

# 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, 原田直人\*1, 前田夏穂\*3

\*1九州大学 理学研究院, \*2東北大学 理学研究科, \*3神戸大学 理学研究科

非理想磁気流体シミュレーションを用いて大質量近接連星形成過程を調べた。高い回転エネルギーと低い熱エネルギーを持つ分子雲コアを初期条件として重力収縮の過程を計算した。高い回転エネルギーは巨大な円盤の形成を促進し、低い熱エネルギーは中心部への質量降着率を上昇させる。シミュレーションの結果、重力収縮の過程で巨大な円盤が分裂し原始連星が誕生した。また、磁気制動、アウトフロー、ジェットによる効率的な角運動量輸送によって連星間距離が 10 天文単位に程度に保たれる近接連星系が維持されることが分かった。原始連星系の各々の原始星からは 100km/s 以上の速度を持つジェットが駆動した、また周連星円盤からは 10km/s 程度の低速のアウトフローが駆動した。低速のアウトフローは時間変動せずほぼ定常であったのに対して、高速のジェットはその強度が激しく時間変動した。また、ジェットの駆動周期は連星の軌道周期と同期していることが分かった。このジェットの時間変動の要因として、連星の軌道運動による重力トルクと磁気トルク変化によって角運動量輸送効率が変わることが考えられる。近接連星系からのジェットは近年の ALMA 望遠鏡の観測結果とよく一致する。この研究によって近接連星形成の初期段階を解明することが出来た。

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

星の多くは連星として誕生することが分かっている。太陽型の主系列星の半数が連星系から成っている。また連星頻度は星の質量とともに増加し大質量星の場合の連星・多重星率はほぼ 100%であると考えられている。また、大質量星の場合、双子連星と呼ばれる等質量の星からなる連星系が多い。このような大質量連星はブラックホール連星に進化する。特に 1au 以下の近接大質量連星の場合、重力波で検出可能な大質量ブラックホール連星となることが期待される。そのため、近接連星形成過程を理解することは星形成分野のみならず重力波源天体の起源を理解する上でも重要である。星形成領域の若い星の連星率は非常に高い。そのため、近年は、連星周囲の円盤中での惑星形成過程の研究も行われている。この場合、惑星形成は連星を取り囲む周連星円盤中で起こる。そのため、連星系初期の周連星円盤の形成とその後の進化を理解する必要がある。

星は分子雲コアが収縮して誕生するが、観測から分子雲コアの収縮中に中心部分で分裂が起こって、原始連星が誕生することが分かっている。ガス雲の収縮と分裂の過程は非常に複雑なため、連星形成過程を理解するためには 3 次元数値シミュレーションが必要である。また、分裂には分子雲コアが保持している角運動量と磁場強度が関係している。分裂は回転によって起こるが、磁場は磁気制動やジェット、アウトフローという現象によって角運動量を輸送する働きをする。また、円盤が出来るような高密度領域では、磁場はオーム散逸や双極性拡散によって散逸する。そのため、3次元非理想磁気流体シミュレーションによって分子雲コアの収縮と収縮するコア中での分

裂から連星形成の過程を調べる必要がある。

これまでの連星形成の研究では、近接連星系の形成と進化を調べることは行われてこなかった (e. g., Kuruwita & Federrath 2019)。これは、近接連星は、1 天文単位以下の軌道長半径を持つが原始星の大きさが 0.01 天文単位程度である。そのため、原始星のサイズである 0.01 天文単位と 1 天文単位以内の連星の軌道運動を空間的に分解して計算を行う必要があるが、そのような高解像度の計算は多大な計算時間を要するため行われてこなかった。

この研究では、地球シミュレータを用いて、これまで行われなかった原始星を空間分解する高い空間解像度で連星形成のシミュレーションを行い、連星形成の初期進化段階を解明することを目的とする。また、近年の ALMA 望遠鏡の観測から近接連星系から駆動する 2 本の高速ジェットが確認されている (Hara et al. 2022)。この研究では、数値シミュレーションを用いて、近接原始連星の観測を再現しつつ原始連星系の形成と進化を解明することを目的とする。

