

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

Hydraulic model experiment on water exchange enhancement
by using tidal energy

村上和男*・菅沼史典**・宮崎啓司***・山田邦明****・清水勝義*****

By Kazuo MURAKAMI, Fuminori SUGANUMA, Keiji MIYAZAKI,

Kuniaki YAMADA and Katsuyoshi SHIMIZU

Water exchange is an important behavior to maintain water quality in enclosed coastal seas. Breakwaters located at the bay entrance have a role to protect the area from natural disaster such as tsunami waves or storm surges. However, water quality deterioration is worried about due to the decreasing of the entrance cross-sectional area.

In the paper, the authors investigate the technique of water exchange enhancement by the layout of the breakwaters and study the mechanism of water exchange. It concludes that the water exchange is promoted by the horizontal circulation which is caused by vorticity generated at the entrance of the bay

Keywords: water exchange, hydraulic model experiment,
horizontal circulation, tidal residual flow

1. はじめに

最近の地球環境問題の高まりから、より質の高い生活環境が望まれている。またウォーターフロント開発において水辺の水質環境の保全是、市民が海域を水に親しむ空間として利用する際には重要な要因となる。

閉鎖域の水質は汚染されていることが多い。海域内の静穏度を保つために防波堤や離岸堤のような構造物が建設される。このような構造物により海域は閉鎖域となり、海水交換が阻害されて水質が悪化することが懸念される。このような閉鎖域の海水交換を促進する手段として、潮の干満に基づく潮汐エネルギーを利用して閉鎖域内に流れを発生させる潮流制御構造物による方法が有効である。潮汐のような自然エネルギーを利用した場合には、現在問題となっている温室効果ガスの排出も無く海水が浄化できることから、非常に期待される工法である。

本研究では、上に述べたような観点から、防波堤の配置・形状を変化させることによって、閉鎖域の海水交換に与える影響を検討するとともに、閉鎖域内の流れ、潮汐残差流の発生要因、更に海水交換のメカニズムについて検討した。このようにして、自然エネルギーを利用した海水交換促進システムを構築することに

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海域環境研究室長
(〒236 横須賀市長瀬3-1-1)

** 正会員 工修 前運輸省港湾技術研究所 海洋水理部主任研究官(現第一港湾建設局)

*** 前運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海域環境研究室(現第四港湾建設局)

**** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海域環境研究室

***** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部主任研究官

より、沿岸域の高度利用における快適な水辺空間の創造のための手だてとなりうる。

2. 水理模型実験

2. 1 模型実験の考え方

閉鎖域の海水交換現象は、潮流の乱れによる乱流拡散、潮汐残差流等による水平循環流、および密度流や吹送流による鉛直循環流等の流れが関与し複雑である。防波堤等による閉鎖域の海水交換に及ぼす影響は、防波堤背後に形成される水平循環流による海水交換を促進させる効果をもつ反面、湾口部の断面積を減少させるために鉛直循環流による交換が阻害されて、海水交換が悪くなる場合もあることが指摘されている（Murakami, 1992）。しかし湾口部に設置された防波堤は、津波や高潮の波高を減少させる働きをもち、防災上の観点からはなくてはならない重要な施設である。したがって、湾口部に防波堤を設置せざるをえないという状況を踏まえて、それらの構造物をいかに配置すると湾内の海水交換が悪くならないか、あるいは促進されるかについての検討を行った。

