

萌芽的研究支援課題 研究報告書

1. 氏名、所属機関および学年

西 真之 九州大学理学府地球惑星科 博士課程2年

2. 課題番号、利用ビームライン、および課題名

2008A1716

BL04B1

沈み込む海洋地殻玄武岩における clinopyroxene の相転移速度測定

3. 研究概要（目的および背景、実験・解析方法、結果、考察、等）

目的および背景

地球深部の物質はマントル対流により循環しており、その温度圧力環境で安定な構造へと相転移する。マントル対流における代表的な下降流である地球深部に沈み込むプレートの内部は、周囲のマントルよりも低温の環境であり、鉱物の反応速度が非常に遅い。そのため、プレート内部のマントル鉱物は完全に平衡相関係に従うわけではなく、高压相安定領域でも低压相のまま、準安定相として存在する可能性が指摘されている (Sung and Burns, 1976 等)。

非平衡相の存在は、プレートの粘性や密度等の物性値に密接に関わることが予想されるため、プレート滞留のメカニズムを考える上で非常に重要な課題である。マントル鉱物の相転移速度については、特に olivine 成分に関しての実験が行われており (Kubo et al., 2004 等)、非平衡相の存在を示唆する数値シミュレーション結果が報告されている (Mosenfelder et al., 2001)。しかし、沈み込むプレート内の海洋玄武岩物質 (MORB) を構成する鉱物 (clinopyroxene (cpx) や garnet) の相転移に着目した研究例は少ない。

我々の研究グループは、これまでマントル遷移層領域における、eclogite-garnetite 相転移 (論文投稿中) や cpx の分解相転移 (SPRING-8, 2007B 課題、論文投稿準備中) の速度測定に取り組み、特に eclogite-garnetite 相転移速度は非常に遅いという研究結果を得つつある。これらの結果から、相転移速度を考慮すると、MORB 層の鉱物構成はこれまでの平衡論で考えられてきたものと比べ大きく変わり、沈み込むプレートの物性を大きく変える可能性があることが示された (Fig. 1 参照)。しかしながら、これらの研究は eclogite-garnetite 相転移速度とその温度依存性を定量的に決定したわけではなく、地球深部条件への外挿がなされていない。そのため、沈み込む MORB 層の鉱物構成は定量的には未だ謎である。

本研究の目的は、上部マントルマントル遷移層条件下で、MORB に存在する cpx が majoritic garnet を析出する速度とその温度依存性を定量的に決定することである、その結果から、沈み込む MORB の鉱物構成が、Fig. 1 の (A) (B) (C) のどのような状態になるかを議論する。

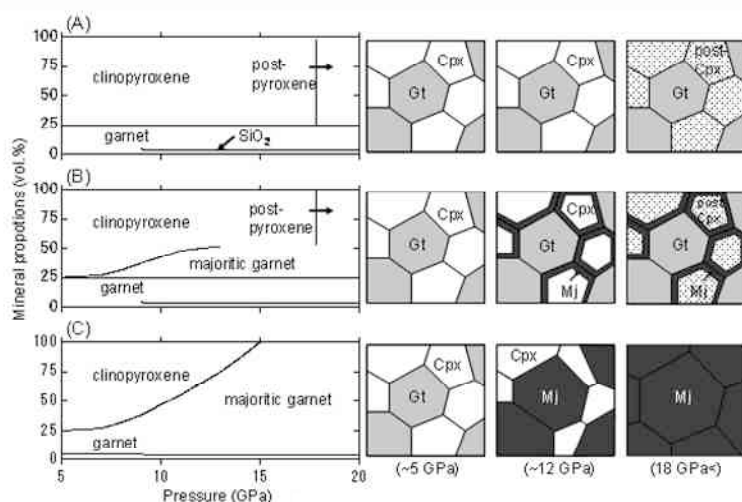


Fig.1 沈み込む MORB の鉱物構成と組織

(A) :garnet と clinopyroxene の反応が起こらない場合。

(B) :clinopyroxene が garnet を析出する場合。

(C) :garnet が clinopyroxene 成分を固溶し、平衡に達する場合。

実験方法

出発物質多結晶合成

出発物質として aluminous clinopyroxene ($\text{Ca}_2\text{Mg}_{1.6}\text{Al}_{0.8}\text{Si}_{3.6}\text{O}_{12}$) 多結晶体を用いた。この出発物質は、同組成のガラス粉末を、九州大学設置の MA 型高压発生装置 MAX-90 を用いて 2GPa, 1000°C の条件で合成したものである。平均粒径は $2\mu\text{m}$ 程度である。また、この出発物質には少量の Au 粉末を圧力マーカーとして含む。

