

潮汐残差流が内湾の海水交換に及ぼす影響

EFFECT OF TIDAL RESIDUAL CURRENT ON WATER EXCHANGE

朝位孝二¹・山崎宗広²・宮脇周作³・羽田野袈裟義⁴

Koji ASAI, Munehiro YAMASAKI, Syusaku MIYAWAKI and Kesayoshi HADANO

¹正会員 博(工) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 通産省中国工業技術研究所主任研究官 海洋制御研究室
(〒737-0197 広島県呉市広末広2-2-2)

³学生会員 山口大学大学院 社会建設工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

Semi-closed bays suffer from water quality pollution frequently since ability of water exchange in semi-closed bays is poor. Many researchers and engineers have proposed the methods to improve water exchange in semi-closed sea. One of the easy methods for improving water exchange is to make a width of bay mouth narrow. According to the study of Murakami et al., the water exchange was improved by using the narrow bay mouth if the tidal amplitude was the same. In this study, the bay mouth shape in the model bay has been changed to improve the water exchange. The effects of the tidal residual currents on the property of water exchange have been studied.

The ability of the water exchange in semi-closed bay become better as the tidal residual current energy increases when the scale of the tidal residual circulation is small. On the other hand, the ability of the water exchange become worse as the tidal energy increases if the scale of tidal circulation is large.

Key Words : semi-closed bay, tidal current, water exchange, tidal residual circulation

1. はじめに

内湾などの閉鎖性水域では外海との海水交換が悪く停滞性水域となる場合が多い。さらに富栄養化している場合は貧酸素水塊の発生、赤潮・青潮の発生など水質汚濁が進行しやすい。水質保全のため外海との海水交換を活性化し停滞域を解消する工法が種々提案されている。例えば中村ら¹⁾の導流堤による潮汐流制御、山崎ら²⁾の湾口部深みの埋め込み操作、大谷ら³⁾の湾口にピアを設置する方法、小松ら⁴⁾の流向によって抵抗係数が異なる粗度の海底面設置などがあげられる。

山崎ら、大谷らの方法は湾口で発生する湾口渦を強化し、その結果潮汐残差流を強化するものである。湾口渦を強化する工法で最も単純な工法の一つに湾口幅を狭くすることが考えられる。村上ら⁵⁾は均一流体による模型実験より同じ潮位振幅であれば狭い湾口幅のほうが海水交換には有利であることを指摘している。

小松らの方法以外は湾口部の形状を変化させることで潮汐流を制御するものである。湾口は潮汐流の流速

が大きく、内湾の潮流の様相を支配する場所であるといえる。したがって湾口形状を適切なものにすれば、海水交換の促進が期待できる。

本研究は矩形型モデル湾において湾口での導流堤の設置、湾口幅を変化させその結果生じる潮汐残差流が海水交換特性に及ぼす影響について検討したものである。

2. 導流堤による流れ制御の模型実験

(1) 模型実験の概要

導流堤は水はね効果により直接流れを制御できるので潮汐残差流に顕著な影響を与えやすい。そこで導流堤による潮汐残差流の制御効果を検討する模型実験を行った。模型実験に用いた湾は図-1に示すような湾口が左右対称に2カ所ある矩形湾である。これは明石海峡と紀淡海峡が湾口となっている大阪湾を念頭においたものである。

