

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻・上部マントル岩石変形の物理過程の解明

(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：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

イ．地殻活動予測シミュレーションの高度化

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

イ．先行現象の発生機構の解明

(3-2) 地震破壊過程と強震動

ア．断層面の不均質性と動的破壊特性

(4) 地震発生・火山噴火素過程

イ．地殻・上部マントルの物性の環境依存性

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

エ．マグマの分化・発泡・脱ガス過程

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

本震破壊およびその直前の強度低下をともなう脆性領域での断層のレオロジーについては、様々な条件での滑り/破壊実験や、多体系の数値モデル等によりその詳細を解明し、現象の裏にひそむ物理メカニズムをあきらかにすることによって、地震現象への合理的適用を基礎づける。また、地震断層への載荷を直接的に担う深部細粒断層岩の流動則や、沈み込みプレート境界における地震発生モデルに必要なウェッジマントルの力学物性を室内実験によって決定する。さらに、様々なレオロジーのプロセスが共存する地震現象の予測モデルをより現実的なものにするために、脆性-塑性遷移や多相系の複合的レオロジーを表現する合理的な枠組みの確立をめざす。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度は、現在用いられている様々なレオロジー構成則についての現象的、理論的關係を整理し、今後 5 年間の研究を有機的に連携されるための概念的枠組みを検討することで、重点的に行うべき実験の内容を調整するとともに、各実験の技術開発を進める。

平成 22 年度は、予備実験を行い、それぞれの実験技術でカバーできる物理現象とその条件範囲を実際に確認する。

平成 23 年度は、系統的なデータの収集を行なう。

平成 24 年度は、実験データの定量的分析により、様々な条件での各種物理プロセスの重要度を検討し、その結果をフィードバックして、さらに実験を進めるべき領域を決定する。

平成 25 年度は、追加実験と、結果の整理を行う。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

摩擦の微視的物理・化学：地震サイクルにおいて大部分の期間をしめる低速滑りが脆性的な性質と流動的な性質をあわせもつという重要な特徴は、鉱物硬度オーダーの局所的高圧下にある真実接触部分での固体流動現象が基礎となっている。今年度は、モース硬度が 1-9 までの各鉱物の点接触変形を圧痕試験によって調べ、さまざまな鉱物を通して系統的な荷重-圧痕深さ-変形エネルギーの関係をあることを見いだした(図 1)。地震サイクルを支配する岩石摩擦の時間的性質は、ほとんどが花崗岩を用いた研究であるが、鉱物種を通してなりたつこの点接触変形での関係を理解することができれば、一つの岩種での摩擦の性質から、他の岩種の摩擦の性質が推察できるかもしれない。

高速摩擦：本年度は、昨年度に同定した高速すべりの問題についてのアプローチを、予備実験を通してさらに本格化した。高温雰囲気化での高速すべり試験においては、まだ、地震発生場の状況とは異なる酸化的雰囲気(大気)中の実験ではあるが、ドレライト試料、垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s の条件で、室温 1000 °C の一定背景温度の実験と、同一試料で温度を室温から 1000 °C まで変化させた実験を行った。前者の実験では試料と落下したガウジを回収して構成物質と微細構造の温度による変化を調べた。どちらの場合も、摩擦強度は背景温度が室温から 100 °C に上昇した時に急激に低下し、400 °C まで低下した後増加に転じ、800 °C まで増加し、その後再び低下した(図 2)。落下したガウジの X 線回折分析から、室温から 800 °C までの摩擦強度は非晶質物質含有量と負の相関があり、非晶質物質の生成により摩擦強度が低下することが明らかとなった。また、400 °C 800 °C での温度上昇に伴う非晶質物質含有量の減少および摩擦強度の増加は、含鉄鉱物の酸化によって生じた磁鉄鉱・赤鉄鉱含有量の増加に対応している。室温から 100 °C への温度上昇に伴う急激な摩擦強度の低下には、水分蒸発も関与していると考えられる。一方、800 °C 以上での温度上昇に伴う摩擦強度低下については、1000 °C の実験試料の断層面付着物質の微細構造観察と結晶方位解析を行った結果、輝石の酸化分解反応生成物の断層面での粒状流動に起因していることが明らかとなった。図 2 に示されるように摩擦強度の背景温度依存性は大きく、従来観察されている変位速度増加に伴う摩擦強度の著しい低下に対しても、摩擦発熱による温度上昇の影響が大きく寄与している可能性がある。

