特集 —— 核—マントルの相互作用と共進化に関する研究の進展 ——

D111 型装置を用いた高圧変形実験による
地球深部レオロジーの研究Studies of Deep Earth Rheology Based on High-Pressure Deformation Experiments Using
D111-Type Apparatus西原 遊^{1,*}Yu NISHIHARA^{1,*}辻野 典秀²Noriyoshi TSUJINO²久保 友明³Tomoaki KUBO³山崎 大輔²Daisuke YAMAZAKI²土居 峻太¹Shunta DOI¹今村 公裕³Masahiro IMAMURA³芳野 極²Takashi YOSHINO²

A new high-pressure deformation apparatus D111-type apparatus, which is a larger version of the deformation T-Cup, was recently installed on a synchrotron beamline NE7A at PF-AR, KEK, Tsukuba, Japan. In this apparatus, well-controlled deformation experiments can be conducted up to ~30 GPa by driving two opposed second-stage anvils in the Kawai-type multi-anvil assembly. High-pressure and high-temperature deformation experiments with quantitative stress and strain measurements have been carried out using the D111-type apparatus in conjunction with synchrotron radiation. Some studies have been conducted to investigate deep Earth rheology including rheology of hcp iron, rheology of bridgmanite and post-spinel, and olivine-ringwoodite phase transformation under deformation.

[D111-type apparatus, DT-Cup apparatus, deformation, rheology, lower mantle, inner core, high-pressure and high-temperature]

1. はじめに

固体岩石でできた地球のマントルでは、その内側に位置する金属核がもつ熱を主な原動力として対流運動が起こっている。このマントル対流は地質学的な長い年月をかけたゆっくりとした現象ではあるが、

これによって地球は徐々に冷却しているだけでなく地表と地球深部間における物質のやり取りが起こってきた。このため、マントル対流は地球の進化の鍵を握る重要な現象だと考えられている。一方、地球の核の中心に位置する固体金属でできた内核は地震波の伝わる速度が極方向と赤道方向で大きく異なる

¹ 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター
Geodynamics Research Center, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790-8577

² 〒682-0193 鳥取県東伯郡三朝町山田 827 岡山大学惑星物質研究所
Institute of Planetary Materials, Okayama University, 827 Yamada, Misasa, Tottori 682-0193

³ 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 九州大学大学院 理学研究院地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

*Electronic address: yunishi@sci.ehime-u.ac.jp

不思議な特徴をもっており、これは地震波速度異方性と呼ばれている。この地震波速度異方性が生じている原因の一つの可能性として、内核内の固体金属の流動変形が挙げられている[1]。このような地球内部での固体の流動変形が物質と熱の輸送に果たしている役割を理解するためには、高温高压下にある地球深部の物質の流動特性「レオロジー」を正確に理解することが必要とされる。

地球深部での物質のレオロジーを解明することを目的として、21世紀を迎えて以降変形 DIA 型(D-DIA)装置[2]や回転ドリッカー装置[3]が開発され 3 GPa を越える高压力下の変形実験が技術的に確立された。現在は、これらと放射光 X 線を組み合わせて定量的な高温高压変形実験が盛んに行われている。最近になって、111 圧し川井型マルチアンビル装置を基にした高压変形実験装置、変形 T-Cup (DT-Cup) 装置が Hunt ら[4]によって開発された。この装置では対向する一対の二段目アンビルを油圧により独立に駆動することで、最高 18 GPa の高压力下でよく制御された変形実験を実現している。この装置は川井型マルチアンビル装置を基にした巧みな構造的特徴から、発生圧力と精密な変形の制御の点においてそれ以前の装置より優れた性能を発揮できるポテンシャルを有している。しかしながら、DT-Cup 装置では小型のガイドブロックを採用していることから与えられる荷重が限られ、地球下部マントルの条件(圧力>23 GPa)での変形実験の実現には大型化が必要とされていた。

このような状況を踏まえて、我々は新学術領域研究「核—マントルの相互作用と共進化—統合的地球深部科学の創成—」の一環として、2017年3月に高エネルギー加速器研究機構、PF-AR、ビームライン NE7A に「D111 型ガイドブロック」を導入・設置し、DT-Cup 装置を大型化した改良版にあたる D111 型装置のシステムを構築した。そして、この実験システムを用いてマントル遷移層、下部マントル、内核といった地球深部の物質のレオロジーを明らかにしつつある。本稿では、D111 型装置の概要とこれを用いて進められている地球深部物質のレオロジーの研究の現状を紹介する。

