

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 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：2019～2021

課題番号：19K23469

研究課題名(和文) 輻射多流体計算を用いたより現実的な原始惑星系円盤内部進化モデルの構築

研究課題名(英文) Developing a realistic model of protoplanetary disk evolution with radiation hydrodynamics simulations

研究代表者

仲谷 峻平(Nakatani, Riouhei)

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：40846391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では惑星系の起源を解明することを目的に、惑星誕生の現場である原始星円盤・原始惑星系円盤の内部構造について理解する研究を理論・観測の両側面から行った。主な成果は以下のよう
にまとめられる。(1)観測的研究からこれまでで最も若い系で惑星形成の兆候を見られることを示した。(2)数値
シミュレーションを用いた研究により、起源が謎である天体について、その形成を説明できるモデルを初めて提
唱した。また、独自に開発したコードを国内外研究者に提供することで、惑星大気・分子雲・ミニハロー・ブラ
ックホールなど多岐にわたる天体についての研究発展にも貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまでの標準的な惑星形成論を覆すもの、また未解明問題の解明に向けての光明となるものである。
(1)の成果は、これまで標準理論で考えられていたよりもかなり早い段階で惑星形成が起こっていることを
示すもので、惑星形成論に修正を迫る結果である。(2)の成果は、長生きが可能な少し特異な性質を持つ円盤系
では、月のような衛星形成が抑制される可能性があるため、生命居住環境構築可能性に示唆を与える結果であ
る。(地球における月の形成は生命居住環境が形成する上で必須と考えられている。) (1)と(2)の成果は共に、
惑星形成論だけでなく生命誕生の謎を迫る上でも示唆に富んだ重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to understand the internal structures and the evolution of protostellar and protoplanetary disks, which are the birthplace of planets. I have conducted the researches from both of the observational and theoretical viewpoints. The main results are summarized as follows. First, we have detected an indicative of planet formation in a youngest-ever protostellar system. Second, in an independent theoretical research regarding so-called "gas-rich debris disks," which are the gas disks that are unexpectedly long-lived, we proposed a new model that can extend the lifetime of the disks. Our code has been distributed to other researchers worldwide and has been used in various topics of studies, such as molecular clouds, planetary atmosphere, minihalos, and blackholes.

研究分野：宇宙物理

キーワード：惑星形成 原始星円盤 原始惑星系円盤 デブリ円盤 輻射流体計算 電波観測 星形成

1. 研究開始当初の背景

2010年代、KeplerやTESS望遠鏡に代表される最新鋭観測機器による活躍で、太陽系外惑星関連の研究が大きく進展した。系外惑星は普遍的に存在し、多様な物理的性質を示すことがこれまでに分かっている。特に太陽系内惑星からは類推も及ばないような特性を持つ惑星も多数発見されており、これらの起源を解明することが現代天文学の重要課題の一つである。

惑星の起源を解明することは即ち、その形成・進化過程を理解することと問題を言い換えることができる。惑星系の大元を辿れば、その素は分子雲を構成するガスや固体微粒子(ダスト)である。分子雲の高密度領域が収縮し、原始星とそれを取り囲む円盤である原始星円盤が形成する。円盤は星へと降着し、やがて主降着期を終えると系のほとんどの質量は中心星に集中し、その周りを幾何学的に薄い静水圧平衡にある円盤(原始惑星系円盤)が囲むという形態になる。惑星はこの円盤内でダストが合体成長して形成していく。それと同時に円盤ガスが散逸し、今日に見るような惑星系が円盤の名残として残される。これが現在の惑星形成の標準的シナリオである。2010年代・2020年代はこの標準シナリオの妥当性を、アルマ望遠鏡やVLA望遠鏡による最新観測との比較によって直接的にテストできる時代にある。

2. 研究の目的

本研究は惑星の多様性の起源やその成り立ちを解明することを念頭に、惑星の誕生現場である星周円盤の形成と進化を明らかにする。特に円盤を構成するダストとガスそれぞれについて、内部構造の進化や物理化学的進化に着目した研究を行う。星惑星系形成過程の探究は、「第二の地球の存在」や「生命の起源」といった現代科学の根源的な問いに対しても豊富な示唆を与える点で意義深い。

3. 研究の方法

本研究では理論研究と観測研究を統合的に推進するために理論的・観測的研究手法の両方を用いた。具体的には、理論的手法は主に多次元輻射流体シミュレーションのことを指し、観測的手法はアルマ望遠鏡とVLA望遠鏡で得られた観測データの解析のことを指す。

