

# 星形成過程の解明

町田 正博\*<sup>1</sup>

〈九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1〉

e-mail: machida.masahiro.018@m.kyushu-u.ac.jp

星は分子雲コアと呼ばれるガスのかたまりの中で誕生する。星が誕生する過程の研究ははるか昔から行われてきたが、近年分子雲コアから星が誕生するまでのを多次元数値シミュレーションで直接再現できるようになった。最新の研究から得られた星形成の描像は従来考えられていたものとは大きく異なる。ガスの収縮過程で星形成前に第一コアという中間的な天体が現れる。この天体からアウトフローという低速のガス流が駆動されることによって分子雲コアがもっていた過剰な角運動量が外層に輸送される。また、第一コアの内部では電離度が極端に低下し磁場が散逸する。この角運動量輸送と磁場の散逸により、ガスのさらなる収縮が可能となり原始星が誕生する。原始星形成後アウトフローとは別の機構によりジェットという高速のガス流が原始星近傍から流出する。他方、第一コアは原始星誕生後に惑星形成の母体である原始惑星系円盤へと進化する。本稿では、近年の主に数値シミュレーションによって解明された星形成過程について概観する。

## 1. 星形成領域の観測

観測から星は分子雲、または分子雲コアと呼ばれるガスのかたまりの中で誕生することがわかっている。しかし、星形成過程には多くの未解決の問題が存在する。星の誕生を理解するためには、星形成領域や原始星周辺で観測される現象や事象を説明しつつ、星形成過程のさまざまな問題を解決しなければならない。そのうえで一貫した矛盾のない星形成のシナリオを構築する必要がある。

星形成を理解するうえで観測から得られる情報は重要な役割を果たす。われわれ太陽系の近傍には、複数の星形成領域が存在しておりさまざまな波長で詳細に観測されている。そのため、観測から星形成に関する多くの情報を得ることができ

る。しかし、観測から得られるデータのみから星形成過程全体を理解することは困難である。そこには、二つの理由がある。一つは、観測は星形成過程全体のある瞬間（つまりスナップショット）を見ているに過ぎないということである。星はガスが自身の重力によって収縮して誕生するが、収縮を開始してから主系列星になるまでおよそ1千万年の時間を要する。したがって、われわれが観測しているのは、ある星の形成過程のほんの一瞬の出来事に過ぎず、星形成過程全体を観測することはできない\*<sup>2</sup>。

観測から星形成過程を理解するうえでのもう一つの困難は、星が誕生する現場を直接観測できないということである。星が誕生する現場のガスは柱密度が非常に高く、どの波長でも光学的に厚

\*<sup>1</sup> <http://jupiter.geo.kyushu-u.ac.jp/machida/index.html>

\*<sup>2</sup> しかし、星形成領域では数多くの星が異なる進化段階で誕生しつつあるため、進化段階の異なる個々の星のスナップショットを寄せ集めると星形成過程全体のおおよその進化の過程を推測することができる。

い。つまり、形成直前と直後の星の周囲は濃い霧がたちこめているような状態になっており、その内部を見通すことはできない。

結果として、観測から得られる情報は、‘星ができる前’と‘星ができた後’のスナップショットであり、星がまさに誕生している瞬間（または時間進化）をとらえることはできない。この‘星ができる前’の観測は、分子雲や分子雲コアの観測に対応しており、ガスが収縮している状態までも見通すことができる。他方、‘星ができた後’の観測は、分子アウトフローや光学ジェットといった原始星に付随する現象、または、赤外線点源として観測される原始星そのものやその周りに広がる円盤などである。

分子雲コアの中で星ができるまでの過程を理解するためには、観測から得られている情報を時間的・空間的に統合し、かつ直接観測が不可能である星が誕生する現場の空間・時間進化を補間して星形成シナリオを完成させる必要がある。そのため、観測のみならず、理論や数値シミュレーションによる理解が重要となる。

## 2. 磁束・角運動量問題

星形成過程には多くの未解決問題が存在する。そのため理論や数値シミュレーションを用いて星形成を理解する際、これらの問題を解決しつつ観測と矛盾のない理論を構築しなければならない。星形成の初期段階では例えば以下のような問題が存在する。

- ・磁束・角運動量問題
- ・分子アウトフローと光学ジェットの駆動問題
- ・円盤形成の問題

こららの中で「磁束・角運動量問題」が最も深刻

かつ重要な問題である。磁束・角運動量問題とは、「分子雲コアの磁束と角運動量が、原始星の磁束と角運動量より5桁以上も大きい」という問題である（詳しい数値は、天文月報2000年10月号参照<sup>1)</sup>）。磁束と角運動量は保存量であるため、分子雲コアのガスがそのまま星に変換したと考えると原始星は分子雲コアと等しい磁束・角運動量をもつべきである<sup>3)</sup>。この5桁の違いというのは、言い換えると、ガスが収縮して星になる際に、分子雲コアがもっていた磁束・角運動量の99.999%が散逸またはどこかに輸送されてしまうということを意味している。逆に考えると、磁場の散逸や角運動量輸送がなければローレンツ力や遠心力が重力収縮を妨げるためガスの収縮が途中で止まってしまう、星は誕生することができない。そのため、星が誕生するためには、分子雲コアがもつ過剰な磁束と角運動量を散逸・輸送させることが必要となる。

