

瀬戸内海における海水交流の実験的研究 (I)

樋口 明生・武岡 英隆・安田 秀一・北川 吉男

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE WATER EXCHANGE IN SETO INLAND SEA (I)

By Haruo HIGUCHI, Hidetaka TAKEOKA, Hidekazu YASUDA and Yoshio KITAGAWA

Synopsis

The fundamental experiments are carried out to reproduce the tide and tidal current in Seto Inland Sea with use of the hydraulic model, of which the horizontal and vertical scales are 1/50000 and 1/500 respectively.

The tide in the inland sea is roughly reproduced by giving the boundary conditions. The velocities of tidal residual circulations in the model are larger than those in the prototype.

1. ま え が き

近年、環境汚染が進行する中で、瀬戸内海に対する関心は急速に高まり、海洋物理学の立場からも様々なアプローチがなされつつあるが、海岸・海底地形の複雑さと、外洋との境界が複雑であること等により、内海での流れは極めて複雑で、2次元的に解析的に取り扱うことは非常に困難である。こうした観点から、杉本・樋口は瀬戸内海の小型模型（水平縮尺1/10万、鉛直縮尺1/1000）を用いて実験を行ない、内海規模の海水交流・物質の拡散過程にとって tidal residual circulation が決定的役割を果たすことを指適している^{1),2)}。しかし、実験施設の都合上、紀伊水道・豊後水道等の外洋への開口部の境界条件を規定できず、模型精度や実験精度にも問題を残していた。そこで、これらの点を考慮して、太平洋の一部を含む水平縮尺1/5万、鉛直縮尺1/500の模型を製作し、実験を行った。一方、瀬戸内海に関しては、工業技術院中国工業技術試験所の大型模型（水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/160）での研究も進んでおり^{3),4),5),6)}、そこで得られた成果と比較することにより、模型の scale effect の問題等も検討していく予定である。

ここでは、現在までの実験で得られた、潮汐・潮流の再現状況について報告する。

2. 原 型

実験の対象とした海域を、Fig. 1 に示す。図中の破線が模型の境界に相当する。模型で水位計を設置した各点での、主な潮汐常数を Table 1 に示す。Table 1 によると、瀬戸内海の潮汐は明石海峡付近を除いては、 M_2 分潮が卓越している。潮汐の位相は、豊後水道（宇和島）では紀伊水道（和歌山）より 20° （約40分）程度遅れ、両水道からの潮汐波は巖灘東部付近で相会し、この付近では潮汐の位相は紀伊水道より 140° （約4時間50分）程度遅れる。潮差は内海中央部で大きくなり、巖灘中央部付近で最大となる。

原型の潮汐・潮流や海況に関しては、杉本・樋口の報告¹⁾ に従来の研究の要約があるので、詳しい説明は略す。

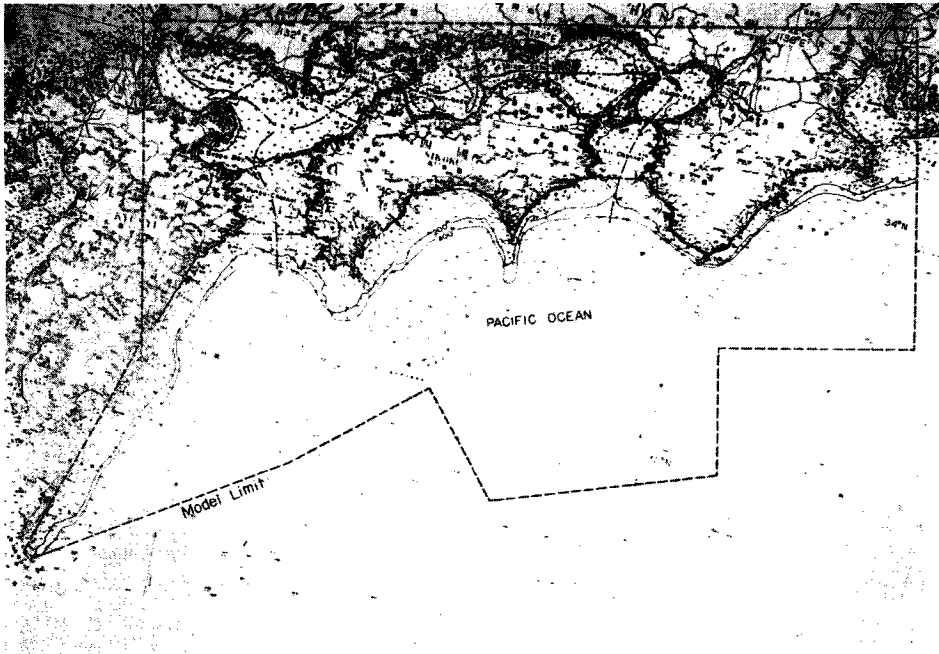


Fig. 1 Bathymetric chart of Seto Inland Sea.

Table 1. Tidal constant.

Station	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$
Uwajima	58.5	207.1	24.8	232.1	25.0	194.1	18.7	174.8
Beppu	60	241	25	266	27	208	19	185
Tokuyama	88.1	252.1	38.0	282.8	29.1	207.4	20.8	186.2
Nagahama	90	245	37	289	28	206	19	180
Hiroshima	102	277	42	304	31	219	22	196
Matsuyama	98.7	263.4	42.2	290.7	30.1	207.4	22.4	182.8
Niihama	107.1	319.6	39.1	355.4	33.3	234.7	24.7	209.7
Onomichi	108	320	40	355	35	238	23	205
Mizushima	99.3	328.3	34.9	358.6	33.1	235.9	23.0	209.7
Takamatsu	63.7	326.6	20.4	350.0	31.1	231.1	20.6	201.9
Shikama	27	320	11	306	31	227	26	205
Osaka	31.5	213.3	17.0	236.3	26.8	205.6	19.2	181.2
Wakayama	46.2	186.4	22.2	210.3	24.2	192.4	18.0	171.7
Komatsujima	42.7	180.3	22.0	205.9	21.8	195.0	17.1	173.5
Shimonoseki	75.4	259.6	32.7	290.1	18.8	230.6	15.5	216.0
Hosojima	94.7	182.7	21.0	207.3	19.9	192.7	15.3	172.5
Kochi	49.2	174.7	21.8	199.4	21.6	190.5	15.6	167.8
Kushimoto	45.7	175.3	20.5	198.4	21.9	187.9	16.7	166.7

