

## [Research Note]

# Identification of Fracture Properties by Inverse Analysis of Tracer Tests Using Genetic Algorithms

Koji YAMASHITA, Kozo SATO\*, and Yoshihiro MASUDA

Dept. of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

(Received February 1, 2005)

Any fractures present in a porous medium have a greater influence on the flow of fluid than the porosity of the bulk material because the fractures are much more permeable. The tracer test, one method for detecting fractures, can estimate the properties of fractures by inverse analysis of effluent-tracer concentration data. This study simulated tracer tests for a porous medium containing a single fracture and tried to identify the properties of the fracture by inverse analysis of the effluent-tracer concentration curve. The complex variable boundary element method (CVBEM), which precisely describes the flow around a fracture, was utilized for the simulation and the genetic algorithm (GA) was used for the inverse analysis.

Several model studies showed that accurate identification of the fracture was difficult by inverse analysis using only one series of effluent-tracer concentration data, whereas two series of concentration data obtained in different well arrangements could identify the fracture more accurately. The crucial parameters that determine the shape of the tracer concentration curve were identified from the convergence behavior in the GA.

**Keywords**

Fracture, Tracer test, Inverse analysis, CVBEM, Genetic algorithm

**1. 緒 言**

多孔質媒体物性の推定や物質移動現象の把握を目的とする試験として、トレーサー試験がある。観測されたトレーサー流出濃度曲線から媒体物性の不均質性やフラクチャーの有無を判断し、それらを表すパラメータを量的に評価することが可能である<sup>1)~3)</sup>。特に、周囲の媒体より極めて大きな浸透率を有するフラクチャーが流体流動に与える影響は大きく、地下での流体流動を考える際、フラクチャーの有無は大きな意味を持っている。

フラクチャーは二次元領域においては線分で与えられ、その両端が特異点となるため、実空間で数値解を導くのは困難である。しかし、複素平面上で等角写像を用いて特異点を回避し、複素変数境界要素法 (CVBEM) と組み合わせることで、フラクチャーを含む媒体内流動を正確にモデル化することができる<sup>4)~6)</sup>。また、CVBEMでは流れ関数を直接変数として取り扱う。流線は流れ関数が一定の曲線であり、流体粒子は流線に沿って移動すると考えられる。ゆえに、流線を追跡することで時間経過に伴うトレーサーの動きを正確に追うことができる<sup>4),7)</sup>。本研究では、多孔質媒体中に単一フラクチャーが存在する場合のトレーサー試験をCVBEMにより再現し、得られるトレーサー流出濃度曲線を逆解析することで、フラクチャーの

位置、方向および浸透率を推定することを目的としている。

逆解析には遺伝的アルゴリズム (GA) を用いる。GAとは生物の進化を模倣した最適化手法である。近年、特にその有用性が注目され、多くの分野で応用されている。油層工学の分野においてもGAを用いた研究例が認められる<sup>8)~10)</sup>。

**2. CVBEMによる流動シミュレーション**

均質な多孔質媒体内の非圧縮性渦なし流れは、速度ポテンシャル  $\Phi = (k/\mu)p$  を実部に、流れ関数  $\Psi$  を虚部に持つ複素速度ポテンシャル  $\Omega = \Phi + i\Psi$  に関するラプラス方程式で表される。

$$\nabla^2 \Omega = 0 \quad (1)$$

ここで、 $k$  は媒体の浸透率、 $\mu$  は流体の粘性係数、 $p$  は流体の圧力である。複素速度ポテンシャル  $\Omega$  は特異点を除き正則であるので、コーシーの積分公式が成り立ち、境界  $\Gamma$  を  $n_b$  個の境界要素に離散化すると Eq. (2) のようになる。

$$\Omega(z) = \frac{1}{2\pi i} \sum_{j=1}^{n_b} \int_{\Delta\Gamma_j} \frac{\Omega(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\Gamma_j$  は  $j$  番目の境界要素であり、 $\Gamma = \Delta\Gamma_1 \cup \Delta\Gamma_2 \cup \dots \cup \Delta\Gamma_{n_b}$  である。また、点  $z$  は領域内の任意の点であり、点  $\zeta$  は境界上の点である。Eq. (2) を数値的に評価することで、領域内の任意の点における複素速度ポテンシャル  $\Omega$  を求めることができる<sup>4),5)</sup>。

**2.1. 特異点の取り扱い**

重ね合わせの原理により、わき出し・吸い込みやフラク

\* To whom correspondence should be addressed.

