## 花崗岩における水みち近傍の硬化原因に 関する化学的検討

松下 智昭1・長田 昌彦2\*・竹村 貴人3・高橋 学4

<sup>1</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
<sup>2</sup>埼玉大学 地圏科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
<sup>3</sup>日本大学 文理学部(〒154-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40)
<sup>4</sup>(独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門(〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7)
\*E-mail: osada@mail.saitama-u.ac.jp

岩盤中において、水みち割れ目には幾何学的あるいは化学的な情報を有している事が期待される.この ような情報を持っている可能性のある割れ目をフィールドで探した結果、屋久島の花崗岩露頭において観 察された.対象とした割れ目は、割れ目の壁面が周りの岩石よりも硬化しており、顕微鏡観察により、石英中 に形成された開ロクラック内に砕屑物と充填物質が観察された.本研究では、これらの物質を同定、また硬 化した原因を明らかにするために、EPMAとXRDによる分析を行った.その結果、充填している物質は非晶 質の炭酸カルシウムであり、硬化した箇所の鉱物組成は母岩のものとほとんど同じであることが分かった.

Key Words: solidified rock, granite, dissolved mineral, a fragment-filled crack

#### 1. はじめに

岩盤中には大小様々な割れ目が普遍的に広がっており、これらの割れ目や割れ目系が地下水の主要な水みちとなっているならば、そこには大別すると幾何学的な情報と化学的な情報を有していることが考えられる.これらの情報を抽出し、評価できたならば、割れ目形成と地下水流動場の形成あるいはその変化を理解する上で有用なものとなると考えられる.

放射性廃棄物の地層処分やダム建設などにおいて、初 期段階のボーリング調査から、地下水流動場を推定する ためには、これまで以上にボーリングコアや野外で観察 される岩盤の割れ目を多面的に検討し、情報を整理する 必要がある.本研究では、局所的に高流量を流していた と考えられる割れ目が屋久島の花崗岩露頭において観 察されたので、ここではその割れ目周辺の化学的な視点 から検討した結果を報告する.なお、割れ目と水みちに 関する幾何学的および鉱物学的な性質に関する報告<sup>10</sup>は、 第12回岩の力学国内シンポジウムで別途報告している.

### 2. 既往の研究

これまで割れ目周辺の化学的な変化に関する報告と

しては、割れ目周辺の酸化還元反応について数多く報告 されている。例えば吉田ら<sup>3</sup>は、岐阜県東濃地域に分布する 凝灰質砂岩を、赤川ら<sup>3</sup>は、岐阜県恵那地域に分布する 苗木花崗岩をそれぞれ露頭において調査し、割れ目周辺 に形成された酸化還元フロントの形成とそれに伴う二 次的物質移動について報告しており、それぞれの岩石に 含まれる元素が岩石中でどのように拡散し、またどのよ うな位置に濃集するかを示している。栗山ら<sup>4</sup>は、風化あ るいは酸化した礫の間隙率変化について報告しており、 また吉田ら<sup>5</sup>も、割れ目周辺の酸化帯の形成による岩石 の間隙率変化に着目し、室内において拡散試験を行い、 割れ目内充填物、変質母岩、新鮮母岩の順で拡散係数が 小さくなることを示している。

#### 3. 対象試料

今回対象とした割れ目は、屋久島の北西に位置する花 崗岩露頭で観察された.その幾何学的な構造については 参考文献1)で報告しているが、全体として割れ目壁面が 母岩よりも硬化しており、また壁面沿いに、部分的に膨 らんだ硬化箇所も観察された.なお対象とした割れ目の 近くで観察された割れ目沿いは、相対的に母岩よりも削 れ易く、周りよりも凹んでいるのが観察された.



図-1 割れ目壁面の硬化した箇所からサンプリングした試料の 薄片全体の顕微鏡写真. 図中の枠内においてEPMA分析 を行った(図-2は組成像).



図-2 EPMAで分析した領域の組成像. 石英に形成された開ロク ラック中に砕屑物,晶出鉱物が混入しているのが分かる.

