

原位置トレーサー試験の逆解析による同定パラメータ値の不確実性評価

畑明仁*1 井尻裕二*1 細野賢一*2 澤田淳*3

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価においては、モデルやデータの不確実性を評価することが重要な課題の一つとなっている。とくに、天然バリア中核種移行評価においては原位置の調査結果に基づきモデルやデータが設定されると考えられるが、天然バリアは本来不均質であるにもかかわらず調査数量は限られ、調査結果には多くの不確実性を伴う。したがって、天然バリア評価において、原位置調査結果から推定されるモデルやデータの不確実性を定量的に評価する手法を確立する必要がある。

このような観点から、著者らは、原位置トレーサー試験結果から逆解析により同定されたパラメータ値を持つ不確実性の評価手法の検討を実施してきた。本研究は、スイスのNAGRAによりGrimmel Test Site (GTS)において実施されたトレーサー試験結果に対して、逆解析を実施し、パラメータ値を同定するとともに、そのパラメータを持つ不確実性を定量的に評価、検討した結果を示すものである。本検討では、パラメータ値の持つ不確実性を、観測値と計算値の誤差に起因する不確実性と、トレーサーの移行経路数のモデル化の違いに起因する不確実性とに分類し、それぞれの定量化方法について検討を行った。その結果、パラメータ同定は精度よく行えること、観測値と計算値の誤差に起因する不確実性は、モデルの設定条件に起因するパラメータの不確実性に比べてきわめて小さいこと、モデルの良否を選択する基準としての情報量基準の有用性を示した。

Keywords: 地層処分, 安全評価, 不確実性, トレーサー試験, 逆解析, 情報量基準

One of key issues in assessing a safety of a deep geological disposal system for high-level nuclear waste is to evaluate the effects of model uncertainties and parameter value uncertainties on the results of the radionuclide migration analysis. In general, models and parameter values used for the analysis in geosphere are obtained from in-situ tests data, that have great uncertainty because of a limited number of tests conducted in a heterogeneous rock formation. Therefore, it is necessary to evaluate the uncertainties of model and parameter value obtained from in-situ tests quantitatively.

From this point of view, we investigate uncertainties due to model and parameter values obtained from inversion analysis of in-situ tracer test. This report describes the inversion analysis of Nagra MI tracer test and discusses the model uncertainties due to the number of migration pathways between injection well and extraction well and parameter value uncertainties due to data fluctuation of tracer breakthrough curve. From the results, it was found that the results of inversion analysis showed good agreement with the results of the in-situ tracer test, that the parameter value uncertainties due to data fluctuation were much smaller than the model uncertainties due to the number of migration pathways, and that the information criteria could be useful for choosing the best model among several prospective models.

Keywords: deep geological disposal system, safety assessment, uncertainty, tracer test, inversion analysis, information criteria

1 はじめに

「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、- 地層処分研究開発第2次取りまとめ -」（以下、第2次取りまとめ）[1]によれば、高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価は、想定される地層処分システムに対し、シナリオ解析による将来挙動の記述、将来挙動のモデル化（概念モデル、数学モデル）、およびモデルを用いた定量的評価という手順で行われる。地層処分システムの一部となる地層は本来的に不均質性を有し、かつその安全評価の対象範囲は時間的・空間的に非常に大きな範囲となるため、安全評価の各段階で様々な不確実性を含むことになる。したがって、地層処分の安全評価においては、各段階における不確実性を適切に取り扱うとともにそれらが評価結果に与える影響を適切に評価しておく必要がある。

一般に、地層処分システムにおける不確実性は、シナ

リオの不確実性、モデルの不確実性、データの不確実性の3つに整理分類できると考えられている[1]が、それらを構成する不確実性の要因は多数あり、また、相互に関連するものも多いため、その取り扱い方法および低減方法は個別に具体的かつ合理的に検討することが肝要である。

本研究では、地層処分場の安全評価において重要な要素の一つである天然バリア中の核種移行評価に関わる不確実性について定量的な検討を行う。第2次取りまとめのレファレンスケースでは、地下1,000m程度の深部で、大規模な断層破砕帯より100m程度離れた位置に処分場が設置されるとして天然バリア中の核種移行評価が実施されている。地層処分場のサイトが選定された際には、その周辺の核種移行特性を把握する目的で、種々の原位置試験が行われると考えられるが、取得できるデータは第2次取りまとめのような評価対象に比べて時間・空間的に限定されることが予想され、安全評価に必要な情報を抽出するためには、試験データやその解釈結果に内在する不確実性を定量的に評価しておくことが必要となる。

以上の観点から、著者らは、原位置で実施されるトレーサー試験について、試験データに逆解析を適用することでパラメータ値の同定を行うとともに、同定されたパラメータ値の不確実性を定量的に評価する手法に関して検討を行ってきた。これまでに著者らは逆解析により

The evaluation of the uncertainty of parameters identified by inversion analysis from in-situ tracer test results by Akihito Hata (hata@ce.taisei.co.jp), Yuji Ijiri, Kenichi Hosono, and Atsushi Sawada

*1 大成建設株式会社 エンジニアリング本部 Engineering Division, Taisei Corporation 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル)

*2 株式会社地層科学研究所 Geoscience Research Laboratory 〒242-0014 神奈川県大和市上和田 1794 鳥海ビル 2F

*3 核燃料サイクル機構 東海事業所 (現在 LBNL 留学中) Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute (currently staying in Laurence Berkley NL) 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

得られた同定パラメータの不確実性を定量的に算出できるツールの整備 開発ツールの原位置試験データへの適用という手順で検討を実施した。原位置試験データとしては、スウェーデンの Äspö Hard Rock Laboratory (以下 HRL) [2]において結晶質岩中の単一亀裂を対象に、SKB により実施されたトレーサー試験結果、およびスイスの Grimsel Test Site (以下 GTS) において断層破砕帯を対象に、NAGRA により実施されたトレーサー試験結果を用いた。

上記、ツールの開発および 原位置試験データへの適用性検討のうち HRL データに関する検討については、既に報告済み[3],[4]であるので、本報告では GTS データについて実施した検討結果を示すこととする。

2 原位置トレーサー試験

2.1 GTS 周辺の地質および水理地質条件

対象とするトレーサー試験が行われた GTS はスイス中央部の Juchlistock 山の東縁に位置し、水力発電所用に掘削された既存のアクセストンネルから、坑道径 3.5m の坑道を TBM を用いて新たに分岐掘削し、試験場として用いているものである[5],[6]。GTS 周辺の母岩はグリムゼル花崗閃緑岩から成り、2500 万年前頃のアルプスの低温変成作用と変形作用により生じたと考えられるせん断帯が、80°以上の傾斜で分布する。トレーサー試験はこれらせん断帯の一つである MI せん断帯を対象として実施された。MI せん断帯は数 cm ~ 数十 cm の幅を持つ雲母質圧砕変成せん断帯である。MI せん断帯の中には角礫状 (粒径 >1mm) や粘土状 (粒径 <1mm) の充填鉱物が見られるが、これらは圧砕変成作用後に、低温低圧下での変形による破断により生じたものと考えられ、またその後の熱水変成作用を受けた跡も見られず未固結である。これらの充填鉱物は数 mm の幅で連なり、せん断帯中の透水経路を成している。

