

閉鎖性海域の海水交換に関する研究

今本 博健・大年 邦雄

STUDY ON THE TIDAL EXCHANGE IN A SEMI-ENCLOSED SEA AREA

By Hirotake IMAMOTO and Kunio OHTOSHI

Synopsis

In general, tidal exchange of water in a semi-enclosed sea area is the result of currents induced by wind and density and horizontal residual circulation associated with the geometry of the basin. This paper describes the tidal exchange phenomena governed by the horizontal mean circulation in the system.

Two approaches were used for analyzing the tidal exchange. One is a physical experiment and the other is a numerical simulation based on the ADI method. It was found that exchange of water between adjacent circulations was determined mainly by the scale and velocity of circulations and the time during the streamlines of the circulation were kept closing.

1. 緒 論

海水交換とは、海水がある水域から別の水域に輸送された後、混合希釈されることを言う。その要因として、潮汐残差流、潮流による乱流拡散、密度流による鉛直循環流、吹送流、波浪あるいは湾へ流入する河川流などがある。

海水交換現象を取り扱う場合に重要なことは、武岡¹⁾が指摘しているように、水域の境界をどう設定するかである。この境界は、その内部にある全ての水はどこにあって等価であるという線であり、その設定は任意である。一般には、閉鎖性の強い湾域における海水交換とは、湾口や海峡などを境界とした水の入れ換わりを指すことが多い。この定義では、Fig. 1の (a) のような水の移動は海水交換と呼ぶが、(b) のような湾内での水の移動は含まれず、単に拡散あるいは分散として扱われることが多い。しかし、海水交換現象の機構を理解するには、物質の輸送という見地から、(a) と (b) の両者を考慮した取り扱いが必要であると思われる。

海水交換現象の評価方法は、オイラー的な方法とラグランジュ的な方法に大別できる。

オイラーの方法は、湾口断面における物質の輸送量に着目し、1潮汐周期間に湾内の水がどの程度入れ換わるかを交換率により評価するものである。Parker²⁾は、上げ潮流時に湾内に流入する海水量 Q_f は、前の下げ潮流時に出て上げ潮時に再び湾内に戻る海水量 Q_e とそれ以外の外海水量 Q_o からなると考え、次式を1潮汐周期あたりの海水交換率と定義した。

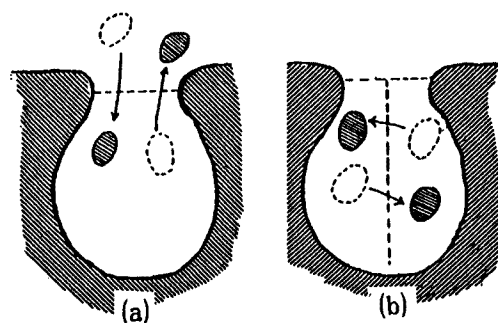


Fig. 1. Concept of the movement of water parcel.

$$R_f = Q_s / Q_f \dots\dots\dots (1)$$

指標物質の濃度として、 Q_s は外海水の濃度 C_s を、 Q_{fe} は前の下げ潮時の平均濃度 C_e を持っているとし、上げ潮流時の平均濃度を C_f とすれば次式が成立する。

$$Q_f C_f = Q_s C_s + Q_{fe} C_e \dots\dots\dots (2)$$

上式に $Q_s = R_f Q_f$ 、 $Q_{fe} = (1 - R_f) Q_f$ を代入すれば、

$$R_f = (C_f - C_e) / (C_s - C_e) \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。Parker らは、サンフランシスコ湾において塩分濃度を連続計測し、潮差が 1.0 m のとき $R_f = 0.17 \sim 0.18$ 、1.77 m のとき $R_f = 0.31 \sim 0.36$ という結果を得ている。

一方、柏井³⁾は、Parker らの考え方を拡張して下げ潮流時に初めて湾外に流出する海水の割合 R_e を考え、次式を交換率として定義している。

$$R_e = Q_b / Q_e \dots\dots\dots (4)$$

同様に指標物質の濃度を用いて R_e を表示すると、

$$R_e = (C_f - C_e) / (C_f - C_b) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_e は下げ潮時の平均濃度、 C_b は内湾水の平均濃度である。こうした断面観測に基づく評価手法は、指標物質の分布の一様性が強くなるほど精度が悪くなることや、湾口部周辺の潮流特性により決定されるので、必ずしも湾全体の交換を評価したことにはならないといった欠点を持っている。

これに対してラグランジュ的な方法は、湾内の水粒子の動きを追跡するものである。中田・平野⁴⁾は、瀬戸内海の安芸灘などでフロート群の追跡を行い、以下のような方法で評価を行った。上げ潮流時に濃度 C_f 、流量 Q_f の海水が湾外より流入し、湾内の混合容積 V の範囲で均一に混合して、濃度が C_e になったとする。下げ潮流時には、この濃度で容積 Q_e だけ湾外へ出ていくものとする、湾内の混合容積内に取り残される物質質量 M は、

$$M = (V - Q_e) C_e \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここで、交換率 R_L として、1 潮汐周期間に湾内に取り残される物質質量の上げ潮流時に湾内に流入する物質質量に対する割合と定義すると、湾内の平均濃度 C_e は式(7) で与えられるので、交換率として式(8) を得る。

$$C_e = Q_f C_f / V \dots\dots\dots (7)$$

$$R_L = M / Q_f C_f = (V - Q_e) C_e / Q_f C_f = (V - Q_e) / V \dots\dots\dots (8)$$

今里・淡路⁵⁾は、明石海峡および鳴門海峡を対象とした潮流の数値計算に基づき、海域に配置した標識粒子をラグランジュ的に追跡して海峡部での交換率を求めている。彼らは交換率を次式のように定義した。

$$R_V = V(T) / V_1(T_1) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $V_1(T_1)$ は内湾起源水が外海側に最も多く存在した時の容積、 $V(T)$ は 1 潮汐周期後に外海側に残っている内湾起源水の容積である。これらの容積を粒子の分布より求め、明石および鳴門海峡の交換率をそれぞれ 45.4% および 72.2% と算定している。さらに、彼らは塩分フラックスに注目した交換率を両海峡について算定し、式(9) によるものよりかなり小さい値を得ている。このことから、Parker らが考えたような塩分フラックスに注目した交換率は、同じ塩分濃度を持った水塊同士の交換は交換したとみなさないために海水自身の交換を評価する尺度としては不適切であるという指摘をしている。このような標識粒子をラグランジュ的に追跡する方法は、海水交換現象の機構を考察する有力な手法である。

Bolin and Rodhe⁶⁾ および武岡⁷⁾は、滞留時間および年令の概念を用いて、海水交換について論じている。ある領域内の物質の年令と滞留時間について次のように定義した。すなわち、 $t = -\tau$ に領域内に入ってきた物質の $t = 0$ における年令は τ であり、 $t = \xi$ に領域外に出ていくとすると、その滞留時間は ξ である。ここで、 $t = 0$ においてこの領域内に存在する物質の総量を R_0 、滞留時間が ξ 以上のものを $R(\xi)$ で表わすと、滞留時間の分布関数 $\Psi(\xi)$ は、次式で表わされる。

$$\psi(\zeta) = \frac{-1}{R_0} \cdot \frac{dR(\zeta)}{d\zeta} \dots\dots\dots (10)$$

したがって、領域内での平均滞留時間は、

$$\tau_r = \int_0^\infty \zeta \psi(\zeta) d\zeta \dots\dots\dots (11)$$

により求められる。式(10)を、式(11)に代入して部分積分を行ない、変数を t に置き換えると次のようになる。

$$\tau_r = \int_0^\infty \frac{R(t)}{R_0} dt = \int_0^\infty r(t) dt \dots\dots\dots (12)$$

$r(t)$ は残余関数と呼ばれ、これを求めれば平均滞留時間が評価されることになる。

村上⁸⁾は、鹿児島湾を対象とした水理模型実験を行ない、染料水の湾内平均濃度の時間的变化より残余関数を求め、平均滞留時間の算定を行なっている。また、上嶋⁹⁾は、瀬戸内海を対象とした水理模型において、平均滞留時間を2つの実験方法により求めている。すなわち、染料濃度の計測による方法と染料の代わりにボールを用いて、これをラグランジュ的に追跡する方法でそれぞれ平均滞留時間を算定し、よく一致した結果を得ている。

潮流による海水交換の形式は、地形や潮流の条件により種々のものがあるが、Fig. 2 に示す2つのタイプに集約される。

(a) は湾外に周期的な潮流が存在し、その枝流が湾内に入り込んで渦流を形成するような場合で、湾外が広い外洋であるような場合に対応する。(b) は潮汐残差環流あるいは生成・消滅を繰り返す渦流が湾内および湾外に存在する場合で、瀬戸内海のようなかなり広い内海の中に大阪湾のような内湾がある場合に該当する。

著者らは、(a) の形式による海水交換について、湾長/湾口幅比および湾外の潮流を変化させた基礎実験を行って、海水交換機構について検討した¹⁰⁾。本研究では、(b) のタイプの交換を取り扱う。

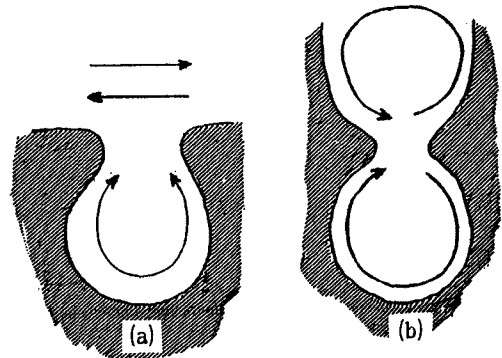


Fig. 2. Classification of flow field governing tidal exchange.

