

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03926

研究課題名（和文）原始惑星系円盤の多重ダストリングの雪線起源説：系統的予言と惑星形成論への展開

研究課題名（英文）Snow lines at the origin of multiple dust rings in protoplanetary disks

研究代表者

奥住 聡（Okuzumi, Satoshi）

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：60704533

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）：電波望遠鏡ALMAによる円盤の高分解能観測により、惑星形成の現場である原始惑星系円盤においてダストがリング状に分布していることが明らかになった。このようなダストリングは、氷が昇華する軌道（雪線）において形成される可能性が理論的に指摘されている。本研究では、雪線位置の予言のために必要な円盤温度分布の正確な計算モデルを開発し、さらに雪線上で形成されるダストリングが惑星形成につながる可能性を検討した。その結果、円盤の温度分布の不安定性によって雪線はさまざまな軌道に形成されうること、雪線での微惑星形成が起こるためには円盤内のダストが短い時間で中心星方向に流れる必要があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始惑星系円盤は若い星の周囲に存在するガスと固体（ダスト）の円盤である。ダストは固体天体の究極の材料であり、これが円盤の中でどのように集まるかを明らかにすることは地球の形成の解明にとって必要不可欠な課題である。また、雪線の位置を正確に理解することは、地球のような岩石惑星がどこで誕生するかを解明のためにも重要である。本研究により、雪線は円盤内を大規模に移動し、雪線由来のダストリングもさまざまな軌道に形成されうることが明らかになった。ただし、雪線上のダストリングが固体天体を形成する条件は厳しく、雪線が惑星のふるさとであるかどうかは慎重な議論が必要であることもわかった。

研究成果の概要（英文）：High-resolution observations of disks by the ALMA radio telescope have revealed that dust rings are distributed in protoplanetary disks. Some models suggest that such dust rings may form around snow lines, where volatiles sublime. In this study, we developed an accurate model for the disk temperature distribution needed for accurate prediction of the location of the snow line. We further examined the possibility that dust rings formed around snow lines may lead to planet formation. We found that snow lines can be everywhere in disks due to the instability of the disk temperature distribution. We also found that dust rings forming around snow lines can produce planetesimals when the radial inward flux of dust in the disk is high.

研究分野：理論天文学

キーワード：原始惑星系円盤 惑星形成

1. 研究開始当初の背景

原始惑星系円盤は、若い星の周囲に存在するガスとダストの円盤である。円盤のダストは固体惑星の究極的な原材料であり、その基本的性質と進化を理解することは惑星形成の始まりを明らかにするうえで決定的に重要である。2015年以降、電波望遠鏡 ALMA による円盤の高分解能観測により、多くの原始惑星系円盤のダストがリング状に分布していることが明らかになった。リング構造が太陽系外惑星と同様に「ありふれた存在」であることが明らかになってきたいま、「ダストリングは惑星形成とどのような関係あるのか?」という問いを解明することの重要性が急速に高まっている。

円盤ダストリング構造の起源については、惑星起源説をはじめとするさまざまな説が提唱されている。本研究ではその1つである「雪線起源説」に焦点を当てる。雪線とは、ダストに含まれる揮発性物質 (H_2O , CO , CO_2 など) の氷が昇華し始める軌道のことである。雪線付近では、氷の昇華、再凝縮、焼結によってダストの成長の仕方が変化し、ダストリングが形成される可能性があることか近年の理論研究から示されている。しかし、雪線の位置は円盤温度構造に依存し、これをダスト進化と整合的に予言する方法論は確立していなかった。また、仮に雪線上にダストリングが形成されるとしても、それが惑星形成に対して本質的な役割を果たすのかどうかは明らかでなかった。

2. 研究の目的

本研究の大きな目的は以下の2つである。

- 円盤の温度分布および雪線の位置をダスト進化 (成長・移動) と整合的に予言するための理論的基礎を確立する
- 雪線でのダストリング形成と惑星形成との関係を理論的に明らかにする

3. 研究の方法

(1) ダストと円盤温度の同時進化の計算を可能にする数値計算モデルの開発

各分子種の雪線の配置は、円盤の温度分布に非常に強く依存する。さまざまな多重リング円盤の温度構造が正確に推定可能になれば、雪線起源リングの観測的な特定が大きく前進する。一般に原始惑星系円盤は、中心星の放射や内部熱源によって加熱され、放射によって冷却する。重要なことに、中心星の放射を吸収し、円盤内の熱を放射によって逃すのは、円盤の質量の大部分を占めるガスではなく、微小なダスト粒子の役割である。よって、円盤温度構造および雪線位置を正確に予言するためには、ダスト成長と円盤温度進化を整合的に取り扱うことが必須である。本研究では、このような計算を可能にする数値計算手法の開発に取り組んだ。

