

光学的手法を用いた亀裂内トレーサー濃度分布の定量的計測

日本原子力研究開発機構 正会員 ○佐藤 久

日本原子力研究開発機構 正会員 澤田 淳

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価における核種移行評価に際しては、地下水の移行経路にあたる岩盤の間隙中での地下水流動挙動や、物質移行挙動の把握が重要となる。花崗岩などの結晶質岩の場合、岩石基質部は緻密で間隙率や透水係数が低く、地下水は主に断層や亀裂などの間隙中を流れる。このような亀裂性岩盤を対象とした地下水流動評価や核種移行評価に際しては、亀裂を均質な平行平板に近似したモデルが用いられる。平行平板モデルは高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の第2次取りまとめでも安全評価のモデルとして採用されている¹⁾。

その一方で、実際の亀裂の表面形状は複雑で、それに伴い亀裂開口幅は一樣ではなく不均質に分布しており、それらが亀裂の水理物質移行特性に大きな影響を与えていると考えられる。第2次とりまとめにおける亀裂開口幅の設定には、トレーサー試験から得られた亀裂の透水量係数との相関を示す経験則が用いられている。トレーサー試験は物質移行に寄与する亀裂開口幅などの平均的特性を求めることができるが、得られた値は不均質に分布する開口幅などの影響により不確実性が大きいと考えられる。本研究では、この様に不均質に分布する亀裂開口幅が水理物質移行現象に与える影響を検討することを目的とした研究開発の一環として、光学的手法による亀裂開口幅測定及びトレーサー濃度分布の測定を行った。Detwilerらは亀裂を対象とした光学的な測定手法を開発し、模様のあるガラス板を用いて作製した亀裂内の開口幅やトレーサー濃度分布の定量的な測定結果を報告している²⁾³⁾。Leeらはこの手法を亀裂の透明レプリカ試料に適用してトレーサー濃度分布の測定を試みているものの、定量的な報告はなされていない⁴⁾。本研究では、これら既往の研究で用いられている光学的手法を用いて、岩石亀裂の透明レプリカ試料を対象に、亀裂開口幅分布の測定と、亀裂内のトレーサー濃度分布の経時変化の定量的な計測を行った。

2. 亀裂内計測手法の概要

亀裂開口幅の測定及びトレーサー濃度の測定原理は吸光光度計と同様で、トレーサー溶液の吸光度が光の透過する厚さに比例する Lambert の法則と、トレーサー溶液の吸光度が光の透過するトレーサー濃度に比例する Beer の法則を用いている。吸光光度計ではセル長（開口幅）を一定にして濃度を測定するが、本研究で用いている光学的手法では一定濃度のトレーサーを亀裂内に満たすことで開口幅を求めることができる。

光学的手法を用いた計測装置は、図 1 に示されるように照明、CCD カメラ、バンドパスフィルター、データ取得用のパソコンで構成されている。透明レプリカ試料に均一な強度の光を入射させるために照明の光源には LED フラット照明を用いた。上記 Lambert と Beer の法則の成立条件である単一スペクトルを抽出するために、トレーサーの吸光スペクトルの極大値に合わせた半値幅が 2nm のバンドパスフィルターを設置した。このバンドパスフィルターを用いたことにより、亀裂開口幅及びトレーサー濃度分布の測定精度が向上した。CCD カメラによる透過光強度の計測データはピクセル毎に 4096 階調（12bit）の数値データとして記録される。また、CCD の画素数は 1292×1030 ピクセルであることから、本研究で用いた 100mm×100mm の透明レプリカ試料の場合には、最小で約 0.1mm 間隔でのデータが取得できる。亀裂開口幅及び亀裂内のトレーサー濃度分布を算出するには、透明レプリカ試料の亀裂内に水と一定濃度のトレーサーを満たした場合の透過光強度をそれぞれ計測する。

Lambert と Beer の法則は次式で表わすことができる。

$$I = I_0 e^{-\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b} \quad (1)$$

I_0 : 入射光強度 I : 透過光強度 ε_d : トレーサーの吸光係数 b : 開口幅（液層の厚さ） c_d : トレーサー濃度

キーワード 光学的手法 開口幅 物質移行 レプリカ 亀裂

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門 TEL 029-282-1111

亀裂内を水で満たした場合の透過光強度を I_{water} 、亀裂内をトレーサーで満たした場合の透過光強度を I_{dye} とすると開口幅と透過光強度の関係は式(2)となる。 $\ln(I_{\text{dye}}/I_{\text{water}})$ と開口幅の関係は傾き $-\varepsilon_d \cdot c_d$ の直線関係となることから、開口幅が既知の試料を用いたキャリブレーションで $-\varepsilon_d \cdot c_d$ の値を求めることにより、 $\ln(I_{\text{dye}}/I_{\text{water}})$ の値から開口幅を算出することができる。透過光強度は Lambert の法則に基づいた開口幅の情報を含んでいることから、Beer の法則から求められる濃度情報のみを抽出するため、以下の式(3)を導いた。一定濃度 C_0 のトレーサーを亀裂に満たした場合の透過光強度を $I_{\text{dye}-C_0}$ 、一定濃度 C_0 のトレーサーを一定流量条件下でステップ状に注入し、時間 t が経過した場合のトレーサー濃度 C_t における透過光強度を $I_{\text{dye}-C_t}$ とすると、トレーサー濃度 C_0 における透過光強度で規格化した濃度分布は式(3)により算出することができる。

