

令和元年6月5日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05541

研究課題名（和文）惑星核条件における惑星内部物質の音速と密度の関係（バーチ則）の検証

研究課題名（英文）Relation between sound velocity and density for liquid iron alloys under Earth's core pressures

研究代表者

境家 達弘（Sakaiya, Tatsuhiro）

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：60452421

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：大型レーザー装置を用いて、他の手法では再現困難である圧力条件下で鉄合金と金属の音速や密度等の物性測定を行った。音速測定は最大1000 GPaまでの圧力でデータを取得した。同じ圧力で比較した場合、鉄へのシリコンの添加は音速を増加させ、ニッケルと硫黄の添加は音速を減少させることがわかった。鉄合金だけでなく金属物質に対しても音速と密度の間に線形関係（バーチ則）が存在する可能性を示した。バーチ則を使って地球外核組成を評価した。バーチ則において物質科学的な普遍性が存在する可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球核だけでなくスーパーアースのような巨大地球型惑星の核の圧力条件下での音速と密度の関係を評価しており、そのような惑星の中心核組成に制約条件を与えることが可能であり大変重要である。溶融状態の鉄合金や金属物質において音速と密度の間に線形関係（バーチ則）があることを示し、バーチ則の固体-液体間の関係が地球惑星の中心核物質だけでなく、他の金属物質に対しても普遍的である結果を示したことで、地球惑星科学だけでなく物質科学にも影響を与えうることは大変意義があったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We conducted shock-compression experiments using a high-power laser. The sound velocity and density for liquid iron alloys and metal at pressures up to 1000 GPa were measured by x-ray radiography. At same pressure, the addition of silicon increases the sound velocity of iron and the addition of nickel and sulfur decreases it. It was suggested that there is a linear sound velocity-density relation (Birch's law) in liquid iron alloys and metal. The outer core composition was estimated by using Birch's law. It was suggested that Birch's law has universal relation on material science.

研究分野：惑星内部物質学

キーワード：鉄合金 音速 地球核 スーパーアース バーチ則 衝撃圧縮 レーザー 予備加熱

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球核の組成に制約条件を与えることは、地球の形成過程を理解し地球の進化を考える上で非常に重要である。地球内核の組成はダイヤモンドアンビルセル(DAC)などを使って固体状態の鉄合金の音速と密度の関係などから評価され[e.g. Badro et al., 2007]、外核の組成は内核組成から内核と外核の境界(ICB)での元素分配などを考慮して評価されており、音速と密度の関係から外核の組成を直接評価した例はない。一方、二段式軽ガス銃などの動的圧縮法を使った実験では、最近、鉄合金の音速データが取得されており、その結果と熱力学的モデルを使って外核組成が評価されはじめている[Huang et al., 2011]。DACなどの静的圧縮法による地球核条件より低い圧力領域からのアプローチに対して、動的圧縮法は地球核条件あるいはより高い圧力領域から地球核へアプローチ可能な手法であり、その音速データはICBの温度推定にも利用されている[e.g. Nguyen & Holmes, 2004]。

ガス銃などの動的圧縮法では400 GPaを超える圧力発生は困難であるが、大型レーザーによる動的圧縮法では圧縮時間は短いけれども、より高圧状態(~1 TPa)を生成可能である[e.g. 境家 他, 2011]。この特性から、巨大惑星や近年多数発見されている巨大地球型惑星(スーパーアース)の中心核の圧力に相当する条件下で、惑星深部物質の物性を調べることも可能にする[e.g. McWilliams et al., 2012]。

地球核の組成評価は、地震波観測から得られたデータを基に作られた地球モデル(PREM[Dziewonski & Anderson, 1981])と実験室で得られたデータとを比較することで行われるが、この時、音速と密度の間に線形関係(バーチ則[Birch, 1961])が成り立つとして組成評価が行われる。固体状態の鉄合金にはバーチ則が成り立つと考えられており[e.g. Badro et al., 2007]、PREMの地球内核領域(固体状態)においてもバーチ則が成り立つと考えられているため、これらを比較することで組成が評価される。一方、PREMによると地球外核領域(液体状態)においてもバーチ則が成り立つように見えるが、液体状態の鉄合金においてもバーチ則が成り立つかどうかは未だわかっていない。

<参考文献>

Badro et al., 2007, Earth Planet. Sci. Lett. 254, 233.

