

電子線トモグラフィ法による GEMS の 3次元構造の観察 3-D observation of GEMS by electron tomography

松野 淳也^{1*}; 三宅 亮¹; 土山 明¹; 中村 圭子²; メッセンジャー スコット²

MATSUNO, Junya^{1*}; MIYAKE, Akira¹; TSUCHIYAMA, Akira¹; NAKAMURA-MESSENGER, Keiko²; MESSENGER, Scott²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ²NASA ジョンソンスペースセンター

¹Dep. of Geology and Mineralogy, Kyoto Univ., ²NASA Johnson Space Center

彗星起源と考えられる無水惑星間塵 (CP-IDPs) には GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides) と呼ばれる微小(数 100 nm) 粒子が多量に含まれている。GEMS は非晶質珪酸塩中に複数の Fe-Ni 金属、硫化物ナノ包有物 (10-50 nm) を有しており、太陽系の最も始原的な物質の一つと考えられている。また GEMS は、その赤外スペクトルの特徴が星間塵や星周塵のものとよく合致するサブミクロンサイズのダストであることから、いわゆる”astronomical silicate” の候補物質でもある [1]。このように惑星物質学上も天文学上も注目されている物質であるが、どこでどのように GEMS が生まれたのかは議論中である [2-5]。

Bradley らは、GEMS は原始太陽系円盤での様々な変成を免れた星間塵であり、結晶が宇宙線などの照射により非晶質化して形成したと主張している [2,4]。その根拠の一つとして透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた観察結果で、GEMS の中に 10nm 程度の relict grain と呼ばれる結晶が存在しその外形が GEMS そのものの外形と仮晶関係にある、というのがある [2]。しかし、そもそも relict grain がこの報告以外では観察されないこと [3] や、2次元の観察での外形評価は不定性が大きいことなどの疑問も残っている。

一方 Keller と Messenger は、GEMS は高温ガスの凝縮物であるというモデルを提案している [3,5]。ほとんどの GEMS に酸素同位体異常がみられない、元素存在度が粒子毎にばらつきが大きい、粒子表面にのみ硫化鉄が存在するという観察事実に基づき、GEMS は原始惑星円盤において高温ガスから金属鉄を含む非晶質珪酸塩が凝縮し、冷却するにつれて凝縮粒子表面の金属鉄が硫化したことにより形成した、と説明している。しかしこのグループの観察においても TEM による 2次元像観察を行なうため、真に硫化鉄が GEMS 表面のみに存在しているのか証明できていない。

GEMS の形成起源を明らかにするため、本研究では、これまで 2次元での観察に留まっていた GEMS の組織観察を、TEM を用いた電子線トモグラフィにより 3次元で行なうことを試みた。これにより、3次元構造が得られるだけでなく、従来の 2次元観察では試料の厚み (>50 nm) により制限を受けていた空間分解能が、透過像の画素サイズの数倍程度まで上げることが可能であり、nm オーダーでの不均一性をもつ GEMS のようなサンプルにとって極めて有効な観察手段である。観察には cluster CP-IDPs である、L2036AA5 cluster4, L2009O8 cluster13, W7262A2 の 3 試料を用いた。このうち W7262A2 はポリウレタンを用いて捕獲した IDP であり、従来の捕獲法で使用されるシリコンオイルによる汚染を受けないという特徴をもつ試料である [6]。

IDP 試料を樹脂に埋めミクロトームにより超薄切片を作成した。GEMS の平均粒径が約 180 nm であるため、切片厚みは 50-300 nm とした。電子線トモグラフィは京都大学の TEM (JEM-2100F, JEOL) を用いて行い、約 ± 65° 回転させながら 1° おきを取得した透過像を再構成し一連の断層像を得た。なお透過像は、明視野透過顕微鏡法 (BF-TEM)、高角散乱環状暗視野走査透過顕微鏡法 (HAADF-STEM) 法により取得した。

断層像中に含まれる鉱物相の推定を、STEM-EDS (エネルギー分散型 X 線分析法) で取得した 2次元元素分布像と比較することにより行なった結果、金属鉄は珪酸塩に含まれる事、硫化鉄は主に GEMS の表面に存在する事を確認した。このことは GEMS が凝縮物であることを示唆するモデル [3,5] と調和的な結果だが、今後サンプル数を増やして統計的に検討する必要がある。なお電子線トモグラフィを惑星間塵へ応用し断層像の再構成に成功したのは、今回の研究が世界初である。このことは今後の惑星物質科学の分析的研究上も意義深いといえる。

[1] Bradley et al. (1999) Science, 285, 1716

[2] Bradley and Dai (2004) ApJ, 617, 650

[3] Keller and Messenger (2011) GCA, 75, 5336

[4] Bradley (2013) GCA, 107, 336

[5] Keller and Messenger (2013) GCA, 107, 341

[6] Messenger et al. (2012) 43rd LPSC, 2696 (abstr.)?

キーワード: 惑星間塵, GEMS, 透過型電子顕微鏡, トモグラフィ

Keywords: IDP, GEMS, TEM, tomography