

# 現地トレーサー試験と数値計算による 不均一浸透場の推定

中川 啓<sup>1</sup>・神野健二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 九州大学大学院助手 農学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院(同上)

帶水層は、透水係数などの水理パラメーターに関して不均一性を有しているが、その不均一な分布の把握は、対象とする帶水層の地下水流れ及び汚染物質の移流分散挙動を評価するうえで重要である。本研究では、トレーサー試験結果と数値計算結果とを比較し、適合度検定により帶水層の透水係数分布を推定する自己回帰モデルのパラメーターを評価する方法を提案している。また本手法をドイツの Horkheimer Insel 野外実験サイトで行われたトレーサー試験に適用し、実際のトレーサーの移流分散挙動を十分再現できることを示し、本手法の適用性を確認している。

**Key Words:** non-uniform aquifer, tracer test, numerical simulation, test of goodness of fit

## 1. はじめに

地下水汚染は深刻な社会問題となっており、その対策及び管理手法が開発されつつあるが、この場合汚染源近傍における汚染プリュームの分散や選択的経路の特定が重要である<sup>1)</sup>。地下水汚染の対策や管理を行う際には、数値シミュレーションによる検討が重要であり、これまでも種々の事例が検討されてきた<sup>2)~7)</sup>。ところで、帶水層は一般的には、その浸透特性に関して不均一性を有しているため、地下水の流動や汚染物質の移動を評価するにあたっては、この不均一性を考慮することが重要と考えられる。このような視点に立ち、著者らは不均一浸透場の流れと物質輸送に関する室内実験に対して数値計算を行い、解析の妥当性を示し、不均一浸透場において浸透特性のランダムな分布に起因して生じる分散、すなわち巨視的分散について検討した<sup>8)</sup>。(本研究では、微視的分散を個々の透水係数の分布している局所ごとに起こる分散と考え、巨視的分散は浸透場全体としてみたときの分散と定義する。)

汚染プリュームやトレーサーの輸送過程に関して、Kinzelbach<sup>9)</sup>やAppelo and Postma<sup>10)</sup>のテキストでは微視的分散と巨視的分散の意味について説明が加えられている。藤間<sup>11)</sup>は巨視的分散長について、多層地盤や透水係数が分布関数で表される帶水層を対象として、モーメント法を用いて理論的及び実験的研究を行っている。著者らは、透水係数とこれらの不均

一分布に起因する巨視的分散との関係について検討した<sup>12)</sup>。

不均一浸透場を議論するにあたっては、分散係数や分散長(本研究では、分散係数を流速に比例するとしたときの比例定数を分散長と呼ぶ)の評価が重要である。室内実験レベルでの分散係数や分散長に関する研究は従来より多くある。この微視的分散に対して、Bear<sup>13)</sup>は、均質材料についてペクレ数の大きさに応じて3つの領域に分けて分散長のペクレ数への依存特性について検討した。またSaffman<sup>14),15)</sup>は、多孔媒体を統計的に均質で等方的であるとして、浸透場内の流れ場を等半径、等長の細管の樹枝状結合体にモデル化し、縦方向及び横方向の分散係数に対する解析解を導いた。Harleman and Rumer<sup>16)</sup>は、等方的な多孔媒体を用いた実験を行い、分散係数とレイノルズ数の関係を導いた。一方、現場でのトレーサー試験で求められる巨視的分散係数は、実験室で求められる分散係数と大きく異なることが知られている。Gelhar et al.<sup>17)</sup>は、多孔体と岩盤割れ目の両方の現場計測から得られた分散長について再評価を行い、測定スケールと縦方向、鉛直横方向、水平横方向分散長の関係を図示してまとめた。また、現場スケールの分散長に関しては、注入点から観測井戸までのスケールに依存することが知られているが<sup>9)</sup>、Mercado<sup>18),19)</sup>は、成層モデルを仮定して、トレーサープリュームの平均流下距離に分散長が比例することを理論的に示した。Neuman et al.<sup>20)</sup>も類似の式を

導いている。さらにNeuman and Zhang<sup>21)</sup>は、このような分散長のスケール依存性に対して、スケールが100 m以下とそれ以上に対してそれぞれ直線で近似する式を経験的に導いた。また、Gelhar<sup>22)</sup>のテキストには、縦方向分散長が初期に急に増加し、十分時間が経過した後に、ある一定値に漸近するといった理論解が示されている。同様の考え方は、Dagan<sup>23)</sup>の解析結果を用いた取出の解説文<sup>24)</sup>にも示されている。以上のように、分散長のスケール依存性を説明した研究は数多く存在する。ところで、一般的にはこのスケールとして、トレーサーの注入井戸と観測井戸の間の距離とされているが<sup>9)</sup>、単に観測井戸までの流下距離だけで議論して良いのか、あるいは巨視的分散長が一定値に漸近するまでの距離を指すのかの議論がなく、あいまいである。従って、巨視的分散長を議論する場合のスケールとしては、分散長が一定値に漸近し始める流下距離と定義するのが適切ではないかと考えられる。このためには、観測井戸で検出されるトレーサーが、分散の遷移過程、すなわち微視的分散から巨視的分散への成長過程との段階であるのか、あるいはすでに一定値に収束しているかを調べる必要がある。

著者らは、このような視点に立ち、不均一浸透場における巨視的分散の遷移状態に関する特性評価の方法を提案した<sup>25)</sup>。この評価方法によって汚染源近傍で、未だ汚染物質の巨視的分散が定常に到達していない遷移段階と評価される場合は、対象場を不均一浸透場として取り扱う必要があることを指摘している。すなわち、このような場合には透水係数などの水理パラメーターの不均一な分布を推定しなければならない。しかしながら現実には、対象地域に多数の調査ボーリング井戸を掘削することはコスト上困難な場合が多い。

ところで、トレーサーの輸送は帶水層の局所的な流速分布や微視的な分散過程に応じて異なる。したがって、トレーサー試験と注入井戸及び観測井戸の透水係数の鉛直分布と数値計算とを用いて帶水層の透水係数の不均一性を評価することが考えられる。このように実測のデータから解析モデルのパラメーターを同定する逆問題について、古市・林田<sup>26)</sup>が、地下水汚染予測に関する従来の研究をまとめて解説している。しかし前述したようなトレーサー試験と、その注入井戸及び観測井戸のデータを用いて帶水層の不均一な浸透特性や巨視的分散特性を検討した例は、著者らが知る限り無いようである。

そこで本研究では、1) Smith and Freeze<sup>27)</sup>と類似の自己回帰モデルにより発生した不均一浸透場に対してトレーサー輸送の数値計算を実施して、2) 観測井

戸の濃度時系列と数値計算結果を比較することにより、自己回帰モデルのパラメーターを推定するとともに、3) 現地の巨視的分散機構を解明する。

## 2. 浸透場の推定モデルとその特性

ここでは、本研究で浸透場を発生するために用いる自己回帰モデルを示し、自己回帰係数を変えることに伴う浸透場の変化を調べ、モデルの特性を明らかにしておく。

推定する不均一浸透場の発生に関しては、透水係数の対数変換値の分布が水平方向に  $x$  軸、鉛直方向に  $y$  軸をとり、式(1)に示す自己回帰式に従うと仮定して、自己回帰係数を任意に与え、雑音項  $\varepsilon(x, y)$  と境界条件には平均 0、分散 1.0 の正規乱数を発生する。ただし、ボーリングによりその地点の深度ごとの透水係数がわかっている場合には、これを境界条件として活用する。その後、式(1)を解いて得られた  $Y$  の値を指数変換して透水係数  $k$  を求める。これは透水係数が、対数正規分布に従うことを考慮したものである<sup>28)</sup>。

$$a_{xx} \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + a_{yy} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} - a_0 Y + \varepsilon(x, y) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $Y$ ：透水係数の対数変換値、 $a_{xx}$ 、 $a_{yy}$ 、 $a_0$ ：自己回帰係数で、 $a_{xx}$ 、 $a_{yy}$  及び  $a_0$  の値を種々変えることによって非等方性の  $Y$  の場を任意に発生することができる。

