

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03746

研究課題名(和文)断層内の非晶質珪酸塩の構造と成因

研究課題名(英文)Formation process and local structure of amorphous aluminosilicates in fault zone

研究代表者

亀田 純 (Kameda, Jun)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40568713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：断層内の含水粘土鉱物の熱的・機械的非晶質化過程について検討した。カオリナイトと緑泥石の高温脱水実験により、これらの鉱物が異なる温度で脱水非晶質化すること、またその反応進行度をX線回折法により評価可能であることが分かった。この性質は、沈み込み帯地震断層の新たな温度評価指標として有用である。また、機械的作用による脱水反応の促進効果が認められたが、これは鉱物層間の水素結合の選択的破壊に起因していることが分かった。南海トラフの地震断層では、断層面において選択的に相転移反応が進行しており、これは断層すべりに伴って反応の活性化エネルギーが低下することでもたらされることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Thermal and mechanical activations on hydrous clay minerals in fault zones are examined. High-temperature XRD experiments demonstrated that kaolinite and chlorite, typical clay components in crustal faults, dehydroxylate in a different manner, which can be utilized as a new temperature proxy for seismogenic faults in subduction zones. In addition, we showed that mechanical action can facilitate mineral dehydroxylation reaction due to selective degradation of clay interlayers connected by hydrogen bondings. We also investigated smectite/illite mixed layers around a slip zone of the mega-branching fault of the Nankai Trough, and showed that mechanochemical processes possibly associated with seismogenic faulting can activate its transformation reaction by reducing the activation energy of the reaction.

研究分野：構造地質学

キーワード：断層岩 メカノケミストリー 摩擦発熱 粘土鉱物

### 1. 研究開始当初の背景

地震発生時に断層が高速で運動すると、「摩擦発熱」と呼ばれる現象によって断層の温度が上昇する。摩擦発熱にともなう温度履歴を正確に見積もることは、断層のすべり過程や力学的な性質を理解するうえで重要である。近年では、断層掘削によって巨大地震発生直後の断層温度を直接測定する試みが進められており、断層の応力状態や摩擦特性について重要な知見がもたらされている (e.g., Fulton et al., 2013)。一方、過去に発生した地震の解析を目的として、活断層だけでなく地質断層の温度評価も精力的に行われている (Sakaguchi et al., 2011; Kameda et al., 2013)。これらの研究では、化学反応速度論に基づく地質温度計と呼ばれる手法を用いるのが主流となっているが、断層運動による機械的な作用は断層物質の反応速度にも影響を及ぼすため、既存の地質温度計は断層には適用できないとの指摘がある (Sawai et al., 2012; Hirono et al., 2013)。特に、地震発生時の高速すべり変形は、物質の著しい細粒化・非晶質化を引き起こすため、正確な温度評価はさらに困難になると予想される。また最近では、断層の非晶質物質が、断層の力学的な性質そのものを変化させる効果についても相次いで報告されており (e.g., Goldsby and Tullis, 2002)、断層内の非晶質化作用に関する実態解明が望まれている状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、断層内の珪酸塩物質の非晶質化過程を原子レベルで明らかにすることを目的とする。具体的には、機械的・熱的処理を施した粘土鉱物を対象として、X線散乱実験による動径分布解析や各種表面分析手法により、断層運動に伴う非晶質化過程の詳細を構造変化から描き出すことを目指す。またこのような非晶質化作用が、断層内の脱水反応や相転移反応の速度に及ぼす影響を定量的に評価し、断層にも適用可能な地質温度計として整備することを試みる。

### 3. 研究の方法

本研究では、南海トラフに代表される沈み込み帯浅部の地震断層を想定し、カオリナイトおよび緑泥石の脱水反応、またスメクタイト-イライト混合層の相転移反応 (S-I 反応) を研究対象として、下記の3つの研究を行った。