相転移実験

高压発生は BL04B1 設置の MA 型高温高压発生装置 (SPEED-1500) を用いた二段加圧方式で行った。また、白色入射 X 線と SSD を用いたエネルギー分散法で試料をその場観察した。放射光 X 線回折を用いた高压相転移のカイネティクス研究は、効率的に精度の良い kinetic data を取得できるため、近年多くの研究成果が得られている。サンプルの圧媒体は (Mg, Co)O、ヒーターにはランタンクロマイト、サンプルカプセルにはグラファイトを用いた。アンビルはタングステンカーバイド製で、トランケーションは 3 mm である。

実験条件を Table 1、温度圧力履歴を Fig. 2 にそれぞれ示す。まず、出発物質を室温で 13-15 GPa 程度まで加圧し、800 °C まで時間をかけて加熱した。300°C、500°C、800°C で X 線回折プロファイルを得たが、この間にサンプルの鉱物構成の変化はみられず、出発物質である clinopyroxene

Table 1 実験条件

Run Num.	Pressure (GPa)	Temp. (°C)	Duration (min.)	H ₂ O (wt.% ppm)
Start.	2.0	1000	180	1310±310
Ts01	14.1	1100	270	920±620
Ts03	12.2	1200	120	880±310
Ts02	13.2	1280	120	-
Ts04	11.8	*1400	60	400±170

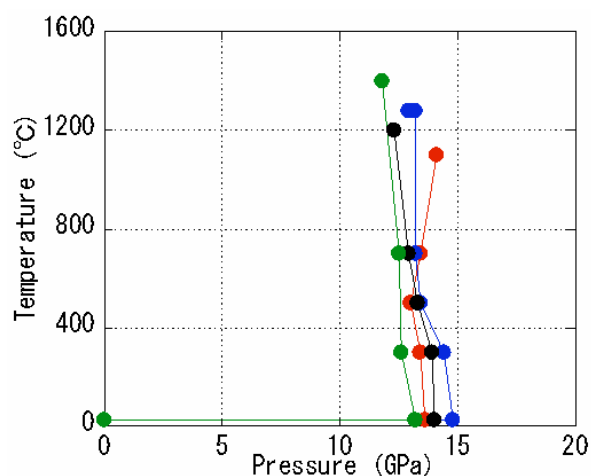


Fig.2 温度圧力履歴

と Au の X 線回折ピークがみられた。その後 800℃ から、相転移が進行する目的の温度（1000–1400℃）へ約 30 秒程度の短時間で加熱し、温度を維持しつつ 10–200 秒間隔の X 線回折時分割プルファイルを得た。

結果と考察

Fig. 3 に、実験 Ts03 (Table 1 参照) における相転移中の 90 秒間隔の X 線時分割プロファイルを示す。時間と共に Gt (garnet) のピーク増加している様子が観測された。得られたデータから鉱物の相転移率を見積もることができる。

