Press Release

2026 年 7 月 3 日
東京科学大学
愛媛大学

超高温高圧鉄の中で、水素が流体のように振る舞う

－地球内核は超イオン状態か－

【ポイント】

○地球中心核に相当する高温高圧下で、面心立方鉄水素化物が超イオン状態で存在することを示唆

○超イオン状態に特長的な熱膨張異常を観測するとともに、水素移動度の温度依存性を実験的に定量

○地球内核の地震波速度異常や地球内部の進化の解明につながることに期待

【概要】

東京科学大学（Science Tokyo） 理学院 地球惑星科学系の長屋慶大博士後期課程学生、岡崎雄祐博士後期課程学生、太田健二教授、愛媛大学 先端研究院 地球深部ダイナミクス研究センターの出倉春彦講師らの研究チームは、鉄–軽元素合金の一種である面心立方鉄水素化物（fcc FeH_x）が高温高圧下で**超イオン状態**（用語 1）になることを示唆する実験的兆候を、世界で初めて確認しました（図 1）。

地球の中心に存在する内核の組成は、密度や地震波伝播速度などの観測値をもとに、鉄・ニッケルに加えて水素、酸素、炭素などの軽元素が含まれた合金であると推定されています。しかし地震波観測から示される内核の弾性は、実験や理論計算から求められている鉄–軽元素合金の弾性とは合わず、詳細な理由は未だに分かっていません。内核の特異な弾性の成因として、近年の理論計算では、鉄–軽元素合金の「超イオン状態」が重要になることが示唆されています。鉄–軽元素合金の場合、鉄格子は通常の固体のままで、軽元素だけが高速で拡散します。鉄–軽元素合金の超イオン状態は超高圧・超高温条件でのみ存在するため、これまで実験で観察されたことはありませんでした。

本研究では、レーザー加熱式**ダイヤモンドアンビルセル装置**（用語 2）を用いて、大型放射光施設 **SPring-8 BL10XU**（用語 3）において実験を行いました。結果として、FeH_x を圧力一定条件で温度を変化させた時、予測された超イオン状態への相転移温度付近で**λ 型の熱膨張率異常**（用語 4）が観察されること、また水素の移動度が急激に上昇することを明らかにしました。これらの結果は、地球内核の条件下で実際に鉄–軽元素合金が超イオン状態で存在することを強く示唆するものです。さらに、実験から見積もられた内核条件下の水素の移動度は従来の理論予測よりも低く、内核の半径程度の距離（約 1,200 km）を水素が移動するためには、地球の年齢の 100 倍以上の時間が

