

岩盤における核種移行予測手法に関する一考察

山下 亮^{*1}

亀裂性岩盤における地下水中の核種移行では、亀裂と岩石マトリクスとの間の拡散移行（マトリクス拡散）が大きな影響を及ぼすことが指摘されている。核種移行のモデルとしてマトリクス拡散を考慮した二重空隙モデルと多孔質体モデルの2種類のモデルについて、地下水年代の観測値が得られている場合の核種移行の予測精度の違いを数値実験により調べた。その結果、二重空隙モデルを用いることで、流出境界における核種の物質濃度の経時変化に関して予測精度が向上する可能性が高いことが明らかとなった。

キーワード：岩盤、亀裂、透水性、放射性廃棄物処分、安全評価、地下水年代

1. はじめに

原子力発電に伴い発生する使用済み燃料は再処理することで再利用可能なプルトニウム等と高レベル放射性廃棄物に分離され、後者は地下深部に地層処分されることが計画されている。その際、放射性物質（核種）が十分に減衰するまで地層中に留めておくことが必要であり、廃棄物周辺に設置される人工バリアに加えて、地層自体のバリア性能（天然バリア）により処分の長期的安全性を確保することが求められている¹⁾。

処分後、廃棄物に含まれる核種は人工バリアから周辺の岩盤へと移行し、地下水の流れや拡散により、岩盤内に存在する亀裂や空隙を通じて移動すると考えられている。移行のメカニズムとして、亀裂における地下水の移流と分散、亀裂と岩石マトリクス（基質部）の間の拡散による移行、放射性崩壊、核種の岩石への収着、などがあるが、最近の数値解析技術の発展により、これらを3次元的にモデル化し、核種の移行を予測することが可能となりつつある。精緻なモデル化を行うことが可能となる一方で、必要なパラメータを調査結果や観測データから高精度に設定することは必ずしも容易ではないという問題がある。

モデルのパラメータ設定においては、透水試験の試験結果や降雨量等の観測データなどを参照することが一般的であるが、最近では全水頭のみならず地下水年代の観測データを利用してモデル検証や逆解析的にパラメータを設定する方法が精力的に研究されている^{2) 3)}。ただし、現状では亀裂の影響を等価な多孔質体モデルに置き換えて解析することがほとんどであり、亀裂と岩石マトリクス間の相互作用までは考慮されていない。

Neretnieksらは、亀裂を含む岩石試料を用いた室内トレーサー試験により、トレーサーの移行におけるマトリ

クス拡散の影響が無視できないこと、実岩盤における長期の核種移行ではマトリクス拡散が遅延メカニズムとして重要であることを示唆している⁴⁾。原位置試験においてもマトリクス拡散の影響は、トレーサー試験のブレイクスルーカーブにおいて低い濃度の流出が長時間継続する現象として観察され、マトリクス拡散を考慮したモデルにより精度よく再現できることが示されている⁵⁾。

本研究では、亀裂性の岩盤における核種移行を予測することを目的とし、マトリクス拡散を考慮したモデルと地下水年代の観測値を用いることで核種移行予測の精度を向上させることができるかについて検討を実施した。

2. 核種移行のモデル

2.1 マトリクス拡散を考慮した二重空隙モデル

岩盤の空隙のうち、地下水が貯留されるマトリクス内の空隙を1次空隙、地下水の流路となる亀裂を2次空隙として区別し、2種類の空隙系間の相互作用を考慮して定式化するモデルは、二重空隙モデル（Double porosity model）と呼ばれ、もともとは石油資源開発の分野で発展してきたモデルである⁶⁾。二重空隙モデル（重ね合わせモデル；Overlapping model）の概念を図-1に示す。2次空隙である亀裂は主に透水性に関わる空隙であり、等価な透水係数を有する多孔質体で表現される。岩石マトリクスの貯留性は1次空隙の空隙率で表現され、多くの場合、その透水性は亀裂の透水性に比べて十分に小さいとして無視される。

以下に二重空隙モデルにおける核種移行の支配式を示す。2次空隙系（亀裂）についてはおける支配式は、

$$\phi_2 R_f \frac{\partial c}{\partial t} = \phi_2 \nabla D \nabla c - \phi_2 \nabla (vc) - \phi_2 R_f \lambda c - 2\alpha q_m \quad (1)$$

であり、 c は核種の濃度 (g/m^3)、 ϕ_2 は2次空隙系の間隙

*1 原子力部

率 (-), R_f は遅延係数 (-), D は分散係数テンソル (m^2/s), v は実流速ベクトル (m/s), λ は核種の崩壊定数 ($/s$), α は単位体積に含まれる亀裂の面積 ($/m$), q_m は亀裂の単位面積からマトリクスへの移行量 ($g/m^2/s$) である。

q_m はマトリクスにおける核種の濃度 c' (g/m^3) により次式で表現される。

$$q_m = -\phi_1 D_m \frac{\partial c'}{\partial \xi} \quad (2)$$

ここで, D_m はマトリクスにおける分子拡散係数 ($m^2 s^{-1}$), ϕ_1 はマトリクスの間隙率 (-) である。 ξ は亀裂に対して垂直方向の座標 (m) を表し, 図-1 のような2次元的なモデルであれば, 紙面に直角方向の座標に該当する。

