特集 —— 高圧メルトの実験最前線 ——

地球惑星深部のメルトの分布と輸送機構

Transport Mechanism and Distribution of Melt in Earth and Planetary Interiors

芳野 極

Takashi YOSHINO

Knowledge of distribution and transport mechanism of melt in the Earth and planetary interiors is important for understanding formation process of stratified structure, estimation of melt fraction in partial molten region, and volatile recycling. In this article, advances in high pressure studies on melt distribution and its transport process were reviewed in terms of surface tension-driven process. Melt migration in solid media is controlled by melt connectivity. A traditional way to determine melt connectivity is determination of dihedral angle by quench experiments. Recently, in situ X-ray radiographic observation or electrical conductivity measurement are developing as effective ways to determine melt morphology. At the end of this article, an example of melt penetration experiments is reported. High pressure experiments on penetration of metallic iron alloy melt into lower mantle phases suggest absence of interaction between core and mantle by surface-tension driven penetration mechanism.

[*transport mechanism, penetration, surface tension, dihedral angle, instability, mantle, core*]

1. はじめに

地球型惑星は主に鉄—ニッケル合金からなる中心核、主にケイ酸塩鉱物からなるマントル、地殻から形成される成層構造を有する。このような成層構造は、密度差が駆動力となって移動度の大きなメルトが移動することにより形成されたものである。部分熔融過程において、固相内のメルトの分布状態は、地殻・マントル・核の分化及びメルトの分離過程、その後の進化過程やダイナミクスを支配するため、高温高圧下におけるメルトの分布とその輸送過程の理解は非常に重要である。さらに、部分熔融岩石のメルトの分布状態は地震波速度・弾性・塑性・電気伝導度などの物性にも大きく影響する。逆に言えば、高圧力下でのメルトの分布状態を知ることができれば、地球物理探査の結果からメルトの量や温度条件を決定することも可能となる。惑星地球内部のメルトの輸送過程には、幅広い時空間スケールでの過程を考える必要がある。メルトは主にメルトと周囲の岩石の密度差に由来する正負の浮力によって移動し、

(a)レーリー・テイラー不安定、(b)ストークス上昇（沈降）、(c)チャンネル流れ、(d)浸透流の4つの様式がある。各輸送様式は、それぞれ特徴的な移動速度と空間スケールをもつ。しかし、地球深部の高温の部分熔融状態においては、物質移動の粒子スケールでの拡散過程が十分に速いことから岩石は表面エネルギーに駆動された構造平衡を容易に達成することができる。そのため、低差応力下でメルトの浮力が小さい場合、メルトの浸透流は結晶粒界スケールでの界面エネルギーによって支配されると考えられている[1]。つまり、固相中のメルトの輸送過程として、固液界面のエネルギーに駆動された浸透流が極めて重要な過程である。本稿では、著者が行ってきた高圧力下における液相の分布と移動に関する研究を中心に、固液間の界面張力駆動の過程に着目した実験的研究を紹介する。最後に核—マントル境界における熔融鉄の下部マントル鉱物中への浸透実験の結果を報告する[2]。

〒682-0193 鳥取県東伯郡三朝町山田 827 岡山大学惑星物質研究所
Institute for Planetary Materials, Okayama University, 827 Yamada, Misasa, Tottori 682-0193
Electronic address: tyoshino@misasa.okayama-u.ac.jp

2. メルトの連結度

2.1 急冷回収実験による二面角の決定

メルトの固相内の分布を支配し、浸透流が可能であるかどうかを規定するパラメータとして濡れ角という概念がある。例えば、中央海嶺下の部分溶融したマントルでは、少量の玄武岩質メルトがオリビンを主体とするマトリックス内を浸透するためには、玄武岩質メルトが珪酸塩鉱物の粒界をどの程度濡らしているかが鍵となる。また、地球惑星形成初期における金属中心核を構成する鉄合金溶融メルトが固体マントル部分を浸透して中心まで到達できるのかという核形成の物理過程においても濡れ角は重要である。

濡れ角は、一般に固液2相系においては固相-固相からなる粒界が、液相に接するときの角度である二面角(θ : dihedral angle)という値で評価される(Fig. 1a)。固相が単一相であれば二面角は、固液界面における力のつりあいとして、以下のように表現される。

$$\frac{\gamma_{ss}}{\gamma_{sl}} = 2 \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (1)$$

Fig. 1. An illustration of melt distribution governed by dihedral angle. (a) Definitions of dihedral angle (θ). Schematic drawings showing melt distribution for (b) $\theta < 60^\circ$ and (c) $\theta > 60^\circ$, respectively.

