



Title	分子雲コア中での星形成の数値シミュレーション
Author(s)	町田, 正博
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2014, 4, p. 45-48
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/70484">https://doi.org/10.18910/70484</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# 分子雲コア中での星形成の数値シミュレーション

町田 正博

九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

## 1. はじめに

星は宇宙の最も基本的な構成要素であるため、その形成過程を理解することは重要である。観測から星は銀河内の複数の領域で集団的に誕生していることが分かっている。様々な観測によって我々近傍の星形成領域は詳しく調べられており、以下のことが理解されている。(1) 星は分子雲コアと呼ばれる低温で比較的密度が高いガスのかたまりの中で誕生する、(2) 星が誕生する際にはジェットとアウトフローというガスの放出現象を示す、(3) 生まれたばかりの星（原始星）の周りには星周円盤が出来、その内部で惑星が誕生する。

しかし、観測のみによって星が誕生する過程を理解することは困難である。実際に観測から分かることは、“星が誕生する直前の初期条件である分子雲コア”と“星が誕生してしばらく経過した後の結果である原始星、ジェット、円盤”などであり、星が誕生する現場（つまり星形成過程）は、密度が濃いガス雲中であるために如何なる波長の電磁場を用いても観測する事は難しい。そのため星形成過程を理解するためには、数値シミュレーションが必要となる。我々は、星形成の母体となる分子雲コアを初期条件としてその重力収縮から星や円盤が出来る過程、またはアウトフロー、ジェットが駆動する過程を調べてきた。

## 2. 計算の設定と計算手法

上記のように星は分子雲コアの中で誕生する。分子雲コアは詳細に観測されており、密度分布、角運動量や磁場の強さと向きなどの情報が詳細に分かれている。円盤形成やアウトフロー、ジェットの駆動には分子雲コアの磁場、回転が重要となる。シミュレーションで星形成過程を理解するためには、観測されているような分子雲コアを初期条件としてその

重力収縮の過程を計算する。しかし、分子雲コアと原始星の空間スケールは大きく異なる。分子雲コアは $>10^4$ AU のスケールを持つのに対して、星の半径は $\sim 0.01$ AU であるため空間スケールが 6 柄以上も異なる。この大きく異なる空間スケールを解像するために、我々は多層格子法という計算手法を用いている。図 1 は、多層格子法の概念図である。実際には

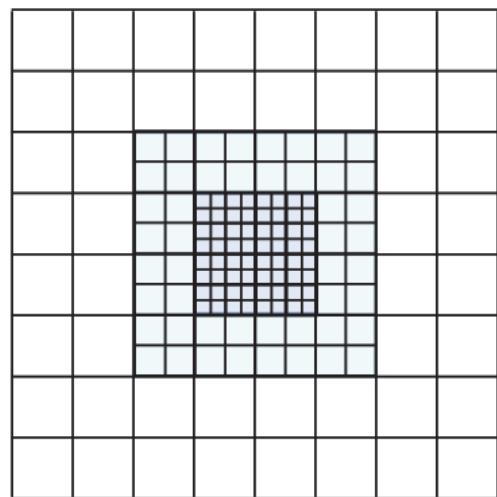


図 1：多層格子法の概念図

3 次元であるが、理解しやすさのため 2 次元で表示している。多層格子法は、図のように空間分解能の低いグリッドで全体を覆いながら、細かいグリッドで空間分解能の必要な領域を覆う手法であり、粗いグリッドから細かいグリッドまでを一体として時間推進する。この手法により、原始星と分子雲コアという空間スケールが大きく異なる天体の両方を同時に空間解像することができる。

また、分子雲コアは、ほぼ中性の水素分子から成っているが、ある程度イオン化しているため磁場と中性ガスは良く結合している。しかし、分子雲コアが収縮して密度が上昇すると電子が分子雲中にわずかに含まれるダストに吸着するためにイオン化度が低下し、磁場がオーム散逸によって散逸する。その散逸の過程も正しく計算するために Resistive MHD 方程式を解き、分子雲の進化を計算する。

