

# 透水係数の分布が不均質な多孔質媒体中に 適用する場合の粒子移動法の改良

藤井淳一\*・糸井龍一\*\*・田中俊昭\*

Improvement of the Method of Shifting Particles Applied to Porous Media  
with Heterogeneous Permeability Distribution

Junichi FUJII\*, Ryuichi ITOI\*\* and Toshiaki TANAKA\*\*

## ABSTRACT

A method of shifting particle was improved to avoid instability that occurred for apply it to porous media with heterogeneous distribution of permeability. The modified method was used to simulate acidizing porous column whose permeability and porosity were heterogeneously damaged due to silica deposition. The simulated results indicated that recovery behaviors of permeability and porosity both in time and space were satisfactory.

### 1. はじめに

地層内の溶存物質の移動現象は、溶質に関する移流分散方程式で表現される。この移流分散方程式の数値解法の一つに粒子移動法があり、離散化誤差の影響を抑制できる利点を有している。しかし、本方法の適用において、透水係数の値が空間的に変化する場合、場の流速が異なるため濃度分布の計算が不安定になる問題が生じる。

本研究では、地熱熱水中のシリカが析出することによって透水係数および空隙率が距離的に変化する多孔質層において、フッ酸を用いた溶解処理による透水性回復の解析に粒子移動法を適用した場合に生じる問題点を指摘し、それを解決するための粒子移動法の改良を行った。次に、この改良した粒子移動法を用いてフッ酸濃度の距離的・時間的変化およびフッ酸とシリカスケールの反応により多孔質層の透水性および空隙率が回復する挙動を数値計算により解析した。

### 2. 移流分散方程式および粒子移動法を用いた解法

粒子移動法は、移流分散方程式の数値解法の一つであり、差分近似の際に発生する離散化誤差を抑制できる点を有している。そのため多孔質層内の流れ場における溶質の輸送現象の数値解析において精度良い解を得ることができる(神野ほか, 1978)。

反応項を含んだ一次元移流分散方程式は、式(1)で

表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{v}{\phi} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \lambda \cdot S \cdot C \quad (1)$$

ここで C : 濃度 (mol/l)、t : 時間 (sec)、v : 断面平均流速 (cm/sec)、 $\phi$  : 多孔質層の空隙率 (-)、x : 距離 (cm)、D : 分散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)、 $\lambda$  : 反応速度定数 (cm/sec)、S : 単位体積あたりの表面積 (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>) である。

式(1)に対する粒子移動法は下記のようなものである。まず解析対象とする場を格子分割し、この格子内に、濃度を持たせた粒子を任意の個数配置する。この粒子が1時刻ステップごとに実流速 (=v/ $\phi$ ) で下流側の格子に移動し、各格子において粒子が移流、分散による濃度変化を生じた後、再び時間経過と共に粒子が濃度を保持したまま次の格子へと移動する。

各格子において、時間経過にともなう粒子の濃度変化を計算することによって解析を行うのが、粒子移動法である。詳細は、神野, 上田(1978)を参照されたい。

### 3. 粒子移動法の問題点

粒子移動法を適用する際、場の透水係数が均一であれば、各格子での実流速は等しくなり、粒子は等間隔で進む。そして格子内に存在する粒子の個数は経過時間にかかわらず、一定である。しかし、透水係数の分布が不均一な場では、各格子での実流速が異なるため、

\* 九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻エネルギー資源工学研究室  
〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

Laboratory of Energy Resources Engineering, Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

\*\* 九州大学大学院工学府地球資源システム工学部門エネルギー資源工学研究室  
〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

Laboratory of Energy Resources Engineering, Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

粒子の移動距離や濃度計算において以下の問題が生じる。

(1) 隣り合う格子において、下流側の格子内の実流速が上流側のそれに比べ小さい場合、下流側の格子内の粒子は単位時間当たりの移動距離が小さく、更に下流側の格子から次の格子へ粒子の移動に時間を要する。よって、格子内の粒子の数が時間と共に増加することになる。一方、場のの上流側の境界においては一定の個数の粒子を1時刻ステップ毎に供給するので、時間の経過に伴い解析領域内の粒子の総数が増加する。その結果、数値計算に要する時間が長くなる。