ここで、 γ_{ss} は固相間の界面エネルギーを示し、 γ_{sl} は固相-液相間の界面エネルギーを示す。二面角(θ)は、液相が3次元的なネットワークを形成するかどうかを決定するパラメータで 60° を閾値とする。Fig. 1に示すように、 60° より大きい時、液体は固相の粒間に孤立し、液体の浸透は起こらない。一方、二面角が 60° より小さい時は固体粒子の稜部を液体が濡らすことにより、液体は固体粒子間にネットワークを形成し浸透流が可能となる。さらに二面角が 0° の時は固相の界面は完全に液相によって覆われることを意味する。

二面角は液相の組成が固相に近づくか、液相の構造が固相に近づくとき小さくなることが知られている。また、水のような界面活性成分が存在すると界面張力が減少する傾向がある。この効果は、一定の温度の下ではGibbsの吸着式として熱力学的に次のように表現される。

$$d\gamma_{sl} = - \sum \Gamma_i d\mu_i \quad (2)$$

ここで、 Γ_i は成分 i の単位面積あたりの表面過剰量、 μ_i は表面における成分 i の化学ポテンシャルである。希薄溶液では添加元素の μ_i はモル濃度 c を用いて、以下のように表される。

$$\Gamma = - \frac{1}{RT} \left(\frac{d\gamma}{d \ln a} \right)_T \quad (3)$$

ここで、 Γ は単位面積あたりの添加元素の吸着量、 R は気体定数、 T は絶対温度、 a は添加元素の活量である。(3)式より、添加元素が界面活性となる場合、固液界面に添加元素が吸着することで表面濃度が上昇すると界面エネルギー γ_{sl} が減少することが分かる。

二面角を用いて、高温高圧実験の急冷回収試料の走査型電子顕微鏡像観察から、様々な条件におけるマントル鉱物に対する様々な液相の濡れ性の評価が行われてきた(Fig. 2)。二面角は回収試料の2次元断面で測定された角度の中央値として与えられる[3]。Fig. 3はオリビン-水系の二面角を圧力の関数としてプロットしたものを示す[4-6]。沈み込んだスラブが脱水した時に、生成された水は温度、圧力が高くなるにつれて3次元のネットワークを形成し、浸透が可能になることが分かる。三部らは沈み込み帯の火山フロントは、前弧側では低温のマントルウエッジで、スラブから脱水した水は二面角が 60° を超えるために移動できないが、火山フロント付近で

Fig. 2. Scanning electron microscopy images showing liquid distribution. (a) Olivine-H₂O (dark) system. (b) Olivine (dark) -basalt (bright) system.

Fig. 3. (Color online) Dihedral angle of olivine-H₂O system as a function of pressure and temperature. Data from Refs. [4–6]. Horizontal line indicates the critical dihedral angle of 60°.

二面角が 60°を切るためにマントルウェッジを水が浮力によって上昇し、融点を下げるためにマグマが形成されるというモデルを提唱した[5]。筆者らはさらに高圧力になると二面角は大きく減少し、

Fig. 4. (Color online) Dihedral angle as functions of partitioning coefficient (K_D) and X_{Mg} in olivine and melt

[8]. K_D is defined by $K_D = K^{Fe-Mg}_{Ol-L} = \frac{X_{Ol}^{FeO} X_L^{MgO}}{X_L^{FeO} X_{Ol}^{MgO}}$. Black symbols denote NBO/T in melt, and data are obtained from Refs. [7,8,26–28].