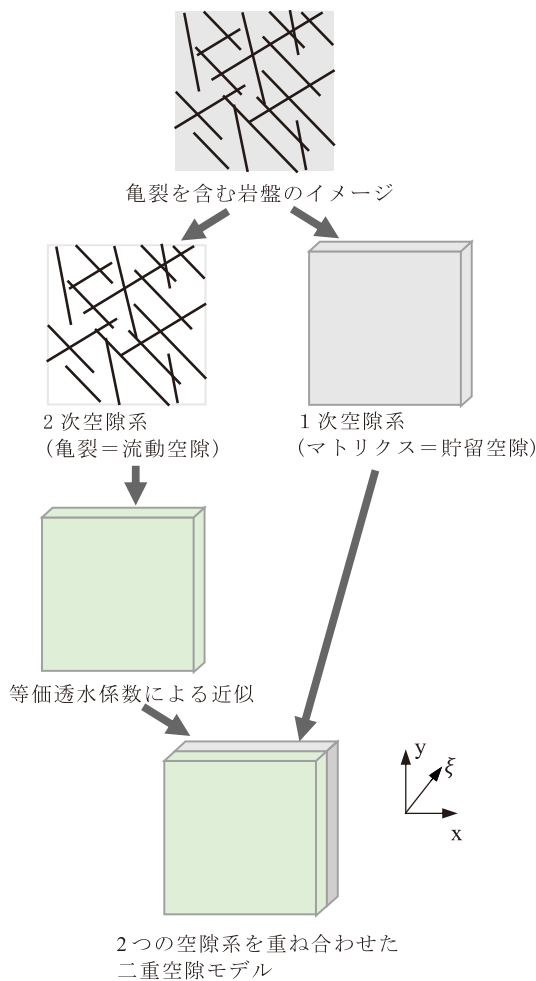


図-1 二重空隙モデル (重ね合わせモデル) の概念

一方, マトリクスにおける支配式は次式で表される。

$$\phi_1 R_m \frac{\partial c'}{\partial t} = \phi_1 D_m \frac{\partial^2 c'}{\partial \xi^2} - \phi_1 R_m \lambda c' \quad (3)$$

ここで, R_m はマトリクスにおける遅延係数 (-) である。境界条件は次のようになる。

$$c' = c \quad (\xi = 0) \quad (4)$$

$$\frac{\partial c'}{\partial \xi} = 0 \quad (\xi = L_m) \quad (5)$$

ここで L_m はマトリクス拡散深さであり, 核種が亀裂面からマトリクス内を拡散移行する最大距離 (m) を表す。単位体積に含まれる亀裂の面積との関係から, 近似的に次のような関係が成り立つと考えられる。

$$L_m = \frac{1}{2\alpha} \quad (6)$$

一方, 重ね合わせモデルとは異なるが, 図-2 に示すような二重空隙モデルの1種について, Tang らはマトリクス拡散深さが無限大の場合について1次元非定常の厳密解を導いている⁷⁾。また, Huyakorn らは同様の問題について, マトリクス拡散深さが有限の場合について, 有限要素法を用いて効率的に解く手法を提示している⁸⁾。

この系では, $\xi = z$ であり, 亀裂幅 b (m) は通常マトリクス拡散深さよりも十分に小さいので, 亀裂幅と2次空隙系の間隙率 ϕ_2 の間には次の関係がある。

$$\phi_2 \cong \frac{b}{2L_m} \quad (7)$$

したがって, 図-2 の系に対しては, 式 (1) は次のように表される。

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (vc) - R_f \lambda c - \frac{2q_m}{b} \quad (8)$$

