

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540487

研究課題名 (和文) 大陸地殻の脆性—塑性遷移と細粒長石の塑性変形

研究課題名 (英文) Brittle-Plastic transition of continental crust and plastic
Deformation of fine grained feldspar

研究代表者

重松 紀生 (SHIGEMATSU NORIO)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・主任研究員

研究者番号：80308163

研究成果の概要 (和文)：

大陸地殻の脆性-塑性遷移付近における細粒長石の変形挙動を明らかにするため、天然断層岩中の細粒長石の解析と、細粒長石焼結体を出発物質とした変形実験を行った。天然断層岩の細粒斜長石は定向配列を持たず、また転位と再結晶の痕跡が見られる。実験試料には夏に用意した試料と冬に用意した試料があり、前者は均質な変形、後者は著しい変形集中を示した。前者の力学的性質と、結晶方位分布、転位と再結晶の痕跡から、天然の断層岩の細粒長石の変形を再現できた可能性が高い。本研究で得られた変形挙動の違いの原因を含め、今後脆性-塑性遷移付近における細粒長石の変形挙動を明らかにするには、試料中の水分量を制御した焼結体の合成技術が必要と考えられる。

研究成果の概要 (英文)：

Analyses of fine-grained feldspars within natural fault rocks and experiments using sintered albite compacts were carried out in order to understand the deformation behavior of the fine-grained feldspars at the brittle-plastic transition of the Earth's continental crust. In naturally deformed fault rocks, fine-grained plagioclase shows almost random crystallographic orientation, well developed dislocation substructure and evidence of strain induced grain boundary migration. Two kinds of sintered albite compacts were used in the deformation experiments, one was fabricated in summer and the other was fabricated in winter. The samples fabricated in summer were deformed homogeneously, while the samples fabricated in winter showed significantly localized deformation. The microstructure of the samples fabricated in summer is similar to that in natural fault rocks after the experiments. To understand the deformation behavior further, it is necessary to develop a technique to sinter feldspar in which water contents is controlled.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：地殻, 岩石のレオロジー, 細粒長石, 脆性-塑性遷移, 岩石変形実験

1. 研究開始当初の背景

大陸地殻の脆性-塑性遷移付近での塑性変形については、石英のみの塑性変形が重要であると考えられてきた。一方、研究代表者である重松紀生は福島県の畑川破砕帯で見られる脆性-塑性遷移付近で変形した天然の断層岩において、粒径1 μm 程度の細粒長石の転位の移動と再結晶を伴う塑性変形を見出し、さらにこの変形過程で、微小空洞が形成し、これらが連結し破壊面を作る可能性を見出した。

細粒長石の変形には不明な点が大きく、また大陸地殻の脆性-塑性遷移付近のレオロジーに長石の影響はきちんと考慮されていない。本研究開始当初の背景は、大陸地殻の脆性-塑性遷移付近における細粒長石の変形挙動、およびその大陸地殻の脆性-塑性遷移付近のレオロジーへの影響を明らかにする必要性である。

2. 研究の目的

細粒長石の変形過程を、天然の断層岩の解析と変形実験により解明することを目的とする。この中でShigematsu et al. (2004)が見出した、塑性変形中の微小空洞の形成と、連結による破壊面形成という現象についても検証する。

3. 研究の方法

当初予定していた研究内容は、(1) 畑川破砕帯, 中央構造線など, 天然の脆性-塑性遷移条件付近で変形した断層岩の解析, (2) 天然の変形機構の実験室での再現と, 構成則の決定, (3) 塑性変形から破壊に変化する過程を変形実験により再現することの3つであった。しかし, (2) の過程で数多くの問題があったため, (3) については実験に必要な30°で斜めに切ったアルミナピストン等の実験部品を揃えるにとどまった。

(1) 天然の断層岩の解析

主として畑川破砕帯の脆性-塑性遷移条件付近で変形した細粒長石について、走査型電子顕微鏡による電子線後方散乱回折法 (SEM-EBSD) により結晶方位を測定、結晶方位が強く並ぶ結晶格子定向配列 (CPO) の有無により細粒長石の変形機構を検討した。

