

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684043

研究課題名(和文) 鉱物多結晶体の超塑性

研究課題名(英文) Superplasticity of minerals

研究代表者

平賀 岳彦(Hiraga, Takehiko)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：10444077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円、(間接経費) 2,640,000円

研究成果の概要(和文)：(i)二相共存試料において、第二相分率の増加と共に細粒化し(Tasaka & Hiraga JGR 2013)、それに伴い「超塑性」が発現しやすくなる(Tasaka, Hiraga & Zimmerman JGR 2013)。(ii)「超塑性」変形下、粒界すべりと同相粒子の合体により、第二相粒子が最大圧縮軸に集合化する。本構造が花崗岩起源マイロナイト中に見出された(Hiraga et al. Geology 2013)。(iii) 応力・歪速度間が線形関係であるオリビンの「超塑性」下で強い結晶選択配向が生じる(Miyazaki et al. Nature 2013)。

研究成果の概要(英文)：Grain size reduction accompanied by an increment of the fraction of the secondary phase is confirmed (Tasaka & Hiraga JGR 2013). Such condition allows the rock to deform via superplastic flow (Tasaka, Hiraga & Zimmerman JGR 2013). Phase aggregation during superplastic flow, which is confirmed experimentally, is identified in natural rocks (Hiraga et al. Geology 2013). Development of crystallographic preferred orientation of olivine is identified during the Newtonian creep of the olivine aggregates.

研究分野：自然科学

科研費の分科・細目：岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：超塑性 マントル オリビン

1. 研究開始当初の背景

「超塑性」とは、多結晶体材料において数百%を超える伸び(伸張永久歪み)を示すことを言う。地球内部では、地球スケールおよび地質時間スケールでの変形場が与えられるので、1000%を超える歪みも珍しくはないであろう。このことから、「超塑性」が地球内部で起きていると推定されてきたが、その実証に成功した例はなかった。天然の岩石から「超塑性」を推定した例は多い。古くは、深部断層岩とされるマイロナイト、特に、数十ミクロン以下の細粒、等粒状かつ結晶配向性を持たないウルトラマイロナイトがその超塑性変形の産物であるとされてきた。また、最近では、スラブが沈みこむ際、相転移(再結晶)による粒径のリセットがおき、スラブ内での超塑性流動が起きることが予想されている。工学材料の「超塑性」下では、歪み速度が応力の1~2乗に比例すること、粒界すべりが主要変形メカニズムであることが知られ、同様な変形特性は、オリビン多結晶体の変形時においても見られることから、上部マントル内でのせん断帯でも「超塑性」流動が起きているとされる。このように、地球内部での「超塑性」は、その工学材料で見られる超塑性材料の組織や変形特性との類似性より、その出現が推定されるに留まってきた。

2. 研究の目的

申請人の研究グループは、最近、フォルステライト系で地球構成物質での「超塑性」の発現に世界で初めて成功した(Hiraga et al. Nature 2010)。本研究は、その研究を押し進め、地球内部での「超塑性」発現の地質条件およびその現象が地球内部ダイナミクスにどのような影響を与えるかを検証するものである。

3. 研究の方法

これまで、鉱物多結晶体において「超塑性」を実験的に実現できていなかった理由は、岩石サンプルには、開口クラックが無数に存在すること、岩石を模擬した鉱物多結晶体においてもクラックや、クラックの発生源であるポア(空洞)が存在し、引っ張り試験では、すぐ破断に至ってしまうのが大きな理由である。我々は、材料科学において、高融点かつ脆性材料として名高いジルコニアやアルミナなどの酸化物で1000%をも超える伸びに成功していることに触発され、マントル主要鉱物も同様な性質を持つことから、高温下での引っ張り変形実験の可能性を予想した。セラミックス材料での「超塑性」を可能にしたのは、試験片を構成する粒子の微細(ナノ)化およびバルク体の高緻密化が格段に進んだことにある。我々は、ここ数年、「粒界物性測定を可能に

する極細粒緻密鉱物多結晶体の作製法の開発」(研究代表・平賀)に力を注ぎ、物質材料研究機構(NIMS)および宇部マテリアルズの協力を得て、粒径300nm以下、ポア体積分率0.1%の主要マントル鉱物多結晶体の焼結法開発に成功してきた。本手法は、従来の地球科学で使用されてきた高圧下での合成法とは異なり、真空炉内での焼結であり、サンプルサイズや形が自在に変えられる特徴を有する。本焼結体を温度1300-1450の高温・大気圧条件下、歪み速度 $10^{-5} \sim 10^{-4}/\text{sec}$ での引張実験を行う。

4. 研究成果

本研究より、地球内部の大部分で「超塑性」流動が起きている可能性が示された。(i)二相共存試料において、第二相分率の増加と共に細粒化し(Tasaka & Hiraga JGR 2013)、それに伴い「超塑性」が発現しやすくなる(Tasaka, Hiraga & Zimmerman JGR 2013)。この結果は、多相系である地球内部において、「超塑性」の出現条件が広がる。(ii)「超塑性」変形下、粒界すべりと同相粒子の合体により、第二相粒子が最大圧縮軸に集合化する。本構造が花崗岩起源マイロナイト中に見出され(Hiraga et al. Geology 2013)、少なくとも地球内部の一部で「超塑性」が発現していることが明らかになった。(iii)「超塑性」変形下での鉱物粒径を決める粒径と第二相分率の関係(ゼナー則)が、10 μm から2mmの粒径を持つ天然ペリドタイト中で成立している。これは、「超塑性」が細粒岩石のみならず、平均的な粒径を持つマントル岩でも発現している間接的証拠である。(iv)応力・歪速度間が線形関係であるオリビンの「超塑性」下で(図1)強い結晶選択配向が生じる(図2)(Miyazaki et al. Nature 2013)。「超塑性」下での粒界・界面すべり易さが粒界・界面の種類によって異なることで、集合化と配向が生じると考えられる。同相界面が異相界面と比べてすべり難いとすると、同相粒の衝突後、粒同士が離れず集合化構造が出来る。特定の結晶面に平行な粒界が発達し(異方粒子の形成)その粒界での選択的なすべりが起きると粒子回転が生れ、結晶配向が生じると考えられた(図3)。

