

2014B1527

BL20XU

形成期の惑星内部における鉄合金メルトとケイ酸塩の分離過程 Metal-Silicate Separation Process in the Planetary Interior

岸本俊八^a, 浦川 啓^a, 寺崎英紀^b, 桑原荘馬^b, 西田圭佑^c, 坂巻竜也^d, 竹内晃久^e, 上杉健太郎^e
Syun-Pachi Kishimoto^a, Satoru Urakawa^a, Hidenori Terasaki^b, Soma Kuwahara^b,
Keisuke Nishida^c, Tatsuya Sakamaki^d, Akihisa Takeuchi^e, Kentaro Uesugi^e

^a岡山大学, ^b大阪大学, ^c東京大学, ^d東北大学, ^e(公財)高輝度光科学研究センター
^aOkayama University, ^bOsaka University, ^cUniversity of Tokyo, ^dTohoku University, ^eJASRI

形成期の惑星内部で起きた金属核と珪酸塩マンツルの分離過程について高温高压実験と X 線 CT 測定を用いて調べた。部分熔融したマンツル内で Fe-S メルトはその体積が 10~18%を超えるとネットワークを形成する。その結果、Fe-S メルトはマンツルを浸透流として沈降し重力分離を起こす。また、マンツルが高いメルト分率を持ち液体的に振る舞う場合、マンツルの上にある Fe-S メルト層は直ちにダイアピルを形成し沈降を始める。

キーワード： 核・マンツル分離過程、X 線マイクロ CT、高温高压

背景と研究目的：

鉄合金からなる金属中心核と珪酸塩マンツル分離過程は惑星形成期における主要な分化過程である。形成期の惑星ではマグマオーシャンの底に蓄積した鉄合金メルト層が、その下のマンツル層の中を浸透流やダイアピルなどとして沈降して中心核を形成すると考えられている。浸透流はケイ酸塩の粒界に鉄合金メルトがネットワークを作るときに起こる。ダイアピルは鉄合金メルトがケイ酸塩を変形させながら流れる過程である。

浸透流による核形成過程については固体のケイ酸塩鉱物と鉄合金メルトのぬれ性に関する 2 面角測定の研究[1]と、鉄合金メルトのネットワークが連結する鉄合金の割合の閾値を求める研究[2-5]が行われている。形成期の惑星ではマグマオーシャンの下にある珪酸塩マンツルは部分熔融状態であることが予想される。このような部分熔融状態のマンツルにおける浸透流についても急冷実験による同様の研究がある[3,6,7]。Holzheid [7]は急冷回収試料の組織観察から、かんらん石と鉄合金メルトの 2 面角がケイ酸塩のメルト分率と鉄合金メルトの割合に依らず 60 度より大きいことを示した。また、珪酸塩が部分熔融している場合、ネットワークを形成する時の鉄合金の割合の閾値が増加することが報告されている [3,7]。

ダイアピルの形成や成長については、主にアナログ物質を用いて研究されている[8]。マンツルの粘性率の変化に伴う脆性-塑性転移付近で沈降する金属メルトの形状はダイク的なものからダイアピル的なものへと変化し、移動速度が変化することが予想されている。部分熔融したマンツルでのダイアピルの形成と成長も興味深い現象である。部分熔融したマンツルの粘性率はメルト分率によって変化する。メルト分率が増加して閾値を超えると、ケイ酸塩マンツルは粘性率が急に下がり流体的に振る舞う[9]。粘性率の減少はダイアピルの形成と成長を加速することが予想される。

ここでは、浸透流とダイアピルによる核・マンツル分離過程に対するマンツルの部分熔融の影響を調べることを目的に、高温高压実験と X 線マイクロ CT を組み合わせた研究の結果を報告する。

実験：

浸透流の実験は、鉄合金メルトがネットワークを形成するのに必要とする鉄合金の割合の閾値を求めることを目的として行った。部分熔融した珪酸塩と鉄合金メルトを、高温高压で保持して組織平衡化をした試料について X 線 CT 測定を行った。組織平衡試料は岡山大学理学部で川井型高压装置を用いて作成した。組織平衡化実験の試料には、珪酸塩はかんらん石に 15 体積%玄武岩を混合したもの、鉄合金は Fe₆₀S₄₀ 組成を用いた。鉄合金をそれぞれ 10、18、30 体積%含む 3 種類

