

東海地域下の三次元地震波減衰構造

Three-dimensional attenuation structure beneath the Tokai region, central Japan

高岡 宏之^{1*}, 津村 紀子¹, 加藤 愛太郎², 高橋 福助¹, 野崎 謙治¹, 飯高 隆², 生田 領野³, 吉田 康宏⁴, 勝俣 啓⁵, 岩崎 貴哉², 酒井 慎一², 山岡 耕春⁶, 渡辺 俊樹⁶, 國友 孝洋³, 山崎 文人⁶, 大久保 慎人⁷, 鈴木 貞臣⁷, 平田 直²

TAKAOKA, Hiroyuki^{1*}, TSUMURA, Noriko¹, KATO, Aitaro², Fukusuke Takahashi¹, NOZAKI, Kenji¹, IIDAKA, Takashi², IKUTA, Ryoya³, YOSHIDA, Yasuhiro⁴, KATSUMATA, Kei⁵, IWASAKI, Takaya², SAKAI, Shin'ichi², YAMAOKA, Koshun⁶, WATANABE, Toshiki⁶, KUNITOMO, Takahiro³, YAMAZAKI, Fumihito⁶, OKUBO, Makoto⁷, SUZUKI, Sadaomi⁷, HIRATA, Naoshi²

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 東京大学地震研究所, ³ 静岡大学理学部, ⁴ 気象研究所, ⁵ 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター, ⁶ 名古屋大学大学院環境学研究所, ⁷ 東濃地震科学研究所

¹Graduate School of Science, Chiba University, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ³Faculty of Science, Shizuoka University, ⁴Meteorological Research Institute, ⁵Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, ⁶Graduate School of Environmental Science, Nagoya University, ⁷Tono Research Institute of Earthquake Science

東海地域では、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下へ沈み込んでおり、その境界において長期的なスロースリップ (LTSS) や非火山性の深部低周波地震 (LFE) が発生している。既存研究からそれらは地震性の固着すべりと安定すべりの遷移領域で、スラブ内の流体が影響して発生していると考えられている。我々はその領域の物理的な性質を理解する目的で同時インバージョン法を用いて三次元地震波減衰構造を推定した。

本研究では東京大学地震研究所、千葉大学、気象研究所、静岡大学、名古屋大学、北海道大学および東濃地震科学研究所が2008年4月～8月の期間に設置した臨時観測点と防災科学技術研究所 Hi-net 観測網の定常観測点の計113点で得られた140個の地震から3688個の波形スペクトルを作りインバージョン解析に用いた。波形スペクトルの周波数帯は0.78125Hz～18.75Hzまでを24等分、18.75Hz～31.25Hzまでを8等分したものである。本研究では東経137°～138.5°までを7つ、北緯34.5°～35.7°までを6つ、深さ方向は地表～5km, 5～10km, 10～17km, 17～25km, 25～35km, 35～45kmの6層に分割し、それぞれのブロックのQ値を推定した。また、そのブロック境界の位置を東、北、北東方向へ半ブロック分ずらしたブロックモデルでもインバージョンを行った。各モデルで推定されたQ値はブロックの重心の位置での値と見なして統合した。

解析の結果、表層(0km)～深さ5kmにおいて、糸魚川 静岡構造線、笹山構造線を境に東側で相対的に低Q(約100)、西側で相対的に高Q(約300～400)を示した。笹山構造線以西には、笹山構造線以东に比べて相対的に時代の古い岩石が連続的に分布しているので、このQ値の違いは、分布する地質の時代の差を反映していると考えられる。また、西南日本を外帯・内帯に分ける中央構造線に沿ってその東西両側より相対的に低いQ値を示す領域が帯状に分布した。これは中央構造線の断層運動による岩石の破碎等が影響しているのかもしれない。深さ17～25kmで得られたQ値は約400～600となったが、Q値が非常に大きい(約2000)領域が存在し、その領域は2001～2005年のLTSSの際のすべりが大きい領域の直上に位置していた。深さ25～35kmにおいて、上述のすべりの大きい領域の直下に相対的にQ値が低い領域が存在した。我々の結果と、地震波速度構造の結果を比較したところ、LTSSのすべりの大きい領域の直上の高Q値の領域は高速度、直下の低Qの領域は低速度、高Vp/Vs域に対応することがわかった。先行研究では、低Q値、低速度、高Vp/Vsの領域は高压流体が存在すると解釈されている。おそらく、すべりの大きい領域の直上の高Q領域がキャップロックとなり流体をトラップし、流体圧が高くなりスロースリップの発生に影響を与えたと考えられる。

キーワード: 地震波減衰構造, Q値, 東海地方, スロースリップ

Keywords: attenuation structure, Q value, Tokai region, slow slip

断層レオロジーと不均質構造に支配されたゆっくり地震の伝播

Propagation dynamics of episodic tremor and slip governed by fault rheology and heterogeneity

安藤 亮輔^{1*}, 武田 直人¹, 山下 輝夫²

ANDO, Ryosuke^{1*}, TAKEDA, Naoto¹, YAMASHITA, Teruo²

¹ 産業技術総合研究所, ² 東京大学地震研究所

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²Earthquake Research Institute, Univ Tokyo

Slow earthquakes called episodic tremor and slip (ETS) propagate over 100 kilometers at low velocities, ~10 kilometers per day, along several plate interfaces. These low velocities differentiate slow earthquakes from ordinary earthquakes, and thus understanding their propagation processes is fundamental to understand the diversity and universality of earthquake processes. Comprehensive modeling and previously-unreported correlations of migration patterns with energetics of tremor observed in Japan show that rheological fault heterogeneity essentially governs ETS propagations. The fault has persistent small-scale segmentation, where the propagations always energetically started in brittle sections and decelerated in the ductile sections; spontaneous rupture calculations constrain the ductility to that caused by the Newtonian plastic flow or dilatant strengthening, but not by large-scale fluid flows.

キーワード: スロー地震, レオロジー, 微動, モデル, 動的破壊, シミュレーション

Keywords: Slow earthquake, Rheology, Tremor, Model, Rupture dynamics, Simulation

三陸沖の浅部超低周波地震

Shallow very low frequency earthquakes off Sanriku, Japan

松澤 孝紀^{1*}, 浅野 陽一¹, 小原 一成²

MATSUZAWA, Takanori^{1*}, ASANO, Youichi¹, OBARA, Kazushige²

¹ 防災科学技術研究所, ² 東京大学地震研究所

¹NIED, ²ERI, University of Tokyo

浅部超低周波地震については、これまで南海トラフや、十勝沖の海溝軸付近で顕著な活動が報告されてきた(例えば、Obara and Ito, 2005; Asano et al., 2008)。Asano et al. (2008)における解析手法では、Hi-net地震観測点に併設された高感度加速度計を用いたアレイ解析により、準リアルタイムで自動的に波動源の震央位置を推定することができ、防災科研はこの手法を用いて浅部超低周波地震の活動状況を常時モニタリングしている。この結果によると、三陸沖以南の太平洋プレートの沈み込み帯においては、わずかにイベントが推定されているが、それらのほとんどは近地地震や海洋波浪等に起因すると判断されてきたため、詳しい調査はされてこなかった。一方、水圧計を用いた観測結果から、三陸沖では過去にスローリップが発生していたことが最近報告されている(Ito et al., 2010)。そこで、本研究では波形相関解析等により、三陸沖における浅部超低周波地震の検出を試みた。

Hi-net高感度加速度計を用いた超低周波地震の定常モニタリングにおいて、2011年3月10日の22時台に、三陸沖に震動源が推定された。このイベントについてIto and Obara (2006)と同様の方法で、F-net広帯域地震計およびHi-net高感度加速度計記録を用いたCMT解析を行ったところ、深さ18kmに、東西圧縮の逆断層型の地震(Mw3.5)が推定された。F-net遠野山崎観測点の記録では、近傍で発生した同程度の大きさの地震が数Hzの卓越周波数を示すのに対し、この地震ではそのような高周波帯域の波は顕著でない。しかし、0.05-0.1Hzの低周波帯域では波群が観測されることから、このイベントは十勝沖等で発生している浅部超低周波地震と同様の現象であると判断される。

