

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540270

研究課題名(和文) 磁気散逸を考慮した乱流分子雲コアにおける星形成の研究

研究課題名(英文) Star formation in turbulent cloud cores with magnetic diffusion

研究代表者

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60308004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：星は分子雲コアの重力収縮によって形成する。分子雲コアは磁場と乱流を持つことが観測によって示唆されている。また磁場は高密度になると散逸する性質が知られており、乱流と磁場の散逸を考慮したモデルが必要である。

そこで本研究では、乱流を持った分子雲コアにおける星形成を、磁場の散逸を考慮した適合格子細分化法(AMR法)シミュレーションを行った。その結果、磁場の強度によらず原始惑星系円盤が形成した。磁場が強いほど原始惑星系円盤の成長が遅くなる。磁場が強いモデルでは磁場の交換不安定が発生し、エンベロープに穴が形成した。

研究成果の概要(英文)：A molecular cloud core undergoes gravitational collapse to form a protostar and protoplanetary disk. Observations suggest that molecular cloud cores have magnetic field and turbulence. The magnetic field has a dissipative mechanism especially in the high-density gas.

In this study, we investigated collapse of magnetized and turbulent molecular cloud cores, taking account of magnetic dissipation. We followed the evolution of the cloud cores from onset of collapse to formation of a protostar and protoplanetary disk, by using high-resolution adaptive mesh refinement (AMR) simulation. All the cloud cores produce protoplanetary disks irrespective of assumed strengths of magnetic field and turbulence. There is a tendency that a strong magnetic field model shows slower growth of a protoplanetary disk. The strong magnetic field models exhibit cavities in the infalling envelopes, which are caused by the interchange instability of the magnetic field.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：星形成 星間ガス 数値シミュレーション 適合格子細分化法

## 1. 研究開始当初の背景

恒星は、分子雲コアが重力収縮することによって形成する。恒星の形成（星形成）の現場である分子雲コアと分子雲では、超音速に広がった分子輝線が観測され、超音速乱流の存在が示唆されている。また重力エネルギーと同程度の強い星間磁場の存在が観測によって示唆されている。したがって、星形成を解明する上で、乱流と星間磁場は自己重力と成り代わって最も重要な要素である（例えば McKee & Ostriker 2007）。

これまで、申請者グループをはじめとしていくつかのグループによって、乱流と星間磁場を考慮した星形成シミュレーションが行われてきた（Matsumoto & Hanawa 2011 他）。その結果、乱流は回転の起源になり、回転と磁場は原始星アウトフローを駆動した。原始星アウトフローは若い星に付随する質量放出現象である。原始星アウトフローは、原始星に降着するガスから角運動量を取り去り、星形成における角運動量問題を解決する重要な現象である。

その一方で、星間磁場は星形成のシナリオにつきのような困難さをもたらすことが分かってきた。磁場と原始星アウトフローによる強力な角運動量輸送により、(1) 原始星の周囲に原始惑星系円盤が形成されない問題、さらに(2) 回転によって駆動される分裂メカニズムが抑制される問題である（Mellon & Li 2008, Hennebelle & Teyssier 2008）。第1の問題は、惑星形成に重大な影響を与える。また第2の問題は連星系形成に重大な影響を与える。恒星の過半数は連星もしくは多重星で形成されることが観測から示唆されているため、この問題は早急に解決しなければならない問題である。これらの未解決問題は星間磁場に起因するものであり、星間磁場を考慮しないモデルでは現れない問題であった（例えば Matsumoto & Hanawa 2003）。

## 2. 研究の目的

本研究は大規模な MHD 数値シミュレーションを遂行することによって、上記の原始惑星系円盤形成と連星系形成の2つの未解決問題に取り組む。星形成は極めて非線形性が強い問題であるため、数値シミュレーションによる研究が必須である。

未解決問題の本質は星間磁場による角運動量輸送（回転の抑制）が効き過ぎることである。そこで本研究では、磁場の散逸を考慮した数値シミュレーションを行う。磁場を散逸させることにより、磁場による角運動量輸送を抑えることが狙いである。磁場の散逸機構には、オーム散逸・ホール効果・両極性拡散が存在し、とくにオーム散逸は星形成時に発生するガスの高密度領域においては主要な磁場の散逸機構として広く知られている。本研究では、磁場の散逸を考慮して、分子雲

コアスケールから原始星スケールまでの進化を再現した3次元シミュレーションを遂行し、円盤形成期を含む星形成の初期段階を研究する。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、適合格子細分化法 (AMR 法) を用いた MHD 数値シミュレーションを遂行した。シミュレーションコードに自己重力 MHD-AMR コード, SFUMATO を用いた (Matsumoto 2007)。

