

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H05998

研究課題名（和文）大規模マルチスケールシミュレーションによる星初期質量関数の起源の探求

研究課題名（英文）Exploration of the origin of the initial mass function using multi-scale simulations

研究代表者

富田 賢吾 (Tomida, Kengo)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70772367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 22,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では可能な限り原理的な数値シミュレーションにより星形成過程の普遍性と多様性の起源を調べた。分子雲形成過程の磁気流体計算を行い、形成される分子雲及び高密度な分子雲コアが環境要素に依らず普遍的な性質を持つことを明らかにした。これは星の初期質量関数などの普遍的性質が分子雲形成過程の段階で既に埋め込まれていることを示唆する重要な結果である。また、原始惑星系円盤形成の長時間シミュレーションを行い、原始惑星系円盤が大質量であり、星形成過程の初期から惑星形成が可能であることを示唆した。また、本研究で必要となる多様な物理過程を含むシミュレーションコードAthena++を国際協力で開発し公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星は宇宙の最も基本的な構成要素であり、その形成過程を理解することはより大きなスケールの銀河やより小さなスケールの惑星形成過程を理解するための基礎となる。本研究では星形成の初期条件である分子雲から、分子雲コア、そして形成される原始惑星系円盤に至るスケールを横断した研究を行った。そのため本研究は宇宙物理学の様々な分野に波及する大きな学術的意義がある。また、本研究で開発した公開シミュレーションコードAthena++は多様な物理過程を含むため幅広い問題に応用可能であり、本研究に留まらない幅広い分野で実際に利用されている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have studied star formation processes focusing on their universality and diversity. Starting from the formation of molecular clouds which are the initial conditions of star formation processes, we have investigated the processes from the first principle as much as possible. We have revealed that formed molecular clouds and dense molecular cloud cores have universal properties regardless of initial conditions. Our results indicate that the universal properties of stars such as the initial mass function is already imprinted in molecular clouds. We also performed long-term simulations of protoplanetary disk formation, and showed that the disk tends to be massive. This indicates that planet formation is already possible in the early phase of star formation.

We have developed the Athena++ MHD simulation code in international collaboration. This code is publicly distributed online and includes various physical processes needed for this project such as MHD and self-gravity.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：星形成 磁気流体力学 数値シミュレーション 分子雲 原始惑星系円盤

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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を理解する上で本質的に重要である。特に星の初期質量分布関数(IMF)は銀河・宇宙全体の進化を決定する上で最も重要な情報であり、多くの星形成領域でよく似た分布をしていることが知られている(e.g. Salpeter 1955, Chabrier 2003 他)。この事実は IMF の起源が何らかの普遍的な物理過程によることを示唆するが、その起源はまだ完全には明らかになっていない。一方小さいスケールでは、近年の観測により多数の系外惑星系の存在とその驚くべき多様性が明らかになった。我々自身の太陽系を含むこれらの惑星系の起源と進化を理解するには、その舞台となる原始惑星形成円盤の形成、即ち星形成過程について深い理解が求められる。これらの一見両極端に見える問題は実は深く関係しており、統合的な研究が必要である。

これまでの電波望遠鏡や Herschel 宇宙望遠鏡による観測から、IMF が個々の星形成過程の初期条件に対応する分子雲コアの質量分布関数 (CMF) と類似していることが知られている。この事実は、素朴には各分子雲コア質量の一定の割合 (星形成効率) が星に転換されると解釈することができる。しかしこのような単純な 1 : 1 対応が実現しているかは自明ではなく、星形成効率の決定機構も十分には理解されていない。星形成効率は磁場によって駆動されるアウトフローや、大質量星の場合は輻射によるフィードバックで制限されていると考えられている。これらのフィードバックの強さは大スケールの分子雲から継承された初期条件、即ち母体分子雲コアの質量や磁場、乱流・回転等に依存している。このため多様な物理過程を含む、大スケールから小スケールまでを統合的に扱う高度な理論モデルが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、多様な物理過程を含む大規模磁気流体シミュレーションコードを開発し、これを用いて母体分子雲の形成過程からはじめて分子雲コア・原始星が形成される過程を可能な限り第一原理的な立場からシミュレーションし、IMF に見られる星形成過程の普遍性や多様性の起源を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