(2) 透水係数が異なる格子から格子へ粒子が移動する場合、隣り合う格子内の実流速が異なる。例えば、上流側の格子の実流速が下流側のそれに比べ大きい場合、上流側の格子の実流速で粒子を移動させると、この粒子が下流側の格子内の粒子を追い越すケースが生じる。例えば、Fig. 1の上図に示すように粒子を配置した場合、1時刻ステップ後には下図に示すように番号5の粒子が番号6の粒子を抜いてしまう。その結果、Fig. 2に示すように粒子の濃度に不自然なばらつきが生じる。

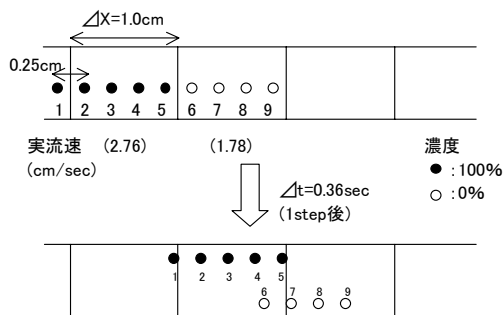


Fig. 1 上流側の粒子が下流側の粒子を追い越す場合のイメージ

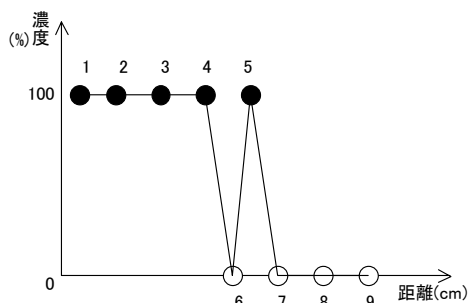


Fig. 2 上流側の格子の粒子が下流側の格子の粒子を追い越した場合の粒子の濃度分布

#### 4. 粒子移動法の改良

##### 4.1 粒子の再配置

3. で指摘した問題点(1)の粒子の個数に関する点

を解決するために、1時刻ステップ毎に粒子の再配置を行うことを検討した。粒子の再配置とは、格子内で増え続ける粒子の数を減らすため、隣り合う粒子の濃度、距離の平均値を用いて格子内で粒子を再配置することである。この方法により、格子内の粒子間の濃度勾配を維持したまま粒子数を減らすことができる。

具体的には Fig. 3 に示すように格子内に粒子が5個存在する場合に、これを4個にするケースを考える。ここで、再配置前の粒子を○で表し、上流側から1, 2, ...と番号を付ける。また、再配置後の粒子を●で表し、a, b, c, dとする。すなわち、粒子1と粒子2を直線で結び、その中点として粒子aを、同様に粒子2と粒子3を直線で結び、その中点として粒子bをそれぞれ求める。この操作を含めた粒子移動法の計算手順を Fig. 5 のフローチャートに示す。

以下、従来の方法を用いた計算法を従来モデル、再配置を組み入れた計算法を再配置モデルと呼ぶ。

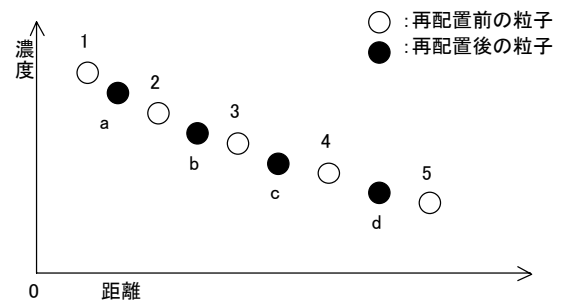


Fig. 3 格子内における粒子の再配置の様子

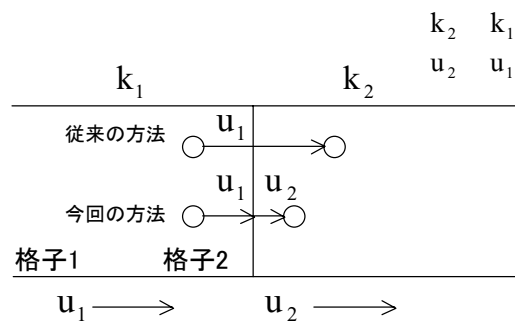


Fig. 4 粒子の移動の比較

##### 4.2 格子内の実流速に応じた粒子の移動

次に問題点(2)の粒子の移動距離に関する点を解決するために、格子内の実流速に応じて粒子を移動させる改良を行った。つまり、Fig. 4に示すように1時刻ステップの間に1つの粒子が格子をまたがって移動する場合に、格子1内を移動する時には格子1内の実流速  $u_1$  を用いて、格子2に移ったら格子2内の実流速  $u_2$  を用いて格子の移動距離を算定する。この操作により、下流側の粒子が上流側の粒子に追い越されることがなくなる。

