

2011年東北地方太平洋沖地震の表面波による南アフリカ金鉱山における断層の挙動 Rheological phenomena of Zebra fault in South Africa goldmine by the 2011 Tohoku earthquake's surface waves

大久保 慎人^{1*}; 小笠原 宏²; 中尾 茂³; 村上 理²; 石井 紘¹
OKUBO, Makoto^{1*}; OGASAWARA, Hiroshi²; NAKAO, Shigeru³; MURAKAMI, Osamu²; ISHII, Hiroshi¹

¹ 東濃地震科研, ² 立命館大, ³ 鹿児島大
¹ TRIES, ² Ritsumeikan Univ., ³ Kagoshima Univ.

2011年東北地方太平洋沖地震では日本各地に大きな被害が生じた。主破壊に伴い約100 km離れた地殻変動観測点において 10^{-5} オーダーの動的ひずみが観測され、1 m オーダーの地表変位が観測されていることから震源近傍の変動の巨大さ(=マグニチュード)が容易に想像できる。一方、震源地から14,000 km離れ、ほぼ地球の裏側に位置する南アフリカにおいても東北地方太平洋沖地震の影響を見ることができる。立命館大学が主導する「科研費基盤研究S:南アフリカ金鉱山におけるM2震源域での地震の準備と発生過程の総合観測(2009-2013)」および「SATREPS: 鉱山での地震被害低減のための観測研究(2010.8-2015.8)」プロジェクトでは、地下数kmまで実際に行き、観察し、観測計器を設置できる金鉱山の利点を生かし、多くの南アフリカ金鉱山で微小地震(AE)活動観測やひずみ観測等が精力的におこなわれている。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に南アフリカ金鉱山内に設置されたひずみ計で観測されたひずみ地震動記録を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震に伴うひずみ地震動主要動および表面波の解析を行った。南アフリカ共和国首都ヨハネスブルクの南西約30 kmに位置するCooke⁴ 鉱山(プロジェクト開始時はEzulwini 鉱山とよばれていた)の地下1 kmの地点では坑道内にZebra Faultと呼ばれる、活動的ではないと考えられる断層を見ることができた。SATREPSプロジェクトによって、この断層を挟むように石井式ボアホールひずみ計が設置され、現在も観測が継続されている。

ひずみ地震動記録の精査の結果、震源から14,000 km離れた南アフリカにおいても、おおよそ 10^{-7} の振幅をもつひずみ地震動(SS; 地表で1度反射するS波、表面波一ラブ波やレイリー波)が明瞭に観測されていた。また、記録から断層を取り囲むひずみ場の時間変動を推定したところ、地震波動の通過に対応して、断層幅が膨張する、もしくはずれひずみの増大するようなひずみ場の変動がみられた。本発表では、南アフリカにおける観測の状況や断層観察を交えながら、2011年東北地方太平洋沖地震によって生じた南アフリカ金鉱山内の断層挙動について発表を行う。

キーワード: 表面波, Zebra 断層, ひずみ地震動, SATREPS
Keywords: Surface waves, Zebra fault, Dynamic strain, SATREPS

Relationship between ESR signal intensity and grain size distribution in shear zones within the Atotsugawa fault system Relationship between ESR signal intensity and grain size distribution in shear zones within the Atotsugawa fault system

Fantong Emilia Bi^{1*}; 竹内 章¹; KAMISHIMA Toshio¹; 道家 涼介²
FANTONG, Emilia bi^{1*}; TAKEUCHI, Akira¹; KAMISHIMA, Toshio¹; DOKE, Ryosuke²

¹Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555., ²Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture, 568 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

¹Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555., ²Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture, 568 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Shear zones are zones of strong deformation within active faults and constitute significant sources of information on the seismogenic behavior of faults. The Atotsugawa fault system, which is in the Northern margin of the Hida Highland lies within a complex tectonic zone consisting of the Pacific plate, the Philippine Sea plate, the Amurian plate and the Okhotsk plate. This system consists of the Ushikubi fault, the Atotsugawa fault and the Mozumi-Sukenobe fault. The study of deformational fabrics and features within these shear zones can give more clarification on geodynamics of faults. Moreover, seismogenic behavior of a fault depends greatly on fault zone internal structure and fault rock constitutive properties. Although there are many studies on shear zone descriptions and deformational mechanisms, only few relate the description of cataclastic rocks (fault gouge) with Electron spin resonance (ESR) signals, which is based on the detection of paramagnetic defects in minerals produced by natural radiation that have accumulated for a long time and produces a characteristic signal detectable with an ESR spectrometer. By measuring the intensity of these trapped electrons, the rate of comminution and displacement of a fault can be clarified or envisaged. This study therefore focuses on the relationship between grain size distribution (sieve method) and ESR analysis, and rate of deformation with proximity to a slip plane.

Three shear zones from both the Atotsugawa and the Ushikubi fault were investigated. Sieve analysis and photomicrographs from thin sections revealed that grain size becomes coarser away from the slip plane (e.g. Fig.1a and Fig.2) indicating that the effect of displacement is more close to the slip plane. However, an irregular pattern in the grain size distribution was equally observed in some of the shear zones. This could be due to multiple phases of deformation. ESR analysis showed a decreasing trend in the intensity of signals toward the fault plane (Fig. 1b and Fig. 2) indicating that the rate of comminution was more intense towards the slip plane. However, the decreasing trend in ESR signal intensity with proximity to the slip plane was not observed in some of the shear zones probably due to multiple phase of deformation as indicated by the anatomizing faults in the shear zone II of the Ushikubi fault.

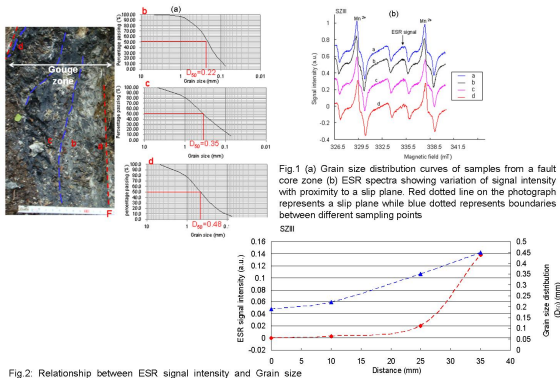
Results from ESR analysis suggest that samples closest to a slip plane will have low signal intensity than those further away while grain size distribution analyses indicates that samples closest to a slip plane become finer due to intensive crushing that is always associated with large displacement during fault activities.

