

マイクロフォーカス X 線 CT による 花崗岩の亀裂形状および開口幅の評価

中島 伸一郎^{1*}・長谷川 大貴²・安原 英明³・岸田 潔⁴

¹正会員 京都大学次世代開拓研究ユニット (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂B)

²学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C)

³正会員 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C)

*E-mail:s.nakashima@hx7.ecs.kyoto-u.ac.jp

直径50mm高さ100mmの縦割れ亀裂を有する花崗岩供試体を、マイクロフォーカスX線CTによって撮像し、CT画像から3次元的な亀裂形状と開口幅の分布を推定した。花崗岩は密度が比較的高いため光線硬化の影響が大きく、亀裂形状を精度良く推定するためには光線硬化に対する処理が不可欠である。本研究では、亀裂経路を探索する際の断面のスライス方向について考慮したほか、花崗岩の光線硬化シミュレーション画像を作成し、CT生画像から差し引くことで光線硬化を除去した。また、CT値の空間的変動の大きい画像から、亀裂経路を自動的に探索する手法を展開した。非拘束状態での亀裂形状と開口幅分布を求めた結果、開口幅の面全体の平均値は0.39mm、アスペリティの接触率は2.0%という値を得た。

Key Words : *μfocus X-ray CT, granite, fracture, aperture, geometry, beam hardening*

1. はじめに

岩盤不連続面の幾何学的特性、すなわち壁面の凹凸状況や開口幅分布は、不連続面の力学・透水挙動に大きな影響を与えるため、精度良く把握することが求められる。供試体レベルで言えば、不連続面の標高分布は、非接触のレーザ変位センサと高精度自動位置決めステージを組み合わせた高精度3次元形状測定システムにより、標高分布をミクロンオーダーの精度で把握することが可能である¹⁾。

一方、不連続面を重ね合わせた時の開口幅分布あるいは接触状況の分布を実測するのは容易ではない。測定手法としては、①上下壁面の標高分布を別々に計測し、数値上で重ね合わせる方法、②重ね合わせた不連続面内に樹脂等を含浸・固化させた後、不連続面に垂直な断面でスライスしながら含浸物質の厚さを実測していく方法、③樹脂等を挟んで壁面を重ね合わせることで、不連続面の開口状況を型取りする方法、④透明な不連続面レプリカ内部を液体で満たし、偏光を当てたときの色彩から開口幅を測定する方法などが試みられている^{2),3)}。

また、最近では、X線CTにより非破壊・非接触で不連続面の開口状況を測定することも行なわれている。例えば、佐藤ら⁴⁾は、亀裂内部を水および空気ですらした状態でそれぞれCT画像を撮影し、両者の画像間差分を取ることで開口幅分布を測定している。

本研究では、直径50mm高さ100mmの縦割れ亀裂を有する花崗岩供試体を、マイクロフォーカスX線CTによって撮像し、CT画像から3次元的な亀裂形状と開口幅の分布を推定した。花崗岩は密度が比較的高いため光線硬化の影響が大きく、亀裂形状を精度良く推定するためには光線硬化に対する処理が不可欠である。光線硬化の障害を取り除く方法としては、上述の画像間差分法のように、撮像条件を工夫する方法もあるが、本研究では、データ処理の方法を工夫することで障害を軽減した。具体的には、亀裂経路を探索する際の断面のスライス方向について考慮したほか、花崗岩の光線硬化シミュレーション画像を作成し、CT生画像から差し引くことで光線硬化の影響を除去することを試みた。また、CT値の空間的変動の大きい画像から、亀裂経路を自動的に探索する手法を展開した。

2. マイクロフォーカスX線CTによる単一亀裂を有する花崗岩供試体の撮像

今回撮像したのは、割裂による縦割れ亀裂を有する直径50mm×高さ100mmの花崗岩供試体(岐阜県瑞浪市産、深度180~200m)である(写真-1)。密度は2.58g/cm³、空隙率は1.00%である。X線回折の結果より、主要鉱物は石英、長石、黒雲母である。供試体は、亀裂面を重ね



写真-1 縦割れ亀裂を有する花崗岩供試体
(右は亀裂を開いた状態)

表-1 マイクロフォーカスX線CTスキャナの性能

最大管電圧, 管電流, 出力	225 kV, 1.0 mA, 200 W
最小焦点寸法	4 μm
検出器視野	229 / 152 / 114 mm
画素数	2048 ² / 1024 ² / 512 ²
最大撮影領域	ϕ 200mm
最大撮影対象	ϕ 700mm \times H700mm, 45 kg

