

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05387

研究課題名(和文) 星形成後期段階の解明

研究課題名(英文) Understanding the accretion phase of star formation

研究代表者

町田 正博 (Machida, Masahiro)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10402786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：数値シミュレーションを用いて原始星形成後の質量降着期の星周円盤の成長と原始星ジェットの駆動機構を解明した。星周円盤の外縁では磁気制動による角運動量輸送が効率的であり円盤のサイズ成長が抑制される。この段階では、定常的に円盤にガスが降着するため、重力不安定により渦状碗が発達する。渦状碗による非軸対称重力トルクによって円盤の角運動量が輸送され、円盤ガスは中心星へ落下する。その後、円盤は重力的に安定となり中心星への質量降着率は下がる。また、中心星に落下するガスの一部がジェットとして原始星近傍から放出される。この研究によって、中心星へのガス降着と中心部からのジェットは非定常であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星は宇宙の最も基本的な構成要素である。そのため、星の形成過程を理解することは宇宙の進化を解明することにつながる。近年の観測から、星周円盤中で惑星が形成していることや、原始星近傍から高速のジェットが駆動していることが分かった。

この研究では星形成の大規模数値シミュレーションを実行し、惑星形成の母体となる星周円盤の形成過程と星形成ジェットの駆動機構を解明した。この研究をさらに発展させることにより地球のような惑星がどのようにして誕生するのかを解明することが出来る。

研究成果の概要(英文)：Using numerical simulations, the growth of circumstellar disk and jet driving mechanism in the main accretion phase were unveiled. The size growth of the circumstellar disk is suppressed due to magnetic braking outside the disk. However, since the gas accretion onto the disk steadily occurs, the disk becomes gravitationally unstable with time. Then, the disk mass suddenly falls onto the protostar with non-axisymmetric gravitational torque. Then, the disk becomes stable against the self-gravity of the disk. In addition, a part of the falling gas is ejected from the central region as the protostellar jet. This study have shown that the mass accretion onto the protostar and mass ejection by the jet episodically occur in the main accretion phase.

研究分野：天文学

キーワード：星形成 惑星形成 磁気流体力学 原始星ジェット 原始惑星系円盤 弱電離プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

観測から星形成過程でジェットという高速のガスが原始星近傍から噴出することが分かっている。また、質量降着が終わった段階の円盤(原始惑星系円盤)は近年 ALMA 望遠鏡によって詳細観測が行われており惑星の形成と密接に関連すると考えられるリングやギャップという構造が検出されている。さらに、ALMA 望遠鏡によって原始惑星の周囲に存在する周惑星円盤も原始惑星系円盤中に発見された。しかし、観測されている原始惑星系円盤は星が誕生してから 100 万から 1000 万年以上経過したものであり、円盤がどのような誕生してどのように成長したのかは、理解されていない。他方、円盤と共に原始星ジェットも星形成過程で普遍的に出現すると考えられているが星や円盤の形成とどのように関係しているか理解されていない。そのため、星や惑星の形成過程を理解するためには、円盤進化やジェットの駆動機構の解明が重要となる。しかし、星形成初期段階では、原始星の周囲に円盤が形成し、円盤上下方向からはジェットは駆動する。より広い範囲では、磁場の効果によって形成する擬円盤や低速アウトフローが存在する。そのため、星周環境は非常に複雑であり解析的な研究によって理解することは困難である。結果、数値シミュレーションが必要となるが、星の母体となる分子雲コアと原始星では空間スケールが 6 桁以上も異なる。また、時間スケールも分子雲コアと原始星では 8 桁以上異なる。そのため、既存の数値計算コードでこの大きく異なる空間・時間スケールを超えてシミュレーションを実行することは困難である。この研究では、多層格子法という手法を用いて大きく異なる空間時間スケールをカバーした星形成の大規模シミュレーションを実行し星形成後期段階を解明する。

