

機関番号：14401  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21740329  
 研究課題名（和文）地震時のコサイスマック化学反応で消費されるエネルギーの定量的見積もり  
 研究課題名（英文）Quantitative evaluation of energy taken up by coseismic chemical reaction  
 研究代表者  
 廣野 哲朗（HIRONO TETSURO）  
 大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：70371713

研究成果の概要（和文）：地震時に解放されるエネルギーは、今まで地震波としての放射エネルギーと摩擦発熱エネルギーおよび破壊エネルギーだけが考慮されていた。しかし、本研究では、地震時の断層滑りによる摩擦発熱で瞬間的に引き起こさる化学反応に着目し、実際の断層試料での反応の痕跡の検出に加え、エネルギー保存論と摩擦発熱・熱拡散および化学反応速度論に基づく数値解析を実施し、地震時に消費される化学エネルギーの定量的評価を行った。

研究成果の概要（英文）：Because determination of the energy budget is key to understanding the physics of earthquakes, quantitative evaluation of the energy taken up by coseismic chemical reaction is important. I performed chemical analysis of fault-rock sample from natural seismogenic faults, and revealed the signals indicating the coseismic reaction were found. By a numerical analysis incorporating thermal property measurement, chemical kinetics, and energy conservation, I evaluated the energy taken up by the reaction.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：断層滑り，摩擦発熱

## 1. 研究開始当初の背景

プレート運動により地殻内で局所的に蓄積した応力(歪)が、岩石の剪断破壊もしくは既存の断層の滑りによって解放されるとき、地震は発生する。地震の際に解放されるエネルギーは、地震波としての放射エネルギーと断層滑りに伴う摩擦発熱エネルギーおよび鉱物粒子の破壊に要するエネルギーに分配されると考えられ、それぞれのエネルギーの定量的評価が近年、精力的に試みられている。しかし、これらの地震時のエネルギー収支

の議論では、ある重要なエネルギー、断層滑りによる摩擦発熱で瞬間的に引き起こされる化学反応で消費されるエネルギー、が一切考慮されていない。実際に1999年台湾集集地震で動いたチェルンブ断層では、その掘削試料の解析より、右下図に示すように、様々な化学反応(方解石の熱分解や粘土鉱物の脱水および脱OHなど)の痕跡が検出されている。これらの反応は吸熱を伴うため、反応が進行した痕跡があるということは、その反応で熱(エネルギー)が消費されたということを

意味する。

## 2. 研究の目的

上述の通り、地震時に解放されるエネルギーは、今まで地震波としての放射エネルギーと摩擦発熱エネルギーおよび破壊エネルギーだけが考慮されていた。そこで、本研究では、地震時の断層滑りによる摩擦発熱で瞬間的に引き起こされる化学反応によって消費されるエネルギーに着目した。このエネルギーの消費は、地震時の断層摩擦滑りによる温度上昇を抑制する、さらに、この温度上昇の抑制は、高温環境を必要とする断層滑り機構（例えば摩擦溶解や thermal pressurization）が機能するかどうかにも影響を与える。そのため、化学反応で消費されるエネルギーの定量的評価は地震時の滑り挙動を理解する上で極めて重要である。そこで、本研究では、実際の断層試料での反応の痕跡の検出に加え、エネルギー保存論と摩擦発熱・熱拡散および化学反応速度論に基づく数値解析を実施し、地震時に消費される化学エネルギーの定量的評価を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究を実施するにあたり、以下の5段階の項目を設けた。

① 地震断層におけるコサイスマック化学反応の痕跡の検出：まず実際の地震断層の試料にて、地震時に瞬間的に引き起こされた化学反応の痕跡の検出を行う。扱う断層は、南海トラフの高角逆断層(1944年東南海地震で動いたと考えられている)、四万十帯久礼メランジ付近に発達する逆断層、房総半島の新第三系の付加地質体に発達する断層である。それぞれの断層にて、主要元素の分析、無機炭素・有機炭素量の分析、磁性鉱物分析、構成鉱物の相対定量分析等を実施し、これらの分析結果から、地震時の高温化で進行した化学反応を検出する。

② 断層滑り時間と化学反応速度の兼ね合いの検討：断層のある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10秒以内ある。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、その短い時間で化学反応が進行するかどうかを評価するためには、定量的な解析が必要である。そこで、アレニウスの関係を含む反応速度論的解析を実施する。この解析にあたり、各化学反応の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なため、それらの決定を室内実験を通して行う。

