

# 沿岸水域の環境修復にむけた海域流況制御技術の研究

— 防波堤で囲まれた湾奥部の流動環境と透過型防波堤の流動促進効果について —

石垣 衛 辻 博 和

## Current Control as a Measure for Improving Water Quality in Enclosed Coastal Areas

— Current Environment of Bay inner Part Area with Break-water and Promotion Effect by Break-water —

Mamoru Ishigaki Hirokazu Tsuji

### Abstract

This paper presents a method designed to improve water quality by enhancing mass exchange between the open sea and enclosed coastal areas. Factors causing the problem are analyzed focusing on a particular study case consisting of a coastal area surrounded by several artificial islands and a break-water. The results show that the break-water hinders mass exchange with the open sea and significantly increases residence times in the enclosed area. A permeable structure is proposed to cope with the problem, and its characteristics are thoroughly investigated using a physical model.

### 概 要

湾奥部の埋立造成や人工島建設および、沖合防波堤の設置などによって創出される沿岸人工水域の環境修復を目的に、大阪湾奥部の沖合防波堤に囲まれた水域に対し、現地観測および瀬戸内海大型水理模型による水理実験を行った。その結果、沖合防波堤が当該水域の流動を阻害し、水域の滞留時間が増大することが確認された。この観測結果および実験結果をもとに、沖合防波堤で囲まれた水域環境の保全・修復策として、従来の不透過型防波堤に代わる海水交換型防波堤を提案し、この海水交換型防波堤の背後水域への流動促進効果を基礎水槽実験で評価した。

## 1. はじめに

東京湾、大阪湾等の湾奥部域では、人工島建設や埋立造成などの各種水際開発事業、さらには、それにとまなう防波堤等の建設によって、水域の閉鎖性が強められ、赤潮や貧酸素水塊の発生などの問題を抱えている。例えば、大阪湾奥部の堺泉北港から神戸港にかけての港湾区域では、沖合防波堤の設置によって、堤内外の海水交換が低下し、このことが当該背後水域の水質悪化の要因となっていることが推測される。

沖合防波堤は、防災上水域の静穏化を目的に設置されているが、海域環境の悪化した当該海域の保全・修復を考えたとき、堤背後水域の流動を促進し、海水交換能力を向上させる技術も必要となる。そのためには、背後水域の流動を促進させる防波堤構造の提案や防波堤の適切な設置計画に関する指針等が不可欠であろう。

中野ら<sup>1)</sup>は、既存の防波堤構造を海水交換型に改変することで、港湾内水域の海水交換を促進することを試みているが、期待された効果を必ずしも得ていない。

本研究では、まず沖合防波堤の存在が流動環境に与える影響を大阪湾奥部の現地観測および、瀬戸内海大型水理模型<sup>2)</sup>を用いた水理実験により明らかにした。次に、沖合防波堤の存在にとまなう背後水域の流動環境の改善

を目的に、従来の防波堤に代わる海水交換型防波堤を提案し、その効果を平面水槽に設定したモデル港湾の基礎実験から検討した。

## 2. 防波堤で囲まれた湾奥部の流動環境

### 2.1 防波堤で囲まれた湾奥部域の流動環境の現地調査

大阪湾奥部の某港を対象に、防波堤で囲まれた水域全体の流動環境を調査した。観測方法として Fig. 1 に示す測線 A, B における流速・流向を ADCP によって測定し、水域全体の流動場を求めた。観測実施期間は、平成 11 年 4 月 16 日 8:30~18:00 であり、90 分毎に 7 回の測定を実施した。測定では、表層~水面下 7 m までを上層、水面下 7 m 以下を下層とした。

Fig. 1 に上げ潮・下げ潮最強時の流況および、観測結果から求めた残差流を示す。Fig. 1 から、上げ潮・下げ潮最強時における上層および下層のベクトルは、若干の違いがあるものの防波堤背後にて循環流を形成している。また、観測結果から算出した残差流からも防波堤背後に循環流が存在することが確認されている。これは、防波堤西側端部より剥離した渦に起因した流動と考えられる。循環流の形成は滞留時間を増大させる要因となり、水域環境に対して負の影響を及ぼすことが考えられる。

