亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の評価 のためのマルチトレーサー試験の適用性検証

熊本 創¹・下茂 道人²・天野 健治³

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: sou@ce.aisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: michito.shimo@sakura.aisei.co.jp

³正会員 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

E-mail: amano.kenji@jaea.go.jp

多孔質岩盤中の亀裂を対象にトレーサー試験を行う場合、亀裂内の移流・分散パラメータ（流速、分散係数）に加え、亀裂から岩石基質部への拡散パラメータ（マトリクス拡散係数）の評価が求められる。既往の研究では、これら全てのパラメータを求める方法として、分子拡散係数の異なる複数成分の混合溶液を用いたトレーサー試験法（マルチトレーサー試験）が提案されている。著者らは、先の研究において、同試験法により上記のパラメータを同定するには、試験の流量条件を適切に設定する必要があることを示し、その設定手法を提案した。本研究では、著者らが提案した手法の検証のために、人工の平行平板亀裂を配した珪藻質泥岩を用いた室内試験を実施した。また、試験を効率的に進めるための手順を新たに提案し、室内試験によりその適用性を確認した。

Key Words : *multiple tracer test, fractured porous media, advection-dispersion, matrix diffusion*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価においては、天然バリアとなる岩盤中の物質移行特性を適切に評価することが求められる。一般に、亀裂の発達した岩盤中の物質移行現象は、亀裂内の移流・分散が支配的となるが、亀裂内の流速が遅い場合や、空隙率の大きい岩盤を対象とした場合は、亀裂から岩石基質部への拡散（マトリクス拡散）による遅延の影響を受けやすくなる^{1), 2), 3)}。

亀裂内の移流・分散やマトリクス拡散現象を表現するパラメータ（亀裂内の流速や分散係数、マトリクス部の空隙率や拡散係数など）は、一般に、トレーサー試験によって評価される。ただし、亀裂内で生じる分散とマトリクス拡散は、破過曲線の形状に対して類似した影響を与えるため、一つの破過曲線から亀裂内の移流・分散とマトリクス拡散の影響を分離して、それぞれに関連するパラメータを一度に全て決定することは困難である場合が多い。そのため、破過曲線からパラメータの評価を行う際には、水理試験結果から求められる亀裂の開口幅（水理開口幅）や、拡散試験から求められる拡散係数など、トレーサー試験とは異なる別の試験結果から求めら

れるパラメータを既知パラメータとして代用して評価されることも少なくない^{4), 5)}。ただし、これらは、トレーサー試験とは別の試料を対象とした（原位置試験の場合は、別の試験区間を対象とした）試験であることが多く、必ずしもトレーサー試験と同じ環境下での現象を捉えていない可能性がある。トレーサー試験は、亀裂内の移流・分散やマトリクス拡散の個々の現象を評価するものではなく、これらの相互作用を評価する試験であるため、既知パラメータとして代用した開口幅や拡散係数がトレーサー試験の対象試料を代表するものとならない場合は、その他の未知パラメータの同定結果の信頼性を大きく低下させる可能性がある。したがって、これらのパラメータは、トレーサー試験結果から直接求めることが望ましいと考えられる。

最近では、トレーサー試験結果から亀裂内の移流・分散およびマトリクス拡散に関わる各パラメータを一度に決定する方法として、同一の試料を対象にトレーサーの注入流量の異なる試験を繰り返し実施する方法（以後、マルチ流量試験と呼ぶ）や、分子拡散係数の異なる複数種類の混合トレーサーを用いる方法（以後、マルチトレーサー試験と呼ぶ）などが提案されており、室内や原位

置での試験に適用されている^{6, 7, 8, 9}。これらの方法は、いずれもマトリクス拡散の影響の異なる観測データ（すなわち、マトリクス拡散係数に対して共線性の低い独立した観測値）を追加情報として用いることによって、逆問題としての不適切性を回避しようとするものである。

著者らは、これらの方法に着目し、理論解を用いた数値実験によって、マルチ流量試験やマルチトレーサー試験の有効性及適用範囲について理論的な検討を行ってきた¹⁰。その結果、同試験法により適切にパラメータを同定するためには、ある流量条件を満足する必要があることを示し、その流量条件の設定方法を提案した¹⁰。ただし、提案した条件設定手法の適用性は、数値実験によって確認したものであり、実際の岩石試料を対象とした試験への適用性は確認されていない。そこで、本稿では、単一の平行平板亀裂を有する堆積岩試料を対象とした室内マルチトレーサー試験を行い、著者らが提案した条件設定手法の適用性を実験的に確認した。また、より効率的に適切なパラメータを同定するために、マルチトレーサー試験とマルチ流量試験を組み合わせた新たな試験手法を提案し、同様の室内トレーサー試験によって、その有効性を確認した。

2. マルチトレーサー試験法

(1) 試験方法および試料

マルチトレーサー試験は、分子拡散係数 $D_d [L^2 T^{-1}]$ の異なる複数種類の混合トレーサーを注入することにより、一度の試験で、拡散の効果の異なる複数の破過曲線を取得する方法である。試料には、日本原子力研究開発機構が北海道幌延町で建設中の地下研究施設内（西立坑の深度40m付近）から採取した珪藻質泥岩（声間層）を用いた。試料は、採取した30cm程度の岩塊（掘削ズリ）から2つのブロック（ $L=136\text{mm}$, $W=50\text{mm}$, $H=57\text{mm}$, W は亀裂の幅）を切り出し、厚さ0.1mmのステンレス製のスペーサーを挟んで重ね合わせた人工平行平板亀裂試料とした。試料は、真空引きによる浸水脱気を約1か月間実施して飽和させた。本研究では、図-1に示すような一次元マルチトレーサー試験を行った。混合トレーサーには、臭化物イオン（ Br^- , $D_F=2.0 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ ）¹¹と、ペンタフルオロ安息香酸（PFBA, $D_F=7.6 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ）^{6, 12}の2種類の非収着性物質を用いた。トレーサー溶液は、真空ポンプにて24時間脱気した脱イオン水に臭化カリウム（KBr）とPFBAを溶解させ、 Br^- とPFBAのそれぞれが設定濃度となるように作成した（濃度の設定値については後述する）。トレーサー溶液の注入は、亀裂端部より一定流量で行い、排出側にて一定時間間隔でサンプリングした。注入には、極微小流量を定流量で送液可能なシリッジポ

