

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05410

研究課題名(和文) わが国の花崗岩体における割れ目分布評価手法の構築

研究課題名(英文) Development of evaluation method of fracture distribution in Japanese granite

研究代表者

笹尾 英嗣 (SASAO, Eiji)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター・リーダー

研究者番号：10421687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：花崗岩における高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、割れ目は処分施設から漏出した放射性物質が人間環境に運ばれる経路になることから、割れ目の多寡やその分布を知ることが重要である。先行研究から、花崗岩の岩相ごとに冷却・固化のプロセスを解明することにより割れ目形成のメカニズムを明らかにできると考えられたため、本研究では、石英の結晶化温度とストロンチウム同位体比に基づいてマグマの不均一性を明らかにした。また、花崗岩中の黒雲母の変質の程度および空隙の面積と割れ目の密度を比較し、割れ目が形成される過程を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義として、花崗岩に発達する割れ目の多寡がどのように形成されたかを明らかにした点が挙げられる。わが国では高レベル放射性廃棄物の地層処分は処分場選定の初期段階にとどまっており、本研究成果は処分場選定の学術的基盤となることに加え、国民の理解醸成にも活用されることが考えられる。また、割れ目の多寡を評価できることで、例えばトンネルへの湧水量の予測を地質学的見地から行うことが可能になると期待できる。これらの点から、地下空間利用の観点で社会資本の整備にも貢献する成果である。

研究成果の概要(英文)：Understanding of frequency and distribution of fractures is important issue for deep-geological disposal of high-level radioactive waste, because fracture can act as a pathway of nuclide dissolved from waste package. Based on previous study, formative mechanism can be clarified by understanding of cooling and solidification process of each lithofacies within granite. This study revealed the heterogeneity of granitic magma based on the crystallization temperature of quartz and initial strontium isotope ratio. By comparison among extent of biotite alteration (chloritization), areal microvoid fractions and fracture, process of formation and development of fractures is estimated.

研究分野：地質学

キーワード：花崗岩 割れ目 地層処分

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

花崗岩はわが国の約半分の面積を占めることから、高レベル放射性廃棄物地層処分の有力な岩石種の一つである。花崗岩における高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、割れ目は処分施設から漏出した放射性物質が人間環境に運ばれる経路になることから、割れ目の多寡やその分布を知ることが重要である。

花崗岩の割れ目は、一般にはA.マグマ冷却・固化の過程で形成されるもの、B.広域のテクトニクスによって形成されるもの、C.侵食による荷重の除去によって形成されるもの、に大別できる。わが国の花崗岩体は同様な広域のテクトニクスの影響下にあるにも関わらず、地表近くに分布する花崗岩体でも割れ目の少ない岩体も分布する。このことは、割れ目形成のメカニズムとして、A.マグマ冷却・固化の過程での割れ目の形成が特に重要であることを示唆する。

研究分担者による先行研究により、花崗岩体冷却時の500程度程度の温度領域での冷却速度と割れ目頻度が相関すること、花崗岩を構成する鉱物組み合わせ(岩相)の違いによって割れ目分布が変化することが把握されていた。このことから、割れ目は岩相と冷却過程の2つに関連して形成された可能性があり、岩相ごとに冷却・固化のプロセスを解明することにより、割れ目形成のメカニズムを明らかにできると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、花崗岩のマグマ形成から今日までの地質履歴に着目し、わが国の花崗岩に適用可能な割れ目分布を評価する方法論を構築することを目的とした。具体的には、既存情報の多い中部日本に分布する土岐花崗岩体を対象として、割れ目形成過程をモデル化し、構築したモデルの汎用性を確認するため、他の花崗岩体においても割れ目形成過程を検討することによって、割れ目の分布(多寡)を評価する手法の構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究で主たる研究対象とした土岐花崗岩体では、従来の調査・研究によって岩相分布は明らかにされており、マグマの冷却・固化に関する情報も取得されてきた。本研究では、従来の研究では情報が未取得のマグマの不均一性と、マグマが固化した後の低温領域での冷却過程に関するデータ取得に重点を置いた。具体的には、土岐花崗岩体は3つの岩相を有するため、花崗岩に普遍的に含まれる石英が結晶化した温度の相違を解明し、マグマの不均一性を明らかにする。また、アパタイトのストロンチウム同位体比を分析し、周辺岩盤の取り込みの割合を定量的に把握する。これらのデータと割れ目分布の比較を通じて、割れ目形成過程のモデル化を実施することとした。

