

沿岸水域の環境修復にむけた海域流況制御技術の研究 (その2)

— 防波堤の部分透過型化による背後水域の流動促進に関する実験的検討 —

石垣 衛 辻 博 和

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

— Experimental Study on a Technique to Improve Flow by Partial Permeability Breakwater —

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 hydraulic model.

概 要

湾奥部域において、沖合防波堤の設置などによって現出される閉鎖性の沿岸水域を環境修復することを目的に、海水交換促進のための海域流況制御技術として、透過型防波堤の適用を検討した。前報で、透過型防波堤の基本性能を基礎水槽実験により評価し、その結果、堤体の透過位置・規模が水域の海水交換に大きく寄与することを明らかにしている。本報告では、基礎水槽実験で得られた結果をもとに、透過型防波堤を実水域に適用したときの効果を確認するために、瀬戸内海大型水槽を用いた水理実験を実施した。実験は、大阪湾奥部にある某港を対象に『防波堤なし』、『現況』、『全透過型防波堤』、『1/4 透過型防波堤』の4ケースについて検討を行った。

検討の結果、防波堤を一部透過構造にすることで海水交換を促進できることを確認し、海水交換型防波堤を実海域に適用する際に、最適な透過位置・規模が存在することを示した。また、このような流況制御を行うことが、防波堤背後水域のみでなく、更なる港内奥部の運河域等の局所的な流れにも有効に作用していることを示した。

1. はじめに

大阪湾等の湾奥部域では、大規模な人工島や埋立などにより閉鎖性水域が形成され、富栄養化による赤潮や貧酸素水塊の発生など多くの問題を抱えている。前報で実施した現地観測および水理実験¹⁾より、埋立にともなう防波堤の設置が、堤内に停滞性水域を形成し、海水交換の低下を招いていることを確認した。

防波堤の設置は、防災や港内静穏化の目的から必要不可欠であるが、沿岸水域の環境修復・保全を考えたとき、海水交換促進機能を付加した海水交換型防波堤の検討が必要と考える。しかし、従来の研究²⁾では、海水交換型防波堤の透過構造と導水量の関係を評価するに止まり、実海域の潮汐流を中心とした流動場を考慮した上で、水域の流況制御を目的とした最適な透過位置・規模を求める検討は行われていない。前報で行なった海水交換型防波堤の予備検討¹⁾より、内湾の沿岸域における海水交換の駆動力は主に潮汐流によるものであることが示唆されており、防波

堤によって潮汐流を制御する手法を検討することが重要と考える。本研究では湾奥部水域における流況制御を目的として、海水交換型防波堤の最適な透過位置・規模について、瀬戸内海大型水理模型を用いて検討を行った。

2. 海水交換型防波堤の性能評価

2.1 瀬戸内海大型水理模型実験装置と実験方法

(1) 実験装置

大阪湾奥部水域において、海水交換型防波堤の設置が水域の流動環境に及ぼす影響を検討するために、瀬戸内海大型水理模型を用いた水理実験を行った。

当該水理模型は、通産省中国工業技術研究所にあり、1973年に完成して以来、上嶋ら³⁾によって潮汐、潮流の相似性が確認されるとともに、多くの実験研究が行われている。Fig. 1に実験装置の概要を、Table. 1に模型の諸元を示す。瀬戸内海大型水理模型は、水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/159の歪模型で、水面の広さ約 7,500m²、1回

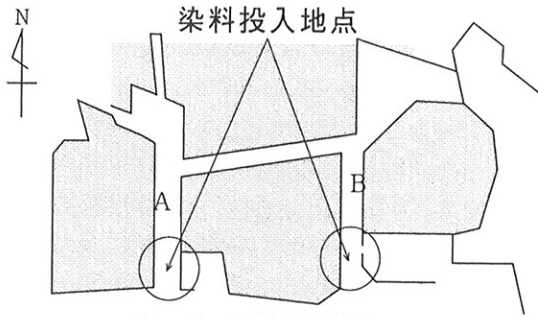


Fig. 8 染料投入地点
Injection spot of dye

3.2 奥部水域の海水交換促進効果

前節にて現地観測より、港内奥部の運河域では潮汐の干満に関係なく西から東へ向かう一方向流が存在していることが確認された。ところで、先に2.2節で示したように、防波堤背後に大きな時計廻りの循環流(恒流)が存在していることから、この循環流が運河の一方向流れの形成に大きく影響していると考えられる。

