

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03941

研究課題名（和文）大規模数値計算によるダスト付着成長の微物理の発展

研究課題名（英文）Development of the Microphysics of Dust Growth through a Large-scale Survey of Dust Numerical Simulations

研究代表者

田中 秀和（Hidekazu, Tanaka）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：00282814

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、ダスト微粒子相互作用モデルを分子動力学計算で分子レベルから調べ明らかにした上で、この最新相互作用モデルを用いダスト集合体の衝突の大規模サーベイ計算を行うことで、高精度かつ詳細なダスト微物理モデルを構築した。分子動力学計算の研究では、比較的低速な衝突でも強いエネルギー散逸が起こることが示された。このエネルギー散逸機構を取り入れたダスト集合体の衝突数値計算からは、ダスト破壊に対する普遍的な衝突速度の閾値や破壊で生じる破片のサイズ分布モデルが導出された。さらに、原始惑星系円盤のダストの理解に役立つ、ダスト内部密度進化やダスト跳ね返り条件についても高精度なモデルを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微惑星に至るまでの形成過程において、ダスト衝突合体または破壊の過程に関する知見は不可欠である。本研究で発展させたダスト微物理モデルはダスト衝突における合体条件をほとんど不定性なしに議論することを可能にした。また、本研究で発展させた、破片サイズ分布や、ダスト密度進化、ダストの衝突跳ね返り条件等の各理論モデルは、原始惑星系円盤やデブリ円盤におけるダスト進化的理論の今後の研究において非常に有力なツールであり、精度の高い研究を推進していく助けとなるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, the dust particle interaction model was developed based on our molecular dynamics simulations, and we constructed a highly accurate and detailed model for dust microphysics, by performing a large-scale survey of simulations of dust aggregate collisions with the developed particle interaction model. Molecular dynamics simulations have shown that strong energy dissipation occurs even in relatively low-velocity collisions. Numerical simulations of dust collisions incorporating this energy dissipation mechanism have revealed a universal collision velocity threshold for dust fragmentation and size distributions of the fragments at each collision. In addition, analytical models of the dust internal density and dust bounce conditions have been developed, which are useful for understanding dust in protoplanetary disks.

研究分野：惑星科学

キーワード：原始惑星系円盤 ダスト ダスト衝突破壊 惑星形成 微惑星

1. 研究開始当初の背景

惑星や小天体の形成は、若い星周りのガス円盤 (原始惑星系円盤) 中における氷や岩石からなる固体粒子 (ダスト) の付着成長で始まる。惑星は微惑星という **km** サイズの天体が集積してつくられたとされているが、微惑星がダストからどのようにして形成されたかは未だ分かっておらず大問題となっている。最近では、**cm** サイズに成長した小石 (ペブル) の集団が自己重力により集積し微惑星が形成されるという説 (**Streaming Instability** 説) やペブルが惑星へ効率よく集積し惑星成長が促進されるという説 (**pebble accretion** 説) が注目されているが、**cm** サイズのペブルへの付着成長過程の不定性は大きい。微惑星形成の問題解決への第一歩として、まずダスト付着成長における大きな不定性を取り除くことが不可欠な状況にある。

従来の天文学や惑星科学におけるダスト成長の研究では「衝突 = 合体」という完全合体が仮定され、ダストの衝突破壊はほとんど議論されていなかった。初期のダストサイズは星間ダスト観測から **0.1 μ m** とわかっている。これらが付着してできたダストは **0.1 μ m** の構成粒子の集合体となる。このようなダスト集合体の構造や付着過程に関する知見が無いままでは、現実的なダスト成長の研究は不可能である。この状況を打開するため、我々のグループは、ダスト集合体の衝突を構成粒子個々の運動を追う **N** 体計算の手法を用い、ダスト付着条件や内部構造の進化を明らかにしてきた。

我々の研究によると、氷ダストは衝突速度 **60m/sec** 以下の衝突で、シリケートダストは **6m/sec** 以下の衝突で合体成長が進行し、これ以上の衝突速度では成長よりも破壊が卓越するという結果が得られている。また、合体成長でつくられる空隙の多いダストの衝突では、跳ね返り現象は非常に起こりにくいことも示されている。しかしながら、これまでの我々の **N** 体計算は構成粒子間相互作用に単純化したモデルを採用しており、この点を改善すれば、これらの結果は大幅に変わってくる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、微惑星形成の問題解決に向けて、ダスト付着・破壊過程を徹底的に調べ、信頼性の高いダスト成長の微物理を構築することである。さらに、構築したダストモデルを、原始惑星系円盤におけるダスト成長過程に応用することも研究目標に含める。

