

大規模シミュレーションで見る 宇宙初期から現在に至る星形成史の変遷

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

星は宇宙の最も基本的な構成要素であり、その形成と進化を理解することは、宇宙の力学的・化学的進化を明らかにする上で本質的に重要である。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やジェットが観測されている(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)。そのため、アウトフローやジェットは、星形成過程を理解するための手がかりとなる。というのも、星形成過程には解決しなければならない問題がある。それは、1. 星形成効率の問題（自己重力的に不安定なガス雲が星に変換される割合）、2. 角運動量輸送問題（ガス雲の角運動量が、原始星の角運動量より 5 桁以上大きい）、3. 初期質量関数の問題（形成される星の分布関数がどのようになっているのか）であるが、これらを解決出来るのがアウトフローとジェットである。これらのフローはガスを外部に輸送するとともに、角運動量も輸送することができる。さらに、これらのフローが駆動されると、降着ガスにも影響を与える。ゆえに、アウトフロー・ジェットの駆動やその物理量（運動量、運動エネルギー、質量放出率など）を調べることで、星形成過程を理解できる。

また、星形成過程を理解する上で、磁場の存在も忘れてはならない。磁場は星形成過程での力学的・熱的進化に影響を与える。星形成過程の理解のためには、磁場を考慮した数値シミュレーションが必要不可欠である。それを考慮した非理想 MHD シミュレーションを行った結果、星形成過程で、磁場によってのアウトフローとジェットが駆動されることが示唆された (Machida et al. 2007,

2008 他)。これは、ALMA 望遠鏡のアウトフローの観測においても、整合的な結果が得られている (Bjerkeli et al. 2016; Hirota et al. 2017)。

現在の星形成過程は、アウトフロー・ジェットの観測や理論研究の進展により、理解されつつある。一方で、宇宙初期から現在に至るまでの星形成過程は、多くの謎が存在する。アウトフローやジェットは、現在の観測精度をもってしても、観測することができない。そのため、宇宙初期から現在に至るまでの星形成過程を理解するためには、星形成の非理想 MHD シミュレーションを行う必要がある。

2. モデルと数値計算手法

初期にガス雲が持つ金属量とイオン化度（宇宙線強度と放射性元素崩壊で生じる γ 線強度）を組み合わせ、様々な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。そのため、様々な金属量とイオン化度を組み合わせることで、宇宙初期から現在までの星形成環境を再現することが可能である。本研究では、異なる 7 種類の金属量 ($Z/Z_{\text{sun}} = 0, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1$) と、異なる 4 種類のイオン化度 1. 電離源なし（始原的な環境）、2. 天の川銀河と同等の電離源量、3. 天の川銀河の 0.01 倍の電離源量（初代銀河）、4. 天の川銀河の 10 倍の電離源量（スターバースト銀河）を想定している。以上より、28 通りの異なる星形成環境を設定した（詳細や定義は Higuchi et al. 2018 を参照）。

初期条件として、設定した 28 通りの星形成環境それぞれにおいて Bonner-Ebert 密度プロファイルを持つ分子雲コアを用意した。中心数密度は $n_{c,0} = 1.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、温度は one-zone 計算した結果を用いた。初

期に与えた磁場強度、角速度などは表 1 にまとめている。

以上の初期条件のもと、分子雲コアから原始星形成までの星形成過程について調べるためには、分子雲コア($\sim 10^4$ au)から原始星(~ 0.01 au)というかなり大きな空間スケールをカバーする必要がある。そこで、両スケールをカバーできる nested grid 法を用いて non-ideal MHD シミュレーションを行った(nested grid の詳細については Machida et al. 2004; Machida et al. 2005; Machida et al. 2007, 2008 を参照)。基礎方程式については Higuchi et al. (2018) と同様である。

