

平成25年度共同利用実施報告書(研究実績報告書)
(特定共同研究(B))

1. 課題番号または共同利用コード 20 13 -B- 04

2. 研究課題名 (データベース化のため英訳を加えてください。)

和文：先端的材料科学技術による鉱物多結晶合成とそれを用いた新たな実験地球物質科学の創生

英文：Synthesis of mineral aggregates with an advanced technology in material science

3. 研究代表者所属・氏名 東京大学地震研究所・平賀岳彦
(地震研究所担当教員名) 平賀岳彦

4. 参加者の詳細 (研究代表者を含む。必要に応じ行を追加すること)

氏名	所属・職名	参加内容
平賀 岳彦	東京大学・地震研究所	試料合成・新規合成法の開拓・試料の物性評価
目 義男	物質材料研究機構・ユニット長	新規合成法の開拓
鈴木 達	物質材料研究機構・主席研究員	新規合成法の開拓
吉田 英弘	物質材料研究機構・主幹研究員	試料の物性評価
久保 友明	九州大学・准教授	試料の物性評価
西原 遊	愛媛大学・准教授	試料の物性評価
武藤 潤	東北大学・助教	試料の物性評価
小畑 正明	京都大学・名誉教授	試料の物性評価
桂 智男	バイロイト大学・教授	試料の物性評価
David L Kohlstedt	ミネソタ大学・教授	試料の物性評価

5. 研究計画の概要 (800 字以内でご記入ください。計画調書に記載した「研究計画」から変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。)

基本となる高緻密極細粒鉱物多結晶体試料合成においては、ナノサイズ微粒鉱物粉を真空焼結する方法を用いる。仮焼き後の粉は、冷間静水圧等加圧成形（CIP）法（200 MPa）によって圧粉体とされ、その後、本焼結（例えば、真空 10^{-3} Pa、1300 度）を行う。鉄などの遷移金属を含む試料は高温・大気圧下では酸化してしまうので、鉱物微粒粉の作成および高温下での物性測定においては、酸化還元状態を制御する必要がある。カンタルスーパーを発熱体とし、炉内中心にアルミナ管を走らせ、管内にはジルコニア酸素濃度センサーを入れる。酸化還元状態を制御するための H_2 および CO_2 ガスの流量比を自由に変えられるガスフローシステムを作る。鉱物の種類および組み合わせによっては融点が低くなるので（例えば、地殻鉱物）、焼結温度の低温化が要求される。焼結中に 10 ボルト前後の電圧をかけ、数百アンペア以上の電流を流す放電プラズマ焼結（SPS）法を適用する。粉体相互の接触部に放電プラズマが発生することで焼結が進むとされ、200～500℃ほど低い温度域かつ短時間で十分な焼結が得られる可能性がある。主要元素から微量元素に至るまで、しらみつぶ的にその化学種の影響を調べる必要がある。まず、 MgO 、 SiO_2 および CaO などを主体とする高純度の結晶内に、他元素をドーピングすることで物性変化を見る。このようなしらみつぶしの戦略と同時に、全ての元素をドーピングし人工パイロライトを作成し、その物性値の測定という戦略をとる。高純度のそれと比較することで、化学効果を支配する元素組み合わせを絞り込む。実際の地球内部では、主に応力場（もしくは流動場）に従った鉱物の選択的な結晶学的配向が生じており、鉱物単結晶物性の異方性が結果的に多結晶体の異方性を生んでいる。溶媒中にある粉体を強磁場下に置くことで、従来磁性を持たないとされる粒子を回転させ配向させることを試みる。

6. 研究成果の概要 (図を含めて1~2頁で記入してください。)

キーワード (3・5程度) : 高緻密極細粒鉱物多結晶体、クリープ、拡散、フォルステライト

平賀研究室でフォルステライト+エンスタタイト系の多結晶体を合成し、高温大気圧下クリープ試験を行った

(図1) (Tasaka et al. 2013)。さまざまな温度・応力条件下での実験により、高精度の本系での流動則が得られた。また、第二相分率のレオロジーに対する効果が明らかにされた(図2)。