\* E-mail: sato@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

チャーによる特異性を CVBEM に組み込むことができる。完全解  $\Omega$  は、非特異解  $\Omega^{ns}$  とわき出し・吸い込み群の特異解  $\sum_{j=1}^{n_w} \Omega_{wj}$ 、およびフラクチャー群の特異解  $\sum_{j=1}^{n_f} \Omega_{fj}$  の和として表される。

$$\Omega = \Omega^{ns} + \sum_{j=1}^{n_w} \Omega_{wj} + \sum_{j=1}^{n_f} \Omega_{fj} \quad (3)$$

点  $z_{wj}$  に存在する単位厚さあたり流量  $q_{wj}/h$  の吸い込みによる特異解は Eq. (4) で与えられる<sup>4),5)</sup>。

$$\Omega_{wj}(z) = \frac{q_{wj}}{2\pi h} \ln(z - z_{wj}) \quad (4)$$

$q_{wj}$  に負値を与えればわき出しとなる。一方、フラクチャー周りの流れを表す特異解は、ジューコフスキー変換を行った  $\chi$  平面上で、

$$\Omega_{fj}(\chi) = \sum_{l=1}^{n_l} \frac{a_l}{\chi^l} + \sum_{l=1}^{n_p} \left( \frac{\beta_l \delta_l}{\chi - \delta_l} + \frac{\overline{\beta_l \delta_l}}{\chi - \overline{\delta_l}} \right) \quad (5)$$

と表される<sup>4),6)</sup>。ここで、 $\beta_l = b_l + ic_l$  であり、 $a_l$ 、 $b_l$ 、 $c_l$  は実数のパラメーターである。第一項は原点を中心とした  $n_l$  次のローラン展開であり、第二項は  $\delta_l$  と  $\overline{\delta_l}$  に位置する  $n_p$  対の仮想極を中心とする一次のローラン展開である。

## 2.2. 流線追跡

流線は流れ関数  $\Psi$  が一定の曲線であり、流線上の点  $z_j$  にある流体粒子を考え、それを逐次追跡することによって時間経過に伴う流体移動を把握することができる。まず、複素速度  $w = -d\Omega/dz$  を考える。コーシー・リーマンの関係式  $\partial\Psi/\partial x = -\partial\Phi/\partial y$ 、およびダルシー則  $u_s = -d\Phi/ds$  ( $s=x, y$ ) より Eq. (6) を得る。

$$w = u_x - iu_y \quad (6)$$

点  $z_j$  から微小距離  $\Delta s$  だけ移動した一次近似座標は Eq. (7) のように評価される。

$$z_{j+1/2} = z_j + \frac{\overline{w_j}}{|w_j|} \Delta s \quad (7)$$

ここで、 $\overline{w_j}$  は点  $z_j$  における複素速度  $w_j$  の複素共役である。点  $z_{j+1/2}$  における流れ関数値は、点  $z_j$  における流れ関数値  $\Psi_0$  と等しいとは限らないので、点  $z_{j+1/2}$  を通る等ポテンシャル線上で同じ流れ関数値  $\Psi_0$  を持つ点に補正する。以下の式を  $|\Psi_{j+1/2} - \Psi_0|$  が許容範囲に収まるまで繰り返して計算し、 $z_{j+1}$  を求める<sup>4),7)</sup>。

$$z_{j+1} = z_{j+1/2} + i \frac{\Psi_{j+1/2} - \Psi_0}{w_{j+1/2}} \quad (8)$$

流体粒子が点  $z_j$  から点  $z_{j+1}$  まで移動するのにかかる時間  $\Delta t_{j+1}$  は Eq. (9) で評価される。

$$\Delta t_{j+1} = \frac{2|z_{j+1} - z_j|}{|w_j + w_{j+1}|} \quad (9)$$

以上のような流線追跡の手法を用いてトレーサー試験を再現することを考える。 $i$  番目の流線が吸い込みに到達する時間を  $t_{bi}$  とすれば、

$$t_{bi} = \sum_{j=1}^m \Delta t_j \quad (10)$$

となる。 $m$  は吸い込みに到達するまでの追跡回数であり、 $\Delta t_j$  は Eq. (9) を用いて評価する。追跡する流線の数を  $n_s$ 、流線が持つ流量を  $q_i$ 、総流量を  $q$  とすれば、時刻  $t$  での吸い込みにおけるトレーサー流出濃度  $C(t)$  は Eq. (11) で表される<sup>4),7)</sup>。

$$C(t) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^{n_s} q_i H(t - t_{bi}) \quad (11)$$

