様　式　Ｆ－１９－２

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　９ 月　２ 日現在

機関番号：１７１０２
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2018～2021
課題番号：１７ＫＫ００９６
研究課題名（和文）強い磁場を持つ分子雲コア中での星形成過程

研究課題名（英文）Star Formation in strongly magnetized clouds

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）　　3,700,000円
渡航期間：　　６ヶ月

研究成果の概要（和文）：観測から星形成の母体となる分子雲コアは強い磁場を持つことが分かっている。これまでの研究では、重力エネルギーが磁気エネルギーを卓越している場合の分子雲コアの進化について研究が行われてきた。しかし、磁気エネルギーが重力エネルギーを卓越している分子雲コアも観測で見つかっている。この研究では、初期に磁場によって支えられている分子雲コア中での星形成過程を調べた。磁場は両極性拡散によって分子雲コアから抜ける。その後、ガスの自己重力により収縮し星が誕生する。しかし、星形成前に磁気制動によって分子雲コアの角運動量の大部分が抜けているため磁場が卓越したガス雲中での星形成過程は通常とは大きく異なることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
多くの観測から重力的に不安定な分子雲コア中で星が出来ることが分かっている。分子雲コアの磁場強度を測定した観測から多くの分子雲コアはローレンツ力が自己重力を卓越するほど強くないことが示されている。一方、ローレンツ力によって即座の自己重力収縮が妨げられる分子雲コアも少数ながら存在する。この研究では強磁場環境下での星形成過程を調べた。その結果、磁場が強い場合は通常の星形成過程と異なり、早期段階で星周円盤が形成されないことが分かった。この結果は系外惑星系の多様性を説明することが可能である。そのため、太陽系や我々の住む地球がどの程度普遍的であるのかを理解する手がかりとなる。

研究成果の概要（英文）：Observations have shown that prestellar cores have strong magnetic fields. In previous studies, researchers have investigated the evolution of molecular cloud cores when the gravitational energy dominates the magnetic energy. However, there exists prestellar cores having magnetic energy larger than gravitational energy. In this study, the evolution of the cloud having a very strong magnetic field was investigated using three dimensional MHD simulations. In such clouds, after the magnetic field is removed by ambipolar diffusion, the cloud collapse occurs to form a protostar. However, since a significant fraction of the angular momentum is removed by the magnetic braking before the cloud collapse begins, the star formation process in very strongly magnetized clouds is considerably different from the normal process.

研究分野：天文学

キーワード：弱電離プラズマ　磁気流体力学　星形成　原始惑星系円盤　角運動量輸送　磁気制動

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｆ－１９－２

１．研究開始当初の背景

星は分子雲コアとよばれるガスの塊が自己重力によって収縮して誕生する。星形成領域には強い磁場が存在しており、星形成過程で磁場が重要な役割りを果たすことが分かっている。従来から分子雲コアは重力に対してローレンツ力が強く磁場によって支えられているか、または、重力が強く即座に収縮を開始するかという議論が行われてきた。2000 年代前半に行われた観測によって、多くの分子雲コアでは磁場は強いながらも重力収縮を妨げるほどの強磁場ではないことが示された。そのため、2005 年頃から行われた数値シミュレーションでは初期の分子雲コアの重力エネルギーが磁気エネルギーより大きい場合のみの進化が研究されてきた。しかし、近年の観測から磁気エネルギーが重力エネルギーよりも高い分子雲コアが確認されている。また、2000 年代に行われたゼーマン効果を使った分子雲コアの磁場強度測定においても磁気エネルギーが卓越した分子雲コアが少数ながら存在することが知られていた。しかし、磁気エネルギーが重力エネルギーより強い場合、つまり、強磁場を持つ分子雲コアの進化は近年研究が行われていない。

２．研究の目的

1980-1990 年代に磁場が卓越している場合の星形成過程が盛んに研究されていた。しかし、当時は大規模かつ詳細なシミュレーションは実行不可能であったため１次元、または２次元の短時間の分子雲コアの収縮を調べていた。その後、2000 年代に入り磁場は強いが分子雲コアを支える程の強度でないことが観測から示唆された。そのため、申請者も含めて世界の他グループは、重力によって即座に収縮するガス雲中での星形成が研究を行った。この研究は大きな成功をおさめ、星形成領域で観測されているアウトフロー、ジェット、擬円盤、星周円盤などの星周構造の再現することが出来た。また、円盤形成過程や、アウトフロー、ジェットの駆動機構が解明された。しかし、近年磁場が極端に強く即座の重力収縮によって星形成を起こさないと考えられる分子雲コアが少数ながら存在することが分かった。これら磁場が強い場合の星形成過程は 2000 年代以前に理論研究が行われていたが、初期の進化段階のみの研究であったため星の誕生の過程や星形成後の描像は理解されていない。

