

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

大谷 英夫* ・ 高山百合子** ・ 石野 和男***
 勝井 秀博**** ・ 宝田 盛康*****

1. はじめに

近年、注目されている「ミチゲーション」を実施するためには、生態も含めた総合的な技術が必要となる。工学的な面で言えば、例えば、埋立地の周辺に停滞水域ができると、夏場に成層が形成され貧酸素化し水質が悪化する。この停滞水域に対し、弱くなった流れを強めることは、ミチゲーションにつながる技術であろう。このような意味で、本研究では閉鎖性の海域の流動、海水交換を促進し、停滞性水域の解消を目的とする流況制御技術を開発している。

従来、閉鎖性湾内の海水交換を促進する研究は、水平循環流を効率よく循環させることに帰着されていると思われる。上嶋ら (1991) や、村上ら (1993) の実験結果によれば、地形改変が行われ水平循環流が増大した湾では、原型の湾に比べ湾内の物質の残留率が小さく海水交換が大きい。この現象の原因について、水理学的に十分な特定がなされているとは言い難い。地形改変の意味は、単に強制的な導流作用のみならず、地形背後で剝離する渦流を変化させていることにある。Kashiwai (1984) は、潮汐残差流を湾口渦の動きによりパターン分けし、湾口部の渦対が、その誘導流速と潮流の非回転成分によって連続的に湾内へ移動するときに、強い潮汐残差流が形成されると説明している。したがって、渦流の誘導流速を湾奥方向にすることが水平循環流増大の鍵であると考えられる。

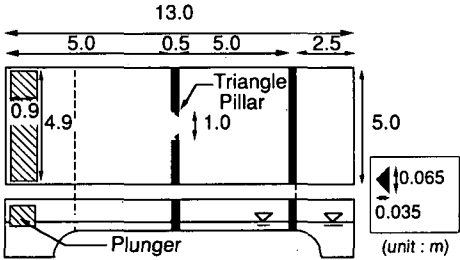
本研究では、湾口部に潮流を剝離させる構造物として三角柱を設置し、湾内の水平循環流の制御を試みた。そして、この方法の海水交換に及ぼす効果、また、水平循環流形成のメカニズムについて検討した。ここでは、現象の単純化のために、水平二次元場を仮定し、乱流、コリオリ力の効果などは考慮しない。

2. 剝離構造物の設置による海水交換の促進

上嶋 (1991) や村上 (1991) の実験結果では、水平循環流の大きさと、海水交換の大きさには正の相関が見られる。筆者ら (1994) は、湾口部の両岸に、三角柱を設置し、上げ潮時の流れを強く剝離させることを試み、ある水理条件のもとでは、三角柱がないときに比べ水平循環流が大きくなることを確認した。ここでは、三角柱を設置した大きな水平循環流を持つ湾と、三角柱がない小さな水平循環流を持つ湾の海水交換を比較してみる。

2.1 実験方法

実験水槽は、図一に示す通産省工業技術院中国工業技術研究所平面水槽 (長さ 13 m×幅 5 m×深さ 0.38 m) を使用した。模型湾は、5×5 m の矩形、平均水深 $H=0.1$ m、潮差 $h=0.01$ m、湾口幅 $W=1.0$ m、潮汐周期 $T=360$ 秒である。湾口位置は、中央のケース EX 1 と湾の端部に偏って設けたケース EX 2 とした。水位変動の周期を潮汐とした場合、模型湾は、水平縮尺 1/1250、鉛直縮尺 1/100 とすれば、水深 10 m、潮汐振幅 1 m、一辺 6.25 km の矩形湾に相当する。実験に用いた三角柱は、底辺が 6.5 cm、高さ 3.5 cm の二等辺三角形断面とし、図一のように三角形の底辺を湾口水道方向と直角方向に設置した。また、湾内に 9×9 メッシュに配置した 81 個の浮標 ($D=3.5$ cm) を上げ潮開始時 (干潮時) に投入し、浮標の湾内の残留量で海水交換を評価した。実験ケースを表一に示す。



図一 実験水槽 (EX シリーズ)