本件では SFUMATO につきの2点の改良を行った。

第1の改良はシンク粒子の実装である。シンク粒子は星を表すサブグリッドモデルである。シンク粒子は重力によってガスと相互作用し、ガスを降着して質量を増加させる。シンク粒子の導入によってこれまで AMR 格子の細分化があるレベルで抑えられ、現実的な計算時間で系の進化を計算することが可能になる。

第2の改良は磁場の散逸機構の実装である。まずオーム散逸を陰解法で実装した (Matsumoto 2011)。陰解法にはマルチグリッド法を用いた。この方法はポアソン方程式のマルチグリッド法をベースとして、解かれる式をスカラーからベクトルへ拡張したものである。空間精度は2次精度であり、時間精度はクランクニコルソン法による2次精度と完全陰解法による1次精度を選ぶことができる。本件では、安定な解の性質を優先して、時間1次精度の完全陰解法を採用した。

他の磁場の散逸機構である両極性拡散とホール効果の実装も行った (松本 2011)。この実装では、上記のベクトルマルチグリッド法を線形方程式から非線形方程式へ拡張した。テスト計算では適切な解を求めることができたが、科学的な計算では解が収束しないことがあり、実用レベルに達するためにはさらなる改良が必要である。具体的には、スムージング法をガウスザイデル法から不完全 LU 分解等に変更するなど、より非線形方程式に適した方法の採用する改良が必要であるが、これは今後の課題である。

## 4. 研究成果

乱流と磁場の強さを変えて、分子雲コアの収縮から原始惑星系円盤形成期（シンク粒子形成後 1000 年）の進化を調べた。シンク粒子の形成は、原始星（セカンドコア）の形成に相当する。乱流として初期に平均マッハ数  $M$  の非圧縮性の速度場を与えた。計算中は乱流を励起する仕組みは考えず、初期に与えた乱流が減衰するのみとした。磁場の強さは、分子雲コアの中心における密度にもとづいて臨界磁場強度を設定し、分子雲コアの中心における磁場強度を臨界磁場強度を単位として  $\alpha$  で表した。

図 1 はシンク粒子形成後 1000 年間における原始惑星系円盤の成長を示す。原始惑星系円盤の半径は、典型的な原始惑星系円盤の密度よりも高密度な領域において、遠心力半径の平均値を導出し、それを円盤の半径の指標とした。

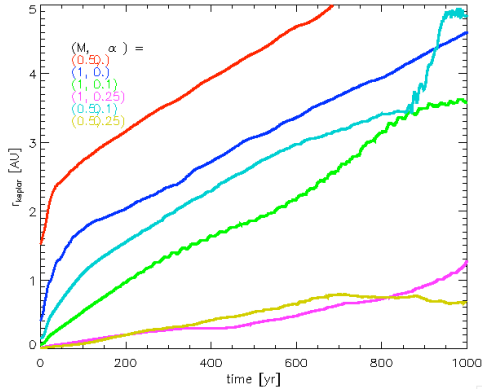


図 1 シンク粒子形成後の時刻に対する円盤の遠心力半径。

磁場がないモデル ( $\alpha=0$ ) は磁場を考慮したモデル ( $\alpha \neq 0$ ) よりも円盤の成長が速いことが確認された。これは磁気制動によって角運動量が外側に輸送された結果である。

磁場を考慮しないモデルについてさらに計算を進めた。シンク粒子形成後 1 万年の面密度分布を図 2 に示す。このモデルは磁気制動が効かないために、円盤が大きな角運動量を持つことになり、結果として円盤が分裂して原始連星が形成した。この連星系では、2 個の原始星がそれぞれ原始惑星系円盤を持ち、さらに 2 個の原始星を取り囲むように周連星円盤が形成した。このような描像は、電波や赤外線で観測される若い原始連星系のものとも一致する。

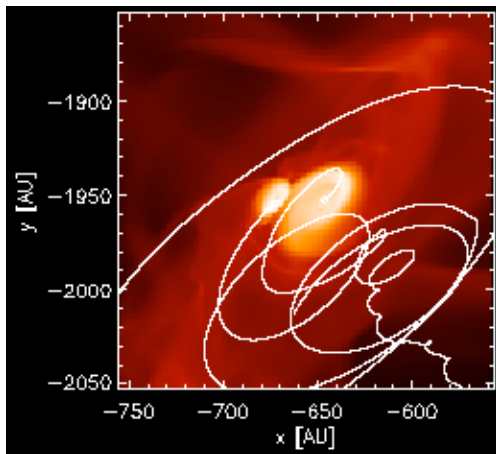


図 2  $M=1$ ,  $\alpha=0$  のモデルにおけるシンク粒子形成後  $1.1 \times 10^4$  年の中心領域の  $(200 \text{ AU})^2$  の面密度分布。曲線はシンク粒子の軌跡である。

