

機関番号：32675

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540238

研究課題名 (和文) 適合格子細分化法による磁気乱流星形成の研究

研究課題名 (英文) Magneto-turbulent star formation with adaptive mesh refinement

研究代表者

松本 倫明 (MATSUMOTO TOMOAKI)

法政大学・人間環境学部・准教授

研究者番号：60308004

研究成果の概要 (和文)：磁場と乱流を持った分子雲コアが重力収縮し、ファーストコアとアウトフローが形成する様子を、適合格子細分化法を用いた数値シミュレーションで調べた。その結果、乱流は分子雲コアの低密度部に複雑な構造を形成した。高密度部では、分子雲コアの質量が小さい場合には円盤状に、質量が大きい場合にはフィラメント状に変形した。高密度部の形状によって 2 タイプのアウトフロー (双極型とらせん型) が形成する。

研究成果の概要 (英文)： Gravitational collapse of magneto-turbulent molecular cloud cores is investigated by adaptive mesh refinement simulations. The simulations show that low-density regions of the cloud cores are disturbed by the turbulence. The high-density regions assume disk and filament shapes for low and high mass cloud cores, respectively. For all the cases, a first core is formed in the cloud core, and an outflow is ejected there. The outflows are classified into two types: bipolar and spiral flows.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：星形成、磁気流体力学、数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 分子雲コアにおける星形成は、星間磁場と乱流の影響をうけると言われている。分子雲コアは強い磁場を持つことが観測から示唆され、磁場のエネルギーは重力エネルギーと同程度である。また分子雲は超音速乱流状態にあり、分子雲に内包される分子雲コアも音速程度の乱流を持つと観測から示唆されている。したがって、磁場と乱流は分子雲コアの重力収縮と星形成に影響を与えると考えられ、磁場と乱流の両方を考慮した分子雲

コアの重力収縮シミュレーションが急務となっていた。

(2) 磁場と乱流は星形成において重要な要素であるにもかかわらず、これまでに磁場と乱流の両方を考慮した分子雲コアの重力収縮を計算したシミュレーションは行われてこなかった。乱流は原始星の自転や原始惑星系円盤の回転の角運動量の起源であると考えられる。また、乱流は分子雲コアの分裂を誘発し、連星系の形成に重要な役割を果たす可

能性がある。さらに、磁場と回転は双極分子流を駆動すると考えられる。双極分子流は星形成において、星の周辺から周囲のガスへ角運動量を輸送する重要な機構として知られている。このように、磁場と乱流は星形成の初期段階において重要な要素である。

(3) 磁場と乱流が星形成に重要であるにも関わらず、磁場と乱流の両方を取り入れた分子雲コアの重力収縮シミュレーションはほとんど行われてこなかった。これまで行われてきたものは、磁場を取り入れて回転を仮定したシミュレーションや、乱流を取り入れ磁場を考慮しないシミュレーションであった。

(4) 星形成の初期段階（分子雲コアの重力収縮から原始星の形成に至る過程）を調べるためには、広い空間ダイナミックを実現するシミュレーション技術が必要である。初期条件である分子雲コアの大きさは 0.1pc 程度であるのに対し、形成されるファーストコアの大きさは 1AU 程度である。したがって要求されるダイナミックレンジは 5 桁以上にわたり、従来の一様格子を用いたシミュレーションで実現不可能なダイナミックレンジである。そこで、本研究では適合格子細分化法（AMR 法）を用いて、広いダイナミックレンジを実現した。AMR 法を用いて自己重力と磁気流体力学を解くことができるのは本研究の他数グループだけである。国内では本研究だけである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、磁場と乱流の両方を考慮して、分子雲コアからファーストコアの形成に至る星形成の初期段階を調べる。磁場と乱流の強さをモデルごとに変えながら、磁場と乱流が星形成の初期段階に与える影響を調べる。本研究ではつぎの点に着目する。

(2) 分子雲コアの形について調べる。観測的にも理論的にも分子雲コアの形について議論されてきたが、何が分子雲コアの形に影響を与え、分子雲コアの形が何に影響を与えるかは不明なままであった。本研究では広いダイナミックの特性を活かし、密度レンジごとの分子雲コアの形を議論する。

(3) アウトフローの形成について調べる。これまでの研究によると、星形成の比較的早い段階でアウトフローが形成されることが知られている。磁場がアウトフローに与える影響については比較的多くの研究が存在するが、乱流がアウトフローに与える影響についてはほとんど調べられていなかった。本研究では、初期の乱流が回転の源となり、アウトフローを駆動すると考えられる。従来のアド

