

大阪湾の潮流と海水交換に関する研究

今本 博健・大年 邦雄・鈴木 隆

STUDY ON THE TIDAL CURRENTS AND TIDAL EXCHANGE IN OSAKA BAY

By *Hirotake* IMAMOTO, *Kunio* OHTOSHI and *Takashi* SUZUKI

Synopsis

This paper presents physical and numerical model tests on the tidal currents in the Osaka Bay and tidal exchange process through the Akashi and the Tomogashima Straits. In the physical experiments, three models which had different geometric scales were used to verify the scale effect that would influence the dynamics in the distorted models. A vertically integrated numerical model was used to provide a comparison with the experiments and field observations and to explore the sensitivity of the tidal flow to variations in horizontal viscosity, bottom friction, Coriolis parameter and boundary conditions for solid boundaries.

Velocity of tidal currents and scale of circulating flow were produced more remarkably in the physical model with a larger distortion ratio. The numerical results are fairly consisted with the experiments and field observations, showing similar tidal characteristics and tidal exchange process through the strait.

1. はじめに

大阪湾は瀬戸内海の東端に位置し、背後に大阪や神戸を始めとする商工業地帯を抱え、古来より海上交通の要衝として重要な役割を果たしている。現在も関西新国際空港や明石海峡大橋が建設中であり、さらに、大阪湾長期構想懇談会が長期的・総合的な視点から、期待される大阪湾の将来像とそれを創り出すための各種プロジェクトを提言¹⁾している。このように大阪湾が果たす役割は今後とも益々大きくなりつつある。

一方、大阪湾は我が国を代表する閉鎖性内湾のひとつに挙げられており²⁾、そのことが将来の開発構想に付随する重要課題であることは間違いない。大阪湾で最も卓越している流動は潮流であるが、河川水の流入に起因する密度流および主として季節風に起因する吹送流も発生し、これらが複合して大阪湾の流動構造が決定されているものと考えられる。

大阪湾内水の流動構造とくに潮流については、従来より現地観測³⁾、水理模型実験⁴⁾⁻⁶⁾および数値計算^{7),8)}による検討がなされてきており、その基本的な水理特性はかなりの部分が明らかにされつつある。しかし、現地測流における種々の制約や困難さ、水理模型実験における縮尺効果および数値計算における計算結果の検証など、明確でない要素も多く、全てが定量的に解明されたとは言えない。

本研究では、恒常的に作用する潮流に着目し、湾内全域の流動構造および湾口（明石海峡、友ヶ島水道）を通じての海水交換の構造を、水理模型実験および数値計算によって検討する。実験においては歪みの異なる3種の大阪湾模型を用い、同一条件を対象とした実験結果に現れる模型歪みの影響を検討しているのが特徴である。また、数値計算においては、計算結果を現地観測結果および水理模型実験結果と比較

して、計算結果の検証をしている点が第2の特徴である。模型実験および数値計算ともに改善の余地が残され、十分な検討結果が得られているとは言えないが、現在までに得られた結果について報告する。

2. 大阪湾の概要

大阪湾の潮流は海底地形とも密接に関係しているため、その概要を簡単に示しておく。Fig. 1は大阪湾の海底地形であり、沿岸の検潮所も併示している。平均水深は28mであるが、東半分は水深20m以下の浅水海域である。淡路島仮屋の東沖10kmの海域は沖ノ瀬と呼ばれており、後述するように、大阪湾潮流を特性づける海域である。明石海峡の地形を海岸線で見ると、東には約180°、西には約90°の開口角であって、この地形の差異が海峡両側海域の潮流を特性づけている。

Fig. 2は潮汐調和定数表⁹⁾を基に、 M_2 潮の振幅(cm)と位相差を図示したものである。友ヶ島水道より流入した潮汐は明石海峡周辺海域で急激に変化しており、明石海峡が大きな『抵抗』となっていることが推察される。

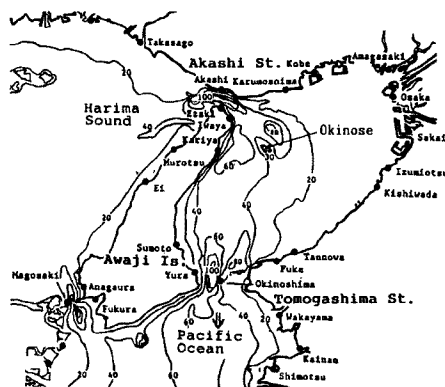


Fig. 1. Topography of Osaka Bay.

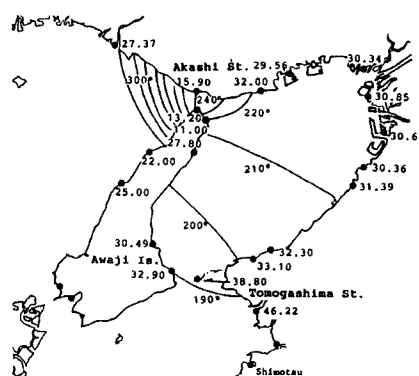


Fig. 2. Distribution of phase lag and amplitude of M_2 tide.

3. 実験装置および方法

3.1 大阪湾水理模型

紀伊水道および播磨灘の一部を含む大阪湾海域を再現した縮尺の異なる3種の歪み模型を用いた⁶⁾。各模型の水平縮尺 X_r と鉛直縮尺 Y_r は次のようである。

A模型： $X_r = 1/5000$ ， $Y_r = 1/500$ ，歪み 10

B模型： $X_r = 1/50000$ ， $Y_r = 1/2000$ ，歪み 25

C模型： $X_r = 1/50000$ ， $Y_r = 1/500$ ，歪み 100

A模型は外壁がコンクリートブロックで作成されており、海底はモルタル刷毛仕上げになっている。BおよびC模型は、等深線を形どったベニヤ板を階段状に重ねて石膏で滑らかに仕上げている。

大阪湾には友ヶ島水道および明石海峡からの潮汐が作用しているが、本模型では紀伊水道側にのみプランジャー型の起潮機を設置し、正弦波形の潮汐を与えている。各模型における潮汐の再現度については前報⁶⁾に示されているが、播磨灘海域の面積不足および海底の粗度不足に起因して、明石海峡以西における潮差と位相差が現地観測値よりもやや大きめに再現されているものの、大阪湾内における再現度は良好であることがわかっている。

3.2 実験方法および解析方法

実験は、1) 潮流速を計測して湾内全域における潮流場の時間的変化を計測する実験、2) 海峡部を通過する水塊のその後の移動過程を計測する実験、3) 大阪湾内水の平均滞留時間を推定する実験とに大別される。

潮流速の計測においては、Fig. 3に示した8つの潮時について、水面に散布した紙片の流動軌跡を数

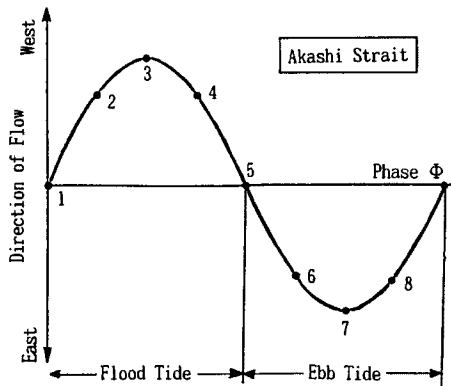


Fig. 3. Definition of phase number.