* 正会員	工修	大成建設(株)	技術研究所構造研究部海洋水理研究室
** 正会員		大成建設(株)	技術研究所構造研究部海洋水理研究室
*** 正会員	博士	大成建設(株)	技術研究所研究推進室課長
**** 正会員	博士	大成建設(株)	技術研究所構造研究部海洋水理研究室室長
***** 正会員	工修	通産省中国工業技術研究所	海洋制御研究室長

2.2 実験結果および考察

図-2は、実験ケース EX 1 の上げ潮開始時から1周期間の浮標の軌跡を示す。(a)が三角柱を設置した EX 1-T, (b)が三角柱を設置しない EX 1-N である。(b)に比べ三角柱を設置した (a) では、フロートの excursion length が増大し、湾内の水平循環流が増大した。図-3に

表-1 実験ケース

case	TrianglePillar	W (m)	L (m)	R (m)
EX 1-T	○	1.0(0.87)	0.5	1.29
EX 1-N	×	1.0	0.5	1.29
EX 2-T	○	1.0(0.87)	0.5	1.29
EX 2-N	×	1.0	0.5	1.29
FL 1-T	○	0.2(0.174)	0.1	0.25
FL 1-N	×	0.2	0.1	0.25
FL 2-T	○	0.4(0.174)	0.1	0.25
FL 2-N	×	0.4	0.1	0.25

W: The width of the channel (excluding triangle pillars),
L: The length of the channel, R: The radius of a semi-cylinder having a volume equal to that of the tidal prism of the bay

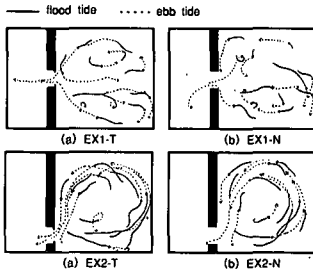


図-2 1周期間の浮標の軌跡

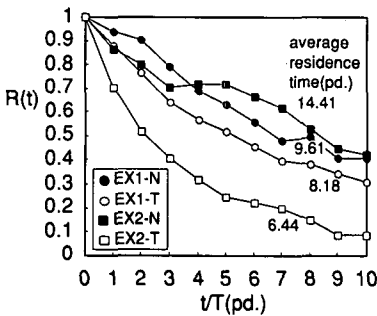


図-3 浮標の残留率の変化

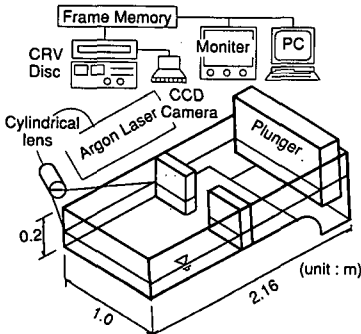


図-4 実験水槽 (FL シリーズ)

各ケースの湾内の残留率の経時変化を示す。図中には、Takeoka (1984) に従って求めた平均滞留時間も併示した。いずれもほぼ指数関数に従い残留率が低下し、三角柱を設置した場合の方が、残留率の低下率が大きい。平均滞留時間も、三角柱を設置した場合の方が小さく、特に EX 2-T では EX 2-N の半分以下となった。本実験も、上嶋らや村上らの実験同様、湾内に大きな水平循環流が生じる場合の方が海水交換が大きい結果となった。また、三角柱を設置し、流れを強制的に剝離させるという比較的容易な方法により海水交換が促進する可能性が示された。

