

液体鉄の密度測定とその圧力依存性の解明

Density measurements of molten pure iron under pressure

浦川 啓²⁾ 下山裕太³⁾ 寺崎英紀¹⁾ 西田圭佑³⁾ 中塚明日美²⁾

横田育美²⁾ 鹿室僚太²⁾ 田窪勇作¹⁾ 片山芳則⁴⁾ 大谷栄治³⁾

Satoru URAKAWA, Yuta, SHIMOYAMA, Hidenori TERASAKI, Keisuke NISHIDA, Asumi NAKATSUKA,

Ikumi YOKOTA, Ryota KAMURO, Yusaku TAKUBO, Yoshinori KATAYAMA, Eiji OHTANI

¹⁾大阪大学 ²⁾岡山大学 ³⁾東北大学 ⁴⁾原子力機構

(概要)

液体純鉄の密度を X 線吸収法によって約 3GPa までの圧力で求めた。測定された密度は、1 気圧における音速と密度および衝撃圧縮から得られた液体純鉄の弾性データに基づく状態方程式と調和的であった。また、3.2GPa における液体純鉄の熱膨張率は $7.7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ と 1 気圧の熱膨張率の下限に近い値を示した。上記に加えて、Fe-3.5wt%C 融体の 3.5, 7.5 GPa における密度を測定した。

キーワード : 地球中心核, 溶融鉄, 状態方程式, 密度

1. 目的

地球磁場の直接の成因となる中心核の対流運動や、地球内部ダイナミクスを規定する核の温度構造を議論するにあたり、溶融状態にある外核の組成や物性は大変重要である。観測された地震波速度と鉄合金メルトの弾性波速度の比較から、核の化学組成について制約を与えることができる。液体の弾性波速度は断熱体積弾性率と密度で表わされるので、鉄合金メルトの圧力下における密度を決めることが重要である。我々はこれまで X 線吸収法を用いて、核構成物質の有力候補である Fe-10wt%Si, Fe-10wt%S 融体の密度測定を行い、4 GPa までの密度の圧力依存性を決定した。この結果から、Si, S によって密度や体積弾性率に与える効果は一樣ではなく、軽元素の種類によって密度や弾性定数は異なることが明らかとなりつつある。これらの軽元素が純鉄の密度・体積弾性率に対して、どのような影響があるか定量的に議論するためには、液体純鉄の密度の温度・圧力依存性の情報が当然必要となる。ところが、核の第一主要元素である鉄は高融点のため実験が難しく、高圧下の密度データは少ない。そこで本申請課題では、主に液体鉄の密度および体積弾性率について X 線吸収法を用いて求めることを目的に研究を行った。

2. 方法

高温高圧実験は 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。圧力を発生させる超硬アンビルの先端サイズは 4 mm のものを使用した。単色 X 線 (35 keV) をコリメーターで $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ に絞り、試料部に導入し、入射 X 線と試料を通しての透過 X 線の強度はイオンチャンバーを用いて測定した。密度測定に必要な試料の吸収プロファイルはプレスをスキャンさせることにより求めた。得られた吸収プロファイルとランベルト・ベールの式により密度を導出することが可能となる。試料には Fe 粉末を使用した。試料容器には、高圧下における変形が小さいと考えられる円筒状の単結晶サファイアを用いた。実験は圧力 3.2GPa、温度 2300K までの条件で行った。またイメージングプレートで収集した粉末 X 線回折パターンから、試料の相同定と融解判定、および圧力測定を行った。さらに Fe-3.5wt%C 試料についても 7.5 GPa, 2000 K までの圧力・温度条件で測定を行った。

3. 研究成果

本研究では X 線回折から見積もった固体の鉄の密度から、各実験における鉄の X 線吸収係数を決めた。異なる温度で決めた鉄の X 線吸収係数は調和的であり、ランベルト・ベールの関係から見積もった液体鉄の密度も十分に信頼できると考えられる。今回の実験では液体鉄の密度測定に成功したのは 2.4GPa の 1 点と 3.2GPa の 3 点だけであり、液体鉄の状態方程式を求めるにはまだ不十分である。しかし、これらの

密度データは、液体鉄の体積弾性率(Hixson et al., 1990), 体積弾性率の圧力微分(Anderson and Ahrens, 1994), および熱膨張率(Nasch and Steinemann, 1995)を用いて3次のBirch-Murnaghanの状態方程式から求めた密度と調和的であった。また、3.2 GPaのデータから液体鉄の熱膨張率は $7.7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ と求めた。Fe-C 融体については、3.5 GPa, 1700 Kにおいて密度は 5.83 g/cm^3 となり、温度上昇と共に減少していく傾向が見られた。

4. 結論・考察

我々は純鉄メルトに対して密度測定だけではなくX線回折法による構造データも蓄積しており、その結果7 GPaまでは純鉄メルトは一様収縮することがわかっている。このことと今回の密度測定の結果が1気圧における弾性データと調和的であることから、純鉄メルトの密度を数 GPa までの圧力範囲では3次のBirch-Murnaghanの状態方程式で表すことができる。そして、熔融鉄の弾性と密度に対する軽元素の影響を考える上で既存データをレファレンスとして用いることが可能であることを示している。

3.2 GPaにおける熱膨張率の値はNasch and Steinemann (1995)による1気圧のデータと調和的であるが、Brillo and Egry (2004)の熱膨張係数の約半分である。前者はγ線吸収法による密度測定から後者はレーザーによる体積測定から求めたもので、1気圧でさえ結果が大きく異なっている。高圧下における吸収測定法は1気圧の測定に比べると精度は落ちるが、データの整合性という観点から1気圧の密度データの吟味を行うことができる。

5. 引用(参照)文献等

- Anderson WW and Ahrens TJ (1994) J. Geophys. Res. 99, 4272-4284.
Brillo J and Egry I, (2004) Z. Metallkd., 8, 691-697.
Hixson RS, Winkler MA, and Hodgdon ML (1990) Phys. Rev. B, 42, 6485-6491.
Nasch PM and Steinemann SG (1995) Phys. Chem. Liq., 29, 43-58.