表-2 撮像条件

管電圧	130 kV	管電流	120 μA
検出器視野	152 mm	視野サイズ	54.4 mm
画素数	1024 ²	スライス厚	80 μm
ビュー数	1200	積算枚数	10枚
再構成フィルタ	Shepp		

合わせてゴムスリーブ (肉厚 1 mm) で覆った状態で撮像に供した。

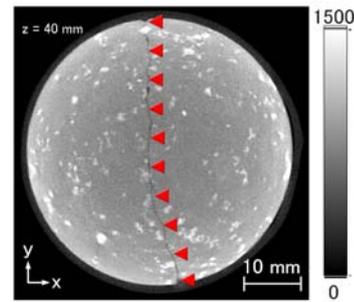
使用した X 線 CT スキャナは、京都大学が運用するマイクロフォーカス X 線 CT 装置 : KYOTO-GEO μ XCT (TOSCANER-32250 μ HDK) である。基本仕様を表-1 に示す。

撮像条件は種々設定が可能であるが、今回は、表-2 に示す条件とした。視野サイズ 54.4 mm (供試体直径 50 mm) を 1024 \times 1024 画素で出力するので、この撮像条件での水平断面内の空間分解能は約 53 μm である。また、1 断面のスライス厚は 80 μm であるため、最小ボクセルサイズは約 53 \times 53 \times 80 μm となる。

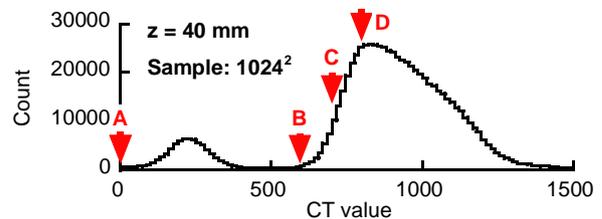
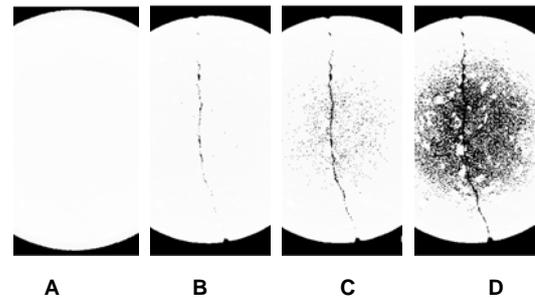
3. 断面の取り方による亀裂抽出状況の差

(1) 撮像結果

撮像結果の一例として、供試体底面から高さ 40 mm ($z = 40 \text{ mm}$) の位置における水平断面の CT 画像を図-1(a) に示す。この図では、CT 値 0~1500 を 256 階調のグレースケールで表示している。図中、赤矢印で示すように、画像中央の縦方向に不連続面の存在が存在する。供試体



(a) グレースケール画像



(b) CT 値ヒストグラム上の閾値と 2 階調画像

図-1 $z=40\text{mm}$ の水平断面 CT 画像と 2 階調画像

中心部よりも外縁部の方が明るいのは、光線硬化⁵⁾ (ビームハードニング) と呼ばれる CT 値の空間変動によるものである。

図-1(a) の CT 画像から、亀裂を抽出することを考える。単純に考えれば、岩石実質部分と亀裂内部 (空気) では CT 値に大きなコントラストが生じるから、CT 値に閾値を設けて 2 階調化すれば亀裂の抽出は可能である。

図-1(b) は断面内の CT 値をヒストグラムで表示したものである。ヒストグラムには CT=200 と 800 の周辺に大小のピークが確認できる。このヒストグラムに基づいて閾値を 4 種類 (A, B, C, D) に設定し、白黒 2 階調で表示した。A と B の比較では、画像上の白色円板の直径が小さくなっていることから、ヒストグラムにおける CT=200 周辺の山は、供試体に被せたメンブレンであることがわかる。B 画像 (閾 CT 値=600) で画像中心付近に亀裂が黒く表示されるようになるが、離れ小島的であり、供試体を上下に貫くほど鮮明ではない。閾 CT 値を 700 まで上げると (C 画像)、亀裂がより鮮明に現れるが、亀裂でない部分も黒く表示されるようになってしまう。しかも、外縁部ではまだ亀裂が白くつぶれている。さらに閾 CT 値を 800 まで上げると (D 画像)、亀裂でない部分の黒色点が増加し、それに隠れて亀裂が見えなくなって