MI せん断帯周辺の空隙構成は、水銀および染料の注入試験より得られている。大別すると 4 種類に区分でき、変形を生じていない花崗閃緑岩部では 0.8~1.5%、圧砕変成部では 0.5~0.9%の値をとる。圧砕変成部の空隙率が変形を生じていない部分のそれより小さいのは変成による再結晶化が起こったためと想定される。一方、充填鉱物周辺は脆性的変形により機械的損傷を受けた後、変成作用を受けていないため 2%程度の値をとり、充填鉱物部では大規模な空隙構造が見られ 10~40%という大きな値をとる。

MI せん断帯における主要な透水経路は主に、充填鉱物と母岩の界面、充填鉱物内の空隙連結による透水経路、微小亀裂の連結による透水経路の 3 つと考えられる。また、せん断帯近傍の母岩部には小さいものの空隙の連結性が確認されておりマトリクス拡散に寄与しているもの

と考えられる。

2.2 トレーサー試験

GTS において実施されたトレーサー試験では、1988 年から 1996 年にかけて 90 ケースの試験が行われている。試験は 9 つのフェーズに分けて段階的に行われており、MI せん断帯内の水理場の確認、試験装置の改良、最適化などの予備試験を経て、最終的には 4 種類の区間において非収着および収着トレーサーを用いてトレーサー試験を実施している。なお、トレーサー試験にあたっては、一方のボーリング孔から注水を行い、もう一方のボーリング孔から揚水を行って、せん断帯内に湧き出し点と吸い込み点を形成している (以下ダイポール場)。Fig.1 に MI せん断帯面内でのボーリング孔の位置関係を示す。本検討ではその中でも 注入流量と揚水流量の比 (以下ダイポール比) の違いの影響、孔間距離の違いの影響、収着特性の違いの影響を検討できるよう 6 ケースを選択し、逆解析を実施した。選択したケースの条件を Table1 に、トレーサー試験の結果を Fig.2 (a)~(d)に示す。なお、Fig.2 ではトレーサー濃度 C を全注入量 M_0 で正規化している。Fig.2 (a)~(c)の結果を見ると、移行距離が長くなるにつれ、移行時間も長くなっていること、移行距離 4.9m のケースについては、ダイポール比が小さい場合にダブルピークが見られることがわかる。また、Fig.2 (d)の収着性トレーサーを用いたケースの場合には、核種の収着による遅延が明瞭に見られる。

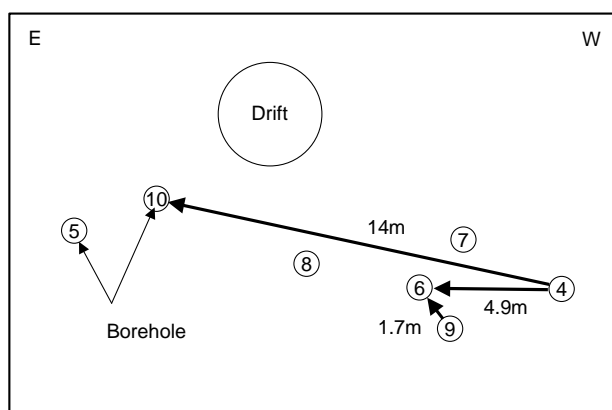
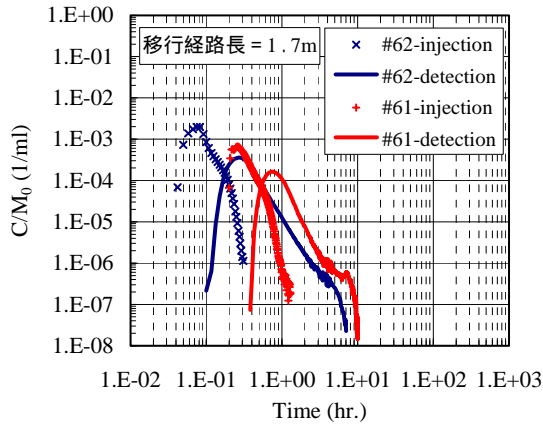


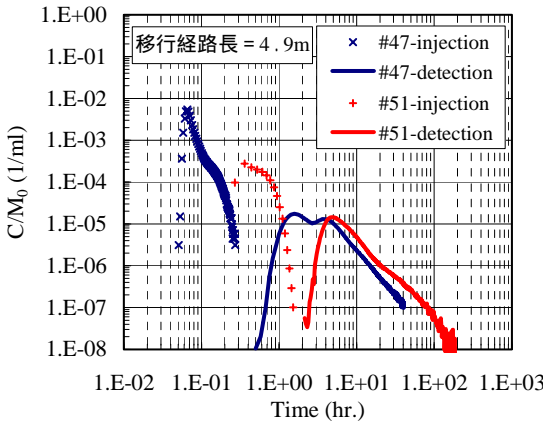
Fig. 1 Borehole layout on MI shear zone[6]

Table 1 Inversion analysis case

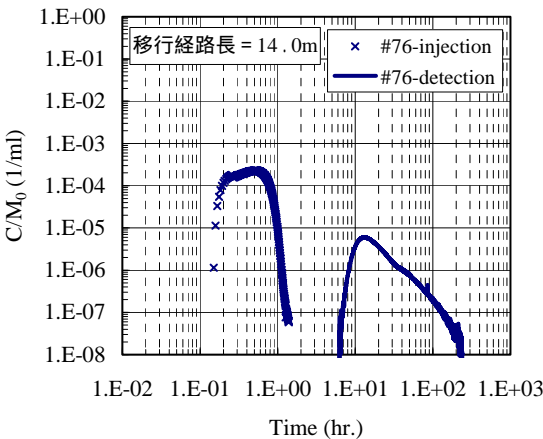
	検討項目	test #	dipole 比	Length	Borehole 配置
1	dipole比による比較 scaleによる比較 (tracer=Uranine)	#62	3.1	1.7m	
		#61	14.8	1.7m	
		#47	2.9	4.9m	
		#51	15	4.9m	
		#76	15	14.0m	
2	tracerによる比較 (tracer=Uranine, Sr85,Cs137)	#90	15	4.9m	



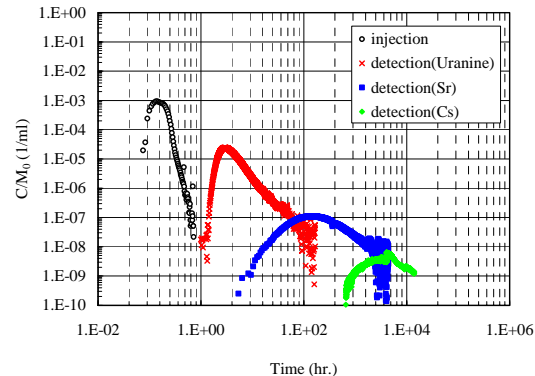
(a) dipole distance=1.7m, tracer=Uranine