分子動力学計算により構成粒子間の付着過程を調べると、ミクロなクラックの発生等の塑性変形によってエネルギー散逸が起こり、粒子間の付着性が増すが、我々の予備的な計算より明らかになっている (**Tanaka et al. 2012**)。本研究では、まずこのような分子動力学計算を大量に行うことで、このエネルギー散逸の効果を取り入れた現実的な構成粒子間の相互作用モデルを構築する。その上で、構築した現実的な相互作用モデルを用いてダスト集合体の衝突計算を大量に行うことにより、ダスト合体条件や破壊過程を明らかにする。これらの研究群により、信頼性の高いダスト微物理モデルの創出を目標とした。

このような方針のもと、本研究では以下の研究項目を行った。

- (1) 分子動力学計算による微粒子間相互作用モデルの精密化
- (2) ダスト衝突過程の微粒子間相互作用モデルに対する依存性
- (3) ダスト衝突における合体と破壊のモデル化
- (4) ダスト衝突合体過程によるダスト構造進化と原始惑星系円盤への応用

3. 研究の方法

「(1) 分子動力学計算による微粒子間相互作用モデルの精密化」の研究手法

微粒子をレナード-ジョーンズ分子でできた面心立方格子の完全結晶で構成し、その微粒子 2 体の間の相互作用を微粒子衝突の分子動力学計算を行うことで詳細に調べた。この計算において、衝突速度と粒子半径をパラメータとして多数の分子動力学計算を行った。分子動力学計算の計算コードには LAMMPS 公開コードを用いた。これにより、微粒子間相互作用においてどの程度のエネルギー散逸効果が働くかを明らかにした。微粒子間相互作用におけるエネルギー散逸はダスト衝突合体において重要な要素だと考えられる。本研究で行う分子動力学計算の結果をもとにして、得られたエネルギー散逸を再現するモデルを構築した。

「(2) ダスト衝突過程の微粒子間相互作用モデルに対する依存性」の研究手法

(1) の新たなエネルギー散逸を取り入れた粒子相互作用モデルを用い、等質量ダストの衝突の数値計算を行った。ダスト衝突の数値計算コードは、Wada et al. (2007) で開発し、我々のグループで高速化したものを用いた。(1) で得られる粒子間相互作用時のエネルギー散逸のモデルには、物質に関するパラメータの不定性が含まれる。本研究ではエネルギー散逸量についてパラメータを想定される範囲で振りつつ、ダスト衝突の数値計算を行うことで、エネルギー散逸の効果や依存性を明らかにした。

「(3) ダスト衝突における合体と破壊のモデル化」の研究手法

(2) の粒子相互作用におけるエネルギー散逸によるダスト衝突の数値計算結果への影響を考慮した上で、衝突条件のパラメータを広範囲で振りダスト衝突の数値計算の大規模サーベイ計算を実行することで、ダスト衝突結果の経験的モデルを構築する。ダスト集合体の構成粒子 (モノマー) は半径 **0.1 μ m** の氷球粒子を用いる。衝突体であるダスト集合体の

構造は比較的密な構造である BPCA(Ballistic Particle Cluster Aggregation)を用いる。衝突破壊を調べる場合、数 m/s 以上の衝突速度が必要であり、そのような衝突速度で衝突する環境では、ダスト集合体は衝突で圧縮されるため、比較的密な BPCA を用いることは妥当である。衝突条件のパラメータは、衝突体 2 体それぞれの質量、衝突速度、衝突角度である。また BPCA 構造は乱数で生成するが、乱数を変えて 4 通りの衝突体を作成し、それらに対し計算を行った。これらのパラメータサーベイのため合計約 24000 ランを行った。

