

大阪湾における潮流の流動特性に関する模型実験

今本 博健・大年 邦雄・木戸研太郎

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE TIDAL CURRENTS IN OSAKA BAY

By *Hirotake* IMAMOTO, *Kunio* OHTOSHI and *Kentaro* KIDO

Synopsis

Physical hydraulic model experiments were done to study the tidal currents in Osaka Bay. Three models which had different geometric scales were used;

1) $x_r = 1/5,000$ $y_r = 1/500$ 2) $x_r = 1/50,000$ $y_r = 1/2,000$ 3) $x_r = 1/50,000$ $y_r = 1/500$ in which x_r and y_r are the horizontal and vertical scales respectively.

As the first step, only the semidiurnal tide (M_2) was taken into account. Other factors, such as density stratification, wind, waves and so on, which might influence the tidal currents in the bay were not considered. The semidiurnal tide was produced by a plunger-type tide generator.

In the experiments for each hydraulic model, first the characteristics of tide in Osaka Bay was adjusted, secondly the currents were measured by continuously photographing a number of floats scattered on the water surface.

The results of experiments for each model were compared with each other and with field observation. From these examination, it was made clear that the model with smaller distortion ratio produced more similar flow patterns as the prototype.

1. はじめに

本模型実験で対象とした大阪湾は、瀬戸内海の東端に位置し、沿岸には大阪、神戸をはじめとする大小の都市が連なり、古来、海上交通の要として重要な役割を果たしてきている。したがって、従来より、潮汐および潮流の現地観測やこれらを対象とした水理模型実験および数値シミュレーション等が実施され、湾内の潮流特性が検討されてきている。しかしながら、現地観測には多大な時間、労力等を要し、特に潮流観測では、数多くの測点を設けて湾内の流況を詳細に知ろうとすることは極めて困難である。模型実験においては、現地との間の相似則について未だ不明な点が多く残されており、また、数値シミュレーションにおいては、得られた結果の検証等の課題がある。

そこで、本研究では、湾域の潮流を対象とした水理模型実験における scale effect を検討する第1段階として、水平および鉛直縮尺の異なる3種の大阪湾模型を用いて、湾内の潮流特性を実験的に検討したものである。未だ十分な結果は得られていないが、現在までに得られた実験結果について報告する。

2. 水理相似則

潮汐に伴う流れ、すなわち潮流は水平方向に卓越した流れであり、圧力は静水圧分布で近似される。この場合、海底から水面まで平均した鉛直平均流の流れ方向に対する運動方程式は次のように表わされる¹⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^{4/3}U^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 U および W はそれぞれ x および z 方向の平均流速、 t は時間、 n はマンニングの粗度係数、 g は重力加速度、 h は水深である。

ここで、原型に対する諸量に添字 p を、模型に対する諸量に添字 m を付して表わすと、式 (1) は原型および模型の両者に対して成立せねばならないので、それぞれ次のように表わされる。

$$\frac{\partial U_p}{\partial t_p} + U_p \frac{\partial U_p}{\partial x_p} + W_p \frac{\partial U_p}{\partial z_p} = -g_p \frac{\partial h_p}{\partial x_p} - \frac{g_p n_p^2}{h_p^{4/3}} U_p^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial U_m}{\partial t_m} + U_m \frac{\partial U_m}{\partial x_m} + W_m \frac{\partial U_m}{\partial z_m} = -g_m \frac{\partial h_m}{\partial x_m} - \frac{g_m n_m^2}{h_m^{4/3}} U_m^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

いま模型と原型における諸量の比に添字 r を付すと、すなわち、 $U_r = U_m/U_p$ 、……のように表わすと、式 (3) より次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{U_r}{t_r} \cdot \frac{\partial U_p}{\partial t_p} + \frac{U_r^2}{x_r} \cdot U_p \frac{\partial U_p}{\partial x_p} + \frac{U_r W_r}{z_r} \cdot W_p \frac{\partial U_p}{\partial z_p} = & -\frac{g_r h_r}{x_r} \cdot g_p \frac{\partial h_p}{\partial x_p} \\ & - \frac{g_r U_r^2 n_r^2}{h_r^{4/3}} \cdot \frac{g_p n_p^2}{h_p^{4/3}} \cdot \frac{g_p n_p^2}{h_p^{4/3}} U_p^2 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

原型と模型との間に相似性が成立つためには、式 (2) と式 (4) との比較より次式が成立する必要がある。

$$\frac{U_r}{t_r} = \frac{U_r^2}{x_r} = \frac{U_r W_r}{z_r} = \frac{g_r h_r}{x_r} = \frac{g_r U_r^2 n_r^2}{h_r^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

①
②
③
④
⑤

上式の②、④より、 $U_r^2 = g_r h_r$ が得られる。 $g_r = 1$ および $h_r = y_r$ であるから、結局次式となる。

$$U_r = y_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

これはフルードの相似則に他ならない。

①、②より、 $t_r = x_r U_r^{-1}$ が得られ、式 (6) を考慮すると

$$t_r = x_r y_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

②、③より、 $W_r = U_r x_r^{-1} z_r$ となるが、 $x_r = z_r$ であるから、

$$W_r = U_r = y_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

②、⑤より、 $h_r = y_r$ を考慮すると

$$n_r = x_r^{-1/2} y_r^{2/3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) は摩擦抵抗を規定する条件である。

以上のように、模型の縮尺 x_r (水平) と y_r (鉛直) が与えられると、流速、時間および摩擦に関する相似関係が得られる。実際には潮流現象が生起する原型の粗度係数が明確でないことが多く、式 (9) の関係を満たすことは困難である。したがって、潮汐の潮差・位相および潮流の流向・流速が再現できるように試行錯誤的に人工粗度を付加して、対象とする現象が再現できるように模型の流況を調整する方法を用いることが多い。

3. 実験装置および方法

3.1 水理模型

本実験では、水平および鉛直縮尺の異なる3種の大阪湾模型を用いている。すなわち、Fig. 1に示すように、各模型は大阪湾全域および紀伊水道、播磨灘の一部を含む範囲が再現されており、その水平縮尺

