

地下水の分散特性

藤 間 聡

まえがき

地下水流による溶質の分散は、空隙系の拡縮、曲折に基づく流路の分散性に依存し、さらに流速が極めて遅いため分子拡散が無視し難いなどの他の水域における分散とは異なった特徴を有する。この分散に関しては1950年代から主に塩水侵入、汚染問題を対象として論じられ^{1,2)}、分散機構の解明、分散係数の評価・同定および溶質移動モデルの確立について多数の研究が行なわれている³⁻⁶⁾。

本講では、従来の研究の中で質量保存則に基づく研究を取上げ、特に均質多孔媒体における飽和浸透流による溶質分散の基本的な水理特性および分散係数について述べることにする。

1. 地下水流による分散と分散方程式

地下水系における分散は、大別して移流 (advection) , 拡散 (diffusion) , 機械的分散 (mechanical dispersion) の水理的現象で構成される⁷⁾。本章ではこれらの機構を概説し、分散方程式の定式化について述べる。

1.1 移流による溶質輸送

多孔媒体内に図 1-1 のような半径 r , 体積 V および表面積 S の球状領域を想定する。この領域の表面を通して単位時間に流入する溶質量は次式で表わされる。

$$J_S = \int_S CU_D \cdot n ds = - \int_V \text{div} (CU_D) dv \quad (1.1)$$

ここに、 J_S は表面を通して流入する溶質量、 U_D はダルシー流速、 n は表面における法線の単位ベクトルを示す。ただし、上式においては Gauss-Ostrogradskii の定理を適用して面積積分を体積積分に変換している。

一方、この領域内の溶質の単位時間当たりの質量増加は次式で示される。

$$J_V = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \lambda_e C dv = \int_V \lambda_e \frac{\partial C}{\partial t} dv \quad (1.2)$$

ここに、 J_V は領域内の溶質の単位時間増加量、 λ_e は有効空隙率を表わす。

この領域における溶質の時間的変化 J_V は表面を通して流入する溶質量 J_S とに等しい。

$$\int_V \lambda_e \frac{\partial C}{\partial t} dv = - \int_V \text{div} (CU_D) dv \quad (1.3)$$

支配体積として定義した領域の空間スケール r は任意に採択できるので、上式の積分が消去できる。

1.2 分子拡散

前述したように、浸透流速は一般に極めて小さいため分子拡散の寄与が無視し難い。この分子拡散による溶質移動は *Fick* 則で記述される。*Fick* 則では単位時間に溶質が単位面積を通して移動する量は、その面の法線方向の濃度勾配に比例するとするものである。これを定式化すると次式となる。

$$J = -D_m \text{grad} C \quad (1.4)$$

ここに、 J は単位時間、単位面積を通過する溶質量、 D_m は分子拡散係数を表わす。

図1-1の対象領域において、流体が静止状態で溶質輸送が拡散のみによって生ずる場合、輸送量は次式で示される。

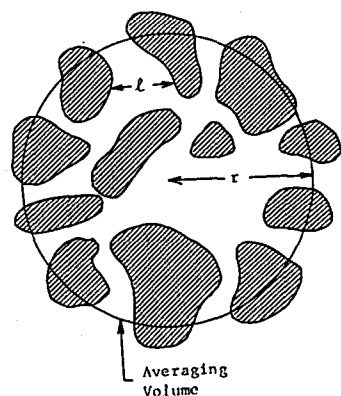


図1-1 多孔媒体内の空隙系

$$\int_S J \cdot n ds + \int_S C U_D \cdot n ds = \int_V \lambda_e \frac{\partial C}{\partial t} dv + \int_V (\lambda - \lambda_e) \frac{\partial C}{\partial t} dv \quad (1.5)$$

ここに、 λ は空隙率、 λ_e は有効空隙率、 C は吸着層内の濃度を示す。上式の第1項は表面を通して分子拡散により輸送される溶質量を示し、第2項は多孔媒体粒子表面の吸着水内に輸送される溶質量を表わす。

1.3 機械的分散

多孔媒体内の溶質輸送機構は空隙流路が分岐、連結、拡張、曲折しているため、以下に述べる流路の分散性に支配される。

- ①一空隙内の流速は粒子表面で0、中心軸で最大となる速度分布をもつ。(図1-2)
- ②空隙径が異なるため、各空隙内での最大流速が異なる。(図1-3)
- ③多孔媒体構成粒子の配置によって流線が主流方向に変動する。(図1-4)