多体粒子系的高速摩擦：ガウジを含んだ摩擦面において、高速時に粒子衝突によるエネルギー散逸がおこり、強烈な速度強化がおこる可能性を多体系数値シミュレーションで指摘してきたが、今年度は、これを化学反応などを極力排除した摩擦実験で実証することができた(図 3a)。伝統的な摩擦則に従う低速域から、強烈な速度強化のおこる高速域までが実験で示され、さらに、粒径や垂直応力に対する依存性も理論とよく整合する結果がえられた。また、高速域でのみガウジ層の強烈な膨張が観察され(図 3b)、これは、観察された強烈な速度強化の原因がわれわれの理論が主張する粒子の集団ダイナミクスの結果であることの相当直接的な証拠である。また、数値モデルによって、衝突ロスによる摩擦は、速度を変化させたときの摩擦抵抗の変化が低速の摩擦のような特徴的距離ではなく、特徴的時間で規定されるとの結果をえた。これは自然地震の滑り弱体化距離が地震時の全滑り量でスケールされることを意味しており、所謂「Dc パラドクス」へのひとつの回答を示すものである。今年度は、さらに、実際の断層ガウジにみられるようなフラクタル的粒径分布を考慮する試みをはじめた。この問題ととりあつかうには、粒子の粉碎過程を再現する必要があるが、粒径分布関数の時間発展を記述する方程

式を考案し、コアや露頭の試料などから観察されているものに近い、冪指数-2.5の冪乗則分布へと粒径分布が発展していく結果を得ることができた。

下部地殻流動のレオロジー：ウルトラマイロナイトと呼ばれる極細粒岩の超塑性流動が内陸地震の載荷メカニズムとして最も有力なものである。我々が開発した極細粒高緻密多結晶体を用いれば、天然岩石の構成鉱物(オリビン)でも超塑性流動をおこせることを昨年度示したが、今年度は、最大500%まで変形させた試料の微細構造解析により、超塑性流動の過程において構成する鉱物の粒径が著しく増大する(図4)ことを見出した。この粒子の成長は、変形量(試料歪み)で決定されており、本研究で見出された鉱物粒径-歪みの関係則を地震断層深部延長帯に適用したところ、せん断歪み15程度岩石が流動変形すると、これ以上の変形において「超塑性」は発現せず、岩石の流動は転位クリープに転移することが判明した。これにより、下部地殻・上部マントルせん断帯の強度は、そこでの変位量に強く依存することが予想される。

沈み込む海洋地殻岩石の変形：フィリピン海プレートの地殻下部物質が露出しているフィリピン海パレスベラ海盆のゴジラメガマリオンから、塩基性岩と超塩基性岩を採取してその構造岩石学的な特徴を明らかにした。塩基性岩の大部分は、無水はんれい岩ではなく角閃石はんれい岩から角閃岩であった。また角閃岩は強く剪断変形したマイロナイトを含む岩石であり、含水鉱物である角閃石に強い結晶方位異方性を発達させたことがわかった。角閃石は沈み込みによる温度上昇によって脱水分解する際に脱水脆性作用を引き起こす可能性がある。また、海洋底風化作用によって著しく風化した蛇紋岩化したカンラン岩について微細構造解析からフィリピン海プレートマントル最上部の構造と変形の局所化を明らかにした。これらを含む岩石の変形実験と音速測定を同時におこなうために装置の改造・調整をおこない、今年度はメノウとフリントを用いた基礎実験で装置の再現性をたしかめた。

