

jh240050

現実的な原始惑星系円盤のガス散逸シナリオ構築に向けた 多角的アプローチ

高棹真介（当時：大阪大学、現：武蔵野美術大学）

概要

原始惑星系円盤のガスの散逸過程を理解することは、惑星の形成条件を明らかにする上で必須である。しかしガス散逸を駆動する星の紫外線や X 線 (XEUV) は円盤スケールよりも 4 桁以上小さいスケールの星大気から放射されており、このスケールギャップが散逸シナリオに大きな不定性を生じている。そこで我々は、星 XEUV モデルの土台となる星大気加熱モデル、星周りのガス分布に関わる星へのガス降着のモデル、そして星の光を浴びて散逸する円盤の計算モデルを総合するようなフレームワークを構築することで、この問題の解明に取り組んでいる。本年度におけるコード開発では主に化学反応計算モジュールのコードの最適化と星大気モデルのアップデートを行った。科学成果の創出も進め、XEUV モデル、円盤光蒸発、星へのガス降着過程のそれぞれで成果を査読論文の形で出すことができた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター
大阪大学 D3 センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

以下の 3 つの課題を 4 人で分担して進めている。

- (i) 磁場加熱を受ける星大気の流れ計算
- (ii) 星の輻射と熱化学反応計算を含めた 3 次元輻射磁気流体計算
- (iii) 現実的な内側境界条件を用いた円盤ガス散逸の 2 次元輻射流体計算

高棹真介：(ii), (iii)

庄田宗人：(i)

仲谷峻平：(ii), (iii)

井上壮大：(ii)

2. 研究の目的と意義

中心星の成長と惑星形成の両方を明らかにするには、原始惑星系円盤の進化の解明が必要となる。しかし円盤にとっての光源である星や円盤内縁は全体のスケールから 4 桁以上も小さく、円盤との接続が未解明であることから、過去の全てのシミュレーションモデルはシステム内側境界条件に大きな不定性を抱えている。その不定性は主に、中心星の輻射の性質（スペクトルや円盤外側に実際に届く光量）にある。言い換えれば、過去のモデルはシステムの内側境界条件に不定性を抱えている。

大きな不定性の一つとなっているのが星からの紫外線・X 線 (XEUV) 放射の影響である。原始惑星系円盤は典型的に 100K 程度の温度を持ち、低温度環境になっている。したがって、XEUV 放射のような高エネルギーな光が円盤に当たると、円盤表層のガスが強く加熱され、膨張して円盤から噴き出していく。この過程は円盤の「光蒸発」と呼ばれ、円盤ガスの散逸に重要だと考えられている。惑星形成の場である原始惑星系円盤のガス散逸

を明らかにすることは、惑星形成のタイムリミットを理解することにも繋がり、惑星形成論の完成に必須のテーマとなっている。

本研究は、星形成のみならず太陽・恒星物理や降着円盤物理の知見を総合してこの不定性を取り除くことを目指している。円盤ガスの散逸過程として本研究で特に注目している、以下の2つである。1. 円盤ガスの星への落下（円盤ガス降着）、2. 星の XEUV による「光蒸発」。ただし、星の XEUV 放射は、円盤に到達するまでに星の周囲を漂う物質に吸収されて減光される。そのため、星の XEUV 放射や光蒸発過程自体の理解（つまり、光の放射開始場所と最終到達場所の理解）だけでなく、その中間の構造も理解する必要がある。それには円盤ガスからガスを受け取り成長する星を3次元シミュレーションでモデル化して星周囲のガス分布を明らかにする必要がある。これらを踏まえて、チーム内の各研究者が各階層のモデル構築を進めつつ、階層連結に取り組んできた。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究が解決しようと試みている課題は、太陽・恒星物理、星・惑星形成、そして星大気の本質が関わる。その上、天体形成に広く共通する降着円盤の物理までが関係する。したがって、私たちの問題は宇宙物理学の幅広い知見を統合して初めて解決できるものになっている。そのため、宇宙物理学分野の中でも異なる背景を持つ研究者たちが協力して課題解決に取り組む環境が重要である。

本研究では問題解決に向けて3つの小課題を設定し、それらを総合することで目的達成を目指してきた。小課題のうちの2つは磁場とプラズマが複雑にカップルする多次元流体现象を扱うものになっている。その基礎方程式は流体力学方程式と Maxwell 方程式を組み合わせた磁気流体方程式を土台とするため、高度なシミュレーションを要する。また3つ目の小課題に関