2. 実験装置および方法

幅4 m、奥行き8 mの平坦な水槽内に、幅3 m、奥行き1.5 mの長方形湾をブロックで作し、湾口幅を0.4 mとした。水槽端にはプランジャー式起潮機が設置されており、正弦波状の潮汐が再現される。実験では、起潮機の回転周期を60秒、水深を10 cmとし、Fig. 3 に示すケースA、BおよびCの3モデル海域を対象とした。ケースB、Cの海峡幅はいずれも45 cmである。また、湾口部での水位変動と潮流の位相差は $\pi/2$ であり、湾口部が干潮となる潮時を原点とし、1周期を8分割してFig. 4のように位相番号を定義する。各ケースにおける湾口部での潮差は8.4 mmで、湾内における潮差の場所的な変動および潮位変動における空間的位相差も殆ど検出できないほど微小であった。

流況の可視化実験では、水面に散布した5 mm角紙片の流動を写真撮影した。撮影時にはカメラの前面を瞬間的に遮ることにより、紙片の移動方向が判別できるようにしている。得られた結果は、格子点上の流

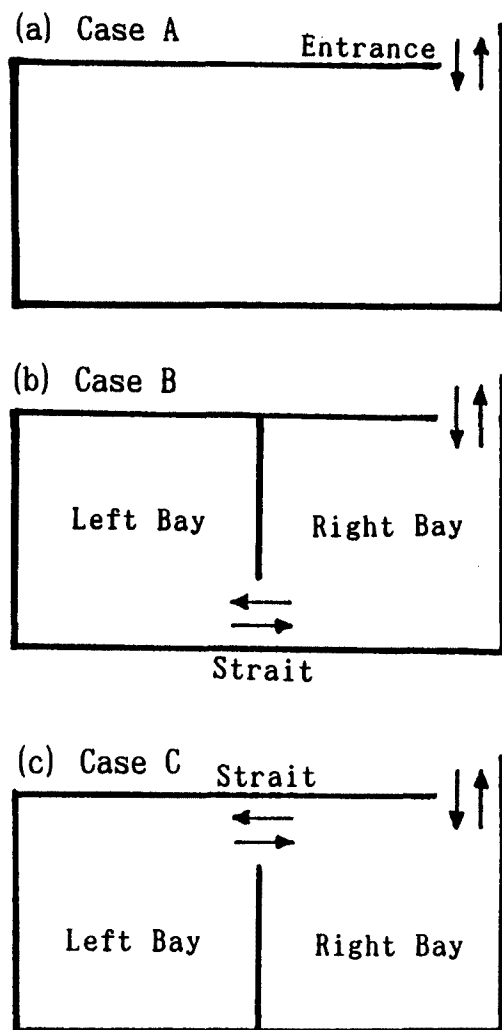


Fig. 3. Three types of model bay.

3.1 潮流特性

各潮時の流速ベクトルおよび潮汐残差流ベクトルをそれぞれ Fig. 5～8 に示す。これらによると、湾内の流況は恒常的に存在する湾規模の環流と湾口部付近に形成される剝離渦に支配されており、潮汐残差流速と各位相時の潮流速には大きな差の無いことが分かる。湾口や海峡の周辺の流速について見ると以下のようなものである。上げ潮最強時における湾口部での流速は各ケースとも $3 \sim 4 \text{ cm/s}$ であるが、下げ潮最強時には、ケース A および C で $3 \sim 4 \text{ cm/s}$ 、ケース B では $4 \sim 5 \text{ cm/s}$ とやや大きくなっている。ケース B および C の海峡部では上・下げ潮の各最強時において $2 \sim 3 \text{ cm/s}$ 程度であって、湾口部周辺の潮流との位相差はほとんど見られない。

これらのベクトル図より、各ケースにおける流況を模式的に表したものが Fig. 9 である。図中の点線は、流速が微弱であったり位相によって生成・消滅するものを示している。隣接する環流間の水塊交換は、環流が閉じている満潮および干潮時ではなく、これらが崩壊した時に現れる 8 の字形の経路¹¹⁾に沿って生じることが理解される。これより、8 の字構造を形成する環流の特性が交換特性を決定すると考えられるので、これらについて検討を行なうことにする。

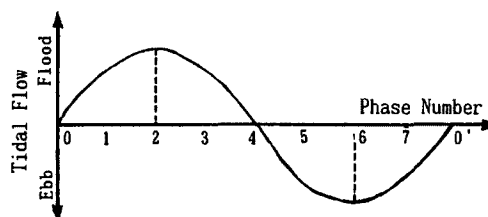


Fig. 4. Definition of phase number.

速ベクトルに変換されるが、ここでは格子間隔を 10 cm とした。

水塊の交換過程を調べる実験では、ロードミン染料を用いてその移動を 8 mm ビデオに収録した。染料水と実験水は等温となるようにし、投入後 $1 \sim 2$ 周期間の染料水の挙動は、当該水域での水塊の挙動にほぼ一致するものと見なして解析した。

着目水域の平均滞留時間を求める実験では、 5 mm 角紙片を 10 cm 間隔の格子点上に瞬間投入し、周期ごとに境界を出入りする数を計測して残余個数を求めた。投入する潮時はいずれの場合も干潮時 ($\phi = 0$) とした。なお、この実験では、長時間たつと浮子の残余個数が少なくなることにより分布が不均一になることや浮子同士の付着による実験の限界があるため、投下後 50 周期までのデータを用いるとともに、データの精度を上げるため、全く同じ実験を数回繰り返した平均値を用いて解析した。

3. 実験結果

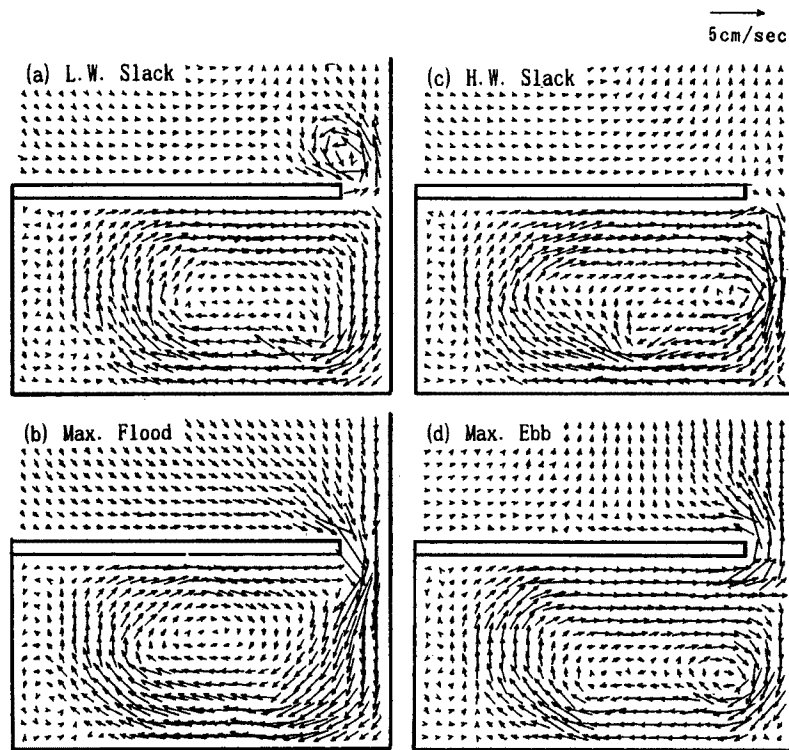


Fig. 5. Examples of velocity vector field in Case A.

