

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03689

研究課題名（和文）宇宙ダスト生成解明に向けた核生成理論モデルの構築

研究課題名（英文）Development of a theoretical model of nucleation for elucidating cosmic dust formation

研究代表者

田中 今日子（Tanaka, Kyoko）

東北大学・理学研究科・客員研究者

研究者番号：70377993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙環境や地球大気における固体微粒子（ダスト）の生成と進化に関する総合的な理解を目指し、気相からの凝縮核生成や結晶化過程を理論モデルや分子動力学（MD）計算などの手法を用いて調べた。特に宇宙の主要物質である氷について、MD計算から得られた知見や理論モデルを用いて、凝縮と結晶化過程を定量的に議論し、地球大気に応用し観測と比較することにより中間圏の雲（夜光雲）の生成メカニズムを特定した。さらに理論モデルや理論的解析と実験との連携を通じて、金属物質やシリケート物質などに対して気相からの核生成問題を考える際に有効な理論モデルを整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

蒸気から液滴や結晶が生まれる際の凝縮核生成過程は、雲の発生や宇宙の固体粒子の生成や進化を考える際の重要なプロセスであるが、最初に行える凝縮核がナノサイズ以下と小さく、その生成率を精度よく予測する一般的な理論はまだ存在していない。本研究では凝縮核生成や結晶化過程を理論モデルや原子・分子レベルで詳細を知ることができる分子動力学（MD）計算の結果に基づき、凝縮と結晶化過程を定量的に議論できる理論モデルを構築した。特に気候変動にも関係する中間圏の雲に適用し形成メカニズムを特定する重要な結果が得られた。凝縮核生成という基本的な問題に寄与する本研究の手法は他の天体や宇宙環境にも適用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：For a comprehensive understanding of the formation and evolution of solid dust particles in astrophysical environments and the Earth's atmosphere, we investigated condensation nucleation and crystallization processes from the gas phase using theoretical models and molecular dynamics (MD) simulations. In particular, we quantitatively discussed the condensation and crystallization processes of ice, a major cosmic material, using findings from the MD simulations and theoretical models, and identified the formation mechanism of mesospheric clouds by applying the results to the earth's atmosphere. Furthermore, by comparing the theoretical models with experiments, we have investigated several nucleation problems of metallic and silicate materials from the gas phase. The model developed in this study is applicable to the formation and crystallization processes of dusts in various environments.

研究分野：宇宙物質科学

キーワード：核生成 氷 固体微粒子 雲 アモルファス 宇宙ダスト 夜光雲

## 1. 研究開始当初の背景

相変化時に起きる核生成過程は宇宙の固体微粒子(ダスト)の生成・進化のみならず、気象分野におけるエアロゾルの生成プロセスや雲の生成プロセス等、さまざまな自然科学分野において幅広い応用性を持つ。しかし、相変化の初期に起きる核生成過程や生成粒子の振る舞いは分子レベルの情報が多く観測も困難であるため理解が限られている。従来の核生成過程の研究では、均質核生成の巨視的記述を与える古典的核生理論が広く用いられてきた。しかし、古典的核生成理論には重大な問題がある。それは理論から得られる核生成率は実験や分子計算による数値実験と何桁も(物質によっては十桁以上)一致しないという点にある。古典的核生成理論から得られる核生成率が実際と異なる原因は、臨界核の表面エネルギーと付着確率の不定性が挙げられる。一方、始めに凝縮が起こる際の臨界核のサイズはナノスケール以下(数10分子程度)であり、そのような微小クラスターは分子ともバルクとも異なる特性を持ち、その構造や生成のための自由エネルギーや付着確率の評価は重要である。

