

(16) 廃棄物層における水分および溶質の移動に関する研究

TRANSFER OF NON-ADSORPTIVE TRACER
IN UNSATURATED SOLID WASTES

島岡 隆行*, 栗谷 陽一*, 花嶋 正孝**

Takayuki SHIMAOKA, Yoichi AWAYA, Masataka HANASHIMA

松藤 康司**, 柳瀬 龍二**

Yasushi MATSUFUJI, Ryuji YANASE

ABSTRACT ; The transfer characteristics of water or non-adsorptive and desorptive solute in the unsaturated layer of solid wastes, which consist of incinerator residue and one including rice straw, are investigated using tritium (^3H) as tracer material.

The results obtained from this study are as follows.

- (1) The breakthrough curves from the series of experiments can not be explained by dispersion equation.
- (2) The flow mechanism of water and the solute in the solid wastes is expressed by two layer flow model of stream region and stagnant region.
- (3) The equation of two layer flow model is approximated by dispersion equation for sufficiently large values of Peclet number (Pe), and dispersion coefficient of unsaturated flow in the waste layer is expressed by flow rate per unit area and three parameters in the equation of two layer flow model.

KEYWORDS ; Solid waste, Solid waste water, Tritium, Breakthrough curve, infiltration, dispersion

1. は じ め に

廃棄物最終処分場（埋立地）に課せられた最大の課題は廃棄物の早期安定化であり、廃棄物の発生量および質の変化に伴い、それに対応して埋立構造の改良・工夫がなされて来ている。構造の決定に際しては、浸出水量・水質負荷の軽減、さらにメタンガス等の発生の抑制が念願におかれ、既に幾種類かの埋立構造が考案¹⁾されている。現在では上記の機能を満足する埋立構造として、準好気性埋立構造に代表される好気的な埋立が主流となっている。また、近年においては、浸出水を埋立地に返送する循環式準好気性埋立構造に関する基礎的研究が実用化をめざし行われている²⁾。

しかし、各埋立構造に見られる諸現象については殆んど解明されておらず、構造の違いによる浸出水量・水質の流出パターンが把握されているにすぎないのが現状³⁾である。それ故に、埋立地からの浸出水量・浸出水質を決める降雨に伴う浸出水の流出メカニズム^{4), 5)}や、浸出水の循環による循環水の流

* 九州大学工学部 (Department of Civil Eng. Hydraulics, Kyushu Univ.)

** 福岡大学工学部 (Department of Civil Eng., Fukuoka Univ.)

下特性を明確にすれば、埋立構造の改善に示唆を与えると同時に浸出水の水質改善、二次公害の防止、ひいては浸出水処理施設を含む埋立地の制御・維持についての指針を与えることができる。

不飽和浸透に伴う溶質の移動は、浸透水の流動に支配される移流および分散とがあるが、溶質の種類によっては吸脱着が大きく流速、分散を支配することになる。本研究では、廃棄物層内の水分および非吸脱着性溶質の移動に関する諸特性を把握し、溶質移動モデルの妥当性の検討を目的とし、トリチウム（HTO）をトレーサーとして廃棄物層内の定常不飽和浸透流における流出特性を調査した。

その結果まず第一に、廃棄物層内の水分の流れは廃棄物間隙が極めて大きいことから透水層などで見られるような拡散方程式により支配される現象とは異なることを確認した。

そこで、廃棄物層内の水の流れを水が流れる部分の「流動域」と水が淀んでいる「非流動域」の2つの領域に分ける二層モデルを用いて取り扱うことにした。このモデルでは、廃棄物層内の溶質は、流動域を降下するとともに流動域と非流動域の2層間相互の溶質交換が行われる。また、実験結果をもとに二層モデルにおける交換係数（ r ）、流動域の割合（ $ef1$ ）、非流動域の割合（ $ef2$ ）の3つのパラメータを決定した。

最後に、緩やかな変化においてはこの二層モデルから拡散方程式を誘導し得ることを示し、廃棄物層中の物質移動をPe数（＝浸透速度×層の厚さ／拡散係数）が大きいときは拡散問題として取り扱えることを示した。それと同時に不飽和流における拡散係数と、空塔速度（ U ）および本モデルで用いた上記の3つのパラメータとの関係を示した。

