

山口大学工学部 正員 ○ 浦 勝
 増田 純雄

はじめに

河口部砂層中に存在する塩分の浸出に關する評価は河口湖の塩分濃度の推移を予測する上で重要である。さらにこの評価法を拡張すれば河口湖底部のみならず一般の水域の底部に存在する種々の物質の浸出の量的評価が可能となるであろう。このように観点から砂層中に含まれる塩分の淡水中への浸出量を模型水槽を用いて実験的に検討した。実験は淡水が静止している静置拡散と淡水が流動する流動拡散の二つの場合を行ない、塩分濃度分布および浸出量を検討した。

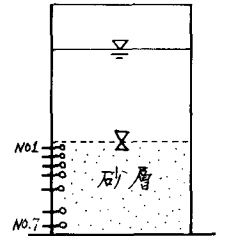


図-1

1. 実験装置

静置拡散実験は図-1に示すような円筒水槽に塩水を含有せしめ砂層と淡水を置き砂層中の塩分濃度は砂層中に埋込んだ内径5mmの樹脂パイプ中に4電極方式塩分濃度計の検出端子により測定し、上層水中の塩分濃度分布はポイントゲージに取付けた端子により測定した。

使用した砂は $d_e = 0.6 \text{ mm}$ で、設置空隙率 λ はほぼ 0.4 程度である。

流動拡散実験は図-2に示すように幅100mmの矩形水路に砂層部を設け Re を変化させて行い、塩分濃度の測定は静置実験の場合と同じである。

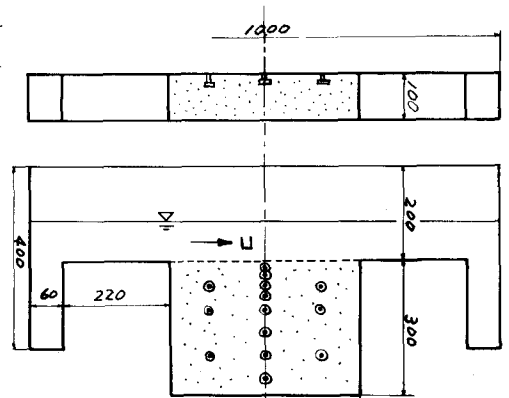


図-2

2. 砂層中の拡散係数

鉛直方向の塩分濃度分布は図-3に示すような型となり、砂層深さ z における塩分濃度 S の時間的变化の一例を図-4に示す。

砂層中の S の分布は一次元の拡散方程式

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial [D(\frac{\partial S}{\partial z})]}{\partial z} \quad (1)$$

を下記のよう仮定にもとなく境界条件を用いて解くことにより与えられる。

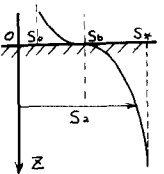


図-3

初期条件: $t=0; S=S_*$ const.

境界条件: (1) 上層部流動;

$$z=0; S=S_0 = \text{const.}$$

(2) 上層流体静止;

$$z=0; \text{境界面平衡濃度}$$

$$S_b = \frac{(V_1 S_0 + \lambda V_2 S_*)}{(V_1 + \lambda V_2)}$$

$$= \frac{(H_1 S_1 + \lambda H_2 S_2)}{(H_1 + \lambda H_2)} \quad (2)$$

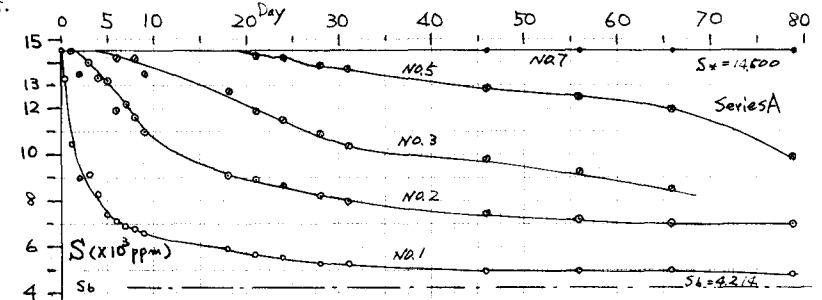


図-4

ここに $V_1, H_1; V_2, H_2$ はそれぞれ水層上部, 下部の体積と水深である。

静止実験の場合上記の条件を用いて式(1)を解けば砂層中の塩分分布は次式により与えられる。

$$\frac{(S_s - S)}{(S_s - S_b)} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D t}}\right) \quad (3)$$

