

研究種目：若手研究（S）  
研究期間：2007～2011  
課題番号：19674003  
研究課題名（和文）超高压地球科学：最下部マントル・中心核の物質学  
研究課題名（英文） Ultrahigh-Pressure Earth Science:  
Study of Lowermost mantle and core materials  
研究代表者  
廣瀬 敬（HIROSE KEI）  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：50270921

研究代表者の専門分野：数物系科学  
科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学  
キーワード：下部マントル、核、鉄、高压

### 1. 研究計画の概要

本研究では、地球の下部マントルや中心核に相当する超高压高温状態を実験室で実現し、地球深部物質の物性やダイナミクスをあきらかにすることを目的としている。具体的な計画は以下の通り。

- (1) スラブ物質（特に玄武岩質地殻物質）の状態図を決定し、最下部マントルの化学的不均質を解明する。
- (2) ポストペロフスカイト転移圧力を超高温まで精密決定し、最下部マントルの温度構造、さらには核からの熱フラックスを推定する。
- (3) ポストペロフスカイト相の電気伝導度測定し、下部マントルの電気伝導度プロファイルを作成する。
- (4) 核・マントル物質の化学反応をあきらかにし、外核の化学組成を推定する。
- (5) 鉄合金の密度を測定し、外核の軽元素を推定する。
- (6) 内核圧力における超高温実験に向けた技術開発を行う。
- (7) 内核・外核境界における結晶化プロセスをあきらかにし、内核の化学組成を推定する。
- (8) 内核物質の結晶構造を決定し、内核の異方性の成因をあきらかにする。

### 2. 研究の進捗状況

これまでに上記8つの目的のうち、6つについて以下の成果を得た。

- (1) マントルへ沈み込んだ玄武岩質海洋地殻の状態図をあきらかにし、マントル最下部に集積しているという最初の証拠を提示した。
- (2) ポストペロフスカイト相転移境界を正確に決定し、最下部マントルの温度構造、さらにはコアからの熱流量を見積もった。

- (3) 下部マントル鉱物の電気伝導度を測定した結果、鉄のスピ状態の変化に伴い下部マントル中位で大きく減少すること、逆にポストペロフスカイト相転移によって数桁上昇することがわかった。最下部マントルがきわめて高い伝導度を持つことにより、マントルの最下部と液体の外核との間に強い電磁氣的結合が生まれ、その結果マントルの自転速度にも影響を与えていることが示された。
- (4) 最下部マントル鉱物と溶融鉄との間の平衡実験を行い、核・マントル物質の化学反応によって、核にはシリコンと酸素が大量に溶け込み得ることをあきらかにした。その結果、外核最上部には外核本体と組成の異なる低密度レイヤーが存在することを示唆した。
- (5) 酸化鉄、鉄-シリコン合金、鉄-硫黄化合物、鉄-炭素化合物の4つにつき、圧力-密度曲線を270GPaに至る超高压まで決定した。得られた圧縮率を、観測される外核の圧縮率と比較して、酸素や炭素がコア中の重要な軽元素ではないこと、一方シリコンもしくは硫黄こそが有力候補であることを示した。
- (6) 超高压超高温の発生に向け、技術開発を極めて精力的に行った。その結果、ついに364GPa・6000Kという、まさに地球中心に相当する条件の発生に成功した。これは世界初の快挙である。

### 3. 現在までの達成度

- ① 当初の計画以上に進展している。  
この3年間、研究は当初の計画を上回るペースできわめて順調に進み、予想していた結果以上の成果が挙げられている。なかでも、最も重要な成果は、超高压超高温の発生である。当初、本研究期間内の目標を364GPa・4000K

においていたにも関わらず、昨年末になって目標を温度の面で大きく上回る、364GPa・6000Kの発生に成功した。これはまさに、地球中心の圧力・温度に相当する。もちろん、動的な実験を除き、世界初の快挙である。超高压超高温の発生技術は、地球深部物質に関する実験的研究の、最も基礎かつ最大の武器である。世界的に見ても、これまでの実験は、地球の外核最上部の条件までにとどまっていた。今後、この技術を用いることにより、地球内部最後のフロンティアである、金属コアの実験が可能になる。その理解が飛躍的に進むことは間違いない。

