

潮汐水理模型の縮率効果について

——瀬戸内海の大型模型と小型模型の比較から——

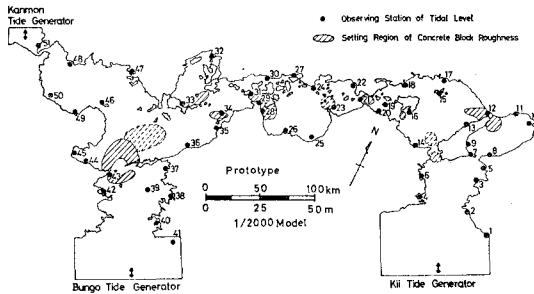
安田 秀一*・樋口 明生**・早川 典生***

1. ま え が き

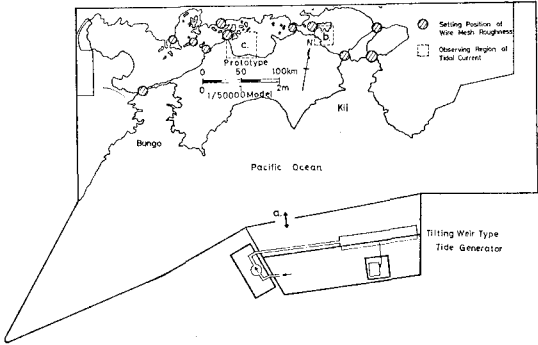
沿岸海域における物質輸送や海水交換に関する研究は、現地観測・理論解析・数値解析・水理実験等を駆使して種々行われているが、これらのうち模型実験（数値・水理）は現実に対応した境界を設置しうる利点があり、様々な縮率やパラメータを与えて拡散シミュレーションが行われ、その機構が論じられている。水理模型では一般にフルード則に基づいて平均的な潮位や体積輸送を再現させているが、流速分布や拡散の相似性については現地資料が少ないこともあり、十分に明らかではない。また水理模型の中には、少数の例を除いて現地ではあまり観測されたことのない潮汐残渣流が顕著に現われ、長時間の大きいスケールの拡散に影響を与えている。本研究はフルード則に基づく潮汐水理模型での諸々の現象の再現性を把握することを目的として、縮率の異なる2つの瀬戸内海水理模型（中国工業技術試験所の水平縮尺 1/2 000、鉛直縮尺 1/160 の大型模型と京都大学防災研究所の水平縮尺 1/50 000、鉛直縮尺 1/500 の小型模型）での潮位、流況、拡散に関する実験データを比較してフルード水理模型の縮率効果を検討、考察したものである。

2. 模型の比較と実験の概要

両模型共、モルタル仕上げで流体現象の起動力となる外力は外海に面した境界から流出入する潮汐流のみである。図一は大型模型の一般概略図であるが、別報な



図一 1/2000 模型の概要と潮位測定位置



図二 1/50 000 模型の概要と流速値測定海域

ど^{1),2)}にも紹介があるのでここでは説明は省略する。図一2は小型模型の概略図である。起潮方式は大型模型と同じ傾斜堰式であるが、模型内の潮位は紀伊・豊後両水道の位相を再現させるために図中の記号 a. の箇所を水が出入りすることによって変化するようにになっている。関門海峡を通過する流量は二つの水道に比べて小さいことから、海峡は仕切って潮位・潮流の調整は行わなかった。両模型の縮尺の諸元を表一に示す。比較のための実験は潮位・潮流・拡散にわたって行ったが、外力としての潮汐は両模型共平均潮である M_2 潮（半日周潮）のみを与えた。なお以下に示す現象の諸量は特に断わらないかぎり現地換算された数値で記す。

