

湾内における海水交換に関する研究

筧 源 亮*・梅田眞三郎**・保 科 公 伯***

1. ま え が き

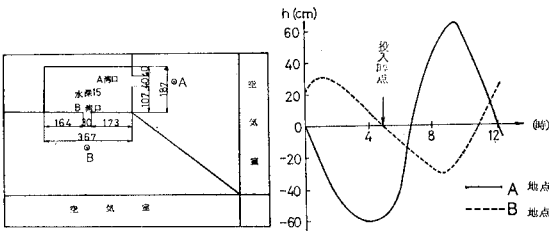
閉塞性の内湾での海水交換の主体は潮流であり、この潮流の非線形性等に起因して生じるといわれる恒流の一種である潮汐残差流は、沿岸海洋の物質分布に重要な役割りを果たすことが樋口ら¹⁾によって指摘されている。さらに彼らはその発生・維持機構も明らかにしつつあり、海水交換における潮汐残差流の影響の大きいことを指摘している。

本研究は、このような従来の海水交換に関する研究に見られないラグランジュ的解析方法を用い、その流動把握と海水交換に関する考察を試みたものである。今回はシミュレーションを目的とするのではないが、基礎的研究として大阪湾を極端に簡略化した2つの湾口部を有する内湾模型に、海水交換のような水塊の移動そのものを取扱うのに有益と考えられるラグランジュ的方法による浮子追跡を主体として実験を行った。その補足及び比較として用いた数値計算により海水交換の解析を試みた。

2. 実験装置・実験方法

(1) 実験装置

模型実験は、図一1に示すように二つの独立した起潮装置を有する実験水槽に、フルード相似にしたがう歪模型を配置して行った。その模型は二つの湾口部があり、水深は15 cmで一定とした。模型の壁面は合板で製作し、底面はゴム張りである。この模型は、大阪湾を55 km×28 kmの長方形で水深を30 mの一定とみなした



図一1 実験装置(単位 cm) 図一2 潮位変動(平均大潮)

簡略模型としたものである。したがって模型の水理要素の縮尺は表一1のようになる。ここで示す粗度縮尺はマンニングの粗度係数で表わしている。

潮汐に関しては、図一1に示す両湾口よりはなれたA、B 両点で、実測による潮位変動を基準とした図一2で示すような潮汐を与えた。

(2) 実験方法

湾内を10×10のメッシュに区切り、そのメッシュの1列ごとに水面上約0.5 cmに電磁石で付着させておいた9個の浮子を図一2の矢印で示す時刻に同時に水中に投入し、浮子の移動を上方約5 mに設置した固定カメラによって2周期間にわたって連続撮影した。なお実験開始は、大潮、小潮いずれも十分定常状態となっていると考えられる7周期目よりとした。

模型には原型に匹敵するだけの量の粗度を相似律にしたがって与える必要があるが、今回は極端な簡略模型を使っているため、粗度の有無によって流動その他に種々の違いが生じることを予想し、その違いを把握する意味で実験では粗度を与えない場合と、粗度として粒径20 mm～50 mmの小石を湾内全体に敷いた場合の2条件下で実験を行った。

海水交換を取扱う場合には、表面の流動についてはもちろんであるが、内部流動についても考慮する必要がある。内部流動について、これをいかにラグランジュ的に測定し表面流動と比較するかは非常に難しい。今回試みた種々の方法の中では最も良好な内部流動を表わすと考えられる次のような方法で実験を行った。すなわち体積比が約1:30であるような上下2個の浮子を糸で連結

表一1 模型の水理要素の縮尺

要素	水平縮尺	鉛直縮尺	流速縮尺	時間縮尺	粗度縮尺
縮尺	1/15 000	1/200	1/14.14	1/1061	1/0.279

表一2 実験ケース

	粗 度 な し		粗 度 あ り	
	大 潮	小 潮	大 潮	小 潮
表 面	Case 1	Case 5	Case 3	—
下 層	Case 2	—	Case 4	—