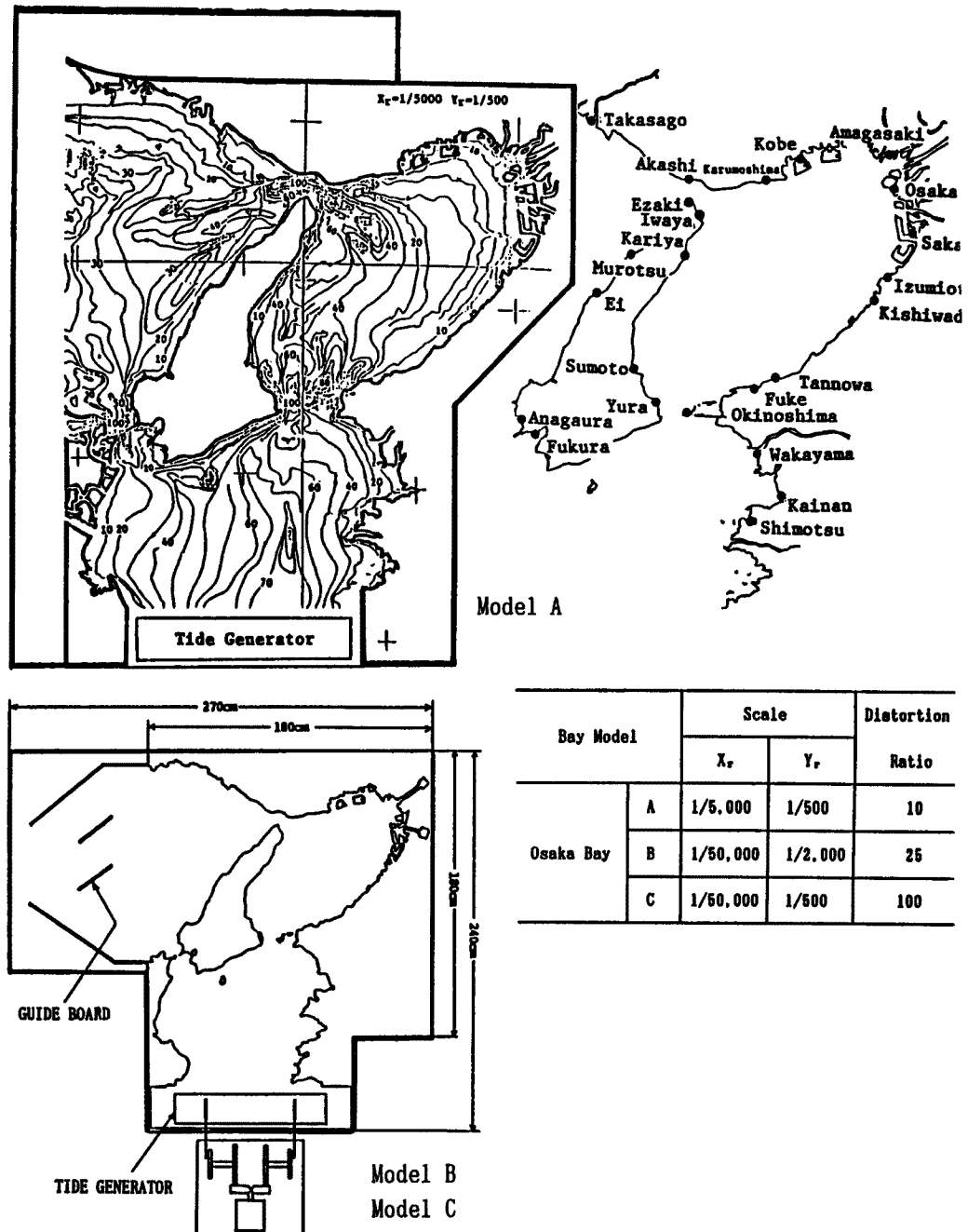


Fig. 1. Hydraulic models of Osaka Bay.

x_r , 鉛直縮尺 y_r およびひずみ率 D_r は次のように設定されている。

Model A : $x_r=1/5,000$ $y_r=1/500$ $D_r=10$

Model B : $x_r=1/50,000$ $y_r=1/2,000$ $D_r=25$

Model C : $x_r=1/50,000$ $y_r=1/500$ $D_r=100$

Model A では、コンクリートブロックの外壁の中に、海図を基にした海底地形がモルタルで作成されており、表面は刷毛仕上げとなっている。また、播磨灘の水面積を出来るだけ広くするために、海底の平坦な水槽を連結させている。一方、Model B および Model C は木製であり、等深線を形どったベニヤ板を重ねて階段状の海底地形を作った後に、石膏で滑らかな地形を形成し、表面をペンキ等で仕上げている。

大阪湾には友ヶ島水道および明石海峡からの潮汐現象が作用しているが、本模型では紀伊水道側にのみ起潮装置を配置している。起潮機はプランジャー型であって、そのストロークおよび周期が調節でき、正弦波形の潮汐が発生されるようになっている。

なお、大阪湾には淀川、大和川をはじめとして多数の河川流が流入しているが、本実験ではそれらの流入量は考慮していない。

3.2 潮位および流況の計測

潮位の計測位置は、Fig. 1 に併示しているように、紀伊水道沿岸、大阪湾沿岸、播磨灘沿岸および鳴門海峡の各検潮所所在地に一致する地点とし、24 地点が選定されている。計測には水面触針型のサーボ式水位計（分解能 0.1 mm）を用い、起潮機のプランジャーに固定した容量式水位計と共に出力電圧をデータレコーダに記録した。

潮流の計測は、大阪湾全域の表面流況を対象とし、水面に投入した紙片あるいは粒子トレーサーの流動を、模型上に設置した 35 mm スティルカメラおよびビデオカメラを用いて同時撮影した。計測時には、起潮機を 작동させて大阪湾の潮汐が 1 周期平均で平衡状態になったのを確認した後に、明石海峡の潮流を基準にして、東流最強時、転流時（東→西）、西流最強時および転流時（西→東）の各位相をさむ 1/8 周期間および 1/16 周期間のトレーサーの流動を撮影している。

3.3 実験条件

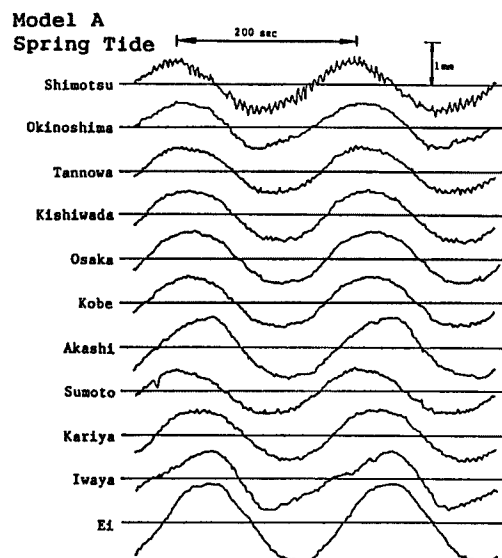
本実験では、小潮、平均潮および大潮時における大阪湾の潮流をその計測対象とすることとし、次のようにしてその実験条件を選定した。大阪湾における潮汐・潮流は、友ヶ島水道および明石海峡による制約を受けることが容易に予想されるが、それを誘起する源は外洋の潮汐変化である。Table 1 は、Fig. 1 に示した検潮所における 4 大分潮の調和定数を示したものである。外洋に近い下津、海南、和歌山では M_2 潮（主太陽半日周潮）の卓越していることがわかる。したがって、実験時に各模型での起潮機を動作させる周期としては、 M_2 潮の周期である 12 時間 25 分に対応する時間とした。

