

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05308

研究課題名(和文)地震サイクルにおける断層内の環境と断層物質の変化

研究課題名(英文) Changes of fault materials and their surrounding environments during seismic cycle

研究代表者

藤本 光一郎 (FUJIMOTO, Koichiro)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：80181395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果は以下のようにまとめられる。(1) 粘土鉱物は粉碎によって比較的容易に非晶質化するが、水を含むと非晶質化はしにくくなる。非晶質化によって降伏応力などの物性も大きく変化する。(2) 非晶質化させたカオリナイトを再結晶化させるには、地表では千年程度かかり、地震サイクルとほぼ同じ時間スケールになる。(3) スメクタイトが他の粘土鉱物に比べて高い液性限界を持つことは、地震断層の挙動を考える上でも重要である。スメクタイト含有量が数十%程度で、かなり物性に影響を与えるので、スメクタイト含有量が多い沈み込み帯においては、その挙動に影響を与える可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The results are summarized as follows. (1) Clay minerals are easily amorphized by dry milling, whereas, water inhibits amorphization. Amorphization changes physical properties. (2) It takes as long time as thousand years under a surface environment, for recrystallization of amorphized kaolinite. (3) Smectite has higher liquid limit comparing to the other clay minerals. Even a few tens wt% of smectite effectively increase the liquid limits of clay-water mixture. Physical properties of smectite-water mixtures is important for understanding the behavior of fault in subduction zones, since smectite is major constituent mineral in subduction zone.

研究分野：地質学

キーワード：断層物質 地震 粘土鉱物 粉碎 非晶質化 水 コンシステンシー

## 1. 研究開始当初の背景

粘土鉱物は断層破砕帯の重要な構成物質であり、非常に低い摩擦特性を持つことから、地震性すべりとの関係で注目されている。一方で、ゆっくり地震や津波地震など、必ずしも短周期の地震波を発生しないような断層のすべりの存在も明らかになり、その点でも粘土鉱物や水の役割の重要性が指摘されている。一方、土木分野においては、粘土を多く含む土壌の含水による性状変化は、コンシステンシー特性と言われてよく把握されていた。また、粘土鉱物は機械的な粉碎や物理化学的な環境変化(温度や水の性質)などで変化しやすい。このような粘土鉱物の特徴を断層研究に取り入れた研究はまだそれほど多くないのが現状である。

## 2. 研究の目的

地震サイクルという言葉に表されるように、地震は同じ場所で繰り返し発生する。そのサイクルは、地震時の破壊過程、地震後の回復過程、応力の蓄積過程などの繰り返しで表現できる。それぞれの過程の中で、断層内物質がどのような変化をするのか、破砕帯の解析と反応速度を評価する実験を組み合わせることで総合的に評価することを目的とする。

## 3. 研究の方法

以下の(1)~(5)の研究を実施した。

(1) 破砕帯物質の解析: 比較的長い活動履歴を持ち、塑性領域から脆性領域までの幅広い条件で変形を起こしている断層として中央構造線を対象として詳細な断層物質解析を実施した。

(2) 粉碎による非晶質化の実験: 粘土鉱物を対象に遊星型ボールミルを用いる粉碎実験を実施し、粘土鉱物の種類や水の含有量により、粉碎のされ方や非晶質化の程度を評価した。

(3) 結晶化実験: 非晶質化された粘土がどの程度の時間スケールで再結晶化するかの実験を行った。

(4) 含水率による粘土鉱物の物性変化: 本課題で購入したレオメータ(ブルックフィールド社RTSレオメータ)を用いて、モンモリロナイト、カオリナイト、ハロイサイトなどの粘土鉱物に水を加えて、粘度と降伏応力と含水率の関係を明らかにした。

(5) 総合解析: 地震時の高速すべりの継続する数十秒程度の短い時間スケールと地震の間の100年~1000年という時間スケールのそれぞれにおいて、断層内物質がどのように変化しうのかを、断層物質の解析と実験、既存の様々な速度論的データを組み合わせることで解明する。

