



原位置トレーサ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

澤田 淳 井尻 裕二* 畑 明仁* 細野 賢一*1 吉野 尚人

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

*大成建設株式会社

*1株式会社地層科学研究所

Evaluation of Parameter Uncertainties Obtained from In-Situ Tracer Experiments

Atsushi SAWADA Yuji IJIRI* Akihito HATA* Kenichi HOSONO*1 Naoto YOSHINO

Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

*Taisei Corporation

*1Geoscience Research Laboratory

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価においては、核種移行計算に用いる入力パラメータ値の不確実性が計算結果に及ぼす影響を定量的に評価することが重要な課題の1つとなっている。本研究では、原位置で実施されるトレーサ試験データから核種移行パラメータの同定並びに、同定値の不確実性の定量的評価を目的に、最尤推定法を用いた逆解析プログラムを開発した。そして、スウェーデンÅspö島の地下研究所内の単一割れ目内で実施された非吸着性及び吸着性トレーサを用いた原位置トレーサ試験結果から得られる核種移行パラメータの不確実性を評価した。今後、このような手法で定量化された不確実性が安全評価に与える影響を組み合わせることで、本手法が安全評価に用いられるパラメータ値の妥当性や保守性を確認するために必要な試験項目や精度等を明確にすると考えられる。

Radionuclide transport parameter uncertainty is an important consideration in the safety assessment of high level radioactive waste disposal. This paper describes the development of a method for the quantitative estimation of transport parameter uncertainties from in situ tracer experiments. The method utilizes a probabilistic inversion based on the maximum likelihood method. Transport parameters and their uncertainties are derived from a series of conservative and reactive tracer tests conducted in a single fracture at the Åspö Hard Rock Laboratory in Sweden. These transport parameters and uncertainties are useful for evaluating the influence of parameter uncertainty on safety assessment.

キーワード

高レベル放射性廃棄物，地層処分，安全評価，不確実性，核種移行，原位置試験，トレーサ試験，逆解析手法，最尤推定法，情報量基準，

High Level Radioactive Waste, Geological Disposal, Safety Assessment, Uncertainty, Radionuclide Transport, In Situ Test, Tracer Test, Inversion Method, Maximum Likelihood Method, Information Criteria



澤田 淳

システム解析グループ所属
副主任研究員
天然バリアの性能評価研究
に従事



井尻 裕二

エンジニアリング本部 計
画グループ所属
課長
天然バリアの性能評価研究
に従事
工学博士



畑 明仁

エンジニアリング本部 計
画グループ所属
課長代理
天然バリアの性能評価研究
に従事



細野 賢一

解析グループ所属
地下水解析，熱・水・応力
連成解析に従事



吉野 尚人

システム解析グループ所属
地層処分における水理・物
質移動研究に従事

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価の不確実性はシナリオ、モデル、データに依存し、それらが安全評価結果に与える影響を検討することが課題となっている¹⁾。本研究ではそれらの不確実性のうちデータの不確実性に着目し、原位置で実施される核種トレーサ試験データから核種移行パラメータ値を同定するとともに、同定値の不確実性を定量的に評価する手法について検討した。核種トレーサ試験を評価するモデルとしては、単純かつ少ないパラメータ数から検討することとし、亀裂性岩盤を対象とした均質一次元平行平板モデルを採用した。このモデルは、亀裂中の移流、分散、岩石基質部中へのマトリクス拡散と放射性核種の崩壊を考慮したモデルで「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」¹⁾(以下、第2次取りまとめ)における安全評価でも用いられている。

トレーサ試験が実施された場の不均質性を考慮する場合には、第2次取りまとめレファレンスケース¹⁾と同様に複数の均質一次元平行平板モデルを重ね合わせることで、移行経路の不均質性を表現することとした。このように安全評価に用いられるモデルで原位置試験データの検討を行うことで、原位置試験の不確実性が安全評価に与える影響を直接的に検討することが可能となるとともに、その検討結果から安全評価に用いられるデータの不確実性を考慮した原位置試験手法の構築に資するものと期待される。

原位置で実施される核種トレーサ試験データから核種移行パラメータ値を同定、並びに同定値の不確実性を定量的に評価する手法として、最尤法を用いた逆解析²⁾³⁾プログラム並びに同定値の信頼区間を評価するプログラムを作成した。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が、その際に重ね合わせる数の最適値選択基準として赤池の情報量基準をはじめとする4つの基準を採用した²⁾³⁾。

作成した核種移行逆解析プログラムを用いて、スウェーデンÄspö島の地下研究所ハードロックラボラトリー(以下、HRL)内の単一割れ目を対象に実施された非収着性トレーサ及び収着性トレーサを用いた原位置トレーサ試験⁴⁾から得られる核種移行パラメータ値の不確実性について検討を行った。

2. 核種移行逆解析手法

2.1 核種移行支配方程式

割れ目中の核種移行には、岩石基質中へのマトリクス拡散と放射性核種の崩壊を考慮した均質な一次元平行平板モデルを採用する。割れ目及び岩石基質中の非定常核種移行支配方程式は、それぞれ以下のように表される。

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

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

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実流速 [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 は開口幅の1/2 [m]、 D_e は実効拡散係数 [m²/s] ($= {}^m D^m$)、 m は岩石基質部の有効間隙率 []、 D^m は岩石基質部中の拡散係数 [m²/s]、 C 、 C^m はそれぞれ割れ目及び岩石基質中の核種の濃度 [mol/m³]、 ω は割れ目面に法線方向の距離 [m] ($0 \leq \omega \leq b$)、 d はマトリクス拡散深さ [m]、 t は時間 [s] を表す。また、 R 及び R^m はそれぞれ割れ目表面及び岩石基質中での収着による遅延係数で瞬時・線形・可逆な収着を仮定して以下のように表される。

$$R = 1 + \frac{K_a}{b} \dots\dots\dots (3)$$

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

ここに、 K_a は割れ目表面への分配係数 [m]、 ρ^m は岩石基質部の乾燥密度 [kg/m³]、 K_d は岩石鉱物への分配係数 [m³/kg] を表す。ただし、本研究では、岩石基質内の収着を考慮しているため、割れ目表面への収着は重ねて考慮しないこととし $R = 1$ とした。

