

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244011

研究課題名（和文） 惑星系円盤ダストの統合モデルの確立

研究課題名（英文） Construction of a comprehensive model of dust in exoplanetary systems

研究代表者

山本 哲生（YAMAMOTO TETSUO）

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：10126196

研究成果の概要（和文）：本研究は、原始惑星系円盤や残骸円盤の今後の精密観測結果を解釈するうえでの基礎となる統合的なダストモデルの構築を目的としている。これとともに天文学から惑星物質科学に至る広範囲にわたる分野において個別に行われてきた円盤におけるダスト研究を整合的にリンクさせるための共通の土台を築く。その柱となるテーマとして、1) 合体成長するダストアグリゲートの成長・構造進化、衝突破壊過程の研究、2) 低温結晶化の探求、3) ダストアグリゲートの光学を設定し研究を展開した。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present project is to construct a comprehensive model to provide a basis of deciphering the results of observations of exoplanetary systems ranging from protoplanetary disks to debris disks. Another objective is to combine astrophysical studies and planetary material ones. The followings are the major theme: 1) collisional evolution of dust aggregates, 2) low temperature crystallization of dust in space, and 3) optics of dust aggregates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2010年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2011年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
年度			
年度			
総計	25,000,000	7,500,000	32,500,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：惑星起源・進化、光学赤外線天文学、宇宙物理学、天文学、宇宙科学

1. 研究開始当初の背景

近年の惑星物質の分析実験技術の発展と太陽系天体探査の進展により、われわれの太陽系の描像が大きく変化しつつある。一方、多数の太陽系外惑星系の発見により、従来の惑星形成論の見直し、一般化が行われている。しかし、現在の惑星形成論は天体力学的研究が主体であり、実験や分析に基づいた惑星物

質科学的研究や宇宙鉱物学とのリンクは十分ではない。その結果、これまで膨大に蓄積されてきた実験・分析的研究の成果が、惑星形成論や天文観測に十分活かされていない状況にある。

申請者らは、これまで原始惑星系円盤におけるダストから微惑星形成に至る過程を、力学

および物質進化の両面から研究してきた。これらの研究は、惑星形成論、ダストの衝突成長、結晶化、光散乱、等の広範囲にわたる。これら一連の研究を通じて、惑星物質科学、惑星形成論、天文観測の解析における統一的なダストモデルの必要性を強く認識してきた。原始惑星系円盤におけるダストから微惑星形成にいたる進化過程の整合的な描像を確立するうえで、ダストの標準モデルの構築は必須である。この認識のもとに本申請に至った。

2. 研究の目的

惑星形成論において、ダストは鍵となる要素である。それは、惑星形成期の記録を保持している物質であるとともに、形成の現場である原始惑星系円盤における種々の物理過程において重要な役割を演じる。

本研究は、惑星物質科学、惑星形成理論、天文学の広範囲にわたる分野において個別に行われてきたダスト研究を、密接にリンクさせるための共通の土台となるダスト標準モデルの構築を目的とする。これをもとに、各分野間の相互交流を活発化させ、惑星物質科学研究の総合的な発展に寄与する。

本研究は、円盤ダストの力学構造、熱物性、光学特性の進化を研究することを通して、物質科学的研究とのリンクや天文観測の解析・モデリングに供し得るダスト標準モデルの構築を目指す。本研究では、ダストの多面的性質のうち、鍵となる以下の3つのプロジェクトに焦点を絞り、研究を展開する。

- 1) 合体成長するダストアグリゲートの成長・構造進化、衝突破壊過程
- 2) 低温結晶化の探求
- 3) ダストアグリゲートの光学を設定している。

3. 研究の方法

本研究は上記の3つの課題を核に、山本が研究を統括し分担者との緊密な連携のもとに研究を進めた。本研究のカバーする研究範囲・手法は広く、ダストアグリゲートの力学、物性、光学にわたる。このため、本研究のプロジェクトを遂行するうえで最適化した研究組織を構成した。ダストの力学的構造のモデル化は、主として田中が担当した。熱物性進化のモデル化については、理論面を山本が担い、実験面では国内外の実験研究者をコーディネートして進めた。光学的性質のモデル化は、主として木村と山本がヘルシンキ大学他の研究者との連携のもとに展開した。3者間で緊密なフィードバックをかけるとともに、国内外の関連研究者をも巻き込んだ広範な体制のもとで研究を展開した。その結果、