代表的な塑性変形機構として、転位クリープ、拡散クリープ、粒界滑りがあるが、転位クリープは、転位滑り系に対応したCPOを作る。一方、拡散クリープや粒界滑りは一般には結晶格子定向配列は作らないことが知られている。

(2) 変形機構の再現と、構成則の決定

細粒長石 (曹長石) 焼結体を円柱形に整形し (高さ 20 mm, 直径10 mm), 産業技術総合研究

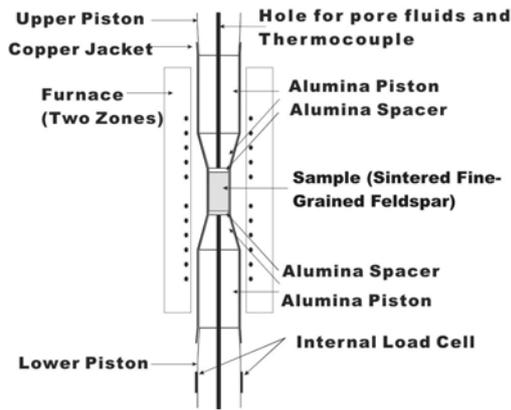


図1 産業技術総合研究所所有のガス圧式変形試験機による塑性変形実験のアセンブリ。

所所有のガス圧式変形試験機(図1)により温度800°C, 歪速度, $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の条件で変形させ, 塑性変形構成則を決める予定であった。しかし, 当初の期待と異なる結果が得られたため, 構成則の決定は行わなかった。また実験装置の加熱用炉の断熱についての技術的な問題も見つかり, 問題解決にかなりの時間を割くことを余儀なくされた。

出発物質として用いた細粒長石(曹長石)焼結体は2003年度に科学技術振興調整費「陸域震源断層深部すべり過程に関する総合研究」の中で合成した。曹長石を粉碎し, 水ひにより $1 \mu\text{m}$ 未満の細粒曹長石粒子のみを取り出し, これを水圧により冷間等方圧縮させる。次に冷間等方圧縮させた細粒長石をステンレス容器に封入し, これを熱間等方圧縮装置(HIP)により焼結させた。なお用意した出発物質には容器への封入を夏に行ったものと冬に行ったものがある。

加熱用炉の断熱の問題は, これまで断熱材のシリカウールでは, 実験目標温度の800°Cにおいて炉側面温度が高温になり, 圧力容器破裂事故の恐れがあったというものであった。これについてはジルコニアを断熱材として用いたものを新たに作成し, 異常がないことを確認した。なお, この費用は科研費の枠内よりも高額であったため, 別途予算より支出した。

以上の実験試料の一部について, 畑川破碎

帯の脆性-塑性遷移条件付近で変形した細粒長石と同様の変形が起こったのかを確認するため, 透過電子顕微鏡観察とSEM-EBSDによる結晶方位の測定を行った。また実験前の出発物質となる細粒長石焼結体についても透過電子顕微鏡で観察し微細構造の確認を行った。

4. 研究成果

(1) 天然の断層岩の解析

畑川破碎帯の脆性-塑性遷移条件付近で変形した細粒長石について, SEM-EBSDにより得られた結晶方位分布は, 斜長石は強い定向配列を持たないが, アルカリ長石は定向配列を持つ(図2a,b)。実験との比較という意味では, 焼結体が曹長石であることから斜長石との比較を考える。一方, これまでの研究における透過電子顕微鏡観察等から転位の移動と再結晶を伴うことが明らかになっている(Shigematsu, 1999; Shigematsu and Tanaka, 2000 など)(図2c, d)。ランダムな結晶方位分布から, 細粒斜長石の変形機構は転位クリープではないこと, 変形中の転位の活動の痕跡からは変形機構が拡散クリープでないことが示唆される。これらを考えると変形機構は粒界滑りである可能性が高いが, 今後の検討が必要である。

