

平成21年 5月22日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740332

研究課題名 (和文) 地球中心圧力の発生と地球内核の物質科学的研究

研究課題名 (英文) Generation of high pressure at the center of the Earth: Implications for the Earth's inner core materials

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・利用研究促進部門極限構造チーム・研究員

研究者番号：70374915

研究成果の概要：地球中心圧力 365 万気圧の超高压力条件を実験的に再現し、この条件下で地球核構成物質である鉄系合金の結晶構造や物性を明らかにすることにより、地球の内核を物質科学的に解明することを目的とした。超高压発生装置ダイヤモンドアンビルセルを用いた技術により、地球内部で最も深部にある内核の圧力条件 330-365 万気圧を達成できる圧力発生技術が開発され、地球中心核の構成物質である鉄、ニッケルおよび鉄系合金に関する密度・物性の測定が地球中心圧力まで可能となった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	0	1,900,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	390,000	3,590,000

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，地球内核，固体地球物理，放射光，超高压力，金属物性

1. 研究開始当初の背景

地球科学において、実験的に地球中心部に相当する圧力 365 万気圧を発生させることは、地球科学的第一級の目標である。地球内部で最深部に存在する内核は 330 万気圧を超える圧力条件下にあり、このような超高压力条件の再現は技術的に非常に困難であり、これまで地球内核領域における地球核物質の実験的研究は世界的にみても皆無であった。また 300 万気圧までの超高压力下における実験的研究も欧米で過去 20 年間に数例実施されているにすぎず、国内においては全くなかった。

近年の地震波速度観測に基づく地球内核における内部構造情報の急速な蓄積に対して、地球内核に関する実験的な物質科学研究による成果が十分に上げられていなかった。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この分野の研究を推し進め、地球内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、地球中心核、特に内核領域 (圧力 330-365 万気圧) における物質構成とその

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) 地球中心圧力 365 万気圧までの圧力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) 地球内核の実体を解明するために、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、金属鉄や鉄系合金について地球内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、超高压実験と高輝度放射光との新しい技術開発を基盤として、地球内核の構造と物性を解明する。

3. 研究の方法

本研究では、地球の内核を構成する物質とその状態を解明するため、内核-外核境界から地球中心部に至る圧力条件 (330~365 万気圧) のもとで、鉄や鉄系合金の結晶構造や相転移、密度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) 超高压力発生装置ダイヤモンドアンビルセルを用いて 360 万気圧を越える超高压力条件を実現するため、ダイヤモンドアンビルの形状・品質の最適化など超高压実験技術の開発を行った。
- (2) 地球内核構成物質である鉄やニッケル、鉄系合金に関して、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利用したその場 X 線観察を実施し、地球中心圧力 365 万気圧までの結晶構造や相転移、密度を明らかにした。

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) 地球中心圧力 365 万気圧の超高压力発生技術の開発

超高压力発生装置ダイヤモンドアンビルセルを用いた地球中心部に匹敵する圧力発生超高压実験技術の開発に関しては、当初の目標である 365 万気圧の圧力発生に成功した (図 1)。また安定した 300 万気圧領域での圧力発生技術が確立され、300 万気圧領域での超高压実験が定常的に可能となった。この圧力発生技術の開発は、ダイヤモンドアンビルセル装置として世界で最先端を行く技術であり、これにより地球の内核、特に地球中心部に相当する圧力条件下まで地球核構成物質に関する実験的研究が世界に先駆けて実施され、この手法の有用性が明らかになっ

た。地球深部物質に関して、従来 300 万気圧を超える超高压力下における実験的研究は欧米で数例実施されているのみで非常に限られており、内核領域 (330~365 万気圧) での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ダイヤモンドアンビルセル装置による圧力発生技術を生かすことにより、これまで想像の域を出なかった地球中心核に関する様々な新しい物質科学的知見が得られることが期待される。