10 GPa 程度の圧力では粒界がほとんど濡れることを明らかにした[6]。この現象は、高圧力になるにつれて流体中の Mg/Si が上昇してオリビンの Mg/Si に近づくことと流体中のケイ酸塩成分が上昇することが原因であると解釈した。一般に水を主体とする液相に比べ、ケイ酸塩メルトは二面角が小さく、常圧においてもオリビン-玄武岩質メルト系の二面角は 30°程度と十分に小さいことは古くから知られていた[7]。Fig. 4 は、マントルのペリドタイト (KLB-1) 中のオリビン-ケイ酸塩メルト系の二面角を NBO/T (ケイ酸塩メルト中の Si サイトの 4 面体の非架橋酸素の割合) とメルト組成の関係を示したものである。メルトの組成が Mg に富みオリビンの組成に近づくにつれ、メルトの構造が固相 (オリビンの場合は NBO/T=4) に近づくにつれて二面角が減少することが分かる。Fig. 5 は珪酸塩鉱物-鉄合金メルト系の二面角を圧力の関数としてプロットしたものを示す[9–13]。ケイ酸塩鉱物に対する鉄メルトの二面角はほとんどの場合、60°を超える非常に大きな値を示すことが分かる。Fe-S-O 系の金属メルトはオリビン-金属メルト間の表面活性を示し、鉄合金メルト中の酸素固溶量が大い 3 GPa 以下の低圧条件、かつ高い酸素雰囲気条件では 60°を切るような小さい値を示す[12]。硫黄の添加量を増やすと二面角が減少することから、酸素、硫黄共に表面活性元素であることが分かる。また、マントル鉱物の

Fig. 5. (Color online) Dihedral angle of olivine-Fe alloy melt as a function of pressure. ΔIW represents a difference of oxygen fugacity from iron-wustite buffer. Horizontal line indicates the critical dihedral angle of 60° . Data obtained from Refs. [9–13].

相転移や鉱物組み合わせに対して、二面角は大きく変化しない。一方、ケイ素を添加しても二面角は変化しないことからケイ素は表面活性にほとんど寄与しないことが分かる[13]。これらの結果は、小天体を除けば鉄合金メルトは浸透流によって核形成を起こすことは難しいことを示唆している。

急冷実験から濡れ角を決定する問題点は、急冷結晶が固液界面で成長することによる見かけの二面角が増加する問題、マルチアンビルを用いた実験では、ピストンシリンダの実験に比較して、高圧セル内部における温度勾配が大きいことに起因したメルトの分離が起こり、統計的に有意な数の二面角測定が困難となる問題が挙げられる。実際にオリビン-水系の実験で二面角が 20° を切るような条件では二面角の定量的な測定は、液相が高温部へ移動して完全に分離するため不可能であった[6]。また、メルト量が多いと2次元断面において、見かけ上ほとんどの粒界が濡らされているため、二面角を定義できなくなる。この方法による誤差を考慮すると、二面角が 60° 近傍を示す物質で連結度を定量的に評価することは難しい。このような問題を解決するためには、高温高圧下におけるメルトの形状のその場観察が有効である。

2.2 マイクロ X 線トモグラフィー

二面角の測定では、実際にメルトが3次的にネットワークを形成しているかを直接評価することは難しい。3次元のメルト構造を復元するために、古くはセクション画像法が行われてきたが、自動化が難しく労力が極めて大きいため一般的な方法としては用いられてこなかった。最近の放射光イメージング技術の発展に伴い、サブミクロンスケールの高解像度の3次元 X 線マイクロコンピュータ断層撮影(X-ray μCT)が可能となり、3次元のメルト分布の定量化に用いられるようになってきている。ケイ酸塩メルトの場合は、固相との密度差が小さく X 線吸収のコントラストが小さいため、Cs のような不適合の重元素をメルトに添加して行われてきた[14]。その後、Zhu らは、部分溶融ペリドタイトの急冷試料のメルトの分布を可視化するために屈折 X 線と非屈折 X 線の干渉を利用したシンクロトン・エッジコントラスト・トモグラフィーを使用し、玄武岩質メルトの3次元分布の撮像に成功した[15]。最近では、超高速 X 線トモグラフィーを用いた技術開発が進行しており、「回転トモグラフィーパリーエンジンバレル」[16]を使用した実験では、高温高圧条件下でせん断変形中の CT データを取得することが可能になりつつあり、今後大きな発展が期待される分野である。

