

潮汐残差環流間の物質分散

樋口明生・黒田芳史・柳 哲雄・北川吉男

DISPERSION OF MATERIAL BETWEEN A PAIR OF TIDAL RESIDUAL CIRCULATIONS

By Haruo HIGUCHI, Yoshifumi KURODA, Tetsuo YANAGI
and Yoshio KITAGAWA

Synopsis

The water exchange between a pair of tidal residual vortices in a bay is studied with use of a hydraulic model.

This model represents a rectangular bay which has two mouths on a side. And the tidal current across the adjacent part of the two vortices is produced by imposing tidal conditions of different phases at the mouths.

It is observed that the two water masses corresponding to the two vortices intrude each other. This intrusion is caused by the Lagrangean displacement of water parcels due to the coupling of the residual vortices and the oscillatory current. Such a mechanism may cause the water exchange between the residual vortices in a bay.

1. 序

内海、内湾の物質分散、あるいはその水塊形成を支配する機構を明らかにする事が、沿岸海洋を研究する上での重要な課題である。

なかでも潮汐による流れについては、従来かなりの研究がなされているが、その物質分散、あるいは水塊形成に果たす役割については未だ明確でない。

SUGIMOTO, T. (1975)¹⁾は潮流に伴って発生する、時間依存しない流れ、すなわち潮汐残差流が潮汐混合の主な機構であるとしている。それによると、水平縮尺1/10万、鉛直縮尺1/1000の瀬戸内海の水利模型において、強い残差環流の存在する海域の拡散係数は、残差環流の停滞域に較べて1桁大きいことを示している。そしてこの残差環流の分布が内海規模の海水交換、水塊形成に重要な役割を果たしていることを指摘している。

潮汐残差環流 (Tidal Residual Circulation 以下 TRC と略す) の原因について、先の SUGIMOTO は潮流の陸岸地形による非線型効果であるとしている。YANAGI, T. (1976)²⁾は、片寄った開口部を持つ正方形の湾という単純な地形の水利模型で、TRC の発生・維持機構について調べている。それによると湾口部付近では、潮流の非線型項で渦度が作られ、残差流で湾内へ運ばれ、水平、鉛直粘性で渦度が逸散し、TRC の渦度分布は定常になっているとしている。OONISHI, Y. (1977)³⁾は、YANAGI と同型のモデルを数値的に扱い、潮汐残差流の発生・維持機構をより詳細に議論している。

SUGIMOTO, T. (1975)¹⁾が指摘したような、長期にわたる物質分散、水塊形成を考える場合には TRC 相互の海水交換を把握する必要がある。それは特に、海峡部における海水交換をどのように評価するかに関わる。このことについては種々の方法で検討されてきたが、それらは海水交換の物理的な内容を明らかにするものではなかった。

今里, 淡路 (1978, 1979)^{4), 5)} は海峡をはさんだ灘と灘, あるいは内湾と外海の間での海水交換量を評価する為に, オイラー的な潮流場に粒子を入れ, その個々の粒子のラグランジ的な挙動を数値的に調べることににより, 潮流による海水交換の素過程を明らかにした。それによると, 海峡部周辺海域では潮流の振幅と位相角のずれが大きく, その為に 1 周期後にも粒子は出発点に戻らず, その結果かなりの海水が交換する。又, 残差流によりさらに軌道をずらされ交換量は一層増加するとしている。

OONISHI, Y. and KUNISHI, H. (1979)⁶⁾ は定常的な渦流とそれ自身はストークスドリフトを持たない振動流の相乗作用で, 隣接する渦間の海水交換を引き起すような 8 の字型のラグランジ運動が可能であることを示している。そして, 振動流のみが存在するときに, 半周期間に入り込む体積で 1 周期間の両渦間の交換量を除した交換率は定常渦が強くなければなるほど, また振動流が弱いほど大きくなるとし, この様な現象が, 強い潮流と一組の TRC が存在する狭い海峡域での海水交換に重要であるとしている。

以上の事から, 内湾や灘における TRC の存在域は, 大きな拡散係数を持ち, ある水塊を形成していると考えられる。したがって, 内海, 灘, 内湾規模の物質分散, あるいは水塊形成を考える場合, TRC がどのように連結し, その間での海水交換量がどの程度であるかを評価する必要がある。本論文では, 内湾, 灘において, 同程度の規模を持ち, 隣接する 2 つの TRC 間の海水交換について, 水理模型を用いて実験的に調べる。交換を考える場合問題になるのは, 内湾水を構成する個々の水粒子がどのようなラグランジ運動を行っているかである。ここでは, 水粒子の 2 つの TRC 間の移動を可能にするものとして潮流及び乱れを考える。そして, 2 つの TRC が隣接する中央部で, 潮流が支配的である場合と, 潮流以外の乱れが支配的である場合の 2 つの例につき実験を行なう。それにより, 潮流及び乱れが TRC 間の交換に果たす役割を調べる。

