

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る。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—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

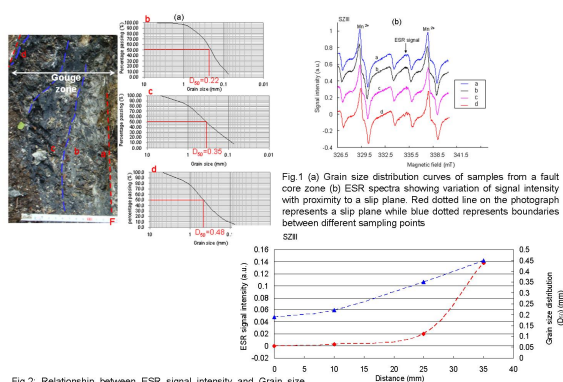


Fig 2: Relationship between ESR signal intensity and Grain size distribution. The intensity of ESR signal increases with proximity to the slip plane. By plotting the D_{50} of samples taken with proximity to the slip plane, it can be seen that grain size becomes coarser away from the slip plane.

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*}; 薮田 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

¹Department 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℃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℃)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℃)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℃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℃以上700℃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

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

⁴Graduate School of Science, Tohoku University, ⁵National 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、宮城県の沖合の、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 $3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 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 $10^{-2} \text{ MJ/m}^2\text{s}$ 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, from 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 $\delta^{13}\text{C}$ values, which shows wide range of $\delta^{13}\text{C}$ values between -20.9 and -33.1 permil, when compared with the $\delta^{13}\text{C}$ 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], 例えば鏡面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(詳細は次講演の-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℃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℃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℃, 350℃および450℃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℃, 600℃および750℃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℃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℃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*}; 瀬戸 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; UJIE, 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 (Ujii 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 MP 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っつい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破碎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こ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

南海トラフ巨大分岐断層の暗灰色ガウジ試料における摩擦発熱履歴の再検討 Re-evaluation of frictional heat recorded in the dark gouge of a megasplay fault at the Nankai Trough

増本 広和^{1*}; 廣野 哲朗¹; 石川 剛志²; 亀田 純³; 薮田 ひかる¹; 向吉 秀樹⁴

MASUMOTO, Hirokazu^{1*}; HIRONO, Tetsuro¹; ISHIKAWA, Tsuyoshi²; KAMEDA, Jun³; YABUTA, Hikaru¹; MUKOYOSHI, Hideki⁴

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, ³ 北海道大学大学院理学研究院自然科学専攻, ⁴ 早稲田大学教育・総合科学学術院

¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁴Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

南海トラフ地震発生帯掘削によって、1944 年東南海地震時に活動したと推定される巨大分岐断層の試料が採取された。この試料には、局所化した剪断帯(暗灰色ガウジ)を含み、先行研究によって、そこでの高いビトリナイト反射率(390℃の摩擦発熱に相当)とイライト-スメクタイト混合層におけるイライト含有量の増加が報告されている。一方で、微量元素・Sr 同位体比分析では、同ガウジにおいて 300℃を超える有意な高温異常が検出されていない。これらの先行研究間の矛盾を解決するために、本研究では、暗灰色ガウジを含む 8 試料において、粉末 X 線回折 - RockJock 解析を用いた鉱物の定量分析、微量元素・Sr 同位体比データにおける高温流体 - 岩石相互作用のモデル計算、および炭質物の赤外分光分析を行った。その結果、暗灰色ガウジでは 250℃を超える発熱を履歴してないことが明らかになった。さらに、スメクタイト - イライト反応が地震時に起きえるかどうかを検証するために、速度論的解析を実施した結果、約 400℃のピーク温度をもつ発熱パルスでは、イライト化はほとんど進行しないことが確認できた。また、ビトリナイト反射率の変化については、温度のみならず、剪断による変化も別の先行研究によって明らかにされつつある。以上、すべての情報を総合的に判断する限り、暗灰色ガウジの履歴温度は 250℃未満であると結論づけることが妥当であろう。この 250℃未満の発熱履歴は、0.01 - 1 m/s の滑り速度を仮定した場合、最大で 80 m の滑り距離に相当する。更なる正確な温度の見積もりが極めて重要であるが、現時点では、100 - 200℃の温度領域における有効な温度プロキシが存在しないため、難しい。これは今後の大きな課題と言える。

キーワード: 南海トラフ地震発生帯掘削, 東南海地震, 流体岩石相互作用, 微量元素, X 線回折, 赤外分光分析

Keywords: NanTroSEIZE, Tonankai earthquake, fluid-rock interactions, trace elements, X-ray diffraction, infrared spectroscopy

ナノからミリスケールにおける断層面の形状特性 Roughness of fault surfaces over a length-scale range from nano- to millimeters.

