

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287140

研究課題名(和文) 原始惑星系円盤でのフォルステライト異方的成長：宇宙鉱物学の新展開

研究課題名(英文) Vapor Growth of Forsterite in Protoplanetary Disks: Anisotropy and Its Application to Astromineralogy

研究代表者

橘 省吾 (Tachibana, Shogo)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50361564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙鉱物学への応用をめざし、宇宙に主に存在する鉱物であるフォルステライトの気相成長速度および異方性を原始惑星系円盤条件(温度、圧力、ガス組成)を制御した実験で求める研究をおこなった。原始惑星系円盤でのフォルステライト形成条件に近い 1350 K、水素圧 5 Pa、水蒸気/水素比 0.05 を赤外線真空炉中に作成し、過飽和比 15-20 の条件でフォルステライトの気相成長の効率を表すパラメータ凝縮係数が 0.003-0.006 であることを決定した。

研究成果の概要(英文)：Vapor growth experiments on forsterite, a major silicate mineral in space, were conducted under controlled protoplanetary disk conditions in order to understand its vapor growth kinetics. The growth experiments of forsterite at 1350 K in the presence of hydrogen gas (5 Pa) containing H<sub>2</sub>O (H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>=0.05) were done at the supersaturation ratio of 15-20, and we found that the condensation coefficient of forsterite, a non-dimension parameter representing kinetic hindrance for vapor growth, is in the range of 0.003-0.006.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：フォルステライト 原始太陽系円盤 気相成長 速度論 宇宙鉱物学

### 1. 研究開始当初の背景

晩期型星周囲でつくられるダストは、金属元素のキャリアとして銀河の化学進化に寄与し、ダストの輻射や吸収は、星形成時の冷却、原始惑星系円盤の熱構造、晩期型星質量放出風の加速にも影響を与える。ダストは恒星の誕生から死、惑星系形成、銀河化学進化と様々な局面で重要な役割を果たす。1990年代からの赤外線天文学の進展 (e.g., Waters et al. 1995) により、恒星周囲に結晶質ダストの存在が明らかになり、「宇宙鉱物学」とよばれる新たな学問分野が誕生した。

これまで鉱物学は、鉱物から様々な時空間スケールでの地質プロセスを解読してきたが、現状の宇宙鉱物学はそのレベルに達しておらず、天体ごとの赤外スペクトルを説明するダスト種、サイズ、温度などの議論が中心で、ダスト形成条件の解明までっていない。申請者らは星周で最も多く観測されるケイ酸塩フォスフェイト ( $Mg_2SiO_4$ ) が異方的に蒸発し、条件に応じた特徴的な形状を取することを室内実験で明らかにした (図 1; Takigawa et al. 2009)。

さらに、フォスフェイトの結晶軸と関連した異方的形状が、赤外観測に与える影響を見積もり、観測可能なスペクトルの違いとなることを示した (図 2; Takigawa & Tachibana 2012)。応用として、原始惑星系円盤 HD100546 に高温蒸発でつくられる異方的形状をもつフォスフェイトダストが 20-30%存在する可能性を示し、異方的形状をもつ鉱物ダストの赤外スペクトルからダスト形成環境を読み解くという宇宙鉱物学の新たな展開を示した。ダスト候補鉱物の高温・低圧下での蒸発挙動について申請者らは系統的に明らかにしてきたが (e.g., Tachibana & Tsuchiyama 1998; Tachibana et al. 2002; Yamada et al. 2006; Takigawa et al. 2009; Tachibana et al. 2011)、ダストの気相成長に関しては、宇宙鉱物学への適用が可能なダスト形成実験は不十分で、これまでのマグネシウムケイ酸塩ダストの成長実験は、宇宙条件より高圧 (1-10 Torr) (e.g., Toppanni et al. 2006; Kimura & Nuth 2007; Kobatake et al. 2008)・条件が未制御 (Nagahara et al. 1988; Tsuchiyama 1995) といった問題がある。申請者らはこれらの問題を解決し、温度・過飽和比を制御した低圧条件での実験から、金属鉄の気相成長が気体分子運動論から導かれる最大速度で起こることを示した (Tachibana et al. 2011)。

フォスフェイト気相成長実験も予察的に開始し、凝縮係数が 0.1 以下である可能性を示す結果が得られていた。しかし、実験上の問題もあり、最も豊富な星周鉱物フォスフェイトがどのような速度で気相成長する

