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

熊本 創¹・下茂 道人²

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.taisei.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.taisei.co.jp

堆積岩などの比較的多孔質な岩盤を対象としたトレーサー試験を行う際は、トレーサーの主要な移行経路となる亀裂内の移流・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現象を支配するパラメータ（マトリクス拡散係数）の評価が求められる。しかし、単成分のトレーサー試験を一回実施しただけでは、これらのパラメータを同時に評価することは困難である。本稿では、これらのパラメータをトレーサー試験結果から同時に評価する際の結果の妥当性について、一次元の移流・分散とマトリクス拡散を考慮した支配方程式の理論解を用いて説明するとともに、各パラメータを一度に決定するための新しい試験方法を提案した。

Key Words : *tracer test, fractured rock, matrix diffusion, uniqueness of parameter estimation*

1. はじめに

近年、廃棄物処分場や工場からの汚染漏洩問題など、地下水中の汚染物質の移行挙動の評価が重要となってきた。高レベル放射性廃棄物地層処分では、地下300m以深の岩盤中に埋設処分する方針で検討が進められており、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ている。

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、亀裂内の滞留時間が長い場合や、堆積岩のように空隙率の大きい岩盤を対象とした場合では、亀裂から岩石基質部への拡散（マトリクス拡散）による遅延効果の影響を受けやすくなると考えられている^{1), 2), 3)}。

亀裂内の移流・分散やマトリクス拡散は、それぞれ亀裂内の流速や分散係数、およびマトリクス部の空隙率や拡散係数などのパラメータによって決定付けられる。これらのパラメータは、一般に、原位置や室内においてトレーサー試験を実施し、試験で取得された破過曲線と、試験における流れの次元や境界条件を考慮した支配方程式の解とのマッチングによって評価される。しかし、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似通っ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、室内試験から求められるマトリクス部の空隙率、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代用して評価されることも少なくない^{4), 5)}。しかし、水理試験結果から求められる水理開口幅は、トレーサー試験結果から求められる物質移行開口幅と必ずしも同じ値にならないことが報告されており^{6), 7)}、マトリクス部の拡散係数についても、試験スケールによって値が異なる可能性があることが報告されている^{8), 9)}。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（原位置試験の場合は、同一の試験区間）を対象にトレーサーの注入流量を変えて、試験を複数回実施し、得られた複数の破過曲線を同時にマッチングする方法（以後、マルチ流量試験と呼ぶ）や、1回の試験で分子拡散係数の異なる数種類の混合トレーサーを同時に注入し、それぞれのトレーサーについて得られた破過曲線を同時にマッチングする方法（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^{10), 11), 12), 13)}。しかし、これらの既往の研究では、マルチ流量試験や、マルチトレーサー試験の有効性について理論的な説明がなされておらず、試験の適用範囲や適切な試験条件の設定方法などについても十分な説明がなされていないのが現状である。

そこで、本稿では、一次元の亀裂内移流分散とマトリクス拡散を考慮した支配方程式の理論解³⁾を用いて、トレーサー試験結果から移流・分散、およびマトリクス拡散に関わる3つのパラメータを一度に評価する際の解の妥当性について理論的な説明を行うとともに、マルチ流量試験やマルチトレーサー試験結果から、各パラメータを適切に評価するための新しい試験条件の設定方法を提案する。

2. トレーサー試験結果の評価方法

(1) 物質移行現象の概念モデル

本稿では、マトリクス拡散を考慮した単一亀裂中の物質移行現象を、図-1に示すような概念モデルで表現する場合について検討する。

図-1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-1の亀裂左端部）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。

(2) 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。

図-1 亀裂内移流・分散およびマトリクス拡散の概念モデル

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

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

ここに、 x は亀裂内の流れ方向軸上の座標 [L]、 y は亀裂と直行する方向軸上の座標 [L]、 c_f は亀裂内の濃度 [M L⁻³]、 c_m はマトリクス内の濃度 [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 [L] ($2b$: 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 [L²T⁻¹]とマトリクス部の拡散係数（マトリクス拡散係数）[L²T⁻¹]を示しており、次式で表される。

$$D_f = D' + D_d = \alpha_L v_f + D_d \quad (3)$$

$$D_m = \tau D_d \quad (4)$$

ここに、 D' は機械的分散係数 [L²T⁻¹]、 α_L は亀裂内の縦方向分散長（x 軸方向の分散長）[L]、 D_d は自由水中における溶質の分子拡散係数 [L²T⁻¹]、 τ はマトリクス部の屈曲度 [-]¹⁴⁾を示す。Tang 等³⁾は、式(1)および(2)について、式(5)~(10)に示す初期条件および境界条件を仮定し、式(11)に示す理論解を導出している。

$$\bullet \text{ 初期条件} \quad c_f(x, 0) = 0 \quad (5)$$

$$c_m(x, y, 0) = 0 \quad (6)$$

$$\bullet \text{ 境界条件} \quad c_f(0, t) = c_0 \quad (7)$$

$$c_f(\infty, t) = 0 \quad (8)$$

$$c_m(x, b, t) = c_f(x, t) \quad (9)$$

$$c_m(x, \infty, t) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{c_f}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_l^\infty \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T}\right] d\xi \quad (11)$$

