

花崗岩の地史を考慮した割れ目形成過程の検討—中部日本土岐花崗岩の事例— Formative process of fracture in granite on the basis of geological history at the Toki Granite, central Japan

笹尾 英嗣^{1*}; 石橋 正祐¹; 湯口 貴史¹
SASAO, Eiji^{1*}; ISHIBASHI, Masayuki¹; YUGUCHI, Takashi¹

¹ 日本原子力研究開発機構東濃地科学センター
¹ Japan Atomic Energy Agency

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、花崗岩などの結晶質岩では割れ目が地下水流動や物質移動の経路になることから、その分布を知ることが重要である。しかし、割れ目の分布は岩体内でも不均一であるため、それを把握することは容易ではない。

北欧諸国の花崗岩では日本の花崗岩に比べて割れ目が少ないとされており、花崗岩の地質学的セッティングや形成プロセスの違いによって、割れ目頻度に差が生じる可能性が考えられる。わが国に分布する花崗岩では、規模や形成年代が異なることから、個々の岩体が置かれた地質学的要因に相違があると思われ、割れ目頻度などは岩体ごとに異なる可能性がある。

このような背景のもと、本論では、花崗岩中の割れ目の形成および充填の履歴を花崗岩マグマ定置後の地史を合わせて検討することにより、割れ目の形成と充填の履歴を検討するために重要な地質学的事象を抽出することを目的とした。対象とした花崗岩は中部日本に分布する土岐花崗岩で、日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市で建設を進める瑞浪超深地層研究所で得られたデータを活用した。

土岐花崗岩は、岐阜県東濃地方の土岐市から瑞浪市にわたって分布し、地表では東西約12km、南北約14kmの範囲に分布する。土岐花崗岩は白亜紀後期に、美濃帯中生層および濃飛流紋岩中に貫入した（年代値として以下がある；モナザイト CHIME 年代：約68Ma, Suzuki and Adachi, 1998, 全岩 Rb-Sr 年代：約72Ma, Shibata and Ishihara, 1979）。土岐花崗岩は中新統瑞浪層群と中新～更新統東海層群に不整合で覆われる。瑞浪層群の基底部の年代は約20Maとされており（笹尾ほか, 2006）、この時期までに花崗岩は地表に露出した。

土岐花崗岩の冷却年代として、角閃石 K-Ar 年代 $74.3 \pm 3.7\text{Ma}$ 、黒雲母 K-Ar 年代 80～60Ma、ジルコン FT 年代 80～50Ma が得られている（Yuguchi et al., 2011）。このことから、土岐花崗岩は 250℃程度までは、最長でも 2000 万年の間に急速に冷却され、その後、約 5000～3000 万年をかけて地表に露出したと考えられる。

瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩では、低角度傾斜（水平面に対して 30° 未満の傾斜角）の割れ目の分布密度が高い上部割れ目帯と、割れ目密度が低い下部割れ目低密度帯が認められる。

上部割れ目帯では、20Ma 以前の露出時に除荷で形成とされたと考えられる低角度傾斜の割れ目と、高角度傾斜（水平面に対して 60° 以上の傾斜角）の割れ目が認められる。下部割れ目低密度帯では高角度傾斜の割れ目のみが分布する。割れ目頻度は瑞浪超深地層研究所の換気立坑では、深度約 460m を境に、上部で多く、下部で少ない。

割れ目充填物として、熱水性と推定される緑泥石、雲母粘土鉱物、方解石、および天水起源と推定される方解石が認められた（石橋ほか, 2014）。

瑞浪超深地層研究所の深度 300 m および深度 500 m の水平坑道床面から 1～2m の高さに設定したスキャンラインに交差する割れ目では、充填物を介する割れ目が大半であり、その割合は深度 300m では 94%、深度 500m では 86%であった。割れ目充填物としては、方解石と絹雲母または緑泥石からなるものが最も多く、絹雲母または緑泥石からなるものと、方解石のみからなるものはほぼ同数である。

