

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01995

研究課題名(和文)超高温・高圧条件における地球深部物質の体積熱容量計測技術の開発

研究課題名(英文)Development of volumetric heat capacity measurement for earth deep interior materials under high temperatures and pressures.

研究代表者

八木 貴志 (Yagi, Takashi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号：10415755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高温・高圧条件の体積熱容量の計測技術を開発し、地球核やマンツルの熱物性について温度軸と圧力軸の両面から依存性を明らかにすることが目的である。マンツル下部の主要鉱物と考えられるFe含有ペロブスカイトおよびポストペロブスカイト相とMgOペリクレーズ、比熱容量計測において金属反射層として重要なPt、さらに地球核の熱進化の解明に重要なhcp鉄について、超高温(最高170 GPa)・超高温(最高2900 K)における熱物性値の詳細な温度・圧力依存性を得ることに成功した。これらの成果をもとに地球核からマンツルに至る熱伝導の描像に大きな手掛かりが得られつつある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、地球の中心がどのようなになっているのか、そして過去および将来の地球がどのように変化をしていくのかを、マンツルや核の類似の条件で熱物性値を計測して解明するものです。マンツル物質や地球核と考えられる鉄の熱伝導率の計測に成功し、これらのデータは原始地球からの現在までの進化の過程やマンツル対流の解明などに貢献します。また本研究で開発した技術は、約200万気圧かつ数千ケルビンという超高温高圧で物質がどのようにふるまうかを知ることができるものであり、新物質や新物性の探索・解明に役立つことが期待できます。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a volumetric heat capacity measurement technique under high temperature and high pressure conditions, and to clarify the dependence of the thermophysical properties of the Earth's core and mantle on both the temperature and the pressure axis. Thermophysical properties of major minerals in the lower mantle (Fe-bearing perovskite, post-perovskite and MgO periclase), Pt as a metallic reflective layer important in specific heat capacity measurements, and hcp iron important in elucidating the thermal evolution of the earth's core were obtained under ultrahigh pressure (up to 170 GPa) and ultra-high temperature (up to 2900 K) conditions. Based on these results, we obtained important clues for understanding heat conduction from the Earth's core to the mantle.

研究分野：熱物性計測技術

キーワード：高圧 高温 マンツル コア 熱物性 熱伝導 比熱

1. 研究開始当初の背景

地球の中心は圧力 360 GPa、温度 5000 K 超の極限環境であり、この高温高压の核からマントル、地表へと輸送される熱流は、外核の対流によるダイナモ効果やマントル対流、プレート運動などの大規模なダイナミクスの源である。したがって、地球を構成する物質の熱物性値は、現在の地球内部の温度構造や熱輸送を解き明かすうえで極めて重要な値である。地球深部物質の研究は世界中で熾烈な競争にあるが、しばしば異なる研究グループ間で熱物性値が一致しないために大きな論争へと発展している。例えば、2016 年の Nature 誌において、本研究の分担者である太田らと Konôpková らによる地球核の熱伝導率に関する論文が同時掲載された。

両論文において核の熱伝導率を前者は 88 W/mK、後者は 18~44 W/mK と見積り、その差は実に 2~3 倍に達する。このような熱伝導率の不確かさは、これをもとにした地球の進化の描像にまで甚大な影響を与えてしまう。先の 2 論文の例を挙げれば、地球内核の誕生年代の予測は、それぞれ 7 億年前と 32 億年前と大きく異なる値が提唱されている。

このような熱伝導率値の曖昧さはなぜ生じるのであろうか？熱伝導率 k は、比熱容量 C_p 、密度 ρ および熱拡散率 α と $k = C_p \rho \alpha$ の関係にあり、それぞれが温度・圧力依存性を有する。ここで問題となるのは、比熱値には、状態方程式による推測値や第一原理による計算値を用いざるを得ないことである。またグリユナイゼン係数 γ (比熱、熱膨張係数、体積弾性率、音速により定義) による熱伝導率の外挿³も多用されているが、ここでも比熱値の曖昧さが不確かさを大きくしている。図 1 に、現在の地球内部の温度・圧力の推測を示すが、温度の不確かさは実に 1000~2000 K に及ぶ。例えば、核の温度は、比熱データがないために、内核-外核境界での鉄の融点 (T_{ICB}) と密度 (ρ_{ICB}) を定点とした単純な断熱圧縮理論により予測されているのが現状である。