岸田 実紀^{1*}; 溝口 一生²; 高橋 美紀³; 廣瀬 丈洋⁴

KISHIDA, Minoru^{1*}; MIZOGUCHI, Kazuo²; TAKAHASHI, Miki³; HIROSE, Takehiro⁴

¹ 広島大学 院・理学研究科, ² 財団法人 電力中央研究所, ³ 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, ⁴ 独立行政法人 海洋研究開発機構 高知コア研究所

¹Hiroshima University, ²Central Research Institute of Electric Power Industry, ³Geological Survey of Japan, AIST, ⁴Kochi, JAMSTEC

断層表面の形状は断層の力学と地震の発生に非常に大きな影響をおよぼす。よって、断層の形状特性を理解することは、地震発生の過程を解明していく上で非常に重要である。そこで本研究では、断層表面の形状特性と断層の力学挙動の対応関係を明らかにすることを最終目的として、まず天然および実験の断層面のナノからミリスケールまでの形状特性を定量的に記述するための手法の確立を試みた。形状特性解析には、(1) サンフランシスコのカストロ地域に位置する Corona Heights 断層、(2) 東北地方太平洋沖地震後に内陸側での正断層運動によって地表に現れた井戸沢断層の 2 つの試料を用いた。試料 (1) は、先行研究によって断層表面の構成鉱物や微細組織が詳しく調べられており、素性がはっきりわかっている試料である。試料 (2) は、地震発生直後に採取されたものであり、地震時の断層面の形状情報がよく保存されていると考えられる。どちらの試料にも、光沢のある断層表面に様々な幅と長さの条線が観察された。

本研究では、これまで連続的に解析されてこなかった 1 nm から 3000 μm のスケールでの断層面の形状を、共焦点顕微鏡 (計測スケール: 0.15 ~ 3000 μm) と走査型プローブ顕微鏡 (1 ~ 50000 nm) を組み合わせることによって計測した。形状計測は条線に平行と直交する方向でおこなった。また形状特性の解析には、パワースペクトル密度法を用い、ハースト指数 H という指標によって形状特性を定量的に解析した。その結果、Corona Heights 断層からは条線に直交方向で $H_N = 0.73 \pm 0.010$ 、平行方向で $H_P = 0.81 \pm 0.012$ 、井戸沢断層からは $H_N = 0.87 \pm 0.013$ 、 $H_P = 0.94 \pm 0.014$ という結果がえられた。一般に、条線に平行な方向の方が直交する方向より小さな H を示すことが知られている (e.g., Sagy et al., 2007)。これは断層変位が大きくなるにつれて、線構造に平行な方が表面の凸凹がなめらかになることになることに起因する。本研究で形状特性を解析した Corona Heights 断層や井戸沢断層は、 H_N と H_P がほぼ同じ値を示すことから、これまで形状特性が解析されてきた断層と比較すると、断層の変位がまだ大きくない未成熟な断層である、もしくは先行研究では解析されてこなかった 1 nm から 3000 μm のスケールでは、すべりが進行しても H_N と H_P におおきな差が生じないといえるかもしれない。Candela et al., (2012) は、天然の 13 箇所の断層から、50 μm ~ 50 km までのスケールにおける断層面形状を解析し、このスケールで断層面形状特性はフラクタルであり、ほぼ同じ次元をとること示している。この結果に本研究で解析したデータをコンパイルすると、異なる断層でありかつ観察スケールが異なるにもかかわらずよい一致を見せた。このことから、天然の断層面の形状特性は nm から km スケールまでフラクタル特性を有することが明らかとなった。

キーワード: 断層面, 粗さ, フラクタル, ハースト指数

Keywords: fault surface, roughness, fractal, Hurst exponent

続成作用にともなう玄武岩の透水性の変化：四万十付加体物質を用いた考察 Evolution of fluid transport property by diagenesis in basaltic rocks from the Shimanto belt, Southern Shikoku

谷川 亘^{1*}; 山口 飛鳥²; 亀田 純³; 多田井 修⁴; 畠田 健太朗⁴; 北村 真奈美⁵

TANIKAWA, Wataru^{1*}; YAMAGUCHI, Asuka²; KAMEDA, Jun³; TADAI, Osamu⁴; HATAKEDA, Kentaro⁴; KITAMURA, Manami⁵

¹ 海洋研究開発機構高知コア研究所, ² 東京大学大気海洋研究所, ³ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, ⁴ 株式会社マリン・ワーク・ジャパン, ⁵ 広島大学

¹JAMSTEC/Kochi, ²Atomosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ³Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁴Marine Works Japan Ltd., ⁵Hiroshima University

2011 年の東北地方太平洋沖地震では、プレート境界断層浅部で断層が 50m にもわたる大きな変位を伴うすべりが生じたことにより大きな津波災害が引き起こされたと考えられている。大変位を引き起こした原因として、(1) 地震時のプレート境界断層の動的弱化機構、(2) プレート境界深部における間隙水圧の増加に伴う強度の低下が挙げられる。(2) の間隙水圧を上昇させるメカニズムとして、沈み込みに伴うプレート境界近傍の物質の脱水反応と続成作用に伴う孔隙体積および透水性の変化が挙げられる。そこで、本研究では南海トラフ地震断層のプレート境界下部の海洋プレート物質を対象として、続成作用にともなう水理特性の変化と間隙水圧発達の関係について考察した。