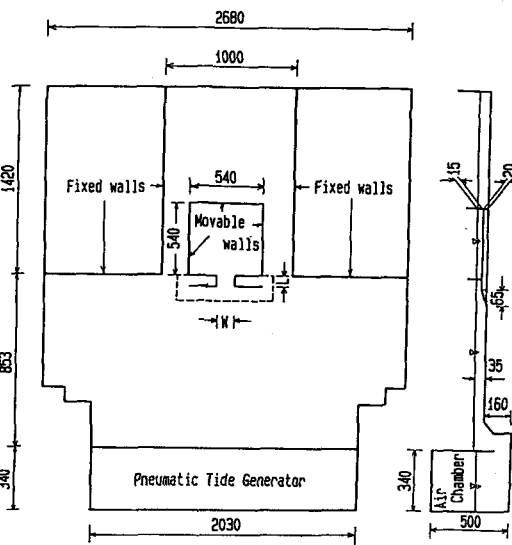


図-1に、本研究で用いた水理模型の概要を示す。簡単な矩形湾による実験を実施した。平面水槽内に5.4m × 5.4m × 0.15mの矩形の閉鎖域を設け、表-1に示す実験条件について、それぞれ潮流、潮汐残差流、および染料とフロートの残存率を求める実験を実施した。

表-1 実験条件

	Scale	Proto T.	Model
Horizontal Length	1/700	3.78km	5.4m
Vertical Length	1/100	15m	15cm
Time Scale	1/70	12h28m	640s
Width of Entrance	1/700	630m	90cm
Length of Entrance	1/700	630m	90cm
Tidal Amplitude	1/100	1.0m	1.0cm

図-1 模型の概要

表-2 実験ケースと潮汐残差流エネルギー(E_R)、循環(L_R)、及び平均滞留時間(τ_R)

	No. of Entrance	Shape of entrance		Amp. (cm)	E_R	L_R	τ_R
		Width(W)	Length(L)				
Run-1	1 center	90 cm	0	0.5	37	1.7	38.6
				1.0	477	214	11.9
				3.0	2132	4735	4.1
Run-2	1 center	180	0	0.5	94	*	165
				1.0	102	*	62
				3.0	1187	1267	10.6
Run-3	1 center	90	180	0.5	24	1.0	340
				1.0	126	19.2	36.7
				3.0	1305	1633	3.6
Run-4	1 right end	90	0	0.5	46	2.8	66.6
				1.0	332	158	14.9
				3.0	2210	6806	3.2
Run-5	2 both sides	45x2	0	0.5	32	2.4	23.1
				1.0	315	126	27.7
				3.0	1460	2288	3.2
Run-6	2 both sides	45x2	0 with jetty	0.5	27.7	1.2	47.4
				1.0	185	49	10.3
				3.0	420	185	5.0

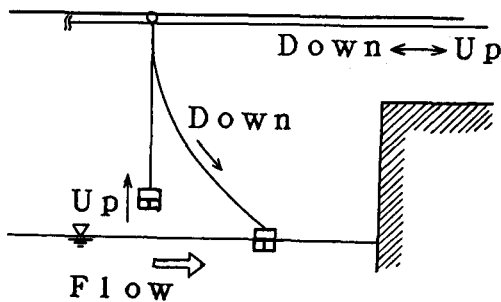


図-2 フロートによる流速測定の方法

湾口部の防波堤の配置・形状と海水交換率との関連を把握するために、表-2に示す実験ケースを実施した。表-2において、 W 、 L 、 S はそれぞれ図-1に示すように湾口幅、湾口長および湾内の面積である。実験は、湾口幅、湾口長、湾口の位置と形状を変化させて、それぞれ3つの潮位振幅についての実験を実施した。

2.2 潮流実験

潮流・拡散の実験は縮尺模型で行われることが多い。本模型も水平縮尺1/700、鉛直縮尺1/100を想定している。このような場合、閉鎖域内の流速は非常に小さくなる。微流速でかつ平面的な流速測定を行う場合、フロートによる写真撮影が一般的に用いられている。フロートによる流速測定は、広い平面水槽内において多点の同時測定が可能であるという利点をもつが、ラグランジェ流の測定になるので、フロートの流れている位置での測定しか行えないという欠点をもつ。したがって、同一地点での流速の経時変化を求めるような場合には困難を伴う。このことは、他の実験ケースとの流速値の比較を行う場合には適さないことを意味する。このような欠点を補う意味で図-2に示すようにフロートに糸を付け、このフロートのある特定点に投入し、あるインターバルでそのフロートを回収して、再び同じ地点から投入するという方法を探った。この方法は、フロート投入時および回収時に水面を乱すという欠点はあるが、常に同一地点での測定が可能であり、かつ模型内全体で測定が行えるという長所を持つ。

