

(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、予備の実験を行い、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 23 年度成果の概要：

高速摩擦：昨年度までの実験で、高温・高速摩擦における強度低下が非晶質物質の生成による可能性が示唆された。そこで、常温・低速における非晶質物質の摩擦を調べるために乳鉢で長時間原岩を粉碎して 39 wt% までの非晶質を含む試料を作成することに成功した。垂直応力約 7 MPa、変位速度 1-10 $\mu\text{m/s}$ で室温下の摩擦実験を行った結果、このような低速域でも非晶質物質を 39 wt % 含む試料の摩擦係数（約 0.55）は非晶質物質を含まない試料（摩擦係数 0.60）より小さいことがわかった。

摩擦の微視的物理・化学：摩擦の物理における古典的モデルである凝着摩擦説によれば、摩擦強度はサンプルサイズによらないはずだが、天然断層での地震時の動摩擦は、実験室で計測されるよりずっと低いのではないかということが度々指摘される。地震時の滑りによる動摩擦の絶対レベルを知るため、南アフリカの鉱山中で M2 級の地震の発生が近いと期待されている断層面を貫くボーリング孔内に高精度の温度センサーを埋設し 5 点で連続観測を開始した。また、昨年度に報告した超微小硬度計による鉱物表面の圧痕形成について、今年度は、結晶方位依存性を調べた。先端角度の異なる圧子 5 種類で試したが、いずれも結晶方位依存性がなく（図 1）、摩擦の基礎をなす真実接触部分での固体流動現象について昨年度報告した圧痕深さ-変形エネルギーの関係は、鉱物学的な詳細の影響をあまり受けないユニバーサルなものであることが示唆される。

二相系のレオロジー：岩石の延性変形領域における流動実験は、岩石を構成する主要鉱物単相の試料を用いて行われることが多いが、現実の岩石は多相系であり、単相系の強度をもって多相系の強度が理解できることは自明ではない。特に地震発生に重要なせん断集中帯の強度やその進化を理解するために、せん断帯で見られる拡散クリープ条件下での二相系の変形再現実験を行ない、第二相粒子の変形挙動に与える影響を調べた。フォステライト-エンスタタイト系で粒成長実験を行い、粒径が第二相（相対的に少ない相の意）の量比、界面エネルギー、Si の拡散係数、時間、歪で決定されることを示した。さらに、このような二相系の量比と共に系統的に変化する粒径を持つ多結晶体の粘性は、粒径と相の強度で決定され、その際、歪速度一定モデルが観察される強度変化をうまく説明できることが分かった（図 2）。著しい粒径変化によって、強度構造が進化することで上部マントルでのせん断変形集中が理解できる。一方、我々は、マイロナイトで見られるのと類似の第二相粒子の衝突合体組織を合成細粒試料の圧縮・引張実験で見出していたが、この組織は同じ試料の捻りせん断試験（ミネソタ大）でも再現され、超塑性的な粒界すべり変形がせん断帯で普遍的に発生することが示唆された。

微小地震に伴う電磁場変動観測：我々は室内での岩石破壊実験において、AE が発生する時やすべり破壊時に電場変動が測定されることを示してきたが、その破壊現象の規模依存性を知らるため、昨年度から、南アフリカの金鉱山内地下 1000 m に設置した高感度のボアホールアンテナにより微小地震に伴う電場変動の観測を行っている。今年度はさらにボアホール磁力計を作成して同鉱山内に設置し、磁場変動の観測も開始した。磁場のある成分（ピオサバル項）は電場成分に比べて地殻伝播中の減衰の影響が小さいからである。これまでの解析では、地震波到達時に電場および磁場の変動が観測されているが、地震発生時の変動は検出されていない。

南海トラフ付加帯浅部物質の力学的・水理学的特性：南海トラフ付加帯浅部（海底下約 1000 m）から採取された泥質堆積物 2 試料（図 3）について、微細構造観察、粒径・孔隙率計測、粉末 X 線回折分析

