

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03734

研究課題名(和文) 鉱物多結晶体の超塑性3 粒径変化とのカップリング

研究課題名(英文) Superplasticity of minerals 3: Grain growth effect

研究代表者

平賀 岳彦 (Hiraga, Takehiko)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：10444077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：フォルステライト( $Mg_2SiO_4$ ) + 10vol%ペリクレーズ( $MgO$ )多結晶体では、最も遅い拡散種であるSiが第1相であるフォルステライトにのみ含まれている。この多結晶体に対し一軸圧縮クリープ実験および粒成長実験を行った。その結果、クリープ速度と粒成長速度から推定された拡散係数が同じであること、つまりクリープ(超塑性変形)と粒成長が、共通の拡散メカニズムに支配されていることが明らかになった。多くの岩石において、最も遅い拡散種が第一相に含まれる。拡散クリープ中の多結晶体の粘性率は粒成長およびクリープに共通な拡散係数で決定され、その粒径に至った時間から粘性率が分かる粒径-時間粘度計が提案された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球内部のマンテル対流を司るマンテル粘性率に対して、岩石を構成する鉱物の粒径およびそれに至るまでの時間から粘性率を求める手法を確立した。実際に観察される粒径と推定された地質時間を用いて、従来困難であった下部マンテル、特に核-マンテル境界という下部マンテル最深部の粘性率推定を行った。最深部においては、大きな粒径変化(粒成長)が予想され、最大粘性率の形で提案された。

研究成果の概要(英文)：In forsterite ( $Mg_2SiO_4$ ) + 10 vol% periclase ( $MgO$ ) polycrystal, the slowest diffusing species, Si, is only present in the primary phase, forsterite. Uniaxial compression creep and grain growth experiments were carried out on this polycrystalline material. The results show that the diffusivities estimated from the creep and grain growth rates are the same, i.e. creep (superplastic deformation) and grain growth are governed by a common diffusion mechanism. In many rocks, the slowest diffusing species are in the primary phase. The viscosity of polycrystals during diffusion creep is determined by grain size and the common diffusivity. We finally proposed a grain size-time viscometer, which gives the viscosity from the time taken to reach that grain size.

研究分野：地球内部ダイナミクス

キーワード：超塑性 粒成長 粘性率 下部マンテル 拡散クリープ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超塑性は粒径依存型クリープであるので、粒径によっては超塑性による高速変形が実現しうる。逆に、超塑性変形下では粒成長が促進され、超塑性は抑制される。したがって、超塑性の発現とその継続は常に粒径によって規定されている。超塑性と粒径変化のカップリングを解くことで、全地球「超塑性」流動仮説の検証を行う。

### 2. 研究の目的

岩石のほとんどは多相固相系であり、第1相鉱物の粒界に孤立して存在している第2相がオストワルド成長し、それに応じて第1相粒子も粒成長する。その時、粗大化する第2相と第1相の重なりを解消するように、第1相粒子の変形(クリープ)が必要と考えられ、多相固相系のクリープと粒成長は同じメカニズムで進むと予想された。その検証を行う。

上部マントル主要鉱物であるオリビンの結晶軸が、岩石中である方向に配向することが知られ、上部マントル内の地震波速度異方性の成因と考えられている。せん断面およびせん断方向に対して結晶軸が並ぶパターンに様々なものがあることが知られている。様々な結晶軸選択配向のパターンが拡散クリープ下での粒成長で生じるかを実験的に調べる。

上部マントル粘性率は、主要鉱物であるオリビン多結晶体の実験的に得られる流動則を地質条件に適用することで推定できる。しかし、とりわけ超塑性型拡散クリープ条件において、研究グループ間で粘性率にして2桁もの異なる結果が報告されており、信頼できる流動則は確立されていない。オリビン粒界ではCaやAlなどの不適合元素が濃集(粒界偏析)する。実験結果の違いは、用いられたオリビン多結晶体試料中の粒界偏析の有無に起因すると予想した。その検証を行う。

造岩鉱物における超塑性変形(拡散クリープ)をオリビン以外で起きるかを検証するために、上部マントルおよび下部地殻の主要鉱物である単斜輝石およびアノーサイト多結晶体の高温変形特性を調べた。

