

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題 (または観測項目) 名：

摩擦すべりに伴うエネルギー散逸過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ア．岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

地殻活動予測システムの構築のためには、断層面の強度を適切に記述することができる摩擦則が不可欠である。室内実験に基づいて、これまでにいくつかの摩擦則が提案されている。これらの摩擦則の素過程は、一般に、真実接触面積の滑り速度・接触時間依存性に基づいて理解されている。これは、摩擦面同士の固着、すなわち、ひずみエネルギーの蓄積過程に対する理解である。一方で摩擦滑りは必然的にエネルギーの散逸を伴う。散逸したエネルギーは、破損面やガウジ粒子の表面エネルギー、摩擦発熱による熱エネルギー、AE などの発生に伴う波動エネルギーの形で消費される。真実接触域の固着により蓄積されたエネルギーが、上記の 3 つの消費形態にどの程度配分されるのかを理解することは、摩擦滑りの挙動を支配する物理過程を理解する上で重要である。本課題では、室内滑り実験により、散逸エネルギーの分配法則を明らかにする。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度：摩擦発熱によるエネルギー消費を見積もるために、実験的アスペリティーの実態と flash melting にかかわる摩擦構成式を検討する。

M2 震源断層貫通掘削コア試料の解析を行い、断層破壊に伴う表面エネルギーを推定する。

平成 22 年度：地震に先行する電磁氣的異常を理解するために、先駆的な triboelectricity に関する固着滑り実験をおこなう。

波動としてのエネルギー散逸を推定する基礎として、広帯域 AE センサーを用いて、摩擦滑りに伴う AE の震源パラメータを推定する。

平成 23 年度以降：表面エネルギーの散逸過程を理解するために、滑り帯内部の構造 (R - シアと Y - シア) と固着滑り過程、強震動による断層破碎帯形成の可能性、断層ジョグでの粉碎の特異性を検討する。

波動エネルギー散逸過程を理解するために、AE の震源パラメータの載荷条件依存性を明らかにする。

(7) 平成 24 年度成果の概要 :

断層面は生来的に不均質であり、それが地震の多様性を生む。断層面上の距離 x とその点上の測度 (例えば凹凸 h) との間に $h = \beta x^H$ の関係にあればフラクタルであり、フラクタル次元 D は $D = E + 1 - H$ である (E はユークリッド次元、 H はハースト指数)。1mm から 100km オーダーの断層の観察によれば、全ての断層帯が断層セグメントとジョグの階層的入れ子構造になっていて、(1) D は 2 よりわずかに大きく、(2) H は 1 よりわずかに小さく、(3) β は約 0.04 である。(1) と (2) の事実は地震学的な推定 (例えば、Frankel, 1991, JGR, 96, 6291; Mai and Beroza, 2002, JGR, 107, B11,2308) と調和する。(3) は本震とサブイベントの長さ比 (例えば、Bersenev, 2001, JGR, 28, 35) を説明する。地震発生層の厚さより長い横ずれ地震断層の地表平均変位 U は長さ L の 1 乗 (Scholz の L-model) ではなく、約 0.46 乗に比例して増加する。これはジョグによるピン止めのためである。Hillers & Wesnousky (2008, BSSA, 98, 1085) による数値実験はこれを再現している。Dieterich & Smith (2009, PAGEOPH, 166, 1799) による数値実験は、 $H=1$ で β が約 0.04 のとき、 $U \propto L^{0.46}$ を再現するようだ。すなわち、断層面の不均質性の実態は、階層的に自己相似な断層帯のジオメトリーそのものと考えてよい。以上の内容の一部は 2012 年の地質学会で講演した。

摩擦に伴う岩石鉱物のエネルギー散逸過程として、岩石鉱物の非晶質化が知られている。これらは、特に石英岩の非晶質化はその後の含水したゲルの生成により滑り・速度弱化を引き起こすことから、摩擦特性にも直接影響を及ぼす。摩擦に伴う石英の非晶質化を調べるために、Pin-on-disk 型の摩擦試験機を用いて、摩擦滑りさせた後の石英トラックのラマン分光分析を行った。摩擦に伴い、 SiO_4 四面体 6 員環からなる石英構造中に、3 - 4 員環というゆがんだネットワーク構造が形成されていることが明らかになった。非晶質化は、高速滑りを必要としないことから、真実接触点での高応力下で、 SiO_4 中距離構造がよりゆがんだ平面 3 及び 4 員環となり、ゆがんだ Si-O 結合部から選択的に水和反応が進むことで、摩擦表面に非晶質シリカの水和物を生成したことを示唆する。非晶質シリカ水和物は、強度の低い粘性物質として振舞うことで、速度弱化を引き起こしたことを考えられる。以上の内容の一部は、Geophys. Res. Lett. にて発表した。

San Andreas 断層などの大規模横ずれ断層帯のダメージゾーンに、顕著な剪断組織は持たないが、著しく粉砕した岩石 (Pulverized rocks) が、幅広く分布することが知られている (例えば Dor et al., 2006, EPSL, 245, 642)。この岩石は、断層に沿って非対称に分布していることなどから、ラブチャー伝播に伴う動的な応力場によって形成された可能性が指摘されているが、その形成機構は明らかではない。Pulverized rocks の形成機構を明らかにするために、San Andreas 断層及び有馬高槻構造線の地質調査を行い、両断層沿いに分布する Pulverized rocks の試料採取を行った。得られた試料の微細組織観察から、粒径分布測定を行い、粉砕化の機構を調べた。粒径分布測定から、Pulverized rocks は通常の断層ガウジヤカタクラサイトに比べ、高いフラクタル次元と大きなカットオフ粒径を持つ。このことは、摩擦によって細粒物質が形成され、徐々に断層破砕帯が出来るという従来の理論 (例えば Scholz, 1987, Geology, 15, 493) では説明できないことから、新たな断層形成機構の存在を示唆する。

