

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247075

研究課題名(和文) 極限環境の熱伝導率計測技術による地球コア内部の熱移動の解明

研究課題名(英文) Study on heat transport inside the Earth using thermal conductivity measurement technique adapted to extreme high pressure and temperature conditions

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・主任研究員

研究者番号：10415755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球のコアからマントル、地表へと流れる熱移動は、地球規模のダイナミクスを支配し、さらに地球の進化の過程を辿り形成要因を解き明かすための根源的なデータである。本研究では、超高温・高圧の極限環境に対応する熱伝導率計測技術を確立し、地球深部物質の測定結果を基に地球内部の熱移動の考察を行った。

対抗するダイヤモンド圧子の中に微小試料を挟み超高压を得るDAC技術と薄膜用の熱伝導率計測手法であるパルス光加熱サーモフレクタンス法を組み合わせた超高压・高温用の熱伝導率計測装置を新たに開発した。純鉄やマントル鉱物の熱伝導率の圧力・温度・組成依存性を網羅的に測定しコア/マントル境界における熱流量の算出を行った。

研究成果の概要(英文)：Heat transport inside the Earth is essential property which controls the rate of core heat loss and the long-term thermal evolution of the Earth, but it has been poorly constrained because of high pressure and high temperature conditions inside the Earth. In order to experimentally observe thermophysical properties of the Earth's core and mantle materials, we have developed thermal conductivity measurement apparatus based on the pulsed light heating thermoreflectance method, which was utilized diamond anvil cell technique. We observed pressure, temperature and composition dependence of thermal conductivity for core and mantle materials, such as iron, ferropericlaase, bridgmanite, MgO-FeO solid solutions and etc. These facts can reveal more exact estimation on heat flow across core-mantle boundary.

研究分野：熱物性計測

キーワード：地球物理 熱伝導 地球コア マントル 高圧 高温

1. 研究開始当初の背景

地球コアの中心は、圧力 360 GPa、温度 5000 K 超の極限的な環境にあると考えられており、コアから地表までの距離約 6400 km において巨大な熱流束を生み出している。この結果、地表面上における全熱流は約 46 TW に達し、言わば、地球そのものが巨大な熱のジェネレータである。この超高压・超高温のコアからマントル、地表へと流れる熱移動は、マントルブルームの生成やプレート移動などの地球規模のダイナミクスを解明するとともに、地球の進化の過程を辿り、現在の地球の形成要因を解き明かすための根源的なデータである。より正確に地球規模の熱移動を描写するためには、地球内部を構成する物質の熱伝導率を求めることが必要であるが、これまでは物質種類、圧力範囲および温度範囲のいずれにおいても、限られたデータが得られているに過ぎない。

2. 研究の目的

本研究では、超高温・超高压の極限環境に対応する熱伝導率計測技術を確認するとともに、地球コア物質をはじめとする各種地球深部物質の熱伝導率の圧力および温度依存性の測定を行い、ヴィーデマンフランツ則の検証および地球内部の熱移動を実験的手法により解明することを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、超高压の発生に先端の尖った 2 つのダイヤモンド圧子の間に微小な試料を挟み超高压を得るダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた (図 1)。DAC 内部に、直径約 50 μm 以下、厚さ 5 μm 以下のディスク形にした試料を封じ、ダイヤモンド圧子を透して、薄膜用の測定方法であるパルス光加熱サーモリフレクタンス法を用いる。ディスクの片面をレーザーパルスで瞬間的に加熱すると、厚さ方向に向かう熱流により、加熱と反対面の温度は熱拡散方程式に従い上昇する。この温度上昇を金属の反射率の微小な温度係数 ($10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) を利用するサーモリフレクタンス法によって検出する。温度測定用のレーザー光を加熱した面と反対側の試料面に照射し、その反射光強度を測定することで、ナノ秒オーダーの超高速の時間分解能で熱拡散現象を捉えることが可能である。

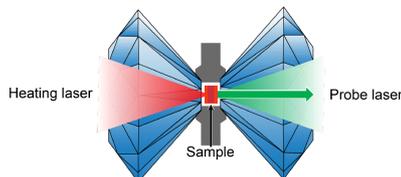


図 1 ダイヤモンドアンビルセルとサーモリフレクタンス法による熱拡散現象の観察原理

本研究では、代表者の有するサーモリフレクタンス法による熱伝導率の計測技術と、分

担者の有する超高压発生技術を融合することで、超高压・超高温の極限環境における熱伝導率測定の基盤技術を確認し、金属を対象に広く熱伝導率データを蒐集する。これにより、極限状態における金属のヴィーデマンフランツ則の検証と地球コアの熱伝導解明に注力し研究を行う。DAC の高温化技術については、世界最高記録を保持する東工大廣瀬研究室の研究協力を得る。また、極限環境における金属相の同定では高輝度光科学研究センターと研究協力を行う。

