

星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション

課題責任者

町田 正博 九州大学 理学研究院

著者

町田 正博^{*1}, 富田 賢吾^{*2}, 樋口 公紀^{*1}, 古賀 駿大^{*1}

*1 九州大学 理学研究院, *2 大阪大学 理学研究科

磁気流体多層格子法の数値計算コードを用いて、磁場が強い場合の分子雲コア中で原始星が誕生するまでのシミュレーションを行った。近年の大型望遠鏡の観測によって、星形成過程において磁場が重要な役割を果たすことが示唆されている。星は分子雲というガスのかたまりが重力によって収縮して誕生するが、収縮の過程で回転によって円盤状構造が形成する。磁場は磁気制動によってこの回転している円盤状構造から角運動量を引き抜く役割を果たす。磁場が強く磁気制動の効果が非常に効率的な場合には、角運動量が過剰に輸送され原始星形成後に星周円盤が形成されない。星周円盤は、時間と共に成長し、惑星形成の母体となる原始惑星系円盤となる。そのため、星形成過程においてどのように原始惑星系円盤が誕生し成長するかを理解することは惑星の起源を考える上で重要である。この研究では、星形成コアの磁気強度をパラメータとして多数の星形成のシミュレーションを行い、原始惑星系円盤が誕生する条件を求めた。また、星形成領域で観測される原始星ジェットやアウトフローが出現するためには、初期に星形成コアが持つ磁気エネルギーが重力エネルギーよりも低い必要があることを示した。

キーワード：星形成, 原始惑星系円盤, 惑星形成, 磁気流体力学, 原始星ジェット

1. はじめに

地球や火星などの固体惑星、また、木星や土星などの巨大惑星は全て原始惑星系円盤という誕生したばかりの星の周囲に出来る円盤の中で形成する。木星や土星などの巨大惑星の形成過程は未だ論争中であるが、地球や火星などの固体惑星は、水素、ヘリウムガスの中に存在する僅かな塵（ダスト）が集まることで形成したと考えられている。ダストの集積の過程やどの程度の質量の惑星が誕生するかは、惑星形成の母体である原始惑星系円盤の性質に強く依存する。例えば、重く大きな原始惑星系円盤が存在した場合には、巨大な惑星からなる惑星系が誕生すると考えられる。他方、軽く小さな原始惑星系円盤では、軽い惑星からなるコンパクトな惑星系が誕生するであろう。そのため原始惑星系円盤の形成・進化を理解することなしに惑星形成過程を理解することは出来ない。また、原始惑星系円盤は星形成の副産物であるため、原始惑星系円盤の性質を理解するためには星形成過程を解明する必要がある。

星形成過程では磁場が重要な役割を果たす ([1],[2])。分子雲コアの分子輝線の分裂（ゼーマン効果）から星が誕生するガス雲の磁場の強さはよく分かっており、星形成コアは重力エネルギーに匹敵するほどの磁気エネルギーを持っていることが分かっている。ガスが収縮して星が出来る過程で磁場は主に角運動量を星間空間に輸送（放出）する働きをする。中心部に落ちたガスの一部が磁気遠心力風という機構によって角運動量を持ち中心部から放出される。また、磁気制動という効果によって中心部分の角運動量がガス雲の外層に輸送される。このアウ

トフローや磁気制動による角運動量の輸送の割合は、分子雲コアが持つ初期の磁場の強さと磁場の散逸過程に依存する ([3],[4])。角運動量が過剰に輸送された場合には、軽く小さな星周円盤が形成される。このような円盤中では、軽い惑星しか誕生しないと考えられる。他方、磁場による角運動量輸送効率が効率的でない場合には、巨大な円盤が形成する。このような円盤中では、木星以上の質量を持つ巨大惑星や数多くの地球型惑星、またはスーパーアースが誕生すると考えられる。

この研究では、星形成過程で磁場によって輸送される角運動量の効率を調べ、誕生する原始惑星系円盤の性質を調べることを目的として数値計算を行った。計算の結果、初期の分子雲コア中の磁気エネルギーが重力エネルギーより僅かに低い場合は十分な大きさの回転円盤が形成するが、磁気エネルギーが重力エネルギーよりも高い場合には回転円盤が形成せずにガスは全て中心星に落下することが分かった。また、星形成領域で頻繁に観測される原始星アウトフローの駆動条件を求めた。