ンプ（KD Scientific社製 KDS100, 最小流量 $0.0035 \mu\text{l}/\text{min}$, 最大流量 $7.1 \text{ml}/\text{min}$, 流量誤差0.1%）を用いた。また、配管による時間遅れや装置内で生じる分散を低減するため、装置の排出側には、脱イオン水を一定流量で常時通水し、試料から排出されるトレーサー溶液をサンプリング口まで強制的に排水した（図-1の排出側のフラッシング）。なお、フラッシングによる濃度希釈の影響は、脱イオン水の通水流量から補正した。サンプリングしたトレーサー溶液の濃度は、 Br^- , PFBAともにイオンクロマトグラフィー（DIONEX社製 DX-500, 以下ICと呼ぶ）にて分析した。また、試料の基本的な物性を把握するために、トレーサー試験用の試料と同じ岩塊から切り出した別の試料を用いて、間隙率測定（浮力法¹³）、透水試験（トランジェントパルス法¹⁴）、拡散試験（透過拡散法¹⁵）を別途試験として実施した。また、亀裂の透水性を把握するために、トレーサー試験用の試料を対象とした透水試験（定水位透水試験）を実施した。表-1に、別途試験により求めた試料の基本的な物性値を示す。

(2) 試験結果の評価方法

a) 物質移行の概念モデル

本稿では、マルチトレーサー試験中の溶質の移動を、図-2に示すような概念モデルを仮定して評価した。

図-2の概念モデルは、多孔質な岩石マトリクス内に単一の平行平板亀裂を配置したものである。亀裂内の流れは一定流速の定常流れとし、亀裂の流入側端部（図-2の

図-1 マルチトレーサー試験の概要

表-1 試料の基本的な物性

マトリクス部				亀裂部
拡散係数: D_m *1 [m^2/s]		透水係数*2	間隙率*3	水理開口幅*4
Br^-	PFBA	k [m/s]	n_m [%]	$2b_H$ [mm]
5.28E-10	1.71E-10	1.20E-10	58.0	0.10

*1: 透過拡散法により測定

*2: トランジェントパルス法により測定

*3: 浮力法により測定

*4: 定水位透水試験により透水量係数を求め、三乗則から算定

亀裂左端部)の濃度を常に一定と仮定する。また、亀裂内の流れ、および濃度は亀裂の奥行方向に一樣であると仮定する。すなわち、亀裂内の奥行方向の移流・分散は考慮しない。また、亀裂の開口幅は、流れ方向(x軸方向)の長さに対して十分に小さく、かつ亀裂内の濃度は、y軸方向に常に完全混合するものと仮定する。すなわち、亀裂内のy軸方向への移流・分散はx軸方向に比べて無視できるほど小さく、x軸方向の移流・分散のみを考慮することを意味する。マトリクス内については、透水性が非常に低く、移流・分散よりも拡散による移行が支配的となり、かつ、亀裂内と比べて移行速度が十分に遅いと仮定する。すなわち、マトリクス内では、移流・分散の影響は無視できるほど小さく、亀裂と直交する方向(y軸方向)への拡散のみを考慮することを意味する。

以上より、本稿では、単一亀裂内のx軸方向の一次元の移流・分散と、マトリクス内のy軸方向(亀裂内の流れと直交する方向)へのマトリクス拡散を考慮した概念モデルを検討の対象とする。

b) 支配方程式と理論解

上記の物質移行概念モデルにおける亀裂内とマトリクス内の移行挙動は、それぞれ、以下のような支配方程式で表すことができる。

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial c_f}{\partial x} - D_f \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} - \frac{n_m D_m}{b} \frac{\partial c_m}{\partial y} \bigg|_{y=b} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} - D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

ここに、 x は亀裂内の流れ方向の座標[L]、 y は亀裂と直行する方向の座標[L]、 c_f は亀裂内の溶質濃度[$M L^3$]、 c_m はマトリクス内の溶質濃度[$M L^3$]、 t は時間[T]、 v_f は亀裂内の断面平均流速[$L T^{-1}$]、 n_m はマトリクス部の空隙率[-]、 b は亀裂開口幅の1/2 ($2b$: 亀裂開口幅) [L]を示す。 D_f および D_m は、それぞれ亀裂内の水理学的分散係数[$L^2 T^{-1}$]とマトリクス部の見掛けの拡散係数(マトリクス拡散係数)[$L^2 T^{-1}$]であり、それぞれ $D_f = \alpha_L v_f$ 、 $D_m = \tau D_d$ で表される。ここで、 α_L は亀裂内の縦方向分散長[L]、 D_d は溶質の分子拡散係数[$L^2 T^{-1}$]、 τ はマトリクス部の屈曲度[-]¹⁶⁾を示す。

Tangら³⁾は、式(1)、(2)について、初期条件として $c_f(x, 0) = 0$ 、 $c_m(x, y, 0) = 0$ 、境界条件として $c_f(0, t) = c_0$ 、 $c_f(\infty, t) = 0$ 、 $c_m(x, b, t) = c_f(x, t)$ 、 $c_m(x, \infty, t) = 0$ を仮定し、式(3)の理論解を導出している。

$$\frac{c_f}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{Pe}{2}\right) \int_0^\infty \exp\left[-\xi^2 - \frac{Pe^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\text{erfc}\left[\frac{Y}{2T}\right] d\xi \quad (3)$$

ここに、 c_0 はソース濃度[$M L^3$]、 ξ は積分変数を示す。また、 Y 、 T および l は、以下の式で表される。

$$Y = \frac{T_0 Pe A}{4\xi^2} \quad (4)$$

図-2 物質移行の概念モデル

$$T = \sqrt{t - \frac{T_0 Pe}{4\xi^2}} \quad (5)$$

$$l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_0 Pe}{t}} \quad (6)$$

ここに、 T_0 は平均滞留時間 [T]、 Pe はペクレ数 [-]、 A はマトリクス拡散による移行パラメータ [$T^{1/2}$]であり、それぞれ以下のように表される。

$$T_0 = \frac{x}{v_f} = \frac{2bWx}{Q_f} \quad (7)$$

$$Pe = \frac{v_f x}{D_f} = \frac{x}{\alpha_L} \quad (8)$$

$$A = \frac{n_m}{b} \sqrt{D_m} \quad (9)$$

ここに、 W は亀裂の幅[L]、 Q_f はトレーサー溶液の注入流量[$L^3 T^{-1}$]を示す(図-1参照)。

c) パラメータの評価方法

式(3)~(6)に示すように、単一亀裂内のトレーサー濃度の変化は、 T_0 、 Pe 、 A の3パラメータによって決定付けられる。トレーサー試験結果の評価では、破過曲線と式(3)~(6)の理論解による解析結果とのマッチングにより、まずこれらの3パラメータが求められ、得られた T_0 、 Pe 、 A から、式(7)~(9)の関係により、 $2b$ 、 α_L 、および D_m を求める。なお、本稿では、空隙率 n_m は既知パラメータとして取り扱った。