(2) 磁場とガスの相互作用による円盤内部加熱を考慮した円盤温度進化モデルの構築

中心星に比較的近い領域の深部の温度は中心星による放射だけでなく、円盤内部からの発熱量にも依存する。内部発熱の効率によっては、 H_2O 雪線の位置は大きく変化しうる (Oka et al. 2011)。本研究では、 H_2O 雪線の位置とその進化を正確に理解するため、磁場とガスの相互作用による円盤内部加熱を考慮した円盤温度進化モデルを構築した。円盤を貫く磁場と円盤中の電離ガスが相互作用すると、磁気流体力学の効果によりジュール加熱が発生する。これは乱流的でない原始惑星系円盤の内部発熱メカニズムの最有力候補と考えられている。本研究では、出版済みの円盤磁気流体シミュレーションの結果 (Mori et al. 2019) に基づいて、ジュール加熱率の空間分布を解析モデル化し、磁気流体シミュレーションをすることなくジュール加熱が円盤温度の長期進化に与える影響を調べることを可能にした。ジュール加熱率の空間分布は電離度分布に依存するが、その電離度分布は帯電する微小なダストの量に依存する。本研究のモデルでは、帯電ダストを含めた円盤電離モデルを用いて電離度分布を決定した。本研究は、東北大学の森昇志氏、久留米大学の國友正信氏、精華大学の Xuening Bai 氏、東京工業大学の近藤克氏と共同して行った。奥住は特に円盤モデルの定式化と結果の解釈を担当した。

(3) 雪線でのダストリング形成を経由した惑星形成の検討

微惑星とは、惑星の種になったと考えられている km サイズの固体小天体である。その形成機構をめぐっては、ダスト粒子の衝突成長によるとする説と、高密度のダストの群れの重力不安定 (重力収縮) によるとする説がある。ダストリングはダストが集中して存在する領域であり、重力

不安定を経て微惑星を形成する可能性がある。本研究では、雪線がつくるダストリングに焦点を当て、これが微惑星形成へとつながる可能性を検討した。雪線前後での微惑星形成の検討は JAXA の兵頭龍樹氏、地球生命研究所の井田茂氏らとの共同研究であり、雪線前後でのダストの移動、ダストからの氷の昇華、水蒸気の拡散とダストへの再凝縮などの効果を考慮した理論モデルを使用した。奥住は円盤乱流モデルの検討と数値計算結果の理論的な解釈に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) ダスト・円盤温度の同時進化計算モデル(大局 2 層モデル)の完成

本研究の最大の成果の 1 つは、ダストと円盤温度の進化を統合的に取り扱える数値計算モデルを完成させたことである。円盤の中でダストの分布が変化すると、円盤表面に中心星の光が当たらないような領域(影領域)ができる。従来広く用いられてきた簡便な円盤温度計算モデル(2 層モデル; Chiang & Goldreich 1997) は、影領域が形成されると破綻してしまう。より精密な、モンテカルロ法を用いた円盤温度計算であれば、影領域を取り扱うことができる。しかし、モンテカルロ法の数値計算コストは大きく、時々刻々の温度が必要となる円盤進化の計算には不向きである。本研究では、従来の簡便な 2 層モデルを、影領域も取り扱えるように拡張した。この新しい円盤温度計算モデルを「大局 2 層モデル」と呼ぶことにする。

大局 2 層モデルは従来の 2 層モデルに対して、以下の 2 つの主要な改善を行っている。まず、中心星の照射光が当たる面の熱放射(再放射光)が、円盤の垂直方向だけでなく半径方向にも伝わることを新しく考慮した(図 1)。これで、中心星の光が直接当たらない影領域の加熱率を求めることが可能になった。軸対称な円盤を仮定するかわりに、再放射光のフラックスの計算を部分的に解析的に処理し、数値計算を大幅に簡単化することに成功した。もう 1 つの改善点は、放射平衡の仮定(「加熱と冷却が釣り合っている」という仮定)を外し、円盤温度の時間変化を加熱率と冷却率の差し引きから決めるようにした点である。近年の研究(例えば Ueda, Flock, & Okuzumi 2019)でもすでに報告されているように、放射平衡を仮定して円盤の温度分布を数値的に計算しようとすると、温度分布に物理的でない(つまり数値計算由来の)振動が生じてしまう。放射平衡の仮定を外すことで、この物理的でない振動は除去可能である(Wu & Lithwick 2021)。大局 2 層モデルはモンテカルロ法を用いた温度計算モデルよりはるかに簡便であるが、後者を用いた温度計算の結果を 20% 以下の精度で再現することを確認した。