2. 初期条件と計算手法

星の誕生の母体である分子雲コアは～10,000AU以上の大きさを持つ。他方、原始星の大きさは0.01AU程度である。そのため、分子雲コアと原始星は空間スケールで6桁以上も異なる。この大きく異なるスケールを空間分解するために我々は多層格子法という計算手法を用いる。多層格子法は、解像度が必要な部分をより細かい格子で計算し、解像度が不要でない領域を粗い格子で計算するという手法である。星形成過程は、単純には自身の重力

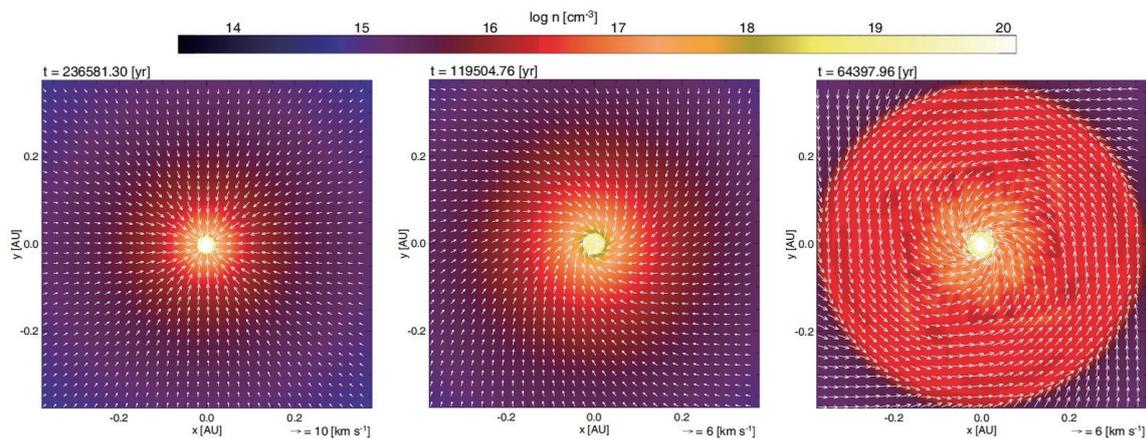


図1 原始星形成時の赤道面の密度（カラー）と速度（矢印）分布。各々の図で初期磁場強度が異なる。

でガスが収縮して、圧力が十分に高くなると、圧力勾配力が重力に匹敵するようになり収縮が止まって星が誕生する。そのため典型的な空間スケールは自由落下時間（重力）と音速（圧力）で決まるジーンズ長というもので決まる。多層格子法ではこのジーンズ長を十分な精度で分解できるように動的に格子を生成する。したがって、分子雲コアから原始星までの進化を十分な空間解像度で計算することが可能である。また、上記の様に星形成過程では磁場の効果が重要であるため、磁気流体力学の方程式を解く必要がある。しかし、分子雲コアは弱电離プラズマ状態にあるため高密度領域で磁場の散逸が起こる。我々の数値計算コードにはこの磁場の散逸も実装されている。磁場の散逸係数は、流体計算とは別に化学進化計算を行い電気伝導度から導出してテーブル化する。その際、密度、温度を引数にして磁気流体計算中で散逸係数をテーブルから参照する。

3. 結果

上の図は、原始星形成時の円盤赤道面の密度と速度分布を示している。左が最も磁場が強い場合、右が最も磁場が弱い場合の結果である。左の図では、星が出来る前の段階で磁気制動によって効率的な角運動量輸送が起こったために回転円盤が形成していない。また、中央の図では、ガスが回転しながら落下しているのが分かる。初期のガスの回転方向は反時計回りであったが、この図ではガスは時計回りに周っている。これは、磁気張力がガスの回転を引き戻す方向にかかったためである。右の図では、回転円盤が形成しているのが分かる。この図は原始星形成後直後の状態を示しており、今後円盤の質量や大きさを決定するためにはさらなる長時間進化の計算が必要であるが、この段階でも磁場の強さによって円盤の特徴が大きく異なることが分かる。