表一 模型 諸 元

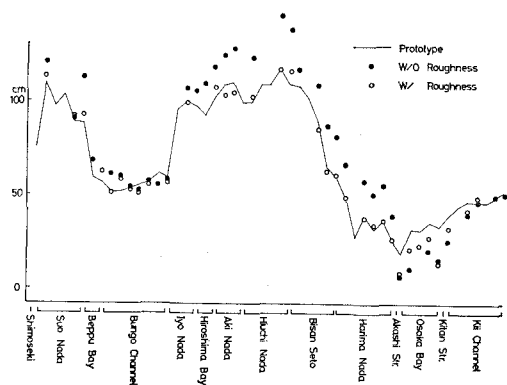
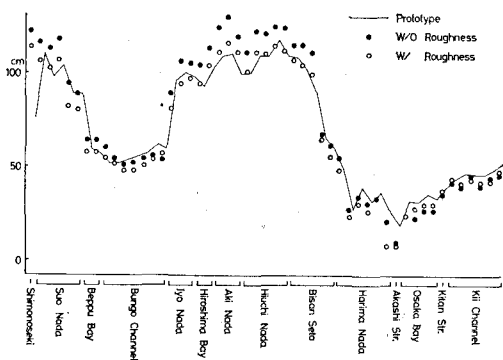
縮 尺 要 素	1/2 000 模型	1/50 000 模型	両模型の縮尺比
水 平 距 離	1/2 000	1/50 000	1/25
深 度	1/160	1/500	1/3.1
周 期	1/158	1/2236	1/14.2
水 平 速 度	1/12.6	1/22.4	1/1.8
水 平 拡 散 係 数	$1/2.5 \times 10^4$	$1/11.2 \times 10^5$	1/44.8
流 量	$1/4 \times 10^6$	$1/1.56 \times 10^8$	1/140

3. 実験 結 果

(1) 潮 汐

両模型共、第一段階の調整は紀伊・豊後両水道（大型では関門海峡も含む）での潮位の振幅と位相を現地に相似させることから行った。さらにこの段階では両模型共

* 正会員 中国工業技術試験所内海水理研究室
** 正会員 理博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
*** 正会員 Ph. D. 中国工業技術試験所内海水理研究室室長

図-3 (a) 潮位の M_2 潮成分の分布図 (1/2 000 模型)図-3 (b) 潮位の M_2 潮成分の分布図 (1/50 000 模型)

内海中央部で潮差が現地よりも大きく現われるため、海峡部の周辺に大型模型ではコンクリートブロックを並べ、小型模型では金網（メッシュ間隔 3.25 mm, 径 0.8 mm）を流れを横切るような断面状に設置して抵抗を与えた。図-3 に二つの模型での各測点における潮位の調和解析による M_2 潮成分の振幅の分布を示す。それぞれ●印が粗度がない場合、○印が粗度を設置した場合である。位相遅れについては再現の精度は振幅よりも良いが、粗度調整後播磨灘で両模型共現地よりやや早く（10°未満）伝播するのが特徴的である。

(2) 潮流

潮流の比較実験は潮汐がよく再現された状態で行った。水面に浮べたフロートの流跡図²⁾から潮流を比較すると小型模型では流れの速い備讃瀬戸などで振動成分が強く見られ、各灘内での潮汐残渣流も図-4 に示すように方向やパターンは各模型でよく似ているが大きさは2倍前後強く得られた。これらのことから特に2カ所の海域に注目して流れの細部構造を比較した。注目した海域は、流れの振動成分が優勢な小豆島と四国の間の播磨灘南西部海域と、潮汐残渣環流の発達している燧灘西部海域である（図-2 参照）。

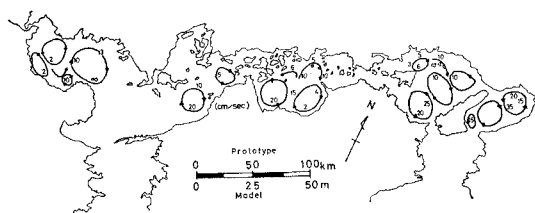


図-4 (a) 潮汐残渣環流の分布 (1/2 000 模型)

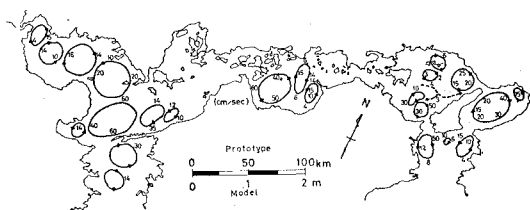
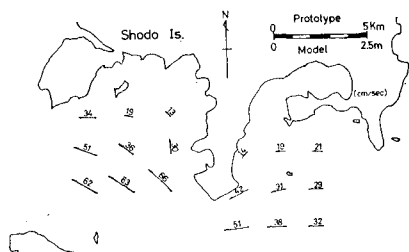
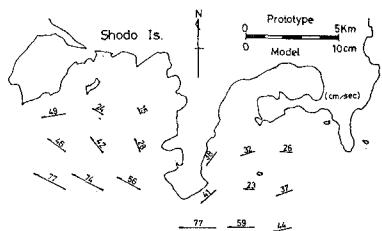