## 2. 研究の目的

数値シミュレーションを用いて、星形成の母体である分子雲コアから原始星が誕生し円盤が十分に成長するまでの段階を解明する。星の誕生時の質量は太陽の約 0.1% であり非常に軽い、その後周囲のガスが円盤を通して星に落下することで星(原始星)は成長する。その成長の過程で円盤が進化するとともに円盤からはジェットによるガス放出が起こる。これらの現象を一貫したシミュレーションで計算し星形成後期過程を解明することがこの研究の目的である。

## 3. 研究の方法

3次元非理想磁気流体多層格子法のシミュレーションコードを用いて星形成の数値シミュレーションを行う。多層格子法は粗いグリッド中に細かいグリッドを入れ子状に配置することによって空間スケールの大きな構造と小さな構造の両方を空間的に分解する手法である[参考文献 1-5]。この手法によって空間スケールが異なる分子雲コアと原始星の両方を空間分解することが出来る。初期条件として観測とほぼ同じ特徴を持つガス雲を粗いグリッドに配置する。ガス雲はガスの自己重力と圧力勾配力で平衡状態にあるポナーエバート球を採用し密度を 50% 程度上昇させることで重力的に不安定にする。また、ガス球に観測で得られている分子雲コアの平均的な回転角速度と磁場強度を課す。回転軸と磁力線のなす角をパラメータとして複数のモデルを用意し計算を行った。計算境界でのアルフベン波の反射を抑制するため分子雲コアの半径の 16 倍大きな領域を計算境界として設定する。その後、非理想磁気流体の基礎方程式に従ってガス雲が重力収縮していく過程を計算する。計算は原始星形成後 500 年程度行う。

## 4. 研究成果

分子雲コアが重力収縮しファーストコアとよばれる中間天体が形成する。その後、ファーストコア外縁から低速のアウトフローが駆動する。また、ファーストコア内部ではガスのイオン化が極端に低く、オーム散逸によって磁場が散逸する。その結果、ファーストコアの中心部が再び重力崩壊して原始星が誕生する。他方、ファーストコア残骸は角運動量保存によって回転角速度が増加し、回転円盤(星周円盤)となる。回転円盤は磁気制動によって成長が抑制される。原始星形成直後は円盤の上下方向に密度が濃いガスが存在するため磁気制動によって回転円盤の角運動量が周囲のガスに輸送される。しかし、円盤の中間領域では磁場が散逸し、磁気制動が効果的ではないために円盤は消滅することなく維持される。円盤内縁ではガスの温度が高いため、イオン化度が再び上昇し磁気散逸が効果的ではなくなる。その結果、原始星近傍に存在するガスと磁力線が結合し、回転と磁場の効果によって高速ジェットが駆動する。

図 1 は、原始星形成 500 年後の中心部近傍の構造を示している。各々のパネルで、初期の分子雲コアが持つ回転軸と磁力線の角度が異なる。図に示のように中心部に薄い円盤が形成していることが分かる。円盤は局所領域の角運動量ベクトルに対して垂直面に形成する。また、円盤から紡錘形のジェットが駆動していることが分かる。ジェットの最大速度は  $100 \text{ km s}^{-1}$  に達する。初期条件として大局磁場の方向を図中の  $z$  方向に設定したが、ジェットの向きは必ずしも大局磁場の方向でないことが分かる。この結果は近年の観測と整合的である。