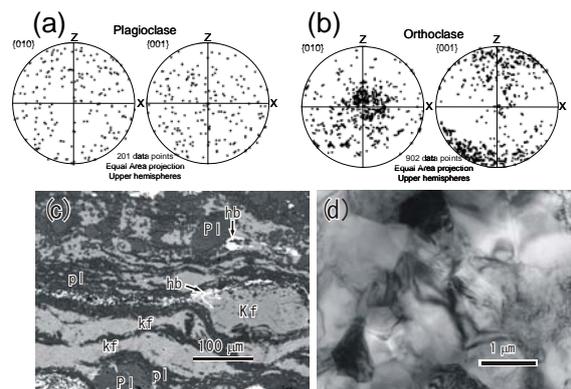


図2 天然の断層岩の細粒長石の特徴。(a) 細粒斜長石の結晶方位分布。(b) 細粒アルカリ長石の結晶方位分布。(a)と(b)のXは線構造, Zは面構造の法線方位。(c) 走査型電子顕微鏡後方散乱電子像。細粒カリ長石層(kf)と細粒斜長石層(pl)が面構造に平行に伸びている。(d) 細粒長石の透過電子顕微鏡像。転位の活動と再結晶の痕跡が見られる。

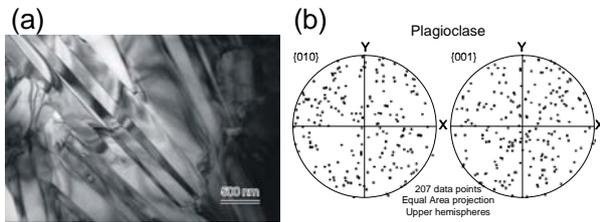


図3 出発物質（曹長石焼結体）の (a) 透過電子顕微鏡像と (b) 結晶方位分布. (b) の XとY は走査型電子顕微鏡のデータ獲得座標.

(2) 変形機構の再現と、構成則の決定

① 出発物質

出発物質として用いた細粒長石（曹長石）焼結体は、粒界等に空隙がない粒数 μm の微細なアルバイト式双晶から構成される（図3a）。また個々の粒子は転位をほとんど含まず、SEM-EBSD による測定から結晶方位分布がほとんどないランダムである（図3b）。

② 力学結果

800°Cにおいて、 $5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の条件の4回の実験を行った。このうち $5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ と $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の実験は夏に容器への封入を行った試料で、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ と $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の実験は冬に容器への封入を行った試料で実験を行った。

夏に容器への封入を行った試料と冬に容器への封入を行った試料で、意図せずして異なる結果が得られた。前者の試料は全体に均質な塑性変形挙動を示したのに対し、後者の試料は著しい変形集中を示した（図4）。

力学的には夏に容器への封入を行った試料は顕著なピークを示さない、もしくは弱いピークの後で定常変形へと移行し、また歪速度が $5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ から $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ と3倍になると定

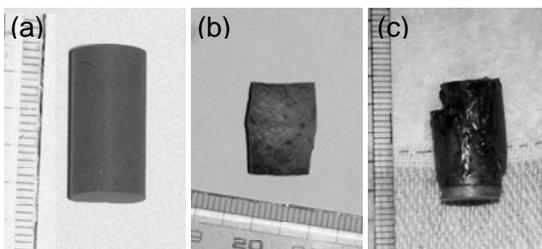


図4 実験試料の形状. (a) 実験前試料形状, (b) 夏に封入した試料の実験後形状, (c) 冬に封入した試料の実験後形状. 夏に封入を行った試料は樽型に変形しているのに対し、冬に封入を行った試料は、著しい変形集中を示す。

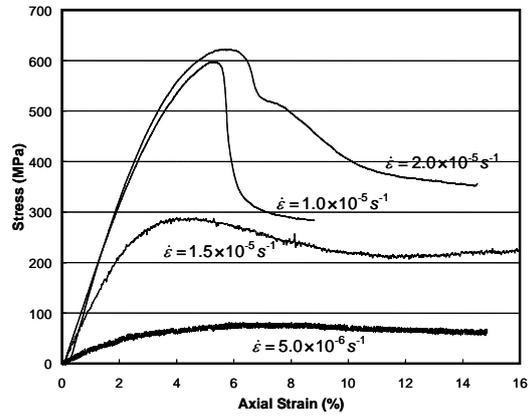


図5 細粒長石の温度 800°C、封圧 200MPa の条件下での応力-歪曲線。各曲線に実験中の軸方向歪速度を示した。歪速度 $5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ と $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の実験は夏に封入を行った試料を用いており、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ と $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の実験は冬に封入を行った試料を用いている。夏に封入を行った試料と冬に封入を行った試料は異なった力学挙動を示す。