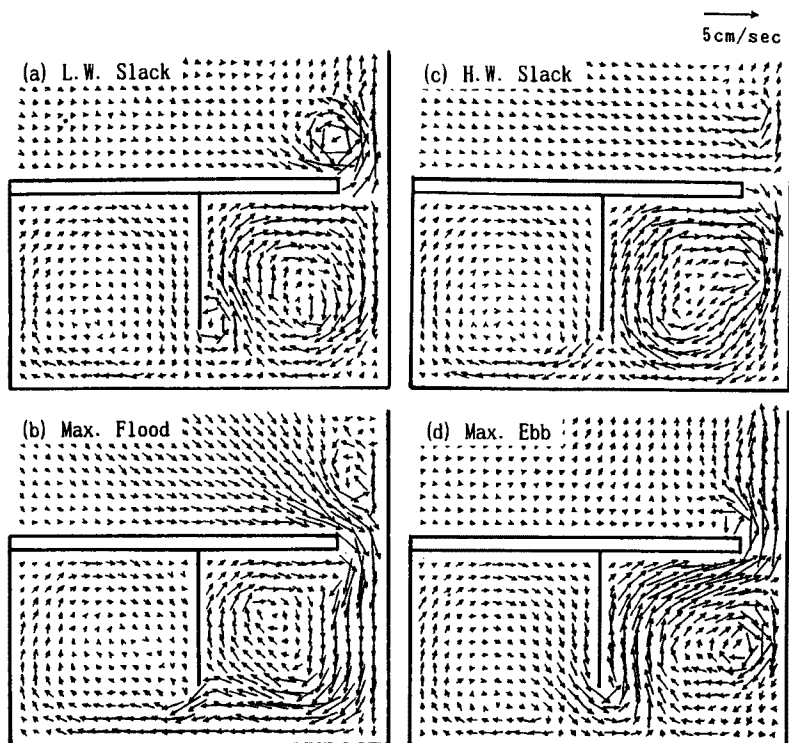


Fig. 6. Examples of velocity vector field in Case B.

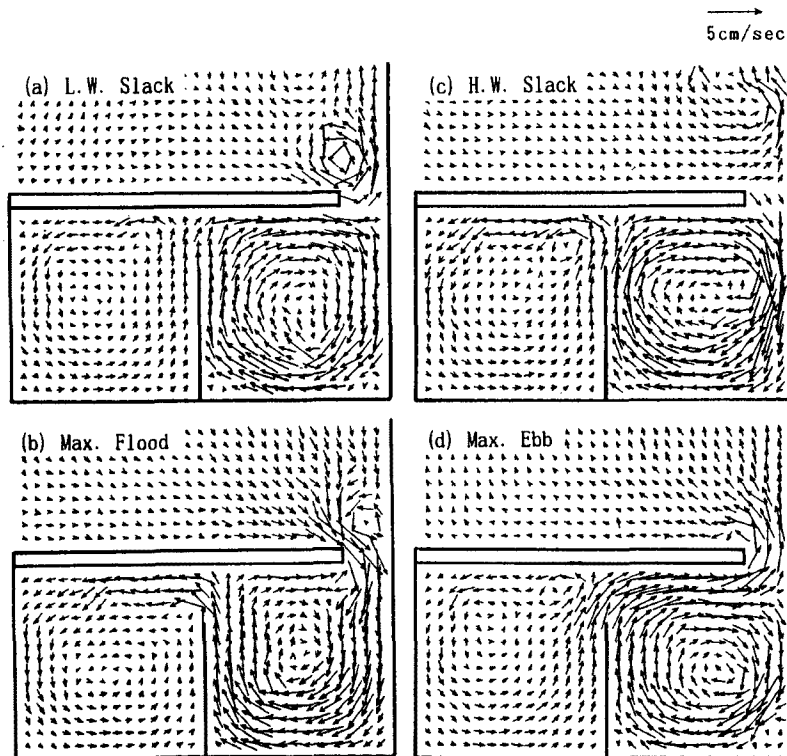


Fig. 7. Examples of velocity vector field in Case C.

湾外に形成される R_0 についてみると、以下のようなものである。これは、下げ潮流時 ($\phi=7$) に流れの剝離により発生・発達するが、やがて湾外左側より湾口に流入する上げ潮流により側壁に押しやられていく。ケース A では、これにより $\phi=2$ には消滅するが、ケース B および C では側壁付近でその形を留めている。

湾内の時計回りの環流 R_1 について見ると以下のようなものである。 R_{A1} は湾内ほぼ全域にわたる大きなスケールをもち、湾内左端にはこれと対をなす微弱な環流 R_{A2} が見られる。また、 R_{C1} は恒常的に右湾全域を占めているが、 R_{B1} は生成・消滅を繰り返す R_{B2} の存在の有無によってスケールが変動する。なお、 R_{B2} は下げ最盛から上げ最盛に至る潮時にかけてのみ存在し、それ以外では見られない。また、ベクトル図に認められるように、各ケースとも上げ潮流時に湾口付近に剝離による渦流が生じ、時計回りの環流 (R_1) に乗って移動するという2重構造になっている。

次に、ケース B および C について左湾の環流を比較する。 R_{B3} と R_{C2} は向きは異なるが、ともに流速は約 1 cm/s 弱である。また、上げ潮流時には海峡部で剝離渦流が生じ、ここでも2重構造が見られる。

ここで注意しなければならないことは、ケース B および C において8の字構造を形成する R_{B2} と R_{B3} および R_{C1} と R_{C2} では、それらのスケールおよび流速が大きく異なるために、B では右湾のごく限られた水域の水塊が左湾に入ってくるのに対し、C では右湾ほぼ全域の水塊が R_{C1} 乗って循環し左湾に入ってくることである。したがって、C の方が交換現象のスケールが大きいことが理解される。

次に、各環流の強さを循環密度により評価する。循環密度はある閉区間における循環値を、閉区間の面積で除したものである。符号は反時計回りを正とする。計算された循環密度 Γ_d の位相ごとの変化を Fig. 10 に示す。これによると、流れの剝離に起因する渦流は発生・消滅を繰り返すために循環密度の変動が

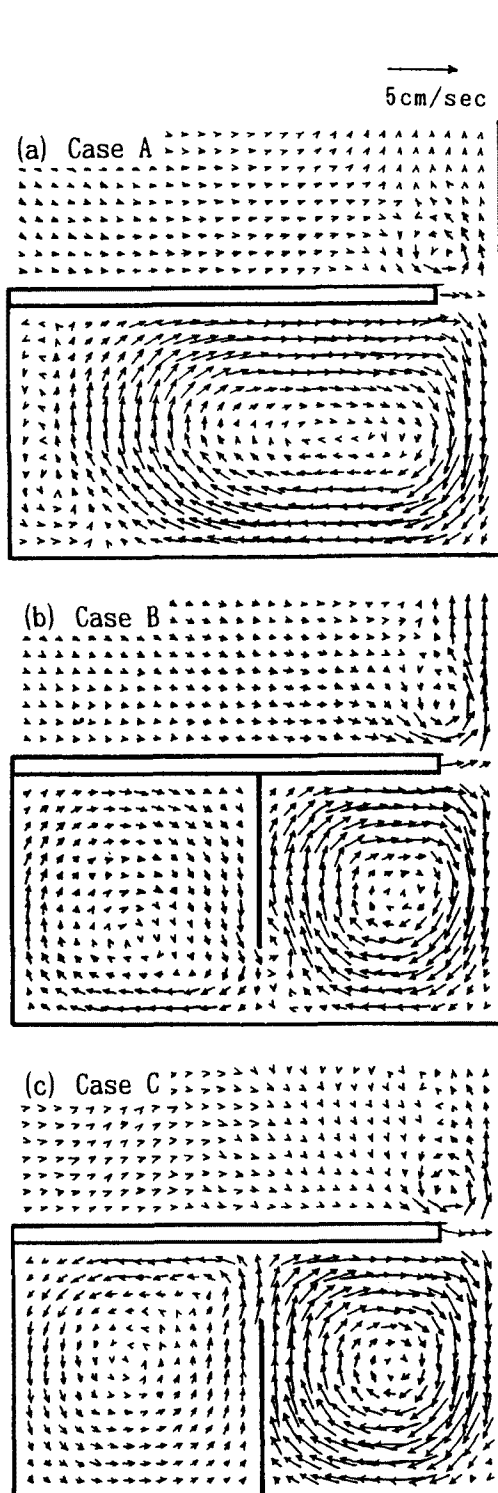


Fig. 8. Tidal residual flow obtained by experiment.

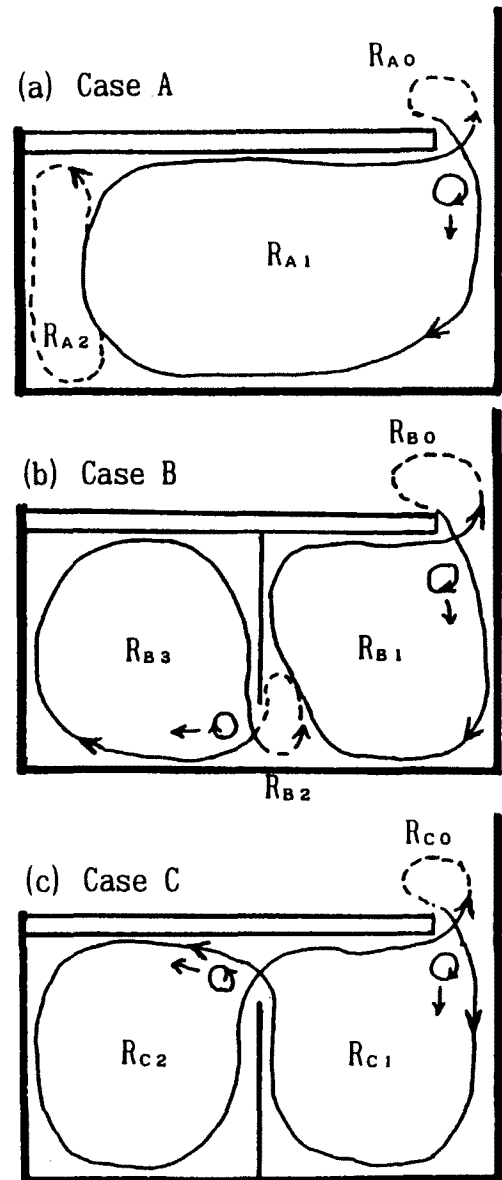


Fig. 9. Schematic illustration of flow patterns.