2. D111 型装置

D111 型装置は、Hunt ら[4]によって開発された高压変形実験装置である DT-Cup を大型化した

装置である。装置名の「D111」は、変形を意味する Deformation の頭文字と圧縮・変形方向が「111 方向」であることに由来している。Fig. 1 に関連する高压装置の機構的な関係を表す。D-DIA 装置は、キュービックアンビル (DIA 型) 装置の対向する一対のアンビルを独立に駆動することにより立方体形状の圧力媒体を変形し高压変形実験を実現する装置であった。一方、D111 型装置 (およびその原型である DT-Cup) は、[111]型ガイドブロック方式の川井型マルチアンビル装置[5]の対向する一対の二段目アンビルを独立に駆動することにより八面体形状の圧力媒体を変形し高压変形実験を実現するものである。二種類の変形装置の原型となったキュービックアンビル装置と川井型マルチアンビル装置を比較すると、通常の超硬アンビルを使用する場合、キュービックアンビル装置では一般に発生圧力は約 15 GPa 程度までに限られるのに対し、川井型では約 30 GPa 程度までの高压力の発生がルーチンの可能である。このため、川井型マルチアンビル装置をもとにした D111 型装置は D-DIA 装置では不可能だった最高約 30 GPa の高压力下での変形実験を実現できると期待される。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)に設置された D111 型装置のガイドブロックの模式図を Fig. 2 に示す。上下ガイドブロックには差動ラム(D-ram)が内蔵されており、これを油圧により駆動することができる。一段目アンビル(first-stage anvil)は 3 個

Fig. 1. Schematic illustrations showing mechanism of D111-type apparatus and its related apparatuses. Deformation-DIA (D-DIA) apparatus is a deformation apparatus which was modified from cubic anvil apparatus for quasi-hydrostatic compression. Similarly, D111-type apparatus (and DT-Cup) is a deformation apparatus which was modified from Kawai-type multi-anvil apparatus with [111] type guide-block.

Fig. 2. A schematic cross section of the D111-type guide-block installed at KEK.

ずつ組み合わされ上下に設置されているが、その中心部に六角柱型の空間が設けられ、この空間に3本のピストン(piston)がはめ込まれている。このタイプのピストンを用いた構成については Hunt and Dobson[6]に詳しい記述がある。ガイドブロック全体の中心部には、通常の川井型マルチアンビル装置の場合と同様に、8個の立方体二段目アンビルと圧力媒体を組み合わせたアセンブリをそのまま設置し実験を行う。(Mg,Co)Oなどのセラミックス半焼結体の圧力媒体内部には、一軸圧縮変形実験の場合は中心部に試料を、試料上下には円柱状の硬い Al_2O_3 ピストンを配置する(Fig. 1)。また、剪断変形実験では斜め 45° に切断された柱状ピストンに板状試料を挟み込んだ構成がしばしば用いられる。以上のような設計により、メインラム荷重を印加し圧力媒体およびその内部の試料に圧力をかけた状態で差動ラムを前進(または後退)させることにより、ピストンと上下二段目アンビルを通じて圧力媒体ひいてはその内部の試料を変形することができる。

ここで示したガイドブロックの最高差動ラム荷重は上下各314 tfである。KEKでは、これをPF-ARのビームラインNE7Aに設置されているMAX-IIIプレスと組み合わせて用いることで、最高メインラム荷重700 tfでの実験が可能な「D111型装置」が構成される。DT-Cup装置では差動ラム荷重とメインラム荷重が最高でそれぞれ62 tfおよび413 tfしかなかったことが、この装置での実験圧力を制限し

ていた[4]。大型化されたD111型装置では発生可能な荷重が大きく拡大されており、より高圧力またはより大容積での変形実験が可能である。このKEK設置のD111型装置では、一段目アンビルの先端面は一辺50 mmの正方形であり、二段目アンビルには一辺26 mmの立方体形状のものが通常用いられている。

