

平成22年度共同利用実施報告書(研究実績報告書)

1. 共同利用種目 (該当種目にチェック)

- 特定共同研究(A) 特定共同研究(B) 特定共同研究(C) 一般共同研究
 地震・火山噴火予知研究 施設・実験装置・観測機器等の利用
 データ・資料等の利用 研究集会

2. 課題番号または共同利用コード 2010-G-21

3. プロジェクト名、研究課題、集会名、または利用施設・装置・機器・データ等の名称

和文: 下部マントル構成物質の結晶粒成長カイネティクスとレオロジー

英文: _____

4. 研究代表者所属・氏名 九州大学・久保友明
(地震研究所担当教員名) 平賀岳彦

5. 利用者・参加者の詳細 (研究代表者を含む。必要に応じ行を追加すること)

| 氏名 | 所属・職名 | 利用・参加内容または 施設,装置,機器,データ | 利用・参加期間 | 日 数 | 旅費 支給 |
|------|----------|----------------------------|-----------------|--------|----------|
| 久保友明 | 富山大学・准教授 | 研究打ち合わせ | 23/2/21~23/2/22 | 2 | 有 |
| 平賀岳彦 | 東京大学・准教授 | 実験消耗品 (発熱体な ど) | | | 無 |
| | | | | | |

6. 研究内容 (コンマ区切りで3つ以上のキーワードおよび400字程度の成果概要を記入)

キーワード: 下部マントル, 粘性, 粒成長

地球下部マントルの粘性を鉱物物理学的に制約するために、ペロフスカイト+ペリクレイスの2相粒成長実験を行う。下部マントルには最下部を除き地震波異方性がみられず拡散クリープにより流動している可能性が高い。拡散クリープ粘性は流動律速原子の拡散係数と結晶粒径から制約できるが、現在までに得られている研究結果では結晶粒径が小さすぎるため、重力や後氷河隆起から推定される下部マントル粘性を説明することができない。その理由として、過去の研究では粒成長実験に用いられた出発物質に問題があり、下部マントルに適用できる正確なカイネティクスが得られていない可能性が指摘されている。本研究では地震研で開発された新しい多結晶合成技術を用いて粒成長実験に適した出発物質を合成し、それを用いて九州大学にて下部マントル条件での定量的な粒成長実験を行う。ペロフスカイトとペリクレイスの2相の量比を変化させながら下部マントルの粒成長カイネティクスの詳細を明らかにし、下部マントルの粒径を制約してその粘性を議論する。

7. 研究実績報告 (公表された成果のリスト*¹または2000~3000字の報告書)(*¹論文タイトル、雑誌・学会・セミナー等の名称、謝辞への記載の有無、ポイント数、電子ファイル添付のこと)

研究実績報告

研究課題名「下部マントル構成物質の結晶粒成長カイネティクスとレオロジー」

地球内部の大規模なマントル熱対流を理解する上で、その大部分を占める下部マントルのレオロジー、特に塑性流動の機構や粘性率を明らかにすることは非常に重要である。下部マントルの主要構成鉱物は主に、ペロブスカイト(MgSiO_3 , 以下 Pv)とペリクレス(MgO , 以下 Pc)である。結晶の塑性変形には大きく分けて拡散クリープ(結晶中の原子の拡散による変形)と転位クリープ(結晶中の線欠陥の移動による変形)がある。転位クリープで変形する場合、格子選択配向が生じるが、拡散クリープで変形する場合、変形は等方的である。地震学的研究によれば下部マントルには最下部を除き地震波異方性がみられない(e.g., Meade et al., GRL1995)。そのため、下部マントルの変形機構は主に拡散クリープであると考えられている(e.g., Karato et al., Science1995; Yamazaki and Karato, Am. Miner. 2001)。拡散クリープは線形流動で、結晶粒径の2-3乗で粘性率が大きく変化することが特徴的である。拡散クリープの流動則や粘性率を鉱物物理学的に理解するためには、下部マントル条件で直接塑性変形実験を行う技術開発に取り組むとともに、流動律速原子の拡散係数と結晶粒径を支配する相転移や結晶粒成長のカイネティクスを実験的に明らかにすることが必要不可欠である。本研究では地震研担当教員である平賀氏の協力の下、特に下部マントル物質の結晶粒径に着目した多相粒成長のカイネティクスを明らかにする研究を進めた。ここではこれまでにを行った共同研究の内容に関して簡潔にまとめる。

