

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20540469

研究課題名(和文) アナログ物質の変形実験に基づく沈み込むスラブの相転移時における強度変化の解明

研究課題名(英文) Rheology of olivine during transformation to its high pressure phase

研究代表者

安東 淳一 (ANDO JUNICHI)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50291480

研究成果の概要(和文)：

広島大学に設置されている固体圧式変形実験装置を使用して、 $Mg_2GeO_4$ オリビンの相転移時における力学強度変化を調べる為に必要な試料セルの開発を行った。その結果、歪速度： $10^{-5}$ ～ $10^{-6}$ /秒、圧力条件：1 GPa ～2 GPa、温度条件：900°C程度までの実験条件で質のよい力学データを取得できる試料セルの開発に成功した。しかし、上記の目的を達する為には、少なくとも約1200°Cの実験に耐えうる試料セルの開発が必要である。本研究を通じて、高温の試料セル開発における問題点は把握できたので、引き続き実験を継続させる。

研究成果の概要(英文)：

We tried to develop cell assembly for deformation experiment using the solid medium deformation apparatus installed at Hiroshima Univ., which can be used to obtain the mechanical data of  $Mg_2GeO_4$ -olivine during transformation to its high pressure phase. In the result, we only succeeded to develop the good cell assembly, which can be applied to the deformation experiment at the condition of strain rate:  $10^{-5}$ -  $10^{-6}$  /sec, pressure: 1 GPa - 2 GPa and temperature: up to 900 C. However we need to conduct the deformation experiment up to almost 1200 C conditions in order to clarify the initial problem. Now we know the key points for its development through the present research, therefore we will continue to improve the cell assembly.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：岩石鉱物流動物性

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：スラブ・滞留・変形実験・アナログ物質・相転移

## 1. 研究開始当初の背景

上部マントルと下部マントルの間に存在

するマントル遷移層は地球内部の重要な境界層の1つである。沈み込むプレートがどの

様にこのマントル遷移層と作用し、その後、どの様に下部マントルに侵入するのかという問題は、マントルの物質循環・熱対流・化学組成の混和を理解する上で重要な研究課題となっている。

低温で（古い）、沈み込む速度が速い海洋プレートは、下部マントルに直接侵入できずにマントル遷移層に滞留する可能性が高い事が指摘されている（例えば Karato et al., 2001）。沈み込むプレートのマントル遷移層付近における滞留問題を考える上で重要となるデータは、660km まで達した沈み込むプレートの内部で生じている深発地震の発生機構である。これら地震波の研究は、沈み込むプレートには、沈み込む方向にほぼ平行に圧縮力が働いている事を示している。この圧縮力の発生は、沈み込むプレートを構成している鉱物（主にオリビン）の相転移のクラペイロン勾配によって説明できる。クラペイロン勾配が負の場合、不連続面が下降し、その結果、プレート中に沈み込みに対する抵抗力となる浮力が発生し、圧縮力が働く。クラペイロン勾配に関する多くの研究は（例えば Ito and Takahashi, 1989; Irifune et al., 1998）この事を支持する。しかし、近年の実験結果（例えば Katsura et al., 2003）は、これまでよりも緩い負のクラペイロン勾配を示しており、この場合、浮力の効果は非常に小さくなる。このような場合にも、沈み込むプレート内部に圧縮力が働く為には、プレートの下降に対して抵抗力が働く必要がある。これは、本研究の主題となる下部マントルとプレートの相対強度（レオロジー）の問題となる。

一方、Ito and Sato (1991), Wang et al., (1997), Karato et al., (2001)は、沈み込むプレートを構成しているオリビンは相転移後に粒径が非常に小さくなり、その結果、強度を極端に小さくさせるメカニズム（超塑性クリープ）によって変形が進行すると考えた。この粒径の効果によって、プレートがマントル遷移層中で容易に変形し、滞留し得ると説明した（ただし、Ito and Sato (1991), Wang et al., (1997)と Karato et al., (2001)では、対象として考えている高压相が異なっている。前者はペロブスカイトとマグネウスタイト混成物質 (Pv+Mw)、後者は $\gamma$ 相である)。しかし、もし粒径の効果によってプレートの強度が極端に低下した場合には、プレート中には圧縮力が発生し得ないと考えられる。

