

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月2日現在

地球核の最適モデルの創出

Creation of the best model of the Earth's core

課題番号：15H05748

大谷 栄治 (OHTANI EIJI)

東北大学・理学研究科・名誉教授



研究の概要

本研究では、融解実験と元素分配実験、放射光非弾性散乱法による音速測定、放射光メスバウア分光法、中性子粉末回折法などの、高圧鉱物物理学の様々な方法を駆使して、地球核を構成する軽元素の種類を特定し、地球中心部の物質科学的モデルを創出する。また、その結果に基づいて軽元素組成をもつ核の形成条件を明らかにする。

研究分野：数物系科学

キーワード：融解、軽元素、元素分配、放射光、音速、磁性、中性子

1. 研究開始当初の背景

地球の中心部は、地球科学のフロンティアである。地球核は、鉄ニッケル合金より軽く、軽元素を含んでいる。しかし、その軽元素の種類と量については、未解明なままである。この軽元素を解明するための地球核物質の音速や磁性の研究は、状態方程式の研究に比べて、大きく遅れている。また、核の形成過程を解明する相平衡と融解実験については、単純系の実験がほとんどである。

2. 研究の目的

地球核に含まれる軽元素の種類と量の解明など、地球中心部の地球物理学的情報を満たす核の最適な物質科学的モデルを構築することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

この目的を達成するために、内核と外核を模擬した金属鉄合金の多成分系の融解と軽元素の固液の分配実験、X線非弾性散乱法による高温高圧条件での鉄軽元素系の音速測定、放射光メスバウア分光法を用いた鉄軽元素系の磁性とスピン状態の解明、中性子回折実験による鉄中の軽元素（特にH）の存在状態の解明など各種の高圧研究を総合して、地球核の物質科学的モデルを提出する。

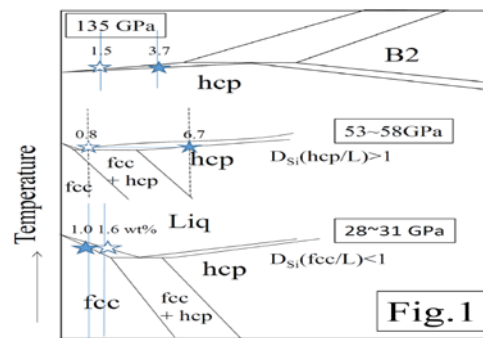
4. これまでの成果

本研究によって地球核を解明する以下のような新たな知見が明らかになった。

・X線回折実験による相関係と元素分配：

地球核の軽元素として、最も重要な元素であるSiおよびSを含む系、Fe-Si-S系の融解と固液元素分配実験を、本研究の最重要課題の一つとして行った。Fe-Si-S系において、

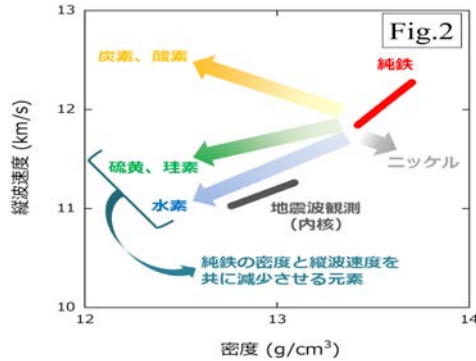
約50GPa付近でリキダス相がfcc相からhcp相に変化すること、fcc相と液、hcp相と液では、SiとSの分配様式が異なることが明らかになった。すなわち、hcp相と液の分配では、Sは液相に富み、Siはhcp相に富む。これはab-initio計算の結果を覆すものであり、液体の外核と固体の内核において、主要な軽元素の量が異なるという重要な結果である。Fig. 1にFe-Si-S系の熔融関係のFe-Si面に投影した相図を示す。



Fe (Ni) → Si

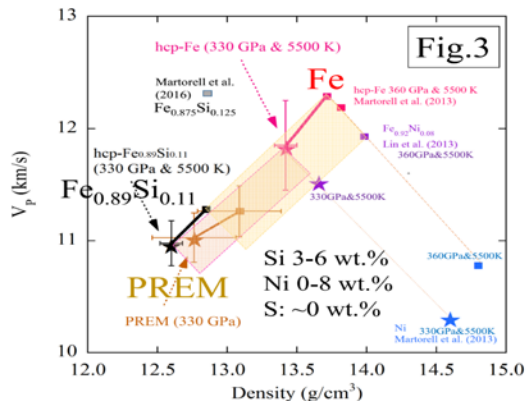
レーザー加熱ダイヤモンドアンビル高圧装置を用いた粉末X線回折実験によってFeNiSi合金の相関係を明らかにした。この合金ではhcp相の高温部にB2相が出現することが明らかになった。hcp相とB2相は内核に存在する可能性が高く、内核の地震波異常の原因になり得ることが明らかになった。内核の構造を解明するには、このB2型FeNiSi相の安定領域と物性を明らかにすることが急務であり、今後引き続き解明したい。炭素は、核中の軽元素の候補の一つである。