割れ目は脆性領域で形成されるため、300～400℃以下の温度領域で形成される。このため、割れ目を充填する鉱物は花崗岩がその温度以下に冷却された以降に形成された。

熱水起源と考えられる方解石は、割れ目周辺母岩中の斜長石の絹雲母化に伴い産出することから、割れ目への熱水の浸透に伴い割れ目周辺母岩の斜長石中の Ca 成分が溶け出して形成されたと推察されている（石橋ほか, 2014）。また、緑泥石の形成温度は一般に 200～300℃程度とされており（Yuguchi et al., in press）、熱水性の鉱物はこの温度領域で形成されたと考えられる。東濃地域では大規模な熱水活動は知られておらず、この熱水は花崗岩冷却過程で形成される熱水による変質であると考えることが可能である。

天水起源と考えられる方解石は、天水が地下へ浸透する過程で形成され、その時期としては瑞浪層群堆積時から現在までの期間であると考えられる。

以上のことから、割れ目の形成および熱水性鉱物による割れ目の充填は、マグマ冷却過程で生じるものであると考えられる。したがって、岩体スケールでの割れ目の形成過程を知るためには、マグマ冷却過程についての理解が必要である。また、天水起源の方解石の形成については、花崗岩露出後の地史についての考察が必要である。

HCG34-01

会場:101A

時間:5月26日 09:00-09:15

石橋ほか, 2014, 応用地質, 55, 156-165.
笹尾ほか, 2006, 地雑, 112, 459-468.
Shibata and Ishihara, 1979, *Geochem. Jour.*, 13, 113-119.
Suzuki and Adachi, 1998, *Jour. Metamorphic Geol.*, 16, 23-37.
Yuguchi et al., 2011, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 162, 1063-1077.
Yuguchi et al., in press, *Amer. Mineral.*

キーワード: 割れ目, 土岐花崗岩, 地史
Keywords: fracture, Toki Granite, geological history

地層処分場のサイト選定における水理学的コンパートメント構造とその意義について Significance of the Hydrogeological Compartment Structure in the Geological Disposal Program

竹内 真司^{1*}; 貴島 望文¹

TAKEUCHI, Shinji^{1*}; KIJIMA, Mifumi¹

¹ 日本大学

¹ Nihon University

1. はじめに

変動帯に位置する日本列島には多くの断層が存在し、特に、トレース長がキロメートルオーダーの断層については、その多くが破碎帯の中央部（コア部）に細粒の粘土物質を含み、その両側にダメージゾーンを伴う、いわゆるサンドイッチ構造を呈することが知られている。このコア部の粘土物質の存在により、断層に直交する方向の透水性は、断層に平行な方向のそれと比べると低くなることが知られている（Caine et al. 1996）。仮に低透水性の断層で四方を囲まれた領域（以下、水理学的コンパートメント構造（HGCS））の中に処分坑道を建設した場合、排水に伴う水位低下領域は、主としてHGCSの内側に限定され、その外側での水位変動は内側に比べて小さくなるとともに、排水停止後は、HGCS外側からの流入が少ないため、水位回復には時間を要することが予想される。また、HGCS内側では、外側の後背地の影響が緩和されることから動水勾配が小さくなり、流速が小さくなることが期待される。この水理学的コンパートメント構造については、（独）日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所において実施された、揚水試験、地震に伴う水圧応答、さらには地下研究施設建設に伴う水圧変動などにより、その詳細が明らかにされてきている（Salden et al. 2005、三枝ほか2007、尾上ほか2008、竹内ほか2013など）。このようなHGCSは、日本列島には多数存在する可能性があり、地層処分場のサイト選定において考慮すべき構造となる可能性がある。

そこで本研究では、日本列島における地質図の判読に基づき、断層で囲まれたコンパートメント構造の分布とその特徴について検討した。さらに、この結果に基づき、サイト選定における水理学的コンパートメント構造の特徴と課題等について検討した。

2. 我が国におけるコンパートメント構造の分布

（独）産業技術総合研究所が公開している地質図 Navi に記載された断層で囲まれた領域をコンパートメント構造として認定した。具体的には、北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州の9地方において、上記断層に囲まれた領域の面積が100km²以下となるコンパートメント構造を対象に抽出した。抽出した構造の面積を算出し、面積のヒストグラムを作成した。

その結果、約1400個のコンパートメント構造を抽出した。地域別にみると、四国地方を除くほとんどの地域で面積が2.25km²にピークをもち、9km²程度までに高い頻度を有する傾向を示すことが判明した。