* 正会員 Ph.D 神戸大学教授 工学部土木工学教室
** 正会員 工修 福山大学講師 工学部土木工学教室
*** 正会員 中国電力KK

したものを浮子として用い、それを追跡した。この浮子によると下部浮子は水面下 14 cm 付近を移動する。

以上のような実験条件や方法の組合せによって、今回は表—2 に示すように 5 つの Case について実験を行った。小潮については、2 周期間での移動状態が小さいので 1 Case についてのみ実験を行った。以下の文では、表—2 にしたがって Case 1, Case 2, … という表現でその実験条件を表わすものとする。

3. 実験結果

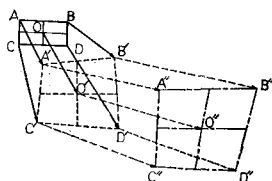
上述のようにして得られた結果を今回はラグランジュ的およびオイラー的にまとめた。

(1) ラグランジュ的結果

実験は浮子追跡というラグランジュ的方法で行われており、得られた結果はそのままでもラグランジュ的結果といえる。しかしラグランジュ的方法によって得られた結果は、一般的に言って偶然性に左右される部分が大きく 1 個の実験結果では信頼性に欠ける。したがってなんらかの方法で実験結果を平均することによって、より信頼性の高い結果を求める必要がある。したがって今回は実験結果を次のような方法で平均した。

実験では湾内を 100 個の長方形のメッシュに区切っており、それぞれの交点での流跡図が得られている。これより 1 つの長方形メッシュを取り、その 4 隅の流跡図を平均することによってそのメッシュの中心の平均的な移動を求める。このようにして得られた結果は、メッシュの中心近傍の水塊の流動を表わすものと考えられる。つまり図—3 のように最初に 1 つの長方形メッシュを決める。この四角形 $ABCD$ の 4 隅の浮子の一定時間の移動をベクトル表示すれば、それぞれ $\overrightarrow{AA'}$, $\overrightarrow{BB'}$, $\overrightarrow{CC'}$, $\overrightarrow{DD'}$ となる。これらのベクトルを平均してベクトル $\overrightarrow{OO'}$ を求める。このようにして求められた新しいベクトル $\overrightarrow{OO'}$ は、最初に選んだ長方形メッシュの中心の平均的な移動を示す。次に O' から平均移動をベクトル $\overrightarrow{A'A''}$, $\dots$, $\overrightarrow{D'D''}$ を平均して $\overrightarrow{O'O''}$ として求める。このような操作を繰返すことによって得られる一連につながったベクトル線は、最初の長方形メッシュの中心近傍の水塊の平均流動状態を表わすものと考えられるであろう。

このようにして得られた Case 1~Case 4 についての



図—3 流跡ベクトルの平均

湾内流動を模式化したものを図—4, 5, 6, 7 に示す。小潮については、このような平均をしなくても湾内全体の流動を容易に把握できるので実験結果をそのまま図—8 に示す。

(2) オイラー的結果

今回の実験はラグランジュ的方法を主体として行っており、オイラー的測定は行わなかった。しかし湾内の潮流速および流況の時間的変化を見る場合にはオイラー的結果が有益であるので、模型実験で得られた流跡図について潮汐残差を湾内全体に求め、これとオイラーの結果を比較して湾内恒流パターンを求めた。Case 1~Case 5 についての結果をそれぞれ図—9, 10, 11, 12, 13 に示す。今回の実験では、恒流のほとんどは地形の効果のみによって発生したものと考えられる。なお図—9~図—13 には、その恒流の大きさの概算値を示したが、これは潮汐残差流の大きさとして求めたものを平均したものであり、オイラー的に測定して求めた恒流の大きさではない。

