

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13907

研究課題名(和文) 回転式変形ダイヤモンドアンビルセルの試作とポストペロフスカイトの変形実験

研究課題名(英文) Rotational diamond anvil deformation cell and deformation test on post-perovskite

研究代表者

山崎 大輔 (Yamazaki, Daisuke)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：90346693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：変形実験は物質の流動特性を理解する上で重要な役割を果たし、故に、高圧下での変形実験は、マントルダイナミクスを研究する上で鍵となる。そこで、ダイヤモンドアンビルセルに回転変形機構を追加することにより高圧変形装置の開発を行った。これまで下部マントル浅部に限られていた変形実験の圧力領域を下部マントル深部まで拡大した。室温約40 GPaの条件で変形実験を行い、この装置の高圧変形に対する有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：Deformation experiments plays important role to understand the rheological properties and hence deformation at high pressure is a key for mantle dynamics. We developed high pressure deformation by adding the rotational deformation device to the conventional diamond anvil. Due to this development, we largely expanded the pressure range to the deep lower mantle condition from the condition of the top of lower mantle. Deformation test by using the present device at room temperature and ~40 GPa suggests that this device is useful for the deformation at high pressure.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：変形実験 ダイヤモンドアンビルセル

## 1. 研究開始当初の背景

2004年に下部マントルを主に構成しているブリッジマナイトの高圧相であるポストペロフスカイト相が、ダイヤモンドアンビルセル超高压発生装置による実験で発見された。この相はマントル最下部のD'層の主要構成物質と考えられ、この相の流動特性がマントル対流、ひいては全地球的ダイナミクスに大きな影響を与えると考えられている。

一般的に流動特性の解明には、試料を変形させ、そのときの応力-歪み速度関係から粘性率の推定を行うことや、変形試料の微細構造観察からスベリ系や変形機構を明らかにするという手段がとられてきている。しかしながら、ポストペロフスカイトは120 GPa以上の高圧のみで安定であるために、実験的にポストペロフスカイトの物性を決定するには、高圧発生的手段として、ダイヤモンドアンビルセルを用いることが現在実現可能性の高いアプローチである。

ダイヤモンドアンビルセルは主に静的な圧縮場での技術として発展してきており、変形機能を備えているわけではない。一方で、既存の変形装置(改造マルチアンビル装置や回転式ドリカマー装置)の圧力上限は、20 GPa程度までと限られおり、マントル最下部の研究を遂行する上で、十分な能力を備えていない。そこで、ダイヤモンドアンビルセルを利用した変形実験装置・技術の開発が一つのブレークスルーになると考えられる。

## 2. 研究の目的

ダイヤモンドアンビルセルを改良し超高压変形実験装置の開発が主要目的となる。さらに、開発した装置を用いて、下部マントル深部条件での変形実験の可能性を示すことを本課題の目的としている。さらに、発展的な研究として、ポストペロフスカイ

トに関するレオロジー実験の遂行が目標としてあげられる。

## 3. 研究の方法

ダイヤモンドアンビルセルに回転変形機構を装着する。先行研究である Novikov et al. (2015)では、対向するアンビルの調整が機構的に困難であるため、変形可能な発生圧力が10 GPa程度に限定されていた。一方で、本課題とほぼ同時期に遂行された Nomura et al. (2017)も、ダイヤモンドアンビルに回転機構を添加し変形装置を構築した。彼らは高精度の機械加工を施すことにより、精度のよい加圧を可能とし、高圧下での変形実験を可能とした。

本研究では、Nomura et al. (2017)の試作機に追加するように回転摺動部にスラストベアリングを設置することにより、高圧発生を可能とし、さらに変形回転のスムーズな動きを保証し変形に要するトルクを低く圧させることに成功した。また、今後の研究で用いる測定系との干渉を軽減するために、ダイヤモンドアンビルセルのガスケット部側面に広く開口部を設置した。このようにして開発した回転機構付き変形ダイヤモンドアンビルセルを用いて、高圧下での変形試験を行った。

