

機関番号：84502

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740383

研究課題名 (和文) 地球中心核の水と地球深部ダイナミクス

研究課題名 (英文) Water in the Earth's core and dynamics of the deep Earth interior

研究代表者

平尾 直久 (HIRAO NAOHISA)

財団法人高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員

研究者番号：70374915

研究成果の概要 (和文)：地球核における水素の挙動と核の構造とダイナミクスへの影響を解明することを目的として、地球内部における物質状態を実験的に再現するため高温高压発生技術を拡張し、鉄-水素系合金の結晶構造や物性を明らかにすることを目指した。レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル技術の開発によって、100 万気圧、2000 K までの圧力温度発生が可能となり、地球核領域で鉄水素化合物が安定に存在する可能性が明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：Hydrogen is one of the most important candidates as light elements in the Earth's core. To understand the behavior of hydrogen in the Earth's core and its effect on the structure and dynamics of the core, experimental studies of crystal structures, phase relations, and their properties in iron-hydrogen (Fe-H) system are needed at high pressures and temperatures. In the Fe-H system we developed a high-pressure and high-temperature generation technique up to about 100 GPa and 2000 K using a laser-heated diamond anvil cell. The double hexagonal close-packed of iron hydride (FeH) was observed up to about 100 GPa, which suggests that FeH is possibly stable in the Earth's core.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

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・惑星内部構造，地球核，高温高压，放射光，金属水素化合物，金属物性

1. 研究開始当初の背景

地球内部の水・水素は、物質の流動性や融点、元素分配など物質の諸特性に極めて重大

な影響を及ぼし、地球表層から中心核におよぶ地球深部の構造・ダイナミクス・進化の物質科学的解明に関わる極めて重要な物質・元

素である。地球核中での水素の存在の可能性や存在量について、明瞭な回答が得られていない。地球核物質としての鉄-水素系合金に関して、水素の散逸性・圧縮性・反応性の高さなどの諸特性が、地球核の圧力領域（135万気圧以上）を越える超高压力条件を実現する障害となり、国内外において80万気圧を超える実験的研究は皆無であったためである。また地球核を対象とした鉄-水素系の研究は、世界的にみても極めて限られた研究機関でしか実施されていなかった。このような状況を打破し、地球深部のフロンティアである地球核の研究を推し進め、地球核の実体を物質科学の立場から解明することが強く求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、地球核中に含まれる水素の挙動とその状態を高圧実験に基づき解明するため、以下の課題についての研究を行うことを目的とした。

(1) 固体水素媒体を用いた鉄-水素系について、地球核の圧力領域135万気圧以上を実験的に再現するため、超高压力発生技術の開発を行うこと。

(2) 地球核の実体を物質科学的に解明するために、超高压実験技術と放射光X線その場観察法を組み合わせ、鉄-水素系合金について地球核の圧力領域における結晶構造や相転移、状態方程式を明らかにすること。

このように、超高压高温発生技術と放射光技術を駆使し、地球核の構造と物性を解明する。

3. 研究の方法

本研究では、地球核の軽元素候補である水素が金属鉄中でどのような状態で存在しているかを実験的手法により解明するため、高温高压下での鉄-水素系合金の結晶構造や相転移、密度、状態方程式などの諸特性を明らかにする、そのため以下の研究を実施した。

(1) 固体水素媒体を用いた鉄-水素系について、100万気圧領域の高圧力および1500 Kを超える高温を実現するため、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを利用した高温高压発生技術の開発・確立を行った。

(2) 鉄-水素系合金に関して、第三世代大型放射光施設 SPring-8 の高輝度X線とダイヤモンドアンビルセルによる圧力発生技術を組み合わせた高圧その場X線観察を実施し、圧力100万気圧までの結晶構造や密度、圧縮特性を明らかにした。

4. 研究成果

本研究において、研究の主な成果、得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望は以下の通りである。