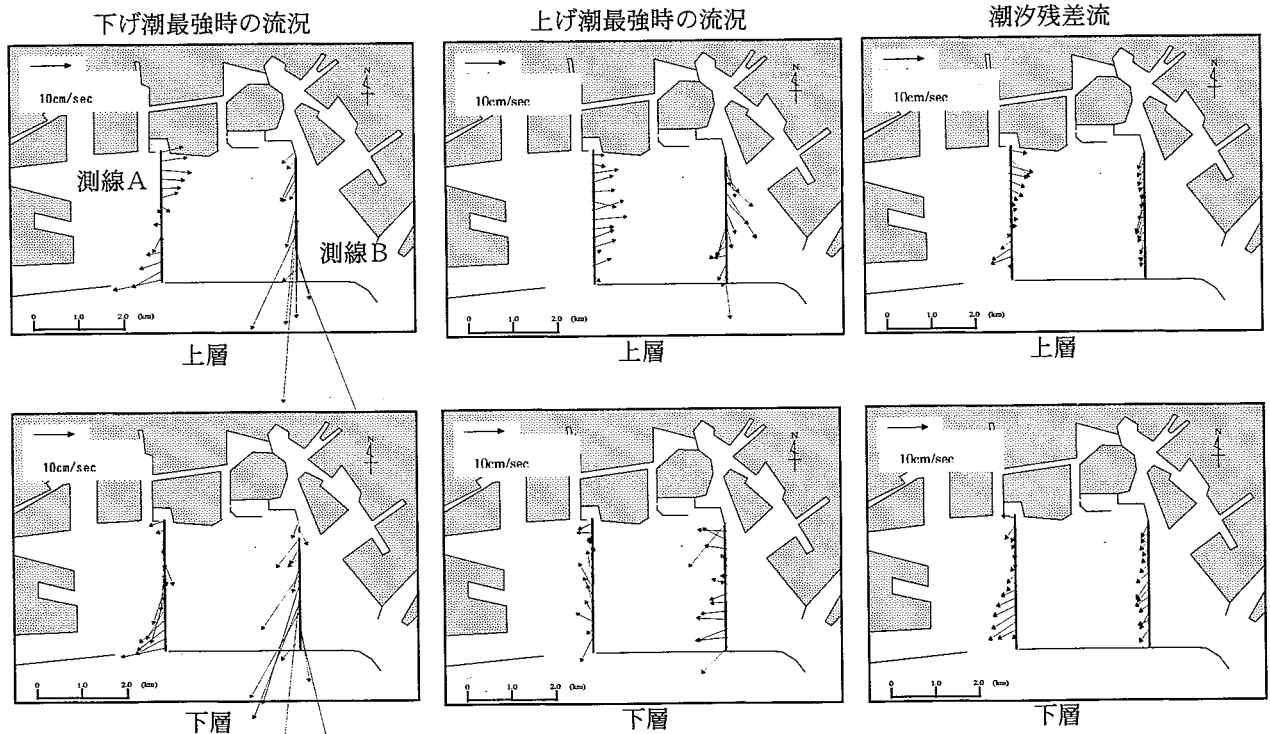


Fig.1 某港における流動環境  
Tidal Current in an Enclosed Coastal Area

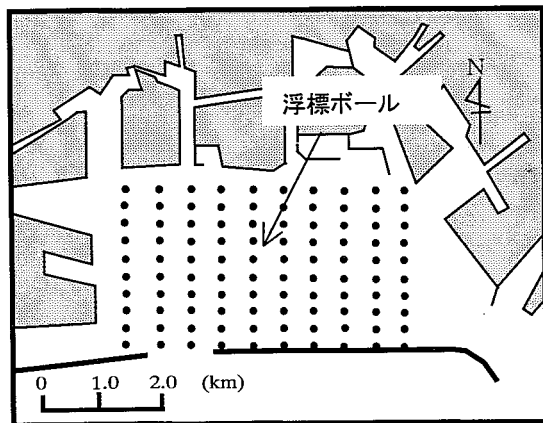


Fig. 2 実験水域地形および浮標初期位置  
Hydraulic Model and Initial Position of Float

## 2.2 水理実験による湾奥部流動環境の確認

2.2.1 水理模型実験装置および実験方法 2.1 にて得られた観測結果から、防波堤の設置が当該水域の流動場を抑制し、水域の滞留時間を増大させる要因であると考えられる。これを確認するため、瀬戸内海大型水理模型による水理実験を実施した。実験に用いた水理模型は、通産省工業技術院中国工業技術研究所が保有する潮汐拡散水理模型であり、水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/159、模型水量は 5000m<sup>3</sup> である。

