

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247087

研究課題名(和文) 鉱物多結晶体の超塑性 2

研究課題名(英文) Superplasticity of minerals 2

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) 24,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球上部マントルで観測される地震波速度異方性は、弾性異方性を持つかんらん石の結晶軸選択配向(CPO)が主要な原因と考えられている。拡散クリープ下での実験試料の表面観察を行い、粒界すべりに伴う粒子スイッチングおよび粒子回転の存在を明らかにした(Maruyama & Hiraga 2017a)。次に、マントル深度に応じた様々な安定な鉱物における低指数面粒界の発達を調べ拡散クリープ下でのCPO発達を予想したところ、全マントル内での地震波速度異方性深度域と良い一致を示した。これを元に、全マントル拡散クリープ(超塑性)説を提唱した(Maruyama & Hiraga 2017b)。

研究成果の概要(英文)：Grain boundary migration, grain boundary sliding, rigid-body grain rotation and grain-neighbor switching occur during diffusion creep. We show that grain boundary sliding during diffusion creep induces grains to rotate. Preferential grain boundary sliding on low-viscosity boundaries results in the development of crystallographic preferred orientation. Finally, diffusion creep (superplastic) Earth hypothesis is proposed.

研究分野：岩石・鉱物物理

キーワード：超塑性 マントル 地震波速度異方性

1. 研究開始当初の背景

これまで研究で、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、それに伴い「超塑性」が発現しやすくなる。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、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 ミクロンから 2 ミリ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、強い結晶選択配向が生じる。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。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のに必要な粒径(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。

2. 研究の目的

「超塑性」流動下の微細構造形成メカニズムを明らかにし、その結果生じる「超塑性」に特徴的な地球物理学的可観測量(粘性・弾性・電気伝導度)を実験的に示すことで、「超塑性」に基づく新たな地球内部ダイナミクスを構築するのが本研究目的である。

3. 研究の方法

申請者研究室で合成される高緻密細粒鉱物多結晶を試験体に用い、高温炉が付設したツインコラム型万能変形試験機を用いて常圧下での高精度のクリープ実験を行うというのが、申請者が経験を積み上げてきた実験手法である。本手法を電気伝導度測定、弾性波速度測定および変形試料の構造解析と組み合わせ、(i) 「超塑性」時の粒界すべりの実体を明らかにする、(ii) 試験体の化学組成や変形時の雰囲気(酸化・還元状態、ドライおよびウェット条件)を制御することで「超塑性」が化学的条件でどのように変化するかを明らかにする、(iii) 「超塑性」下でどのよ

うな粘性・弾性・電気的特性が生まれるかを明らかにする。これらの結果をまとめ、地球内部の流動とその結果生じるダイナミクスを明らかにする。

4. 研究成果

地球上部マントルで観測される地震波速度異方性は、弾性異方性を持つかんらん石の結晶軸選択配向(CPO)が主要な原因と考えられている。超塑性変形(拡散クリープ)下での単粒子から複数粒子にわたる変形の直接観察に成功し、かんらん石の結晶軸選択配向(CPO)形成に必要な粒界すべり、その結果生じる粒子スイッチングおよび粒子の剛体回転の存在を証明した(Maruyama & Hiraga 2017a) (図 1)。

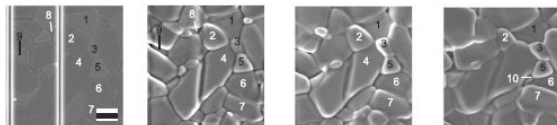


図 1 高温変形実験と走査型電子顕微鏡観察を組み合わせたミクロな変形直接観察の結果。左から右にかけて変形が進行。上下方向が圧縮軸でそれと平行にマーカーを付けた。方向にスケールバー: 1 ミクロン。注目すべき粒子に番号がふられ、白番号はオリビン、黒はダイオプサイド粒子。