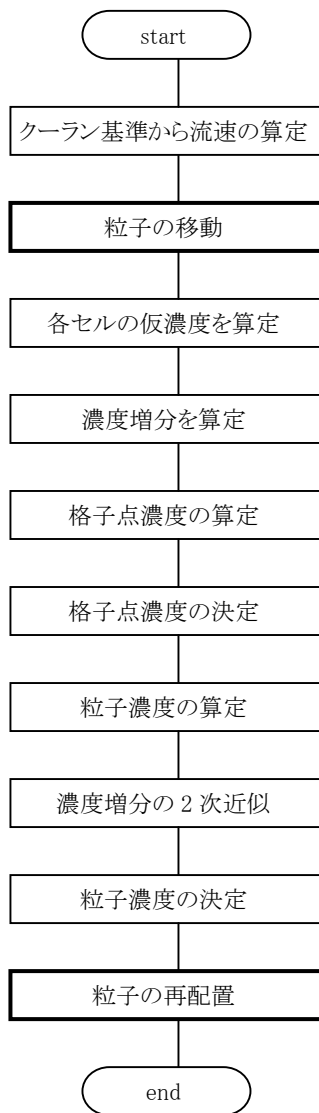


Fig. 5 粒子移動法による数値計算のフローチャート

## 5. 改良したモデル(再配置モデル)を用いた数値計算

### 5.1 数値計算に用いた条件

#### 5.1.1 透水係数の分布が不均一な多孔質層モデル

上述の再配置モデルの有用性を確認するために、透水係数の分布が不均一な場が必要となる。そこで、1次元直線流れの多孔質層にシリカが過飽和に溶存する熱水を出入口間の圧力差を一定にして供給し、多孔質層内でシリカが析出するモデル計算を行った。次にシリカスケールの析出により透水係数および空隙率の距離方向の分布が不均一となった多孔質層にフッ酸を供給し、シリカスケールの溶解に伴い透水係数と空隙率が回復する様子を数値計算により解析した。

Table 1 には、シリカスケール析出の数値計算に用いたパラメータの値を示す。多孔質層は長さ 50cm、直径 5.27cm の円筒形であり、これを距離刻み 1cm で格子分割した。本計算には、野口(2001)のシリカの

析出に関するプログラムを用いた。また、シリカスケールの溶解に関するパラメータの値を Table 2 に、フッ酸の移流分散に関するパラメータの値を Table 3 に示す。

Table 1 シリカの析出の計算に用いたパラメータ

多孔質層のパラメータ		
多孔質層の長さ (L)	50	(cm)
分割数 (N)	50	(-)
多孔質層の直径 (D)	5.27	(cm)
多孔質物質の密度 ( $\rho_m$ )	3.62	(g/cm <sup>3</sup> )
多孔質物質の半径 (d)	0.1	(cm)
計算に用いたパラメータ		
時間刻み ( $\Delta t$ )	60	(sec)
x=0 での水頭 ( $h_0$ )	158.2	(cm)
x=50 での水頭 ( $h_L$ )	134.5	(cm)
シリカスケールの密度 ( $\rho_s$ )	2.04	(g/cm <sup>3</sup> )
流入させるシリカの濃度 ( $C_0$ )	522	(ppm)
シリカの飽和濃度 ( $C_s$ )	520	(ppm)
重力加速度 (g)	980	(cm/sec <sup>2</sup> )
流体の動粘性係数 ( $\nu$ )	0.00326	(cm <sup>2</sup> /sec)
初期空隙率 ( $\phi_0$ )	0.4	(-)
2次空隙率 ( $\phi$ )	0.93	(-)
初期流量 ( $Q_0$ )	40.36	(cm <sup>3</sup> /sec)
初期透水係数 ( $K_0$ )	3.6	(cm/sec)
Kozeny 定数 (k)	5	(-)
シリカの付着パラメータ ( $\beta_1$ )*	0.00035	(cm/sec)
シリカの付着パラメータ ( $\beta_2$ )*	4200	(-)

Table 2 シリカスケールの溶解の計算に用いたパラメータ

頻度係数**	0.12	(g·l/sec·cm <sup>2</sup> ·mol)
気体定数	8.3145	(J/mol·K)
活性化エネルギー**	37.5	(kJ/mol)
熱水の温度	363.15	(K)