以上のように多孔媒体内の溶質の行程は確率的なものであり、溶質の複雑な不規則運動を空間的に平均化し、ランダム運動とみなすことは取扱い上極めて便利となる。

図1-1の領域において、流速および溶質濃度の平均値を次のように定義する。

$$U = \frac{1}{V} \int_V u dv, \quad C = \frac{1}{V} \int_V c dv \quad (1.6)$$

ここで、 u は浸透流速でダルシー流速を空隙率で除した値 U_D/λ である。

浸透流速および溶質濃度を平均値と変動量で示すと、

$$u = U + \hat{u}, \quad c = C + \hat{c} \quad (1.7)$$

と書ける。ここで $\hat{u}$ 、 $\hat{c}$ は体積平均値からの偏差を示す。式(1.7)からこの領域に流入する溶質の平均量は次式で表わされる。

$$\overline{uc} = UC + \overline{\hat{u}\hat{c}} \quad (1.8)$$

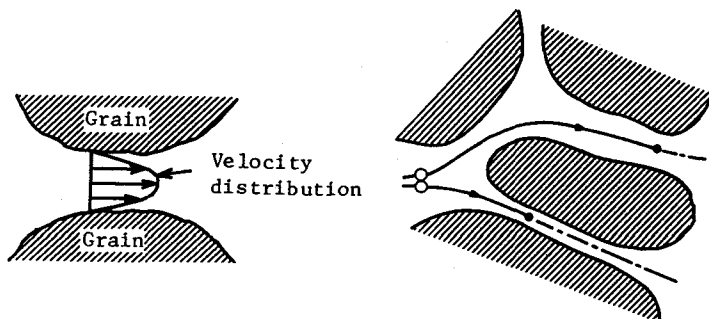


図1-2 空隙流路の速度分布

図1-3 空隙流路の速度偏差

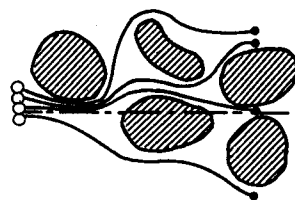


図1-4 多孔媒体内における機械的分散

上式は、物理的には領域に流入する溶質の真の輸送量と空間平均量による輸送量の偏差を示すものとなる。右辺第1項は、前述した移流による溶質輸送量であり、第2項は空隙流路の分散性によって生じた溶質輸送量となる。後者は Taylor⁸⁾、Elder⁹⁾をはじめとして、次式で示す Fick 則と類似の形式で定義されている。

$$\bar{u}c = -K_o \text{grad}C \quad (1.9)$$

ここに、 K_o は分散係数を示す。

以上の結果、移流、分子拡散および機械的分散によって多孔媒体内の微小領域に単位時間内に流入する溶質の収支は次式で示される。ただし、領域は任意に固定された閉曲面であるから、積分演算子を消去する。

$$\text{div}(K_o \text{grad}C - CU_D) = \lambda_e \frac{\partial C}{\partial t} + (\lambda - \lambda_e) \frac{\partial C'}{\partial t} \quad (1.10)$$

ここで、 $C' = C$ 、 $K = K_o / \lambda + D_m$ とし、浸透流速の主流方向を x 軸と一致させると、上式は次式のように変形される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_T \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_T \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1.11)$$

ここで、 K_L は主流方向の分散係数で縦方向分散係数 (Longitudinal dispersion coefficient) と称し、 K_T は主流に直角方向の分散係数で横方向分散係数 (Transverse dispersion coefficient) と呼称される。式 (1.11) の分散方程式に適当な初期・境界条件を設定すると、分散現象の数学的定式化が行なわれたことになる。

2. 分散係数

分散現象に関与するパラメータの中で最も重要な分散係数は浸透場の空間分布に支配されるため、多孔媒体の種類、浸透流の流況ごとに決定しなければならない。この理由から代表的物理量を用いて普遍的な分散係数の表示式を導くことに努力が払われている^{10~15)}。

ここで、分散係数を規定する物理量の関数関係を求めるため次元解析を行なう。基本物理量は以下

に記述するものを採択する。

①運動学的特性：平均浸透流速 U 。

②流体特性：粘性係数 μ ，密度 ρ および分子拡散係数 D_m 。

③幾何学的特性：固有浸透係数 κ 。(固有浸透係数 κ と透水係数 k との関係は $k = \kappa \rho g / \mu$ で示される。)

以上の基本物理量を次の考えに従い組合せを行なう。

①分散現象において流体体積の収縮・膨張は無視されるとし， $g(\rho_1 - \rho_2)$ をパラメータとする。
ここで，添字は 1 が搬送流体，2 は溶質を示すものとする。

