

# 花崗岩の粒界クラックの分布が力学的特性 に及ぼす影響に関する研究

## STUDY FOR MECHANICAL PROPERTY OF GRANITE WITH DISTRIBUTION OF MICROCRACKS ON GRAIN BOUNDARY

清木隆文\*・海老原 和\*\*・篠原雄介\*\*\*

In this study, the authors focused on the relation between the mechanical properties and the distribution of the microcracks of grain boundaries on Indata granite. Although intact rock is also failure on the certain load, the threshold of the failure should occur around the microcracks around the grain boundary. In this study, the authors carried out the replica method to get the geometrical information of microcracks on the surface of the granite specimens and the scanning to get the information by the laser scanning microscope. The authors map the material information on the finite element mesh and estimate the uniaxial strength by elastic FEM analysis. The numerical results show that the microcracks around the grain boundary degrade the elastic modulus.

**Key Words:** granite, microcracks, grain boundary, mechanical property, FEM analysis

### 1. はじめに

近年では、高レベル放射性核種の処理問題への対策として地層処分が計画されていることなどから、より一層地下空間を有効利用する需要が高まると予想されるので、堅固な岩盤の構造解明は重要な課題である。放射性廃棄物の地層処分問題では、地下深部を構成する岩盤の力学的挙動を正確に把握することが必要不可欠である。節理などのない健全な岩盤も、微視的に見ると岩種によって、マイクロクラックが多数含まれている。この微視的なクラックが巨視的な破壊につながるものであり、無視することはできない。特に多結晶質岩は、その鉱物間や鉱物内に多くのマイクロクラックを含む。本研究は、稲田花崗岩の長石、石英、黒雲母などの造岩鉱物間の粒界クラックに注目し、その幾何学情報を得ることを目的として、走査型レーザー顕微鏡やレプリカ法による表面情報取得によって、花崗岩表面の粒界クラックを抽出し、幾何学特性を整理した。その結果を受けて、造岩鉱物の形状および粒界クラックの分布を統計的手法で有限要素メッシュ上に再現した。この有限要素メッシュを用いて、一軸圧縮試験を有限要素法解析で再現し、要素試験としての弾性係数を求めた。解析結果より、粒界クラックが存在することで、造岩鉱物の組み合わせ構造である花崗岩の弾性係数が実験結果に近づくことが確認された。本研究は、その際の画像サイズをボックスカウンティング法によるフラクタル次元解析により決定し、また、レーザー顕微鏡を用いることによって得られた花崗岩供試体の表面情報をもとに、粒界クラックを考慮した幾何構造を再現し、微視的クラックの構造への寄与度を考察する。

### 2. 対象とした岩石供試体について

本研究で用いた試料は、茨城県産の稲田花崗岩である。筑波地方の花崗質岩類は、古い順に筑波型・稲田型・上城型に分けられている<sup>1)</sup>。筑波地方の花崗質岩類は主に花崗閃緑岩～花崗岩からなり、岩相は比較的単調である。主に花崗岩は、雲母・石英・長石の三鉱物からなり、各鉱物の材料定数は表-1 のようになることが実験によって得られている。また、一般的な稲田花崗岩の鉱物組成も表-1 に示すようになっている。そして、花崗岩全体の弾性係数は 90GPa 程度を示すことも実験結果から予め判っている。

\* 正会員 博士(工学) 宇都宮大学 工学部 建設学科建設工学コース

\*\* 篠原設計 (元宇都宮大学学生)

\*\*\* XEBEC (元宇都宮大学学生)

表-1 花崗岩構成鉱物の実験結果および稲田花崗岩内の鉱物組成

| 材料定数<br>造岩鉱物 | 稲田花崗岩にお<br>ける含有率比 | 弾性係数(GPa) | ポアソン比 $\nu$ |
|--------------|-------------------|-----------|-------------|
| 長石           | 0.51              | 84.90     | 0.299       |
| 石英           | 0.40              | 87.50     | 0.109       |
| 雲母           | 0.09              | 76.60     | 0.200       |