この研究では包括的に星形成過程を理解するために最新の数値計算コードを用いて、非常に強い磁場を持つ分子雲コア中での星形成過程を解明する。また、即座に重力収縮する場合と比較を行い星形成過程の全貌を明らかにする。

３．研究の方法

これまで我々のグループで開発を続けてきた３次元非理想磁気流体多層格子法という数値計算コードを用いて、分子雲コアから原始星形成までのシミュレーションを実行してきた[文献 1-5]。数値計算コードには磁場の散逸過程としてオーム散逸のみを考慮していた。しかし、磁場が強く重力収縮が起こらない場合には両極性拡散(ambipolar diffusion)の効果が重要となる。磁場が非常に強い分子雲コアの場合、両極性拡散によって磁場が分子雲コアから抜けた後に重力収縮を開始し星が誕生する。我々は従来のコードに両極性拡散の実装を行った。この改良された数値計算コードを用いて磁場が非常に強い環境下での星形成過程を解明する。

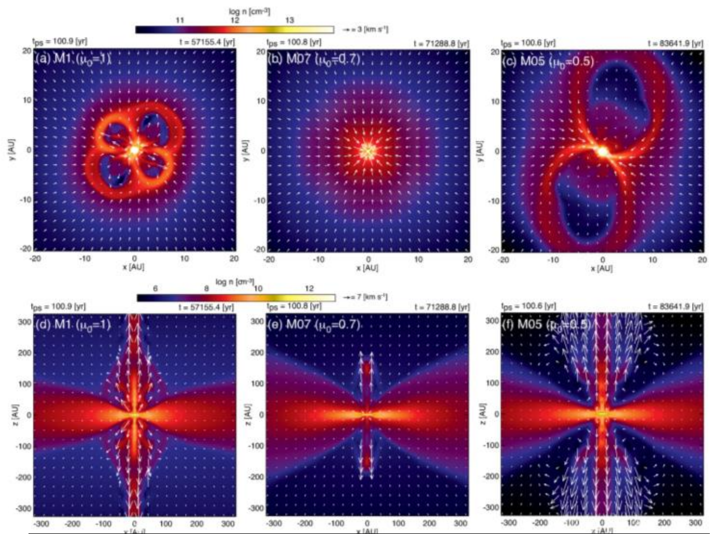

図１：パラメータごとの赤道面(上のパネル)と y=0 面(下のパネル)上での密度と速度分布。右のモデルが最も磁場が強く、左のモデルが最も磁場が弱い。

４．研究成果

初期条件としてボナーエバート球を設定し、磁場強度を変化させて星形成の計算を行った。磁場強度は質量磁束比μ_0で表され、質量磁束比が小さいほど磁場が強い。図１は、原始星形成後 100 年経過した時点での中心星近傍の構造を示している。赤道面に見られるリングやホールは磁気交換型不安定性によるものである。この不安定性は磁気圧勾配力がガスの圧力勾配力よりも大きい場合に起こる。図１に示した３つのモデルのうち２つが磁気交換型不安定性を起こしていることが分かる。磁気交換型不安定性は星周円盤を破壊するため円盤が形成出来ない。また、図１中央のモデルは回転円盤が出来ず分子雲コア近傍には原始星のみが存在している。結果、どのモデルでも回転円盤を形成していないことが分かる。

図 1 下のパネルから磁気交換型不安定性を示したモデルでは激しいガスの放出現象(原始星ジェット)が起こっていることが分かる。また、図 1 中央のモデルでも非常に弱い原始星ジェットが確認出来る。従って、これらのモデルで高速ジェットの駆動を確認することが出来た。しかし、即座の重力収縮の際に見られる開口角の広い低速アウトフローはどのモデルでも確認出来なかった。これは、回転円盤が形成しないためだと考えらえる。

図 2 はモデル μ_0=0.5 のジェットの回転速度を異なる空間スケールで表示している。左上の図は中心部の紡錘上部分以外の領域はインフォーリングエンベロープに対応している。図からジェット内部、外部の両方で回転方向が入れ子状に逆になっていることが分かる。例えば、図２右上の図では、ジェットの外側は半時計まわりをしているのに対し、内側は時計回りとなっている。また、図２左下の図からさらに内側ではジェットの回転は時計回りになっている。これは、両極性拡散によって磁場が分子雲コアから抜けるまで重力収縮が始まらないため、原始星が出来る前の段階で十分な角運動量が分子雲コアから抜けたためである。分子雲コアの角運動量は磁気制動によって一度は全て抜けてしまう。しかし、磁力線が捩じられているため、捩じられた磁力線が磁気張力によって戻る際に元の回転と逆の回転をガスに与える。このプロセスが繰り返されることにより収縮前の分子雲コアは半径ごとに回転軸が 180° 異なるという構造を持つ。多くの角運動量は既に磁気制動によって抜けてしまっているため回転円盤が形成しないことは自然である。