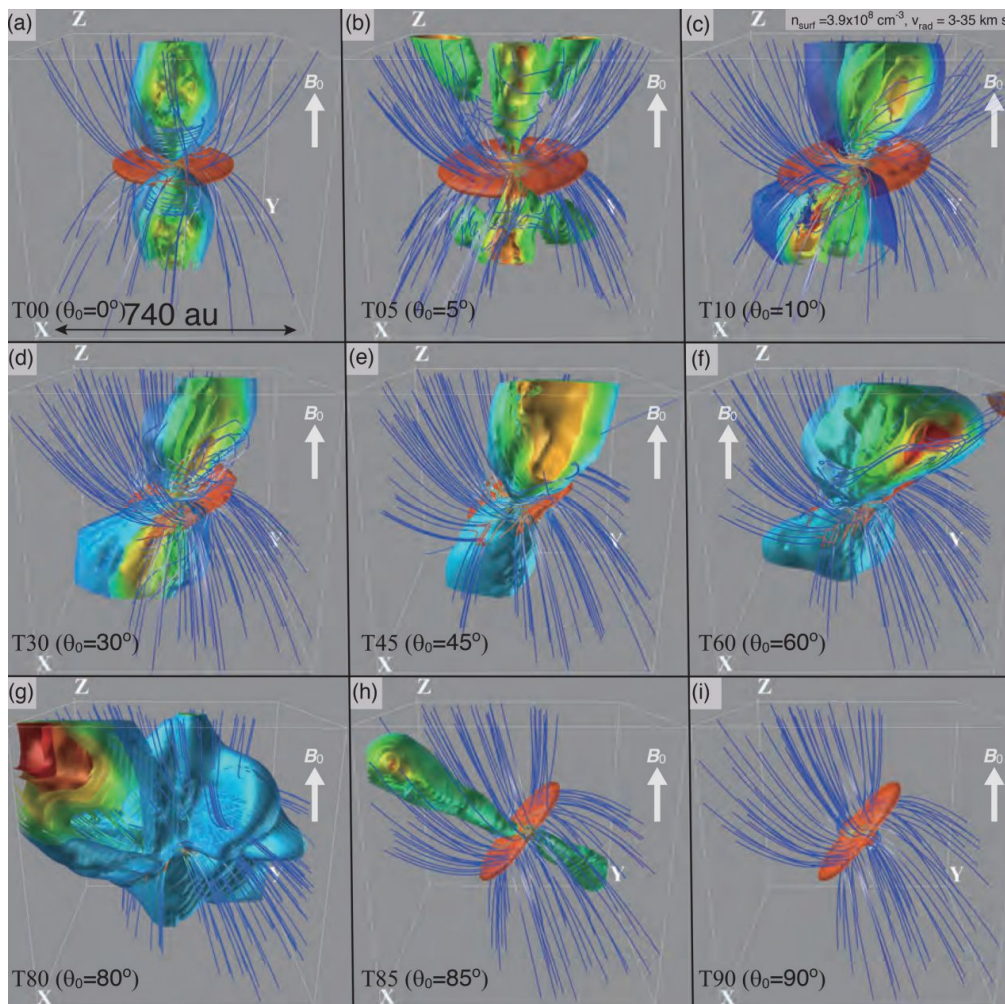


図 1 異なるパラメータ ( ) ごとの原始星形成約 500 年後の原始星周囲の構造。青色の線は磁力線、茶色の領域は回転円盤。青、緑、橙、赤の表面は原始星ジェット(色の違いは速度の違いを意味し青から赤で高速になる)。

また、初期に磁場と回転軸のなす角が大きくなるにつれてジェットが弱まる事が分かる。ジェットはガス放出と共に余分な角運動量を輸送する役割を果たすが、磁場と回転軸がなす角度が大きい場合には磁気制動によって角運動量が輸送される。結果として角度が大きくなるとジェットの運動量を小さくなり、角度が  $90^\circ$  の場合には出現しない。

近年の観測によって少数ながらジェットを駆動しない原始星が確認されている。この研究によって原始星形成後の質量降着段階の星形成過程を解明することが出来た。

#### < 参考文献 >

- Machida, M. N., Can high-velocity protostellar jets help to drive low-velocity outflow?, 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 508, 3208-3225
- Machida, M. N., Hosokawa, T., Failed and delayed protostellar outflows with high-mass accretion rates, 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 499, 4490-4514
- Machida, M. N., Basu, S. Different modes of star formation - II. Gas accretion phase of initially subcritical star-forming clouds, 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 494, 827-845
- Machida, M. N., Hirano, S., Kitta, H. Misalignment of magnetic fields, outflows, and discs in star-forming clouds, 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 491, 2180-2197
- Machida, M.N., Basu, S., The First Two Thousand Years of Star Formation, 2019, The Astrophysical Journal 876