2.2 最尤推定法

原位置トレーサ試験により得られた濃度観測値誤差の共分散行列 C は以下のように表される。

$$C = \sigma^2 \cdot V \dots\dots\dots (5)$$

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対値を表す対角行列を表し、観測値間有意な差がない場合は単位行列となる。

したがって、濃度観測値に対する最尤推定法の

目的関数 S は、次式のように表される。

$$S = \frac{J}{\sigma^2} + \text{Mn}|V| + \text{Mn}\sigma^2 + \text{Mn}(2\pi) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 N は濃度観測時間数、 J は原位置トレーサ試験により得られた濃度破過曲線の観測値 C_i 、及び一次元平行平板モデルにより得られた計算値 C_i^* の残差二乗和で次式で表される。

$$J = \sum_{i=1}^N \{(C_i - C_i^*)^2 V^{-1}(C_i - C_i^*)\} \dots\dots\dots (7)$$

逆解析は、式(6)の目的関数 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返し計算しながら収束計算を実施する(図1参照)。繰返し計算 $k + 1$ 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、

$$p_{k+1} = p_k + \Delta p_k \dots\dots\dots (8)$$

修正ベクトル Δp_k は、次式で表される。

$$\Delta p_k = [J^T C^{-1} J + \lambda I]^{-1} \cdot J^T C^{-1} \{C_i - C_i^*\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 J はヤコビアン行列、 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、繰返し計算の収束判定基準には、以下に示すように繰返し計算回数 $niter$ [回] (7式の J 、繰返し計算における J の変化率を用いた。

$$niter \leq 100 \dots\dots\dots (10)$$

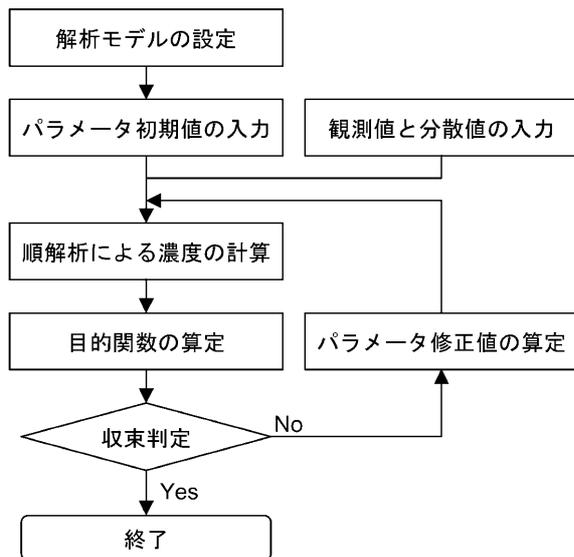


図1 最尤推定法による解析フロー

$$J \leq 10^{-5} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{|\Delta J|}{J} \leq 10^{-5} \dots\dots\dots (12)$$

2.3 パラメータ同定値の信頼区間の算定

測定機器の精度や経験などに基づいて事前に濃度観測値の分散が既知の場合は、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。

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

分散が未知の場合には、濃度観測値の分散に各繰返し計算における分散値 s^2 を用いてパラメータ同定値の共分散行列 Σ_p は次式のように表される。

$$\Sigma_p = s^2 [J^T V^{-1} J]^{-1} \dots\dots\dots (14)$$

$$s^2 = \frac{J}{N} \dots\dots\dots (15)$$

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 $N_c - N_p$ の F 分布の $100(1 - \alpha)\%$ 百分比点を用いて次式のように表される。

$$(p - p_0)^T \Sigma_p^{-1} (p - p_0) \leq N_p \cdot F_{N_p, N_c - N_p, 1 - \alpha} \dots\dots\dots (16)$$

したがって、原位置トレーサ試験の逆解析により得られたパラメータ同定値の不確実性は、パラメータ値の共分散行列から算定した信頼区間により不確実性を評価することができる。

2.4 最適モデルの選定基準

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。重ね合わせるモデルの数を増加させると目的関数 S が減少する傾向を示すが、この場合同定されるパラメータの数も増加しそれぞれの同定値の不確実性が大きくなる。したがって、複数のモデルの中から最適なモデルを選定するにあたっては、赤池の情報量基準 AIC 及び BIC 、自己回帰移動平均モデル型基準 (以下、ARMA 基準)、修正 Kashyap 基準 d_{N_p} を採用した³⁾。すなわち、各モデルに対してパラメータ同定値 p_0 における基準値を算定し、基準値が最も小さいモデルを最適なモデルと判断した。

$$AIC(p_0) = S(p_0) + 2N_p \dots\dots\dots (17)$$

$$BIC(p_0) = S(p_0) + N_p \cdot \ln N \dots\dots\dots (18)$$

$$\phi(p_0) = S(p_0) + 2N_p \cdot \ln(\ln N) \dots\dots\dots (19)$$

$$d_{N_p} = S(p_0) + N_p \cdot \ln\left(\frac{N}{2\pi}\right) + \ln|I_{N_p}| \dots\dots\dots (20)$$