(b) dipole distance=4.9m, tracer=Uranine



(c) dipole distance=14m, tracer=Uranine



(d) dipole distance=4.9m, tracer=Uranine, Sr-85, Cs-137

Fig. 2 (Continued) Tracer test results

Table 2 Predicted value of distribution coefficient[6]

	Kd (Sr) (× 10 ⁻³ m ³ / kg)	Kd (Cs) (m ³ / kg)
室内試験 (< 63 μ m)	110 ± 10	1.5 ~ 3.8
原位置における 予測値	20 ± 2	0.5 ~ 3.9

2.3 吸着性核種の分配係数

吸着性核種の分配係数については、NAGRA から Table2 に示すような予測値が報告されている[6]。NAGRA の予測は、吸着のメカニズムが主に陽イオン交換により発生することに注目して求めているもので、室内と原位置における岩の陽イオン交換能を測定し、室内試験で得られた分配係数をイオン交換能の比で割り返すことにより、原位置における分配係数を予測している。原位置における分配係数の予測値は、Sr については室内試験結果の約 20%、Cs についてはほぼ同オーダーと考えられるようである。

3 核種移行モデルと逆解析手法

3.1 核種移行モデル

第 2 次取りまとめによれば、高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価において天然バリア中の核種移行評価を行う際、わが国においては 1 次元平行平板モデルの重ね合わせを採用することが有効であることが示されている。これは、わが国の岩盤に多く見られる亀裂性岩盤中の核種移行は 1 次元平行平板モデルの重ね合わせで近似的に評価できること、亀裂だけでなく岩石基質も有意な核種移行経路となる一部の第三紀岩盤中の核種移行は 1 次元平行平板モデルの重ね合わせで保守的に評価できることを根拠としている。

天然バリア中の核種移行をモデル化する際には、より複雑なモデルを採用することも可能であり、複雑なモデルを用いて逆解析を行う方が、その同定精度も向上する可能性がある。しかしながら、モデルが複雑化しパラメータ数が増大すると、限られた原位置情報から全ての同定パラメータ値を合理的に説明するには困難が生じる場合があり、むしろ、解釈可能な同定パラメータ値を用いて単純なモデルにより得られる計算結果の方が、安全評価に用いる上では有用な場合があると考えられる。また、本検討の最終目的は、本検討で評価された不確実性が、安全評価結果に与える影響を検討することであり、今後安全評価における核種移行評価に用いられることが想定されるモデルを用いて検討を行うことは重要である。

以上のことより、本検討では、第 2 次取りまとめで採用された 1 次元平行平板を仮定した移流分散・マトリクス拡散モデルを用いて、逆解析を行うこととした。式 (1)、(2) に、支配方程式を示す。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} + q \frac{\partial C}{\partial \ell} - \frac{\partial}{\partial \ell} D_L \frac{\partial C}{\partial \ell} + R \lambda C + \frac{1}{b} D_e \frac{\partial C^m}{\partial \omega} \Big|_{\omega=0} = 0 \quad (1)$$

$$R^m \frac{\partial C^m}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \omega} D^m \frac{\partial C^m}{\partial \omega} + R^m \lambda C^m = 0 \quad (2)$$

ここに、上添え字 m は岩石基質部を表す。また、 q は割れ目内の地下水流速 [m/s]、 D_L は縦方向分散係数 [m²/s] ($= \alpha_L q + D_0$ 、 α_L は縦方向分散長 [m]、 D_0 は自由水中の拡散係数 [m²/s])、 λ は崩壊定数 [1/s]、 b は亀裂開口幅の 1/2 [m]、 D_e は実効拡散係数 [m²/s] ($= \theta^m D^m$ 、 θ^m は岩石基質部の有効間隙率 [-]、 D^m は岩石基質間隙中の拡散係数 [m²/s])、 C 、 C^m はそれぞれ割れ目および岩石基質中の核種の濃度 [mol/m³]、 ℓ は割れ目面に法線方向の距離 [m] ($0 \leq \ell \leq d$)、 d はマトリクス拡散深さ [m]、 t は時間 [s] を表す。また、 R および R^m はそれぞれ割れ目表面および岩石基質中での吸着による遅延係数で瞬時・線形・可逆な吸着を仮定して以下のように表される。

$$R = 1 + \frac{Ka}{b} \quad (3)$$

$$R^m = 1 + \frac{\rho^m Kd_n}{\theta^m} \quad (4)$$

ここに、 K は割れ目表面の分配係数 [m]、 Kd_n はマトリクス部における分配係数 [m³/kg]、 ρ^m は岩石基質の乾燥密度 [kg/m³] である。なお、本モデルでは、数値解法としてラプラス変換有限要素法を用いている[7]。

本モデルは、マトリクス拡散、マトリクス内部及び割れ目表面の核種の吸着、および核種の放射性崩壊も考慮できるものである。ただし、本検討で対象とするトレーサー試験データでは核種崩壊の影響が排除されているため、計算時も核種崩壊に関する影響は考慮していない。また、非吸着性の Uranine を対象としてマトリクス拡散を考慮した場合と考慮しない場合で逆解析した結果、Fig.3 に示すようにトレーサーの移行時間が比較的短いにもか

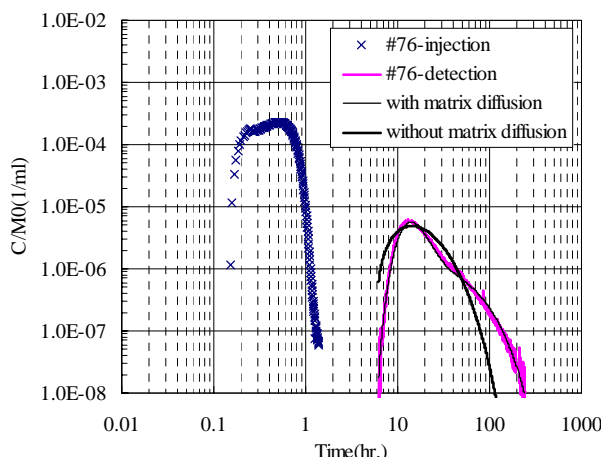


Fig. 3 Inversion results with and without matrix diffusion (#76, Uranine)

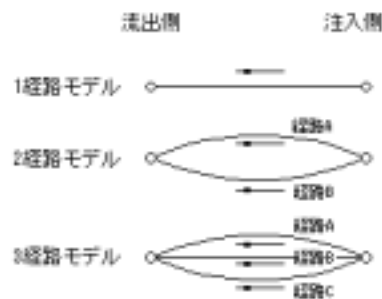


Fig.4 Concept of multiple path modelling

かわらずマトリクス拡散の影響は無視できないことがわかった。したがって、逆解析にあたっては、全てのケースでマトリクス拡散を考慮することとし、割れ目表面の吸着による遅延係数 R は 1 に固定した。

