

(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：

本震破壊及びその直前の強度低下を伴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明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となる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目指す。

(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、予備的実験を行い、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、更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 24 年度成果の概要：

非晶質物質と摩擦特性：昨年度までに、粉砕法によって、非晶質含有量 0-40 wt% の範囲で制御したドレイライトガウジを作成することに成功し、本年度は広い速度範囲での系統的な実験を行った。まず、広島大学の二軸装置を用いて 2-20 μ m/s の低速での速度ステップ摩擦実験を室温及び 120 $^{\circ}$ C で行った (図 1a,b)。ステップ試験での定常摩擦の速度依存性はいずれもわずかに速度弱化であったが、実験した 20mm 程度の全体にわたっての累積変位に対する摩擦の依存性に差が見られた。室温の実験では、非晶質分が高いほど、滑り弱化から滑り硬化に移るが、120 $^{\circ}$ C の実験では、どの試料も摩擦レベルは一定のままであった。これは、室温では実験中に非晶質分に水の吸着が進むためではないかと考えている。ついで、産業技術総合研究所の回転式試験機を用いて、20 μ m/s - 1.3 m/s での広い速度範囲の実験を室温下で行った (図 1c)。試料によらず、4 cm/s 以上では非常に顕著な速度弱化となった。さらに、低速レンジでは、非晶質分が多い試料の方が強いが高速レンジでは逆となり、二軸実験の場合と同じく、非晶質に対する水の吸着と、温度 (この場合は摩擦発熱) による逸失という解釈が可能である。

南海トラフ付加体浅部堆積岩試料の摩擦特性の粘土鉱物含有量依存性：南海トラフ付加体浅部 (海底下約 1000-1500 m) から採取された砂岩、凝灰岩シルト質泥岩及び粘土質泥岩 4 試料について、試料原位置に近い条件 (室温、封圧 36-58 MPa、間隙水圧 28-43 MPa) で、軸方向の変位速度を 0.1, 1, 10 μ m/s でステップ状に変化させて三軸摩擦実験を行い (図 2)、摩擦強度と粘土鉱物含有量に負の相関が認められた。すなわち、粘土鉱物含有量が約 5 wt% の砂岩試料の摩擦係数は 0.8 より大きく、約 15 wt% の凝灰岩試料の摩擦係数は約 0.7、約 30 wt% のシルト質泥岩試料の摩擦係数は約 0.53、さらに、約 40 wt% の粘土質泥岩試料の摩擦係数は約 0.25 であった。また、滑り依存挙動にも粘土鉱物含有量との相関が認められた。すなわち、砂岩試料、凝灰岩試料、シルト質泥岩試料、粘土質泥岩試料はそれぞれ、わずかに滑り硬化、ほぼ定常滑り、わずかに滑り軟化、明瞭な滑り軟化の挙動を示した。全試料とも速度強化の挙動を示したが、摩擦強度の変位速度依存性にも粘土鉱物含有量との相関が認められ、粘土鉱物含有量が多くなると、変位速度依存性に対する流動の影響が大きくなる。

下部地殻のレオロジー：下部地殻の塑性変形が内陸地震発生に重要な役割を果たしていると考えられている (e.g., 飯尾, 2009)。今年度は、下部地殻を代表する鉱物としてアノーサイトを選び、その流動動性について調べた。先行研究でえられている様々な含水率を持つアノーサイト多結晶体の流動則から、下部地殻の条件 (温度 400-700 $^{\circ}$ C、及びマイロナイトで見られる粒径数十 μ m 程度) では拡散クリープで変形すると考えられている。しかし、先行研究で用いられた試料には、多結晶体合成法に起因する水やガラス相が含まれており、結晶のみからなる試料のクリープ則は未だ得られていない。そこで水やガラス相を全く含まない試料を作製し、高温変形実験を行うことで流動則のパラメータを求めた。変形実験の温度は 1150-1380 $^{\circ}$ C、応力は 10-120 MPa、ひずみ速度は 5×10^{-7} から 2×10^{-3} /s、大気圧下で行った。一定のひずみ速度になったところで応力-ひずみ速度を読み取った。実験終了前後の走査型電子顕微鏡観察で、試料の粒径は 1 μ m、変形実験中の粒子成長は見られなかった。応力-ひずみ速度を対数プロットしたところ、線形関係が見られ、その傾きから拡散クリープで変形したと推定された。活性化エネルギーは 490 ± 30 [kJ]、比例定数は $10^{10.71}$ [$\text{MPa}^{-1} \times \mu\text{m} \times \text{sec}^{-1}$] であった。活性化エネルギーは先行研究と同程度だが、実験室の温度領域では 2 桁固く、水やガラス相がないせい

