

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01190

研究課題名（和文）電場で岩石の粒成長、粘性率は変わるのか？

研究課題名（英文）Sintering and deformation properties of peridotite in an electrical field

研究代表者

田阪 美樹 (Tasaka, Miki)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号：80772243

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：近年、材料科学の分野でセラミックス試料に電場をかけて加熱し変形実験を行うと、電場をかけない場合に比べて、低温度・低応力で塑性変形が起きることが発見された。これは試料に電場を加えることで、物質拡散が加速するためと考えられている。これまでの地球科学における研究では、精確な力学データと電気物性を同時に測定することが実験的に難しかったために、電場と粘性率の関係を求めた研究例はない。そこで本研究は、地球科学と材料科学の知見を駆使し電場下におけるマントルかんらん岩の粒成長・粘性変化を求め「地球内部に加わる電場で物質拡散が加速され、岩石が柔らかくなるのか？」という問いに対し研究を進める。

研究成果の学術的意義や社会的意義

焼結実験中に電場を加えると密度が増加し電場を加えない場合より短時間で緻密化が進むことが分かった。変形実験中に電場を加えると、電場を加えない場合に比べて同じ荷重で1桁程度ひずみ速度が速くなることが分かった。これは電場下で空孔濃度が変化し物質拡散が加速したためと考える。太陽活動などの地球外部起源の磁場と電場の変動により、地球内部に電場が誘導される。地球科学分野の実験岩石学的な研究において、岩石の粘性率に関する水やメルトの効果は多くの先行研究があが「電場の効果」は本研究で初めて実験的に示された。

研究成果の概要（英文）：A new technique called “flash sintering” has been proposed in the field of materials science. When tensile deformation experiments conducted on a dense oxide body in an electrical field have shown that plastic deformation can be enhanced at lower temperatures with lower stresses, as compared with conventional deformation experiments. Fluctuations in the magnetic and electrical fields derived from outside Earth, such as solar activity, induce an electrical field inside Earth. Although electrical fields inside Earth may affect the deformation behavior of rocks, no experimental studies have been conducted on geomaterials to assess this effect. Therefore, based on these recent findings in materials science, we conducted sintering and deformation experiments to examine the effects of an electrical field on high-temperature mass transport.

研究分野：実験岩石学

キーワード：かんらん岩 変形 電場 拡散

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球や地球型惑星はマントル対流によりその内部で物質循環が起こり熱的・化学的に進化している。マントル対流を理解するためには岩石の流動しやすさを特徴付ける粘性率を知る必要がある。マントルの対流変形で主要な変形メカニズムの粒径依存型クリープは粒径の $-2 \sim -3$ 乗で粘性率が変化するため粒径と粘性変化を精度よく理解することが重要である。

近年、材料科学分野で「フラッシュ焼結」と呼ばれる技術が注目されている。これはセラミックス材料に電場をかけ加熱すると、ある臨界温度と電場において急激に緻密化が加速し、ごく短時間で焼結が完了する特異な現象である (Raj et al., 2010)。この現象は電場をかけることで物質拡散が通常の 1000 倍以上に加速し粒成長が促進されるため起きると解釈されている。またセラミックス材料に電場をかけ加熱し引張変形実験を行うと、一般的な変形実験よりも低温度・低応力で塑性変形が起きることが発見された (Yoshida and Sasaki, 2018 Scripta Materialia)。これは電場をかけることで物質拡散が加速し粘性率が下がるためと説明されている。

岩石は「無機物を加熱し焼き固めた焼結体」という意味ではセラミックス多結晶体の一種であり、マントルの流動変形は結晶スケールでは鉱物を構成する元素の拡散移動と考えることができる(例えば Karato, 2008)。つまりセラミックス材料の変形も、地球マントル流動も、物質拡散に起因し本質的には同じ素過程が成り立つはずである。そこで本研究は、近年の材料科学分野における知見を踏まえて「地球内部にかかる電場により物質拡散が加速し、岩石が柔らかくなるのか？」を実験岩石学的手法を使って明らかにすることを目的に研究を行う。