図-4 (b) 潮汐残渣環流の分布 (1/50 000 模型)

(a) 播磨灘南西部海域の潮流

この海域内のフロートの移動から固定点での流速値を読み取り調和解析を行った。図-5 は M_2 潮成分の各点での上げ潮最強時の流速ベクトルを描いたものである。潮位の M_2 潮成分は先に示したように両模型でよく合っているにもかかわらず、潮流の M_2 潮成分は小型模型のほうで20%前後大きい値が得られている。図-6 は M_2 潮成分の位相分布図であるが、海域内での位相差は小型模型のほうで大きく現われており、潮流の M_2 潮成分が

図-5 (a) 潮流の M_2 潮成分の長軸方向の振幅 (1/2 000 模型)図-5 (b) 潮流の M_2 潮成分の長軸方向の振幅 (1/50 000 模型)

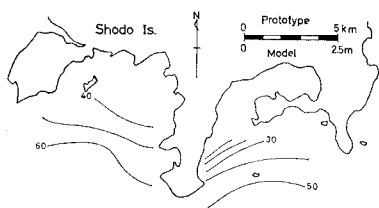


図-6 (a) 潮流の M_2 潮成分の位相遅れ (1/2 000 模型)

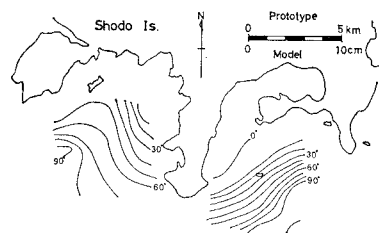


図-6 (b) 潮流の M_2 潮成分の位相遅れ (1/50 000 模型)

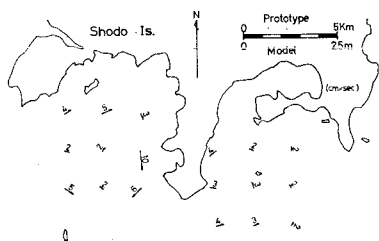


図-7 (a) 恒流成分 (1/2 000 模型)

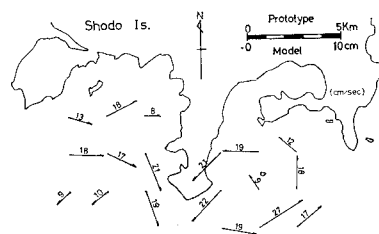


図-7 (b) 恒流成分 (1/50 000 模型)

違っても潮位が合うのは流れの位相差によって補われていることがわかる。図-7 は調和解析による恒流（潮汐模型においては潮汐残渣流に相当）成分である。各模型共小豆島から出る半島を境にして対称的な渦ができていて、向きはそれぞれ同じであるがその強さに関しては小型模型のほうが1桁近く大きく現われている。小豆島の半島の東西海域での流速実測値から1周期間の循環値を計算し、積分領域の面積で割った平均渦度として表わしたのが図-8 である。積分経路も図中に示す。これによると渦度についても小型模型のほうが M_2 潮成分の振幅や平均値（恒流の渦度）の絶対値が大きいことがわかる。