## 4. 研究成果

変形試験は、高圧室温下で行った。ダイヤモンドアンビルにはキュレット径120  $\mu\text{m}$ を用い、試料にはReを用いた。通常のダイヤモンドアンビルと同様に室温下で約35 GPaまで加圧した。その後、上方のダイヤモンドアンビルを回転させることにより、試料を回転剪断変形させた。変形において、ダイヤモンドアンビル表面と試料との接触部でのスリップが不可避であるために、変形量をダイヤモンドアンビルの回転角度から正確に見積もることは困難である。上方

ダイヤモンドアンビルを 360 度回転させたところ、圧力が約 45 GPa へと上昇した。これは、回転によるガスケット部分の外側への流動により、試料室内が圧縮されたためだと考えられる。この段階で変形を終了し、試料を減圧、回収した。

回収試料の微細構造観察には、電界放出型走査電子顕微鏡を用いた。観察試料準備には、フォーカスイオンビーム装置を用い、微細なダイヤモンドアンビルセル試料において試料の中心部（この部分は回転中心となるため、歪み量が小さい）と中心から 30-40  $\mu\text{m}$  離れた箇所（この部分は、回転中心から離れているので歪み量が大きい）の観察面を準備した。電子顕微鏡観察の結果、今回の試験では変形が室温で行われたことと歪み速度が大きいこと（キュレット外縁部では、およそ $\sim 10^{-2}/\text{s}$ ）から多くの転位が発生しており断面観察から変形構造を読み取ることが困難であったが、伸張組織を呈している試料部分がみられた。このことは、転位スベリによる塑性変形がなされたことを示唆している。

以上より、本装置はこれまでの圧力領域を大きく拡大する変形装置として機能することを示した。今後は、加熱装置と組み合わせることで、マントル深部のレオロジー解明へと有用な装置と発展していくことが期待できる。

## 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 16 件)(以下、全て査読有り)

1. Tateno, S., Hirose, K., Sinmyo, R., Morard, G., Hirao, N., Ohishi, Melting experiments on Fe-Si-S alloys to core pressures: Silicon in the core?, *American Mineralogist*, in press, DOI: 10.2138/am-2018-6299.
2. Sakai, T., Yagi, T., Kadobayashi, H., Hirao, N., Kunimoto, T., Ohfuji, H., Kawaguchi, S.I., Ohishi, Y., Irifune, T., Tateno, S., Hirose, K. (2018) High Pressure Generation using

- Double-Stage Diamond Anvil Technique: Problems and Equations of State of Rhenium, *High Pressure Research*, DOI: 10.1080/08957959.2018.1448082.
3. Ozawa, H., Tateno, S., Xie, L., Nakajima, Y., Sakamoto, N., Kawaguchi, S.I., Yoneda, A., Hirao, N. (2018) Boron-doped diamond as a new heating element for internal-resistive heated diamond-anvil cell, *High Pressure Research*, DOI: 10.1080/08957959.2018.1441407.
  4. Fei, H., Wiedenbeck, M., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Yoshino, T., Yamazaki, D., Katsura, T. (2018) Negative activation volume of oxygen self-diffusion in forsterite, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 275, 1-8, DOI: 10.1016/j.pepi.2017.12.005.
  5. Fei, H., Yamazaki, D., Sakurai, M., Miyajima, N., Ohfuji, H., Katsura, T. and Yamamoto, T. (2017) A nearly water-saturated mantle transition zone inferred from mineral viscosity, *Science Advances*, 3, e1603024, DOI: 10.1126/sciadv.1603024, 2017.)
  6. Gréaux, S., Nishi, M., Tateno, S., Kuwayama, Y., Hirao, N., Kawai, K., Maruyama, S., Irifune, T. (2017) High-pressure phase relation of KREEP basalts: a clue for finding the lost Hadean crust ?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 274, 184-194, DOI: 10.1016/j.pepi.2017.12.004.
  7. Ishii, T., Yamazaki, D., Tsujino, N., Xu, F., Liu, Z., Kawazoe, T., Yamamoto, T., Druzhbin, D., Wang, L., Yuji, H., Tange, Y., Yoshino, T., Katsura, T. (2017) Pressure generation to 65 GPa in Kawai-type multi-anvil apparatus with tungsten carbide anvils, *High Pressure Research*, 37, 507-515, DOI: 10.1080/08957959.2017.1375491
  8. Kawaguchi, S.I., Nakajima, Y., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Tateno, S., Kuwayama, Y., Tsutsui, S., Baron, A.Q.R. (2017) Sound velocity of liquid Fe-Ni-S at high pressure, *Journal of Geophysical Research*, 122, 3624-3634, DOI: 10.1002/2016JB013609
  9. Mori, Y., Ozawa, H., Hirose, K., Sinmyo, R., Tateno, S., Morard, G., Ohishi, Y. (2017) Melting experiments on Fe-Fe<sub>3</sub>S system to 254 GPa, *Earth and Planetary Science Letters*, 464, 135-141, DOI: 10.1016/j.epsl.2017.02.021
  10. Nishi, M., Steeve, G., Tateno, S., Kuwayama, Y., Kawai, K., Irifune, T., Maruyama, S. (2017) High-pressure phase transitions of anorthosite crust in the Earth's deep mantle, *Geoscience Frontiers*, in press, DOI: 10.1016/j.gsf.2017.10.002.
  11. Xie, L., Yoneda, A., Yoshino, T., Yamazaki, D., Tsujino, N., Higo, Y., Tange, Y., Irifune, T., Shimei, T., Ito, E. (2017) Synthesis of boron-doped diamond and its application as a heating material in a multi-anvil high-pressure apparatus, *Rev. Sci. Instrum.*, 88, 093904, DOI:

10.1063/1.4993959.

12. Xu, F., Yamazaki, D., Sakamoto, N., Sun, W., Fei, H., Yurimoto, H. (2017) Silicon and oxygen self-diffusion in stishovite: Implications for stability of SiO<sub>2</sub>-rich seismic reflectors in the mid-mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 332-339, DOI: 10.1016/j.epsl.2016.11.044.
13. Yamazaki, D., Tsujino, N., Yoenda, A., Ito, E., Yoshino, T., Tange, Y., Higo Y. (2017) Grain growth of  $\epsilon$ -iron: Implications to grain size and its evolution in the Earth's inner core, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 238-243, DOI: 10.1016/j.epsl.2016.11.049.
14. 角野 浩史・貴志 智・野村 龍一・三部 賢治・館野 繁彦・鍵 裕之、高温高压実験で探る地球深部始源的希ガスリザーバーの在処、*高压力の科学と技術*、27、266-277、2017、DOI: 10.4131/jshpreview.27.266
15. Tsujino, N., Nishihara, Y., Yamazaki, D., Seto, Y., Higo, Y., Takahashi E. (2016) Mantle dynamics inferred from the crystallographic orientation of bridgmanite, *Nature*, 539, 81-84, DOI:10.1038/nature19777.
16. Yoshino, T., Yamazaki, D., Tange, Y., Higo Y. (2016) Short-period cyclic loading system for in situ X-ray observation of anelastic properties at high pressure, *Rev. Sci. Instrum.*, 87, 105106. DOI: 10.1063/1.4963747.

〔学会発表〕(計5件)

1. 山崎大輔、六方晶鉄の変形実験：軽元素の影響、*高压討論会*、2017年
2. D. Yamazaki, Pressure generation of 120 GPa in a Kawai-type apparatus and stability of bridgmanite, *地球惑星関連連合大会(JpGU)*, 2017年.
3. D. Yamazaki, High Pressure Generation in a Kawai-type Multianvil Apparatus Equipped with Sintered Diamond Anvils, *AIRAPT26 Joint with ACHPR 8 & CHPC 19*, 2017.
4. D. Yamazaki, N. Sakamoto, H. Yurimoto, Preliminary result on iron self-diffusion in  $\epsilon$ -iron, *地球惑星関連連合大会*、2016年
5. 山崎大輔、焼結ダイヤモンドを用いた川井型装置による圧力発生、*高压討論会*、2016年

〔その他〕ホームページ：

<http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hacto/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

山崎 大輔 (YAMAZAKI, Daisuke)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：90346693

### (2)研究分担者

館野 繁彦 (TATENNO, Shigehiko)