2. 研究の目的

目的：電場下におけるマントルかんらん岩の粒成長・粘性変化を明らかにすること

3. 研究の方法

実験試料作製：我々の研究グループで開発した鉱物量比・化学組成を制御できる試料作製方法 (Koizumi et al., 2010PCM)を用いて、マントルかんらん岩の代表的な鉱物組み合わせである、かんらん石-単斜輝石系の2相系多結晶体を作製する。この方法は高純度のナノパウダーを出発物質にすることで細粒緻密で化学組成と岩石を制御した試料を作製できる利点がある。2相系試料を使うことで、粒径を小さく抑え試料に粒界が多く存在する条件を作り、電場を加えることで粒界拡散が変化する過程を実験的に捕らえ易いように工夫している。

焼結実験：箱型電気炉の中で試料をプラチナ線でするし加熱しながら無電場、500, 1000, 2000V/cmの電場を加えた焼結実験を行った。焼結中の試料の形状変化は電気炉の石英窓を通し CCD カメラで撮影・測定した。この実験結果から「電場を加えると物質拡散が加速し緻密化が促進される」という仮説を検証する。実験終了後、試料の密度はアルキメデス法を用い算出した。

変形実験：本研究で新規導入する高温炉付設のオートグラフ変形試験機を用いて変形実験を行った。この試験機で圧縮変形実験を行い「電場を加えると岩石の粘性率は下がり柔らかくなる」という仮説を検証する。プラチナペーストを使って試料にプラチナ線を巻き付け、直流電場を加える。この間 SiC ピストンを通して試料に荷重をかけ変形させることで直流電場下の粘性率を測定する。この試験機は長時間測定に耐える設計である。電場を 1000V/cm 加えた場合と無電場の場合で温度 1200、ひずみ速度 10^{-4} s^{-1} で圧縮変形実験を行った。

4. 研究成果

焼結実験：同じ熱履歴を持つ試料で加える電場が大きいほど試料の相対密度が高くなることが分かった。2000V/cmの電場を加えた焼結試料は他の低電場の試料よりも粒径が大きかった。これは電場を加えることにより物質拡散が加速したためと考える。

変形実験：先行研究の電場無しの通常の変形実験で得られた力学データと本研究で得られた実験結果の比較から、試料は拡散クリープで変形したことが分かった。電場を加えた場合と無電場の場合の変形実験の結果から、応力一定の条件下で、電場を加えた場合は加えない場合に比べてひずみ速度で1桁速く変形することが分かった。これは地球科学の物質で初めて電場により物質拡散が加速し変形が促進されることを示した実験結果である。

試料観察：焼結実験、変形実験を行った試料の微細構造は走査型電子顕微鏡(FE-SEM)とエネルギー分散型X線分析(EDS)を用い観察した。電場を加えた場合と無電場の場合で変形実験試料の粒径や微細構造に変化は見られなかった。

電場下における物質拡散加速のメカニズム：直流電場を加えた焼結実験と変形実験から電場下で物質拡散が加速されることが分かった。粒成長モデルと変形モデルから、電場下で物質拡散が加速される理由は、電場を加えたことで空孔濃度が増加するためと考えた。具体的には直流電場下で電子(e-)が陰極から陽極に移動するためマイナスにチャージしたマグネシウム空孔(V_{Mg}'')も陽極側へ移動する。電気的中性条件を保つために、陽極側でプラスにチャージした酸素空孔(V_O)も増加する。陽極側で空孔濃度が増加するために、物質拡散が加速し焼結速度や変形速度が変化したと提案する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tasaka, M., K. Maeda, K. Nambu, H. Motomura, H. Yoshida	4. 巻 341
2. 論文標題 Sintering and deformation properties of forsterite + diopside aggregates in an electrical field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 107051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2023.107051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tasaka, M., *Y. Nakai, Y. Harigane, A. Andreas	4. 巻 849
2. 論文標題 Mantle deformation during opening of the Japan Sea back-arc: Insights from peridotite xenoliths, Kawashimo, southwest Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 229722
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2023.229722	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前田光稀, 田阪美樹, 南部洸太, 本村寛樹, 吉田英弘
2. 発表標題 かんらん石 + 単斜輝石多結晶体から得られた直流電場が及ぼす高温物質輸送への効果
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田阪美樹, 藤井七夢, 前田光稀, 南部洸太, 吉田英弘
2. 発表標題 かんらん石 + 単斜輝石多結晶体の電場下での焼結と変形特性
3. 学会等名 日本惑星科学連合大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学理学部地球科学科 田阪研究室
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/tasaka/articles/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉田 英弘 (Yoshida Hidehiro) (80313021)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------