ホックに過程された回転が駆動するアウトフローとの違いを議論する。

(4) 分子雲コアの重力収縮中における分裂について調べる。分子雲コアの分裂は、連星系形成の主要な機構のひとつであると考えられ、星形成において重要な要因である。本研究では乱流が密度ゆらぎとなって、分子雲コアの分裂を促進する可能性がある。一方、磁場が分裂を抑制する可能性もある。本研究では乱流と磁場を持った分子雲コアの分裂の可能性についても探査する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、分子雲コアからファーストコアの形成に至る過程を、数値シミュレーションを用いて調べる。モデルでは乱流と磁場を考慮する。

(2) 分子雲コアの重力収縮における広いダイナミックを実現するため、AMR 法を用いた高精度な数値シミュレーションコード SFUMATO を用いた。SFUMATO は本研究代表者によって開発された自己重力・磁気流体力学 AMR コードである。図 1 は SFUMATO を用いて二重マッハ反射問題を解いた計算例である。衝撃波の位置に高解像なブロックが配置され、衝撃波が高解像度で分解されている。

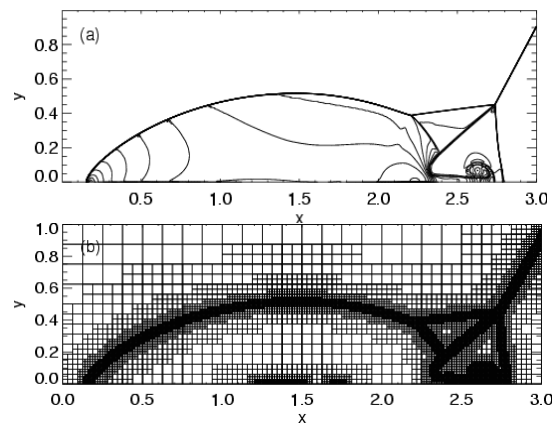


図 1 AMR コード SFUMATO を用いて計算した二重マッハ反射問題の一例。上図は密度分布を、下図はブロックの分布を示す。

(3) 分子雲コアの初期条件はつぎの通りである。初期の密度分布として、自己重力等温ガス雲の球対称平衡解である Bonner-Ebert 球を用いる。重力収縮を促すため、密度を数倍増やす。この Bonner-Ebert 球に $P(k) \propto k^{-4}$ のスペクトルを持つ乱流の速度場を初期に与える。乱流速度場の平均速度をモデルごとに変える。磁場として初期に一樣磁場を仮定した。磁場の強度をモデルごとに変える。

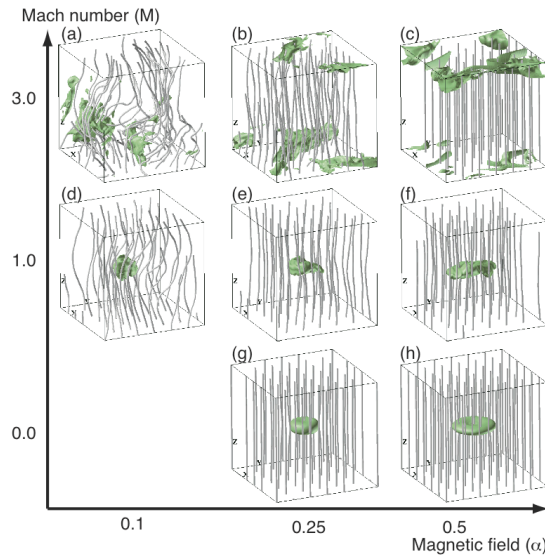


図 2 分子雲コアの質量が小さい場合の最終状態（ファーストコア形成 200 年後）の分布。縦軸は初期に設定した乱流のマッハ数、横軸は初期に設定した磁場強度である。磁場強度は臨界強度によって規格化されている。

