

# 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, 富田賢吾\*2, 平野信吾\*1, 古賀駿大\*1, 樋口公紀\*1, 原田直人\*1

\*1九州大学 理学研究院, \*2東北大学 理学研究科

磁気亜臨界コア中での星形成過程を3次元非理想磁気流体シミュレーションによって調べた。星の誕生の母体である分子雲コアは弱電離プラズマから成る。分子雲コアの磁場が強くローレンツ力によって収縮が抑制されている場合、両極性拡散によって磁束が分子雲コアから抜けた後重力収縮によって星が誕生する。近年の観測は、星の母体である分子雲コアの磁場強度が極めて強いことを示唆している。この研究では両極性拡散を組み込んだ数値計算コードを用いて磁場強度が非常に強い環境下での星形成過程を調べた。両極性拡散によって磁束が減少するまでの間に分子雲コアの角運動量は磁気制動によって減衰する。磁束が十分に抜け自己重力によって収縮し、星が出来た後でも回転角速度は大きくない。そのため、磁気臨界コア中での星形成とは異なり、磁気亜臨界コア中では回転円盤や顕著なアウトフローは現れない。これらの特徴は近年 ALMA 望遠鏡で観測された円盤が極めて小さい天体の特徴と一致する。この研究は、通常とは異なる進化過程によっても星が誕生することを示した。

キーワード: ジェット, 原始惑星系円盤, 磁気流体, 惑星形成, 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宇宙の進化を理解することに寄与する。また星形成初期段階で形成する星周円盤は惑星の形成の母体であるため惑星形成を考える上でも星形成過程の解明は重要である。

近年 ALMA 望遠鏡によって星の誕生の現場が詳細に観測されるようになってきた。特に偏光観測によって星が誕生する現場である分子雲コアの磁場形状が得られるようになってきている。多くの観測は、分子雲コアの磁力線は、どの空間スケールでも非常に良く揃っていることを示している。これは磁場が、乱流で乱れないほど強いことを意味している。また、間接的に測定した磁場強度から導出した分子雲コアの磁気エネルギーは重力エネルギーを凌ぐ場合があることが分かってきた。多くの分子雲コアの磁気エネルギーは、重力エネルギーよりもわずかに小さく、分子雲コア形成後、即座に自己重力収縮を開始して星を誕生させる。しかし、磁場によって重力収縮が抑制されている分子雲コアがある一定数存在することが分かってきた。

他方、ALMA 望遠鏡による原始星形成後の観測も従来とは異なる星形成の描像を捉え始めている。星形成過程では、原始星周囲に星周円盤(回転円盤)が形成し回転円盤からアウトフローが出現することで過剰な角運動量を輸送し円盤から原始星へのガス降着を促進すると考えられてきた。しかし、高解像度観測によって円盤やアウトフローが付随しない原始星が発見されるようになった。これらの原始星周囲の構造は、従来考えられている星形成の描像とは大きく異なる。

この研究では最新の天文観測から得られた結果を補完するため、磁場によって自己重力収縮が抑制されている

コア(磁気亜臨界コア)中での星形成過程を3次元非理想磁気流体シミュレーションによって調べた。初期条件として観測されている分子雲コアと同等のガスコアを再現し、また観測と同等の回転エネルギー、熱エネルギー、磁気エネルギーを与えて、その進化を調べた。中心で誕生する原始星を空間的に分解して、原始星形成後 500 年間に進化計算を行った。

## 2. 初期条件と計算手法

星形成の母体である分子雲コアの進化過程では、磁場が重要な役割を果たす。重力が卓越しており即座に自己重力を開始するコアを磁気超臨界コアと呼ぶ。他方、ローレンツ力によって支えられており即座の重力収縮が起こらないコアを磁気亜臨界コアと呼ぶ。この研究では分子雲コアが持つ磁場強度をパラメータとして磁気超臨界コアと亜臨界コア中での星形成過程を調べた。初期条件として 10,000 天文単位の半径をもち太陽質量程度程の質量を持つ分子雲コアを採用した。このコアに観測から得られている分子雲コアの平均的な角運動量を与えた。また回転軸と平行に一樣な磁場を与えた。磁場強度は上記のようにパラメータとしている。分子雲コア外部には一樣密度の星間ガスを配置した。また固定境界条件を採用した。境界は分子雲コアから十分遠方に配置したため、境界からの影響は無視できる。