実は、上で記述した残りの問題もすべてこの磁束・角運動量問題に帰着する。これは、アウトフローやジェットまたは円盤形成は、ガスがもっている磁場と回転の効果によって生じる現象であるためである。分子アウトフローと光学ジェットの駆動問題というのは、星形成領域でタイプの異なる二つのガス流<sup>4)</sup>が観測されているが、どこからどのようにしてこれらが駆動するのかという問題である。円盤形成の問題は、若い段階の星の周りの円盤は観測が難しくその初期の進化がわかっていないために、どのように星周円盤が形成するのかという問題である。星周円盤は惑星形成の母体であり、惑星形成の初期条件でもあるため、その形成や性質を理解することは非常に重要である。

<sup>3)</sup> 実際には、分子雲コアのすべてが星に転換するわけではなく、数割（大体30–70%）が星になると考えられているが、磁束・角運動量の減少率とは桁が大きく異なるため、分子雲コアのガスのすべてが星になると考えても差し支えない。

<sup>4)</sup> 分子輝線で観測される低速（ $\leq 1\text{--}50\text{ km/s}$ ）で開口角の広い‘分子アウトフロー’と、光学で観測される高速（ $\geq 50\text{--}100\text{ km/s}$ ）で細長い‘光学ジェット’。

### 3. 星形成の研究と数値シミュレーション

2節で述べた問題を解決しつつ星形成過程全体を理解するためには、星が誕生する以前の星形成の母体である分子雲コアからその進化を追い、収縮するガスの中で星が誕生し、その後どのように進化していくかを調べる必要がある。しかし、ガスの重力収縮の過程は、重力のほかにもガスの熱進化、回転や磁場の影響が複雑に絡みあっているため、解析的に扱うことは困難である。そのため、さまざまな問題を解決しつつ星形成の過程を理解するためには多次元の数値シミュレーションが必要となる。しかしながら、分子雲コアから星ができるまでを計算するためには広範なダイナミックレンジを空間分解しなければならない。例えば、分子雲コアは典型的には0.1 pc程度の大きさをもつものに対して、原始星はおよそ0.01 AU程度の半径をもつ。したがって、空間スケールが7桁以上も異なる。このように大きく異なるダイナミックレンジを克服して分子雲コアの収縮を扱う方法として、適合格子細分化法、または多層格子法という手法がある。これらは格子法による計算方法の一種であるが、空間解像度が異なる格子を階層的に配置することにより高解像度が必要な領域を細かい格子で覆うという方法である。われわれの研究では、多層格子法を用いているが、詳細は天文月報2000年10月号<sup>1)</sup>および2008年2月号<sup>2)</sup>に記述されているためここでの説明は省く。

近年、われわれは多層格子法を用いて、必要と考えられる物理を考慮し、分子雲コアから直接原始星ができるまでの数値シミュレーションを実現した。その過程において、上記の星形成の初期段階の問題を解決することができた。以下では、分子雲コアから星形成の各段階の進化を概観しながら、それぞれの問題がいかに関解決されたかを示し、最後に数値シミュレーションによって得られた最新の星形成シナリオを提示する。

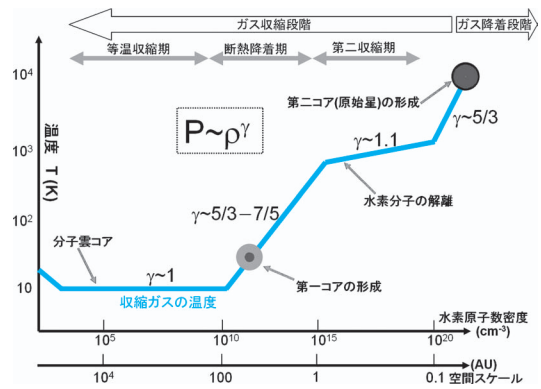


図1 ガスの熱進化の模式図。横軸は水素原子数密度と、密度と温度から導出されるゾーンズ長に対応するおおよその空間スケール。また、それぞれの段階のポリトロップ指数  $\gamma$  を表示している。

### 4. 星形成の各段階

一般に、星形成過程はガス収縮段階（前期段階）とガス降着段階（後期段階）という二つの段階に分けることができる。ガス収縮段階は、分子雲コアのガスが収縮を開始してから原始星ができるまでの段階で、この段階では基本的にガスは収縮を続ける。他方、ガス降着段階は、原始星が誕生しガスの収縮が止まった後に原始星または周りの円盤にガスが降着する段階である。

最初に、ガス収縮段階の進化について述べる。図1は1次元球対称輻射流体計算から得られた（分子雲コア中で収縮している）ガスの熱進化の概念図である<sup>3),4)</sup>。縦軸は収縮しているガスの温度、横軸はガスの数密度またはゾーンズ長（温度と密度から決まる長さ）に対応する典型的なスケールを示している。重力収縮するガスは密度が時間とともに上昇するため、横軸は時間軸に対応する。図の上部に示しているように、ガス収縮段階は、さらに等温収縮、断熱降着と第二収縮という典型的な三つの時期に分けられる。

分子雲コアのガスは主に水素分子からなるが、その数密度が  $n \leq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  の間は、ほぼ等温で