断層面外亀裂の再現実験：地質学的ずれ変位の大部分が、成熟した断層のコア部分の繰替えし滑りによっているのは確かであるが、そこからは多数の副次断層が発生している。それらのずれ変位はわずかでも、副次断層面の形成に要するエネルギーは、地震のエネルギー収支の大きな部分を占める可能性があり、また、地震時破壊エネルギーと地震サイズのスケリングの物理メカニズムとしてもよくとりあげられるものである。われわれは、室内実験でこの現象を再現できる系として、既存弱面をもつアガロースゲルによる実験手法を数年前から模索していたが、今年度はついに弱面の固着度をコントロールして、さまざまな程度の面外亀裂を発生させることに成功した(図5)。亀裂は破壊先端近傍の引張場側だけに生成し、面外亀裂の生成中は主断層の速度が減速する。亀裂生成中のエネルギー解放率は面外亀裂を含めた破壊表面エネルギーの関係はグリフィスの破壊基準をほぼ満たしており、地震の動的破壊と基本的のは同じ力学的枠組みに則った現象であり、有効なアナログ実験系であると考えられる。

微小地震に伴う電位変動観測：先行現象のメカニズムとしてよく提案される微小破壊であれ、本震による破壊であれ、石英等の圧電鉱物が速い歪変化をおこせば、圧電効果による電位変動がおこることは避けがたい。我々は室内実験において、水に飽和した花崗岩でAEが発生する時に石英の圧電効果などにより電位変化が測定されることを示してきたが、石英の結晶軸の向きがそろっていない場合、実験室での結果をどのように微小地震のスケールまで拡張できるかが問題である。我々は、新たに開発した高感度のボアホールアンテナを南アフリカのEzuwini金鉱山内地下1000mに設置して微小地震に伴う電位変動の観測を開始した。観測域の大部分が珪岩である。ランダムな方向を持つベクトルの和の大きさは一般にその個数のルートに比例することが理論的に予測できたので、圧電効果の強さは破壊域の体積のルートに比例すると仮定して実験結果を外挿し、ノイズレベル10mVを超える電位変動をもたらずマグニチュード、震源距離についての条件を求めた(図6)。その際、電気伝導度の違いも考慮した。しかし、今までのところ、この条件を満たす地震は発生していない。一方、地震波が到着した時の電位変化は数多く観測された。アンテナから90mほど離れたサイトに設置してある地震計記録(速度)、及びそれを積分して得られる変位波形と比べると(図7)、速度波形に似ているようである。地震波が透過したときに、圧電効果によって周囲の岩石の歪みに比例した電位変化が生じた可能性もある。その場合、地震波到着より前に変化が現れてもよさそうであるが、これまでのところ、そのよう

な信号は見つかっていない。

(6) と一致した。

(8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Hatano, T., 2010, Constitutive law of dense granular matter, J. Phys. Conf. Ser. vol. 258, 012006.

Hatano, T., 2010, Critical scaling of granular rheology, Prog. Theor. Phys.Suppl. 184, 143.

Harigane, Y., L. Michibayashi and Y. Ohara, 2010, Amphibolitization within the lower crust in the termination area of the Godzilla Megamullion, an oceanic core complex in the Parece Vela Basin, Island Arc, 19, 718-730. doi:10.1111/j.1440-1738.2010.00741.x

Harigane, Y., K. Michibayashi and Y. Ohara, 2011, Relicts of deformed lithospheric mantle within serpentinites and weathered peridotites from the Godzilla Megamullion, Parece Vela Back-Arc Basin, Philippine Sea. Island Arc, in press.

Hiraga, T., T. Miyazaki, M. Tasaka and H. Yoshida, 2010, Mantle superplasticity and its self-made demise. Nature, 468, 1091-1094

井元 恒・道林克禎, 2010. 1GPa, 800 °C におけるメノウ中の石英多結晶体の結晶成長実験. 静岡大学地球科学研究報告, no. 37, 13-19

金川久一・岩邊香苗・東 修平・中谷正生・望月裕峰, 2010, IODP Exp. 315 で採取された南海トラフ付加体浅部泥岩試料の摩擦挙動. 日本地質学会第 117 年学術大会(富山大学)講演要旨, 226.

