

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13977

研究課題名（和文）断層の活動性評価のための高速摩擦試験と鉱物・化学分析の高精度化に関する研究

研究課題名（英文）Establishment of a new method for evaluating fault activity based on rotary shear experiments, microstructural observations, and chemical analyses

研究代表者

清水 麻由子（Shimizu, Mayuko）

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・研究職

研究者番号：10751191

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：断層を被覆する地層がない場合の活動性評価手法は未だ確立されていない。本研究では断層の活動性評価の鍵となり得る鉱物・化学組成の変化や組織変形などの特徴を捉えることを目的に、模擬の断層内物質を用いて高速摩擦試験を行い、試験後の試料の組織観察や化学分析を実施した。その結果、模擬の断層内物質として石英と黒雲母を用いた試験など複数の試験において、試料中にclay-clast aggregate（CCA；岩片や鉱物片の周りを粘土質物質が同心円状に取り囲んだ組織）とみられる組織が確認された。CCAの産状や化学組成から、地震性の断層すべりを特徴づけるような物理的・化学的变化を見出すことができる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力関連施設の耐震安全性評価や、地層処分安全評価の際に必要な断層の活動性評価は、一般的には断層を被覆する年代既知の地層の変位に基づいて実施されるが、そのような地層がない場合（例えば、地下坑道掘削中に出現した断層など）はこの手法を適用することが難しい。このような場合の断層の活動性評価手法として、断層運動に伴い生じる破壊や化学反応が有効な指標となり得る。補助事業期間内には活動性評価の指標として決定的な特徴を捉えることはできなかったものの、確認された複数パターンのCCAを今後詳細に調べることで、新しい活動性評価手法構築の端緒となるような特徴を見出すことができる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The method for evaluating activity of a fault covered by no strata has not been established. The purpose of this study is to capture features such as mineralogical changes, chemical composition changes, and microstructural deformation that can be key to evaluating fault activity. We performed rotary shear experiments on simulated fault gouges and conducted microstructural observations and chemical analyses of the samples after the experiments. As a result, clay-clast aggregates (CCAs) were identified in the samples of several experiments, including the experiment using quartz and biotite as a simulated fault gouge. By focusing on the textures and chemical compositions of these structures, some physical and chemical changes that characterize seismic fault slip may be identified.

研究分野：地質学

キーワード：活断層 摩擦試験 EPMA clay-clast aggregate CCA

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子力関連施設の耐震安全性評価や、地層処分時の安全評価の際に必要な断層の活動性評価は、一般的には断層を被覆する年代既知の地層の変位に基づいて実施されるが、そのような地層がない場合(例えば、地下坑道掘削中に出現した断層など)はこの手法を適用することが難しい。このような場合の断層の活動性評価手法として、断層運動に伴い生じる破壊や化学反応が有効な指標となる可能性がある。しかし、標準的な指標として広く受け入れられているものは未だ存在しないのが現状である。

(2) 清水ほか(2015)は、活断層の断層岩に対して X 線顕微鏡や電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)を用いた元素マッピングを行い、一部の岩片・鉱物を取り囲むような局所的な Mn の濃集を確認した。清水ほか(2015)はこの結果について、断層岩の全岩化学組成のデータからは Mn の濃集が捉えられないことを踏まえ、この濃集は流体移動によって外部から新しく Mn が付加したのではなく、断層運動に伴う Mn 含有鉱物(例えば、黒雲母など)の破碎・変質によって溶脱した Mn が局所的に濃集したと考察した。断層岩における Mn の濃集については、大谷ほか(2012, 2014)による報告例があり、断層の活動性評価の指標となる可能性を指摘している。