「(4) ダスト衝突合体過程によるダスト構造進化と原始惑星系円盤への応用」の研究手法

(4) では、ダスト連続衝突の数値計算を実行し、ダスト密度進化モデルを構築する。

Suyama et al. (2008) では等質量ダストの衝突という理想的な場合を調べたが、本研究では質量比のついた衝突での圧縮過程を調べた。衝突体は BPCA 構造のものを扱い、その質量や、衝突速度、転がり摩擦などのパラメータを振って全体の合計で 8 千回程度の衝突計算を実行した。さらに、より密な構造の衝突体を用いてはね返りの可能性についても調べた。

4. 研究の成果

以下では、上記目標の下で得られた成果を(1) 分子動力学計算による微粒子間相互作用モデルの精密化、(2) ダスト衝突過程の微粒子間相互作用モデルに対する依存性、(3) ダスト衝突における合体と破壊のモデル化、(4) ダスト衝突合体過程によるダスト構造進化と原始惑星系円盤ダストへの応用に分けて概観する。

(1) 分子動力学計算による微粒子間相互作用モデルの精密化

レナード-ジョーンズ分子の結晶からなる球粒子の正面衝突時におけるエネルギー散逸を分子動力学計算により調べた。従来の球粒子の相互作用モデルとしては、摩擦による散逸を含まない JKR モデルとこれに摩擦による散逸を取り入れた Krijt et al. (2013) のモデルがある。本研究の分子動力学計算の結果より、比較的低速な衝突において Krijt et al. (2013) のモデルよりも強いエネルギー散逸（摩擦力）が発生することが明らかになった。この結果は、衝突する 2 球の狭い接触面において強い応力集中が起き高い応力が発生したために、強いエネルギー散逸が引き起こされたと解釈される。欠陥のない完全結晶の球粒子に対しても、本研究のような強い散逸が起こるといふ本研究の結果は予想外のものではあった。さらに、この結果を再現する散逸モデルとして、発生応力に依存したエネルギー散逸モデルを構築した。この経験的モデルは、エネルギー散逸の粒子サイズや衝突速度に対する依存性をよく再現する。この成果は Yoshida et al. (2024) として論文にまとめ国際論文雑誌に投稿中である。

さらに、正面衝突以外に、接触した 2 球を転がして回転速度の減衰から転がり摩擦を調べる分子動力学計算も行った。得られた転がり摩擦は、Diminik & Tielens (1997) のモデルと調和的であった。

(2) ダスト衝突過程の微粒子間相互作用モデルに対する依存性

まず、法線方向の変形摩擦を取り入れた等質量ダストの衝突の数値計算を行い、それによるダスト衝突結果への影響を調べた。その結果、法線方向の変形摩擦の効果は、ダスト衝突における破壊/成長の衝突速度条件にはほとんど影響しないことが示された(Arakawa et al. 2022a)。この結果は、次に述べる接線方向の摩擦が十分に効果的であり、これが衝突時のエネルギー散逸を担っているため、法線方向の変形摩擦の有無に依らないようになっていると解釈できる。但し、法線方向の変形摩擦は高速衝突における微小破片の生成に影響することも明らかになった。法線方向の変形摩擦が強い場合は、微小破片の生成が大幅に抑制される。微小破片の存在は円盤の光吸収係数を左右するため、これらの生成抑制という本研究の結果は重要である。

次に、接線方向の、転がり、せん断、ねじれによる各摩擦に対するダスト衝突結果の依存性を調べた。これら接線方向の各摩擦力と法線方向の変形摩擦力がすべて働かないという条件で計算を行った場合、破壊/成長の衝突速度条件は変わり、臨界衝突速度は 1/2 程度に低下した(Arakawa et al. 2023a)。しかしながら、2 球の付着面でせん断摩擦やねじれ摩擦が働かないという状況は非現実的である。このような接線方向の摩擦が働かないという非現実的な状況を除けば、転がり摩擦や法線方向の変形摩擦の有無にかかわらず、臨界衝突速度は変わらないことが確かめられた(Arakawa et al. 2022b)。この結果より、摩擦に関する各係数に不定性が残されていても、ダスト衝突結果は精度よく予測することが可能ながことが示された。