次に、浅野他(2010)と同様に波形相関解析手法を用いて、三陸沖に発生する他の浅部超低周波地震の検出を試みた。近傍のF-net観測点6点の広帯域地震計記録に、0.02-0.1Hzの帯域でフィルターをかけたのち、前述のイベント(テンプレートイベント)との波形相関をとった。震央位置を同時に推定するため、テンプレートイベントの震央に対し緯度方向、経度方向にそれぞれ1度の範囲でグリッドを配置し、その中で波形相関の平均値が最も高くなる点を各時間ステップの震央位置とした。この波形相関の平均値が0.3を越えたイベントについて観測波形を確認し、近地または遠地地震の影響によるもの、海洋波浪等のノイズに起因すると考えられるものを除去した。

2005年から2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震発生前までをこの方法で解析したところ、2007年12月12日に2イベント、2009年7月5日に1イベント、2011年3月10日にもさらに1イベントを検出した。十勝沖では同期間の浅部超低周波地震の累積数が6千程度(浅野, 2011)であるのに比べ、この地域の活動は極めて低調である。これらのイベントは3月9日の三陸沖の地震(M7.3)の余震域の北端付近の、定常的な地震活動が低い領域内に決定された。本研究で検出された浅部超低周波地震の発生場所が、陸側プレート内かプレート境界かは未だ明らかでないが、もしプレート境界で発生しているならば、この領域での境界面の摩擦特性が、通常は安定な準静的すべりとなっている可能性を示唆する。Shibazaki et al. (2011)は、低・中速のすべりですべり速度強化であるものの、高速すべりですべり速度弱体化に変化するような摩擦則をアスペリティー周辺領域に仮定することで、百年程度の間隔で繰り返すアスペリティーでの大地震と、数百年間隔で広範囲がすべる巨大地震の発生サイクルを数値モデル上で再現した。今回検出された浅部超低周波地震は、3月9日に発生したM7.3の地震の震源域の周辺で、かつ3月11日の東北地方太平洋沖地震時の大すべり領域に位置しており、数値モデルでアスペリティー周辺領域に仮定したような、すべり速度の変化に伴って摩擦特性が変化する特徴とも調和的であることから、この領域は巨大地震の発生サイクルにおいて実際に重要な役割を果たしている可能性も考えられる。三陸沖だけでなく茨城沖等でも超低周波地震とみられるイベントが検出されており、現状では陸上の観測網から遠いために東北から房総沖に関する詳細な解析は容易でないものの、今後の海底地震・地殻変動観測の進展により、スロー地震とプレート境界すべりのさらなる理解が進むことが期待される。

キーワード: 超低周波地震, 三陸沖

Keywords: very low frequency earthquake, Off Sanriku

Thermal pressurization を考慮した東北地方太平洋沖地震の3次元発生サイクルモデル 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization

芝崎 文一郎^{1*}, 野田 博之², 嶋本 利彦³, 堀 高峰²

SHIBAZAKI, Bunichiro^{1*}, NODA, Hiroyuki², SHIMAMOTO, Toshihiko³, HORI, Takane²

¹ 建築研究所国際地震工学センター, ² 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, ³ 中国国家地震局地質研究所
¹IISEE, Building Research Institute, ²IFREE, JAMSTEC, ³China Earthquake Administration

During the 2011 Tohoku-oki earthquake, large slips occurred in the region near the trench off Miyagi (e.g. Fujii et al. 2011). Hasegawa et al. (2011) showed that during the earthquake, the background deviatoric stress was completely released. This result suggests that the frictional strength decreased considerably. Recent studies on the fault rheology show that a considerable weakening can occur at a high slip velocity because of thermal pressurization or thermal weakening processes (Tanikawa and Shimamoto, 2009; Di Toro et al., 2011; Tsutsumi et al., 2011). Noda and Lapusta (2010) performed 3D simulations of earthquake sequences with evolving temperature and pore pressure resulting from shear heating, and they found that regions of more efficient thermal pressurization produce relatively large slips, resulting in large events with long interseismic periods. Mitsui et al. (2012) developed a 2D quasi-dynamic earthquake cycle model of the Tohoku-oki earthquake by considering thermal pressurization. The present study develops a 3D quasi-dynamic earthquake cycle model of the Tohoku-oki earthquake by considering thermal pressurization. We use a spectral solver for 1D diffusion problem developed by Noda and Lapusta (2010) to efficiently calculate the temperature and pore pressure evolution on a fault plane. We set several asperities in the regions off Miyagi, off Fukushima, and off Ibaraki, and set long asperities near the trench. We set the frictional properties of velocity weakening in the asperities; however, we set velocity strengthening outside of the asperities. Further, we set a low value for hydraulic diffusivity in the shallower part of the plate interface off Miyagi. The preliminary results show that M7.5 class earthquakes occur at the zone with relatively large hydraulic diffusivity. When rupture occurs around the low hydraulic diffusivity zone, significant thermal pressurization occurs and results in large and fast slips. This rupture propagates to the surrounding region and to the asperities of M7.5 earthquakes, because thermal pressurization occurs as a result of large slip even in the region of large hydraulic diffusivity.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 3次元地震発生サイクルモデル, thermal pressurization

Keywords: the 2011 Tohoku-oki earthquake, 3D earthquake cycle model, thermal pressurization

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

HORI, Takane^{1*}, SAKAGUCHI, Hide¹

¹ 海洋研究開発機構

¹IFREE, 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 process 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 using discrete element method. The results show that before the occurrence of large events, the deviation of the direction of principal stress axes becomes small in a surrounding area of the large events. 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.

自然断層周辺に見られる微小亀裂の分布形状に関する数値計算

Numerical simulation of a shape of an off-fault microcrack distribution observed in natural faults

稲川 聡^{1*}, 鈴木 岳人², 並木 敦子²

INAGAWA, Satoshi^{1*}, SUZUKI, Takehito², NAMIKI, Atsuko²

¹ 東大地震研, ² 東大・理・地惑

¹ERI, Univ. Tokyo, ²DEPS, Univ. Tokyo

断層の破壊にともなって断層面外では非弾性に微小亀裂が発生する。断層面外での非弾的な変形は、野外観察 (Vermilye and Scholz, 1998)、数値実験 (Andrews, 2005; Hok *et al.*, 2010) において研究されている。しかし、野外観察によって確認された微小亀裂の数密度の分布と数値実験によって再現された微小亀裂の分布形状は整合的ではない。mode III の破壊では、野外観察によると微小亀裂の数密度は断層に沿ってほぼ一定だが、数値実験で再現された微小亀裂の分布域は、破壊の開始点から断層を対称軸として扇状に広がるのが分かっている。つまり野外観察の結果と異なり、断層周辺の微小亀裂の数密度は破壊開始点からの距離と共に増加することが推測される。

今回二次元 mode III の断層を考え、野外観察で確認された微小亀裂の分布を数値実験で再現することに研究の焦点を当てた。数値実験により天然の微小亀裂の分布を再現するようなパラメータセットを推定する。断層面上を断層端が伝播した時にその周辺で生じる応力分布の変化を計算し、微小亀裂が生じうる範囲を推定した。線形弾性媒質を仮定し、クーロンの破壊基準を用いて自発的な断層端の進展を考えた。一方断層面外では、最大せん断応力とこれに直交する応力成分を求め、これらがクーロンの破壊基準を満たすと微小亀裂が生じるとした。

まず、ストレスドロップが負になる領域ができるように、断層の伝播方向に初期せん断応力が線形に減少すると仮定した。この場合、断層端の伝播は停止した。また、微小亀裂の分布はこれまでの計算で得られた扇形ではなく、断層に沿ってほぼ一定の幅で広がる野外観察で見られたような分布となった。一方で、断層面に直交する方向に沿って初期せん断応力を線形に減少させても野外における観察結果を再現することは出来なかった。

次にクーロンの破壊基準において凝着力を大きくすることで、微小亀裂の分布がつくる扇形の幅を小さくすることが出来た。静岩圧を大きくすることで同様の結果が見られた。凝着力は破壊に必要なせん断応力を大きくし、静岩圧はクラックが開きにくくなる方向に働くので、これらが大きくなると微小亀裂は生成しにくくなる。

以上の結果は実際の断層において、微小亀裂の分布の幅がほぼ一定と見なせるような長さから伝播方向の応力の変化を推定できる可能性を示唆している。

キーワード: 微小亀裂, 数値計算, 応力場, 断層端成長の停止

Keywords: microcrack, numerical simulation, stress field, arrest of fault-tip growth

難透水性岩石を用いた断層すべり運動に伴う流量変化の考察 Dynamic change of flow rate in impermeable fault rock

谷川 亘^{1*}, 廣瀬 丈洋¹, 向吉 秀樹²

TANIKAWA, Wataru^{1*}, HIROSE, Takehiro¹, HIDEKI, Mukoyoshi²

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構, ² (株) マリン・ワーク・ジャパン

¹JAMSTEC/Kochi Institute for Core Sample Research, ²Marine Works Japan LTD.

