

水理模型実験による海水交換率の算定

堀 江 毅*・村 上 和 男*・亀 山 豊**・入尾野幸雄**

1. はじめに

東京湾、大阪湾のように比較的湾口部が狭い閉塞性の内湾では、近年水質の悪化が問題となっている。これは沿岸地域の人口増加、産業の発展等による背後地からの廃水の流入量が多いということの他に、湾内水と外海水との交換が悪いために希釈効果や自浄能力が低下すること、その一因であると考えられる。このため、背後地からの汚染物質の排水規制を強化すると同時に、湾口部での海水交換機構を明らかにし、またこれを促進する手法を確立する必要がある。

従来、海水交換に関して速水¹⁾の明石海峡における研究、速水・宇野木²⁾の瀬戸内海における研究、Parker³⁾の Golden Gate での研究、柏井⁴⁾の研究、及びその他などがある。しかしながら、これらの研究における海水交換の意味するところは必ずしも同一ではない。そこで本研究においては、これらの研究における海水交換の物理的な意味（どの水塊とどの水塊との交換を論じているのか）を考察すると共に、東京湾の水理模型実験によって得られたデータから同海域の海水交換率を算定した。更に、模型実験より得られた濃度分布から、隣接する断面での交換率を算定し、その値を用いて簡単なボックスモデルにより東京湾の水質予測を行った。

2. 交換率に関する従来の研究

速水¹⁾が明石海峡で行った海水交換についての研究は、この種の問題に対する先駆的なものである。この方法は、塩素量の濃度分布を誤差関数で近似することにより、拡散係数を求め、Arons and Stommel⁵⁾の混合距離の概念を用いて式 (1) より交換率を算定する方法である。

$$K_x = \alpha \overline{UL} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K_x : 拡散係数、 α : 交換率、 U : 潮流の平均流速、 L : 潮汐によって一方向に流れる距離を示す。

速水・宇野木²⁾は瀬戸内海を1次元のブロックに分割して、海域における海水の交流と物質の移動について解析している。この方法は、拡散係数、淡水流入量、海水

流入量をパラメータにして、実際の塩分分布に合わせるもので、拡散係数として $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値を得ている。

これに対して Parker³⁾は、交換率の測定断面で、流出時と流入時の流量及び塩分濃度を知ることにより、交換率を求めている。この方法は流出時に湾外に出た水塊が、次の流入時に外海水とどの程度交換して湾内に戻るかを求めるものであって、式 (2) により求められる。

$$r_E = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - \bar{C}_E} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r_E : Parker らの方法による交換率、 $\bar{C}_F$: 流入水塊の平均濃度、 $\bar{C}_E$: 流出水塊の平均濃度、 C_0 : 外海水の濃度を表わす。

柏井⁴⁾は、Parker らの方法を拡張して次の三つの交換率を定義した。ひとつは Parker の方法による交換率 (r_E , 式 (2)) であり、他のひとつは流出水塊のうち、始めて湾外に流出する湾内水の占める割合 (r_F , 式 (3)) である。更に、外海水と湾内水とが直接交換しているとした交換率 r_G を定義した。この交換率は式 (4) によって表わされる。

$$r_F = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{\bar{C}_F - C_1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$r_G = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - C_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 C_1 は湾内水濃度を表わす。

このように、海水交換率あるいは海水交流について多くの研究が行なわれているが、研究者によってそれらの定義が必ずしも同一でない。

3. 実験方法

図-1 に東京湾水理模型の概観図を示す。模型は、縦 46.5 m、横 29 m の大きさであり、縮尺は水平縮尺 1/2 000、鉛直縮尺 1/100 の 20 対 1 の歪模型である。外海側の房総沖約 8 km 相当の地点で、気圧式起潮装置による潮汐振動を与え、潮流現象を再現している。湾内水と外海水を識別するた

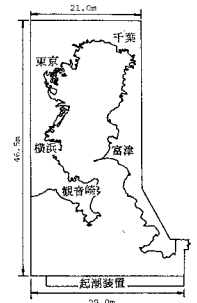


図-1 東京湾模型の概要

* 正会員 運輸省港湾技術研究所

** 運輸省港湾技術研究所

めに、東京湾口の観音崎と富津を結ぶ断面を遮蔽板により分離し、湾内側に螢光染料（ウラン）を投入して、湾内水が約 5 ppm の一様濃度になるようにした。各河川からもこの濃度で年平均流量に相当する流量を投入した。