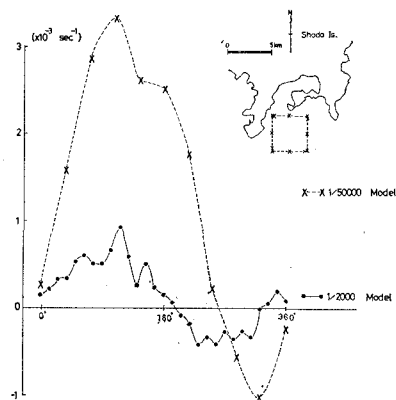


図-8 (a) 循環値の時間変化（東側）

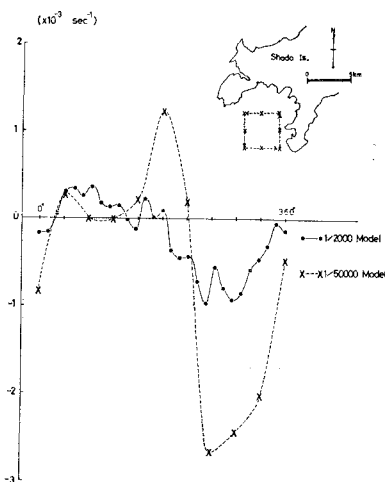


図-8 (b) 循環値の時間変化（西側）

(b) 燧灘西部海域の潮流

燧灘西部海域は、原型では詳細に観測された例はないが、水理模型内においては両方の模型で同じ向きのかなり強い潮汐残渣流が見られる海域である。潮汐残渣流は物質輸送に著しい移流効果を生じさせるものであり、水理模型内での拡散実験にも大きな影響を与えるが、その相似性は未だあまり明らかではない。本報においては、その発生機構を考察できるよう、潮汐残渣流の著しい当海域での潮流を調和解析し、諸々の量を比較してみた。

図-9 は当海域での恒流ベクトルの分布を示す。当海域での潮汐残渣流の形成する環流の向きは両模型共反時計廻りである。しかしベクトルの大きさはこの環流の縁辺に沿って小型模型のほうが大きく、その直径も小型模型のほうが大きい。なお大型模型ではこの環流の中心が来島海峡のすぐ近くにもあって二重構造になっているのは興味深い。潮汐残渣流の起動力は潮流の振動成分の非線形効果に起因する‘Tidal Stress’が大きい役割を果たすということが言われているが^{4),5)}、図-10 には潮流の

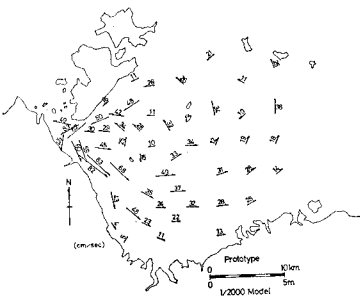


図-9 (a) 恒流成分 (1/2 000 模型)

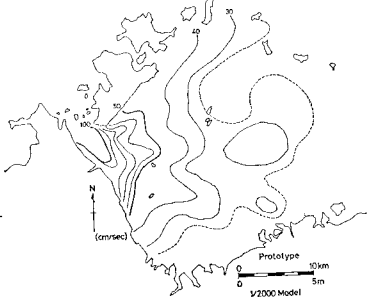


図-10 (a) 潮流の M_2 潮成分の長軸方向の振幅分布 (1/2 000 模型)

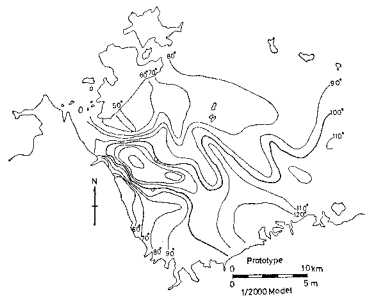


図-11 (a) 潮流の M_2 潮成分の位相遅れ (1/2 000 模型)

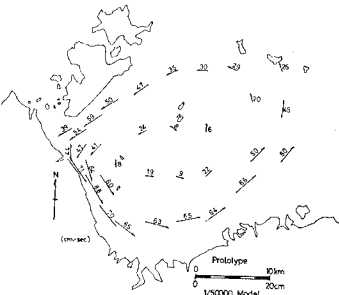


図-9 (b) 恒流成分 (1/50 000 模型)

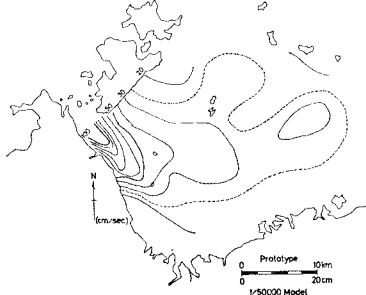


図-10 (b) 潮流の M_2 潮成分の長軸方向の振幅分布 (1/50 000 模型)

