

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800292

研究課題名(和文)高温高压下における鉄合金の音速・密度測定と融解関係の解明

研究課題名(英文) Determination of sound velocity - density and melting relation of iron-alloys under high pressure and high temperature conditions

研究代表者

坂巻 竜也 (Sakamaki, Tatsuya)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30630769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：

地球の最深部は内核と呼ばれ、主に鉄から成ることが知られています。本研究では、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルとX線非弾性散乱を組み合わせることで163万気圧、3000ケルビンまでの極限条件下での鉄の音速・密度の同時決定に成功しました。

実験で得られた結果を地震学に基づくモデルと比較することで、鉄の縦波速度と密度は実際の地球内核より高い値を示すことが明らかになりました。つまり、内核中に含まれている鉄以外の元素は、鉄の縦波速度と密度を共に減少させる効果を示す必要があります。そこから地球内核に含まれる軽元素としては、水素・珪素・硫黄である可能性が高いことを突き止めました。

研究成果の概要(英文)：

Hexagonal close-packed iron (hcp-Fe) is a main component of Earth's inner core. The difference in density between hcp-Fe and the inner core in the Preliminary Reference Earth Model (PREM) shows a density deficit, which implies an existence of light elements in the core. Sound velocities then provide an important constraint on the amount and kind of light elements in the core.

This study shows the compressional sound velocity ( $V_p$ ) of hcp-Fe up to 163 GPa and 3000 K using inelastic x-ray scattering from a laser-heated sample in a diamond anvil cell. The result indicates that Earth's inner core has a 4 to 5% smaller density and a 4 to 10% smaller  $V_p$  than hcp-Fe. This demonstrates that components other than Fe in Earth's core are required to explain Earth's core density and velocity deficits compared to hcp-Fe. Hydrogen is a good candidate; thus, Earth's core may be a hidden hydrogen reservoir. In addition, silicon and sulfur are also possible candidates.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：地球科学 高圧 高温 鉄 地球核 内核 音速 密度

### 1. 研究開始当初の背景

地震学的観測事実から地球は中心部から順に核・マントル・地殻で構成されていることが分かっている。さらに核は中心に固体の内核があり、それを覆うように液体の外核が存在している(図1)。また、地球化学的見地から地球の核は主に鉄から成っていると考えられている。ただし、核の組成を純鉄と仮定した場合、地球内部の密度分布と一致しなく、地球核は純鉄より低い密度を示している。このことは、核中には鉄より軽い元素が含まれている可能性を示唆している。しかしながら、地球核の条件は百万気圧を超える圧力に、数千ケルビンの温度という極限環境であり、実験的な困難さから地殻やマントルの研究に比べて核の研究は十分ではない現状がある。

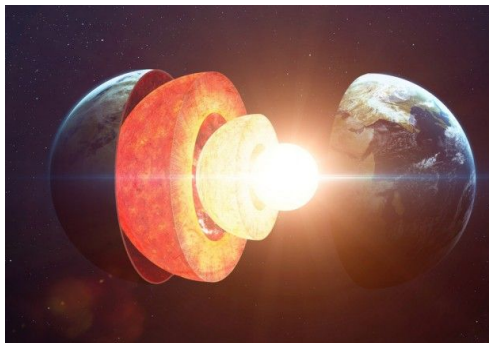


図1 地球内部の層構造

地球は岩石から成る地殻とマントル、金属の核で構成されており、核は液体の外核と固体の内核に分けられる。本研究では最深部の内核に焦点を当てている。

### 2. 研究の目的

地球の核に関しては、地震学的モデルによって地震波速度(縦波、横波)と密度の分布が報告されている。そこでその地震学的モデルを満たすような核の組成を決定することが重要な研究テーマとして挙げられる。本研究では、高温高压条件下において核の主要元素である鉄の縦波速度・密度測定を行い、地球核、特に内核の組成に制約を与えることを目的とした。

### 3. 研究の方法

地球内部のような超高压かつ超高温環境を実験的に再現するためにレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた。極限条件下での物性を調べるには放射光 X 線を利用することが有用であるため、兵庫県にある大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL35XU を活用した。鉄の縦波速度は X 線非弾性散乱により決定した。X 線非弾性散乱では、物質に入射された X 線が散乱される際に

変化したエネルギーとその X 線が散乱される角度の関係を調べることで、弾性波の伝搬速度に関する情報を抽出することができる(図2)。本研究で達成した圧力 163 万気圧(163 GPa)、温度 3000 K は X 線非弾性散乱実験の世界最高記録である。また、鉄の密度に関しては、X 線回折法を用い、縦波速度測定と同じ条件下で決定した。