(3) 天然の断層での詳細な化学分析によって、方解石の熱分解(Ikehara et al., 2007)、微量元素の移動(Ishikawa et al., 2008)、粘土鉱物の脱水・構造変化(Yamaguchi et al., 2011)など、さまざまな地震時の化学反応の痕跡が明らかとなってきた(林ほか, 2017)。一方で、嶋本・堤(1994)により、1m/s 以上に達する高速すべりと 10m を超えるような大変位の条件下における岩石摩擦の性質を精度良く調べることを目的に回転剪断式高速摩擦試験機が開発されて以来、断層の高速摩擦について、「すべり軟化」(数 cm から数十 cm 以上に達するすべりを伴いながら摩擦係数が著しく低下する現象)や、「速度弱化」(すべり速度が数 cm/s に達すると急激に摩擦強度が減少する現象)など、多くの知見(例えば、Di Toro et al., 2011)が得られている(林ほか, 2017)。このように、これまで天然の断層の観察や分析に基づいて断層運動時の化学反応を考察した研究や、断層の摩擦特性に着目した研究が行われてきているものの、ミクロンスケールでの特定の元素の濃集に着目して高速摩擦試験によって再現を試みた研究は行われていない。

2. 研究の目的

本研究は、断層の活動性評価の汎用的な指標を見出すことを最終目的とする。そのために、まずは断層運動に伴い断層内で生じる変形や化学的变化などを解明することを目的に、実際の断層内物質を模擬するように鉱物組成を調整した人工試料や、天然の断層から採取した断層内物質に対して、断層運動を模擬した高速摩擦試験を実施し試験後の試料の組織観察や化学分析を行う。これにより実際の断層の活動性評価の鍵となるような特徴(鉱物・化学組成の変化や変形組織等)を捉えることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 天然の断層内物質は様々な種類の鉱物を含んでいる場合が多く、これをそのまま再現するように人工試料を調製すると、断層運動とそれに伴う変化の因果関係を特定することが困難になることが想定される。そのため、実験系を極力単純にする目的で、まずは石英と黒雲母の2種類の鉱物の標準試料を混合することにより断層ガウジの模擬試料を調製した。石英と黒雲母はいずれも代表的な主要造岩鉱物であるが、黒雲母は Mn を含むので、前述のような断層岩における Mn の濃集の様子が検証できることが期待される。また、高速摩擦試験ではガウジに蒸留水や Mn などの標準液を添加することで含水条件の試験も行った。ガウジを挟む岩石(母岩)は花崗岩または砂岩とし、回転速度は地震性すべりを想定し 1 m/s、軸圧は地表付近の断層を想定し 1 MPa または 3 MPa とした。以上のような条件をそれぞれ変化させて、複数のパターンでの高速摩擦試験を行った。試験後に母岩ごと試料を回収し薄片に加工した上で、偏光顕微鏡や走査型電子顕微鏡(SEM)による観察と、EPMAによる面分析を実施した。

(2) 後述するように(4. 研究成果(1))、上記3(1)の石英と黒雲母からなる模擬ガウジによる試験では Mn などの特定の元素の濃集は確認されなかったことから、斜長石の標準試料も用意し模擬ガウジに添加することとした。斜長石は、花崗岩中では基本的に黒雲母より量比が大きく、また天然では風化により粘土鉱物となり得る鉱物である。そのため、花崗岩中の断層を想定した場合、斜長石を模擬ガウジに添加することによって粘土鉱物生成の影響を捉えられる可能性がある。模擬ガウジとして具体的には、石英、黒雲母、斜長石の3種類を混合したものを、斜長石と石英、斜長石と黒雲母をそれぞれ混合したものをを用いた。また、これらのケースとの比較のために、

斜長石のみを模擬ガウジとした実験も行った。これらの実験では、母岩は全て花崗岩とし、回転速度は 1 m/s、軸圧は 4(1)の結果を踏まえて 3 MPa とした。実験後は前述の 3(1)と同様に薄片に加工し、偏光顕微鏡観察等を行った。

4. 研究成果

(1) 3(1)の方法による実験の結果、一部の試料のガウジ中に、clay-clast aggregate (CCA; Boutareaud et al., 2008)とみられる組織が生じていることが明らかになった(図 1)。CCA は、岩片や鉱物片の周りを細粒の粘土質物質が同心円状に取り囲んだ組織であり、地震性すべり速度における摩擦実験で形成されたとの報告がある (Boutareaud et al., 2008 など)ほか、天然の活断層 (Boullier et al., 2009 など)でも確認されている。したがって、CCA の産状や化学組成に着目することにより、地震性の断層すべりを特徴づけるような物理的・化学的变化を見出すことができる可能性がある。