対象となる亀裂内では、チャネリングなどの影響により複数の移行経路が形成されることがあるが、こうした亀裂内の不均質性は、1次元平行平板モデルを複数本用い、重ね合わせることで表現することが出来る。本検討では、1次元平行平板モデルを複数本重ね合わせて用いた際に、同定されたパラメータ値やその不確かさがどのように評価されるかを検討するために、対象となる場合を Fig.4 に示す 1~3 本の 1次元平行平板モデルで表現し、その結果を比較した。

3.2 MI せん断帯のモデル化

前節で示した核種移行モデルは、平行平板を仮定した亀裂中の移流分散・マトリクス拡散モデルであるが、MI せん断帯は圧砕破砕帯であり、明確な開口亀裂ではなく、せん断帯とマトリクス部の境界は不鮮明である。また、せん断帯中には透水性を有すると考えられる微小な亀裂群や圧砕変形に伴う充填鉱物が存在し、その構成は複雑である。したがって、本検討では、1次元平行平板移流分散モデルを用いるにあたって以下のように仮定した。

原位置での観察によれば、試験場所周辺のせん断帯の幅は約 5cm であり、その中に移流ゾーンと拡散ゾーンが併存するため、亀裂開口幅を 1cm と仮定し、その両側に 2cm ずつのマトリクス拡散領域が存在すると仮定する。また、マトリクス部の間隙率は、せん断帯中の充填鉱物内の間隙率測定結果を参考に 0.2 とする。

3.3 地下水流場のモデル化

対象とするトレーサー試験はダイポール型の水理場で実施されており、ダイポール比により流れ場が変化する。平面内の一様透水場を仮定すれば、種々のダイポール比に対して、ダイポール場における流線網を理論的に求めることができる。Fig.5 には、孔間距離が 4.9m、ダイポール比が 15 および 3 の場合の、2次元一様透水場における流線網を示す[8]。

採用した 1次元平行平板モデルは、面内の一様流を仮定したものであり、Fig.5 に見られる流れ場をモデル化す

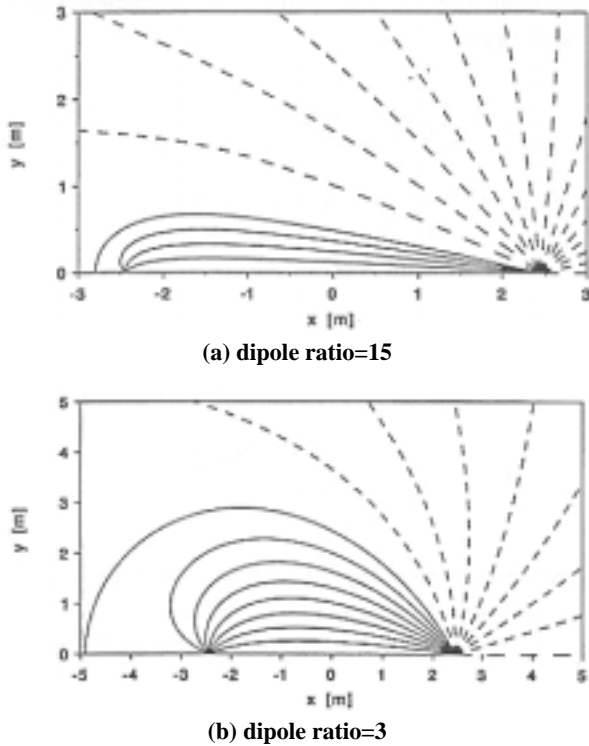


Fig. 5 Computed results of flow net in dipole field[7]

るにあたっては、ダイポール比により流線網の形状が異なることを考慮して、平行平板幅を設定することとした。すなわち、Fig.5 から、注入側ボーリング孔より流入し揚水側ボーリング孔に達する流線の最大幅を求め、平行平板幅とした。また孔間距離が 1.7m, 14m の場合には、流線の幾何学的相似を仮定して求めた。種々の孔間距離、ダイポール比に対して採用した平行平板幅を Table 3 に示す。

3.4 最尤推定法を用いた逆解析手法

本検討では、現位置トレーサー試験により得られる濃度観測値に対して、最尤推定法を適用し逆解析を行う。すなわち、観測値が母数のまわりに正規分布することを仮定して、濃度観測値に対する最尤推定法の目的関数 S を次式のように定義する[9]。

$$S = \frac{U}{\sigma^2} + N \ln|V| + N \ln \sigma^2 + N \ln(2\pi) \rightarrow \min \quad (5)$$

ここに σ^2 は濃度の分散値、 V は濃度観測値間の誤差の相関を表す対称行列、 N は濃度観測値の個数、 U は原位置トレーサー試験により得られた濃度観測値と計算により求められた濃度計算値との残差二乗和である。 U は濃度観測値 C_i と濃度計算値 C_i^* を用いて以下のように表さ

Table 3 Assumed flow width

	Dipole ratio=3	Dipole ratio=15
L=14.0m	16.6m	4.0m
L=4.9m	5.8m	1.4m
L=1.7m	2.0m	0.49m

れる。

$$U = (C_i - C_i^*)^T V^{-1} (C_i - C_i^*) \quad (6)$$

逆解析は目的関数 S を最小化する問題となり、非線形最小二乗法には修正マルカート法を用い、目的関数の最適値が得られるまでパラメータ値の修正を繰り返しながら収束計算を実施する。繰り返し計算 $k+1$ 回目におけるパラメータ値 p_{k+1} は、以下のように表され、

$$p_{k+1} = p_k + \Delta p_k \quad (7)$$

修正ベクトル Δp_k は、次式で表される。

$$\Delta p_k = [J^T C^{-1} J + \lambda I]^{-1} \cdot J^T C^{-1} (C_i - C_i^*) \quad (8)$$

ここに、 J はパラメータ値に対する濃度計算値のヤコビアン行列、 I は単位行列、 λ はマルカート法における定数を表し、ヤコビアン行列の算定には数値微分法を採用した。また、繰り返し計算の収束判定基準には、以下に示すように目的関数 U 、目的関数の変化率 $\Delta U / U$ 、収束計算回数 $niter$ の 3 種類を用いて、繰り返し計算の打ち切り回数を設定した。

$$U \leq 10^{-5} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta U}{U} \leq 10^{-5} \quad (10)$$

$$niter \leq 100 \quad (11)$$

3.5 同定パラメータ値の不確実性の算定

パラメータ同定値の信頼区間は、濃度計算値を期待値として求めた濃度観測値の分散から誤差伝播則により求めた。

一般に、パラメータ同定値の共分散行列 Σ_p は、以下のように表される。

$$\Sigma_p = \sigma^2 [J^T V^{-1} J]^{-1} \quad (12)$$

ただし、本検討では分散が未知なので、濃度観測値の分散に各繰り返し計算における標本分散 s^2 を用いて、パラメータ同定値の共分散行列 Σ_p を次式のように求めた。

$$\Sigma_p = s^2 [J^T V^{-1} J]^{-1} \quad (13)$$

$$s^2 = \frac{U}{N} \quad (14)$$

ここで、パラメータ同定値 P_0 まわりのパラメータ値 P の $100(1 - \alpha)\%$ 信頼区間は、パラメータ数 N_p 次元空間の超楕円体で表され、自由度 N_p と $N - N_p$ の F 分布により次式のように表される。

$$(p - p_0)^T \Sigma_{p_0}^{-1} (p - p_0) \leq N_p \cdot F_{N_p, N - N_p, 1 - \alpha} \quad (15)$$

