

SSS029-01

会場:104

時間:5月23日 08:30-08:45

非弾性な効果の観点による地震破壊過程の動的枠組みの構築 Constructing a dynamic framework of earthquake rupture process in terms of inelastic effect

鈴木 岳人^{1*}

Takehito Suzuki^{1*}

¹ 東大・理・地惑

¹EPS, Univ. Tokyo

ここでは動的地震滑り過程における非弾性な効果に焦点を当てる。損傷生成や塑性など、非弾性な効果の滑り過程における重要性は広く知られており、多くの研究者たちによって調べられてきた。例えば、損傷生成によるエネルギー喪失は破壊伝播速度を抑えるメカニズムの一つとして提案されている。ここで損傷というのは媒質中に非弾性に生成される微小亀裂の集合であることを注意しておく。しかしながら、滑り過程におけるそういった非弾性な効果の系統的な理解はなされていない。

まず空隙生成という観点から非弾性な効果の重要性を明らかにする。非弾性な空隙生成、熱及び流体の間の相互作用を考える。発熱と空隙生成が起こる細い領域の存在を仮定する。空隙生成の時間変化は、過去の実験に基づき滑り速度に比例するものとする。我々は1次元断層を仮定し、動的断層滑りの振る舞いを完全に支配する2つの無次元数 Su と Su' を導出した。 Su は流体圧変化に対する非弾性な効果の寄与、温度変化の寄与に対する比である。このパラメータは応力-滑り関係を支配する。 Su がある臨界値 Sc (~ 1) より大きいと滑り強化の振る舞いが現れる。一方 Su が Sc より小さいと滑り弱化則となる。 Su' は流体の流れに関係し、透水係数に比例する。我々は動的地震滑りの振る舞いの多くの点を、この2つのパラメータの違いとして説明することに成功した。例えば通常の地震とゆっくりした地震は、これらのパラメータの観点から次のように理解される。通常の地震は $Su > \sim 1$ と小さな Su' で特徴付けられる。一方、(Sc よりはるかに大きい Su による) 流体圧の減少に伴う強力な滑り強化則と (大きい Su' による) 流体の流入に伴う滑り弱化則のバランスは、ゆっくりした地震を再現するのに重要であることが分かった。ここでの枠組みは、微動を伴うゆっくりとした地震をも再現した。

我々の定式化を拡張する際に、そこでは断層面外の非弾性な効果が取り扱われていないことに注意する。上で述べたように、非弾性な効果は細い領域の中に現れるということを仮定してきたのである。断層面外の効果は、例えばエネルギー収支の観点から、破壊過程においてその重要性が知られてきた。定式化の拡張と断層面外効果の取り扱いのために損傷の視点を導入する。損傷の効果は微小亀裂の向き、大きさ及び密度を表現しなければならず、それゆえ2階のテンソルで表現されるべきであるということもまた強調しておく。Murakami and Kamiya (1997) に基づく枠組みにより、エネルギー収支の方程式系を解析的に導出することができた。二次元断層モデルを仮定することで、非弾性なエネルギー収支は時間の2乗で増大することが、その解析的結果に基づいて明らかになった。損傷理論及び損傷テンソルを用いて得られた結果を先の熱や流体の効果と結合することは将来の課題である。

キーワード: 非弾性な効果, 熱, 流体, 損傷

Keywords: inelastic effect, heat, fluid, damage

摩擦すべり直後の模擬断層物質の流量変動測定 Real-time monitoring of flow rate through simulated fault rock after friction test

谷川 亘^{1*}, 廣瀬 丈洋¹

Wataru Tanikawa^{1*}, Takehiro Hirose¹

¹ 海洋研究開発機構高知コア研究所

¹JAMSTEC / Kochi Core Center

断層帯の流体が地震発生サイクルプロセスに影響を与える物理概念モデルの一つとして「fault-valve model」が提唱されている (Sibson, 1992)。このプロセスを支配する断層帯の主要な物性は「流体移動特性」と「せん断強度」であり、地震発生サイクルの期間に、この2つの物性は大きく変化することが予想される。断層帯の流体圧は、地震直後に急激に減少してインターサイスミック期間に緩やかに増加することが予想され、断層帯の流体移動特性の変化がその流体圧変動を支配するものと考えられる。しかし、一連の地震サイクルにおける流体移動特性の変化する過程はほとんどわかっていない。そこで本研究では、断層すべり運動最中から直後にかけて流体移動特性がどのように変化するかを室内実験を通して考察を行った。

本実験には石英質インド砂岩 (間隙率 = 12 ~ 14%、透水係数 = $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$) を外径 25mm、内径 9mm の中空円筒状に成形した供試体を用いた。2つの供試体を重ね合わせて、片側の供試体を回転してもう片側の供試体に荷重を与えることにより断層すべり運動を再現した。さらに、供試体の中心部から圧力を一定に制御した窒素ガスを注入して、供試体の内側から外側に向かって流れるガス流量を測定することによって透気係数を評価した。断層すべり実験は、垂直荷重 2MPa、すべり量約 3m、回転速度を一定に制御した条件で行った。またすべり速度は 0.00022 ~ 0.22 m/s の領域で変化させて、すべり速度に対する透気係数変動の影響を考察した。

すべり速度 0.00022 ~ 0.022 m/s の実験では、すべり開始とともに急激に流量が減少し、すべり変位量の増加とともにその減少量は小さくなり、一定値に収束していく傾向が認められた。また、流量の減少量は速度の増加とともに増加する傾向が認められた。回転終了後、流量は急激に増加して、10分後には流量はほぼ一定になった。ただし、その流量はすべり開始前の値までは回復しなかった。また、流量の回復量はすべり量の増加とともに増加する傾向が認められた。一方、すべり速度 0.22m/s の実験でも、すべり開始とともに流量が減少したが、すべり終了後はすべり開始前よりも流量が大きくなる傾向が認められた。すべり速度 0.22m/s の一部の実験では、すべり開始とともに流量が増加する傾向が認められた。実験中の供試体の長さの変化の測定結果から、低速すべりでは回転中に熱膨張により供試体の長さが増加し、すべり終了は温度の低下とともにゆっくりと試料が短縮していく傾向が認められた。一方、高速すべりは、すべり開始とともに摩擦物の生成と熱破壊により供試体の急激な短縮が起こり、すべりが止まった後は低速すべりと同様に冷却により供試体のゆるやかな短縮が認められた。

以上の実験結果から、せん断変形に伴う断層帯の流量変動を促すプロセスとして大きく2つの要素が想定される。1つは摩擦発熱に伴う間隙流体の温度変化に伴う粘性率の変化であり、もう1つはせん断変形に伴うガウジ生成と割れ目生成による供試体の透水係数の変化である。低速すべりでは、前者のプロセスが流量変動に大きな影響を与え、高速すべりでは後者が支配的なプロセスになることが考えられる。

キーワード: 透水係数, permeability evolution, 断層帯, fault-valve model, 間隙水圧

Keywords: permeability, permeability evolution, fault zone, fault-valve model, Fluid pressure

グラファイト混合ガウジの断層潤滑作用; 跡津川断層系の断層運動への寄与 Fault lubrication by graphitic fault gouge; implications for fault creep along the Atotsugawa fault system

大橋 聖和^{1*}, 廣瀬 文洋², 嶋本 利彦³
Kiyokazu OOHASHI^{1*}, Takehiro Hirose², Toshihiko Shimamoto³

¹ 広島大学大学院理学研究科, ² (独) 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ³ 中国地震局地質研究所

¹ Graduate School of Sci, Hiroshima Univ., ² KCC, JAMSTEC, ³ China Earthquake Administration

炭素鉱物は、堆積岩起源の地質体およびその変成岩体に普遍的に含まれ、様々なテクトニクス場における断層帯の主要構成物質のひとつである (e.g., Zulauf et al., 1990, Manatschal, 1999, Craw, 2002)。特に付加体が大部分を占める日本列島では重要な断層構成物質となっている。断層構成物質の力学特性は、断層の挙動を支配する重要な要素であるが、炭素鉱物の力学挙動はほとんど理解されておらず、断層運動への重要性は論じられていない。Oohashi et al. (2011) は炭素鉱物の結晶度の端成分である非晶質炭素とグラファイトの摩擦実験をおこない、広いすべり速度条件下におけるグラファイト模擬断層ガウジの一貫した低摩擦特性 (Steady-state friction $\mu_{ss}=0.1$) を明らかにした。しかしながら、天然の多くの断層帯は複数の鉱物種によって構成されている。そこで、どれだけの量の炭素物質 (特に断層の強度低下に繋がるグラファイト) が断層の力学挙動を支配するようになるかを明らかにするために、代表的な造岩鉱物である石英とグラファイトの混合物質を用いて摩擦実験をおこなった。実験には 5.8 から 54 vol% までの様々なグラファイト量比の模擬混合ガウジを用い、垂直応力 2.0 MPa, すべり速度 50 $\mu\text{m/s}$ -1.3 m/s の条件化で実験を行った。

実験の結果、5 vol% のグラファイトを混入すると、混合物質の摩擦が減少しはじめ、約 15 vol% でほぼ初期摩擦の半分程度まで低下し、28 vol% 以上になると純粋なグラファイトと同じ値になることが明らかとなった。また、このようなグラファイトの混入量に対する摩擦の減少割合は、べき乗則に従うことがわかった。実験断層内部の微細構造観察の結果、グラファイト量が 5-10 vol% の時の摩擦の減少は局所的なグラファイトすべり面の形成、グラファイト量が 28 vol% 以上の場合の急激な摩擦の減少はグラファイト同士の間接した幅の広いすべり帯の形成に起因することが明らかとなった。べき乗則にそった急激な摩擦強度の減少は、これまで断層の強度低下を引き起こす要因と考えられてきたスメクタイトや滑石の摩擦特性 (e.g., Tembe et al., 2010, Moore and Lockner, 2011) と比較してもより顕著であり、グラファイトが非常に強力な“断層潤滑剤”として断層の強度低下を引き起こすことを示唆している。断層帯の熱流量測定から推測される断層の摩擦係数が室内摩擦実験から決まる岩石の摩擦係数より著しく小さいことが 30 年以上にわたって議論されているが、本実験結果は、グラファイトが摩擦係数の小さい“弱い断層”を作り出す有力な断層物質のひとつであることを明確に示した。また、跡津川断層系の断層ガウジやカタクレサイトからは、効果的な断層強度弱体化に十分な量のグラファイト (~15 vol%) が含まれており、実験で観察された微細組織と調和的な断層岩ファブリックが認められている。これらのことは、グラファイトによる断層強度弱体化が跡津川断層系において実際に起こっていることを示唆する。

[引用文献]

Zulauf, G., Kleinschmidt, G., Oncken, G., 1990, Geological Society, London, Special Publications 54, 97-103.

Manatschal, G., 1999, Journal of Structural Geology 21, 777-793.

Craw, D., 2002, Chemical Geology, 191, 257-275

Oohashi, K., Hirose, T., Shimamoto, T., 2011, Journal of Structural Geology, doi:10.1016/j.jsg.2011.01.007

Tembe, S., Lockner, D. A., Wong, T.-F., 2010, Journal of geophysical Research 115, B03416, doi:10.1029/2009JB006383.

Moore, D.E., Lockner, D.A., 2011, Journal of geophysical Research 116, B01403, doi:10.1029/2010JB007881.

キーワード: グラファイト, 断層ガウジ, 摩擦実験, 断層強度弱体化, 跡津川断層

Keywords: graphite, fault gouge, friction experiment, fault weakening, Atotsugawa fault

SSS029-04

会場:104

時間:5月23日 09:15-09:30

摩擦構成則における長さスケールの統計性とフラッシュヒーティングの発展法則 Statistical properties of the characteristic length in friction constitutive law and a evolution law for flash heating

波多野 恭弘^{1*}

Takahiro Hatano^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ ERI, the University of Tokyo

Despite the long history since 1979 (Dieterich) and 1983 (Ruina), the physical meaning of rate-state dependent friction (RSF) law is not very clear to this date. Heslot et al. (1994) were astute to find out that the time-dependent increase of the true contact area and the thermally activated sliding play essential roles to RSF law. Dieterich and Kilgore (1998) and Nakatani (2001) experimentally confirmed some consequences derived from a theory of Heslot et al.