星形成過程の数値シミュレーションには磁気流体力学・自己重力・輻射輸送・化学反応など多数の物理過程をサポートする高度な数値シミュレーションコードが必要である。本研究ではまず代表者がこれまで国際協力で開発してきた Athena++コードを拡張し、大規模並列に対応した自己重力ソルバや輻射冷却モジュール、原子ガスから分子ガスへの転移を模擬するのに必要な化学反応モジュールなどを開発する。

分子雲のスケールが 10-100pc 程度であるのに対し、星形成過程の初期条件である分子雲コアは 0.01-0.1pc 程度、形成される原始星及び原始惑星系円盤は 100AU 以下であるため、この過程を一つのシミュレーションで扱うことは極めて困難である。そこで本研究ではこれを2段階に分割する。大スケールでは、星形成過程の最初期にあたる分子雲の形成過程からはじめた星形成のシミュレーションを行う。分子雲は銀河内の星間ガスが衝撃波などによって圧縮・冷却されることで形成されることが知られている。本研究ではシミュレーション領域の左右から高速ガスを衝突させることでこの過程を模擬した高分解能シミュレーションを行う。衝撃波で圧縮されたガスは熱的に不安定であり、急速に冷却されたガスは圧力勾配によって自然に乱流的な分子雲を形成する。

また小スケールの研究では、分子雲コアの重力収縮によって原始星や原始惑星系円盤が形成される過程の高分解能磁気流体シミュレーションを行う。低質量星では磁場によって駆動されるアウトフロー、大質量星では輻射によって駆動されるアウトフローが星に変換される質量を制限すると考えられている。このシミュレーションにより分子雲コアスケールの星形成効率や、原始惑星系円盤の形成・成長過程を調べる。さらにこれらの結果をもとにして、ALMA 望遠鏡などによる観測との比較も行う。

最終的には、大スケールのシミュレーションで得られた分子雲コアを初期条件として、原始惑星系円盤スケールの高分解能ズームインシミュレーションを行い、現実的な形成環境を反映した原始惑星系円盤の形成過程や星形成効率について調べる。これにより大スケールと小スケールを接続し、全体的に統合的な理論モデルを構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) コード開発

Athena++コードは Princeton 大学・Princeton 高等研究所を中心とする国際協力で開発している宇宙物理学向けの公開磁気流体シミュレーションコードである。我々はこのコードの開発に中心的役割を果たしており、Adaptive Mesh Refinement や TaskList による動的な並列化、Multigrid 法に基づく高速な自己重力ソルバなどの基幹機能を開発した。磁気流体部は

Oakforest-PACS や富岳などを用いた十萬スレッド以上の大規模並列計算でも 90%の並列化効率を維持する高性能を実現した。また、特に本研究において重要となる Adaptive Mesh Refinement に対応した自己重力ソルバも、高速フーリエ変換を用いた従来のソルバよりも高い性能を実現した (図1)。

Athena++全体についての論文を Stone et al. 2020, ApJS, 249, 4, Multigrid 法に基づく新しい自己重力ソルバに関する論文を Tomida & Stone 2023, ApJS, 266, 7 として出版した。また本コードのユーザー・開発者ミーティングを 2019 年に Las Vegas で開催した(更に第二回を 2023 年に New York で開催)。更に、本コードを用いた流体シミュレーションの学校を国立天文台 CfCA において計 4 回 (2017, 2018, 2021, 2022)、中国上海天文台、インド・ハイデラバードにて各 1 回開催した。また本コードは HPCI ソフトウェア賞開発部門奨励賞を受賞した。

## (2) 分子雲形成シミュレーション

衝突流による分子雲形成過程について、まず自己重力なしの高分解能磁気流体シミュレーションを行った。この研究では衝突流と磁場の方向の関係に注目して調べ、磁場と衝突流のなす角が大きい程分子雲の形成効率が低下することを明らかにした (Iwasaki et al. 2019, ApJ, 873, 6)。また、磁場のない場合について分子雲形成シミュレーションを幅広いパラメータについて行い、シミュレーション結果が収束するための分解能の要件や、分子雲中の乱流の性質について詳細な解析を行った (Kobayashi et al. 2020, ApJ, 905, 90, Kobayashi et al. 2022, ApJ, 930, 76)。