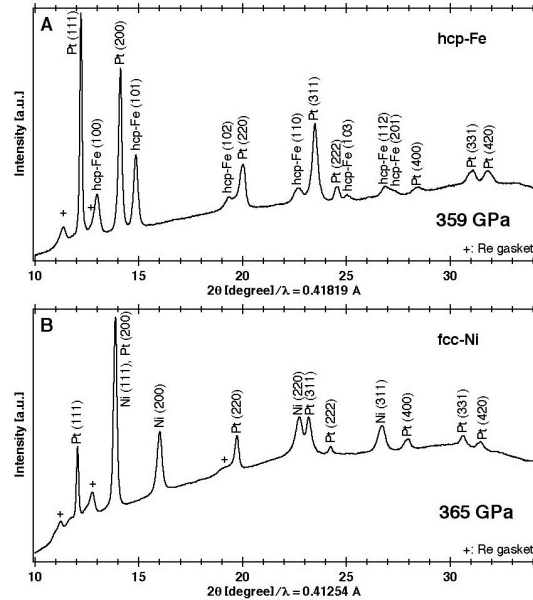


図 1. 地球中心圧力 365 万気圧付近で取得された (A) 鉄および (B) ニッケルのその場 X 線回折パターン。

- (2) 地球中心圧力条件までの鉄・ニッケルの密度データ取得

ダイヤモンドアンビルセル装置による圧力発生技術と高輝度放射光を組み合わせたその場 X 線回折実験を行い、地球中心核の主要構成物質である鉄およびニッケルに関して、地球内核条件 (330~365 万気圧) における密度データの取得に成功した。その結果、地球中心圧力までの密度データを用いることにより、従来外挿されてきた地球内核領域において、地震波速度データに基づく地球内部構造モデルである Preliminary Reference Earth Model (PREM) の密度と実験データを外挿なしに直接的に比較・議論できるようになったことは特筆に値する (図 2)。

また地球中心核はニッケルを 5~15% 程含む鉄ニッケル合金から成ると考えられている。鉄とニッケルの端成分の密度データを、地球中心圧力まで取得できたことにより、様々な組成の鉄ニッケル合金の密度を見積もることが可能となった。次の展開としては以下の研究課題が重要となるであろう。地球中心核中には鉄ニッケル合金に軽元素が含まれていることが示唆されている。より現実

の地球中心核の物質構成や化学組成を定量的に明らかにするためには、軽元素を含んだ鉄系合金や鉄ニッケル系合金の密度データを地球中心圧力まで取得していくことが、今後の極めて重要な物質科学的研究テーマとなると考えられる。

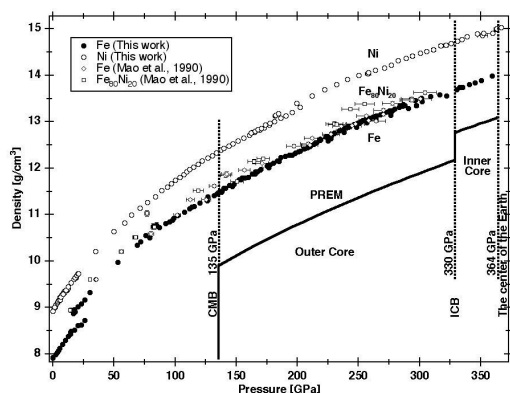


図2. 鉄、ニッケルおよび鉄ニッケル合金の圧力-密度分布と地震学的地球内部構造モデル (PREM) の密度との比較。

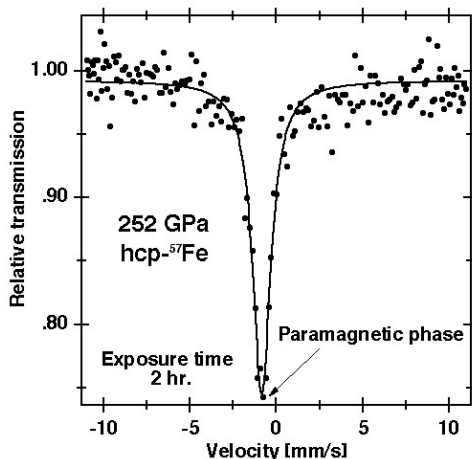


図3. 圧力252万気圧で取得された鉄の放射光メスbauer吸収スペクトル。

(3) 300万気圧を超える鉄・鉄系合金のメスbauer分光測定

地球内核構成物質である鉄および関連する鉄系合金として $GdFe_2$ の放射光メスbauer分光測定をそれぞれ 252, 302 万気圧まで実施した。鉄の高圧相 hcp は 252 万気圧においても常磁性体であることがわかった (図3)。一方 $GdFe_2$ に関しては、200 万気圧という超高压下で磁性が消失することが明らかになった。希土類元素の 4f 局在電子は圧力の影響を受け難く、特に $GdFe_2$ では Gd の 4f 電子が担う磁気モーメントが磁気特性に強い影響を及ぼすため、100 万気圧領域の非常に高い圧力においても磁性が保持されていることが過去の研究から示されていたが、より高压下での磁気特性に関しては不明であった。

