

Experimental study on rheological properties of mantle minerals: Implication for subducting slab and the lower mantle

今村, 公裕

<https://hdl.handle.net/2324/1959074>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (理学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 今村 公裕

論 文 名 : Experimental study on rheological properties of mantle minerals:
Implication for subducting slab and the lower mantle
(地球のマントル鉱物の流動物性に関する実験的研究と沈み込むスラブ及び下部
マントルへの応用)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

地震波トモグラフィによって、地球深部に沈み込むスラブは地下約 660 km の上下マントル境界で滞留するスラブや下部マントルまで沈降した後に地下約 1000 km で滞留するスラブ、核-マントル境界まで沈降するスラブなど様相が異なるスラブが観測されている。これらの様相を説明するためには、まずマントル遷移層中のスラブ(遷移層スラブ)や下部マントル中のスラブ(下部マントルスラブ)とマントルの粘性率を理解する必要がある。しかし、マントル鉱物を用いた実験を基にスラブの強度やマントルの粘性率を制約するような研究はほとんど行われていない。そこで本研究では異なる 2 つの実験的研究を行った。これらの結果からスラブの強度や下部マントルの粘性率を制約することを目的としている。

遷移層スラブの強度を制約するためには、遷移層スラブ条件での主要構成鉱物の流動則を明らかにする必要がある。特に低温のスラブ中においてはパイエルス機構による流動が卓越していると考えられているが、変形実験を基にした遷移層鉱物のパイエルス機構の流動則は報告されていない。そこで本研究では主に遷移層下部におけるスラブの主要構成鉱物であるリングウッダイトのパイエルス機構の構築を目指し、低温高圧力における変形実験を行った。

高圧高温変形実験は大型放射光施設である高エネルギー加速器研究機構(KEK) PFAR の NE7 や SPring-8 の BL04B1 に設置されている Deformation-DIA 型高圧変形装置と PFAR の NE7 に設置されている Deformation-111 型高圧変形装置を用いた。実験は 6.6-17.5 GPa、200-1000°C の条件で定ひずみ速度($0.96-9.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)で変形実験を行った。出発物質には九州大学設置の川井型高圧発生装置を用いてサンカルロスオリビンの単結晶円柱からあらかじめ合成したリングウッダイト(22 GPa、1400°C、3h)の円柱多結晶を用いた。変形実験中は 50-60 keV の放射光単色 X 線を併用し、X 線透過像と 2 次元 X 線回折パターンを交互に取得することで、変形実験中の圧力、差応力、ひずみ速度のデータを約 6 分毎に取得した。回収試料の微細組織観察には FE-SEM を用い、含水量測定には micro FT-IR を用いた。

リングウッダイトの流動応力は先行研究で示されているリングウッダイトの転位クリープ(Kawazoe et al., 2016)の場合よりも小さく、リングウッダイトにおいても低温条件ではパイエルス機構が卓越することが実験的に明らかになった。本研究の結果からリングウッダイトのパイエルス機構の流動則を構築し、スラブの強度を検討した。冷たいスラブでは推定される遷移層スラブのひずみ速度(10^{-14} s^{-1})において、スラブ中心部ではパイエルス機構が卓越し外周部では転位クリープが卓越することが実験的に明らかになった。リングウッダイトのパイエルス機構の流動則から推定さ

れる沈み込む遷移層スラブの強度は拡散係数から計算された強度よりも小さく、その値は沈み込む遷移層スラブに関する数値計算による研究における降伏応力に近い値である。このことから本研究によって繊維層スラブの強度を制約できると考えられる。

