

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成22年度採択分

平成25年5月29日現在

研究課題名（和文） **地球惑星中心領域の超高圧物質科学**
研究課題名（英文） **Ultrahigh-pressure Material Science of the
Central Regions of the Earth and Planets**

研究代表者

大谷 栄治 (OHTANI EIJI)
東北大学・大学院理工学研究科・教授



研究の概要：地球中心部の地震学的構造を解明するために、地球核物質の高温高压X線回折実験による安定な相の解明と相境界・融点の決定、メスバウア分光測定による高压下でのスピン状態や磁性を解明する。さらに放射光X線非弾性散乱、ブリルアン散乱測定、超音波法による音速測定を実施する。これらの結果を総合して、地球中心部の観測結果を説明する地球深部の化学組成、温度構造のモデルを提案する。

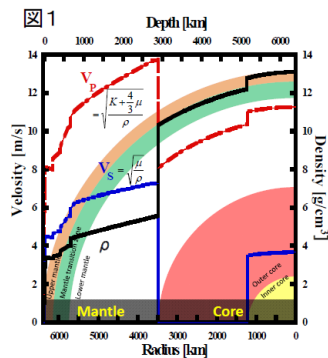
研究分野：高压地球科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地球惑星物質、地球惑星進化、地殻・マントル・核、鉱物物理

1. 研究開始当初の背景

地球核は、マントルへの熱の流入、地球磁場の生成などにより全地球のダイナミクス・進化に大きな影響を与えている。地球核は、その不均質性や速度異方性など地震学的な観測情報が



報告されているが（図1）、核の条件の実現とそこでの物性測定の困難さのために、核の実態は、低压の実験結果を外挿したり、モデル物質や理論計算によって、核の実態が推定されているにすぎない。

2. 研究の目的

本研究は、以下の課題を解明することによって、地球核、核マントル境界、マントル深部の地球中心領域の物質科学モデル確立することを目的とする。

第一に地球核の温度圧力を実現し、圧カスケールを確立する。そして地球核の条件を実現し、核の条件における鉄-軽元素系の相関係・溶融関係を明らかにする。第二に核・下部マントル条件で地球物質の弾性波速度と密度を測定する。第三にメスバウア分光法を用いてスピン転移、磁気転移、構造相転移など

地球・惑星中心部の様々な相転移現象を明らかにする。

以上の三つを制約条件として地球中心部の物質モデルを創出することを目的とする。

3. 研究の方法

このような課題を解明するために、以下のような技術開発を行っている。①地球核の条件をカバーする高温高压放射光X線粉末回折実験を可能にする。放射光のX線とブリルアン散乱法を併用してNaCl-B2相などの密度と



図2 ポータブル加熱测温装置

音速の測定を行い、地球核に及ぶ圧カスケールを確立する。そして、地球中心条件でのX線回折を可能にする。② SPring-8のBL10XUビームラインにおいて、我が国独自のエネルギー領域放射光⁵⁷Feメスバウア分光システムを導入し、世界初のX線回折、放射光メスバウア併用システムを構築し、地球中心部の鉄原子の価数、スピン状態、磁性相転移を解明する。③高分解能X線非弾性散乱(IXS)を用いて下部マントルと核を構成する物質の弾性波速度の測定を行う。さらにポータブル

レーザー加熱測温装置(図2)を開発し、3000 Kを超える条件での音速測定を行う。

4. これまでの成果

(1) 金属軽元素系の融解・相転移と分配:

核の条件を実現する実験として約 273 GPa の条件で 4490 K までの高温高压の発生に成功し、Fe、FeNi、FeNiSi 相の高温高压実験を行い、約 304 GPa、2850 K を超える条件で hcp 相が安定であることを明らかにした。

Fe-Fe₃S 系の X 線その場観察実験によって、外核深部の条件である 182 GPa、3000 K 以上の条件で融解実験を行いソリダス温度を決定した。この結果を外挿し、内核境界および核マントル境界の温度を推定した。さらに、急冷回収実験により固相として存在する hcp-Fe 中に 7wt.% を超える硫黄が固溶することを明らかにした。

Fe-S-Si 系の融解実験を行い、固液の元素分配実験を 135 GPa までの条件で行った。そして、固体の hcp-Fe 中に珪素が濃集し、共存する金属鉄メルト中は珪素に枯渇し硫黄に濃集するという興味深い結果を得た。その結果にもとづいて、内核の軽元素は Si を主とし、外核の軽元素は S を主とするという新たな核の化学構造モデルを提案した。