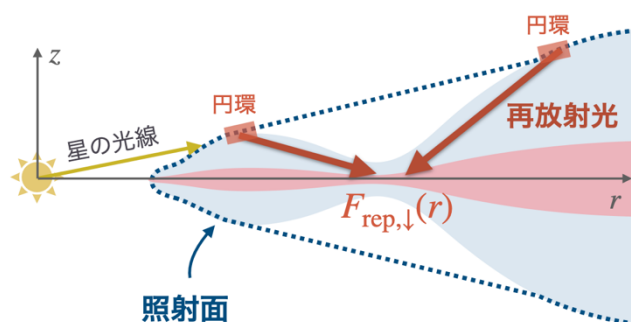


図 1: 大局 2 層モデルにおける放射の伝達を表す概念図 (Okuzumi et al. 2022 の図を改変)。青の領域は、軸対称な円盤の断面を表す。赤の領域は、円盤の中でも赤外線に対して不透明な領域である。

以上の成果をまとめた論文 (Okuzumi, Ueda, & Turner 2022) は、国際学術誌 Publications of the Astronomical Society of Japan に掲載予定である(2022 年 5 月掲載受理)。プレプリントは arXiv にて公開済みである(arXiv:2201.09241)。

(2) 円盤温度不安定性による雪線移動の振る舞いの解明

研究成果(1)の温度計算モデルを用いて、熱波不安定性 (thermal wave instability; Watanabe & Lin 2008) による雪線位置の移動を詳しく調べた。熱波不安定性とは、円盤の照射面(図 1 参照)の揺らぎが成長して同心円状の影領域をつくる現象で、赤道面の温度分布にも同心円状の起伏が形成される。この温度起伏は赤道面の方向に移動することから「熱波」と呼ばれる。熱波は雪線の周期的な移動を引き起こす(Ueda et al. 2021)ため、この不安定性の理解は雪線の位置を正しく予言するために必要不可欠である。研究成果(1)で開発した大局 2 層温度計算モデルは、放射平衡を仮定していないため、円盤温度の物理的な不安定性を取り扱うことが可能である。かつ、熱波不安定で必然的に形成される影領域を取り扱える、計算コストが小さいため長時間にわたる進化の計算が可能である、という利点も持つ。本研究では、大局 2 層モデルを用いて、熱波不安定の発現に伴う雪線の移動を初めて 100 万年にわたってシミュレートすることに成功した。

計算の結果、雪線の移動は単純な周期運動ではなく間欠的であることを明らかにした(図 2 左)。この傾向は、過去の熱波不安定性のシミュレーション(Ueda et al. 2021)では見られていなかった。これは、先行研究の計算では円盤の冷却効率について簡単化されたモデルを使用していたためである。より現実的な冷却モデルを使用した我々の計算は、雪線の移動周期についても先行研

究とは異なる結果を得ており、中心星から 10–100 天文単位 (au) の領域では振動周期は 1–10 万年程度、より内側の領域では 100 万年に及ぶことを示している (図 2)。雪線の移動振幅は大きく、半径の最大値は最小値の 4 倍にも及ぶ。以上のことから、雪線およびそれがつくるダストリングは、原始惑星系円盤のさまざまな場所に生じることが明らかになった。以上の成果も上記の印刷中の論文 (Okuzumi et al. 2022) で発表している。