2 実験装置および方法

実験装置は、Fig. 1 に示す内径7 cm、高さ25 cmのアクリルパイプを用い、底部に玉じゃりを敷いている。カラム充填廃棄物は福岡市の清掃工場より排出された焼却灰で、埋立地に焼却灰が搬入された直後に10 mm篩でふるい、通過した焼却灰を使用した。また、焼却灰は異なる日に2度採取（焼却灰A、B）した。各々の粒度分布をFig. 2 に示す。焼却灰A、Bは似た粒度分布を示すが、焼却灰Bの方が若干粒径が大きくなっている。

実験は10回（RUN 1～RUN 10）行い、所定の含水比に調整した焼却灰を2層～4層に分けて充填した。RUN 5、RUN 6では1.5 cmに刻んだ稲わらを重量割合で焼却灰の1.8 %（乾重基準）になるよう焼却灰に混入した。充填見掛け密度を決定するに当っては焼却灰の最大乾燥密度1.513 t/m³を基に、その8割の1.20 t/m³を目標値とした。各実験の充填高さおよび他の充填条件は、Table 1 に示す通りである。

土壌に関するトレーサー実験においては、一般にトレーサー物質として、土壌への吸着の影響の少ないNaClなどの塩素イオンが用いられる。しかし、埋立地浸出水の塩素イオン濃度は1,000～

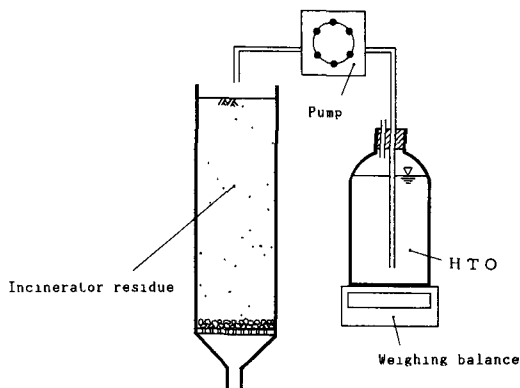


Fig. 1 Incinerator Residue Column and Water Supply System

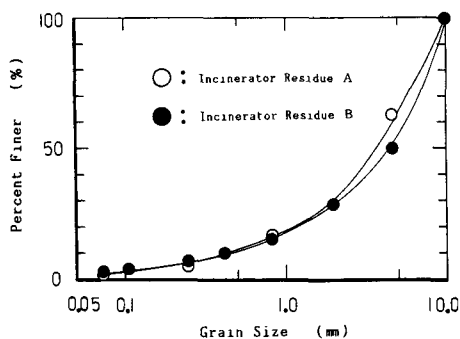


Fig. 2 Grain Size Accumulation Curve

Table 1 Conditions of Experiment

Run Number	Content	Height of Content (cm)	Apparent Density (g/cm ³)	Specific Gravity (—)	Porosity (—)	water Ratio (—)	Flow Rate per Unit Area(cm ³ /min)	Residence Time (min)
1	Incinerator Residue A	7.0	1.32	2.64	0.565	0.325	0.0774	32.32
2		7.0	1.18	2.64	0.579	0.285	0.0769	28.57
3		20.0	1.32	2.64	0.533	0.315	0.0772	81.58
4		20.0	1.29	2.64	0.544	0.303	0.0780	77.69
5	Incinerator Residue A + rice straw	7.0	1.09	2.32	0.561	0.347	0.0800	33.37
6		20.0	1.19	2.32	0.529	0.355	0.0787	90.15
7	Incinerator Residue B	20.0	1.22	2.71	0.552	0.307	0.0457	134.13
8		20.0	1.22	2.71	0.552	0.308	0.0764	80.73
9		20.0	1.22	2.71	0.552	0.314	0.1567	40.11
10		20.0	1.22	2.71	0.552	0.320	0.3092	20.68

3,000 mg/ℓ⁷⁾と極めて高く、廃棄物層のトレーサー物質としては不向なため、今回は焼却灰への吸着および塩素イオン濃度の影響を受けない、放射性同位元素であるトリチウム (³H) をトレーサー物質として採用することにした。トリチウム水 (HTO) は、濃度が約 20 Bq/mℓ になるように原液を希釈して使用した。

