

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

樋口 明生・安田 秀一*・早川 典生*

EXPERIMENTAL STUDIES OF SCALE EFFECTS ON THE MODELS OF SETO INLAND SEA

By Haruo HIGUCHI, Hideichi YASUDA and Norio HAYAKAWA

Synopsis

Reported herein is a comparative study of two hydraulic models of the Seto Inland Sea in order to better understand the scale effect on the similarity principle of the hydraulic model. The larger model is built with scale ratios of 1 to 2000 and 1 to 160 in horizontal and vertical directions respectively. The smaller model has scale ratios of 1 to 50,000 and 1 to 500 in horizontal and vertical directions respectively. The semi-diurnal (M_2) tide was generated in the models and it was found that both models exhibit the same tendency of yielding greater tidal ranges around the inner portion of the models than corresponding prototype values, though with a slightly different spatial pattern. This difference has been corrected by addition of concrete blocks in the larger model and wire mesh in the smaller model around narrow straits. Flow velocities and one-dimensional dispersion-coefficients are found to be twice larger and as much as ten times larger, respectively, in the smaller model than in the larger model suggesting possible effect of flow separation.

1. ま え が き

瀬戸内海の海水交流や物質輸送に関して、各方面からの研究がなされているが、水理模型による研究も様々な縮率で行なわれ¹⁻⁶⁾、それぞれ、ユニークな解析も試みられている。しかし、これらの水理模型はいずれもフルード相似律に基づいて、潮位や体積輸送を再現させるもので、流速分布や、目的とする物質輸送・拡散の再現性については、現地での資料が少ないこともあり、いまだ不明確なところが多い状態である。

工業技術院中国工業技術試験所では、瀬戸内海の大規模模型（水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/160）を導入して、高精度な条件を与えての実験を行なうかわら、現地資料の解析も並行して行ない、水理模型の相似則についての研究も進めているが、潮位以外の現地のデータについては観測のむづかしさもあり、信頼度の高い資料は少なく、原形との相似性を詳細に議論するまでには至っていない。しかし、この大規模模型は、水質汚濁予測を目的とした拡散模型で、このような拡散模型においては潮位を再現させることも必要ではあるが、拡散係数や流速分布を再現させることは不可欠のことであり、その相似性や、再現のための調整については、拡散実験を行なうにあたって早急に解決せねばならない問題である。

このようなことから、水理模型の性能をより明解にすべく、拡散模型におけるフルード律による縮率効果という観点から、宇治川水理実験所にある瀬戸内海の小型模型（水平縮尺 1/50000、鉛直縮尺 1/500）と上記の大規模模型を、潮位・流況・拡散の項目で実験資料を比較し、記述的に考察を試みた。

なお、ここでは大規模模型については昭和49年度までの成果を中心にし、小型模型では前報に報告された文献⁷⁾よりもさらに詳細に実験を行ない、この2つの結果について比較する。

*中国工業技術試験所

2. 模型の概要の比較

それぞれの模型の諸元を **Table 1** に示す。

大型模型も小型模型と同様、外力としては、紀伊水道・豊後水道・関門海峡から独立に潮汐のみを与えるが、現地に存在する優勢な37分潮を任意に合成することもでき、水の出入り口における境界条件としての潮汐は高精度に設定することができる。但し、ここで比較の対象となる昭和49年度までの報告は平均的な M_2 潮のみを与えたものが大部分である。境界条件としての設定値などについては、すでに詳しく記載した報告^{6,7)} も成されているのでここでは省略する。

Table 1. Hydraulic factors.

Factor	1/50000 Model	1/2000 Model	Ratio
Distance	1/50000	1/2000	1/25
Depth	1/500	1/160	1/3.1
Peroid	1/2236	1/158	1/14.2
Velocity	1/22.4	1/12.6	1/1.8
Horizontal Diffusivity	1/11.2×10 ⁶	1/2.5×10 ⁴	1/44.8
Vertical Diffusivity	1/112	1/60	1/0.69
Discharge	1/55.9×10 ⁷	1/4×10 ⁶	1/140

小型模型では起潮機は1つで、高精度の調整をすることは困難であるが、前回の報告⁴⁾ の場合よりも多少の改良を試みた。文献⁴⁾ の状態で潮位を精密に測定すると、豊後水道側での振幅が少し小さめであったため、外洋底に設置したブロックをとりはずし、位相の調整のためには起潮機の前面の水の出入り口を1 m 右側(現地換算で 50 km 東側)にずらした。起潮機の振幅も 5 %程度増幅した。また関門海峡には潮汐を与えるための遊水池を設けてあったが、細かい調整が難しいこともあり、杉本らの10万分の1模型¹⁾ と同様、海峡を仕切って潮汐の出入りを0にした。このため、周防灘近辺の現象を大型模型と対応させるのは適切ではないかもしれない。