稲田花崗岩に存在する石目であるリフト面、グレイン面、ハードウェイ面の中で、最も割れやすいリフト面について解析を行った。花崗岩表面の中で、各鉱物の結晶内部に存在するものが粒内クラック、結晶と結晶の境界に存在するクラックが粒界クラックである。模式図を図-1に示す。

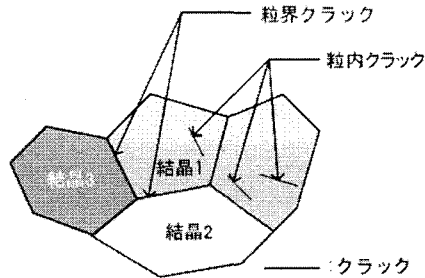


図-1 結晶間のクラックの分類

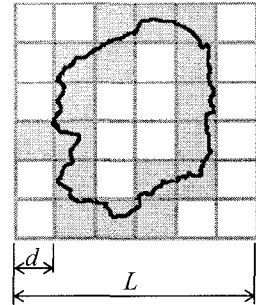


図-2 鉱物粒界とピクセルの考え方(ハッチがけの部分を鉱物粒界面として捉える。)

### 3. 岩石供試体からの画像情報の抽出について

#### (1) フラクタル次元解析におけるボックスカウンティング法の適用

フラクタル次元を求める方法は複数あるが、一般的にデジタル画像を使用する場合にはボックスカウンティング法が用いられる。ボックスカウンティング法とは、図-2のように、一辺の長さ $L$ の画像を一辺の長さ $d$ のピクセルで小領域に分割し、対象となる図形、本研究では各種鉱物のピクセルを含む小領域の個数 $N$ を数えることによって求める方法である<sup>2)</sup>。本研究では、通常の式を(1)式のように修正した。

$$D = \frac{\ln N(r)}{\ln r}, \quad r = \frac{L}{d} \quad (1)$$

ここに、 $r$ は対象となる図形を縮小した図形の縮尺の逆数、 $N(r)$ は、縮小した図形で元の図形を被覆するために最低限必要な個数、 $D$ はフラクタル次元である。本研究では、(1)式を用いて、フラクタル次元を求めるのではなく、対象となる画像に自己相似性が成立しているならば、(1)式の分子と分母の変化の関係が直線的になるという性質に着目し、画像サイズ $L$ のみに変化を与え、自己相似性が成立しなくなる画像のサイズを見つけることにより、画像サイズの決定を実施した。

#### (3) 画像ピクセルにおける鉱物の決定

花崗岩における構成鉱物は、主に長石・石英・雲母(黒雲母)の三種類である。岩盤表面を見たとき、乳白色で最も広い面積に分布しているのが長石、黒色で直径1~5mm程度の斑点状に分布しているのが雲母、石英はガラス質であるが、表面からは透けて向こう側が霞んで見えるため、わずみ色を呈する。三種の鉱物を肉眼で見分けることは比較的容易であるが、これを、画像データとしてコンピューター上で判別する方法として次のような方法<sup>3)</sup>をとった。通常画像ファイルは、カラー画像で、RGB法で分類すると赤・緑・青の情報を持ち、それぞれについて0~255までの階調を持っている。この3色のバランスによって様々な色を表現するが、配列を使って表現すると[255,255,3]という複雑な形になってしまい、あまり簡便に扱うことができない。そこで画像を図-3のようにグレースケールに変換することで、すべてのピクセルは0~255までの整数で表現することで、容易に扱うことができる。グレースケールに変換された花崗岩は、おおまかに白色=長石、灰色=石英、黒色=雲母と表現できる。しかし微視的には、解像度に依存して同一ピクセル内に異なる鉱物が混在する場合など、ピクセルは当然その中間の階調を持って与えられる。このピクセルをどちらの鉱物と判断するかは非常に難しい。今回は階調にしきい値を設けることによって三種の鉱物を判別し(図-4)、さらにそれぞれの鉱物に一つずつのグレースケールの階調を与え図-5のように領域を分けた。今回の解析において、リフト面の画像をスキャナーで取り込んだ画像から任意に180pixel四方で抜き出した画像を4枚使用した。これらの画像の解像度は28.346pixel/cmであるので、ピクセル寸法は0.035cm/pixelとなる。なお、画像を取り込む際には、鉱物分布に片寄りが生じない(各鉱物が体積比率に近くなる)ように抜き出す必要がある。