本研究では高知県の四万十帯付加体中の続成状態が異なると考えられる興津小鶴津と久礼の玄武岩を用いた。興津と久礼の間隙率、および P 波速度はそれぞれ 1.4 % と 6.4 km/s および 2.1 % と 5.9 km/s を示し、また、S 波速度の違いは認められなかった。水銀圧入法により間隙径分布を測定した結果、0.01 μm 以下の非常に低い間隙構造を持っていることが確認された。透水係数の測定は、室温下で封圧 1~160 MPa まで変化させて行った。間隙流体として窒素ガスを用いて、ガス流量法からにより値を算出した。

同じ封圧下で間隙差圧を変化させてガス浸透係数を測定すると、間隙圧の増加に対して透水係数が減少し Klinkenberg 効果が認められた。そこで、測定した「ガス浸透係数」は間隙圧依存性を基に Klinkenberg の式を用いて「透水係数」に補正した。補正した「透水係数」は「ガス浸透係数」と比較して約 1/2~1/4 低い値を示した。有効圧 1MPa 時の透水係数は試料ごとの違いは認められず、 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{m}^2$ の値を示した。透水係数は圧力増加に伴い減少し、有効圧 100MPa において $10^{-18} \sim 10^{-21} \text{m}^2$ を示し、試料の違いによる透水性の違いが顕著に現れた。また、久礼の玄武岩試料が一番低い透水係数を示し、100MPa で 10^{-21}m^2 を示した。一方興津の玄武岩試料は 100MPa で $3 \times 10^{-19} \text{m}^2$ で一番高い透水係数を示した。高い透水係数の試料以外はおおむね透水係数の有効圧変化はべき乗曲線で近似できて、係数は -2~-3 を示した。一方、高い透水性を示した試料は、Gangi (1978) が紹介しているヘルツの接触理論を基にした理論式で近似できる。高い透水性を示す試料は割れ目が発達していることから、有効圧増加に対する透水係数の減少は間隙の変化よりも割れ目の凹凸形状の変化が大きく影響しているものと考えられる。

本研究で測定した玄武岩の透水係数は Kato et al. (2004) で報告されている興津の断層帯内部の玄武岩よりも低い値を示した。また、Juan de Fuca と Tonga-Kermadec の玄武岩 (Christensen and Ramanantsoa, 1988) と比較してもやや低い透水性を示した。

現時点では、続成作用に伴う玄武岩の透水性およびその他の物性の変化について系統的な傾向は得られていない。ただし、いずれの玄武岩試料も非常に低い透水係数を示したことから、地下深部もしくは脱水反応に伴う流体の供給による間隙水圧が発生する可能性は十分に考えられる。

キーワード: 透水係数, 流体圧, 続成作用, 沈み込み帯, 南海トラフ地震, 玄武岩

Keywords: permeability, fluid pressure, diagenesis, subduction zone, Nankai Trough earthquake, basalt

玄武岩、斑レイ岩および花崗岩の弾性波速度およびポアソン比への熱クラッキングの影響

Effects of thermal cracking on elastic wave velocities and Poisson's ratio of basalt, gabbro and granite

西村 佳也^{1*}; 上原 真一¹; 溝口 一生²

NISHIMURA, Kaya^{1*}; UEHARA, Shin-ichi¹; MIZOGUCHI, Kazuo²

¹ 東邦大学理学部, ² 財団法人 電力中央研究所

¹Faculty of science, Toho University, ²Central Research Institute of Electric Power Industry

地震波を用いた物理探査により、沈み込み帯の海洋地殻中にポアソン比の高い領域 (> 0.35) が存在することが知られている。Christensen (1984) は海洋地殻を主に構成する岩石である玄武岩について、高封圧・高間隙圧条件下で弾性波速度およびポアソン比を測定した室内実験を行い、この高ポアソン比は高間隙圧 (低有効圧) で説明できることを示した。このような高間隙圧の分布は、沈み込み帯のプレート境界断層の運動にも影響を与えられ、注目を浴びている。Christensen (1984) の実験では無垢な岩石試料が用いられた。しかしながら、天然の岩石、特に断層周辺では一般的に亀裂等が含まれることが考えられる。こういった内部構造を持つ岩石の弾性波速度 (P 波、S 波速度、それぞれ V_p 、 V_s) およびポアソン比 σ について評価することは、地震波速度から地下の間隙圧分布を推定する上で重要である。これを検証するには、 V_p 、 V_s と高間隙圧との関係を実験により検証する必要がある。そこで本研究では、沈み込み境界の速度異常を説明する物理モデルの構築を将来的な目標として見据え、その第一歩として海洋地殻を構成する主要な岩石である斑レイ岩、玄武岩、および大陸地殻を構成する代表的な岩石である花崗岩について、加熱して (100 °C、300 °C、500 °C、700 °C) 内部に亀裂を生成させた (熱クラッキング) 岩石試料の大気圧下での弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度への熱クラッキングの影響について検証した。このとき、試料は乾燥している。また、700 °C で加熱した各々の岩石を水で飽和させ、弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度の間隙流体依存性についての検討も試みた。

