

II-337 湾域の海水交換に関する研究

京都大学防災研究所 正員 大年 邦雄

京都大学防災研究所 正員 今本 博健

1. はじめに：湾口断面を通して湾内水と外海水が交換する現象を海水交換という。この現象の主要な要因は潮汐残渣流による水平循環流、潮流乱れによる乱流拡散および密度流による鉛直循環流であるが¹⁾、基本的には、流れによって運ばれたものが混合・希釈され、それがまた流れによって運ばれるという機構で説明される。本報では、湾口が一ヶ所で河川流入のない湾での潮流による海水交換現象を、簡単なモデルを用いて解析し、実験結果との比較を通して現象の基本的特性を検討する。

2. 海水交換現象の定式化：海水交換過程を模式的に示すと図-1のようになる。すなわち、上潮時に湾へ流入する水塊の容積 Q_f は、直前の下潮時に流出した水塊の一部 Q_{fe} と元々外海にあった水塊 Q_s とから構成される。同様に、下潮時に湾から流出する水塊の容積 Q_e は、直前の上潮時に流入した水塊の一部 Q_{ef} と元々湾内にあった水塊 Q_b とから構成される。対象とする湾は強混合であると仮定すると、湾内水の平均濃度 C_m の時間的変化率（時間の単位は潮汐周期）は、 N_t を潮汐数として次のように表わされる（図-1 参照）。

$$dC_m / dN_t = (Q_f C_f - Q_e C_e) / V \quad (1)$$

$$\text{上潮時における水塊の組成より、} Q_f = Q_s + Q_{fe}, \quad Q_f C_f = Q_s C_s + Q_{fe} C_e \quad (2) \quad (3)$$

$$\text{下潮時における水塊の組成より、} Q_e = Q_b + Q_{ef}, \quad Q_e C_e = Q_b C_m + Q_{ef} C_f \quad (4) \quad (5)$$

日潮不等などの潮汐の不規則性を無視し、下に定義する2種の交換係数 R_0 および R_1 を導入する。

$$Q_f = Q_s, \quad R_0 = Q_s / Q_f, \quad R_1 = Q_b / Q_e \quad (6) \quad (7) \quad (8)$$

以上の諸式より、式(1) は次のように書き表わされる。

$$dC_m / dN_t = \alpha (C_s - C_m), \quad \alpha = R_0 R_1 Q_f / \{1 - (1 - R_0)(1 - R_1)\} V \quad (9)$$

上式を $N_t = 0$ のとき $C_m = C_0$ の条件下で解き、さらに $C_s = 0$ と置くと、

$$C_m / C_0 = \exp(-\alpha N_t) \quad (10)$$

式(10)は、初期に濃度 C_0 であった湾内水が、湾口での海水交換によって次第にその濃度を減じてゆく過程を表わしている。湾内水の平均滞留時間 τ_r は、式(10)を $N_t = 0 \sim \infty$ で積分することにより、次のように得られる²⁾。

$$\tau_r = 1 / \alpha \quad (11)$$

対象とする湾の容積 V および tidal Prism Q_f を評価することは比較的容易であるが、交換係数 R_0 と R_1 をそれぞれ理論的に推定することは困難である。本解析では便宜上、 $R = R_0 = R_1$ と仮定する。したがって、

$$\alpha = R Q_f / (2 - R) V \quad (12)$$

次に、上に示したと同様な解析を、一次元拡散方程式に基づいて行なう（図-2参照）。

$$\partial C / \partial N_t = K \partial^2 C / \partial x^2 \quad (13)$$

ここに K は、一周内に生起する混合過程の全てを集約した拡散係数である。初期条件および境界条件は、

$$C(x, 0) = C_0, \quad C(0, t) = 0, \quad \partial C(L, t) / \partial t = 0 \quad (14)$$

式(13)の解を $x=0 \sim L$ で積分すると湾内平均濃度 C_m が算定され、それをさらに $N_t = 0 \sim \infty$ で積分すると平均滞留時間 τ_r が先と同様に求められ、それぞれ次のように表わされる。

$$C / C_0 = \sum_{n=1}^{\infty} (2/N) \cdot \sin(NX) \cdot \exp(-N^2 \cdot T) \quad (15)$$

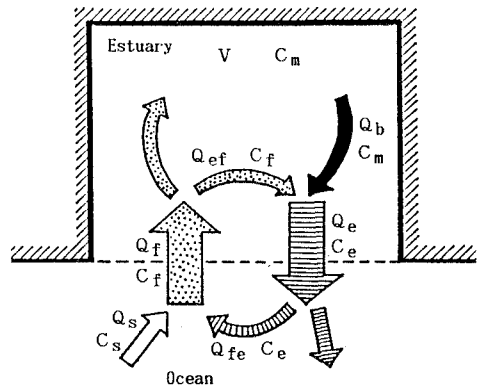


図-1 海水交換過程の模式図

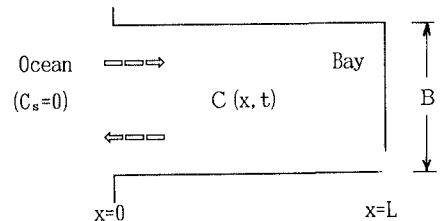


図-2 長方形湾モデル

$$C_m / C_0 = \sum_{n=1}^{n=\infty} (2/N^2) \cdot \exp(-N^2 \cdot T) \quad (16)$$

$$\tau_r = L^2 / 3K \quad (17)$$

ここに、 $N = (2n-1)\pi/2$, $X=x/L$, $T=KN_t/L^2$
式(11), (12), (17)より、交換係数Rと拡散係数Kとが次式で結び付けられることが分かる。

$$(2-R) V / RQ_s = L^2 / 3K \quad (18)$$

3. 実験の概要：図-2の長方形湾モデルを水槽内に作成し、外海に潮流（周期 T_s 、最大流速 U_s 、 U_s 、流向は湾口断面に平行）を与えた。湾内にメチレンブルーの様な濃度分布を与えた状態を初期条件とし、表-1に示す実験ケースについて、湾内潮流の流動および濃度分布の計測を行なった。

