

# 星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション

課題責任者

町田 正博 九州大学 理学研究院

著者

町田正博\*1, 平野信吾\*2, 古賀駿大\*1, 原田直人\*1, 川崎良寛\*1, 前田夏穂\*3

\*1九州大学 理学研究院, \*2東京大学 大学院理学系研究科, \*3神戸大学 理学研究科

3次元磁気流体多層格子法の数値シミュレーションを用いて原始星からのジェットの駆動条件を調べた。星形成の母体となる約1万天文単位程度の半径を持つガスの塊である分子雲コアを初期条件として、その重力収縮の過程のシミュレーションを行った。収縮するガスは最終的に数密度が分子雲コアの1000兆倍程度になると収縮が止まり、半径が0.01天文単位程度の原始星が誕生する。原始星誕生前後に原始星周囲には回転円盤が形成し、磁場と回転の効果によってジェットが駆動すると考えられている。しかし、原始星形成直後は原始星や円盤へ激しくガス降着が続いている段階であるため、ガスの動圧を無視することはできない。この研究では、初期の分子コアの熱的不安定性(重力エネルギーに対する熱エネルギーの比)をパラメータとすることで原始星形成後の質量降着率を変化させて、定量的にジェットの駆動条件を求めた。結果、中心星への質量降着率が $10^{-4} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ よりも大きい場合には、ジェットが駆動しないことが分かった。ジェットが駆動しない場合には、磁気制動によって角運動量を分子雲コアの外側に輸送する。また落下するガスのほぼ全てが最終的に星になるため大質量星が形成されやすいと考えられる。

キーワード：磁気流体, 星形成, 惑星形成, ジェット, 弱電離プラズマ

## 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。特に太陽質量の10倍程度以上の大質量星は、周囲の環境に様々な影響を与える。また、大質量星は誕生後100-1000万年という短時間で超新星爆発を起こし中心に中性子星やブラックホールを残しその寿命を終える。そのため、太陽程度の星のみならず大質量星の形成過程を理解することは、宇宙を理解する上で重要である。

大質量星はその母体となる分子雲コアが大質量であり、原始星形成後に星への質量降着率が十分高い場合に誕生すると考えられる(Hirano et al. 2021, Harada et al. 2021)。観測から星への質量降着率を見積もることは困難である。しかし、星は、その誕生の過程でジェットというガスの放出現象を普遍的に起こすことが観測から知られている(e.g., Chuang et al. 2021, Riaz & Machida 2021, Morii et al. 2021)。ジェットによる質量放出率は原始星への質量降着率に比例していると考えられる。そのため、観測からジェットの質量、速度を見積もることで、質量放出率から中心星への質量降着率に変換することが出来る(Matsushita et al. 2021)。しかし、近年、低質量星形成領域でジェットを駆動しない原始星が少なからず観測されている。また、質量放出率と質量降着率の関係も良く分かっていない。

この研究では、星形成の母体である分子雲コアを初期条件として、分子雲コアが重力収縮して原始星が誕生し、ジェットを駆動する段階までの数値計算を行う(Machida 2021)。初期に分子雲コアの質量を変化させることで熱的不安定性を変える。熱的不安定性の違いは原始星形成後の質量降着率に影響する。分子雲コアの重力エ

ネルギーが熱エネルギーに対して支配的である場合には、分子雲コアは重力的に不安定となり原始星形成後の質量降着率が非常に大きくなる。他方、重力エネルギーと熱エネルギーが同程度である場合には、圧力勾配力によってある程度重力収縮が抑制されるため、原始星形成後の質量降着率は低くなる。

この研究では、原始星ジェットの駆動条件を調べるために、分子雲コアの熱エネルギーと重力エネルギーの比と、磁気エネルギー大きさの2つをパラメータとして合計で22モデルを用意し、それぞれについて原始星形成とその後のジェット駆動についてシミュレーションを行った。

## 2. 計算手法と初期条件

上記のように分子雲コアを初期条件とした。最初に重力と圧力勾配力で釣り合うガス球(ボナーエバート球)を採用して、その後、ガス球全体の密度を増加させる。その際、密度上昇の度合いをパラメータとする。我々の以前の研究で、密度上昇値と質量降着率の関係については導出済みである。また、ガス球の磁場強度もパラメータとしている。2つのパラメータ(熱的安定性と磁場強度)を組み合わせて22モデルを星形成、ジェット駆動の初期条件として用意した。