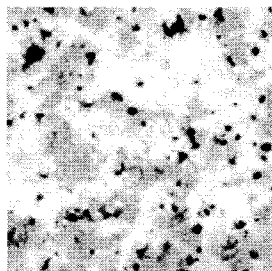


図-3 稲田花崗岩のデジタル画像

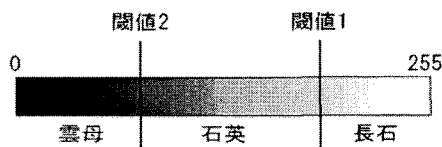


図-4 造岩鉱物のグレースケール上の色調としきい値の関連

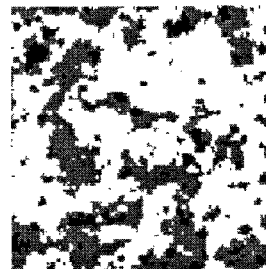


図-5 稲田花崗岩の鉱物判別画像

#### (4) ボックスカウンティング法による解析の手順

ボックスカウンティング法による解析は3の(3)節で説明したように、カラー画像をグレースケールに変換し、MATLAB(CYBERNET社)を用いて実施した。なお、しきい値の決定はプログラムを用いてグレースケール画像と領域を分けた画像を比較して行う。

#### (5) ボックスカウンティング法解析の結果

前節で行った解析結果はテキストファイルに出力されるので、この数値を表計算ソフトに貼り付けて結果の整理を行った。自己相似性の成立の判断は、 $\ln N(r)$  と  $\ln r$  の関係をグラフにプロットしたときの直線性で判断するのであるが、目視でこれを判断することは困難であるので、相関係数を用いて判断する。

この点について大野ら<sup>3)</sup>は経験上、相関係数の絶対値が0.99以上るときフラクタル性(自己相似性)が成立し、0.995以上るとき良く成立するとしている。しかし、この判断基準は曖昧なので、独自に判断基準を設けた。本研究では、 $K=0.995$  と  $K=0.993$  のとき、グラフの傾きに大きな変化が見られなかったこと、 $K=0.991$  のときにグラフの傾きが大きく変化したことなどを考慮した結果、 $K \geq 0.993$  のときに自己相似性が成立するとした。この結果から、自己相似性の成立しなくなる画像サイズで最大のものは140pixel四方である。よって、この解析法によって算出された自己相似性の成立する最小の画像サイズは150pixel四方となる。ボックスカウンティング法は、画像中の各鉱物のピクセル数を数える解析法であるので、画像中に鉱物のピクセルが特定の箇所に固まった状態と散らばっている場合に関係なく解析結果が同じものとなる。また、画像の領域を拡大していくと、各鉱物の分布状態に変化が見られなくなるので、各鉱物の周囲長の標準偏差は、一定の値に収束すると考えた。そこでImage-Pro(Media Cybernetics社)を用いて、各画像サイズにおける、画像に占める各鉱物の画素数の標準偏差を求めた。その結果、最大150pixel四方の画像を用いることで、各鉱物の標準偏差が一定値と見なせる傾向を示した。