マイクロ X 線トモグラフィーによる急冷実験の回収試料のメルト分布の研究はすでに成果が上がりつつある。Zhu らは、多様なメルト量の構造平衡に達したオリビンと玄武岩質メルトの部分溶融岩石の急冷回収試料を用いて、メルトの3次元分布と連結度の評価を行っている[15]。その結果、2体積%程度のメルト分率でも二面角から推定されるように、メルトは固体粒子の稜部に沿って3次的に連結していることが示された。さらに、上部マントルの共通成分であるカンラン石、斜方輝石に玄武岩質メルトを様々な割合で加えた岩石では、表面エネルギーの低い界面を持つカンラン石と高い界面を持つ斜方輝石の濡れ性の違いのためにメルトの分布は不均質となることが観測された。得られた3-D形状を用いて、数値シミュレーションから溶融岩石の透磁率、電気伝導度を定量化する試みが行われている。

2.3 界面張力の測定

急冷回収試料の二面角測定から濡れ性を議論することが一般的な方法であったが、放射光 X 線を用

Fig. 6. (Color online) (a) Melt fraction for pinch-off and connection boundary conditions as a function of melt fraction modified after Ref. [20]. (b) Electrical conductivity of FeS melt bearing olivine aggregate and peridotite (KLB-1) measured at 773 K, suggesting that percolation threshold locates between 3 and 6 vol.%. Data obtained from Refs. [18,19].

いた融体の界面張力の高温高压下その場測定は、急冷時の界面張力の変化を考慮すると有効な方法である。寺崎らは静滴法によって高温高压下で初めて鉄合金融体の界面張力の測定に成功した[17]。静滴法とは、固体表面に置かれた液滴の形状から界面張力を求める手法である (Fig. 6)。寺崎らはケイ酸塩メルトをマトリックスに使用することにより、2次元 X 線ラジオグラフィで液滴形状の観測に成功した。多様な含有量の Fe-S 合金および Fe-P 合金の界面張力が測定され、硫黄含有量が 40 at% まで増加すると 800 mN m^{-1} から 112 mN m^{-1} まで大きく減少する。一方、リン含有量が 17 at% まで増えても界面張力は変化しない。硫黄が界面活性元素となり界面張力を大きく減少させるのに対し、リンは界面活性にはほとんど寄与しないことを示す。この手法は鉄合金とケイ酸塩メルトの間の非常に大きな

X 線吸収のコントラストがあるような場合には有効な方法であるが、ケイ酸塩メルトを測定するためには前述のエッジ・コントラスト・イメージング技術の導入など、高分解能イメージを得るために、さらなる工夫が必要となる。

2.4 電気伝導度測定

二面角測定では、 60° 付近の二面角を持つ系にとって連結度を評価することはその測定精度の点で難しい。また、濡れ性の悪い物質が連結し始めるパーコレーション閾値を急冷実験で決定することも難しい。メルトの連結度を評価するのに高温高压下におけるその場電気伝導度測定は有効な手段である。メルトの電気伝導度はメルト中の電荷を運ぶ高いイオンの移動度によって、固相に比較して高い電気伝導度をもつ。つまり、もしメルトが固相中で 3 次元的に連結していれば、部分熔融岩石の電気伝導度はメルトの電気伝導度に支配されるため、連結度に対して非常に敏感である。この電気伝導度の特性を利用して、筆者らは固液 2 相系の液相の連結度を決定する試みを行ってきた[18,19]。

ケイ酸塩鉱物に対して濡れ性の悪い熔融金属は少量のメルト量では浸透流は起こらないと考えられていたが、ある程度のメルト量が存在すれば連結することが可能となるパーコレーション閾値に達することができる。筆者らは、多様な量の硫化鉄合金を含んだオリビン多結晶体またはペリドタイトの電気伝導度測定を行ったところ、5 体積%を超えると電気伝導度が高いまま保持されることがわかった (Fig. 6)。つまり、3–5 体積%の間にパーコレーション閾値が存在することを示した。これは、構造平衡に達した部分熔融岩石から計算されたパーコレーション閾値と一致する結果であった[20]。一方、最近のシミュレーションによる報告では、固体粒子が均等な形状を持つ場合は、これまでに報告されているパーコレーション閾値と一致するが、イレギュラーな形状を持つ場合のパーコレーション閾値は、均等な粒子の場合より多くのメルト分率を必要とすることが報告されている[21]。さらにケイ酸塩が部分熔融する温度に達するとケイ酸塩メルト中に金属メルトは不混和液体として孤立するため、硫化鉄メルトの量が 20 体積%を超えても連結が失われることが分かった。この結果は、微惑星形成後の早い段階で浸透流によってコアが形成されることを示唆し、タングステン同位体比から推定されたような微惑星が太陽