Kanagawa, K., H. Noda, T. Hirose and A. Inoue., 2010, Effect of background temperature on the frictional strength of dolerite at an intermediate slip rate. Abstracts of the Workshop on Physico-chemical Processes in Seismic Faults (Padova, Italy), 43.

金川久一・野田博之・廣瀬丈洋・井上厚行・海野知子, 2010, ドレライトの中速域における摩擦強度の背景温度依存性. 地球惑星科学連合 2010 年度連合大会予稿集, SSS020-02.

Kuwano, O., Dynamic Fault Rupture Propagation in Agarose-gel, 2010, The International Conference on Science of Friction 2010 Satellite Meeting "Contact and stick-slip dynamics in sliding friction", Tokyo.

桑野修・平野史朗・藤田哲史・日下部哲也・小寺祐貴・亀伸樹・中谷正生・安藤亮輔, 2011, 寒天(アガロースゲル)を用いた断層の動的破壊実験, 日本地震学会ニュースレター, Vol.22, No.6, 1-2, (表紙)(印刷中)

Masuda, T., Miyake, T., Enami, M., 2011. Ultra-high residual compressive stress (> 2 GPa) in a very small volume (< 1 μ m³) of indented quartz. American Mineralogist, in press.

植田直彦・道林克禎, 2010. 1GPa, 800 °C におけるフリント中の石英多結晶体の結晶成長実験. 静岡大学地球科学研究報告, no. 37, 21-26

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

摩擦の微視的機構においては, 圧痕試験データの解釈を深化させるとともに, 天然の断層運動では大事な役割をはたすとかんがえられる水の化学的効果を実験する予定である. 高速・高温摩擦試験では, 含鉄鉱物の酸化が少なからず摩擦強度に影響する結果となったが, 実際の断層運動は酸素に乏しい条件下で起こっている. そこで, アルゴン雰囲気下での実験を行う予定である. 多体系の高速摩擦においては, より現実の断層に近い系の振舞を調べることが目標とし, 粒系分布, 摩擦熱による昇温, 化学的効果などをとりいれていく予定である. 下部地殻のレオロジーにおいては, 上部地殻の代表的鉱物であるオリビンから, 地殻に代表的な鉱物による試料へ実験条件を拡張する. 沈み込む海洋地殻のレオロジーについては, 今年度の解析で重要性が示唆された角閃石のレオロジーを高圧高温変形実験で詳細に調べるとともに, 変形による音速変化も測定する. 断層面外亀裂のアナログ実験においては, 系統的な実験により面外亀裂の角度, 長さ, 間隔とバックグラウンドの応力, 破壊伝播速度の関係を明かにする. 微小地震による電位変動については, 観測を継続する.

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 中谷正生・吉田真吾・波多野恭弘・武井康子
他機関との共同研究の有無 : 有
千葉大学 金川久一
静岡大学 増田俊明, 道林克禎
東京大学大学院理学系研究科 清水以知子

(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 : 東京大学地震研究所
電話 : 03-5841-5763
e-mail : nakatani@eri.u-tokyo.ac.jp
URL :

