

航空機を用いた微小重力実験による宇宙ダストの初期形成プロセスの解明

木村 勇気 (北大), 石塚 紳之介 (北大), Sašo Šturm (ヨーゼフステファン研究所), 田中 今日子 (北大), 山崎 智也 (北大), 齋藤 史明 (北大), 佐藤 陽亮 (北大), 稲富 裕光 (JAXA/ISAS),

Elucidating the early processes of cosmic dust formation based on microgravity experiments using aircrafts

Yuki Kimura^{1,*}, Shinnosuke Ishizuka¹, Sašo Šturm², Kyoko K. Tanaka¹, Tomoya Yamazaki¹, Fumiaki Saito¹, Yosuke Satoh¹, Yuko Inatomi³

¹ Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan

² Jožef Stefan Institute, Department for Nanostructured Materials, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenia

³ Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210, Japan

⁴ SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), School of Physical Sciences, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210, Japan

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

Abstract: Two kinds of in-situ observation experiments of nucleation processes from a vapor phase were performed in a microgravity environment prepared by aircrafts. We successfully observed the nucleation temperatures and partial pressures of astronomically interested minerals and determined sticking probability to be around 10^{-4} for Ni nucleation for instance. We could also observe in-situ infrared spectra of free flying alumina nanoparticles just after nucleation from a vapor phase. The infrared spectra allow us to compare directly with that obtained by astronomical observations.

Key words: Microgravity experiment, Cosmic dust particles, Nucleation

1. はじめに

宇宙には、ダストと呼ばれるナノ粒子が多量に存在しており、惑星の材料¹⁾、分子形成の基板^{2,3)}、星間や星周環境におけるエネルギー収支^{4,5)}を担っており、星形成を促進する^{6,7)}ことが知られている。このように、ダストは宇宙における物質循環を支配しており、そのため、ダストの組成やサイズ・質量を明らかにすることは決定的に重要である。

ダストの組成やサイズ、質量は、主に赤外線を用いた天体観測や、星周環境の物理化学条件を理論計算に与えることで見積もられている。しかし、これには、現在の所それぞれに課題がある。

天体観測では、赤外線領域に観測されるフィーチャーを正しく解釈するための実験データが不足している。赤外線フィーチャーは、ダストの結晶構造や形、温度などに依存するため、その起源物質は光学定数を元に、フィーチャーに合うように計算から予測されている。また、再現実験で得られるダスト類似物は、臭化カリウムなどの媒質に埋め込んだ後に赤外線スペクトルを測定しているため、凝集や表面構造の変化、粒子表面の電荷の打ち消しによるピークシフトなどの影響を強く受ける。天体のスペクトル解析は、このようなスペクトルを基準にすることを余儀なくされている。

理論計算では、生成が予想される鉱物の物理定数

として、バルクの表面張力が与えられ、衝突する原子、分子は必ずくっつく（付着確率 100 %）と仮定している。しかし、ダスト形成の初期過程（核生成過程）は、原子や分子が集まるナノスケールの現象であり、ナノ粒子の表面張力を用いる必要があることは容易に想像できる。また、気相中では、水素原子同士の衝突による分子生成は非常に効率が悪いように、クラスター（特にダイマー）形成時には、付着確率は小さな値をとると予想できる。さらに、温度依存性も無視できないと考えられ、ダストが生成する温度領域における物理定数を決める必要がある。

我々は、上記の二つの問題を解決するために、二つの実験装置を独自に立ち上げ、その改良型を航空機や観測ロケットに搭載して、微小重力実験を行っている。これにより、138 億年の宇宙史における、分子、鉱物粒子（ダスト）、惑星、そして生命へとつながる有機物の形成過程や変遷といった宇宙物質の創成史を、物理、化学の素過程に立脚した物質科学の視点から確立することを目指している。ここでは主に、2016年に実施した二回の航空機を用いた微小重力実験の結果について報告する。