2.3 海水交換実験

湾内水と外海水の交換率を求めるために、湾内でのフロートあるいは染料の残存率から平均滞留時間 (Takeoka, 1984) を求めた。湾内水のトレーサーとして、染料による方法とフロートによる方法がある。染料の場合、初期状態として湾内水と外海水とを遮へい板によってわけ、湾内水に染料を混合させて均一濃度に設定し、その染料濃度の低減曲線から湾内水の平均滞留時間を求めた。したがって、初期条件として湾内の水塊が静止している状態からの実験である。これに対してフロートをトレーサーにした場合、模型内の潮汐運動を安定させてから実験を開始できるという利点を持つ。しかし、模型内の流れは三次元構造をもっているために、表層において収束・集散が生じ、フロートの集積・発散が生じてしまう。したがって、フロートによる水塊の代表性 (フロートの数による海水交換率の算定) には問題点がある。したがって、本実験においては、染料をトレーサーとした海水交換実験を実施した。

3. 実験結果の検討

表-2に示した実験ケースに対してフロートによる潮流実験を実施した。矩形湾の最奥部で測定した水位変化の結果をみると、どのケースについてもほとんど同じであり、湾口部の形状による湾内の潮位変動に及ぼす影響は非常に小さいものと考えられる。このことは、干潮時から満潮時までの半周期間に湾外から湾内に流入する水塊の容積は、湾口の形状にはほとんど影響されないことを意味している。したがって、湾口部での潮流の断面平均流速は湾口断面積に逆比例することになる。

潮流実験結果からの一周期間の平均値としての潮汐残差流、および海水交換実験からの湾内の染料濃度の低減曲線の結果を図-3～図-8に示す。図-3 (Run-1) は、 $W=90\text{cm}$ 、 $L=0\text{cm}$ 、図-4 (Run-2) は、 $W=180\text{cm}$ 、 $L=0\text{cm}$ の場合である。湾口幅が広い湾口における流速が小さく、したがって防波堤背後に形成される循環流が小さくなるので、海水交換量も小さくなっている。この結果は、防波堤による水平循環流に基づ

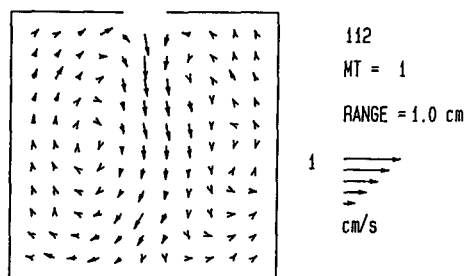
く海水交換の促進効果と考えることができる。

次に図-5 (Run-3)の結果について検討する。図-5のケースは $W=90\text{cm}$, $L=180\text{cm}$ の場合である。湾口幅が図-3の場合と同じであり、湾口断面での平均流速は同じであるが、潮汐残差流にみられる水平循環流は小さく、したがって海水交換量も小さい結果となっている。これは、湾口長 $L=90\text{cm}$ のために、流入時に流れが整流されて、湾口部で形成される渦度が小さかったためと思われる。

次に、開口部の位置についての検討を行う。Run-1~3のシリーズの実験は開口部が湾口の中心にあった場合についてであったが、その位置を片側に寄せた場合についての結果を図-6 (Run-4)に示す。 $W=90\text{cm}$, $L=0\text{cm}$ はRun-1の場合と同様である。Run-1の場合は左右にそれぞれ循環流が形成されたのに対し、Run-4の場合は1つの大きな循環流が形成されている。Run-1に比べて若干海水交換率が低いのは、開口部が片側に寄ったことにより、閉鎖域の開口部からの距離が遠くなったためと思われる。しかし潮位振幅が大きくて、水平循環流の大きさが湾内全体に及ぶようになれば、海水交換量の大きさは開口部の位置には依らないようである。

