



## 亀裂ネットワーク水理物質移行モデルの開発

内田 雅大 澤田 淳

東海事業所環境技術開発部

資料番号：90-6

The Development of Discrete Fracture Network Model for Simulating Hydrology and Mass Transport Through Fractured Media

Masahiro Uchida Atsushi Sawada  
(Waste Technology Development Division, Tokai Works)

亀裂状媒体中の核種移行においては、移行経路の幾何形状が重要である。このため、動燃事業団においては移行経路の幾何形状を忠実にモデル化可能な亀裂ネットワークモデルに着目し、亀裂ネットワークコードFracMan/MAFICの開発を行っている。本論では、FracMan/MAFICの機能と、これまでの開発状況の概略を述べる。また、本コードを用いて、平成4年に釜石原位試験場で実施されたトレーサー試験を解析し、物質移行に係わる間隙幅を評価した。

### 1. はじめに

花崗岩をはじめとする亀裂状媒体においては、核種の移行は亀裂に沿って起きると考えられている。亀裂状媒体における核種の移行は、移流・分散・収着・マトリクス拡散によって支配されると考えられているが、これらは亀裂の幾何的形狀と深く関連するため、核種移行の評価に当たっては亀裂の幾何的形狀を何らかの形で考慮する必要がある。

核種移行においては、特に選択的経路の存在が問題となるため、連続体モデルでは保守性が担保されない可能性がある。

この点、1982年にLong他<sup>1)</sup>により導入された亀裂ネットワークモデルは、亀裂の幾何的形狀を詳細に表現可能であり、多数の研究者により開発が行われてきている。

亀裂ネットワークモデルは、1980年より始まり1992年に終了したOECD/NEA国際ストリバ・プロジェクト<sup>2)</sup>において急速に開発が進み実用化が図られた。

亀裂ネットワークモデルの1つの利点は、従来の連続体モデルに比べ、地質学的データを直接モデルに反映することができモデルの信頼性を向上させることが可能な点である。

動燃事業団としても、本モデルのこうした長所に着目し、ストリバ・プロジェクトにおいて最も高い評価を得た米国Golder Associates社のFracMan/MAFICコード<sup>3)</sup>の開発を、我が国の岩盤条件に適したコードとし、かつ種々の機能を増強し信頼性を高めるために、平成3年度から同社と協力して進めている。

### 2. 亀裂ネットワークコードの開発の現状

本コードは、亀裂性岩盤中の主たる水みちである亀裂を、それぞれ多角形平行平板で代表し、それらによって構成される亀裂ネットワークをモデル化することで、岩盤中の不均質な流れを表現することが可能である。この際に問題となるのは、解析対象となる岩盤中に存在する透水性亀裂は、坑道やボーリング孔でのみ観測が可能であり、そのすべてを観測することができないということである。そこで、本コードは限られたデータを基に、それぞれのパラメータの母集団を推定し、これを基に統計的な亀裂モデルを構築するためのデータ解析機能を備えている。これにより、原位置で得られたデータを反映したモデルを作ることができ、モデルの信頼性を担保することができる。

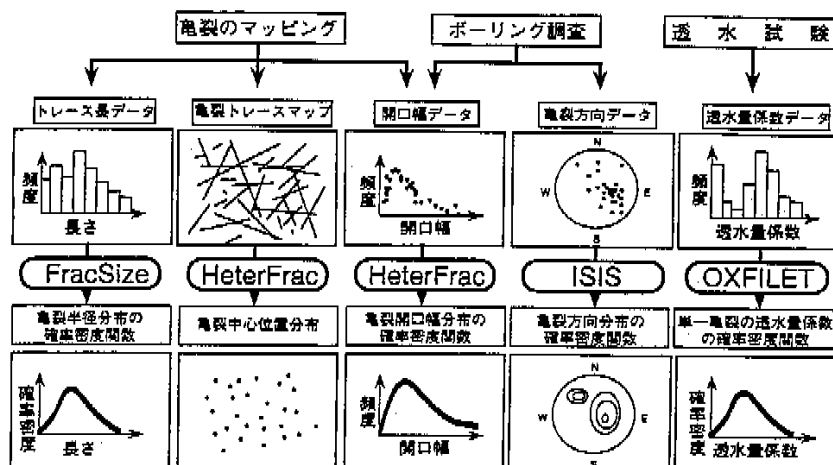


図1 FracSysによる解析の流れ

## 2.1 亀裂ネットワークコードの基本構成

本コードは下記の5つのモジュール群から構成されている。

- (1) 亀裂データの統計的解析モジュールFracSys
- (2) 亀裂発生モジュールFracWorks
- (3) 有限要素作成モジュールMeshMonster
- (4) 要素編集モジュールEdMesh
- (5) 水理、物質移行解析ソルバーMAFIC

以下では、これらのコード群について、その概略を紹介する。

### (1) 亀裂データの統計的解析モジュールFracSys

原位置で得られる限られたデータから、モデル化に必要なパラメータの母集団を確率密度関数として求める解析モジュール群である。FracSysは以下の4つのモジュールから構成される(図1)。