ここで、 $H(x)$  はヘビサイド関数である。トレーサーを無次元時間  $\Delta V_p$  だけ圧入したスラグ試験の場合、時刻  $V_p$  での吸い込みにおけるトレーサー流出濃度  $C_{slug}(V_p)$  は Eq. (11) を用いて、

$$C_{slug}(V_p) = C(V_p) - C(V_p - \Delta V_p) \quad (12)$$

となる。

## 3. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA)<sup>11),12)</sup> とは、環境に適応した生物は生き残り、適応できなかった生物は淘汰 (とうた) される、というダーウィンの進化論に基づいた探索手法である。GA の利点としては、他の最適化手法とは異なり目的関数が連続や微分可能である必要がない、アルゴリズムが単純、初期値に影響されない、局所解に陥りにくい、適用範囲が非常に広い、といった点が挙げられる。本研究では、対象とする目的関数が複雑で導関数を求めるのが煩雑であり、また局所解が多数存在することが予想されたため GA を採用した。

### 3.1. 基本的な GA の流れ

#### 3.1.1. 初期集団の生成

乱数を用いて、 $\{0,1\}$  からなる長さ  $L$  のビット列で構成される染色体を  $N$  個生成する。乱数の値が 0.5 未満であれば 0 を、0.5 以上であれば 1 を与える。本研究では、 $L=35$ 、 $N=30$  とした。

#### 3.1.2. 評価と適合度

解の候補が真の解に近い度合いが適合度である。計算値と目標値の誤差の関数として適合度を定義し、評価した。ある定められた世代になったところで計算を終えるものとした。

#### 3.1.3. 選択

選択では、適合度の大きい個体ほど多くの個体を生むようにする、という原則に基づき、次世代に子孫を残すべき親となる個体を決める。本研究ではトーナメント選択を用いた。本研究ではトーナメントサイズを 2 とした。

#### 3.1.4. 交叉

交叉 (こうさ) とは、選択より得られた個体間での染色体の組み換えにより新しい個体を生み出す操作である。本研究では一様交叉を用いた。交叉が行われる確率は 0.95 とした。

#### 3.1.5. 突然変異

突然変異は、ある一定の確率で染色体上のある値を、0 なら 1、1 なら 0 に置き換えることにより、交叉だけでは生成できない子を生成して、個体群の多様性を維持する働きを持つ。突然変異が起こる確率は 0.03 とした。

## 3.2. 最適化問題への GA の適用

GA における個体は  $\{0,1\}$  のビット列で表されているので、ビット列を可能解の領域内に含まれる実数変数に変換する必要がある。 $N$  ビットのビット列  $\langle b_{N-1} b_{N-2} \dots b_0 \rangle$  から、閉区間  $[a, b]$  に含まれる実数値  $x$  への変換は、まずビット列  $\langle b_{N-1} b_{N-2} \dots$

$b_0$ に対応する10進数 $x'$ を求め、

$$x = a + (b - a) \cdot \frac{x'}{2^N - 1} \quad (13)$$

と線形に補間することで行う。ビット列 $\langle 00 \dots 0 \rangle$ ,  $\langle 11 \dots 1 \rangle$ がそれぞれ下限 $a$ , 上限 $b$ に対応する。変数が複数の場合は、一つのビット列を変数の数だけ分割し、得られた部分ビット列をそれぞれの変数に割り当てればよい。

GAに2進コードを用いた場合、積木仮説<sup>11)</sup>が成り立つ妨げとなり好ましくないため、本研究では2進コードではなくグレーコード<sup>11)</sup>を用いた。

## 4. アルゴリズムの概要

### 4.1. プログラムの構成

今回作成したプログラムでは、まず各個体をフラクチャーを表す五つのパラメーターに変換し、CVBEMに入力する。次に、シミュレーションにより得られたトレーサー流出濃度曲線と目標となるトレーサー流出濃度曲線の誤差を求める。そこで得られた誤差を変換し、その個体の適合度とする。その後、選択、交叉、突然変異を経て世代を更新し、再びCVBEMに入力する。以上の操作を設定した世代になるまで行う。

### 4.2. シミュレーションモデル

不透性境界で囲まれた $1 \times 1$ の正方形領域を考え、その内部に存在するフラクチャーを同定する。境界上にわき出しと吸い込みを配置し、両者の流量の絶対値は等しくする。