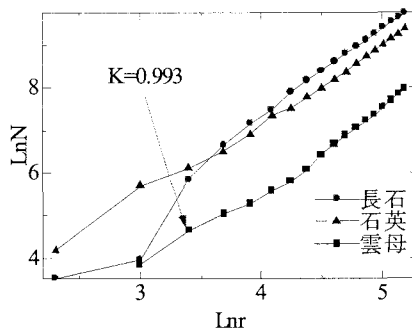


図-6 鉱物毎のボックスカウンティング実施例

### 4. 粒界クラックの認識と解析

#### (1) 岩石供試体の表面処理

今回の研究では、花崗岩供試体の表面情報得るための詳細な画像を、レーザー顕微鏡を用いて取得した。レーザー顕微鏡で測定可能な供試体の寸法は、縦と横が5cm、厚さが2cm程度なので、その範囲に収まるように供試体を切り出した。また、表面の凹凸は測定結果にノイズとなって現れるため、鏡面処理を施し、可能な限り凹凸を取り除いた。

#### (2) レーザー顕微鏡による供試体の表面情報の抽出

本研究で作成した供試体は、粒界クラックの分布性状を把握するために、表面を、走査型レーザー顕微鏡(名古屋大学, OLYMPUS社, OLS1100, 図-7)を用いて撮影した。この装置は供試体表面の高低さをグレースケールの濃淡によって表現するもので、凹部は黒く表示される。今回の撮影においてのレーザー顕微鏡の諸設定は、対物レンズ 5.0×、ズームは 1.0×、視野範囲は 2560.0μm×2560.0μm である。よって、5cm 四方の供試体一つの表面全体の画像を採取するために、オーバーラップする部分も含め

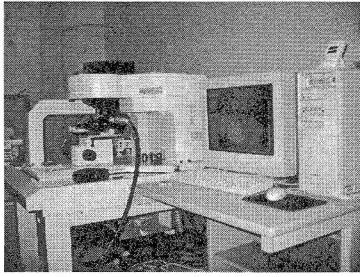


図-7 走査型レーザー顕微鏡

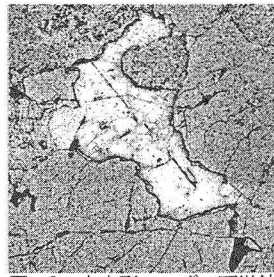


図-8 走査型レーザー顕微鏡による走査画像

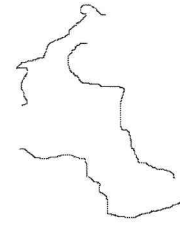


図-9 走査画像からの粒界クラック

625 枚の画像を撮影した。撮影した画像は PhotoShop ELEMENT(Adobe 社)を用いて統合した。粒界クラックは、走査画像上では、グレースケールの濃淡で出るので、凹形状を示す濃さを判断したうえで、各鉱物間の粒界クラックをラインツールでなぞり(図-8)、クラックの情報を抽出した(図-9)。クラックの抽出は、実物の供試体と比較しながら目視で実施した。

## 5. 粒界クラックの長さや角度の測定

図-8 のように、粒界クラックを抽出した画像において、Image-Pro を用いて粒界クラックの長さや方向の測定を行った。

### (1) 粒界クラックの長さについて

粒界クラックの長さについて 0.005cm 間隔ごとの頻度分布を求めた。図-10 は、そのヒストグラムである。また、全粒界クラックの累計長さや各種鉱物間に存在する粒界クラックの累計長さを求めた。各種鉱物間に存在する粒界クラックの累計長さは、図-9 に示したレイヤー上で測定した。その結果、累計長さは 12.939cm、平均値 0.055cm、標準偏差 0.041cm となった。各鉱物種類間の構成比を表-2 に示す。