ここに、 c_0 はソース濃度 $[\text{M L}^{-3}]$ 、 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。

$$Y = \frac{T_0 P_e A}{4\xi^2} \quad (12)$$

$$T = \sqrt{t - \frac{T_0 P_e}{4\xi^2}} \quad (13)$$

$$l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_0 P_e}{t}} \quad (14)$$

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

$$T_0 = \frac{x}{v_f} \quad (15)$$

$$P_e = \frac{v_f x}{D_f} \quad (16)$$

$$A = \frac{n_m}{b} \sqrt{D_m} \quad (17)$$

ただし、式(16)中の D_f は、式(3)に示すように、機械的分散係数 D' と分子拡散係数 D_d の和として表されるが、亀裂内の流速が速く、分子拡散係数に比べて機械的分散係数が非常に大きくなるような場合は ($D' \gg D_d$ となる場合)、 $D_f \doteq D'$ と近似されることもある。本稿では、 $D_f \doteq D'$ の近似が成り立つ場合を想定する。したがって、式(16)は、以下のように表すことができる。

$$P_e = \frac{x}{\alpha_L} \quad (18)$$

(3) パラメータの評価方法

式(11)～(14)に示すように、単一亀裂内のトレーサー濃度の変化は、移流、分散およびマトリクス拡散に関わる3パラメータ (T_0 、 P_e 、 A) 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、破過曲線のマッチングにより、 T_0 、 P_e 、 A が求まれば、式(15)、(18)から、亀裂内の断面平均流速 v_f 、縦方向分散長 α_L が算定できる。また、トレーサーの注入流量 $Q_f [\text{L}^3 \text{T}^{-1}]$ を一定とした条件では、亀裂内の断面平均流速 v_f と開口幅 $2b$ の間に式(19)に示すような関係が成り立ち、これを式(15)に代入すると、平均滞留時間 T_0 は式(20)となる。

$$v_f = \frac{Q_f}{2bW} \quad (19)$$

図2 一次元トレーサー試験の概念

$$T_0 = \frac{2bWx}{Q_f} \quad (20)$$

ここに、 W は亀裂の幅 $[\text{L}]$ である (図-2)。 W と Q_f を既知パラメータとすれば、式(20)より、平均滞留時間 T_0 から開口幅 $2b$ を求めることができる。また、マトリクス拡散係数 D_m は、式(17)に、式(20)から算定された開口幅 $2b$ と空隙率 n_m を代入して求めることができる。この場合、空隙率 n_m もマトリクス拡散係数 D_m と同様に未知パラメータであるが、通常は、コア試料を利用した室内試験によって求められる値を既知パラメータとして代用することが多い。本報告では、空隙率は既知パラメータとして取り扱う。

以上より、トレーサー試験結果の評価は、破過曲線のマッチングによって求めた3パラメータ (T_0 、 P_e 、 A) から、式(17)、(18)、(20)により、亀裂の開口幅 $2b$ 、縦方向分散長 α_L 、マトリクス拡散係数 D_m の3パラメータを決定することに帰着する。

(4) マルチ流量試験

前述のように、一回の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3つのパラメータ ($2b$ 、 α_L 、 D_m) を一度に決定することは困難である場合が多い。そこで評価結果の妥当性を確保するための一つの方法として、同一の試料に対して、トレーサーの注入流量を変えた複数回のトレーサー試験を繰り返し実施し、得られた複数の破過曲線を同時にフィッティング可能なパラメータの組み合わせを求める方法 (マルチ流量試験) が提案されている^{9), 10), 11)}。

マルチ流量試験では、トレーサーの注入流量 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ため、 Q_f を変化した試験の T_0 、 P_e 、 A は、 Q_f の変化率との関係によって、以下のように表すことができる。

$$Q'_f = mQ_f \quad (21)$$

$$T'_0 = T_0/m \quad (22)$$

$$P_e' = P_e \quad (23)$$

$$A' = A \quad (24)$$

ここに、 m はトレーサー注入流量の変化率、 Q_f' 、 T_0' 、 P_e' 、 A' は、それぞれトレーサー注入流量を変化させた試験に対応する注入流量、平均滞留時間、ペクレ数、マトリクス拡散による移行パラメータを示す。

以上より、マルチ流量試験では、流量を変えたそれぞれのトレーサー試験から求められる複数の破過曲線を同時にマッチングすることによって、式(21)～(24)を満たすような T_0 、 P_e 、 A が求められる。

(5) マルチトレーサー試験

パラメータ評価結果の妥当性を確保するためのもう一つの方法として、一回のトレーサー試験において、自由水中での分子拡散係数 D_d の異なる複数のトレーサーを同時に注入し、各トレーサーについて得られた複数の破過曲線を同時にフィッティング可能なパラメータの組み合わせを求める方法（マルチトレーサー試験）が提案されている^{10), 11), 12), 13)}。