3. 可視化による湾口渦と水平循環流に関する考察

ここでは、湾内の流れを可視化し、様々な条件のもとで水平循環流のパターンを調べるとともに、三角柱設置による水平循環流、海水交換の増大の原因を考察する。

3.1 実験方法

実験水槽は、図-4に示す大成建設技術研究所の亚克力製小型平面水槽 (長さ 2.4 m×幅 1 m×深さ 0.2 m) を使用した。流れは、500 μ m 程度の微細粒子にレーザーライトシートを照射し、CCD カメラで撮影、レーザーディスクに記録した。本実験では流速が小さく水流の乱れが小さいため、微細粒子は水中に浮遊することができず沈降してしまう。そこで、微細粒子は水面に浮かべることとした。また、水面が潮汐で変動するため、レーザーライトシートは潮差程度 (1 cm) の厚みにした。画像処理方法は PTV (Particle-Tracking Velocimetry) を用いた。PTV は、湾内の瞬間的な流れ場を定量的に求めることが可能で、潮流など比較的広域な流れ場のパターンを求めるには有効な手法である。本実験では、9 周期分の撮影を行い、各位相毎にベクトルを重ね併せ、1 位相につきトータル 800~900 個程度のベクトルを得た。その後、内挿補間計算を行い、31×31 のメッシュ上へ格子点化した。実験ケースは、表-1 中に FL シリーズとして示す。湾の形状は、2.と同様に矩形、湾口部の位置は、湾幅に対して中央とした。潮汐周期 T は 70 秒、潮差 1 cm、水深 10 cm、用いた三角柱は、底辺が 1.3 cm、高さ 0.5 cm の二等辺三角形断面で、配置は、2.の実験と同様である。

3.2 湾口渦と水平循環流パターン

図-5に、一周期平均の水平循環流を示す。本実験で得られた水平循環流パターンは、Kashiwai (1986) の3つの循環流のタイプと一致した。(a)は三角柱を設置したケース FL 1-T である。水平循環流は、湾内に広く分布し流速も大きい。これは、湾口渦と同じ方向の循環を持つ強い水平循環流で、Kashiwai の分類では「TYPE-I」に属する。(b)は、三角柱を設置しないケース FL 1-N であ

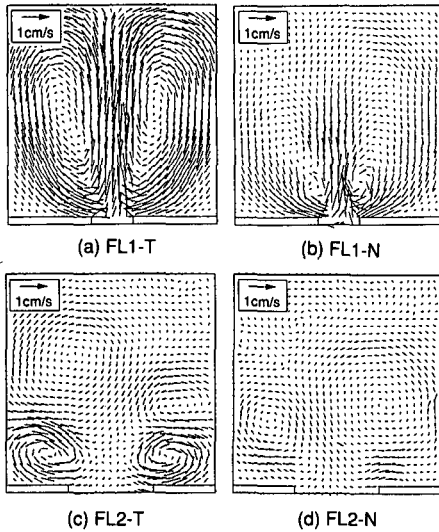
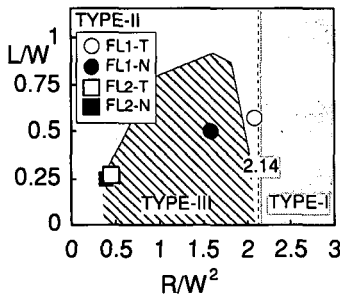


図-5 1周期平均の水平循環流

る。湾口近傍に中心を持つ水平循環流が形成されているが、流速は小さい。これは、湾口渦と同じ方向の循環を持つ弱い水平循環流で「TYPE-II」に属する。(c)は、三角柱を設置し、FL1と周期、潮差は同じで、湾口幅が倍のケース FL2-T である。湾口部近傍には、湾口渦と同じ方向に回転する水平循環流が形成されたが、より湾奥では、湾口部の渦とは逆向きの水平循環流が形成された。これは湾口渦と反対方向の循環を持つ水平循環流で、「TYPE-III」に属する。(d)は、FL2-Tと同じ水理条件で、三角柱がない FL2-N である。一周期平均の水平循環流は、(c)より弱い、これも「TYPE-III」に属する。図-6に、Kashiwai にならって、タイダルブリズムに等価な半円筒の半径 R と湾口幅 W の比の2乗 $(R/W)^2$ と、湾口水道長 L と湾口幅の比 (L/W) および、水平循環流タイプの関係を示す。 $(R/W)^2$ は湾口渦の循環 Γ を示すパラメータである。 W には、三角柱の幅も考慮した。本実験の場合も FL1-N を除いて、ほぼ Kashiwai の分類に従っている。しかし、三角柱を設置した FL1-T は、