## 2. 計算手法と初期条件

重力的に不安定な状態にあるガス球(ポナー・エバート球)を初期条件とする。連星は、母体となる分子雲コアの回転エネルギーが高い場合に誕生すると考えられる。一般に回転エネルギーは重力エネルギーで規格化された値を用いて表される。観測から分子雲コアの平均的な回転エネルギーは重力エネルギーの 2%程度と考えられており、単星形成のシミュレーションの初期条件として、この 2%という値がよく採用される。この研究では連星形成過程を調べるため重力エネルギーに対して 5%の回転エネルギーを分子雲コアに与えた。この値は平均値よりは高

いが観測から得られている回転エネルギーの上限よりは低い。また、磁場強度は、120 マイクロガウスを採用しており、観測される分子雲コアの平均的な値である。分子雲コアの質量は3.7 太陽質量、半径は5300 天文単位である。この初期条件から解散を開始、原始星形成後 400 年までのシミュレーションを行った。

計算は非理想磁気流体方程式を解いた。その際ガスの圧力は1次元計算から得られているパロトピック関係式を用いている。また、磁場の散逸係数は、密度と温度の関数として化学進化計算から得られたものを使用した。

数値計算にしようとした3次元非理想磁気流体多層格子法のシミュレーションコードは、我々が従来から使用してきたものを用いた。(i, j, k)=(128, 128, 128)のセルから成るグリッドを16段重ねて計算を行った。最も解像度の良いグリッドの幅は5天文単位、また、セルの幅は0.039天文単位であるため原始星の半径を空間的に分解することが可能である。

### 3. 結果

計算の結果、分子雲コアの収縮の過程で分裂が起こり、原始連星が誕生した。図1は原始連星形成後の赤道面上での連星軌道の中心に対する回転速度を連星系のケプラー速度で規格化したものを表示している。この図から赤色から紫色の領域はほぼケプラー回転速度を持っていることが分かる。この領域は周連星円盤に対応する。また、原始連星近傍の領域はケプラー回転速度よりも遅くガスが原始連星系に落下している領域である。周連星円盤は軸対称ではなく、渦状碗のような構造を持つ。この構造によっても角運動量は輸送されると考えられる。

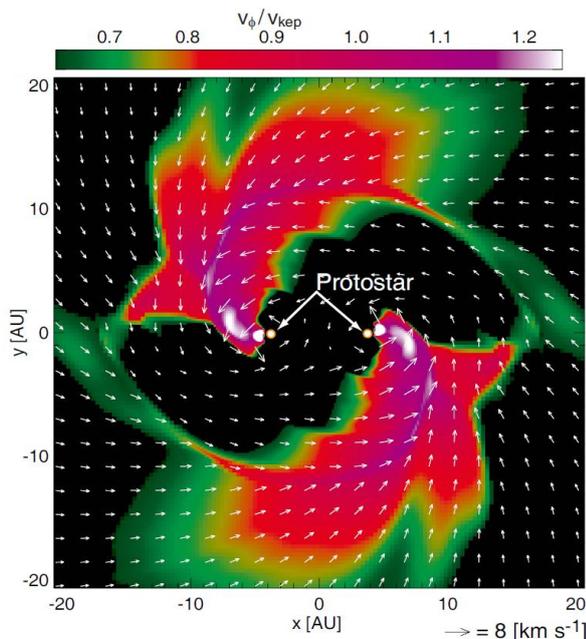


図1 赤道面のケプラー速度で規格化した回転速度分布。

図2は原始連星からのジェットとアウトフローをプロットしている。図2左図は原始連星近傍の密度と速度構造を示しており、各々の原始星連星からガスが噴出していることが分かる。また、ガス噴出により各々の原始星の上下方向はX字状のキャビティが生じている。各々の原始星から駆動するジェットの速度は100km/sを超えてお