巨大地震の発生に伴う地下水流量や化学的な性質の急激な変動現象が、断層帯近傍や温泉施設において、数多く観測されている。その原因の一つとして、断層帯の急激な透水性構造の変化が挙げられる。また地震すべりに伴う断層帯の水理特性の変化は、断層すべり過程や地震発生サイクル過程にも大きな影響を及ぼす。しかし、断層すべりに伴い断層帯の水理学的性質が変化する物理化学的プロセスはほとんどわかっていない。

そこで本研究では、地震すべりに伴う断層帯の水理特性の変化する過程を明らかにするために、高知コア研究所に設置してある回転式摩擦実験装置を用いた室内実験により考察を行った。本実験は二つの円筒形試料(内径9 mm、外径25 mm、長さ20 mm)を摩擦実験装置にセットして、垂直荷重を与えた状態で片側を固定して、もう片側を回転することによってせん断変形を再現する。さらに、円筒形試料の中心部から一定圧力に制御した窒素ガスを放射状に流して、試料のせん断(回転)中からせん断後にかけての流量変化を測定することにより、透水係数を推定する。いずれの摩擦実験も庵治花崗岩を用いて、垂直荷重は2 MPa、すべり変位量は1.5m、回転速度は0.076 mm/s から190 mm/sの範囲で一定に制御して行った。庵治花崗岩の透水係数は、断層を模擬した状態($10^{-16} \text{ m}^2 \sim 10^{-18} \text{ m}^2$)では未変形の状態(10^{-19} m^2)に対して1~3桁ほど高い値を示した。

ほとんどの摩擦実験において、断層すべりに伴い流量の変化が認められた。また、すべり直前の透水係数が 10^{-17} m^2 より低いときはせん断中に流量が増加し、反対に高いときは減少する傾向が認められた。流量はせん断終了直後から減少し、10分間ほどで10%減少しその後ほぼ一定値に収束した。一方、すべり速度が50mm/sより早い実験条件では流量は増加した。せん断終了後に流量が減少する原因としては、摩擦発熱に伴うすべり面の熱膨張、つまりせん断後の冷却による開口幅の減少による透水係数の減少が考えられる。一方、流量が増加する原因としては、同じく摩擦発熱に起因する窒素ガスの粘性率の増加が考えられる。

同じすべり速度条件では、せん断変形中の平均流量は摩擦係数に比例する傾向が認められた。すべり面は部分的にシート状に変形した透水性の低い細粒摩擦物(断層ガウジ)に覆われている。シート状の細粒摩擦物は低い摩擦係数を示すと考えられることから、すべり面を覆うガウジの割合が多くなると、摩擦係数と透水係数が同時に低下しかつ流量が減少することが考えられる。すべり表面積に対するガウジの割合だけでなく、ガウジの連結度合いも摩擦係数と透水係数に影響を与えるものと考えられる。本結果を応用することにより、将来、断層帯の流量測定をもとにして摩擦係数を推定できるかもしれない。

キーワード: 透水係数, 摩擦発熱, 摩擦, 地震, 断層, 流量

Keywords: permeability, frictional heating, wear, earthquake, fault, flow rate

石英ガウジを用いた粉碎エネルギーの見積と焼結による表面積低下について Energy partition for grain crushing in quartz gouge and sintering effect during subseismic to seismic fault motion

東郷 徹宏^{1*}, 福山 英一¹, 嶋本 利彦²

TOGO, Tetsuhiro^{1*}, FUKUYAMA, Eiichi¹, SHIMAMOTO, Toshihiko²

¹ 防災科学技術研究所, ² 中国地震局地質研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Institute of Geology, China Earthquake Administration

To determine how much of the frictional energy consume in grain crushing is important because this fraction will affect the energy used for frictional heating which in turn can affect the mechanical properties of a fault during seismic fault motion. In addition, it is geologically important to understand the formation and developing process of the mature fault zones.

Thus we have conducted friction experiments on quartz gouge as a simple case at subseismic to seismic slip rates. Quartz was selected because it is a very common mineral in fault zones and its surface energy is measured (about 1 J/m², Brace and Walsh, 1962). Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area of quartz gouge was measured before and after shearing. Measurement of BET surface area provides more direct data on surface-area change than grain-size measurement does. Our recent results show that grain crushing absorbed only 0.02~0.22 % of frictional work. Thus, grain comminution is unlikely to be an important energy sink at least for mature faults with well-developed slip zone.

Another new finding from our study is that the BET surface area of quartz gouge deformed at high slip rates begins to decrease after a certain displacement. Sawai et al. (2009) also have found that the surface area of Nojima fault gouge decreases, rather than increases, with shearing deformation at seismic slip rates. Our observations of quartz gouge revealed that fine grains formed cohesive aggregates and dendritic clusters. In particular, the dense granular aggregate strongly suggests that sintering of gouge partially occurred. The bulk temperature rise in quartz gouge in our experiments would be on the order of several hundred degrees Centigrade in view of recent experiments under similar conditions and temperature calculations (Mizoguchi et al., 2009; Kitajima et al., 2010; Han et al., 2011). This may not be enough for full sintering to occur, but flash heating probably contribute to partial sintering (see Rice, 2006; Han et al., 2007a, 2007b; Oohashi et al., 2011).

キーワード: 高速摩擦実験, 断層のエネルギー収支, 破壊エネルギー, 焼結

Keywords: High-velocity frictional experiment, Energy budget, Fracture energy, Sintering

地震性高速すべり挙動に及ぼすオリビン粒径の影響 An effect of grain size on high velocity slip behaviors of olivine aggregates

木下 千裕^{1*}, 廣瀬 丈洋²

KINOSHITA, Chihiro^{1*}, HIROSE, Takehiro²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 独立行政法人海洋研究開発機構 高知コア研究所

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Olivine is a key mineral that controls the slip behavior of seismic faults in deep oceanic crusts at mid-ocean ridges and subduction zones. However, its frictional property is not well understood, especially at coseismic slip velocity (i.e. >0.1 m/s). In this experimental study we crushed and sieved San Carlos olivine into four grain size ranges (3, 5, 15, 35, and >50 micron). The olivine aggregates of 0.5 g were deformed dry to >10 m displacement at velocity of 0.0013-1.3 m/s and normal stress of 0.5-2.0 MPa using a rotary-shear apparatus, in order to reveal the effect of initial grain size on slip behavior at high velocities. In addition, we examined the microstructures of the simulated fault zone that control the high-velocity slip behaviors using a FE-SEM.

The experiments at high velocity showed a typical slip weakening behavior: friction coefficient is 0.7-0.9 at the initiation of slip and it decays exponentially to a steady-state stage of 0.2-0.3 over a slip weakening distance D_c . D_c decreases from 40.0 to 4.0 m as increase in normal stress from 0.5 to 2.0 MPa, respectively, following a power-law relation. There is no clear grain size dependence of friction level and D_c . In contrast, slip weakening behaviors are invisible at velocities of < 0.13 m/s. Such slip-weakening and velocity-weakening behaviors of olivine aggregates are quite similar with other rocks sheared at high velocities (e.g., Di Toro et al., 2011).

A slip localized zone forms during high-velocity sliding and is composed of fine-grained olivine with less than 1 micron. Interestingly thickness of the localized zone tends to become thinner for initially finer grains: thickness of localized zone is 50, 33 and 3 micron, respectively. This implies that a positive feedback process between grain-size reduction and slip localization could operate within a gouge zone during coseismic sliding leading to the dynamic weakening of faults.