上記の3課題にとどまらず、その発展として今後の新たな研究展開の糸口を拓くことにも成功した。

本研究の推進においては、専門的知識と技術をもつ研究支援員を雇用し、共同研究を通じて研究を展開した。これを通して、惑星物質科学の若手研究者を育成することも企図した。

本研究の目的の達成、および当該分野への研究成果の還元を図る一助とするために、惑星物質科学、惑星形成理論、天文学の各分野にまたがったダストに関する Grain Formation Workshop を毎年開催し、各分野の交流を図り情報交換を促進させた。加えて H22 年度に日独ワークショップをイェーナにて開催した。また本研究の成果と実績は H24 年 8 月に惑星科学研究センター (CPS, 神戸市) にて国際研究集会 "Cosmic Dust" を開催することにも結実した。

4. 研究成果

- (1) 合体成長するダストアグリゲートの成長・構造進化、衝突破壊過程

ダストアグリゲートの合体成長条件についての研究を完成させた(雑誌論文#16)。この研究では原始惑星系円盤でのダストアグリゲートの衝突条件において、合体成長または破壊する条件を数値シミュレーションによって追求し、それをもとに合体成長/破壊条件を定式化した。本研究の結果、合体成長するダストアグリゲートは極めて空隙率に富み、その密度は地上の空気のそれと同程度あるいはそれ以下であることを示した。従来、原始惑星系円盤の赤外スペクトルの変化の観測から、円盤内のダストの成長タイムスケールが議論されている。しかし、観測の解釈においてはコンパクトな粒子を仮定している。本研究は、赤外スペクトルの変化が生じる主因はダストサイズの増加ではなく、むしろコンパクションが起こることであることを示した。この結果は従来の描像に変革を迫るものである。

衝突破壊に関しては、その臨界速度にその室内実験とわれわれの数値シミュレーションとの間に不一致があった。この原因を解明すべく、実験の条件を設定したシミュレーションを遂行した(#3)。そして衝突合体あるいはリバウンドが起こる条件を決定した。その結果、アグリゲートを構成する粒子(モノマー)の最近接モノマー数が重要なファクターであることを見出した。この結果は実験とシミュレーションの不一致を改善したが、まだ完全な一致をみていない。これは今後の課題で

ある。

この解決のため、シミュレーションの基礎となっている弾性球間の相互作用を与えるJKR理論の検証をまずもっともシンプルな場合、すなわちLenard-Jonesポテンシャルで相互作用するモノマーについてN体シミュレーションを行いつつある。

関連研究として、衝突破壊を考慮したガス惑星のコア形成の研究(#4, #10)、惑星における衝突カスケードの研究(#11)を展開した。

(2) 低温結晶化の探求

従来、原始惑星系円盤で観測される結晶シリケートダストは、中心星方向へのダストのドリフトとその後の円盤の動径方向への移動という物質循環の際に、中心星付近での加熱によって形成されたと考えられてきた。

われわれはこのような加熱による結晶化に加えてまったく新しいいわば非熱的結晶化のメカニズムを提案した(#14, #9)。このメカニズムでは、通常の熱的結晶化温度と比べてずっと低温でダスト表面を覆うラジカル分子の反応を誘起しその反応熱によって、シリケートコアの結晶化を引き起こす。このアイデアは壁内らによる実験によって実証された。彼らは常温でのシリケート結晶化を実証した。論文(#9)ではこの実験を詳細に解析するとともに、低温結晶化の条件を定式化した。この研究結果は国内外の学会、研究会等においても幅広く発表し、賛否両論のインパクトを与えた。