その他も研究についても、期待通り以上の成果を挙げている。玄武岩地殻物質の状態図を作成したばかりでなく、カリフォルニア大学のLay教授との共同研究により、最下部マントルに複数回の地震波速度ジャンプを示すデータを得たことにより、世界で初めて、玄武岩地殻物質がマントルの底に溜まっている証拠を見つけることができた。ポストペロフスカイト相転移の境界を精密に決定したところ、先行する理論研究の結果よりもずいぶん大きな値のクラペイロン勾配を持つことがあきらかとなり、マントル対流への貢献が予想以上に大きいことが初めてあきらかになった。ポストペロフスカイト相の電気伝導度はペロフスカイト相の3桁も高いことがわかったのも驚きであった。その結果、コアとマントルの電磁気カップリングの重要性を指摘した論文をScience誌に掲載することができた。マントル物質と共存する溶融鉄（外核の液体）へのシリコンと酸素の溶解度も予想をはるかに超えていた。その結果、外核最上部に組成の異なる軽い液体が成層しているというアイデアに結びついた。軽元素を含む鉄の圧縮率を測定し、観測されているコアの密度プロファイルとの整合性をチェックすることにより、軽元素を特定しようという試みは世界で初めてのものであった。未だ固体の測定にとどまっているが、ひとつの有力な手段を提示できたと考えている。最後に、地球中心の超高压超高温条件まで、鉄の状態図を決定することができた（論文を準備中）。これは研究代表者が10年以上夢見ていたことでした。これらは一流の成果であると思っています。

#### 4. 今後の研究の推進方策

残る2つの目的に沿って、以下の研究を行う。

(1) 鉄-シリコン系、および鉄-硫黄系の溶融実験を行い、共存する固体と液体の化学組成を決定する。その結果を内核・外核境界の密度ジャンプに関する観測データと比較し、核に含まれる軽元素を特定する。

(2) 少量のこれらシリコンもしくは硫黄を含む鉄化合物のX線回折実験を364GPa・6000K

まで行い、内核を構成する金属の構造をあきらかにする。

さらに、本研究の進展の結果、あらたに出て来た、以下の2つの問題解明に挑む。

(3) 天然組成のペロフスカイト相・ポストペロフスカイト相中の鉄の2価・3価比を決定する。さらに、価数を考慮に入れて、フェリペリクレス相との鉄分配をあきらかにする。

(4) 下部マントル鉱物の熱拡散率を高圧下で測定し、核からマントルへの熱流量を見積もる。

#### 5. 代表的な研究成果

(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3件)

1. Tateno, S., Hirose, K., Sata, N., Ohishi, Y., Determination of post-perovskite phase transition boundary in  $MgSiO_3$  up to 4400 K and implications for thermal structure at the base of the mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 277, 130-136, 2009. 査読有
2. Ohta, K., Onoda, S., Hirose, K., Sinmyo, R., Shimizu, K., Sata, N., Ohishi, Y., Yasuhara, A., The electrical conductivity of post-perovskite in Earth's D" layer, *Science*, 320, 89-91, 2008. 査読有
3. Kwayama, Y., Hirose, K., Sata, N., Ohishi, Y., Phase relations of iron and iron-nickel alloys up to 300 GPa; Implications for the composition and the structure of the Earth's inner core, *Earth and Planetary Science Letters*, 273, 379-385, 2008. 査読有

[学会発表] (計3件)

1. 廣瀬敏, "Discovery of post-perovskite and the new views of core-mantle boundary region" International Union of Geodesy and Geophysics 2007, 2007年7月6日, ペルージャ.
2. 廣瀬敏, "Partitioning of iron in the lower mantle" Fall Meeting, American Geophysical Union, December 2007年12月12日, サンフランシスコ.
3. 廣瀬敏, "High-pressure studies of core materials" Gordon Conference, 2009年6月18日, ボストン.

[その他] ホームページ

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/hirose/research.html>