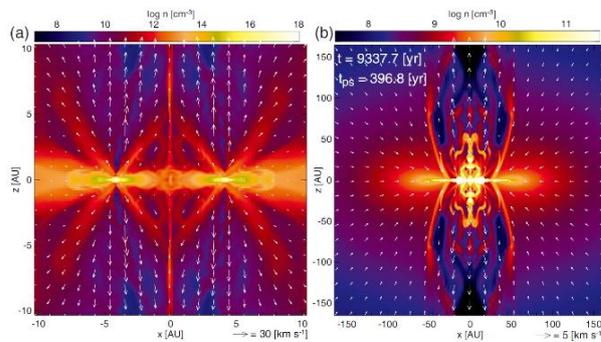


図2 原始連星形成後のy=0面上の密度(カラー)と速度(矢印)分布。左図は原始連星近傍領域、右図はより広い領域を示している。

り、観測される原始星ジェットの速度とほぼ同等である。また、各々の原始星は星周円盤を保持していることが分かる。この段階の星周円盤のサイズは2-5天文単位程度である。お互いの原始星の相互作用によって星周円盤の成長は阻害される。

この研究によって、初めて原始連星の各々の星から駆動する高速ジェットを再現することが出来た。また、図2右図はより大きなスケールの密度と速度構造を示している。より大きなスケールでは単一のアウトフローが駆動しているように見える。このアウトフローは周連星円盤から駆動する低速度のフローと各々の原始星から駆動する高速ジェットが起動運動によって捩じられて一つのフローになったものである。また、アウトフローの外側の円盤状の構造は擬円盤と呼ばれる磁場の効果によって形成したものである。

図3は原始連星系からのジェットとアウトフローの3次元構造を示している。中心に存在する赤い球状の領域が各々の原始星に対応する。各々の原始星の上下方向でガスの噴出が確認出来る。これがジェットに対応する。ジェットは原始連星の軌道運動により回転方向(半時計まわり)とは逆の方向にたなびいているのが分かる。このような傾向は近年のALMA望遠鏡の観測によっても確認されている。

ジェットの内側の青色の線は磁力線に対応する。ジェット内部で磁力線が強く巻き付いているのが分かる。ジェットとアウトフローの中間的な領域には周連星円盤が存在するがこの領域では磁場の散逸が起こるため、磁場が弱くフローが出現しない。そのため、磁場とガスがよく結合している原始星近傍と低密度領域である周連星円盤の外側領域のみからフローが出現する。中間領域では磁

