

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03707

研究課題名（和文）総合的ダスト形成モデルの構築と宇宙固体微粒子の起源の解明

研究課題名（英文）Disclosing the origin of cosmic dust particles by establishing the synthetic model of dust formation

研究代表者

野沢 貴也（Nozawa, Takaya）

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特別客員研究員

研究者番号：90435975

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙環境下における固体微粒子の形成過程を統一的に理解するため、「分子形成」「安定核の凝縮」「ガス降着による核成長」「ダスト同士の合体成長」を総合的に取り扱う“総合的な”ダスト形成モデルを構築した。本研究で確立されたダスト形成計算モデルは、各天体の現実的な流体計算モデルに適用することにより、銀河におけるダスト形成量および惑星の原材料物質を明らかにする上で決定的な役割を果たし、星間ダストの生成から惑星形成にまで至る宇宙の固体物質進化を考察する上で重要な基盤となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって構築された“総合的”ダスト形成モデルは、AGB星や超新星の放出ガス、星間雲の衝撃波圧縮ガス、原始太陽系星雲ガスなど宇宙の様々な環境での固体微粒子形成メカニズムを紐解く有効かつ重要な手法であり、各天体でのダスト形成量やそのサイズ分布の解明に決定的な役割を果たす。従って本研究成果は、「宇宙におけるダストの起源」「惑星の原材料としての星間ダストの役割」という近代天文学における二つの大問題に迫ることができ、極めて重要な学術的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：We aim at comprehensively understanding the formation processes of cosmic dust grains under the various environments in the universe. We construct the state-of-the-art dust formation model consistently taking account into "formation of molecules", "condensation of stable nuclei", "grain growth of by gas accretion", and "growth via grain-grain collisions". The dust formation model established in our study plays a crucial role in disclosing the total amount of dust grains in galaxies and the origins of planets by applying it to the hydrodynamic simulations in many kinds of astronomical objects. Our achievement is also the important basis to investigate the evolution of cosmic solid materials from the production of interstellar dust up to formation of planets.

研究分野：天文学

キーワード：ダスト 超新星 プレソラー粒子 スパッタリング

### 1. 研究開始当初の背景

我々人類が住む地球は、宇宙固体微粒子(宇宙ダスト)の集積により形成されたと考えられる。それでは、この惑星の原材料「宇宙ダスト」は、いつどこでどのように形成されたのか? この「問い」は、宇宙の物質進化および生命の誕生史を理解する上で根源的な問題である。

星間ダストの主な形成場所は、漸近巨星分枝(AGB)星や超新星爆発など進化末期の星から放出されたガス中と考えられている。しかしこれらの天体により供給されるダスト量は、銀河系のダスト総量を説明するには一桁程度足りず、別のダスト供給源として分子雲中での重元素ガスの降着によるダスト成長が提案されている。一方密度の高い原始太陽系星雲では、星間ダスト同士が合体成長を繰り返して数センチほどの小石サイズになり、それらの集積によって微惑星・惑星が作られたと考えられている。このように、我々の知る宇宙の固体物質進化は依然として大局的であり、特にその中核となる固体微粒子の起源は、綿密に理解されているとは言い難い状況にある。そもそも、宇宙ダストの形成・成長過程の研究においては、各天体・各環境で考慮される物理過程が異なっており、例えば超新星では「ガス相からのダスト凝縮」、分子雲では「ガス降着によるダスト成長」、原始太陽系星雲では「ダストの合体成長」が主要なダスト形成過程として別々に取り扱われている。それゆえ、星間ダストから惑星形成までの固体物質進化のストーリーを描くためには、まずは宇宙固体微粒子の生成過程についての統一的理解が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙における固体微粒子の起源を明らかにすべく、星間雲から原始太陽系星雲におよぶ多様な宇宙環境に適用できる“総合的な”ダスト形成モデルを構築することである。そしてこの計算モデルを駆使し、ガスの密度と冷却率をパラメータとして、様々な物理環境下におけるダスト形成の可否および形成されるダストのサイズ分布を系統的に調べ上げる。そして、得られた結果を種々の天文観測・隕石中の微粒子の分析結果と比較・考察することにより、宇宙環境下でのダスト形成の素過程を統一的理解することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の最大の特徴は、従来の研究において個別の過程として扱われていた「分子形成」「安定核の凝縮」「ガス降着による核成長」「ダスト同士の合体成長」を統合的に取り扱う点にある。これにより、各過程の重要性(寄与)や関連性が理解できるとともに、1 程度の原子サイズから小石サイズまでのダスト形成・成長を首尾一貫して追跡することができる。