しては、多次元の輻射輸送方程式と流体方程式、そして非平衡熱化学反応方程式を同時に高精度で解く必要がある。

このような背景のため、JHPCN システムの提供する共同利用環境は、複数の共同研究者が共通の目的達成のために研究を進める上で必要なものであった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

2023 年度は、主にコード開発や共同研究フレームワークの土台作りに取り組んだ。具体的内容は主に以下の(a)~(g)である。

(a) 熱化学反応計算モジュールの移植と3次元並列計算のテスト：

公開磁気流体コード PLUTO (Mignone et al. 2007 ApJS) を用いて仲谷が開発を進めてきた熱化学反応モジュールを、高棹が星・円盤研究に用いてきた、入れ子格子を使ったより柔軟なメッシュ構造に対応できる公開磁気流体コード Athena++ (Stone et al. 2020 ApJS) に移植した。

(b) 入れ子格子を用いた領域分割にも対応する、星からの直接光の計算モジュールの導入：

(a)で挙げた2つの流体コードの間には計算領域分割に関する設計に関して大きな違いがあり、星からの直接光の取り扱いを Athena++の方で考慮し直し、熱化学反応モジュールと整合させる必要があった。この作業の大部分を終え、テスト計算を進めていた。

(c) 熱化学反応計算モジュールの高速化への着手：

複数の化学種を取り扱う熱化学反応計算は、磁気流体計算よりも計算量が大きくなりやすいため、計算の高速化が重要となる。2023年度はいくつか高速化のアイデアを挙げ、実際に試行錯誤することで、高速化の方向性

を絞った。調査の結果、一部の計算を近似的に取り扱うことで、結果を大きく変えずに計算速度を大きく向上できることがわかった。

(d) ガスの運動をラグランジュ的に追う、トレーサー粒子計算モジュールの導入：

星の光を吸収減光させるガスがどこから来たのかなどを調査できるよう、トレーサー粒子計算のモジュールを導入した。主な開発はアラバマ大の Chao-Chin Yang 氏によるもので、我々はそれを自分たちのコードに移植・テストした。

(e) 磁気加熱を受ける星大気からの XEUV 放射スペクトル計算：

まず、庄田がそれまでに開発していた太陽型星の大気計算モデル(1次元磁気流体モデル)を、本研究がターゲットにしている若い星(前主系列星)などに応用できるよう星表面の取り扱いやコード自体の拡張を行った。そして、観測データが豊富な TW Hya と呼ばれる前主系列星のモデル構築を進め、計算を開始した。

(f) 星コロナ大気の3次元高解像度モデルの構築：

(e)のモデルは磁力線に沿った空間1次元のモデルになっている。しかし実際は隣り合う磁力線同士が絡み合うなど、3次元的なプロセスも大気加熱に重要となりうる。それを検証するため、庄田が中心となって3次元磁気流体モデルの構築とテスト計算を実施した。

(g) 星の EUV 放射で駆動される円盤光蒸発流の分類に関する理論の構築：

本課題で改良を続けている熱化学反応モジュールが組み込まれた輻射流体コードを用いて、極端紫外線(EUV)が駆動する光蒸発の振る舞いに関するパラメータ調査と、その性質を説明する理論構築を行った(仲谷が中心

となって進めた)。

5. **今年度の研究成果の詳細**

特に「(i) 磁場加熱を受ける星大気の磁気流体計算」に関連する成果

星からの XEUV 放射のモデルは、庄田が太陽の研究で改良を続けてきたものに基づいている。そのモデルをより堅牢なものにするべく、若い太陽型星の XUV 放射スペクトルを予測する物理モデルを構築し、観測と比較することでモデルの改良と検証を行った。JHPCN の計算資源はモデル計算のための数値シミュレーションコード開発、およびテスト計算に主に使用した。結果として、我々のモデルはモデルパラメータをファインチューニングすることなく、太陽型星の放射スペクトルをよく再現することがわかった。この成果は、査読論文 Shoda, Namekata and Takasao (Astronomy & Astrophysics, 2024) として出版済みである。

また、太陽型星で検証が進められたモデルを拡張することで、TW Hya という名前の原始惑星系円盤を持つ若い星(前主系列星)のモデルを構築し、XEUV 放射スペクトルの計算を行った。TW Hya は X 線スペクトル観測データがあるため、モデル予測とそのデータを比較した。その結果、我々のモデルは TW Hya のコロナから来る定常放射スペクトルを、誤差3倍以内程度でよく再現できるとわかった。モデルのテスト計算から product run に至るまで全て JHPCN の計算資源を用いた。本研究の成果も査読論文としてまとめ、Shoda, Nakatani & Takasao (Astronomy & Astrophysics, 2025) として出版済みである。