系形成から数百万年以内の非常に短い段階でコアを形成するという結果と整合的である。また、より大きな惑星ではマグマオーシャンの形成によるコア形成メカニズムが必要であることを示唆している[19]。

3. メルトの浸透実験

メルトが固相内で 3 次元的なネットワークを形成している時、固液間の密度差により生じる浮力を駆動力として浸透流が起こる。浸透流(ダルシー流れ)によるメルトの移動速度(v)は、以下の式で表される。

$$v = \frac{k_{\phi}}{\phi\mu} \Delta\rho g \quad (4)$$

ここで、 k_{ϕ} は浸透率、 ϕ はメルト分率、 v は液相の粘性率、 $\Delta\rho$ は固液間の密度差、 g は重力加速度である。浸透率はメルト分率のべき乗、粒径の 2 乗に比例する係数である。浸透流による移動速度は、レーリー-テラー不安定や固相内での液相のストークス上昇(沈降)に比較して、桁違いに速い過程である。したがって、メルトの 3 次元ネットワークが形成されるか否かは惑星の分化過程を考える上で鍵となる。一方で、メルトが存在しない領域とメルトが接したときに、粒子スケールでメルトはどのように振る舞うのかを知ることはメルトの浸透過程、中央海嶺下におけるメルトの分離過程、核-マントル境界での相互作用を考える上で、重要な課題である。

地球惑星を対象とした液相の浸透実験は、主に地殻物質を対象として行われてきた。液相が連結していても、重力の影響は連結した液相のコラムの高さ(h)が浮力を支配するため、重力を駆動力とした液相の浸透実験は、高圧セル内では試料の大きさが限定されるため、固液の密度差が大きく、濡れ性が良く、かつ液相分率が高い場合を除いて難しい。したがって、高圧力下における液相の浸透実験では、固液 2 相系において物理的、化学的に平衡状態にあると仮定すると、液相の浸透は界面エネルギーを駆動力とした微細構造の再配置が卓越する。この時、(i) 固液間の二面角が一定、(ii) すべての固液界面の曲率が一定、(iii) 界面エネルギーを最小とする液相分率、(iv) 粒成長の 4 つの条件を満たす必要がある。二面角が 60° を切る系では、液相が系の全エネルギーを最小化するために固相のみより液相を含んだ方がエネルギー的に安定になる。この時、界面エネ

ルギーが駆動力となった浸透が起きる。本稿では、筆者が最近行った鉄合金の下部マントル物質への浸透実験をもとに、界面張力駆動の浸透メカニズムについて考察する[2]。

地球の中で核-マントル境界(CMB)は地球内部最大の不連続面である。ケイ酸塩岩石からなるマントルと鉄を主体とする金属中心核は、その大きな密度差を駆動力として太陽系の誕生初期の段階に分離し、それ以降はその成層構造を保持し続けていると考えられている。この化学成層は非常に安定であるため、その境界における核とマントルの相互作用が、金属核形成後にどの程度岩石マントルの組成に影響しているかについてはほとんど調査されていない。しかしながら、地球物理学的見地から、核とマントルの相互作用の証拠の 1 つとして、地球の自転は 10 年程度の周期で 1 日の長さが変動していることが挙げられている。この周期での 1 日の長さの変動は核とマントル間の電磁結合が必要とされ、現在の核-マントル境界において、マントル最深部に 8,000 S 程度の非常に高い電気伝導度を持つ層の存在が指摘されている[22]。CMB の直上にこのような高い電気伝導度層を形成するために、いろいろな仮説が提案されてきた。高い密度コントラストの存在によって、軽元素を含む熔融鉄合金からなる外核の物質が、浸透することは難しいと考えられてきた。そのため、高い電気伝導度を持つポストペロプスカイトやフェロペリクレーズが存在するという説が提唱されてきたが[23,24]、この場合、核物質はほとんどマントル組成に寄与することはできない。しかし、Otsuka and Karato は金属メルトとフェロペリクレーズの間の Mullins-Sekerka 不安定による表面張力に駆動されて、熔融鉄が単結晶フェロペリクレーズへ浸透できることを実験的に証明し、その浸透距離は地球史を通じて数 100 km の規模に及ぶと提唱した[25]。つまり、液体の外核からマントルへの熔融鉄の大幅な付加が、CMB 直上の高電気伝導度層の形成を生み出しうる可能性を示した。