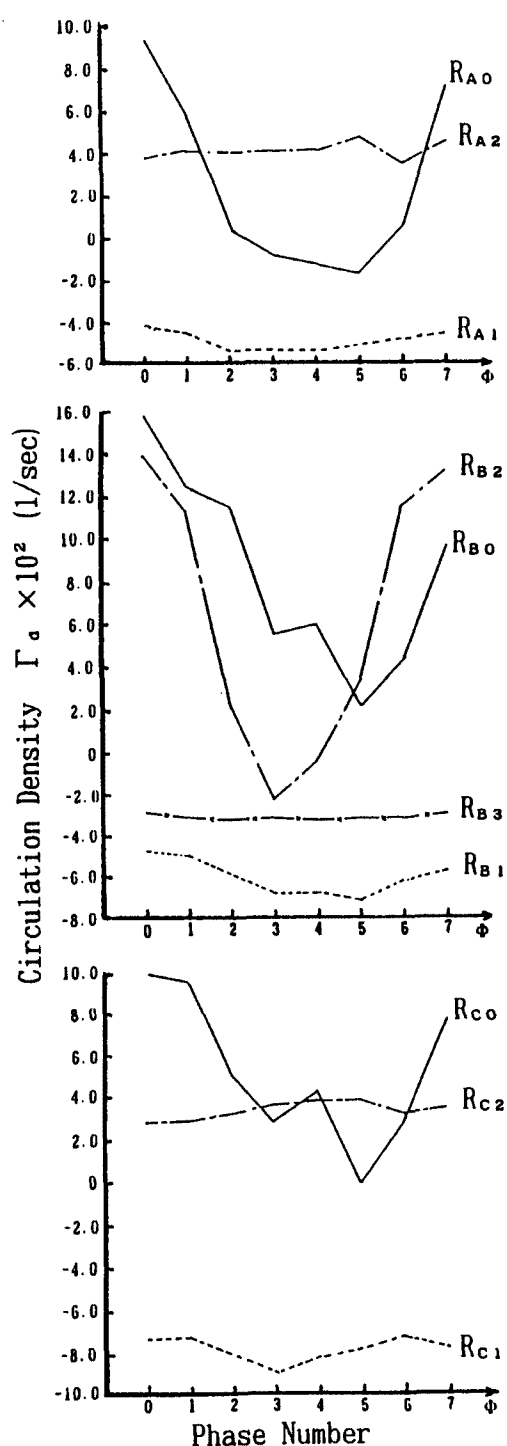


Fig. 10. Variation of circulation density with time.

若干異なる特性が見られる。ケース A では、湾外の渦流が消滅し、強い上げ潮流によって 1 周期目に出た湾内起源水の多くは湾外水と混合希釈されて湾内に戻り、残りは次の下げ潮流によりさらに遠くへ運ばれている。一方、湾内に残り残された湾外起源水は環流の中心部へは拡がらず、外周に沿って伸びている。

大きく、転流時にピークを持つことが分かる。これに対して、地形性による大きなスケールの環流では変動が小さい。これは、環流の「閉鎖度」の違いによるものである。すなわち、環流の流線が閉じている時間が長いほど、また流速が大きい（循環密度が大きい）ほど閉鎖度は高くなると考えてよい。

湾口部の交換に関する R_0 と R_1 について見ると、以下のようなものである。 R_0 については、いずれのケースも満潮時あたりで発生し、干潮時に最大値をとって流線は閉じた状態になるが、やがて崩壊し循環密度は小さくなり閉鎖度は極めて低くなる。各ケースで比較すると、 R_{A0} が最も閉鎖度が低く、 R_{C0} および R_{B0} の順に閉鎖度が高くなる。一方、 R_1 については、他よりスケールの大きい R_{A1} が最も閉鎖度が高く、次いで Γ_d の絶対値の大きさの順に R_{C1} , R_{B1} の順になると考えられる。以上のことより、 R_0 と R_1 の相互関係を考えると、湾内の環流 R_1 の閉鎖度が高いと、湾口部の下げ潮流速が弱まり湾外に閉鎖度の低い環流 R_0 が形成されると考えられる。

3.2 海水交換機構

各ケースについて干潮時に湾外を染料で着色した場合、ケース B および C について干潮時に右湾内を着色した場合について、染料水塊の外縁形状の拡がりを調べた。前者を実験 I、後者を実験 II と区別する。

実験 I の結果を Fig. 11 に示す。図中、 N_t は経過潮汐周期数を表わしている。投入後 1 周期までは、各ケースとも次のような共通した特性が見られる。 $N_t = 0.25$ では、上げ潮流により湾外水は真っ直ぐに湾内に向かい、先端部は $N_t = 0.50 \sim 0.75$ にかけて湾口付近で生じる剝離による渦流の移動および環流の影響を受けて徐々に拡がる。一方、湾上端から湾口付近にかけては、湾口へ向かう下げ潮流が強まるため、湾口付近の湾外起源水は時計回りの環流に誘導されて湾奥へ押しやられ、湾内水が湾外へ出ていく。 $N_t = 1.0$ では、湾内には湾外起源水が取り残され、湾内起源水は湾外に形成されている渦流内に大半が trap される格好になっている。

$N_t = 1.25 \sim 1.50$ にかけては、各ケースについて

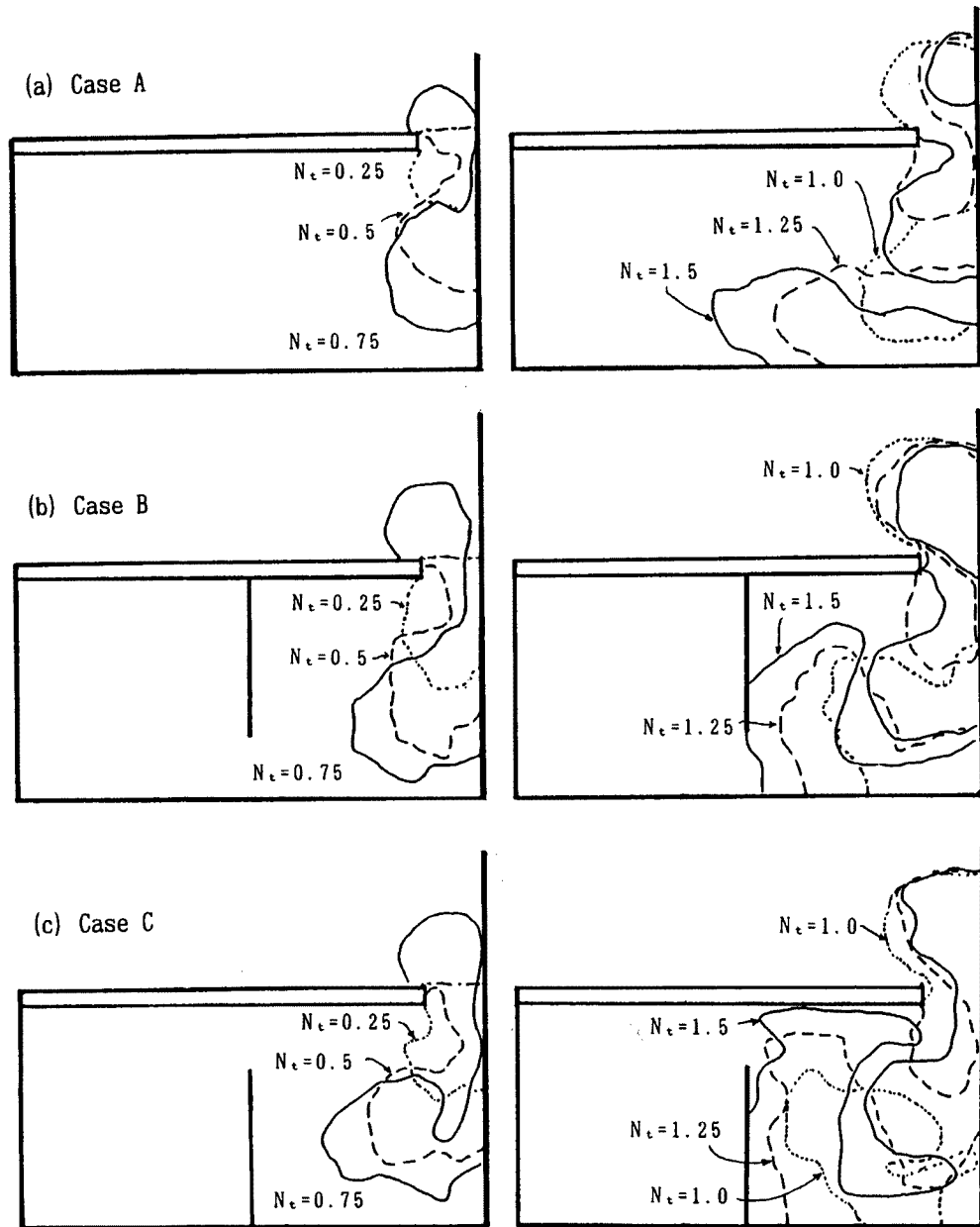


Fig. 11. Movement of water parcels (Experiment I).

