

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04128

研究課題名（和文）かんらん石粒界すべりクリープの実態と沈み込みプレート境界の非定常挙動の広がり

研究課題名（英文）Geological analysis for grain boundary sliding creep of olivine and its possible contribution to non-steady state behaviours of subduction boundaries

研究代表者

水上 知行（Mizukami, Tomoyuki）

金沢大学・地球社会基盤学系・助教

研究者番号：80396811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：沈み込みプレート境界のマントル深度において非定常挙動の要因となりうるかんらん石の粒界すべり（GBS）クリープの実態解明のため、天然かんらん岩（三波川帯東赤石かんらん岩体と日高帯幌満かんらん岩体）を用いて構造解析を行った。電子線チャネリングコントラストイメージング（ECCI）を利用した転位観察法に取り組み、試料処理の最適条件を探り非破壊で転位を可視化することに成功した。また、幌満岩体の衝上時に形成された細粒橄欖岩組織に多様な動的再結晶過程を経て粒径依存型クリープ（GBSクリープと拡散クリープ）へ遷移した事実を明らかにした。特に、反応を伴う細粒化の実態を天然のマントル岩石において初めて見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレート境界型地震の震源域の上盤を持ち上げる応力の蓄積は、より深部の歪み解消過程と関連している。テクトニック微動やスロースリップが観測されるゆっくりすべり域が直接的な影響を及ぼすが、さらに深部のかんらん岩の流動現象も連動する一つのシステムとして捉えるべきであろう。その深部で優勢と予想される、かんらん石の粒径依存型クリープの実態を示した地質学的研究の例が少ない。今回、幌満岩体において輝石を含む典型的なマントルかんらん岩に見出された構造は普遍性を持つ。そして、この岩石の動的再結晶組織の定量的解析、そして岩石の非定常的な強度変化の解析へと道を開いた。

研究成果の概要（英文）：Grain boundary sliding (GBS) creep of mantle olivine can potentially induce non-steady-state behaviours of subduction boundaries at mantle depth. In order to understand the potential importance of the GBS creep, this study made structural analyses of natural peridotite, such as the Higashi-akaishi peridotite body and the Horoman peridotite body. Challenges for non-destructive dislocation observation using electron channeling contrast imaging, that is expected as a new methodology in earth science, are successful. The structural analyses of the fine-grained and ultra-fine grained peridotites in the Horoman body depict that various processes of dynamic recrystallization have worked to cause transitions of deformational mechanism from grain-size insensitive dislocation creep to grain-size sensitive creeps. The most striking result is the microstructural evidence that reactions between olivine and pyroxenes under strain play a major role in grain-size reduction in natural mantle rocks.

研究分野：構造地質学

キーワード：かんらん岩の構造解析 動的再結晶 電子線チャネリングコントラスト

## 1. 研究開始当初の背景

海洋プレートが地中へ入り込む沈み込み帯では、剪断によって周期的に巨大地震が発生する。甚大な災害を引き起こす巨大地震の背景にある、沈み込むプレートと上盤の境界(「沈み込み境界」と呼ぶ)における歪みの蓄積および解消過程を理解することは、地球科学において最も重要な問題の一つである。近年の観測を通じて、巨大地震の震源域の沈み込み境界深部側で、より周期が短く、規模の小さな「ゆっくりすべり」の活動が検知され、深部の歪み解消が浅部の歪み蓄積を支配する複合的なシステムが描き出された。

このようなすべり挙動の違いは、沈み込む海洋プレートと上盤の結合の強度と性質(カップリング)が深さに応じて変化することを示す。さらに深部の高温条件ではカップリングが強く、プレートの沈み込みによる剪断がマントル流動を引き起こして島弧マグマを生成する高温状態を作るモデル(例えば Iwamori, 2000)が受け入れられてきたが、マントルウェッジ先端部に流動しない「冷たい鼻」が存在するという提案もある(Wada and Wang, 2009; Syracuse et al., 2010)。そこで「沈み込み境界のカップリングを深さ方向へどこまで連続的に理解できるか」が、問題となっている。その本質を理解するためには、観測による物理現象の追究と並行して、物質科学的な要因を探る研究を二人三脚で進める必要がある。マントルウェッジを構成するかんらん石の流動特性を明らかにする系統的な研究が求められている。

近年のかんらん石の実験研究によって、新たな変形メカニズムの重要性が指摘されている(Hansen et al., 2011; Ohuchi et al., 2015)。粒界すべりクリープが幅広い条件で支配的になりうるという。粒界すべりクリープ下では流動の歪み速度が粒径に依存するため、変形に伴う鉱物の再結晶によって弱化し、鉱物の成長によって硬化する。この性質により流動変形が局所化し、断層運動に近い非定常的な挙動を示す可能性がある。沈み込むプレート内部で起こるやや深発地震の原因として提案されている(Ohuchi et al., 2017 Nature Geoscience)。

転位クリープをベースに考えてきたマントル像が、粒界すべりクリープの優勢によってどう変化するのか、という問題が浮かび上がる。深部の沈み込み境界のカップリングにおいても、このかんらん石の粒径依存型クリープが支配メカニズムとなる可能性がある。しかし、実験装置の中で認識された現象が、地球内部で実際に起こりうるかを十分に検証しなければならない。そして、沈み込み帯ダイナミクスモデルに導入するには、どこまで深く、どこまで広く影響を及ぼすかを制約する必要がある。