本研究によって確立された“総合的な”ダスト形成モデルは、AGB 星や超新星の放出ガス、星間雲の衝撃波圧縮ガス、原始太陽系星雲ガスの現実的な流体モデルに適用することにより、各天体でのダスト形成量やそのサイズ分布の解明に決定的な役割を果たす。従って本研究の遂行は、「宇宙におけるダストの起源」「惑星の原材料としての星間ダストの役割」という近代天文学における二つの大問題に迫ることができ、極めて重要な学術的意義を持つ。

### 4. 研究成果

(1) 隕石中には、その同位体組成から超新星起源と考えられるプレソーラー-SiC 粒子が多数発見されている。しかしこれまでの理論研究において、超新星放出ガス中で SiC ダスト粒子の形成を実現した計算例はない。

そこで本研究では、SiC 分子形成の非平衡計算と SiC 分子から SiC ダストが凝縮するという経路に則してダスト形成計算を実行し、隕石中で発見される 1 μm より大きい SiC 粒子が形成され得るかどうかを調べた。

計算の結果、ガスが数千 K まで冷えると SiC 分子が効率的に形成し、それを原材料として有意な量の SiC ダストが形成できることがわかった。しかし、超新星放出ガスの典型的な物理環境を考える限りでは、0.1 μm より大きい SiC 粒子の形成は達成できなかった(図 1)。それゆえ、SiC 粒子は非常に密度の高いガス塊などの極めて特殊な環境で形成されたと考えられる。

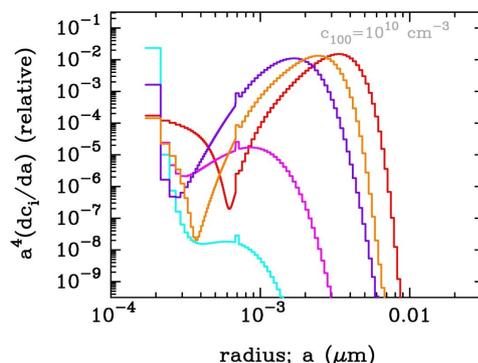


図 1. 形成される SiC ダストのサイズ分布の時間進化

(2) 近年の星間ダスト進化モデルは、銀河中のダスト総量を説明するために「分子雲中での重元素ガス降着によるダスト成長が不可欠」と結論づけられている。しかし、ダスト成長の詳細な物理化学過程は全くわかっておらず、また低温の分子雲中ではダスト表面に氷マントルが形成さ

れ、重元素降着によるダスト成長は困難であると指摘されている。そこで本研究では、比較的密度の高い分子雲に超新星衝撃波が衝突し、高温に加熱されたガスが冷却・収縮する過程でガス相から直接ダストが凝縮する可能性を考えた。簡単な解析の結果、そのような環境ではガスの冷却速度がダストの成長速度よりも早いため、ダストの凝縮はほぼ不可能であることがわかった。しかし本解析においては、ガスの放射冷却の効率が非常に高いものと想定しているため、今後はガスの冷却をより現実的に評価して星間雲中でのダスト凝縮の可能性を追究する。

(3) 京都大学の Roberto Iaconi 氏、前田啓一氏らとの共同で、連星系の共通外層から放出されたガス中でのダスト形成の可能性を調べた。

SPH 法による流体シミュレーションで得られた放出ガスの力学・温度進化にダスト形成計算を適用した結果、共通外層から放出されたガスはダスト形成に非常に適した環境であることがわかった。また、放出ガスの密度・温度進化に応じて様々なサイズのダストが形成されることがわかり、形成されるダストのサイズ分布・空間分布も計算することができた(図2)。3次元の流体シミュレーション結果に基づいてダスト形成を評価した研究は世界で初めてである。

