

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340162

研究課題名(和文) 上部マントルのレオロジーに与える超低歪速度の効果の検証

研究課題名(英文) Verification of ultra-low strain rate effect on olivine rheology

研究代表者

安東 淳一 (ANDO, Jun-ichi)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50291480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：オリビンの塑性変形特性に与える“超低歪速度の効果”の有無を、上部マントル起源のペリドタイトを構成しているオリビンの“変形微細組織観察”と“微小領域化学組成分析”、及び“変形実験”を通して明らかにすることを目的とした。その結果、観察した全てのペリドタイトにおいて、コットレル雰囲気起因すると考えられる、転位線へのFeの濃集が認められた。この結果は、上部マントルのダイナミクスを解明するためには、オリビンの塑性変形特性に与える超低歪速度の影響を明らかにする必要があることを強く示唆している。変形実験に関しては、残念ながら研究期間中に成果を得る事ができなかった(現在も研究を継続させている)。

研究成果の概要(英文)：In this research, we observed the microstructures of both alpine-type peridotites and peridotite xenoliths in basalt, and analyzed the microchemistry around the dislocations developed in the olivine grains of the studied samples, using optical microscopy, EPMA, EBSD, TEM and ATEM techniques to clarify if the ultra-low strain rate has any effect on the olivine plasticity. We detected Fe-concentration along dislocation line in all observed samples, which was probably caused by Cottrell atmosphere. This result strongly suggests that the effect of ultra-low strain rate on olivine plasticity is very important to understand the dynamics of the upper mantle, which has not been studied so far. In addition, we tried to do the deformation experiments of olivine to support the above conclusion, which has yet to produce any confirming results.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石鉱物鉱床学

キーワード：マントルのレオロジー オリビン 塑性変形 歪速度効果 コットレル雰囲気

## 1. 研究開始当初の背景

オリビン ( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ) は上部マントルの6割以上を占める鉱物である為に、その塑性変形特性は上部マントルのダイナミクスに大きな影響を与えていると考えられている。この約50年間にわたるオリビンに関する研究の結果、オリビンの基本的な塑性変形特性(流動則や塑性変形メカニズム)はほぼ解明され、近年では、より地球内部の状態に近い条件での塑性変形特性の解明を目的として、“水の効果”と“高圧力の効果”に関する研究が精力的に行われている。

この様にオリビンの塑性変形特性に関する研究は質量共に充実し、上部マントルのダイナミクスを鉱物物性から理解できつつある。しかし、その一方で現実の上部マントルのダイナミクスを考える上で解決しなければならない重要な問題が残されている。それは、オリビンの塑性変形特性に与える“歪速度”の問題である。室内における変形実験では、試料の歪速度は $10^{-3}$ - $10^{-6}\text{s}^{-1}$ の条件で行わざるを得ないが、上部マントルにおける歪速度はそれよりもはるかに小さい( $10^{-12}$ - $10^{-16}\text{s}^{-1}$ )。歪速度が大きく異なる変形実験を基にして得られたデータが、本当に上部マントルにおけるオリビンの塑性変形特性を再現できているのか現時点では不明である。

上部マントルのダイナミクスにおいては、オリビン中の欠陥である“転位”の生成と移動(転位クランプ)が重要な変形のメカニズムになると考えられている。金属学或いはセラミックス学の分野では、結晶の歪速度が小さくなると、結晶中の転位線に特定の固溶原子が濃集する“コットレル雰囲気”とよばれる現象が発現することが知られている。コットレル雰囲気が存在すると、その粘性力の為に転位の運動が大きく制約される。すなわち、コットレル雰囲気が発現するか否かで、その結晶の流動則が大きく異なることになる。上

部マントルにおいて、オリビン中に発達す転位はコットレル雰囲気を生じているのであるか?このことが、低歪速度がオリビンの塑性変形特性に影響を与えているかを解明する1つの指標となる。

マントルを構成するオリビン中での転位線への固溶原子の濃集は、Kitamura et al. (*Proc. Japan Acad.*, 62, 1986)と Ando et al. (*Nature*, 414, 2001)が報告している。彼らは、上部マントル起源の塑性変形したペリドタイト岩体(東赤石ペリドタイト岩体とウエンザルペリドタイト岩体)を構成するオリビン(Fo91-92)を分析透過型電子顕微鏡(ATEM)によって詳細に観察し、固溶原子であるFeが転位線に選択的に濃集していることを発見した。そして、その成因をコットレル雰囲気に求めた。しかし同様の組織は塑性変形終了後(すなわち転位が静止した状態)において、メタソマティズム等の影響で特定の原子が転位線に沿って選択的に拡散すること(パイプ拡散)でも形成されうる。実際、Plumper et al., (2012)は、蛇紋岩中に残されたオリビン中にパイプ拡散によって形成された直線的なFeの濃集部分を報告している。Ando et al. (2001)では、複数のデータを基にパイプ拡散の可能性を否定している。