本研究では, Huyakorn らの方法に準じた解析コードを作成して, 検討に用いることとする。

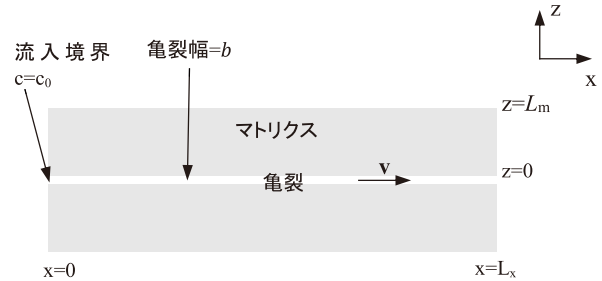


図-2 亀裂とマトリクスからなる1次元モデル

2.2 地下水年代へのマトリクス拡散の影響

ここでは, 亀裂性岩盤においてマトリクス拡散が地下水年代に与える影響について考察する。降水は地表から浸透して地下水として深部へと流動するが, 浸透してから着目している地点に至るまでの流動時間 (滞留時間) を地下水年代と呼ぶ。地下水年代は, 降水に含まれる崩壊性トレーサー (^{14}C 等) や岩盤内で生成する蓄積性トレーサー (He 等) の地下水中濃度の測定結果から推定される。蓄積性のトレーサーの濃度については空隙率の影響をほとんど受けないとされていることから, 本論文では崩壊性トレーサーについて検討する。なお Neretnieks⁹⁾ もマトリクス拡散が地下水年代に与える影響について, 亀裂内の分散がない場合について検討を行っているが, ここでは分散も含めた場合を考える。

炭素 (^{14}C) の場合, 降水中の濃度が一定とみなせるの

で、地表から浸透し、地下水の流動とともに移動する過程で減衰することを利用して観測地点でのかん養後の時間が推定される。対象とする地層において数万年以上の時間スケールで隆起・浸食等の変動が十分小さければ、 ^{14}C の半減期(約5730年)から考えて地下水中の濃度は定常状態に達しているとみなすことができ、地下水中濃度から地下水年代を推定することが可能である。

図-2のような系において、流入境界で濃度一定(= c_0)の条件で崩壊性トレーサーが注入され、 $x = L_x$ においてトレーサー濃度が観測される場合を考える。定常状態における亀裂とマトリクスそれぞれの支配式は以下ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (vc) - R_f \lambda c - \frac{2q_m}{b} = 0 \quad (9)$$

$$\phi_1 D_m \frac{\partial^2 c'}{\partial z^2} - \phi_1 R_m \lambda c' = 0 \quad (10)$$

マトリクスについての境界条件は非定常の場合と同様であるが、亀裂についての境界条件は、下記となる。

$$c = c_0 \quad (x = 0) \quad (11)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (x = L_x) \quad (12)$$

となる。マトリクスについての厳密解は、次式で与えられる。

$$c' = \frac{\exp(-\omega L_m) \exp(\omega z) + \exp(\omega L_m) \exp(-\omega z)}{\exp(\omega L_m) + \exp(-\omega L_m)} \cdot c \quad (13)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{R_m \lambda}{D_m}} \quad (14)$$

したがって、亀裂とマトリクスの相互作用の項 q_m は次のように得られる。

$$q_m = \eta \cdot c \quad (15)$$

$$\eta = \phi D_m \omega \frac{\exp(\omega L) - \exp(-\omega L)}{\exp(\omega L) + \exp(-\omega L)} \quad (16)$$

これを亀裂の支配式に代入すると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (vc) - \left(R_f \lambda + \frac{2}{b} \eta \right) c = 0 \quad (17)$$

$$\lambda' = R_f \lambda + \frac{2}{b} \eta \quad (18)$$

となる。上式の解は Ogata¹⁰⁾の導いた厳密解を用いて次式で与えられる。

$$c = c_0 \exp \left[\left(\frac{V}{2D} - \sqrt{\left(\frac{V}{2D} \right)^2 + \frac{\lambda'}{D}} \right) \cdot x \right] \quad (19)$$

ここで、 $2\eta/b$ は、トレーサーがマトリクス内部で崩壊する影響を表すパラメータと解釈でき、地下水年代を利用してモデルパラメータを逆解析する場合、このパラメータを参照しつつ、逆解析の対象となる亀裂幅や間隙率、マトリクス拡散深さを探索することが考えられる。なお、上式(17)の形からわかるように、多孔質体を対象

とした移流拡散コードでも、 λ' を未知パラメータとしてマトリクス効果を考慮した地下水年代の逆解析が可能であることがわかる。

3. 数値実験による移行予測手法の検討

3.1 移行特性に関するパラメータスタディ

多孔質体モデルと二重空隙モデルによる移行特性の比較として、1次元の系でのパラメータスタディを行った。パラメータスタディの目的は地下水年代が同じである系において、マトリクスの拡散深さと間隙率を変化させた場合に、非定常な核種の移行特性がどのように異なるかを調べることである。

パラメータスタディでは、各ケースの流出端での地下水年代が一致するように式(18)における $2\eta/b$ の値を参照しつつ、間隙率を調整した上で、非定常解析を行い、流出端での単位時間あたりの核種流出濃度の経時変化について比較した。

パラメータスタディのモデルは図-3に示すように、長さが100mであり、モデル幅に関しては多孔質体モデルでは1m、二重空隙モデルではマトリクス拡散深さを L_m として $2L_m + b$ である。亀裂幅は、亀裂の透水量係数から三乗則を用いて換算した。動水勾配が1/1000となるように両端の全水頭が固定されている。間隙率調整後の非定常解析では初期条件、境界条件を次のように設定した。初期条件は、上流端の境界条件の影響を抑えるために、 $x = 10m$ の位置において単位質量の溶質が存在するように濃度値 c_0 を設定した。

$$c = c_0 \quad (x = 10, t = 0) \quad (20)$$

$$c = 0 \quad (x = 0, t \geq 0) \quad (21)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (x = 100m, t \geq 0) \quad (22)$$