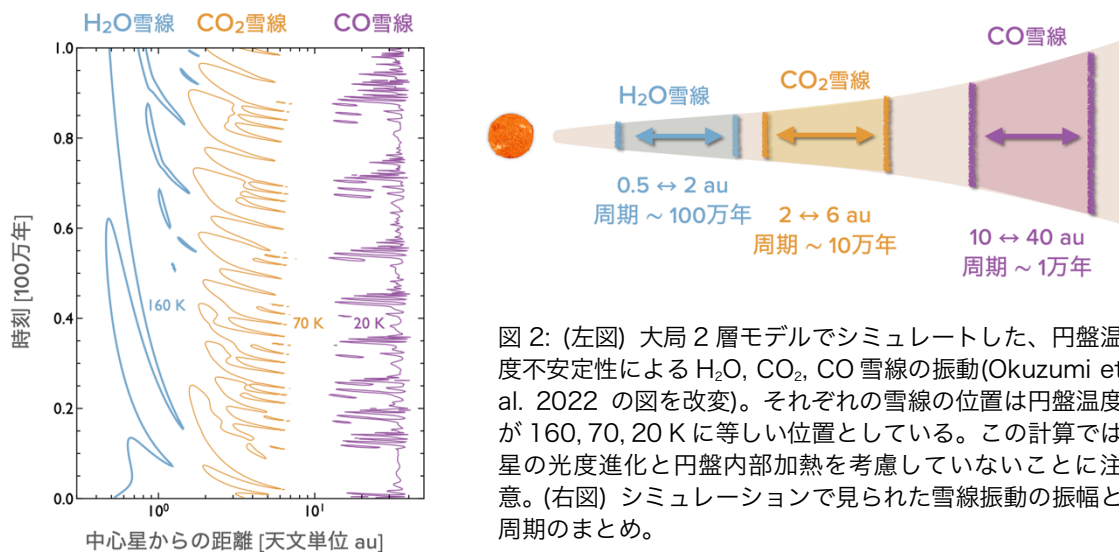


図 2: (左図) 大局 2 層モデルでシミュレートした、円盤温度不安定性による H₂O, CO₂, CO 雪線の振動 (Okuzumi et al. 2022 の図を改変)。それぞれの雪線の位置は円盤温度が 160, 70, 20 K に等しい位置としている。この計算では星の光度進化と円盤内部加熱を考慮していないことに注意。(右図) シミュレーションで見られた雪線振動の振幅と周期のまとめ。

(3) 磁気流体力学的に進化する円盤の非効率な内部加熱： H₂O 雪線半径は小さい

研究成果(2)の計算では、円盤の内部発熱を無視していた。実際には上述のとおり、H₂O 雪線付近では内部加熱が重要となりうる。ここでは、熱波不安定を無視するかわりに、研究方法(2)で述べた磁気流体力学的な加熱 (ジュール加熱) を考慮した円盤温度モデル (磁気流体円盤) を用いて、H₂O 雪線の進化を計算した。中心星の放射光度の時間変化も、星の進化計算の結果を用いて解析モデル化し導入した。比較のため、円盤の内部加熱率 (単位質量あたり) は一様であると仮定した、古典的な円盤モデル (一様粘性円盤) における H₂O 雪線の進化も計算した。

計算の結果、磁気流体円盤における H₂O 雪線は、従来の一様粘性円盤に比べて内側の軌道に位置することを明らかにした。例えば年齢 100 万年の円盤における H₂O 雪線の半径を比べてみると、一様粘性円盤では数 au であるのに対し、磁気流体円盤では 1 au を下回る (図 3)。この違いは、円盤の加熱率の分布の違いに起因する。物理に基づいた加熱率分布を採用している我々の磁気流体円盤では、発熱は円盤の表面近くに集中しており、結果として深部の温度が上がりにくいのである。ALMA で分解能できるスケールはごく一部の例外を除いて 1 au を上回るため、H₂O 雪線のつくるダストリングは現状の ALMA では観測できないと考えられる。ただし、ジュール加熱効率は円盤電離度を決定するダストのサイズ分布にも依存することも我々の計算から示されており、ダストの平均サイズが 10–100 μm 程度であれば H₂O 雪線のつくるダストリングは ALMA の観測可能範囲に入る。本研究の成果は、地球をはじめとする岩石惑星の形成条件に対しても制約を与える重要なものである。本研究の成果の一部は国際学術誌に発表済みであり (Mori, Okuzumi, Kunitomo, & Bai 2021)、さらに詳しい結果を同誌に投稿中である (Kondo, Okuzumi, & Mori, arXiv:2205.13511)。

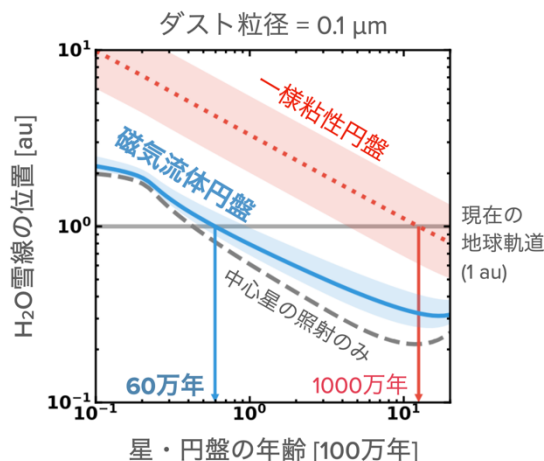


図 3: 磁気流体円盤と一様粘性円盤における H₂O 雪線の位置の進化 (Mori et al. 2021 の図を改変)。この計算ではダストの代表サイズは 0.1 μm であると仮定している。