D111型装置はKEK, PF-AR, NE7Aに2017年に設置されたのに続いて、岡山大学惑星物質研究所、九州大学にも相次いで設置されている。これらの装置ではサイズや一部の仕様が異なる部分があるものの、基本的なデザインが共有されている。

3. 高圧変形その場観察実験

高圧変形その場観察実験は、従来のD-DIA装置などを用いた変形実験の場合とはほぼ同様の手順で行われる。実験では、まず試料を含む圧力媒体にメインラム荷重を印加し高圧力を発生させる。装置は上下差動ラムの油圧が開放された状態で試料が等方圧縮されるように、あらかじめ調整されている。一部の試料の引張を目的とした実験では、差動ラムとピストンの間に設置するスペーサーを薄いものに置き換えて用いる。この場合は、差動ラムの油圧を調整しながら等方圧縮を行う。目的圧力到達後に、圧力媒体に内蔵した発熱体により試料を加熱し、上下差動ラムを一定速度で前進(または後退)させることにより高温高圧下での試料の圧縮(または引張)変形を行う。Fig. 3に、180–500 tfのメインラム荷重下の圧縮変形実験における差動ラムの変位と差動ラム荷重の関係を示している。いずれの実験においても差動ラムの前進を開始すると差動ラム荷重は急速に上昇し、メインラム荷重の1/4弱の値に達すると緩やかな上昇に転じた。ピストンと一段目アンビルの間には潤滑剤(MoS_2 粒子含有ペースト)が塗布されているが、初期の実験では塗布されていなかった。この潤滑剤を用いなかった実験では、Fig. 3のグラフ上で二回の折れ曲がりを示し、変形中の差動ラム荷重は同一荷重下の潤滑剤を使用した実験よりも高かった。変形ピストンの滑らかな動作のためにはこの部分での摩擦の軽減が重要であることがわかる。

Fig. 4に示すのは、KEK, PF-AR, NE7Aに設置されたD111型装置を用いた高圧変形実験その場観察システムの概念図である。50–60 keVの単色X線

Fig. 3. Plots of D-ram load with D-ram displacement (red: top ram, black: bottom ram). Main-ram load and the displacement rate are also shown. Lubricant was not pasted between the piston and the first-stage anvils in the data with an asterisk.

Fig. 4. A schematic illustration of experimental system at a beamline NE7A, PF-AR, KEK.

を圧力媒体中の試料に照射しラジオグラフ像および二次元 X 線回折パターンを収集する。ラジオグラフ像は YAG または GAGG 蛍光体と CCD または CMOS カメラを用い、二次元 X 線回折パターンはフラットパネルセンサー (Dexela 2923) を用いて撮影する。通常、二段目アンビルには超硬合金が用いられるが、受光側の二つのアンビルが回折 X 線を遮ってしまう。このため受光側二段目アンビルには、cBN などの X 線を透過する材料でできたアンビルまたは円錐形の掘り込みを施した超硬合金アンビルを用いて、その場での二次元 X 線回折測定を可能にしている。このようにして得られたラジオグラフ像から試料の歪を、二次元回折パターンから圧力と差応力を決定する。

Fig. 5. Pressure and temperature conditions of experiments using D111-type apparatus at KEK. Blue squares and lines are deformation conditions of hcp iron and phase boundaries in iron [13], respectively. Green circles are deformation conditions of bridgmanite and post-spinel. Red and black circles are pressure-temperature paths in four series of the olivine-ringwoodite transformation experiments in shear with and without annealing prior to the transformation, respectively (solid symbols indicate ringwoodite appeared). Black lines are phase boundaries in Mg_2SiO_4 [14–17]. TEL denotes truncation edge length of the second-stage anvils in mm.

4. 地球深部物質のレオロジー

現在までに、さまざまな物質について KEK 設置の D111 型装置を用いて実験が進められている。この中から六方最密構造 (hcp) 鉄のレオロジー、ブリッジマナイトとポストスピネルのレオロジー、オリビン-スピネル相転移と変形の相互作用についての研究を紹介したい。Fig. 5 には、これらの実験における温度圧力条件およびメインラム荷重、アンビル先端サイズ (TEL) をまとめた。