二重空隙モデルのパラメータスタディでは、動水勾配、透水量係数は共通とし、マトリクスの間隙率が0.005でマトリクス拡散深さが1mのケースを基本ケースとした。ただし、多孔質体モデルは透水量係数の代わりに透水係数を用い、流出端での地下水年代(濃度と崩壊定数から換算)が同じとなるように空隙率を調整した。計算条件を表-1に、調整した間隙率とマトリクス拡散深さの関係を図-4に示す。地下水年代を基本ケースに合わせるためには、マトリクス拡散深さが比較的小さいケースでは、間隙率を大きく設定する必要があるが、ある程度より深くなると間隙率の感度は小さいことがわかる。

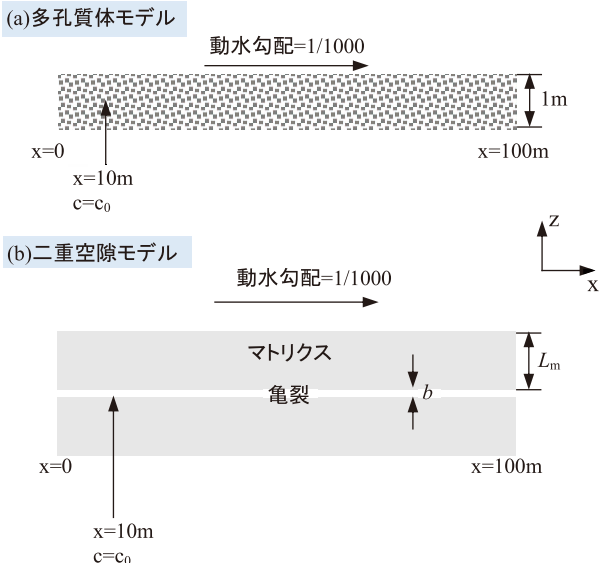


図-3 パラメータスタディに用いた1次元モデル

表-1 計算条件

	二重空隙モデル	多孔質体モデル
透水量係数	5m ² /year	—
透水係数	—	5m/year
動水勾配	1/1000	
マトリクス拡散深さ	0.1 ~ 1 m	(モデル幅 1m)
崩壊定数	0.0231 (/year)	
地下水年代	67year	
分散長	5m	
間隙率	0.005 (基本ケースのφ ₁)	0.00376 (φ)

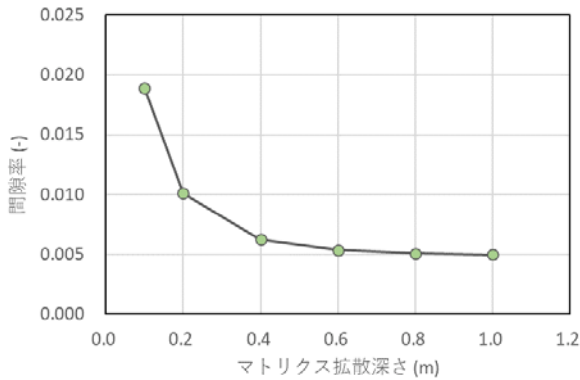


図-4 マトリクス拡散深さと間隙率の関係

各ケースでの単位時間あたり核種流出濃度の経時変化を図-5に示す。x=10mに初期濃度を設定していることから、平均の移行時間は定常解析で計算した地下水年代の約90% (約60年) であり、このラインを同図に示している。ただし、上流側の濃度固定境界条件の影響を受けており平均移行時間は厳密には一致していない。マトリクス拡散深さ L_m が0.2mまでは、多孔質モデルと類似した曲線であるが、0.4mより大きくなるとピークが低くなるとともに、ピークの時刻がかなり早くなり、時間が経つ

ても収束しにくいことがわかる。地下水年代が同じであっても、二重空隙モデルではマトリクス拡散深さ L_m の違いにより経時変化曲線の形状が大きく異なっている。このように非定常な流出挙動はモデルにより大きく異なることから、安全評価における予測に際しては地盤の特性に応じた適切なモデル化が重要であることがわかる。