実験では、浮標ボール（直径 35mm、比重 0.92）を Fig.2 に示す水理模型内の湾奥部に均一に初期配置（図中●印）し、M<sub>2</sub> 潮において 5 周期間この浮標ボールを追跡した。

ここに、実験ケースは、防波堤の存在の影響を把握するため、『現況ケース（防波堤あり）』、『防波堤なしのケース』の 2 ケースを設定した。

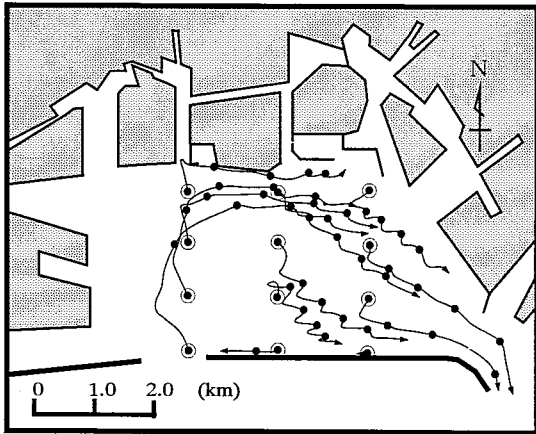
2.2.2 実験結果と考察 Fig.3 は、一潮汐周期間の浮標の流跡を、上げ潮後の憩流時をスタートとして●印で示し、各ケースについて、5 周期間追跡した結果を示したものである。

防波堤が存在している現況ケースでは、防波堤内西側の水域で時計周りの循環流が存在し、中央部から東側水域では西から東への一方向の流れが見られるものの全体的に停滞している。これは、先の現地観測結果を再現している。防波堤なしのケースでは、流れは水域内にて阻害されることなく、全体的に西から東へ向かう大きな循環流を形成した。

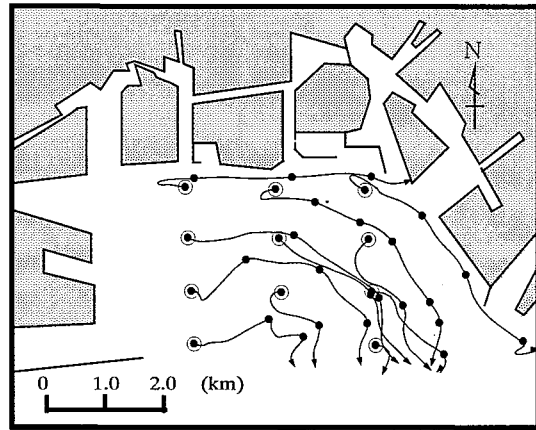
両ケースにおける浮標の滞留時間に着目すると、現況ケースでは、初期配置した浮標のほとんどが 5 周期経過後も港内に存在した。これに対して、防波堤なしのケースでは、ほとんどの浮標が 3~4 周期で港外へ流出した。この水理実験結果から、沖合防波堤の存在は、当該水域の流動場を抑制し、水域の滞留時間を増大させる要因であることが明らかになった。

## 3. 防波堤構造の改変による流動環境の改善

瀬戸内海大型水理模型実験から、沖合防波堤の存在が背後水域の流動環境に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。そこで、沖合防波堤の背後水域の流動環境改善を目的に、防波堤の構造を改変することを試みた。



現況ケース



防波堤なしケース

Fig. 3 沖合防波堤が背後水域に及ぼす影響

The Influence on the Tidal Current in the Rear Area of Offshore Break Water

防波堤構造の変更にあたっては、既設位置を保持したまま、背後水域の流況制御を実施することを考え、海水交換型防波堤を採用した。ここで、海水交換堤の構造は、『波は消すが、潮流はある程度通過する』条件のもと捨石構造を想定した。

