

赤ちゃん星がガスを食べて成長する様子を 大規模3次元シミュレーションで世界初観測！ —星の誕生メカニズムと太陽系起源の解明に期待—

キーワード：星形成、宇宙物理、シミュレーション、原始星、ガス円盤、CAI

【研究成果のポイント】

- ◆ 生まれたばかりの原始星の内部構造と周囲のガス円盤、さらに磁場の効果まで考慮した 3 次元的シミュレーションに世界で初めて成功し、原始星のダイナミックな成長過程を明らかに
- ◆ 原始星とガス円盤の境界領域で起きていることは多くの謎に包まれていたが、星が自身の強い磁場が生むスパイラル衝撃波によってガス回転を減速させ、ガスを取り込んで成長することを発見
- ◆ 星の誕生メカニズムの解明につながるだけでなく、太陽系の起源を物語る“特別な鉱物”の形成過程の解明にも期待

❖ 概要

大阪大学大学院理学研究科の高棹真介助教(研究当時。現：武蔵野美術大学 准教授)、京都大学の細川隆史准教授、東北大学の富田賢吾准教授、国立天文台の岩崎一成助教らの研究グループは、**原始星の内部構造と周囲のガス円盤、さらに磁場の影響も考慮した世界初の大規模 3 次元シミュレーションに成功しました。**これにより、原始星がどのように成長するのかについての理解が大きく進展しました。

原始星は、まわりを回転している原始惑星系円盤のガスを食べて成長します。このプロセスは非常に複雑で、シミュレーションによる調査が必須です。しかし、原始星とガス円盤の“境界領域”ではガスの密度や速度などが急激に変化するため、シミュレーションで調べることはとても困難です。さらに、原始星が持つ強い磁場もシミュレーションを難しくする大きな要因となっています。そのため、ガスが原始星の表面に到達する最後の瞬間は、これまで謎に包まれていました。

本研究グループは、様々な技術的工夫を重ねることで、太陽型星の原始星モデルを構築し、大規模シミュレーションを可能にしました。その結果、**原始星が原始惑星系円盤にスパイラル状の衝撃波を立てながらガスを取り込んでいくという、これまで知られていなかった成長の様子を発見しました。**さらに、原始星はガス円盤との相互作用を通じて強い磁場で覆われることで、磁場のエネルギーを使って太陽フレアのような爆発現象や高速なガス噴出を引き起こすことも明らかになりました。このようなダイナミックな現象が起きている原始星の周りでは円盤物質の大循環も起きており、特別な隕石鉱物の起源についても新たなヒントが得られました。

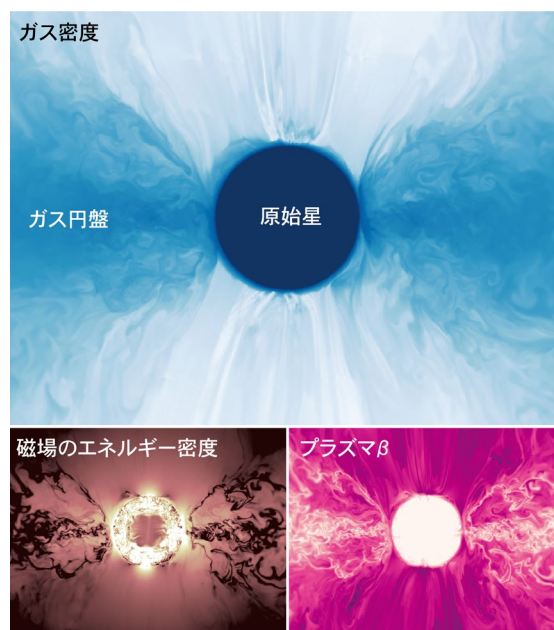


図1 原始星が磁化したガス円盤からガスをのみ込んでいる様子。各パネルの図は、円盤の回転軸に沿った 3 次元構造の断面図を示している。プラズマ β は磁場のエネルギー密度に対するガス圧の割合を表し、色が暗い部分ほど磁場が重要であることを意味する。(クレジット：高棹真介)

原始星とガス円盤の境界領域は、星形成の研究におけるフロンティアの一つでした。本研究により、星の進化や太陽系の起源に関する理解がさらに深まることが期待されます。

本研究成果は、権威ある学術誌であるアストロフィジカルジャーナル(The Astrophysical Journal)に、5月14日(水)午後5時(日本時間)に掲載されます。

【高棹准教授のコメント】

このシミュレーションに取り組み始めたのは2019年頃で、ここまで来る間に多くの困難がありました。試行錯誤を重ねながら一つずつ問題を克服し、ようやくまとめた成果を出すことができたことを嬉しく思います。試行錯誤のために計算資源を与えてくれたスパコン環境と、建設的な議論を重ねてくれた共同研究者たちは大変貴重であり、本研究に不可欠でした。深く感謝申し上げます。

❖ 研究の背景

星は、宇宙に漂うガスが重力によって集まり、圧縮されることで誕生します。この初期の段階にある赤ちゃん星は原始星と呼ばれ、まわりのガスを取り込みながら成長していきます。

