

# 分子雲コアの重力収縮と連星系形成 —多層格子法を用いた超高解像度数値 シミュレーション—

松 本 倫 明

〈法政大学人間環境学部 〒102-8160 東京都千代田区富士見 2-17-1〉

e-mail: matsu@i.hosei.ac.jp

多層格子法を用いて超高解像な数値シミュレーションを行い、連星系形成のメカニズムを調べました。その結果、ほぼ平衡状態にある分子雲コアでも、その進化の過程で分裂し、原始連星系を形成することを示しました。原始連星の形成過程では、分子雲コアの回転が重要であり、観測で示唆されるようなゆっくりとした回転でも、十分に原始連星を形成します。生まれた原始連星の連星間隔は、観測ともよく合致し、この数値シミュレーションが現実的なものであることを示唆しています。さらに、分裂の主要なメカニズムは、星周円盤が分裂する「衛星型分裂」であることを示しました。

## 1. はじめに

### 1.1 連星系形成のシナリオと分裂

大半の恒星は連星として誕生すると考えられています<sup>1)</sup>。恒星が誕生するシナリオは次のように考えられています。まず、分子雲の高密度部である分子雲コアが自己重力で暴走的に収縮し、密度が臨界密度に達すると、中心部にファーストコアと呼ばれる最初の星のコアが形成します。古典的研究によると、ファーストコアの大きさは 1 AU 程度です<sup>2)</sup>。ファーストコアは、半径 100 AU 程度のガス円盤（降着円盤）を介して分子雲コアのガスを降着し、質量を増加させ、自己重力によってさらに収縮し、原始星、おうし座 T 型星の段階を経て、主系列星に進化します。この進化の中で、一つの星が誕生すれば単独星が形成し、複数の星が誕生すれば連星系が形成します。現在有力な連星系形成のシナリオでは、分子雲コアの重力収縮中に、分子雲コアが分裂し、それぞれの分裂片が

ファーストコアに進化して、連星系が形成すると考えられています。

### 1.2 伝統的な研究

このシナリオに基づき、過去 20 年あまりの間、連星系形成の研究が盛んに行われてきました。初期の研究では、とりあえずファーストコアの形成を無視し、分子雲コアを簡単な等温ガス雲としていました。等温ガス雲が重力収縮中に分裂すれば、連星系が形成するというモデルです。分裂の基本的なメカニズムは重力不安定性であるため、分子雲コアを容易に分裂させるために、非常に重い（または低温な）分子雲コアを仮定していました<sup>3)</sup>。

しかし、最近の観測によると、分子雲コアは力学的平衡状態に近く<sup>4)~7)</sup>、従来の言っていた分裂条件<sup>8)~11)</sup>を満たさないことがしばしばです。また、星形成の標準シナリオに照らし合わせても、初期に非常に不安定な分子雲コアから出発するには無理があります。一方、現実の星の大半は連星

なので、現実的な条件の下でも連星が容易に誕生する必要があります。

## 1.2 最近の動向

最近は、より現実的に、ファーストコアの形成を考慮した研究が行われています。分裂に対するファーストコアの効果は以下の二つが考えられます。(1) ファーストコアの形成により分子雲コアの暴走的な収縮が止まり、中心部でガス塊が分裂する時間的な余裕ができ、分裂が促進される。(2) 中心部が高温になるので、分裂が抑制される。どちらの効果が効くのか、問題が非線形で複雑なため、数値シミュレーションで確認する必要があります。しかし、最近の研究の多くでは、上記の等温ガス雲の分裂の研究による先入観からか、やはり非常に重い（または低温な）分子雲コアを仮定したものが多く<sup>3)</sup>、このような分子雲コアはファーストコアが形成する前に分裂してしまいます。これでは、分裂に対するファーストコアの効果は効きません。

そこで、我々は、ファーストコアの形成を考慮して、従来分裂しないと考えられていた力学的平衡状態に近い分子雲コアが分裂して、連星系が形成する可能性を調べました。大規模なパラメータサーチを行い、全部で 225 モデルの進化を調べました。計算では、分子雲コアから出発して、ファーストコア形成後の数千年間の進化を追跡しました。

## 2. 分子雲コアのモデル

ほぼ力学的平衡状態にある分子雲コアから出発して、中心部に小さなファーストコアが形成し、ファーストコアにガスが降着するまでの進化を数値シミュレーションで調べました。分子雲コアのモデルとして、等温ガス雲の球対称な平衡解（臨界 Bonnor-Ebert 球<sup>12), 13)</sup>）を考えました。このままでは、収縮しないので、密度を 10% だけかさ上げします。ガスの温度を 10 K、中心の水素分子個数密度を  $2.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  とすると、ガス雲の半