2. 実験内容

2.1 実験目的

内湾や灘部において隣接して存在する 2 つの TRC 間での交換の様子を調べる。特にその隣接部で潮流及び乱れが交換にもたらす効果について調べる。

YANAGI, T. (1976)³⁾ は片角に開口端を持つ 5 m×5 m の正方形の内湾を設け, プランジャー型起潮機で外湾側に潮汐を与えることにより内湾に TRC が形成されることを示している。そこで, 内湾に同様の TRC を 2 つ隣接して発生させる為に両側に開口端を持つ長方形の内湾を設ける。この場合, 地形は対称であり, 内湾に生じる潮流も対称となる。したがって湾の中央における 2 つの TRC の隣接部を横切る潮流成分はほとんどあらわれない。一方, 両開口部における潮流に位相差を与えることにより, 隣接部を横ぎる, TRC と同程度の強さの潮流を発生させる。以下, この 2 つの場合について, TRC 間の交換を調べていく。

2.2 実験施設

Fig. 1(a) に水槽の概要を示す。水槽はプランジャー型起潮機を持つ長さ 11 m, 幅 5.4 m, 深さ 0.25 m のコンクリート製である。これにアクリル板とコンクリートブロックで仕切りを設け, 両端に 0.2 m の開口部を持つ縦 2 m, 横 4 m の長方形の内湾を設定した。ここでは地形は対称であり両開口部の潮流に位相差はない。

一方, プランジャーから左, 右の開口部までの距離に差をつけることにより両開口部の潮流に位相差を与える。この為の仕切りの様子を Fig. 1(b) に示す。プランジャーから開口部までの距離は右側の方を左側より約 6.7 m 長くした。その結果, Fig. 1(b) の場合, 右側の開口部の潮流の位相は, 左側に較べて約 80°遅れている。つまり, 右の開口部で上げ潮に転じる憩流時にある場合, 左の開口部ではほぼ上げ潮最強時にある。

2.3 実験方法

湾内平均水深 5 cm, プランジャー周期 180 sec を一定として各実験を行なった。

(1) 湾内流速

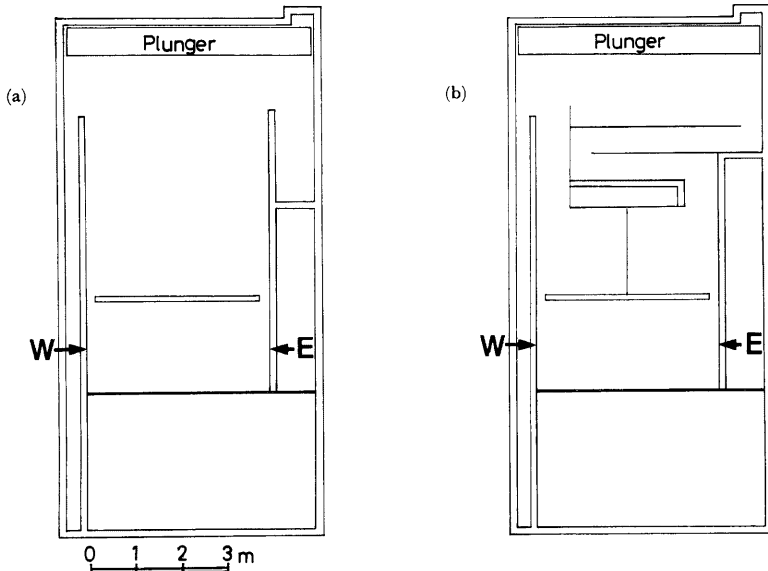


Fig. 1. Model basin.