 図-6 循環流タイプと $(R/W)^2$ と L/W の関係

$(R/W)^2$ が TYPE-III と TYPE-I の境界域であるにも関わらず、強い循環流が見られている。

3.3 剝離構造物（三角柱）の役割

図-7は、各ケースの流速ベクトルの時間変化を示したものである。まず、(a) FL1-T、(b) FL1-N に着目する。上げ潮時に、FL1-N では湾口渦が湾口部に留まっているのに対し、FL1-T では湾奥へ向って移動している。6 T/7 には、FL1-N では湾口渦が湾外へ流出してしまうが、FL1-T では湾内中央に移動し水平循環流の中心を形成している。注目すべき点は、2 T/7 に、FL1-T は FL1-N に比べ湾口部から離れた位置に湾口渦が形成していることである。これは、三角柱周辺の流向と局所的な流速の加速によると考えられる。ここでは、循環の大きさとして $(R/W)^2$ を用い、湾口渦の初期形成位置の影響のみを、Kashiwai の解析モデルを援用して考察してみる。渦の動きは、以下の常微分方程式で表される。

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \cot 2\theta + \frac{\pi R^2}{2T\tau} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\Gamma}{4\pi r^2} \quad (2)$$

$$\Gamma = -U_0 \left(\frac{t}{2} - \frac{\sin(4\pi t/T)}{8\pi/T} \right) \quad 0 \leq \frac{t}{T/2} < 1 \quad (3)$$

$$\Gamma = -\frac{\pi^4 R^4}{16W^2 T} \quad 1 \leq \frac{t}{T/2} \quad (4)$$

ただし、 Γ ：渦の循環、 t ：時刻、 T ：潮汐周期、 U_0 ：湾口部の最大流速、 W ：湾口幅である。 r 、 θ は、図-8に示す渦位置を示す変数である。図-9は、 $(R/W)^2 = 1.56$ の場合の計算結果である。図中 yp は、Kashiwai のモデルの渦の初期位置からの y 方向への変位を示す。初期の渦位置 r が小さいと、下げ潮時に渦は湾口部へ戻るが、初期の渦位置 r が大きくなると渦は湾口部へは戻らず湾奥へと移動することが分かる。図-8で考えると、湾口から離れた位置に渦1が形成すると渦2の作用が渦3の作用よりも相対的に大きくなり、渦1・渦2からなる渦対の湾奥方向の誘起速度が卓越する。それゆえ、渦対は湾奥方向へ移動することになる。よって、同じ大きさの循環をもつ湾口渦でも初期に形成する位置が湾口から離れると TYPE-I の循環流を得ることができる。また、式(1)より、TYPE-I が成立するための循環 $(R/W)^2$ と渦位置 θ の関係は、下げ潮時の潮流の非回転成分が最大時 ($t = 3\pi/2$) に、 $dr/dt > 0$ の条件を満たすことから、