#### 1) ISIS(Interactive Set Identification System)

ISISは、坑道やボーリング孔で観測された亀裂の方向やトレース長、充填鉱物、亀裂端形状等の地質学的データを基に、亀裂セットのクラスタリング解析を行い、複数の亀裂セットを同定するとともに、その亀裂セット毎の平均方向とその分散(Fisher分布を仮定)を推定する。その際、データの各項目に任意の重み係数を設定することができ、地質学的な判断を解析に反映させることが可能である。また、亀裂の方向については、測線や観測面の方向によるデータ数の偏りを、次式により計算されるNを亀裂総数に乘じて補正できる(Terzaghiの手法<sup>4)</sup>)。

$$N = \min(\text{int}[R/\cos \beta], 7) \quad (2.1)$$

ここで、R: 0~1の乱数

$\beta$ : 亀裂の法線方向と測線のなす角

int: [ ] 内の整数値

min: { } 内の最小値

亀裂クラスタリングの後、ISISは後述のFracSizeに必要な各セット毎の亀裂トレース長データファイルを作成する。

#### 2) FracSize

FracSizeは、坑道や露頭で観測された亀裂のトレース長を基に、亀裂の半径分布を解析するモジュールである。原位置で観測されたトレース長は、露頭や坑道壁面で任意に設定した観測面内に表われた亀裂の長さを測定しており、実際の亀裂の大きさを表わしてはいない。そのためFracSizeでは、亀裂半径分布、亀裂方向および亀裂の中心点と坑道との距離を任意に設定して亀裂を発生させ、データが測定された観測面を用いてトレース長をサンプリングし、このトレース長分布と実測されたトレース長分布と比較する。そして、実測されたトレース長分布を再現するまで、亀裂半径の平均値と標準偏差を少しずつ変化させながらシミュレーションを繰り返す。その際、シミュレーション結果と実測されたトレース長分布のフィッティングの程度はKolmogorov-Smirnov検定と $\chi^2$ 検定を用いて判定される。

シミュレーションに用いる亀裂半径分布には、正規分布、指数分布、対数正規分布、一様分布、ベキ級数分布等の分布を仮定できる。

#### 3) OXFILET (Osnes Extraction from Fixed-Interval-Length Effective Transmissivities)

OXFILETは、単孔透水試験データを基に、亀裂の透水量係数分布と透水亀裂密度を求めるモジュール

ルである。透水試験のパッカー区間の透水量係数が、その区間に交差する各透水性亀裂の透水量係数の総和と等しいと仮定する。

$$T_i = \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} \quad (2.2)$$

ここで、 $T_i$ : パッカー区間  $i$  の見かけの透水量係数

$n_i$ : パッカー区間  $i$  中の透水性亀裂数

$T_{ij}$ : パッカー区間  $i$  中の  $j$  番目の透水性亀裂の透水量係数

パッカー区間  $i$  内の透水性亀裂の数  $n$  は次式で表わされるポアソン分布を仮定して与える。

$$f_n(n) = N^n e^{-N} / n! \quad (2.3)$$

ここで、 $N$ : ポアソンプロセス比

( $n$  の期待値に等しい)

以上の仮定に基づき、透水試験の個数だけ、各パッカー区間の透水量係数の分布をシミュレートし、実測されたパッカー区間の透水量係数分布とのフィッティングを行い、所定の基準を満たすまで透水性亀裂のポアソンプロセス比、透水性亀裂の透水量係数、標準偏差を変えながら最適なフィッティングを行うことができる。その際の判定は、FracSizeと同様に、Kolmogorov-Smirnov検定と $\chi^2$ 検定を用いる。

#### 4) HeterFrac

HeterFracは亀裂の構造を解析するモジュールであり、下記の2つの機能を有する。

- ① 坑道壁面等で得られる亀裂のトレスマップを基に、亀裂の中心位置分布を解析する機能。
- ② 単一亀裂内における、亀裂間隙幅分布を解析する機能。

①では、下記の5つのモデルを考慮することができ、実測されたトレスマップに最も適合するモデルを選定することができる(図2参照)。

##### ・Enhanced Baecherモデル

3次元空間において亀裂の中心位置が均質にランダムな分布を示すモデル。新しい亀裂が既存の亀裂と交差する場合に、新しい亀裂が既存の亀裂を貫通せずに終焉することが考慮できる。

