

## 星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション

課題責任者

町田正博 九州大学 理学研究院

著者

町田正博\*1, 野崎信吾\*1, 平野信吾\*2, 早川喬\*1, 原田直人\*3, 村社伊樹\*1

\*1九州大学 理学研究院, \*2神奈川大学 工学部 応用物理学科 \*3東京大学 理学系研究科

キーワード：磁気流体, 星形成, 惑星形成, ジェット, 弱电離プラズマ

## 1. はじめに

惑星は、星形成過程で形成する星周円盤(原始惑星系円盤)の中で誕生する。近年の観測は、原始惑星系円盤で惑星の素となる固体微粒子(ダスト)がリング、ギャップなどの構造を作っていることを示している。さらに、観測によって原始惑星系円盤で形成中の惑星も数例確認されている。しかし、惑星が原始惑星系円盤中で、いつ、どのようにして誕生するのかは、未だ解明されていない。

古典的惑星形成論では、惑星形成は、エンベロープからの質量降着が終了した孤立した円盤で始まると考えられている。しかし、原始惑星系円盤の観測は、孤立円盤段階では惑星を形成するための固体微粒子の量が十分存在しないこと、また、降着段階の円盤中で惑星形成の兆候を示すリング・ギャップ構造が成長していることを示している。そのため、惑星形成は従来考えていたよりも早い段階から開始していると予測される。

上記のように、これまで、孤立した円盤を初期条件として惑星形成過程が調べられてきた。しかし、多くの観測によって、近年では、惑星はガスとダストの降着が続いている星周円盤の中で誕生すると考えられている。円盤成長段階では、原始星アウトフローによる質量放出が起こる。また、この段階では、アウトフローと磁気制動によって円盤から角運動量が輸送される。そのため、適切に惑星形成過程を理解するためには、より早期の段階、つまり円盤の形成段階から円盤進化と円盤中の固体微粒子の振る舞いを理解することが必要である。

この研究では、星が誕生する前の分子雲コアを初期条件として原始星形成後 15 万年の計算を行った。その結果、円盤周囲のエンベロープが枯渇し、円盤への質量降着が終了し、円盤風によって円盤が散逸を始める段階までの進化を明らかにした。

## 2. 計算手法と初期条件

星形成の母体として観測されている分子雲コアを模するために、中心密度  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ 、温度 10 K のボナー・エバート球に観測と同等の磁場と回転を与えたガス雲を初期条件とし、自己重力による収縮過程と星形成後の降着過程を計算した。

計算に使用した 3 次元磁気流体多層格子法の数値コードは、ES4 で高速に計算出来るようチューニングされている。(i, j, k)=(64, 64, 32) の格子を 14 重ねて原始星形成後 15 万年間の計算を行った。2014 年(ES3)から計算を開始

し、途中で ES4 に乗り継ぎ 8 年程度計算を継続した後、解析を行った。

## 3. 結果

図 1 は、原始星形成時からの中心星、アウトフロー、円盤、インフォーリングエンベロープの質量の時間進化を示している。図から、計算終了時には、エンベロープの質量は初期の分子雲コアの 3%程度となっており、エンベロープはほぼ枯渇していることが分かる。また、原始星と同等の質量のガスがアウトフローによって放出されている。計算終了時の円盤質量は、0.3 太陽質量である。ガスとダストの比を 100:1 とすると、計算終了時の円盤には、およそ 1 万地球質量の固体微粒子が存在する。従って、惑星系を形成するために十分な量の固体微粒子が円盤中に存在している。この計算によって、星形成前の分子雲コアから、