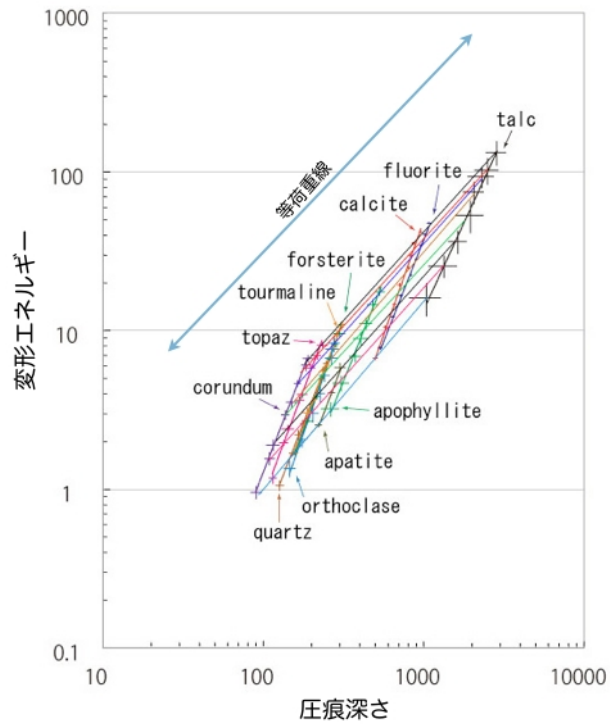


図 1

様々の鉱物の圧痕試験の結果．同じ荷重での試験を細線をつないである．

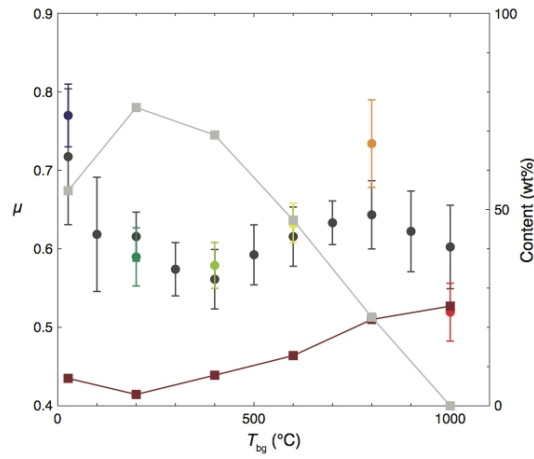


図2
ドレライトの摩擦係数(丸印)、非晶質物質(灰四角)および(磁鉄鉱+赤鉄鉱)含有量(茶四角)の背景温度(T_{bg})依存性

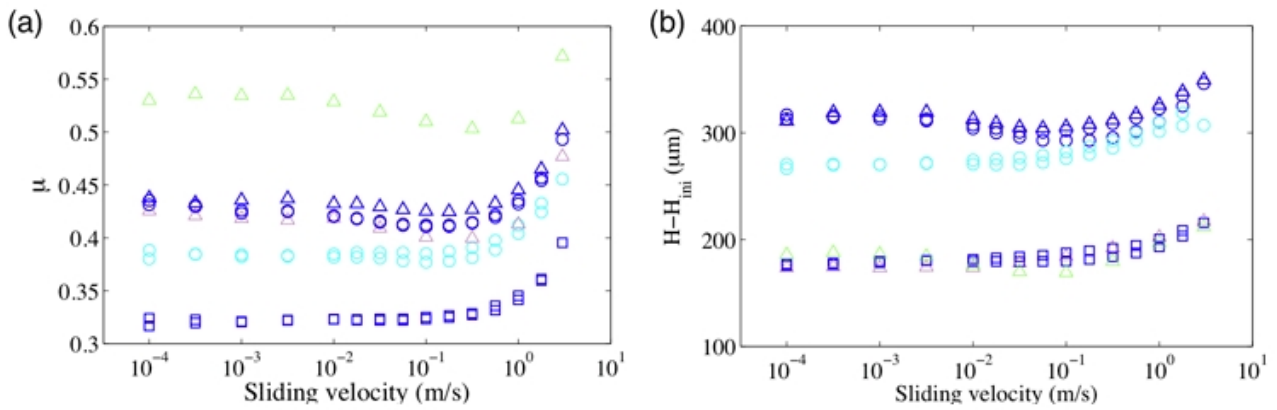


図3
粉体摩擦実験による高速摩擦の発現．(a) 摩擦係数 (b) 層の膨張量

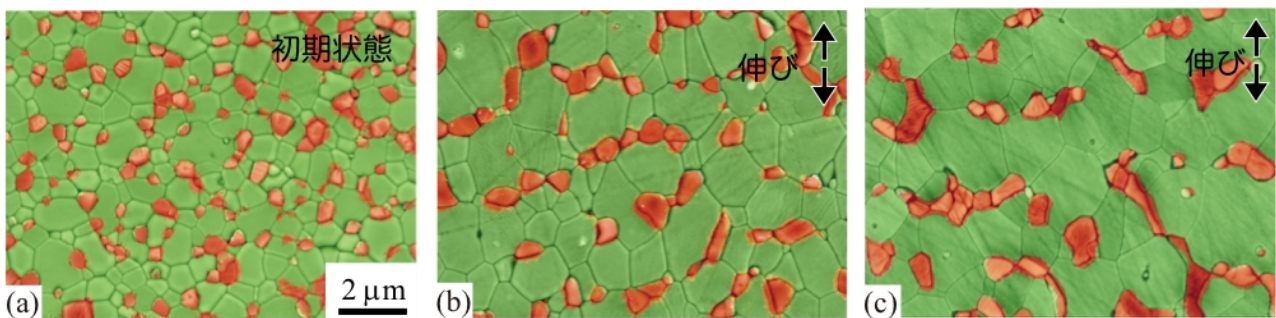


図4
2種の鉱物からなる人工岩石の超塑性変形とともに粒径の成長．(a)->(c)の順に歪みが進行していく