##### ・Nearest Neighborモデル

前もって断層等の主要な亀裂セットを発生させた後、その断層の周辺部へ亀裂を密集させるモデル。

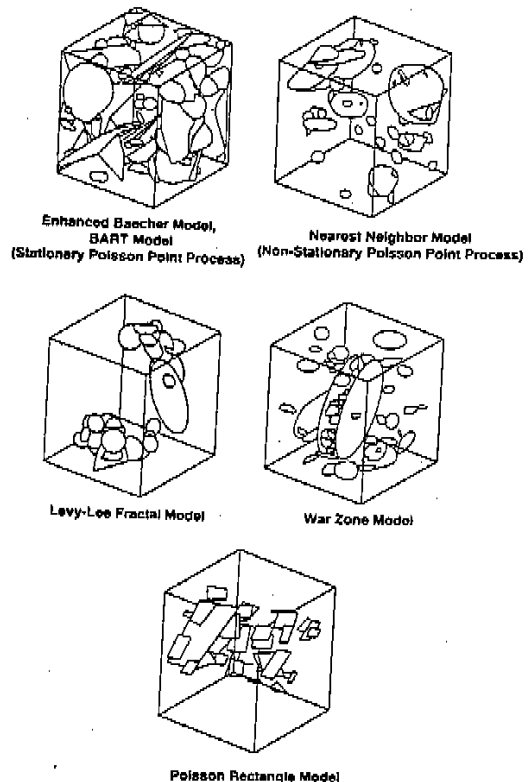


図2 亀裂分布モデルの概念図

##### ・Levy-Lee Fractalモデル

フラクタルな空間分布を考慮したモデル。

Levy flight processの手法により亀裂の中心位置が決定され、亀裂の大きさは、直前に作成された亀裂と現在の亀裂の中心間の距離に比例する。

##### ・War Zoneモデル

破碎帯をモデル化するため、破碎帯の両端にあたる平行で大きな亀裂の間に小さな選択的に亀裂を発生させるモデル。

##### ・Poisson Rectangleモデル

Enhanced Baecherモデルのより単純なモデルで、一枚の亀裂を長方形で表現する。亀裂の中心位置分布はEnhanced Baecherモデルと同様に、均質でランダムである。

一方で②は、以下の4つのモデルから亀裂間隙幅分布を求めることができる。

##### ・Stationaryモデル

正規分布や対数正規分布等で亀裂間隙幅のばらつきを表現し、亀裂間隙幅の空間的な相関性を考慮しない。

表1 FracWorksへ入力するパラメータ

| 決定論的亀裂発生 | 統計的亀裂発生      |
|----------|--------------|
| 亀裂中心位置   | 亀裂密度         |
| 亀裂の方向    | 亀裂中心位置分布関数   |
| 亀裂半径     | 亀裂の方向分布関数    |
| 亀裂の透水量係数 | 亀裂半径分布関数     |
| 亀裂の貯留係数  | 亀裂の透水量係数分布関数 |
| 亀裂の開口幅   | 亀裂の貯留係数分布関数  |
|          | 亀裂の開口幅分布関数   |

・Geostatisticalモデル(地球統計法)

地球統計法で亀裂間隙幅の空間的相関性を表現する。

・Fractalモデル

フラクタル法で亀裂間隙幅の空間的相関性を表現する。

・Non-stationary/Empiricalモデル

亀裂間隙幅の空間的相関性を、亀裂間隙幅の極大点と極小点間の空間的密度を用いて表現する。なお、極大点と極小点は解析者が任意に選定できる。

(2) 亀裂発生モジュールFracWorks

FracWorksは、多角形平行平板に近似した亀裂を三次元空間内に、原位置データを直接用いて決定論的に、または前述のFracSysで解析して得られた各パラメータの確率密度関数を基に統計的に発生させることができる。その際、用いるパラメータを表1に示す。

決定論的な亀裂の発生においては、個々の亀裂についてそれぞれパラメータを与えて亀裂を発生させる。また、統計的な亀裂の発生においては、亀裂面に入力した確率密度関数からモンテカルロ法でサンプリングを行い、各パラメータを個別に決定する。したがって、統計的な亀裂発生を行う場合、同じ確率密度関数を与えてもサンプリング時に用いる乱数が異なれば、全体としては与えられた確率密度関数を満たすが、全く異なる亀裂パターンを作ることが可能である(これら一つ一つの亀裂パターンをrealizationと呼ぶ)。この場合、通常数10個のrealizationを作成し、水理・物質移行解析を行い、その結果を統計的に処理し評価することとなる。

また、FracWorksは作成した亀裂パターンに水理・物質移行解析のための外側・内側境界条件を、任意の多角柱で与えることができる。多角柱で与えられた境界領域の各境界面にそれぞれ、下記の境界条件タイプを指定できる。

- 1) 定常および比定常の全水頭
- 2) 定常および比定常の流量
- 3) 境界グループ毎の全流量

さらに、各境界面の全水頭Hまたは全流量Qは次式で空間的な不均質性を与えることができる。

$$H = H_x \cdot x + H_y \cdot y + H_z \cdot z + H_0 \quad (2.4)$$

$$Q = Q_x \cdot x + Q_y \cdot y + Q_z \cdot z + Q_0 \quad (2.5)$$

ここで、x, y, z: 直交座標系における各座標

(3) 有限要素作成モジュールMeshMonster

MeshMonsterは、FracWorksで作成した亀裂パターンから、亀裂交差部を考慮しながら三角形要素メッシュに分割し、かつ境界節点へ境界条件の割り付けを行い、水理・物質移行ソルバーMAFICで解析可能な有限要素モデルを作成する。

