

(17) 岩石内部亀裂系の 3 次元グラフィックス表示

3-Dimensional Graphical Visualization of Cracks in a Rock

清水 均^{*}・高橋 学^{**}・浜島良吉^{***}

Hitoshi SHIMIZU, Manabu TAKAHASHI, Ryoukichi HAMAJIMA

To study techniques for visualization of microcracks in a rock, the authors carried out the following methods. The 1st one is called the full-color 3-D imaging of cracks which is able to show the potential water-flowing channels by a full-color 3-D image of cracks in a rock impregnated with red dyed resin; the 2nd one is the replica method which displays 3-D graphical distribution of microcracks recorded on the replica film whose resolution is 100 angstrom, and this method is especially good for recording and displaying microcracks. The another one is X-Ray computer tomography method which collects data of the cracks in a cross section of a rock sample by X-Ray scanner without slicing or cutting the sample. Each methods have different characteristics, therefore different applicability.

1 はじめに

岩石の内部に存在する潜在亀裂や、応力によって生じた亀裂系を可視化するために、従来から様々な試みがなされてきている。著者らのグループも今までに、岩石の亀裂系の可視化に対して様々なアプローチを行ってきた。その主なものとして、①岩石内部亀裂系の 3 次元フルカラー画像データ作成、②レプリカフィルムを用いた微小亀裂系の 3 次元分布表示、③X線CTスキャナを用いた岩石内部の非破壊表示、の 3 つを挙げることができる。これらの一連の研究は、岩石の内部の亀裂を可視化する、という目的は共通しているが、対象とする亀裂系の規模や種類などの可視化の条件はそれぞれ異なっている。

そこで本研究では、それぞれの条件での「最適な可視化法」と「2次元から3次元への拡張」ということをキーワードに、新しい可視化手法の開発とデータの3次元表示を試みた。

2 岩石内部亀裂のフルカラー表示手法¹⁾

2.1 サンプルの作成と CCD カメラによる画像取り込み

通常、地下の岩石はその深さに応じた地圧を受けており、流体も応力を受けた岩石中の亀裂系を移動している。そこでこのような状態における水みちを再現し可視化するために、三軸圧縮応力下におかれた稲田花崗岩の供試体（直径 30mm、高さ 60mm）の割れ目系に、その応力状態を保ったまま、赤色顔料で着

^{*} 学生員 埼玉大学大学院博士前期過程 理工学研究科建設工学専攻

^{**} 正会員 工博 通産省工業技術院地質調査所主任研究官 環境地質部

^{***} 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科

色された樹脂（シアノアクリレート）を注入し、その供試体断面のフルカラー画像を CCD カメラでコンピュータに入力した。さらにその供試体を 0.5 ミリ間隔で研磨した毎に取り込んだ 98 枚の画像を 3 次元構築し、フルカラーによる任意断面のスライス画像の表示を行った（図 1）。

2.2 画像データの 3 次元構築

断面画像は取り込んだ順に、フルカラーの画像データとして 3 次元構築される。その画像データを縦方向（重ねた断面を貫く方向）にスライスして画像表示すると、取り込んだ断面画像とは違う角度から岩石の内部の状況を確認できる。また図 1 の模式図に表したように、3 次元直交座標系の座標軸を X、Y、Z 軸とすると、それぞれの軸に垂直な断面をスライスして表示することが可能である（図 2）。

図 3 は Y 軸方向に垂直な断面を、供試体端部より 5、30、60、90、134(中央部)、178、208、238、263 番目の順に切り出し、表示した様子を示している。このようにすると、赤色樹脂が亀裂を通して浸透している様子が各断面毎によく確認することができる。

