

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540244

研究課題名(和文) 輻射磁気流体力学計算に基づく原始惑星系円盤モデルの構築

研究課題名(英文) Protoplanetary disk model based on radiation magnetohydrodynamics simulations

研究代表者

廣瀬 重信 (Hirose, Shigenobu)

独立行政法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員

研究者番号：90266924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：惑星形成の舞台となる原始惑星系円盤の物理状態、特に円盤ガスの乱流状態と温度分布を正しく知ることは、惑星形成プロセスを理解する上で重要である。本研究では、輻射磁気流体力学方程式の直接数値計算によって、円盤ガスの乱流を解像しつつ、輻射輸送も解くことにより、温度を含む原始惑星系円盤の構造を無矛盾に求めた。特に、中心星近傍における有効温度と面密度の関係を求めることにより、そこで起こり得る水素電離に伴う熱不安定性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is crucial to know correct turbulent states and thermodynamics in protoplanetary disks to understand the planet formation processes. We have computed thermodynamical structure with magnetic turbulence for a local patch of a protoplanetary disk using direct numerical simulations of magnetohydrodynamics with radiative transfer. Specifically, we have obtained a thermal equilibrium curve (effective temperature vs. surface density) at an inner radius where thermal instability due to ionization transitions is expected.

研究分野：天体物理学

キーワード：原始惑星系円盤 降着円盤 熱平衡曲線 磁気回転不安定性 磁気流体力学 輻射輸送 水素電離 熱不安定

1. 研究開始当初の背景

星形成過程で形成される原始惑星系円盤は、中心星におよそ 10^8 [太陽質量/年] でガスを供給している降着円盤である。この質量降着率の大きさから、原始惑星系円盤は何らかの乱流状態にあり、その乱流ストレスによって降着が起きていると考えられている。乱流は、ガスに含まれるダストの運動を直接コントロールして、ダストの合体成長や赤道面への沈殿に大きな影響を与える一方、その散逸による加熱は円盤ガスやダストの温度に影響を与えるため、正確に取り扱うことが重要である。

この乱流の起源として最も有力な候補が、差動回転から自由エネルギーを取り出す磁気回転不安定性である (Balbus & Hawley 1991)。この磁気流体力学不安定性が起こるためには、ガスが電離して磁場と結合している必要があるが、温度の低い原始惑星系円盤では熱電離が効かず、表層部分のみが、宇宙線や中心星からの X 線等によって非熱的に電離され得る。この結果、原始惑星系円盤では、その大部分において、表層部分でのみ磁気乱流が維持されて質量降着が起きる一方、内部は磁気乱流の発達しない「デッドゾーン」になると考えられている; Gammie 1996, Sano et al. 2000 他)。

これに対し、従来の原始惑星系円盤モデルの多くでは、乱流を簡便に取り扱うために「乱流ストレスがガス圧に比例する」という仮定 (Shakura & Sunyaev 1973) を導入している。しかし、このパラメタリゼーションによる乱流モデルでは、デッドゾーンを含む原始惑星系円盤の複雑な垂直構造を記述出来ない。そのためには、直接数値計算によって乱流を解像することが必須となる。

一方、原始惑星系円盤の温度は、円盤ガスとダストの化学進化をコントロールする重要な物理量であるが、この温度を正確に求めることもまた難しい。原始惑星系円盤は、上述の磁気乱流の散逸と共に中心星からの可視光照射によって加熱されており、これらの加熱と輻射による冷却が釣り合うことで熱平衡状態となる。従って、円盤の温度を正しく求めるためには、乱流を解像する磁気流体力学計算と同時に、これらの加熱・冷却過程を含む輻射輸送を解く必要がある。しかし、これまでの磁気流体力学計算モデルでは、計算コスト削減のため、等温が仮定されてきた。

そこで、本研究では、輻射磁気流体力学の直接数値計算によって、磁気乱流と輻射輸送の双方を第一原理から取り扱い、デッドゾーンを含む原始惑星系円盤の物理状態をセルフコンシステントに求めることにした。なお、本研究では、十分な計算解像度を確保するために直接数値計算の対象を局所構造に限定している。