マルチトレーサー試験では、 D_d の異なる各トレーサーに対応する T_0 、 P_e 、 A は、 D_d の比率との関係によって、以下のように表すことができる。

$$D_{d2} = nD_{d1} \quad (25)$$

$$T_{02} = T_{01} \quad (26)$$

$$P_{e2} = P_{e1} \quad (27)$$

$$A_2 = \sqrt{n}A_1 \quad (28)$$

ここに、 n は 2 つのトレーサーの自由水中の分子拡散係数の比率を示す。また、添字 1 および 2 は、それぞれ対象とするトレーサーの違いを示す。

以上より、マルチトレーサー試験では、各トレーサーについて求め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、式(25)～(28)を満たすような T_0 、 P_e 、 A が求められる。

なお、次章の数値実験で実施するマルチ流量試験とマルチトレーサー試験結果の評価では、上記の式(21)～(28)の関係を考慮して、2 つの破過曲線を同時にマッチングする場合について検討した。

3. 数値実験によるトレーサー試験の妥当性検証

マルチ流量試験やマルチトレーサー試験により、前述の 3 つの物質移行パラメータ ($2b$ 、 α_d 、 D_m) を一度に評

価する際の結果の妥当性を検証するために数値実験を行った。検討の方法は、まず、式(11)～式(14)の理論解を用いて、表-1 の条件で破過曲線を計算し、これを仮想的なトレーサー試験データとする（図-3、図-4）。次に、同じ理論解を用いて、求める 3 つのパラメータを順次変化させながら計算した破過曲線と仮想試験データとの残差二乗平均の分布を計算し、残差の極小値の局所性から解の妥当性を検討した。なお、理論解による破過曲線と残差二乗平均の計算には、米国ローレンスバークレー国立研究所開発の iTOUGH2-TRAT¹⁵⁾ 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が、本稿では、同コードの Grid Search 機能¹⁶⁾を用いた。Grid Search 機能は、複数組の任意のパラメータの組み合わせを指定し、それぞれの組み合わせについて、観測データ（ここでは、仮想試験データを意味する）と解析結果との残差の二乗和を出力する機能である。また、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(11)～式(14)の理論解を用いた。

(1) 仮想トレーサー試験

仮想トレーサー試験は、注入流量 Q_f のオーダーが異なる 2 ケース (case1, case2) を設定し、それぞれの流量条件で単成分のトレーサー試験を一回実施する場合（単一試験と呼ぶ）と、マルチ流量試験、マルチトレーサー試験を実施する場合を想定した（表-1）。マルチ流量試験では、case1 と case2 のそれぞれについて、注入流量を 2 倍にしたケースと組み合わせた 2 回の試験を想定した。また、マルチトレーサー試験では、1 回の試験で、非収着性のハロゲンイオン (I や Br など、表-1 中の tracer1) と、それよりも分子拡散係数が 1/3 程度低い PFBA^{10), 17)}（ペンタフルオロ安息香酸、表-1 中の tracer2）の 2 種類を混合して注入する場合を想定した。なお、試料の大きさ（試料長 L と亀裂幅 W ）はコア試料を用いた室内トレーサー試験を想定して $L=W=5\text{cm}$ とした。

図-3 および図-4 に、仮想トレーサー試験結果を示す。同図は、実際の試験を想定して、理論解から求めた破過曲線に、 $\pm 2\%$ の測定誤差を付加したものである。なお、図中の BTC1-1～BTC2-3 の表記は、表-1 中の破過曲線 No. に対応している。以下、それぞれの関係について case1 を例に説明する。case1 の破過曲線は、BTC1-1～BTC1-3 の 3 つのデータがある。このうち、BTC1-2 は BTC1-1 の条件で流量を変えた場合の試験結果である。また、BTC1-3 は BTC1-1 と同じ流量条件でトレーサーの種類を変えた場合の試験結果である。すなわち、マルチ

表-1 仮想トレーサー試験の設定条件

解析ケース			トレーサー 注入流量 Q_f (cc/min)	トレーサー	マトリクス 拡散係数 D_m (m ² /s)	亀裂 開口幅 2b (m)	縦方向 分散長 α_L (m)	マトリクス 空隙率 n_m (-)	α
ケース No.	試験方法	破過曲線 No.							
case1	単一試験	BTC1-1	0.05	tracer1	3.0E-10	1.0E-04	0.05	0.3	3.2
	マルチ 流量試験	BTC1-1	0.05	tracer1	3.0E-10				3.2
		BTC1-2	0.1		3.0E-10				1.6
	マルチ トレーサー試験	BTC1-1	0.05	tracer1	3.0E-10				3.2
		BTC1-3		tracer2	1.0E-10				1.1
case2	単一試験	BTC2-1	0.005	tracer1	3.0E-10	1.0E-04	0.05	0.3	32.4
	マルチ 流量試験	BTC2-1	0.005	tracer1	3.0E-10				32.4
		BTC2-2	0.01		3.0E-10				16.2
	マルチ トレーサー試験	BTC2-1	0.005	tracer1	3.0E-10				32.4
		BTC2-3		tracer2	1.0E-10				10.8

流量試験では BTC1-1 と BTC1-2, マルチトレーサー試験では BTC1-1 と BTC1-3 のそれぞれ 2 つの破過曲線が得られることを想定している. 以下, マルチ流量試験とマルチトレーサー試験については, 2 章(4), (5)に示した式(21)~(28)の関係を考慮し, それぞれ 2 つの破過曲線を同時にマッチングする場合について検討を行う.