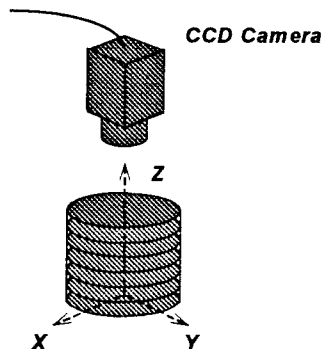


図 1 画像取り込み模式図

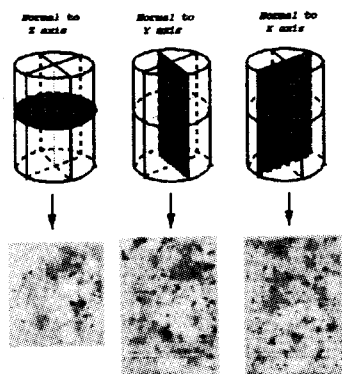


図 2 表示可能な断面の方向

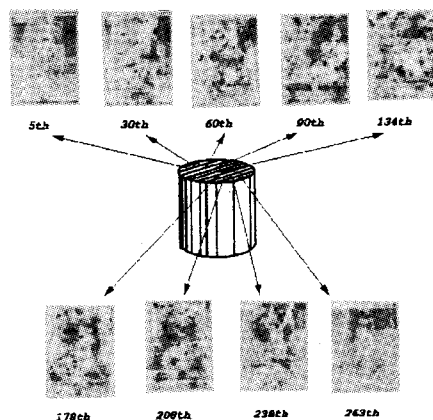


図 3 各位置で切り出した断面画像

3 レプリカ法による微小亀裂の 3 次元分布表示

3.1 レプリカフィルムについて

レプリカフィルムとはアセチルセルロース（Acetyl Cellulose）フィルムとパラフィンを組み合わせた、被膜形成能の良いプラスチックフィルムのことである。このフィルムを酢酸メチル溶剤を塗布した試料表面に手早く貼りつけ、乾燥後剥がすとフィルムに試料表面の凹凸のみが記録される。この原理を利用して岩石表面に現れる亀裂系の抽出を行うことを、ここではレプリカ法と呼ぶことにする（図 4）。製品の説明書によると、レプリカの解像度は約 100 Å と非常に高解像度であり、岩石全体の内部亀裂系を表現するには十分である。

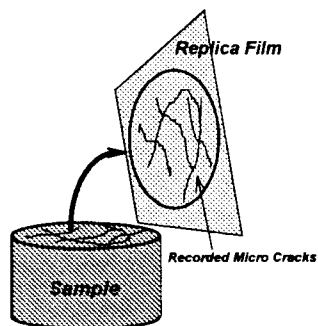


図 4 レプリカ法概念図

3.2 亀裂の 3 次元分布画像

岩石内部の亀裂の分布を 3 次元的に捉えることは、困難ではあるが非常に重要である。そこで一定間隔で作成した岩石断面のレプリカフィルムの画像をコンピュータ上で積み重ねて 3 次元表示を行った。

図5は3軸試験後の稲田花崗岩の亀裂の分布を3次的に表したものである。一枚のレプリカフィルム上には、岩石断面に現れるほぼすべての割れ目（凹凸）のみが記録されるため、RGB 画像の様に画像処理で2値化を施して亀裂系を抽出する必要が全くない。このフィルムを0.1mm 間隔で268枚、すなわち供試体直径30mm、高さ0.1mm×268=26.8mmの領域において作成し、一旦印画紙に焼き付けた後にイメージスキャナでワークステーションに取り込む。そしてデータをコンピュータ上で3次元構築し、亀裂系のボリュームデータ（Volume Data）を作成し、レイ・トレーシング・メソッド（Ray Tracing Method）²⁾によって、図のように3次的な画像を画面表示させることが可能となった。この画像は任意に回転、移動、拡大・縮小、視点の設定などが可能で、また断面の切り出しも行うことができる（図6）。