一般的に粒成長速度は次の式で表される。

$$G^n - G_0^n = kt \quad (1)$$

ここで G は時間 t の時の粒径、 G_0 は初期粒径、 n は粒成長指数、 k は速度定数である。粒成長速度は第二相の存在により劇的に小さくなることが知られており、主に Pv と Pc の2相からなる下部マントルではその効果を明らかにすることが重要となるが、これまでの過去の研究には大きな問題点があった。Yamazaki et al. (Science1996) は Pv:Pc がバルクでオリビン組成の 68:32 (体積比) で実験したところ、 n の値がペロブスカイトで 10.6、ペリクレスで 10.8 と非常に大きな値(粒成長が極めて遅い)となり、46億年経っても下部マントルの粒径は $100\mu\text{m}$ 以下であると報告した。しかしそのような小さい粒径では、重力や後氷河隆起など地球物理学的に推定される下部マントルの粘性率を説明できない。最近、超塑性による大歪みがマントルの多相粒成長を促進させる結果(Hiraga et al., Nature2010)が報告されたが、その効果を考慮しても説明は困難である。これは下部マントルレオロジーに関する一つのパラドックスとも言え、この2相粒成長カイネティクスを再検討する必要がある。また2相の粒成長においてその成分比はカイネティクスに大きな影響をあたえることが知られているが、下部マントルの組成は実際にはオリビン (Mg/Si比が2) よりも Si に富む組成を持つはずであり、その場合はペリクレスの体積比はより小さくなる。

このような背景をふまえ、本研究ではこれまでのオリビン組成ではなくパイロライトやコンドライトといった Si に富む組成を用いて、ペロブスカイトとペリクレスの体積比が粒成長速度に与える影響を明らかにするための高温高压実験を行った。高压発生には九州大学設置の川井型マルチアンビル装置を使用した。実験条件は圧力 25GPa、温度 1600°C および 1800°C、保持時間 4~1200min で行った。これは下部マントル最上部付近の温度圧力条件である。出発物質には地震研で開発された多結晶合成技術を用いて、体積比で Pv:Pc=70:30 (パイロライトモデル組成に相当、以下 Pv70Pc30) 及び 84:16 (コンドライトモデル組成に相当、以下 Pv84Pc16) となるようなオリビンとパイロキシンの細粒焼結体を用いた。

回収試料の X 線回折パターンよりオリビンとパイロキシンはペロブスカイトとペリクレスに完全に相転移していることがわかった。SEM の反射電子像を用いて多結晶体組織と粒径を観察した。短時間の実験ではオリビンがポストスピネル相 (Pv+Pc) に分解するとき特有の eutectoid 組織が見られ Pv と Pc の2相が細かいラメラ組織を呈するが、時間が経つにつれ次第に等粒状の2相組織へと変化する。平均粒径の時間変化データから、 $G \gg G_0$ として $G_0=0$ を仮定して式(1)に Fit させた結果、粒成長指数 n は Pv70Pc30 ではペロブスカイト 10.5、ペリクレス 5.0、Pv84Pc16 ではペロブスカイト 11.7、ペリクレス 11.7 となった。下部マントルで予想されるパイロライトやコンドライトモデルに相当するより Si に富む Pv と Pc の体積比においても、過去の研

究結果(Yamazaki et al., Science1996)同様に n 値は非常に大きい値をもち粒成長カイネティクスは非常に遅いことが予想された。

一方で、過去の実験(Yamazaki et al., Science1996)でも今回の実験でも出発物質にオリビンを含んでいるため、実験の初期段階にはポストスピネル相転移が起こり eutectoid 組織が出現する。一般にこの組織には結晶学的方位関係が存在することが知られており、それは粒界エネルギー差を駆動力とする粒成長のカイネティクスに影響を与える可能性がある。特に分解相はドメイン状に成長する傾向があり、微細なラメラ組織よりももっとマクロなスケールで選択配向を起こしているかもしれない。そこで実験初期段階の試料に対して EBSD を用いた予備的な方位マッピング解析を行っているが、これまでのところ相転移起源結晶選択配向のクリアな証拠は得られていない。

それに関連して、過去の実験(Yamazaki et al., Science1996)も含めこれまでの解析では、初期に出現する eutectoid 組織が細粒であるため $G \gg G_0$ として $G_0=0$ を仮定している。しかしその場合、eutectoid から等粒状への組織変化とその後の粒成長の区別をしていないことになり、駆動力の異なる(カイネティクスの異なる)現象を混同して解析している可能性がある。そこで最初に等粒状組織が確認された試料の粒径を G_0 として新たに解析し直したところ、粒成長指数 n 値がより小さくなり一般的な多相粒成長の結果に近くなる傾向が得られた。未だ実験点が限られるので追加実験が必要ではあるが、粒成長現象のみを実験的に再現してそのカイネティクスを調べることが重要と考えられる。

これらのことからポストスピネル分解相転移を経ずに最初から MgSiO_3 と MgO の 2 相を出発物質として粒成長実験を行うことが肝要であると考えられる。常圧では MgSiO_3 と MgO が反応してオリビンが生成するため、これまでの研究では出発物質にオリビンが含まれることが普通であった。そこで地震研で開発された多結晶合成技術を利用して、 MgSiO_3 と MgO の 2 相からなる多結晶体を作成した。2 相粒成長カイネティクスに対する成分比依存性を明らかにするために、Pv:Pc 体積比が 97:3, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 となるような 5 種類の 2 相多結晶体を作成した。今後、この出発物質を用いて系統的な粒成長カイネティクスを明らかにし、下部マントルレオロジーのパラドックスを解決しながら下部マントルの Mg/S 比がレオロジーに与える影響について検討していきたい。