場による角運動量輸送が抑制されるため、円盤(星周円盤や周連星円盤)が形成しやすい。

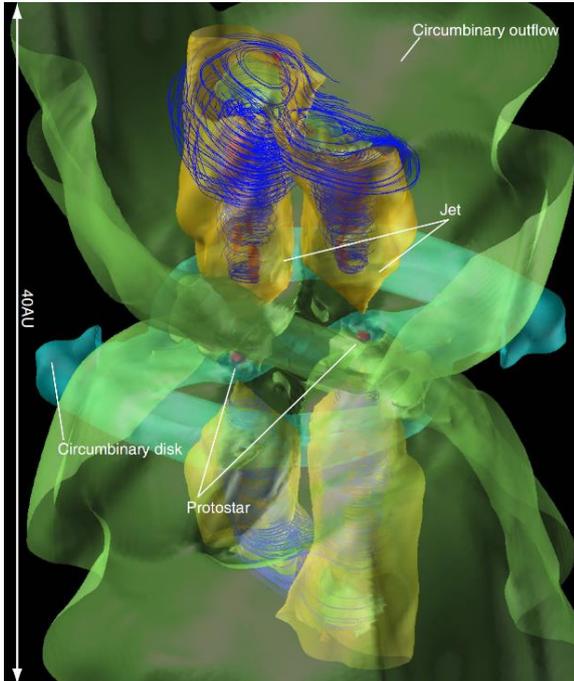


図 3 原始連星からのジェットとアウトフローの3次元構造。ジェット(Jet)とアウトフロー(Circuminary outflow)の等速度面と周連星円盤の等密度面(Circuminary disk)がプロットされている。また、原始星の等密度面(Protostar)が中心部に存在する。青色の流線は磁力線に対応する。全体のスケールは 40 天文単位。

原始連星の外側のリング構造が周連星円盤に対応しており、より開口角の広いフローは周連星円盤から直接駆動している。計算中、原始連星の軌道半径は1~30天文単位の間で激しく変動した。そのため、より大きなスケールでは各々のジェットが複雑に絡み合い図 2 に右図のように各々の星からのジェットとして観測することは困難であることが分かった。原始連星ジェットが空間的に分解できるのは、ジェットの速度と軌道周期を掛けて得られる長さスケールである。

ジェットの内側に見られる赤色の領域は、原始星から直接放出されたガス塊である。ガス塊は不連続に分布しており非常に放出されたことを意味している。

図 4 上図は、原始星質量、円盤質量、ジェット質量、軌道長半径の時間進化を示している。原始星質量は計算終了時に原始連星合計で 0.4 太陽質量であった。図からアウトフローの質量も原始星質量に等しいことが分かる。従って、落下してきたガスの半分程度はジェットとアウトフローによって放出されていることが分かる。また、軌道長半径は、時間と共に激しく振動している。これは、磁

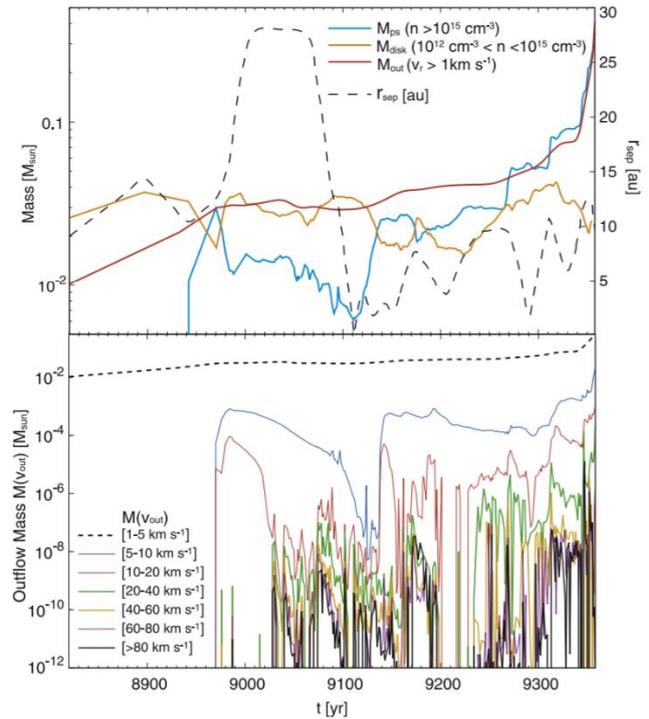


図 4 上図：原始星質量、円盤質量、アウトフロー質量、軌道長半径の時間進化。下図：表示された速度範囲のアウトフロー質量の時間進化。

気制動に加えて、ジェット、アウトフロー、重力トルクなどによって複雑に角運動量輸送が起こっていることを意味している。磁場が弱い場合には軌道は広がり続けるため、磁場による角運動量輸送によって近接連星が出来ることが分かる。