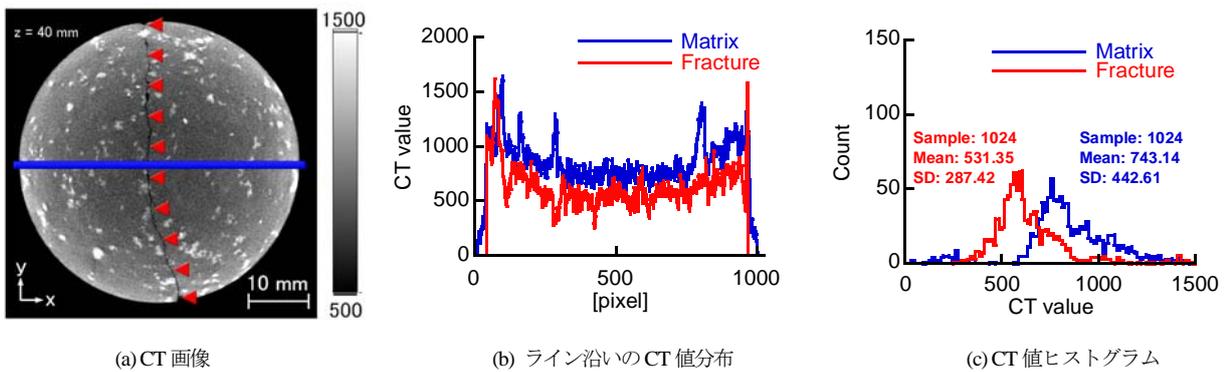


図-2 水平断面 CT 画像 ($z=40$ mm) における亀裂上の CT 値とマトリクス部の CT 値の比較

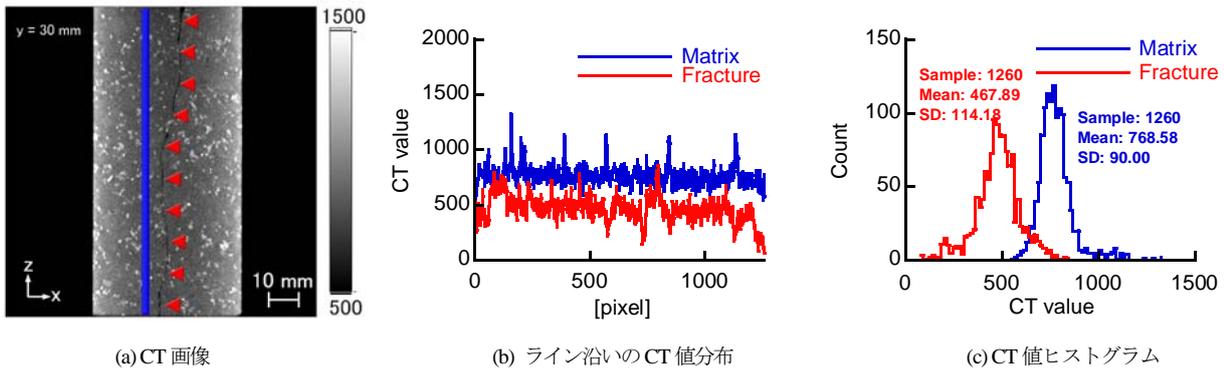


図-3 鉛直断面 CT 画像 ($y=30$ mm) における亀裂上の CT 値とマトリクス部の CT 値の比較

しまう。以上より、単に CT 値に閾値を設けて 2 階調化するだけでは、亀裂情報を抽出することは困難であることがわかる。

(2) 断面の取り方による亀裂抽出状況の差

図-2 は、 $z=40$ mm の水平断面画像について、亀裂沿い (赤矢印) と非亀裂部分 (青ライン) の CT 値を比較したものである。亀裂内部は空気に満たされているため、CT 値は空気の CT 値で一定のはずであるが、実際には図-2(b)のように分布し、非亀裂部と同様に、供試体中心部よりも外縁部のほうが高くなる。図-2(c)のヒストグラムより、平均的には「亀裂内部 CT 値 < 岩石実質部 CT 値」となっているが、その差は必ずしも明確ではなく、重なり合う部分も大きい。図-1 において閾 CT 値を動かすだけでは「亀裂が繋がってくれない」あるいは「余分な部分まで亀裂として認識されてしまう」ということが生じたのは、このためである。

