

提出日： 2025 年 5 月 29 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： 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・M2

分担者氏名： 高木 彪

分担者所属・職名： 岡山大学理学部地球科学科・B4

研究報告：

研究目的

地球型惑星内部の物質や元素分布を理解するために、惑星の前段階である微惑星内部の分化過程についての情報は重要である。固体マントルから鉄合金メルトが分離するメカニズムとして、鉄合金メルトの鉱物粒間への浸透は有力な分離メカニズムの一つと考えられる。固体マントル中を鉄合金メルトが濡れる場合は浸透によるコア形成、濡れない場合は別のメカニズムによるコア形成が起こることになる。本研究では、微惑星内部と地球下部マントル条件において、鉄合金メルトとマントル鉱物間の濡れ性および浸透実験を行いコア形成過程について調べた。我々のこれまでの結果から、1.0-1.5 GPa 以下で FeS メルトは opx 粒間を濡れることがわかっている。

本課題では、まず微惑星～原始惑星内部条件下でのコアーマントル分化過程を明らかにするため、微惑星・原始惑星の主要マントル鉱物である opx と Fe-S 間の濡れ性（二面角）の圧力依存性を、これまでの 2.5 GPa から圧力を拡張して、3-5 GPa の原始惑星内部条件で調べた（二面角実験）。

次に浸透メカニズムによるコア形成のタイムスケールを制約するため、微惑星内部条件において鉄に富むマントル鉱物（olivine, opx）中への FeS メルトの浸透実験を行い、浸透組織の時間変化を調べた。更に多様なマントル内部を想定し、マントル鉱物空隙率の浸透への影響も調べた（浸透実験）。加えて、地球下部マントル条件での Fe-S メルトの下部マントル鉱物（ブリッジマナイト+フェロペリクレース）中の濡れ性についても調べた。

実施内容

二面角実験は、合成した Opx(Fe#=0.3)と FeS の混合粉末を用い、グラファイトカプセルに封入し

た。高温高压実験は、理学部地球科学科設置の川井型マルチアンビル高压装置を用いて 3-5 GPa, 1573-1773 K, 4 h 保持の条件で実施した。回収試料の組織観察は、惑星研の FE-SEM (JSM-7001F) を用い、組成分析は SEM/EDS および EPMA (JXA-8230, 岡大理学部) を用いた。反射電子像の画像解析から Opx と FeS メルト間の二面角を測定した。

浸透実験では、出発試料の Opx と Olivine(Ol)はそれぞれ Fe# = 0.3 を出発組成とし、ガス雰囲気炉を用いて 1573K, $\Delta IW = +1$ の条件で合成した。空隙率の影響を調べるために、Opx, Ol は、空隙率の大きい粉末ペレットと鉱物粒間が密着し空隙率の小さな焼結体の 2 種の状態を用いた。焼結体は、1.0 GPa, 1273 K で合成し、超音波加工機を用いて焼結体を円盤状に切り出した。浸透実験では、FeS 層を Opx または Ol (粉末ペレット又は焼結体) で挟み層状に配置し、FeS メルトの鉱物中への浸透を検証した。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 つのカプセルにそれぞれ Opx 粉末と Opx 焼結体の試料を入れ、同条件で実験を行った。高压実験は惑星研のピストンシリンダー高压装置を用いた。実験条件は、これまでの我々の実験により浸透が起こる条件(1.0-1.5 GPa 以下)である 0.75 GPa、温度は 1523, 1573 K で実施した。保持時間を 15-300 min と変えて、FeS メルトの移動距離とメルトフラクションの時間変化を調べた。回収試料は、X 線 CT (エジンバラ大学) と FE-SEM (惑星研) を用いて組織観察を行い、EPMA (岡大理学部) と SEM/EDS を用いて組成分析を実施した。

地球下部マントルの二面角実験では、試料は、opx+Fe-14wt%S の混合粉末をグラファイトカプセルに封入した。セル構成は、10/4 セル、ランタンクロマイドヒーターを用いた。惑星研の 5000t マルチアンビル高压装置を使用し、25 GPa, 1800 K, 12 h の条件で実験を実施した。