キーワード: Active fault, Shear zones, ESR signal intensity, Grain size distribution, Atotsugawa fault system
Keywords: Active fault, Shear zones, ESR signal intensity, Grain size distribution, Atotsugawa fault system

SSS32-02

会場:315

時間:5月1日 09:15-09:30



1999年台湾集集地震時におけるスリップゾーンでの物理-化学-メカニカルプロセス Physico-chemo-mechanical processes in a slip zone during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake

廣野 哲朗^{1*}; 亀田 純²; 神田 大樹¹; 谷川 亘³; 石川 剛志³
HIRONO, Tetsuro^{1*}; KAMEDA, Jun²; KANDA, Hiroki¹; TANIKAWA, Wataru³; ISHIKAWA, Tsuyoshi³

¹ 大阪大学, ² 北海道大学, ³ 海洋研究開発機構
¹Osaka Univ., ²Hokkaido Univ., ³JAMSTEC

To investigate the physicochemical processes of minerals during and after slip of the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, we analyzed the mineral assemblages in the Chelungpu fault by using quantitative X-ray diffraction together with scanning and transmission electron microscope observations. In the primary slip zone, we found markedly low contents of quartz and clay minerals and large amounts of amorphous particles ranging in size from submicrometer to several tens of nanometers. Milling and heating experiments with host-rock samples indicated that these mineralogical changes are due to comminution and frictional heat during slip. Moreover, the changes may affect slip behavior through a mechanism such as thermal pressurization assisted by clay-mineral dehydration. In addition, preservation of a high amount of amorphous fine particles can potentially be used to identify the slip zone of the latest earthquake on not only the Chelungpu fault but also on other faults.

キーワード: メカノケミカル, アモルファス
Keywords: mechanochemical, amorphous

台湾チェルンプ断層における炭質物の分光分析による熱履歴解析 Characterization of carbonaceous materials in the Taiwan Chelungpu fault by micro FTIR- Raman spectroscopies

前川 由佳¹; 廣野 哲朗^{1*}; 藪田 ひかる¹
MAEKAWA, Yuka¹; HIRONO, Tetsuro^{1*}; YABUTA, Hikaru¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹ Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震時の断層面での摩擦発熱履歴の評価は、地震の滑り挙動およびメカニズムの理解において極めて重要である。1999年台湾集集地震で活動したチェルンプ断層では、地震時の滑り面である黒色ガウジ帯において、摩擦発熱に起因すると考えられる無機炭素量の減少、帯磁率の増加、粘土鉱物の減少、微量元素組成および Sr 同位体比の異常が報告され、地震時に 400 °C 以上の発熱を経験したと示唆されている。しかし、正確な最高温度は未だ十分に解明されていない。そこで、熱に対して不可逆的に変化し温度履歴を敏感に反映する炭質物に着目し、地震による断層中の炭質物の分子化学構造の変化に基づく最高温度の評価について検討した。

本研究では、試料としてチェルンプ断層の PSZ (primary slip zone: 主滑り帯) を含む掘削試料中の炭質物を対象とし、赤外分光分析およびラマン分光分析を実施した。また、地震時の瞬間的な摩擦発熱を考慮した温度評価を行うため、摩擦発熱を模擬した母岩の炭質物の加熱実験 (昇温速度: 10, 500 K/min., 到達温度: 100-900 °C) および中-高速摩擦実験 (滑り速度: 0.01-1 m/s, 到達温度: 40-310 °C) を行い、断層試料と同様に赤外分光分析およびラマン分光分析を実施した。

その結果、剪断が集中した PSZ では上下の未変形な岩石の層と比較して、地震時の摩擦発熱を反映すると考えられる炭質物の部分的な分解を示唆する変化が認められた。さらに、その炭質物の分解の程度より最高到達温度は 700 °C 未満であると示唆され、先行研究の結果を考慮すると、PSZ における集集地震時の摩擦発熱温度は 400 °C 以上 700 °C 未満であると推定される。

キーワード: 台湾集集地震, 炭質物, 赤外分光分析, ラマン分光分析

Keywords: Taiwan Chi-Chi earthquake, carbonaceous materials, FTIR spectroscopy, Raman spectroscopy

ドレライト粉砕ガウジの低～高速摩擦特性 Frictional properties of ground dolerite gouges at low to high slip velocities

和田 純一¹; 北島 弘子²; 高橋 美紀²; 大橋 聖和¹; 井上 厚行¹; 金川 久一^{1*}
WADA, Jun-ichi¹; KITAJIMA, Hiroko²; TAKAHASHI, Miki²; OOHASHI, Kiyokazu¹; INOUE, Atsuyuki¹; KANAGAWA, Kyuichi^{1*}

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

¹ Graduate School of Science, Chiba University, ² Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan

鉄乳鉢で粉砕した粒径 500 μm 以下のドレライト試料を、自動瑪瑙乳鉢を使用して 10 分から 60 時間までさらに粉砕し、粉砕時間による摩擦特性の変化を検討した。粉末 X 線回折分析の結果、粉砕時間 10 分間の試料には非晶質物質は含まれず、粉砕時間の増加に伴って非晶質物質含有量が約 40 wt% まで増加した。また、6 時間以上粉砕した試料には、非晶質微粒子から成る球状粒子が多く含まれることが明らかとなった。この球状粒子は、火山豆石のように、非晶質微粒子が帯電と水分の吸着により凝着して形成されたものと考えられる。実際、熱重量分析により、粉砕時間が長く非晶質物質を多く含む試料ほど水分を多く含む (最大約 14 wt %) ことが明らかとなった。

上記ドレライト粉砕ガウジ試料について、室温、垂直応力 2 MPa、変位速度 20 $\mu\text{m/s}$ - 1.3 m/s の範囲で回転剪断実験を行った。1.3 cm/s 以下の低変位速度ではすべり面の温度は 70 °C 以下、定常摩擦係数は 0.59-0.75 で、同一変位速度では粉砕時間の長い試料ほど定常摩擦係数が大きくなる傾向が認められた。変位速度 4 cm/s ではすべり面の温度が 100 °C 以上に達し、定常摩擦係数は 0.60-0.66 で、粉砕時間による定常摩擦係数の差が小さくなった。変位速度 13 cm/s 以上ではすべり面の温度が 180 °C 以上に達し、変位速度の増加に伴って定常摩擦係数が大きく低下し、同一変位速度における定常摩擦係数は粉砕時間の長い試料ほど小さくなる傾向が認められた。

このような粉砕時間によるドレライト粉砕ガウジの摩擦強度の違いは、非晶質ガウジに吸着した水分量の差に起因すると考えられる。1.3 cm/s 以下の低変位速度では、すべり面の温度が 100 °C 未満のため非晶質ガウジに吸着した水分が保持され、水分を多く吸着した粉砕時間の長い試料ほど非晶質粒子間の毛管凝縮によって凝着力が高まり、摩擦強度が大きくなったと考えられる。一方、変位速度 4 cm/s では、摩擦発熱によりすべり面の温度が 100 °C 以上に達し、非晶質ガウジが脱水して非晶質ガウジ粒子間の凝着が失われたため、粉砕時間による摩擦強度の違いが小さくなったと考えられる。さらに、13 cm/s 以上の高変位速度では、非晶質ガウジからの脱水による水蒸気の発生速度がそのリーク速度より大きくなって、水蒸気がガウジ層内に保持されたため間隙圧が上昇し、その結果、水分を多く吸着していた粉砕時間の長い試料ほど間隙圧が大きく上昇して、定常摩擦強度が小さくなったと考えられる。

