



不均質多孔質媒体中の水理物質移動 概念およびその原位置試験への適用

畑中耕一郎 梅木 博之*

東海事業所環境技術開発部
*環境技術開発推進本部

資料番号: 94-10

Concept on Groundwater Flow and Mass Transport Through
Heterogeneous Porous Media and Application to In-Situ
Test Analysis

Kolchiro Hatanaka Hiroyuki Umeki*
(Waste Technology Development Division, Tokai Works
* Radioactive Waste Management Project)

地層はその特性により通常多孔質媒体あるいは亀裂性媒体と見なされ、モデル化される。地層のもつ不均質性は、地下水流動のチャンネルや核種の移行経路を決定するため、これを定量的に把握することは地層中の水理物質移動を考える上で重要な課題となっている。したがって、原位置試験から得られるデータの統計的特性を解釈することにより不均質性に関する相関関係を求め、場の不均質性を推定する手法の開発およびそうして求めた不均質性の下で水理物質移動現象をモデル化し、実測値と比較する検証研究が現在盛んに行われている。本報告では、岩盤が多孔質媒体でモデル化できる場合について、不均質場の推定手法とその中で水理物質移動概念について述べ、動燃事業団がNAGRAと共同で実施しているグリムゼル試験サイトでのトレーサ試験の解析について紹介する。

1. はじめに

地層中の核種移行は、移行経路の幾何学的特徴や遅延特性等、媒体である地層の構造的な特性を強く反映した因子に影響を受けると考えられる¹⁾。

地層はその特性により、通常多孔質媒体あるいは亀裂性媒体と見なされ、モデル化が行われる。固結度の低い堆積岩が主に多孔質媒体としてモデル化されるが、亀裂性の岩盤であっても、亀裂が密に生じていれば、ある大きさ以上のスケールを考えた場合、透水係数が一定となるような等価多孔質媒体と見なされる。また、内部に亀裂を有する結晶質岩あるいは固結した堆積岩で、亀裂数の少ないあるいはモデル化領域が小さく個々の亀裂の存在が無視できない場合には、等価多孔質媒体とみなすことができず、亀裂性岩盤としてモデル化される。多孔質媒体は、透水係数の場所的な違いにより不均質性が発生し、亀裂性岩盤は、亀裂のネットワーク構造および各亀裂内の透水性、あるいは開口部分の変化により不均質性が発生する。

地層の不均質性は、地層を構成する岩盤の種類、構造、亀裂状態等の地質データ、透水係数、地下水位および間隙水圧等の水理データならびにトレーサ試験により得られる破過曲線（観測点における濃度の時間変化）を解釈することにより定量化される。近年、地層のもつ透水性に関する不均質性をいかに定量化し、地層処分システム性能評価に反映させるかが、モデル構築上の重要な課題となってきており、我が国を初め、各国で不均質性を考慮した新たなモデル開発が行われている。動燃事業団では、このような地層の特性を把握する手法の確立および地層中での地下水/物質移動モデルの検証を目的として、釜石鉱山（亀裂性岩盤）を利用して原位置試験を実施している。また、NAGRA（スイス放射性廃棄物管理共同組合）との共同研究として、グリムゼル試験サイトに存在する単一破砕帯を対象としたトレーサ試験を実施している他、SKB（スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社）が実施しているエスボ島での

破碎帯ネットワークを対象とした水理・トレーサ試験の解析に関するワークショップへの参加を行い、不均質性定量化/モデル検証に取り組んでいる。

本報告では、個々の亀裂およびそれらのネットワーク構造についての評価を行わなければならない亀裂性媒体と比べて、取り扱いが容易である多孔質媒体として岩盤がモデル化できる場合について、不均質な透水係数場の推定手法とその中での水理物質移動概念について述べる。さらに上述の動燃事業団が関係している原位置試験のうち、本概念の適用例として、グリムゼル試験サイトで実施されたトレーサ試験解析について簡単に述べる。