径は 0.14 pc、質量は 3.2 太陽質量となります。このガス雲に内部運動を与えます。観測によると、分子雲コアはゆっくり回転しているので<sup>14)</sup>、我々のモデルでも初期のガス雲はゆっくりと回転しているとします。さらに、モデルごとにさまざまな回転則を考え、さまざまな大きさのバー モードの速度ゆらぎを与える。バー モードの速度ゆらぎとは、ガス雲が棒状に変形するモードのゆらぎです。ファーストコアの形成をモデル化するため、密度によってガスの温度を変化させました。すなわち、密度  $5.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  よりも低密度では温度 10 K の等温ガス、この密度よりも高密度では比熱比 7/5 で温度が上昇するポリトロープガスとしました。以下、このガスの状態の変わり目の密度を臨界密度と呼ぶことにします。

## 3. 方法：多層格子法による高解像度数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、半径 0.14 pc の分子雲コアの中に、半径数 AU の非常に小さなファーストコアが形成します。密度も  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  から  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  まで増加します。このような非常に広いダイナミックレンジを実現するためには、通常用いられている一様格子では不可能で、特別

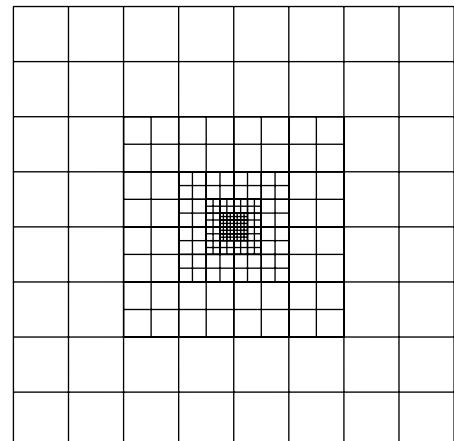


図 1 多層格子法の概念図。中心部ほど細かい格子で覆い、高解像度を得る。

な工夫が必要になります。我々は多層格子法<sup>15), 16)</sup>という方法を用いて、広いダイナミックレンジを実現しました。図1は多層格子法の概念図です。分子雲コア全体の広い領域を粗い格子で覆いながら、ファーストコアが形成する中心部を細かい格子で覆います。この方法によって、分子雲コア全体の進化を解きつつ、同時に分裂やファーストコアの進化も高解像度で計算することが可能になります。

