

閉塞された水域の海水交換に関する検討

角 湯 正 剛*・ 加 藤 正 進*・ 和 田 明**

1. はじめに

閉塞された水域（たとえば湾口部の狭い湾等）における長期間の水質問題を考える場合、湾口部における海水交換現象は、重要な役割を果たす。

海水交換についてのこれまでの研究では、湾口部において一潮汐間に湾口部より流出（あるいは流入）する総流量に対し、外海水（内湾水）と内湾水（外海水）が交換する割合を海水交換率と定義し、この値を現地海域での塩分濃度の観測結果より求めている。この値は、湾口部において1潮汐間に外海水と内湾水とが置換する割合であり、この海水交換率が求められても湾内のある部分に位置した水塊が外海水と置換するまでに要する時間を求めることはできない。閉塞された水域における海水交換現象を把握するためには、湾口部における交換率とともに、湾奥の海水が外海水と交換するまでに要する時間を検討する必要がある。

本文は、この問題を検討するために、海水交換率を算定するための新しい解析手法を提案するものである。海水交換現象において重要な役割を果たすものは、海域の流動と乱れであろう。そこで、この海域の流動と乱れを数理モデルで再現し、実際の海域で生起しているであろう現象を再現し、海域の各点における海水交換率を求め、この結果より、湾奥の海水が外海水と交換するまでに要する時間を求めようとするものである。

2. 海水交換率の定義

閉塞された湾における海水交換率に関するこれまでの研究では、Parker et al.¹⁾ や柏井²⁾は、湾口部における物質濃度の観測値を用いて、1潮汐間の海水交換率を次式で定義している。

$$r_E = \frac{C_F - C_E}{C_0 - C_E} \dots\dots\dots (1)$$

$$r_F = \frac{C_F - C_E}{C_F - C_B} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 r_E (r_F): 上げ潮（下げ潮）による流入量（流出

量）のうち始めて湾内（湾外）へ流入（流出）する外海水（湾内水）の占める割合、 C_E (C_F): 下げ潮（上げ潮）で流出（流入）する水塊の平均濃度、 C_0 : 外海水の濃度、 C_B : 湾内水の濃度。

中村・富樫³⁾は、潮汐の繰り返しを考慮して、外海水の内側への交換率および湾内水の外側への交換率を定義している。これらの交換率は、あくまでも湾口部における平均交換率を示しており、これらの交換率が求められても湾奥の水塊が外海水と交換するまでに要する時間を求めることは出来ない。

本文では、海水交換率を以下のように定義する。潮汐往復流の存在する湾を考え、海域には残差流がなく、乱れのない平均的な潮流のみが存在すると仮定すると、高潮時に湾口部に近い湾内のある点（ST-A とする）に投入された粒子群は、下げ潮で一旦外海へ流出し、引き続く上げ潮で湾内へ流入し、高潮時には ST-A に戻る。しかし、実際の海域では、残差流や乱れ成分が存在しているために、ST-A に投入された粒子群は、1潮汐後には全ては ST-A には戻らずに分散し、そのうちの幾つかは湾外に取り残されるものが存在すると考えられる。この取り残されたものの代償として、外海に存在したものが新たに湾内に入ってくると考えられる。本文では、この湾外に取り残されたものの全投入量に対する割合を ST-A における海水交換率と定義する。粒子投入点が湾外の場合は、湾内に取り残されたものの全投入量に対する割合が海水交換率である。

いま、湾内の数多くの投入点での1潮汐後の海水交換率と、投入された個々の粒子の位置が求められると、2潮汐経過後の海水交換率は、ある点に投入された粒子が、1潮汐後に分散した個々の粒子の位置での海水交換率の平均値で示される。これを繰り返せば n 周期後の海水交換率を求めることができる。すなわち、投入点 (x_0, y_0) の n 周期後の交換率 $r_n(x_0, y_0)$ は、次式で表わされる。

$$r_n(x_0, y_0) = \frac{\iint r_{n-1}(x, y) \cdot f(x, y | x_0, y_0) dx dy}{\iint f(x, y | x_0, y_0) dx dy} \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工修（財）電力中央研究所土木技術研究所環境水理部海洋環境研究室

** 正会員 工博（財）電力中央研究所土木技術研究所環境水理部長

ここに, $r_{n-1}(x, y)$: $(n-1)$ 周期での交換率, $f(x, y|x_0, y_0)$: (x_0, y_0) に投入された粒子群の1潮汐周期後の位置の確率密度関数.