キーワード: ドレライト, 粉砕ガウジ, 摩擦特性, 非晶質ガウジ, 水分吸着

Keywords: dolerite, ground gouge, frictional properties, amorphous gouge, moisture adsorption

海陸地殻変動観測に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動モデル Modelling of the postseismic deformation of the 2011 Tohoku Earthquake based on land and seafloor geodetic observations

飯沼 卓史^{1*}; 日野 亮太¹; 木戸 元之¹; Sun Tianhaozhe²; Wang Kelin³; 太田 雄策⁴; 長田 幸仁¹; 藤本 博己¹; 稲津 大祐⁵

IINUMA, Takeshi^{1*}; HINO, Ryota¹; KIDO, Motoyuki¹; SUN, Tianhaozhe²; WANG, Kelin³; OHTA, Yusaku⁴; OSADA, Yukihito¹; FUJIMOTO, Hiromi¹; INAZU, Daisuke⁵

¹ 東北大学災害科学国際研究所, ² ヴィクトリア大学, ³ カナダ地質調査所, ⁴ 東北大学大学院理学研究科, ⁵ 防災科学技術研究所

¹ International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, ² Victoria University, ³ Geological Survey of Canada,

⁴ Graduate School of Science, Tohoku University, ⁵ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)に伴う余効変動は、本震発生から3年近くが経過した現在においても、陸上及び海底での地殻変動観測により、有意な大きさの変動として捉え続けられている。飯沼・他(2013, 地震学会秋季大会)は、GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測及び圧力計を用いた海底水圧観測によって推定された海底地殻変動データと、陸上GPS観測により得られた変位時系列データを共に説明するためには、余効すべりやプレート間の固着の回復といった、沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートとの境界で生じる摩擦・すべり現象に起因する弾性変形だけでなく、粘性緩和等の非弾性的な要因による変形のモデル化が不可欠であることを示した。これを踏まえ、より現実的な余効変動のモデルの構築のため、有限要素法を用いて、沈み込むスラブの形状や海洋性及び大陸性それぞれのマンツルの粘性の違いを考慮したモデルを作成し、これを用いて粘性緩和による変位を推定することとした。また、地殻変動観測により得られた変位時系列データから、有限要素モデルにより計算された粘性緩和による変位を差し引いたものが余効すべりによる変位であるとの仮定のもとに逆解析を行って、余効すべり分布の時空間発展の推定を行った。本講演では、これらの結果を紹介し、また、粘性構造の仮定の違いが余効すべり分布の推定に与える影響について議論を行う。

データおよび解析手法

GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測データ、自己浮上式の海底圧力計で記録された水圧データから推定される海底上下変位データ、並びに陸上のGPS連続観測点での変位時系列データを用いる。海底水圧データについて一次的な解析を行ったところ、取得されている期間については、すべての圧力観測点に関して共通の緩和時間を持つ対数関数を用いて観測データを近似できることが分かったので、各観測点での振幅を推定し得られた対数関数を用いて圧力計揚収後の水圧データを外挿的に補完した。解析期間中に発生した地震に伴う変位については、気象庁のCMTカタログを用いて期待される変位量を計算し、測地学的観測から求められた変位時系列データからこれを差し引くことで補正を行った。

粘性緩和による変位の見積りには有限要素法を用いた。沈み込むスラブの形状、海洋性プレートと大陸性プレートそれぞれのマンツルの粘性の違い等を反映させて、また、マンツルウェッジ部分には高粘性領域を設定した。海底地殻変動データを用いて推定されたIinuma et al. (2012)の地震時すべりモデルを初期値として与えて粘性流動を駆動させることによって、粘性緩和から期待される変位時系列を作成した。

これらを観測された変位時系列から差し引いて、余効すべりによると思われる成分のみを、Yagi and Kikuchi (2003)に基づく時間依存逆解析手法を用いて解析し、余効すべりの時空間発展を推定した。

結果

有限要素法による計算の結果を見ると、西向きの変位を示していた海底観測点の動きは粘性緩和によって十分説明可能である一方、岩手県南部から茨城県北部にかけての陸上GPS観測点においては、観測された値よりも大きな東向きの変位が計算されている。そのため、今度は陸域における西向きの変位を余効すべりによって説明する必要が生じてしまっている。この変位時系列を逆解析すると正断層型のすべりが分布する領域が現れる。正断層型のすべりが推定されること自体は、水平成層構造を仮定して粘性緩和による変位を見積もった場合と同じであるが、その位置は大きく異なる。水平成層構造を仮定した場合に地震時すべりが大きかった領域内に推定されていたのに対し、不均質構造を仮定して有限要素法を用いて計算した場合には、宮城県沖の沖合、地震時すべりが大きかった領域よりもやや深いところに正断層型のすべりが分布する。正断層型のすべりが推定されていることは、プレート間の固着がそこで生じていると考えることができるため、その位置及びすべりレートを精度よく見積もることはプレート境界の摩擦特性を考えるに非常に重要である。ゆえに、その推定が粘性緩和の見積りに大きく依存してしまうのは避けるべき問題であり、今後、より尤もらしい粘性緩和による変位を推定するため、モデルを現実の構造に即して高度化していく必要がある。当日の講演において

SSS32-06

会場:315

時間:5月1日 10:15-10:30

は、最新のモデルを用いた解析結果を紹介する予定である。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 粘性緩和, 余効すべり, GPS, 海底地殻変動

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Postseismic deformation, Viscoelastic relaxation, Postseismic slip, GPS, Seafloor crustal deformation

大型二軸摩擦実験によって示された岩石摩擦のスケール依存性 Scale dependency of rock friction strength revealed by large scale biaxial friction experiment

山下 太^{1*}; 福山 英一¹; 溝口 一生²; 滝沢 茂³; 川方 裕則⁴

YAMASHITA, Futoshi^{1*}; FUKUYAMA, Eiichi¹; MIZOGUCHI, Kazuo²; TAKIZAWA, Shigeru³; KAWAKATA, Hironori⁴

¹ 防災科学技術研究所, ² 電力中央研究所, ³ 筑波大学, ⁴ 立命館大学

¹NIED, ²CRIEPI, ³Tsukuba Univ., ⁴Ritsumeikan Univ.