種の露光時間で写真撮影し、トレーサの移動距離を数値化して流速を算出している。得られた流速を格子点ベクトルに変換するとともに8つの潮時の平均としてオイラー的な潮汐残渣流を求めている。なお、トレーサの方向は、一定のタイミングでカメラを遮光することによって検知できるようにしている。大阪湾全域を対象として湾内水の流動軌跡を計測する実験では、明石海峡が東流から西流に遷移する憩流時（干潮憩流時）を基準として、それからの1周期間について計測している。

水塊の移動過程を調べる実験は次のように行なった。明石海峡および友ヶ島水道の各海峡部を通過して湾内に流入あるいは湾外へ流出する水塊を所定の半周期間ウランで

着色し、染料水塊の拡がりビデオ撮影して追跡した。また、各海峡の仮想境界から半周期間連続的に紙片を投入し、紙片群の拡がり範囲を追跡するとともに、所定の潮時において仮想境界両側の水域に存在する紙片個数を計測した。これらの実験より、後述する海水交換係数を求めた。

大阪湾内水の平均滞留時間を求める実験では、明石海峡の潮流が西流から東流に遷移する憩流時（満潮憩流時）に、湾全域に紙片を均一間隔で投入し、海峡部を通過する紙片の個数をその後の50周期間計測した。これより、湾内に残留する紙片個数の経時変化を求め平均滞留時間を推定した。

以上の実験を3種の模型について実施したが、同一の計測を数回行うことによって結果の再現性をチェックし、各計測の平均値を実験値とした。なお、実験条件としては、平均大潮および平均潮の各条件を対象としている。

4. 数値計算法の概要

4.1 潮流の基礎式

鉛直平均された潮流場の基礎方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h) C^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h) C^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\zeta + h) u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\zeta + h) v \} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u および v はそれぞれ x および y 軸方向の鉛直平均流速、 ζ は平均水面からの水位変動量、 t は時間、 f はコリオリ係数、 C は chezy 係数 ($=h^{1/6}/n$)、 h は平均水面からの水深、 n はマンニングの粗度係数、 A_h は水平渦動粘性係数である。

本研究では ADI 法¹⁰⁾を用いて潮流計算を行う。計算対象領域は、検潮所がある沼島—海南を結ぶ線より北側、東二見—江井を結ぶ線より東側で、東西約 60 km 南北約 70 km の範囲とした。検潮所付近の格子点での潮汐の計算結果と観測値との比較で計算結果を検証している。

4.2 潮流計算における計算条件の吟味

本計算では、空間刻みは $\Delta x = \Delta y = 2000$ m の一定としたが、潮流計算に際しては、時間刻み、水平渦

動粘性係数および閉境界条件の与え方について検討しておく必要がある。また、マニングの粗度係数およびコリオリ力が及ぼす影響についても検討しておく必要がある。

ここでは、それぞれについての事前検討結果の要点のみを述べる。

(1) 時間刻み

ADI法は陰解法であることから時間刻みに対するクーラン条件はかなり緩いが、時間刻みを大きくし過ぎると流速分布の計算結果が不正確になることが分かっている¹¹⁾。本計算では $\Delta t = 60 \text{ sec}$, 90 sec , 180 sec とし、計算結果へ現われる影響を検討して最適な時間刻みを決定することとした。なお、各時間刻みに対するクーラン数は、1.45, 2.18, 4.36である。

$\Delta t = 60$ および 90 sec を与えた場合には計算の安定性は比較的良いが、 $\Delta t = 180 \text{ sec}$ とすると潮位が振動する等の安定性への影響が見られた。また、潮汐の位相差は $\Delta t = 90 \text{ sec}$ の時最も現地観測結果に近い分布となった。潮差の分布、海峡部における最盛時流速値および流況パターンには時間刻みを変化させても大きな変化は認められなかった。以上の検討結果より、 Δt として 90 sec を選定した。

(2) 水平渦動粘性係数

水平混合項は流れの平滑化作用を持ち、流体の運動状態や運動規模によってその大きさは変化するものである。水平渦動粘性係数 A_h の与え方については、現在のところ確定していないが、格子間隔の $4/3$ 乗に比例する量として与えられることが多い。例えば、金子ら⁷⁾は次式のように与えている。

$$A_h = 0.01 \cdot (\Delta x)^{4/3} \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、対象とする全海域に一律に与え、しかも時間によらず一定値として与えている。このような与え方は非定常な潮流場の計算を行なう上で明らかに物理的に不合理である。したがって本研究では、場所的・時間的变化を考慮するために、摩擦速度 U_* と水深 h の積に比例する形で水平渦動粘性係数を与えた。すなわち、

$$A_h = \alpha U_* h \dots\dots\dots (5)$$

摩擦速度は $U_* = \sqrt{ghI}$ より求め、水面勾配は $I = \partial\zeta/\partial x$ あるいは $\partial\zeta/\partial y$ で与えた。ただし比例係数 α の値は未定であり、その値を決定する必要がある。

そこで、試行錯誤的に α を $1 \sim 100$ の範囲で変化させ、計算結果（潮差および位相差の分布、流況パターン）への影響を検討して最適な値を決定することとした。その結果、現地観測結果との比較では、 $\alpha = 10$ 程度とした場合に良好な計算結果の得られることが分かった。

(3) 閉境界条件

閉境界に垂直な流速成分を0とする通常の条件の他に、陸地付近における差分計算を行なう場合、境界外の流速を与える必要が生じてくる。そこで、閉境界外流速の取り扱いについて3種類の与え方を比較検討した。すなわち、次の3種である。

ケース1：閉境界面上で non-slip とする。

ケース2：境界に平行な流速成分の垂直方向の微係数を0とする。

ケース3：境界外の流速を0とする。

境界条件を変えても潮差、位相差および流況への大きな影響は見られなかった。閉境界面上で non-slip とすると剥離渦流が再現され易いという特性¹²⁾は本計算結果には現われなかった。以上の検討結果より、ケース1の閉境界条件を与えることとした。

(4) マニングの粗度係数

従来から大阪湾の潮流計算で用いられている $n = 0.025$ を本計算でも採用したが、他に $n = 0.02$ を与えた場合についても計算を行って粗度係数の変化が計算結果へ与える影響について検討した。

マニングの粗度係数を小さくすると潮差が若干小さくなる傾向が見られたが、位相差の分布には顕著な変化は認められなかった。しかし、流況パターンの比較では、 n を小さくすると沖ノ瀬環流のスケールが大きくなるなどの傾向が見られた。これは、『粗度が大きい模型ほど潮汐残渣環流が小さくなる。』ことを

示した樋口ら¹³⁾による模型実験結果に対応している。

(5) コリオリ力

従来より大阪湾程度のスケールではコリオリ力の影響は小さいと言われているので、本計算でもコリオリ力を考慮しないで ($f=0$) 数値計算を行なったが、考慮した場合との差異を調べておくこととした。

いずれの場合も潮差の分布に現れた差異は微小であって、比較的再現性の良い結果が得られたが、位相差の分布についてはコリオリ力を考慮しない場合の方が現地観測結果に近い結果が得られた。また、流況パターンの比較では、コリオリ力を考慮すると沖ノ瀬環流がわずかに小さく現れる傾向が認められたが、湾全体の流況に与える顕著な影響は見られなかった。

4.3 仮想粒子のラグランジュ的追跡法

計算されたオイラー潮流場に仮想粒子を配置し、その後の移動軌跡を追跡する手法として、Lagrangian Marker Method¹⁴⁾を用いた。以下に x 方向を例に取り計算方法を示す。

タイムステップ $k\Delta t$ における粒子位置を X_k 、移動速度を u_k とし、次式を用いて intermediate position X^* を求める。

$$X^* = X_k + u_k \Delta t \dots \dots \dots (6)$$

次にタイムステップ $k\Delta t$ における X^* での流速を内挿補完で求め、その流速を u^* とすれば、タイムステップ $(k+1)\Delta t$ における位置 X_{k+1} は以下の式から求められる。

$$X_{k+1} = X_k + \Delta t/2(u_k + u^*) \dots \dots \dots (7)$$

y 方向の移動も同様に計算され、粒子位置 (X_{k+1}, Y_{k+1}) が得られる。

仮想粒子には識別番号が付けられているので、個々の粒子を追跡することが可能である。

5. 大阪湾全域の潮流特性

5.1 模型実験結果

(1) 潮流の時間的変化

大潮を対象として得られた8潮時の流速ベクトルのうち4潮時についてのものを示すと Fig. 4 のようである。これより1周期内における潮流の時間的変化について説明すると以下のようである。

まず A 模型での結果について述べる。干潮憩流時には、沖ノ瀬の海域に時計回りの大きな環流が存在している。これが従来から指摘されている沖ノ瀬環流である。須磨沖にもその反流として小さな反時計回りの環流が認められる。上げ潮流の発生にともない、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が顕著となって、沖ノ瀬環流は縮小して東側に押される。先の須磨沖環流は消滅し、ここでは西流して明石海峡へ抜ける流れとなっている。上げ潮最盛時から満潮憩流時への移行時には、友ヶ島水道を抜けた海域で剝離渦が発生し、次の満潮憩流時にはそれらの剝離渦は成長しスケールも大きくなっている。