3. 模型の概要

今回の実験に用いた模型は、水平縮尺1/5万、鉛直縮尺1/500のモルタル滑面の Froude 模型である。模型諸元を **Table 2** に、模型一般図を **Fig. 2** に、写真を **Photo. 1** に示す。

Fig. 2 からわかるように、黒潮を流すために太平洋の一部を模型に取り入れたことが、本模型の特徴である。この太平洋の部分は、水深が 400m 程度（模型で80cm）の所までは地形を再現したが、それより深い部分は 400m の等深にした。これは、内海の平均水深が 30m 程度であることから考えて、一応問題ないと思われる。

起潮機は、**Fig. 3** および **Photo. 2** に示すような傾斜堰式のものである。当初は、紀伊水道と豊後水道の潮汐の位相差を再現しようとして、東よりに設定していたが、その後の調整の結果 **Fig. 2** に示す起潮機前面の破線の部分を閉じて、破線の切れる部分に起潮機を設けたと同じ効果が得られるようにした。これは、両水道の相対的な潮差の調整のためであり、豊後水道側の位相の遅れは、足摺岬から南の外洋の底にコンクリートのブロックを 3 段（200m 以深）空積みすることによって調節した。

Table 2. Hydraulic factors.

Factor	Scale	Prototype	Model
Distance	1/50000	100 km	2 m
Water Depth	1/500	10 m	2 cm
Tidal Range	1/500	1 m	2 mm
Tidal Period	1/2236	12 ^h 25 ^m	20.0 sec
Velocity	1/22.4	44.8 cm/sec	2 cm/sec
Horizontal Diffusivity Kx	1/11.2×10 ⁵	11.2×10 ⁴ cm ² /sec	0.1 cm ² /sec
Vertical Diffusivity Kz	1/112	11.2 cm ² /sec	0.1 cm ² /sec
Discharge	1/55.9×10 ⁷	55.9 m ³ /sec	0.1 cc/sec

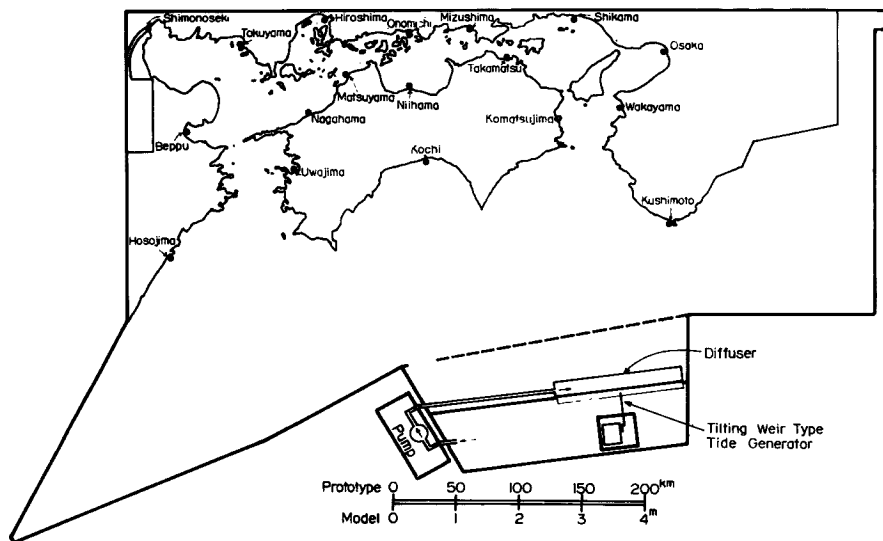


Fig. 2 Schematic diagram of experimental facilities.



Photo. 1. Model of Seto Inland Sea.

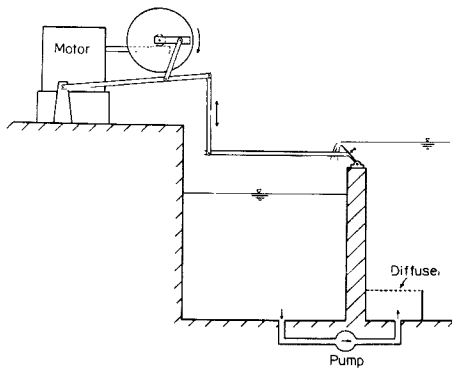


Fig. 3 Schematic diagram of tide generator.

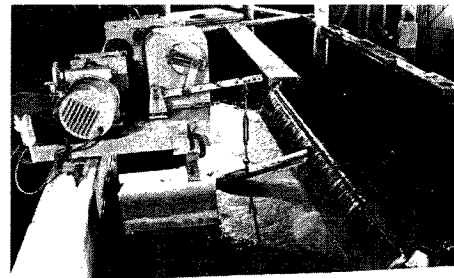


Photo. 2. Tilting weir type tide generator.

関門海峡の部分には起潮機を設置せず、海峡の外側に遊水池を設け、この水面積を調節することによって海峡部の潮差の調整をするようにした。

内海及び外洋の一部には、Fig. 2 に●印で示した18地点に電気抵抗式の水時計を設置した。

4. 実験結果

4.1 潮 汐

模型の調整は、境界条件として紀伊・豊後両水道の潮汐の位相の差と潮差を再現することを目的として行なった。大潮、平均潮、小潮としては、それぞれ $2(M_2+S_2)$ 、 $2M_2$ 、 $2(M_2-S_2)$ の潮差を M_2 分潮の周期で与えた。

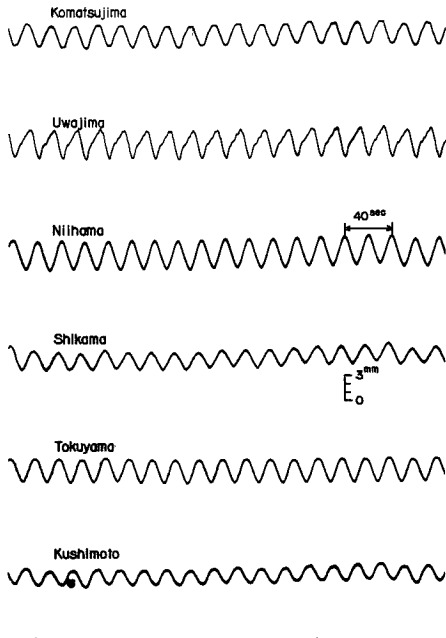


Photo. 3. Record of sea level in the model.

