

固体惑星起源物質としての非晶質珪酸塩の重要性とその初期進化  
Importance of amorphous silicates as source material  
of the solid planets and its initial evolution

土山 明 (TSUCHIYAMA AKIRA)

大阪大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

非晶質珪酸塩の合成と加熱および水質変成による結晶化実験と地球外サンプル（隕石、宇宙塵だけでなく宇宙機によるリターンサンプル）の分析を有機的に組み合わせることにより、非晶質珪酸塩が固体惑星起源物質としてどのような役割を果たし、また初期太陽系でどのような進化をしたかを明らかにする。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地球惑星物質、宇宙塵

1. 研究開始当初の背景

星周塵や星間塵の赤外天文観測からは、非晶質珪酸塩が太陽系固体物質の原材料であることが論理的な帰結であるにもかかわらず、太陽系形成初期における非晶質珪酸塩の役割についてはほとんどわかっていない。また、彗星起源の宇宙塵やある種の炭素質隕石には始原的と思われる非晶質珪酸塩が存在するが、これらの太陽系の原材料と考えられる非晶質珪酸塩についての物質科学的な研究も進んでいない。

2. 研究の目的

太陽系原材料物質としての非晶質珪酸塩が太陽系形成にどのような役割を果たし、またどのような進化を遂げたのかについて解明する。具体的には、始原天体の原材料が非晶質珪酸塩であったことを示し、その非晶質珪酸塩の性質を特定するとともに、彗星内や始原的な小惑星での非晶質珪酸塩の進化の解明し、非晶質珪酸塩が分子雲に取り込まれる以前の段階での星周領域・星間空間での珪酸塩の進化についても議論する。

3. 研究の方法

室内実験（非晶質珪酸塩の合成とその加熱・水質変成による結晶化実験など）と始原的な地球外物質の鉱物学的研究（隕石・宇宙塵だけでなく、スターダスト計画やはやぶさ計画による彗星や小惑星からのリターンサンプルの分析）を有機的に組み合わせることにより、おこなう。

4. これまでの成果

太陽系固体材料物質としての非晶質珪酸塩に関して、CI組成に関連した組成をもつ系統的な非晶質珪酸塩の合成とその加熱結晶化実験をおこなった。実験生成物の赤外吸収スペクトルから結晶化率を求めることにより、かんらん石は不均一核形成と拡散律速成長により結晶化しその活性エネルギーが $\sim 4.0 \times 10^4 \text{K}$ であること、輝石は均一核形成と拡散律速成長により結晶化しその活性エネルギーが $\sim 1.1 \times 10^5 \text{K}$ であることがわかった。これらのデータをもとにしてTTT図を作成し、晩期星や若い星また彗星での結晶化過程を定量的に議論できることを示した。また、かんらん石と非晶質珪酸塩間のFe-Mg元素分配実験により、低温においてもMgがかんらん石に選択的に濃集することを明らかにした。実験生成物と晩期星星周塵の赤外スペクトルとの比較から、これまでの観測で帰属が不明であった吸収ピークが、多量の積層欠陥を含む輝石や球状のかんらん石で説明できることを示した。以上の成果より、赤色巨星のような晩期星においては、中心星から放出されたガスからの非晶質珪酸塩の生成とその後の加熱による結晶質珪酸塩の生成モデルを、また我々の太陽系形成も含めた若い星では、非晶質珪酸塩である星間塵の原始惑星系円盤における加熱による結晶化モデルを、提案した。

また、小惑星内での水質変成を模擬するために、非晶質珪酸塩の水質変成実験をおこな

った。従来の水質変成実験ではかんらん石や輝石などの結晶質珪酸塩を用いていたが、非晶質珪酸塩は反応性が高いこと、また Mg, Fe, Si 以外の元素を含むため、炭素質コンドライトに見られるサポナイトやサーペンティンといった含水珪酸塩鉱物が純水中での変成でも容易に生成することがわかった。水質変成作用についても TTT 図 (温度-時間-相変化図) を作成し、CM コンドライトの鉱物組み合わせに対応する生成物が最終的に得られることがわかった。Fe を含む非晶質珪酸塩の水質変成実験でも、含水珪酸塩だけでなく磁鉄鉱が生成されたが、当初の目標であるフランボイダル構造をもつものは現在の所合成できていない。