図中の圧縮軸方向に離れて存在している 1 と 4 の粒子は、変形の進行と共に接近・合体するのに対し、引張方向にある 2 と 3 の粒子は変形と共に離れ、最終的に分離する。その間、短冊形の 4 の粒子は、粒内のマーカーからも分かるよう、試料の変形と共に右回りの剛体回転を起こしている。短冊粒子の直線的な粒界で選択的にすべり、粒子回転が生じている。その粒界は、結晶学的な面に平行な粒界で、一般的な粒界と比べて粒界の凹凸が小さく、それがすべり易さを生んでいる。すなわち、その特殊粒界が準備されれば、超塑性変形下で CPO が形成される。これまで報告されているマントル鉱物の粒子形からその特殊粒界の有無を推定したところ、オリビンおよびポストペロプスカイト相のみに確認され、これらの鉱物の安定領域と地震波速度異方性の深度分布が良い一致を示した(Maruyama & Hiraga 2017b JGR) (図 2)。

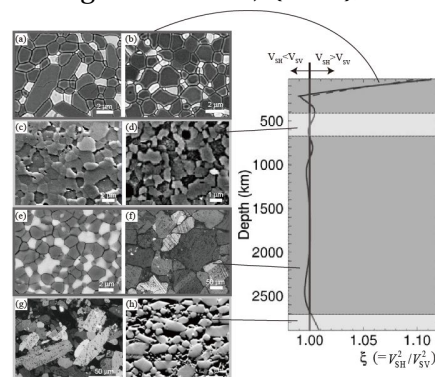


図2 上部マントルから D''層にかけて安定な鉱物の微細構造と地震波速度異方性の深度プロファイル (Panning & Romanowicz 2006)。 (a) 短冊形オリビン, (b) 等軸形オリビン, (c) ウォズリアイト(Nishihara et al. 2006), (d) リングウツダイト (Yamazaki et al. 2006), (e) プリッジマナイト (Yamazaki et al. 2009), (f) プリッジマナイト+フェロペリクレス(Yamazaki & Yoshino 2007), (g) CaIrO_3 ポストペロプスカイト(Yamazaki & Yoshino 2007), (h) CaPtO_3 ポストペロプスカイト(McCormack et al. 2011)

試料のインピーダンス測定から粒界の異常を検出することを試み、実際に、Ca を添加するとオリビン電気伝導度が、 $0.92 \times$ 融点より若干低温から温度上昇と共にアレニウス型から外れる異常な伝導度上昇を示す。電気伝導度は粒径と負の相関を持つことから、粒界伝導を見ていることが分かる。また、これらの異常は、メルトの生成が開始しても連続的に続くことから、粒界での前駆的融解現象つまり、粒界 disordering の発生を推定した。

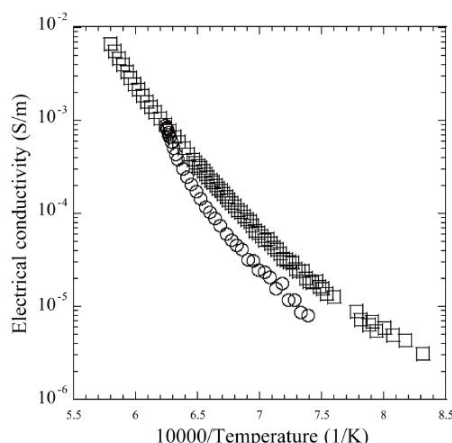


図3 電気伝導度 vs 温度の逆数 (未公表データ)。○: 無添加オリビン試料、□: Ca 添加試料

Ca を添加していない試料の変形時の活性化エネルギー $\sim 300\text{--}500\text{ kJ/mol}$ と比べ、Ca を添加するとクリープの活性化エネルギーが $\sim 700\text{ kJ/mol}$ と強い温度依存性をもつことを見出した(図4)。Ca がオリビン粒界に偏析することは、我々の以前の研究で見出しており、それが何らかの影響を及ぼしていることが推定される。これは、Fe 入り・なしオリビン、酸素分圧が異なる条件でも見いだされ、上部マントル内で普遍的に生じていると考えられる。この急激な粘性率低下をマントル条件に適用したところ、アセノスフェアの低粘性率を説明できることが分かり、今後、その詳細を明らかにすべき重要研究テーマになった。