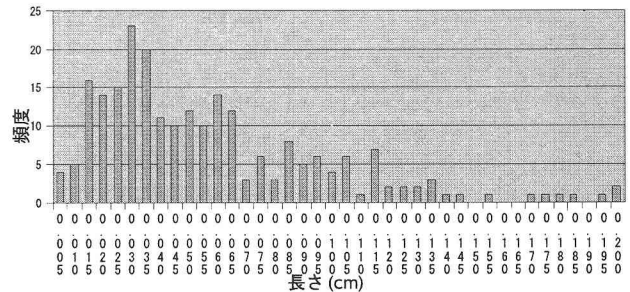


図-10 粒界クラックの長さのヒストグラム

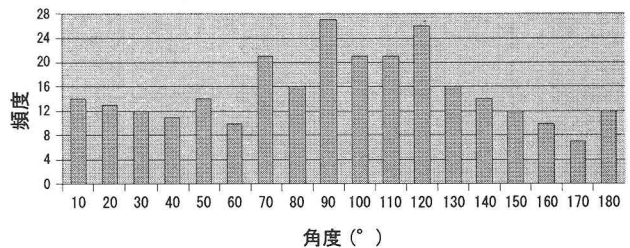


図-11 粒界面クラックの線分群の方向頻度分布

### (2) 粒界クラックの角度について

粒界クラックの方向分布については、ひとつづきのクラックをそのまま測定すると方向頻度分布が捕らえにくいので、実際の画像と比較しながら鉱物の角となる部分と鋭角を形成する部分の先端を削除しクラック線群に分割した。この結果を用いて、頻度分布と統計量を求めた。その結果を図-11 に示す。また、方向頻度分布が正規分布に従うかを調べるために正規確率紙を作成して確認した。

## 6. 粒界クラックを考慮した有限要素法解析

### (1) 粒界クラックを考慮した有限要素メッシュの作成

今回の解析において、有限要素メッシュとして四節点アイソパラメトリック要素(以下四角形要素)のみを組み合わせた六角形鉱

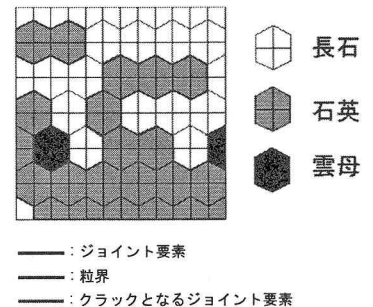


図-12 有限要素メッシュ概念図

表-2 粒界クラックの鉱物間の構成比

| クラックの種類       | 項目 | 累計長さ<br>(cm) | 構成比<br>(%) |
|---------------|----|--------------|------------|
| 長石-石英間の粒界クラック |    | 7.122        | 55         |
| 石英-雲母間の粒界クラック |    | 5.139        | 40         |
| 長石-雲母間の粒界クラック |    | 0.690        | 5          |

物群を作成した。四角形要素と四角形要素の間には、Goodman のジョイント要素を挿入し、そのジョイント要素が粒界部になるとき、標準正規分布に基づいた確率でクラックを正規乱数分布させる。

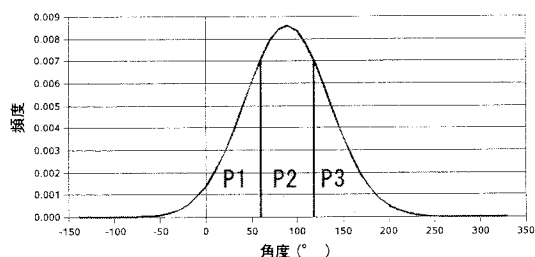


図-13 正規化した粒界クラックの方向分布

## (2) ピクセルデータをもとにした六角形鉱物群の作成

本研究では、図-12のように四つの四角形要素(台形)の集合体を1つの六角形鉱物群とし、鉱物群の材料定数は各鉱物に分類したピクセルのうち最多数を占めるものを代表させた。鉱物群を四角形要素からなる六角形で表現した理由は、①クラックの方向頻度分布は平均約90度の正規分布に従うと判断したので、90度方向を表現するのが必要があり、②形状が六角形ではあるが、四角形の要素の集合体であるので、要素内にピクセルを割り当てるのが容易である、③六角形鉱物群を作成する際に、三角形要素と四角形要素を組み合わせると、三角形要素にピクセルを割り当てるのが困難であり、かつ、四角形要素と三角形要素は計算方法が異なり、算出結果が異なるため、四角形要素で統一することが適切であるためである。