Table 3 解析条件

解析領域の長さ	50	(cm)
直径	5.27	(cm)
分散係数	0.08	(cm <sup>2</sup> /sec)
x=0 での水頭	158.2	(cm)
x=50 での水頭	134.5	(cm)
流入させるフッ酸の濃度	1.5	(mol/l)
分割数	50	(-)
時間刻み	0.2	(sec)
格子内の粒子の個数	4	(個)

\* 糸井ほか (1987) 参照

\*\* Blumberg,A.A.(1958) 参照

### 5.1.2 初期条件および境界条件

初期条件および境界条件は、以下のように表わされる。

$$\begin{aligned}
 t=0, 0 \leq x \leq L, C=0 \\
 t > 0, x=0, C=C_{HF} \\
 x=L, \partial C / \partial x=0
 \end{aligned}$$

これらの条件を以下のように取り扱った。

まず、時刻  $t=0$  において、多孔質層の流入口の格子 ( $x=0 \sim 1\text{cm}$ ) にフッ酸の流入濃度を持つ 4 個の粒子を等間隔に配置する。これより下流側に位置する各格子 ( $x=1 \sim 50\text{cm}$ ) に 4 個づつ、濃度 0 の粒子を等間隔に配置する。

流出口にも仮想の格子 ( $x=50 \sim 51\text{cm}$ ) を 1 つ設け、1 つ上流側の格子との間で濃度勾配 0 を与えた。

各時刻ステップにおいて 1 番目の格子 ( $x=0.0 \sim 1.0\text{cm}$ ) に常に粒子が 4 個存在するように、フッ酸の流入濃度を持つ粒子を等間隔に配置する。

### 5.1.3 その他の条件

粒子移動法では、計算結果の発散を防ぐために式 (2) で示されるクーラン基準を満たす必要がある。

$$|\Delta t \cdot v / \Delta x| \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 $\Delta x$ 、 $\Delta t$  は、それぞれ距離刻み、時間刻みである。しかし、透水係数が場によって異なる場合、各格子によってクーラン基準が異なる。そこで、全ての場でこの基準を満足するように解析領域中最大の実流速を用いてクーラン基準に  $\Delta x$ 、 $\Delta t$  を与える必要がある。Fig. 6 にシリカ析出計算終了時における実流速の分布を示す。図より、各格子で実流速が異なり、最大の実流速をもつ格子は 1 番目の格子 ( $x=0 \sim 1\text{cm}$ ) であることが分かる。 $\Delta x$  には一定値を与えるので、

以上の条件のもとで、クーラン基準を満たす時間刻み ( $\Delta t$ ) を計算すると  $\Delta t=0.42\text{sec}$  となった。

しかし、フッ酸とシリカスケールの反応により、スケールが溶解し、多孔質層の空隙率が時間と共に回復していく。その結果、透水係数も経時的に回復する。また、多孔質層の流入口と出口の水頭差 (圧力差) を一定にしているため、透水係数が回復することによって、多孔質層内を通過する流量が大きくなり、各格子の実流速も大きくなる。そのため  $\Delta t=0.42\text{sec}$  を継続して用いると途中から粒子が下流側の隣り合う格子を飛び越えて、さらに下流側の格子へ移動する現象が生じる。その結果、計算が不安定となるため下記の方法で  $\Delta t$  を求めることにした。

まず、シリカスケールが全て溶解された時点での流量を推測する。その時の透水係数から各格子の実流速を求め、その時の実流速の最大値をクーラン基準に採用する。Fig. 7 にシリカの析出前後での流速分布を示しているが、フッ酸による処理を施した場合、流速分布は図中の (b) から (a) へと回復することとなる。すると今回の計算で取りうる最大の  $\Delta t=0.2\text{sec}$  が求まる。