本報内では、上式により定義される信頼区間を、観測値の不確実性に起因する同定パラメータ値の不確実性と定義する。

また、本研究では、均質一次元平行平板モデルの重ね合わせにより場の不均質性を表現する。均質平行平板モデルを複数個用いた場合、その数により同定パラメータ値は変化するものと予想される。本報内では、均質平行平板モデルの重ね合わせ個数を変化させた際に現れる同定パラメータの変化の幅を、モデル選択に起因する同定パラメータ値の不確実性と定義するものとする。

3.6 最適モデルの選定基準-情報量基準の算定

均質一次元平行平板モデルの重ね合わせにより核種移行を表現する場合、重ね合わせるモデルの数を増加させると目的関数 S が減少し、同定精度が向上する可能性があるが、一方同定されるパラメータの数が増加するためモデルの複雑性が増加する。こうした同定精度とパラメータ数の均衡関係の評価し、最適モデルを選択する基準として以下に示す赤池の情報量基準 AIC [10],[11]を採用した。情報量基準は目的関数の値にパラメータ数を加えた量であり、情報量基準が小さくなれば、単純なモデルで精度良い予測値が得られていることを示す。したがって、各モデルに対してパラメータ同定値 p_0 における情報量基準を算定し、情報量基準が小さいモデルを適性の高いモデルと判断した。

$$AIC(p_0) = S(p_0) + 2N_p \quad (16)$$

3.7 同定手順

逆解析は、まず 1 経路モデルにより行い、その後同様の検討を 2 経路モデルおよび 3 経路モデルを用いて行った。また、各経路モデルを用いた逆解析においては、すべてのパラメータを同時に同定するのではなく、その物理特性を考慮して以下の手順でパラメータ同定を行った。すなわち、第 1 段階として収着性のない Uranine のデータを対象として、せん断帯の収着特性以外の特性に関するパラメータを決定する目的で、その試験条件における移流特性、分散特性、マトリクス拡散特性を同定した。この際、その同定パラメータは流速、縦方向分散長、湿潤辺長とし、それら以外の拡散係数やマトリクス拡散深さなどのパラメータは別途室内試験等で測定された値を用いて固定した。なお、湿潤辺長はマトリクス拡散寄与面積を示すパラメータとして用いている。第 2 段階では、第 1 段階で得られた同定パラメータを固定し、収着性核種 Sr , Cs を対象に収着特性を示す遅延係数のみを同定した。また、同定された遅延係数からマトリクス部の分配係数を算定した。この際、分配係数の算定に必要な岩石の乾燥密度、間隙率は原位置観測および室内試験結果等を用いて固定値とした。

また、上記手順は、1 経路モデル、2 経路モデル共通に実施し、3 経路モデルについては、収着特性を除く特性を同定した。

4 逆解析結果

4.1 非収着トレーサーを用いた試験の逆解析結果

4.1.1 試験条件が逆解析結果に与える影響

Fig.6 (a)~(e)に逆解析の結果得られた濃度破過曲線と試験結果の比較を示す。また、Table 4 (a)~(c)に各パラメータの同定結果と同定したパラメータ値の 95% 信頼区間の上下限值および上下限幅の同定値に対する比を示す。95% 信頼区間は前述のように濃度観測値の分散から誤差伝播則により算出され、観測データの計算結果に対するばらつきから同定パラメータ値の信頼区間を規定するものであり、観測データの不確実性に起因する同定パラメータ値の不確実性を示すものとする。

なお、逆解析により同定された流速は 1m/hr オーダーで分散長は 0.1m オーダーであることから、分散係数 (= 流速 × 分散長 + 分子拡散係数) は $0.1m^2/hr (=10^{-5}m^2/s)$ オーダーとなり、分子拡散係数 $10^{-9}m^2/s$ オーダーよりも十分大きい。一方、逆解析に用いたモデルはこの程度の分散係数であれば理論解との比較により十分な精度を有することが確認されていることから[12]、逆解析により同定された分散長に対する数値拡散の影響はほとんどないと考えられる。

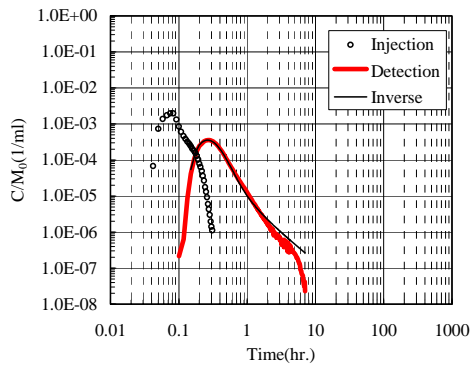
Fig.6 からは、試験条件の違いに関わらず、精度よく濃度破過曲線が再現されていることがわかる。ただし、本検討で採用した 1 経路モデルでは#47 の試験結果に表れるダブルピークを再現できていない。これは、場の不均質性に起因して主たる透水経路が 2 本存在したためと考えられる。

また、Table 4 により 95% 信頼区間上下限幅の同定値に対する比は、流速で 3% 以下、縦方向分散長/孔間距離で 4% 以下、マトリクス拡散寄与面積率で 10% 以下であり、試験条件に関わらずすべてきわめて小さい値を得ている。これは試験条件に依存せず、パラメータの同定値の信頼度が高いことを示していると考えられる。

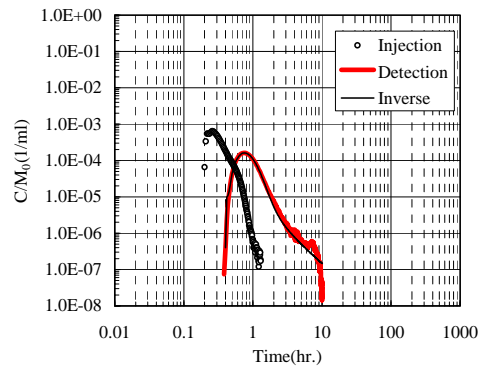
4.1.2 収着による遅延特性の評価

Fig.7(a)~(b)に収着性核種の濃度破過曲線を、Table5 に分配係数の同定結果と 95% 信頼区間の上・下限値および上下限幅の同定値に対する比を示す。Fig.7より逆解析結果は核種の収着性の強さに伴う応答時間の遅れを良く再現していることがわかる。また、Table 5 から、本検討で逆解析の結果得られた分配係数と、Table 2 に示す NAGRA による原位置における予測値は良好な一致を見ている。

