

セルオートマトン法による流体・物質移動解析手法の検討

核燃料サイクル開発機構	正会員	○吉野 尚人
株式会社クインテッサジャパン	非会員	青山 裕司
株式会社クインテッサジャパン	非会員	高瀬 博康
核燃料サイクル開発機構	非会員	澤田 淳
核燃料サイクル開発機構	非会員	内田 雅大

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に際して天然バリア中の核種移行解析においては対象となる地質媒体の特性を適切に取り扱うことが重要となる。「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）の母岩に対するレファレンスケースでは、亀裂の透水量係数の不均質性に着目した均質一次元平行平板モデル（以下、取りまとめモデル）を重ね合わせた手法を採用しており、第2次取りまとめ以降の課題としては取りまとめモデルの信頼性向上が上げられている²⁾。実際の岩盤内では、巨視的には亀裂ネットワークが、微視的には亀裂開口幅や亀裂表面形状の不均質性などが亀裂内の透水・物質移行特性に影響するため、取りまとめモデルの信頼性向上のためにはこれらについて検討する必要がある。そのため、著者らは亀裂の表面形状や開口幅分布が亀裂内の透水・物質移行現象に与える影響について検討するために、微細かつ複雑な形状を有する単一亀裂内の流体・物質移行解析が可能なセルオートマトン法³⁾による解析コードを開発した。本論文では、開発した解析コードを実際の亀裂へ適用し、亀裂内の不均質性を表現できるかどうかについての検討を行った。

2. セルオートマトン法の概要

流体のシミュレーションは一般に Navier-Stokes などの微分方程式の形で記述された支配方程式を、有限要素法や差分法を用いて、離散化したマトリクス方程式を解くことによって行われる。しかし、微細かつ複雑な表面形状を持つ亀裂を対象とした流体・物質移動解析をする場合、有限要素法等により数値的に厳密に解くことが困難となる場合がある。そこで、微細かつ複雑な表面形状を持つ亀裂内の流体粒子及び溶質の挙動を計算することのできるセルオートマトン法により、単一亀裂内における流体・物質移動のモデル化を行った。セルオートマトン法は、格子上の比較的簡単なローカルルールからマクロ的に複雑な現象を再現する手法であり、流体粒子間で質量と運動量を保存する衝突を繰り返させることにより Navier-Stokes の支配方程式を解いた場合と同等な流れが再現できる⁴⁾。また、物質移動についても流体解析と同様に解くことが可能である。セルオートマトン法には、格子ガスオートマトン法⁵⁾、格子ボルツマン法⁶⁾、実数格子ガスオートマトン法⁷⁾がある。ここでは、最も計算負荷の小さい方法である格子ガスオートマトン法を用いることとした。

2. 格子ガスオートマトン法の概要

格子ガスオートマトン法の流体解析では初期状態として等間隔格子上に単位質量の粒子を配置し、粒子の移動・衝突、散乱のプロセスを繰り返すことによってミクロな粒子運動からマクロな流体挙動を再現する。粒子の移動・衝突・散乱に関する処理が整数演算に限られ計算効率は高い。しかし、計算結果は各粒子のベクトルの方向と大きさであり、実際の物理量と比較する際には、それらを単位領域内で平均化する計算が必要である。また、三次元問題に適用する際には FCHC (Face Centered Hyper Cubic) モデル⁸⁾と呼ばれる四次元空間上の面心立方格子を三次元空間に射影した格子を用いる必要がある。なお、格子ガスオートマトン法では、圧力は亀裂単位面積あたりに衝突する粒子数の総和、流速はある領域にある粒子の運動量の総和が示す方向の大きさと与えられる。そのため、圧力および流速の大きさは物理量ではなく、モデル全体の中での相対的な大きさで表現される。流体解析では、圧力、流速は、最大値を 1 最小値を 0 として規格化した値で出力した。物質移動解析では通常の粒子を注入して平衡に達した後に、トレーサー粒子の注入を開始した。トレーサー粒子と通常の粒子が衝突した場合、衝突はすべて通常の粒子が衝突した場合と同じ処理を行い、衝突後の粒子の中から衝突したトレーサー粒子数と同じ粒子数を乱数により選択して、衝突後のトレーサー粒子とし、単位体積あたりに存在するトレーサー粒子数をトレーサー濃度として出力した。なお、本解析コードは、理想的な平行平

キーワード：地層処分，核種移行，セルオートマトン法，格子ガスオートマトン法

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 電話 029-287-1111 fax 029-282-9295

板を対象とした流体・物質移動解析により，その適用性について検討した。その結果，流体解析においては，ほぼ3乗則を再現でき，物質移動解析では，トレーサー試験でのブレイクスルーカーブを再現できることを確認している。