ここでは、2.2節で示したように、防波堤を一部透過構造にすることで、防波堤背後水域の流動を制御することに着目し、防波堤背後水域の流動を制御することが、当該運河の流動環境にどのような影響をおよぼすか、瀬戸内海大型水理模型実験にて検討した。

(1) 実験方法

Fig. 8に示すように、水理模型内のA, B地点に対し大阪港の上げ潮後の憩流時に染料を投入し始め、10潮汐周期間に渡って連続投入した。使用した染料は、インディゴカルミン(青色)で濃度は20mg/lに設定した。

実験ケースとして、先の第2章で示した4ケースから、Case1:不透過型防波堤(現況), Case4:部分透過型防波堤(端部1/4透過構造)の2ケースについて実験を行った。

(2) 実験結果

Fig. 9にCase1およびCase4の10周期後における染料の拡散状況の結果を示す。図から、Case1で連続投入した染料は、10周期後には運河域(図中の点線四角で囲んだ領域)の西側まで達していることが確認された。Case2で連続投入した染料は、10周期後には運河域の東端まで達していることが確認された。両ケースにおける染料の時間当たりの移流から運河域の流速を算出すると、Case1で約2cm/sec, Case4では約5cm/secの流速を得た。ここで、Case1にて算出された流速は、Fig. 7に示した恒流とほぼ同オーダーの数値である。実験結果から、防波堤を一部透過構造にすることで、水域に連結する奥部運河域の海水交換を促進できることを示した。

4. おわりに

大阪湾奥部の防波堤で囲まれた水域に対し、防波堤を一部透過構造にすることで、堤背後水域の流況制御を可能と

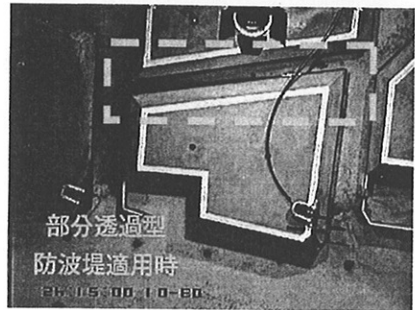
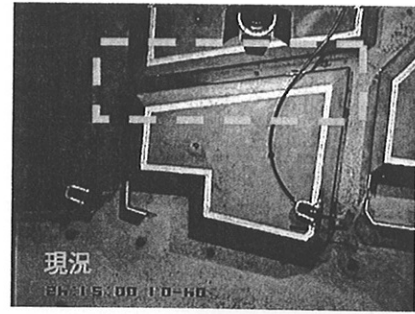


Fig. 9 染料の拡散状況 (10pd.)
Diffusion of dye

し、海水交換を促進できることを示した。また、堤背後水域の海水交換を促進することは、当該水域に連結する水域奥部の運河域の海水交換にも大きく寄与することを水理実験により確認した。

今後は、当該技術による海水交換の促進が水域におよぼす影響を、生物的指標によって評価すべく、生態系モデルによる数値解析にて検討を実施するとともに、部分透過の構造形式について検討する予定である。

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) 石垣 衛・辻 博和: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-, 大林組技術研究所報 No.60, pp.111-pp.116, 2000
- 2) 西守男雄・日比野忠史・鶴谷広一・石原弘一:実海域における下部透過型防波堤の海水交換特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1081-pp.1085, 1999
- 3) 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
- 4) 武岡英隆:沿岸域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 第21巻, 第2号, pp.169-pp.182, 1984

一方、恒流として比較的大きな流れが得られたSt. 2とSt. 3東西方向の運河域では、潮汐の干満による往復流に加えて、西から東へ向かう一方向の流れが存在すると考える。

Fig. 7に冬季観測の結果を示す。図は、Fig. 5に示すL1およびL2の測線をADCPにて観測することで、断面の流速分布を求め経時変化にて示した。各①から⑥の図の潮時を图中的潮位変動グラフに対応させて示した。ここで、分布を示すコンターの色が赤ければ西から東へ向かう流れを示し、青ければ東から西へ向かう流れを示す。また、