ここでモデルの自己回帰係数に対して、 $Y$  の値がどのように変化するかについて検討しよう。式(1)の差分式は、 $x$  方向に  $i$ 、 $y$  方向に  $j$  とする差分表示に従えば、次のようになる。

$$Y_{i,j} = A_X(Y_{i+1,j} + Y_{i-1,j}) + A_Y(Y_{i,j+1} + Y_{i,j-1}) + A_\varepsilon \varepsilon_{i,j} \quad (2)$$

ここで、右辺第1項、右辺第2項及び右辺第3項の係数は以下のようになる。

$$A_X = \left( \frac{2a_{xx}}{\Delta x^2} + \frac{2a_{yy}}{\Delta y^2} + a_0 \right)^{-1} \left( \frac{a_{xx}}{\Delta x^2} \right) \quad (3)$$

$$A_Y = \left( \frac{2a_{xx}}{\Delta x^2} + \frac{2a_{yy}}{\Delta y^2} + a_0 \right)^{-1} \left( \frac{a_{yy}}{\Delta y^2} \right) \quad (4)$$

$$A_\varepsilon = \left( \frac{2a_{xx}}{\Delta x^2} + \frac{2a_{yy}}{\Delta y^2} + a_0 \right)^{-1} \quad (5)$$

式(2)中の  $A_X$ 、 $A_Y$  は、隣接する差分点の  $Y$  の値が寄与する割合を示している。また  $A_\varepsilon$  は、正規乱数  $\varepsilon$  に

表-1(a)  $a_{xx}=10 \sim 10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=10 \sim 10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.0$  の場合

$a_0=0$		$a_{yy}$			
		10	100	1000	10000
$a_{xx}$	10	$A_x$ 0.146487 0.019894 0.002063 0.000207	$A_y$ 0.353513 0.480106 0.497937 0.499793	$A_\epsilon$ 1.004292 0.136393 0.014146 0.00142	
	100	$A_x$ 0.402795 0.146487 0.019894 0.002063	$A_y$ 0.097205 0.353513 0.480106 0.497937	$A_\epsilon$ 0.27615 0.100429 0.013639 0.001415	
	1000	$A_x$ 0.488218 0.402795 0.146487 0.019894	$A_y$ 0.011782 0.097205 0.353513 0.480106	$A_\epsilon$ 0.033471 0.027615 0.010043 0.001364	
	10000	$A_x$ 0.498796 0.488218 0.402795 0.146487	$A_y$ 0.001204 0.011782 0.097205 0.353513	$A_\epsilon$ 0.00342 0.003347 0.002762 0.001004	

表-1(b)  $a_{xx}=10 \sim 10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=10 \sim 10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.5$  の場合

$a_0=0.5$		$a_{yy}$			
		10	100	1000	10000
$a_{xx}$	10	$A_x$ 0.097519 0.018624 0.002049 0.000207	$A_y$ 0.235339 0.449455 0.49444 0.499438	$A_\epsilon$ 0.668571 0.127685 0.014047 0.001419	
	100	$A_x$ 0.353926 0.139483 0.01976 0.002062	$A_y$ 0.085412 0.33661 0.476854 0.497585	$A_\epsilon$ 0.242646 0.095627 0.013547 0.001414	
	1000	$A_x$ 0.480182 0.397309 0.145755 0.019881	$A_y$ 0.011588 0.095881 0.351747 0.479778	$A_\epsilon$ 0.032921 0.027239 0.009993 0.001363	
	10000	$A_x$ 0.497945 0.487402 0.402239 0.146414	$A_y$ 0.001202 0.011762 0.097071 0.353336	$A_\epsilon$ 0.003414 0.003342 0.002758 0.001004	

表-1(c)  $a_{xx}=10 \sim 10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=10 \sim 10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=1.0$  の場合

$a_0=1$		$a_{yy}$			
		10	100	1000	10000
$a_{xx}$	10	$A_x$ 0.073087 0.017507 0.002035 0.000207	$A_y$ 0.176378 0.422482 0.490991 0.499084	$A_\epsilon$ 0.501071 0.120023 0.013949 0.001418	
	100	$A_x$ 0.315633 0.133118 0.019627 0.00206	$A_y$ 0.076171 0.32125 0.473645 0.497233	$A_\epsilon$ 0.216393 0.091264 0.013456 0.001413	
	1000	$A_x$ 0.472406 0.39197 0.145031 0.019867	$A_y$ 0.0114 0.094593 0.349998 0.479452	$A_\epsilon$ 0.032387 0.026873 0.009943 0.001362	
	10000	$A_x$ 0.497096 0.486589 0.401685 0.14634	$A_y$ 0.0012 0.011743 0.096938 0.353158	$A_\epsilon$ 0.003408 0.003336 0.002754 0.001003	

対する倍率である。表-1は、モデルの自己回帰係数  $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ ,  $a_0$  の変化に対して、 $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_\epsilon$  がどのように変化するかをまとめたものである。表-1(a)には、 $a_0$ を0.0として、 $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ をそれぞれ10  $\text{cm}^2$ から10000  $\text{cm}^2$ まで変化させた場合、表-1(b)には、 $a_0$ を0.5として、 $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ をそれぞれ10  $\text{cm}^2$ から10000  $\text{cm}^2$

まで変化させた場合、表-1(c)には、 $a_0$ を1.0として、 $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ をそれぞれ10  $\text{cm}^2$ から10000  $\text{cm}^2$ まで変化させた場合を示している。ここでは高さ4.0 m, 長さ10.93 mの領域に対して、差分格子間隔 $\Delta x=8.28 \text{ cm}$ ,  $\Delta y=5.33 \text{ cm}$ を用いている。表-1から一般的な特性をまとめると以下のようないいえよう。(1)  $a_{xx}$ が大きく、 $a_{yy}$ が小さいときは、 $A_x$ が大きくなるため、 $x$ 方向に長い相関を持つような場が生成される。(2) 逆に $a_{xx}$ が小さく、 $a_{yy}$ が大きいときは、 $A_y$ が大きくなるため、 $y$ 方向に長い相関を持つような場が生成される。(3)  $a_0$ が大きいときは、 $A_\epsilon$ が小さくなるが、相対的に $A_x$ 及び $A_y$ が小さくなるため場の変動の割合が大きくなる。すなわち不均一浸透場のランダム性が大きくなる。

### 3. 数値計算モデル

ここでは、トレーサー輸送の数値計算において適用する数値計算モデルについて基礎式を示し、整理しておく。

基礎式として鉛直2次元飽和地下水流れの式と、トレーサー濃度に関する鉛直2次元移流分散方程式を用いた<sup>29)</sup>。

#### (1) 地下水流れの式（圧力水頭に関する基礎式）

被圧帶水層の中での鉛直2次元地下水流れの基礎式は、等方性の地盤に対して水平方向に $x$ 軸、鉛直方向に $y$ 軸をとり次式で示される。

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (7)$$

$$v = -k \left( \frac{\partial h}{\partial y} + 1 \right) \quad (8)$$

ここで、 $k$ :透水係数( $\text{cm}/\text{s}$ )、 $t$ :時間(s)、 $h$ :圧力水頭(cm)、 $u$ ,  $v$ : $x$ ,  $y$ 方向のダルシー流速( $\text{cm}/\text{s}$ )である。 $S_s$ は比貯留係数である。なお、ここでは式(8)のようにトレーサー濃度の密度効果は考えていない。