実験開始に当っては、カラムに焼却灰などの充填物を充填の後、層内の浸透を定常にするために所定の流量で7日間水道水を微量定量ポンプで供給し続け、水道水をトリチウム水に切り換えることによって実験を開始した。また、Table 1 に示す供給水量の範囲において充填層表面にトリチウム水の滞留は認められなかった。ただし、RUN 7～RUN 10は充填をしかえず同一カラムを用い、実験終了後水道水を供給し層内部のトリチウム水が水道水に置き替わったのを確認の上、次の実験に移った。浸出水はフラクションコレクターで採取し、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンター (Aloka 製 LSC-LB1) でトリチウムの濃度を測定した。

実験終了後は速やかにカラムを解体し、深さ方向の含水比および充填物間隙水のトリチウム濃度は、供給水の濃度とはほぼ同じ値を示した。これらの値を用いてトリチウムの収支を取った結果、実験中に供給した総トリチウム量の 97%～100% のトリチウムが回収され収支が概ね取れていることを確認した。なお、廃棄物層内の含水比分布は、一様分布を示した。

3. 実験結果の考察

トレーサー実験の結果の一例を Fig. 3～Fig. 6 に示す。トリチウムを投入後、極めて早い時期にトリチウムは検出され始め、早いものは 0.1 RT (ただし、RT は滞留時間 (= 保水量/供給水量)) 以内にトリチウムが検出された。それに対し、浸出水の濃度が供給水濃度に達するのに用いた時間は、4 RT～6 RT と長時間を要し tailing が認められた。以上のことは、今回のすべての実験について言えることで、sigmoid 型とは言い難い破過曲線を呈している。本実験に用いた焼却灰は、Fig. 2 に示す粒度分布から分るように均等係数が 10.0 以上と広い範囲の粒径を持っていること、さらに通過百分率 50% の粒径が 4 mm 前後であることから、粗孔隙が孔隙のかなりの部分を占めているものと考えられる。故に、廃棄物層の不飽和浸透流は、この粗孔隙によって特徴づけられているものと思われる。ここで、実際の埋立地に目をやると、埋立地に搬入される焼却灰は含水比が 20% 前後とかなりの水分を含んでおり、微粒子が比較的大きな焼却灰粒子表面に付着している状態になっている。本実験においても、カラムに焼却灰を充填する際に微粒子の焼却灰が粗粒子に付着している様子が観察され、このことが一層廃棄物層

内の粗孔隙率を大きくすることに寄与しているものと想像された。

次に、充填高さの異なる Fig. 3, Fig. 4 に示す RUN 2 (充填高さ 7.0 cm) と RUN 3 (充填高さ 20.0 cm) のトリチウムの流出傾向を見てもと、両者ともにトリチウム濃度の立ち上がりが鋭く、それに伴い浸出水の濃度が供給濃度に達するまでに約 6 RT もの時間を要し、tailing の傾向が顕著であった。

Fig. 5, Fig. 6 は、同一カラムで流量を変えて行った RUN 7 と RUN 9 の実験結果を示している。供給水量は空塔速度で表わすと RUN 7 が 0.0457 cm/min, RUN 9 が 0.1567 cm/min と約 3.5 倍の開きがあるにもかかわらず、浸出水のトリチウム濃度および経過時間をそれぞれ供給濃度と滞留時間で無次元化表示すると、破過曲線にはさほど差が見られなかった。

4. 廃棄物層における溶質移動のモデル化

4.1 移流分散モデルへの適応

不飽和浸透流における溶質移動は吸脱着を考慮しない場合、次の移流分散方程式で示される。

$$\lambda \frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$U = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

境界条件は、

$$C_0 U = C U - \lambda D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{at } x=0) \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (\text{at } x=l) \quad (4)$$

であり。初期条件は、

$$C = 0 \quad (\text{at } t=0) \quad (5)$$

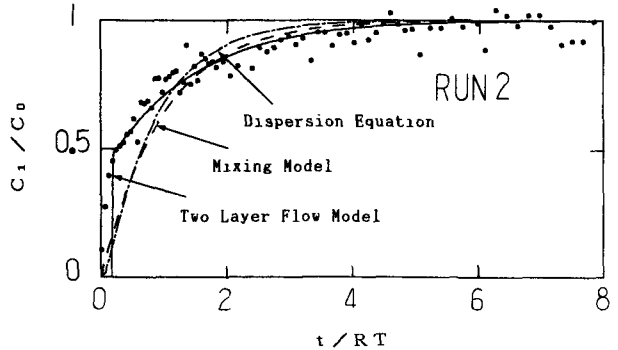


Fig. 3 Comparison of Observed Breakthrough Curve (●) with the Result of Two Layer Flow Model, Mixing Model and the Solution of Dispersion Equation