小型模型での潮位の測定は、大型模型に使われている自動追従式(サーボ式)と同型の携帯用の水位計を用いてアナログ測定した。これは別の報告⁸⁾ などにもあるように、きわめて性能のよい精密水位計である。

潮汐としては、大型模型と同様に、平均潮である M_2 潮のみを与えた。

3. 実験結果

以下、小型模型での実験を、大型模型の49年度までの成果と対応させながら述べる。なお、ここで用いる現象の諸量は現地換算されたものとして記す。

3. 1 潮汐

潮位の調整は、文献⁴⁾ に述べてあるように、まず紀伊・豊後の両水道、とくにその入口となっている田辺、宿毛での潮差と位相差を再現させるようにし、さらに、その状態では瀬戸内海中央部で潮差が現地よりも大きく現われるため、主な海峡部に金網(メッシュ間隔 3.25 mm, 径 0.8 mm)を断面状に設置した。**Fig. 1** に金網設置位置と潮位測定の位置を示す。

Fig. 2 は別府における潮位の記録の例である。小型模型での振幅・位相は、これを2周期間で48点(原形で31分間隔)読み取り、それを調和解析し、 M_2 潮成分(12時間25分周期)を取り出したものである。

Fig. 3, Fig. 4 に小型模型の各測点での M_2 潮成分の振幅と位相の分布を示す。実線は現地の M_2 潮成分の値で、○印が両水道での潮差・位相差の調整後のもので、◇印がさらに金網粗度を投入した場合のもの

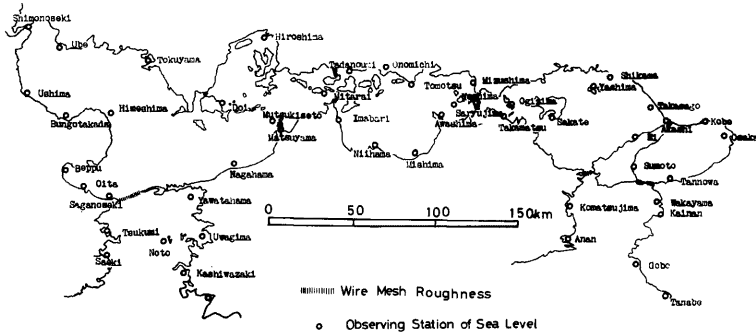


Fig. 1. Position of mesh roughness and tide gage.

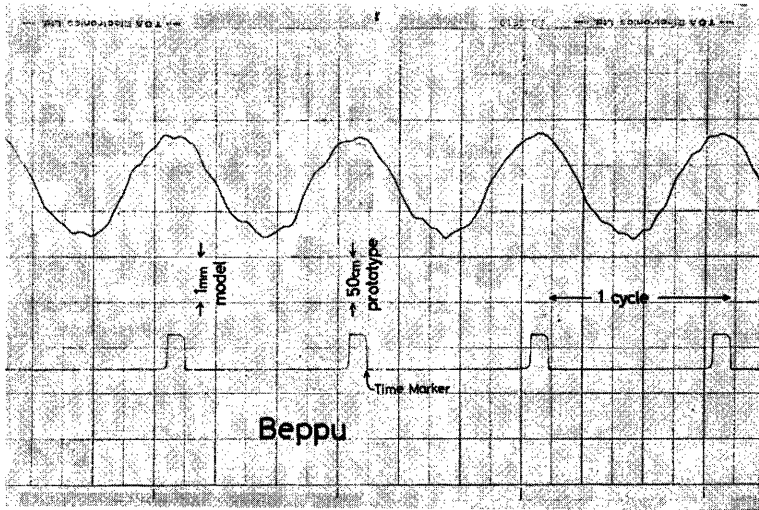


Fig. 2. An example of observed record of sea level.

を表わす。

Fig. 5, Fig. 6 に大型模型における振幅・位相の分布を示す。この模型でも全体の潮差の調整のために、新たに粗度が必要で、海峡付近にブロック粗度を投入している。○印が粗度を入れないとき、◇印がブロック粗度を入れた場合である。

Fig. 3 を見ると、小型模型では両水道部での振幅が1割程度小さくなっており、潮位については線形性がほぼ成り立つであろうということから、比較のために、**Fig. 7** に粗度なしの場合の値を11%増しにして改めて書き印した。

Fig. 5, Fig. 7 の粗度なしの場合からは、縮率による効果は顕著なものではなく、両模型とも、同程度に内海中央部で振幅が大きくなっているが、大型模型では播磨灘から安芸灘の間で、また小型模型では備讃