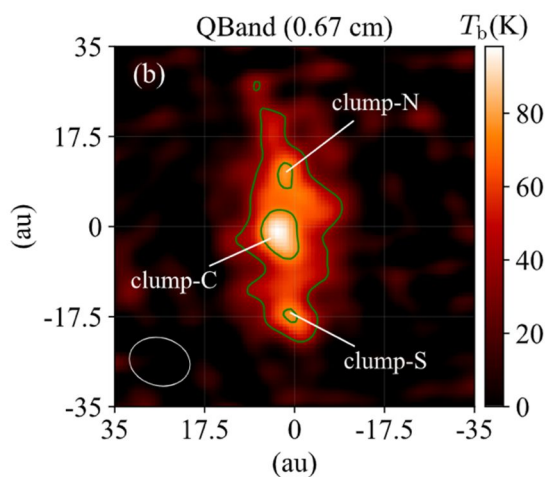
4. 研究成果

本研究により得られた成果を独立な研究ごとに箇条書きで以下にまとめる。それぞれ、連番の直後に各研究のショートタイトル、それ以降を研究成果の具体的記述とする。(1)は観測的研究、それ以外については理論的研究の成果になる。

(1) 「史上最も若い系において惑星形成の兆候を発見」

近年の電波望遠鏡による観測により、星惑星系形成の現場を鮮明に直接捉えることができるようになった。その結果、これまでの標準的星惑星系形成シナリオによる予言と整合的な観測結果と非整合的な観測結果の両方が得られた。これら非整合的な観測事実は現在の星惑星系形成理論に突きつけられた解明すべき課題として残っている。その中の一つに惑星の形成時期についての課題がある。これまでの標準理論においては、数値計算等の結果により、惑星形成は形成が始まった後の数百万年後に起こるとされてきた。一方で、2010年代に入り惑星発見数が増え、また原始惑星系円盤質量の観測サンプル数が増えてくると、見つかった惑星に含まれる固体質量より原始惑星系円盤に含まれる固体質量の方が少ないという事実が判明してきた。円盤が惑星の母天体であることからすると、この事実は惑星を作るのに材料が不足していることを意味している。2010年代後半になるとさらに観測研究が進展し、原始惑星系円盤にリングやギャップなど内部構造が普遍的に存在することが明らかになった。これらの構造は(直接は見えない)惑星が作り出したものという考えが主流である。(ただし、反対意見も存在することには留意されたい。)また逆に、これらの内部構造の存在は形成途中にある惑星の存在を示唆するものであるとも考えられている。

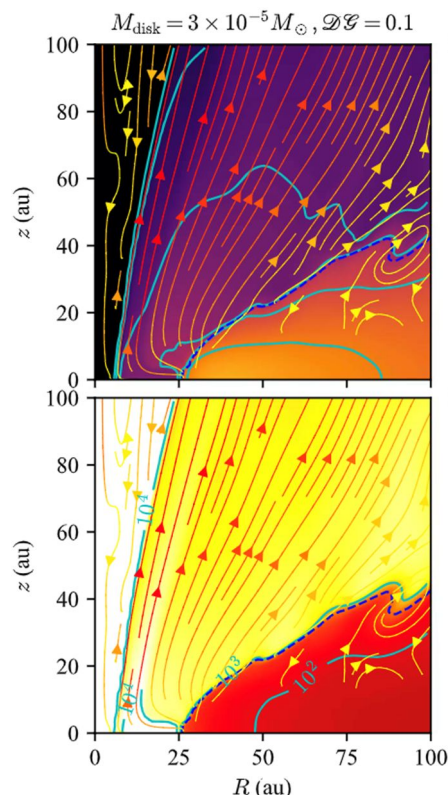
これまでにこういった内部構造が見つかっている系は、ほとんど進化後期段階にある原始惑星系円盤で、進化前期段階にある原始星円盤での発見は数例しかなかった。この若い円盤で惑星形成の兆候が見られることは標準シナリオと反している結果であるため、星惑星系形成



過程を理解する上で大変意義深い結果である。本研究より以前にも内部構造を持つ原始星円盤が見つかったが、それらの年齢はどれもおよそ数十万歳と見積もられている。その中で、本研究で対象にした円盤の年齢はそれよりもずっと若くおよそ 10 万歳以下と推定されている。アルマ望遠鏡と VLA 望遠鏡のデータ解析の結果、上図のような構造が見つかった。上図で clump-N と clump-S で示される構造は、円盤内部に存在する固体リングを横向きに見ている構造であると結論づけた。本研究結果は、標準シナリオが予言するよりもずっと若い段階で惑星形成が起こっていることを示すものであり、標準理解にアップデートを迫る重要な結果である。本研究成果は、Nakatani et al. (2020)として The Astrophysical Journal Letters で出版された。[1]