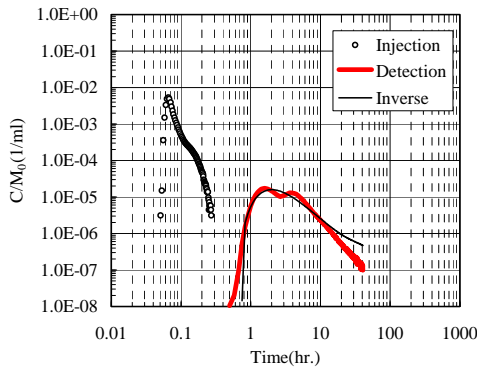
なお、分配係数の 95% 信頼区間上下限幅はそれぞれ同定値の 1% 以下であり、きわめて小さい。こうした、信頼区間がきわめて小さいという結果は、濃度破過曲線の再



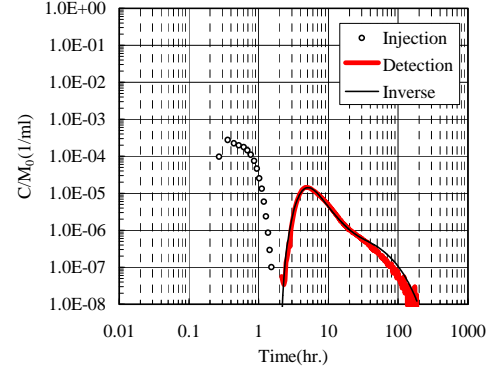
(a)#62, Uranine, dipole ratio=3.2, dipole distance=1.7m



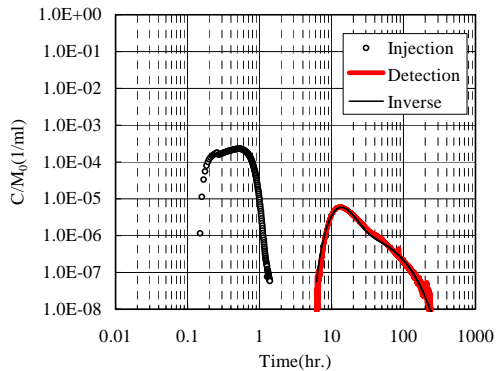
(b)#61, Uranine, dipole ratio=14.8, dipole distance=1.7m



(c)#47, Uranine, dipole ratio=2.9, dipole distance=4.9m



(d)#51, Uranine, dipole ratio=15, dipole distance=4.9m



(e)#76, Uranine, dipole ratio=15, dipole distance=14m

Fig.6 Inversion analysis results(Break-through curve)

Table 4 Optimized parameters and 95%-confidence region

(a)Velocity

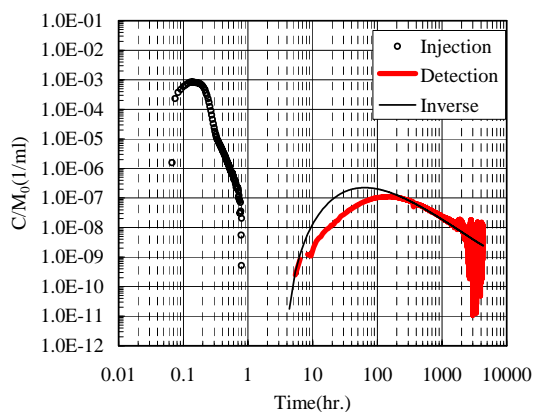
	流速 (m/hr.)			上下限幅 /同定値 (%)
	同定値	上限	下限	
#62	6.74	6.78	6.70	1.2
#61	2.89	2.90	2.88	0.4
#47	2.47	2.50	2.44	2.6
#51	1.203	1.207	1.200	0.6
#76	1.120	1.121	1.119	0.2

(b)Longitudinal Dispersivity Coefficient

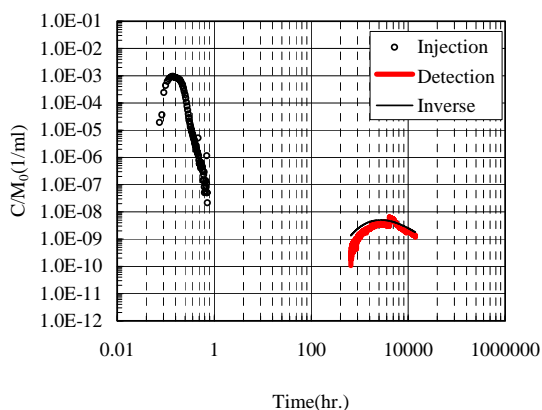
	分散長/孔間距離			上下限幅 /同定値 (%)
	同定値	上限	下限	
#62	0.124	0.127	0.122	3.5
#61	0.0974	0.0981	0.0967	1.4
#47	0.0987	0.0995	0.0978	1.7
#51	0.035	0.036	0.034	3.6
#76	0.0348	0.0350	0.0346	1.4

(c)Effective Area of Matrix Diffusion

	マトリックス拡散 寄与面積率			上下限幅 /同定値 (%)
	同定値	上限	下限	
#62	7.35	7.51	7.17	4.6
#61	2.76	2.80	2.72	2.7
#47	0.64	0.67	0.61	9.2
#51	5.52	5.58	5.47	1.9
#76	2.65	2.66	2.64	0.8



(a)#90,Sr, dipole ratio=15, dipole distance=4.9m



(b)#90,Cs, dipole ratio=15, dipole distance=4.9m

Fig.7 Inversion analysis results(Break-through curve)

Table 5 Optimized parameters and 95%-confidence region

核種	分配係数 : Kd (m ³ /kg)			上下限幅/同定値 (%)
	同定値	95%信頼区間		
		上限	下限	
Sr	0.0214	0.0215	0.0213	0.95
Cs	0.9013	0.9013	0.9013	7.4E-06

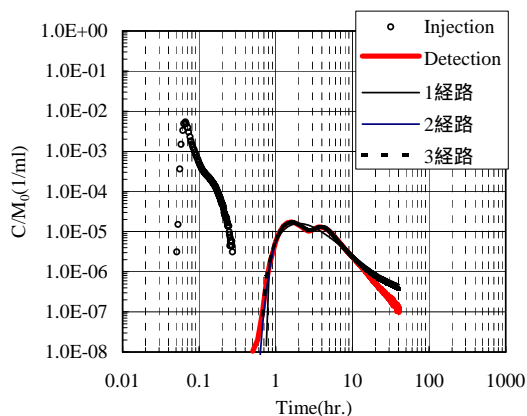
現性, 分配係数に関する他の試験結果との整合性を裏付けるものであり, 逆解析の結果得られたパラメータの精度を保証するものと考えられる.

4.2 複数経路モデルによる同定結果

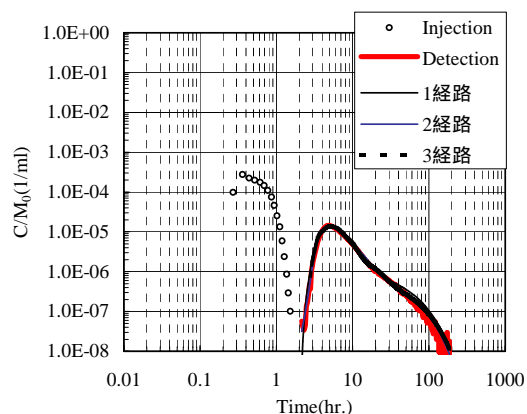
4.2.1 逆解析結果(濃度破過曲線)

Fig.8 (a)~(d)に複数経路モデルを用いた逆解析により得られた濃度破過曲線を示す. どの試験ケースについても, 経路数によらず, 良好に濃度破過曲線が再現されていることがわかる. 加えて, 濃度破過曲線にダブルピークを持つ#47 のケースについては, 1 経路モデルでは再現できなかったダブルピークを 2 経路モデルおよび 3 経路モデルでは良好に再現出来ており, 明確な精度向上が見られた.