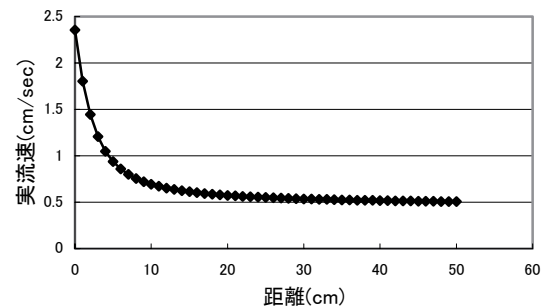


Fig. 6 シリカの析出終了時における実流速分布

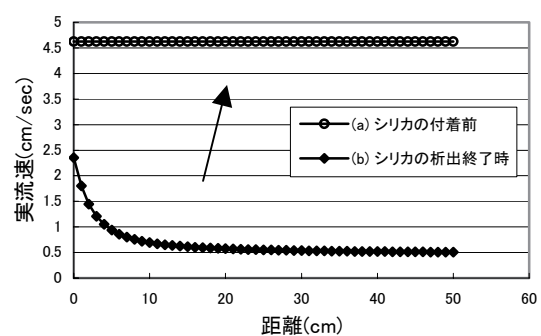


Fig. 7 シリカの付着に伴う実流速分布の推移

## 6. 計算結果および考察

6.1 従来モデルと再配置モデルを用いた場合の計算結果の比較

### 6.1.1 濃度分布

Fig. 8 は再配置モデルを用い、時間刻み  $\Delta t=0.0005\text{sec}$  を与えたときの 10 秒後の濃度分布を基準にして、時間刻みの大きさを変えたときの相対誤差を表したものである。時間刻みについては今回の解析

で取りうる最大の  $\Delta t=0.2\text{sec}$  から  $0.1\text{sec}$ ,  $0.05\text{sec}$ ,  $0.01\text{sec}$ ,  $0.005\text{sec}$ ,  $0.001\text{sec}$  と値を小さくして6通りに与えた。また、Fig. 9には再配置モデルを用い  $\Delta t=0.2\text{sec}$  を与えたときの濃度分布の経時変化を示している。時間刻みを小さくすると、より精度の高い結果が得られることが想定される。しかしその分、計算時間がかかるために、合理的な時間刻みの値の選定が必要である。Fig. 8に示すように、距離  $x=15\text{cm}$  から  $25\text{cm}$  の間では他に比べて大きい相対誤差が見られる。この原因は距離  $x=15\text{cm}$  から  $25\text{cm}$  の区間が濃度の分散が生じている濃度フロントであり、 $x$  の値が大きくなるほど基準となる濃度の値が小さくなるためである。ここで、Fig. 9の濃度分布(10秒後)を見ると、濃度の値が大きく変化する  $x=15$  から  $20\text{cm}$  の区間では、 $\Delta t$  による相対誤差に大きな差は認められない。よって、最も大きな時間刻み  $\Delta t=0.2\text{sec}$  を以下の計算に用いた。

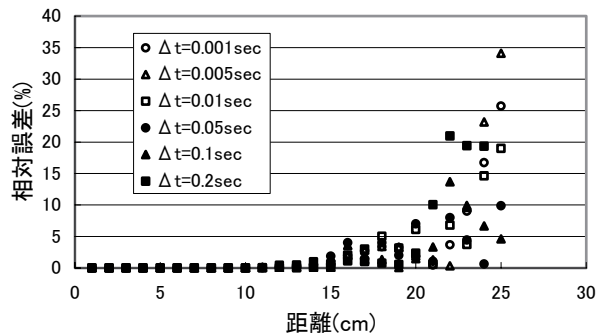


Fig. 8 時間刻み ( $\Delta t$ ) が濃度分布の計算結果に与える影響。  $\Delta t=0.0005\text{sec}$  を与えて求めた 10 秒後の濃度分布に対する各  $\Delta t$  の計算結果の相対誤差。

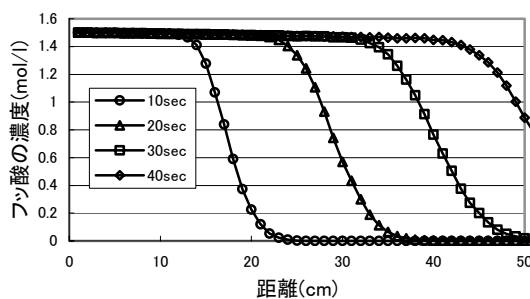


Fig. 9  $\Delta t=0.2\text{sec}$  を与えたときの濃度分布の経時変化

### 6.1.2 格子内の粒子の個数

Fig. 10 は従来モデルを用いた場合の  $x=30\text{cm}$ ,  $40\text{cm}$  の 2 点における格子内の粒子数、Fig. 11 は再配置モデルを用いた場合の同一地点における格子内の粒子数の経時変化をそれぞれ示す。Fig. 10 の時刻 30 秒より後では、 $x=30\text{cm}$  に比べ  $x=40\text{cm}$  の地点で格子内の粒子数が大きく増加している。これは  $x=30\text{cm}$  の地点では、 $x=40\text{cm}$  に比べて早く濃度の分散の最先端部分が到達しているためである。