各々の色が濃いほど流速が大きいことを表している。

図から上げ潮時(①の潮時)において、運河の主流を示すコンターは赤く、流れは西から東への向きである。満潮から干潮の潮時(②~⑤)では、下げ潮後の憩流時の⑤において、L2で主流の向きが混在しているが、その他の潮時で、流れは西から東へ向かう一方向流を形成している。

上述の夏季・冬季の2つの観測結果から、当該運河域では、潮汐の干満に関係なく西から東へ向かう一方向流れが存在することが確認された。

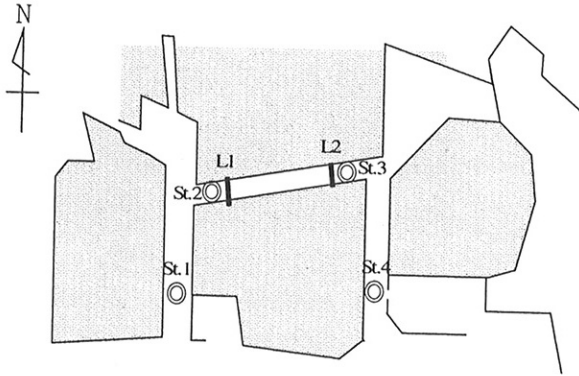


Fig. 5 調査地点
Observation point

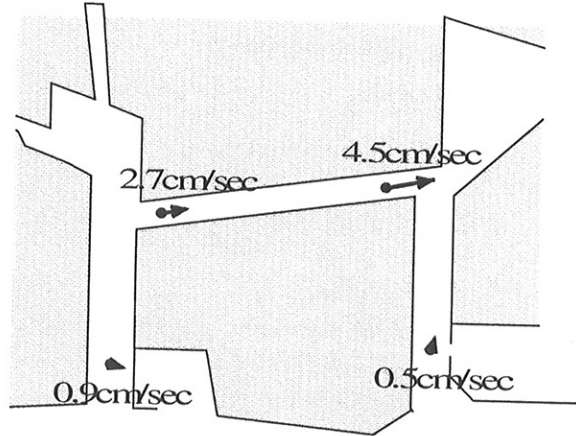


Fig. 6 恒流図 (夏季)
Observation result of current

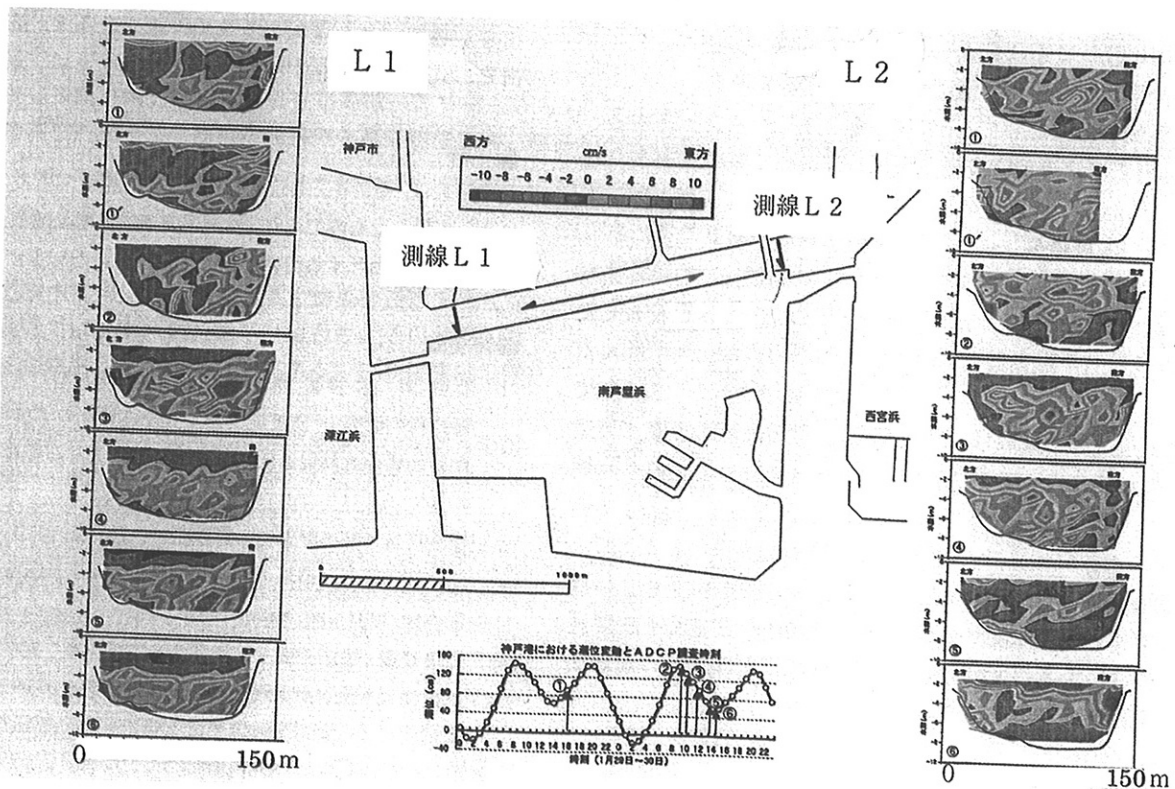


Fig. 7 冬季ADCP調査結果
Observation result of tidal current in winter using ADCP

(2) 海水交換率と平均滞留時間について

各実験ケースの海水交換性能を比較するために、各潮汐周期毎に堤内水域に残留した浮標個数をプロットしたグラフを Fig. 4 に示す。ここで、初期配置した浮標の個数に対する各潮汐周期毎の堤内水域に残留した浮標の個数の比を浮標の残留率として数値を求めた。

図より、Case 2 は最も海水交換性能が高く、5 周期で残留率約 10% 以下となった。Case 1 は、最も海水交換性能が低く 5 周期で残留率約 60%、10 周期で残留率約 30% であった。Case 3 および Case 4 は、ほぼ同等の海水交換性能であり、5 周期で残留率約 35%、10 周期で残留率約 10% であった。