#### (2) 鉛直2次元移流分散方程式（物質輸送に関する基礎式）

トレーサー濃度 $C(x, y, t)$ に関する基礎式は次式で示される。

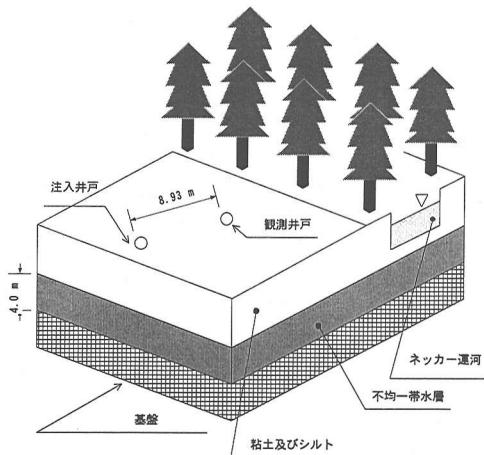


図-1 Horkheimer Insel野外実験サイトの概要

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u'C)}{\partial x} + \frac{\partial (v'C)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (9)$$

ここに、 $u'$ 、 $v'$ は $x$ 方向及び $y$ 方向の実流速であり、式(7)及び(8)のダルシー流速との間には $u' = u/\theta$ 、 $v' = v/\theta$ の関係がある( $\theta$ は空隙率である)。Huyakorn and Pinder<sup>30)</sup>によれば、上式の微視的分散係数 $D_{xx}$ 、 $D_{xy}$ 、 $D_{yx}$ 、 $D_{yy}$ は、次式のように流速依存型の分散と分子拡散の和で表される。

$$D_{xx} = \frac{\alpha_L u'^2}{V} + \frac{\alpha_T v'^2}{V} + \tau D_M \quad (10)$$

$$D_{yy} = \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + \tau D_M \quad (11)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) u' v'}{V} \quad (12)$$

ここで、 $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$  であり、 $\alpha_L$ : 微視的縦方向分散長(cm)、 $\alpha_T$ : 微視的横方向分散長(cm)、 $D_M$ : 水の分子拡散係数(cm<sup>2</sup>/s)、 $\tau$ : 屈曲度である。

#### 4. 現地における不均一浸透場の推定

##### (i) Horkheimer Insel 野外実験サイトの概要

今回、不均一浸透場の推定の対象としては、Ptak and Teutsch<sup>31)</sup>が行った現地観測データを用いて行う。彼らが対象とした現場はドイツのHorkheimer Insel野外実験サイトで、フルオレッセインを用いたトレーサー試験が行われている。

図-1 に現地の概要を示す。現地の地盤は、完新

世の沖積砂とレキが網目状に不均一に堆積した沖積層である。上部には、粘土質の堆積物と、下部には不透水性の石灰岩の基盤が存在する。深度 5.0 m 以深が、およそ 4.0 m の厚さを持つ帶水層と考えられている。

ここで、Ptak らが行ったトレーサー試験のうち、本研究で引用する部分についてまとめておく。トレーサー試験は、観測井戸において深度ごとに濃度変化を観測するものと、平均濃度変化を観測するものの 2種類行われた。

まず、深度ごとのトレーサー試験では、注入井戸及び観測井戸の透水係数の鉛直分布、観測井戸における流速とピーク濃度の鉛直分布が得られている。また観測井戸における深度ごとのトレーサーの破過曲線も得られている。この破過曲線に対して、定常平行流中に瞬間注入された物質の一次元濃度分布の解析解は；

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi A_L \bar{u}' t}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{u}' t)^2}{4A_L \bar{u}' t}\right) \quad (13)$$

である。ここに、 $x$ ：注入点からの距離、 $t$ ：経過時間、 $C_0$ ：初期濃度、 $\bar{u}'$ ：平均実流速、 $A_L$ ：分散長である。彼らはボーリング孔内で、深度区間毎に観測されているトレーサー濃度を平均した断面平均濃度に対して(13)式を適用し、実流速及び分散長として、それぞれ 0.0364 cm/s、138 cm を得ている。両者の積により巨視的分散係数は 5.02 cm<sup>2</sup>/s であることがわかる。

##### (2) 不均一浸透場の推定手順

本研究で提案する浸透場の透水係数分布を推定する手順を図-2 に示す。まず、現場で行われたトレーサー試験の試験井戸における地質ボーリングデータを活用するため、透水係数の対数変換値  $Y$  を浸透場発生モデルの境界条件として用いる。トレーサー試験から先見情報として得られるデータを図-3 に示す。ここで用いたデータは図-3(a), (b) の注入及び観測ボーリング井戸 2 本の鉛直透水係数分布である(註：この  $k$  の単位は(m/s)である。表-2 も同様)。なお基盤面から 1.0 m までの区間にに関してはデータが得られていないため、注入井戸と観測井戸の  $Y$  が既知部分のデータについて統計的な特性を調べ、同じ平均と標準偏差を持つように発生した正規乱数を式(1)に対する境界条件として与えた。これはこの部分に  $Y$  の平均値を一定値として与えると、数値計算の際にこの部分を通るトレーサーが塊となって流れ、不都合なためである。この場合、鉛直方

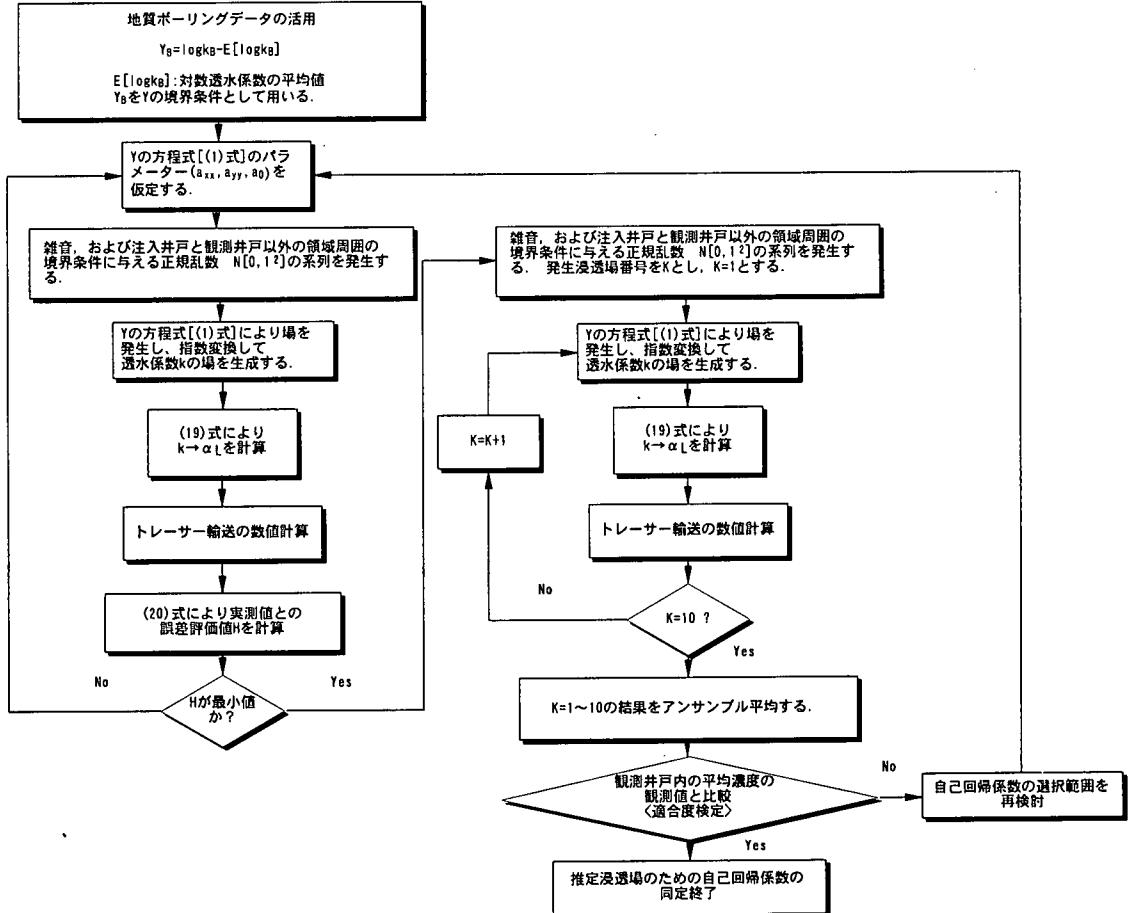


図-2 現場に対する不均一浸透場の推定手順

向についても式(2)に基づいて相関を持たせるべきであるが、ここでは簡単のため鉛直方向には無相関とした。なお後述の方法で、 $a_{xx}$ 、 $a_{yy}$ 、 $a_0$  が推定できれば、これらを用いてボーリング孔内の  $Y$  が非測定である区間の再設定が可能である。表-2 には注入井戸と観測井戸それぞれの  $\log_{10} k$  に関するデータの特性を示している。