#### (1) 緑泥石・カオリナイトの脱水反応速度

緑泥石 (CCa-2: アメリカ粘土学会) およびカオリナイト (関白: 日本粘土学会) の標準試料を用いて、高温 XRD 測定を行い、昇温過程における底面反射強度の変化について検討した。また熱重量分析から、脱水反応の活性化エネルギーを見積もった。

#### (2) カオリナイトの物理的非晶質化作用にともなう局所構造変化

関白産カオリナイトを出発物質とし、ボールミルによる段階的な粉碎処理を施し、非晶質カオリンを作成した。得られた試料について、粉末 XRD 分析、DG-DTA 分析を行った。また、X線散乱強度測定を行い、取得されたパターンから動径分布関数を導出した。

#### (3) 南海トラフ地震断層内の S-I 反応におけるメカノケミカルな効果

南海トラフの浅部分岐断層のすべり面試料とその周囲の岩石試料について、定方位 XRD 分析を行い、すべり面における S-I 反応進行度の定量を行った。また、摩擦発熱の数値計算から、活性化エネルギーの逆解析を行った。

### 4. 研究成果

(1) 高温 XRD 測定の結果、カオリンと緑泥石の多重ピークが分離されることが分かった (図 1)。これは、両鉱物の c\* 方向の熱膨張率の違いによると考えられる。カオリンのピークは、約 400 °C から低下し始め、約 550 °C で完全に消失した。一方、緑泥石のピークは 500 °C まではほぼ変化が見られず、550 °C まで加熱すると急激に強度低下することが分かった (図 1)。

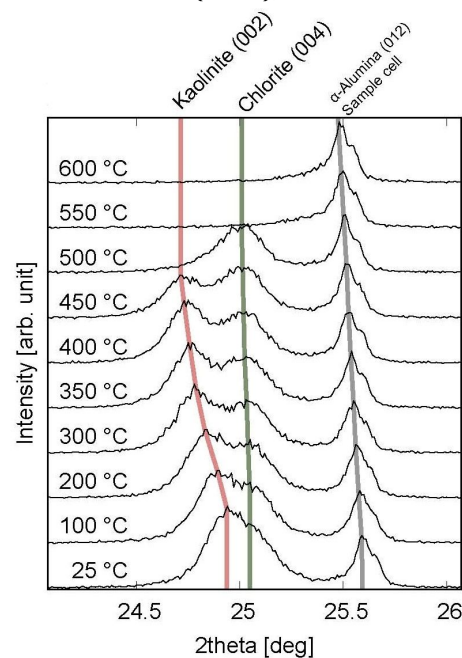


図 1. カオリナイト・緑泥石の底面反射強度の温度変化

これらのピークをフィッティングして得られた各強度とその強度比の変化を図 2 に示す。強度比は、400 以上で低下し始め、500 でほぼ 0 になった (図 2b)。Kameda et al., (2013) は、房総半島南部に発達する白子断層中の粘度鉱物組成を分析し、カオリンと緑泥石の底面反射強度比が断層ガウジにおいて局所的に低下していることを報告している。本実験の結果から、白子断層の断層ガウジにおいて 400 以上の局所発熱が起こった可能性が示唆される。上述のように、両鉱物の熱分解反応が異なる温度で進行することが分かったため、この性質を利用することで、断

