

SGC065-03

会場: 301A

時間: 5月23日09:30-09:45

宇宙空間に浮かぶマグマ“コンドリュールメルト”結晶化過程の解明に向けて

For understanding chondrule formation: crystallization process of mm-sized levitated magma droplet in space

三浦 均^{1*}, 塚本勝男¹, 長嶋剣², スリバスタバ アトゥル¹, 横山悦郎³, 田中今日子⁴

Hitoshi Miura^{1*}, Katsuo Tsukamoto¹, Ken Nagashima², Atul Srivastava¹, Etsuro Yokoyama³, Kyoko K. Tanaka⁴

¹東北大・理, ²大阪大・工, ³学習院大・計セ, ⁴北大・低温研

¹Tohoku University, ²Osaka University, ³Gakushuin University, ⁴Hokkaido University

コンドリュールとは、コンドライト隕石中に含まれる直径mmサイズの球状組織であり、主にシリケートから成っている。これらは、46億年昔の原始太陽系において、微小シリケート粒子の集合体（前駆体）がなんらかの加熱過程によって熔融し、表面張力で丸くなったのち、急冷・結晶化したものだと考えられている。多いものでは、コンドライト隕石の80 vol.%以上を占めており、太陽系の岩石を構成する主要な組織であると言える。そのため、コンドリュール形成メカニズムを解明することは、原始太陽系における固体物質進化の謎を解き明かすことに繋がる。

コンドリュール形成とは、いわば、「浮遊状態におけるmmサイズ球状マグマ（メルト）の急冷結晶化過程」である。浮遊状態（非接触）では、完全熔融したメルトは極めて結晶化しにくい。それは、接触部による非均一核形成が起こらないからである。自発的な結晶化にはある程度の核形成待ち時間が必要であり、結果、急冷によって融液のまま大きな過冷却状態が実現し得る。これは、宇宙空間という特殊な環境におけるコンドリュールメルト結晶化過程の特徴である。しかしながら、このような大過冷却状態における結晶化の特異性については、これまでほとんど注目されていなかった。

我々は、コンドリュールメルト結晶化過程を明らかにするため、液滴浮遊法を用いた結晶化実験、及び、結晶化過程の“その場”観察を行ってきた。コンドリュールメルトの模擬物質としてフォルステライト (Mg_2SiO_4) 組成のメルトを急冷させた実験では、自発的な結晶化には数100 K以上の過冷却度を要することが明らかとなった。しかし、いったん結晶化が始まると、その結晶化速度は極めて速く、mmサイズメルトの結晶化がわずか0.1秒程度の間で完了した。また、メルト結晶化に伴い、メルトの温度が急上昇する。これは、結晶化潜熱の解放によるものであり、メルト表面における瞬間的な増光現象（再輝現象）として観察される。高速度カメラによる“その場”観察により、メルト全体が同時に増光するのではなく、メルト表面のある一点が増光したのち、次第にメルト表面全体へと広がっていく様子が見られた。これは、結晶化の際、わずかmmサイズのメルト内部に数100 Kという温度差が生じていることを示している。このような結晶化過程を経た試料は、天然のコンドリュールに類似した凝固組織を示していた。これらの結果は、コンドリュールの凝固組織形成において、結晶化潜熱が重要な役割を果たしていることを強く示唆している。

では、メルト内部に生じる温度差は、コンドリュール凝固組織形成においてどのような役割を果たすのか？この問いに答えるため、我々はメルト結晶化の数値シミュレーションを実施した。数値シミュレーションでは、潜熱解放による局所的な温度上昇、非定常熱拡散、過冷却度に依存した結晶成長速度をモデル化している。我々の数値シミュレーションは、実験結果に見られるように、メルトが極めて短い時間の間（0.1秒程度）に結晶化する様子を再現した。また、メルト

表面の一点から始まった結晶化は、それがメルト内部へと進行するにつれ、非常に複雑な結晶-メルト界面形状を示すことが明らかとなった。このような複雑な結晶化パターンの形成には、結晶-メルト界面における急激な温度勾配に起因する形態不安定（Mullins-Sekerka不安定）が本質的な役割を果たす。メルト内部の結晶化パターンは、結晶化が生じた過冷却度や、メルト表面の冷却率に依存する。ある条件下においては、天然コンドリュールに見られる凝固組織に類似した結晶化パターンが再現された。我々の数値計算結果は、大過冷却メルトの結晶化において生じるメルト内部の急激な温度勾配が、コンドリュール凝固組織形成過程において本質的な役割を果たすことを示している。

浮遊環境におけるメルト結晶化の特殊性に注目した我々の研究は、従来とは全く異なる、新しいコンドリュール形成シナリオを提示しつつある。従来の研究との違いは、宇宙空間を模擬するために浮遊法を採用したことに加え、“その場”観察、及び、メルト結晶化シミュレーションによって、形成過程そのものを対象としたことである。現時点では、素過程をひとつずつ明らかにするために比較的単純な単成分メルトの結晶化を扱っているが、実際のコンドリュールは多成分系であり、今後は多成分系へと研究を展開していく必要があるだろう。多成分メルトが宇宙空間で結晶化するとき、それはこれまで固体地球化学・惑星化学で培われてきた常識とどこが同じで、何が違うのか？また、それらの理解はどのようなコンドリュール形成シナリオを提示するのか？以上の問いに答えるためには、従来の地球化学的手法に加え、従来にはない手法・アプローチによる研究が必要であろう。

キーワード:コンドリュール,浮遊法,結晶化 “その場” 観察,結晶化数値シミュレーション,再輝現象

Keywords: chondrule, crystallization experiment, levitation method, in-situ observation, numerical simulation, recalescence