

( 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 ) 計画期間中 ( 平成 21 年度 ~ 25 年度 ) の成果の概要 :

地震現象に関連する非常に広い速度範囲での摩擦特性とその背後にあるメカニズムが、多岐にわたる実験によって次々明らかになり、その知識に基づく自然現象へのスケールリングが検討された。低い法線応力下での粉体層の摩擦については、統一的な実験を通して図 1 に示すような 3 つの領域が示され (Kuвано and Hatano, 2011, Kuвано et al., 2013a), それぞれのステージを支配する物理モデルおよびその移り変りの理論を提示した (Kuвано et al, 2013b)。

低速域での摩擦は、地震サイクルのモデルで標準的に使われている速度・状態依存摩擦則に従う。今年度その次元解析的側面を明らかにした (波多野, 2013)。また、現象論的摩擦パラメータを、真実接触部位での微視的プロセスから導出しスケールリングの理論的基礎を構築した。真実接触部位の局所的超高応力下で駆動される微視的クリープについては、超微小硬度計を用い徹底的な圧痕形成試験を行い、今年度は荷重範囲を拡張したが、鉱物種や結晶方位、試験法によらないユニバーサルな挙動 (図 2) がみられた (Masuda et al., 2011; 増田・大森, 2013)。また、微視的クリープの素過程の反応速度を考慮して大地震後のプレート間固着回復のスケールリングを行った (Yoshida et al., 2013)。今年度はさらに、Cheng and Lapusta (2009) が繰り返し地震のスケールリングを説明するために提案した速度弱化領域の一部分だけが破壊するモデルを用いて、2011 東北地方太平洋沖地震後の繰り返し地震の発生間隔と規模の変化を説明した (図 3)。

図 1 の中速域における顕著な速度弱化については、様々な実験で確認され、表面のゲル化等がその原因としてあげられているが、われわれは、そのような物質変成のおこりえない条件でもこれを見だし、真実接触部の局所的な温度上昇で定量的に説明できることを示した (Kuвано and Hatano, 2011)。

地震時の断層滑り速度程度の高速域での顕著な速度強化 (図 1) は、我々が新たに発見したもので、摩擦物の動的再配置に伴う散逸過程として定量的に説明できる (Hatano and Kuвано, 2013)。これが 1MPa 程度の法線応力でも可能であることを実験し示すと同時に、高速ステージの緩和過程を記述する新しい発展法則 (Hatano, 2009) も発見した。この発展法則はいわゆる「臨界滑り量」が全滑り量に比例することを帰結し、摩擦特性のスケール依存性に関する重要問題に全く新しい解釈を与えるものである。さらに臨界滑り距離については、速度急変時に過渡応答を調べられるようになり、10 m クラスの長大な臨界滑り量をもつ摩擦の緩和を見いだした。この摩擦緩和は滑り速度の急減速時も加速時と対称な応答を示し、それに対応して粉体層厚も変化しており、多体粒子系の構造変化が関与していると考えられる (桑野ら, 2013d)。本年度はこの緩和過程に対して粉体層全体の厚みがどのように影響するかを調べた。その結果、速度急変に対する瞬間的応答の大きさは粉体層の厚みにほとんど依存しないが、緩和は層が厚いほど大きいことが分かった (Kuвано et al., 2013c,e)。したがって層全体にわたる多体粒子系の遅い応答が緩和を支配している可能性が高い。天然の断層破碎帯の主滑り面は数 mm と非常に薄いものであるが、実験結果からはその外側も含む破碎帯全体の厚みが断層の過渡応答に影響する可能性が示唆される。

一方で、天然の環境下では、鉱物が様々な化学反応をおこすのはあきらかであり、それが摩擦の性質を変えてしまうかを検討する必要がある。また、高速滑りにおける摩擦挙動の変化が、摩擦発熱による温度上昇のせいなのか、それによる材料の変質によるのか、あるいは、滑り速度そのものの影響な

