

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00724

研究課題名(和文) 高圧変形実験技術の革新による地球内核の複雑な地震波構造の起源とダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Development of innovative high-pressure deformation technology toward understanding complicated seismic structure and dynamics of Earth's inner core

研究代表者

野村 龍一 (Nomura, Ryuichi)

京都大学・白眉センター・特定准教授

研究者番号：40734570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々のグループによって開発・高度化が進められている新しい超高圧変形実験装置、回転式ダイヤモンドアンビル装置と放射光X線による力学データ測定系のさらなる高度化を行った。X線ビームの極小化と抵抗加熱法により高圧高温環境下での地球構成物質の力学データの取得が可能になった。これらの開発技術を用いて、地球内核の主要構成物質である金属鉄の高圧力学データを取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球の深部は極めて高い圧力と温度が支配しており、文字通りのフロンティアで直接探査が不可能な領域です。このような「直接観る」ことが不可能な世界を理解するため、本課題では特にそのダイナミクスに焦点をあて、地球中心圧力温度環境下での地球物質の変形実験実現を目指し新しい装置を開発しました。

研究成果の概要(英文)：Technical developments on ultra-high pressure deformation experiments have been achieved toward understanding the dynamics of Earth's inner core. 1. development of a rotational diamond anvil cell and high-temperature generation, 2. measurement system of rheological properties: combined X-ray diffraction and X-ray laminography in a synchrotron facility.

研究分野：地球科学

キーワード：高圧力 高温 地球深部

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ジュール・ヴェルヌのSF小説「地底旅行」にみられるように、地球の深部はどうなっているという疑問を、人類は永年にわたり心に抱いてきた。しかし地球の内部は核-マントル境界で 136 GPa(ギガパスカル)・約 3500 K(ケルビン)、中心で 364 GPa・4500 K 以上に達する超高压力高温の世界であり、直接探査が不可能な領域である。地球深部のダイナミクス(流動)は、地震波などの間接的な観測を説明しうる様々なダイナミクスモデルを、地球深部物質の高圧物性に基き検証棄却することで制約し解明できる。しかしながら研究開始当初、変形実験による物質の流動特性(レオロジー、「動的」物性)の研究に関しては、大型変形装置(回転ドリッカマー装置や D-DIA 装置)による約 30 GPa までの実験がようやく可能になってきた程度であった。すなわち、地球最深部に存在する内核の流動特性は、低圧の実験データを 1 桁以上圧力外挿することでしか理解されていなかった。圧力誘起の結晶 c/a 軸比変化によるすべり面と選択配向の変化、高压下での金属鉄融点の不確定性に伴う、融点規格化温度(ホモロガス温度)を利用した粘性実験データの温度外挿など、実験条件の大幅な外挿は深刻な問題を内包する。そのため地球深部のダイナミクスの、実験データに基づく実証的理解は研究当初、極めて困難な状況にあった。

### 2. 研究の目的

我々のグループによって開発・高度化が進められている新しい超高压変形実験装置、回転式ダイヤモンドアンビル装置と放射光 X 線による力学データ測定系のさらなる高度化を行い、地球内核圧力温度までの定量的変形実験を可能にすることを目的とする。地球内核を構成する金属鉄の粘性と変形誘起結晶方位選択配向を実験で制約し、内核の複雑な地震波構造の起源とダイナミクスの解明を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1)超高压高温変形実験のための技術開発

##### 高压力下での変形実験技術の開発

ダイヤモンドアンビルの先端形状(大きさ、テーパ角度)を試行錯誤することにより高压での変形実験実現を目指す。研究当初は既にマルチメガバール圧力での変形実験に成功してはいたものの、その成功確率は極めて小さかった。これは従来の静的高圧実験の「押す」という機構に加えて、新たに高压試料を「回転してねじる」変形機構が加わったためだと考えられる。単結晶ダイヤモンドアンビルの先端形状最適化を第一とし、その結晶方位やナノ多結晶ダイヤモンドなどダイヤモンド素材もパラメータとして考慮し、最適化をはかる。