上記の研究に加えて、結晶化の素仮定研究としてLenard-Jones型分子ガスの凝縮過程、とくに核形成のシミュレーション研究を完成させた(#2)。シミュレーションの詳細な解析は現在行いつつある。

上述の研究展開の過程で新たな研究の方向を見出した。その一つは原始惑星系円盤における微惑星衝撃波によるダスト形成に関する研究である。微惑星衝撃波は隕石等に見出されているmmサイズの粒子(コンドルール)の起源の理論として三浦らによって提唱されてきた。われわれはこの微惑星衝撃波はコンドルールサイズの粒子のみならず、より微小なダスト粒子も生成することを示した(#8)。このような微小ダストは特徴的な結晶構造をもつ粒子として隕石や惑星間塵に見出されている。本研究はこれなお起源を説明する。

微惑星衝撃波のよりドラスティックな効果

として、われわれは衝撃波によって微惑星自体が蒸発することを見出した(#2)。すなわち、現在の小惑星帯付近にある原始惑星系円盤内の氷微惑星では原始惑星の寡占的成長の段階で顕著な微惑星蒸発が起り得ることを示した。微惑星蒸発は惑星形成論や惑星大気の組成等に大きな影響を与えることを論じた。この結果は専門誌に投稿中である。

上記2つの研究は原始惑星系円盤における微惑星衝撃波の重要性を具体的に示すことはもちろん、微惑星から惑星への進化過程の研究に力学的のみならず物質進化の研究を組み込み、従来の力学的惑星系形成論に新たな総合的な視点を提供しつつある。

(3) ダストアグリゲートの光学

ヘルシンキ大学他のグループとの共同研究によって本研究を推進した、ダストアグリゲートの光学的性質についてはその計算方法の一つであるDDA(discrete dipole approximation)の適用範囲に関する研究を展開した(#12)。その結果、適用範囲は従来考えられていたより広く、結果として多くの光散乱現象に応用できることを示した。

宇宙ダストによる光散乱の際の偏光観測はダストの性質や星惑星形成領域の構造を解明するうえで有力な方法である。偏光観測からこれらの情報を得る基礎研究として、ダストアグリゲートによって散乱される電磁波の変更を広い範囲のサイズパラメータ、複素屈折率、散乱位相角について計算し、その結果をコンパイルした。その中で偏光度は複素屈折率の虚部 $Im m$ に強く依存することを見出した。正偏光が最大になる位相角は $Im m$ の単調増加関数であるという得られた事実は、ダストの物性を知るうえでの有力なツールとなる。この方法を17P/Holmes彗星の偏光観測の解析に応用し、この彗星のダストの特性、とくにその複素屈折率、サイズ分布を決定した(#6)。

加えて、偏光とアルベドの関係を与える経験的Umov効果について、その理論的根拠についての研究を行った(#7)。

ダストによる光散乱研究の総括的まとめとして[図書]の項に記載した図書をウェブ出版した。

本課題の研究については基礎的研究を広範囲に行いDDAの信頼度とロバストネスについての知見を集積することができた。偏光観測は惑星系円盤の構造やそこでのダストの特性を解明するうえでの有力な手法であるが、

残念ながら観測データはまだ十分ではない。また偏光輸送コードの開発はほぼ完成したものの、モデル系への実証シミュレーションは残念ながら現時点ではできていない。今後は偏光観測をエンカレッジするとともに、上記コードを用いてその解析を行いたいと考えている。

以上に加えて、デブリ円盤における氷ダストリングの形成の力学(#1, #18)と太陽系におけるその実証可能性(#13), β Pic 円盤における惑星系存在の予言(#15), 将来の日本の月探査における月周辺のダスト検出計画(#5)についての研究を出版した。