③ 各化学反応における吸熱量の評価：各化学反応における吸熱量は、反応前の物質の生成エンタルピーの和と反応後の物質の生成エンタルピーの和との差に相当する。そこ

で、各化学反応の各物質における生成エンタルピーを過去の文献・データベースにて検索し、各反応における吸熱量の計算を行う。

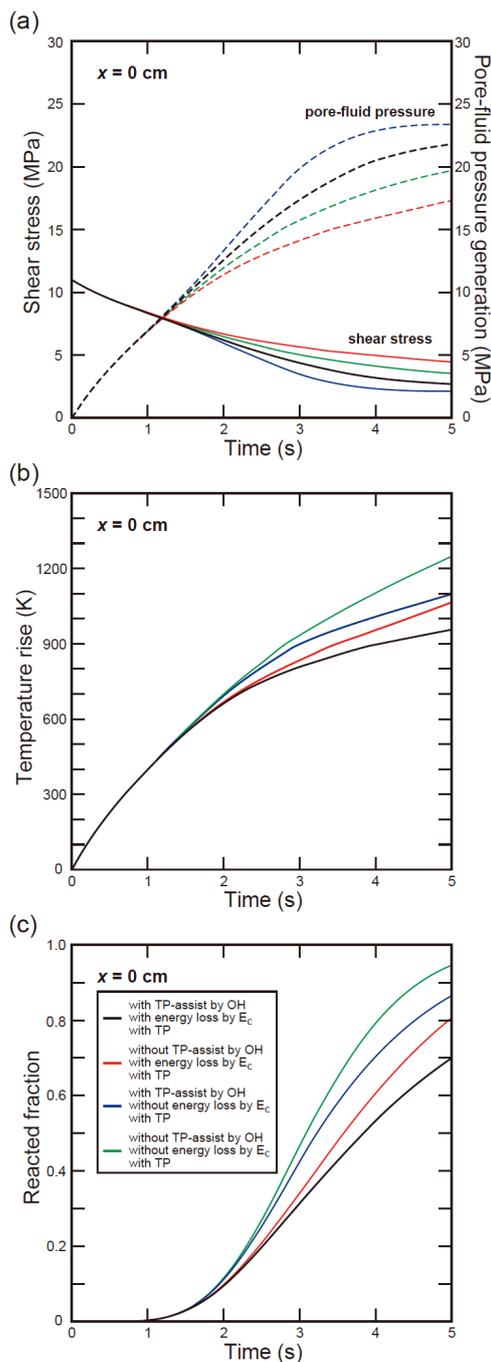
④ 断層物質の比熱容量の評価：物質に与えられた仕事・エネルギーを熱に変換するためには、その物質の比熱容量の情報が不可欠である。そこで、断層物質の比熱容量の評価を行う。

⑤ 地震時に消費される化学エネルギーの評価：以上の情報を元に、地震時のコサイスマック化学反応で消費される熱(エネルギー)を数値解析を通して定量的に評価する。

## 4. 研究成果

研究の方法に記した①について、過去に地震を引き起こした断層(南海トラフ高角逆断層、房総半島新第三系の付加地質体に発達する断層、および四国四万十帯、久礼メランジに発達する逆断層)におけるコサイスマック化学反応の痕跡の検出を多角的な化学分析を通して行った。その結果、南海トラフ高角逆断層では、高温流体の存在の指標であるCs, Li, Rbなどの微量元素の濃度に異常が認められず、有意な摩擦発熱の痕跡は検出されなかった。これは断層深度がわずか海底下271mに起因するという低い有効剪断応力レベルによるものと考えられる。一方、房総半島の付加地質体に発達する断層では、これらの微量元素の異常が顕著に検出され、この断層が地震時に350°C以上の高温に達していたことが明らかになった。さらに、久礼メランジに発達する断層では、同様の異常に加え、溶解現象に伴って移動しうる元素の異常も検出できた。これは、この断層が地震時に高温流体との相互作用だけでなく、摩擦滑りによって溶解まで生じていたことを示す。以上の3つの断層での結果については、3編の国際学術誌に公表済みである(Hirono et al., 2009, *Tectonophysics*; Hamada et al., 2010, *Journal of Geophysical Research*; Honda et al., 2011, *Geophysical Research Letters*)。

