

地球核とマントル・核境界の超高压地球科学
Ultra-high pressure earth science of the core
and mantle-core boundary

大谷 栄治 (Ohtani Eiji)

東北大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

この研究では、金属鉄・軽元素系の合金について高压下での相転移の様式と状態方程式を決定し、金属鉄とケイ酸塩との反応の有無、それらの間の元素分配を明らかにすることによって、地球核とマントル・核の境界部の状態と形成過程を明らかにした。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

理学／地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学／核、マントル・核境界、超高压、高温

1. 研究開始当初の背景・動機

地球中心部の研究は、これまで達成できる温度圧力条件の限界のために、高压への大きな外挿や核のモデル物質を用いた研究がなされているに過ぎなかった。最近、高温高压発生技術や微小試料の分析技術が向上し、地球中心部の条件を本当に達成し、そこでの物質の状態と反応を明らかにすることが可能になった。このような背景のもと、核マントル境界と核の条件を実際に達成して、そこでのマントル核の反応と核の状態を解明するための実験的研究に着手した。

2. 研究の目的

地球核とマントル・核の境界部に焦点をあて、金属鉄・軽元素系の合金について高压下での相転移の様式を解明し、それらの状態方程式を決定する。核マントル境界の実体を解明するために、金属鉄とケイ酸塩との反応を明らかにする。そして、核の形成過程を解明するために、初期地球のマグマオーシャンの条件のもとで、金属鉄と下部マントル鉱物やマグマとの元素の分配実験を行い、マグマオーシャン内部で核の形成過程を明らかにする。これらの研究を総合して、核の構造と物性、形成と進化過程を解明する。

3. 研究の方法

本研究は、ダイヤモンドアンビル高压装置とマルチアンビル高压装置という二つの装置と放射光からの強力X線を組み合わせた高温高压X線回折実験、そして回収試料

のEPMAおよび分析電子顕微鏡による組成分析にもとづいて、金属鉄・軽元素合金の相転移、状態方程式、金属・ケイ酸塩間の元素分配実験を行い、核と核・マントル境界の実態を解明しようとするものである。

金属鉄・軽元素系の相転移、状態方程式を決定し核の構造を解明するために、主としてレーザー加熱ダイヤモンドアンビル高压装置と放射光を用いる。

核マントル境界部の実態を解明し、核の形成過程を明らかにするために、金属鉄とケイ酸塩の間の反応実験と元素の分配実験を行う。実験には、マルチアンビルとダイヤモンドアンビルの両方を駆使した実験を行う。回収試料の組成分析には、EPMA および分析電子顕微鏡を用いる。購入したキュービックアンビル、超高压プレス、油圧ユニット・コントローラは、この実験に使用するものである。さらに、これらの実験に用いる出発物質を合成するために高周波炉を導入した。

4. 研究の主な成果

本研究では、ダイヤモンドアンビル高压装置とマルチアンビル高压装置を用いた実験によって、核および核マントル境界での相転移と反応、核の形成期の反応を明らかにした。これまでに行われた実験結果は以下のようにまとめることができる。

(1) 下部マントルの代表的鉱物である(Mg, Fe)O系に関してレーザー加熱法と放射光を用いた高温高压X線その場観察実験を行った。(Mg, Fe)OやFeOは100万気圧2000Kの条件下でもNaCl構造が安定である

〔4. 研究の主な成果 (続き)〕

事を見出し、FeO 端成分側で出現する NiAs 相・及び金属相が、5%-20%の Mg 成分を含んだ組成では NiAs 相が観察されず、下部マントル条件下では岩塩構造相が安定であることを見出した。

(2) 鉄-珪素合金について室温下で、地球核内部の条件である約 200 万気圧までの圧縮曲線を得た。その結果、珪素が入る事によって鉄珪素合金は純鉄よりも非圧縮的に(硬く)なる事が明らかになった。珪素は内核の鉄にくらべて低い密度と速い地震波速度を説明することができ核中に存在する軽元素の有力候補である。

