

## 観測ロケット S-520-30 号機を用いた宇宙ダストの再現実験

木村 勇気<sup>1</sup>、石塚 紳之介<sup>1</sup>、中坪 俊一<sup>1</sup>、齋藤 史明<sup>1</sup>、山崎 智也<sup>1</sup>、左近 樹<sup>2</sup>、竹内 伸介<sup>3</sup>、稲富 裕光<sup>3</sup>

### Reproduction experiment of cosmic dust particles using the Sounding rocket S-520-30

Yuki Kimura<sup>1\*</sup>, Shinnosuke Ishizuka<sup>1</sup>, Shunichi Nakatsubo<sup>1</sup>, Fumiaki Saito<sup>1</sup>, Tomoya Yamazaki<sup>1</sup>, Itsuki Sakon<sup>2</sup>, Shinsuke Takeuchi<sup>3</sup>, Yuko Inatomi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita 19, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0819 Japan

<sup>2</sup>Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan

<sup>3</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-08510 Japan

E-Mail: ykimura@lowtem.hokudai.ac.jp

**Abstract:** In a microgravity environment using the sounding rocket S-520-30, we duplicated cosmic dust particles in the similar formation condition, which, especially, is a ratio of time scale for supersaturation increase and collision frequency of growth units, around evolved stars such as asymptotic giant branch stars and supernovae on September 11th, 2015. Clarify the nucleation process of alumina and silica is a goal of this project. Oxide particles, which are formed first around evolved stars, greatly influence the evolution or alteration of cosmic dust particles. Consequently, identification of the first material and understanding the formation conditions are the crucial to know the material cycle with accompanying stellar life. In order to identify which material is formed first, two double-wavelength Mach-Zehnder-type interferometers and an infrared spectrometer were boarded into the rocket. Two interferometers are for alumina and silicate, and a spectrometer is for alumina.

**Key words:** Microgravity experiment, Dust, Nucleation, IR

#### 1. はじめに

天文学・惑星科学分野の種々の謎を解明する上で、宇宙ダストの組成やサイズ・質量を明らかにする事は、その土台となる重要な課題である。赤外線天文観測は、宇宙ダストの特徴を知ることができる強力な手法である。観測では、まさに宇宙ダストが核生成している現場のスペクトルを測定することで、恒星周囲の環境を『宇宙の実験場』とみなした議論を行うことができる。これに対し、地上実験やバルク実験を元に宇宙ダストの生成モデルが立てられ、観測と比較研究されてきた。その結果、宇宙ダストの核生成の予測に最も重要な物理パラメータである表面自由エネルギーと付着確率の二つの物理定数の大きな不定性がこれまで見過ごされてきた。実は、宇宙における物質進化の初期条件となる、最初の宇宙ダストの生成がよく分かっていないのである。そこで、微小重力環境で核生成実験を行い、この物理定数を決定し、同時に赤外スペクトルの変化を捉えて、天体観測の結果と直接比較することで宇宙ダストの生成過程の解明につなげることを目的に研究を展開している。

地上での原子・分子の核生成過程では、個々の原子・分子に及ぼす重力効果は小さいが、ガス雰囲気中の濃度勾配、温度勾配が巨視的な密度差対流をもたらす。ま

た、対流により粒子同士の融合成長が促進されて巨大化することで付着確率の過大評価を引き起こす。また、宇宙ダストの生成過程は、過飽和度が大きくなる時間スケールと衝突頻度の比が同じであれば、同様の物理系として取り扱えることが知られており<sup>1)</sup>、微小重力下における無対流環境では、現在の宇宙ダストの主な供給源である超新星や晩期型巨星での核生成過程と相似形の実験ができる。その結果、核生成温度を直接観測と対応させられ、その温度における物理定数が得られることから、宇宙ダストの生成過程の解明の決定打となる。