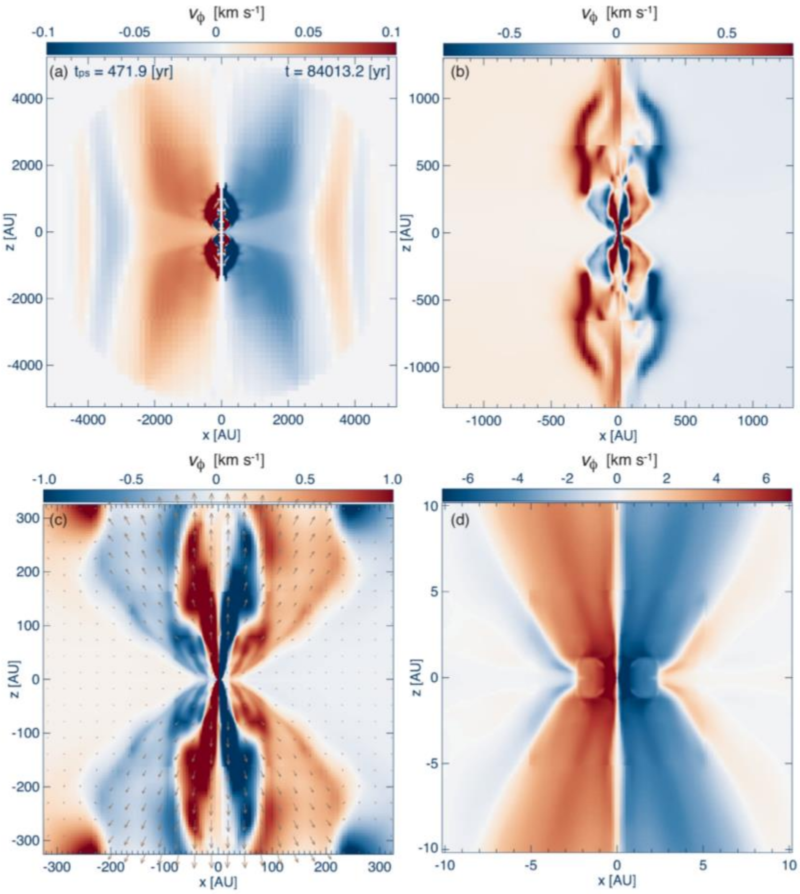

図２：モデルμ_0=0.5 のジェットの回転速度(カラー)。矢印は y=0 平面の速度ベクトル。また、各々のパネルで空間スケールが異なる。

この研究によって強磁場環境下での星形成過程は通常の星形成とは大きく異なることが分かった。通常の星形成過程では低速アウトフローと高速ジェットが駆動し、原始星周囲には回転円盤が成長する。他方、強磁場環境下では、弱い高速ジェットは駆動するが低速アウトフローは出現しない。また、回転円盤は出来ず磁気交換型不安定性により原始星周囲に複雑な構造が現れる。近年 ALMA 望遠鏡によって若い降着段階にある原始星でアウトフローが確認されない天体が観測されている。このような天体の特徴は強磁場環境で形成した星の特徴と整合的である。そのため、通常とは異なるモードで星が誕生する可能性がある。

＜引用文献＞

① 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

② 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

③ 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

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計6件（うち査読付論文　5件／うち国際共著　2件／うちオープンアクセス　0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 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 Hirano Shingo、Tsukamoto Yusuke、Basu Shantanu、Machida Masahiro N.	４．巻 898
２．論文標題 The Effect of Misalignment between the Rotation Axis and Magnetic Field on the Circumstellar Disk	５．発行年 2020年
３．雑誌名 The Astrophysical Journal	６．最初と最後の頁 118～118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab9f9d	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 Machida, Masahiro N.; Hirano, Shingo; Kitta, Hideyuki	4．巻 491
2．論文標題 Misalignment of magnetic fields, outflows, and discs in 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 2180-2197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stz3159	査読の有無 無
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 －

〔学会発表〕　計0件

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	バスー　シャンタヌ (Basu Shantanu)	ウェスタンオンタリオ大学・Department of Physics and Astronomy・Professor	

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			
Canada	University of Western Ontario			