実験より得られた各深さ z の S の変化を図-5に示す。同図の曲線は式(3)により計算したものであり、これより求めた砂層中の拡散係数は表-1に示すような値であった。これより砂層中の拡散係数は鉛直方向に多少のばらつきはあるがほぼ一定値とみてよく Series A では $0.642 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$, B では $1.045 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値とされた。この数値の妥当性を検討してみる。

希薄成金の液中での分子拡散係数 D_M については次の関係がある、

$$D_M \mu / T = 1/F \quad (4)$$

ここに μ は溶媒の粘性係数 (cp), T は絶対温度 ($^{\circ}\text{K}$), F は定数で, NaCl の場合 $F = 2.18 \times 10^7$ である。したがって S (NaCl) の水中での分子拡散係数は温度 t ($^{\circ}\text{C}$) により変化し、つぎの関係式で示される。

$$D_M = (273 + t) / (2.18 \times 10^7 \mu) \quad (5)$$

この式(5)の関係を図-6に示しておく。

このグラフに示したように、実験により求められた拡散係数 D は分子拡散係数 D_M より小さくほぼ7割の値となっている。

この事実は次のようなモデルを考へることにより説明できるようである。液中に形成するモル流束 N は

$$N = -D \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (6)$$

であり、静止流体中では $D = D_M$ である。

ところで砂層中では図-7に示すように砂層長 Δz における濃度差 ΔS の流体の経路は Δz より長くなるはずである。

物質輸送を式(6)より、 D に流体中の拡散係数を用いて表示しようとすれば、次のような流体の実際経路を考慮した式とすべきである。

$$N = -D \left(\frac{\partial S}{\alpha \partial z} \right) \quad (7)$$

この α は空隙に関係し、空隙率 $\lambda = 1.0$ のとき $\alpha = 1.0$ であり、 $\lambda = 0$ のとき $\alpha = \infty$ とする。さきに空隙率 λ は砂層中の実質流体体積を表示する1の無次元量と考へることができ、長さに関

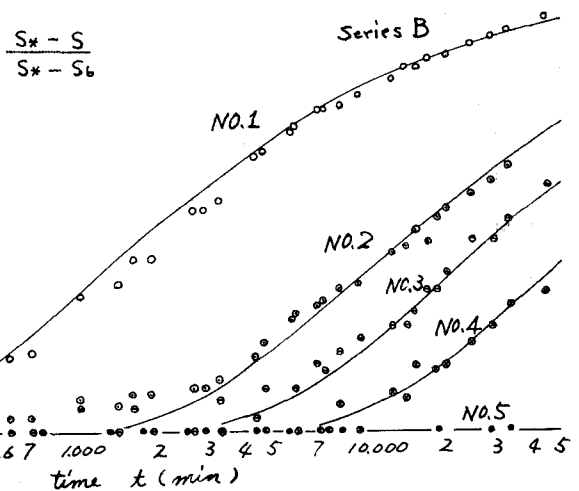


図-5

Series	A	B	
空隙率: λ	0.4	0.4	
平均水温 ($^{\circ}\text{C}$)	7	23	
D_M ($\times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$)	0.898	1.450	
$\sqrt{D_M}$ ($\times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$)	0.661	1.068	
z (cm)	D ($\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$)	z	D ($\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$)
No.1	1.0	1.2	1.066
2	3.0	3.3	0.990
3	4.8	5.0	1.086
4	7.0	7.2	1.036
5	10.0		
平均値	0.642		1.045

表-1

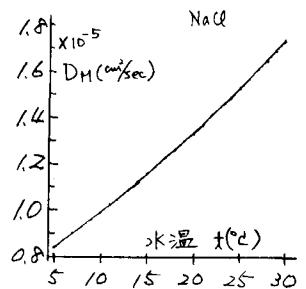


図-6

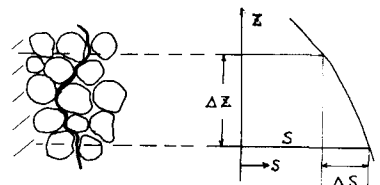


図-7

する係数 α と次のような関係にあると考えてみる。

$$\alpha = 1/\sqrt[3]{\lambda} \quad \dots \dots \dots (8)$$

したがって、式(7)は

$$N = -D_M \left[\frac{\partial S}{\partial z} (\alpha \sqrt{\lambda}) \right] = -\sqrt{\lambda} D_M (\frac{\partial S}{\partial z}) \dots (9)$$