このような背景のもと、申請者は、DAC 内部に封入された高温・高压下の微小材料に対する直接的な体積熱容量計測方法を提案し、これを実現することを目指す。申請者は基板上に作製された薄膜の熱拡散率を計測するためのパルス光加熱サーモフレクタンクス法を開発し、この簡易技術をこれまでにマントルの熱伝導率研究に応用してきた。元来の基礎技術では、強度変調を加えた加熱パルス光列を用いることで、基板の体積熱容量 (J/m^3K 、 C_p と ρ の積) を基準に体積熱容量を決定することが可能である。この体積熱容量計測技術について DAC 用に光学系をアレンジし適用することが可能である。

2. 研究の目的

本課題では高温・高压条件における体積熱容量の計測技術を開発し、地球核およびマントル物質の熱伝導率や体積熱容量を温度軸と圧力軸の両面から依存性を明らかにすることを目的とする。従来は推測に基づいていた地球内部の熱物性値に対し、実験的なエビデンスを得ることが可能となる。この結果、地球核からマントルに至るまでの地球内部の温度分布の精密化、地球の熱進化の過程解明、マントル対流やダイナモシミュレーションの精緻化など地球科学分野における様々

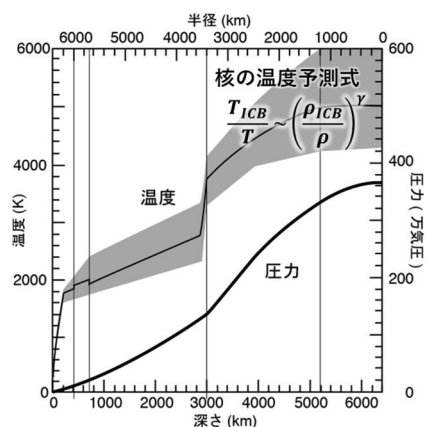


図 1 地球内部の温度・圧力構造

な課題に対し重要な貢献が期待できる。

3. 研究の方法

地球深部物質の体積熱容量の計測技術を開発する。図 2 は本計測技術の概念図である。DAC に封入された微小試料(内核を模した鉄合金など)に対し、周期的に強度変調された加熱パルス光列を照射する。試料サイズは圧力によって異なるが、200 GPa 程度では直径 30 μm 、厚さ 5 μm 程度である。この変調パルスレーザーの照射によって、図 2 上に示すように試料周囲には周期加熱による半径数 μm の熱拡散長の遅い温度振動場と、パルス加熱による同数 100 nm 程度の早い温度振動場が形成される。図 2 下は、試料表面温度の時間変化の計算例である。遅い温度振動(周期加熱)は試料とその周囲にある断熱材の体積熱容量の比に依存し、早い温度振動(パルス加熱)は主に試料の体積熱容量に依存する。したがって、長周期と短周期の温度振動の大きさを正確に計測すれば、断熱材の体積熱容量を基準として試料の体積熱容量を決定できる。開発技術は、我々が保有する高温・高圧用熱伝導率計測装置に組み入れる。本装置は、ダイヤモンド圧子を通して 20 W の連続光レーザーを試料に照射することで、2000 K 以上の高温を実現し、同時にサーモフレクタンス法による熱拡散率測定を行うものである。本研究では下部マントル候補鉱物や地球核を模した鉄合金および純鉄に対し地球深部に相当する高温高圧条件下での熱物性特性を明らかにする。

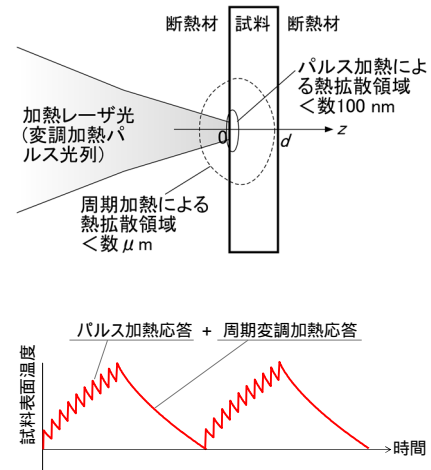


図 2 パルス加熱と周期加熱による DAC 内部の試料周囲における温度場(上図)と同試料表面温度の時間変化(下図)