我々は自然地震のスケール ($\sim 10^3$ m) と室内実験のスケール ($\sim 10^{-2}$ m) の間のギャップを埋める目的で、メートルサイズの岩石試料を用いた大型二軸摩擦実験を実施した。岩石試料として1組の直方形インド産ギャブロを用い、その接触面積(模擬断層面積)は $1.5 \times 0.1 \text{ m}^2$ であった。実験は 1.3, 2.7 および 6.7 MPa の垂直応力下において 10^{-4} から 3×10^{-2} m/s の載荷速度でおこなわれた。垂直およびせん断荷重はロードセルを用いて測定した。以後、測定したせん断荷重を垂直荷重で除した値を摩擦係数と呼ぶ。回転せん断摩擦試験機を用いた室内実験により、岩石の摩擦係数は高いすべり速度領域においてすべり速度依存性を持つことが示されている(例えば Di Toro *et al.*, 2011, Nature)。我々は本実験においてメートルサイズの岩石試料が同様の摩擦特性を持つことを確認した。すなわち、摩擦係数は低い載荷速度 (10^{-4} から 10^{-3} m/s) においては 0.75 でほぼ一定であるがおよそ 10^{-2} m/s を越えると急激に低下することを確認した。メートルサイズの岩石試料を用いた実験でこのような速度弱化特性が確認されたことは世界で初めてである。ただし、メートルサイズ試料の摩擦係数は垂直応力に対しても弱い依存性を示すことが確認された。このことはすべり速度が摩擦特性を支配する唯一の要素ではないことを意味している。そこで、垂直応力の寄与も含む、仕事率に対する依存性を調べた。これまでの室内実験では、摩擦係数は低い仕事率ではほぼ一定であるが自然地震の条件に近づくにつれて低下することが示されている(例えば、Di Toro *et al.*, 2011; Mizoguchi and Fukuyama, 2010, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.)。メートルサイズ試料での摩擦係数と仕事率の関係を調べたところ、摩擦係数が 10^{-2} MJ/m²s 以上の仕事率において急激かつ明瞭な減少を示すことが明らかとなった。この明瞭な依存性は、摩擦特性がすべり速度ではなくむしろ仕事率に依存していることを示している。Di Toro *et al.* (2011) は、仕事率と断層面上の温度上昇率は比例関係にあり、摩擦仕事によってつくられた摩擦熱が岩石鉱物の物理化学的遷移とそれによる弱化を引き起こしていると主張している。本実験においても同様のメカニズムが働き摩擦強度を下げていていると考えられるが、メートルサイズの摩擦係数は小さな試料を使って推定された摩擦係数に比べ1桁小さな仕事率から低下が始まっている。我々は、この差異が断層面上のせん断応力不均質に起因していると予測し、大型二軸摩擦試験機によって断層面上に作り出される不均質な応力分布と、その応力条件下での仕事率に依存する巨視的な摩擦弱化特性を推定した。さらに我々は、さらなる応力不均質が存在する場合の弱化特性の推定もおこなった。これらの推定から、応力不均質が強いほど小さな仕事率で巨視的な摩擦係数が低下することを確認した。一般にスケールが大きくなるにつれて空間的不均質性が強くなる傾向にあることを考慮すると、岩石の摩擦特性はスケール依存性を持つ可能性があると考えられる。

キーワード: 岩石摩擦, 二軸摩擦実験, スケール依存性, 仕事率

Keywords: Rock friction, Biaxial friction experiment, Scale dependency, Work rate

変堆積岩中のグラファイトを含むシュードタキライト: グラファイトの酸化による
CO₂脱離の示唆
Graphite-bearing pseudotachylytes in metasediment: Implication for CO₂ degassing by
oxidation of graphite

中村 佳博^{1*}; Madhusoodhan Satish-Kumar²; 豊島 剛志²
NAKAMURA, Yoshihiro^{1*}; MADHUSOODHAN, Satish-kumar²; TOYOSHIMA, Tsuyoshi²

¹新潟大学 自然科学研究科, ²新潟大学 理学部地質科学科

¹Graduate School of Science & Technology, Niigata University, ²Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

Graphite in fault rocks has important role in controlling the redox states in COH fluid, and many researchers have pointed out that the behavior of fluid in pore water or hydrous minerals dramatically change the physical and chemical property of fault rocks. Recently, the CO₂ degassing, form possible biogenic sources, along the faults is monitored in various active faults (e.g. Lewickie and Brantley, 2000). It is expected that the behavior of graphite in fault rocks play a key role about the fluid composition and the physicochemical properties. Here we present a detailed analysis of graphite found in pseudotachylyte and discuss the relationship between graphite and fluid during earthquake activity.

Graphite-bearing pseudotachylyte in Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan was examined using SEM, EMPA, and XRD. In pseudotachylyte-bearing cataclasite, melt-induced textures such as biotite microlites, shell textures of Fe-oxide, flow textures, spherulites and vesicles in Fe-oxide are observed. On the basis of microtextures, mineral assemblages of melted and survived minerals, pseudotachylytes are divided into two types; Pst I and Pst II. The matrix of Pst I is composed of sanidine, hematite and vesicles in Fe-oxide, and plagioclase and quartz are remained. These observations suggest that they are solidified from silicate melts by dehydration of biotite at around 700 - 1150 degree Celsius based on the experimental data. In addition, we can also deduce the stability of biotite and graphite in silicate melts of Pst I from the reaction of biotite equilibria on the T-fO₂ plane at 200MPa based on the experimental data of graphite and biotite. Mineral assemblages of sanidine, hematite and volatile in vesicles are stable only in high fO₂ fields, suggesting fO₂ in the range of over 10⁻¹¹ at around 700 degree Celsius by frictional melting of Pst I phase. In this phase, graphite in Pst I is unstable and will be converted to COH fluid in silicate pseudotachylyte melts. On the other hand, in Pst II matrix, these phyllosilicates but also quartz, plagioclase and apatite are found to be melted or have formed embayment textures, whereas only zircon has survived. These data indicate that the Pst II has formed at a peak temperature of around 1200 - 1400 degree Celsius by the breakdown of plagioclase, sulfide and apatite. The graphite content in Pst II decrease from 1.5 wt.% to 0.9 wt.% with increasing degree of frictional melting and alter the δ¹³C values, which shows wide range of δ¹³C values between -20.9 and -33.1 permil, when compared with the δ¹³C values of graphite from associated fault rocks and host metamorphic rocks (-24.8 +/- 0.67 permil). These data suggest that the host graphite has been converted to the COH fluids and then a part of fluid deposited graphite are re-precipitated from COH fluid during isobaric cooling and other carbon expelled as COH fluid due to the oversaturated melt.

Thus it is evident that frictional melting and dehydration of sheet silicates during coseismic slip generates CO₂ gas by the oxidation of carbonaceous materials. During the transformation of cataclasite to pseudotachylyte the total carbon content has decreased by about 0.5 wt.%. Assuming a rock density of 2.7g / cm³, the fusion of 10⁻³ m³ (i.e. 1mm thickness × 1m² fault plane) of cataclasite into Pst II releases 50g of excess CO₂. The estimation of CO₂ degassing in this study is comparable to those reported by Famin et al. (2008). Thus, not only carbonates but also organic matters, including graphite and carbonaceous materials in crustal rocks, are potential to be a source of CO₂ by frictional melting, and the release of CO₂ into fault planes may drastically change the dynamic properties of flash fluid pressure and frictional properties of fault planes during seismic activity.

Reference: Famin. et al., 2008. EPSL, 265, 487-497. Lewicki. & Brantley., 2000. GRL, 27(1), 578.