次に、開口部の断面積を半分にして、2つの開口部を設けた場合である。その結果を図-7 (Run-5)に示す。この場合は湾内の循環流が複雑になってくる。Run-5の場合、海水交換の促進はあまり期待できない。これは、開口部の位置が湾内の形状の対称形に位置しており、湾中央部に流れが左右の開口部からの循環流の衝突によりエネルギーを相殺したものと考えられる。

これまでの実験ケースは、各開口部からの流入量と流出量は同一の場合である。そこで、海水交換の促進効果を持つ一方向流を湾内に発生させるために、図-8 (Run-6)に示すような湾口形状についての実験を実施した。この場合、上げ潮時には右側の開口部は流入しやすいが、左側は流入しにくい形状となっている。また、下げ潮時はその逆の特性となっているので、一潮汐間の平均をとると、右側の開口部から流入して左側



$$E_R = 213.81 \text{ (cm/s)}^2$$

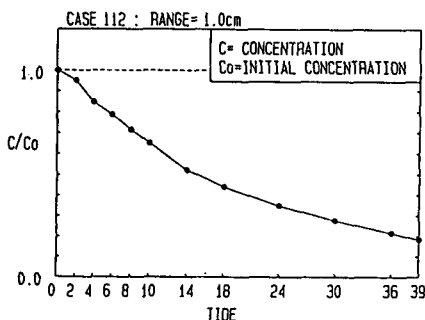
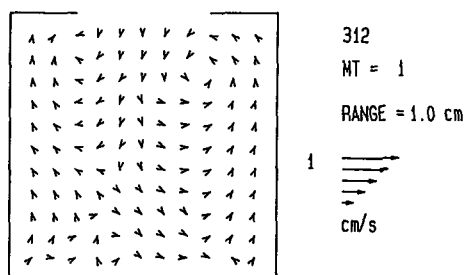


図-3 実験結果 (Run-1)

(上: 潮汐残差流, 下: 染料濃度の減衰曲線)



$$E_R = 2.78547 \text{ (cm/s)}^2$$

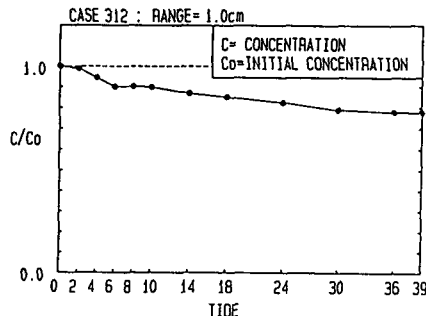
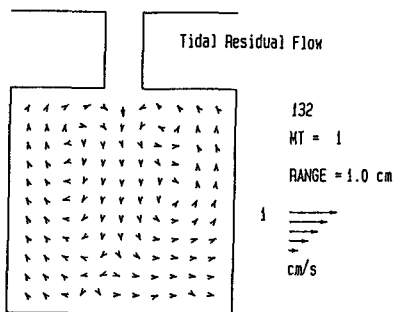
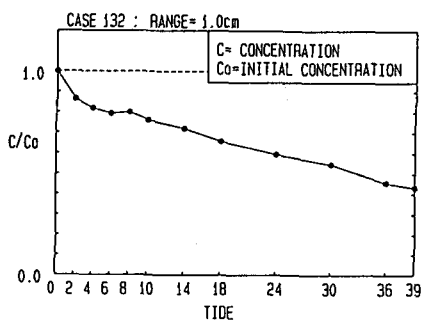


図-4 実験結果 (Run-2)

(上: 潮汐残差流, 下: 染料濃度の減衰曲線)

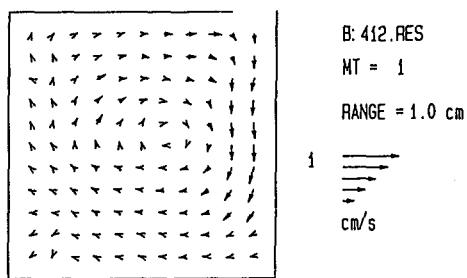


$$E_R = 19.2121 \text{ (cm/s)}^2$$

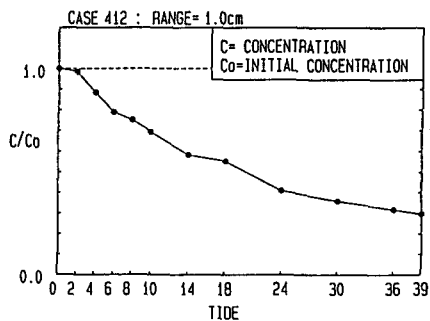


図一五 実験結果 (Run-3)