However, some important problems are still left open. For example, evolution laws (the aging law, the slip law, or others) have not been derived from the rheological properties of true contact area. Thus, the important parameters, which are typically denoted as "a", "b", and "L", are just phenomenological constants, although at least it is well known that the constant "a" is proportional to temperature. Under this circumstance, the application of the RSF law to natural faults involves the blind extrapolation from laboratory to geoscale, which requires brute courage. Along the line of thought, the derivation of the RSF law from the "first principle" is essential to the theoretical basis of the application of the RSF law to natural fault (at least aseismic slip rate).

Here we reformulate the RSF law together with evolution laws (the aging and the slip laws) using only the microscopic rheological properties of true contact area. Taking the statistical properties into account, we show that the critical slip distance in the evolution law is a weighted power mean of a linear dimension of true contact patches.

We also take the frictional heat into account to derive an evolution law for flash heating, which is different from that of Beeler et al. Comparison with experiments by Han et al. (2006) reveals that our theory works well.

キーワード: 速度状態依存摩擦, 臨界滑り量, フラッシュヒーティング

Keywords: rate- and state-dependent friction, critical slip distance, flash heating

脆性延性遷移を記述する経験的構成則とその安定性解析 Transient behavior and stability analyses of a constitutive law accounting for brittle-ductile transition

野田 博之^{1*}, 嶋本 利彦²

Hiroyuki Noda^{1*}, Toshihiko Shimamoto²

¹カリフォルニア工科大学, ²中国国家地震局

¹California Institute of Technology, ²China Earthquake Administration

Formulating the fault constitutive law under brittle-ductile transition (BDT) which describes not only the steady state flow stress but also the transient behaviors is of great importance in understanding the deep extent of the seismogenic active faults. In this work, we extended an empirical constitutive law suggested by Shimamoto [2004, JPGU] and Shimamoto and Noda [2010, AGU fall meeting] for the steady state flow stress to the transient behavior, and conducted linear and non-linear stability analyses of a spring-slider system with one degree of freedom, similarly to Gu et al., [1984]. Most of physical parameters appearing in the constitutive law and the spring constant are estimated from the laboratory experiments by Kawamoto and Shimamoto [1997] and Noda and Shimamoto [2010] for NaCl shear zone except ones related to the transient behavior in the brittle regime. Note that NaCl is so unstable that it is difficult to conduct stable friction experiments without stick-slips in its brittle regime.

In BDT, the steady state flow stress smoothly changes from a ductile flow law to a brittle friction law, and is always smaller than the predictions from both of the laws [Shimamoto, 1986]. For the empirical fitting, Shimamoto [2004, JPGU] suggested a connection:

$$t = t_{dss} \tanh(t_{bss}/t_{dss})$$

where t is the flow stress, t_{bss} and t_{dss} are ductile and brittle steady state flow stress, respectively. We extended it to:

$$t = t_d \tanh(t_b/t_d)$$

where t_b and t_d are flow stress formulated in a rate- and state-dependent framework [Ruina, 1983 for brittle friction law, Noda and Shimamoto, 2010 for ductile flow law].

The transient behavior on an abrupt change in the load point velocity is characterized by a peak-decay behavior in the brittle regime and a monotonic decay in the ductile regime. In BDT, a peak-decay is followed by another decay in an opposite direction, often observed in laboratory experiments [Reinen et al., 1994 for chrysotile, Blanpied et al., 1998 for granite, Noda and Shimamoto, 2010 for NaCl]. Such a behavior could be explained by Dieterich-Ruina law with 2 state variables with positive and negative b -values.

Stability of the steady state solution depends on the slip rate, temperature, and the normal stress if the constitutive parameters are fixed; at low slip rate, high temperature, and high normal stress, t_d increases and t_b decreases and thus the ductile flow law becomes dominant which shows rate-strengthening behavior. By comparing the computed stability/instability boundary and experimental data by Kawamoto and Shimamoto [1997], we can estimate the state evolution distance for the brittle constitutive law as 5 microns, based on a reasonable assumption for the a -value.

Noda and Shimamoto [2010] observed permanently sustained oscillation at multiple slip rates with fixed temperature and normal stress near BDT. The finite parameter regime for the sustained oscillation has been understood as a supercritical Hopf bifurcation and generation of a stable limit cycle around a destabilized equilibrium point [Gu et al., 1984]. We have conducted a fully nonlinear analyses using MATCONT [Govaerts et al., 2006], which is a free package for MATLAB. Unfortunately, we found that the system undergoes a subcritical Hopf bifurcation; an unstable limit cycle is absorbed at the Hopf bifurcation. Further study is needed to resolve this problem. The continuation between the brittle and ductile regime is not unique so that there may be a more plausible function following the same empirical approach. The brittle friction law may have 2 or more state variables which probably make the Hopf bifurcation super critical. Also, constructing the model of the physical processes operating in BDT and formulating a physics-based constitutive law deserves future study.

Keywords: fault constitutive law, brittle-ductile transition

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS029-06

会場:104

時間:5月23日 09:45-10:00

大きな破壊への準備過程：数値実験にもとづく考察 Mechanical processes of preparation for large scale events

堀 高峰^{1*}, 阪口 秀¹
Takane Hori^{1*}, Hide Sakaguchi¹

¹ 海洋研究開発機構
¹ JAMSTEC

In order to forecast the occurrence of large events in the Earth's crust, we need to understand their preparation process. Although some precursory phenomena have been proposed as preparation processes for large events, most of their mechanical background is not clear. To understand the mechanical processes before large scale events, we examine numerical experiments in which multi-scale events spontaneously occur. The results show that before the occurrence of a large event, the deviation of the differential stress becomes small in a surrounding area of the large event. This represents a kind of homogenization of the stress field before a large event. After the large event, the stress distribution becomes scattered where only small events can occur.

SSS029-07

会場:104

時間:5月23日 10:00-10:15

南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験 (2010年) Semi-controlled earthquake-generation experiments in South African gold mines (2010)

小笠原 宏^{1*}, R Durrheim², 中谷正生³, 矢部康男⁴, A Milev⁵, A Cichowicz⁶, 川方裕則¹, 村上 理¹, 直井 誠³, 森谷祐一⁴, 佐藤隆司⁷, 研究グループ⁸

Hiroshi Ogasawara^{1*}, R Durrheim², M Nakatani³, Y Yabe⁴, A Milev⁵, A Cichowicz⁶, H Kawakata¹, O Murakami¹, M Naoi³, H Moriya⁴, T Satoh⁷, Research Group⁸

¹立命大 (SATREPS), ²Witwatersrand Univ., ³東大震研, ⁴東北大, ⁵CSIR, ⁶Council for GeoScience, ⁷産総研, ⁸南ア半制御地震発生実験・SATREPS

¹Ritsmeikan U. (SATREPS), ²Witwatersrand Univ., ³ERI univ. Tokyo, ⁴Tohoku Univ., ⁵CSIR, ⁶Council for GeoScience, ⁷AIST, ⁸SeeSA, SATREPS

南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験国際共同研究グループ(以下南アG)の2010年度の活動を報告する。報告の中心は、イズルウィニ、モアブ・コツオン、ドリーフォンテインの3つの鉱山で2009年から準備を進めている観測計画である。この計画では、AE、歪・傾斜・採掘跡の閉塞の観測のみならず、断層透過波や破壊前線での動的応力変化の観測網をM2級予想震源のごく至近距離に展開する。地下採掘現場での強震観測、地表での強震観測も合わせて行い、地震の準備と発生、および、被害現場での強震動についても理解を深め、南アフリカ金鉱山の地震活動評価の高度化と地震被害低減に寄与することも目指す。2011年1月までに、ドリリングは合計45本、総延長1.9kmに達し、予定の6割近くが終了している。掘り上がった孔の多くに対し、コア観察および孔内カメラ観察を行い、ターゲット断層の3次元的地質構造をcm精度で把握し、それを取り囲む最適な観測網になるようにチューンアップした。イズルウィニの鉱山では、2010年11~12月の小笠原・中谷・矢部・中尾らの渡航の際にAE、歪、破壊前線動的応力など計器のデータ収録が始めることができ、また、1月には一部の収録装置がインターネットに接続され、日本からも地下坑内の収録装置を遠隔操作できるようになった。2011年2月の時点で観測網の2~3割が完成している状況である。これらの現場では、すべての工程が60mm径のドリリングで行える応力解放法応力測定、ポアホール・ブレイクアウト、コアディスクキングによる応力場推定も試みられている。

南アGは、南アフリカの鉱山および鉱山地震研究者達と、1992年以来の研究交流・観測経験を持ち、これまでに予測された場所に2~3年以内に発生するM2級の地震と付随する現象の準備と発生の詳細を観測し続けている。これまでに、極微小な鉱山地震にいたるまで地震発生のスケールリングが成り立ち、M2級の地震といえども、震源の至近距離では準備から活動の終息するまでに100 μ strainを超える歪変動があり、余震期には1万個のオーダーのAEが観測され、破壊域と破壊様式が克明に描き出されている。明瞭な前駆を伴うスローイベントも見出され、さらなる詳細を2013年までに明らかにすることを目指している。

今回の計画は、日本サイドは立命・東大・東北大・京大・鹿児島大・東濃地震研・産総研・明間ボーリングなどから、南アサイドはCSIR(南ア科学技術省研究機関)、Witwatersrand大、Council for GeoScience(南ア資源省研究機関)、First Uranium Ltd., AngloGold Ashanti Ltd., Goldfields Ltd., Seismogen CC, Open House Management Solutions Ltd. Murry and Roberts Cementation Ltd., Lesedi Drilling and Mining Ltd. などから、合計百名近い研究者・技術者達が協力しながら進めている。この計画を推し進めるためにJICAと南アフリカ政府の間で協力協定も調印されている。

従来のAEと歪の同時観測データの解析によって、南アフリカの震源域のローディング・メカニズムなどの理解も進んだ。このことも簡単に紹介する。

キーワード: 南アフリカ金鉱山, 震源至近距離, 地震・AE, 歪・傾斜, 動的破壊過程, 透過弾性波

Keywords: South African gold mines, Closed distance from hypocenters, Earthquake & AE, Strain & Tilt, Dynamic rupture process, Transmitted electric wave

SSS029-08

会場:104

時間:5月23日 10:15-10:30

Viscoelastic Model of 2004 Sumatra-Andaman Earthquake observed from near (AG-NeSS) and far field GPS measurements Viscoelastic Model of 2004 Sumatra-Andaman Earthquake observed from near (AG-NeSS) and far field GPS measurements

Gunawan Endra^{1*}, Takeshi Sagiya¹, Takeo Ito¹, Fumiaki Kimata¹, Takao Tabei², Didik Sugiyanto³, Irwandi³
Gunawan Endra^{1*}, Takeshi Sagiya¹, Takeo Ito¹, Fumiaki Kimata¹, Takao Tabei², Didik Sugiyanto³, Irwandi³

¹Nagoya University, ²Kochi University, ³Syiah Kuala University

¹Nagoya University, ²Kochi University, ³Syiah Kuala University

The 2004 Sumatra-Andaman (SA) earthquake occurred due to the subduction of the Indo-Australian plate beneath the Eurasian plate along the Sunda trench. Coseismic deformation of the 2004 SA earthquake was detected by Global Positioning System (GPS) over a wide area in the Southeast Asia. [i.e. Vigny et al., 2005; Subarya et al., 2006; Hashimoto et al., 2006]. In addition, postseismic deformation has been detected by GPS in the Andaman Islands [i.e. Paul et al., 2007; Gahalaut et al., 2008] and Thailand [Satirapod et al., 2008].

We have been operating a GPS network in northern Sumatra called AGNeSS (Aceh GPS Network for Sumatran Fault System) from 2005 and also detected significant postseismic signal. AGNeSS is a densification of the area for about 150 km by 150 km wide which located in the northern region of Sumatran fault. AGNeSS constituted of campaign and continues GPS sites. Totally, 20 campaign sites were obtained during our field observation. Meanwhile, our continuous GPS site, USKL, has been operated since March 2005.