②固有浸透係数 κ および分子拡散係数 D_m はそれぞれ単独の物理量とする。

③粘性係数 μ は溶質濃度が薄い場合を想定し，分散過程で流体，溶質の粘性係数は変化しないと仮定する。

④運動学的特性は平均浸透流速のみであるから，これを基本物理量とする。

以上の物理量を用いて次元解析を行なうと次の関係が得られる。

$$K = f(g\Delta\rho, \mu_1, \mu_2, U, D_m, \kappa) \quad (2.5)$$

上式では基本物理量が 7 個であり，[L - M - T] の 3 個の基本次元を選ぶと次の 4 個の無次元量を得る。

$$K/D_m = \phi(U\sqrt{\kappa}/D_m, \mu_1/\mu_2, g\Delta\rho\kappa^{3/2}/(\mu_1 D_m)) \quad (2.6)$$

右辺括弧内の第 1 項はペクレ数 (Peclet 数) と呼ばれ，式 (1.11) の右辺の第 1 項および第 2 項の比からも求められる。

$$\frac{U \frac{\partial C}{\partial x}}{\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial C}{\partial x} \right)} = \frac{UC/L}{KC/L^2} = UL/K \quad (2.7)$$

ここで， L は流路の特性長である。

このペクレ数が大きな場合には移流項に比較して拡散項の寄与が小さく，場合によってはこの項を無視した分散方程式を基礎式とする。逆に，この値が小さい場合には移流項が無視できる。また，ペクレ数は次のような二つの無次元数に分割することができる。

$$P_e = U\sqrt{\kappa}/D_m = U\sqrt{\kappa}/\nu \cdot (\nu/D_m) = R_e \cdot S_c \quad (2.8)$$

ここに， R_e はレイノルズ数， S_c はシュミット数を示す。上式においてレイノルズ数により多孔媒体の流れがダルシー則の適用範囲であるか否かの検討ができる。

ペクレ数およびレイノルズ数は運動学的，流体的および幾何学的特性すべてが含まれており，現象の概略的な把握には非常に有効であるが，反面，要素が多く煩雑な関係を避けるためシュミット数を用いることがある。シュミット数は流体的特性のみから構成されているので取り扱いが容易となる。

分散係数は多くの研究者によって解明されているが，Pfannkuch は式 (2.6) で示される関係

を検証するため多数の実験結果をまとめ、分散係数がペクレ数に依存することを見出した¹⁶⁾。

図2-1において、Pfannkuchは分散現象をペクレ数により5つの領域に分割し、分散機構の特性を類型化した。

領域① $P_e < 0.4$ ：浸透流速が小さく分子拡散が卓越し、分散係数と分子拡散係数との比が一定となる。

$$(K_L / D_m)_0 = 0.67 \quad (2.9)$$

領域② $0.4 < P_e < 5$ ：分子拡散と分散の寄与が同程度となる領域。

領域③ $5 < P_e < 300$ ：分散が卓越するが分子拡散も無視できない領域。

$$K_L / D_m = (K_L / D_m)_0 + \alpha_L (Ud / D_m)^m \quad (2.10)$$

領域④ $300 < P_e < 2 \times 10^5$ ：分散が卓越する。分散係数は次式で求められる。

$$K_L = (K_L / D_m)_0 + \beta Ud \quad (2.11)$$

ここに、 $\beta = 1.8 \pm 0.4$ であり、右辺第1項の拡散の寄与は無視することができ、分散係数は浸透速度と空隙径の関数として与えられる。

領域⑤ $P_e > 2 \times 10^5$ ：この領域ではレイノルズ数が100を越え、ダルシー則が成立せず乱流分散となる。

図2-2は式(2.6)の関係を図示するもので、式(2.10)の係数 m の値を与えるものである¹⁷⁾。

$$K_L / D_m = (K_L / D_m)_0 + \alpha_L (Ud / D_m)^m \quad (2.10)$$

$$\alpha_L = 0.5$$

$$m = 0 \quad P_e < 5$$

$$m = 1 \sim 1.2 \quad 5 \leq P_e < 300$$

$$m = 1 \quad 300 \leq P_e < 2 \times 10^5$$

$$m < 1 \quad P_e > 2 \times 10^5$$

図2-3は横方向分散係数とペクレ数との関係を示すもので¹⁸⁾、縦方向分散係数と同様にペクレ数により m の値が求められる。

$$K_T / D_m = (K_T / D_m)_0 + \alpha_T (Ud / D_m)^m \quad (2.12)$$

$$\alpha_T = 0.025$$

$$m = 0 \quad P_e < 5$$

$$m = 1.1 \quad 5 \leq P_e < 300$$

$$m = 1 \quad 300 \leq P_e < 2 \times 10^5$$

現実の地下水流動の大部分は領域④であり、分子拡散の寄与を無視すると次の関係式が得られる。

$$K_L = \epsilon_L |U|, \quad K_T = \epsilon_T |U| \quad (2.13)$$

ここに、 ϵ_L 、 ϵ_T は長さの次元をもち、分散率と称する。縦方向分散率 ϵ_L は小規模のカラム実験においては数cmのオーダーであるが¹⁹⁾、現地実測では、地層構造の不均質により数mのオーダーとなる。