2. 航空機を用いた微小重力実験の目的

我々は、2012 年 12 月と 2015 年 9 月に、それぞれ、宇宙における鉄の存在形態の理解と、晩期型巨星周に

おける酸化物ダストの核生成過程の理解を目的に観測ロケットを用いて微小重力実験を実施した。観測ロケットを用いることで、 10^{-4} G オーダーの非常に質の良い微小重力環境を約 7 分半得られる。一方で、日本では実験後のロケットは海洋に落下するため、実験で生成した試料を回収できない。また、準備に要する時間も膨大で、実験回数も限られる。航空機を用いると、微小重力は 10^{-1} – 10^{-2} G 程度とガスの流れに対して多少の影響は避けられない大きさであり、微小重力の時間も 20 秒程度と短くなるが、生成試料を回収できるだけでなく、実験装置も毎回使用することができる点においてロケット実験にはない利点がある。実験後に生成粒子を分析し、数密度やサイズ、結晶構造を同定することで、どの結晶の物理定数や赤外スペクトルが得られたのかを明らかにできる。また、実験直前まで手を加えることもでき、1 度の実験で 20 秒の微小重力を十数回得ることができ、実験回数を増やせる。そのため、航空機実験では観測ロケット実験の再現実験や、将来のロケット実験のための予察実験を行うのに有用である。そこで、結果の再現性の確認と、生成粒子の分析を行うために、航空機を用いた微小重力実験を、2016 年 2 月 24-27 日に Mu-300 を用いて、2016 年 10 月 20-23 日に G-II を用いて二回実施した。加えて、将来の日米欧の国際協力による観測ロケット実験を行うための予備実験も実施した。

3. 実験方法

Mu-300 と G-II に搭載するためにデザインし直した赤 (632.8 nm) と緑 (532 nm) の二つのレーザーから成る二波長マッハツェンダー型レーザー干渉装置と浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置を、それぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。二波長マッハツェンダー型レーザー干渉装置では、二つの波長を用いることで、核生成環境の温度と濃度を同時に決定することができる。干渉装置の基本構成は、地上実験や S-520 観測ロケットを用いた微小重力実験と同様である。主な特徴は、極微量 (10^{-7} – 10^{-6}) な屈折率変化を検出でき、核生成時の温度と濃度を同時に決定できる点にある。その結果、核生成理論を用いることで、ダストの物理定数を決められる^{8,9)}。

一方で、観測ロケット実験では、打ち上げ時の振動の為に、精密な可動部のある、通常実験室で使用しているフーリエ変換型の赤外分光光度計の搭載は難しく、波長分散型の赤外分光光度計を設計し、搭載した。航空機実験では、振動に対する制約が小さいために、小型のフーリエ変換赤外分光光度計（日本分光、VIR-200）を搭載し、より高感度にスペクトル測定を行った。浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置は、ガスから生成するナノ粒子の生成過程における赤外吸収スペクトルの変化を“その場”で捉えることができるため、天文観測で得られる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

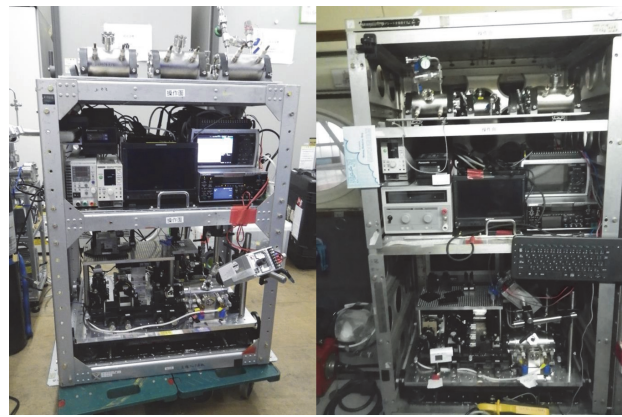


Fig. 1 Photographs of the experimental systems of the double-wavelength Mach-Zehnder-type laser interferometer with the nucleation chamber onboarded in the Mu-300 (left) and G-II (right).

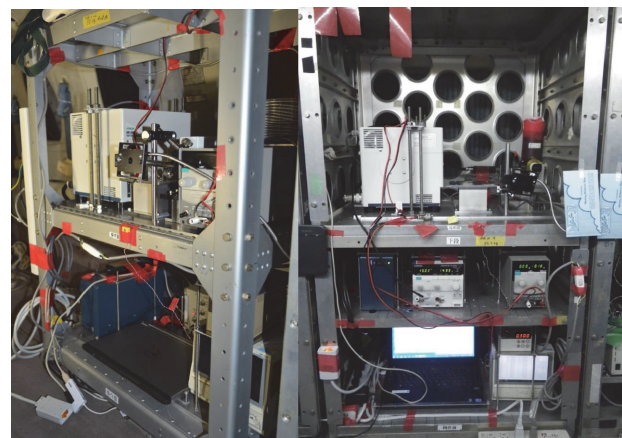


Fig. 2 Photographs of the free-flying in situ IR measurement system for nucleating nanoparticle with the nucleation chamber onboarded in the Mu-300 (left) and G-II (right).