## 2. 研究の目的

本研究は宇宙環境や地球大気における固体微粒子(ダスト)の生成と進化に関する総合的な理解を目指し、気相からの凝縮核生成や結晶化過程を理論モデルや分子動力学(MD)計算などの手法を用いて調べた。原子・分子レベルで物質を観察できるMD計算は、新しい情報を得ることが可能となる強力なツールであり、気相からの核生成のMD計算を行うことにより、核生成率や付着確率を決定する。また気相から固相への相変化の際に過冷却液滴やアモルファス相を経る非平衡凝縮過程をMD計算から得られた知見や理論モデルを用いて明らかにする。さらにMD計算と理論的解析および実験や観測との連携を通じて、気相からの核生成問題を考える際に有効な理論モデルを整備し再構築する。

## 3. 研究の方法

核生成の理論的モデルや分子動力学(MD)計算を用いていくつかの宇宙の主要物質の核生成過程を調べる。本研究では並列計算用の汎用コードであるLAMMPSを用いて宇宙の主要な固体物質である金属の核生成過程を再現する。これまで代表者らが行ってきたMD計算と理論の比較検討を発展させて、宇宙で使える凝縮・結晶化過程を記述できる理論モデルを構築する。また気相からの核生成および結晶化のMD計算結果を反映させ、高精度の核生成理論モデルや凝縮・結晶化過程を扱うことができる理論モデルを構築する。また構築した理論モデルと観測や実験との連携を行う。宇宙模擬ダストの凝縮や結晶化実験が精力的に行われており、近年のTiCやSiOを用いた宇宙模擬ダストの凝縮や結晶化の実験結果と理論モデルを比較検討し、分子クラスターの表面張力や付着確率などの物性値を推定する。また核生成モデルを用いた非平衡凝縮計算を行い、地球大気の雲の生成に応用し、雲の成因について議論する。

## 4. 研究成果

主な研究成果を以下にまとめる。

(1)

アモルファス相からの結晶化問題に関連し、過冷却水滴の結晶化過程を調べた。過冷却水滴内における結晶化核生成と結晶成長を同時に解き、結晶化の振る舞いについて調べ結晶化温度や粒子内の結晶核の個数等について定量的に求め、これまで過冷却水滴について調べられた多数の結晶化実験データと比較した。過冷却水滴の結晶化過程については、これまで幅広い冷却速度での、さまざまなサイズの過冷却水滴に対する結晶化実験があり、マイクロメートルサイズの液滴は、冷却速度や実験方法に関係なく、およそ235 Kで結晶化することが知られている。一方、小さなナノメートルサイズの液滴の結晶化温度は、低くなることや、非常に高い冷却速度 ( $10^6$ - $10^7$   $\text{Ks}^{-1}$ ) では、液体の水滴は結晶化するのではなく、非晶質化(ガラス化)することが示されている。このように、過冷却水滴の結晶化温度は水滴のサイズや冷却速度に依るが、その依存性は未だ明らかになっていなかった。我々は過冷却水滴内における結晶化核生成と結晶成長を同時に解き、結晶化温度や粒子内の結晶核の個数等について予測できる理論モデルを構築した。結晶化温度はサイズと冷却速度に依存し、粒子サイズが $1\ \mu\text{m}$ から $1000\ \mu\text{m}$ の場合、結晶化温度が $-(30-40)$  になること、また冷却速度が $10^4\text{Ks}^{-1}$ 以上になると急激に結晶化温度が下がることなどが示された(図1参照)。粒子サイズが小さくなると結晶化温度は下がり、例えば $10\text{nm}$ 程度の場合には $-(40-60)$  になる。本結果は従来の多くの過冷却水滴の結晶化温度の実験結果を統一的に良く説明し、アモルファス化(ガラス化)する臨界冷却速度も予言できる。本結果は国際誌に掲載された(Tanaka and Kimura, 2019)。本研究で構築したモデルは宇宙ダストに普遍的に存在するアモルファス相の起源やさまざまな宇宙環境での結晶化に適用可能である。

