

2023年度岡山大学 惑星物質研究所 共同利用・共同研究 成果報告書

提出日： 2024年 5月 20日

共同利用研究の種類：国際共同研究 一般共同研究 設備共同利用 ワークショップ

課題名： 高圧下における Fe 合金液体の固体鉄およびマントル鉱物中への浸透特性

共同研究員氏名：寺崎 英紀

所属・職名：岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域・教授

分担者氏名：芳野 極

分担者所属・職名：岡山大学惑星物質研究所・教授

分担者氏名：松原 潮李

分担者所属・職名：岡山大学大学院自然科学研究科・M2

分担者氏名：小林 幸太郎

分担者所属・職名：岡山大学大学院環境生命自然科学研究科・M1

研究報告：

研究目的

鉄合金液体が鉄合金固体間やケイ酸塩鉱物間に浸透するかどうかを明らかにすることは、微惑星や地球型惑星内部の分化過程（コア-マントル分化，コアの固化過程（液体-固体コア分化））を理解するうえで重要である。また地球型惑星内部における物質分布を理解するには、地球型惑星の前段階である微惑星内部の物質分布や分化過程についての情報が必要である。

そこで本研究では、本研究テーマの1つである“微惑星内部条件下でのコア-マントル分離過程”について、微惑星内部において浸透によるコア-マントル分離が起こるかを検証するため、微惑星内部条件下で微惑星マントルの主要鉱物の1つである斜方輝石（Opx）中のFeSメルトの浸透を調べた。2022年度までの共同研究で、Opx粉末と合成したOpx焼結体を用いてOpx中のFeSメルトの浸透に対する初期空隙率の違いの影響を調べたところ、Opx粉末と焼結体の両方でFeSメルトの浸透が観察された。2023年度の研究では、三次元組織観察を実施して浸透組織やメルト分布をより詳細に調べ、さらに実験保持時間を変えてFeSメルト移動の時間変化を調べ、メルトの移動速度を推定することを目指した。

次に本研究テーマのもう1つのテーマである“固体鉄中の鉄合金液体の浸透特性”の研究では、微惑星や惑星の中心核（コア）が冷却して固化する際に、固体鉄粒間に液体成分が捕獲され残留するか否かを決定する。軽元素を多く含む鉄合金液体成分が、固体鉄粒間に捕獲されると、固体コアの融点降下や密度・弾性定数の減少が起こるため、天体内部の熱史やダイナミクスに大きく影響する。微惑星のコアとされる鉄隕石では、微量元素分析などに基づく先行研究（例えば、Wasson 1999）により、鉄合金中にFe-Sメルトが捕獲されるモデルが提唱されている。我々は2022年度までの共同利用課題において、固体鉄中のFe-Sメルト液体の濡れ性（固液間の二面角）を、小天体内部条件

(0.5~3.0 GPa) で調べた。その結果、二面角は圧力増加と共に減少し、これはメルト中の S+O 量の圧力変化と相関がある事が分かった。いずれの条件でも二面角は閾値の 60° を下回り、Fe-S メルトが固体鉄中を浸透できることが分かった。そこで 2023 年度の共同研究では、固体鉄中の Fe-S メルトの三次元分布と移動度合い・速度を調べるため、セル内に組成や温度勾配をつけ、組織観察からメルトの移動度合いを調べた。

実施内容

Opx 粉末はガス雰囲気炉で 1300 °C、保持時間 24 時間、 $\Delta IW = +1$ という条件で合成した。Opx 焼結体は、合成した Opx 粉末をピストンシリンダー高圧装置で 1 GPa, 1000 °C で焼結した試料を超音波加工機で円盤状に切り出した。FeS-Opx の浸透実験では、出発試料は FeS ペレットを Opx 粉末ペレットまたは Opx 焼結体で挟み層状に配置した。試料はグラファイトカプセルに封入し、1 つの実験で上下 2 つのカプセルを配置し、Opx 粉末と Opx 焼結体の試料の場合で同じ実験条件で実験した。浸透実験は、岡山大学惑星物質研究所のピストンシリンダー型高圧装置を使用し、圧力・温度条件は、0.75 GPa、1250 °C で行い、保持時間は 15-300 分の範囲で時間を変化させた。回収試料は、二面角測定と組成分析のため一部で SEM/EDS 観察と EPMA 分析をおこない、一部をエジンバラ大学において X 線 CT 測定をおこない、FeS メルトの三次元分布を調べた。