かかってしまうことが分かりました。
本成果は、6 月 9 日付の「*Nature Geoscience*」誌に掲載されました。

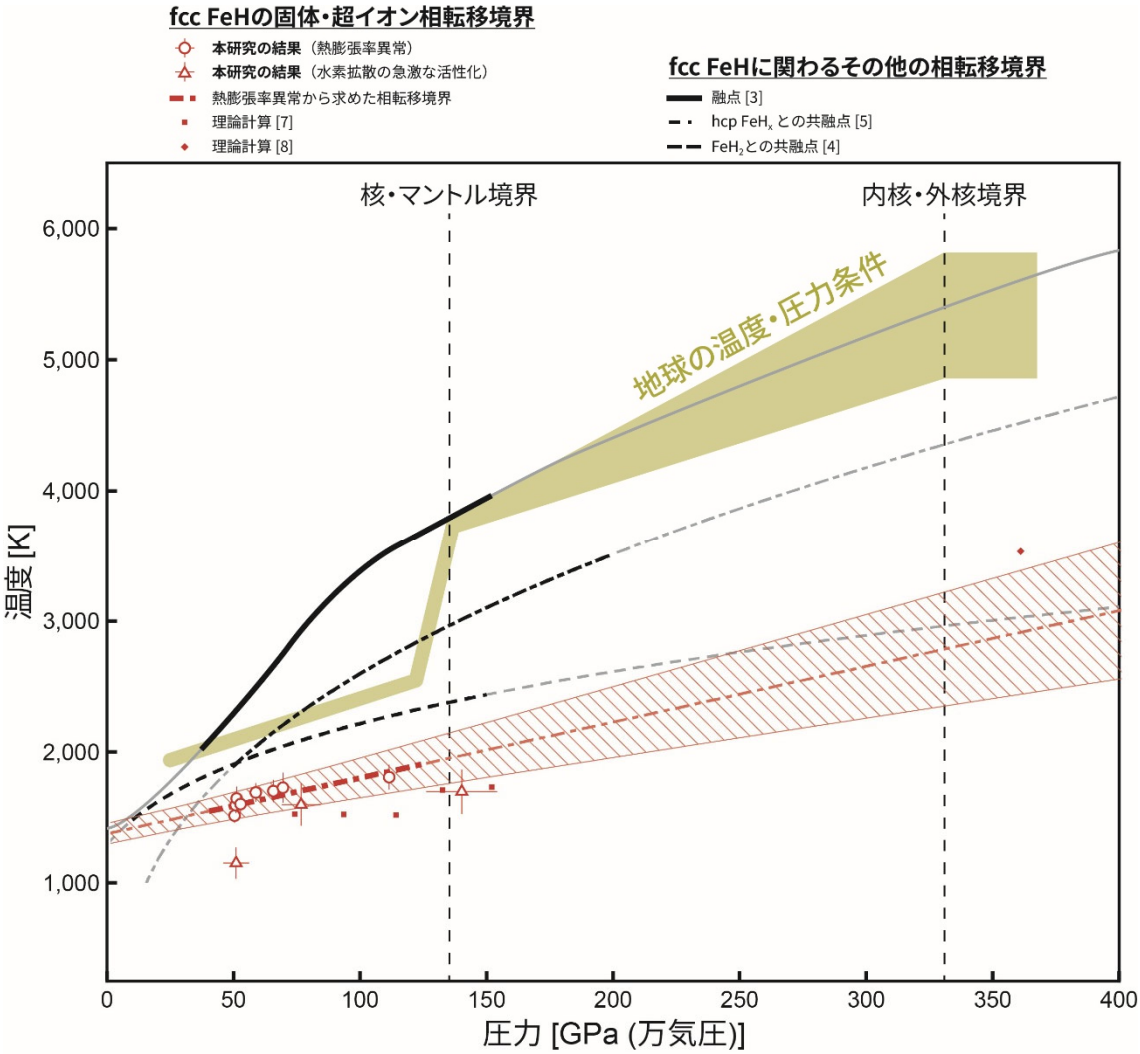


図 1　本研究の結果から得られた面心立方鉄水素合金（fcc FeH_x）の相平衡図。それぞれの曲線において、太線は実験データで求められた部分で、細線はそのデータをモデルによって外挿した部分。なお、本研究の熱膨張率異常の観察から求められた固体・超イオン相転移境界は直線でフィッティングした。線の周りの斜線部は直線モデルの誤差。

●背景

地球の中心から半径 3,500 km までの領域は核と呼ばれ、液体の外核と固体の内核に大別されます。核は地球全体の 8 分の 1 程度の体積しか持ちませんが、非常に重く高温であるため地球全体のエネルギーの 3 分の 1 を保持しています。そのため、地球の歴史を考える上では非常に重要な研究対象です。核の中心部である内核では、圧力は約 360 万気圧、温度は数千度にも達します。人類の掘削可能範囲（深さ約 10 km まで）をはる

かに超えたこの領域について研究するためには、このような極限環境における物質の性質を調べることが必要です。

また、物質を伝播する地震波には縦波と横波の 2 種類があり、内核を伝わる横波の速度は縦波の速度と比べて非常に遅いことが知られています。地震波の伝わる速度は物質の弾性によって決まりますが、以上に示したような内核の弾性は、既存の鉄–軽元素合金の弾性データでは説明できず、地球科学上の第一級課題として盛んに研究されています。

太陽系に存在する物質から推定すると、核は基本的に鉄とニッケルでできており、密度や地震波伝播速度などの観測から、核には少量の軽元素が含まれていると考えられています［参考文献 1］。軽元素の候補はいくつかありますが、広い圧力範囲で鉄との親和性が高い水素が有力な候補の 1 つと言われています［参考文献 2、3、4、5］。近年の理論計算によると、内核条件では鉄水素合金中の水素が鉄格子中で高速に拡散することが示唆されており［参考文献 6、7、8］、「超イオン状態」と呼ばれるこの状態においては、通常の固体とは異なる弾性を示すことが考えられます。しかしながら、最低でも数十万気圧を超える超高圧、1,000 K を超える高温条件での実験の難しさから、超イオン状態の存在は実験的には明らかにされていませんでした。もし、超イオン状態の存在を明確に示すことができれば、内核の弾性に関する研究の進展にも寄与することが期待されます。

●研究成果

共同研究チームは、面心立方鉄水素合金（fcc FeH_x）試料をダイヤモンドアンビルセル中で合成し、高温高圧条件下の試料の X 線回折測定を行いました。まず、圧力一定のまま温度を変化させ、鉄の格子体積から評価される水素のみかけ体積（ΔV_H）の温度依存性を調べました。その結果、約 1,500–1,800 K において ΔV_H が一時的に増大する λ 型の熱膨張異常を観察しました。この現象は、他の物質の超イオン相転移でも観察されるものです［参考文献 9］。