取り込まれるガスは、原始星のまわりを回転しながら円盤状に広がっており、これを原始惑星系円盤といいます。私たちの太陽が自転しているのも、回転するガスを取り込んで成長した名残です。

原始星が円盤ガスを取り込むこと自体はよく知られていますが、実は原始星と円盤の境界領域で何が起きているのかは、まだ十分に理解されていません。円盤のガスは、原始星の重力と遠心力(回転しているものが、回転の中心から外に押し出されるように感じる力)のつり合いによって、そのままでは簡単に原始星に落ちてくれません。そこで、ガスの回転を弱めるような働きが必要になります。

ガスの回転を弱める働きをするものとして重要なのが磁場です。磁場は十分電離したガスに対してゴム紐のように振る舞い、回転するガスにまとわりついて減速させ、ガスの落下を促します。これまで広く注目されてきたのが「磁気回転不安定性」と呼ばれる、円盤内に乱流的な磁場をつくる機構です。これは原始星のまわりだけでなく、ブラックホールの周囲のガス円盤でも重要なしくみとして知られています。ところが、原始星とガス円盤の境界領域では、ガスの速度構造の影響によってこの磁気回転不安定性が起これないと考えられており、代わりとなる仕組みが必要だと言われてきました。

そこで研究チームが注目したのは、原始星の磁場の役割です。太陽は磁場を持っていることが知られていますが、原始星はそれよりもはるかに強い磁場を持っていると予想されています。太陽物理の研究にも携わっている高棹准教授は、この原始星の強い磁場が、ガス円盤との境界でガスの回転を減速させる可能性があると考えました。これは、従来の研究と一線を画す点です。

強い磁場を持つ原始星とガス円盤の“つながり”を調べるには、シミュレーションによるアプローチが不可欠で、物理的な性質が大きく異なる両者を一つのモデルに含める必要があります。ただし、シミュレーションは万能ではありません。ガスの密度や磁場の強さなど、物理的性質が急激に変化する状況の計算は非常に難しくなるため、これまで詳しいシミュレーションは実現していませんでした。

❖ 研究の内容

研究チームは、太陽型星の原始星を対象とした大規模シミュレーションに挑戦しました。計算に用いたスーパーコンピュータは、大阪大学D3センターの「SQUID」と、国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの「アテルイⅡ」です。計算の実現が可能な問題設定を考えたり、数値的な問題を克服するための手法を

組み合わせるなどの様々な試行錯誤の末、ついにシミュレーションに成功し、図 1 に示すように原始星が円盤のガスを取り込む様子を捉えることができました。

まずシミュレーションで明らかにしたのは、原始星が円盤から取り込んだ磁場を蓄えるだけでなく、太陽と同様にガス内部の対流運動によって磁場を増幅し、強い磁場をまとっているというダイナミックな姿です(図 1 下段の 2 パネル)。強い磁場を持つ原始星では、太陽フレアのような爆発現象が頻繁に起きており、円盤との境界からはジェットが噴き出していました。この結果は、原始星の“食事風景”が、これまで想像されていた以上に激しいものであることを示しています。

次に研究チームが調べたのは、原始星と円盤の境界領域におけるガスの落下メカニズムです。調査の結果、ガスの落下は一つの要因ではなく、複数のメカニズムが組み合わさって起きていることが明らかになりました。中でも重要な発見が、星の表面から伸びる複数のスパイラル状の衝撃波です(図 2 左)。このスパイラル衝撃波が円盤ガスの回転を減速させることで、遠心力と重力のバランスを崩し、激しいガスの落下を引き起こしていることが分かりました。

さらに、このスパイラル衝撃波の発生源を詳しく調べたところ、原始星の強い磁場が鍵となっていることがわかりました。本研究で考えている原始星の内部では、太陽と同様にガスが対流しています。そのような原始星が磁場を含んだ円盤ガスを取り込むと、磁場も一緒に引き込まれ、星の表面に太陽黒点のような強い磁場領域が形成されます(図 2 右)。こうしてできた原始星の強い磁場領域が、スパイラル衝撃波の発生源となっていました。

原始星の磁場は、超音速で回転する円盤ガスにとって障害物のような役割を果たします。ガスが磁場に衝突すると、強く圧縮され、衝撃波が発生します。これまでの研究でもスパイラル衝撃波の存在は予測されていましたが、原始星の磁場の影響は考慮されておらず、衝撃波の強さもそれほど大きくないとされてきました。今回の研究では、原始星の磁場が強い衝撃波を生じ、激しいガスの落下を引き起こすという新たなメカニズムが示され、従来の理解を覆す結果となりました。

さらに、スパイラル衝撃波に加えて、原始星と円盤の境界から噴き出すジェットが、円盤ガスの角運動量(回転の勢い)を外に運び出す様子も確認されました。角運動量を失ったガスは回転が遅くなり、より星へと落ち込みやすくなります。このように、円盤の赤道面だけでなく、回転軸方向に現れる構造も、ガスの落下を促進するうえで重要であることがわかりました。