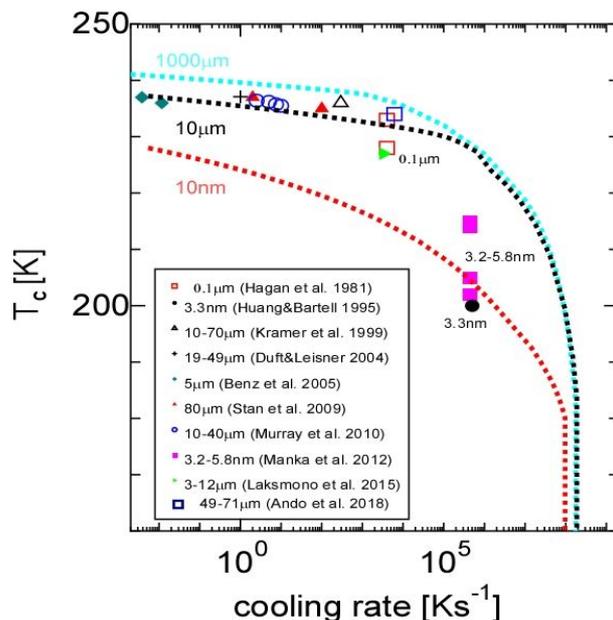


図1. 過冷却水滴からの結晶化過程を解析するモデルによって得られた各冷却速度における結晶化温度(点線)と実験値(記号)(Tanaka and Kimura, Physical Chemistry Chemical Physics, 2019)。

(2)

これまで我々が行ってきた気相からの凝縮過程の分子動力学(MD)計算および凝縮・結

晶化の理論モデルを、地球大気の中間圏で観測されている夜光雲の形成過程に応用し、その成因を調べた。夜光雲は氷粒子から成るが、その起源については、均質核生成および微隕石からの不均質核生成の2通りが提案されている。本研究では中間圏で取りうる大気条件内の温度（圧力）、冷却速度をパラメータとして、核生成の凝縮計算を行った。均質核生成の計算を行う際、実験や分子動力学計算で得られる核生成率をよく再現する高精度の半現象論モデルを用いた。その結果、従来の研究では均質核生成が起きる場合、凝縮温度は100K以上でおきると考えられていたが、新しいモデルを用いた場合、凝縮温度が60K-90K付近と非常に低い温度になった。実際に夜光雲として観測される温度は常に100K以上であるため、本結果は中間圏で均質核生成は効率的に起きていないことを示唆する。一方、中間圏には微隕石の摩擦熱による蒸発・破壊で生成されたダスト粒子が存在しており、不均質核生成の核となりうる。そこで理論的な見積もりにより不均質核生成が卓越する条件を求め、微隕石の観測値と比較した。その結果、観測されているわずかなダスト量でも、不均質核生成が効果的に起こることが示された。また氷粒子が生成する際、氷は非晶質ではなく結晶状態で直接形成される可能性が高いことを示した。本結果は国際雑誌に掲載され(Tanaka et al. 2022)、また東北大学・北海道大学の共同プレスリリースとしても掲載され、インタビュー内容がNHKニュースにも取り上げられた。

(3)

宇宙の重要物質のひとつである鉄がどのように星の周りで凝縮するかを明らかにするため、気相の鉄からの凝縮過程の分子動力学（MD）計算を行った。鉄のMD計算は過去に1例あるが、1000原子程度を用いた少数系の計算しか行われておらず、理論との詳細な比較はされていなかった。本研究では1万以上の鉄原子を用いたMD計算を行い、気相からの均質凝縮核生成過程を再現した。MD計算の汎用コード（LAMMPS）を用い、鉄の相互作用ポテンシャルはEAM（embedded atom method）を使用し計算を行った。従来よりも多い粒子数を用いて計算を行うことにより、数桁低い核生成率で進行する現象を再現し、核生成率や分子クラスターのサイズ分布などを求めることができた。理論との比較検討を行った結果、今回計算した条件では、得られた核生成率は理論による見積りよりも数桁程度小さくなることが分かった。この結果は凝縮する際のダイマー生成が困難であることを示している。本結果は宇宙ダスト生成の模擬実験結果を考察する上でも重要である。

(4)