水面に1cm 角のフロートをまき、5 sec 間隔で写真撮影を行ない、この間の流程から湾内流速を求めた。

(2) 交換の状況

交換の状態を見る為に染料の連続投入実験を行った。すなわち Fig. 1 の W, E 地点よりそれぞれメチレンブルー、ローダミン B 溶液を $1\text{cm}^3/\text{sec}$ の割合で連続投入し、写真撮影を行なった。Table 1 に以上の実験ケースを示す。

Table 1. Cases of Experiment

Phase Diff.	Float Ex.	Dye Ex.
0°	case I-19	case I-20
80°	case II-14	case II-15

3. 実験結果

3.1 流速場

Fig. 2 (a), (b) に case I-19, case II-14 の5秒間のフロート流程から得られた、 $0\pi, \frac{1}{2}\pi, \pi, \frac{3}{2}\pi$ の各位相における流速場を示した。ここでいう位相 0π とは、I-19 では両開口部、II-14 では左側の開口部における潮流が下げ潮から上げ潮に転流する憩流時である。

Fig. 2 (a) の位相差のない時、各位相を見ると流れは中央線に対しほぼ対称である。そして中央線を横切る流速成分は小さい。Fig. 2 (b) の位相差のある時、対称性はなく、中央においてもかなり大きな横方向の流速成分が存在しているのがわかる。又、湾内の左、右の領域で潮流に位相差があることは明白である。

次に、残差流場を求める。上記のような流速分布が 20° 毎に得られている。それを 5×10 個の格子点上で1周期間の時間平均をとり残差流とした。各格子点上の値を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a), (b) はそれぞれ、case I-19, case II-14 である。Fig. 3 (a) で、左、右の TRC は TRC の中心部を除けば対称である。これは Fig. 3 (b) についてもいえる。又、case I-19, case II-14 の TRC は同程度の流速を持ち、流速分布も変化していない。つまり、左、右の領域において潮流の位相にずれがあっても、残差流場は同位相の場合と変わら

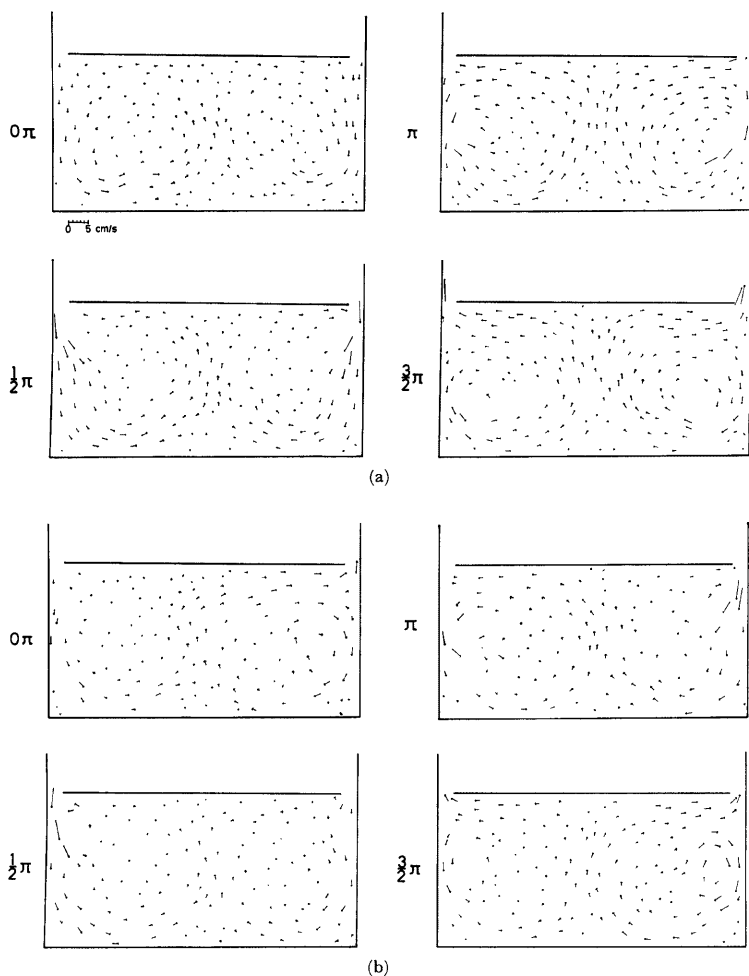


Fig. 2. Velocity distribution.

ない。

左, 右の TRC 間での海水交換を検討する場合, 中央線を横ぎる流れを詳しく知る必要がある。そこで中央線 PQ 上の 20 cm 間隔, 9 点における流速を残差流成分とそれ以外の成分に分けて Fig. 4 に示した。a, b はそれぞれ case I-19, case II-14 である。左端は残差流, その右側は残差流を除いた成分である。潮流の位相の 20° 毎に U, V 成分を示してある。縦軸は速度 0, 右向き (シャドウ部) は正, 左向きは負である。Fig. 4 (b) の右端に座標軸を示した。

Fig. 4 (a), (b) を見ると, 残差流の V 成分は case I-19, II-14 と同, ほとんどの部分で y 方向に正の流速をもち, 中央部で最大流速 (約 1.0 cm/s) を持つ, そして上下の境界に近づくほど小さくなる。又, 下辺