(2) パラメータ同定における解の妥当性の確認

図-3 および図-4 の仮想トレーサー試験結果から, 3 つのパラメータ ($2b$, α_L , D_m) の組み合わせを同定する際の結果の妥当性を確認した. 図-5~図-10 は, 3 つのパラメータの組み合わせを, 真値 (表-1 の仮想試験の設定パラメータ) を中心に 1 オーダーの範囲で順次変化させた場合の破過曲線と, 仮想試験データ (図-3, 図-4) との残差二乗平均 ε の分布のコンター図である. なお, ε は以下の式(29)から算定した.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i^* - c_i)^2} \quad (29)$$

ここに, N はマッチングポイントの総数, c_i^* は i 番目のマッチングポイントにおける濃度の観測値, c_i は i 番目のマッチングポイントにおける濃度の計算値を示す. なお, マッチングポイントの総数は, 各破過曲線とも時間を等分割した 100 点 ($N=100$) とした.

図-5~図-10 のコンターの寒色系は, 仮想試験データと解析結果が良く一致していることを示す. したがって, 真値 (図中の白丸) の周りに寒色系の明瞭なピークが現れれば, より信頼性の高いパラメータ同定が可能であることを示す. なお, 図の(a)~(e)の D_m は tracer1 の値であり, マルチトレーサー試験については, tracer2 の D_m は, 式(25)の関係から全て tracer1 の 1/3 の値である. 図-5~図-7 は, 注入流量の多いケース (case1) の結果である. 図-5 より, 単成分のトレーサー試験を 1 回行う場合 (単一試験の場合), 残差二乗平均 ε は, 真値の周りで低くなるものの (図-5(c)), 明瞭なピークは見られず, $D_m =$

図-3 仮想トレーサー試験結果 (case1)

図-4 仮想トレーサー試験結果 (case2)

9.5E-10 m²/s においても真値の周辺と同等の低い ε の分布が見られる (図-5(d)). したがって, 単一試験では, 3 つのパラメータを正しく評価できない可能性があることが分かる. 一方, 図-6 および図-7 のマルチ流量試験やマルチトレーサー試験の場合は, ε の低い範囲がより真値の近傍に集中しており, 単一試験の場合と比べて, より正確なパラメータを同定できることが分かる.

図-8~図-10 は, 注入流量の少ないケース (case2) の結果である. 図-8 より, 流量の少ないケースでは, 単一試験の場合でも, α_L や D_m については, 概ね真値の近傍に ε の低い範囲が集中しており, ある程度正確に評価できる可能性があるが, 開口幅 $2b$ については, 広範囲に渡って ε が低くなっており (真値の周りに集中してい

図-5 残差二乗平均 ε の分布 (case1, 単一試験)

図-6 残差二乗平均 ε の分布 (case1, マルチ流量試験)

図-7 残差二乗平均 ε の分布 (case1, マルチトレーサー試験)

図-8 残差二乗平均 ε の分布 (case2, 単一試験)

図-9 残差二乗平均 ε の分布 (case2, マルチ流量試験)

図-10 残差二乗平均 ε の分布 (case2, マルチトレーサー試験)

ない), パラメータを一意に評価できない可能性があることが分かる. また, この傾向は, 図-9 および図-10 のマルチ流量試験やマルチトレーサー試験の場合においても同様であり, いずれも開口幅を正しく評価できない可能性があることが分かる.

図-11 に, 仮想トレーサー試験の case1 および case2 の単一試験 (BTC1-1, BTC2-1) の設定条件のうち, 開口幅のみを変化させた場合の破過曲線を示す. これより, 開口幅を小さくすると濃度上昇が速くなるが, ある範囲から開口幅を変化させても曲線形状が変化しないことが分かる. また, ε の収束性が高い case1 は, 曲線形状が変化する範囲にあるが, 収束性の低い case2 は, 開口幅の変化に対して感度の低い範囲にあることが分かる.

以上より, 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 3 つのパラメータを評価するためには, マルチ流量試験やマルチトレーサー試験が有効であるが, 開口幅の感度が十分に確保されるような流量条件を設定する必要があることが示唆された. 次章では, 適切なパラメータ評価を可能とするような流量条件の設定方法について理論的な説明を試みる.

4. 試験条件と開口幅の感度の関係

ここでは, 理論解を用いて, 試験の流量条件と開口幅の感度の関係について説明し, 開口幅の同定が可能となる流量条件を決定するための理論式を導出する.

まずは, 簡単のために, 亀裂内の移流とマトリクス拡散のみを考慮した (分散を無視した) 理論解を用いて説明し, その後, 分散を考慮した理論解を用いて説明する.