次に、自己重力を取り入れた高分解能シミュレーションを行い、分子雲形成環境と形成される分子雲および分子雲コアの性質の関係について調べた。その結果、衝突流の速度や磁場等のパラメータに依らず、形成される分子雲の密度と磁場と間に普遍的関係が成立していることを見出した。この関係は我々のシミュレーションのみならず異なる設定・コードで行われた他の研究でも成立していることもわかった (図2)。更に、形成された分子雲コアの熱・乱流・磁場・重力エネルギーの間に環境に依存しない普遍的なスケーリング関係が成立していることを明らかにした (図3)。これらの結果は星形成の普遍性が分子雲コア形成の段階で既に埋め込まれていることを示唆する重要な結果である。

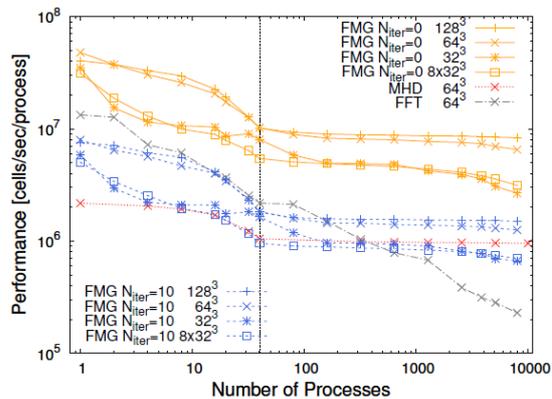


図1: Multigrid 法に基づく自己重力ソルバの弱スケーリング性能。従来の FFT による自己重力ソルバ (灰色) や磁気流体部 (赤) よりも高い性能を実現した。

(C) Hennebelle et al. (2008) (M) Inoue et al. (2017)  
 (C) Banerjee et al. (2009) (G) Paduan et al. (2016)  
 (C) This work model  $\Theta_c 2V5$  (G) Girichidis et al. (2018)  
 (M) Inoue & Fukui (2013) (G) Hennebelle (2018)

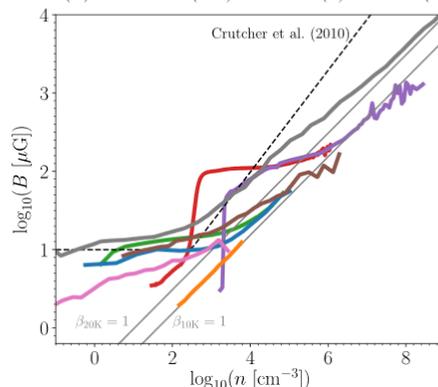


図2: 分子雲の密度と磁場の関係。高密度ではプラズマ  $\beta$  一定に収束していく。

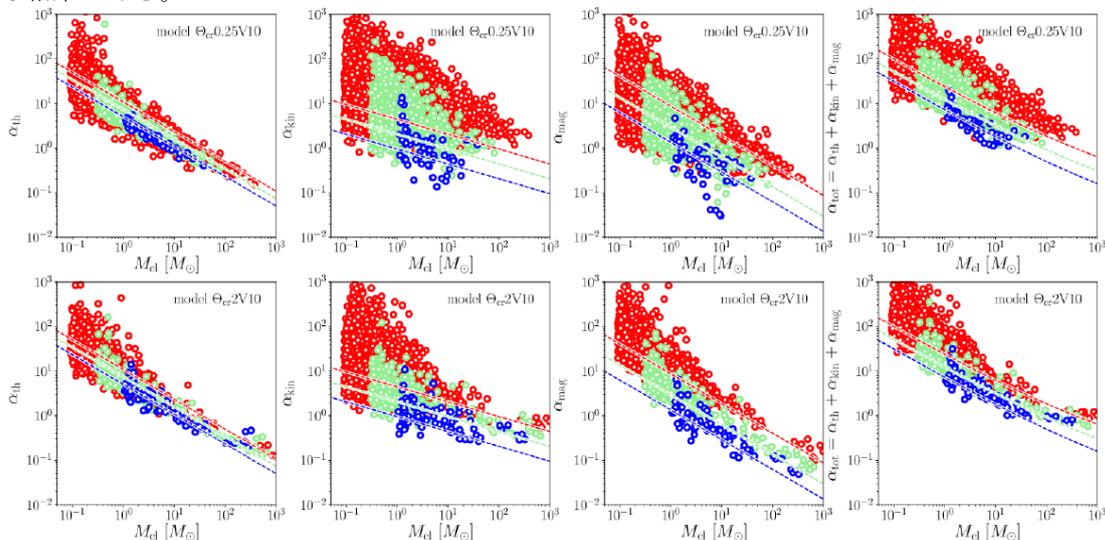


図3: 形成された分子雲コアの性質と質量の関係。左から熱・運動・磁場・全エネルギーと重力エネルギーの比。上下パネルは異なる衝突流の結果であり、異なる色は分子雲コアを同定する密度を変えた結果 (赤: 低、青: 高) を示す。全て普遍的なスケーリング則 (破線) に従う。