なお、捨石構造にすることで、海水交換部が石積み浄化堤の役割を果たし、その礫間接触酸化による海水浄化機能<sup>3)</sup>を発揮することで、堤周辺水域に対する海水浄化にも、おおいに貢献できると考える。

### 3.1 平面水槽実験装置および実験方法

大阪湾奥部の某港を単純化したモデル港として、Fig. 4 に示す水理模型を平面水槽に設置した。水槽内における港湾区域規模は、5 m×6 mとし、防波堤模型の規模は堤長 3 m、堤体幅 0.2 m、高さ 0.3 mとした。

透過型防波堤の仕様として、8mm メッシュのステンレス網の籠に直径 1cm のビーズ玉を詰め込んだ模型（空隙率：約 50%）を採用した。

実験では、潮汐の周期、振幅を一定とし、潮汐の発生には平面水槽に設備されているプランジャー式起潮装置を用いて、周期 180 秒、振幅 1 cm の潮汐を設定した。

実験ケースは、Fig. 4 に示すように堤体長を 4 分割した上で、堤体 1～堤体 4 とし、透過位置を Table 1 に示す透過堤と不透過堤の組合せによる 5 ケースとした。計測では、港内に浮標ポールを 20cm 間隔格子状に均一に配置し、一潮汐周期間あたりの浮標の流跡および流程を計測した。更に、上げ潮最強時および下げ潮最強時の流速ベクトルから港内における流速分布を求めた。また、水域の流出入の水量バランスを求めるため、Fig. 4 に示す開口部 1、開口部 2 の 9 地点（10cm 間隔：計 18 地点）に、二次元電磁流速計（アレック電子製 ACM-200P）を設置し、各実験ケースにおける流速分布を測定し、開口部の断面平均流量を算出した。

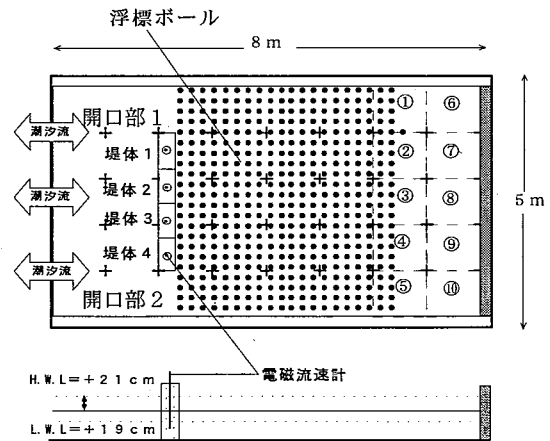


Fig. 4 実験装置概略図  
The Experimental Device

Table 1 実験ケース  
Experimental Case

ケース	堤体 1	堤体 2	堤体 3	堤体 4	潮汐 (cm)	周期 (秒)
Case1	不透過	不透過	不透過	不透過	1.0	180
Case2	透過	不透過	不透過	不透過	1.0	180
Case3	透過	透過	不透過	不透過	1.0	180
Case4	透過	不透過	透過	不透過	1.0	180
Case5	透過	透過	透過	透過	1.0	180

### 3.2 実験結果と考察

**3.2.1 堤体内の透過水量の確認** 各実験ケースにおいて、海水交換堤模型内を水が通過していることを調べるため、Fig. 4 に示すように、二次元電磁流速計を堤中心部に設置して、通過流速の測定を行った。流速計は、堤体長に対する法線方向に y 軸を正とし、堤体長に対し平行の方向に x 軸とした。

Fig. 5 は代表的実験ケースである、Case 2 と Case 5

の主流方向である y 軸方向成分の計測結果を示したものである。図より、2つの実験ケースは、潮の干満にともない、実測値が正弦波的な値を示すことが確認された。特に、Case 5 では、堤体 1～堤体 4 で顕著な差は見られず同じ挙動を示している。これより、海水交換堤内に水がほぼ一様に通過していると考えられ、『波は消すが、潮流はある程度通過する』ことが可能な防波堤であることが確認された。