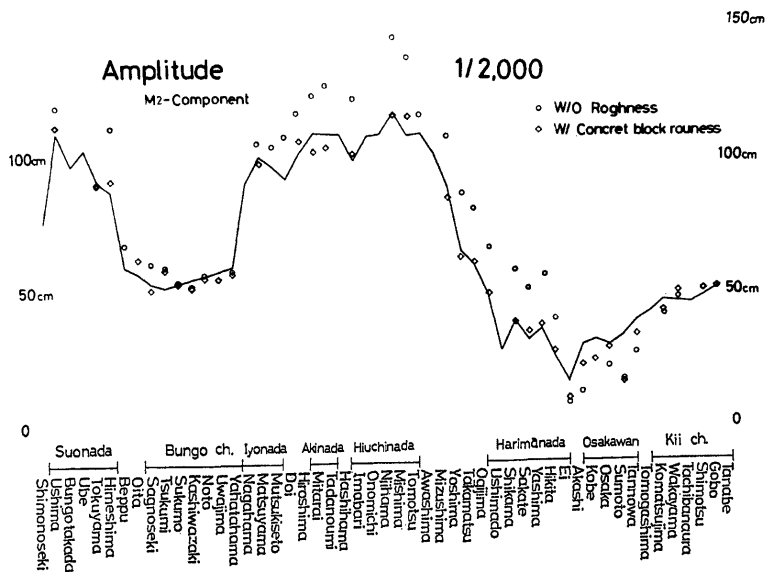


Fig. 5. Distribution of tidal amplitude: M_2 component (1/2000 model).

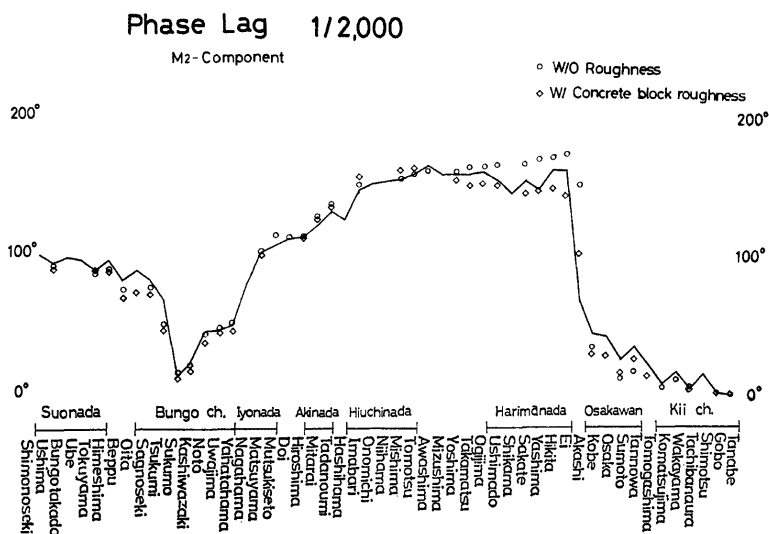


Fig. 6. Distribution of phase lag: M_2 component (1/2000 model).

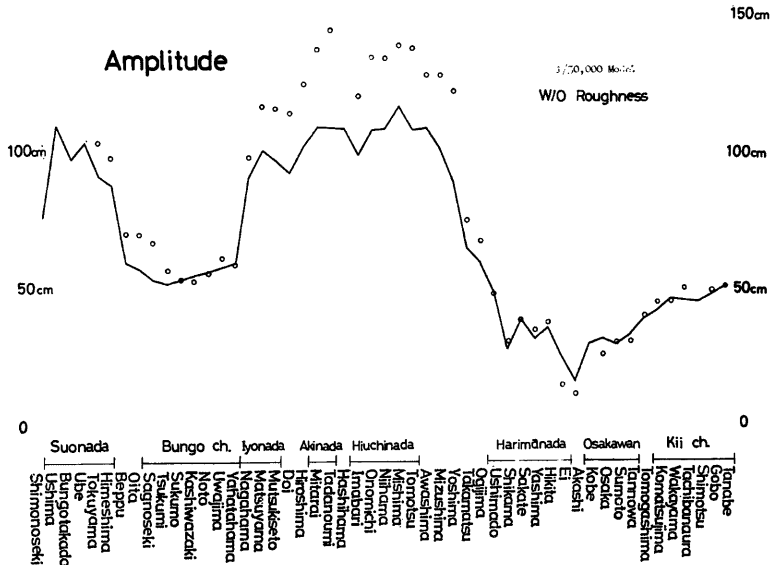


Fig. 7. Distribution of tidal amplitude: M_2 component ($1/50000$ model) $\times 1.11$.