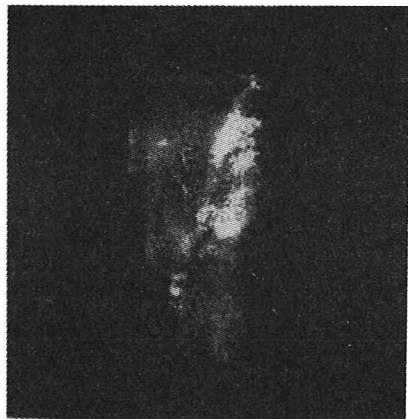


図5 亀裂系の3次元分布図



図6 切り出されたレプリカデータ断面図

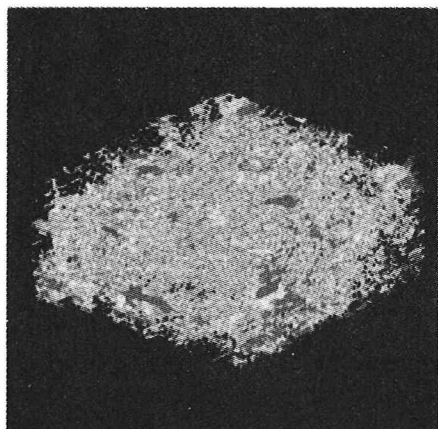


図7 インタクトな花崗岩の3次元表示

図7はインタクトな状態の稲田花崗岩のHardway面に平行な断面のレプリカフィルムを0.1mm 間隔で88枚作成し、CCD カメラを用いて直接コンピュータに取り込んで上記のようにレイ・トレーシングメソッドによって3次元表示したものである。レプリカフィルムに記録された凹凸は、平行光線を透過させることによってはじめてその凹凸にコントラストがつき、スクリーン上に線形として表示される。図5の例のように印画紙に焼き付けることによって線形を表すことも有効な手段であるが、一度印画紙という媒介を通さなければならないため非常に手間がかかる。ところが CCD カメラを使用する手法はフィルムから直接データが取り込めるため、作業時間の大幅な短縮が可能になる。

4 X線CTスキャナによる岩石内部の表示

4.1 概要

当然ながら、サンプルは研磨してしまうと元に戻すことは不可能になる。それゆえ上記2つの可視化手法は、例えば実験前と実験後の内部構造の比較などには向いていない。

そこでX線CTスキャナによって岩石の内部を表示することを考える。このような研究は既に何例か報告されており、例えば岡津³⁾は油層コアの孔隙特性の分析や流動特性分析にX線CTを用いている。X線

C Tを用いることの最大の利点は、非破壊で内部を観察できることである。しかし、亀裂系の表示や幾何学的特徴の分析などに利用するには、解像度などの点を考えるとむしろ欠点も多い。

今回はまだテストケースであるが、その欠点を捕うべく、岩石に水銀を圧入することによって、亀裂系とその他の部分のC T値に予めコントラストをつけ、その後X線C Tスキャナで画像を撮影するという新しい手法を紹介する。

4.2 水銀を圧入した岩石のX線C T画像

図8は稲田花崗岩（直径30mm、高さ60mm）のX線C T画像である。左右ともに破壊強度直前まで1軸圧縮試験機で軸力を作用させ、微小亀裂を発生させた。図の左（図8.a）は医療用の造影剤を浸透させたもの、右（図8.b）は水銀を約1500barの油圧によって圧入させたものである。画像が白いほどC T値が高い（物質の密度が高い）ことを示し、画面上では空気は黒で表現される。ちなみに水銀の比重は13.6である。

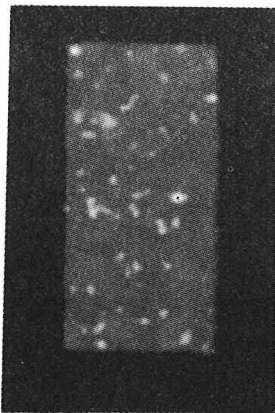


図 8.a 造影剤を浸透

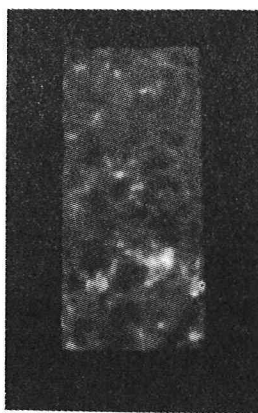


図 8.b 水銀を圧入

造影剤浸透サンプルの画像では、所々白い部分が点在しているのがわかる。これは花崗岩中の比重の高い鉱物が表現されているものと思われる。また造影剤もC T値を上昇させる働きがあるのだが、この画像で見える限りでは、亀裂系をはっきりと確認することはできない。

一方、水銀圧入サンプルの画像においては、白い部分が連結性をもって表現されている。この白い部分が亀裂系に入っていた水銀、及び高密度の鉱物を表していると思われる。この画像からは鉱物と亀裂（に入った水銀）を区別することは難しいが、造影剤浸透の画像と比較すれば、明らかにこの部分が亀裂のネットワークを表現していることがわかる。