次に下げ潮流になると、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、沖ノ瀬環流は消滅している。下げ潮末期には、岩屋沖と須磨沖に明石海峡を抜ける流れによって地形性の剝離渦流が顕在化している。やがて干潮憩流時にかけて湾内の主流の流速は弱まり、友ヶ島水道北側の流れが停滞して主流は南下を妨げられるために、時計回りの流れとなって上述した沖ノ瀬環流を形成するようになる。

大潮時のいずれの潮時においても、水深 20 m 以浅の海域とくに湾奥部の流速は微弱であって、閉鎖性が問題となり得る海域であることがわかる。

B 模型および C 模型においても基本的には A 模型と同様の潮流特性を示しているが、A 模型との差異

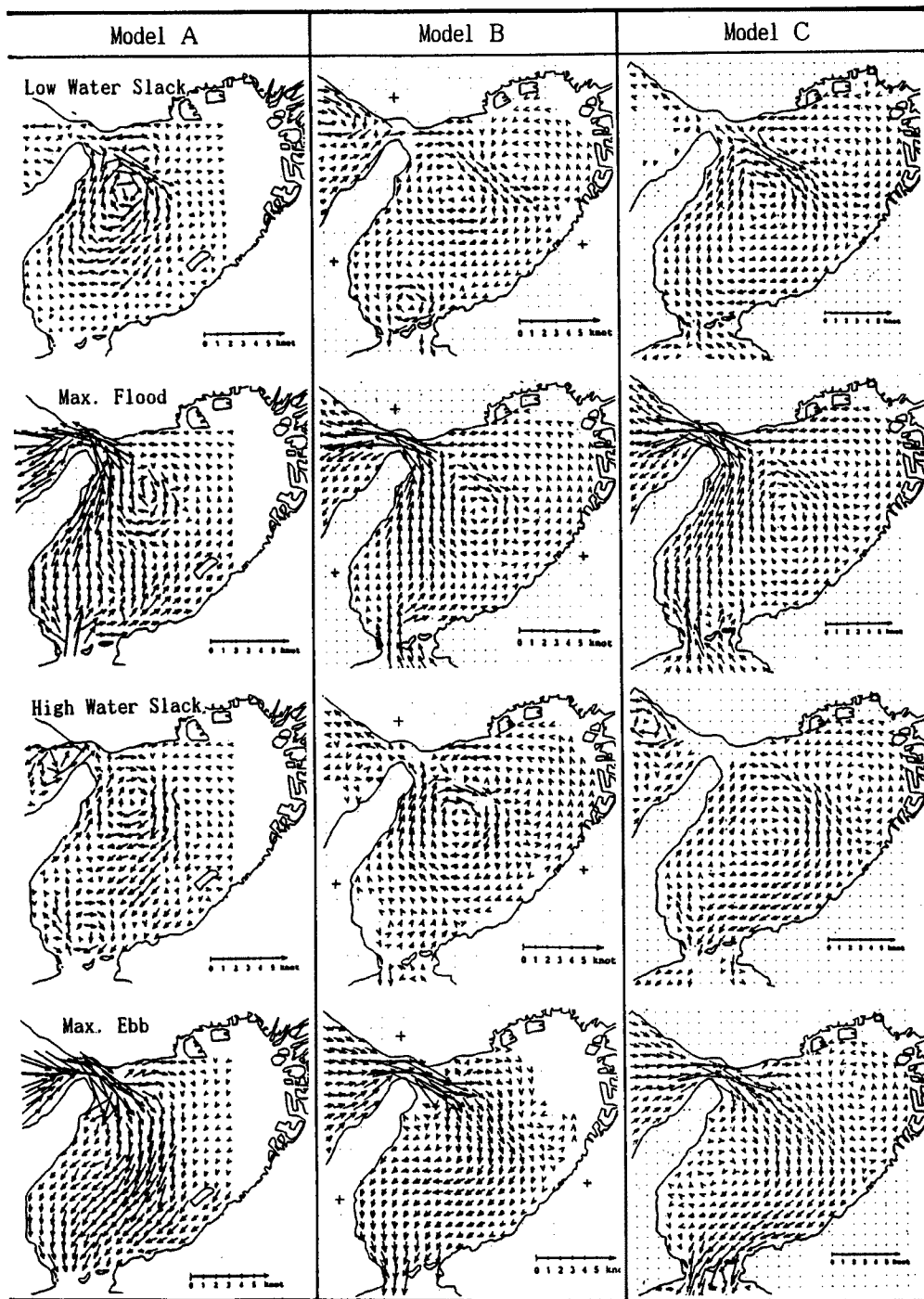


Fig. 4. Tidal currents in the physical models for spring tide.

は流速が大きくなって環流のスケールが大きく再現される点である。そのような差異はC模型でとくに顕著であり、模型ひずみの効果として現れているものと考えられる。

ここには示していないが、平均潮における潮流は大潮時と比べて流速が小さく、沖ノ瀬環流のスケールも小規模である。また、上げ潮時および下げ潮時における主流域が淡路島東岸沿いに限られるという特徴

を持つが、基本的な流動パターンは大潮時のものと同様である。

次に、模型間における潮流速の差異を定量的に評価するために、明石海峡での流速に着目した比較を行ない Table 1 にまとめた。A 模型と B 模型では大潮時の流速が平均潮時の約 2 倍であるのに対し、C 模型では平均潮時でも大潮時に匹敵する大きな流速となっている。すなわち、前述した模型ひずみの効果が C 模型でとくに顕著であることがわかる。また、A 模型に再現された流速は現地観測結果³⁾に極めて良く一致しており、3 種の模型の中で現地の潮流を最も良く再現しているものと見なされる。

(2) 沖ノ瀬環流の特性

ここでは、沖ノ瀬環流の特性を評価する指標として循環値と環流の大きさに着目した。各潮時における潮流ベクトルを基に、格子点での渦度を計算しそれを環流の存在領域について面積分することにより循環値を求めた。符号は反時計回りを正としている。また、沖ノ瀬環流は円形に近いことから、環流の存在領域と等価の面積を持つ円の直径として環流の大きさを評価した。

求められた循環値 Γ と直径 D の 1 周期内における時間的変化を Fig. 5 に示している。これより次のような特性が認められる。

- 1) 環流は下げ潮最盛時以降に生成され干潮憩流時付近と満潮憩流時付近で極大となる。その時の直径はおよそ 15 km 程度 (A 模型) である。
- 2) 循環値および直径は共に歪の大きな模型ほど大きく、また、流速の大きな大潮時に大きな値を取る。
- 3) A 模型の平均潮では、下げ潮最盛から干潮憩流時の期間にのみ環流の存在時間が限られており、

Table 1. Comparison of flow velocity at Akashi Strait between three physical models

(unit: knot)

Model	Tide	Max. Flood	Max. Ebb
A	Spring Tide	4.5	5.0
	Mean Tide	2.5	2.5
B	Spring Tide	5.5	6.0
	Mean Tide	2.5	3.0
C	Spring Tide	6.0	6.0
	Mean Tide	5.0	4.0
Field	Spring Tide	4.4	5.0

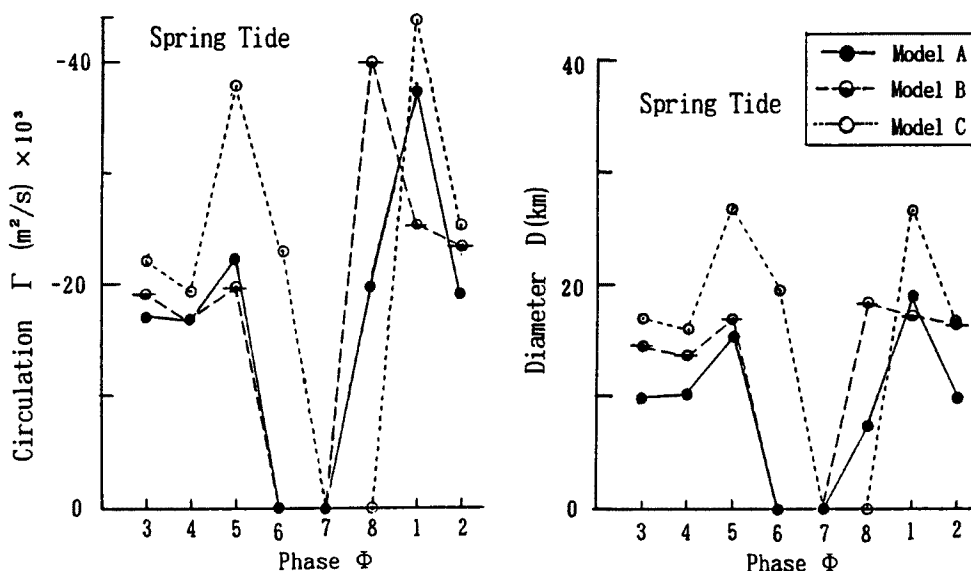


Fig. 5. Transitional change of circulation and scale of Okinose circulating flow.