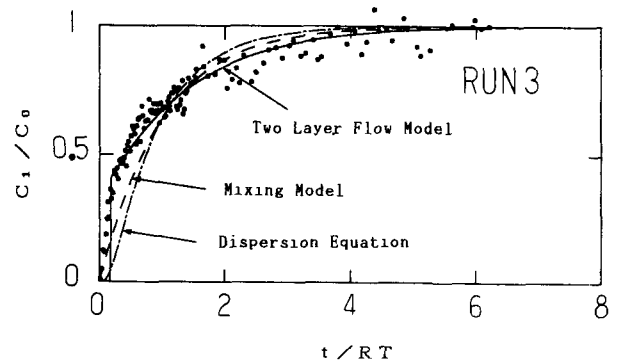


Fig. 4 Comparison of Observed Breakthrough Curve (●) with the Result of Two Layer Flow Model, Mixing Model and the Solution of Dispersion Equation

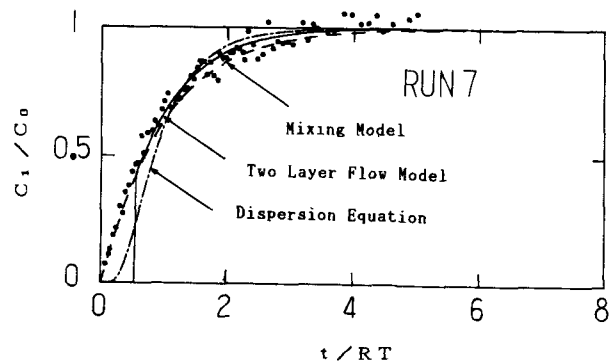


Fig. 5 Comparison of Observed Breakthrough Curve (●) with the Result of Two Layer Flow Model, Mixing Model and the Solution of Dispersion Equation

となる。

まず始めに、(1)式の解析解は Brenner, H. ら⁹⁾ によって求められており、本実験で得られた実測値に対する移流分散方程式の解を適合させ拡散係数Dの値を推定することを試みた。その結果、拡散係数をいくら大きく取っても良好な適合性は得られず、トリチウム供給開始後のトリチウム濃度の増加速度が非常に大きいために、実測破過曲線は(1)式より得られる破過曲線と交差する傾向を示した。参考までに拡散係数が無限大、つまり、廃棄物層内の溶質移動は完全混合によるものと想定して数値解を求め、破過曲線を Fig. 3 ～ Fig. 6 に破線で示している。そ

れでもなおすべての実験の破過曲線に一致することはなく、焼却灰Bを用いたRUN 9, RUN 10においてかなり程度の一一致を見たにすぎなかった。

以上のことから、焼却灰からなる廃棄物層の溶質移動は、(1)式で表現される拡散方式では記述し得ないものと判断された。

4.2 二層モデルによる解析

土壌水分の存在形態は、一般に蒸気態水分、結合水、自由水に大別される。さらに、自由水は、懸垂水、重力自由水に区分されている。廃棄物層の水分形態も土壌水と同様であると考えられ溶質移動のモデル化に当っては、廃棄物層内の水を焼却灰粒子に付着している水、細孔隙に入り込んで滞留している水、さらに、粗孔隙を降下する水に分けて考えるのが妥当であると思われる。しかし、このように液相を3成分とするモデルではパラメータが増え、パラメータの決定が非常に困難になることが予想された。これらのことから今回は、前述の実験結果にもとずいて付着水は考慮せず、廃棄物層内の水分を焼却灰細孔隙内の滞留水と粗孔隙を流下する水の2つに分けるモデル^{9), 10)}を用いることにした。すなわち、廃棄物層における溶質移動は Fig. 7 に示すような「流動域」と「非流動域」から成るものとする。このモデルでは上部より流入した溶質は、流動域を降下するとともに流動域と非流動域の2層間で溶質の交換が行われる。二層モデルの基礎式を(6), (7)式に示し、基礎式には交換係数(r), 流動域の割合(ef 1), 非流動域の割合(ef 2)の3つのパラメータを含んでいる。前述したように、ef 1 と ef 2 との和は、水分率に等しい。