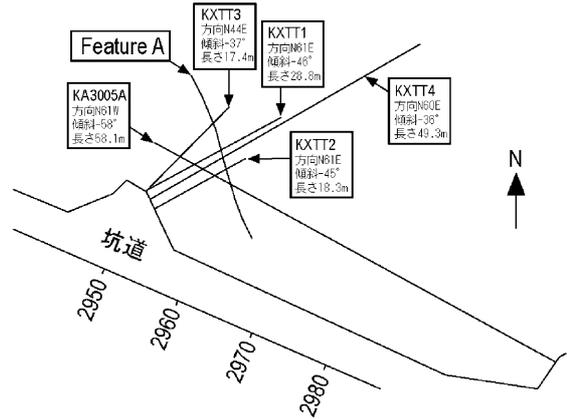
ここに、 I_{N_p} はフィッシャー情報行列で、次式のよ
うに表わされる。

$$I_{N_p} = \frac{1}{\sigma^2} J^T V^{-1} J \dots\dots\dots (21)$$

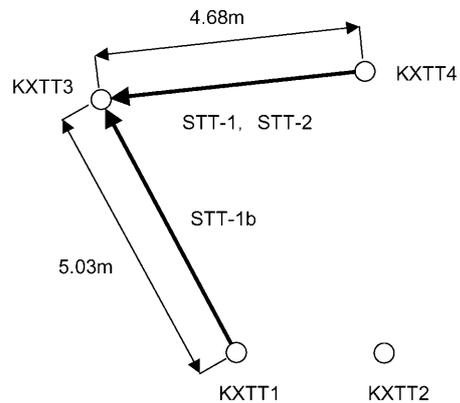
3. スウェーデンÄspö島原位置トレーサ試験

スウェーデンÄspö島のHRLでは、割れ目系結晶
質岩中の放射性核種の遅延メカニズムの把握を目的
としたTRUEプロジェクト(The Tracer Retention
Understanding Experiment)の一環として、
地下400mの坑道付近のFeature Aと呼ばれる割れ
目(図2参照)を対象とした原位置トレーサ試験
が実施されている⁴⁾。Feature Aは、マイロナイト
中に発達する急傾斜の割れ目で、割れ目周辺には
閃緑岩の変質部が存在し、変質部を含む厚さは
0.05~0.09mと測定されている。ボーリング削孔
時に掘削水によって洗い流された可能性は否定で
きないものの、ボーリングコアにおいて割れ目内
に断層粘土は確認されていない。透水試験結果に
よると、Feature Aの透水量係数は $8 \times 10^{-9} \sim 4 \times$
 $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 範囲に分布する。

Feature Aには、図2に示すKXTT1からKXTT4
を含む計5本のボーリング孔が削孔され、原位置
トレーサ試験は表1に示すように孔間距離が約
5mのKXTT3とKXTT4間、KXTT3とKXTT1間で
STT1、STT2、STT1bの3つの試験が実施され
ている。トレーサ試験には、複数の非吸着性トレー
サ(Uranine、HTO)及び吸着性トレーサ(Na
22、Sr 85、Ba 133、Rb 86、Cs 134、Cs 137)
が用いられ、注入孔において水圧を乱さずにト
レーサを投入し、揚水孔で回収する放射流収束試
験(radially convergent)法で実施されている。表
2に示すトレーサの回収率によると、揚水量の大
きい(400cc/min)STT1及びSTT1bでは、非吸
着性トレーサHTOや吸着性の小さいトレーサNa
及びSrの回収率が比較的高いのに対し、揚水量の
小さい(200cc/min)STT2では、トレーサの回
収率が若干低いことがわかる。したがって、STT
2で測定された濃度破過曲線からパラメータ値を
同定した場合には、不確実性が大きくなる可能性
がある。



(a) 各ボーリング孔とFeature Aの配置



(b) Feature A面内における各ボーリング孔の位置

図2 ボーリング孔とFeature A

表1 原位置トレーサ試験仕様

試験名	STT 1	STT 2	STT 1b
注入孔	KXTT4	KXTT4	KXTT1
揚水孔	KXTT3	KXTT3	KXTT3
揚水量(cc/min)	400	200	400
孔間距離(m)	4.68	4.68	5.03
トレーサ	Uranine		
	HTO		
	Na 22		
	Sr 85		-
	Ba 133		
	Rb 86		
Cs 134	-		-
Cs 137		-	

表2 トレーサ回収率(単位: %)

トレーサ	STT 1	STT 2	STT 1b
HTO	96	83	94
Na	97	83	96
Sr	98	79	81
Ba	87	66	-
Rb	64	49	93
Cs	33	11	-

注入したトレーサ全量で正規化した濃度破過曲線を図3に示す。STT 1とSTT 2は、同じボーリング孔間で実施されているにもかかわらず、揚水量が異なるため濃度破過曲線の形状も異なり、揚水量の小さいSTT 2では顕著なダブルピークが見られている。