ここで、プロットした残留個数に対して武岡⁴⁾らが用いた (1) 計算式によって、残留曲線を近似させることで各実験ケースの 50% 海水交換時間および、90% 海水交換時間、平均滞留時間を求めた。

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp - at \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

C_0 : 初期配置した浮標個数

$C(t)$: 各潮汐周期における残留浮標個数

$\frac{C(t)}{C_0} = 0.5$ のとき t は 50% 海水交換時間を表す

$\frac{C(t)}{C_0} = 0.1$ のとき t は 90% 海水交換時間を表す。

また、武岡らは、平均滞留時間 τ_r を以下の (2) 式により定義している。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \exp - at \, dt \dots\dots\dots (2)$$

Table 4 にケース毎の 50% 海水交換時間および、90% 海水交換時間、平均滞留時間を示す。Table 4 より、4 つの実験ケースの中で、Case 2 の海水交換率が最も高く、平均滞留時間が 2.4pd. を得ている。Case 1 は最も海水交換率が低く、平均滞留時間が 6.4pd. であった。Case 3 および Case 4 は平均滞留時間が 4.5pd., 4.4pd. とほぼ同等であった。

実験結果から、透過型防波堤を用いることによって、従来の不透過構造の防波堤に比較して、海水交換を促進できることが明らかとなった。その際、透過型防波堤を用いた Case 3 と Case 4 の海水交換性能がほぼ同等であることから、防波堤を一部透過構造にすることで、有効な海水交換性能を得ることが確認できた。このことは、海水交換型防波堤を実海域に適用する際に、最適な透過位置・規模を検討することが重要であることを示している。

