

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684039

研究課題名(和文)粘土鉱物の脱OH反応が地震性滑り挙動に与える影響の解明

研究課題名(英文)Coseismic dehydroxylation in clay minerals and implications for fault weakening during earthquakes

研究代表者

廣野 哲朗(Hirono, Tetsuro)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70371713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,200,000円、(間接経費) 6,360,000円

研究成果の概要(和文)：粘土鉱物の脱OH反応で放出される水に着目し、粘土鉱物の粉末資料における反応の痕跡の検出と熱分析による反応速度パラメータの決定、断層滑り挙動の数値解析を実施した。その結果、粘土鉱物の脱OH反応による水が地震時の断層の剪断強度を大幅に弱体化させることが明らかになった。このような現象は、粘土鉱物を多く含む日本海溝付近のプレート境界断層でも生じた可能性がある。

研究成果の概要(英文)：To elucidate that released water from clay mineral affects dynamic fault weakening and energetics during earthquakes, I first made experimental determinations of the kinetic parameters of the dehydroxylation reaction of illite-muscovite as representative components in the fault gouges, and measured the specific heat capacity and thermal diffusivity. I performed numerical analyses of dynamic fault weakening, taking into account the dehydroxylation reaction of illite on the basis of our experimental results. I clarify that released fluids assist in the pressurization of pore fluid and subsequently induce a decrease in effective normal stress on faults, and that the dehydroxylation reaction takes up heat from the energy released on the fault during earthquake slip. This effect, which inhibits the rise in temperature in the fault, may be significant in clay-rich faults such as subduction boundary faults.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：断層 地震

### 1. 研究開始当初の背景

水が地震時の断層滑り挙動に与える役割は極めて大きい。古くから有効応力の法則として、岩石中の間隙流体圧が岩石全体の破壊強度を低下させることが知られているが、最近、地震時にもこのような現象が生じることが明らかになってきた。断層の摩擦発熱によって間隙流体が加熱、加圧され、有効垂直応力が低下し、断層の摩擦係数を低下させる現象であり、thermal pressurizationと呼ばれる。この現象は地震時に断層が動いている数秒の間に起きるものであり、断層の滑りを大きく加速する効果を持つため、地震による地殻変動(海底面変動)およびそれに付随する被害(津波)の原因などを探るにあたり、キーとなる重要な因子である。しかし、現在までの thermal pressurization の考えには、高圧化する水は地震前から断層に含まれている間隙流体だけであり、粘土鉱物の脱 OH 反応によって放出される水は一切、考慮されていない。

### 2. 研究の目的

上述のように、地震時の断層強度を著しく弱体化させる thermal pressurization の考えには、高圧化する水は地震前から断層に含まれている間隙流体だけであり、粘土鉱物の脱 OH 反応によって放出される水は一切、考慮されていない。そこで、本研究では、粘土鉱物の脱 OH 反応で放出される水に着目し、震源断層の試料における反応の痕跡の検出と熱分析による反応速度パラメータの決定、断層滑り挙動の数値解析等を通して、粘土鉱物の脱 OH 反応による水が地震時の断層滑り挙動に与える影響の解明を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究を実施するにあたり、以下の6段階の課題を設けた。

震源断層における粘土鉱物の脱 OH 反応の痕跡の検出：まず震源断層の試料にて、地震時に引き起こされた粘土鉱物の脱 OH 反応の痕跡を検出する。

室内岩石高速摩擦実験による粘土鉱物の脱 OH 反応の実証的検証：地震時の断層滑りを模擬した室内岩石高速摩擦実験を実施し、脱 OH 反応の実証的検証を行う。

粘土鉱物の脱 OH 反応の速度論パラメータの決定：断層の任意の場所における滑り時間(risetime)は極めて短く、一般的には5秒程度である。そのため、滑り時の摩擦発熱によって高温環境が生じたとしても、その短い時間で粘土鉱物の脱 OH 反応が進行するかどうかの評価、すなわち反応速度論的解析が必要である。この解析にあたり、脱 OH 反応の速度論パラメータ(反応機構と活性化エネルギーおよび頻度因子)の情報が必要であり、室内加熱実験によって、その決定を行う。