2. 不均質場の推定方法

本来地層の透水性に関する不均質性は3次元的なものであるが、地層を等価多孔質媒体として考える場合、これまでの報告例をみると、対象とする帯水層（断層を含む）のみに着目して、透水係数を帯水層厚さ方向に平均化した透水量係数の概念を用いて平面2次元（準3次元）に解析を行っている例が多い。したがって、ここでは、あるサイトにおいて透水量係数が実測されているものとして2次元の場合について話を進める。

いま、2次元領域内の n 個の点 $x_1, x_2, \dots, x_n$ で透水量係数 $Z(x_i)$ が実測されていると考える。 n 個の測定値をもとに領域内の透水量係数分布を推定するためには、統計上の仮定が必要となる。弱定常（2次定常）の仮定が成り立つと考える場合、透水量係数のその領域での平均値が(2.1)式に示すように一定であり、

$$E[Z(x)] = m \quad (2.1)$$

また、共分散が(2.2)式に示すように場所の関数ではなく、2つの測定点間の距離の関数として表わされる。

$$C(h) = E[Z(x_1)Z(x_2)] - m^2 \quad (2.2)$$

ここで、 $h = x_1 - x_2$

しかしながら、実際問題として、2次定常の仮定は n 個の透水量係数のデータに基づき計算してみると満足されないケースが多く、したがって、通常2次定常の仮定よりも制限の緩いイントリンシックの仮定が、透水量係数場の推定に適用される。

イントリンシックの仮定は、2点間の透水量係数の増分 $[Z(x+h) - Z(x)]$ に対する2次定常の関係で表わされる。すなわち、

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = m(h) \quad (2.3)$$

$$\text{var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (2.4)$$

ここで、 $\text{var}[\]$ は分散を表わしており、増分の分散 $\gamma(h)$ はバリオグラムと呼ばれ $Z(x)$ の場所的な相関性を表わす指標である。イントリンシックの仮定を考える場合は、通常 $m=0$ であり、(2.3)、(2.4)式は(2.5)、(2.6)式のように書き換えられる。

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (2.5)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (2.6)$$

したがって、 n 個の観測点を有する領域の透水量係数分布を推定する場合、(2.5)、(2.6)式に示す増分の平均値およびバリオグラムが基本になる。特にバリオグラムは、領域内の透水量係数の相関構造を表わす指標であるので、計算の際には透水量係数の観測値およびその観測点の座標データを適切に統計処理することが必要である。観測値により計算されたバリオグラムから、理論バリオグラムのパラメータがフィッティングにより決定される。理論バリオグラムには、線形モデル、べき乗モデル、球形モデル、指数モデル等の様々な形状をもつモデルが提案されている。この理論バリオグラムを用いて、クリギング法あるいはモンテカルロ法により、領域の透水量係数分布が推定される。

クリギング法は、バリオグラムで表わされる $Z(x)$ の場所的な相関性に基づいて観測点以外の $Z(x)$ の値を推定する内挿法の一つであり、領域内の任意の点での最適透水量係数の値 Z^* が(2.7)式により計算される。

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda^i Z_i \quad (2.7)$$

ここで、 λ^i は重みであり、観測点 i における透水量係数の実測値 Z_i に対してそれぞれ乗じられ、その線形和が、任意の点での透水量係数の最適推定値になる。また、(2.8)式が制約条件として課せられる。

$$\sum_i \lambda_i = 1 \quad (2.8)$$

一方、モンテカルロ法では、理論バリオグラムで表わされる透水量係数と距離との相関構造の関係から、ランダムにサンプリングを行うことにより、ひとつの透水量係数場が生成される。この操作を繰り返すことにより、多くの透水量係数場が生成され、生成された個々の透水量係数場が荷重平均される。荷重平均の重みは、各観測点における透水量係数の実測値と荷重平均化された透水量係数場での値が一致するよう条件付けが行われる。