次に式(1)の浸透場発生モデルに任意の雑音項  $\varepsilon(x, y)$  を与え、自己回帰係数を変えながら浸透場を発生し、得られた  $Y$  の分布を指数変換して透水係数  $k$  の分布を得る。

トレーサー輸送の数値計算は、3 章で整理した基礎式を用いて、地下水流れの式は陰形式の差分法で繰り返し計算を行い、移流分散方程式については特性曲線法を用いる<sup>29)</sup>。この数値計算には、透水係数の他に微視的分散長の分布を知る必要があるが、以下のようにして導かれた関係式(19)により透水係数から求める。

透水係数と粒径の関係については、セルハイムの

式（山村・鈴木<sup>32)</sup> 参照）；

$$k_0 = b d_m^2 \quad (14)$$

を適用する。ここで、 $k_0$  は固有透過度 ( $\text{cm}^2$ ) である。透水係数  $k(\text{cm}/\text{s})$  と  $k_0(\text{cm}^2)$  の関係は、水の密度  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、重力加速度  $g(\text{cm}/\text{s}^2)$ 、粘性係数  $\mu(\text{g}/\text{cm s})$  とすれば、次式のようであるから、

$$k_0 = k \frac{\mu}{\rho g} \quad (15)$$

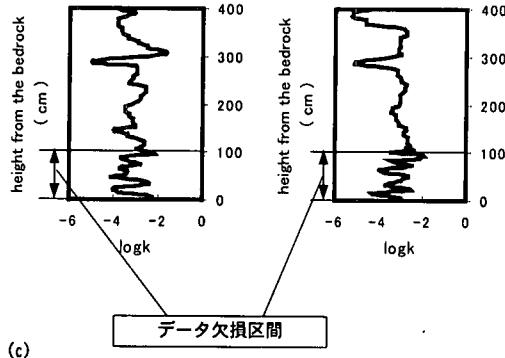
新たに  $B=b(\rho g / \mu)$  と置き直せば次式のようになる。

$$k = B d_m^2 \quad (16)$$

$B$  の値については、セルハイムは清浄な石英砂に対して、35.7 という値を示しているが、ここではガラスビーズの粒径と透水係数の関係より求めた 55.0 を用いている<sup>8)</sup>。実際は、ボーリングコアから得られる砂などのサンプルから  $B$  を決定すればよい。式(16)から粒径と透水係数の関係式；

(a)

(b)



(c)

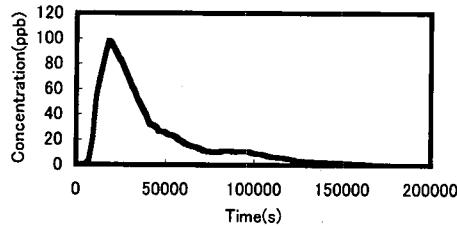


図-3 トレーサー試験から先見情報として得られるデータ  
(a)注入井戸の対数透水係数分布、(b)観測井戸の対数透水係数分布、(c)観測井戸における鉛直平均濃度の時間変化

$$d_m = \sqrt{\frac{k}{55.0}} \quad (17)$$

が得られる。一方著者ら<sup>8)</sup>が示したガラスピースの各粒径毎のカラム試験より；

$$\alpha_L = 0.3668 d_m \quad (18)$$

が示されている。そこで式(18)に式(17)を代入すれば $\alpha_L$ が $k$ より式(19)を用いて求められる。

$$\alpha_L = 0.3668 \sqrt{\frac{k}{55.0}} \quad (19)$$

微視的横方向分散長 $\alpha_t$ に関しては、微視的縦方向分散長の $1/10$ の値を与えた。また空隙率は場所的に変わらないとして、 $0.35$ を与えた。

数値計算は、実施されたトレーサー試験の条件に合わせた計算条件で行う。表-3にトレーサー試験の条件を示している。注入トレーサー量に相当する濃度を注入井戸における初期濃度として与えた。また上下流の地下水頭差は、現地で得られている平均透水係数を均一に分布させた浸透場に対する数値計算による流量と注入水量があうように与えた。計算

表-2 注入井戸、観測井戸の  $\log_{10} [k (\text{m/s})]$  データ特性

注入井戸	観測井戸
平均	-3.23408
標準誤差	0.082694
中央値	-3.1763
標準偏差	0.618823
分散	0.382942
尖度	1.279157
歪度	-0.25589
範囲	3.25528
最小	-4.95633
最大	-1.70105
平均	-3.18897
標準誤差	0.083543
中央値	-2.97328
標準偏差	0.728309
分散	0.530434
尖度	2.463652
歪度	-1.90127
範囲	2.64623
最小	-5.21186
最大	-2.56563

表-3 トレーサー試験の条件

注入トレーサー量 (g)	20
トレーサー注入時間 (s)	30
注入水量 (l/s)	4.05
注入井戸と観測井戸の距離 (m)	8.93
試験時間 (days)	4

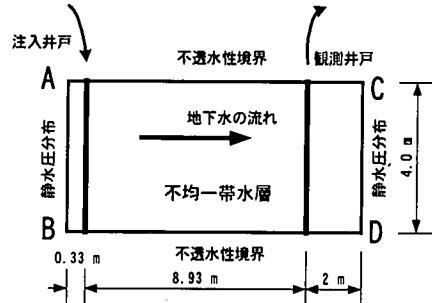


図-4 数値計算の境界条件

領域は、現場の状況から鉛直方向に $4.0\text{ m}$ の帯水層とした。水平方向には、注入井戸と観測井戸との間の距離 $8.93\text{ m}$ に対し、トレーサーを瞬間注入すると若干上流側にも分散するため、上流に $0.33\text{ m}$ 、下流側では観測井戸の変化に境界条件が影響を与えないよう、下流に $2.0\text{ m}$ 設けて全長 $11.26\text{ m}$ とした。領域は、前報<sup>25)</sup>と同じプログラムを利用するため水平方向に $136$ 、鉛直方向に $75$ 分割した。この結果差分格子間隔は $\Delta x=8.28\text{ cm}$ 、 $\Delta y=5.33\text{ cm}$ となる。なお水平方向の差分格子間隔は、後にも示すように不均一浸透場の積分特性距離に比べて十分小さな値であることから計算結果に重大な相違を及ぼさないと考えられる。境界条件は、図-4に示されるように、AB及びCDは静水圧境界、AC及びBDは不透水性境界とする。

数値計算の後、観測井戸位置で得られるトレーサーの断面平均濃度変化と実測値との誤差について、

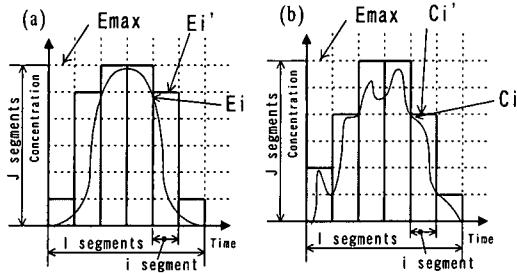


図-5 濃度分布から頻度分布への変換説明図 (a) 観測値に対する変換、(b) 計算値に対する変換

次式で示す評価式(20)により  $H$  が最小となる自己回帰係数の組を、 $a_{xx}$  と  $a_{yy}$  はそれぞれ 10, 100, 1000, 10000 とそれらの値の 2~9 倍と変化させながら、 $a_0$  は 0.00 から 0.01 刻みで増加させながら試行錯誤的に探索する。

$$H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \left[ C_{obs}(t_l) - C_{cal}(t_l; a_{xx}, a_{yy}, a_0) \right]^2} \quad (20)$$

