

GEMS模擬粒子の再現を目指したFe-Mg-Si-O-S系での凝縮実験

Synthesis of GEMS analogue particles with condensation experiments in the system Fe-Mg-Si-O-S

*河野 颯¹、土山 明¹、Kim Tae-Hee^{1,2}、松野 淳也¹

*Hayate Kawano¹, Akira Tsuchiyama¹, Tae-Hee Kim^{1,2}, Junya Matsuno¹

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2. 済州大学校

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University

彗星塵にはGEMS (glass with embedded metal and sulfides) と呼ばれる径100 nm程度の非晶質珪酸塩粒子が多量に含まれている[1,2]。GEMSは非晶質珪酸塩にFe-Ni金属と硫化鉄の微小粒子(約10-20nm)を内包しており、硫化鉄は主に粒子表面に存在している [1,3]。GEMSは太陽系で最も始原的な物質の一つと考えられており、その起源を理解することは太陽系物質の起源を理解する上で重要となる。その起源については、原始惑星円盤内での非平衡凝縮によるもの [1]や星間塵の粒子線照射による非晶質化 [2] などの説があるが、未だ議論中である。[1]に基づいて、これまでGEMS模擬粒子の凝縮実験が行われているが [3,4]、硫黄を含む系での系統的な実験は行われていない。本研究では、硫黄を含むFe-Mg-Si-O-S系において、酸化還元条件を系統的に変化させた凝縮実験によるGEMSの再現と、その形成環境の理解を目指している。

凝縮実験には誘導熱プラズマ(induction thermal plasma: ITP)装置(JEOL, TP-40020NPS)を用いた[4]。この装置により、 $\sim 10^4$ Kの熱プラズマにより出発物質を蒸発させ、そのガスの急冷により微粒子を合成することができる。GEMS平均組成Mg:Fe:Si:S = 0.7:0.6:1:0.3 (mol比)となるように、粉体試薬 (SiO_2 , Si, MgO, Fe, FeS_2) の混合物を出発物質として用いた。酸化還元雰囲気による影響を調べるために、Siと SiO_2 の混合比を $\text{Si}/(\text{Si}+\text{SiO}_2)=0$ (Run1), 0.25(Run3), 0.5(Run2)と変化させ実験を行った。Arをプラズマガスとして用い、圧力 0.7×10^5 Paで実験を行なった。また、Run3と同じ出発物質を用いて、直流プラズマ(direct current plasma: DC)装置 (Technoserve, YC-500TSPT5)を用いた実験も行なった(Run4)。DCP装置はITP装置と比べてより高温($\sim 1.5 \times 10^5$ K)の熱プラズマを生成することができ、冷却速度も速い。得られた生成物は、粉末X線回折装置(XRD, SmartLab, Rigaku)、フーリエ変換赤外分光装置(FT-IR, MFT- 680, JASCO)、透過型電子顕微鏡(TEM, JEM-2100F, JEOL)及び電子線トモグラフィ(TEM-CT)を用いた3次元観察により評価した。

酸化的なRun1では、主に硫黄を含む非晶質珪酸塩粒子が生成された。中間的な酸化還元条件であるRun3では、XRDにより非晶質珪酸塩、金属鉄と少量の硫化鉄(troilite)が確認でき、FT-IRにより $9.8 \mu\text{m}$ 付近に非晶質珪酸塩由来の吸収がみられた。TEM/EDS観察においては、わずかに硫黄を含む100nmほどの非晶質珪酸塩粒子の表面または内部に10-20nmの金属鉄、硫化鉄(troilite)を含むGEMSに類似した粒子が確認できた。還元的なRun2では、 Fe_3Si (gupeiite), MgS(niningerite)を含む100nm程度の非晶質珪酸塩粒子が生成された。一方DCPを用いたRun4では、Run3と比べてより多くの硫化鉄を含む微小粒子が確認された。TEM-CTにより、硫化鉄は非晶質珪酸塩の表面に位置していることが確認でき、GEMSの硫化鉄分布[1,3]と調和的であったが、金属鉄も非晶質珪酸塩粒子の内部ではなく表面に位置していることが分かった。

Run3, Run4においてGEMSと類似した特徴を持つ粒子が形成されたことから、GEMSはこれらの実験と近い環境下で形成されたことが予想される。一方、Run1, Run2という酸素量のわずかに異なる酸化還元条件でGEMSとはやや異なる粒子が生成されたことから、GEMSの形成条件はごく狭い範囲に限定されることが考えられる。

[1] Keller and Messenger (2011) GCA, 75, 5336-5365. [2] Bradley et al. (2004) ApJ, 17, 650-655. [3]

Matsuno (2015) Ph.D. thesis, Kyoto University. [4] T. H. Kim, et al (2017) ISPC, 23, P2-33-7.

キーワード：非晶質珪酸塩、彗星塵、誘導熱プラズマ、直流プラズマ、ナノ粒子

Keywords: Amorphous silicate, Cometary dust, Induction thermal plasma, Direct current plasma, Nanoparticles