(1) 固体水素を用いた高温高压発生技術の開発

高温高压発生技術の基盤技術となるレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを利用し、固体水素媒体を用いた鉄-水素系に関して極限状態を発生させる技術の開発を行った。その結果、室温下では圧力100万気圧まで(図1)、また40万気圧、2000 Kまでの高温高压発生が可能となった。また、従来技術的に難易度が高かったダイヤモンドアンビルセルへの水素充填や試料室からの水素散逸、水素脆性によるダイヤモンドアンビルの破壊などに関する問題点が明らかになり、様々な技術的な蓄積が行われた。本装置の開発で取得されたノウハウによって、安定した実験が実施できるようになり、鉄-水素系に関して高温高压力下におけるその場X線観察などの物性測定研究が可能となった。これまで地球核物質としての鉄-水素系合金に関する実験的研究は、室温で80万気圧、高温高压領域では20万気圧、1600 Kまでであり、またダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高压実験は世界的にみても皆無であった。本研究により開発されたレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルによる高温高压力発生技術を生かし、物性測定を行うことにより、地球核中の水素の挙動だけでなく、金属水素化物における金属-水素相互作用の理解など様々な研究分野において新しい物質科学的知見が得られることが期待される。

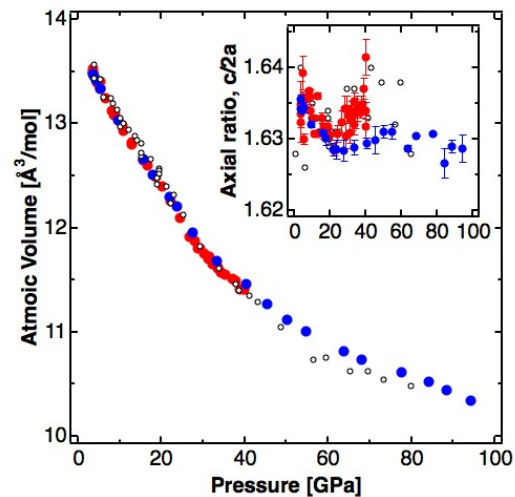


図1. dhcp相の鉄水素化物の圧力-体積プロファイル。アニーリングなし(青丸)、アニーリングあり(赤丸)、過去の研究データ(白抜き黒丸)。挿入図: 軸比の圧力依存性。

(2) 高温高压下における鉄水素化物のその場X線観察

鉄水素化物(FeH_x)の物理学・化学的特性は、純鉄のそれとは大きく異なる。例えば、高压相への相転移圧力の低下、融点降下、新たに

出現する高圧相における結晶構造の相違および高圧相の磁性の有無などが挙げられる。地球核中における水素の存在が、地球核の構造と物性に与える効果は大きい。FeH_xの高圧下での振る舞いなど未解明な問題が数多い理由の一つは、実験技術が難しいことだった。本研究では、開発されたレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルによる高温高圧発生技術と高輝度放射光を組み合わせたその場 X 線回折実験を実施し、圧力 40 万気圧、温度 1500 K までの高温高圧領域における鉄水素化物の相関係を調べることに成功した。その結果、圧力 40 GPa、温度 1500 K では dhcp 相が安定に存在することを示す結果が取得された(図 2)。20 万気圧、1500 K では fcc 相が観察されている。このことは、fcc 相の安定領域は 40GPa 以下の圧力であることを提案している。FeH_xにおける dhcp 相-fcc 相境界および dhcp 相-fcc 相-液体三重重点の圧力温度の決定することは、地球核における水素存在量を推定する上で非常に重要な研究テーマに位置づけられるであろう。

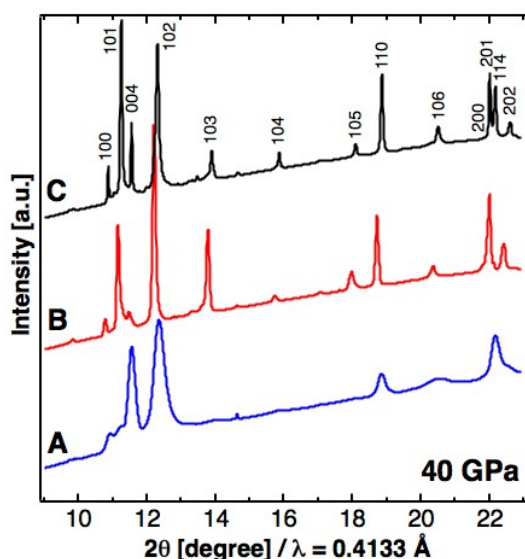


図 2: 高温高圧下における FeH_x のその場 X 線回折パターン。(A) 加熱前、(B) 1500 K で加熱中、(C) 加熱後。数字は dhcp 相の指数付け (hkl)