図2は、原始星形成直後の様子を3次元で示している。図中の線は磁力線を示している。また、赤色の領域は擬円盤と呼ばれる回転ではなく磁場の効果によって出来た円盤である。右図の緑色の領域はアウトフロー領域である。また、中心面の密度、速度を各々の壁面に投影している。図2左図は磁場が強い場合、図2右図は磁場が比

較的弱い場合の結果を示している。図から比較的磁場が弱い場合はアウトフローが駆動しているが、磁場が強い場合にはアウトフローが現れないことが分かる。

観測では星形成過程では、アウトフローが現れることが分かっている。また、アウトフローはローレンツ力によって駆動する。そのため、星形成過程で磁場は重要な役割を果たすが、磁場が強すぎる場合には、アウトフローも駆動せず、回転円盤も出来ない。磁場が非常に強い場合の星形成過程の結果は、観測結果を説明することが出来ない([5],[6])。また、図2からも星形成過程で形成される円盤の大きさは磁場強度に強く依存することが分かる。

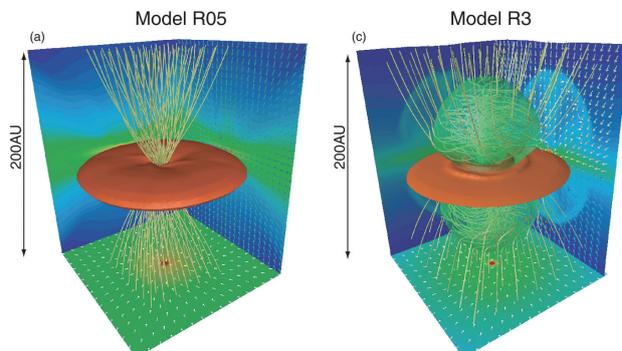


図2 線は磁力線を示している。また、赤色の領域は高密度領域の等密度面。右図の緑色の領域はアウトフロー領域である。中心面の密度、速度をカラーと矢印で各々の壁面に投影している。

4. まとめ

図3は全計算モデルの収縮中の比角運動量（上段）、角速度（中段）、規格化した角速度（下段）を示している。R01が最も初期磁場が強いモデルで、R5が初期の磁場が最も弱いモデルである。この図から磁場強度の違いによって異なるモデル間で、収縮中の角運動量の値が大きく異なっていることが分かる。最終的には、分子雲コアに残留している角運動量が中心部分に落下して原始惑星系円盤を作るが、我々の計算結果は初期磁場によって原始惑星系円盤のサイズが大きく異なることを意味している。

分子雲コア中での星形成過程を考える場合、磁場以外にも初期角速度や温度、乱流などを考える必要があるが近

年の観測は、磁気エネルギーが、回転、熱、乱流エネルギーを卓越していることを示している ([7])。そのため、初期磁場の強度の違いによって原始惑星系円盤の多様性が生じると考えられる。原始惑星系円盤の多様性は、惑星系の多様性に直接関係すると考えられる。現在の研究では、原始星形成直後に計算を止めているが、今後の研究で原始星形成後の質量降着段階の長時間計算を行い、原始惑星系円盤の長時間進化を調べることを予定している。