実験の結果、各岩石について高温で加熱するにつれて V_p 、 V_s が遅くなるということが分かった。また、密度も高温で加熱するにつれてごくわずかであるが小さくなり、特に 500 °C から 700 °C への密度の変化が顕著であることが分かった。これより、高温で加熱するにつれて岩石の内部の亀裂密度が増加し空隙が増え、この空隙の増加が弾性波速度を減少した原因であると考えられる。また、ポアソン比の値は 0.05~0.25 程度の値を示し、観測された高ポアソン比領域の指していた値よりも小さい結果が得られた。また、岩石試料を水で飽和させた実験では、全体的に速度が速くなる傾向は見られたが、出力波形の立ち上がりを読み取りにくく、実験システムおよび波形読み取り方法の改良が必要だと考えられる。

キーワード: ポアソン比, 弾性波速度, 高間隙圧, 玄武岩, 斑レイ岩, 花崗岩

Keywords: Poisson's ratio, Elastic wave, High pore pressure, Basalt, Gabbro, Granite

伊豆-ボニン-マリアナ弧を構成する岩石の高温高压摩擦特性 Frictional property of rocks in the Izu-Bonin-Mariana Forearc under high temperature and pressure conditions

兵東 玄威^{1*}; 高橋 美紀²; 斎藤 実篤³; 廣瀬 丈洋⁴

HYODO, Geni^{1*}; TAKAHASHI, Miki²; SAITO, Saneatsu³; HIROSE, Takehiro⁴

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 独立行政法人 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, ³ 独立行政法人 海洋研究開発機構, ⁴ 独立行政法人 海洋研究開発機構 高知コア研究所 地震断層研究グループ

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Geological Survey of Japan-Advanced Industrial Science and Technology, ³Japan Agency Marine-Earth Science and Technology, ⁴Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency Marine-Earth Science and Technology

関東平野の位置する北米プレートの下には、フィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込んでいる。特に東北日本弧や西南日本弧の沈み込み帯と違い、関東にはフィリピン海プレートに太平洋プレートが沈み込むことによって形成された伊豆・ボニン・マリアナ島弧 (IBM) が衝突・沈み込んでいるのが大きな特徴である。これら 3 つのプレート境界およびプレート内部では、関東大震災を引き起こした巨大地震から房総半島沖でのスロー地震まで、多様な地震活動が確認されている。スロー地震は、巨大地震震源域の浅部及び深部の沈み込むプレート境界に沿った比較的幅の狭い領域で発生するが、関東周辺ではこのような地震性と非地震性のすべり挙動が比較的近い場所のほぼ同じ深度 (等温等圧条件) で発生している可能性がある。地震の発生には、間隙水圧や断層面の形状などの様々な要因が寄与しているが、本研究では関東に沈み込む IBM 弧を構成する様々な岩石の摩擦特性に着目し、その違いによって関東で発生する多様な地震発生機構を解明することを目指している。

そこで本研究では、ODP (Ocean Drilling Program) Leg125 (Site784, 786) で採取された IBM 弧を構成する主要な 5 種類の岩石 (marl, boninite, andesite, sheared serpentinite and serpentinitized dunite) を $10\sim50\ \mu\text{m}$ の粒径になるように粉砕し、その摩擦特性を産業技術総合研究所に設置されている高温高压ガス圧式三軸試験機をもちいて調べた。実験条件は、温度 $300\ ^\circ\text{C}$ 、封圧 156MPa 、間隙水圧 60MPa 、軸変位速度 0.1 および $1\ \mu\text{m/s}$ である。摩擦実験の結果、sheared serpentinite と serpentinitized dunite は定常摩擦係数がそれぞれ 0.55 と $0.35\sim0.41$ であり、摩擦の速度依存性は正であることがわかった。粉末 X 線回折とラマン分光分析によって同定した主含有鉱物が、sheared serpentinite は antigorite, serpentinitized dunite は chrysotile と iowaite であることから、これらの摩擦特性は serpentinite に関する既存の実験結果とよく一致することがわかった。一方、marl, boninite, andesite は、すべり速度 $1\ \mu\text{m/s}$ においてスティック・スリップが現れることがわかった。ただし、これらスティック・スリップは常温で見られる挙動とは異なり、平均ライズタイムがそれぞれ $3.9, 9.3, 10.8\ \text{sec}$ と非常に長く、スロースティック・スリップとよぶことができるようなすべり挙動である。このようなスロースティック・スリップは、これまで岩塩や蛇紋岩の高温下における摩擦実験で確認されているが、本研究のような堆積岩や火成岩で確認されたのははじめてである。実験条件が限られているため、本実験結果にのみ基づいて関東で発生する地震の多様性を議論するのは難しいが、今後このような特徴的なすべり挙動がどのような条件、特に温度条件によって現れるかを明らかにすることによって、関東で発生する地震の発生機構を物質学的に探っていきたい。

キーワード: 摩擦, 伊豆-ボニン-マリアナ弧, スロー地震, スティック・スリップ, 地震

Keywords: Friction, Izu-Bonin-Mariana Forearc (IBM), slow earthquake, stick-slip, earthquake

