

適合格子細分化法を用いた原始連星の星周構造の解明

松本, 倫明 / MATSUMOTO, Tomoaki

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

10

(発行年 / Year)

2020-06-09

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05394

研究課題名(和文) 適合格子細分化法を用いた原始連星の星周構造の解明

研究課題名(英文) A numerical study of circumstellar structures around binary protostars with adaptive mesh refinement

研究代表者

松本 倫明 (Matsumoto, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60308004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原始連星の周囲のガス構造について数値シミュレーションで調べた。本研究では流体モデルとMHDモデルの2種類のモデルを調べた。AMR法を用いて連星の周囲を局所的に解像度で分解した。その結果、各々の星周円盤から伸びる渦状腕と周連星円盤に非対称構造が再現された。MHDモデルでは、新たに開発したBoris-HLLD法を採用し、従来計算が困難であったモデルを、現実的な計算時間で計算することができた。MHDモデルによると、磁場によって、周連星円盤から比較的低速なアウトフローが、ふたつの星周円盤から比較的高速なアウトフローが放出される。これらの構造は最近のALMAによる観測でも発見されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、AMRという高度なシミュレーション技術を用いることにより、原始連星の周囲の詳細な構造をこれまでに見えない高い解像度で再現する。このシミュレーション結果と最近ALMAの観測結果を比較することにより、原始連星のガスやダストの構造の力学過程を理解することができる。ALMAは国際プロジェクトで建設・運用している大規模な電波望遠鏡であり、これらの観測の物理的な解釈に貢献することは重要である。

研究成果の概要(英文)：We studied the gas structure around the protobinary stars by using numerical simulations with the AMR method to locally resolve the periphery of binary stars. In this study, we investigated two models, the fluid model, and the MHD model. The MHD model reproduces the spiral arms extending from each disk and asymmetric structure in the circumstellar disk. The newly developed Boris-HLLD method allows us to compute the MHD model in a feasible time. The magnetic field causes relatively a slow outflow from the circumstellar disk and relatively fast outflows from the two circumstellar disks. Recent ALMA observations have also discovered these structures.

研究分野：理論天文学

キーワード：星形成 連星系 原始星 星周円盤 周連星円盤 数値シミュレーション MHD AMR

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽程度の質量を持つ恒星の過半数は連星系に属し、若い小質量星の多くも連星系に属していることが観測により指摘されている (Reipurth et al. 2014)。したがって、連星系の形成は星形成において主要なモードであると考えられている。つまり連星系の形成は星形成の分野において主要な研究課題である。

(2) 連星系の形成は単独星の形成と比べて複雑である。連星系の大雑把な形成シナリオによると、① 分子雲コアが重力収縮の過程で複数の分裂片に分裂し、② 各々の分裂片にガスが降着して原始連星 (または原始多重星) が形成すると考えられている。分裂の過程では複数の理論的なシナリオが提唱されており、連星系形成のシナリオは理論的には未解明の問題が多く残されている。一方で ALMA 望遠鏡をはじめとする最近の高分解能観測によって、これらの進化段階と考えられる天体が捉えられはじめた (たとえば Tokuda et al. 2014; Takakuwa et al. 2014)。現在はまさに理論と観測が両輪を成して連星系形成を解明する好機である。

(3) 星形成において磁場は重要な役割を果たすと考えられている。単独星形成では磁場を考慮した理論的な研究は多数存在する。これに対し、連星系形成では磁場の理解はあまり進んでいない。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、若い星の星周構造を数値シミュレーションを用いて調べる。本研究ではとくに原始連星系に焦点を当てる。従来我々の研究グループが行ってきたシミュレーションの結果を解析し、連星系に特徴的な構造の起源を探る。周連星円盤をはじめとする星周構造がどのような物理過程の結果なのかを明らかにする。