大阪湾の洲本—大阪方向の長さが約50km, 明石海峡

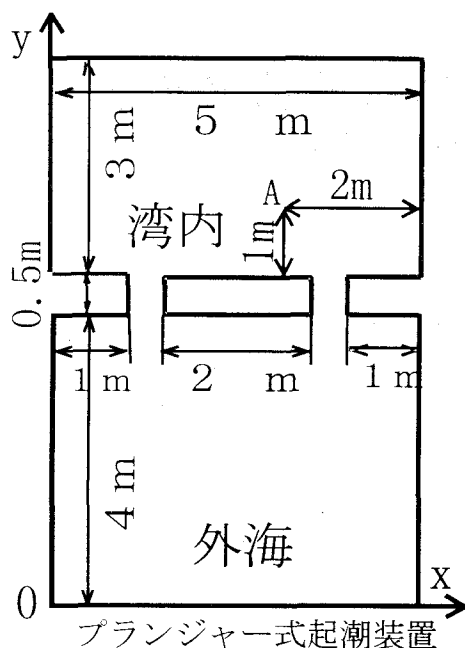


図-1 モデル湾形状

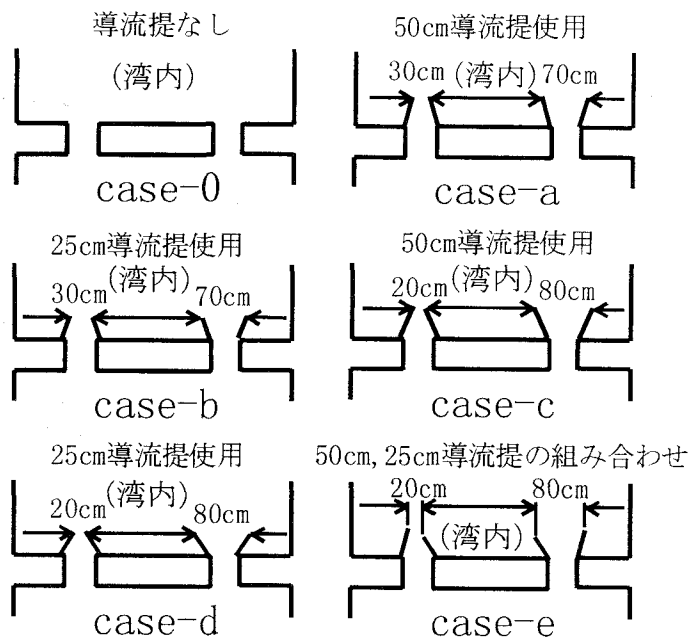
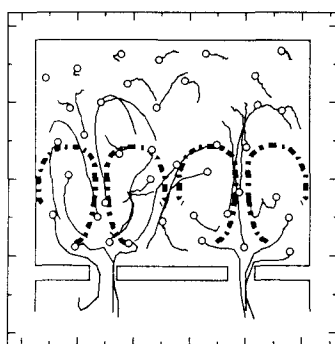
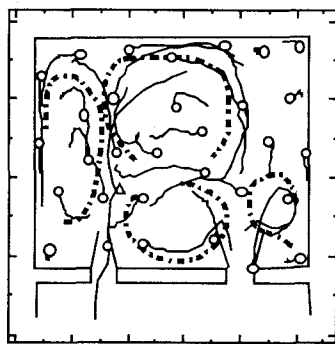


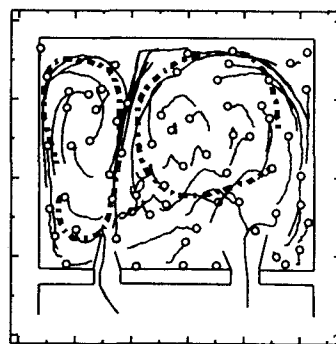
図-2 湾口形状



(a) case-0



(b) case-c



(c) case-e

図-3 浮標ボールの軌跡

一関空方向の長さが約40kmで縦横比が約1.3程度である。これを参考にまた後述の浮標ボール固定装置の大きさの都合から模型内湾の規模を奥行き3m、幅5mとした。湾口幅はそれぞれ0.5mである。水深は内湾、外海とも0.14mに設定した。導流堤が湾口幅に対して相対的に小さい場合は単なる粗度になってしまうため、導流堤の長さは湾口幅とコンパラブルな大きさとして50cm、25cmとした。導流堤は左側湾口から右側湾口に向かう潮汐残差流が発生することを期待して図-2に示す6通りの湾口形状を採用した。case-a～eはいずれも導流堤を「ハの字」（および逆の「ハの字」）に設置し、流れの縮流と拡大流を利用したものである。

プランジャー式起潮装置により振幅6mm、周期180秒の潮汐を発生させた。360個の浮標ボール（直径3.5cm、比重0.92）を湾内に20cm間隔で均一に配置し、クレーンでつり下げられたボール固定装置によりボールを一

時的に固定した。潮汐を発生させ流れが安定した段階でクレーンを引き上げ浮標ボールの拘束を解除し、ボールの挙動をビデオ撮影した。10潮汐間測定を行い、浮標ボールの挙動から潮流場の様相と残留率を求めた。なお、測定は干潮時から始めた。