本研究の成果の別の、しかし重要な一面として、コミュニティーの育成および国際交流の一助として、下記の国際研究集会を開催した/する。

2010年9-10月にイェーナにて、日本側オーガナイザー山本(本研究代表者)とドイツ側オーガナイザー A. Krivov 教授とによって、日独ワークショップ

Dust in Planetary Systems

(<http://www.astro.uni-jena.de/Theory/DI/DI/>)

を開催した。当初の予定の2倍におよぶ日独それぞれ約20名の参加者を得た。H24年度には、より参加者をより広げた国際会議

Cosmic Dust

(<https://www.cps-jp.org/~dust/Welcome.html>)

を8月に惑星科学研究センター(CPS, 神戸市)にて開催する。

加えて本研究はH24年度から開始した科研費新学術領域研究「太陽系外惑星の新機軸:地球型惑星へ」の計画班構築の基礎づくりにも寄与できたと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計18件)

①H. Kobayashi, H. Kimura, S. Watanabe, T. Yamamoto, S. Müller, Sublimation temperature of circumstellar dust particles and its importance for dust ring formation, *Earth, Planets and Space*, 査読有, Vol. 63, 2011, 1-9,

<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/toc/6310.html>

②K. K. Tanaka, H. Tanaka, T. Yamamoto, K. Kawamura, Molecular dynamics simulations of nucleation from vapor to solid composed of Lennard-Jones

molecules, *Journal of Chemical Physics*, 査読有, Vol. 134, 2011, 204313(pp1-13), DOI: 10.1063/1.3593459

③K. wada, H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, T. Yamamoto, The Rebound Condition of Dust Aggregates Revealed by Numerical Simulation, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 737, 2011, 36(12pp), DOI: 10.1088/0004-637X/737/1/36

④H. Kobayashi, H. Tanaka, A. V. Krivov, Planetary Core Formation with Collisional Fragmentation and Atmosphere to Form Gas Giant Planets, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 738, 2011, 35(11pp), DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/35

⑤Kobayashi, M., Ohashi, H., Sasaki, S., Shibata, H., Iwai, T., Fujii, M., Nogami, K., Kimura, H., Nakamura, M. H., Hirai, T., Sarma, R., Grün, E., A future observational plan of dust particles around the Moon by LDM (Lunar Dust Monitor) onboard the orbiter of the next Japanese lunar mission, *Earth, Planets and Space*, 査読有, Vol. 63, 2011, 1113-1117,

<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/frame/63.html>

⑥E. Zubko, R. Furusho, K. Kawabata, T. Yamamoto, K. Muinonen, G. Videen, Interpretation of photo-polarimetric observations of comet 17/P Holmes, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 査読有, Vol. 112, 2011, 1848-1863, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407311000458>

⑦E. Zubko, G. Videen, Y. Shkuratov, K. Muinonen, T. Yamamoto, The Umov effect for single irregularly shaped particles with sizes comparable with wavelength, *Icarus*, 査読有, Vol. 212, 2011, 403-413, DOI: 10.1016/j.icarus.2010.12.012

⑧H. Miura, K. K. Tanaka, T. Yamamoto, T. Nakamoto, J. Yamada, K. Tsukamoto, J. Nozawa, Formation of cosmic crystals in highly supersaturated silicate vapor produced by planetesimal bow shocks, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 719, 2010, 642-654, DOI: 10.1088/0004-637X/719/1/642

⑨K. K. Tanaka, T. Yamamoto, H. Kimura, Low-temperature crystallization of amorphous silicate in astrophysical environments, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 717, 2010, 586-596, DOI: 10.1088/0004-637X/717/1/586

⑩Hiroshi Kobayashi, Hidekazu Tanaka, Alexander V. Krivov, Satoshi Inaba, Planetary Growth with Collisional

Fragmentation and Gas Drag, *Icarus*, 査読有, Vol.209, 2010, 836-847,

DOI: 10.1016/j.icarus.2010.04.021

⑪ Hiroshi Kobayashi, Hidekazu Tanaka, Fragmentation Model Dependence of Collision Cascades, *Icarus*, 査読有, Vol. 206, 2010, 735-746,