次に、周期を所定の時間に設定し、起潮機のストロークを変化させた場合の潮位の時間的変化を計測した。結果の一部を Fig. 2 に示している。各計測点における潮位はほぼ正弦波状に変化しているが、上潮時と下潮時の時間の長さは必ずしも一致していない。なお、下津における波形には高周波の変動成分が現われているが、これは潮位計測点が地形の後流域にあったためである。

このような波形記録を基に、潮差（満潮位－干潮位）および位相差（沖ノ島を基準）を求めた。Model A および C に対する結果を Fig. 3 に示している。潮差は大阪湾沿岸では良好に再現されているが、明石海峡以西では過大となっている。なお、原型における大潮、平均潮、小潮の潮差は Table 1 の調和定数を用いてそれぞれ、 $(M_2 \text{ 潮差} + S_2 \text{ 潮差})$ 、 $M_2 \text{ 潮差}$ 、 $(M_2 \text{ 潮差} - S_2 \text{ 潮差})$ より算出し線で結んでいる。一方、沖ノ島を基準にした位相差（各計測点が満潮となる時刻のずれより評価した）も潮差と同様、大阪湾沿岸では良好に再現されているが、明石海峡以西で過小（位相が早い）となっている。このように模型において明石海峡以西で潮差が過大となるとともに位相差が過小となっている原因としては、1) 海底の粗

Table 1. Tidal constant in the prototype

Constituent Station	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
	H(cm)	K(°)	H(cm)	K(°)	H(cm)	K(°)	H(cm)	K(°)
Shimotsu	45.56	185.04	21.80	208.05	24.24	191.43	18.20	170.98
Kainan	44.75	188.73	21.40	211.80	23.89	192.66	17.91	172.26
Wakayama	46.22	186.42	22.18	210.27	24.19	192.36	17.95	171.71
Okinoshima	38.80	192.50	19.80	215.40	25.30	201.10	18.70	181.90
Fuke	33.10	207.10	18.00	228.20	24.50	199.70	18.30	184.00
Tannowa	32.30	204.21	17.71	221.58	25.23	200.74	19.02	178.81
Kishiwada	31.39	211.79	16.70	227.38	25.95	203.69	19.84	180.56
Izumitsu	30.36	213.62	17.31	226.36	25.89	203.09	19.15	180.92
Sakai	30.61	213.73	17.28	228.44	26.34	202.70	19.65	181.20
Osaka	30.85	214.70	17.18	229.08	26.19	204.10	19.78	182.54
Amagasaki	30.34	215.65	17.17	229.49	25.89	204.04	19.30	181.81
Kobe	29.56	215.05	16.47	229.62	25.88	203.56	19.67	181.78
Karumoshima	32.00	214.00	17.00	229.00	27.00	205.00	21.00	180.00
Akashi	15.90	240.30	9.30	236.60	23.60	216.40	16.70	201.30
Takasago	27.37	314.29	7.67	306.48	27.85	225.89	20.36	200.52
Himeji	31.05	315.82	8.68	313.36	28.22	226.02	20.84	202.32
Yura	32.90	190.50	17.00	214.30	22.90	205.70	17.90	182.30
Sumoto	30.49	193.23	17.03	215.01	24.14	204.09	18.35	181.96
Kariya	27.80	204.90	17.70	233.40	25.30	208.20	20.50	184.40
Iwaya	11.00	220.00	11.00	237.00	24.00	218.00	21.00	196.00
Ezaki	13.20	239.90	9.40	235.40	25.40	221.70	20.00	202.60
Murotsu	22.00	335.00	8.00	286.00	26.00	228.00	23.00	206.00
Ei	25.00	333.60	5.60	326.00	27.60	230.90	20.40	206.60
Anagaura	32.40	340.60	7.80	351.50	29.10	231.40	21.70	204.10
Fukura	44.20	189.60	21.00	211.50	23.10	195.20	17.50	171.80


Fig. 2. Examples of water level measurements.
(Model A, Spring tide)

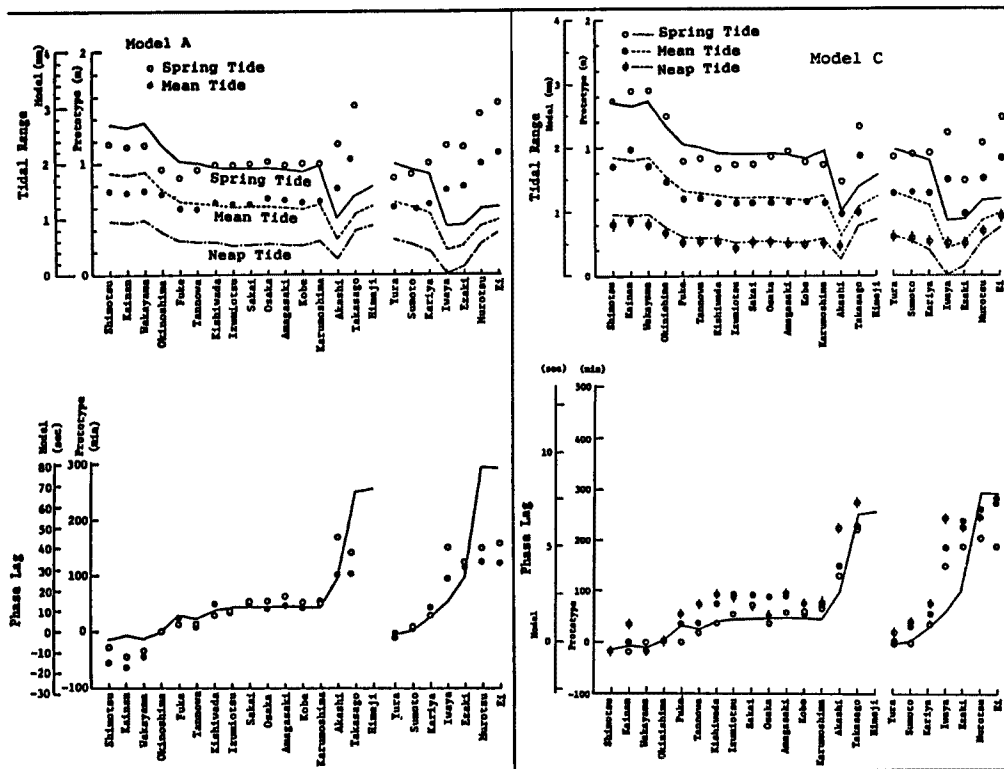


Fig. 3. Distribution of tidal range and phase lag.