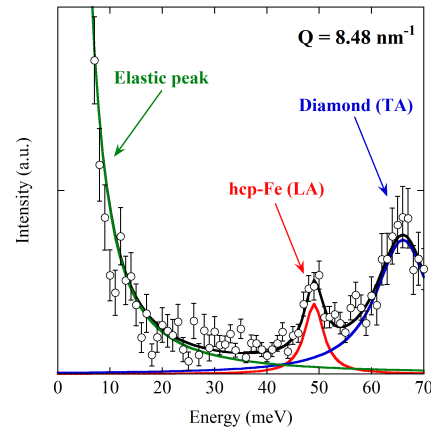


図2 X線非弾性散乱の典型的なスペクトル  
横軸が散乱された X 線のエネルギー変化に対応している。エネルギー変化 0 meV にある緑のピークが弾性散乱、50 meV 付近にある赤のピークが鉄(縦波)の非弾性散乱である。また、青のピークは高压発生に用いたダイヤモンドアンビルセル中のダイヤモンド(横波)の非弾性散乱が由来である。

### 4. 研究成果

既述しているように 163 GPa、3000 K までの鉄の縦波速度と密度の決定に成功した。図3に X 線非弾性散乱による鉄の縦波速度測定の実験条件を比較したものを示す。この図から明らかのように、米国や欧州の放射光施設での実験条件を大きく更新した。これは世界で初めてレーザー加熱システムを X 線非弾性散乱実験に導入したことにより、大幅に温度発生領域を広げること成功したためである。

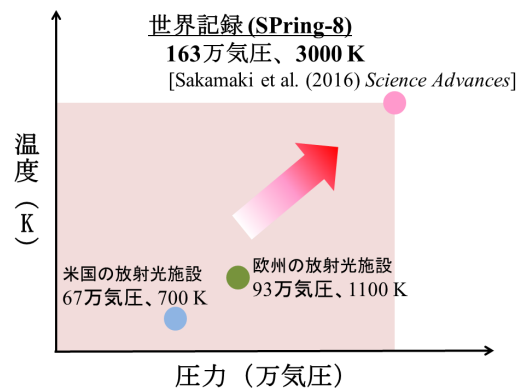


図3 鉄の X 線非弾性散乱の実験条件比較

本研究で達成した実験条件(163 GPa、3000 K)は、米国や欧州の研究施設で実施されてきた実験よりもさらに高温かつ高压である。

本研究によって、高温高压条件下での鉄の密度-縦波速度の関係が明らかになり(図4)温度増加に伴う縦波速度の減少が確認された。縦波速度に及ぼす温度の効果を定量的に理解することができたため、地球の内核条件下での鉄の縦波速度の推定へ繋がり、観測に基づく地震学的モデルとの直接比較が可能となった。

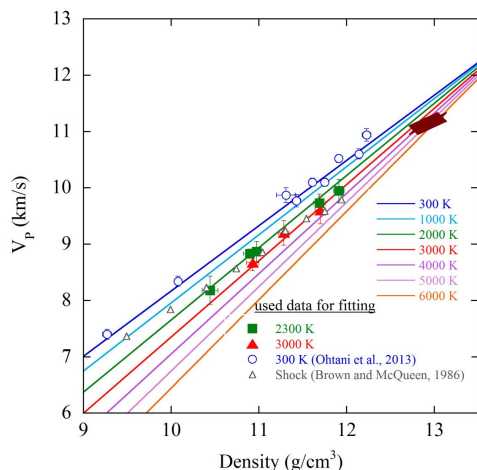


図4 鉄の密度と縦波速度の関係  
横軸が密度、縦軸が縦波速度に対応している。直線の色の違いが各温度(300 K ~ 6000 K)における密度-縦波速度の関係を示している。

本研究の目的は、地球核の組成に制約を与えることである。そのためには、観測された地球の内核(地震学的モデル: PREM)と実験で得られた高温高压下での鉄の密度-縦波速度を比較して、その差を理解することが重要である。図5に鉄と地球内核の密度-縦波速度を比較したものを示す。