(4) 要素編集モジュールEdMesh

EdMeshは、MeshMonsterで作成した有限要素モデルを、下記のように編集することができる。

- 1) 境界条件を変更する。
- 2) 各要素の物性値(透水量係数、開口幅、貯留係数)を変更する。
- 3) 解析上無視可能な要素(透水量係数が小さい要素、一辺の長さが極端に小さい要素)を除去する。
- 4) 孤立した要素を除去する。
- 5) 指定された要素を再分割し、各要素の物性値にHeterFracの解析結果に基づいて不均質性を与え、単一亀裂内の不均質性をモデル化する。

MeshMonsterでの計算は、多数の亀裂を三角形要素に分割するため多くの時間を要する。そこで、モデルの幾何学的形状を変えずに物性値や境界条件の一部を変更する際や、各要素を細分割して単一亀裂内の不均質性をモデル化する際には、EdMeshを用いることで効率的に解析できる。

(5) 水理、物質移行解析ソルバーMAFIC

MAFICは、有限要素法による定常または非定常状態の浸透流解析と、粒子追跡法による物質移動解析を行うコードである。

1) 浸透流解析

亀裂中の流れは、連続の式とDarcyの法則に基づき、次式で示される。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} - T \nabla^2 h = q \quad (2.6)$$

ここで、S: 亀裂の貯留係数(無次元)

h: 水頭(L)

t: 時間(T)

T: 亀裂の透水量係数(L<sup>2</sup>/T)

q: source/sink項

$\nabla^2$ : 2次元ラプラス演算子

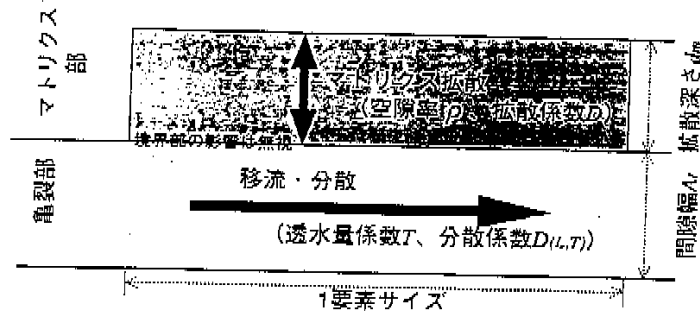


図3 マトリクス拡散モデル概念図

MAFICでは、式(2.6)の近似解をGalerkin法により求めている。

## 2) 物質移動解析 (粒子追跡法)

粒子追跡法は、地下水中の物質濃度を、均等な質量をもつ有限個の粒子で代表させ、個々の粒子を追跡する手法である。地下水中の溶質の移動は、地下水流速に基づく移流と、流速の不均質性に伴う分散により表わされる。分散は移流による移動距離に対するランダムな統計的過程として次式で表わされる。

$$X_d = N_L \cdot (2d_L \cdot X_c)^{1/2} \quad (2.7)$$

ここで、 $X_d$ : x方向の分散による移動距離

$X_c$ : 移流による移動距離

$d_L$ : x方向の分散係数

$N_L$ : 1 ~ 0 の乱数

MAFICでは、モデル化した亀裂それぞれの平面内における2次元方向の移流分散を表現するため、分散係数として、移流方向に平行な分散係数 $d_L$ と垂直な分散係数 $d_T$ を設定する。

## 2.2 ストリバ・プロジェクト以降の主な改良開発

ストリバ・プロジェクト以降、動燃事業団はGolder Associates社と協力し、FracMan/MAFICの様々な改良開発を行ってきた。以下に、その主なものについて概略を記す。

### (1) 単一亀裂内の不均質性モデル化

単一亀裂内において、卓越した流路が存在（チャネリング現象）することが知られている。このような現象は、単一亀裂内における流速分布の不均質性を生ずる。地層処分性能評価においては、核種の移行速度と流路面積を正確にモデル化し、単一亀裂内の不均質性をモデル化する必要がある。このため、原位置もしくは実験室で測定された亀裂間隙幅データを解析する前処理コードとしてHeterFrac

(2.1, (1), 4) 節参照)を開発するとともに、単一亀裂内の間隙幅の不均質性を発生させる機能をEdMeshに追加した。HeterFracでは、4つのモデルを選択することができ、その結果をEdMeshに入力して、モデルを作成する。EdMeshでは、それぞれの亀裂要素を細分割し、入力されたモデルに基づき、物性値の不均質性を統計的に発生させることができる。

### (2) Conditioning機能

FracWorksに、亀裂を統計的に発生させる時に、坑道やボーリング孔で測定された亀裂の位置と方向を発生条件に加えて、モデルの自由度を制限する機能(conditioning)を追加した。この際、坑道で得られる亀裂トレースマップを用いて、亀裂の位置と方向に加えて、亀裂トレースのパターンも条件に使用することができる。さらに、複数のトレースマップやボーリング孔データを同時に亀裂発生条件に用いることができる。この機能をFracWorksに追加することで、より現実的なモデル化が可能となるとともに、特定のポイントにおける結果の比較が可能となった。