計算は3次元磁気流体多層格子法を使用した。磁気流体方程式には、非理想磁気流体効果としてオーム散逸と両極性拡散が実装されている。磁気拡散係数は化学進化計算を行って、密度、温度、磁場のテーブルを作成して使用する。

多層格子法とは複数のグリッドを用いて空間解像度が

必要な場所に多くのグリッドを配置精度良い計算を行い、精度の必要でない場所には精度の粗いグリッドを配置する手法である。そのため星や星周円盤の形成の計算に適している。

多層格子法では空間分解能の異なるグリッドを21段用意した。各々のグリッドは、(i, j, k)=(64, 64, 32)のセルから成る。これらのグリッドを入れ子状にして計算を行う。外側の粗いグリッドでは分子雲コアを空間的に分解し、内側の解像度の良いグリッドでは原始星自体を空間分解する。地球シミュレーターSX-ACEを用いて原始星形成後500年が経過するまでの計算を行った。1ノード内は自動並列を使い、ノード間はMPIによるパラメータ並列を行い複数のパラメータでの計算を行った。

### 3. 結果

この研究では分子雲コアの状態から磁束が抜け、重力収縮が起こり、中心部で原始星が誕生し、その後エンベロップからガスが原始星に落下する過程の計算を行った。原始星が誕生するまでの過程はこれまでの研究により良く調べられているため原始星形成後の進化に焦点を当て

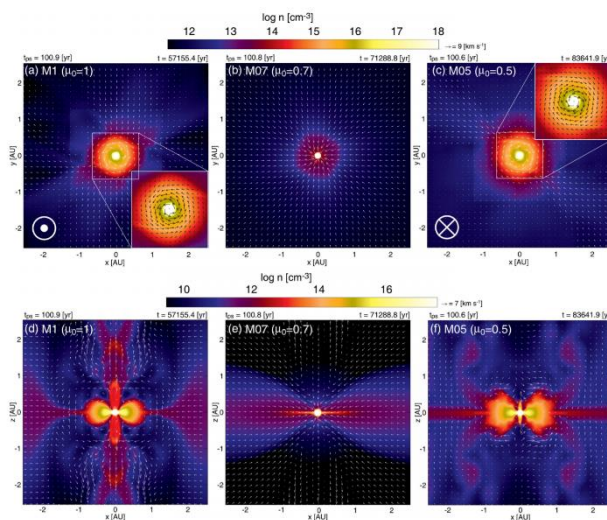


図1 磁気臨界(左)、磁気亜臨界(中央、右)の赤道面(上段)と側面(下段)の密度(カラー)、速度(矢印)分布

る。

図1は、原始星形成100年後の磁気超臨界コアと磁気亜臨界コア中で出来た原始星とその近傍の構造を示している。左の図は、磁場が弱い場合のモデルであり、このモデルでは回転円盤が形成して、円盤からアウトフローが駆動している。そのため標準的な星形成過程と考えられる。

中央の図は磁場が強い場合の結果である。このモデルでは非常に弱いアウトフローが原始星上空から駆動している。このモデルの3次元構造を図2に示している。この図から分かるように原始星の回転によって磁力線が捩じられて磁気圧勾配力によってアウトフローが駆動してい

る。このモデルは、近年ALMA望遠鏡で観測された円盤が存在せず、アウトフローが非常に弱い天体に対応すると考えられる。また、このモデルでは回転円盤が形成しなかった。これは分子雲コア段階で磁束が抜けるまでの間に磁気制動によって角運動量が星間空間に輸送されたため