ここで、 $C_{cal}(t_l; a_{xx}, a_{yy}, a_0)$  は、ある自己回帰係数の組の時刻  $t_l$  における断面平均濃度の計算値である。 $C_{obs}(t_l)$  は時刻  $t_l$  における断面平均濃度の観測値である。また  $t_l$  の添字  $l$  は観測時点番号、 $N$  はその総数である。

以上のようにして概ね適切な自己回帰係数の組が得られた後、その自己回帰係数の組を用いて、雑音項に用いる乱数の系列を変え、浸透場を発生し、トレーサー輸送の数値計算を行うという一連の操作を 10 回繰り返し、観測井戸における断面平均濃度変化と実測値（ここでは図-3(c)）の適合度検定を実施する<sup>33)</sup>。適合度検定では、観測値の分布と計算値の分布を時間軸に対して図-5 に示すように  $I$  個に、また濃度に対して  $J$  個に分割し、頻度分布  $C'_i$  及び  $E'_i$  に変換する。そして次式による統計量を用いて検定を行う。

$$z = \sum_{i=1}^I \frac{(C'_i - E'_i)^2}{E'_i} \quad (21)$$

ここに、 $i$ ：時間分割番号、 $E'_i = J \cdot E_i / E_{max}$ 、 $C'_i = J \cdot C_i / E_{max}$ 、 $E_i$ ：分割区間  $i$  における期待濃度（ここでは測定値）の最大値、 $E_{max}$ ： $E_i$  の中の最大値、 $C_i$ ：分割区間  $i$  における計算濃度の最大値である。適合度検定における時間軸及び濃度軸の分割に関しては、細かく分割したり粗く分割することにより適合度が変動するが、あまり細かく分割すると（極端な場合はそのままデータを用いると）、適合が良いと判断しても差し支えない場合でも棄却され

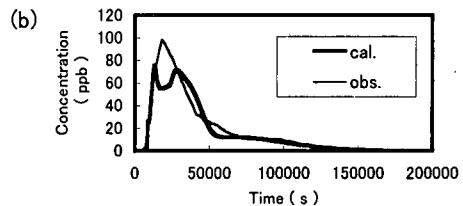
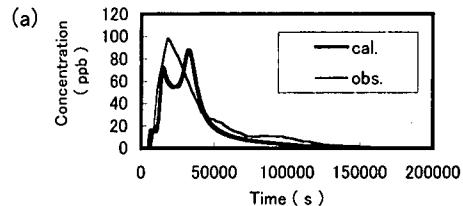


図-6  $x$  方向に相関が長い場合の観測井戸の断面平均濃度分布 (a)  $a_{xx}=1000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.03$ ,  
(b)  $a_{xx}=10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.03$

る。一方粗く分割すると、適合の良い悪いの判断が鈍ることになる。従って後の検討例では、 $I=30$ ,  $J=30$  のように分割して適用している。

### (3) 結果と考察

ここで、誤差評価を行う段階で試したいつかの自己回帰係数の組に対する実測値と計算値を比較した結果を図-6 に示す。図-6(a) は、 $a_{xx}=1000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.03$  の組、また図-6(b) は、 $a_{xx}=10000 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.03$  の組に対する結果である。これらの場合も、 $H$  の評価を行っているが、それぞれ、11.13 ppb, 9.13 ppb である。これらはいづれも  $x$  方向に相関を長く持つ非等方的浸透場の場合である。 $x$  方向に透水係数の相関が長くて成層に近い場合は、各層に卓越した選択的な流れが生じて、トレーサーが層毎に輸送される。その結果、トレーサーが観測井戸に到達する時間がずれて、観測井戸における断面平均濃度の時間変化に複数のピークが表れる。図-6(a), (b) とも 2 つのピークが表れていて、トレーサーはほぼ 2 つの塊に分かれて流下したものと考えられる。図-7 の上段に図-6(b)に対するトレーサーの移流分散挙動を例として示した。同図下段には、模式図を示したが、いま仮に浸透場が、①～⑤の 5 つの層により構成されているとして、観測井戸には 2 つのピーク濃度が表れているとする。最初のピークには、②及び④層の選択的に速く流れるトレーサーが寄与し、2 番目のピークには、①、③及び⑤層のトレーサーが

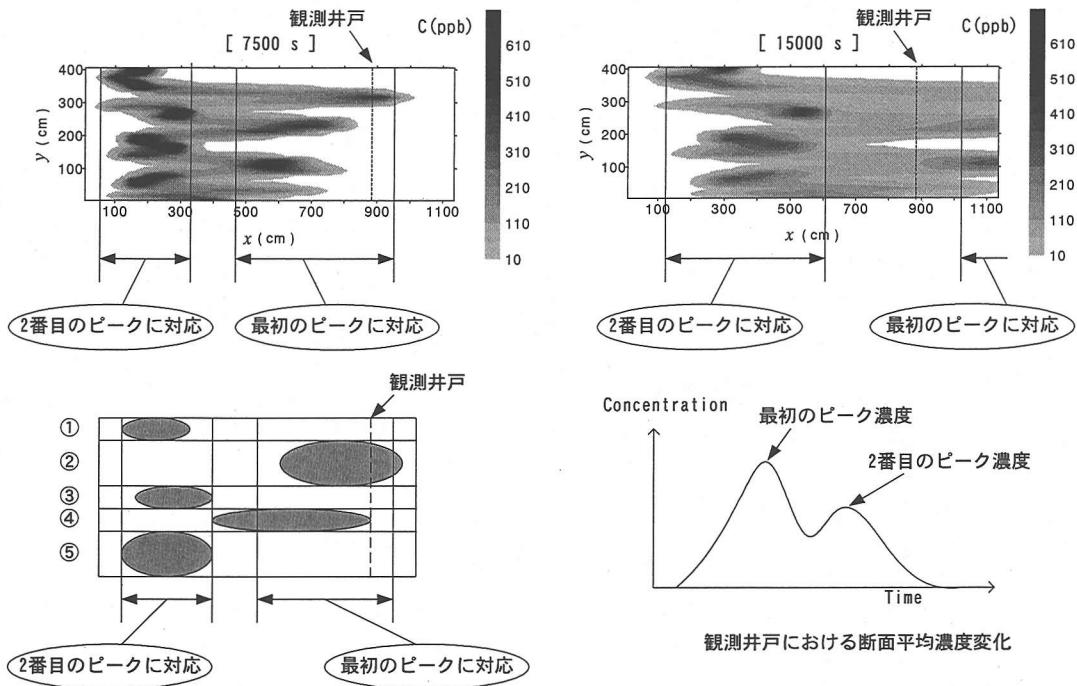


図-7 図-6(b)に対応するトレーサー挙動とその模式図

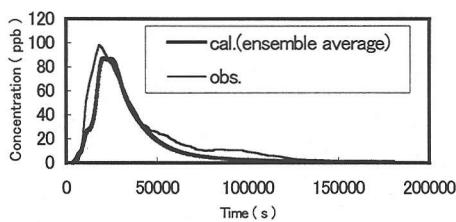


図-8 観測井戸における断面平均濃度の計算値のアンサンブル平均と実測値 ( $a_{xx}=200 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.03$ )

