

Fe-C および Fe 融体の密度・圧縮率不連続変化の探査

Investigation of the discontinuous change of density and compression ratio of liquid Fe-C and Fe

下山 裕太¹⁾ 田窪 勇作²⁾ 浦川 啓³⁾ 寺崎 英紀²⁾ 近藤 忠²⁾ 桑原 荘馬³⁾
大谷 栄治¹⁾ 片山 芳則⁴⁾

Yuta SHIMOYAMA, Yusaku TAKUBO, Satoru URAKAWA, Hidenori TERASAKI, Tadashi KONDO, Soma KUWABARA,
Eiji OHTANI, Yoshinori KATAYAMA

¹⁾東北大学²⁾大阪大学³⁾岡山大学 ⁴⁾原子力機構

(概要)

Fe-C融体の密度測定を 6.5-6.8 GPa, 1600-1800 Kまでの温度圧力条件で行った。Fe-O融体の密度測定をX線吸収法により、2000-2200 K, 0.5-6.0 GPaまでの温度圧力条件で行った。等温条件における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、Fe-C融体については、 $K_{0T}=55.3$ GPa, Fe-O融体については $K_{0,2100K}=60$ GPaとなった。

キーワード：X線吸収法、高温高圧、Fe-C融体、密度

1. 目的

地球外核は 10 %ほどの軽元素(珪素、酸素、硫黄、炭素、水素など)を含む鉄合金融体で構成されているとされ、その組成や構造を解明するためには、鉄融体の物性に与える軽元素の影響を定量的に評価することが必要である。これまで、我々はFe-3.5 wt% C融体の密度測定を行ってきた結果、5 GPa, 1800 K付近において密度の不連続変化の可能性が示唆された。これに似た報告はSanloup et al.(2011)において異なる炭素含有量のFe-5.7 wt% C融体でもなされている。しかし、圧縮率に関しても不連続変化があるかは特に 5 GPa 以上の密度測定データが不足しているため、いまだ評価できていない。そこで本研究では、5 GPa 以上の圧力下においてFe-CおよびFe融体の密度測定を行い、融体密度の圧縮率変化における不連続性の有無を探査することを目的とした。また、Fe融体に酸素が含有された場合の密度・圧力変化についても調べ、炭素と酸素の鉄融体密度および圧縮率に与える影響を調べた。

2. 方法

高圧発生はBL22XU設置の180 tonキュービックマルチアンビルプレスを用いて行った。アンビル先端部サイズは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ため(例えばNishida et al. 2011)、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。試料の加熱には円筒形グラファイト抵抗ヒーターを使用し、W/Re3-25熱電対を用いて測温を行なった。また、圧力はMgOとh-BNまたはMgOとPtの混合粉末をプレッシャーマーカーとして使用紙、イメージングプレートを用いて収集したプレッシャーマーカーのX線回折パターンから求めた。Fe-3.5Cwt% C融体の密度測定を6.5-6.8 GPa, 1600-1900 Kにて測定した。Fe-2.2wt% FeO試料については、圧力条件は0.5-6.0 GPa、温度条件は2000K-2200Kにて測定を行った。試料容器には高温高圧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。

3. 研究成果

Fe-3.5Cwt% C融体の密度測定について、今回の結果と今までの結果を組み合わせた結果、5 GPa以上の高圧側の密度データと調和的な傾向を示すことが分かった。このことから、5 GPaを境界としてFe-C融体の密度不連続変化があらためて示される結果となった。また、低圧側の体積弾性率 K_{0T} は 55.3 ± 2.5 GPaとなった。高圧側の体積弾性率に関しては測定圧力範囲が狭くデータ点の制約もあることから低圧側との違いを明らかにするには至らなかった。

Fe-0.5wt%O融体の密度は0.5-6.0 GPa、2000-2200Kの条件下で測定した。2100 K付近において得られたFe-O融体の密度を測定条件と同じ0.5-6.0 GPaの圧力範囲での純鉄の密度と比較すると、2-7 %程度の密度減少があることがわかった。また、密度の圧力依存性から2100 KにおいてVinet universal 状態方程式を用いて等温体積弾性率を求めたところ、2100 Kでは体積弾性率の圧力微分 $(dK_0/dP)_T=6$ と仮定した場合に $K_{0,2100K} = 60 \pm 20$ GPaとなった。この結果は、同じ温度条件で求めた純鉄の等温体積弾性率 $K_{0,2100K} = 75$ GPa(Anderson and Ahrens, 1994)に近い値となった。

4. 結論・考察

本実験によるFe-C融体の密度測定から5 GPaを境界に密度の不連続変化があることが示された。この不連続変化の要因として、5 GPaにおけるFe-C系のリキダス相の変化の影響が考えられる。Fe-C系では5 GPaを境界に融体と共存するリキダス相がGraphiteから Fe_7C_3 に変化することが先行研究より明らかにされている(Nakajima et al. 2009)。本研究結果と過去の研究結果(Sanloup et al. 2011, Terasaki et al. 2010)より、Fe-C融体の密度は炭素量増加とともに非線形に減少し、測定温度圧力条件においてはFe-C融体は非理想混合することがわかった。

本実験でのFe-O融体の密度測定では密度低下が6.0 GPaまでの圧力条件において最大で7 %程度あり、鉄融体に及ぼす酸素の密度減少効果が確認された。また一方で、密度の圧力依存性については2100 KにおけるFe-O融体の等温体積弾性率の値が純鉄の値に近く、圧縮率に対する酸素の影響は小さいと考えられる結果が得られた。しかしFe-Oの体積弾性率はデータ点が十分でなく、誤差も大きいためさらなる異なる圧力条件での測定が必要である。本実験により6.8 GPaまでの条件におけるFe-C, Fe-O系融体の密度測定を行い、炭素と酸素の密度と体積弾性率に与える効果を明らかにすることができた。

5. 引用(参照)文献等

Anderson and Ahrens, 1994, An equation of state for liquid iron and implications for the Earth's core. *J. Geophys. Res.* 99, 4273-4284

Nakajima, Y., Takahashi, E., Suzuki, T., Funakoshi, K., 2009. "Carbon in the core" revisited, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 174, 202-211

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

Sanloup, C., W. van Westrenenc, Dasgupta, R., Maynard-Caselye, H., Perrillat, J.-P., 2011. Compressibility change in iron-rich melt and implications for core formation models. *Earth and Planetary Science Letters*, 306, 118-122.

Terasaki, H., K. Nishida, Y. Shibasaki, T. Sakamaki, A. Suzuki, E. Ohtani, T. Kikegawa, 2010. 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, *Journal of Geophysical Research*, 115, B06207, doi:10.1029/2009JB006905.