

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, 野崎信吾*1, 平野信吾*2, 早川喬*1, 原田直人*3, 村社伊樹*1,
槻木勇大*1, 畠花帆*1, 山本晶菜*1

*1 九州大学 理学研究院, *2 神奈川大学 工学部 応用物理学科 *3 東京大学 理学系研究科

キーワード：磁気流体, 星形成, 惑星形成, ジェット, 弱電離プラズマ

1. はじめに

近年、ALMA 望遠鏡による高分解能観測によって、若い星の周囲に形成される円盤（星周円盤）の詳細な構造が明らかになりつつある。星は、分子雲コアが自己重力によって収縮することで誕生するが、その後、角運動量をもったガスが中心星へ降着する過程で星周円盤が形成・成長する。ガス降着が継続している段階の円盤は Class 0/I 円盤と呼ばれ、降着がほぼ終了した段階の円盤は Class II 円盤と分類される。Class II 円盤では、惑星の存在を示唆するリングやギャップなどの構造が数多く確認されている。さらに近年の観測により、これらのリング・ギャップ構造は、円盤が成長途上にある Class I 円盤においても存在することが明らかになってきた[1]。これらの観測は、原始星および星周円盤の形成・成長の過程において、すでに惑星形成が開始している可能性を示唆している。

惑星は、円盤中に存在する固体微粒子（ダスト）が合体・成長することによって形成すると考えられている。一方、星周円盤中では磁気回転不安定性（MRI）によって乱流が励起されると考えられており、MRI による乱流は、ダストの中心面への沈殿を妨げるとともに、ダスト同士の衝突による破壊を引き起こす[2]。その結果、ダストの成長や惑星形成は抑制される可能性がある。しかし、星周円盤はイオン化度が極端に低い弱電離プラズマ状態にあり、非理想磁気流体効果によって磁場が散逸する。

過去の解析的研究により、磁場が非常に強い場合には、磁気拡散によって円盤外縁部に磁束が蓄積し、磁気交換型不安定性が発生することが指摘されている。この不安定性が成長すると、短時間で磁束が星周円盤から外部へ輸送され、周囲のエンベロープに強磁場領域が形成される。強磁場領域では磁気圧が支配的となるため、ガス分布はリング状やアーク状の構造を示すと予想される。

我々は ALMA 望遠鏡の観測により、星周円盤周囲のエンベロープにリング状およびアーク状構造を発見するとともに、星周円盤内部においても多重のリング構造を検出した。これらの観測結果は、星周円盤から短時間で磁場が抜き取られた可能性を強く示唆している。星周円盤内部では、磁場が弱まることで MRI が抑制され、ダストの成長が促進されてリング構造が形成される一方、円盤周囲では、円盤から漏れ出した磁束によってリング状・アーク状構造が形成される。

本研究では、このような磁気交換型不安定性によって

円盤から放出された磁束が、円盤周囲にどのような構造を形成するのかを、数値シミュレーションを用いて検証することを目的とする。

2. 計算手法と初期条件

初期条件として、中心密度 10^6 cm^{-3} 、温度 10K のボナー・エバート (B. E.) 球を採用し、観測と同程度の角運動量を与えた。また、観測で推定されている平均磁場強度よりもわずかに強い一様磁場を、計算領域全体に初期条件として設定した。B. E. 球の外側は、中心密度の 7% に相当する一様密度のガスで満たしている。さらに、B. E. 球の半径の 32 倍の位置に固定境界を設定した。この境界は B. E. 球から十分に離れた位置にあるため、B. E. 球内部のガス運動には影響を与えない[3]。

計算は、オーム散逸および両極性拡散を考慮した非理想磁気流体方程式を 3 次元磁気流体多層格子法を用いて解き、分子雲コアの重力収縮過程を追跡した。多層格子は、 $(i, j, k) = (64, 64, 32)$ の格子点を持つ格子を 11 階層重ねた。最も内側の格子における空間解像度は 1 au である[4]。