以下からは、まだ論文として出版されていない研究に関する報告である。

TW Hya の放射スペクトルの再現に成功したが、TW Hya は地球から遠く離れており空間分解して直接構造を観測することができないため、モデルの多角的な検証も重要だと考

えている。そこで我々が注目しているのは、X 線を出すような星コロナからの恒星風である（太陽からも、常時、太陽風と呼ばれる風がコロナから吹き出している）。X 線観測によって TW Hya の恒星風のデータがあるため、モデル検証の一貫として、コロナモデルを応用して恒星風のモデル化を行った。

太陽や TW Hya のような星は、光球と呼ばれる星の光学的な表面に対応する層を持ち、その上に彩層とコロナが並んでいる。星大気の空間 1 次元モデルでは、彩層からコロナ中の乱流の振る舞いをパラメトライズしている。太陽のような平均磁場強度が 1G 程度の星から、TW Hya のような平均磁場強度が 100-1000Gt 程度の星にわたって、乱流強度が恒星風に与える影響はこれまで十分に考察されていなかった。

庄田が中心となって調べたところ、TW Hya のような磁気活動度が高い星の恒星風シミュレーションを行うと、彩層中の乱流の有無によって恒星風強度が 10-100 倍も変わってしまうことがわかった。現状の結果としては、彩層での乱流を人為的に off にする方が観測と整合的であることがわかった。彩層乱流の有無の妥当性を検証すべく、詳細な観測データがある太陽風について太陽風乱流 on/off の計算結果と観測データの比較を行った。結果、やはり彩層乱流を off にした方が観測との整合性は高いことがわかった。これまでの彩層乱流を入れて計算した恒星風シミュレーション結果は誤っている可能性が高く、再計算が必要であることを示唆する。モデル計算には全て JHPCN の計算資源を用いた。

上で用いたモデルは、全て磁力線方向に沿った空間 1 次元モデルである。1 次元モデルによる XEUV 放射予測の妥当性を検証すべく、太陽コロナの 3 次元磁気流体シミュレーションを行った。その結果、コロナ中では磁気リコネクションと呼ばれるプロセスによって乱流カスケードが駆動され、磁場は大スケー

ル、速度場は（リコネクションアウトフローに由来する）小スケールにエネルギーを持つという、通常の磁気流体乱流とは全く異なる描像が得られた。これは 1 次元モデルで採用している現象論的乱流モデルに何らかの修正が必要であることを示唆する。今後は恒星風シミュレーションの結果も考慮しながら、乱流モデルのアップデートに取り組む。

特に「(ii) 星の輻射と熱化学反応計算を含めた 3 次元輻射磁気流体計算」とに関連する成果

化学反応モジュールの最適化：本課題の目的である化学反応を組み込んだ磁気流体計算を行う上で、コードの最適化は重要な課題である。仲谷は、計算コストの大部分を占める化学反応モジュールの最適化を行なった。まず、2023 年度で取り組んでいた近似的な計算法の採用により、妥当な範囲内で計算を簡略化できることをテスト計算により確認した。そしてプロファイラを利用しコストが高くなっている関数や行を特定し、変数の再利用や計算順序の再編、for 文のループ回数の最小化等を行い、最終的に化学反応モジュールの計算速度を 2 倍上昇させた。

改良した熱化学反応計算モジュールを組み込んだ 3 次元磁気流体計算を実施し、テストランを開始した。その結果、星の EUV 放射によって星近傍の乱流的な水素原子ガスが電離されている様子を確認できた。このことから、星の EUV 放射の吸収減光を議論できるようになってきたと言える。しかし、一部の領域で数値不安定性が起きて熱構造が非物理的になってしまい、いまは原因の特定に取り組んでいる。