のかをみるためには、これらを独立に変えて調べる必要がある。我々は、複数の試験機と実験手法を組合せて、ドレライトの摩擦試験を室温から 1000 程度まで、広い速度範囲で行い、また、今年度は、化学反応を抑えるために窒素雰囲気下でも実験を行ない(田中ら, 2013), それらを総合していくつかの物質変化と摩擦への影響をみいだした。1) 輝石の酸化分解反応による細粒の生成物の碎屑流動が摩擦を低下させる。実験では 800 程度でおこった (Noda et al., 2011)。2) 400-800 程度での含鉄鉱物の酸化による磁鉄鉱・赤鉄鉱の増加と、それに相関した摩擦の増加 (Noda et al., 2011)。3) 鉱物の極度な機械的損傷によって生じる非晶質成分は直接的には摩擦にあまり影響しないが、非晶質への吸着水には、毛管凝縮による凝着力を通して摩擦を増加させる効果があり、また、摩擦発熱による急激な脱水は、間隙圧効果を通して強度低下をもたらさう(和田ら, 2013)。

粘土鉱物は、機械的性質が他の鉱物とは大きくことなり、流動的な性質をもつことがよく知られており、その含有量は断層の性質に大きな影響があると考えられる。我々は、ODP 掘削によって得られた南海トラフ付加体浅部体積物試料の分析と、各試料の現位置条件での種々の水理・変形試験を行い(図 4)、粘土鉱物含有量への系統的な依存性を見出した (Kanagawa et al., 2012; Takahashi et al., 2013)。特に粘土鉱物含有量の高い泥岩試料(図 4, C2516)の諸々の性質は、それらが南海トラフ付加体浅部で観測されているスロースリップの発生源となっている可能性を示唆するものである。

地震そのものである断層の滑りの理解とならんで、本課題のもうひとつの大きな目標は、地震が発生する脆性断層を載荷する下部地殻、上部マントルの流動を支配する塑性変形のメカニズムを理解することであった。我々は、独自に開発した高緻密極細粒鉱物多結晶体を用いて高温・大気圧下でのクリープ試験を行うことで、硬質珪酸塩鉱物において超塑性による変形をはじめて実現し (Hiraga et al, 2010a), 研究が飛躍的に進んだ。まず、上部マントルを代表するカンラン石-輝石系を用いて、二相目鉱物の量比が多くなるにつれてクリープ強度が一桁以上下がることを示した (Tasaka et al., 2013b)。この低下は、岩石が粒径依存型の拡散クリープで変形すること、岩石中の二相目鉱物の増加と共に平均粒子径が小さくなること (Hiraga et al., 2010b; Tasaka and Hiraga, 2013a) でよく説明され、様々な岩石に適用可能な第二相分率の効果を入れた多相系流動則を提案した。さらに、カンラン石-輝石系での粒成長実験から、それぞれの鉱物粒径の比が第二相分率でよく表される(ゼナー則に従う)ことを明らかにし、今年度はこの関係が、天然のペリドタイトマイロナイト中の 10 ミクロンから 1 ミリにかけての広い粒径範囲で成り立っていることを示した (Tasaka et al., 2014)。

また、剪断実験変形試料の微細構造解析により、超塑性変形に特有の圧縮方向への同相粒子集合化構造(図 5)と変形誘起粒成長を見出した (Hiraga et al, 2010a)。今年度は、同相粒子集合化は粒界滑りの結果生じること、また集合化が変形誘起粒成長の原因であることを示すとともに、集合化構造を天然のウルトラマイロナイト中に見出し、自然界における粒界滑り変形を初めて実証した (Hiraga et al, 2013)。これは、としてこれまで常識とされてきた、変形に伴う鉱物相の分散という、断層深部延長等の塑性変形局所化を可能にするメカニズムが、実際には働かないということの意味している。また、変形誘起粒成長則をマントルせん断帯にも適用し、その強度が 10 万年程度で 2 桁も増加することを示した (Tasaka et al., 2014)。

(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)：  
波多野恭弘, 2013, 摩擦法則におけるミクロ・マクロ対応, 表面科学 34 巻 2 号 p.62-67.

