

## 論文内容の要旨

論文題目 : New deformation indicator for peridotites in the upper mantle:

Experimental study on diffusion in chromite spinel

( 上部マントルかんらん岩の新たな変形指標 :

クロマイトスピネル中の拡散の実験的研究 )

氏名 : 鈴木 彩子

マントル流動によって、上部マントルではかんらん岩が物性・変形条件に従って塑性変形する。物質が塑性変形すると、プレート境界やリソスフェア・アセノスフェア境界等での相互作用に影響が生じる。このため、マントル流動メカニズムの理解のためには、マントル内の物性・変形条件を解明することが重要であり、そのためには、マントル主要構成物質であるかんらん岩構成鉱物の塑性変形解析が有用となる。

かんらん岩構成鉱物のうち、主要構成鉱物であるオリビンの変形挙動が従来主に検討され、変形解析に用いられてきた。しかしオリビンからは拡散クリープによる変形時の情報を引き出すことができない。また、変形を受けた時間情報を引き出すことはきわめて困難である。さらに、かんらん岩が経験したであろう様々な変形場の全ての情報を網羅できない。そのため他の構成鉱物からも情報を引き出し、併せて理解することが重要となる。本研究では、オリビンから抽出できない情報を補える変形指標として、少量ではあるが普遍的にマントル物質に含まれるクロマイト-スピネル系に注目する。スピネルを新たに変形流動の指標として確立し、マントルかんらん岩に適用してその有用性を示すことが本研究の目的である。

スピネルは、かんらん岩中に数体積%含まれる鉱物である。Cr の主要なリザーバとなっており、温度・圧力や周囲の鉱物組成等に敏感な化学組成を示す特性をもつため、温度・圧力を推定する有用な指標とされている。特に、結晶内にしばしばみられる陽イオンの累帯構造は、温度履歴 (Mg-Fe) や、変形履歴 (Cr-Al) を反映して形成されたものであり、岩体や鉱物の辿った熱史や変形史を、時間情報も含めて解く鍵となる重要な情報である。このうち非同心的 Cr-Al 累

帯構造は、拡散クリープによる変形によって形成されたと説明されている。

スピネルを用いるメリットは、まず、この拡散クリープの証拠がみつかったこと、拡散クリープによって形成された非同心円状 Cr-Al 累帯構造が変形情報を保存していること、また等軸晶系のため歪み量を推定でき、従って変形時間を推定し得ることが挙げられる。鍵となる Cr-Al 累帯構造の解析のためには、スピネル中および相境界に沿った Cr と Al の拡散速度を知る必要がある。スピネル中の陽イオンの拡散速度は、 $\text{Fe}^{2+}$ , Mg, O については実験で決定されているが、Cr と Al に関しては未だ全く報告されていない。そこで本研究では、高温高压下で拡散実験を行い、Cr と Al の体拡散係数および相境界拡散係数を求めた。これらの拡散係数に基づいて、スピネルの変形指標を確立した。それを用いて、実際に海嶺下の上部マントルからのサンプルの解析を行い、スピネルの変形指標としての有用性を示した。

体拡散係数は、拡散対を用いた実験を行って Cr-Al 相互拡散係数を求め、Cr および Al の自己拡散係数は計算で推定するという方法を用いた。出発物質としては、単結晶の端成分スピネルとクロマイトを拡散対として用いた。実験は、マルチアンビル型高压発生装置を用い、1400-1700°C、3-7GPa の条件下で行った。実験後、回収したサンプルは、EPMA によって面およびライン分析を行った。Cr と Al の拡散プロファイルが左右非対称を示したため、Cr-Al 相互拡散係数を Boltzmann-Matano 法によって求めた。Cr#が 0.1-0.9 まで変化するに従い、相互拡散係数は 1 桁以上変化した。温度を変化させて温度依存性を調べたところ、活性化エネルギーは 3GPa のとき 520kJ/mol、圧力を変えて圧力依存性を調べたところ、活性化体積は 1.36cm<sup>3</sup>/mol となった。

自己拡散係数は、イオン性結晶で 2 成分系の場合、相互拡散係数と 2 つの自己拡散係数の間に成り立つ関係式から、制約を与えられる場合がある。スピネル中の Cr-Al の場合、相互拡散係数が組成によって大きく変化し、その変化が強い非線形性を持つため、Cr と Al の自己拡散係数の比にある程度制約を与えることができた。方法は、Cr と Al の自己拡散係数は単調関数であると仮定していくつかの関数を設定し、それらについてフィッティングを行って、すべての実験結果について共通の特徴を探した。Cr と Al の自己拡散係数は一致しないこと、相互拡散係数も単調関数であるとする、共通の特徴として、Cr の自己拡散係数は著しい組成依存性はずらず、Cr#=0.1 のときの相互拡散係数にほぼ近い値となること、Al の自己拡散係数は、Cr より 1 桁以上速いことがわかった。

相境界拡散では、拡散対実験を応用し、クロマイト-オリビン間の相境界を作成して Cr-Al 相境界拡散速度を求めた。実験は、クロマイト、スピネル、オリビン 3 つの単結晶を用いて、1400-1700°C、3-GPa の条件下で行った。実験後のクロマイト結晶内では、かんらん石との相境界に近いところほど高速の相境界拡散に由来する Al の濃集が認められた。観察された Al の等濃度線を、2 次元拡散モデルに基づく数値計算結果と合わせることで、 $\delta D_g/D_v$  ( $D_v$ : 体拡散係数,  $D_g$ : 相境界拡散係数,  $\delta$ : 境界の幅) を推定した。活性化エネルギーは体拡散より著しく小さいという結果を得た。この結果から、スピネルが拡散クリープを起こす際の実効的拡散係数  $D_{eff}=D_v+\pi \delta D_g/d$  (こ

ここで  $d$  は粒径)を得ることができた。

最後に、変形指標としての解析例とその有用性を示した。スピネルから引き出せる情報は4つある。①温度、②差応力、③歪み速度、④変形時間である。ゾーニングパターンの温度依存性と粒径依存性から、Cr-Al 累帯構造を形成し得る温度に制限がつけられる。温度がわかると拡散速度が決まる。1次元定常流モデルに適応して、拡散速度比と組成差と初期組成から差応力が求まる。差応力と拡散速度がわかると、流動則から歪み速度が求められる。流動則は、一般式に組成勾配を含めた流動則を導出して用いた。変形時間は、歪み速度と歪み量から算出できる。以上の手順に基づいて、実際に、海嶺下の上部マントルから得たかんらん岩のスピネルについて解析を行った。1100°C以上で最大数十 MPa という高応力を経験していることがわかった。また差応力は岩相により異なり、メルトが関与する dunite では差応力は低い。変形時間は数千年～数万年と見積もられる。

以上の結果から、スピネルはオリビンに残る変形ステージより前の情報を記録していることを実際に示すことに成功した。スピネルとオリビンの情報を組み合わせることで、海嶺下の上昇・冷却に伴う応力の変化が示される。以上の結果から、スピネルは様々なテクトニックな場の理解を深める変形指標として有用であるといえる。