

P39. 深部花崗岩体割れ目に伴う変質鉱物からみた地下環境の推定

Estimation of geochemical environment by secondary minerals in fractured granitic rock

○鶴飼 恵美, 吉田 英一 (名古屋大学)

Emi Ukai, Hidekazu Yoshida

はじめに

花崗岩には岩体の冷却や隆起・削剝による応力開放、断層活動など、様々な地質現象に伴って形成された大小の割れ目が存在し、そのような割れ目は地下水の通路・物質の移行経路として機能する¹⁾。このような割れ目での岩石と地下水の反応は、母岩を変質させるだけでなく、地下水の水質も変化させると考えられる²⁾。したがって岩石の変質過程を知ることは、地下環境の推定に不可欠である地下水組成の形成機構の理解に役立つと考えられる。

本研究では、深部花崗岩体中に認められる変質鉱物の形成メカニズムを明らかにし、割れ目分布などの地質構造が地下環境に与える影響を調べるために、岐阜県東濃地方の土岐花崗岩を対象に調査研究を進めている。本報告では、これまでに実施した割れ目などの断層構造と地球化学的特性との関係について述べる。

土岐花崗岩地域の地質とボーリングコア

土岐花崗岩分布地域の地質図を図-1に示す。土岐花崗岩は細～粗粒の黒雲母花崗岩からなる白亜紀後期(68.3±1.8Ma)³⁾に美濃帯中生層に貫入した岩体である。岩体中に認められる主な断層は、月吉断層、次月断層、屏風山断層などである。岩体には直交する2方向の高角な割れ目系と水平な割れ目の節理系が卓越する⁴⁾。一方、断層近傍の花崗岩には中角度(約 30°～60°)の割れ目系が発達することが認められている。

今回、調査・研究に用いたボーリング孔(DH-5号孔:掘削深度31.5m～502.3m)は、細～中粒岩相が分布する岩体の中西部で掘削されたものである。DH-5号孔の花崗岩類の分類ダイアグラム⁵⁾を図-2に示す。岩相は、石英、カリ長石、斜長石、黒雲母を主要造岩鉱物とする細～中粒黒雲母花崗岩からなる。コアには単一割れ目及び割れ目帯が発達し、それらの割れ目に沿って様々な様式の変質が認められる。

実施内容及び調査結果

これらのボーリングコアを用いて、割れ目形態や割れ目周辺に発

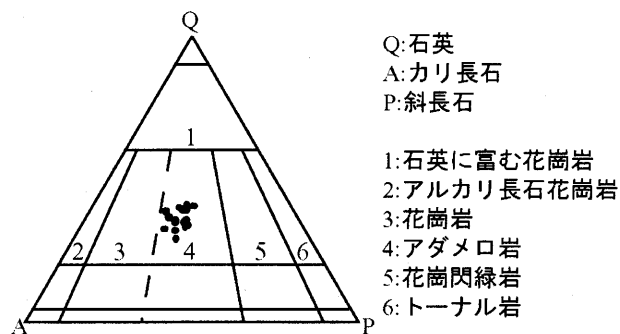


図-2 土岐花崗岩の分類図

達する変質状況について、以下の調査を行った。

①コアの分類

割れ目充填鉱物や母岩の変質は岩石-地下水反応の結果であり、地下深部の地球化学的環境を解明する糸口になると考えられる。また割れ目は透水性に影響を及ぼすため、割れ目の形態・分布状況ごとに母岩の変質状況は異なることが考えられる。したがって割れ目・変質に注目した岩芯観察を行い、割れ目の分布・変質状況によってコアを分類した。

②割れ目の分布とバルクでの母岩の変質状況

変質部の全岩化学組成は、岩石-地下水化学反応の履歴を残している可能性が考えられる。とくに母岩の化学組成の変化が割れ目による影響か否かを判断するためには、分析試料と同じスケールで水みちとなる構