スターダスト計画により地球に持ち帰られた Wild-2 彗星の塵の分析をおこない、彗星塵の中にコンドリュールの欠片を含むことを発見した。さらに、塵サンプル捕獲時にエアロジェル中に生成された衝突トラックの分析をおこない、彗星塵の密度を求め (1.0 g/cc と予想よりもやや高密度であった)、コンドリュールなどの高温生成物の含有量を約 5% 程度と推定した。これらにより、原始惑星系円盤における高温生成物の彗星形成領域への大規模物質移動の研究に大きく貢献した。また、スターダストサンプルの捕獲プロセスを模擬した高速衝突実験をおこない、トラック形成モデルを新たに提案した。

始原始的な小惑星に由来する考えられる炭素質コンドライトには、数 100 nm 径の有機物から成り中空な球状物質 (有機物グロービュール) が特徴的に存在している。これが分子雲で生成されたならば、中空部分には始原始的な氷を由来とする流体が閉じ込められている可能性がある。超高分解能 CT を用いて有機物グロービュールの撮影に成功し、従来の破壊分析では逃げてしまったかもしれない流体の検出を試みている。

はやぶさ計画以降の次期小惑星サンプルリターン計画では、炭素質コンドライト母天体と考えられる C 型小惑星がターゲットとなっている。サンプル採取法の検討のためにはサンプルの破壊強度が必要であるが、炭素質コンドライトは貴重でありまた脆弱で強度測定のための大型試料を得ることができない。微小試料の強度測定法を開発し、多くの種類の炭素質コンドライトだけでなく宇宙塵についてもその強度測定をおこなった。

初期太陽系における惑星形成は、ダストのアグリゲーションにより開始される。このようなダストアグリゲイトを実験室内で再現し、その 3 次元構造を超高分解能 CT により明らかにした。また、宇宙塵の 3 次元構造を CT により求め、ダスト集積シミュレーション結果と比較した所、両者に共通な特徴があることを見出した。

## 5. 今後の計画

今後はこれまでの成果をもとに、さらにこれらについて引き続き研究を進める。とくに、当初の目標の到達がやや遅れている、非晶質珪酸塩の構造変化と星間塵の関係、水質変成実験によるフランボイド磁鉄鉱の再現や有機物と非晶質珪酸塩の相互作用の研究も視野に入れ、最終的な研究目的である「太陽系原材料物質としての非晶質珪酸塩が太陽系形成にどのような役割を果たし、またどのような進化を遂げたのか」を達成したい。

## 6. これまでの発表論文等

Noguchi et al. (2nd: Tsuchiyama) (2010) Surface morphological features of boulders on Asteroid 25143 Itokawa. *Icarus*, 206, 319-326.

Koike et al. (6th: Tsuchiyama) (2010) Effect of forsterite grain shape on infrared spectra. *ApJ*, 709, 983-992.

Tsuchiyama et al. (2nd: Nakamura) (2009) Three-dimensional structures and elemental distributions of Stardust impact tracks using synchrotron microtomography and X-ray fluorescence analysis. *MAPS*, 44, 1203-1224.

Imai et al. (5th: Tsuchiyama) (2009) Shape and lattice distortion effects on infrared absorption spectra of olivine particles. *A&A*, 507, 277-281.

Murata et al. (7th: Tsuchiyama) (2009) Crystallization experiments on amorphous magnesium silicate. II. Effect of stacking faults on infrared spectra of enstatite. *ApJ*, 698, 1903-1906.

Murata et al. (6th: Tsuchiyama) (2009) Crystallization experiments on amorphous magnesium silicate. I. Estimation of activation energy of enstatite crystallization. *ApJ*, 697, 836-842.

Murata, et al. (5th: Tsuchiyama) (2009) Mg/Fe fractionation in circumstellar silicate dust involved in crystallization. *ApJ*, 696, 1612-1615.

Nakamura et al. (2nd: Tsuchiyama) (2008) Bulk mineralogy and three dimensional structures of individual Stardust particles deduced from synchrotron X-ray diffraction and microtomography analysis. *MAPS*, 43, 247-259.

Nakamura et al. (2nd: Noguchi, 3rd: Tsuchiyama) (2008) Chondrule-like Objects in Short-Period Comet 81P/Wild 2. *Science*, 321, 1664-1667.

Murata et al. (3rd: Tsuchiyama) (2007) Crystallization experiments on amorphous silicates with chondritic composition: quantitative formulation of the crystallization. *ApJ*, 668, 285-293.