(3) ダスト衝突における合体と破壊のモデル化

水ダスト衝突結果に対する衝突ダストの質量比依存性を調べた。その結果、特に質量比が 3 倍程度の場合に破壊が最も起こりやすいことが明らかになった。一方、質量比が大きく 10 倍を超えた場合の衝突では破壊が起こりにくいことも発見した。例えば、数十倍の質量比がついた 2 体の衝突では、150m/s 以下の衝突速度であれば破壊よりも成長が卓越する。従来の小さなダスト集合体を用いた数値計算では質量比のついた衝突では非常に破壊が進みやすいという逆の結果が得られていたが、本研究の大規模ダスト衝突の数値計算結

果はこれを覆すものである。例えば、 $100\ \mu\text{m}$ 以上のダストを想定した場合には、小さなダスト集合体の結果は適用不可であり本研究の大規模ダスト衝突の結果に近くなる。大きなダストで破壊が起こりにくいのは、自由度が高く衝突時の衝撃を吸収しやすいためであることも確認された。この結果は、原始惑星系円盤で小さなダストは破壊では生じにくいことを示唆しており、重要である (Hasegawa et al. 2021)。

さらに、衝突破壊時における破片サイズ分布についても系統的に調べ、破片サイズ分布の経験的モデルの構築に成功した (Hasegawa et al. 2023)。この経験的モデルは衝突の結果生成される破片サイズ分布を、衝突する 2 体の質量比と衝突速度の関数として与えるものである。従来研究では、ダスト衝突における破片サイズ分布はほとんど明らかにされておらず、非常に単純で非現実的なモデルが仮定されていたのみであった。本研究で得られたダスト衝突における破片サイズ分布の経験的モデルは、原始惑星系円盤におけるダスト進化を議論する上で非常に有用なものである。一方、これらの結果は氷ダストに対するものである。シリケートダストの破片サイズ分布に対しても本研究の結果が適用できるかどうかについては今後確かめる必要がある。

(4) ダスト衝突合体過程によるダスト構造進化と原始惑星系円盤への応用

質量比がついたダスト同士の衝突の 1 回では質量変化が小さく、また圧縮の程度も小さい。本研究では連続した多数回の衝突をダスト衝突数値計算により調べることで、圧縮の効果を明らかにした。その結果、質量比がついた衝突では、同程度の質量成長をした段階では、等質量衝突の場合に比べ大幅に圧縮が効率良く進行することが明らかになった。また、数値計算により示された圧縮過程を再現する経験的なダスト衝突圧縮モデルを構築した。さらに、この圧縮モデルを原始惑星系円盤のダストに応用した。観測により示されている原始惑星系円盤のダストは比較的密な構造を持っている。本研究で示された効率的な圧縮でこの観測結果を説明可能であることが明らかになった (Tanaka et al. 2023)。

ダストの跳ね返り現象は、従来実験室実験では数多く観測されていたが、数値シミュレーションにおいては極めて密な構造をもつ特殊なダスト集合体のみでしか起きないと報告されていた。今回の再検討では、サイズの大きいダスト集合体を考えた場合より空隙の多い構造でも跳ね返り現象が起こることが示された。従来の数値シミュレーションでは実験室実験のダストより小さいものを用いていたため差異が生じていたことも明かになった。この結果により、原始惑星系円盤で成長が止まっているという観測結果は跳ね返り現象で説明可能である (Arakawa et al. 2023b)。

以上の研究成果は次のようにまとめられる。本研究では、ダスト微粒子相互作用モデルを分子動力学計算で分子レベルから調べ明らかにした上で、この最新相互作用モデルを用いダスト集合体の衝突の大規模サーベイ計算を行うことで、高精度かつ詳細なダスト微物理モデルを構築した。分子動力学計算の研究では、比較的低速な衝突でも強いエネルギー散逸が起こることが示された。このエネルギー散逸機構を取り入れたダスト集合体の衝突数値計算からは、ダスト破壊に対する普遍的な衝突速度の閾値や破壊で生じる破片のサイズ分布モデルが導出された。これらの微物理モデルにより原始惑星系円盤でのダスト進化について高精度な議論が可能となった。さらに、ダスト内部密度進化やダスト跳ね返り条件についても高精度なモデルを作成し、これにより原始惑星系円盤のダストのサイズや密度の起源を自然に説明することに成功した。本研究は、主に氷ダストに関する微物理モデルを構築した。このモデルがシリケートダストにも適用可能であるかについては今後調べるべき課題である。