層が被った温度条件を制約することができると思われる。

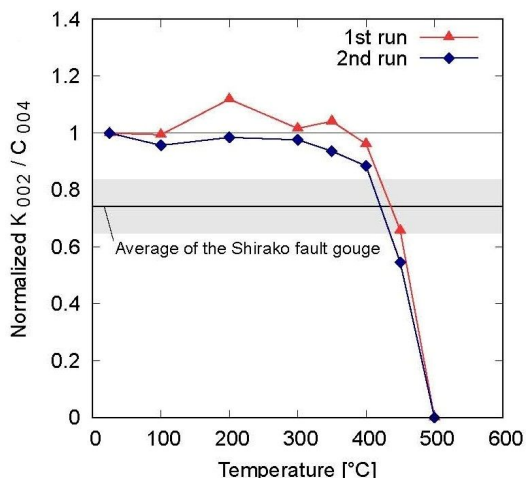


図2. ピーク強度比の温度変化

(2) 粉末 XRD 測定を行った結果、粉碎時間と共に非晶質化が進み、20 時間の粉碎処理で、ほぼ非晶質化が完了することが分かった。TG-DTA 分析の結果、非晶質化とともに、結晶中の構造水の脱水温度やムライトへと相変化する温度がより低温にシフトすることが明らかとなった。20 時間粉碎によって得られた非晶質カオリンの PDF 解析の結果を(図3)、熱処理による非晶質化カオリンの結果 (Sugiyama et al., 1993)と比較すると、Si-O や Al-O に帰属されるピークに大きい違いは見られないものの、O-O, Si-Al, Si-Si, Al-Al 原子対に対応するピークについては強度や位置に変化が見られた。特に前者では、Si-Al

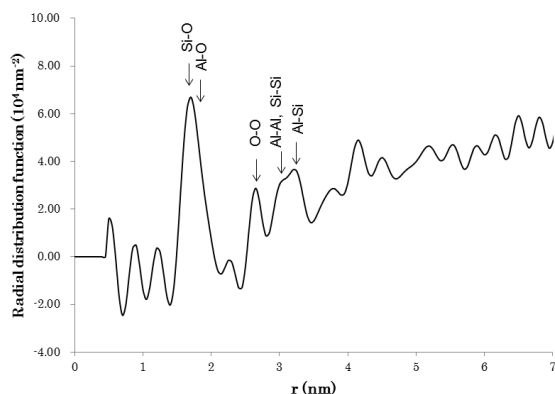


図3. 非晶質カオリンの PDF 解析の結果

対の距離と Al-Al 対及び Si-Si 対の距離に明瞭な違いが見られた。これらは、熱的または機械的処理により、異なる局所構造を持つ非晶質体が形成されることを示しており、粉碎によるものは、カオリン本来の層構造の特徴をより強く残している可能性がある。本研究により、断層内の結晶が被る複合的な非晶質化過程を個々のプロセスに分離して評価できる可能性を提示できた。

(3) 南海トラフ分岐断層試料の XRD 分析の

結果、断層すべり面において約 10% の S-I 反応の進行が認められた。これは、南海トラフ分岐断層とよく似た地質環境で形成された白子断層における反応進行度 (Kameda et al., 2013) とほぼ同程度であった。一般に S-I 反応は熱によって促進すると考えられているため、上記の反応も地震発生に伴う断層面の摩擦発熱に関連した現象と考えられる。しかしながら、Hamada et al., (2015)が行ったビトリナイト温度計を用いた解析からは、これらの断層が、S-I 反応が進むほどの高温状態にはならなかったことが示されている。そこで、今回得られた反応進行度と Hamada et al., (2015)によって示された温度履歴にもとづいて、S-I 反応の活性化エネルギーについて逆解析を行ったところ、南海トラフ分岐断層、白子断層のいずれにおいても、活性化エネルギーが既往値に比べて 30%程度低下している可能性が示された。この低下量は、摩擦実験によって示された鉱物脱水反応の活性化エネルギーの低下量ともよく一致する (Hirono et al., 2013)。以上のことから、これらの断層においては、断層すべりによるメカニカルな作用によって S-I 反応の活性化エネルギーが低下し、静的な環境に比べて反応がより進みやすくなっていたと推定される。

<引用文献>

Fulton, P., at Low Coseismic Friction on the Tohoku-Oki Fault Determined from Temperature Measurements, *Science*, 342, 2013, 1214-1217  
DOI: 10.1126/science.1243641

Goldsby D., T.E. Tullis, Low frictional strength of quartz rocks at subseismic slip rates, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1844, 2002  
DOI:10.1029/2002GL015240.