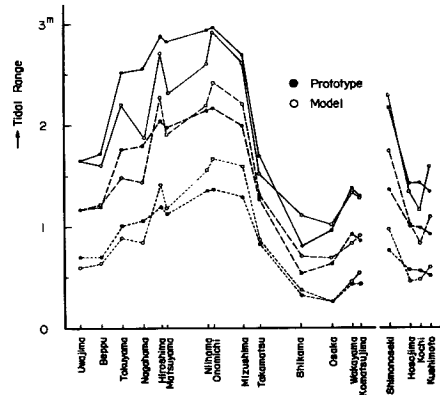


Fig. 4 Tidal range versus distance.

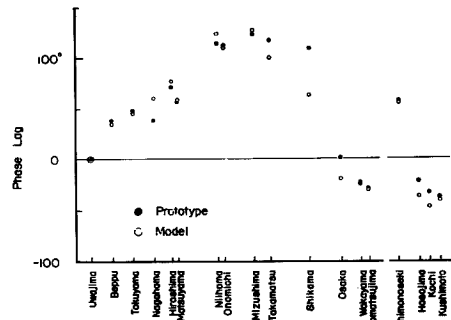


Fig. 5 Phase lag versus distance.

調整の結果得られた各測点での潮差の分布を Fig. 4 に、水位記録の一例を Photo. 3 に示す。また、宇和島を基準にした潮汐の位相差の分布を Fig. 5 に示す。Fig. 4 は、上から $2(M_2+S_2)$ 、 $2M_2$ 、 $2(M_2-S_2)$ の値である。Fig. 5 の原型の値は M_2 のもので、模型の値は大潮のものである。また、模型での潮差、位相差は調和分解して求められたものではなく波形から直接読み取ったものである。

Fig. 4 を見ると、潮差は一応両水道でよく再現されているが、内海の西半分では特に大潮の場合に再現性はよくない。注目されるのは、大潮の場合に特に小さい値を示している、新居浜・松山・長浜の3点がいずれも四国側の測点で、尾道・広島などの本州側の測点ではかなりよい値が出ていることである。この原因についてはまだ不明であるが、今後検討していく予定である。

Fig. 5 を見ると、位相差は全体的にかなりよく再現されているが、播磨灘北部の飾磨では非常に位相が早い。これは明石海峡の摩擦の不足によるものと思われる。

4.2 潮 流

内海の潮流は、一辺 1 cm、厚さ 3 mm 程度の正三角形の発泡スチロールに錘をつけた浮子を、各灘毎に50個程度まき、2秒間隔 (M_2 の周期の $1/10$) の写真追跡により、ラグランジュ的に測定した。この方法によって得られた、大潮と小潮における流況の一例を Fig. 6~13 に示す。それぞれその海域での上げ潮最強時、又は下げ潮最強時にはほぼ相当するが、 $1/10$ 周期の流程から求めた平均流速であるため、実際の最強流速よりやや小さめであろう。海峡部や島の多い海域では、浮子の岸への付着などにより、この方法での測流は困難であり、今後何らかの方法でオイラー的に測定していく必要があろう。

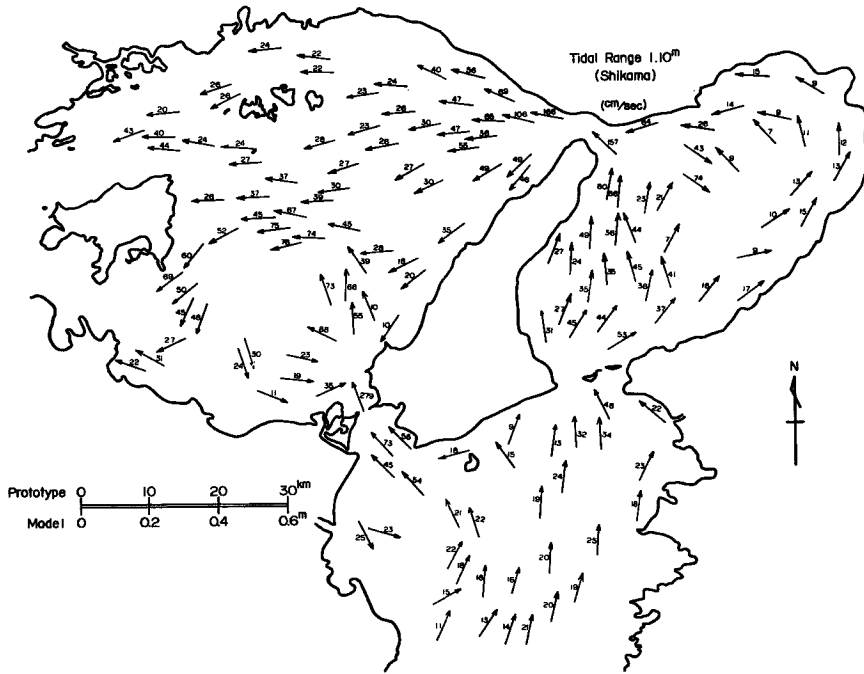


Fig. 6 Flow pattern in the flood (model, spring tide).