Thus we try to model postseismic deformation combining all those available data. By assuming a coseismic fault model the 2004 SA and the 2005 Nias earthquakes [Einarsson et al., 2010], we predict postseismic viscoelastic relaxation and compare the model calculation with observation. We use PSGRN/PSCMP program developed by Wang et al. [2006]. We assume three-layered structure, a Burgers viscoelastic layer is intervened between the elastic surface layer and the Maxwell viscoelastic substratum. Here, we did not use Maxwell rheology since it can not match with GPS observation [Paul et al., 2007].

We assume that viscosity for Maxwell element is 10^{19} Pa s. Our result shows that the viscosity for Kelvin element is 2×10^{18} Pa s. Our rheology model is similar to those obtained by Hoechner et al. [2010] and Pollitz et al. [2008]. However, our current viscoelastic model here can not match the vertical deformation data in northern Sumatra. On the other hand, the model reproduces both the horizontal and the vertical GPS data in the Andaman Islands well [Hoechner et al., 2010]. One possible reason is that other physical process such as an afterslip has may have significant contribution to the postseismic deformation. Our current estimate of the elastic layer thickness is 55 km. However, the best fit model for elastic depth in Andaman Islands is 40 km [Hoechner et al., 2010]. This result indicates that there is structure heterogeneity between north Sumatra and Andaman Islands.

キーワード: 2004 Sumatra-Andaman earthquake, GPS, viscoelastic deformation

Keywords: 2004 Sumatra-Andaman earthquake, GPS, viscoelastic deformation

かんらん岩中の断層に見られる、mylonitic pseudotachylyte 及び付随するマイロナイトの岩石学的特徴 Petrographical Characteristics of Mylonitic Pseudotachylyte in Peridotitic Fault Zones

上田 匡将^{1*}, DI TORO Giulio⁴, 小澤 一仁³, 小畑 正明¹
Tadamasa Ueda^{1*}, Giulio DI TORO⁴, Kazuhito Ozawa³, Masaaki Obata¹

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻, ² 日本学術振興会特別研究員, ³ 東京大学理学系研究科地球惑星科学, ⁴ パドバ大学地球科学

¹Earth&Planetary Science, Kyoto Univ., ²JSPS research fellow, ³Earth&Planetary Science, Univ. Tokyo, ⁴Geoscience, Univ. Padova

主要な地震は岩石の脆性-延性遷移領域付近で発生する。そのような震源領域での震源核形成等の素過程の研究、変形モデルの検証には天然の地震断層の研究が重要である。

地質学的に地震を記録している断層岩にシュードタキライトがあるが、これは地震時に断層が溶融して形成した岩石である。シュードタキライトの認定には通常、ガラスや微細な急冷結晶組織等が用いられるが、脆性-延性遷移領域付近の高温環境下ではこれらの急冷組織の形成・保存が難しくなると考えられる。従って、既存のシュードタキライト認定方法のみでは、脆性-延性遷移領域での地震組織が系統的に見落とされる危険性がある。また、ウルトラマイロナイトに密接に伴ってシュードタキライトが産する例もしばしば報告されており、これまで報告されたウルトラマイロナイトの中には地震溶融由来のものも含まれている可能性がある。我々は地震溶融由来を示唆するウルトラマイロナイト様岩石を mylonitic pseudotachylyte (以下、mylonitic PsT) と呼び、イタリア Balmuccia かんらん岩体に産するシュードタキライト及びマイロナイトの研究をおこなって来た。

調査地域にはシュードタキライトや mylonitic PsT からなる断層、及び溶融していないマイロナイト剪断帯等がネットワーク状に産する。1回の地震を記録した断層の変位量は読み取ることができたものでは10⁻²数十 cm 程度である。本調査地域では、溶融由来の組織をよく残したシュードタキライト断層ほど注入脈が発達し、断層物質の組織が mylonitic PsT 組織に近い断層ほど注入脈が稀になる傾向がある。このため、mylonitic PsT が溶融由来であるとの認定は難しいが、溶融由来組織と mylonitic PsT 組織とが同一断層面上で相互に移行する例があり、本発表の mylonitic PsT は溶融を経たものと判断される。

Mylonitic PsT はポーフィロクラスト状のクラスト(かんらん石、スピネル、輝石)と極細粒の基質からなる。Mylonitic PsT 断層脈は壁の粗粒な結晶を鋭利に切っていたり、壁のマイロナイトと漸移的な境界を持っていたりする。また、壁岩の一部が結晶片(クラスト)として mylonitic PsT に取り込まれつつある組織がしばしば見られる。Mylonitic PsT 基質は極細粒で、メソスコピックには均質な見かけである。基質粒径は submicron ~ 数 micron 程度で、かんらん石、斜方輝石、単斜輝石、スピネル、ホルンブレンド、ドロマイト、±斜長石、少量の硫化物からなる多相混合物である。基質鉱物の粒界はしばしば三重会合点を有する。斜長石を欠いた鉱物組み合わせのもの形成深度は20-40 km程度と見積もられている。基質ではかんらん石が変形フレームワークに対応した結晶定向配列を持っており、この結晶定向配列に調和的な、集合的な光学的異方性が偏光顕微鏡で観察できる。クラストはしばしば、複数の結晶粒子からなり、破碎岩様組織を呈する。クラストはスピネルやかんらん石が主で、斜方輝石や単斜輝石は少ない。

カタクレーサイトや溶融していないマイロナイトと mylonitic PsT とは以下の点で識別可能である。カタクレーサイトに比して mylonitic PsT は基質の粒径が均質で、かつ基質の割合が大きい。溶融していないマイロナイトと mylonitic PsT の違いは、前者ではマイロナイト基質の粒径が通常数十 micron 程度と大きいこと、mylonitic PsT 基質に見られる特徴的な淡い褐色が前者のマイロナイト基質に見られないことである。(mylonitic PsT の褐色は散在する硫化物の粒子によると考えられる。)

Mylonitic PsT の変形・再結晶の程度が小さい箇所では、含まれるスピネルクラストが特有のコロナ状組織を呈することがある。これは、比較的 Al に富むスピネルクラストの周囲を、Cr に富んだ放射状極細粒スピネル、さらに Al, Ca に富んだ物質が同心円状に取り囲む組織であり、壁から離れた脈内部ほどより発達する傾向がある。同様の組織は、同岩体かんらん岩試料の高速摩擦剪断試験によって形成したシュードタキライト中や、同岩体に天然に産するガラスを含むシュードタキライト中にも観察されている。

また、mylonitic PsT に含まれるクラストや直近の壁岩に特異的に見られる組織として、粗粒なかんらん石や単斜輝石内部に、それぞれ斜方輝石、かんらん石(とホルンブレンド)が亀裂状の形態で存在するというものがある。亀裂状の組織形態や断層直近にのみ観察されることから地震活動による特有の組織であることが示唆される。

以上の観察は、ウルトラマイロナイト様断層岩の履歴が、詳細で系統的な観察によって、シュードタキライトに関連

付けられる例である。かんらん岩だけでなく他の岩型においても同様の知見が蓄積すれば、mylonitic PsT 一般から震源情報が引き出せるようになり、脆性-延性領域で形成する地震性変形へと断層地質の射程が広がるだろう。

キーワード: シュードタキライト, ウルトラマイロナイト, 脆性 延性遷移領域, かんらん岩, 微細組織, mylonitic pseudotachylyte

Keywords: pseudotachylyte, ultramylonite, brittle-ductile transition, peridotite, microtexture, mylonitic pseudotachylyte

SSS029-10

会場:104

時間:5月23日 11:00-11:15

流動化したウルトラカタクラスティック脈に記録された地震すべり:下円井断層を例に

Seismic slip recorded in fluidized ultracataclastic veins: an example from the Shimotsuburai Fault, central Japan

林 愛明^{1*}, 辛 正換¹, 狩野謙一²

Aiming Lin^{1*}, Jeong-Hwan Shin¹, Ken-ichi Kano²

¹ 静岡大学創造科学技術大学院, ² 静岡大学理学部

¹Graduate School, Shizuoka University, ²Faculty of Science, Shizuoka University

It is well known that large earthquakes occur repeatedly along pre-existing mature active faults and that the history of seismic slip may be recorded by the meso- and microstructures in fault rocks that form at all depths from the near-surface to deep levels within fault zones in the crust. It is possible, therefore, to gain an insight into the deformation process of seismic slip recorded in seismogenic fault zones by studying the macro- and microstructures, fabrics, physical properties, and chemical compositions of fault rocks exposed at the surface. In this study, we report typical fluidized ultracataclastic veins formed repeatedly along the active Shimotsuburai Fault of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line (ISTL) active fault system.

Field investigations and meso-microstructural analyses reveal that multi-stage veinlet ultracataclastic rocks, composed of aphanitic pseudotachylyte (Pt) and unconsolidated fault gouge and alluvial deposits, are widely developed within a fault shear zone (<5 m wide) as simple veins, breccias, and complex networks, along the Shimotsuburai Fault. Early veins are generally fractured and overprinted by younger veins, indicating that vein-forming events occurred repeatedly within the same fault zone. Microstructurally, both the Pt and fault gouge veins are characterized by a superfine- to fine-grained matrix and angular/subangular fragments ranging in size from sub-micron scale to several centimeters. Powder X-ray diffraction patterns show that the fault veins and injection veins of fault gouge and Pt are characterized by crystalline materials composed mainly of quartz and feldspar, similar to the host granitic cataclasites.

Based on the meso- and microstructural features of ultracataclastic veins and the results of powder X-ray diffraction analyses, we conclude that i) the Pt veins were generated mainly by crushing rather than melting, ii) multi-stage veinlet fault gouge and Pt formed repeatedly within the fault-fracture zone via the rapid fluidization and injection of superfine- to fine-grained materials derived from the host granitic rocks during seismic faulting events, and iii) veins of alluvial deposit formed by liquefaction associated with strong ground motion during large-magnitude earthquakes that occurred along the ISTL. The present results show that the fluidized ultracataclastic veins and alluvial deposit veins record paleoseismic faulting events that occurred within a seismogenic fault zone; consequently, these features are a type of earthquake fossil, as is melt-origin pseudotachylyte.

Reference:

Lin, A. (2011). Seismic slip recorded in the fluidized ultracataclastic veins formed along the coseismic shear zone during the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, *Geology*, in press.

Keywords: ultracataclastic veins, pseudotachylyte, earthquake fossil, fluidization, fault gouge, fault rocks

SSS029-11

会場:104

時間:5月23日 11:15-11:30

2008年汶川地震を起こした龍門山断層の内部構造と高速摩擦実験 Internal structure and high-velocity friction studies on the Longmenshan fault that caused the 2008 Wenchuan earthquake

東郷 徹宏^{1*}, 嶋本 利彦², 馬 勝利²
Tetsuhiro Togo^{1*}, Toshihiko Shimamoto², Shengli Ma²

¹ 広島大学, ² 中国地震局地質地研究所
¹Hiroshima University, ²China Earthquake Administration

A challenge in fault and earthquake studies is whether a recent well-instrumented earthquake can be reproduced or not based on measured frictional properties of fault zones that caused the earthquake. In collaboration with Institute of Geology, China Earthquake Administration, the author has studied internal structures of Beichuan fault zone at a large outcrop in Hongkou, Sichuan Province. This fault is the major fault in the Longmenshan fault system that ruptured for more than 250 km during Wenchuan earthquake, and the vertical offset at near Hongkou outcrop is 4 to 5 m. Fault zone consists of clayey fault gouge of about 1 m in width and of fault breccia zones of 30-40 m in width on the hanging-wall side. Slip zone during Wenchuan earthquake was 10-20 mm, but overlapping striations indicate that localization of slip to an even narrower zone of a few to several millimetres occur during seismic fault motion. Graphite was found close to the coseismic fault and it might have formed during seismic fault motion. Fault gouge contains illite and chlorite, but not smectite. Black gouge found in fault core in WFSD-1 (Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project) was not found on the Hongkou outcrop.