(2) 「ガスリッチデブリ円盤の起源について新説提唱」

原始惑星系円盤で惑星が形成した後、ガスが散逸するとデブリ円盤と呼ばれる微惑星同士の衝突により生成された微粒子からなる二次的なダスト円盤が形成すると考えられている。実際にデブリ円盤は遠赤外線観測やミリ波観測などによりその存在が直接的に確認されている。古典的な惑星形成論では、デブリ円盤はガスを保持しない固体円盤と解釈されてきたが、特に 2010 年代の観測によってガスを保持するデブリ円盤、通称ガスリッチデブリ円盤の存在が確認されるようになった。年を追うごとにその存在の確認例が増えていき、現在では 20 余のガスリッチデブリ円盤が見ついている。古典的標準シナリオでは、原始惑星系円盤がガスを保持できるのはせいぜい数百万年程度と言われてきたので、ガスリッチデブリ円盤のガスの存在は当分野の研究者の頭を悩ませた。このガスの存在をどう説明するか、それについてこれまでに 2 つの説が提唱されている。一つは (i) 生き残りガス説で、これは原始惑星系円盤のガスが何らかの理由でたまたま生き残ったとする説である。もう一つが (ii) 二次ガス説で、デブリ円盤の固体微粒子と同じくガスも微惑星の衝突により生まれたとする説である。上記のようにこれまでの理論研究でガスが生き残る時間が数百万年と示されてきたので、ガスリッチデブリ円盤のような数千万歳までガスが残る理由を説明できず、ほとんど (i) の説は棄却



されている状況にあった。一方でこれまでの主流は (ii) の説であったが、整合的に起源を説明できるガスリッチデブリ円盤は数例しかないという問題点もあった。その中で我々は、これまで事実上棄却されてきた (i) の説を再検証することにした。こうすることにしたのは、これまでの研究で行われた円盤ガス散逸時間の見積りが、熱化学計算や流体計算を簡略した手法により導かれたもので、その正確性に疑問を抱くようになったからである。本研究では輻射輸送、熱化学反応、流体計算の全てを自己整合的に解くコードを独自に開発し、円盤ガス散逸過程の輻射流体シミュレーションを遂行し、円盤ガス散逸時間を正確に見積もった。右上の図がそのシミュレーションのスナップショットの例である。(リング状の円盤の断面を示している。上が密度分布、下が温度分布で矢印が速度場を表す。円盤部からガスが流出している様子がわかる。) 本研究の詳細なシミュレーションの結果、円盤ガス散逸時間が数千万年程度となることを示した。これはガスリッチデブリ円盤の年齢までガスが生き残ることができることを示している。したがって、簡略化を解除した詳細な計算手法を用いると、これまで棄却されていた (i) の説が実はガスリッチデブリ円盤の起源を説明し得る説であるということが判明した。しかも、我々の計算結果では比較的紫外線や X 線放射率が弱いとされる A 型星周りでガス円盤寿命が長くなる傾向があることが分かり、これはこれまで見つかったガスリッチデブリ円盤がほとんど A 型星周りにあるという観測的統計と整合的な結果である。本研究成果は Nakatani et al. (2021)として The Astrophysical Journal に掲載されている。[2]

(3) その他：「開発したコードの他研究・他分野への応用」

開発した輻射流体コードは国内外の研究者に提供され、上記の円盤進化についての研究のみならず、惑星大気散逸[3,4]、分子雲蒸発[5]、遠方ミニハロー散逸[6]、大質量ブラックホール降着[7]など多岐に渡る研究に応用され、多分野において成果を産んできた。

<引用文献>

[1] Nakatani et al., "Substructure Formation in a Protostellar Disk of L1527 IRS," *The Astrophysical Journal Letters*, 895, L2, 2020

[2] Nakatani et al. "Photoevaporation of Grain-depleted Protoplanetary Disks around Intermediate-mass Stars: Investigating the Possibility of Gas-rich Debris Disks as Protoplanetary Remnants," *The Astrophysical Journal*, 915, 90, 2021

[3] Mitani et al. "Atmospheric Escape of Close-in Giants around Hot Stars: Far-Ultraviolet Radiation and Photoelectric Heating Effect," arXiv:2005.08676, 2020

[4] Mitani et al. "Stellar wind effect on the atmospheric escape of hot Jupiters and their Ly α and H α transits," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512, 855, 2022

[5] Nakatani et al. "Photoevaporation of Molecular Gas Clumps Illuminated by External Massive Stars: Clump Lifetimes and Metallicity Dependence," *The Astrophysical Journal*, 883, 127, 2019

[6] Nakatani et al. "Photoevaporation of Minihalos During Cosmic Reionization: Primordial and Metal-enriched Halos," *The Astrophysical Journal*, 905, 151, 2020