計算は、我々が開発を続けている3次元非理想磁気流体多層格子法の数値計算コードを用いる。(i, j, k)=(64, 64, 64)からなるグリッドを21段入れ子状にして計算を行う。この手法により半径1万天文単位の分子雲コアの外側領域と半径0.01天文単位の原始星の両方を空間的に分解して計算することが可能である。計算は、原始星形成後500年間経過するまで継続する。地球シ

ミュレータ ES4 を用いて、ノード間パラメータ並列を行い、多数のパラメータを同時に計算した。

### 3. 結果

全てのモデルについて分子コアから原始星形成後 500 年が経過するまでシミュレーションを行った。以下では、特に磁場が強いモデルについての結果について示す。

図 1 は、初期に分子雲コアの熱エネルギーが重力エネルギーとほぼ等しい値を持つモデルの分子雲コアの重力収縮後に誕生した原始星とその周辺の構造を示している。原始星に対して左上から右下方向にジェットが駆動していることが分かる。原始星の大きさは 0.1 天文単位以下

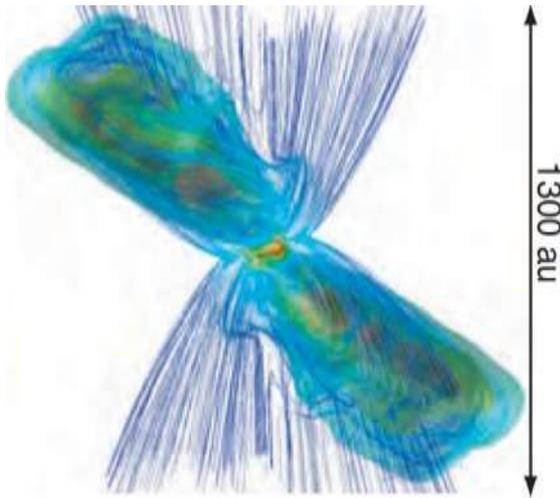


図 1 原始星(中心のオレンジの表面)からのジェット(青、緑、茶色の等速度面)と周囲の磁力線(青い流線)。

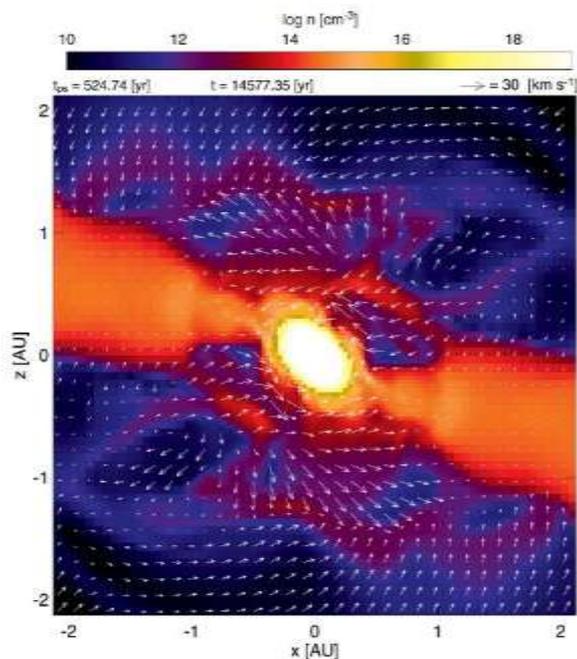


図 2 原始星周囲の密度(カラー)と速度ベクトル(矢印)。

であるのに対して、ジェットは1000 天文単位程度まで成長している。また、ジェット内部では磁力線が強く振じられていることが分かる。これは質量降着率が低い(重力エネルギーが相対的に小さい)モデルであるが、このように質量降着率が低い場合には、原始星形成直後から激しくジェットが駆動し時間と共に成長する。

図 2 は質量降着率が高い場合の原始星周囲の構造を示している。中心の楕円状の領域が原始星に対応する。原始星周囲から原始星から遠ざかる方向にガスが流れ出ていることが分かる。しかし、この流出する流れは、原始星への降着流に抑えられて図 1 のように成長することなく、ジェットは原始星形成 500 年後でも 2 天文単位に留まっている。