天体より放出されるガスから最初に生成する宇宙ダストは、その後の凝縮核となったり、表面を分子形成の場として供したりと、ナノメートルサイズの宇宙ダストから惑星に至る固体物質の変遷に、非常に大きな影響を与える。そのため、その最初の物質の同定と生成条件の理解は、宇宙の物質循環を知る上で根幹となる。その中で最も有力な物質が酸化アルミニウムであるが、地上実験では確定できていない。また、微粒子表面は化学反応の場として使われるため、豊富に存在するシリカが、最初に核生成する酸化アルミニウムの表面を後から覆い尽くすのか、自ら単独に核生成するのかを知ることは重要である。

そこで本実験では、酸化アルミニウムやシリカの蒸気から微粒子が生成・成長する過程を直接測定することで、その生成条件の解明を目指す。

## 2. 実験装置

屈折率変化を 100 万分の 1 以下の精度で捉えられる小型の二波長レーザー干渉計を作製してロケットに搭載することで、核生成時のガスの温度と濃度を同時に決定できる<sup>2)</sup>。気体の屈折率は温度、濃度、レーザー波長の関数である。したがって、異なる二波長の光を宇宙ダストの生成環境に入射して屈折率変化を同時に得れば、簡単な計算の後に温度と濃度の情報を得ることができる。

図 1 に示すベースプレートと、その上に配置する光学部品を保持して光軸を出すために必要なすべての部品を北海道大学低温科学研究所の技術部装置開発室で作製した(図 2)。この干渉計は数十 nm 程度の光路長変化を捉えられるために、光学部品を適切な位置に精度よく配置する必要がある。そのために、強度が高く残留応力が低いために加工歪が発生しにくい材質である、アルミ合金の YH75 を使用した。

二波長レーザー干渉計に加えて、最近開発した「『浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置』」<sup>3)</sup>を小型化してロケットに搭載し、宇宙ダストの核生成過程の赤外スペクトルを測定した。中間赤外領域は酸化物の指紋領域と言われ、非晶質から結晶への変化や、その結晶構造の同定を行うことが可能である。得られるスペクトルは、天文観測で得ている天体周辺での宇宙ダストの生成過程のスペクトルと直接比較できる点に特徴がある。従来は、ダストの候補物質を媒質(臭化カリウム)に埋め込んで赤外線を照射し、試料固有の赤外吸収スペクトルを測定していたために、埋め込むことによる凝集や表面構造の変化などの影響を受けたスペクトルしか得られず、直接天体観測の結果と比較することはできなかった。

図 3 に実験装置の外観を示す。今回は、13  $\mu\text{m}$  に特徴的なピークを持つ物質の起源がアルミナであるのかを明らかにすることが目的であり、中間赤外領域の波長 9-17  $\mu\text{m}$  の光を回折格子で分光して、赤外線カメラの素子で強度を測定する。光学系は、光が核生成領域を 2 回通るオフナー式を採用した。光学系の設計においては、ベクトル場を考慮した厳密な計算を行い、検出感度を考慮して、光源のスリット間隔と得られる赤外スペクトルの波長分解能を決定した。また、最初ミラーに軸対称非球面ミラーを用いると、端で波長分解能が若干低下するため、トロイダルミラーを用いた。これにより、スリット端までほとんど同じ波長分解能が

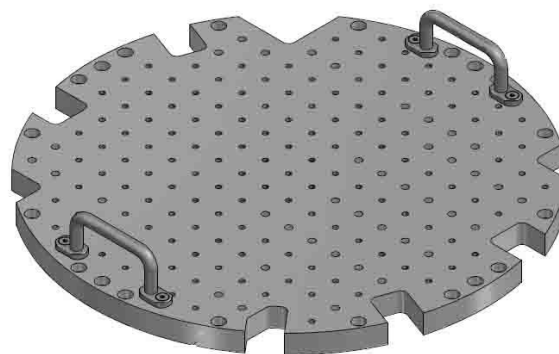


Fig.1 Schematic of the baseplate with 420 mm in diameter and 20 mm in thickness for three experimental systems.