実験装置を観測ロケットに搭載して、ガス中の対流の影響が無視できる微小重力下で宇宙ダストの核生成実験が行われた（PI:木村勇氣教授(研究協力者)）。この観測ロケットにより、シリケート粒子と炭素質粒子の2つの実験が行われており、この実験結果と理論モデルの比較検討を行った。ガス中の温度や濃度の分布が時間変化して微粒子が形成される様子を、光学的な方法によりリアルタイムで観察することにより、核生成時の温度や圧力が測定されており、この実験結果を理論モデルと比較検討した結果、表面張力と付着確率を定量的に導出することができた(Kimura et al. 2022, 2023)。その結果、付着確率は非常に小さく、ダスト生成の効率が低いこと等が示された。実験では隕石中のプレソーラー粒子に見られる、中心に炭化チタンのナノ結晶を持った炭素質の粒子の生成を再現できており、その生成過程についての推定を行った。これらの研究成果は東北大学・北海道大学・JAXAにおいてプレスリリースとして掲載された。

その他、ダストサイズを考慮した褐色矮星の赤外観測のダストサイズ依存性について調べた内容が国際雑誌に掲載された (Sorahana et al. 2021)。また原始惑星系円盤内の木星の摂動により影響を受ける氷微惑星の加熱現象等について調べた論文が国際雑誌に掲載された (Nagasawa et al. 2019)。