のか (凝縮係数) という赤外観測と鉱物形成条件を結びつける根本的情報が欠如している状況であった。

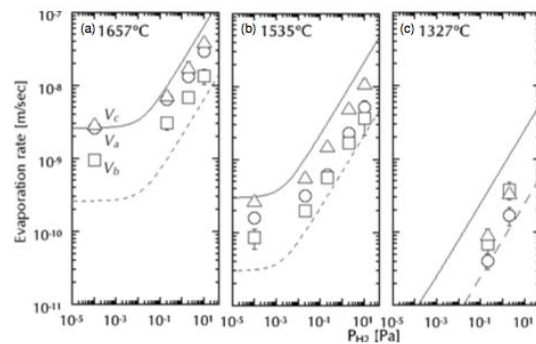


図 1. フォスフェイト蒸発速度の水素分圧依存性 (Takigawa et al., 2009)。

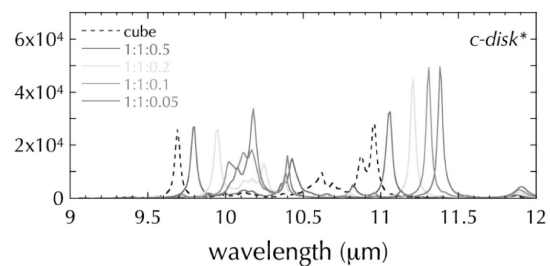


図 2. フォスフェイトの赤外スペクトルの形状効果 (Takigawa and Tachibana, 2012)。

### 2. 研究の目的

これまでの実験を基に、原始惑星系円盤の温度、圧力、ガス組成を制御・再現した実験システムをつくり、フォスフェイトの異方的成長を解明し、宇宙鉱物学へ応用する。成長速度(凝縮係数)の温度、圧力、ガス組成、過飽和比依存性、異方性を求め、結晶学的に考察する。

得られる成長速度およびその異方性はダスト気相成長研究の基礎データとして星周環境物質形成モデルに直接、応用が可能であり、赤外線天文観測と組み合わせ、フォスフェイトダスト形成条件推定するプローブとなりうる。これにより、宇宙鉱物学を大きく前進させることを目的とする。

### 3. 研究の方法

フォスフェイト成長実験は金属鉄気相成長実験 (Tachibana et al. 2011)と同様の手法で、原始惑星系円盤を模擬した圧力 (~1 Pa) の  $H_2$ - $H_2O$  ガスを導入した炉内でフォスフェイト粉末を加熱し、蒸発したフォスフェイト組成ガスを低温部の白金メッシュ上で成長させる。装置は赤外線集光加熱真空炉を用いる (図 3)。

石英ガラス管を真空チャンバーとして使

用し，ガス源となる合成フォルステライト粉末を入れたイリジウムルツボを外部から加熱する．チャンバー内には，水素ガスを定温槽に入れた H<sub>2</sub>O 容器内を經由して，炉内にマスフローコントローラで流量を制御して導入し，排気速度とのバランスで炉内に定常的に一定圧力環境 (~1 Pa) がつくられる．導入ガスの H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> 比は 0.05 程度とする．

作成した試料は電界放射型走査型電子顕微鏡で観察，エネルギー分散型 X 線分光で組成分析，電子線後方散乱回折で結晶構造解析をおこなう．必要に応じて，集束イオンビーム加工装置で試料を切り出し，透過型電子顕微鏡での観察・分析をおこなう．

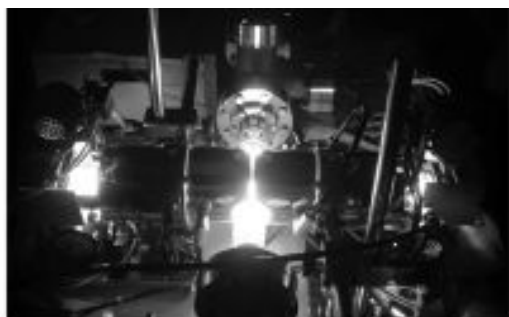
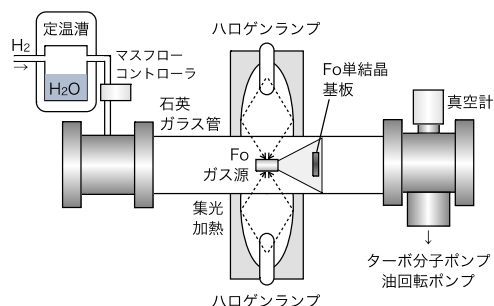