## 4. 結 果

### 4.1 進化の道筋と分裂のタイプ

個々のモデルの結果を示す前に、まず分子雲コアの進化（収縮と分裂）を概観します。図2は進

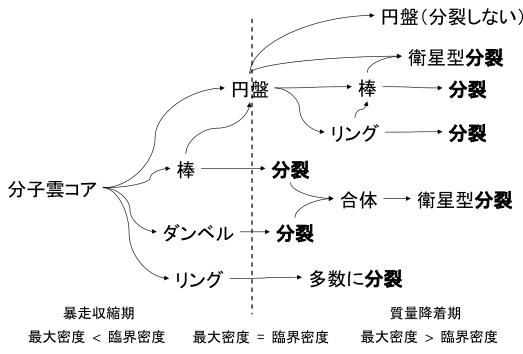


図2 進化の道筋。

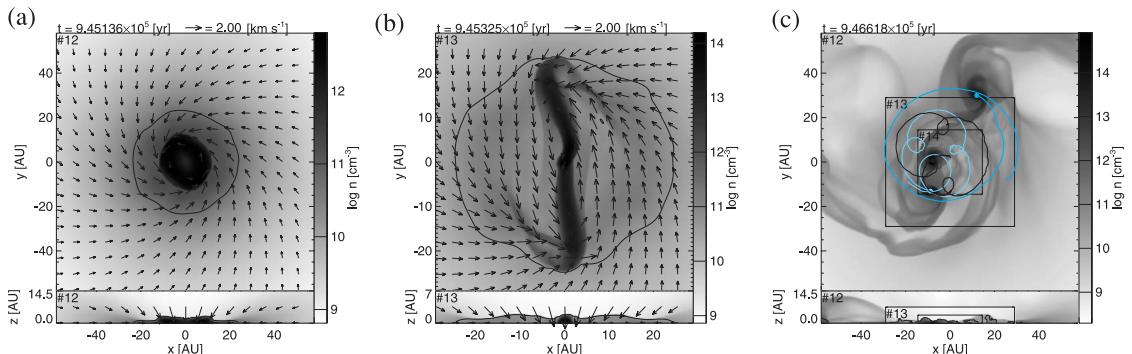


図3 リング-棒型分裂の進化。上のパネルは  $x-y$  平面（赤道面）の断面図、下のパネルは  $x-z$  平面（子午面）の断面図である。グレースケールはガスの個数密度分布を、矢印は速度分布を表す。等高線は、臨界密度  $5.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  を表す。番号 #12, #13, ... は多層格子法のグリッドの入れ子のレベルを表す。たとえば、#12 のグリッドは最も粗いグリッド (#1) よりも、 $2^{11}=2048$  倍も解像度が良い。一つのグリッドは  $256 \times 256 \times 32$  個の格子を持つ。図Cの曲線は分裂片の軌道である。

化の道筋を表しています。分子雲コアの高密度部は円盤、リング、棒、ダンベルと形を変えながら進化します。進化は最大密度によって、暴走収縮期と質量降着期の二つに分けられます。暴走収縮期では、最大密度が臨界密度よりも小さく、分子雲コア全体が等温ガスの状態です。一方、質量降着期では、最大密度が臨界密度を超えると、分子雲コア中に高密度なファーストコアが形成します。いったんファーストコアが形成すると、ファーストコアに周囲の等温ガスが降着します。「分裂」を「自己重力で束縛された複数のガス塊の形成」と定義すると、すべての分裂は質量降着期で起こります。

以下、典型的な進化の経路を見ていきます。

### 4.2 リング-棒型分裂

リング-棒型分裂は質量降着期に、リングから棒へ変形した後、分裂するタイプです。図3はリング-棒型分裂の典型的な場合の進化を示しています。暴走収縮期の後期に、等温ガス円盤が分子雲コアの中心部に形成します。ガス円盤の密度が臨界密度を超えると、質量降着期に入ります。質量降着期になると、ガス円盤は重力不安定でリング状に変形します（図3a）。自己重力ガスのリングは不安定であることが知られているので<sup>17)</sup>、リ

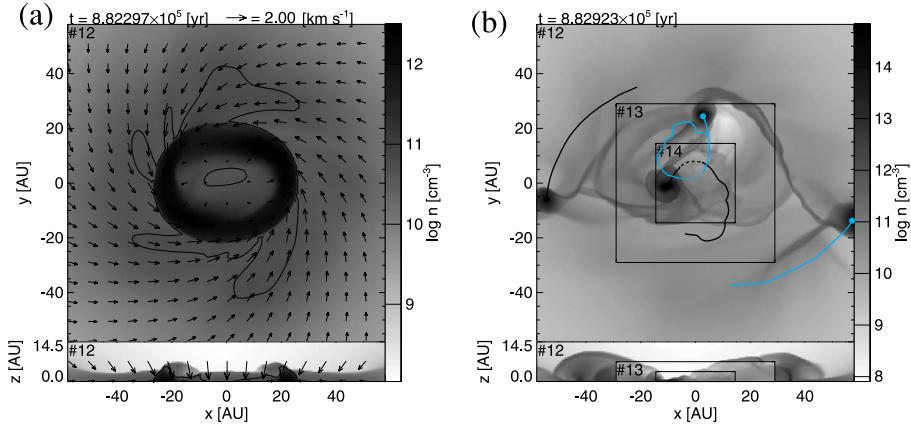


図 4 リング型分裂の進化。図の表記方法は図 3 と同じ。

シグは棒状に変形します(図 3b)。棒は回転しながら三つの分裂片に分裂します。個々の分裂片がファーストコアに対応します。図 3c はシミュレーションの最終状態を断面図で示し、分裂片の軌道も併せて表示しています。このモデルでは、分裂片はほぼ安定な軌道で公転運動します。図 3c の時点で、最も近い二つの分裂片は距離 14 AU の近接連星系を形成し、その連星系から 41 AU の距離に三つめの分裂片が公転しています。

三つの分裂片の質量はほぼ等しく、すべて 0.02 太陽質量程度です。他の分裂の型においても、分裂片は同程度の質量を持ちます。このシミュレーションでは質量降着期の始めの 2000 年程度を計算しています。この後の 10<sup>5</sup> 年間に、質量が 0.1~1 太陽質量程度まで成長すると考えられます。

