

## 星の進化とシリケートダスト進化の関係の実験的解明

Experimental study on the relationship between evolution of stars and silicate dust

永原 裕子 (NAGAHARA HIROKO)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授



### 研究の概要

原始惑星系円盤、晩期星周囲のガス中におけるダスト形成を理論的に考察し、天文観測と対比可能とするため、凝縮装置を開発し、ダスト凝縮にともなう種々のカイネティックパラメータを世界で初めて実験により決定した。その結果を用い、星周におけるダストの化学進化、ダストとガスの分離による化学分別をモデルにより考察した。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：星、ダスト、ガス、凝縮、ケイ酸塩

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 星の回りにケイ酸塩ダスト(微粒子)が沢山存在することが明らかとなってきた
- (2) ダスト形成は物理条件に支配される
- (3) 星の回りにおけるダスト形成を理論的に考察することができていない
- (4) 理論的考察ができない理由は、ダスト凝縮速度、非平衡条件における生成ダスト種などについての定量的実験データが存在しないためである

### 2. 研究の目的

- (1) 凝縮実験装置の開発
- (2) Mg-ケイ酸塩凝縮のカイネティックパラメータの決定、非平衡凝縮における凝縮相の実験的決定
- (3) ダスト進化モデルの開発
- (4) 実験結果を用い、星周におけるダスト進化の推定

### 3. 研究の方法

- (1) 分子線エピタキシー型凝縮装置(ガス発生装置、基盤加熱装置つき)および赤外線集中加熱型凝縮装置の開発
- (2) Mg-ケイ酸塩の凝縮実験、フォルステライトとSiO<sub>2</sub>ガスの反応実験、金属鉄の凝縮実験
- (3) 実験産物の電界放射型走査電子顕微鏡による観察
- (4) 実験結果と熱力学的考察から、凝縮速度係数の決定
- (5) 星のまわりにおけるダスト粒子進化モデルの開発
- (6) 実験結果とモデルを用いたダスト進化のコンピュータシミュレーション

### 4. 研究の主な成果

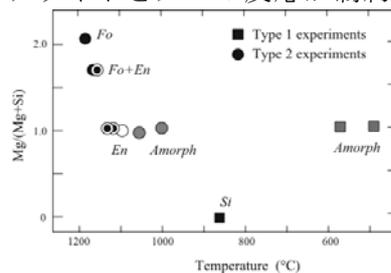
- (1) 星周環境を実現する高温・低圧条件でのダスト形成実験を可能とするエピタキシー型真空装置星装置の開発



装置はタングステンメッシュヒーターによるガス発生部分、赤外線導入加熱機構により独立に温度コントロールされる基盤、水素・酸素ガス導入システム等から構成される。星周環境でダストの形成される温度(約 1000°C)で、Mg-ケイ酸塩凝縮、ガス反応が可能である。

- (2) Mg-ケイ酸塩の非平衡な凝縮相、凝縮条件の決定

Mg-Si-Oガスを様々な温度で凝縮させると、1200°C程度ではフォルステライト(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)、約1150°Cではフォルステライトとエンスタタイト(MgSiO<sub>3</sub>)、1050°C以下では非晶質Mg-ケイ酸塩が形成される。ことが明らかとなった。高温で凝縮したフォルステライトとガスの反応が制約される場合は

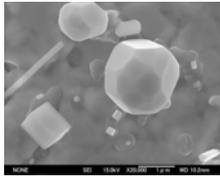


(図のType 2)、エンスタタイトは形成されない。また、酸素が少ない

と金属ケイ素が凝縮しうる。フォーステライトの不均質凝縮に必要な過飽和度は、凝縮温度 1200°C で約 50 であり、もっとも低温は約 800°C で、係数は 10000 と決定された。

### (3) 金属鉄の凝縮条件の決定

金属鉄は種々の基板上、広い温度範囲で凝縮することが示された (写真は凝縮した鉄の単結晶粒子)。不均質核形成の条件を過飽和比 ( $S$ ) の関数として決定することに成功した。凝縮係数は  $S \sim 5$  の場合 0.5、 $S \sim 50$  の場合 0.8、 $S > 50$  で 1 となる。 $S \sim 5$  が不均質核形成のおこる最低の条件であることが明らかとなった。



飽和比 ( $S$ ) の関数として決定することに成功した。凝縮係数は  $S \sim 5$  の場合 0.5、 $S \sim 50$  の場合 0.8、 $S > 50$  で 1 となる。 $S \sim 5$  が不均質核形成のおこる最低の条件であることが明らかとなった。