(4) 雪線上における微惑星形成条件の特定

研究方法(3)で述べた雪線付近のダスト進化モデルを用いて、雪線上のダストリングが暴走的に成長する(微惑星が形成される)条件を、円盤乱流の強度とダストの円盤内降着率(単位時間あたりに円盤遠方から雪線へ流れる質量)の関数として明らかにした(Hyodo et al. 2021)。全体的に、ダストの降着率がガスの降着率の10%を超えると雪線ダストリングが暴走的に成長することがわかった。本結果はH₂O雪線に対して得られたものである。昇華・再凝縮する物質の量がより少ないCO₂雪線、CO雪線では、ダストリングの暴走成長のために必要なダスト・ガス降着率比はさらに大きくなると予想される。

雪線上での微惑星形成が要求するダスト降着率が高いため、これが現実的に起こりうるかどうかについてはより慎重な検討が必要である。円盤内のダストの総量には限りがあるため、ダスト降着率が高い状況は円盤ダストの寿命が短い状況に相当する。より具体的には、ダスト・ガス降着率比が0.1以上という状況では、円盤ダストの寿命は100万年を大きく下回る可能性がある。しかし、ALMAの観測によると、年齢が100万年を超える円盤にも多くのダストが残留している。観測と統合的な範囲内で雪線上での微惑星形成が起こるかどうかを判断するためには、円盤におけるダストの大局的な輸送と雪線前後でのダストの局所的な進化の両方を考慮したシミュレーションが必要である。そのようなシミュレーションコードの開発は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ohashi, S., Kobayashi, H., Nakatani, R., Okuzumi, S., Tanaka, H., Murakawa, K., Zhang, Y., Liu, H. B., & Sakai, N.	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 article id.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 Hyodo, R., Guillot, T., Ida, S., Okuzumi, S., & Youdin, A. N.	4. 巻 646
2. 論文標題 Planetesimal formation around the snow line. II. Dust or pebbles?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 article id.A14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202039894	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
1. 著者名 Ida, S., Guillot, T., Hyodo, R., Okuzumi, S., & Youdin, A. N.	4. 巻 646
2. 論文標題 Planetesimal formation around the snow line. I. Monte Carlo simulations of silicate dust pile-up in a turbulent disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 article id.A13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202039705	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
1. 著者名 Okuya, A., Okuzumi, S., Ohno, K., & Hirano, T.	4. 巻 901
2. 論文標題 Constraining the Bulk Composition of Disintegrating Exoplanets Using Combined Transmission Spectra from JWST and SPICA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 article id.171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abb088	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 Ohno, K., Okuzumi, S., & Tazaki, R.	4. 巻 891
2. 論文標題 Clouds of Fluffy Aggregates: How They Form in Exoplanetary Atmospheres and Influence Transmission Spectra	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab44bd	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 Shibaike, Y., Ormel, C. W., Ida, S., Okuzumi, S., & Sasaki, T.	4. 巻 885
2. 論文標題 The Galilean Satellites Formed Slowly from Pebbles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab46a7	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

1. 著者名 Tazaki, R., Tanaka, H., Kataoka, A., Okuzumi, S., & Muto, T.	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
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 Hu, X., Zhu, Z., Okuzumi, S., Bai, X.-N., Wang, L., Tomida, K., & Stone, J. M.	4. 巻 885
2. 論文標題 Nonideal MHD Simulation of HL Tau Disk: Formation of Rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab44cb	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

1. 著者名 Tazaki, R., 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 Tsukagoshi, T., Muto, T., Nomura, H., Kawabe, R., Kanagawa, K. D., Okuzumi, S., Ida, S., Walsh, C., Millar, T. J., Takahashi, S. Z., Hashimoto, J., Uyama, T., & Tamura, M.	4. 巻 878
2. 論文標題 Discovery of An au-scale Excess in Millimeter Emission from the Protoplanetary Disk around TW Hya	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab224c	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