$$\tan 2\theta < -\frac{\pi^2}{16} (R/W)^2 \quad (5)$$

であることが分かる。水平循環流の増大に貢献する三角柱の役割は、湾内に流入する潮流の剝離点をより湾奥にし、湾口渦対の誘起速度を湾奥方向へ導いたことにある。

次に、図-7(c) FL2-T、(d) FL2-N に着目する。湾

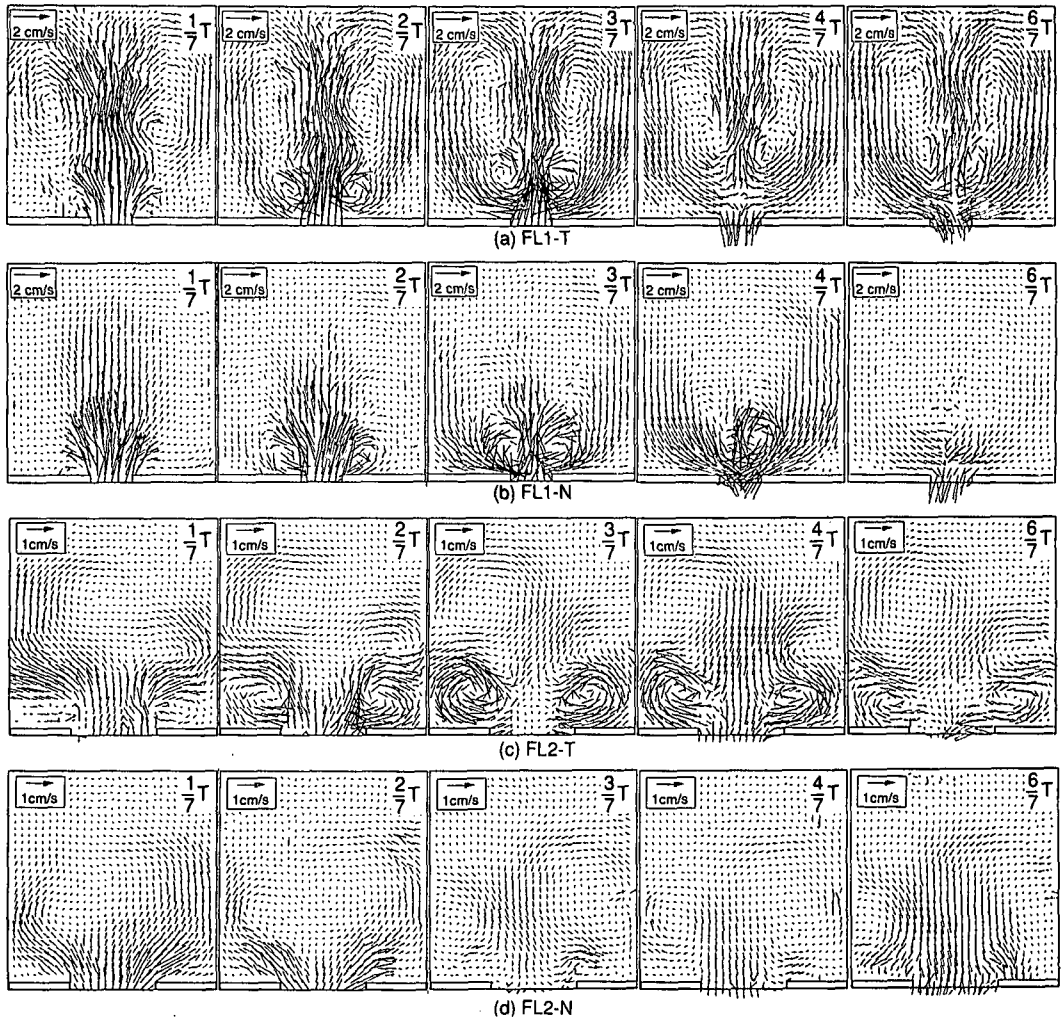


図-7 流速ベクトルの時間変化

口幅が大きいため、湾口渦は対岸の渦と湾奥へ向う誘起流速ベクトルを持つことができない。湾口部の端では流れがポテンシャル流的に加速されており、湾口部岸よりの渦度と湾口部中よりの渦度では最大流速軸を挟んで符号が異なる。湾内では最大流速軸の湾央側では、湾口渦と逆の循環が形成され、湾口渦に反流する渦が湾奥側に形成している。このような理由で TYPE-III の水平循環流が形成されていることが分かる。この場合、三角柱の役割は、FL 1-T で見られた効果は得られないが、三角柱の角で流速を加速し、周辺の渦度をより大きくしている。湾口部にある程度の幅があれば、TYPE-III が期待される。