収縮（等温収縮期）する。その後数密度が  $n \geq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  を超えるとガスは断熱的に収縮（断熱降着期）するようになる。これは密度が高くなると輻射冷却が非効率になり、収縮によるガスの加熱が冷却を上回るためである。温度が上昇を始めると第一断熱コア（以後、第一コア）と呼ばれるほぼ力学的に釣り合った天体が形成されて、ガスの収縮が非常に遅くなる。第一コアは、星形成のミッシングリンクとも呼ばれており、星形成過程の‘前’と‘後’を結びつける‘中間の天体’に位置づけられる、重要な天体である。この第一コアは理論予測では、寿命が短く（～100–1,000年程度、最大で数万年<sup>5)</sup>）、サイズが小さい（1–100 AU程度）ために観測によって同定するのが困難であると考えられてきた。しかし2010年度から複数のグループが第一コアの発見を報告している<sup>6),7)</sup>。これら発見された天体が確実に第一コアであるかどうかを判断するにはALMAなどによるさらなる詳細な観測が必要である。

理論計算によると、この第一コアはガス降着によって質量が増大し中心の密度と温度が緩やかに上昇する。第一コアの中心部分でガスの温度が～2,000 K、密度が  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  を超えるとガスの主成分である水素分子が解離し水素原子になる。この過程は吸熱反応であり、ガス収縮が再び促進される。この時期を第二収縮期と呼ぶ。ほぼすべての水素分子が水素原子に転換されるとガスは再び断熱的になり、このとき第二コアが形成される。この第二コアが原始星である。形成直後の原始星（第二コア）の質量は、図1にあるような温度と密度から決まるジーンズ質量に相当し、ちょうど木星 ( $10^{-3} M_{\odot}$ ) と同じ質量である。この木星質量の初期原始星が、その後のガス降着によって質量を獲得する（ガス降着段階）。図1の概念図は球対称計算から得られた結果であるが、多次元計算で磁場や回転の効果が入った場合にも定性的には変わらないことが示されている<sup>8),9)</sup>。

## 5. ガス収縮段階

2節で述べた星形成の問題を解決するためには、磁場や回転を考慮した多次元計算が必要となる。図2はオーム散逸を考慮した磁気流体方程式を解く数値コードを用いて、磁場と回転を考慮して分子雲コアから原始星が誕生するまでを直接計算した結果である。その際、ガスの熱進化としては球対称計算から得られたものを用いている（パロトロピック近似）。

### 5.1 等温収縮と第一コア形成

初期条件として観測から得られる分子雲コアを模したボナー・エバート球という重力と圧力がほぼ釣り合った状態の密度分布を採用し、それに観測される分子雲コアと同等の回転と磁場を与えた。その後、分子雲コアのガスが収縮していく過程を計算している。図2のそれぞれのパネルに中心密度とスケールが表示されている。図に示されているように、等温収縮期は磁力線が中心に収束している。

その後、第一コアが形成すると、中心部分で磁力線がより束ねられる。また、中心部分で第一コアを取り囲む衝撃波によって磁力線が急に折れ曲がっているのがわかる。等温収縮期はガスの収縮が速く「収縮の時間尺度 < 回転の時間尺度」であるが、断熱降着期はガスの収縮がほぼ止まるため「収縮の時間尺度 > 回転の時間尺度」となる。そのため図2 下段の一番左の図にあるように第一コアの回転によって磁力線が強くなじられる。また、このとき第一コアの角運動量は磁力線の「ねじり」を通して外層に輸送される（磁気制動）。さらに、ねじられた（または折れ曲がった）磁力線によって、第一コアに降着しているガスの一部が磁気遠心力という機構（後述）によって吹き飛ばされる。この吹き飛ばされるガス（アウトフロー）によっても角運動量は効率的に外層に輸送される。



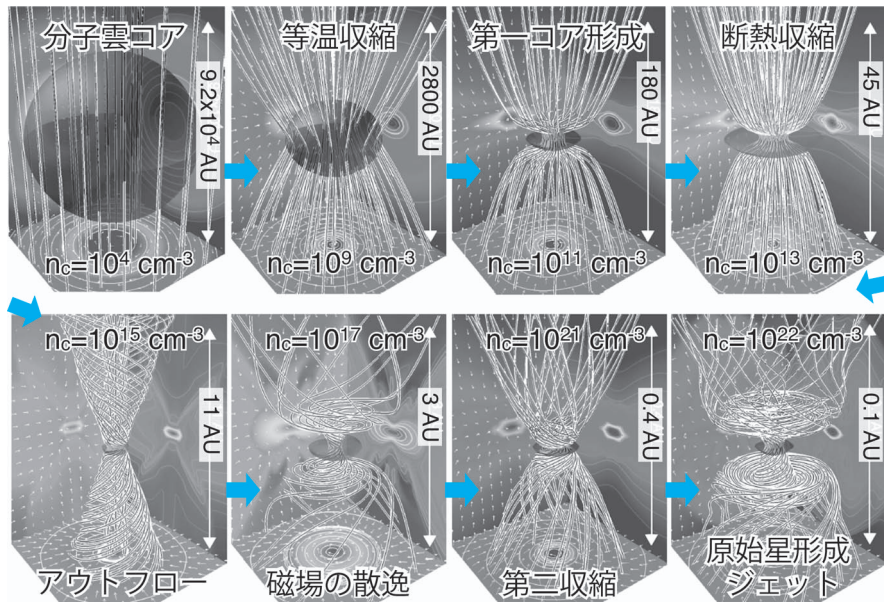


図2 3次元計算による分子雲コアから原始星形成までの直接計算. 典型的な八つの時期を表示. 空間スケールはそれぞれのパネルで異なる. それぞれのパネルで線は磁力線, また中心部の球または楕円状の領域は高密度領域の形状. 中心の切断面の密度分布を壁面に投影している.