湾内の数多くの投入点に投入された粒子群の位置を1潮汐周期追跡すれば, 式(3)を用いて湾内の各投入点の n 周期後の海水交換率が求められることになる.

3. 数値モデル

(1) 数値モデルの概要

潮汐往復流の存在する閉塞された湾における流動は, これまで多くの地点での流動の観測結果より判断すれば半日あるいは1日周期で振動する往復流成分とそれに重畳された乱れ成分より構成されと考えられる. それ故, 本文では, この規則的な往復流成分と不規則な乱れ成分を夫々独立に再現し, これらの合成されたものが実際の海域で生起しているであろう流れと考える.

規則的な往復流成分は, 流体力学の運動ならびに連統方程式を用いた数値モデルにより再現することができる. 次に, 不規則な乱れ成分については, 乱数を用いて所定の拡散係数を有する乱れを再現する方法を筆者らは既に展開してきているのでこの方法を用いることとした⁴⁾.

この方法は, 乱れが一次 Markov 過程に従うと仮定したモデルであり, この手法を用いるためには, 乱れの自己相関曲線は, 次式で示すように単調に指数関数的に減少し, 相関係数が零に漸近する形状となる必要がある.

$$R(\tau) = \rho^{\tau} \dots \dots \dots (4)$$

(ρ : 定数, $0 < \rho < 1$)

筆者らは, これまで瀬戸内海の数多くの地点で実施された流動連続観測記録より自己相関曲線を求めている. その結果, 観測された流速変動より周潮流成分や半日以上周期を有する長周期成分を除去した流速変動より求められた自己相関曲線は, 式(4)とほぼ同様の形状となり, 前述の仮定は, ある時間スケール以下の高周波成分の乱れについては成り立つものと考えられる.

周期的な往復流成分と乱れ成分を再現することができれば, 実際の海域で生じているであろう拡散現象を再現することができる. 閉塞された湾における海水交換率を求めるために以下の手順でシミュレーションを実施する.

- 1) 数値モデルを用いて周期的な往復流成分をシミュレートする.
- 2) 湾内(あるいは湾外)のある点に数多くの粒子を投入し, 個々の粒子は周期的な往復流成分と夫々の粒子に与えられた乱れ成分により移動するとして, 個々の粒子の位置を1周期間追跡する. 粒子の投入時期は, 投入点が湾内の場合は高潮時, 湾外の場合は低潮時とする.

3) 粒子投入時より1周期経過した時点で分散した粒子の位置より湾内外に存在する粒子の個数を算定し, 投入点が湾内の場合は湾外に, 湾外の場合は湾内に存在する粒子数の全投入量に対する比を求め, この値をその投入点での海水交換率とする.

4) 1周期後の海水交換率と粒子の位置より式(3)を用いて2周期後の海水交換率が求まり, この繰り返して各投入点での n 周期後の交換率が求まる.

(2) 計算条件

計算対象領域として, 図-1に示すような幅1.2 km,

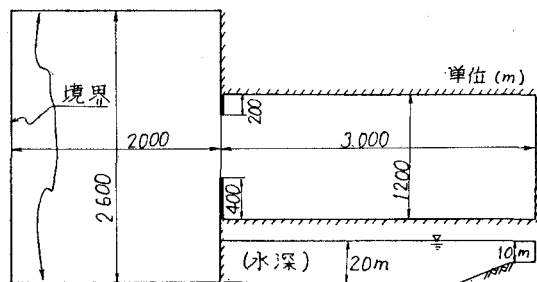


図-1 計算対象モデル海域

奥行3 kmの長方形の湾を考え, 湾口部は0.6 kmとし, 湾外は沿岸方向2.6 km, 沖合方向2 kmの海域とし, これらの海域を縦横100 m間隔の格子群に分割した. 外海部周辺の境界で潮位条件を設定し, 周期的な往復流成分をシミュレートすることとした.

海水交換率を求めるための粒子の分散のシミュレーションは, 湾内外の200 m間隔の格子上にそれぞれ50個の粒子を配置し, これらの粒子に所定の拡散係数を有する乱れを与え, 粒子の位置を時々刻々計算することとした.