浸透による熔融鉄のマントルへの付加は下部マントルの第二の主要鉱物である(Mg,Fe)O で観察されたが、ケイ酸塩マントルへの鉄の付加をもたらす浸透過程は実験的に確認されてこなかった。筆者は、熔融鉄合金の下部マントル相(ポストスピネル、ブリッジマナイト、フェロペリクレーズ)への浸透を調べるために高圧高温実験を行った。浸透実験は、Fe, Fe-C, Fe-S の多結晶体を事前に合成したポス

Fig. 7. Backscattered electron images of experimental run products. (a) A pair of $(\text{Mg}_{0.50}\text{Fe}_{0.50})\text{O}$ -Fe-bridgmanite; (b) A pair of $(\text{Mg}_{0.50}\text{Fe}_{0.50})\text{O}$ - $\text{Fe}_{80}\text{S}_{20}$ -postspinel. Overviews of run products showing penetration of Fe alloy into $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ aggregates and no penetration of Fe alloy into silicates. The melt-rich layer (MRL) in $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ aggregates represents a region formed by transcrystalline migration of iron-rich liquid inclusions due to Mullins-Sekerka instability.

トスピネルまたはブリッジマナイトとフェロペリクレス多結晶体の間に挟んで、25 GPa の圧力で鉄合金の共融点温度以上(1,600–2,300°C)で10分から4時間程度保持することによって行われた。

Fig. 7は回収試料の微細構造を示す。フェロペリクレス多結晶体に対しては溶融鉄合金の浸透が確認された。対照的に、溶融鉄合金とケイ酸塩相との間の界面では溶融鉄合金の浸透は観察されなかった。フェロペリクレス多結晶体への溶融鉄合金の浸透を示す微細組織の1つの重要な形態は、全ての粒界が溶融鉄合金で覆われていたことである。これは、Fe合金と $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ の間の界面エネルギーが非常に低いことを示唆している。すべての系において、酸素に富む部分がFe合金層中に孤立相または急冷相として現れた。酸化物と金属の境界は、鉄に富むメルトの方向にわずかに移動した。これらの観察は、粒界に沿ってFeO成分が溶解し、鉄に富む溶融物中でFeO成分が析出したことを示す。もう1つの浸透の形態は、フェロペリクレス多結晶体と溶融鉄合金との間の界面に現れる鋸歯状の組織で、多くの鉄合金の溶融プロブを含む層(melt-rich layer: MRL)を形成している。この形態学的特徴は、Otsuka and Karato[25]によって観察されたものと同等で、Mullins-Sekerka (MS) 不安定性によって形

Fig. 8. (Color online) Distribution of Fe across the interface between molten Fe alloy and $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ modified after Ref. [2]. Left panel indicates an element map of Fe, and right panel shows a variation of iron content ($X_{\text{Fe}} = \text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$) in $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ over iron-rich liquid penetration region as a function of distance from the solid-melt interface.