2. 研究の目的

研究目的として以下の三点を設定した。

(1) 局所構造のパラメタ依存性と大局構造の推定

局所構造を考える上での計算パラメタは、中心星からの距離と面密度であり、これらに関する系統的なサーベイを行う。計算ボックス内で準定常的な平衡状態が得られた場合、物理量の垂直分布と質量降着率が統計平均量として求まる。さらに、サーベイ結果をコンパイルして構築される質量降着率のデータベースから、大局的な定常状態における面密度の動径分布を、離散的な逆関数として求める。

(2) 円盤大気における磁気乱流の散逸機構

従来の研究では取り扱うことの出来なかった磁気乱流とその散逸が起こるのは、円盤大気部分である。ここでは、直接数値計算のスナップショットの時系列データから、特に、分子輝線による観測可能性のある大気上部で起こる磁気乱流の散逸機構について調べる。具体的には、磁気リコネクションと磁気流体衝撃波に着目し、それらが発生するための物理的条件・頻度とともに、それぞれのメカニズムによる散逸率を定量的に評価する。

(3) 水素電離に伴う熱安定性の検証

原始惑星系円盤でも中心星に十分近い場所では、温度が、水素の熱電離が起きる 10^4K に達する。この水素電離によるオパシティ変化のために冷却率が負の温度依存性を持つことから、そのような場所での熱的不安定の発現とそれに伴う質量降着率変動の可能性が指摘されている (Kawazoe & Mineshige 1993)。しかし、その先行研究では、ガスの電離状態、すなわち電気抵抗の大きさによって磁気乱流の散逸による加熱率が変化する点は考えられていない (Sano & Stone 2003)。そこで、ガス温度が 10^4K 程度になるパラメタセットで直接数値計算を行い、オパシティと電気抵抗の双方が大きく変化する状況での、局所構造解の熱安定性を数値的に調べる。

3. 研究の方法

原始惑星系円盤の局所構造を再現するために、シアリングボックスと呼ばれる線形化した回転系を用いる。支配方程式は、流束制限拡散近似を適用した輻射磁気流体力学方程式であり、これを、エネルギー保存するように修正した ZEUS 法を用いて数値的に解く (Turner & Stone 2001, Hirose et al. 2006)。また、デッドゾーンを取り扱うため、ガス電離度を決定する化学反応式も同時に解く。

上記の研究目的に共通なのは、シアリングボックス内での準定常状態を求めることである。シアリングボックスの位置 (中心からの距離、あるいは角速度) を決めると残るパラメタは面密度だけである。そこで、この面密度に相当するガス (と適当な磁場、輻射場) をボックス内に入れて、数値計算を開始し、

系が（熱時間に比べて十分長く継続する）定常状態に達するまで計算を行う。

4. 研究成果

(1) 輻射磁気流体力学計算コードの作成

研究目的(3)において取り扱う、水素電離の影響は、状態方程式とオパシティに現れる。状態方程式に関しては、水素分子の解離・水素原子（および他の原子）の電離を考慮した電離平衡の式を解き、温度・圧力などを密度と内部エネルギーの関数として表したテーブルを用意した。オパシティに関しては、パブリッシュされている三つのオパシティテーブルを組み合わせることで、水素電離温度を含む幅広い温度域に対応できるテーブルを用意した。また、時間陰解法で輻射輸送をロバストに解けるように、時間ステップを動的に変化させる仕組みも取り入れた。一方、円盤大気において、ダストとガスの温度が分離する場合にも対応できるように、輻射輸送アルゴリズムの定式化も行った。