Birch, 1961, Geophys. J. R. Astron. Soc. 4, 295.

Dziewonski & Anderson, 1981, Phys. Earth Planet. Inter. 25, 297.

Huang et al., 2011, Nature 479, 513.

McWilliams et al., 2012, Science 338, 1330.

Nguyen & Holmes, 2004, Nature 427, 339.

境家 他, 2011, 高圧力の科学と技術 21, 84.

2. 研究の目的

地球核、特に外核の組成に制約条件を与え、地球・惑星の形成過程を理解することが目的である。大型レーザーによる動的圧縮法を使って地球核条件下での地球核物質の音速・密度測定を行い、地球深部の情報を持つ地震波データと直接比較可能な音速データ(弾性波速度)を使って外核の組成を評価する。また得られた音速データから、巨大惑星やスーパーアースの中心核の組成にも制約条件を与える。物質科学的な応用として、音速と密度の間にある線形関係が固体と液体の間で普遍であるかどうか検証することも目的とする。

3. 研究の方法

大型レーザー装置を利用することで地球中心核条件を実験室で再現し、地球核に存在し得る物質の音速等の物性測定を行う。レーザー衝撃圧縮により鉄合金や鈹物を核条件にし、試料の透過X線撮影(ラジオグラフィ)を行って試料の動き(圧縮・膨張過程)を測定し、音速や密度などの物性値を得る。純鉄実験で実績がある800 GPa近傍の圧力状態で鉄合金や鈹物の音速測定を行う。この圧力領域はスーパーアースや巨大惑星の核条件に相当する。また、地球外核条件を実現するために必要な予備加熱装置の開発を行う。

4. 研究成果

大型レーザー装置を用いて、他の手法では再現困難である圧力条件下で鉄合金や金属の音速等の物性測定を行った。磁硫鉄鈹を用いた音速測定は、最大600 GPaまでの圧力でデータを取得し、その結果、音速は圧力に対して増加し、同じ圧力で比較した場合、純鉄よりも磁硫鉄鈹の音速は小さいことがわかった。この結果は、先行研究における鉄-硫黄系合金の音速結果とコンシステントであった。鉄への硫黄の添加は音速を減少させ、圧力に対する音速変化への影響は小さいと考えられる(図1)。この結果を用いて外核組成を評価すると、硫黄のみが含有する場合、外核中に硫黄が最大で18-40 at.%含まれ得ることがわかった。鉄-硫黄系合金は、地球の始原物質にも含まれており、核の密度を大幅に減少させる物質でもあるので、近年多数発見されているスーパーアースにおいて核密度が小さい天体が発見されれば、本研究結果からスーパーアースの核組成に評価に制約条件を与えることが出来ると考えられる。鉄合金や金属試料を用いた音速測定は、最大1000 GPaまでの圧力でデータを取得した。同じ圧力で比較した場合、シリコンを含有した鉄合金は純鉄よりも音速は大きく、ニッケルを含有した鉄合金は純鉄よりも音速は小さくなることがわかった(図1)。また、音速と密度の関係においては、鉄合金だけ

