

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14764

研究課題名（和文）理論と観測で相補的に迫る原始惑星系円盤構造形成から惑星形成に至る新たな描像

研究課題名（英文）New picture of planet formation through structure formation of protoplanetary disks, approached complementarily by theory and observation

研究代表者

高橋 実道（Takahashi, Sanemichi）

鹿児島大学・理工学研究科・特任研究員

研究者番号：80838566

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、惑星形成の現場である原始惑星系円盤の、詳細な構造が観測されている。本研究では最新の観測結果を元に、円盤構造および惑星形成について研究を行った。観測から、生まれたての円盤に明るさの非対称性が発見された。本研究では、それが円盤自身の重力によって引き起こされる不安定性によって説明可能であることを、流体計算から示した。自己重力不安定な円盤は、分裂により惑星形成に至る可能性があるが、その分裂条件を明らかにする研究も行った。また、より年月を経た円盤にはダストのリング構造が観測されている。本研究では安定性解析を元にリングが自己重力によって収縮した場合に惑星サイズの天体が形成可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始惑星系円盤の詳細構造は近年の観測で多くの円盤に観測されるようになり、その起源や惑星形成に与える影響の理解を進めることが求められてきた。本研究では、観測結果を再現できる円盤モデルを構築することで構造の起源に迫ることができた。また、最も多く観測されているリング構造中での惑星形成過程についても理解を進めることができた。これらの成果は、今後より詳細な円盤観測や惑星形成過程の全体像を明らかにする上で重要な役割を果たす。

研究成果の概要（英文）：Recently, detailed structures of protoplanetary disks, which are the birthplace of planets, have been observed. In this study, we investigate the formation processes of the disk structure and the planets based on the latest observations. Observations have revealed asymmetries in the intensity map of young disks. We have shown that these asymmetries can be explained by instabilities caused by the self-gravity of the disks from hydrodynamic simulations. We have also studied the condition of the fragmentation of self-gravitating disks. From the observations, dust ring structures have also been found in older disks. Based on stability analysis, we have shown that planet-sized objects can be formed by gravitational collapse of the rings.

研究分野：星・惑星形成

キーワード：原始惑星系円盤 原始星円盤 惑星形成 重力不安定性

1. 研究開始当初の背景

惑星系は星の周囲に形成される原始惑星系円盤中で形成されると考えられている。その形成過程の解明に向けてこれまで多くの研究がなされてきたが、いまだに解明には至っていない。近年の原始惑星系円盤の高分解能観測により、円盤にリング-ギャップ構造などの構造が形成されていることが発見された。そのため、これまで考えられてきた、構造のない滑らかな円盤中での惑星形成過程からの大きな変更が求められている。

2. 研究の目的

本研究課題では、観測から得られた円盤の詳細な構造の起源を明らかにするとともに、円盤構造が惑星形成過程に与える影響を調べる。本研究で行った主な研究として、以下の3つがある。これらの研究について目的、方法、成果を報告する。

(1) これまでの星・原始惑星系円盤形成のシミュレーションから、形成したばかりの若い円盤は自己重力的に不安定で「渦状腕構造」が形成されると考えられてきた。一方、ALMAの大型観測計画であるeDiskでは、19個の若いClass 0/I天体の円盤を観測したが渦状腕構造は観測されなかった。この結果は、若い円盤が自己重力的に安定である可能性を示唆しており、シミュレーション結果との乖離があった。また、円盤の輝度分布に長軸に沿った非対称性が見つかっており、この起源は未解明となっていた。研究(1)では、観測結果を再現する円盤モデルを構築し、若い円盤の物理構造を明らかにする。

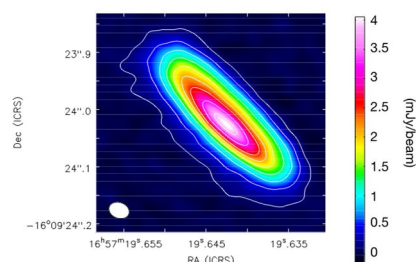


図1：eDiskによる観測結果の一例(Kido et al. 2023)。渦状腕構造は発見されていない。

(2) 自己重力的に不安定な円盤は、進化の過程で分裂に至る可能性があることが知られている。円盤が分裂した場合、ガス惑星形成にいたる可能性がある。しかし、分裂の条件は十分には理解されていなかった。これまでの研究で、円盤の分裂条件は、円盤に形成された渦状腕自体が自己重力不安定になることだと分かっていた。そこで、研究(2)では、円盤分裂条件の解明のため、円盤分裂を引き起こす自己重力的に不安定な渦状腕ができる条件について調べる。