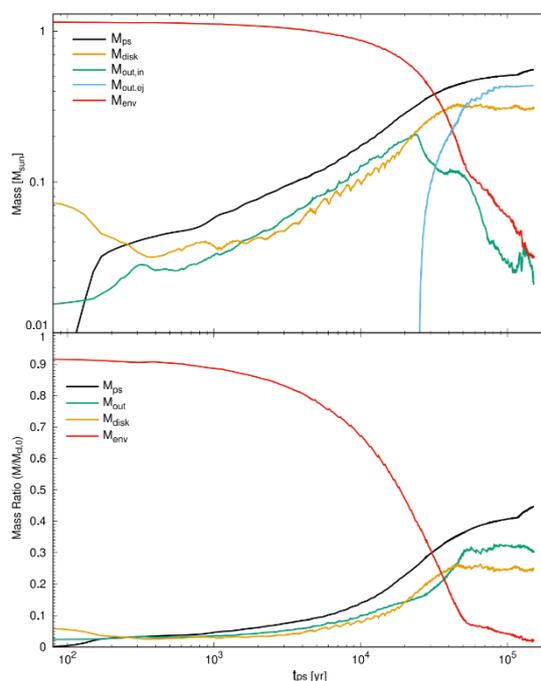


図 1：中心星、アウトフロー、円盤、エンベロープ質量の時間進化。下の図は初期の分子雲コア質量で規格化した質量進化。

原始星が形成し円盤の進化が終わる降着段階終了時まで

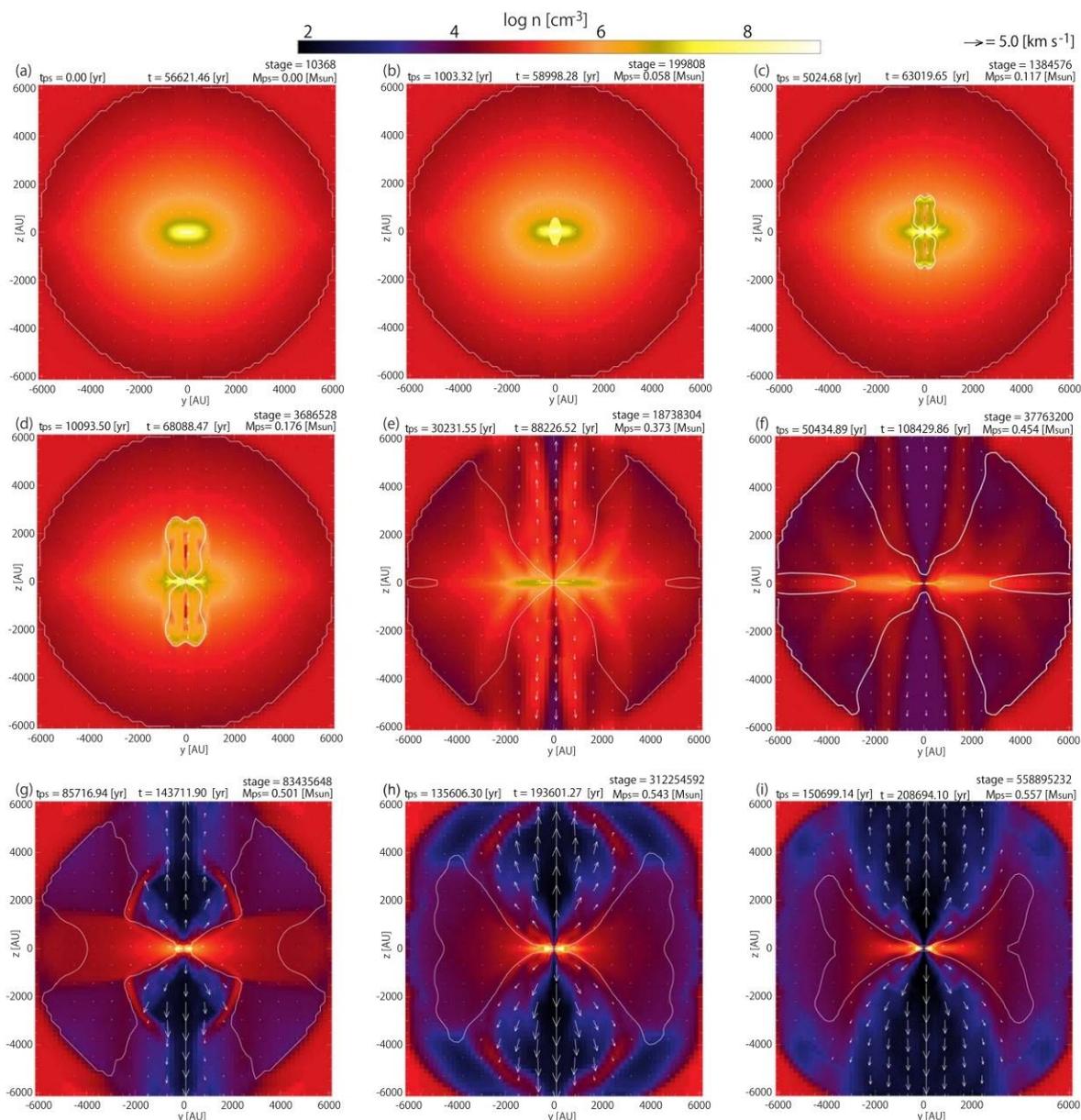


図2：分子雲コアスケールの時間進化。y=0 切断面での密度(カラー)と速度分布を示している。白のコントアは、アウトフローとインフローの境界で白線の内側がインフォーリングエンベロープに対応する。