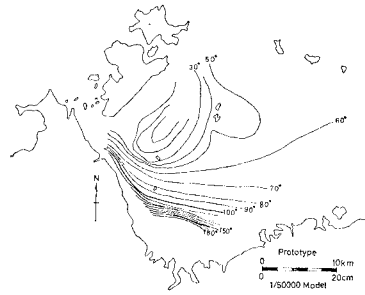


図-11 (b) 潮流の M_2 潮成分の位相遅れ (1/50 000 模型)

M_2 潮成分の長軸の値を等値線で表わし、図-11 にはその位相遅れを線の間隔を 10° にして示した。位相遅れは両模型共潮汐残渣流の主流に沿って顕著で、当海域内での位相差は小型模型のほうが大きい。

(3) 拡散

1次元拡散係数(分散係数)で拡散分布を表わすことのできると思われる備讃瀬戸において拡散実験を行った。実験の方法は投入源を水島港とした瞬間点源投入で、両模型の比較のためにはフロートを使ったが、大型模型においてはフロートでは表わされない鉛直方向のシアによる分散が有効かどうかを調べるために、同じ投入法で染料による実験も行った。図-12 は各実験ケースでの備讃瀬戸の縦方向の統計的分散値の時間変化曲線である。染料やフロートの拡がりの様子からみると、ここで扱う縦方向分散値は備讃瀬戸近辺での潮流による1次元分散能力によるものであろうと思われる。分散値の時間変化から拡散係数(分散係数)を示すと、図-12 中の記号の順に $0.75 \sim 1.3 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $1.3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $1.1 \sim 0.5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。大型模型での染料とフロートの拡散係数の違いは特に有意なものではなく、このことから当海域での1次元分散能力は水平的なシアによるものであると思われる。両模型を比較すると分散係数は小型模型のほうが1桁大きい値で得られている。

分散係数の違いの構造を調べるために流速データのそ

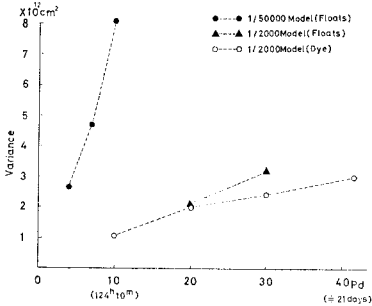


図-12 統計的分散値の時間変化の比較

表-2 1 潮汐周期間のフロートの拡がりの比較

	初期の分散値 (cm^2)	1 周期後の 分散値 (cm^2)	拡散係数 (cm^2/sec)	1 周期間の実 質的な循環値 (sec^{-1})
1/2 000 模型	2.36×10^{10}	4.64×10^{10}	5.15×10^5	0.43×10^{-3}
1/50 000 模型	1.75×10^{10}	16.09×10^{10}	32.1×10^5	1.69×10^{-3}

ろっている播磨灘南西部海域(図-2 の b. 海域)で各模型で 10 個のフロートを 1 周期間追跡してその拡散係数を求めた。但しここで扱った分散値 σ_x^2 は方向性をなくせるように $\sigma_x^2 = (\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2)^{1/2}$ (σ_{x1} は東西方向、 σ_{x2} は南北方向の分散値で σ_{xy} は共分散値である) で求めた。また先に求めた循環値(図-8 参照)と比較するために便

宜上1潮時間の二乗平均値の平方根を求め表-2に示した。現象のスケールは当海域での Tidal Excursion に匹敵するもので、両模型での拡散係数の違いは循環値のそれによく対応している。なお拡散係数値の原型との比較考察は別報⁷⁾で行われる。

4. 考 察

以上の結果を小型模型を中心にしてその特徴を整理すると、まず模型自体の器の性質から

- ① レイノルズ数が小さい。
- ② 水平縮尺と鉛直縮尺に関しての歪率が大きい。
- ③ 潮位については両模型共内海中央部で潮差が大きく現われるが、海峡を中心に粗度を設置することにより極めてよい再現性が得られた。
- ④ 潮流の振動成分の振幅が大きく、位相差も大きい。
- ⑤ 循環値（渦度）が大きい。
- ⑥ 恒流（潮汐残渣流）成分が大きい。
- ⑦ 拡散係数が大きい。