研究成果

二面角実験では、組織観察の結果、3-5 GPa の圧力条件では、FeS メルトは丸みを帯びた形状をしており、Opx 粒間への FeS メルトの浸透組織は確認できなかった(Fig. 1)。測定した二面角は、3-5 GPa において $83-104^\circ$ であり(Fig. 2)、全て浸透の閾値である 60° を上回り、圧力とともに増加する傾向が得られた。この傾向は 2.5 GPa までの実験で得られた我々のこれまでの結果とおおよそ整合的な傾向を示した。また 4 GPa 以上では二面角はほぼ横ばい傾向を示した。組成分析の結果、二面角が大きいほど FeS メルト中の酸素量の低下が見られた。これは酸素量の上昇により FeS メルトの

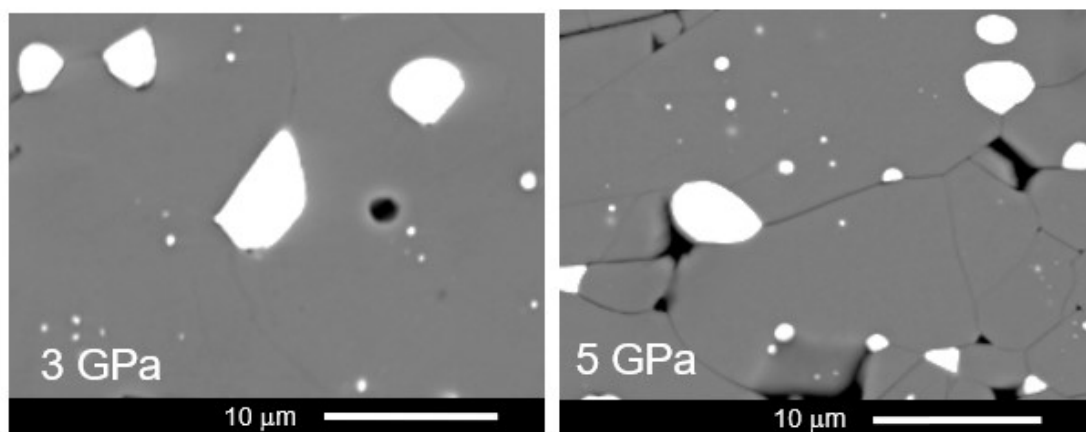


Fig. 1. Backscattered images of FeS melt in opx matrices at 3 and 5 GPa.

界面張力が低下し二面角が小さくなるためと考えられる。

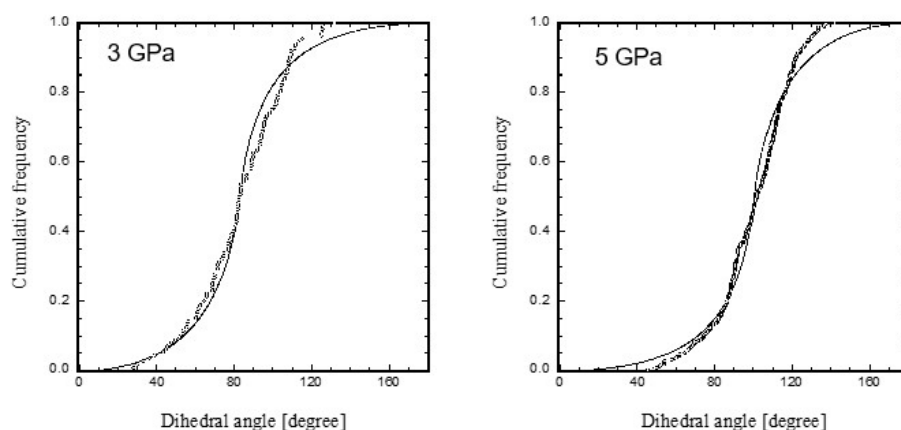


Fig. 2. Cumulative frequency curves of measured dihedral angles at 3 and 5 GPa (circles) and theoretical frequency curves

本研究の 3-5 GPa の圧力は、半径 1300-1700 km の原始惑星の中心圧力に相当する。よってこのような原始惑星の深部でのコア形成には浸透以外のコア形成メカニズムが必要となると考えられる。