4. 実験の考察

(1) 湾内流動について

以上の実験結果によると、湾内では両湾口を結ぶ線上に主流が発生し、これより派生した潮流が廻流し湾口部付近に環流を発生させる。この様子を図—14 に示す。この図では、B 湾口から A 湾口に向けて潮流が発生している場合を実線で、反対の場合を破線で示している。また環流については、その環流のどの部分がどちら向きの潮流に大きく影響されているかによって実線、破線の区別をした。図からわかるように、主流については潮流の向きによって主流の発生する位置が異なっている。これは両湾口における流速と地形の偏平度によるもので潮流の性質をよく表わしていると思われる。環流については、A と B 及びその I と II の大きさをそれぞれ比較すると異なる。これらのことから、環流はそれを発生させる湾口の流速と地形の両方の影響によってその大きさや形が決定され、湾口の流速が大きいかほど大きな環流が発生するものと思われる。このような傾向は Case 1~Case 4 のいずれの場合にも見うけられた。環流は時間によって流速が変化するものの、憩流をみず、これらの環流が恒流となるようである。このことは図—9~図—13 の恒流パターンが環流とほぼ一致していることから容易に推察できる。小潮においては、上記のような強い環流はほとんど見られず、わずかに B の環流が現われたにすぎなかった。

次に図—4~図—8 の湾内流動図と図—9~図—13 の恒流パターンを比較してみると、湾内の浮子は潮汐の周期的な影響を受けて複雑な移動をするが、長期的な移動方向は恒流に支配されていることがわかる。このことは海水交流には恒流の影響が重要であることを示している。

(2) 海水の交換について

実験の 2 周期間に湾外へ流出した浮子は、Case 1~

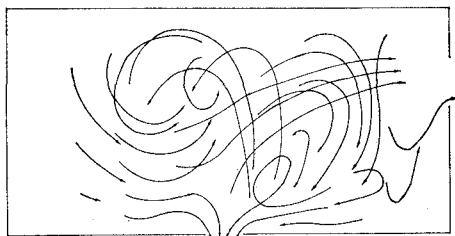


図-4 湾内流動図 (Case 1)

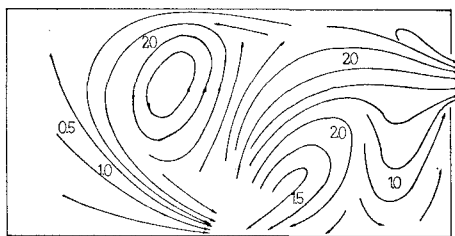


図-9 湾内恒流パターン (Case 1) 単位 cm/sec

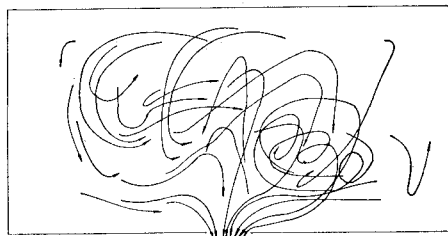


図-5 湾内流動図 (Case 2)

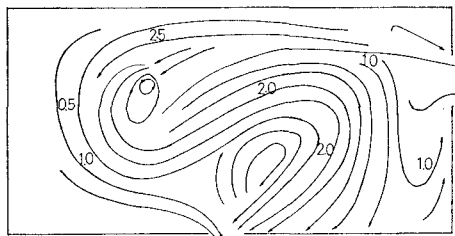


図-10 湾内恒流パターン (Case 2) 単位 cm/sec

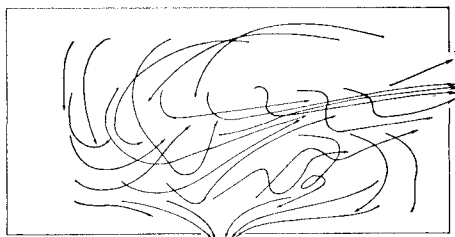


図-6 湾内流動図 (Case 3)