だと考えられる。下部地殻が完全なドライ及び粒径が $10 \mu\text{m}$ として、本研究で得られた流動則を下部地殻温度に適用すると、アノーサイト多結晶体は代表的なマントル物質であるオリビン多結晶体が転位クリープで変形した際に比べて大きな粘性率を持つこととなる。湿潤条件では、ずっと柔くなるはずであるが、それについては課題 1214 に試料を提供して来年度に行う。

摩擦破壊のスケール依存性：摩擦強度に破壊サイズ依存性がないかを確認するための南アフリカ鈹山内での断層面摩擦発熱の観測は、観測点を増やして継続中であるが、ターゲット断層が滑る地震はおきていない。天然環境下での現象の定量をめざした電磁場の計測もあわせて継続している。

破壊・変形の規準として、応力の単位で表現される摩擦強度以外に、 $[\text{J}/\text{m}^2]$ の単位で表される破壊エネルギーがあり、これが地震発生に先行する準静的震源核の大きさを規定することが理論的に知られている。Kato(2012) は、2次元でのサイクルシミュレーションと破壊力学的考察から繰り返し時間の長い地震ほど破壊開始点での破壊エネルギーが高いはずだと指摘した(課題 1702)。静的応力降下が地震のサイズに依存しないという観察から、繰替えし間隔と地震のサイズは同一視できる。このアイデアの拡張として、アスペリティの破壊エネルギーがアスペリティの半径(R)に依存しないと仮定して3次元の地震サイクルシミュレーションを行い、その場合、大きな地震ほど応力降下が低くなり、応力降下一定則が満たないことがわかった(図3)。逆に、破壊エネルギーがRに比例すれば、応力降下一定則がみだされることは、簡単な破壊力学的考察で示すことができる。破壊エネルギーがアスペリティ半径に比例すれば、震源核の半径が本震破壊の半径と比例することが期待できる。

摩擦の微視的物理・化学：摩擦面は、わずかな直接接触部位でのみ応力を支えており、摩擦滑りは最終的にはそのような部分での物質の非弾性変形によって賄われる。そのような変形を理解するために、超微小硬度計を用いた圧痕形成実験を行っているが、今年度は結晶方位異方性について徹底的に検討した(図4)。石英単結晶試料の方位を変え、5種類の圧子を用いて試した。それぞれの圧子について、全ての結晶方位のデータは同一直線上にのり、結晶方位依存性がないことが分かった。また、直線の傾きは圧子の種類にかかわらずほぼ同じであることも分かった。

岩石の準静的な滑りの摩擦特性は速度・状態依存摩擦法則という巨視的経験則によって記述され地震発生の研究で多く用いられているが、直接接触部位の微視的クリープ変形過程に基づいてその理論的導出を行い、経験則に含まれるパラメータ群や状態変数の微視的表現が得られた。特に臨界滑り量の微視的表現が初めて得られたことは特筆される。