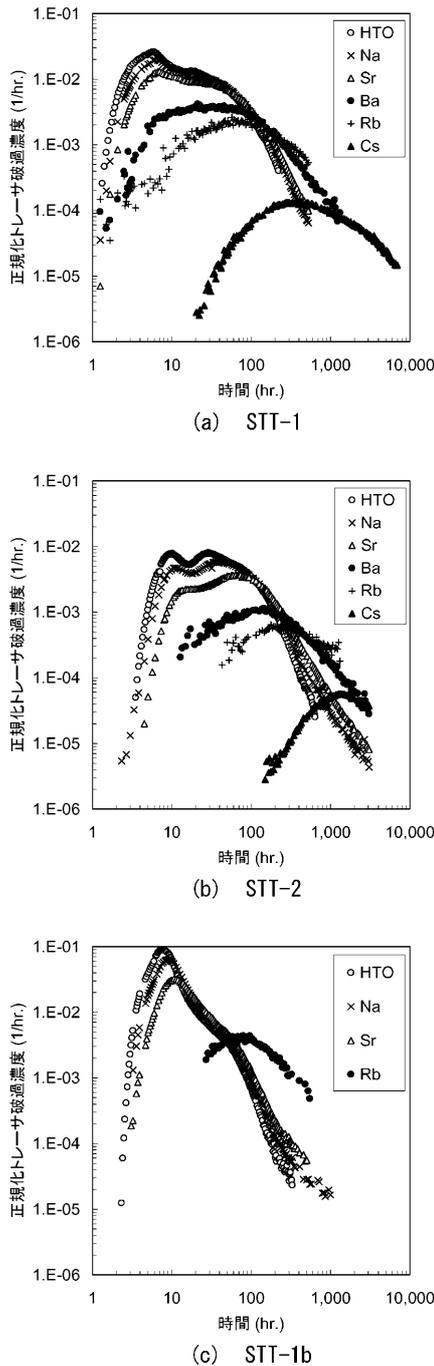


図3 正規化したトレーサ濃度破過曲線

4. 逆解析の概要

4.1 解析ケースの設定

一般に、割れ目中の流路は複雑なチャネリング形態を示すことが知られており⁵⁾、トレーサは注入孔と揚水孔間で一様に流れているのではなく、いくつかの経路を選択的に流れていると考えられる。実際、STT 2の濃度破過曲線にはダブルピークが見られることから、注入孔と揚水孔の間には複数の経路が存在する可能性が高い。本研究では、STT 2の試験を対象に、図4に示すように注入孔から揚水孔までを経路長が等しい1本の経路でモデル化した場合、2本の経路でモデル化した場合、3本の経路でモデル化した場合についても逆解析を実施した。

4.2 パラメータ同定手順

核種移行問題においては、取り扱うパラメータ数が多く、逆解析で同定するパラメータ数を多くすると解が不定になったり計算効率が悪くなるため、以下に述べるように逆解析により同定するパラメータを絞り込むこととした。

一般に、トレーサ濃度破過曲線のピーク位置は、移流と分散に支配され、濃度破過曲線のテール部分の形状はマトリクス拡散及び岩石基質内での収着による遅延効果に支配される。移流に係わるパラメータとしては、移行経路長と割れ目中的実流速 q があり、本論では移行経路長を孔間距離に固定し、 q を同定することとする。分散に関しては、1次元平行平板モデルを用いることから、縦方向の分散長 α_L のみ同定することとし、横方向の分散は考慮しないこととする。

マトリクス拡散及び岩石基質内での収着に係わるパラメータとしては、割れ目開口幅 $2b$ 、マトリ

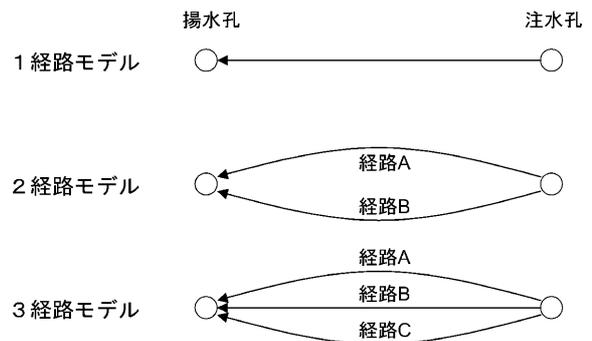


図4 移行経路モデル

クス拡散深さ d , 実効拡散係数 D_e , 有効間隙率 m , 乾燥密度 ρ_d 及び分配係数 Kd がある。これらのパラメータのうち D_e , m 及び ρ_d に関しては、室内試験に基づいて設定された推奨値⁴⁾を固定値として用いた(表3参照)。また、マトリクス拡散深さ d に関しては、岩石基質部の有効間隙率が1%以下と非常に小さいことと、試験時間が数時間から最大でも50日間程度と比較的短いことから、トレーサは割れ目表面から深くまで拡散しないと考えられる。したがって、マトリクス拡散は変質部に限られると仮定し、変質部を含む厚さが0.05~0.09mと測定されていることから d は一律0.05mに固定した。

逆解析においては、移流に係わる実流速 q , 分散に係わる縦方向分散長 α_L , マトリクス拡散に係わる割れ目開口幅 $2b$ 及び遅延に係わる分配係数 Kd を同定パラメータとした。また、複数の経路によりモデル化する場合には、各経路へのトレーサ流入量は地下水流入量に比例することから、各経路へのトレーサ流入量を規定するために、全流量に対する各経路を流れる地下水の流量比率も同時に同定した。

逆解析のフローを図5に示す。逆解析にあたっては、まず、非吸着性トレーサHTOの逆解析により実流速 q , 分散長 α_L 及び割れ目開口幅 $2b$ の最適値と分散値を同定する。次に、非吸着性トレーサの逆解析で得られたパラメータ同定値を固定して、吸着性トレーサの逆解析により各吸着性トレーサの分配係数 Kd の最適値と分散値を同定する。なお、逆解析にあたっては(5)式中の濃度観測値の分散²⁾は未知とした。