また、土岐花崗岩以外の岩体においては、岩相分布とマグマの冷却・固化の過程に関する情報を取得する。なお、対象とする岩体については、既存データの多い岩体を対象とし、不足するデータを補足的に取得することによって、効率的に研究を進めることとした。

これらの調査・研究の結果を総合的に解析し、わが国の花崗岩に汎用的に適用できる割れ目分布を評価する手法を構築するというアプローチとした。

4. 研究成果

(1) 土岐花崗岩を対象とした研究

土岐花崗岩体は3つの岩相を有する。こうした岩相を形成したマグマの不均一性やマグマ冷却過程を明らかにするため、石英の結晶化温度とアパタイトのストロンチウム同位体データを取得することとした(アパタイトに関しては(4)で述べる)。このうち、石英の結晶化温度については、花崗岩に普遍的に含まれる石英が結晶化した温度の相違を解明するものであり、石英粒子のカソードルミネッセンス像観察により、試料の結晶構造や微量不純物を解析するとともに、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)分析により石英中のチタン濃度を測定し、石英の結晶化温度を決定した(Yuguchi et al., 2020)。

具体的には、石英粒子の形状や産状の情報、石英の結晶内部構造を反映するカソードルミネッセンス(CL)パターン、石英中のチタン濃度から算出した結晶化温度を取得することで、石英の連続的な成長様式に関する新知見を得た。その結果、土岐花崗岩に含まれる石英は複数のCLパターンに区分できた。それらのCLパターンの相違は、マグマ(メルト)の温度やメルト中のチタンの拡散性に依存する。石英のCLパターンと結晶化温度条件から、土岐花崗岩体を形成したマグマの冷却温度条件を詳細に区分することができた(図1; Yuguchi et al., 2020)。

(2) 土岐花崗岩以外の岩体を対象とした研究

土岐花崗岩体以外の研究対象岩体については、文献調査により割れ目データの有無を確認するとともに、岩石試料の入手可能性を調査した。その結果、北上山地の花崗岩類と飛騨山脈の新しい時代に形成された花崗岩を抽出した。このうち、北上山地の花崗岩類についてはボーリングコアを、飛騨山地の花崗岩については岩石薄片を入手し、予察的な検討を行った。

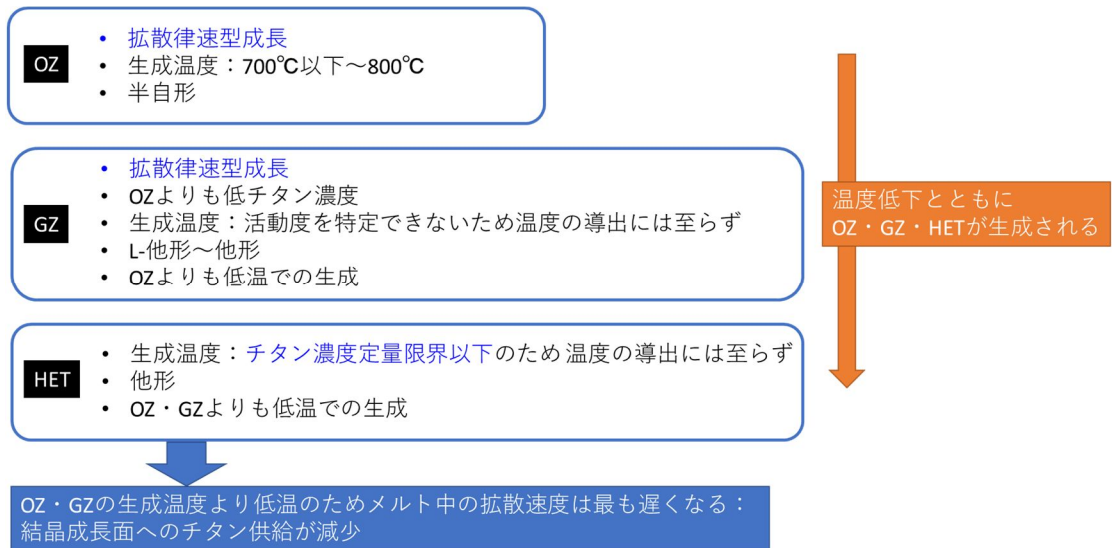


図1 CLパターンごとの石英成長プロセス（本図は Yuguchi et al., 2020 に先行して口頭発表を行った湯口ほか, 2019（鉱物科学会 2019 年大会発表資料）より引用）
 OZ：オシラトリゾーニングを有する石英
 GZ：コアからリムへの漸移的な輝度の変化を持つ石英
 HET：不均質な輝度パターンを持つ石英