一方、図-3 は、 $y=30$ mm の鉛直断面について図-2 と同様に亀裂沿いと非亀裂部の CT 値を比較したものである。図-3 (b)より、鉛直断面については、岩石実質部と亀裂部の CT 値はそれぞれのラインにそってほぼ一定で、図-3 (c)のヒストグラム上でもピークが明確に分離できることが確認できる。

以上の性質は、光線硬化による CT 値の変動が、供試体の縁に沿って同心円状に発生することに起因する。し

たがって、閾 CT 値を設けて亀裂を抽出するにあたっては、亀裂沿いに CT 値が大きく変動する水平断面よりも、変動がほとんどない鉛直断面のほうが好都合であるといえる。

4. 亀裂形状の評価

(1) 亀裂経路の特定方法

鉛直断面の CT 画像を用いて、亀裂の形状 (経路) を自動的に探索することを考える。

図-4 は、亀裂経路および開口幅の特定方法の流れを示している。ここでは、縦軸が z 方向、横軸が x 方向を表す。まず、亀裂部分は CT 値が低いので、CT 画像上は濃い黒色で表現される (図-4(a))。亀裂経路は各行 (各 z ライン) を必ず横切り、かつ横切るのは 1 回だけと想定すれば、図-4(b)のように、各行で CT が最小値を示すセル (赤セル) が亀裂経路となる (ただし、実際には、ノイズや亀裂開口幅の狭さ、CT 値の空間変動のせいで、CT が最小値を示すセルが亀裂経路とは限らない)。続いて、開口幅を特定するために、亀裂経路のセルから左右方向 ($\pm x$ 方向) に CT 値が所定値よりも低いセル (黄セル) を探索する (図-4 (c))。各 z ライン上で、赤セルが亀裂経路、黄セルが亀裂開口幅、黄セルの左右端が亀裂壁面と特定される (図-4 (d))。

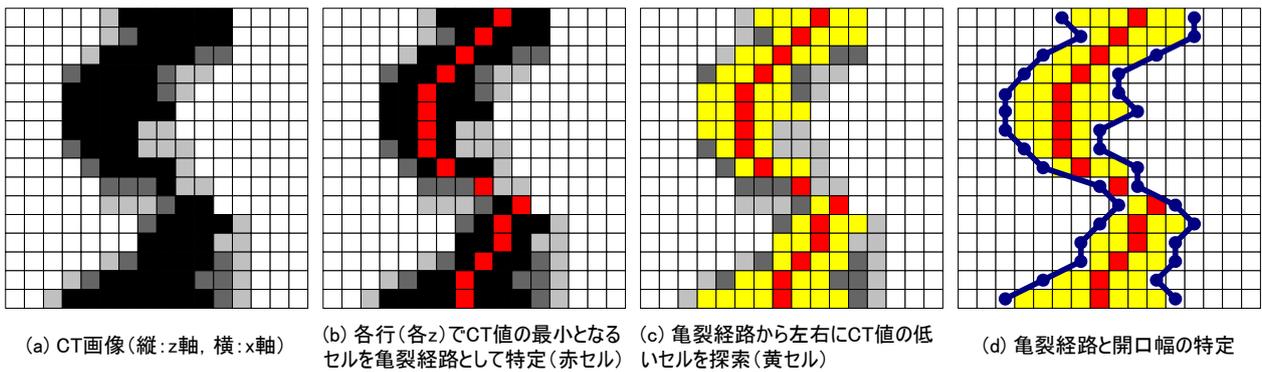
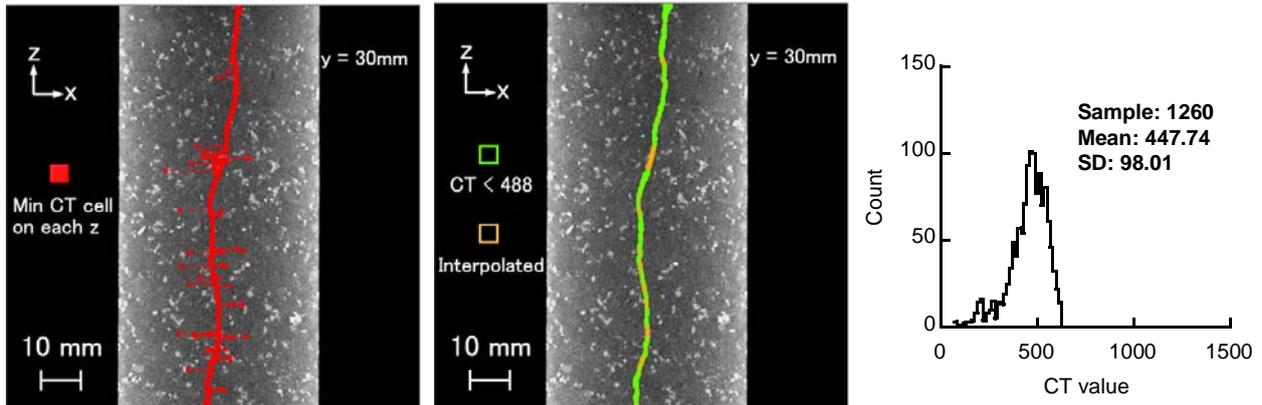