Keywords: Graphite, Pseudotachylyte, Carbon isotopes, Frictional melting, CO₂ degassing

断層面上のナノ粒子と炭素質薄膜：沈み込みプレート境界巨大分岐断層の例 Nanograins and carbonaceous film on a fault surface: an example from a fossil megasplay fault in the subduction zone

北村 有迅^{1*}; 木村 学²; 亀田 純⁴; 瀬藤 佑衣⁵; 山口 飛鳥⁶; 鍵 裕之⁵; 浜橋 真理²; 福地 里菜²; 濱田 洋平³; 藤本 光一郎⁷; 橋本 善孝⁸; 斎藤 実篤³; 川崎 令詞²; 高下 裕章²; 清水 麻由子²; 藤井 岳直⁹
KITAMURA, Yujin^{1*}; KIMURA, Gaku²; KAMEDA, Jun⁴; KOUKETSU, Yui⁵; YAMAGUCHI, Asuka⁶; KAGI, Hiroyuki⁵; HAMAHASHI, Mari²; FUKUCHI, Rina²; HAMADA, Yohei³; FUJIMOTO, Koichiro⁷; HASHIMOTO, Yoshitaka⁸; SAITO, Saneatsu³; KAWASAKI, Ryoji²; KOGE, Hiroaki²; SHIMIZU, Mayuko²; FUJII, Takenao⁹

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ³ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, ⁴ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, ⁵ 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, ⁶ 東京大学大気海洋研究所, ⁷ 東京学芸大学, ⁸ 高知大学, ⁹ 株式会社島津製作所

¹Dept. Earth and Environmental Sci., Kagoshima University, ²Dept. Earth and Planet. Sci., University of Tokyo, ³IFREE, JAMSTEC, ⁴Dept. Nat. Hist. Sci., Grad. Sch. Sci., Hokkaido University, ⁵Geochem. Research Center, University of Tokyo, ⁶Atmosph. Ocean Research Institute, University of Tokyo, ⁷Tokyo Gakugei University, ⁸Kochi University, ⁹SHIMADZU Corp.

断層面の摩擦特性は地震性滑りの挙動を左右する重要な要素である。近年では摩擦過程はスケール依存性を持つことも示唆されている [Li and Kim, 2008]。このため断層表面の様々なスケールにおける構造観察は極めて重要になる。断層面のラフネスはキロメートル?マイクロメートルのスケールでフラクタル性を持つと考えられていたが [e.g. Candela et al., 2009], 例えば鏡肌を持つ断層面の例ではナノメートルスケールではフラクタル性が成立しない [Siman-Tov et al., 2013]。このような断層面では数十ナノメートルの粒子が表面を覆っており、可視光の波長以下の凹凸となるために光沢を生じると考えられている。そこで本発表では、延岡衝上断層掘削計画 (NOBELL) で回収されたコア中の主断層近傍の条線のついた一断層面の表面を詳細に観察した結果を報告する。

NOBELL は 2011 年 7/9 月に宮崎県延岡市内において深度 255 m までのコアを回収した。約 41 m の深度で延岡衝上断層を貫通し、コアの記載や物理検層データから上下盤の特徴的な差異が明らかになった [Hamahashi et al., in revision]。本研究では主断層直下の条線が発達し光沢を持つ断層面の表面を、走査型レーザー顕微鏡・走査型プローブ顕微鏡の複合機 (SHIMADZU SFT-3500) を用いて観察した。また同試料表面をラマン分光法によって分析した。

プローブ顕微鏡像では断層表面に直径が数十ナノメートルの粒子状物質が観察された。この表面は 10 マイクロメートル四方の撮影領域でわずか 80 ナノメートルの起伏しかない極めて平滑な面であった。レーザー顕微鏡の XZ 計測から表面下約 1 マイクロメートル付近に界面が観察され、また暗色部の縁部に干渉縞が観察された。これらのことから暗色部は約 1 マイクロメートル程度の薄膜様物質に覆われていることが示唆される。ラマン分光分析の結果より非晶質炭素の存在が示唆され、断層表面から得た粉末試料の有機元素分析によっても炭素の存在が確かめられた。オージェ電子分光法による分析によって最表面への炭素の濃集が確認された。

以上の結果から、本試料は断層面の摩擦過程の進行により表面がサブマイクロメートルスケールまで平滑に琢磨され、その表面を炭素質薄膜物質が覆っている構造を取っていると考えられる。断層面の形状や表面のナノスケール微細構造、化学組成を詳細に明らかにすることで、断層の動的弱化過程の理解を深めることに貢献できる。

キーワード: 延岡衝上断層掘削計画 (NOBELL), 沈み込み帯, 付加体, 四万十帯, 断層弱化, 断層鏡面

Keywords: Nobeoka Thrust Drilling Project, subduction zone, accretionary prism, Shimanto belt, fault weakening, fault mirror

Dynamic backthrust branching: role of barriers, and implications Dynamic backthrust branching: role of barriers, and implications

XU, Shiqing^{1*}; FUKUYAMA, Eiichi¹; BEN-ZION, Yehuda²; AMPUERO, Jean-paul³
XU, Shiqing^{1*}; FUKUYAMA, Eiichi¹; BEN-ZION, Yehuda²; AMPUERO, Jean-paul³

¹NIED, ²University of Southern California, ³California Institute of Technology
¹NIED, ²University of Southern California, ³California Institute of Technology

Increasing evidence indicates that backthrusts may become active during or after megathrust ruptures in subduction zones, such as in Chile and Sumatra (Melnick et al., 2012; Singh et al., 2011). Previous studies of relevant mechanisms mainly focused on the interaction between forethrusts and the megathrust. Here we investigate through dynamic rupture simulations how backthrusts may be activated by megathrust ruptures in subduction zone environments. Assuming a single backthrust branch that is backward inclined to the compressional side of a continuous main fault, our results show that (1) fast speed and long propagation distance of the main rupture favor the activation of backthrust; (2) the outward propagation of the activated branch rupture interacts with the main fault mainly in the backward direction, while the tapered slip towards the branch end at the junction affects the main rupture behavior around the junction. We further assume an effective barrier for the main fault at the junction, motivated by the previous studies that barriers of various types (e.g. sharp fault bend, fault end, and transition region with increased basal friction) can also generate backthrusts during the long-term quasi-static process. Compared to the case without barrier, one prominent effect of the barrier is to arrest or delay the forward propagation of the main rupture, such that a resultant backward stress lobe as discussed in Xu and Ben-Zion (2013) can load the backthrust branch over a considerable time. This is particularly important for rupture activation along relatively immature backthrusts within sediments, where the nucleation time leading to the spontaneous propagation phase could be long, due to the large effective D_c , low frictional strength drop, or surface roughness. Indeed, our additional results confirm that the barrier model, although not always necessary, is more favorable for the activation of backthrusts with increased dynamic friction.

