

令和 2 年 4 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04861

研究課題名(和文) 高温高压実験で探る地球中心核の熱伝導率と地球熱進化

研究課題名(英文) Thermal Conductivity and Evolution of the Earth's Core Explored in High-Temperature and High-Pressure Experiments

研究代表者

太田 健二(Ohta, Kenji)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：20727218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,300,000円

研究成果の概要(和文)：熱伝導率は地球内部の温度構造と熱進化を探索するための基礎的な物理量であるにも関わらず、実際の地球中心核の温度圧力条件での測定例は殆ど存在しない。本研究の目的は、地球の核を構成する鉄-軽元素合金の熱伝導率を実際の地球中心核の温度圧力条件で実測することである。代表者が開発・実用化した高压下その場熱伝導率測定法と核条件に相当する高温の発生技術を組み合わせることで、地球中心核条件での鉄および鉄合金の熱伝導率測定が可能になった。また、正確な熱伝導率決定のために、高压その場における試料のX線3次元形状観察手法の確立がなされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題によって地球マントル、中心核条件での物質の熱伝導率測定手法が確立した。今後、この手法をもちいて地球・惑星深部物質の熱物性が広く計測されていくことで、惑星内部の温度構造や熱進化への理解が大きく進むと期待される。極限環境下での物質の熱物性測定法は高機能材料の開発や物性物理理論の検証などの他分野での応用も大いに期待が持てる。

本課題によって、鉄の高压相の伝導率には結晶方位異方性があることや、溶融鉄の伝導率測定の高難度が浮き彫りにされた。地球中心核は液体、固体の2層構造を成しており、核の熱進化のさらなる理解のために取り組むべき新たなテーマが明らかにされたことも成果の一つと言える。

研究成果の概要(英文)：Although thermal conductivity is a fundamental physical property for investigating the temperature structure and thermal evolution of the Earth's interior, there are few actual examples of measurements under the temperature and pressure conditions of the Earth's core. The purpose of this study is to measure the thermal conductivity of iron-light element alloys under the temperature and pressure conditions of the core. The combination of the in-situ thermal conductivity measurement method under high pressure developed and put into practical use by the PI and the high temperature generation technology corresponding to the core condition made it possible to measure the thermal conductivity of iron and iron alloys under the Earth's core condition. To determine the thermal conductivity accurately, a method of observing the three-dimensional shape of a sample at high pressure in situ was also established.

研究分野：高压地球惑星科学

キーワード：地球中心核 熱伝導率 鉄合金 高温高压実験

1. 研究開始当初の背景

地球の熱進化とは地球形成時に内部に蓄えられた熱を地表へと放出する過程とも言い換えることができる。核は地球内部で最も高温の領域であり、最大の熱源である。この核からマントル、地殻へと流れる熱流量を決定することは、マントル上昇流やプレート運動などのダイナミクスの解明や、地球の熱進化過程を辿り現在の地球の形成要因を解き明かすための重要な研究である。核の熱伝導率はその地球内部を貫く熱流量を大きく支配する物理量である。核は融体金属からなる外核(圧力 135~330 GPa、温度 3800~5000 K)と、固体金属からなる内核(圧力 330~360 GPa、温度 5000~6000 K)で構成されている。核を構成する物質は鉄に少量のニッケルと軽元素を含む合金であることは知られているが、実際の化学組成は未だ不明である。核のような金属中の自由電子による熱伝導率は Wiedemann-Franz 則 (WF 則) ($\kappa = \sigma LT$; κ は電子熱伝導率、 σ は電気伝導率、 L はローレンツ定数、 T は絶対温度)によって電気伝導率と温度の関係式となっている。