従来の研究では、原始星や円盤の赤道面付近だけを切り取った小規模なモデルが主流でした。そのようなモデルは、ガスが原始星と円盤の境界領域にたまってしまいガスが星に取り込まれ続けることは難しいという、観測事実を説明できない結果を示すこともありました。

しかし本研究チームは、原始星の内部構造、円盤、そして磁場をすべて計算に取り入れたことで、原始星がガスを絶えず取り込み続ける様子を明らかにしました。今回のシミュレーションは、長年の謎であった「円盤ガスが原始星に取り込まれる最後の瞬間」の理解に、大きな一歩をもたらす成果となりました。

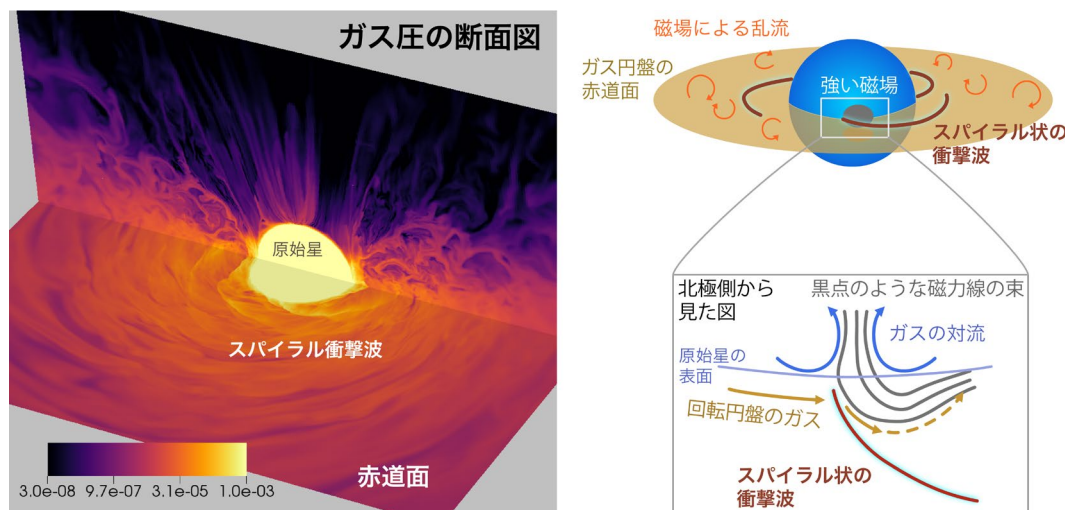


図 2 左:原始星とガス円盤を含む領域のガス圧の断面図。原始星の表面から円盤内にスパイラル衝撃波が伸びている。右:原始星の磁場がスパイラル衝撃波を生じていることの説明。(クレジット:高棹真介)

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

原始星がどのような“大人の星”に成長するかは、取り込むガスの性質に大きく左右されます。取り込むガスの量だけでなく、熱量や角運動量も、星の成長を決定づける重要な要素です。本研究によって原始星まわりのガスの性質がより鮮明になってきたため、星の誕生メカニズムに関する理解が今後より一層深まっていくと期待されます。

さらに本研究は、太陽系の起源の解明にも新たな示唆を与えます。太陽系の歴史を物語る隕石の中には、「カルシウム-アルミニウム包有物(CAI)」と呼ばれる、特別な鉱物を含むものがあります。CAI は太陽系で最も古い物質なので、太陽系誕生の最初期を明らかにする鍵となります。

CAI の材料は、およそ 1,000K 以上という高温な環境を経験し、高エネルギー粒子の照射も受けていたと考えられています。そのため、原始星のすぐ近くにあるガス円盤が、その起源となっている可能性が指摘されています。

この仮説を検証するため、研究チームは原始星の近傍におけるガスの流れを詳しく解析しました。その結果、原始星の近くから外側の円盤へと、ガスが大きく循環している様子が確認されました。また、原始星は高エネルギー粒子を放出するような爆発現象を繰り返し起こしていることから、こうした粒子にさらされたガスが外側に運ばれ、そこで CAI が形成されたというシナリオが示唆されました。

本研究のシミュレーションモデルは最先端のものですが、今後さらに改良の余地があります。このシナリオも、現時点では一つの仮説にすぎませんが、原始星とガス円盤のダイナミックな連携を明らかにした今回の成果は、星の誕生と太陽系の成り立ちをつなぐ新しい道筋を照らすものとして、大きな意義をもっています。

❖ 特記事項

本研究成果は、2025 年 5 月 14 日(水)午後 5 時(日本時間)に米国科学誌「The Astrophysical Journal」(オンライン)に掲載されます。

タイトル: "Connecting a Magnetized Disk to a Convective Low-mass Protostar: A Global 3D Model of Boundary Layer Accretion"

著者名: Shinsuke Takasao, Takashi Hosokawa, Kengo Tomida, and Kazunari Iwasaki

DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/adc37b>

なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(22K14074, 21H04487, 22KK0043, 19KK0353, 22H00149)の助成を受けて実施されました。また本研究で行ったシミュレーションは、大阪大学 D3 センターの SQUID と、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト(CfCA)の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイⅡ」を使用して実施しました。