3. サイト選定における水理学的コンパートメント構造の特徴と課題

これまでの検討の結果、日本列島に分布するコンパートメント構造は、四国地方を除いて概ね2.25~9km²（1.5km × 1.5km~3km × 3kmに相当）が卓越していることが判明した。この面積は、現在想定されている処分場の面積（2km × 3km）と概ね同等である。なお、コンパートメント構造の抽出に用いた地質図 Navi に記載された断層以外にも、瑞浪超深地層研究所の事例のように記載のない断層がHGCSを形成する例は存在することから、実際のコンパートメント構造の数は、今回抽出したものよりも多くなると考えられる。

仮にHGCSの中に処分場が選定された場合は、既述のように、坑道掘削中には外側への水位低下の影響は少なく、外側からの地下水の流入量は小さくなる。加えて、排水後（埋め戻し後）はHGCS内部での動水勾配は小さいことから、地下水流動にとっては好ましい環境と考えられる。一方で、水位回復が著しく遅く、地表水の流入等により酸化性の環境が長く続く場合は、地球化学的な観点からは好ましい環境とはならない。これらについては、HGCSを形成する断層の水理学的な特性（断層コア部の粘土物質の厚さや透水性）や地表水の流入の経路などが影響すると考えられることから、HGCSが推定される場合は、これらについて個別に調査することが必要である。加えて、HGCSを考慮したモデルに基づいて、坑道掘削中（排水中）や排水後（埋戻し後）の地下水流動や物質の移行挙動について予め予測しておくことも必要である。

キーワード: 水理学的コンパートメント構造, 地層処分, サイト調査, 高レベル放射性廃棄物, 地質図ナビ

Keywords: hydrogeological compartment structure, geological disposal, site characterization, high-level radioactive waste, Geomap Navi

多重のデータセットを考慮したベイズ統計学による未知の活断層の評価 A Bayesian approach to assess the probability of concealed active faults existing from multiple datasets

マーティンアンドリュース^{1*}; 浅森 浩一²; 石丸 恒存²; 梅田 浩司²
MARTIN, Andrew^{1*}; ASAMORI, Koichi²; ISHIMARU, Tsuneari²; UMEDA, Koji²

¹ 放射性廃棄物管理共同組合, ² 日本原子力研究開発機構
¹NAGRA, ²JAEA

Assessing the stability of the geological environment including the spatio-temporal distribution of active faulting is of particular concern in the context of site selection of nuclear facilities such as radioactive waste repositories and nuclear power plants.

In order to assess the spatio-temporal distribution of active faults, one typically starts by looking at mapped active faults (e.g. AIST's active fault database) to estimate spatial frequencies and orientations. However, active faults listed in current databases do not represent a complete picture of active faulting, as not all active faults have a surface rupture, and their existence might be unknown. In this case, additional datasets are needed that may imply the existence of active faulting.

Datasets such as high He-3/He-4 ratios which tend to be found in volcanic regions have been attributed to degassing from the mantle with faults potentially acting as conduits. Studies carried out in the western Tottori district have shown the potential of using He-3/He-4 ratios as a means of providing indirect evidence of the existence of source fault(s) that caused the 2000 Western Tottori earthquake, but which had no apparent surface indication prior to the earthquake (e.g., Umeda and Ninomiya, 2009). Other factors that may need to be taken into account when assessing the existence of active faults include horizontal stress orientation, change in stress regimes, regional stresses and so on.

The Bayesian approach can be used to construct probabilistic models from multiple datasets in order to assess the likelihood of given natural phenomena occurring over defined time periods. This method has previously been applied to assessing future new volcano formation (e.g. Martin et al., 2004, 2012) but not to new active fault segment formation. We have thus been developing such a Bayesian model in the Western Tottori district as a case study. In the first step, known active faults are divided into equal fault segments. We assume that unknown fault segments do not exist far from known fault segments. Also, the probability of unknown faults existing decreases with distance from the known faults. 2-D *a priori* probability distributions are calculated using kernel functions centered over the fault segments with varying values of standard deviation depending on the degree of conservation required. A Cauchy probability density function (PDF) is assigned conservatively as the kernel function in the first step so that probability is never zero.