High-velocity friction experiments were conducted on fault gouge from this outcrop to understand the dynamic weakening processes of the fault during Wenchuan earthquake. Experiments were done on gouge of about 1 mm in thickness between a pair of solid cylindrical specimens of Belfast gabbro of about 25 mm in diameter under dry conditions, using a rotary-shear high-velocity frictional testing machine at Kochi Core Center of JAMSTEC and a rotary-shear low-to-high-velocity friction apparatus at Hiroshima University. Frictional coefficient decreases from around 0.6-0.8 at slow slip rates to 0.1 to 0.2 at high slip rates. An exponential slip-weakening was confirmed and empirical relationships for the slip-weakening distance and for steady-state frictional coefficient were determined as functions of normal stress and slip rate. A very small temperature anomaly detected WFSD-1 hole at a likely coseismic fault at a depth of 590 m suggests that frictional coefficient during the Wenchuan earthquake was far smaller than 0.1 (Mori et al, 2010). Present experiments reproduced duplex-like structures and shear bands as observed in fault zones in Hongkou outcrop. But any mineralogical changes was not recognized in the samples and present experiments could not reproduce fault rocks similar to the black gouge recognized in WFSD-1 hole. Experiments at normal stresses of at least 10 MPa, corresponding to the depth of the coseismic fault in the drill hole, are needed in the future to reproduce intrafault processes at depths. This requires a new specimen assembly that can prevent gouge leakage at high normal stresses.

Fault motion during an earthquake does not occur at a constant slip rate; it undergoes initial acceleration to the maximum slip rate, and then it decelerates and stops during an earthquake. The servo-motor of the low to high-velocity apparatus was controlled electronically to produce linear accelerating/decelerating slip history and a slip history characterized by regularized Yoffe function (rapid initial acceleration followed by nearly exponential deceleration). Better control of servo-motor has made it possible to conduct friction experiments with complex slip histories. Frictional behaviors of Longmenshan fault gouge are characterized by peak friction, nearly linear slip-weakening and final strength recovery. Slower deceleration causes more pronounced strength recovery which can act as brake to fault motion to promote pulse-like rupture propagation during an earthquake. A modified empirical law of Sone and Shimamoto (2009) describes observed behaviors for variable slip histories reasonably well, using parameters determined in constant slip-rate tests.

キーワード: 汶川地震, 龍門山断層, 高速摩擦実験

Keywords: Wenchuan Earthquake, Longmenshan Fault, High-velocity friction experiment

SSS029-12

会場:104

時間:5月23日 11:30-11:45

断層の摩擦特性に対する加速度の影響 Effect of acceleration on frictional properties of faults

廣瀬 丈洋^{1*}, 向吉 秀樹², 谷川 亘¹, 野田 博之³

Takehiro Hirose^{1*}, Mukoyoshi Hideki², Wataru Tanikawa¹, Hiroyuki Noda³

¹ 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ² (株) マリン・ワーク・ジャパン, ³ Seismological Laboratory, California Ins
¹JAMSTEC/Kochi, ²Marine Works Japan, ³Seismological Laboratory, California Ins

Recent high-velocity friction experiments shows that frictional resistance of faults increases rapidly at the onset of sliding over distance of more than several centimeters, that is followed by prolonged slip-weakening. The initial frictional barrier may affect how earthquake ruptures propagate into the shallow crustal depth, but it received little attention up to now. Thus we have conducted constant acceleration experiments on simulated gouge using a rotary-shear friction apparatus. We especially focus on the effect of acceleration of fault on the initial frictional barrier.

In the experiments, we slid a simulated fault at a constant slip rate of 0.1 mm/s and then suddenly increase slip rate to 1.3 m/s with different acceleration of from 0.13 to 13 m/s². In all runs, friction coefficient is 0.6~0.7 at slip rate of 0.1 m/s and then increases by 2~10% over distance of several centimeters as a fault starts to accelerate. Amplitude of the initial frictional barrier and hardening distance seem to depend on acceleration. When a simulated fault overcomes the initial barrier, friction coefficient gradually decreases with slip toward the steady-state value of 0.1~0.2. In order to evaluate whether the initial barrier can affect rupture propagation, we estimate a ratio of the frictional work consumed on fault during the initial hardening stage to the frictional work during the slip weakening. The ratio is about ~0.01 at acceleration of 0.13 m/s², but tends to increase with acceleration to ~0.1 at 13 m/s². The result suggests that as the rupture speed increases, the effect of initial frictional barrier at the onset of rapid faulting could not be negligible and must be incorporated into the analysis of earthquake rupture propagation.

Keywords: fault, friction, earthquake, acceleration, slip hardening

SSS029-13

会場:104

時間:5月23日 11:45-12:00

高速剪断領域を透過する弾性波の性質 Acoustic properties across the high velocity sheared zone

福山 英一^{1*}, 山下 太¹, 溝口 一生²
Eiichi Fukuyama^{1*}, Futoshi Yamashita¹, Kazuo Mizoguchi²

¹ 防災科研, ² 電中研
¹NIED, ²CRIEPI

We investigated the transmitted waves emitted from a piezo-electronic device during the high velocity slip experiments. We modified the high velocity shear apparatus installed at NIED to make it possible to measure the transmitted waves across the sliding interfaces. In this experiment, we used a pair of solid cylindrical sample of monzodiorite from Zimbabwe whose length and diameter are 43mm and 40mm, respectively. Input signal was a single sine pulse with 20Vpp and 0.5MHz. Since the resonance frequency of piezo device is 2MHz for parallel motion and 0.5MHz for perpendicular motion, the received signal is expected to be dominant in shear wave motions.

Before the experiment, we measured the transmitted waves under various normal stress conditions without rotating the samples. As expected, amplitude increases linearly with increasing the normal stress (from 1MPa to 8MPa), indicating the increase of contact area in the interface.

Then, we conducted a friction experiment with continuously monitoring the acoustic amplitudes. The experiment was done under constant slip velocity of 0.08m/s under constant normal stress of 3MPa. Under this condition, no visible melting occurred. A single 0.5MHz sine pulse was shot at an interval of 1KHz. To monitor the averaged variation of the amplitude, 10000 traces were stacked to get a single observed trace, therefore the stacked traces were obtained every 10s. Since total amount of slip was 110m in about 20 seconds, we obtained 125 stacked traces during the sliding. We measured the maximum amplitude of each trace between 30-50 micro seconds after shoot time, which mainly includes S-wave arrival time. The variation of maximum amplitudes seem to be related to the friction coefficient. When the friction decreases, maximum amplitude increases.

We could get some information on the high slip friction from the above amplitude variation of transmitted waves.

キーワード: 高速摩擦試験, 透過波振幅, 摩擦, 断層

Keywords: high-velocity friction experiment, amplitude of transmitted wave, friction, fault

SSS029-14

会場:104

時間:5月23日 12:00-12:15

Induced seismicity along a fault due to fluid circulation: conception and application Induced seismicity along a fault due to fluid circulation: conception and application

Hideo Aochi^{1*}, Blanche Poisson¹, Renaud Toussaint², Jean Schmittbuhl²

Hideo Aochi^{1*}, Blanche Poisson¹, Renaud Toussaint², Jean Schmittbuhl²

¹BRGM/RNSC, Orleans, France, ²IPGS-EOST, Strasbourg, France

¹BRGM/RNSC, Orleans, France, ²IPGS-EOST, Strasbourg, France

It is believed that the some seismicity is driven by the fluid circulation within fault zone and different rheology models have been proposed principally based on the Darcy's law, fluid flow in porous medium. Although it is very difficult to quantify such feature in natural seismicity (some aftershocks of large earthquakes, or seismicity in subduction), the direct application is the induced seismicity at the geothermal sites where micro-fracturing (seismicity) is necessary to allow fluid circulation between two wells and thus the assessment of such seismicity becomes also important. In this study, we construct a conceptual model for the simulators, taking into account of elastic and plastic porosity change (e.g. Segall and Rice, 1995) and fault width evolution (e.g. Yamashita, 1999), supposing first that the seismicity (fluid flow) expands dominantly along a plane. In fact, for an injection of about a few 10 l/s, pore pressure increases immediately (about 1 min) up to more than 10 MPa. This is much faster than the fluid circulation in general. This requires that the fracturing co-seismic process should play a dominant role for bringing the fluid circulation.

キーワード: induced seismicity, fluid, porosity, Darcy's law, fault rheology

Keywords: induced seismicity, fluid, porosity, Darcy's law, fault rheology

SSS029-15

会場:104

時間:5月23日 12:15-12:30

断層滑り時における岩石 水相互作用 Fluid-rock interaction in a fault during coseismic slip

本多 剛^{1*}, 石川 剛志², 谷川 亘², 廣野 哲朗¹
Go Honda^{1*}, Tsuyoshi Ishikawa², Wataru Tanikawa², Tetsuro Hirono¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所

¹Osaka University, ²Kochi Institute for Core Sample Research

断層帯に含まれる水は、地震時における破壊、滑り過程に重要な役割を担っている。例えば、断層滑りによって生じた摩擦発熱により、断層帯中の間隙水が温められ、間隙圧が上昇することによって、断層の摩擦強度を著しく下げる効果がある。これを一般的に Thermal Pressurization と呼ぶ。この滑り現象が起きた際、高温になった間隙水と断層帯との間で化学的な相互作用が生じる可能性がある。近年、台湾チェルンブ断層、房総江見、四万十帯久礼にて断層帯とその母岩の微量元素、同位体分析を行うことによって、滑り時における断層での岩石 水相互作用の履歴が発見された (Ishikawa et al., 2008; Hamada et al., 2011)。これらの地域の断層帯は母岩と比較して、高温の水との相互作用によって岩石から水側へと移動しやすい Li, Rb, Cs などの元素成分が少なく、また逆に水から岩石側へと移動しやすい Sr が増加する傾向が認められた。また摩擦発熱によって温められた間隙水の最高到達温度を見積もるため、水熱実験によって求められた各元素の分配係数 (You et al., 1996) に基づき、その含有量の変化を計算すると 350°C 以上の高温の水との相互作用があったことが推測された。したがって断層の微量元素分析は地震発生時における断層の動的弱化機構、物理化学的素過程を解明する上で直接的な証拠と言える。

四万十帯久礼 OST は海底下 2.5-5.5km で形成された過去の分岐断層であり、ここでは岩石 - 水相互作用だけでなく、熔融の証拠も発見した。先行研究によってシュードタキライトが発見されてはいたが、微量元素分析によってメルトに移動しやすい REE などの incompatible elements が断層帯において著しく濃縮していることが明らかになった。これらの結果から、Thermal Pressurization を起こすに至るまでの水圧は上昇せず、更に温度が上昇し続け、melting に至ったと考えられる。Thermal Pressurization のみ働いたと考慮される、分岐断層の浅い部分 (1-2km) で形成された房総江見と比較することによって、分岐断層に沿った破壊伝播による滑り挙動の違いが見えてきた。

また、本研究ではこの岩石 - 水相互作用に着目し、天然での現象の再現性を図るため、高速剪断摩擦試験機を用いた wet 環境下でのガウジ試料の高速摩擦実験を行った。台湾チェルンブ断層掘削プロジェクト (TCDP) によって掘削されたコアのシルト質岩石を用いた。これを粉末状にしたものを断層ガウジとみなし、円形の金属板で挟み、間の水圧を一定にして剪断を行った。我々はこの wet 環境下でのガウジ試料の力学的性質を調べることに加え、実験前後の試料の微量元素、同位体分析を行い、摩擦発熱によって引き起こされる岩石 - 水相互作用の存在を検証した。低封圧、低剪断速度の条件下では実験前後の試料において微量元素の変化は認められなかった。この原因は滑り面の最高到達温度が 250°C であったことに起因する。Li, Rb, Cs, Sr などの元素は 300°C 以上のときに移動しやすいことが知られているため (You et al., 1996)、相互作用を引き起こすには、更なる温度上昇が必要となる。発表では、現在岩石 - 水相互作用が確認されている天然の断層の紹介と、高速摩擦実験の最新の結果を報告する予定である。

キーワード: 地震性滑り, 岩石 水相互作用, 微量元素, 高速摩擦試験

Keywords: coseismic slip, fluid-rock interaction, trace elements, high velocity frictional experiments

SSS029-16

会場:104

時間:5月23日 12:30-12:45

剪断脱水反応の蛇紋岩変形機構への影響

Effects of shear-induced dehydration of serpentine on the mechanical behavior

高橋 美紀^{1*}, 上原 真一¹, 溝口 一生², 増田 幸治¹

Miki Takahashi^{1*}, Shin-ichi Uehara¹, Kazuo Mizoguchi², Koji Masuda¹

¹ (独) 産業技術総合研究所, ² 財団法人 電力中央研究所

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²CRIEPI

The frictional properties of serpentinite are of particular interest in the study of earthquake generation processes along subducting plates and transform faults. Previous studies showed that the rheology of serpentinite is quite complicated, but that complicated rheology is not yet fully understood. We were not able to pinpoint the role of serpentinite in fault behavior and/or earthquake occurrence. Currently it becomes imperative to investigate the rheology of serpentine-bearing fault comprehensively. Serpentine accompanied by high pore water pressure at wedge mantle has a possibility to affect occurrences of slow earthquakes and/or non-volcanic tremors [e.g., Obara, 2002] at a place where a subducting plate contacts a serpentinized mantle wedge. Here we will report results of experiments the transient behaviors of the serpentine gouge to stepwise change in slip velocity under high temperature condition. We conducted the shear-sliding tests on the serpentine gouge (almost pure antigorite) using a gas-medium, high-pressure, and high-temperature triaxial testing machine. Sliding deformation was applied on the thin zone of the gouge (c.a. 0.8 mm) between two alumina blocks with oblique surfaces at 30° to the cylindrical axis, under various temperature conditions. The experiments were carried out using a constant confining pressure (100 MPa), a constant pore-water pressure (30 MPa), and a range of temperatures (from room temperature to 600 deg.C). The transient responses of mechanical characteristics following stepwise changes in the slip velocity were documented at each temperature. Slip rates varied between 0.0115 micron/sec (~36 cm/yr) and 11.5 micron/sec (~1.0 m/day).