(2) 模型実験の結果

図-3は3周期の始めから一潮汐間の浮標ボールの挙動を示した流跡図である。図中の○印はボールの始点を表している。また図中の点線は流れを模式的に示したものである。

case-0では湾口近傍に対となった循環的な流れが見受けられる。湾奥では浮標ボールの動きは小さく循環的な流れは湾全体には広がっていない。case-cの場合は湾奥に右回りの循環的な流れ、導流堤の間に左回りの循環的な流れが存在する。case-eでは湾中央部に右

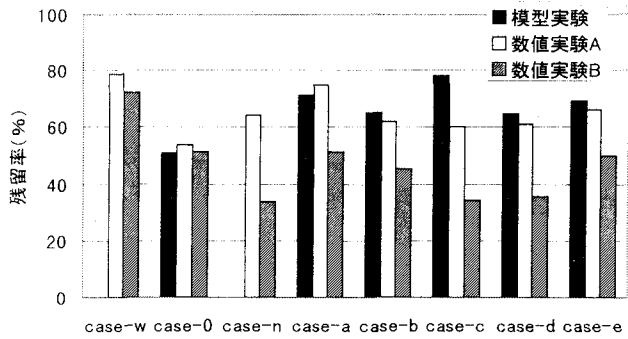


図-4 残留率

回りの流れが存在する。いずれも導流堤の効果により湾内の流動が活性化されたことが分かる。

図-4に各実験ケースの10潮汐後の残留率を示す。図中の黒い凡例が実験結果である。case-0ではおよそ50%の残留率であるが、他のケースでは残留率が60～80%となり、導流堤の設置は内湾水の流動は活性化させるが海水交換の促進にはつながらなかった。

3. 数値実験

(1) 数値実験の概要

計測装置の不足から潮流場の流速など詳細なデータが得られなかったので数値実験でデータを補強することにした。数値実験においても水深、内湾・外海形状は模型実験と同様である。数値実験では図-2に示す湾口形状に加えて、導流堤を設置せず湾口幅を70cm、30cmに設定した場合も行った。それぞれをcase-wおよびcase-nとする。

平面2次元浅水方程式を有限体積法で離散化し数値計算を行った。海底摩擦係数は0.0026、動粘性係数は分子動粘性係数とし0.01cm²/secを与えた。計算格子間隔は縦方向、横方向とも0.1mとした。湾内に2cm間隔で37500個のマーカーを配置し、ラグランジュ的にそれを追跡し残留率を求めた。なお、模型実験の再現計算を数値実験Aと名付ける。

計算の再現性の確認としてcase-0において図-1中のA点における潮位振幅の一周期の変動と比較する。その結果を図-5に示す。外海の境界で振幅6mmの余弦波を与えているが湾内では多少変調されて最大振幅が6.34mmとなり位相が多少ずれる。計算値の最大振幅は6.28mmであった。位相のずれは実験値ほどではないがほぼ再現していると思われる。

数値実験Aでは模型湾で生じている現象の再現を試みたものであるが、模型湾を実際の湾規模にスケールアップした場合の計算も行った。これを数値実験Bと名付ける。水平スケールを模型の5000倍とした。すなわち湾の幅が25km、湾の奥行きが15kmとなる。大阪湾と

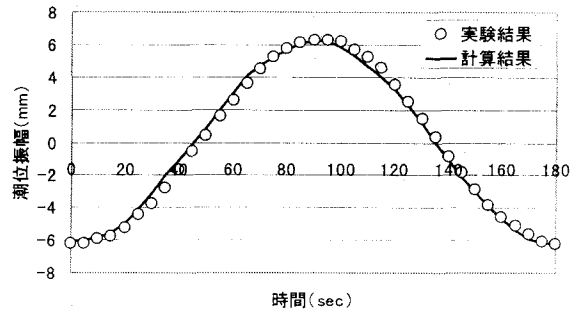


図-5 潮位振幅

表-1 模型スケール湾と実スケール湾の比較

	模型湾	実物大	縮尺
水深	0.14m	30m	1/214
内湾幅	5m	25km	1/5000
内湾奥行	3m	15km	1/5000
潮位振幅	6mm	1m	1/167
周期	180sec	12h	1/240
湾口最大流速	2.5cm/s	39.5cm/s	1/16
フルード数	0.02	0.023	
レイノルズ数	3500	0.237	

比較し半分程度の大きさの湾である。水深は30m、渦動粘性係数を50m²/sec、海底摩擦係数は0.0026、計算格子間隔は500mとした。動粘性係数、海底摩擦係数とも沿岸海域のシミュレーションで比較的良好に用いられる値を採用した。潮汐の条件は振幅1m、周期12時間である。なお、コリオリ力は考慮していない。