## 2. 研究の目的

本研究は“コットレル雰囲気”を重要なキーワードとし、オリビンの塑性変形特性に与える“超低歪速度の効果”の有無を、上部マントル起源のペリドタイトを構成しているオリビンの“変形微細組織観察”と“微小領域化学組成分析”、及び“変形実験”を通して明らかにすることを目的とした。すなわち、Kitamura et al. (1986)と Ando et al. (2001)で報告されている塑性変形したオリビン中での転位線へのFeの選択的な濃集は、普遍的な現象であるのか、そして、その成因がコットレル雰囲気であるのかを明らかにすること

を研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では以下の2つの側面から研究を進めた。1) 上部マントル起源の塑性変形したオリビンの変形微細組織のキャラクタリゼーションと転位線近傍の微小領域化学組成分析(主に透過型電子顕微鏡(TEM)とATEMを使用)、2) オリビンの変形実験(広島大学設置の固体圧式変形実験装置を使用)と回収試料のキャラクタリゼーションを行う。

まず1)の天然の試料の観察では、ゼノリスタイプ(佐賀県高島、福岡県黒瀬、秋田県目瀧、ハワイオアフ島ソルトレイク)とアルパイントイプ(幌満、ウエンザル)のペリドタイトを研究対象とした。本研究では、対象とした試料の塑性変形履歴の解明が重要となる。これにはオリビンの“地質差応力計”及び“転位のすべり系”を主に用い、以下にまとめた変形微細組織の基本的な発達過程の考え方に基いて考察を行った。

結晶中の転位は、試料に応力が加わった直後から生成と移動を始め、すぐに作用している応力値に対応した転位密度を持つようになる(転位密度地質差応力計)。その後さらに変形が進行(歪が増大)すると、亜結晶粒径、動的再結晶粒径の順番で応力値に対応した特定の値を持つようになる(亜結晶粒径地質差応力計と結晶粒径地質差応力計)。これら3つの独立した地質差応力計から求めた応力値は、上記した変形の各進行段階以後において作用した値を反映するようになる。したがって、各応力値を比較するにより、ペリドタイト岩体に作用した応力履歴を考察できる。本研究では、転位密度地質差応力計として Kohlstedt et al. (*J. Geophys. Res.*, 1974)、亜結晶粒径地質差応力計と結晶粒径地質差応力計は Karato et al. (*Geophys. Res. Lett.*, 1980)を使用した。

また転位のすべり系は塑性変形時の諸条

件(温度、差応力、含水量等)によって変化することが知られている(例えば Karato et al., *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2008)。したがって、すべり系を求めることでも変形条件を考察することが可能となる。本研究では、“転位の直接観察”と“亜結晶粒界の方位と回転軸”(キンクバンド法)それと“格子選択配向(LPO)”から精度よくすべり系を決定した。転位の直接観察にはTEMを用いた Weak Beam Dark Field(WD)法を(図1)、亜結晶粒界の方位と回転軸及びLPOの決定には電子線後方散乱回折(EBSD)法を使用した。この3つの方法から求められた変形条件は、おのおの転位密度地質差応力計、亜結晶粒径地質差応力計、結晶粒径地質差応力計の適応変形進行段階に対応しているものと考えられることから、地質差応力計とすべり系の変化を総合して変形履歴を考察した。

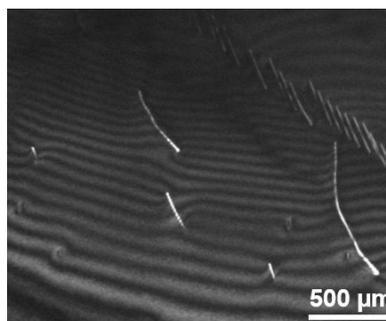


図1: WD法による転位のTEM像

試料は幌満カンラン岩を構成するオリビン

### 4. 研究成果

#### 1) 天然の試料の観察:

ATEMを用いた化学組成分析の結果からは、ゼノリスタイプとアルパイントイプの全てのペリドタイト試料において、転位線近傍部分にFeの濃集が生じていることが明らかとなった(図2)。このFeの濃集の成因を解明するために、各試料の塑性変形履歴を精査した。以下に各試料の微細組織観察の結果と考察した変形履歴を記述する。