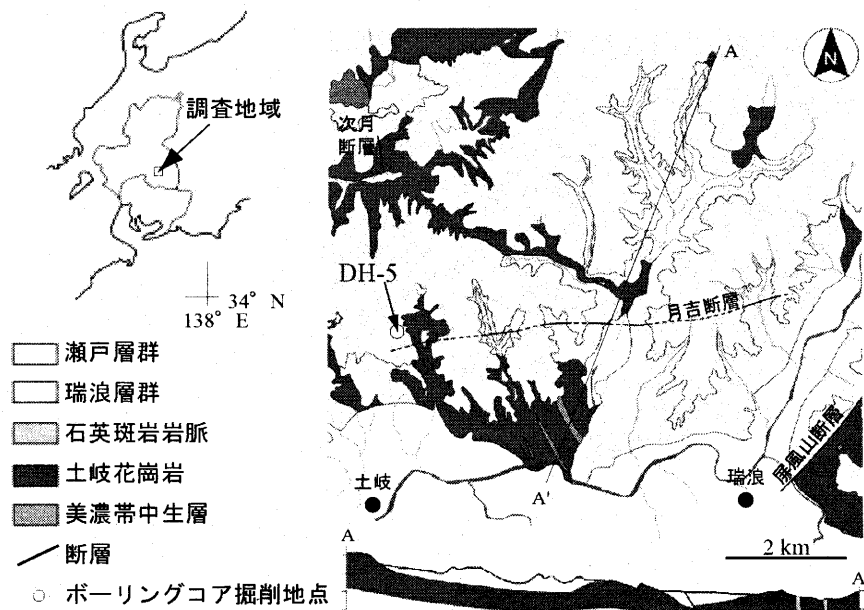


図-1 東濃地域の地質図

造を捉える必要があり、空隙率の測定で空隙や微小割れ目の発達状況を調査した。また、全岩スケールでの割れ目と母岩の変質の化学的関係を把握するため、XRF による主成分分析を行った。分析試料は、浅部から深部までの母岩の肉眼上未変質から強変質の状態のものまで 34 個を使用した。

③ 鉱物スケールの変質状況

花崗岩では構成鉱物種ごとに異なる変質鉱物が形成される。地下水の水質形成機構を推定する上では、バルクのみならず、鉱物ごとの変質状況を把握することが重要になる。このような鉱物スケールの変質鉱物調査については、偏光顕微鏡、EPMA、XRD 等を用いて同定し、その産状や含有量などを顕微鏡観察、モード測定を行い微視的な解析を行った。

割れ目・変質の性状によるコアの分類

割れ目充填鉱物・母岩中の変質鉱物の形成メカニズム

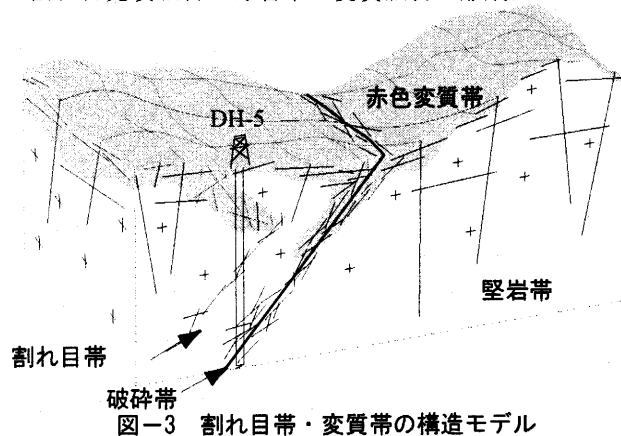
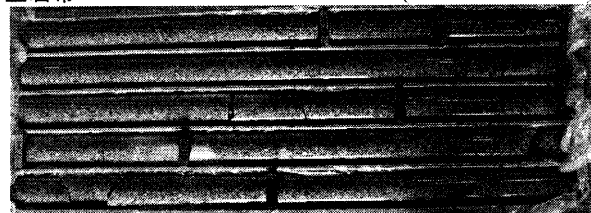
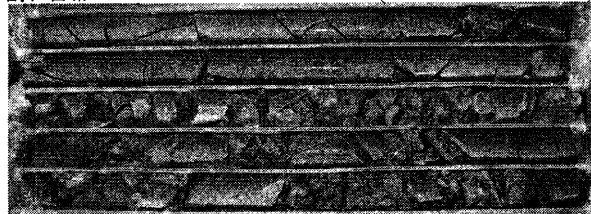


図-3 割れ目・変質帯の構造モデル

堅岩帯 (60.00 m - 65.00 m)



