

瀬戸内海大型水理模型による実験的研究（序報）

井原 潤*・肥後竹彦*・田辺弘道*・平田静子*

1. 概 要

瀬戸内海大型水理模型実験場は、昭和48年5月に完成し実験を開始した。本論文には実験場建設時の諸問題、実験のために新しく開発した計測機器などの内容、研究初期成果について報告をする。

瀬戸内海は近年沿岸地域の開発により汚染が急速に進んでいて、今後の大規模な埋立などによる潮流変化、汚濁の変化等予測するには、大型水理模型実験は精度が高い。特に内海水域は豊後、紀伊、関門の3海峡から海流が出入し、多数の島や複雑な地形などにより水理実験が有用である。また大型のため広範囲、長期間にわたり実験が可能となる。大型水理模型は縮尺水平1/2 000、垂直1/160で、模型水槽は長さ約200 m、幅約100 m、最大水深2 mとし通常水5 000 tを使用する。模型表面積は約7 500 m²で3カ所の起潮装置により内海に±2 cmの潮汐を発生させる。研究内容は、原型と模型の相似性確認後、河川流量を与え、電子計算機導入により、起潮装置の制御性向上とともに各種計測器の集中制御、データ収集システムを完成し、廃水の拡散、海流現象の研究、内海の水海交換の研究、埋立、海中構築物の影響の研究、広域汚濁に関する研究、密度流をよる研究、温排水による拡散研究などを実施する。

2. 相 似 性

水理模型実験では、原型の現象をすべての面について模型で再現することは原理的に不可能である。相似性とは現象のうちから抽出されたある特定の関係が原型と模型において相似性を保つことを意味する。

潮流は水平方向に卓越し圧力は静水圧分布をなしているため運動方程式および連続式は次のように示される。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + SU \frac{\partial U}{\partial x} + SV \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{C}{2h} U^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + SU \frac{\partial V}{\partial x} + SV \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{C}{2h} V^2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uh) + \frac{\partial}{\partial y}(Vh) = 0 \cdots \cdots \cdots (3)$$

U および V はそれぞれ x, y 方向の平均流速, t は時

間, ζ は水面昇降量, C は水底の摩擦係数, g は重力加速度, h は水深, S は流速の鉛直分布に關係し 1 に近い係数。これらの式を解き原型に関する量と模型に関する量との比を添字 r で表わし $S_r = 1$ として

- 垂直縮尺 $h_r = x_r^{2/3}$
- 時間縮尺 $t_r = x_r^{2/3}$
- 摩擦係数縮尺 $C_r = x_r^{-1/3}$
- 粗度係数縮尺 $n_r = x_r^{-1/18}$
- 流量縮尺 $Q_r = x_r^2$

表-1 模型諸元（水平縮尺1/2 000）

水 平 縮 尺 x_r	1	2 000
垂 直 縮 尺 h_r	1	159
水 深	30m	20.1cm
湖 差	2m	1.34cm
時 間 縮 尺 t_r	1	159
周 期	12時25分	4.7分
"	1年	55.1時間
流 速 縮 尺 U_r	1	12.6
流 速	1ノット	4.0cm/sec
"	1m/sec	7.9cm/sec
流 量 縮 尺 Q_r	1	4×10 ⁶
流 量	100m ³ /sec	25cc/sec
"	100万m ³ /day	2.9cc/sec
粗 度 係 数 縮 尺 n_r	1	0.656
粗 度 係 数	0.02	0.031
摩 擦 係 数 縮 尺 C_r	1	1/16
摩 擦 係 数	5×10 ⁻³	0.08

これらはすべて水平縮尺のみにより決定しうる。また垂直縮尺は必ずしも等しくする必要はなくひずみ模型でもよい。水平縮尺は原型の再現について可能な限りの精度を保つため 1/2 000 とした。模型の主要諸元を 表-1 に示す。

以上の関係において摩擦係数は一般にレイノルズ数の関数であり、摩擦係数は時間的に変化するので厳密な意味での相似性を保つには、原型の摩擦係数の時間的変化に応じて変化する摩擦係数を模型に与えねばならない。しかし原型は摩擦係数の変化はわからず、模型にも変化を与えることも不可能である。