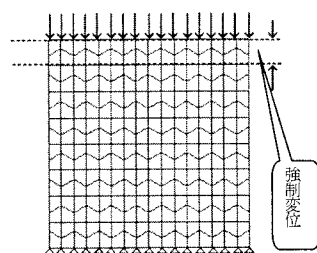


図-14 有限要素メッシュと一軸圧縮試験のモデル化概念図

## (3) 六角形メッシュにおける鉱物の角度の決定

六角形鉱物群を作成するにあたり、それぞれの辺の角度を設定しなければならない。六角形の辺の方向は縦方向と、二つの斜め方向であること、粒界クラックの方向頻度は0~60°, 60~120°, 120~180°の区間を境として変化が大きいこと(図-11)を考慮して、三区間に分けて角度を決定する(図-13)。まず、縦方向の角度は、粒界クラックの頻度分布が90°付近が最も高く、角度の平均が88.9°とほぼ90°に近いことから、90°とする。次に、斜辺の角度は、方向頻度分布が平均88.9°、標準偏差46.5°正規分布に従うことが分かっているため、P3部の面積の重心を求めることにより決定する。重心の算出には、数値積分を用いた。その結果、正規分布は左右対称であるから、斜辺の角度は31.5°と148.5°となり、ほぼ30°と150°に近い値なので、本研究では六角形鉱物群の斜辺の角度は水平から±30°とした。

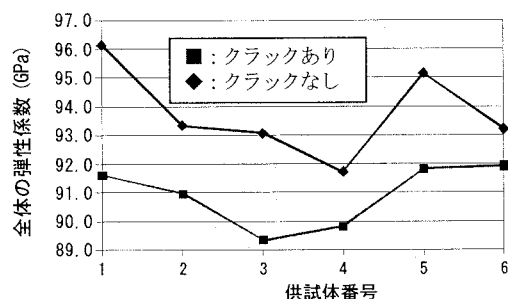


図-15 一軸圧縮試験から想定した弾性係数

## 7. 二次元弾性解析による一軸圧縮試験

### (1) 二次元弾性解析の手順

先に説明した有限要素メッシュにマッピングされたデータをもとに、一軸圧縮試験を数値計算で再現した(図-14)。この解析は、二次元平面ひずみ弾性問題として扱う。粒界クラックは正規乱数で、先に示した頻度・角度で発生された。計算機内でこの有限要素メッシュについて一軸圧縮試験を数値モデル化することで、弾性係数を算出した(図-15)。なお、粒界クラックをモデル化する場合に用いたジョイント要素の材料定数は、せん断剛性 $K_s$ は、限りなく小さな値を与えた。垂直剛性 $K_N$ は、鉛直の粒界クラックで開口を阻害する場合には、小さな値とし、それ以外では隣り合う要素が重ならないように比較的大きな剛性を選択した。

### (2) 解析の結果および考察

有限要素法解析による一軸圧縮試験を、クラックを発生させた有限要素メッシュとクラックを発生させていない有限要素メッシュについて解析を行った。クラックを発生させたメッシュ(図-16)については、乱数を用いてクラックを発生させたため、弾性係数が一定の値にならないので、一つの供試体につき6回の解析を行い、平均値を求めた。なお、稲田花崗岩の弾性係数は実験値の90GPaを基準とした。また、クラックを発生させていない場合と発生させた場合の最大主応力分布図を図-17、図-18に示す。一軸圧縮試験から算出した弾性係数は、平均で2.86GPa、変化の比率に換算すると3.04%低下することが確認できた。全体の弾性係数が低下した原因は、粒界クラックを発生させたことにより、花崗岩内部の応力の再配分が可能となり、結果として応力が緩和されたためである。