さらに fcc FeH_x に電圧をかけた状態で、圧力一定のまま温度を上昇させたところ、約 1,600 K 付近で試料中の水素分布が急激に変化しました。急冷後に X 線回折マッピングを行うと、陽極側に水素が濃集し、陰極側では水素が希薄になっていることが確認されました。これは、高い速度で水素が電場に応じて移動していることを示しており、鉄水素合金が超イオン状態になっている重要な傍証です。

この実験結果から見積もられた内核条件での水素の移動度は、理論計算で予想されていた値よりも低いことが分かりました。実験値から計算すると、内核中の水素が熱力学的に最適化された状態になるには、地球の年齢を大幅に上回る時間が必要になってしまいます。我々の結果は、鉄水素合金が超イオン状態に達したとしても、地球内核全域にわたる長距離スケールでの水素拡散は、地球史の時間スケールではほとんど進行しないこ

とを示唆しています。

●今後の展開

太陽での元素の存在度、隕石の組成、初期地球の元素分配モデルなどの研究によると、地球の内核には、水素のほかにも炭素、酸素、ケイ素、硫黄などのさまざまな軽元素が含まれると考えられています。したがって、「内核は超イオン状態になっているのか」という問いに答えるためにはこれら他の軽元素についても、高温高圧実験を行う必要があります。本研究で採用した、熱膨張率や軽元素の移動度に着目し鉄–軽元素合金の超イオン状態への相転移を確認・定量する手法を他の鉄–軽元素合金に適用していくことが求められます。

また、内核の特異な弾性異方性のメカニズムを明らかにするためには、内核に対応する超高温高圧での鉄–軽元素合金の弾性を定量することが必須ですが、本研究ではその実現には至りませんでした。高温高圧条件での物質の弾性測定は非常に困難ですが、共同研究チームには実験・理論計算両面でこれを求める基盤が整っています。

●付記

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（JSPS 科研費）24KJ1090、25KJ1233、24H00266 の支援を受けて行われました。

また、放射光実験は SPring-8 BL10XU において、2023A、2023B、2024A、2024B、2025A の課題のもとで実施されました。

【参考文献】

[1] Hirose, K., Wood, B., & Vočadlo, L. (2021). Light elements in the Earth's core. Nature Reviews Earth & Environment, 2(9), 645-658.

[2] Iizuka-Oku, R., Yagi, T., Gotou, H., Okuchi, T., Hattori, T., & Sano-Furukawa, A. (2017). Hydrogenation of iron in the early stage of Earth's evolution. Nature Communications, 8(1), 14096.

[3] Tagawa, S., Helffrich, G., Hirose, K., Ohishi, Y. (2022). High-Pressure Melting Curve of FeH: Implications for Eutectic Melting Between Fe and Non-Magnetic FeH. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(6), e2022JB024365.

[4] Mita, S., Tagawa, S., Hirose, K., Ikuta, N. (2025). Fe-FeH Eutectic Melting Curve and the Estimates of Earth's Core Temperature and Composition. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 130(1), e2024JB029283.

[5] Hirose, K., Tagawa, S., Kuwayama, Y., Sinmyo, R., Morard, G., Ohishi, Y., Genda, H. (2019). Hydrogen Limits Carbon in Liquid Iron. Geophysical Research Letters, 46(10), 5190-5197.

[6] Wang, W., Li, Y., Brodholt, J.P., Vočadlo, L., Walter, M.J., Wu, Z. (2021). Strong

shear softening induced by superionic hydrogen in Earth's inner core. Earth and Planetary Science Letters, 568, 117014.

[7] He, Y., Sun, S., Kim, D. Y., Jang, B. G., Li, H., & Mao, H. K. (2022). Superionic iron alloys and their seismic velocities in Earth's inner core. Nature, 602(7896), 258-262.

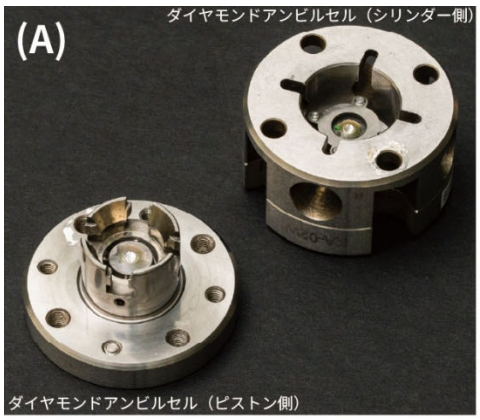
[8] Yang, H., Dou, P., Xiao, T., Li, Y., Muir, J.M.R., Zhang, G. (2023). The Geophysical Properties of FeH_X Phases Under Inner Core Conditions. Geophysical Research Letters, 50(22), e2023GL104493