その結果、研究対象として割れ目データと岩石試料をセットで入手可能な北上山地の花崗岩を選定した。本研究においては、地表から下向きに掘削されたボーリング孔において、割れ目頻度の異なる区間から 11 試料を採取した。そして、岩石薄片を作成して基礎情報の取得を目的とした岩石・鉱物学的記載を行うとともに、全岩化学分析（蛍光 X 線分析）を行った。また、電子顕微鏡に搭載された化学分析装置により、鉱物の化学組成を取得した。さらに、年代測定および同位体組成分析用にジルコンおよびアパタイトの分離作業を行い、花崗岩マグマ冷却過程を把握するためにジルコンを用いたウラン - 鉛（U-Pb）年代、チタン濃度およびトリウム/ウラン（Th/U）比の同時測定を実施した。石英に対しては、カソードルミネッセンス像とチタン濃度のデータを収集した（アパタイトに関しては（4）で述べる）。

これらの調査の結果、全岩化学組成と鉱物組成は深部方向へ珪長質から苦鉄質への特徴の変化を示し、マグマ溜まり内での重力による結晶分化が生じたと考えられた。ジルコンの U-Pb 年代、チタン濃度、Th/U 比の同時測定から、マグマ固化以前の花崗岩マグマの時間 - 温度履歴を検討した。この結果に基づくと、この花崗岩は約 1 億 2500 万年前に 900 から 700 へ冷却されたと考えられた。また、普通角閃石の結晶化温度と圧力のデータから、普通角閃石結晶生成中の 800 ~ 730 の温度領域では花崗岩は約 9~10km にあり、温度が低下したにも関わらず深度変化は無かったと推定された。異なる深度で採取した試料においても Th/U と温度の関係が同一の傾向を持つことから、冷却するマグマ溜まり内では同じシステムの分別晶出が生じたことを示している。さらに、異なる 2 つの深度の試料で同じ分別晶出が生じていることは、重力による結晶分別が生じたことを示すと考えられる。

これら岩石記載と年代測定の結果については、論文として取りまとめ、国際誌へ投稿した。

（3）割れ目形成過程のモデル化

土岐花崗岩を対象として、割れ目の発生と発達過程を明らかにする目的で、花崗岩中の巨視的割れ目と、鉱物の変質と微小空隙の関係を検討し、黒雲母の緑泥石化を用いた記載岩石学的な変質指標を熱水変質の規模と割れ目頻度を評価する新しい指標として提案した（Yuguchi et al., 2021）。

黒雲母は花崗岩中で様々な程度に変質して産することがある。花崗岩中の割れ目形成発達過程を解明するため、緑泥石化した黒雲母中の変質指標と微小空隙とを割れ目頻度と比較した。変質指標は原鉱物（黒雲母）の面積に対する変質部（緑泥石）の面積の割合で定義した。この結果、割れ目頻度は微小空隙の面積と変質指標に関連しており、割れ目頻度が多い試料では、微小空隙の面積が大きく、変質指標が大きい（より広範囲が変質している）ことが明らかになった（図 2、図 3）。

微小空隙は 350 ~ 780 の温度領域で形成されたと考えられる。巨視的な割れ目の走向・傾斜などに基づくと、350 以下の温度領域で、断層活動や除荷によって微小空隙が発展して形成されたと考えられる。微小空隙は割れ目の素になったと考えられ、現在さらに将来の割れ目分布頻度分布の評価に貢献できる成果が得られた（Yuguchi et al., 2021）。