ここでは、軽元素の候補である Fe-C 系の溶解関係、相関係を明らかにした。Fe₃C は少なくとも 200 GPa を超える条件まで安定であり融点近傍で Fe₇C₃ 相と液に分解溶解することを突き止めた。この結果は、内核の構成物質として、Fe₃C と Fe₇C₃ がともに Fe₃C も安定であることを初めて示したものである。



・ X 線非弾性散乱法による音速測定

我々の測定は世界で最高の圧力と温度を達成している。Fe の音速測定によって、hcp-Fe の音速と密度は、内核のそれらよりも大きく、核の主要な軽元素は鉄合金の音速を減少させる Si, S, H の可能性が高いことが明らかになった (Fig.2) さらに、X 線回折実験と元素分配実験に基づいて、内核の主要な軽元素の候補が Si であることを明らかにし、hcp-FeSi 合金の音速をこれまで行われていない高温高圧のもとで測定した。得られた音速・密度関係にもとづいて、内核の Si 量 (3~6wt.%) を見積もった (Fig.3)。



・ X 線メスバウア分光による磁性的研究

放射光 X 線粉末回折のビームライン (BL10XU) に、放射光メスバウア分光システムを導入した。このシステムを用いて、hcp-FeSi 合金において、電子トポロジカル転移の存在を示唆する結果を得た。この転移は金星などの惑星核に存在する可能性を示唆した。

・ FeH_x の高温高圧中性子回折実験

地球核の軽元素の有力候補である水素の核中の挙動を解明するために高温高圧中性子回折実験によって、FeH_x の高温高圧多形の安定領域を解明し、鉄格子中の水素 (H)

の状態と席選択を世界に先駆けて解明した。高温高圧下での fcc および dhcp 構造の FeH_x の水素による膨張を実測し、従来の核中の水素量の見積もりが過剰であることを示した。

5. 今後の計画

以上の実験において、核の軽元素に関して、いくつかの重要な知見が明らかになった。核の主要な軽元素としては、金属鉄の音速を下げる Si, S, H が最有力である。今後これらの軽元素の役割を解明するために、

- ・ 金属鉄の固体と液体の間の S, Si の元素分配実験を引き続き進め、内核と外核の Si と S の存在量をより正確に推定する。
- ・ 内核は主として hcp 構造の FeNiSi 合金であるが、B2 相も高温で存在する。内核の内部構造の原因となっている可能性のある B2 相について、安定領域の決定、音速の測定などを行う。
- ・ 核中の水素の量を見積もるために、引き続き FeH_x の高温高圧中性子回折実験を継続する。以上の成果を総合して、地球中心部の物質科学的モデルを構築する。

6. これまでの発表論文等

- ・ Chemical reactions between Fe and H₂O up to megabar pressures and implications for water storage in the Earth's mantle and core, Yuen, L., *Ohtani, E., Ikuta, D., Kamada, S., Tsuchiya, J., Hirao, N., Ohishi, Y., Suzuki, A., Geophysical Research Letters, 45, (3), 1330-1338, (2018)
- ・ Sound velocity measurements of hcp Fe-Si alloy at high pressure and high temperature by inelastic X-ray scattering, Sakairi, T., Sakamaki, T., *Ohtani, E., Fukui, H., Kamada, S., Tsutsui, S., Uchiyama, H., Baron A.Q.R., American Mineralogist, 103, 85-90, (2018)
- ・ Melting relations in the Fe-S-Si system at high pressure and temperature: implications for the planetary core, Sakairi, T., *Ohtani, E., Kamada, S., Sakai, T., Sakamaki, T., Hirao, N., Progress in Earth and Planetary Science, 4, (2017), doi:10.1186/s40645-017-0125-x
- ・ Constraints on Earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions, *Sakamaki, T., Ohtani, E., Fukui, H., Kamada, S., et al., Science Advances, 2, (2), (2016), doi:10.1126/sciadv.1500802
- ・ Urey Award を EAG より受賞 (2017/08).

ホームページ等

http://epms.es.tohoku.ac.jp/minphys/S_HP_27-31/index_s.html