また、マルチトレーサー試験の場合は、トレーサー物質ごとの複数の破過曲線が得られ、それらを同時にマッチングすることによって $2b$ 、 α_L と、各物質の D_m が得られる。このとき、各物質が完全に混合し、物質の違いが亀裂内の移流・分散に影響しないと仮定すると、 $2b$ と α_L は、各物質で同じ値となり、 D_m のみ異なる値が得られることになる。また、マトリクス部の空隙率や屈曲度が媒体固有のものと考え、物質によって変わらないと仮定すると、破過曲線のマッチングでは、以下の式(10)~(12)の関係を満たす T_0 、 Pe 、 A を同定することとなる。

$$T_{02} = T_{01} \quad (10)$$

$$Pe_2 = Pe_1 \quad (11)$$

$$A_2 = \sqrt{n} A_1 \quad (12)$$

ここに、 n は2つのトレーサー物質の分子拡散係数 D_d の比を示す。また、添字1および2は、それぞれ対象とするトレーサー物質の違いを示す。本研究でマルチトレーサーとして用いたBrとPFBAでは、PFBAの D_d はBrの0.38倍であるので n は0.38となる。以上より、本研究で実施するマルチトレーサー試験の結果の評価では、取得される複数の破過曲線の同時マッチングによって、式(10)~(12)の関係を満足するような T_0 、 Pe 、 A を同定し、最終的に、式(7)~(9)によって、 $2b$ 、 α_L 、 D_m の3つのパラメータを求めることになる。なお、 D_m については、トレーサー物質毎に別の値が求められるが、本研究では、屈曲度が物質によって変わらないと仮定し、かつ D_d の比を既知とするため、 $D_m = \tau D_d$ の関係から各物質に共通の1つの屈曲度 τ を求めることになる。

また、後の5章では、効率的な試験手順の提案として、マルチトレーサー試験とマルチ流量試験を組み合わせた方法を提案している。マルチ流量試験では、トレーサーの注入流量を変えた試験を繰り返し実施し、各試験で得られた複数の破過曲線を同時にマッチングすることによって、 $2b$ 、 α_L 、 D_m が求められる。マルチ流量試験は、各試験の Q_f のみを変化させ、対象とする試料や使用するトレーサー物質などは同条件とする。したがって、破過曲線のマッチングでは、以下の式(13)~(15)の関係を満たす T_0 、 Pe 、 A を同定することとなる。

$$T_{02} = T_{01}/m \quad (13)$$

$$Pe_2 = Pe_1 \quad (14)$$

$$A_2 = A_1 \quad (15)$$

ここに、 m は各試験のトレーサー注入流量の比を示す。また、添字1および2は、注入流量の異なる各試験ケースの違いを示す。以上より、マルチ流量試験の結果の評価では、取得される複数の破過曲線の同時マッチングによって、式(13)~(15)の関係を満足するような T_0 、 Pe 、 A を同定し、最終的に、式(7)~(9)によって、 $2b$ 、 α_L 、 D_m の3つのパラメータを求めることになる。

3. 試験条件の設定

著者らは、式(3)の理論解を用いた数値実験を通して、マルチトレーサー試験やマルチ流量試験の適用性について理論的な検討を行ってきた¹⁰。その結果、同試験によ

って、3つの同定パラメータ ($2b$ 、 α_L 、 D_m) のうち、マトリクス拡散係数 D_m に対して共線性の低い独立した観測値を追加しても、試験の流量条件によっては、特に開口幅 $2b$ の同定に対して極端に感度の低い観測データとなる場合があることを明らかにした。また、これを回避する方法として、マルチトレーサー試験から $2b$ を含む3つの未知パラメータを適切に同定するために満たすべき流量条件の決定方法を提案した¹⁰。以下に、既報で提案した条件設定方法の基本的な考え方を説明するとともに、本稿で実施した試験の設定条件について説明する。

(1) 既報で提案した流量条件の設定方法¹⁴⁾

a) 流量条件と開口幅の感度の関係

式(7)~式(9)より、開口幅 $2b$ は、亀裂内の移流とマトリクス内の拡散に関わる T_0 および A に影響するパラメータであり、亀裂内の分散に関わる Pe とは無関係である。ここでは、簡単のため、式(16)に示す分散を考慮しない場合の理論解^{3, 17)}を用いて流量条件と開口幅の感度の関係について説明する。

$$\frac{c_f}{c_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t - T_0}} \right) \quad (16)$$

図-3に、式(16)を用いて解析したマトリクス拡散が生じない場合と、生じる場合の破過曲線の例を示す。マトリクス拡散が生じる場合、亀裂内の濃度は、マトリクス拡散による遅延の影響を受け、時間 $t=T_0$ から徐々に上昇する。Jakob¹⁸⁾は、亀裂内の相対濃度 c_f/c_0 が0.5となる時間 $t_{0.5}$ を見掛けの破過時間 (solute breakthrough time) [T]とし、式(16)の相補誤差関数の逆算から、以下のような近似式を示している。

$$t_{0.5} = T_0 + 1.1T_0^2 A^2 \quad (17)$$

図-3 破過曲線の例 (分散を考慮しない場合)

表-2 解析の入力条件

ケースNo.	トレーサー 注入流量 Q_f (cc/min)	亀裂 開口幅 $2b$ (m)	マトリクス 拡散係数 D_m (m ² /s)	マトリクス 空隙率 n_m (-)
case1	0.05	1.0E-04	3.0E-10	0.3
case2	0.005			

ここに、 $T_0^2 A^2$ は、マトリクス拡散による遅延時間を表すパラメータ[T]であり、式(7)、(9)から以下のように表される。

$$T_0^2 A^2 = \frac{4W^2 L^2 n_m^2 D_m}{Q_f^2} \quad (18)$$

すなわち、マトリクス拡散が生じる場合の見掛けの破過時間 t_{05} は、亀裂内の移流による滞留時間 T_0 と、マトリクス拡散による遅延時間 $1.1T_0^2 A^2$ の和として表現できる。流量条件と開口幅の感度の関係は、見掛けの破過時間 t_{05} における T_0 と $T_0^2 A^2$ の比に関連付けて説明できる。