(上: 潮汐残差流, 下: 染料濃度の減衰曲線)

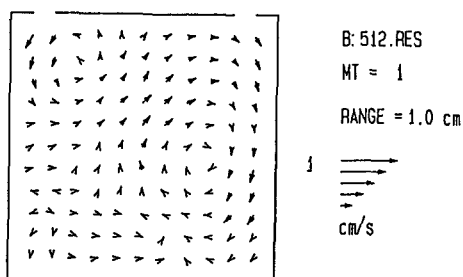


$$E_R = 157.571 \text{ (cm/s)}^2$$

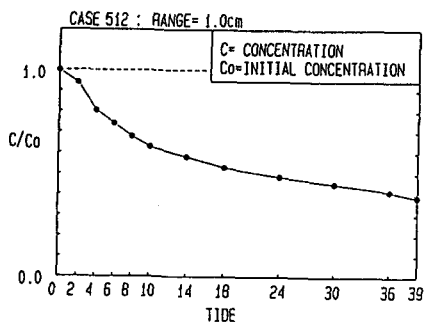


図一六 実験結果 (Run-4)

(上: 潮汐残差流, 下: 染料濃度の減衰曲線)

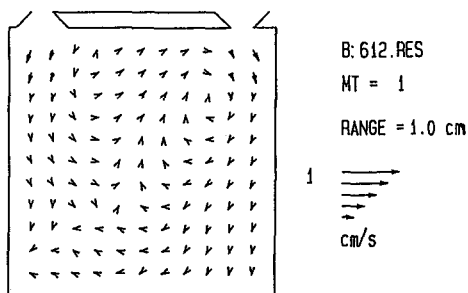


$$E_R = 126.386 \text{ (cm/s)}^2$$

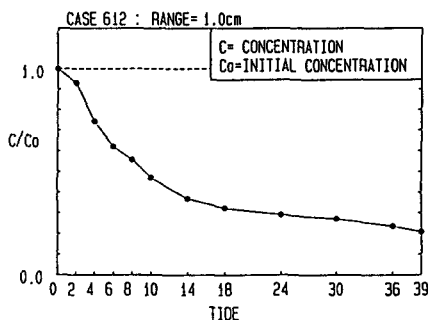


図一七 実験結果 (Run-5)

(上: 潮汐残差流, 下: 染料濃度の減衰曲線)



$$E_R = 48.5097 \text{ (cm/s)}^2$$



図一八 実験結果 (Run-6)

(上: 潮汐残差流, 下: 染料濃度の減衰曲線)

の開口部から流出するという一方向流が形成される。したがって、潮汐残差流による水平循環流はRun-1に比べると大きいとは云えないが、一方向流の形成により海水交換が促進されていることがわかる。

4. 実験結果の考察

防波堤の配置による閉鎖域の流れおよび海水交換に関する実験結果について述べた。これらの結果から、湾口の形状と潮汐残差流の強さおよび海水交換の大きさに関して考察する。表-2に、各々の実験ケースの平均滞留時間、潮汐残差流エネルギー、および閉鎖域内の渦度の絶対値の和による循環の値を示す。

$$\tau_R = \int \frac{R(t)}{R_0} dt \quad (1)$$

$$E_R = \frac{1}{2} \sum (U_R^2 + V_R^2) \quad (2)$$

$$L_R = \sum \left(\left| \frac{\partial V_R}{\partial x} - \frac{\partial U_R}{\partial y} \right| \right) \quad (3)$$