地球中心核に相当する温度圧力条件下での金属の熱伝導率や電気伝導率はその温度圧力の高さゆえに直接測定が非常に難しい。そのため、高圧実験による核の熱伝導率推定は、伝統的に、鉄-珪素合金などの電気伝導率を 100 GPa に満たない圧力かつ室温下で測定し、核の温度・圧力条件までの外挿を行った電気伝導率値に、WF 則などの諸理論を適用してなされていた (Gomi et al., 2013 Physics of Earth and Planetary Interiors)。核条件での鉄合金の熱伝導率の理論計算も近年可能となり、核の熱伝導率はこれまで信じられていた推定値の 3 倍以上高い可能性が論じられるようになった。もしも、核の熱伝導率が 3 倍高いと、核からマントルへの熱輸送量(核の冷却速度)は約 3 倍上昇し、初期地球内部の温度は現在よりもはるかに高くなければならない。また、内核成長速度も速まるため、内核の形成開始年代が若返る。このように、核の熱伝導率は初期地球の様相や熱進化に関する我々の認識を大きく変える可能性を秘めた物性値である。そのため、核を構成する物質の熱伝導率を実際の核の温度圧力条件下で実測することが必要である。

代表者は科研費若手研究 A として採択された課題(2014~2016 年度)において、地球中心核に相当する超高温超高压条件下での鉄合金の電気伝導率測定を可能にする技術開発を行った。その技術を用いて、純鉄の電気伝導率を地球中心核と同様の温度圧力条件下で測定することに世界で初めて成功した (Ohta et al., 2016 Nature)。得られた電気伝導率と WF 則から地球中心核の熱伝導率の推定を行った。得られた結果は前述の研究と整合的であった。つまり、核の熱伝導率は高く、初期地球はマントルが全溶融するほどに高温で、内核は約 7 億年前に誕生した可能性が高い。ところが、代表者の論文と同号に掲載された研究結果 (Konopkova et al., 2016 Nature) では、核条件下での鉄の熱伝導率を高温高压実験から決定し、代表者の結果よりも約 70% 低い核の熱伝導率を報告した。低い核の熱伝導率では初期地球内部の温度は現在と殆ど変わらず、内核の誕生時期は地球磁場の誕生時期に近づき、約 32 億年前と推定される。では、高温高压実験を用いた核の熱伝導率の推定にこれほどの違いが生じた原因は何か? 次の 2 点が考えられる。

1. WF 則は常圧条件下で確立された理論であるために、地球中心核のような極限温度圧力環境下では修正が必要。そのため、Ohta et al. (2016 Nature) のような電気伝導率測定からの熱伝導率推定に不確かさがある。
2. Konopkova et al. (2016 Nature) は高温高压状態の鉄の冷却過程を観察し、その過程を鉄の熱伝導率を変数とした数値シミュレーションで再現するという手法である。そのため、熱伝導率を実測しているとは言えず、シミュレーションに用いる他の変数の影響を大きく受けている。

2. 研究の目的

本研究課題は、上記の 2 仮説を検証し、地球中心核の熱伝導率を確度・精度良く決定することを目的としていた。

3. 研究の方法

目的の達成のために、核に相当する温度圧力条件下での鉄合金(純鉄、鉄-ニッケル合金、鉄-軽元素合金)の熱伝導率測定実験を行う。外核は熔融金属からなるため、融解が鉄合金の熱伝導率に与える影響も調べる。また、若手研究 A 課題として参画中であった地球中心核物質の電気伝導率測定と同じ試料を用いて実験を行うことで、両物性データを直接比較し、地球深部のような極限温度圧力条件下に適応可能な修正版 WF 則を提案する。得られた実験結果を基に地球内部の熱伝導率構造を明らかにし、初期地球内部環境と内核の誕生時期などの地球の熱進化を明らかにすることが本研究が 2017~2019 年度の 3 年間に及ぶ本課題で目指す到達点であった。

研究の進め方として、代表者がこれまでに培った高圧下その場熱伝導率測定手法と、微小物質の非破壊形状観察の最新手法である放射光 X 線ラミノグラフィ法を組み合わせ、様々な化学組成の鉄-軽元素合金を対象に広い温度圧力範囲における高確度かつ高精度の熱伝導率デー

データを蒐集する。これにより、各種金属の熱伝導率の圧力・温度依存性や融解の影響を明らかにする。実験の大半は代表者の所属機関で行い、高温高圧下での試料合成や X 線ラミノグラフィーは大型放射光施設 SPring-8 で行う。得られた実験データを用いて、WF 則の高温高圧下での妥当性の検証、地球内部熱伝導率構造の推定、初期地球内部環境や地球熱進化の推定を行う。