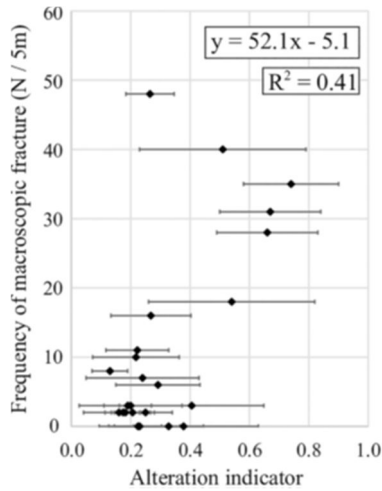


図2 黒雲母中の緑泥石の割合（横軸）と割れ目頻度（縦軸）との関係（笹尾・湯口，2022）

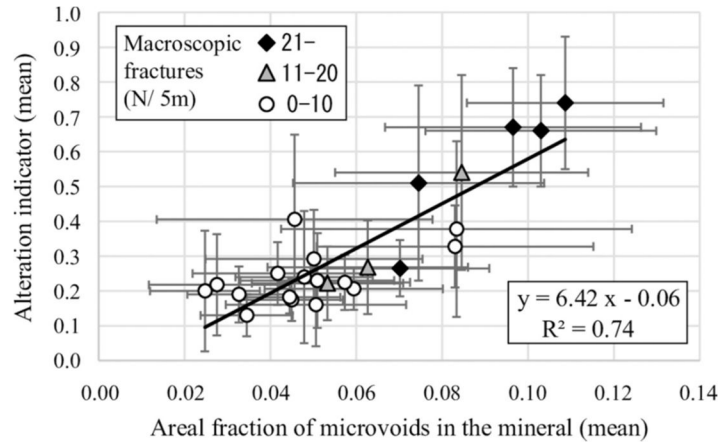


図3 黒雲母中の微小空隙の割合（横軸）と黒雲母中の緑泥石の割合（縦軸）および割れ目頻度の関係。微小空隙が多いほど緑泥石の割合が高い。（笹尾・湯口，2022）

（4）アパタイトのストロンチウム同位体分析

全岩の初生ストロンチウム（Sr）同位体比（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比）はマグマの組成の違いを表す指標として有効である。また、アパタイトの化学的特徴としてルビジウム（Rb）が不適合元素であるため、そのSr同位体組成はマグマの初生的な組成を示すことから、マグマの不均一性に関する情報として活用できる。

アパタイトのSr同位体分析については、当初、外注分析を想定していたが、研究代表者所属機関（日本原子力研究開発機構東濃地科学センター）において、本研究とは別のプロジェクトで鏡味沙耶研究員を中心にレーザーアブレーションICP質量分析装置（LA-ICP-MS）を用いたSr同位体分析の整備が進められていたため、鏡味研究員と協働してデータを取得することにした。

LA-ICP-MSを用いたアパタイトのSr同位体分析に際しては、斜長石を対象としたSr同位体分析で実用化されている、脱溶媒した溶液と固体試料をICPへ導入する手法（dual inlet system）を応用した（鏡味ほか，2021）。本研究においては、フィッシュトラック法などの年代測定の標準試料として用いられるMud Tank, Durango, Fish Canyon Tuffのアパタイトを対象としてSr同位体分析を実施した結果、先行研究と0.1%以内で整合的な結果を得ることができた（再現性は約0.5‰；2SD）（鏡味ほか，2021）。この結果を踏まえ、Sr同位体分析用の試料を採取し、アパタイトの分離を行った。さらに、LA-ICP-MSでのSr同位体分析前に試料の基礎情報を把握するため、EPMAによるアパタイトのCL画像取得や元素濃度分析を行った。

最初に、北上山地の花崗岩に含まれるアパタイトに試験的に適用し、上記標準試料中のアパタイトよりもSr濃度が低く（100～200 ppm）、約100 μmの粒径を持つ粒子の分析が可能であることを確認した（鏡味ほか，2022）。一方で、アパタイトに微量のRbが含まれる場合があり、含有量は粒子ごとに異なることが判明した。

土岐花崗岩においては、Sr同位体分析用の試料を採取し、アパタイトの分離を行うとともに、LA-ICP-MSでの最適な分析条件を探索し、Sr同位体分析を行った。その結果、北上山地の花崗岩中のアパタイトと同様に、微量のRbが含まれることが明らかになった。さらに、レーザー照射中にRbの信号強度（Rb/Sr比）の変動が認められたことから、単一粒子内でRbの分布が不均質であると考えられた。