これによると、フォルステライト 100%からエンスタタイト分率が増えるにつれて、粘性率は一桁以上低くなり、エンスタタイト分率が 50%を超えると一転して増加に転じる。これは、第二相分率の増加に伴って粒径が小さくなること、変形が粒径依存型クリープ下で進行したことがその理由である(Tasaka and Hiraga 2013)。

エンスタタイト分率 10%試料は、愛媛大学のグループに提供され、そこで高圧下でのクリープ試験が行われた(図3) (Nishihara et al. 2013)。これに大気圧下から

5 GPa までの応力 - 歪速度の関係が得られた。実験試料を統一し、試料由来の流動特性の差異が完全に排除されたことにより、オリビン流動における活性化体積が求まり、上部マントル内での粘性率の深度変化が精度よく決定された。

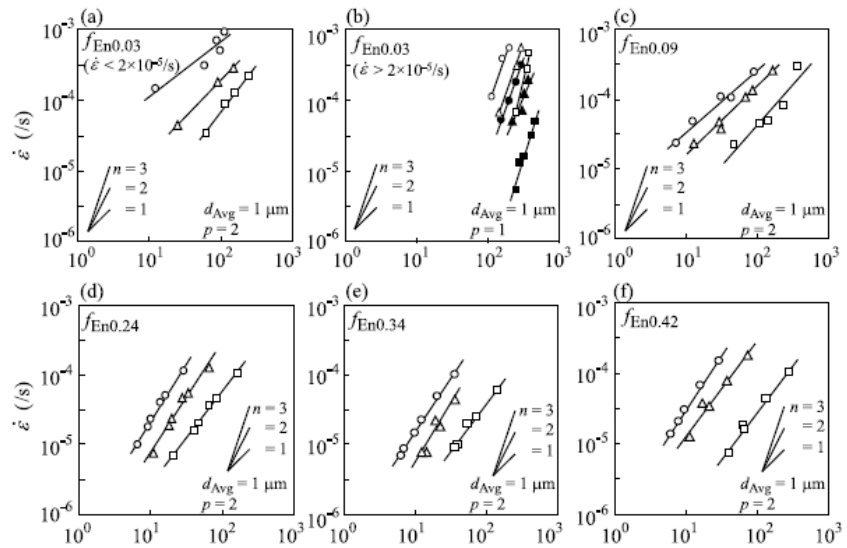


図1 異なるエンスタタイト分率を持つフォルステライト+エンスタタイト系の応力(横軸) - 歪速度(縦軸)の関係。□、△および○は、それぞれ 1260°C、1310°C、1360°C のデータ。