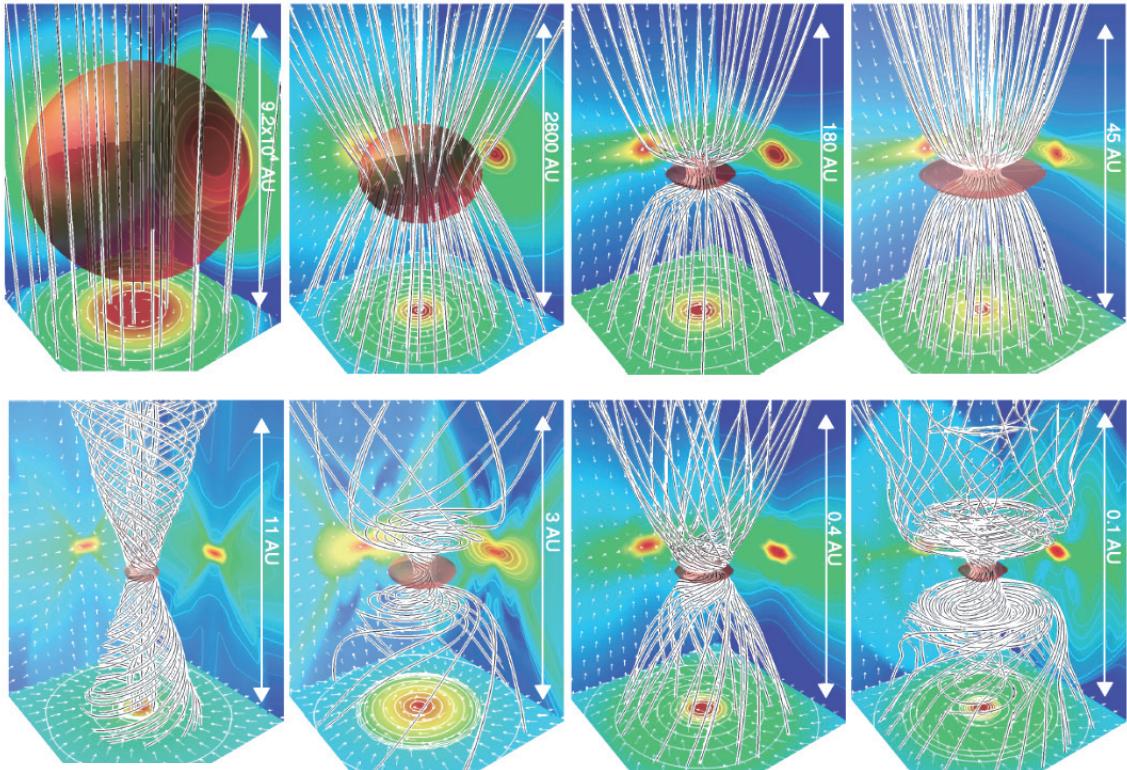


図 2：前期段階の進化

## 2. 星形成の前期段階の計算

星形成過程は、理論的にガスが収縮して原始星が誕生する前の“前期段階（ガス収縮段階）”と原始星形成後にガスが降着する“後期段階（ガス降着段階）”に分けられる。我々の近年の研究によってガス降着段階の進化は、ほぼ理解することが出来た[1]-[5]。

図2は、分子雲コア収縮後、原始星が出来るまでの構造の進化を示している。原始星は、収縮する分子雲コアの中心部分で形成するため各々のパネルで空間スケールが異なっている。図中の白黒の線は磁力線を表している。また、高密度領域を赤の等密度面で、中心部の密度・速度構造を壁面に投影している。

図から分かるように分子雲コアが収縮すると共に磁力線が中心部に束ねられていく。中心密度が $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ を超える中心部分が光学的に厚くなり温度（圧力）が上昇しファーストコアという天体が（一時的に）形成する。ファーストコアは非常に緩やかに断熱的に収縮するために、収縮のタイムスケールが回転のタイムスケールよりも長くなり磁力線が捻られて回転と磁場の効果により低速のアウトフローが駆動する。その後、中心密度がさらに上昇し $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