瀬戸から伊予灘にかけて振幅が大きく現われており、位相図からも、大型模型では播磨灘で遅く、小型模型では備讃瀬戸で遅い、というような多少のずれが示されている。さらに大阪湾で、大型模型では振幅が小さいに出る傾向が著しいが、小型模型ではさ程でもないということも示される。

粗度調整後は、両模型とも振幅については非常によい再現性が示されたが、位相遅れについてはともに播磨灘で現地より $10^\circ \sim 20^\circ$ 速く表われている。また粗度調整によって、小型模型では位相はほとんど変わらないのに大型模型では播磨灘で $20^\circ \sim 30^\circ$ 速くなっており、粗度を与えて潮汐波の伝播が速くなるという興味深い現象がみられる。

本報告では、模型の外力の条件として M_2 潮を与え、内海部でさらに M_2 潮成分を取り出し原形との比較をしているが、原形では M_2 潮以外に S_2 , O_1 , K_1 などその他多くの分潮があり、その中から M_2 潮成分を取り出している訳である。先に、潮位についてはほぼ線形性が成り立つとして Fig. 7 のような補正図を書いたが、実際には、 M_2 潮のみを与えている大型模型でも内海部では高周波が発生しており、 M_2 潮成分のみで原形と比較することに問題はある。このような比較方法についての議論は今後の課題とするが、ここでは補足的な意味で、Fig. 8, Fig. 9 に両模型での M_4 潮（周期 6 時間 12 分）、 M_6 潮（周期 4 時間 8 分）の振幅分布を表す。これらの図の全体的な傾向は両模型ともよく似ているが、 M_4 潮については豊後水道では小型模型のほうがかなり大きいのが目立つ。このことについては、文献 4) にも示してあるが、 M_4 潮の周期が模型の太平洋での静振の周期にほぼ等しいことから、この静振をとらえているものと思われ、調整がまだ不十分であるということを示しているのかもしれない。

また、これら粗度の調整に対して、両模型とも簡便さから海峡を中心に粗度を与えているが、大型模型のブロック（ $40 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ）については単に海底摩擦を修正するだけでなく、明らかに海底地形を変えるという効果が大きいようであり、金網粗度についても粗度を 1 か所に集中させていることになり、あま

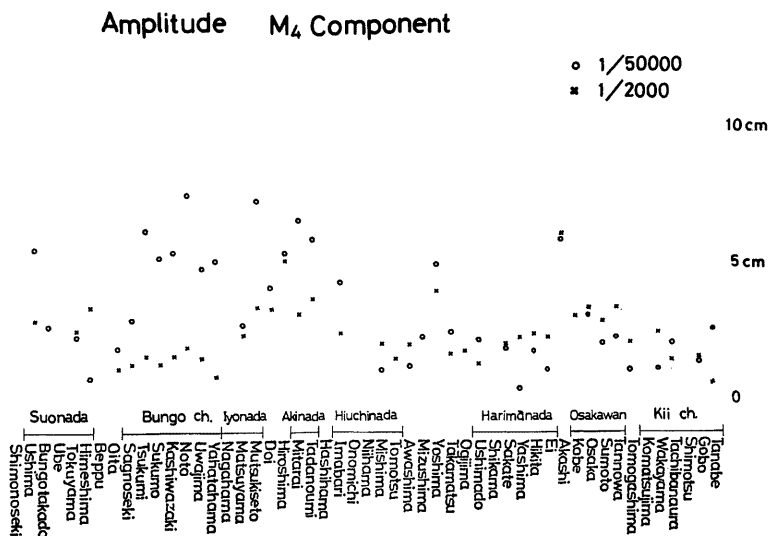


Fig. 8. Distribution of tidal amplitude: M_4 component.

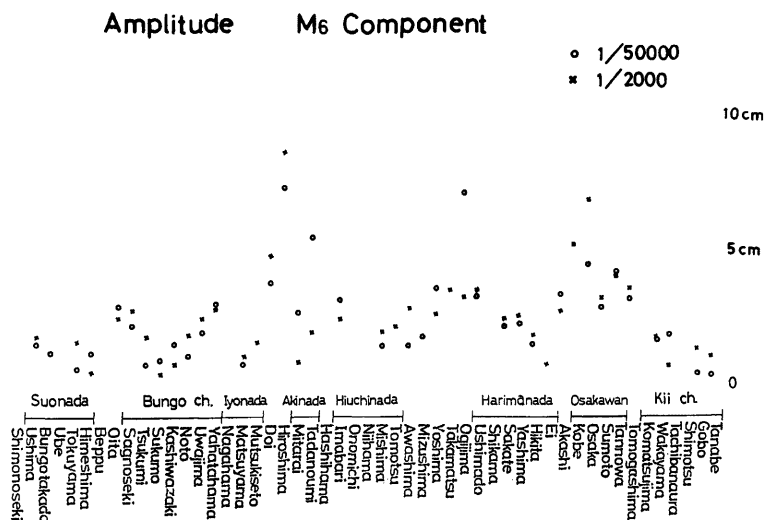


Fig. 9. Distribution of tidal amplitude: M_6 component.