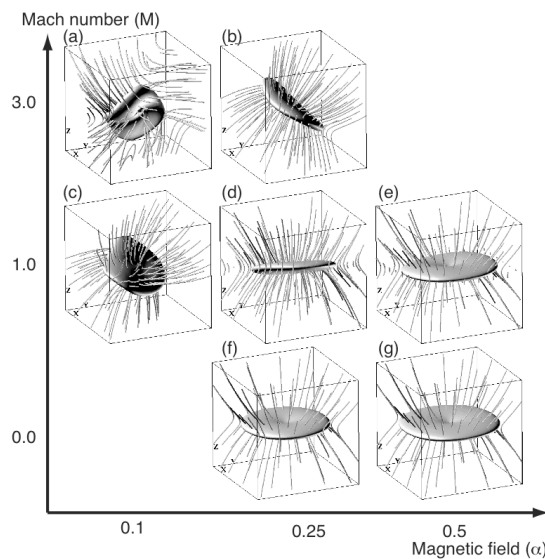


図 3 ファーストコア近傍(400AU)³の密度分布と磁場分布。

4. 研究成果

(1) 乱流によって分子雲コアは低密度部分（分子雲コアの周辺部）だけが複雑な密度分布をもち、高密度部は比較的なめらかな密度分布になる。図 2 はファーストコア形成 200 年後の分子雲コアの様子である。乱流が強いモデル（マッハ数 3）では初期に設定した分子雲コアは強く乱され、とくに磁場が弱いモ

デルでは複雑な磁力線を呈する。乱流が中程度のモデル（マッハ数 1）においても、分子雲コアの外周部は乱流によって複雑な構造を持つ。図 3 はファーストコア近傍(400AU)³の密度分布と磁力線を示す。分子雲コアの高密度部では、低密度部のような複雑な密度分布ではなく、なめらかな密度分布になる。磁場に垂直な扁平した密度分布を呈し、磁力線は砂時計型になる。これは従来行われてきた、乱流を導入せずに回転を仮定したモデルと整合的である。ファーストコアは球状で、扁平したエンベロープに内包されている。

(2) 乱流を持った分子雲コアでもアウトフローが形成される。従来は初期の回転をアドホックに仮定し、回転と磁場によってアウトフローが駆動された。本研究では乱流が収縮中の分子雲コアに角運動量を持ち込み、回転の起源となり、アウトフローを駆動する（図 4）。

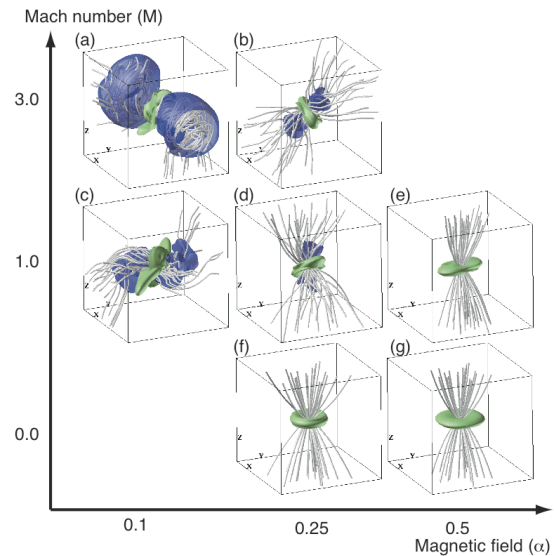


図 4 ファーストコア近傍(40AU)³の密度分布(緑の等値面)と磁場分布(チューブ)。青い等値面は動径速度がマッハ 3 の位置を示し、アウトフローを示す。

(3) 分子雲コアの質量が大きい場合には、分子雲コアの高密度部は細長いフィラメント状になる。ファーストコアは球状でフィラメント状のエンベロープに内包されている。

(4) アウトフローの構造はエンベロープの構造に依存する。双極型のアウトフローは円盤状のエンベロープに付随する。一方、スパイラル状のアウトフローはフィラメント状のエンベロープに内包されている。

(5) 分子雲コアの質量が小さい場合、乱流は

分子雲コアの分裂を促進することはできなかつた。一方、分子雲コアの質量が大きい場合には、分子雲コアの高密度部は細長いフィラメント状になるため、フィラメントは分裂すると予想される。

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 19 件)