臨界滑り量(Dc)は先述の破壊エネルギーを支配する主要因であるが、最近の実験は、伝統的な低速滑りの実験で見出されるmm以下のものより何桁も大きな臨界滑り量をもつ現象が発見されている。多くの場合それは高速滑り特有の熱軟化・ゲル化等の物性変化によると考えられているが、Chambon et al.(2006)は、低速($10 \mu\text{m}/\text{s}$)滑りがかつ滑りのほとんどが数粒子厚以下に狭く局在している状況下でもバックグランドに厚い粉体層があれば、数十cmという長いDcが可能なことを発見した。これは、地震発生場で一般的に期待される環境で動的破壊に移る前の震源核が非常に大きくなりうることを示唆する重要な結果である。我々は、前年度までに粒子自体の物性変化を極力排した実験で、高速滑りにおいては多体粒子相互作用に支配される新たな摩擦メカニズムがあることを証明したが(Hatano and Kuwano, 2013)、今年度はこの系に厚い粉体層をはさんで実験し、10mクラスの長大なDcをもつ摩擦の緩和を見いだした(図5)。滑り速度の急減速時も加速時と対称な応答を示したので、粒子自体の物性変化ではなく、多体粒子系の構造変化が原因である可能性が高い。また、摩擦緩和に対応した粉体層の厚味変化も観察された。

摩擦強度の回復は、さまざまな時定数をもつ物理化学過程で起こりうる。Kato and Yoshida(2011)は東北地方太平洋沖地震の数値シミュレーションを行い、M7級地震を引き起こすアスペリティでは大地震の直後から固着が開始し、周囲で起こる余効滑りにより次のM7級地震が早められると予測した。仮定した速度及び状態依存摩擦則では非常に速く強度が回復するためである。しかし、GPSデータの解析によるとM7級地震のアスペリティで発生後1年経っても固着が見られないという報告もある。そこで、室内実験で示されている強度回復の物理化学プロセスに固有のカットオフタイム(e.g., Nakatani and Scholz; 2004, 2006)を導入し、固着開始がどのように遅れるか数値シミュレーションで調べた。実

験によればカットオフタイムは 10 桁程度変わりうる。数値計算の結果、カットオフタイムが長いと確かに固着開始は遅れるが、同時に最大滑り速度も遅くなり、地震性の高速滑りを起こせるような場合には、固着開始は 1 か月程度しか遅れないことが分かった。実際の地震では強度回復に異なる二種類以上の素過程が関与していると考えられている。そこで、異なるカットオフタイムを有するふたつの素過程に基づく摩擦則を定式化し、更に検討を進めた。最大滑り速度は短い方のカットオフタイムで規定され、全体的な固着の遅れは長い方のカットオフタイムの影響を強く受けるため、結果として、ひとつの素過程を仮定した場合に比べ、高速滑りの後に大きな固着遅れが生じることが分かった。

地震発生を支配するさまざまな変形過程について、現実的な条件での定量的な測定と物理機構の解明・また、そこから予測される地震発生の特性についての洞察が深まっており、到達目標にむかって順調に進展した。

(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) :

Hatano, T. and O. Kuwano, 2013, Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, *Pure Appl. Geophys.* 170, 3.

金川久一・東 修平・高橋美紀・上原真一・井上厚行, 2012, 南海トラフ付加体浅部の半遠洋性・タービダイト起源泥質堆積物の力学的・水理学的特性. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS38-27.

Kawamura, H., T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, 2012, Statistical physics of fracture, friction and Earthquake, *Rev. Mod. Phys.* 84, 839.

高橋美紀・東 修平・上原真一・井上厚行・金川久一, 2012, 南海トラフ付加体中の半遠洋性およびタービダイト性泥岩の水理特性・強度・摩擦特性の違いについて. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-P12.

高橋美紀・東 修平・上原真一・金川久一・井上厚行, 2012, 南海トラフ付加体浅部泥質堆積物の摩擦特性. 日本地質学会第 119 年学術大会, 大阪府立大学, T5-O-4.

Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, K. Kanagawa, and A. Inoue, 2013, Contrasting hydrological and mechanical properties of clayey and silty muds cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism. *Tectonophysics*, doi: doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.008, in press.

和田純一・金川久一・中谷正生・望月裕峰・廣瀬丈洋・安東淳一・古川 登・井上厚行, 2012, 粉碎によるドレライトの非晶質化とその摩擦特性に対する影響. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-P21.