Both the strength and the shear behavior showed the drastic change at around 450 ~ 500 deg.C. The average strength at 1.4 mm of the displacement showed a sharp rise of c.a. 0.15 of the friction coefficient between 400 deg.C and 450 deg.C, which friction increasing was quite large. The transient behavior to the stepwise change in the velocity also indicated change in the type of the behavior drastically, from the creep-type behavior at 400 deg.C to the frictional (or stick-slip) behavior at the temperature higher than 450 ~ 500 deg.C.

Although only a limited volume of the serpentine was involved in the dehydration reaction, X-ray diffraction analyses and scanning electron microscopy observations showed that forsterite had nucleated in the experimental products at the temperatures higher than 450 ~ 500 deg.C that were associated with frictional behavior. Sub-micron-sized, streaky forsterite masses in shear-localized zones may be evidence of shear-induced dehydration that caused strengthening and embrittlement of the gouge (refer to Takahashi and Shimizu, 2011, in S-IT39 at this year JpGU Meeting for details of the microscopic observations).

Our observation revealed that the serpentine at the shear-localized zone were reacted preferentially, implying a possibility of shear-induced dehydration reaction at the fault having the hydrous minerals. Moreover, this localized reaction can control the deformation style of the fault even though the dehydration was limited. At the outset of the dehydration, both the strength and shear behavior are already controlled by physical properties of the reaction products. Owing to the drained condition, the mechanism of embrittlement was not due to the pore pressure increasing. Thus it also suggests that the fault with hydrous minerals becomes brittle once the dehydration reaction starts even if the P-T condition and/or poroelastic condition do not allow the pore pressure increasing.

SSS029-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

真実接触点を考慮した固着滑りの有限要素モデリング Finite element modeling of stick-slips on a solid surface with many asperities

兵藤 守^{1*}, 阪口 秀¹, 堀 高峰¹

Mamoru Hyodo^{1*}, Hide Sakaguchi¹, Takane Hori¹

¹ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

¹JAMSTEC/IFREE

Friction is the tangential force resisting the relative motion of solid surfaces or material elements sliding against each other. Since all real surfaces have topography (or roughness) in the microscopic view, they touch at a few points or asperities, when they are brought together. Hence, macroscopic friction is regarded to be the sum of interacting forces at such microscopic asperities. For an contacting asperity, we consider the additional deformation at the area surrounding the asperity. In such a case, depending on the deformation amount, the real area of contact at the asperity will largely increase or decrease. Such a change in contact state at the asperity affects not only the interacting force at the asperity but also the macroscopic friction. Furthermore, it is expected that friction between solid surfaces has a possible dependence on materials, since the deformation of the solid material is strongly depend on their properties (rigidity, viscosity, etc.). The effects of the deformation and property of materials on friction, however, have not been explicitly included in many existing friction laws.

Therefore, in this study, we examine these effects on macroscopic friction through a finite element modeling of stick-slips on a solid surface with many asperities. As a tentative result, the calculation with 50 asperities repeats stick-slips with various sizes, though the maximum number of asperities which break in an event is much smaller than 50. Hence, the macroscopic friction is almost constant, and steady slip motion of two blocks is generated.

In the presentation, we will show the detail of our finite element modeling and calculation results with various material property or asperity distributions.

キーワード: friction, asperity, FEM, material property

ピンオンディスク摩擦実験による石英の非晶質化：ラマン分光分析 Quartz amorphization due to friction and wear : Raman spectroscopic analysis

中村 悠^{1*}, 武藤 潤¹, 長濱裕幸¹, 三浦 崇², 荒川 一郎²
Yu Nakamura^{1*}, Jun Muto¹, Hiroyuki Nagahama¹, Takashi Miura², Ichiro Arakawa²

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 学習院大学理学部物理学科
¹Graduate School of Science, Tohoku Univ., ²Dept. Phys. Gakushuin Univ.

これまでにナノインデンテーションやボールミル粉砕、ダイヤモンドアンビルによる高圧実験から、鉱物の非晶質化が生じることが知られており、実験により生じた花崗岩および珪岩の断層上においても鉱物の非晶質物質の存在が TEM 分析によって確認されている [1]。石英岩を用いた摩擦実験は、高速すべりにおいて断層上ですべり弱化が起きることを示唆し [2]、生成したガウジは石英とアモルファスシリカから構成されていた [3]。さらに断層表面上に水和したアモルファスシリカの生成が認められ、非晶質化に加え、この水和物のチキソトロピックな挙動が摩擦係数の低下を生じさせたと報告されている [3]。従って、石英岩断層上でのすべり弱化を理解するためには非晶質化の物理過程の把握が重要である。そこで本研究では石英の非晶質化の詳細を調べるために、ピンオンディスク摩擦実験 [4] を行い、摩擦トラックのラマン分析を行った。ディスクは人工および天然ブラジル産の単結晶石英を用い、ピンには天然ダイヤモンドおよび水晶 (曲率半径 0.5~1.5mm) を用いた。荷重は 0.01N ~ 1N、すべり速度は 0.01 m/s ~ 0.25m/s の範囲内で制御可能であり、大気圧下で、摩擦実験を行った。ラマン分光測定法により原子や分子の振動モードが得られるため、摩擦による試料の非晶質化の程度をラマン分光法を用いて解析した。石英ディスクの摩擦トラック上においてラマン分光測定 (励起波長 532.1 nm) を行ったところ、波数 126 cm⁻¹(E(LO+TO)), 204 cm⁻¹(A1), 356 cm⁻¹(A1), 394 cm⁻¹ (E(TO)), 464 cm⁻¹ (A1) に顕著なピークが認められた。これらは石英の代表的な格子振動モードに帰属されるが、464 cm⁻¹ および 204 cm⁻¹ において高波数側へのピークシフトが見られた。また、垂直応力 20 MPa およびトラック回転数 660 回 (すべり変位約 80μm) の実験においては、464 cm⁻¹ 以外の上述したラマンスペクトルの完全な欠如、すなわち石英結晶の固有振動モードの欠如が認められた。これは、摩擦に伴い石英中の中距離構造が失われたことを示唆している。本発表では応力、すべり変位およびすべり速度の各パラメータがどの程度石英の非晶質化に寄与しているのか報告する予定である。

[1] Yund, R. A., M. L. Blanpied, T. E. Tullis, and J. D. Weeks, 1990, Amorphous material in high strain experimental fault gouges, *J. Geophys. Res.*, 95, 15589-15602.

[2] Di Toro, G., D. L. Goldsby, and T. E. Tullis, 2004, Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates, *Nature*, 427, 436-439.

[3] Hayashi, N., and A. Tsutsumi, 2010, Deformation textures and mechanical behavior of a hydrated amorphous silica formed along an experimentally produced fault in chert, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L12305, doi:10.1029/2010GL042943

[4] Muto, J., H. Nagahama, T. Miura, and I. Arakawa, 2007, Frictional discharge at fault asperities: Origin of fractal seismo-electromagnetic radiation. *Tectonophysics*, 431, 113-122.

キーワード: 摩擦摩擦実験, 非晶質化, ラマン分光, すべり弱化

Keywords: friction experiment, amorphization, raman spectroscopic analysis, weakening

SSS029-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

ラマン顕微鏡による断層強度回復プロセスの予察的観察 Raman spectroscopic characterization of fault gouge rapidly healed after dynamic weakening

廣瀬 丈洋^{1*}, 向吉 秀樹², 溝口 一生³
Takehiro Hirose^{1*}, Mukoyoshi Hideki², Kazuo Mizoguchi³

¹ 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ² (株) マリン・ワーク・ジャパン, ³ 財団法人 電力中央研究所
¹JAMSTEC/Kochi, ²Marine Works Japan, ³Central Research Institute of Electric P

How rapidly fault strength recovers after an earthquake is an important question for understanding the earthquake generation mechanism in seismic cycles. Recent friction experiments at coseismic velocities revealed that the fault can completely regain its strength to pre-slip level within few days (Mizoguchi et al. 2009, BSSA). However the factor causing such rapid fault healing after dynamic weakening is still not understood. We expected that the reformation of a certain type of chemical bond is responsible for fault healing. Thus, we performed high-velocity friction experiments on quartz gouge at a slip velocity of 1.3 m/s, normal stress of 1.0 MPa and displacement of >10 m. At this condition, the simulated fault weakened markedly with displacement to friction coefficient of ~0.2. In order to identify the chemical bonds that play a key role in fault healing after dynamic weakening, the slip surface of gouge zone was analyzed immediately after the experiments using a laser Raman microscope. We found a characteristic peak at ~1600 cm⁻¹ in a Raman spectrum detected only from the dynamically weakened gouge at high velocities. This peak corresponds to bending vibrations of a H₂O molecule. The peak appeared just after the experiment and its intensity decreased with time. After two days, the peak totally disappeared. Interestingly the time scale of existence of the peak is almost same as that of gouge healing. We propose a hypothesis that the excitation of bending vibrations of a H₂O molecule by shear and/or frictional heat during rapid sliding and the degradation of the vibrations after the termination of the sliding results in the dynamic fault weakening and the rapid fault healing, respectively.