$$\therefore D = \sqrt{\lambda} D_M \dots \dots \dots (10)$$

すなわち砂層（一般に多孔体）中では分子拡散係数が空隙率の3乗根倍の値にしか増えず減少すると仮定することになる。

式(10)を用いて計算した $\sqrt{\lambda} D_M$ の値を表-1に示しているが、各位置における測りかたがほぼ一致している。

このモデルの検討は λ を変化させて行う予定である。

次に上層流体の流動による砂層中の拡散係数の変化についてふれておく。

流動実験における砂層中の塩分濃度分布は式(3)の $S_b E S_0$ と置き換えて表すことができる。

$$\frac{(S_w - S_0)}{(S_w - S_0)} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) \dots (11)$$

実験による S の時間的変化の一例を図-8に示す。同図の曲線は式(11)の曲線である。

式(11)を用いて算出した砂層中の拡散係数を表-2に示す。

$D/\sqrt{\lambda} D_M$ の Re 数による変化を図-9に示す。この図から砂層中の拡散係数は式(10)により表される上部流体の流動の影響を受けて増大する。

このことは砂層部の流体が図-10に示すように上層流体の流れに伴われて流動する点と思われる。したがってこの場合の拡散は分子拡散より大きくなり、流れの変動速度による寄与が考えられる。

$$N' = -S'v' = -l_s \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right) \times l_u \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = -l_s l_u \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right) \dots (12)$$

ここに N' は変動によるモル流量、 S' は変動成分、 $l_s l_u$ は混合距離とす。

式(12)を式(6)のFick型で示せば拡散係数は次のようになる。

$$D = +l_s l_u \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (13)$$

砂層中の流速分布が式(14)で表される場合式(13)は次のようになる。

$$D = u_b \exp \left(\frac{z}{z_0} \right) \dots \dots \dots (14)$$

$$D = l_s l_u \left(\frac{u}{z_0} \right) \dots \dots \dots (15)$$

上式を無次元化して

$$\frac{D}{D_M} = \left(\frac{l_s l_u}{z_0 R} \right) \left(\frac{u}{U} \right) \cdot Re \dots \dots \dots (16)$$

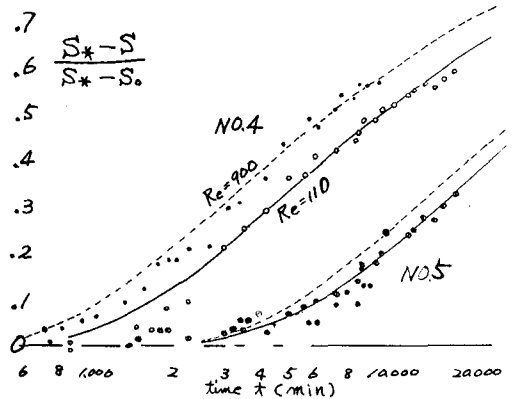


図-8

$Re = UR/\nu$	900	670	650	560	440	280	110
平均水温(°C)	10	9.5	23	23	18.5	16.5	12
D_M ($\times 10^{-5}$ cm ² /sec)	0.99	0.97	1.45	1.45	1.28	1.21	1.05
$\sqrt{\lambda} D_M$ ($\times 10^{-5}$ cm ² /sec)	0.73	0.71	1.07	1.07	0.94	0.89	0.77
NO.4	D	1.16	0.85	—	1.16	0.94	0.93
$z=2.1$	$D/\sqrt{\lambda} D_M$	1.59	1.20	—	1.08	1.00	1.00
NO.5	D	0.76	—	1.05	1.05	0.98	0.94
$z=3.7$	$D/\sqrt{\lambda} D_M$	1.04	—	0.98	0.98	1.04	0.94
NO.6	D			1.08		0.85	
$z=5.4$	$D/\sqrt{\lambda} D_M$			1.01		0.90	
NO.12	D			1.16			0.74
$z=6.1$	$D/\sqrt{\lambda} D_M$			1.08			0.96