3. 結果

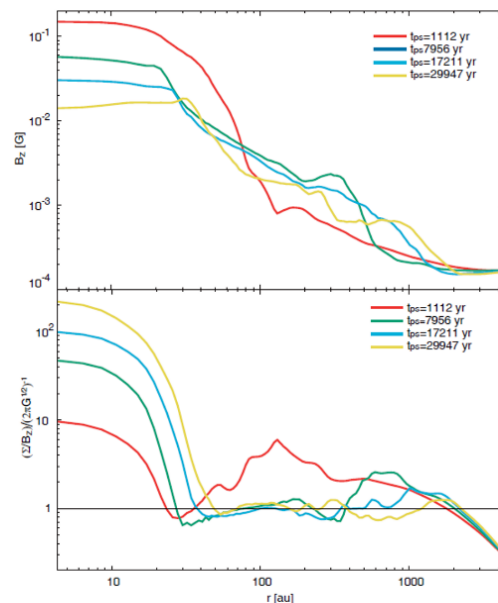


図1：磁場強度(top)と面密度磁束比(bottom)の中心星からの距離の分布。原始星形成後の異なる時間を異なる色で示している。

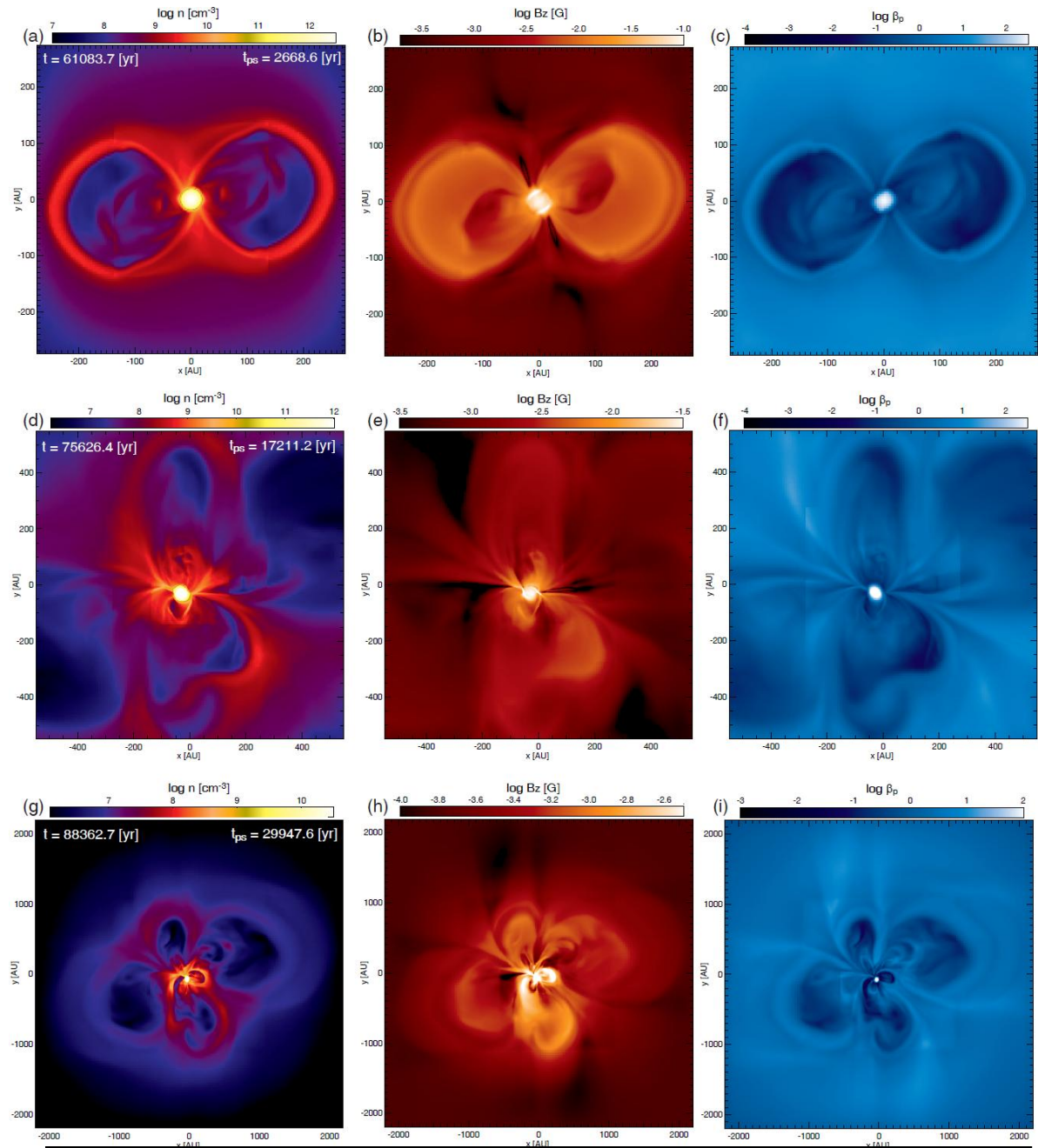


図 2：密度分布(左)、磁場強度(中央)、プラズマベータ(右)の赤道面での時間進化。計算開始からの時間 t 、原始星形成からの時間 t_{ps} を左のパネルに示している。各々のパネルでスケールは異なる。

図 1 は、磁場強度および面密度磁束比の時間進化を示している。横軸は中心星からの距離を表し、異なる色の線は原始星形成後の異なる時刻における分布を示している。この図より、中心部では時間の経過とともに磁場が弱くなり、外層では逆に磁場が徐々に強くなっていく様子が確認できる。また、図 1 下段から分かるように、磁場(磁束)が蓄積されている領域は時間とともに外側へと移動していく傾向を示している。

図 2 は、赤道面における密度、磁場強度、およびプラズマベータの分布の時間進化を示している。左パネルの中心近傍に見られる高密度領域(黄色の領域)は、星周円

盤に対応している。図より、星周円盤の周辺においてキャビティやアーク状構造が発達し、時間の経過とともに外側へ広がっていく様子が確認できる。

また、図 2 の中央および右パネルを図 1 左パネルと比較すると、ガス密度の低いキャビティおよびアーク構造の内部では磁場強度が高くなっていることが分かる。さらに、図 1 に示した磁場分布も併せて考慮すると、円盤から磁気交換型不安定性によって漏れ出した磁束が円盤外部に磁気圧の高い領域を形成し、その結果として磁気圧に起因する空洞やアーク状構造が形成されていると解釈できる。

本シミュレーションでは、原始星形成後およそ 3 万年

間にわたって計算を実施したが、この複雑な星周構造は計算終了時まで発達を続けた。また、図 3 に示すように、赤道面近傍において複雑な構造が形成されている場合であっても、中心部の回転円盤によって、図 3 に示したようなアウトフローが継続的に駆動されていることが確認された[5]。