断層潤滑物質による“弱い断層”の形成過程

The influence of lubricating agents for the strength reduction of faults

大橋 聖和^{1*}, 廣瀬 丈洋²OOHASHI, Kiyokazu^{1*}, HIROSE, Takehiro²¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 独立行政法人海洋研究開発機構 高知コア研究所¹Graduate School of Science, Chiba University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

成熟した断層の長期的な“弱さ”は、断層近傍における熱流量や応力方位の測定から、内陸活断層やプレート境界の様々な断層において報告されている (e.g., Lachenbruch and Sass, 1980, Zoback, 2000, 山野・濱元, 2006)。これらの弱い断層を作る一つの説明として、一般的な造岩鉱物よりも摩擦強度の低い層状ケイ酸塩鉱物が潤滑剤として機能しているという考えがある。この可能性を検証するために、低強度物質を混合させた模擬物質を用いた実験が古くからなされている (e.g., Logan and Rauenzahn, 1987; Brown et al., 2003; Takahashi et al., 2007; Crawford et al., 2008) が、これらの既存研究では試験機のジオメトリから限られた剪断歪量 () しか与えられてこなかった。一方で、断層の弱さにはその組織が重要であると指摘されている (Collettini et al., 2009)。そこで著者らは剪断歪を無限大に与えられる回転剪断式摩擦試験機を用いて二成分混合ガウジの変形実験を行い、剪断歪量、微細組織、摩擦強度の関係性を調べた。実験には潤滑物質としてグラファイトとスメクタイト (Na-bentonite) をそれぞれ使い、石英砂と任意の割合で混合させた。グラファイトは無水条件下、スメクタイトは無水・含水の両条件下でそれぞれ変位速度 150 μ m-1.3 m/s、垂直応力 2.0 MPa で実験を行った。

実験の結果、グラファイト-石英ガウジ、スメクタイト-石英ガウジ (含水条件下) のいずれもその量比の増加に応じて定常摩擦が減少したが、従来報告されていたようなほとんど線形的な傾向ではなく、量比 10-30 vol % を境に急激に減少する劇的なものであった。この関係性を、与えた歪量ごとに解析したところ、 $\gamma = 10$ 付近 (従来実験が行われていた領域) までは既存研究に近い傾向であったのに対し、 $\gamma = 200$ を超えたあたりから指数関数的に減少する傾向になり、 $\gamma = 2000-10000$ で定常状態に達することが明らかとなった。これは、歪量 (変位量) の増大とともに認められたすべり弱化現象によるものである。実験後の試料の微細構造観察によると、すべり弱化は変形集中帯の形成と、その内部に出現するグラファイトもしくはスメクタイトの連結したすべり面 (Y 面) の形成に対応していることが明らかとなった。これらの結果は従来の低歪量の実験では認められておらず、断層強度への組織発達的重要性を強調し、天然の成熟した“弱い断層”の形成過程に迫るものである。

[引用文献]

Brown, K. M., A. Koef, M. B. Underwood, and J. L. Weinberger (2003), Compositional and fluid pressure controls on the state of stress on the Nankai subduction thrust: A weak plate boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 589-603, doi: 10.1016/S0012-821X(03)00388-1.

Collettini, C., A. Niemeijer, C. Viti, and C. Marone (2009), Fault zone fabric and fault weakness, *Nature*, 462, 907-910, doi:10.1038/nature08585.

Crawford, B. R., D. R. Faulkner, and E. H. Rutter (2008), Strength, porosity, and permeability development during hydrostatic and shear loading of synthetic quartz-clay fault gouge, *J. Geophys. Res.*, 113, B03207, doi:10.1029/2006JB004634.

Lachenbruch, A. H., and J. H. Sass (1980), Heat-flow and energetics of the San-Andreas fault zone, *J. Geophys. Res.*, 85 (Nb11), 6185-6222, doi:10.1029/JB085iB11p06185.

Logan, J. M., and A. Rauenzahn (1987), Frictional dependence of gouge mixtures of quartz and montmorillonite on velocity, composition and fabric, *Tectonophysics*, 144, 87-108, doi:10.1016/0040-1951(87)90010-2.

Takahashi, M., K. Mizoguchi, K. Kitamura, and K. Masuda (2007), Effects of clay content on the frictional strength and fluid transport property of faults, *J. Geophys. Res.*, 112, B08206, doi:10.1029/2006JB004678.

山野・濱元 (2006), 地殻熱流量データに基づく南海トラフ沈み込み帯の温度構造の推定. しんかいシンポジウム予稿集 22, 47.

Zoback, M. D. (2000), Strength of the San Andreas, *Nature*, 405, 31-32, doi:10.1038/35011181.

キーワード: 断層潤滑剤, グラファイト, スメクタイト, 断層ガウジ, 断層弱化, 摩擦実験

Keywords: Fault lubricant, Graphite, Smectite, Fault gouge, Fault weakening, Friction experiment

不安定すべり実験により得られた破壊伝播過程の封圧・鉱物種依存性 Effects of confining pressure and mineral property on rupture propagation process revealed by unstable-slip experiments

平内 健一^{1*}, 武藤 潤², 大槻 憲四郎²
HIRAUCHI, Ken-ichi^{1*}, MUTO, Jun², OTSUKI, Kenshiro²

¹ 広島大学大学院地球惑星システム学専攻, ² 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Dept. Earth Planet. Syst. Sci., Hiroshima Univ., ²Dept. Earth Sci., Tohoku Univ.

Episodic slow slip events, as defined by anomalously low rupture velocity within a range of 5 to 15 km/d (0.06 to 0.17 m/s), have been observed in subduction zones, and occur as shear slip on the plate interface downdip of the seismogenic zone. A considerable body of evidence points to high fluid pressures on the plate interface that may reduce effective normal stress and enable slow slip. Laboratory observations on rocks have shown that nucleation of unstable slip consists of an interval of fault creep that localizes and accelerates to a dynamic rupture, with propagating velocity comparable to shear wave velocity of the material. However, in spite of the importance of low effective normal stress in causing slow slip events, the effect of normal stress on the rupture properties of the fault has been yet explored.

In this study, unstable-slip experiments were conducted in a gas-medium apparatus at room temperature, confining pressures of 60-180 MPa, and a nominal strain rate of $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. We used powders of lizardite/chrysotile (liz/ctl), antigorite, and olivine as the starting material, producing a ~0.7-mm-thick layer of simulated fault gouge between two gabbroic forcing blocks. To monitor directly the strain field parallel to the fault surface, four strain gauges were mounted onto the lower gabbro cylinder along the fault. The friction coefficient was 0.48-0.58 for liz/ctl and 0.67-0.72 for antigorite, while olivine has a friction coefficient of 0.72-0.73.

The stress-strain curves exhibit an initial linear elastic portion, a strain-hardening range in which stress increases with strain and, finally, a range in which the stress levels off or drops off until one sudden, large unstable-slip occurs. At $P_c = 100$ and 140 MPa for antigorite and olivine, the shear stress dropped to a residual value at least within 50 μs during the unstable-slip event. The rupture propagated bilaterally at speeds ranging from a few hundreds meters to a few kilometers per seconds. At $P_c = 100$ -180 MPa for liz/ctl and $P_c = 60$ MPa for antigorite and olivine, the local strains show that a rupture started to propagate slowly at speeds in the range of 0.7 to 2.0 m/s. Eventually, a rupture propagates at fast speeds. At $P_c = 60$ MPa for liz/ctl, the shear stress decreased very slowly towards a residual value within ~1 s. The local strains show that a rupture nucleated just before the onset of stress drops, and then propagated at speeds ranging from 0.07 to 0.25 m/s.

There is no systematic dependence of confining pressure on the observed rupture velocity during the fast stress drops. In contrast, the rupture velocity during the slow stress drops appears to decrease with decreasing confining pressure. We thus conclude that the slow rupture propagation process along the gouge-bearing fault is affected by intrinsic material property and confining pressure. A series of slow earthquakes including slow slip may reflect differences in the size and duration of slow rupture phase, which becomes dominant if the weak material exist on the fault at low effective normal stress. In particular, the rupture property characterized by a slow stress drop with anomalously low rupture velocity observed at $P_c = 60$ MPa for liz/ctl might be analogous to that of slow slip events in nature.

南海トラフ付加体中の半遠洋性およびタービダイト性泥岩の水理特性・強度・摩擦特性の違いについて

Contrasting hydrological and mechanical properties between hemipelagic and turbidite muds from the shallow Nankai Trough

高橋 美紀^{1*}, 東 修平², 上原 真一³, 井上 厚行², 金川 久一²

TAKAHASHI, Miki^{1*}, AZUMA, Shuhei², UEHARA, Shin-ichi³, Atsuyuki Inoue², KANAGAWA, Kyuichi²

¹(独)産総研 活断層・地震研究センター, ²千葉大学大学院理学研究科, ³東邦大学 理学部

¹GSJ, AIST, ²Graduate School of Science, Chiba University, ³Faculty of Science, Toho University

We found that two mud samples cored from shallow (c.a.1000 mbsf) accretionary sediments at Site C0002 of IODP Exp. 315 are different in origin; one is a hemipelagic mud and the other is a turbidite mud. The hemipelagic mud sample is poorer in quartz and feldspar (34 wt%), richer in clay minerals (41 wt%) and uniformly fine-grained, whereas the turbidite mud sample is richer in quartz and feldspar (51 wt%), poorer in clay minerals (37 wt%) and poorly sorted. The former has a small porosity of 11%, while the latter has a large porosity of 38%.