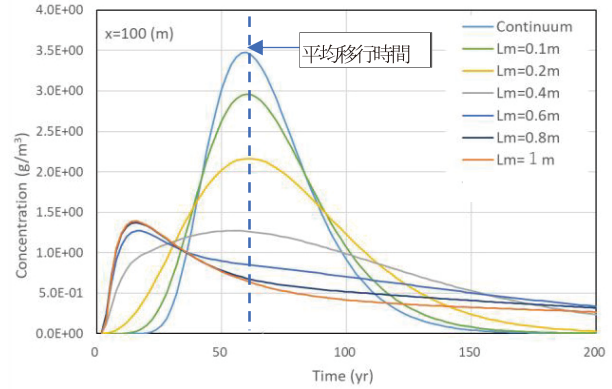


図-5 流出端における核種濃度の経時変化

3.2 亀裂ネットワークを対象とした数値実験

先に示した図-2のモデルは、複雑なき裂ネットワークを含む実際の岩盤での移行を単純化して近似的に予測するためのモデルである。こうしたモデルの予測精度を検証することが重要となるが、長期のデータに基づく実データはほとんど存在しないため、数値実験による検討を行うこととした。数値実験のフローを図-6に示す。

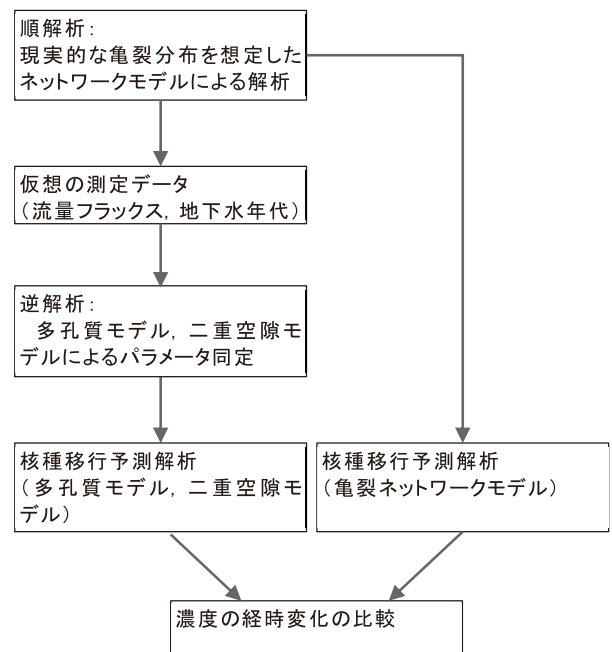


図-6 数値実験のフロー

実際の岩盤において地下水年代が観測された場合を想定し、観測値から移行特性パラメータを逆解析し、さら

に将来予測を行う場合を考える。机上で作成した亀裂ネットワークモデルを用いた順解析で流量、地下水年代を計算して仮定の観測データとし、前節で述べた1次元的な二重空隙モデルと多孔質体モデルによる逆解析でパラメータを同定した上で流出端での核種の流出濃度の予測を行う。この予測結果とオリジナルのネットワークモデルによる結果を比較することで、地下水年代を利用した逆解析の有効性について検討する。

(1) 順解析のためのネットワークモデル

実際の岩盤には多くの亀裂がネットワーク状に存在することが多い。複雑な亀裂構造を完全にモデル上に再現することは困難であることから、本研究では、単純ではあるが、現実には有りうると思われる亀裂構造として、互いに直交する2次元の亀裂群のモデル（以後ネットワークモデルと呼ぶ）を数値的に作成することとした。これを用いて定常解析を行い、仮定の観測値（流量と地下水年代）を計算するとともに、非定常解析により流出端での核種流出量を計算する。

作成した亀裂のネットワークモデルを図-7に、モデル作成のためのパラメータと設定した物性値等を表-2に示す。亀裂の透水量係数の不均質性を考慮するために平均の透水量係数とその対数標準偏差を設定し、モデル要素にランダムに割り当てている。モデルには、亀裂の間に存在するマトリクス部も含まれているが、その透水係数については無視しうるほど小さいと仮定した。

表-2 ネットワークモデルのパラメータと物性値

パラメータ	model-1	model-2
モデル領域範囲	100m (x方向) 5m (z方向)	
亀裂間隔の平均値	4.35m (x方向) 0.71m (z方向)	4.35m (x方向) 1.25m (z方向)
平均透水量係数	10^{-7} (m ² /sec) (=3.16m ² /year)	
透水量係数の対数正規分布の標準偏差	0.5	
マトリクスの間隙率	0.003	
縦分散長	5.0	
横分散長	0.5	
核種の崩壊定数	0.0231 (/year)	

亀裂パターンについては、z方向の亀裂間隔が異なる2種類のモデル(model-1とmodel-2)を作成した。また、亀裂の配置は、設定した平均亀裂間隔となるよう本数を設定した上でランダムに配置している。地下水年代を計算するための定常解析の条件、核種移行の予測のための非定常解析の条件を図-7に示す。非定常解析では、初期においては亀裂内のみ核種が存在し、総量が1.0(単位質量)となるように亀裂流量で重みづけをした初期濃度をx = 10mに位置する節点に設定した。亀裂の透水量

係数については同一亀裂内での不均質性を考慮するために亀裂の長さ20m毎に透水量係数を割り当てた(図-9参照)。亀裂幅については透水量係数から三乗則により計算した。