ここに、 $R(t)/R_0$ は時刻 t での物質の湾内における残存率、 R_0 は初期状態での湾内の物質質量、 U_R 、 V_R はそれぞれ潮汐残差流の流速成分、 E_R は潮汐残差流エネルギー、 L_R は循環である。

まず、湾内の潮汐残差流エネルギーと循環との相関を図-9に示す。非常に良い相関を示すことがわかる。この循環は、防波堤の開口部によって形成された渦度が湾内に輸送されたものと考えられることから、開口部の形状と潮汐残差流の大きさとは密接な関係があることがわかる。

図-10に示すのは、その循環の値と平均滞留時間との関係を示したものである。この図から、循環値が大きい（すなわち潮汐残差流が大きい）と海水交換率が大きいことを示している。これらの結果から、防波堤開口部の形状と海水交換率の大きさについて考察する。まず、Run-1とRun-2の防波堤開口幅についてであるが、これは前述したように、開口幅が広いと開口部での流速が減少するために、渦度の形成が小さくなる。そのため湾内の循環流が小さくなり、海水交換率が小さくなる。次に、Run-1とRun-3の開口部の長さについて考察する。Run-3の場合、湾外から湾内に流入する際に、開口部の水路部分にそって流れは整流される。また水路壁の摩擦抵抗によって渦度エネルギーは消費され、湾内に輸送される渦度のエネルギーは $L=0\text{cm}$ の場合に比べてかなり小さくなる。これが、Run-3の方が海水交換率が小さくなる原因である。ただし、振幅3cmの場合はどのケースとも比較的大きな海水交換率となっており、開口部の形状にはあまり差がないように思われる。これは、閉鎖域内の規模と開口部とで形成される渦度との関係において、閉鎖域内の規模が小さいと開口部で形成された渦度は内湾域の壁によってそのエネルギーが失われてしまうために、あまり差がない結果となってしまうものと考えられる。

Kashiwai(1984)は、この海水交換のメカニズムを L/W と $(R/W)^2$ の関数により、3つのタイプに分類している。ここに R は湾のタイダルプリズムの容積に等価な半円筒の半径で定義されており、

$$R = \sqrt{2Sh/\pi H} \quad (4)$$

である。ここに、 S は湾の面積、 H は水深、 h は潮差である。Kashiwaiの解析によると $(R/W)^2$ が2.14を超えると湾内の潮汐残差流のパターンはタイプIに分類され、 $(R/W)^2$ が2.14以下の場合は L/W の大きさによりタイプIIとタイプIIIの潮汐残差流が形成されるとしている。このことは、ある閉鎖域において、ある

