

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分

平成30年5月31日現在

研究課題名（和文） **太陽系始原物質の3次元構造から探る宇宙・太陽系における固体物質の生成・進化モデル**

研究課題名（英文） **A model for formation and evolution of solid materials in space based on 3D structures of solar primitive materials.**

課題番号：15H05695

研究代表者

**土山 明** (TSUCHIYAMA AKIRA)

京都大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要：太陽系始原物質のマルチスケール3次元構造観察・分析により、彗星塵に類似した超多孔質岩相やCO<sub>2</sub>を含む流体（これらは45億年前の”氷の化石”ともいえる）を発見した。これらの成果を、凝縮・変成による固体生成・進化についての実験成果と組み合わせることにより、太陽系の固体原材料物質の起源と進化に関する新しいシナリオを提唱した。

研究分野：数物系科学 地球惑星科学 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地球惑星物質、凝縮、宇宙風化、はやぶさ2

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙において物質がどのように生成され、どのように進化してきたか、地球を作った物質の究極のルーツは未だよくわかっていない。理論・天文観測モデルによると、赤色巨星などの進化末期の恒星の周りで高温ガスの凝縮により固体微粒子が生成され、星間空間で粒子線照射により変成（宇宙風化）を受け、星間ガスとともに集まって太陽系が形成されたと考えられているが（図1）、実証はされていない。一方、太陽系形成時からほとんど変化を受けていない始原物質である彗星塵や隕石の中に、先太陽系由来の微粒子の存在が明らかにされ、太陽系だけでなく先太陽系での固体生成や変成過程の物質科学的研究が可能になりつつある。本研究で着目する物質の3次元構造は、微小な試料から形成・進化履歴を読み解く鍵となる新たな情報源である。

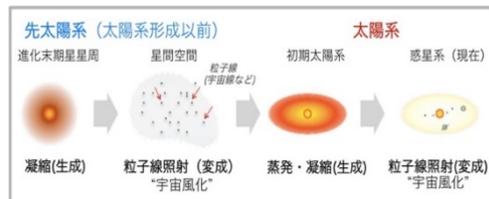


図1 宇宙における固体生成と進化（概念図）

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽系始原物質の3次元構造分析とその構造を再現する条件を実験的に調べることにより、先太陽系と太陽系とい

う2つの異なった環境における物質の生成・変成過程を物質科学的に実証し、宇宙・太陽系における固体物質の生成・進化モデルを物質科学的に構築することにある。

### 3. 研究の方法

(1) 星周および原始太陽系円盤における凝縮プロセス（固体物質の生成）の実験的研究

高周波誘導熱プラズマ装置を用いて凝縮実験をおこない、星周および原始太陽系円盤における高温ガスからの固体微粒子の凝縮プロセスを実験的に明らかにする。

(2) 星間および太陽系天体表面における変成プロセス（固体物質の進化）の実験的研究

粒子線照射実験により太陽系・星間空間での宇宙風化を明らかにする。衝突実験や磨耗実験により、大気のない天体でのレゴリス粒子の生成と進化（宇宙風化）を明らかにする。非晶質珪酸塩の水質変成実験をおこない、プロセスの理解とともに、太陽系始原物質が水質変成を受ける以前の始原的な状態を求める。

(3) 太陽系始原物質（彗星塵と隕石）の3次元構造の研究

集束イオンビーム加工と走査型電顕、マイクロ・ナノX線CT、透過型電顕、ラマン分光、ナノ2次イオン質量分析などを組み合わせたマルチスケール3次元観察・分析手法を開発する。これを太陽系始原物質に適用し、始原的な岩相を探索するとともに、それらの構成物の集積プロセスを明らかにする。また、水

質変成を受けた炭素質コンドライトから流体包有物を探索し、その組成から隕石の形成領域を推定する。

#### 4. これまでの成果

##### (1) 凝縮プロセスの実験的研究

硫黄を含む系 (Fe-Mg-Si-O-S 系) での凝縮実験により、彗星塵中の非晶質珪酸塩微粒子である GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfide) の再現に成功するとともに、酸化還元条件の違いによる多様な GEMS 様粒子が生成されることを明らかにした。

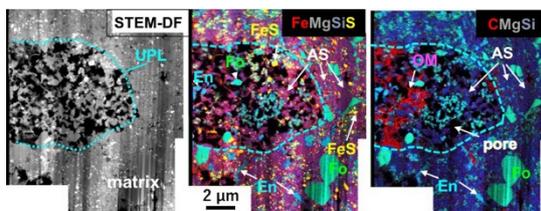
##### (2) 変成プロセスの実験的研究

太陽風照射を模擬した輝石への照射実験により、小惑星イトカワ粒子に見られる宇宙風化層組織を再現し、宇宙風化層生成速度が従来の説より大きいことを示した。磨耗実験により、イトカワでは粒子の磨耗は起こらず、一部のイトカワ粒子はイトカワ前駆天体起源であることがわかった。従来の宇宙風化モデルを見直す必要がある。