### (3) マトリクス拡散のモデル化

亀裂性媒体においては、亀裂中の流れが支配的であるが、長期的には岩盤マトリクス中への拡散現象がおきる。MAFICでは、この岩盤マトリクス中への拡散を図3に示すように、亀裂鉛直方向への一次元のランダムな動きでモデル化し、マトリクス拡散に要する時間を遅延時間とみなして、各要素を粒子が通過するための所要時間が計算可能となっている。

## 3. 釜石トレーサー試験の解析

ここでは、FracMan/MAFICを用いたトレーサー試験の解析例を紹介する。解析対象のトレーサー試験は、釜石原位置試験場で平成4年度に行われた。釜石原位置試験場は、岩手県釜石市西方に位置する釜石鉱山を利用した試験場で、動燃事業団では

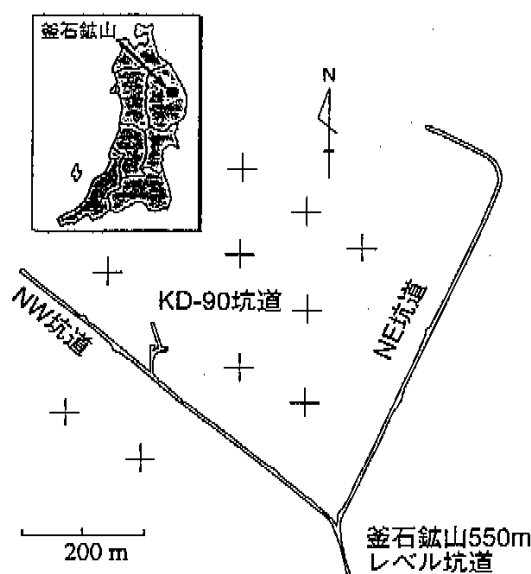


図4 釜石原位置試験場の坑道配置図

1988年より亀裂性岩盤中の種々の試験が地層科学研究の一環として継続して行われている。トレーサー試験は、釜石鉱山(図4)KD-90坑道中心から上方約7.4mと約12.5mにKD-90坑道と平行に垂直されたボーリング孔(KH-7孔、KH-8孔:図5参照)を用いて行われた。

### 3.1 試験内容

できるだけ単一の亀裂を対象としてトレーサー試験を行うために、以下の3つの試験を組み合わせ、トレーサー試験の対象区間が設定された。

- 既存の亀裂データからの予察
- ボーリング孔間圧力応答試験
- 染料トレーサー試験

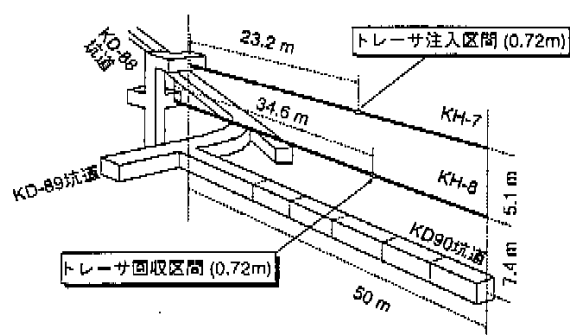


図5 KD-90坑道付近のボーリング孔

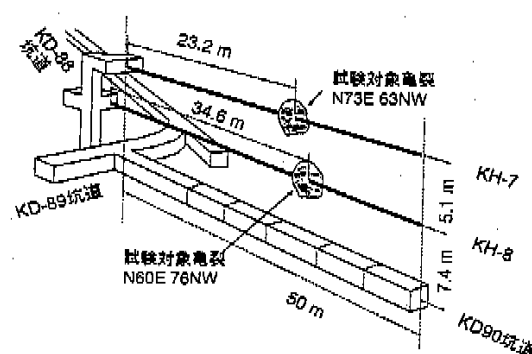


図6 試験対象亀裂

これらの結果から試験対象亀裂が選定され、トレーサーの注入区間と観測区間が設定された(図6)。トレーサーには非吸着性の塩水(NaCl)が使用され、塩水の濃度は電気伝導度センサーを用いて測定された。KH-7孔とKH-8孔に設置したバックカー装置には、それぞれ注水ラインと採水ラインが、またバックカー区間内には圧力センサー、電気伝導度センサー、および温度センサーが備えられた。

試験は以下の手順で行われた。

まず、トレーサーの注入開始より1日以上前からKH-7孔から所定の圧力で水を注入する。KH-8孔では採水ラインのバルブを開放する(その際、KH-8のバックカー区間では区間内圧力がわずかに残ることになる)。そして、KH-7孔およびKH-8孔の各バックカー区間内圧力がそれぞれ安定していると判断された後、KH-7孔の水の注入から約1g/lの濃度に調整した塩水の注入に切り換える。水注入から塩水注入への切り換えには、水用と塩水用の2台の定圧注入装置を用意し、バルブを切り換えて行う。こうすることで、注入圧力を変えずにスムーズな塩水注入への切り換えが可能となる。

