

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20385

研究課題名（和文）原始惑星系円盤の動力学とダスト成長を包括した微惑星形成理論の構築

研究課題名（英文）Theoretical modeling of planetesimal formation in protoplanetary disks based on combined effects of disk dynamics and dust coagulation

研究代表者

富永 遼佑 (Tominaga, Ryosuke)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・基礎科学特別研究員

研究者番号：10908338

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、惑星形成に必須の「微惑星」の形成過程を解明することを目的として、原始惑星系円盤でのダスト集積と衝突成長が相互に促進される過程を数値シミュレーションと線形解析により探求した。主な成果は、(1) 衝突成長が駆動する新しい不安定性によってダストが効率的に集積され、衝突成長が加速的に進むことを明らかにしたこと、(2) この集積領域では従来の不安定性による微惑星形成が起こり得ることを示したこと、(3) ストリーミング不安定性と呼ばれるより小さいスケールのダスト集積が衝突成長を促す可能性を示したことの3つである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微惑星がいつ・どこで・どのくらい形成されるかを解明することは、系外惑星の多様性・共通性の起源を理解する上で本質的に重要である。また太陽系小天体の探査から太陽系の歴史に迫る上でも、微惑星形成の理論的理解は必須である。従来、微惑星形成機構として有力な不安定性の研究が数多く行われてきたが、多くの場合大きく成長した大量のダストが仮定されていた。本研究成果は、ダスト成長の初期段階と従来の不安定性による微惑星形成を橋渡しする点で意義深い。また衝突成長とダスト集積の相乗効果によって、衝突破壊などの問題が回避され得ることを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to reveal planetesimal formation, which is a necessary step in the planet-forming process. Conducting numerical simulations and linear analyses, we explored potential feedback process between dust concentration and collisional growth in protoplanetary disks. We showed (1) that coagulation instability promotes dust concentration that accelerates coagulation, (2) that previously proposed instability can operate in the resulting dust-rich regions and cause planetesimal formation, and (3) that smaller-scale instability called streaming instability can also promote dust coagulation.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：原始惑星系円盤 ダスト 微惑星 流体不安定性

1. 研究開始当初の背景

これまでの観測によって数多くの惑星が太陽系外に発見されてきた。このように宇宙に普遍的に存在する惑星がどのように形成されたのかは、天文学・惑星科学分野における根源的な問いのひとつである。

惑星形成は、生まれたばかりの星の周囲にできるガス円盤(原始惑星系円盤)の中で起こると考えられている。円盤内にはミクロンサイズの固体微粒子(ダスト)が存在し、それらが衝突合体を繰り返すことで惑星が形成されると考えられている。特にキロメートルサイズの間中天体は微惑星と呼ばれているが、その形成過程には未解明な点が多く長年の問題となっている(e.g., Nakagawa et al. 1986; Johansen et al. 2014)。

近年、ALMA 望遠鏡による高解像度観測によって原始惑星系円盤の詳細な構造が明らかになってきた。連続波観測ではダストのサイズと共に空間分布が調べられており、多くの円盤のダスト分布にリング構造が発見された。ダストリング構造は従来の理論では予想されていなかった構造であり、その起源は未だ明らかでない(e.g., Andrews 2020)。提案されている説のひとつは、従来理論の予想より早い段階で惑星が形成され、円盤との重力相互作用によってリングが形成されたというものである(e.g., Gonzalez et al. 2015)。しかしリングが観測されたのはおよそ 10au 以遠であり、そうした外側領域ではダストの衝突頻度は小さく微惑星に成長することさえ極めて困難と考えられている。したがって、惑星を必要としないリング形成機構や、外側領域での微惑星形成を促す何らかの機構が不可欠かつ重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、ダストリングと微惑星の起源解明を目的として、円盤内でのダストの衝突成長過程と流体力学的不安定性によるダスト集積過程を調べる。特にそれらの相互作用に着目し、ダスト成長が誘発する集積過程(Coagulation instability)や、従来の不安定性による集積の中でダスト成長が促進される過程を調べる。これらに基づき、ミクロンサイズからのダスト成長が、微惑星形成にどのように繋がるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、数値シミュレーションと理論解析を行いダスト成長・集積の素過程を探求した。数値シミュレーションの研究では、まずは独自に開発した1次元コードを用いて Coagulation instability によるダスト集積過程を明らかにした。またダストのサイズ分布進化を記述するコードの開発も順次行い、Coagulation instability に対するダストサイズ分布の影響を調査した。従来の流体力学的不安定性によるダスト集積についての研究では、多次元流体計算が可能な公開コード Athena (Stone et al. 2008)を用いた。従来の不安定性の中でも、本研究では特にストリーミング不安定性に着目した。これは、Coagulation instability の数値計算では分解することが難しい程小さいスケールで起こる現象であり、それがダスト成長に与える影響を調べることは、相補的な研究として重要である。またダスト集積後の微惑星形成への発展を明らかにするために、永年重力不安定性の多次元線形解析を行い、鉛直方向の構造や運動によって発動条件がどの程度変わるのかを調べた。

