

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707029

研究課題名(和文)地球中心核の伝導特性の解明

研究課題名(英文)Electrical and thermal conduction properties of Earth's core

研究代表者

太田 健二(Kenji, Ohta)

東京工業大学・理学院・講師

研究者番号：20727218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：電気伝導度・熱伝導率は地球内部の温度構造と熱進化を知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条件での測定例は殆ど存在しない。本研究の目的は高温高圧実験によって地球の核を構成する鉄・軽元素合金の電気伝導度測定を実際の地球中心核の温度圧力条件で行い、地球中心核の電気伝導度及び熱伝導率構造を明らかにすることであった。技術の開発を経て、実際の地球中心核の温度圧力条件における純鉄の電気伝導度を測定することに成功した。また、硫黄、水素の固溶が鉄の電気伝導度を与える影響も実験から明らかにした。本研究によって得られた結果は地球及び地球型岩石惑星の熱進化を考える上で重要な情報となるだろう。

研究成果の概要(英文)：Electrical and thermal conductivities are fundamental physical properties to know thermal structure and evolution of Earth's interior. However, there is few report regarding the conductivity measurements under the Earth's core conditions. The purpose of this study is to measure the electrical conductivity of iron-light element alloys that may consist of the Earth's core under very high pressures and temperatures, and to reveal electrical and thermal conductivity profile of the Earth. After some technical developments, we succeeded to measure the electrical conductivity of iron at the core conditions. In addition, we revealed the effect of sulfur and hydrogen incorporation on the conductivity of iron at high pressure and temperature conditions. The findings in this study will be a fundamental information to consider thermal structure and evolution of Earth and other terrestrial planets.

研究分野：高圧地球惑星科学

キーワード：地球中心核 鉄合金 電気伝導度 熱伝導率 高温高圧実験

1. 研究開始当初の背景

超高温の地球中心から地表までの間に存在する大きな熱勾配は融体金属からなる地球外核とマントルの対流を引き起こし、地磁気の生成やプレート運動などの地球のダイナミズムの原動力となっている。地球中心核を構成する物質は純鉄に少量のニッケルと軽元素(水素、ケイ素、酸素、硫黄、炭素など)を含む合金であることは知られているが、実際の外核、内核の組成は未だ不明である。電気伝導度・熱伝導率は地球内部の熱構造と熱進化を知るための基礎的な物理量であるにも関わらず、実際の地球中心核に相当する温度圧力条件で測定された例は殆ど存在しない。

近年、理論計算と高圧実験の両方の研究によって、地球中心核の電気伝導度および熱伝導率はこれまでの推定値よりもおよそ3倍近く高いことが提唱された[1-3]。核の伝導率の大幅な上方修正は地球の熱史や地球内部構造に関する我々の理解を大きく変えつつあった。しかし、高圧実験による鉄—軽元素合金の電気伝導度測定の温度圧力条件は実際の核の条件(135 GPa, 4000 K以上)には遥かに及ばない条件(100 GPa, 380 Kまで)での固体金属に対する実験が大多数であった[3,4,5]。そのため、地球中心核の温度圧力条件に相当する超高温超高压下での鉄—軽元素合金の電気伝導度の温度・圧力依存性や軽元素固溶の効果、融解の影響などは未だよくわかっておらず、熱伝導率推定値には大きな不確かさが伴っていた。以上の研究背景から、実際の地球中心核の条件での鉄合金の伝導率測定実験が必要であると考えた。

2. 研究の目的

高温高圧実験によって地球の核を構成する鉄—軽元素合金の電気伝導度測定を実際の地球中心核の温度圧力条件で行う。金属の電気伝導度と電子による熱伝導率の間に成り立つ、ヴィーデマン—フランツ則を用いることで、地球中心核の熱伝導率構造も明らかにする。目的の達成のための通過点として、以下の4つの小目標を設定し、研究を行った。