定常解析の結果として、全水頭と濃度(流入濃度を1としたときの相対濃度)を図-10と図-11に示す。核種は亀裂に沿って浸入し、亀裂の両側のマトリクス部に拡散している状況が確認できる。また、亀裂の透水量係数の違いにより、全水頭や核種の濃度の分布に違いが生じていることがわかる。

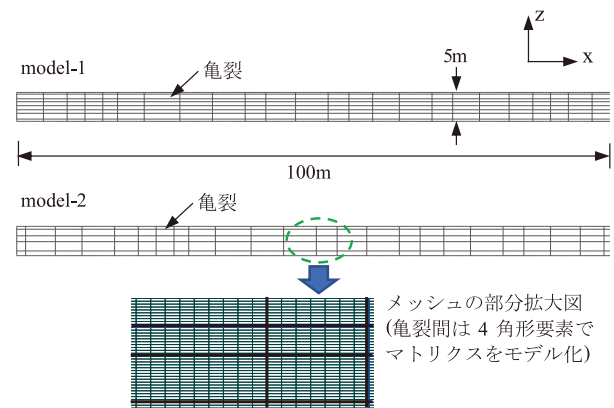


図-7 ネットワークモデルと解析メッシュ

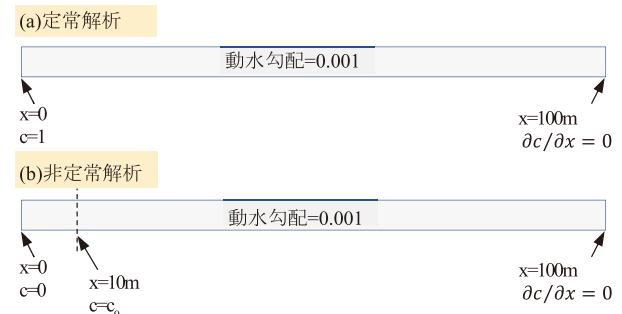


図-8 境界条件と初期条件

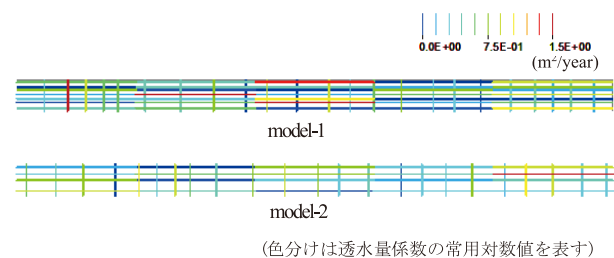


図-9 透水量係数分布

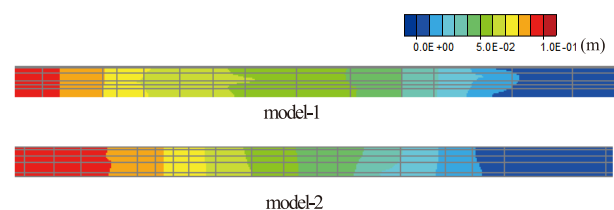


図-10 定常解析における全水頭分布

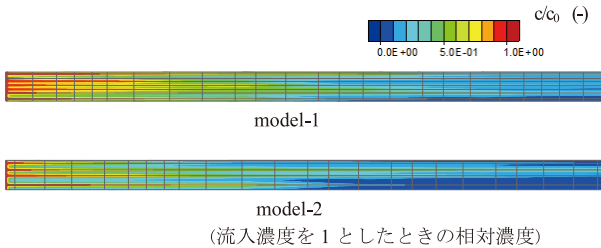


図-11 定常解析における濃度分布

非定常解析では、流出境界における核種の物質濃度の経時変化について整理した。結果を図-12に示す。最初の立ち上がりの時期はそれほど差がないように見えるが、ピークの時期と高さはかなり異なっている。亀裂が少なく、マトリクス拡散深さの大きいmodel-2では一部の透水量係数の大きな亀裂の影響がピークの時期に影響を与えていると思われる。これに対して、亀裂が多く、マトリクス拡散深さが小さいmodel-1では、いくつかの亀裂に分散して移行が進むこと、マトリクスに入り込んだ核種が比較的早く亀裂に戻って来ることで、トータルでは比較的なだらかなピークを形成していると推察される。また、こうした傾向は、マトリクス拡散深さを変化させた単一亀裂モデルによるパラメータスタディの結果(図-5)と同様であると言える。