本研究ではこの硬化した箇所からサンプリングを行 い,まず最初に鉱物学的な検討を行った<sup>1)</sup>. その結果, 試料 中に観察される比較的幅の広い開ロクラックにおいて, 砕屑物が充填しており, これらの砕屑物は周りの石英か ら由来したものだけでなく, 斜長石や黒雲母が含まれて いた.また石英中のクラック壁面において, 薄い膜状の 鉱物が晶出し, 結晶化していることが観察された. この 充填している物質の同定, さらに割れ目壁面が硬化した 原因を明らかにするために, 化学的な分析を行うことと した.

屋久島花崗岩については、例えばR. Anmaら<sup>®</sup>に詳しく、 主要造岩鉱物は、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母である. R. Anmaら<sup>®</sup>は、屋久島花崗岩を4つに分類(Yakushima Main Granite: YMG, Core Granodiorite: CGD, Core Cordierite Granite: CCG, Marginal Facies Granite: MFG) しており,本研究で対象としている花崗岩は,YMGに分類される.YMGには微量鉱物として,白雲母,緑泥石,イルメナイト,ジルコン,アパタイトが含まれる.

## 4. 分析方法

#### (1) 微小領域における元素分布分析

採取した試料から岩石薄片を作成し、EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)を用いて、元素分布分析を行った. 図-1に岩石薄片の顕微鏡写真を示す.組成鉱物中にクラックが多数存在し、相対的に幅の広い開ロクラック(図中の□で囲った部分)において砕屑物が混入しているのが観察される.このような領域において分析を行った.

装置は、日本大学文理学部地球システム科学科の波長 分散型EPMA(日本電子社製:JXA-8800)を用いた.な お、元素分布分析を行う前に、対象領域内で定性分析を 数点行った結果, Al, Ca, Mg, P, Siの混入が確認されたので、 これらの元素とFeについての元素マッピングを行った.

#### (2) 組成鉱物の同定

全岩分析を行うため, 試料の一部をメノウ乳鉢によ り粉末状にし, XRD (X-ray diffraction) 分析を行った. 装置は, 日本大学文理学部地球システム科学科のX線回 折装置(リガク製: RINT 2100S)を用いた. X線はCuKα, 発散スリット・散乱スリットはともに1°, 受光スリッ トは0.15mmである. 測定した2θ範囲は, 4~60°で, 0.02°間隔で測定した. 電圧, 電流はそれぞれ50kV, 250mAである.

なお組成鉱物の比較のため、割れ目から離れた場所 で採取した試料に対しても、同様に分析を行った.

#### 5. 分析結果·考察

#### (1) 微小領域における元素分布分析

EPMAによる分析結果として、図-2に分析領域の組成 像を、図-3にAl, Ca, Mg, P, Si, Feの元素マッピング図をそれ ぞれ示す.組成像では、原子番号が大きい元素ほど反射 電子をより多く放出するため、白いコントラストになる. 図-2の組成像では、開ロクラック内に混入している砕屑 物のいくつかは周りの石英と同じような像となってい る.また、例えば図-3b)と組成像を比較すると、図-3b)で 見られる砕屑物のいくつか(図中の点線内など)が、組 成像では確認できない.このように、周りの石英とは異 なる鉱物がクラック内に存在する.これらの鉱物は、地 下水の流れによってもたらされた<sup>1</sup>か、あるいは地下水



図-3 EPMAにより得られた元素マッピング図; a) Al, b) Ca, c) Fe, d) Mg, e) P, f) Si b)の点線内は, 図-2の組成像で確認できなかった砕屑物の一部.



図-4 XRD分析結果; 図中のy-1は, 割れ目壁面の硬化した場所よりサンプリングした試料であり, y-2は, 割れ目から離れた場所でサン プリングした試料である. 図の横軸は回折角, 縦軸は回折線の相対強度となっている. 相対強度は, それぞれの試料において, 回 折強度の最も大きい値を1としたときの値である. 中に溶け出した物質がクラック内で結晶化した可能性 が考えられる. M. Manakaら<sup>7</sup>は, 亀裂を模擬したセル内 にカリウムミョウバンの飽和溶液を流し, カリウムミョ ウバンの成長による亀裂部の開口幅減少を模擬した室 内試験を実施した. その中で, セル内に設置したカリウ ムミョウバンの種晶が破損あるいは欠損し, 2次核が生 成された事を報告している.