- ・地球中心核条件における金属の電気伝導度測定技術の確立(電気伝導度測定のための微小回路の作成と安定した超高温発生技術の開発)。
- ・各種鉄合金の電気伝導度の圧力、温度、不純物含有量依存性の解明。
- ・鉄合金の相転移が電気伝導度に与える影響を明らかにする。
- ・地球中心核の電気伝導度・熱伝導率構造の推定から地球の熱進化過程に制約を与える。

3. 研究の方法

研究代表者が有する高温高圧下その場電気伝導度測定手法を更に高温高圧下でも可能にする技術開発を行い、様々な化学組成の

鉄—軽元素合金を対象に広くデータを蒐集する。これにより、各種金属の電気伝導度の圧力・温度依存性、構造相転移や融解の影響を明らかにすることを目指した。

4. 研究成果

(1) 地球中心核条件における純鉄の電気抵抗率の決定(Ohta et al., 2016 Nature [6])

135 GPa, 4000 Kを超える地球中心核の条件において純鉄の電気伝導度を測定するためには高温高圧発生装置の中に封入された試料に微細な電気回路配線を施す必要がある。そこで、研究代表者は集束イオンビーム装置(FIB)を試料成型及び電気回路作成に用いることで、画一形状の鉄試料及び電気回路を高圧装置内部に組み込む技術を確立した。この技術開発によって地球中心核条件での鉄の電気伝導度測定が可能になっただけでなく、実験ごとに全く同じ形状の試料を作ることが出来るために実験の再現性も格段に向上した。

上述した技術を導入し、まずは地球中心核の主成分である純鉄の電気抵抗率測定を212 GPa, 4500 Kまでの温度圧力条件で行った。26, 51 GPaで行った高温高圧下電気抵抗率測定では純鉄が六方最密充填構造(ϵ 鉄)から面心立方構造(γ 鉄)へ相転移する際に電気抵抗率が急激に上昇することを確認した。また、更に加熱し、 γ 鉄を融解させることで鉄の伝導率は20%程度悪くなることも確認できた。更に高圧、地球中心核に相当する圧力での鉄の電気伝導度測定では、内核の結晶構造と考えられる ϵ 鉄の電気伝導度の圧力、温度依存性を広い温度圧力条件で制約することが出来た。得られた鉄の電気伝導度からヴィーデマン—フランツ則を用いて計算した純鉄の熱伝導率は近年提唱されている高い核の熱伝導率と調和的であり、地球内部では非常に活発な熱輸送が行われていることを示唆している。

本研究成果は地球中心核の温度圧力条件で純鉄の電気伝導度を測定することに世界で初めて成功したという点で非常にインパクトのある結果といえる。この結果から導き出される活発な核の熱移動は地球の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ている。しかし、本成果と同時期に発表された論文では、純鉄の熱伝導率を地球中心核の条件で測定し、本成果と異なる結論を得ている[7]。このことは純鉄に対するヴィーデマン—フランツ則が高圧下で破綻している可能性を示唆しており、今後の研究が待たれる。

(2) 硫黄、水素の固溶が鉄の伝導率に与える影響(Suehiro et al., under review; Ohta et al., in prep.)

地球中心核は鉄の他にケイ素、硫黄、水素などの軽元素も含むことがわかっており、これらの軽元素が鉄の伝導率に与える影響を

調べることは核の伝導率を推定する上で非常に重要である。ケイ素は鉄中に多量に固溶し、単成分合金を作成するのが容易であるため、鉄-ケイ素合金の電気伝導度測定例は多く存在する[3,4,8]。しかし、その他の軽元素候補と鉄は多成分合金となることが多いために、軽元素固溶が純鉄の伝導率に与える影響を調べることは困難であった。そのため、鉄-硫黄合金と鉄-水素合金の電気伝導度測定例はこれまで殆ど存在しない。

我々の研究グループは鉄水素合金の高圧実験を行うための技術開発を数年前から行っており、地球中心核の条件で鉄-水素合金の実験を行うことに成功している[9]。この手法を利用し、鉄-水素合金の電気伝導度を 56 GPa, 1800 K まで測定することに成功した。測定した鉄-水素合金の電気伝導度は純鉄のそれと殆ど変化がなく、水素の固溶効果は無視できる程に小さいといえる。また、硫黄に関しても、六方最密充填構造の Fe-S 合金の合成条件を見出し、Fe-S 合金の電気伝導度測定を 110 GPa まで行うことに成功した。この結果から硫黄の固溶効果はケイ素のそれよりも小さいことがわかった。