## 5.2 磁場の散逸

第一コア形成後, その内部で増幅した磁場が散逸する. この節では, 磁場の進化について記述する. 収縮しているガスは弱电離プラズマであり, ガスの電離度は非常に低い ( $< 10^{-6}$ ). しかし, それでも低密度ではガスの典型的な進化のタイムスケールである自由落下時間より中性粒子と荷電粒子の衝突時間のほうが十分に短いため, 磁場と中性ガスはよく結合している. この段階では電離度は低いが磁場はほとんど散逸しない. その後, 密度の上昇とともにさらに電離度が低下し電気抵抗率が上昇していく. 最終的には, 水素分子の数密度が  $n \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  を超えると磁気レイノルズ数 (磁場の散逸が効くかどうかの指標) が1以下になり中性ガスと磁場との結合が破れ, 磁場はオーム散逸により弱まっていく. このオーム散逸が有効である段階は, 断熱段階であるため徐々にガスの温度が上昇していき, およそ2,000 Kを超えるとガス中に含まれる一部の元素がイオン化し

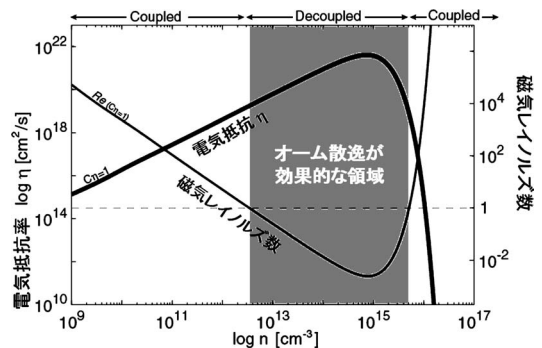


図3 水素原子の個数密度に対する電気抵抗率 (左の軸: 太線) と磁気レイノルズ数 (右の軸: 細線). 灰色の密度領域で磁気レイノルズ数が1以下となり磁場が効率的に散逸する. 文献13の図を改編.

て電離度が急激に増大し, 中性ガスと磁場との結合が回復する. 結果として, 図3の灰色で塗られた領域で (または, この時期に) 磁場は効率的に散逸する. 図2の下段左から2番目の図で, 中心部分では磁力線がねじられているが, 上空ではね

じられていない（一度ねじられた磁力線がほどか  
れている）のがわかる。これは、高温の中心部分  
ではガスと磁場がよく結合しているために回転に  
よって磁力線がねじられているが、上空では磁場  
が中性ガスと結合していないために磁力線が中性  
ガスをすり抜けるためである。この領域では、磁  
場は中性ガスに引きずられることなく磁気テン  
ションによってまっすぐな状態に戻ろうとする。

この磁場の散逸は、偶然にも第一コアの内側で  
起きるため、第一コア（の外層）から磁気遠心力  
風によって駆動するアウトフローにはあまり影響  
を与えない。そのため、角運動量は磁場の散逸が  
起こる前の段階（またはより大きなスケール）で  
磁場（磁気制動とアウトフロー）によって外層に  
輸送される。他方、磁束はさらに後の段階（また  
はより小さなスケール）で第一コアの内側でオー  
ム散逸によって減少する。つまりこの断熱降着段  
階で余分な角運動量を輸送し、また余分な磁場を  
散逸することによって、遠心力とローレンツ力が  
十分に弱くなりガスはさらに収縮することが可能  
になる。収縮が可能になった結果、第二収縮を起  
こしてさらに密度と温度が上昇し、最終的には原  
始星が誕生する。

### 5.3 磁束・角運動量問題の解決

図4は、分子雲コア（初期条件）と原始星形成  
直後の磁束（上図）と比角運動量（下図）を示し  
ている。横軸は、中心部から積分した質量であ  
り、原始星の（計算終了時の）質量は $0.01 M_{\odot}$   
程度である。この図から形成した原始星の磁束は、  
分子雲コアよりも4~5桁程度低いことがわかる。  
また、原始星の比角運動量は、分子雲コアと比較  
すると2桁程度低い。これらは、初期にもって  
いたガスの比角運動量と磁束が原始星に降着する  
前に十分に抜けたことを意味している。分子雲  
コアの中心部の比角運動量はもともと外層より  
低いため、この時点（まだ原始星質量が小さい  
時期）での2桁の減少でも十分角運動量が抜  
けており原始星の比角運動量の値と非常によく  
一致する。こ