4. 研究成果

(1) Coagulation instability によるダスト集積過程

Coagulation instability は、ダスト同士の衝突による僅かな成長によってダストが自律的に集積される現象である(Tominaga et al. 2021)。Tominaga et al. (2021)では局所線形解析を行い、Coagulation instability の成長率を体系的に調べた。そこで分かったことは、従来の流体力学的不安定性が起こらないほどダストが少ない場合であっても Coagulation instability は起こり得るということである。このことは、Coagulation instability によってダストが集積されれば、従来の不安定性が起こり微惑星が形成され得ることを示唆している。

そこで本研究では、Coagulation instability の数値シミュレーションを行い、ダスト集積の効率や、集積中にダストがどこまで成長するのかを体系的に調べた。数値計算コードは独自に開発した Lagrange-mesh 法に基づくコードを使用した。これにより数値散逸をできるだけ回避して Coagulation instability の成長を正確に記述できることを確認した。

シミュレーションの結果、Coagulation instability はダストが大きく成長して動径移動を始めるタイミングで起こり、リング状にダストを集積することがわかった。ガスへの反作用を無視した場合には、面密度が1桁以上も大きくなるほどの集積が起こり、集積領域の幅は1au以下と非常に狭いことがわかった。一方、反作用を考慮した場合には非線形成長段階で集積効率が徐々に下がり、赤道面でのダスト-ガス質量比がおよそ1程度になったところで面密度の上昇が止まることわかった。これは集積に伴い動径移動速度が抑え

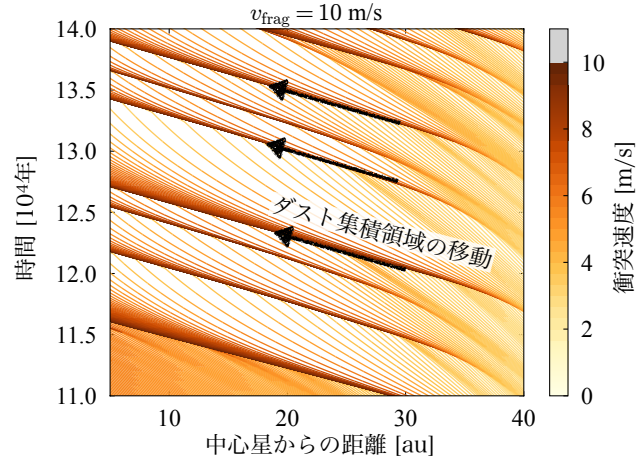


図1: ダストの軌跡と衝突速度 (Tominaga et al. 2022bの図を改変)

られたためであり、Tominaga et al. (2021)の線形解析からの予想と整合的であった。また集積領域ではダスト成長も加速することがわかった。反作用を無視した場合にはダストサイズの増加に伴い衝突速度が上がるため、ある臨界速度に達すると破壊によってサイズ成長が頭打ちとなってしまうことがわかった。一方反作用を考慮した場合には、衝突速度の上昇が抑えられ(図1)、破壊で妨げられることなくダストが成長することがわかった。以上のような集積・成長は、臨界速度が3m/s以上で、また近年観測的に示唆されているような弱乱流円盤であれば起こることがわかった。さらに形成された集積領域では永年重力不安定性による微惑星形成が起こり得ることもわかった。この一連の時間発展は、衝突成長だけでは難しい円盤外側領域での微惑星形成を説明し得る重要な過程である。以上の成果をまとめた2編の論文(Tominaga et al. 2022a, 2022b)は The Astrophysical Journal で出版済みである。