磁場を考慮した場合 ( $\alpha \neq 0$ )、初期の磁場が弱いほど円盤の成長率は大きく、シンク粒

子形成後 1000 年における円盤も大きい(図 1)。また初期の乱流の大きさへの依存は小さい。

図 3 に  $\alpha = 0.1$ ,  $M = 0.5$  のモデルの面密度分布である。図に示す通り、半径 10 AU 程度の原始惑星系円盤が形成する。その周囲には、渦状腕をともなったエンベロープが半径 20 AU 程度まで広がっている。

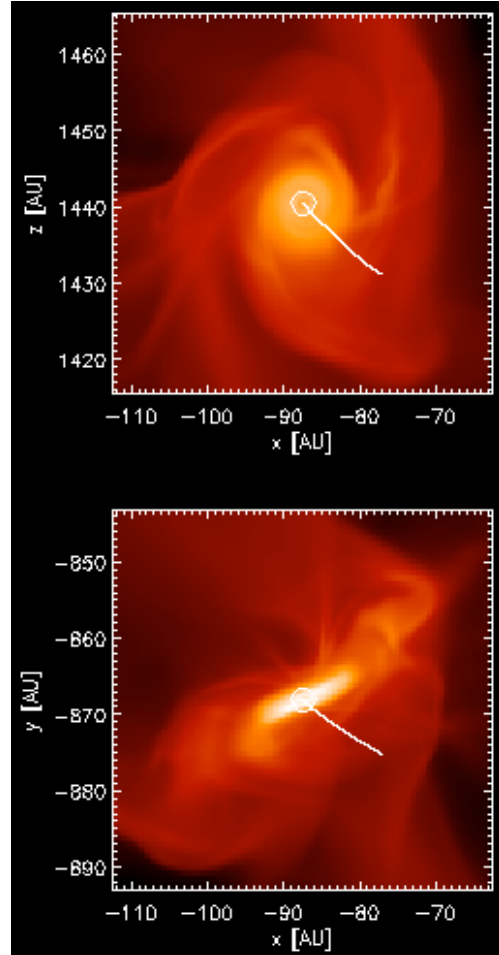


図 3  $M=0.5$ ,  $\alpha=0.1$  のモデルにおけるシンク粒子形成後 1000 年の中心領域の  $(50 \text{ AU})^2$  の面密度分布。曲線はシンク粒子の軌跡である。曲線に端の円はシンク半径を示す。上図は円盤を上から (face-on)、下図は横から (edge-on) 見たものである。

図 4 はもっとも磁場が強い ( $\alpha = 0.25$ ) のモデルの  $(200 \text{ AU})^2$  の面密度分布を示す。エンベロープに 50 AU 程度の広がりをもった穴が開いている。これはつぎの理由による。シンク粒子の周辺は高密度部なのでオーム散逸がよく効く領域である。そこではガスと磁場の凍結が解けてガスだけがシンク粒子に落下することができる。またシンク粒子の実装上、ガスだけを吸い込み、磁場はそのままにしている。したがって、シンク粒子に降着せずに取り残された磁場がシンク粒子の周囲に貯まり、それが磁場の交換不安定によってガスを押しよけながら外側へ広がったと考えられる。穴は磁場が強く、穴の磁気圧とエ

ンベロープのガス圧がおおよそ釣り合っている。

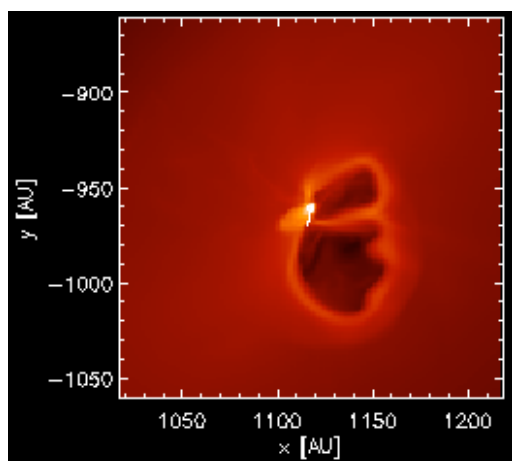


図4  $M=1$ ,  $\alpha=0.25$  のモデルにおけるシンク粒子形成後 1000 年の中心領域の  $(200 \text{ AU})^2$  の面密度分布。曲線はシンク粒子の軌跡である。曲線に端の円はシンク半径を示す。