4.1 hcp 鉄のレオロジー

地球中心に位置する固体金属の内核には、南北方向に伝播する P 波が赤道方向のものに対し約 3% も高速となる大きな地震波異方性が存在することがわかっている [7]。この内核の異方性の成因には、さまざまなメカニズムが提唱されているが、現在までに一致した見解は得られていない。Lasbleis and Deguen [8] によれば、内核の年齢 (内核冷却速度の逆数に相当) と粘性率の値によって内核ダイナミク

スの支配的なメカニズムが異なるが、内核年齢と粘性率はよく制約されていないため、異方的成長、熱対流をはじめとするいくつかのメカニズムが現在の内核ダイナミクスの支配的なメカニズムである可能性をもっている。内核の粘性率は内核を構成する hcp 鉄の流動変形の力学的性質（レオロジー）によって決まっていると考えられるため hcp 鉄の高温高压でのレオロジーの理解が重要である。このため内核異方性形成メカニズムに制約を与えることを目的として、高温高压変形実験によって hcp 鉄のレオロジーの決定を目指している。

鉄の焼結多結晶を用いて、一定歪速度における高温高压変形実験を行った。これまでに行われた変形の条件は温度 450–600°C、圧力 15.1–22.6 GPa、一軸圧縮歪速度 1.5×10^{-6} – $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ である。Fig. 6 に示すような応力歪曲線が様々な条件で得られ、定常流動応力が決定された。得られた結果から総合的に判断すると、約 500°C 以上の高温とそれ以下の低温では、それぞれ異なる変形機構が卓越していることが示唆される。高温機構は応力指数がおおよそ 5 程度であり、格子拡散が律速する高温型べき乗則クリープであると考えられる。一方で、低温機構は転位芯拡散が律速する低温型べき乗則クリープであると考えられ、また約 400°C 以下では顕著なべき乗則の崩壊を伴っている。内核条件でべき乗則クリープが支配的な変形機構であると仮定し、融点規格化に基づいた見積もりを行うと、内核条件での hcp 鉄の粘性率は約 $10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 以上の高い値をもつことが示唆される。

Fig. 6. Plots of stress versus strain in the deformation experiments of hcp iron at temperature of 550, 500, and 450°C and pressure of 16.5–16.3 GPa with strain rates in a range of 1.7 – $2.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Stress values were determined from the four diffraction peaks of hcp iron ($10\bar{1}0$, 0002 , $10\bar{1}1$, and $10\bar{1}2$).

4.2 ブリッジマナイトとポストスピネルのレオロジー

パイロライトモデルでは、下部マントルは主に約 70 vol.% を占め高い粘性率をもつと考えられているブリッジマナイト（以下 Brg）と、約 20 vol.% を占める低粘性率と考えられているフェロペリクレース（以下 Fp）から構成されている。Brg と Fp の構成比と粘性率比から、対流に伴う変形により下部マントルの粘性率を支配する鉱物が変化することで、下部マントルの粘性率が大きく変わる可能性が指摘されている。地球物理学的観測によるマントルの一次元粘性率モデルによって、下部マントルは上部マントル・遷移層に比べて高粘性率であるだけでなく、下部マントル中の粘性率は深さとともに大きく増減することが報告されている。この深さに伴う粘性率の変化を理解するために Brg 単相の粘性率を明らかにすることが重要であるうえ、歪量の増加に伴い硬い Brg の代わりに軟らかい Fp が下部マントルの粘性率を支配することで下部マントル全体の粘性率の低下が起きる可能性を明らかにすることが重要である。

Brg 単相の粘性率を明らかにするため、Brg 多結晶焼結体を用いて、高温高压一軸変形実験中のその場応力-歪測定を行った。変形条件は温度 1,200–1,400°C、圧力 ~ 24 –27 GPa、歪速度 2.5×10^{-6} – $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ である。Fig. 7 が示すように、最大歪量は約 30% に達した。また、応力依存性・温度依存性を精密に決定するため、一回の変形実験中に歪速度および温度を変えたその場応力-歪測定も行った。その結果、本研究の実験条件では、Brg 単相の応力

Fig. 7. The X-ray radiographs at ~ 24 –27 GPa taken (a) before and (b) after deformation. The maximum strain reached about 30%.