(3) 核の軽元素の候補として有力な水素と鉄の合金について高圧力下での圧縮特性を室温下 80 万気圧まで調べた。dhcp 構造の鉄水素化合物が磁気転移と考えられる圧縮曲線の異常を示す事を見出し、高圧下では逆に非圧縮的挙動を示す事を示した。この結果は、鉄水素化合物 FeH において、第一原理計算で、予想された転移とそれに伴う体積弾性率の増加が、実験的に確認されたことを意味する。今回の実験結果、地震波解析で得られた核の密度を説明する核内部の水素量は、核の軽元素がすべて水素であると仮定しても、水素量が 6-20 atm%と少なく従来の推定値の 1/3 程度である。

(4) 金属鉄と水 (H₂O) の反応を 84GPa まで明らかにした。その結果、10GPa を超える高圧下、で 1000K 以上の高温で、金属鉄と水が反応し、鉄水素化合物と酸化鉄が生成することが実験的に明らかになった。この反応は、地球の集積時の初期地球内部で生じ、コアの軽元素として水素が鉄に溶解することが明らかになった。

(5) マルチアンビルによる実験においては、圧力約 30GPa のもとで約 3000°C までの条件で MgSiO₃ ペロブスカイトと金属鉄が反応しマグネシオブスタイトが生じ金属鉄メルト中に Si と O が溶解する反応を確認した。この反応は大きな圧力・温度依存性がある。この結果から、断熱的な温度プロファイルに従う核の分離に伴って、鉄中への Si と O の溶解が進むことが明らかになった。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

今回の実験によって、ダイヤモンドアンビル高圧装置によって実際に核・マントル条件を実現することの重要性を世界に認識させることができた。世界の複数の研究グループがさらに高温高圧の地球中心部の条件を目指す研究を開始しており、成果を競い合っている。試料の分析電子顕微鏡による分析を、核マントル境界条件から回収し

た試料に対して、世界で始めておこなった。このような極端条件から回収試料に対して、分析電子顕微鏡による分析が有効であることを示した。レーザー加熱・温度測定システムや試料の加工は非常に優れており、海外の研究機関からも利用希望がなされ共同研究を開始している。同様の手法を用いた研究が欧米でも開始されている。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1. Sakai T., Kondo T., **Ohtani E.**, Terasaki H., Endo N., Kuba T., Suzuki T. and Kikegawa T., (2006), Interaction between iron and post-perovskite at core-mantle boundary and core signature in plume source region, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2006GL026868.
2. Hirao N., **Ohtani E.**, Kondo T., Endo N., Kuba T., Suzuki T. and Kikegawa T., (2006). Partitioning of potassium between iron and silicate at the core-mantle boundary, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2005GL025324.
3. Kawazoe T., **Ohtani E.**, (2006), Reaction between liquid iron and (Mg,Fe)SiO₃-perovskite and solubilities of Si and O in molten iron at 27 GPa, *Phys. Chem. Minerals*, Doi 10.1007/s00269-006-0071-4.
4. Terasaki H., Suzuki A., **Ohtani E.**, (2006), Effect of pressure on viscosity of Fe-S and Fe-C liquids up to 16GPa, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, L22307, doi: 10.1029/2006GL027147.
5. **Ohtani, E.**, Kondo, T. et al., Iron-water reaction at high pressure and temperature, and hydrogen transport into the core, *Phys. Chem. Minerals.*, 32, 77-82 (2005) , DOI 10.1007/s00269-004-0443-6.
6. Hirao, N., Kondo, T., **Ohtani, E.**, et.al., Compression of iron hydride to 80 GPa and hydrogen in the Earth's inner core, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06616, doi: 10.1029/2003GL019380, (2004).
7. Hirao, N., **Ohtani, E.**, et al., Equation of state of iron-silicon alloys to megabar pressure, *Phys. Chem. Minerals*, 31, 329-336, DOI 10.1007/s00269-004-0387-x (2004).
8. Kondo, T., **Ohtani, E.**, et.al, Phase transitions of (Mg,Fe)O at megabar pressures, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 143-144, 201-213 (2004).

ホームページ等

<http://www.ganko.tohoku.ac.jp/bussei/achievement/kakenhi/index.html>