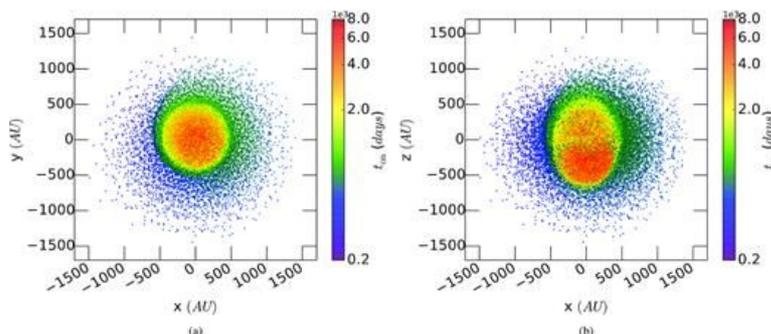


図 2. SPH シミュレーションで得られた連星系共通外層で形成される炭素質ダストの空間分布

(4) 最新の3次元スパッタリング計算コードを駆使して、高温プラズマ中でのスパッタリングによるサブミクロンサイズの宇宙ダストの現実的な破壊効率を導出する計算を行った。

研究の取り掛かりとして、宇宙ダストのターゲットとして非晶質炭素ダストに対して計算を進め、スパッタリング収率に対するその物質密度、表面形状、空隙構造の影響を調べた。しかしこれらの結果を解釈する上で、スパッタリングの基本的な物理素過程を集約することが不可欠であることを認識し、本研究ではスパッタリング過程の本質的理解およびスパッタリング収率への入射粒子・入射エネルギー依存性の解明に専念した。

本研究での入念な解析の結果、スパッタリング収率の入射粒子・入射エネルギー依存性は、入射粒子が一回の衝突でターゲット原子を弾き出すエネルギーとその弾き出し衝突が起こる断面積を乗じて得られた「入射粒子からのエネルギー輸送の期待値」で記述できることがわかった。本研究ではさらに、この衝突時のエネルギー輸送効率によってスパッタリング収率のターゲット物質密度依存性が説明できることを示した。

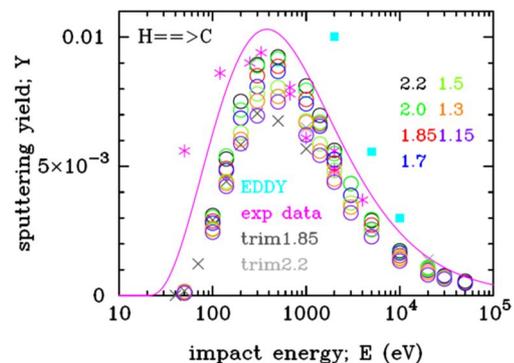


図 3. 水素の入射エネルギーの関数としての炭素質ダストのスパッタリング収率

(5) 本研究の基軸である「総合的なダスト形成モデルの構築」に関して、分子形成とダスト形成を統合的に取り扱うダスト形成計算コードを完成させた。酸素よりも炭素の存在量が多い炭素過多の環境における炭素質ダストの形成を計算するダスト形成モデルのみならず、酸素過多の環境におけるシリケートダストの形成も考慮することによりどのようなガス組成下においてもダスト形成計算を実行できるようにした。特に、ダスト形成と分子形成によるガス原子とガス分子の存在量に応じて、ダスト形成過程を律速するガス種である key species を状況に応じて変化するように計算コードを改良することにより、酸素過多の環境でもシリケートを含む多種のダストの形成過程を安定して計算できるようにした。