図-4には、表-2の条件で式(16)の理論解により算定した時間 t_{05} までの破過曲線を示す。なお、同図中には、開口幅のみを2倍変化させた場合の破過曲線の変化を併せて示した。表-2より、case1とcase2の違いは注入流量 Q_f のみであり、その他のパラメータは同一の値である。式(7)および式(18)より、開口幅 $2b$ は $T_0 \propto 2b$ の関係にあり、 $T_0^2 A^2$ とは無関係であるため、開口幅の変化は、図のように T_0 の変化に相当する曲線の時間軸方向への平行移動として現れる。一方、注入流量 Q_f は、 T_0 と $T_0^2 A^2$ の双方に関連しており、それぞれ $T_0 \propto 1/Q_f$ 、 $T_0^2 A^2 \propto 1/Q_f^2$ の関係にあるため、注入流量を変えると、図-4のように T_0 と $T_0^2 A^2$ の比が変化する。注入流量の小さいcase2は、着目する時間 t_{05} に対して T_0 が極端に小さいため（すなわち $T_0 \ll T_0^2 A^2$ であるため）、開口幅の変化に対する曲線の変化量が相対的に小さくなっている。したがって、注入流量が小さく、 T_0 に対して、 $T_0^2 A^2$ が過大となるような条件では、開口幅の感度が小さくなり、一意的な同定が困難になると言える。そこで著者らは、滞留時間 T_0 とマトリクス拡散による遅延時間 $T_0^2 A^2$ の比を下式のように無次元パラメータ α と定義し、 α が過大とならないような注入流量を設定することを提案した。

$$\alpha = \frac{T_0^2 A^2}{T_0} = T_0 A^2 = \frac{2WLn_m^2 D_m}{Q_f b} \quad (19)$$

b) 流量条件の設定方法

著者らは、上記の α の上限値の設定方法として、次式で表される濃度変化率と α の関係を用いることを提案した。

$$\text{濃度変化率} = (c_1 - c_2) / c_1 \times 100 \quad (20)$$

ここで、濃度変化率は、開口幅の γ 倍の変化に対する時間 t における濃度の変化率であり、開口幅の感度の一つの指標と考えられる値である（図-5を参照）。 c_1 は時間 t における亀裂内の相対濃度 (c_f/c_0)、 c_2 は開口幅を γ 倍大きくした場合の同じ時間 t の相対濃度である。図-5のように、 $c_f/c_0 = 0.5$ となる時間 t_{05} に着目する場合、式(3)～(6)に式(17)を代入すれば、濃度変化率は、 α と Pe と γ の

(a) case 1 ($Q_f = 0.05$ cc/min)

(b) case 2 ($Q_f = 0.005$ cc/min)

図-4 開口幅の変化と破過曲線の関係

図-5 開口幅の感度の指標の概念

図-6 濃度変化率と α の関係 ($t = t_{05}$, $\gamma = 2.0$ の場合)

関数で表される¹⁰⁾。図-6に時間 t_{05} に着目した場合の2倍の開口幅の変化 ($\gamma = 2.0$) に対する濃度変化率と α の関係を示す。なお、同図には、 $Pe = 1, 10, 100$ の3ケースを示した。これより、 Pe の範囲によって程度は異なるが、濃度変化率は、 α が小さくなるほど大きくなっており、 α が小さくなるほど開口幅の感度が大きくなるのが分かる。著者らは、図-6の関係に基づいて、 α の上限値を設け、注入流量 Q_f を決定する方法を提案した。すなわち、濃度センサーの測定精度などから、開口幅の同定に必要な濃度変化率を決定し、図-6の濃度変化率と α の関係から α の閾値を決定すれば（たとえば、 $\alpha < 5$ など）、式

(19)から適切な流量条件 Q_f を求めることができる。なお、マルチトレーサー試験の場合は、1回の試験で複数種類の混合トレーサーを注入するため、使用するトレーサーの数だけ α を求めることができる。この場合、少なくとも1種類以上のトレーサーについて α の上限値の条件を満たせば開口幅を適切に同定できる。

また、ここで説明した α の上限値は、注入流量の下限値を規定するものである。注入流量の上限値については、試験時間やサンプリングの時間間隔など試験方法に関わる条件や、亀裂内の流れの状態（乱流・層流）などの概念モデルの適用範囲に関わる条件などによって制限される。また、特に、本研究で対象としているようなマトリクス拡散の影響を評価する場合は、注入流量を過大に設定すると、トレーサー溶液が亀裂内を瞬時に破過するため、マトリクス拡散の効果が表れにくくなると考えられる（すなわち、マトリクス拡散係数 D_m の感度を低下させる。）。したがって、注入流量は、基本的には、できる限り小さくする必要があるが、開口幅の感度を確保するためには、その下限値を著者らの提案した手法によって制限する必要があると言える。

なお、本節で概説した条件設定方法の詳細については、文献10)を参照されたい。

(2) 本試験の条件設定

表-3に本研究で実施したマルチトレーサー試験の設定条件を示す。トレーサー溶液の濃度およびフラッシング流量については、IC分析（必要サンプル量：0.25mL）の定量下限値（Br⁻：0.1mg/L、PFBA：0.7mg/L）および定量上限値（Br⁻：30mg/L、PFBA：50mg/L）から、トレーサー濃度を500mg/L、フラッシング流量を注入流量の10倍程度に設定した。トレーサーの注入流量は、上記の提案手法に基づいて設定した。以下に詳細を説明する。

a) 濃度変化率の設定

まず、開口幅の同定に必要な濃度変化率を設定した。濃度変化率の設定は、試験で得られる破過曲線の測定誤差から設定されるべきものである。理論的には、測定誤差のない完全に理想的な破過曲線が得られれば、その結果が開口幅の感度の低い範囲にあっても開口幅の同定は可能である。しかし、実際の試験結果は様々な測定誤差を含んでおり、その場合、試験結果が誤差の幅よりも高い感度を有する範囲になれば開口幅の同定は困難となる。本試験では、試験結果の測定誤差の目安として、IC分析の測定誤差を求め、濃度変化率が分析誤差以上となるような条件を設定した。なお、試験結果に含まれる誤差の要因としては、注入ポンプの流量制御などの影響も考えられるが、本試験では、流量誤差0.1%の高精度シリンジポンプを採用しており、流量誤差の影響は小さいものと判断した。

IC分析の測定誤差は、既知濃度（Br⁻、PFBAともに20mg/L）の混合トレーサーを作成し、その濃度を20回繰り返し分析した際の測定誤差を確認した。その結果、分析誤差は、それぞれBr⁻が2.1%、PFBAが1.4%となった。そこで、開口幅の同定に必要な濃度変化率を4%以上（分析誤差の2倍）と仮定した。

b) α の上限値の設定

上記で設定した濃度変化率から、図-6の関係図を用いて α の上限値を設定した。図-6より、 α と濃度変化率の関係はペクレ数によって異なる（式(8)より x_l は既知条件であるので、実際には分散長 α_L によって異なる）。ペクレ数は、本来は未知パラメータであるため、既往事例などから推定する必要がある。

一般に分散長はスケールに依存することが知られている。Gelhar¹⁹⁾は、多孔質地盤と割れ目系岩盤を対象として実施された複数の原位置トレーサー試験結果から得られた縦方向分散長のデータをとりまとめ、縦方向分散長が試験スケールとともに増加する傾向があることを示した。また、単一亀裂を対象とした室内トレーサー試験の実施例としては、例えば、Neretnieks²⁰⁾、Moreno²¹⁾、Callahan⁶⁾などがある。これらの例では、試験結果から得られたペクレ数は、いずれも平均で15程度で、1~100程度の範囲に分布している。ただし、これらは全て自然亀裂を対象とした試験結果から得られた値である。本研究の対象試料は、人工の平行平板亀裂試料であるため、ペクレ数は、比較的大きい範囲にあることが予想される（すなわち分散長は比較的小さい）。そこで、本研究では、既往の試験例の中でもペクレ数の大きい範囲に当たる $Pe=100$ の場合の濃度変化率- α 曲線から α の上限値を