(2) 水素電離温度近傍の熱平衡曲線（研究目的(1)(3)、雑誌論文①）

中心星からの距離を 0.04 天文単位に設定したシアリングボックスにおいて、様々な面密度（ボックス内のガスの量）に対する準定常状態を求め、そこでの質量降着率（あるいは有効温度）を測定した。これにより、質量降着率が、面密度の関数として得られたことになる。結果、解の集合は、三つの異なるブランチに分かれた。一つは、高温かつ光学的に厚い状態に対応し（＝高温ブランチ）、別の一つは、低温かつ光学的に薄い状態に対応する（低温ブランチ）。これらの二つのブランチは、オパシティが水素電離温度を境に高温側（低温側）で高く（低く）なることが要因である。高温ブランチと低温ブランチの間に位置する、もう一つの解ブランチは、熱輸送が対流で起こることが特徴であり、他の二つの解ブランチにおいて熱輸送が輻射拡散で起こると対照的である。

また、ある面密度範囲において、二つ（あるいは三つ）の解ブランチが同時に存在すること、すなわち、系は双安定になることがわかった。このことは、条件（周囲の質量降着率の値）によっては、異なる解ブランチ間で、状態遷移（リミットサイクル）が起こることが予想される。観測的には、このような状態遷移（質量降着率の変化）は、光度変化として現れるはずであることから、逆に、原始惑星系円盤の光度変化から、円盤内部の物理状態が推定できる可能性がある。実際、いくつかの原始惑星系円盤では、アウトバーストと呼ばれる突発的な増光現象が観測されている。今後、中心星からの距離が異なる複数の計算結果から状態遷移のモデル光度曲線を構築し、それを観測結果と比較することで、原始惑星系円盤の状態を推定したいと考えている。ただし、現段階でも本研究で得られ

た熱平衡曲線からどの程度の規模の状態遷移が起こるか推測することは可能であり、恐らく EX Lupi 型アウトバーストと呼ばれるクラスに対応すると考えられる。一方、より大型の FU Ori アウトバーストは、このような水素電離に伴う状態遷移では起きないと考えられる。

(3) 矮新星降着円盤における熱平衡曲線（研究目的(1)(3)、雑誌論文②）

本研究は、原始惑星系円盤を対象としたものであるが、水素電離温度近傍の熱平衡曲線は、他の天体でも重要な意味を持つ。特に、矮新星と呼ばれる天体（白色矮星と主系列星からなる近接連星系）は、やはり突発的なアウトバースト現象を示すが、このアウトバーストは、水素電離温度近傍で起きる状態遷移（リミットサイクル）によってうまく説明できることが、1970-80 年代に示された。ただし、そのモデル化において、観測される光度変化を説明するためには、高温ブランチと低温ブランチで異なる「アルファ値」（乱流ストレス/ガス圧の値）を設定する必要があった（具体的には、高温ブランチで 0.1、低温ブランチで 0.03）のだが、その物理的背景は不明であった。

今回、白色矮星に対応した角速度を設定したシアリングボックスで(2)と同様の計算を行ってみたところ、やはり、高温ブランチと低温ブランチで双安定になる面密度領域が現れた。さらに、アルファ値を測定したところ、低温ブランチで（通常の磁気回転不安定性による乱流で見られる）0.03 程度であったのに対し、高温ブランチでは 0.1 以上になり、まさに観測から示唆される通りの結果となった。実は、このアルファ値の増大は全く予期しないものであったが、その後の解析によって、高温ブランチにおいては対流による熱輸送が起きていて、それによりアルファ値が増大することが明らかとなった。すなわち、対流による垂直方向の運動が垂直磁場を作り出し、それによって磁気回転不安定性が強められ、乱流ストレスが増大する一方、対流によって熱輸送効率が高まりガス圧が減少すること、によってアルファ値が増大するのである。これにより、矮新星降着円盤のアルファ値に関する 30 年来の謎の一つの明確な答えを出すことが出来たことは大きな成果である。ところで、高温ブランチにおけるアルファ値の増大は、原始惑星系円盤のケースでも起きており、角速度に依存しないロバスト結果と言える。

(4) 原始惑星系円盤の大気構造に与える磁場の影響（研究目的(2)、雑誌論文③）

原始惑星系円盤では、低温低電離状態によって赤道面近傍がデッドゾーンとなっている場合でも、表層付近は外部からの非熱的電離によって磁気活動が活発になっている可能性がある。この場合、円盤大気ガスは、磁