以上の数値シミュレーションでは、質量を担うサイズのダストに注目したものであった。実際には何らかのサイズ分布が期待されるため、その影響を調べることは必須である。そこで本研究課題期間中にサイズ分布の時間進化を解くコードの開発にも取り組んだ。Coagulation instabilityの数値計算では移流を精度良く解く必要があるため、4次精度風上差分法(Yamamoto & Daiguji 1993)を実装した。数値実験の結果、長波長モードに対して揺らぎの僅かな成長を見ることができた。一方短波長モードはサイズ分布の分散の効果によって安定化されることがわかった。この振る舞いは単純化した理論モデルを用いた線形解析で定性的に確かめることができた。

(2) 永年重力不安定性の多次元線形解析

研究(1)によって、永年重力不安定性が成長し微惑星が形成され得る領域が Coagulation instabilityの発展の末にできることがわかった。永年重力不安定性は、ダストがガスと角運動量を交換しながら自己重力的に集まる現象である。またこれは自己重力的に安定な円盤であっても起こり、ガスとの相互作用がなくとも起こるダスト層の自己重力不安定性とは独立したモードである。従来この現象は、鉛直構造を無視した方程式系に基づく線形解析や数値シミュレーションで調べられてきた。一方、Coagulation instabilityで形成されるダスト集積領域では、ダストは効率的に沈殿するため、ガスに対して非常に薄いダスト層が形成される。また近年の高解像度電波観測によって薄いダスト円盤が観測されているため(e.g., Pinte et al. 2016; Villenave et al. 2022), ガス円盤とダスト円盤で大きく異なる鉛直構造を考慮することは必須である。

本研究では、そうした鉛直構造の中で永年重力不安定性がどのように成長するのかを調べるために、多次元線形解析を行った。この解析では軸対称性と動径方向の局所性を仮定しつつ、鉛直方向にはグローバルな構造を考慮して線形摂動に対する連立常微分方程式を導き、その固有値を数値的に求めた。その結果、永年重力不安定性に対応するモードを発見することができた。鉛直構造を無視した従来の解析結果と比べて成長率は低い(図2)、ダストの運動(固有関数)は類似していることがわかった。一方、ガスの運動には顕著な違いがあり、赤道面からガス円盤表面にわたる循環運動が現れることがわかった。このことは、ダスト層上空のガスも永年重力不安定性の発展に重要で

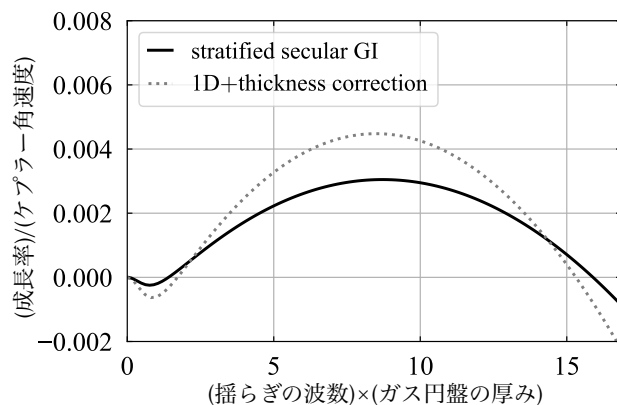


図2: 1次元及び多次元解析により得られた永年重力不安定性の分散関係の例 (Tominaga et al. 2023の図を改変)

あることを意味している。実際、それらの運動を無視して単なる外圧として扱ってしまうと、永年重力不安定性が現れなくなることがわかった。

また、パラメータ探査を行うことで永年重力不安定性の発動条件を経験的に求めた。その結果、従来の解析で求められていた条件式でおおよそ再現できることがわかった。これをもとに発動条件をダスト円盤質量に対する条件式に書き直し、観測されている円盤(Ansdell et al. 2018; Long et al. 2019)との比較を行った。その結果、Class II 円盤のうち比較的重い円盤や、より若い円盤では永年重力不安定性が起こるほど十分な量のダストがあることがわかった。この研究成果をまとめた論文(Tominaga et al. 2023)は The Astrophysical Journal に出版済みである。