Our study has several implications: (i) it agrees with the quasi-static model based on the critical taper theory and limit analysis (Cubas et al., 2013) that an increase of basal friction towards the toe may statistically favor the activation of backthrusts near the up-dip limit of megathrust ruptures; (ii) there are also possibilities that backthrusts can still be activated by a propagating rupture, therefore the dynamic critical taper theory developed by Wang and Hu (2006) needs to be improved. In fact, not only the region near the up-dip limit of the seismogenic zone can be pushed into a critical state, successive region around the propagating rupture front within the seismogenic zone can also be temporarily stressed to failure and may even sustain a failure propagation along preexisting branches; (iii) it provides a specific example of compressional-side antithetic branching that can support the early speculation of fault behavior at junctions (King, 1986; Andrews, 1989).

キーワード: earthquake branching, friction of fault zones, fault barrier
Keywords: earthquake branching, friction of fault zones, fault barrier

炭質物断層温度計の可能性- 1 : 反射率 A possibility of a CM fault thermometer Part 1: Reflectances

岡本 汐理¹; 星野 健一^{2*}

OKAMOTO, Shiori¹; HOSHINO, Kenichi^{2*}

¹ 広島大学理学部, ² 広島大学理学研究科

¹Fac. Sci., Hiroshima Univ., ²Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.

炭質物の熟成(石炭化)のカイネティクスは Burnham らの一連の研究で詳細に解析されている(例えば, Braun and Burnham, 1987). Burnham and Sweeney (1989) と Sweeney and Burnham (1990) は, 石炭化の脱水・脱ガス反応の速度則に活性化エネルギー分布モデルを導入し, この速度則から導いた反応進行度(F)と炭質物の油浸反射率(%Ro, パーセント表記)との相関を示した。彼らはまた, この速度則が実験(1C/週), 火成岩の貫入(1C/日), 地熱系(10C/百年)および埋没続成作用(1C/千万年)の昇温率に適用出来ると述べている。

一方で, Huang (1996) は, 炭質物の%Ro は数日-数十日間の加熱実験でも上昇することを示し, 実験結果から t (秒) のべき数が 0.078 であるべき速度則を導いた。また, Muirhead et al. (2012) は, 熱分解装置によるマーチソン隕石中の炭質物の数秒-数十秒間の加熱によるラマンスペクトルの R1 の変化から, t のべき数が温度に依存するべき速度則を提唱した。しかしながら, これらのべき速度則は, 岩石や隕石から抽出した裸の炭質物の加熱実験に基づいている。筆者らの加熱実験によれば, 加熱後の岩石の表面にある炭質物の R1 と岩石中の炭質物の R1 の変化は著しく異なることが明らかとなったため(詳細は次講演(-2)), 上記のべき速度則は地質試料の温度履歴解析には適用出来ないであろう。そこで筆者らは次の実験を行ない, 炭質物による断層温度計の可能性を検討した。

四万十帯から採取した泥岩の岩片をアルゴン雰囲気のカプセルに入れ, 300, 350, 450, 550, 600 及び 700 °C で, 2, 5, 13 および 34 分間, 加熱炉で加熱した。使用した加熱炉は, 設定温度に上昇するまで 10 分程度かかり, また室温までの冷却に数分かかるため, これらの加熱時間は, 上記温度の継続時間を示している。

これらの加熱試料の表面を削り取った後に研磨した岩片を用いて, 反射率および次講演(-2)のラマンスペクトルの測定を行なった。空気中での反射率(Ra, 非パーセント表記)は, 反射顕微鏡像の RGB 解析による G の階調を標準試料(SiC, GGG, YAG など)の階調と比較する事により求めた。

加熱前の 2 つの岩片中の炭質物の Ra の平均は 0.093 と 0.106 で, 前者の%Ro は 1.99 であった。上記の Sweeney and Burnham (1990) の相関によれば, これに対応する F は 0.618 である。450 °C 以下の加熱試料では, Ra はほとんど変化しない。この結果は, 300 °C, 350 °C および 450 °C で 34 分間の加熱 T-t 経路に沿ってシミュレートした F がそれぞれ 0.618, 0.618 および 0.622 であり, ほとんど進行しないことと調和的である。

一方で, 550 °C, 600 °C および 750 °C で 34 分間加熱した試料の Ra は, それぞれ 0.121, 0.127 および 0.151 と上昇した。これらの T-t 経路から求めた F は, それぞれ 0.742, 0.811 および 0.850 である。また, 750 °C の 2, 5 および 13 分間の加熱試料の Ra は, それぞれ 0.147, 0.150 および 0.150 で, 上記の同温での 34 分間の加熱後の Ra とほとんど変わらない。このことはまた, これら 750 °C の加熱 T-t 経路から求めた全ての F が 0.850 であり, 彼らの速度則の上限の反応進行度であることと調和的である。

様々な熟成度の CM を含む岩石のさらなる加熱実験が必要であるが, 上記の結果は, 炭質物の熟成度に基づく地震温度計の高い可能性を示している。

本加熱実験による炭質物の熟成のラマン分光分析結果については, 次講演(-2)で報告する。

キーワード: 炭質物, 温度計, 断層, 反射率

Keywords: carbonaceous matter, thermometer, fault, reflectance

炭質物断層温度計の可能性-2 : ラマンスペクトル A possibility of a CM fault thermometer Part2: Raman spectra

岡本 汐理^{1*}; 瀨瀬 佑衣²; 清水 以知子³; 星野 健一⁴
OKAMOTO, Shiori^{1*}; KOUKETSU, Yui²; SHIMIZU, Ichiko³; HOSHINO, Kenichi⁴

¹ 広島大学理学部, ² 東京大院 理, ³ 東京大院 理, ⁴ 広島大学理学研究科
¹Fac. Sci., Hiroshima Univ., ²Univ. Tokyo, Grad. Sch. Sci., ³Univ. Tokyo, Grad. Sch. Sci., ⁴Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.

炭質物のラマンスペクトルから得られるいくつかのパラメータは、地質温度計として広く使われてきた(例えば, Beyssac et al., 2002)。一方で, Huang (1996) と Muirhead et al. (2012) は、岩石から抽出した炭質物の加熱実験から、それぞれ炭質物の熱成熟度を示す油浸反射率とラマンスペクトルの R1 比の変化について、加熱温度・時間に関するべき速度則を提唱している。

そこで本研究では、ラマンスペクトルにより示される炭質物の熱成熟度に基づく断層温度計の可能性を探るため、ビトリナイト反射率の測定により続成温度が 180 °C と見積もられている四万十帯安芸層群(北村ほか, 2014) から採取した泥岩試料の加熱実験を行なった。試料は、300, 350, 450, 550, 600 および 700 °C で、それぞれ 2, 5, 13 および 34 分間加熱した(詳細は前講の-1 参照)。加熱試料の表面の炭質物と試料内部の炭質物のラマンスペクトルの対比から、前者の熟成は後者より早く進行していることが確認された。したがって、炭質物の熟成度を断層温度計として用いるためには、試料内部の炭質物を分析しなければならない。