### 3. 研究の方法

最も遅い拡散種であるケイ素は、この多結晶体では第1相であるフォルステライトにのみ含まれており、先程の仮説を検証するために適した試料だと考えられる。このフォルステライト+ペリクレーズ多結晶体に対して、大気圧・高温(1150~1400°C)下での一軸圧縮方向のクリープ実験を行った。また、1300°Cから1450°Cの異なる温度で500時間の粒成長実験も行った。実験後の試料の微細構造を走査型電子顕微鏡で観察した。

オリビン+20vol%ダイオプサイド多結晶体に対して、異なる温度、変形時間条件での純粋せん断変形実験を行った。実験後の試料の微細構造を走査型電子顕微鏡で観察した。

通電焼結法を用いて僅かにフォルステライト( $Mg_2SiO_4$ )およびアノーサイト( $CaAl_2Si_2O_8$ )多結晶体を合成し、それらを高温変形実験に用いた。実験後の試料の微細構造を走査型電子顕微鏡で観察した。

### 4. 研究成果

フォルステライト( $Mg_2SiO_4$ )+エンスタタイト( $MgSiO_3$ )およびフォルステライト+ペリクレーズ( $MgO$ )多結晶体のクリープ実験と粒成長実験を行い、クリープと粒成長を支配する拡散メカニズムを明らかにした。クリープ速度と粒成長速度の両方から推定される拡散係数は実質同じであることがわかった。この結果は、両多結晶体のクリープと粒成長が、共通の拡散メカニズムに制御されていることを示す。多くの岩石において、最も遅い拡散種が第一相(例えば、Si)に含まれることから、クリープと粒成長の速度が共通の拡散係数で決まることが予想される。粒成長を伴う拡散クリープ中の多結晶体の粘性率はその共通な拡散係数と時間で記述することでき、粒径-時間粘度計が提案された。また、海洋リソスフェアのせん断帯における粒径と粘性率の推定を行った。50 kmで700°C、10ミクロンを仮定すると、リソスフェアの最深部の温度として仮定される1350°Cで2 mmであった。その条件での、本研究で得られた拡散クリープ則にしたがうと粘性率は $\sim 2 \times 10^{20}$  Pa·sが得られる。この値は、地球物理学的観測およびそのモデリングで推定された海洋リソスフェア底での粘性率とほぼ等しい。

全マントル対流において、深さ660 kmを下方通過後、ブリッジマナイト安定深度域内を下降するマントル内ではほぼ一定となる粒径に直ちに到達する。ブリッジマナイトからポストペロブスカイトへの相転移直後にも急激な粒成長が生じる。コアからの熱供給により高温な下部マントル底部をマントル物質が水平方向に移動する期間も粒成長が継続する。マントル上昇(湧昇)に転じるまでに粒径は $\sim 10$  mmに達し、そのサイズは上昇流中さらなる粒成長が生じえないほど十分に大きい。得られた粒径および拡散係数より、マントル対流時の深度と共に変化する粘性率を得た。マントル下降流および上昇流の温度差が小さい場合には、下降マントルが細粒であるために上昇マントルと比べ低粘性になりうる。地球物理学的に推定されるブリッジマナイト安定

域での深度ともに  $10^{21}$  から  $10^{23}$  Pa·s と変化する粘性率、ポストペロブスカイト安定深度域で推定される  $10^{16}$  から  $10^{20}$  Pa·s の低粘性率がよく再現された。

オリビンの b 軸がせん断面の法線方向に集中するタイプ、その集中に加えて a 軸がせん断方向に並ぶタイプ、配向しない (ランダム) タイプが見いだされた。そのタイプが、オリビン粒子形で決定されていること、粒子形は粒子成長と共に変化することが分った。これまで、オリビンの配向およびそのパターンは、転位クリープ下での水の有無、応力の大小、温度の違い等によって変化すると考えられてきたが、我々は、粒成長によって粒界すべりし易い方向が変化し、それに応じて結晶軸選択配向パターンが変化するという新しいメカニズムを提案した。