成された[26]ものと考えられる。MS不安定は、固液がFeOのような共通の成分を持つときに固液界面が表面張力によってメニスカス状に変形する過程で固液の組成差に依存して特徴的な波長をもって起こる現象である。したがって、組成差が大きいMgOに富むフェロペリクレスでは起きにくい現象である。境界面に形成された細長い指状のプロブは、最終的にくびれて切れることにより、孤立した溶融プロブからなる層を形成している。MRLでは、界面に沿って測定された特徴的な波長は約5 μm であり、これは平均粒径よりも小さい。MRLの厚さは、粒界を通じた毛細管現象でメルトが浸透した距離よりもかなり短い(Fig. 8)。

フェロペリクレス多結晶体中への鉄合金液体の浸透は、毛細管現象またはMullins-Sekerka不安定性の2つの過程によって引き起こされる。粒界に沿った浸透で形成された層の厚さは、継続時間が長くなるにつれて時間の1/2乗に比例して厚くなることから、浸透メカニズムは拡散律速である。浸透距離から見積もられる拡散係数およびその活性化エネルギーは鉄中の酸素拡散と一致することから、律速過程は鉄合金メルト中の酸素拡散であると推察される(Fig. 9)。どちらのメカニズムも純粋なMgO多結晶体の境界では起こらないことから、フェロペリクレス中のFeO成分が、この現象に本質的な役割を果たすことを示している。粒界に沿った溶融鉄合金の浸透(毛細管現象)が支配的な過程であり、Mullins-Sekerka不安定性による浸透に先行する。毛細管現象によってフェロペリクレス中のFeO

Fig. 9. (Color online) Effective diffusivity corresponding to the infiltration rate of Fe alloy melt compared with the Fe-Mg interdiffusion coefficient in (Mg,Fe)O modified after Ref. [2]. Red squares, Fe-C liquid in (Mg_{0.5}Fe_{0.5})O; green diamonds, Fe liquid in (Mg_{0.5}Fe_{0.5})O; orange circles, Fe-S liquid in (Mg_{0.5}Fe_{0.5})O; blue circles, Fe-C liquid in (Mg_{0.8}Fe_{0.2})O; and purple circle, Fe-S liquid in (Mg_{0.8}Fe_{0.2})O. Solid lines also indicate results from the Arrhenius fitting as a function of X_{Fe} in (Mg_{1-x}, Fe_x)O. Solid black lines represent Fe-Mg interdiffusion coefficients [30]. Dashed line represents O diffusion in molten Fe determined at 1 atm [31].

成分は先に失われるために組成差を駆動力として進行する Mullins-Sekerka 不安定性による浸透は自発的に止まる。これは単結晶を使用した Otsuka and Karato[24]の実験では、認められなかった現象である。

CMB で観測される超低速度層(Ultra Low Velocity Zone)が鉄に富むフェロペリクレーヌで構成されているならば、毛細管現象による熔融鉄合金の上昇が期待できる。しかし、表面張力と重力との間の力の釣り合いによって支配されるため、鉄合金の密度を考慮すると負の浮力により最大浸透距離は 20 m 程度に制限される。したがって、マンツルの基部への鉄の豊富な熔融物の添加は、一日の長さの 10 年程度の周期変動から予測される CMB 領域の高いコンダクタンスの主要な原因になる可能性は低い。さらに、ケイ酸塩相への熔融鉄合金の浸透が起こらないことは、コア-マンツル相互作用によるマンツルの化学組成の広範な改変は界面張力駆動の浸透メカニズムでは説明できないことを示唆する。

4. おわりに

本稿では、メルトの高圧力下における分布や移動機構を支配する物性として界面張力の重要性を述べ、メルトの分布・移動機構を決定する高圧力実験の手法について総括した。界面張力駆動のメルト分布の知識は、惑星の中心核の形成、核-マンツル境界における相互作用、中央海嶺における玄武岩質マグマの分離過程を議論するために、必要不可欠な情報である。高圧力下におけるメルト分布とその移動機構の研究は、静的な高圧急冷実験による研究からせん断変形場におけるメルト分布の変化、メルトの浸透過程などの、よりダイナミックな場におけるその場観察をする方向へ進展しつつある。

謝 辞

本論を執筆するに際し、執筆の機会を与えていただいた東京工業大学の太田 健二 准教授に深く謝意を表します。また、この研究は科学研究費補助金(新学術領域研究 15H05827, 基盤研究 17H01155)を受けて行なわれた。