潮流の流速はゼロから最大に達するので流れは層流域から遷移域を通して乱流域になるが、潮流が潮汐によっておこされる場合は乱流が支配的であり、模型内の流れ

* 工業技術院 中国工業技術試験所

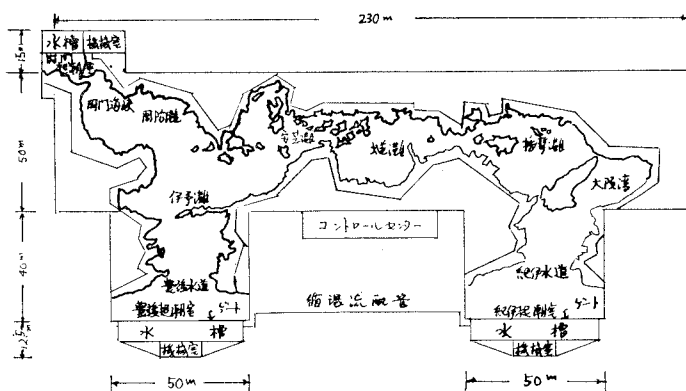
がどの程度乱流になっているか計算する必要がある、模型の精度を論ずる一つの尺度である。

実際には、原型の粗度係数が明確でなく、まず m_r を大ざっぱに見積って模型を作り、検証実験により潮汐の振幅、位相、流況、流速など正しく再現しようという試行錯誤的に人工粗度を調整する。

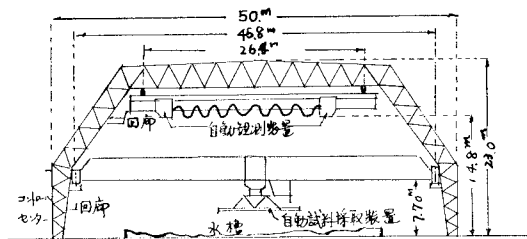
3. 実験設備

(1) 水理模型実験場

実験場の構造は、床が鉄筋コンクリート造り、建屋は350 mmφ 鋼管造平家建て、その一部の水槽、起潮室、機械室は鉄筋コンクリート造りである。床面積は約 17 000 m²、棟高約 23 m である。建設場所は、瀬戸内海に面した埋立地で、広大な床面を支える基礎が不安定であ



図一 大型水理模型実験場平面図



図二 大型水理模型断面図

り、床面が不等沈下の心配があり、800 mmφ の特殊基礎杭を打ち、床面を特に地中ばりで補強している。建屋内部は上、下2段に天井走行クレーン懸架用のガーダーレールを備え、また観測用に上下2段の通路を設置した。建屋構造は新しく開発した立体トラス構造で屋根は長尺カラー鉄板葺、壁はスレート造りアルミサッシュ取付け。建屋中央部に隣接しコントロールセンターがあり、床面積延 980 m² の鉄筋コンクリート造り2階建である。

(2) 水理模型

対象海域は瀬戸内海全域と、紀伊水道、豊後水道、関門海峡部を含みそれぞれに起潮装置を設置した。

海底地形図は、水路部の原図をもとにし不足分は海図を用い、全域を水平縮尺 5 万分 1 の等深線図で作製し、合計 35 枚となる。しかし原図は各海域における基本水準面により作製しているため水深を統一するため宇部港基本水準面を基準として東京湾中等潮位に対比しうる基準面に補正した。

模型を限られた建屋内に配置するため、35 枚の図面上に特別の基点を設けて座標軸を決め、建屋の柱位置を決定したが、地図上で 0.01 秒の精度で読み取り、建物の柱位置は mm 単位で決定した。海岸線は、海図を修正し、5 万分 1 の国土地理院の地形図、港湾局よりの現状海岸線図、港湾図、埋立図などで補正し、航路は現状図による。河川の図面は、一級河川など実測図があるものは資料により横断面縦断面図を模型縮尺に合わせて製作し資料