Hiraga, T., T. Miyazaki, H. Yoshida, M.E. Zimmerman, 2013, Comparison of microstructures in superplastically deformed synthetic materials and natural mylonites: Mineral aggregation via grain boundary sliding. *Geology*, doi:10.1130/G34407.1.

Kuwano, O., R. Ando, and T. Hatano, 2013a, Granular friction in a wide range of shear rates, *POWDERS AND GRAINS 2013: Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, AIP Conf. Proc. 1542, pp. 32-37.

Kuwano, O., R. Ando, and T. Hatano, 2013b, Crossover from negative to positive shear rate dependence in granular friction, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1295-1299, doi:10.1002/grl.50311.

- Kuwano, O., M. Nakatani, T. Hatano, and H. Sakaguchi, 2013c, Relaxation processes of a thick granular layer at seismic slip rates, AGU 2013 Fall meeting, MR13A-2274, San Francisco, Calif., 9-13 Dec, 2013.
- 桑野 修・中谷正生・波多野恭弘・阪口 秀, 2013d, 高速剪断される厚い粉体層の緩和過程, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉.
- 桑野 修・中谷正生・波多野恭弘・阪口 秀, 2013e, 高速すべり速度ステップ実験で観察された長い Dc, 日本地震学会 2013 年秋季大会, 横浜.
- 増田俊明・大森康友, 2013, 石英のマイヤー硬度: 結晶方位依存性について. 日本地質学会第 120 年学術大会, 仙台.
- 高橋美紀・東 修平・伊東英紀・金川久一・井上厚行, 2013, 南海トラフ付加体浅部堆積物の摩擦特性. 日本地質学会第 120 年学術大会, R13-O-1, 仙台.
- 田中伸明・和田純一・金川久一, 2013, 窒素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強度の温度依存性. 日本地質学会第 120 年学術大会, R13-P-2, 仙台.
- Tasaka, M., T. Hiraga, 2013a, Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 1: Grain size and grain growth laws. J. Geophys. Res. DOI: 10.1002/jgrb.50285.
- Tasaka, M., T. Hiraga, M.E. Zimmerman, 2013b, Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 2: Deformation experiments. J. Geophys. Res. DOI: 10.1002/jgrb.50284.
- Tasaka, M., T. Hiraga, K. Michibayashi, 2014, Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 3: Application of grain growth and flow laws on peridotite ultramylonite, J. Geophys. Res. DOI:10.1002/2013JB010619.
- 和田純一・金川久一・大橋聖和・高橋美紀・北島弘子・井上厚行・廣瀬丈洋・安東淳一, 2013, ドレライト粉砕ガウジの吸水と低～高速摩擦特性に対する影響. 日本地質学会第 120 年学術大会, R13-P-3, 仙台.
- Yoshida, S., M. Nakatani, and N. Kato, 2013, Recovery of plate coupling at a ruptured asperity, J. Geophys. Res., doi: 10.1002/jgrb.50172.

( 9 ) 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

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

( 11 ) 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

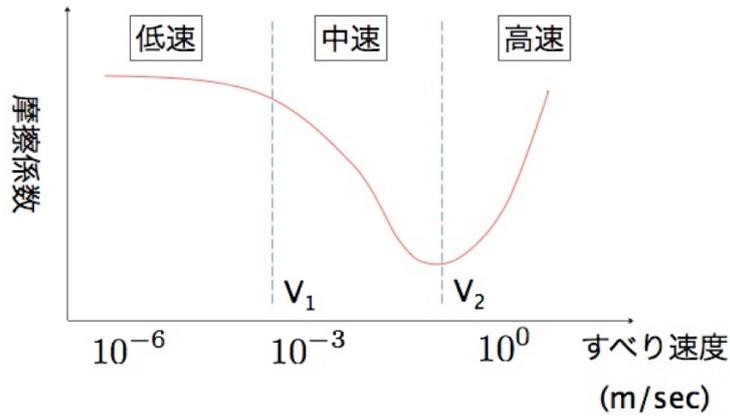


図 1.