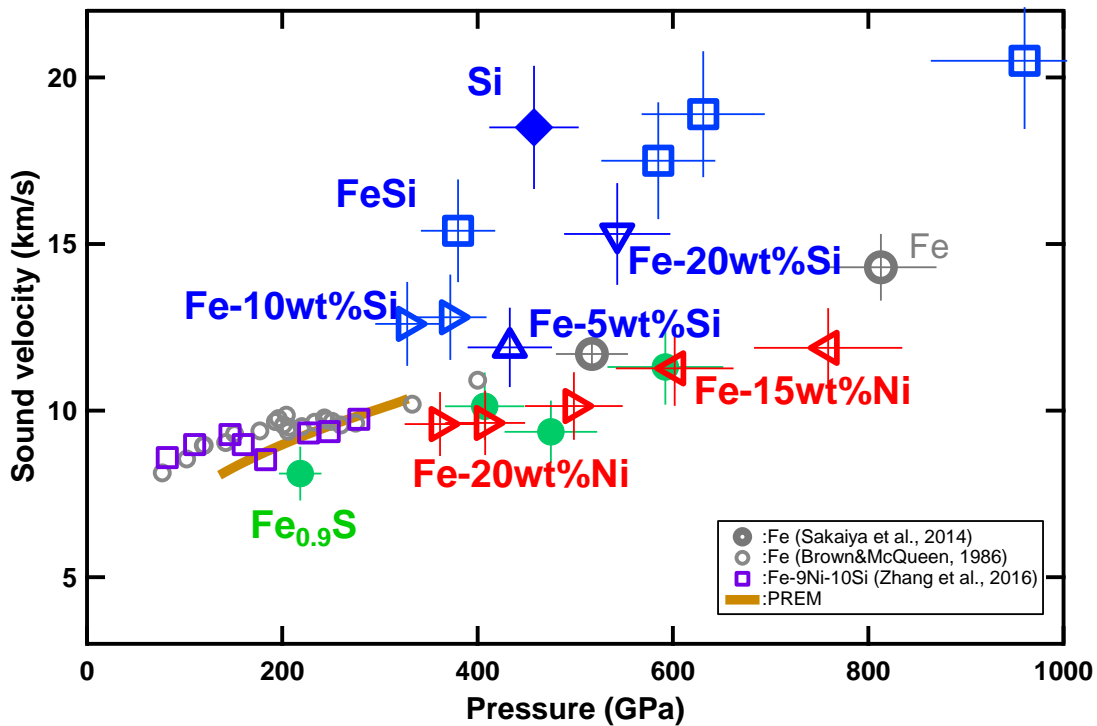


図1. 音速と圧力の関係.

でなく金属試料に対しても線形に変化する傾向（パーチ則）が見られた（図2）。音速の密度に対する変化率は、純鉄へのシリコンやニッケルや硫黄の含有量の増加に伴って、線形に変化する傾向が見られた。この結果を用いて外核組成を評価すると、シリコンのみが含有する場合、外核中にシリコンが最大で 9-23 at.%含まれ得ることがわかった。金属物質（バナジウム）の音速測定結果からは、シリコン、ニッケルだけでなく、バナジウムに関しても音速と密度の間に線形関係が存在する可能性を示した。また、鉄合金と同様に、音速の密度に対する変化率が、液体の方が固体より約 1.5 倍大きい結果となっており、あらゆる金属物質において普遍的な関係である可能性を示唆した。また鉄合金においては、パーチ則における傾き A および切片 B が、鉄にシリコンを含有した場合は含有量の増加に伴ってそれぞれ線形に増加し、鉄にニッケルあるいは硫黄を含有した場合はその増加に伴ってそれぞれ線形に減少する傾向を示した（図3）。パーチ則を使った地球核組成への応用だけでなく、鉄に不純物を添加していった場合に音速と密度の間にある関係が物質に依存した普遍的な変化を起こすといった物質科学的な応用の可能性を示唆した。

一方で、地球外核条件での音速データを取得するために、真空中で試料を予備加熱する装置の開発として、実験室に既存のレーザー加熱装置に設置可能な真空容器の設計および製作を行った。真空容器内で試料を予備加熱するための加熱システムを構築し、予備テストではヒーター一部で 700 °C までの加熱を確認した。見積もりでは、この温度でこれまでの実験条件で音速測定を行えば、地球外核上部の温度・圧力条件で音速データを取得することが可能になる。

本研究は、地球核だけでなくスーパーアースのような巨大地球型惑星の核の圧力条件での音

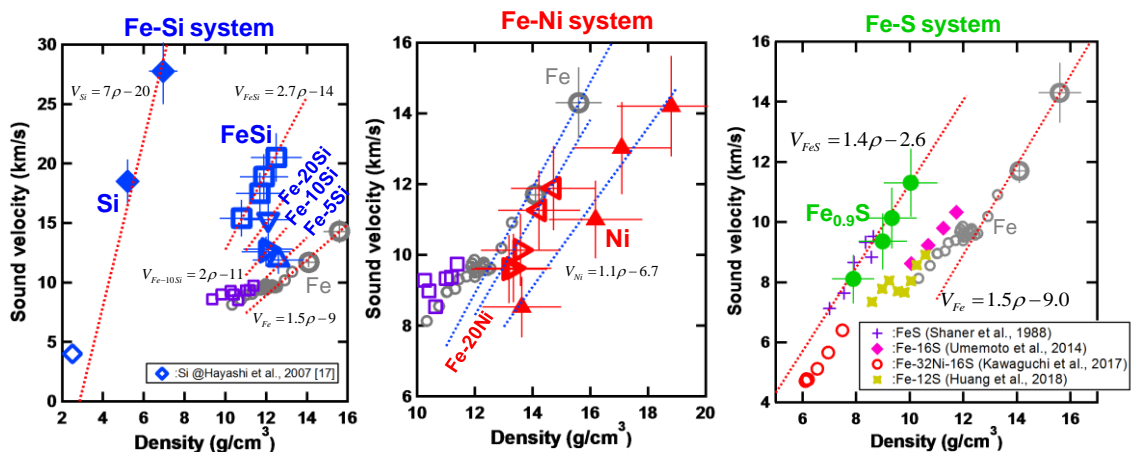


図2. 音速と密度の関係.