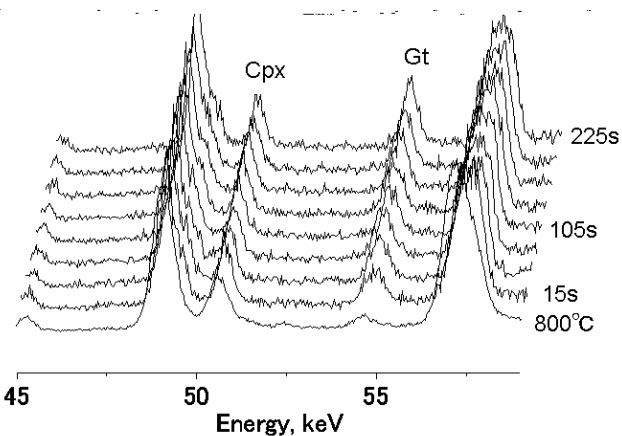


Fig.3 相転移中の時分割 X 線回折プロファイル

相転移途中の組織を観察することは、相転移メカニズムを推測し、相転移速度を計算する上で必要不可欠である。Fig. 4 に実験後回収したサンプルの組成像を示す。

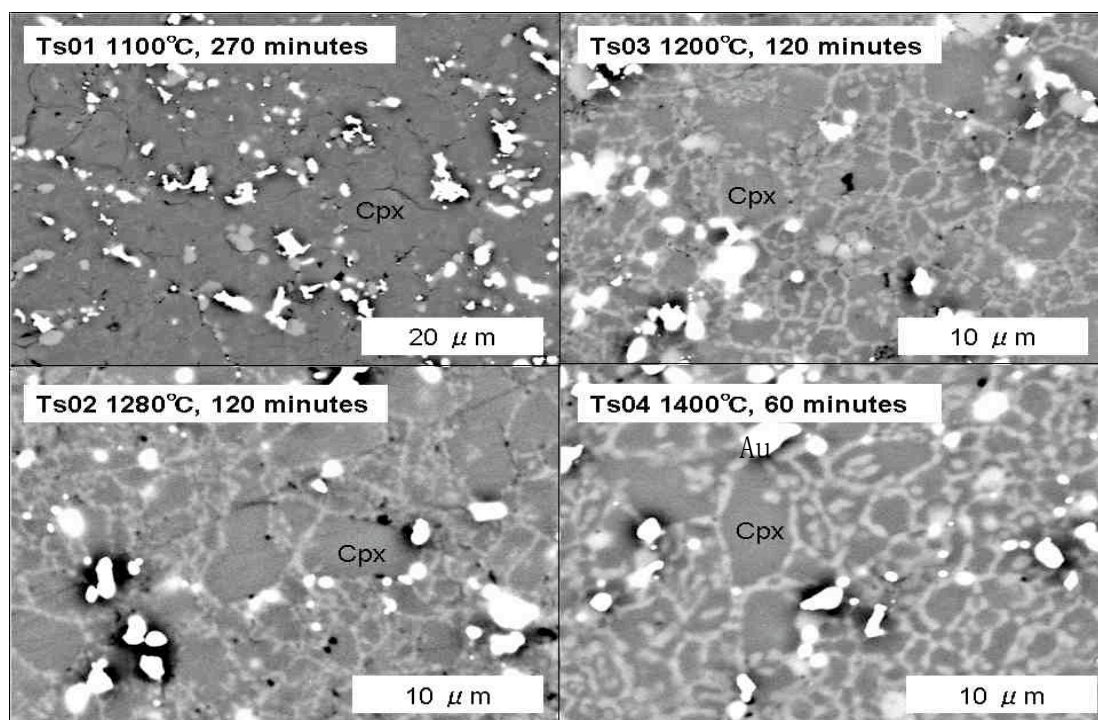


Fig. 4 相転移実験終了後の回収試料の組成像

clinopyroxene の粒界に garnet が reaction rim を形成し析出していた。このことは、相転移の初期段階で新相が母相の粒界に核形成し、サイトサチュレーションした可能性を示唆するものである。

多結晶体の相転移が進行し、生成相同士の衝突が起こるような場合の相転移率の時間変化の解析には、アブラミの式が適用される。アブラミの式は以下のように記述される。

$$V = 1 - \exp(-k t^n) \dots (1)$$

ここで、k 値は核生成や成長の速度に依存した定数で、時間指数 n 値は核生成や成長の時間依存性、成長方向の次元数に依存する。この式は以下のように変形できる。

$$\ln \ln \frac{1}{1-V} = \ln k + n \ln t \dots (2)$$

$\ln t$ に対し $\ln \ln 1/(1-V)$ をプロットすることで得られる 1 次式の勾配や y 切片から、アブラミの式における n 値や k 値を決定することができる。求まった n 値の違いは相転移組織に反映されるはずであるので、相転移速度だけでなく、相転移のメカニズムを議論する上でも重要となる。

Fig. 5, 6 は、各実験それぞれの相転移率変化をアブラミの式でフィッティングしたものである。Fig. 5 から、時間とともに相転移が進行していくのがわかる。相転移速度は温度が高いほど早く、温度が低いほど遅かった。Fig. 6 の切片と傾きは上記の式における k 値と n 値に対応する。

Fig. 6 の各実験における直線の傾き (n 値) は、理論的に予測される n 値 (0.5) と比べ、非常に低い値となった。そのため、歪エネルギーの蓄積やソフトインピンジメントの効果を検討する必要がある。