粘土鉱物の高温下熱物性の測定：断層滑り挙動の数値解析に必要な各粘土鉱物の高

温下での熱物性を計測する。

粘土鉱物の脱 OH 反応を組み入れた断層滑り挙動の数値解析：脱 OH 反応で外部に放出される水を組み込んだ地震時の断層滑り挙動の数値解析を実施する。

研究の総括：以上の分析・実験・数値解析の結果をもとに、粘土鉱物の脱 OH 反応で放出される水が地震時の断層滑り挙動に与える影響を明らかにする。

### 4. 研究成果

以上の一連の研究(①~⑥)によって、大きく3つの成果を得ることができた。

(1) 断層の主要構成要素は粘土鉱物であるため、イライト-白雲母の粉末試料を用いて、脱 OH 反応の速度論パラメータの決定、熱物性計測、およびこの反応を考慮した断層滑り挙動の数値解析を実施した。速度論構築では、4つの異なる昇温速度(5, 10, 15, 20 / 分)での加熱実験を実施した。実験中は、酸化を防ぐために、アルゴンガスを流した。さらに、これらの温度-重量変化の結果をもとに、フリードマン解析に基づく、活性化エネルギーの決定およびソフトウェアによる最適な反応機構と活性化エネルギーおよび頻度因子の絞り込みを実施した。その結果、本粘土鉱物の脱 OH 反応は2段階の逐次反応によるもので、それぞれのパラメータの決定が出来た。さらに、地震時の断層滑りを模擬した数値解析を実施した。その結果、脱 OH 反応による水の放出を考慮した場合としない場合を比較すると、脱 OH 反応が摩擦係数と温度など滑り挙動に大きな影響を与えることが明らかになった(Hirono and Tanikawa, 2011)。

(2) コサイスミック化学反応におけるメカノケミカルな効果を検証するために、高速摩擦試験機を用いた粘土鉱物(イライト, IMt-2 標準試料から水ひ作業によって分離)の剪断実験と、実験前後試料の熱分析, X 線回折分析, 全反射型赤外分光分析, 粒度分析を実施した。その結果、試料に与えるエネルギー密度(剪断応力×滑り距離/slip zone の厚さ)が大きいほど、イライトの非晶質化が進行し、さらにこれと平行して脱 OH 反応の活性化エネルギーが減少することが明らかになった。活性化エネルギーの低下は、反応がより低温から進行し易くなることと同義である。そのため、粘土鉱物に滑りが生じた場合、滑りに伴う非晶質化が進行、このメカノケミカルな効果によって、より低温にて脱水反応(脱 OH 反応)が進行、外部に水を放出し、thermal pressurization のアシストを引き起こすという一連のプロセスが発生しうることを意味する(Hirono et al., 2013)。

(3) 以上のような粘土鉱物脱水による断層強度弱体化が、2011年東北地方太平洋沖地震時の海溝付近のプレート境界断層の大規模滑りを主因である可能性がある。そこで、IODP EXP343 で採取されたプレート境界断層の掘削試料を用いた脱水速度論の決定および鉱

物組成の定量分析を実施した結果、断層試料はスメクタイトを主とする粘土鉱物を多く含み、かつ比較的低温(100-200 °C)の温度領域で多くの水を外部に放出しうることが明らかになった。これは、先の可能性が高いことを示す。今後は、断層滑りの数値解析を実施を通して、より定量的な評価を目指したい。

#### 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 9 件)

Hirono, T. and Tanikawa, W., Implications of the thermal properties and kinetic parameters of dehydroxylation of mica minerals for fault weakening, frictional heating, and earthquake energetics, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 307, (2011), 161-172.

Lin, A., Takano, S., Hirono, T., and Kanagawa, K., Coseismic dehydration of serpentinite: Evidence from high-velocity friction experiments, *Chemical Geology*, 査読有, 344, (2013), 50-62.

Hirono, T., Tanikawa, W., Honda, G., Kameda, J., Fukuda, J., and Ishikawa, T., Importance of mechanochemical effects on fault slip behavior during earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 40, (2013), 1-5, doi:10.1002/grl.50609.