4. 研究成果

超高压超高温条件における熱伝導率計測装置の開発

本研究では、地球深部物質の熱物性の探求のため、超高压条件と超高温条件を同時に実現し、熱伝導計測を行う世界的にも類のない計測装置を開発した。図 2 に開発した計測装置のシステムを示す。図中の下部中央にある DAC に、ダイヤモンド圧子を透して左からパルス加熱用のレーザー光 (波長 1064 nm、パルス幅 1 ns) を試料に照射する。パルス光によって加熱された試料の温度変化は、DAC 左側からサーモリフレクタンス測定用の連続光レーザー光 (波長 532 nm) を照射し、その反射光を高速フォトディテクタで検出し、最終的にオシロスコープによって温度 - 時間曲線を測定する。高温条件での測定では、別の高出力連続光レーザービーム (波長 1064 nm、出力 20 W) を、それぞれの熱伝導測定用のレーザービームに対し同軸化して、すべてのレーザーを同時にサンプルに照射する。高出力連続光レーザーの照射により、サンプルの照射面における温度を 2000 K 以上に昇温することが可能である。図 3 に測定時の DAC 内部における各レーザー照射状況と、高温条件での測定中における DAC 外観の様子を示す。加熱中のサンプルの温度の測定には、サンプルから発光する輻射光スペクトルを用いた。DAC 左側のダイヤモンド圧子から輻射光を取り出し、輻射光は集光光学系を通過してダイクロイックミラーによりレーザービームから 90 度の方向に分離される。分離した輻射光は、計測装置で使用するレーザー波長の 532 nm と 1064 nm をカットするダブルノッチフィルタを通して冷却 CCD 分光器に導入され、そのスペクトルが測定される。図 4 は、圧力 105 GPa、温度 1630 K の条件において Pt 試料の輻射スペクトル (a) とパルス加熱後の温度 - 時間曲線 (b) の例である。輻射スペクトルは、通過する光学系の吸収特性を基に補正されたものであり、これをプランク則に則りフィッティングをすることでサンプル面の温度が決定される。温度 - 時間曲線は、横軸の時刻 0 において、Pt 試料の片面にパルス幅 1 ns のレーザー光により瞬間加熱された後の、試料反対面の温度変化をサーモリフレクタンス法により捉えたものである。これを DAC 内部の形状を境界条件とした熱伝導方程式によ

て解析し、熱伝導率が決定される。

開発した超高温・高圧の極限環境に対応する熱伝導計測技術により、従来技術では到達できなかった地球深部環境における様々な物質の熱伝導特性の測定が可能となり、これにより地球内部のダイナミックな熱移動の解明への貢献が期待される。

図2 超高温超高温条件における熱伝導率計測装置のシステム図

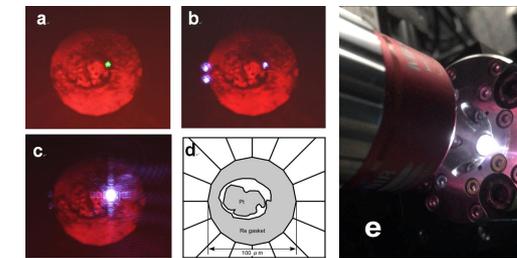


図3 測定時におけるDAC試料の様子 (a) 試料にサーモフレクタンス計測用(温度測定)レーザを照射したときのDAC内部写真 (b) 同じくパルス加熱用レーザを試料背面から照射 (c) 試料の高温化のための高出力連続光加熱レーザを試料両面から照射 (d) 超高温加熱時のDACの写真。高温となった試料からの輻射光がダイヤモンド圧子を透して観察される。

