

# 多様な星形成環境における連星形成可能性

樋口 公紀

九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻

## 1. はじめに

宇宙は誕生してから現在まで日々刻々と進化を続けている。この宇宙の力学的・化学的進化を知るためには、その時代・その環境での星形成を理解することが重要である。というのも、星は宇宙の最も基本的な構成要素であり、その形成過程は、周囲の環境に影響され変化し、また、形成過程で生じる現象が、周囲の環境に影響を与えるからである。

形成過程で生じる現象として、質量放出現象（アウトフローやジェット）があげられる。銀河系内の、いわゆる現在の星形成において、普遍的にアウトフロー（低速度成分）やジェット（高速度成分）が観測されている（Richer et al. 2000; Beuther et al. 2002; Swift & Welch 2008; Duarte-Cabral et al. 2013; Wang et al. 2014b; Dunham et al. 2014 他）。これらの現象の駆動メカニズムや星形成に与える影響は、理論的に調べられており、磁場の効果によって駆動し、大部分の角運動量をガス雲中心から外部に輸送できることが示されている（Tomisaka 2000; Banerjee & Pudritz 2006; Machida et al. 2007; Tomida et al. 2015; Tsukamoto et al. 2015 他）。原始星形成時、原始星の周囲には円盤(原始惑星系円盤)が形成される。形成当初の原始惑星系円盤は非常に重いいため、自己重力不安定性によって分裂する場合がある。アウトフローによって、十分に角運動量が外部に輸送されなければ、角運動量が分裂片に軌道角運動量として残る可能性が高い。つまり、ガスの分裂が起こり、将来的に連星系が形成する可能性が高くなる。以上より、アウトフローが駆動するかどうかは、角運動量輸送過程を大きく変えるため、極めて重要である。

現在の星形成に関しては観測的にも理論的に調べられており、多くのことが分かってきた。しかし、銀河系外の星形成については、観測的には現在の望遠鏡の分解能では足りず、調べることができない。

そのため、銀河系外の星形成に関して、アウトフロー・ジェットの駆動や分裂に関して、理論的に調べることは、銀河系内外の多様な星形成を理解するための唯一の方法である。

## 2. モデルと数値計算手法

基本的なモデル設定と数値計算手法は、Higuchi et al. (2018, 2019)と同様であるため、そちらを参照されたい。本研究では、初代銀河やスターバースト銀河といった銀河系外環境に焦点を当て、初期にガス雲が持つ金属量 ( $Z/Z_{\text{sun}} = 0, 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ ) とイオン化度 ( $C_{\text{e}} = 0, 0.01, 1, 10$ ; 宇宙線強度と放射性元素崩壊で生じる  $\gamma$  線強度) を組み合わせ、24通りの極低金属量星形成環境を設定する。金属量は星の進化と関連するため、宇宙の各々の時代に対応する。また、イオン化度は電離源の強度に関係しており、周囲の環境に対応する (Susa et al. 2015; Higuchi et al. 2018, 2019)。

設定した 24通りの星形成環境それぞれに対して、Bonner-Ebert 密度プロファイルを持つコアを初期条件 (中心数密度は  $n_{\text{c},0} = 1.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、温度は one-zone 計算した結果を引用) とした。それぞれのコアにおいて、初期の熱エネルギーと重力エネルギーの比 ( $\alpha_0$ ) が 0.47、回転エネルギーと重力エネルギーの比 ( $\beta_0$ ) が  $1.84 \times 10^{-2}$  とした。初期に与えた磁場は初期質量磁束比 ( $\mu_0$ ) を 3 と定義し、それぞれの環境に応じた初期磁場強度を与えた。

以上の初期条件のもと、コアから原始星形成まで、多層格子法を用いた non-ideal MHD シミュレーションを行った (多層格子法の詳細: Machida et al. 2004; Machida et al. 2005; Machida et al. 2007, 2008)。基礎方程式については Higuchi et al. (2018, 2019) と同様である。