参考文献

- [1] E.B. Watson: *Geology*, **10**, 236 (1982).
- [2] T. Yoshino: *C. R. Geosci.*, doi: 10.1016/j.crte.2018.06.013 (2018).
- [3] S.R. Jurewicz, A.J.G. Jurewicz: *J. Geophys. Res.*, **91**, 9277 (1986).
- [4] K. Mibe, T. Fujii, A. Yasuda: *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1233 (1998).
- [5] K. Mibe, T. Fujii, A. Yasuda: *Nature*, **401**, 259 (1999).
- [6] T. Yoshino, Y. Nishihara, S. Karato: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **256**, 466 (2007).
- [7] H.S. Waff, J.R. Bulau: *J. Geophys. Res.*, **84**, 6109 (1979).
- [8] T. Yoshino, D. Yamazaki, K. Mibe: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **283**, 167 (2009).
- [9] M.C. Shannon, C.B. Agee: *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2717 (1996).
- [10] W.G. Minarik, F.J. Ryerson, E.B. Watson: *Science*, **272**, 530 (1996).
- [11] H. Terasaki, D.J. Frost, D.C. Rubie, F. Langenhorst: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **232**, 379 (2005).
- [12] H. Terasaki, D.J. Frost, D.C. Rubie, F.

- Langenhorst: Earth Planet. Sci. Lett., **273**, 132 (2008).
- [13] U. Mann, D.J. Frost, D.C. Rubie: Phys. Earth Planet. Inter., **167**, 1 (2008).
- [14] S. Ikeda, T. Nakano, A. Tsuchiyama, K. Uesugi, Y. Suzuki, K. Nakamura, Y. Nakashima, H. Yoshida: Am. Mineral., **89**, 1304 (2004).
- [15] W. Zhu, G.A. Gaetani, F. Fusses, L.G. Montési, F. De Calro: Science, **332**, 88 (2011).
- [16] E. Boulard, A. King, N. Guignot, J.-P. Deslandes, Y. Le Godec, J.-P. Perrillat, A. Clark, G. Morard, J.-P. Itié: J. Synchrotron Rad., **25**, 818 (2018).
- [17] H. Terasaki, S. Urakawa, K. Funakoshi, N. Nishiyama, Y. Wang, K. Nishida, T. Sakamaki, A. Suzuki, E. Ohtani: Phys. Earth Planet. Inter., **174**, 220 (2009).
- [18] T. Yoshino, M.J. Walter, T. Katsura: Nature, **422**, 154 (2003).
- [19] T. Yoshino, M.J. Walter, T. Katsura: Earth Planet. Sci. Lett., **222**, 625 (2004).
- [20] N. von Bagen, H.S. Waff: J. Geophys. Res., **91**, 9261 (1986).
- [21] S. Ghanbarzadeh, M.A. Hesse, M. Prodanović: PNAS, **114**, 13406 (2017).
- [22] R. Holme: Geophys. J. Int., **132**, 176 (1998).
- [23] K. Ohta, S. Onoda, K. Hirose, R. Sinmyo, K. Shimizu, N. Sata, Y. Ohishi, A. Yasuhara: Science, **320**, 89 (2008).
- [24] K. Ohta, K. Fujino, Y. Kuwayama, T. Kondo, K. Shimizu, Y. Ohishi: J. Geophys. Res., **119**, 4656 (2014).
- [25] K. Otsuka, S. Karato: Nature, **492**, 243 (2012).
- [26] W.W. Mullins, R.F. Sekerka: J. Appl. Phys., **35**, 444 (1964).
- [27] H.S. Waff, J.R. Bulau: in *High Pressure Research in Geophysics*, eds. S. Akimoto, M.H. Manghnani (Center for Academic Publications, Tokyo, 1982), p. 229.
- [28] A. Toramaru, N. Fujii: J. Geophys. Res., **91**, 9239 (1986).
- [29] M. Cmiral, J.D. Fitz Gerald, U.H. Faul, D.H. Green: Contrib. Mineral. Petrol., **130**, 336 (1998).
- [30] D. Yamazaki, T. Irifune: Earth Planet. Sci. Lett., **216**, 301 (2003).
- [31] K. Suzuki, K. Mori: J. Iron Steel Inst. Jpn., **57**, 2219 (1971).
- [2019年1月28日受付, 2019年2月25日受理]
© 2019 日本高圧力学会