の試料を 1.5 GPa、1600 K で 5 時間保持した後、急冷凍結した。実験条件は玄武岩の液相線より高温であるので、玄武岩は全て溶けている。

ダイアピルに関する実験は、珪酸塩の粘性率が急変するあたりのメルト分率で鉄合金メルトがどのように沈降するのかを調べるために、BL20XU においてトモグラフィ用 80 トンプレスを用いたその場観察法で行った[10]。高圧発生は一軸押しの特ロイダルアンビルを使用し、約 1.5 GPa、1600 K で実験を行った。高圧セルの断面図を図 1 に示す。ヒーターと試料カプセルにはグラファイト、圧力媒体には X 線透過性の高いボロン-エポキシおよびボロン焼結体を使用した。試料はかんらん石と玄武岩（40 または 55 体積%）の混合物の上に Fe と FeS の混合物（ $\text{Fe}_{60}\text{S}_{40}$ 組成）を置いた 2 層構造となっている。

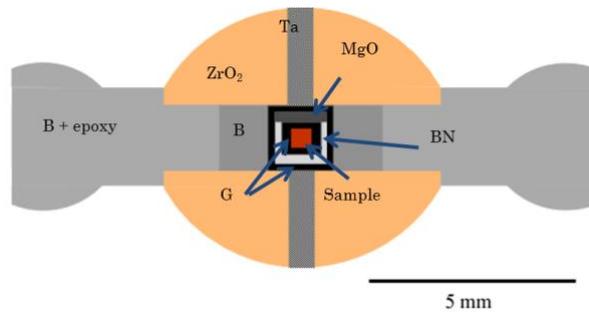


図 1. 高圧セルの断面図。

X 線マイクロ CT 測定は BL20XU で行った。25 keV の単色 X 線を使用し、CMOS カメラで透過像を撮影した。ピクセルサイズは $1.493 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。0.2 度毎に撮影した 900 枚の透過像から CT イメージの再構築を行った。トモグラフィプレスは 2 本の柱を持ち、その間の開口角は 160 度と制限されている。このため透過像には柱の影が映りこみ、再構成した CT イメージには影によるアーティファクトが現れる。今回の実験目的に対してはアーティファクトの影響は限定的であり、CT 再構成像から必要な情報を得ることができた。