ことが知られている²⁰⁾。

一方、横方向分散率 ϵ_T は ϵ_L の1/5から1/100の値となる²¹⁾。

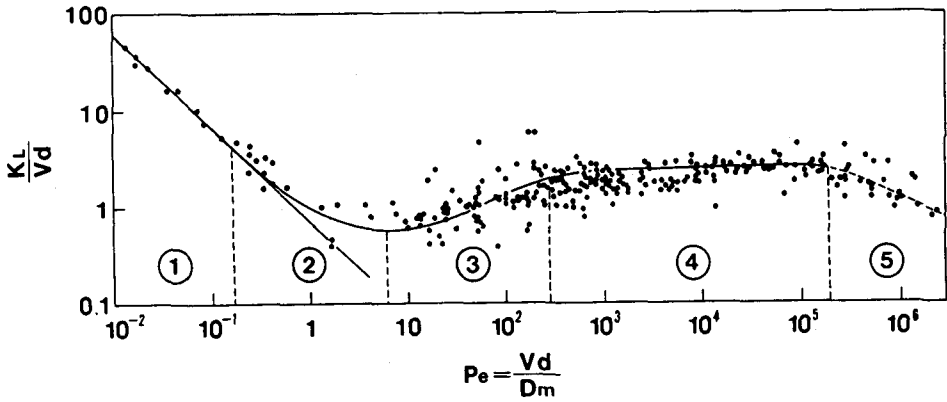


図 2-1 Pfannkuch による分散現象の特性区分

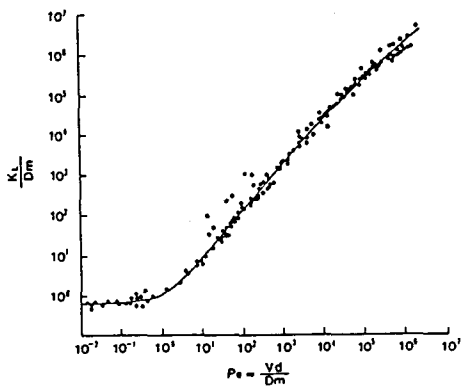


図 2-2 縦方向分散係数とペクレ数の関係

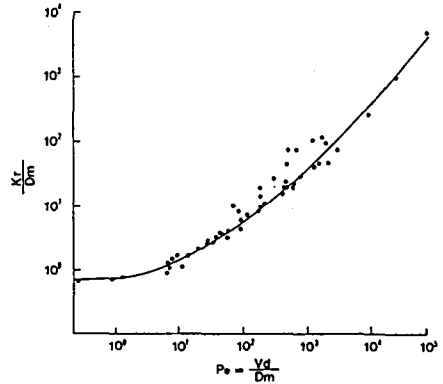


図 2-3 横方向分散係数とペクレ数の関係

3. 分散係数の算定法

3.1 一次元カラム実験

図 3-1 に示すようなカラムに砂を充填し、砂層内の流れが定常状態に達したのち、一定濃度の塩水を連続供給させると図 3-2 に示す濃度の経時変化が得られる。図中の濃度破過曲線は水頭差 H を 6 段階に変化させ、塩水放出面から距離 $x = 66\text{cm}$ の地点に設置された濃度センサーによって測定されたものである。実線で示される理論値は式 (1. 11) を一次元に変換し、実験条件と一致する下記の初期および境界条件で求めた解析解である²²⁾。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \frac{\partial c}{\partial x} + K_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3. 1)$$

初期条件： $c(x, 0) = 0, x > 0$

(3. 2)

境界条件： $c(0, t) = c_0, c(\infty, t) = 0, t \geq 0$

上記条件での式 (3, 1) の解は次のように与えられる。

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - Ut}{(4 K_L t)^{1/2}} \right) + \exp \left(\frac{Ux}{K_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + Ut}{(4 K_L t)^{1/2}} \right) \right] \quad (3. 3)$$

ここに、 c_0 は初期塩分濃度、 U は浸透流速、 K_L は縦方向分散係数、 x は塩水放出点からの距離を表す。また $\operatorname{erfc}(\cdot)$ は余誤差関数を示す。