がない河川は平面図を 5 万分の 1 の地形図で現地距離 2 km まで作製し、河川数合計 98 となっている。

模型は外周立上りをコンクリートブロックで造り高さ 96 cm にし床、立上りともアスファルト防水を行ない、模型下地は、各種テストの結果 1:10 の粗モルタルで作し、中塗モルタル整形荒仕上げの後、白色セメント使用のモルタル上塗、刷毛引き仕上げとした。海底地形の等深線は、新しく開発した特殊投影装置により直接床面に投影し描いた。

陸地部、島部は水深 0 m より垂直に 50 mm 立上り、上部は 45° の勾配にし、0 m より 100 mm 高で平面とした。模型内平均水面は床面より約 80 cm の高さであり、現地の水深が 320 m 以上は、模型内水深 2 m を限度とした。この部分はあらかじめ床面を建設時に掘り下げて製作した。模型製作精度は水深 10 cm まで ±1.0 mm、10 cm 以上は ±2.0 mm とした。

大型模型のため全域を同一水準に製作する技術が必要であり、水準測量には慎重な作業を実施し完成した。

主要検潮所位置には、差圧型水位計設置用と部分汚染水の排水用と併用のため水抜孔を設置した。

(3) 設置機器

a) 起潮装置

潮汐を発生させる装置としてバルブ式、空気式などがあるが、堰式を採用した。瀬戸内海大型水理模型のように狭い幅の所に大容量の水を出入させ、しかも相互に干渉の恐れがある距離に起潮装置が 3 か所もあるので、従来の国内での装置では潮汐の制御は困難である。今回設置した堰式は国内でも最初で最大の装置である。構造上強力なサーボ駆動装置と、密閉型の堰と組合せが必要で、堰の構造や取付けに高い精度が必要である。

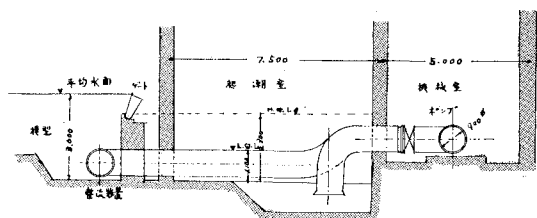


図-3 ゲート部断面図

主要構成は大型低圧給水ポンプと堰の組合せからなり貯水槽の水を給水ポンプで模型側に送水し、堰の上部より越流させ、堰の開閉により模型水面に振幅を与え模型内に潮汐を発生させる。建屋の構造上から、油圧シリンダー直結の押し上げ方式とする。

紀伊水道、豊後水道起潮装置用ゲート全長は45.8mでそれぞれ4門で構成し、

径間 13.9m×扉高0.7m 2門

径間 9.0m×扉高0.7m 2門

関門海峡は全長14.5m×扉高0.7m 1門となっている。

制御方法は中央制御室からの遠隔操作方式をとる。

ゲート動作は、中央制御室内の制御用発振器にあらかじめ設定された信号による。ゲート制御装置はそれぞれ各起潮装置ごとに設置し、制御信号発生部、水位検出部、一次制御部、二次制御部、サーボシリンダー部、油圧配管などよりなる。扉体は4分割し、個々に運転も可能であり、現地1年間の潮汐が再現可能なよう、連続55時間以上運転可能である。給水用には大型斜流ポンプを使用し耐塩水用で、油混入を防ぐ水潤滑ベアリング構造である。

各ポンプの給水容量は次のようである。

豊後水道 120 m³/min, 紀伊水道 90 m³/min,

関門海峡 10 m³/min

ゲート前面には水位制御性向上のためドリフトが少ない、特に開発した精密水位計を各ゲートごとに設置した。

実験開始前に、模型内で水温、水質を一定に調整するため、豊後、紀伊各起潮室内の水槽を600mmφのパイプで連結し循環流を発生させ、起潮装置運転中は各水槽の水位を一定に保持させる。

豊後水道、紀伊水道起潮室水槽

7.5 m(幅)×45.8 m(長)×3 m(深)

関門海峡起潮室水槽

7.5 m(幅)×15.0 m(長)×3.18 m(深)