表-2

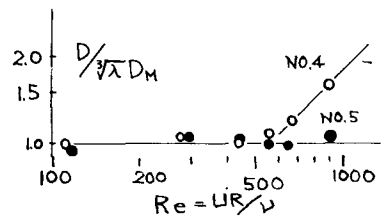


図-9

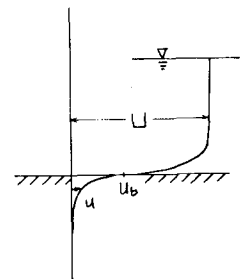


図-10

さらに運動輸送と物質輸送量の比を表すSchmitz数 $Sc = \nu/D_M$ を導入して式(16)を変形すれば、

$$D/\sqrt{\lambda D_M} = (k_s l_u / z_{0R}) (\nu/\lambda) \cdot Sc \cdot Re \quad \dots \dots \dots (17)$$

上式と図-9と比較してみると、 $Re > 500$ で Re に比例してより拡散が変動成分の寄与を受け、さらに式(17)右辺の Re の係数が一定と示している。この係数中の混合距離 l_u 、砂層中の流速分布に関する z_{0R} 、 ν などについては今後検討しなくてはならないが、式(17)より拡散係数が砂層中の流速分布により定まるが鉛直方向に異なる値をとることと示し、図-9の測定結果とも一致する。

式(17)は拡散物質が決まり温度がわかると Sc 数が一定値となるので場合以外の種々の物質の拡散量の推定が可能となる。

3. 砂層からの塩分浸出量

静置実験の測定塩分濃度分布より計算した浸出塩分量の時間的変化を図-11に示す。同図の○印は表層塩分分布より、●印は砂層塩分分布よりλ倍して求めた単位砂層面積当りの塩分浸出量である。

砂層表面を通り、表層中に浸出する塩分のモル協連は次式で示される。

$$N_i = -D \left[\frac{\partial S}{\partial z} \right]_{z=0} \quad \dots \dots \dots (18)$$

このとき S の分布は式(3)で表されるから、

$$\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S_* - S_b}{\sqrt{\pi D t}} e^{-\frac{z^2}{4Dt}}$$

より
$$\left[\frac{\partial S}{\partial z} \right]_{z=0} = (\pi D t)^{-1/2} (S_* - S_b) \quad \dots \dots \dots (19)$$

したがって時間 t までの浸出塩分量は砂層単位表面積当り次のように表される、

$$\frac{M}{A} = \lambda \frac{M_2}{A} = \lambda \int_0^t N_i dt = \lambda \int_0^t \left(\frac{D}{\pi t} \right)^{1/2} (S_* - S_b) dt = 2\lambda \left(\frac{D}{\pi} \right)^{1/2} (S_* - S_b) t^{1/2} \quad \dots \dots \dots (20)$$

上式は単位砂層表面積当り、浸出量が砂層中の拡散係数 D の平方根に比例し、時間 t の平方根に比例して増加してゆくことを示している。図-11には式(20)に $\lambda = 0.4$ 、 $D = \sqrt{\lambda D_M}$ 、 S_b に式(2)を用いて計算した直線を示した。この結果がかなりの近似が認められ浸出量を式(20)、式(10)を用いた式(22)で予測することが可能であるといえる。

おわりに

砂層中の塩分濃度の場所的、時間的変化を砂層中に乱さずに測定した。これより境界面濃度に式(2)を用いて濃度分布が式(3)で示されること、砂層中の拡散係数が式(10)で表されることと示した。表層流体が流動すると砂層部拡散係数は増大し式(17)で評価できること、 Re 数に比例することと示した。塩分浸出量が式(2)、(10)を用いて式(20)により表されること、~~また~~塩分以外の物質への拡張の可能性を示した。

最後に実験と資料整理に労力を惜まれないで、在本学卒業生・藤本哲郎君(現・山口県)に感謝の意を表します。

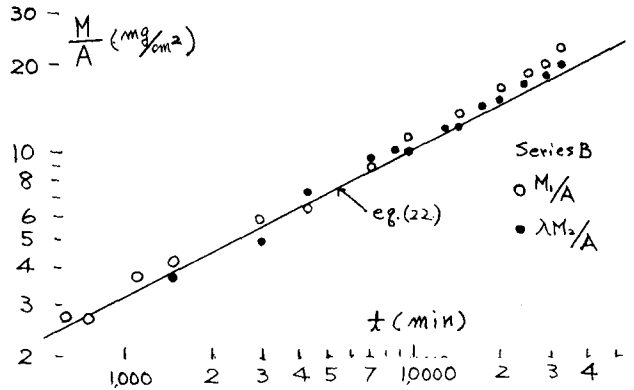


図-11