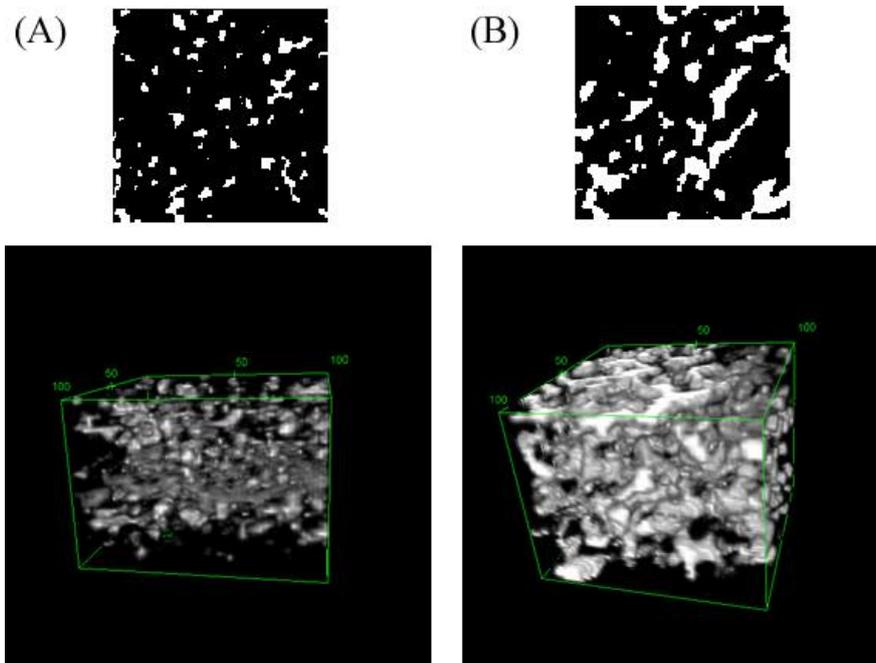


図 2. 浸透流実験回収試料の二値化した CT 再構成像。白が Fe-S メルトを示している。上は 2 次元イメージ、下は 3 次元イメージ。(A) Fe-S メルトを 10 体積%含む試料、(B) 18 体積%含む試料

結果および考察：

浸透流実験から部分熔融した珪酸塩中での Fe-S メルトのネットワーク形成に対する、鉄合金の割合の閾値を検討した。珪酸塩部分のメルト分率は回収試料の組織観察から約 0.2 と見積もった。組織観察から Fe-S メルトとケイ酸塩メルトは共存しており、かんらん石中に孤立した Fe-S メルトはほとんどないことがわかった。Fe-S メルト（鉄合金メルト）を 10 体積%と 18 体積%含む試料の CT イメージを図 2 に示す。3 次元イメージから、10 体積%では Fe-S メルトは孤立しているが、18 体積%の場合は Fe-S メルトがネットワークを形成していることがわかる。このデータから連結度を求めてみると図 3 のようになり、Fe-S メルトの割合が 10 体積%と 18 体積%の間で、大きな変化があることがわかる。この結果から、部分熔融状態の珪酸塩中で鉄合金メルトがネットワークを形成する時、鉄合金の割合は 10 から 18 体積%の間に閾値を持つと考えられる。この値は Yoshino et al. [3]と調和的であり、珪酸塩が固体の場合[2,3]の 5~10 体積%より明らかに大きい。部分熔融している場合に閾値が大きくなるのは、鉄合金メルトと珪酸塩メルト間の大きな界面エネルギーによると考えられる。珪酸塩メルトと Fe-S メルトが共存している場合、表面エネルギーの差から珪酸塩メルト中に球状の Fe-S メルトが孤立して分布する。このため、ネットワークを形成するために必要な鉄合金の割合が大きくなってしまう。孤立した鉄合金の成長速度は遅いため [11]、鉄合金が沈降してマントルから分離するためには大きな重力が必要となる [6]。一方、自己重力の小さい小惑星のような天体の場合は金属の割合が 18 体積%を超えない限り、浸透による核マントル分離は有効に働かないであろう。

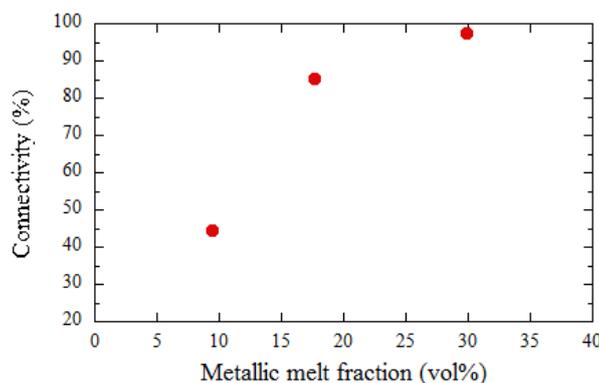


図 3. 浸透流実験における鉄合金メルトの割合と連結度の関係。連結度は鉄合金メルトのクラスター体積と全体積の比で定義した。100%で Fe-S メルトは完全にネットワーク化している。

高温高压 X 線 CT 実験から鉄合金メルトのダイアピルの成長過程を観察した。回収試料から見積もった珪酸塩のメルト分率は、玄武岩を 40 体積%含む試料では 0.52、55 体積%含む試料では 0.89 であった。部分熔融した珪酸塩が急減して液体的になるメルト分率は 0.4~0.6 程度であるとされているので [9]、今回の実験はそれぞれ境界領域と液体的振る舞いをする領域で行われたと考えられる。部分熔融した珪酸塩の実効粘性率はそれぞれ 400 と 10 Pa·s と見積もった。X 線その場観察では、いずれの場合もダイアピルの形成が確認された (図 4)。ダイアピル形成に要した時間はそれぞれ 15 分と 5 分であり、珪酸塩の粘性率が小さい方がダイアピルの成長は速かった。これは、Olson and Weeraratne [12]によるアナログ実験の結果と調和的である。今回の結果は、部分熔融したマントルのメルト分率が高く液体的振る舞いをする場合は珪酸塩が容易に変形し鉄合金が沈降することを示している。