参考文献

- Arakawa, Tanaka, et al. (2022a) *Astrophys. J.* 933:144(13pp)
Arakawa, Tanaka, et al. (2022b) *Astrophys. J.* 939:100 (10pp)
Arakawa, Tanaka, et al. (2023a) *Astron. & Astropys.* 670, L21 (10pp)
Arakawa et al. (2023b) *Astrophys. J. Lett.* 951:L16(7pp)
Hasegawa, Suzuki, Tanaka, et al. (2021) *Astrophys. J.* 915, 22(18pp)
Hasegawa, Suzuki, Tanaka, et al. (2023) *Astrophys. J.* 944:38 (26pp)
Krijt et al. (2013) *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46, 435303
Suyama, Wada, Tanaka, et al. (2008) *Astrophysical J.* 684, 1310-1322
Tanaka et al. (2012) *Prog. of Theor. Phys. Suppl.* 195, 101-11
Tanaka et al. (2023) *Astrophys. J.* 945:68(12pp)

Wada, Tanaka, et al. (2007) *Astrophysical J.* 661, 320-333

Yoshida, Kokubo, Tanaka, et al. (2024) *Physical Review E*, submitted

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Arakawa Sota, Tanaka Hidekazu, Kokubo Eiichiro	4. 巻 933
2. 論文標題 Impacts of Viscous Dissipation on Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 144 ~ 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7460	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 Arakawa Sota, Tanaka Hidekazu, Kokubo Eiichiro	4. 巻 939
2. 論文標題 Collisional Growth Efficiency of Dust Aggregates and Its Independence of the Strength of Interparticle Rolling Friction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 100 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac96e1	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 Arakawa Sota, Tanaka Hidekazu, Kokubo Eiichiro, Nishiura Daisuke, Furuichi Mikito	4. 巻 670
2. 論文標題 Threshold velocity for the collisional growth of porous dust aggregates consisting of cohesive frictionless spheres	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L21 ~ L21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202345887	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 Hasegawa Yukihiko, Suzuki Takeru K., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Wada Koji	4. 巻 944
2. 論文標題 Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates. II. Mass Distribution of Icy Fragments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 38 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acadda	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 Tanaka Hidekazu, Anayama Ryoichi, Tazaki Ryo	4. 巻 945
2. 論文標題 Compression of Dust Aggregates via Sequential Collisions with High Mass Ratios	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 68 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb92b	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 Tominaga Ryosuke T., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 940
2. 論文標題 Nonlinear Outcome of Coagulation Instability in Protoplanetary Disks. II. Dust-ring Formation Mediated by Backreaction and Fragmentation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 152 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac97e8	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 Tagawa Hiromichi, Kimura Shigeo S., Haiman Zoltan, Perna Rosalba, Tanaka Hidekazu, Bartos Imre	4. 巻 927
2. 論文標題 Can Stellar-mass Black Hole Growth Disrupt Disks of Active Galactic Nuclei? The Role of Mechanical Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 41 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac45f8	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 Tanaka Yuki A., Kanagawa Kazuhiro D., Tanaka Hidekazu, Tanigawa Takayuki	4. 巻 925
2. 論文標題 Eccentric Gap Induced by a Super-Jupiter-mass Planet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac3af5	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 Kanagawa Kazuhiro D., Muto Takayuki, Tanaka Hidekazu	4. 巻 921
2. 論文標題 Dust Rings as a Footprint of Planet Formation in a Protoplanetary Disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 169 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac282b	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 Hasegawa Yukihiko, Suzuki Takeru K., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Wada Koji	4. 巻 915
2. 論文標題 Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates with Low Mass Ratios. I. Critical Collision Velocity for Water Ice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 22 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf6cf	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 Kanagawa Kazuhiro D, Tanaka Hidekazu	4. 巻 494