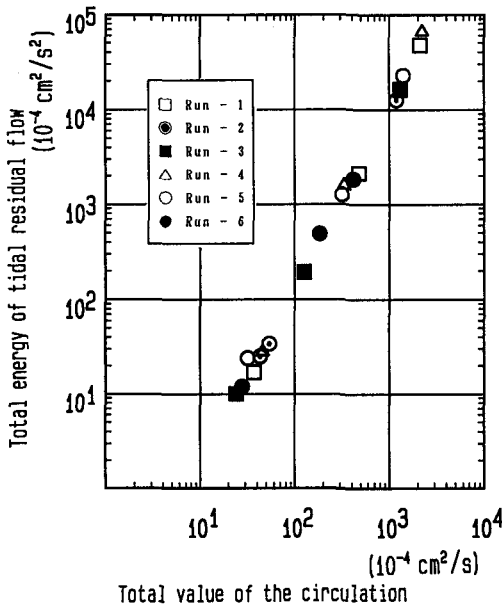


図-9 循環と潮汐残差流エネルギー

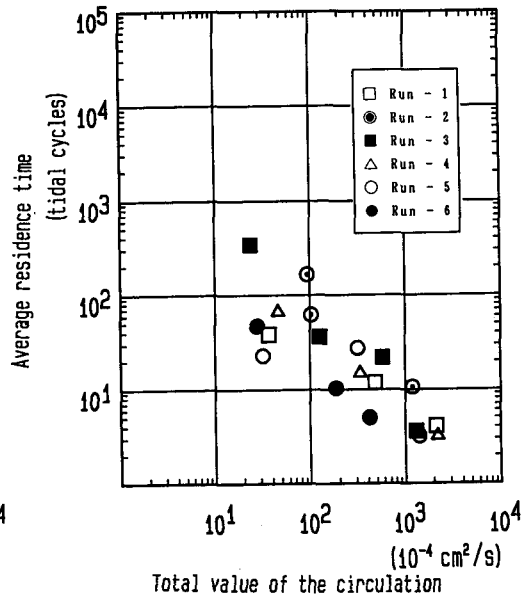


図-10 循環と平均滞留時間

程度以上の潮位差があれば潮汐残差流のパターンはタイプ I になり、海水交換率の大きさは潮の干満による交流量に左右されることになり、開口部の L/W 比にはあまり左右されないことを意味している。

次に Run-6 の結果について考察する。Run-6 の場合は右側の開口部は流入が卓越し、左側の開口部は流出が卓越しているため湾内に時計廻りの循環流が形成されており、これまでの実験結果とは条件が異なっている。この場合は開口部の長さ $L=45\text{cm}$ となっているために、開口部での流況が整流されて循環の値が小さくなっている。それにもかかわらず、平均滞留時間が小さいのは、時計廻りの一方向の循環流が海水交換の促進に寄与しているものと思われる。これは筆者による強制循環流による海水交換の促進工法（村上他，1982）と同じ原理である。したがって、防波堤の開口部の配置を一方向流が発生するように工夫することは、海水交換を大きく促進させることに有効な方法である。

以上のことから、同じ開口部の断面積であっても、湾内の潮汐残差流を大きくし、かつ一方向流も発生させることにより、海水交換が促進されることがわかった。

5. まとめ

本研究は、閉鎖域の海水交換を考えるに際して、防災上の観点から開口部の面積を縮小せざるを得ない場合に対して、開口部の防波堤の配置と海水交換の大きさについて水理模型実験によって検討したものである。本研究において明らかになったことをまとめると以下のようになる。

- ① 閉鎖域の循環と潮汐残差流エネルギーは良い相関を示す。このことより、閉鎖域内の潮汐残差流は開口部で生成された渦度の輸送によって形成され、その大きさが潮汐残差流の大きさに影響を及ぼす。
- ② 閉鎖域内の循環の大きさ、すなわち潮汐残差流エネルギーが大きいと海水交換は促進される。したがっ

て、開口部の形状が海水交換の大きさに影響する。

- ③ 同じ潮位振幅であれば、開口部の幅が狭い方が、また開口部の長さは短い方が大きな渦度が形成されて、海水交換は大きくなる。
- ④ Run-6のように導流堤を設置すると、渦度は小さくなり潮汐残差流は弱まるが、一方向流が形成されて海水交換は促進される。渦度を小さくしないで一方向流を発生させれば更に海水交換は促進される。
- ⑤ 開口部で形成された渦度が湾奥まで輸送されると、湾内の循環流は湾全体に形成されて海水交換が大きくなる。

本研究は、水平循環流による海水交換のみを考慮した実験を実施したが、海水交換に及ぼす鉛直循環流の影響は非常に大きいと考えられるので、今後は密度流あるいは吹送流による鉛直循環流を考慮した海水交換促進工法の研究を実施する予定である。

参考文献

- 村上和男他(1982): 強制循環流による海水交換の促進について, 第29回水理講演会論文集, pp.341-346.
- Kashiwai, K. (1984): Tidal residual circulation produced by a tidal vortex, Part 1, Life-history of tidal vortex, Jour. of Oceanographical Soc. of Japan, Vo..40, pp.279-294.
- Murakami, K. (1992): Tidal exchange mechanism in enclosed regions, Proc. 2nd Int'l. Conf. on Hydraulic and Environ. Modelling of Coastal, estuarine and River Waters, Vol.1, pp.111-120.
- Takeoka, H. (1984): Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea, Continental Shelf Research, Vol.3, No.3, pp.311-326.