3. 地下水および物質移動モデル

3.1 地下水移動モデル

多孔質媒体中の地下水流動は、流速が動水勾配に比例するというダルシー則と連続の式により表現される。等方性透水係数を有する2次元領域を考えると、ダルシー則は(3.1)、(3.2)式で示される。

$$u = K(x, y) \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.1)$$

$$v = K(x, y) \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3.2)$$

ここで、 u : x 方向ダルシー流速(L/T)

v : y 方向ダルシー流速(L/T)

K : 透水係数(L/T)

ϕ : 全水頭(L)

流れの定常状態を考えると連続の式は(3.3)式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

(3.1)、(3.2)式を(3.3)式に代入して(3.4)式を得る。(3.4)式が、定常状態等方場を仮定した場合の2次元領域での地下水流動の支配方程式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(x, y) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(x, y) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.4)$$

地下水が厚さ b の帯水層内を流動していると考え、この帯水層内の平均的な地下水流動は(3.5)式により表現される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T(x, y) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T(x, y) \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.5)$$

$$T(x, y) = bK(x, y) \quad (3.6)$$

$$\Phi = \frac{1}{b} \int_z^{z+b} \phi(z) dz \quad (3.7)$$

ここで、 T : 透水量係数(L²/T)

Φ : 帯水層厚さ方向の平均全水頭(L)

3.2 物質移動モデル

多孔質媒体中の物質移動は、移流、分散、拡散、吸着、崩壊を考えると、物質収支から(3.8)式に示される方程式が得られる。ここでは一般性をもたせるために、方程式はベクトル表示で示している。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \theta) \rho_s \frac{\partial S}{\partial t} = \nabla(D \nabla C) - \nabla(CV) - \lambda \theta C - \lambda(1 - \theta) \rho_s S \quad (3.8)$$

ここで、 C : 液相中の物質濃度(M/L³)

S : 固相中での物質濃度(M/M)

θ : 空隙率(-)

D : 分散係数(L²/T)

V : ダルシー流速ベクトル(L/T)

λ : 崩壊定数(1/T)

ρ_s : 固相の真密度(M/L³)

固相と液相間に瞬時の線形吸着を仮定すると(3.9)式が得られる。

$$S = K_d C \quad (3.9)$$

ここで、 K_d : 分配係数(L³/M)

(3.9)式を(3.8)式に代入すると、多孔質媒体中を移動する物質の支配方程式(3.10)が得られる。

$$\theta R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D \nabla C) - \nabla(CV) - \lambda \theta R_d C \quad (3.10)$$

$$R_d = 1 + \frac{(1 - \theta) K_d \rho_s}{\theta} \quad (3.11)$$

ここで、 R_d : 遅延係数(-)

4. スイス、グリムゼル試験サイトでのトレーサ試験解析

4.1 解析のアプローチ

グリムゼル試験サイトで実施されたトレーサ試

験の解析は、以下の手順で実施されている²⁾。

ステップ1：試験サイトの孔井から実測された水理データに基づいた、不均質場作成および水理解析。

ステップ2：非吸着性トレーサのウラン、 ^{82}Br の破過曲線を使用した、トレーサ移行モデルのキャリブレーション。

ステップ3：キャリブレーションを行ったモデルによる、弱吸着性トレーサ(^{22}Na 、 ^{85}Sr)を用いた試験から得られる観測データの予測。

ステップ4：予測データと観測データの比較および考察

ステップ5：強吸着性トレーサ(^{135}Cs 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$)を用いた試験での観測データを使用した、十分にキャリブレートされた移行モデルの検証

4.2 グリムゼル試験サイトにおけるトレーサ試験

グリムゼル試験サイトにおけるトレーサ試験は、結晶質岩盤内に存在する2次元平面で近似できる単一の破碎帯を対象としており、地球化学的挙動の異なるトレーサ(He、Br、I、Na、Sr、Cs、Tcおよびウラン)が試験に使用された。各々の試験では、移行距離、トレーサ注水/揚水比等の試験条件を種々変えて、多くのデータが採取されている。