### 3.2.2 堤体設置水域の流動環境評価

(1) 流跡および流程 Fig.6 は、一潮汐周期間の浮標の流跡を示したものである。ここでは、代表的な実験結果として、Case 1, Case 2, Case 4 の結果を示した。Case 1 の従来型防波堤では、防波堤の堤体長を二等分する中心線に対して左右対称な循環流が形成された。この循環流は、開口部の堤付近から港内の半ば付近まで大きな流れを形成するものの、港内奥部では小さな流れとなり、停滞域が存在する。Case 2 では、堤体 1 を海水交換堤に改変したことにより、循環流は湾奥部まで到達し、Case 1 で確認された停滞域は存在しなかった。この循環流の形成は、堤体 1 を海水交換堤に改変したことによって、開口部 1 の周辺で流れのシアが変化したためと推論する。

一方、Case 4 の堤体 1 と堤体 3 を海水交換堤に改変した場合では、各開口部において、小さな循環流しか形成されず、Case 1 と比較して港内奥部だけでなく、港内全体を停滞域にしてしまう結果となった。

(2) 流速分布 Fig.7 は、Case 1 と Case 2 における上げ潮最強時、下げ潮最強時の流速ベクトルとコンターを示したものである。Case 1 では、上げ潮最強時および下げ潮最強時ともに各開口部で流速が最大となり、港内にて対称な循環流を形成する。形成された循環流は、上げ潮時には、側壁側に速い流速分布を有するものの、港内奥部まで到達できず、結果として港内奥部に停滞域を形成している。Case 2 でも、上げ潮最強時および下げ潮最強時に各開口部で流速が最大となるが、堤体 1 を海水交換堤に改変したことによって、流速値は、開口部 1 よりも開口部 2 のほうが若干小さい。しかしながら、上げ潮最強時の流速コンターは開口部 1 からのほうが湾奥まで拡っており、湾奥の停滞域を解消している。

Case 1, Case 2 で得られた流速ベクトル・コンターは、前述の流跡線・流程に反映することから、開口部における流入水量のバランスが港内全体の循環流形成に大きな影響を与えていると推測される。

(3) 堤内外水域の交流水量 Fig.8 は Case 1 と Case 2 における各開口部の横断方向における上げ潮最強時および下げ潮最強時の y 軸方向の流速分布を示したものである。Case 1 の開口部における流速分布は、上げ潮、下げ潮最強時ともほぼ同じ値を示している。一方、Case 2 の各開口部における流速分布は、下げ潮時のみ同じ傾向を示し、上げ潮時には、開口部 1 の方が、開口部 2 より

壁際で大きい値を示している。このことは、Fig.7 の流速コンターからも明らかであり、堤体 1 を海水交換型にしたときの開口部の交流水量バランスが、上げ潮時に大きく変化していることが判る。

Table.2 は Case 1, Case 2 の上げ潮時における各開口部からの流入水量を Fig.8 に示したグラフを積分することで求めたものである。両ケースにおける流入水量の合計を比較すると、Case 2 のほうが Case 1 に比較して少ない。

一潮汐間における流出入水量は常に一定であることから、この流入水量の差だけ、堤内を水が通過したと考えられる。3.2 節に示した Case 2 における堤内の通過流速は、流入時において最大 0.2cm/sec であり、堤内を水が一様に通過すると仮定すれば実透水面積  $750\text{cm}^2$  (堤体長 75cm×水深 20cm×開口率 0.5) より、通過水量は  $150\text{cm}^3$  と算出される。この値は、Case 1 と Case 2 の合計水量の差と同じオーダーである。

以上から、前掲の Fig.6 および Fig.7 に示した Case 2 の流動環境について考察すると、堤体 1 を海水交換型にすることで、開口部 1 および堤体 1 を通過する水量が開口部 2 を通過する水量を上回り、結果として港湾内の循環流の対称性を崩すこととなる。対称性の崩れた循環流は、流入水量の多い開口部 1 および堤体 1 の流程を増大させ港内奥部まで流入水を到達させることになり、港内奥部の流動を促進させていると考えられる。

### 3.2.3 透過型防波堤の有効的な設置法について

Table 3 は港内奥部 (前掲の Fig.4 に示した①～⑩のエリア) の各ブロックにおける流動改善指標を示したものである。なお、流動環境指標は、各ケースの流程距離と Case 1 の流程距離の比より求めた。