3. 海水交換の促進が港内奥部水域に及ぼす効果

前章までに、部分透過型防波堤を用いて防波堤の背後水域の流況を制御することで、海水交換を促進することが可

能であることを示した。本章では、防波堤で囲まれた港内

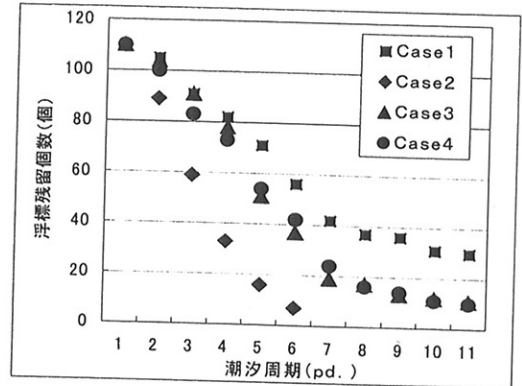


Fig. 4 浮標ボールの残留個数変化
Variation of number that float is left

Table 4 海水交換性能比較
Reference of performance of tidal exchange

	海水交換時間 (pd.)		平均滞留時間 (pd.)
	50%交換	90%交換	
Case 1	5.4	12.7	6.4
Case 2	2.1	4.6	2.4
Case 3	3.9	8.7	4.5
Case 4	4.1	8.2	4.4

の海水交換の促進が、港内奥部水域の流動環境に及ぼす効果について検討すべく、現地の流況を観測するとともに、瀬戸内海大型水理実験模型にて、港内奥部に位置する運河域の流況変化について実験的検討を行った。

3.1 港内奥部水域の流動環境の観測

(1) 観測場所・日時および内容

Fig. 5 に示す港内奥部に位置する運河域に対し、流動環境を把握するために、運河内の流況観測を夏季と冬季に 1 回、合計 2 回の観測を実施した。

夏季の観測は、1997年9月3日～9月25日にかけて23日間の観測を実施した。Fig.6 中に◎印で示した地点に流速計を設置し15日間連続流況観測した。

冬季の観測は、水塊構造の違う冬場の現地状況を観測することで、運河域の季節による流れの構造特性を把握することを目的とし、1998年1月29日～30日の大潮期における集中観測とした。Fig.6 に示した測線L1, L2上でADCPを用いた断面方向の流況特性を観測した。

(2) 調査結果

Fig. 6 に夏季観測の結果を示す。図より、St. 2 および St. 3 では、約 3cm/sec～4cm/sec の西から東へ向かう恒流が観測された。また、St. 1 および St. 4 では、恒流は 1cm/sec 以下の小さな流速であった。St. 1 と St. 4 の南北方向の運河で恒流が小さいことは、潮汐の干満に応じて運河域に往復流が存在することで、北へ向かう流れと南へ向かう流れが同じ大ききでバランスしている結果と考える。

2.2 海水交換型防波堤の性能評価

(1) 堤背後水域の流況変化について

Fig. 3は、1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。

図より、Case1 (現況) では、防波堤内西側の水域で循環流が存在し、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。Case2 (防波堤なし) では、流れは防波堤内の水域で阻害されることなく、全体的に西から東へ向かう一方向流を形成した。

Case1では、初期配置した浮標ボールが5周期経過後も堤内水域に存在するのに対し、Case2では、3~4周期で浮標ボールのほとんどが、堤外水域に流出することが確認された。この結果から、防波堤の設置が堤内水域の停滞性を増し、海水交換を低下させる要因の1つであることが明らかとなった。

Case3 (全面透過) および Case4 (部分透過) では、Case2同様に防波堤内の水域で西から東へ流れる一方向流を形成し、浮標ボールは4~5周期でそのほとんどが堤外水域へ流出した。ここで、各ケースの1潮汐周期間の流況を比較すると、Case2が水域全体で最も長い流程であり、次いで、Case3、Case4がほぼ同等の流程であった。Case1は、防波堤内西側に存在する循環流の流程は長いものの、

中央部から東側水域の流程は、他のケースと比較して短くなっている。

Table 3 実験ケース
Experimental Case

ケース名	堤体1	堤体2	堤体3	堤体4	堤体5
Case1	不透過	不透過	不透過	不透過	不透過
Case2	なし	なし	なし	なし	なし
Case3	透過	透過	透過	透過	透過
Case4	透過	不透過	不透過	不透過	不透過