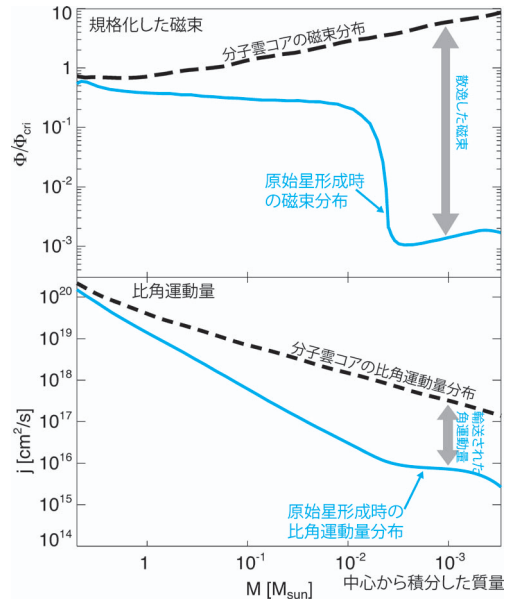


図4 規格化した磁束（上図）と比角運動量（下図）  
の質量分布。横軸は中心から積分した質量。  
初期（分子雲コア）と計算最後（原始星形成後）  
の磁束と比角運動量の値を表示。灰色の矢印  
が磁気散逸、または角運動量輸送によって初  
期値から下がった量。文献13の図を改編。

の計算では、まだ原始星の質量が $0.01 M_{\odot}$ 程度  
であるために、最終的に $1 M_{\odot}$ 程度の星まで成長  
したときに角運動量・磁束が十分に抜けているこ  
とはまだ示せていない。しかし、後から落ちてく  
るガスも同様のプロセスを経験すると考えると、  
同様に角運動量・磁束が抜けると予測できる。形  
成した原始星の磁場強度と回転周期はそれぞれ、  
 $B \sim 0.1 - 1 \text{ kG}$ ,  $P \sim 1 - 10$ 日程度であり原始星の観  
測とよく一致する。

### 5.4 アウトフローとジェットの駆動機構

図3からわかるように、原始星周辺の高密度領  
域は温度が高く磁場と中性ガスが再び結合する。  
しかし、形成直後の原始星の周りの磁場はオー  
ム散逸を経験しているために非常に弱い。この時  
期の原始星の周囲の磁気圧はガス圧の100万分の1  
程度であり、原始星形成時に磁場はほとんど進  
化に影響を与えない。また、磁場が非常に弱いた

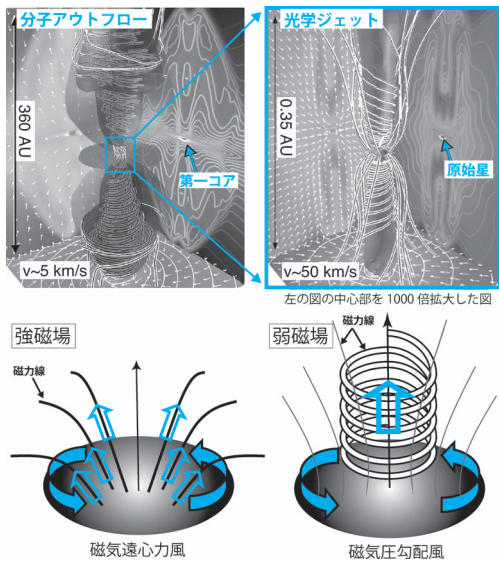


図5 上図: 数値計算から得られた第一コアから駆動する低速で広い開口角をもつアウトフロー (左図) と原始星から駆動する高速で狭い開口角をもつジェット (右図). 図中で中心の円筒状の構造がアウトフローとジェットに対応する. 右の図は左の図の中心部分を約1,000倍拡大した図. 下図: アウトフロー (磁気遠心力風) とジェット (磁気圧勾配力風) の駆動メカニズム. 文献14の図を改編.

め、磁気遠心力風によるガス流も発生しない (磁気遠心力風の駆動には強い大局磁場が必要となる). しかし原始星形成後は、原始星の回転によって磁力線がねじられて磁場が再増幅する. その結果、原始星の回転軸に沿って強い磁気圧勾配力が発生しガスが原始星近傍から高速で流出するようになる.

図5は星形成過程で現れる2種類のガス流を示している. 左上の図からわかるように第一コアから開口角が広い低速のガス流が現れる. 右上の図は、左上の図の中心部を1,000倍拡大した図である. この図から原始星近傍では、開口角の狭い高速のフローが出ているのがわかる. これらガス流の開口角の違いは、ガス流の駆動機構の違いから生じる. 図5の下にガス流の駆動メカニズムを示している. 左下に示すように強い大局磁場が存在

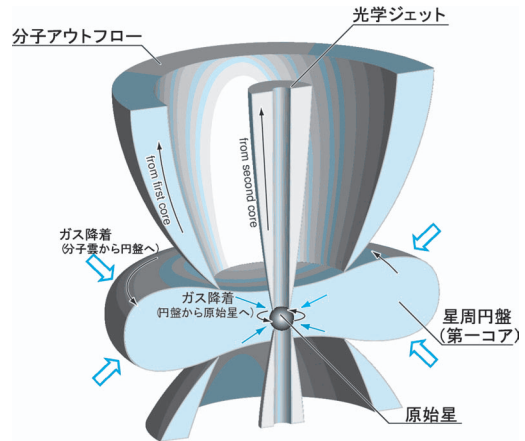


図6 第一コアを起源とする星周円盤から駆動する分子アウトフローと原始星近傍から駆動する光学ジェットの概念図. 文献14の図を改編.