4 . 研究成果

この研究課題では、代表者が開発・実用化を行った高圧下その場熱伝導率測定法(TR 法)と核条件に相当する高温の発生技術を組み合わせることで、地球中心核条件での鉄および鉄合金の熱伝導率測定を行う計画であった。また、正確な熱伝導率決定のために、SPring-8 における X 線ラミノグラフィーシステムを高圧構造物性ビームライン BL10XU に新たに立ち上げることで、これにより、各種鉄合金に対する熱伝導率の圧力・温度依存性と融解の影響を調べ、地球中心核の熱伝導率を制約することが主な目的であった。

3 年間の課題期間の約半分が終了した時点で得られた成果または新たな知見は以下の 3 つであった。

- A. レーザー加熱及び内部抵抗加熱法の 2 種類の高温発生法と TR 法を組み合わせた高温高圧下熱伝導率測定がルーチン化したことに加え(Hasegawa, Yagi & Ohta, 2019 Review of Scientific Instruments; Suehiro, Ohta et al., 2019 High Pressure Research)、BL10XU におけるラミノグラフィーを用いた形状測定システムの構築もほぼ完了した。
- B. 六方最密充填(hcp)構造の純鉄の熱伝導率測定を高圧下で行うことで、hcp 鉄の熱伝導率には他の hcp 金属よりも強い結晶方位異方性があることがわかった(Ohta et al., 2018 Frontiers in Earth Science)。
- C. 鉄試料の融解に伴う形状変形が大きく、液体鉄の伝導率測定のためには融解による試料変形を最小限に留めるための試料室構成の工夫が必要であることがわかった。

A の成果によって、熱伝導率測定に関する技術開発がほぼ完了し、対象とする核候補物質の熱物性データの蒐集を集中的に行うことが出来る段階に入った。しかし、B の hcp 鉄の熱伝導率異方性発見の成果から、固体鉄合金の熱伝導率決定に際しては、XRD 測定による試料の選択配向評価も同時に行う必要性が生じた。つまり、実験ごとに放射光施設の利用が必須で、1 データの取得に要する期間が増す。また、C の知見により、液体鉄合金の伝導率測定実験をルーチン化するための技術開発期間が更に必要となった。

以上を考慮して、当初計画を残り 1 年半で完遂することは非常に困難であるという結論に達したため、研究計画最終年度前年度応募制度を利用し、基盤 A 課題への発展課題の申請を行った。無事に採択された基盤 A 課題で提案するテーマを 2019 年度からの 4 年間で取り組むことで、本課題当初の研究計画を達成することが出来るだけでなく、内核の流動性といった地球深部のレオロジカルな問題に対して高圧実験学と同位体分析科学を組み合わせたアプローチ手段を見出すことが出来ることを期待している。