フラクチャーは二次元領域では線分で与えられるので、その位置を定めるのに四つのパラメーターが必要となる。具体的には、中点 $M$ の座標 $(x_m, y_m)$ 、長さ $l$ 、 $x$ 軸となす角度 $\theta$ とした。しかし、 $l$ を直接変数として扱おうと、パラメーターの組合せにより解の候補として領域外に出てしまうフラクチャーも含まれてしまい、GAの効率が下がると考えられる。そこで、 $l$ を別の変数 $\alpha$  ( $< 1$ )を用いて次のように表す。まず、中点 $M$   $(x_m, y_m)$ と $\theta$ を定めると $M$ を通る直線が引け、その直線は境界と二つの交点を持つ。その交点のうち中点 $M$ に近い方を点 $A$ とし、 $MA = d$ とおく。そして、 $l = 2\alpha d$ と求める。

一方、フラクチャー内の流れを平行平板間の流れで模し、平面ポアズイユ流を考えれば、フラクチャーの浸透率 $k_f$ はフラクチャーの幅 $w_f$ を用いて $k_f = w_f^2/12$ と表される。 $w_f$ は実数 $r$ を用いて $w_f = 1.0 \times 10^r$ と表す。ゆえに、扱う変数は $x_m, y_m, \alpha, \theta, r$ となる。各変数をこの順にそれぞれ7ビットでコード化し、前節でも述べたように計35ビットの染色体とした。GAは30個体、300世代で計算を行った。

### 4.3. 幅と長さに関する敏感度試験

フラクチャーが流体流動に大きな影響を及ぼす要因は、その内部が周囲の媒体に比べ浸透率が極めて大きい、という点である。そこで浸透率、すなわち幅の変化によりトレーサー流出濃度曲線がどのように変化するかを比較した。トレーサーを無次元時間 $\Delta V_p = 0.2$ だけ圧入し、それ以降はトレーサーを含まない流体で後押しするトレーサーラグ試験を再現した。モデルのフラクチャーは、中点 $M$   $(0.5, 0.5)$ 、 $l = 0.5$ 、 $\theta = \pi/4$ とし、追跡する流線の数 $n_s = 500$ 、追跡する刻み幅 $\Delta s = 0.0025$ とした。

フラクチャーの存在が大きく影響している場合、濃度曲線は

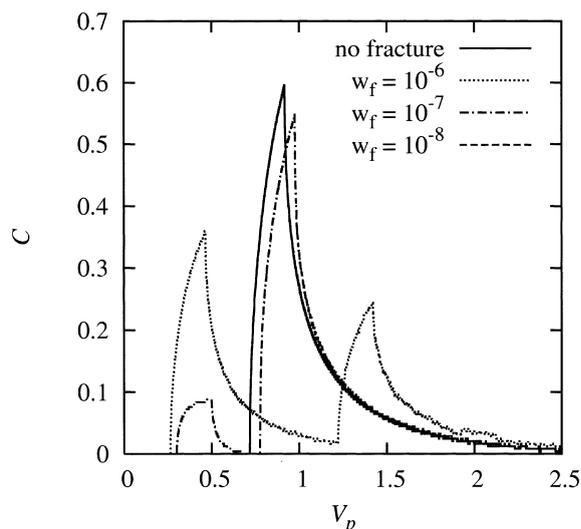


Fig. 1 Effluent Tracer Concentration Curves for Various Widths

二つの極大部を持つ。一つ目のピークはフラクチャーを通過したトレーサーによる濃度増加であり、二つ目のピークはフラクチャーを通過しなかったトレーサーによる濃度増加である。ゆえに、一つ目のピークの大きさはフラクチャーの浸透率の大きさに依存している。Fig. 1を見ると、 $w_f = 10^{-6}, 10^{-7}$ では $V_p = 0.5$ 付近に一つ目のピークが見られるが、 $w_f = 10^{-8}$ ではフラクチャーがない場合とほぼ一致した。 $w_f = 10^{-8}$ ほどの幅では、流体流動に影響を与えるだけの浸透性がないことが分かる。逆に、 $w_f = 10^{-6}$ を超えても濃度曲線は変化しなくなる。これは、浸透率が十分に大きくなりフラクチャー内の流速が媒体内の流速に比べ無限大とみなせるようになるためである。したがって、 $w_f$ の値は $[10^{-8}, 10^{-6}]$ の範囲で考えるものとする。