そこで、相転移前後のオリビンおよびその高压相の力学強度を変形実験によって明らかにし、相転移前後において、試料の強度が

どの程度相対的に変化するのかを評価する事が重要になる。この事は、これまでの研究ではほとんど行われていなかった。

## 2. 研究の目的

沈み込むプレートのマントル遷移層付近での滞留問題は、トモグラフィを含めた地震波の解析や数値シミュレーションによって研究が進められている。我々はこの問題に対して、独自に開発した固体圧式変形実験装置を用いて、相転移時におけるオリビンのレオロジー特性の変化の解明を通じて理解したいと考えている。そこで本研究は、この実験に必要な試料セルの開発を行う事から開始した。

地球内部を構成する鉱物のレオロジー特性を物質科学の側面から研究する方法として、D-DIA 型高压発生装置を利用した研究が注目されている（例えば Wang et al., 2003）。この装置は、約 10GPa (地球深部約 300Km の深さに相当) までの高圧力状態での変形実験が行える。しかし、精度の良い歪速度の制御や試料の歪量の測定が困難である（大型“放射光”施設において、強力な X 線を併用する事でのみ、これらの事は可能である）。また、本研究が対象としている様な深さ 660km に相当する圧力条件での実験は当面できない（注：2011 年現在においては、マントル遷移層に相当する様な高圧力高温状態での変形実験が行えるまでに進展している）。

一方、本申請研究で使用する固体圧式変形実験装置は、約 5GPa (深さ約 150Km) 以上のマントル構成鉱物に対する適切なアナログ物質（マントル構成鉱物と結晶構造は同じであるが、化学組成が異なり、かつ低い圧力で安定な結晶）を用いる事で、地球深部のレオロジー特性に対して制約を与えうる力学データを取得できる。また、固体圧式変形実験装置を使用したアナログ物質の変形実験が可能になると、日常的なルーティンワークとしてマントル深部におけるマントル構成鉱物の力学データの取得が可能になるというメリットもある。従って、今後のマントル構成鉱物のレオロジー特性の研究は、D-DIA 型高压発生装置と固体圧式変形実験装置を使用した研究が両輪として機能して進んでいくと考えられる。日本においては、複数の研究機関が D-DIA 型高压発生装置による研究を開始させているが、固体圧式変形実験装置を用いたマントル鉱物のレオロジー特性の研究を進めているのは現時点では申請者らのグループのみである。本研究による固体圧式変形実験装置を用いた実験の遂行は、マント

ルのレオロジー特性の研究に強く貢献し続ける事ができると考えている。

### 3. 研究の方法

本研究では、地球を構成するオリビン ( $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ ) のアナログ物質として  $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$  オリビンを実験に使用する。アナログ物質を使用したマントル構成鉱物のレオロジー特性の研究例は多数あり、アナログ物質を使用する有効性は Karato et al. (1989) にまとめられている。

$\text{Mg}_2\text{GeO}_4$  オリビンは圧力増加に伴って、その構造を  $\alpha$  から  $\gamma$  に転移させる (図1)。この

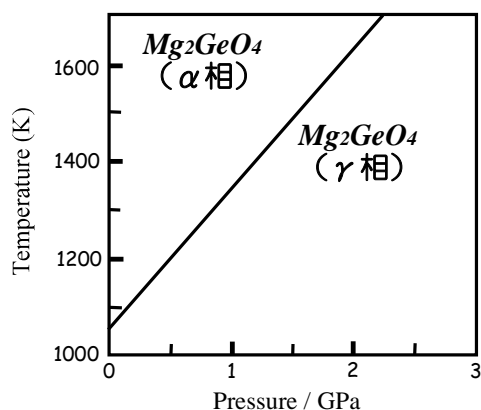


図1:  $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$  オリビンの相図 (Ross and Navrotsky, 1987)

反応は、マントル遷移層中におけるオリビンの  $\alpha$  相から  $\gamma$  相への転移と同じ構造変化である為、マントル中の模擬反応と考えられる。固体圧式変形実験装置によって  $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$  オリビンの定歪速度実験を行い、相転移前後の試料の力学強度と相転移中の力学強度変化を明らかにする事と、各実験の回収試料の変形微細組織を観察し、変形のマニピュレーションを明らかにする事を最終の研究目標とする。これらの定歪速度実験を行う為に、以下の2点を克服する実験研究を遂行した。