	Model	C_ζ	Z/Z_{sun}	μ_0	$B_0(\mu\text{G})$	$\Omega_0(\text{s}^{-1})$	$M_{\text{cl}}(M_\odot)$	$T_{\text{cl}}(\text{K})$	$r_{\text{cl}}(\text{AU})$	Outflow
1	I0ZPM3		0		34.1	1.31×10^{-14}	1.08×10^4	198	4.91×10^5	×
2	I0Z5M3		10^{-5}		33.8	1.31×10^{-14}	1.05×10^4	194	4.87×10^5	×
3	I0Z4M3		10^{-4}		31.9	1.31×10^{-14}	8.75×10^3	172	4.59×10^5	×
4	I0Z3M3		10^{-3}	3	24.6	1.31×10^{-14}	3.98×10^3	103	3.52×10^5	×
5	I0Z2M3		10^{-2}		9.83	1.35×10^{-14}	2.27×10^2	16.4	1.33×10^5	×
6	I0Z1M3		10^{-1}		10.3	1.62×10^{-14}	1.26×10^2	18.1	9.67×10^4	○
7	I0Z0M3		1		5.76	1.78×10^{-14}	15.2	5.65	4.49×10^4	○
8	I001ZPM3		0		28.4	1.31×10^{-14}	6.20×10^3	140	4.09×10^5	×
9	I001Z5M3		10^{-5}		25.1	1.31×10^{-14}	6.03×10^3	136	4.05×10^5	×
10	I001Z4M3		10^{-4}		26.2	1.31×10^{-14}	4.88×10^3	117	3.77×10^5	×
11	I001Z3M3	0.01	10^{-3}	3	20.0	1.31×10^{-14}	2.15×10^3	68.0	2.87×10^5	○
12	I001Z2M3		10^{-2}		9.85	1.35×10^{-14}	2.30×10^2	16.5	1.34×10^5	○
13	I001Z1M3		10^{-1}		10.4	1.62×10^{-14}	1.28×10^2	18.2	9.72×10^4	○
14	I001Z0M3		1		5.76	1.78×10^{-14}	15.2	5.64	4.49×10^4	○
15	I1ZPM3		0		12.1	1.31×10^{-14}	4.79×10^2	24.9	1.74×10^5	○
16	I1Z5M3		10^{-5}		12.1	1.31×10^{-14}	4.82×10^2	25.1	1.74×10^5	○
17	I1Z4M3		10^{-4}		12.4	1.31×10^{-14}	5.09×10^2	26.0	1.77×10^5	○
18	I1Z3M3	1	10^{-3}	3	12.7	1.31×10^{-14}	5.43×10^2	27.3	1.81×10^5	○
19	I1Z2M3		10^{-2}		12.1	1.34×10^{-14}	4.39×10^2	25.0	1.66×10^5	○
20	I1Z1M3		10^{-1}		10.9	1.59×10^{-14}	1.58×10^2	20.1	1.06×10^5	○
21	I1Z0M3		1		6.11	1.78×10^{-14}	18.0	6.34	4.75×10^4	○
22	I10ZPM3		0		13.5	1.31×10^{-14}	6.56×10^2	31.0	1.93×10^5	○
23	I10Z5M3		10^{-5}		13.6	1.31×10^{-14}	6.64×10^2	31.2	1.94×10^5	○
24	I10Z4M3		10^{-4}		14.0	1.32×10^{-14}	7.25×10^2	33.1	1.99×10^5	×
25	I10Z3M3	10	10^{-3}	3	15.3	1.32×10^{-14}	9.39×10^2	39.6	2.17×10^5	○
26	I10Z2M3		10^{-2}		15.3	1.34×10^{-14}	8.67×10^2	39.6	2.09×10^5	○
27	I10Z1M3		10^{-1}		12.6	1.55×10^{-14}	2.74×10^2	26.8	1.29×10^5	○
28	I10Z0M3		1		8.03	1.78×10^{-14}	40.1	11.0	6.24×10^4	○

表 1 モデルパラメータ。1, 2 列目はモデル数とモデル名を示す。3–10 列目はイオン化パラメータ（イオン化度を修正するパラメータ）、金属量、質量磁束比、初期磁場強度、初期角速度、分子雲コアの質量、温度、半径を示す。11 列目はアウトフローの駆動(○と◇)、未駆動(×)を示している。