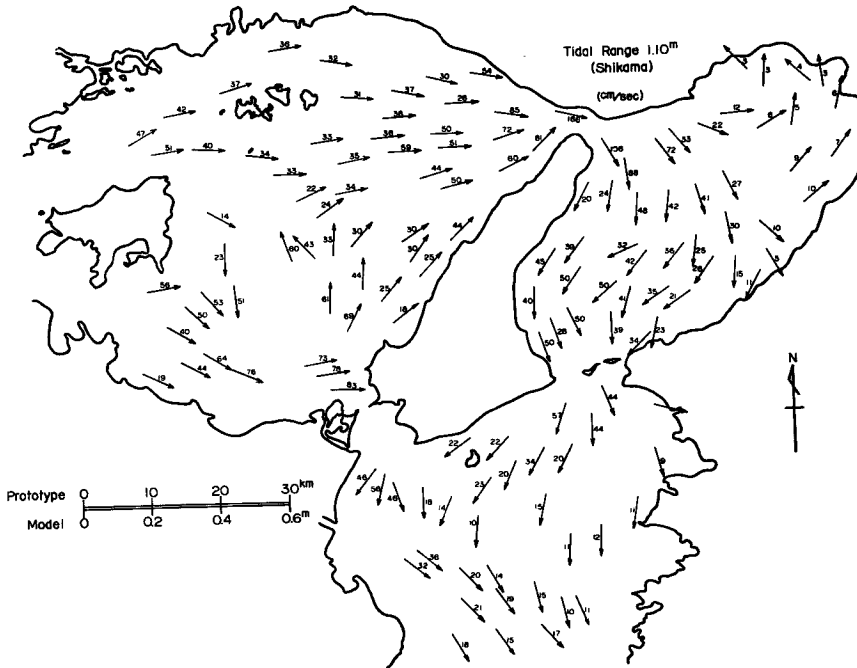


Fig. 7 Flow pattern in the ebb (model, spring tide).

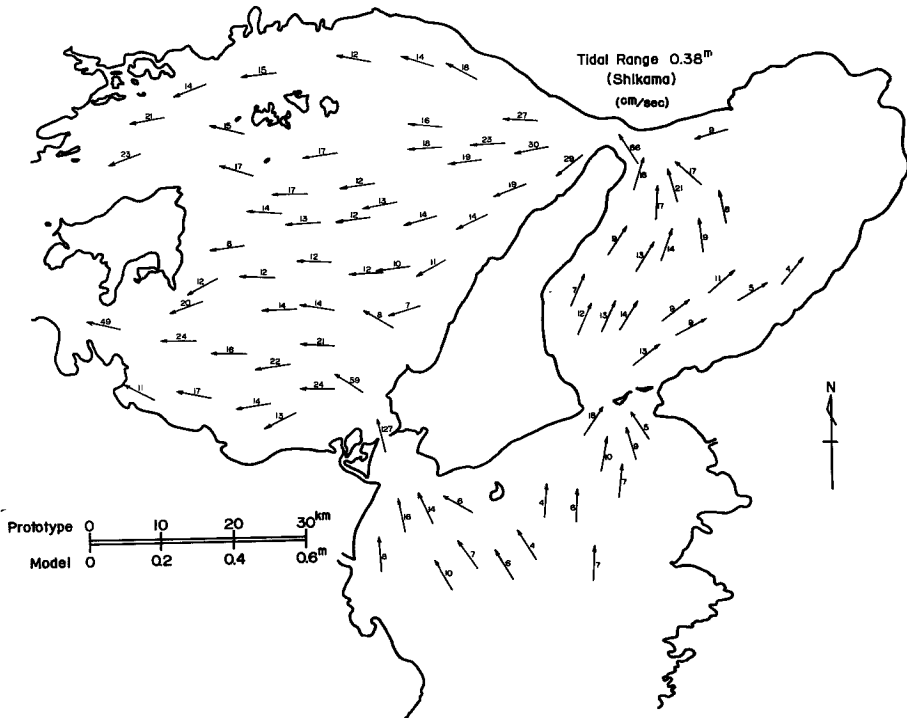


Fig. 8 Flow pattern in the flood (model, neap tide).

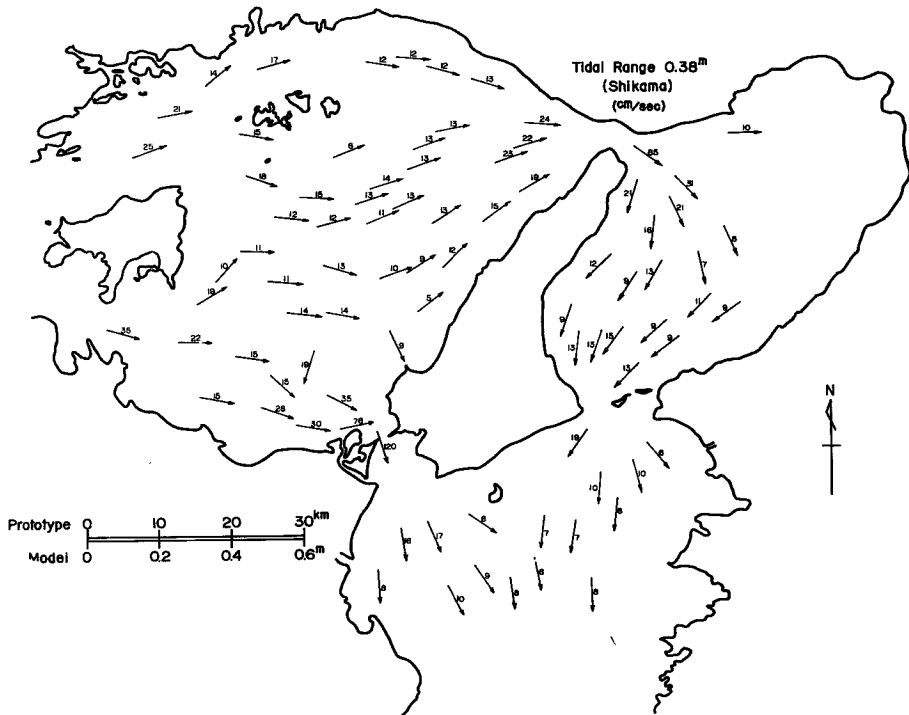


Fig. 9 Flow pattern in the ebb (model, neap tide).