なお、豊後水道側水槽には予備水槽を設置している。

ゲート転倒角 36°

周 期 4.0分～9.4分

ゲート振幅 ±50 mm

ゲート撓度	径間の1/3 000
追従精度	±1.0 mm (制御信号に対するゲート動作)
停止精度	±0.5 mm (同上)
同期精度	±1.0%(シリンダーストローク300 mに対する各シリンダーのずれ)
制御用水位計 (V C-201 型) 触針型	
測定範囲	0～±30 mm
精 度	±0.1 mm (淡水, 塩水用)
直 線 性	±0.1 mm
ドリフト	0.1 mm/10 hr

ポンプ吐出口には配管と同じ口径の整流装置を設置した。

48年度においては制御用電子計算機を導入し、ゲート扉体を4分割のままで独立に運転制御をさせるほか、従来の起潮装置で制御が困難な分潮の合成、異状潮位の発生などを可能にし、模型実験精度の高度化を考慮している。

b) その他装置

① 河川流量制御装置：模型内に流入する河川について月間平均流量が与えられるものは、計算機からの信号により年間流量を可変にし、他の河川は年間平均流量を与える。

② I・T・V監視装置：模型内機器の運転状況、場内実験経過を監視し、中央制御室で制御するI・T・V装置である。

③ 場内連絡ページング装置：場内相互に連絡可能なように、有線、無線連絡ページング装置を設置している。

④ 潮汐周期、時間表示装置：計算機からの信号により場内に設置し、実験経過の確認用となっている。

⑤ 場内照明装置：場内撮影用を含め、天井吊下げ灯と投光器を設置し、光源はメタルハライドランプで水面を500 lx以上で照明する。

⑥ 換気装置：天井屋上に、換気扇を設置し、遠隔制御可能となっている。

(4) 計測装置

a) 水位計 (20台)

起潮装置のゲート前面に設置した水位計と同じ触針型で、実験継続時間が55時間以上のためドリフトが少なく高精度のもので同様に新しく開発したものである。

記録は中央制御室の12チャンネル記録計に収録するが、今年度は電子計算機の補助記憶装置に同時に収録し必要なデータを解析する。

測定範囲	0～±20 mm
精 度	±0.1 mm
直 線 性	0.1 mm

ドリフト 0.1mm/6 hr

通常水, 塩水 切替可能

b) 自動観測装置 4基

流速測定方法は, 浮標追跡方式とする。大型水理模型のため撮影範囲が広く, 全域撮影には天井走行型の自動観測装置を必要とし, 撮影装置を積んだ4基の装置であり, 大阪湾から周防灘まで210 m間移動が可能で, 模型水面上約14 mに設置している。1基に2台の観測室が取り付けられ, この床面に模型水面の位置決めをなすI・T・Vとモニターおよび特殊長尺マガジンをもち35 mmカメラが付設している。

c) 自動撮影装置

自動観測装置の床面に設置し, 200 ft (1 600 コマ)撮影可能なように新しく開発した長尺マガジンをもち一眼レフ35 mm電動カメラである。観測装置に8台設置し, 豊後, 紀伊水道には固定場所に設置した。各カメラは, 制御線により作動し, 中央制御室のタイマー信号で最大1秒間隔の撮影が可能である。フィルムはカラーか白黒の200 ft用を使用する。レンズは24 mmを標準とし将来は20 mmより望遠まで使用する計画である。

d) 自動試料採取装置(2基)

拡散実験による染料濃度分布を計測するため, 採水器を塔載可能な10 m×10 mの採取台をもつ天井走行型の装置で, 模型水面上約6 mに設置し, 水面上全域に移動可能である。採水位置は再現性が必要であり, 自動観測装置と同様, 新たに開発したもので, 走行, 横行, 採取台の捲上下, 採取台回転の諸機能をもち, それぞれ直流サイリスタワードレオナード制御装置を備えた高精度の採取装置で, 任意の位置での採水が繰返し再現可能である。スパン45.8 m, 重量は約70 tである。