図 4 下図は、図中に表示された速度範囲にある放出されるガスの質量の時間進化をプロットしている。この図から低速のアウトフローは、ほぼ定常に出ていることが分かる。他方、高速ジェットによって放出される質量は時間とともに大きく変動している。これはジェットが非定常に出現していることを意味している。図 4 上図から分かるように連星の軌道長半径の進化は激しく時間進化する。ジェットは原始星近傍から駆動するため、軌道変化や連星による磁場構造の変化により質量降着の非定常になった結果、その過程で放出されるジェットの強度の時間と共に激しく振動していると考えられる。ジェットは、降着エネルギーの一部を磁気エネルギーと運動エネルギーに変換して駆動するため、急激な降着とジェット駆動はある程度同期している。実際、軌道長半径と高速ジェットの質量を比較すると、軌道長半径が狭まった時期にジェットが激しく噴出している。また、軌道長半径が大きい場合にはジェットの噴出はあまり起こらない。図 4 から分かるように、この計算では、原始連星系が誕生してから 400 年程度の時間積分を行っている。

#### 4. まとめと議論

3次元非理想磁気流体シミュレーションを用いて近接連星の形成過程を調べた。観測から連星は単一の分子雲コア内で誕生すると考えられている。これは観測される原始連星の連星間距離が分子雲コアのサイズよりも十分に小さいためである。他方、過去の数値シミュレーションでは、原始連星形成後に角運動量の大きいガスが後から落下してくるため連星間距離は時間と共に大きくなり近接連星を維持するのは困難であることが指摘されている。観測では、連星系の全体の1/3程度が連星間距離1天文以下の近接連星であることが分かっている。また、重力波源となる連星ブラックホールも近接大質量連星が進化した系だと考えられている。

これまでの連星形成のシミュレーションでは、各々の原始星は半径が1天文単位程度のシンクセルを用いて計算されていた。そのため1天文単位以下の連星系を空間的に分解することは出来なかった。また、磁場の影響を考慮しない場合、上記のように連星間距離は徐々に大きくなり遠隔連星になる。

この研究では、分子雲コアの状態から計算を開始し、シンクセルを使用せず原始星を空間分解してシミュレーションを実行した。また磁場とその散逸の効果を考慮した。その結果、磁場による角運動量輸送が効果的に働き連星間距離は時間と共に変化するが、単調に増加するというのではなく近接連星系を維持したまま進化可能であることが分かった。

近年ALMA望遠鏡によって近接連星からジェット駆動が観測されている。各々の原始星がジェットを噴出するため、2本のジェットが出現する。これまでのシミュレーションで連星からのジェットの計算出来た例は存在しない。我々は、初めて十分な空間分解能で原始連星ジェットを再現することに成功した。そのため、この研究から観測と無矛盾な連星形成シナリオを構築することが出来た。

一方、観測ではジェットの軸が平行でないケースも報告されている。これまで、そのようなジェットは乱流が強い環境で形成すると考えられてきた。しかし、強い乱流がある環境では実効的な角運動量が大きくなるため近接連星になることは困難である。また、乱流が強い場合にはジェットやアウトフローが駆動不可能であるという研究結果も存在する。

今回の我々のシミュレーションは理想的な初期条件の下で一例のみ計算を行った。その際、初期の磁場の向きと回転軸の向きは揃っていた。しかし、これまでの単星形成の研究で磁場の向きと回転軸の向きが異なっている場合には、ジェットやアウトフローの向きが空間スケールによって異なることを示した。そのため、原始連星系の場合に乱流が無い場合でもジェットの向きが異なる可能性がある。

次年度の研究では、初期条件を変えて何例か計算を行い、近接連星系とジェットの関係についての描像を理解することを目的として研究を行う。また、上記のように、この計算では原始連星系誕生から400年間のシミュレー

ションを行った。しかし、質量降着段階は1-10万年程度継続する。そのため、連星質量、連星間距離などの連星系のパラメータを決定するためには、さらなる長時間進化の計算が必要である。