実験は、起潮装置を運転すると同時に、湾口部の遮蔽板を撤去して行った。試料採水は、図-2 の如く湾口部

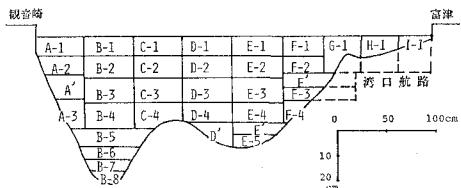


図-2 測定断面図

を約 35 の区画に分割した各々の断面で、実験開始後 20 ~ 22 潮汐目の 2 潮汐間にわたって、約 15 cc ずつの採水を 16 秒間隔で行った。また模型面全域約 70 点で、10 潮汐毎の採水も同時に行った。採水方法は、後者については真空ポンプを用いた自動多点同時採水器によったが、前者についてはサイホンの原理を用いて連続的に放流させ、それを採水する方法をとった。

湾口の濃度測定と同じ断面で、超音波流速計（電子工業社製）による流速測定を行った。尚、湾全域の流況については、以前に行った潮流の実験結果⁶⁾を利用した。

実験ケースは、Case 1: 現況地形大潮時、Case 2: 将来地形、湾口航路の掘削大潮時、Case 3: 現況地形小潮時の 3 ケースである。

4. 実験結果

図-3 に超音波流速計による代表的な 4 点の流速測定結果を示す。図-4 は、各々の断面での 1 潮汐間にわたる流出量、流入量を示したものである。これらの図から、東京湾湾口部では観音崎側で流出が卓越し、富津側で流入が卓越しているのが明瞭にわかる。このように断面によって流出量と流入量が大きく異なるのは、観音崎

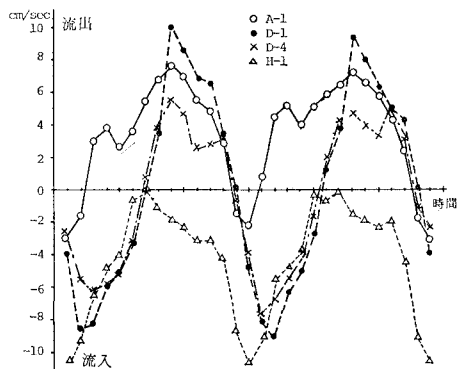


図-3 流速の経時変化図 (+ 流出, - 流入)

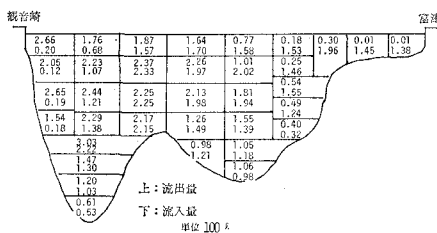


図-4 一潮汐間の流入流出 (模型値)

及び富津岬による反流域の形成によるもので、地形性の潮汐差流の影響であると考えられる。

図-5 に、測定点 D-4 (図-2 参照) の濃度の経時変化図を示す。実験は 2 回行っている。同断面の流速値も同図に示す。この図から、下げ潮時に濃度が上昇し、上