In the second step, Kolmogorov-Smirnov statistical tests are used to remap additional datasets (e.g. He-3/He-4, horizontal stress orientation) into a likelihood PDF. The *a priori* PDF from the first step above is then combined with the likelihood PDF using Bayes' rule to produce a *a posteriori* PDF. In the third and final step, the *a posteriori* PDF is evaluated by comparing probability maps calculated from datasets before and after the 2000 Western Tottori Prefecture earthquake.

The whole procedure can be repeated as new information/data becomes available where the derived *a posteriori* PDF from the first cycle is then used as the starting point, i.e. the *a priori* PDF in the next cycle.

References

- AIST, Active fault database of Japan, https://gbank.gsj.jp/active-fault/index_gmap.html
Martin et al. (2004) J. Geophys. Res., 109, B10208, doi:10.1029/2004JB003201.
Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009) Geochem. Geophys. Geosys., 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
Martin, Umeda and Ishimaru (2012) InTech Pub., doi:10.5772/51859

キーワード: 活断層, ベイズ確率

Keywords: Active fault, Bayesian approach

Cesium adsorption on redox zone pumice tuff at different geochemical condition Cesium adsorption on redox zone pumice tuff at different geochemical condition

RAJIB, Mohammad^{1*}; OGUCHI, Chiaki T.²; SASAKI, Takayuki³; KOBAYASHI, Taishi³
RAJIB, Mohammad^{1*}; OGUCHI, Chiaki T.²; SASAKI, Takayuki³; KOBAYASHI, Taishi³

¹Grad. Sch. Sc. Eng., Saitama University/Bangladesh Atomic Energy Commission, ²Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University, ³Department of Nuclear Engineering, Kyoto University

¹Grad. Sch. Sc. Eng., Saitama University/Bangladesh Atomic Energy Commission, ²Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University, ³Department of Nuclear Engineering, Kyoto University

Non-redox-sensitive element Cesium (Cs) was used to investigate the ionic strength effect on the adsorption behavior on a potential host rock for low and intermediate radioactive wastes. Now-a-days, formation of redox zones in subsurface host rock formation surrounding radioactive disposal facility is a major concern. As such, different geochemical reactions during water-rock interaction around the disposal facility have gained interest to nuclear researchers. The present study attempts to compare the adsorption phenomena, an important geochemical reaction in waste disposal research field, between fresh rock and rock from such redox zone of an underground research facility of Japan. The surrounding rock formation is rhyolitic pumice tuff belong to tuffaceous sandstone which has been affected by redox environment and oxidation to the rock formation has been greatly observed. Physical, mechanical and chemical analyses were carried out to distinguish between fresh and oxidized solid phase. Batch adsorption study was carried out at different geochemical condition including several initial nuclide concentration of Cs, ranging from 10^{-3} mol/dm³ to 10^{-7} mol/dm³; wide range of pH from 4-12, and very low to very high ionic strength ranging from 0.001 to 3.0 mol/dm³. The ionic strength was controlled by Na⁺ ion concentration of NaClO₄. Based on experimental distribution coefficient values, K_d , ionic strength was found to be the most influential for Cs adsorption on both oxidized and fresh pumice tuff. With increasing salt concentration, the K_d of cesium apparently decreases, reflecting the competition of the electrolyte Na⁺ with the sorption of Cs⁺. However, such salt concentration effect became minimum at higher nuclide concentration due to its saturation capacity and a threshold concentration has been observed. Oxidation of pumice tuff did not affect the adsorption of Cs significantly even at variable salt concentration, due to being redox inactive element. Simple surface complexation model without considering the electrostatic layer has also been adopted to explain the adsorption mechanism.

キーワード: Cesium, Redox zone, Pumice tuff, Salt concentration, Adsorption coefficient, Surface complexation model
Keywords: Cesium, Redox zone, Pumice tuff, Salt concentration, Adsorption coefficient, Surface complexation model

江若花崗岩中の小規模破碎帯の走向に関する方位統計学的検討の試み Preliminary study on the directional statistics of crush zones' strikes in the Kojaku Granite