を行って特徴を把握し、また試料原位置に近い条件で透水実験、破壊実験および摩擦実験を行った。その結果、両者は起源が異なり、力学的・水理学的性質も大きく異なることが明らかとなった。石英や長石などの碎屑粒子に富み粘土鉱物粒子が比較的少ないタービダイト起源泥試料は、孔隙も多く（約 38%）透水性が良い（浸透率 $2.3E-18 \text{ m}^2$ ）。対照的に、半遠洋性泥試料は細粒均質（ $1.40 \pm 1.25 \text{ \mu m}$ ）で、スメクタイトなどの粘土鉱物粒子に富み、孔隙が少なく（約 11%）、透水性が悪い（ $2.9E-19 \text{ m}^2$ ）。これらの試料の破壊試験（図 4a）と、摩擦試験（図 4b）の結果からは、付加体浅部における断層運動に次のような傾向があることが期待される。半遠洋性泥層は変形時に非排水に近い状態となり、高間隙圧層を形成する。付加体浅部に新たに断層が形成される場合、破壊強度が小さい半遠洋性泥層中に形成されやすく、かつ比較的ゆっくりとした断層運動が起こりやすい。半遠洋性泥層中の断層は顕著な速度強化の挙動を示すので、通常地震性断層運動の発生源とはならないが、高い間隙水圧を維持するため、地震性断層運動が伝播すると間隙水の熱加圧によって強度が大きく低下し、大きく変位しやすい。一方、タービダイト起源の泥層は破壊強度が大きく、付加体浅部では断層が形成されにくい、断層が形成される場合は急激な断層運動が起こり、また長期的には速度弱化的挙動を示すので、地震性断層運動の発生源になり得る。しかしながら、排水状態を維持するため熱加圧が起こりにくく、変位量は比較的小さいと予想される。

多体粒子系の摩擦：前年度までに、化学反応などを極力排除した摩擦実験では、高速すべりに強烈な速度強化が起こることを確認した。今年度は、まずこの実験結果を説明する理論を構築した。この理論では粒子の微小変形に伴うエネルギー散逸が速度強化の原因であるとしており、粒子間の摩擦係数には依存しないので、化学反応生成物による潤滑が起こっても、実効圧力が十分低ければ高速領域では速度強化型の摩擦が観察されることを予言する。これを実証するために、花崗岩試料を用いて摩擦熱の影響が無視できない程度の圧力（1MPa）で低速から高速まで幅広いレンジで摩擦実験を行った（図 5）。低速度領域で従来知られている振る舞いを示すことを確認した後、中程度のすべり速度（mm/sec）において顕著な速度弱化的挙動を見出した。この弱化的挙動は他グループによる摩擦実験でもしばしば観察されるものであるが、その微視的原因について、圧力を変化させて系統的なデータをとることにより、弱化的挙動の始まる特徴的速度が圧力に依存しないことを確認し、さらに弱化的挙動の度合いが flash heating 理論によって定量的に記述できることを見いだした。さらに地震滑り程度の高速領域（m/sec）では摩擦が速度強化に転じることを発見した。この強化の度合いは我々の粉体動力学による理論で説明でき、粉体力学的な速度強化が実効圧力 1MPa 程度でも生き残ることが示された。

- (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）：
東修平・金川久一・井上厚行・高橋美紀，2011, IODP Exp. 315 掘削地点 C0002 の付加体泥岩試料の鉱物構成・微細構造と破壊・透水特性との対応関係. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS035-P22, 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ国際会議場.
- Hatano, T., 2011, Rheology and dynamical heterogeneity in frictionless beads at jamming density, *J. Phys. Conf. Ser.* 319, 012011.
- Hatano, T. and O. Kuwano, 2011, Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, *Pure Appl. Geophys.* DOI: 10.1007/s00024-011-0409-9.
- Hiraga, T., T. Miyazaki, M. Tasaka, and H. Yoshida, 2011, Comparison of microstructure of superplastically deformed synthetic materials and ultramylonite: Coalescence of secondary mineral grains via grain boundary sliding (invited), Fall Meeting, AGU, San Francisco.
- 金川久一・東修平・高橋美紀・井上厚行, 2011, 南海トラフ付加体のタービダイト起源泥岩と半遠洋性泥岩の力学的・水理学的性質の相. 日本地質学会第 118 年学術大会, T17-O-14, 2011 年 9 月 10 日, 茨城大学.
- Kawamura, H, T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, Statistical physics of fracture, friction and Earthquake, *Rev. Mod. Phys.*(accepted).
- Kuwano, O. and T. Hatano, 2011, Flash weakening is limited by granular dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17305.