破碎帯には8本の孔井が、破碎帯と交差するように掘削されており、単一孔試験とクロスホール試験が破碎帯に対して実施され、透水量係数が各試験について測定されている。図1に解析対象となっている破碎帯の平面図、および破碎帯に対して掘削された孔井の位置を示す。また、表1は、単一孔試験により測定された透水量係数を示している³⁾。

トレーサ試験は、注入孔と揚水孔の2つの孔井を使用したダイボール型の試験であり、試験に使

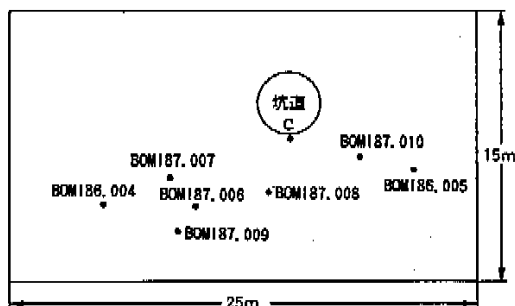


図1 破碎帯の平面図および孔井の位置

表1 各孔井の位置および透水量係数

孔井	x(m)	y(m)	T (m ² /s)	logT
BOM186.004	-9.95	-5.61	1.30E-06	-5.89
BOM186.005	6.6	-3.72	4.20E-08	-7.38
BOM186.006	-5.06	-5.77	1.10E-06	-5.95
BOM187.007	-6.43	-4.15	1.00E-07	-7.00
BOM187.008	-1.19	-4.9	7.00E-07	-6.15
BOM187.009	-6.02	-7.19	4.40E-06	-5.36
BOM187.010	3.73	-2.99	1.00E-07	-7.00

用した孔井間の距離は4.7mおよび1.7mである。

4.3 概念モデル

試験対象である破碎帯は、mylonite^{*1)}およびfault gouge^{**2)}から構成されており、fault gouge部分の空隙率は10~30%、myloniteは実質的には不透水である⁴⁾。これらの破碎帯内の幾何学特性を考慮して作成した概念モデルを図2に示す。

4.4 不均質場の作成

破碎帯中の透水量係数に関する不均質場の相関特性を把握するために、透水量係数の実測値に基づき、バリオグラムを計算した。バリオグラムを計算するにあたり、できるだけ多くの透水量係数データを使用する必要があるため、表1に示してある7つの単一孔試験で得られたデータに加え、クロスホール試験で得られたデータも使用した。(2.6)式に示されているバリオグラムの計算には、(4.1)式に示すように透水量係数の常用対数値をZ(x)の値として使用した。



