

高温高压下でのパイロライトの密度測定による遷移層での温度の見積もり

Temperature of the mantle transition zone inferred from high pressure and high temperature measurement of pyrolite density.

山下 牧生 [1], # 八木 健彦 [2], 住田 達哉 [2], 高藤 尚人 [2], 内田 雄幸 [3], 亀卦川 卓美 [4]

Makio Yamashita [1], # Takehiko Yagi [2], Tatsuya Sumita [3], naoto takafuji [4], Takeyuki Uchida [3], Takumi Kikegawa [5]

[1] 東大・理・鉱物, [2] 東大・物性研, [3] 東大物性研, [4] 物構研・高エネ研

[1] mineralogy, Tokyo Univ, [2] Inst. Solid State Phys, Univ. Tokyo, [3] ISSP, Univ. of Tokyo, [4] ISSP, [5] IMSS, KEK

マルチアンビル装置と放射光からの強力X線を組み合わせることによって、高温高压下で疑似パイロライト組成のX線その場観察を行った。上部マントルの遷移層に相当する 17-18 GPa、1600 Kまでの温度圧力領域において安定な、スピネル相とガーネット相の格子定数を、同時に測定することができた。得られたデータから、17.3 GPaでの2相の熱膨張を見積もった。この結果から、パイロライト組成の密度を見積もり、地震学的に得られている一次元地球モデル (PREM) と比較することにより、17.3 GPa (504 km)での温度の見積もりを行った。これまでに見積もられている温度プロファイルよりも実際の温度は僅かに高い可能性がある。

はじめに

地震学的に求められている一次元地球モデルPREMは、マントル中での圧力と密度の関係を与える。一方、鉱物の温度、圧力、密度の関係は状態方程式によって与えられるので、マントル構成物質の状態方程式とPREMの比較から、マントル内部での温度を推定することができる。

現在までに得られている鉱物の状態方程式は、限られた組成、温度、圧力範囲に対してのみ測定されており、マントル条件に対応するためには大きな外挿が伴う。また、鉱物の状態方程式は様々な実験によって求められているが、それらを組み合わせて議論する際に、実験条件の違いや測定法の違いから大きな系統的な不確実性が生まれる危険がある。

地球の上部マントルの代表的な組成として、パイロライトは広く受け入れられている。我々はX線その場観察と回収試料の組成分析を組み合わせ、パイロライト組成のマントル条件下における密度を精密に決定することを試みた。今回は圧力に関して実験条件が比較的容易な、遷移層付近 (16-20 GPa)での測定を試みた。過去のクエンチ実験によって、この領域ではスピネル相とガーネット相のみが存在することがわかっており、2相とも立方晶であるため2相同時に格子体積を正確に決定でき、上記の不確実性をある程度軽減できる利点がある。

実験

相平衡を容易にするため出発物質にはガラスを用いた。Feが2価に保たれたガラスの作成と雰囲気制御した実験が困難なため本実験ではFe成分をMg成分に置換し、CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂系の疑似パイロライト組成を用いた。ガラスは微小試料をCO₂レーザーで溶解しハンマークエンチすることにより作成し、組成はEPMAで確認した。高温高压X線その場観察実験は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光実験施設BL14Cに設置されているMAX90装置を用いて行われた。基本的なセル構成と光学系のデザインは、Funamori et al. (1996)で採用されたものと同様である。X線回折はエネルギー分散法で、圧力はAuの格子体積から状態方程式 (Anderson et al., 1989)を用いて計算した。温度は熱電対(W95Re5-W74Re26)により測定した。

結果と議論

高温高压下でのX線プロファイルは、解析に必要なS/N比の大きなピークプロファイルを得るために2000-3000秒の露出をかけて測定した。全ての実験を通して使用できたピークは、スピネル相は311、400、440面、ガーネット相は420、431、611面の各々3本ずつであった。4回の実験において17-18 GPa、1200-1600 Kの範囲に分布するP-V-Tデータが得られた。実験の平均圧力である17.3 GPaにそれぞれのデータを補正することにより、この圧力下での熱膨張率を見積もった。スピネル相、ガーネット相に関してそれぞれ $1.8 \times 10^{-5} / \text{K}$ と $2.3 \times 10^{-5} / \text{K}$ という値が得られた。

密度の議論をするためには、構成鉱物の組成に関する情報が必要不可欠であるが、回収した試料は粒径が小さすぎるため、EPMAによる組成分析は不可能であった。しかしスピネル相に関しては、そのCaやAlに関する固溶は非常に少ないという報告があり (e.g. Irifune, 1994)、また今回測定された常温常圧での格子定数は、純粋なMg₂SiO₄スピネルの値と誤差の範囲で一致することから、スピネル相へのCa、Alの固溶を無視した。

今回の実験にはFeが含まれていないため、この影響を考える必要がある。ここで、Feの濃度 ($\chi_{\text{Fe}} = \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Mg})$) を10.54 (Ringwood, 1975)、分配係数 ($k = (\text{Fe}_{\text{Gar}} / \text{Mg}_{\text{Gar}}) / (\text{Fe}_{\text{Sp}} / \text{Mg}_{\text{Sp}})$) を0.82 (Irifune, 1994)に固定し、今回の圧縮及び熱膨張のデータから高温高压下でのパイロライトの密度を計算した。このときFeが固溶した場合の各相の格子体積の変化に対する見積もりは、Weidner & Wang (1998)によるものを用いた。17.3 GPaは

地球の深さにすると504kmに相当し、その深さでPREM密度は3.855g/cm³である。これらから、504kmにおける温度は1900K程度になると推定される。しかし、Feはパイロライトの主成分元素の中で最も重い元素であるため、密度に及ぼす影響が大きいと考えられる。パイロライト組成の種々の見積もりは、比較的良く一致しているが (e.g. Palme & Nickel 1985; Sun 1982)、濃度 χ_{Fe} は10-11%であり、約1%の幅がある。また分配係数 k にも不確定性がある。そこで、これらの値を変化させた場合の温度の見積もりの影響について調べた。その結果、分配係数の変化は各鉱物の密度には影響を与えるものの、パイロライト全体の密度としては殆ど変化せず、従って温度の見積もりには殆ど影響を与えない。一方 χ_{Fe} はパイロライトの密度に直接影響を与えるため、わずか1%の変化によっても約200Kの温度差を生じる。つまり組成の不確定性を考慮すると、504kmでの温度の見積もりは1800-2000Kの間をとる。これは、これまでに報告されてきた温度プロファイル (Ito & Katsura 1989) に比べ僅かに高い温度を示している。