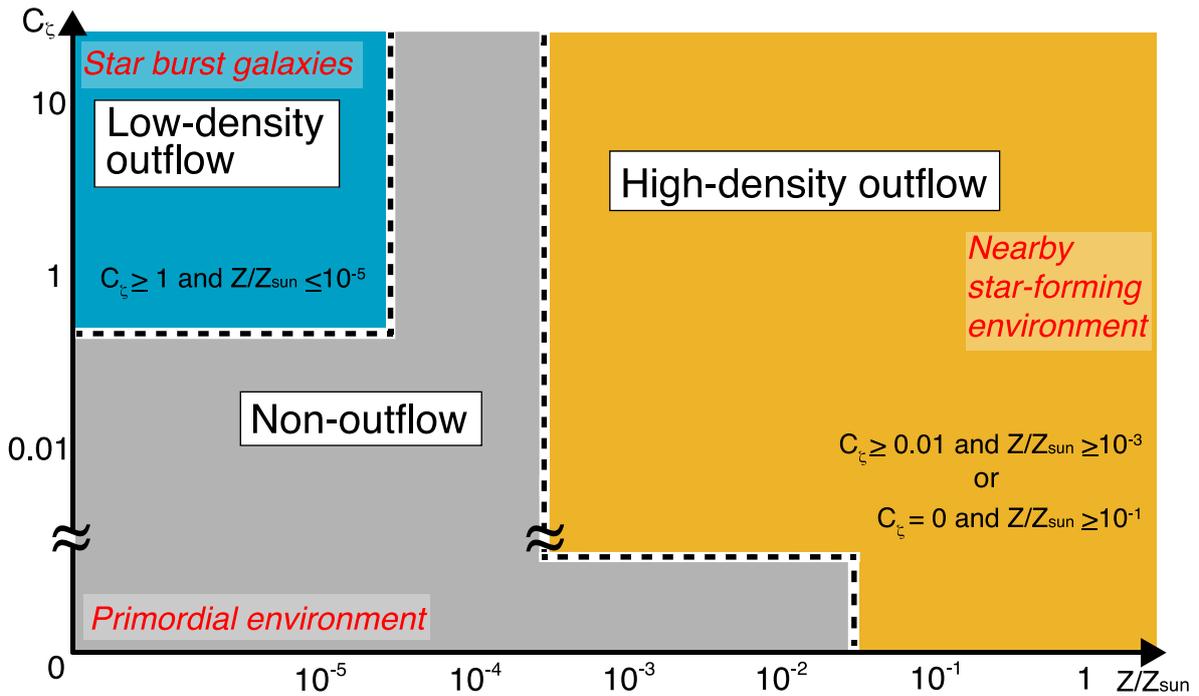


図 1 シミュレーション結果。横軸が金属量、縦軸がイオン化パラメータである。背景オレンジ色領域が太陽系近傍で見られる、first core 段階（数密度  $n > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ; high-density outflow）で駆動したモデル、背景青色領域が形成過程のより初期段階（数密度  $n < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ; low-density outflow）で駆動したモデル、背景灰色領域が原始星形成までアウトフローが駆動しなかったモデルである。Higuchi et al. (2019)より引用。

### 3. 銀河系外の星形成過程

#### 3-1. アウトフロー

銀河系内、太陽系近傍の星形成領域では普遍的に駆動するとされるアウトフローだが、銀河系外の星形成領域は望遠鏡の分解能が足りず、調べられてきていない。そこで、銀河系内外の星形成環境を再現し、原始星が形成されるまでに、アウトフローが駆動するかどうかを調べた (Higuchi et al. 2019)。図 1 が、そのシミュレーション結果である。背景オレンジ色、青色の領域では、アウトフローが駆動し、背景灰色の領域ではアウトフローが駆動しなかった。横軸の金属量( $Z/Z_{\text{sun}}$ )は星の進化と関連するため、宇宙の各々の時代に対応する。金属量が増えていくほど、宇宙は時間進化し、 $Z/Z_{\text{sun}} = 1$  が現在に対応する。宇宙初期の星形成環境における星形成過程では、アウトフローは駆動せず、宇宙進化に伴って、星形成過程でアウトフローが駆動するようになることが分かった。そして、その遷移は、おおよそ、 $Z/Z_{\text{sun}} \approx 10^{-4}$ - $10^{-3}$  で起こっていることが示唆され

た。アウトフローの駆動メカニズム等、詳細に関しては Higuchi et al. (2019)を参照されたい。

#### 3-2. 分裂・ジェット

Higuchi et al. (2019)の結果から、アウトフローは銀河系外では普遍的に駆動しないことが示唆された。アウトフローによって十分に角運動量が外部に輸送されなければ、角運動量がガス雲中心部に残る。したがって、原始星形成時に、周囲に形成される原始惑星系円盤が分裂する可能性が高くなる。宇宙初期の特に、初代星形成過程では銀河系内の星形成過程よりも連星を形成しやすいことが示されている (Machida et al. 2008) が、初代星形成環境以外での分裂に関して言及していない。そこで、Higuchi et al. (2019)でアウトフローが駆動しなかった金属量領域を中心に、 $Z/Z_{\text{sun}} \approx 0$ - $10^{-3}$ における分裂可能性について言及するため、数値シミュレーションを行い、図 2 にシミュレーション結果の 3 次元図を示した。