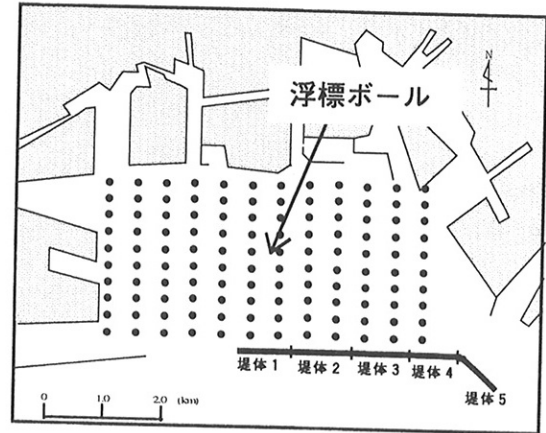
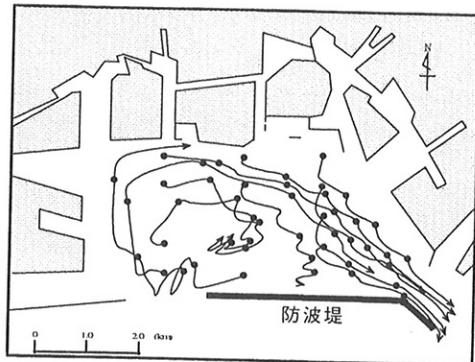
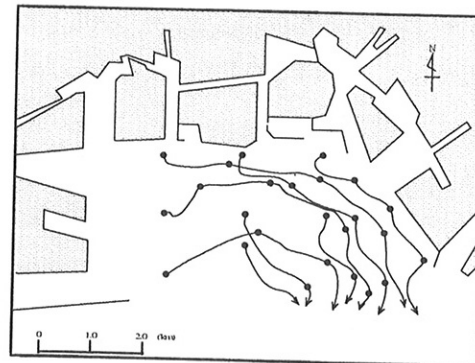


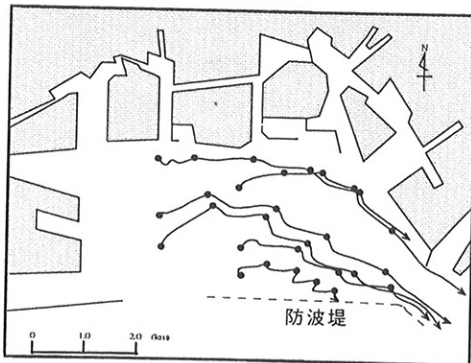
Fig. 2 実験水域地形および浮標初期位置
Hydraulic Model and Initial Position of Float



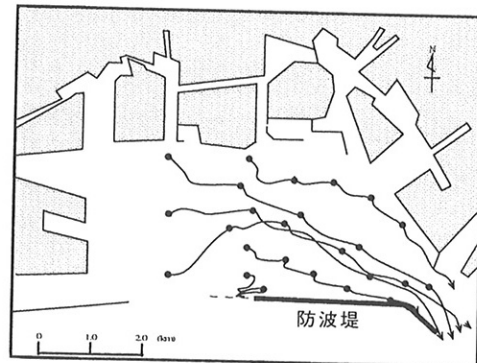
Case1: 不透過型防波堤 (現況)



Case2: 防波堤なし



Case3: 全透過型防波堤



Case4: 部分透過型防波堤

Fig. 3 各ケースにおける流跡線
Trajectory of Each Cases

に使用する水量は約 5,000m³であり、豊後水道から大阪湾、紀伊水道までの瀬戸内海全体を再現した世界最大級の水力模型である。水力模型内に潮汐を発生させる装置は紀伊水道、豊後水道および関門海峡の3つの海峡部の位置に設置され、潮汐発生システムによって Table. 2 に示す半日周期 (M₂潮) を 4.7 分で起こすことで、運転制御されている。

(2) 実験方法について

防波堤で囲まれた代表的な水域として大阪湾奥部の某港をケーススタディの場所を選定した。実験は、Fig. 2 に示すように、110個の浮標ボール (直径35mm、比重0.95) を港内に均等に初期配置し、M₂潮において10周期間この浮標ボールを追跡することで堤内水域の流動や海水交換特性を求めた。実験に用いた防波堤の模型は、某