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 2件）

1. 著者名 Suehiro Sho, Wakamatsu Tatsuya, Ohta Kenji, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 39
2. 論文標題 High-temperature electrical resistivity measurements of hcp iron to Mbar pressure in an internally resistive heated diamond anvil cell	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 579 ~ 587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2019.1692008	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ohta Kenji, Suehiro Sho, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 351
2. 論文標題 Electrical resistivity of fcc phase iron hydrides at high pressures and temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Comptes Rendus Geoscience	6. 最初と最後の頁 147 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.crte.2018.05.004	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 Ohta Kenji, Nishihara Yu, Sato Yuki, Hirose Kei, Yagi Takashi, Kawaguchi Saori I., Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 6
2. 論文標題 An Experimental Examination of Thermal Conductivity Anisotropy in hcp Iron	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2018.00176	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 Wakamatsu Tatsuya, Ohta Kenji, Yagi Takashi, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 45
2. 論文標題 Measurements of sound velocity in iron?nickel alloys by femtosecond laser pulses in a diamond anvil cell	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 589 ~ 595
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-018-0944-3	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 Suehiro Sho, Ohta Kenji, Hirose Kei, Morard Guillaume, Ohishi Yasuo	4. 巻 44
2. 論文標題 The influence of sulfur on the electrical resistivity of hcp iron: Implications for the core conductivity of Mars and Earth	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 8254 ~ 8259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL074021	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 Okuda Yoshiyuki, Ohta Kenji, Yagi Takashi, Sinmyo Ryosuke, Wakamatsu Tatsuya, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 474
2. 論文標題 The effect of iron and aluminum incorporation on lattice thermal conductivity of bridgmanite at the Earth's lower mantle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 25 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.06.022	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 Wakamatsu Tatsuya, Ohta Kenji, Yagi Takashi, Hirose Kei, Ohishi Yasuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurements of sound velocity in iron?nickel alloys by femtosecond laser pulses in a diamond anvil cell	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	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) 10.1007/s00269-018-0944-3	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 Matsuoka Takahiro, Kuno Keiji, Ohta Kenji, Sakata Masafumi, Nakamoto Yuki, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo, Shimizu Katsuya, Kume Tetsuji, Sasaki Shigeo	4. 巻 48
2. 論文標題 Lithium polyhydrides synthesized under high pressure and high temperature	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 1222 ~ 1228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jrs.5183	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14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Ohta, K., Suehiro, S., Hirose, K., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Electrical resistivity of fcc phase iron hydrides at high pressures and temperatures
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suehiro, S., Ohta, K., Hasegawa, A., Yagi, T., Hirose, K.
2. 発表標題 Simultaneous measurements of electrical and thermal conductivity of iron at high pressure and temperature in an internal heating method
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hasegawa, A., Yagi, T., Ohta, K., Hirose, K.
2. 発表標題 Thermal conductivity measurement under high pressure and high temperature conditions
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ohta, K.
2. 発表標題 Experimental determination of the thermal and electrical conductivity of iron at Earth's core conditions
3. 学会等名 High Pressure Research at Gordon Research Conference 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ohta, K., Suehiro, S.
2. 発表標題 Experimentally inferred thermal conductivity of planetary cores
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ohta, K., Nishihara, Y., Sato, Y., Hirose, K., Yagi, T., Kawaguchi, S., Hirao, N., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Anisotropic thermal conductivity of hcp iron and the implications for the Earth's inner core
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Inoue, H., Suehiro, S., Ohta, K., Hirose, K., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Electrical resistivity of hcp Fe-Si alloy at high pressure and temperature
3. 学会等名 AGU 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suehiro, S., Ohta, K., Hirose, K., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Measurement of electrical conductivity of iron at high pressure and temperature in an internally-heated diamond anvil cell
3. 学会等名 AGU 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tagawa, S., Ohta, K., Yagi, T., Hirose, K., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Formation of non-stoichiometric fcc and hcp Fe _x at high pressure and temperature conditions
3. 学会等名 High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hasegawa, A., Ohta, K., Yagi, T., Hirose, K., Kondo, T.
2. 発表標題 Lattice thermal conductivity of (Mg,Fe)O solid solutions
3. 学会等名 High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Suehiro, S., Ohta, K., Hirose, K., Morard, G., Ohishi, Y.
2. 発表標題 The influence of sulfur on the electrical resistivity of hcp iron: implications for the core conductivity of Mars and Earth
3. 学会等名 High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wakamatsu, T., Ohta, K., Yagi, T., Hirose, K., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Measurements of sound velocity in iron-nickel alloys by femtosecond laser pulses in a diamond anvil cell
3. 学会等名 High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Okuda, Y., Ohta, K., Yagi, T., Sinmyo, R., Wakamatsu, T., Hirose, K.
2. 発表標題 Compressional and pressure-temperature dependence of the thermal conductivity of bridgmanite
3. 学会等名 High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ohta, K., Sato, Y., Nishihara, Y., Yagi, T., Hirose, K., Kawaguchi, S., Hirao, N., Ohishi, Y.
2. 発表標題 Is thermal conductivity of hcp iron anisotropic?
3. 学会等名 High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者の個人ホームページ https://sites.google.com/view/kenji-ohta Researchmap ID https://researchmap.jp/7000018082
--

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