各粒子の計算領域の境界での境界条件は, 海岸線に到着した粒子は一たんその点に留め, 海域方向への乱れ成分が生じた段階で海域へ飛び出すものとした.

計算ケースは, 表-1に示す3ケースとした. 潮汐流は, ケース1, 2は同じものを用い, ケース3の場合はその1/2の潮流とした.

表-1 数値計算の条件

ケース番号	拡散係数 (cm ² /s)	θ (s)	σ_u (cm/s)
1	10^4	10^3	3.16
2	2×10^3	10^3	1.41
3	10^4	10^3	3.16

表中, θ : integral time scale = $\int_0^\infty R(\tau) d\tau$

σ_u^2 : 乱れの変動速度の自乗平均

4. 数値シミュレーション結果とその検討

(1) 潮汐流のシミュレーション結果

沖合および沿岸部の境界で12時間周期の潮位条件を

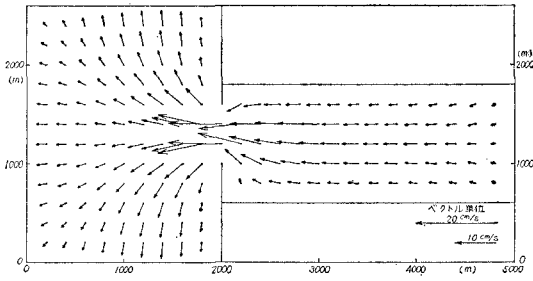


図-2 下げ潮最強流速時の流動のシミュレーション結果
(ケース 1, 3)

設定し、潮流流を計算した。図-2 にケース 1, 2 で用いる下げ潮最強流速時の潮流のシミュレーション結果を示す。ケース 3 では、この流速の 1/2 とした。湾口部の流速は、中央部で約 14 cm/s である。上げ潮最強流速は、図-2 と流向が逆向きで流速は同じ流れとなり、残差流はほとんど存在しない。湾口部を流出入する流量は、平均潮位時に最大で、ケース 1, 2 では 1310 m³/s であり、ケース 3 では 655 m³/s であり、高、低潮時に 0 となる余弦関数となる。

(2) 海水交換率のシミュレーション結果

図-2 で示すような潮流流を用い、湾内外の投入点に配置した粒子に所定の拡散係数を有する乱れを与え、各粒子の位置を 1 潮汐間に亘り追跡し、交換率を求めた。各ケースの 1 周期後の交換率のシミュレーション結果を図-3 に示す。ケース 1 は、粒子投入点を湾内外としたが、ケース 2, 3 では、湾内のみとした、各ケースとも 1 周期後の交換率は、湾口部で大きく、それから離れるに従い小さくなる。粒子に与えた乱れの拡散係数の小さいケース 2 では、湾口部での交換率は大きい、湾奥方向への減少傾向が顕著であるのに対し、潮流流は同じで拡散係数の大なるケース 1 では、ケース 2 と比較すると、湾口部では交換率は小さい、湾奥方向へ離れるとケース 2 に比べて大きくなる。拡散係数はケース 1 と同じで、潮流流が 1/2 であるケース 3 では、湾口部付近の交換率は、ケース 1 と同程度であるが、湾口より少し離れ

るとかなり小さくなる。既往の研究と同様の上げ潮(下げ潮)で湾口部より流入(流出)する総流量に対する平均交換率を求めると、ケース 1 では、湾外で 0.27、湾内で 0.24、ケース 2 では 0.17、ケース 3 では 0.31 であり、これらの値は、これまで各地で観測されてきた交換率 0.1~0.3 と同程度の値を示す。湾口部での平均交換率から判断すると、この値は、潮流流と乱れの拡散係数の影響を受け、潮流流が同じなら乱れが大なる場合が平均交換率としては大きくなる。

2 周期目以後の交換率は、式 (3) を用いて求めたが、この式の適用性を検討するために、粒子の分散のシミュレーションを続行した場合の結果との比較を行った。ケース 1 の湾内の投入点について行った両者の比較を図-4 に示す。両者の結果は、良好な一致を示しており、式