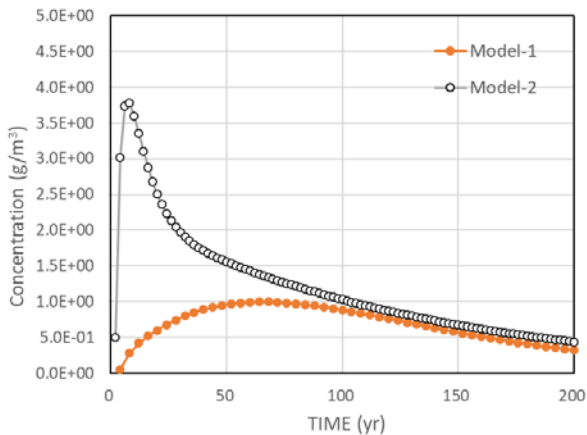


図-12 濃度の経時変化

(2) 逆解析と予測解析

ここでは、前節のネットワークモデルの結果を観測値と見立てて、図-3に示すような1次元のモデル(二重空隙モデルと多孔質体モデル)の未知パラメータを逆解析で求める。ここで観測値としては、流出境界における流量と濃度、動水勾配、亀裂間隔が既知であるとする。逆解析に用いた仮定の観測値を表-3に示す。濃度は、流出境界の各節点における濃度を流量で重み付けた平均として求めた。また、マトリクス拡散深さについては、ボーリング孔観察等から、表-2に示す平均的な亀裂間隔が既知であるとしてモデルに設定した。

表-3 数値実験上の観測値

	model-1	model-2
流量フラックス (m/year)	0.00545	0.00281
地下水年代 (year)	76.6	54.5
平均的なマトリクス拡散深さ (m)	0.355	0.625

逆解析で求める未知パラメータを表-4の○印で示す。透水係数(透水量係数)については、観測値から容易に求めることができるので実質的には間隙率が未知パラメータとなる。間隙率は、ネットワークモデルの計算結果の地下水年代から換算した濃度と一致するように式(16)、式(18)、式(19)を用いて求めた。得られた結果を表-5に示す。流量フラックスと地下水年代のデータから多孔質体モデルと二重空隙モデルのそれぞれで求めた間隙率は、ネットワークモデルによる順解析で用いた間隙率の値とは必ずしも一致しないが、あくまでも多孔質体モデルと二重空隙モデルで近似した場合の等価間隙率であることに留意する必要がある。

得られたパラメータを用いて3.1節と同様の条件で非定常の核種移行解析を行った。ただし、非定常解析では核種の崩壊定数を考慮しない条件($\lambda = 0$)で計算を行っている。

流出境界における物質濃度の経時変化についてネットワークモデルとの比較を行った結果を図-13、図-14に示す。

表-4 逆解析で対象とするパラメータ

	多孔質体モデル	二重空隙モデル
透水係数(透水量係数)	○	○(亀裂の透水量係数)
間隙率	○	○(マトリクスの間隙率)
亀裂幅	-	透水量係数から三乗則で換算した。

表-5 逆解析で得られた間隙率

	model-1	model-2	ネットワークモデル
二重空隙モデル(1次空隙)	0.0061	0.0030	0.003
多孔質体モデル	0.0048	0.0017	0.003

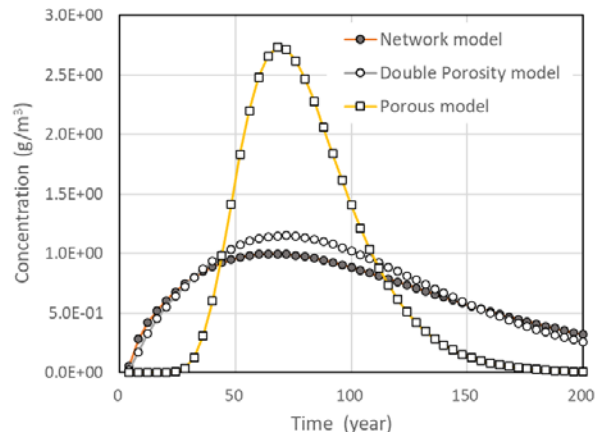


図-13 流出境界での濃度の比較 (model-1)

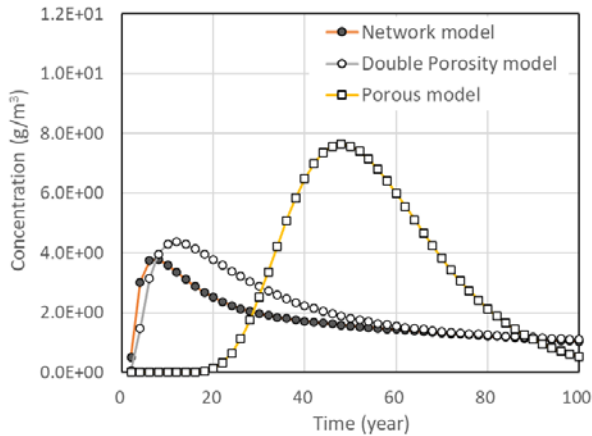


図-14 流出境界での濃度の比較 (model-2)