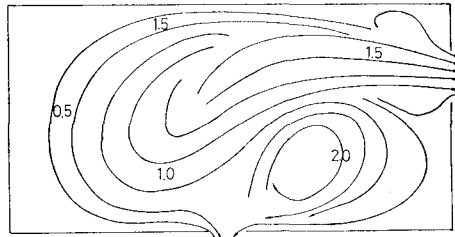


図-11 湾内恒流パターン (Case 3) 単位 cm/sec

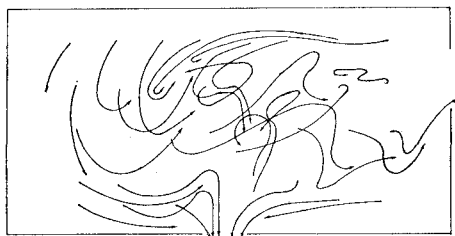


図-7 湾内流動図 (Case 4)

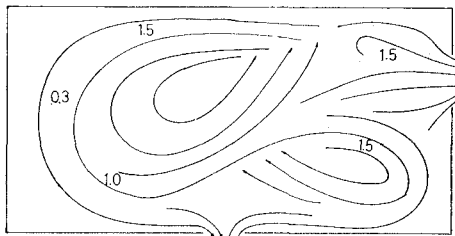


図-12 湾内恒流パターン (Case 4) 単位 cm/sec

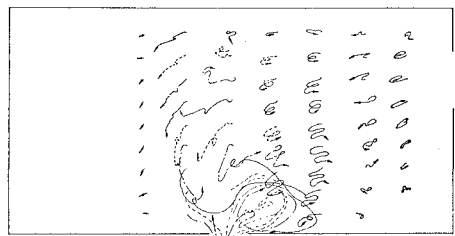


図-8 湾内流動図 (Case 5)

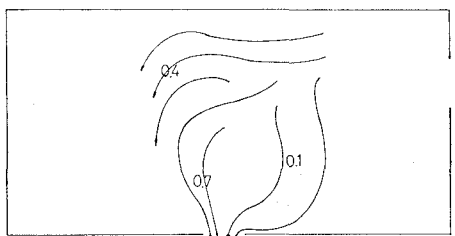
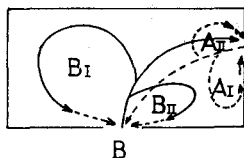
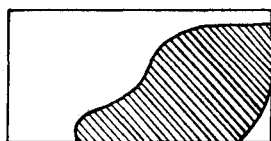


図-13 湾内恒流パターン (Case 5) 単位 cm/sec



図—14 潮流模式図

図—15 浮子流出領域
(平均大潮)

Case 4 のいずれの実験においても、図—15 の斜線領域に限られており、この領域は湾内全体の約 40% にあたる。この領域内の浮子の約半数が湾外へ流出しており、浮子の流出は浮子を含む近傍の水塊の流出を表わすと考えられることより、単純に算出すれば 1 周期で約 10% の湾内水が外海へ流出したことになる。しかし実際には、一度湾外へ流出した海水のいくらかは再び湾内へ流入しており、この数値をそのまま海水の交換と考えることはできない。

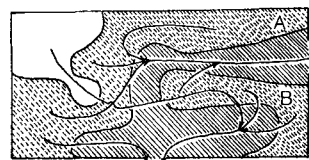
図—15 の斜線領域について考えてみると、この領域は図—14 からわかるように潮流の主流部付近であり、潮流速が湾の他の場所に比べて大きい所である。これは、水塊を湾外へ流出させる直接の原因は主流部の強い潮流であることを示している。このことと前節 (1) で述べたように水塊の移動が恒流に支配されていることを合わせて考えれば、水塊は図—15 の無斜線部から恒流によって斜線部に移動し、その後斜線部の強い潮流によって湾外へ流出していると考えられるであろう。