一方、フラクチャーの長さもトレーサー流出濃度曲線に大きな影響を及ぼすと考えられる。幅の場合と同様に、いくつかの長さにおけるトレーサー流出濃度曲線を比較した。計算条件は幅の場合と同様とし、モデルのフラクチャーは、中点 $M$   $(0.5, 0.5)$ 、 $\theta = \pi/4$ 、 $w_f = 10^{-6}$ とした。Fig. 2に長さの違いによる濃度曲線の違いを示す。長さが大きくなるにつれ、一つ目のピークと二つ目のピークが離れてゆき、ブレイクスルーも早くなる。また、一つ目の極大値が大きくなる一方、二つ目の極大値が小さくなっている。これは、フラクチャーが長いほど通過するトレーサーが多く、かつ早く吸い込みに到達するためである。

このように、幅と長さはトレーサー流出濃度曲線の形状を大きく左右し、両者の変化は類似した影響を与えることが分かる。

## 5. 結果と考察

### 5.1. 逆解析結果

個体 $i$ に対する誤差 $err_i$ をEq. (14)で評価した。

$$err_i = \sum_{j=1}^n w_j |C_{data}(V_{p,j}) - C(V_{p,j})| \quad (14)$$

ここで、 $C_{data}(V_p)$ は目標となる濃度、 $C(V_p)$ は解の候補により

得られた濃度,  $n$  はデータ数,  $w_j$  は重みである。  $w_j$  は主に二つ目, および二つ目の極大値周辺の9点でそれぞれ5と10とし, それ以外は1とした。 個体  $i$  の適合度は  $err_i$  の逆数で評価した。 また, 追跡する流線の数  $n_s = 101$ , 追跡する刻み幅  $\Delta s = 0.0025$  とした。 目標となるフラクチャーは, 中点  $M(0.6, 0.2)$ , 長さ  $l = 0.6$ ,  $x$  軸となす角度  $\theta = \pi/9$ , 幅  $w_f = 5.0 \times 10^{-7}$  とした。

### 5.1.1. 一方向のトレーサー試験による同定

わき出しを  $(0.0, 0.0)$ , 吸い込みを  $(1.0, 1.0)$  に配置して行ったトレーサースラグ試験のデータをもとに逆解析を行った。 **Table 1** および **Figs. 3, 4** に最も適合度の高かった Run S1 の結果を示す。 トレーサー流出濃度曲線はほぼ一致しているが, 位置は目標のものとは少しずれた場所に得られた。 また, 長さが大きくなり, 幅が小さくなった。 **4.3.** で述べたように, 幅と長さはトレーサー流出濃度曲線に類似の影響を及ぼす。 そのため, 幅が小さい分だけ長さが大きくなったと考えられる。 また, 吸い込みとわき出しを結ぶ線分にフラクチャーが近いほど, フラクチャーを通過したトレーサーは早くわき出しに到達できる。 このことも幅が小さくなった要因の一つだと考えられる。

一方, **Table 1** の Run S2 のように目標のフラクチャーとは位置が大きく異なる解が得られる場合があった (**Fig. 4**)。 しかし, Run S2 の解を  $y=x$  に関して対称移動させると, 目標とほぼ同じ位置に移った。 ほかに,  $y=1-x$  および点  $(0.5, 0.5)$  に関する対称性も見られた。 これは, 領域とフラクチャーが存

在しない場合の流線の形状が  $y=x$ ,  $y=1-x$ , および点  $(0.5, 0.5)$  に関して対称であるからであり, 対称なフラクチャーより得られるトレーサー流出濃度曲線は目標のものと一致していた。

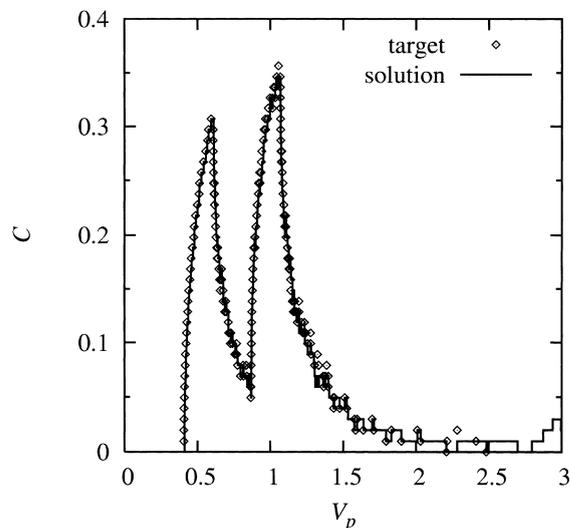


Fig. 3 Effluent Tracer Concentration Curve (injector at  $(0.0, 0.0)$  and producer at  $(1.0, 1.0)$ ) — Run S1