#### 4.3 リング型分裂

このモデルもリング-棒型モデルと同様にリングが形成します。しかし、リング-棒型モデルと異なり、暴走収縮期に比較的大きなリングが形成します(図 4a)。リングは、密度が臨界密度を超えた後に、直接分裂します。分裂片の個数は四つで、棒への変形を経て分裂したリング-棒型モデルよりも、多くの分裂片が生まれます(図 4b)。中心部で二つの分裂片が近接遭遇し、外側では二つの分裂片が外側へ移動します。このモデルの近接遭遇では、分裂片は合体を免れましたが、計算したモデルの中には、合体してしまうものもあります。いずれにしても、最終的に複数の分裂片が生き残ります。

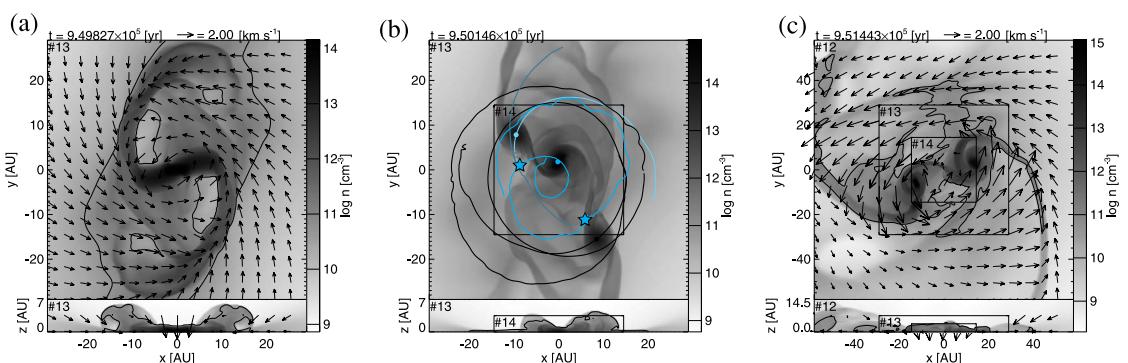


図 5 衛星型分裂の進化。図の表記方法は図 3 と同じ。ただし、図 b の星印は分裂片が合体した箇所を示す。

#### 4.4 衛星型分裂

衛星型分裂では、中心星のまわりの星周円盤が分裂します。図5は衛星型分裂の典型的なモデルの進化を示しています。質量降着期の初期に高密度部が棒状になりかけますが、分裂はせずに、中心天体とそのまわりに渦状腕が形成します（図5a）。渦状腕は微分回転によって巻き込まれ、星周円盤になります。星周円盤中の渦状腕が重力不安定によって分裂し、分裂片が形成します。このモデルでは、二つの衛星分裂片が形成しました。図5bは分裂片の軌道を示しています。二つのうち一つの衛星クランプは中心天体と合体し、連星系を形成します。図中、分裂片が合体した地点を星印で示しています。さらに進化が進むと、再び衛星型分裂が起こり、新たな分裂片が一つ形成します。この分裂片も、その後のステージで他の分裂片と合体して、最終状態では連星系になります（図5c）。この例のように間欠的に分裂片が形成するのが衛星型分裂の特徴です。

#### 4.5 ダンベル型分裂

図6はダンベル型分裂の典型的なモデルの進化を示しています。暴走収縮期の後期に分子雲コアの高密度部は、二つの密度のピークを持ったダンベル型に変形します（図6a）。それぞれの密度のピークは、質量降着期に分裂片に進化しますが、合体してしまいます（図6b）。しかし、その後、衛星型分裂によって、新たに三つの分裂片が現れま

す（図6c）。

### 5. 分子雲コアの回転が分裂を決める

図7は数値シミュレーションで得られた結果を(1)初期の回転速度、(2)初期のゆらぎの大きさ(回転の非一様度合い)、(3)初期の微分回転の度合い(回転則)の3次元空間にプロットしています。分子雲コアの最終状態をさまざまなマークで示しています。黒い×印(円盤)と\*印(振動)は分裂しない結果を、それ以外は、分裂の型を示しています。初期の回転速度が $\Omega_0 t_{\text{ff}} \leq 0.03$ の場合、一つの例外を除きすべてのモデルは分裂しません(円盤)。ここで、 $\Omega_0$ と $t_{\text{ff}}$ は初期の角速度と自由落下時間です。一方、 $\Omega_0 t_{\text{ff}} \geq 0.05$ の場合、振動モデルを除いてすべて分裂します。振動モデルは、回転が速すぎてガス雲が収縮せずに、振動するモデルです。したがって、分裂の条件は、初期のゆらぎの大きさや回転則に依存せず、初期の回転の速さだけで決まります。つまり、初期に分子雲コアがある程度の速度( $\Omega_0 t_{\text{ff}} \geq 0.05$ )で回転し、暴走収縮するならば、分子雲コアは分裂します。この分裂条件は暴走収縮中に、回転によって円盤が形成する条件に対応します。