次に図-3の元素マッピング図をみると、クラック内を 充填している物質のCa含有量が非常に多く、また現地調 査において、対象岩石に塩酸をかけると反応を示すこと から、この物質は炭酸カルシウムであると考えられる. AI, Fe, Mgに関しては、全体的に含有量が非常に少なく、分析 領域内で濃集しているような部分も観察されなかった. クラック内に混入している砕屑物のいくつかに関して は、周りの鉱物である石英と同じように、Siが含まれてい る.またPに関しては、Siとほぼ同じような元素マッピン グ図となっている.

屋久島花崗岩の鉱物を構成する元素の溶脱に関して, T. Nakanoら<sup>8</sup>は、斜長石とアパタイトから溶脱するCa. Na. Sr. Pの量は多く、特にCaの溶脱量が多いことを示してい る. 岩石中からCaが溶脱されると、COの溶け込んだ地下 水と反応して、炭酸塩鉱物の一種であるカルサイトが形 成されることが考えられる. カルサイト形成に関しては、 西本ら<sup>9</sup>は、土岐花崗岩の組成鉱物変化、すなわち黒雲母 の緑泥石化,斜長石の絹雲母化,そしてカルサイトの形 成が、熱水と造岩鉱物の一連の反応であると報告してい る.新井ら<sup>10</sup>は,花崗岩質岩中の野島断層破砕帯およびそ の周辺に存在する地中ガスのCOっとカルサイト脈の炭素 同位体比の測定結果から、30~50℃の温度範囲内でカル サイトは沈殿したとしている.また測定された地下水の 酸素同位体比とCO2の炭素同位体比から、カルサイトの 沈殿に寄与した流体は、深部熱水ではなく海水と天水の 混合流体である可能性を示している.

#### (2) 組成鉱物の同定

図-4にXRD分析結果を示す.2つの試料(硬化した場所からサンプリングした試料:y-1,割れ目から離れた場所からサンプリングした試料:y-2)の組成鉱物に大きな違いはなく、石英、カリ長石、斜長石、雲母が検出された.なおXRD分析では、カルサイトは検出されなかった.その理由としては、クラック内を充填していたカルサイトは非晶質であった可能性があり、また含有量もそれほど多くなかったためと考えられる.

#### (3)割れ目壁面が硬化した原因

開ロクラック中の充填している物質は、割れ目から離 れた場所から採取した試料にも存在していることが顕 微鏡観察で確認されている.そのためこのような充填物 質のみが割れ目壁面を硬化させた原因であるとは考え にくい.またXRD分析結果から,母岩のものと比べ際立 った鉱物変化は生じていないため,化学的な変化,また は元素移動はほとんどないと考えられる.ただしクラッ ク内に観察された砕屑物が混入しているような脈は,割 れ目から離れた場所で採取した試料においては見つか っていない.ここで,このような複合材料を身近な例で 考えるとコンクリートがある.コンクリートの強度と粗 骨材を抜いたモルタルの強度を比較すると,コンクリー トの方が強度が高くなる可能性がある<sup>例えば、10</sup>.仮にこの ような砕屑物がコンクリート中の粗骨材のような役目 をしているとすれば,割れ目壁面が周りの岩石よりも硬 化(侵食に対する耐久性が向上)していることを力学 的に解釈することができる.

#### 6. まとめ

本研究では、屋久島の花崗岩露頭で観察された割れ目 壁面に形成されている周りの母岩とは異なる硬化した 部分に焦点をあて、その化学的な分析を行った.

以下に本研究で得られた知見を記す.

- 割れ目壁面から採取した試料において、開ロクラ ック内を充填している物質は炭酸カルシウムで あった.
- 割れ目壁面と割れ目から離れた場所でサンプリングしたそれぞれの試料の組成鉱物は、ほぼ同じであった.

今回は割れ目壁面と割れ目から離れた場所で採取した2つの試料しかなかったが、今後はサンプル数を増やし、割れ目表面から新鮮母岩方向へ連続的な分析を行い、開ロクラック内の砕屑物や充填している物質がどの程度の領域にまで混入されているか調査していきたい、また前述したが、水みちと考えられる割れ目周辺では変質帯が形成されていることがしばしば報告されており、このような変質帯では、岩石の内部構造も変化することが示されている<sup>4,5</sup>.本研究においても、対象としている割れ目壁面の硬化した部分の内部構造が新鮮母岩と異なっている可能性は十分考えられ、間隙率の測定、または強度測定を行い、力学的な評価を行っていきたいと考えている.