を超えると水素分子の解離が起こり、その吸熱反応により第二収縮を起こす。水素分子がほぼ水素原子に変換されるとガスは再び断熱的になり収縮が止まり原始星が誕生する（図2の右下のパネルの赤い部分）。誕生した原始星は高速で回転しているために磁力線を激しく捻り高速のジェットが駆動する。

このように分子雲の収縮中にはファーストコアと原始星という異なる天体が出来るために、異なる2つのフロー（低速のアウトフローと高速のジェット）が現れる。

## 3. 星形成の後期段階の計算

我々や他のグループの研究によって原始星が出来るまでの分子雲の進化は詳しく解明された。しかし、この過程で誕生する原始星の質量（形成時のジーンズ質量で決まる）は太陽の千分の1程度（ほぼ木星の質量）であり、太陽質量まで成長するためには、原始星にガスが降着する過程（後期段階）を長時間計算する必要がある。ガスの降着はおよそ10-100万年続くと考えられている。しかし、原始星、または原始星からのジェットまでを空間分解してしまうと、計算のタイムステップが非常に短くなってしまう

い（～秒のオーダー！）太陽質量程度の星が誕生するまでの計算は困難になる。

この困難を克服するためにシンクセルという手法が用いられる。シンクとはすい込み口のことであり、文字通りシンクセル内に落ち込んだ高密度のガスを吸い込む（吸い込んだガスは中心星の重力源としてのみ扱う）。この種の計算の典型的な時間尺度は自由落下時間であり密度の  $1/2$  乗に反比例する。そのため、高密度ガスを取り除くとタイムステップを長く取ることが出来、長時間の計算が可能になる。他方、高密度ガスが存在する原始星近傍の領域は空間解像できないというデメリットがある。しかし、原始星形成後は原始星ではなく星周円盤にガスが降着し、星周円盤は原始星よりずっと大きい空間スケールを持つためにこのような扱いが可能となる。

図3にシンクセルを導入した場合の星周円盤の成長を示している。近年、磁場の効果によって角運動量が過剰に輸送されてしまい、回転円盤（星周円盤）

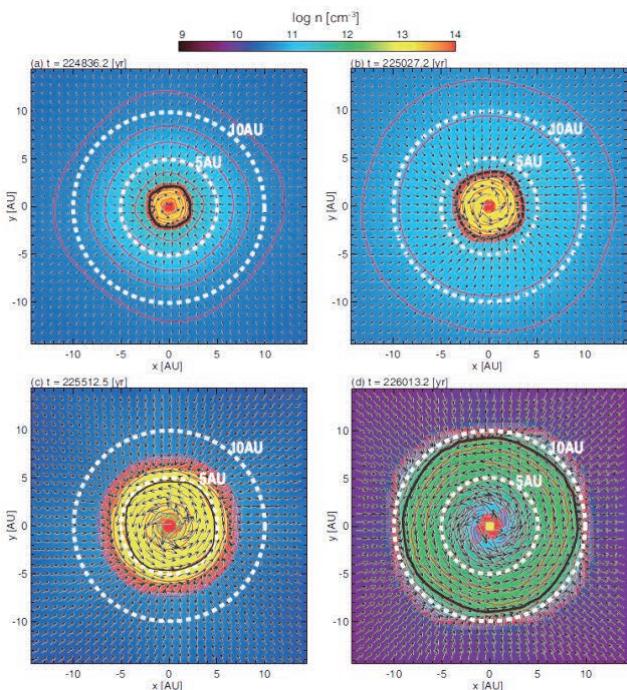


図3：後期段階の円盤形成過程

が形成されないという問題（Magnetic Braking Catastrophe）が指摘されていた。これは、具体的には、磁気制動により円盤の角運動量が落下中のガスに輸送されてしまい、円盤を形成せずに中心星に直接落下してしまうという問題である。観測的に星周円盤は確認されており、また星周円盤（原始惑星系