窒素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強度の温度変化と摩耗物質中の非晶質物質含有量との関係

Temperature-dependent frictional strength of dolerite in a nitrogen atmosphere and its relation to amorphous material

田中 伸明^{1*}; 和田 純一¹; 金川 久一¹

TANAKA, Nobuaki^{1*}; WADA, Jun-ichi¹; KANAGAWA, Kyuichi¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Chiba University

Noda et al. (2011, JGR) による背景温度を制御したドレライト試料の回転剪断実験（垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温～1000 °C）では、摩耗物質中の非晶質物質含有量と含鉄鉱物の高温酸化がドレライトの摩擦強度の複雑な温度変化と相関のあることが判明した。しかし、地下の断層は大気中にはないため、実験で観察されたような含鉄鉱物の高温酸化は現実的ではない。

そこで、Noda et al. (2011) と同じドレライト試料を、同じ条件（垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温～1000 °C）、窒素雰囲気下（酸素濃度 0.1% 程度）で回転剪断実験を行い、Noda et al. (2011) の結果と比較した。実験では試料面が定常状態になるまで 100 m 程度変位させた後に 20 m 程度変位させ、後者の力学データを取得した。また、実験で得られた摩耗物質を 250 μm のふるいにかけた後、X 線回折プロファイルのピーク強度を用いて鉱物組成の定量分析を行った。

定常状態における摩擦係数は、室温および 200 °C では約 0.47、400 °C および 600 °C では約 0.7、800 °C では試料の破壊が著しく定常状態が得られず、1000 °C では約 0.9 であった。摩耗物質中の非晶質物質含有量は、室温で約 65 wt%、200 °C で約 70 wt%、400 °C で約 60 wt%、600 °C で約 45 wt%、800 °C で約 15 wt%、1000 °C で 0 wt% で、Noda et al. (2011) と同様な温度変化が得られた。一方、摩耗物質中の鉄酸化物含有量には温度による有意な変化は認められなかった。

Noda et al. (2011) の大気中の実験では、800 °C 以下の温度で摩擦強度と非晶質物質含有量との間に負の相関が認められたが、今回の実験でも温度上昇に伴って摩擦強度が増大し、非晶質物質含有量が減少する傾向が認められた。しかしながら、非晶質物質含有量が約 5 wt% しか変わらない室温と 400 °C で摩擦係数に 0.2 以上の差が認められ、また摩擦係数がほぼ同じ 400 °C と 600 °C との間で非晶質物質含有量に 15 wt% 程度の差が認められた。従って、ドレライトの摩擦強度と非晶質物質含有量の間には直接的な関係はないと考えられる。摩擦強度の温度変化が実際には何に起因しているのかについては、現在検討中である。

キーワード: ドレライト, 摩擦強度, 摩耗物質, 窒素雰囲気, 回転剪断試験

Keywords: Dolerite, Frictional strength, Wear material, Nitrogen atmosphere, Rotary shear experiment

大型二軸摩擦実験におけるスティック・スリップ・イベントの二次元的破壊伝播 Observation of 2-D rupture propagation for stick-slip events during large-scale biaxial frictional experiments

土田 琴世^{1*}; 川方 裕則¹; 福山 英一²; 山下 太²; 溝口 一生³

TSUCHIDA, Kotoyo^{1*}; KAWAKATA, Hironori¹; FUKUYAMA, Eiichi²; YAMASHITA, Futoshi²; MIZOGUCHI, Kazuo³

¹ 立命館大学, ² 防災科学技術研究所, ³ 電力中央研究所

¹Ritsumeikan University, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ³Central Research Institute of Electric Power Industry

地震発生過程のモデルとして期待される一つに Ohnaka and Kuwahara(1990) によって提案されたプレスリップモデルがある。このモデルでは、破壊伝播速度が亀裂(破壊)の成長に伴い加速することが示されている。しかし、観測からは地震に先行するプレスリップ現象は明瞭には捉えられていない。Ohnaka and Kuwahara(1990) は、試料端(表面)で計測した歪の記録を用いて、破壊伝播速度を一次元的に調べた。一次元の破壊伝播速度は、空間的広がりを考えた際に見かけの破壊伝播速度を示す。さらに、試料表面における計測であるため、表面が存在することによって与える破壊への影響は無視できない。したがって、破壊を二次元的に捉えることで、なぜプレスリップが地震に対して捉えられていないのかを再検討する必要がある。

福山ほか(2012, 2013, 地震学会) は、メートルスケールの大型岩石試料を用いたせん断すべり実験を行った。本研究では、特に、破壊を二次元的に捉えるため、AE センサー及び歪ゲージを試料内部に面状に配置させるという新たな試みをした第二期の実験(福山ほか, 2013, 地震学会)のうち、最も低速(0.025 m/s)で実施された実験(LB03-008)で計測された微小破壊による弾性波及び歪の記録を扱い、繰り返し発生するスティック・スリップ・イベントの二次元的な破壊伝播を検討するとともに、イベントの特徴について調べた。