低い法線応力下での粉体層の摩擦における，滑り速度に応じた3つのステージ(概念図)．それぞれは異なる物理過程が支配し，構成法則も異なる．物理過程のクロスオーバーが起こる条件として  $V_1$  と  $V_2$  が求まる．実験と物理モデルによって，我々はその具体形を求め，スケール依存性まで明らかにした．

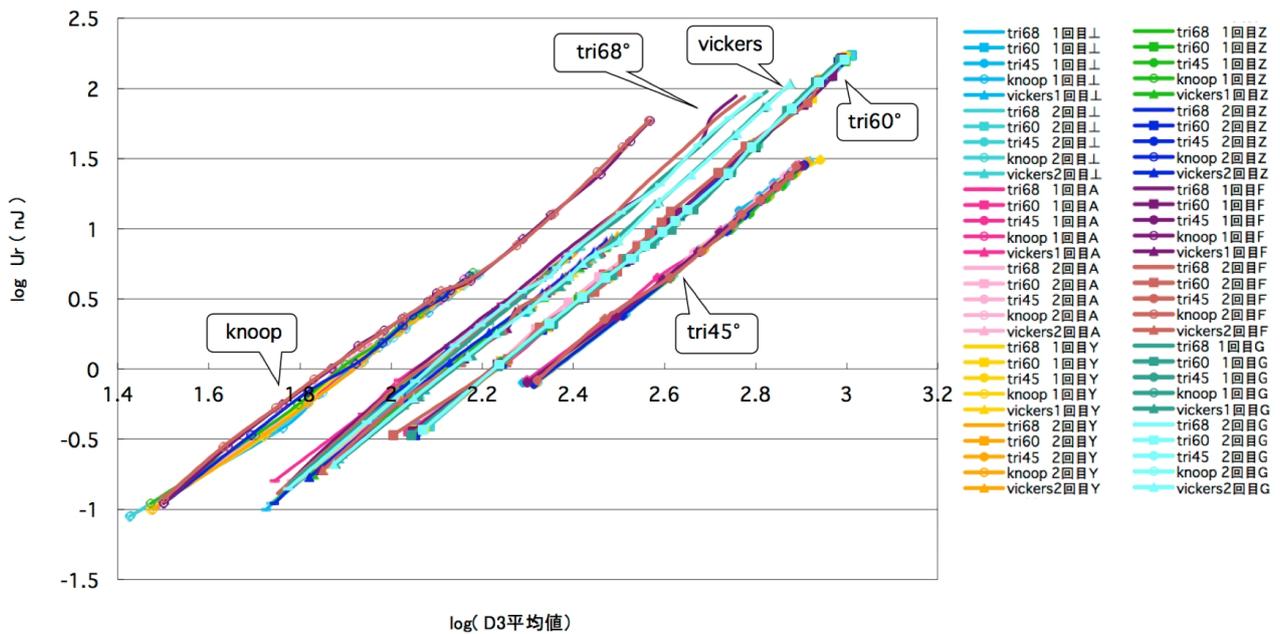


図 2 .

単結晶石英表面での圧痕形成実験の結果のまとめ．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である．5種類の圧子を用いたので，別々にプロットした．いろいろな結晶方位のデータが同一直線上にのっており，結晶方位依存性がないことがわかる．直線の傾きは圧子の種類にかかわらずほぼ同一であることも分かった．また，モース硬度 1-9 の各種鉱物表面でも同じ傾きが得られている．