する場合には、円盤から磁力線に沿ってガスが放出される. この場合、根元の磁力線が傾いているために、ある程度の開口角をもってガスが流出する (しかし、長距離ではフープストレスによってある程度細長い構造を作る). 他方、磁場が非常に弱い場合には、回転軸に沿って磁力線が強くねじられて‘ばね’のような構造になり、磁気圧勾配力によりガスが打ち出される. この場合は、回転軸方向のみにガス流が現れるために、開口角は非常に狭くなる.

5.2節で示したように、第一コア周辺のガスはオーム散逸を経験していないために、強い (大局) 磁場が存在し磁気遠心力風による開口角の広いガス流が現れる. 他方、原始星周辺のガスはオーム散逸を経験しているために強い磁場は存在せず、原始星の回転によって生成されたねじれた磁場による磁気圧勾配力によって開口角の狭いガス流が現れる.

また、速度の違いは重力ポテンシャルの深さの違いによる. 第一コアも原始星も質量はほぼ等しい (進化の段階にもよるが、後述するように実際には原始星形成時は第一コアのほうが10倍程度重い). しかしサイズが大きく異なる. 第一コア



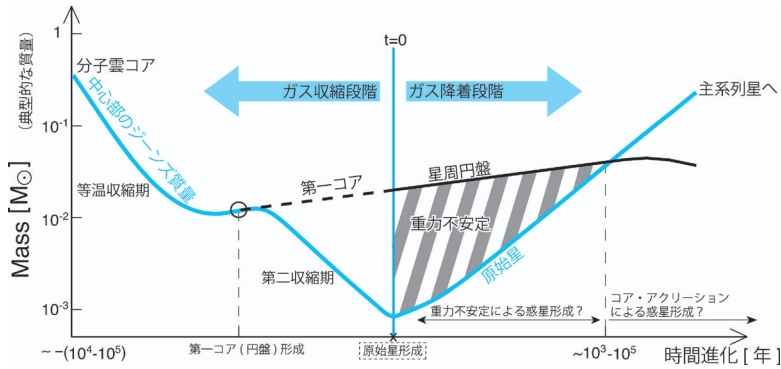


図7 典型的な質量の時間進化. 青い線は収縮するガスのジーンズ質量（ガス収縮段階）と原始星質量（ガス降着段階）を、黒い線（破線と実線）は第一コア（ガス収縮段階）と星周円盤（ガス降着段階）の質量を表している. 斜線部分は星周円盤が中心星よりも重く、円盤が重力的に非常に不安定である時期. 文献10の図を改編.

は1 AU以上（回転を考慮すると10-100 AU程度）の大きさをもつものに対して、原始星は0.01 AU程度の大きさである. そのため、原始星のほうが重力ポテンシャルが深く、脱出速度（または回転速度）も速い. ガス流の速度は、駆動領域の脱出速度（または、回転速度）にほぼ等しい. そのため重力ポテンシャルの深い原始星近傍からは高速のガス流（ $\sim 10-100$  km/s）が、重力ポテンシャルの浅い第一コアからは低速のガス流（ $\sim 1-10$  km/s）が現れる.

図6は、ジェットとアウトフローの概念図を示している. この図からわかるように、二つの異なる駆動体（第一コアと原始星）から二つの異なるガス流（分子アウトフローと光学ジェット）が駆動される.

## 6. ガス降着段階

原始星形成後は、ガスの収縮が止まり原始星にガスが降着する. 原始星は、第一コアの一部が崩壊して誕生するが、第一コアの大部分は原始星形成後も原始星の周りに残存している. 3次元磁気流体計算によって、原始星形成後に、この第一コアはわずかに収縮するがやがて重力と遠心力が釣り合うようになり星周円盤に進化することが示された<sup>10)</sup>. 重力と遠心力が釣り合った後は、円盤

は降着によりそのサイズと質量を増大させる. 原始星形成時、第一コアは原始星よりも十分に重く大きい. したがって、原始星が誕生した瞬間には、すでに原始星よりも重く $\sim 1-100$  AU程度の大きさをもつ円盤が存在している. その後は、星周円盤はガス雲からの直接のガス降着によって、また原始星は星周円盤からのガス降着によって質量を増大させていくが、原始星形成後しばらくの間は星周円盤の方が原始星よりも重い. そのため星周円盤は重力的に不安定になる<sup>10)</sup>.

### 6.1 典型的な質量の進化

図7は分子雲コアの崩壊から原始星形成を経て円盤ができるまでのそれぞれの段階の典型的な質量の進化を示している. ガスは初期に等温で収縮するため、典型的な質量であるジーンズ質量もガスの進化とともに減少する. その後断熱降着期に温度が上昇するために一時的にジーンズ質量が増大する. このとき第一コアが形成し、進化が二つのトラックに分かれる（一つは将来円盤になる第一コア、もう一つは将来原始星になる第一コア中心部の高密度ガス）. 第一コアの中心部はさらに収縮し密度が上昇してジーンズ質量は低下し続ける. その後、中心密度が $\sim 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>を超えると第二コア（原始星）が誕生する. 原始星は、第一コアを起源とする円盤から質量を獲得するため、



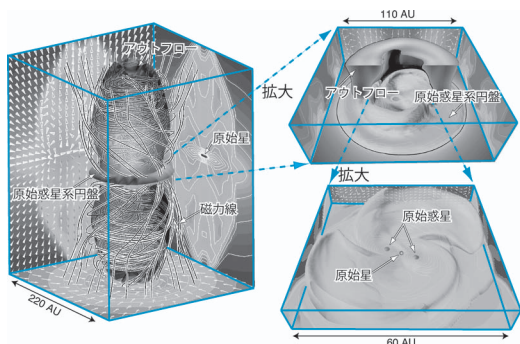


図8 原始星形成後のアウトフローと円盤の構造. 右上の図は左の図の拡大図. 右下の図は、右上の図をさらに拡大したもの. 右下の図では、円盤の重力不安定により木星の数倍程度の質量をもつ原始ガス惑星が誕生している. 文献10の図を改編.