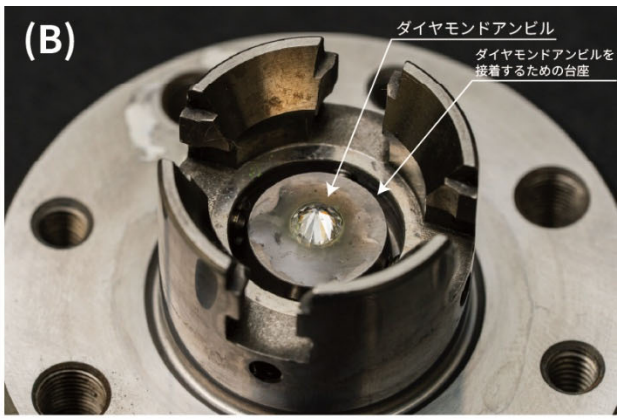
[9] Roberts, R.B., White, G.K. (1986). Thermal expansion of fluorites at high temperatures. Journal of Physics C: Solid State Physics 19(36), 7167–7172.

【用語説明】

(1) **超イオン状態**：通常の固体結晶では、構成原子はおおよそ定まった結晶格子位置または格子間位置の周辺にとどまり、長距離にわたって拡散することはない。一方、特定の温度・圧力条件下では、一部の原子種のみが高い移動度を示し、固体の結晶骨格を保ったまま、格子間を長距離拡散する状態が現れることがある。このような状態を超イオン状態と呼ぶ。本研究では、鉄の結晶格子中を移動する水素を対象としている。

(2) **ダイヤモンドアンビルセル装置**：ダイヤモンドを用いた小型の高圧装置（下図 A)。ダイヤモンドは圧力を発生させる尖頭状の部品（アンビル）として用いられる（下図 B)。ガスケットと呼ばれる金属の板に小さな穴をあけ、その穴に試料を入れて 2 つのダイヤモンドアンビルで挟み込むことで高圧を発生させる。ダイヤモンドの先端のサイズを小さくすることで、地球中心部に相当する圧力の発生が可能。





(3) **SPring-8 BL10XU**：兵庫県播磨にある大型放射光施設 SPring-8 の 10 番目のビームライン。ダイヤモンドアンビルセルを用いた超高圧における X 線回折測定実験に特化している。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8GeV に由来。

放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波。BL10XU の場合は電磁波の中でも 30 keV の単色 X 線を用いて実験を行うことができる。

(4) **λ型の熱膨張異常**：二次以上の相転移に伴ってしばしば観察される現象の 1 つ。「λ型相転移」というと、通常は、温度に対する比熱のグラフがギリシャ文字のλの形に似た鋭いピークを示すものを指す。λ型相転移では比熱の他にも熱膨張、体積弾性率などの物理量も温度に対して鋭いピークを持つことが熱力学的に示されている。特に物質の秩序や対称性に関わる相転移ではλ型のピークがしばしば現れ、水や蛍石の超イオン相転移においてもλ型の熱膨張率異常が観察されている。

【論文情報】

掲載誌：*Nature Geoscience*
論文タイトル：Experimental indications of superionic behaviour in iron hydride under Earth's core conditions
著者：Yoshihiro Nagaya, Yusuke Okazaki, Haruhiko Dekura, Kenji Ohta
DOI：10.1038/s41561-026-02001-5

【研究者プロフィール】

長屋 慶大（ナガヤ ヨシヒロ） Yoshihiro Nagaya
東京科学大学 理学院 地球惑星科学系　博士後期学生
研究分野：高圧地球科学、高圧物性物理学

岡崎 雄祐（オカザキ ユウスケ） Yusuke Okazaki
東京科学大学 理学院 地球惑星科学系　博士後期学生
研究分野：高圧地球科学、高圧物性物理学

出倉 春彦（デクラ ハルヒコ） Haruhiko Dekura
愛媛大学 先端研究院 地球深部ダイナミクス研究センター　講師
研究分野：高圧地球科学、計算物質科学

太田 健二（オオタ ケンジ） Kenji Ohta
東京科学大学 理学院 地球惑星科学系　教授
研究分野：高圧地球科学、高圧物性物理学

【お問い合わせ先】

（研究に関すること）
東京科学大学 理学院 地球惑星科学系
太田 健二
Email：k-ohta@eps.sci. isct.ac.jp
TEL：03-5734-2590

（報道取材申し込み先）
東京科学大学 総務企画部 広報課
取材申し込みページ：https://www.isct.ac.jp/ja/001/media
Email：media@adm.isct.ac.jp
TEL：03-5734-2975　FAX：03-5734-3661

愛媛大学 総務部 広報課
Email：koho@stu-ehime-u.ac.jp
TEL：089-927-9022