さ不足, 2) 播磨灘海域の水面積の不足などが考えられる。

以上の潮位記録の結果より, 大阪湾に限定すれば, 原型の潮汐特性がほぼ再現されることがわかった。

4. 実験結果および検討

4.1 表面流況パターン

既述のように, 大阪湾の潮流は友ヶ島水道および明石海峡の両開口部に規制されているため, 湾内の潮流現象は両開口部での潮流速の影響を強く受けている。

大阪湾が上げ潮にある時には, 友ヶ島水道の潮流は北流であり, 明石海峡では西流となる。一方, 下げ潮時には, 友ヶ島水道の潮流は南流であり, 明石海峡は東流となる。各海峡部の潮流向は上述のような変化をするが, それらの変化は同時ではなく位相差がある。Model Aでの計測結果を用いて, 明石海峡を基準とした潮流の位相差を記述すると, 次のようである。

明石海峡が東流最強の時, 友ヶ島水道では既に南流最強を過ぎて転流(南→北)へ向う途中にあり, 友ヶ島水道の方が約45分(模型で12秒)位相が早い。次に明石海峡が転流(東→西)する時, 友ヶ島水道は転流(南→北)直後であり, その位相差は上の場合と同様である。明石海峡が西流最強の時には, 友ヶ島水道は北流最強直後である。また, 明石海峡が転流(西→東)する時, 友ヶ島水道は転流(北→南)直後の状態にある。

本実験では明石海峡での流速・流向を基準にし, 東流最強時, 転流時(東→西), 西流最強時および転流時(西→東)の各位相時をはさむ1/16周期間および1/8周期間での表面流況を可視化した。ここでは, 明石海峡が東流および西流の各最強時のものだけを取り出して示すと Photo 1, Fig. 4および Fig.

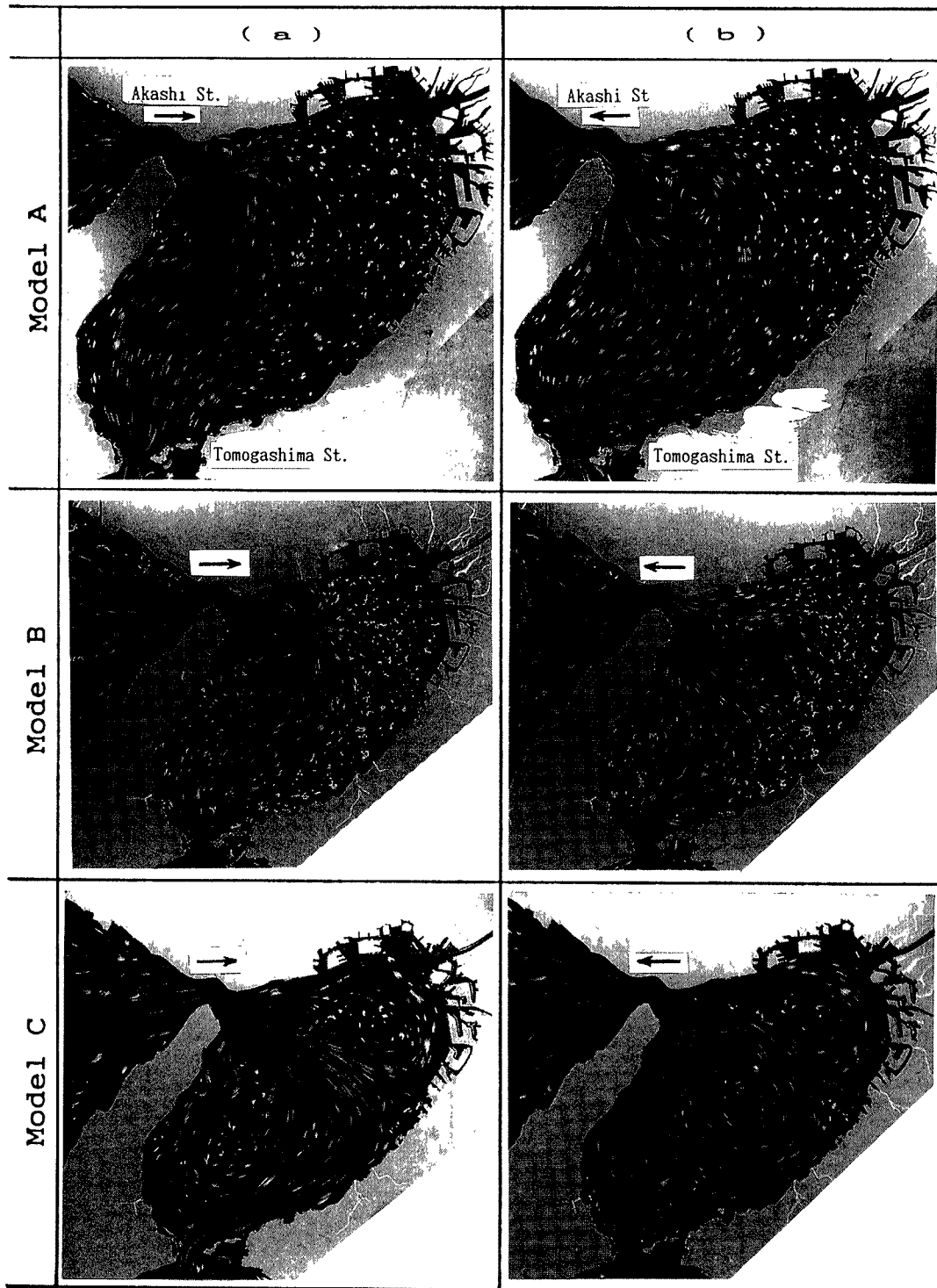


Photo. 1. Comparison of tidal currents obtained in three hydraulic models (Spring tide)
 (a) : Ebb tide (b) : Flood tide