表-3 試験条件の設定値（マルチトレーサー試験）

トレーサー濃度 C_0 [mg/L]	注入流量 Q_f [cc/min]	フラッシング流量 [cc/min]	無次元パラメータ* α [-]	
500	0.5	5.3	Br ⁻	5.8
			PFBA	1.9

* 表-1の別途試験結果より T_0 と A を推定し、式(19)から算定

図-7 濃度変化率と α の関係（ $Pe=100$ 、縦軸拡大）

設定することとした。

図-7には、図-6の3つの曲線のうち $Pe=100$ の曲線について縦軸のスケールを拡大したものを示す。図-7より、濃度変化率が4%以上となるように α の上限値を10とした。

c) 注入流量 Q_f の算定

上記で設定した α の上限値から、式(19)により注入流量 Q_f を算定した。ただし、式(19)中の b , n_m , D_m は、本来は未知パラメータであるため、透水試験や拡散試験などの他の調査情報や既往の研究成果などを参考に、事前にある程度の範囲を推定する必要がある。本研究では、表-1の別途試験から求めた値を用いて式(19)から $\alpha < 10$ となるような注入流量 Q_f を算定した。表-3に算定した注入流量 Q_f とその時の α の値を示す。注入流量 Q_f の設定値は0.5cc/min、無次元パラメータ α はBrが5.8、PFBAが1.9であり、いずれも $\alpha < 10$ の条件を満たしていることが分かる。

4. 試験結果と考察

(1) 逆解析手法の概要

試験結果のマッチングには、米国ローレンスバークレー国立研究所開発の逆解析コード(iTOUGH2-TRAT²⁹)を用いた。iTOUGH2-TRATは、トレーサー試験結果の評価を目的として開発された逆解析コードである。同コードでは、破過曲線の計算には、数値解析ではなく理論解を用いている。理論解は、一次元の室内試験やボーリング孔を用いた原位置試験など、流れの形態や境界条件の異なる数種類を選択可能となっている。本稿では、全ての破過曲線の計算に式(3)～式(6)の理論解を用いた。

iTOUGH2-TRATでは、以下の目的関数 S を最小とるように、Gauss-Newton法の一様であるLevenberg-Marquardt法によってパラメータの同定を行う²⁹。

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(c_i^* - c_i)^2}{\sigma_{ci}^2} \quad (21)$$

ここに、 N はマッピングポイントの総数、 c_i^* は i 番目のマッピングポイントにおける濃度の観測値、 c_i は i 番目のマッピングポイントにおける濃度の計算値を示す。パラメータの同定では、以下のパラメータ更新ベクトル Δp_k を求め、一定基準以下になるまで反復計算を行う。

$$\Delta p_k = (J_k^T C_{zz}^{-1} J_k + \lambda_k D_k)^{-1} J_k^T C_{zz}^{-1} r_k \quad (22)$$

ここに、添え字 k は逆解析の反復数、 C_{zz} は、観測値と計算値の共分散行列(対角行列)、 r_k は残差ベクトルを示す。 J_k は次式で示されるJacobian行列である。

$$J_k = -\frac{\partial r_k}{\partial p_k} \quad (23)$$

D_k は共分散行列とJacobian行列から計算される対角行

列、 p_k はパラメータベクトル、 λ_k はLevenbergパラメータであり逆解析ステップごとに自動的に減少させる値である。iTOUGH2-TRATでは、以下の5つの収束判定基準を満たした場合に繰り返し計算を終了する。

- 1) 反復回数が設定上限値を超えた場合
- 2) 更新後のパラメータが設定上限値を超えた場合
- 3) 目的関数が小さくなった場合
- 4) 目的関数の勾配が小さくなった場合
- 5) パラメータ更新ベクトルが小さくなった場合

(2) 試験結果

図-8に表-3の試験条件で実施した試験結果とiTOUGH2-TRATによるTangの理論解とのマッピング結果を示す。表-4にはパラメータの同定結果を示す。トレーサー試験は、サンプリングの時間間隔が等しくなるように、合計40個の濃度データを取得しており(Br, PFBAのそれぞれについて40個)、逆解析のマッピングポイントの総数 N は80個となる。パラメータの同定は、合計80個の観測値から、 $2b$, α , D_m を未知パラメータとし(n_m は既知パラメータと仮定)、BrとPFBAの破過曲線を同時に再現可能なパラメータの組合せを求めた。なお、PFBAの D_m はBrの0.38倍と仮定した(すなわち、BrとPFBAのそれぞれに共通の屈曲度 τ を求めることに等しい)。また、試験結果は、フラッシングによる希釈の影響を次式にて補正した。

$$c_{cor} = c_{obs} \cdot \frac{(Q_f + Q_{add})}{Q_f} \quad (24)$$

ここに、 c_{cor} は補正後の濃度、 c_{obs} は補正前の濃度、 Q_{add} はフラッシング流量を示す。

図-8より、BrとPFBAの破過曲線には明瞭な相違が見られ、分子拡散係数の低いPFBAは、Brに比べてマトリクス拡散による遅延効果が小さいため、濃度上昇が速いことが分かる。また、試験結果と解析結果はよく一致しており、今回の試験結果が、Tangの理論解により適切に表現可能であることが示唆される。また、表-4より、マトリクス部の拡散係数 D_m と開口幅 $2b$ は、表-1の室内試験の結果と概ね整合的である。 D_m については、別途実施した室内試験とトレーサー試験で対象試料の拡散特性が同等であったことが伺われる。 $2b$ については、今回の対象試料が平行平板亀裂であることから、透水試験から求めた水理開口幅と同等の値を示したものと考えられる。分散長 α_L は、2.8mmであり($Pe=49.0$)、3.(2)bで述べた既往の自然亀裂を対象とした室内試験結果(平均で $Pe=15$)と比べるとペクレ数の大きい範囲にあることから、平行平板亀裂としては、妥当な範囲の結果であると考えられる。

著者らは、図-6の濃度変化率と α の関係を、試験計画

時の条件検討だけでなく、既に実施された試験の妥当性の検証にも用いることを提案した。すなわち、試験後に同定されたパラメータから α を再評価し、濃度変化率 α 曲線と比較すれば、その試験が、事前に推定した通り十分な開口幅の感度を有する条件で実施されたかどうかを検証することができる。表-4の無次元パラメータ α は、各パラメータの同定結果から算定した値である。これより、 α は、いずれも上限値の10を下回っており、実施した試験が著者らの提案する条件を満たした流量条件で実施されたことが分かる。