2. 論文標題 Comments on ' Type II migration strikes back ? an old paradigm for planet migration in discs ' by Scardoni et al.	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 3449 ~ 3452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1011	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 Ohashi Satoshi, Kobayashi Hiroshi, Nakatani Riouhei, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu, Murakawa Koji, Zhang Yichen, Liu Haiyu Baobab, Sakai Nami	4. 巻 907
2. 論文標題 Ring Formation by Coagulation of Dust Aggregates in the Early Phase of Disk Evolution around a Protostar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd0fa	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 Tanaka Hidekazu, Murase Kiyoka, Tanigawa Takayuki	4. 巻 891
2. 論文標題 Final Masses of Giant Planets. III. Effect of Photoevaporation and a New Planetary Migration Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab77af	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 Tazaki Ryo, Tanaka Hidekazu, Kataoka Akimasa, Okuzumi Satoshi, Muto Takayuki	4. 巻 885
2. 論文標題 Unveiling Dust Aggregate Structure in Protoplanetary Disks by Millimeter-wave Scattering Polarization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 52 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab45f0	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 Tazaki Ryo, Tanaka H, Muto T, Kataoka A, Okuzumi S	4. 巻 485
2. 論文標題 Effect of dust size and structure on scattered-light images of protoplanetary discs	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 4951 ~ 4966
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz662	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 Arakawa Sota, Tatsuuma Misako, Tanaka Hidekazu, Furuichi Mikito, Nishiura Daisuke	4. 巻 109
2. 論文標題 Interparticle normal force in highly porous granular matter during compression	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 024904-024904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.109.024904	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 Tominaga Ryosuke T., Tanaka Hidekazu	4. 巻 958
2. 論文標題 Rapid Dust Growth during Hydrodynamic Clumping due to Streaming Instability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 168 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad002e	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 Ohashi Satoshi, Momose Munetake, Kataoka Akimasa, Higuchi Aya E, Tsukagoshi Takashi, Ueda Takahiro, Codella Claudio, Podio Linda, Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami, Kobayashi Hiroshi, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 954
2. 論文標題 Dust Enrichment and Grain Growth in a Smooth Disk around the DG Tau Protostar Revealed by ALMA Triple Bands Frequency Observations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace9b9	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 Kobayashi Hiroshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 954
2. 論文標題 Rapid Formation of Gas-giant Planets via Collisional Coagulation from Dust Grains to Planetary Cores. II. Dependence on Pebble Bulk Density and Disk Temperature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 158 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace96b	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 Tatsumi Misako, Kataoka Akimasa, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 953
2. 論文標題 Formulating Compressive Strength of Dust Aggregates from Low to High Volume Filling Factors with Numerical Simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 6 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acdf43	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 Arakawa Sota, Yamamoto Daiki, Ushikubo Takayuki, Kaneko Hiroaki, Tanaka Hidekazu, Hirose Shigenobu, Nakamoto Taishi	4. 巻 405
2. 論文標題 Oxygen isotope exchange between molten silicate spherules and ambient water vapor with nonzero relative velocity: Implication for chondrule formation environment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115690 ~ 115690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2023.115690	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 Arakawa Sota, Okuzumi Satoshi, Tatsuuma Misako, Tanaka Hidekazu, Kokubo Eiichiro, Nishiura Daisuke, Furuichi Mikito, Nakamoto Taishi	4. 巻 951