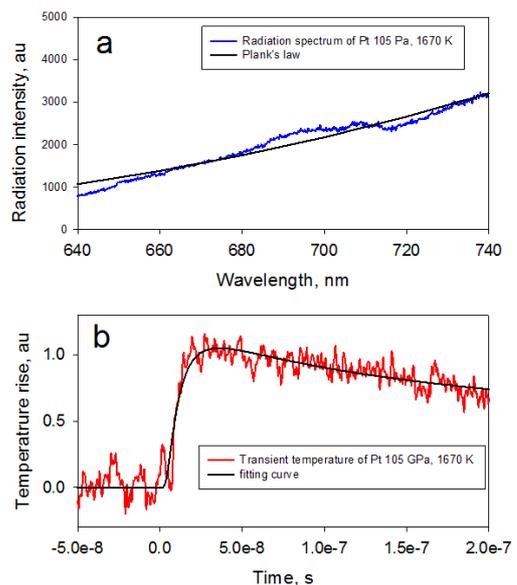


図4 圧力105 GPa、温度1630 Kにおいて測定したPt試料の(a)パルス加熱後の輻射スペクトルと(b)温度-時間曲線

各種金属およびマントル物質の熱物性評価と地球深部の熱移動の推定

本研究では、超高温・高圧用の熱伝導計測技術を軸に、様々な地球深部物質の熱物性の解明を実施した。ここではいくつかの代表的な成果を示す。

地球核物質の熱物性値とローレンツ数

図5は、内核および外核の主要構成物質である純鉄について、40 GPaにおける熱伝導率と温度との関係を示したものである。純鉄の熱伝導率は、温度とともに減少し、その傾向はKonopkovaらの報告値と整合するが、電気伝導率から換算した値とは数倍の違いがあることが明らかになった。このことは、熱伝導率と電気伝導率が比例関係にあるとするウィーデマンフランツ則に基づくと、図6に示すように比例定数であるローレンツ数が高圧においては50%以上減少する可能性を示唆している。一方、純鉄は、常圧の安定相のbccから、40 GPa以上でhcp相に相転移し、hcp相は電気伝導率と熱伝導率に対し異方性を有する可能性もある。この異方性の影響については、現在さらに研究を進めているところである。我々の実測の熱伝導率値を基に推定した核/マントル境界条件における熱伝導率はおよそ60~70 W/mKであり、同境界における熱流量は7~11 TWが見込まれる。

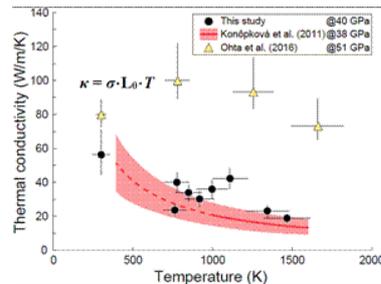


図5 純鉄の熱伝導率の圧力依存性

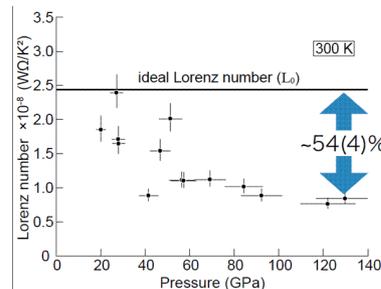


図6 純鉄のローレンツ数の圧力依存性

マントル物質の熱伝導率 圧力依存性

地球コアから地表面までの熱移動の解明においては、中間に位置するマントル物質の熱物性値も重要なデータである。本研究では、マントルの主要物質に対する網羅的な評価を行った。以下に代表的な測定データを示す。

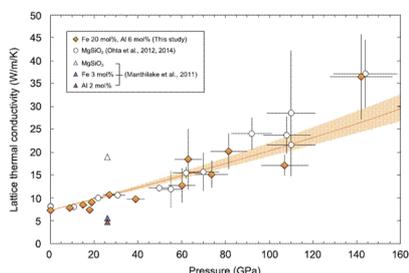


図7 Bridgmaniteの熱伝導率 圧力依存性

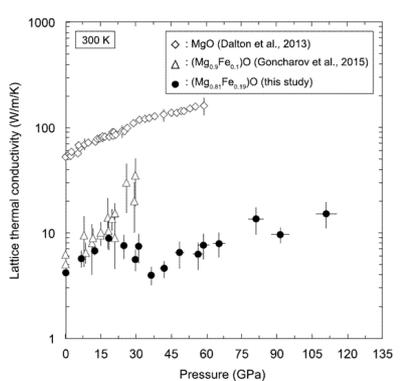


図8 フェロペリクレスの熱伝導率 圧力依存性

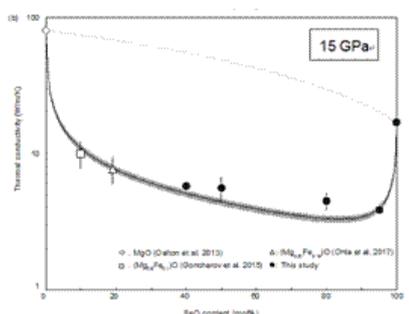


図9 MgO-FeO 固溶体の熱伝導率 (15 GPa) - 組成依存性

地球核物質やマントル物質の組成条件は今なお多くの議論がなされている。我々は、物質・組成・相条件を変更しつつ熱物性評価を継続しており、これらのデータによってより緻密な地球全体の熱移動の描写に近づくことを目指している。