上げ潮時には環流の存在が認められない。これは、環流の存在領域が仮屋沖の比較的狭い領域であるために、明石海峡へと向かう主流によって消されることによる。

(3) 流動軌跡

湾内における1周期間の流動軌跡を大潮時について Fig. 6 に示している。各模型とも明石海峡が干潮憩流となる時を始点(図中の○)としている。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。流跡がループを描いている領域は沖ノ瀬環流の存在領域に一致している。大阪湾東部および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子が読み取れる。湾奥部の流動方向を見ると、各模型とも陸岸付近の停滞域を除いて反時計回りに流動しており、沖ノ瀬環流と対をなす格好となっていることがわかる。

3種の模型間での比較をすると、前述したと同様、歪みの大きな模型ほど流動距離も大きく現れている。

5.2 数値計算結果

前節で示したように、A模型に再現された流速は現地観測結果を良好に再現しているものと見なされるので、海上保安庁発行の潮流図⁹⁾とともに数値計算結果の検証資料として用いることとした。Fig. 7 に3者の比較を4潮時について示している。また、1周期の平均として求めた潮汐残渣流の計算結果も3者を比較する形で Fig. 8 に示している。

現地の測流結果は計測点が粗く、計算結果との詳細な比較をすることはできないので、主として実験結果との比較を以下に要約する。

1) 沖ノ瀬および須磨沖の環流が実験結果と同様に見られる。しかし、1周期を通して実験結果よりはスケールが小さく計算されている。

2) 上げ潮時の主流は実験結果と同じく淡路島東岸沿いを北上しているが、友ヶ島水道から真北に向かう流れの流速が若干大きい(最大2 knot に達する)。

3) 満潮憩流時には、沖ノ瀬付近、江崎沖、友ヶ島北側の環流が実験結果と同様に存在している。しかし、沖ノ瀬付近の環流は流速も小さく(最大で1 knot 程度) 顕著に現れてはいない。また湾内全域の流速は微弱で、環流が見られる海域以外では流れが停滞している。

4) 下げ潮時における主流は、明石海峡を抜けて沖ノ瀬付近に至り湾の南側全域を南下して友ヶ島水道に至る流れであって、実験結果および現地の測流結果を良好に再現している。

5) 潮汐残渣流の計算結果には、実験結果と同様に沖ノ瀬環流および友ヶ島逆流の存在が見られるが、沖ノ瀬環流はスケールおよび流速が小さく計算されており湾全体の流況へ与える影響も実験結果ほどではない。

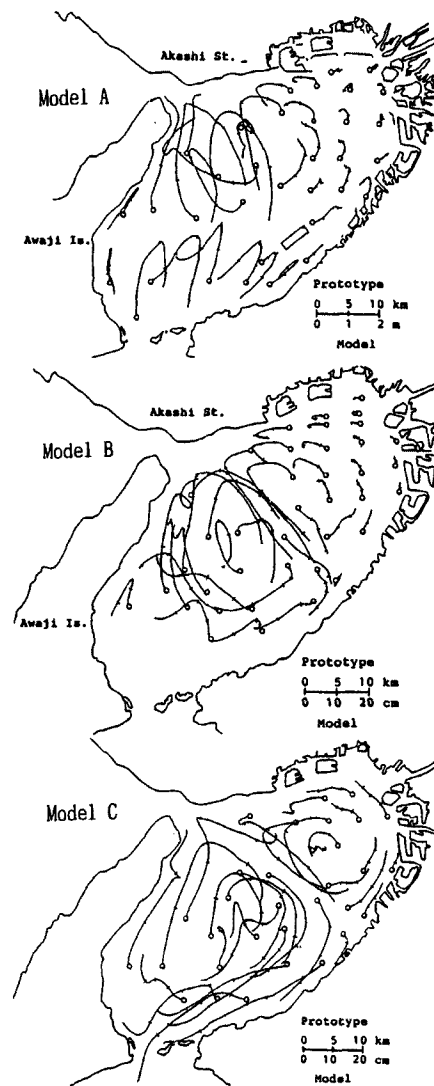


Fig. 6. Streak lines during one tidal cycle for spring tide.

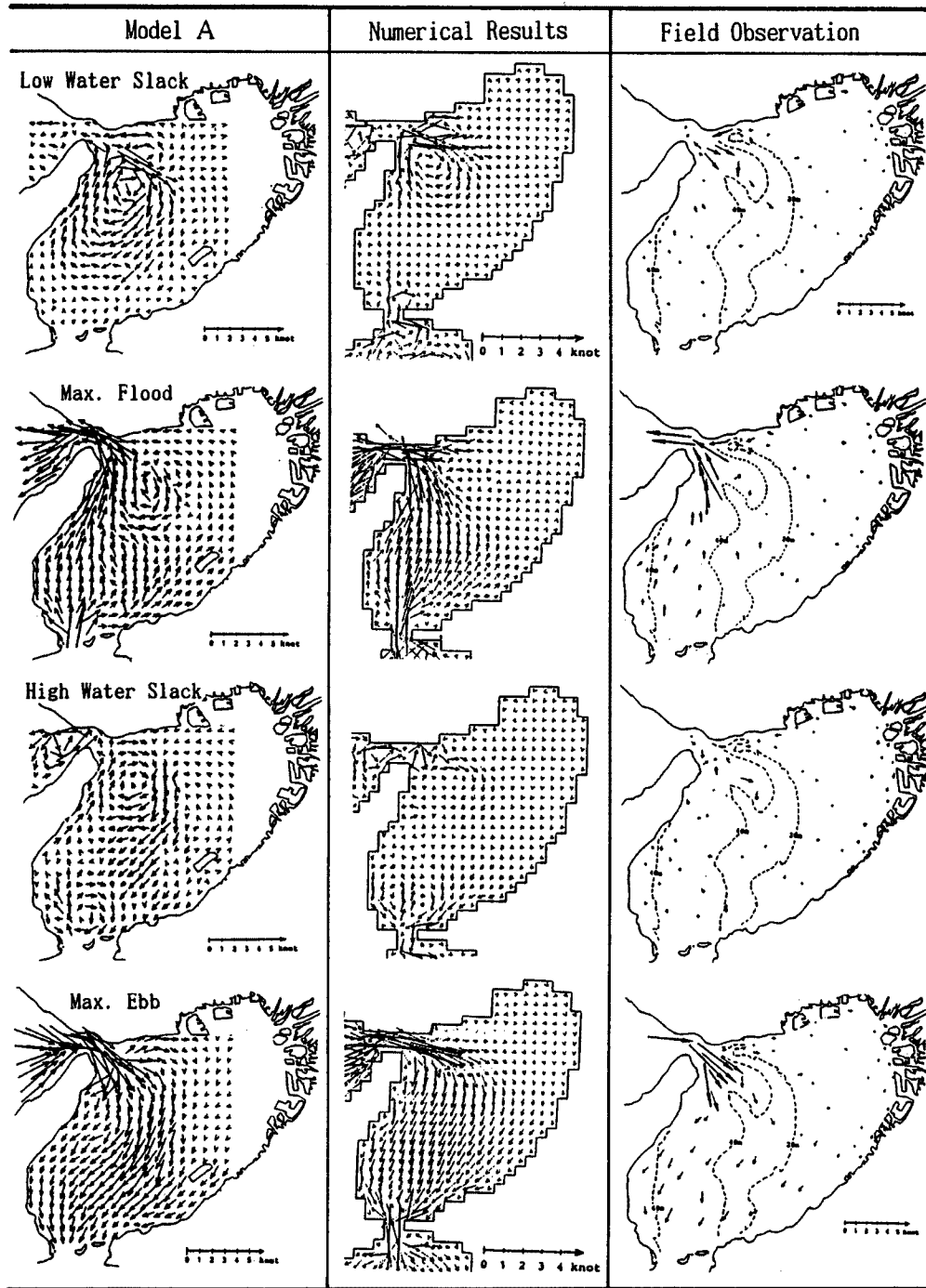


Fig. 7. Comparison of tidal currents obtained by physical model, numerical model and field observation for spring tide.