At room temperature, in-situ confining pressures of 36-38 MPa and water pressures of 28-29 MPa, the hemipelagic mud sample has a smaller permeability of $2.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$, while that the turbidite mud sample has a larger permeability of $2.3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$. Triaxial compression experiments at these conditions and an axial displacement rate of 10 micron/s reveal that the former exhibits a smaller peak strength of 14.5 MPa followed by a slow failure lasting for a minute, whereas that the latter exhibits a larger peak strength of c.a. 20 MPa followed by a rapid failure within seconds. Friction experiments at these conditions and axial displacement rates changed stepwise among 0.1, 1 and 10 micron/s reveal that the hemipelagic mud sample has a much smaller friction (friction coefficient = 0.25) than the turbidite mud sample (friction coefficient = 0.53). Although both samples exhibit rate-strengthening behavior upon velocity stepping, the velocity dependence of the former is much larger than that of the latter. In addition, a certain type of flow likely contributes to the former's frictional strength.

Such contrasting hydrological, mechanical and frictional properties between hemipelagic and turbidite muds have important implications for faulting in the shallow Nankai Trough accretionary prism. Faulting would preferentially occur in the hemipelagic mud, because it is weaker than the turbidite mud. The faulting in the hemipelagic mud would occur slowly, and therefore is a possible source of very low frequency earthquakes recently found in the shallow Nankai Trough accretionary prism. Faults formed in the hemipelagic mud are also much weaker in strength than those in the turbidite mud. In addition, the hemipelagic mud is much less porous and permeable than the turbidite mud so that in the former pore pressure likely builds up during deformation and thermal pressurization is expected to occur during faulting, which results in further weakening and large displacements. Our results may constrain the possible properties of mud to generate tsunami earthquakes in the shallow Nankai Trough accretionary prism.

キーワード: 南海トラフ, 半遠洋性泥岩, タービダイト性泥岩, 浸透率, 強度, 摩擦挙動

Keywords: Nankai Trough, hemipelagic mud, turbidite mud, permeability, strength, frictional properties

台湾チェルンブ断層における炭質物のラマン分光分析

Characterization of carbonaceous materials in the Taiwan Chelungpu fault by microRaman spectroscopy

前川 由佳^{1*}, 藪田 ひかる¹, 廣野 哲朗¹

MAEKAWA, Yuka^{1*}, YABUTA, Hikaru¹, HIRONO, Tetsuro¹

¹ 大阪大学 大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻

¹Department of Earth & Space Science, Osaka Univ.

地震発生時には、断層での滑りによって摩擦発熱が生じる。この発熱による温度上昇量から地震時の剪断応力や滑り距離を推定する事が出来るため、断層が履歴している温度情報を調べることは重要である。1999年台湾集集地震で動いたチェルンブ断層では、周囲の未変形な岩石と比較して、断層における顕著な化学変化（炭酸塩鉱物の熱分解、粘土鉱物の脱水、磁性鉱物の生成など）が検出されているが、これらの反応は可逆的であるため、地震後の断層回復過程での影響を除去し、地震時のみにおける情報を抽出することは難しい。

そこで本研究では、温度に対して不可逆的な反応を示す炭質物に着目し、チェルンブ断層の掘削試料に含まれる炭質物を分離、ラマン分光分析による構造の解析を実施した。その結果、黒色ガウジから分離した炭質物では、Gバンドの半値幅の低下と蛍光強度の減少が認められた。これらは地震時の摩擦発熱による、炭質物の分子構造の変化を反映しているのかもしれない。

キーワード: 炭質物, ラマン分光分析

Keywords: carbonaceous materials, Raman spectroscopy

ビトリナイト反射率を用いた地震性断層すべりに伴う摩擦発熱の検出：高速摩擦実験からのアプローチ

Detection of frictional heat in seismic faults by vitrinite reflectance :Insights from high-velocity friction experiment

北村 真奈美^{1*}, 向吉 秀樹², 廣瀬 丈洋³

KITAMURA, Manami^{1*}, HIDEKI, Mukoyoshi², HIROSE, Takehiro³

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 独立行政法人 海洋研究開発機構高知コア研究所

¹Dept. of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Marine Works Japan Ltd.,

地震時の断層すべりに伴う摩擦発熱は、地震発生のプロセスや地震時のエネルギー収支を理解する上で非常に重要である。近年、地震性断層すべりを起こした断層帯から、強磁性反射波 (Fukuchi et al., 2005), 微量元素と元素同位体 (e.g., Ishikawa et al., 2008), 粘土鉱物の変化 (e.g., Hirono et al., 2008), ビトリナイト反射率 (e.g., Sakaguchi et al., 2011) などの手法によって熱異常が検出されはじめた。この中でもビトリナイト反射率 (R_o) と温度の相関関係 (e.g., Barker., 1988) は古くから地質温度計として用いられてきたが、これらの関係式は地質学的年代スケールの被熱時間を仮定している。地震断層すべりは被熱時間が数秒から数十秒と非常に短く、不可逆反応なので、従来の R_o と温度の関係式から断層の発熱温度を求めことは難しい。そこで我々は、数秒間の摩擦発熱を伴う地震性断層すべりによって R_o がどのように変化するのかを、石英 (90 wt%) とビトリナイト (10 wt%) の混合ガウジを用いた高速摩擦実験によって調べた。

実験には、海洋開発機構高知コア研究所に設置されている高速摩擦試験機をもちいた。実験条件は、垂直応力 1 MPa, すべり速度 0.0013 m/s, 0.65 m/s, 1.3 m/s, 変位すべり距離 15 m である。摩擦発熱によって有機物が二酸化炭素に酸化分解するのを防ぐため、すべての実験は窒素雰囲気下でおこなった。また、熱電対を用いて断層ガウジ内部の温度を測定した。地震性断層すべりを再現した高速実験 (1.3 m/s) では、11 秒間のすべりでガウジ内部の温度は室温 (20 °C) から 270 °C, R_o は 0.9% から最大で ~6.0 % まで上昇した。 R_o はガウジ帯内部に形成される変形集中帯に近づくにつれて顕著に上昇した。低速実験 (0.0013 m/s) では、2 時間かけて高速実験と同程度の摩擦仕事量をするように変位させたが、温度と R_o ともにほとんど変化がなかった。しかし低速実験ではすべり面付近で、高い R_o を示すビトリナイト粒子が不規則に点在していた。このような高い R_o は、微小な粒子間の摩擦による局所的な発熱 (flash temperature), もしくはすべりに伴う mechanochemical な効果に起因すると考えられる。

キーワード: 断層, 摩擦発熱, ビトリナイト反射率, 炭質物

Keywords: fault, frictional heat, Vitrinite reflectance, carbonaceous material

走査型 ESR 顕微法による断層摩擦熱の検出 Detection of seismic frictional heat using scanning ESR microscopy

福地 龍郎^{1*}

FUKUCHI, Tatsuro^{1*}

¹ 山口大学大学院理工学研究科

¹ Yamaguchi University

断層摩擦熱を見積ることは地震エネルギー配分を考える上で重要である。摩擦熱の計算結果には摩擦発熱幅が大きく影響するので、摩擦熱を正確に見積もるためには摩擦発熱幅を特定する必要がある。さらに、摩擦熱温度は断層面からの距離数 mm で急激に低下すると考えられるので、断層岩から摩擦熱の指標を検出する場合、1mm 以下の分解能で連続的に検出する必要がある。そこで本研究では、走査型 ESR (電子スピン共鳴) 顕微法により摩擦熱の指標となる ESR 信号を用いて断層岩から摩擦熱を検出し、摩擦発熱幅を特定する方法について述べる。研究対象とした断層岩は、兵庫県・野島断層帯に産出する粉碎起源のシュードタキライトと鹿児島県・内之浦断層帯に産出する溶融起源のシュードタキライトの他、台湾チェルンプ断層帯深部掘削 Hole B コア中に産出する固結した黒色物質である (Ma et al., 2006)。