図 2 のオレンジ線で囲まれた領域では分裂は見

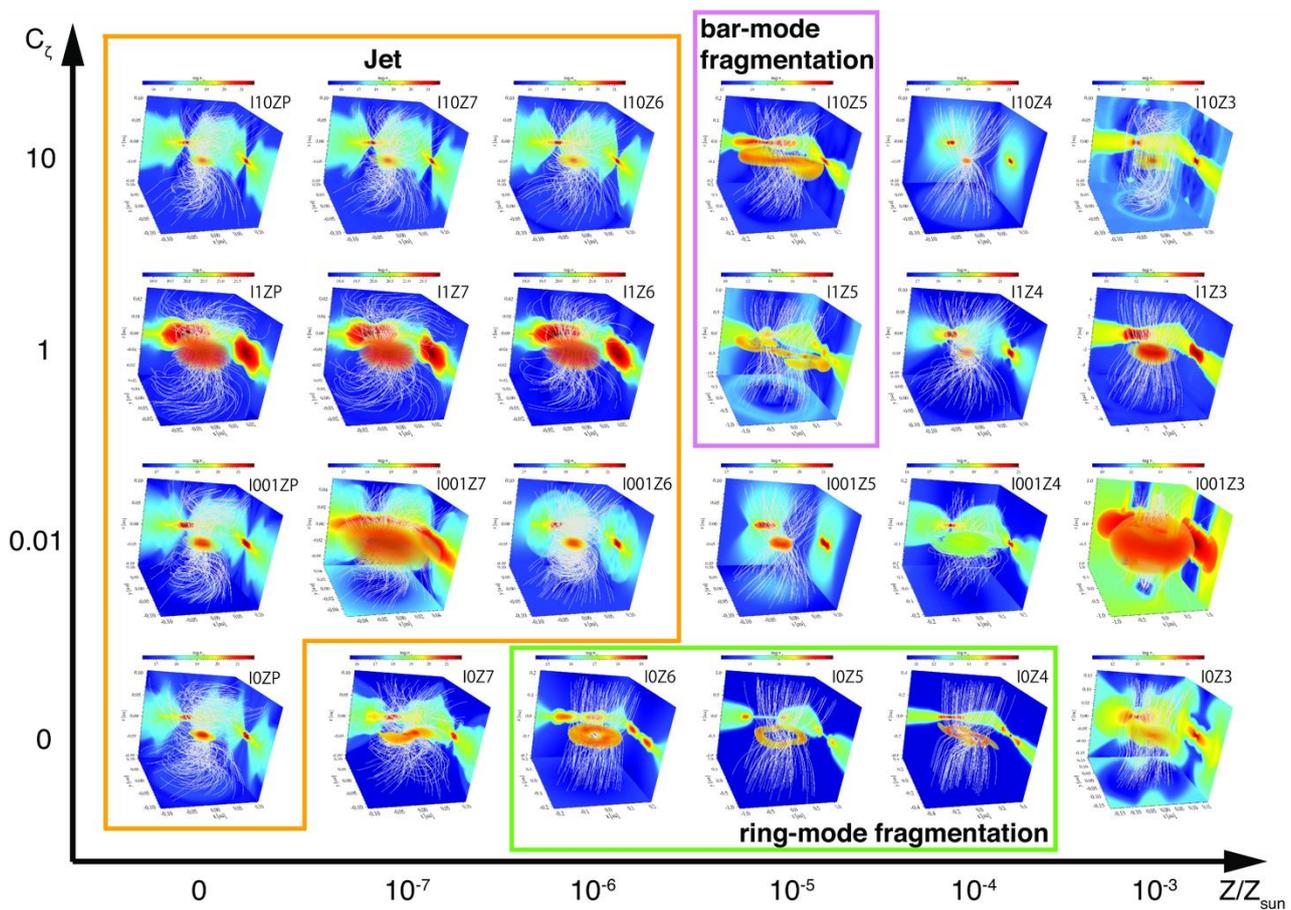


図 2 原始星形成時のシミュレーション結果。横軸が金属量、縦軸がイオン化パラメータである。それぞれの 3 次元図右上にモデル名を記載 (例: I0ZP は  $C_\xi=0, Z/Z_{\text{sun}}=0$  を示し、I10Z3 は  $C_\xi=10, Z/Z_{\text{sun}}=10^{-3}$  を示す)。カラーコントアは数密度、白線は磁力線を表す。オレンジ線で囲まれたモデルはジェットが駆動したモデル、紫線、緑線で囲まれたモデルは分裂が見られたモデルである。