3．解析条件と解析結果

本研究において実際の亀裂として使用した試験体は1辺が10cmの立方体の花崗岩であり，高さ方向のほぼ中央に人工割裂一面亀裂を有する。亀裂開口幅測定では，まず亀裂上部と亀裂下部を引き離し，3次元測定装置によりそれぞれの亀裂表面の高さを1mm間隔で計測した。その後，亀裂上下面を元の状態に重ね合わせて試験体全体の高さを計測し，亀裂全体の高さから亀裂上下部の高さを引くことで亀裂開口幅を算出した⁹⁾。図-1，図-2には，それぞれ対象とした試験体の亀裂面の表面形状と亀裂開口幅分布を示す。解析に使用した亀裂開口幅は0mm～4mm程度に分布していた。FCHCモデルでは，メッシュ形状が立方体に限定され，高さ方向に解析上有意味なメッシュ数を確保するために，解析メッシュは測定間隔1mmの間を線形補間して0.2mmとし，これを1メッシュの長さとした。また，亀裂の注入・排出区間には注入・排出部の圧力値を得るために助走区間（注入・排出ともに25メッシュ）を設けた。流体解析結果を図-3，図-4に示す。圧力分布は注入側から排出側にかけて漸減しており，流速分布は亀裂開口幅分布の影響を受けて流速の不均質性を表現できていることがわかる。このことから，実際の亀裂を対象とした流体解析が可能であることがわかった。

5．おわりに

微細かつ複雑な亀裂内空隙構造が亀裂内を流れる地下水に与える影響を検討するための流体解析手法として，セルオートマトン法による流体解析コードを開発し，その適用性について確認した。今後は，本解析コードにより実際の亀裂内の物質移動解析を実施し，その適用性を確認する。また，流体解析結果の妥当性の検証のため，実際の透水量係数との関係について検討する予定である。これらの流体・物質移動解析結果と第2次取りまとめで使用した均質一次元平行平板モデルの重ね合わせ手法を比較することで，第2次取りまとめで使用した核種移行モデルの保守性の確認等についての知見を得ることができ，核種移行モデルの信頼性向上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(1999):“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. 2)核燃料サイクル開発機構(2002):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成13年度報告—，JNC TN1400 2002-003,pp2-1～2-5. 3)Neumann.J(1958): The Computer and the Brain, New Haven, Yale Univ.Press. 4)Wolfram.S(1986):Theory and Applications of Cellular Automata, World Scientific. 5)Kadanoff.L.P, J.Swift(1968):Physical Review, 165. 6)Frisch.U(1986):Physical Review Letter,56. 7)Malevanets.A(1997): Statistical mechanics of hydrodynamic lattice gases, Ph.D. thesis., University of Toronto. Neretnieks,I.(1983): A Note on Fracture Flow Mechanisms in the Ground, Water Resources Res.,19, pp.364-370. 8)d'Humières.D, et al (1986): Euro physics Letter, 2, pp291-297. 9) 吉野尚人, 澤田淳, 佐藤久(2003): 岩盤亀裂開口幅評価に関する検討, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム, pp347-352.

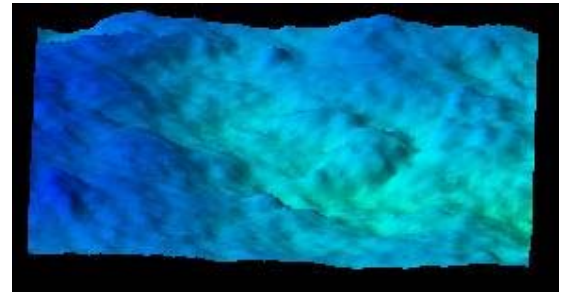


図-1 亀裂表面形状

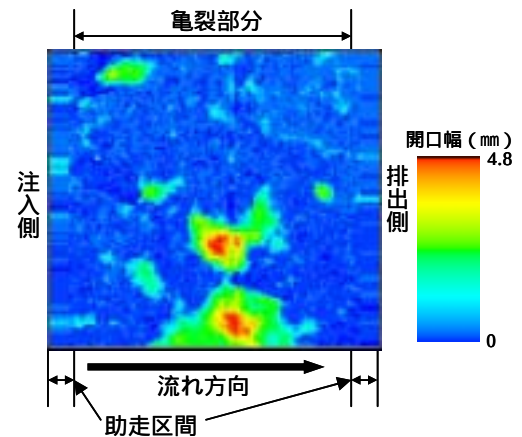


図-2 亀裂開口幅分布

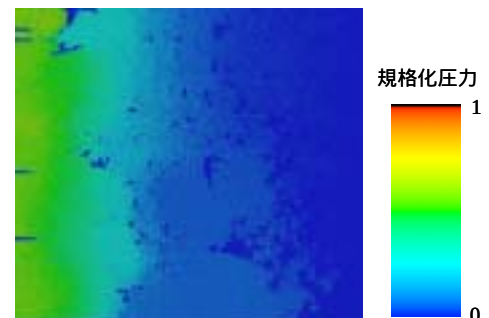


図-3 流体解析結果(圧力分布)

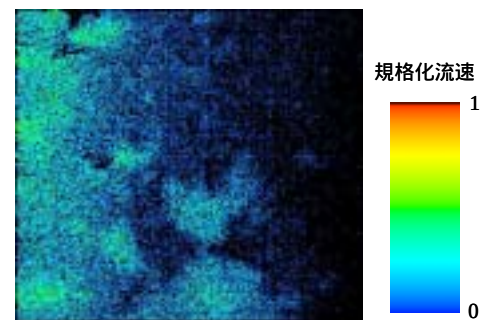


図-4 流体解析結果(流速分布)