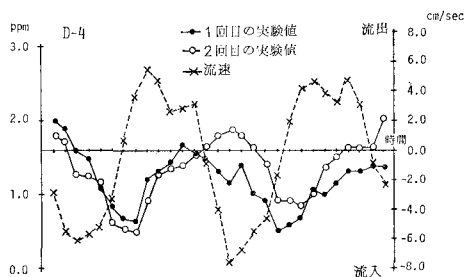


図-5 濃度の経時変化図

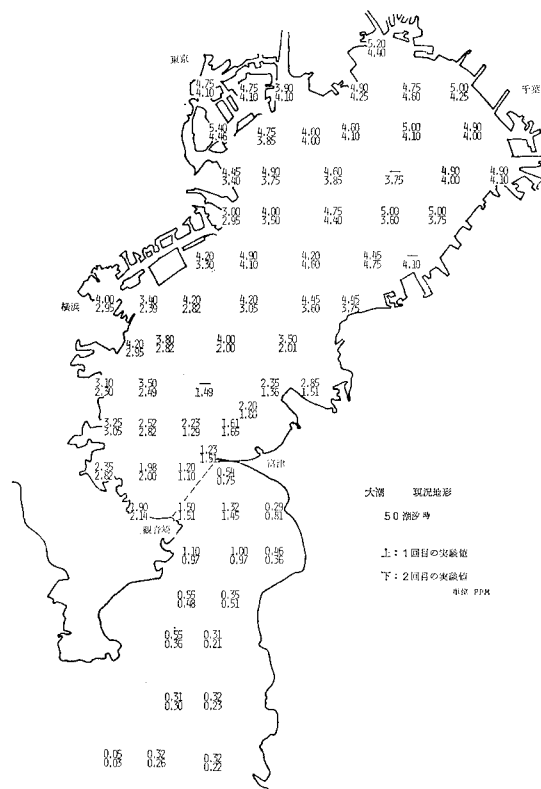


図-6 濃度の平面分布

げ潮時に降下する様子がよくわかる。

図-6 に示すのが、湾内の濃度の平面分布であり、実験開始後 50 潮汐時（干潮時）の濃度分布である。海水交換により、湾内の濃度は減少し、湾外の濃度は増加している。この傾向は、湾外からの流入量の卓越している千葉県側の海域で著しい。図-6 に示した実験結果は、現況地形、大潮時のケースである。

5. 海水交換率の算定

(1) 速水らの方法による算定

図-6 に示した濃度の平面分布を速水らの方法にならって、横軸に測定断面からの距離、縦軸に濃度の単位で無次元表示したものが図-7 である。これを式 (5) の誤

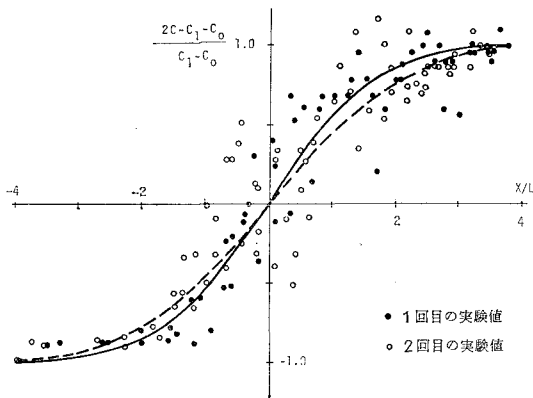


図-7 濃度分布

差関数で近似したものが、図中の実線（1 回目）及び破線（2 回目）で示されている。

$$\frac{2C - C_1 - C_0}{C_1 - C_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x/L}{2\sqrt{E_x t/L}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C ：濃度、 C_1 ：湾内濃度、 C_0 ：外海濃度、 x ：湾口断面からの距離、 L ：潮汐によって一方向に流れる距離、 E_x ：拡散係数、 t ：混合開始後の経過時間を表わす。

速水らはここで、 t を潮流の周期の半分として解析しているが、この方法は柏井⁷⁾が指摘しているように、潮汐の半周期毎にステップ状の濃度分布が与えられることになり、実際の現象を表していない。従って t としては混合開始後の時間をとる必要があり、ここでは 50 潮汐とした。

表-1 速水ら¹⁾のモデルによる交換率

		L	U	E_x	α
Case 1. 1.	大潮	4.5m	4.0cm/s	80cm ² /s	4.4 %
	2. 大潮	4.5m	4.0cm/s	130cm ² /s	7.2 %
Case 2. 1.	大潮	4.5m	4.0cm/s	130cm ² /s	7.2 %
	2. 大潮	4.5m	4.0cm/s	60cm ² /s	3.3 %
Case 3. 1.	小潮	2.0m	1.8cm/s	80cm ² /s	22 %
	2. 小潮	2.0m	1.8cm/s	40cm ² /s	11 %

表-1 に、このようにして求めた交換率及び式 (5) に現われる諸量を示す。交換率は大潮時で 3~7% 前後であるのに対し、小潮時は 10~20% とかなり大きな値を示した。これは、温度差、密度差等による対流現象が模型内に存在すると、それが小潮の場合、特に誤差として顕著になるものと考えられる。

