

部分溶融体の構造安定・不安定に関する実験的研究

Experimental study on the stability / instability of the structure of the partially molten system

高嶋 晋一郎[1]; 熊谷 一郎[2]; 栗田 敬[3]

Shinichirou Takashima[1]; Ichiro Kumagai[2]; Kei Kurita[3]

[1] 東大・理・地球惑星; [2] 東大・地震研; [3] 東大・地震研

[1] Earth and Planetary Sci., Tokyo Univ; [2] ERI, Univ. Tokyo; [3] ERI, Univ. of Tokyo

はじめに

部分溶融状態は地球内部で時間的にも空間的にもさまざまな場面で現れる、きわめて一般的な物質状態である。この物質状態は外からの擾乱に対して不安定であり、固液は分離する。この固液分離は地球内部の熱・物質輸送を進行させるプロセスである。固液分離を生むメカニズムは数多く提案されてきた(例えば、Spiegelman et al. 2001)が、その取り扱いにはメルトフラクションが小さな所に限られている。小さなメルトフラクションでの固液分離が進めば、部分溶融体は大きなメルトフラクションの状態を経験するはずである。メルトフラクションが大きいとき、部分溶融体は固体相の変形だけでなく流動によっても変形する。流動による変形の特徴は、レオロジーと内部構造変化のカップリングで構造が常に変化し続ける点にある。このようなメルトフラクションの大きい状態での部分溶融体の構造安定・不安定を扱ってきた研究は殆ど無い。

本研究では特に2つの点に焦点をあてた。

・レオロジー測定

部分溶融体が発生する場では外力による大きな変形が期待される。この外力による変形に対する部分溶融体の構造安定・不安定をレオロジー測定から調べた。

・重力不安定実験

地球内部での物質の動きは重力によって制御される。密度差のある部分溶融体を上下に成層させたときの構造安定・不安定を調べた。

実験では部分溶融体のアナログ物質としてゲル+粘性流体を用いる。ゲルは透明性が高く、流動中の試料の内部構造の観察が可能である。

実験方法

・レオロジー測定

外径 100mm、内径 25mm、高さ 90mm の 2 重円筒容器にゲル (球状粒子、ずり弾性率 10^3 Pa、直径 5mm) とメチルセルロース水溶液 (粘性率 100mPas) を入れる。ゲルとメチルセルロース水溶液の密度は揃えてある。内筒を回転させて試料を変形させ、流動状態を観察する。流動状態の観察のために、回転軸に垂直な面に平行な 2 次元レーザーシート光を容器内に入れて試料を照らし、カメラで撮影する。流動中の試料に働くトルクを測定して応力を見積もり、速度分布から求めた速度勾配と合わせて、試料内部の粘性率分布を推定する。

・重力不安定実験

375mm*145mm*30mm の直方体の容器にゲルとメチルセルロース水溶液を詰める。その上に、底の部分にスリット (開閉可能) の付いた容器を載せる。その容器の中にゲル+メチルセルロース水溶液より密度の大きな粘性流体を入れる。スリットを開けると重い液体はメチルセルロース水溶液と入れ替わりながら、ゲル+メチルセルロース水溶液の中に浸透していく。重い液体には色を付けておく。装置内部の重い液体のパターンと固体相の流動状態を観察する。

結果

・レオロジー測定

混合系には降伏応力があり、固体割合 (55% - 75%) と共にその値は増加する。降伏応力を超える応力を加えると、系は流動する。流動中の固体相の速度分布・粘性率分布は時間と共に変化する。容器の内側部分では速度は増加し、外側部分で減少する。粘性率は容器内側で減少し、外側で増加する。これらは、レオロジーと内部構造変化のカップリングで固液分離が進行したことを示唆している。

・重力不安定実験

重い液体はその浸透当初、メチルセルロース水溶液 (軽い液体) との入れかわりによる finger-like pattern で移動する。このときの移動様式はグレインスケールでの均質浸透流である。このとき固体相の流動は起こらない。浸透が進行すると、重い液体の浸透フロント付近で固体相が流動を始め、重い液体の浸透方向に動き始める。また、その流動領域に向かって水平方向に固体相が集まる。流動開始直後、重い液体の移動様式は均質浸透流であるが、流動の成長と共に固体相より大きな間隔で固体相と共に流れるチャンネル流に流れ様式が変化する。

重い液体とゲル間の密度差、重い液体の粘性率、固体割合をパラメータにして一連の実験を行った結果、(1) 固体相の流動開始が固体相フレームの降伏応力によってコントロールされること、(2) チャンネル流の波長形成は粘性流体系の Rayleigh-Taylor instability で近似できること、がわかった。この結果は、どの段階でチャンネル流が生まれるのかが、「重い液体の均質浸透流としての移動」と「重い液体+固体相のチャンネル流としての移動」の競合で決まることを示している。

2つの実験で共通していることは、流動状態で固液分離が進むということである。このとき部分溶融体の構造安定・不安定を決めるパラメータは降伏応力である。