model-1, model-2 のそれぞれにおいて3種類のモデルの流出境界における地下水年代は共通であるが、ネットワークモデルのプロットに対して、多孔質体モデルでは、立ち上がりが遅く、ピークの高さが2~2.5倍程度高くなるとともに、亀裂間隔の大きなmodel-2ではピークとなる時刻もかなり遅くなっていることがわかる。一方、二重空隙モデルでは、ピークとなる時期、高さに関して、多孔質体モデルに比べて順解析に用いたネットワークモデルの結果にかなり近い結果が得られていることがわかる。安全評価においては核種毎に分配係数や崩壊定数が異なり、その移行挙動はここに示した核種の崩壊や収着を考慮していない解析結果にそれらの影響を重ね合わせた結果として予測することになる。核種の半減期によっては、核種の崩壊を考慮しない条件での解析結果におけるピークが低くても、ピーク時期が早ければ必ずしも安全側とはならないため、ピークの高さ、時期の両方を精度よく予測することが重要である。

以上から、亀裂性岩盤の核種移行を予測する上で、どのようなモデルを選択するかが非常に重要であり、限られた条件での検討ではあるものの、予測精度向上の観点からは亀裂とマトリクスの相互作用を考慮した二重空隙モデルを用いることが望ましいと考えられる。また、本研究では、流量フラックスや動水勾配、亀裂間隔などを既知として扱ったが、実際のサイトにおける調査では、これらは必ずしも既知ではないため、全水頭、降水量、地下水年代等のデータから、多くの未知パラメータを逆解析で求めることが必要となってくる。そのような場合の逆解析の最適な手順についても検討を進める必要がある。

4. まとめ

亀裂を含む岩盤における核種移行の問題に関して、地下水年代の情報を利用することで予測精度が向上するか

どうか、その際に用いるモデルの違いによる影響について検討を行った。

結論として、亀裂性岩盤における核種移行の予測においては、亀裂とマトリクスの間の核種の移行を考慮した二重空隙モデルを用いることが望ましいと考えられた。多孔質体モデルでは、物質濃度のピークの予測精度が不十分となる可能性が大きい。また、二重空隙モデルでは、順解析モデルの結果にかなり近い結果が得られており、地下水年代を利用してパラメータを調整することで、核種移行の予測精度向上が期待できる。

一方、今後の課題として、以下のことがあげられる。

本研究では2次元ネットワークモデルを用いた数値実験として検討を行ったが、実務面では3次元モデルについてもモデル化手法を発展させていくことが必要となる。3次元においても亀裂とマトリクスの相互作用については本論文で扱った方法をそのまま適用することが可能であり、より現実的なデータに基づいた3次元の亀裂ネットワークモデルによる解析結果との比較を行って、その適用性を確認することが課題と考えられる。亀裂性岩盤を対象とした場合の地下水流動解析において等価な透水係数が連続体モデルへ導入されたのと同様、今後は核種移行解析における等価な二重空隙モデルによる予測解析の高精度化が期待される。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—概要編, p.8, 2021.
- 2) 長谷川琢磨：地下水年代による地下水流動解析モデルの検証に関する研究, 岡山大学 博士論文, 2007.
- 3) 岡本駿一, 長谷川琢磨, 中田弘太郎：地下水年代による地下水流動モデルの校正と検証, 日本地下水学会 2019 年秋季講演会, 予稿集, pp.110-113, 2019.
- 4) Neretnieks, I., Eriksen T., and Tahtinen P.: Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock: Some Experimental Results and Their Interpretation, *Water Resour. Res.*, 18 (4), pp.849-859, 1982.
- 5) 山下亮, 小林晃：亀裂性岩盤における物質移行特性についての一考察, 土木学会第46回学術講演会Ⅲ-443, 1991.
- 6) Barenblatt, G.I., Zheltov, I.P. and Kochika, I.N.: Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rock (strata), *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Vol.24, pp.1286-1303, 1960.
- 7) Tang, D. H., et al.: Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a single fracture, *Water Resour. Res.*, 17(3), pp.555-564, 1981.
- 8) P.S.Huyakorn, B.H.Lester, J.W.Mercer: An efficient finite element technique for modeling transport in fractured porous media: 1. Single species transport, *Water*

Resource Research, Vol.19, No.3, pp.841-854, 1983.

- 9) Neretnieks, I. : Age dating of groundwater in fissured rock: Influence of water volume in micropores, Water Resour. Res., 17(2), pp.421-422,1981.
- 10) A. Ogata and R. B. Banks, A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media, US Geological Survey Professional Papers, No.34, p.411-A, 1961.

Study on nuclide transport model in fractured porous media

Ryo YAMASHITA

Interactions between fractures and rock matrix (matrix diffusion) have significant effects on nuclide migration in fractured rock masses. As a numerical experiment, a double porosity model considering matrix diffusion and an ordinary advection-diffusion model (equivalent porous model) were compared with regard to prediction accuracy of nuclide migration when groundwater age observation values are available. It became clear that the prediction accuracy is expected to be improved with the double porosity model.