(3) これまでの観測で、進化が進んだ多くの円盤にリング-ギャップ構造が発見されている。リング中のダストが十分な質量を持つ場合、ダストが自己重力崩壊し、分裂に至る可能性がある。研究(3)では、この分裂過程で惑星や惑星の元となる微惑星が形成された場合に、どのようなサイズ分布を持つのかを明らかにする。これは、その後の進化を通して最終的にどのような惑星系が形成するのかを理解する上で重要となる。

3. 研究の方法

(1) 観測された若い円盤の強度分布を理解するため、自己重力円盤のシミュレーションを行い、渦状腕構造が作る密度・温度分布を調べた。シミュレーション結果をもとに輻射輸送計算を行い、観測された輝度分布と比較を行った。

(2) 円盤が大質量で自己重力的に不安定になるのは、周囲から円盤へガスの供給がある形成過程であると考えられる。そこで、円盤の形成過程の分裂条件を明らかにするために円盤への質量降着の効果を取り入れた流体計算を行った。円盤形成過程では、円盤に降着したガスが渦状腕によって角運動量が輸送され、中心星へと落下する。円盤への質量降着率が大きいほど、角運動量輸送も効率的になると考えられる。本研究では、円盤中の質量降着率と角運動量輸送率の関係、および角運動量輸送率と渦状腕構造の関係を調べ、分裂に至るような渦状腕が形成される質量降着率を、角運動量輸送率を介して調べた。

(3) リング構造中のダストについて、重力崩壊過程についての線形安定性解析を行った。特に、リング構造形成メカニズムの候補である永年重力不安定性によってリング構造が形成された場合について、リング構造が自己重力的な分裂に至る条件や、分裂した際の質量分布を調べた。

4. 研究成果

(1) 流体シミュレーションと輻射輸送計算の結果から、円盤に形成される渦状腕構造は eDisk の観測ビームサイズでは分解できず、渦状腕として観測できないことを明らかにした(図3上段)。このことから、eDisk の結果は必ずしも円盤が安定であることを意味しないことを示した。また、円盤に非対称な腕構造が形成される場合や、円盤が非常に重い(Toomre の Q 値 1.2)場合に、観測で見つかったような輝度分布の長軸上の非対称性として観測されることを明らかにした(図3下段)。

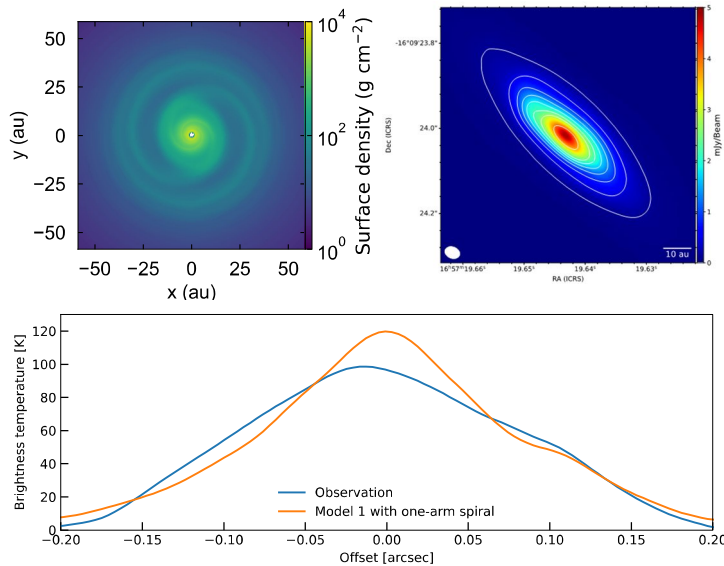


図3:(左上)シミュレーションで得られた渦状腕構造を持つ自己重力円盤の面密度分布。(右上)シミュレーションをもとに模擬観測を行った結果。シミュレーションで渦状腕構造が見えても、観測されないことを示している。(下)観測とシミュレーションの、円盤長軸上の輝度分布の比較。横軸が中心からの距離、単位は天球面上の角度(秒角)、縦軸は円盤からの放射の輝度。ピーク強度などの違いはあるが、どちらも右側のおよそ 0.1arcsec の位置で左側に比べて明るい非対称構造を持っている。

(2) シミュレーションにより質量降着率が大きいほど渦状腕による角運動量輸送率が大きくなることを数値的に確かめた。渦状腕による角運動量輸送率は、渦状腕の面密度などによって決まり、大きな角運動量を輸送できる渦状腕ほど自己重力的に不安定になりやすい。このことを用いて、角運動量輸送率を介して円盤中の質量降着率と分裂条件を関係付けるモデル式を構築した。

(3) 線形解析の結果、リング構造が円盤の広い範囲で分裂に至るためには、リング幅がリング半径の 0.1%程度まで細くなる必要があることがわかった。また、分裂した際の質量が地球質量以上に大きくなりうることを明らかにした(図2)。また、分裂条件や分裂質量を与える解析的な近似式を導出した。