実験は、防災科学技術研究所所有の大型振動台を用いて、上側に $1.5W \times 0.5D \times 0.5H$ m³、下側に $2.0W \times 0.5D \times 0.5H$ m³ のインド産ギャブロ試料を配置し、せん断方向に滑らせた(福山ほか, 2013, 地震学会)。計測には、AE センサーと歪ゲージを用いた。AE センサーは、下側試料の内部に長さ(W)方向 150 mm 間隔で 8 ケ所、奥行き(D)方向 125 mm 間隔で 3 列の計 24 ケ所に埋め込まれ、両側の側面 8 ケ所ずつに 75 mm 間隔で貼り付けられた。また、歪ゲージは AE センサー同様に下側試料の内部 24 ケ所に埋め込まれ、両側の側面 12 ケ所ずつに 75 mm 間隔で貼り付けられた。また、同時にロードセルを用いてバルクの法線応力とせん断応力も計測された。

土田ほか(2013, 地震学会) は、弾性波の記録から S 波速度よりも遅い速度で伝播する波を確認した。この波がイベントによって放射されたものであると考え、実験を行った全時間帯の記録を眺めた。イベント群は、法線応力に対するせん断応力の比がもっとも低下したイベントを境に、前半と後半で、数 10 ms 程度の時間間隔で数回認められる場合と、20 ms 程度以内に密集して 1 つだけ存在する場合に大別されることが分かった。

そこで本研究では、イベントのある時間帯に着目し、その際の歪変化について検討した。まず、全時間帯、全 ch の歪変化の概要を把握するため、1024[sp] で平均することでノイズを低減させ、各 ch 毎の時間変化を調べた。どの ch においても、バルクの値から求めた摩擦係数の変化と同様に、イベントのタイミングに著しい歪低下が見られた。また、幅 100 mm の試料において確認された(福山ほか, 2013 地震学会; 溝口ほか, 2013 地震学会)のと同様に、その直前に弾性波を伴わないゆっくりとした歪の低下も確認出来た。一方、バルクのせん断応力に変化が見られないイベントに関しては、歪ゲージの記録でも顕著な変化は見られず、弾性波でしか捉えられないような極めて小さな破壊があったことが推察される。また、実験後半においては slip 直前の摩擦係数の最大値がほぼ一定となるのに対し、実験後半の歪の蓄積量はほぼ一定となる場合、増加し続ける場合、減少する場合と様々で、蓄積量の大きさ自体も位置によって異なることが分かった。

次に、イベント付近の歪変化を詳しく見るため、イベントを含む 1 秒間の歪変化を見た。顕著な歪変化が見られない時間帯の歪の記録に対して自己相関関数を調べたところ、およそ 4~8[sp] で相関値が上がるのがわかり、これをノイズの卓越周期であると判断し、平均をとるデータ数を 300[sp] まで絞った。イベントごとに各 ch の変化を比べたところ、弾性波を用いて大別された 2 パターンのイベントの内、前半のあるイベントにおいて、緩やかにせん断歪が低下する(およそ $1\sim3\mu\text{strain}$) イベントが試料前面付近から奥行き方向へとゆっくりと伝播しているのが見られた。このタイプのゆっくりとしたイベントを繰り返し、最終的には伝播が加速し、高速なせん断歪の低下、すなわち、動的なイベントに達している。弾性波の観測される時間は、この高速なせん断歪の低下の際及びその後の不安定な歪変化に対応している。今後、この加速の開始点、及び、加速する方向と試料表面の亀裂(破壊)の成長、弾性波との関係について検討する。

本研究は、防災科学技術研究所プロジェクト研究「地殻活動の観測予測技術開発」、科学研究費補助金基盤研究(B) 23340131 の助成を受けた。

キーワード: スティック・スリップ・イベント, 破壊伝播, 大型二軸試験

Keywords: stick-slip event, rupture propagation, large-scale biaxial frictional experiment

エネルギー比の観点からみた摩擦不安定性に関する実験的研究 The experimental study about frictional instability of fault gouges in terms of Rowe's energy ratio

平田 萌々子^{1*}; 武藤 潤¹; 長濱 裕幸¹

HIRATA, Momoko^{1*}; MUTO, Jun¹; NAGAHAMA, Hiroyuki¹

¹ 東北大学・理・地学

¹Dept. Earth Science, Tohoku University

1. Introduction

The stress-dilatancy relationship for granular materials in a dense packing state was introduced by Rowe (1962). He used the energy ratio (K), which was the ratio of rate of energy dissipation in the direction of minimum principal stress to energy supply in that of maximum principal stress. According to the concept, K shall be a minimum and constant value (Rowe, 1962). However, there are many questions about the physical meaning of K. Therefore, the Rowe's law has not been applied much for fault mechanics until now. Nevertheless the stress-dilatancy relation is related to the onset of frictional instability, it has not been clear yet. So, we conducted friction experiments using simulated fault gouges in order to confirm whether Rowe's law can be applied to fault situation or not.