ケース B および C では、湾外の渦流は $N_t = 1.25$ において側壁付近に存在し続けており、そのため 1 周期目に出た湾内起源水は、より長くこの渦流に trap されることになる。湾内に残り残された湾外起源水は、ケース B では、上げ潮流に引きずられて海峡付近に達するが、 $N_t = 1.50$ にはその先端は湾口へ真直に向かい、それ以外の水塊は環流の中心で混合希釈される。これに対してケース C では、先端は $N_t = 1.50$ には海峡付近に達し、その後、海峡より左湾へ向かうものと、環流の外周を通して湾口へ向かうものとに分かれる。

次に、実験 II の結果を Fig. 12 に示す。ケース B では、左湾に入ってくる右湾水は環流の中心へはあまり拡がらずその外周に沿って拡がる。これに対して、右端へ流入する左湾水は $N_t = 0.75 \sim 1.0$ にかけて

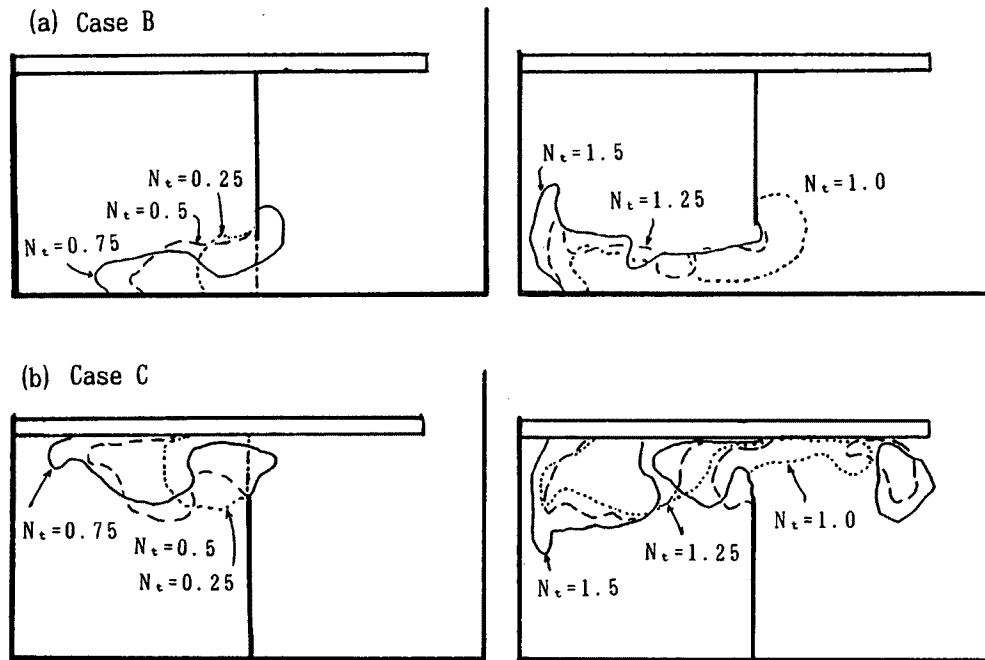


Fig. 12. Movement of water parcels (Experiment II).

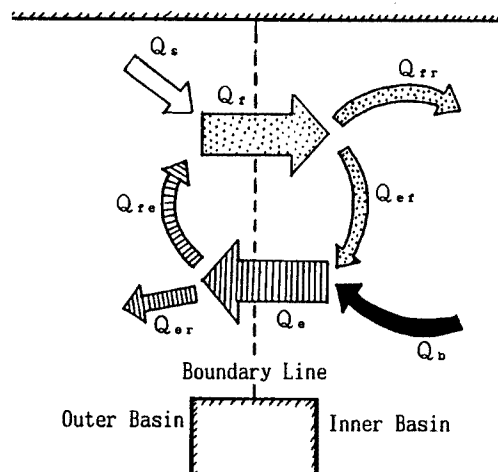


Fig. 13. Schematic illustration of tidal exchange.

渦流 (R_{B2}) に trap されるが、これが消滅すると上げ潮流に乗って大半が左湾に戻っている。ケース C では、上げ潮流時に左湾側に比較強い渦流が生じるため、右湾水はこの渦流に巻き込まれて環流 (R_{C2}) の中心方向へ拡がる。一方、右湾に流出した左湾水は、 $N_t = 1.0$ で先端は右湾の上端半ばあたりまで達するが、残りは上げ潮流によって左湾に戻る。これにより先端は分離し、 $N_t = 1.25$ では湾口からの上げ潮流の影響を受けて環流 (R_{C1}) の中心方向へ拡がる。

次に交換係数によって、交換特性を評価する。湾口あるいは海峡付近の水塊の交換機構を Fig. 13 のように模式化して考える。図中、 Q は 1 潮汐周期あたりの流量を表わし、各流量を以下のように定義する。

Q_f : 上げ潮流によって湾内に流入する水塊の流量

- Q_e : 下げ潮流によって湾外に流出する水塊の流量
 Q_{fr} : Q_f のうち、湾内に残存する水塊の流量
 Q_{er} : Q_e のうち、湾外に残存する水塊の流量
 Q_{fe} : Q_f のうち、その前の下げ潮流による水塊の流量
 Q_{ef} : Q_e のうち、その前の上げ潮流による水塊の流量
 Q_s : Q_f のうち、 Q_{fe} を除いた水塊の流量
 Q_b : Q_e のうち、 Q_{ef} を除いた水塊の流量

これらを用いて、交換係数を以下の流入係数 r_f および流出係数 r_e で定義する。

$$r_f = Q_s / Q_f, \quad r_e = Q_b / Q_e \quad \dots\dots\dots (13)$$

また、 $Q_f = Q_s + Q_{fe} = Q_{fr} + Q_{ef}$ と $Q_e = Q_b + Q_{ef} = Q_{er} + Q_{fe}$ が成り立ち、 $Q_f = Q_e$ とすると、式(13)は、

$$r_f = Q_{er} / Q_e, \quad r_e = Q_{fr} / Q_f \quad \dots\dots\dots (14)$$

流速が鉛直方向にほぼ一様であるとする、 r_f および r_e は染料水の拡がり面積から以下のように求められる。

満潮時を原点とした 1 周期内において

$$r_f = \frac{\text{1周期後に湾外に残存している湾内起源水面積}}{\text{湾外に湾内起源水が最も多く存在する時の湾内起源水面積}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

干潮時を原点とした 1 周期内において

$$r_e = \frac{\text{1周期後に湾内に残存している湾外起源水面積}}{\text{湾内に湾外起源水が最も多く存在する時の湾外起源水面積}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

この算定法では、拡散による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、始めの 1 周期間での水塊の挙動を対象として評価を行なう。算定結果を Table 1 に示す。表中、 ≈ 1.0 は、前述したように、拡散による濃度の希釈により水塊の量が過大評価されたもので正確ではないが、1 に近い数値を表わしていると考えてよい。これより、湾口における交換特性について考察すると以下のようなものである。

r_e は各ケースとも ≈ 1.0 であることにより、湾内に入った水塊の殆どが一旦湾内に留まり、始めから湾内にあった水塊とそっくり入れ換わることを表している。 r_f についてみると、ケース B および C では 0.7 ~ 0.8 とほぼ同程度であるが、A ではこの半分近くの値になっている。これは、前述した湾外に生じる剝離による渦流 R_0 の特性に起因している。すなわち、渦流内に trap された水塊はその崩壊により湾口周辺の潮流と混合希釈するため、渦流の閉鎖度が最も低い A では、湾内に初めて流入する水塊の割合が小さくなって r_f が小さく評価される結果となったものと考えられる。以上のことより、渦流が強いほど trap される水塊の割合が大きくなって、交換が良くなることが分かる。

次に、ケース B および C における海峡部の結果について比較検討すると以下のようなものである。 r_f についてみると、B は C に比べると極端に小さい。 r_f の値は、B では閉鎖度の極めて低いスケールの小さな渦流 R_{B2} 、C ではこれに比べて閉鎖度の極めて高い環流 R_{C1} により決まる。 R_{C1} における水塊の移動は前述したような特性を持つため、 r_f は大きくなる。これに対して、 R_{B2} の特性は R_0 ときわめてよく似ている。すなわち、閉鎖度が低いために水塊を短い時間しか trap できず、しかも場所を移動しないために渦流が消滅すると、強い上げ潮流により左湾に大半が戻るために r_f は小さ

Table 1. Tidal exchange ratio obtained by experiment

Case		r_f	r_e
A	entrance	0.42	≈ 1.0
	strait	0.73	≈ 1.0
B	entrance	0.10	0.85
	strait	0.75	≈ 1.0
C	entrance	0.86	≈ 1.0
	strait		