- Masuda, T., T. Miyake, and M. Enami, 2011. Ultra-high residual compressive stress (>2 GPa) in a very small volume ($<1 \text{ um}^3$) of indented quartz. *American Mineralogist*, 283-287.
- Nagata, K., M. Nakatani, S. Yoshida, A revised rate- and state-dependent friction law obtained by constraining constitutive and evolution laws separately with laboratory data, *J. Geophys. Res.* (accepted).
- Nakatani, M., 2011, Growing Dc in conservative slow laboratory friction (invited), ESF Research Conferences - Continuing Challenges in Earthquake Dynamics: New Methods for Observing and Modelling a Multi-Scale System, 24-29 Sept., Obergurgl, Austria.
- Noda, H., K. Kanagawa, T. Hirose, and A. Inoue, 2011, Frictional experiments of dolerite at intermediate slip rates with controlled temperature: Rate-weakening or temperature-weakening? *J. Geophys. Res.*, 116, B07306, doi:10.1029/2010JB007945.
- 高橋美紀・東修平・上原真一・金川久一, 2011, IODP Exp. 315, Site C0002B より採取した付加体中泥岩の破壊および浸透率特性. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, S-SS35-29, 2011 年 5 月 24 日, 幕張メッセ国際会議場.
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, A. Inoue, and K. Kanagawa, 2011, Difference in mechanical and hydrological properties between hemipelagic and turbidite mudstones cored from the Nankai Trough accretionary prism at Site C0002 of the IODP Expedition 315. AGU Fall Meeting, T21B-2337, 2011 年 12 月 6 日, Moscone Center, San Francisco.
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, K. Kanagawa, and A. Inoue, 2012, Contrasting hydrological and mechanical properties between hemipelagic and turbidite muds from the shallow Nankai Trough accretionary prism. International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction Zones, Poster #61, 2012 年 2 月 28 日 ~ 3 月 1 日, 高知市文化プラザかるぼーと.
- Tasaka, M., 2012, Grain-size sensitive creep of forsterite + enstatite aggregates, Doctoral thesis, The University of Tokyo.
- Wada, J., K. Kanagawa, M. Nakatani, H. Mochizuki, T. Hirose, J. Ando, N. Furukawa, and A. Inoue, 2012, Amorphization of dolerite gouges and its effects on their frictional properties. International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction Zones, Poster #109, 2012 年 2 月 28 日 ~ 3 月 1 日, 高知市文化プラザかるぼーと.

(9) 平成 24 年度実施計画の概要 :

多体粒子摩擦理論において、現段階ではパラメータとして与えている粒子間摩擦係数などの微視的情報を直接接触部位における原子論的ダイナミクスを出発点として計算することを目指す。非晶質の摩擦実験においては、非晶質含有量を系統的に変えた実験を行うとともに、速度依存性を調べる。付加体物質についても、より多くの掘削試料について実験を行う。二相系のレオロジーにおいては、第二相粒子の衝突合体組織の成因をより深く検討する。真実接触のプロセスについては、斜長石と方解石での結晶方位依存性を調べる。微小地震による電磁場変動、断層発熱の測定については、サイトの地震活動が高い状態にあり、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：

(12) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：中谷正生

所属：東京大学地震研究所

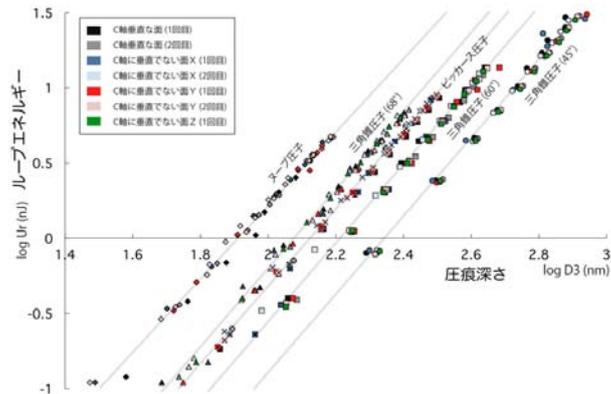


図 1. 様々な結晶方位の面に対する圧痕形成.
試料は石英.