図 3 は、質量降着率が低い場合(上のパネル)と高い場合(下のパネル)の原始星形成後約 500 年後の原始星周囲の構造を示している。図 3 の上のパネルのように質量降着

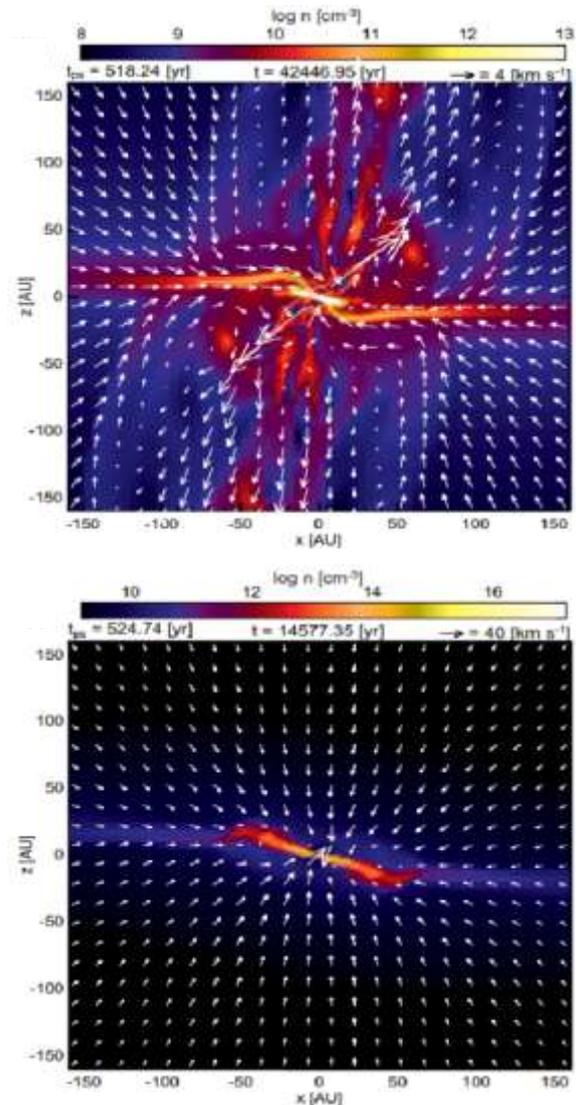


図 3 原始星形成後約 500 年後の質量降着率が低い場合(上)と高い場合(下)の 300 天文単位スケールでの密度(カラー)と速度ベクトル(矢印)

率が高い場合は中心星から激しくジェットが駆動しており、複雑な密度構造を持つことが分かる。他方、図3下のパネルのように質量降着率が高い場合には、中心星と円盤に向かってガスが落下し続けるのみでジェットや複雑な構造は全く見られない。このように質量降着率の違いによって星形成過程が大きく異なることが分る。

図4は AM3-FM3 の異なる6つのモデルについてジェットの中心からの距離(ジェットの空間的な広がりに対応する)を原始星形成後の時間に対して表示している。これらのモデルの中で質量磁束比は一定である。これはどのモデルも磁気エネルギーと重力エネルギーの比は等しいことを意味している。他方、熱エネルギーと重力エネルギーの比は異なる。モデル AM3 が最も小さな重力エネルギーを持ち、モデル FM3 が最も大きな重力エネルギーを持つ。重力エネルギーの大小は質量降着率と関係しており、初期に重力エネルギーが大きいモデルは中心星への質量降着率が高い。

図4は、質量降着率の低いモデル (AM3, BM3, CM3, DM3) では、ジェットが時間と共に成長しているのが分かる。他方、質量降着率が高いモデル(EM3, FM3)では、ジェットはほとんど成長しない。モデル EM3 ではジェットの長さは振動している。これは、一時的にジェットが100-300天文単位まで成長するが、その後動圧によって成長が抑制さ