図2 破碎帯の概念モデル

* 1) mylonite

固結した岩石が著しい圧砕作用を受け、すべての原鉱物が破砕されつくして、微粒集合体に変ったもの。

** 2) fault gouge

断層運動による両側の摩擦破砕で生じ、断層面の空隙を脈状に満たす粘土。断層粘土ともいう。

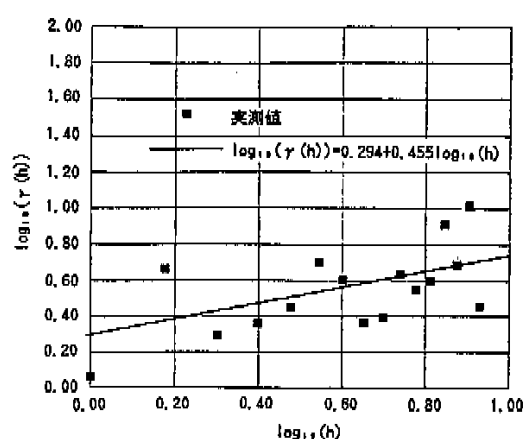


図3 バリオグラム

$$Z(x) = \log_{10} T(x) \quad (4.1)$$

図3は、2点間の距離に対するバリオグラムを両対数グラフにプロットしたものである。

図3に示される両対数グラフ上での両者の関係を、(4.2)式に示すべき乗則で近似した。

$$\log_{10}(\gamma(h)) = a + 2H \log_{10}(h) \quad (4.2)$$

ここで、 H はHurst数と呼ばれる。最小二乗法を用いて(4.2)式のパラメータを決定することにより、(4.3)式が得られた。

$$\log_{10}(\gamma(h)) = 0.294 + 0.455 \log_{10}(h) \quad (4.3)$$

本解析では、(4.3)式をもとに解析領域内の不均質場を発生させた。

4.5 数学モデル

地下水流動に関しては、破碎帯内の自然流の影響は、トレーサ試験によって生じる流れに比べて無視できるものと仮定して、(3.5)式に示されるモデルにタイボール試験の注入/揚水を考慮した(4.4)式を支配方程式として用いた。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x, y) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(T(x, y) \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + Q = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

ここで、 Q は注入流量あるいは揚水流量を表わしている。

図2に示した概念モデル内でのトレーサの移動は、亀裂領域内で移流と分散が卓越し、fault gouge

内で拡散が卓越すると考え、(3.8)式で示したモデルを適用すると、亀裂領域およびfault gouge内の支配方程式は(4.5)、(4.6)式ようになる。(4.5)式右辺第4項は、亀裂領域とfault gouge間の物質の流入/流出を表わしている。

亀裂領域内：

$$\begin{aligned} R_{d1} \theta_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} = \nabla(D \nabla C_1) - \nabla(C_1 V) \\ - \lambda \theta_1 R_{d1} C_1 + \frac{\theta_2 D_p}{b} \frac{\partial C_2}{\partial z} \Big|_{z=b} \end{aligned} \quad (4.5)$$

fault gouge内：

$$R_{d2} \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} - \lambda R_{d2} C_2 \quad (4.6)$$

また、遅延係数および分散係数は(4.7)、(4.8)式で表わされる。

$$R_{di} = 1 + \frac{(1 - \theta_i) K_d}{\theta_i} \rho_s \quad (4.7)$$

$$D = \alpha_L |V| + D_e \quad (4.8)$$

ここで、 D_p ：空隙中の拡散係数(L^2/T)

D_m ：水中の拡散係数(L^2/T)

D_e ：媒体中の実効拡散係数(L^2/T)

$2b$ ：亀裂領域の幅(L)

i ：指標、1=亀裂領域、2=fault gouge

α_L ：分散率

4.6 解析結果

図4は、非吸着性トレーサであるウラニンの破過曲線(観測濃度の時系列曲線)をもとに、(4.5)、(4.6)式に示されるモデルでキャリブレーションを行った結果である。表2に推定されたパラメータの値を示す。

図5は、非吸着性トレーサの破過曲線により推定したパラメータ(表2に示す)を用いて、吸着性トレーサである ^{22}Na の破過曲線を K_d 値を種々変化させることにより予測した計算結果である。 ^{22}Na を用いたトレーサ試験で得られた破過曲線の観測データも合わせて示している。観測値と計算値との比較から、 K_d の範囲が0-0.35の範囲内で、両者がほぼ良好な一致を示すことがわかる。このときの K_d 値は、実験で測定された範囲内にあるものの、一般的な K_d 値のバッチ試験による測定範囲では小さめの値となっている。これは、

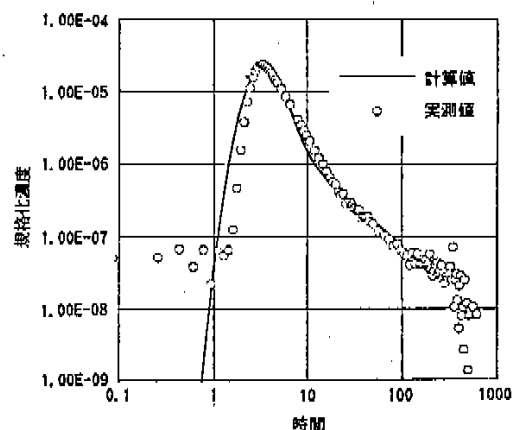


図4 実測値と計算値の比較 (ウラン)