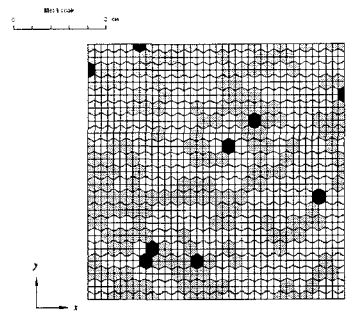


図-16 有限要素モデルの例

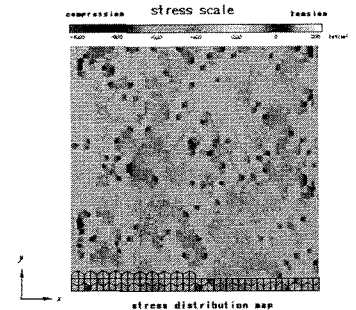


図-17 最大主応力分布図  
(粒界クラックあり)

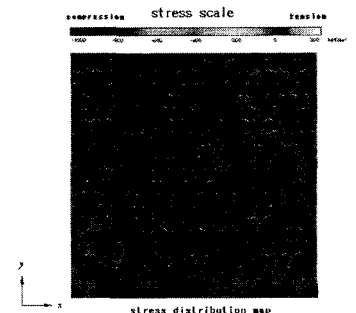


図-18 最大主応力分布図  
(粒界クラックなし)

### (3) レプリカ法による粒界クラックのモデル化および数値解析による一軸圧縮試験

走査型レーザー顕微鏡で岩石供試体の表面情報を取得するのは別に、アセチルセルロースフィルム(以下フィルム)を用いたレプリカ法で、花崗岩表面の凹凸情報を得て、粒界クラックの抽出、分布モデル作成も実施した<sup>4)</sup>。この場合、あまり微細なサイズでは各結晶との比較が困難である等の理由から、比較的大きめの範囲(3×3cm)を二つの供試体表面から計3箇所、1.5×1.5cmの範囲を1箇所の全部で4箇所から凹凸情報(フィルム)を採取した。また、比較用に供試体の同じ箇所をデジタルカメラで撮影した。レプリカ法で得たフィルムの凹凸は、コンピュータ上でクラックの認識作業を実施するためにグレースケールでデジタル化し、デジタルカメラによる表面画像と重ね合わせた。このデータを基に、造岩鉱物を配置したメッシュに、先の場合と同様に粒界クラックを乱数に従って発生させたが、ある程度明確に開口している0.03mm以上の長さを持つ粒界クラックの情報であったので、モデル化したクラックの方向を水平および鉛直方向に限定した結果、粒界クラックの効果を過大に評価したものとなった。

## 8. まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- ① 供試体を画像として得る際の、画像サイズの決定において、ボックスカウンティング法の有効性が確認された。
- ② 粒界クラックの抽出の際に用いる供試体は、0.25μmよりもさらに細かい粒子で鏡面処理を行うべきである。そうすることにより、レーザー顕微鏡によって撮影された画像からノイズを取り除くことができ、クラック抽出をグレースケールの階調に引き値を設けて自動化することが可能になり、人為的誤差を軽減することが可能である。
- ③ 粒界クラックの分布特性を考慮することで、稲田花崗岩の現実構造に則したモデル化を行うことができる。
- ④ レプリカ法で抽出した粒界クラックをもとにした幾何構造は、抽出できる大きさが限定されるため、弾性係数に対する粒界クラックの影響を過大に評価する結果となった。

## 参考文献

- 1) 亀原大道, 画像解析による岩石の鉱物再組成と力学的特性に関する研究, 宇都宮大学平成12年度卒業論文, 2001.
- 2) 合原一幸, カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書, 2000.
- 3) 大野博之, 安田実, 丹澤純, 河川構成要素に見られるフラクタル特性の分析, 環境情報科学論文集, 26-1, p68-74, 1997.
- 4) 篠原雄介, 清木隆文, 画像解析による花崗岩中の粒界クラック分布特性に関する研究, 土木学会第30回関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, III-37, 2003.