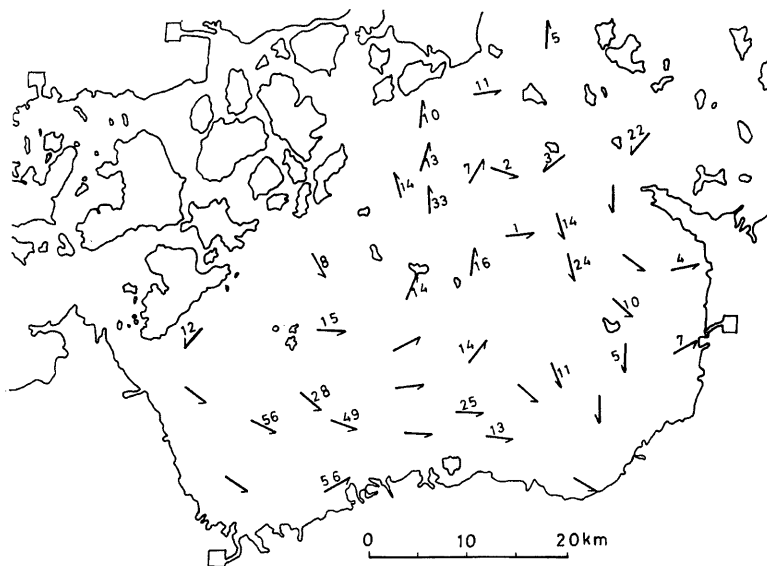


Fig. 10. Flow pattern in the flood (cm/sec, 1/50000 model).

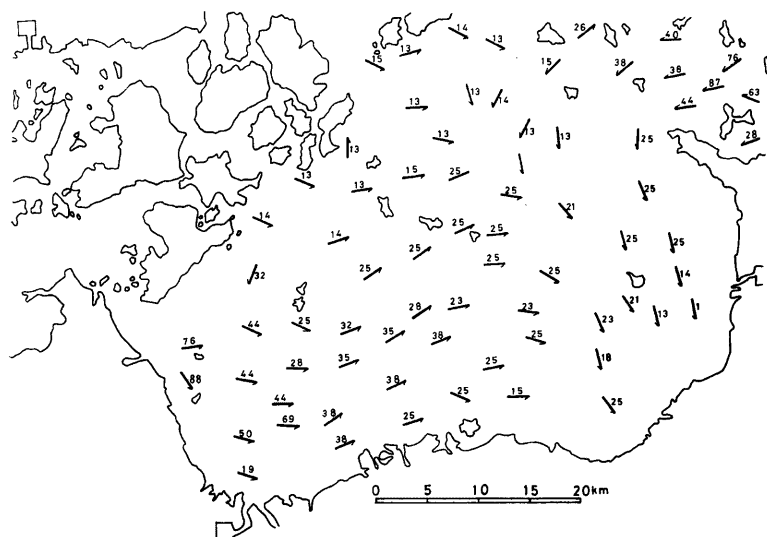


Fig. 11. Flow pattern in the flood (cm/sec, 1/2000 model).

り適切なものとはいえない。瀬戸内海のような複雑な地形の模型では、流れも複雑な様相をみせ、粗度に対しても基礎的な実験からの再検討が必要と思われる。

3. 2 流況

内海部の潮流は、粗度調整の後、文献⁴⁾の浮子と同じものを使って同様の測定をしたが、模型が小さいために表面張力が働いて精度のよい測定は困難であった。備讃瀬戸近辺では、地形も複雑で流れも強いこともあり、さらに小さい直径 2 mm ぐらいのプラスチックの素材を浮子にして、1 秒間隔の写真撮影によるラグランジェ測定をした。**Fig. 10** に燧灘での上げ潮最盛時（米島海峡）の流況ベクトル図を示す。また**Fig. 11** は大型模型での同潮時の場合である。これによると両模型とも、東西からの流れの接する点は燧灘東部のようなのである。ベクトルの大きさについては、大型模型で 1/28 周期毎の撮影から導いているのに対し、小型模型では 1/10 周期の時間で平均していることになり、大きさの比較は直接にはできない。しかし小型模型では、燧灘中央部でこの図の 2/10 周期後にさらに大きい値もみられ、流速の位相差がかなり大きいように観察された。