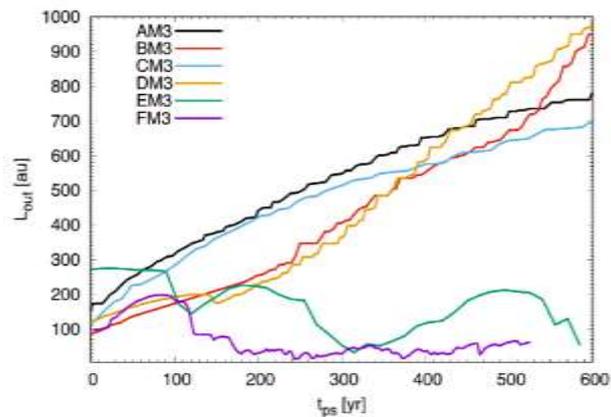


図4モデルごとのジェットの原始星からの到達距離と時間。どのモデルも磁気エネルギーと重力エネルギーの比は同じで、質量降着率が異なる。

れてジェットが縮小することを意味している。その結果、モデル AM3-DM3 のようなジェットの長さの単調な増加は起こらない。

質量降着率が高い場合は、大質量星が誕生する。しかし、我々のシミュレーションの結果は、大質量星誕生時に必ずしも原始星近傍からジェットを駆動しないことを意味している。

#### 4. まとめと議論

この研究では、星形成の初期条件となる分子雲コアの熱エネルギーと重力エネルギーの比と磁気エネルギーを変えて異なる22モデルについて星の誕生とジェット駆

動の数値シミュレーションを行った。

初期に重力エネルギーが大きい場合は、原始星形成後に質量降着率が高く大質量星を誕生させる。他方、重力エネルギーが小さい場合には質量降着率が低くなる傾向があり低質量星が誕生しやすい。

計算の結果、磁場の強さに依らず、質量降着率が高い場合には、ジェットが駆動しないことが分かった。解析の結果、ジェットが駆動しない場合には、原始星周囲での降着流による動圧(ラム圧力)が磁気圧よりも高くジェットが成長しないことが分かった。ジェットが駆動する場合は、磁気圧が動圧に対して優勢な領域が広く原始星を取り囲んでいる必要がある。磁気優勢領域では、原始星近傍から出現したジェットを加速させることが出来る。質量降着率が高いということは、原始星近傍のある面を考えたとき、その面上で密度と速度の積が大きいということの意味する。動圧は密度と速度の二乗の積であるため、質量降着率が高ければ動圧も高い傾向にある。

図4では全22モデルの中で最も分子雲コアを持つ磁場が強い(磁気エネルギーが最も大きい)6つのモデルのみを表示しているが、これらの場合でも質量降着率が高い場合には、ジェットは成長しなかった。より磁場が弱いモデルでは、質量降着率が低い場合でもジェットは駆動しないモデルが存在する。

近年ALMA望遠鏡の観測によって低質量星形成領域でジェットが付随しない原始星が発見されているが、多くの原始星にはジェットが付随する。我々の計算結果は、磁場が弱い場合には、原始星周囲で、動圧が磁気圧を圧倒するためジェットが駆動しないことを示している。そのため、ほとんどの星がジェットを駆動するという観測的な証拠は、星が強磁場環境のみで誕生することを意味している。また、ジェットを駆動しない原始星は弱磁場環境下で誕生したと考えられる。

上記のようにジェットは大きな空間スケールを持つため、ジェットとそれに付随している原始星は見つけやすい。他方、ジェットが付随していない天体は、赤外線点源としてのみ観測されるが、ジェットが付随しているかどうかは電波や可視光などの他の波長の電磁波で観測する必要がある。結果、ジェットが付随していない原始星は発見されにくいという観測のバイアスが存在する。現状、このバイアスを考慮してもほとんどの星は誕生時にジェットを駆動すると考えられているが、より詳細な観測が必要である。

質量降着率が高い場合には磁場が非常に強い場合でもジェットが駆動しないことが分かった。大質量星は存在頻度が低いため我々の近傍には存在せず、観測するためには遠方領域まで調査する必要がある。そのため、空間的に広く広がった大質量ジェットが大質量星形成の存在の指標となっているが、ジェットを示さない大質量星がある場合には、それらが見逃されている可能性がある。