(1) 亀裂内の分散を無視した理論解による説明

a) 亀裂内の分散を無視した理論解

式(1), (2)において, 亀裂内の分散を無視した支配方程式の理論解は, 次式のように表される³⁾.

$$\frac{c_f}{c_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t-T_0}}\right) \quad (30)$$

図-12 に, 同式から計算した破過曲線の例を示す. 分散を無視した場合, 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. Jakob (1997)¹⁸⁾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(30)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.

$$t_{0.5} = T_0 + 1.1T_0^2 A^2 \quad (31)$$

ここに, $T_0^2 A^2$ は, マトリクス拡散による遅延時間 [T]

(a) case1, BTC1-1

(b) case2, BTC2-1

図-11 開口幅の変化と破過曲線の関係

図-12 分散を無視した場合の破過曲線の例

を表すパラメータであり, 以下のように表される.

$$T_0^2 A^2 = \frac{4W^2 L^2 n_m^2 D_m}{Q_f^2} \quad (32)$$

すなわち, 見掛けの破過時間 $t_{0.5}$ は, 移流による滞留時間 T_0 にマトリクス拡散による遅延時間 $1.1T_0^2 A^2$ を加えたものである. なお, 式(32)中の 1.1 は, 相補誤差関数の逆算から近似される定数であり, 着目する濃度毎に求めることができる (たとえば, c_f/c_0 が 0.3 になる時間 $t_{0.3}$ では 0.5 となる).

b) 理論解の無次元化

開口幅の感度と流量条件の関係について, より一般化した形で議論するために理論解の無次元化を行う. 式(30)の理論解について, 時間 t を $T_0^2 A^2$ で正規化すると, 以下のように表すことができる.

$$\frac{c_f}{c_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{t^* - 1/\alpha}}\right) \quad (33)$$

ここに, t^* は正規化時間 [-] ($=t/T_0^2 A^2$) である. また,

α は、 T_0 と $T_0^2 A^2$ の比を表す無次元パラメータであり、以下のように表される。

$$\alpha = \frac{T_0^2 A^2}{T_0} = T_0 A^2 = \frac{2WLn_m^2 D_m}{Q_f b} \quad (34)$$

以上より、時間 t を $T_0^2 A^2$ で正規化すると、パラメータが一つ減り、破過曲線の形状は無次元パラメータ α のみによって決まることが分かる。

c) 注入流量と開口幅の感度の関係

図-13は、開口幅を2倍変化させた場合の破過曲線の変化を示す。なお、同図は、仮想トレーサ試験のパラメータ(表-1の単一試験BTC1-1およびBTC2-1、ただし分散長は除く)を用いて計算した $t=t_{0.5}$ までの破過曲線である。これより、注入流量 Q_f の大きいcase1は、同じ2倍の開口幅の変化に対する破過曲線の変化がcase2よりも大きい。この違いは、上記の T_0 と $T_0^2 A^2$ の比と関連づけて以下のように説明できる。

式(20)、(32)より、 Q_f は $T_0 \propto 1/Q_f$ 、 $T_0^2 A^2 \propto 1/Q_f^2$ の関係にあるため、 Q_f が変わると、図-13のように T_0 と $T_0^2 A^2$ の比が変化する。また、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。注入流量の小さいcase2は、着目する時間 $t_{0.5}$ 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たと考えられる。

図-14は、図-13の時間軸を正規化したものである。正規化プロット上では、時間 $t_{0.5}$ に対するマトリクス拡散による遅延時間は1.1で一定となり、滞留時間は $1/\alpha$ で表される。同図より、開口幅の変化に対する破過曲線の変化量は、無次元パラメータ α が小さいほど大きくなっており、開口幅の感度を α との関係で整理できることを示唆している。

d) 開口幅の感度の指標の提案

以上より、開口幅の感度は、 T_0 と $T_0^2 A^2$ の比を表す無次元パラメータ α に依存することが示唆された。ここでは、この関係に着目し、試験の適切な条件設定のための、以下のような新たな指標を提案する。

$$\text{濃度変化率} = (c_1 - c_2)/c_1 \times 100 \quad (35)$$

ここに、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-15を参照)。 c_1 は、時間 t における亀裂内の相対濃度であり、図-15のように、 $c_f/c_0 = 0.5$ となる時間 $t=t_{0.5}$ に着目する場合は $c_1=0.5$ となる。また、 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。式(20)および式(17)から、 T_0 は開口幅と比例関係にあり、 A は反比例の関係にあるため、式(30)より、 c_2 は次式で表される。

(a) case1, BTC1-1

(b) case2, BTC2-1

図-13 開口幅の変化と破過曲線の関係

図-14 開口幅の変化と破過曲線の関係 (t 正規化)

図-15 開口幅の感度の指標の概念 ($t=t_{0.5}$ の場合)

$$c_2 = \operatorname{erfc}\left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t - \gamma T_0}}\right) \quad (36)$$

式(36)は、 $t=t_{0.5}$ とした場合、式(31)、(34)から、以下のような α と γ の関数で表せる。

$$c_2 = \operatorname{erfc}\left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t_{0.5} - \gamma T_0}}\right) = \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{1.1\alpha + 1 - \gamma}}\right) \quad (37)$$

式(35)、(37)より、時間 $t=t_{0.5}$ における濃度変化率を無次元パラメータ α と γ の関数で表せることが示された。なお、ここでは、例として $t=t_{0.5}$ の場合を示したが、着目する時間が変わっても同様に濃度変化率を α と γ の関数で表すことができる。