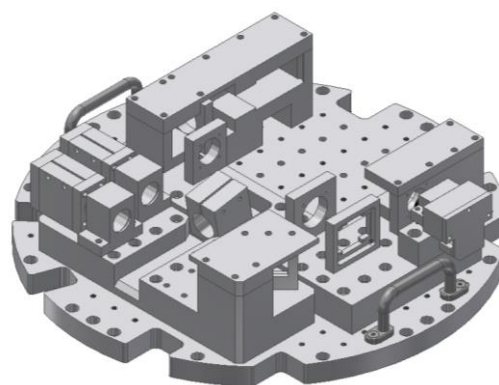


Fig. 2 Schematic of the experimental system using double-wavelength Mach-Zehnder-type interferometers made in Technical Division, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University. All of components such as optics, vacuum chamber, cameras, lasers were placed on this system.

得られる構成となった。

## 3 環境試験

作製した実験装置に対して、振動試験、衝撃試験、真空試験を行った。振動試験は機軸方向に 10.7 Grms、30 秒間、横方向 2 軸に 11.9 Grms、30 秒間の計 3 軸。衝撃試験は 3 軸とも 40 G / 10 ms の正弦半波で行った。真空試験は、ロケットが高度 300 km 程度まで 3 分ほどで到達するので、同等の時間スケールで  $10^{-5}$  Pa までの真空引きが望ましい。特に、ロケットに搭載実績のない赤外線カメラの回路内で用いられている固体電解コンデンサーと発熱、真空放電の有無に注目し、動作に問題が無い事を確認した。どの試験も、実際のフライトを模擬する必要があるため、通電状態で行った。

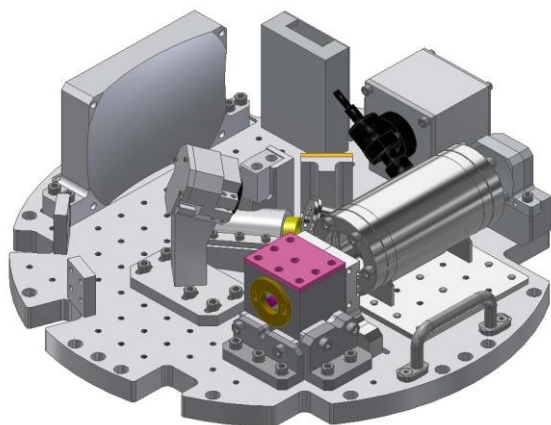


Fig. 3 Schematic of the experimental system with an infrared spectrometer made in Technical Division, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.

### 3. 結果

平成 27 年 9 月 11 日 (金) 20 時 00 分 00 秒に内之浦宇宙空間観測所 (鹿児島県肝属郡肝付町) から上下角 78 度で予定通り打上げた。打上げ 50 秒に赤外スペクトル測定実験用のバックグラウンド測定を開始し、53 秒にノーズコーンを開頭、55 秒にスピン制御モードに移行した。90 秒、180 秒、255 秒に 3 組の実験装置に用意した蒸発源の加熱をそれぞれ開始し、各部の温度・圧力データ及び核生成過程の赤外スペクトル、干渉縞像、実像の画像データを取得した。その間、打上げ 283 秒後に最高到達高度 312 km に到達し、同 550 秒後に鹿児島沖に着水した。

浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置 1 台と二波長レーザー干渉計 2 台、計 3 台の実験装置を、それぞれ IRC、IFC-1、IFC-2 と名付けた。IRC は InfraRed Chamber、IFC は InterFerometer Chamber の略である。IRC では、宇宙空間を模した真空チャンバー内にアルゴンガス  $3.8 \times 10^4$  Pa と酸素ガス  $2.0 \times 10^3$  Pa を封入し、その中で蒸発させたアルミニウムの蒸気を酸素と反応させながらアルミナとして核生成させ、生成した宇宙ダストによる光吸収強度の時間変化を測定した。IFC-1 では、真空チャンバー内にアルゴンガス  $4.0 \times 10^4$  Pa を封入し、蒸発源 (図 4) に用意したシリカをそのまま蒸発させた。IFC-2 の条件は IRC と同様である。