Hirono, T., Kameda, J., Kanda, H., Tanikawa, W., and Ishikawa, T., Mineral assemblage anomalies in the slip zone of the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: Ultrafine particles preserved only in the latest slip zone, *Geophysical Research Letters*, 査読有, (2014) .

Hirono, T., Ishikawa, T., Masumoto, H., Kameda, J., Yabuta, H., and Mukoyoshi, H., Re-evaluation of frictional heat recorded in the dark gouge of the shallow part of a megasplay fault at the Nankai Trough, *Tectonophysics*, 査読有, (2014).

Maekawa, Y., Hirono, T., Yabuta, H., Mukoyoshi, H., Kitamura, M., Ikehara, M., Tanikawa, W., and Ishikawa, T., Estimation of slip parameters associated with frictional heating during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake by vitrinite reflectance geothermometry, *Earth, Planets and Space*, 査読有, (2014).

石川剛志・廣野哲朗，断層岩の微量元素組成・同位体組成からみた地震時の流体岩石相互作用，*地球化学*，査読有，46，(2012)，217-230.

廣野哲朗・小村健太郎・藤本光一郎・伊藤久男・ジェームズ・モリ・ジロウ・佐藤比呂志，断層掘削研究によって明らかになった

地震時の断層滑り挙動とその物理化学的側面，*地学雑誌*，査読有，122，(2012)，323-342.

河本和朗・石川剛志・松多範子・廣野哲朗，長野県天然記念物，中央構造線安康露頭における原岩の判定と地質境界断層の決定 偏光顕微鏡観察と全岩化学分析による解析，*伊那谷自然史論集*，査読有，14，(2013)，1-17.

[学会発表](計 29 件)

Hirono, T., Coseismic chemical reactions during earthquake slip, Asia Oceania Geoscience Society 8th Annual General Meeting, 2011.8.11, Taipei.

Honda, G., Ishikawa, T., Hirono, T., and Mukoyoshi, H., Frictional melting and generation of high-temperature fluids during coseismic slip in an ancient megasplay fault, Asia Oceania Geoscience Society 8th Annual General Meeting, 2011.8.12, Taipei.

Matsuta, N., Ishikawa, T., Kameda, J., Kawamoto, K., Nishio, T., Honda, G., and Hirono, T., Fluid rock interaction of the gouge samples of the Median Tectonic Line, Asia Oceania Geoscience Society 8th Annual General Meeting, 2011.8.12, Taipei.

Matsuta, N., Ishikawa, T., Kameda, J., Kawamoto, K., Nishio, T., Honda, G. and Hirono, T., Geochemical signature of fluid-rock interaction in the fault gouge from the Middle Tectonic Line, Japan, AGU (American Geophysical Union) 2011 Fall Meeting, 2011.12.7, San Francisco, USA.

廣野哲朗・谷川 亘，粘土鉱物の脱 OH 反応が地震時の断層滑り挙動に与える影響について，日本地震学会 2011 年度秋季大会，2011.10.12，グランシップ（静岡市）。

本多 剛・谷川 亘・石川剛志・廣野哲朗，地震性滑りによる高温流体の発生とそれに伴う物理化学的過程，日本地震学会 2011 年度秋季大会，2011.10.12，グランシップ（静岡市）。

松多範子・石川剛志・亀田 純・河本和郎・西尾嘉朗・本多 剛・廣野哲朗，中央構造線の断層がガウジにおける水-岩石相互作用，日本地震学会 2011 年度秋季大会 2011.10.12，グランシップ（静岡市）。

廣野哲朗・本多 剛・谷川 亘，脱 OH 反応後の粘土鉱物の組織構造と摩擦滑り特性，日本地球惑星科学連合 2011 年大会，2011.5.23，幕張メッセ（幕張市）。

本多 剛・石川剛志・谷川 亘・廣野哲朗，断層滑り時における岩石-水相互作用，日本地球惑星科学連合 2011 年大会 2011.5.23，幕張メッセ（幕張市）。

本多 剛・平井 望・谷川 亘・廣野哲朗，高速摩擦実験時のテフロン混入による滑り挙動への影響，日本地球惑星科学連合 2011 年

大会, 2011.5.23, 幕張メッセ(幕張市)。  
松多範子・石川剛志・廣野哲朗・本多 剛・西尾嘉朗・河本和郎), 中央構造線の断層ガウジにおける岩石-水相互作用: 微量元素・同位体分析からのアプローチ, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011.5.23, 幕張メッセ(幕張市)。

Maekawa, Y., Yabuta, H., and Hirono, T., Characterization of carbonaceous materials in the Taiwan Chelungpu fault by microRaman spectroscopy, AGU (American Geophysical Union) 2012 Fall Meeting, 2012.12.4, San Francisco, USA.