図-16 は、式(35)と式(37)から求めた、開口幅の変化率 $\gamma=2.0 \sim 5.0$ に対する濃度変化率と α の関係である。これより、濃度変化率は、 α が小さくなるほど大きくなり、たとえば、 α が 10 以下の範囲であれば、2 倍以上の開口幅の変化に対して、 $t=t_{0.5}$ における濃度は数%以上変化することが分かる。また、前章で残差二乗平均 ε の収束性が高かった case1 の仮想トレーサ試験は、 $\alpha=3.2$ であり(表-1 の BTC1-1)、図-16 では 10%以上の感度が得られる範囲にある。一方、 ε の収束性が低かった case2 は、 $\alpha=32.0$ であり(表-1 の BTC2-1)、非常に感度が低い範囲にあることが分かる。

以上のことから、開口幅を適切に評価するためには、 α が小さくなるような条件(すなわち、注入流量 Q_i が大きい条件)で試験を実施する必要があると言える。

(2) 亀裂内の分散を考慮した場合

ここまで、亀裂内の分散を無視した理論解から、開口幅の感度が α に依存し、開口幅を適切に評価するためには、 α が小さくなるような条件で試験を実施する必要があることを示した。ここでは、亀裂内の分散を考慮した場合について、同様の検討を行う。

a) 理論解の無次元化

検討に先立ち、(1)節 b)項と同様の無次元化を行う。式(11)～式(14)の理論解について、時間 t を $T_0^2 A^2$ で正規化すると、式(12)、式(13)の Y 、 T は、以下の Y' 、 T' に置き換えられ、 l は、式(40)のように変形できる。

$$Y' = \frac{P_e}{4\xi^2} \quad (38)$$

$$T' = \sqrt{t^* - \frac{P_e}{4\xi^2 \alpha}} \quad (39)$$

$$l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_e/\alpha}{t^*}} \quad (40)$$

ここで、 t^* は前述の正規化時間 ($=tT_0^2 A^2$) である。以上より、分散を考慮した場合でも、時間 t を $T_0^2 A^2$ で正規化すると、パラメータが一つ減り、破過曲線の形状は α と P_e によって決まることが分かる。

図-17 は、図-11 の時間軸を正規化したものである。図-11 は、いずれも同じ $P_e=1$ であるため、各曲線の違いは α のみである。図-17 より、開口幅の感度は、 α が小さいほど高くなり、ペクレ数が同じであれば、分散を無視した場合と同様に α との関係で整理できることを示唆している。

b) 濃度変化率と α の関係

以上より、開口幅の感度は、分散を無視した場合と同様に無次元パラメータ α に依存する可能性があることが示された。ここでは、亀裂内の分散を考慮した場合の濃度変化率と α の関係を導出し、試験条件決定の指標とし

図-16 濃度変化率と α の関係 ($t=t_{0.5}$ の場合)

図-17 α の変化と破過曲線の関係 (t 正規化)

ての適用性を検討する。

分散を考慮した場合、式(35)中の c_1 は、 $t=t_{0.5}$ とすると、式(11)～式(14)と式(31)から、次式のような α と P_e の関数で表される。

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_{l_{0.5}}^{\infty} \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha P_e^2}{1.1\alpha + 1 - P_e/4\xi^2}}\right] d\xi \quad (41)$$

$$l_{0.5} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_e}{1.1\alpha + 1}} \quad (42)$$

また、式(35)中の c_2 は、 α と P_e と γ の関数として、次式のように表される。

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_{l'_{0.5}}^{\infty} \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha P_e^2}{1.1\alpha + 1 - \gamma P_e/4\xi^2}}\right] d\xi \quad (43)$$

$$l'_{0.5} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma P_e}{1.1\alpha + 1}} \quad (44)$$

したがって、式(35)に式(41)～式(44)を代入すると、分散を考慮した場合の濃度変化率は、 α と P_e と γ の関数で表されることが分かる。

図-18 には、例として、開口幅の変化率 $\gamma=2.0$ とした場合の濃度変化率と α の関係を示す。なお、同図には、 $P_e=1, 10, 100$ の 3 ケースと、比較のため、分散を無視

したケース (図-16 の $\gamma=2.0$) を示した. ここで, P_e と縦方向分散長 α_L は, 式(18)に示したように反比例の関係にあるため, P_e が大きいことは, すなわち分散長が小さいことを示す.

図-18 より, 濃度変化率は, 分散を無視した場合と同様に α が小さくなるほど大きくなる. また, 分散の小さい場合 ($P_e=100$ の場合) は, 分散を無視した場合とほぼ同等の濃度変化率となっているが, ペクレ数が小さくなるにつれて濃度変化率が低くなるのが分かる. ペクレ数が小さい場合は (分散が大きい場合は), 破過曲線の初期の濃度上昇が速く, $t_{0.5}$ における破過曲線の傾きが小さくなる. 図-19 は $P_e=1.0$ と 10 の場合について, 開口幅を 2 倍変化した場合の破過曲線の変化を示す. $P_e=1.0$ の場合は, $P_e=10$ の場合と比べて $t_{0.5}$ における破過曲線の傾きが小さく, 同じ開口幅の変化に対する濃度変化量 (c_1-c_2) が小さくなっている. このため, 図-18 のように, ペクレ数が小さいほど濃度変化率は低くなり, 開口幅の感度も低くなる.