Fig. 11 は、再配置モデルを用いた場合の  $x=30\text{cm}$ ,  $40\text{cm}$  地点における粒子数の経時変化を示したものである。図より、格子内の粒子数は初期値 (=4) よりも大きくはならないが、粒子数が 3 個になるケースが生じる。この原因は、再配置によって粒子の位置が変わり、格子によっては 1 個の粒子が下流側の格子に移動したにもかかわらず、上流側の格子からは粒子が移動してこない状況が生じるためである。しかし、この場合でも濃度計算には支障はなく安定した解析が維持できている。

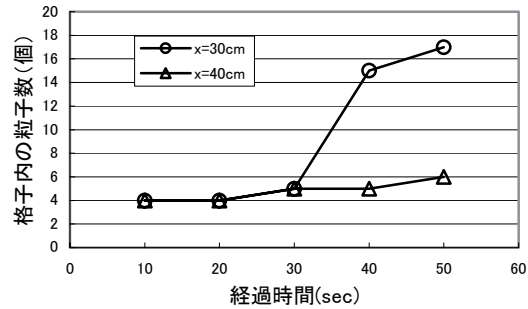


Fig. 10 従来モデルによる格子内の粒子数の経時変化

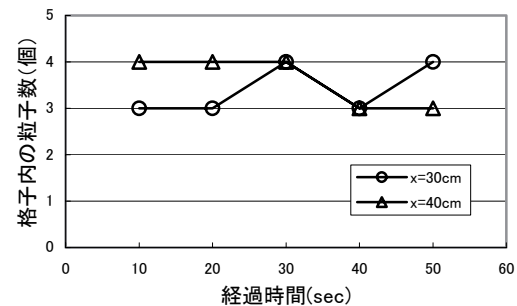


Fig. 11 再配置モデルによる格子内の粒子数の経時変化

### 6.1.3 計算時間

従来モデルと再配置モデルを用いた場合の数値計算に要する時間を比較し、結果を Table 4 にまとめて示す。計算はそれぞれ 5 回行い平均値を求めた。その結果、平均の計算時間は従来モデルが 45.0 秒、再配置モデルが 37.2 秒で、再配置モデルの方の計算時間が約 17% 短くなることが分かった。この計算時間の短縮の程度はそれ程大きくないが、今回は 1 次元の場合

Table 4 コンピュータの計算時間の比較 (CPU:CELERON・600MHz を使用)

計算時間の比較	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
従来モデル	45.08	44.98	44.98	44.97	44.94	45.0
再配置モデル	37.17	37.17	37.18	37.12	37.17	37.2

単位(秒)

扱っており、この方法を2次元、3次元の計算に適用すると、計算時間の短縮効果は大きくなると考えられる。

### 6.2 フッ酸処理の数値解析結果および考察

再配置モデルを用い、フッ酸濃度 1.5mol/l を与えた時の時間経過に伴う解析結果を以下に示す。なお、シリカスケールの付着率 ( $Q_s$ )、シリカスケールの溶解によって回復する多孔質層の空隙率 ( $\phi$ )、透水係数 ( $K$ ) (Kozeny-Stein の式) はそれぞれ式 (3)、(4)、(5) を用いて算出した (野口, 2001)。

$$\frac{dQ_s}{dt} = -k_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \frac{3}{\rho_m r} C_{HF} \quad (3)$$

ここで  $Q_s$  はシリカの付着率 (-) (多孔質層の単位質量あたりに付着したシリカスケールの質量割合)、 $k_0$  は頻度定数 ( $g \cdot l/sec \cdot cm^2 \cdot mol$ )、 $\Delta E$  は活性化エネルギー ( $kJ/mol$ )、 $R$  は気体定数 ( $J/mol \cdot K$ )、 $T$  は熱水の温度 ( $K$ )、 $\rho_m$  は多孔質物質の密度 ( $g/cm^3$ )、 $r$  は多孔質物質粒子の半径 ( $cm$ )、 $C_{HF}$  はフッ酸の濃度 ( $mol/l$ ) である。

$$\phi = \phi_0 - \frac{\rho_s (1 - \phi_0) Q_s}{\rho_s (1 - f_s)} \quad (4)$$

ここで  $\phi_0$  はシリカスケール析出前の空隙率 (-)、 $\rho_s$  はシリカの密度 ( $g/cm^3$ )、 $f_s$  はシリカスケールの空隙率 (2次空隙率) (-)