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{U}{ef1} \frac{\partial c_1}{\partial x} = \frac{r}{ef1} (C_2 - C_1) \tag{6}$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = \frac{r}{ef2} (C_1 - C_2) \tag{7}$$

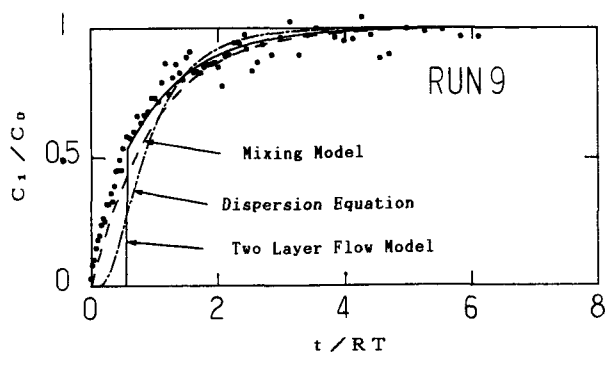


Fig. 6 Comparison of Observed Breakthrough Curve (●) with the Result of Two Layer Flow Model, Mixing Model and the Solution of Dispersion Equation

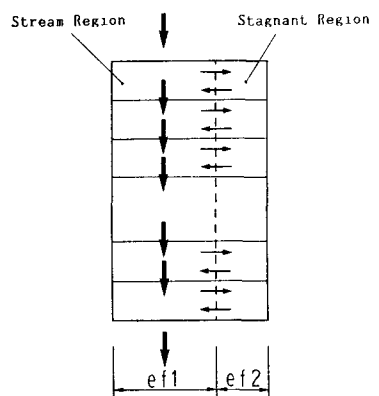


Fig. 7 Schematic Illustration of Two Layer Flow Model

このモデルの数値計算には Runge-Kutta 法を用い、計算方法は Fig.7 に示すように最上部流動域に一定の溶質を与え、非流動域との間で溶質を交換させたのち下層の流動域へ溶質を降下させるという過程を順次繰り返す手順で行った。計算結果は、各図に実線で示している。パラメータの決定に際しては、ef1 と ef2 の一方を定めれば水分率が分っているため自ずと他方が決定され、交換係数 r と ef1 を変化させてそれらの最適と思われる値を求めた。本モデルでは基礎式(6)、(7)から分るように、簡単のため流動域に流速分布を持たせていないことから、廃棄物層の深さ方向の全層で流動域と非流動域の交換が終了したのちに、始めて溶質が流出してくることになった。その様子は図中の実線が縦軸と平行な立ち上がりをしているところに見られ改善を要するところである。

Table 2 には、各実験の破過曲線に最も良く一致した数値解が得られたときのパラメータ r 、ef1、ef2 の値をまとめている。廃棄物層厚 7 cm と 20 cm の各パラメータを比較してみると顕著な差はなく、本モデルは層厚によらずほぼ同じパラメータの値を取ると言える。次に、充填物の違いによるパラメータの大小関係を見てみると、焼却灰 A (RUN 1 ~ RUN 4)、稲わらを混入させている焼却灰 A (RUN 5、6)、焼却灰 B (RUN 8) では流動域の割合 ef1 に大きな差が見られ、2 ~ 3 倍の開きがあるようである。

Fig.8 は、流量を変化させて行った実験 (RUN 7 ~ RUN 9) の各パラメータと空塔速度 (U) の関係を示したものである。交換係数は空塔速度の増加とともに大きくなっていることが分る。また、空塔速度が 0 の場合においても交換係数は値を有しているとも見られ、溶質の交換には分子拡散も寄与していることが同える。一方、ef1、ef2 は空塔速度によらずほぼ同じ値を示し、ef1 と ef2 の和で表わされる水分率も流量によらずほぼ同じ値となっていることから、流量の増加に伴ない流動域内の流速が大きくなり、溶質の流動域間の交換が激しくなることが考えられる。