Yabe (2002) では、摩擦滑りに伴う AE の波動エネルギーが滑り速度に依存することが示された。しかし、その実験では、1cm 程度の滑りを繰り返して約 6.5cm の累積滑りを実現しているため、断層面の状態が連続的には成熟していない。また、法線応力も 5MPa に限られている。このような問題を解決し、実験結果の一般性を検証するため、連続した滑りで大変位を実現できる回転式せん断試験機を用いた実験を開始した。今年度は、Yabe (2002) と類似の载荷条件で予備的な実験を行い、その結果が概ね再現できることを確認した (図 1)。また、载荷軸内に広帯域 AE センサーを設置して波形を収録する手順を確立した。

(8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

武藤 潤・中村 悠・長濱裕幸・清水以知子・三浦 崇・荒川一郎 (2012), ピンオンディスク摩擦試験による石英非晶質化, 2012 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場, 2012 年 5 月 21 日・22 日。

Nakamura, Y., Muto, J., Nagahama, H., Shimizu, I., Miura, T., and Arakawa, I. (2012) Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces Geophys. Res. Lett. 39 L21303.

中谷 剣・武藤 潤・西川 治・長濱裕幸 (2012), Pulverized Rock の微細構造：サンアンドレアス断層と有馬高槻構造線，2012 日本地球惑星科学連合大会，幕張メッセ国際会議場，2012 年 5 月 21 日・22 日．

中谷 剣・武藤 潤・西川 治・長濱裕幸・大槻憲四郎 (2012), Pulverized rock の微細構造と粒径分布：サンアンドレアス断層と有馬高槻構造線，日本地質学会大阪大会，大阪府立大学，2012 年 9 月 17 日．

Nakatani, T., Muto, J., Nishikawa, O., Nagahama, H., Otsuki, K. (2012), Microstructures and grain size distribution of pulverized fault rocks: Examples from San Andreas Fault and Arima-Takatsuki Tectonic Line, Tohoku University GCOE program Final symposium, Sendai, Japan, 2012 年 9 月 26 日.

大槻憲四郎 (2012), 断層帯の階層的フラクタル幾何の普遍則：地震の多様を支配する鍵，日本地質学会大阪大会，大阪府立大学，2012 年 9 月 17 日．

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

前年度の成果は階層的に自己相似な断層帯の幾何を定式化したことから生まれた。破壊表面エネルギー G_c の大部分はジョグに存在していて、 G_c にはサイズ依存性がある (Otsuki, 2007, JGR, 34, L20305)。ラブチャー先端は、次々と遭遇するジョグの G_c と自らの先端のエネルギー解放率 G を見比べ、前者が大きければそこで停止し、後者が大きければ更に進展していく。線形破壊力学では $G \propto L$ であるが、不均質断面面での有効長さは L の 0.46 乗に比例するので、 $G \propto L^{0.46}$ として G_c と比較し、 L によらず両者がほぼ等しい必要がある。そうであるためには、 G_c のサイズ依存性を決めるパラメータの一つ α (ジョグの幅と長さとの間のべき関係のべき数) が約 0.87 であることを要請する (観察値は 0.6 程度)。Otsuki (2007, JGR, 34, L20305) は、簡単のため、 α を 1 として議論を進めたが、断層運動は散逸過程なので、必然的に進化する。この進化を記述するパラメータのひとつが α であり、具体的には断層滑りのピン止めの強さを表す。本年度は上述の問題を解き明かす。

回転式せん断試験機を用いた実験を系統的に行い、Yabe (2002) で示された、摩擦滑りに伴う AE の波動エネルギーの滑り速度依存性が一般的に観察されるかを検証する。また、Yabe (2008) では、AE の震源パラメータが累積滑りとともに変化することを示したが、その一般性についても検証する。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

矢部康男・大槻憲四郎・他

他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/

(12) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：矢部康男

所属：東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

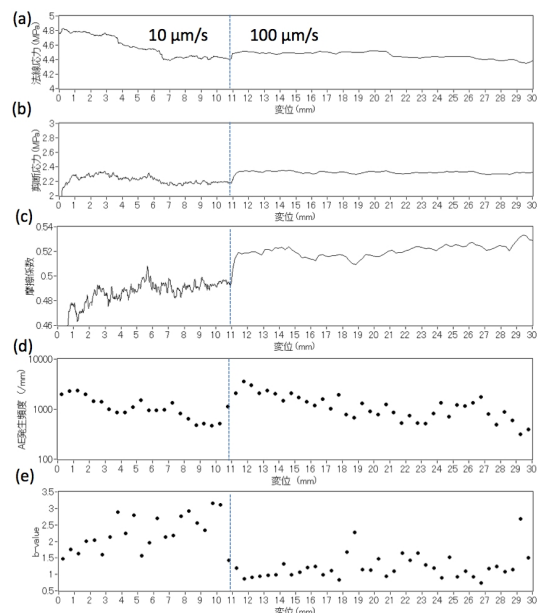


図 1

回転式剪断試験機を用いた速度ステップ実験の結果の一例。試料は円筒形の大島花崗岩で、内径 20mm、外径 30mm のドーナツ状の断層面を持つ。断層面は#60 で研磨。(a) 法線応力、(b) 剪断応力、(c) 摩擦係数、(d) 単位変位あたりの AE の発生頻度、(e) b 値 (規模別累積頻度の傾き)。両対数で表した分布に最小二乗法で直線を当てはめて推定。図の横軸はいずれも実験開始からの変位。図の点線部で滑り速度を 10 μ m/s から 100 μ m/s に、階段状に増加させた。