[7] Inayoshi et al. "Rapid Growth of Seed Black Holes during Early Bulge Formation," *The Astrophysical Journal*, 927, 237, 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakatani Riouhei, Liu Haiyu Baobab, Ohashi Satoshi, Zhang Yichen, Hanawa Tomoyuki, Chandler Claire, Oya Yoko, Sakai Nami	4. 巻 895
2. 論文標題 Substructure Formation in a Protostellar Disk of L1527 IRS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab8eaa	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 Bianchi E, Chandler C J, Ceccarelli C, et al.	4. 巻 498
2. 論文標題 FAUST I. The hot corino at the heart of the prototypical Class I protostar L1551 IRS5	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L87 ~ L92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slaa130	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 Flores-Rivera Lizxandra, Flock Mario, Nakatani Riouhei	4. 巻 644
2. 論文標題 Hydrodynamical simulations of protoplanetary disks including irradiation of stellar photons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A50 ~ A50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202039294	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 Nakatani Riouhei, Fialkov Anastasia, Yoshida Naoki	4. 巻 905
2. 論文標題 Photoevaporation of Minihalos During Cosmic Reionization: Primordial and Metal-enriched Halos	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 151 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc5b4	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 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 Okoda Yuki, Oya Yoko, Francis Logan, et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 FAUST. II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398-3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abddb1	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 Komaki Ayano, Nakatani Riouhei, Yoshida Naoki	4. 巻 910
2. 論文標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Protoplanetary Disks: Stellar Mass Dependence of the Disk Photoevaporation Rate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 51 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe2af	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 Nakatani Riouhei, Yoshida Naoki	4. 巻 883
2. 論文標題 Photoevaporation of Molecular Gas Clumps Illuminated by External Massive Stars: Clump Lifetimes and Metallicity Dependence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 127 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab380a	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 Nakatani Riouhei, Takasao Shinsuke	4. 巻 930
2. 論文標題 Anatomy of Photoevaporation Base: Linking the Property of the Launched Wind to Irradiation Flux	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 124 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac63a0	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 Nakatani Riouhei, Kobayashi Hiroshi, Kuiper Rolf, Nomura Hideko, Aikawa Yuri	4. 巻 915
2. 論文標題 Photoevaporation of Grain-depleted Protoplanetary Disks around Intermediate-mass Stars: Investigating the Possibility of Gas-rich Debris Disks as Protoplanetary Remnants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 90 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0137	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 Mitani Hiroto, Nakatani Riouhei, Yoshida Naoki	4. 巻 512
2. 論文標題 Stellar wind effect on the atmospheric escape of hot Jupiters and their Ly α and H α transits	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 855 ~ 860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac556	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 Inayoshi Kohei, Nakatani Riouhei, Toyouchi Daisuke, Hosokawa Takashi, Kuiper Rolf, Onoue Masafusa	4. 巻 927
2. 論文標題 Rapid Growth of Seed Black Holes during Early Bulge Formation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 237 ~ 237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4751	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

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Riouhei Nakatani
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporating Disks: Dependencies on Disk Properties
3. 学会等名 International Conference of the Research Unit "Planet Formation Witnesses and Probes: Transition Disks" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Riouhei Nakatani
2. 発表標題 Dust Substructure in a Protostellar Disk
3. 学会等名 UT Joint Workshop on Protoplanetary Disks and Planets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲谷峻平、小林浩、Rolf Kuiper、野村英子、相川祐理
2. 発表標題 輻射流体シミュレーションを用いたガスリッチデブリ円盤の始原ガス説の検証
3. 学会等名 天文学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲谷峻平、小林浩、Rolf Kuiper、野村英子、相川祐理
2. 発表標題 ダスト枯渇した原始惑星系円盤の光蒸発: ガスリッチ・デブリ円盤形成との関連性
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 仲谷峻平、小林浩、Rolf Kuiper、野村英子、相川祐理
2. 発表標題 進化後期段階における原始惑星系円盤の光蒸発
3. 学会等名 惑星系形成若手研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riouhei Nakatani, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideko Nomura, Rolf Kuiper
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporating Protoplanetary Disks with Various Metallicities
3. 学会等名 In the Spirit of Lyot 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Riouhei Nakatani, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideko Nomura, Rolf Kuiper
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporating Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence
3. 学会等名 Planet2/RESCEU Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Riouhei Nakatani, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideko Nomura, Rolf Kuiper
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporating Protoplanetary Disks: Implications to Metallicity Dependence of Disk Lifetimes
3. 学会等名 Subaru Telescope 20th Anniversary (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Riouhei Nakatani, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideko Nomura, Rolf Kuiper
2. 発表標題 Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence and Lifetimes
3. 学会等名 NAOJ Planet Formation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Riouhei Nakatani, Hanyu Baobab Liu, Satoshi Ohashi, Yichen Zhang, Tomoyuki Hanawa, Claire Chandler, Yoko Oya, Nami Sakai
2. 発表標題 Substructure Formation in a Protostellar Disk around a Class 0 Protostar
3. 学会等名 Workshop for Protoplanetary Disks and Exoplanets (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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