(2) シミュレーションで得られたデータを、ALMA をはじめとする観測結果と比較する。これにより、観測された天体の物理的な解釈を行う。

(3) これまでの原始連星系の流体モデルを、磁場を考慮した MHD モデルに拡張する。図 1 に示すように、従来の流体モデルで再現された星周円盤と周連星円盤に加えて、MHD モデルではアウトフローや磁気回転不安定 (MRI) にともなう質量降着の増加が再現されると期待される。

3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーションには研究代表者が開発した 3 次元適合格子細分化 (AMR) 法コード SFUMATO を用いる (Matsumoto 2007)。AMR 法は解像度が異なる格子を階層的に配置する方法で、本研究では連星や周連星円盤を選択的に細かい格子で覆い、局所的に高解像度を得る。本研究では連星の軌道を固定しているので、動的に格子を張り替えるのではなく、あらかじめ決められた場所に静的に格子を配置した (Static mesh refinement; SMR)。

(2) ALMA を用いた観測との比較では、連携研究者である高桑繁久 (鹿児島大学教授) と西合一矢 (国立天文台特任助教) とともに、数値シミュレーション結果に観測的可視化を施し、実際の観測結果と比較した。

(3) 流体モデルに磁場を考慮して MHD モデルに拡張した。MHD スキームには後述する Boris-HLLD

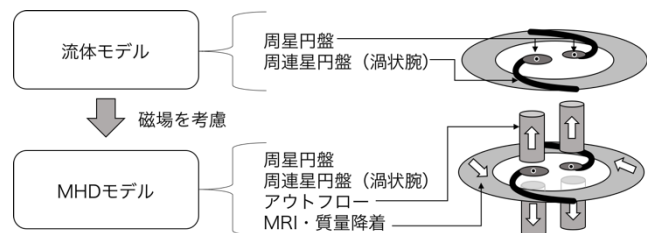


図 1 流体モデルから MHD モデルへの拡張の模式図。流体モデルでは星周円盤・周連星円盤・渦状腕が再現され、MHD モデルではこれらに加えてアウトフローや磁気回転不安定 (MRI) にともなう質量降着の増加の再現が期待される。

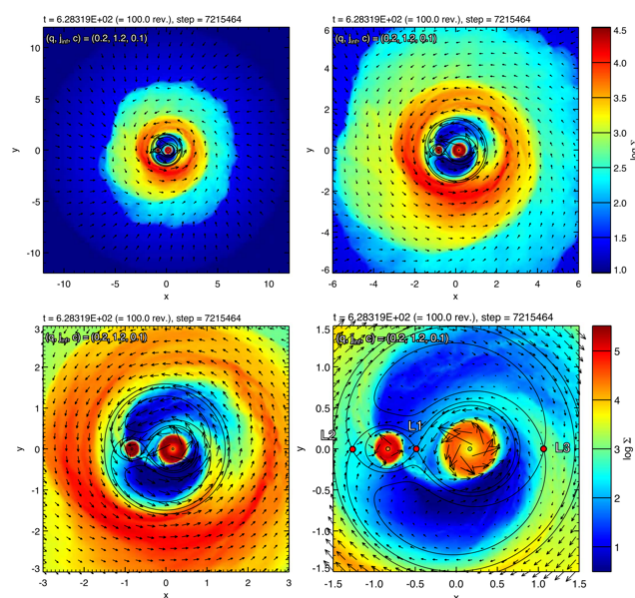


図 2 原始連星の星周構造の 3 次元数値シミュレーション。色は z 方向から見た面密度の対数を、矢印は密度で重みをつけた速度を表す。右側が主星、左側が伴星である。連星の周囲に黒い曲線でロッシュポテンシャルを表示した。出典: Matsumoto, Saigo, & Takakuwa (2019)

(3) 流体モデルに磁場を考慮して MHD モデルに拡張した。MHD スキームには後述する Boris-HLLD

法を用いた。この方法を採用することにより、磁場が極端に強い場合にも大きな時間ステップを取ることができる。また計算領域を鉛直方向(z方向)に拡張し、アウトフローが伸びる様子を計算できるようにした。