Keywords: fault, healing, H₂O

電気抵抗を通してみる模擬断層の接触状態 Contact state of simulated fault via electrical resistance

山下太^{1*}, 福山英一¹, 溝口一生², 柳谷俊³

Futoshi Yamashita^{1*}, Eiichi Fukuyama¹, Kazuo Mizoguchi², Takashi Yanagidani³

¹ 防災科学技術研究所, ² 電力中央研究所, ³ 所属なし

¹NIED, ²CRIEPI, ³None

地震は断層面の摩擦すべりであり、そのすべりを制御する要因の一つである摩擦強度を接触状態を保持したまま非破壊にモニターできれば、岩石の摩擦特性および断層の摩擦すべりメカニズムの解明に向けた重要な情報を得られるであろう。そのようなモニタリングを可能とする物理量として、筆者らは断層面の電気抵抗に着目し、岩石試料間の模擬断層面の電気抵抗を連続的にモニターするための測定システムを開発した(山下他, 2010)。このシステムを用いたこれまでの実験で、高速せん断摩擦試験機(Shimamoto and Tsutsumi, 1994; Mizoguchi and Fukuyama, 2010)に設置した岩石試料の模擬断層面の電気抵抗が、断層面に加わる垂直応力の増加や摩擦溶融層の発生にともなって減少したことを確認している。ただしこれまでは、試験機の構造的な制限により高速せん断摩擦試験中の測定をおこなえなかったため、摩擦すべり時の断層面の接触状態は不明なままであった。しかし2010年12月に試験機に改良を加え、高速せん断摩擦試験中であってもスリッピングを通して回転側の試料からも信号を取り出すことが可能となった。さらに、岩石試料の電気抵抗測定においてエレクトロメータの高抵抗測定機能を使用した測定の有効性を確認できたので、これを用いて摩擦すべり時の断層面の電気抵抗モニタリングを実施した。

使用したエレクトロメータ(Keithley 6514)は、最大250Vの電圧を印加し、210Gまでの抵抗値を測定可能である。2端子測定のため、測定結果には接触抵抗および岩石試料そのものの抵抗値が含まれるが、接触面の持つ抵抗値が非常に高いためそれらの影響は低いと考えた。まず、垂直応力変化にともなう模擬断層面の抵抗変化をモニターした。用いた試料は円柱形のGabbro試料(インド産)で、直径は25mm、長さはおよそ30mmである。それぞれの試料の断層面ではない側の端面に導電性テープを用いて電極を設置した。垂直応力は一定圧力で300s保持した後、0MPaから8MPaの間で0.5MPaずつ変化させた。0MPaでの抵抗値はエレクトロメータでは測定不能であったことから、このときの断層面が持つ抵抗値は210G以上であると考えられる。0.5MPaでの抵抗値は約90Gであったが、垂直応力の増加にともない抵抗は減少し、8MPaでは約30Gまで減少した。これは垂直応力の増加によって断層面の真の接触面積が増加し、断層面の抵抗値が減少したことを示していると考えられる。次に、低速の摩擦すべり時の電気抵抗モニタリングを実施した。試料は加圧試験と同一の試料を用い、垂直応力は3MPa、すべり速度は 5.3×10^{-3} m/sで一定に保った。摩擦強度(垂直応力に対するせん断応力の比)は摩擦すべり開始直後に0.8まで上昇した後、すべり弱を示し、その後0.2から0.6の間で変動した。電気抵抗は摩擦すべり開始後に130Gから8Gまで減少した後、10Gから30Gの間で変動した。摩擦強度と電気抵抗の変化を比較すると、摩擦強度の増加に対して電気抵抗の減少(あるいはその逆)が観察された。これは断層の真の接触面積が増加することで摩擦強度の増加および電気抵抗の減少が引き起こされたためと考えられる。次に、摩擦溶融層の発生をともなう高速の摩擦すべり試験をおこなった。垂直応力は3MPa、すべり速度は1.3m/sとし、最終的なすべり量は52mであった。摩擦すべり開始後の約1秒間に断層は最初のすべり弱を示し、その後、Hirose and Shimamoto (2005)によって示されたような摩擦溶融層の発生に関連する2度目のすべり強化と2度目のすべり弱を示した。電気抵抗は、摩擦すべり開始直後に約70Gから3Gまで減少し、最終的に1Gまで減少し続けた。すべり初期の電気抵抗変化について詳細に調査すると、最初のすべり弱から2度目のすべり強化への遷移にともない、電気抵抗の減少率が上昇していることが明らかになった。これはアスペリティ等に局所的に発生した溶融が互いにつながり始めた段階を示していると考えられる。その後、断層の強度が2度目のピークに達するとともに電気抵抗の減少が一時的に止まっており、断層全体に溶融が行き渡った状況を示していると解釈できる。その後も摩擦溶融層の成長に関連する変化と考えられる段階的な電気抵抗の減少を確認できた。今後さらに詳細な解析をおこなうとともに、透過弾性波によるモニタリング結果(福山他, 本連合大会)とも比較し、定量的な議論をおこないたい。

キーワード: 電気抵抗, 断層, 摩擦, 摩擦溶融, 高速せん断摩擦試験

Keywords: Electrical resistance, Fault, Friction, Frictional melting, High-velocity rotary-shear frictional test

SSS029-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

高速摩擦試験時のテフロン混入による滑り挙動への影響 Influence by teflon contamination on the fault slip behavior during high-speed friction experiments

平井 望¹, 本多 剛^{1*}, 谷川 亘², 廣野 哲朗¹
Nozomu Hirai¹, Go Honda^{1*}, Wataru Tanikawa², Tetsuro Hirono¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所
¹Osaka University, ²Kochi Institute for Core Sample Research

粘土質の断層ガウジを含む断層帯は天然において数多く存在している。そのため、高速滑り時における断層ガウジの滑り挙動を解明することは、地震時の断層強度に影響を及ぼす断層ガウジの役割を理解する上で極めて重要である。

一般的にガウジ試料を用いた高速摩擦実験を行う際、試料ホルダーとして円柱形のテフロンが用いられる。本研究の予備実験としてイライト/白雲母ガウジ試料を使った高速摩擦実験（垂直荷重 2.0Mpa, 滑り速度 1.3 m/s）を行い、実験後のガウジ試料に関して顕微鏡観察、示差熱・熱重量測定を行った所、重量比 10wt%ものテフロンが実験時に混入していることが明らかになった。また、剪断速度が大きい、剪断変位量が大きいほど、この混入量が相対的に多いという系統的な傾向も出た。テフロンの摩擦係数は岩石と比べ小さいため、テフロンの試料への混入は試料全体の摩擦強度に影響を及ぼす可能性がある。そのためテフロンホルダーを用いたガウジの高速摩擦実験を行う際には、この影響を検討する必要がある。

そこで、本研究ではあらかじめイライト/白雲母試料にテフロンパウダーを全試料の重量比、0wt%, 5wt%, 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%, 50wt% 混ぜた試料を作成し、これを用いた高速摩擦実験を行い、実験後の試料に対して熱分析を行った。これらの結果から各試料の滑り挙動の違いと最終的なテフロンの混入を定量することで、テフロン混入による断層滑り挙動の影響を考察した。発表ではこれらの実験の最新の結果を報告する。

キーワード: 滑り挙動, 高速摩擦実験, テフロン, 示差走査熱量測定, 熱重量測定

Keywords: slip behavior, high-velocity friction experiments, teflon, differential scanning calorimetry, thermogravimetry

SSS029-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

活断層沿いに発達するダメージゾーンの微小割れ目解析 Microfracture analysis of damage zone along active faults

溝口 一生^{1*}, 上田 圭一¹

Kazuo Mizoguchi^{1*}, Keiichi Ueta¹

¹ 電力中央研究所

¹ Central Research Institute of Electric P

Brittle faulting along faults in the crust often results in the fault zone structure characterized by a fault core surrounded by a damage zone. The fault core is narrow localized shear deformation zone consisting of fault gouge, fault breccia and cataclasite. Previous studies showed a clear relationship that the width of the damage zone becomes thick with the net displacement occurred along faults (e.g., Mitchell & Faulkner, 2009). The damage zone width is important for understanding the degree of maturity of a previously unknown fault and its associated seismic hazard. In the damage zone, fractures develop at various scales, from ~?m to ~ m, and their density typically increases with proximity to the fault core. We examined the spatial distribution of the microfracture density around a newly-found active fault in Takiyama area, east of Tottori plain (Sasaki et al., this 2011 JGU meeting).

The studied fault zone consists of the 1 m thick fault core of the purple-colored clayey fault gouge and the fault breccia with cataclastic foliation, and the surrounding damage zone developed in Cretaceous Kyushozan granite. The boundary plane between the fault gouge and the fault breccia has a strike of N79W and a dip of 87N, corresponding to a fault plane. We collected ten orientated samples 19.4 m to 329 m from the fault core. The samples were coated with epoxy and then thin sections were cut perpendicular to the fault plane and parallel to a horizontal plane because the slip direction is unknown. More than 10 quartz grains per sample were analyzed for the microfracture density measurements. Quartz is suitable to estimate the damage that the rock sample has sustained because quartz without cleavage acts as an isotropic medium for fracturing. We counted the number of microfractures that intersected a line which was drawn from the edge of each quartz grain, through the center point, to the other edge of the grain. The linear microfracture density for each sample is calculated to be the total number of microfractures intersecting the lines divided by the total counting line length. The microfractures we counted are divided into (1) healed fracture (fluid inclusion planes), (2) sealed fracture filled with clay minerals and (3) open fracture. The linear density of open fractures increases as the fault core is approached. The other fractures do not show a clear relationship between the microfracture density and the perpendicular distance from the fault core. In this presentation we will discuss whether such a spatial distribution of microfractures is structural characteristics of damage zone along active faults.

キーワード: 活断層, ダメージゾーン, 微小割れ目

Keywords: active fault, Damage zone, microfracture

SSS029-P07

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

境峠断層沿いに発達する剪断帯の構造解析 Structural analysis of shear zone developed in Sakaitoge Fault

土橋 悟^{1*}, 林 愛明²

Satoru Tsuchihashi^{1*}, Aiming Lin²

¹ 静岡大学大学院, ² 静岡大学大学院

¹Graduate school, Shizuoka University, ²Graduate school, Shizuoka University

カタクラスティック岩石が脆性剪断帯で形成されることがよく知られている (Higgins, 1971; Engelder, 1974; Lin, 2008). このような脆性剪断帯は地震断層運動の影響を強く受けている部分であり, 震源断層運動像や構造発達史を明らかにする上で重要な情報を提供してくれる. また剪断帯の内部には多数のクラックや小断層, リーデル剪断面や非対称複合面構造などの面構造が発達している. これらの面構造は断層運動センスを決定する上で極めて重要な指標となる. 本研究では木曾山脈を横切る境峠 - 神谷断層の断層剪断帯構造について報告する.

境峠 - 神谷断層は長野県に位置する北北西 - 南南東方向の全長 50km の断層であり, 境峠断層は境峠 - 神谷断層の北部セグメントを構成している. 本断層は第四紀後期における断層活動性についての研究は行われている (狩野・佐藤, 1988; 林・狩野, 2000; 狩野ほか, 2001) が, 境峠断層は侵食作用が活発で, 第四紀層を切断する機会が少ない山岳地を横断しているため最近の活動度を示す情報を得ることは難しい. そこで断層岩の組織構造の解析や, 剪断帯の構造から断層の構造発達について研究する必要がある.

野外調査は先行研究で行われている露頭のほかに, 空中写真を用いて断層地形判読を行い, 断層の分布位置を明らかにした上で現地調査を行った. 調査地域である境峠 - 神谷断層の北西側約 30km の部分の断層中央部付近の基盤岩は主に三畳紀のチャートとジュラ紀の砕屑岩からなる美濃帯の中生層と, 南部で貫入する白亜紀末期の黒雲母花崗岩によって構成されている. この中央部では 4 km の断層変位が推定されており (林・狩野, 2000; 狩野ほか, 2001), この部分の断層がもっとも成熟していると考えられるので, 断層破碎帯がもっとも発達していると予想される. 現地調査の結果,

主断層周辺には断層ガウジ, 断層角礫岩, カタクレサイトといった断層岩が発達しており, 全体的には断層帯の幅は数十メートル以上に及ぶ. また, 組織構造の解析により, これらの断層岩にはリーデル剪断面や非対称複合面構造などの面構造が発達していることが明らかにされた.

カタクレサイト, 断層ガウジの研磨面から非対称複合面構造から, 一致した左横ずれの変位センスが示される. これは狩野ほか (2001) で求められた結果と一致している. またカタクレサイト中の面構造と断層ガウジ中の面構造に示される断層剪断センスは同じ方向を示していることから境峠断層はカタクレサイトが形成してから一貫して同じ変位センスで活動していると考えられる.