プレート境界条件において、かんらん石粒界すべりクリープが作動した天然の証拠は非常に少なく、その実態はほとんどわかっていない。数少ない例が、三波川帯東赤石かんらん岩体の権現越の角閃石を含むダナイトにて確認されている。天然の産例を増やすこと、また変質の少ないかんらん岩にて正確な情報を得ることが求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、この非定常クリープの実態と沈み込み帯ダイナミクスにおける役割を明らかにするため、国内に露出する島弧由来のかんらん岩体の構造解析を行なう。粒界すべりクリープの(1)天然の認定基準、(2)実験による流動則の妥当性の検証、(3)優勢条件の制約、(4)非定常的な変形挙動の実証、の4つの検討課題に取り組む。その結果に基づき、沈み込み境界カップリングのレオロジーモデルを検討・考案し、沈み込み帯のダイナミクスへの寄与を論ずる。

## 3. 研究の方法

日高帯幌満かんらん岩体のフィールド調査を行ない、変形構造の履歴を明らかにするとともに、微細組織の観察から細粒化過程を特定する。転位の観察から差応力条件を推定する共に、蓄積された歪みエネルギーとその解消過程を読み取る。粒子認識と形状などの定量化、結晶方位の選択配向の再結晶に伴う変化を読み取るため EBSD 分析を行なう。

研究の要点である、転位クリープと粒界すべりクリープの識別のために、二つの技術的問題に取り組む。一つは EBSD マッピングによる粒子解析の精度の向上である。従来よりも高解像度のマッピングを行なって突き詰めていく。また、転位の分布や密度、そして滑動について正確な情報を得る必要がある。酸化デコレーション法による転位の可視化は酸化反応の不均質が誤差要因になる可能性が指摘されている。その検証のため、電子線チャネリングコントラストイメージング(ECCI)による転位の可視化に挑戦する。ECCI によるかんらん石中の転位の可視化を変形構造解析に生かした例はまだない。ECCI 活用の技術的な問題を克服し、マントルダイナミクスの新たなツールとしての可能性を切り開くのが本研究の一つの到達目標である。

転位観察は金沢大学 AMSL の FE-SEM (JSM-7100F) EBSD 分析には金沢大学材料工学研の FE-SEM

(JSM-7900F)を使用した。

#### 4. 研究成果

沈み込みプレート境界のマントル深度において非定常挙動の要因となりうるかんらん石の粒界すべりクリープの実態解明のため、天然かんらん岩(と日高帯幌満かんらん岩体)を用いて構造解析を行った。また、幌満岩体の衝上時に形成された細粒橄欖岩組織に多様な動的再結晶過程を経て粒径依存型クリープ(粒界すべりクリープと拡散クリープ)へ遷移した事実を明らかにした。特に、反応を伴う細粒化の実態を天然のマントル岩石において初めて見出した。

プレート境界型地震の震源域の上盤を持ち上げる応力の蓄積は、より深部の歪み解消過程と関連している。テクトニック微動やスロースリップが観測されるゆっくりすべり域が直接的な影響を及ぼすが、さらに深部のかんらん岩の流動現象も連動する一つのシステムとして捉えるべきであろう。その深部で優勢と予想される、かんらん石の粒径依存型クリープの実態を示した地質学的研究の例が少ない。今回、幌満岩体において輝石を含む典型的なマントルかんらん岩に見出された構造は普遍性を持つ。そして、この岩石の動的再結晶組織の定量的解析、そして岩石の非定常的な強度変化の解析へと道を開いた。

三波川帯東赤石かんらん岩体の試料を用いてECCIを利用した転位観察法に取り組み、試料処理の最適条件を探って非破壊で転位を可視化することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakamoto Keita, Hiramatsu Yoshihiro, Matsuzawa Takanori, Mizukami Tomoyuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Variations in the Characteristic Amplitude of Tectonic Tremor Induced by Long Term Slow Slip Events	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JB021138	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 Guotana Juan Miguel, Morishita Tomoaki, Nishio Ikuya, Tamura Akihiro, Mizukami Tomoyuki, Tani Kenichiro, Harigane Yumiko, Szilas Kristoffer, Pearson D. Graham	4. 巻 13
2. 論文標題 Deserpentinization and high-pressure (eclogite-facies) metamorphic features in the Eoarchean ultramafic body from Isua, Greenland	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geoscience Frontiers	6. 最初と最後の頁 101298 ~ 101298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gsf.2021.101298	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 該当する

1. 著者名 Nakamoto Keita, Hiramatsu Yoshihiro, Matsuzawa Takanori, Mizukami Tomoyuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Variations in the characteristic amplitude of tectonic tremor induced by long term slow slip events	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JB021138	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 Arai Shoji, Ishimaru Satoko, Miura Makoto, Akizawa Norikatsu, Mizukami Tomoyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Post-Serpentinization Formation of Theophrastite-Zaratite by Heazlewoodite Desulfurization: An Implication for Shallow Behavior of Sulfur in a Subduction Complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 806 ~ 806
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/min10090806	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 Guild Meghan R, Till Christy B, Mizukami Tomoyuki, Wallis Simon	4. 巻 61
2. 論文標題 Petrogenesis of the Higashi-Akaishi Ultramafic Body: Implications for Lower Crustal Foundering and Mantle Wedge Processes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Petrology	6. 最初と最後の頁 1~25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/petrology/egaa089	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 該当する

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 水上知行 小川史洋
2. 発表標題 早池峰 - 宮守超マフィック岩体の蛇紋岩組織の解読
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会 (2021名古屋)
4. 発表年 2021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
---------	---------