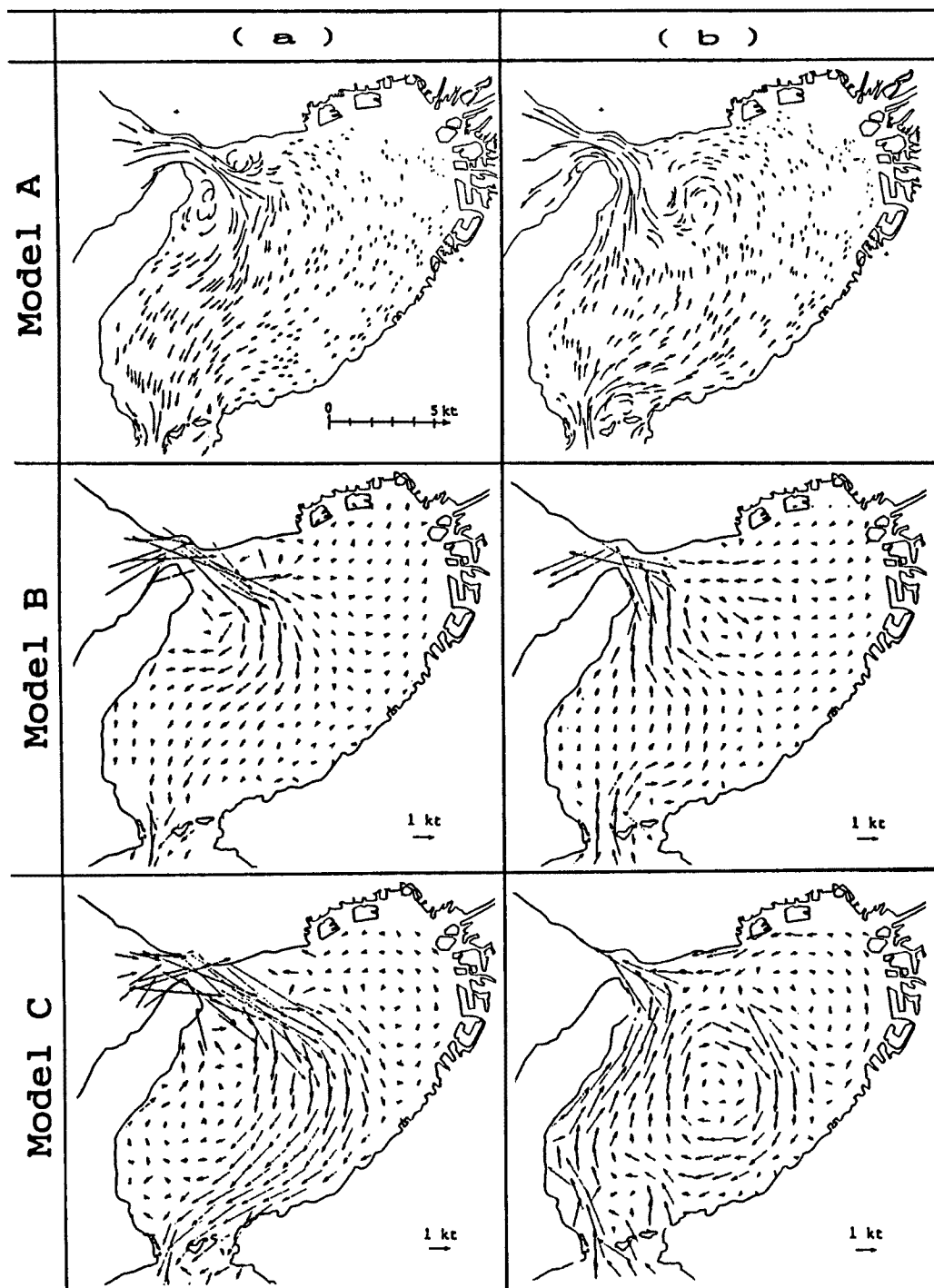


Fig. 4. Comparison of tidal currents obtained in three hydraulic models. (Spring tide)
 (a): Ebb tide (b): Flood tide

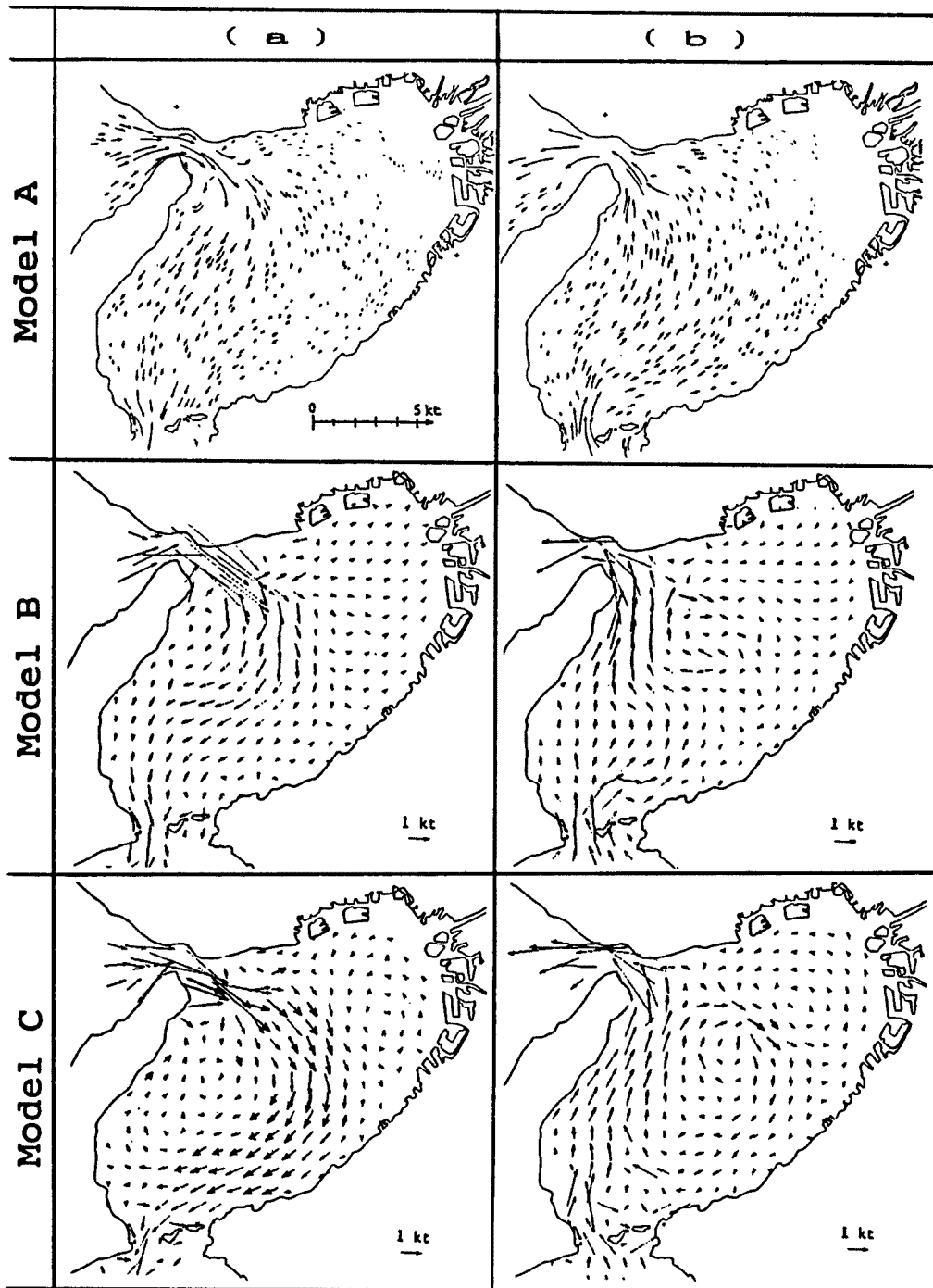


Fig. 5. Comparison of tidal currents obtained in three hydraulic models. (Mean tide)
(a) : Ebb tide (b) : Flood tide