4.3 二層モデルと拡散モデルとの関係

ここでは、廃棄物層での深さ方向の溶質分布が緩やかに変化する場合には、前述の二層モデルが拡散モデルにより近似し得ることを説明する。二層モデルの基礎式を平均濃度 $\bar{C}$ と流動域と非流動域の濃度差 ΔC を用いて拡散方程式を導くことにする。平均濃度、濃度差は次式で示される。

$$\bar{C} = \frac{ef1C_1 + ef2C_2}{ef1 + ef2} \quad (8)$$

Table 2 The Values of Three Parameters in Two Layer Flow Model, Dispersion Coefficient Calculated from eq. (16) and Peclet Number

Run Number	Rate of Exchange (1/min)	Volume Ratio of Stream Region (-)	Volume Ratio of Stagnant Region (-)	Dispersion Coefficient (cm ² /min)	Peclet Number (-)
1	0.0045	0.055	0.27	2.83	0.589
2	0.004	0.055	0.23	3.38	0.559
3	0.0035	0.055	0.26	3.68	1.331
4	0.004	0.06	0.24	3.24	1.604
5	0.006	0.1	0.247	1.56	1.036
6	0.005	0.1	0.255	1.80	2.462
7	0.002	0.16	0.147	0.78	3.815
8	0.003	0.17	0.138	1.27	3.912
9	0.005	0.17	0.144	3.29	3.035
10	0.008	0.17	0.15	8.21	2.355

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad (9)$$

また、(8)、(9)式より C_1 、 C_2 は、

$$C_1 = \bar{C} + \frac{ef2}{ef1+ef2} \Delta C \quad (10)$$

$$C_2 = \bar{C} - \frac{ef1}{ef1+ef2} \Delta C \quad (11)$$

となる。上式を基礎式(6)、(7)に代入すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{ef2}{ef1+ef2} \frac{\partial \Delta C}{\partial t} \\ + \frac{U}{ef1} \left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \frac{ef2}{ef1+ef2} \frac{\partial \Delta C}{\partial x} \right) = -\frac{r}{ef1} \Delta C \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \frac{ef1}{ef1+ef2} \frac{\partial \Delta C}{\partial t} = \frac{r}{ef2} \Delta C \quad (13)$$

さらに、(12)、(13)式より ΔC を消去すると(14)式が求まる。

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial t^2} + \frac{U}{ef1} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial t \partial x} \right) + \frac{1}{ef1 ef2} \left\{ U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + (ef1+ef2) \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \right\} = 0 \quad (14)$$

ここで、乱流測定における凍結乱流の考えと類似の考え方をを用い、ゆっくり、ゆったりした変化を考えると、時間および空間に関する高階微分の項を低階微分の項と比較して小さいと考えると、近似的に高階における時間微分を空間微分で置き替えることができる。すなわち、例えば簡単のために(14)式でまず0近似として2階微分の項を省略すると、

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\frac{U}{ef1+ef2} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}$$

となる。これを(14)式の2階微分の項に代入すると

$$-\frac{ef1 ef2 U}{r(ef1+ef2)} \left(-\frac{\partial}{\partial t} + \frac{U}{ef1} \frac{\partial}{\partial x} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + (ef1+ef2) \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = 0$$

となる。したがって、さらに微分の順序を入れ替えて代入すると

$$-\frac{(ef2U)^2}{r(ef1+ef2)^2} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + (ef1+ef2) \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = 0$$

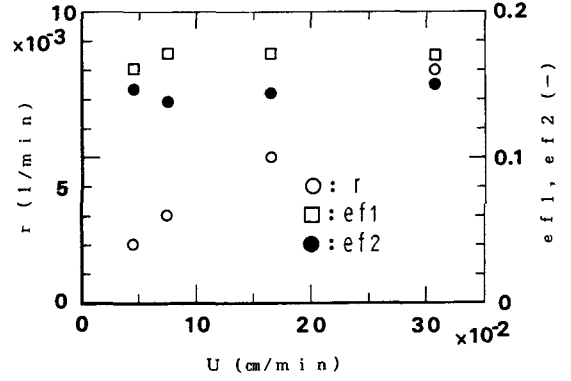


Fig. 8 Relationship Between U and r, ef1, ef2

を得る。このような計算を高い階数の微分項まで拾って行い、4階微分以上の項を省略すると、

$$(ef1+ef2) \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{(ef2U)^2}{r(ef1+ef2)^2} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} - \frac{ef1(ef2U)^3}{r^2(ef1+ef2)^4} \left(1 - \frac{ef2}{ef1}\right) \frac{\partial^3 \bar{c}}{\partial x^3} \quad (15)$$