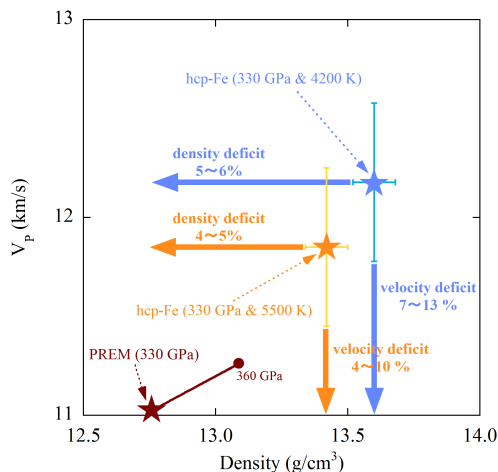


図5 高温高压下の鉄と内核の比較  
地震学的モデル(PREM)は茶色、鉄は橙色(高温モデル: 内核の温度を5500 Kと仮定)と水色(低温モデル: 内核の温度を4200 Kと仮定)で示されている。核の温度モデルに依らず、鉄の密度と縦波速度は共にPREMより大きい。

地球の内核と比べると、鉄は密度に加えて、縦波速度も大きいことが明らかになった。つまり、鉄以外の地球内核を構成している元素が、鉄の密度と縦波速度の両方を減少させることで、系全体の密度・縦波速度が観測された内核と一致することになる。そこで内核中に含まれている可能性がある元素に対して、鉄の密度・縦波速度に及ぼす効果を図6にまとめた。これより水素、硫黄、珪素に関しては、鉄の密度と縦波速度を減少させるため、核中に含まれている元素として有力であると考えられる。

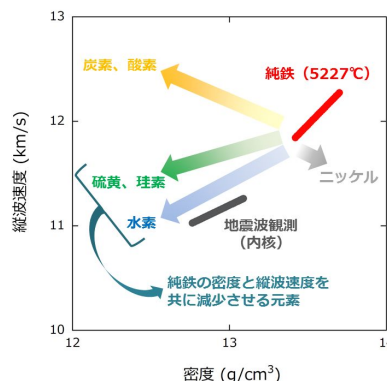


図6 各元素が鉄に及ぼす効果の比較  
赤線で示された鉄が黒線のPREMを満たすためには、密度と縦波速度を減少させる元素が必要になる。そのような効果を期待できる元素は水素や硫黄・珪素であり、反対に炭素や酸素は主要な軽い元素の候補からは外れることになる。

本研究の成果に基づくと図7に示すような六方最密充填構造の鉄中に水素・硫黄・珪素が含まれている内核モデルを提案できる。

目的であった内核組成の制約を達成することができたが、より詳細な議論のためには更なる研究(“様々な組成”の鉄合金に対して“より高圧力”かつ“より高温”での実験)が今後も必要となる。また、内核の組成から核全体の組成に対する知見を得ることで、地球の形成・進化の解明へと繋がることも期待される。

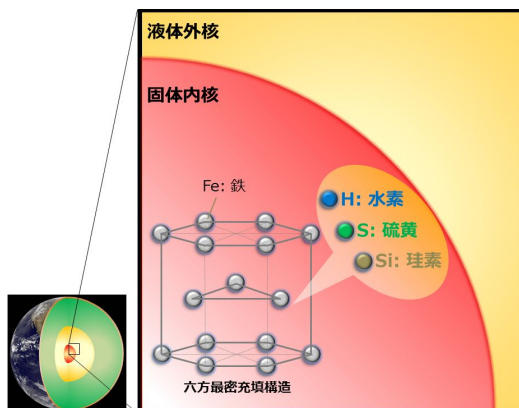


図7 地球の内核モデル  
六方最密充填構造の鉄中に水素・硫黄・珪素が含まれている可能性が示唆される。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 14 件)

T. Sakamaki, E. Ohtani, H. Fukui, S. Kamada, S. Takahashi, T. Sakairi, A. Takahata, T. Sakai, S. Tsutsui, S. Ishikawa, R. Shiraishi, Y. Seto, T. Tsuchiya, A. Q. R. Baron  
Constraints on Earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions  
Science Advances, 2016, 査読有  
Vol. 2, No. 2, e1500802,  
DOI:10.1126/sciadv.1500802

### 〔学会発表〕(計 14 件)

T. Sakamaki, E. Ohtani, H. Fukui, S. Kamada, S. Takahashi, T. Sakairi, A. Takahata, T. Sakai, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron  
Sound velocity and density of hcp-Fe under Earth's core conditions (Invited),  
AGU Fall Meeting 2014  
December 15-19 2014, San Francisco (USA).

### 坂巻 竜也

超高温高圧下における鉄合金の音速測定  
(招待講演)、  
地球惑星科学研究会、高圧物質科学研究会、  
機能性材料ナノスケール原子相関研究会合同研究会  
2015年9月12-13日、福岡

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

坂巻 竜也 (SAKAMAKI, Tatsuya)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30630769