図-9は、Tangの理論解を用いて、3つの同定パラメータ ($2b$, α_L , D_m) を、同定結果を中心に1オーダーの範囲で変化させながら求めた解析結果と試験結果との残差二乗平均 ε の分布をコンター図にしたものである。なお、 ε は次式により算定した。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i^* - c_i)^2} \quad (25)$$

図-9のコンターの寒色系は、試験結果と解析結果が良く一致していることを示す。したがって、同定値 (図中の白丸) の周りに寒色系の明瞭なピークが現れれば、3つのパラメータが一意的に同定できていることを示す。なお、図-9の(a)~(e)の D_m はBr⁻の値であり、PFBAの D_m は、全てBr⁻の0.38倍となる。

図-9のコンターは、 ε の低い範囲が同定値の周りに集中しており、一意的なパラメータ評価ができていることが分かる。ただし、分散長 α_L については、同定結果に向かってなだらかなピークを示しており (図-9 (C))、同定の感度が低いことがうかがえる。これは、上述にもあるように、今回の対象試料は人工の平行平板亀裂試料であるため、亀裂内の分散が小さいためであると考えられる。図-8の破線は、式(16)の分散を考慮しない場合の理論解を用いた解析結果である。つまり、分散長 α_L を小さくすると最終的にこの破線に漸近することになる。今回の試験結果は、分散を考慮しない場合の理論解と大差ない結果となっているため、 α_L の同定感度が低くなったと考えられる。しかしながら、本研究で特に問題とし

ている開口幅の感度については、同定値に向かって ε の明瞭なピークが見られるため (図-9 (c))、今回の試験が、十分な開口幅の感度を有する条件で実施されたことが確認されたと言える。

以上より、著者らの提案した方法で注入流量を設定すれば、十分な開口幅の感度を有する試験を行うことが可能となり、3つのパラメータを適切に評価可能であることが実験的に検証された。

5. 効率的な試験手順の提案

3章で述べたように、著者らの提案した条件設定手法は、開口幅やマトリクス拡散係数などの未知パラメータのある程度の範囲を事前に把握しておく必要がある。本稿では、事前に実施した室内試験結果 (表-1) を参考にしたが、コストや工期などの制約から、今回のように未知パラメータの推定のための十分な情報が得られない場合も考えられる。事前に推定した未知パラメータの範囲が実際の値と大きく乖離した場合、著者らの提案した手

図-8 試験結果と解析結果の比較

表-4 パラメータ同定結果

拡散係数 D_m [m ² /s]	開口幅 $2b$ [mm]	分散長 α_L [mm]	無次元パラメータ*1 α [-]
Br ⁻	3.29E-10	0.096	2.8
PFBA	1.25E-10		1.4

*1 上記の同定パラメータより算定

図-9 残差二乗平均 ε の分布

※単位は $2b$, α_L とも[m]

法に基づいて流量条件を設定しても、十分な開口幅の感度を有する範囲の試験を実施できない可能性がある。

本章では、これらの課題を解決するために、マルチトレーサー試験とマルチ流量試験を組み合わせた新たな試験手法を提案し、その検証のための試験を実施した。

(1) 試験手順の提案

図-10に著者らの提案する試験のフローを示す。本試験手法の特徴は、最初に2種類の非収着性物質を用いたマルチトレーサー試験を実施し、流量条件を見直した再試験にはマルチトレーサー試験とは異なる非収着性物質を用いる点である。これにより、マルチトレーサー試験後に、試料や装置の洗浄が不要となり、マルチトレーサー試験を終了後すぐに再試験を行うことが可能となる。本研究では、最初のマルチトレーサー試験は、前章と同様のBr⁻とPFBAを用いた試験を行い、再試験はヨウ化物イオン (I⁻) を用いた単成分のトレーサー試験を行った。I⁻は、非収着性トレーサーとしてよく用いられる物質であり、Br⁻とほぼ同等の分子拡散係数を有する ($D_F=2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)¹⁰⁾。したがって、最初のマルチトレーサー試験から得られるBr⁻の破過曲線と、流量条件を見直した再試験から得られるI⁻の破過曲線を同時にマッチングすれば、1章で紹介したマルチ流量試験（単成分のトレーサー試験を流量条件を変えて繰り返し実施する方法）として取り扱うことができる。流量条件の見直しにより、再試験を開口幅の感度を有する適切な条件で実施できれば、先のマルチトレーサー試験結果と再試験結果を同時にマッチングすることによって、開口幅を含む3つのパラメータを一意に同定することが可能となる。

以下に、図-10の試験手順に従って実施した検証試験について説明する。なお、試験装置および試料は、前章までと同じものを用いた。

(2) 試験条件の設定

本章では、図-10の試験手順において、最初のマルチトレーサー試験が適切な流量条件で実施されず、再試験が必要となる場合を想定する。そこで、表-1の別途試験結果のうち、マトリクス拡散係数のデータを取得できず、最初の推定値を誤って1オーダー低く評価した場合を想定する（すなわち、Br⁻: $D_m=5.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, PFBA: $D_m=1.7 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ）。この誤った推定値に基づいて、3章と同様に $\alpha < 10$ となるような流量条件を算定すると、注入流量 Q_f は、3章で設定した値よりも1オーダー小さい $Q_f=0.05 \text{ cc/min}$ となる。表-5に試験条件と α の一覧を示す。表-5の α は、表-1の別途試験結果のうち、マトリクス拡散係数 D_m のみを1オーダー低くした場合に算定される値を示している。

図-10 効率的な試験フロー

表-5 マルチトレーサー試験の設定条件

トレーサー濃度 C_0 [mg/L]	注入流量 Q_f [cc/min]	フラッシング流量 [cc/min]	無次元パラメータ* α [-]	
500	0.05	0.58	Br ⁻	5.8
			PFBA	1.9

* 表-1のうち、 D_m を1オーダー下げた値とし、式(19)から算定

図-11 試験結果と解析結果の比較

(3) マルチトレーサー試験の実施

表-5の試験条件に基づいてBr⁻とPFBAを用いたマルチトレーサー試験を実施した。図-11に、試験結果を示す。本ケースは、開口幅の感度が低く、 $2b$, a_L , D_m の3つを未知パラメータとした同定が困難であった（解が収束しない）。したがって、この結果からも、著者らの提案した条件設定法の重要性が示されたと言える。