分裂条件は、分子雲コアの初期の回転だけで決まりましたが、分裂の型は初期のゆらぎの大きさと回転則にも依存します。分子雲コアは多様な型で分裂しますが、多くの場合、衛星型分裂(青い

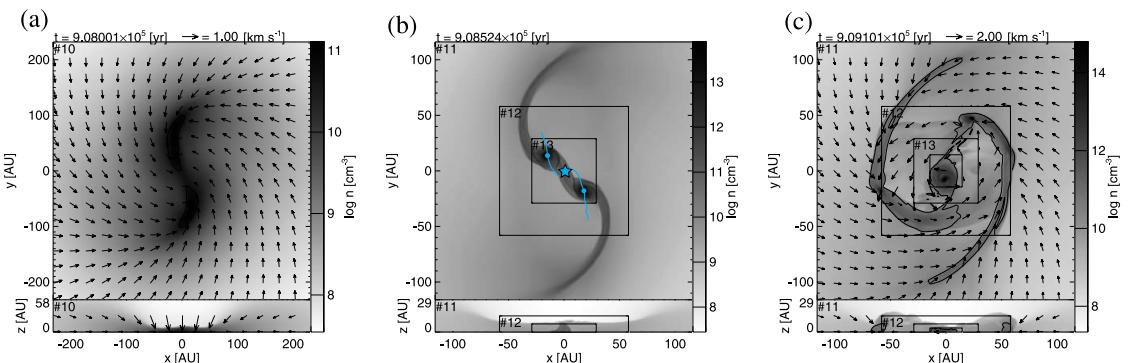


図6 ダンベル型分裂の進化。図の表記方法は図5と同じ。

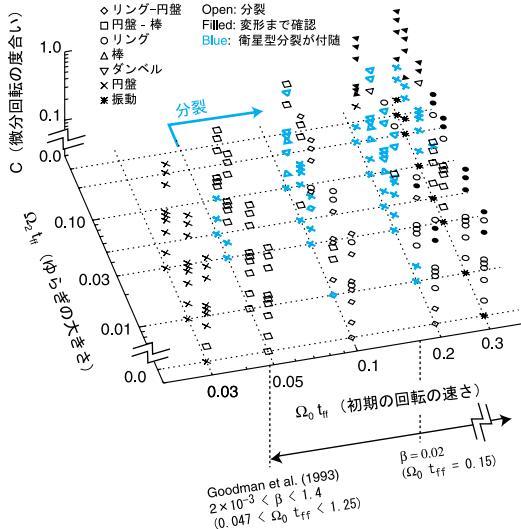


図 7 分裂の型の分布。

マーク)を経験します。したがって、衛星型分裂は、分裂の主要なメカニズムです。ダンベル型や衛星型分裂の例で示したように、一度分裂片が合体してしまった後にも、新たに衛星型分裂が起きます。

## 6. 観測との対応

観測から示唆される分子雲コアは、我々の分裂条件を満たします。分子雲コアの回転を系統的に観測した研究は少ないですが、Goodman et al. (1993) の研究が有名です<sup>14)</sup>。彼女たちの観測によると、分子雲コアの回転は  $2 \times 10^{-3} < \beta < 1.4$  の範囲にあり、典型的な値は  $\beta \sim 0.02$  です。ここで、 $\beta$  は回転エネルギーと重力エネルギーの比で、回転の速さを表すパラメータです。観測からは回転則の情報までは得られませんが、簡単に一様回転を仮定した場合の  $\beta$  も図 7 に示しています。観測から得られる  $\beta$  の値は、ほぼ我々の分裂の条件を満たします。したがって、この数値シミュレーションで示された分裂メカニズムは、観測で得られる高い連星頻度を説明します。

さらに、我々の数値シミュレーションは、典型的な連星の間隔も再現します。我々の数値シミュ

レーションでは、分裂片の間隔は数 10 AU から 100 AU 程度です。この間隔は星周円盤のサイズを反映しています。一方、観測によると、10 AU から 100 AU の間隔を持つ連星が最も多いことが知られています<sup>15)</sup>。したがって、この数値シミュレーションは、観測される主要な連星系の形成を再現していると考えられます。