### (3) 原始星・原始惑星系円盤形成シミュレーション

まず、理想的な環境での原始星・原始惑星系円盤の形成過程を調べるため、回転と磁場を持つ Bonnor-Ebert 球の重力収縮を初期条件とした非理想磁気流体シミュレーションを行った。長時間シミュレーションを可能とするために、中心星をシンクパーティクルと呼ばれるサブグリッドモデルで置き換えて計算を行った。星形成過程の初期、あるいは外側の比較的低密度な領域では磁場によって角運動量が輸送されるが、中心付近の高密度領域では電離度が低下するために非理想磁気流体効果が強く働いて磁場による角運動量輸送が抑制される。その結果、中心星周囲に形成される円盤は初期には小さいが、その後周囲からの降着で質量と角運動量を獲得しながら成長する。この際、磁場による角運動量輸送の効率が低いいため円盤は大質量となり、重力不安定性によって生じる渦状腕を介した自己重力トルクによる角運動量輸送が働く。重力トルクによる角運動量輸送で円盤は一時的に安定化し渦状腕は消失するが、すぐにガス降着によって重力不安定となるため、降着が続く間円盤は渦状腕の形成と消失を繰り返しながら成長していく様子を明らかにした。降着したガスのうち 40%程度が磁場駆動のアウトフローで放出され、20%は円盤に降着し、残る 40%が原始星となることが明らかになり、磁場駆動によるアウトフローが星形成効率を制御していることを示した。

更にこのシミュレーション結果に対して後処理で輻射輸送計算を行い、更に ALMA による観測シミュレーションを行って観測的性質を予測し、原始惑星系円盤 Elias 2-27 の観測と比較した。その結果、円盤のサイズや2本の対称な渦状腕などを良く再現することができた (図4)。この結果は現実の原始惑星系円盤も大質量であることを示しており、従来惑星形成の初期条件として使われてきた最小質量円盤とは異なる環境で惑星形成がはじまった可能性を示唆している。

これらの結果は原始惑星系円盤が星形成過程の初期から形成され、原始星と共進化することを示している。また若い原始惑星系円盤が大質量であることは、星形成の初期段階から惑星形成に十分な材料が存在し、既に惑星形成が可能であることも示している。従来、星形成・円盤形成・惑星形成過程は別個に研究されてきたが本研究によりこれらを統一する「星系形成」研究が必要であることを提唱した (Tomida et al. 2017, ApJL, 835, L11)。