ところで、最高温度・最長時間の加熱後の炭質物の micro-XRD 分析では、石墨のピークが確認されなかった。したがって、本加熱実験による炭質物の変化は、石墨化ではなく石炭化であると考えられる。

炭質物のラマンスペクトルには、いわゆる G と D の二つのバンドのピークが現れる。加熱試料のラマン分光分析から、これらのバンドから得られるいくつかのインデックスが、低温(300-450 °C)の加熱実験後でも顕著な変化を示すことが認められた。一方で、これらの試料中の炭質物の反射率は、加熱前とほぼ同様に変化はみられない(前講演の-1 参照)。

G バンドと D バンドのピーク位置は、すべての実験温度において、加熱時間が長くなるにつれ、より高波数側にシフトする。しかしながら、これらの位置は温度の上昇に伴い単調にシフトはせず、450 °C までは高波数側にシフトし、550 °C で低波数側に、更に高温では再び高波数側にシフトする。

両バンドのピーク位置の波数差も、加熱温度・時間に対応して変化する。最長時間(34 分)の加熱試料では、この差は高温ほど小さくなるが、同様の傾向は他の加熱時間の試料では認められない。

G バンドのピークの強度と半値幅の比(Gif)と D バンドのピークのそれ(Dif)はそれぞれ、300 °C-450 °C までと 550 °C-750 °C の間では高温ほど減少する傾向を示すが、450 °C-550 °C 間では増加する。

以上述べたように、加熱温度と時間に対応して単調に変化するインデックスは未だ見出されていないが、これらのインデックスの加熱温度・時間に対する敏感さは、スペクトルにより示される炭質物の熱成熟度が断層温度計として利用できる可能性を十分に示していると思われる。また、上記のインデックス変化の粒径依存性や、粗粒な炭質物のリムと細粒な炭質物の類似性は、粒径に依存する温度計、即ち、加熱温度と時間を同時に推定出来る温度-時間計の可能性も示している。

キーワード: 炭質物, 温度計, 断層, ラマンスペクトル
Keywords: carbonaceous matter, thermometer, fault, Raman spectra

日本海溝プレート境界断層の鉱物学的特徴と発達過程 Mineral characteristics of the plate-boundary fault at the Japan Trench

亀田 純^{1*}; 清水 麻由子²; 氏家 恒太郎³; 廣瀬 丈洋⁴; イカリ マット⁵; レミッティ フランチェスカ⁶; モリ ジム⁷; チェスター フレッド⁸; 木村 学²

KAMEDA, Jun^{1*}; SHIMIZU, Mayuko²; UJIIE, Kohtaro³; HIROSE, Takehiro⁴; IKARI, Matt⁵; REMITTI, Francesca⁶; MORI, James⁷; CHESTER, Frederick⁸; KIMURA, Gaku²

¹北海道大学, ²東京大学, ³筑波大学, ⁴海洋研究開発機構高知コア研究所, ⁵ブレーメン大学, ⁶モデナ大学, ⁷京都大学防災研究所, ⁸テキサス A&M 大学

¹Hokkaido University, ²University of Tokyo, ³Tsukuba University, ⁴JAMSTEC, ⁵University of Bremen, ⁶Universita di Modena, ⁷kyoto University, ⁸Texas A&M University

The rupture and slip of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) propagated along the plate-boundary megathrust and caused a huge tsunami. In order to elucidate the physical mechanisms responsible for such unexpectedly large slip of the fault, the IODP Exp. 343, the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) was carried out one year after the earthquake. It succeeded in recovery of material from the plate boundary shear zone. We have examined how mineralogical properties vary through a depth-section including the plate boundary fault rock.

At the drill site (C0019E) where the large fault slip (>50m) occurred, a plate boundary shear zone was identified around 820 mbsf. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that abundance of smectite is markedly higher within the fault (60-80 wt.%) than in the surrounding host rocks, suggesting the shear zone material had a low intrinsic friction coefficient. Laboratory experiments on these materials demonstrated very low frictional state under various sliding conditions (Ujiie et al., 2013; Ikari et al., submitted)

In comparison, we also examined the mineralogy of reference material recovered on the outer rise of the Japan Trench (Site 436) during DSDP Leg 56. XRD analyses on the continuous series of cores found a marked anomaly in smectite abundance in the topmost ~5m section in the pelagic clay layer. Such a mineralogical feature compares well to that observed in the JFAST cores, and the smectite-rich horizon in the incoming sediments is inferred to be the localized deformation zone (decoulement) when it arrives at the Japan Trench.

キーワード: 日本海溝, スメクタイト, 遠洋性粘土, 東北沖地震

Keywords: Japan Trench, smectite, pelagic clay, Tohoku-oki earthquake

オリビンの衝撃圧縮実験 -その3: 摩擦溶融に先んじて粉砕が起こった! Shock compression experiment of olivine- Part 3: pulverization occurred before frictional melting

小畑 正明^{1*}; 真下 茂²; 陳 黎亮²; 安東 淳一³; 山本 貴史³; 上田 匡将¹
OBATA, Masaaki^{1*}; MASHIMO, Tsutomu²; CHEN, Liliang²; ANDO, Jun-ichi³; YAMAMOTO, Takashi³; UEDA, Tadamasa¹

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 熊本大学パルスパワー科学研究所, ³ 広島大学大学院理学研究科
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Institute of Pulsed Power Science, Kumamoto University, ³Graduate School of Science, Hiroshima University

地震波は地下深部で発生した破断面 (shear fracture, 断層) の急速拡大先端部付近での急速な剪断応力低下と急速滑りによって発生する。先端部での急速な滑り弱体化は物質のいかなる状態変化に対応するのかということは地震学の物質科学的な側面として重要な研究課題である。この滑り弱体化についてはこれまで、(1) frictional melting and lubrication, (2) thermal pressurization, (3) flash heating and melting, (4) powder lubrication, 及びそれらの組み合わせが提案されてきた。これまで断層の剪断摩擦特性の実験的研究は高速回転摩擦試験器を用いた研究が主流であったが、この方法では、「断層面」はあらかじめ用意されているので、破断面の形成過程 (shear fracturing) そのものは再現され得ない。またサンプルにかけられる封圧が高々数十 MPa に限られるという技術的制約もあった。