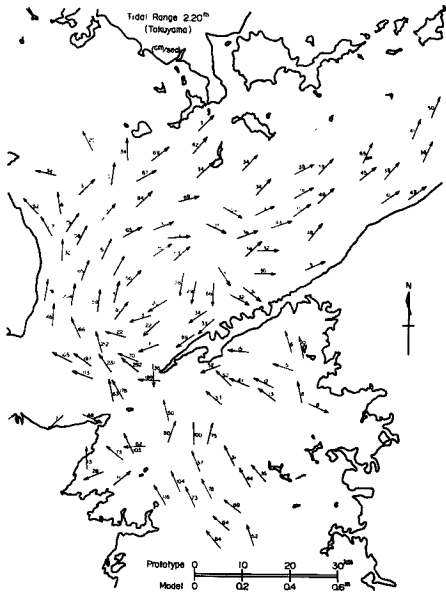


Fig. 10 Flow pattern in the flood (model, spring tide).

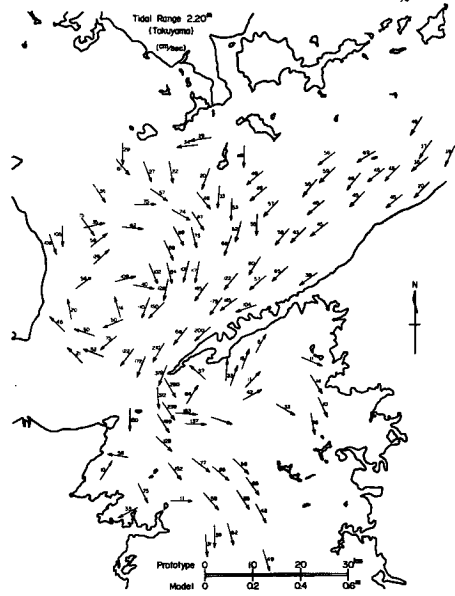


Fig. 11 Flow pattern in the ebb (model, spring tide).

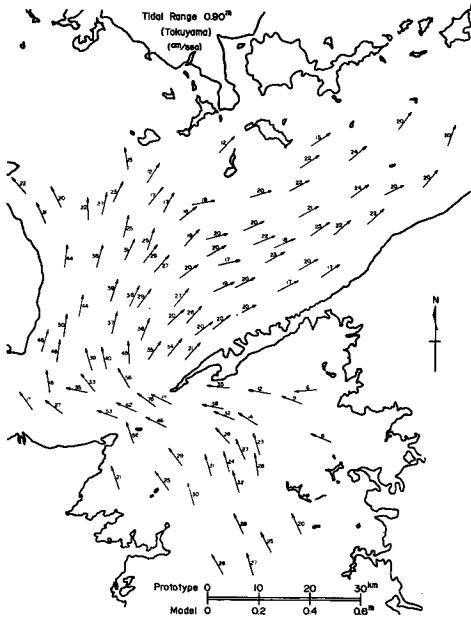


Fig. 12 Flow pattern in the flood (model, neap tide).

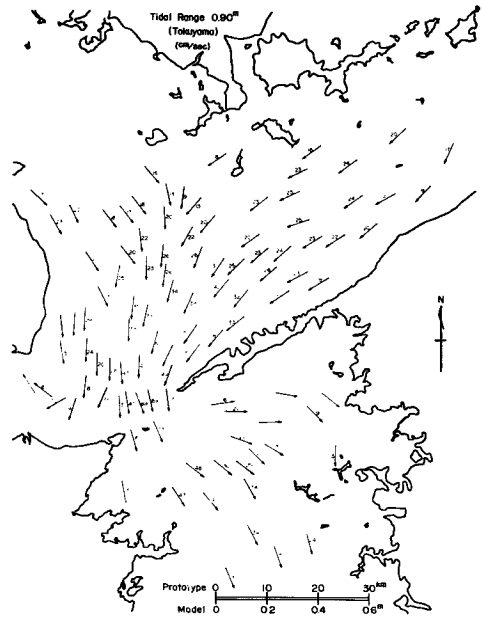


Fig. 13 Flow pattern in the ebb (model, neap tide).

4.3 恒流

次に、浮子の追跡によって得られた大潮における1周期の流跡図を Fig. 14~17 に、小潮における流跡図を Fig. 18~21 に示す。これらによると、潮流により移動する浮子（水粒子）は、一般的には1周期後には元の位置に戻らない。浮子の元の位置と1周期後の位置とを結ぶベクトルは、tidal residue と呼ばれ、これにより tidal residual flow（潮汐残渣流）が定義される。恒流（constant flow）とは、オイラー流に測定した流速の1周間の平均値のことであるが、以下の文では、模型実験から得られた潮汐残渣流についても、簡単のために恒流と呼ぶ。

大潮の流跡図から見ると、播磨灘南部と燧灘西部に強い反時計回りの環流があり、伊予灘西部には強い時計回りの環流がある。これらの環流の周辺の最大流速は、播磨灘南部のもので50cm/sec程度、燧灘西部で55cm/sec程度、伊予灘西部では110cm/sec程度にも達する。これらの海域では恒流が卓越し、憩流をみない。また周防灘中央に存在する環流もこれらに次いで強く、周辺流速は20cm/sec程度である。その他の海域での恒流は比較的小さく、大体数cm/secから10数cm/sec程度である。

小潮の流跡図から見ると、全体的に恒流は極めて小さくなり、燧灘西部と伊予灘西部に、大潮の場合と同様なパターンの環流が残る程度である。流速も小さくなり、恒流の卓越した状態は燧灘の一部に残るのみで、伊予灘西部では流れは振動流になっている。

流跡図から推定した大潮における恒流の模式図を Fig. 22 に示す。図中の数字は周辺流速の概値である。比較のために1/10万模型での恒流の模式図を Fig. 23 に示す²⁾。これは平均潮での実験結果であり、恒流のパターンはかなりよく一致しているが、流速は小さい。1/10万模型では周防灘の資料はなく、1/5万模型では広島湾の資料はない。