Fig. 12 は小型模型の備讃瀬戸での上げ潮最盛時の流況図である。その中に $\leftarrow \bigcirc$ 印として大型模型での同潮時の流速ベクトルを挿入したが、比較すると、小型模型のほうが 2～3 倍程度大きく表われているところもある。この海域は地形の上からも振動流の卓越するところで、 M_2 潮成分の流速の振幅としても小型模型のほうがかなり大きいといえる。

また、拡散がラグランジェ的な現象であることから、浮子の写真撮影から、拡散の背景となる浮子の 5 周期間追跡図を作製した。**Fig. 13** にそれを示す。これを見ると潮流の振動の方向や、潮汐残渣流ともいわれる恒流の存在がよくわかる。さらにこの流跡図より、潮汐残渣流を環流として模式的に表わすと **Fig. 14** のようになる。**Fig. 15** には大型模型での潮汐残渣環流の模式図を示す。全体的なパターンは両模型ともよく似ているが、小型模型では流速値が約 2 倍前後大きくなっている。現地では、これらの模型に相当するような環流は測定されておらず、もしあるとしてもかなり小さい値になるのではないか、ということが一般的にいわれており、原形を含めてこれら 3 つの瀬戸内海を比べるかぎり、フルード律に従って小さいスケー

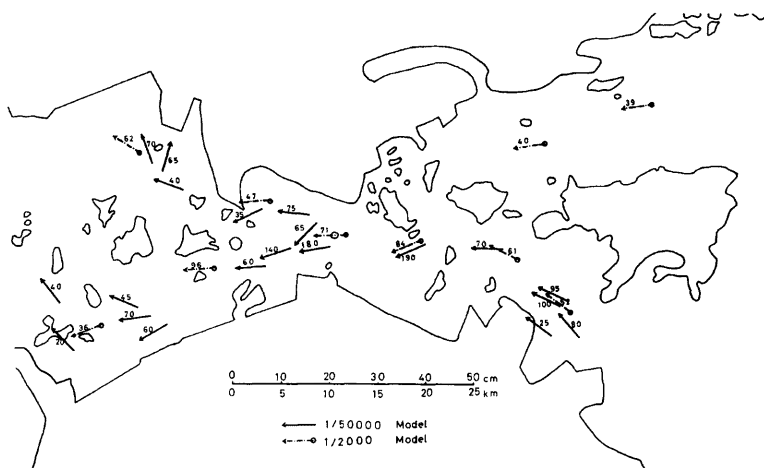


Fig. 12. Flow pattern in the flood (cm/sec).

ルのものほど残渣流が強くなっているようである。

3. 3 拡散

大型模型では、49年度に水島港からの瞬間点源投入の拡散実験を行っており⁹⁾、小型模型でもそれと比較のため水島港近辺から浮子（備讃瀬戸の流況測定で使った浮子）を200個投入して拡散の状況を調べた。

Fig. 16 は、瀬戸内海の縦（東西）方向の統計的分散値の時間的変化を示したものである。記号は○…○が小型模型での浮子の値で、△…△が大型模型での染料（ローダミン B）、○…○が浮子（フィルムケースのふた・直径 33 mm）の値を表わす。この縦方向分散値が内海の拡散能力に対応する 1 次元分散値として意味をもつには、横方向に浮子がよく行き届いているということが必要条件であるが、縦方向標準偏差値は 11 km から 28 km を示し、分散値の時間変化率は各模型ではほぼ安定しており、この分散値の時間変化が備讃瀬戸での物質輸送能力を表わしていると思える。これらの分散値から拡散係数を求めると、上記の順に、 $0.75 \times 10^7 \sim 1.3 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $1.1 \times 10^6 \sim 0.5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $1.3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。但し拡散係数 D_x の定義は次のとおりである。

$$D_x = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2}{dt}$$

σ_x^2 は縦方向の統計的分散値で、 t は時間である。ここでは数字を見るかぎり、拡散係数（この場合分散 dispersion 係数といったほうが適当かもしれない）において、小型模型で 1 桁程度大きいという結果になる。

4. 考 察

潮位をみると、両模型とも、海峡付近に人工粗度を設置したことにより、現地と非常によい対応を示しているが、流況については振動流の卓越する備讃瀬戸で、小型模型のほうがかなり強い流れが得られている。潮位がよく合っているということは、平均流が合っているということで、このような結果の違いについては速度分布の在り方が縮率によって異なるのではないかとことが考えられる。実際、見た目にも小型模型では島や半島によるウェークの領域が広いよう

で、その領域内では乱れのために平均流が小さくなることから、主流域では体積輸送（平均流）を合わせるために、大きい流速が生じるのであろうと考えられる。ウェークの領域が広いことについては、小型模型で



Fig. 13. Tidal locus in the 1/50000 model.