#### 謝辞

本研究の数値計算は、令和2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] Machida, M. N. and Hosokawa, T. "Failed and delayed protostellar outflows with high-mass accretion rates", MNRAS, 499, 4490-4514.
- [2] Aso, Y. and Machida, M. N. "Testing Disk Identification Methods through Numerical Simulations of Protostellar Evolution", ApJ, 905,
- [3] Homma, T., Ohtsuki, K., Maeda, N., Suetsugu, R., Machida, M. N., and Tanigawa, T. "Delivery of Pebbles from the Protoplanetary Disk into Circumplanetary Disks", ApJ, 903, .
- [4] Hirano, S., Tsukamoto, Y., Basu, S., and Machida, M. N. "The Effect of Misalignment between the Rotation Axis and Magnetic Field on the Circumstellar Disk", ApJ, 898, .
- [5] Saiki, Y. and Machida, M. N. "Twin Jets and Close Binary Formation", ApJL, 897, .

# 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>, Shunta Koga<sup>\*1</sup>, Naoto Harada<sup>\*1</sup>, Natsuho Maeda<sup>\*3</sup>

\*1 Faculty of Science, Kyushu University, \*2 Faculty of Science, Tohoku University, \*3 Faculty of Science, Kobe University

Using non-ideal magnetohydrodynamics simulations, we investigated the formation of a massive close binary system. As the initial state, a gravitationally unstable cloud core is adopted, in which the core has a large rotational energy and a low thermal energy. The large rotational energy promotes a large disk formation and subsequent fragmentation, while the large thermal energy enhances the mass accretion rate onto the central region. In the collapsing cloud, fragmentation occurs and a proto-binary system appears. The high-velocity jet is driven by each protostar in the proto-binary system, while the low-velocity outflow is driven by the circum-binary disk. We could calculate the evolution of the proto-binary system for about 400yr after protostar formation, in which the protostellar radius is spatially resolved. Our results are well agreement with recent ALMA observations of proto-binary systems. This study can unveil the early formation phase of the close binary system.

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

## 1. Introduction

Stars are born in binary systems. A half of solar type stars are the member of binary systems. The binary frequency increases as the stellar mass increases. In addition, the binary frequency is about 100% for massive stars. When the separation of massive binary system is small, such a system evolves into a binary black hole system which can be detected as gravitational wave. Recently, the planet formation around the binary system has been investigated. The planet is considered to be formed in the circum-binary system. Thus, it is important for investing the formation process of the binary system. In this study, we investigate the evolution of the close binary system using three-dimensional resistive magnetohydrodynamics (MHD) nested grid code.

## 2. Numerical settings and initial condition

The Bonnor-Ebert density profile is adopted as the initial state. We impose a uniform magnetic field of 120 micro-Gauss and a rigid rotation, in which the core has 2% of the rotational energy to the gravitational energy. The cloud has a mass of 3.7 solar mass and radius of 5300 au.

We solved resistive magnetohydrodynamics equations, in which the barotropic equation of state was used. We prepared 16 levels of nested grids. Each grid composed of  $(i, j, k) = (128, 128, 128)$ . The size of the finest grid is 5au and the cell width is 0.039 au. Thus, we can spatially resolve the radius of protostars.

## 3. Results

In the gravitational collapsing cloud, fragmentation occurs and proto-binary system appears. Fig. 1 shows the distribution of the azimuthal velocity normalized by the Keplerian velocity. In the figure, the red and purple regions correspond to the circum-