2. Methods

The friction experiments using simulated fault gouges were conducted in a gas-medium apparatus. The confining pressure was ranging from 140 to 180 MPa. We used a cylindrical gabbroic forcing blocks (20 mm in a diameter, 40 mm in a length, and cut by a 50 degree from their cylindrical axis) and quartz gouges were sandwiched by them. The sample sustained loading initially and holding at several values of axial stresses at 190, 450, 640 and 800 MPa. The strain rate was 10^{-3} /s. In order to measure strain, three strain gauges were glued onto a gouge layer through the Teflon jacket. Another one was placed to a forcing block in a vertical direction and far from a gouge layer. Data were recorded at 2 MHz.

3. Results and Discussion

From our friction experiments, we obtained K of gouges at different confining pressures. K is given by the ratio of rate of energy dissipation in σ_3 direction to energy supply in σ_1 direction, so it can be represented by the ratio of output energy to input one. We obtained strain of σ_3 direction from three strain gauges glued onto a gouge layer. Similarly, σ_1 and strain of σ_1 direction were obtained from another gauge. σ_3 was the confining pressure. Our results showed that the output energy was the linear function of input one. K increased with confining pressure and showed a certain constant value at each loading and holding stage. Moreover, the change in K was remarkable at the final loading stage. In other words, the output energy increased suddenly because gouge particles began to slip. So, the change in K is large under high stress, including just before unstable slip. It matched shear localization (e.g. Logan et al., 1992; Marone, 1998).

Because K is represented by a function of internal friction angle, we suggest that the change reflects the process of microstructural development. It implied that the statistical particle arrangements of gouges changed at each stress level. After gouges become a closest packing state at the peak stress, the grain size reduction (GSR) of gouges occurs leading to the development of shear structure. Under GSR occurrence, K became a new state. From previous study, it is known that the microstructural development has a close relation with frictional instability (e.g. Logan et al., 1992; Marone, 1998; Onuma et al., 2011). During progressive shear, the angle of R1-shear developed in gouges decreases with cumulative slip (Gu and Wong, 1994). Hence, the change in K, that is to say the change in internal friction angle must be connected with not only microstructural development but also frictional instability.

4. Summary

From our experiments using simulated fault gouges, we obtained relationships among microstructural development, frictional instability and energy ratio of it. We confirmed that the Rowe's law could be applied to simulated fault gouges. Therefore, we can assess frictional instability in terms of the energy ratio based on Rowe's law. Systematic laboratory observation provides better understanding on energetical or microstructural consideration on the shear localization and seismogenic process.

Keywords: frictional instability, simulated fault gouge, Rowe's minimum constant energy ratio, friction experiments

繰り返すスリップイベントの発生確率の時間発展 -房総半島沖・八重山諸島沖スローイベントを例として-
Temporal evolution of slip event probability -Case study of slow slip off the Boso Peninsula and the Yaeyama Islands

三井 雄太^{1*}
MITSUI, Yuta^{1*}

¹ 静岡大学理学研究科
¹ Grad. Sci., Shizuoka Univ.

特にプレート境界において、空間的に孤立して発生するすべりイベント (地震・スロースリップ) は、準周期的に発生する場合があると知られている (e.g., Nadeau and McEvilly [1997], Matsuzawa et al. [2002], Rogers et al. [2003])。これは、プレート境界に蓄積されたひずみがある程度溜まると解放される、という単純な弾性反発の概念が近似的に成り立っていることを示している。

もちろん、イベントの繰り返し間隔に数学的な意味で厳密な周期性があるわけではない。天然の現象である以上、まったく同じ様式のすべりイベントが二度起きることはないためと考えられる。特に動的な断層破壊を伴う地震の場合にこの傾向は強いはずであり、実際に、過去の繰り返し履歴から推定されていた発生時期から大きく外れて地震が起こったという事例も存在する (Bakun et al. [2005])。また、普段は孤立して活動しているように見えるイベントでも、周辺地域の巨大地震に大きく影響を受けるといことが起こり得るので (e.g., Uchida and Matsuzawa [2013])、決定論的物理モデルに基づいてイベントの繰り返し間隔を定量的に議論するのは極めて困難である。このことから、イベントの繰り返し間隔を評価するために確率分布が用いられてきた。

イベント繰り返しを確率分布で評価する際に、実際にイベントが発生したとき発生確率はどうであったか、という点が重要であろう。この点については、従来あまり活発な議論はされてこなかった。本研究ではこれに取り組む。対象として、繰り返し間隔が短いスロースリップイベントを選ぶこととした。具体的には、2014 年に入ってから発生した房総半島沖のスロースリップイベント (Hirose et al. [2012]) と八重山諸島沖のスロースリップイベント (Heki and Kataoka [2008]) を選んだ。確率分布として、ひとまず簡単なポアソン分布を仮定し、イベント回数が 0 である累積確率を 100% から引く、という形で発生確率を評価することとした。さらに、1 回イベントが起こるごとに累積確率は 100% に戻るとした。ポアソン分布のパラメータである平均繰り返し間隔は、前回までのイベント繰り返しの標本平均の値を使うこととした。以上の設定から、房総半島沖と八重山諸島沖におけるスロースリップイベント発生確率の時間発展を追うことができるようになった。これを実際のイベント発生と照らし合わせることで、**結果を検証可能**である。