次にこれらの流出浮子が、どの程度の時間でどのような流出経路を経て流出したかを考察してみる。今回の実験で原型に最も近いと思われる Case 3 について 2 周期間のデータを使って水塊の流出時間を求めた。湾内を図—16 のように分割して、各メッシュ内の水塊の移動が平均浮子移動によって表わされるとする。これよりメッシュ内の水塊が 2 周期後にどのメッシュに移動するかを求める。ただしすべてが 2 周期後の次のメッシュの中心に行くとは限らないが、次のメッシュの中心に移動するものと仮定し、この新しいメッシュの 2 周期間の移動と連続させる。この操作を最初のメッシュ内の水塊が湾外へ流出するまで繰り返し、流出に要する周期数を求める。その結果が図—16 の数字で示すものである。この図を基本として図—15 及び湾内流動図や潮流図などより求めた流出時間の分布と流出経路の概略を示すのが図—17 である。

これらの図からもわかるように、湾内水塊の流出時間には湾口からの距離の影響が大きく、湾口から近い場所ほど流出が早い。しかし湾口に近いにもかかわらず流出がそれほど早くない場所も見られるが、図—17 の流出時間の短い斜線部についてみると、この部分には湾口に向う恒流があり (図—11 参照)、その経路にも恒流の影

8	12	4	4	6	7	8	4
12	4	6	2	4	4	2	2
6	10	4	2	4	8	4	4
4	6	6	4	2	2	2	2
4	2	2	4	6	2	2	2

図—16 浮子流出時間 単位: 周期



流出時間小 (2 周期程度)
 流出時間中 (4~8 周期程度)
 流出時間大 (10 周期以上)

図—17 浮子流出時間と流出経路

響と考えられる動きがある。このようなことより、流出時間には湾口からの距離以外に恒流の影響があると考えられる。

(3) 表面と下層の比較および粗度の影響

湾内の恒流パターンについて図—9 と図—10 あるいは図—11 と図—12 を比較すると、いずれの場合でも表面では下層よりも環流の影響が少なく、しかも湾口 B から湾口 A への恒流のはっきりと現われている。しかし恒流全体の形態には、表面と下層の変化による大きな差異はないと考えられる。一方粗度を与えることによって表面、下層いずれでも環流が弱まる傾向がみられた。

ところで、このような潮汐残差流なる恒流の発生は、潮流の非線形性に起因するもので、またこれによって生じる環流は潮汐残差環流と呼ばれている。樋口らの研究^{2),3)}によれば、このような潮汐残差流の強さは非線形項に対する底の摩擦項の比である鉛直レイノルズ数によっており、その環流は潮流の非線形項に関係しているといわれている。これらのことを考慮して実験結果を考察すると、図—9 の Case 1 から図—11 の Case 3 また図—10 の Case 2 から図—12 の Case 4 に見られるように、粗度をつけることによって恒流の強さが減少することはその強さが鉛直レイノルズ数に関与していると想像される。また表層と下層での流れの違いは、表層に比べ下層では境界層の発達等により後流渦域が大きくなり、恒流の発生を促進させているのではないかと考える。しかしこれ以外の要素もその違いに関与していることと想像される。

その他、図—5 及び図—7 に見られるように下層付近の湾内流動状況は、粗度の影響を受けて非常に乱れが大きく、流況は複雑である。

5. 数値計算

基礎方程式は、Navier-Stokes の運動方程式を海底か

ら海面まで積分し流量成分で書き直した式を基に、模型実験と同様のメッシュに切り水深も同じとし、時間に関して中心差分をとって数値計算を行った。ただし差分式の上では、両湾口での流入に対しては連続式を満足させながら適当に流量配分を行うように潮位を工夫した。

その結果は、模型実験と同様両湾口を結ぶ線上に発生する主流が卓越し、その大きさもほぼ同程度のものではあった。しかしながら湾口の両側には模型実験でみられた程の環流は発生せず、模型実験に比べて流況が概略的となった。

次に模型実験と同様この数値解を使って浮子の追跡を試みた。計算方法⁴⁾は、図-18の各格子点に落した浮子が次の式によってメッシュ内を移動すると考える。

$$x_k^{n+1} = x_k^n + u_k \cdot \Delta t, \quad y_k^{n+1} = y_k^n + v_k \cdot \Delta t$$