図-4 亀裂経路および開口幅の特定の流れ



(a) 各 z の最小 CT 値のセル (b) 特定された亀裂セル

図-6 最小 CT 値のヒストグラム

図-5 y=30mm 鉛直断面における亀裂経路の特定

y = 30 mm の鉛直断面 CT 画像について、各 z ごとに CT 値が最小となるセルをプロットしたのが図-5 (a)である。図-3 (a)との比較から、赤のプロットがおおまかには亀裂経路に該当していることが確認できる。ただし、ノイズ的に亀裂経路から外れる部分が存在する。

図-5(a)のノイズを除去するため、CT 値から判断して、亀裂上にあることが確実なセルだけを、まず特定する。図-6 は、図-5(a)における赤プロットの CT 値のヒストグラムである。図より、「確実な亀裂」の判断基準として、平均値 (CT 値 448) を用いることにする。CT 値が 488 未満のセルだけをプロットしたものが図-5(b)の緑のプロットである。

さらに、亀裂セルが特定できていない行 (z) については、亀裂の連結性を考慮して位置を特定することにした。すなわち、「隣接行の亀裂セルは、お互いそれほど遠くない位置にある」という仮定を設け、すでに位置が特定された亀裂セルから、順次探索していくことにした。探索結果が図-5 (b)のオレンジのプロットである。今回は、探索範囲を亀裂セルから左右に 5 セルぶんとし、その探索範囲内での最小 CT 値となるセルを亀裂セルとみなした。図より、緑プロット (CT ≤ 448) とオレンジプロット (探索範囲中の最小 CT 値セル) によってノイズが除去され、ほぼ完全に亀裂経路を探索できていることが確認できる。

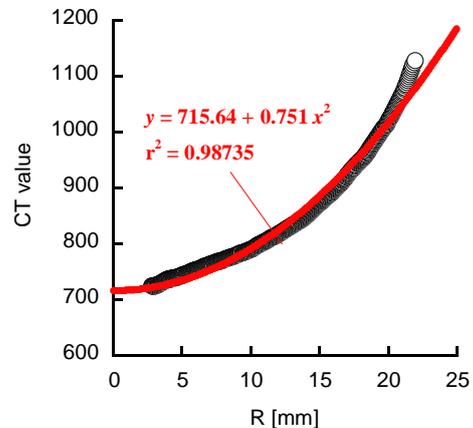


図-7 供試体中心軸からの距離 R と CT 値の関係

(2) 光線硬化シミュレーションによる光線硬化の除去

光線硬化の程度は、線源の条件、被写体の材質や寸法、撮像条件等に依存するため、一概に特定することは難しい。光線硬化の影響を除去する方法としては、亀裂内を密度の異なる物質 (例えば、空気と水) で満たした場合の CT 画像をそれぞれ撮像し、差画像を求めることで、光線硬化の影響をキャンセルし亀裂の情報のみを取り出すことが行なわれている⁴⁾。また、別の方法として、CT 画像に発生する光線硬化を理論的にシミュレートして補