#### ②高压環境下での高温発生技術開発

金属線を用いたヒーターの外部設置式抵抗加熱手法、高压試料室内設置型抵抗加熱手法、赤外レーザーや炭酸ガスレーザーを用いたレーザー加熱法を導入し、実験目的・目標温度に応じて適切な加熱方式が選択可能な実験系を組み立てる。

抵抗加熱による高温高压その場環境での力学データ取得が可能な(X線測定が可能な)変形装置の設計を行う。具体的には X 線測定系に適合する真空・不活性ガスチャンバーを導入し、その内部に変形実験装置を設置する。

またレーザー加熱が可能な光学系を設計し、高压高温変形実験機構に組み入れる。

#### 高压高温変形実験下での力学データ、結晶方位選択配向測定系の開発

力学データとして、実験試料の結晶方位選択配向性およびひずみ速度、応力データの取得を行う。測定には大型放射光施設 SPring-8 の放射光 X 線を利用する。

高压下、とくにマントル最深部以深の圧力において、実験試料サイズは 100 ミクロンより小さく、さらに回転による変形実験系においては回転中心からの距離に応じてひずみ速度が変わるため、力学データ取得にはより極小の X 線ビームサイズが必要である。研究当初はスリットで半値幅約 20  $\mu\text{m}$  に切った X 線ビームを使用しており、これ以上のスリットによる極小化はビーム強度の低下を招き実現不可能であった。また高压極薄試料からの微弱な X 線回折測定において、現状の 2 次元 X 線検出器では感度とダイナミックレンジが不足している。そこで本プロジェクトにおいて、X 線ビーム極小化および高感度 X 線検出器の導入を行う。

結晶方位選択配向と応力のデータは高压高温変形その場環境での X 線回折測定によって決定し、ひずみ速度はその間に行う断続的な X 線ラミノグラフィ撮影によって試料内部に埋め込まれたひずみマーカーの 3 次元形状変化を追跡することで決定する。

## (2)内核の複雑な地震波構造の解明

(1)の実験技術によって得られた金属鉄の結晶方位選択配向、ひずみ速度と応力のデータを組み合わせることで、地球内核で観測されている地震波構造データをレオロジーの観点から解釈する。

## 4. 研究成果

### (1)超高压高温変形実験のための技術開発

高压発生に関して、ダイヤモンドアンビルの回転軸調整手法を最適化したことにより、実験の成功確率をあげることに成功した。また、地球下部マントル中部に相当する圧力までの変形実験に関しては、テーパ型アンビルを利用することで比較的安価で実験が可能になった。

②抵抗加熱による高温実験が可能な真空・不活性ガスチャンバーを導入した。冷却に伴う振動等の影響なく高温高压その場での力学データ取得が可能になった。加えて、赤外レーザー・炭酸レーザー及び輻射温度測定のための分光器を導入した。

X線用集光光学素子を導入し、高強度かつ微小のX線ビームを実現した。またX線測定・データ解析の自動化を行った。これらの成果により、変形実験という動的な実験環境において細かく時間分解された動的データの取得および膨大なデータの半自動解析が実現しつつある。