港内の沖合防波堤を5分割し、各区画の堤体が透過構造、不透過構造になるように設定した。ここで、透過構造の防波堤模型は、その投影断面開口率が30%となるように、ステンレスの網を張った堤体を用いた。実験ケースとして、Table. 3 に示す4ケースを設定し実験をおこなった。ここで、各ケースについて、

Case1: 不透過型防波堤 (現況)

Case2: 港内に防波堤がない

Case3: 全透過型防波堤 (全面透過)

Case4: 部分透過型防波堤 (端部透過)

を想定した実験とした。Case4の部分透過型防波堤は、防波堤の西端部を透過型にして、透過部堤体長さは、堤体の1/5の長さとしている。

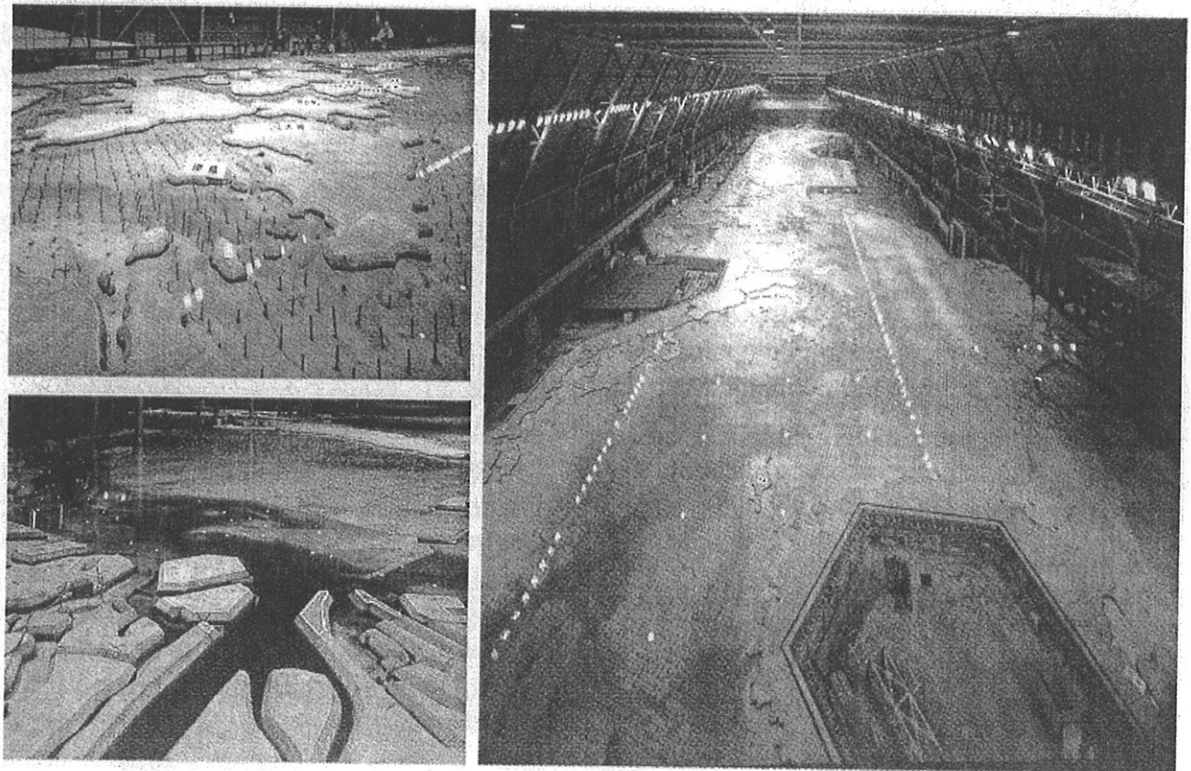


Fig. 1 瀬戸内海大型水力模型
Seto Inland Sea Hydraulic Model

Table. 1 水力模型の縮尺
Hydraulic Model Various Element

項目	原形	模型
水平縮尺	1	1/2000
鉛直縮尺	1	1/159
時間縮尺	1	1/159
流速縮尺	1	1/12.6

Table 2 水力模型における境界条件 (M₂潮)
Boundary Conditions for Physical Model

場所	振幅 (mm)	位相 (°)
紀伊水道	5.0	0.0
豊後水道	5.2	349.0
関門海峡	1.9	238.0