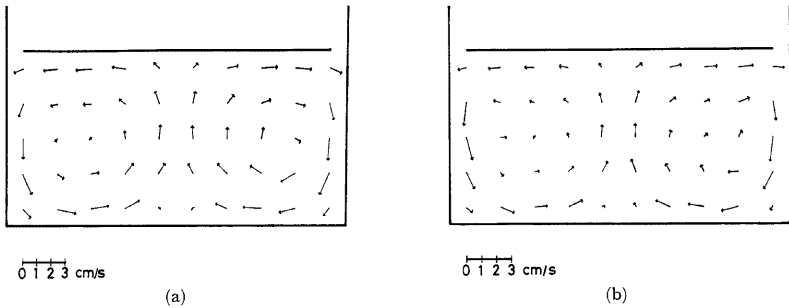


Fig. 3. Velocity distribution of Tidal Residual Circulation.

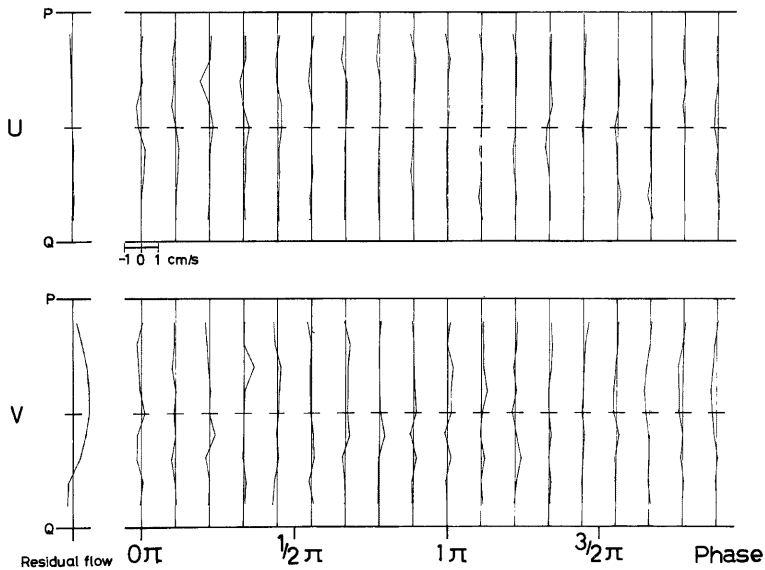


Fig. 4(a)

近くでは y 方向に負の流れが存在する。 x 方向の U 成分は両方とも中央では 0 cm/s で、境界近くでは $0.1 \sim 0.15 \text{ cm/sec}$ である。

3.2 交 換

交換の状況を見る為に染料の連続投入実験を行った。その結果を **Photo. 1** (a), (b) に示す。**Photo. 1** (a) は位相差のない場合 (case I-20), **Photo. 1** (b) は位相差のある場合 (case II-15) である。左側の数字 6, 7, 8, 9 は投入後、何周期目であるかを示し、上の 0π 及び π は各周期での位相を示す。ここでは染料が内湾全域を満たし、中央部で両側からの染料水が接してからの状態を示している。なお、**Photo. 1** (b) の中で J と示した、白くなっている部分は、上げ潮時に外湾からとりこまれた水塊であり右側の領域から入ってきたものではない。

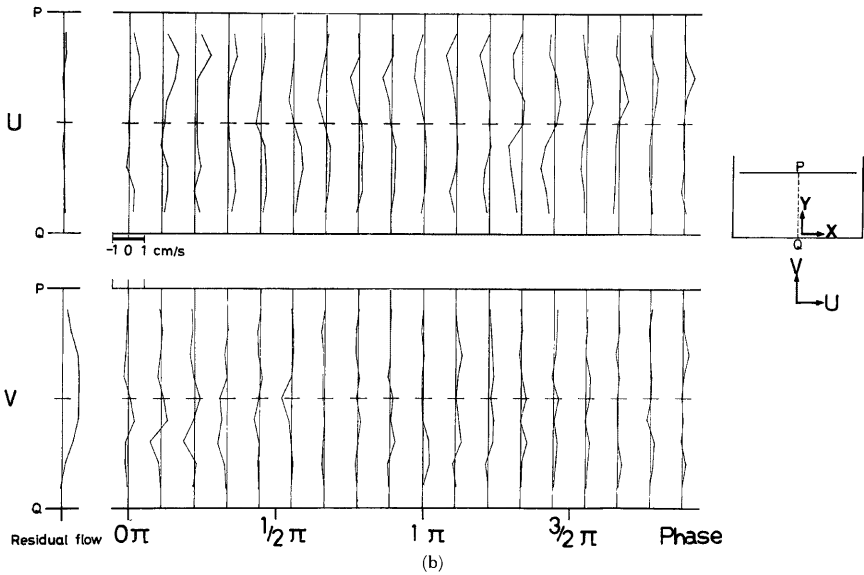


Fig. 4. Velocity on center line.