また 150 万気圧を超える圧力下でのメスbauer分光測定はこれまで報告されておら

ず、それを遥かに凌ぐ 300 万気圧以上でのメスbauer分光測定に世界で初めて成功した。このような超高压領域におけるメスbauer分光測定は、複雑な系の物質を研究対象とすることが多い地球惑星科学のみならず、材料科学や物性科学に関連した学際的分野の新たな研究の展開も期待される。

以上のように、本研究は当初の目的に沿って当面の目標が達成され、新しい実験技術の開発とともにその応用測定により、地球中心核の物質科学に関する様々な新しい知見が得られた。

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7件)

- ① M. Murakami, Y. Ohishi, N. Hirao, K. Hirose, Elasticity of MgO to 130 GPa: Implications for lower mantle mineralogy, *Earth and Planetary Science Letters*, 277, 123–129 (2009), 査読有
- ② Y. Ohishi, N. Hirao, N. Sata, K. Hirose, M. Takata, High-intensity monochromatic x-ray diffraction facility for high-pressure research at SPring-8, *High Pressure Research*, 28, 163–173 (2008), 査読有
- ③ H. Asanuma, E. Ohtani, T. Sakai, H. Terasaki, S. Kamada, N. Hirao, N. Sata, Y. Ohishi, Phase relations of Fe-Si alloy up to core conditions: Implications for the Earth inner core, *Geophysical Research Letters*, 35, L12307 (2008), 査読有
- ④ N. Hirao, E. Ohtani, T. Kondo, T. Sakai, T. Kikegawa, HollanditeII phase in $KAlSi_3O_8$ as a potential host mineral of potassium in the Earth's lower mantle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 166, 97–104 (2008), 査読有
- ⑤ 平尾直久, マルチメガバール実験が切り開く地球惑星科学の新展開, *高压力の科学と技術*, 18, 11–20 (2008), 査読有
- ⑥ N. Sata, H. Ohfuji, K. Hirose, H. Kobayashi, Y. Ohishi, N. Hirao, New high-pressure B2 phase of FeS above 180 GPa, *American Mineralogist*, 93, 492–494 (2008), 査読有
- ⑦ A. Sano, E. Ohtani, T. Kondo, N. Hirao, T. Sakai, N. Sata, Y. Ohishi, T. Kikagawa, Aluminous hydrous mineral δ -AlOOH as a carrier of hydrogen into the core-mantle boundary, *Geophysical Research Letters*, 35, L03303-1–5 (2008), 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① 平尾直久, 大石泰生, 三井隆也, 瀬戸誠, 竹村謙一, 亀卦川卓美, 放射光メスbauer測定による FeH の圧力誘起強磁性-常磁性転移, 第7回水素量子アトムクス研究会, 2008/11/22, 新潟大学.
- ② 平尾直久, 三井隆也, 瀬戸誠, 大石泰生, マルチメガバール領域における放射光メスbauer分光法, 第49回高圧討論会, 2008/11/12, 姫路.
- ③ N. Hirao, T. Mitsui, Y. Ohishi, M. Seto, High-pressure study of iron-bearing materials by energy-domain synchrotron radiation Mössbauer spectroscopy, IUCr High Pressure Commission, 2007/9/4-9/5, Oxford, UK.
- ④ N. Hirao, Y. Ohishi, K. Yasuda, Y. Akahama, H. Kawamura, Compression behavior of iron at multimegabar pressure, High Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-7), 2007/5/11, 宮城県松島.

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・利用研究促進部門極限構造チーム・研究員
研究者番号：70374915

研究者番号：

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：