4. 研究成果

(1) 流体モデルのうち代表的なモデルを図 2 に示す。多くのモデルではこのモデルのように①中心部にギャップを持つ周連星円盤が形成、②各々の連星の周囲に星周円盤が形成、③星周円盤から渦状腕が形成する。渦状腕は連星による重力トルクの結果であり、星周円盤の近くではガスは渦状腕に沿って落下し、星周円盤から遠い周連星円盤では渦状腕にそって膨張運動が確認された。

(2) 周連星円盤に非対称性が認められた(図 2)。この非対称性を詳しく調べるために、非対称パターンと同期して回転する座標系において、密度と速度分布を長時間平均した。その結果、周連星円盤のバンプの周りに渦が確認された(図 3)。この渦は連星からの重力トルクによって励起され続けられ、ロスビー波不安定のように密度に非対称性を生むと考えられる。また、非対称パターンの回転周期は連星の回転周期と 4:1 の整数関係にあり、連星の軌道運動と周連星円盤の共鳴であることが示唆される。

(3) 質量降着についても調べた。ガスが主星と伴星のどちらに多く降り積もるのか、質量比 (= 伴星の質量/主星の質量) は増加するのか減少するのか、という問題は長年論争があった。本研究の多くのモデルでは伴星は主星よりも高い質量降着率を持つ。極端な問題設定をした場合を除き、全てのモデルは質量比が増加する(1 に近づく)方向に進化した(例えば図 5)。

(4) 上記のモデルを ALMA の観測結果と比較した。原始連星 L1551 IRS5 とパラメータを合わせてモデルを構築し、シミュレーション結果に観測的視覚化を施して観測結果と比較した。その結果、L1551 IRS5 の周連星円盤に見られる特徴的な構造をシミュレーションと比較することにより、その力学構造を理解することができた。成果は論文投稿中である。

(5) 連星モデルを、磁場を考慮した MHD モデルに拡張するにあたり、新しいスキーム Boris-HLLD 法を開発した(Matsumoto, Miyoshi, & Takasao 2019)。従来の MHD シミュレーションでは、極端に強い磁場や低い密度が計算領域の一部にでも現れた場合、アルフヴェン速度が大きくなり、時間ステップが小さくなって計算が進まなくなるという困難があった。新しいスキームである Boris-HLLD 法を採用すると、光速を人為的に低下させることによってアルフヴェン速度も低下させ、比較的長い時間ステップを取ることができる。したがって、現実的な計算時間でシミュレーション

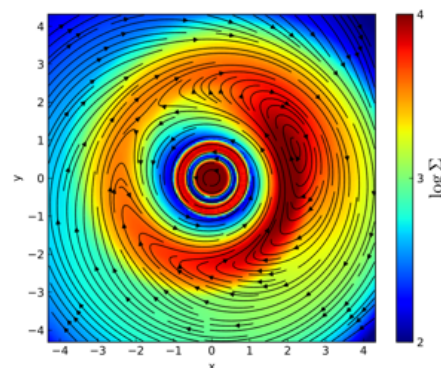


図 3 周連星円盤の非対称パターンと同期して回転する座標系で時間平均した構造。色は面密度の対数、流線は密度で重みをつけた速度を表す。周連星円盤は右側ほど濃い非対称性が認められる。高密度の周りに渦が生成する。出典: Matsumoto, Saigo, & Takakuwa (2019)

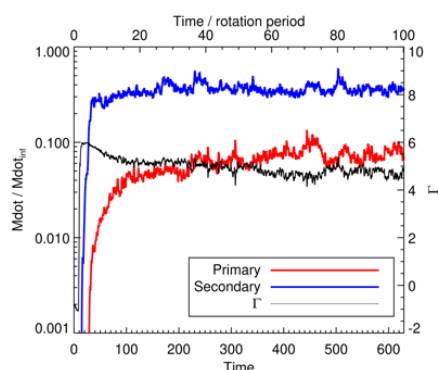


図 5 主星(赤)と伴星(青)の質量降着率の変化。黒線の Γ は質量比 (= 伴星の質量/主星の質量) の進化の指標で、 Γ が正の場合、質量比は増加する方向に進化する。出典: Matsumoto, Saigo, & Takakuwa (2019)