表より、Case 2 の湾奥における流程は、Case 1 に比較して、最大で 2.65 倍、平均でも 1.4 倍であり、透過型防波堤を用いることが、港内奥部流動の促進に大きく寄与していることを示している。

一方で、Case 4 は、堤体長の 50% に透過堤を利用しているものの、Case 1 に比較して、全般的にはほぼ同等の値か、それ以下の値を示しており、湾奥部の流動を抑制している。また、海水交換型防波堤を全面に採用した Case 5 については、Case 1 とほぼ同等の流程しか得られておらず、流動環境促進に対する、効果は低い。

ここで、Case 2, Case 3 とともに防波堤端部を透過構造にしたにもかかわらず、Case 2 のみ港内奥部流動の促進効果が認められた。この結果から、港内奥部の流動を促進させるためには、最適な端部透過の規模が存在することが示唆される。

以上から、防波堤の背後水域の流動を促進する技術として、防波堤の片側端部のみを透過構造に改変する方式は、有効な対策の一つであり、その際、防波堤端部の最適な透過規模が存在することが明らかとなった。

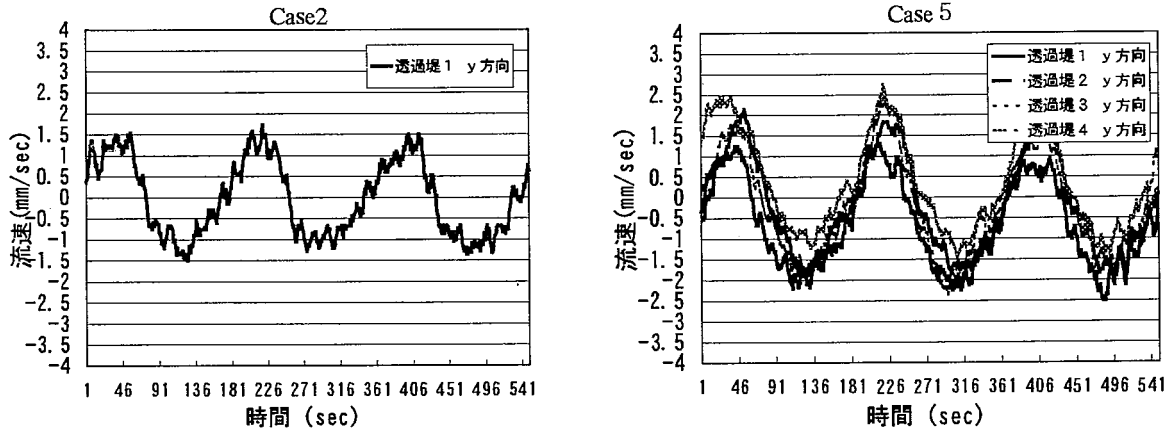


Fig.5 堤内流速測定結果  
Current Velocity Assay Result in Breakwater

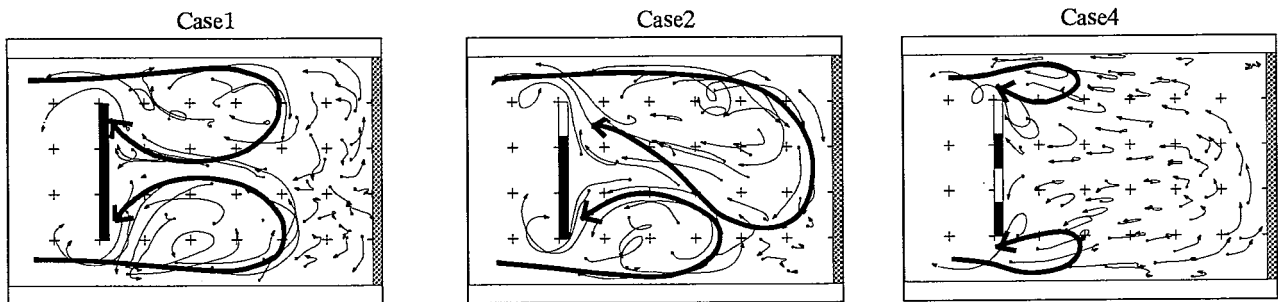


Fig.6 一潮汐周期間における流跡線  
Current Line in One Tide

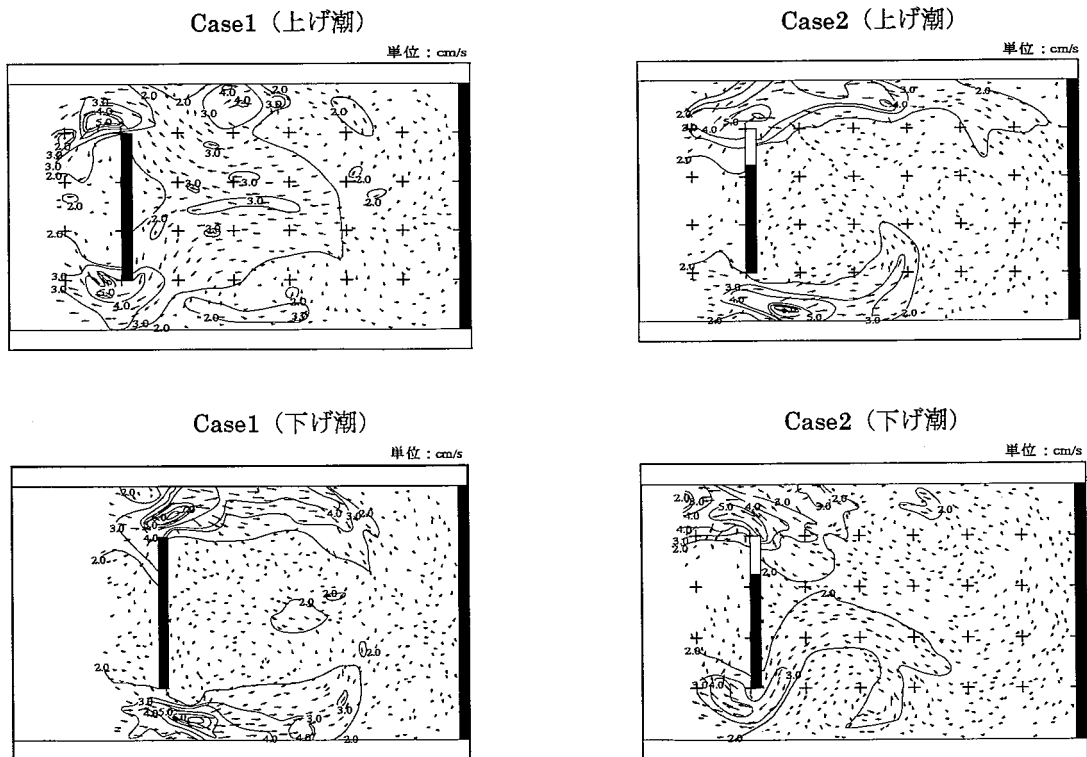


Fig.7 上げ潮最強時および下げ潮最強時における流速ベクトル  