上述したように、本計算結果は前節で示した大阪湾潮流の基本的な流動を比較的良好に再現しているものと見なされるが、格子間隔がやや大きかったことに起因して陸岸付近の計算精度が十分ではないなどの改善点が残されている。

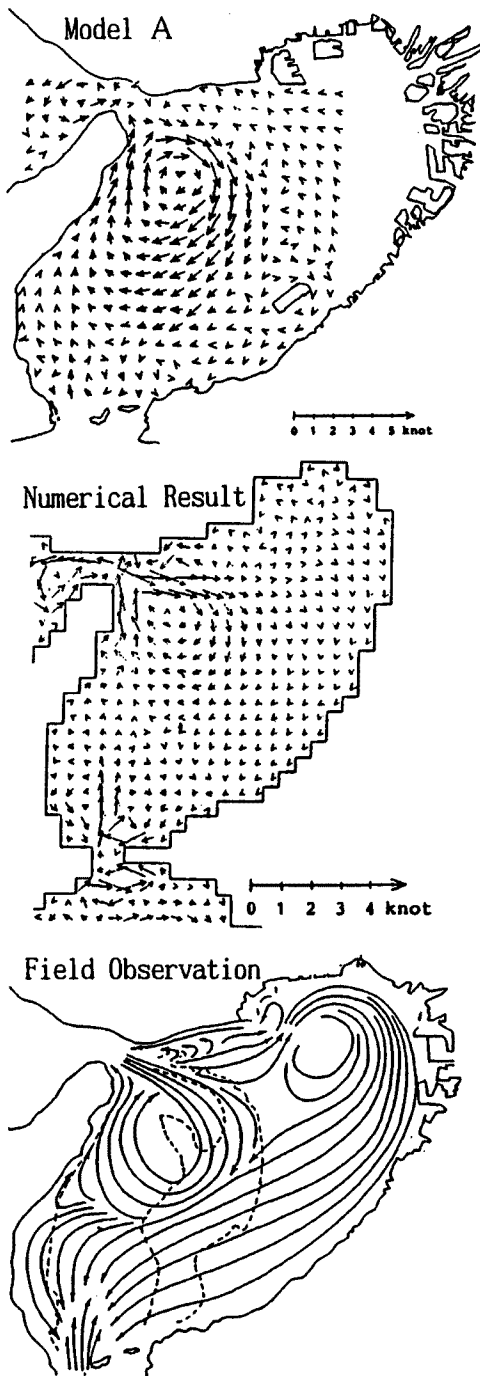


Fig. 8. Comparison of tide-induced residual currents obtained by physical model, numerical model and field observation for spring tide.

5.3 大阪湾内水の平均滞留時間

水面に均一に散布した浮子の湾内残留数と経過潮汐周期数 N_t との関係を実験で求め ($N_t = 50$ 周期まで), 残余数と初期散布数との比 r を次式で近似し,

$$r = \exp(-aN_t^b) \dots \dots \dots (8)$$

最小二乗法によって係数 a と b を求め平均滞留時間を算定した¹⁵⁾. なお, この種の実験では, 時間がかかり経過とすると浮子の湾内残留数が少なくなって, 実際には海峡部を通じて水の出入りがあるにも拘らず浮子は出入りしないために, 実際の現象を代表し得ないという問題や浮子同士の付着という問題がある。したがって, 最小二乗法に用いたデータは30周期までのものとした。算定された平均滞留時間が Table 2 にまとめられている。

実験では同一の潮流が一定周期で繰り返し作用しているが, 現地ではそうではなく, 風の影響や密度流も当然含まれている。したがって, 本実験結果は一つの目安としての意味以上は持たないと考えた方がよい。また, 本模型実験では A 模型が最も現地に近いと見なされるので, A 模型の平均潮を対象とした実験結果が一つの目安となるであろう。このような前提で大阪湾内水の平均滞留時間は1.7ヶ月程度と推定される。なお, 同様の実験が中国工業技術試験所¹⁶⁾でも実施されており, 2.3ヶ月と推定されている。

Table 2. Summary of mean residence time obtained by all physical experiments

Model	Tide	τ_r (month)
A	Spring Tide	1.4
	Mean Tide	1.7
B	Spring Tide	1.4
	Mean Tide	5.3
C	Spring Tide	1.1
	Mean Tide	1.1

6. 海峡部の海水交換特性

6.1 海峡部における海水交換の様式

外海と内湾とが接する海峡周辺海域での水塊の交換機構を、1周期間について模式的に表したものが Fig. 9 である¹⁷⁾。湾内に流入する水塊に着目して説明すると次のようになる。湾内に流入した水塊 Q_f は、湾内の流動構造に応じて、そのまま外海に流出する水塊 Q_{ef} と湾内に残存する水塊 Q_{fr} とに分けられる。水塊 Q_{ef} は湾内に存在していた水塊 Q_b を合わせて外海に流出する水塊 Q_e を構成する。湾内に残存した水塊は移流拡散して湾内水と混合し、いずれは水塊 Q_b の一部として湾外に流出する。水塊 Q_{fr} の量が少なく且つ湾内存在時間が長いほど、その内湾の閉鎖性が高いことになる。

一方、湾外に流出する水塊に着目して説明すると次のようになる。湾外に流出した水塊 Q_e は、湾外の流動構造に応じて、そのまま湾内に再流入する水塊 Q_{fe} と外海に残存する水塊 Q_{er} とに分けられる。水塊 Q_{fe} は外海水塊 Q_s を合わせて湾内に流入する水塊 Q_f を構成する。外海に残存した水塊は外海水と混合して再び湾内に戻ることもあるし、二度と戻らない場合もある。それは外海の流動構造に依存している。水塊 Q_{fe} の量が多いほど、その内湾の閉鎖性が高いことになる。

このような海水交換の機構に対し、海水の入れ換わりを表す尺度として海水交換係数が導入される¹⁸⁾。着目する水塊に応じて海水交換係数にも種々の定義が可能であるが、本研究では流入係数 r_f と流出係数 r_e として、次式で定義する。

$$r_f = Q_s / Q_f, \quad r_e = Q_b / Q_e \quad \dots \dots \dots (9)$$

このような海水交換係数を決定しているのは海峡周辺海域における流動の構造であって、検査断面の流動構造ではない。従来より、物質輸送には恒流や恒流のシアが重要だと言われているが、恒流は単なる数学的な平均流であって、その物理的な実体が曖昧である。海峡部周辺のように、地形性渦流が生成・消滅を繰り返し、流速場の時間的・空間的な変動が顕著な場における物質の移動には、数学的な平均流である恒流よりも振動成分である潮流そのものが重要な役割を演じる。ただし、大阪湾湾奥部のように恒流の空間分布が潮流の時空間分布を代表するような場では、恒流の分布と物質の分布とは充分対応づけられる。

6.2 明石海峡における海水交換特性

明石海峡を通過して大阪湾内に流入した水塊はその後どのように拡がり、その内の何割が湾内に残留するのか。また、明石海峡を通過して播磨灘に流出した水塊はその後どのように拡がり、その内の何割が再び大阪湾内に戻ってくるのか。これらのことを検討するため、満潮憩流時に湾外側を、干潮憩流時に湾内側をそれぞれ染料で着色することにより、その後の一周期間における染料水塊の外縁形状の拡がりを追跡した。その結果を Fig. 10 に示している。各模型について同様の実験を実施しているが、ここでは A 模型の大潮時を対象とした結果のみを示す。

まず、湾内に流入した水塊に着目する。下げ潮時に海峡を通過した水塊は流速の大きな主流に追従して拡がるが、やがて沖ノ瀬の環流領域に停滞する。上げ潮時になると淡路島東岸沿いおよび北部沿岸沿いの流れが明石海峡に向かうため、先の流入水塊はちぎられる格好で湾内に取り残され混合希釈される。この

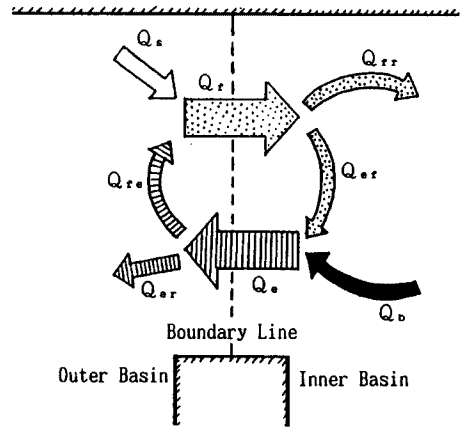


Fig. 9. Conceptual diagram for tidal exchange through the strait.