図-18 中には, 前章の仮想トレーサー試験の濃度変化率と α の関係を示した. 仮想トレーサー試験は, 両ケースとも $P_e=1$ である (表-1). 図より, 残差二乗平均 σ の収束性が高かった case1 の仮想トレーサー試験 (BTC1-1 ~ BTC1-3) は, いずれも 5% 以上の感度が得られる範囲にあるが, case2 (BTC2-1 ~ BTC2-3) は, いずれも感度が非常に低い範囲にあることが分かる. すなわち, 亀裂内の分散を考慮した場合でも, 開口幅を適切に評価するためには, 取得した複数の破過曲線データのうち少なくとも 1 ケース以上は, α が小さくなるような条件で試験を実施する必要があると言える.

5. 試験条件の設定方法の提案

(1) 試験条件の設定方法

前章までの知見に基づき, トレーサー試験を実施する際の適切な試験条件の設定方法を提案する.

トレーサー試験では, 試験スケールは既知条件であることが多く, 決定すべき条件としては, 使用するトレーサーの種類や濃度, および注入流量 Q_f などである. これらの条件は, 通常, 対象とする場の水理地質特性や化学特性などを考慮した上で, 注入ポンプや濃度センサーなどの装置の性能に関わる制約や, 試験に必要な時間やコストなどの制約に基づいて決定されることが多い. しかし, 本報告のように, 亀裂とマトリクスの相互作用を考慮した試験を行う場合は, 前述のようなパラメータの感度に関わる新たな条件を加えて検討する必要がある. 本研究では, 以下のような条件設定方法を提案する.

上述のように, 開口幅を適切に評価するためには, 滞

図-18 濃度変化率と α の関係 (分散考慮, $t_{0.5}$, $\gamma=2.0$)

図-19 α の変化と破過曲線の関係 (t 正規化)

留時間 T_0 とマトリクス拡散による遅延時間 $T_0^2 A^2$ の比を表す無次元パラメータ α の範囲を考慮した注入流量 Q_f を設定する必要がある. そこで, 図-18 の濃度変化率と α の関係を用いた方法を提案する. すなわち, 濃度センサーの測定精度や分解能などから, 開口幅の同定に必要な濃度変化率を決定し, 図-18 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(34)から適切な流量条件 Q_f を求めることができる. ただし, 式(34)中の T_0 や A , また, 分散を考慮した場合の P_e 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, ある程度の範囲を事前に推定しておく必要がある.

(2) 既往の試験結果の検証

図-18 の濃度変化率と α の関係は, 上述のような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ができる. すなわち, 試験結果から同定されたパラメータと, 試料サイズや注入流量などの試験条件から α を算定し, 濃度変化率- α 曲線と比較すれば, その試験が, 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. 以下に既往の試験結果の検証の例を示す.

Callahan 等 (2000) ¹⁰⁾ は, 2 種類の凝灰岩コア試料 (Core1, Core2) を対象とした一次元非収着性トレーサー試験を実施し, マルチ流量試験やマルチトレーサー試験による亀裂内移流・分散およびマトリクス拡散パラメ

表-2 Callahan 等 (2000)¹⁰⁾の室内トレーサー試験条件と無次元パラメータ α

試験条件および同定パラメータ			Core 1				Core 2			
			マルチ流量試験			マルチトレーサー試験	マルチ流量試験			マルチトレーサー試験
			test1	test2	test3		test1	test2	test3	
試験条件	注入流量: Q_f	cc/hour	2.0	20.1	8.3	6.4	19.9	49.6	11.7	6.0
	トレーサー注入時間: t_{end}	hours	32.0	2.9	7.6	11.5	4.0	1.5	6.2	11.9
	使用トレーサー	-	I ⁻			Br ⁻ PFBA	I ⁻			Br ⁻ PFBA
	分子拡散係数: D_d	m ² /s	2.0E-09			2.0E-09 7.6E-10	2.0E-09			2.0E-09 7.6E-10
	試料長: L	m	0.16				0.17			
	亀裂幅: W	m	0.095				0.095			
	マトリクス空隙率: n_m	-	0.27				0.14			
同定パラメータ	開口幅: $2b$	m	7.0E-04			1.2E-03	7.2E-04			7.2E-04
	分散長: α_L	m	1.0E-02			5.4E-02	7.5E-03			1.2E-02
	マトリクス拡散係数: D_m	m ² /s	3.7E-10			1.3E-09 4.3E-10	3.1E-10			2.4E-10 8.0E-11
	T_0	s	1.9E+04	1.9E+03	4.6E+03	1.0E+04	2.1E+03	8.6E+02	3.6E+03	7.1E+03
	P_e	-	1.5E+01			3.0E+00	2.3E+01			1.5E+01
	A	s ^{-1/2}	1.5E-02			1.7E-02 9.7E-03	6.8E-03			6.0E-03 3.5E-03
	無次元パラメータ: α	-	4.22	0.42	1.02	2.79 0.93	0.10	0.04	0.17	0.26 0.09