(2) Parker らの方法による算定

図-5 に示す流速分布及び濃度分布から、湾口断面全体での流出水塊の平均濃度、流入水塊の平均濃度を求め、式 (2) に代入して交換率を求めたのが表-2 である。

表-2 Parker ら³⁾、柏井⁴⁾のモデルによる交換率
単位 %

		C_1	C_0	$\bar{C}_E$	$\bar{C}_F$	r_E	r_F	r_G
Case1 1.	1.	5.0	0.0	1.49	1.44	2.9	1.2	0.9
	2.	4.4	0.0	1.70	1.54	9.7	5.8	3.8
Case2 2.	1.	4.9	0.0	1.26	1.14	9.5	3.2	2.5
	2.	4.8	0.0	1.17	1.09	6.8	2.2	1.7
Case3 1.	1.	4.1	0.0	1.90	1.85	2.9	2.3	1.3
	2.	4.8	0.0	1.58	1.42	11.1	4.6	3.3

C_1 湾内濃度 C_0 外海濃度 $\bar{C}_E$ 流出濃度 $\bar{C}_F$ 流入濃度

$$r_E = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - \bar{C}_E}, r_F = \frac{\bar{C}_E - \bar{C}_F}{C_1 - \bar{C}_F}, r_G = \frac{\bar{C}_E - \bar{C}_F}{C_1 - C_0}$$

交換率は、3~10% 前後の値が得られた。この値は、Parker らの方法を用いて東京湾で行った現地観測⁸⁾の結果 (8~10%) とほぼ同じオーダーとなっている。実験の繰返し性は余り良くない。これは、流速と濃度が同時測定でないこと、及び密度流的な流れが発生しているためであると考えられる。

柏井の示す r_E, r_G についても同様に表-2 に示す。交換率 r_G は、Parker らのモデルの交換率の 1/3~1/4 とかなり小さい。汚染した湾内水と清浄な外海水の交換による自浄作用を考える場合、湾内水と外海水の交換率を意味する r_G が最も適切であると考えられるが、湾内水の水質をどう定義するかに、若干の問題が残る。ここでは、実験開始前の湾内の平均濃度を湾内水濃度としている。

(3) ボックスモデルによる交換率の算定

図-8 に示すように、東京湾を 9 つのブロックに分割し、一次元の水路と考える。潮汐によって上潮時にボックス i に入った水塊は、下潮時に α だけ交換して元のボックスに戻るものと仮定すると、ボックス i の物質量の増減は式 (6) で表わすことができる。

$$\begin{aligned} & V_i(C_i^{n+1} - C_i^n) \\ &= Q_i C_{i-1}^n - (1 - \alpha_i) Q_i C_{i-1}^n - \alpha_i Q_i C_i^n - Q_{i+1} C_i^n \\ &+ (1 - \alpha_{i+1}) Q_{i+1} C_i^n + \alpha_i Q_{i+1} C_{i+1}^n - q_i C_i^n \\ &+ q_{i+1} C_{i+1}^n + r_i C_{r_i} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 V ：容積、 C ：濃度、 Q ：交流量、 α ：交換率、 q ：恒流量、 r_i ：流入量を示す。交流量としては、湾口断面で測定した流量を、そのボックスから湾奥までの面積