られず、単星が中心部に形成され、その原始星からジェットが駆動したことが確認された。初代星形成モデル (モデル I0ZP) の今回の結果は Machida et al. (2008) と整合的な結果となった。

緑線、紫線で囲まれたモデルでは、今回のシミュレーション時間内に、分裂が見られたモデルである。特に紫線で囲まれたモデルは、bar-mode の分裂が見られ、緑線で囲まれたモデルは、ring-mode の分裂が見られた。ring-mode は分裂片間の軌道角運動量が大きくなるため、連星や複数星として生き残る可能性が高い (Matsumoto & Hanawa 2003; Machida et al. 2005, 2008)。線で囲まれていない領域のモデルでは、ジェットや分裂は見られなかったが、比軸対称構造が見られている。

シミュレーションでは、おおよそ、 $Z/Z_{\text{sun}} \leq 10^{-6}$

においては、分裂が確認されず、 $Z/Z_{\text{sun}} \approx 10^{-5}$  において、分裂が多く見られることが分かった。今回、初期に質量磁束比 ( $\mu_0$ ) を 3 と定義し、初期磁場を与えている。磁場強度が強ければ強いほど、分裂が抑制される (Machida et al. 2008)。磁場は分裂を抑制するセンスに力が働くが、今回の状況下でも分裂したモデルは、進化の長い段階において、磁場が散逸しやすい環境であり (Susa et al. 2015; Higuchi et al. 2018)、非常に分裂しやすい環境であることが示された。

#### 4. ブラックホール (BH) 連星形成の可能性

近年ブラックホール (BH) 連星の存在が重力波の検出によって明らかになり、この数十太陽質量同士の BH 連星が宇宙のいつ、どこで、どのように誕生す

るかが問題となっている。一般的な BH 連星形成シナリオとして、孤立した 2 つの大質量星からなる連星（大質量星連星）からの形成が挙げられるが、こういった連星形成が起りやすいのはいつ、どういった環境なのか、まだ議論が続いている。

今回シミュレーションは星形成の前期段階のみの結果であるが、分裂したモデルに関しては、連星が形成されやすい環境であり、星形成後期段階に十分な質量を獲得することができれば、BH 連星になる可能性が存在する。

## 謝辞

今回の研究は、九州大学 町田正博准教授と甲南大学 須佐元教授との共同研究として実施しており、多数の議論・アドバイスをしていただきました。感謝いたします。3D plot に関して、千葉大学 松本洋介さんに多大なる協力をしていただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。また、本研究成果は、大阪大学サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータシステム SX-ACE を利用して得られたものです。感謝いたします。

## 参考文献

- (1) Banerjee R., Pudritz R. E., 2006, *ApJ*, 641, 949
- (2) Beuther H., Schilke P., Sridharan T. K., Menten K. M., Walmsley C. M., Wyrowski F., 2002, *A&A*, 383, 892
- (3) Duarte-Cabral A., Bontemps S., Motte F., Hennemann M., Schneider N., Andre P., 2013, *A&A*, 558, A125
- (4) Dunham, M. M., Arce, H. G., Mardones, D., et al. 2014, *ApJ*, 783, 29
- (5) Higuchi, K., Machida, M. N., & Susa, H. 2018, *MNRAS*, 475, 3331
- (6) Higuchi, K., Machida, M. N., & Susa, H. 2019, *MNRAS*, stz1079, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1079>
- (7) Machida, M. N., Matsumoto, T., Tomisaka, K., & Hanawa, T. 2005, *MNRAS*, 362, 369
- (8) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto T., 2007,

*ApJ*, 670, 1198

- (9) Machida, M. N., Inutsuka, S.-i., & Matsumoto, T. 2008, *ApJ*, 685, 690
- (10) Matsumoto T., Hanawa T., 2003, *ApJ*, 595, 913
- (11) Richer J. S., Shepherd D. S., Cabrit S., Bachiller R., Churchwell E., 2000, in Mannings V., Boss A. P., Russell S. S., eds, *Protostars and Planets IV*. University of Arizona Press, Tucson, p. 867
- (12) Susa, H., Doi, K., & Omukai, K. 2015, *ApJ*, 801, 13
- (13) Swift, J. J., & Welch, W. J. 2008, *ApJS*, 174, 202
- (14) Tomida K., Okuzumi S., Machida M. N., 2015, *ApJ*, 801, 117
- (15) Tomisaka K., 2000, *ApJ*, 528, L41
- (16) Tsukamoto Y., Iwasaki K., Okuzumi S., Machida M. N., Inutsuka S., 2015, *MNRAS*, 452, 278
- (17) Wang, L.-Y., Shang, H., Su, Y.-N., et al. 2014, *ApJ*, 780, 49