これらの結果から、アパタイトでもRbを含む場合があり、アパタイトのSr同位体比が起源マグマの初生Sr同位体比を示すかどうかについては検討が必要であることが分かった。このため、本研究とは別途に土岐花崗岩は付加体堆積岩と噴出岩（濃飛流紋岩）に貫入していることから、花崗岩体の様々な場所で採取された試料中にアパタイトの分析を通じて、Rb含有量の評価に取り組むこととし、検討を継続する予定である。

< 引用文献 >

湯口貴史，小北康弘，加藤文典，横田倫太郎，笹尾英嗣，西山忠男（2019）花崗岩体の石英の結晶化プロセス：石英のCL累帯パターンとTitaniQ温度計．日本鉱物科学会2019年年会．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuguchi Takashi , Nonaka Mai , Suzuki Satoshi , Imura Takumi , Nakashima Kazuo , Nishiyama Tadao	4. 巻 107
2. 論文標題 Using cathodoluminescence to identify oscillatory zoning of perthitic K-feldspar from the equigranular Toki granite.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1563 ~ 1574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2022-8146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuguchi Takashi , Yuasa Haruka , Izumino Yuya , Nakashima Kazuo , Sasao Eiji , Nishiyama Tadao	4. 巻 107
2. 論文標題 Micropores and mass transfer in the formation of myrmekites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 476 ~ 488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2021-7956	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuguchi Takashi , Izumino Yuya , Sasao Eiji	4. 巻 117
2. 論文標題 Association of hydrothermal plagioclase alteration with micropores in a granite: Petrographic indicators to evaluate the extent of hydrothermal alteration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 220415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.220415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuguchi Takashi , Matsuki Takanobu , Izumino Yuya , Sasao Eiji , Nishiyama Tadao	4. 巻 106
2. 論文標題 Mass transfer associated with chloritization in the hydrothermal alteration process of granitic pluton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1128 ~ 1142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7353	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi Takashi , Izumino Yuya , Sasao Eiji	4. 巻 16
2. 論文標題 Genesis and development processes of fractures in granite: Petrographic indicators of hydrothermal alteration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0251198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0251198	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi Takashi , Yagi Koshi , Sasao Eiji , Nishiyama Tadao	4. 巻 7
2. 論文標題 K-Ar geochronology for hydrothermal K-feldspar within plagioclase in a granitic pluton: constraints on timing and thermal condition for hydrothermal alteration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e06750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2021.e06750	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuguchi Takashi , Ogita Yasuhiro , Kato Takenori , Yokota Rintaro , Sasao Eiji , Nishiyama Tadao	4. 巻 192
2. 論文標題 Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Cathodoluminescence zonation pattern controlled by temperature and titanium diffusivity.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2020.104289	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 鏡味 沙耶, 横山 立憲, 笹尾 英嗣, 湯口 貴史, Chang, Q.
2. 発表標題 起源マグマの化学組成の制約に向けたLA-ICP-MSによるアパタイトの局所Sr同位体分析手法の開発
3. 学会等名 2022年度日本地球化学会第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹尾英嗣, 村上裕晃, 尾崎裕介, 湯口貴史
2. 発表標題 土岐花崗岩における物質移行特性に関する研究：透過拡散試験の結果について
3. 学会等名 日本地質学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹尾 英嗣, 湯口 貴史
2. 発表標題 花崗岩中の割れ目形成の地質学的検討；中部日本、土岐花崗岩の事例
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (JpGU 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 湯口貴史, 五十公野裕也, 笹尾英嗣
2. 発表標題 花崗岩中の割れ目発生・発達プロセスの解明：熱水変質を指標としたアプローチ
3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鏡味 沙耶, 横山 立憲, Chang, Q., 湯口 貴史, 笹尾 英嗣
2. 発表標題 LA-ICP-MSによるアパタイトのSr同位体分析技術の開発
3. 学会等名 第18回同位体科学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笹尾 英嗣, 湯口 貴史, 石橋 正祐紀
2. 発表標題 花崗岩における割れ目形成過程の検討～中部日本, 土岐花崗岩を事例として～
3. 学会等名 令和2年度 日本応用地質学会 研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	湯口 貴史 (YUGUCHI Takashi) (00516859)	山形大学・理学部・教授 (11501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------