図-11の解析結果（実線）は開口幅を $2b=0.1\text{mm}$ で固定し、 a_L と D_m を未知パラメータとした場合のマッチング結

果である。また、図中の破線は、マッチング解析結果の開口幅を $2b=0.01\text{mm}$ にした場合の破過曲線である。これより、本ケースは、開口幅の感度が低く、 $2b=0.1\text{mm}$ 、 0.01mm の双方で試験結果を概ね再現できているため、開口幅を一意に同定することが困難であることが分かる。したがって、当初推定した未知パラメータの値に誤りがあり、適切な流量条件を設定できていなかったことが推定できる。そこで、前章と同様に、残差二乗平均 ε のコンターを作成し、 ε の分布からある程度のパラメータの範囲を推定することを試みた。図-12に残差二乗平均 ε のコンターを示す。これより、今回の試験結果は、 ε の明瞭なピークは見られず、開口幅が概ね 0.1mm 以下の範囲（図-12の横軸において、 $\log 2b$ が-4以下の範囲）に ε の低い領域が広く分布していることが分かる。これは、すなわち今回の試験が開口幅の感度の低い条件で実施されたことを示している。一方、マトリクス拡散係数 D_m は、 $2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 付近（Br⁻のマトリクス拡散係数を示す。PFBAは、この値の0.38倍となる）で ε が低く、この付近の値に収束することが確認できる。したがって、この時点で、最初の D_m の推定値（Br⁻で $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ）が1オーダー程度過小評価していたことを確認することができる。また、分散長については、概ね 6mm 以下の範囲（図-12の縦軸において、 $\log \alpha_L$ が-2.2以下の範囲）で ε が低くなっており、平行平板亀裂試料であることと整合的な結果であることが読み取れる。

以上より、当初のマトリクス拡散係数の推定値に誤りがあったため、ここで実施したマルチトレーサー試験の流量条件が十分な開口幅の感度を有する範囲になかったことを確認することができた。そこで、図-12のコンターから、3つのパラメータの推定値を見直し、その結果に基づいて流量条件を見直した再試験を行った。次節では、再試験のための流量条件の見直しについて説明する。

(4) 流量条件の見直し

前節のマルチトレーサー試験の結果から、再試験のための流量条件の見直しを行った。なお、前述した通り、再試験では、Iを用いた単成分のトレーサー試験を行う。

Iの濃度分析は、Br⁻、PFBAと同様にICにて実施した。Iに対するIC分析の測定誤差は、20回の既知濃度測定（既知濃度： 20mg/L ）の結果から2.2%であり、前述のBr⁻、PFBAと同等であった。したがって、流量条件設定のための α の上限値についても、Br⁻、PFBAと同様に10とした。

流量条件の見直しは、まず、前節のコンターを参考に未知パラメータの推定値を見直し、見直した推定値と式(19)から、 $\alpha < 10$ の条件を満たすような流量条件 Q_f を再度算定した。なお、見直し後の各未知パラメータは、図-12のコンターから ε の低い領域内の1点（図-12(c)の白丸）を仮定して、その値を読み取った。表-6に見直し後のパラメータを示す。また、表-7には、表-6と式(16)から算定した見直し前後の試験条件を示す。なお、表-7の α は、いずれも表-6の見直し後のパラメータに基づいて算定した値である。これより、先に実施したマルチトレーサー試験は、Br⁻、PFBAともに α が上限値の10を大きく上回っており、開口幅の感度の低い流量条件であったことが分かる。一方、流量条件を見直した再試験の α は9.2であり、 $\alpha < 10$ の条件を満たすことが分かる。

(5) 再試験（Iによる単成分トレーサー試験）の実施

表-7の試験条件に基づき、Iを用いた単成分のトレーサー試験を実施した。試験結果を図-13に示す。パラメ

表-6 パラメータの見直し結果

拡散係数 $D_m [\text{m}^2/\text{s}]$		開口幅 $2b [\text{mm}]$	分散長 $\alpha_L [\text{mm}]$
Br ⁻	$2.5\text{E}-10$	0.03	2.0
PFBA	$9.5\text{E}-11$		

表-7 見直し前後の試験条件

ケース	トレーサー濃度 $C_0 [\text{mg/L}]$	注入流量 $Q_f [\text{cc/min}]$	フラッシング流量 $[\text{cc/min}]$	無次元パラメータ* $\alpha [-]$	
Br ⁻ 、PFBA試験 (見直し前)	500	0.05	0.58	Br ⁻	91.5
				PFBA	34.8
I試験 (見直し後)		0.5	5.1	I	9.2

* 表-6の見直し後のパラメータを用いて、式(19)から算定

図-12 残差二乗平均 ε の分布 (D_m の推定を誤ったケース：収束せず)

※単位は $2b$ 、 α_L とも[m]

ータの評価は、図-13の再試験結果と、(2)節のマルチトレーサー試験結果（図-11のBr⁻とPFBAの試験結果）を合わせた3つの破過曲線の同時マッチングによって行った。同定解析には、4章と同様にiTOUGH2-TRATを用いた。なお、前述した通り、I⁻とBr⁻はほぼ同じ分子拡散係数（ $D_m=2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ）を有するため、図-13のI⁻の試験結果と図-11のBr⁻の試験結果は、マルチ流量試験として取り扱うことができる。したがって、3つの破過曲線の同時マッチングにおいては、Br⁻とI⁻については式(13)～(15)、Br⁻とPFBAについては式(10)～(12)の関係を満たすようなパラメータの組み合わせを求めた。なお、 D_m はBr⁻、PFBA、I⁻のそれぞれの値を同定するが、これは、4章と同様に、各物質に共通の1つの屈曲度 α を求めることに等しい。また、逆解析のマッチングポイントの総数 N は、最初のマルチトレーサー試験でBr⁻とPFBAが各30個、再試験でI⁻が40個の合計100個である。図-14には、Br⁻とPFBAについて3つの破過曲線を同時マッチングした結果を示す。なお、I⁻については、図-13の実線が同時マッチング結果である。また、表-8には、3つの破過曲線の同時マッチングによって求めたパラメータの同定結果を示す。これより、同定結果は、表-1の別途試験結果および表-4の適切な流量条件で実施されたマルチトレーサー試験結果と概ね同等の値が得られていることから、拡散係数の事前の推定値に誤りがある場合でも、本章で提案した試験手順に従って再試験を実施すれば、拡散係数を正しく推定した場合と同等の同定結果を得られることが示された。また、同定結果から算定した α は、先に実施したマルチトレーサー試験は、いずれも上限値の10を上回っているが、再試験のI⁻は、10を十分に下回る範囲で試験が実施されたことが分かる。図-14には、3つの破過曲線を同時マッチングした場合の残差二乗平均 ε のコンターを示す。これより、コンターには同定結果の周りに明瞭なピークが見られ、3つのパラメータが一意に評価されていることが分かる。

以上より、試験前の情報が不十分で未知パラメータの範囲を推定することが困難な場合でも、著者らの提案する試験手順（図-10）によれば、 $2b$ 、 α_L 、 D_m の3つのパラ