寄与すると説明できる。一方、実測の観測井戸における断面平均濃度変化は、ピークが 1 つ観測されており、トレーサーは選択的な流れにより分割されることなく、ほぼ 1 つの塊として流下したことが推測されよう。従って図-3(c)のようになるためには、現地地盤が極端な成層構造でないことが想定される。これは  $a_{xx}$  が  $a_{yy}$  に対して極端に大きな値をとらないことに対応する。

以上のような特性をふまえて、数値計算をいくつかのパラメーターの組に対して実行し、 $H$  を最小にする不均一浸透場モデルの自己回帰係数の組が、 $a_{xx}=200 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_0=0.03$  程度と推定された。このときの  $H$  の値は、8.01 ppb である。適合度検

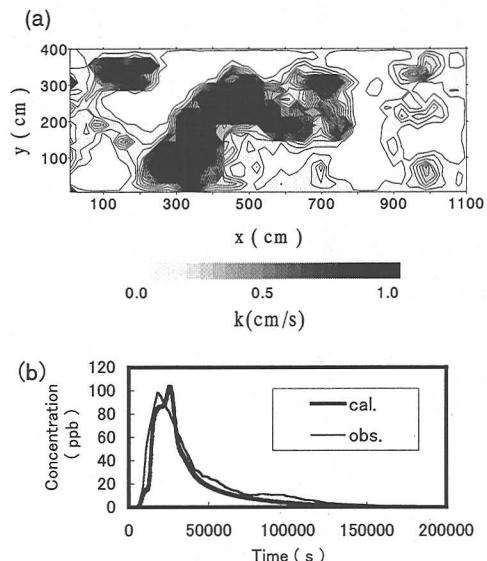


図-9 (a)推定された浸透場の例[注入井戸以降], (b)その浸透場における観測井戸の断面平均濃度分布変化

定では、時間方向に 30、濃度方向に 30 に分割して有意水準 5 % で採択され、この組み合わせで平均濃度時系列が再現されることがわかった。そこで乱数発生の初期値を 10 通り変えて、アンサンブル平均

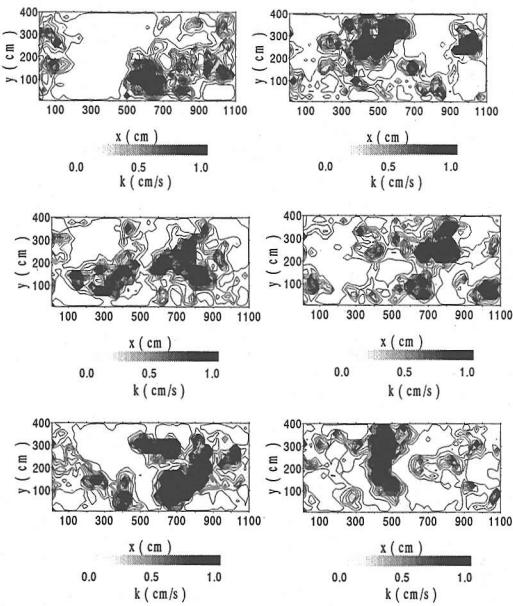


図-10 推定されたパラメーター ( $a_{xx}=200 \text{ cm}^2$ ,  $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ ,  $a_\theta=0.03$ ) に対する浸透場[注入井戸以降]

した観測井戸における断面平均濃度変化を実測の断面平均濃度分布と比較した。その結果を図-8 に示す。ピーク濃度の到達時間や濃度の低減傾向に若干の相違は見られるものの、概ね良好な再現状況といえよう。対象とした現場に対して適合すると評価された自己回帰係数の浸透場の 1 例を図-9 に示す。

#### (4) 巨視的分散係数についての検討

ここでは、推定された浸透場に関する積分特性距離や巨視的分散係数などの特性について考察する。図-9(a)に示された浸透場に関して、 $x$ ,  $y$  それぞれの方向の積分特性距離は、まず透水係数の対数変換値  $Y$  の分布から自己相関係数  $R(\xi, \eta)$  を次式により計算する。

$$R(\xi, \eta) = \frac{\mathbb{E}[(Y(x, y) - \bar{Y})(Y(x + \xi, y + \eta) - \bar{Y})]}{\mathbb{E}[Y(x, y) - \bar{Y}]} \quad (22)$$

ここに、 $\xi$  および  $\eta$  は、 $x$  及び  $y$  方向に対する 2 点間距離、 $\mathbb{E}[\cdot]$  は期待値、 $\bar{Y}$  は  $Y$  の期待値である。ここで式(1)にもとづいて発生した浸透場  $Y$  の空間分布の自己相関係数については、前報<sup>12), 25)</sup>で検討した様に、次式が適用できる。この自己相関係数に対して、 $x$  方向及び  $y$  方向の積分特性距離をそれぞれ  $L_x$  と  $L_y$  として、次式のような関係式を仮定する。

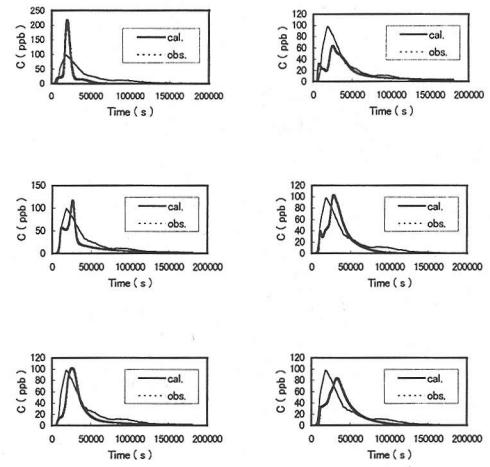


図-11 推定されたパラメーターを用いた浸透場における観測井戸の断面平均濃度分布の時間変化（各図は図-10 の浸透場と各々対応）

$$R(\xi, \eta) = \exp \left[ - \left( \left( \frac{\xi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{\eta}{L_y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (23)$$

この式は  $\eta=0$  または  $\xi=0$  のとき、式(24), (25)のように表される。

$$R(\xi, 0) = \exp \left[ - \frac{|\xi|}{L_x} \right] \quad (24)$$

$$R(0, \eta) = \exp \left[ - \frac{|\eta|}{L_y} \right] \quad (25)$$

式(24), (25)で表現された自己相関係数が、対象とした現場で求められたものと最も一致するように  $L_x$  と  $L_y$  を決定する。図-9(a)に対して求められる積分特性距離は、 $L_x=74.52 \text{ cm}$ ,  $L_y=58.63 \text{ cm}$  となった。同じ自己回帰係数の組で乱数の系列を変えた他の浸透場を図-10 に示す。これより現地のデータから推定された浸透場は、図-9(a)と概ね類似の透水係数の分布特性を有していると考えられる。また各浸透場に対してトレーサー試験の数値計算を実施して、観測井戸における濃度変化を実測値と比較したものを図-11 に示す。さらに、図-9 に示した浸透場に対するトレーサー試験の数値計算結果を示したのが図-12 である。これによると、トレーサーは基盤面より  $3.0 \text{ m}$  程度の高さから先に流下して、帶水層の上部と下部は遅れて流下することがわかる。また、濃度の高い部分は帶水層のほぼ中央の高さに存在し

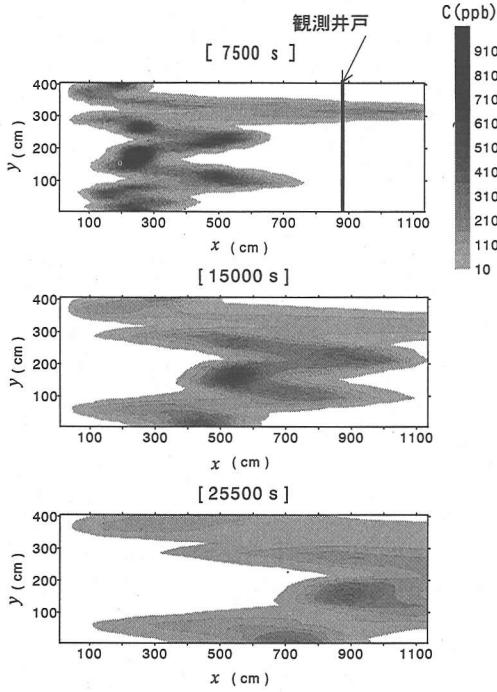


図-12 ある推定された浸透場におけるトレーサープリュームの挙動[注入井戸以降]