気圧によって（磁場を考慮しないガス圧だけの場合に比べて）より高い位置まで支えられることになる。一方、中心星から放たれた可視光線は、原始惑星系円盤の大気で吸収され、近赤外線として再放出される。原始惑星系円盤の近赤外線観測の解析から、どの程度の高度に位置する大気で中心星照射が吸収されたかを推測することが可能であるが、その結果は、ガス圧のみで大気を支えたモデルとは不整合であった。今回、磁気圧によって支えられた大気モデルを用いて、中心星からの輻射輸送計算を行ったところ、観測と整合的な結果を得ることができた。つまり、近赤外線による原始惑星系円盤の観測は、原始惑星系円盤表層における磁気活動を支持していると言える。

(5) 研究の総括と今後の展望について

今回の研究では、先に述べたように、研究目的(3)において、期待以上の成果が得られた。一方、研究目的(1)の大局構造の推定と、研究目的(2)の大気中での磁気乱流の散逸と分子輝線による観測可能性の評価、について計画遂行に遅れが生じた。実は、本研究計画提出とほぼ同時期に、円盤表層における磁気活動に関して一つのクリティカルな研究が発表された (Bai & Stone 2011)。それは、これまで考えられていたオーム散逸だけでなく、非理想 MHD 効果として両極性拡散を考慮すると、表層の磁気活動まで抑制される、というものである。したがって、円盤表層での磁気活動を前提としていた研究目的(1)(2)のためには、両極性拡散を取り入れた計算を行うことが必須となった。そして、そのための計算コード修正に時間を要したことが、当該研究の遂行が遅れた原因である。ただし、最終年度において、両極性拡散の定式化と拡散係数の導出がほぼ完了しており、近い将来にこれらの研究目的を達成する見込みは得られている。

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 4 件)

- ① Hirose, S., Magnetic turbulence and thermodynamics in the inner region of protoplanetary discs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448, 3105–3120, 2015, DOI:10.1093/mnras/stv203, 査読有
- ② Hirose, S., Blaes, O., Krolik, J. H., Coleman, M. S. B., Sano, T., Convection Causes Enhanced Magnetic Turbulence in Accretion Disks in Outburst, *The Astrophysical Journal*, 787, 1(14pp), 2014, DOI:10.1088/0004-637X/787/1/1, 査読有
- ③ Turner, N. J., Benisty, M., Dullemond, C. P., Hirose, S., Herbig Stars' Near-infrared Excess: An Origin in the

Protostellar Disk's Magnetically Supported Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 780, 42(9pp), 2014, DOI:10.1088/0004-637X/780/1/42, 査読有

- ④ Okuzumi, S., Hirose, S., Planetesimal Formation in Magnetorotationally Dead Zones: Critical Dependence on the Net Vertical Magnetic Flux, *The Astrophysical Journal Letters*, 753, L8(5pp), 2012, DOI: 10.1088/2041-8205/753/1/L8, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① 廣瀬重信, FU Ori アウトバーストと原始惑星系円盤の熱不安定について, 日本天文学会春季年会, 2015年3月19日, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ② 廣瀬重信, 矮新星アウトバースト時の降着円盤における磁気乱流状態, 日本天文学会春季年会, 2014年3月22日, 国際基督教大学 (東京都三鷹市)
- ③ 廣瀬重信, 水素電離を伴う降着円盤におけるエネルギー輸送, 日本流体力学会年会, 2013年9月13日, 東京農工大学 (東京都府中市)
- ④ 廣瀬重信, MHD 乱流のグリッドスケールでのエネルギー散逸率の評価について, 日本天文学会秋季年会, 2013年9月10日, 東北大学 (宮城県仙台市)
- ⑤ 廣瀬重信, 輻射磁気流体力学計算による矮新星降着円盤の熱平衡曲線 I, 日本天文学会春季年会, 2013年3月22日, 埼玉大学 (埼玉県さいたま市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.jamstec.go.jp/mat/j/members/shirose/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 重信 (Hirose, Shigenobu)

独立行政法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員

研究者番号：90266924

(2) 研究分担者

佐野 孝好 (Sano, Takayoshi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号：80362606