

高温・高圧 X 線その場観察によるパイロープの状態方程式

High-pressure and high-temperature in situ X ray observations of pyrope

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

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

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

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

パイロープガーネット ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) の X 線その場観察実験をシンクロトロン放射光と MA8 型高圧発生装置を組み合わせることにより, 17~25 GPa, 300~1300 K の範囲で行なった. 実験で得られた温度・圧力・体積のデータを基に, 室温下での体積弾性率と 21 GPa における熱膨張係数が決定された. 体積弾性率は 2 次のバーチ・マーナハンの式にフィットすることにより, 167 GPa が得られ, この値は過去のデータとも調和的である. 21 GPa における熱膨張係数は $2.3 \times 10^{-5}/\text{K}$ であったが, この値は深度 600 km に存在するマントル鉱物の中で最も大きな値をとる. このことから, 深度 600 km におけるガーネットの受ける浮力について議論した.

1. はじめに 地震学で得られる密度・体積弾性率等のデータを用いて, マントルの組成や温度プロファイルを議論する際, 鉱物の温度 - 圧力 - 体積の関係式すなわち状態方程式が必要である. garnet は, ペリドタイト組成において 15~20 GPa の圧力で ringwoodite および wadsleyite の次に存在度が高い鉱物であり, その状態方程式を調べることは有用である. また, garnet は 15 GPa 以上の圧力でペリドタイトのリキダス相であるため, 初期地球のマグマオーシャンにおける固液分化のダイナミクスや溶融の熱力学の基礎データとしても重要である. しかしながら, その状態方程式は一部の組成の garnet について室温下では約 30 GPa (Zhang et al., 1998), 高温下にいたっては約 10 GPa (Wang et al., 1998) までしか調べられていない. そこで今回は, マントル garnet の主成分の pyrope ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) について, 17~25 GPa, 300~1300 K の範囲で X 線回折実験を行った. 本講演では, 室温下における圧縮曲線, 21 GPa における熱膨張等について発表するとともに, ilmenite $\rightarrow$ garnet 転移に関するデータも発表する.

2. 実験 試料は, あらかじめ合成した pyrope を粉末にして用いた. X 線回折実験は, 高エネ研内の AR-NE5C に設置された MAX80 を使用し, エネルギー分散法で行った. 使用したセル構成は, Funamori et al. (1996) と同様である. 圧力マーカーとして MgO と Au の混合粉末を用い, それぞれ Jamieson et al. (1982) および Anderson et al. (1988) の状態方程式を基に圧力を計算した. 実験は, まず室温下で 300 ton まで加圧し, その後 1300 K まで加熱して, ここから 200 K おきに室温まで温度を下げながら, 圧力マーカーとサンプルの X 線回折パターンを取得した. その後, 減圧し 200 ton 及び 150 ton において, 同様に 1300~300 K のパターンを取得した. 最後に 50 ton おきにパターンを取得しながら, 室温下で常圧まで減圧した.

3. 結果 300 ton (24.5 GPa), 1300 K において pyrope の一部が ilmenite に相転移した. これらの相は, 後に 200 ton (23.2 GPa), 1300 K でほとんど消失した. Kanzaki (1987) によると pyrope 組成の garnet $\leftrightarrow$ ilmenite 転移が 1000 において 24 GPa であると推定しており, 今回の結果と調和的である. pyrope の格子体積は, 全ての温度・圧力範囲で ilmenite 相の出現の影響をほとんど受けていないと思われる, 400, 431, 611, 642 面の 4 つのピークを使い解析した. 今回の pyrope の常温・常圧における体積は 1505.6 (1.0×10^{-23}) cm^3 で JCPDS の 1503.1 (1.0×10^{-23}) cm^3 より僅かに大きい. 回収した garnet を分析電顕により組成分析したところほぼ理想的な pyrope 組成であったことから, この違いは ilmenite 相の出現の影響ではなく, 光学系のもつ何らかの系統的誤差と考えられる. 常温での格子体積の圧力依存性を 2 次の Birch - Murnaghan の式を用いてフィットすると, 体積弾性率 166 GPa (MgO marker) および 167 GPa (Au marker) が算出された. これは, DAC を用いた高圧 X 線構造解析のデータ 171 GPa (Zhang et al., 1998) と良い一致を示している. 今回のデータを内挿することにより 21 GPa における 300~1300 K の平均の熱膨張係数 α を求めると, $2.3 (0.3) \times 10^{-5} / \text{K}$ という値を得た. この値は, CMAS 系の疑似パイロライト組成の garnet ($\text{Mg}_{2.8}\text{Ca}_{0.7}\text{Al}_{1.0}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{12}$) の 17.3 GPa における $\alpha = 2.3 \times 10^{-5} / \text{K}$ (山下, 1999) と一致する.

4. 考察 今回の pyrope の 21 GPa における α は, 他の鉱物の高圧下のそれ (α (ringwoodite at 17.3 GPa) = $1.8 \times 10^{-5} / \text{K}$ (山下, 1999), α (stishovite at 10.5 GPa and 1300 K) = $1.6 \times 10^{-5} / \text{K}$ (Suito et al., 1996)) と比べて大きい. このことは, 従来重いと考えられていた沈み込み体のスラブ上面の MORB 起源の garnetite が, 上部マントル最下部で周りのマントルより軽くなる可能性を示すので, その点について考察した. まず, Irifune (1987), Irifune & Ringwood (1987 a,b) および Irifune et al. (1986) における 15~21.5 GPa の garnet の密度と組成の関係を調べると, 密度は鉄の含有量と次のような関係にある $\text{Density} / (\text{g/cc}) = 3.56 + 0.016 * (\text{FeO} / (\text{wt.}\%))$. ここで, 今回の体積弾性率と 21 GPa における α を使うことにより, 深さ 600 km (21 GPa) における PREM 密度 (3.97) と釣りあう温度

を計算すると $\text{Temp.}/\text{K}=5+181.6 \cdot (\text{FeO}/(\text{wt.}\%))$ を得る。MORB起源のgarnetiteの場合、garnet中には約 10 wt.%のFeO成分が含まれるので、約 1820 Kで周りのマントルと釣りあう。Akaogi et al.(1989)によると深さ600 kmにおけるマントルの温度は 1858 Kであるが、スラブは平均的なマントルの温度より低く、またgarnetiteには、密度の大きなstishovite (4.63 at 21 GPa, 1850 K)が含まれることが多いことを考えると、garnetiteが周りのマントルより軽くなるとは、考えにくい。