## 7. 分裂、合体、生き残り、そして敗者復活戦

分裂片はしばしば合体します。分裂片が小さな軌道角運動量を持っている場合、分裂片は合体し、大きな軌道角運動量を持っている場合、分裂片は生き残る可能性があります。分裂片の軌道角運動量は分裂の型に依存します。暴走収縮期の変形が分裂の契機になる場合、分裂片は小さな軌道角運動量を持つ傾向があります。たとえば、暴走収縮期に棒やダンベルに変形して分裂する場合、分裂片が合体するのは、先の典型例で示したとおりです。ただし、暴走収縮期にリングに変形する場合には、多数の分裂片が形成するため、いくつかの分裂片は合体せずに生き残ることができます。一方、質量降着期の変形が分裂の契機となる場合には、分裂片は大きな軌道角運動量を持つ傾向があります。

分裂片が合体した後にも敗者復活戦があります。合体後、衛星型分裂によって、新たな分裂片が形成するのです。この点は重要です。過去の多くの数値シミュレーションでは、分裂片が合体してしまった時点で、計算を終了させていました。しかし、その後のステージも長時間計算すると、衛星型分裂が起きるのは我々の計算が示したとおりです。衛星型分裂は多くのモデルで起きることから、比較的後期の進化段階においても分裂が起きる可能性を示唆しています。

衛星型分裂で生まれた分裂片は、多くの場合、近接遭遇を経験します。近接遭遇によって合体してしまう場合もあれば、遠方に飛ばされてしまう

場合もあります。分裂片が星周円盤や連星周円盤の外に飛ばされた場合、分裂片への質量降着がとまって小さな質量のままになり、分裂片は褐色矮星に進化する可能性があります。このような褐色矮星形成の可能性は、他の数値シミュレーションでも示唆されています<sup>18)</sup>。また、星形成の初期段階は、我々が従来想像していたものよりもダイナミックです。質量降着率なども、間欠的な合体によって、ダイナミックに変動します。

## 謝 辞

この研究は、花輪知幸教授（千葉大学）との共同研究です。数値計算は国立天文台データ解析計算センター共同利用VPP5000で行われました。このような高速な計算機によって、本研究の系統的なパラメータサーチが可能になりました。

## 参考文献

- 1) Mathieu R. D., 1994, ARA&A 32, 465
- 2) Larson R. B., 1969, MNRAS 145, 271
- 3) Bodenheimer P., Buerkert A., Klein R. I., Boss A. P., 2000, in Protostars and Planets IV, p. 675
- 4) Onishi, et al., 1996, AJ 465, 815
- 5) Alves J., Lada C. J., Lada E. A., 2001, Nature 409, 159
- 6) Harvey D. W., et al., 2001, ApJ 563, 903
- 7) Racca G., Gomez M., Kenyon, S. J., 2002, AJ 124, 2178
- 8) Miyama S. M., Hayashi C., Narita S., 1984, ApJ 279, 621
- 9) Boss A. P., 1993, ApJ 410, 157
- 10) Boss A. P., Myhill E. A., 1995, ApJ 451, 218
- 11) Tsuribe T., Inutsuka S., 1999, ApJ 523, L155
- 12) Bonnor W. B., 1956, MNRAS 116, 351
- 13) Ebert R., 1955, Z. Astrophys. 37, 222
- 14) Goodman A. A., et al., 1993, ApJ 406, 528
- 15) Matsumoto T., Hanawa T., 2003, ApJ 583, 296
- 16) Matsumoto T., Hanawa T., 2003, ApJ 595, 913
- 17) Norman M. L., Wilson J. R., 1978, ApJ 224, 497
- 18) Bate M. R., Bonnell I. A., Bromm V., 2002, MNRAS 332, L65

## Fragmentation in Prestellar Collapse: High-resolution Simulations with a Nested Grid

Tomoaki MATSUMOTO

*Department of Humanity and Environment, Hosei University, Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8160, Japan*

**Abstract:** We performed high-resolution simulations using a nested grid in order to investigate binary formation. The simulations show a nearly equilibrium molecular cloud core fragments when the cloud rotates slowly, and the fragments evolve to proto-binaries. The condition of the fragmentation is satisfied by many observed molecular cloud cores. The binary separation is also consistent with observations. The major mode of the fragmentation is satellite type fragmentation, in which a massive circumstellar disk fragments.