3. 星形成過程の変遷

図 1 に 28 モデルのアウトフロー駆動についてまとめた。分子雲コアから原始星形成までのシミュレーションを行い、アウトフローが駆動したモデルに関してはアウトフロー駆動時（背景色が赤、緑のパネル）、アウトフローが駆動しなかったモデルはシミュレーション終了時（背景色が青色のパネル）の x-y 平面のスナップショットを示した。さらに、今回調べた 28 モデルでは、アウトフローが駆動したモデルの中にも、駆動時の密度レンジに違いが見られた（背景緑色：低密度レンジ $n_c \sim 10^8 \text{cm}^{-3}$ 、背景赤色：高密度レンジ $n_c \sim 10^{12} \text{cm}^{-3}$ ）。

背景赤色のモデルは、星形成過程の高密度レンジで形成される準静水圧平衡球（ファーストコア）からアウトフローが駆動される。というのも、現在の星形成環境（モデル I1Z0M3）は、ファーストコアスケールで磁気遠心力によってアウトフローが駆動する(Machida et al. 2008; Bate 2014)。モデル I1Z0M3 を含めた背景赤色のモデルはファーストコアが形成され、アウトフローが駆動していることから、現在の星形成過程と同様の過程を経ることが示唆される。

背景緑色のモデルは、星形成過程の低密度レンジでアウトフローが駆動し、シミュレーション終了時まで駆動し続けたモデルである。これらのアウトフローのモーメントフラックス（アウトフロー駆動力）を調べてみたところ、ファーストコアスケールで駆動するアウトフローと同等の値を示すことがわかった。したがって、今回はアウトフローの駆動に着目したため原始星が形成された段階でシミュレーションをとめたが、原始星形成後も長時間吹き続けるのであれば、星形成効率にも影響してくるため非常に重要である。今回この密度レンジでアウトフローが駆動した理由については 4 章で詳しく述べる。

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が駆動されていることが観測により確認されているが、今回のモデルでは原始星形成までにアウトフローが駆動しないものも存在した（背景青色）。さらにこれらのモデルでは、数 10au スケールのスパイラルといった非軸対称構造が形成されていることが確認された。したがってアウトフローが出現しなかったモデルでは、非軸対称構造に伴う重力トルクによって、角運動量を中心部から外部へ輸送していることが考えられる。これらのモデルは、アウトフローが駆動されないため、現在の星形成過程とは全く異なる過程を経ることが示唆された。