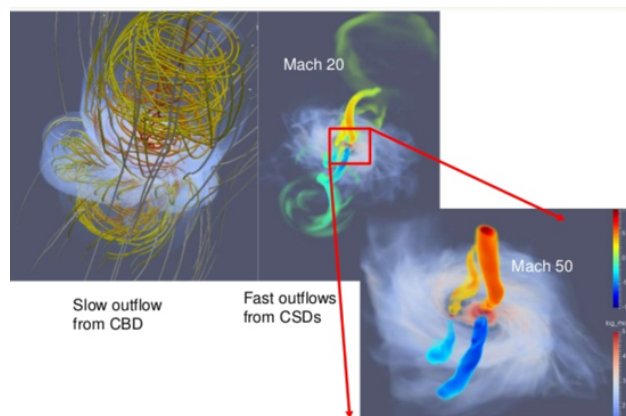


図 4 連星の MHD モデルの結果。周連星円盤(CBD)から遅いアウトフローが放出し、星周円盤(CSD)から速いアウトフローが放出される。速いアウトフローは螺旋状の構造を持つ。周連星円盤には磁気回転不安定(MRI)が発達する。出典: Matsumoto & Stone in preparation

ュレーションを遂行することができる。Boris-HLLD 法は、従来知られていた Boris の方法と現代のデファクトスタンダードである HLLD 法を融合した方法であり、今後多くの分野での利用が期待される。本研究では Boris-HLLD 法の定式化だけではなく、安定条件についても数値的に調べた。また多くのテスト計算を実施してコードの堅牢性を確認した。

(6) 連星の MHD モデルの結果を図 4 に示す。流体モデルと同様に、周連星円盤と星周円盤が形成した。これらに加えて MHD モデルでは 3 個のアウトフローが形成した。第 1 のアウトフローは周連星円盤から放出されるもので、比較的低速な流れである。第 2 第 3 のアウトフローは連星各々の星周円盤から放出されるもので、比較的高速な流れである。第 2 第 3 のアウトフローは連星の軌道運動のために、螺旋状の構造を呈する。また周連星円盤に磁気回転不安定 (MRI) が発達し、角運動量の輸送が起きていることが確認された。MHD モデルで再現された磁場に起因した特徴的な構造は、最近の ALMA の観測でも発見されており、今後は観測との比較を行う予定である。

<引用文献>

- ① Reipurth, B., Clarke, C. J., Boss, A. P., et al. 2014, Protostars and Planets VI, 267
- ② Tokuda, K., Onishi, T., Saigo, K., et al. 2014, ApJL, 789, L4
- ③ Takakuwa, S., Saito, M., Saigo, K., et al. 2014, ApJ, 796, 1
- ④ Matsumoto, T. 2007, PASJ, 59, 905
- ⑤ Matsumoto, T., Saigo, K., & Takakuwa, S. 2019, ApJ, 871, 36
- ⑥ Matsumoto, T., Miyoshi, T., & Takasao, S. 2019, ApJ, 874, 37