(2) 模型スケール湾と実物大スケール湾の相似性

数値実験A、Bともに次元量で計算しているため、両者の力学的相似の関係が明確ではない。そこで表-1に両者の長さスケール、時間スケールの比較と湾口におけるフルード数、レイノルズ数を示す。フルード数、レイノルズ数の代表流速および代表長さは湾口における断面平均最大流速、平均水深を用いた。また実物大スケール湾におけるレイノルズ数は動粘性係数を用いて評価した。流速はcase-0について計算した結果を用いた。

両者ともフルード数がおおよそ0.02であるがレイノルズ数が大きく異なる。このことが次節で見られるように流れの様相に大きな違いを与える原因となっている。

(3) 潮汐残差流の様相

図-6は数値計算による潮汐残差流の流線を示したものである。浮標ボールの一潮汐間の軌跡は残差流に沿っている訳ではないが、流動の様相の比較検討は可能と思われる。図-6のcase-0では潮汐残差環流が湾内全体に広がっている。環流の大きさが実験とは異なるが特徴的な4個の環流が見られる。case-cで湾中央部に

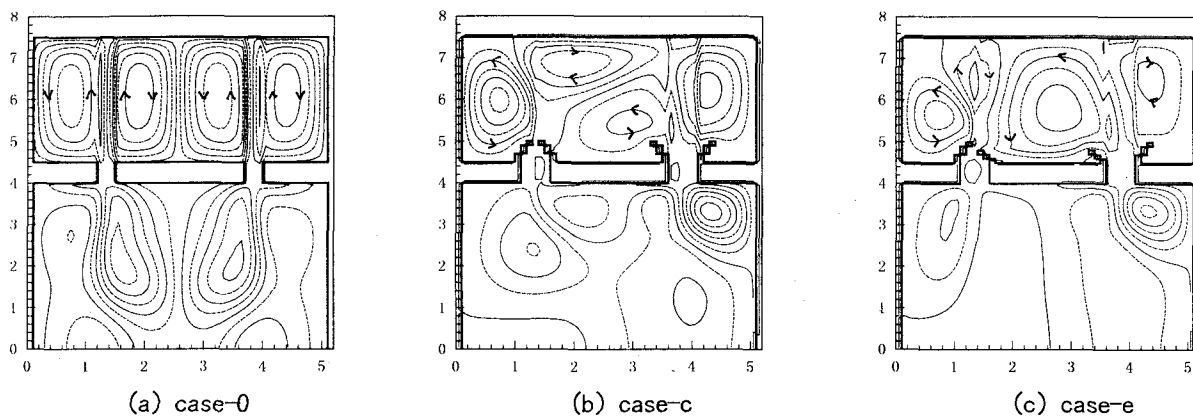


図-6 潮汐残差流の流線（数値実験A）

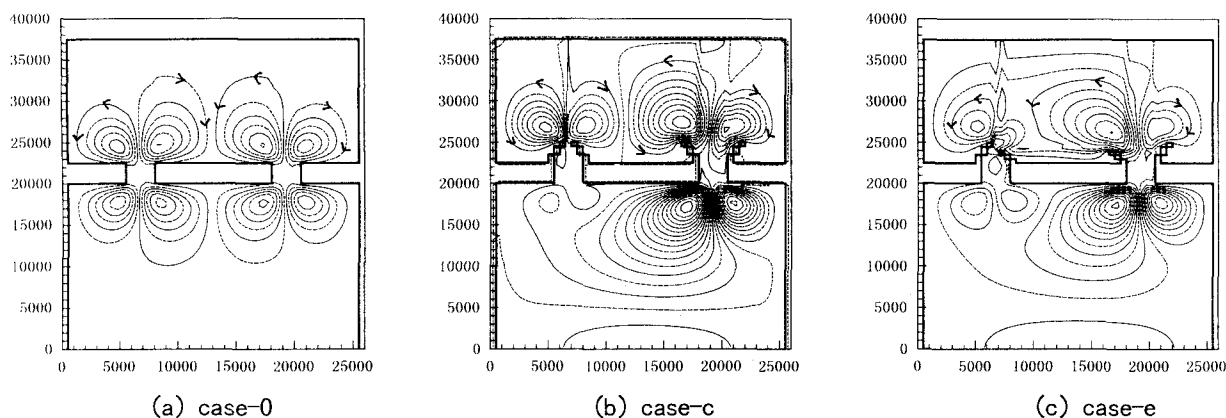


図-7 潮汐残差流の流線（数値実験B）

において、湾奥部と湾口側にそれぞれ右回り残差環流、左回り残差環流が見られる。定性的には実験結果と同様である。case-eでは湾中央部に左回りの大きな残差環流が発生している。case-cに見られる湾中央部湾口側の左回り環流の規模が大きくなったようである。いずれのケースも導流堤の効果により残差環流が互いに干渉しあい、複雑な様相を形成することが分かる。