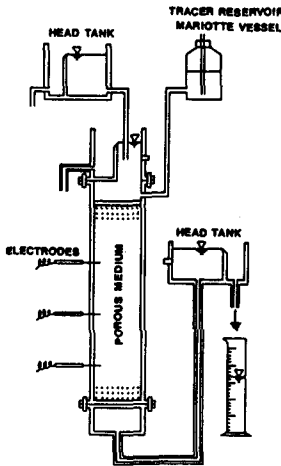


図 3-1 カラム分散実験装置

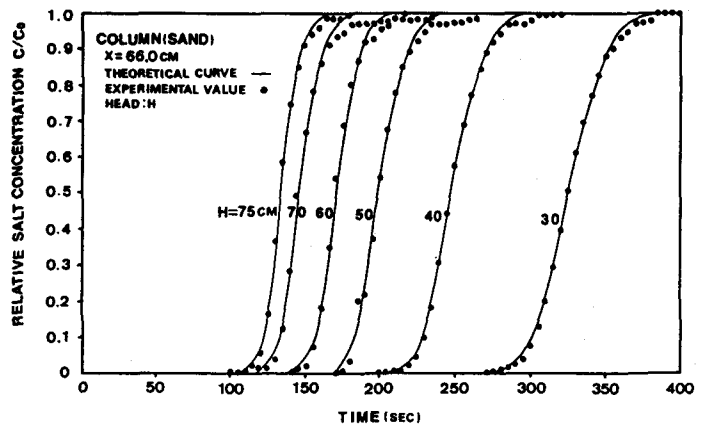


図 3-2 一次元分散実験による塩分濃度破過曲線

上式において、 K_L / Ux が 0.0075 以下では右边第 2 項を無視しても 5 % 以下の誤差であり、簡便化のためにしばしば省略される。従って、式 (3. 3) は次式のように変形される。

$$\begin{aligned} \frac{c}{c_0} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(X_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-\eta^2/2) d\eta \\ &= 1 - \Phi(X) \end{aligned} \quad (3. 4)$$

ここで、 $X_0 = (x - Ut) / (4 K_L t)^{1/2}$, $X = (x - Ut) / (2 K_L t)^{1/2}$

上式から相対濃度は平均 $m = Ut$, 分散 $\sigma^2 = 2 K_L t$ をもつ確率分布関数 Φ で表わすことができ、その分布は正規分布となる。従って、相対濃度 $c/c_0 = 0.5$ は平均流速で下方に進行し、この点の前後で主流方向に分散が生ずる²³⁾。

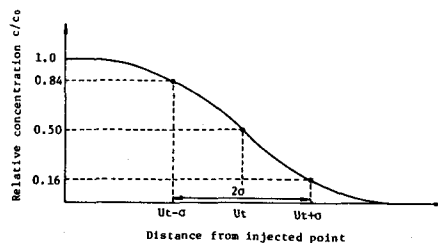


図 3-3 縦方向分散による濃度破過曲線

ここで、理論展開を簡単化するための塩分濃度の場所的变化を模式的に表現したものが図3-3である。この曲線は砂層の多点で同時刻に測定を行なった場合に得られる濃度破過曲線である。この曲線を平均 m 、分散 σ^2 をもつ正規確率分布曲線と考えると、相対濃度 $c/c_0 = 0.50$ に相当する横軸の $x_{0.50} = Ut$ は平均 m となる。また、相対濃度 $c/c_0 = 0.84$ および 0.16 に相当する横軸は $x_{0.84} = m - \sigma$ 、 $x_{0.16} = m + \sigma$ にそれぞれ等しい。従って、次式が成立する。

$$2\sigma = 2(2K_L t)^{1/2} = x_{0.16} - x_{0.84} \quad (3.5)$$

上式を変形すると分散係数は次式で与えられる。

$$K_L = (x_{0.16} - x_{0.84})^2 / (8t) \quad (3.6)$$

以上の展開は砂層全域で同時刻に測定された濃度破過曲線に基づき分散係数を求める方法を記述したが、次に図3-2に示す任意点で測定された濃度破過曲線を用いて分散係数を算定する方法を考える。式(3.4)で示す正規確率分布関数は次の特性をもつ。

$$\Phi(X=1) = 0.84, \Phi(X=-1) = 0.16 \quad (3.7)$$

従って、次式が成立する。

$$\frac{(x - Ut_{0.16})}{\sqrt{2K_L t_{0.16}}} - \frac{(x - Ut_{0.84})}{\sqrt{2K_L t_{0.84}}} = 2 \quad (3.8)$$