- ① 松本倫明、An Implicit Scheme for Ohmic Dissipation with Adaptive Mesh Refinement, Publication of Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.63, No.2, 2011, pp. 317-323
- ② 松本倫明、花輪知幸、Protostellar Collapse of Magneto-turbulent Cloud Cores: Shape During Collapse and Outflow Formation, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 728, Issue 1, 2011, article id. 47, 18pp.
- ③ 町田正博、松本倫明、The origin and formation of the circumstellar disc, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 印刷中
- ④ 町田正博、犬塚修一郎、松本倫明、Recurrent Planet Formation and Intermittent Protostellar Outflows Induced by Episodic Mass Accretion, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 729, Issue 1, 2011, article id. 42, 17pp.
- ⑤ 富田賢吾、町田正博、西合一矢、富阪幸治、松本倫明、Exposed Long-lifetime First Core: A New Model of First Cores Based on Radiation Hydrodynamics, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 725, Issue 2, 2010, pp. L239-L244
- ⑥ 町田正博、犬塚修一郎、松本倫明、Formation Process of the Circumstellar Disk: Long-term Simulations in the Main Accretion Phase of Star Formation, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 724, Issue 2, 2010, pp. 1006-1020
- ⑦ 犬塚修一郎、町田正博、松本倫明、Emergence of Protoplanetary Disks and Successive Formation of Gaseous Planets by Gravitational Instability, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 718, Issue 2, 2010, pp. L58-L62
- ⑧ 町田正博、小久保英一郎、犬塚修一郎、松本倫明、Gas accretion onto a protoplanet and formation of a gas giant planet, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 405, Issue 2, 2010, pp. 1227-1243.
- ⑨ 富田賢吾、富阪幸治、松本倫明、大須賀健、町田正博、西合一矢、Radiation Magnetohydrodynamics Simulation of Proto-stellar Collapse: Two-component Molecular Outflow, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 714, Issue 1, 2010, pp. L58-L63
- ⑩ 眞山聡、田村元秀、花輪知幸、松本倫明、他 9 名、Direct Imaging of Bridged Twin Protoplanetary Disks in a Young Multiple Star, Science, 査読有, Volume 327, Issue 5963, 2010, pp. 306-308
- ⑪ 町田正博、大向一行、松本倫明、犬塚修一郎、Binary formation with different metallicities: dependence on initial conditions, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 399, Issue 3, 2009, pp. 1255-1263
- ⑫ 町田正博、大向一行、松本倫明、Star Formation in Relic H II Regions of the First Stars: Binarity and Outflow Driving, 査読有, The Astrophysical Journal, Volume 705, Issue 1, 2009, pp. 64-67
- ⑬ 町田正博、犬塚修一郎、松本倫明、The Circumbinary Outflow: A Protostellar Outflow Driven by a Circumbinary Disk, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 704, Issue 1, 2009, pp. L10-L14
- ⑭ 町田正博、犬塚修一郎、松本倫明、First Direct Simulation of Brown Dwarf Formation in a Compact Cloud Core, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 699, Issue 2, 2009, pp. L157-L160
- ⑮ 町田正博、小久保英一郎、犬塚修一郎、松本倫明、Angular Momentum Accretion onto a Gas Giant Planet, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 685, Issue 2, 2008, pp. 1220-1236
- ⑯ 町田正博、松本倫明、犬塚修一郎、Magnetohydrodynamics of Population III Star Formation, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 685, Issue 2, 2008, pp. 690-704
- ⑰ 三上隼人、佐藤裕司、松本倫明、花輪知、Three-dimensional

- Magnetohydrodynamical Simulations of a Core -Collapse Supernova , The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 683, Issue 1, 2008, pp. 357-374
- ⑱ 町田正博、大向一行、松本倫明、犬塚修一郎、Conditions for the Formation of First-Star Binaries , The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 677, Issue 2, 2008, pp. 813-827
- ⑲ 町田正博、犬塚修一郎、松本倫明、High-and Low-Velocity Magnetized Outflows in the Star Formation Process in a Gravitationally Collapsing Cloud, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 676, Issue 2, 2008, pp. 1088-1108

[学会発表] (計4件)

- ① 松本倫明、磁気乱流分子雲コアにおける回転円盤とアウトフローの形成、日本天文学会、2010年9月22日、金沢大学(石川県)
- ② 松本倫明、星形成 AMR シミュレーションにおけるシンク粒子の開発、日本天文学会、2009年9月15日、山口大学(山口県)
- ③ 松本倫明、Star formation in a turbulent cloud core with Self-gravitational MHD Adaptive Mesh Refinement, ASTRONUM 2009, 2009年7月2日、Chamonix (フランス)
- ④ 松本倫明、磁気乱流を持った分子雲コアの収縮とアウトフローの放出、日本天文学会、2009年3月25日、大阪府立大学(大阪府)

[図書] (計1件)

- ① 松本倫明, Astronomical Society of the Pacific, Numerical Modeling of Space Plasma Flows ASTRONUM-2009, 2010, pp. 22-27.

[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・准教授

研究者番号：60308004