また、我々の計算は原始星形成後500年間のみであったが、さらなる長時間計算でジェットが駆動する可能性がある。分子雲コアの質量は有限であるため、原始星形

成後、質量降着率は時間と共に減少する。そのため、主降着段階後期には動圧を磁気圧が上回り、ジェットが駆動し成長する可能性がある。ジェットの駆動条件を決定するためにはさらなる長時間計算が必要となる。

ジェットは星形成過程で余分な角運動量を外側に放出するという役割を持つ。ジェットが駆動しない場合には、磁気制動などの他の機構によって角運動量輸送する必要があるためさらなる議論が必要となる(Kawasaki et al. 2021)。ジェットの駆動条件、また初期星形成段階のより詳細な理解には、今後のより現実的な数値シミュレーションの実行と高空間解像度での星形成領域の観測が必要である。

## 謝辞

本研究の数値計算は、令和3年度地球シミュレータ公募課題「星形成と惑星形成を包括する大規模シミュレーション」によって採択された海洋研究開発機構の地球シミュレータ (ES) を用いて行いました。

## 文献

[1] Harada, N., Hirano, S., Machida, M. N., and Hosokawa, T. "Impact of magnetic braking on high-mass close binary formation", *MNRAS*, 508, 3730-3747.

[2] Machida, M. N. "Can high-velocity protostellar jets help to drive low-velocity outflow?", *MNRAS*, 508, 3208-3225.

[3] Hirano, S., Machida, M. N., and Basu, S. "Supermassive Star Formation in Magnetized Atomic-cooling Gas Clouds: Enhanced Accretion, Intermittent Fragmentation, and Continuous Mergers", *ApJ*, 917, 34.

[4] Chuang, C.-Y., Aso, Y., Hirano, N., Hirano, S., and Machida, M. N. "(y) "ALMA Observations toward the S-shaped Outflow and the Envelope around NGC 1333 IRAS 4A2", *ApJ*, 916, 82.

[5] Riaz, B. and Machida, M. N. "Complex structure of a proto-brown dwarf", *MNRAS*, 504, 6049-6066.

[6] Kawasaki, Y., Koga, S., and Machida, M. N. "Growth of magnetorotational instability in circumstellar discs around class 0 protostars", *MNRAS*, 504, 5588-5611.

[7] Matsushita, Y., Takahashi, S., Ishii, S., Tomisaka, K., Ho, P. T. P., Carpenter, J. M., and Machida, M. N. "Super-fast Rotation in the OMC 2/FIR 6b Jet", *ApJ*, 916, 23.

[8] Morii, K., Takahashi, S., and Machida, M. N. "Revealing a Centrally Condensed Structure in OMC-3/MMS 3 with ALMA High-resolution Observations", *ApJ*, 910, 148.

# Star and Planet Formation Simulations

## Project Representative

Masahiro Machida Faculty of Science, Kyushu University

## Authors

Masahiro Machida<sup>\*1</sup>, Shingo Hirano<sup>\*1</sup>, Shunta Koga<sup>\*1</sup>, Naoto Harada<sup>\*1</sup>, Yoshihiro Kawasaki<sup>\*1</sup>, Natsuho Maeda<sup>\*2</sup>

\*1 Faculty of Science, Kyushu University, \*2 Faculty of Science, Kobe University

Using three-dimensional non-ideal magnetohydrodynamics simulations, we investigate the driving condition of protostellar jet. We adopt a gas sphere with a radius of  $10^4$  au as the initial state and simulate the gravitationally contraction process of such a sphere. When the number density of the gravitationally collapsing cloud exceeds  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>, the gas contraction stops and a protostar forms. A circumstellar disk appears after protostar formation. The jets are driven near the protostar or the inner edge of the disk and they evolve with time. However, the ram pressure cannot be ignored when considering the jet driving in the main accretion phase during which the gas accretion onto the disk is significant. This study focuses on the condition for the jet driving, in which we use two parameters of thermal stability and magnetic field strength. Our simulations show that the protostellar jet does not appear when the mass accretion rate is higher than  $>10^{-4}$   $M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ . In such a case, the magnetic braking play a significant role for transporting an excess angular momentum around the protostar. In addition, massive stars tend to be formed without appearance of the jet, because the mass ejection does not occur.

