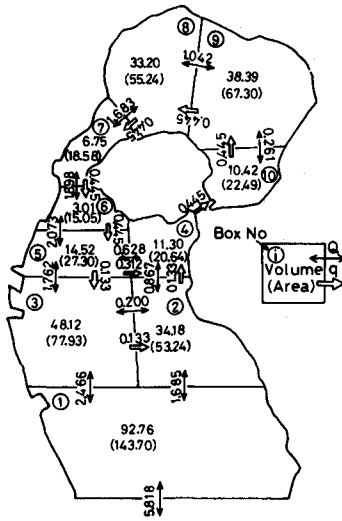


図-10 ボックスモデル  
(容積・面積・流量・恒流量)

Case-A～Case-D に対しての  $\alpha$ ,  $p$  の値については表-1に示す。これらの結果から、現況および上下潮通過のケースには  $p = 0.78 \sim 0.80$  が、また上潮通過および下潮通過の場合には  $p = 0.86$  がよく合っているようである。このように

残余関数の指数  $p$  は、実験ケースによって若干の違いがみられ、交換率が良い場合には比較的大きい値を示している。表-1には、これらの残余関数を式(2)に代入して得られる平均滞留時間についても示す。Case-B, Cの値が82日と、現況ケースの半分以下に減少している。

次に、物質輸送量の概算を行う。いま、流れによって断面を通過する物質の時間的・空間的平均輸送量は、

$$\phi = \overline{(uc)}_A = \overline{u}_A \overline{c}_A + (\overline{u^* c^*})_A + \overline{U_A C_A} + (\overline{U^* C^*})_A + (\overline{u' c'})_A \quad (4)$$

で表される<sup>5)</sup>。ここに、 $\overline{u}$ ,  $\overline{c}$ は時間平均値、 $U$ ,  $C$ は潮汐周期成分、 $u'$ ,  $c'$ は乱れ成分を示し、サフィックスAは断面平均を、\*はそれよりの偏差を示す。いま考えている強制循環流による輸送は $\overline{u_A c_A}$ に相当し、その他の項はすべて $\alpha_{ji} Q_{ji} (c_j - c_i)$ に含まれるものと考えることができる。これに図-12に示した残余関数をあてはめて考える。いま湾奥濃度が3.46 ppmである状態を考えると、現況ケースでは30潮汐目、上潮通過ケースでは15.7潮汐目となる。次の一潮汐後での湾奥の平均濃度から物質の断面通過量を算定すると表-2のようになる。流量による海水交換量はCase-Aの結果であるから1.173 g、恒流量による海水交換は、恒流量に領域7と4の濃度の積から輸送量を見積ると1.121 gとなる。したがって、Case-Bでの交換量による海水交換量は1.255 gとなる。これらの概算結果から、Case-Bの強制循環流による海水交換量は、大潮時の潮汐流による海水交換量にほぼ匹敵することがわかる。

## 6. まとめ

閉鎖水域の水質を改善するために、水路を開削し、そこに水門を設けて一方向の流れのみを通過させて強

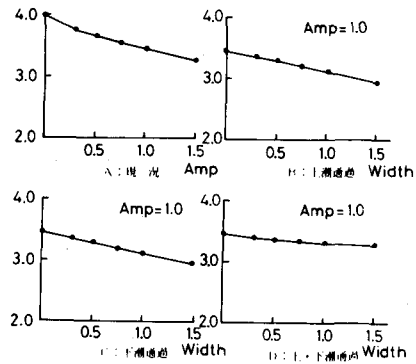


図-11 振幅・水路幅による湾奥濃度の変化  
(ボックスモデル)

表-1 回帰曲線の係数及び平均滞留時間

|        | ケース名  | $\alpha \times 10^3$ | $p$  | $\tau$ (日) |
|--------|-------|----------------------|------|------------|
| Case-A | 現況    | 9.468                | 0.80 | 192        |
| Case-B | 上潮通過  | 13.324               | 0.86 | 82         |
| Case-C | 下潮通過  | 13.361               | 0.86 | 82         |
| Case-D | 上下潮通過 | 13.197               | 0.78 | 149        |

