

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17787

研究課題名(和文) 星周環境におけるエンスタタイト形成過程の解明

研究課題名(英文) Experimental study on enstatite formation under circumstellar environments

研究代表者

瀧川 晶 (Takigawa, Aki)

京都大学・白眉センター・特定助教

研究者番号：10750367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：彗星塵中のエンスタタイトの凝縮条件を明らかにするために、ガス温度・凝縮温度を定量的に制御し、かつ幅広いMg/Si比をもつガスからのケイ酸塩凝縮実験が可能な実験系を構築した。これを用いて、ガス組成を $\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{MgO})=0.05-0.9$ まで変化させて凝縮実験をおこなった。凝縮物として、フォルステライト、斜方輝石、単斜輝石を得た。単射エンスタタイト凝縮に対しては、過飽和比と不純物としての陽イオンの影響が重要であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the condensation conditions of enstatite in cometary materials, an experimental setup, which enables to control the temperatures of vapors and substrates, and the Mg/Si ration of the gases, was developed. Condensation experiments of gases with  $\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{MgO})$  of 0.05-0.9 were carried out and forsterite, and ortho- and clino-enstatite grains were obtained as condensates. The results indicate that not only supersaturation ratio but also a trace amount of cations are important to form clinoenstatite.

研究分野：宇宙鉱物学

キーワード：実験 エンスタタイト 凝縮 彗星塵

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球の岩石や隕石試料などを用いた太陽系物質の鉱物学的研究は、地球や太陽系における物質進化の解明に大きく貢献してきた。一方、赤外観測技術の発達により天文学と鉱物学の境界分野として「宇宙鉱物学」が開拓され、サブミクロンからミクロンサイズの非晶質ケイ酸塩や Mg に富むカンラン石、輝石などの微粒子 (ダスト) が、太陽系外の原始惑星系円盤や晩期型巨星の大気などに普遍的に存在することが明らかにされてきた (Waters et al. 1996; Henning 2010).

ダストの形成実験と星周ダストの観測や隕石試料などの分析を直接結びつけ、ダスト形成条件に制約を与えるために、これまでフォルステライトの蒸発、コランダムの蒸発・凝縮実験をおこない、ダストの結晶形状が星周での形成過程や条件を反映することを示した。特に、コランダムの凝縮実験においては、低圧・低過飽和(S~5)条件での凝縮実験手法を確立させ、コランダムの成長速度および異方性を初めて定量的に示した。

(2) エンスタタイト(MgSiO<sub>3</sub>)は、フォルステライト(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)と共に、星周環境で豊富に存在するダストと考えられ (e.g., Grossman 1972), 実際に、原始惑星系円盤や晩期型巨星の中間赤外スペクトルから、エンスタタイトやフォルステライトが普遍的に存在することがわかっている (e.g., Bowey et al. 2001; van Boekel et al. 2005). 特に、以下に述べる惑星間塵中のエンスタタイトは、モルフォロジーの特徴から、非晶質の結晶化ではなく、気相から直接凝縮していると考えられている。エンスタタイトの凝縮実験は過去にいくつかおこなわれているが、Mg/Si=1 のガス組成を用いた実験が主で、凝縮物とガス組成の関係を調べた研究はほとんどない (Mysen & Kushiro 1988; Tsuchiyama 1988; Yamada 2008).

2. 研究の目的

コランダムで確立した実験手法を、主要なダストであるエンスタタイトに発展・応用し、初期太陽系、原始惑星系円盤や進化末期の晩期型巨星周囲に存在する主要ダストであるエンスタタイトを含めたケイ酸塩の凝縮実験を、幅広い Mg/Si 比をもつガス源をもちいておこない、形成条件を決定する。

3. 研究の方法

- (1) ガス温度および凝縮温度を決定するために、真空炉内に設置したルツボ内部の温度構造の測定を熱電対おこなった (図 1).
- (2) 実験
  - ① Mg/Si 比が太陽系元素存在比のメル

トをガス源とし、既存のイリジウムるつぼの底に入れ、るつぼごと加熱する。るつぼ内温度勾配を利用し、るつぼ内に設置したイリジウム線上に異なる凝縮温度での凝縮物をえる。