**Keywords :** Jet, Binary system, Magnetohydrodynamics, Circum-binary disk, Weakly ionized plasma

## 1. Introduction

High-mass stars are important for investigating the history and structure of the universe (Harada et al. 2021, Hirano et al. 2021). However, it is difficult to observe forming high-mass stars, because the existence probability of the high-mass stars is very low compared with the low-mass stars. Thus, a few high-mass star exist in nearby star-forming regions. Therefore, we need to observe the forming high-mass stars far from the sun.

It is considered that the protostellar jet always appears in the star formation process (Chuang et al. 2021, Riaz & Machida 2021, Matsushita et al. 2021, Morii et al. 2021). Thus, the protostellar jets are a useful index to find out forming high-mass stars. However, recent observations indicate that the protostar does not always show the protostellar jet. Thus, we can not determine whether or not the protostellar jet are useful to survey forming high-mass stars. In addition, the protostellar jet plays a significant role in the star formation process. An excess angular momentum around the protostar is transferred by the jet. Moreover, the star formation efficiency is closely related to the strength of the jet (Machida 2021).

In this study, we investigate the driving condition of the protostellar jet using three-dimensional non-ideal magnetohydrodynamic nested grid code.

## 2. Numerical method and initial settings

As the initial state, the gas sphere having a Bonnor-Ebert density profile is adopted. A uniform magnetic field and a rigid rotation are imposed to the sphere. To characterize the initial cloud core, we use two parameters of the thermal stability and magnetic field strength. The former controls the mass accretion rate after

protostar formation (Machida 2021). Since the protostellar jet is magnetically driven, the latter is closely related to the jet driving condition.

The simulation is executed by our nested grid code, in which different sized grids are nested. Each grid has the same cell number and is composed of  $(i, j, k)=(64, 64, 64)$  cells. On the other hand, the spatial scale is different among the grids (for details, see Machida 2021). Firstly, we prepare five levels of grid ( $l=5$ ). After the calculation begins, a new finer grid is automatically generated to resolve the minimum Jeans wavelength. The maximum grid is set to be 21 ( $l=21$ ). With this code, we can resolve both the prestellar core ( $\sim 10^4$  au) and protostar (0.01 au). With two parameters, we prepare 22 models.

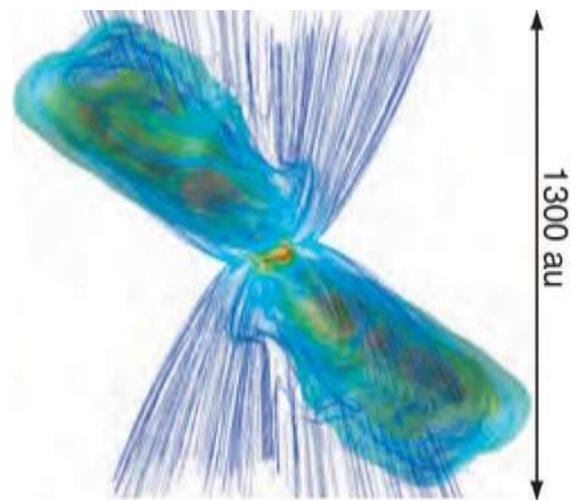


Fig. 1 Jet (Blue surface) driven by protostar (orange surface). Blue lines are magnetic field

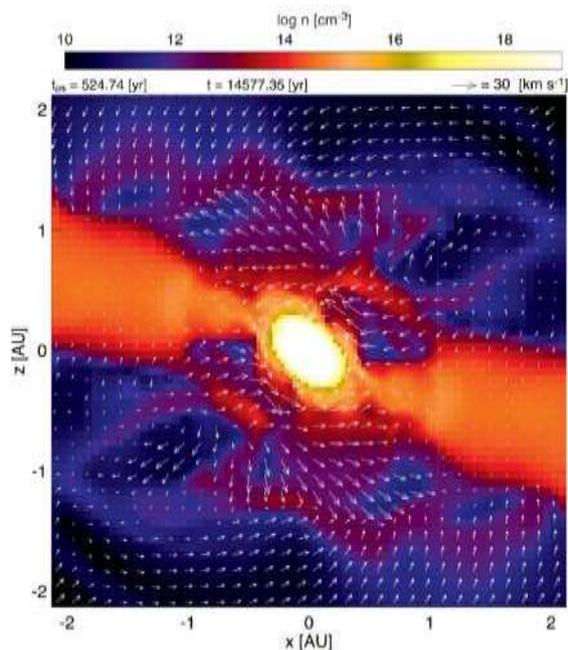


Fig. 2 Density (color) and velocity (arrows) distributions around protostar.