## 4. 研究成果

### (1) 破砕帯物質の解析

三重県松阪市の中央構造線の破砕帯の詳細な記載と物質解析を実施した。物質境界の断層露頭の解析を実施し、記載を行い、断層岩の分布や構成鉱物を解析した。その結果、物質境界にはガウジを挟まずに密着していること、物質境界から上盤20m以上にわたってイライト化を強く受けたカタクレーサイト帯が分布し、それより離れた場所ではブドウ石や濁沸石など200程度の温度を示すマイロナイトや弱変形花崗岩が分布していることが分かった。一方、下盤側の三波川変成帯では、物質境界より20m離れて物質境界とほぼ平行な断層ガウジ帯が見られた。このような観察を詳細に行い、近傍の露頭や掘削試料との比較を行うことで、中央構造線の深部の地震発生領域の状態がより明確になることが期待される。

### (2) 粉碎による非晶質化の実験

含水比が0%および25%の場合は数時間の粉碎で非晶質化が進行したが、それ以上の含水比になるとほとんど非晶質化が進行しなかった。さらに600%以上になると再び非晶質化がみられた。25%という含水比は、モンモリロナイトのコンシステンシーの収縮限界に相当し、それ以上水がはいるとモンモリロナイトは塑性的にふるまうことが知られている。含水比が25%までは、ほとんど無水状態と同じようにふるまい、容器内の衝突エネルギーが有効に粉碎や非晶質化に使われるが、25%以上になると、分散系となって衝突エネルギーが散逸してしまい、個々の粒子の粉碎が進まないと考えられる。一方で、600%は液性限界に相当し、それ以上の含水比では液体としてふるまう。したがって再度衝突エネルギーが有効に作用するようになると考えられる。このことは、モンモリロナイトを多く含む断層ガウジの力学特性を考えるうえで重要な視点である。

### (3) 結晶化実験

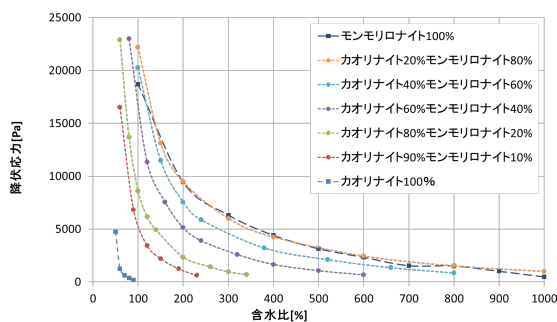
非晶質化カオリナイトを200前後の酸性熱水条件下で再結晶化させたが、250では数時間で、170では4日前後でほぼ10%程度がカオリナイトに再結晶化すると評価された。この結晶化率から考えると常温では再結晶化するのに数百年以上の時間がかかることが予想される。この実験はpH3程度の酸性条件で実験したものであり、中性に近い条件になるともっと再結晶化に時間がかかる可能性がある。

### (4) 含水率による粘土鉱物の物性変化

試料は、カオリナイトは日本粘土学会参照試料(JCSS-1101)、ハロイサイトは試薬(ALDRICH685445-500G)、モンモリロナイトは日本粘土学会参照試料(JCSS-3101)を用いた。

モンモリロナイトの降伏応力は含水比が100%で約20000Paで含水比が高くなるにつれて低下し、含水比が800%になると降伏応力も1000Pa程度に下がり液状化する。ハロイサイトの降伏応力は、含水比が50%で12000Paで含水比が120%で500Paまで下がり、液状化する。カオリナイトはさらに降伏応力が低下し、含水比50%で4000Paだったものが90%で200Paまで低下する。粘度も同様の傾向を示す。このようにカオリナイト族の粘土鉱物はモンモリロナイトに比べて同じ含水比でも降伏応力が小さく、液性限界も100%程度である。これはモンモリロナイトの交換性イオン容量が他の二つよりも多いことに起因すると考えられる。カオリナイト族でもハロイサイトが降伏応力が高いのはハロイサイトの結晶がチューブ状で層間水を持つからと考えられる。

カオリナイトとモンモリロナイトの混合物について混合比を変えて同様の実験を行った。その結果、カオリナイトにモンモリロナイトを10%程度加えるだけでかなり降伏強度の増加が見られ、80%程度加えるとモンモリロナイト単体と同じ挙動を示した。これは、懸濁液にした場合のモンモリロナイトの粒径がカオリナイトに比べて非常に小さく、カオリンの周囲にモンモリロナイトの結晶が取り囲み、モンモリロナイトの物性がより強調されやすいためと考えられる。天然では、複数の粘土鉱物が混合していることはよくみられるので、混合比を検討する必要がある。