② 2つの Ir クヌーセンサーを製作し、それぞれに MgO もしくは SiO<sub>2</sub> 粉末を入れ、ガス源とする。クヌーセンサーの蓋に空いた穴の直径や粉末の量により、ガス組成(Mg/Si)を広く変化させて実験をおこない、凝縮物を得る。

凝縮物は FE-SEM で観察し、EDS 組成分析および EBSD 分析から、凝縮温度範囲および凝縮物の構造を推定する。ガス源温度を変化させることで、過飽和比およびるつぼ内温度を変化させ、エンスタタイト凝縮に必要な温度・過飽和比条件範囲を推定する。

4. 研究成果

(1) 直線導入機に接続した熱電対 2 (図 1) を用いてルツボ内の温度構造を決定した。炉内部の温度はヒータ中央に設置した熱電対 1 の温度により制御し、複数の温度で測定をおこなった。結果を図 2 に示す。ルツボの底から上端にかけて、400° C 程度の温度勾配が得られていることがわかる。温度測定の結果を用いて、実験における凝縮条件 (表 1) を得た。

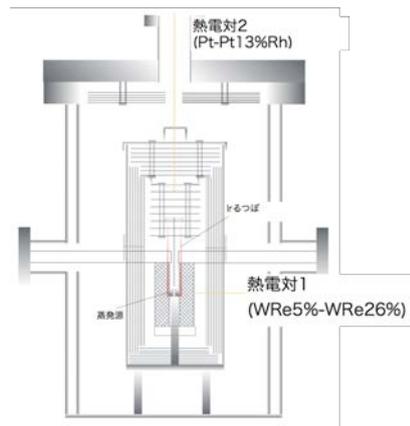


図 1 : 実験装置の概略図。

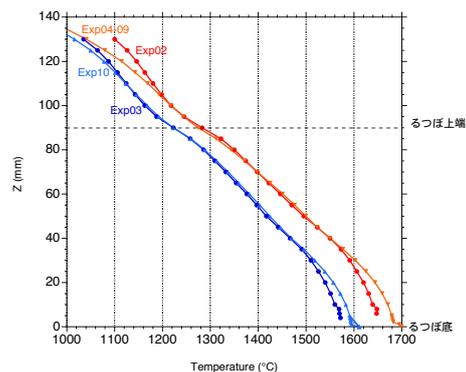


図 2 : ルツボ内温度構造

表 1 : 実験条件

Exp#	T <sub>gas</sub> (°C)	t (h)	Starting Material	SiO <sub>2</sub> / (SiO <sub>2</sub> +MgO)	Condensate
02	1670	50	Si-Mg-O melt	0.5-1	Fo, cEn(pEn)
03	1590	25	Si-Mg-O melt	0.5-1	Fo, oEn, cEn(pEn)
04	1699	25	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.34	Fo
05	1699	25	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.048	Fo
06	1699	25	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.52	Fo
07	1699	25	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.58	Fo
08	1699	25	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.61	Fo
09	1699	25	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.67	Fo
10	1611	100	SiO <sub>2</sub> and MgO powder	0.67-0.91	Fo, oEn

(2) 実験

① MgO-SiO<sub>2</sub> 混合粉末 (MgO/SiO<sub>2</sub>=1) を Ir ルツボに入れ、1670, 1590° C で熔融させ、それぞれ 50, 25 時間加熱し白金線を基盤として凝縮物を得た。ガス温度 1670° C では、基盤温度 > 1600° C で凝縮物は得られず、1600-1580° C の領域でフォルステライト (Fo) が凝縮し、より低温では低温型クラインオエンスタタイト (cEn) もしくはプロトエンスタタイト (pEn) が凝縮した (図 3)。高温ではエンスタタイトは角張っていたが、より低温では、エッジのない丸みをおびた形状に変化した。

ガス温度 1590° C では、Fo の凝縮はおこらず、1420° C の付近の狭い温度域で斜方輝石が観察され、1410° C より低温では cEn もしくは pEn が凝縮した。