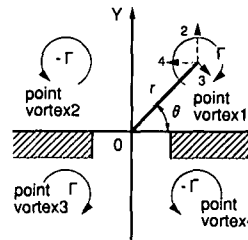


図-8 定義図

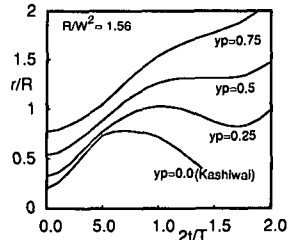


図-9 渦の動きの計算結果

4. 剝離構造物の設置による海水交換促進理由の説明

2., 3. で述べた実験の結果、三角柱の設置により外洋水が効率よく湾内へ取り込まれることが容易に予想でき

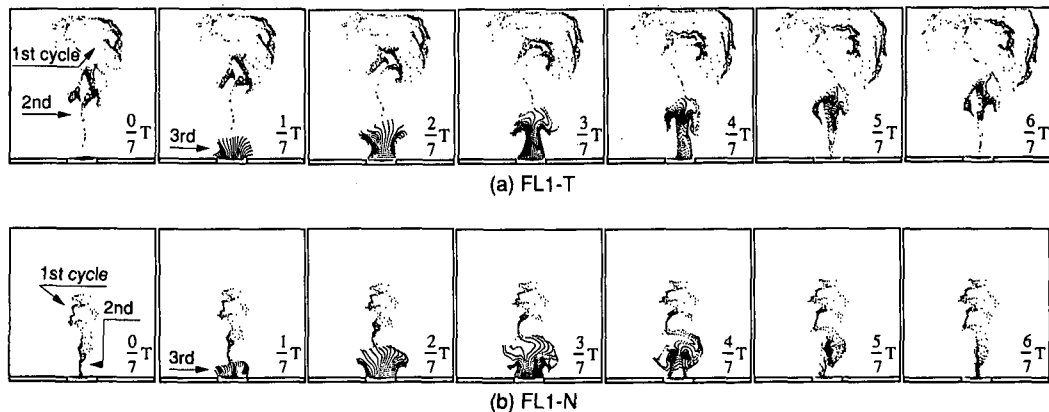


図-10 フロート追跡の計算結果

る。図-10は、可視化実験で得た湾内の流速場に対して、上げ潮の半周期に計1100個のトレーサーを0.625秒毎に湾口水道湾内出口に投入し、3周期の追跡計算をしたものである。追跡計算は、Predictor-Corrector Method (1991)による。(a)は三角柱を設置したFL1-Tである。流入した外洋水が渦に取り込まれ湾奥へ向って行き、下げ潮時の位相 $6T/7$ でもトレーサーは湾内中央付近に残留している。前の周期に投入されたトレーサーは湾奥へ水平循環流によって輸送されている。これは、大西ら(1980)が、リモートセンシングの画像から明らかにした鳴門海峡のpuffと同じ動きを示している。(b)は三角柱がないケースFL1-Nである。湾外水が渦に取り込まれるものの下げ潮時にはFL1-Tよりも多く湾外へ流出してしまった。水平循環流も小さいためFL1-Tに比べると湾奥への輸送速度が小さいことが分かる。

5. おわりに

以上の検討結果より、流況制御技術として湾口部に剝離構造物を設置し、湾内の水平循環流を増大する方法を提案する。この方法は、湾口部の両端から形成する渦の初期形成位置をより湾奥方向にするものである。湾口幅が適当な場合、一对の湾口渦の誘起速度は、湾奥方向が卓越し、渦対は湾奥方向へと移動する。このため、強い水平循環流が形成され、海水交換も促進する。

今後は、さらに本方法の詳細な適用条件と、剝離構造物の形態について検討を重ねて行きたい。また、実際の

場に適用するための計算方法も検討して行きたい。

最後に、本研究は、中国工業技術研究所および民間四社(中国電力(株)、大成建設(株)、五洋建設(株)、(株)ブリジストン)による「海域制御のためのミチゲーション技術の確立に関する研究」の一環であることを付記する。

参考文献

- 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・山崎宗広 (1994): 湾口渦の制御による水平循環流変化に関する一考察, 土木学会第49回年譜概要集, II-438, pp. 876-877.
- 大西外明・田中總太郎・西村 司 (1980): Landsat リモートセンシングを導入した海峡部海水交換現象の研究, 土木学会論文報告集, 第298号, pp. 63-75.
- 村上和男・菅沼史典・宮崎啓司・山田邦明・清水勝義 (1993): 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.
- Kashiwai, M. (1984): Tidal residual circulation produced by a tidal vortex, Part 1, Life-history of tidal vortex, Journal of Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 40, pp. 279-294.
- 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.
- Ramsden, D. and G. Holloway (1991): Timestepping lagrangian particles in two dimensional eulerian flow fields, Journal of Computational Physics, Vol. 95, pp. 101-116.