島田 耕史^{1*}
SHIMADA, Koji^{1*}

¹ 原子力機構
¹ Japan Atomic Energy Agency

はじめに: (独) 日本原子力研究開発機構 (以下, 「JAEA」) の高速増殖原型炉もんじゅ (以下, 「もんじゅ」) においては, 敷地内破碎帯の追加地質調査の報告書を取りまとめて, 原子力規制委員会に提出し, その後, 評価が進められているところである。例えばもんじゅのような重要構造物の地盤に関係する自然現象に対する施設の安全性に関連して, 地質等の調査結果が専門家との協働により公開の場で評価される状況は, 地質学の実際問題への対応という意味で新たな領域を形成しつつある。そのような場では, 現地を共に確認し, より科学的・客観的な吟味や評価を行うことが重要であろう。本報告では, JAEA が報告した内容のうち, もんじゅ敷地内に見られる江若花崗岩中に発達する小規模破碎帯の走向が示す複数の系統について, 客観性の向上により説明をわかり易くすることを目的として試行している方位統計学的検討結果と若干の構造地質学的考察をのべる。

課題: これまでの報告 (島田ほか, 2014) では, 互いに切断しあう「2系統」の破碎帯 (β 系, 走向 $N10^\circ E$ 前後; α -3系, 走向 $N50^\circ E$ 前後) が分布することは露頭観察から自明としていた。「2系統」とした客観的な判断基準が与えられるべきである。

方法: 水平露頭で観察される高角度傾斜の破碎帯および粘土を挟む不連続面の走向と長さを約 15m 四方の範囲の 1/200 スケッチから読み取り, 長さを単位長さで割り, 走向を単位長さ個数ならべたリストを作る。走向 (0~180度) を方位統計学的に検討するために 2 倍する。García - Portugués (2013) の方法 (フリー統計ソフト R とパッケージ “movMF” を使用) により, 方位分布がいくつのフォン - ミーゼス分布の混合か検討する。各分布の平均方位を 2 で割り走向に換算する。

結果: データは, 8 個のフォン - ミーゼス分布の混合であると算出された。各平均走向 (北から時計回りに 180° 表示) と集中度パラメータと全体に占める割合 (mean strike in deg./kappa/fraction) は, $10/12.5/0.147$ ($\equiv \beta$ 系), $14/3.79/0.117$, $26/3.22/0.134$, $44/15.3/0.145$ ($\equiv \alpha$ -3系), $47/3.55/0.116$, $66/2.55/0.110$, $132/4.14/0.066$, $169/4.63/0.167$ であった。これまで 2 系統と表現してきた破碎帯は, それぞれ集中度パラメータが 10 を超える 2 方向に近い。全体の方位密度分布曲線は 2 個のピークを示す (Fig. 1)。このことから, これまで自明とした主要な「2系統」は, 方位集中度の方位統計学的検討によっても客観的に根拠づけられた。

考察: 2 系統の破碎帯は, β 系は右ずれ, α -3系は左ずれを主体とする。両破碎帯内には黒雲母の塑性変形が普遍的に観察されるので, 形成温度条件は比較的高温である。両破碎帯は方位統計学的に同程度に発達しており, $N30^\circ E$ 方向を挟む斜方対称的な分布をなし, 互いに切断する関係である。これらのことから両破碎帯は共役系をなすと解釈される。すなわち, 両破碎帯の形成時に, この付近は, $N30^\circ E$ 方向に短縮かつ直交方向に伸びるように変形した。この変形は, 第四紀後期の東西短縮の状況とは整合しない。これらの状況は, 両破碎帯が, 現在の地表付近の環境で形成されたものではなく, 古い地質構造であることを示している。

文献: Eduardo García-Portugués, 2013, Exact risk improvement of bandwidth selectors for kernel density estimation with directional data. *Electron Journal of Statistics*, vol. 7, 1655-1685.

Hornik, K. and Grun, B., 2014, movMF: an R package for fitting mixtures of von Mises-Fisher distributions. *Journal of Statistical Software*, 58(10):1?31

R Core Team, 2014, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

島田ほか, 2014, 江若花崗岩中の小規模破碎帯の剪断センスの逆転. 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨.

Fig.1 方位密度分布曲線 横軸は走向で 360° 表示, 縦軸は分布密度 (平均 1) を示す。

キーワード: 方位統計学, 破碎帯, 江若花崗岩, もんじゅ
Keywords: directional statistics, crush zone, Kojaku Granite, Monju

HCG34-05

会場:101A

時間:5月26日 10:00-10:15