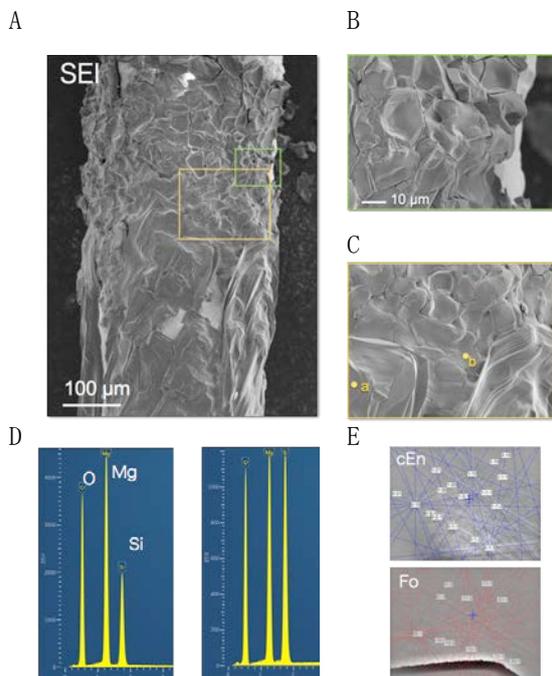


図 3 : MgO-SiO<sub>2</sub> メルトガス源からの凝縮物 (Exp02)。A. 白金線上の凝縮物のフォルステ

ライトとエンスタタイトの境界部分の SEI 像。緑および黄色領域の拡大図を B および C に示す。C 中の a, b 点の EDS スペクトル (D) および EBSD 像 (E)。

② ガス温度を 1700° C, MgO と SiO<sub>2</sub> 粉末を異なるクヌーセンセルに入れて加熱することで、ガス組成を変化させた。ガス組成は、実験前後の MgO および SiO<sub>2</sub> の蒸発量から求め、ガス組成の SiO<sub>2</sub> / (SiO<sub>2</sub>+MgO) 比を 0.05 から 0.7 まで幅広く変化させて実験を行った (表 1)。Exp10 ではガス温度 1610° C, SiO<sub>2</sub> / (SiO<sub>2</sub>+MgO) 比が約 0.7-0.9 でおこなった。

その結果、低い Si/Mg 比 (SiO<sub>2</sub> / (SiO<sub>2</sub>+MgO)=0.05, 図 4) だけでなく、高い Si/Mg 比 (SiO<sub>2</sub> / (SiO<sub>2</sub>+MgO)=0.58, 図 5) でも Fo のみが凝縮し、En の凝縮物は観察されなかった。一方、ガス温度が 90° C 低い Exp10 においては、1340° C 付近で Fo と oEn が凝縮し (図 6)、より低温では oEn のみが凝縮した。oEn はすべて粒状形状で、惑星間塵にみられるような針状や板状の cEn は観察されなかった。

本研究により、これまでほぼ単一の組成でのみ行われてきたエンスタタイト凝縮実験が、任意の Mg/Si 比で再現性よく実験が可能になった。エンスタタイトの凝縮条件および惑星間塵にみられるエンスタタイトを再現する条件を定量的に制約するためには、ガス温度および基盤温度をより広く変化させて網羅的に実験することが重要であると考えられる。

先行研究では、高過飽和度  $\ln(p/p_{eq}) = 60-120$  条件で異なるモルフォロジーの oEn の凝縮に成功しているが (Yamada 2008), cEn の直接凝縮には成功していない。本研究では、低過飽和比条件でも Mg-Si-O 系メルトが蒸発したガスから cEn が凝縮することがわかった。ただし、クヌーセンセルを用いた実験では、近い条件でも cEn が形成されなかった。メルトを用いた実験では、ルツボ内の酸素分圧が高く、ルツボ上部に使用されたタングステンの一部が酸化・蒸発していた。したがって、cEn の形成には W の不純物の影響が考えられる。彗星塵のエンスタタイトにはわずかに鉄が含まれていることが知られているため、今後、酸化還元状態を制御した系での凝縮実験に発展させることが重要と考えられる。

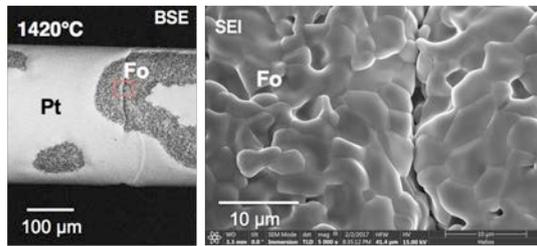


図 4 :  $\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{MgO})=0.05$  (Exp05) で白金線上に得られた凝縮物.