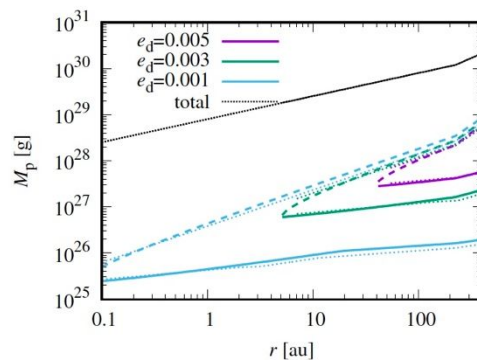


図2: ダストリング構造の自己重力崩壊によって形成される分裂片質量の分布。横軸が中心星からの距離、縦軸が分裂片質量。各色はリング構造の幅の違いを反映しており、 e_d はリング半径とリング幅の比。実線、破線は質量の見積もりの最小・最大値にそれぞれ対応する。細い点線はそれぞれの質量分布の近似式を表す。黒の実線はリングの総質量を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takahashi Sanemichi Z., Kokubo Eiichiro, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 945
2. 論文標題 Planetesimal Formation by the Gravitational Instability of Dust Ring Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 120 ~ 120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac9fd0	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 Uyama Taichi, Currie Thayne, Christiaens Valentin, Bae Jaehan, Muto Takayuki, Takahashi Sanemichi Z. et al.	4. 巻 900
2. 論文標題 SCEXAO/CHARIS High-contrast Imaging of Spirals and Darkening Features in the HD 34700 A Protoplanetary Disk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 135 ~ 135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aba8f6	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., Takahashi Sanemichi Z., Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 900
2. 論文標題 Secular Gravitational Instability of Drifting Dust in Protoplanetary Disks: Formation of Dusty Rings without Significant Gas Substructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 182 ~ 182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abad36	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19件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 高橋実道、小久保英一郎
2. 発表標題 原始惑星系円盤形成過程における自己重力的分裂過程
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋実道、小久保英一郎、塚本裕介
2. 発表標題 原始惑星系円盤形成過程における自己重力的分裂過程
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋実道、小久保英一郎、塚本裕介
2. 発表標題 形成中の原始惑星系円盤における自己重力的分裂過程
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 高橋実道、小久保英一郎、塚本裕介
2. 発表標題 Self-Gravitational Fragmentation of Protoplanetary Disk in Fromation Stage
3. 学会等名 新学術大研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋実道、小久保英一郎、塚本裕介
2. 発表標題 形成過程における原始惑星系円盤の自己重力的分裂に対する条件
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋実道
2. 発表標題 円盤形成理論 星・円盤形成過程における磁場の寄与のモデル化
3. 学会等名 2021年 星・惑星形成研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sanemichi Takahashi, Yusuke Tsukamoto, Shu-ichiro Inutsuka, Eiichiro Kokubo
2. 発表標題 A criterion for self-gravitational fragmentation of protoplanetary disks
3. 学会等名 Modelling of Disc Fragmentation, Planet Migration and Episodic Accretion (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋実道
2. 発表標題 Condition for gravitational instability of dust ring structure and planetesimal mass
3. 学会等名 新学術領域「星・惑星形成」2021年度大研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋実道
2. 発表標題 ダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成
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 高橋実道
2. 発表標題 原始惑星系円盤のダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成
3. 学会等名 新学術領域研究「新しい星形成理論によるパラダイムシフト」2020年度大研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋実道
2. 発表標題 ダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成
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 Sanemichi Takahashi
2. 発表標題 Planetesimal formation in the dust ring through the gravitational instability
3. 学会等名 Five years after HL Tau: a new era in planet formation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋実道
2. 発表標題 原始惑星系円盤のダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成
3. 学会等名 第33回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋実道
2. 発表標題 原始惑星系円盤のダストリング構造中での永年重力不安定性
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 Sanemichi Takahashi
2. 発表標題 Analytical description of magnetic braking for weakly magnetized star-forming core
3. 学会等名 Planet formation workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sanemichi Takahashi, Takayuki Muto
2. 発表標題 Structure of the protoplanetary disk around V1094 Sco obtained from dust continuum emission and SED
3. 学会等名 Spirit of Lyot 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋実道、塚本裕介、犬塚修一郎
2. 発表標題 磁気制動を考慮した星・原始惑星系円盤の解析的モデル構築
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 高橋実道、塚本裕介、犬塚修一郎
2. 発表標題 Analytic Model for Formation and Evolution of Protoplanetary Disk with Magnetic Field
3. 学会等名 星・惑星形成再検討会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋実道、武藤恭之、塚越崇、橋本淳
2. 発表標題 ダスト連続波分布とSEDが示唆する原始星 V1094 Sco の原始惑星系円盤の構造
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

〔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
---------	---------