

論文審査の結果の要旨

氏名 谷部 功将

本論文は5章からなる。第1章はイントロダクションで、本研究の学術的背景が述べられている。オリビン多結晶体の高温変形特性に基づくと、上部マントルの流動メカニズムは拡散クリープもしくは転位クリープと考えられる。上部マントルの地震波速度異方性は良く知られており、弾性的異方性を持つオリビンが転位クリープによって結晶軸選択配向するのがその理由とされてきた。しかし最近、拡散クリープ下でも結晶軸選択配向が生じることが実験的に示された。本研究では、マントル流動が拡散クリープである可能性を粘性率の観点から検証する。オリビンの拡散クリープは、これまで二つの研究グループによって調べられ、同じ温度・圧力・粒径下にも関わらず粘性率にして2桁もの異なる実験結果が報告されている。それぞれの実験では天然オリビン結晶由来の粉末もしくはゾル・ゲル法を用いた薬品由来の粉末の焼結体が用いられている。本研究では、二つのグループにおける粘性率の大きな違いは、ある特定の元素が粒界に濃集する「粒界偏析」の有無により生じたと予想した。粒界偏析の拡散クリープへの影響は材料科学ではよく知られており、オリビン粒界ではCaやAlなどの不適合元素が偏析するとの報告がある。本研究ではまず、粒界偏析を生じないMg, Fe, Si, Oのみからなる純粋なオリビン多結晶体試料の高温変形特性を実験的に明らかにする。この結果を基

準にして、Ca, Al を添加した試料の実験結果および先行研究の結果を解析することで、拡散クリープに対する化学効果を明らかにし、実際の上部マントルに適用可能な拡散クリープ則を構築する。それに基づき海洋上部マントルの粘性率構造を推定する。

第2章では、高緻密細粒オリビン($\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.2}\text{SiO}_4$ および Mg_2SiO_4)多結晶体の1気圧・高温下での一軸圧縮実験について述べられている。化学組成を正確に制御したナノサイズ原料粉を用いることで、変形実験に適した高緻密細粒のオリビン試料(Ca 添加、Ca+ Al 添加、および無添加(純粋))を真空焼結によって作成した。試料の粒径、実験温度、および荷重を変えて変形実験を行い、歪速度の粒径、温度および応力依存性を調べた。その結果、試料の変形メカニズムは、細粒・低応力条件ではべき乗型界面反応クリープ、粗粒・高応力条件では粒界拡散クリープが支配的になることが分かった。また、添加試料は、ある温度以上で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がわかった。軟化の開始温度は、Ca、Al の添加量や Fe の有無で大きく異なるが、試料の融点の 0.92 倍程度という共通性があり、また軟化の温度依存性は共通の活性化エネルギー 230 kJ/mol で表せることが分かった。これらの結果に基づき、Ca, Al 添加オリビン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。0.92×融点以上での粒界無秩序化の効果を取り入れたオリビンの粒界拡散クリープ則を確立した。

第3章では、2章で確立したオリビン拡散クリープ則の先行研究結果への適用性

を調べた。ドライ試料のみならず、ウェット（水入り）試料の結果も検証した。まず、先行研究で用いられた実験試料の融点を推定し、天然由来試料を用いた実験は全て $0.92 \times$ 融点以上の温度条件、逆に、薬品由来の試料を用いた実験は $0.92 \times$ 融点以下の実験条件で行われていたことを示した。ウェット条件下にも関わらず水軟化を否定した Si 自己拡散結果も、その実験条件が $0.92 \times$ 融点以下であったことを示した。また、 $0.92 \times$ 融点以下および $0.92 \times$ 融点以上での先行研究の結果は全て、本研究で確立した粒界拡散クリープ流動則に整合的であることを示した。オリビンの拡散クリープについて、これまでの矛盾する実験結果が粒界無秩序化の効果を取り入れることで統一かつ定量的に説明できることを示した。オリビンの拡散クリープ下における水軟化は、水による融点降下、具体的には粒界無秩序化開始温度の低下によって説明できることを示した。

第4章では、海洋上部マントルの粘性率構造を明らかにするために、本研究で確立したオリビン粒界拡散クリープ則を海嶺直下および 50 Ma の海洋底下マントルに適用した。半無限冷却モデルに基づく温度構造を深度に応じたマントル岩の融点で規格化した。その際、マントル岩中の水の量を 0-300 $\mu\text{g/g}$ と仮定した。水の量にも依存するが、海嶺直下では深さ約 200 km まで、50 Ma の海洋底下マントル内では深さ約 100 km から 200 km までの範囲が粒界無秩序条件下にあることが推定された。海洋リソスフェア由来のマントル捕獲岩中のオリビンと輝石の粒径比は輝石の体積分率で決定（ゼナー則）され、上部マントルを代表するレールゾライトの輝石量においてはオリビンの粒径

が~1 mmであることを、先行研究の岩石微細構造の報告値から明らかにした。その粒径を用いて、粒界無秩序化による低粘性領域が海嶺直下では粘性率 $3\text{--}10 \times 10^{18}$ Pas、50 Ma の海洋底下では $2\text{--}5 \times 10^{19}$ Pas の最小値をとり、観測されるアセノスフェアの粘性率に対応することが示された。リソスフェアは中央海嶺下で極めて薄く、海洋底年代(冷却時間)の増加とともに厚化、その下に深さが年代に依存しない~200 km までのアセノスフェア構造が生じることを示した。

第5章には、2~4章で得られた結論がまとめられている。

以上にまとめた通り、本博士論文はオリビンの粒界物性を考慮した拡散クリープ則を構築し、それに基づき海洋上部マンツルの粘性率構造を明らかにした研究である。高精度の実験結果とそれを説明する粒界無秩序化、その効果を組み込んだ拡散クリープ則に基づくマンツル粘性率構造は、低粘性層としてのアセノスフェアの成因が「水」もしくは「メルト」によるマンツル岩の軟化という従来のモデルに対し、新規かつより実験的な裏付けのあるモデルを提案し、固体地球科学の進歩に大きく寄与する成果であると高く評価できる。本論文の第2章は末善健太および平賀岳彦、第3章および第4章は平賀岳彦との共同研究であるが、Fe なしオリビンの高温変形実験を除いて、全てで論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、博士(理学)の学位を授与できると認める。