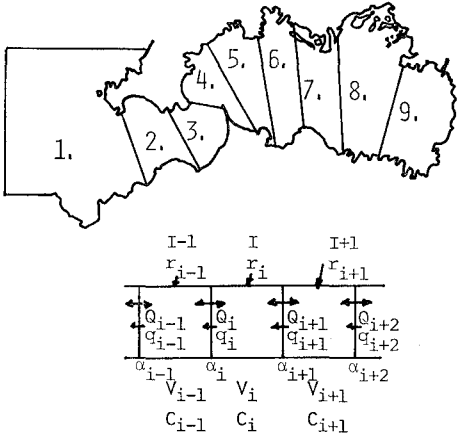


図-8 ブロック図

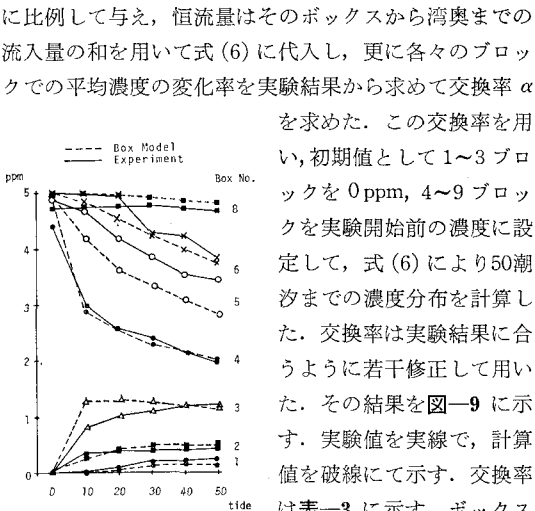


図-9 ボックスモデルによる濃度の純時変化

ら, Parkar らの交換率よりも当然大きな値が得られる。
以上, 3つの方法で海水交換率を求めた。それぞれの

表-3 ボックスモデルによる交換率

	単位 %					
	Case 1		Case 2		Case 3	
	1	2	1	2	1	2
α_9	7	8	7	15	7	25
α_8	8	23	9	30	9	50
α_7	10	15	16	25	26	50
α_6	12	38	20	30	26	30
α_5	15	30	13	15	44	18
α_4	15	20	13	25	48	17
α_3	21	21	20	30	65	50
α_2	36	30	26	30	65	50
α_1	27	8	39	30	65	50

α_i ボックス(i)とボックス(i-1)の交換率

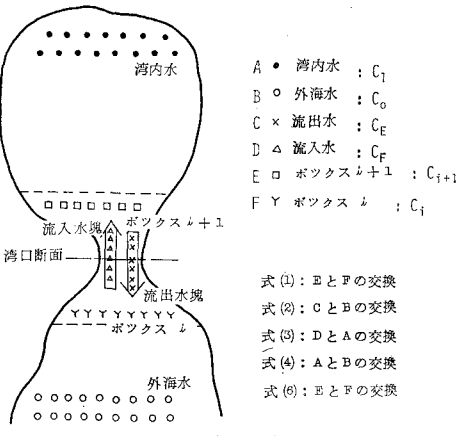


図-10 各々のモデルの交換率の模式図

モデルにより交換率の意味は異なり, またそれに応じて交換率の値も異なる。図-10は, 各々のモデルの交換率はどの水塊とどの水塊の交換であるかを示したものである。湾口部付近の水塊は, 湾内水と外海水の混合したものである。速水のモデルは, 長さLのボックスを考えた場合に隣接するボックス間の交換を示すものと考えられる。

6. まとめ

以上, 海水交換の現象について述べ, 更に東京湾の模型を用いて, 海水交換率を算定した。これらの結果を以下に要約して示す。

(1) 海水交換率の持つ意味は, それぞれのモデルによって異なる。例えば, 図-10に示す如く, Parker らのモデルは水塊BとCの交換を意味するのに対し, 柏井の示す式(3)は水塊DとAの交換, 及び式(4)は水塊AとBの交換を意味している。また, 速水のモデル, ボックスモデルの持つ交換の意味は, 隣接するボックス間の交換である。

(2) 交換率の値は, ボックスモデルの場合が最も大きく, 柏井のモデルの式(4)が最も小さい値が見積られる。

(3) 実験によると, 東京湾は観音崎側で流出が, 富津側で流入が卓越しており, この循環流が海水交換を促進している。

(4) 大潮時の交換率は, Parker らの方法及び速水らの方法とともに, 数%程度の値であった。小潮時については実験精度が悪く, 交換率は大きく出ている。

最後に, この実験は運輸省第二港湾建設局の要請によってなされたものである。また, 本論文をまとめるに当り御指導頂いた, 港湾技術研究所佐藤昭二海洋水理部長, 金子安雄前海水汚染水理研究室長(現(株)日本テトラポッド), 並びに海水浄化研究室細川恭史君, 三好英一君に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について，第3回海岸工学講演会講演集，pp. 49-53, 1956.
 - 2) 速水頌一郎・宇野木早苗：瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 385-393, 1970.
 - 3) Parker, D. S., Norris, D. P. and Nelson, A. W.: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, SA2, pp. 305-323, 1972.
 - 4) 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.
 - 5) Arons, A. B. and Stommel, H.: A mixing length theory of tidal flushing, Trans. AGU, Vol. 32, 1951.
 - 6) 金子安雄・堀江 毅・上野信行・久保正則：東京湾口航路潮流模型実験，港研報告，Vol. 12, No. 1, pp. 83-121, 1973.
 - 7) 柏井 誠：潮汐による海水交換について—その2—速水ほか（1956）に対する検討，1977年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 98-99, 1977.
 - 8) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅：海水交流に関する現地観測，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 291-296, 1974.
-