和田純一・野田博之・岡崎啓史・安東淳一・金川久一・井上厚行・廣瀬丈洋・片山郁夫, 2012, ドレライトガウジの非晶質化と摩擦特性に対する影響. 日本地質学会第 119 年学術大会, 大阪府立大学, R12-P-2.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

摩擦強度に対する非晶質の効果が水の吸着によるものであるという仮説について、滑り面の温度の計測、窒素雰囲気化での実験等の検証を行って論文化する。付加体物質の摩擦試験については、温度・圧力・間隙水圧に対する依存性を調べる。下部地殻のレオロジーに関しては、アノーサイトに引き続いて、石英の多結晶合成を目指し、地殻条件下での岩石レオロジーの総まとめをおこなう。また、アノーサイト試料の湿潤条件下でのレオロジーについては課題 1214 に試料を提供して調べる。さらに、天然の岩石でよく見られる、鉱物の選択配向の影響を調べるために、配向性をもった多結晶体の人工合成を試行する。摩擦のスケール依存については南アフリカでの観測を維持してターゲット断層での地震を待つ。また、3 次元の地震サイクル計算を用いた破壊エネルギーのスケールリングの考察を進める。多体粒子系的高速摩擦について、天然の断層ガウジのように粒子サイズが広い分布をもつ系についてはまだ取り扱っておらず、この方向への拡張を試みる。また、力学的結果でなく天然との比較において有用と思われる、粒子サイズの偏析について数値実験での再現を目指す。また、厚い層での長い Dc の発現について、層厚等を系統的に変化させた実験を行う。

(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

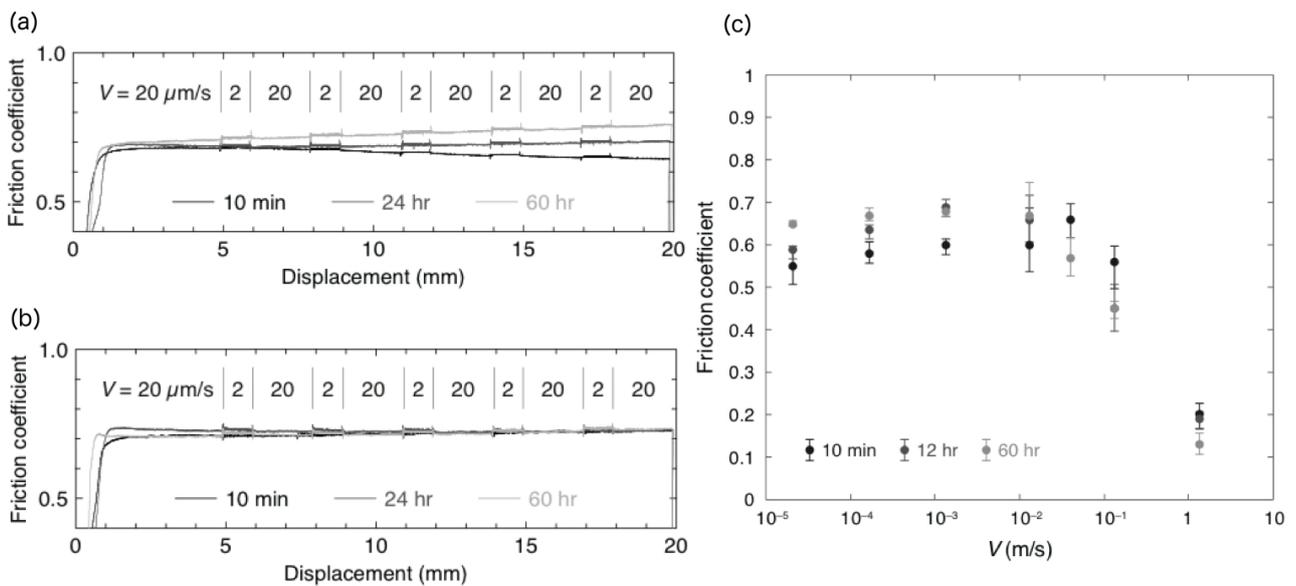


図1. 10分, 24時間, 60時間粉砕ドレイライト試料の摩擦実験結果.