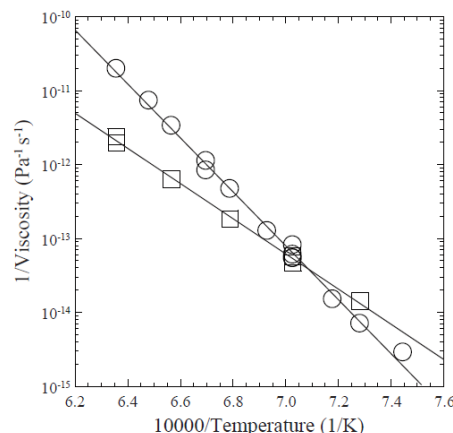


図4 粘性率の逆数 vs 温度の逆数 (未公表データ)。○: 無添加オリビン試料。□: Ca, Al 添加試料。粒径1ミクロン時の粘性率に補正。

結果をまとめると、試料の温度が融点(ソリダス; T_m)に近づくと、急激な (i) 粒界拡散クリープ速度の上昇、(ii) オリビン粒界電気伝導度の上昇、(iii) オリビン粒子形(010面粒界の発達)の変化がある。すべて粒界に関わる現象であり、さらに、オリビン多結晶体において、粒界に偏析する Ca および Al の添加によってこれらの物性異常が促進されたことから、これらの物性変化は融解の前駆現象として生じる粒界 disordering によるものと推定された。また、全マントル地震波速度の等方性・異方性が低指数面粒界の発達とよい相関がある。結晶学的に支配された粒界の発達とそこでの選択的粒界すべりによってCPOが生じ、それを地震波速度異方性でとらえていると考えることができる。

最終的に、我々は Diffusion creep (superplastic Earth) hypothesis (全地球内部超塑性仮説)を提案した (Maruyama & Hiraga 2017b JGR)。アセノスフェアの存在理由、全マントル粘性率の解明につながる成果をあげることができた。今後、この2点に関して集中的に研究が行われる予定である。

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4件)

査読すべて有

1. Maruyama, G., Hiraga, T. (2017) Grain- to multiple-grain-scale deformation processes during diffusion creep of forsterite + diopside aggregate: 1. Direct observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 5890–5915 DOI 10.1002/2017JB014254

2. Maruyama, G., Hiraga, T. (2017) Grain- to multiple-grain-scale deformation processes during diffusion creep of forsterite + diopside aggregate: 2. Grain boundary sliding-induced grain rotation and its role in crystallographic

preferred orientation in rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 5916–5934 DOI 10.1002/2017JB014255

3. 平賀岳彦 (2017) 岩石 vs ファインセラミックス. *地質学雑誌*. 123: 379-390 DOI 10.5575/geosoc.2017.0009

4. Koizumi, S., Suzuki, T.S., Sakka, Y., Yabe, K., Hiraga, T. (2016) Synthesis of crystallographically oriented olivine aggregates using colloidal processing in a strong magnetic field. *Physics and Chemistry of Minerals*, 43: 689-706 DOI 10.1007/s00269-016-0826-5

〔学会発表〕(計 4 件)

すべて招待講演

1. Hiraga, T., Nakakoji, T., Maruyama, G. (2017) Grain-to multiple-grain-scale deformation processes during diffusion creep. American Geophysical Union, San Francisco, U.S.A

2. Hiraga, T. (2016) Superplasticity in rocks. Symposium on “Faulting, friction and weakening: from slow to fast motion”, The Royal Society, Buckinghamshire, U.K

3. Hiraga, T., Maruyama, G., Yabe, K., Nakakoji, T., Sueyoshi, K., Koizumi, S. (2016) Mantle superplasticity and anisotropy. Japan Geophysical Union, Makuhari

4. Hiraga, T., Maruyama, G. (2015) Grain rotation during diffusion creep of forsterite + diopside. American Geophysical Union, San Francisco, U.S.A

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/hiragalab/index.html>

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()