固体鉄中の Fe-S メルトの移動度合いを調べる実験では、試料部をヒーター低温部まで拡張し、試料内に温度勾配をつけ、メルトの移動度合いを調べた。出発試料は、これまでの二面角を調べた組成と同じ Fe-2wt%S 組成を用いた。試料を MgO カプセルに封入し、実験を行った。高圧実験はピストンシリンダー型高圧装置を使用した。圧力・温度条件は 1.0 GPa, 1323 K で行い、保持時間は 1~8 h の範囲で 1-2 h おきに時間を変化させた。試料の二次元組織観察には SEM を用い 500 倍の画像を 100—200 枚程撮影した。組成分析には SEM/EDS または EPMA を用いた。三次元組織観察には X 線 CT 測定をエジンバラ大学にて実施した。得られた SEM 画像および CT 画像の解析には画像処理ソフトウェア Fiji を使用し、メルト分布を評価した。

研究成果

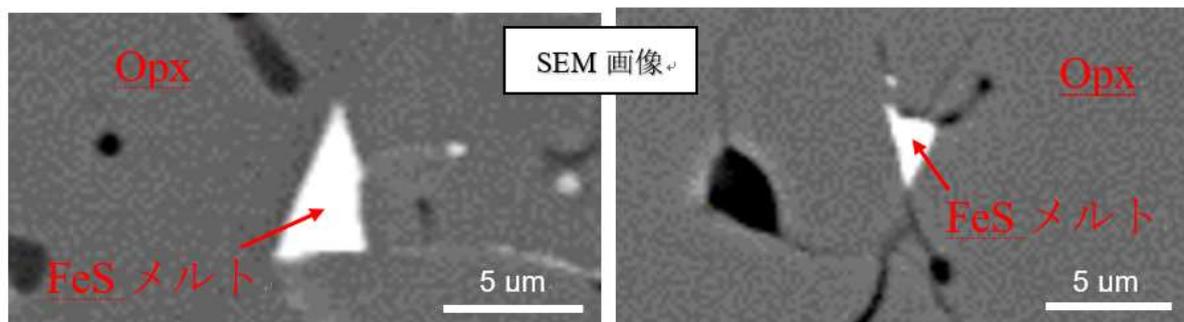


図 1. 0.75 GPa の Opx 中の FeS メルトの組織 (反射電子像) (左) Opx 粉末試料 (右) Opx 焼結体試料

Opx-FeS メルトの浸透実験の結果、保持時間 60 分の試料について、SEM 反射電子像 (図 1) の解析から Opx-FeS メルト間の二面角を求めると、二面角は 59-60° となり閾値の 60° をわずかに下

回り、0.75 GPa では浸透が起こりうる結果となった。また CT 像から得られたメルトの三次元分布を解析した結果、Opx 粉末、Opx 焼結体層のいずれの層へも FeS メルトの浸透が観察された (図 2)。Opx 焼結体でも浸透が観察されたことから、空隙率の小さい焼結の進んだマントル中においても浸透によるコア-マントル分化が起こり得ることが示唆される。ただし焼結体ではメルトの移動距離が小さかったため、マントルの空隙率や焼結度により分化度合いは変化すると考えられる。保持時間を変化させて調べたメルト分布の時間変化については、CT 測定を実施し、現在は CT 画像を解析中である。

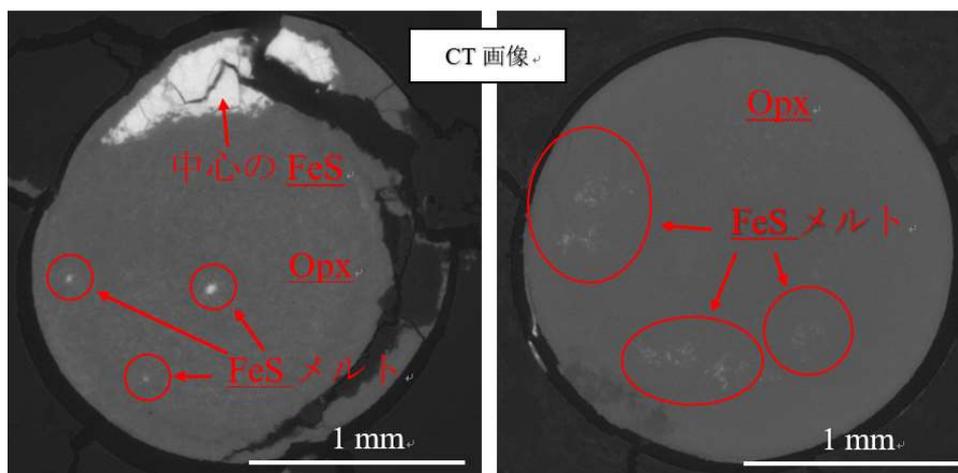


図 2. 0.75 GPa の Opx 中の FeS メルトの組織 (CT 断面像) (左) Opx 粉末試料 (右) Opx 焼結体試料。どちらも Opx 層中に FeS メルトが浸透していることが観察できる。