(2) X 線非弾性散乱法 (IXS) を用いた音速測定法の開発と核構成物質の音速測定:

高精度 X 線非弾性散乱のビームライン SPring-8 の BL35XU において、ダイヤモンドアンビルを用いて、この方法では世界最高の圧力 176 GPa のもとで hcp-Fe の音速測定を行った。また、外熱法による 1000 K までの高温での音速測定を行い、1000 K までの温度においては、パーチ則に温度依存性がないことを明らかにした。また、鉄軽元素合金である FeH について 70 GPa まで、また Fe₃S について 84.5 GPa の圧力で音速測定を行った。

ポータブルレーザー加熱測温装置を開発し、100 GPa のもとで 3000 K を超える条件で X 線非弾性散乱 (IXS) 法による音速測定を可能にした。レーザー加熱による高温高压 X 線非弾性散乱法の実験は世界初である。このシステムを用いて、100 GPa までの条件で 300 K、2300 K、3000 K での hcp-Fe の音速を決定した。このような測定は世界初であり、実験を

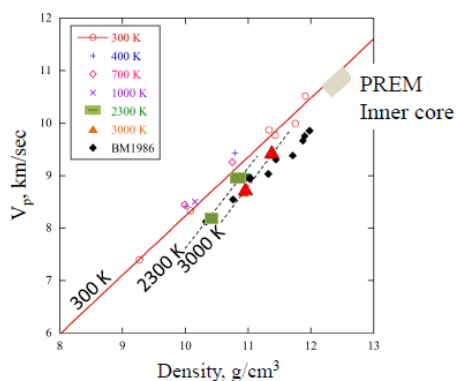


図3 100GPa、3000 Kまでのhcp-Feの音速

継続し本年度中に音速密度関係の温度依存性を解明する予定である。この実験は世界をリードするものである(図3)。

マルチアンビル高压装置と超音波法を用いて 5GPa において液体 FeS の音速を世界で初めて測定した。この結果を用いて月・火星の核、地球の外核の音速を推定した。

(3) 放射光 X 線メスバウア法の導入とマントルおよび核物質の鉄のスピ状態と磁性:

SPring-8 の BL10XU に放射光 X 線メスバウアシステムを導入し、ダイヤモンドアンビルを用いて 100GPa を超える高压下でメスバウアスペクトルを取ることに成功した。このシステムを用いて、マグネシオウスタイト (Mg_{0.6}Fe_{0.4})O およびウスタイト FeO の構造相転移とスピン転移および磁性転移のとの関係を 100 GPa までの条件で明らかにした。

5. 今後の計画

(1) 放射光 X 線非弾性散乱法とポータブルレーザー加熱測温装置を用いて核の温度圧力条件において hcp-Fe および鉄軽元素合金の音速を測定する。

(2) 放射光メスバウア分光システムにポータブルレーザー装置を組み合わせ、下部マントル・核条件で高温高压メスバウア分光測定を行い、下部マントルおよび核構成物質のスピン転移、磁性転移を解明する。

(3) 核の条件において、Fe-S 系、Fe-Si-S 系などの相転移・熔融関係を明らかにし、金属固体・液体間の分配挙動を明らかにし、平衡に共存する内核と外核の組成を求める。

(4) 以上の実験結果を総合して内核・外核・核マントル境界部の物質モデルを創出する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1) Ohtani E., Chemical and Physical Properties and Thermal State of the Core. *Physics and Chemistry of the Deep Earth*, First Edition. Edited by Shun-ichiro Karato. 2013 John Wiley & Sons, Ltd. 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

(2) Kamada S., Ohtani E., Terasaki H., Ōsakai T., Miyahara M., Ohishi Y., Hirao N., Melting relationships in the Fe-Fe₃S system up to the outer core conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 35-36, 26-33, 2012.

(3) Shibasaki Y., Ohtani E., Fukui H., Ōsakai T., Kamada S., Ishikawa D., Tsutsui S., Baron A.Q.R., Nishitani N., Hirao N., Takemura K., Sound velocity measurements in dhcp-FeH up to 70 GPa with inelastic X-ray scattering: Implications for the composition of the Earth's core. *Earth and Planetary Science Letters*, 313-314, 79-85, 2012.

ホームページ:

http://epms.es.tohoku.ac.jp/minphys/j_publications.html