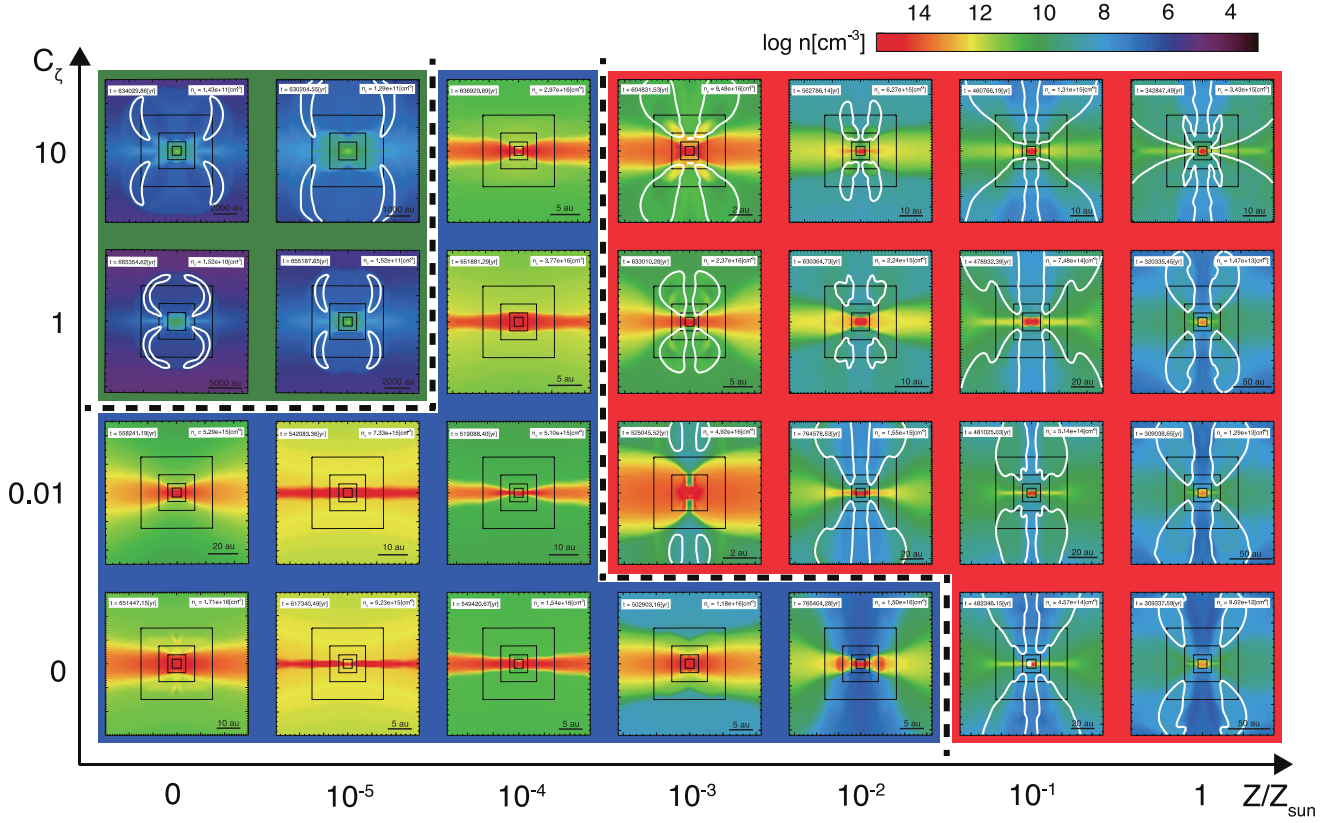


図1 モデルごとのアウトフロー駆動の見取り図。横軸が金属量、縦軸がイオン化パラメータである。背景色が赤色、緑色のパネルはアウトフローが駆動したモデルであり、青色のパネルはアウトフローが駆動しなかったモデルである。それぞれのパネルのカラーコントアは数密度、白の実線はアウトフロー領域で、パネルの上部にスナップショットをとった時の中心数密度と経過時間を示す。黒色の四角で示すのはグリットの境界であり、空間スケールは下部に表記している。

最後に図1をアウトフロー駆動という観点で見ると、星形成は宇宙初期から現在まで同じような過程を経るわけではないことがわかる。イオン化パラメータに多少依存するが、およそ $Z/Z_{\text{sun}} = 10^{-4} - 10^{-3}$ の金属量レンジで、太陽系近傍で観測されているような星形成過程へと遷移することを今回の結果は示している。

4. アウトフロー駆動条件

図2には中心磁場強度の数密度に対する進化を示した。4つの図はアウトフローの駆動の有無で分けられており、(a)と(b)はアウトフローが駆動されなかったモデル、(c)と(d)はアウトフローが駆動されたモデルである。図2は、以下の条件を満たすと、アウトフローが駆動されることを示している。