割れ目帯 (310.00 m - 315.00 m)



破碎帯 (395.00 m - 400.00 m)

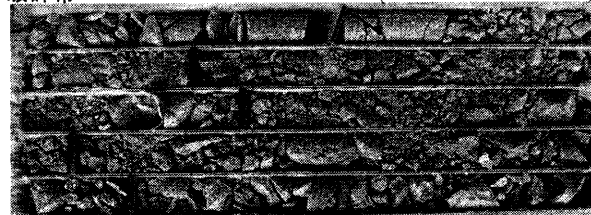


図-4 ボーリングコアで観察される割れ目帯の分類

ムを解明するために、割れ目の分布状態によって堅岩帯、割れ目帯、破碎帯に分類した(図-3,4)。まず、堅岩帯では単一の割れ目が主に観察される。次に、割れ目帯では、コアが角礫状に破碎する割れ目帯が確認できる。また、非開口性の微小割れ目が母岩中に密に発達する。そして、破碎帯では、コアが強破碎し粘土状を呈す。

これらのそれぞれの母岩部には、割れ目の状況と密接に関わって異なった変質がみられる。母岩の変質状態については、母岩の色の違いや状態をもとに未変質部・赤色変質・黄褐色～緑色変質・粘土化変質に区分した。まず、未変質部は肉眼上変質が認められない部分である。また、赤色変質は、鉄酸化物の生成に由来する変質である。次に黄褐色～緑色変質は、斜長石の絹雲母化、黒雲母の緑泥石化、白雲母化、緑簾石化などで特徴付けられる変質帯である。粘土化変質は、スメクタイト等の粘土鉱物の生成が認められることで特徴づけられる。

空隙率とCIA

全岩スケールでの水みちの有無は空隙率で表されると考えられる。測定の結果、空隙率は微小割れ目を含む試料で特に大きいことが判明した。また、微小割れ目の有無は割れ目帯・破碎帯の分布と調和的である。

さらに全岩スケールでの変質の程度を表す指標として CIA (Chemical Index of Alteration)⁶⁾を用いた。CIA は化学組成のモル比を用いて次式で表される。

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O)] \times 100$$

(CaO*: ケイ酸塩鉱物中の CaO 含有量)

CIA は深度とは相関を持たず、空隙率とよい相関を示すことが図-5 から認められる。

母岩の変質鉱物の種類・産状

母岩中の主な二次鉱物には、絹雲母、緑泥石、緑簾石、白雲母等があり、斜長石は絹雲母へ、黒雲母は緑泥石へとそれぞれ交代される。斜長石の絹雲母化は、Ca 成分に富む中心部や累帯構造に沿って進み、黒雲母の緑泥石化は粒界や劈開面に沿って進行する。これらの二次鉱物化は、岩体のほぼ全深度において認められる。鉱物スケールでの変質を表す量として、初生鉱物を交代する二次鉱物の割合(モード比)を図-5 に示す。堅岩部では、二次鉱物化の割合の増減は互いにより相関を示し、緑泥石化した黒雲母と絹雲母化した斜長石は鏡下で隣り合って観察されることが多い。また、割れ目帯において、微小割れ目周辺の緑色変質した母岩では二次鉱物化は著しく、黒雲母は、緑泥石のほか、白雲母、緑簾石などの熱水性鉱物に交代される。赤色変質した母岩中では緑泥石化は大きい、絹雲母化は未変質部よりも小さい。

割れ目充填鉱物の種類・産状

割れ目を充填する鉱物には、絹雲母、石英、方解石、粘土状充填物、鉄酸化物などがある。また、絹雲母、石英、方解石は割れ目帯の非開口性微小割れ目を充填することが多い。石英には塑性変形・再結晶が認められることがある。微小割れ目を充填する絹雲母は、割れ目と接する斜長石を交代する絹雲母と、連続して産する。粘土状充填物は割れ目帯の開口した割れ目表面や、破碎帯で認められる。この粘土状充填物にはスメクタイトが含まれる。鉄酸化物は赤色変質部において見られる。上部堆積岩との不整合面直下の赤色変質では、鉄酸化物は砂状と化した部分の粒間や微小割れ目、斜長石内部の空隙などを充填する。深部の赤色変質帯では、単一割れ目に沿って酸化還元フロントが形成される。