上式から分散係数は次式で与えられる。

$$K_L = [(x - Ut_{0.16})/(t_{0.16})^{1/2} - (x - Ut_{0.84})/(t_{0.84})^{1/2}]^2 / 8 \quad (3.9)$$

多孔媒体として砂、スチレン球およびガラス球を用いたカラム実験によって得られた結果を図3-4に示す。同図には最小2乗近似による回帰式を併せて提示してある²⁴⁾。この回帰式は次式で与えられる。

$$K_L = 0.139 U^{1.025} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (0.01 < U < 1.0 \text{ cm/s}) \quad (3.10)$$

上式は式(2.13)を満足し、縦方向分散係数はほぼ浸透流速に比例することが認められ、係数0.139は実験試料の平均径に近似した値であり、多孔媒体の幾何的特性のみに依存し、流速の空間的相関を示すものと考えられる。この実験に用いた多孔媒体の平均粒径は $d = 1 \text{ mm}$ であり、ペクレ数は $50 < P_e < 5000$ の範囲で図2-1の分散領域④にほぼ相当する。この領域では、分散係数がペクレ数に正比例し、式(3.10)はこの特性に従うことから妥当なものであるといえる。

Rumer は平均粒径 $d = 1.65 \text{ mm}$ の石英砂に対してつぎに示す実験結果を提示している²⁵⁾。

$$K_L = 0.2 U^{1.083} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (3.11)$$

式(3.10)と(3.11)を比較すると平均粒径がほぼ等しいため、指数および係数とも近似した値となっている。

3.2 二次元砂層分散実験

縦、横方向分散係数を同時に求めるには、式(1.11)の解析解が得られる境界条件の下で砂層帯水層モデルを形成し塩水を鉛直方向 (z 方向) に瞬間線状放出させ、平面的 (xy 平面) に配置した

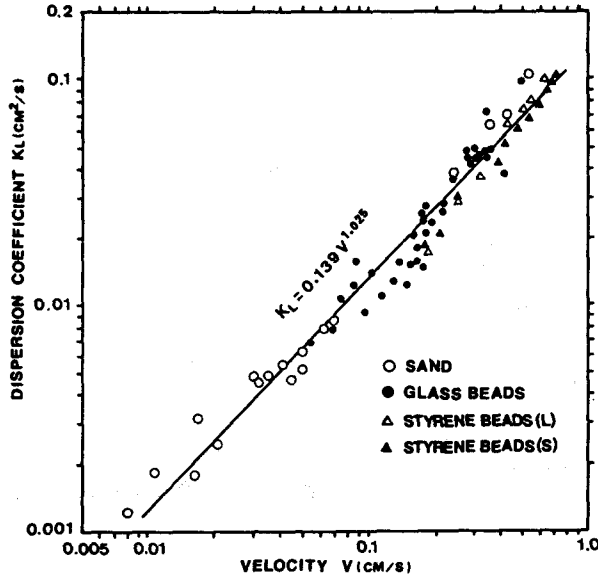


図 3-4 縦方向分散係数と浸透流速との関係

数点の観測点で濃度測定を行なう。

この状態における塩分濃度の挙動は次式で示される。

$$c(x, y, t) = \frac{c_0 Q}{8 \pi K_L R} \exp(-\gamma t) \exp\left(\frac{Ux - \beta R}{2 K_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{R - \beta t}{\sqrt{4 K_L t}}\right) \quad (3.12)$$

ここに、 $R = \sqrt{x^2 + Y^2}$ 、 $Y = y \sqrt{K_L / K_T}$ 、 $\beta = \sqrt{U^2 - 4 K_L \gamma}$ 、 c_0 は初期塩分濃度、 Q は流量、 γ は実験において塩水を矩形パルス状に瞬間放出することが不可能であり、実験時の放出条件に合わせるため導入した濃度減衰率を表わす。

横方向分散係数を求めるためには、上式で示すように縦方向分散係数および浸透流速と連成させて求めなければならない。従って、現在、最小2乗法や非線形最適化手法の一法である Powell 法を用いて最適同定を行なっている²⁶⁾。これらの方法は観測値に対する式(3.12)の計算値の誤差を最小とする分散係数を求めることに帰着される。