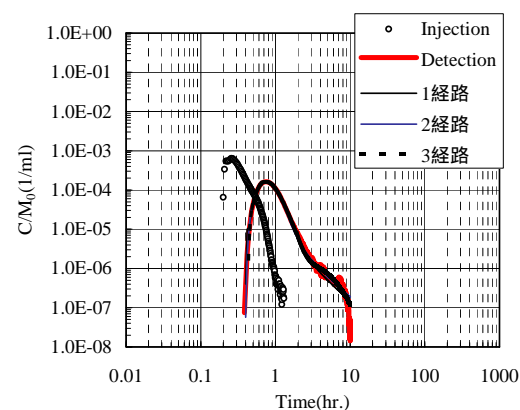
Table 6 (a)~(c)に逆解析により得られた同定パラメータとそれぞれの信頼区間を示す. 同定パラメータの信頼区間は総じて小さく, 同定値の 10%以内となる場合が多いが, 経路数を増加させた場合には, 経路によっては信頼



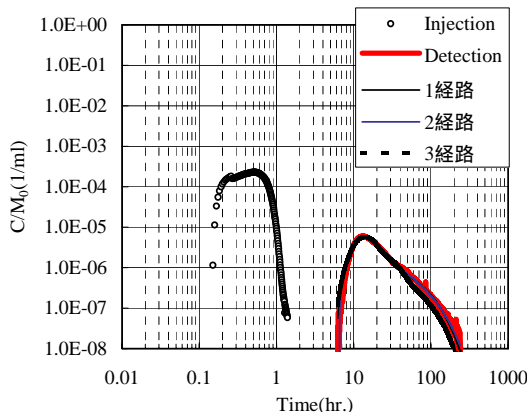
(a)#47, Uranine, dipole ratio=2.9, dipole distance=4.9m



(b)#51, Uranine, dipole ratio=15, dipole distance=4.9m



(c)#62, Uranine, dipole ratio=3.2, dipole distance=1.7m



(d)#76, Uranine, dipole ratio=15, dipole distance=14m

Fig. 8 Inversion analysis results (Multiple path modelling)

Table 6 Optimised parameters and 95%-confidence region

(a) Velocity

試験ケース	経路数	流速 (m/hr.)			上下限幅/ 同定値 (%)
		同定値	上限	下限	
#47	1経路	2.47	2.50	2.44	2.6
#47-1	2経路	4.89	4.90	4.87	0.6
#47-2		1.485	1.491	1.478	0.9
#47-1	3経路	3.80	3.81	3.79	0.6
#47-2		1.445	1.450	1.440	0.7
#47-3		0.59	0.64	0.53	18.4
#51	1経路	1.2	1.2	1.2	0.6
#51-1	2経路	1.3	1.3	1.3	0.3
#51-2		0.5	0.5	0.5	1.4
#51-1	3経路	0.6	0.6	0.6	0.4
#51-2		0.3	0.3	0.3	6.3
#51-3		0.8	0.8	0.8	0.4
#61	1経路	2.9	2.9	2.9	0.4
#61-1	2経路	3.3	3.3	3.3	0.1
#61-2		0.0	0.0	0.0	98.6
#61-1	3経路	3.6	3.6	3.6	0.0
#61-2		0.2	0.3	0.2	4.6
#61-3		1.8	1.8	1.8	0.2
#76	1経路	1.1	1.1	1.1	0.2
#76-1	2経路	1.2	1.2	1.2	0.1
#76-2		0.1	0.1	0.1	9.7
#76-1	3経路	1.4	2.5	0.4	144.1
#76-2		0.4	0.4	0.4	1.0
#76-3		0.9	0.9	0.9	0.1

(b) Longitudinal Dispersion Coefficient

試験ケース	経路数	分散長/孔間距離			上下限幅/ 同定値 (%)
		同定値	上限	下限	
#47	1経路	0.0987	0.0995	0.0978	1.7
#47-1	2経路	0.0189	0.0196	0.0181	7.6
#47-2		0.0145	0.0152	0.0138	9.3
#47-1	3経路	0.039	0.040	0.038	4.3
#47-2		0.0135	0.0140	0.0130	7.8
#47-3		0.058	0.065	0.051	23.2
#51	1経路	0.03	0.04	0.03	3.6
#51-1	2経路	0.03	0.03	0.03	2.7
#51-2		0.10	0.10	0.10	0.7
#51-1	3経路	0.00	0.01	0.00	138.1
#51-2		0.03	0.04	0.01	91.7
#51-3		0.08	0.08	0.08	3.0
#61	1経路	0.10	0.10	0.10	1.4
#61-1	2経路	0.09	0.09	0.08	6.4
#61-2		0.08	0.08	0.08	2.9
#61-1	3経路	0.08	0.08	0.08	3.1
#61-2		0.14	0.15	0.14	6.6
#61-3		0.13	0.13	0.12	4.1
#76	1経路	0.03	0.04	0.03	1.4
#76-1	2経路	0.05	0.05	0.05	1.2
#76-2		0.50	0.50	0.50	0.0
#76-1	3経路	0.65	0.78	0.52	39.9
#76-2		0.02	0.02	0.02	8.7
#76-3		0.06	0.06	0.06	0.6

(c) Effective Area of Matrix Diffusion

試験ケース	経路数	マトリクス拡散 寄与面積率			上下限幅/ 同定値 (%)
		同定値	上限	下限	
#47	1経路	0.64	0.67	0.61	9.2
#47-1	2経路	0.999	1.004	0.994	1.0
#47-2		0.994	1.003	0.985	1.7
#47-1	3経路	0.995	1.001	0.990	1.1
#47-2		0.994	1.002	0.986	1.6
#47-3		5.6	6.2	5.0	21.9
#51	1経路	5.5	5.6	5.5	1.9
#51-1	2経路	1.0	1.0	1.0	0.2
#51-2		1.0	1.0	1.0	0.4
#51-1	3経路	1.0	1.0	1.0	0.3
#51-2		4.1	4.1	4.0	1.8
#51-3		3.0	3.0	3.0	0.7
#61	1経路	2.8	2.8	2.7	2.7
#61-1	2経路	1.0	1.0	1.0	2.0
#61-2		1.4	1.5	1.3	14.3
#61-1	3経路	0.1	0.1	0.1	7.4
#61-2		0.0	0.1	0.0	57.8
#61-3		0.3	0.3	0.3	11.3
#76	1経路	2.7	2.7	2.6	0.8
#76-1	2経路	0.9	0.9	0.9	0.1
#76-2		1.9	1.9	1.9	0.1
#76-1	3経路	0.0	0.1	0.0	189.5
#76-2		2.9	2.9	2.9	0.2
#76-3		3.6	3.6	3.6	0.0