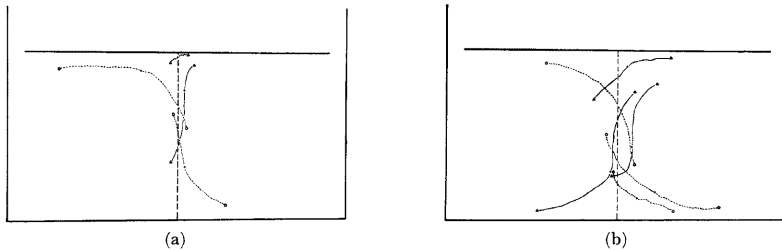


Fig. 5. Displacement of floats.

Photo. 1を見て一般的に言えることは、中央部において2つの染料水の境界は明瞭で、2つの水塊の間で混合は起っていない。しかし、上方の陸岸近くではその境界は折れ曲がり、両水塊の間で相互入り込みが行なわれる。そして、入り込んだ水は上辺に沿って流れ、潮流が大きく乱れの強い開口部付近で混合される。つまり、隣接する TRC 間の海水交換には、この両水塊の相互入り込みが本質的役割を果している。

次に個々のフロートの動きから交換量を推定してみよう。Fig. 5 (a), (b) に位相 0π の時にそれぞれの領域にあったフロートが1周期後に中央線を横切って、隣の領域へ移動した軌跡を示した。Fig. 5 (a), (b) はそれぞれ case I-19, case II-14 を示す。図中○印は右側の領域から左側へ、△印は左から右へ移動したフロートを示す。+印は1/2周期の時の位置を示す。

位相 0π のときに中央線上に境界を仮定し、左と右の水塊に分ける。そして、1周期後の交換の状況を上 に示したようにフロートの動きを追跡することにより求めた。それを Fig. 6 (a), (b) にそれぞれ case I-19,