試験開始とともに注入区間と観測区間の電気伝導度、間隙水圧と温度がそれぞれ測定された。また、KH-7孔への注水量とKH-8孔からの排水量が随時測定され、その量が一定に保たれていることが確認されている。

試験はKH-7孔への注入圧力とKH-8孔での区間内圧力を変えて2回行われた。その試験条件を表2に記す。

1回目、2回目の試験結果をそれぞれ図7、図8に示す。KH-8孔でのトレーサーの回収率は1回目が29.6%、2回目が71.6%であった。

また、トレーサー試験終了後、KH-7孔、KH-8孔の試験対象区間においてそれぞれ透水試験が実

表2 試験条件

|                              | 試験1                   | 試験2                   |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| KH-7孔注入圧力水頭 (m)              | 24                    | 15                    |
| KH-7孔注入量 (m <sup>3</sup> /s) | $2.83 \times 10^{-6}$ | $9.5 \times 10^{-7}$  |
| KH-8孔区間内圧力水頭 (m)             | 7                     | 5                     |
| KH-8孔排水量 (m <sup>3</sup> /s) | $1.50 \times 10^{-6}$ | $2.07 \times 10^{-6}$ |

施され、それぞれの区間の透水係数が求められている。

KH-7パッカー区間： $9.5 \times 10^{-8}$  m/s

KH-8パッカー区間： $1.72 \times 10^{-7}$  m/s

### 3.2 モデル化

釜石鉱山KD-90坑道付近の透水性亀裂の分布特性は、すでにUchida et al. (1993)<sup>5)</sup>によって解析が行われている。UchidaらはKD-90坑道付近の4本のボーリング孔で観測された湧水亀裂の方向と位置を亀裂発生条件に加え(Conditioning)、KD-90坑道壁面の透水性亀裂パターンとKD-90坑道への湧水量の予測解析を行っている。

今回の解析では基本的にUchidaらのパラメータを用いて解析を行うこととした。ただし、トレーサー試験の対象亀裂は、単一亀裂内の不均質性を考慮し、より詳細なモデル化を試みた。また、外側境界条件については、Uchidaらのモデルを解析してKD-90坑道を中心とする100m×100m×100mの本解析の領域の圧力分布を検討し、KD-90坑道中心を基準面として全水頭20mを設定した。モデル化の手順を以下に記す。

対象亀裂の走行傾斜は、KH-7孔、KH-8孔でわずかに斜交しているが、連続した亀裂とみなして、一枚の亀裂でモデル化した。その際、亀裂の半径はUchidaらのデータから7mと仮定し、また、

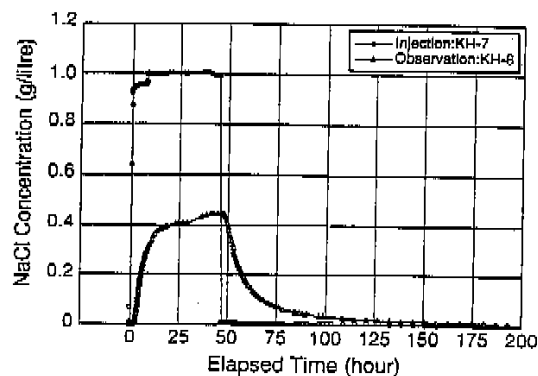


図7 トレーサー試験1の結果

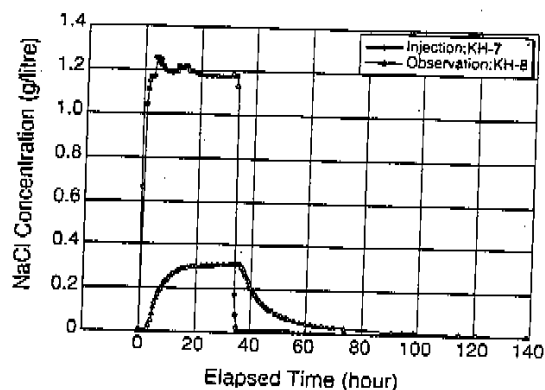


図8 トレーサー試験2の結果

KH-7孔、KH-8孔それぞれのパッカー区間を横切る透水性亀裂は試験対象亀裂のみであると仮定し、KH-7孔、KH-8孔の透水係数からそれぞれのパッカー区間(区間長0.8m)の透水量係数を求めた。そして、対象亀裂の透水量係数として、これらの平均値 $1.1 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/sを与えた。他の亀裂は、KH-7孔とKH-8孔の既存の亀裂データから湧水亀裂と充填鉱物幅が10cm以上の亀裂を抽出し、それらの位置と方向を亀裂発生条件に加えて亀裂を発生(Conditioning)することとした。以上を表にまとめ、表3に記す。また、亀裂モデルの概念図を図9に示す。