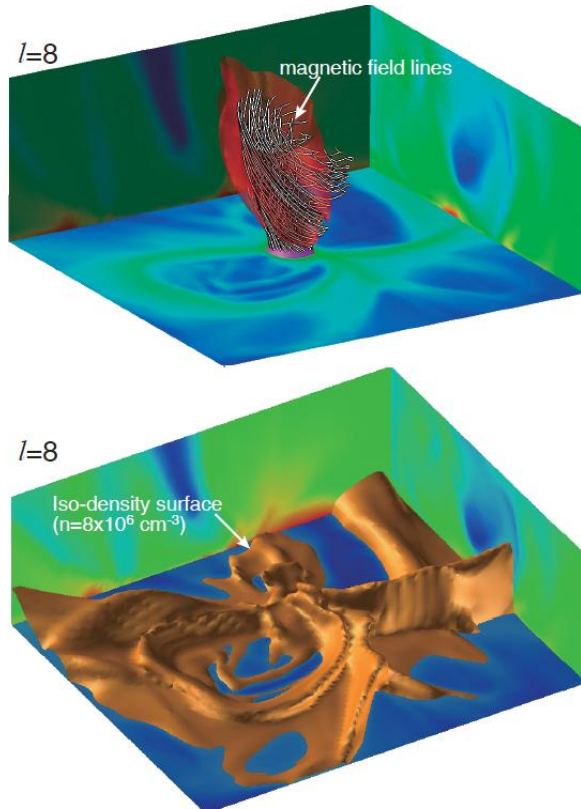


図 3(上图) アウトフロー(赤表面)と磁力線(黒と白の線)の3次元分布。(下图)密度の3次元構造。どちらのパネルも中心面の密度分布を壁面に投影している。

4. まとめと議論

本研究では、近年 ALMA 望遠鏡によって観測されている複雑な星周構造を再現することを目的として、観測で確認されている星形成前コアを初期条件に用い、コアの重力収縮過程に関する数値シミュレーションを実行し、星周円盤、星周構造、およびアウトフローの進化について調べた。本研究では、観測値よりもわずかに強い磁場環境における星形成過程を想定した。

その結果、円盤形成後に磁気交換型不安定性が発生し、複雑な星周構造が形成されることが明らかとなった。本研究で再現された星周構造は、降着段階にある原始星 (Class 0/I) で観測されている構造とよく対応しており、観測結果を定性的に再現することができた。しかし、本研究では 1 例のみの計算に基づく結果であり、どのような物理条件のもとでこのような星周構造が形成されるのかについては、今後、系統的なパラメータ調査を通じて明らかにしていく必要がある。

5. 今後の展望

今後の研究において、円盤から磁束が抜けて磁場が弱くなる現象は、惑星形成と密接に関係していると考えられる。通常、星周円盤では磁場の効果によって磁気回転不安定性 (MRI) が発生し、円盤は乱流状態となる。MRI による乱流は、ガス中の固体微粒子を巻き上げることで、固体微粒子の成長や惑星形成を阻害する要因となる。しかし、磁気交換型不安定性によって短時間で円盤から磁束が抜き取られ、円盤中の磁場が弱くなると、MRI は起こりにくくなり、固体微粒子の成長や惑星形成が促進される。

我々は現在解析中の天体の中で、磁気交換型不安定性が発生していると考えられる星周構造を持つ円盤において、惑星形成の間接的な証拠であるリング・ギャップ構造を有する天体を検出している。このことから、磁気交換型不安定性の発生は、惑星形成と強く関係している可能性が高いと考えられる。

今後の観測研究においては、複雑な星周構造を持つ天体の円盤において、惑星形成の兆候が存在するかどうかを詳しく探査する予定である。また、数値シミュレーションにおいては、星形成コアの物理パラメータを系統的に変化させることにより、どのような条件下で磁気交換型不安定性が発生するのかを詳細に調べる。今後は、観測と数値計算の比較検討を通して、磁気交換型不安定性と惑星形成の関係の解明を目指す。

謝辞

本研究の数値計算は、令和 7 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 (ES4) を用いて行いました。

文献

- [1] Shoshi, A., Muto, T., Bosschaart, Q., van der Marel, N., Mulders, G. D., Omura, M., Tokuda, K., and **Machida, M. N.** "ALMA High-resolution Observation for the Transitional Disk Around IRAS 04125+2902", *ApJ*, 993, 90, 2025
- [2] Kawasaki, Y. and **Machida, M. N.** "Impact of Magnetohydrodynamic Disk Wind on Early Evolutionary Stage of Protoplanetary Disk and Dust Growth", *ApJ*, 985, 106, 2025
- [3] **Machida, M. N.**, Hirano, S., and Basu, S. "Effect of Magnetic Field on the Accretion Phase of Population III Star Formation", *ApJ*, 988, 6, 2025
- [4] **Machida, M. N.** and Basu, S. "Complex Structure around a Circumstellar Disk Caused by Interchange Instability", *ApJL*, 979, L49, 2025
- [5] Aso, Y. and **Machida, M. N.** "Inclination Effect on Observational Identification of Outflow Rotation in Magnetohydrodynamics Simulations", *ApJ*, 989, 184, 2025