謝辞: 本研究は、財)原子力環境整備促進・資金管理センターからの受託研究費によって実施されたものの一部である.ここに記して感謝の意を表します.また本研究において、EPMA・XRD分析を行うにあたり、日本大学文理学部地球システム科学科の装置を使わせていただきました.また日本大学文理学部地球システム科学科の金丸龍夫氏にはEPMAに関するご指導をしていただきました.ここに記して感謝申し上げます.

#### 参考文献

- 長田昌彦,高橋学,松下智昭:割れ目の幾何学的構造 と水みちに関する一考察;屋久島花崗岩の露頭を例と して,第12回岩の力学国内シンポジウム,pp.959-964, 2008.
- 2) 吉田英一,山本鋼志,田中姿郎,輿語節生:酸化還元フロントの形成と二次的物質移動現象-地質環境中汚染物質の移動と長期的固定に関するアナログ研究-,地質学雑誌,第109巻,第9号, pp.548-558,2003.
- 3) 赤川史典,吉田英一,予語節生,山本鋼志:花崗岩割れ 目周辺の酸化還元反応と二次的物質移動現象-地質 環境中汚染物質の移動と長期的固定に関するアナロ グ研究-,地質学雑誌,第110巻,第11号,pp.671-685, 2004.
- 4) 栗山健弘,吉田英一,山本博文,勝田長貴:河岸段丘礫の表面風化にみる酸化フロントの形成とその移動速度,地質学雑誌,第112巻,第2号,pp.136-152,2006.

- 5) 吉田英一, 佐藤治夫, 仙波毅:マトリクス拡散による 物質移動の遅延効果の評価手法とその検討, 応用地質, 第43巻, 第1号, pp. 24-34, 2002.
- 6) Ryo Anma, Yoshinobu Kawano, and Masaki Yuhara : Compositional Zoning and its Implication in a Toroidal Circulation Inside the Yakushima Plution, SW JAPAN, Memoirs of National Insitute of Polar Research, Special Issue 53, pp.157-176, 1998.
- Mitsuo Manaka, Takato Takemura, and Manabu Takahashi : Water-Pathway Sealing by Crystallization under Advective Supersaturated Solution Conditions, Materials Transactions, Vol. 49, No.10, pp.2365-2370, 2008.
- 8) Takanori Nakano, Yoriko Yokoo, Ryo Anma, and Junko Shindo : Ca Depletion in the Soil Column on a Granite Substrate on the Island of Yakushima, a World Natural Heritage site, Water, Air, and Soil Pollution 130, pp. 733-738, 2001.
- 西本昌司, 鵜飼恵美, 天野健治, 吉田英一:地下深部花 崗岩の変質プロセス解析-土岐花崗岩を例にして-, 応用地質, 第49巻, 第2号, pp. 94-104, 2008.
- 新井崇史,塚原弘昭,森清寿朗:カルサイトの炭素・ 酸素同位体比から見た野島断層浅部破砕帯のシール 過程の解明,地学雑誌, Vol. 112, No. 6, pp. 915-925, 2003.
- 渡邉悟士,黒岩秀介,陣内浩,並木哲:高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第588号,pp.21-27,2005.

## STUDY ON SOLIDIFIED ROCK SPECIMEN FROM VICINITY OF GROUNDWATER PATHWAY FRACTURE IN GRANITE

# Tomoaki MATSUSHITA, Masahiko OSADA, Takato TAKEMURA, and Manabu TAKAHASHI

Fractures as major pathways for groundwater flow in rockmass may have physical or chemical features. Therefore, it is relevant to find out and study these features in order to understand the flow mechanism in fractured rocks. In the study of Yakushima granite, solidified parts were observed in the vicinity of fractures in outcrops. Microscopic observation revealed that these parts were filled with several fragments and crystallized minerals. Further chemical analyses were performed to identify these materials and to resolve the cause of the solidification. The results of EPMA and XRD show that the crystallized mineral is calcium carbonate and mineral composition of the solidified part is same with the rock matrix.