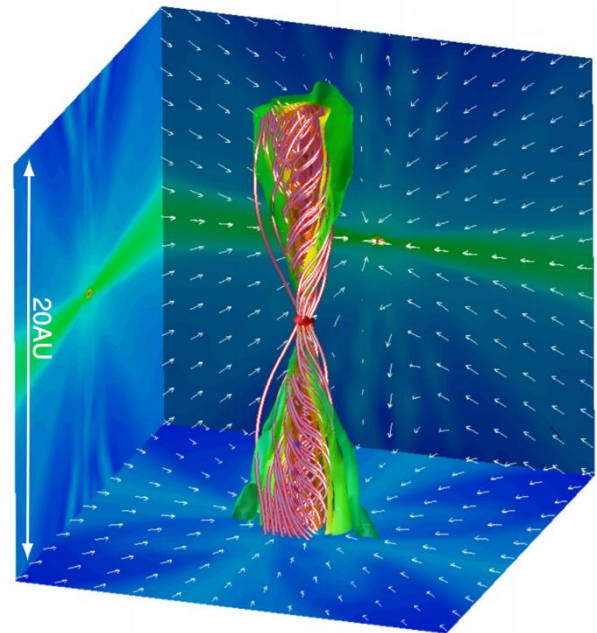


図2 原始星形成後500年後の構造。中心部の赤い部分が原始星。赤い線が磁力線、中心部の密度と速度構造を壁面に投影している。

である。

図1の右の欄は磁場が最も強い場合のモデルである。このモデルでは、磁気制動の効果が非常に強くエンベロップと逆回転する円盤が形成している。これは分子雲コアの段階で初期の回転により磁力線が捩じられたが、その後、捻じれを解消するための揺り戻しにより角運動量が外層から持ち込まれたことに起因する。磁気張力により初期の回転とは逆方向にガスの回転が起こる。また、逆回転円盤から駆動したアウトフローもエンベロップの回転とは逆であることが分かった。今後の観測で、エンベロ

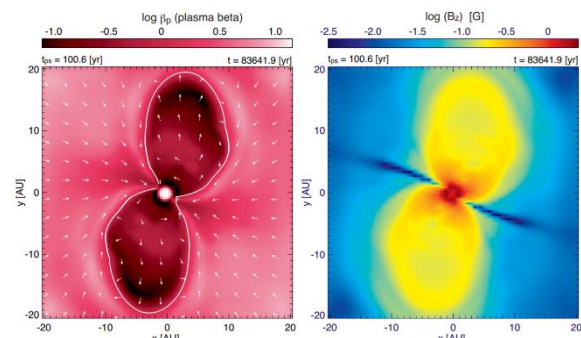


図3 磁気亜臨界コアの赤道面のプラズマβ(左)と磁場強度(右)。左図の矢印は磁場ベクトル。

ープと円盤、またはアウトフローの回転が異なっている天体が多数見つかり、磁気臨界コアの中で星形成が起こっている証拠となる。

図3は磁気臨界コア中での赤道面のプラズマベータと磁場強度を示している。このモデルでは磁気交換不安定が起こることによって、磁場が中心部から抜け出していることが分かる。中心部の1au程度の領域では比較的磁場が弱い。この場所ではオーム散逸と両極性拡散が有効であるために磁場が散逸する。この過程で強い磁束が中心から抜け出すことによって星が誕生する。

近年のALMA望遠鏡によって観測されるアウトフローを出さず小スケールの円盤を持つ原始星周囲と同様の構造が確認されている。これらの構造は磁気臨界コア中での星形成過程であると考えられる。

#### 4. まとめ

3次元非理想磁気流体シミュレーションを用いて磁気臨界コア中での星形成過程について調べた。磁気臨界コア中では観測で見られるような現象がシミュレーションでも再現された。原始星形成後にその周囲に回転円盤が形成し、円盤からはジェットが駆動した。ジェットは角運動量を円盤から運び去るため、円盤ガスが中心に落下することにより中心星が成長する。

他方、磁気臨界コア中での星形成過程は、磁気臨界コアの星形成と大きく異なる。両極性拡散により十分な磁束が抜けるまでガス雲は自己重力によって収縮が出来ない。その間に磁気制動によってガス雲の角運動量が十分に星間空間に輸送される。そのため原始星形成後も回転円盤が出来ない。しかし、中心星の回転によって磁力線は振じられるために磁気圧勾配力によって弱いジェットを駆動することが出来る。

また、より磁場が強い場合には磁気張力によってエンベロープの回転とは逆に回転する円盤やアウトフローが現れた。逆回転円盤やアウトフローは少数ながらも観測によって確認されている。

これまでの星形成領域での観測は原始星の周囲に円盤が形成しジェット、アウトフローが駆動することを示していた。ALMA望遠鏡以前の観測では中心星や円盤は空間的に分解できないためアウトフローを原始星の指標としていた。そのため、アウトフローを駆動している天体を選択的に観測しており、当然ながら円盤も付随する。ALMA望遠鏡完成後、これまで赤外線点源として原始星が確認されていたものの周囲の構造を望遠鏡で分解出来ていなかった天体の観測を行った。その結果、少数ながらも顕著なアウトフロー駆動を示さず、また円盤も付随していない天体が見つかった。また、同時にラージスケールの偏光観測から星形成コアの磁場強度は非常に強いことが間接的に示された。これらの結果から、これまで観測されていた多くの天体は磁気超臨界コアの中で形成されたものであり、磁気臨界、つまり非常に強い磁場環境でも原始星は形成されうることを観測と理論シミュレーションは示