We simulate the gravitational collapse for each model and execute the calculation for 500 years after protostar formation.

### 3. Results

Firstly, we show the results for the models with the strongest magnetic field. Fig. 1 shows a three-dimensional view of the jet and magnetic field for the model with a low-mass accretion. In the figure, a clear jet and complicated structure of magnetic field lines can be confirmed. For this model, the jet continues to evolve and reaches about 1000 au at the end of the simulation.

Fig. 2 shows the density and velocity distributions around the protostar at the end of the simulation for the model with a high mass accretion rate. As seen in the figure, the jet does not sufficiently evolve for this model. Although the outflowing gas appears near the protostar, the evolution of jet is suppressed by the infalling gas. As a result, the outflowing gas are distributed only around the protostar.

### 4. Summary and Discussion

Our simulations show that the protostellar jet cannot evolve when the mass accretion rate is as high as  $>10^{-4} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ . In this case, only a weak outflowing gas appears near the protostar, while it is suppressed by the accretion flow. In other words, the ram pressure dominates the magnetic pressure around the protostar. Thus, the evolution of protostellar jet is suppressed by a strong ram pressure. The mass accretion rate at arbitrary radius is determined by the density and radial velocity. The mass accretion rate is high when the density and velocity are large. Since the ram pressure is the product of the density and square of the velocity, the ram pressure is large as the high accretion rate

becomes high. Therefore, the jet driving tends to be suppressed when the mass accretion is high.

The protostellar jet play a role in the star formation process. An excess angular momentum is transported by the protostellar jet. In the absence of the protostellar jet, the angular momentum should be transported by either magnetic braking nor gravitational torque (Kawasaki et al. 2021). In addition, the protostellar jet expels a large fraction of the infalling gas. The high mass star tends to be formed when no jet appears, because the mass ejection does not occur. It is expected that the star formation process is significantly changed if no jet appears. However, we calculated the jet driving only for 500 years. Further long-term simulations are necessary to understand the high-mass star formation and jet driving.

### Acknowledgement

Simulations reported in this paper were performed by 2021 Koubo Kadai on Earth Simulator at JAMSTEC.

### References

- [1] Harada, N., Hirano, S., Machida, M. N., and Hosokawa, T. "Impact of magnetic braking on high-mass close binary formation", *MNRAS*, 508, 3730–3747.
- [2] Machida, M. N. "Can high-velocity protostellar jets help to drive low-velocity outflow?", *MNRAS*, 508, 3208–3225.
- [3] Hirano, S., Machida, M. N., and Basu, S. "Supermassive Star Formation in Magnetized Atomic-cooling Gas Clouds: Enhanced Accretion, Intermittent Fragmentation, and Continuous Mergers", *ApJ*, 917, 34.
- [4] Chuang, C.-Y., Aso, Y., Hirano, N., Hirano, S., and Machida, M. N. "(y) "ALMA Observations toward the S-shaped Outflow and the Envelope around NGC 1333 IRAS 4A2", *ApJ*, 916, 82.
- [5] Riaz, B. and Machida, M. N. "Complex structure of a proto-brown dwarf", *MNRAS*, 504, 6049–6066.
- [6] Kawasaki, Y., Koga, S., and Machida, M. N. "Growth of magnetorotational instability in circumstellar discs around class 0 protostars", *MNRAS*, 504, 5588–5611.
- [7] Matsushita, Y., Takahashi, S., Ishii, S., Tomisaka, K., Ho, P. T. P., Carpenter, J. M., and Machida, M. N. "Super-fast Rotation in the OMC 2/FIR 6b Jet", *ApJ*, 916, 23.
- [8] Morii, K., Takahashi, S., and Machida, M. N. "Revealing a Centrally Condensed Structure in OMC-3/MMS 3 with ALMA High-resolution Observations", *ApJ*, 910, 148.