1. 著者名 Okuzumi, S., Mori, S., & Inutsuka, S.-. ichiro .	4. 巻 878
2. 論文標題 The Generalized Nonlinear Ohm's Law: How a Strong Electric Field Influences Nonideal MHD Effects in Dusty Protoplanetary Disks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2046	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 Okuzumi, S., & Tazaki, R.	4. 巻 878
2. 論文標題 Nonsticky Ice at the Origin of the Uniformly Polarized Submillimeter Emission from the HL Tau Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab204d	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 Homma, K. A., Okuzumi, S., Nakamoto, T., & Ueda, Y.	4. 巻 877
2. 論文標題 Rocky Planetesimal Formation Aided by Organics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1de0	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 Koga, S., Tsukamoto, Y., Okuzumi, S., & Machida, M. N.	4. 巻 484
2. 論文標題 Dependence of Hall coefficient on grain size and cosmic ray rate and implication for circumstellar disc formation	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 2119-2136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3524	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 Ida, S., Yamamura, T., & Okuzumi, S.	4. 巻 624
2. 論文標題 Water delivery by pebble accretion to rocky planets in habitable zones in evolving disks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201834556	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63件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 大橋聡史, 小林浩, 仲谷峻平, 奥住聡, 田中秀和, 村川幸史, Yichen Zhang, Hanyu Baobab Liu, 坂井南美
2. 発表標題 原始星円盤におけるガス成長前線によるリング形成
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥住聡, 百瀬宗武, 片岡章雅
2. 発表標題 ngVLA を用いたスノーライン前後の原始惑星系円盤構造の模擬観測
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原卓, 森中宏樹, 奥住聡, 梅村雅之
2. 発表標題 原始惑星系円盤の高レイノルズ数乱流中でのダスト成長
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚越崇, 野村英子, 川邊良平, 高橋実道, 武藤恭之, 金川和弘, 田村元秀, 奥住聡, 井田茂, Catherine Walsh, Tom Millar, 橋本淳, 鶴山太智
2. 発表標題 ALMA 多波長画像解析で探る TW Hya の原始惑星系円盤のスペクトル指数分布
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥住聡, 百瀬宗武, 片岡章雅
2. 発表標題 ngVLA と ALMA を用いた岩石惑星形成領域の温度構造の断層撮影
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福原優弥, 奥住聡, 小野智弘
2. 発表標題 原始惑星系円盤のダストと鉛直シア不安定性の共進化: 線形解析からの示唆
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎一成, 富田賢吾, 高棹真介, 奥住聡, 鈴木建
2. 発表標題 原始惑星系円盤における赤道面非対称な磁場構造の形成
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥住聡, 百瀬宗武, 片岡章雅
2. 発表標題 次世代電波望遠鏡 ngVLA でスノーラインを観る
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森昇志, 奥住聡, 國友正信, Bai Xuening
2. 発表標題 磁氣的に降着する原始惑星系円盤におけるスノーラインの移動: 地球型惑星の形成過程への示唆
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本間和明, 奥住聡
2. 発表標題 原始惑星系円盤におけるダストの紫外線被曝と有機物形成：乱流混合とアグリゲイト衝突破壊の重要性
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福原優弥, 奥住聡, 小野智弘
2. 発表標題 原始惑星系円盤における鉛直シア不安定性とダストの共進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塚越崇, 武藤恭之, 野村英子, 川邊良平, 金川和弘, 奥住聡, 井田茂, 高橋実道, 橋本淳, 鶴山太智, 田村元秀, Catherine Walsh, Tom J. Millar
2. 発表標題 高分解能多波長画像解析によるTWHyaの原始惑星系円盤のスペクトルインデックス動径分布の調査
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 植田高啓, 奥住聡, 荻原正博, 小久保英一郎
2. 発表標題 デッドゾーン内側境界での微惑星形成：太陽系地球型惑星形成への示唆
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤風音, 奥住聡, 黒澤耕介, 長谷川直
2. 発表標題 放出物カーテン内での粒子のクラスター形成: 解析モデルと室内実験・数値計算との比較
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Seki, Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Forming Earths and Super-Earths in Nascent Protostellar Disks
3. 学会等名 Exoplanets III (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ayaka Okuya, Satoshi Okuzumi, Kazumasa Ohno, Teruyuki Hirano
2. 発表標題 Constraining the bulk composition of disintegrating planets with JWST and SPICA transmission spectroscopy
3. 学会等名 Exoplanets III (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumasa Ohno, Satoshi Okuzumi, Ryo Tazaki