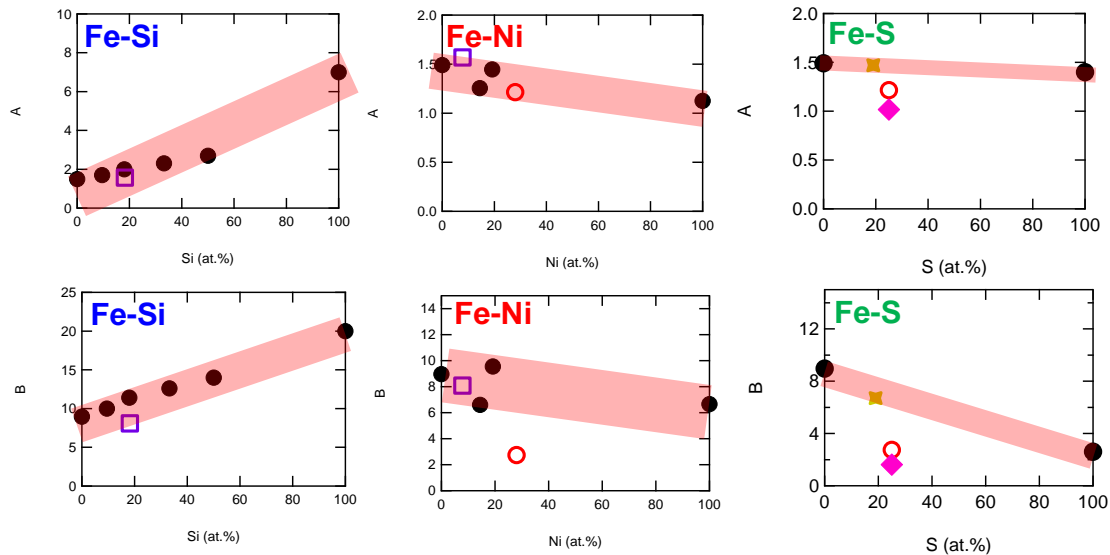


図3. 音速と密度の線形関係（バーチ則）。

速と密度の関係を評価しており、地球だけでなくスーパーアースのような巨大惑星の中心核組成に制約条件を与えることが可能であり大変重要である。熔融状態の鉄合金や金属物質において、音速と密度の間に線形関係（バーチ則）があることを示した。バーチ則を使って外核組成を評価した結果、地球外核中に硫黄あるいはシリコンのみが含有する場合、それぞれ最大で18-40 at.%あるいは9-23 at.%含まれることを示した。また、バーチ則の固体-液体間の関係が地球惑星の核物質だけでなく、他の金属物質に対しても普遍的である結果を示したことで、地球惑星科学だけでなく物質科学にも影響を与えることは大変意義があったと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① T. Sakaiya, T. Kondo, H. Terasaki, K. Shigemori, and Y. Hironaka, Relation between sound velocity and density for liquid iron alloys under Earth's core pressures by laser-shock compression, Japan Geoscience Union Meeting 2019, May. 30, 2019.
- ② T. Sakaiya, T. Kondo, H. Terasaki, N. Yokoyama, R. Hosogi, Y. Ogata, K. Shigemori, and Y. Hironaka, Sound velocity and density of liquid iron alloys under Earth's core pressures by laser-shock compression, Workshop on properties of planetary interiors, Jan. 30, 2019.
- ③ T. Sakaiya, T. Kondo, H. Terasaki, K. Shigemori, and Y. Hironaka, Sound velocity and density of liquid iron alloys under Earth's core pressures by laser-shock compression, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, May. 21, 2017.
- ④ 尾方優士, 境家達弘, 近藤忠, 寺崎英紀, 重森啓介, 弘中陽一郎, 地球核条件下にレーザー衝撃圧縮されたFeSの音速, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016年5月22日.