くなる。 r_e についてみると、Cがほぼ1に近い値で、Bは若干小さくなっている。BおよびCについて r_e を規定する環流 R_{B0} および R_{C2} は、流向が異なるだけでスケールはあまり変わらないが、Cの方が剥離渦流による水塊の trap が大きいために r_e の値は大きくなる。

3.3 拡散係数

前節では、ある境界断面を設定し、この断面周辺の交換係数を評価することにより、湾単位の交換特性を検討した。本節では、湾内での局所的な水塊の移動について検討する。

干潮時に染料水塊を注入した場合の拡がりの様子を Fig. 14 に示す。注入地点番号およびその地点での拡散係数（単位は cm^2/s ）の値を併示している。拡散係数 K の値は、経過潮汐周期数 $N_t = 0 \sim 0.25$ におけ

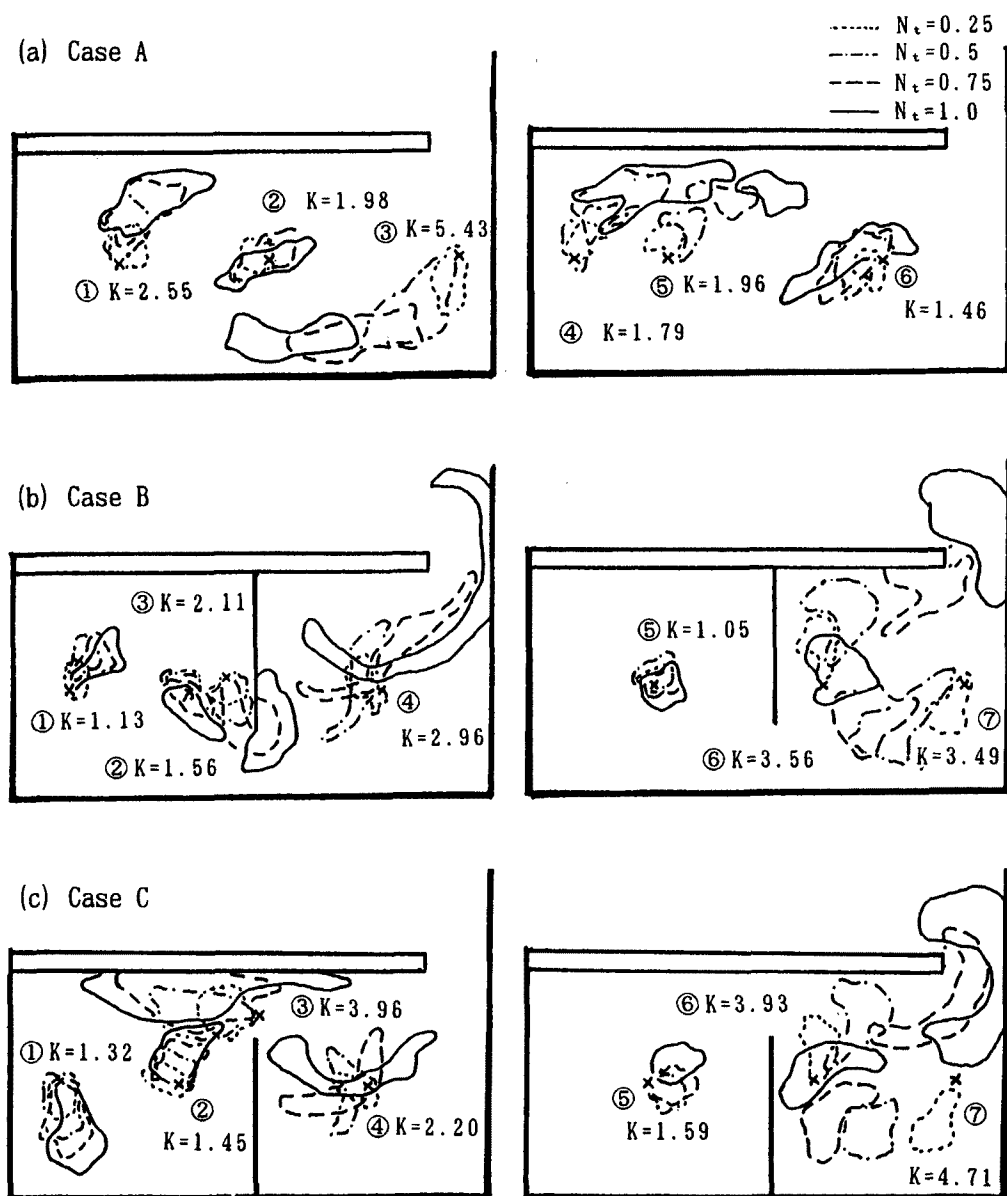


Fig. 14. Changes of spreading area of dye cloud.

る染料の拡がり面積 A_t から、 $A_t = 4\pi Kt$ と近似して算定したものであり、移流および拡散を含む“みかけの拡散係数”である。

ケース A について拡がりの特徴を要約すると以下のようである。湾内に恒常的に存在する楕円形の環流は、前述したように、極めてスケールが大きく、閉鎖性が高い。また、細長いドーナツ型の帯状の主流域をもち、その内側に流れが停滞する水域がある。主流域に属する①③④⑤の地点に注入された水塊は主流方向に伸びながら移動し、環流の中心方向へは殆ど拡がらない。 $N_t = 0.75 \sim 1.0$ になると、③⑤に見られるように、形状があまり変化せず移流による輸送が強いことが分かる。一方、②⑥の水塊は、上げ潮流時の $N_t = 0.25 \sim 0.5$ では拡がり小さいが、下げ潮流になると染料水の両端がそれぞれ主流に引きずられて細長い形状となっている。しかし、その中心は投入地点から殆ど移動しておらず、 $N_t = 1.0$ までのタイムスケールでは、環流の主流域と停滞域の混合は顕著ではない。拡散係数の値を比較すると、強い潮流が生じる③はかなり大きな値を示し、環流の中心にいくにつれて値が小さくなる傾向が見られる。

ケース B および C については以下のようである。左湾を見ると、いずれのケースでも海峡付近では、前節の実験結果と一致した結果になっているが、それ以外では拡がり極めて小さく、目立った移動は見られない。右湾では左湾に比べて環流速が大きく、流況も位相により変動するため、ケースにより異なる。右湾の中心地点である B の④、C の④を比較すると次のようである。B では $N_t = 0.25$ で強い上げ潮流に影響されて引き伸ばされ、下端は環流の外周に沿って移動し、上端は $N_t = 1.0$ になると湾外に出ていく。これに対して C では、同様にして染料は引き伸ばされるが、環流の外周に沿って回転するだけで湾外へは出て行かない。また、環流の外縁に染料を投下した場合、B の⑥では $N_t = 1.0$ には湾外に流出し、⑦に投下された水塊はこのとき⑥の地点に到達している。C の⑥⑦も同様な挙動を示す。

ケース B での拡散係数について見ると、左湾では中心より左側が小さい値をとり、海峡に近いほど大きくなる。右湾では中心が最も小さく、環流の外周では約 20% ほど大きくなっている。ケース C の左湾では中心が最も大きい、ケース B のものよりは小さい。右湾では外周が中心の 2 倍に近い値をとっている。

環流 R_1 の中心域の拡散係数を比較すると、A が最も小さく、B は C より大きな値をとる。これは閉鎖度の高い環流ほど中心域の拡散係数の値が小さく、水塊の混合が悪いことを示している。

以上のことから、1 周期内のタイムスケールでは、閉鎖度の高い環流ほど環流外の水域との混合が悪く、中心域と外周域の混合も悪くなることが分かる。

3.4 平均滞留時間

ここでは、湾全域の平均滞留時間およびケース B、C における左湾の平均滞留時間を算定し、湾口部および海峡部の交換係数による評価結果との整合性について検討するものである。

実験で得られた浮子の残余数と経過潮汐周期数 N_t の関係より、残余関数を次式で近似し、

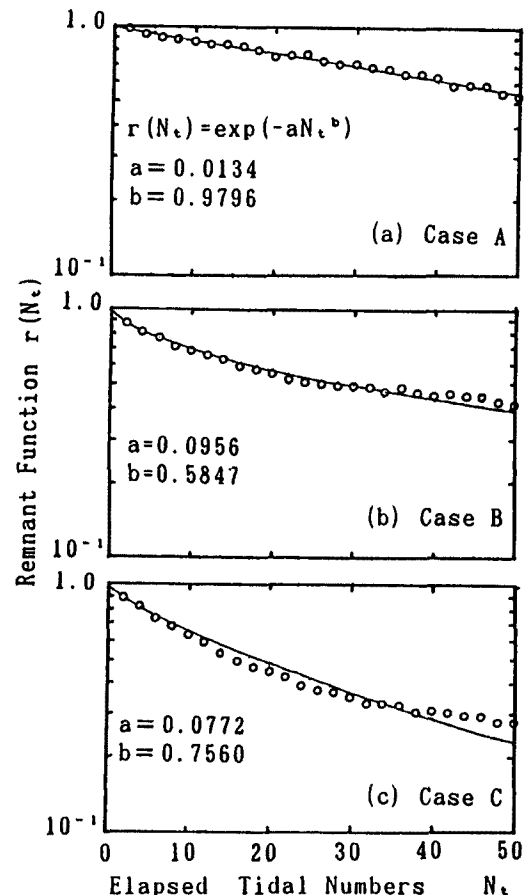


Fig. 15. Remnant function obtained by experiment.