- (1) 原始星形成前に準静水圧平衡球（コア）が形成される
- (2) 形成されたコアが長く維持される

(3) 磁場とコア付近のガスが強く結合している

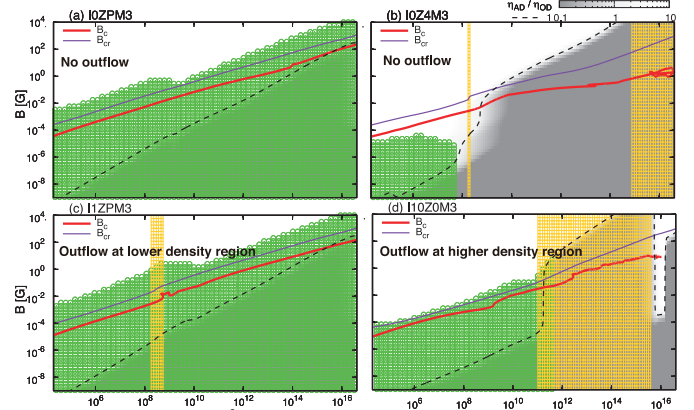


図2 数密度に対する中心磁場強度の進化。4枚の図はそれぞれ、(a) I0ZPM3、(b) I0Z4M3、(c) I1ZPM3、(d) I10Z0M3のモデルである。紫色の実線は臨界磁場強度、赤色の実線は今回のシミュレーション結果の磁場強度を示す。グレースケールは2つの磁場散逸機構のどちらが優勢かを示しており、黒色の点線はその境界を表す。緑色の領域は磁気レイノルズ数が1以上の領域（磁場とガスが強く結合し、磁場が散逸されない領域）、黄色の領域はポルトロピック指数 γ が $4/3$ より大きい領域（準静水圧平衡球が形成される領域）を示す。詳細は Higuchi et al. (2018) を参照。

図2の(a)を見ると、緑色の領域に覆われている(磁場とコア付近のガスは強く結合されている)が、黄色の領域に覆われていない(原始星形成前にコアが形成できていない)。そのため、アウトフローが駆動しなかったと考えられる。図2の(b)では、原始星形成前にコアは形成されていることはわかるが、磁場とコア付近のガスが強く結合していないため、アウトフローが駆動できなかったと考えられる。図2の(c)と(d)では、緑色の領域と黄色の領域が重なっている。つまり(1)–(3)の駆動条件を満たしたため、アウトフローが出現した。モデル I1ZPM3 と I10Z0M3 でアウトフローが駆動する密度レンジが異なった理由は、その駆動条件を満たしたのが、モデル I1ZPM3 では低密度レンジ、モデル I10Z0M3 では高密度レンジであったためである。

5. おわりに

今回、銀河系内の、いわゆる現在の星形成において、普遍的に駆動されるアウトフローという現象に着目し、宇宙初期から現在までの星形成過程の変遷を明らかにしようと試みた。宇宙初期から現在までの星形成環境を金属量とイオン化パラメータを組み合わせて再現し、分子雲コアから原始星形成までを3次元 non-ideal MHD シミュレーションを行うことで調べた。その結果、現在の星形成では普遍的に駆動すると考えられているアウトフローだが、環境が異なれば、駆動しない場合があることがわかった。今回のシミュレーション結果から、太陽系近傍で観測されているような星形成過程への遷移は金属量が $Z/Z_{\text{sun}} = 10^{-4} - 10^{-3}$ で起こることが示唆され、宇宙初期から現在までの星形成過程は、絶えず変化していることが考えられる。

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・アドバイスをいただきました。感謝いたします。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) Bate, M. R. 2014, MNRAS, 442, 285
- (2) Beuther H., Schilke P., Sridharan T. K., Menten K. M., Walmsley C. M., Wyrowski F., 2002, A&A, 383, 892
- (3) Bjerkeli P., van der Wiel M. H. D., Harsono D., Ramsey J. P., Jørgensen J.K., 2016, Nature, 540, 406
- (4) Duarte-Cabral A., Bontemps S., Motte F., Hennemann M., Schneider N., Andre P., 2013, A&A, 558, A125
- (5) Dunham, M. M., Arce, H. G., Mardones, D., et al. 2014, ApJ, 783, 29
- (6) Higuchi, K., Machida, M. N., & Susa, H. 2018, MNRAS, 475, 3331
- (7) Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., et al. 2017, Nature Astronomy, 1, 0146
- (8) Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2007, ApJ, 670, 1198
- (9) Machida, M. N., Inutsuka, S.-i., & Matsumoto, T. 2008, ApJ, 676, 1088-1108
- (10) Machida, M. N., Matsumoto, T., Tomisaka, K., & Hanawa, T. 2005, MNRAS, 362, 369
- (11) Machida, M. N., Tomisaka, K., & Matsumoto, T. 2004, MNRAS, 348, L1
- (12) 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
- (13) Susa, H., Doi, K., & Omukai, K. 2015, ApJ, 801, 13
- (14) Swift, J. J., & Welch, W. J. 2008, ApJS, 174, 202
- (15) Wang, L.-Y., Shang, H., Su, Y.-N., et al. 2014, ApJ, 780, 49