これを補完する方法として、我々は、特に中・深部地震を念頭において、衝撃圧縮により、サンプルに瞬間的に一軸圧縮をかけることで剪断面をあらたに作り出しサンプルを回収して微細構造を観察するという実験を行ってきた。用いた装置は熊本大学衝撃・極限環境研究センターの一段式火薬銃である。この装置では飛翔体の素材とサイズ、飛翔体のスピード (1~2km/s) をコントロールすることで鉄カプセルに封入したサンプルに瞬間的に 10~30GPa の高圧をかけることが可能である。実験には天然のオリビン単結晶 (Fo94) を用いた。本実験の衝突時の衝撃波速度は約 7km/s, 粒子速度は約 1km/s, 圧縮時間は 0.5 マイクロ秒程度である。なおこの圧力範囲では断熱圧縮による温度上昇は限られており (せいぜい数百度)、断熱圧縮のみによってはオリビンの溶融は起こらない。圧縮実験後回収したサンプルの微細構造を光学顕微鏡, SEM, TEM によって観察したところ衝突方向に斜交してかんらん石結晶内に多数の剪断面が発達していることが認められた。圧縮を受けたオリビンには広域的に波動消光が発達すると共に局所的に粉砕が顕著である。破碎粒子は鋭角的で角張っており粒子同士は大きくはくずれしていないことから破碎箇所では顕著な剪断運動は起こっていないと判断できる。これに対して、マクロな剪断面 (断層面) はシャープで最大 0.5 mm の滑り変位が認められる。剪断面の壁にも亀裂は発達しているが、それに加えて局所的に多数の粒子からなるスポンジ状の物質が付着しているところが見つかった。このスポンジ状部分を、FIB で切り出し TEM 観察を行ったところ、断層面壁は次のような累帯構造をしていることが確認出来た。一番内側のオリビン単結晶部は [001] ラせん転位が密に発達し、複雑に絡み合った構造をいている。この転位構造が上記波動消光の原因となっていると考えられる。断層面から内側の 25 ミクロン幅のゾーンでは細粒多結晶化しており (粒子サイズ 200-300 nm), 最外縁部 2 ミクロン幅ゾーンで数百ナノメートルのやや丸みを帯びたオリビン粒子が多数発達し、粒間をオリビン組成のガラスが充填している。また細粒オリビンの縁がガラス化に伴って大きく内側に湾曲している場所も確認できる。これらガラスの存在は、オリビンが部分的にかつ局所的に溶融したことを示す。これらのオリビン微粒子にも単結晶部、多結晶部で見られたと同種の転位構造が残っていることから、このオリビン微粒子はメルトから晶出したものではないと結論できる。多結晶部と溶融部が断層面に沿っていることから多結晶化と溶融が剪断運動によって出来たことは間違いないが、ここで重要なことは溶融に先立って転位構造の発達と粉砕が起こったことである。しかもこれらの全プロセスは時間にして 0.5 マイクロ秒という極超短時間に起こったことである。これらの現象は衝突によって発生した衝撃波がサンプルを通過に伴って形成していった剪断面 (最前線) 先端部付近で起こった現象と考えられ、ここに Reches and Dewers (2005) の考察と計算結果が適用できると我々は考える。

本実験では剪断面形成が衝撃波通過によるものであるという点で天然の地震の状況とは異なるが、その他の状況は相似的であると言える。この結果はシュードタキライトの形成プロセスの再考も促すものである。

文献: Reches and Dewers (2005) Gouge formation by dynamic pulverization during earthquake rupture. EPSL 235, 361-374.

キーワード: 衝撃圧縮実験, かんらん石, 摩擦溶融, 粉砕, 断層, 地震

Keywords: shock compression experiment, olivine, frictional melting, pulverization, fault, earthquake

間隙水圧下におけるドレライトの高速摩擦挙動 High-velocity frictional behaviors of dolerite under controlled pore-water pressure

東郷 徹宏^{1*}; 嶋本 利彦¹; 馬 勝利¹; 姚 路¹
TOGO, Tetsuhiro^{1*}; SHIMAMOTO, Toshihiko¹; MA, Shenli¹; YAO, Lu¹

¹ 中国地震局地質研究所

¹Institute of Geology, China Earthquake Administration

地震時の断層の摩擦挙動を測定するために、過去 20 年間にわたって岩石の摩擦やガウジを用いた高速摩擦実験が多数行われ、高速領域では顕著な弱化が起ることが示されている (例えば Di Toro et al., 2011, *Nature*)。また、近年では含水条件下での高速摩擦実験が行われ (例えば Ujiie and Tsutsumi, 2010, *GRL*; Faulkner et al., 2011, *GRL*)、室内の乾燥条件での摩擦実験とは大きく異なる挙動が示されているものの、これらの含水条件下での実験は流体圧のシールが行われていない排水条件での実験である。そのため、沈み込み帯などの流体が豊富に存在する条件下での摩擦挙動は解明されておらず、流体圧をコントロールした摩擦試験機の開発と摩擦挙動の測定が求められている。

そこで、発表者らは中国地質研究所の低速・高速摩擦試験機 (株式会社丸井製、MIS-233-1-76) に圧力容器を設置し、間隙水圧下で低速～高速摩擦実験を試みている。試験機のキャパシティーとしては、内径 15 mm、外径 40 mm の円筒形試料を使用した場合、流体圧は 35 MPa までコントロールでき、有効垂直応力は最高で 9 MPa、変位速度は 60 mm/年から 2 m/秒までが可能である。また、軸力装置を現在使用している 10 kN ベローシリンダー (空気圧アクチュエーター) から 100 kN 油圧シリンダーへ変更すれば 10 倍の有効垂直応力を載荷することが可能である。

本発表の実験では中国山西省産の石英ドレライトを使用し、岩石表面どうしの摩擦挙動の測定を行った。実験条件は有効垂直応力を 0.13～1.07 MPa、変位速度を 1 mm/s、1 cm/s、10 cm/s、1 m/s に変えてそれぞれ実験を行った。また、流体には水と窒素を用いた場合の二通りの実験を行い摩擦挙動の比較を行った。窒素を用いた実験では軸力をおよそ 1 kN に設定し、窒素ガスの圧力を 0 MPa から 5 MPa にまで変えることによって有効垂直応力を変えて実験を行った。水を用いた実験では、岩石を純水の中に浸した状態で設置し、高圧窒素ガスを圧力容器内に導入することによって流体圧を加えた。この窒素ガスは流体圧の圧媒体として働くだけでなく、実験中の流体圧変化に対するバッファーとしても機能する。

実験の結果、水を流体として用いた場合には、低速領域 (<10 cm/s) では定常摩擦係数は 0.4～0.8 の間になるのに対して、速度の増加とともに緩やかに摩擦係数が低下し 1 m/s では摩擦係数は 0.3～0.5 に低下することが明らかになった。しかしながら、Di Toro et al. (2011, *Nature*) の乾燥条件の結果と比較すると、高速領域 (1 m/s) では摩擦係数が高く、水の存在によって速度弱化が抑制される事が明らかとなった。また、窒素の雰囲気下の実験では Reches and Lockner (2010, *Nature*) で認められた sub-seismic な速度領域 (10～100 mm/s) での速度強化と同様の挙動が顕著に認められる。しかしながら、一方の含水条件下の実験では sub-seismic 領域での摩擦強化は認められず、これまでの乾燥条件での摩擦挙動とは大きく異なる結果が得られた。このことは、間隙水圧下では摩擦の性質は無水条件下と比べて全く異なる可能性があり、今後は実験をより高温・高圧の熱水条件下での摩擦実験へと拡張していく必要がある。

キーワード: 高速摩擦実験, 間隙水圧

Keywords: High-velocity friction experiment, Pore-water pressure