ていることもわかる。このような挙動は、Ptak らの観測井戸における鉛直流速分布から推測されることとも一致しており<sup>31)</sup>、妥当な結果と言えよう。

次にここで評価された積分特性距離を用いて、積分特性距離と巨視的分散係数が一定値に収束するまでに必要な流下距離の関係について考察してみよう。まずプリュームの分散の時間変化を式(26)<sup>34)</sup>で計算する。

$$\sigma_L^2(t) = \frac{\sum C(x,t)(x - \bar{x})^2 \Delta x}{\sum C(x,t) \Delta x} \quad (26)$$

ここで、 $\bar{x}$  は断面平均濃度分布の重心位置である。また、巨視的分散係数の時間変化を式(27)<sup>34)</sup>で計算する。

$$D_L(t) = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_L^2(t)}{dt} = \frac{\Delta \sigma_L^2(t)}{2 \Delta t} \quad (27)$$

これらの結果を図-13(a)に示す。なおトレーサーの先端が、計算領域の最下流から流出し始めると式(26)の計算ができない。今回の場合 1800 s までは巨視的分散係数の計算ができなかった。従って、図からわかるように 1800 s では未だ巨視的分散係数は、一定値に収束していない。仮に観測井戸のさ

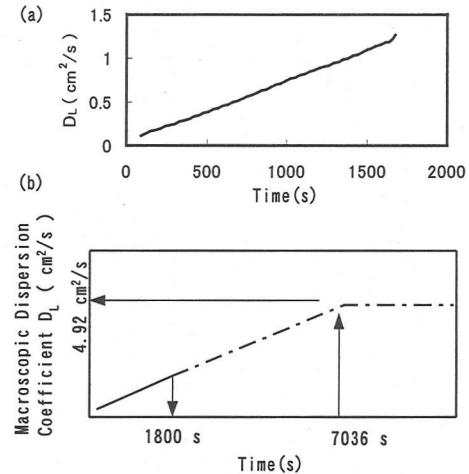


図-13 (a)既報<sup>12)</sup>と同様の方法で求められる巨視的分散係数  $D_L$  の変化 (b)直線を延長して得られる  $D_L$  の模式的変化

らに下流側に第 2 の観測井戸がある場合は、浸透場を発生する範囲を、より下流まで拡げることが可能である。しかしながら、本研究のようにトレーサー試験の注入井戸と観測井戸のみを用いて評価する場合は、さらに下流まで計算領域を拡げることは困難である。そこで、本研究では以下のように考えた。既報では<sup>12)</sup>、積分特性距離のおよそ 3.4 倍以上流下すれば、巨視的分散係数が一定値に収束し始める事を示している。本例の場合、 $74.52 \times 3.4 = 255.3$  cm 程度流下することが必要であると考えられる。いま、数値計算での平均実流速は 0.036 cm/s であるから、収束するために必要な流下時間になおすると、 $255.3 \div 0.036 = 7036$  s となる。図-13(a)の巨視的分散係数変化の勾配をそのままに保ち、7036 s まで延長すると、巨視的分散係数は、4.92 cm²/s に収束すると推定された。この模式図は図-13(b)に示している。巨視的な分散長  $A_L$  (cm) は次式の関係を用いて求めることができる。

$$A_L = \frac{D_L}{U_{mean}} \quad (28)$$

ここで  $\bar{U}_{mean}$  は、同じパラメーターの組により発生した浸透場それぞれに対する平均実流速  $U_{mean}$  の平均である。式(28)を用いて巨視的分散長を推算すれば、 $4.92 \div 0.036 = 136.7$  cm となる。この値は Ptak and Teutsch<sup>31)</sup>が解析解の濃度変化と実測値の断面平均濃度変化とのフィッティングにより求めた巨視的分散長 138 cm とほぼ同じ値である。このことは、浸透場の積分特性距離と必要最小流下距離の関

係が、概ね正しいことを示唆している。また、図-13(a)に示した数値計算から得られる巨視的分散係数の変化を積分特性距離と必要最小流下距離の関係を用いて延長する方法(図-13(b))により、観測井戸より下流への拡張距離が不十分でも概ね良い結果が得られると言えよう。

ここで、観測井戸のトレーサー濃度の時系列から、時間に関する分散を求めて、縦方向の分散へ換算して $D_L$ を評価してみよう。

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum C(t)(t - \bar{t})^2 \Delta t}{\sum C(t) \Delta t} \quad (29)$$

ここに、 $C(t)$ :観測井戸の時間 $t$ の濃度、 $\bar{t}$ :濃度分布の重心時間である。また $\sigma_t^2$ から $\sigma_L^2$ への換算式は；

$$\sigma_L^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} x^2 \quad (30)$$

であり、 $x$ は注入井戸から観測井戸までの距離である。さらに次式により、 $D_L$ を求めることができる。

$$D_L = \frac{\sigma_L^2}{2t} \quad (31)$$

ここでは図-8に示したアンサンブル平均に対して適用すると、 $D_L = 5.36 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり $A_L$ は $142 \text{ cm}$ が得られた。図-3(c)に示すPtakらの実測値に対して同様の方法で評価すると、 $D_L = 5.12 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり $A_L$ は $148 \text{ cm}$ であり、数値計算により評価された浸透場が概ね正しいことがわかる。

なお、観測井戸におけるトレーサー濃度の時系列に対して、式(29)を適用して求めた分散長は、Ptakらが解析解へのフィッティングにより求めた値および、図-13のように積分特性距離の3.4倍の流下距離まで延長する方法により求めた値よりも大きめに算定された。これは、式(29)の場合には、濃度の時間変化の離散化が粗かったためと考えられるが、両者の差が8%程度であることと、およそ9mという現場のスケールから比べると概ね良い結果が得られたと言えよう。

## 5. おわりに

本研究では、トレーサー試験の観測井戸における断面平均濃度変化をもとに、不均一浸透場を種々発生して、実際のトレーサー試験を再現できるような不均一浸透場を推定することを試みた。さらに、現場データを用いて推定された不均一浸透場に対して、

巨視的分散機構について検討した。

本研究で得られた結果を要約すれば以下のようになる。

(1) 本研究で提案したフローチャート(図-2)により、Horkheimer Insel 野外実験サイトに対して不均一浸透場発生モデルの自己回帰係数を評価したところ、 $a_{xx}=200 \text{ cm}^2$ 、 $a_{yy}=100 \text{ cm}^2$ 、 $a_0=0.03$ 程度と推定された。適合度検定では、時間軸方向に30、濃度軸方向に30に分割して、有意水準5%でも十分に採択された。

(2) Horkheimer Insel 野外実験サイトに対して評価された浸透場の例に対するトレーサープリュームの数値計算結果によれば、トレーサーは不透水基盤から3.0mの高さから先に流下して、帶水層の上部及び下部は遅れて流下する様子が示された。これは、Ptakらの示している観測井戸内の流速分布とも概ね一致している。

(3) Horkheimer Insel 野外実験サイトに対して推定された浸透場の例に対して、 $x$ 方向と $y$ 方向それぞれの積分特性距離は、 $L_x=74.52 \text{ cm}$ 、 $L_y=58.63 \text{ cm}$ と推定された。

(4) 推定された浸透場の積分特性距離と必要最小流下距離の関係より、巨視的分散係数の収束値を求めるに、 $4.92 \text{ cm}^2/\text{s}$ となった。また、巨視的分散長は、 $136.7 \text{ cm}$ と推定された。これらの値は、Ptakらの求めた巨視的分散長 $138.0 \text{ cm}$ 及び、巨視的分散長と実流速の積として求まる巨視的分散係数 $5.02 \text{ cm}^2/\text{s}$ とほぼ同じである。