キーワード: 境峠断層, 剪断帯, 面構造

Keywords: Sakaitoge fault, shear zone, foliation

SSS029-P08

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

粉々になった地震断層岩：有馬 - 高槻構造線沿いに産出する脈状断層岩 Earthquake fossil: ultracataclastic veins occurred along the Arima-Takatsuki Tectonic Line

田中 誠^{1*}, 林 愛明¹, 山下 和彦¹
Makoto Tanaka^{1*}, Aiming Lin¹, Kazuhiko Yamashita¹

¹ 静岡大学

¹ Shizuoka university

断層岩は地震断層運動や構造発達史などに密接に関係している。したがって、地震発生領域をはじめとする地殻浅部～深部における断層運動で形成される断層岩の組織構造は、直接地震断層の変形像を反映しているため、断層のレオロジー的性質や地震発生メカニズムを理解する上での重要な情報をもたらしてくれる。最近、地震断層運動と関連した脈状断層岩は『地震の化石』として広く重要視されてきている (Lin, 2008)。本研究では、西南日本の有馬 - 高槻構造線六甲断層における断層破碎帯に産出した脈状断層岩の形態の産状を報告するとともにその形成メカニズムを考察する。

有馬 - 高槻構造線は京都盆地南西から六甲山地北部に至る全長約 60km の急傾斜な断層面をもつ東北東 - 西南西走向の右横ずれ活断層である。本構造線の断層は、中新世中期後に活動を開始し、一貫して右横ずれ成分が卓越する断層運動を完新世まで繰り返していることが報告されている (Maruyama and Lin, 2002)。本研究で調査した六甲断層は有馬 - 高槻構造線の主要なセグメントの一部で、北側の流紋岩質凝灰岩からなる有馬層群と南側の六甲花崗岩と境をなしている。断層沿いには、断層ガウジや断層角礫岩、カタクレサイトなどの断層岩が発達している。

野外調査において断層周辺で見られる脈状断層岩の産状の記載を行い、サンプルを採集して研磨片スケールや薄片スケールでの組織構造の観察を行った。その結果、断層破碎帯内部では黒褐色や赤色、緑色などの様々な色を呈したネットワーク状・脈状断層岩が発達していることが明らかになった。これらの脈状断層岩は大きく断層脈と注入脈に区別することができる。断層脈は主に断層面上に平行して単一脈状構造を呈しており、一部の脈内に面構造が観察できる。注入脈は、明瞭な変位の無い割れ目などに注入する構造をもち、断層面に沿う親断層脈から複雑なネットワーク状やレンズ状に産出することが多い。脈状断層岩の中には、黒褐色で緻密なシュードタキライト脈や緻密では無いが緑色、赤色で細粒なものが見られる。薄片下では、角ばった細粒な破片と細粒基質により構成されている。これらの脈状断層岩について粉末 X 線回析による母岩との構成鉱物の比較を行った結果、六甲花崗岩中に産出するシュードタキライト脈を含む脈状断層岩の構成鉱物は母岩とほとんど同じく石英と長石で構成されており、有馬層群のものは母岩には見られない緑泥石を多く含むことが分かった、また脈状断層岩には非晶質がほとんど認められないことがわかった。このシュードタキライト脈は粉碎起源のものであることを示されている。

本研究では、有馬 - 高槻構造線六甲断層の断層破碎帯内において、粉碎起源シュードタキライト脈や断層ガウジ脈などを含む様々な色を呈した脈状断層岩が 200m ~ 250m といった広範囲にまで発達しており、破碎帯内の断層運動によって形成されたと考えられる。またこれらの脈状断層岩は溶融起源のシュードタキライトのように、地震断層運動に伴い、細粒な粉碎物が熱圧・流動化作用 (thermal pressurization-fluidization) により瞬間的に割れ目沿いに注入したことで形成されたと考えられる。

キーワード: シュードタキライト, 脈状断層岩, 有馬-高槻構造線

Keywords: pseudotachylyte, veinlet fault rock, Arima-Takatsuki Tectonic Line

SSS029-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

コディアック島に分布する Ghost Rocks 層泥岩中に発達する細粒黒色断層物質の高速すべり弱体化機構

High-velocity weakening of the black fine-grained fault rock from the Ghost Rocks Formation, Kodiak Island, Alaska

沖田 正明^{1*}, 堤 昭人¹

Masaaki Okita^{1*}, Akito Tsutsumi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科

¹ Kyoto University

近年、コディアック島に露出している付加体中に、厚さが数十センチにも達する黒色の断層岩の発達することが報告された (Rowe et al., 2005)。コディアック島は、現在のアリューシャン海溝で進行するプレート沈み込み帯の背後に位置する島で、そこに分布する付加体物質はかつてのデコルマ帯で形成された岩石であると考えられている (Fisher and Byrne, 1987)。これまでの研究によって、この黒色岩中には熔融の痕跡であるシュードタキライトが含まれていること (Meneghini et al, 2009)、またその一方で高速の破碎流動 (液状化) で形成されたと考えられる延性的変形組織が発達すること (E.E.brodsky, et al, 2009) などの特徴が明らかになっている。

以上の背景を踏まえ、この研究ではコディアック島 Ghost Rocks 層中の、黒色断層岩近傍に産する細粒な泥質岩を用いて、その高速の断層すべりに至るまでの断層物質の摩擦性質を調べた。この断層岩の摩擦特性を明らかにすることは、なぜこのように分厚いすべり域が発達しているのかという疑問も含めた、沈み込み帯震源域における断層変形の過程を理解する上で重要であると考えられる。また、実験でできた組織構造や組成が、天然でできたそれと一致すれば、それは実験結果の信頼性を補強することになる。

ここでは先行研究である井上 (2010) の実験結果から、300mm/s のすべり速度の実験の再現性を調べると共に、同すべり速度での垂直応力を変えた実験を行った。試料はあらかじめ十分に細粒にしたものを用いた。併せて、X線回析による実験試料の内部組織の変化も観察した。

その結果、垂直応力 1 MPa, すべり速度 300mm/s の実験条件では、井上 (2010) の実験結果と異なり、摩擦係数の弱体化は起こらなかった。より高い垂直応力では、より大きい試料の体積増加が確認され、垂直応力を下げるにつれて試料の体積増加が減少していったことから、温度変化による何らかの機構が関係していると思われる。また摩擦係数の増減のタイミングと、試料の体積増加のタイミングが全ての実験でほぼ一致していることから、温度変化と摩擦係数変化が関連していることがうかがわれる。今後は、温度変化によって内部の組織が具体的にどう変化しているのかを調べるのが課題である。

X線回析の結果、試料の組成に有意な変化は見られなかった。これは実験器具の性質上、試料の組成が変化する部分が限定されており、そうでない部分と混合してX線回析を行ったことが原因と考えられる。今後は組成が変化していると思われる少量の試料を用いて、X線回析を行う必要がある。

キーワード: 岩石摩擦, 泥岩, コディアック島

Keywords: rock friction, pelitic rock, Kodiak Island

SSS029-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

高知県南東部・四万十帯内部に発達する主要断層帯の内部構造と透水性 Internal and permeability structures of faults developed in the Shimanto accretionary prism in Kochi prefecture

北村 真奈美^{1*}, 向吉 秀樹², 廣瀬 丈洋³
Manami Kitamura^{1*}, Mukoyoshi Hideki², Takehiro Hirose³

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ²(株) マリン・ワーク・ジャパン, ³ 海洋研究開発機構高知コア研究所
¹Hiroshima University, ²Marine Works Japan, ³Kochi Institute for JAMSTEC

付加体内部に発達する断層帯の透水性構造は、多量の水が存在する沈み込み帯での地震発生過程に大きな影響を及ぼす。そこで本研究は、沈み込み帯地震の根源である低角断層帯の透水構造モデルを構築することを最終目的として、高知県南東部に位置する白亜紀四万十帯中に発達する断層帯の内部構造と透水性構造を調べた。調査地域では数多くの断層が認められたが、その中でも変位の大きな断層が付加体内部での断層運動を理解する上で重要であると考えた。そこで、ピトリナイト反射率から調査地域の温度構造を決定し、断層を境に大きな温度ギャップ、つまり大きな垂直変位を被ったと考えられる2つの断層帯に着目した。1つは、玄武岩と礫質泥岩との境界に認められるシーケンス境界断層であり、もう1つはメランジュ帯内部で認められた断層で、30℃以上の温度ギャップがこれらの断層を挟んで確認された。地熱温度勾配を30℃/km、断層の傾斜を15°とすると、断層の変位は2km以上になる。しかしどちらの断層においても、断層すべりは幅0~10cm程度の粘土質断層ガウジ内部に集中しており、変位の割に断層すべり帯の幅が非常に薄いことがわかった。この2つの断層帯の浸透率を広島大学に設置されている油圧式容器内試験機で測定した。間隙流体には窒素ガスもちいて、有効圧5~100 MPaの条件で測定をおこなった。その結果、有効圧50MPa以上において、断層上盤の浸透率は $10^{-20} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$ と非常に低く、一方断層ガウジおよび下盤の浸透率はそれより2桁以上高い浸透率がえられた。前弧域で活動していた時期の断層の傾斜は低角であったことを加味すると、このような浸透率構造によって断層帯内部に高間隙水圧が保持され、断層にかかる有効応力を低下させた可能性がある。断層変位に対して断層帯の幅が薄いのは、有効応力が小さいため大きな破壊をとまわずに地震断層すべりが付加体浅部に伝播したためであろう。

キーワード: 断層, 付加体, 透水係数

Keywords: fault, accretional complex, permeability

SSS029-P11

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

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

Fluid-rock interaction in the fault gouge of the Median Tectonic Line

松多 範子^{1*}, 石川 剛志², 廣野 哲朗¹, 本多 剛¹, 西尾 嘉朗², 河本 和朗³

Noriko Matsuta^{1*}, Tsuyoshi Ishikawa², Tetsuro Hirono¹, Go Honda¹, Yoshiro Nishio², Kazuro Kawamoto³

¹ 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 大鹿村中央構造線博物館

¹Earth and Space Science, Osaka Univ., ²JAMSTEC Kouchi, ³Oshika museum of Japan MTL

Frictional heating during coseismic slip induces transient fluid-rock interaction and fluid transfer. In order to understand these physicochemical process and mechanism, we performed geochemical analyses of major- and minor-element concentrations and Sr isotope. The fault gouge samples used were collected from the Anko outcrop, Nagano prefecture, of the Middle Tectonic Line. Using the fluid-mobile trace element spectrum, which is sensitive to fluid-rock interaction at high temperatures, we estimated that the black gouge experienced frictional heating of approximately 150 degree Celsius. This temperature signal probably indicates that frictional heating have occurred in the gouge together with high amount of coseismic fluid transfer.

Thermal pressurization を考慮した動的破壊過程と間隙水の相変化 Spontaneous dynamic rupture propagation with thermal pressurization: Phase transitions of pore fluid

浦田 優美^{1*}, 久家 慶子¹, 加瀬 祐子²
Yumi Urata^{1*}, Keiko Kuge¹, Yuko Kase²

¹ 京大・院・理, ² 文部科学省

¹Dept. Geophysics, Kyoto University, ²MEXT

We investigate whether or not an increase in pressure and temperature of pore fluid due to thermal pressurization (TP) can cause phase transition of pore water, on the basis of 3-D numerical simulations for spontaneous dynamic ruptures. Mizoguchi et al. (2007) conducted friction experiments and observed a decrease in friction owing to the phase transition of water from liquid to vapor. Although effect of TP has been investigated using numerical simulations (e.g., Urata et al., 2008), the phase transition of pore water controlling TP has never been considered. In this study, we discuss possibility of the phase transition and its effects on dynamic ruptures. Our numerical algorithm is based on the finite-difference method by Kase and Kuge (2001). Pore pressure and temperature are calculated by the formulations of Bizzarri and Cocco (2006), and simply compared to a water phase diagram. Any processes of the phase transitions are not included in our simulations. We put a vertical strike-slip square fault with the length of 6 km. The fault is subjected to external normal and shear stresses. We examine cases when the external stresses are either uniform or depth-dependent. Under the uniform stresses, initial values of stresses, pore pressure, and temperature are uniform and independent of depth, whereas the values increase with depth under the depth-dependent stresses. The values of the uniform stresses correspond to those at a depth of 3 km in the depth-dependent stresses.

Judging from the temperature and pressure of pore water, liquid pore water is likely to change to supercritical water in most part of the fault under the uniform stresses, whether TP works or not. On the other hand, under the depth-dependent stresses, liquid pore water is likely to change to supercritical water in deeper portions than about 2 km. In both cases, TP promotes the transition. The phase transition from liquid to vapor is not likely to occur. According to PROPATH¹⁾, the transition from liquid phase to supercritical one can cause changes in viscosity, compressibility, and thermal expansion of water, which can affect TP. The changes due to the transition would have two opposite effects on TP; suppressing a rise of pore pressure from temperature increase, and decreasing hydraulic diffusivity. We include the changes due to the transition in numerical simulations of dynamic ruptures and investigate whether or not the phase transition of pore water causes TP to be more effective.

¹⁾ PROPATH Group, PROPATH : A Program Package for Thermophysical Properties, version 13.1, 2008.