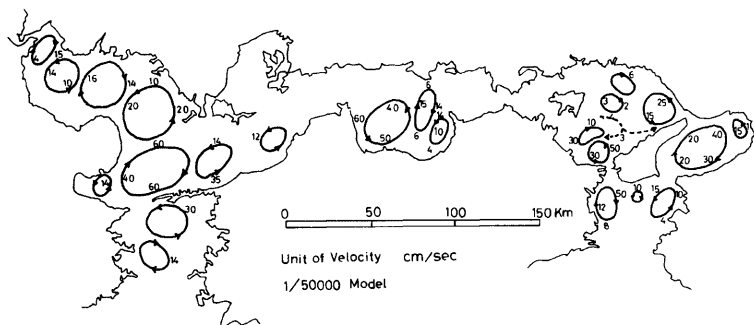


Fig. 14. Distribution of tidal residual circulation (1/50000 model).

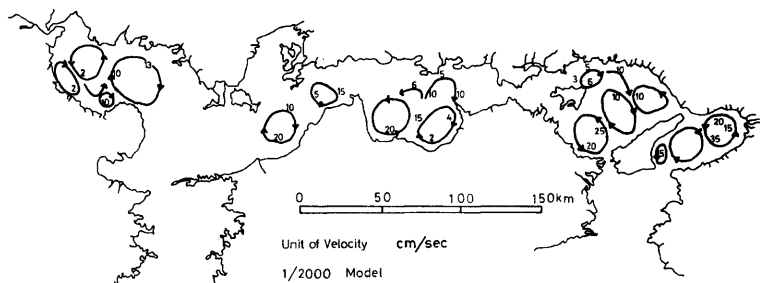


Fig. 15. Distribution of tidal residual circulation (1/2000 model).

は乱れが十分でないためであると推測される。

また、振動流中では、運動方程式の摩擦の項が小さい領域において、流速の位相は圧力勾配の位相よりも 90° 近く遅くなり、摩擦の項が優勢な領域では圧力勾配の位相に近づくというような速度分布を示す¹⁰⁾。摩擦の項が優勢な領域とは、いわゆる境界層（層流においては定数 $\cdot \sqrt{2} \cdot \text{粘性係数} / \text{振動数}$ で与えられる）や、乱れが大きいウェークの領域内などのことで、小型模型では全体的に層流に近く、振動数も大きいために境界層が厚く、また先の理由でウェークの領域も広く、これらのことから振動流中での速度分布はきわめて勾配の強いものとなりがちで、体積輸送（平均流）の振幅を合わせるために大型模型よりも大きい速度の振幅が期待されることになる。

小型模型では潮位（平均流）は同程度であるにもかかわらず、強い潮汐残渣環流が表われている。均質流体場では、潮流の振動成分の非線形性が環流の起動力と成りうることが報告^{12,13)}されているが、上に述べたように流れのシアの強い小型模型では非線形項が大きくなり、大型模型や原形に比べてより大きい起動力が生じて、強い環流を生み出すのではないかと考えられる。

これらの流れの現象については、さらに基礎模型などをつかって実験データを揃え、綿密な検討をしてゆく必要がある。

備讃瀬戸での拡散係数についても、小型模型のほうが1オーダー大きい値で得られているが、このことも流れの分布の仕方が影響を与えているものと思われる。開水路での振動流中の浮子の1次元化された拡散は、分散 (dispersion) として、その係数は次のような式で表わされている。

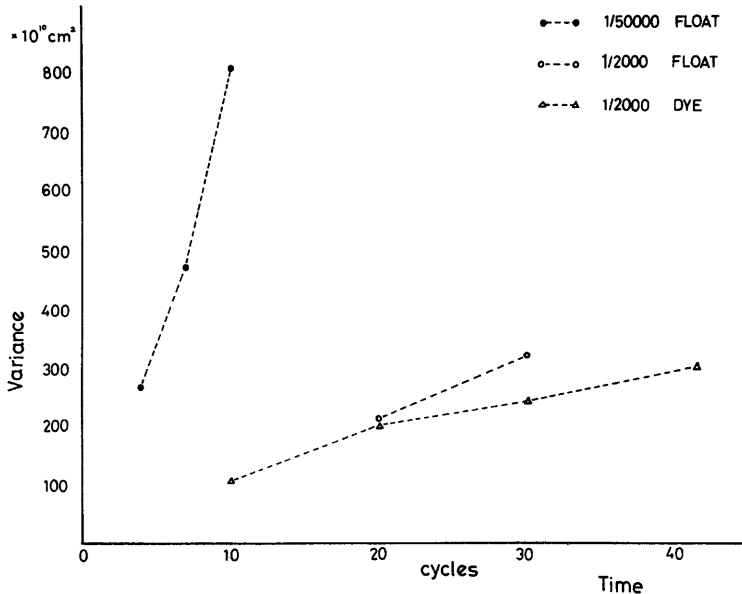


Fig. 16. Comparison of longitudinal variance between 1/50000 model and 1/2000 model.