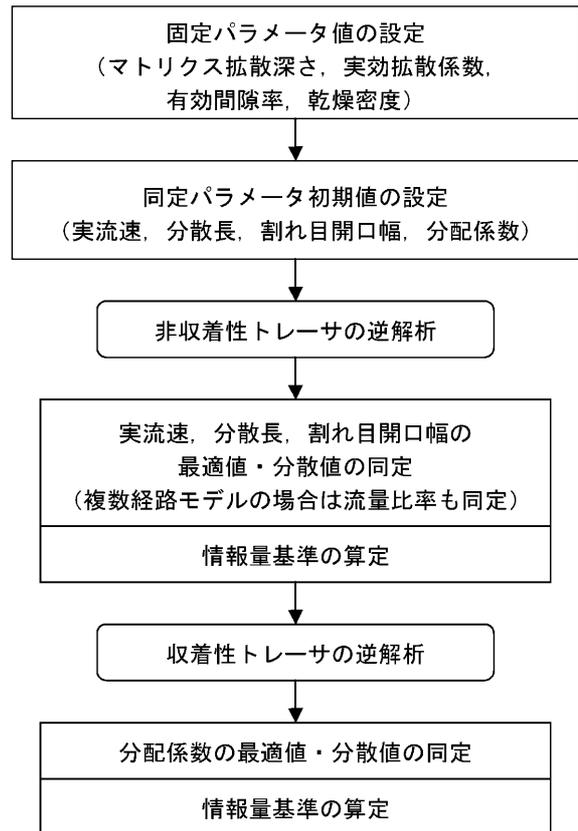


図5 原位置トレーサ試験逆解析フロー

5. 逆解析結果

5.1 1経路モデルによる解析結果

(1) 非吸着性トレーサ

STT 2の非吸着性トレーサ試験データ(HTOトレーサ)を逆解析した結果を図6に、逆解析により同定されたパラメータ値を表4に示す。ここでは均質一次元モデルの1経路でモデル化している

表3 パラメータ固定値

有効間隙率 [-]	0.004	
乾燥密度 [kg/m ³]	2.689	
マトリクス拡散深さ [m]	0.05	
拡散係数 [× 10 ⁻⁶ m ² /h]	HTO	8.4
	Na 22	4.8
	Sr 85	2.8
	Ba 133	3.0
	Rb 86	7.3
	Cs 134,137	7.3

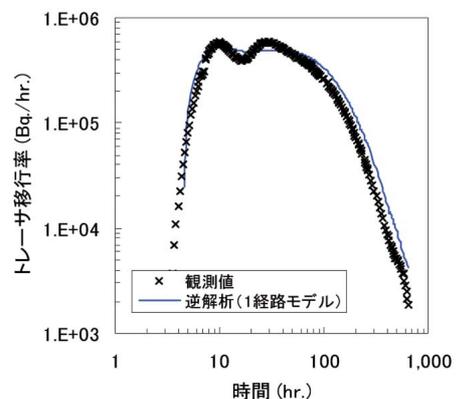


図6 非吸着性トレーサHTOの逆解析結果 (STT 2, 1経路モデル)

ため、濃度破過曲線観測値で得られているダブルピークを明確に表現できていない一方で、幅広いピークを持つ破過曲線を表現するために分散長の同定値が移行距離の約1.2倍という比較的大きな値となっている。得られた実流速及び分散長同定値の95%信頼区間楕円を(6)式の目的関数の等高線とともに図7に示す。図中の折れ線は、逆解析の収束繰返し計算における同定値の変遷を示す。同図から実流速、分散長の同定値の95%信頼区間は、それぞれ0.117~0.125m/hr(区間幅0.008m/hr)、5.71~6.69m(区間幅0.98m)に分布していることがわかる。同様に、割れ目開口幅の同定値の95%信頼区間は0.33~0.35mm(区間幅0.02mm)と求められた。

(2) 吸着性トレーサ

吸着性トレーサ試験データへの逆解析結果を図8に、同定した分配係数を表5に示す。このとき、実流速、分散長及び割れ目開口幅は非吸着性トレーサ試験の逆解析により同定された値を固定値として用いた。逆解析により同定された分配係数は、Srの結果を除いて室内試験により得られた推奨値よりも1桁大きくなる傾向が認められる。

表4 非吸着性トレーサ(HTO)逆解析結果
(STT 2, 1経路モデル)

パラメータ	同定値
実流速 [m/hr]	0.12
分散長 [m]	6.20
開口幅 [$\times 10^{-3}$ m]	0.34

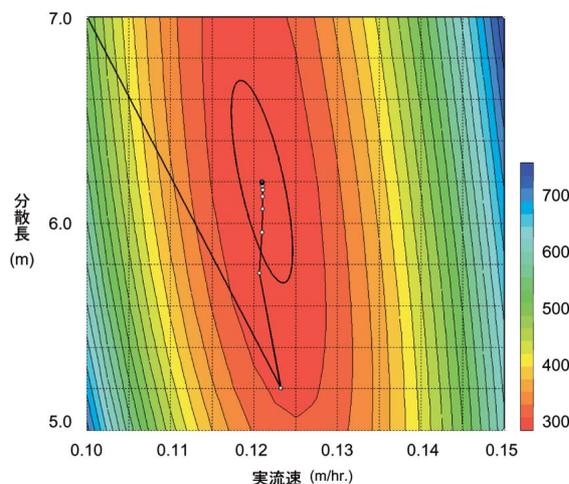


図7 実流速と分散長の95%信頼区間楕円
(STT 2, 1経路モデル)

5.2 2経路モデルによる解析結果

(1) 非吸着性トレーサ

2経路モデル(図4参照)を用いて非吸着性トレーサ試験データを逆解析した結果を図9に、同定されたパラメータ値を表6に示す。

各試験ともに経路Aの実流速は、表4に示す1経路モデルにより得られた同定値に近く、経路Bの実流速は経路Aよりも大きくなっている。また、2経路モデルにおいては、実流速の異なる2つの経路により機械的分散の効果が考慮されるため、各経路の分散長は1経路モデルよりも小さくなる傾向が認められる。

経路Aの実流速及び分散長の同定値の95%信頼区間楕円を図10に示す。図中の折れ線は、逆解析の収束繰返し計算における同定値の変遷を示す。同図から実流速、分散長の同定値の95%信頼区間は、それぞれ0.206~0.211m/hr(区間幅0.005m/hr)、0.12~0.15m(区間幅0.03m)に分布していることがわかる。同様に、割れ目開口幅の同定値の95%信頼区間は0.13~0.14mm(区間幅0.01mm)に分布しており、図7に示した1経路モデルで得られた信頼区間よりも不確実性が小さくなっていることがわかる。