2. 発表標題 Exo-hail or Exo-snow? Microphysical modeling and synthetic observations of sub-Neptune clouds
3. 学会等名 Exoplanets III (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥住聡, 関航佑
2. 発表標題 Forming Super-Earths from Protostellar Phases
3. 学会等名 新学術領域「星惑星形成」2020年度大研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuaki Homma, Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 UV irradiation and organic synthesis on growing dust particles in protoplanetary disks
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 関航佑, 奥住聡
2. 発表標題 Super-Earth Formation in Nascent Protostellar Disks: Connecting ALMA Observations to Exoplanet Studies
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福原優弥, 奥住聡
2. 発表標題 原始惑星系円盤の鉛直シア不安定性に対するダスト進化の影響
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤風音, 奥住聡, 黒澤耕介, 長谷川直
2. 発表標題 数値計算と室内実験による放出物カーテン内でのパターン形成のモデル化
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥谷彩香, 大野和正, 平野照幸, 奥住聡
2. 発表標題 次世代宇宙望遠鏡によるダストテイル分光観測から探る系外解体惑星の内部組成
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塚越崇, 武藤恭之, 野村英子, 川邊良平, 金川和弘, 奥住聡, 井田茂, Walsh Catherine, Millar Tom, 高橋実道, 橋本淳, 鶴山大智, 田村元秀
2. 発表標題 高分解能多波長画像解析を用いたTWHyの原始惑星系円盤のスペクトルインデックス分布の調査
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥住聡
2. 発表標題 原始惑星系円盤の進化と固体惑星形成: 核心的「問い」の整理
3. 学会等名 惑星系形成若手研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥住聡
2. 発表標題 微惑星形成研究の現状とはやぶさ2プロジェクトへの期待
3. 学会等名 「惑星形成過程とはやぶさ2探査」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Growth and transport of dust, ice, and organics in the inner part of protoplanetary disks
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Dust growth in protoplanetary disks: the roles of organics and dry ice
3. 学会等名 Turbulence and Structure Formation in Protoplanetary Disks 2019: Observation, Theory, and Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Dust growth in protoplanetary disks: Are grains sticky or nonsticky?
3. 学会等名 Planet Formation Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Testing planet formation theories with the ngVLA
3. 学会等名 next generation VLA workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Okuzumi, Shu-ichiro Inutsuka, Shoji Mori
2. 発表標題 The nonlinear Ohm's law: How plasma heating changes the MHD of protoplanetary disks
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Growth and porosity evolution of protoplanetary dust particles
3. 学会等名 First solids and planetesimals: formation conditions and evolution (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥住 聡
2. 発表標題 惑星形成理論の課題
3. 学会等名 第32回理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦 孝之, 奥住 聡
2. 発表標題 うみへび座TW星周囲のギャップを持つ原始惑星系円盤でのダスト進化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奈良 悠冬, 奥住 聡, 黒川 宏之
2. 発表標題 ペブル集積による小惑星セレスへのアンモニア氷の供給
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 昇志, Xuening Bai, 奥住 聡
2. 発表標題 原始惑星系円盤の非効率な磁気降着加熱: スノーラインの進化への影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野 和正, 奥住 聡, 田崎 亮
2. 発表標題 Mineral clouds of fluffy aggregates: how they form in exoplanetary atmospheres and influence transmission spectra
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒澤 耕介, 岩澤 聖徳, 奥住 聡, 長谷川 直, 村主 崇行
2. 発表標題 天体衝突で発生する放出物カーテン中の電荷移動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 宏之, 桑原 歩, 奥住 聡
2. 発表標題 Icy pebble accretion onto terrestrial planets: the effect of gas flow
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田崎 亮, 田中 秀和, 武藤 恭之, 片岡 章雅, 奥住 聡
2. 発表標題 Probing dust aggregate structure in protoplanetary disks by millimeter-wave polarization
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚越 崇, 武藤 恭之, 野村 英子, 川邊 良平, 金川 和弘, 奥住 聡, 井田 茂, Catherine Walsh, Tom Millar, 高橋 実道, 橋本 淳, 鷗山 大智, 田村 元秀
2. 発表標題 TW Hyaの原始惑星系円盤に付随する局所的なサブミリ波超過の検出