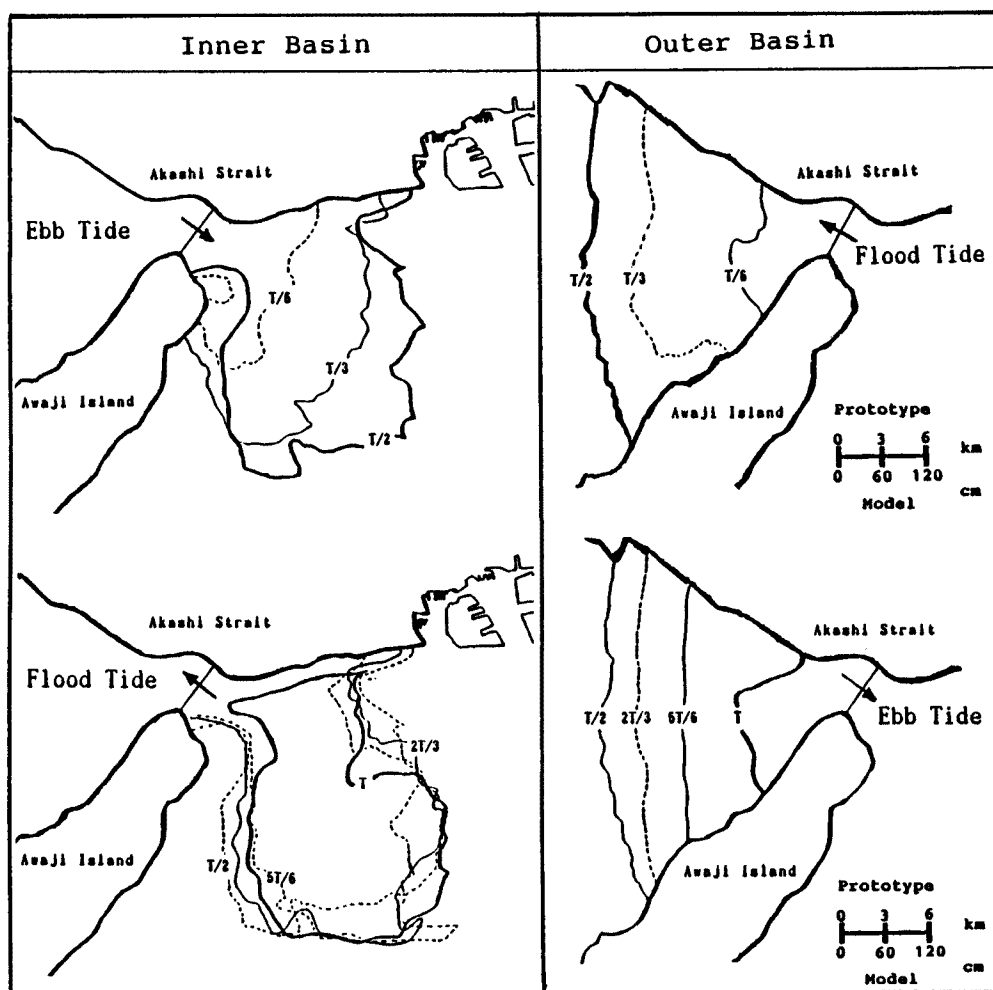


Fig. 10. Tidal exchange process through the Akashi Strait for spring tide based on the physical model using dye-tracer.

水塊が残留する海域は沖ノ瀬の潮汐残渣環流の領域に対応している。次に、湾外（播磨灘）に流出する水塊を見ると、上げ潮時に海峡を通過した後、ほぼ同心円状に広がるが、下げ潮時になると播磨灘水に押され、ほぼ相似形状を保ちながら縮小して湾内へ再流入している。しかし、主として淡路島背後に形成される環流にトラップされる形で湾外に一部が残存する。この残存領域も江崎沖に見られる潮汐残渣環流の位置にほぼ対応したものである。

染料の代わりに紙片を用いて同様の実験を行った結果を Fig. 11 に示している。これは満潮憩流時を始点として半周期間、明石海峡断面から連続的に紙片を投入し、湾内における一周期間の拡がり形状を調べた結果である。数値計算による同様の検討結果も同図に併示している。

両結果とも染料を用いた実験結果に類似しており、上述した特徴を示している。ただし、数値計算では沖ノ瀬環流の外周に沿って仮想粒子が移動しており、実験結果とは異なっている。これは、数値計算では粒子位置が決定論的に追跡され、乱流拡散等の不確定要素を考慮していないことに起因していると考えられる。

以上に示したように、明石海峡における海水交換にとって沖ノ瀬環流の果たす役割の非常に大きいことがわかる。

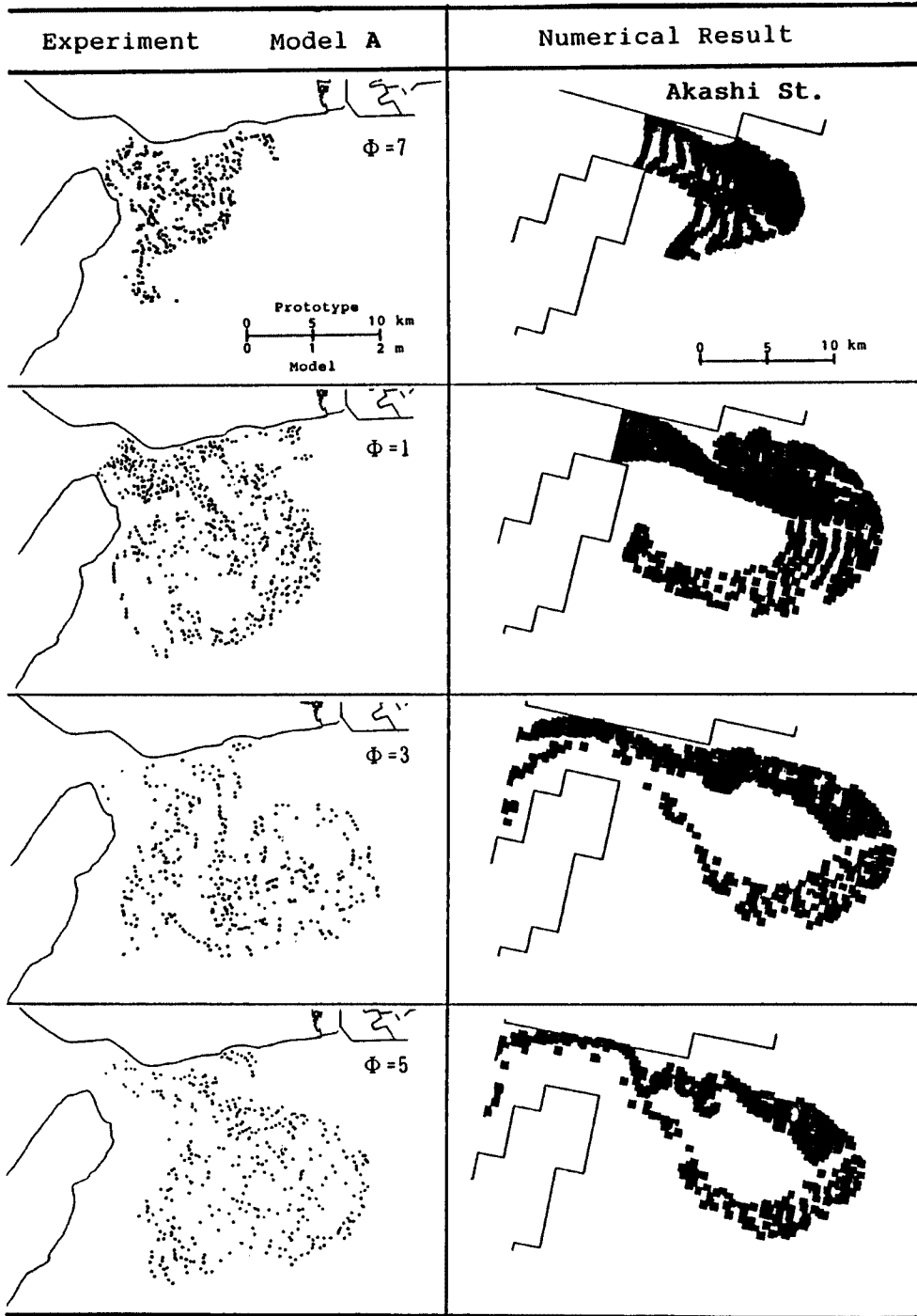


Fig. 11. Tidal exchange process through the Akashi Strait for spring tide based on the physical model using particle-tracer and the numerical model.