常流動応力も 70MPa から 210MPa と 3 倍になり定常応力と歪速度に線形関係があることが示唆される（図5）。

一方、冬に容器への封入を行った試料は 600MPa のピークの後に着しい応力降下を示し、その後に定常変形へと移行する。このとき定常流動応力は歪速度が $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ から $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ と 2 倍になったとき約 290MPa から約 350 MPa となり、定常応力は歪速度依存性があり、かつ歪速度と応力には応力指数が 3~4 程度のべき乗則関係があるように見える（図5）。なお、実験試料の X-CT 解析では（図6）、除荷の際の亀裂が多いものの、歪集中部分で完全に分離はしていないことから摩擦滑りによる変形ではないと思われる。

③ 微細構造と結晶方位分布

歪速度 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で実験を行った試料（夏

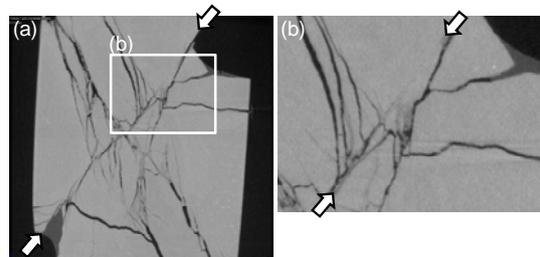


図6 冬に容器への封入を行った実験試料（歪速度= $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ）のマイクロフォーカス X-CT 像。像の右上から左下にかけて変形が局所化している（白矢印）。(b) は(a) の変形局所化部分の拡大。試料は全体に除荷に伴う亀裂が多いが、(b) に示した変形が局所化した面（白矢印）の一部で、面が完全に分離していない。

に容器への封入を行った試料) について透過電子顕微鏡観察と SEM-EBSD による結晶方位の測定を行った (図 7).

試料は粒径 μm の微細な粒子から構成され、粒子内の転位密度はかなり高い一方、粒界付近において転位密度が低くなっている領域が観察される (図 7a). 観察された転位は、出発物質 (図 3a) との比較から実験中に導入されたものであり、粒界付近の転位密度が低い領域は動的再結晶による。また SEM-EBSD による結晶方位の測定結果は強い定向配列を持たない (図 7b).

以上の特徴は天然の断層岩中の細粒斜長石で見られた結果と一致している。夏に容器への封入を行った試料で行った実験は、天然の脆性-塑性遷移付近での細粒長石の変形を再現している可能性が高い。

(3) 2つの変形挙動の意味と今後の課題

今回、意図せずして夏に容器への封入を行った試料と冬に容器への封入を行った試料で異なる実験結果が得られた (図 4・5). 夏に容器への封入を行った試料については、定常応力と歪速度に線形関係が示唆されること、結晶方位分布が強い定向配列を持たないことから、粒界滑

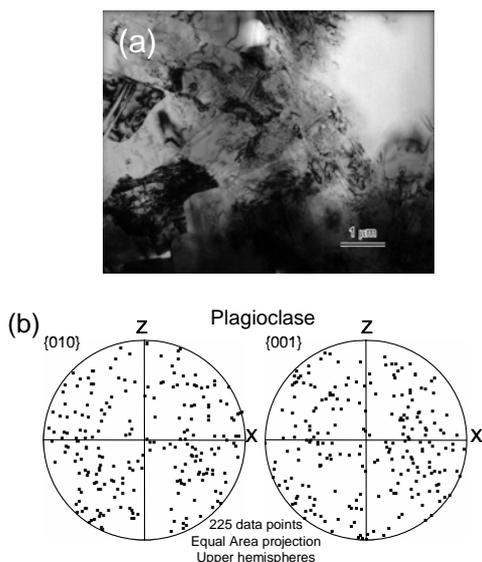


図7 歪速度 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で実験を行った試料 (夏に容器への封入を行った試料) の解析結果. (a) 透過電子顕微鏡像. (b) 結晶方位分布.