$$D_x = \frac{U^2 L^2}{K_y} \cdot f$$

ここに U は振動流の振幅の代表値, L は開水路の幅, K_y は幅方向の有効な乱流拡散係数, f は流れの分布の形と振動流の周期 $\cdot L \cdot K_y$ が複雑にからみあった従属変数で, 内海を1次元化したときなどには, 明確に吟味しなければならない量である。簡単には小型模型では上式の U が2~3倍ほど大型模型より大きいので, D_x が1桁大きくなるのではないかと考えられる。

以上のような2つの模型の間の流れと分散の相違については, さらに基礎模型などを使って, 振動流中のウェークや物質輸送の現象を綿密に検討し, 理論的にも明確なものにしてゆく必要がある。振動流の諸々のメカニズムの解明は今後の重要な課題である。

5. あとがき

文献4)に引き続き, 水平縮尺1/2000, 鉛直縮尺1/160の瀬戸内海大型模型との比較実験を行ない, 現在までに次のような結果を得た。

- 1) M_2 潮による実験の潮位は両模型とも内海中央部で振幅が大きくなっているが, 海峡付近にブロック粗度もしくは金網粗度を設置することによって, きわめてよい再現性を示すようになった。
- 2) 小型模型では, 地形が比較的複雑で振動流の卓越する備讃瀬戸において, 大型模型の2倍以上大きい流速の振幅が見られ, 灘での潮汐残渣環流についても2倍前後大きい流速が観測された。
- 3) 拡散について比較したのは備讃瀬戸近辺のみであるが, 小型模型で1桁大きい拡散係数 $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ が得られた。

その他の海域, とくに灘などにおいても恒流の大きさが異なることから, 両模型で異なる値を示すものと

考えられる。

これら両模型での相違の改善については、小型模型の中に針金のようなストリップ粗度をしきつめ、乱れを十分なものになるようにすればよいのではないかと考えるが、これも詳細は基礎実験によるデータの解析から、まず理論を十分なものにすることが先決であろう。

最後に、小型模型での実験にあたって終始御協力いただいた北川吉男氏と武岡英隆氏に心からの謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 杉本隆成, 樋口明生: 瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(I), 京都大学防災研究所年報, 第14号B, 1971, pp. 435-450.
- 2) 杉本隆成, 樋口明生: 瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(II), 京都大学防災研究所年報, 第15号B, 1972, pp. 431-440.
- 3) 早川典生, 田辺弘道, 宝田盛康, 岡田三郎: 瀬戸内海潮汐の模型実験について, 昭和50年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 1975, pp. 49-50.
- 4) 樋口明生, 武岡英隆, 安田秀一, 北川吉男: 瀬戸内海における海水交流の実験的研究(I), 京都大学防災研究所年報, 第18号B, 1975, pp. 621-635.
- 5) 樋口明生, 武岡英隆, 北川吉男: 瀬戸内海における海水交流の実験的研究(II), 京都大学防災研究所年報, 第19号B, 1976, 印刷中.
- 6) 井原潤他: 瀬戸内海大型水理模型実験経過昭和48年度報告, 工業技術院中国工業技術試験所, 1975.
- 7) 早川典生他: 瀬戸内海大型水理模型実験経過昭和49年度報告, 工業技術院中国工業技術試験所, 1976.
- 8) 岡田三郎: 水理計測機器(その1), 中国工業技術 No. 6, 1976, 3, pp. 2-20.
- 9) 井原 潤他: 水島重油流出事故環境影響総合調査報告瀬戸内海における流出油の水中分散に関する研究, 工業技術院中国工業技術試験所, 1975.
- 10) Lamb, H: Hydrodynamics, 6th, Cambridge University Press, 1932, pp. 619-631.
- 11) Fukuoka, S: Longitudinal Dispersion of Matter in Alternating Shear Flows, Queen's Fellow, Department of Engineering, James Cook University of North Queensland, 1973.
- 12) 柳 哲雄, 柏井 誠, 安田秀一, 樋口明生, 北川吉男: Tidal Residual Circulation に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第27号B, 1974, pp. 657-664.
- 13) 杉本隆成, 上嶋英機, 安田秀一, 柳 哲雄, 樋口明生: 潮汐残差環流の渦度バランス, 1976年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 1976, pp. 168-169.