ここには示していないが平均潮における水塊の移動は、潮流そのものが弱くなるため大潮時に比してその範囲が狭い。また、3種の模型間では、歪みの大きな模型ほど潮汐残渣環流のスケールおよび流速が大きいため、湾内への流入水塊は環流内にトラップされやすく、一周期後に残存する水塊の領域も広がる

という特性を持っている。

6.3 友ヶ島水道における海水交換特性

明石海峡の場合と全く同様の実験および数値計算を実施した。それらの結果を Fig. 12 および Fig. 13 に示している。これらより、次のような特性が認められる。

友ヶ島水道を上げ潮時に通過する水塊は、一様な流速場に乗って北方へほぼ同心円状に広がる。次の下げ潮時には湾内起源水に押しされ南側へ縮小するが、1周期後には由良沖および沖ノ島北方に残留している。この残留位置は潮汐残渣環流の存在する海域にほぼ対応している。一方、下げ潮時に友ヶ島水道を通過する水塊は、主として南西方向の潮流に追従して広がっている。下げ潮が終る頃になると海峡南西部に環流が発達するため、水塊はそれにトラップされる。トラップされた水塊は、次の上げ潮時には湾外起源水に押しされ縮小するが、友ヶ島水道の南西近に残存している。この海域も潮汐残渣環流の位置に対応している。

平均潮における水塊の移動は、潮流そのものが弱くなるため大潮時に比してその範囲が狭いものとなっている。また、歪みの大きな模型ほど潮流の流動が大きく、1周期後に残存する水塊の領域も広がると

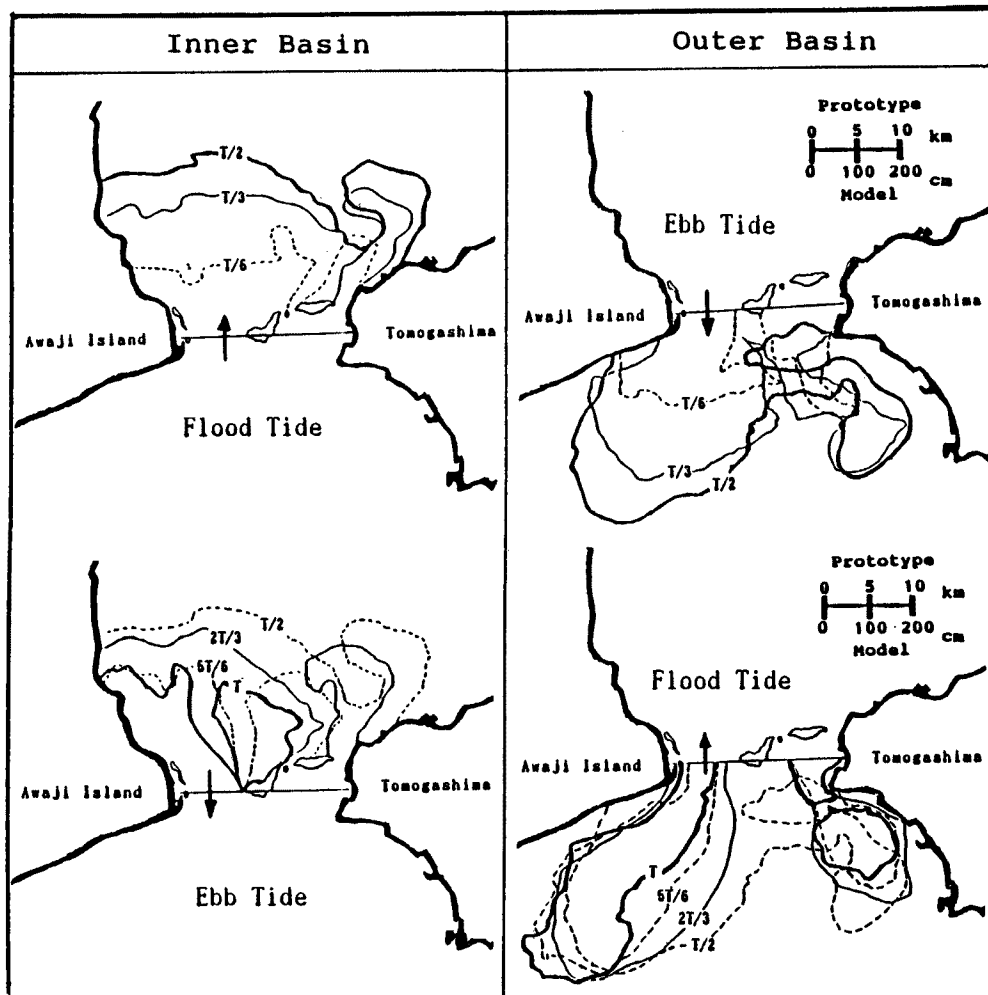


Fig. 12. Tidal exchange process through the Tomogashima Strait for spring tide based on the physical model using dye-tracer.