今後の課題：

その場観察では、Fe-S メルトのダイアピルは形成後すぐに成長が止まり、カプセルの底まで沈降することはなかった。実験中にダイアピルの成長が止まった原因としては、ダイアピルが固体の珪酸塩結晶とほぼ同じサイズであること (スケール効果)、グラファイトカプセルと Fe-S メルトの反応、固液分離した珪酸塩の粘性率の場所による不均質性などが考えられる。サンプルサイズと試料カプセル、試料セル内の温度分布の最適化等により、実験上の問題点を解決することが今後の研究を展開するために必要である。

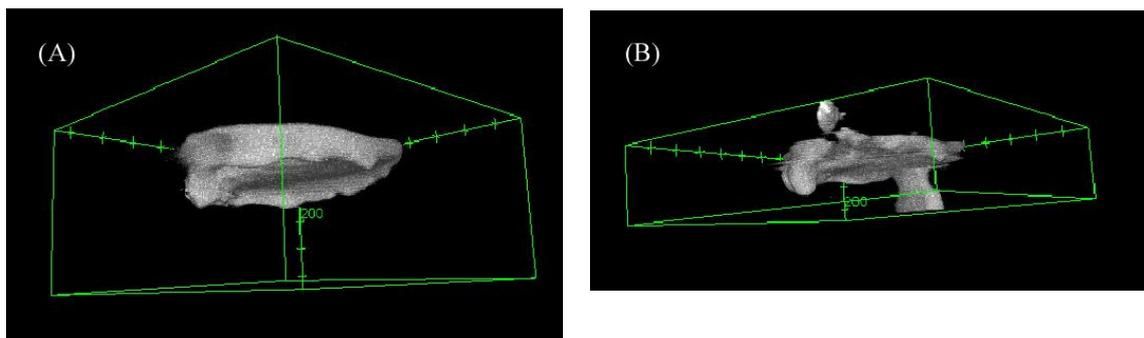


図 4. メルト分率 0.52 の試料の CT 再構成像。(A) 加熱前、(B) 加熱後。

謝辞：

この研究は日本学術振興会科学研究費補助金 23340129 の助成を受けて行われた。回収試料の組織観察と化学分析は岡山大学自然生命科学研究センターの電子プローブマイクロアナライザーを用いて行った。

参考文献：

- [1] H. Terasaki et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **273**, 132-137 (2007).
- [2] T. Yoshino et al., *Nature*, **422**, 154-157 (2003).
- [3] T. Yoshino et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **222**, 625-643 (2004).
- [4] N. Bagdassarov et al., *Phys. Earth Planet. Int.*, **177**, 139-146 (2009).
- [5] H.C. Watson and J.J. Roberts, *Phys. Earth Planet. Int.*, **186**, 172-182 (2011).
- [6] N. Bagdassarov et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **288**, 84-95 (2009).
- [7] A. Holzheid, *Eur. J. Mineral.*, **25**, 267-277 (2013).
- [8] I. Sumita and Y. Ohta, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **304**, 337-346 (2011).
- [9] A.M. Lejeune and P. Richet, *J. Geophys. Res.*, **100**, 4215-4229 (1995).
- [10] S. Urakawa et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **215**, 012026 (2010).
- [11] T. Yoshino et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **235**, 453-468 (2005).
- [12] P. Olsen and D. Weeraratne, *Phil. Trans. A.*, **366**, 4253-4271 (2008).

©JASRI

(Received: January 22, 2018; Early edition: February 27, 2018;
Accepted: July 3, 2018; Published: August 16, 2018)