



Title	Crystallization Kinetics of Amorphous Silicate and Alumina Dust in Protoplanetary Disks [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	小林, 航大
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15283号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89590
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kodai_Kobayashi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 小林 航大

学 位 論 文 題 名

Crystallization Kinetics of Amorphous Silicate and Alumina Dust
in Protoplanetary Disks
(原始惑星系円盤における非晶質ケイ酸塩およびアルミナダストの結晶化速度論)

ケイ酸塩ダストは、晩期星の星周、星間空間、原始惑星系円盤と様々な宇宙環境で豊富に存在する固体物質である。10、18 μm 波長帯の赤外天文観測から、ケイ酸塩ダストは星間空間では主に非晶質として存在し (Kemper et al., 2004)、原始惑星系円盤においては、非晶質と結晶質の両方の形態で存在することが知られている (Bouwman et al., 2001)。さらに、若い星周囲の赤外分光観測から、円盤内側領域ほど結晶質のケイ酸塩ダストが多いことを示唆する結果が得られている (van Boekel et al., 2004)。これは、非晶質ケイ酸塩ダストが中心星近傍の円盤内側で加熱を受けて結晶化したためと考えられている。すなわち、ケイ酸塩ダストの結晶性や結晶相の分布が円盤の物理条件を反映している可能性がある。

酸素に富む AGB 星の観測では、一部の恒星で 11-12 μm にかけて緩やかなピーク、13 μm に比較的鋭いピークを示すスペクトルがみられ、それぞれのピークに対して非晶質アルミナまたは γ -アルミナ、コランダムが存在が示唆されている (Takigawa et al., 2015)。これらの酸化物ダストは、進化末期の恒星周囲や原始惑星系円盤での高温物質進化を記録していることが期待される。

始原的隕石中のマトリックスにおいて、太陽系起源や太陽系外起源の非晶質、結晶質ケイ酸塩粒子や、コランダム粒子、非晶質アルミナ粒子が観察されており (e.g., Scott, 2007; Takigawa et al., 2014)、これらの粒子は太陽系形成過程において加熱による結晶化を経験したものや結晶化せずに生き残ったものなどであると考えられる。したがって、原始惑星系円盤におけるケイ酸塩ダストやアルミナダストの熱進化の条件を明らかにすることは、初期太陽系での惑星材料の進化の理解につながることを期待される。

円盤でのダストの熱進化を理解するために、これまで様々な実験的研究がおこなわれてきた (e.g., Brucato et al., 2002)。非晶質フォルスセライトの結晶化実験では円盤中に存在しうる水蒸気によって結晶化が促進されることが示された (Yamamoto & Tachibana, 2018)。しかし、他の組成の非晶質ケイ酸塩について、円盤ガスの影響を考慮した結晶化の実

験は十分におこなわれていない。アルミナの結晶化や相転移に関する実験的研究では、物質科学分野において様々な準安定アルミナから α -アルミナへの相転移について議論されてきた (e.g., Yamaguchi et al., 1976)。しかし、準安定アルミナの相転移については、異なる速度や幅広い活性化エネルギー ($\sim 200\text{--}600\text{ kJ/mol}$; e.g., McArdle & Messing, 1993) が報告され、非晶質アルミナの結晶化に関する速度論的研究はほとんどおこなわれていない。

本論文では、円盤ガスとして低圧の水素ガスや水蒸気が存在することに注目して、周辺雰囲気や圧力の結晶化への影響を調べるために、誘導熱プラズマ法で合成された (Imai, 2012) サブミクロンサイズの非晶質エンスタタイトダストの結晶化実験を空气中、真空中、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ Pa}$ 、 $P_{\text{H}_2} = 5\text{ Pa}$ 、 $P_{\text{total}} = 5\text{ Pa}$ ($P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{H}_2} \sim 10^{-3}$) と様々な雰囲気でおこなった。その結果、結晶化に対する活性化エネルギーは $727\text{ (空气中)} - 951\text{ kJ/mol (真空中)}$ が得られ、水蒸気は非晶質フォルステライト同様 (Yamamoto & Tachibana, 2018)、非晶質エンスタタイトの結晶化の活性化エネルギーを小さくすることを示した。さらに、実験温度領域では、空气中での結晶化は低圧での結晶化より遅く、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3\text{ Pa}$ 下での結晶化が一番速いことが示された。加熱粒子の観察から、低圧での加熱は空气中より焼結を進行させることがわかり、非晶質エンスタタイト構成原子 (Mg, Si, O) の蒸発がおこることで (Reitmeijer et al., 1986)、粒子表面で不均質核形成がおこり、エンスタタイトの結晶化を促進することが考えられる。このように、周辺ガスは実験の温度領域やタイムスケールにおいて明らかに結晶化速度に影響を与えるが、原始惑星系円盤のタイムスケールにおいては、非晶質エンスタタイトの結晶化の活性化エネルギーが極めて大きいため、影響が最小限にとどまることがわかった。したがって、結晶質エンスタタイトダストは温度以外の円盤条件に依らず、円盤でケイ酸塩ダストが経験した温度の良い指標となる可能性がある。

非晶質アルミナの結晶化や γ -アルミナの相転移に関する速度論的研究から、非晶質アルミナの結晶化や γ -アルミナの相転移に対する活性化エネルギーはそれぞれ $314, 427\text{ kJ/mol}$ が得られ、非晶質アルミナから準安定アルミナ (γ -アルミナ) の結晶化は非晶質フォルステライトの結晶化 (Yamamoto & Tachibana, 2018) と似た速度でおこることがわかった。原始惑星系円盤においては、非晶質アルミナはおよそ 700 K よりも低温の円盤外側で、 α -アルミナはおよそ 900 K よりも高温な円盤内側領域のみで存在することが示唆され、非晶質アルミナダストや準安定アルミナダストは非晶質ケイ酸塩ダストが生き残るような円盤の温度領域において十分維持されうるということがわかった。さらに、酸素同位体交換反応 (Nabatame et al., 2003) との比較から、円盤に取り込まれた太陽系外起源の非晶質、 γ -アルミナの多くは同位体交換を経験してから結晶化、相転移し、太陽系のダストに変化することが明らかとなった。これは、隕石中でみられるアルミナ粒子の多くは太陽系起源のコランダムであり、太陽系外起源のコランダム粒子が少数観察されるにとどまっていることと整合的である。