

コンドリュールメルト結晶化における再輝現象と凝固組織形成

Recalescence during chondrule melt crystallization and formation of the solidification textures

三浦 均^{1*}, 横山 悦郎², 長嶋 剣³, 塚本 勝男¹

Hitoshi Miura^{1*}, Etsuro Yokoyama², Ken Nagashima³, Katsuo Tsukamoto¹

¹東北大・理, ²学習院大・計セ, ³阪大・工

¹Tohoku University, ²Gakushuin University, ³Osaka University

コンドリュールが、46億年昔の原始太陽系においてどのような環境で形成されたのかについては、非常に長い間議論されてきた。コンドリュールの凝固組織を再現する上で特に重要だと考えられてきた条件は、メルトのピーク温度とその後の冷却速度である。これらに関する制約条件は、室内におけるコンドリュール再現実験と、天然コンドリュールに見られる凝固組織や化学組成分布との比較に基づいて得られてきた[1]。しかし、従来の再現実験では、コンドリュールが結晶化する様子を直接見ていないため、どのようなタイミングで、どのように、どのようなタイムスケールで結晶化するかは、凝固組織から得られる結果に基づいて考察する他はなかった。一方、液滴落下法[2]や液滴浮遊法[3,4]を用いた単成分メルトの結晶化実験、及び、結晶化過程の“その場”観察によると、浮遊環境ではメルトが数100 Kという大過冷却状態となり、その後一瞬（数秒以内）で結晶化が完了するという観察事実が報告されている。この際、結晶化潜熱が短い時間で解放されることにより、メルトからの熱放射が急激に増加する現象（再輝現象）が見られている。このような再輝現象は、コンドリュール凝固組織の形成にとってどのような役割を果たしているのだろうか？

我々は、メルト結晶化の数値シミュレーションを行なうことで、コンドリュールメルト結晶化の素過程を理解することを目的としている。素過程を理解すれば、コンドリュール形成に要するタイムスケールやメルトの冷却速度に関する制約について新しい知見が得られるだろう。今回の発表では、過冷却状態となったメルトの表面の一点（核形成地点）から核形成によって結晶化が始まったとき、結晶化潜熱の発生とともにメルト内部がどのように結晶化していくかを調べた。

メルトの断面を二次元直交格子で差分化し、フェーズフィールドモデル[5]（結晶成長を扱う数理モデルであり、潜熱の解放による局所的な温度上昇、非定常熱拡散、界面過冷却度に比例した結晶成長速度、などが考慮されている）に基づいてメルト内部の結晶化過程をシミュレーションした。メルト物性としては、フォルステライト（ Mg_2SiO_4 ）組成の単成分メルトを想定した。シミュレーションの結果、核形成地点から結晶化が進行するにつれて、結晶化潜熱によって局所的に温度が上昇し、mmサイズのメルト内部に数100 Kもの温度差が発生することが分かった。結晶相は潜熱によって高温となっており、より低温なメルト相に向かって結晶は成長する。この場合、結晶-メルト界面は形態不安定により、非常に複雑なパターンを示す[7]。結晶化がメルトの反対地点まで到達するのに要する時間はわずか数秒以下であり、これは液滴落下法や液滴浮遊法を用いた実験に見られる再輝現象のタイムスケールと調和的である。この時点では、メルト内部は結晶相とメルト相が複雑に入り乱れたパターンを示しているが、メルトの冷却に伴い、次第にメルト全体が固化していく。また、結晶化パターンは、過冷却度やメルト表面冷却率に強く依存していることが分かった。以上の結果は、浮遊状態で大過冷却となったメルトの結晶化においては、潜熱の発生が極めて重要な役割を果たすことを示している。

References:

[1] Hewins et al., in Chondrites and the Protoplanetary Disk, vol.341, pp.286 (2005). [2] Nelson et al., EPSL 14, 338-344 (1972). [3] Tsukamoto et al., Antarct. Meteorites 24, 179 (1999). [4] Nagashima et al., J.Crys.Growth 293, 193-197 (2006). [5] Wang et al., Physica D 69, 189-200 (1993). [7]三浦他,日本地球惑星科学連合2009年大会,演題番号J235-006.

キーワード:コンドリュール,結晶化,再輝現象,凝固組織形成,数値シミュレーション

Keywords: chondrule, crystallization, recalescence, solidification texture, numerical simulation