図-7は実スケールの湾に対する計算結果である。いずれのケースも残差環流の規模は小さい。環流が干渉しあうほどの規模を持っていないため特にcase-c、eでは模型実験、数値実験Aと異なる様相を示している。

数値実験AとBでは湾口におけるレイノルズ数が大きく異なる。模型スケール湾では慣性項が大きく湾奥まで運動量が到達するが実スケール湾では運動量が拡散し湾奥まで到達しないため、残差流に大きな相違が生じた。

(4) 残留率

数値実験Aについては10潮汐後の残留率を、数値実験Bについては100潮汐後の残留率を図-4に示している。いずれもcase-0の残留率がほぼ50%の値となる周期である。

数値実験Aでは模型実験と同様、case-a～eがcase-0

よりも残留率が大きくなった。またcase-w、nはcase-0よりも海水交換が悪くなる結果を得た。一方、数値実験Bでは導流堤の効果によって残留率が小さくなることが示された。さらに湾口幅が小さくなるにつれ単調に残留率が減少する。

模型実験と数値実験Aにおける流動の詳細な比較はできていないが、少なくともcase-0で最も残留率が低くなる傾向は再現できているので、次章では数値実験の結果を中心に海水交換特性について議論を進める。

4. 潮汐残差流と海水交換特性

(1) 潮汐残差環流の強度と規模を表す指標

図-7に示すように模型スケール湾と実スケール湾では残差流のパターンが異なる。このことが海水交換特性に大きな影響を及ぼしていると想像される。そこで以下に示す湾内の流動の強さを表す指標を導入し、それと残留率の関係を考察する。

湾内の流動の強さを表す指標として次式のようなパラメータを用いる。

$$E_R = \int_A (u_R^2 + v_R^2) dA / A \quad (1)$$

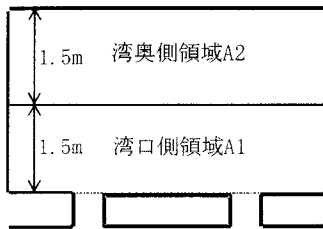


図-8 湾の分割

$$\Gamma_R = \int_A \left| \frac{\partial v_R}{\partial x} - \frac{\partial u_R}{\partial y} \right| dA / A \quad (2)$$

ここで u_R は潮汐残差流の湾幅方向成分, v_R は潮汐残差流の湾の奥行き方向成分, A は内湾の面積, E_R は内湾の平均潮汐残差流エネルギー, x は湾幅方向座標, y は湾の奥行き方向座標, Γ_R は内湾の平均渦度である。

上記二つのパラメータは流動の強度と渦の強度を代表するものである。この他に残差環流の規模を表す指標として次に示すパラメータを採用する。

$$R = E_{R2} / E_{R1} \quad (3)$$

ここで

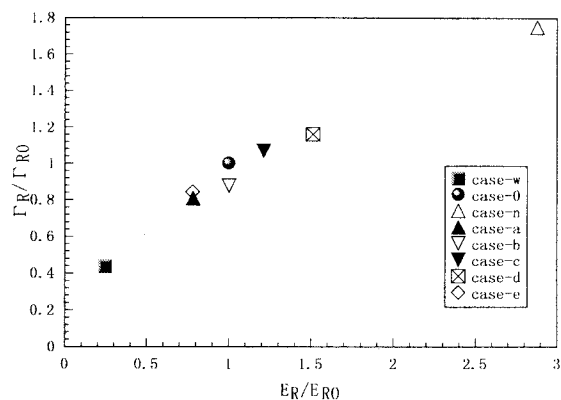
$$E_{R1} = \int_{A1} (u_R^2 + v_R^2) dA / A1$$