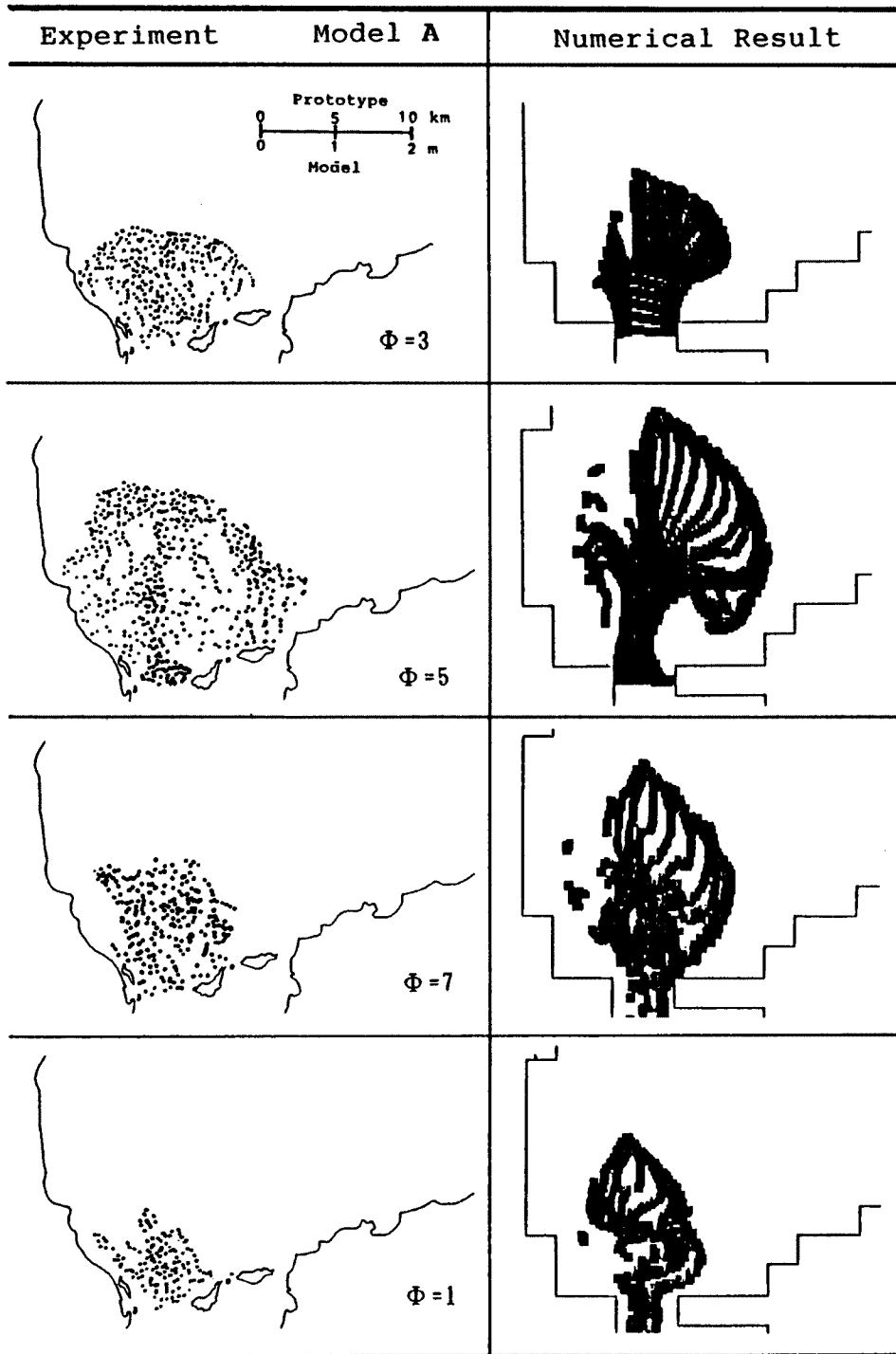


Fig. 13. Tidal exchange process through the Tomogashima Strait for spring tide based on the physical model using particle-tracer and the numerical model.

いう特性は明石海峡の場合と同様である。数値計算では、1周期後に残存する水塊の領域が実験結果よりもかなり広いものになっている。

6.4 海水交換係数

上述した実験結果および数値計算結果を用い、式(9)に基づいて海水交換係数を算定する。染料を用いた実験に対しては、染料水の拡がり面積の比として以下のように算定される¹⁷⁾。

憩流時を始点とした1周期内において

$$r_f = \frac{\text{1周期後に湾外に残存している水塊の表層面積}}{\text{湾外に湾内水が最も多く存在する時の水塊の表層面積}} \dots\dots\dots (10)$$

$$r_e = \frac{\text{1周期後に湾内に残存している水塊の表層面積}}{\text{湾内に湾外水が最も多く存在する時の水塊の表層面積}} \dots\dots\dots (11)$$

このような算定法は濃度の希釈について考慮していないため厳密性に欠けるが、近似値は与えるものと期待している。紙片および仮想粒子に対しては、上式における面積の代わりにそれぞれの個数とすれば良い。

算定結果を Table 3 にまとめている。なお、模型実験による各算定値は数回の実験の平均値であることを明記しておく。また、表中の ≈ 1.0 は、前述したように拡散に伴った拡散希釈により水塊の量が過大に評価され、交換係数が算定不可能となったものである。

この結果より、以下のことが指摘される。

1) 全ケースにおいて、明石海峡では流出係数が流入係数より大きな値を示している。このことは、湾内水は海峡部を流出してもその大部分が湾内に戻る現象を繰り返し、湾外起源の水が湾内に入りにくいという定性的な海水交換構造を示唆している。

2) 友ヶ島水道では、A 模型の大潮時を除き、流出係数と流入係数がほぼ同じ値を示すことから、湾内水および湾外水とも同程度の交換をするといえる。

3) 染料水による実験より算定された明石海峡の流入係数は、紙片によるものよりかなり大きな値を示している。これは沖ノ瀬環流にトラップされた染料水塊が拡散・希釈しているにもかかわらず、表面積で代表しているためである。したがって、紙片をトレーサとした実験値の方が実際の現象を良く表しているものと考えられる。また、前章までの検討より、3種の模型の中ではA模型が最も優れていると見なされるので、交換係数の定量的な値としては、A模型で紙片をトレーサとした実験値を代表させる。

今里ら¹⁹⁾は、本研究での定義とは異なっているが、明石海峡の海水交換係数（ここでの流出係数 r_e に対応）を0.41（大潮時）と推定している。表に示されるように、本実験では0.52、数値計算では0.48であり、彼らの推定値より大きい値が得られている。

Table 3. Summary of tidal exchange coefficients obtained by all physical and numerical experiments for Akashi and Tomogashima Strait

Strait	Tide	Model A (dye)		Model A (particle)		Model B (dye)		Model C (dye)		Numerical result
		r_e	r_f	r_e	r_f	r_e	r_f	r_e	r_f	r_e
Akashi	Spring Tide	0.89	0.19	0.52	0.16	0.99	0.49	≈ 1.0	0.49	0.48
	Mean Tide	0.72	0.16	0.32	0.19	0.80	0.38	≈ 1.0	0.35	—
Tomogashima	Spring Tide	0.31	0.58	0.26	0.56	0.56	0.56	0.85	0.94	0.40
	Mean Tide	0.57	0.57	0.47	0.41	0.67	0.80	0.83	0.84	—

7. おわりに

大阪湾潮流の流動構造および湾口（明石海峡、友ヶ島水道）を通じての海水交換の構造を、水理模型実験および数値計算によって検討した。湾内の潮流は沖ノ瀬環流で特性づけられ、それが明石海峡を通じての海水交換構造に対しても重要な役割を担っていることがわかった。また、模型歪みの影響については、歪みの大きな模型ほど潮流速および環流等が大きく現れ、潮流場を過大評価する傾向にあることがわかった。

本研究では河川水の流入を考慮しておらず、今後は密度差を考慮した検討を実施する必要がある。最後に、実験およびデータ整理等に協力して頂いた京都大学大学院生の野井潤生君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大阪湾長期構想懇談会：オーバルビジョン 2025, 1991.
- 2) 國松孝男・村岡浩爾編著：河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, 1989, p. 239.
- 3) 海上保安庁：大阪湾潮流図, 海図第 6201 号, 1969.
- 4) 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, 1973, pp. 99 - 201.
- 5) 工業技術院中国工業技術試験所：瀬戸内海全域の汚濁予測に関する研究報告書, 1980, pp. 260 - 293.
- 6) 今本博健・大年邦雄・木戸研太郎：大阪湾における潮流の流動特性に関する模型実験, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号 B-2, 1988, pp. 793 - 806.
- 7) 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.
- 8) 大西行雄：大阪湾の恒流に関する数値実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 514 - 518.
- 9) 海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表, 1983.
- 10) Leendertse, J.J.: A Water-Quality Simulation Model for Well-Mixed Estuaries and Coastal Sea, Vol. 2, The Rand Corporation, 1971.
- 11) Stelling, G.S., A.K. Wiersma and J.B.T.M. Willemse: Practical Aspects of Accurate Tidal Computations, Proc. ASCE, Vol. 112, HY 9, 1986, pp. 802 - 817.
- 12) Falconer, R.A., E. Wolanski and L.M. Hadjipandeli: Modeling Tidal Circulation in an Island's Wake, Proc. ASCE, Vol. 112, WW 2, 1986, pp. 234 - 254.
- 13) 樋口明生・安田秀一・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, 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B-2, 1976, pp. 397 - 409.
- 14) Gordon, J.O. and M. Sydor: Plume Development Using Lagrangian Marker Method, Proc. ASCE, Vol. 107, WW 3, 1981, pp. 131 - 140.
- 15) 武岡英隆：海水交換と物質輸送の概念について, 愛媛大学工学紀要, 第 9 巻, 第 4 号, 1980, pp. 287 - 298.
- 16) 上嶋英機・橋本英資・山崎宗弘・宝田盛康：瀬戸内海の海水交換機構—ラグランジュ的手法による水理模型実験—, 第 31 回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 665 - 669.
- 17) 今本博健・大年邦雄：閉鎖性海域の海水交換に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 34 号 B-2, 1991, pp. 401 - 419.
- 18) 宇野木早苗：海水交換とその素過程について, 沿岸海洋研究ノート, 第 17 巻, 第 2 号, 1980, pp. 89 - 98.

- 19) 今里哲久・淡路敏之：明石・鳴門海峡を通しての海水交換の数値実験，沿岸海洋研究ノート，第20巻，第1号，1982，pp.19-32.