モンモリロナイト カオリナイト混合物の含水比と降伏応力の関係

さらに予察的ではあるが、粉碎して非晶質化させたモンモリロナイトについても測定を行ったが、100%に満たない含水比で液状化した。モンモリロナイトの持つ層状構造や層間イオン、層間水が、物性にも大きく影響を与えることが示唆される。

##### (5) 総合解析

今回の研究で実験対象とした粘土鉱物はスメクタイトをはじめ、100以下の比較的低温(浅部)の断層に低まれる粘土鉱物であるが、それらは以下のようにまとめられる。

粘土鉱物は粉碎によって比較的容易に非晶質化するが、水を含むと非晶質化はしにく

くなる。非晶質化によって降伏応力などの物性も大きく変化する。

非晶質物質を再結晶化させるには、かなりの時間(地表では千年程度以上)を要する。地表条件では、地震サイクルとはほぼ同じ時間スケールになる。

スメクタイトが他の粘土鉱物に比べて高い含水比まで塑性状態を保つことは、実際の地震断層の挙動を考える上で重要である。混合物の実験結果から示唆されるようにスメクタイト含有量が数十%程度で、かなり物性に影響を与える。実際に日本海溝などの沈み込み帯の断層ではスメクタイト含有量が多く、その挙動に影響を与える可能性がある。

##### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

K Numata, K Sato, K Fujimoto and K Ito, Positron beam studies of saponite film prepared by precipitation method. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, 791, 2017, 012024  
DOI:10.1088/1742-6596/791/1/012024

Koichiro Fujimoto, Kiminori Sato, Masataka Nakata, Cesium Diffusion through Angstrom-Scale Open Spaces in Clay Minerals, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 86, 2017, 034901.  
DOI: 10.7566/JPSJ.86.034901

Koichiro Fujimoto, Kiminori Sato, Studies of montmorillonite mechanochemically decomposed at different water Contents, Geomaterials, 査読有, 7, 2017, 41-50.  
DOI: 10.4236/gm.2017.72004

Kiminori Sato, Koichiro Fujimoto, Katsuyuki Kawamura, Enhanced Adhesivity of Water Molecules Confined in Angstrom-Scale Open Spaces Formed by Two-Dimensional Nanosheets, J. Phys. Chem. C, 査読有, 120, 2016, 27509-27514.  
DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b11308

Kiminori Sato, Kazuomi Numata, Koichiro Fujimoto, Reduction of Local Stress Concentration on Nanosheet in Layered Nanoparticles with Water Molecules, International Journal of Nanoscience, 査読有, 14, 1460019, 2015, 4p.  
DOI: 10.1142/S0219581X14600199

MORI Hiroshi, WALLIS Simon, FUJIMOTO Koichiro, SHIGEMATSU Norio, Recognition of shear heating on a long-lived major fault using Raman carbonaceous material

thermometry: implications for strength and displacement history of the MTL, SW Japan. Island Arc, 査読有, 24, 2015, 425-446.

DOI: 10.1111/iar.12129

〔学会発表〕(計 5 件)

藤本光一郎, カオリナイト-モンモリロナイト-水系の降伏応力と粘度, 日本地球惑星科学連合 2018 年合同大会, 2018 年.

藤本光一郎, モンモリロナイト 水系のせんだんすべりと粉碎挙動, 鉱物科学会 2017 年年会, 2017 年.

藤本光一郎, モンモリロナイト 水系のコンシステンシー特性と降伏応力, 粘性, 日本地球惑星科学連合 2017 年合同大会, 2017 年.

Koichiro FUJIMOTO, Fault zone mineralogy of the Median Tectonic Line (MTL) in the Eastern Kii Peninsula, SW Japan, Crustal Dynamics 2016 International Symposium, 2016 年.

藤本光一郎, モンモリロナイトの粉碎と非晶質化における水の影響, 日本地質学会第 122 年学術大会, 2015 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 光一郎 (FUJIMOTO, Koichiro)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号: 80181395

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

佐藤 公法 (SATO, Kiminori)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号: 00401448

### (4) 研究協力者

( )