ゼノリスタイプのペリドタイトは主に等粒状組織を示す。オリビンは比較的粗粒(数百 $\mu\text{m}$ )

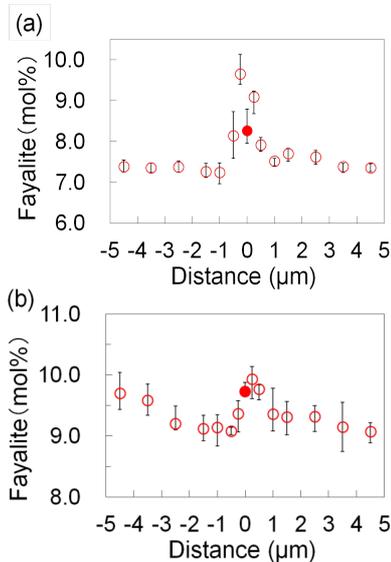


図2：転位近傍の化学組成プロファイル

縦軸はFayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) の mol%, 横軸は転位からの距離を示す。赤丸が転位の直上を表す。(a) 目濁ペリドタイト、(b) ホロマンペリドタイトの結果。

数mm) で、その粒界は直線的かつ三重点も一般的に観察される。オリビン粒子中にはキックバンド様の亜結晶粒界が発達しているが、波動消光はほとんど認められない。キックバンド法、及びLP0から得られるすべり系は互いに相補的な結果となっており、高島、黒瀬、目濁の試料では $[100]\{0kl\}$ が、ソルトレイクの試料では $[100](010)$ が卓越している。

WB法を用いて決定したすべり系は上記した結果とは一致せず、高島は $[100](010)$ と $[001](100)$ 、黒瀬は $[100](001)$ 、目濁は $[001](100)$ と $[100]\{0kl\}$ 、ソルトレイクは $[100](010)$ と $(010)[001]$ が卓越する。

3種類の地質差応力計から求めた差応力値は各試料で傾向が一致しており、転位密度から得られた値が約50MPaと最も高く、次いで再結晶粒径から得られた約10MPa、そして亜結晶粒径から得られた約1MPaとなる。

一方アルパインタイプのペリドタイトは、動的再結晶したオリビンの粒径が比較的細粒(数十~数百μm)なポーフィロクラスティック組織を呈している。特にウエンザルペリド

タイトでは、動的再結晶がかなり進行しておりポーフィロクラストの割合が少ない。両試料とも、オリビンの粒界は房状やアメーバ状を呈している。ポーフィロクラスト中には波動消光が顕著に発達するが、亜結晶粒界を明確に認識することは困難であるので、亜結晶粒径及びキックバンド法を用いた差応力値の見積もり、及びすべり系の決定に関する記述は省略する。

LP0から得られるすべり系は、幌満ペリドタイトでは $[100](001)$ が卓越する。ウエンザルペリドタイトではLP0の集中度が弱く、すべり系を明確に決定する事が出来なかったが $[100]\{0kl\}$ の可能性が強い。興味深いことは、ポーフィロクラストと動的再結晶粒子では、 $[100]$ の集中方向が $90^\circ$ 異なる可能性が強いことで、これが弱いLP0の集中度の原因と考えられる。WB法を用いて決定したすべり系は、幌満ペリドタイトは $[100](010)$ 、ウエンザルペリドタイトは $[100](001)$ が卓越している。

転位密度地質差応力計を用いて求めた応力値は、両試料共に約100MPaであった。しかし、結晶粒径地質差応力計から得られた値は、幌満ペリドタイトで約30MPa、ウエンザルペリドタイトでは約200MPaであった。

以上の微細組織観察結果から考察される各ペリドタイト岩体が経た変形履歴をまとめる。まずゼノリスタイプのカンラン岩は4つの試料ともに、約10MPaという低い差応力下での定常クリープ状態を経た後に、静的回復作用を受けたことが理解される。またその後、約50MPaの付加応力を受けたと考えられる。これら一連の現象は、上マントルにおける塑性変形とその後生じたマグマに取り込まれる際のアニーリング過程、そしてゼノリスとして地表へ上昇する過程における付加応力を受けたことを示唆している。最終的に受けた付加応力中には、亜結晶粒界の生成は生じていないことを考慮すると、この付加応力は非常に短時間にパルス的に作用した可能性が高い。