りによる変形である可能性が高い。なお力学的結果は海外のグループにより求められた曹長石の拡散クリープの流動則 (Rybacki and Dresen, 2004) とほぼ一致するが、微細構造等は拡散クリープでは説明がつかず検討が必要である。一方、冬に容器への封入を行った試料は歪速度と応力のべき乗則の関係から転位クリープに伴うものである可能性が高い。

変形挙動の違いの原因は、冷間等方圧縮させた細粒長石粉末をステンレス容器に封入する際の吸着水の影響である可能性が高い。夏は湿度が高いため、試料が大気中の湿気を吸着し、一方冬は湿度が低いため、試料が大気中の湿気をあまり吸着しないものと考えられ、わずかな湿度の違いが実験結果の違いを生み出していると考えられる。今後も継続して、大陸地殻の脆性-塑性遷移付近における細粒長石の変形の解明を目指したいが、これにはこれまで用いてきた細粒焼結体試料ではなく、試料中の水分量を制御した焼結体の合成技術が必要である。

また当初、中央構造線沿いでも天然の脆性-塑性遷移条件付近で変形した断層岩の解析を含める予定であったが、中央構造線沿いの断層岩の場合、長石が分解し大量の雲母類が形成している (図 8). これは水素の活度が高い環境では長石が分解して雲母類が形成するためと考

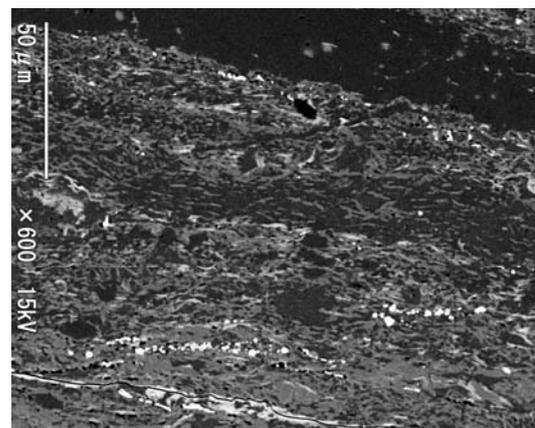


図8 中央構造線沿いウルトラマイロナイトの二次電子線像. 大量の白雲母が形成している.

えられる (例えば Wintsch et al., 1995). こうした条件を再現する上でも試料中の水分量を制御した焼結体の合成技術が必要と考えられる。

なお、本研究の当初計画では「塑性変形から破壊に変化する過程を変形実験により再現すること」を含めていたが、これは研究代表者の報告をきっかけに(Shigematsu et al., 2004), 海外のグループで再現実験が盛んに行われている (Rybacki and Dresen., 2008 など). この部分についても海外の動向を見つつ、研究計画を再検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Norio Shigematsu, Koichiro Fujimoto, Tomoyuki Ohtani, Bunichiro Shibasaki, Tomoaki Tomita, Hidemi Tanaka, Yukari Miyashita, Localisation of plastic flow in the mid-crust along a crustal-scale fault: insight from the Hatagawa Fault Zone, NE Japan, Journal of Structural Geology, 査読有, 31 巻, 2009, 601-604.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 重松 紀生, 断層帯の不均質変形と内陸大地震の発生に関する疑問— 削剥断層の地質構造から —, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 2009 年 10 月 22 日, 京都.
- ② 重松紀生, 藤本光一郎, 大谷具幸, 削剥された地質断層からみる、断層深部での破壊開始と流体移動, 日本地球化学会, 2008 年 09 月 17 日, 東京.
- ③ 重松 紀生, 高木秀雄, 藤本 光一郎, 大谷具幸, 島田耕史, 断層岩の変形微細構造に基づく断層深部応力状態の推定, 地球惑星科学関連学会 2007 年大会, 2007 年 05 月 20 日, 千葉幕張.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重松 紀生 (SHIGEMATSU NORIO)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・主任研究員

研究者番号:80308163

(2) 研究分担者

増田幸治 (MASUDA KOJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断

層・地震研究センター・研究チーム長
研究者番号:30344104

(3) 連携研究者

藤本光一郎 (FUJIMOTO KOICHIRO)

国立大学法人東京学芸大学・教育学部・准教授

研究者番号:80181395

高橋美紀 (TAKAHASHI MIKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・研究員

研究者番号:40470033

吉田英人 (YOSHIDA HIDETO)

国立大学法人東京大学大学院理学系研究科・地球惑星科学専攻・技術職員

研究者番号:30376553