$$r(N_t) = \exp(-aN_t^b) \dots\dots\dots (17)$$

最小自乗法により係数 a と b の値を求めて平均滞留時間を算定した。各ケースについて干潮時に湾内全域に浮子を投下した場合の浮子残余率の時間的变化を Fig. 15 に、算定された平均滞留時間の値を Table 2 に示している。なお、同表には、ケース B および C について左湾全域に浮子を投下した実験により得られた左湾水の平均滞留時間も併示されている。

湾全域の平均滞留時間は、C, A, B の順に長くなり、湾内をケース C のように仕切ると、仕切らない場合よりも交換が良くなることが注目される。左湾の平均滞留時間を比較すると、B よりも C の方がかなり小さくなっており、2つの環流による 8 の字構造のスケールが大きいほど湾全体の交換が良いことが理解される。

Table 2. Mean residence time estimated by experiment

(unit: Tidal period)		
Case	Total area	Left bay
A	82.0	—
B	86.2	64.1
C	34.9	23.4

4. 数値計算による検討

4.1 ADI法による計算の概要

本研究では、ADI 法を用いて潮流計算を行い、その結果を用いて仮想粒子の追跡計算を行なう。鉛直方向に平均して二次元化した潮流の運動方程式を式(18)、(19)に、連続式を(20)に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \dots\dots\dots (19)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\zeta+h)u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\zeta+h)v \} = 0 \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 u , v はそれぞれ x , y 方向の流速、 h は平均水深、 ζ は平均水面からの変位、 f はコリオリ定数、 C は Chezy 係数、 A_h は水平方向の渦動粘性係数である。

差分式については、金子ら¹²⁾が大阪湾を対象として同様の潮流計算を行なった際、計算式の線形化、安定化を図るために若干の変更を行っており、本研究もこれに従って計算を行なっている。

なお、計算はケース A および B を対象とし、計算に用いるパラメータの諸元を下のように設定した。

$$\Delta x = \Delta y = 7.5 \text{ cm}, \Delta t = 0.04 \text{ sec}, T = 60 \text{ sec}, f = 0, h = 10.0 \text{ cm},$$

$$C = h^{1/6}/n, n = 0.01, A_h = 0.05 \text{ cm}^2/\text{s}$$

開境界に与える強制水位は正弦波とし、その振幅は湾口部の潮差が実験値とほぼ一致するように与えた。初期条件は $\zeta = u = v = 0$ とした。

こうして得られた潮流計算の結果を用いて、水面に配置した多数の仮想粒子の追跡を行う。計算の概要は以下のようなものである。初期に配置される粒子の密度は 1 格子内に 16 個で、湾内には最大約 12000 個の粒子が配置可能である。また、粒子を配置する潮時は任意に設定できるが、本計算では交換係数の算定を行うため、実験と同様、湾外に配置する場合は湾口の潮流が干潮時、湾内に配置する場合には満潮時としている。

計算の方法は以下のようなものである。タイムステップ $k\Delta t$ おける粒子の位置を (X_k, Y_k) とすると、この位置を第 1 象限に含む格子を見つけ、粒子を囲む 4 つの格子点との距離による重みづけ計算により粒子位置における流速 (u_k, v_k) を求め、次式によりタイムステップ $(k+1)\Delta t$ における粒子の位置 (X_{k+1}, Y_{k+1}) を求める。

Y_{k+1}) が計算される。

$$X_{k+1} = X_k + u_k \Delta t, \quad Y_{k+1} = Y_k + v_k \Delta t \quad \dots \quad (21)$$

4.2 計算結果および検討

計算された潮汐残差流ベクトルを Fig. 16 に示す。これより、潮流の流況パターンは比較的良く実験結果を再現していると言える。

仮想粒子の追跡計算結果の一例を Fig. 17 および Fig. 18 に示す。図中、 N_t は粒子を配置してから経過潮汐周期数を表す。

ケース A で湾内に仮想粒子を配置した場合、 $N_t = 0.5$ から 0.75 にかけて湾外の渦流に粒子が trap されている様子がわかる。 $N_t = 1.0$ から 2.0 では、これと同様の現象と 1 周期目に湾外に取り残された右側側壁の粒子が、渦流により誘起されて生じる開境界へ向かう流れにより運ばれていく様子が理解される。一方、湾外に仮想粒子を配置した場合、湾口で生じた渦流が粒子を trap して移動するのが理解できる。また、 $N_t = 1.0$ から 2.0 の結果より、渦流が湾奥に到達した後、左へ移動し始めると、渦流内の粒子がはじめは密であったのが時間の経過とともに疎になることより、渦流が衰退していくのがわかる。

ケース B で湾内に仮想粒子を配置した場合、右湾左上の粒子が停滞するために湾外に出ていく粒子数が過小になり、 $N_t = 1.0$ の以降では実験結果との適合性が十分でない。 $N_t = 1.0$ における粒子の拡がりの外縁形状はケース A の結果より大きくなっており、湾外の剥離渦流が強いほど、多くの粒子が trap されることを示した結果になっている。一方、湾外に仮想粒子を配置した場合、はじめのうちは大半の粒子が剥離渦流に trap されているがその影響力は弱く、環流により分散していく。

次に、式(15)、(16)に基づき、湾口部における交換係数の算定を行なった。初期における粒子の配置密度は十分高いので、はじめの 1 週間内の粒子の拡がり面積は、粒子数によって評価できるものとした。算定された交換係数の値を実験結果と比較したのが Table 3 である。これによると、 r_e は計算結果ではケース B の方がケース A よりも若干大きくなっているが、両ケースとも 1 に近い値である。一方、 r_f の計算結果は、A では実験結果より約 30% 弱大きくなっている。これに対して B では実験結果とほぼ同じである。

以上のような仮想粒子をラグランジュ的に追跡して海水交換を検討する方法は、その機構を理解し、現象を定量評価する上で非常に有効である。しかし、本研究では、その基礎となる潮流の計算結果が長時間の追跡に耐えるだけの精度を持っていなかったために、実験結果と定量的に一致しなかったが、実験結果を定性的に検証するはできた。

5. 結 論

本研究は、潮汐残差環流および生成・消滅を繰り返す渦流による海水交換の機構を明らかにするために、底が平坦な長方形湾を対象として、実験および数値計算による検討を行ったものである。得られた成果を要約すると以下のようなものである。

- 1) 隣接する潮汐残差環流あるいは渦流間の水塊の交換は、これらからなる 8 の字型の経路に沿って生じる。その交換特性は、これを構成する潮汐残差環流、渦流の閉鎖度により決まる。すなわち、流線が閉じている時間が長く、流速の大きい環流ほど閉鎖度が高く、より多くの物質を trap する性質を持つ。ケース A のように、湾内にスケールの大きな閉鎖度の高い環流が形成される場合、湾内には多くの湾外水が trap され、下げ潮流になってもその大半は湾内に留まって混合希釈される。一方、湾外には閉鎖度の低い渦流が形成されるが、生成・消滅を繰り返すために湾内水の多くは trap されず、上げ潮流により混合希釈されながら湾内に戻る。そのため、湾口部での流入係数の値は流出係数