下部マントルスラブではポストスピネル相転移の影響で結晶細粒化(約 1 μm)がおきること、下部マントルでは地震波異方性が観察されないことから下部マントル(スラブ)では拡散クリープが卓越すると考えられている。拡散クリープが卓越する場合、流動応力は粒径の 2-3 乗に比例することが知られている。またパイロライトは下部マントル上部(<27 GPa)では第一相としてブリッジマナイト、第二相としてフェロペリクレイス、Ca-ペロプスカイト、メジャライトガーネットの 4 相が存在し、下部マントル全体(>27 GPa)ではメジャライトを除いた 3 相が存在することが知られている(e.g., Irifune 1994)。粒成長カイネティクスは $d^n - d_0^n = kt$ (d : 結晶粒径、 d_0 : 初期粒径、 n : 粒成長指数、 k : 速度定数、 t : 時間)と表される。多相系では第一相の粒成長が分散した第二相粒子に妨げられ(Zener pinning)、その粒成長は第二相粒子の Ostwald ripening によって律速される。この Ostwald ripening が第一相中の体拡散で進行する場合 $n=3$ 、粒界拡散で進行する場合 $n=4$ となることが知られている。そのとき第一相粒子と第二相粒子の粒径は $d_I/d_{II} = \beta/f_{II}^z$ (β と z : Zener parameter、 f_{II} : 第二相の体積比)と表される。これらのことから下部マントル(スラブ)の強度を検討するために本研究では pyrolite 物質を用いた粒成長実験を行い、多相粒成長カイネティクスを構築し下部マントルスラブの粒径進化を検討した。

粒成長実験は九州大学及び愛媛大学 GRC 設置の川井型マルチアンビル装置を用いて行った。実験条件は 25-27 GPa、1600-1950°C で行い、6-3000 分保持した。相同定には粉末 XRD と FE-SEM、微細組織の観察には FE-SEM を用い、含水量測定には micro FT-IR を用いた。

本実験では Ca-ペロプスカイトの体積比が 2 vol%と非常に少なく常温常圧において非晶質化するため、25 GPa における実験では 3 相系、27 GPa における実験では 2 相系として多相粒成長カイネティクスを検討している。ポストスピネル相転移に伴う共析組織の影響をなくすために、等粒状組織である回収試料の粒径を用いて粒成長カイネティクスを構築した。3 相系と 2 相系どちらの場合でも第二相粒子は第一相粒子であるブリッジマナイトの粒界にランダムに分布していた。また 3 相系、2 相系どちらの場合でも d_I/d_{II} の比が一定であった(3 相系: $d_I/d_{II}=1.4$ 、2 相系: $d_I/d_{II}=1.8$)。これらのことから第二相粒子の Zener pinning と粒界拡散に基づいた Ostwald ripening によって粒成長が進行していると考えられる($n=4$)。このことから、まず 3 相系における pyrolite 物質の $n=4$ のときの粒成長カイネティクスを構築した。また d_I/d_{II} と f_{II} (3 相系: $f_{II}=0.2$ 、2 相系: $f_{II}=0.3$)の関係がフォルステライト-エンスタタイト系における先行研究の結果(Tasaka and Hiraga et al., 2013)と調和的であること、粒成長組織における第二相粒子の分布が似ていることから先行研究(Tasaka and Hiraga et al., 2013)における Zener parameter($z=0.5$, $\beta \sim 0.8$)を用いて下部マントル中の多相粒成長カイネティクスを構築した。このようにして構築されたブリッジマナイトの粒成長カイネティクスから下部マントル(スラブ)中の粒径進化を検討した。パイロライト物質($f_{II}=0.2$)を仮定すると下部マントルスラブ条件(800-1400°C)では 2×10^7 年(5 cm/yr、1000 km)経過した場合、粒径は約 10-200 μm となる。また下部マントル条件(1600-2400°C)では 1×10^8 年(5 cm/yr、1000 km)経過した場合、粒径は約 500-3000 μm となる。これらの結晶粒径と MgSiO_3 ブリッジマナイト中の Si の拡散係数をもとめた先行研究の結果(Xu et al., 2011)から下部マントル(スラブ)の大部分では拡散クリープが卓越し、例外的に核-マントル境界などの比較的高応力の領域やスラブ周辺などの変形が大きな領域では転位クリープが卓越することが示唆される。またこれらの結果は岩相によって変化しない。