指数は3となり高温型べき乗則（転位）クリープが支配的であることが明らかとなった。また、温度依存性からも高温型べき乗則クリープが支持された。さらに、Brg 単相の粘性率は同様な一軸変形実験によって粘性率の報告がある遷移層主要鉱物のウォズレアイトやリングウッドイトと比べて高粘性率をもつことが明らかとなった。

歪量とともにどのように下部マントルの粘性率が変化するかを明らかにするため、Brg : Fp のモル比が1 : 1、体積比が約2 : 1となる混合物（ポストスピネル）を用いた高温高压剪断変形実験を行った。先行研究となる回転ドリッカマー装置を用いた剪断変形実験[9]では、歪量 γ が約0.3から定歪速度でのBrgにかかる応力の明らかな低下が報告されている一方で、我々の実験では最大歪量 γ は約1に達したが、Brgの明らかな応力低下は観察されていない。今後、さらに実験を行うことで、どのような条件下でどちらの鉱物が粘性率を支配するのかを明らかにしていきたい。

4.3 オリビンスピネル相転移と変形の相互作用

固体地球で駆動するプレートテクトニクス型のマントル対流を理解する一つの鍵が、マントル遷移層（深さ約400–700 km, 約14–23 GPa）を通過する沈み込んだ海洋プレート（遷移層スラブ）の挙動である。遷移層スラブは硬い下部マントルから抵抗を受けて深発地震を起こすとともに大変形して折れ曲がる場合が多い。それには遷移層で起こるオリビンスピネル（ウォズレアイトおよびリングウッドイト）相転移が深く関与しているとされている。特にスラブ低温下では相転移が過剰圧状態で非平衡に進行するため細粒化が起こりやすく、それが超塑性（粒界すべり等により粘性率が粒径の2乗～3乗で変化する流動機構）を引き起こすことが指摘されている[10]。その実証には非平衡相転移と塑性流動が相互作用する現象を解明する必要があるが、D111型装置の開発によりその直接的な実験研究が可能になった。ここではその予備的結果を紹介する。

オリビンの焼結多結晶体を出発物質として、圧力15–25 GPaで600°Cから1,200°C付近へ昇温させながら剪断変形実験を行い、オリビン–リングウッドイト相転移の進行と変形挙動をその場観察した。その一部について、温度圧力経路と相転移が起こった条件をFig. 5に示す。高圧力下の剪断変形場で相転移する試料に対し、二次元X線回折パターンから

相転移の進行と圧力および差応力を、X線ラジオグラフィから試料中に挟んだAu箔の傾きを通して剪断歪みの増加量をモニタしている。その一例として、18 GPa付近で得られた結果をFig. 8に示す。上下アンビルの変位速度は一定(200 $\mu\text{m h}^{-1}$)にしているが剪断歪速度は一定ではなく、昇温よりも相転移の開始にリンクして顕著に増加している。そのときの差応力は昇温の効果もあるが相転移の進行とともに顕著に減少している。つまり試料部の変形強度は相転移にともなって大きく低下していることがわかる。より過剰圧の大きい22 GPa付近で相転移した場合はその効果がより顕著であった。このようにマントル遷移層圧力下で相転移と変形の相互作用をその場観察できつつあるが、課題も多い。特に二次元X線回折パターンのクオリティが低く、減少しつつある母相と増加しつつある新相の量比や差応力について、変形速度や相転移速度に応じた時間分解能で良質なデータが得られるまでには至っていない。入射X線の高輝度化や試料部以外の回折線を除去する回転型スパイラルスリット、高速二次元検出器の導入などを検討し、相転移にともなって時間変化する多相のレオロジーを高い時間空間分解能でその場観察していく必要がある。

Fig. 8. Changes of stress and strain during the olivine-woodite transformation in shear at ~18 GPa with increasing temperature. The piston was advanced with a constant rate of 200 $\mu\text{m h}^{-1}$.

5. おわりに

D111 型装置を使用することで、すでに最高圧力 27 GPa, 最高温度 1,400°C での定量的な応力・歪測定をともなった変形実験が実現されている。これにより従来の装置では調べるのが困難であった高温高圧力下での地球深部物質のレオロジーが明らかにされつつある。