本研究課題の遂行によって、純鉄の電気伝導度の圧力、温度、相変化に対する挙動を従来の研究よりも広い温度圧力範囲において明らかにすることが出来た。また、これまで未知であった、硫黄、水素の固溶が鉄の電気伝導度に与える影響に関する理解も進んだといえる。

<引用文献>

- [1] de Koker *et al.*, Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid Fe alloys at high P and T , and heat flux in Earth's core, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **109**, 4070–4073, 2012.
- [2] Pozzo *et al.*, Thermal and electrical conductivity of iron at Earth's core conditions, *Nature*, **485**, 355–358, 2012.
- [3] Gomi *et al.*, Thermal and electrical conductivity of iron at Earth's core conditions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **224**, 88–103, 2013.
- [4] Seagle *et al.*, Electrical and thermal transport properties of iron and iron-silicon alloy at high pressure, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 5377–5381, 2013.
- [5] Deng *et al.*, High pressure and temperature electrical resistivity of iron and implications for planetary cores, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 33–37, 2013.
- [6] Ohta *et al.*, Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions, *Nature*, **534**, 95–98, 2016.
- [7] Konopkova *et al.*, Direct measurement of thermal conductivity in solid iron at planetary core conditions, *Nature*, **534**, 99–101, 2016.
- [8] Secco, Thermal conductivity and Seebeck

coefficient of Fe and Fe-Si alloys: Implications for variable Lorenz number, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **265**, 23–34, 2017.

[9] Tagawa *et al.*, Compression of Fe-Si-H alloys to core pressures, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3686–3692, 2016.

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3件)

Kenji Ohta, Takashi Yagi, Kei Hirose, and Yasuo Ohishi, Thermal conductivity of ferropericlase in the Earth's lower mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有、465, 2017, 29–37, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.030>.

Kenji Ohta, Yasuhiro Kuwayama, Kei Hirose, Katsuya Shimizu, and Yasuo Ohishi, Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions, *Nature*, 査読有、534, 2016, 95–98, doi:10.1038/nature17957.

Shoh Tagawa, Kenji Ohta, Kei Hirose, Chie Kato, and Yasuo Ohishi, Compression of Fe-Si-H alloys to core pressures, *Geophysical Research Letters*, 査読有、43, 2016, 3686–3692, doi:10.1002/2016GL068848.

[学会発表](計4件)

Kenji Ohta, Yasuhiro Kuwayama, Kei Hirose, Katsuya Shimizu, Yasuo Ohishi, Takashi Yagi, Sho Suehiro, Experimental determination of the electrical and thermal conductivity of iron at Earth's core conditions, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 2016年12月12日、サンフランシスコ(米国).

Kenji Ohta, Yoshiyuki Okuda, Takashi Yagi, Kei Hirose, Ryosuke Sinmyo, Lattice thermal conductivity of lower mantle minerals, The 26th V.M. Goldschmidt Conference, 2016年6月27日、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市).

Kenji Ohta, Sho Suehiro, Kei Hirose, Yasuo Ohishi, The electrical resistivity of iron alloys at Earth's core conditions, The 25th V.M. Goldschmidt Conference, 2015年8月20日、プラハ(チェコ共和国).

Kenji Ohta, Experimental constraints on thermal conductivity of the core-mantle boundary region, The 14th symposium of Study of Deep Earth Interior, 2014年8月5日、湘南国際村センター(神奈川県葉山町).

[図書](計0件)

なし

〔産業財産権〕

なし

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenjiohta-uhpr.sakura.ne.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

太田 健二（OHTA Kenji）

東京工業大学・理学院・講師

研究者番号：20727218

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

廣瀬 敬（HIROSE Kei）

大石 泰生（OHISHI Yasuo）

未広翔（SUEHIRO Sho）