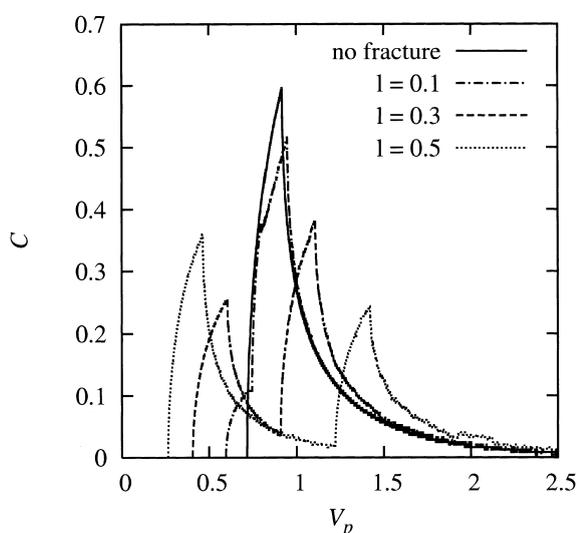


Fig. 2 Effluent Tracer Concentration Curves for Various Lengths

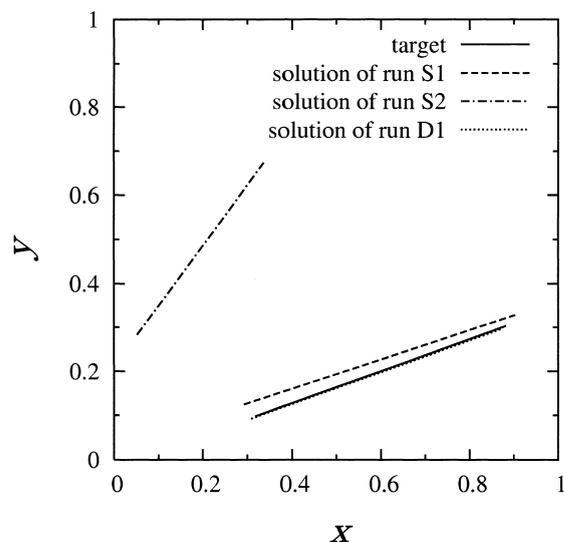


Fig. 4 Comparison of the Fracture Positions — Runs S1, S2 and D1

Table 1 Results of Inverse Analysis

Run	$x_m$	$y_m$	$l$	$\theta$	$w_f$	Total error
S1	0.597638	0.225984	0.642787	0.321580	0.271063E-6	1.831692
S2	0.194488	0.477953	0.483025	0.940004	0.450343E-6	3.485161
D1	0.591339	0.194488	0.600472	0.346317	0.484216E-6	5.733380
target	0.600000	0.200000	0.600000	0.349066	0.500000E-6	—