摩擦熱検出のためのターゲット信号は、摩擦熱による鉄含有鉱物の熱分解で生成するフェリ磁性共鳴 (FMR) 信号および有機物の熱分解で生成する常磁性信号 (有機ラジカル) である。花崗岩質ガウジが源岩である野島シュードタキライトからは特徴的な FMR 信号が検出され、FMR 信号の g 値やスペクトルの線形 (lineshape) を元にガウジ中のレピドクロサイト (-FeOOH) が加熱脱水して生成する低結晶度のマグヘマイト ($\text{-Fe}_2\text{O}_3$) が磁気ソースであると考えられてきた (Fukuchi et al., 2007) が、シデライト (FeCO_3) の瞬間的な加熱分解で生成する低結晶度のマグネタイト (Fe_3O_4) も同様の g 値や線形を示すことが今回実施した詳細なスペクトル解析の結果判明した。野島シュードタキライト生成時の初期温度 (約 200) を考慮すると、レピドクロサイトは安定的に存在できないので、シデライトから生成される低結晶度のマグネタイトが磁気ソースである可能性が高い。花崗岩を源岩とする内之浦シュードタキライトからも特徴的な FMR 信号が検出され、花崗岩中に含まれる黒雲母の熱分解でマグネタイトが生成することが実験的に確認されているので、黒雲母起源のマグネタイトが磁気ソースであると考えられる (Fukuchi, 2012)。一方、台湾チェルンプ断層黒色物質の場合、顕著な FMR 信号は観察されず、泥質岩中に含まれる有機物の熱分解で生成される常磁性有機ラジカル ($g=2.004$) が特徴的に検出されるので、この信号を摩擦熱検出のためのターゲット信号とした。

今回、摩擦熱検出に用いた走査型 ESR 顕微鏡は、TE₁₁₁ モードキャビティに 1.6-2.6mm のピンホールを取り付けたもので、検出感度を上げるために 100kHz 変調磁場コイルを内蔵したものをを用いた。検出の分解能は ESR 信号の強度にも依存するが 0.1mm である。二次元 ESR 解析の結果、野島シュードタキライトからは過去の摩擦熱作用により生成した FMR 信号強度の複数のピークが検出され、摩擦発熱幅は 0.5-1.0mm と見積もられた。内之浦シュードタキライトの場合は、注入しているシュードタキライト脈と接触している部分で非常に高い FMR 信号強度が検出されるが、脈内部ではほぼ一様で低い信号強度になっていることが判明した。FMR 信号は磁気ソースであるフェリ磁性鉱物が溶融すると消滅するので、シュードタキライト脈内部の FMR 信号の強度と分布状態によりシュードタキライトの成因 (溶融起源又は粉碎起源) を判定できる可能性がある。一方、台湾チェルンプ断層では、固結した黒色物質からは源岩よりも高い有機ラジカル強度分布を示すことが明らかになった。

引用文献

Fukuchi, T. et al. (2007) *Tectonophys.*, 443, 127-138.

Fukuchi, T. (2012) ESR Techniques for the Detection of Seismic Frictional Heat. In: *Earthquake Research and Analysis: Seismology, Seismotectonics and Earthquake Geology* (ed. D'Amico Sebastiano). InTech-Open Access Publisher, 285-308.

Ma, K.-F. et al. (2006) *Nature*, 444, 473-476, doi:10.1038/nature05253.

キーワード: 電子スピン共鳴, フェリ磁性共鳴, ESR 顕微法, 有機ラジカル, 地震, 摩擦熱

Keywords: electron spin resonance, ferrimagnetic resonance, ESR microscopy, organic radical, earthquake, frictional heat

Pulverized Rock の微細構造：サンアンドレアス断層と有馬高槻構造線 Microstructures of pulverized fault rocks: Examples from San Andreas Fault and Arima-Takatsuki Tectonic Line

中谷 剣^{1*}, 武藤 潤¹, 西川 治², 長濱 裕幸¹

NAKATANI, Tsurugi^{1*}, MUTO, Jun¹, NISHIKAWA, Osamu², NAGAHAMA, Hiroyuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地圏進化化学講座, ² 秋田大学工学資源学部

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

断層破砕帯は、岩石がずれ動く時のせん断変形が重複し、断層面の周りに摩耗物質が蓄積することによって形成するものだと考えられている (Sholtz, 1987 Geology)。しかし、近年、サンアンドレアス断層などの世界最大級の横ずれ活断層のすべり面の周りに、せん断の証拠を伴わないが著しく破砕した岩石 (Pulverized Rock) が広く分布することが報告されている (Dor et al., 2006 EPSL)。このようなダメージゾーンの発達には、粒子の変位や回転を伴う、せん断破壊では説明できないため、断層面上をラブチャーが進展したときに生じる引張場が原因で生成すると考えられている。また、サンアンドレアス断層で報告された Pulverized Rock の 70% 以上が断層の北東側に分布する (Dor et al., 2006 EPSL) ことから、ダメージゾーンの非対称性について議論されている。非対称のダメージゾーンが形成されるメカニズムとして、ラブチャーの伝播方向 (Di Toro et al., 2005 Nature)、岩石の硬さ (地震波速度) (Ben Zion et al., 2005 EPSL)、スーパーシアー・ラブチャー (Doan and Gary, 2009 Nature) が要因に挙げられている。

しかしながら、Pulverized Rock の岩石学的特徴や形成メカニズムには、下記のような不明点がある。Pulverized Rock の研究は、主にサンアンドレアス断層地域で行われているため (Dor et al., 2006 EPSL)、断層の規模や周りの岩石の違いなどの効果によって、Pulverized Rock の微細組織や破砕機構が変化するのか分かっていない。また、報告されている Pulverized Rock は主に花崗岩中の石英粒子のみに焦点が当てられているため (Dor et al., 2009 PAGEOPH)、他の岩石および鉱物に関する破砕の特徴が明らかではなく、摩耗によって形成された断層ガウジなどの他の脆性断層岩や風化作用による変形プロセスとの違いも明確に示されていない。

上記の問題を解決するために、有馬高槻構造線 (ATTL) とサンアンドレアス断層 (SAF) を対象に野外調査を行い、電子顕微鏡を用いて、Pulverized Rock の分析を行った。花崗岩を原岩とする Pulverized Rock は、雲母類が薄い黒色を示し、石英と長石は全体的に白色を呈している。手で軽く握ると容易に割れ、粉末状になる。顕微鏡において、石英や長石などのテクトケイ酸塩鉱物の破砕は著しく、ジグソーパズル状に 10-100 μm サイズまで粉砕している。ただし、原岩の花崗岩の組織を維持しており、断層ガウジのような細粒基質部分のみから成るような部分は認められない。破断した粒子は外形を残した状態で、粒子内部には不均質な割れ目が存在する。断片は角張っており、断層ガウジで見られる円磨度の高い粒子とは異なる。一部では、異なる粒子同士を貫いている割れ目や、粒子同士の接触部分を中心にして放射状に割れ目が発達している構造が見られる。石英の破断面は、滑らかな形状を示し、リバーパターンが認められる粒子もある。一方、長石の破断面は石英に比べて粗い形状を呈している。角閃石などのイノケイ酸塩鉱物は、10-100 μm サイズまで粉砕している。破断面は平滑で、割れ目はへき開面に沿う。角閃石の一部では、へき開面とは異なる方向に割れ目が発達している。フィロケイ酸塩鉱物である雲母類は、基底面にキンクが発達するのみで、ほとんど破砕していない。また、カタクレーサイトで見られる雲母フィッシュのような非対称剪断構造は認められない。上記に示した鉱物は、風化作用によるカオリナイトやスメクタイトなどの粘土鉱物、絹雲母や緑泥石などの変質鉱物は見られなかった。さらに、粒子の歪が小さく、初生の花崗岩の組織を維持しており、細粒基質部分から成るような部分や非対称な剪断構造は存在しない。このことは、Pulverized Rock が、体積膨張を伴うが歪み量の小さい変形によって形成し、摩耗で形成された断層ガウジなどとは異なる機構で形成されたことを示唆する。

Keywords: pulverized fault rocks, damage zone, fracture pattern

Glarus 衝上断層中に発達する鏡肌の形成過程 Formation process of slickenside developed on the Glarus thrust

西脇 隆文^{1*}, 安東 淳一¹, 大藤 弘明²

NISHIWAKI, Takafumi^{1*}, ANDO, Jun-ichi¹, OHFUJI, Hiroaki²

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Geodynamics Research Center, Ehime University

地震現象は断層が破壊する事によって引き起こされる。地震発生時及び地震発生以前に断層がどのような状態にあるのかを調べる事は、地震発生の素過程を理解する上で重要である。野外に露出する断層岩は断層運動を反映した組織が残されている場合が多い。その為、断層岩の微細組織観察を通して、断層運動の素過程を考察する事が可能である。“シュードタキライト”は、断層運動の素過程の情報を有している最も代表的な断層岩である。