唆している。

磁場が強い場合には、角運動量が効率的に輸送される特徴だと考えられていたジェット、アウトフロー、回転円盤が現れない。この研究によって従来とは異なるモードによって星が誕生することを示した。

この計算では、原始星形成後500年間の計算を行った。原始星の回転タイムスケールは1日程度であるため、星を空間分解するとより小さな時間刻みが必要である。また、星周囲のアルファベン速度は非常に高速であり小さな時間刻みを要求する。現在ALMA望遠鏡によって原始星形成後1000年以内と考えられる原始星が見つまっている。しかし、原始星段階は10万年程度続く。そのため1000年以内の天体の存在確率は1%程度である。これは、シミュレーションは観測全体の1%程度の天体としか比較できないことを意味する。今後、原始星形成後の計算時間を延ばし1000年から1万年程度の長時間積分をすることによって、より多くの観測天体を比較することを目指す。また、観測と直接比較するためにはシミュレーションで得られる物理量を観測で得られる物理量に変換する必要がある。現在シミュレーション結果の観測的可視化の研究も進行中であるため、今後より精度よく数値シミュレーションと観測を比較することが可能となる。

#### 謝辞

本研究の数値計算は、平成30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] Tsukamoto, Y., Machida, M. N., Susa, H., Nomura, H., and Inutsuka, S. "Early Evolution of Disk, Outflow, and Magnetic Field of Young Stellar Objects: Impact of Dust Model", *ApJ*, 896, 158.
- [2] Hirota, T., Plambeck, R. L., Wright, M. C. H., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Kim, M. K., Burns, R. A., and Honma, M. "Magnetic Field Structure of Orion Source I", *ApJ*, 896, 157.
- [3] Sai, J., Ohashi, N., Saigo, K., Matsumoto, T., Aso, Y., Takakuwa, S., Aikawa, Y., Kurose, I., Yen, H.-W., Tomisaka, K., Tomida, K., and Machida, M. N. "Disk Structure around the Class I Protostar L1489 IRS Revealed by ALMA: A Warped-disk System", *ApJ*, 893, 51.
- [4] Machida, M. N. and Basu, S. "Different modes of star formation - II. Gas accretion phase of

initially subcritical star-forming clouds”, MNRAS, 494, 827-845.

[5] Machida, M. N., Hirano, S., and Kitta, H. “Misalignment of magnetic fields, outflows, and discs in star-forming clouds”, MNRAS, 491, 2180-2197

[6] Aso, Y., Hirano, N., Aikawa, Y., Machida, M. N., Ohashi, N., Saito, M., Takakuwa, S., Yen, H.-W., and Williams, J. P. “Protostellar Evolution in Serpens Main: Possible Origin of Disk-size Diversity”, ApJ, 887, 209.

[7] Tokuda, K., Tachihara, K., Saigo, K., André, P., Miyamoto, Y., Zahorecz, S., Inutsuka, S., Matsumoto, T., Takashima, T., Machida, M. N., Tomida, K., Taniguchi, K., Fukui, Y., Kawamura, A., Tatematsu, K., Kandori, R., and Onishi, T. “A centrally concentrated sub-solar-mass starless core in the Taurus L1495 filamentary complex”, PASJ, 71, 73.

[8] Riaz, B., Machida, M. N., and Stamatellos, D. “ALMA reveals a pseudo-disc in a proto-brown dwarf”, MNRAS, 486, 4114-4129.