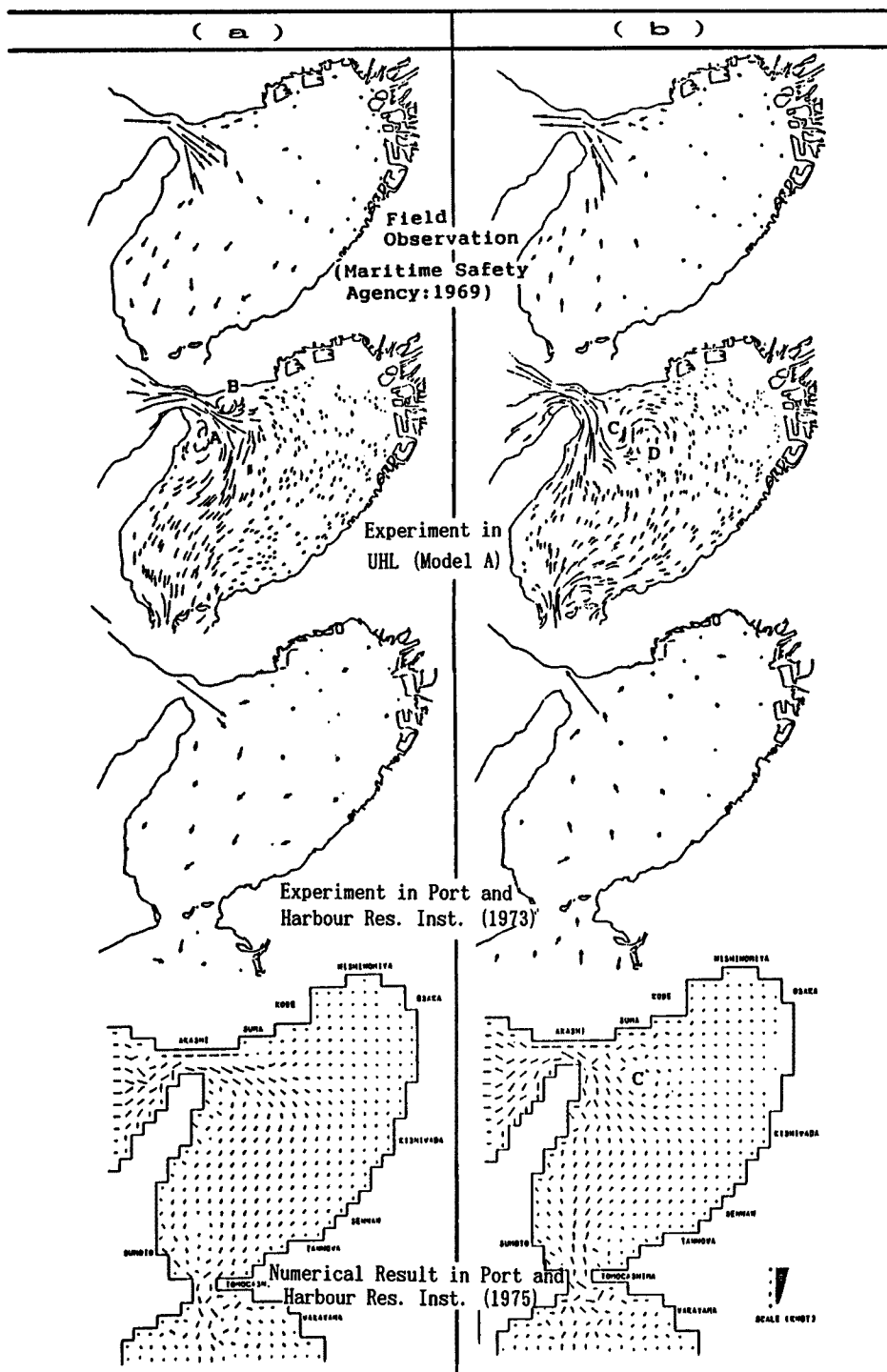


Fig. 6. Comparison of tidal currents obtained in some other models. (Spring tide)
(a): Ebb tide (b): Flood tide

5 のようである。また、Fig. 6 には、海上保安庁発刊の潮流図²⁾と港湾技術研究所で実施された水理模型実験の結果³⁾およびシミュレーション計算結果⁴⁾を併示している。これらの資料およびビデオ撮影結果を考慮して大阪湾の潮流特性を検討すると次のようである。

1) 明石海峡が東流最強の時

まず、大潮の場合について見ると、明石海峡から沖ノ瀬付近に至り、そこから南西方向に向きを変えて友ヶ島水道に至る流れが主流となっている。すなわち、大阪湾東部沿岸海域の流速は微弱であり、主流は湾中央より西側の海域であることがわかる。この特性は、観測結果、港湾技研での実験およびシミュレーション結果にも同様に認められる。また、本実験では、淡路島の仮屋および岩屋沖の海域に時計回りの環流、須磨沖に反時計回りの環流が認められるが、それらのスケールおよび流速はひずみ率の大きな模型程大きく現れている。

次に、平均潮の場合について見ると、大潮の場合とほぼ同様の流向を示す潮流が生起しているが、岩屋沖の時計回り環流および須磨沖の反時計回り環流は縮小されたものとなっている。しかし、それらのスケールはひずみ率の大きな模型程大きく現れている。

2) 明石海峡が西流最強の時

まず、大潮の場合について見ると、友ヶ島水道より淡路島東岸沿いに北流して明石海峡に至る主流と、その主流から分岐して沖ノ瀬付近を中心とする時計回りの環流が認められる。また、その環流と対をなす環流がある。大阪湾北部の沿岸海域は西流して明石海峡へと向かい、明石海峡東流時に認められた須磨沖の環流は消失している。この場合に認められる環流も、ひずみ率の大きな模型程大きく現れている。主流から分岐した沖ノ瀬付近の時計回り環流は、シミュレーション結果には認められるが、それと対をなす環流の存在は認められない。