この選択配向が生じる条件を上部マントルに適用したところ、マントルアセノスフェア内の地震波速度異方性の深度分布と一致した(図4)。選択配向は転位(非線形)クリープに固有のもので、地震学的に見出される異方性は、上部マントルで転位クリープが生じている証拠と考えられてきたが

、転位クリープでアセノスフェアが流動するに必要な粒径（数cm）もしくは差応力（数十MPa）は、マントル由来の岩石の平均粒径やアセノスフェア内の推定応力0.1 MPaオーダーと大きく異なり、矛盾があった。転位クリープと比べて、より細粒・低応力条件下で発現し、さらに選択配向を作るマントル「超塑性」は、地震波の観測結果と鉱物物理の間の矛盾を解決する。

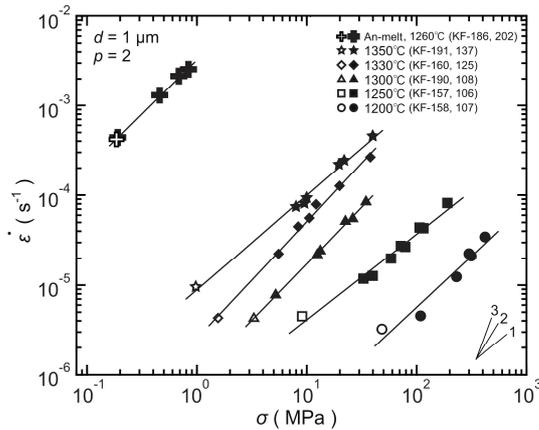


図1 オリビン多結晶体の応力-歪速度の関係。傾きが~1であり、線形クリープを示す。

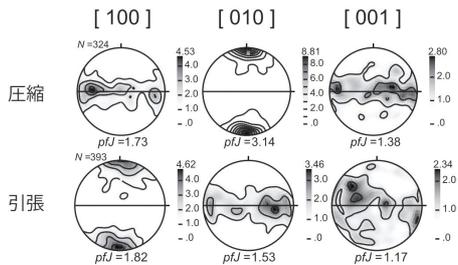


図2 1350 における圧縮・引張試験後(変形軸はZ軸方向)のオリビン粒子の結晶選択配向。それぞれ、[010]の圧縮軸への集中、[100]の引張軸への集中が見られる。

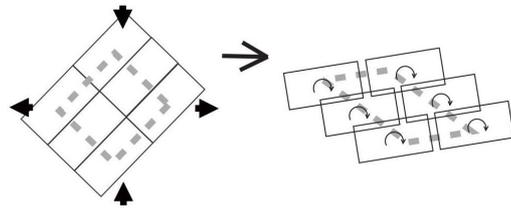


図3 異方粒子の粒界すべりに伴う粒子回転と結晶選択配向モデル

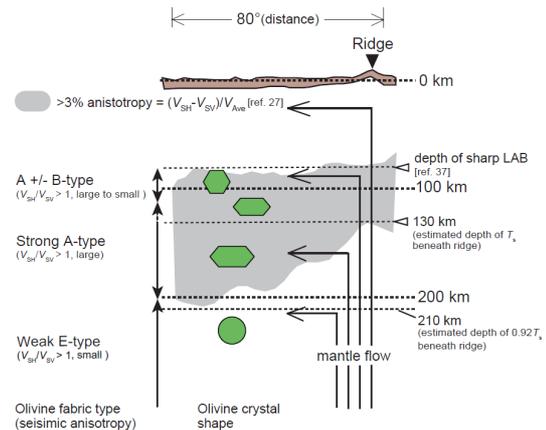


図4 本研究で推定された太平洋底に横たわるマントルアセノスフェア内のオリビン粒子形、結晶配向パターンとそれに基づく地震波速度の特徴。

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 5 件)

1. Tasaka, M., Hiraga, T. and Michibayashi, K., 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, 2014. 査読有

2. Tasaka, M. and Hiraga, T., 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.*, 118, DOI: 10.1002/jgrb.50285, 2013. 査読有

3. Tasaka, M., Hiraga, T. and Zimmerman, M.E. , Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 2: Deformation experiments, *J. Geophys. Res.*, 118, DOI: 10.1002/jgrb.50284, 2013.

査読有

4 . Hiraga, T., Miyazaki, T. Yoshida, H. and Zimmerman, M.E., Comparison of microstructures in superplastically deformed synthetic materials and natural mylonites: Mineral aggregation via grain boundary sliding, *Geology*, 41, 9, 959-962, 2013. 査読有

5 . Miyazaki, T., Sueyoshi, K. and Hiraga T., Olivine crystals align during diffusion creep of Earth's upper mantle, *Nature*, 502, 321-326, 2013. 査読有

〔学会発表〕(計 1 件)

Miyazaki, T., Sueyoshi, K. and Hiraga T. Development of crystal preferred orientation of olivine during diffusion creep: a matter of olivine crystal shape. American Geophysical Union, Fall Meeting 11 Dec, 2013, San Francisco, U.S.A

〔図書〕(計 1 件)

地球の物理学事典 平賀岳彦ほか共訳 朝倉書店 P.136 - 166, 2013 年

6 . 研究組織

(1)研究代表者

平賀 岳彦 (Hiraga, Takehiko)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号 : 10444077