## (2)内核の複雑な地震波構造の解明

(1)の開発技術を用いて、金属鉄の結晶方位選択配向・応力とひずみ速度の力学データを取得し、データ解析を行っている。地球マントル物質に関しては一部論文としてデータを公表済みである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ishimatsu N., Iwasaki S., Kousa M., Kato S., Nakajima N., Kitamura N., Kawamura N., Mizumaki M., Kakizawa S., Nomura R., Irifune T., Sumiya H.	4. 巻 103
2. 論文標題 Elongation of Fe-Fe atomic pairs in the Invar alloy Fe65Ni35	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.L220102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 George Helffrich, Kei Hirose, Ryuichi Nomura	4. 巻 47
2. 論文標題 Thermodynamical Modeling of Liquid Fe-Si-Mg-O: Molten Magnesium Silicate Release From the Core	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL089218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020GL089218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 西原 遊, 辻野 典秀, 久保 友明, 山崎 大輔, 土居 峻太, 今村 公裕, 芳野 極	4. 巻 .30
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 高圧力の科学と技術	6. 最初と最後の頁 78-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4131/jshpreview.30.78	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M. Kousa, S. Iwasaki, N. Ishimatsu, N. Kawamura, Ryuichi Nomura, S. Kakizawa, M. Mizumaki, H. Sumiya, T. Irifune	4. 巻 40
2. 論文標題 Element-selective elastic properties of Fe65Ni35 Invar alloy and Fe72Pt28 alloy studied by Extended X-ray Absorption Fine Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 130-139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/08957959.2019.1702175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Razvan Caracas, Kei Hirose, Ryuichi Nomura, Maxim D. Ballmer	4. 巻 516
2. 論文標題 Melt?crystal density crossover in a deep magma ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 202-211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.03.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 桑原 秀治, 野村 龍一, 中田 亮一, 入船 徹男	4. 巻 29
2. 論文標題 下部マントル最上部条件におけるカンラン岩と中央海嶺玄武岩の融解関係とその部分溶融層の重力的安定性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 高圧力の科学と技術	6. 最初と最後の頁 75-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.29.75	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 I. Katayama, Y. Matsuoka, S. Azuma	4. 巻 6
2. 論文標題 Sensitivity of elastic thickness to water in the Martian lithosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-019-0298-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kubo Yusuke, Ishimatsu Naoki, Kitamura Naoto, Kawamura Naomi, Kakizawa Sho, Mizumaki Masaichiro, Nomura Ryuichi, Irifune Tetsuo, Sumiya Hitoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Visualization of the disordered structure of Fe-Ni Invar alloys by reverse monte carlo calculations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Materials	6. 最初と最後の頁 954110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmats.2022.954110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Park Yohan, Azuma Shintaro, Okazaki Keishi, Uesugi Kentaro, Yasutake Masahiro, Nishihara Yu, Nomura Ryuichi	4. 巻 49
2. 論文標題 Development of Lattice Preferred Orientations of MgO Periclase From Strain Rate Controlled Shear Deformation Experiments Under Pressure up to 120?GPa	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 100178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022GL100178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Ryuichi Nomura
2. 発表標題 Torsional deformation experiments at Mbar pressures toward understanding deep Earth rheology
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2020年度連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西原遊, 肥後祐司, 丹下慶範
2. 発表標題 高温高圧下のbcc鉄のレオロジー
3. 学会等名 第61回高圧討論
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西原遊, 肥後祐司, 丹下慶範
2. 発表標題 Rheology of bcc-iron at high-pressure and -temperature
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020:Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Azuma, R. Nomura, K. Uesugi, Y. Nishihara, T. Arimoto
2. 発表標題 Deformation experiments of bridgmanite and ferropericlaase; Implication for the strength of the subducted slab in the lower mantle.
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東真太郎, 野村龍一, 上杉健太郎, 西原遊, 土居峻太, 有本岳史, 入船徹男
2. 発表標題 下部マントルに沈み込んだ_スラフ_内レオロシ_
3. 学会等名 鉱物科学会2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東真太郎, 野村龍一, 上杉健太郎, 西原遊, 土居峻太, 有本岳史, 入船徹男
2. 発表標題 Development of the rotational diamond anvil cell for high-pressure deformation experiments and its measurement systems
3. 学会等名 日本地球惑星科学2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東真太郎, 野村龍一, 上杉健太郎, 西原遊, 土居峻太, 有本岳史, 入船徹男,
2. 発表標題 回転式ダイヤモンドアンビルセルの開発と下部マントル物質の大歪変形実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学2020年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本高圧力学会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 500
3. 書名 高圧力の科学・技術事典	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西原 遊 (Nishihara Yu) (10397036)	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授  (16301)	
研究分担者	東 真太郎 (Azuma Shintaro) (60771293)	東京工業大学・理学院・助教  (12608)	
研究分担者	上杉 健太郎 (Uesugi Kentaro) (80344399)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・分光推進室・主席 研究員  (84502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------