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sai Jinshi, Ohashi Nagayoshi, Saigo Kazuya, Matsumoto Tomoaki, Aso Yusuke, Takakuwa Shigehisa, Aikawa Yuri, Kurose Ippei, Yen Hsi-Wei, Tomisaka Kohji, Tomida Kengo, Machida Masahiro N.	4. 巻 893
2. 論文標題 Disk Structure around the Class I Protostar L1489 IRS Revealed by ALMA: A Warped-disk System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 51, 21 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kandori Ryo, Tamura Motohide, Saito Masao, Tomisaka Kohji, Matsumoto Tomoaki, Tazaki Ryo, Nagata Tetsuya, Kusakabe Nobuhiko, Nakajima Yasushi, Kwon Jungmi, Nagayama Takahiro, Tatematsu Ken'ichi	4. 巻 892
2. 論文標題 Distortion of Magnetic Fields in BHR 71	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 128, 7 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7b68	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugimura Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki, Hosokawa Takashi, Hirano Shingo, Omukai Kazuyuki	4. 巻 892
2. 論文標題 The Birth of a Massive First-star Binary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L14, 5 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab7d37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kandori Ryo, Saito Masao, Tamura Motohide, Tomisaka Kohji, Matsumoto Tomoaki, Tazaki Ryo, Nagata Tetsuya, Kusakabe Nobuhiko, Nakajima Yasushi, Kwon Jungmi, Nagayama Takahiro, Tatematsu Ken'ichi	4. 巻 891
2. 論文標題 Distortion of Magnetic Fields in Barnard 335	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 55, 13 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6f07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kandori Ryo, Tamura Motohide, Saito Masao, Tomisaka Kohji, Matsumoto Tomoaki, Kusakabe Nobuhiko, Kwon Jungmi, Nagayama Takahiro, Nagata Tetsuya, Tazaki Ryo, Tatematsu Ken'ichi	4. 巻 72
2. 論文標題 Distortion of magnetic fields in Barnard 68	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id 8, 17 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kandori Ryo, Tamura Motohide, Saito Masao, Tomisaka Kohji, Matsumoto Tomoaki, Tazaki Ryo, Nagata Tetsuya, Kusakabe Nobuhiko, Nakajima Yasushi, Kwon Jungmi, Nagayama Takahiro, Tatematsu Ken'ichi	4. 巻 890
2. 論文標題 Distortion of Magnetic Fields in the Dense Core CB81 (L1774, Pipe 42) in the Pipe Nebula	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 14, 16 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab67c5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kandori Ryo, Tomisaka Kohji, Saito Masao, Tamura Motohide, Matsumoto Tomoaki, Tazaki Ryo, Nagata Tetsuya, Kusakabe Nobuhiko, Nakajima Yasushi, Kwon Jungmi, Nagayama Takahiro, Tatematsu Ken'ichi	4. 巻 888
2. 論文標題 Distortion of Magnetic Fields in a Starless Core. VI. Application of Flux Freezing Model and Core Formation of FeSt 12457	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 120, 18 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokuda Kazuki, Tachihara Kengo, Saigo Kazuya, Andre Phillippe, Miyamoto Yosuke, Zahorecz Sarolta, Inutsuka Shu-ichiro, Matsumoto Tomoaki, Takashima Tatsuyuki, Machida Masahiro N, Tomida Kengo, Taniguchi Kotomi, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko, Tatematsu Ken'ichi, Kandori Ryo, Onishi Toshikazu	4. 巻 71
2. 論文標題 A centrally concentrated sub-solar-mass starless core in the Taurus L1495 filamentary complex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id 73, 13 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsumoto, Tomoaki; Miyoshi, Takahiro; Takasao, Shinsuke	4. 巻 874
2. 論文標題 A New HLLD Riemann Solver with Boris Correction for Reducing Alfven Speed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 37, 15 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.3847/1538-4357/ab05cb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsumoto Tomoaki, Saigo Kazuya, Takakuwa Shigehisa	4. 巻 871
2. 論文標題 Structure of a Protobinary System: An Asymmetric Circumbinary Disk and Spiral Arms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 36, 17 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf6ab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kandori Ryo, Nagata Tetsuya, Tazaki Ryo, Tamura Motohide, Saito Masao, Tomisaka Kohji, Matsumoto Tomoaki, Kusakabe Nobuhiko, Nakajima Yasushi, Kwon Jungmi, Nagayama Takahiro, Tatematsu Ken'ichi	4. 巻 868
