

(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、真実接触面積のすべり速度・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、歪エネルギーの蓄積過程に対する理解である。一方で摩擦すべ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、摩擦すべ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、室内すべり実験により、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、断層墓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 に関する固着すべり実験をおこなう。

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、摩擦すべりに伴う 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、すべり帯内部の構造（R-シアと Y-シア）と固着すべり過程、強震動による断層破砕帯形成の可能性、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载荷条件依存性を明らかにする。

(7) 平成 23 年度成果の概要：

1) Pin-on-disc 摩擦実験

ディスクに単結晶石英を、ピンにダイヤモンドおよび水晶を用い、垂直応力 10~440 MPa、すべり速度 0.01~2.6 m/s で pin-on-disc 摩擦実験を行った結果、弱いすべり速度弱化が認められた。摩擦トラックスをラマン分光分析した結果、 α 石英の固有振動モード (A1) である 464 cm^{-1} に加えて 490 cm^{-1} (非晶質シリカ 4 員環), 500 cm^{-1} (モガナイト 4 員環), 515 cm^{-1} (コーサイト 4 員環) および 606 cm^{-1} (非晶質シリカ平面 3 員環) のピークが認められた。石英ディスクの赤外分光マッピング分析を行った結果、水分子中の OH 基の対称伸縮を示す 2900 cm^{-1} ~ 3600 cm^{-1} のブロードなピークが摩擦痕上のみに検出された。また、摩擦表面の電子顕微鏡による観察では、直径 200 nm 程度、長さ 5~16 μm からなるダクタイルなロール状粘着性物質が認められた。以上のことから、アスペリティの一部では垂直応力が 1.8 GPa を越え、6 員環からなる SiO_4 中距離構造が変化して平面 3 および 4 員環中の歪んだ Si-O 結合部から選択的に水和反応が進み、摩擦表面に非晶質シリカの水和物を生成したこと、そして非晶質シリカ水和物はダクタイル物質として振舞い、速度弱化を引き起こしたことを示唆する。

2) 摩擦すべり実験に伴う震源核形成と電位変化

石英を含まないハンレイ岩の forcing block および同質の模擬ガウジを用いた高封圧下での固着すべり実験を行い、前兆的電位変化を検出した。電位変化は固着すべりイベント直前のゆっくりすべりに伴っていて、電位変化の大きさはすべりのすべり量に比例する。電位変化はすべり面近傍に設置された 3 対の電極によって局所的に検出された。模擬ガウジ層の微小構造の観察によれば、安定すべりの間に形成されることが知られている R1 リーデルシアが電位変化を検出した電極対の付近で最もよく発達していた。このことは、固着すべりの核形成フェーズの間に R1 シアに沿うゆっくりすべりがあり、それに伴って摩擦電気が発生して局所的に電位が変化したことを示す。この実験結果は、より厚いガウジ層を持つ天然の断層はより大きな前兆的すべりを必要とし、震源核形成フェーズでの電氣的シグナルがより大きいことを示唆する。

3) ガス圧試験器の改良

ガス圧試験機のデータレコーダーを従来の 7 チャンネルから 10 チャンネルに増強し、5MHz で収録できるように拡充した。

ガス圧試験機でサンドイッチ型や direct shear を行えるように、サンプル持具を作成した。

4) 破壊エネルギー計測

天然の地質断層において地震時の断層破損過程を直接観測し、破壊エネルギーを推定するため、課題 1420 及び課題 1423, 課題 2401, 課題 2402 と連携して、南アフリカ金鉱山のひとつであるドリフオンテイン金鉱山の地下約 3.2km の坑道から総延長約 300m の掘削を行い、平成 22 年度に本課題で開発した動的応力変化計 4 台を埋設した。また、断層面の絶対強度を推定するため、動的応力変化計を埋設した掘削孔には課題 1427 と共同で白金測温抵抗も埋設した。平成 22 年度に応力変化計を埋設したイズルイーニ金鉱山では、観測対象断層上で、計器埋設地点から数十 m 以内を震源とする M1 級の地震が数回発生した。現在、これらの地震時にとられたデータを解析中である。

(8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

中村悠, 武藤 潤, 長濱裕幸, 三浦 崇, 荒川 一郎, 2011, ピンオンディスク摩擦実験による石英の非晶質化：ラマン分光分析. 地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ.

中村 悠・武藤 潤・長濱 裕幸・三浦 崇・荒川 一郎, 2011, ピンオンディスク摩擦試験による石英非晶質化. 日本地質学会 118 年学実大会, 水戸.

Nakamura, Y., Muto, J., Nagahama, H., Miura, T., Arakawa, I., and Shimizu, I., 2011, Physical processes of quartz amorphization due to friction. AUG Fall Meeting, San Francisco.

Onuma, K., Muto, J., Nagahama, H., and Otsuki, K., 2011, Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges. Tectonophysics, 502, 308-314.

(9) 平成 24 年度実施計画の概要：

1) 震源核形成と R1 リーデルシアのすべりとが密接に関係していることは、Onuma et al. (2011) を含むこれまでの我々の実験が示唆している。高速すべり直前にゆっくりすべりが起こり、そのときにガウジ層が 5% ほど膨張することをつきとめたが、その詳細に関しては十分な再現性のある結果が得られていないので、改良したサンプル持具を用いて改めて実験を行う。

2) 低封圧下での岩石の摩擦挙動（摩擦不安定性およびラプチャー速度など）を明らかにするために、蛇紋岩などを用いた摩擦実験を行う。ガウジを挟む岩石を高圧下で載荷した後、徐々に封圧を減少させることで、固着すべりが頻発する（予備実験にてすでに確認済み）が、その際の摩擦特性を増強したデータレコーディングシステムにて測定する。特に封圧の減少率と固着滑りの頻度や規模、また一回のイベントのラプチャー速度を比較することで、スロースリップなどの低封圧下（高間激水圧下）での岩石の摩擦特性を調べる。

3) 高速すべりの際の岩石のダメージ発達を調べるために、様々な岩石試料を用いて摩擦滑りに伴う岩石中のダメージ発達（マイクロクラックやガウジ生成など）を調べる。摩擦特性は増強した強したデータレコーディングシステムにて測定し、ダメージ発達具合はマイクロ X 線 CT および薄片観察から行う。不安定すべり前のピーク応力値やラプチャー速度などと断層表面から離れた場所でのダメージ発達を比較することで、Off-fault でのラプチャー進展に伴うダメージ発達及びこれに対する岩石の効果を調べる。

4) 南アフリカ大深度金鉱山における断層破損過程の直接計測を目的とした観測を継続する。イズルイーニ金鉱山で観測点から数十 m 以内で発生した M1 級地震時のデータを解析する。

5) 断層のコンプライアンスを直接計測し、断層透過波と断層コンプライアンスを関係づける基礎理論の較正を行う。

(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