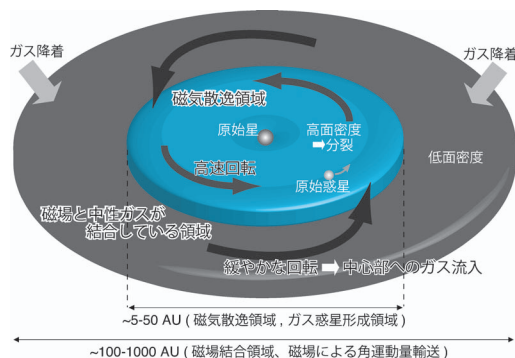


図9 磁場とその散逸による円盤の内側（青い部分）での分裂と原始惑星形成の概念図. 円盤の外側（灰色の部分）の領域では、磁場が強く磁気制動やアウトフローによって角運動量が輸送される.

その形成後質量は単調に増加する.

他方、第一コアは中心部以外は崩壊せずに、ガス降着により質量を増大する. また、第一コアから成長した星周円盤もガス降着により分子雲コアのガスが枯渇するまで質量を増大する. その後、分子雲コアのガスがほぼすべて星周円盤に落下すると円盤への質量供給が終了し、円盤のガスは徐々に中心星へと落下していく. したがって、図からわかるように、原始星形成直後は円盤のほうが原始星よりも重い時代が存在する（図7の斜線部分）. この段階では、しばしば円盤内で重力不安定により分裂が起こり、（ジーンズ質量に対応する）木星質量程度の天体を形成する.

## 6.2 重力不安定と磁気散逸による惑星形成

6.1節で述べたように、原始星が形成してしばらくの間は、原始星よりも重く重力的に不安定な円盤が存在する. 図8は、星周円盤内で分裂が起きて木星質量をもつ原始ガス惑星が誕生した時期のスナップショットである. これは分子雲コアから計算したものであるが、原始星形成後の円盤の長時間進化を調べるため、1 AU以下の領域に落下したガスは重力源（つまり質点としての原始星）としてのみ扱い空間的には分解していない

（シンクセル法）. この図から円盤外側のみからアウトフローが駆動しており、円盤の内側では原始惑星が誕生しているのがわかる.

この原始惑星は、円盤内の分裂によって誕生したものであるが、分裂は磁場の散逸と関係している. 図9に示されているように円盤の外側では面密度が低く磁場と中性ガスがよく結合しているためアウトフローや磁気制動によって角運動量が外層に輸送される. そのため円盤外層のガスは円盤の内側に流入する. 他方、円盤の内側では面密度が高く磁場が散逸するために角運動量を有効に輸送する機構が存在しない. そのため外層から流入したガスは、円盤内側で回転によって支えられその場にとどまる. その結果、円盤内側で徐々に面密度が上昇し、最終的には重力不安定によって分裂を起こして木星質量程度の原始惑星が誕生する. 現時点では、この分裂によって形成した天体があるまま惑星になるのか、さらに成長して連星なるのかはわかっていない. しかし、このガス惑星形成機構は、直接撮像によって観測されているような中心星から遠い軌道を回る巨大ガス惑星<sup>11)</sup>の形成を説明する可能性がある<sup>10), 12)</sup>.

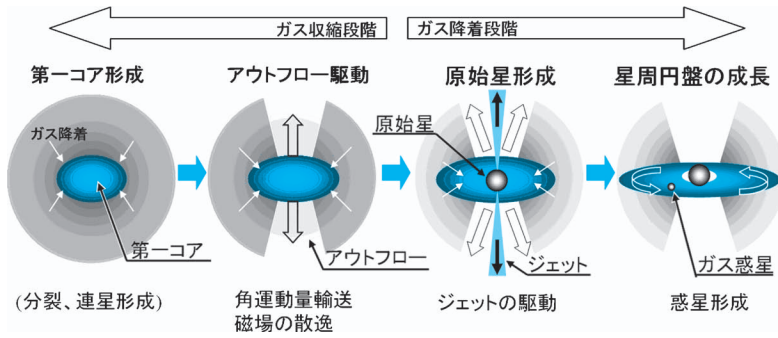


図10 数値シミュレーションから得られた新しい星形成シナリオ.