#### 参考文献

- Y. Kimura, K. K. Tanaka, Y. Inatomi, F. T. Fergusone, J. A. Nuth III, Inefficient Growth of Silicate Grains: Implications for Circumstellar Outflows, *Astrophysical Journal letters*, 934, L10, 2022.
- Y. Kimura, K. K. Tanaka, Y. Inatomi, C. Aktus, J. Blum, Nucleation experiments on a titanium-carbon system imply nonclassical formation of presolar grains, *Science Advances*, 9, eadd8295, 2023.
- M. Nagasawa, K. K. Tanaka, H. Tanaka, H. Nomura, T. Nakamoto, and H. Miura, Shock-Generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk, *Astrophysical Journal*, 871, 110(15pp), 2019.
- S. Sorahana, H. Kobayashi, and K. K. Tanaka, Effect of Dust Size on the Near-Infrared Spectra (1.0-5.0 $\mu$ m) of Brown Dwarf Atmospheres, *Astrophysical Journal*, 919, 117, 2021.
- K. K. Tanaka and Y. Kimura, Theoretical analysis of crystallization by homogenous nucleation of water droplets, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21, 2410, 2019.
- K. K. Tanaka, I. Mann, and Y. Kimura, Water condensation through nucleation in the mesosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 5639-5650, 2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 田中 今日子	4. 巻 93
2. 論文標題 大規模分子動力学計算および理論改良に基づく核生成の理解	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 応用物理日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 225-230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.93.4_225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 田中 今日子	4. 巻 50
2. 論文標題 分子動力学計算と理論モデルによる希ガスと水の気相からの多段階核生成	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 4-04(p.1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kyoko K. Tanaka, Ingrid Mann, Yuki Kimura	4. 巻 22
2. 論文標題 Formation of ice particles through nucleation in the mesosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 5639-5650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/acp-22-5639-2022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 田中 今日子	4. 巻 37
2. 論文標題 気相からの核生成の分子動力学シミュレーション 核生成率の高精度化と夜光雲への適用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 エアロゾル研究	6. 最初と最後の頁 247-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11203/jar.37.247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kimura, Kyoko K. Tanaka, Yuko Inatomic, Coskun Aktus, Jurgen Blum	4. 巻 9
2. 論文標題 Nucleation experiments on a titanium-carbon system imply nonclassical formation of presolar grains	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eadd8295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.add8295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuki Kimura, Kyoko K. Tanaka, Yuko Inatomic, Frank T. Ferguson, Joseph A. Nuth III	4. 巻 934
2. 論文標題 Inefficient Growth of SiO <sub>x</sub> Grains: Implications for Circumstellar Outflows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L10(7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac8002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kyoko K. Tanaka, Ingrid Mann, Yuki Kimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Formation of ice particles through nucleation in the mesosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmosphere Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Satoko Sorahana, Hiroshi Kobayashi, and Kyoko K. Tanaka	4. 巻 919
2. 論文標題 Effect of Dust Size on the Near-Infrared Spectra (1.0-5.0 μm) of Brown Dwarf Atmospheres	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 117(15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1271	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ingrid Mann, Aigen Li, Kyoko K. Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Nano dust in space and astrophysics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy in Focus - XXX Proceedings IAU Symposium	6. 最初と最後の頁 379-381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921319004666	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kyoko K. Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Dust Formation from Vapor through Multistep Nucleation in Astrophysical Environments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy in Focus - XXX Proceedings IAU Symposium	6. 最初と最後の頁 396-397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921319004903	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中 今日子, 長澤 真樹子, 三浦 均, 田中 秀和, 野村 英子, 中本 泰史, 山本 哲生	4. 巻 78
2. 論文標題 微惑星衝撃波による固体微粒子と微惑星の 加熱・蒸発・再凝縮過程	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 低温科学	6. 最初と最後の頁 191-197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/lowtemsci. 78. 191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. K. Tanaka and Y. Kimura	4. 巻 21
2. 論文標題 Theoretical analysis of crystallization by homogenous nucleation of water droplets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 2410-2418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CP06650G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Nagasawa, K. K. Tanaka, H. Tanaka, H. Nomura, T. Nakamoto, and H. Miura	4. 巻 871
2. 論文標題 Shock-Generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110(15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Martina Lippe, Satrajit Chakrabarty, Jorge Ferreiro, Kyoko K. Tanaka, and Ruth Signorell	4. 巻 149