$$E_{R2} = \int_{A2} (u_R^2 + v_R^2) dA / A2$$

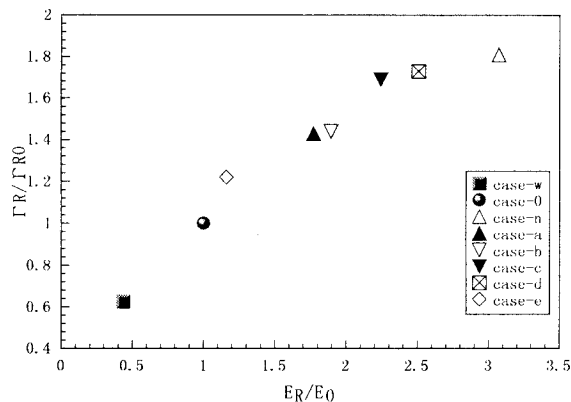
図-7から実スケール湾の残差環流は内湾奥行きの半分程度のスケールを持つようなので便宜的に図-8に示すように内湾を上下対称に分割する。A1 は湾口側の領域の面積であり, A2 は湾奥側の面積である。 E_{R1} は湾口側領域の平均潮汐残差流エネルギー, E_{R2} は湾奥側領域の平均潮汐残差流エネルギーである。 R は湾口側と湾奥側の平均残差流の比である。湾口側に残差環流が集中している場合, R は1よりも小さな値をとる。残差環流が湾内に満遍なく広がっている場合は1近傍の値をとる。

(3) 潮汐残差流エネルギー, 残差環流規模と残留率

図-9は平均残差流エネルギーと平均渦度の関係を示している。縦軸はcase-0の値 (Γ_{R0}) で規格化した平均渦度, 横軸はcase-0の値 (E_{R0}) で規格化した平均潮汐残差流エネルギーである。図-9(a) は模型湾に対する計算結果, 図-9(b) は実スケール湾に対する計算結果である。村上ら⁵⁾の実験結果と同様, 渦度と残差流エネルギーは比例の関係があることが確認できる。