## 7. 星形成シナリオ

従来の星形成シナリオでは、星が誕生した後に円盤が徐々に成長していくと考えられており、第一コアの形成や進化については考慮されていなかった。また、磁場の散逸やアウトフローの効果は無視されていた。しかし近年、星形成前の分子雲コアから直接星や円盤の形成進化が計算できるようになり、星形成過程についてより詳細な理解が得られた。また2節で述べた星形成上のさまざまな問題も解決されつつある。

図10は近年の理論計算から得られた新しい星形成のシナリオを示している。4節で述べたように、星が誕生する前に第一コアという天体が形成する。本稿では述べなかったがこの段階で分裂が起り連星が誕生することがある（詳しくは天文月報2008年2月号参照<sup>2)</sup>）。第一コアの形成によりガスの収縮が遅くなり磁力線がねじられて、アウトフローや磁気制動により角運動量が効率的に外層に輸送される。この角運動量輸送によってガスがさらに収縮することができる。その結果、第一コア中心部のガスがより高密度になり電離度がさらに低下して第一コアの内部で磁場が散逸する。この角運動量輸送と磁場の散逸によりさらなるガス収縮が可能になり、原始星が誕生する。

原始星誕生後は原始星近傍から磁気圧勾配力により細長い高速のジェットが駆動する。原始星形成後もアウトフローは駆動され続けるため、この

高速で細長いジェットは低速で広い開口角をもつアウトフローに取り囲まれている。さらに原始星形成時には、第一コアを起源とする回転円盤がすでに存在している。原始星形成後、ガスが回転円盤に降着を続けている段階では、円盤のほうが原始星よりも重いために重力的に不安定になる。この重力的に不安定な円盤の外側領域では磁場の効果によって角運動量が輸送されるためガスは円盤の内側領域に流入する。他方、円盤内側では磁場が散逸しているために、有効な角運動量輸送機構が存在せず、蓄積したガスによって重力的により不安定になり分裂を起こして原始ガス惑星が誕生する。最終的には、ガス円盤が散逸して太陽のような主系列星へと進化していく。

## 8. 今後の課題

近年の研究により星形成前の分子雲コアから原始星の形成とその後の円盤の形成・進化についてさまざまな知見が得られた。しかし、これらはまだ星形成初期の段階であり、原始星が主系列星になるまでにはさらなる進化段階を理解しなければならない。例えば、星周円盤はこの後の段階で何らかの機構によって散逸して消滅する。また、この円盤の散逸の前後では他のガス惑星や固体惑星も誕生する。さらに原始星形成後のジェットの進化や原始星の表面および内部の磁場の進化についてもよくわかっていない。これらを理解するためには、より発達した輻射磁気流体数値コードなど

を用いて、さらに空間解像度を上げて数値シミュレーションを行う必要がある。また、今後ALMAなどによって観測から得られるデータもより増大することが予想される。理論計算は観測と相補的なものであり、今後の詳細な観測結果を説明するために、さらに深く星形成過程を理解することが重要になると考えられる。

## 謝 辞

本稿の内容は、名古屋大学の犬塚修一郎氏、法政大学の松本倫明氏、国立天文台の富阪幸治氏との共同研究<sup>12)-15)</sup>に基づいている。また、総合研究大学院大学/国立天文台の富田賢吾氏には原稿について有益なコメントを数多くいただきました。

## 参考文献

- 1) 富阪幸治, 2000, 天文月報 93, 10
- 2) 富阪幸治, 2008, 天文月報 101, 2
- 3) Larson R. B., 1969, MNRAS 145, 271.
- 4) Masunaga H., Inutsuka S., 2000, ApJ 531, 350
- 5) Tomida K., Machida M. N., Saigo K., Tomisaka K., Matsumoto T., 2010, ApJL 725, L239
- 6) Chen X., Arce H. G., Zhang Q., Bourke T. L., Launhardt R., Schmalzl M., Henning T., 2010, ApJ 715, 1344
- 7) Enoch M. L., Lee J.-E., Harvey P., Dunham M. M., Schnee S., 2010, ApJL 722, L33
- 8) Bate M. R., 2010, MNRAS L38
- 9) Tomida K., Tomisaka K., Matsumoto T., Ohsuga K., Machida M. N., Saigo K., 2010, ApJL 714, L58
- 10) Inutsuka S., Machida M. N., Matsumoto T., 2010, ApJL 718, L58
- 11) Thalmann C., et al., 2009, ApJL 707, L123

- 12) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto, T., 2011, ApJ 729, 42
- 13) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto T. 2007, ApJ 670, 1198
- 14) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto, T., 2008, ApJ 676, 1088
- 15) Machida M. N., Tomisaka K., Matsumoto T., Inutsuka S. -i., 2008, ApJ 677, 327

## The Formation of Protostars

Masahiro MACHIDA

*Department of Earth and Planetary Sciences,  
Faculty of Sciences, Kyushu University, 6-10-1  
Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan*

Abstract: Stars are born in the molecular cloud core. Recently, we can directly calculate the protostar formation from the prestellar core stage. The star formation process unveiled by the current simulation is considerably different from the previous one. Before the protostar formation, an intermediate object that is called the first core appears in the collapsing cloud. The first core drives the protostellar outflow that transfers the excess angular momentum outward. In addition, the ionization rate becomes very low inside the first core, and the magnetic field dissipates by the Ohmic dissipation. Both the angular momentum transfer and magnetic dissipation promote further gas contraction and make the protostar formation possible. Around the protostar, another high-velocity flow that is called a jet appears just after the protostar formation. On the other hand, the first core directly evolves into the protoplanetary disk after the protostar formation. In this paper, we report recent results of the star formation investigated by the numerical simulation.