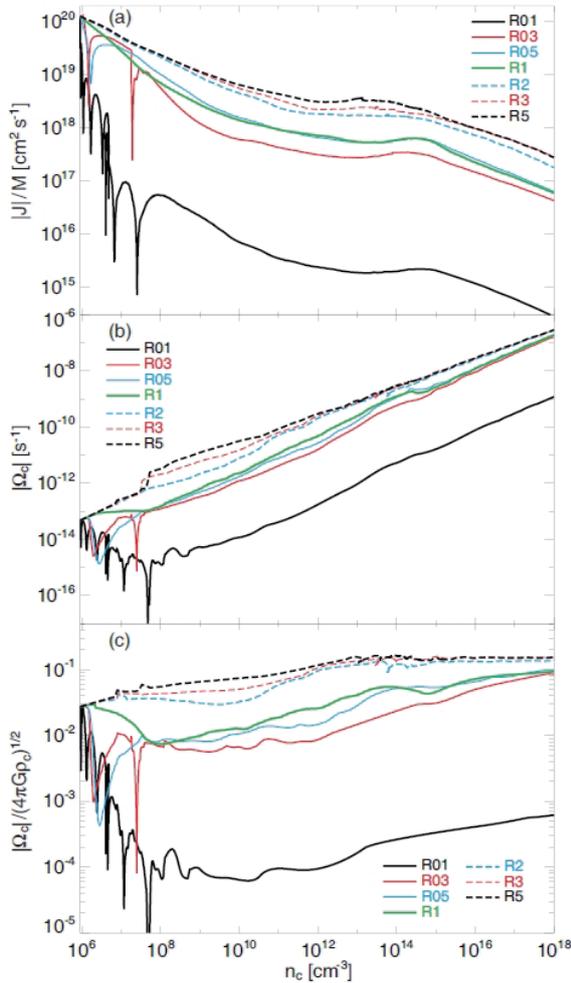


図3 ガス収縮期の全計算モデルの比角運動量 (上段)、角速度 (中段)、自由落下時間で無次元化した角速度 (下段)。横軸は収縮しているガスの中心密度。

謝辞

本研究の数値計算は、平成 29 年度地球シミュレータ公募課題「星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション」によって採択された海洋研究開発機構の地球シミュレータ (ES) を用いて行いました。

文献

- [1] Higuchi, K., Machida, M. N., and Susa, H. "Evolution of magnetic fields in collapsing star-forming clouds under different environments", *MNRAS*, 475, 3331-3347, 2018.
- [2] Matsushita, Y., Sakurai, Y., Hosokawa, T., and Machida, M. N., "Massive outflows driven by magnetic effects - II. Comparison with observations", *MNRAS*, 475, 391-403, 2018.
- [3] Machida, M. N., Higuchi, K., and Okuzumi, S., "Different modes of star formation: gravitational collapse of magnetically subcritical cloud", *MNRAS*, 473, 3080-3094, 2018.
- [4] Tsukamoto, Y., Okuzumi, S., Iwasaki, K., Machida, M. N., and Inutsuka, S., "The impact of the Hall effect during cloud core collapse: Implications for circumstellar disk evolution", *PASJ*, 69, 95-, 2017.
- [5] Matsushita, Y., Machida, M. N., Sakurai, Y., and Hosokawa, T., "Massive outflows driven by magnetic effects in star-forming clouds with high mass accretion rates", *MNRAS*, 470, 1026-1049, 2017.
- [6] Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Matsumoto, N., Kim, M. K., Burns, R. A., and Honma, M., "Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I", *NatAs*, 1, 0146-, (2017).
- [7] Matsumoto, T., Machida, M. N., and Inutsuka, S., "Circumstellar Disks and Outflows in Turbulent Molecular Cloud Cores: Possible Formation Mechanism for Misaligned Systems", *ApJ*, 839, 69-, 2017.

Star and Planet Formation Simulations

Project Representative

Masahiro Machida Faculty of Science, Kyushu University

Authors

Masahiro Machida^{*1}, Kengo Tomida^{*2}, Koki Higuchi^{*1} and Shunta Koga^{*1}

^{*1} Faculty of Science, Kyushu University, ^{*2} School of Science, Osaka University

We investigate the formation of protostar and protoplanetary disk starting from prestellar cloud cores using three-dimensional magneto-hydrodynamics nested grid simulations. Recent observations imply that the magnetic field plays a critical role in the star formation process. Star forms in gravitationally collapsing cloud, and protoplanetary disk appears around the protostar. The magnetic field transfers the excess angular momentum in the collapsing cloud and promotes the formation of protostar. Thus, in order to investigate the planet formation in the protoplanetary disk, we need to understand the star formation process. In this study, we derive the formation condition of the protoplanetary disk with a parameter of the magnetic field strength of the prestellar cloud core. In addition, we show that the magnetic energy comparable to the gravitational energy is necessary for driving prestellar outflows and jets which are usually observed in various star-forming regions.