考察：花崗岩体の地下構造と化学的環境

DH-5 号孔に認められる割れ目などの断裂構造や変質鉱物の種類・産状から、地下構造はまず次のセグメントⅠ～Ⅴに分けることが可能である。

セグメントⅠ (深度 31m～45m)：岩体の地表付近を中心に赤色変質が認められる。ここでは鉄酸化物が微小割れ目や粒間、斜長石内部の空隙などを充填する。この変質はおおよそ地下 45m 程度まで認められる。

セグメントⅡ (深度 45m～120m, 340m～355m)：単一の割れ目が見られるものの、ほぼ未変質の堅岩帯である。鏡下でも二次鉱物化が見られるものの CIA は低く、全岩スケールでの元素の溶脱はあまり見られない。

セグメントⅢ (深度 120m～160m, 245m～340m)：破

碎帯を中心に上下に角礫状の割れ目帯が分布する。開口割れ目の表面はスメクタイトを含む粘土状充填物に覆われる。割れ目帯では二次鉱物化が著しく、CIA も高い。一方、非開口性微小割れ目の卓越した割れ目帯の熱水性二次鉱物に充填された微小割れ目の発達する割れ目帯では CIA は大きい。

セグメントⅣ (深度 160m～245m)：単一割れ目に沿って酸化還元フロントが観察されることが特徴的な堅岩帯である。

セグメントⅤ (深度 355m～502m)：原岩の構造がわからないほど破碎され、著しく変質が進んだ破碎帯が卓越する。コア全体が緑色または白色の粘土状を呈す。岩芯全体が非常に脆い。また割れ目表面に条線が見られる部分もある。

上述したセグメントⅠ～Ⅴの各部の特徴及びその相違は、①セグメントⅡ、Ⅲでは熱水性二次鉱物が、セグメントⅠ、Ⅳ、Ⅴでは低温で形成される二次鉱物が主として存在する。②セグメントⅡ、Ⅳでは CIA・空隙率はともに低く、セグメントⅠ、Ⅲではともに高い。セグメントⅤでは空隙率は高いが CIA は低い。③低温で形成される二次鉱物は、セグメントⅠ、Ⅳでは鉄酸化物が特徴的に見られ、セグメントⅡ、Ⅴでは粘土状充填物が主にみられることである。これらの調査結果は、地下水の動きに関わる割れ目などの断裂構造と変質構造とが密接に関係していることを示すものである。

セグメントⅡ、Ⅲには緑泥石や緑廉石、絹雲母など熱水性鉱物が確認できる。一方、セグメントⅠ、Ⅳ、Ⅴには非晶質な鉄酸化物や 100℃以下で形成されるスメクタイトが多く認められる。このような変質を生