浸透実験では、X 線 CT 像から得られたメルトの三次元分布の結果、Opx 粉末ペレット、Opx 焼結体のいずれの層へも FeS メルトの浸透が観察された。Opx 焼結体でも浸透が観察されたことから (Fig. 3)、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。また反射電子像観察の結果からも、Opx 焼結体と比べ Opx 粉末ペレットへの FeS メルト移動距離とメルトフラクションが大きいという結果が得られた。今回用いた X 線 CT 像の画像解像度(約 3 $\mu\text{m}/\text{pix}$)は FE-SEM に比べて低い、CT 像でも FeS メルトの浸透を観察することができた。X 線 CT と SEM 観察結果から、空隙率が大きく鉱物粒間が大きい方が、FeS メルトがより効率的に移動することが確認された。次に保持時間を 15-300 min に変化させた浸透実験試料について、反射電子像観察より Opx を用いた試料の方が Ol を用いた試料よりも FeS メルト移動距離とメルトフラクションが大きいことがわかった。Opx と Ol の移動速度の違いは、鉱物の粒成長速度が影響している可能性がある。また、本研究から求めた FeS メルトの移動速度は、試料組織から見積もったダルシー流の移動速度とは異なる速度を持つことが明らかとなった。このことはマントル鉱物中での FeS メルト移動がダルシー流とは異なるメカニズムで移動することを示唆している。

地球下部マントル条件での二面角実験では、カプセルがダイヤモンド化したため、試料研磨に苦労したが、ダイヤモンド砥石などを用いて、ダイヤモンドカプセルを除去し、試料部分を研磨することができた。試料はブリッジマナイトとフェロペリクレスおよび Fe-S が共存した組織をしており、12 h の保持時間においても鉱物粒径は非常に細粒であった。SEM 観察は完了しているため、今後は画像解析により下部マントル鉱物と Fe-S 間の二面角測定を進める予定である。

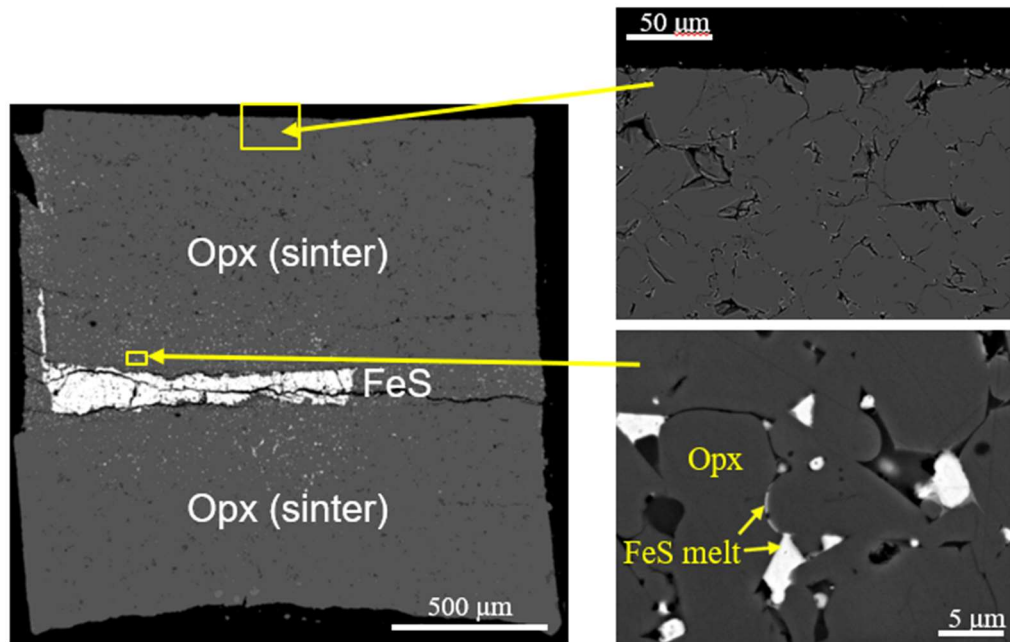


Fig. 3. Back-scattered image of FeS sandwiched by sintered opx at 0.75 GPa and 120 min duration. FeS melt migration in opx layer was observed near the central FeS while FeS was not observed at far edge of sintered opx.

【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.

加えて二面角実験の結果をまとめて、5 月末に国際誌へ投稿予定である(Miura et al. 投稿準備中)。

【学会発表】

2024 年度に本研究に関して以下の学会発表で発表を行った。

H. Terasaki, S. Matsubara, T. Yoshino, G. D. Bromiley, I. Butler, Experimental study on trapped melt in iron meteorite: Implication for the planetesimal core solidification. Japan Geoscience Union meeting 2024, May 26-31/2024. (International session)