に特徴がある¹⁰⁻¹²⁾。

核生成チェンバー本体には、6 mm ϕ の電流導入端子が設置してあり、そこに 0.2-0.3 mm ϕ のフィラメント上に出発物質を用意し、蒸発源として取り付けている。データロガーで記録した計測項目は、核生成チェンバー内の蒸発源に印加する電圧、蒸発源に流れる電流、その際に放射温度計で測定した蒸発源温度、熱電対で測定する蒸発源端と電流導入端子の接続部の温度、核生成チェンバー内の圧力が主である。その他に、制振装置の上に設置した二波長干渉計のベースプレート上で重力加速度を計測した。

航空機実験では、実験機器の固定と、微小重力実験中のアクセス性を両立する必要がある。特に、2016 年 2 月と 10 月では、それぞれ MU-300 と G-II という異なる航空機を用いたために、それぞれで搭載可能な積載量やインターフェースが異なり、装置の配置

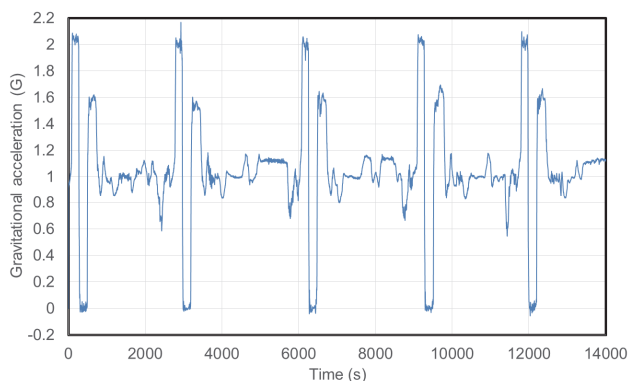


Fig. 3 Time evolution of the acceleration gravity of the first 5th parabola in a microgravity experiment using the aircraft Mu-300.

や固定方法を見直した。

3. 実験プロセス

航空機を用いた微小重力実験では、前日までにほとんどの実験準備を終えてフライト当日を迎える。いくつかの核生成チェンバーは出発直前まで真空に引いておき、平均自由行程を短くする目的で Ar ガスを導入し、航空機まで持参する。航空機が離陸した後、実験空域に到着するまでの 30 分程で装置を立ち上げて実験準備を進める。空域到着後は、他大学が実施する実験と合わせて、すべてのラックが準備できた後にパイロットから 2 分前コールが掛かる。その後、1 分前、30 秒前と順にコールされると、MU-300 では 2 G 程度、G-II では 1.8 G 程度の過重力状態となり、10 秒前コールが聞こえてしばらくすると微小重力状態に突入したことを知らせる” now” コールが出され、20 秒程度の微小重力環境が得られる。実験は、この 20 秒間で行う。その後、また過重力状態へと移行した後に定常飛行に戻る。数サイクル分の重力加速度の変化を例として Fig. 3 に示す。定常飛行の間に、実験を終えた核生成チェンバーを取り外し、新たな核生成チェンバーをセットする。その後に熱電対と圧力計のプラグをつなげ、放射温度計の焦点位置を合わせる。10 秒前コールがなされた際にハイビジョンカメラの録画を開始し、now のコールを待って、高速度カメラにトリガー信号を送る。その後、安定化電源を用いて徐々に電流を流すことで、核生成チェンバー内に準備した蒸発源を加熱し、出発物質を蒸発させる。

4. 実験結果

得られた干渉縞の一例として、Ar ガス 40000 Pa 中で行った Ni の核生成実験の結果を Fig. 4 に示す。実験開始前からの赤色と緑色のレーザーが作る干渉縞の動きをそれぞれ検知し、全圧の変化を考慮することで、温度と濃度を同時に決定した。核生成は、蒸発源温度が ~ 2200 K の時に蒸発源から 2.7 mm 離れ