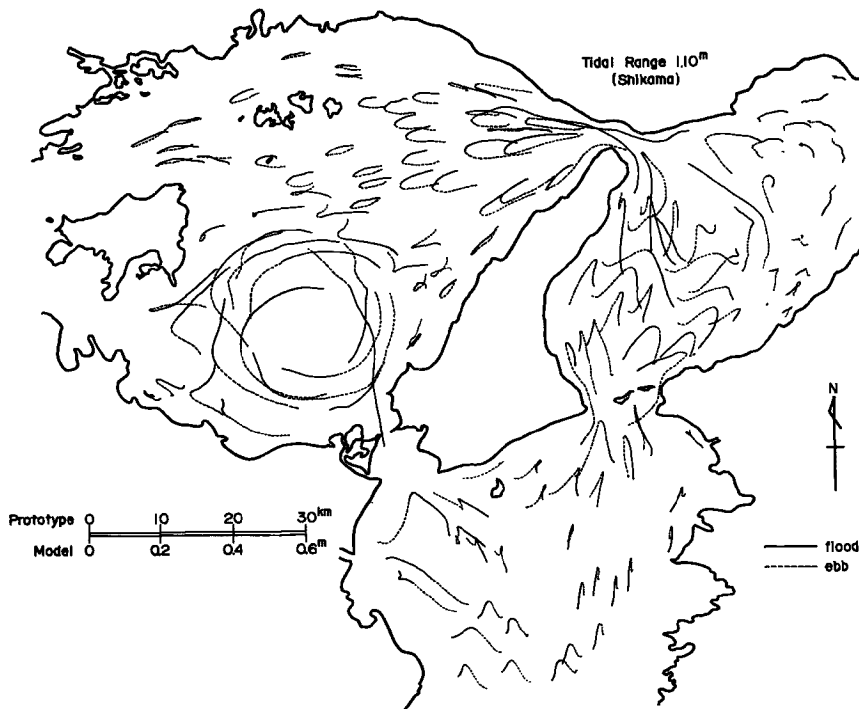


Fig. 14 Tidal locus in the model (spring tide).

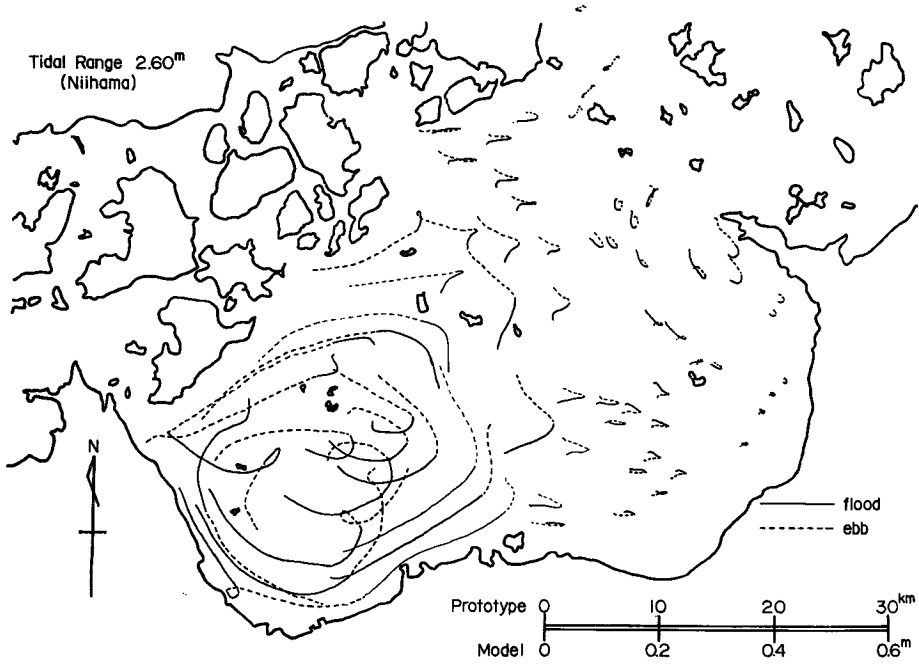


Fig. 15 Tidal locus in the model (spring tide).



Fig. 16 Tidal locus in the model (spring tide).

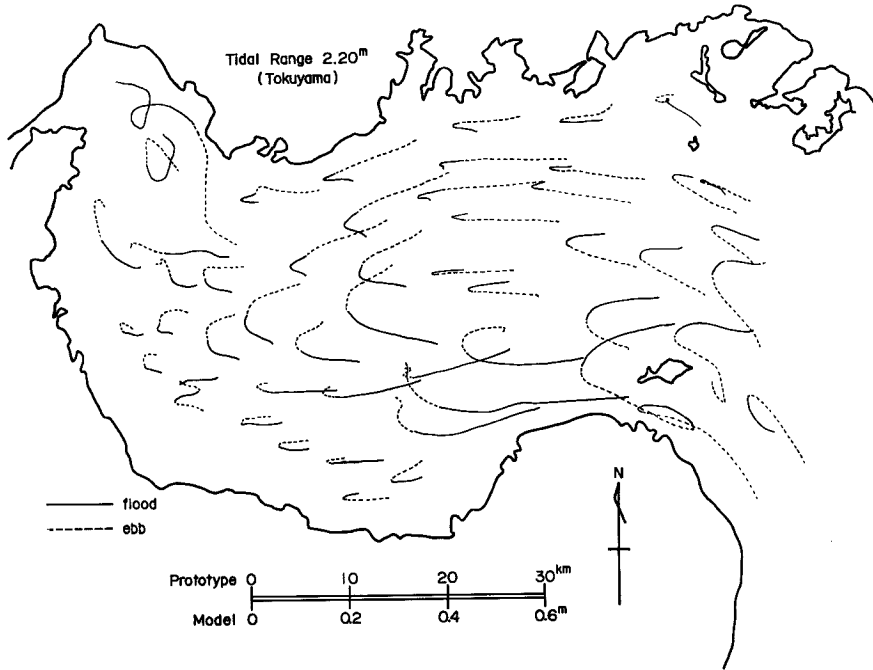


Fig. 17 Tidal locus in the model (spring tide).