D111 型装置を用いて行われたこれまでの実験では、基本的に通常の超硬合金製の二段目アンビルが用いられてきた。一方で、川井型マルチアンビル装置では二段目アンビルに焼結ダイヤモンドを用いた実験で 100 GPa を超える高圧力の発生が実現されている[11]。このため、D111 型装置と焼結ダイヤモンドアンビルを組み合わせることで、より高圧力での定量的変形実験が実現できる可能性がある。強い地震波速度異方性が存在する地球下部マントルの底部の D'' 層では、(Mg,Fe)SiO₃ ポストペロフスカイトを含む岩石が剪断変形によって結晶選択配向を起こしている可能性が議論されてきた[12]。しかし、この仮説は 135 GPa の高圧力下にある D'' 層条件での定量的応力・歪測定をともなう実験によって検証されていない。D111 型装置を用いた将来的な研究によって、この D'' 層の地震波速度異方性の成因をはじめとするマントル深部のレオロジーに関連した問題が解き明かされることが期待される。

謝 辞

D111 型装置の製作、立ち上げ作業でご協力いただいた Simon Hunt 博士、David Dobson 教授 (University College London)、大内 智博 准教授 (愛媛大学)、山本 周平 氏 (C&T ファクトリー)、鈴木 昭夫 准教授 (東北大学)、亀卦川 卓美 博士、若林 大佑 助教、船守 展正 教授 (KEK)、Fang Xu 博士 (Sorbonne Universite) に深く感謝します。本稿 4 章で紹介した研究でご支援をいただいた松影 香子 教授 (帝京科学大学)、坪川 祐美子 助教 (九州大学)、Andrew Thomson 講師 (University College London)、森 悠一郎 氏 (東京大学) に謝意を表します。この研究は科学研究費補助金、新学術領域研究 (15H05827)、基盤研究 (B) (15H03749)、基盤研究 (A) (19H00723)、基盤研究 (S) (18H05232) を受け

て行われました。匿名の査読者には本稿の改訂に際して有益なコメントをいただきました。また、本稿を執筆する機会を与えて下さった太田 健二 准教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] I. Sumita, M.I. Bergman: in *Core Dynamics*, ed. P. Olson (Elsevier, Amsterdam, 2007), *Treatise on Geophysics* Vol. 8, Chap. 10, pp. 299–318.
- [2] Y. Wang, W.B. Durham, I.C. Getting, D.J. Weidner: *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, 3002 (2003).
- [3] D. Yamazaki, S. Karato: *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 4207 (2001).
- [4] S.A. Hunt, D.J. Weidner, R.J. McCormack, M.L. Whitaker, E. Bailey, L. Li, M.T. Vaughan, D.P. Dobson: *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 085103 (2014).
- [5] 尾崎仁: 高圧力の科学と技術, **14**, 312 (2004).
- [6] S.A. Hunt, D.P. Dobson: *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 126106 (2017).
- [7] K.C. Creager: *Nature*, **356**, 309 (1992).
- [8] M. Lasbleis, R. Deguen: *Phys. Earth Planet. Inter.*, **247**, 80 (2015).
- [9] J. Girard, G. Amulele, R. Farla, A. Mohiuddin, S. Karato: *Nature*, **351**, 144 (2016).
- [10] T. Kubo, S. Kaneshima, Y. Torii, S. Yoshioka: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **278**, 12 (2009).
- [11] D. Yamazaki, E. Ito: *High Pressure Res.*, 10.1080/08957959.2019.1689975 (2020).
- [12] A. Tommasi, A. Goryaeva, P. Carrez, P. Cordier, D. Mainprice: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **492**, 35 (2018).
- [13] F.P. Bundy: *J. Appl. Phys.*, **36**, 616 (1965).
- [14] H. Morishima, T. Kato, M. Suto, E. Ohtani, S. Urakawa, W. Utsumi, O. Shimomura, T. Kikegawa: *Science*, **265**, 1202 (1994).
- [15] A. Suzuki, E. Ohtani, H. Morishima, T. Kubo, Y. Kanbe, T. Kondo, T. Okada, H. Terasaki, T. Kato, T. Kikegawa: *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 803 (2000).
- [16] T. Irifune, N. Nishiyama, K. Kuroda, T. Inoue, M. Isshiki, W. Utsumi, K. Funakoshi, S. Urakawa, T. Uchida, T. Katsura, O. Ohtaka: *Science*, **279**, 1698 (1998).
- [17] T. Tsuchiya: *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2003JB002446 (2003).

[2020 年 2 月 16 日受付, 2020 年 5 月 22 日受理]

© 2020 日本高圧力学会