シュードタキライトと共に“鏡肌”も断層面上に発達する組織として古くから知られている。鏡肌は滑らかな光沢のある面を示し、その成因は断層運動による母岩の溶融或いは粉碎といった現象の関与が考えられている(例えば、Spray, 1989, Yund et al., 1990)。しかし、その詳細はシュードタキライト程には理解されていない。本研究では、微細組織の観察を通じて鏡肌の成因を明らかにし、鏡肌を形成する様な断層運動中の素過程を考察する事を目的とした。試料は、スイス、アルプス地方東部に分布する Glarus 衝上断層面上に発達する鏡肌である。この Glarus 衝上断層は、漸新世から中新世の間に水平距離で約 30km から 40km 北方に移動した世界最大級の断層である(例えば星野, Briegel, 2000)。

Glarus 衝上断層の上盤はペルム紀の火山砕屑岩 (Verrucano) が、下盤は古第三紀の海成堆積物である砂岩泥互層 (Flysch) が位置している。Verrucano と Flysch の間には、極細粒な方解石から構成される層厚 1 m ~ 2 m の石灰岩層 (Lochseiten 石灰岩) が狭在されている。Glarus 衝上断層はこの Lochseiten 石灰岩中に発達する。露頭観察を行ったスイス Glarus 州 Linthal では、Lochseiten 石灰岩と Verrucano 及び Flysch との境界は明確な不整合面として認識できる。風化が進んでいない鏡肌は非常に強い光沢を有し、また鏡肌面には平行に伸びる条線が発達する。

Glarus 州 Linthal で採取した試料 (転石) に対し、鏡肌面に垂直、条線方向に平行な薄片を作成し、偏光顕微鏡、EBSD 装置、TEM を用いた観察を行った。その結果、以下の事が明らかとなった。1) Lochseiten 石灰岩は断層面から約 1cm の部分を境に組織が大きく異なる。断層面側ではカタクラスティック組織が、外側では細粒な方解石 (粒径約数 μm) から構成される等粒状組織が発達する。2) 両領域共に、鏡肌面にほぼ平行な波状形態を有する面状組織が発達する。3) カタクラスティック組織を示す領域では、細粒な方解石粒子と共に、脆性破壊を受けた粒径数十 μm の相対的に大きなサイズの方解石が特徴的である。4) 細粒等粒状組織の領域を構成する方解石の c 軸は、鏡肌面に垂直な方向から条線方向に約 30° 時計回りに回転した方向に、また、a 軸は条線方向に対し約 30° 時計回りに回転した方向に強い点集中を示す。5) TEM 観察によると、カタクラスティック組織と細粒等粒状組織を示す領域共に、細粒な粒子中には、転位の配列による亜結晶粒界と転位の絡みによる微細組織が発達していた。

これらの観察結果から以下の事が示唆される。1) 鏡肌を形成する断層運動の前段階では、Lochseiten 石灰岩を構成する方解石は (001)[100] のすべり系が卓越する転位クリープによって塑性変形していた。その際の剪断応力方向は鏡肌面に形成されている条線方向と平行である。即ち、方解石の塑性変形と断層形成が同じ応力場で生じた可能性が強い。2) 断層運動に伴う Lochseiten 石灰岩の脆性破壊は、断層面から約 1cm の幅の部分に限られて生じた。また、その際の大きな差応力は、細粒な方解石中に転位の絡みを生じさせた。

現在は、TEM を用いて鏡肌面の微細組織の観察を進めている。

引用文献

星野, Briegel, 2000, 地学雑誌, 109, 784. Spray, 1989, J.S.G., 11, 895. Yund et al., 1990, J.G.R., 95, 15589.

キーワード: 鏡肌, 断層運動, 微細組織, Glarus 衝上断層

Keywords: slickenside, faulting, microstructure, Glarus thrust

マイロニティックシュードタキライト断層を伴う、剪断方向に有限長のマイロナイト剪断集中領域；地震の破壊開始点？

Mylonite shear localized region with finite length, associated with mylonitic pseudotachylyte; an ancient hypocenter?

上田 匡将^{1*}

UEDA, Tadamasu^{1*}

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻

¹ Div. Earth&Planetary Sci., Kyoto Univ.

イタリア北西部 Balmuccia かんらん岩体に、非溶融起源のかんらん岩マイロナイトからなる、剪断面方向に延長が限られた（端が認定できる）塑性剪断集中領域（剪断面垂直方向に $\sim 40\text{cm}$ 、剪断面平行方向に 2m 以下）を見出した。このマイロナイト剪断集中構造は非常に稀で、かんらん岩体に含まれる初生的な輝岩マーカー岩脈と斜交して発達しており、同マーカーを変形させている。岩脈マーカーは 1m 程度の間隔で互いに平行に分布しており、同マーカーの変形により露頭における変形集中構造の分布が判別できる。同剪断集中域の剪断歪は岩脈の変形により 2 以上と見積ることができる。当該剪断集中領域はその剪断変形が最も集中した部分に、剪断面と同一の方向を有し、剪断集中領域外側に延長が続く、厚さ $\sim 1\text{mm}$ のマイロニティックシュードタキライト断層脈を伴う。マイロニティックシュードタキライト断層脈中のポーフィロクラストの伸びの方向と露頭面との角度は $\sim 50^\circ$ であり、露頭表面における輝岩岩脈の断層の変位は $\sim 40\text{cm}$ である。マイロナイト断層集中領域は断層の南東側に限定されている。

剪断集中領域のマイロナイトでは初生的な粒径 $\sim 2\text{mm}$ の粗粒かんらん岩中に粒径 $\sim 20\ \mu\text{m}$ の再結晶粒が形成している。再結晶粒部の占める割合は剪断集中域から 40cm 遠方の $\sim 15\%$ （かんらん岩）、 $\sim 5\%$ （輝岩）から剪断集中領域内の $\sim 40\%$ （かんらん岩、輝岩）へ増加する。再結晶粒部の鉱物組み合わせは、かんらん岩中、輝岩中ともに、かんらん石、単斜輝石、斜方輝石、スピネル、ホルンブレンドであり、初生的な粗粒かんらん岩の鉱物組み合わせに比してホルンブレンドが付加している。マイロナイトのポーフィロクラストは波動消光を示すが、純粋に単相での動的再結晶は非常に稀であり、かんらん石ポーフィロクラストの再結晶部には必ず少量のスピネル、場合によって斜方輝石や単斜輝石がかんらん石に加えて存在する。一部の単斜輝石・スピネルポーフィロクラストには波動消光を伴った単斜輝石結晶の開裂と、開いた部分をスピネルがくさび形状で充填していて、このくさびの先端に向かってスピネルのAIが富んでいく組織が見られる。剪断集中構造内外の再結晶粒部に輝石地質学的温度計を適用した結果、 $800\sim 850$ の温度が得られた。

これらの構造発達には以下のように解釈することができる。まず、マイロナイト剪断集中構造は断層の片側に限られることは、剪断集中構造形成後、同剪断集中域が断層に切られたためと考えられる。断層兩岸の岩相はどちらもかんらん岩・輝岩であるため、もしこれが断層形成後の変形であれば断層を挟んで両側に同程度の剪断集中構造が発達しなければならないからである。断層に切られたもう反対側は、断層の露頭垂直成分変位によって露頭面外に移動したと考えられる。したがって、マイロナイト剪断集中は断層形成前に、孤立したおそらく扁平な楕円体形状の形状で岩体中に形成し、その後シュードタキライト地震断層が剪断集中領域と同じ場所同じ方向で発達したと考えられる。

剪断集中が起きているので、岩石はマイロナイト化とともに弱化したと考えられる。この周囲より弱化したマイロナイト剪断帯が扁平な楕円体形状で存在することはすなわち、剪断集中領域の先端付近に応力集中が存在したことを示唆する。しかし、マイロナイト化がホルンブレンド形成を伴う加水反応を伴って進行していたこと、マイロナイト化に伴って有意な温度上昇が検知されていないことから、マイロナイト化は環境温度に束縛された一定の反応速度で進行したと考えられる。マイロナイト剪断集中領域のアスペクト比が増すにつれ応力集中は増大するがマイロナイト化の速度が限られているため一定程度以上の応力集中が緩和しきれない。このように、環境温度で弱化過程進行速度が限定されるメカニズムでの、剪断方向に端が存在する剪断集中領域を形成するような剪断集中にともなっては、テクトニック応力が岩石の破壊強度未満でも、いずれ周囲の媒体の破壊するほどの応力集中が剪断集中領域周辺に発達すると考えられる。