(2) 吸着性トレーサ

1経路モデルの場合と同様、非吸着性トレーサ試験から求められた実流速、分散長及び割れ目開口幅を用いて吸着性トレーサ試験データへの逆解析結果を図11に、同定された分配係数を表7に示す。

吸着性の小さいNaとSrに関しては、2経路モデルの方が1経路モデルよりもダブルピークなどの観測値へのフィッティング精度が向上する傾向が認められた。一方、吸着性の高いBa、Rb及びCsに関しては、観測値へのフィッティング精度が悪くなっている。

5.3 3経路モデルによる解析結果

3経路モデルを用いた逆解析結果を図12に、同定されたパラメータ値を表8に示す。

3経路のうち経路AとBの実流速同定値は2経路モデルの場合とほぼ同じで、分散長と開口幅は2経路モデルよりも若干小さくなる傾向がある。もう1つの経路Cの実流速は経路AとBの間で、分散長及び流量比は経路AとBよりも小さくなっている。

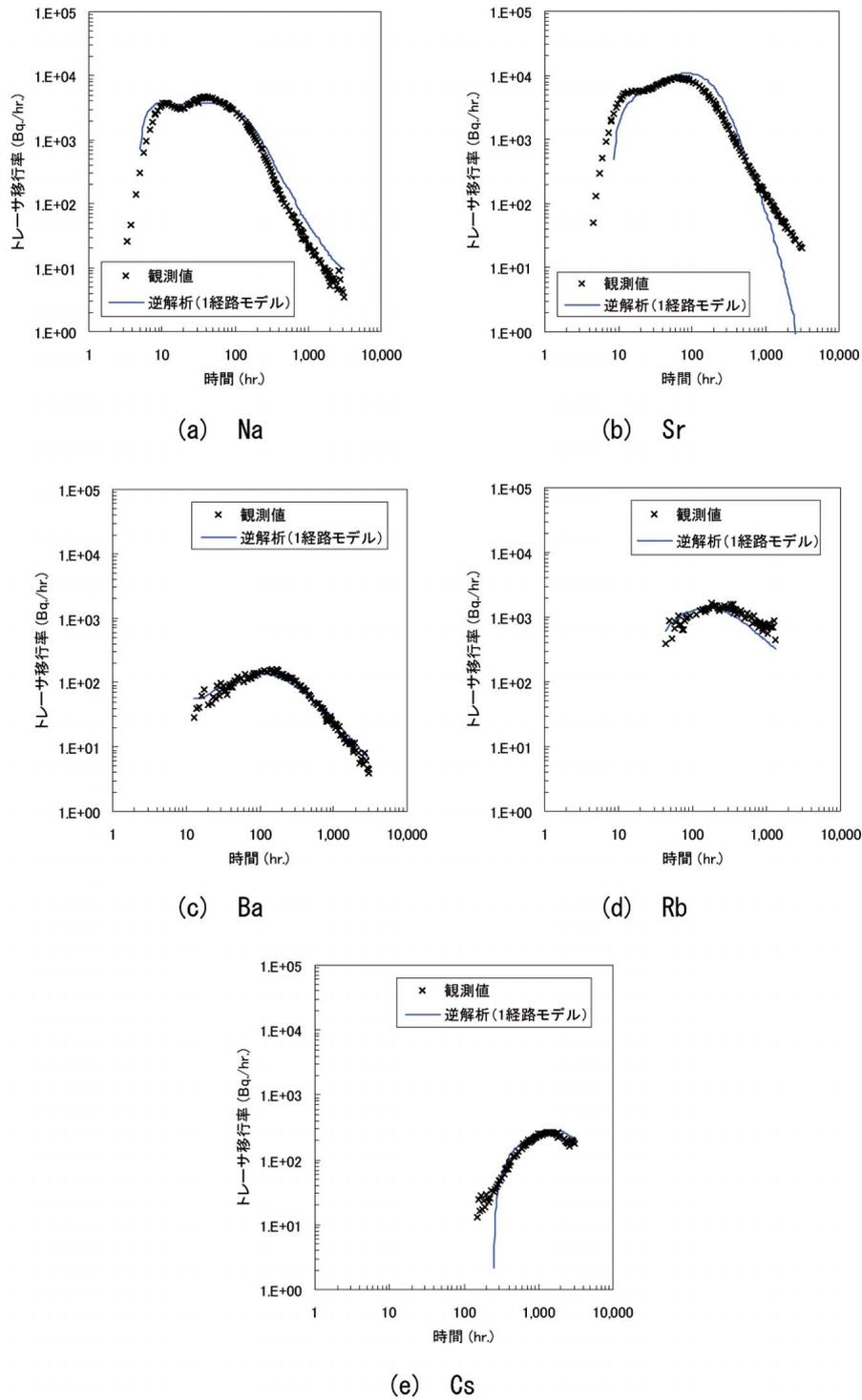


図8 吸着性トレーサ逆解析結果 (STT 2,1 経路モデル)

表5 分配係数同定値
(STT 2, 1 経路モデル, 単位: $\times 10^{-5} \text{m}^3/\text{kg}$)

トレーサ	室内試験推奨値	同定値
Na	0.14	3.1
Sr	0.47	0.28
Ba	20	243
Rb	40	297
Cs	600	4,270

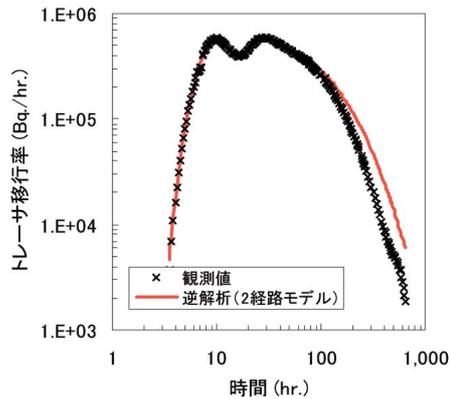


図9 非吸着性トレーサHTOの逆解析結果
(STT 2, 2経路モデル)