(3) 高温高圧アニーリング手法による dhcp-FeH_x の結晶性の改善

本課題では、開発された高温高圧発生技術を利用したアニーリング法により、dhcp 構造を持つ FeH_x の結晶性が大幅に改善でき(図 2C)、粉末 X 線回折法により正確な密度情報の取得に成功した(図 1 赤丸)。また 25 万気圧付近で顕著な体積減少および軸比の変化の特徴が観られた。dhcp-FeH_x は室温下 3.5 万気圧で bcc-Fe 中に水素が吸蔵することにより形成される。その X 線回折ピークは非常にブ

ロードであり、水素吸蔵による体積膨張に伴う応力発生または積層欠陥の生成が寄与しているとみられている。今後アニーリング手法を利用した精密構造解析によって、鉄水素化物内での鉄の挙動および水素の影響を明らかにできるだろう。FeH_x の研究は、地球科学だけでなく、物性物理や材料科学など幅広い分野において興味を持たれている。FeH_x に関する様々な特性の系統的な研究は、水素吸蔵に伴う鉄の電子状態変化とその起源、つまり鉄と水素の相互作用を解明でき、さらには水素貯蔵材料開発の新たな指針をもたらすと期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. Matsuoka, N. Hirao, Y. Ohishi, K. Shimizu, A. Machida, K. Aoki, Structural and electrical transport properties of FeH_x under high-pressures and low-temperatures, High Pressure Research 31, 64–67 (2011). 査読有
- ② T. Mitsui, N. Hirao, Development of an energy domain ⁵⁷Fe Mössbauer spectrometer using synchrotron radiation and its application to ultrahigh-pressure study on metal hydrides, Materials Research Society Symposium Proceedings 1262, W06–09 (2010). 査読有
- ③ H. Fukui, N. Hirao, Y. Ohishi, A.Q.R. Baron, Compressional behavior of solid NeHe₂ up to 90 GPa, Journal of Physics: Condensed Matter 22, 095401-1–8 (2010). 査読有
- ④ T. Mitsui, N. Hirao, Y. Ohishi, R. Masuda, Y. Nakamura, H. Enoki, K. Sakaki, M. Seto, Development of an energy-domain ⁵⁷Fe-Mössbauer spectrometer using synchrotron radiation and its application to ultrahigh-pressure studies with a diamond anvil cell, Journal of Synchrotron Radiation 16, 723–729 (2009). 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 平尾直久, 大石泰生, 三井隆也, 松岡岳洋, 瀬戸誠, 青木勝敏, 竹村謙一, 山上浩志 (2010) 強磁性hcp-FeH_xの高圧合成と磁気転移, 第 51 回高圧討論会, 仙台, 2010/10/21.
- ② N. Hirao, T. Mitsui, Y. Ohishi, M. Seto (2010) Energy-domain synchrotron radiation Mössbauer spectroscopy in the multimegabar pressure range and its application to Fe, International Union of Crystallography (IUCr) commission on High Pressure 2010 Meeting, Gatlinburg, TN, USA, 2010/9/23.
- ③ N. Hirao, Y. Ohishi, T. Mitsui, T. Matsuoka, M. Seto, K. Aoki, K. Takemura, H. Yamagami

(2010) Synthesis and characteristics of hcp iron hydride at high pressure, International symposium on metal-hydrogen systems MH2010, Moscow, Russia, 2010/7/21.

④ N. Hirao, Y. Ohishi, T. Mitsui, T. Matsuoka, M. Seto, K. Aoki, K. Takemura (2010) High-pressure structural and magnetic properties of iron hydride, JAEA-Symposium on Synchrotron Radiation Research 2010, SPring-8, Japan, 2010/2/25.

⑤ N. Hirao (2009) In situ X-ray study at multimegabar pressures and the diamond anvil Raman gauge (Invited), Ehime Univ. G-COE International Summer School, Matsuyama, Japan, 2009/8/5.

⑥ N. Hirao, T. Mitsui, Y. Ohishi, M. Seto, K. Aoki, K. Takemura, T. Kikegawa (2009) Pressure-Induced Magnetic Transition of Iron Hydride, International Conference on High Pressure Science and Technology Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50, Tokyo, Japan, 2009/7/29.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平尾 直久 (HIRAO NAOHISA)
財団法人高輝度光科学研究センター・
利用研究促進部門・研究員
研究者番号：70374915

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：