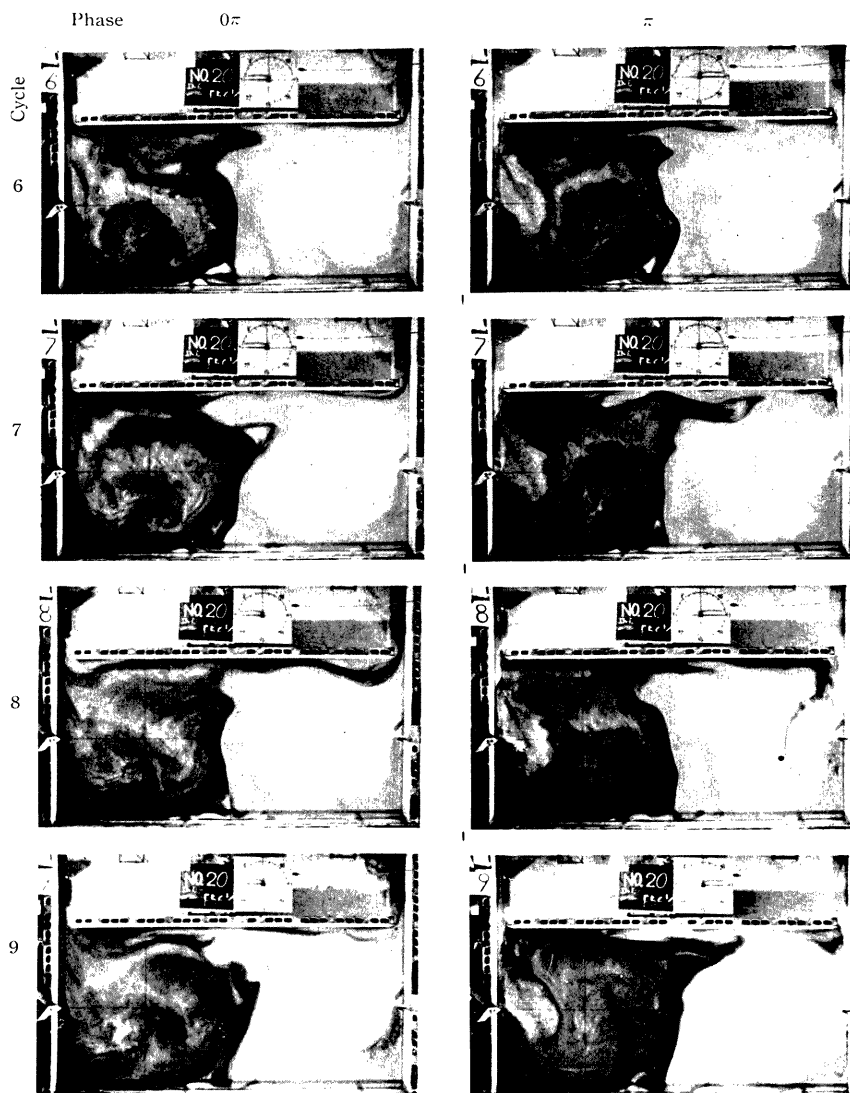
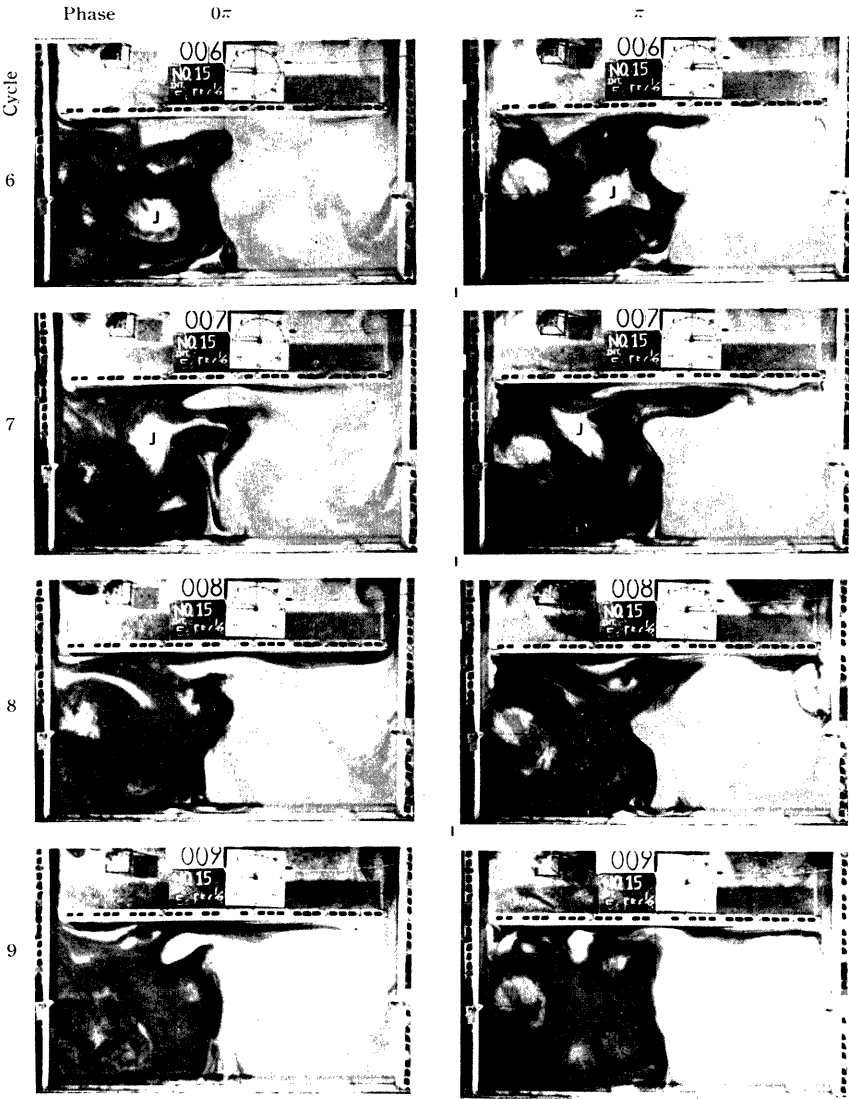


Photo 1(a)



(b)

Photo. 1. Dye release experiment.