次に、②~⑤の項目について、コサイスマック化学反応の速度論的解析と吸熱量の解析を組み合わせることによって、断層物質の比熱容量の温度依存性を考慮しつつ、消費される熱(エネルギー)および断層の温度情報を、数値解析によって定量的に評価した。特に、海溝型地震断層のセッティングにおける主要構成鉱物であるイライト-白雲母に着目し、熱分析装置を用いて、その速度論パラメータの決定、比熱容量と熱拡散係数の測定、および吸熱量の測定を実施した。さらに、これらのパラメータ、実測値を用いて、地震時の断層滑りを模擬した数値解析を実施した。その結果の一例を次の図に示す。



(a) 滑りに伴う断層での剪断応力と有効間隙水圧の変化。(b) 温度変化。(c) 化学反応の進行率。

この図では、地震時の断層の滑り挙動において、イライト-白雲母の脱 OH 反応によるエネルギー消費および外部への水の放出を組み入れた場合および入れない場合の違いを示している。黒い線が両方とも組み入れた場合、赤は後者のみ、青は前者のみ、緑は両方とも組み入れない場合に相当する。この結果より、イライト-白雲母から OH (水) が脱水することによって、断層内の間隙水圧が上昇し、剪

断応力の劇的な低下が起きうることを読み取ることができる。さらに、この脱水反応は吸熱を伴うため、地震時に断層から放出されるエネルギーの多くを消費し、それによって、断層での温度上昇が抑制されることも示す。

以上の一連の研究成果は、海溝型地震において、断層にてどのような物理化学的な素過程が生じているのかを理解する上で、極めて重要であり、さらなる今後の研究の発展が必要である。

## 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 6 件)

① Hamada, Y., Hirono, T., and Ishikawa, T., Coseismic frictional heating and fluid-rock interaction in a slip zone within a shallow accretionary prism and implications for earthquake slip behavior. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 116, B01302, (2011), doi:10.1029/2010JB007730.

② Honda, G., Ishikawa, T., Hirono, T., and Mukoyoshi, H., Geochemical signals for determining the slip-weakening mechanism of an ancient megasplay fault in the Shimanto accretionary complex. *Geophysical Research Letters*, 査読有, 38, L06310, (2011), doi:10.1029/2011GL046722.

③ Hirono, T. and Hamada, Y., Specific heat capacity and thermal diffusivity and their temperature dependencies in a rock sample from adjacent to the Taiwan Chelungpu fault. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 115, B05313, (2010), doi:10.1029/2009JB006816.

④ Lin, W., Yeh, E., Hung, J., Haimson, B., and Hirono, T., Localized rotation of principal stress around faults and fractures determined from borehole breakouts in hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP). *Tectonophysics*, 査読有, 482, (2010), 82-91.

⑤ Hirono, T., Ujiie, K., Ishikawa, T., Mishima, T., Hamada, Y., Tanimizu, M., Soh, W., and Kinoshita, M., Estimation of temperature rise in a shallow slip zone of the megasplay fault in the Nankai Trough. *Tectonophysics*, 査読有, 478, (2009), 215-220.

⑥ 徐 垣, 谷川 亘, 廣瀬丈洋, 林 為人, 谷水雅治, 石川剛志, 廣野哲朗, 中村教博, 三島稔明, En-Chao Yeh, Sheng-Rong Song, Kuo-Fong Ma, 1999年台湾集集地震を引き起こ

したチェルンプ断層の深部掘削の成果概要 - 明らかになってきた断層岩の物質科学と今後の課題-. 地質学雑誌, 査読有, 115, (2009), 488-500.

[学会発表] (計 4 件)

① 廣野哲朗, 粘土鉱物の脱 OH 反応が地震性滑り挙動に与える影響について, 日本地球惑星科学連合 2010 年連合大会, 2010. 5. 26, 幕張メッセ.

② 廣野哲朗, 台湾チェルンプ断層における地震時の化学反応について: TCDP Hole-B`project の総括, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 2009. 10. 21, 京都大学.

③ 廣野哲朗, 台湾チェルンプ断層近傍の母岩試料における比熱と熱拡散係数の実測-それらの温度依存性について-, 日本地質学会第 116 回学術大会, 2009. 9. 6, 岡山理科大学.

④ 廣野哲朗, 台湾チェルンプ断層のコア試料分析から明らかになった地震時の化学変化について, 日本地球惑星科学連合 2009 年連合大会, 2009. 5. 16, 幕張メッセ.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣野 哲朗 (HIRONO TETSURO)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 70371713