図 3. 赤外線集光加熱真空炉の模式図・写真

#### 4. 研究成果

気相成長実験により，白金メッシュ上にサブミクロン，ミクロンサイズの凝縮物が得られた (図 4)．

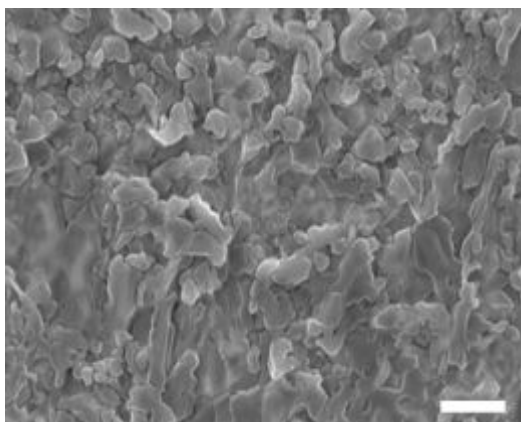


図 4. 得られた凝縮物の二次電子像．スケールバー 1 ミクロン．

エネルギー分散型 X 線分光で得られた凝縮物の化学組成はフォルステライト組成に等しく，電子線後方散乱回折により，凝縮層は多結晶フォルステライトであることがわかった (図 5)．

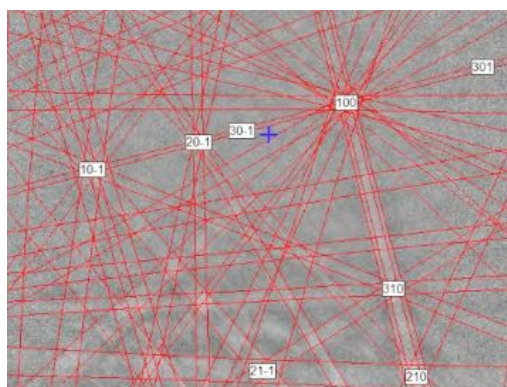


図 5. 凝縮物の電子線後方散乱回折菊池パターン

透過電子顕微鏡観察でも多結晶フォルステライトであることが確認された (図 6)．

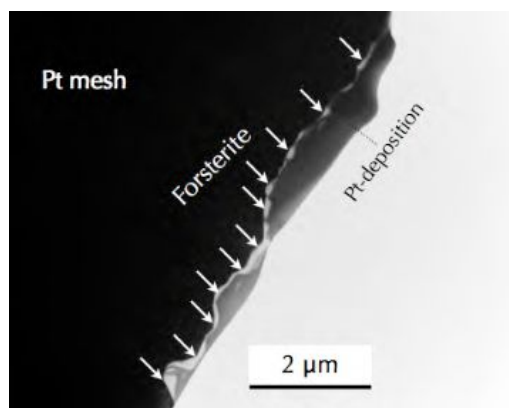


図 6. 凝縮層 FIB 薄片の透過電子像

また，フーリエ変換型赤外線吸収分光分析もおこない，フォルステライトの吸収スペクトルを確認した．制御した原始惑星系円盤条件で形成されたフォルステライトの初めての赤外吸収スペクトルデータとなる (図 7)．

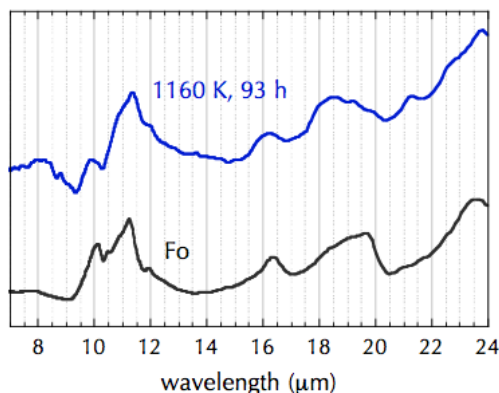


図 7. フォルステライト凝縮物の赤外線吸収スペクトル

基板上へのフラックスに対して、実際の凝縮フラックスから、過飽和比 15-20 の条件での凝縮係数が 0.006-0.003 であることが求められた(図8). 金属鉄の凝縮係数( ~1; Tachibana et al., 2011 )よりはるかに小さい値であった. コランダム凝縮係数 0.05 よりも小さく、温度条件がより低温であること、Al-O 二成分系のコランダムに対し、フォルステライトは Mg-Si-O の三成分系であることの影響が考えられる.