(3) ストリーミング不安定性がダスト成長に与える影響

研究 (1), (2) で注目した不安定現象は、最大成長波長がおおよそガス円盤の厚み程度のモードであった。一方、より小さいスケールで起こるストリーミング不安定性という現象も存在し(e. g., Youdin & Goodman 2005), 微惑星形成機構の候補として世界的に注目されている(e. g., Simon et al. 2022)。これらは空間スケールが桁で異なるため、個別に調べる必要がある。

ストリーミング不安定性が円盤内で起こると、乱流的な流れ場が発生しダストが集積される。さらに十分な量のダストがあれば、重力的に不安定な重いダストクランプが形成されるほど強力な集積が起こることが知られており、ダストクランプが重力崩壊して微惑星が形成されると期待されている(e. g., Johansen et al. 2007)。この集積効率はダストのサイズに依存しており、ガス抵抗による制動時間がケプラー周期程度になる比較的大きいダストが最も集積されることがわかっている(e. g., Johansen & Youdin 2007; Bai & Stone 2010)。しかし、その大きさまでダストがどのように成長するのかは未解明である。

本研究では、ストリーミング不安定性による乱流中でダストが成長する可能性を検討した。先行研究では衝突成長時間の見積もりは行われていたが(Johansen et al. 2007, Supplementary Information), それが強力な集積よりも速く起こるかどうかは不明であった。そこで本研究ではまず、2つの先行研究(Bai & Stone 2010; Schreiber & Klahr 2018)に基づいた衝突速度モデルを用いて衝突時間を見積もり、最新の高解像度シミュレーションの研究(Li & Youdin 2021)で報告されている「重力不安定なダストクランプが形成される時間」と比較することで、強力な集積が起こる前にダストが成長するかどうかを検討した。その結果、従来仮定されていたダスト密度やダストサイズの範囲内で衝突成長が優勢になるパラメータ領域があることがわかった。また強力な集積と衝突成長が同程度の時間で進行する共発展線が存在し得ることがわかった(図 3)。その進化は先行研究で示唆されていた「衝突成長と集積の間のフィードバック」により実現されると期待できる(Bai & Stone 2010)。以上の内容をまとめた論文(Tominaga & Tanaka 2023)は The Astrophysical Journal に出版済みである。

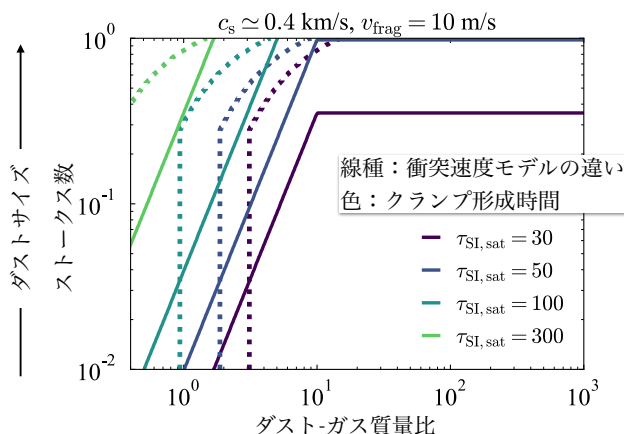


図3: クランプ形成と衝突成長の共発展線。右下の領域で衝突成長が優勢。(Tominaga & Tanaka 2023の図を改変)

以上の見積もりからダストの衝突成長が集積中に進むことが期待されたため、本研究課題期間中にストリーミング不安定性の数値シミュレーションを行い衝突率を測定した。上記の見積もりとの違いは、ダストの軌跡に基づいて高密度・低密度領域間をダストが移動することを考慮した点である。解析の結果、ケプラー周期の数倍~10倍程度でダストが成長し得ることがわかった。これは衝突成長がやはり速く進むことを示唆しており、ダスト成長と集積の相乗効果の重要性を示す成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tominaga Ryosuke T., Inutsuka Shu-ichiro, Takahashi Sanemichi Z.	4. 巻 953
2. 論文標題 On Secular Gravitational Instability in Vertically Stratified Disks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 60 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace043	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 Tominaga Ryosuke T., Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 937
2. 論文標題 Nonlinear Outcome of Coagulation Instability in Protoplanetary Disks. I. First Numerical Study of Accelerated Dust Growth and Dust Concentration at Outer Radii	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 21 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac82b4	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, 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 Tominaga Ryosuke T., Inutsuka Shu-ichiro, Kobayashi Hiroshi	4. 巻 923
2. 論文標題 Coagulation Instability in Protoplanetary Disks: A Novel Mechanism Connecting Collisional Growth and Hydrodynamical Clumping of Dust Particles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 34 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac173a	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 -