表6 非吸着性トレーサ (HTO) 逆解析結果
(STT 2, 2経路モデル)

経路	パラメータ	同定値
A	実流速 [m/hr]	0.21
	分散長 [m]	0.13
	開口幅 [$\times 10^{-3} \text{m}$]	0.14
	流量比率 (%)	49
B	実流速 [m/hr]	0.96
	分散長 [m]	0.17
	開口幅 [$\times 10^{-3} \text{m}$]	0.03
	流量比率 (%)	51

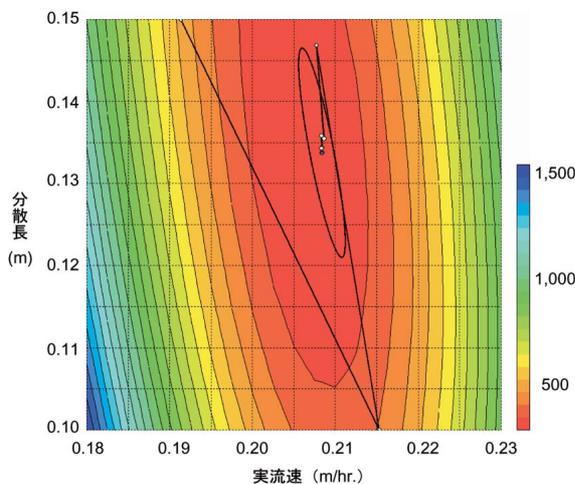


図10 実流速と分散長の95%信頼区間楕円
(STT 2, HTO, 2経路モデル経路A)

経路Cの流量比が経路AとBよりも小さく、しかも図12に示すように2経路モデルと3経路モデルの濃度破過曲線計算値はほぼ同じことから、3経路モデルにおける経路Cはパラメータ値の同定精度に顕著な影響を及ぼさないと思われる。

また、経路Aの実流速、分散長及び割れ目開口幅の同定値の95%信頼区間は、それぞれ0.196~0.199m/hr (区間幅0.003m/hr)、0.11~0.12m (区間幅0.01m) 及び0.172~0.175mm (区間幅0.003mm) に分布しており、2経路モデルよりもさらに不確実性が低減されていることがわかった。

5.4 最適モデルの検討

各モデルにおける情報量基準値を図13に示す。経路数が多いほど情報量基準値は小さくモデル化の精度が向上する傾向があることがわかる。2経路及び3経路モデルの方が1経路モデルよりも情報量基準値が非常に小さく、モデル化の精度が格段に向上していることがわかる。ただし、2経路モデルと3経路モデルでは、情報量基準値にそれほど顕著な差がなく、3経路モデルは、2経路モデルと比較して、パラメータ数が多い割にはモデル化の精度は向上していないことがわかる。これは、3経路モデルになるとパラメータ数 N_p の増加量と目的関数 $\mathcal{L}(p_0)$ の減少量が相殺されていると理解できる。したがって、本検討においては2経路モデルが非吸着性トレーサ試験 (HTOトレーサ) を説明するのに最も合理的と考えられる。

6. まとめと今後の課題

逆解析手法を用いたパラメータ同定並びに同定値の信頼性評価手法を核種移行解析コードへ適用することで、原位置で実施されたトレーサ試験から各パラメータの同定と、同定値の95%信頼区間を評価した。また情報量基準を導入することで、より合理的なモデルが選定できる見通しを得た。今後は、他の試験ケースにおけるパラメータ同定並びに不確実性評価を実施する。また、試験ケースの違い (ボーリング孔間組み合わせ、流量の違い、トレーサ種類の違いなど) や試験手法がパラメータ同定値やその不確実性に与える影響を整理するとともに、このような手法により定量的に示された不確実性が安全評価に与える影響評価を組み合わせて実施してゆく予定である。このような検討は、原位置で実施される種々のトレーサ試験