### 3.3 解析と解析結果

上記の亀裂モデルから、対象亀裂を約1mの大きさの要素に細分割し、透水量係数の不均質性を与えた。その際、透水量係数分布はgeostatistics理論<sup>6)</sup>に基づく分布モデルを仮定し、対象亀裂内の透水量係数の不均質性は、次式の指数モデルに基づく共分散C(r)を用いてシミュレートした。

$$C(r) = \sigma^2 \cdot e^{-(r/b)} \quad (3.1)$$

ここで、 $\sigma$ ：標準偏差

表3 解析に用いたパラメータ

|                             | 対象亀裂                  | INNER REGION                                                                                        | OUTER REGION                                                                                        |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 走行・傾斜                       | N66.5E 64NW           | Bootstrap+Conditioning                                                                              | Bootstrap                                                                                           |
| 亀裂半径分布 (m)                  | 7                     | 対数正規分布<br>平均: 7<br>標準偏差: 1.25<br>範囲: 5~25                                                           | 対数正規分布<br>平均: 25<br>標準偏差: 10<br>範囲: 30~50                                                           |
| 透水量係数分布 (m <sup>3</sup> /s) | $1.07 \times 10^{-7}$ | 対数正規分布<br>平均: $4.05 \times 10^{-7}$<br>標準偏差: $2.28 \times 10^{-7}$<br>範囲: $3 \times 10^{-8} \sim 1$ | 対数正規分布<br>平均: $4.05 \times 10^{-7}$<br>標準偏差: $2.82 \times 10^{-7}$<br>範囲: $3 \times 10^{-8} \sim 1$ |

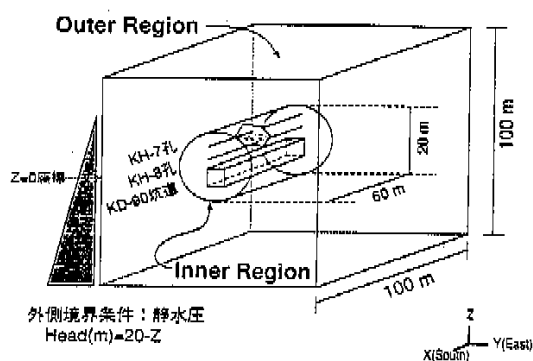


図9 モデル概念図

$r$  : 2点間の距離  
 $b$  : 影響範囲

その際、透水試験から得られた値をその平均値とし、標準偏差 $\sigma$ に変化を与えた。また、2点間の透水量係数の影響範囲 $b$ にも変化を与えて、表2の圧力流量条件を満たす標準偏差 $\sigma$ および影響半径 $b$ を解析した。その結果、標準偏差 $\sigma=10 \times$ 平均値と影響半径 $b=100\text{m}$ を組み合わせた場合、表2に近い圧力流量関係を得た。

そして、物質移行に係わる亀裂の間隔幅 $A_L$ は、透水量係数とある相関性をもって変化すると考え、その関係式を式(3.2)のように仮定した。

物質移行を考える場合は亀裂中の空隙の体積が問題となるが、空隙の体積を表わすパラメータとして貯留係数が考えられる。亀裂内のチャンネルを管流路で代表した場合、その透水量係数は管流路半径の四乗に比例する。また、貯留係数はその空隙体積に比例することから、貯留係数は管流路半径の二乗に比例することとなる。しかし、貯留係数はdead-end-pore等の空隙も表現するので、それを除いた部分が物質移行に寄与すると考える。したがって、物質移行上の間隔幅 $A_L$ は、透水量係数の平方根に比例することとなり、次式で表現することができる。

$$A_L = a \cdot T^{1/2} \quad (3.2)$$

ここで、 $T$  : 透水量係数  
 $a$  : 比例定数

本解析では、 $a$ に変化を与えて、まずトレーサの回収率が良かった試験2のトレーサ試験結果についてキャリブレーションを行って $a$ を求め、その $a$ を用いて試験1の結果を予測した。

その結果、 $a=2$ において破過時間が実測値に

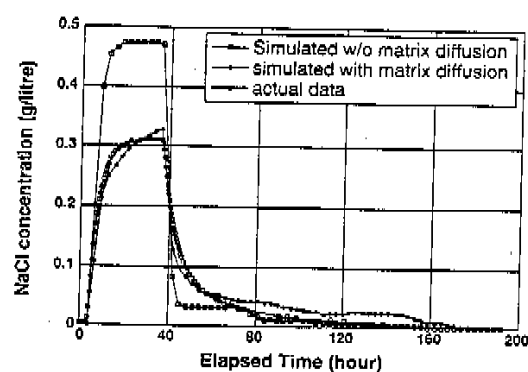


図10 試験2の解析結果

もっとも良く説明できるが、その濃度と破過曲線のtail部を十分説明することができなかった(図10□印)。そこで、2.2.(3)節で述べたマトリクス拡散を考慮した解析を行った。マトリクス拡散で新たに用いるパラメータは、マトリクス部におけるNaClの拡散係数 $D$ 、空隙率 $\rho$ および拡散深さ $d_m$ である。拡散係数 $D$ についてはNaClの自由水中における拡散係数( $1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )を、空隙率 $\rho$ については1%を、また、拡散深さ $d_m$ については平均間隔幅の半分( $3 \times 10^{-4} \text{ m}$ )を仮定した。その結果、実測された破過曲線をより良く説明することができた(図10◇印)。