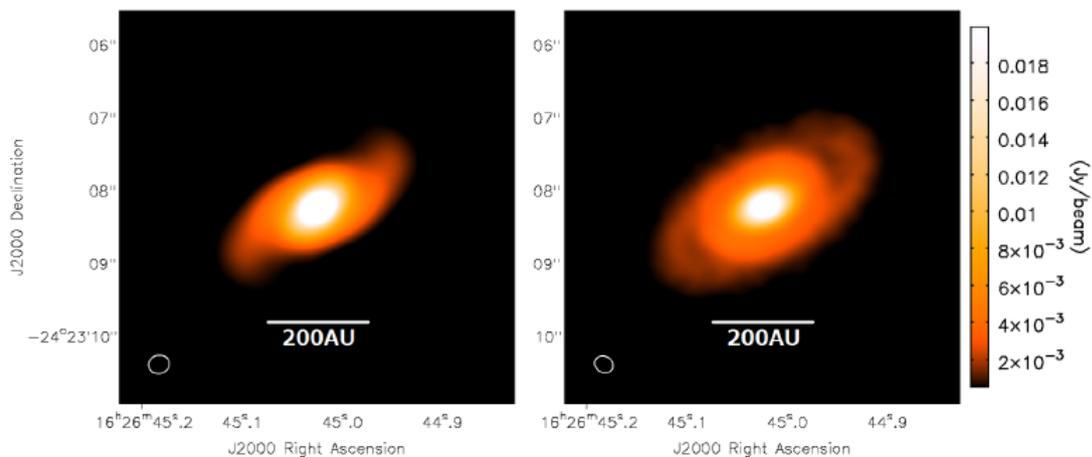


図4：原始惑星系円盤形成シミュレーションと観測との直接比較。左：磁気流体計算から輻射輸送計算と ALMA による観測シミュレーションを行った 1.3mm ダスト連続波放射の観測予測。右：ALMA 望遠鏡による若い原始惑星系円盤 Elias 2-27 の観測。特にファインチューニングを行っていないが、円盤の大きさや明るさ、対称性の高い渦状腕などを再現することができた。

これらのシミュレーションの結果をもとに、ALMA 望遠鏡による若い原始惑星系円盤の大規模サーベイ “eDisk” (PI: N. Ohashi) に参加し、理論グループの共同代表として観測計画の立案や結果の解釈を行っている。また、ホール効果や乱流を考慮した原始惑星系円盤形成の研究を国際協力で推進した (Marchand et al. 2020, ApJ, 900, 180, Lam et al. 2019, MNRAS, 489, 5326)。更に原始星への降着の最終段階である原始星と円盤の相互作用の磁気流体シミュレーションの研究も行い、高緯度降着の新しい機構 (Takasao et al. 2018, ApJ, 857, 4) や円盤磁場のリコネクションで駆動される大規模な原始星フレアの新しい理論モデル (Takasao et al. 2019, ApJ, 878, 10) を提唱し、原始星磁気圏のモデルを構築 (Takasao et al. 2022, ApJ, 941, 73) するなど、関連する分野の研究も実施した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 19件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Tomida Kengo, Stone James M.	4. 巻 266
2. 論文標題 The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Multigrid Solvers for Self-gravity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 7~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/acc2c0	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 該当する

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 941
2. 論文標題 Three-dimensional Simulations of Magnetospheric Accretion in a T Tauri Star: Accretion and Wind Structures Just Around the Star	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 73~73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9eb1	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 Iwasaki Kazunari, Tomida Kengo	4. 巻 934
2. 論文標題 Universal Properties of Dense Clumps in Magnetized Molecular Clouds Formed through Shock Compression of Two-phase Atomic Gases	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 174~174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac75cc	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 Kobayashi Masato I. N., Inoue Tsuyoshi, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Nakatsugawa Hiroki	4. 巻 930
2. 論文標題 Nature of Supersonic Turbulence and Density Distribution Function in the Multiphase Interstellar Medium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 76~76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5a54	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 Kobayashi Masato I. N., Inoue Tsuyoshi, Inutsuka Shu-ichiro, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Tanaka Kei E. I.	4. 巻 905
2. 論文標題 Bimodal Behavior and Convergence Requirement in Macroscopic Properties of the Multiphase Interstellar Medium Formed by Atomic Converging Flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc5be	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 Tanaka Kei E. I., Zhang Yichen, Hirota Tomoya, Sakai Nami, Motogi Kazuhito, Tomida Kengo, Tan Jonathan C., Rosero Viviana, Higuchi Aya E., Ohashi Satoshi, Liu Mengyao, Sugiyama Koichiro	4. 巻 900
2. 論文標題 Salt, Hot Water, and Silicon Compounds Tracing Massive Twin Disks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abadfc	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 該当する

1. 著者名 Marchand Pierre, Tomida Kengo, Tanaka Kei E. I., Commercon Benoit, Chabrier Gilles	4. 巻 900
2. 論文標題 Protostellar Collapse: Regulation of the Angular Momentum and Onset of an Ionic Precursor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 180 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abad99	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 Stone James M., Tomida Kengo, White Christopher J., Felker Kyle G.	4. 巻 249
2. 論文標題 The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Design and Magnetohydrodynamic Solvers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 4 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab929b	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 Zhao Bo, Tomida Kengo, Hennebelle Patrick, Tobin John J., Maury Anaëlle, Hirota Tomoya, Sanchez-Monge Alvaro, Kuiper Rolf, Rosen Anna, Bhandare Asmita, Padovani Marco, Lee Yueh-Ning	4. 巻 216
2. 論文標題 Formation and Evolution of Disks Around Young Stellar Objects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 43 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-020-00664-z	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 該当する