円盤）は惑星形成の母体であるため、円盤が出来ないという事は星・惑星形成過程において様々な矛盾を生じさせる。しかし、我々の計算によりシンクセルを導入した際にファーストコアを十分な空間精度で分解すれば回転円盤が形成することが分かった。これは、ガスの収縮が一時的に高密度のファーストコア中で止まり、磁場が散逸するために磁気制動が非効率的になるためである [6], [7]。

図4は円盤形成後にさらに計算を進めた様子を異なるスケールで表示している。左側のパネルはより大きなスケールでの表示で、図中のオレンジ色の領域はガスが流出している（アウトフロー）領域である[8]。また、右上のパネルから中心部分では円盤が出来ており、アウトフローは円盤の外縁部から駆動しているのが分かる。さらに右下のパネルでは、円盤の中で分裂が起こり、惑星質量の分裂片が誕生している。

円盤の中心部分は電離度が低く磁場が散逸しているために磁場が非常に弱い。そのため、アウトフローが駆動する事はできない（アウトフローは磁気遠心力という磁場と回転の効果によって駆動する）。結果として円盤内縁部では、磁場による角運動量輸送が効率的ではなく回転円盤が形成する。回転円盤は遠心力によって支えられているために、ガスが効率的に中心星に落下することは出来ない。他方、円盤の外縁部ではアウトフローや磁気制動によって効率的に角運動量が外層に輸送されてガスは円盤内縁に落下（移動）する。これらの効果のために円盤内縁部にガスがたまり円盤の面密度が上昇し、自己重力によって円盤内部で分裂が起こる。図4の右下のパネルの惑星質量天体はこの過程によって形成した。

図5は円盤内縁の分裂によって形成した惑星質量天体の軌道運動を示している。円盤中で誕生した分裂片の多くは、最終的には中心星に落下する。この段階では、中心星は分裂片の落下によってその質量を増加させる。また、いくつかの分裂片は中心星に落下することなく生き残った。これらの分裂片は直接撮像で観測されている中心星から遠い軌道を周回する惑星になる可能性もある[9]。