次に固体鉄中の Fe-S メルトの結果について、CT データによる Fe-S メルト分布の解析の結果、三次元に接続したネットワーク組織が観察された (図 3)。CT 断面像から水平・鉛直方向のメルト分布を解析すると、メルトは水平方向にほぼ均一に分布していた。一方、鉛直方向では上部ほどメルトフラクションが増加する傾向が見られた。

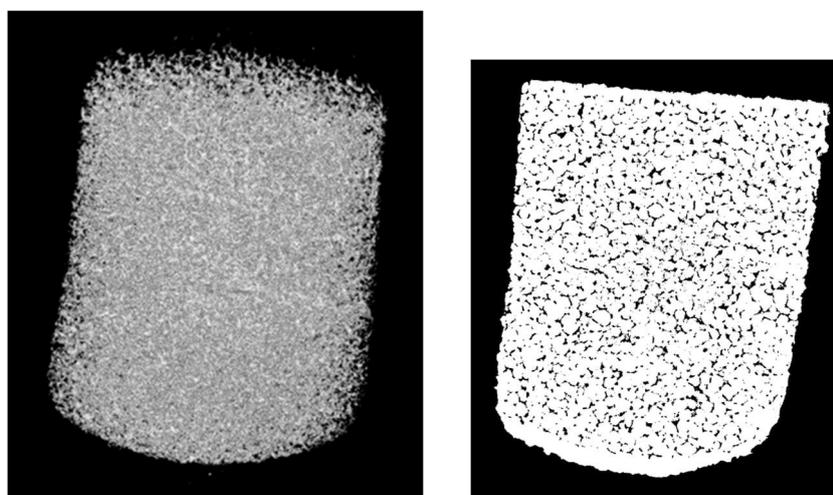


図 3. 1.5 GPa の固体鉄中の Fe-S メルトの組織。(左) Fe-S メルトの三次元分布 (明るい部分が Fe-S メルト)。(右) CT 断面像 (黒い部分が Fe-S メルト)。

固体鉄中の Fe-S メルト移動度を調べた実験では、1 h 保持した試料では、試料全体にわたって Fe-S メルトが固体鉄粒界に接続したネットワークを形成しているのが観察された。また試料の低温部ではメルトポケットが小さく、メルトフラクションの少ない領域が観察された。これより、この部分は固体鉄からのメルトの分離が進行していると考えられる。時間変化させた試料については現在、試料を X 線 CT 測定中である。CT データが得られたら、画像解析を進めメルトの三次元分布を明らかにし、微惑星コアの固化過程におけるメルトの分離過程を解明していく予定である。

【学術雑誌】

本研究に関して、以下の論文が *Meteoritics and Planetary Science* 誌に掲載された。

Matsubara, S., H. Terasaki, T. Yoshino, S. Urakawa, D. Yumitori, Wetting property of Fe–S melt in solid core: Implication to core crystallization process in planetesimals, *Meteoritics and Planetary Science*, <https://doi.org/10.1111/maps.14149>, 2024.

【学会発表】

2023 年度に本研究に関して以下の学会発表またはワークショップで発表を行った。

1. H. Terasaki, T. Yoshino, G. D. Bromiley, I. B. Butler, T. Miura, S. Matsubara, K. Kobayashi, 3D distribution of FeS melt in orthopyroxene mantle: Implication to core segregation in planetesimals, Japan Geoscience Union meeting 2023, May 21-26/2023. (International session)
2. S. Matsubara¹, H. Terasaki, T. Yoshino, S. Urakawa, K. Kobayashi, G. D. Bromiley, I. Butler, Evaluation of Fe-S melt segregation in solid core during core crystallization in planetesimals. Japan Geoscience Union meeting 2023, May 21-26/2023. (International session)
3. K. Kobayashi, H. Terasaki, T. Yoshino, S. Matsubara, S. Urakawa, G. D. Bromiley, I. B. Butler, The effect of porosity on FeS melt migration in orthopyroxene mantles in planetesimals. Japan Geoscience Union meeting 2023, May 21-26/2023. (International session)
4. H. Terasaki, T. Yoshino, G. D. Bromiley, I. Butler, K. Kobayashi, S. Matsubara, T. Miura, Possibility of percolative core formation in planetesimals. Workshop on Interiors of planetesimals and terrestrial planets (International), 2023/11/28, Okayama
5. S. Matsubara, H. Terasaki, T. Yoshino, S. Urakawa, D. Yumitori, Wetting property of Fe–S melt in solid core: Implication to core crystallization process in planetesimals. Workshop on Interiors of planetesimals and terrestrial planets (International), 2023/11/28, Okayama