4. 研究成果

体積熱容量の計測技術の開発では、レーザー光源にパルス幅 130 fs、パルス繰り返し 40 MHz、波長 1064 nm のモードロックファイバレーザーを導入し、音響光素子により 1 MHz の強度変調を加え、これを加熱光とした。一部のレーザービームを分割し、2 次高調波結晶により半波長の 532 nm に変換し、これをプローブ光とした。体積熱容量計測技術の基本でもある LHDAC とサーモフレクタンス技術を融合した熱伝導計測技術の不確かさの検証のため、Pt と Fe

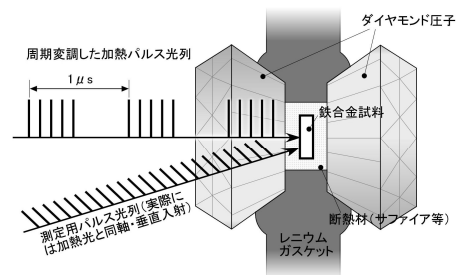


図 3 DAC 中サンプルの体積熱容量計測技術

の微小ディスクをサンプルに用いて高温高圧条件の計測を行うとともに、有限要素法によって LHDAC 中のサンプルの温度分布シミュレーションを実施し、サンプル全面にわたる温度分布の見積もりを行った。以上の結果から 2000 K、60 GPa の条件下で、試料温度の不確かさは 10% 程度であり、熱伝導率値については 15% 程度であることを明らかにした。モードロックレーザーの故障があり、当初計画より遅延したが、DAC 内部の体積比熱計測の原理の実証が完了した。

本計測技術を軸に様々な地球深部物質の熱物性の解明に取り組んだ。ここでは主要な成果について紹介する。マントル下部の主要鉱物と考えられる Fe 含有ペロブスカイトおよびポストペ

ロブスカイト相の 177 GPa までの熱伝導率を調べ、Fe イオンによる熱伝導率低下を明らかにした。図 4 に高圧下のポストペロブスカイト相の室温(上左)および高温(上右)の熱伝導計測データと DAC 解放後のサンプル断面(下左)およびマントル最下部相当の圧力におけるポストペロブスカイト相の熱伝導率の温度依存性(下右)を示す。また 0.34 μ m 程度の結晶粒径が熱伝導率に与える影響を調べ、室温において 60% 程度の減少要因になることを示した。

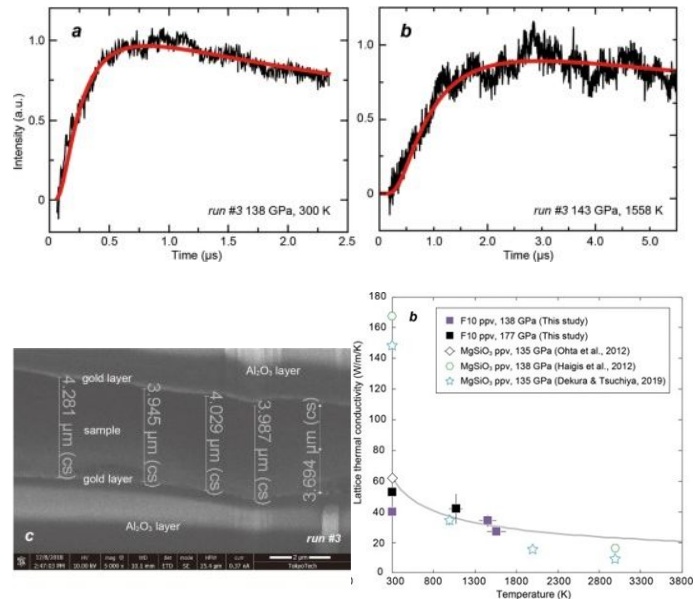


図 4 ポストペロブスカイト相の高温・高圧環境における熱伝導率計測

次に、高圧・高温における Pt および MgO ペリクレースの熱伝導率を測定した。図 5 に Pt の熱伝導率を示す。特徴的なことに Pt は正の圧力および温度依存性を示し、125 GPa、1850 K の条件で約 210 W/(m K)に達した。図 6 に示す MgO ペリクレースの熱伝導率では 140GPa、1950 K までの測定に成功した。これは地球の最下部のマントル条件に相当し、熱伝導率は約 90 W/(m K) が得られた。これらのデータは、比熱容量計測において金属反射層として重要な Pt と対象マントル物質の基準となる MgO の P-T 依存性であり、Mbar 圧力と数千ケルビン温度まで今後の計測範囲を網羅することが可能となる。