打ち上げから 90 秒後に IRC の蒸発源への電圧印加による温度上昇が起こり、それに伴う圧力上昇が確認できた。予定通り 140 秒で印加電圧は 8 V まで上がった。打ち上げから 100-105 秒後に温度と圧力の低下が見られたことから、ここで予期していた通り蒸発源のタンタルが切れたことが分かる。温度と圧力の上昇は 97-98 秒でいったんピークを迎え、下降した後に 99-100 秒で再び上昇に転じた。これは、97-98 秒で蒸発源からアルミニウムの蒸発が起こり

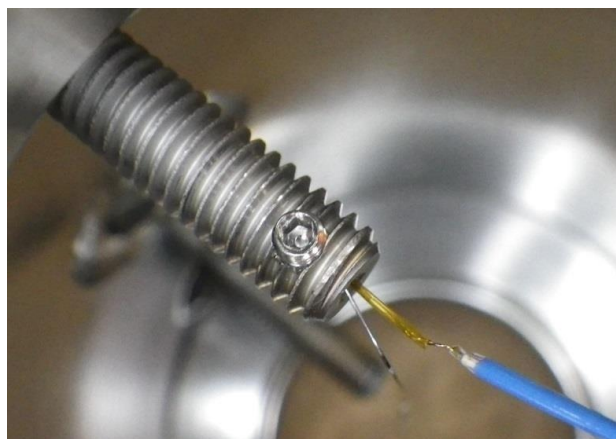


Fig. 4 Photograph of the evaporation source with a thermocouple, which has been insulated by a polyimide tube.

始めたことによると考えられる。この加熱蒸発が終了した後の圧力は、実験開始前よりも減少していた。これは、蒸発したアルミニウムが酸素と反応し、酸化アルミニウムの固体になったことで説明できる減少量であり、予定通りに酸化アルミニウムの宇宙ダストを生成できた。

その結果、中間赤外領域の 9-17  $\mu\text{m}$  のスペクトルの測定に成功し、酸素リッチな晩期型巨星に特徴的に見られる 13  $\mu\text{m}$  のフィーチャーが酸化アルミニウムに由来するか否かを明らかにできるデータの取得に成功した。13  $\mu\text{m}$  のフィーチャーが酸化アルミニウムに由来することが明らかになると、初めて宇宙ダストの生成・成長過程を同定し、物質進化のストーリーを記述できるようになる。

IFC-1 によるシリカ実験では、打ち上げから 180 秒後に蒸発源への電圧印加による温度上昇が起こり、それに伴う圧力上昇が確認できた。予定通り 195 秒で印加電圧は 8 V まで上がり、蒸発源温度はそこからゆっくりとした上昇に変化した。その後、230 秒で印加電圧は off され、温度、圧力とも急激に下降した。印加電圧が 8 V まで上がる直前の 193 秒程度で蒸発源に用意していたシリカが蒸発し、均質核生成を経て生成した微粒子は、蒸発源から同心円状に煙のように見られた。地上実験では、蒸発源が作る熱対流によって冷たいアルゴンガスが下方から供給される。結果、蒸発ガスは急冷されて短時間に核生成する。一方、微小重力実験では、同心円状にゆっくり拡散した後に均質核生成することが確認できた。

酸化アルミニウムの実験に関しても、打ち上げ 255 秒から実験を開始し、予定通りのデータが取得でき、当初の目標は達成できた。

### 謝辞

本実験の一部は、科研費基盤研究 S「核生成」

(15H05731) や低温研萌芽研究の助成により行われた。

#### 参考文献

- 1) T. Yamamoto, H. Hasegawa, *Prog. Theor. Phys.*, **58**, 816 (1977).
- 2) Y. Kimura, K. K. Tanaka, H. Miura, K. Tsukamoto, *Crystal Growth & Design*, **12**, 3278 (2012).
- 3) S. Ishizuka, Y. Kimura, I. Sakon, *Astrophysical Journal*, **803**, 88 (2005).