II-14 について示した。Fig. 6(b) で右側に存在する領域 A_1 というのは位相 0π のときに左側にあった領域 A_0 の水が 1 周期後に移動した結果である。同様に C_0 から C_1 へ移動し、又、位相 0π のときに右側にあった B_0, D_0 は 1 周期後には左側の B_1, D_1 へ移動する。Fig. 6(a) も同様である。

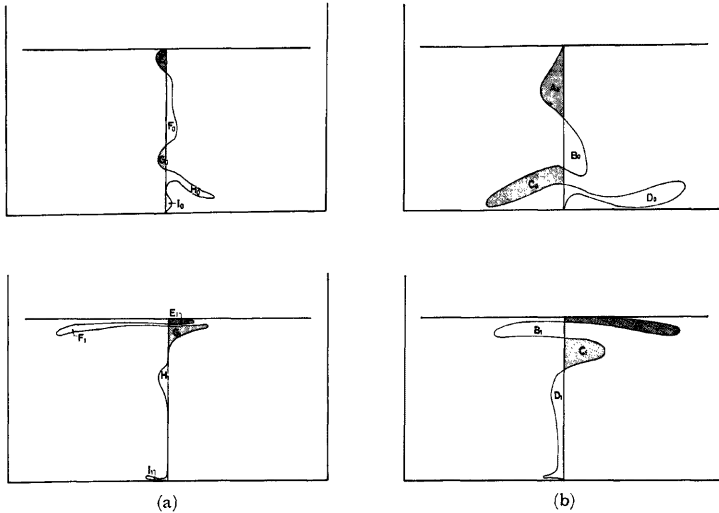


Fig. 6. Distribution of exchanging water.

1 周期間の交換量として、内湾の半分の体積に対する交換した体積 (Fig 6(b) でいえば $A_1 + C_1$ あるいは $B_1 + D_1$) の割合で示すと case I-19 の場合約 2%, case I-14 は約 7% である。

4. 考 察

前節で示された交換がどのようなラグランジ流速に支配されているかを考える。特に中央線付近の残差流以外の流速成分は case I と case II ではかなり異なっており、それが交換に及ぼす影響について調べる。

時刻 $t=t_0$ における流体粒子の位置を $\mathbf{x}$, $t=t$ における流体粒子の空間座標を $\mathbf{X}(\mathbf{x}, t)$ とする。ラグランジ流速を $q(\mathbf{x}, t)$, オイラー流速を $\mathbf{u}[\mathbf{X}(\mathbf{x}, t), t]$ とすると、一般的に次のように書かれる。

$$q(\mathbf{x}, t) = \mathbf{u}[\mathbf{X}(\mathbf{x}, t), t] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{x} + \int_{t_0}^t q(\mathbf{x}, t') dt' \quad \dots\dots\dots (2)$$

これは近似的に

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}, t) \simeq \mathbf{x} + \int_{t_0}^t \mathbf{u}(\mathbf{x}, t') dt' + \int_{t_0}^t dt' \int_{t_0}^{t'} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t'') \nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}, t') \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。

本実験でフロートの流程から得られた流速は、時刻 $t_0 \sim t_0 + 5$ の 5 秒間における平均のラグランジ流速である。又、その軌跡上でオイラー流速が急激に変化しなければ (3) 式の右辺第 3 項は無視できて、得られた流速は $\mathbf{x}$ における 5 秒間の平均のオイラー流速であると考えられる。流れが強く変動が激しい開口部付近では適当でないと思われるが、ここではフロートから得られた流速をオイラー流速とする。

オイラー流速 $\mathbf{u}$ を、時間に依存しない残差流成分 $\mathbf{u}_s(\mathbf{X})$ 周期的に変動する潮流成分 $\mathbf{u}_T(\mathbf{X}, t)$, それら以

外の潮流より時間規模の小さい乱れ成分 $u'(X, t)$ に分離する。

$$u(X, t) = u_s(X) + u_T(X, t) + u'(X, t) \quad (4)$$

個々のフロートの動きは次式で表わされる。

$$X(x, t) = x + \int_{t_0}^t \{u_s(X) + u_T(X, t') + u'(X, t')\} dt' \quad (5)$$

(5) 式の各項の形と組合せて交換の様子が決定される。

Fig. 3 のような、速度 u_s に対応する、定常で対称な TRC が存在するだけでは、水粒子は 1 つの TRC の中だけで軌道を描き、2 つの TRC 間で水が交換することはほとんどない。2 つの TRC の境界を横切る水粒子が現われるには潮流 u_T 、あるいは乱れ u' が必要である。

case II (位相差あり) の場合を考える。Fig. 4 (b) の中央線上での流速値の調和解析を行なった。その結果、x 方向の U 成分は、周期 180 秒の潮流成分が卓越し、他の成分より 1 桁大きな値を示す。その最大振幅は 0.6 cm/sec で、中央部に 0 cm/sec に近い極小部を持ち、位相差にも空間分布を持っている。y 方向の V 成分は、残差流成分が他の成分より 1 桁大きな値を示し、1.0 cm/sec の最大流速を中央部付近に持っている。そこで、(5) 式において u' 成分は無視できて