キーワード: 剪断集中, マイロナイト, シュードタキライト, 前駆変形, 地震発生過程, 脆性 - 延性遷移領域

Keywords: shear localization, mylonite, pseudotachylyte, pre-seismic deformation, seismogenic process, brittle-ductile transition zone

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 Minor element characteristics of melt-origin and crush-origin pseudotachylytes

本多 剛¹, 石川 剛志², 廣野 哲朗^{1*}, 高木 秀雄³

HONDA, Go¹, ISHIKAWA, Tsuyoshi², HIRONO, Tetsuro^{1*}, TAKAGI, Hideo³

¹ 大阪大学, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 早稲田大学教育・総合科学学術院

¹Osaka University, ²JAMSTEC-Kochi, ³Department of Earth Science, Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

断層運動によって形成されたシュードタキライトの成因は熔融起源型と粉碎起源型の2種類に区分される。熔融起源型のシュードタキライトはメルトの急冷を示唆するガラス状マトリックス部、マイクロライト、気孔、杏仁状構造・融解縁などの典型的な熔融組織を含む。一方、粉碎起源型のシュードタキライトは野外での産状こそ熔融起源型のものと類似するが、顕微鏡下では熔融組織は一切認められない。しかし、熔融組織の発達は冷却速度にも依存するため、単に組織観察のみで起源を判断することは極めて難しい。そこで、本研究では、微量元素・同位体といった化学的側面に着目し、これらの特徴によって熔融起源と粉碎起源を区分することができるかどうかを検討した。具体的には、足助剪断帯に産出する熔融起源型のシュードタキライトと飯田 - 松川断層に産出する粉碎起源型のシュードタキライトにおいて、ICP-mass を用いた微量元素と Sr 同位体比の分析を実施した。

その結果、飯田 - 松川断層に産出する粉碎起源のシュードタキライトの微量元素組成は一部の不適合元素の濃集が認められ、Sr 同位体比は母岩よりも小さい値を示した。一方、足助剪断帯に産出する熔融起源型のシュードタキライトでは有意な組成・同位体異常は検出されなかった。しかし、先行研究の結果も考慮すると、熔融起源型のシュードタキライトと粉碎起源型のシュードタキライトとも、細粒基質部と破砕された鉱物片から構成されており、その細粒基質部は黒雲母成分に富むことが明らかになった。すなわち両者において、バルクの状態では元素組成・同位体の特徴に違いはなく、基質部のみの場合には両者とも黒雲母に多く含まれる元素に富むと言える。残念ながら現時点では、微量元素・同位体の特徴からシュードタキライトの成因に制約を与えることは難しいが、キーとなる黒雲母の粉碎時および熔融時の挙動を精査することにより、何らかの指標を期待したい。

雰囲気コントロール下での断層摩擦実験による希ガスの脱ガスと挙動 Noble gas release and frictional degassing from faults during coseismic sliding: under controlled gas environment

佐藤 佳子^{1*}, 廣瀬 丈洋², 熊谷 英憲¹, 田村 肇¹, 坂口 真澄³, 鈴木 勝彦¹

SATO, Keiko^{1*}, HIROSE, Takehiro², KUMAGAI, Hidenori¹, TAMURA, Hajimu¹, Masumi Sakaguchi³, SUZUKI, Katsuhiko¹

¹ 海洋研究開発機構, 地球内部ダイナミクス領域, ² 海洋研究開発機構, 高知コア研究所, ³ マリンワークジャパン

¹IFREE, JAMSTEC, ²KCC, JAMSTEC, ³Marine Works, JAPAN

Noble gases very limitedly react with other elements because of their inert nature. Therefore, isotope ratios of noble gases in certain minerals are believed to reflect well those of their ambient reservoirs when the temperatures of the minerals containing them went up to their closure temperatures, or higher.

We have reported the resetting of isotope signatures of noble gases released during rotary-shear high-velocity friction experiment on the Aji granite samples shaped as cylinders and rotated at 1.6 m/s at a constant normal stress of 1.4 MPa. Friction increased with slip and reached maximum value at ~ 5 seconds ("first fuse"; Hirose et al, 2005) after the beginning of the slip. Completely melted glass formed by frictional heat was found only on the sliding surface. The most part of the post experiment specimen were little or not melted, which is possibly due to very short duration of the experiment.

Under controlled gas environment of gabbroid experiment, limited "first fusion" occurred at the first temperature maxima (corresponding to the displacement of Magnitude -2 ~ -3). Then, friction suddenly dropped down, and decreased gradually further in several seconds associated with moderate melting ("second fuse", corresponding to the displacement of the Magnitude 5 or larger, e.g. Kanamori et al., 2005).

Compared with gabbroid experiments, Ar gas degassed at the "first fusion" when a granite was used for the starting material for the experiment because the granite used, with an age of 77.2 ~ 87.1 Ma (Yuhara, 2008), contained abundant radiogenic ⁴⁰Ar. Ar was clearly emitted after only 5 seconds sliding, and with more amounts than with the gabbroid sliding. Also, the timing of melting depended on the atmospheres of the experiment; whether moist-air, dry-air, He or Ar was used in the experiment. These results suggest that the dissipation of friction-induced heat depends on the mass numbers of the ambient gases. Furthermore, in the case that a sedimentary rock containing much higher potassium is in contact with a fault, emission of ⁴⁰Ar may be faster and much intense during the fault motion. Thus, the liberation of volatiles believed to be detected in some large earthquakes may be controlled by ambient condition of the fault.

キーワード: 希ガス, 脱ガス, 摩擦加熱, 花崗岩類, 玄武岩類

Keywords: noble gas, degassing, frictional heating, granit, gabbro

粉碎によるドレライトの非晶質化とその摩擦特性に対する影響 Amorphization of dolerite gouges and its effects on their frictional properties

和田 純一^{1*}, 金川 久一¹, 中谷 正生², 望月 裕峰², 廣瀬 丈洋³, 安東 純一⁴, 古川 登¹, 井上 厚行¹

WADA, Jun-ichi^{1*}, KANAGAWA, Kyuichi¹, Masao Nakatani², Hiromine Mochizuki², HIROSE, Takehiro³, Jun-ichi Ando⁴, Noboru Furukawa¹, Atsuyuki Inoue¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 東京大学地震研究所, ³ 海洋研究開発機構高知コア研究所, ⁴ 広島大学大学院理学研究科
¹Department of Earth Sciences, chiba university, Japan, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan, ³Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, Japan, ⁴Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, Japan

鉄乳鉢で粉碎しふるいにかけた、粒径 500 ミクロン以下のドレライト粉碎試料をさらに自動瑪瑙乳鉢で粉碎し、10 分、6 時間、12 時間、以後 12 時間毎に 60 時間まで粉碎した。摩擦熱による試料の酸化を防ぐために、3 時間おきに 15 分間の休止を挟んで粉碎を行った。透過電子顕微鏡観察から、6 時間以上粉碎した試料中にはサブミクロンサイズの丸い非晶質粒子が多く含まれることが明らかとなった。粉碎時間 36 時間までは細粒化と非晶質化が進行し、非晶質物質含有量は約 40 wt% まで増加するが、粉碎時間が 36 時間以上になると、粉碎時間が長くなっても非晶質物質含有量は増減しなくなる。これは、自動瑪瑙乳鉢の粉碎能力によるものと考えられる。また、走査電子顕微鏡観察から、6 時間以上粉碎した試料中には、角ばった破碎粒子を非晶質微粒子がコーティングした丸い粒子が多く含まれることが明らかとなった。この粒子は、火山豆石のように、非晶質物質が水分により破碎粒子に吸着成長して形成されたものと考えられる。同様な粒子は天然や実験で生成した粘土質の断層ガウジ中にも見出されており、clay-clast aggregate (CCA) と呼ばれている。粉碎時間の増加に伴い、この CCA 様の粒子の量は増加する傾向にある。

二軸試験機を使用して、垂直応力約 7 MPa、変位速度 1, 10 ミクロン/s でステップ状に変化させながら摩擦実験を行った結果、非晶質物質を全く含まない 10 分間粉碎試料の摩擦係数 (約 0.6) に比べて非晶質物質を約 40 wt % 含む 36 時間粉碎試料の摩擦係数 (約 0.55) が小さく、非晶質物質の存在により摩擦強度が低下することが明らかとなった。また、10 分間粉碎試料は速度弱化的挙動を示すのに対し、36 時間粉碎試料は摩擦強度の変位速度依存性が中立に近く、非晶質物質の存在により摩擦強度の変位速度依存性も変化することが明らかとなった。