2. 論文標題 Size Dependence of the Bouncing Barrier in Protoplanetary Dust Growth	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L16 ~ L16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acdb5f	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25件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Hidekazu Tanaka
2. 発表標題 Compression of Dust Aggregates via Sequential Collisions with High Mass Ratios
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川幸彦, 鈴木建, 田中秀和, 小林浩, 和田浩二
2. 発表標題 ダストアグリゲイト間の衝突破壊に関する破片と質量比の関係性
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田雄城, 小久保英一郎, 田中秀和
2. 発表標題 分子動力学で探るモノマー間相互作用
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 佑希, 中澤 佐穂, 田中 秀和, 金川 和弘, 谷川 享行
2. 発表標題 超木星質量惑星による原始惑星系円盤へのギャップ形成と惑星への質量降着率
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林浩, 田中秀和
2. 発表標題 ダストから惑星まで統一シミュレーション: 巨大ガス惑星形成と軌道の分布
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長沢真樹子, 田中秀和
2. 発表標題 木星型惑星の成長と惑星散乱
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金川和弘, 武藤恭之, 田中秀和
2. 発表標題 移動する惑星が作るダストリング構造について
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富永遼佑, 田中秀和, 小林浩, 犬塚修一郎
2. 発表標題 原始惑星系円盤中のダスト成長が駆動する不安定性と微惑星形成: 衝突破壊の影響
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辰馬 未沙子, 片岡 章雅, 田中 秀和, Tristan Guillo
2. 発表標題 ダスト集合体の物質強度で探る太陽系小天体形成過程
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hasegawa Yukihiko, Suzuki Takeru K., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Wada Koji
2. 発表標題 Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates with Low Mass Ratios
3. 学会等名 JPGU Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 秀和、奥住 聡、和田 浩二
2. 発表標題 焼結したダストの正面および斜め衝突の3次元数値シミュレーション
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川 幸彦、鈴木 建、田中 秀和、小林 浩、和田 浩二
2. 発表標題 Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates with Low to Very High Mass Ratios
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辰馬 未沙子、片岡 章雅、田中 秀和
2. 発表標題 高空隙ダストの引張強度と原始惑星系円盤内での回転による破壊
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 佑希、金川 和弘、田中 秀和、谷川 享行
2. 発表標題 木星より重い巨大ガス惑星による原始惑星系円盤のギャップ形成と質量降着率への影響
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤 佐穂、田中 佑希、田中 秀和
2. 発表標題 二次元数値流体計算による巨大惑星へのガス降着モデルの検証
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中秀和
2. 発表標題 巨大惑星形成モデルによる系外惑星の質量・軌道半径分布の解釈
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田雄城, 小久保英一郎, 田中秀和
2. 発表標題 分子動力学シミュレーションで探るダストモノマー間相互作用
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 2. 吉田雄城, 小久保英一郎, 田中秀和
2. 発表標題 分子動力学シミュレーションで探るダストモノマー間相互作用: JKR理論の拡張
3. 学会等名 日本惑星科学会2023年秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川幸彦, 田中秀和, 鈴木建, 小林浩, 和田浩二
2. 発表標題 質量輸送を伴うダストアグリゲイト間の衝突と衝突エネルギーの関係
3. 学会等名 日本惑星科学会2023年秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永遼佑, 田中秀和
2. 発表標題 原始惑星系円盤におけるストリーミング不安定性とダスト成長の共発展
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川幸彦, 田中秀和, 鈴木建, 小林浩, 和田浩二
2. 発表標題 質量輸送を伴うダストアグリゲイト間の衝突と衝突エネルギー
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辰馬 未沙子、奥住聡、片岡章雅、田中 秀和
2. 発表標題 ペブル同士の衝突付着による接触面半径の解析モデルと付着N体計算との比較
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 秀和
2. 発表標題 グランドタック惑星移動モデルの困難
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中佑希、金川和弘、谷川享行、田中 秀和
2. 発表標題 超木星質量惑星による離心ギャップ形成と惑星への質量降着率への影響
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sijme-Jan Paardekooper, Paul Duffell, Frederic S. Masset, Gordon Ogilvie, Hidekazu Tanaka, Ruobing Dong, Jeffrey Fung
2. 発表標題 Planet-Disk Interactions and Orbital Evolution
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>宇宙の塵の塊の「跳ね返り」が衝突合体による微惑星形成を阻害する 大きくなるとくっつきにくくなる粉状体の衝突挙動を発見 (2023/7/6) https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/07/press20230706-02-universe.html 高層大気に見られる夜光雲の形成メカニズムを解明 ~ 新しい理論モデルを用いて夜光雲の形成メカニズムを特定 ~ (2022/5/17) https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/05/press20220517-03-cloud.html 世界初! 統一シミュレーションにより、木星や土星などの「巨大ガス惑星」の形成過程を解明 (2021/11/17) https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/11/press20211117-01-giant.html 原始惑星系円盤のリング構造が惑星形成の歴史を残している可能性を示唆 最新の観測とスーパーコンピュータから世界で初めて解明: 新たな惑星形成理論を展望 (2021/11/15) https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/11/press20211115-01-planet.html</p>

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
研究分担者	和田 浩二 (Wada Koji) (10396856)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・主席研究員 (32503)	
研究分担者	奥住 聡 (Okuzumi Satoshi) (60704533)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	
研究分担者	田中 今日子 (Kyoko Tanaka) (70377993)	東北大学・理学研究科・客員研究者 (11301)	

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