等のことが掲げられる。

⑥の結果はこれまで成されてきた潮汐残渣流の研究による⁹⁾と小型模型で水平粘性係数が小さいということを表わしており、また④、⑤の結果も潮汐のシアの強さを表わして水平方向の運動量の混合が小さいということがわかるが、これらのことは流れを規定する実質的なレイノルズ数は小型模型のほうが大きいということを意味しており、①の性質とは一見矛盾している。これらの原因としては小型模型では相対的に乱れ度が小さい。また歪率の大きさから鉛直平均流に対しての底からの摩擦が不足しているのではないかと、等のことが考えられる。また瀬戸内海は非常に複雑な地形を有する海域で、内海中央部の潮位を決めるような全体的な摩擦は水平的な地形の変化による形状抵抗も優勢であると考えられ、摩擦の調整についてはこれを制御するように後流やそれによる縮流のパターンを合わせる事が重要であろうと思われる。今回は、特に小型模型では第一段階として全体的な摩擦を海峡からの通過流量をおさえるような単純な粗度抵抗に甘んじた、ということも付記しておく。潮汐残渣流の強さや位相差の違いもストリップ粗度等を用いて形状抵抗（実質的なレイノルズ数）を合わせることによってなくせるのではないかと考える。

拡散については小型模型の器の大きさから水平等方向性の拡散係数の比較はできなかったが、長期間の拡散については⑥、⑦などの結果から潮流の水平方向のシアが重要な役割を果しているらしいことがわかった。模型での流速分布の再現は拡散実験を行うにあたって重要な

課題である。

5. あとがき

潮流や水平乱流拡散の水理模型相似則に関しては樋口・杉本の成果⁷⁾などがあるが、地形変化の複雑な瀬戸内海では、水平方向粘性係数に支配される潮汐残渣流や振動流の位相差によるシアー流等の現象がみられ、それが縮率の大きい小型模型で大きく現われ、大きいスケールの拡散に重要な影響を与えていることが認められた。2つの実験ケースの比較だけからでは縮率効果を数量的に導くことはできなかったが、以上の結果から、複雑な地形を有する瀬戸内海のような潮汐水理模型の相似性は、従来行われているような小さいスケールの現象だけでなく、灘・湾規模のスケールで確める必要性が示唆される。しかし現地における観測例は技術的な難しさもあって乏しく、将来に残された問題である。

最後に、本研究は著者の1人が中国工業技術試験所から京都大学防災研究所へ流動研究員として派遣され防災研究所の宇治川水理実験所の小型模型で実験する機会を得てきたものである。この機会を与えて下さり、また実験に際して御指導、御激励を賜った災害気候部門の中島暢太郎教授に深甚なる謝意を表します。また小型模型での実験にあたっては宇治川水理実験所の北川吉男技官と京都大学理学部大学院生の武岡英隆氏に始終御協力をあおいだ。さらに潮流資料の解析に際しては中国工業技術試験所の高杉由夫技官に、また資料の整理や図面の作製には中国工業技術協会の方々に御援助いただいた。これらの方々にこの場をかりて厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 早川典生他：水理模型による瀬戸内海拡散現象の実験的研究，第24回海講論文集，1977。
- 2) 井原 潤・肥後竹彦・田辺弘道・平田静子：瀬戸内海大型水理模型による実験的研究（序報），第20回海講論文集，pp. 221~225，1973。
- 3) 安田秀一・樋口明生・早川典生：瀬戸内海水理模型における縮率効果に関する実験的研究，中国工業技術試験所報告第1号，pp. 61~78，1976。
- 4) 樋口明生・柳 哲雄：潮汐残渣流の基礎的研究，第22回海講論文集，pp. 213~218，1975。
- 5) Nihoul, J. C. J. and F. C. Roday: The influence of the "tidal stress" on the residual circulation, Tellus XXVII, pp. 484~489, 1975。
- 6) 大西行雄・柳 哲雄：Tidal Residual Circulation に関する基礎的研究（IV），昭和50年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 47，1975。
- 7) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水理模型実験について（IV），京大防災研年報13B, pp. 457~470, 1970。