4. 実験結果：水面に散布したトレーサー粒子の一周期間の流跡に関する計測結果の一例を図-3に示す。湾口部付近に顕著な環流が形成されているのが分かる。これが海水交換の主要な要因である潮汐残渣環流に相当する。この環流のスケールは、各実験ケースでほぼ同じであった。

湾内平均濃度の時間変化に関する計測例を示したものが図-3である。各計測値は片対数紙上で直線を形成しており、このことは式(10)の妥当性を示している。したがって、同式を適用して、直線の勾配より交換係数Rを算定し、式(11), (18)を用いて平均滞留時間 τ_r および拡散係数Kを推定した。各実験ケースに対して得られたそれらの値をまとめたものが表-2である。

湾内の濃度分布に関する計測結果を式(15)と比較したものが図-4である。計測値は式(15)と定量的には一致していない。その不一致は、前述した環流の存在する湾口付近で顕著である。すなわち、計測値はほぼ一様濃度となっており、環流が湾内水の混合に与える影響が大きいことを追認した結果となっている。

実験結果の詳細は講演会当日発表する。

5. おわりに：本解析モデルは、限定された条件下における一周単位での海水交換現象の基本的特性を説明しているが、便宜的な仮定を含んでいるなど問題点も多い。今後、さらに詳細な現象計測を実施するとともに、現場での予測に有効な解析法を模索してゆく必要がある。

参考文献：

- 1) Fischer et al.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, Inc., 1979.
- 2) Takeoka, H.: Continental Shelf Research, 3, pp.311, 1984.

表-2 交換係数・拡散係数・平均滞留時間の一覧

L/B	$T_s = 50 \text{ sec}$			$T_s = 100 \text{ sec}$			$T_s = 150 \text{ sec}$			$T_s = 200 \text{ sec}$		
	R	K	τ_r	R	K	τ_r	R	K	τ_r	R	K	τ_r
1.0	0.41	360	2.3	0.80	310	2.7	0.86	290	2.8	0.80	290	2.9
2.0	0.47	660	5.1	0.82	470	7.0	0.88	470	7.2	0.73	470	7.1
4.0	0.50	1210	11.0	0.86	1080	12.4	0.89	1100	12.1	0.95	1290	10.4

Note) T_s : tidal period L: length of the bay B: width of the bay
R: exchange ratio K: diffusion coefficient ($\text{cm}^2/\text{tidal cycle}$)
 τ_r : mean residence time (tidal cycle)

表-1 実験条件

Case	T_s (sec)	L/B	ΔH (cm)	U_s (cm/s)	U_r (cm/s)
1	50	1.0	1.37	5.81	7.62
2		2.0	1.47		
3		3.0	---		
4		4.0	1.50		
5	100	1.0	0.16	2.66	2.73
6		2.0	0.20		
7		3.0	---		
8		4.0	0.18		
9	150	1.0	0.23	1.74	1.64
10		2.0	0.25		
11		3.0	---		
12		4.0	0.24		
13	200	1.0	0.20	1.25	1.14
14		2.0	0.23		
15		3.0	---		
16		4.0	0.24		

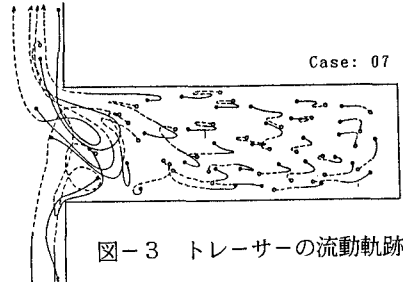


図-3 トレーサーの流動軌跡

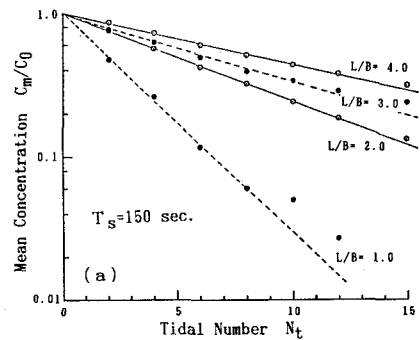


図-4 湾内平均濃度の時間的変化

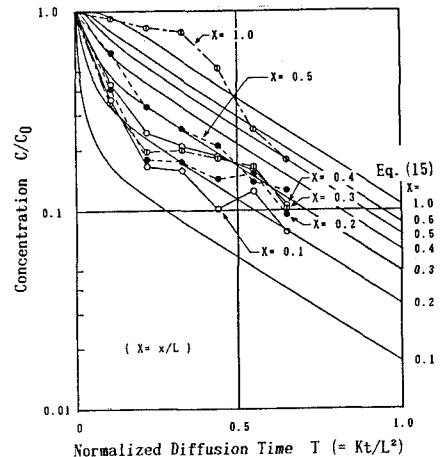


図-5 湾内濃度分布の時間的変化