下部地殻主要鉱物である単斜輝石 ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) および斜長石の端成分であるアノーサイト ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 多結晶体の高温変形特性を明らかにした。単斜輝石の本実験および過去の実験結果は、体拡散クリープで統一的に説明できることを示した。得られた拡散クリープの著しく大きな活性化エネルギー  $720 \text{ kJ/mol}$  は単斜輝石を主要とする岩石の高温下での著しい弱さを予想する。アノーサイト粒子の形態が 010 面を発達させる半自形であり、変形中に 010 面粒界での優先的粒界すべりによって、結晶軸選択配向を起こすことが分かった。MgO を添加すると劇的に流動応力が下がることが示され、Mg の粒界偏析によって誘起された粒界 disordering が示唆された。これらの特性は、オリビン多結晶体の拡散クリープのそれと共通で、造岩鉱物に一般的な現象であることが推定された。

Ca と Al をわずかに添加したオリビン多結晶体制試料と無添加試料を作製し、大気圧高温一軸圧縮実験によって化学組成が流動特性に与える影響を調べた。その結果、粒界拡散クリープが支配的であること、及び添加試料は試料の融点の 0.92 倍程度以上から無添加試料と比べて軟化し、その程度は温度上昇とともに増加することを明らかにした。添加試料が軟化した原因は、粒界偏析と温度に駆動されるソリダス近傍での粒界の無秩序化によるものと結論づけた。その軟化の効果を組み込んだ拡散クリープ則に基づいて、海洋上部マントル粘性率の深度構造を推定した。粒径が 1 mm であると、 $10^{19}$ – $10^{20}$  Pa·s の低粘性層およびプレート冷却に伴う高粘性層の発達が推定され、リソスフェア - アセノスフェア構造とよく対比できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ghosh S, Koizumi S, Hiraga T	4. 巻 126
2. 論文標題 Diffusion creep of diopside	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB019855	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 K. Yabe, K. Sueyoshi, T. Hiraga	4. 巻 125
2. 論文標題 Grain boundary diffusion creep of olivine: 1. Experiments at 1 atm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB019415	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 K. Yabe, T. Hiraga	4. 巻 125
2. 論文標題 Grain boundary diffusion creep of olivine: 2. Solidus effects and consequences for the viscosity of the oceanic upper mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB019416	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 Koizumi, S., Hiraga, T., Suzuki, T. S.	4. 巻 47
2. 論文標題 Vickers indentation tests on olivine: size effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-019-01075-5	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 Nakakoji, T., Hiraga, T., Nagao, H., Ito, S., & Kano, M.	4. 巻 123
2. 論文標題 Diffusion creep and grain growth in forsterite+ 20 vol% enstatite aggregates: 1. High resolution experiments and their data analyses.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 9486-9512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015819	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 Nakakoji, T., & Hiraga, T.	4. 巻 123
2. 論文標題 Diffusion creep and grain growth in forsterite+ 20 vol% enstatite aggregates: 2. Their common diffusional mechanism and its consequence for weak temperature dependent viscosity.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 9513-9527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015818	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 Yabe K., Koizumi S., & Hiraga, T.	4. 巻 128
2. 論文標題 Diffusion creep characteristics of anorthite revealed by uniaxial and pure shear deformation experiments.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022JB024752	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto A., Hiraga T.	4. 巻 127
2. 論文標題 A Common Diffusional Mechanism for Creep and Grain Growth in Polymineralic Rocks: Experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022JB024638	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kim, N., Ando, A., Yabe, K. & Hiraga, T.	4. 巻 127
2. 論文標題 Olivine morphology and fabric during diffusion creep: Pure shear experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB023613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 N. Kim, T. Hiraga
2. 発表標題 Olivine fabric development during diffusion creep by channel angular extrusion
3. 学会等名 International Conference on Textures of Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T Hiraga, K Yabe and T Nakakoji
2. 発表標題 On the low stress power-law creep of polycrystalline olivine
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiraga T., Nakakoji T., Yabe, K.
2. 発表標題 Small and large effective activation energies of diffusion creep in the oceanic lithosphere and asthenosphere
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------