- (1) 当研究グループが持つ固体圧式変形実験装置は、本研究を開始する時点においては、封圧 1GPa、温度 700°C までの条件での変形実験をルーティンで行う事ができるようになって可能であった。従って、 $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$  オリビンが相転移を生じる条件(圧力 1GPa から 2GPa、温度 1200°C 程度) で変形実験を行う為には、試料セルの改良を行う必要がある。
- (2) 固体圧式変形実験装置の場合、ピストンと圧力媒体間に生じる摩擦力が試料に発生する応力値の測定に大き

な影響を与える。この摩擦力を極力小さくする試料セルを開発する必要がある。

### 4. 研究成果

広島大学の固体圧式変形実験装置を用いて、以下の様な条件で変形実験を行う事が可能な試料セル(図2)を開発する事ができた。

- 1) 歪速度:  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  /秒
- 2) 圧力条件: 1 GPa ~ 2 GPa
- 3) 温度条件:  $\sim 900^\circ\text{C}$
- 4) ピストンと圧力媒体(NaCl)間に発生する摩擦力が小さく、ピストンが試料に触れた事を示すヒットポイントが明確に分かる。

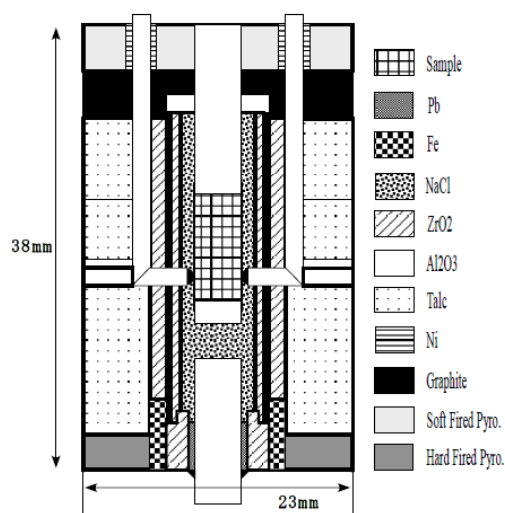


図2: 開発した試料セル

この試料セルの開発において注目した主な改良ポイントは、1) グラファイトヒーターの安定性(肉厚等)、2) 円柱状試料の温度勾配の減少( $\text{ZrO}_2$  スリーブの挿入等)、3) 円柱状試料の直径/長さ比の減少(試料に均等な応力を発生させる為)である。

この試料セルは、比較的低い温度で塑性変形する岩石・鉱物の変形実験に使用することが可能である。現在では既に、この試料セルを使用した蛇紋岩の変形実験をすすめており、蛇紋岩の塑性変形特性の解明に貢献している(既に研究成果の一部は、雑誌及び学会発表を通じて公表している。次項参照。図3に、蛇紋岩の変形実験の結果の1例を示す。美しい力学データの取得が行えている)。

しかし、残念ながら本研究期間中には当初目的としていた様な、 $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$  オリビンの相転移を生じさせながら、変形実験を長時間継続させる事が可能な試料セルの開発は達成できなかった。現状としては、図2の試料セル

を使用すると、目的の圧力と温度 (1GPa で約 1100°C) に到達後、試料を変形させる為に必要なピストンの駆動を開始させると、試料が降伏する前の段階でグラフアイトヒーターが不安定になる。その結果、有効に試料を塑性変形させ、かつ、解析に耐えうる力学データの取得が困難になっている。今後、この間

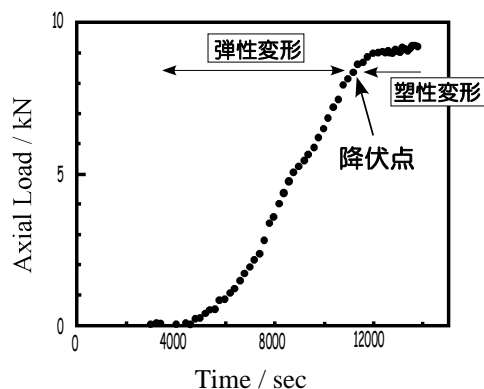


図 3 : 蛇紋岩の実験結果

題を解決させる為には、まず、試料セル全体のサイズに対する NaCl 圧力媒体の体積をもう少し減らす必要があると考えている。NaCl 圧力媒体は、ピストンと圧力媒体間に発生する摩擦力を非常に小さくさせるが、一方で、目的としている実験温度条件(約 800°C以上)では完全に溶解しており、試料セル内部の応力状態を不均質にする原因となっている。その為、NaCl 圧力媒体の量を極力減らす事で、試料セル及びグラフアイトヒーターがより安定な状態におかれると期待している。