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5件)

Tatsuya Wakamatsu, Kenji Ohta, Takashi Yagi, Kei Hirose, Yasuo Ohishi, "Measurements of sound velocity in iron-nickel alloys by femtosecond laser pulses in a diamond anvil cell", *Physics and Chemistry of Minerals*, (2018)

DOI: 10.1007/s00269-018-0944-3

Yoshiyuki Okuda, Kenji Ohta, Takashi

Yagi, Ryosuke Sinmyo, Tatsuya Wakamatsu, Kei Hirose, Yasuo Ohishi, "The effect of iron and aluminum incorporation on lattice thermal conductivity of bridgmanite at the Earth's lower mantle", *Earth and Planetary Science Letters* 474 25-31, (2017)

DOI: 10.1016/j.epsl.2017.06.022

Kenji Ohta, Takashi Yagi, Kei Hirose, Yasuo Ohishi, "Thermal conductivity of ferropericlasite in the Earth's lower mantle", *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 29-37, (2017)

Saori Imada, Kenji Ohta, Takashi Yagi, Kei Hirose, Hideto Yoshida, Hiroko Nagahara, "Measurements of lattice thermal conductivity of MgO to core-mantle boundary pressures", *Geophysical Research Letters* 41(13) 4542-4547, (2014)

DOI: 10.1002/2014GL060423

太田 健二, 八木 貴志, 廣瀬 敬, "パルス光加熱サーモフレクタンズ法を用いた高圧力下での下部マントル鉱物の格子熱伝導率測定", 24 巻 2 号 p. 118-125(2014)

DOI:10.4131/jshpreview.24.118

[学会発表](計10件)

A. Hasegawa, K. Ohta, T. Yagi, K. Hirose, T. Kondo, "Lattice thermal conductivity of (Mg, Fe)O magnesiowustite", JpGU-AGU Joint Meeting (2017, Chiba, Japan)

A. Hasegawa, K. Ohta, T. Yagi, K. Hirose, T. Kondo, "Lattice thermal conductivity of (Mg, Fe)O solid solutions", 9th High pressure mineral Physics Seminar, (2017, Saint Malo, France)

長谷川暉、太田健二、八木貴志、廣瀬敬、近藤忠, "(Mg, Fe)O magnesiowustite の格子熱伝導率", 第 58 回高圧討論会 (2017 名古屋)

若松達也、太田健二、八木貴志 "フェムト秒パルスレーザーを用いた地球深部物質の高圧下弾性波速度測定", 第 57 回高圧討論会 (2016 つくば)

末広翔、太田健二、八木貴志、廣瀬敬 "高温高圧下における鉄の電気・熱伝導率の同時測定", 第 57 回高圧討論会 (2016 つくば)

太田健二、八木貴志、廣瀬敬 "(Mg, Fe)O フェロペリクレスの熱伝導率" 第 57 回高圧討論会 (2016 つくば)

奥田善之、太田健二、八木貴志、新名良介、廣瀬敬 "ブリッジマナイトの格子熱伝導率" 第 57 回高圧討論会 (2016 つくば)

八木貴志、太田健二 "ダイヤモンドアンビルセルを用いた超高压高温用の熱拡散率測定装置の開発" 第 36 回日本熱物性シン

ポジウム, (2015 仙台)

太田健二、八木貴志、廣瀬敬、清水克哉、
桑山靖弘、大石泰生, “ マルチメガバール条
件下で地球深部物質の電気・熱伝導率を測
る ” 第 56 回高圧討論会 (2015 広島)

K.Ohta, Y.Kuyawaya, K.Shimizu, T.Yagi,
K.Hirose, Y.Ohishi, “ Measurements of
electrical and thermal conductivity of
iron under Earth’s core conditions ”,
American Geophysical Union, 2014 Fall
meeting, (2014, San Francisco, USA)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

八木 貴志 (YAGI, Takashi)
産業技術総合研究所・物質計測標準研究部
門・主任研究員
研究者番号 : 10415755

(2)研究分担者

太田 健二 (OHTA Kenji)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号 : 20727218