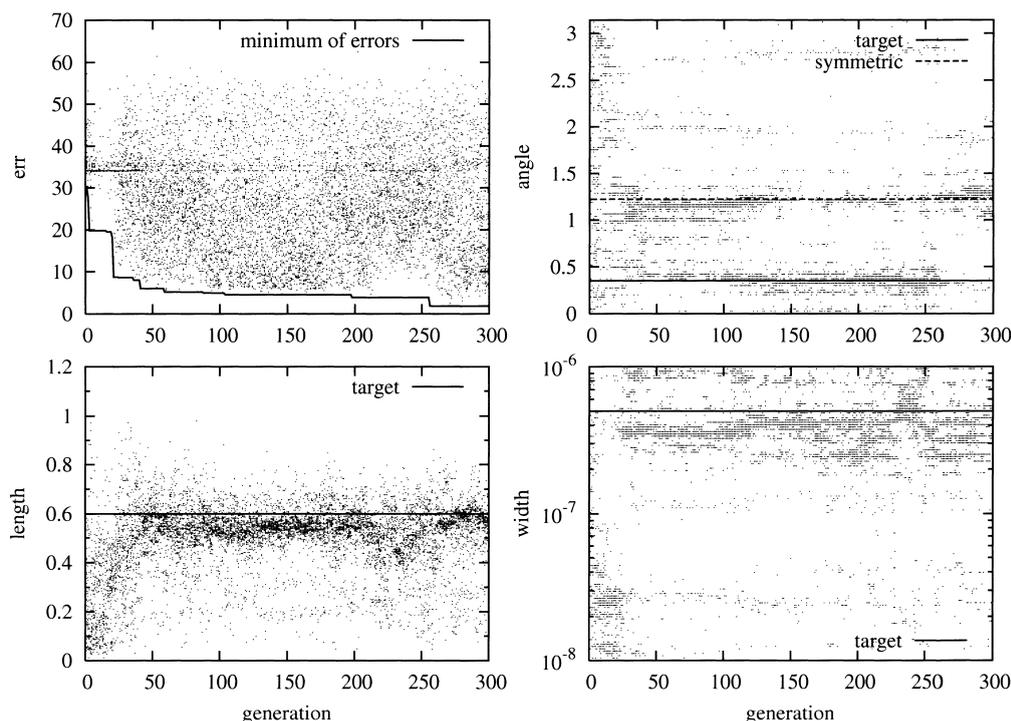


Fig. 5 Distribution of Errors and Fracture Properties — Run S1

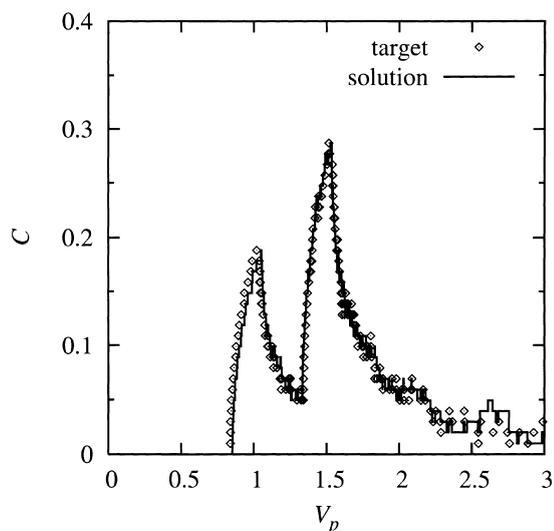


Fig. 6 Effluent Tracer Concentration Curve (injector at (0.0, 0.55) and producer at (1.0, 0.5)) — Run D1

### 5.1.2. 各パラメータの収束性に関する考察

Fig. 5にRun S1の計算において得られた、世代に対する各個体の誤差、長さ、角度、および幅の分布を示す。GAの性質として、目標との誤差が小さい個体は生き残り、大きい個体は淘汰される。このことを考慮すると、よく収束しているパラメータはその変化が誤差に与える影響が大きい、すなわちトレーサー流出濃度曲線の形状に支配的であるといえる。長さの分布を見てみると、50世代目以降から0.5から0.6の間に分布が

偏っており、全体を通してよく収束している様子がうかがえる。誤差の分布と比較して見てみると、50世代～200世代目にかけて長さが特に密集して分布しており、その間は誤差も最小値に近いところに個体が多く発生している。その後、200世代～250世代目で長さの分布がばらつき、それに対応して各個体の誤差が多くなっている。さらに250世代目以降、長さが目標値の0.6付近に分布し始めると、誤差も小さくなり最小値を更新する。このように、長さとは誤差には強い相関があるといえる。角度の分布に関しては、二つの収束部分が見られる。一つは目標値である $\theta = \pi/9$ であり、もう一つは $y=x$ および $y=1-x$ に関して対称なフラクチャーの角度である $\theta = 7\pi/18$ である。ほとんどの個体がこれら二つに近い値を取っていることが分かる。しかし、幅の分布の挙動は長さや角度とはやや異なっている。 $3.0 \times 10^{-7}$ から $5.0 \times 10^{-7}$ の間に広く分布する結果となった。このように、幅に関してはオーダーの異なるような値はないが、長さや角度のように強い収束性は見られなかった。

### 5.1.3. 二方向のトレーサー試験による同定

5.1.1.で見たように、一方向のトレーサー試験データで逆解析を行うだけでは対称性の問題もあり、正確な解を得ることが困難である。そこで、解の精度を向上させるため、わき出しを(0.0, 0.0)、吸い込みを(1.0, 1.0)に配置して行ったトレーサースラッグ試験のデータに、わき出しを(0.0, 0.55)、吸い込みを(1.0, 0.5)に配置した場合のデータを加え、それぞれから得られる誤差の和が最小になるように逆解析を行った。これにより、領域の対称性の問題は回避される。Table 1のRun D1、およびFigs. 4, 6に最も良い解が得られた結果を示す。わき出しを(0.0, 0.0)、吸い込みを(1.0, 1.0)とした濃度曲線はRun S1の結果と同様に目標のものと同じし、さらにわき出し

