

論文の内容の要旨

論文題目 Experimental Study on the Dynamics of the Partially Molten System
(部分溶融体のダイナミクスに関する実験的研究)

氏名 高嶋晋一郎

はじめに

部分溶融体は固体とそれが融解してできた液体の混合体である。この物質状態は地球内部でその活動が活発な場所に現れる。現在では、中央海嶺直下、火山体下部、コア・マン
トル境界のD''層、内核・外核境界に存在し、地球形成初期では、地球はマントル規模で部
分溶融していたと考えられている。部分溶融体は物性の大きく異なる固体と液体の混合体
であるので、これが示す物性は極めて複雑である。また一方で、このような物質状態は外
からの刺激に対して安定には存在し得ず、時間が経つと両者は分離する。例えば地球のよ
うな重力が働く場では、固液間に密度差があるので、両者は分離する。重力以外にも、外
からの応力や固液間化学反応でも分離してしまう。この固液分離過程は地球内部での物質
分化や熱輸送を効率的に進める過程である。

固液分離過程に関する研究はこれまで数多くなされてきたが、その研究はどれもメルト
フラクションの小さな領域（このとき部分溶融体は基本的に固体として振る舞う）のみを
扱い議論されてきた。しかし、固液分離が進めば部分溶融体の中には高いメルトフラクシ
ョンの状態を経験するものが現れる。この状態での部分溶融体の挙動は極めて複雑である
が、このときの部分溶融体の構造安定性に関しては、十分に研究されてこなかった。本研
究では、部分溶融体のアナログ物質を用いた室内実験的手法でこの問題を扱った。

本研究は2つの部分に分けられる。部分溶融体の構造安定を制御する要因を見つけるためのレオロジー測定と、重力が効く場での部分溶融体の構造安定・不安定を調べるための研究である。

実験手法

・アナログ部分溶融体のレオロジー測定

部分溶融体のアナログ物質として、非常に柔らかいゲルと粘性流体の混合体を用いる。両者の密度はそろえる。これを共軸円筒型の装置に詰める。内側の筒を回転させて試料を変形させ、流動状態を観察する。

・重力場での固液分離

直方体の容器（容器 A）にゲルと粘性流体を詰める。両者の密度は同じにする。別の直方体の容器（容器 B）にゲル+粘性流体より大きな密度の粘性流体を詰める。容器 A の上に容器 B を載せる。容器 B の底にはシャッターがあり、それを開けることにより、重い液体が下の混合体の中に浸透していく。このときの重い液体のパターンとゲルの動きを観察する。

結果

・アナログ部分溶融体のレオロジー測定

この混合体には降伏応力があること、降伏応力が固体割合と共に増加することがわかった。降伏応力を超える応力が加わると、混合体は流動する。この状態では、流動の進行と共に固体相の速度分布が変化することがわかった。応力が大きい内筒付近で固体相の速度は増加し、応力の小さい外筒付近でその速度は減少する。得られた速度分布をもとに粘性率分布を調べた。粘性率分布も流動の進行と共に変化し、粘性率分布の不均質が成長することがわかった。内筒付近で粘性率は減少し、外筒付近で逆に増加する。この粘性率分布、速度勾配分布をもとに、混合体でのエネルギーの散逸率を調べた。流動が進むと、系は散逸率が小さくなる状態に進化することがわかった。流動に伴うこの内部構造進化は内部構造変形とレオロジーのカップリングが生み出したと考えられる。これらの結果は、混合体の構造安定を制御する要因は降伏応力であり、流動が起きると混合体では固液分離が進行することを示唆している。

・重力場での固液分離

重い液体浸透の初期、重い液体はゲル粒子間を浸透流という形で移動していく。重い液体の浸透を受けたゲルは、密度差のために上に動く。このとき固体相の流動は起こらない。浸透が進むと一部のゲルが下向きに動き始める。このゲルが動き始めた領域では、ゲルの動く速度が増し、流動が進む。それと共に重い液体もその領域に集まり始める。最終的に、固体の流動が起きる領域の下は、その上の領域よりも重い液体の分布が不均質になる。重い液体の密度・粘性率・固体割合を変えたパラメータスタディの結果、ゲルの流動を決める要因は降伏応力であることがわかった。また、流動後に形成される不均質の波長が、重い液体が浸透した層のうちで流動をしている領域（流動層と定義する）の厚さと良い相関があることがわかった。この系で得られる、流動層の厚さと不均質の波長の間になり立つ関係を、液体系の Rayleigh-Taylor instability と比較すると、固液混合系での不均質形成は液体系の Rayleigh-Taylor instability で近似できることがわかった。不均質の波長は、重い液体が浸透流として移動する速度と混合体がダイアピルとして移動する速度の競合で決まることがわかった。

議論

2つの実験いずれにも共通していることは、固液混合体の構造の安定性を支配する要因が降伏応力であることである。この降伏応力がマントル部分溶融体でどのくらいになるかをスケーリングによって推定した。その結果、固体割合で 50%から 75%の間では、 10^3Pa から 10^6Pa 程度であることがわかった。一方マントル部分溶融体に働く応力は平均で 10^5Pa である（局所的にはもっと大きい値をとる）ので、現実の部分溶融体でも上記のような大きな固体割合で流動化が起きることを示している。