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\left\{ \phi_0 - (1 - \phi_0) \frac{\rho_s Q_s}{\rho_s (1 - f_s)} \right\}^3}{\phi^3 \left\{ 1 + \frac{\rho_s Q_s}{\rho_s (1 - f_s)} \right\}^2} \left\{ \frac{\rho_s Q_s}{3\rho_s (1 - f_s)} + \frac{1}{2} + \sqrt{1 + \frac{\rho_s Q_s}{4 \rho_s (1 - f_s)}} \right\} \quad (5)$$

ここで  $K_0$  はシリカスケール析出前の透水係数 ( $cm/sec$ )

#### 6.2.1 水頭勾配の経時変化 (Fig. 12)

図に示すように、初期において多孔質層の  $x=0$  から 10cm にかけて大きな勾配を持つ水頭分布が、時間の経過に伴い緩やかになっていつのかわかる。さらに、3000 秒後には一様な水頭勾配を示している。

#### 6.2.2 シリカの付着率の経時変化 (Fig. 13)

流入部でのシリカスケールとの反応では消費されずに下流側へと移動したフッ酸は、下流側のシリカスケールを溶解することになる。その結果、フッ酸の濃度が低下したにもかかわらずシリカスケールは多孔質層の下流側の方が、流入部に比べて先に全てのシリカスケールが溶解され、1500 秒後には  $x=10cm$  より下流側では付着率が 0 となる。これは上流側に比べて下流側では付着量が少ないためである。

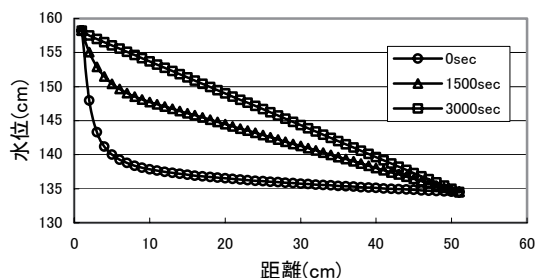


Fig. 12 再配置モデルを用いた水頭勾配の経時変化 (フッ酸の流入濃度  $C_{HF}=1.5mol/l$ )

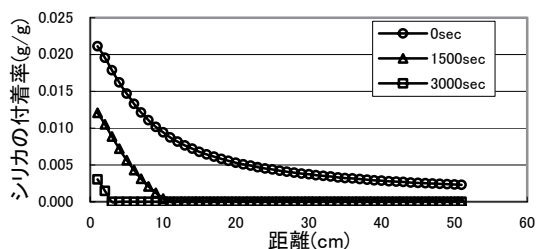


Fig. 13 再配置モデルを用いたシリカ付着率の経時変化 (フッ酸の流入濃度  $C_{HF}=1.5mol/l$ )

#### 6.2.3 空隙率の経時変化 (Fig. 14)

より多くシリカスケールが付着している  $x=0$  から 10cm が最も回復が遅く、付着量が微量である  $x=20$  から 50cm は、早い段階でシリカスケールが析出する前の値まで回復している。さらに 3000 秒後には、多孔質層の流入部付近を除いて各地点の空隙率は一定値 (シリカスケールが析出する前の空隙率 = 0.4) になっている。

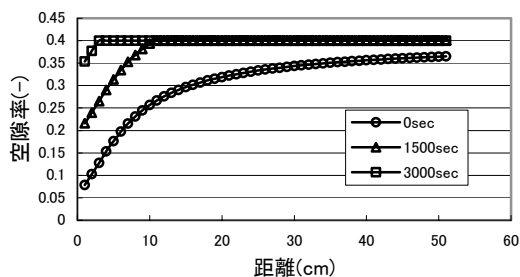


Fig. 14 再配置モデルを用いた空隙率の経時変化 (フッ酸の流入濃度  $C_{HF}=1.5mol/l$ )

#### 6.2.4 透水係数の経時変化 (Fig. 15)

空隙率と透水係数の両者は付着率が減少するにしたがって回復していく。したがって、より多くシリカスケールが付着している  $x=0$  から 10cm が最も回復が遅く、付着量が微量である  $x=20$  から 50cm は、早い段階で多孔質層本来の値まで回復している。さらに 3000 秒後には、多孔質層の流入部付近を除いて各地点の透水係数は一定値 (シリカスケールが析出する前の透水係数 = 3.6cm/sec) になっている。