Keywords: Star Formation, Protoplanetary disk, Planet Formation, MHD, Protostellar Jets

1. Introduction

Planets such as Earth, Mars, Jupiter and Saturn are formed in the protoplanetary disk. The protoplanetary disk is formed in the star formation process. Thus, to unveil the formation process of earth- and Jupiter-like planets, we need to clarify the star formation process. Recent observations showed that the magnetic field is crucially important for the star formation process, because it transfers the angular momentum in the star forming clouds [1, 2]. An amount of the angular momentum remaining in the star forming cloud determines the properties of the protoplanetary disk, such as the total mass and radius. When the magnetic braking is effective and angular momentum is largely removed from the central region, a compact planetary system composed of small-earth like planets would form. On the other hand, when the magnetic braking is not very effective, a sufficiently large amount of the angular momentum results in forming a large protoplanetary system which would include both massive (e.g. Jupiter and Saturn) and small (e.g. Earth and Mars) planets.

In this study, we investigate the efficiency of the angular momentum transfer by the magnetic field effect such as magnetic braking and determine the formation condition of the protoplanetary disk. In addition, we also investigate the origin and driving mechanism of outflows and protostellar jets which are frequently observed in star forming regions.

2. Numerical Method and Settings

The molecular cloud cores, which are the parents of the stars, have a size of $>10,000$ AU, while the size of the protostar is about 0.01 AU. Thus, the spatial difference between them

is about six orders of magnitude. To spatially resolve both the molecular cloud core and protostar, we used the nested grid method which can cover both objects. For this method, some different grids are nested and the inner grid has a finer spatial resolution. Thus, we cover the region around the protostar with a higher resolution grid, and the cloud core with a coarser resolution grid.

The molecular cloud core is in a weakly plasma state. In addition, the ionization degree decreases as the cloud collapses or the density increases. Thus, the magnetic field dissipates by Ohmic dissipation and ambipolar diffusion in a high-density gas region [3, 4]. For this reason, we implemented the dissipation term of the magnetic field to our nested grid code. The dissipation coefficients are estimated by one-zone calculation, in which chemical reactions and electric conductivities are pre-calculated. As an initial state, we prepare the equilibrium sphere (so-called the critical Bonnor-Ebert sphere), in which the gravity is balanced with the pressure gradient force. In addition, an uniform magnetic field and rigid rotation are imposed to the initial cloud core.

3. Results

We calculated the evolution of cloud with different magnetic fields until the protostar formation. Figure 1 shows the density and velocity distributions for each model at the protostar formation epoch. When the initial magnetic field is strong, no disk appears (Fig. 1 left) without rotation, in which a large amount of the angular momentum is already transferred by the magnetic braking in the collapsing cloud. On the other hand, a rotationally supported disk appears in the cloud with a

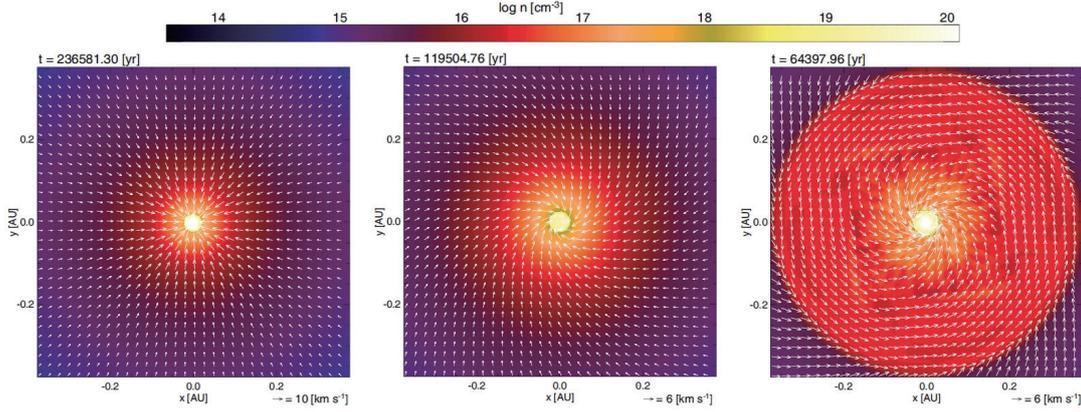


Fig. 1 Density (color) and velocity (arrows) distributions on the equatorial plane for models with different magnetic field strengths.

relatively weak magnetic field as seen in the right panel of Fig. 1. The clockwise rotation seen in the middle panel of Fig. 1 is caused by the magnetic tension force. For this model, the gas is swinging back by the magnetic tension force. Thus, clockwise and anticlockwise rotations coexist in this model.