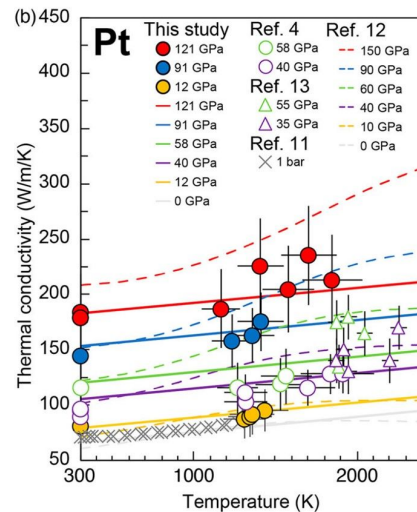


図 5 Pt の熱伝導率

地球核の熱輸送研究にも大きな進展があった。過去 10 年間にわたり、地球核の熱進化は大きな議論である。本研究では、LHDAC 内で、最大 176 GPa および 2900 K にわたって hcp 鉄の熱伝導率の測定に成功した。hcp 鉄の熱伝導率の温度依存はある圧力において符号が変化することが明らかとなり、地球核相当の条件で熱伝導率は従来予想より高くなることが示唆された。また金属において熱伝導率の温度依存性が圧力により逆転現象を示す最初の例である。本成果については、現在論文の査読対応を行っているため、詳細は割愛する。

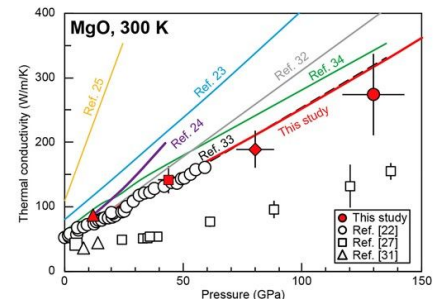


図 6 MgO の熱伝導率

本研究では、超高圧・超高温環境における熱物性のトータル計測技術により、地球深部物質の主要物質の熱物性の広範な P-T 依存性データの取得が大いに進展した。これらの成果をもとに地球核からマントルに至る熱伝導の描像に大きな手掛かりが得られつつある。一方で、主要な深部物質を網羅できているわけではなく、本研究後にも実験とデータの蓄積に取り組んでいく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okuda Yoshiyuki, Ohta Kenji, Hasegawa Akira, Yagi Takashi, Hirose Kei, Kawaguchi Saori I., Ohishi Yasuo	4. 巻 547
2. 論文標題 Thermal conductivity of Fe-bearing post-perovskite in the Earth's lowermost mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116466 ~ 116466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116466	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 Hasegawa Akira, Yagi Takashi, Ohta Kenji	4. 巻 90
2. 論文標題 Combination of pulsed light heating thermoreflectance and laser-heated diamond anvil cell for in-situ high pressure-temperature thermal diffusivity measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 074901 ~ 074901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5093343	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 Hasegawa Akira, Ohta Kenji, Yagi Takashi, Hirose Kei	4. 巻 43
2. 論文標題 Thermal conductivity of platinum and periclase under extreme conditions of pressure and temperature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 68 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2023.2193892	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 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、廣瀬敬、大石泰生、八木 貴志
2. 発表標題 地球コア相当の高圧力高温条件における鉄の熱伝導率
3. 学会等名 第42回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、廣瀬敬、大石泰生、八木 貴志
2. 発表標題 地球コア相当の高圧力高温条件における鉄の熱伝導率とローレンツ数
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、八木 貴志、廣瀬敬
2. 発表標題 Thermal Conductivity Measurement at High Pressure and High Temperature Similar to Earth's Lower Mantle Conditions
3. 学会等名 Goldschmidt2019 (Barcelona, Spain) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、八木 貴志、廣瀬敬
2. 発表標題 Thermal conductivity of MgO periclase up to 140 GPa and 2000 K
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (SanFrancisco, USA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、八木 貴志、廣瀬敬
2. 発表標題 Thermal conductivity measurements on iron and MgO periclase at high pressure and high temperature similar to the Earth's mid-lower mantle conditions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、八木 貴志、廣瀬敬
2. 発表標題 地球深部相当の高温高圧力条件下熱伝導率測定技術の開発(2)
3. 学会等名 第40回熱物性シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 暉、太田健二、八木 貴志、廣瀬敬
2. 発表標題 高温高圧力条件下におけるMgOの熱伝導率
3. 学会等名 第60回高圧討論会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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	太田 健二 (Ohta Kenji) (20727218)	東京工業大学・理学院・准教授 (12608)	

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
---------	---------