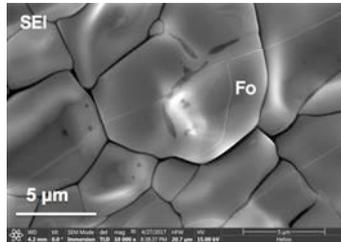


図 5 :  $\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{MgO})=0.58$  (Exp07) で Ir 線上に得られた凝縮物.

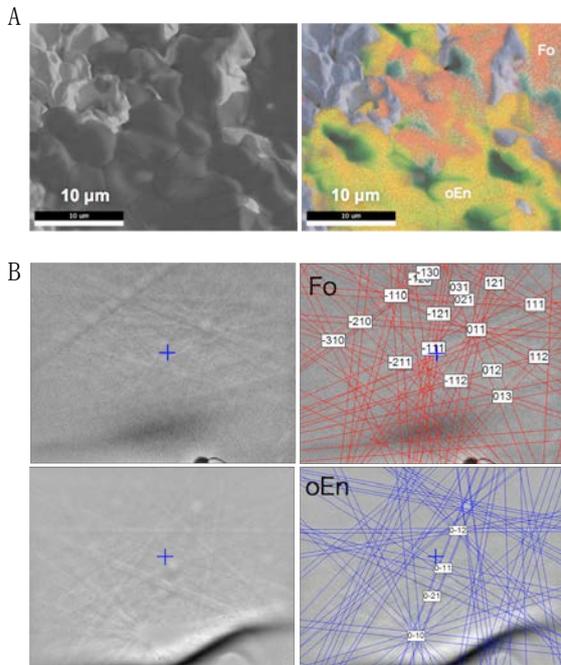


図 6 :  $\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{MgO})=0.5-1$  (Exp10) で Ir 線上に得られた凝縮物. A. BSE 像 (左) と EDS マップ (右) R=Mg, G=O, B=Si. B. Fo および oEn 領域の EBSD 像.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 瀧川 晶, 「星周ダスト形成を模擬した Mg-Si-O 系での凝縮実験:Mg/Si 比依存性」 日本地球惑星科学連合 連合大会

2017 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2017 年 5 月 22 日

- ② Aki Takigawa, “Condensation experiments in the Mg-Si-O system.” International Workshop: Solar System symposium in Sapporo 2017, Rusutsu Resort, Hokkaido, Feb. 14, 2017.
- ③ 瀧川 晶, 「宇宙鉱物学のこれから」, 第 59 回薄片研磨片技術討論会, 京都大学, 2016 年 9 月 29 日(招待講演)
- ④ 瀧川 晶 「星周アルミナ観測とプレソーラーアルミナ分析の調和と衝突」, プレソーラー粒子から探る星間ダストの進化と太陽系の起源研究会, 国立天文台, 2016 年 9 月 27 日(招待講演)
- ⑤ Aki Takigawa, “Microscopic and Telescopic Studies on Circumstellar Dust”, Pre-Forum Meeting on Future Cosmochemistry for the JSPS Forum 2016, Cosmos Club, Washington DC, USA, June 9, 2016 (Invited)
- ⑥ 瀧川 晶, 2015. 宇宙塵から探る太陽系原材料物質の形成と変成. 平成 27 年度日本学術振興会育志賞研究発表会, 京都大学, 2015 年 9 月 1 日.
- ⑦ 瀧川 晶, 「エンスタタイト凝縮実験に向けた装置改良と  $\text{SiO}_2\text{-MgO}$  蒸発実験」 日本地球惑星科学連合 連合大会 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 25 日
- ⑧ 瀧川 晶, 2015. ダスト形成実験, プレソーラー粒子分析, 赤外線観測から探る宇宙鉱物の形成と進化 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 2015 年 5 月 26 日. PPS24-01 (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

瀧川 晶 (TAKIGAWA, Aki)  
京都大学・白眉センター／大学院理学研究  
科・助教  
研究者番号：10750367

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者  
( )