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀駿大, 奥住聡
2. 発表標題 スパイラル構造を持つ自己重力円盤におけるダストの運動
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 大野和正, Xi Zhang, 田崎亮, 奥住聡
2. 発表標題 トリトン大気におけるヘイズ微物理モデリングとヘイズ生成率への示唆
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 塚本裕介, 奥住聡, 岩崎一成, 町田正博, 犬塚修一郎
2. 発表標題 星形成後期過程でのオーム散逸、両極性散逸の役割について
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 塚越崇, 野村英子, 川邊良平, 高橋実道, 武藤恭之, 金川和弘, 田村元秀, 奥住聡, 井田茂, Catherine Walsh, Tom J. Millar, 橋本淳, 鷗山太智
2. 発表標題 ALMA を用いた二周波観測による TW Hya の原始惑星系円盤のスペクトル・インデックス分布の調査
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 大野和正, 奥住聡, 田崎亮,
2. 発表標題 系外惑星大気中の雲形成における粒子サイズ・空隙率分布の共進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥谷彩香, 大野和正, 平野照幸, 奥住聡, SPICA サイエンス検討会 太陽系・系外惑星班
2. 発表標題 系外蒸発惑星のダストテイルの理論透過光スペクトル: 惑星組成の制約に向けて
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦孝之, 奥住聡, 塚越崇, 田崎亮
2. 発表標題 TW Hya 周囲の原始惑星系円盤におけるダスト付着度の制約
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井寛裕, 大坪貴文, 水木敏幸, 奥住聡, 奥谷彩香, 大野和正, 関根康人, 平野照幸, 藤井友香, 笠羽康正, 川島由依, 葵生川陽子, 小林仁美, 小林浩, 佐川英夫, 空華智子, 高橋葵, 前澤裕之, 松尾太郎, 藪田ひかる, SPICA チーム
2. 発表標題 SPICA サイエンス検討会「太陽系・系外惑星班」の活動報告
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥住聡, 植田高啓, Neal Turner
2. 発表標題 原始惑星系円盤のダストと温度構造の共進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥谷彩香, 大野和正, 平野照幸, 奥住聡, SPICA サイエンス検討会 太陽系・系外惑星班
2. 発表標題 SPICA を用いた解体惑星の分光観測から系外惑星組成に迫る
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 森昇志, 奥住聡, Xuening Bai, 相川祐理, 野津翔太, 中川貴雄, 野村英子, 本田充彦, SPICA サイエンス検討会惑星形成班
2. 発表標題 SPICA の水輝線観測が明らかにする原始惑星系円盤の熱・力学構造
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 奥住聡, 百瀬宗武, 片岡章雅
2. 発表標題 ngVLA でスノーラインを観る
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 岩崎一成, 富田賢吾, 高棹真介, 奥住聡, 鈴木建
2. 発表標題 原始惑星系円盤内側領域のデッドゾーン境界近傍におけるガスダイナミクス
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 Yuto Nara , Satoshi Okuzumi, Hiroyuki Kurokawa
2. 発表標題 Delivery of ammonia ice to Ceres by pebble accretion
3. 学会等名 The 12th meeting on Cosmic Dust (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Matsuura, Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Dust evolution in the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 The 12th meeting on Cosmic Dust (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuto Nara , Satoshi Okuzumi, Hiroyuki Kurokawa
2. 発表標題 Delivery of ammonia ice to Ceres by pebble accretion
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuaki A. Homma, Satoshi Okuzumi, Taishi Nakamoto, Yuta Ueda
2. 発表標題 Collisional growth of organic-mantled grains and formation of rocky planetesimals
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Matsuura, Satoshi Okuzumi
2. 発表標題 Constraints on the stickiness of icy aggregates in the protoplanetary disk around TW Hya
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Ohno, Satoshi Okuzumi, Ryo Tazaki
2. 発表標題 Clouds of fluffy mineral aggregates in warm mini-Neptunes
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Ohno, Satoshi Okuzumi, Ryo Tazaki
2. 発表標題 Clouds of Fluffy Aggregates in Exoplanetary Atmospheres
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Ohno, Satoshi Okuzumi, Ryo Tazaki
2. 発表標題 Clouds of Fluffy Aggregates: How They Form in Exoplanetary Atmospheres and Influence Transmission Spectra
3. 学会等名 Planet2/RESCEU Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

奥住聡 個人ウェブサイト http://www.geo.titech.ac.jp/~sokuzumi/

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	植田 高啓 (Ueda Takahiro)		

6. 研究組織（つづき）

	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	森 昇志 (Mori Shoji)		
研究協力者	國友 正信 (Kunitomo Masanobu)		

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			
中国	精華大学			
フランス	コートダジュール天文台			
中国	清華大学			
米国	Jet Propulsion Laboratory			