図5は図4のシンク粒子周辺を拡大したものである。シンク粒子の周囲には原始惑星系

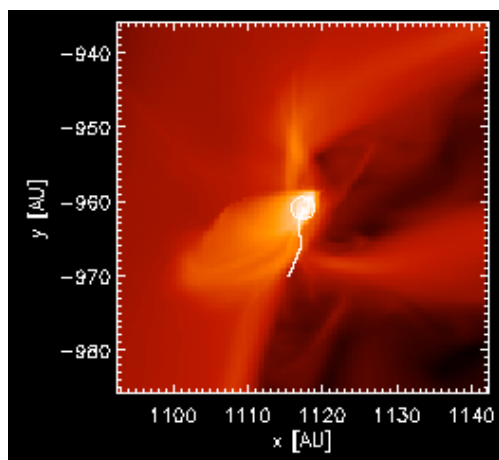


図5  $M=1$ ,  $\alpha=0.25$  のモデルにおけるシンク粒子形成後 1000 年の中心領域の  $(50 \text{ AU})^2$  の面密度分布。曲線はシンク粒子の軌跡である。曲線に端の円はシンク半径を示す。

円盤が形成しつつあるが、磁場によって開けられた穴によって円盤が変形している。図中において左下に伸びた構造になる。このような穴構造は他著者による一部のシミュレーションでも認められており、その成因について今後さらに詳しく調べられるであろう。また観測の可能性についても議論を進める予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Machida, Masahiro N.; Inutsuka, Shu-ichiro; Matsumoto, Tomoaki, Conditions for circumstellar disc formation: effects of initial cloud configuration and sink treatment, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 438, Issue 3, p.2278-2306, 2014  
DOI: 10.1093/mnras/stt2343
- ② Shimoikura, Tomomi; Dobashi, Kazuhito; Saito, Hiro; Matsumoto, Tomoaki; Nakamura, Fumitaka; Nishimura, Atsushi; Kimura, Kimihiro; Onishi, Toshikazu; Ogawa, Hideo, Molecular Clumps and Infrared Clusters in the S247, S252, and BFS52 Regions, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 768, Issue 1, article id. 72, 27 pp., 2013  
DOI: 10.1088/0004-637X/768/1/72
- ③ Tomida, Kengo; Tomisaka, Kohji; Matsumoto, Tomoaki; Hori, Yasunori; Okuzumi, Satoshi; Machida, Masahiro N.; Saigo, Kazuya, Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Protostellar Collapse: Protostellar Core Formation, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 763, Issue 1, article id. 6, 29 pp., 2013  
DOI: 10.1088/0004-637X/763/1/6
- ④ Furuya, Kenji; Aikawa, Yuri; Tomida, Kengo; Matsumoto, Tomoaki; Saigo, Kazuya; Tomisaka, Kohji; Hersant, Franck; Wakelam, Valentine, Chemistry in the First Hydrostatic Core Stage by Adopting Three-dimensional Radiation Hydrodynamic Simulations, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 758, Issue 2, article id. 86, 20 pp., 2012  
DOI: 10.1088/0004-637X/758/2/86
- ⑤ Machida, Masahiro N.; Matsumoto, Tomoaki, Impact of protostellar outflow on star formation: effects of the initial cloud mass, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 421, Issue 1, pp. 588-607, 2012  
DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.20336.x
- ⑥ Machida, Masahiro N.; Inutsuka, Shu-ichiro; Matsumoto, Tomoaki, Effect of Magnetic Braking on Circumstellar Disk Formation in a

Strongly Magnetized Cloud,  
Publications of the Astronomical  
Society of Japan, 査読有, Vol.63, No. 3,  
pp.555-573, 2011

DOI: 10.1093/pasj/63.3.555

- ⑦ Machida, Masahiro N.; Matsumoto, Tomoaki, The origin and formation of the circumstellar disc, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 413, Issue 4, pp. 2767-2784, 2011

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18349.x

- ⑧ Matsumoto, Tomoaki, An Implicit Scheme for Ohmic Dissipation with Adaptive Mesh Refinement, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.63, No.2, pp.317-323, 2011

DOI: 10.1093/pasj/63.2.317

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 松本倫明、乱流と降着流をもった分子雲における集団的星形成、日本天文学会 2013 年春季年会、2013 年 3 月 20 日、埼玉大学
- ② 松本倫明、陰解法を用いた磁場の散逸過程の数値解法、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011 年 9 月 21 日、鹿児島大学

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://redmagic.i.hosei.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号： 60308004