(a) 二軸低速ステップ試験, 法線応力 20MPa. 室温. (b) 同, 120 . (c) 低-高速の回転式試験における定常摩擦. Iは変動幅. 法線応力 2MPa. 室温.

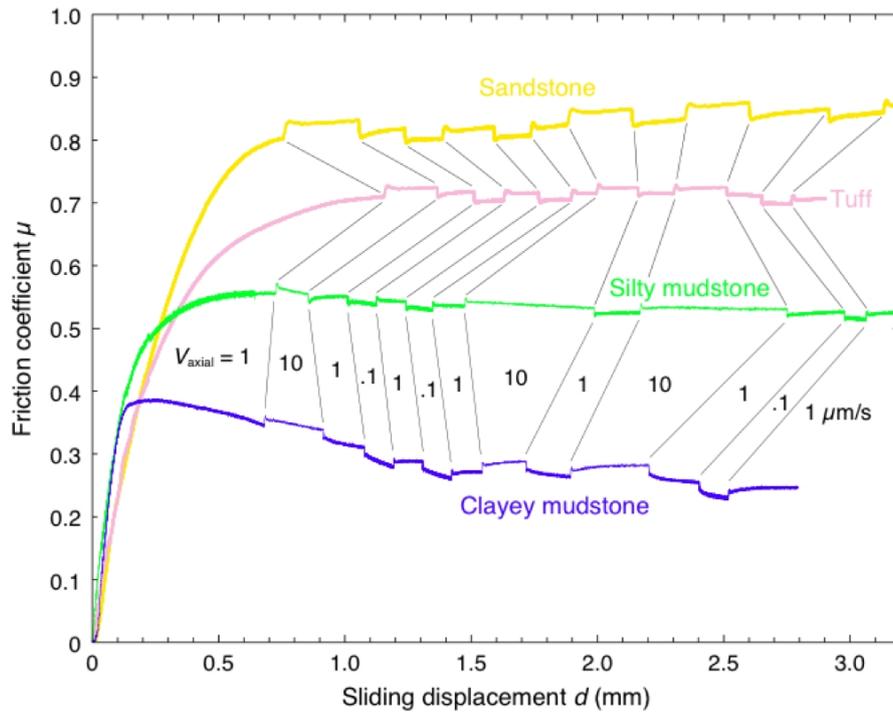


図 2 . 付加体浅部堆積岩試料の摩擦係数-変位量曲線 .
 数字は軸方向の変位速度 .

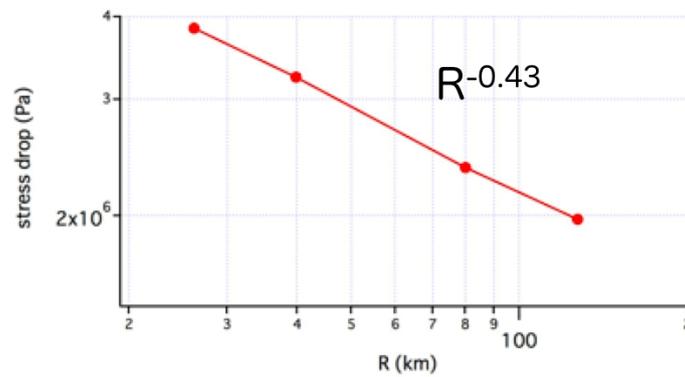


図 3 . スケール依存性のない摩擦則から期待される応力降下量 .
 摩擦の特性滑り距離がアスペリティ半径 R に依存しないと仮定した場合の 3 次元サイクルシミュレーションで予想された応力降下量の地震サイズ依存性 . 特性滑り距離は 0.1 m, 速度弱化パラメタ 0.7MPa とした .