### (4) 結晶異方性と赤外スペクトルの関係

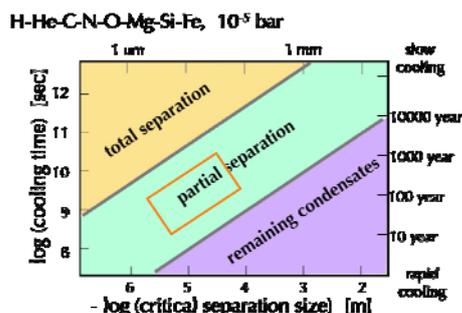
星周環境に応じ、フォーステライトの安定な結晶形状が異なることが実験により明らかとなった。それをもとに赤外スペクトルを計算すると、条件に応じた特徴的なピーク位置、ピーク強度が出現する。星周を赤外線天文観測し、フォーステライト存在する場合、ピークからダスト形成条件の推定が可能となることが示された。

### (5) 星周環境におけるダスト形成モデルの開発

太陽系元素存在度組成のガスの冷却に伴う、不均質核形成をと考慮したダスト凝縮モデルを構築した。ガスの圧力、冷却速度の関数として、凝縮するダスト種、ケイ酸塩と金属鉄の存在形態、粒子サイズ分布が変化することを示した。重要な結果として、金属鉄の不均質核形成により、エンスタタイト形成が阻害され、 $\text{SiO}_2$  が出現することが明らかとなった。

### (6) 原始惑星系円盤におけるガスとダストの相対運動による化学分別モデル開発

原始太陽系のガスが冷却によりダストが形成され、密度差によりガスから分離することで起こる化学分別を、(2)-(5)の結果を用いて検討した。コンドライト隕石にみられる  $\text{Mg}/\text{Si}$ 、 $\text{Fe}/\text{Si}$  化学分別が形成されるためには、図のオレンジの条件に示す冷却速度 (で、ミクロンサイズのダスト分離が必要であることが明らかとなった。



### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究により決定されたさまざまな条件 (蒸発速度、フォーステライト凝縮に必要な過飽和比、金属鉄不均質核形成の境界条件) は、従来は実験的試みすらなされていなかったもので、本研究が世界ではじめて成功したものである。これらの条件を用いることで、原始惑星系円盤、晩期星周囲のダスト形成を理論的に解明する端緒を開いた。

### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

(1) **Nagahara, H.**, Ozawa, K., Ogawa, R., Tachibana, S., and Chiba, H. (2009): Laboratory condensation and reaction of silicate dust. In "Cosmic Dust - Near and Far", Th. Henning, E. Grün, J. Steinacker (eds.). ASP Conf. Ser., (印刷中).

(2) **Nagahara, H.**, Kita, N., Ozawa, K. and Morishita, Y. (2008): Condensation of major element during chondrule formation. Geochim. Cosmochim. Acta 72, 1442-1465.

(3) Takigawa A., Miki J., Tachibana S., Huss G. R., Tominaga N., Umeda H. and Nomoto K. (2008) Injection of short-lived radionuclides from a faint supernova with mixing-fallback into the early solar system. Astrophys. J 688, 1382-1387.

(4) 瀧川 晶・横山聖典・橘 省吾・永原裕子・小澤一仁 (2007) 原始惑星系円盤におけるフォーステライト蒸発の赤外スペクトルへの影響. 日本惑星科学会誌 16, 128-134.

(5) Yamada, M., Tachibana, S., **Nagahara, H.** and Ozawa, K. (2006): Anisotropy of Mg isotopic fractionation during evaporation and Mg self-diffusion of forsterite in vacuum. Planet. Space Sci. 54, 1096-1106.

(6) Sogawa H., Koike C., Chihara H., Suto H., Tachibana S., Tsuchiyama A. and Kozasa T. (2006) Infrared reflection spectra of forsterite crystal. Astron. Astrophys. 451, 357-361.

(7) **Nagahara, H.**, Ozawa, K. and Tomomura, S. (2005): Kinetic condensation of silicate melt and its role in the chemical diversity of chondrules. In Chondrites and the Protoplanetary Disk. ASP Conf. Ser., 341, 456-468.

(8) Davis, A., Alexander, C. M. O'D., **Nagahara, H.**, and Richter, F. (2005): Evaporation and condensation during CAI and chondrule formation. In Chondrites and the Protoplanetary Disk. ASP Conf. Ser., 341, 432-455.

ホームページ等

<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/member/nagahara.html>

<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~tachi/research.html>