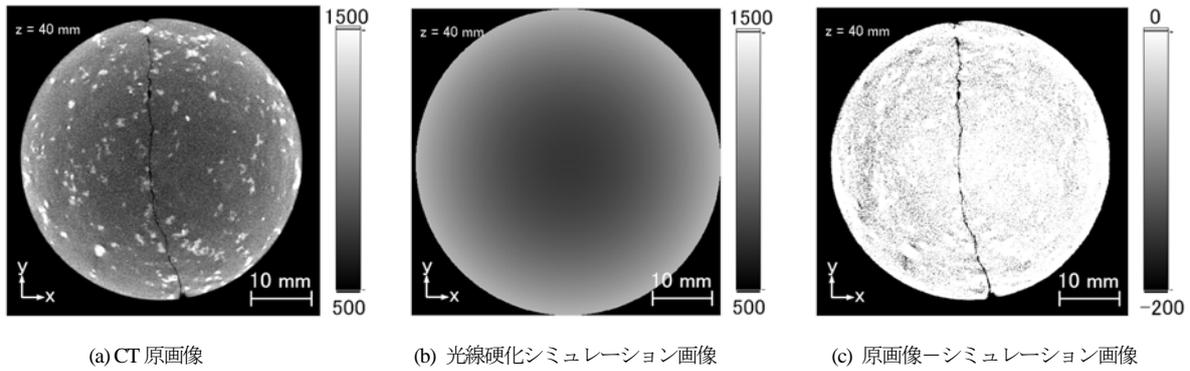


図-8 光線硬化シミュレーション画像を用いた光線硬化補正例 (z = 40 mm)

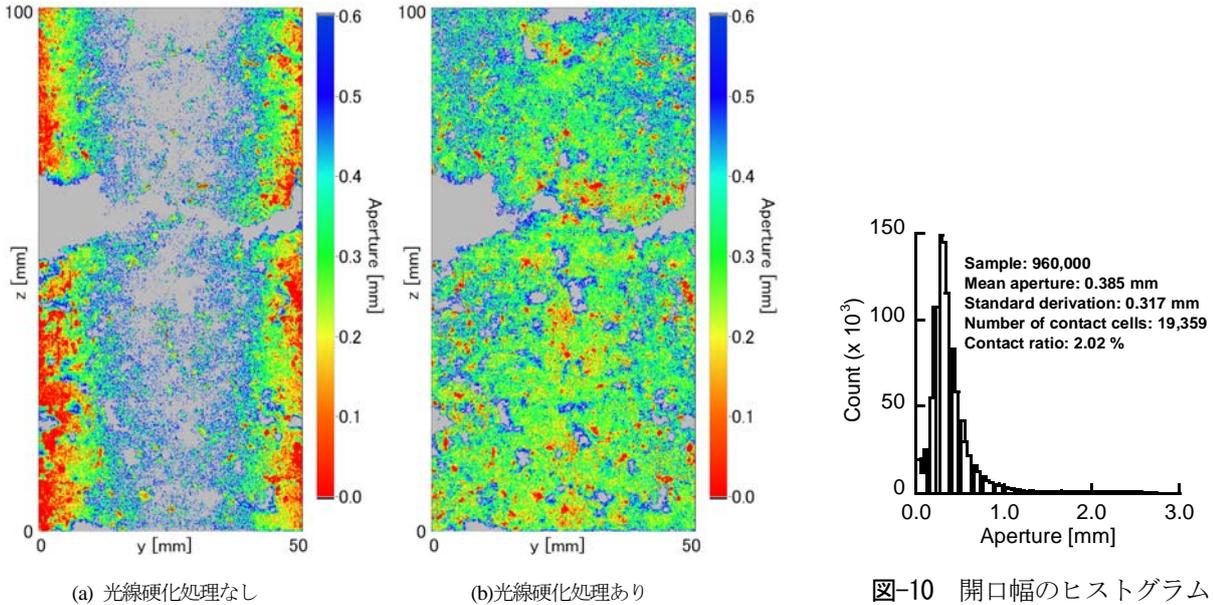


図-9 CTデータに基づく亀裂の開口幅分布
(灰色の領域は開口幅>0.6mm)

正する方法もあるが、CT スキャナの X 線スペクトルデータ、試料の密度と化学組成が既知であることが条件であり⁵⁾、これも容易ではない。

本研究では、撮像した全ての CT 画像データのうち、亀裂でない部分の CT 値を用い、供試体中心軸からの水平距離 R と CT 値との平均的な関係を求め、この関係を用いて光線硬化を補正することにした。つまり、CT データを同心円上ごとに平均化することで、仮想的に均質な花崗岩円柱供試体の光線硬化を含む画像をシミュレートする。