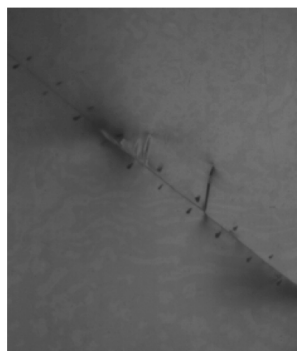


図 5

既存弱面 (左上から右下) をもつアガロースゲルにおける動的断層滑り時の分岐副次断層の形成

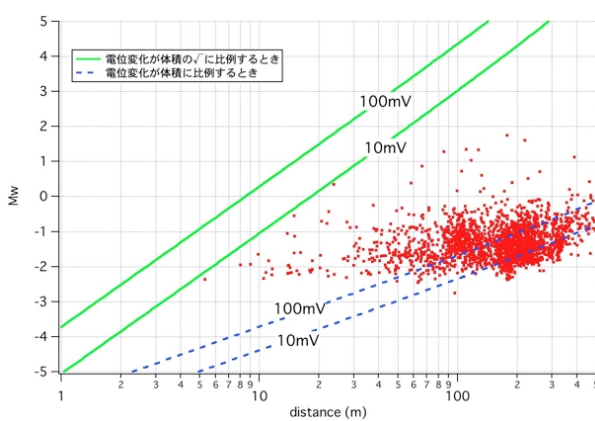


図 6

地震発生時に期待される電位変化の大きさ．電位変化が破壊域の体積に比例する場合と，体積のルートに比例する場合について，アンテナからの距離と Mw の関数として計算した．約 1ヶ月間に発生した地震を赤でプロットしてある．

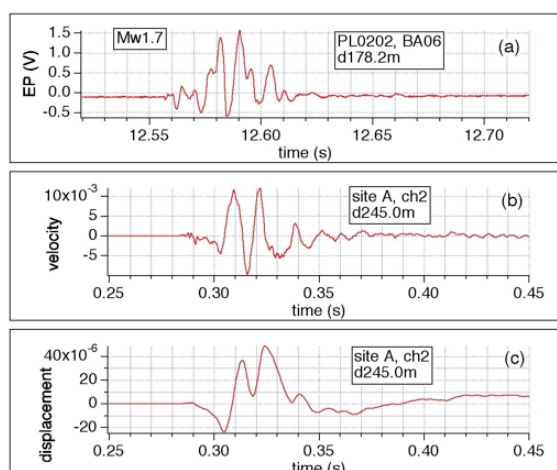


図 7

(a) 地震波が到達した時の電位変化．(b) アンテナから約 90m 離れたサイトでの速度波形 (Ezulwini 鉱山の厚意による)．単位は m/s(c) 積分して得られた変位波形．単位は m