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Machida Masahiro N, Basu Shantanu	4. 巻 494
2. 論文標題 Different modes of star formation ? II. Gas accretion phase of initially subcritical star-forming clouds	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 827 ~ 845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa672	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 Machida Masahiro N, Hosokawa Takashi	4. 巻 499
2. 論文標題 Failed and delayed protostellar outflows with high-mass accretion rates	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 4490 ~ 4514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3139	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 Saiki Yu, Machida Masahiro N.	4. 巻 897
2. 論文標題 Twin Jets and Close Binary Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L22 ~ L22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab9d86	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 Tsukamoto Y., Machida M. N., Susa H., Nomura H., Inutsuka S.	4. 巻 896
2. 論文標題 Early Evolution of Disk, Outflow, and Magnetic Field of Young Stellar Objects: Impact of Dust Model	5. 発行年 2020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/ab93d0	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 Machida, Masahiro N.; Basu, Shantanu	4. 巻 494
2. 論文標題 Different modes of star formation - II. Gas accretion phase of initially subcritical star-forming clouds	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 827-845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa672	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 Hirano, Shingo; Machida, Masahiro N.	4. 巻 485
2. 論文標題 Origin of misalignments: protostellar jet, outflow, circumstellar disc, and magnetic field	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 4667-4674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz740	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, Shunta; Tsukamoto, Yusuke; Okuzumi, Satoshi; Machida, Masahiro 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 Takahashi, Satoko; Machida, Masahiro N.; Tomisaka, Kohji; Ho, Paul T. P.; Fomalont, Edward B.; Nakanishi, Kouichiro; Girart, Josep Miquel	4. 巻 872
2. 論文標題 ALMA High Angular Resolution Polarization Study: An Extremely Young Class 0 Source, OMC-3/MMS 6	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf6ed	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 Matsushita, Yuko; Takahashi, Satoko; Machida, Masahiro N.; Tomisaka, Kohji	4. 巻 871
2. 論文標題 A Very Compact Extremely High Velocity Flow toward MMS 5/OMC-3 Revealed with ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf1b6	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 Higuchi, Koki; Machida, Masahiro N.; Susa, Hajime	4. 巻 475
2. 論文標題 Evolution of magnetic fields in collapsing star-forming clouds under different environments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3331-3347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty046	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 Matsushita, Yuko; Sakurai, Yuya; Hosokawa, Takashi; Machida, Masahiro N.	4. 巻 475
2. 論文標題 Massive outflows driven by magnetic effects - II. Comparison with observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 391-403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx3070	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 Machida, Masahiro N.; Higuchi, Koki; Okuzumi, Satoshi	4. 巻 473
2. 論文標題 Different modes of star formation: gravitational collapse of magnetically subcritical cloud	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3080-3094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2589	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 Matsushita, Yuko; Machida, Masahiro N.; Sakurai, Yuya; Hosokawa, Takashi	4. 巻 475
2. 論文標題 Massive outflows driven by magnetic effects in star-forming clouds with high mass accretion rates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1026-1049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx893	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3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松下祐子, 高橋智子, 町田正博, 富阪幸治
2. 発表標題 Class 0天体MMS5から駆動するアウトフローとジェットの軸のずれ
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松下祐子, 高橋智子, 町田正博, 富阪幸治
2. 発表標題 中間質量星形成領域OMC-3 MMS5に付随するEHVアウトフロー
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口公紀, 町田正博, 須佐元
2. 発表標題 低金属量環境における星形成過程
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017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			
カナダ	Western University			