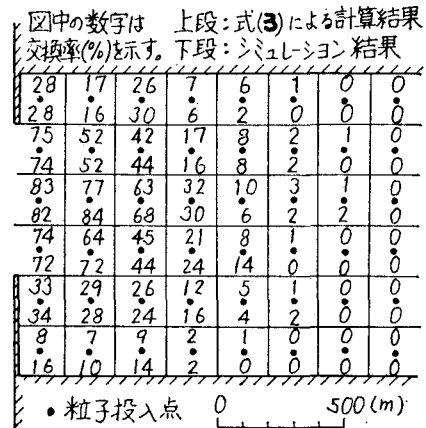


図-4 数値シミュレーションと式 (3) を用いた計算
とによる 2 周期後の海水交換率の比較

(3) を用いて計算した交換率は、粒子の分散のシミュレーションを続行した場合と等しいと考えられる。

式 (3) を適用して、湾内に位置する投入点における交換率を順次計算した。湾口中央部を通る湾軸線上で、湾口より 100, 500, 1500 m 離れた位置での交換率が、潮汐周期の経過に伴い変化する様子を図-5 に示す。拡散

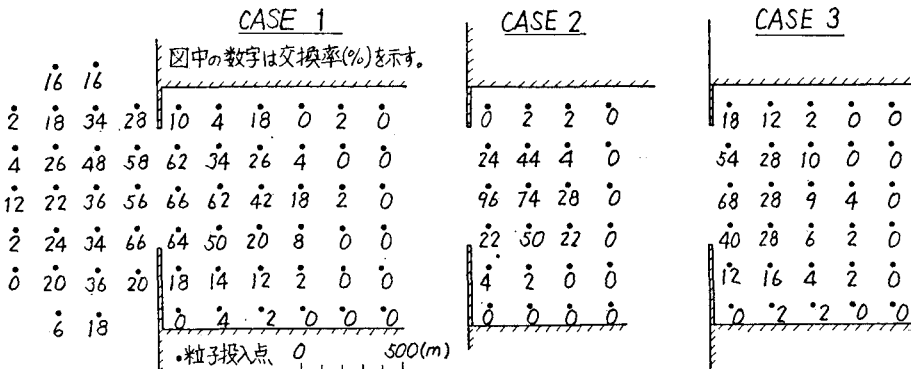


図-3 1 周期後の海水交換率のシミュレーション結果

係数の小さいケース 2 では、湾口部に近い投入点での交換率は、時間の経過に伴い急激に増加するが、湾中央部の投入点での増加傾向は小さい。拡散係数の大なるケース 1, 3 では、湾口部では、交換率の値は異なる