Figure 2 shows the three dimensional view of strongly (left) and weakly (right) magnetized models. In both models, the pseudo-disk, which is supported by the Lorentz force, appears (red-isosurfaces). However, the outflow appears in the right panel, while it does not appear in the left panel. In observations, the outflow universally appears in the star formation process [5, 6]. Thus, the star formation simulated in a considerably strong magnetic field is not consistent with observations [7].

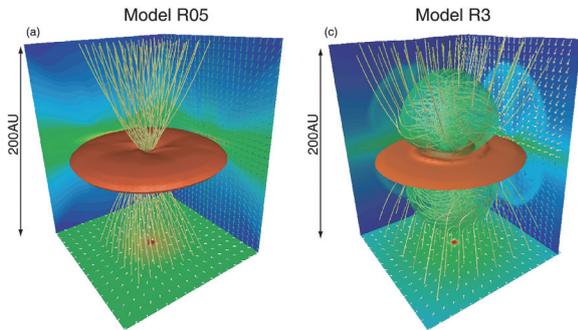


Fig. 2 Three-dimensional view for strong (left) and weak (right) magnetic field models. Lines are the magnetic field lines. The red and green surfaces correspond to the high-density and outflowing regions.

4. Summary

We investigated the formation of the protostar and protoplanetary disk using three-dimensional non-ideal MHD nested grid simulations with a parameter of magnetic field strength of the prestellar cloud. When the initial cloud has a magnetic energy larger than the gravitational energy, the cloud collapse slows because the rapid collapse does not occur until the magnetic flux is removed by ambipolar diffusion. In such a case, a large amount of the angular momentum is removed by the magnetic braking and is transferred into the interstellar medium. In addition, for this model, neither protoplanetary disk nor outflow/jet appears because of the deficit of the angular momentum. On the other hand, when the magnetic energy is

smaller than the gravitational energy, the cloud rapidly collapses maintaining a large amount of the angular momentum. In such a cloud, both the protoplanetary disk and outflow/jet appear. Thus, the strength of the magnetic field in the prestellar cloud core significantly affects the formation process of protostars and protoplanetary disks, and controls the planet formation.

Acknowledgement

Simulations reported in this paper were performed by 2017 Koubo Kadai on Earth Simulator (NEC SX-ACE) at JAMSTEC.

References

- [1] Higuchi, K., Machida, M. N., and Susa, H. "Evolution of magnetic fields in collapsing star-forming clouds under different environments", *MNRAS*, 475, 3331-3347, 2018
- [2] Matsushita, Y., Sakurai, Y., Hosokawa, T., and Machida, M. N., "Massive outflows driven by magnetic effects - II. Comparison with observations", *MNRAS*, 475, 391-403, 2018.
- [3] Machida, M. N., Higuchi, K., and Okuzumi, S., "Different modes of star formation: gravitational collapse of magnetically subcritical cloud", *MNRAS*, 473, 3080-3094, 2018.
- [4] Tsukamoto, Y., Okuzumi, S., Iwasaki, K., Machida, M. N., and Inutsuka, S., "The impact of the Hall effect during cloud core collapse: Implications for circumstellar disk evolution", *PASJ*, 69, 95-, 2017.
- [5] Matsushita, Y., Machida, M. N., Sakurai, Y., and Hosokawa, T., "Massive outflows driven by magnetic effects in star-forming clouds with high mass accretion rates", *MNRAS*, 470, 1026-1049, 2017.
- [6] Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Matsumoto, N., Kim, M. K., Burns, R. A., and Honma, M., "Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I", *NatAs*, 1, 0146-, (2017).
- [7] Matsumoto, T., Machida, M. N., and Inutsuka, S., "Circumstellar Disks and Outflows in Turbulent Molecular Cloud Cores: Possible Formation Mechanism for Misaligned Systems", *ApJ*, 839, 69-, 2017.