メータを効率的かつ適切に同定できることが確認された。

6. まとめ

本研究では、既報¹⁰⁾にて著者らが提案した、マルチトレーサー試験やマルチ流量試験を実施する際に満たすべき流量条件の設定手法の適用性を検証するために、以下

図-13 試験結果と解析結果の比較（I⁻再試験）

図-14 試験結果と解析結果の比較（Br⁻、PFBA試験）

表-8 パラメータ同定結果（3曲線同時マッチング）

拡散係数 D_m [m^2/s]	開口幅 $2b$ [mm]	分散長 α_L [mm]	無次元パラメータ*1 α [-]
Br ⁻	0.093	5.9	29.8
PFBA			11.5
I ⁻			3.0

*1 上記の同定パラメータより算定

図-15 残差二乗平均 ε の分布（3曲線同時マッチング）

※単位は $2b$ 、 α_L と[m]

の検討を実施した。

- 1) 著者らの提案した流量条件の設定手法に基づいて、単一の平行平板亀裂を配した珪藻質泥岩試料を用いた室内マルチトレーサー試験を実施し、提案した手法の適用性を確認した。
- 2) 上記の室内マルチトレーサー試験より、著者らが提案した方法で注入流量を設定すれば、十分な開口幅の感度を有する試験を行うことが可能となり、3つのパラメータ（開口幅 $2b$ 、分散長 α_L 、マトリクス拡散係数 D_m ）を適切に評価できることが実験的に検証された。
- 3) 上記の室内マルチトレーサー試験の実施を通して、流量条件の設定に必要な濃度変化率や無次元パラメータ α の下限値について、具体的な値の決定方法を示し、その妥当性を確認した。
- 4) 流量条件の設定に必要な未知パラメータの概略値の推定が困難な場合について、マルチトレーサー試験とマルチ流量試験を組み合わせた新たな試験手法を提案し、室内試験を通してその有効性を確認した。

以上より、著者らの提案した流量条件の設定手法の適用性を実験的に検証することができた。また、同手法に基づいた、より効率的な試験手順を提案し、その適用性を確認することができた。今後は、提案手法の原位置試験への拡張に向けた検討を行う予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、米国ローレンスバークレー国立研究所開発のiTOUGH2-TRATを使用させて頂き、開発者であるQuanlin Zhou博士には有益な御助言を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Neretnieks, I. : Diffusion in the rock Matrix : An important factor in radionuclide retardation?, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B8, pp.4379-4397, 1980.
- 2) Grisak, G. E. and Pickens, J. F. : Solute transport through fractured media 1. The effect of matrix diffusion, *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 4, pp. 719-730, 1980.
- 3) Tang, D. H., Frind, E. O. and Sudicky, E. A. : Contaminant transport in fractured media : Analytical solution for a single fracture, *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 555-564, 1981.
- 4) Maloszewski, P. and Zuber, A. : On the theory of tracer experiments in fissured rocks with porous matrix, *Journal of Hydrology*, Vol. 79, pp. 333-358, 1985.
- 5) Maloszewski, P. and Zuber, A. : Mathematical modeling of tracer behavior in short-term experiments in fissured rocks, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 7, pp. 1517-1528, 1990.
- 6) Callahan, T. J., Reimus, P. W., Bouman, R. S. and Haga, M. J. : Using multiple experimental methods to determine fracture/matrix interactions and dispersion of nonreactive solutes in saturated volcanic tuff, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 12, pp. 3547-3558, 2000.
- 7) Becker, M. W. and Shapiro, A. M. : Tracer transport in fractured crystalline rock : Evidence of nondiffusive breakthrough tailing, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 1677-1686, 2000.
- 8) Reimus, P. W., Haga, M. J., Adams, A. I., Callahan, T. J., Turin, H. J. and Counce, D. A. : Testing and parameterizing a conceptual solute transport model in saturated fractured tuff using sorbing and nonsorbing tracers in cross-hole tracer tests, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 62-63, pp. 613-636, 2003.
- 9) Novakowski, K. S., Bickerton, G. and Lapcevic, P. : Interpretation of injection - withdrawal tracer experiments conducted between two wells in large single fracture, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 73, pp. 227-247, 2004.
- 10) 熊本創, 下茂道人 : 単一亀裂を対象としたトレーサー試験による亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の評価手法, 土木学会論文集C, Vol. 68, No. 3, pp. 535-546, 2012.
- 11) Li, Y. and Gregory, S. : Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 38, No. 5, pp. 703-714, 1974.
- 12) Bowman, R. S. and Gibbens, J. S. : Difluorobenzoates as nonreactive tracers in soil and ground water, *Ground Water*, Vol. 30, No. 1, pp. 8-14, 1992.
- 13) 地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説一二分冊の1, pp. 186-194, 2009.
- 14) 青木智幸, 井尻裕二, 下茂道人 : 高精度トランジェントパルス透水試験機の開発, 第49回土木学会年次学術講演会, pp. 80-81, 1994.
- 15) 喜多治之, 岩井孝幸, 中嶋悟 : 花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定, 応用地質, Vol. 30, No. 2, pp. 26-32, 1989.
- 16) Bear, J. : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publications, New York, 1972.
- 17) Grisak, G. E. and Pickens, J. F. : An analytical solution for solute transport through fractured media with matrix diffusion, *Journal of Hydrology*, Vol. 52, pp. 47-57, 1981.
- 18) Jakob, A. : Modelling solute transport using the double porous medium approach, In: Grenthe, I., Puigdomenech, I. (Eds.), *Modelling in Aquatic Chemistry*, OECD/NEA, Paris, France, 1997.
- 19) Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. R. : A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 7, pp. 1955-1974, 1992.
- 20) Neretnieks, I., Eriksen, T. and Tahtiinen, P. : Tracer movement in a single fissure in granitic rock : Some experimental results and their interpretation, *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 849-858, 1982.
- 21) Moreno, L., Neretnieks, I. and Eriksen, T. : Analysis of some laboratory tracer runs in natural fissures, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 7, pp. 951-958, 1985.
- 22) Zhou, Q. : Software management report for iTOUGH2-TRAT, Version 1.0, 1001-SMR-1.0-00, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 2005.
- 23) Finsterle, S. : iTOUGH2 User's Guide, Report LBNL-40040, UC-400, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 1999.

(2013.12.3受付)

APPLICATION OF MULTIPLE TRACER TEST FOR EVALUATION OF ADVECTION-DISPERSION AND MATRIX DIFFUSION PARAMETERS

Sou KUMAMOTO, Michito SHIMO and Kenji AMANO

The evaluation of the advection-dispersion in fractures and diffusion into the matrix from fractures is important to describe the mass transport processes in fractured porous media such as sedimentary rocks. However, it is often difficult to uniquely determine a number of parameters relevant to these phenomena, such as fracture aperture, dispersivity coefficient, and matrix diffusion coefficient, from a data set of a single tracer test. In this paper, a one-dimensional multiple tracer test for single fracture in a sedimentary rock block was conducted under the condition of injection rate for the unique parameter estimation suggested by authors. And the new efficient test procedure using both multiple tracer and multiple flow rate tests was suggested.