また、上記の問題を解決する際には是非考慮しなければならない課題は、本固体圧式変形実験装置の基本構成の改善である。本装置は、圧力と温度条件が共に大きくなればなるほど、圧力媒体(外側のタルク部分)がシリンダー部から浸み出しやすくなるという構成を有している。高压高温条件において、この圧力媒体の浸み出しをいかに食い止めるかが必要になる。この点に関しては、ドリッカマーアンビル装置に似た機構を加える事で、改善できると考えている。

今後、以上の2点に固執して、セル開発を継続させる予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Han, R., Hirose, T., Shimamoto, T., Lee, Y. and Ando, J., Granular

nanoparticles lubricate faults during seismic slip, *Geology*, 査読有, 2011, doi: 10.1130/G31842.1

2. Muramoto, M., Michibayashi, K., Ando, J., Kagi, H., Rheological contrast between garnet and clinopyroxene in the mantle wedge: an example from Higashi-akaishi peridotite mass, SW Japan, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 2011, 184, 14-33.

3. Kawazoe, T., Karato, S., Ando, J., Jing, Z., Otsuka, K. and Hustof, J.W., Shear deformation of dry polycrystalline wadsleyite up to 2100 K at 14-17 GPa using a rotational Drickamer apparatus (RDA). *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 2010, 115, doi:10.1029/2009JB007096

4. Katayama, I., Michibayashi, K., Terao, R., Ando, J. and Komiya, T., Water content of the mantle xenoliths from Kimberley and implications for explaining textural variations in cratonic roots. *Geological Journal*, 査読有, 2010, 45, 1-10.

5. Katayama, I., Hirauchi, K., Michibayashi K. and Ando, J., Trench-parallel anisotropy produced by serpentine deformation in the hydrated mantle wedge. *Nature*, 査読有, 2009, 461, 1114-1117.

6. Katayama, I., Suyama, Y., Ando, J. and Komiya, T., Mineral chemistry and P-T condition of granular and sheared peridotite xenoliths from Kimberley, South Africa: Origin of the textural variation in the cratonic mantle. *Lithos*, 査読有, 2009, doi:10.1016/j.lithos.2008.05.004.

7. Yamamoto, J., Ando, J., Kagi, H., Inoue, T., Yamada, A., Yamazaki, D. and Irifune, T., *Physics and Chemistry of Minerals*, 査読有, 2008, In-situ strength measurements on natural upper-mantle minerals. 35, 249-257.

[学会発表] (計 8 件)

1. Ando, J., Urata, Y. and Ohfuji, H., Deformation mechanism of antigorite, "The Asian Network in Deep Earth Mineralogy" symposium, 6 Nov 2010, 2010, Wuhan (China)

2. 安東淳一、浦田義人、曾田祐介、アンチゴライト蛇紋岩の塑性変形メカニズム、日本鉱物学会、2010年9月25日、島根県松江市

3. Ando, J., Urata, Y., Soda, Y. and Ohfuji, H., Deformation mechanism of antigorite considered from microstructures of naturally deformed serpentinite, The 20<sup>th</sup> meeting of the International Mineralogical Association, 26 Aug 2010, Budapest (Hungary)
4. 安東淳一、大藤弘明、浦田義人、村田恵子、前川寛和、蛇紋石化に伴って形成されたオリビン中に発達する鉄の縞状ゾーニング、日本地球惑星科学連合大会、2010年5月27日、千葉県千葉市
5. Ando, J., Ohfuji, H., Urata, Y., Murata, K, and Maekawa, H., Heterogeneous distribution of Fe in olivine grains generated by serpentinization, American Geophysical Union Fall Meeting, 16 Dec 2009, San Francisco (USA)
6. 安東淳一、寺田優希子、片山郁夫、金川久一、アンチゴライト蛇紋岩の塑性変形特性、日本地球惑星科学連合大会、2009年5月19日、千葉県千葉市
7. Ando, J., Katayama, I. and Ohfuji, H., Plastic and dehydration instabilities of antigorite serpentinite, American Geophysical Union Fall Meeting, 17 Dec 2008, San Francisco (USA)
8. 安東淳一、片山郁夫、金川久一、含水反応によってもたらされた Fine ペリドタイト中の剪断集中、日本地球惑星科学連合大会、2008年5月25日、千葉県千葉市

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安東 淳一 (ANDO JUNICHI)  
広島大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：50291480

### (2) 研究分担者

片山 郁夫 (KATAYAMA IKUO)  
広島大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：10448235

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：