5 まとめ

5.1 可視化手法

着色樹脂を注入する手法は、赤く着色された部分が、流体が通過していった可能性のある経路の範囲を示しているのであるが、逆にその部分がそのままの透水経路を表している訳ではない、ということに注意しなければならない。なぜなら粘性が低く、表面張力の小さい流体は毛細管現象によって、圧力を加えなくともそれ自身で鉱物粒界まで入り込んで濡れさせてしまうからである。よってこのフルカラー画像から2値化によって赤色部分を抽出しても、正確な亀裂の幅や方向性を検討することは困難である。しかし今まで他の研究での3次元データの作成は、そのほとんどが既に2値化されたデータによって行われてきたことを考えると、データ量は増えるが岩石の内部をリアルに、しかも任意の位置で観察できるこの手法は、亀裂の可視化以外にも含有鉱物の観察など様々な目的において利用価値があるものと思われる。

レプリカ法は解像度が高く、2値化の必要なしに亀裂のみを抽出できるので、非常に優れた可視化法である。非常に精密に作成されたレプリカフィルムならば、顕微鏡観察にも使用することができ、岩石薄片と比較しても遜色無い結果を得ることが可能である。現在のところ、開口幅の広い破断面のような大きな割れ目から数十ミクロン幅のマイクロクラックまで、しかも岩石全体の範囲においてそのすべてを記録できる手法はこのレプリカ法以外に存在しないであろう。しかし、溶剤でフィルムを溶解することで生じる

周辺部の歪みや、3次元データ作成時の位置あわせの難しさなどの問題点もあり、この手法も万能とはいえない。

X線CT画像は非破壊で内部を可視化でき、3次元データも容易に作成することができる。また今回は2次元画像のみであったが、水銀を圧入して亀裂系の可視化を試みた。先ほどの樹脂とは逆に、水銀は接触角及び表面張力が非常に大きいので、圧入の圧力を解放すると、時間とともに水銀が岩石の亀裂内部から流出してくる。この問題に対しては、水銀より融点が高く常温では固化する Wood's Metal を用いた研究が Pyrak-Nolte ら⁴⁾によって行われている。ただしいずれにしても、今回用いたX線CT装置の解像度自体はおおよそ数ミリ程度であり、もともと岩石内部に存在するミクロンオーダーの潜在亀裂等を可視化するには、まだ現段階では実用的ではない。

またX線CT装置で岩石のように空気との密度差が大きいものを撮影すると、空気と岩石の境界面でX線の散乱による偽像 (artifact) が発生する。偽像が発生した画像では、偽像が原因の線形と岩石の亀裂系などの線形との区別がつきにくく、完全に分離することは不可能である。

5.2 3次元表示手法

本研究での3次元表示のアルゴリズムは、医療の分野では人体内部の臓器や骨格を3次元表示するために、CT画像やMRI画像を用いて既に実際の研究や治療に活用されているものである。しかし医療の分野とは違って、この分野における3次元ビジュアライゼーションの意義や目的は、現在のところ実際の現象や、シミュレーション結果を理解するための補助的役割の域を脱していない。これは対象とするものの規模があまりにも違うのと、可視画像化の手法自体がまだ発展途上であるということもその一因であろう。

今回のデータに関しても、これらから実際にモデル化や解析を行うためには、さらにいくつかのステップを踏まなくてはならず、今後もその妥当性を含めてさらに検討する必要がある。

5.3 おわりに

見えないものを見えるようにする、というのが可視化の意義であるが、ではなぜ可視化が必要なのだろうか。当然「百聞は一見にしかず」の諺のように、単に見て理解するための手段であることは間違いないが、もう一つの答えとして、「可算化」という言葉を挙げておきたいと思う。

可算化を目的とした可視化の場合、そのデータはアナログではなくコンピューターを用いたデジタルデータのことを意味する。今後のコンピューターのハード並びにソフト技術の発達に伴い、この分野における可視化の意義もさらに重要度を増していくことであろう。

参考文献

- ¹⁾ 清水 均・高橋 学・浜島良吉(1995): 岩石内部亀裂系のフルカラー可視化法、応用地質、Vol.36、No.3、pp219-223
- ²⁾ 株式会社クボタ 編(1995): AVSによる実践ビジュアライゼーション、オーム社
- ³⁾ 岡津弘明(1995): X線CTスキャナーそのコア分析への応用技術開発一、非破壊検査、Vol.44、No.5、pp319-324
- ⁴⁾ Laura J.Pyrak-Nolte., Carlo D.Montemagno., Gemei Yang., Neville G.W.Cook, and Larry R.Myer. (1995): Three-dimensional tomographic visualization of natural fracture networks and graph theory analysis of the transport properties, International Congress on Rock Mechanics (ISRM) PROCEEDINGS, Vol.2, pp855-859