# Star and Planet Formation Simulations

## Project Representative

Masahiro Machida Faculty of Science, Kyushu University

## Authors

Masahiro Machida<sup>\*1</sup>, Kengo Tomida<sup>\*2</sup>, Shingo Hirano<sup>\*1</sup>, Koki Higuchi<sup>\*1</sup>, Shunta Koga<sup>\*1</sup> and Naoto Harada<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Science, Kyushu University, <sup>\*2</sup> Faculty of Science, Tohoku University

Using non-ideal magnetohydrodynamics simulations, we investigated the star formation process in magnetically subcritical cloud cores. Unlike the star formation in magnetically super critical cores, neither outflow or circumstellar disk appears in magnetically subcritical cores. Before the gravitational collapse is induced, the angular momentum of the molecular cloud core is effectively transferred by the magnetic braking. After the magnetic flux is significantly removed by ambipolar diffusion, the gravitational collapse begins and a protostar forms in the gravitationally collapsing cloud core. After protostar formation, a very weak outflow appears because the magnetic field lines are twisted by the rotation of the protostar. However, no rotationally disk appears during the main accretion phase. These features correspond to recent ALMA observations, in which neither clear outflow nor disk has been detected.

**Keywords :** Jet, Protoplanetary disk, Magnetohydrodynamics, Planet formation, Weakly ionized plasma

## 1. Introduction

Stars form in molecular cloud cores. Recent polarization observations indicate that magnetic fields are well ordered in the molecular cloud core and the magnetic field in prestellar clouds is very strong. Thus, we need to consider the effect of magnetic field on the star formation. When the magnetic energy is larger than the gravitational energy in the cloud core, the magnetic field suppress the gravitational contraction or the star formation. In such a case, the gravitational collapse is induced after the magnetic flux is significantly removed by the ambipolar diffusion. However, until now, the star formation in magnetically dominated core has not been investigated. This study focuses on the star formation in very strongly magnetized cores.

## 2. Initial Condition and Numerical settings

As the initial state, we adopted a Bonnor-Ebert sphere which mimics the prestellar clouds. A rigid rotation and uniform magnetic field are added to the prestellar cloud, in which the magnetic field strength is the parameter. We calculate the cloud evolution with our non-ideal MHD nested grid code which spatially covers both the prestellar cloud and protostar. Before the Jeans condition is violated, a new finer grid is generated. Each grid compose of  $(i, j, k) = (64, 64, 32)$  cells. Magnetohydrodynamic equations including self-gravity are solved in the nested grid cord. The cloud evolution is calculated about 500 years after protostar formation.

## 3. Results

We prepared three prestellar core with different magnetic field strengths. Fig. 1 shows the structures around the protostar for different models. The magnetic field is relatively weak in the model shown in the left panels of Fig. 1. For this model, both the

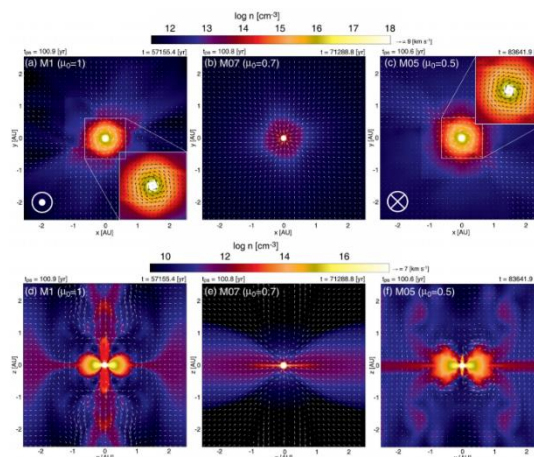


Fig.1 Density (color) and velocity (arrows) distributions on the  $z=0$  (top) and  $y=0$  (bottom) planes for the models with weak (left), moderate (middle) and strong (right) magnetic field.

circumstellar disk and outflow appear after protostar formation. Thus, this model shows typical features of the star formation confirmed in past observations. The model shown in the middle panels of Fig. 1 has a moderate magnetic field strength. For this model, no disk appears, while a very weak outflow appears above and below the protostar. Fig. 2 shows the three-dimensional structure for this model. The figure indicates that the magnetic field lines are strongly twisted by the rotation of the protostar and the magnetic pressure gradient force drives a weak outflow. This model corresponds to the objects recently observed by ALMA, in which neither disk nor outflow has not been confirmed.