Hamada, Y. et al., Estimation of slip rate and fault displacement during shallow earthquake rupture in the Nankai subduction zone, *Earth, Planets and Space*, 67, 2015, 39,  
DOI:10.1186/s40623-015-0208-0

Hirono T. et al., Importance of mechanochemical effects on fault slip behavior during earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2013, 2988-2992

Kameda, J. et al., Progress of illitization along an imbricate frontal thrust at shallow depths in an accretionary prism, *Tectonophys.*, 600, 2013, 41-51

Sakaguchi A. et al., Seismic slip propagation to the updip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTro SEIZE cores, *GEOLOGY*, 39, 2011, 395-398  
DOI: 10.1130/G31642.1

Sugiyama, K. et al., 1993. Local ordering structures of meta-kaolinite and meta-dickite by the X-ray radial distribution function analysis, *J. Mater. Sci.*, 28, 1993,  
DOI: 10.1007/BF00356219

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5件)

Kameda, J., S. Inoue, W. Tanikawa, A. Yamaguchi, Y. Hamada, Y. Hashimoto, and G. Kimura, Alteration and dehydration of subducting oceanic crust within subduction zones: Implications for décollement step-down and plate boundary seismogenesis, *Earth, Planets and Space*, 69, 2017, 52 (査読有)

Kameda, J., A. Okamoto, K. Sato, K. Fujimoto, A. Yamaguchi, and G. Kimura Opal-CT in chert beneath the toe of the Tohoku margin and its influence on the seismic aseismic transition in subduction zones, *Geophysical Research Letters*, 44, 2017, 687-693,  
DOI:10.1002/2016GL071784 (査読有)

亀田 純、清水 麻由子、海溝型地震・津波発生における粘土鉱物の役割、粘土科学、3巻、2016、105-113 (査読有)

Kameda, J., C. Inaoi, M. Conin, Exchangeable cation composition of the smectite-rich plate boundary fault at the Japan Trench, *Geophysical Research Letters*, 43, 2016,  
DOI:10.1002/2016GL068283 (査読有)

Hamada, Y., A. Sakaguchi, W. Tanikawa, A. Yamaguchi, J. Kameda, G. Kimura, Estimation of slip rate and fault displacement during shallow earthquake rupture in the Nankai subduction zone, *Earth, Planets and Space*, 67, 2015, 39,  
DOI:10.1186/s40623-015-0208-0 (査読有)

[学会発表](計 6件)

亀田 純、東南海地震の震源域に迫る、鉱物科学会、シンポジウム「ちきゅう掘削鉱物科学」、金沢大学、24/09/2016

亀田 純他、日本海溝におけるチャートの続成・変形過程、地質学会、日本大学(東京)、11/09/2016

亀田 純、日本海溝プレート境界断層の交換性陽イオン組成、研究集会「物質科学的視点から迫る断層運動についての学際的取り組み」、東大地震研究所、07/03/2016

亀田 純、断層粘土の物理化学的ふるまい、シンポジウム「沈み込み帯テクトニクス学の未来」、東京大学、04/03/2016

増本 広和、亀田 純、濱田 洋平、北村 有迅、南海トラフ巨大分岐断層の暗灰色ガウジにおけるイライト化反応の定量的評価、日本地質学会、信州大学、11/09/2015

亀田 純、海溝型地震・津波発生における粘土鉱物の役割、粘土科学討論会 シンポジウム「粘土鉱物の摩擦滑り挙動～地滑り、断層滑りと災害発生機構」、山口大学、03/09/2015

[その他]

ホームページ等

<http://www.sci.hokudai.ac.jp/geotec/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

亀田 純 (KAMEDA, Jun)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40568713

### (3)連携研究者

杉山 和正 (SUGIYAMA, Kazumasa)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：40196762

堤 昭人 (TSUTSUMI, Akito)

京都大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：90324607

竹下 徹 (TAKESHITA, Toru)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：30216882