

(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 の震源パラメーターの載荷条件依存性を明らかにする。

(7) 計画期間中(平成21年度~25年度)の成果の概要:

これまでに、摩擦滑りに伴うエネルギー散逸過程の解明を目的として下記を明らかにした。模擬断層ガウジの不安定滑り実験から、不安定滑り直前のゆっくり滑りに伴われる前兆の電位変化を検出した。電位変化は滑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。模擬ガウジ層の微細組織観察から、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、摩擦の不安定性に先立ち、ガウジの粒径減少および電磁波シグナル生成などがR1リーデルシアでのゆっくりとした滑りによって引き起こされることを示唆する。摩擦滑りに伴う鉱物の非晶質化機構の解明を目指し、石英を用いたピンオンディスク摩擦実験を行い、滑り弱化した試料の摩擦物質の分光測定を行った。摩擦に伴い、含水した非晶質シリカやモガナイトといったSiO₄四面体の4員環の存在が明らかになった。これはアスペリティ化の高垂直応力で石英の中距離構造が変化し、ひずんだSi-O結合が形成され、選択的に水和反応することで、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。

また、地震発生時のOff-fault damageの発達過程とその空間分布特性を解明するために、今年度は、サンアンドレアス断層および有馬高槻構造線沿いに分布する粉碎岩(pulverized rocks)の分布調査と試料観察から、フラクタル幾何学を用いて粉碎の度合いを評価した。pulverized rockは、初生的な源岩の組織を残しているが、鏡下にて無数の開口割れ目が発達した断層岩であり、指先で容易に粉碎する。採取試料の岩石薄片を用いた粒径分布測定から、粉碎岩の粒径は数 μ m程度まで、フラクタル分布を示すことが明らかになった。また断層コア(ガウジ)に近づくにつれて、フラクタル次元は増加し、カットオフ粒径(べき乗分布の終わる粒径)は減少することが明らかになった。これまで報告されている天然の断層岩及び実験的に形成された断層ガウジの粒径分布との比較から、粉碎岩は断層ガウジより高いフラクタル次元と大きなカットオフ粒径を持つことが明らかになった。得られたフラクタル次元からワイブル係数を求めると、フラクタル次元の増加により、ワイブル係数が著しく増加することが推定される。ワイブル係数は非変形の岩石試料より大きく、粉碎に伴い粒径の均質化および降伏強度の分散が減少(強度の均質化)したことを示唆する。高ひずみ速度下でおこる粉碎化の理論的モデルから、ワイブル係数の増加により、低ひずみ速度下での単一亀裂形成からより高ひずみ速度での多数亀裂形成へと遷移する臨界応力が減少することが知られている。従って、粉碎岩のフラクタル特性とその破壊様式(剪断ひずみが少なく開口割れ目が卓越)は、断層近傍での激しい高周波振動の存在を示唆していると考えられる。

さらに、累積変位の増加に伴う断層摩擦や摩擦滑りに伴うAE活動の変化を明らかにするため、回転式せん断試験機を用いた摩擦滑り実験を行った。さらに、これらの累積変位依存性に対する法線応力の影響も明らかにした。実験開始直後は、断層の摩擦特性は滑り速度強化であるが、その程度は徐々に小さくなり、ある累積変位で滑り速度弱体化に転じる。その後、滑り速度弱体化の程度はわずかにますが、やがてある一定値に収束する。ここで、摩擦特性が滑り速度強化から滑り速度弱体化に転じる累積変位を特徴的累積変位と呼ぶことにする。摩擦滑りに伴い、断層面上で発生するAE活動の m 値は、最初、2.5程度であるが、累積変位の増加に伴って増加して、3.0程度で一定値に収束する。 m 値の収束に要する累積変位は、特徴的累積変位とほぼ一定していた。さらに、 m 値は滑り速度依存性を示しており、その符号は、実験開始直後は負であるが、累積変位がほぼ特徴的累積変位に達したあたりでほぼゼロに収束する。法線応力を変えて実験をすると、特徴的累積変位は小さくなり、法線応力に反比例するように見える。これらの結果は、地震活動や断層の非地震性滑りの時空間変化から、断層の摩擦特性を推定しうることを示唆する。一方、摩擦係数は、実験開始直後には累積変位の増加に伴い急激な増加を示す。その後、増加率は減少するものの、実験を行った累積変位の範囲(最大約200mm)では、一定値に収束することはなかった。単位滑り量当たりのAE発生数も、実験開始直後に急速に減少し、その後、減少率は低下するが、一定値に収束する様子は認められない。ただし、単位滑り量当たりのAE発生数は、明瞭な滑り速度依存性を示した。すなわち、滑り速度が増加すると、単位滑り量当たりのAE発生数は増加し、その増加率は、累積変位量によらずほぼ一定であった。このことは、小繰り返し地震の発生間隔のような地震活動の増減は、プレート境界の滑りの変動に非常に敏感

に反応することを示唆する。

- (8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
八巻 淳子・武藤 潤・長濱 裕幸・佐々木 治・鹿納 晴尚 (2013), 3 次元 X 線 CT を用いた岩石試料の割れ目のフラクタル幾何学的特性, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 2013 年 5 月 19 日 - 24 日.
平田 萌々子・武藤 潤・長濱 裕幸・大槻 憲四郎 (2013), 模擬断層ガウジの圧密に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 2013 年 5 月 19 日 - 24 日.
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 .
平田 萌々子・武藤 潤・長濱 裕幸・大槻 憲四郎 (2013), 模擬断層ガウジの挙動に関する実験的研究 . 日本地質学会仙台大会, 東北大学, 2013 年 9 月 14 日 - 16 日.
八巻 淳子・武藤 潤・長濱 裕幸・佐々木 治・鹿納 晴尚 (2013), X 線 CT を用いた岩石割れ目の空間分布の異方性・不均質性. 日本地質学会仙台大会, 東北大学, 2013 年 9 月 14 日 - 16 日.
Yamaki, J., Muto, J., Nagahama, H., Sasaki, O., and Kano, H., (2013), Fractal characteristic of fracture in glass or single crystals of quartz by 3D X-ray CT measurement, proceeding in The 6th International Symposium on In-situ Rock Stress, Sendai, Japan, 150.
Yamaki, J., Muto, J., Nagahama, H., Sasaki, O., and Kano, H. (2013), Fractal properties of fracture in rock mineral using 3D X-ray CT measurement, proceeding in 10th Internatinal Workshop 56 on WATER DYNAMICS, Sendai, Japan, 82.
飯田拓郎・矢部康男 (2013), 摩擦すべりに伴う AE 活動と断層の摩擦特性の関係, 日本地震学会 2013 年秋季大会, 神奈川県民ホール, 2013 年 10 月 7 - 9 日 .

- (9) 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

- (10) 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/>

- (11) 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