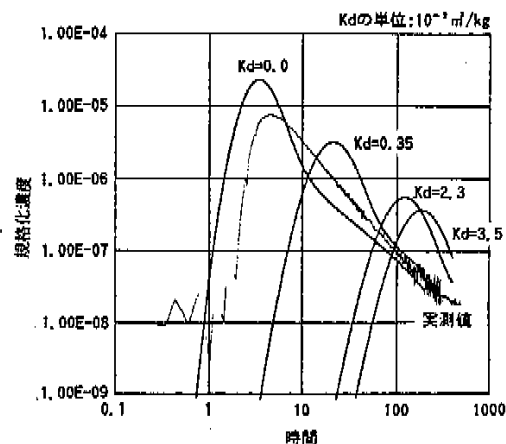
図5 ^{22}Na の破過曲線の計算値と観測値の比較

表2 推定したパラメータ

パラメータ	推定値
α_L (m)	0.35
θ_1 (-)	$1.30\text{E}-01$
$\theta_2 D_0$ (m^2/s)	$5.00\text{E}-11$
ρ_s (kg/m^3)	2700
$2b$ (m)	$1.00\text{E}-02$

試料作成によって生じる表面積の増加が核種の吸着を大きめに評価しているためと考えられる。

5. おわりに

本報告では、不均質場の作成手法、地下水/物質移動のモデル化の考え方、およびグリムセル試験サイトでのトレーサ試験解析について概略を述べた。地層の透水性に関する不均質性については、透水性の場所的な相関関係を示すバリオグラムを適切に作成することが重要である。バリオグラムに基づき生成される不均質性は、地下水流動のチャンネルや核種の移行径路の形状に大きな影響を及ぼす。生成を行う手法としては、クリギング法とモンテカルロ法が主として使用されている。不均質性を統計的に解釈する方法は、本報告で述べた帯水層パラメータの推定問題ばかりでなく、亀裂ネットワークモデリングや地下水位マップ作成等で現在盛んに用いられている。

多孔質媒体中のダルシー則と連続式に基づく地下水流動をモデルは、従来から様々な地下水問題に使用されてきている。その支配方程式は差分法あるいは有限要素法で離散化され解法される。物

質移動に関しては、3.2節で示した移流分散方程式を、直接、差分法や有限要素法を用いて解法する手法が従来用いられていたが、最近では、粒子の移動を確率的に追跡してゆく粒子追跡法を用いた解析が主流となりつつある。

原位置試験の解析例として、グリムセル試験サイトでのトレーサ試験の解析について示した。この解析例では、非吸着性トレーサの試験データを用いてキャリブレーションを行ったモデルで吸着性トレーサの破過曲線の子測を行ったところ、観測値と計算値間で良好な一致を示した。しかしながら、このときの分配係数 K_d の値は、実験室で採取された値に比べ小さい値であった。

今後、原位置での試験を実施するにあたり、信頼性のある解析が行えるよう、本論で述べた解析手法および解析モデルの高度化を行っていくとともに、これまでに得られた成果を原位置でのデータ採取計画や試験設計に反映していく予定である。

参考文献

- 1) 動燃事業団、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告—平成3年度—動燃技術資料、PNC TN 1410 92-081、(1992)。
- 2) H. Umeki, K. Hatanaka, et al, THE NAGRA/PNC GRIMSEL TEST SITE RADIONUCLIDE MIGRATION EXPERIMENT: RIGOROUS FIELD TESTING OF TRANSPORT MODELS, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII: Mater. Res. Soc. Symp. Proc, (1994)。
- 3) 動燃事業団、地層処分開発の現状 (平成5年度)、動燃技術資料、PNC TN1410 94-094、(1994)。
- 4) U. Frick, et al., Grimsel Test Site: The Radionuclide Migration Experiment-Overview of Investigations 1985-1990, Nagra Technical Report, NTB91-04, (1992)。