廣野哲朗・谷川 亘・石川剛志・亀田 純・福田惇一, コサイスミック化学反応におけるメカノケミカル効果, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

本多 剛・石川剛志・廣野哲朗・高木秀雄, 熔融起源・粉碎起源のシュードタキライトにおける微量元素組成変化について, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

本多 剛・谷川 亘・石川剛志・廣野哲朗, 流体制御型摩擦試験装置を用いた高間隙水圧条件下における摩擦実験, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

本多 剛・谷川 亘・石川剛志・廣野哲朗, 地震性滑りに伴う断層での高温流体発生の実験的再現, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

松多範子・石川剛志・廣野哲朗, 房総付加体における断層滑り面の化学的-鉱物学的特徴, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.24, 幕張メッセ(幕張市)。

松多範子・石川剛志・廣野哲朗・河本和朗・藤本光一郎・亀田 純・西尾嘉朗, 中央構造線の断層ガウジにおける地震時-非地震時の物理化学的反応について, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.20, 幕張メッセ(幕張市)。

前川由佳・藪田ひかる・廣野哲朗, 台湾チェルンプ断層における炭質物のラマン分光分析, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

福田惇一・廣野哲朗・奥平敬元・石川剛志・佐藤比呂志・Rupert Sutherland・John Townend・Virginia Toy, アルパイン断層掘削計画の概要とその成果速報, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.24, 幕張メッセ(幕張市)。

⑳ 福田惇一・廣野哲朗・奥平敬元・石川剛志・佐藤比呂志・Rupert Sutherland・John Townend・Virginia Toy, アルパイン断層掘削プロジェクトの成果速報, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

㉑ 松多範子・石川剛志・藤本光一郎・亀田純・河本和朗・西尾嘉朗・廣野哲朗, 中央構

造線安康地域における断層ガウジでの流体-岩石相互作用と摩擦特性, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 2012.10.19, 函館市民会館(函館市)。

㉒ 前川由佳・藪田ひかる・廣野哲朗・谷川 亘, 台湾チェルンプ断層における炭質物のラマン分光分析, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 2012.10.19, 函館市民会館(函館市)。

㉓ 増本広和・廣野哲朗・藪田ひかる・石川剛志・谷川 亘, 南海トラフ巨大分岐断層の掘削コア試料における鉱物組成および炭質物分析, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.22, 幕張メッセ(幕張市)。

㉔ 前川由佳・廣野哲朗・藪田ひかる・谷川 亘・石川剛志, 台湾チェルンプ断層における炭質物のラマン分光分析および赤外分光分析, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.24, 幕張メッセ(幕張市)。

㉕ 神田大樹・廣野哲朗・亀田 純・谷川 亘, 台湾チェルンプ断層における炭質物のラマン分光分析および赤外分光分析, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.24, 幕張メッセ(幕張市)。

㉖ 上田明広・廣野哲朗・神田大樹・谷川 亘・石川 剛志, 地震時の粉碎によりダメージを受けた石英粒子の間隙水への溶解現象について, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.24, 幕張メッセ(幕張市)。

㉗ 廣野哲朗・谷川 亘・亀田純・福田惇一・石川剛志, 鉱物におけるメカノケミカル効果が地震時の断層滑り挙動に与える影響について, 2013.10.9, 神奈川県民ホール(横浜市)。

㉘ 廣野哲朗, 断層深部掘削研究の進展とその活断層研究への応用, 日本活断層学会 2013 年度秋季学術大会, 2013.11.29, つくば国際会議場(つくば市)。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣野 哲朗 (HIRONO TETSURO)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 70371713