Velocity Vector in Flood Tide and Ebb Tide

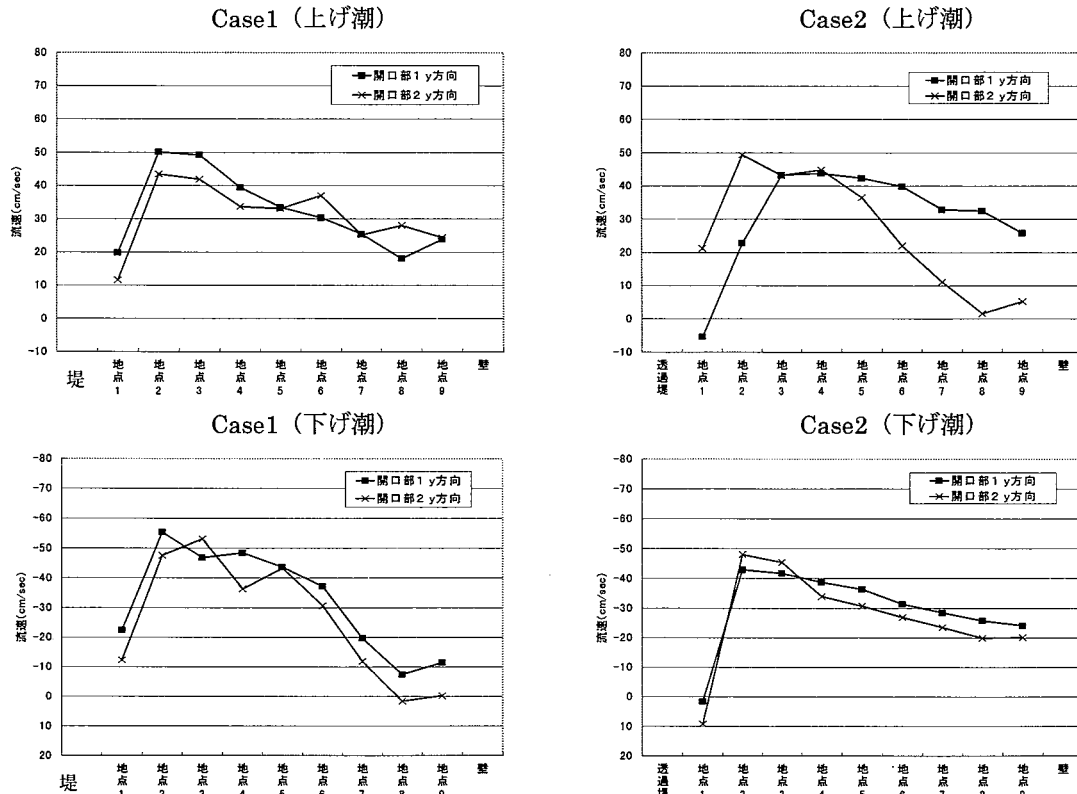


Fig.8 各開口部の横断方向における流速分布

Current Distribution in Crossing Direction of Each Opening Department

Table 2 上げ潮最強時における開口部からの流入水量  
Inflow Quantity of Water from Opening Department in Flood Tide

単位: cm<sup>3</sup>

	開口部1	開口部2	合計流入水量
Case1	6269.3	6368.9	12638.2
Case2	7430.7	4690.0	12120.7

Table 3 湾奥部における流動改善指標

Indicator of Flow Improvement in Bay inner Part

区域	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
	Case1	Case1	Case1	Case1	Case1
①	1.00	2.65	1.23	0.52	-
②	1.00	0.89	1.08	0.56	0.67
③	1.00	1.25	1.02	0.49	0.57
④	1.00	1.56	0.95	0.70	1.30
⑤	1.00	0.70	0.88	0.70	1.32
区画平均	1.00	1.41	1.03	0.59	0.96
⑥	1.00	1.30	-	0.25	-
⑦	1.00	-	0.95	1.10	1.03
⑧	1.00	2.03	0.74	1.13	0.54