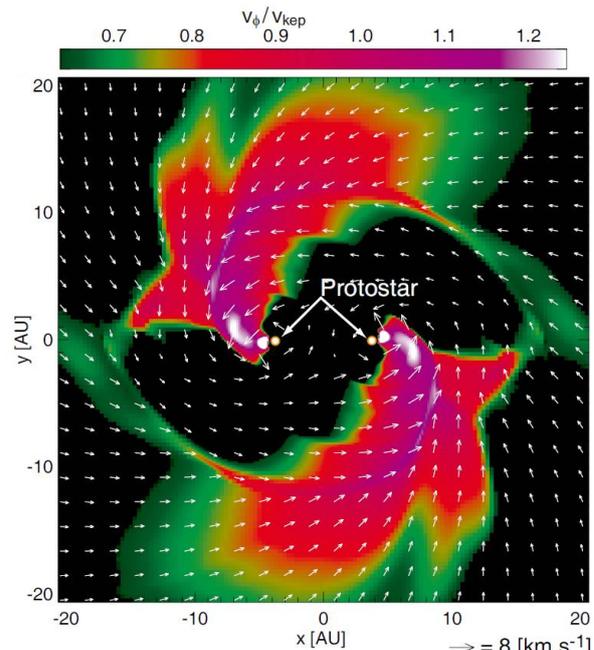


Fig. 1 Distribution of the azimuthal velocity normalized by the Keplerian velocity on the equatorial plane.

binary disk. In the black region, the gas falls onto the binary system. We can see a non-axisymmetric structure around the protostars.

Fig. 2 shows a three-dimensional view of the close binary system. The high-velocity jets associated with the protostars are swung back by the orbital motion of the binary system. The velocity of the jets exceeds 100km/s. The low-velocity outflow is driven by the circum-binary system. Thus, the low-velocity outflow encloses the high-velocity jets. Fig. 2 also shows that the

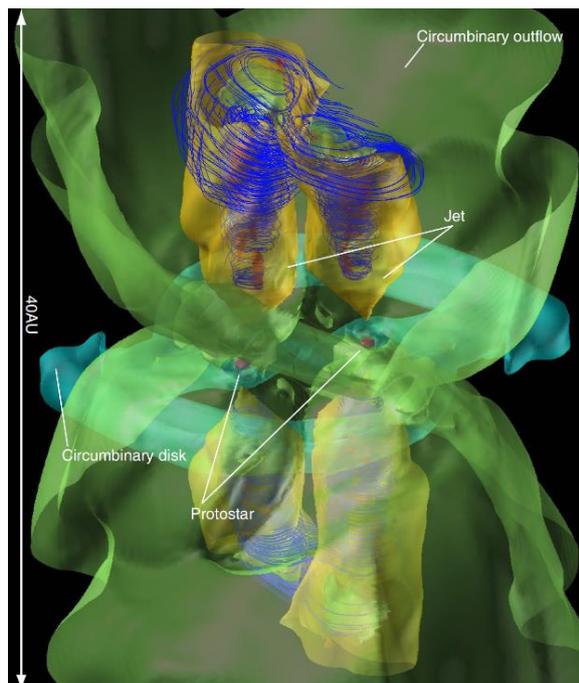


Fig. 2 Three-dimensional view of protobinary system. Jet, circum-binary outflow, circum-binary disk and protostar are plotted. The box size is 40 au.

magnetic field lines are strongly twisted within the jet. The binary orbital motion is very complicated which induce time-variable mass ejection. The red clumps within in the jet region correspond to the ejected mass from the surface of the protostar when a rapid mass accretion occurs.

#### 4. Summary and Discussion

Using three-dimensional non-ideal MHD nested grid simulation, we could reproduce the binary jet, circum-binary outflow and circum-binary disk confirmed in recent ALMA observations. In the simulation, the binary separation is shorter than 30au. The orbital angular momentum of the binary system is efficiently transported by the magnetic braking, jet and outflow. As a result, a close binary system maintains. With this simulation, we could unveil the early phase of the close binary formation. We can directly compare our simulation with recent ALMA observations of the early phase of the binary system. However, a massive infalling envelope still remains around the binary system and supplies the gas to the binary system. Thus, we need a further long-term simulation to determine the binary parameters such as mass, mass ratio and separation.

#### Acknowledgement

Simulations reported in this paper were performed by 2020

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.
- [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.