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 878
2. 論文標題 Giant Protostellar Flares: Accretion-driven Accumulation and Reconnection-driven Ejection of Magnetic Flux in Protostars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L10 ~ L10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab22bb	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 Marchand P., Tomida K., Commerçon B., Chabrier G.	4. 巻 631
2. 論文標題 Impact of the Hall effect in star formation, improving the angular momentum conservation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A66 ~ A66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936215	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 Lam Ka Ho, Li Zhi-Yun, Chen Che-Yu, Tomida Kengo, Zhao Bo	4. 巻 489
2. 論文標題 Disc formation in magnetized dense cores with turbulence and ambipolar diffusion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5326 ~ 5347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2436	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 Iwasaki Kazunari, Tomida Kengo, Inoue Tsuyoshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 873
2. 論文標題 The Early Stage of Molecular Cloud Formation by Compression of Two-phase Atomic Gases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 6~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab02ff	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 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 857
2. 論文標題 A Three-dimensional Simulation of a Magnetized Accretion Disk: Fast Funnel Accretion onto a Weakly Magnetized Star	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab5b3	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 Iwasaki Kazunari, Tomida Kengo, Inoue Tsuyoshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 873
2. 論文標題 The Early Stage of Molecular Cloud Formation by Compression of Two-phase Atomic Gases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 6~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab02ff	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 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 857
2. 論文標題 A Three-dimensional Simulation of a Magnetized Accretion Disk: Fast Funnel Accretion onto a Weakly Magnetized Star	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab5b3	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 Kengo Tomida, Masahiro N. Machida, Takashi Hosokawa, Yuya Sakurai, Chia Hui Lin	4. 巻 835
2. 論文標題 Grand-design Spiral Arms in a Young Forming Circumstellar Disk	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/835/1/L11	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

[学会発表] 計25件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Kengo Tomida, James M. Stone
2. 発表標題 The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Multigrid Solvers for Self-Gravity
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富田賢吾
2. 発表標題 eDiskサーベイで得られた若い原始惑星系円盤の性質の理論的解釈
3. 学会等名 日本天文学会 2023年春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Formation and Early Evolution of Protoplanetary Disks
3. 学会等名 Workshop on Star Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Formation and Early Evolution of Circumstellar Disks
3. 学会等名 Zooming in on Star Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Formation of Protostars and Protoplanetary Disks- theoretical aspects of Core2Disk
3. 学会等名 FROM PRESTELLAR CORES TO SOLAR NEBULAE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Formation of Circumstellar Disks and Non-ideal Magnetohydrodynamic Effects
3. 学会等名 12th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kengo Tomida, James M. Stone
2. 発表標題 Athena++: A New MHD Simulation Code with Adaptive Mesh Refinement
3. 学会等名 The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tomida, J. M. Stone, K. Iwasaki, S. Takasao
2. 発表標題 MHD Simulations with Athena++: from molecular clouds to protoplanetary disks
3. 学会等名 Max-Planck Princeton Plasma Center Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Hands-on sessions on Athena++
3. 学会等名 Winter School on Astronomy 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Inside Athena++
3. 学会等名 Athena++ Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田賢吾、James M. Stone
2. 発表標題 Athena++による大規模宇宙磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 PLASMA2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kengo Tomida
2. 発表標題 Toward Realistic Stellar System Formation Theories - Theory Review, from Cores to Stars and Disks
3. 学会等名 Star Formation 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Athena++ <a href="https://princetonuniversity.github.io/athena/">https://princetonuniversity.github.io/athena/</a> Athena++ 日本語サポートページ <a href="https://www.astr.tohoku.ac.jp/~tomida/athena/">https://www.astr.tohoku.ac.jp/~tomida/athena/</a>
---

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 M.)	プリンストン高等研究所・School of Natural Science・ Institute for Advanced Study	Athena++コードの共同開発
研究協力者	岩崎 一成  (Iwasaki Kazunari)  (50750379)	国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・助教   (62616)	本研究で研究員として雇用し、その後継続的に共同研究を行っている
研究協力者	小林 将人  (Kobayashi Masato)  (10837454)	ケルン大学・研究員	本研究で研究員として雇用し、その後継続的に共同研究を行っている

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Princeton University	Institute for Advanced Study	University of Virginia	他1機関
フランス	Ecole Normale Supérieure de Lyon			
その他の国・地域	台湾 ASIAA			