一方アルパインタイプのペリドタイトであるが、幌満ペリドタイト岩体は、低差応力場（約30MPa）から高差応力場（約100MPa）へ塑性変形場が変化したことが示唆される。この応力場の変化の際に、剪断（或いは最小主応力）方向が90°変化した可能性が高い。また、ウエンザルペリドタイト岩体は、歪結晶回転による動的再結晶の起こるような高温状態から、バルジング再結晶の起こる低温状態へ塑性変形場が変化したと考えられる。このような幌満ペリドタイト岩体が経た低差応力場から高差応力場への変化、それとウエンザルペリドタイト岩体が経た高温状態から低温状態への変形場の変化は、ペリドタイト岩体の上昇過程に対応すると考えられる。

以上のように本研究で観察した試料は全て、上部マントル中での塑性変形によって形成された微細組織を強く残存させている。また以下にまとめるような非常に重要な観察結果も得られている。1) オリビンの粒界に沿った部分には全くFeの濃集は認められない。2) 転位線部分にはFe以外の元素の濃集は認められない。これら2つの観察結果は、パイプ拡散（Feの起源をオリビン粒子外に求める）による転位線へのFeの濃集を強く否定する。パイプ拡散の場合には、粒界に沿った部分にもFeの濃集が期待される。更にパイプ拡散の場合には、拡散起源の性質により複数の元素の濃集が期待される。Plumper et al., (2012) が蛇紋岩中の残存オリビンで報告している転位線へのFe、Mn、Niの濃集がこれにあたる。

今回得られた全ての観察結果を総合的に考えると、研究対象とした試料で観察された転位線近傍におけるFeの濃集は、上部マントルにおける塑性変形時、すなわちコットレル雰囲気によって発生したと結論できる。

## 2) 変形実験：

現時点では実験に適した試料セルの開発を継続して行っており、残念ながら当初の目的

を達するに至っていない。しかし、本年中には一定の結果を得ることができそうである。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

1. T. Yamamoto, J. Ando, H. Ohfuji, T. Morishita, N. Tomioka, K. Watanabe, Ultra-low strain rate effect in the upper mantle: constraint from microstructural observation on naturally deformed olivine. American Geophysical Union, Fall Meeting, 9-13 Dec 2013, San Francisco, USA
2. 山本貴史, 安東淳一, 大藤弘明, 森下知晃, 富岡尚敬, 渡辺克晃, カンラン岩中の変形したオリビンの微細組織観察. 上部マントル起源のオリビンの微細組織観察から探る超低歪速度効果の検証. 日本鉱物科学会2013年年会, 2013年9月11日-9月13日, 筑波大学
3. 小畑正明, 真下茂, 陳黎亮, 安東淳一, 山本貴史, かんらん石の衝撃圧縮実験: 深発地震震源過程解明に向けての試験的研究その2. 日本地質学会第120年学術大会, 2013年9月14日-9月16日, 東北大学
4. 山本貴史, 安東淳一, 大藤弘明, 富岡尚敬, 森下知晃, カンラン岩中の変形したオリビンの微細組織観察. 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月19日-24日, 千葉
5. 山本貴史, 安東淳一, 大藤弘明, 森下知晃, 富岡尚敬, 渡辺克晃, マントル起源のオリビンをを用いた超低歪速度効果の検証. 日本鉱物科学会2012年年会, 2012年9月19日-9月21日, 京都大学
6. 山本貴史, 安東淳一, 大藤弘明, 森下知晃, 富岡尚敬, 渡辺克晃, マントル起源のオリビンに記録されている超低歪速度効果の探査. 日

本地球惑星科学連合2012年大会 ,2012年5月22  
日-27日 ,千葉

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

安東 淳一 ( ANDO JUN-ICHI )

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 5 0 2 9 1 4 8 0

### (2)研究分担者

平賀 岳彦 ( HIRAGA TAKEHIKO )

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号 : 1 0 4 4 4 0 7 7

森下 知晃 ( MORISHITA TOMOAKI )

金沢大学・自然システム学系・教授

研究者番号 : 8 0 3 3 4 7 4 6

大藤 弘明 ( OHFUJI HIROAKI )

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究セン  
ター・准教授

研究者番号 : 8 0 4 0 3 8 6 4