区間が大きくなる場合が見られる。これは、経路数を増やしても、必ずしも同定精度の向上に寄与しない場合があることを示している。

4.2.2 最適モデル評価

本検討のように場の不均質性を複数経路モデルで表現する場合、場を詳細に表現するためには、経路数を増やすことが必要であるが、経路数を増やしても同定精度に明確な改善が無い場合、いたずらにモデルを複雑にすることは必ずしも得策でないと考えられる。ここでは、モデルの精度と、モデルに必要なパラメータ数の最適な組み合わせを選択するために情報量基準の適用を試みる。Fig. 9 に#47 の試験ケースについて逆解析を施した結果得られた赤池の情報量基準を示す。これより 1 経路モデルに比較して 2 経路モデルでは情報量基準が大きく減少しモデルの適性が向上しているが、一方、3 経路モデルの情報量基準は 2 経路モデルのそれと大差なく、モデルの適性に大きな差はないことが分かる。すなわち 3 経路としてパラメータを増やしたにも関わらず同定精度はあまり改善されず、モデルを複雑にするメリットが小さいことを示している。このことは、3 本目の経路の存在が同定精度の向上に寄与していないことを示唆するものと考えられ、前述の経路によってはパラメータ同定値の信頼性が低下する事実と整合している。

4.2.3 データの不確実性とモデルの不確実性

本報では、前項までに検討を加えてきたパラメータの信頼区間を、観測値の不確実性に起因する同定パラメータの不確実性と定義している。また、経路数を変更することにより生じる同定パラメータ値の変化を、モデル選択に起因する同定パラメータの不確実性と定義している。

Table 6 に示される結果では、逆解析により同定されたパラメータ値の信頼区間幅は非常に小さいが、経路数を変更した場合の同定パラメータ値の変化量は、上記信頼区間幅に比べてきわめて大きい。すなわち、観測値の不確実性に起因する同定パラメータ値の不確実性はモデル選択に起因するそれに比べて、きわめて小さいといえる。

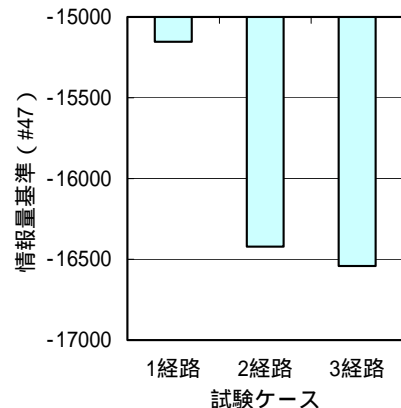


Fig.9 Akaike's information criteria (#47)

こうした結果は、他の原位置試験結果について行った検討結果と整合するものである[3, 4]。

5 まとめと今後の課題

本検討の結果、断層破砕帯を対象に実施された原位置トレーサー試験結果に対して、1次元平行平板モデルを用いて、濃度破過曲線を精度良く再現する移流、分散、マトリクス拡散および遅延に関するパラメータ値の逆解析による同定が可能であることが示された。

また、不確実性を定量的に評価するために求めた同定パラメータ値の95%信頼区間はきわめて小さく、本報内で定義した濃度観測値の不確実性に起因した同定パラメータの不確実性は小さいことが示された。

さらに、複数経路モデルの中から最適経路数を求める指標として、情報量基準が有用であることが示された。ただし、経路数を増やした場合に、情報量基準が若干小さくなるものの、増やした経路のパラメータ値の不確実性が大きくなる場合があるため、最適経路数の同定にあたっては情報量基準とパラメータ値の不確実性の大きさから総合的に判断する必要があると考えられる。

最後に、経路数の選択、すなわち場の不均質性モデルの設定に起因する同定パラメータ値の不確実性は、観測データの不確実性に起因するそれに比べ大きいことを定量的に示した。

本検討では、パラメータ値を同定する順序は全て統一して実施したが、同定する順序を変更した場合、その同定パラメータ値も変化する可能性があり、こうした同定順序にともなって表れるパラメータの変化も、同定パラメータ値の不確実性と言える。また、異なる移行プロセスモデルを用いれば、異なるパラメータが必要となり、そのパラメータ値にも不確実性がともなう。今後はこれらの不確実性も含めて安全評価結果にどのような影響を及ぼすのかを考慮しながら、原位置トレーサー試験の具体的な方法についても検討を加え、原位置トレーサー試験に求められる試験項目や試験データに求められる精度について更なる検討を行っていく予定である。

参考文献

[1] 核燃料サイクル機構: 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 」, JNC TN1400 99-023(1999).

[2] Winberg, A. et al. : Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, SKB TR00-07, Swedish Nuclear Fuel and Waster Management Company (2000) .

[3] 畑明仁, 細野賢一, 井尻裕二, 澤田淳: 原位置トレーサー試験の逆解析による不確実性評価(その1),(その2), 土木学会第57回年次学術講演会概要集, CS10-17, CS10-18, 札幌, 平成14年9月25~27日 pp.415-

418 (2002) .

[4] 澤田淳, 井尻裕二, 畑明仁, 細野賢一, 吉野尚人: 原位置トレーサー試験より得られる核種移行パラメータ値の不確実性評価, サイクル機構技報 No.18 2003.3, pp.39-49(2003).

[5] Frick, U. et al.: The Radionuclide Migration Experiment – Overview of Investigations 1985-1990, NAGRA NTB 91-04, Grimsel Test Site (1992) .

[6] Smith, P.A. et al.: The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock, I:Radionuclide Migration Experiment –Overview 1990-1996, NAGRA NTB 00-09, Grimsel Test Site (2001) .

[7] 井尻裕二, 澤田淳, 坂本和彦, Willian S. Dershowitz, 内田雅大, 石黒勝彦, 梅木博之: ラプラス変換有限要素法を用いた割れ目ネットワーク中の核種移行モデルの開発, 土木学会論文集, No.694 / -57, pp.229-243 (2001) .

[8] Heer, W., Hadermann, J.: Grimsel Test Site Modelling Radionuclide Migration Field Experiments, PSI-Bericht Nr.94-13, Paul Scherrer Institut (1994) .

[9] Carrera,J.,Neuman,S.P.: Estimation of aquifer parameters under transient and steady state condition:1 Maximum likelihood method incorporating prior information, *Water Resource Research*, Vol.22, No.2, pp.199-210 (1986) .

[10]赤池: 情報量基準 AIC とは何か その意味と将来への展望, 数理科学, No.153, pp.5-11 (1976) .

[11]大西有三, 井尻裕二: 不均質地盤における浸透流の逆問題解析手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第376号 / -6, pp.121-130 (1986) .

[12]澤田淳, 井尻裕二, 坂本和彦, 巨真吾: 亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN8400 99-093 (1999) .