e) 採水装置

上記試料採取装置に塔載する移動型採水装置を100台と, 模型周辺に設置し連続に採水可能な固定型採水装置28台がある。両者とも, 一定水深から採水可能な水面検知器を備え, 前者は, 自動試料採取装置の採取台に塔載し2回採取可能である。後者は, 30回, 90回連続で採水可能な真空式採水器であり90回連続採水用は新たに開発したものである。

f) 自動濃度測定装置

拡散実験で採水した染料水の濃度を分析する装置である。採水する量が多いので, 自動分光光度計を設置した。

デジタル分光光度計, サンプルファイダー, デジタルレコーダー, サンプルカウンター, 卓上記録計などより構成され自動測定をなす。

g) その他

その他の計測装置として, (1)模型内の流速測定用小

型流速計, (2)多点の水温測定用装置, (3)温排水の拡散現象測定用装置などを設置し, (4)データの解析装置として, 自動撮影装置で撮影した膨大な量の浮標解析用, フィルム座標解析装置, (5)データを処理図形化用大型XYプロッター, (6)記録されたデータを解析するカーブリーダーなどの装置を設置し, 電子計算機による自動化を計画している。

4. 実験内容

起潮装置と各種計測機器を調整し6月より実験を開始し表-2に示す境界条件により実験の結果, 堰式起潮装置の特性を示す高精度の制御性, 追従性などが確認され, また高度の模型製作技術によりかなり原型との相似現象が見られ, 今後の機器の調整, 模型粗度調整により従来にない高精度の実験結果が得られる。

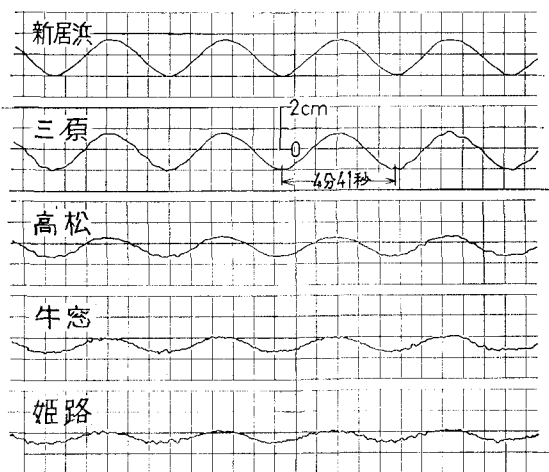


図-4 水位計記録図

表-2 実験結果 (M₂ 潮)

	模型振幅 mm	原型換算 振幅 cm	原型振幅 cm	模型位相 差 deg	原型位相 差 deg
紀伊水道ゲート*	3.2			0	
豊後水道ゲート*	3.3			14	
関門海峡ゲート*	1.9			122	
宇和島	3.5	56	56	52	42
宇部	7.8	124.8	109	106	90
新居浜	8.2	131.2	109	152	153
高松	4.5	72	64	158	158
牛窓	3.4	54.4	48	159	154
和歌山	2.7	42.4	46	18	14
引田	3.5	55.2	36	183	162

* ゲートの設定値 周期4.68分

5. あとがき

6月より起潮装置の総合運転を続行し、原型との相似現象を確認し始めた。設置した模型は大型のもので、広域にわたる長期間の連続運転が可能で各種目的に応じてかなりの成果が期待される。しかし水理模型実験そのものの有用性と限界によって実験内容には限界があり、設置した起潮装置をはじめ各種計測器も開発中のものが多く今後の重要な研究内容となっている。

参 考 文 献

- 1) 工業技術院資源技術試験所：大型水理模型の潮汐制御について，昭45. 5.25
 - 2) 工業技術院資源技術試験所：大型水理模型の潮汐発生装置の設計，昭和45. 5.29
 - 3) 通産省企業局：瀬戸内海大型水理模型 現地データ，海底地形図，底質図作製要領，昭45. 6.
 - 4) 通産省公害保安局公害部：同上(2)，昭45. 7.
 - 5) 樋口明生：沿岸海洋に関する水理模型実験，1972. 7
 - 6) 建設省中国地方建設局：水理模型実験場工事概要，1972.1
-