図 3-5 は粒径範囲 0.60~0.70mm の試料砂を用いて層厚 30cm、幅 40cm、長さ 70cm の帯水層モデルを製作し、動水勾配 0.03 の水理条件で塩水放出点から 50cm 地点で得られた濃度破過曲線を表わす。黒丸で示す実験値は測定時間 2925 秒、測定間隔 15 秒で得られたものであり、理論曲線は Powell の共役方向法によって縦、横分散係数および浸透流速を最適同定したものである。図 3-6 は実験濃度破過曲線を正規確率紙上にプロットしたものであり、微小な波状変動を有しているがほぼ正規分布形となる。表 3-1 は粒径範囲を変化させて縦、横方向分散係数を求めた結果を示す。この結果、横方向分散係数は縦方向分散係数の約 1/10 程度の値となり、分散率 ϵ_L 、 ϵ_T は粒径の変化とは無関係にほぼ一定値となる。

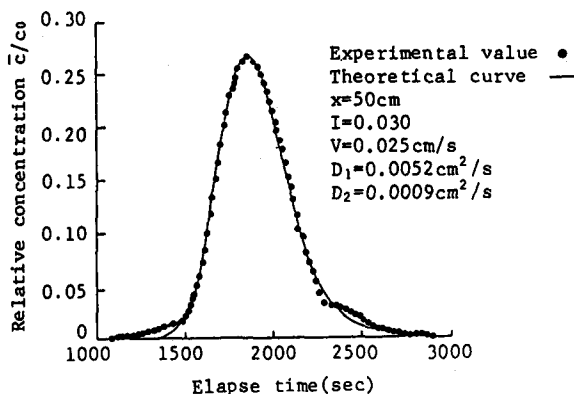


図 3-5 二次元分散実験による
塩分濃度破過曲線

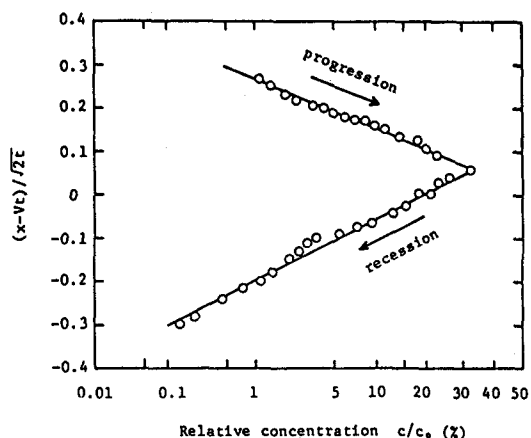


図 3-6 濃度破過曲線の正規分布へのあてはめ

表 3-1 試料砂の透水係数, 分散係数および分散率

試料 No.	粒径範囲 (mm)	透水係数 k (cm/s)	浸透流速 U (cm/s)	分散 係 数		分 散 率	
				K_L (cm ² /s)	K_T (cm ² /s)	ϵ_L (cm)	ϵ_T (cm)
1	0.13-0.30	0.03	0.005	0.0006	0.0001	0.13	0.02
2	0.30-0.40	0.10	0.015	0.0030	0.0003	0.20	0.02
3	0.40-0.60	0.25	0.038	0.0083	0.0008	0.22	0.02
4	0.60-0.71	0.36	0.054	0.0124	0.0016	0.23	0.03
5	0.71-0.85	0.46	0.069	0.0159	0.0021	0.23	0.03

結 び

浸透流が多様な形状をもつ空隙流路を流動することによって空間的な速度偏差を生じ、溶質は主流による移流拡散と小さな空間スケールの不規則運動に起因する横方向分散の二つの機構で搬送されることが明らかになった。

このような分散においては、分散係数は拡散係数のように流体の物性値を表すパラメータではなく、浸透場の状態量の関数で与えられる。しかし、分散率 ϵ が多孔媒体固有の値を示し、ペクレ数と連成させて分散係数を推定することができ、分散方程式により実際の分散現象を定量的に論ずることが可能であることを示唆している。

本講では、物理的な現象による溶質移動について述べたが、現実の溶質は多孔媒体に吸着され分散機構はさらに複雑なものとなる。今後はこうした現象を含めた問題に関する基礎的研究が必要となる。