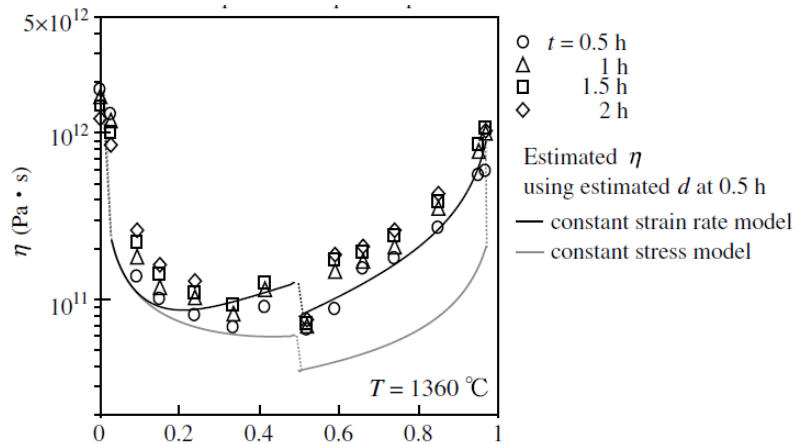


図2 フォルステライト+エンスタタイト系でのエンスタタイト分率(横軸)と粘性率(縦軸)の関係。

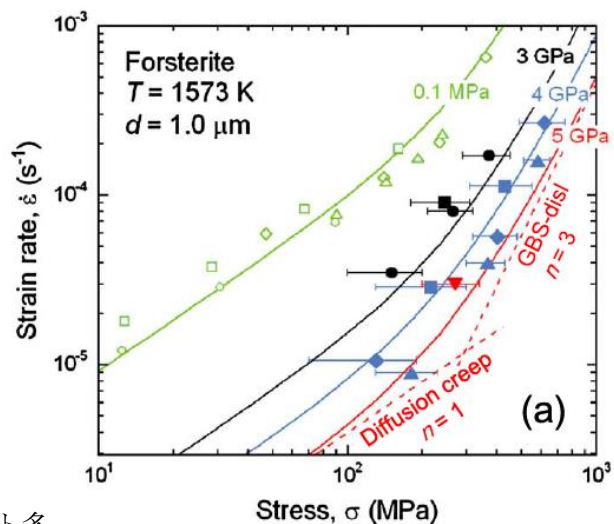


図3 異なる圧力下でのフォルステライト多結晶体の応力 - 歪速度の関係

研究成果の概要（続き）

上で、正確に流動則が得られた同一試料は、バイロイト大学において高圧下での Si, O の拡散実験に用いられ、ドライおよびウェット条件下で二つの元素の粒界拡散係数が得られた(Fei et al. 印刷中)。また、ミネソタ大学では、ウェット条件下でのクリープ試験に用いられ、流動特性が調べられた。これらの結果をまとめることで、拡散係数と用いてマントル流動を調べるその妥当性や、流動メカニズムの実態に迫れることが期待される。フォルステライト+ダイオプサイド系の流動特性および組織解析から、拡散律速型クリープ（超塑性型クリープ）下でフォルステライトの結晶選択配向が生じることが明らかにされた(Miyazaki et al. 2013)。また、超塑性変形に特徴的な微細構造が天然の間色ナイトに見いだされることを示し、地球内部での超塑性変形が実際に生じていることを明らかにした(Hiraga et al. 2013)。フォルステライト粉のスラリーを強磁場下に起き、その後焼結させることで、フォルステライトの a 軸を磁場方向に配向させた試料を作ることに成功した。

7. 研究実績（論文タイトル、雑誌・学会・セミナー等の名称、謝辞への記載の有無）

Hiraga, T., Miyazaki, T., Yoshida, H., Zimmerman, M.E. (2013) Comparison of microstructures in superplastically deformed synthetic materials and natural mylonites: Mineral aggregation via grain boundary sliding. *Geology*, 41: 959-962 謝辞あり

Hiraga, T., Miyazaki, T., Yoshida, H., Zimmerman, M.E. (2013) Comparison of microstructures in superplastically deformed synthetic materials and natural mylonites: Mineral aggregation via grain boundary sliding. *Geology*, 41: 959-962 謝辞あり

T Katsura, H Fei, S Koizumi, T Hiraga, N Sakamoto, M Hashiguchi (2013) Si grain-boundary diffusion in forsterite as a function of pressure, temperature and water content. *AGU Fall Meeting Abstracts* 1, 2354 謝辞なし

Miyazaki, T., Sueyoshi, K., Hiraga, T. (2013) Olivine crystals align during diffusion creep of Earth's upper mantle. *Nature*, 502: 321-326 謝辞あり

Y. Nishihara, T. Ohuchi, T. Kawazoe, D. Spengler, M. Tasaka, T. Kikegawa, A. Suzuki, and E. Ohtani (2014) Rheology of fine-grained forsterite aggregate at deep upper mantle conditions, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, DOI:10.1002/2013JB010473 謝辞あり

M. Tasaka, and T. Hiraga (2013) Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 1: Grain size and grain growth laws, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, DOI:10.1002/jgrb.50285 謝辞あり

M. Tasaka, T. Hiraga, and M. Zimmerman (2013) Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 2: Deformation experiments, *Journal of Geophysical Research- Solid Earth*, DOI:10.1002/jgrb.50284 謝辞あり

M. Tasaka, T. Hiraga, and 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, *Journal of Geophysical Research- Solid Earth*, DOI:10.1002/2013JB010619. 謝辞あり