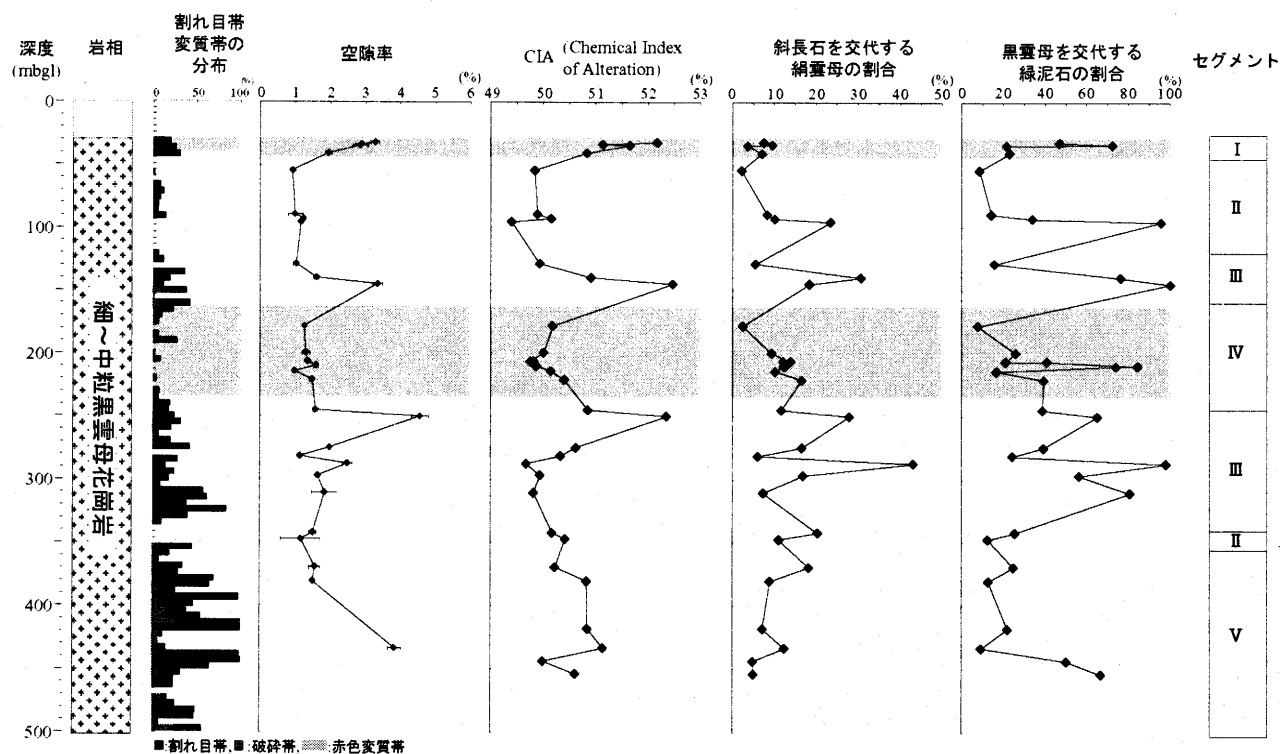


図-5 DH-5号孔の観察・分析結果

じさせる熱水の起源としては、2つの可能性が考えられる。1つは花崗岩のマグマの最終残留物である熱水か、もう1つは地熱活動による熱水である。この地域では土岐花崗岩の貫入を含む一連の火成活動の後、新しい時代の熱源となるような火成活動は周囲で見当たらないことから⁷⁾、岩体冷却後の地熱活動による熱水の可能性は低いと考えられる。したがって岩体に認められる高温性の変質は、花崗岩の冷却最末期に起きた可能性が高い。さらにその後の、おそらく天水起源の地下水によって、より低温性の変質が生じたものと考えられる。

鉱物スケールでも熱水による変質プロセスが観察される。例えば、斜長石の絹雲母化と黒雲母の緑泥石化は、未変質帯においては割合の増減が同様であることや、隣り合って観察される産状から、これらの反応は互いに促進しながら同時に進んだ可能性が高い。このような全岩の化学組成変化は現在の地下水組成にも大きく影響を及ぼしているものと考えられる。

今後の課題

これまでの調査から、割れ目の分布・構造と二次鉱物とは相関があり、地下の地球化学的特性と密接に関わっていることが示された。これらの知見は、二次鉱物の組成・モード分析により地下水化学組成の予測や水質形成機構の推定が可能であることを示すものである。今後は、これらの二次鉱物の詳細な分析、地下水組成との対比の実施し、推定手法を構築していくつもりである。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ボーリングコア試料を使わせていただいた核燃料サイクル機構東濃地科学センターに記して感謝申し上げます。

文献

- 1) 吉田英一・佐藤治夫・仙波毅, 2002, 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, 43, 24-34.
- 2) 鶴飼恵美・吉田英一, 2004, 深部花崗岩の割れ目の分布・構造と地球化学的特性. 日本地質学会第111回学術大会講演要旨, 224.
- 3) Suzuki K. and Adachi M., 1998, Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Jour. Metamorphic Geol.*, 16, 23-37.
- 4) 藤井幸泰, 2000, 中部日本東濃地方, 土岐花崗岩中の割れ目解析. 地質雑, 106 巻, 249-263.
- 5) I.U.G.S., 1973, Classification and nomenclature recommended by the I.U.G.S. *Geotimes*, October 1973, 26-30.
- 6) Nesbitt H. W., and Young G. M., 1982, Early

Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.

- 7) 山下昇・鮎野義夫・糸魚川淳二, 1988, 日本の地質 5, 中部地方Ⅱ, 共立出版, 東京, 77-101.