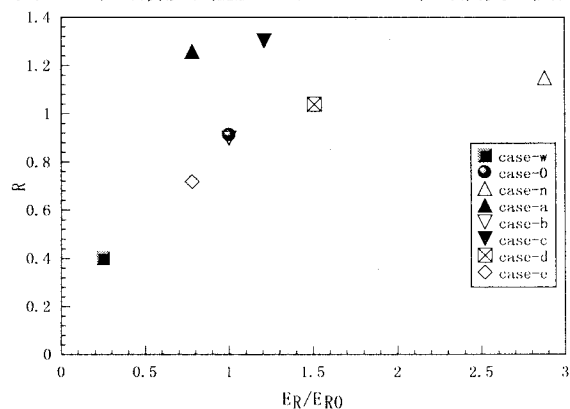


(a) 模型スケール湾

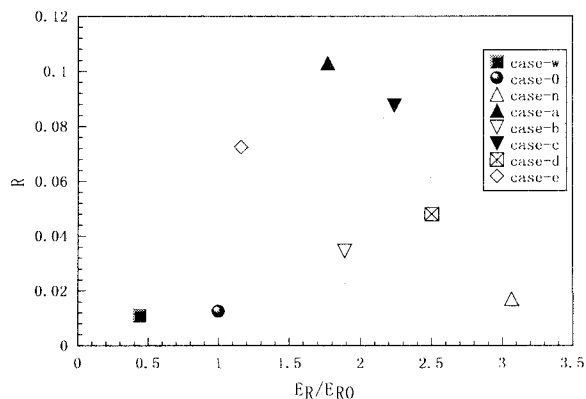


(b) 実スケール湾

図-9 平均潮汐残差流エネルギーと平均渦度の関係

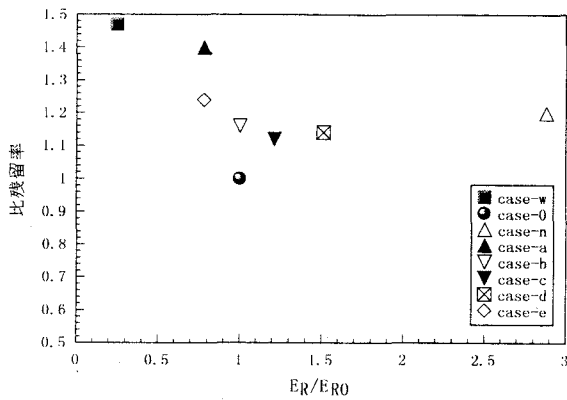


(a) 模型スケール湾

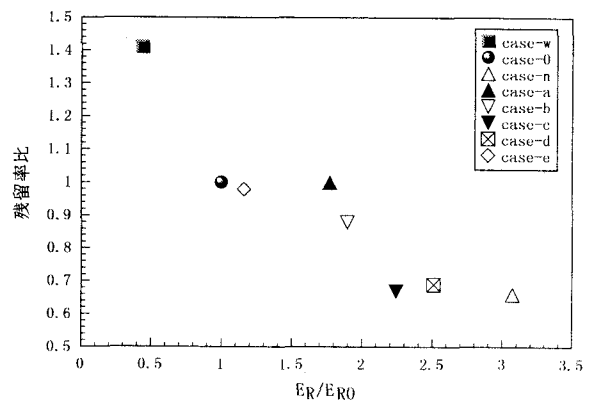


(b) 実スケール湾

図-10 平均潮汐残差流エネルギーとRの関係



(a) 模型スケール湾



(b) 実スケール湾

図-11 平均潮汐残差流エネルギーと残留率比の関係

模型スケール湾ではcase-a, b, eのように導流堤の設置によって潮汐残差流エネルギーや平均渦度が低下する場合がある。一方実スケール湾では、導流堤は潮汐残差流エネルギーおよび平均渦度を増加させる。

平均残差流エネルギーと R の関係を図-10に示す。図-10 (a), (b) とともにcase-a, cで R が大きくなる。これらのケースでは長い導流堤を使用しており、湾奥まで運動量を運ぶ効果が比較的高いため R が大きくなったものと思われる。

図-11に平均残差流エネルギーと残留率比の関係を示す。模型湾については図-4ですで見たとようにcase-0が最も残留率が小さい。case-w, a, b, eは残差流エネルギー（または平均渦度）がcase-0よりも小さくなることから残留率は高くなったと解釈できる。case-c, d, nではcase-0の残差流エネルギーや平均渦度よりも大きいにも関わらず残留率比が1.1程度である。これらのケースでは R が1を越えている。残差環流が湾内全域に達する場合は内湾の流動が活性化されるだけで海水交換には効率的ではなくなる。

実スケール湾では残差流エネルギーの増加とともに残留率が単調に減少している。 R はcase-aにおける0.1程度が最大値であり全てのケースにおいて残差エネルギーは湾口部側に集中している。つまり残差環流の規模は大きくない。このような場合は、潮汐残差流エネルギーや平均渦度に比例して海水交換は促進される。

5. おわりに

初めに導流堤による海水交換特性を模型実験で検討した。次いで数値実験により、潮汐残差環流の強度と規模を表すパラメータを導入して湾口形状と海水交換特性を検討した。その結果をまとめると以下になる。

- 1) 残差環流の規模が小さい場合は、残留率は残差流エネルギーに依存する。したがって、導流堤の設置や湾口幅を狭くすることは海水交換促進につながる。
- 2) 残差環流の規模が大きくなり湾奥にも強い循環流が広がれば、残差エネルギーを増加させても海水交換能力は改善されない。
- 3) 残差環流が内湾一杯に広がっていない場合は図-11のcase-cのように長い導流堤を用いれば湾奥の流動も活性化し海水交換にも有効である。

実際の湾には風吹流や密度流などバロトロピック以外のモードが存在する。今後はこれらの影響を考慮して研究を進めていく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり当時4年生の萱島嘉郎君の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村充：改訂水産土木学，工業時事通信社，pp. 347-354，1991。
- 2) 山崎宗広，宝田盛康，上嶋英機，朝位孝二：湾口部地形変化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. 1026-1030，1998。
- 3) 大谷英夫，上野成三，高山百合子，勝井秀博：湾口渦強化による閉鎖性海域の循環流の増大方法に関する研究，ながれ，16，pp. 490-499。
- 4) 小松利光，矢野真一郎，鞠承淇，小橋乃子：方向性を持つ底面粗度を用了潮汐残差流の創造と制御，水工学論文集，第41巻，pp. 323-328，1997。
- 5) 村上和男，菅沼史典，宮崎啓司，山田邦明，清水勝義：潮汐エネルギーを利用した海水交換促進に関する水理模型実験，水工学論文集，第37巻，pp. 411-418，1993。

(2000. 10. 2受付)