

鉄融体の密度・圧縮性に与える炭素の効果

The effect of carbon on density and compressibility of liquid iron

下山 裕太¹⁾ 田窪 勇作²⁾ 寺崎 英紀²⁾ 西田 圭佑¹⁾ 浦川 啓³⁾ 鹿室 僚太³⁾ 岸本 俊八³⁾ 片山 芳則⁴⁾ 大谷 栄治¹⁾

Yuta SHIMOYAMA, Yusaku TAKUBO, Hidenori TERASAKI, Keisuke NISHIDA, Satoru URAKAWA, Ryota KAMURO, Shun-pachi KISHIMOTO, Yoshinori KATAYAMA, Eiji OHTANI

¹⁾ 東北大学 ²⁾ 大阪大学 ³⁾ 岡山大学 ⁴⁾ 原子力機構

X線吸収法を用いて、5 GPa までの Fe-3.5wt%C メルトおよび Fe-FeO メルトの密度測定を行った。1500 K から 2100 K までのそれぞれ等温条件での圧力と密度の関係から、等温体積弾性率 (K_{0T}) を求めたところ、1500 K では $K_{0T}=26.5$ GPa、2000 K では $K_{0T}=36.8$ GPa という値が得られた。また Fe-FeO 共融組成合金融体の密度は、3 GPa, 2250 K の条件まで測定した。

キーワード : X線吸収法、高温高压、Fe-C融体、密度

1. 目的

地球の中心核は鉄を主成分とした鉄・ニッケル合金であると推定され、PREM モデルと純鉄の衝撃波実験から地球の外核の密度は純粋な溶融鉄よりも 10~15wt%小さいことが知られている。地球外核には Fe-Ni 系合金に H,C,O,S,Si などの軽元素が含まれているとされ、軽元素の効果により密度が純鉄と比べて 10%程度軽減しているとされている。先行研究から炭素は 1 気圧で溶融鉄との高い反応性を示し(Ogino et al., 1984)、地球核に炭素が 2~4wt%程度含まれることが示唆されている(Wood, 1993)。よって炭素が外核に含まれる可能性は高く、Fe-C 系メルトの密度情報は核の物性を調べる上で重要となる。そこで本研究では Fe-C 系メルトの密度測定を行い、炭素の溶融鉄密度への依存性から核中における炭素の存在の可能性を探ることを目的とする。

2. 方法

高压発生には 180ton キュービックマルチアンビルプレス(SMAP-180, BL22XU 設置)を用いて行った。アンビル先端部の長さ:TEL(Truncated Edge Length)は 4 mm を使用した。単色 X 線(35keV)を試料部に導入し、入射 X 線と透過 X 線の強度をイオンチャンバーを用いて測定した。このときプレスを X 線と直行方向に動かすことにより試料の吸収プロファイルを得た。ランベルト・ベールの式より、密度は入射 X 線強度と透過 X 線強度の比で表すことができる。得られた吸収プロファイルをランベルトベールの式を用いてフィッティングすることにより試料の密度を求めた。このとき密度を計算するには定数である質量吸収係数が必要であるため、あらかじめ粉末 Fe-C 試料をコールドプレスにより固めてペレットを作成し、そのペレットの吸収プロファイルと密度から質量吸収係数を導出した。ここで固体と液体における試料の質量吸収係数に差はないと仮定した。試料は Fe-3.5wt%C を使用し、圧力条件は 3.5-7.5 GPa、温度条件は 1100-2100 K の範囲にて行った。試料容器には高温高压下においても変形しにくい円筒状の単結晶サファイアを用いた。MgO と h-BN の粉末を体積比 1:1 で混合したものをプレッシャーマーカーとしてヒーター内に配置した。イメージングプレートを用いて収集したマーカーの X 線回折パターンと状態方程式から実験圧力を求めた。また Fe-FeO 試料を用いた密度測定についても行った。

3. 研究成果

Fe-3.5wt%C の密度を 1.8-6.5 GPa、1100-2100 K の条件下で測定した。その結果、温度上昇と共に密

度が減少する傾向が見られ、Fe-3.5wt%C の密度は 5.14 GPa, 1800 K において 7.82 g/cm^3 となった。また、1500 K から 2100 K までのそれぞれ等温条件での圧力と密度の関係から、等温体積弾性率 (K_{0T}) を求めた。この際 3 次の Birch-Murnaghan 状態方程式を用いて $K'=4$ と仮定し、フィッティングを行った。その結果 1500 K では $K_{0T}=26.5(\text{GPa})$ 、2000 K では $K_{0T}=36.8 \text{ GPa}$ という値が得られた。

また Fe-FeO 共融組成合金の密度を 3 GPa, 2250 K までの高温高压条件下で測定することに成功し、得られた密度は 3 GPa, 2088 K において 6.58 g/cm^3 であった。

4. 結論・考察

1.8-6.5 GPa、1100-2100 K における Fe-C 融体の密度の温度・圧力依存性が得られたが 1800 K 以下では、4-6 GPa の圧力領域で圧縮性の変化が見られた。これは 1800 K 以下のデータが高压側で部分溶融状態にあった可能性のためであると考えられる。あるいは Sanloup et al.(2011)の主張する 5 GPa 前後に Fe-C melt の構造変化に伴うとされる圧縮性の変化がある可能性も否定できない。今後はさらに圧力の異なる条件で密度測定を行い、データを増やすことで、より正確な K_{0T} および K' を求め、Fe-C melt の圧縮性の変化についての評価を行う。

加えて、融点が高く高压下において困難とされる Fe-O 系合金融体の密度測定に初めて成功した。今後は試料密度の温度および圧力依存性を明らかにしていき、これまでに報告されている他の Fe-軽元素合金の密度測定の結果(e.g. Nishida et al. 2011)と比較し、中心核の軽元素候補を評価する予定である。

5. 引用(参照)文献等

Terasaki H., K. Nishida, Y. Shibazaki, T. Sakamaki, A. Suzuki, E. Ohtani, and T. Kikegawa, Density measurement of Fe_3C liquid using X-ray absorption image up to 10 GPa and effect of light elements on compressibility of liquid iron, J. Geophys. Res., Vol. 115

Nishida K., E. Ohtani, S. Urakawa, A. Suzuki, T. Sakamaki, H. Terasaki, and Y. Katayama Density measurement of liquid FeS at high pressures using synchrotron X-ray absorption, American Mineralogist, Volume 96, pages 864-868, 2011