となる。さらに3階微分の項も省略すると拡散方程式となり、したがって拡散係数Dは

$$D = \frac{(ef2U)^2}{r(ef1+ef2)^3} \quad (16)$$

で与えられることになる。しかし、この拡散方程式は、変化の緩やかな場合に対する近似にすぎない。したがって、今回行った実験のように流入水濃度を不連続的に変化させた場合については、変化の急激なカラムの流入端付近で誤差が大きくなることが考えられる。カラム全体としてはPe数($Pe = U\ell/D$)が大きいときには、カラムの大部分で変化が緩慢となり、したがってカラム全体の流下特性としては適合性が良くなると思われる。

Fig.3～Fig.6中の一点鎖線は、4.2で求めたr、ef1、ef2を16式に代入し得られる拡散係数を用いた場合の移流分散方程式(1)式の解である。参考までに、各実験の拡散係数、Pe数をTable2に載せている。RUN7～RUN10の結果ではrがUの0.7乗に比例しており、したがって、拡散係数Dの値は空塔速度Uのはば1.3乗に比例することとなり、0.7乗に比例する説¹¹⁾とは一致しなかった。今後は、二層モデルをさらに改善して実測破過曲線との適合性を検討し、また拡散方程式の適用限界を明確にするつもりである。

最後に本研究を行うに際し、実験場所を快よく提供して頂くとともに、トリチウムの分析の指導をして下さいました¹²⁾九州環境管理協会環境放射能部の皆様に心から御礼申し上げます。

＜記 号 表＞

A ; カラム断面積 (cm^2)	ℓ ; 廃棄物層の厚さ (cm)
C ; 溶質濃度 (Bq/ml)	Pe ; ペクレ数 (—)
C_0 ; 供給溶質濃度 (Bq/ml)	Q ; 供給水量 (cm^3/min)
C_1 ; 流動域中の溶質濃度 (Bq/ml)	r ; 交換係数 ($1/min$)
C_2 ; 非流動域中の溶質濃度 (Bq/ml)	RT ; 滞留時間 (min)
$\bar{C}$; 流動域と非流動域中の平均溶質濃度 (Bq/ml)	t ; 時間 (min)
ΔC ; 流動域と非流動域の溶質濃度差 (Bq/ml)	U ; 空塔速度 (cm/min)
D ; 拡散係数 (cm^2/min)	x ; 廃棄物層下方向の深さ (cm)
ef1 ; 流動域の水分割合 (—)	λ ; 液相率 (—)
ef2 ; 非流動域の水分割合 (—)	

〈参考文献〉

- 1) 花嶋正孝他：廃棄物埋立構造に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第310号，P 69，1981
- 2) 松藤康司他：循環式準好気性埋立の実用化に関する研究，第7回全国都市清掃研究発表会，pp204～207，1986
- 3) 花嶋正孝：廃棄物の好気性埋め立てに関する研究，九州大学学位論文，1985
- 4) 高村和典，田中信寿他：廃棄物充填層内の定常不飽和流における非反応性物質の移動特性について，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集 第2部，pp873～874，1986
- 5) 島岡隆行，栗谷陽一他：準好気性埋立構造における浸出液量の算定，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp150～151，1987
- 6) 平田登基男，花嶋正孝他：焼却灰のせん断および締固め特性に及ぼすプラスチック混入の影響，第22回土質工学研究発表会，p181，1987
- 7) 昭和49年度厚生省報告書「廃棄物の埋立処分に関する開発研究報告書」，p40，1975
- 8) Brenners, H. : The diffusion model of longitudinal mixing in beds of finite length, Chem. Eng. Sci., 17, pp229～243, 1962
- 9) Gaudet, J. P. et al. : Solute Transfer, with Exchange between Mobil and Stagnant Water, through Unsaturated Sand, Soil Sci. Soc. Am. J., 41, pp665～671, 1977
- 10) 堀内将人，森澤真輔他：不飽和定常流砂カラム内での収着性物質移動の解析，衛生工学研究論文集，Vol. 23, pp197～208, 1987
- 11) Harleman, D. R. F. et al. : Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, J. Fluid Mech., 16, pp385～394, 1963