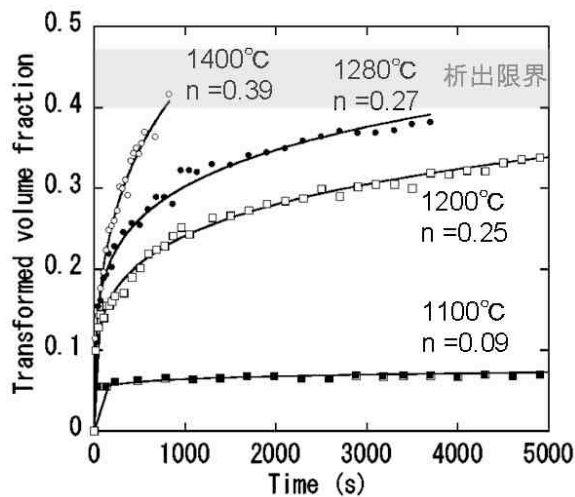


Fig. 5 それぞれの実験の Cpx の X線回折強度から求まった相転移率の時間変化

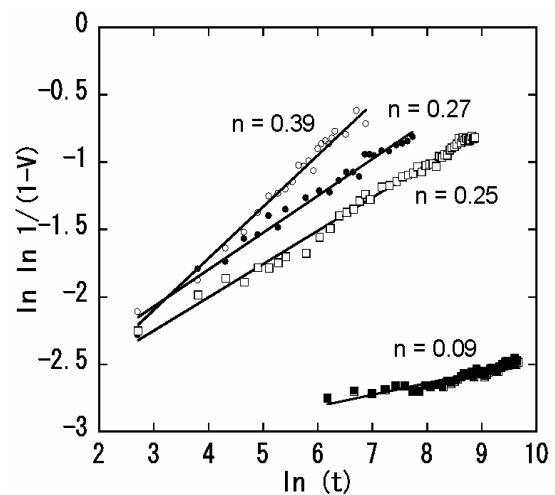


Fig. 6, 相転移率の時間変化
軸は対数表示

地球深部の対流運動を考えるためには、相転移を10 万年、100 万年の時間スケールで考察する必要がある。我々が実験できる時間スケール(数時間)は非常に短いため、計算により地球深部条件に外挿しなければならない。今回の実験により、様々な温度での定量的な相転移速度が明らかとなったため、沈み込むプレート の時間スケールでどの程度相転移が進行するか計算した (Fig7)。

沈み込む MORB の温度が 1100℃ 以下なら、clinopyroxene は garnet をほとんど析出しないため、MORB の鉱物構成は Fig. 1(A) となると推測できる。また、1200℃ 以上なら clinopyroxene は garnet を析出するため、MORB は Fig. 1(B)、もしくは(C) となる。沈み込む MORB の温度は、マントル遷移相領域において 1000 度程度であるが地域により異なるため、比較的冷たいプレートと比較的暖かいプレートで鉱物構成が変わる可能性がある。鉱物構成の違いは、沈み込む MORB の密度や物性値に直接かかわるため、今回の研究は、マントル対流のメカニズム、駆動力を考える上で非常に重要な結果となったと考えられる。

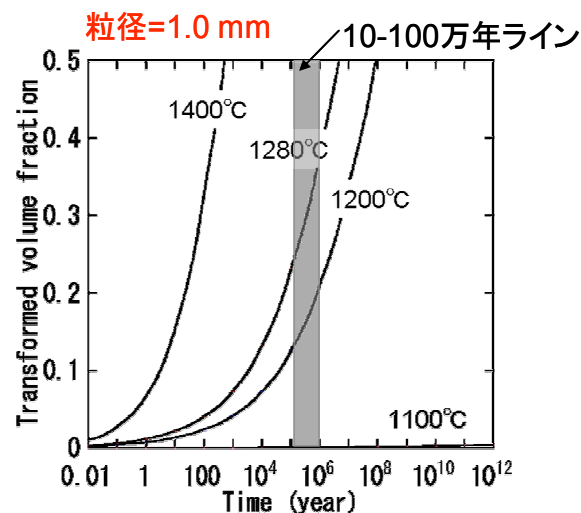


Fig.7 母相 clinopyroxene の粒径を 1.0mm と仮定した場合の相転移率の時