$$\ln\left(\frac{I_{\text{dye}}}{I_{\text{water}}}\right) = (-\varepsilon_d \cdot c_d) b \quad (2),$$

$$\frac{C_t}{C_0} = \ln\left(\frac{I_{\text{dye}-C_t}}{I_{\text{water}}}\right) / \ln\left(\frac{I_{\text{dye}-C_0}}{I_{\text{water}}}\right) \quad (3)$$

光学的手法により求めた透明レプリカ試料の開口幅分布を図 2 に示す。100mm×100mm の透明レプリカ試料の大きさに対して、約 700×約 700 ピクセルで開口幅データを求めている。透明レプリカ試料の亀裂上下面の形状を接触式三次元測定機を用いて 1mm 間隔で測定し、開口幅を評価した結果を図 3 に示す。光学的手法により求めた開口幅分布は亀裂表面形状から算出した亀裂開口幅分布と同様の分布であり、かつ空間分解能の高い光学的手法がより精緻な開口幅データを得られている。図 4 に式(3)を用いて求めた、100 秒、200 秒、300 秒後のトレーサー濃度分布をそれぞれ示す。図 2 と同様の空間分解能でトレーサー濃度を定量的に得ることができている。このように、式(3)を活用することで、亀裂内の濃度分布の定量的評価が可能となった。

3. おわりに

不均質に分布する亀裂開口幅が水理物質移行現象に与える影響を検討することを目的とした研究開発の一環として、Lambert と Beer の法則に基づく光学的手法を用いた開口幅測定及びトレーサー濃度分布の測定を行った。このような、定量的な計測データは、複雑な構造を持つ亀裂中の水理物質移行現象の把握に資するとともに、不均質亀裂性媒体中の移流分散解析コードの検証データなどに活用できると考えられる。今後は、天然の亀裂など様々な開口幅分布を呈する岩石試料への本手法の適用を検討していく予定である。

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 ―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) Detwiler, R, et al. : Measurement of fracture aperture fields using transmitted light, WATER RESOURCES RESEARCH, vol.35, 2605, 1999.
- 3) Detwiler, R, et al. : Solute transport in variable-aperture fracture, WATER RESOURCES RESEARCH, vol.36, 1611, 2000.
- 4) Lee, J, et al. : Experimental analysis on the effects of variable apertures, WATER RESOURCES RESEARCH, vol.39, 1015, 2003.

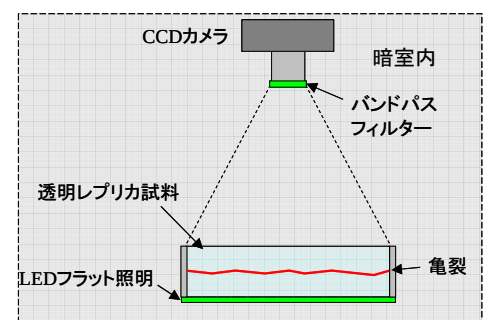


図 1 撮影装置概要

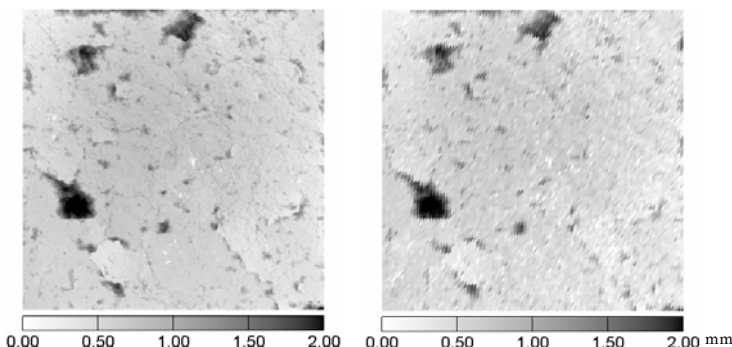


図 2 光学的手法による開口幅分布

図 3 亀裂表面形状測定による開口幅分布

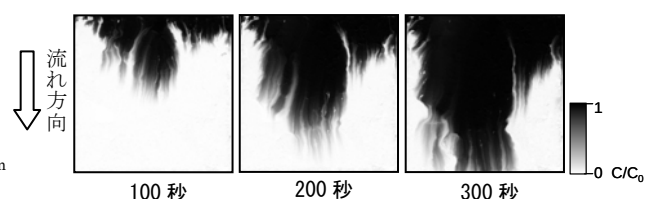


図 4 トレーサー濃度分布