The strongly magnetized model is shown in the right panels of Fig.1. For this model, although both rotationally supported disk



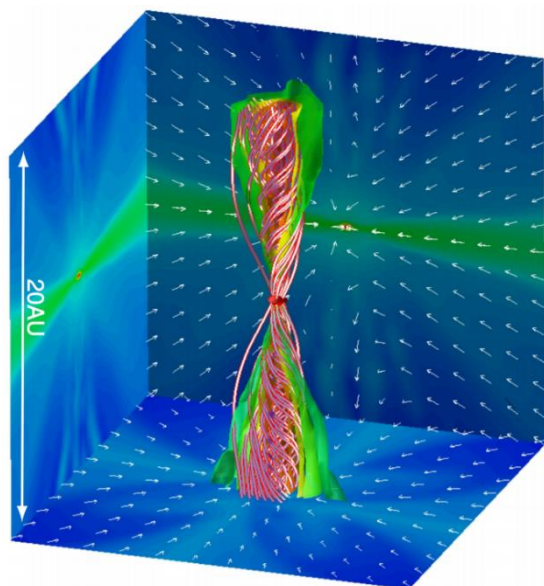


Fig. 2 Three-dimensional view for the strongly magnetized model. Red line are the magnetic field lines.

and outflow appear, their rotation vectors are not agreement with the rotation of the envelope and initial cloud core. The envelope has an anti-clockwise rotation, while both the disk and outflow have a clockwise rotation. The counterrotation is due to the magnetic braking. The initial angular momentum of the cloud is effectively transferred by the magnetic braking and the counterrotation is introduced into the central region caused by the magnetic tension force before the cloud collapse begins.

#### 4. Summary

In this study, we investigated the star formation process in the cloud cores with very strong magnetic fields. When the Lorentz force is stronger than the gravity in the prestellar core, the cloud collapse does not occur until the magnetic field is removed by the ambipolar diffusion. In such a case, the angular momentum of the cloud is largely removed by the magnetic braking. Thus, the prestellar cloud has a very small amount of the angular momentum when the magnetic field is very strong. The star formation process in magnetically subcritical cloud is considerably different from that in magnetically supercritical clouds. In such a cloud, neither rotationally supported disk nor outflow appears. Thus, we found a different mode of the star formation which can explain very recent ALMA observations of protostars not associated with disk and outflow.

#### Acknowledgement

Simulations reported in this paper were performed by 2019 Koubo Kadai on Earth Simulator (NEC SX-ACE) at JAMSTEC.

#### References

- [1] Tsukamoto, Y., Machida, M. N., Susa, H., Nomura, H., and Inutsuka, S. "Early Evolution of Disk, Outflow, and Magnetic Field of Young Stellar Objects: Impact of Dust Model", *ApJ*, 896, 158, 2019
- [2] Hirota, T., Plambeck, R. L., Wright, M. C. H., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Kim, M. K., Burns, R. A., and Honma, M. "Magnetic Field Structure of Orion Source I", *ApJ*, 896, 157, 2019
- [3] Sai, J., Ohashi, N., Saigo, K., Matsumoto, T., Aso, Y., Takakuwa, S., Aikawa, Y., Kurose, I., Yen, H.-W., Tomisaka, K., Tomida, K., and Machida, M. N. "Disk Structure around the Class I Protostar L1489 IRS Revealed by ALMA: A Warped-disk System", *ApJ*, 893, 51, 2019
- [4] Machida, M. N. and Basu, S. "Different modes of star formation - II. Gas accretion phase of initially subcritical star-forming clouds", *MNRAS*, 494, 827-845, 2020
- [5] Machida, M. N., Hirano, S., and Kitta, H. "Misalignment of magnetic fields, outflows, and discs in star-forming clouds", *MNRAS*, 491, 2180-2197, 2020
- [6] Aso, Y., Hirano, N., Aikawa, Y., Machida, M. N., Ohashi, N., Saito, M., Takakuwa, S., Yen, H.-W., and Williams, J. P. "Protostellar Evolution in Serpens Main: Possible Origin of Disk-size Diversity", *ApJ*, 887, 209, 2019
- [7] Tokuda, K., Tachihara, K., Saigo, K., André, P., Miyamoto, Y., Zahorecz, S., Inutsuka, S., Matsumoto, T., Takashima, T., Machida, M. N., Tomida, K., Taniguchi, K., Fukui, Y., Kawamura, A., Tatematsu, K., Kandori, R., and Onishi, T. "A centrally concentrated sub-solar-mass starless core in the Taurus L1495 filamentary complex", *PASJ*, 71, 73, 2019
- [8] Riaz, B., Machida, M. N., and Stamatellos, D. "ALMA reveals a pseudo-disc in a proto-brown dwarf", *MNRAS*, 486, 4114-4129, 2019