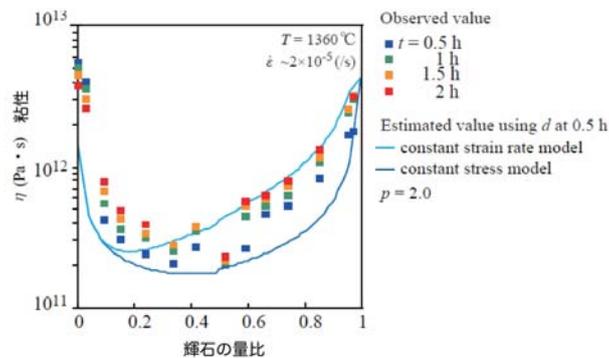


図 2. 二相系のレオロジー.
歪速度一定モデルに整合的である.

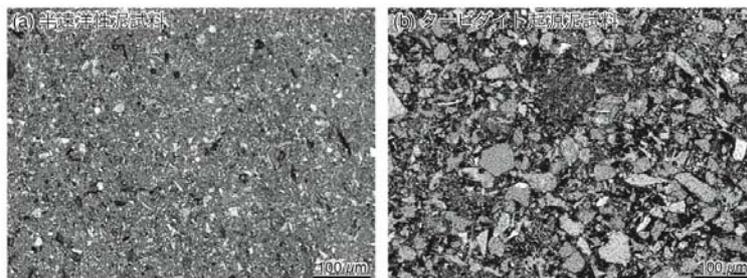


図 3. 半遠洋性泥試料 (a) とタービダイト起源泥試料 (b) の微細構造 (後方散乱電子線像).

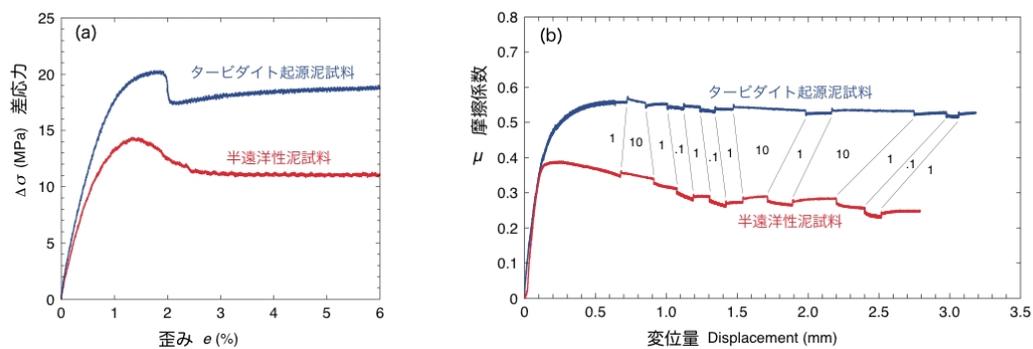


図4. 付加体浅部試料の力学特性 室温、封圧 36 38 MPa、間隙水圧 28 29 MPa における三軸試験 .
 (a) 破壊 . 変位速度 10 $\mu\text{m/s}$ (b) 摩擦 . 数字は軸方向の変位速度 ($\mu\text{m/s}$) .

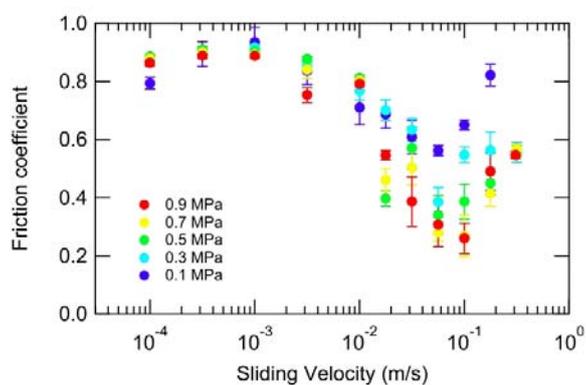


図5 . 花崗岩における摩擦係数の速度依存性. (法線応力 0.1-0.9MPa)
 すべり速度 1mm/sec から数 cm/sec 程度の間では, 摩擦係数は速度に対して負の依存性を示すが, 数 cm/sec よりも速い領域では正の依存性に転じる. この正の依存性は粉体力学による理論で説明可能である.