まず、数の多い八重山諸島沖の結果を考察する。八重山諸島沖では、計 26 回のうち、発生確率が 50% に満たない段階で発生したイベントは 5 回であった。例外的イベントは存在するものの、全体の約 8 割は発生確率が 50% を超えてから発生したことになる。一方、房総半島沖では、計 5 回のうち 2 回のイベントが、発生確率が 50% に満たない段階で発生した。この 2 回ともが 2011 年東北地震の後に発生したイベントである。このことは、Hirose et al. [2012] が指摘したように、東北地震による擾乱の影響と解釈できる。以上のことをまとめると、上記のポアソン分布に基づく発生確率評価では、確率が 50% を超えない段階でイベントが実際に起きることは少ない、ということがわかった。また、八重山諸島沖イベントに関しては、イベント発生時点での発生確率が徐々に増大している傾向があることが見出された。

キーワード: 繰り返すスロースリップイベント, 発生確率, 統計的アプローチ, 房総半島沖, 八重山諸島沖
Keywords: Repeating slow slip event, Event probability, Statistical approach, Off Boso Peninsula, Off Yaeyama Islands

浅部超低周波地震と長期的スロースリップイベントの同期発生の数値モデリング Numerical modeling of concurrent occurrence of shallow very low frequency earthquakes and long-term slow slip events

松澤 孝紀^{1*}; 芝崎 文一郎²; 小原 一成³; 廣瀬 仁⁴

MATSUZAWA, Takanori^{1*}; SHIBAZAKI, Bunichiro²; OBARA, Kazushige³; HIROSE, Hitoshi⁴

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, ⁴ 神戸大学都市安全研究センター

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Building Research Institute, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

豊後水道で発生する長期的スロースリップイベント (SSE) と、足摺岬沖で発生する浅部超低周波地震の活発化が過去 3 回にわたって同期していることが、Hirose et al. (2010, Science) によって報告されている。この領域は、予想されるプレート間大地震のすべり域の西端部に位置しており、歪み蓄積過程と大地震の関係を理解する上でも重要である。我々はこれまで、短期的 SSE と長期的 SSE の数値モデルに取り組んできたが (例えば, Matsuzawa et al., 2013, GRL), ここでは浅部超低周波地震と長期的 SSE の同期した発生を、数値的に再現することを目指した。

数値モデリングにあたっては、Matsuzawa et al. (2010, JGR) と同様に、半無限弾性媒質中に置かれた平板の沈み込みプレート仮定し、境界の摩擦力としてはカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を用いた。長期的 SSE を再現するために、このモデルにおいても、周囲より有効法線応力が低く、 $10^{-6.5}$ m/s のカットオフ速度をもつ長期的 SSE 領域を 10 km 以深に設定した。一方、浅部超低周波地震の発生域については、岩石実験から低速側ですべり速度強化、高速側ですべり速度強化を示す摩擦則が得られている (Saito et al., 2013, GRL)。また、Ito and Obara (2006, GRL) は地震波の解析から、超低周波地震の半径を 5-10 km と推定している。これらに基づき、深さ 10 km 以浅の領域に、周囲よりも低い有効法線応力をもつ半径 6 km の円形の浅部超低周波地震領域を設定し、この領域内では、 10^{-4} m/s のカットオフ速度を仮定した。さらに、足摺岬沖の西側の日向灘の領域では、浅部超低周波地震の活動が活発となっており、長期的 SSE の観測されていない時期においても断続的に活発化している。このことは、この付近のプレート境界が足摺岬沖の領域よりも連続的にすべっていることを示唆するため、長期的 SSE 領域の隣に、安定すべり領域を持つモデルを検討した。以上のように設定したモデルを以下 Model 1 と呼ぶ。また、日向灘の安定すべり領域を仮定しない場合についても検討した (Model 2)。さらに、長期的 SSE 領域の上端の深さによる影響を検討するため、上端が深さ 18 km となる場合についても検討した (Model 3)。

数値計算の結果、Model 1,2,3 のいずれにおいても、長期的 SSE および超低周波地震領域でのイベント発生がそれぞれ再現された。Model 1 および 2 では、長期的 SSE の発生時に、超低周波地震領域での同期したすべりがみられたものの、Model 3 では明瞭なすべりの同期はみられなかった。また、Model 2 では、長期的 SSE 以外の時期にも超低周波地震領域で大きなすべりが発生している一方、Model 1 では顕著なすべりイベントは長期的 SSE 時にほぼ限られた。これらの結果は、長期的 SSE のすべり域が、浅部超低周波地震域付近まで到達している場合や、近傍における安定すべり域の存在によってより定常的なローディング状態にある場合の方が、観測事実を再現しやすいことを示唆する。

キーワード: 超低周波地震, スロースリップイベント, 数値シミュレーション, 豊後水道

Keywords: very low frequency earthquake, slow slip event, numerical simulation, Bungo Channel