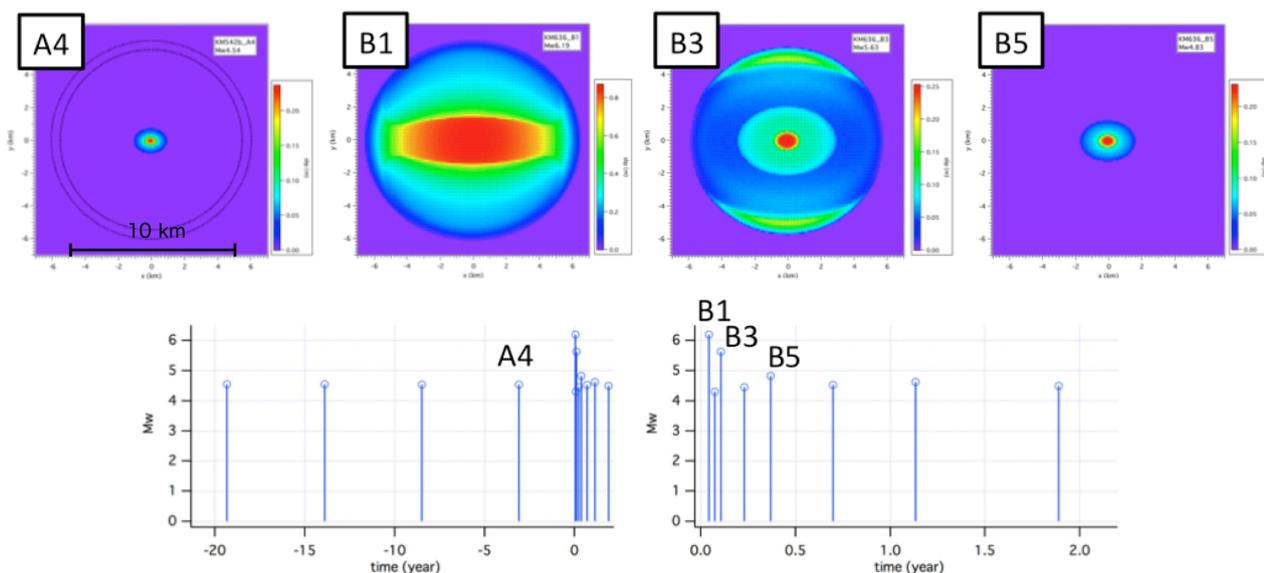
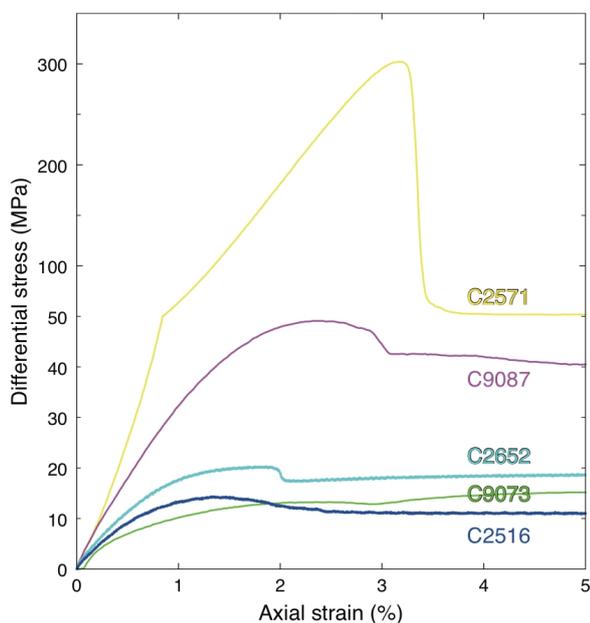


図 3.

2011 東北地方太平洋沖地震後の繰り返し地震の発生間隔と規模の変化を説明する地震サイクルシミュレーション。上段) 同じ速度弱化パッチ (半径 5.5km) 内で繰り返しおこった地震のうち四例における地震時滑り分布。パッチの物性は同じだが、载荷速度の違いにより規模の異なる地震が起きた。地震時に滑らなかった部分では、それ以前にクリープして滑り遅れが解消されている。モデル領域に対する载荷は、東北地震の余効滑りの観測結果 (Fukuda et al., 2013) を説明できるように調節してある。下段左) 予測されたマグニチュードの時系列。下段右) 地震後の部分を拡大してしめたもの。



Sample	Clay content (wt%)	Porosity (%)	P <sub>c</sub> (MPa)	P <sub>p</sub> (MPa)	Permeability (m <sup>2</sup> )
C2516	42.0	11.2	36	28	2.9×10 <sup>-19</sup>
C2571	5.7	0.7	37	29	N/A
C2652	34.1	38.5	38	29	2.3×10 <sup>-18</sup>
C9073	29.4	29.5	57	43	N/A
C9087	17.2	27.4	57	43	3.4×10 <sup>-19</sup>

図 4.