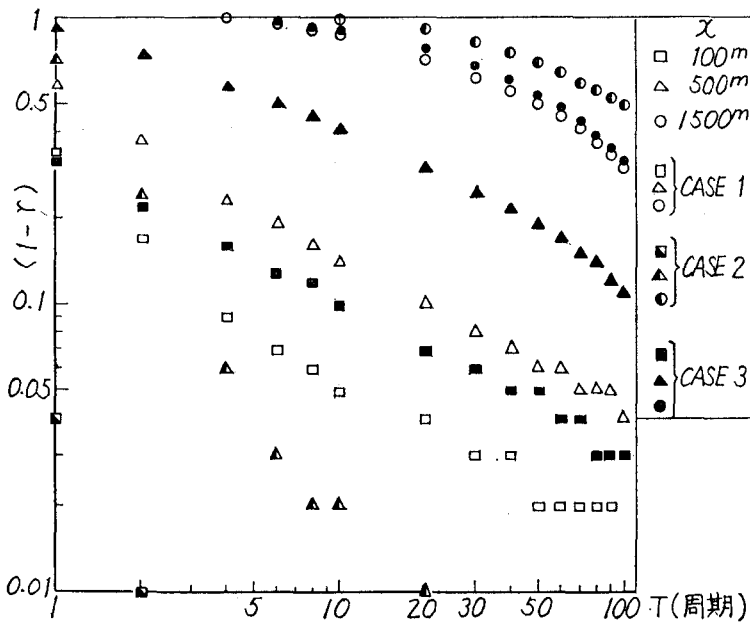


図-5 潮汐周期の経過に伴う海水交換率の変化

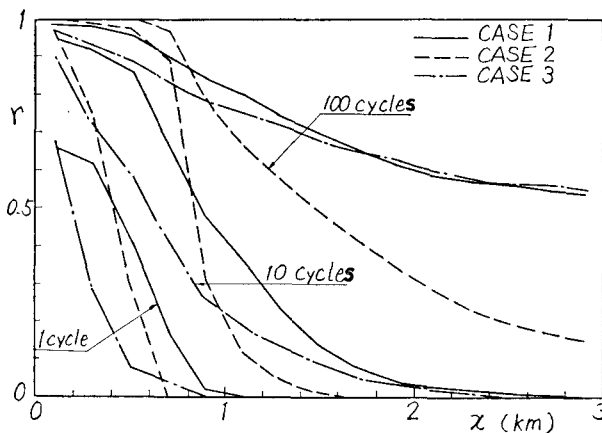
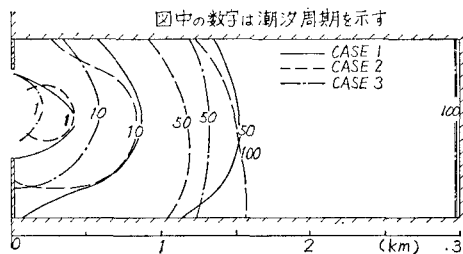


図-6 湾口中央を通る湾軸方向の海水交換率の分布

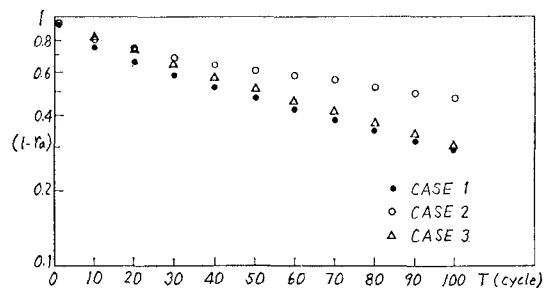
が、その増加傾向はほぼ同じであり、湾中央部では潮汐周期が大きくなると両者の交換率はほぼ同じであり、ケース2よりかなり大きな値となる。図-6は、湾口中央部を通る湾軸方向の交換率の分布を示している。ケース2の湾軸方向の交換率は、周期が大きくなっても湾奥方向

図-7 海水交換率 $r=0.5$ の等交換率線

への減少勾配は大きく、湾奥部では100周期後でも0.15と小さいが、ケース1, 3では、潮流の大きさが異なるため両者に差があるが、100周期後では両者はほぼ同程度の値となり、交換率の減少勾配は緩やかで、湾奥部でも交換率は0.5となる。潮汐周期の小さい間は、交換率は潮流の影響が大きい、長期間の交換率には、乱れの大きさの影響の大きいことが認められる。図-7は、交換率0.5の等交換率線が潮汐周期の経過に伴って変化する様子を示している。ケース1が各周期とも最も大きな範囲となり、ケース2は、10周期程度まではケース1と同じ範囲となるがそれ以後は小さくなり、ケース3は、50周期程度ま

ではケース1よりかなり小さな範囲となるが、それ以後はほぼ同じ範囲となり、交換率は、時間スケールの短い間は潮流が、大きくなると乱れの影響が大なることが示される。

図-8は、湾全体の平均の交換率が潮汐周期の経過に伴い変化する様子を示している。湾全体の平均交換率は、潮汐周期が大きくなるとケース1, 3はほぼ同じ値となるが、ケース2はこれらよりかなり小さい値となり、長時間の時間スケールの交換問題に対しては、乱れの影響の大なることが認められる。また、対象とした空間スケールの湾では、流動の乱れの拡散係数が $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ では約50周期、拡散係数が $2 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$ では約100周期で湾全体の海水の1/2が、外海水と交換すると考えられる。

図-8 潮汐周期の経過に伴う湾全体の平均海水交換率 (r_a) の変化

5. 結 論

閉塞された水域における海水交換率を求めるために、

実際の海域で生じているであろう粒子の分散現象を数理モデルで再現し、時間の経過に伴う海域の各点における海水交換率を求める手法を提案した。その結果、海水交換率は、時間スケールが短い間は、潮汐流の影響が顕著であるが、大きくなると潮汐流よりはむしろ流動の乱れの影響が支配的となることが認められた。

参 考 文 献

- 1) Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, SA 2, pp. 305~323, 1972.
- 2) 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, 1977 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 96~97, 1977.
- 3) 中村武弘・富樫宏由: 内湾の潮汐による海水交換について, 第 24 回水理講演会論文集, pp. 457~464, 1980.
- 4) 和田 明・角湯正剛: 瀬戸内海における水粒子運動の数値シミュレーション, 第 20 回水理講演会論文集, pp. 191~196, 1976.

1) Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson: Tidal