$$X \approx x + \int_{t_0}^t \{u_s(X) + u_T(X, t')\} dt' \quad (6)$$

と書ける。つまり、1 対の TRC 成分 u_s と潮流成分 u_T の相乗作用で交換が決定される。

次に case I (位相差なし) の場合を考える。調和解析から x 方向については、潮流成分は最大でも 0.1 cm/sec 程度で、これは、それより短周期の成分と同程度である。y 方向については、case II と同じく、V 成分が卓越し、最大で 0.9 cm/sec の流速を持っている。ここでは (5) 式において u' を無視することはできない。

次に、上記の流速が交換に及ぼす影響を考える。Fig. 6 を見ると交換量は case II の方が大きい。これは x 方向の流速の絶対値が case I に較べて大きい為と考えられる。又、Photo. 1 (b) (case II) を見ると位相 0π で、いずれの周期においても PQ 方向の位置によりその入り込みの形が決まっている。それはフロートから求めた Fig. 6 (b) の入り込みの形とも一致する。ところが Photo. 1 (a) (case I) においては、同位相のものを見ても周期が異なれば入り込みの形は異なっている。

まとめていえば、2 つの TRC とその間に強い潮流があれば、それらの相乗作用により規則的な相互入り込みを行ない、2 つの TRC 間に海水交換をひき起す。又、2 つの TRC と相乗作用を行う潮流が弱く、乱れ成分が無視できない時、相互入り込みは行なうがその規則性は失われる。

5. ま と め

内湾、灘において TRC が隣接して存在する場合を想定し、その TRC 間の境界を通じての海水交換を水理模型を用い実験的に研究を行なった。その結果次の事が明らかになった。

(1) 内湾の中央で接した 2 つの TRC による両水塊の境界は上辺の陸岸近くで折れ曲がり、両水塊による相互入り込みが行なわれる。入り込んだ水塊は陸岸に沿って流れ潮流が大きく乱れが強い海峡部付近でまわりの水と混合する。このような形の水の相互入り込みが TRC 間の海水交換に本質的役割を果たしている。

(2) この相互入り込みをもたらすものは TRC と、潮流及び乱れの相乗作用によるラグランジュ運動である。

(3) TRC の隣接部を横切る潮流が強くそれに較べて乱れが無視できる場合、その相互入り込みの形は、各位相によりそれぞれ形が決定し規則的である。一方、潮流が弱く乱れが無視できない場合、同位相を見ても相互入り込みの形は異なり不規則である。

今後の課題として

- (1) 原型との相似則を考えつつ、TRC、潮流、乱れをパラメータ化し、そこで交換の特性を把握する。
- (2) 潮流の振幅と位相の空間変化が水粒子の移動に及ぼす影響を明らかにする。

(3) この実験では TRC は対称であるが、それを非対称にした場合の海水交換の状況を明らかにする。

以上のことを明らかにする為に、本実験のより詳細な整理検討をもとに新たな実験をする必要があるだろう。今後はより一層、現実の海との対応を考える必要がある。

6. 謝 辞

この研究を進めるにあたって終始御指導、御助言を頂いた、京都大学理学部國司秀明教授、今里哲久講師、同防災研究所中島暢太郎教授、田中正昭助教授、並びに実験の実施や内容の討論等に御協力下さった、京都大学理学海洋物理学研究室、同防災研究所災害気候部門の諸氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Sugimoto, T.: Effect of boundary geometries on tidal currents and tidal mixing, J. Oceang. Soc. Japan, Vol. 31, 1975, pp. 1-14.
- 2) Yanagi, T.: Fundamental study on the tidal residual circulation I, J. Oceang. Soc. Japan, Vol. 32, 1976, pp. 199-208.
- 3) Oonishi, Y.: A numerical study on the tidal residual flow, J. Oceang. Soc. Japan, Vol. 33, 1979, pp. 207-218.
- 4) 今里哲久・淡路敏之：内湾における混合と交換 I, 日本海洋学会, 1978年度秋季大会講演要旨集, pp. 94-95.
- 5) 今里哲久・淡路敏之：内湾における混合と交換 II, 日本海洋学会, 1979年度春季大会講演要旨集, pp. 74-75.
- 6) Oonishi, Y. and Kunishi, H.: Water exchange between adjacent vortices under an additional oscillatory flow. J. Oceang. Soc. Japan, Vol 35, 1979, pp. 136~140.