平均潮の場合には、主流の方向は大潮の場合と同様であるが、主流から分岐する環流は Model A および B では顕著でないが、ひず

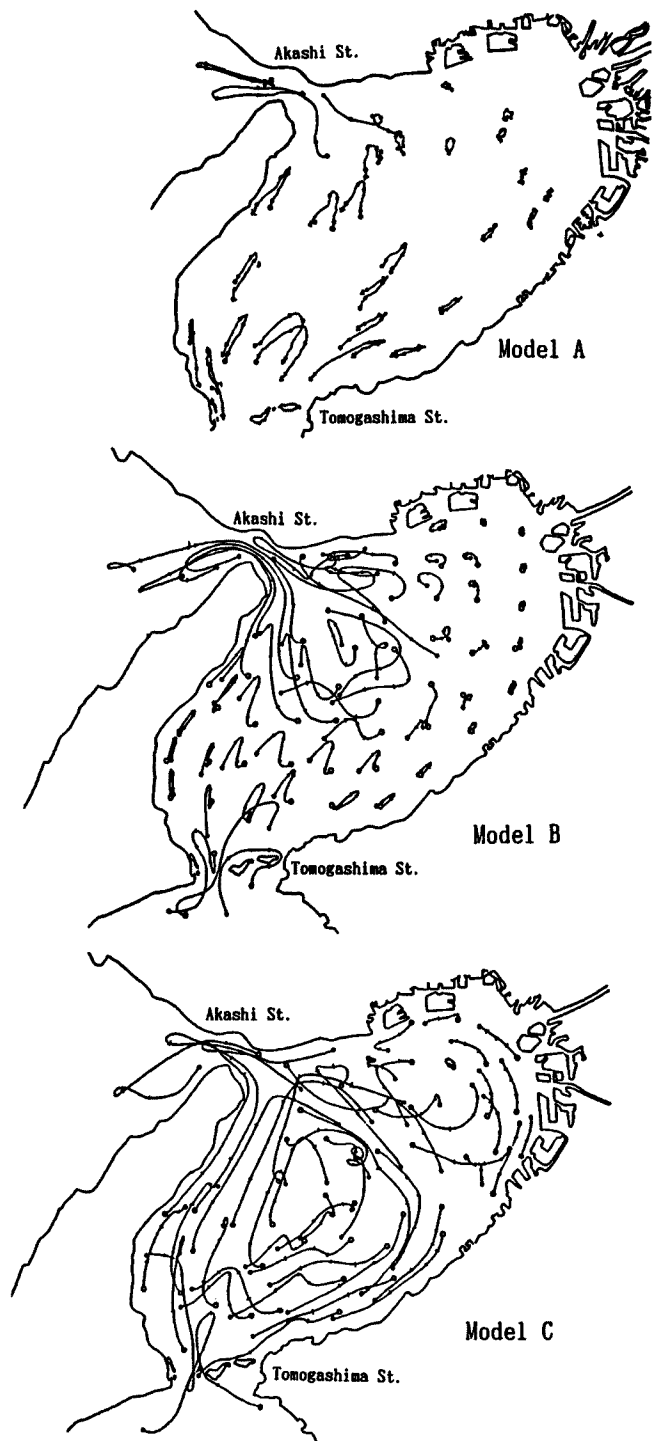


Fig. 7. Streak lines during one tidal cycle.
(Mean tide)

み率の最も大きな Model C では依然として顕著に現れている。

以上に示したように、いずれの位相時においても、大阪湾東部沿岸海域の流速は微弱であり、主流は湾中央より西側の海域であることがわかった。このような主流位置に関する結果は現地での観測結果と良好に対応するものであるが、流速はひずみ率の大きな模型程大きく現れている。また、本実験における各大阪湾模型では、現地観測結果には見られない顕著な環流が認められたが、それらのスケールおよび流速もひずみ率の大きな模型程大きく現れている。

4.2 恒流

一般的に、潮流により移動する浮子は1周期後には元に位置に戻らない。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 (潮汐残査流) が定義される。一方、恒流 (Permanent Flow) とは、オイラー的に計測した流速の1周期間の平均値のことである。両者は混同して用いられることが多いが、ここでは、明確に区別して扱う。

Fig. 7 は、水面に投入したトレーサの1周期間における流跡を平均潮の場合について示したものである。トレーサ追跡は、Model A では、明石海峡の潮流が東流から西流へと転流する約2時間前を始点とし、転流時 (東→西)、西流最強時、転流時 (西→東) および東流最強時の各位相に対する時刻での位置が・で表わされている。Model B および C では、大阪湾の上げ潮開始時点を始点とし、1/4周期毎の位置がマークされている。

いずれの模型においても、流動距離の大きいのは湾中央より西側の海域であり、湾東部での流動は小さい。流動の大きな海域は前述した潮流の主流位置と対応している。沖ノ瀬付近には流跡がループを描いているものがあり、これも前述した環流位置と対応している。さらに、大阪湾東部ならびに淡路島南部の沿岸では、流跡は海岸線にほぼ平行であり、陸地に沿って潮流が流動している様相が読み取れる。また、各位相時間での流動距離を見ると、明石海峡西流最強時から転流時 (西→東) までの流動距離がどの流跡線に対しても小さくなっており、大阪湾内の潮流は、明石海峡の転流時から各方向最強時までの間で大きいことがわかる。さらに、3種の模型間での比較をすると、前述したと同様、模型ひずみの大きい程流動距離も大きく現われている。

次に、潮流を連続観測して平均した恒流について検討する。現地観測により求められた大阪湾における恒流の流向および流速を示すと Fig. 8 のようである⁹⁾。大阪湾の恒流を大きく分類すると、(P1) 湾奥の神戸、大阪港付近から沿岸沿いに湾内を南下して友ヶ島水道付近に至るもの、(P2) 明石海峡より流入し沖ノ瀬付近で大きく右旋して環流するものおよび (P3) 神戸から大阪港沖で右旋して環流するものがある。恒流速については、明石海峡と沖ノ瀬を結ぶ海域で 0.3～0.9 kt の大きい流速値を示している。なお、堺沖に 0.3～0.4 kt の恒流速を示す海域が存在しているが、これは淀川および大和川等の沿岸排水が海水と混合して、真水の混じった軽い海水が表層を流れ出るために起こるものと考えられている。

本実験における恒流の計測結果を、Model B と C について示すと Fig. 9 のようである。現地観測結果に見られる恒流 (P2) が両模型に認められ、その流速も現地観測結果とほぼ一致している。しかし、恒流 (P3) については、その回転方向が現地観測結果と実験結果とでは逆になっており、したがって、恒流 (P1) も岸和田付近を境界にして、北流と南流とに分岐している。また、模型間での比較をすると、恒流 (P2) および (P3) のスケールおよび流速共、ひずみ率の大きな Model C の方が大きく現れており、Model B の方が観測結果に近い。