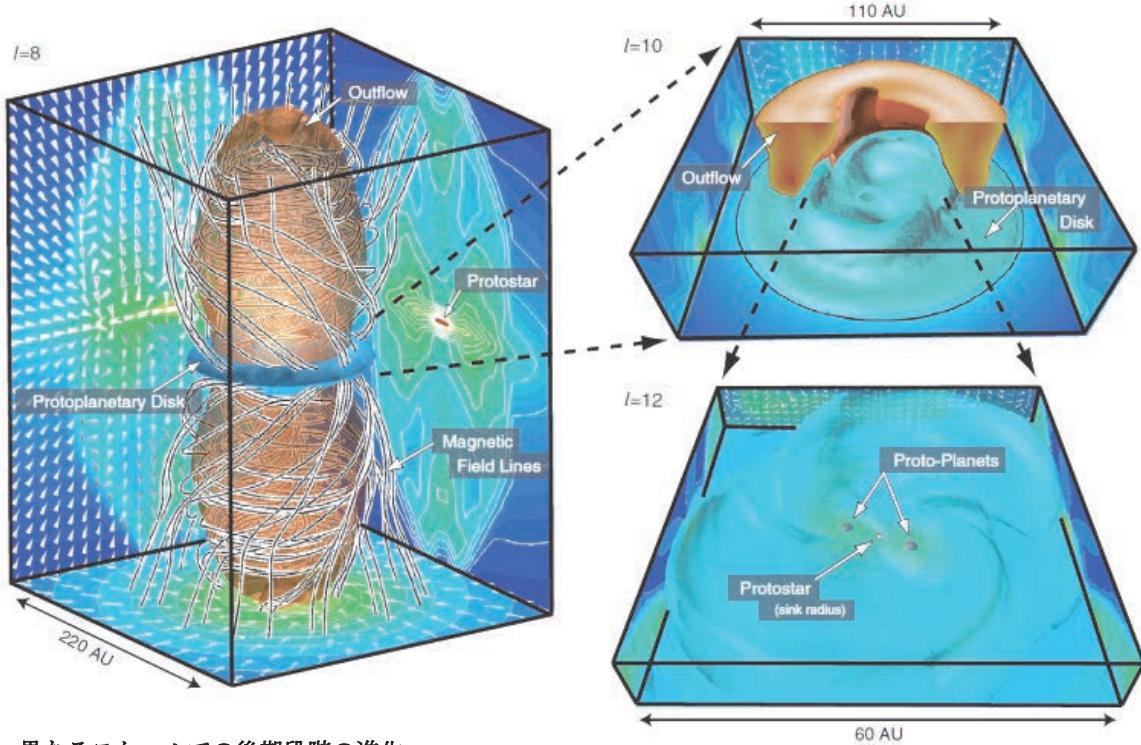


図4：異なるスケールでの後期段階の進化

## 5. まとめと今後の研究

今まで数値シミュレーションを用いて、分子雲コア中の星形成過程の計算を行い、原始星の形成過程、ジェット、アウトフローの駆動メカニズム、円盤とガス惑星の形成過程を解明してきた。しかし、上記のように後期段階の計算はシンクセルを用いているために原始星近傍を分解できていない。そのため、図3、図4から分かるように原始星近傍から駆動する高速ジェットの効果が無視されている。今後

は、中心星までを分解した星形成過程の数値計算を実行し、星形成過程をより詳細に理解することを計画している。

## 参考文献

- (1) Machida, M. N., Tomisaka, K., Matsumoto, T., and Inutsuka, S. (2008), ApJ, 677, 327-347.
- (2) Machida, M. N., Inutsuka, S., and Matsumoto, T. (2008), ApJ, 676, 1088-1108.
- (3) Machida, M. N., Inutsuka, S.-i., and Matsumoto, T. (2007), ApJ, 670, 1198-1213.
- (4) Machida, M. N., Matsumoto, T., Hanawa, T., and Tomisaka, K. (2005), MNRAS, 362, 382-402.
- (5) Machida, M. N., Matsumoto, T., Tomisaka, K., and Hanawa, T. (2005), MNRAS, 362, 369-381.
- (6) Machida, M. N., Inutsuka, S., and Matsumoto, T. (2011), PASJ, 63, 555-.
- (7) Machida, M. N., Inutsuka, S., and Matsumoto, T. (2014), MNRAS, 438, 2278-2306.
- (8) Machida, M. N. and Hosokawa, T. (2013), MNRAS, 431, 1719-1744.
- (9) Inutsuka, S., Machida, M. N., and Matsumoto, T. (2010), ApJ, 718, L58-L62.

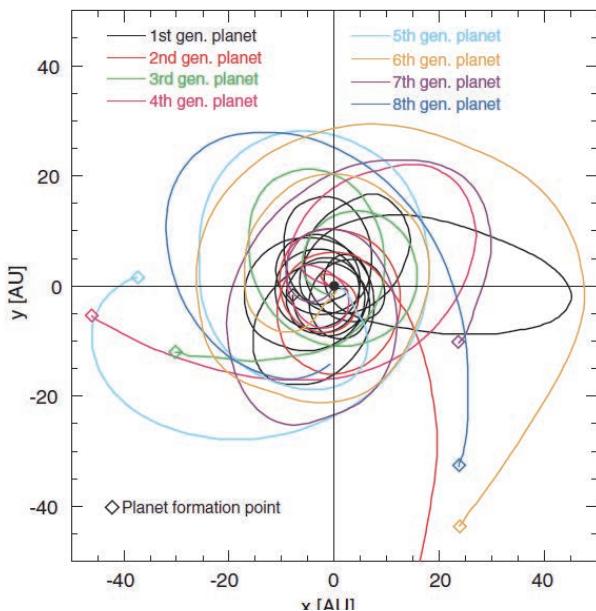


図5：円盤中で誕生した惑星質量天体の軌道運動