南海トラフ付加体浅部堆積物試料の三軸変形試験結果。各試料の現位置条件 (右表の P<sub>c</sub>, P<sub>p</sub>) で試験を行った。表には粘土鉱物の含有量と、測定された間隙率、透水率も示してある。C2516:粘土質泥岩, C2571:方解石による膠結の進んだ砂岩。C2562:シルト質泥岩, C9073:シルト質泥岩, C9087:凝灰岩。

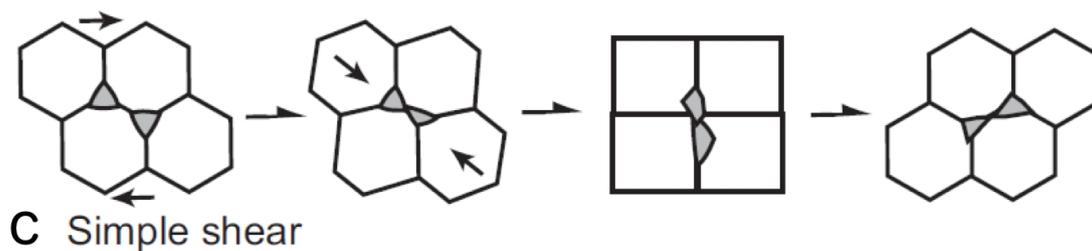
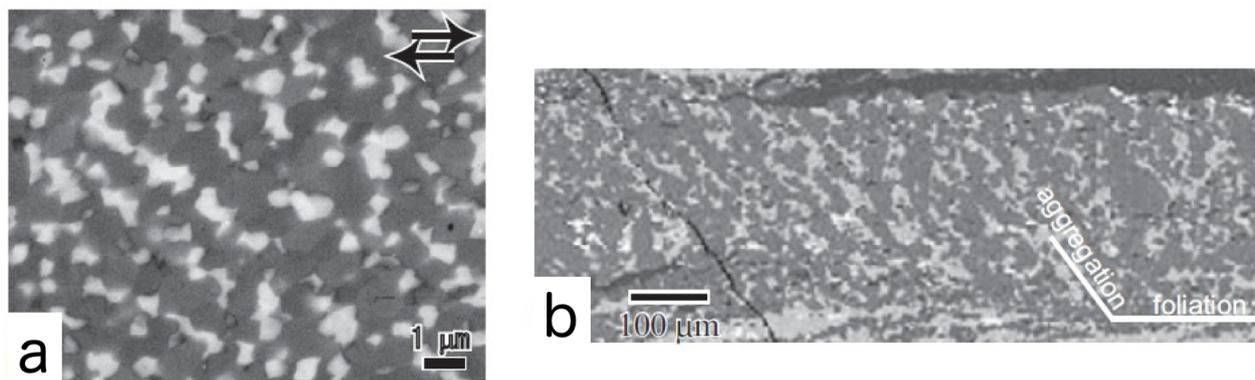


図 5.

二種の鉱物からなる多結晶体の超塑性変形に特有の圧縮方向への同相粒子集合化構造。すべて水平方向がせん断方向の右横ずれ変形 a) せん断変形実験後の微細構造。灰色粒子がオリビン, 白色粒子が輝石. b) 花崗岩起源ウルトラマイロナイト. c) 粒界滑りに伴う同相粒子集合化構造の形成モデル. 粒界滑りに伴う粒子のスイッチング + 同相粒子合体.