2. 論文標題 Water nucleation under extreme conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 244303(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5052482	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 木村 勇気, 田中 今日子, 稲富 裕光, Blum Jurgen
2. 発表標題 観測ロケットによる微小重力環境中での気相からのカーボン粒子の核生成実験
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小泉海翔, 中川広務, 藤原均, 津田卓雄, 田中今日子, 木村勇気, 青木翔平, 寺田直樹, 笠羽康正, Ann Carine Vandaele, Ian Thomas, Bojan Ristic, Frank Daerden, Zachary Flimon, Yannick Willame, Jonathon P. Mason, Manish Patel, Giuliano Liuzzi, Giancarlo Bellucci, Jose Juan Lopez-Moreno
2. 発表標題 TGO搭載分光器NOMADを用いた火星中間圏水氷雲における核生成機構の研究
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇氣
2. 発表標題 Multistep Nucleation process of Water
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小泉海翔, 中川広務, 寺田直樹, 藤原均, 津田卓雄, 田中今日子, 木村勇氣, 笠羽康正, 青木翔平, Frank Daerden, Ann Carine Vandaele, Ian Thomas, Bojan Ristic, Jon Mason, Yannick Willame, Manish Patel, Giancarlo Bellucci, Jose; Juan Lopez-Moreno, Giuliano Liuzzi, Zachary Flimon
2. 発表標題 TGO/NOMADの太陽掩蔽観測による火星中間圏水氷雲の核生成過程の解明
3. 学会等名 日本気象学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小泉海翔, 中川広務, 寺田直樹, 藤原均, 津田卓雄, 田中今日子, 木村勇氣, 笠羽康正, 青木翔平, Frank Daerden, Ann Carine Vandaele, Ian Thomas, Bojan Ristic, Jon Mason, Yannick Willame, Manish Patel, Giancarlo Bellucci, Jose; Juan Lopez-Moreno, Giuliano Liuzzi, Zachary Flimon
2. 発表標題 Mesospheric water ice cloud on Mars observed by TGO/NOMAD solar occultation
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Kimura, Kyoko K. Tanaka, Yuko Inatomi
2. 発表標題 Multi-step crystallization processes of cosmic dust analogues founding in microgravity experiments
3. 学会等名 IUCr (国際結晶学連合) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村勇気, 稲富裕光, 田中今日子, 齋藤史明, 千貝健, 森章一, 中坪俊一, 竹内伸介, Coskun Aktas, Jurgen Blum
2. 発表標題 観測ロケットによる微小重力実験で見られた 非古典的核生成経由のダスト形成
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村勇気, 稲富裕光, 田中今日子, 齋藤史明, 千貝健, 森章一, 中坪俊一, 竹内伸介, Coskun Aktas, Jurgen Blum
2. 発表標題 非古典的核生成による先太陽系炭化チタン粒子の生成
3. 学会等名 日本結晶成長学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村勇気, 稲富裕光, 田中今日子, 齋藤史明, 千貝健, 森章一, 中坪俊一, 竹内伸介
2. 発表標題 海外の観測ロケットによる微小重力環境を利用した宇宙ダストの合成実験
3. 学会等名 マイクロ重力応用学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇気
2. 発表標題 鉄の気相からの凝縮核生成の分子動力学計算
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇気
2. 発表標題 水蒸気の凝縮核生成および結晶化モデル
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇気
2. 発表標題 水の多段階核生成過程
3. 学会等名 日本結晶成長学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇気
2. 発表標題 鉄の高過飽和蒸気からの均質核生成過程の分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇気
2. 発表標題 鉄の気相からの凝縮核生成の分子動力学計算
3. 学会等名 日本結晶成長学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 勇気, 田中 今日子, 稲富 裕光, Aktas Coskun, Blum Jurgen
2. 発表標題 重力下および微小重力下におけるチタンおよびカーボンの核生成実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中今日子, Ingrid Mann, 木村勇気
2. 発表標題 中間圏での核生成による氷粒子の凝結
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村勇気, 田中今日子, 稲富 裕光, Frank T. Ferguson, Joseph A. Nuth III
2. 発表標題 星周ダストの形成過程の解明に向けたシリカ微粒子の生成効率の決定
3. 学会等名 日本結晶成長学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中今日子, Ingrid Mann, 木村勇気
2. 発表標題 Nucleation of water particles in the mesosphere
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中今日子, Ingrid Mann, 木村勇気
2. 発表標題 中間圏での核生成による氷粒子の凝結
3. 学会等名 日本結晶成長学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中今日子
2. 発表標題 Homogeneous nucleation of iron from saturated vapor by molecular dynamics simulation
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中今日子
2. 発表標題 鉄の気相からの核生成の分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇気
2. 発表標題 過冷却水滴の結晶化モデル
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中今日子
2. 発表標題 鉄の気相からの核生成の分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 第36回Grain Formation Workshop
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇氣
2. 発表標題 過冷却水滴の結晶化理論モデル
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. K. Tanaka, Y. Kimura, J. Diemand, H. Tanaka, and R. Angelil
2. 発表標題 Dust Foramtioin from Vapor through Multistep Nuceation in Astrophysical Environments
3. 学会等名 International Astronomical Union 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇氣
2. 発表標題 Theoretical analysis of crystallization through homogeneous nucleation in water droplets
3. 学会等名 地球惑星科学関連学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中今日子, 木村勇氣
2. 発表標題 過冷却水滴の結晶化理論モデル
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyoko Tanaka
2. 発表標題 Nucleation Processes Revealed by Molecular Dynamics Simulations
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/05/press20220517-03-cloud.html">https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/05/press20220517-03-cloud.html</a> <a href="https://www.hokudai.ac.jp/news/2023/01/post-1154.html">https://www.hokudai.ac.jp/news/2023/01/post-1154.html</a> <a href="https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/01/press20230116-01-spacedust.html">https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/01/press20230116-01-spacedust.html</a> <a href="https://www.isas.jaxa.jp/topics/003288.html">https://www.isas.jaxa.jp/topics/003288.html</a>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木村 勇氣  (Kimura Yuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	ブラウンシュバイク工科大学			
米国	NASAゴダード宇宙飛行センター			
ノルウェー	UiT The Arctic University of Norway			
米国	University of Missouri			
スイス	ETH Z"urich	Zurich University		