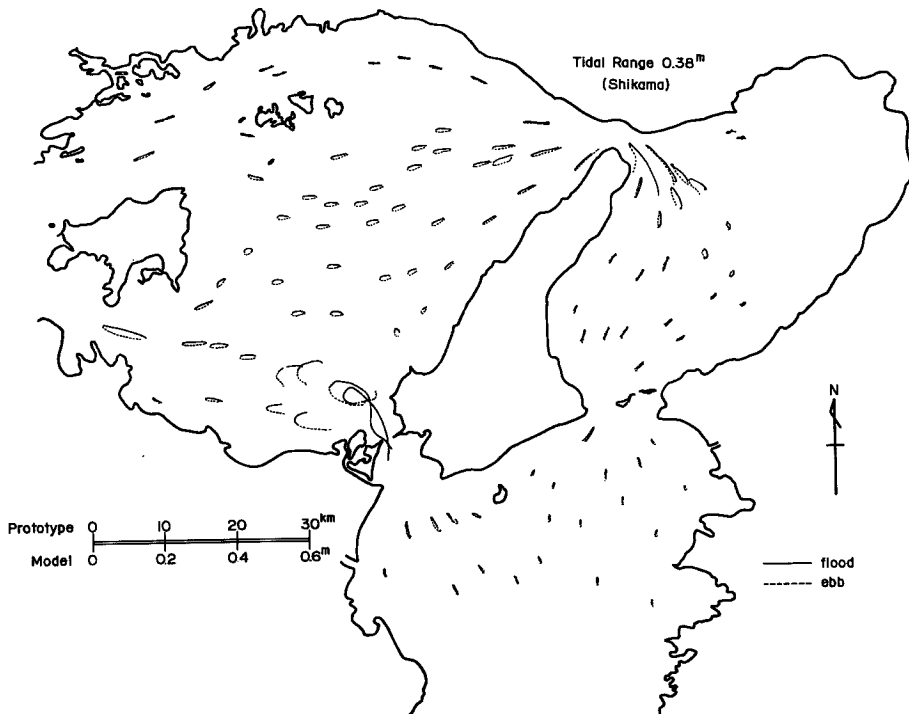


Fig. 18 Tidal locus in the model (neap tide).

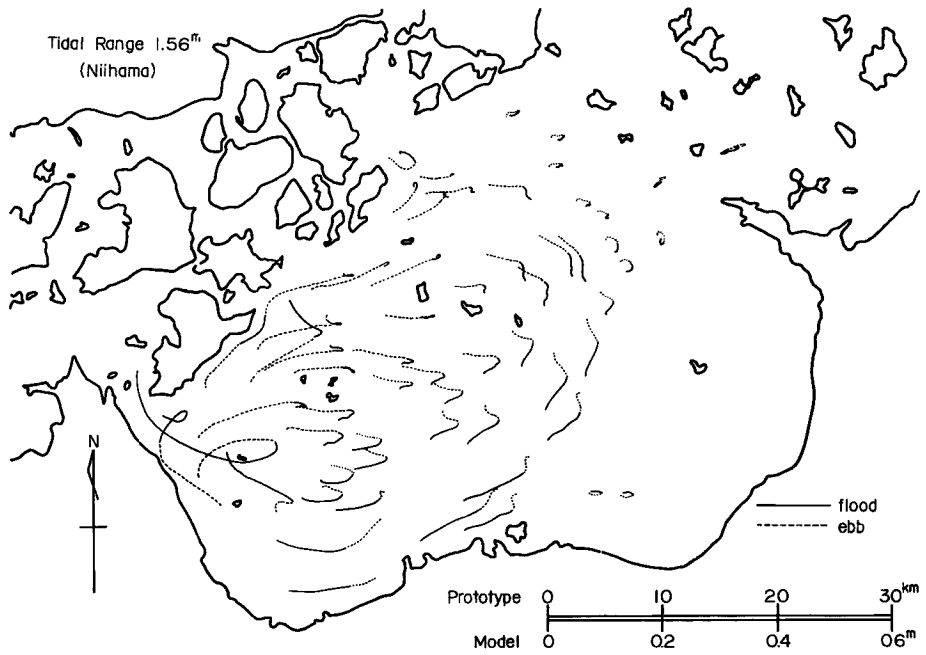


Fig. 19 Tidal locus in the model (neap tide).



Fig. 20 Tidal locus in the model (neap tide).

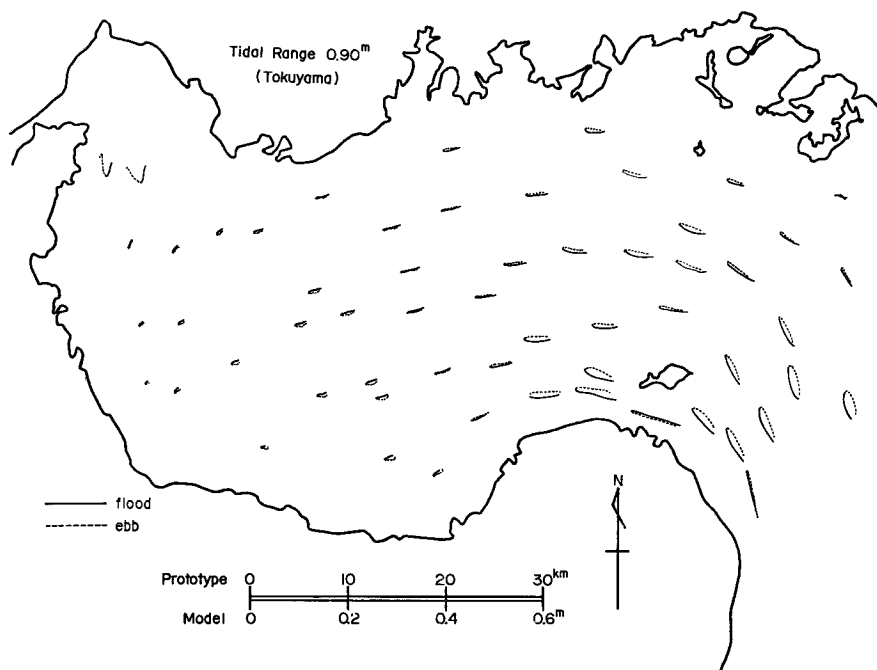


Fig. 21 Tidal locus in the model (neap tide).

