

放射状輝石コンドリュールメルトの準安定リキダス：過冷却制御実験による検討

Metastable liquidus of radial pyroxene chondrule melts: Investigation with supercooling experiments

長嶋 剣[1], 佐藤 久夫[2], 塚本 勝男[1]

Ken Nagashima[1], Hisao Satoh[2], Katsuo Tsukamoto[1]

[1] 東北大・理・地球物質, [2] 産総研、地調、微小領域同位体研

[1] Faculty of Science, Tohoku University, [2] MIGG, GSJ, AIST

1980年頃から冷却速度をパラメータとしたコンドリュール再現実験が行われてきており、その結果100~1000 K/hr. 程度の冷却速度でコンドリュールは形成したとされている。ところが理論的には結晶組織を形作る駆動力は冷却速度ではなく結晶化温度(過冷却度)に強く依存している。我々は天然のコンドリュール組成に近い forsterite, enstatite などを中心とした再現実験を行ってきており、過冷却度にして数百Kといった非常に大きな非平衡過程によってコンドリュール組織が形成されることを示してきた(本学会講演 Nagashima et al. 2000~2002等)。本講演では天然の radial pyroxene コンドリュール組成似のアナログ物質 (MgO: 30.34, FeO: 7.71, CaO: 1.72, Al₂O₃: 3.40, Na₂O: 0.31, SiO₂: 56.52 wt.% En_{74.5}Fe_{14.1}An_{8.8}Ab_{2.6}; T_m = 1480) を用いた高過冷却 (T = 150~650 K) 結晶化実験について報告する。

実験は赤外線イメージ加熱炉で行った。出発試料は 0.6 Pt wire を直径4mm程度のリング状に加工してその上に保持した。脱酸素アルゴン雰囲気下で出発試料を加熱して完全溶融した後に融点以下のある温度まですばやく(約10秒)下げて過冷却状態のまま静置して結晶化を待った。試料の温度は放射温度計によって測定した。結晶化の際には融液がより安定な結晶相へと変化するためエネルギーを発生し温度が上昇する。よって試料温度を測定することで結晶化が起こった時間も知ることができる。さらに実験温度は1000を超えて可視光の輝度として現れることから、この様子を CCD カメラで撮影した。温度の保持は結晶化が完全に完了するまで継続したが、結晶化が CCD カメラで確認できなかった場合は10分程度保持した後に室温まで急冷した。実験後の試料は薄片にし、偏光顕微鏡観察ならびに EPMA による組成像観察と化学分析を行った。

回収試料は以下のような特徴を示した：(1) 過冷却度が180 K以下ではガラス、(2) 過冷却度180~300 Kでは幅数十μm程度で試料全体を横断するような非常に長い棒状 forsterite 結晶が方位を揃えて配列している組織、(3) 過冷却度が300 Kを超えたあたりから長い棒状の組織を持つ結晶は目立たずにガラス質、(4) 過冷却度が450 K以上になると全体がひび割れた不定形で球形をした enstatite 結晶がガラスと共存する組織となっていた。

過去の我々による enstatite メルト急冷実験では enstatite 結晶のみが晶出していたが、今回の実験組成のようにたとえ enstatite 組成に近いメルトであっても forsterite が核形成すると、そのまま棒状の forsterite 結晶が成長し、その後、enstatite が over-growth することがわかった。

メルトからどの結晶が核形成するかは核形成に必要な自由エネルギーの大小により決まる。古典的核形成理論から核形成に必要な自由エネルギーは $\propto (T_m/(L-T))^2$ と表せる(γ : 比例定数, σ : 界面張力, T_m : 融点, L : 融解潜熱)。よってどちらの結晶が核形成するかは forsterite liquids と enstatite metastable liquids、各々の界面張力に強く依存することがわかる。450 K程度の過冷却度で enstatite の球晶が見られたということは、その温度で enstatite が核形成するために必要なエネルギーが forsterite のそれを下回ったということであり、計算すると界面張力の比 σ_{en}/σ_{fo} は0.68~0.70となる。

この結果から、enstatite 組成メルト(SiO₂: 59.85 wt.%)の場合なら enstatite に対し210~280 K以上の過冷却度であれば enstatite が核形成することがわかる。しかし、SiO₂ wt.%がわずかに1%少なくなると310~480 K、3%では470~600 K以上の過冷却度が必要となり、微妙な SiO₂%の違いが核形成条件に効いてくることになる。そして今回の実験組成ではたとえ大過冷却状態から enstatite が核形成したとしても radial pyroxene 組織は形成されなかった。逆に SiO₂ wt.%が1%増えると過冷却度は80~110 Kを超えただけで enstatite が核形成することになる。そこで En_{68.0}Fe_{9.6}An_{8.4}Ab_{2.0}Qz_{3.0} (62.55 wt.%)組成で同様の実験を行ったところ enstatite が核形成し radial pyroxene 組織が形成された。よって radial pyroxene コンドリュールが形成するための条件としては数百 K程度の大きな過冷却度が必要なだけでなく、enstatite が最初に核形成する必要がある。よって、1) メルト組成が enstatite 以上程度に SiO₂ rich、さもなければ、2) enstatite の不均質核形成を誘発するようなダスト等が衝突することが形成条件としてあげられる。