CCA はガウジ模擬物質として石英と黒雲母を質量比 1:1 で混合したものをを用いた試験で明瞭に形成されていた。特に、すべり速度 1 m/s、軸圧 3 MPa、変位量 10 m で試験を行った花崗岩を母岩とする試料のうち、非含水条件のもの、ガウジ模擬物質に 1000 mg/L の Mn 標準液を添加したものの 2 試料に顕著であった。後者の試料では、CCA の反射電子組成像から、石英粒子の周囲に石英中の元素よりも原子番号の大きい元素を含む物質が付着していることが確認できた。さらに EPMA による面分析を実施したところ、この物質には Mg、Al、K、Fe が周囲より多く含まれているという結果が得られたことから、これは破碎した黒雲母が石英粒子の周囲に濃集したものと考えられる。ただし、今回の試験では CCA における Mn の明瞭な濃集は認められなかった。

その他の試験の結果も踏まえると、CCA の形成には水の添加の有無は無関係と考えられる。一方で、軸圧 3MPa での試験後の試料と比較して、軸圧 1MPa での試験後の試料においては CCA の形成が不明瞭であったことから、CCA 形成には垂直応力が関与している可能性がある。また、試料の切断面において CCA の分布に規則性が見られないことから、今回の切断面の速度範囲 (約 0.64~1.00 m/s) においては速度は CCA の形成に影響しないと考えられる。

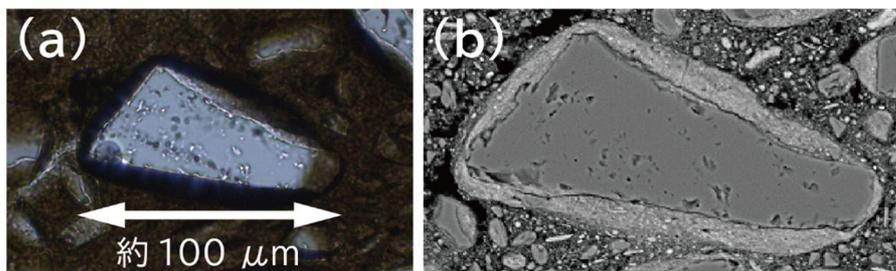


図 1. (a)形成された CCA の偏光顕微鏡像と、(b)反射電子組成像

(2) 3(2)による高速摩擦試験後の試料の一部においても、ガウジ中に CCA 様組織が生じていることが明らかになった。具体的には、模擬ガウジの組成が (A) 斜長石のみ (図 2) (B) 石英・黒雲母・斜長石の 3 種類、(C) 石英と斜長石の 2 種類の場合に、鉱物片の周囲を黒色の組織が取り囲む CCA 様組織が見られた。一方、(D) 斜長石と黒雲母の 2 種類を混合したものを模擬の断層ガウジとして試験を行ったケースについては、このような組織は見られなかった。4(1)で見られた石英と黒雲母からなる CCA 様組織と反射電子組成像を比較した場合、(A) の試料中の CCA 様組織は、鉱物の中心部と縁辺部のコントラストが小さいことが分かった。また、(A) の試料中の CCA 様組織の縁辺部には、4(1)の CCA に比べて細かい凹凸があることも分かった。これに類似した特徴を持つ CCA 様組織は (B) (C) の試料中にも見られた。