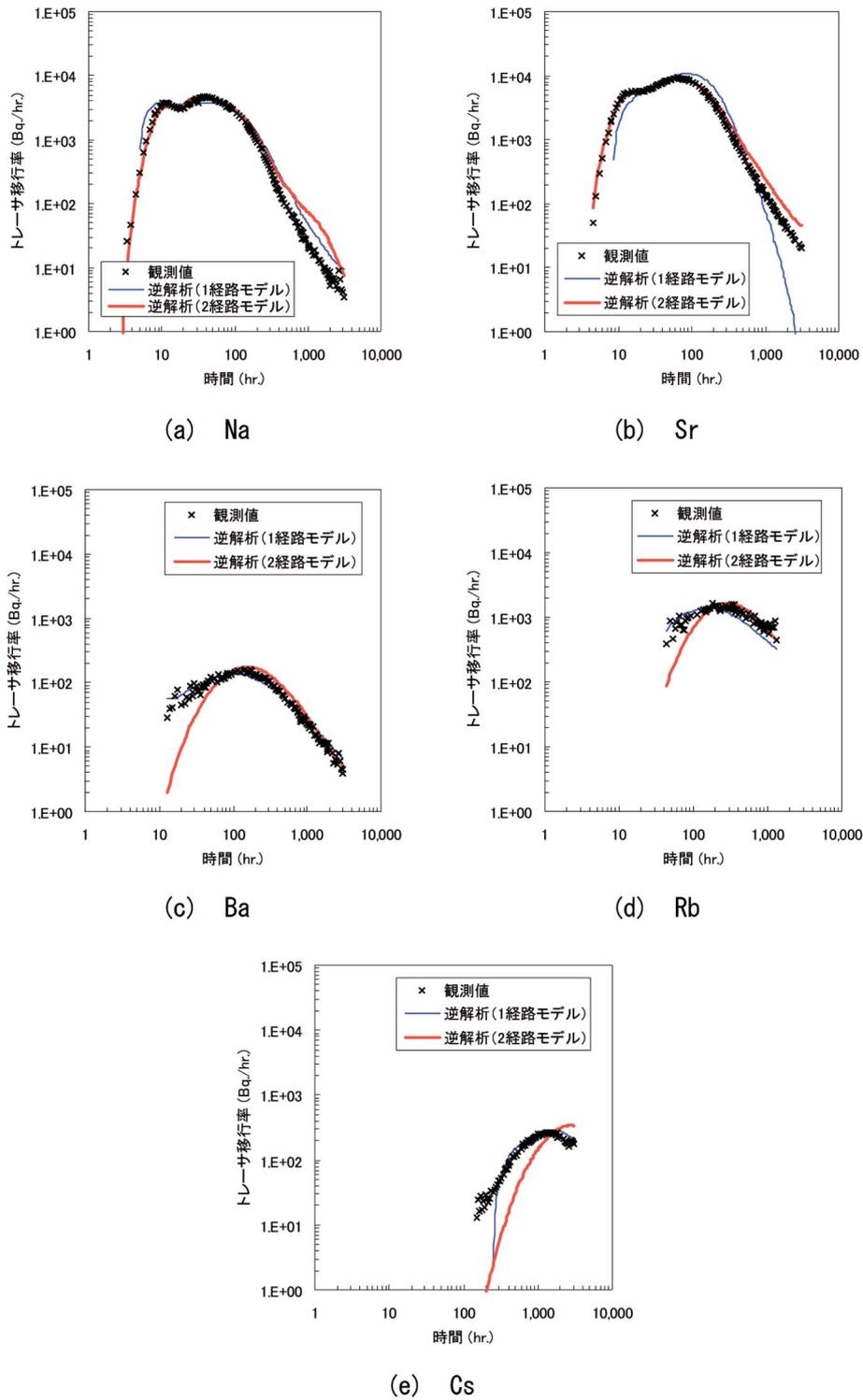


図11 吸着性トレーサ逆解析結果 (STT 2,2経路モデル)

表7 分配係数同定値
(STT 2, 2経路モデル, 単位: $\times 10^{-5} \text{m}^3/\text{kg}$)

トレーサ	室内試験推奨値	同定値
Na	0.14	0.4
Sr	0.47	2.2
Ba	20	13.7
Rb	40	15.5
Cs	600	183

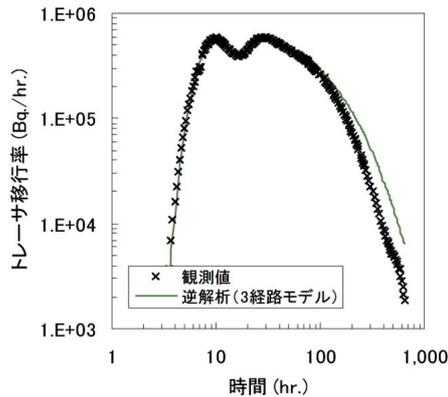


図12 STT 2非執着トレーサ逆解析結果
(STT 2, 3経路モデル)

表8 非収着トレーサ (HTO) 逆解析結果
(STT 2, 3経路モデル)

経路	パラメータ	同定値
A	流速 [m/hr]	0.20
	分散長 [m]	0.11
	開口幅 [$\times 10^{-3} \text{m}$]	0.17
	流量比率 [%]	39
B	流速 [m/hr]	0.96
	分散長 [m]	0.12
	開口幅 [$\times 10^{-3} \text{m}$]	0.04
	流量比率 [%]	40
C	流速 [m/hr]	0.66
	分散長 [m]	0.02
	開口幅 [$\times 10^{-3} \text{m}$]	0.03
	流量比率 [%]	21

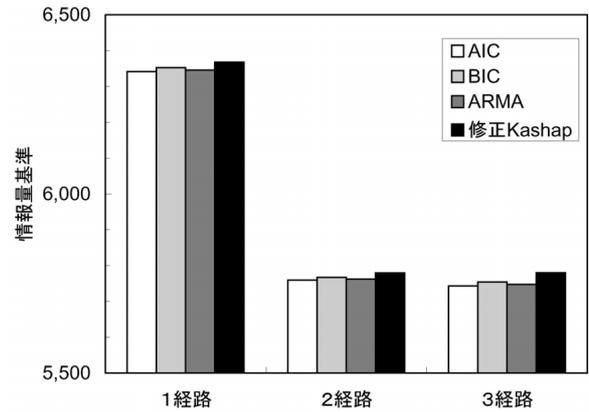


図13 情報量基準値の比較
(STT 2, HTOトレーサ)

で核種移行評価に用いるモデルやパラメータ値の妥当性もしくは保守性を確認するために必要な試験項目や精度等の明確化に資すると考えられる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“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 - 分冊3 地層処分システムの安全評価”，JNC TN1400 99 023 (1999)
- 2) Carrera, J. and Neuman, S.P.：“Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information”，Water Resources Research, Vol 22, No 2, pp.199-210 (1986)
- 3) 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, 376/6, pp.121-130 (1986)
- 4) Winberg, A., Andersson, P. et al.：“Aspo Hard Rock Laboratory, Final Report of the First Stage of the Tracer Retention Understanding Experiments”，SKB, TR 00 07 (2000).
- 5) Tsang, C.F.：“Tracer transport in fracture systems”，Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, edited by Bear, J., Tsang, C.F. and de Marsily, G., Academic Press, Inc., pp.237-266 (1993).