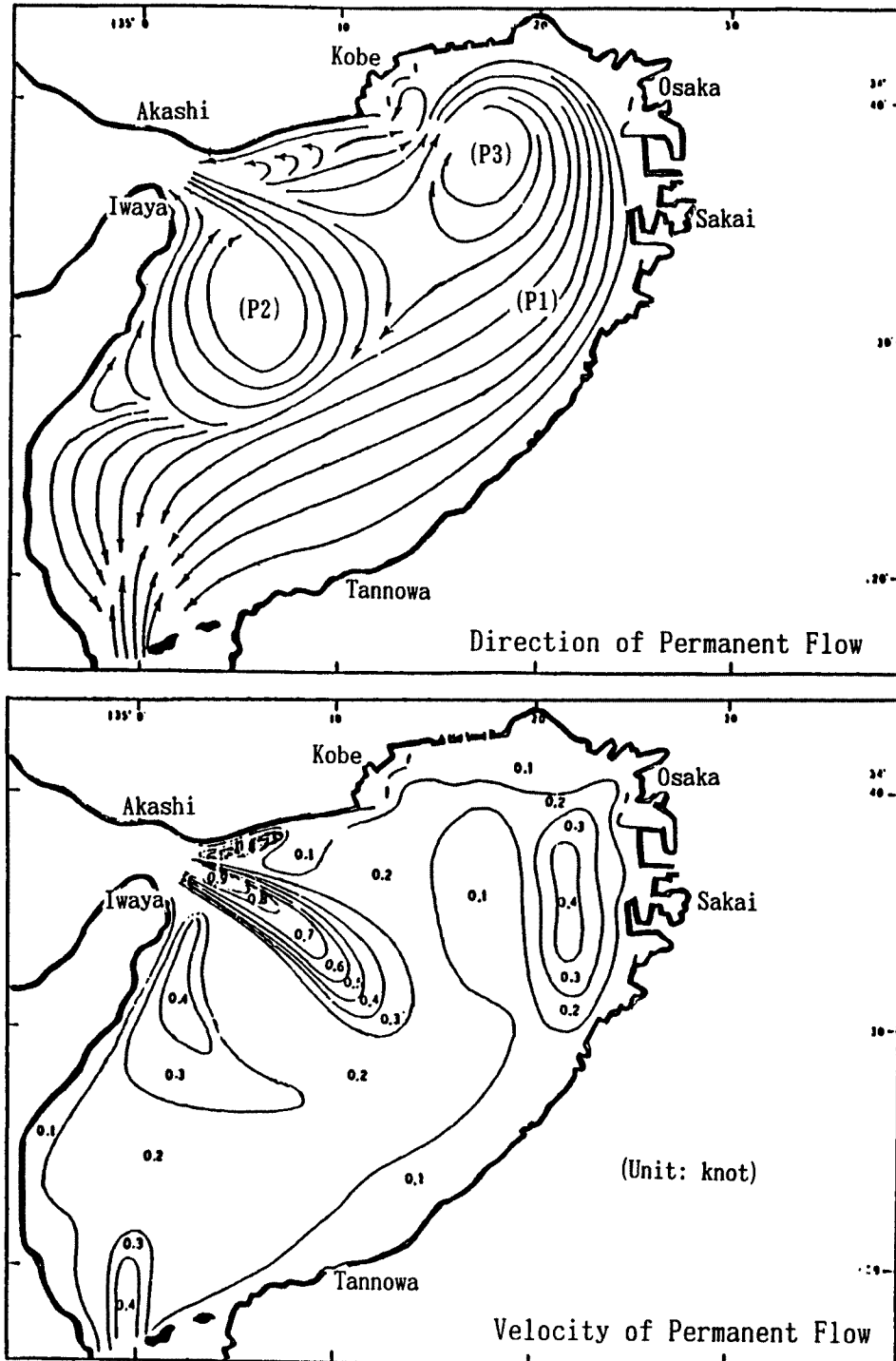


Fig. 8. Permanent flow. (Field Observation)

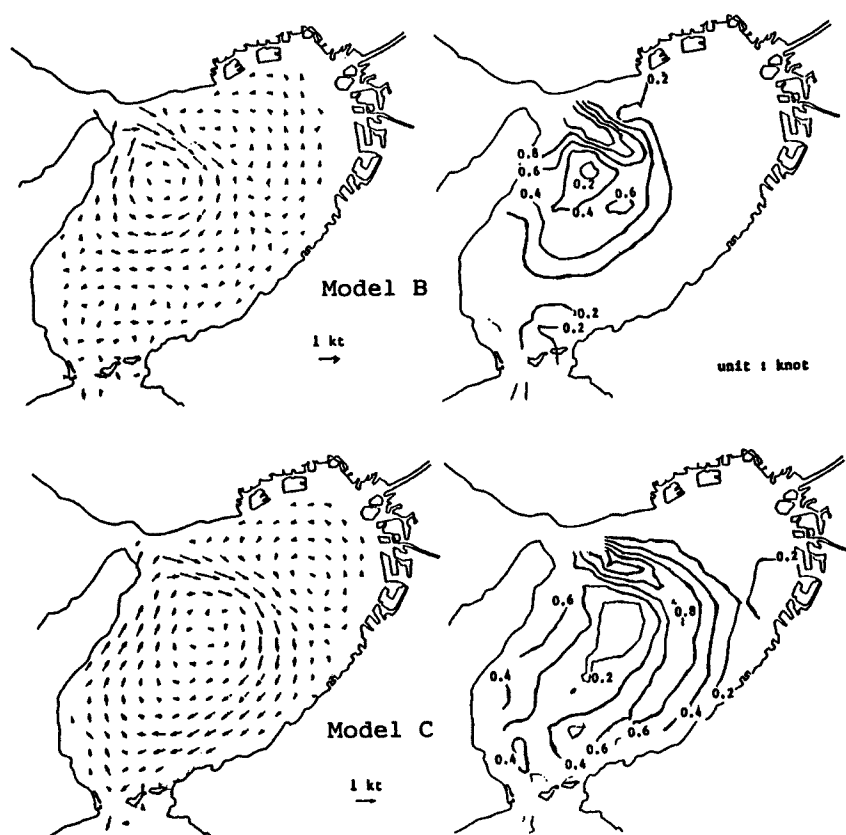


Fig. 9. Permanent flow. (Model B and C, Mean tide)

5. おわりに

本研究は、湾域の潮流を対象とした水理模型実験における scale effect を検討する第1段階として、水平および鉛直縮尺の異なる3種の大阪湾模型を用いて、湾内の潮流特性を実験的に検討したものである。その結果、ひずみ率の小さな水理模型ほど現地の流況に近い結果が得られた。また、明確な環流の存在することが見出され、従来の研究では見られなかった潮流特性が指摘された。

今後は、さらに詳細な検討を加えるとともに、単純な地形を用いた基礎実験によって scale effect を解明してゆく予定である。

参考文献

- 1) 樋口明生: 潮流水理模型実験, 土木学会水理委員会水工学シリーズ, 74-B-8, 1974.
- 2) 海上保安庁: 大阪湾潮流図, 海図第6201号, 1969.
- 3) 金子安雄・堀江毅・村上和男・上野信行・久保正則: 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 3号, pp. 99-201, 1973.
- 4) 金子安雄・堀江毅・村上和男: ADI法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合について——, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 1号, 1975.
- 5) 山田紀男: 大阪湾の潮流と流程図について, 海上保安庁水路要報, 第92号, pp. 23-29, 1972.