を (0.0, 0.55), 吸い込みを (1.0, 0.5) とした濃度曲線も Fig. 6 のように目標に一致した。その結果, 解として得られたフラクチャーにおいても全てのパラメーターが目標の値と非常に近い値となり, 同定に成功したといえる。

このように, 対称性を含まないような井戸配置で得られるデータを加えることで, 対称性の問題を緩和できるだけでなく, 解の精度も上がることが分かった。

## 6. 結 言

トレーサー試験を CVBEM を用いて再現し, トレーサー流出濃度曲線を GA により逆解析してフラクチャーを同定する, という目的のもと本研究を行い, 同定の可能性を示した。本研究で考えた領域設定では, 一種類の流出濃度曲線のデータで逆解析を行った場合は正確な同定が困難であった。そこで, 二種類のデータを組み合わせて逆解析を行うと, より正確にフラクチャーを同定することが可能であった。さらに, 各パラメーターの収束挙動を観察することにより, トレーサー流出濃度曲線の形状に特に支配的なパラメーターは長さや角度であることが分かった。浸透率に深く関係している幅も支配的なパラメーターの一つではあるが, その変化が微小なとき濃度曲線に与える影響は長さや角度に比べ小さいと考えられる。

今後, さらに現実的な問題に適応できるようにするためには, 分散を伴う流れ, フラクチャー内混合を加味した流れ, 複数のフラクチャーを有する媒体, 三次元流れなどへの拡張が課題となる。

## References

- 1) Guerreiro, J. N. C., Barbosa, H. J. C., Garcia, E. L. M., Loula, A. F. D., Malta, S. M. C., *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **1**, (3), 218 (1998).
- 2) Ramírez, S. J., Samaniego, V. F., Rodríguez, F., Rivera, R. J., *SPE Formation Evaluation*, **10**, (3), 186 (1995).
- 3) Kim, Y. C., Lee, K. K., *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **35**, 179 (2002).
- 4) Sato, K., "Complex Variable Boundary Element Method for Potential Flow," Baifukan, Tokyo (2003).  
佐藤光三, "ポテンシャル流れの複素変数境界要素法," 培風館, 東京 (2003).
- 5) Sato, K., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **45**, (6), 389 (2002).
- 6) Sato, K., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **192**, (11-12), 1421 (2003).
- 7) Sato, K., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **30**, (1), 29 (2001).
- 8) Sen, M. K., Datta-Gupta, A., Stoffa, P. L., Lake, L. W., Pope, G. A., *SPE Formation Evaluation*, **10**, (1), 49 (1995).
- 9) Gümrah, F., Sarkar, S., Tasti, Y. A., Erbas, D., *Energy Sources*, **23**, (3), 245 (2001).
- 10) Romero, C. E., Carter, J. N., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **31**, 113 (2001).
- 11) Sakawa, M., Tanaka, M., "Genetic Algorithms," Asakura Shoten, Tokyo (1995).  
坂和正敏, 田中雅博, "遺伝的アルゴリズム," 朝倉書店, 東京 (1995).
- 12) Iba, S., "Fundamentals of Genetic Algorithms —Solve the mystery of GA—," Ohmsha, Ltd., Tokyo (1994).  
伊庭奇志, "遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く—," オーム社, 東京 (1994).

## 要 旨

### 遺伝的アルゴリズムを用いたトレーサー試験逆解析によるフラクチャーの同定

山下 紘司, 佐藤 光三, 増田 昌敬

東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻, 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

多孔質媒体中にフラクチャーが存在する場合, フラクチャー内では周囲の媒体に比べ浸透性が極めて大きいため, 流体流動に大きな影響を及ぼす。トレーサー試験はフラクチャーを検知する一つの方法であり, 得られたトレーサー流出濃度曲線を逆解析することでフラクチャーの特性を推定することが可能である。本研究では, 多孔質媒体中に単一フラクチャーが存在する場合に行ったトレーサー試験を再現し, 得られたトレーサー流出濃度曲線を逆解析することで, フラクチャーの特性を同定することを目的としている。シミュレーションにはフラクチャー

周りの流れを正確に表すことができる複素変数境界要素法 (CVBEM) を, 逆解析には遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。

逆解析を行う際, 1種類のトレーサー流出濃度データを用いただけでは正確な同定が困難であった。そこで, 異なる坑井配置で得られた2種類のデータで逆解析を行ったところ, より正確にフラクチャーを同定することが可能であった。また, GA における収束挙動からトレーサー流出濃度曲線の形状に支配的なパラメーターを考察した。