参 考 文 献

- 1) Cooper, H. H., Jr., A Hypothesis Concerning the Dynamic Balance of Fresh Water and Salt Water in a Coastal Aquifer, *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, No. 4, pp. 461 – 467, 1959.
- 2) Kohout, F. A., Cyclic Flow of Salt Water in the Biscayne Aquifer of Southeastern Florida, *J. Geophys. Res.*, Vol. 65, pp. 2133 – 2141, 1960.
- 3) Scheidegger, A. E., Statistical Hydrodynamic in Porous Media, *J. Appl. Physics*, 25, pp. 994 – 1001, 1954.
- 4) Rumer, R. R., Longitudinal Dispersion in Steady and Unsteady Flow, *J. Hydraul. Div. ASCE*, Vol. 88, HY4, pp. 147 – 171, 1962.
- 5) Gelhar, L. W., A. L. Gutjahr, and R. L. Naff, Stochastic Analysis of Macrodispersion in a Stratified Aquifer, *Water Resour. Res.*, Vol. 15, No. 6, pp. 1387 – 1397, 1979.
- 6) Matheron, G., and G. de Marsily, Is Transport in Porous Media Always Diffusive?, *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 5, pp. 902 – 917, 1980.
- 7) Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier, p. 581, 1972.
- 8) Taylor, G. I., The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe, *Proc. Royal Soc., A*, pp. 446 – 468, 1954.
- 9) Elder, J. W., The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear, *J. Fluid Mech.*, 1959.
- 10) Sato, K., Sur le coefficient de la dispersion en milieu poreux, 大阪府立高専紀要, Vol. 3, p. 99, 1969.
- 11) Hiby, J. W., Longitudinal and Transverse Mixing during Single-Phase Flow through Granular beds, 1st Chem. Engr., Symp. Interaction between Fluids and Particles, London, pp. 312 – 325, 1962.
- 12) Saffman, P. G., Dispersion due to Molecular Diffusion and Macroscopic Mixing in Flow through a Network of Capillaries, *J. Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 194 – 208, 1960.
- 13) 福山正美・桂山幸典, 飽和多孔性媒質内における分子の拡散および分散現象に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 246, pp. 73–82, 1976.
- 14) 神野健二, 浸透層内の縦方向分散係数および細管モデルについて, 日本地下水学会会誌, 第21巻, 第2号, 1979.
- 15) Li, W-H., and F-H. Lai, Experiments of Lateral Dispersion in Porous Media, *J. Hydraul. Div.* Vol. 92, HY6, pp. 141 – 149, 1966.
- 16) Pfannkuch, H. O., Contribution à l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux, *Revue. de l'Institut Français du Pétrole*, Vol. 18, pp. 215 – 270, 1963.
- 17) Raudkivi, A. J., and R. A. Callander, Analysis of Groundwater Flow, Edward Arnold, pp. 36

— 38. 1976.

- 18) Fried, J. J., and M. A. Combarous, Dispersion in Porous Media, Adv. Hydrosience, Vol. 7, pp. 169 — 282, 1971.
- 19) Klotz, D., K. P. Seiler, H. Moser, and F. Neumaier, Dispersivity and Velocity Relationship from Laboratory and Field Experiments, J. Hydrol., Vol. 45, pp. 169 — 184, 1980.
- 20) Pickens, J. F., and G. E. Grisak, Scale-Depend Dispersion in a Stratified Granular Aquifer, Water Resour. Res., Vol. 17, No. 4, pp. 1191 — 1211, 1981.
- 21) Marsily, G. de, Quantitative Hydrogeology, Academic Press, p. 238, 1986.
- 22) 本間仁・林泰造編, 続水理学, 丸善, p. 305, 1980.
- 23) Harleman. D. R. F., and R. R. Rumer, Longitudinal and Lateral Dispersion in a Isotropic Porous Media, J. Fluid Mech., Vol. 16, part 3, pp. 385 — 394, 1963.
- 24) 藤間聡・馬場一孝, 多孔体の分散係数の最適同定について, 室蘭工業大学研究報告, 第34号, pp. 17—24, 1984.
- 25) 前出4)
- 26) 前出24)

記 号 表

C : 体積要素平均濃度	R_e : レイノルズ数
c : 溶質濃度	S : 体積要素の表面積
$\hat{c}$: 溶質変量	S_c : シュミット数
D_m : 分子拡散係数	t : 時間
d : 多孔媒体粒径	U : 平均浸透速度
g : 重力加速度	U_D : ダルシー流速
K : 一般的な分散係数	u : 浸透流速
K_L : 縦方向分散係数	X : 式(3. 4)
K_T : 横方向分散係数	x : 主流方向距離
k : 透水係数	Y : 式(3. 12)
L : 流路特性長	y : 横断方向距離
m : 指数, 濃度重心位置	z : 鉛直方向距離
n : 単位ベクトル	α_L : 式(2. 10)
P_e : ペクレ数	α_T : 式(2. 12)
Q : 浸透流量	β : 式(3. 12), 式(2. 11)
R : 式(3. 12)	γ : 濃度減衰率

ϵ_L : 縦方向分散率

ϵ_T : 横方向分散率

η : 式(3. 4)

κ : 固有浸透係数

λ : 空隙率

λ_e : 有効空隙率

μ : 粘性係数

ρ : 密度

σ : 標準偏差

ϕ : 式(2. 6)