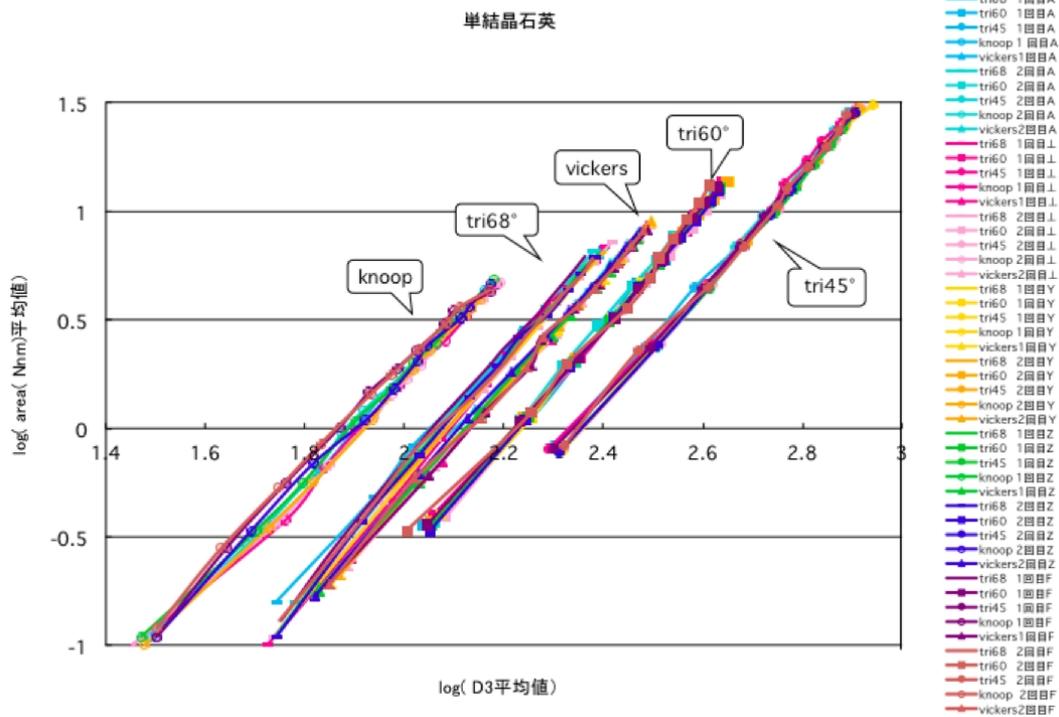


図4．圧痕形成プロセスの結晶方位依存性の検証実験．

用いた5種の圧子べつにプロット．荷重は，10-100 mN．横軸は圧痕の深さの対数，縦軸は圧痕を作るときに費やされたエネルギーの対数．結晶方位は右の凡例を参照．

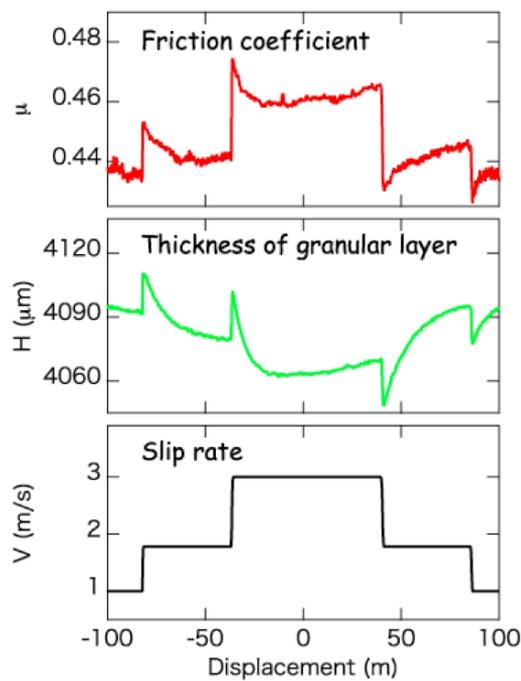


図5．厚い粉体層での高速ステップ試験．

上から，摩擦係数，層厚，滑り速度．横軸は滑り変位．