##### (3) 太陽系始原物質の3次元構造の研究

彗星塵の XCT 撮影で微小コンドリュールを発見、初期太陽系での大規模物質移動の新たな証拠を得た。また、TEM/EDS-CT により世界で初めて GEMS の3次元元素分布を求めた。

水質変成をほとんど受けていない始原的炭素質コンドライトのマトリクスに、GEMS 様の非晶質珪酸塩を持つ始原的な岩相を見出した。とくに Acfer 094 隕石に彗星塵に類似した超多孔質岩相 (空隙にはかつて氷が存在したと考えられる) を発見した (図2)。始原的な岩相は多様で、彗星塵ともわずかに異なる。凝縮実験において異なる条件で多様な GEMS (様) 物質が生成されることも考慮し、「太陽系の異なる領域で多様な始原物質が凝縮によって形成された」という太陽系の固体原材料物質の起源と進化に関する新しいシナリオ



を提唱した。

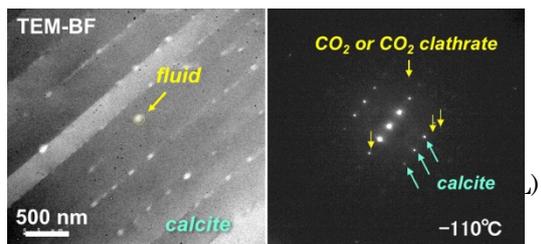


図3 Sutter's Mill 隕石の方解石中の流体包有物 (TEM 像) と、 $-110^{\circ}\text{C}$  で出現する  $\text{CO}_2$  氷あるいは  $\text{CO}_2$  clathrate の電子線回折反射 (矢印)

また、水質変成を受けた炭素質コンドライト中に、ナノサイズの  $\text{CO}_2$  を含む包有物を発見した (図3)。これは、「超多孔質岩相とともに、45 億年前の太陽系創生期の氷の化石」といえる。 $\text{CO}_2$  の存在はこの隕石が太陽系の比較的外側の低温領域で形成されたことを示唆し、提唱したシナリオとも整合的である。

#### 5. 今後の計画

##### (1) 凝縮プロセスの実験的研究

GEMS に関するより現実的な系 (Si-Mg-Fe-Na-Al-Ca-Ni-O 系) を用いた系統的な実験を進める。非晶質珪酸塩だけでなくナノ結晶の凝縮条件を明らかにするとともに、星周での凝縮プロセスを明らかにする。

##### (2) 変成プロセスの実験的研究

星間塵を模擬した非晶質珪酸塩への宇宙線照射を模擬した照射実験をおこない、宇宙での宇宙風化の理解を進める。太陽系での宇宙風化のモデルを見直し、はやぶさ2サンプルへ応用する。また、凝縮実験で作成した GEMS 模擬物質を用いた水質変成実験をおこない、初期の水質変成プロセスを理解する。

##### (3) 太陽系始原物質の3次元構造の研究

彗星塵のマルチスケール3次元構造観察・分析を進め、始原的炭素質コンドライトのマトリクスと比較する。多くの始原的炭素質コンドライトに超多孔質岩相のような始原的岩相を探索する。水質変成実験結果より、わずかに水質変成を受けている始原的炭素質コンドライトマトリクス中の初期状態を推定し、GEMS とも比較することにより、今回提唱したシナリオを検証する。また、ナノ流体包有物を探索し、隕石の生成領域の推定をおこなう。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(1) K. Yoshida (他 8) A. Miyake (4th), A. Tsuchiyama (5th) (2018) Micro-excavation and direct chemical analysis of individual fluid inclusion by cryo-FIB-SEM-EDS: Application to the UHP talc-garnet-chloritoid schist from the Makbal Metamorphic Complex, Kyrgyz Tian-Shan. *Geochem. J.* 52, 59-67.

(2) T. Michikami (他 7), A. Tsuchiyama (3rd), K. Uesugi (6th) (2018) Influence of petrographic textures on the shapes of impact experiment fine fragments measuring several tens of microns: Comparison with Itokawa regolith particles. *Icarus*, 302, 109-125.

(3) T. Matsumoto, A. Tsuchiyama, K. Uesugi 他 (16) (2016) Nanomorphology of Itokawa regolith particles: Application to space-weathering processes affecting the Itokawa asteroid. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 187, 195-217.

ホームページ <http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-min/special.html>