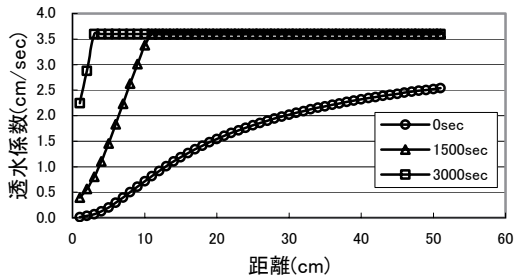


Fig. 15 再配置モデルを用いた透水係数の経時変化 (フッ酸の流入濃度  $C_{HF}=1.5\text{mol/l}$ )

### 6. 2. 5 透水係数と流量の関係 (Fig. 16, Fig. 17)

多孔質層に供給したフッ酸濃度をパラメータにとり、多孔質層内を通過したフッ酸の積算流量と透水係数の関係を求めた。この図より、透水係数の回復に要するフッ酸の総量を知ることができる。そこで、フッ酸処理前の多孔質層の平均透水係数が、10倍回復するまで ( $k/k_1=10:k_1$  はシリカスケール析出後の多孔質層の平均透水係数) のフッ酸の量を図より求めるとフッ酸濃度 0.5mol/l, 1.5mol/l, 2.5mol/l に対してそれぞれ  $41822\text{cm}^3$ ,  $13980\text{cm}^3$ ,  $8387\text{cm}^3$  である。また、回復に要する時間は濃度によって異なり、濃度 0.5mol/l を基準にして比較すると、濃度 1.5mol/l では約3倍、濃度 2.5mol/l では約5倍回復時間が早いことが分かる。

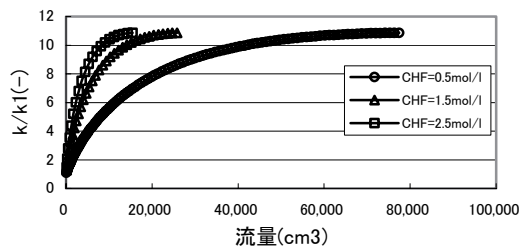


Fig. 16 フッ酸濃度が透水係数と流量に及ぼす影響

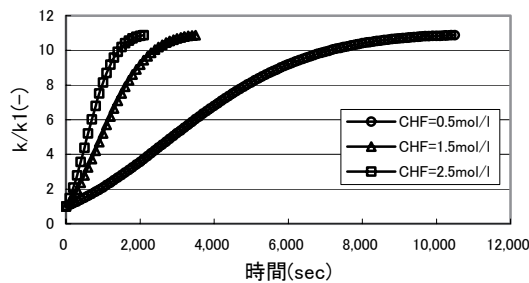


Fig. 17 フッ酸濃度が透水係数の経時変化に及ぼす影響

## 7. 結論

本研究では、透水係数の分布が不均質な1次元多孔質媒体中での移流分散方程式の解析に粒子移動法を適用するための数値解法の改良を行った。次に、改良した手法を用いて、シリカの析出により透水係数および空隙率の低下した多孔質層の酸処理によるこれらのパラメータの回復挙動を数値解析により明らかにした。得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 透水係数の分布が不均質な場合は、格子内の粒子の並び方によっては上流側の粒子が、下流側の粒子を追い越し計算が不安定になる。よって、粒子をその格子内の速度で移動させることによりこの問題を解決できた。
- (2) 流速が低い格子内では、経時的に粒子数が増え、計算時間の増加の原因になる。そこで、格子内の粒子が常に初期の個数を維持するように、粒子を再配置する改良を行った (以下、再配置モデル)。その結果、計算時間を約17%短縮することができた。
- (3) 再配置モデルを用い、多孔質層のフッ酸処理による透水性回復の解析プログラムを開発し、それを用いた解析を行った。その結果、時間の経過と共にフッ酸がシリカスケールを溶解し、透水係数の回復現象をシミュレートすることができた。

## 参考文献

Blumberg, A.A (1958) : Differential Thermal Analysis and Heterogeneous Kinetics: The Reaction of Vitreous Silica with Hydrofluoric Acid, Mellon Institute, Pittsburgh 13, Pennsylvania, Vol.63, 1129-1132

糸井龍一, 福田道博, 神野健二, 横山拓史, 清水晨 (1987) : 熱水中のシリカの付着による貯留層の透水性低下に関する研究—1次元流れの数値解析—, 日本地熱学会誌, 第9巻, 第4号, 285-306

神野健二, 上田年比古 (1978) : 粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討, 土木学会論文報告集, 第271号, 45-53

野口寿人 (2001) : 化学的坑井刺激法による還元井能力回復に関する数値シミュレーション, 九州大学修士論文