これらのパラメータを用いて、試験1結果を予測したところ、トレーサ濃度を過大評価しているものの、実測された破過曲線の形に良く合う結果を得た(図11◇印)。

### 3.4 考察

今回の解析では、表2の圧力条件を与えて定常水理解析を行い、KH-7孔とKH-8孔での流量を実測値と比較して、水理モデルの妥当性を検討した。圧力流量条件はボーリング孔近傍の透水量係数分布に大きく影響される。しかし、現状では統計的にその不均質性をモデル化しているため、全体としての透水量係数分布が同じでもrealizationが異なればボーリング孔付近の透水量係数が変わり、解析結果が異なることとなる。今後は、亀裂の位置と方向を亀裂発生条件に用いる現在のConditioning機能に、透水試験データを条件に亀裂の透水量係数を制限できる機能を加えて、対象亀裂の透水量係数分布をより正確にモデル化する必要がある。

また、対象亀裂の物質移行に係わる亀裂間隔幅は、比例定数 $a=2$ より、約 $6.3 \times 10^{-4} \text{ m}$ となる。一方、対象亀裂の平均透水量係数 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ に対応

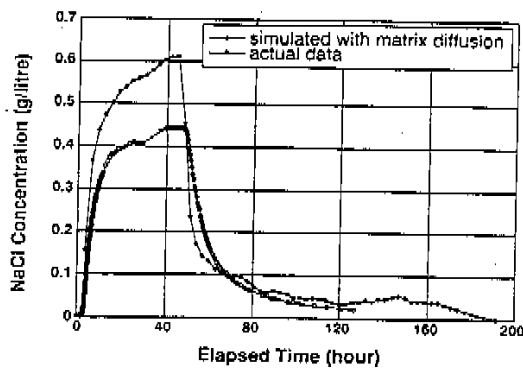


図11 試験1の解析結果

する水理学的間隙幅 $A_c$ は

$$T = \rho \cdot g \cdot A_c^3 / 12 \mu \quad (3.3)$$

ここで $\rho$  : 流体密度

$g$  : 重力加速度

$\mu$  : 流体の粘性係数

で示され、これにより $A_c$ を求めると約 $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ となり、 $A_f$ の約1/13程度であることがわかる。このことは、試験の対象とした亀裂中の実流速は、三乗則に基づく流速よりも1/13倍程度遅いことを示している。

今回、マトリクス拡散を考慮した解析に用いたパラメータは実測に基づくものではないが、マトリクス拡散の効果をモデルに組み入れることで、実測された破過曲線をより良く説明することができた。今後、亀裂に接する岩盤マトリクス部の観察や、そこでの空隙率の測定、拡散試験による拡散係数の評価等<sup>7)</sup>を実施し、拡散深さ、空隙率や拡散係数を求めていく予定である。

#### 4. おわりに

今後、FracMan/MAFICの開発は、以下の3つの観点から継続する予定である。

① 亀裂の幾何的モデルの信頼性向上

② モデルの高度化

- 例えば、

・ 取捨項、崩壊項の追加

・ 連成現象のモデル化

・ conditioning機能の強化 (バックアー区間  
透水量係数のモデル化)

③ 他の性能評価コードとの接続

また、モデル開発は実際の原位置・室内試験から得られるデータへの適用をはかり改良を加えることが望ましい。したがって、今後東海事業所地層処分施設研究施設における亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK) から得られるデータ、および釜石鉱山での原位置試験から得られるデータへの適用をはかり、さらに改良を加えていく予定である。

#### 参考文献

- 1) Long, J.C.S., J.S. Remer et al.: Porous Media, Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resour. Res., vol.18 (3), p645-658, (1982).
- 2) Fairhurst, C., Ferruccio Gers et al.: OECD/NEA International Stripa Project Overview, vol.1, (1993).
- 3) Dershowitz, W., G. Lee et al.: FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation (User Documentation), Golder Associates Inc., Seattle, (1994).
- 4) Terzaghi, R., Sources of Error in Joint Surveys, Geotechnique, vol. 15, p287-304, (1965).
- 5) Uchida, M., T.W. Doe et al.: Simulation of Fracture Flow to the Kamaishi Validation Drift, High Level Radioactive Waste Management, Proceedings of the Fourth Annual International Conference, American Nuclear Society, vol.1, p437-442, (1993).
- 6) 新井博典: 地球統計学の基本的概念とその応用 - 鉱床品位のドリッキングとシミュレーションについて -, 鉱山地質, 35巻, 4号, p 299-311, (1985).
- 7) 佐藤浩夫, 芦田 敏 他: ベントナイト中での核種の実効拡散係数, PNC TN8410 92-164, (1992).