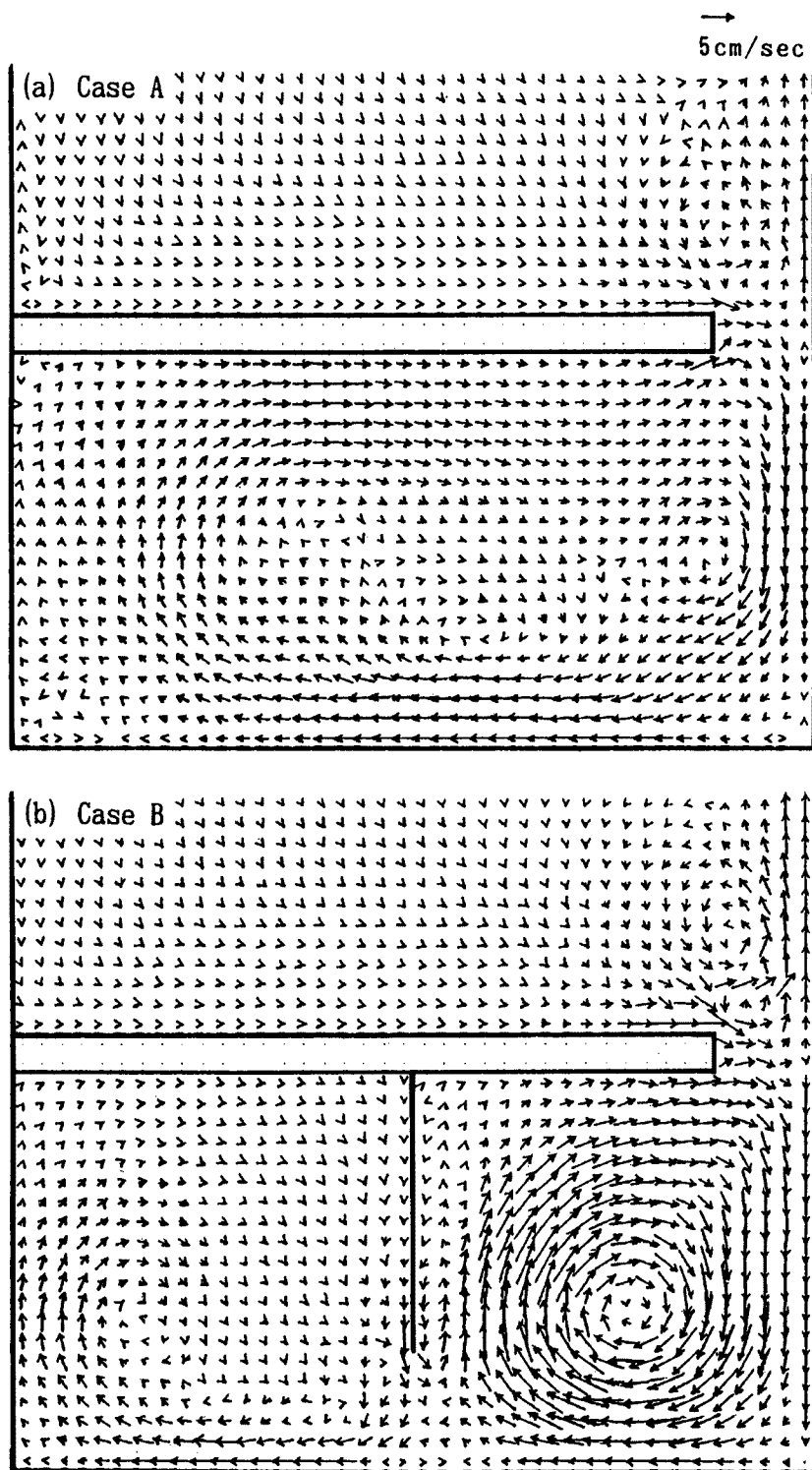


Fig. 16. Tidal residual flow obtained by numerical simulation.

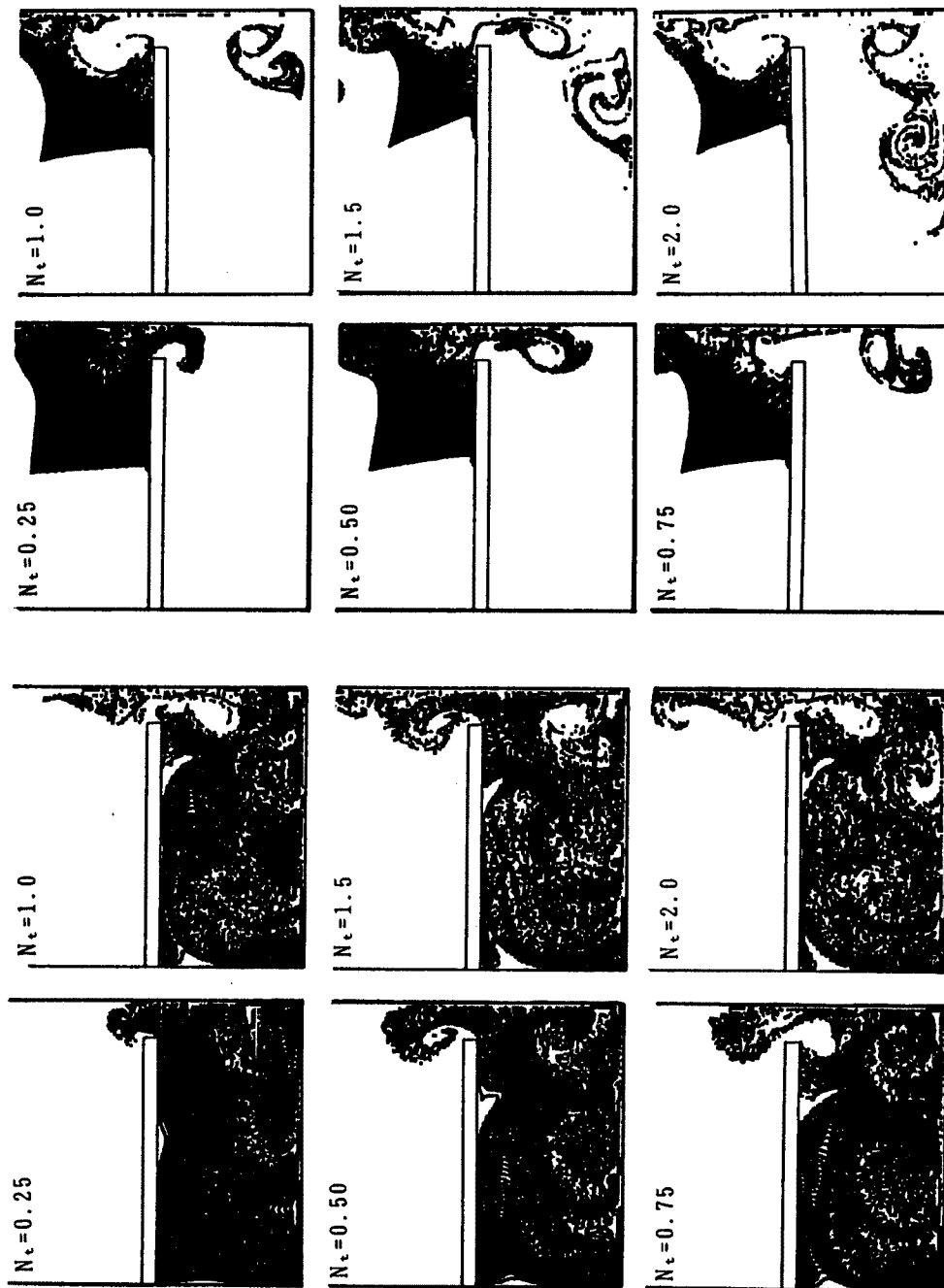


Fig. 17. Movement of marked particles (Case A).

のそれに比べて小さくなっている。

2) 閉鎖度が高く、スケールの大きい環流や渦流ほどその外周部と中心部の混合が悪い。すなわち、流れの剥離による渦流内では、水塊の混合希釈は活発であるが、スケールが大きく閉鎖度の高い環流では、外周の流速が中心部のそれより極端に大きくなるために、中心付近の水塊は停滞し、殆ど移動しない。

3) 湾内を仕切ることによって、2つの環流からなる8の字構造の交換が生じ、これにより湾内水と



Fig. 18. Movement of marked particles (Case B).

Table 3. Tidal exchange ratio obtained by experiment and numerical simulation

Case	r_t		r_o	
	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
A	0.54	0.42	0.89	≈ 1.0
B	0.70	0.73	0.93	≈ 1.0

外海水との交換を促進することが可能となる場合もあることが分かった。

- 4) 仮想粒子の追跡計算の結果、粒子の拡がりには染料を用いた実験の結果にほぼ合致した。また、交換係数の計算結果は、実験結果から指摘された湾外の渦流の特性を追認したものになった。すなわち、渦流の閉鎖度が低いほど交換係数は小さくなる。

今後は、海水交換現象の理解・評価に加え、実験結果の検証や方法的に困難な実験を補完する手段としての数値計算手法を発展させる必要がある。

参考文献

- 1) 武岡英隆：沿岸海域の海水交換，沿岸海洋研究ノート，第20巻，第2号，1984，pp.169-182.
- 2) Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson: Tidal Exchange at Golden Gate, Proc. ASCE, Vol. 98, SA 2, 1972, pp.305-323.
- 3) 柏井 誠：潮汐による海水交換について，その1，海水交換の概念と海水交換率，日本海洋学会春季大会講演要旨集，1977，pp.96-97.
- 4) 中田英昭・平野敏行：瀬戸水域における海水の交流・交換について，水産海洋研究会報，No. 29，1976，pp. 7-14.
- 5) 今里哲久・淡路敏之：鳴門・明石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.
- 6) Bolin, B. and H. Rodhe: A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs, Tellus, Vol. 25, 1973, pp. 58-63.
- 7) 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.
- 8) 村上和男・森川雅行・白井正生・佐藤英治：強制循環流による海水交換促進の水理模型実験——鹿児島湾模型による検討——，港湾技術研究所資料，No. 544，1986.
- 9) 上嶋英機：瀬戸内海の物質輸送と海水交換性に関する研究，中国工業技術試験所研究報告，第1号，1986，pp.135-174.
- 10) Imamoto, H. and K. Ohtoshi: One-Dimensional Analysis of Tidal Exchange in a Well-Mixed Estuary, 7th Congress APD-IAHR, Vol. 3, 1990, pp.407-412.
- 11) 大西行雄・國司秀明・吉松康公・秋松和典：内湾の物質分散過程における潮流と恒流の相乗効果，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，1980，pp.319-332.
- 12) 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.