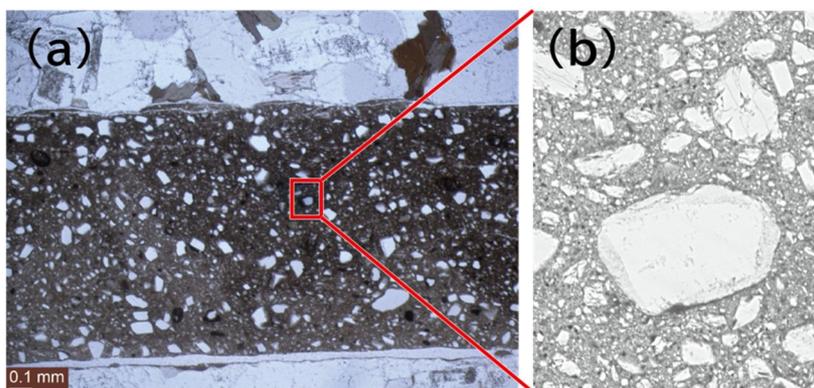


図 2. (a)斜長石のみをガウジとして用いた試料中に見られた CCA 様物質の偏光顕微鏡像と、(b)反射電子組成像

これらのうち、まず(A)のケースで形成されたCCA様組織について、EPMAによる定性分析及び面分析を実施した。このケースでは、斜長石のガウジとして曹長石の標準試料を粉碎したものをを用いている。定性分析の結果、分析対象のCCA様組織は中心部・縁辺部とも曹長石と比較してNaが少ないことが分かった。縁辺部では中心部と比較してNaが多く検出された。また、面分析により、このCCA様組織周辺の基質には縁辺部よりも多くのNaが含まれるという結果が得られた。以上より、斜長石の破碎・変質によってNaが溶脱し基質中に濃集した可能性が考えられるが、そのメカニズム等の詳細は現在までに明らかにできていないため、今後の検討課題としたい。

<引用文献>

- 清水麻由子, 丹羽正和, 田中義浩, 青木和弘, 亀高正男. (2015). 六甲断層・五助橋断層の断層岩における化学組成変化. *日本地質学会学術大会講演要旨, 2015*, 520.
- 大谷具幸, 山下光将, 小嶋智, 若居勝二, 各務和彦. (2012). 2011年4月11日福島県浜通りの地震で地表に現れた断層ガウジと元素移動の関係. *日本地質学会学術大会講演要旨, 2012*, 275.
- 大谷具幸, 河野雅弘, 小嶋智. (2014). 前期更新世までに活動を停止した断層における破碎帯の鉱物学的・地化学的特徴. *日本地質学会学術大会講演要旨, 2014*, 262.
- Ikehara, M., Hirono, T., Tadai, O., Sakaguchi, M., Kikuta, H., Fukuchi, T., Mishima, T., Nakamura, N., Aoike, N., Fujimoto, K., Hashimoto, Y., Ishikawa, T., Ito, H., Kinoshita, M., Lin, W., Masuda, K., Matsubara, T., Matsubayashi, O., Mizoguchi, K., Murayama, M., Otsuki, K., Sone, H., Takahashi, M., Tanikawa, W., Tanimizu, M., Soh, W. and Song, S. (2007): Low total and inorganic carbon contents within the Chelungpu fault. *Geochemical Journal*, 41, 391-396.
- Ishikawa, T., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Matsuoka, J., Tadai, O., Sakaguchi, M., Hirono, T., Mishima, T., Tanikawa, W., Lin, W., Kikuta, H., Soh, W. and Song, S.-R. (2008): Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault. *Nature Geoscience*, 1, 679-683, doi:10.1038/ngeo308.
- Yamaguchi, A., Sakaguchi, A., Sakamoto, T., Iijima, K., Kameda, J., Kimura, G., Ujiie, K., Chester, F.M., Fabbri, O., Goldsby, D., Tsutsumi, A., Li, C.F. and Curewitz, D. (2011): Progressive illitization in fault gouge caused by seismic slip propagation along a megasplay fault in the Nankai Trough. *Geology*, doi:10.1130/G32038.1.
- 林為人, 廣瀬丈洋, 谷川亘, 濱田洋平. (2017). 科学掘削による地震断層の応力状態・物性・すべりパラメータの評価. *地学雑誌*, 126(2), 223-246.
- 嶋本利彦・堤 昭人 (1994): 新しい回転式高速せん断摩擦試験機: その基本設計と研究目的. *構造地質*, 39, 65-78.
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M. and T. Shimamoto (2011): Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, 471, 494-498.
- Boutareaud, S., Calugaru, D. G., Han, R., Fabbri, O., Mizoguchi, K., Tsutsumi, A., & Shimamoto, T. (2008). Clay clast aggregates: A new textural evidence for seismic fault sliding?. *Geophysical Research Letters*, 35(5).
- Boullier, A. M., Yeh, E. C., Boutareaud, S., Song, S. R., & Tsai, C. H. (2009). Microscale anatomy of the 1999 Chi Chi earthquake fault zone. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水麻由子, 大橋聖和, 丹羽正和
2. 発表標題 高速摩擦試験により断層ガウジ模擬物質中に形成されたCCAの特徴
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------