進化が進んだことが分かる。

図2は、コアスケールの時間進化を示している。原始星形成後中心部から弱いアウトフローが出現する(パネル a-e)。その後、アウトフローは分子雲コアを突き破り、星間空間を伝搬する(パネル e, f)。また、同時期には、赤道面からガス放出が起こっていることが分かる(赤道面アウトフロー)。さらに時間が経過すると、円盤から強力な円盤風が出現しているのが分かる(パネル g, f)。この円盤風は、円盤上下方向の密度が薄くなり落下するガスのラム圧が弱まったことにより駆動している。この円盤風がインフォーリングエンベロープの大部分を吹き飛ばし、円盤へのガス降着を止める。計算終了時(パネル i)には、インフォーリングエンベロープがほぼ枯渇し、中心に半径 300 au の回転円盤が残る。

#### 4. まとめと議論

円盤は回転によって支えられている。従って、円盤の角運動量輸送過程が円盤進化を決定する。従来は円盤内部に生じる磁気回転不安定による乱流が角運動量輸送の主要因だと考えられてきた。しかし、原始惑星系円盤は低温で密度が高いため、電離度が低く磁場が散逸するため磁気回転不安定性が発達しないことが近年の研究で分かっている。

この研究では、大局的な磁場によって駆動するアウトフロー、円盤風が角運動量輸送の主要因であることが分かった。インフォーリングエンベロープが残っている段階では、磁気制動によっても円盤から角運動量が輸送される。しかし、インフォーリングエンベロープが枯渇する

と磁気制動による角運動量輸送は非効率になる。他方、エンベロープの密度が低下することにより強力な円盤風が現れて円盤の質量と角運動量を星間空間に輸送する。計算終了時の値を用いて、円盤の質量散逸と角運動量輸送の時間尺度を見積ったところ、どちらもおよそ $10^6$ 年となった。この時間尺度は、観測から得られている原始惑星系円盤の寿命と一致する。そのため、惑星形成段階では円盤風が円盤進化に重要な役割を果たすことが分かる。

## 5. 今後の展望

この研究では、星形成前の分子雲コアから星が誕生し、円盤周囲のエンベロープが散逸するまでの計算を行った。その結果、星形成初期段階と惑星形成段階である降着後期、また降着終了後の円盤の進化を解明することが出来た。この計算では、惑星形成の素となるダスト(固体微粒子)を含んでいない。そのため、観測で見られるようなリング状のダスト分布などは再現できない。今後はダストとその成長を考慮した円盤形成の長時間進化の計算が必要となる。

## 謝辞

本研究の数値計算は、令和6年度地球シミュレータ公募課題「星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション」によって採択された海洋研究開発機構の地球シミュレータ(ES4)を用いて行いました。

## 文献

- [1] Riaz, B., Thi, W.-F., and Machida, M. N. "HCN as a probe of the inner disc in a candidate proto-brown dwarf", MNRAS, 532, L36-L41, 2024
- [2] Machida, M. N. and Basu, S. "Cloud Dissipation and Disk Wind in the Late Phase of Star Formation", ApJ, 970, 41, 2024
- [3] Maeda, N., Ohtsuki, K., Suetsugu, R., Shibaike, Y., Tanigawa, T., and Machida, M. N. "Delivery of Dust Particles from Protoplanetary Disks onto Circumplanetary Disks of Giant Planets", ApJ, 968, 62, 2024
- [4] Basu, S., Sharkawi, M., and Machida, M. N. "Outflows Driven from a Magnetic Pseudodisk", ApJ, 964, 116, 2024
- [5] Omura, M., Tokuda, K., and Machida, M. N. "Revealing Multiple Nested Molecular Outflows with Rotating Signatures in HH270mms1-A with ALMA", ApJ, 963, 72, 2024
- Sato, A., Tokuda, K., Machida, M. N., Tachihara, K., Harada, N., Yamasaki, H., Hirano, S., Onishi, T., Matsushita, Y., "Secondary Outflow Driven by the Protostar Ser-emb 15 in Serpens", The Astrophysical Journal 958, December 2023.
- [2] Tokuda, K., Fukaya, N., Tachihara, K., Omura, M., Harada, N., Nozaki, S., Shoshi, A., Machida, M. N., "An ALMA-resolved View of 7000 au Protostellar Gas Ring around the Class I Source CrA-IRS 2 as a Possible Sign of Magnetic Flux Advection" The Astrophysical Journal 956, October 2023
- [3] Riaz, B., Thi, W.-F., Machida, M. N. "First observations of warm and cold methanol in Class 0/I proto-brown dwarfs", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 522, 4934-4954, July 2023
- [4] Kawasaki, Y., Machida, M. N., "Impact of turbulence intensity and fragmentation velocity on dust particle size evolution and non-ideal magnetohydrodynamics effects", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 522, 3679-3692, July 2023
- [6] Hirano, S., Machida, M. N., Basu, S., "Magnetic Effects Promote Supermassive Star Formation in Metal-enriched Atomic-cooling Halos", The Astrophysical Journal 952, July 2023