2. 論文標題 Distortion of Magnetic Fields in a Starless Core. V. Near-infrared and Submillimeter Polarization in FeSt 1-457	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 94, 6 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokuda Kazuki, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Matsumoto Tomoaki, Inoue Tsuyoshi, Inutsuka Shu-ichiro, Fukui Yasuo, Machida Masahiro N., Tomida Kengo, Hosokawa Takashi, Kawamura Akiko, Tachihara Kengo	4. 巻 862
2. 論文標題 Warm CO Gas Generated by Possible Turbulent Shocks in a Low-mass Star-forming Dense Core in Taurus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id 8, 14 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac898	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsumoto Tomoaki, Machida Masahiro N., Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 839
2. 論文標題 Circumstellar Disks and Outflows in Turbulent Molecular Cloud Cores: Possible Formation Mechanism for Misaligned Systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 69 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa6a1c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsumoto Tomoaki, Tokuda Kazuki, Onishi Toshikazu, Inutsuka Shu-ichiro, Saigo Kazuya, Takakuwa Shigehisa	4. 巻 837
2. 論文標題 Theoretical Models of Protostellar Binary and Multiple Systems with AMR Simulations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 id 012009, 8 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1088/1742-6596/837/1/012009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sugimura Kazuyuki, Mizuno Yurina, Matsumoto Tomoaki, Omukai Kazuyuki	4. 巻 469
2. 論文標題 Fates of the dense cores formed by fragmentation of filaments: do they fragment again or not?	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4022 ~ 4033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokuda Kazuki, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Hosokawa Takashi, Matsumoto Tomoaki, Inutsuka Shu-ichiro, Machida Masahiro N., Tomida Kengo, Kunitomo Masanobu, Kawamura Akiko, Fukui Yasuo, Tachihara Kengo	4. 巻 849
2. 論文標題 A Detached Protostellar Disk around a $\sim 0.2 M_{\text{sun}}$ Protostar in a Possible Site of a Multiple Star Formation in a Dynamical Environment in Taurus	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 101, 7 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8e9e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yen Hsi-Wei, Takakuwa Shigehisa, Chu You-Hua, Hirano Naomi, Ho Paul T. P., Kanagawa Kazuhiro D., Lee Chin-Fei, Liu Hanyu Baobab, Liu Sheng-Yuan, Matsumoto Tomoaki, Matsushita Satoki, Muto Takayuki, Saigo Kazuya, Tang Ya-Wen, Trejo Alfonso, Wu Chun-Ju	4. 巻 608
2. 論文標題 1000 au exterior arcs connected to the protoplanetary disk around HL Tauri	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 id.A134, 18 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730894	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimoikura Tomomi, Dobashi Kazuhito, Nakamura Fumitaka, Matsumoto Tomoaki, Hirota Tomoya	4. 巻 855
2. 論文標題 A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 45, 28 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaaccd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Tomoaki Matsumoto
2. 発表標題 Boris-HLLD: a new MHD Riemann solver for reducing Alfven speed
3. 学会等名 ASTRONUM 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本倫明
2. 発表標題 周連星円盤における磁場の効果: MRI と三つのアウトフロー
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoaki Matsumoto
2. 発表標題 Circumstellar Disks and Outflows in Turbulent Molecular Cloud Cores: Possible Formation Mechanism for Misaligned Systems
3. 学会等名 IAU 30 GA, FM4 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本倫明(法政大学), 崔仁士(東京大学), 西合一矢, 大橋永芳(国立天文台)
2. 発表標題 角運動量の非定常な降着によるワーブ円盤の形成
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ストーン ジェームズ (Stone James)	プリンストン大学・宇宙物理学科・教授	2019年7月に所属がプリンストン大学からIASに異動
連携研究者	高桑 繁久 (Takakuwa Shigehisa) (50777555)	鹿児島大学・理工学域理学系・教授 (17701)	
連携研究者	西合 一矢 (Saigo Kazuya) (30399290)	国立天文台・アルマプロジェクト・特任助教 (62616)	