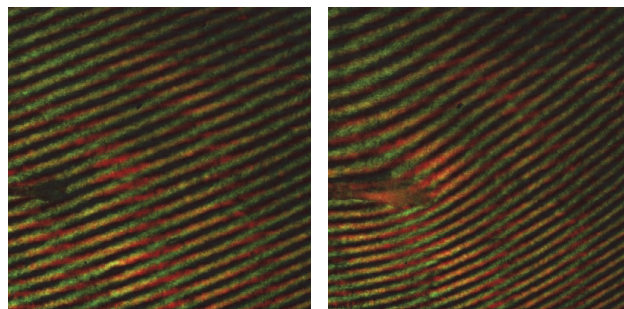


Fig. 4 Still snapshots of interference images before (left) and after (right) heating in the experiment on Ni nucleation under microgravity.

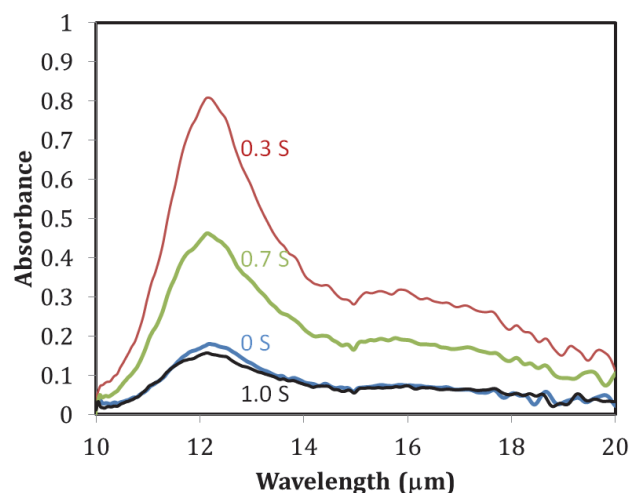


Fig. 5 Infrared spectra of free-frying alumina nanoparticles just after nucleation in a microgravity experiment.

た位置で起こった。核生成が起こると、生成したナノ粒子がレーザー光を散乱するために、核生成の時間と場所が分かる。核生成直前の温度は 928 ± 27 K で、Ni の分圧は 3120 ± 2600 Pa であった。928 K の温度における Ni の平行蒸気圧は $\sim 10^{-11}$ Pa であることから、 10^{14} を超える、非常に大きな過飽和度で核生成が起こったことが分かる。核生成理論（半現象論的核生成モデル）を元に、この核生成過程を説明する付着確率を求めたところ、 10^{-4} 以下の非常に小さな値が得られた。これは、観測ロケット S-520-28 号機を用いて行った鉄の核生成実験の結果と類似している。生成したナノ粒子は、拡散した後にチェンバー内壁に設置している透過電子顕微鏡観察用のグリッド上に堆積する。後日、透過型電子顕微鏡などを用いて、この粒子のサイズや結晶構造などを分析できる。

赤外スペクトルの“その場”測定の一例として、Ar ガス 38000 Pa と O₂ ガス 2000 Pa の混合ガス中でアルミを蒸発させた際に得られた酸化アルミニウム粒子の赤外スペクトルを Fig. 5 に示す。蒸発にともなって 12 μ m に見られる吸収帯が大きくなり、蒸発

の終了に伴って、吸収強度は徐々に低下したことが分かる。このように、我々は赤外スペクトルの時間変化を捉えることに成功した。

今回見られた 12 μm 帯の吸収ピークの強度は 1 秒足らずで小さくなったのに対して、観測ロケットを用いた実験では、アルミナの吸収帯は 10 秒以上に渡って強度を保っていた。観測ロケットの微小重力の大きさが 10^{-4} G 程度であるのに対して、航空機実験の微小重力は、 10^{-2} G 程度と大きい。このオーダーで重力加速度がふらつくと、航空機実験で生成した粒子は流れて、赤外線スペクトルの測定範囲からはずれやすくなり、一部はチェンバー壁面にくっつく。その結果、吸収強度が徐々に低下したと考えられる。生成した粒子の揺らぎは、実像からも確かめられている。干渉計の実験においても、この揺らぎの影響が認められる。観測ロケットを用いた Fe の実験では、蒸発源から 11 mm 程度も離れた位置で核生成したのに対して、航空機を用いた Ni の実験では、核生成は蒸発源からわずか 2.7 mm 離れた位置で生じている。これは、 10^{-2} G オーダーの微小重力中では、非常に均質かつ安定した観測ロケット実験に比べて、密度揺らぎが大きくなった結果、蒸発源近くで核生成が起こったと考えられる。地上実験では、蒸発源近傍 (1 mm 程度離れた所) で核生成することから、大きな冷却速度を経て核生成する。晩期型巨星周におけるダストの核生成過程の再現には、観測ロケットと同程度の冷却速度が必要であることが分かっている。今回の結果から、航空機を用いた微小重力実験では、地上に比べて冷却速度は大きくなるが、観測ロケットには及ばないことが分かる。