ここに、 u_k, v_k は追跡浮子のあるメッシュの原点から (h, l) の位置での流速である。それぞれの流速は、図-18に示すような格子点の流速を使って次のように原点5について Taylor 級数展開によって求める。

$$\begin{aligned} u_k \approx & u_5 + \frac{h}{2DX}(u_6 - u_4) + \frac{l}{2DY}(u_2 - u_8) \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{h}{DX} \right)^2 (u_6 + u_4 - 2u_5) \right. \\ & + \left(\frac{l}{DY} \right)^2 (u_2 + u_8 - 2u_5) \\ & \left. + 2 \left(\frac{h}{DX} \right) \left(\frac{l}{DY} \right) (u_3 - u_1 + u_7 - u_9) \right] \end{aligned}$$

このようにして浮子の追跡を行ってみると、模型実験で2周期程度で流出した部分でも数値計算では湾口近接部を除いては数周期経ても流出しない。そこで各周期ごとにその浮子の位置を見てみると、ほとんどその最初の格子点にもどってきている。その一例として湾口付近の結果を図-19に示す。これは本来の潮流の性質を表現している。すなわち模型実験にみられるような潮汐残差流なる恒流がこの数値計算にはほとんど存在していないといえる。これは恐らく一次の流速の再現性が十分でないで、二次のオーダーのものである潮汐残差流を期待するのは非常に難しい。したがって今回の数値計算に関して、基礎式での拡散項などの取扱いについて十分に検討すべきであろう。

6. あとがき

本研究は、簡略模型によるラグランジュ的方法を中心に海水交流機構を考察した。初めにも述べたように大阪湾のシミュレーションを目的とした潮流解析ではないが、実験結果から金子ら⁵⁾の実験を参考に原型の再現性

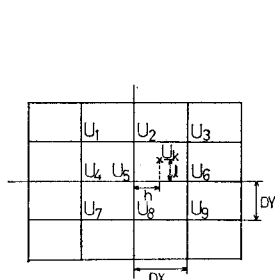


図-18 u_k の2次内挿

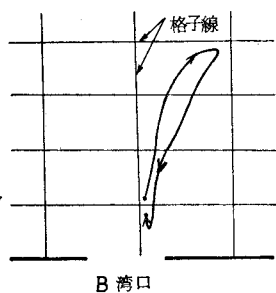


図-19 浮子の流跡(2周期目)

についても考察してみる。

湾内では模型の潮流速の方がやや大きく現われているが、湾内流況に関して湾奥部を除いては比較的よく再現している。しかし恒流に関しては、原型にみられるような恒流が本実験でもみられるが、それ以上に実験ではその流れによる強い環流が発生している。この原因は湾口部の形態と小型模型に影響していると思われる。一方粗度に関しては、相似律から原型での粗度係数を求めると $n \approx 0.007$ となり、原型での海底粗度が一般にいわれている $n \approx 0.025$ 程度とするならば、少し小さい。

原型の再現性についてはこの程度であるが、本研究で用いたラグランジュ的方法による解析結果は、たとえば図-4から図-8の湾内流動図のようにかなり鮮明に湾内の流況を把握することができた。確かにその整理にあたっては繁雑さはあるが、湾内の海水交換状況や海水交流に重要な潮汐残差流なる恒流の流況等の把握にも有益であった。

今後数値計算の検討と潮流解析に一番重要である地形の影響、すなわち湾口部の形態を十分配慮の海水交流機構の解明を進めたいと考えている。

参考文献

- 樋口明生・柳 哲雄・柏井 誠：三河湾における潮流による拡散の水理模型実験について、第21回海岸工学講演会論文集，pp. 361-366, 1974.
- 樋口明生・柳 哲雄：潮汐残差流の基礎的研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 213-218, 1975.
- 樋口明生・柳 哲雄：潮汐残差流の基礎的研究(続)，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 563-566, 1977.
- 和田 明：数値モデルによる斜面上での有限振幅波の挙動，第18回水理講演会論文集，pp. 73-78, 1974.
- 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，第3号，1973.