DOI: 10.1016/j.icarus.2009.10.004

⑫ E. Zubko, D. Petrov, Y. Grynko, Y. Shkuratov, H. Okamoto, K. Muinonen, T. Nousiainen, H. Kimura, T. Yamamoto, G. Videen, Validity criteria of the discrete dipole approximation, *Applied Optics*, 査読有, Vol.49, 2010, 1267-1279,

DOI: 10.1364/AO.49.001267

⑬ H. Kobayashi, H. Kimura, S. Yamamoto, S. Watanabe, T. Yamamoto, Ice sublimation of dust particles and their detection in the outer solar system, *Earth, Planets and Space*, 査読有, Vol.62, 2010, 57-61,

DOI:10.5047/eps.2009.03.001

⑭ T. Yamamoto, T. Chigai, H. Kimura, K. K. Tanaka, Nonthermal crystallization of amorphous silicate in comet, *Earth, Planets and Space*, 査読有, Vol.62, 2010, 23-27, DOI:10.5047/eps.2008.11.002

⑮ H. Kimura, M. Fukagawa, M. Tamura, H. Kobayashi, T. Yamamoto, M. Ishii, H. Suto, Planets in orbit around β Pictoris formed the orbital architecture of planetesimal belts?, *Earth, Planets and Space*, 査読有, Vol.61, 2010, 111-116,

DOI: 10.5047/eps.2009.11.001

⑯ K. Wada, H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, T. Yamamoto, Collisional Growth Conditions for Dust Aggregates, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol.702, 2009, 1490-1501,

DOI: 10.1088/0004-637X/702/2/1490

⑰ E. Zubko, H. Kimura, Y. Shkuratov, K. Muinonen, T. Yamamoto, H. Okamoto, G. Videen, Effect of absorption on light scattering by agglomerated debris particles, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 査読有, Vol.110, 2009, 1741-1749, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407308002744>

⑱ H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Kimura, T. Yamamoto, Dust ring formation due to sublimation of dust grains drifting radially inward by the Poynting-Robertson drag: An analytic model, *Icarus*, 査読有, Vol.201, 2009, 395-405,

DOI:10.1016/j.icarus.2009.01.002

[学会発表] (計6件)

① 山本哲生, Planetesimal evaporation due to planetesimal bow shock, AOGS 2011, 2011

年8月9日, Taipei International Convension Center (台湾)

② 山本哲生, Physical processes involving dust in protoplanetary disks, NCU-CPS Japan-Taiwan Planetary Science Workshop, 2009年12月9日, NCU (台湾国立中央大学) (台湾)

③ 山本哲生, Low temperature crystallization of dust, Dust in Planetary Systems, 2009年9月28日, イエナ大学 (ドイツ)

④ 山本哲生, Physical processes in protoplanetary disks, ISSI (International Space Science Institute) Workshop on Nono-Particles, 2009年9月22日, ISSI (国際宇宙科学研究所) (スイス)

⑤ 山本哲生, Physical Processes in Protoplanetary Disks, Physikalishes Kolloquium, Friedlich-Schiller-Universitaet, 2009年7月6日, イエナ大学 (ドイツ)

⑥ 山本哲生, 宇宙における結晶化 (Crystallization of dust in astrophysical environments), 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月17日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県)

[図書] (計1件)

① L. Kolokolova, E. Petrova, H. Kimura, InTech, *Electromagnetic Waves / Book 1*, Chap. 9, 2011, 510

[その他]

<http://risu.lowtem.hokudai.ac.jp/publications.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 哲生 (YAMAMOTO TETSUO)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 10126196

(2) 研究分担者

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)
北海道大学・低温科学研究所・准教授
研究者番号: 00282814

木村 宏 (KIMURA HIROSHI)
神戸大学大学院・理学研究科・特命准教授
研究者番号: 10400011

(3) 連携研究者

なし