光蒸発研究の基礎理論に関連する成果

EUV 駆動光蒸発の一般化理論構築：原始惑星系円盤に照射される星から極端紫外線 (EUV) 放射は、星のスペクトル型や円盤の進化段階

に依存して広いバリエーションを持つ。それに伴い、円盤光蒸発の描像が大きく変わる。例えば EUV スペクトルが比較的ソフト（高周波数側に向かってスペクトルが急速に減衰）で光度が大きい場合、蒸発流中にあるガスはほとんど完全電離され、高温で超音速の流れになる。一方で、スペクトルが硬くて光度が小さい場合、蒸発流は中性ガスで構成された低温・亜音速流になる。こういった光蒸発のバリエーションは近年の輻射流体シミュレーションにより明らかになったものであり、それ以前では専ら上記のソフト EUV スペクトル・高光度の描像が適用されていた。Nakatani, Turner & Takasao (The Astrophysical Journal, 974, 281, 2024) では、中心星 EUV スペクトル・光度に対して、光蒸発流の電離度・温度・速度がどのように応答するか一元的に取り扱える解析的一般化理論を構築した。また、本課題で用いる熱化学反応モジュールが組み込まれた輻射流体コードを用いて、EUV スペクトル・高度をパラメータとして変えた計算を複数行い、我々の解析モデルが数値計算の結果をよく再現することを確認した。このモデルは、我々の目的において、調査すべきパラメータ範囲を絞り込む上で、かつ数値計算結果の妥当性を保証する上で重要となる成果である。

対流的な原始星の内部から原始惑星系円盤までを含む大規模 3 次元計算

当初の研究計画では明確に予定していなかったが、対流的な原始星の内部から原始惑星系円盤までを含む大規模 3 次元磁気流体シミュレーションを実施し、査読論文として成果を発表した (Takasao et al. 2025b, ApJ)。この成果について共同プレスリリースを行ったところ、共同通信を通じて各新聞社で広く報じられた。ここでは、本研究を本課題の一部として実施するに至った経緯と成果について簡潔に説明する。

本課題で注目している原始星近傍の高解像度シミュレーションは、この 1、2 年で世界的に関心を集めるようになり、本研究を取り巻く状況が急激に変わりつつある。特に、観測や理論モデルの進展によって星表面までを空間分解した計算に強い関心が示されており、そのような計算が世界的な競争になっている。我々のサブ課題(ii)で取り組んでいる星・円盤相互作用の 3 次元モデルは未だ重要であるものの、星表面を空間分解せず、球座標系の内側境界としている。エネルギー密度の高い星表面の構造（特に星の持つ磁場）までモデルに含めたとき、降着構造がどのように影響を受けるかについては、未だに十分に理解されていない。そこで、世界に先駆けてそのような計算を実施することに決めた。

原始星と円盤は密度や圧力が何桁も異なるため、一つのモデルで両者を同時に扱うことは容易ではない。しかし、計算可能なモデルパラメータを選び、これまで本研究で作上げてきた数値不安定性などに強いコードを用いることで、そのような計算を実施することができた。

計算の結果、星の磁場は様々な形で降着構造に影響を及ぼすことが分かった。一つは、星表面に太陽黒点のような強い磁場領域ができると、そこからスパイラル状に衝撃波が伸び、円盤ガスの降着を促進するというものである。もう一つは、回転円盤に囲まれた原始星は強いトロイダル磁場で覆われるため、星に落下しようとするガスがその強い磁場によって減速を受けるということである。FU Ori 型星という、原始星かそれ以上に高い降着率を示す若い星がいるが、降着速度が単純な想定よりも遅いということが報告されていた (Carvalho et al. 2025)。今回の結果は、このような観測とも整合的になっている。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

(i)の恒星大気モデルによる XEUV スペク

トル計算の研究は予定通りに進展している。研究成果も 2 本の査読論文として出ているため、順調に進んでいると考えている。今後は彩層乱流の影響を評価した論文を準備や、3 次元モデルによる乱流の効果の直接評価に取り組んでいく予定である。

※7. 研究業績はウェブ入力です

(ii)に関して、化学反応計算コードの最適化は概ね計画通りに進んでいる。ただし前述のように数値不安定性への対処についてはまだ調査が必要となっている。2025 年度中に初期成果を論文化できるよう、コードの改良を進めていく。

2025 年度は、数値不安定性への対処に加えて、モデルをより現実的にしていく改良も予定している。具体的には磁気拡散に関する非理想磁気流体効果と、CO のような分子種まで含む熱化学反応計算の導入である。非理想磁気流体効果を取り入れると、乱流的な空間構造がなまされると予想されるので、計算の数値的な安定性も増すと期待している。

(iii)に関するパラメータ調査についてであるが、リード役である高棹と仲谷の両方が所属機関を異動することになったため、研究時間を十分に確保することができず予定通り進展させることができなかった。星の XEUV スペクトルモデルのアップデートは着実に進めており、庄田の行っている定常的な放射に加えて、磁気リコネクションによるフレアの放射スペクトルのモデル化も行った (Washinoue, Takasao & Furuya 2024 ApJ)。現在はそれらを組み合わせたスペクトル計算コードを用意し、スペクトルモデルに関する論文を執筆中である。論文化を 2025 年度中に終え、光蒸発モデルのパラメータ調査に取り組む。