なお、本手法は鉛直2次元について検討しているが、実際の地下水流动現象は、3次元的であるため、その適用は、地下水の流向が正しく評価できている場合に限られる。また、対象とした帶水層を被圧帶水層で層厚が一定としたが、不圧帶水層を考える場合は、不飽和領域の取り扱いも必要である。従って、不飽和帯や対象領域の変化を考慮した解析や、3次元的に評価する方法を検討する必要があり、この点は今後の課題としたい。

**謝辞：**本研究は、核燃料サイクル開発機構の「不均質多孔媒体中の水理・物質輸送に関する研究」に基づいて行われたもので、有益なご助言を頂いた同機構研究員、畠中耕一郎氏、井尻裕二氏、亘真吾氏

(現在、株式会社CRC総合研究所)に心より感謝申し上げます。地下水流れ及び移流分散の数値計算にあたっては、九州産業大学工学部土木工学科、細川土佐男教授にご指導及びご助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。また本研究で、ドイツチュービング大学のPtak博士の論文から、現地トレーサー

試験のデータを引用させて頂きましたが、博士にはこのデータの引用を快諾していただき、心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) Lichtner, P. C., Steefel, C. I. and Oelkers, E. H.: *Reactive Transport in Porous Media*, Reviews in Mineralogy, Vol. 34, Mineralogical Society of America, pp.269-310, 1996.
- 2) Freeberg, K. M., Bedient, P. B. and Conner, J. A.: Modeling of TCE Contamination and Recovery in a Shallow Sand Aquifer, *Groundwater*, Vol.25, No. 1, pp.70-80, 1987.
- 3) 古市徹, 林田貴範, 真柄泰基: 河川を考慮した地域地下水汚染の解析, 地下水学会誌, 第32巻, 第2号, pp.71-80, 1990.
- 4) 江種伸之, 神野健二, 鶴見栄一: ガス拡散を考慮した有機塩素化合物の不飽和-飽和領域における輸送特性解析, 土木学会論文集, 第503号/II-29, pp.167-176, 1994.
- 5) 翁井和朗, 神野健二, 上田年比古, 伊藤敏朗, 細川土佐男: 不飽和領域を考慮した海岸地下水の塩水の侵入分散の数値解析, 日本地下水学会誌, 第28巻, 第1号, pp.103-112, 1986.
- 6) 西垣誠, 菊谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, 第511号/III-30, pp.135-144, 1995.
- 7) 藤繩克之: 地下水数値計算法(12) 2-3有限要素法と特性曲線法による物質輸送解析, 地下水学会誌, 第33巻, 第3号, pp.185-193, 1991.
- 8) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 亘真吾: 不均一多孔媒体中の流れと物質輸送特性について, 地下水学会誌, 第40巻, 第1号, pp.1-16, 1998.
- 9) Kinzelbach, W.: パソコンによる地下水解析, 上田年比古監訳, 森北出版, 286p., 1990.
- 10) Appelo, C. A. J. and Postma, D.: *Geochemistry, groundwater and pollution*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp.349-395, 1994.
- 11) 藤間聰: 地下水パラメーターの推定に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 98p., 1989.
- 12) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男: 不均一浸透場におけるトレーサー輸送の微視的分散と巨視的分散に対する水理学的考察, 水工学論文集, 第42巻, pp.385-390, 1998.
- 13) Bear, J. : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier, New York, 764p., 1972.
- 14) Saffman, P. G.: A theory of dispersion in a porous medium, *J. Fluid Mech.*, Vol. 6, pp.321-349, 1959.
- 15) 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.
- 16) Harleman, D. R. F. and Rumer, R. R.: Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, *J. Fluid Mech.*, Vol.16, pp.385-394, 1963.
- 17) Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K. T.: A critical review of data on field scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, Vol.28, No. 7, pp.1955-1397, 1992.
- 18) Mercado, A. : The spreading pattern of injected water in a permeability aquifer, *IAHS/AISH Publ.*, Vol.72, pp.23-36, 1967.
- 19) Mercado, A.: A note on micro and macrodispersion, *Groundwater*, Vol. 22, No. 6, pp.790-791, 1984.
- 20) Neuman, S. P., Winter, C. L. and Newman, C. M.: Stochastic theory of field-scale Fickian dispersion in anisotropic porous media, *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 3, pp.453-466, 1987.
- 21) Neuman, S. P. and Zhang, Y. -K.: A quasi-linear theory of non-Fickian and Fickian subsurface dispersion, 1 Theoretical analysis and application to isotropic media, *Water Resources Research*, Vol.26, No.5, pp.887-902, 1990.
- 22) Gelhar, L. W.: *Stochastic Subsurface Hydrology*, Prentice-Hall, New Jersey, 390p., 1993.
- 23) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous media, *J. Fluid Mech.*, Vol. 145, pp.151-177, 1984.
- 24) 取出伸夫: 不均一な土中水の流れを伴う圃場中の溶質移動, 水文水資源学会誌, 第10巻, 第5号, pp.485-497, 1997.
- 25) 中川啓, 神野健二: 不均一場における巨視的分散の遷移状態の特性評価, 地下水学会誌, 第40巻, 第4号, pp.485-499, 1998.
- 26) 古市徹, 林田貴範: 誌面講座 地下水汚染(5)地下水汚染予測のための逆問題, 地下水学会誌, 第31巻, 第1号, pp.45-55, 1989.
- 27) Smith, L. and Freeze, R. A.: Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain, 2. Two-dimensional Simulations, *Water Resources Research*, Vol.15, No.6, pp.1543-1559, 1979.
- 28) Schafmeister-Spierling, M. -Th. and Pekdeger, A.: Influence of spatial variability of aquifer properties on groundwater flow and dispersion, *Contaminant Transport In Groundwater*, Kobus, H. E. and Kinzelbach, W. eds., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 215-220, 1989.
- 29) 翁井和朗: 地下水数値計算法(11) 2-2差分法と特性曲線法による物質輸送解析の応用, 地下水学会誌, 第33巻, 第3号, pp.177-184, 1991.
- 30) Huyakorn, P. S. and Pinder, G. F.: *Computational method in subsurface flow*, Academic Press, New York, 473p., 1983.
- 31) Ptak, T. And Teutsch, G.: Forced and natural gradient tracer tests in a highly heterogeneous porous aquifer : instrumentation and measurements, *Journal of Hydrology*, No.159, pp.79-104, 1994.
- 32) 山村和也, 鈴木音彦: 現場監督者のための土木施工 5 土と水の諸問題, 鹿島出版会, 212p., 1979.
- 33) 大野豊・磯田和男監修: 新版数値計算ハンドブック, オーム社, 1155p., 1990.
- 34) 翁井和朗, 神野健二, 上田年比古: 移流分散における粘性低層の効果に関する数値計算による検討, 第27回水理講演会論文集, pp.609-614, 1983.

(1999.11.15 受付)

## EVALUATION OF NON-UNIFORM FIELD WITH TRACER AND NUMERICAL SIMULATION

Kei NAKAGAWA and Kenji JINNO

In general, a groundwater aquifer is hydrogeologically non-uniform due to its inherent formation. Although numerical simulation of mass transport plays an important role for prediction and remediation of pollution, studies on macroscopic dispersion from a hydrogeological point of view are insufficient. In the present paper, a method for estimating the parameters used in a geostatistical model of logarithmic hydraulic conductivity is proposed and applied for a tracer test carried out in the aquifer of Horkheimer Insel, Germany. The macroscopic dispersion coefficient obtained by the present method agrees well with the one observed in the tracer test. It is shown that the present method is useful for evaluating the non-uniform hydrogeological structures and the macroscopic dispersion.