図-20 Callahan 等 (2000)¹⁰⁾の濃度変化率と α の関係

ータの評価を実施している。同試験では、単一試験では、 $2b$, α_L , D_m の複数の組み合わせによって試験結果をフィットすることが可能でありパラメータを一意に決定できないが、マルチ流量試験やマルチトレーサー試験を適用することによって、 $2b$, α_L , D_m の3つのパラメータを一意に評価することができたと結論づけられている¹⁰⁾。表-2にCallahan等の試験について、試験条件とパラメータの同定結果、ならびに無次元パラメータ α の算定結果を示す。表-2より、Callahan等の試験は、無次元パラメータ α は最大で4.22であり比較的小さい条件で実施されていることが分かる。図-20には、表-2の試験条件と同定パラメータを用いて、式(35)と式(41)～式(44)から算定した濃度変化率と α の関係を示す(ただし、 $t=t_{0.5}$, $\gamma=2.0$ とした)。また、同図には、比較のためにCore1とCore2のそれぞれの平均的なペクレ数(Core1: $P_e=10$, Core2: $P_e=20$)に対する濃度変化率と α の理論曲線を合わせてプロットした。同図より、Callahan等の試験は、開口幅の2倍の変化に対する時間 $t=t_{0.5}$ における濃度変化率が、全ての試験で10%以上となっており、開口幅の感度が比較的大きい範囲で実施されていることが分かる。したがって、Callahan等の試験は適切な流量条件下で実施されており、同定されたパラメータの信頼性が高いと考えられる。

6. まとめ

本研究では、一次元トレーサー試験結果から亀裂内の移流・分散とマトリクス拡散に関わる3つのパラメータ(亀裂の開口幅 $2b$ 、亀裂内の縦方向分散長 α_L 、マトリクス部の拡散係数 D_m)を一度に評価するために以下の検討を実施した。

- 1) 理論解を用いた一次元トレーサー試験の数値実験を実施し、試験の流量条件とパラメータ同定結果の妥当性との関係について確認した。
- 2) 上記の数値実験より、単成分のトレーサー試験を1回実施するだけでは、3つのパラメータを一度に評価することは困難であることを示した。また、特に開口幅については、試験の流量条件によってはパラメータの感度が低く、マルチ流量試験やマルチトレーサー試験を実施した場合でも一意に決定することが困難であることを示した。
- 3) 分散を無視した場合と考慮した場合の理論解を用いて、開口幅の感度が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 $T_0^2A^2$ の比を表す無次元パラメータ α に依存することを明らかにした。
- 4) さらに、開口幅の感度の指標として、新たに濃度変化率(式(35)および図-15を参照)を提案し、濃度変化率と無次元パラメータ α の関係から、 α がある閾値以下(たとえば、 $\alpha < 5$ など)となるように試験条件を設定することにより、3つのパラメータを一度に評価できることを示した。
- 5) 既往の研究で実施された室内トレーサー試験結果について濃度変化率と α の関係を整理し、提案した条件設定手法の適用性を確認した。

以上より、一次元トレーサー試験結果から3つのパラメータを評価する場合の解の妥当性について理論的に説明するとともに、3つのパラメータを一度に評価可能な試験条件の設定方法を提案し、その適用性を確認するこ

とができた。今後は、複数の亀裂を対象とした場合や、異なる次元や境界条件を想定した場合など、より複雑な条件において同様の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) Silliman, S. E. : An interpretation of the difference between aperture estimate derived from hydraulic and tracer tests in a single fracture, *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 10, pp. 2275-2287, 1989.
- 7) Tsang, Y. W. : Usage of "Equivalent Apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 1451-1455, 1992.
- 8) Liu, H. H., Zhang, Y., Zhou, Q. and Molz, F. J. : An interpretation of potential scale dependence of the effective matrix diffusion coefficient, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 90, pp. 41-57, 2007.
- 9) Zhou, Q., Liu, H. H., Molz, F. J., Zhang, Y. and Bodvarsson, G. S. : Field-scale effective matrix diffusion coefficient for fractured rock : Results from literature survey, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 93, pp. 161-187, 2007.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Bear, J. : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, New York, 1972.
- 15) Zhou, Q. : Software management report for iTOUGH2-TRAT, Version 1.0, 1001-SMR-1.0-00. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 2005.
- 16) Finsterle, S. : iTOUGH2 User's Guide, Report LBNL-40040, UC-400. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 1999.
- 17) 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.
- 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) 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.

(2012.1.6 受付)

AN EVALUATION METHOD ON ADVECTION-DISPERSION AND MATRIX DIFFUSION PARAMETERS WITH TRACER TEST IN SINGLE FRACTURE

Sou KUMAMOTO and Michito SHIMO

The evaluation of the advection-dispersion in the fracture and diffusion into the matrix from fracture is very important to describe the mass transport processes in fractured porous media such as a sedimentary rock. However, it is often difficult to uniquely determine a number of parameters relevant to the advection-dispersion and matrix diffusion phenomena, such as the fracture aperture, dispersivity coefficient, and matrix diffusion coefficient, from a data set of single tracer test. In this report, the uniqueness of the parameter estimations from one-dimensional tracer test was studied using an analytical solution for single fracture model. And the new method of tracer test conditioning to uniquely estimate these three parameters was suggested.