航空機を用いた微小重力実験を行うことで、核生成の起こる空間的な広がり、無対流環境で蒸発源に加える電圧と、蒸発源温度と温度場の関係、生成粒子の結晶構造やサイズの同定、これらのガス圧依存性などの基礎データを取得できた。これにより、将来日米欧の国際協力により実施予定の観測ロケット実験で取り組むべき鉱物種や、蒸発源の形状、必要な蒸発源温度とその為の電力など、実験条件の選定が飛躍的に進んだ。

参考文献

- 1) A. J. Weinberger, Construction-site inspection. *Nature* 433, 114–115 (2005).
- 2) T. Hama, N. Watanabe, Surface processes on interstellar amorphous solid water: Adsorption, diffusion, tunneling reactions, and nuclear-spin conversion. *Chem. Rev.* 113, 8783–8839 (2013).
- 3) J. A. Nuth, III, N. M. Johnson, Complex protostellar chemistry. *Science* 336, 424–425 (2012).
- 4) T. T. Takeuchi, V. Buat, D. Burgarella, The evolution of the ultraviolet and infrared luminosity densities in the universe at $0 < z < 1$. *Astron. Astrophys.* 440, L17–L20 (2005).
- 5) W. A. Schutte, A. G. G. M. Tielens, Theoretical studies of the infrared emission from circumstellar dust shells - The infrared characteristics of circumstellar silicates and the mass-loss rate of oxygen-rich late-type giants. *Astrophys. J.* 343, 369–392 (1989).
- 6) L. J. Tacconi, R. Genzel, R. Neri, P. Cox, M. C. Cooper, K. Shapiro, A. Bolatto, N. Bouché, F. Bournaud, A. Burkert, F. Combes, J. Comerford, M. Davis, N. M. Förster Schreiber, S. Garcia-Burillo, J. Gracia-Carpio, D. Lutz, T. Naab, A. Omont, A. Shapley, A. Sternberg, B. Weiner, High molecular gas fractions in normal massive star-forming galaxies in the young Universe. *Nature* 463, 781–784 (2010).
- 7) C. F. McKee, Let there be dust. *Science* 333, 1227–1228 (2011).
- 8) Y. Kimura, K. K. Tanaka, H. Miura, K. Tsukamoto, Direct observation of the homogeneous nucleation of manganese in the vapor phase and determination of surface free energy and sticking coefficient. *Cryst. Growth Des.* 12, 3278–3284 (2012).
- 9) Y. Kimura, H. Miura, K. Tsukamoto, C. Li, T. Maki, Interferometric in-situ observation during nucleation and growth of WO_3 nanocrystals in vapor phase. *J. Cryst. Growth* 316, 196–200 (2011).
- 10) S. Ishizuka, Y. Kimura, I. Sakon, In-situ infrared measurements of free-flying silicate during condensation in the laboratory, *The Astrophysical Journal*, 803, 88 (6pp) (2015).
- 11) S. Ishizuka, Y. Kimura, T. Yamazaki, In Situ FT-IR Study on the Homogeneous Nucleation of Nanoparticles of Titanium Oxides from Highly Supersaturated Vapor, *Journal of Crystal Growth*, 450, 168–173 (2016).
- 12) S. Ishizuka, Y. Kimura, T. Yamazaki, T. Hama, N. Watanabe, A. Kouchi, Two-step Process in Homogeneous Nucleation of Alumina in Supersaturated Vapor, *Chemistry of Materials*, 28, 8732–8741 (2016).