⑨	1.00	0.75	-	1.13	0.63
⑩	1.00	-	0.64	-	-
区画平均	1.00	1.36	0.77	0.72	0.73

#### 4. おわりに

大阪湾奥部の閉鎖性水域に対し、防波堤の存在が水域環境悪化の要因であることを現地観測および、瀬戸内大型模型の実験で示した。そして、基礎水槽実験から、防波堤構造を一部透過型にすることで、防波堤背後水域内の流動を促進できることを明らかにした。

今後は、当該技術の実海域に対する有効性を、瀬戸内海大型水理模型実験で確認するとともに、水域規模・形状および、潮汐規模を変化させた基礎水槽実験も実施し、部分透過型防波堤の基本設計法の確立および、技術の実用化を目指したい。

#### 謝辞

本研究は、通産省工業技術院中国工業技術研究所との共同研究により実施したものであり、共同研究者である上嶋部長、山崎主任研究官を始めとする関係各位に対し深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 中野淑治・岩上淳一・溝内俊一・入尾野幸雄：  
名瀬港における潮流実験－防波堤計画の比較検討－，  
第29回海岸工学講演会論文集，pp. 629－632，(1982)
- 2) 上嶋英機・橋本秀資・田辺道弘・宝田盛康：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での実験  
結果－，海岸工学論文集，第38巻，pp. 851－855，(1991)
- 3) 辻博和 ほか：石積み浄化堤による海水浄化工法の開  
発（その1）実海域の浄化堤実証施設における水質  
浄化機能の初期特性，大林組技術研究所報，No. 49  
pp. 121～125，(1995)