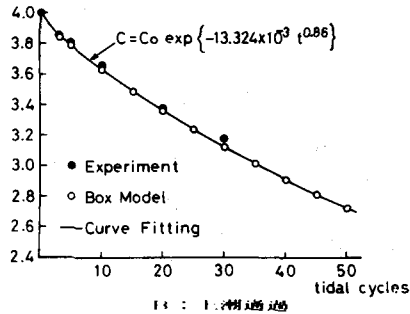
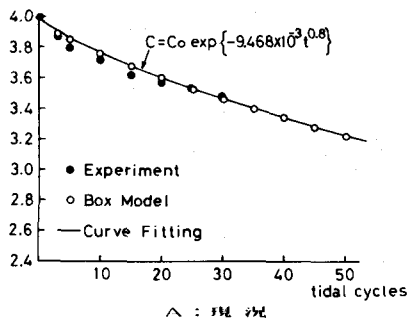


図-12 湾内平均濃度の経時変化と低減曲線 (● 水理模型, ○ ボックスモデル, — 近似曲線)

制循環流を発生させ、海水交換の促進についての検討を行った。ここで明らかになったことを列記すると、

- ①. 閉鎖水域に水路を開削するだけでは、湾奥部全体への海水交換への寄与はあまり大きくならない。
  - ②. 水門などによる強制循環流の発生は、湾奥部全体の海水交換を大きく促進させる。
  - ③. ボックスモデルによる計算例によると、強制循環流による海水交換量は潮汐流による海水交換量にほぼ匹敵し、また恒流量の増大は海水交換を大きく促進する。
- なお、ここでの検討は鹿児島湾というある特殊な例について検討したにすぎないが、今後は、他の海域および小規模な港湾域についても検討し、より一般的な海水交換機を解明していく所存である。

#### 参考文献

- 1). 運輸省第五港湾建設局、昭和50年度伊勢湾環境対策調査報告書、伊勢湾水理模型実験場報告、№9、263 p. 1976.
- 2). 鹿児島湾調査報告、水産庁調査部、183 p., 1975.
- 3). 樋口・武岡・北川：松山港における潮流の水理模型実験、京大防災研年報、第20号B-2、pp. 541~551, 1977.
- 4). 中野・岩上・溝内・入尾野：名瀬港における潮流実験、第29回海講論文集、pp. 629~632, 1982.
- 5). 宇野木早苗：海水交換とその素過程について、沿岸海洋研究ノート、第17巻2号、pp. 89~98, 1980.
- 6). Parker, D. S. et al. : Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, 98, № SA2, pp. 305~323, 1972.
- 7). 武岡英隆：海水交換と物質輸送の概念について、愛媛大学紀要、第Ⅲ部、第9巻4号、pp. 287~298, 1981.
- 8). Imasato, N. et al. : Tidal exchange through Naruto, Akashi and Kitan Straits, Journal of the Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 36, pp. 151~162, 1980.
- 9). 堀江・村上・亀山・入尾野：東京湾の海水交換に関する水理模型実験、港研報告、第16巻3号、pp. 69~99, 1977.
- 10). 村上・森川：有限要素法による二層の潮流及び拡散計算、港研資料、№495、45 p. 1984.

表-2 海峡部での質量輸送量

|                             | Case : A          | Case : B            |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| ケース名                        | 現 況               | 上 潮 通 過             |
| $c^{(n)}$ (ppm)             | $c_{30} = 3.4640$ | $c_{15.7} = 3.4640$ |
| $c^{(n+1)}$ (ppm)           | $c_{31} = 3.4508$ | $c_{16.7} = 3.4372$ |
| $c^{(n)} - c^{(n+1)}$ (ppm) | 0.0132            | 0.0268              |
| 湾内部の容積 ( $m^3$ )            | 88.76             | 88.76               |
| 質量輸送量 ( $g$ )               | 1.173             | 2.376               |
| 恒流量 ( $m^3$ )               | 0.0               | 0.455               |
| $c_7$ (ppm)                 | 2.35              | 2.95                |
| $c_4$ (ppm)                 | 0.34              | 0.43                |
| 移流項 ( $g$ )                 | 0.0               | 1.121               |
| 拡散項 ( $g$ )                 | 1.173             | 1.255               |