四国地域における微動分布とプレートの沈み込み形状を考慮したスロースリップイベントの数値モデリング

Numerical models of slow slip events in Shikoku based on observed distribution of tremor and plate configuration

松澤 孝紀^{1*}, 芝崎 文一郎², 廣瀬 仁¹, 小原 一成³

Takanori Matsuzawa^{1*}, Bunichiro Shibazaki², Hitoshi Hirose¹, Kazushige Obara³

¹ 防災科学技術研究所, ² 建築研究所, ³ 東京大学地震研究所

¹NIED, ²Building Research Institute, ³ERI, University of Tokyo

近年, 世界のいくつかの沈み込み帯において, スロースリップイベント (SSE) や低周波微動, 超低周波地震などのゆっくりすべり現象が発生していることが明らかになった。四国から九州にかけての南海トラフの沈み込み帯では, 海溝軸付近に浅部超低周波地震の活動がみられ, プレート間大地震発生域の深部延長上には, 短期的 SSE や, 低周波微動, 深部超低周波地震といった現象が発見されている。さらに豊後水道では, 低周波微動・短期的 SSE 領域 (以下, ETS 領域) よりも浅い側において, 長期的 SSE が繰り返し発生している。我々は, これまで短期的および長期的 SSE の発生を平板のプレートモデル中で再現することに成功し (Matsuzawa et al., 2010, JGR), 紀伊・東海地域の短期的 SSE については, プレート形状と微動の分布を考慮したモデルにおいて, その繰り返しとセグメント化を再現することができた (Matsuzawa et al., 2010, AGU)。本研究においては, 四国地域における長期的および短期的 SSE の発生を, 現実的なプレート形状および実際の微動分布を取り込んだ数値モデル中で再現することを目指した。

ETS 領域は大地震発生域の脆性的な挙動から, 安定沈み込み域の塑性的な変形へと遷移する領域にあたる。本研究では Shibazaki and Shimamoto (2007) と同様に, Shimamoto (1987) 等による halite の実験結果を参考に, カットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存の摩擦則を仮定し, この領域での摩擦挙動をモデル化した。また, ETS 領域および長期的 SSE 領域においては, 周囲よりも V_p/V_s が高くなっていることが報告されており (Shelly et al., 2006; Matsubara et al., 2009), 同領域で間隙水圧が高く (つまり, 有効法線応力が低く) なるようなパラメータの分布を考えた。沈み込むフィリピン海プレートの形状については, Shiomi et al. (2008) および Baba et al. (2006) を参考にしてモデルを作成した。なお, 微動分布から ETS 領域を設定することとし, Obara et al. (2010) によるクラスタリング処理された微動分布に基づき, プレート境界面の ETS 領域では上述した遷移領域の摩擦則を与えた。一方で, 微動の発生しない周辺領域については安定すべりとなるようにパラメータを与えた。長期的 SSE 領域については, Matsuzawa et al. (2010, JGR) と同様に, strike 方向に有効法線応力を変化させ, 周囲よりも有効法線応力が低い領域を豊後水道においた。実際の数値シミュレーションにおいては, プレート境界面を約 65,000 個の三角形の面要素に分割して表現した。この各要素上で, 上述の摩擦則・パラメータ分布を仮定し, 半無限弾性体の応答を与えてその時間発展を計算した。

数値シミュレーションの結果, 短期的 SSE の繰り返し再現され, 長期的 SSE のパッチでは, ゆっくりしたすべりが繰り返し発生した。また, 観測されているように四国西部では大きな活動が, 四国東部は比較的小規模な活動がみられた。Obara et al. (2011) が報告したような規模の大きな微動活動が深い側から開始する傾向も, 四国西部でみられた。しかしながら, 数値シミュレーションでは四国中部の ETS 領域と固着域の間でゆっくりすべりが間欠的に発生するなど, 実際の観測とは異なる挙動もみられる。このような観測事実と数値シミュレーション結果の差異を比較し, モデルの検討を引き続き行っていくことにより, プレート沈み込み過程のさらなる理解が期待される。

キーワード: スロースリップイベント, 数値シミュレーション, 四国, 地震サイクル

Keywords: slow slip event, numerical simulation, Shikoku, seismic cycle

SSS029-P14

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

高分子ゲル - アクリル樹脂のすべり摩擦におけるゆっくりすべりと高速すべり Slow and rapid slip in sliding friction between polymer gel and plexiglass

山口 哲生^{1*}, 堀 高峰², 阪口 秀²

Tetsuo Yamaguchi^{1*}, Takane Hori², Hide Sakaguchi²

¹ 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻, ² 海洋研究開発機構

¹Dep. Appl. Phys, Univ. Tokyo, ²JAMSTEC

はじめに

高分子ゲルのようなやわらかくて粘着性をもった物質を硬い基板上で滑らせると、しばしば時空間的に不均一なスティック - スリップ運動が発生し、実験室レベルの小さなスケールにおいても GR 則に従うような複雑な振る舞いを再現することができる。本研究では、ゲルの粘弾性をコントロールすることにより、地震波を伴う高速すべりだけでなく、最近発見されたゆっくりすべりなど、多様なすべり現象を再現することができた。発表では、これらの実験結果や理論モデルを用いた解析について報告を行なう。

実験

試料：ガラス板上でシリコングエル (SILPOT184・SE1886 混合物, 東レダウコーニング) を作成し、下側のプレートとした。ゲルの物性としては、 G' (複素ずり弾性率における実部) を一定にしたまま G'' (虚部) の異なる 2 種類の試料を作成した。また、上側のプレートとしては、30mm (すべり方向) x 100mm (水平方向) x 20mm (厚み方向) のアクリル樹脂 (PMMA) ブロックを用いた。

摩擦実験：引張試験機 (MST-I, 島津製作所製) に、歯車を介して下部のゲルプレートを水平に移動させる機構を作成して装着した。固定されたロードセルにアクリル樹脂を支持する固定具を取り付け、ゲルプレートの移動速度 (すべり速度) や垂直荷重を変えて摩擦力を測定した。

可視化：ゲル表面の近傍に直径 100 μm のマーカー粒子を多数配置し、PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いてすべり量分布を動的に計測した。

結果

粘性の異なる 2 つのシリコングエルのうち、粘性の大きなゲルではゆっくりすべり、粘性の小さなゲルでは音波 (地震波) を伴う高速すべりを起こすことが分かった。PIV 法によってイベントサイズ (M_0 : 地震モーメント) と持続時間を解析したところ、粘性の大きなゲルでは、 $M_0 \sim T^{(1/2)}$ の関係を示すことが分かった。なお、解析の詳細については当日報告する。

キーワード: スロースリップ, モデル実験, 高分子ゲル, スケーリング則

Keywords: slow slip, laboratory experiment, polymer gel, scaling law

還元環境下におけるコサイスミックなグラファイト形成 Formation of graphite during high-velocity friction experiment under H₂ atmosphere

大橋 聖和^{1*}, 韓 來熹², 廣瀬 丈洋³, 小村 健太郎⁴, 松田 達生⁴, 嶋本 利彦⁵

Kiyokazu OOHASHI^{1*}, Raehee Han², Takehiro Hirose³, Kentaro Omura⁴, Tatsuo Matsuda⁴, Toshihiko Shimamoto⁵

¹ 広島大学大学院理学研究科, ² 韓国地質資源研究院, ³ (独) 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ⁴ (独) 防災科学技術研究所, ⁵ 中国地震局地質研究所

¹Graduate School of Sci, Hiroshima Univ., ²KIGAM, Korea, ³KCC, JAMSTEC, ⁴NIED, ⁵China Earthquake Administration

グラファイトは一般的に有機物の熟成によって形成されることが知られているが、野島断層(新井ほか, 2002)や棚倉構造線、牛首断層の一部では、源岩が有機物や炭質物を含まない場合(例えば花崗岩や晶質石灰岩)であっても断層帯内部からグラファイトが見いだされている。熱水沈殿グラファイトの存在はスリランカや北米などから報告されており、下部地殻に相当する条件下でC-O-H混合流体から沈殿する(2H₂+CO₂->C+2H₂O)ことが広く受け入れられている(例えばLuque et al., 1998)。しかしながら、より低温・低圧の上部地殻での溶解・沈殿作用は一般的ではなく、特に断層に沿ったグラファイトの形成メカニズムは明らかにされていない。一方で、近年精力的に行われてきた高速摩擦試験は、秒速1 m以上の高速摩擦により短時間(数十秒)のうちに劇的な物質変化が起こることを明確に示した(例えばHan et al., 2007, Oohashi et al., 2011)。そこで、本研究では、炭質物を含まない源岩を用いてC-O-H混合雰囲気下で高速摩擦試験を行い、グラファイトが形成されるかどうかを検証した。実験は、回転剪断式低-高速摩擦試験機(広島大学)を用い、高速摩擦時に熱分解によってCO₂を放出することが明らかになっているカララ大理石(Han et al., 2007)を用いた。実験条件は垂直応力2.0 MPa、すべり速度1.3 m/sで、0.1 MPaで水素パーージした圧力容器内で実験を行った。継続時間は100秒以内である。

実験後の回収試料のすべり面からは、方解石(CaCO₃)の熱分解生成物であるCaO(熱分解温度T>720)と黒色のパッチ状付着物が認められた。黒色付着物のレーザーラマン顕微分析からは、グラファイト(炭質物)のラマンスペクトルである1350 cm⁻¹と1590 cm⁻¹の二つのピークが検出された。実験に用いたカララ大理石はグラファイトを含まないこと、大気条件下やAr雰囲気下では黒色付着物が形成されないこと(Han et al., 2010)を考えると、すべり面でのグラファイトの形成は水素パーージしたことによってC-O-H混合雰囲気が達成されたことに直接起因すると考えられる。Salotti et al. (1971)はC-O-H混合雰囲気の静的条件下における反応実験(温度500, 圧力13.8 MPa, 6時間)を行い、高結晶度グラファイトが方解石上に生成することを示した。これは本実験と比べるとより高い圧力条件および継続時間であるが、この反応は熱活性化過程であるため、我々の実験では摩擦発熱によって達成された高い到達温度(>720)が反応を促進したものと考えられる。これらの結果は、炭酸塩鉱物(CO₂流体の存在でも置き換えられる)を含む岩石がH₂やCH₄が存在するような地下深部の還元環境下で地震性断層すべりを起こすことにより、グラファイトが無機的に形成されることを示す。野島断層では花崗岩起源の主断層沿いに炭酸塩脈が濃集しており(新井ほか, 2003)、グラファイトは地震性断層すべりにもともなう炭酸塩脈の熱分解と還元反応によって形成されたと説明できる。

[引用文献]

新井ほか, 2002, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, G061-P011.

新井ほか, 2003, 地学雑誌, 112, 915-925.

Han et al., 2007, Science, 316, 878-881.

Han et al., 2010, Journal of Geophysical Research, 115, B03412, doi:10.1029/2008JB006136.

Oohashi et al., 2011, Journal of Structural Geology, doi:10.1016/j.jsg.2011.01.007

Salotti et al., 1971, Economic Geology, 66, 929-932.

Luque et al., 1998, American Journal of Science, 298, 471-498.

キーワード: 野島断層, グラファイト, 炭酸塩鉱物, 高速摩擦試験, メカノケミカル反応

Keywords: Nojima fault, Graphite, Carbonate minerals, High-velocity friction, Mechano-chemical reaction

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS029-P16

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 14:00-16:30

地震時における粘土鉱物の脱 OH 反応と組織および摩擦滑り特性との関係 Relationship between dehydroxylation reaction of clay minerals and their inner structure and frictional property

廣野 哲朗^{1*}, 本多 剛¹, 谷川 亘²

Tetsuro Hirono^{1*}, Go Honda¹, Wataru Tanikawa²

¹ 大阪大学, ² 海洋研究開発機構 高知コア研究所

¹Osaka University, ²JAMSTEC Kochi

Transient frictional heating during earthquake slip induces dehydroxylation of phyllosilicate minerals. As this reaction is endothermic and releases H₂O, it may affect dynamic fault weakening and the energetics of earthquakes. To elucidate this question, we measured thermal property, chemical kinetic parameters, and frictional property of dehydrated clay minerals (montmorillonite, illite, and kaolinite), and observed the inner structure under scanning electron microscope. We then discuss the relationship among the reaction, structure (fabrics), and frictional property, and also argue their implications on dynamic fault weakening and energetics during an earthquake.

キーワード: 粘土鉱物, 脱 OH 反応

Keywords: clay mineral, dehydroxylation