[学会発表] 計23件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 R. Tominaga, H. Tanaka, H. Kobayashi, S. Inutsuka
2. 発表標題 A New Instability Driven by Dust Coagulation in Protoplanetary Disks
3. 学会等名 Extreme Solar Systems V (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富永遼佑, 田中秀和
2. 発表標題 ストリーミング不安定性による乱流中のダスト成長
3. 学会等名 惑星形成討論会
4. 発表年 2024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 新学術領域「星・惑星形成」2023年度大研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永遼佑, 田中秀和
2. 発表標題 原始惑星系円盤の不安定性とダスト成長の共発展
3. 学会等名 研究会「星・惑星形成：これまでの20年とこれから」
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秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永遼佑, 犬塚修一郎, 高橋実道
2. 発表標題 原始惑星系円盤の鉛直構造を考慮した永年重力不安定性の線形解析
3. 学会等名 JpGU 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. T. Tominaga, H. Tanaka, H. Kobayashi, S. Z. Takahashi, S. Inutsuka
2. 発表標題 Dust growth toward planetesimals via coagulation instability and secular gravitational instability in protoplanetary disks
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. T. Tominaga, H. Tanaka, H. Kobayashi, S. Inutsuka
2. 発表標題 Dust transport and outer planetesimal formation via dust-growth-driven instability in protoplanetary disks
3. 学会等名 Symposium on Next Generation Astrochemistry (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. T. Tominaga, H. Tanaka, H. Kobayashi, S. Inutsuka
2. 発表標題 Numerical studies of a new instability driven by dust growth in protoplanetary disks
3. 学会等名 The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. T. Tominaga, H. Tanaka, H. Kobayashi, S. Inutsuka
2. 発表標題 Coagulation instability and planetesimal formation in protoplanetary disks
3. 学会等名 NCTS-ASIAA Workshop: Stars, Planets, and Formosa (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富永遼佑, 犬塚修一郎, 高橋実道
2. 発表標題 原始惑星系円盤の鉛直構造を考慮した永年重力不安定性の線形解析
3. 学会等名 日本天文学会2023春季年会
4. 発表年 2023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 原始惑星系円盤におけるダスト駆動不安定性の観測的検証に向けたモデル化
3. 学会等名 日本天文学会2023春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永遼佑, 犬塚修一郎, 高橋実道
2. 発表標題 永年重力不安定性の多次元解析
3. 学会等名 惑星形成討論会2023春
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永遼佑, 犬塚修一郎
2. 発表標題 原始惑星系円盤の鉛直構造を考慮した永年重力不安定性の線形解析
3. 学会等名 第35回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2022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 ダスト成長駆動の不安定性による原始惑星系円盤での微惑星形成
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Tominaga, Shu-ichiro Inutsuka, Hiroshi Kobayashi, Sanemichi Z. Takahashi
2. 発表標題 Toward Understanding Planetesimal Formation in Protoplanetary Disks I: A Bridge between Dust Growth and Ring-Forming Instabilities
3. 学会等名 Planet-forming Disks: From Surveys to Answers (国際学会)
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秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富永遼佑, 小林浩, 犬塚修一郎
2. 発表標題 ダスト成長が駆動する原始惑星系円盤の不安定性の数値シミュレーション
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の数値シミュレーション: 衝突破壊と濃集によるフィードバックの影響
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
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 ガス成長を考慮した原始惑星系円盤の安定性解析
3. 学会等名 2021年 星・惑星形成大研究会
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 ガス成長・破壊を伴う原始惑星系円盤の不安定性によるガス濃集
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 富永遼佑, 田中秀和, 小林浩, 犬塚修一郎
2. 発表標題 ガス成長が駆動する原始惑星系円盤の不安定性
3. 学会等名 新学術大研究会
4. 発表年 2022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 原始惑星系円盤におけるガス成長が駆動する不安定性とガス濃集
3. 学会等名 惑星形成討論会2022春
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

RIKEN Research Highlight https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20240227_1/index.html https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20220318_1/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
---------	---------