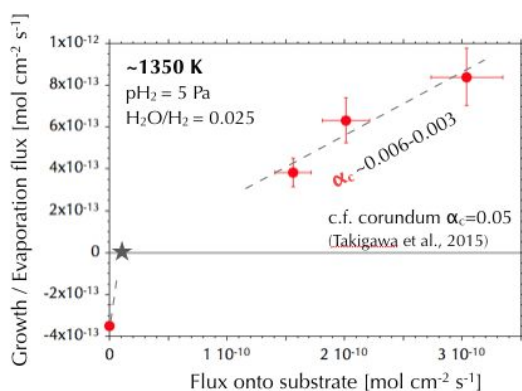


図 8. 基板上への到達フラックスとフォルステライト気相成長フラックスの関係

## 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 6 件)

1. Takigawa A., Tachibana S., Nagahara H. and Ozawa K. (2015) Evaporation and condensation kinetics of corundum: The origin of the 13- $\mu$ m feature of oxygen-rich AGB Stars, *Astrophys. J. Suppl.* **218**, doi:10.1088/0067-0049/218/1/2 (査読有)

2. Kawano J., Sakuma H. and Nagai T. (2015) Incorporation of Mg<sup>2+</sup> in surface Ca<sup>2+</sup> sites of aragonite: an ab initio study. *Prog. Earth Planet. Sci.* **2**:7. doi: 10.1186/s40645-015-0039-4 (査読有)

3. Tachibana S. and Takigawa A. (2014) Experimental Studies on Dust Formation in Space. Proceedings of "The Life Cycle of Dust in the Universe: Observations, Theory, and Laboratory Experiments" PoS (LCDU2013)046. <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=207> (査読無)

4. Takigawa A., Tachibana S., Huss G. R., Nagashima K., Makide K., Krot A. N. and Nagahara H. (2014) Morphology and crystal structures of solar and presolar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **124**, 309-327.

doi:10.1088/0067-0049/218/1/2. (査読有)

5. Matsuno J., Tsuchiyama A., Miyake A., Noguchi R., and Ichikawa S. (2014) Reduction Experiment of FeO-bearing Amorphous Silicate: Application to Origin of Metallic Iron in GEMS. *Astrophys. J.* **792**, 8pp, doi: 10.1088/0004-637X/792/2/136. (査読有)

6. Zhang A. C., Itoh S., Sakamoto N., Wang R. C., Yurimoto H. (2014) Origins of Al-rich chondrules: Clues from a compound Al-rich chondrule in the Dar al Gani 978 carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **130**, 78-92. doi:10.1016/j.gca.2013.12.026. (査読有)

[学会発表](計 4 件)

1. Tachibana S. and Takigawa (2015) Condensation coefficient of forsterite in the H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> system. 46<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, 2015/3/16-20, Houston, USA.

2. Tachibana S., Takigawa A., Miyake A., Nagahara H. and Ozawa K. (2014) Condensation of forsterite under controlled protoplanetary disk conditions. 45<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, 2014/3/17-21, Houston, USA.

3. Tachibana S. (2013) Experimental studies on dust formation in space. The life Cycle of Dust in the Universe. 2013/11/18-22, Taipei, Taiwan (招待講演)

4. Tachibana S. and Takigawa A. (2013) Evaporation behavior of forsterite (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) in H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub> gas. Goldschmidt Conference 2013, 2013/8/26-30, Firenze, Italy.

[図書](計 1 件)

橘 省吾 (2014) "太陽系の元素は銀河系から" 宇宙と生命の起源 2 ~ 素粒子から細胞へ (岩波ジュニア新書) (小久保英一郎・嶺重慎編), 岩波書店, pp.256.

[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

橘 省吾 (Shogo Tachibana)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号：50361564

### (2) 研究分担者

三宅 亮 (Akira Miyake)  
京都大学・理学(系)研究科(研究院)・  
准教授  
研究者番号：10324609

坂本 直哉 (Naoya Sakamoto)  
北海道大学・創成研究機構・助教  
研究者番号：30466429

川野 潤 (Jun Kawano)  
北海道大学・創成研究機構・特任助教  
研究者番号：40378550

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：