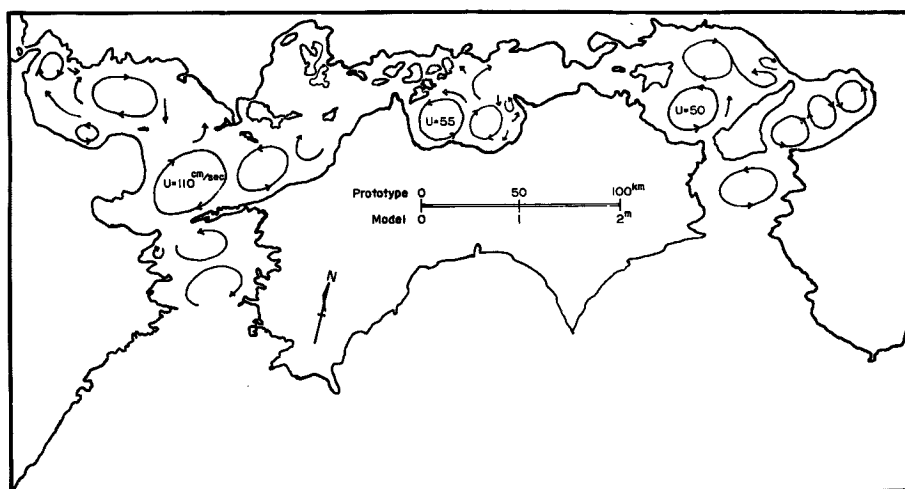


Fig. 22 Distribution of tidal residual circulation (model).

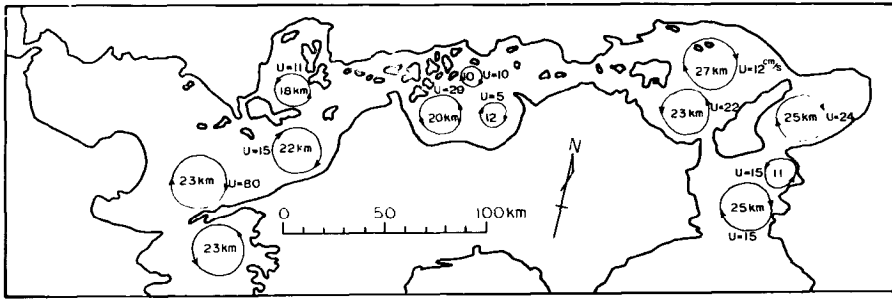


Fig. 23 Distribution of tidal residual circulation (1/100000 model).

5. 考 察

Fig. 4を見ると、既に述べた事他に次の点が注目される。即ち、紀伊・豊後両水道での潮差を再現させた場合、内海中央部の潮差は、原型の値に対して、小潮の場合はやや大きく、大潮の場合はやや小さい。平均潮の場合は、平均的には大体同じかわずかに大きいといった程度である。これは、平均潮の場合には、全体的に摩擦の効果が充分であることを示している。この点を他の瀬戸内海模型と比較してみると、1/10万模型では平均潮での実験に対して摩擦の効果が少なく、中央部の潮差が大き過ぎるため、主な海峡の断面積を1/3程度縮小することによって調整している¹⁾。また大型模型でも同様に、中央部の潮差が大きいためコンクリートブロック等を沈めて、人工的な粗度を与えており²⁾、いずれも本模型の傾向とはあまり合っていない。この理由については現在明らかでないが、模型の scale effect の問題や、以下に述べる恒流の問題とも関連して今後検討していきたい。

杉本・樋口は1/10万模型による実験の結果、強い環流の存在する海域では、弱い海域に比べて拡散係数が1桁程大きくなることを見出し、内海規模の潮汐混合に対する恒流の重要性を指摘しており、本実験に際しても恒流がどのようなパターン・流速を持つかは重要な課題である。このため、模型の恒流と原型の恒流との比較が望まれる訳である。原型の資料については、なるべく多くの測点で、少なくとも15昼夜以上連続した同時観測によるもので、しかも四季別のものが必要と考えられるが、現在ある資料についてこうした条件は満たされていない。更に、原型での恒流は地形の効果の他、風、密度、河川の流入等の影響や、季節による変化、潮差による変化、コリオリ力の効果等々の様々な要素を含んだものであり、基本的には地形の効果のみによって発生すると考えられる模型の恒流と、単純に比較することはあまり適切でないと言える。この問題に関しては、恒流に対する種々の効果の相対的な大きさを評価することが、今後必要であろう。

以上のような事情により、恒流のパターンの再現性については、今のところ十分な議論はできない。しかし、模型での播磨灘南部や隠岐西部、伊予灘西部等に見られるような卓越した恒流が原型にも存在すれば、十分に観測によって見出される筈であるが、原型で観測されている値はいずれもはるかに小さいことから考えると、模型での恒流の流速は原型より大き過ぎるということは間違いないと思われる。これは、本実験では特に大潮の場合について言えることであるが、小潮の結果や、他の瀬戸内海模型での結果からみて^{1), 2), 6)}、平均潮での実験でもある程度同様の傾向が出るであろうと予想される。このような強い環流が発生する原因として、1/10万模型の報告では、海峡部の断面積を縮小した点を挙げている¹⁾。しかし、本実験では内海の地形を修正していないのに同様に強い環流が発生しており、實際上、海峡部の流れが強調されている可能性がある。このため、今後恒流の再現について検討するためには、海峡部での相似性の検討が必要であろう。

6. あとがき

以上著者らは水平縮尺1/5万、鉛直縮尺1/500の瀬戸内海模型を使って、潮汐・潮流の再現について基礎的な

実験を行ない、現在までに次のことが明らかになった。

(1) 紀伊・豊後両水道での境界条件を合やすことにより、内海の潮差はある程度再現される。大潮、平均潮、小潮の潮差の違いによって摩擦の効果は一様でない。

(2) 恒流は他の瀬戸内海模型とかなり一致したパターンを示すが、流速は原型より大き過ぎる。

今後は以上のような点を改善する方向で検討していきたい。黒潮を流すことについては、まだ実験を行っていないので、技術的には未知数であるが、今後早急に実現していきたいと考えている。

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）序報，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) 井原欄・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回海岸工学講演会論文集，1973，pp. 221—225.
- 4) 福田保・井原欄・早川典生：瀬戸内海大型水理模型，第18回水理講演会講演集，1974，pp. 31—36.
- 5) 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.
- 6) 杉本隆成・上嶋英機・安田秀一・柳哲雄・樋口明生：瀬戸内海大型模型における潮流残差環流について，昭和50年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，1975，p. 51.