図-7 は、供試体中心軸からの距離 R と CT 値との関係を示す。図中に示した二次関数による回帰曲線を使用し、光線硬化をシミュレートした。

図-8 は光線硬化の補正の例である。図-8 (a)に示す CT 原画像から、(b)に示す光線硬化シミュレーション画像を引くことで、(c)の画像を得る。図-8(c)と図-1 との比較からも、光線硬化の補正によって岩石実質部がほぼ均等に除去され、亀裂が鮮明に浮かび上がっていることが確認

できる。

(3) 亀裂壁面の標高分布と開口幅分布

以上の方法を用いて、全ての鉛直断面画像について亀裂経路を探索した後に、図-4 の流れに従って壁面標高分布と開口幅分布を求めた。

図-9 は、光線硬化シミュレーションによる光線硬化補正を行なった場合と行なわない場合の開口幅分布を示している。図-9(a)より、光線硬化の補正を行なわない場合の開口幅分布は、中央部の開口幅が広く (灰色は開口幅 >0.6 mm を示す)、左右端部で開口幅が狭い結果となっていることが確認できる。一方、図-9 (b)より、光線硬化の補正を行なった場合には、面全体に均質な接触状況となった。

図-10 は光線硬化を補正した CT 画像から求めた開口幅のヒストグラムである。図より、開口幅の面全体の平均値は 0.39 mm、接触率は 2.0% と評価される。

5. おわりに

本研究では、直径 50mm 高さ 100mm の縦割れ亀裂を有する花崗岩供試体を、マイクロフォーカス X 線 CT によって撮像し、CT 画像から 3 次元的な亀裂形状と開口幅の分布を推定した。撮像された CT 原画像には、光線硬化の影響が大きく現れていることが確認されたため、亀裂経路を探索する際の断面のスライス方向について考慮したほか、花崗岩の光線硬化シミュレーション画像を作成し、CT 原画像から差し引くことで光線硬化を除去した。また、CT 値の空間的変動の大きい画像から、亀裂経路を自動的に探索する手法を展開した。非拘束状態での亀裂形状と開口幅分布を求めた結果、開口幅の面全体の平均値は 0.39mm、アスペリティの接触率は 2.0% という値を得た。この推定結果については、今後、レーザープロファイラによる壁面標高分布の測定など、他の手法での推定結果と比較して、その精度を検証する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)

No.20560460 によって実施した。X 線 CT の使用および撮像に際しては、京都大学 岡二三生教授、肥後陽介助教にご尽力賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大西有三, 矢野隆夫, 岩本宏, 西川直人: 岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発・研究とその変遷, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.307-320, 2000.
- 2) E. Hakami, H.H. Einstein, M. Iwano and S. Gentier, Characterization of fracture apertures - methods and parameters. In: Proceedings of 8th ISRM Congress, pp. 751-754, 1995.
- 3) 佐藤久, 澤田淳: 単一亀裂を対象とした光学的手法によるトレーサー移行計測データに基づく物質移行評価, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (CD-ROM), pp.263-268, 2008.
- 4) 佐藤晃, 深堀大介, 澤田淳, 菅原勝彦: X 線 CT による不均質材料中の亀裂開口量評価, 資源と素材, Vol. 120, No. 6, 7, pp.365-371, 2004.
- 5) 中島司, 中島善人, 中村光一, 池田進: X 線 CT による岩石内部構造の観察・解析法, 地質学雑誌, Vol. 106, No.5, pp.363-378, 2000.

APERTURE MEASUREMENT OF GRANITE FRACTURE USING MICROFOCUS X-RAY CT SYSTEM

Shinichiro NAKASHIMA, Daiki HASEGAWA, Hideaki YASUHARA
and Kiyoshi KISHIDA

Microfocus X-ray CT imaging was conducted on a granite sample, 50 mm in diameter and 100 mm in length, containing a single fracture. Analyzing the CT data, three-dimensional geometry and aperture distribution of the fracture was evaluated. An artifact called beam hardening remarkably occurred in the obtained CT images because bulk density of granite is rather high. The artifact was reduced by the correction of the image using the computer-simulated beam-hardening image of granite. We developed a procedure to determine the path of the fracture automatically from the obtained CT image. From the result, average aperture and contact ratio of the sample fracture was estimated to be 0.39 mm and 2.0%, respectively.