また、この計算コードに基づいて超新星放出ガスを模倣した環境でテスト計算を行い、問題なく計算が走り妥当な結果が得られた。そこでこの総合的なダスト形成計算コードを使用して、通常の超新星、通常よりも一桁以上爆発のエネルギーが大きい極超新星、爆発のエネルギーが小さい暗い超新星など、様々な球対称超新星爆発モデルにダスト形成計算を実行し、形成されるダストのサイズや量の前駆星質量依存性・爆発のエネルギー依存性を明らかにした。計算の結果得られたダスト種や形成量は今後基礎データとして銀河の化学進化計算に組み込み、宇宙初期から現在までの元素の進化および星間ダストの進化を明らかにする上で重要な基盤となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ono Masaomi, Nozawa Takaya, Nagataki Shigehiro, Kozyreva Alexandra, Orlando Salvatore, Miceli Marco, Chen Ke-Jung	4. 巻 271
2. 論文標題 The Impact of Effective Matter Mixing Based on Three-dimensional Hydrodynamical Models on the Molecule Formation in the Ejecta of SN 1987A	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 33 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ad1a08	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 Roberto Iaconi, Keiichi Maeda, Takaya Nozawa, Orsola De Marco, Thomas Reichardt	4. 巻 497
2. 論文標題 Properties of the Post-inspiral Common Envelope Ejecta II: Dust Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3166-3179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2169	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 Roberto Iaconi, Keiichi Maeda, Orsola De Marco, Takaya Nozawa, Thomas Reichardt	4. 巻 489
2. 論文標題 Properties of the Post-inspiral Common Envelope Ejecta - I. Dynamical and Thermal Evolution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3334-3350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2312	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 Shigeru Wakita, Yasuhiro Hasegawa, Takaya Nozawa	4. 巻 863
2. 論文標題 Abundances of Ordinary Chondrites in Thermally Evolving Planetesimals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 100 (13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad0a2	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 非晶質炭素のスputtering破壊 - 物理的解釈と宇宙ダストへの応用に向けて -
3. 学会等名 宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 非晶質炭素のスputtering計算：入射粒子・入射エネルギー・物質密度依存性
3. 学会等名 「自然科学における階層と全体」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 非晶質炭素ダストのスputtering：物質密度と表面構造依存性
3. 学会等名 「自然科学における階層と全体」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 宇宙におけるダストの破壊とスputtering
3. 学会等名 天文・核融合連携準備研究会（第1回）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 On the roles of molecules for dust formation
3. 学会等名 第1回宇宙における物質進化(r-EMU)--原子核・原子・分子--シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaya Nozawa
2. 発表標題 Probing the formation and destruction processes of dust with large MIR telescopes
3. 学会等名 Mid-infrared Astronomy - past 20 years & future 20 years - (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaya Nozawa
2. 発表標題 Dust destruction in supernova remnants
3. 学会等名 Collaborative Meeting on Supernova Remnants between Japan and USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 炭素質ダストのスパッタリング：物質密度・空隙率の依存性
3. 学会等名 「自然科学における階層と全体」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 非晶質炭素ダストのスパッタリング破壊
3. 学会等名 第36回Grain Formation Workshop
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 SPICAで探る超新星爆発でのダストの形成と破壊
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takaya Nozawa
2. 発表標題 Formation of Supernova-origin Presolar SiC Grains
3. 学会等名 Dusty Visions - 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takaya Nozawa
2. 発表標題 Formation of SiC grains in the Ejecta of Core-collapse Supernovae
3. 学会等名 The 11th meeting on Cosmic Dust (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 超新星爆発時におけるプレソラー-SiC粒子の形成
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 星間ダストの起源と量
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2018@茨城（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 宇宙固体微粒子の起源と進化
3. 学会等名 「自然科学における階層と全体」シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野沢 貴也
2. 発表標題 星間ダストは主にどこで形成されるか？
3. 学会等名 第35回Grain Formation Workshop
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト ホームページ  
<https://www.nao.ac.jp/research/project/cfca.html>

Takaya Nozawa's Homepage  
<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/nozawa/index.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
オーストラリア	Macquarie University			
イタリア	INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo	Universita degli Studi di Palermo		
その他の国・地域	Academia Sinica, Taiwan			